

麻酔・集中治療と テクノロジー

2005

●編集

獨協医科大学救急医学教室教授

崎尾秀彰

京都府立医科大学大学院医学研究科

麻酔学助教授

橋本 悟

京都府立医科大学大学院医学研究科

麻酔学教授

田中義文

simulation
intranet
software
database
network

麻酔・集中治療と テクノロジー 2005

●編集

獨協医科大学救急医学教室教授

崎尾秀彰

京都府立医科大学大学院医学研究科
麻酔学助教授

橋本 悟

京都府立医科大学大学院医学研究科
麻酔学教授

田中義文

序 文

第22回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会は2004年11月27日(土)に獨協医科大学開学30周年記念講堂にて開催させていただきました。約200本の銀杏の黄金色もすでに盛りを過ぎましたが、意義深い晩秋の1日でありました。

メインテーマは岩瀬良範講師(現埼玉医科大学麻酔科助教授)の発案で『創造にまなぶ麻酔・集中治療のテクノロジー』として、マイクロプロセッサ i-4004 を開発されました会津大学教授の嶋正利先生に『マイクロプロセッサの誕生と創造的開発』、ならびに、キャラクター玩具の開発をされています株式会社バンダイ開発統括部の片瀬健二様に『夢クリエーションのテクノロジー』のタイトルで特別講演をしていただきました。講演の全文は岩瀬講師の編集により本誌に掲載されていますので、ご一読いただきたく存じます。

嶋先生は大学では有機化学を専攻されましたが、卒後に従事された電卓からマイクロプロセッサの開発に至る創造的開発の経緯についてご紹介いただきました。私の専門的知識は皆無であります。「創造的開発＝芸術」や「人との出会い」、「独自の道を歩むこと」、「柔軟で回転の速い頭脳」、「試行錯誤は進歩させながら3回まで」、「秀でた問題抽出能力」などがキーワードであり、独創的な医学研究にも求められるものであります。

獨協医科大学は東武宇都宮線「おもちゃのまち」駅で下車します。当地の代表的産業でありますバンダイの片瀬様は対話可能な人形やロボット玩具を実際に呈示しながら、「世界中の技術を生かして感動を生む商品開発」をモットーに「良い商品は長寿命」や「意欲的な人材の育成」、「情報の共有化による迅速な開発・試作」について熱弁を振るわれました。結びには「チャレンジャー、イノベーター、エンターテイナーの3つの魂」について言及されましたが、研修医教育や医学研究の指導にも相通じるものを感じました。

一般演題は22題の応募をいただきました。テクノロジーを駆使して麻酔関連領域の臨床研究をされているのが理解できます。私自身はビデオ喉頭鏡の開発を願っています。実習終了後の救急救命士は適応のある傷病者に気管挿管を実施しています。準備万端整った手術室の気管挿管とは異なり、困難な環境下で行わなければなりません。ビデオ喉頭鏡の画像を医療機関に伝送できるシステムを開発してほしいものです。また、厳格な血糖値管理の重要性が注目されていますが、血糖値の連続モニター装置も開発してほしいものです。

2年前の会員懇親会で諏訪邦夫先生が披露されました音楽クイズをもとに纏められました『私の音楽趣味：5歳から69歳まで』も興味深く読むことができます。無芸、無趣味の私には今後も継続してほしいと密かに願っています。

本学会はコンピュータなどのテクノロジーに精通あるいは興味を持つ麻酔科医を対象とした学術集会で、学会運営や会誌発行に関しましては京都府立医科大学の田中義文教授の多大なご努力によるものであります。発展途上ではありますが、テクノロジーの開発には目覚ましいものがあり、将来的には大きく羽ばたくものと期待しています。

第22回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会
会長 崎尾秀彰

– MEMO –

目 次

第 22 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会論文集

特別講演：マイクロプロセッサの誕生と創造的開発	1
嶋 正利（会津大学），諏訪邦夫，岩瀬良範	
特別講演：「夢・クリエーション」のテクノロジー	12
片瀬健二（株式会社バンダイ），橋本 悟，岩瀬良範	
Data Dictionary Task Force（DDTF）と OperatingRoomofFuturePlug	20
— and — Playstandardization（ORFPnP）について	
菅井直介（茅ヶ崎徳洲会病院麻酔科痛みセンター） 他	
喉頭鏡にクリップオン型パイプアダプタを装着し汎用気管支ファイバースコープを	23
挿入して利用する簡便などデオ喉頭鏡システムの試作	
中尾正和（JA 広島厚生連 広島総合病院麻酔科）	
血液ガス電子博物館作成と問題点	27
諏訪邦夫（帝京大学）	
実体型患者シミュレータ環境を用いた更新医療機器の選定に関する試み	30
上農壱朗（兵庫医科大学麻酔科学教室）	
気管挿管教育訓練用喉頭鏡システムの開発	34
松本尚浩（九州厚生年金病院） 他	
ウェーブレット解析による脳波アーティファクト除去の試み	37
萩平 哲（大阪大学大学院医学系研究科生体機能調節医学講座（麻酔科学））	
雑誌や書類のデジタル保存	40
野上俊光（成尾整形外科病院） 他	
フェンタニル併用セボフルラン麻酔時の bicoherence の変化	46
森本康裕（山口大学医学部 麻酔・蘇生学教室） 他	
3 画面同時録画による喉頭鏡視野の比較検討システム	49
岩瀬良範（独協医科大学救急医学） 他	
X-Port(TM) によるシリアルデータのイーサネット変換とその利点について	51
岩瀬良範（独協医科大学救急医学） 他	
高機能患者シミュレータによる臨床実習の工夫—いかに学生を本気にさせるか—	53
松島久雄（独協医科大学救急医学） 他	

VMware Workstation を使用したシステム管理	57
斎藤智彦（独立行政法人国立病院機構南岡山医療センター）	
特別寄稿：Fick の拡散法則から統計力学まで	61
田中義文（京都府立医科大学 麻酔学教室）	
特別寄稿：私の音楽趣味：5 歳から 69 歳まで	114
諏訪邦夫（帝京大学）	
第 22 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会抄録抜粋	120

第 4 回麻酔科医のためのパソコンセミナーテキスト

第 4 回麻酔科医のためのパソコンセミナー	126
内田 整、讃岐美智義	
デジカメで学会を取材する	128
讃岐美智義（県立広島病院麻酔・集中治療科）	
基礎から学ぶ電子メール	140
斎藤智彦（独立行政法人国立病院機構南岡山医療センター）	
無線 LAN の基礎と応用	152
内田 整（国立循環器病センター麻酔科）	
Excel のグラフ機能を使いこなす	158
増井健一（諏訪中央病院麻酔科）	

特別講演 マイクロプロセッサの誕生と創造的開発

演者：嶋 正利*

司会：諏訪邦夫†

編集：岩瀬良範‡

本稿は、第22回日本麻酔集中治療テクノロジー学会総会における特別講演から、総会事務局が聞き取り原稿を作成し編集したものである。

諏訪邦夫

以前から、日本麻酔集中治療テクノロジー学会の特別講演には、偉い先生をお招きして良い話を伺っています。今回はとびきりの超大物をお迎えすることができて、とても嬉しいことです。今日お話しします嶋正利先生は、パソコンの歴史のことをご存知の方なら、すぐわかりかと思います。念のために申し上げますと、コンピューターそのものは1940年代から存在しますが、それを1つの集積回路に組み込むことをなされた方で、1960年代の終わり頃から仕事をされて、インテルの4004という大変有名なマイクロプロセッサ(MPU)を開発されて、その後いろいろな仕事を続けていらした方です。

私が言う必要もないことですが、このようなプロジェクトは、考えるだけでなく、それを実現していく能力と学力、いろいろな人々に協力を得ていく人間的な能力、といった総合的な力がなくては実現できないことなのです。そのようなお話を今日これから伺えることは、大変嬉しいことです。

それでは嶋先生よろしくお願い申し上げます。

嶋正利

諏訪先生、ご紹介ありがとうございます。今日は、マイクロプロセッサの誕生と創造的開発

についてお話し致します。

実は私は、電気もコンピューターも大学で専門に勉強したわけではありません。私の大学での専門は有機化学で、七員環の「トロポロン」という物質の反応速度を研究しました。子供の頃から化学が好きでしたが、中学3年生の時にロケット遊びで指を3本ほど失くしまして、そのうえ左目も中心部の視力がなくなりました。そのため大学卒業後は化学の会社に入ることができず、恩師の友達がやっている電卓やコンピューターを製造販売しているビジコンという会社に入りました。最初はサイエンティフィック分野のプログラマーになろうということで入社し、約6ヶ月ほどFortran, COBOL, アセンブラーなどのプログラムを行いましたが、ビジネス向けのソフトウェア開発が面白くなって、その後、電卓の部門に異動させてもらいました。事務系のソフトウェア開発を担当したわけですが、面白くないことを続けていても自分がハッピーになりません。

電卓の部門に移ってから電子回路、電磁気、電源などの勉強を始めました。困ったことに、この分野は大学で勉強したわけではないから、どの本を買ったら良いかわかりません。本屋さんに行くとかたくさん本があって、迷ってしまいます。ですから、一番薄くて簡単な入門書、次に最も難しい本、それから中間ぐらいの本を買いました。それから、ノートを一冊作って勉強してみました。最初の半年は電卓の試作を行い、

*会津大学

†帝京大学

‡獨協医科大学

就職して2年目に新しいプリンタ付き電卓を手がけることになりました。どうせやるなら、少し変わった方法でやってみたいと思いました。

電卓の構造と「論理」

電卓の構造は、まず入力装置(キーボードやカードリーダー)と出力装置(表示装置やプリンタ)があります。それから、コンピューターと同じように入力されたデータの処理装置があります。入力したデータや演算結果は、必要に応じてメモリ装置に格納します。したがって、電卓はコンピューターの入出力装置、データ処理装置、メモリ装置を持ったものと全く同じ構造になっているわけです。コンピューターと違う点は、「論理」の作り方が全く異なることです。

電卓を構成している「論理」には、一つはメモリにどのようにアクセスしていくかというメモリアクセス手順の論理、続いて入出力装置をどのように制御するかの入出力制御手順の論理、その次に控えているのが四則演算をどのような計算手順で実現するか計算手順の論理があります。最終的に「どのような電卓を作るのか?」という電卓の機能に関する手順の論理があります。このようなすべての論理を初期の電卓では、パソコンのマザーボードに似たような大きなボードまたは小さなボードを何枚も実装し、配線でトランジスタなどを接続して論理を組んでいたわけです。これが、いわゆる「ハードワイアード論理方式」です。

ですから、電卓の機能を変更する、例えば電卓に平方根の機能を入れてみたい場合は、基板を変更しなければなりません。これは非常にややこしい問題で、新しいやり方を考えることになりました。それと同時に、ビジコン社は自社ブランドだけで電卓を売っていたわけではなくて、米国であればNCR、イタリアであればオリベッティーといったOEMのビジネスも行っていました。

ですから、電卓を1台開発すると続いてNCR向けやオリベッティー向けのそれぞれ異なった基

板を開発しなければならませんでした。生産する場合も、各社向けに違ったものを生産して、さらにストックしておく必要がありました。

電卓の開発とプログラム論理方式

「嶋はプログラムの経験があるから、コンピューターで使われている『プログラム論理方式』を電卓の中に組み込んでみたらどうだろう?」といわれました。「さあ困ったなあ」「プログラムはやったことがあるけれども、電卓用にどのようにコンピューターを応用して良いものか?」と色々悩みました。その当時は、二進法のコンピューターだけでなく、IBMは10進法のコンピューターをビジネス向けに売っていました。10進用のコンピューターの非常に簡単なものを作ってみて、さらに電卓に最適化したような命令セットを考えて作ればよいのではないかと考えました。そのとき使ったプリンタが、当時東京オリビックで有名になった信州精機、今のセイコーエプソンが作った傑作機といわれるプリンタです。これを使って、プログラム論理方式で電卓を作ることになりました。こうすれば、NCR向けのOEMが必要になった場合は、プログラムを変えるだけでNCR向けのものができてしまうわけです。

「この方法はなかなか良さそうだ。」ということになって、入社3年目の1969年、これをLSI化することになりました。どうせLSI化するのであれば、またちょっと違ったことができるようになることを考えました。OEM先はNCRやオリベッティーですから、電卓だけではなく伝票発行機やキャッシュレジスター、銀行の窓口端末機などに使えるような汎用のLSIを作ってみることになりました。この背景には、ビジコン社の大阪工場がポケットに入る電卓を作っていましたから、東京工場では汎用のLSIを作ることになりました。ビジコンの社長(小島義男氏)は非常に先見の明がある方で、「これからのLSIはより多くのトランジスタを使う必要がある。どうせやるんだったら、新しいテクノロジーを持っ

た会社を探してみよう」ということになりました。新しいテクノロジーとは、いわゆる「シリコンゲート MOS セミコンダクタ」(メタルの下にもトランジスタが置けるような高密度実装が可能な技術)です。それから、開発費として約 10 万ドル(当時の相場で 3600 万円)以上の大金を出すわけですから、信用の置ける会社でなくてはなりません。これらの条件を満たす会社として、大阪工場はベン・ローゼンという人がやっているモステック(Mostek 社)を選び、私の属する東京工場である電子技研はインテルを選びました。インテルは、半導体とトランジスタの神様ともいえるドクター・ノイス(Dr. Robert Noyce)がやっている会社ですから、これならば大丈夫だろうと判断しました。

4004 開発へのきっかけ

私が行ったインテル、当時設立 2 年目の本社の写真を示します。当時のインテル社は、シリコンバレーのあるカリフォルニア州マウンテンビューの Middlefield Road にあり、昔のユニオン・カーバイドがサンジエゴに移転したあとを使っていました。平屋社屋の左側には経営者がおりました。私は右側にオフィスを設けさせてもらって、インテルと話し合いを始めました。ところが、いざ交渉を開始するとなかなか話が進みません。なぜかという、当時のインテルはメモリの会社ですから、論理を設計する人がいなかったのです。これは後から考えれば最初からわかっていたことでした。いわゆる化学屋さん、物理屋さんなどの物性関係がほとんどで、あとは回路を設計する人が数人程度しかいません。全社員集めても 125 名でした。そんな会社ですから、図面を見せても何も理解してくれません。インテルの方でもこれは困ったことだと認識し、アプリケーション・マネージャーのテッド・ホフ(Edward Hoff: "Ted" は"Edward"の呼び名)という人物を出してきました。テッド・ホフさんは、スタンフォードの研究所で、PDP-8(DEC 社)というミニコンピュータで仕事をし、IBM の 10 進の

コンピュータも知っていましたから、話がだんだん噛み合うようになってきました。ただ困ったことは、彼は非常に背の高い人で 2 メートル位あったので、立ったまま話をする私は上を向いて話すことになって、なかなか通じません。英語もそんなに上手じゃない日本人が、アメリカ人に負けないものが一つだけあります。それは座高です。ですから、私は彼に「まず、座ってくれ」と椅子を勧めました。座ってもらうと、座高はほぼ同じですから、視線が合い、話も対等にできるようになったので、必ず座ってもらうことにしました。

こうして話をしているうちに、彼ならばコンピュータ的なことが理解できることがわかりました。そして彼には、論理図を見せるのではなく、コンフィデンシャル(部外秘)の書類でしたが、我々が準備した電卓の命令セットとビジネス用電卓のフローチャートを見せて説明しました。

すると、テッド・ホフさんは「嶋の言っていることは面白い。プログラムを変更することで電卓の機能を変えていく、というアイデアは非常に面白い。」と言っていました。その段階で話は一旦止まってしまいました。なぜかという、論理を設計したことがない人から見ると、10 進のコンピュータは難しく思うらしいのです。逆に 2 進のコンピュータは非常に楽だと思うようです。実際には、10 進のコンピュータも 2 進のコンピュータも、ちょっとした回路を付け加えることで 2 進が 10 進になるわけですが、このことはあまり知られていなかったようです。

さらにもう一つ、電卓の場合は安いメモリを使いたかったので、シフトレジスタを使っていました。現在は、RAM(Random Access Memory)を使ってメモリに直接データを読み書きするわけですが、シフトレジスタを使うと時間が経たないとデータが出てきません。しかし、安価というメリットがありました。ところが、RAM を作る技術とシフトレジスタを作る技術は全く異なったものです。そのため、(RAM を得意としていた)

インテルはシフトレジスタを使いたくありませんでした。このような駆け引きがありましたが、最終的にはプログラム論理方式を活かしていくことになりました。

渡米してから3ヶ月ほど経過した1969年8月末のある日、テッド・ホフさんが私の部屋に飛び込んできて、「アイデアが沸いた」と言うんです。この人はどんなちっぽけなことでも，“My idea is …”(「自分のアイデアはこうだ。」)と切り出します。このときは、「嶋の言うプログラム論理方式は、10進のコンピューターを使っている。そして、命令がn桁、例えば10桁とか16桁という非常にマクロなレベルである。次のように考えてみたらどうだろう？ n桁というマクロの命令を一桁、すなわち4ビットというマイクロな命令に置き換えたらどうだろうか？そして、そのマイクロ命令を使ってマクロの命令を作れば良いのではないか？これを二進のコンピューターとして作ってみようじゃないか。」という発想でした。

インテルとの交渉と駆け引き

しかし難しい問題も山積していました。まず、インテル側には「プロセッサだけ作りたい。あとは標準品のRAMとROMを使って欲しい。それから、入出力の制御のLSIは自分で(ビジコン側で)作って欲しい」という考えがありました。これですと、LSIだけでシステムを構築していいこうという当初の目的と反することになります。ここから、粘り強くというか頑固な交渉が始まりました。なぜかというと、当時のRAMはコンピューター屋さんが使うわけで非常に高価で電卓には使えません。

「私たちはLSIだけでシステムを組む『ファミリー』(編注:チップセットの根源ともなる概念である)として、ROMやRAMもプロセッサと同じレベルのファミリーとして作って行きたいのだ。」と粘り強く説得して了解してもらいました。

その次に困ったことが、入出力の制御です。これ

を実現するLSIの開発にも時間がかかりますし、当時は英語の文献でも、一つのプロセッサで複数の入出力機器をリアルタイムで制御するという論文はありません。これについてもいろいろ考える必要がありました。さらにデータもあります。たとえば、プログラムを使ってキーボード入力を実現するとき、人間はどれくらい速くキーボードを打てるかが不明でした。キーボード入力は素人がやればゆっくりですが、専門のオペレーターが打てばわずか20ミリ秒程度しかタッチしていないことがわかりました。これは日本に連絡して計測してもらいました。20ミリ秒程度のタッチの間に最低2回、可能ならば3回のスキャンを行って、同じデータが出てきたらキーボードが押されている、という判断をしなければなりませんでした。

ところがマイクロプロセッサを使うと、期待できる動作周波数が750kHzというAM波でした。こんな遅いスピードで、キーボードのスキャンができるか心配でしたので、命令セットも十分に考えました。

さらに、電卓には電卓の、会計機には会計機の「言語」(マクロの命令セット)があります。これのマクロな命令を(プロセッサに合わせた)ネィティブな命令(コード)に翻訳しつつ実行するいわゆるインタープリタ方式を考えました。

さらに、この翻訳のループの中に入出力機器をセンス(感知)するような工夫を加えることで、リアルタイムに複数の入出力機器の制御を行いながら、インタープリタ(翻訳)を使って演算ができるようにも考えたわけです。

上記の作業は、1969年9月から12月までの約4ヶ月間位かかりました。その間に仕様書もたどたどしい英語で作りました。私はうまく人を使うというか、ずるいところがありまして、「アメリカ人にわかるようにするにはどうしたら良いか？」考えました。米国人は偉くなると、ディクテーションのマシンを使って秘書にタイプを打たせます。私は、秘書の中で誰が一番うまいか

を聞いて、その人のところに持って行ってタイプしてもらいました。こうすると、実に(文法的にも)きれいな英語になって返ってきます。英語が下手でも、命令セットのマニュアルを作るときも文章を読まなくても絵で示すことができれば、お互いのコミュニケーションがはかれると考え、なるべく絵を多用してマニュアルを作りました。この段階で日本に帰国しました。

放置されていた 4004 プロジェクト

正式な契約が終わって 1970 年 3 月に「設計はどれくらいできているだろうか？」と希望を胸に再び渡米しました。ところが、テッド・ホフさんは「ワシはやらない」と言います。後で聞くと、「できるとは思わなかった」と言っていました。そのかわり、シリコンゲート研究の第一人者であるイタリアから移民してきたフェデリコ・ファジンがフェアチャイルドからインテルに入ってきて、彼が担当することになりました。「何時きた？」と尋ねますと、「私は 1 週間前に入ったばかりだから何をするのかわからない」と言うのです。私は、「もうお金も払ってあるし、かなり出来上がっているだろうから私は日本からやって来たのだ。もう一人のエンジニアはどうしたんだ？」と聞き返しました。そうしたら、「いやあ、見つからないんだ」と言うのです。インテル側は、契約書の添付文書を持ち出して次の条項を持ち出しました。

そこには、「もし必要であれば、嶋が論理設計を手伝う」と書いてありました。さらに、「もし必要であれば、嶋がテストプログラムを作る」ともあり、「まだあるのか？」と私が尋ねたら「もう一つある。もし必要であれば、(LSI の) レイアウトとそのマスクのチェックも嶋が手伝う。」というのです。何のことはない、私が自分でこれ(編注: 4004 の開発)をやるのかなと思って、ファジンに聞いたんです。「ところであんた、何ができるの？」

ファジンは、「回路設計は絶対うまい」と答えました。「最終的にはこういうものを作ろう」と、

彼とのプロジェクトが開始しました。最終的なものとは、プロセッサだけでなく、命令を格納する ROM、データを格納する RAM、キーボードやプリンタの入出力ポートを (LSI の) ファミリーとして作ることです。そして、CPU と RAM と ROM の間は 4 ビットのシステムバスを構築して、それですべてのやりとりを行うわけです。ファジンとの間には、「私 (嶋) が CPU の論理設計をするから、あなたは RAM、ROM、入出力ポートの回路設計をする」という分担で行きました。設計の計画書は英文で作っておきましたから、この通り作ってみれば良いはずですが、その間に私が CPU の論理設計をしました。実は、CPU の論理設計をした段階で私には半導体を使った回路設計の経験はありませんでした。「どうしたらいいだろう？」と困りましたが、ファジンは「簡単だ」と言うのです。一番重要なのは配線です。例えば、横の方向に向かってメタルで配線する。では縦の方向の配線はどうするのかというと、ポリシリコンや拡散で配線すればよいわけです。「なんだ、基板の表と裏で配線するのと同じ感覚で設計すれば良いのだ。」ということがわかりました。それならば、同じ論理設計をするのであれば、回路設計やレイアウトに役に立つような論理設計をやってみようじゃないか、と思いました。ただ、問題になったのは「トランジスタの数を 2000 個以内で作ってくれ。」、といわれたことです。たった 2000 個のトランジスタを使って、どういう具合に論理を作ってみようか考えました。実際には 2200 個で出来上がりましたが、人によっては 2300 個と勘定する人もいますが、これはどれをトランジスタと定義するかで異なります。論理というものは、例えば「A と B と条件がそろったらこういうことをしよう」、という論理の組み方と、「何もないればこういうことをしよう。ただし、こういう条件であればこの機能を停止させよう」、といった色々な論理の組み方があるのです。

4004 の完成

このような組み方で最終的に出来上がったのが、この 4004 という世界初の 4 ビットのマイクロプロセッサです。これはわずか 9ヶ月間で設計が終わり、それから 3ヶ月間でマスクを作り 1971 年 3月に日本に送られてきて、一回目でうまく無事に動きました。

ここにありますのが 4004 のチップの写真です。これは設計をやった人が見るとよくわかるのですが、まず、8 ビットの命令レジスタがあり、次になんとなく規則正しく見える部分、これが命令を解読する部分です。その隣の規則正しい部分は 4 ビットの主演算回路を制御する回路があり、主演算回路は回路の配列から 4 ビットであることがわかります。反対側には、汎用レジスタが 16 本あります。これは、私が電卓用の汎用 LSI を考えたときに、アドレスにアクセスするためのポインターや演算用のレジスタを「インデックス・レジスタ」と名付けていましたが、後に「汎用レジスタ」と呼ばれるようになりました。次にプログラムカウンタを含んだスタックです。マクロな命令をマイクロな命令で作り上げるので、マイクロな命令を何度も使う必要があります。そのための工夫がここにあるわけです。あと、アドレスの更新回路があります。これを約 2200 のトランジスタを使って作り上げたのです。

これが 1971 年に出来上がって、ビジコン社は電卓や会計機に応用して成功しました。ところが、このときの評価は正直言ってあまり高いものではありませんでした。「おもちゃのようなプロセッサを作ってきた。」という具合です。インテルで 2 番目の技術者を雇えなかったのも、4 ビットのプロセッサだからかも知れません。しかし見方は色々あるわけで、10 進のデータを扱うのであれば 4 ビットという考え方は、必ずしも悪くない。ある応用に最適化されたものであれば、決して悪くないと思います。その 4004 を使って出来上がったのが、写真右の電卓です。基板の中心に CPU があって RAM、ROM、入力ポー

ト、出力ポート、プリンタの駆動回路が配置されています。こうして、たった一枚の基板でプリンタ付きの電卓が出来上がったわけです。

ノイズからの電話と再渡米

私は開発をすることが大好きでした。私は大学を卒業して化学ができなくなったときに「研究はもう諦めよう」と考えました。だから、私は開発に専念して生きて行こうと考えました。最初は何でも良いから「開発ということ」をやってみたい、と思いました。一通りの仕事をビジコンでやった後は、もうちょっと新しいことをやってみたくなってリコーという会社に移りました。運の良いことに色々な仕事をやらせてもらいました。例えば、ミニコンに I/O タイプライターを接続するとか、グラフィック機能がついたミニコンを日立のメインフレームのチャンネルに接続する、などがありました。最もその後役に立ったのは、高速プリンタの電子制御です。これは将来のマイクロコントローラーに対する知識がここで身についたわけです。最後にやったのが、NEC 製の 8 ビットのミニコンを使って、磁気ドラムの生産用テスターを作るという課題でした。ここでミニコンというものを再び勉強させてもらったわけです。

そんなある日、インテルのノイズからリコーの重役に「お前のところに嶋っていうのがいるだろ。そいつを俺にくれ！」という電話が入ってきて、すぐに呼び出されました。その重役から、「お前、何やったんだ？」と聞かれました。「実は、4004 というマイクロプロセッサをやりました。」

「インテルという会社がお前に来て欲しいと言っている。お前、行きたいのか？」、と尋ねられました。

当時の米国はまだ差別主義が残っていて、日本人が半導体で働くのはあまり好まれていなかったのも、そこに再び飛び込むのは結構な勇気が要りました。それでも、面白そうだからやってみようと思い、1972 年に結婚したばかりの妻を連れて 1972 年 11 月に渡米しました。実は、結

婚するときに妻にお金をだいた渡したんですけれど、行くことになって「どれくらい残っている？」と聞いたところ、「全部使っちゃった」というんです。宝塚が好きなのでそれに行ったり、美味しいものを食べたりしたので、確かに全部使っちゃったわけです。そこでインテルに「金がないから送ってくれ」と連絡して、500ドル送ってもらいました。これが私の悪いクセで、「500ドル手に入ったから、ちょっとハワイに寄って遊んでから行こう」、それでアメリカに着いたら「何ですぐ来ないのか？」、「いやあ、ちょっとハワイで遊んで来た」、「金がないだろう？」、「ええ、ありません。」「じゃあ前借りするか？」、で、お金を借りまして1年で返すようにしました。「自動車はどうするんだ？」、「自動車ありません。」「じゃあ今ウェルズファーゴバンク (Wells Fargo Bank) に電話して、俺 (R. ノイス) が保証人になるからいくらでも金を借りろ！」。私はアメリカの車のことはあまり詳しくありませんでしたので、キャデラックの会社で購入した車をてっきりキャデラックだと思っていたら、ビュイックのリビエラだったという顛末がありました。

8080 の開発

4004 のあと、インテルは8ビットのマイクロプロセッサ 8008 を開発していました。「アイデアは良かったのだが、あまり売れない。だから、これを大改良してくれ。」と言われました。それじゃあ、これを8ビットのミニコン風に作ってみようと思いました。11月に7人位集まって議論して、8080 のプロジェクトが始まりました。「で、誰がやるの？」、「お前 (嶋) がやるんだ」というのです。さらに「1月2日からレイアウトを開始する」とも言われました。あと1ヶ月しかありません。その間にマニュアルは作らなければならない、論理設計はしなければならない、回路設計もしなければならない、レイアウト計画もある程度やらなければならない、いわゆる仕事のストックを作っておかないと仕事がスムーズに出来ないわけです。

まあ、自転車操業のようなものです。だいた無理をして仕事しまして、翌年の8月9日に8080が出来上がりました。なぜこの日を覚えているかというと、やっと設計が終わって家に帰って「明日から休みだよ」と家内に伝えたら、翌日双子の未熟児を出産しました。ですから、私は同時に3人の赤ん坊が手に入ったわけです。よく、「誰が一番可愛いですか？」と質問を受けますが、私は8080が一番可愛いと答えます。女の人は体を傷つけながら出産するわけですが、マイクロプロセッサの開発も体を傷つけるわけです。私は、この時か次のZ80をやっているときに軽い心筋梗塞を起こして冠動脈が詰まったらしいんですが、無事に生き残ってます。

8080 の完成

8080 は素人が見ると何とも思わないでしょうが、専門家が見ると実にへたくそなレイアウトなんです。このときは、論理設計と回路設計まではできるようになりましたが、レイアウトに関してはまだもう一歩わかっていませんでした。

8080 では、中央上方から命令レジスタ、命令解読回路、命令の制御回路が配置され、右側に8ビットの主演算回路が配置されています。この当時は、スタックポインタ、プログラムカウンタや汎用レジスタなど (中央左下) はプロセッサ内に配置し、スタックそのものはすでに外のメモリに配置しました。中心からU型に走行している一見不規則な空間は、システムバスです。ということは、メタルは縦方向にも横方向にも配線しなければならなくなります。ですから、8080のレイアウトは必ずしもうまくできていなかったのです。

それでも、8080は飛ぶように売れました。一個300ドル、当時の価値で約10万円です。最初は上記のような理由で、本格的な生産は待ってもらいましたが、日本にセールスで帰国している間に「数万個作っちゃった」というんです。「どうして？」と聞いたら、「一個300ドルで売れるんですよ。」

300 ドルというのはものすごい大金です。「しょうがないなあ。じゃあ、特性を計ってみよう。」と言って測定したら、大変な失敗をしていました。どんな失敗をしたかという、8080 はチップの外周にグランド (接地) の太い線をメタルで配線してあります。太くは見えるけれど、実は細いのです。8080 は、アドレスは 16 ビット、データは 8 ビットあります。そこへ、TTL から大きな電流が流れ込んできます。そうすると、メタルとはいえ、これは抵抗ですから、チップ内の接地線が浮き上がるような形になってしまうわけです。初期の 8080 では、low power TTL (低い電流で駆動できる TTL) と互換でした。後で大修理をして標準 TTL にも互換になるように作り上げたのが 8080-A です。

この頃になると、インテルもビジネスが大きくなってきて、四半期 (3ヶ月) で約 4000 万ドルの規模の会社になっていました。そこでアメニティー (記念品) を作りました。左の写真は 8080 のメタルの層だけを印刷した皿ですが、実はここには私のマークが入っています。普通はイニシャルを入れるのですが、私の場合は Masatoshi Shima で M.S. になり、米国に M.S. は山ほどいて、「嶋」という名は埋もれてしまいます。そこで考えて〇に三本の棒が入った私の家の家紋 (九割三引) をこっそり入れました。こういうこともマイクロプロセッサ開発の面白味です。

8080 はとても高い評判を得ました。4004 で知的能力を提供するようになりましたが、8080 では計算力を人に与えるようになりました。そして、「マイクロプロセッサというビジネスがこれから立ち上がりそうだ」、と考えた人々がこの業界に入ってきました。

Z80 の開発と DOS マシン

私は、次のチップを考えました。1970 年代前半、3 つの技術が前面に出てきました。一つは私が、という用語がありますが、開発したマイクロプロセッサです。次に 4 キロビットの DRAM (Dynamic Random Access Memory) が

特別な配線をしなくても、普通の人々が使えるような品質になりました。しかも大量に安く出回るようになりました。さらに、IBM がフロッピーディスクを開発しました。これらが何を意味するかというと、「ディスクオペレーティングシステムが登場してくるだろう。このようなシステムが重要になってくるだろう。」と予測しました。この予測に基づいて開発したのが、Z80 です。

それまでは、8080 とその対抗馬であるモトローラの 6800 が主流でした。6800 の方がアーキテクチャーとしては、きれいだといわれていました。しかし、実際に売れているのは 8080 でした。なぜ売れたかという、同じ時期に開発しても、モトローラの場合は「考えて」開発するわけです。インテルの場合、すなわち私の場合と言った良いのかも知れませんが、ちょっと最初に考えて、あとは走りながら考えて作っていくので 1 年位で完成してしまうわけです。一方、モトローラの場合は 2 年位かかり、いつも遅れてくる。もちろん、モトローラの製品にも良いところはたくさんあります。

Z80 では、8080 と命令の互換性を持たせた上で、さらにコンピューターらしい命令をたくさん追加しました。一方でチップは小さく作らなければなりません。この当時には、すでに私は、製品の仕様を考え、論理設計、回路設計、レイアウトのすべてができるようになっていました。

人間は、似たような仕事を 3 回やると良いものが出来るようになります。全く同じものではだめですが、似たようなものを少しずつ進歩させて 3 回やると、ほぼ満足するものができるようになります。

Z80 は、8080 と同じ周波数でより高性能を実現しました。8080 は、私が自分で作ったのですから全部頭に入れてありますから、違う論理を使って開発しました。同じ論理を使うと後で解析されて、「同じものを使ったのではないか」と言われる可能性があります。絶対違うように作るために、演算回路を 4 ビットにしました。これをパ

イブラインでうまく使うと、8ビットや16ビットの演算が自由に作れるようになります。絵を見ておわかりのように、回路は結構きれいに出来上がりました。

このような製品はコピーされることがあります。そこで色々な工夫をするわけです。この当時は、イオンの注入という技術が確立しました。これを使って、わざといたずらをしました。関係のないトランジスタを論理の中にわざと置いて、そこにわざとイオンの注入をしておきます。こんなエンハンスメントデバイス(脚注参照¹)の中に、イオンの注入はしないのが普通です。顕微鏡、それも超高性能のもので見なければ絶対にわかりません。こうすると、これをコピーすると、レジスター間で操作した結果を記憶させる場合、勝手に他のレジスターの結果も変化する、といった現象を作ることができます。これは、通常のテストプログラムを組んでも検出することは不可能です。実は、日本の某社がコピーして、予想より半年くらい後にこのトラップに引っかかりました。こうした工夫や面白いこともたいぶ行いました。

マイクロプロセッサの発展

こうしてマイクロプロセッサのビジネスが立ち上がってきました。簡単に説明しますと、4004はわずか2300個のトランジスタで出来ていたものが現在は5000万個、動作周波数も750kHzのAM波から始まったものが、1990年代にはFMの波長(MHz)になり、今は無線に近いGHzの単位になりました。性能についてですが、まずマイクロプロセッサは3~3.5年で新しいものが

開発され、半導体としての性能は2倍位良くなります。これに加えて動作周波数を2倍に上げれば、さらに性能は向上します。性能の評価は、一命令で何クロック使うか、あるいは一クロックで何命令実行できるかで行います。現在ではトランジスタがたくさん使えますから、この性能も向上しています。その他の工夫も加えると、3~3.5年でトータルの性能は4.5倍程度になります。これを10年で3回繰り返すと、性能は約100倍になり、20年では10000倍になるのです。パソコンの主メモリやハードディスクも同様の発展をしています。

「時代を切り拓く技術」がもたらした産業の変化

「時代を切り拓く技術」がいろいろなことをもたらしてきました。運の良いことに私は、集積回路ができて広まった頃に会社に入りました。ですから、「論理の時代」に私は会社にいたわけです。「論理の時代」とは、「何を作ろうか?」を考え、その機能を論理的に作り上げて、出来上がった論理を集積回路にマッピングすれば製品ができるという時代でした。マイクロプロセッサが誕生することによって、「プログラムの時代」というものが生まれてきました。キーワードはマイクロプロセッサやソフトウェアであり、システム産業やゲーム産業が発展していきました。

創造的開発について

最後に「創造的開発」についてお話ししたいと思います。創造的開発とは芸術であり、アイデアは個性のほとばしりであります。創造的開発に挑戦する体制には、全面的な支持者がいなければなりません。市場にない製品を開発するわ

¹エンハンスメント・トランジスタについて

MOSトランジスタ(MOSFET:MOS形電界効果トランジスタ)は多数キャリアにより電流が流れるデバイスで、n形MOSトランジスタとp形MOSトランジスタの2種類に分類される。前者は多数キャリアが電子の場合で、後者は多数キャリアが正孔の場合である。p形MOSとn形MOSを使用すると現在主流となっている低消費電力であるCMOSデバイスが出来上がる。いずれのMOSトランジスタも、しきい値電圧の極性により、エンハンスメント形とデプリーション形の2種類に分けられる。n形MOSトランジスタでは、正のしきい値電圧を持つトランジスタをエンハンスメント形n形MOSトランジスタとよび、負のしきい値電圧を持つトランジスタをデプリーション形n形MOSトランジスタとよぶ。イオン注入を行うことによりデプリーション形n形MOSトランジスタを形成することができる。ICへの供給電圧を+5VとGNDとし、回路の出力は+5V(実際には+3.3Vぐらい)と0Vとなる。すなわち、負のしきい値電圧を持つデプリーション形n形MOSトランジスタは常にオン状態となっている。

8080まではエンハンスメント形n形MOSトランジスタのみを使用し、Z80から8086まではエンハンスメント形n形MOSトランジスタデプリーション形n形MOSトランジスタの両方を使用した。

けですから、人跡未踏の荒野を精度の良くない羅針盤を持って進むようなものです。「成功したらいいな」という希望と、「失敗したらどうしよう」という不安を抱きかかえて進むので、誰かが後ろから少し押してくれないとなかなか前に進めないのです。新規性のあるものを生む開発技術者は、開発こそ我が道と信じ、新規概念(開発コンセプト)を創造していかなければなりません。研究も同じことだと思います。そのためには、絶対に「人の歩んだ道は行かない」と心に決めています。これは父親の性質を受け継いだものかも知れませんが、私は人のマネはあまりせず、人のやらないことをやってみることが好きでした。とにかく、人の歩んだ道は行きません。ですから、あまり論文も読みません。一番良いのは、最先端を行けば人の論文を読む必要もありません。でも、それも10年ほどで追いつかれましたが、原則論としてはこう考えています。

次に、現状に執着しないことです。過去と現在を分析・解析し、必要なフレームだけを残して昇華し、あとは全部捨ててしまうのです。例えば、新しい半導体のプロセスができると、「この半導体のプロセスを使って、さあどう料理してみようか?」と考えます。昔の料理の本なんかない、ということです。ですから、新しい半導体のプロセスでは、今まで信じていたことを必ずしも信じてはいけなことが多いいのです。過去と現在は捨ててしまったほうが良いのです。

インクリメンタルな改良や改善は創造的開発ではありません。もちろん、過去を捨てることは容易なことではありません。就職した、恋人ができた、結婚した、家を買ったなど、(これを振り切る力がなければ、)もう使い物になりません。若い間にそのくらいやらないとダメなんです。しかし、「お父さんのような生き方は大変だ」と子供に言われてしまいました。「そうかなあ」と思って子供を見ていると、彼らも同じようなことをやっています。新規概念(開発コンセプト)とは、自分の世界(ストーリー)を創造することで

す。開発者の頭の中は誰も知りませんから、新規概念を出したときの理解者はほんの僅かで、あとはほとんど無視されてしまいます。現在でも、大学でいろいろと研究して発表しても、日本でそれが流行っていないとなかなか受け入れられません。困ったものだと思います。

討論には、柔軟で強く回転の速い頭脳が必要です。「のんびり考えて、また次に話をしましょう」、という態度ではだめで、その場で決めなければなりません。特に会議は、結論を出すために行うのです。報告会ではありません。自分が正しければ不退転の意志を持って主張します。相手に説明してわからなければ、違った見方で話をします。ダメだといわれても、次はその人のレベルに合わせて話をしてみます。ある意味で、これは宗教と同じだと思います。すなわち、懇々と説得するような話をして、ダメだといわれても何度も説得をくりかえす。そうして、相手が徐々にこちらのことを信じてくれて、乗ってきただけのものではないのです。

良いアイデアが出たときに、ダメだといわれて止めてしまうようではいけません。「自分程度の者が考えたのだから、立派な人はもっと良い考えがあるだろう」と思っはいけません。自分が3ヶ月も半年も一生懸命考えたのだから、そこには必ず何か良いものがあると信じるのです。開発はスピード感を持ち、設計は素早く行うことが大切です。

なぜかという、製品はなまものと同じで、時間が立つと、陳腐化したり、活きが悪くなって、誰も買わなくなってしまう。人間は同じ間違いを繰り返します。仕事の量が少なかったり、仕事のレベルが高くなければ、間違いを繰り返すことは少ないのですが、仕事の量が多くなったりレベルが高くなったりチームのメンバーが多くなると、その人の欠点は必ず出てくるものです。ですから、開発の初期には性善説、すなわちその人の良いところを使って開発を進めます。一方、開発の最後や他の人とのインタフェース

時には、その人の悪い癖が出てくると考え、性悪説をとらないとうまくいきません。

開発技術者が養成すべき能力とは何でしょうか？
まず、問題を自分で見つけ出すことです。問題を提供されたら、解く人はたくさんいます。そして、本質を見抜いて、創造するための、考え出す能力、知恵だと思います。

以上で、マイクロプロセッサの誕生と創造的開発の講演を終わらせて頂きます。

質問

松本尚浩 (九州厚生年金病院) て

民族差についてお聞きします。よく、「日本人は創造的ではない」とか、ユダヤ人は小さい頃から「人と違う面を考えろ」と躰けられるから創造的なのだ、と民族差が取沙汰されることがあります。いろいろな方と接された先生のお考えをお聞かせ下さい。

嶋正利

民族というより国ではないかと思います。例えば、イギリスで育った人は研究が上手で、アメリカの人は開発がうまい。改善を含めた生産は日本人が上手だと思います。しかし、アメリカで仕事をすると、開発がうまくなります。そういう環境で仕事をやるからだと思います。ですから、私は民族ではなくて、どういう環境で仕事をするかで変わるんだと考えています。

例えばアメリカですと、開発が一番重要になります。人のマネをしないという土壌で仕事をしますと、開発が上手な人間になっていきます。8080の開発会議でのことでしたが、私が発言しないで聞いていたら、「発言しないんだったら出て行け！」と言われて「エライところに入ったものだ」と思いました。民族性はあるとは思いますが、それよりも環境の方が大きな要素ではないかと思います。

以上.

「夢・クリエイション」のテクノロジー

片瀬健二^{*}，鵜池善仁[†]，

司会：橋本 悟[‡]，編集：丹羽美貴[§]，岩瀬良範^{*}

橋本悟 (座長)

今日ご講演頂きます片瀬健二様は、大阪工業大学電子工学部をご卒業になって昭和 52 年にバンダイに入社され、現在に至るまで栃木で開発生産部門に従事されております。昨日の懇親会で、「今日はどんな格好して話しかか？」というになり、「普通の学会とは違いますので、いつもと同じ『素』の自分を出して下さい」とお願いしたら、「わかったあ」とご快諾頂き、今日は楽しいお話が伺えるのではないかと期待しております。それでは片瀬様よろしくお願い申し上げます。

片瀬健二

バンダイの片瀬です。本日は、当社設計担当の鵜池とともにお話します。今日は、「プリモプエル」というおもちゃを持って参りました。バンダイ栃木工場の主力は戦隊のロボットですが、我々はこのようなぬいぐるみのおもちゃも発売しております。これは 1999 年に発売しましたが、当時のターゲットとした購買層は高校生から新入社員になられた方ぐらいを想定していました。しかし、現実の購買層は 30 代以上が大半でした。これは結果論ですが、その年代の方は子供たちが就職し一本立ちされ、自宅に残っているのはご両親だけになります。また子育てを楽しみたいと思い、買われているのだと想像しています。

おもちゃの寿命はどうでしょうか。我々が扱うキャラクター玩具は、販売期間がキャラクター展開時期に限られてしまいます。しかしおも

ちゃは、1 分で飽きる人もいる一方で、代々引き継がれて 150 年以上持っておられる人もおられます。これは人間と同じで、良い商品を作れば長く楽しんでいただけるのだと思っております。

1. (株) バンダイについて

バンダイの本社は、東京都台東区駒形にあります。隅田川のほとりで、夏の花火大会は本社の最上階からの眺めが絶景です。「バンダイ＝おもちゃ」と思われている方が多いと思いますが、実はバンダイは「キャラクターを自由に料理する料理人」だと私は思っております。バンダイグループの中で、純玩具は「トイホビー」という部門が扱っています。「トイホビー」以外には、衣料や生活雑貨、文房具を扱う「ライフスタイル」、アミューズメント部門の「バンプレスト」、ビデオゲーム事業部門、ネットワーク事業部門、ビジュアル事業部門などがあります。たとえば、浅草の「花やしき」は「バンプレスト」が経営しておりますし、北野武監督の映画は、すべてビジュアル事業部門が協賛しています。ネットワーク事業部門は、携帯電話のコンテンツなどを扱い、近年株式市場に上場されました。この会社は、「ピピンアットマーク」(編註：テレビに接続するインターネット端末。1996 年頃発売。)の失敗で得たノウハウをもとに立ち上げました。「どこでもキャラっぱ」などのネットワークコンテンツを扱っています。その他、映像のオンデマンド配信をしている会社もあります。バンダイの組織は細分化されていますが、基本的には様々

^{*}株式会社 バンダイ 開発統括部 兼 プロダクト保証部

[†]同 開発統括部設計チームリーダー

[‡]京都府立医科大学

[§]同 プロダクト保証部

^{*}獨協医科大学

な事業体が個別独立をした形で機能しています。(4枚目のスライド)右横の数字の左側は、開発に従事している人数、右側が全体です。さらに一番右端に63,63という数字があります。これが工場機能をもっている2つの事業部門の人員数です。ホビーの静岡工場が63名とボーイズトイ、ガールズトイ、プレイトイのトイ関連の栃木工場が63名です。各事業部とも約3割から4割の人員が何らかの形で開発に携わっています。

バンダイは栃木と静岡にしか工場を持っておりません。商品全体の約2割強が自社内開発です。それ以外は、すべて全部協力メーカーさんをお願いをして、さらに海外で製造しています。まとめてみますと、目標は「全世界のあらゆる技術を生かし、感動を生む商品を開発する」ことです。弊社には、「開発設計生産に関する技術を十分保有していない」という認識が必要です。だから、「商品に関する熱い思いがあれば、実現してもらえる企業は世界のどこかにある。だから必ず探そう。」と考えています。常に「お客様、すなわち子供たちが喜んでもらえる商品は何なのか？」を念頭において商品開発を心がけています。

2. キャラクター&商品紹介

我々の扱っている純玩具は、フィギュア、超合金、変形合体のロボット、ラジオコントロール、ぬいぐるみやEL機能、音声合成を取り入れた商品です。変形合体のロボットについては後ほど詳細に説明します。先ほどのぬいぐるみも、協力メーカーをお願いをして商品開発をしました。これには、内蔵センサーが7箇所あり、言葉も280語くらい喋れますが、ちゃんとお世話をしないと喋ってくれない言葉などもあります。

当社の面白いデータをいくつか紹介したいとします。戦隊のロボットの累計販売数は約5000万個で、象が8000頭分の重さになります。それからカード、トレーディングカードなどの累計販売数は約75億枚で、カードを縦に並べると地球を15周する長さになります。静岡ではガンダムのプラモデルを作っておりますが、リアルガ

ンダムの累計販売数が3億6千万個です。3億6千万個ということは、日本の人口が1億2千万人ですから、国民1人あたり2.8個持っていることになります。ウルトラマンの怪獣、ソフトビニール製の怪獣ですが、この19年間で6千万個が販売されています。「たまごっち」(初版)は、3年間で2150万個売れました。バンダイはたまごっちで人気が出て、たまごっちで赤字になりましたが、今回リベンジでもう一回たまごっちを発売しまして、好調に売れております。キャンディトイというのは、菓子流通でも玩具を売ろうとして始まった、いわゆる食玩、玩具菓子です。これが12億個。それから自販機専用カプセル玩具というのは、いわゆる「ガシャポン」です。100円を入れるとガチャっとでてくるカプセルで、累計でこれが21億個売れました。小児用ブリーフ(パンツ)はアパレルの商材で、5,127万枚の販売です。一昨年、パンツ大作戦というキャンペーンを行い、パンツ1枚に1個フィギュアをつけて販売し、大好評でした。現在はまた新しい販促方法を思案中です。

3. バンダイグループの生産拠点

バンダイの製品は海外生産が大半ですが、自社工場として持っているのは、タイのバンコク近郊にありますタイ工場と、中国北京から約400キロにある石家庄(セッカソウ)というところの中国工場の2拠点です。他にも多くの生産拠点がありますが、中でも中国福萬玩具有限公司は最初の海外生産拠点で、創業はバンダイと合併でした。1999年に合併を解消し、中国の独立企業になっています。現在でも玩具製造を依頼しているメインの工場です。

4. 栃木エンジニアリングセンターにおけるものづくりのアプローチ

座長の橋本先生からも、「可能な限り「オタク」のような話を」、とのことですので、これからは主に栃木エンジニアリングセンターにおけるものづくりのアプローチについてお話しします。

栃木エンジニアリングセンターは、おもちゃの

まちにあり、従業員は約 80 名です。主な業務は、製品の開発から金型製作までです。それ以後の生産は中国とタイで行っています。玩具生産という分野も時代とともに大きな変遷を遂げました。おもちゃのまちという名前の由来は、現在の場所に玩具輸出工業団地というのが（昭和 30 年代後半）にできたことに始まります。当時の玩具製造は、日本における輸出の花形業種でした。おもちゃのまちにおける最盛期のバンダイは、社員 400 名、加工メーカーさん約 500 社、玩具組み立ての外注企業さんが約 50 社 2000 名ほどの生産機能をもった工場でした。この時代は 1987 年頃まで続きましたが、中国や東南アジアの価格の問題などで、生産拠点は国外にシフトしていきました。現在では、先ほどお話したように約 80 名しか残っておりません。この 20 年で業務は、製造主体から開発設計に大きくシフトしました。

5. 商品開発の流れと設計

商品開発は、デザインスケッチ、電気設計、製品設計、金型製作、生産技術・品質保証、試作成形トライ、量産、という流れになっています。日本国内では、試作成形トライまでを行って、「この金型で十分いけるだろう」と判断されたら、その金型を中国やタイへ持って行って量産しています。

1) 設計者の悩み

余談になりますが、玩具の設計者は商品化のチャレンジについてすごく悩んでおります。玩具の商品化は、ある企画マンが企画開発をして、商品のアイデアコンセプトをもとに、「こんなものを作りたい」という商品企画案が出てくるわけです。以前、あるバンダイの専務が、アニメで登場する自動車型ロボットが、ハイスピードで走行し、ジャンプ台を飛び出したと同時に、ロボットに変形して着地した時にロボットとして立つというおもちゃをつくれと、企画案を出しました。「さあどうしようか?」、設計者はそれを何らかの形で具現化しなければなりません。設

計者は次のように考えました。自主走行機構をつけると変形しづらいので、レーシングサーキットで別の発射機構により走行を実現する。発射台から飛び出す時点で、本体についているスプリング開閉によりロボットに変形し、頭と足の重心移動によって着地をする。このような考え方で実現をしようと努力しました。結果的には、「ロボットに変形し、」までは実現できましたが、「頭と足部の重心移動により着地。」は成功しませんでした。コロコロと転がって、ロボットはその辺で寝そべっていました。それでも商品化をしましたが売れませんでした。

2) 人材の育成

先ほど玩具工業団地の変遷の話をしたとおり、我々の人員も 400 名から 80 名に人員が縮小していきました。従来はエンジニアリングスキルを持った人が十分必要だったんですが、そのような人材も潤沢にあるわけではありません。実は、栃木エンジニアリングセンターでは、専門家による設計は少ないのです。我々のスタッフは、文系出身者が多いのが特徴です。品質管理は 100% 文系、設計でも半分半分、購買でも文系が多い。男女の比では、女子が多くなっています。女子社員の特徴として、入社時は秘書科の専門学校を卒業して秘書として採用されましたが、後に購買へ行って購買の実務を学び、金型へ行って金型の CAM (Computer Assisted Modeling) をやって、その後設計に行って現在は設計を担当している、というような事例がたくさんあります。採用時のスキルだけで業務を固定しないで、いかに次の業務へ自分を進化できるかを促進しています。ある面で栃木の生産部門の歴史は、中国やタイへ生産がシフトした中で、人間の進化の歴史に似た部分があるのではないかと思います。

3) 設計の三次元化

バンダイは他の企業よりも設計部門で 3 次元化を進めるのは早かったと思います。ドラフターは昔からやっておりましたが、2 次元の CAD が 1987 年、そして 3 次元 CAD への移行が 1991 年

です。この移行が早かった理由は、玩具に働いている人の特徴かもしれませんが、「何か新しいものをやりたい」という希望が強いのです。先ほどの嶋先生の講演にもありましたが、あまり昔のことに固執をしないで、新しいことへのチャレンジが好きな連中が多くて、2次元CADにこだわっている人はあまりいません。現在は、設計のCADツールだけではなく、そのシステム全体を環境統合する取り組みをしております。金型も同様で自動化や3次元化はかなり昔から行っております。ここでのポイントは、1986年から本型にアルミ金型を導入していることです。これについては、各企業さんもよく栃木の工場を見学された際に驚いておられます。本型からアルミ金型を使うは意外に少ないのです。一般的には、試作型で2万個もしくは5千個を製作するためにアルミ金型を使う事例は多いのですが、バンダイの実績では一番多いもので100万個強の部品をアルミ金型で生産をした実績があります。

次に金型に用いる3次元データの活用についてお話しします(図1)。おおとの設計データは製造にかかわる活用の仕方、すなわち金型設計、加工データ、製品設計、そして生産技術に利用するだけでなく、営業資料や印刷物の製作、そして三次元データを利用してそのままアニメーションを作成するなど、マルチに三次元データを活用しております。設計ツールだけではうまくいかない部分があり、そのデータをいかに多くのセクションの人が早く見て活用できるかが重要なのです。3次元設計のデータは、品質仕様や彩色(塗装)などの仕様書類へ転化させています。このようを実現する「橋渡しのTOOL」は、従来の軽いパソコンでもその設計データが見られるビューアーを使い、オフィスの個々の人たちのパソコンで設計データが見られる環境を作っております。それを実現することで、今までは「これをやったらその次にこれ」という順番だった作業も、大幅に平行作業にすることができて、5年前と比較すると約30%の大幅な期間短縮に

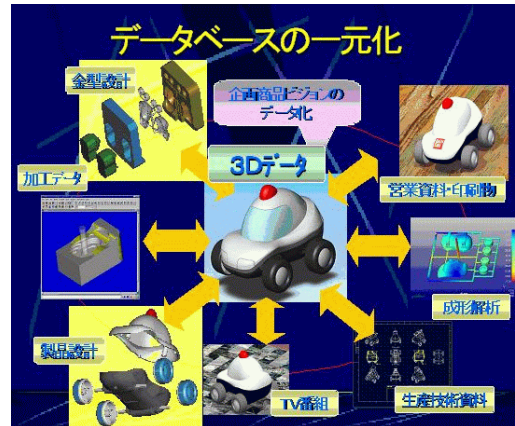


図1 データベースの一元化



図2 バーチャル商品開発の流れ

はなっていると思います。

6. 商品開発の事例(図2)

昨年の「爆竜戦隊アバレンジャー」の開発を通じて、設計から量産までの事例をお話したいと思います。組織体制は、企画、設計、生産技術、デザイン、金型、品質管理、仕入れ購買のチームが栃木の内部にあります。さらにバンダイグループのデザイン会社であるPLEX、バンダイのタイの工場のBICが含まれます。すなわちバンダイ内部だけではなく、この2つの別会社も同じ組織体として仕事を進めました。先ほどお話しした通り、この組織体制は、三次元データを全部に共有して活用するというものです。これを実際の手順を追って説明します。

1). イラスト(7月)

最初はイラストです。メカニカルな部分の有無によってイラストも異なります。今回は爆竜戦隊でモーターを使って駆動させる商品だったので、最初に原理試作が必要なので、基本的な構造のイラストがきます。これを企画、設計、PLEXで検討します。

2). 仕掛け (7~8 月)

それが実現できるかどうか、先ほどの例のようにロボットが転がったのでは仕方がないので、仕掛け、すなわち遊びの検討をします。これには、PLEX、企画、設計、品質管理、生産技術、BICが関与しています。

3). ラフデザイン (8 月)

この段階でコストを算出し、面白さを検討します。そして、「S.H.I.P. 推進室」でデザインレビューを行います。「SHIP」というのはプロジェクト名です。この前の年に同じようなシリーズで3月に発売を予定し、通常は船便で海外から輸入するところ、納期が間に合わなくなり、JALの航空便をたくさん使ったため8千万くらいの運賃がかかりました。このときの反省で、船便で行くために「SHIP」という推進室を設けて、いかに3月に発売できるかというプロジェクトを作りました。この時点で3月に6万個を生産することが全部門の共通認識になりました。「S.H.I.P. 推進室」でのデザインレビューは、三次元データを活用して、各チームが自分の専門性を活かし、商品を品質検証することです。ここでは先述の3次元ビューアーを使って検証していきます。この先の専門的な部分を鵜池に引き継ぎます。

<鵜池>

3)-1. バンダイの社内ネットワーク

「物を作るという行為」は、ある意味で「設計者の聖域」という考えがあります。設計をしたものが出来上がってから、とやかくいう人達が多く、出戻りの作業が問題になっていました。このために、設計データのデジタル化を推進することで、設計中に様々な検証を関係者ができる社内のネットワークを構築しています。

私たちの商品は、ヒーローものの「戦隊シリーズ」、「仮面ライダー」や「ウルトラマン」シリーズなどのようにカテゴリー別に様々なものがあります。これを分類に従ってクリックすると必要な情報がすべて見られるようになっています。例えば仮称ですが、2005年「戦隊」の「新1号ロボ」に関しての情報は、部品表の場合はExcelで構成部品がすべて表示されます。このことは正直言って、今までは製品ができるまで誰も把握していなかったところですが、現在では設計中に様々な部署がアクセスして把握しています。また、商品を製造・販売する上では、不具合が生じることがあります。そのような事例もデータベース化してノウハウとして蓄積しております。

3)-2. グラフィックサーバー

全員で画像の検証をするために、グラフィックサーバーを設置しています。これにアクセスすると、現在設計中の商品群がコードネームとサムネイル画像が表示されます。ここから担当部署の人達がアクセスをすると、三次元の画像データが表示されます。これはすべての情報をビューイングするだけのソフトなので設計はできませんが、従来の2次元設計では、その商品を知るために「図面を読む」という能力が必要でした。それが三次元表示で排除されて、担当部署がいろいろな方向からチェックができるようになりました。たとえば、あるパーツについてクリックしていくと、設計者の名前、材料はプラスチックのABS、使う数は1個だけ、今日現在の重さは8.6グラムなどという情報が得られます。設計段階で重さがわかるということは、購買の方は材料のコストを検証できることになります。さらに塗装のような細かい情報も含まれています。こうして、すべての情報が設計中にアクセスできるという、全員設計の環境を実現しました。全員設計をすることでかなりのスピードアップ、それからクオリティの高い商品が作れるようになってきております。

<片瀬>

4). 外観設計 (9 月)

デザインレビューのあとは、設計者による外観設計です。

5). 詳細設計 (10 月)

詳細設計には、流動解析や強度の解析も含まれます。ただ、ここがコンピュータと人間の違いだと思うのですが、人間はぱっと見るだけで悪いところが見えるのですが、コンピュータの場合は完全に CG を完成させないとできません。ですからバンダイの場合は、これらのツールも持っていますが、例えば強度解析の場合は、無限に強度解析点があり解析だけで何千時間も要するので、基本的には今までの経験をメインにして、どうしてもわからない点だけを抽出をしてコンピュータで検証しています。

詳細設計は三次元 CAD で行います。先ほどのビューアーとほぼ同様の表示になりますが、機能は大きく違います。この説明を鶴池がします。

<鶴池>

三次元 CAD のソフトを使って詳細設計を行います。このソフトは、ゼロからの設計ができるだけでなく、先ほどのビューアーで設計を見られるようにするため、三次元データをビューアー用に吐き出す(ダウンロードする)ことができます。高価なソフトで、1 本約 500 万円ほどします。

CAD は CG ではなく、あくまでも設計用ソフトです。ですから、全体像を示していても、内部の構造を全て仕込むようになっています。そして CAD 上で、一部を取り出したり、動かしたりして見て、どこが不要な接触をしているなどの不具合を見つけながら、設計を進めていきます。ネジを仕込んだり、シャフトを仕込んだり、これは電池で動きますからモーターを仕込む作業も CAD 上で行います。このようにモデリング(設計)をする一方で、すべての構成部品はツリー構造で関連付けられ、「全ての部品がどのように配置されてどのような関連を持っているか」がわかるようになっています。ですから、設計者はこのツリー構造を最初に考えてから、どの

ように部品を展開していくかを考えながら設計しています。曲面や円弧は、半径や曲率を指示して入力するわけですが、企画の担当者からくる指示はあくまでも「イラストのような顔を作る」であって、「ここの半径を 5mm にする」といった表現はありません。「ちょっともっとバーンといい感じにしてくれないの?」とか、「これが何でお前はカッコイイと思うんだ?」など、要は怒られ方も「本当にこれでいいと思っているのか?」という、非常に曖昧な、でも迫力のある怒られ方をします。バンダイの場合はほとんどの社員がマニアというか、キャラクターを好きな人間が揃ってますので、そのような指示でも十分通じるところがあります。しかし、中には担当するキャラクターが嫌いという人もいます。そういう場合は、まず番組のビデオを見て勉強しておかないと指示がよくわからない、というようなことが起こります。設計とは違うところもいろいろ勉強しながらやっております。

<片瀬>

擬音が好きなのは、企画の担当者だけでなく、うちの設計のスタッフも同じです。「バーン」とか「ヒューン」などの擬音が仕様なのです。それを実現することは簡単なことではありません。ある女性の設計者の悩みは、「片瀬さん、私カッコイイっていうのがわからないんですよ。カワイイっていうのはわかるんですけどね。」でした。ですから、商品を作る人も「この人だったらこれは作れるだろうな」と考えながら、設計担当を決めたりします。

6). 試作 (11 月)

設計が終わると自社内で試作をします。試作が完成したら直ちにいろいろな検証をします。試作のために栃木の場合は、今流行の光造形は使っておりません。ABS 樹脂の削り出しで作っております。というのは、比較的年長の子供たちが対象のプラモデルとはちがって、うちの場合には比較的年少の子供たちが対象になります。で

すから、高い安全性が求められ、落下試験や強度試験が相当多いのです。光造形だと、形はできるけれど強度試験には耐えられないので、うちの場合にはABSを削りだして、より量産に近い形で検証しています。

7). 金型製作 (11～12 月),

立ち上げ～量産 (1 月)

設計が完了してから、金型の製作を行います。12 月頃にある程度金型が完成し、タイの工場に金型を送り、量産を開始します。これが 1 月のことです。今が 11 月で、来年の商品の立ち上げが真っ盛りで、タイのスタッフが今日現在も 4 名ほど栃木に来て量産の準備をしています。そして、6 万個の納品が 3 月にうまくいった一つの事例を紹介しました。

7. 人材育成のための設計スクール,

インターンシップについて

これは商品のできるまでとは違うのですが、先ほどお話をしたとおり当社の設計部隊は工業系の学歴があり設計スキルを持った人だけではありません。文科系の人も多くいます。このため、いかに早く設計に慣れてもらうために、自社内に設計スクールを立ち上げました。女性のパートさんも第一線で設計をやっております。金型も同様ですが、社員、パートという垣根はなく、いい人であれば、誰でも担当してもらっています。設計スクールとインターンシップは、自社開発および製造部門の生き残りのため、そして設計スタッフのスキル向上とノウハウの構築など、物作りのための人材育成を目的に設立しました。2001 年からほぼ毎年実施しております。実習人員実績は 13 名、宇都宮大学や横浜国大などから応募がありましたが、工学系の人はあまり来ませんでした。2 週間で自分でデザインをし、3 次元 CAD を使って試作品を作り上げる、というのが研修スケジュールです。実働 10 日間で、設計の基礎、現場を見学、自分でデザイン、3 次元設計、試作品製作の手順を経て、最後は塗装して持って帰ってもらっています。物作りが好きそうな学生が多く、楽しく 2 週間で試作まで漕ぎ

つけました。インターンシップの成果事例としては、サンタクロース、ロボット、タコ、唇をイメージした車などがあります。インターンシップのあとにバンダイにめでたく入社する事例も増えてきています。当社の人材発掘の方法論は、スペシャリストを雇うというよりも、たとえ経験はなくても意欲のあるスタッフを雇って育成することです。そのためにバンダイは「バンダイバリュー」という 3 つの魂を私たちの心に刻んでおります。「チャレンジャー魂 まずやってみよう!」「イノベーター魂 そこまでやるか!」「エンターテイナー魂 やるんだったら面白く!」と。このことは常にどんな仕事でも念頭に置いています。

最後に、百聞は一見にしかずなので、栃木工場のビデオを作りました。これはうちのデザインスタッフが構成をしたビデオで、それを見ていただければ私の話よりも正確な事がおわかり頂けると思います。〈ビデオ上映：夢をかたちにするヒーローたち〉

8. 金型について

一般に「金型の製作には時間がかかる」といわれていますが、バンダイでは速いものでは 1 週間、遅いものでも 1 ヶ月以内で作っています。これは、他の企業さんは驚かれると思います。たとえば、松下さんの MOVA の外側のケースをうちの現場のスタッフが勉強のために試作したときは、設計 4 時間くらい、試作を次の日に作って、金型は一週間でつくりました。速いことだけが自慢というわけではありませんが、当社の場合は納期タイミングが非常に重要なので、いかに早く商品を作り上げるか、スピードも要求しながらモノづくりに励んでおります。ご静聴ありがとうございました。

質疑応答橋本 (座長) :

金型についてですが、本日お持ちになったロボットの部品には、いくつの金型が必要なのでしょう

片瀬 :

19 型 (かた) が必要です。これを 1 つに組み合わせ埋め込んで「ファミリーモールド」として使います。これは玩具メーカーでは一般的なことで、この 19 型を一回ショットすれば、すべての部品ができるということです。

橋本：

その金型は、何組必要なのでしょうか？1 セットですべて済むとは思えないのですが？

片瀬：

基本的には、1 セットしか作りません。この 1 セットだけで一気に作るのです。しかし、「売れたら」話は別です。「たまごっち」のときは、2000 万個ですから金型は一ヶ月半で 37 セット作りま

した。金型の単価は高く、先行投資料が非常に大きくなりますから、できるだけ少なくしたいのです。しかし、売れたら「それいけ！」と金型も大量に作るわけです。

橋本：

金型の単価についてもお聞きしたかったのですが、その原価はどれくらいなのでしょう？

片瀬：

1 個 100 万円から 200 万円の間です。ですから、一つのおもちゃには 4000 万円程度の金型費用かかっていることになります。

以上。

Data Dictionary Task Force (DDTF) と Operating Room of Future Plug-and-Play (ORF PnP) について

菅井直介*, 岩瀬良範†

2004 年ラスベガスの ASA 年次大会では、米国麻酔テクノロジー学会の関連行事として 10 月 24 日に Data Dictionary Task Force (DDTF) の会合があり、一方、翌 10 月 25 日に Operating Room of Future Plug-and-Play (ORF PnP) の集まりも開かれた。また ASA のとき慣例となっている STA デイナーは 23 日夜シーザーズパレスで開かれた。ASA は来年 100 周年を迎えようとしており、年次集会は 18,000 人規模の大学会となっている。そのためか、各地で行われる STA など公認の関連学会の集会は顔なじみを集めてむしろ盛況を呈している。STA デイナーでは STA の創始者の一人、Dr. N. Ty Smith の名を冠した講演が毎年行なわれている。昨年のサンフランシスコの会では金門橋についての講演があったが、今回はラスベガスに近いコロラド川の三つのダムについてコロラド下流事務所の Timothy Ulrich 氏による「2 千 800 万エーカーフィートの水をどうするか?」というダムの構造と管理についての話があった。

Data Dictionary Task Force¹⁾

ASA 会場のヒルトンホテルでは麻酔科医が、自動麻酔情報管理システムの売り手の業者側と共に、麻酔記録のコンピューター処理のための麻酔用語および文脈の符号化について小人数での討論を行った。これには米国外科学会の outcomes research の代表も加わっている。DDTF の主催者であり、Duke 大学麻酔科教授である Dr. Terri Monk が司会、英国の Society for Computation and Technology in Anesthesia (SCATA) の Dr.

Andrew Norton が補佐した。

DDTF の成り立ち

米国で麻酔の outcomes を検討しようとする動きは 1990 年代の終り National Center for Clinical Outcomes Research (NCCOR) に始まったが標準的な医学用語のないことが大きな障害となり、報告の相互比較と検討が不可能であることがわかった。麻酔自動記録装置を使用しても標準的な仕様ががないので各病院間の自動記録を比較することができない。

一方 ASA は麻酔の安全のために 1984 年 Anesthesia Patient Safety Foundation (APSF) を立ち上げ麻酔の安全についての多くの活動を行い、これは医学会全体でも患者の安全のための最初の機構として高く評価されてきた。APSF は自動麻酔情報管理システム anesthesia information management system (AIMS) により outcomes 研究のデータを集めることにして、その標準化を図るために 2001 年 Data Dictionary Task Force を設立し Dr. Monk を委員長として麻酔用語の符号化とその体系化 (ontology) を開始した。

また、英国では 1990 年ごろからすでに SCATA により麻酔用語の標準化に取りこみ国民健康保険において用いられてきた。これには英国の Clinical Terms Version 3 (CTV3) という医学用語集が用いられていた。2003 年には DDTF は SCATA のメンバーと共に、世界的な麻酔

*茅ヶ崎徳洲会病院麻酔科痛みセンター

†獨協医科大学救急医学・麻酔部

標準用語を作るための International Organization for Terminology in Anesthesia (IOTA) を立ち上げこれにはカナダの代表も加わっている。DDTF/IOTA の content director は Dr. Andrew Norton, technical director は Dr. Martin Hurrell でいずれも 10 年以上にわたって麻酔用語の検討に携わってきた英国 SCATA のメンバーである。また ASA はこれらの DDTF/IOTA の活動を強く応援している。

現在、麻酔用語の符号化には SNOMED (Systematized Nomenclature for Medicine) の最新版である SNOMED CT の使用が 2003 年 9 月に公認されており、これに麻酔関係の用語を収録する作業が行われている。SNOMED はもともと病理学の分野で始まったものであるが、米国では国立医学図書館がその版權を買い、米国内の医学関係の施設では自由に使用できる体制になっている。また英国でも国の保健機構がこれを買って、CATV3 も組み入れている。しかし日本を含めて、国家的に SNOMED を導入していない国々では、DDTF/IOTA の用語を使用する際にはこの SNOMED CT の版權が問題となって来る。したがって今後 DDTF/IOTA の麻酔用語が世界中で使用されるようになるのにはこの問題を解決する必要がある。

現在すでに DDTF/IOTA により 1800 から 1900 の麻酔用語が符号化されて、新たに SNOMED CT に加えられている。Dr. Norton によると 2004 年 10 月の時点で収録された用語は次のような部類ものである。

General anesthesia, Local anesthesia, Vascular access procedure, Anesthesia drugs, Monitoring terms, Anesthesia equipment, Airway management, Some administrative terminology

また将来収録される部類は次のようなもので

ある。

Preoperative assessment, National Surgical Quality Improvement Policy (NSQIP), Anesthesia subspecialty terms (Cardiothoracic, Obstetric, Neurosurgery など), Adverse events and complications

Ontology と呼ばれるこれらの用語の相互関係とシステム化が行われ、Distributed Anesthesia and Mapping System (DATAMS) というプログラムで麻酔の情報が処理されるようになっている。またこれを Internet 上に公開して世界各地の user がアプローチできて、情報を比較検討できるようにしている。

Operating Room of Future Plug-and-Play (ORF PnP) について

これは、手術室で用いられる器具相互の連携を図る目的で、MGH の Dr. Julian Goldman らによって 2004 年 4 月に始められた。10 月 25 日朝、ベネチアンホテルで開かれたこれについての会でも 20 名ほどの麻酔科医と業者が集まり、今後の方針について討議が行われた。この会ではできるだけ広くの人々の参加を呼びかけており、www.orfpnp.org でこの会の討論に参加することができる。現在、臨床からの要求、政府の規制、器具間の情報交換についての構築、器具と使用者との interface などについての working group が作られている。FDA の応援もあり 11 月には FDA で次回の会合が開かれている。

このように麻酔関係の情報と器具の共通化を図る動きが主として英語圏で急速に進んでいるようである。

参考文献

1. Monk TG Toward standardization of termi-

nology in anesthesia information systems. Interface, Society for Technology in Anesthesia, October 2004, p1-4.

ABSTRACT

Data Dictionary Task Force (DDTF)
and Operating Room of Future
Plug-and-Play (ORF PnP)

Naosuke Sugai, Yoshinori Iwase*

In the 2004 Annual Convention of the American Society of Anesthesiologists, two discussion meetings were held, i.e. DDTF and ORF PnP. DDTF headed by DR. Terri Monk is now co-operating with SCATA of UK and they joined in forming International Organization for Terminology in Anesthesia. Its members consist mainly of those from US, UK and Canada. Its content director is Dr. Andrew Norton and technical director, Dr. Martin Hurrell both from UK. By October 2004, DDTF/IOTA collected 1800-1900 terms to its dictionary and de-

veloped ontology leading to DATAMS. Anesthesia terminology by DDTF/IOTA is officially incorporated in SNOMED CT. It also includes CTV3 of the British National Health Service. ORF PnP was initiated by Dr. Julian Goldman of MGH in May 2004. Clinicians and medical device producers along with institutions and government got together to make the equipments used in the operating room to be better related with each other. The group is backed by the FDA and anyone can join its discussion through the web.

Keywords:

DDTF, ORF PnP, SNOMED CT,
DDTF/IOTA, DATAMS

*Department of Anesthesiology and Pain Relief
Center, Chigasaki Tokushukai Medical Center
14-1 Saiwaicho, Chigasaki, Kanagawa 253-0052*

**Department of Emergency Medicine and
Anesthesiology, Dokkyo Medical University 880
Kobayashi, Shimotsukagun, Mibucho, Tochigi
321-0293*

喉頭鏡にクリップオン型パイプアダプタを装着し汎用気管支ファイバースコープを挿入して利用する簡便なビデオ喉頭鏡システムの試作

中尾正和*

はじめに

2004 年度より新臨床研修制度、救急救命士の気管挿管実習など、麻酔科医の指導下での気管挿管研修が増えている。古典的な喉頭鏡操作は術者 1 人が直視できるだけで、他者には見えない。他者が同時に観察できるビデオ喉頭鏡システムはすでに市販されており¹⁾、主として医育機関に導入され有用性が評価されている^{2,3)}。一般病院で働く演者も各社のビデオ喉頭鏡システ

ム (図 1) を試用し、その有用性は実感できたが、高価であり入手に難があった。一方、気管支ファイバースコープは手術室にはほぼ常備されており、これを利用できれば、挿管実施者による直視以外にファイバースコープを通して観察ができる。さらにファイバースコープに装着できるビデオカメラがあれば、記録やビデオ画像を複数で観察することも可能である。筆者は市販品納入前の当面の対策として、汎用の喉頭鏡に既



図 1 各社のビデオ喉頭鏡システムと喉頭鏡

左上から Karl Storz 社 VMS Berci, Rusch 社 X-Lite, FiberTech 社 FineView, Saturn Biomedical Systems 社 Glidescope. 特殊な喉頭鏡 Truphatek 社 Truview や町田製作所 Laryngo View は汎用ビデオカメラを装着可能。

*JA 広島厚生連 広島総合病院麻酔科

存の気管支ファイバースコープを挿入できるクリップオン型曲パイプアダプタを試作した。この簡易ビデオ喉頭鏡システムは新規投資が約千円だが十分実用的であったので紹介する。

ファイバースコープを利用した 自作ビデオ喉頭鏡

アイデアの源は、通常の喉頭鏡に必要時に装着できるペンロン社の視角変更用プリズム (図2) である。

まず、6mm パイプを用いてオリンパス社ファイバースコープ LF-DP (外径 3.2mm, 視野角 90度) を挿入できる形状を試作し、それをクリップ型とした (図 3A, B)。

この試作 B ではハンドルを握り難く、ファイバースコープの挿入や固定も困難となることから、パイプの曲りを少なくした試作版 C (外径 5mm パイプ) をつくった (図 4)。さらにパイプ内でのファイバースコープが回転することで視野が回転するのを防止する目的に、二重チューブで外より固定した。また喉頭展開操作で細径ファイバースコープを屈曲させてファイバーを折損する危険性があるため、市販の電気配線用熱収縮チューブで補強した。

使用結果

ファイバースコープ単独ではレクチャースコープのように他者 1 人が観察でき、ビデオカメラを接続すれば複数人数での確認や録画が可能であった。本クリップオン型パイプシステムの画質と視野角は使用するファイバースコープに依存し、安価なポータブルタイプではファイバー数が少なく解像度が落ちるが、それでも挿管の確認には十分な画質であった。

考 察

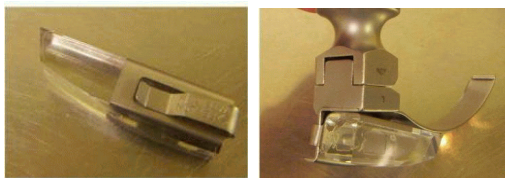


図 2 ペンロン社プリズム

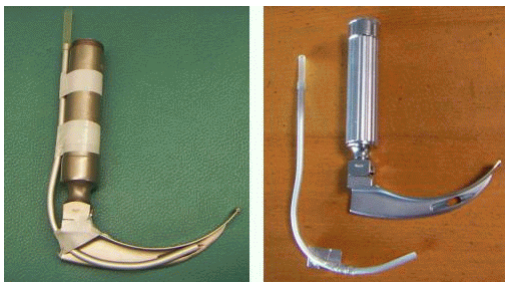


図 3 試作ビデオ喉頭鏡
形状考案試作A, クリップ型試作B

商用ビデオ喉頭鏡システムは各社から発売されているがいずれも高価である (図 1)。試用の印象は Karl Storz 社 Berci; 長い開発歴があり、喉頭の診断にも利用できる精細画質だが最も高価。同社の内視鏡システム (光源とヘッドアンプ) があれば喉頭鏡側のみ購入なので半額ですむ。通常のマッキントッシュ型なので直視での喉頭展開も可能であるがキセノン光源が明るすぎて、口腔内、喉頭の観察が白く見えて困難となる場合がある。ビデオ録画ではモアレ干渉がしやすい。Rusch 社 X-Lite; 通常のマッキントッシュ型で直視が可能である。明るすぎる点は Berci と同じ。ビデオ方式が PAL のみで、日本の NTSC に変換アダプターが必要で許容範囲の画質劣化がある。カメラハンドル部とブレードの接合条件で画面にモアレ干渉がしやすい。FiberTech 社 FineView; ハンディーだが重い。光源がハンドル内のランプのためビデオノイズが多い。直視性はほぼよいがブレード部カメラが厚く視野がやや制限される。ブレードの実効長が短く男性の

挿管には使えない場合がある。Saturn Biomedical Systems 社 GlideScope；スタンドつきでコンパクト。ケーブルも外すことが可能で取扱や滅菌も容易。青赤 2 色の LED 光源と白黒 CCD でノイズもなく画像は鮮明で立体感もあるが白黒画像であるため慣れを要する。カメラ視野自体は広いが光源の届く範囲が狭く、実際のビデオ視野はやや狭い。光源色とブレード部のカメラサイズから、直視は困難。ブレード形状がやや特殊であるが挿管困難症例にも定評がある⁴⁾。Truphatek 社 Truview；直径約 1cm の硬性鏡を組み込んだ喉頭鏡。硬性鏡経由で見ると遠方に見える。3 万円程度の値段は魅力。ブレード形状が異なるため、直視での喉頭展開修練には向かないが、麻酔科専門医による通常の気管挿管にはハンディーで実用的である。カメラを装着すると直視での挿管は困難。町田製作所 Laryngo View；ブレードはマッキントッシュ型で、標準規格 (グリーンスペック) のファイバーライトガイドハンドルが利用でき、通常の喉頭展開操作が可能。カメラを装着した場合には重量バランスが悪いがブレードは 20 万円未満であり一般病院でも購入しやすい。

すでに Haas ら⁵⁾ が Miller の汎用喉頭鏡に気管支ファイバースコープオリンパス BP-P20 をテープ固定して利用する方法をレターで報告しているが、テープ固定のため、喉頭鏡専用にする必要がある。今回のファイバースコープを挿入したパイプを汎用喉頭鏡にクリップオンするビデオ喉頭鏡システムは 1000 円程度の材料費であり、挿管後にはパイプから抜けば、本来の目的にもすぐ利用できる長所がある。画質は使用するファイバースコープに依存したが、高価な市販品と比べて遜色ない実用性であった。ブレードについている電球と本パイプのため直視での視野制限が生じ

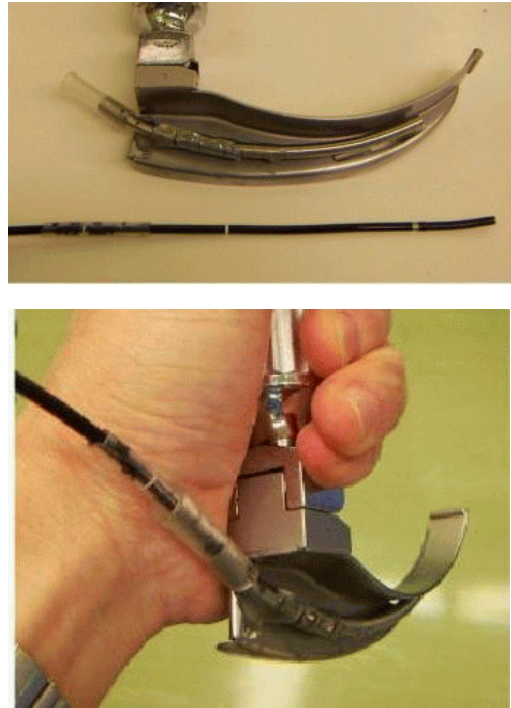


図 4 試作版 C

たが、ファイバースコープ光源を利用して電球を外すことで改善できた。また喉頭鏡ブレードの形は同じサイズでも会社によって多少異なるため、パイプはブレードごとに作る必要があった。挿入するファイバースコープの保持にも改良の余地があった。

手作りの長所として、パイプの長さや角度を調整することでファイバースコープ先端位置や視野方向をかえられることがあげられる。挿管指導目的、挿管困難補助などにカスタマイズすることなど、今後のビデオ喉頭鏡の方向性を検討するのにも役立つと思われる。また、喉頭展開をビデオ画面で拡大して確認できることは老眼の麻酔科医にとっても福音であると考えられる。挿管のためには喉頭が確認できれば良く、直視の際のような極端な喉頭展開が不要となるため、展開操作時の血圧変動が減った印象もあった。これらについても更なる検討が望まれる。

すでに 4mm(1/6 インチ) の CCD チップも市販されており⁶⁾、現在のわが国の技術であれば細径の CCD カメラと高輝度白色 LED を組み合わせればすぐにでも製作可能にもかかわらず、市販されていない。早く安価でコンパクトな喉頭鏡システムが各手術室に一台と普及する時代を期待したい。

参考文献

1. Kaplan, M.B., D.S. Ward, and G. Berci, A new video laryngoscope-an aid to intubation and teaching. *J Clin Anesth*, 2002. 14(8): p. 620-6.
2. 岩瀬良範, 崎尾秀彰, and 諏訪邦夫, 無線／有線 CCD ビデオ喉頭鏡. 麻酔・集中治療テクノロジー 2002, ed. 太田吉夫, 橋本悟, 田中義文. 2002, 東京: 克誠堂出版. 7-9.
3. 岩瀬良範, 松島久雄, and 崎尾秀彰, ビデオ喉頭鏡による気管挿管記録を支えるビデオ技術について. 麻酔・集中治療テクノロジー 2003, ed. 尾崎真, 橋本悟, 田中義文. 2004, 東京: 克誠堂出版. 30-33.
4. Cooper, R.M., Use of a new videolaryngoscope (GlideScope) in the management of a difficult airway. *Can J Anaesth*, 2003. 50(6): p. 611-3.
5. Haas, J.E. and K. Tsueda, Direct Laryngoscopy with the Aid of a Fiberoptic Bronchoscope for Tracheal Intubation. *Anesth Analg*, 1996. 82: p. 438.
6. SONY, Super HAD CCD. 2004.

ABSTRACT

Inexpensive video-laryngoscope system by using conventional fiberscope via "Clip-on" type pipe.

Masakazu Nakao

In Japan, there is the increasing demand and task for teaching intratracheal intubation for trainee physicians and emergency paramedics instructed by anesthesiologists. Only single user can visualize larynx with conventional laryngoscopy. While video-laryngoscopy is useful and efficient way to teach intratracheal intubation, the commercial video-laryngoscopy systems are large and expensive. Since fiberscope is available in most OR, author developed clip-on type pipe system. With thin fiberscope, inserted through this pipe, instructor can share the view like a lecture scope. When video system is available, video view can be seen by multiple doctors and can be recorded for further evaluation. Positioning and the fixation of fiberscope to thin pipes were key points. Author hopes this technique is shared in other institutions.

key word: video-laryngoscope, clip-on pipe, education

*Div of Anesthesia and Pain Control
Hiroshima General Hospital
1-3-3 Jigozen, Hatsukaichi City,
Hiroshima, 738-8503, Japan
masa.nakao@nifty.ne.jp*

血液ガス電子博物館作成と問題点

諏訪邦夫*

血液ガス電子博物館作成を作成中で、その意図・経過・問題点を述べる。

目 標

「血液ガス関係の情報のすべて」を電子化してブラウザーで自分でも見、他人にも見せたいと考えた。著者のラジオメーター社における活動の一部として行う。

基本方針

画像つまり図、写真、絵などを中心とし、それを短い文章で説明するスタイルとする。原則として、文章中心の頁を避ける。文章中心のものは、書籍もインターネット情報も大量に存在するからである。説明の文章はすべて自分で書く。

中心となる画像は、数冊の書籍（Astrup P, Severinghaus JW. History of Blood Gases and Acids and Bases. Munksgaard, Copenhagen. 1986. など）、インターネットからとったもの、自作の図などからなっている。作成には、MS-WORD のホームページ作成機能を使用した。原則として、パソコン画面ずつで構成し、多数頁にわたる展示を避けた。

結 果

図または写真一葉と説明とで1頁を構成し、これを目次頁から探すスタイルとした。

2004 年末までに作成した分量は、作成画面で 320、ファイル数で 6500 程度である。ただし、このファイル数は実際には使用していないものも

多数含んでおり、「博物館の所蔵品」として扱うべきものである。

展示の内容は、クイズ、人名と項目のリスト、機器の使用とサンプルの扱い、血液ガスの基礎事項、呼吸管理関係の 5 つの大きな部分に分け、さらに付録として科学年表 (血液ガス中心、エクセル形式) と自作の血液ガスと呼吸管理関係のパワーポイントファイルを加えた。各々の内容は以下の通りである。

クイズ：この博物館自体に興味をもって貰う目的で作成した。「問題」の頁はつくったが、回答の頁は他の頁と共通で、特に「回答」だけの頁はごく少数である。

人名と項目のリスト：この博物館の一番の基本的な項目である。人名の他に、項目も並べてある。

機器の使用とサンプルの扱い：血液ガスの実務的な問題を取り扱っている。

血液ガスの基礎事項：血液ガスに関する基礎的な問題を取り扱っている。

呼吸管理関係：血液ガスは呼吸管理と密接に関係しているので、麻酔・集中治療・呼吸管理などの記述を加えた。

人名の扱い：人名は仮名書きを基本とし、これに原語表記と生年と没年、国籍と主な業績などを加えた。

詳しい文章の頁に連携させたものがあるが、これはごく少数である。

公開：2004 年末の時点ではラジオメーター社内部でのみ公開している。

*帝京大学八王子キャンパス (学部所属なし)

考察と問題点

- I. 未解決の問題として「著作権の問題」つまり画像・写真・図などの著作権をどう処理するかが残っている。文章と異なり、図や写真は一葉でも著作権があるから処理が容易でない。可能性として以下のことを考えている。
 1. 狭い範囲に限定して DVD で配布する。
 2. 一部は公開の許可が得られたり、インターネット上のリンクで解決できる可能性はあるだろう。
 3. 著作権にきびしい部分は空欄で公開する可能性もある。
 4. 上記, Astrup & Severinghaus の書籍は、ラジオメーターのデンマーク本社が版權を持っているはずなので、解決できる可能性があるがまだ検討していない。
- II. 目次画面と個々の画面同士の連携は十分だが、個々の画面同士相互の関連づけが不十分である。
- III. 図の大きさ、文章の文字の大きさなども不ぞろいで、整理する余地が残っている。
- IV. 自分自身の図・絵・写真などの整理に大きく役立った。具体的には、「○○の図が欲しい」と考えた時に、この博物館作成の記憶・目次などをたどって、パソコン内の図に確実にたどり着ける。従来、文章はパソコン内で相互の連携をつけてあったが、図などは連携が不十分で「探す」ことに時間とエネルギーを費やしていた。今回の仕事の経験で、それが容易になったと感じる。
- V. 作成中にいろいろな発見があった。「フィックの原理」の発見者と「フィックの拡散の

法則」の発見者が同一人物と知ったなどがその例である。

結 論

血液ガス電子博物館作成を作成中で、順調に進行はしている。画像・写真・図などの著作権をどう処理するかが、未解決の問題として残っている。自分の学習・知識の整理に役立つ面は間違いない。



フィック Fick, Adolf (1829-1901)
 ドイツの生理学者、数学者、物理学者。『フィックの原理』で名高い生理学者だが、同時に『フィックの拡散の法則』で名高い物理学者でもある。実証的な研究よりも、物理学・数学的な考え方を生理学に当てはめることに腐心したという。チューリッヒでルードヴィッヒの下で16年間働いた後、Würzburg 大学生理学教授を25年間つとめた。若干28歳で、Die Medizinische Physik (医学物理学) を出版している。詳しくは「エッセイ：フィックについて」参照

図説明

血液ガス電子博物館から”Adolf Fick”の項目。フィックの肖像と最低限の業績など。この頁は珍しく参照ファイルがある。

ABSTRACT

Virtual Blood Gas Museum: Its Construction
and the Lessons Learned.

Kunio Suwa, M.D.

Virtual blood gas museum was planned and is now under construction which sums up all information on blood gases and aims to show them on a PC. The basic policy is to rely mainly on figures or photos and not much on text, because there are good many text-based examples on the Internet and because the text-based pages, though useful, do not fit the concept of "Virtual Museum". It is meant to be viewed on a browser.

Figures and photos were taken from books and Internet in addition to the drawings of the author.

Results:

As of the end of 2004, the museum consists of 350 pages and 6500 files. Many of the figures and photos are copyrighted and cannot be released to the public. Conclusion: Virtual blood gas museum is being worked out. Many of the figures and photos are copyrighted, therefore making the museum difficult to be available to the public.

key word:

virtual museum, blood gases, copyright, graphics

*Teikyo University Hachioji-Campus Bldg12,
Rm:1-15, K. Suwa's Study Rm
359 Ohtsuka, Hachioji, Tokyo 192-0395 Japan.
Email : kunio.suwa@nifty.ne.jp*

実体型患者シミュレータ環境を用いた 更新医療機器の選定に関する試み

上農喜朗*

要 旨

実体型患者シミュレータを用いた模擬手術室環境において、麻酔器更新における麻酔器の試用をおこない、複数の麻酔科医によるアンケート調査を行った。その結果を点数化し、更新機器選定において麻酔科医の意見を反映する客観的資料とした。これによって麻酔器更新の機器選定のプロセスの公平性と透明性を保つことができた。

はじめに

医療機器の更新に際して、選定のプロセスの公平性と透明性を保ち、実際に機器を使用する現場の要求にこたえるための障害となる要因が数多く存在する。1) 各診療部門で更新機器の選定を行う担当者の嗜好、2) 機器メーカーの営業担当者との関係、3) 病院事務部門による経済的な理由などによる選定作業への介入などである。

さらに、機器選定に先立って機器の試用を行うことが多いが、いままで使用したことがない医療機器を実際に患者に対して使用することは、道義上だけでなく患者の安全確保の上でも問題が多い。また、多数の麻酔科医が試用するには長い期間が必要である。今回われわれは、実体型患者シミュレータを中心とした模擬手術室環境において、麻酔器試用に対するアンケート調査に基づいた更新申請を行ったので報告する。

方 法

兵庫医科大学中央手術部で使用している患者監視装置への接続が可能で、換気のパラメータなど麻酔器から得られる情報を生体情報データベースに保存する事ができる機能を備えている事を機種選定候補の麻酔器の備えるべき最低条件とした。この条件を満たす機種として、国内外の3社から3機種を更新機器の候補とした。

2003年11月から2004年7月の間に、これらの麻酔器を1機種ずつ1週間、兵庫医科大学中央手術部内にある患者シミュレータ室に設置し、標準的な患者において麻酔器を実際に使用できるようにした。模擬手術室環境の中心となる実体型患者シミュレータはHPS(Type C Version 5.5, Medical Education Technology Inc., 米国フロリダ)、モニターとしてフィリップス社製モニターを使用した。兵庫医科大学麻酔科学教室およびその関連部署、ならびに外部の施設の麻酔科医が、模擬手術環境下で実際に麻酔器を使用し、アンケート調査に回答した。回答者の麻酔科医としての経験は原則として麻酔科標榜医以上とした。アンケートの質問は、操作性に関すること(6問)、麻酔器の構造に関すること(7問)、モニターAラームに関すること(5問)、その他(5問)と全体評価(2項目)の5項目の合計25問とした。表1に質問内容を示す。これ以外に候補となった麻酔器に特有の機能に関する質問も設けたが、今回の選定の対象外とした。

アンケート結果は、各質問に対する回答のうち、麻酔器選定にあたって好ましい回答の場合+1、どちらともいえない場合は0、好ましくない回答の場合-1として合計した。わからないという回答は有効回答から除外した。合計点数を有効回答

*兵庫医科大学麻酔科学教室

表 1：アンケートをおこなった 5 項目と各項目の質問内容と評価

	A 社	B 社	C 社
操作性の平均	0.53	0.55	0.42
1 麻酔器の準備のしやすさ	0.43	0.45	0.29
2 始業前点検のしやすさ	0.50	0.36	0.14
3 自発呼吸での使用	0.50	0.89	0.62
4 マニュアル呼吸での使用	0.47	0.30	0.43
5 機械式人工呼吸での使用	0.67	0.50	0.71
6 総合的な操作性	0.60	0.82	0.36
構造の平均	0.36	0.49	0.41
7 リザーバーバッグの位置	0.67	0.50	0.46
8 流量調節ノブの位置	0.13	0.42	0.36
9 流量調節ノブの形	0.21	0.33	0.36
10 APL バルブの位置	-0.29	0.50	0.29
11 APL バルブの形	0.43	0.42	0.29
12 酸素フラッシュバルブ	0.47	0.25	0.21
13 麻酔器の大きさ	0.87	1.00	0.93
モニター・アラームの平均	0.43	0.38	0.37
14 麻酔器のモニター項目の種類 (換気回数, PIP,1 回換気量など)	0.87	1.00	0.93
15 麻酔器のモニター項目の表示の見やすさ	0.53	0.27	0.17
16 アラームの設定	0.33	0.25	0.38
17 アラームの音や表示	0.20	0.27	0.23
18 アラームの解除	0.20	0.09	0.15
その他の平均	0.60	0.47	0.23
19 本体の固定	0.53	0.58	0.62
20 デザイン	0.60	0.67	0.21
21 堅牢さ	0.62	0.50	0.30
22 故障	0.55	0.36	- 0.10
23 保守管理しやすそう	0.70	0.25	0.10
全体評価の平均	0.33	0.73	0.19
24 全体的な印象	0.67	0.67	0.38
25 新規購入について	0.00	0.80	0.00

数で除して点数化した。すべての有効回答が好ましい評価のとき+1となる。逆にすべての有効回答が好ましくない評価のときは-1となる。

結 果

表1に、各質問に対する評価を機種ごとに示した。A社製麻酔器では、APLバルブの位置に関する評価が-0.29となり、好ましくない評価が好ましい評価を上回った。C社製麻酔器でも故障に関する評価が-0.10となり、好ましくない評価が好ましい評価を上回った。B社製麻酔器では好ましくない評価が好ましい評価を上回った質問はなかった。このように回答を点数化することで、各麻酔器の優れた点、劣った点を客観的かつ容易に把握することができた。

図1に項目ごとに質問の評価点数を平均し、グラフで示した。操作性ではA社製麻酔器とB社製麻酔器がC社製麻酔器に比べて高い評価を得た。構造ではA社製麻酔器が最も高い評価を得た。モニター/アラームに関しては3社とも同様の評価であった。以上3項目に関しては、3機種間の評価に大きな差がなかった。その他の項目ではA社製麻酔器が最も高い評価を得た。全体評価では、A社製麻酔器は特に高い評価を得た。

担当事務部門は更新候補の第1位として、もっとも安価なC社製麻酔器を挙げた。しかし、麻酔科医は最も高価なB社製麻酔器に最も高い評価を与えた。機器更新申請にあたって、各項目のポイントを合計したものと定価を比較した資料を提示した(表2)。実際に麻酔をおこなう麻酔科医の意見を反映した客観的な資料として今回の結果を示すことで、機器更新会議の委員の理解を得ることができ、B社製麻酔器を更新機器として決定することができた。

考 察

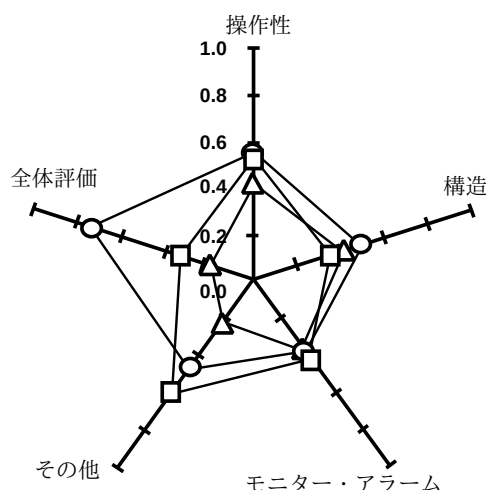


図1 各麻酔器のアンケート比較

項目ごとに、質問に対する回答の点数化を平均し、A社製麻酔器(□, 15名), B社製麻酔器(○, 12名), C社製麻酔器(△, 14名)の評価としてグラフで表した。

表2 各麻酔器のアンケートによる
合計ポイントと価格の比較

	アンケート結果 (全項目の合計ポイント)	価格の比 (定価)
A社製	2.24	1.09
B社製	2.63	1.25
C社製	1.63	1.00

麻酔器は手術中の患者の生命を維持し、適切な麻酔深度を保つためになくてはならない医療機器である。したがって、適切な維持管理を行い、計画的に更新時期を決定する必要がある。さらに、更新機器決定のプロセスは客観的かつ透明性を保ちつつ、実際に麻酔を担当する麻酔科医の意見を反映する必要がある。しかし、従来の更新機器選定は、これらの条件を満足しているとはいえない。

麻酔器に求められる基本3項目(操作性・構造・モニター/アラーム)に関して、3機種間に大きな評価の差が見られなかったことは、今回候補とした麻酔器が安全で適切な麻酔をおこな

う機能において、いずれも高い水準を保っている結果であると考えられる。したがって、担当事務部門は価格を優先した選定を要求する場合が多い。

今回試みた模擬麻酔環境における複数の麻酔科医による評価は、不慣れた麻酔器を実際の患者に使用するという危険な行為を回避することができる。その上で、カタログのデータや価格などにのみによって評価する担当事務部門の意見を、医療現場の意見によって修正するための客観的な資料となる。また、選定担当者の嗜好などに左右されることなく、公平性と透明性を保った選定を行うことができる。

結 論

実体型患者シミュレータ環境下での医療機器更新のための機器の試用とアンケート調査は、患者の安全を確保し、更新手続きの公平性と透明性を保ち、医療現場の要求を反映させることができる。

ABSTRACT

Selection of renewal medical device using simulated environment of operating room

Yoshiroh Kaminoh, MD

The selection of renewal medical device is affected by the cost, the performance, and the relationship with company, but the opinion of the person who actually use that device is often ignored. We asked anesthesiologists to anesthetize the standard patient of human patient simulator in the simulated environment of operating room, using three different anesthesia machines. Anesthesiologists answered the questionnaires about the operability, the structure of anesthesia machines, the monitor/alarm system, and the overall assessment. These results are an objective opinion of anesthesiologists to choose the new anesthesia machine. The equitableness and transparency of the process to choose the renewal anesthesia machine can be maintained by this trial.

*Department of Anesthesiology
Hyogo College of Medicine
Mukogowa-cho 1-1, Nishinomiya City, Hyogo
663-8501 Japan
Phone: +81-798-45-6392
FAX: +81-798-45-6393
E-mail: ykaminoh@hyo-med.ac.jp*

気管挿管教育・訓練用喉頭鏡システムの開発

松本尚浩*, 三上亮一†, 田川善彦†, 稲田智久†

はじめに

気管挿管は人工呼吸での気道確保の標準的方法であり、麻酔・集中治療・救急など医療の現場において一般的であるが、その訓練・施行に合併症を伴う。なかでも傷病者の歯の損傷は高頻度な合併症である。また今年より医師研修制度が改められ、全ての研修医は一定期間、麻酔・救急分野で気道確保の訓練を受け、また一方では、救急救命士が麻酔科医指導のもと 30 例の挿管成功例をもって、現場での気管挿管許可を得られることになり、日本各地で気管挿管教育の頻度が増加し、より客観的な挿管教育方法が求められる。今回我われは、既存のセンサ技術を喉頭鏡に取り入れた気管挿管教育用・訓練用システムを開発したので報告する。

方 法

ブレードと歯の接触荷重を検出するために、薄型の力センサ (Flexi Force ボタンセンサ, ニッタ株式会社)(図 1) をブレードに取り付けた。この時、センサの上に、強度に優れた薄い金属板を梁の様に取り付けることにより、歯が接触した大凡の位置も計算により算出できるようにした(図 2)。このセンサは、感圧部に掛かる圧力により値が変化する可変抵抗となっており、荷重が少ないほど抵抗値が大きく、荷重が大きくなるほど抵抗値が小さくなる。この力センサの出力抵抗を電圧に変換するために図 3 の回路を用いた¹⁾。図 4 はセンサの最大測定荷重が 440N の



図 1 薄型力センサ

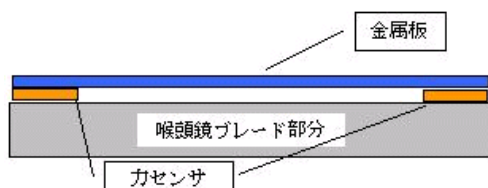


図 2 カセンサの喉頭鏡取り付け位置

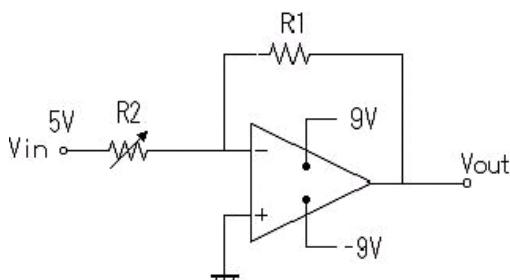


図 3 抵抗変化を電圧変化にして出力する回路

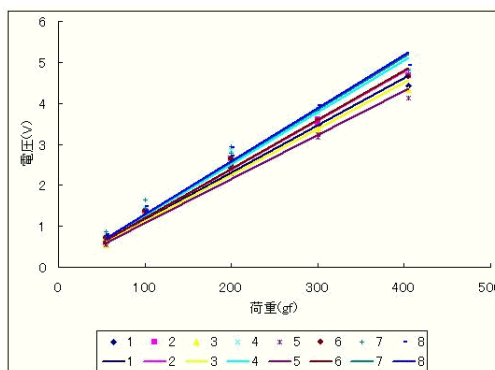


図 4 カセンサの荷重-電圧特性

ものを 8 本用いて力センサの荷重-電圧特性を示し、喉頭鏡に加えられた圧と出力電圧が比例することを示している。喉頭鏡ハンドル動作の検

*九州厚生年金病院麻酔科

†九州工業大学

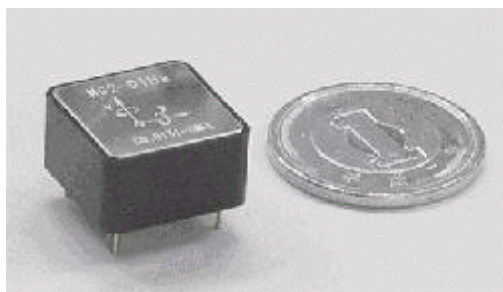


図 5 二軸ジャイロセンサ外観

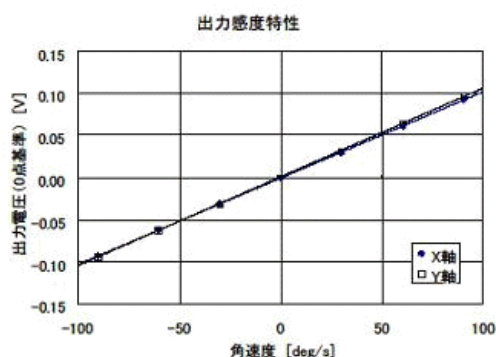


図 6 二軸ジャイロセンサの出力感度特性

知を行うために、喉頭鏡の回転方向の動き(角速度)を検出する二軸ジャイロセンサ(MG2-01Ca, マイクロストーン株式会社)を喉頭鏡ハンドルに内蔵した(図5)。このセンサの出力感度特性は図6の如くであり、図7に示すような喉頭鏡の動きを感知できる。

両センサからの出力を測定し、喉頭鏡使用者への警告や監督者への教示をするために、マイコン(H8/2144, ルネサス社)、ブザー、小型液晶等を1つの外部ユニットとして作成し、このユニットとPCを接続することによりセンサの出力をPC側において表示、保存可能にした(図8)。なお、警告音を発する条件は、1) 喉頭鏡ブレードが歯に接触した場合、2) 喉頭鏡ハンドルが使用者から見て手前側に回転した場合、3) 喉頭鏡ハンドルが左に回転した場合、4) 喉頭鏡ハンドルが右に回転した場合、の4つとし、さら

に小型液晶に教示する項目は、1) 接触荷重、2)

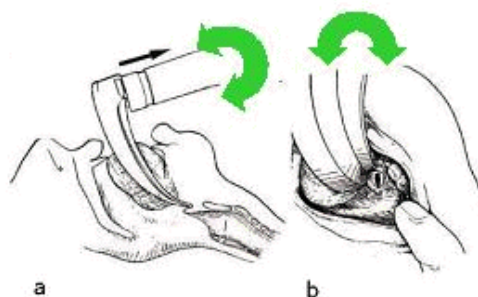


図 7: 二軸ジャイロセンサが感知するハンドル操作

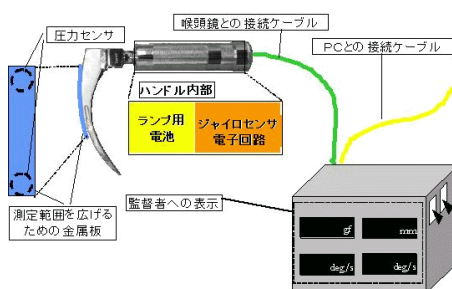


図 8 システム全体の概略図

ジャイロセンサの X 軸周りの回転方向(使用者の前後)、3) ジャイロセンサの Y 軸周りの回転方向(使用者の左右)の3つとした。PC に表示及び記録する項目も小型液晶への教示項目と同様とした。

結 果

現在、実機の製作中であり、完成後フィールド調査を行う予定である。また実用新案として特許申請中である。

考 察

喉頭鏡の動作を数値データとして残すことにより、習熟過程の吟味や熟練者の動作との比較・検討が可能になり、訓練における注意点が明確になる。また歯と接触する位置やタイミングについての傾向を知ることができる。数値としての

指標を設けることにより、教育や訓練の効率を上げることが可能であると考えられる。

参考文献

1. 岡村勉夫, OP アンプの回路設計, CQ 出版社, 1990

ABSTRACT

Developement of a laryngoscope system for training and education of tracheal intubation.

Takahiro Matsumoto, Ryoichi Mikami,
Yoshihiko Tagawa and Tomohisa Inada

Adequate handling of the laryngoscope is essential in correct endotracheal intubation and preventing dental damage. We aimed to create a training device for correct laryngoscope handling with multiple sensors which are force sensors on the blade to detect pressure against

teeth, and a two-ax gyroscope sensor installed in the handle to monitor its motion.

In this system, two commercially available Flexi-Force sensors (Nitta Corporation, Japan), and a two-ax gyroscope sensor (Micro-Stone Corporation, Japan) were applied. The sensor outputs are incorporated in a H8 microcomputer with a LCD display (SUNLIKE Corporation, Taiwan) to evaluate the trainee's skill. If the laryngoscope is maneuvered inappropriately, an alarm will go off according to the wrong actions made. This laryngoscope system is also designed to be capable of sending data to another computer for further analysis.

We have just introduced here the prototype of this system, and evaluating the efficacy of this training device will be the next step.

key word: laryngoscope, force sensor, two-ax gyroscope sensor

Department of Anesthesia, Kyushu Koseinenkin Hospital

ウェーブレット解析による脳波アーティファクト除去の試み

萩平 哲*, 高階 雅紀†, 中江 文*, 森 隆比古‡

はじめに

ウェーブレット解析はフランス人の石油探査技師 Morlet が 1980 年代に開発した波形解析方法であり, 近年各種分野で広く応用されている. ウェーブレット解析はコンパクトな波の小片 (Wavelet) を用いて波形を時間軸と周波数軸の 2 次元で解析する解析法である^{1),2)}. これまでに最もよく用いられてきたフーリエ解析は基底関数として無限に繰り返される三角関数を用いるため周波数情報は得られてもその周波数成分の局在を知ることはできなかった. 一方, ウェーブレット解析では有限長の波を基底関数として用いるため周波数成分の時間的局在を知ることにも可能である. また, フーリエ解析では周波数方向の解析幅が一定であるために低周波数になるほど解像度が低下するが, ウェーブレット解析では周波数方向の解析幅ウェーブレットの大きさに合わせて可変としておりこのような問題が生じない. このようにウェーブレット解析はいくつかの点でフーリエ解析よりも優れている. ウェーブレット解析はコンピュータの速度向上と共にここ 10 年来種々の分野で応用が進められている.

ウェーブレット解析を脳波解析に応用する利点としては, 特定の波形の時間周波数解析 (波形の局在性の解析) が可能となる点や, 原波形を温存したままでアーティファクトの除去が行える点などが挙げられる. 今回, 我々はウェーブレッ

ト解析を用いて脳波からアーティファクトを取り除くことを試みた.

ウェーブレット解析の基礎

ウェーブレット解析では解析の基底関数を mother wavelet と呼ぶ. フーリエ解析では基底関数は三角関数に限定されているが, ウェーブレット解析では目的に応じた mother wavelet を選択することが可能である. もちろんある関数が mother wavelet となるにはアドミッシブル条件と呼ばれる特定の条件を満たしている必要がある. ウェーブレット解析ではこの mother wavelet をものさしとして波形を解析していくのである.

ウェーブレット解析にはいくつかの方法があるが, ここでは離散ウェーブレット変換の 1 種である MRA (multi resolution analysis) を選択した. MRA は mother wavelet を $2^0, 2^1, 2^2 \dots$ 倍に拡大しながら原波形の高周波成分から順次取り出して分離していく解析方法である.

two scale 関係

mother wavelet には必ず対となる scaling 関数と呼ばれる関数が存在する. しかも mother wavelet も scaling 関数も, この scaling 関数の合成関数として表現される関係がある. このような関係を two scale 関係と呼ぶ. Mother wavelet $\psi(x)$ と scaling 関数 $\phi(x)$ は以下のように表現される.

$$\begin{aligned}\phi(x) &= \sum_k p_k \cdot \phi(2x - k) \\ \psi(x) &= \sum_k q_k \cdot \phi(2x - k)\end{aligned}$$

*大阪大学大学院医学系研究科 生体機能調節医学講座 (麻酔科学)

†大阪大学医学部附属病院 手術部

‡大阪府立急性期・総合医療センター麻酔科

ここで、 p_k および q_k は定数係数である。これらの関数はそれ自体がフィルタになっている点がポイントである。Scaling 関数は一種のローパスフィルタの形をしており、ウェーブレット関数はバンドパスフィルタの形になっている。従って時間軸スケールの異なるウェーブレット関数を用いれば異なるバンドの成分が抽出できることになる。

MRA の原理

さて、MRA では最初のステップで原波形 (原関数) を scaling 関数の線形結合として表現する。この操作を interpolation (補間) と呼ぶ。原波形は通常実際にサンプリングされた離散的データであるが、scaling 関数は連続関数である。従って補間によって得られた関数は元の観測ポイントを通る連続関数となった訳である。

続いて補間によって得られた関数を分解アルゴリズムと呼ばれるアルゴリズムで漸化的に高周波成分と低周波成分に分離してゆく。1 回目の分解では等倍の mother wavelet を用いて補間された関数から第 1 の wavelet 成分を取り出す。ここで思い出して頂きたいのだが、補間によって得られた関数は scaling 関数の線形結合であり、さらに mother wavelet もまた scaling 関数の線形結合であるという点である。この点を考慮すれば、残された関数は scaling 成分の線形結合であることが解るだろう。従って 1 回目の分解で残された関数に対して全く同様のアルゴリズムで 2 回目の分解が行えることになる。2 回目の分解では 2 倍の幅の mother wavelet を用いる。このようにして残された scaling 成分に対して順次オクターブ幅の mother wavelet を用いて分解を進める訳である。

今回はこの MRA をノイズフィルタとして応用する訳であるが、この利点について解

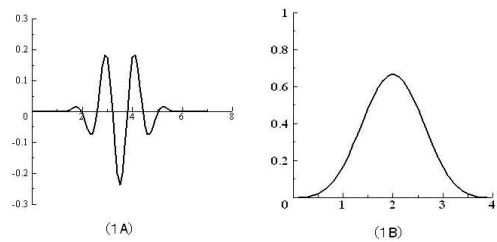


図 1 4 級 B Spline の mother wavelet (1A) と scaling 関数 (1B)

説する。MRA では結局原波形は以下に示すような関数の和として表現されるようになる。
$$f(x) = g_{-1}(x) + g_{-2}(x) + \dots + g_{-n}(x) + f_{-n}(x)$$
この右辺の各関数はすべて scaling 関数の線形結合である。結果として元データを補間した $f(x)$ は各レベルのウェーブレット成分 $g_{-i}(x)$ と残ったスケーリング成分の $f_{-n}(x)$ の和に分解される。従ってスケーリング関数が滑らかであれば、これらの成分関数の一部を取り除いたり各軸方向に拡大縮小させたりしても尖点が生じるようなことはない。つまり処理後の関数もやはり滑らかな関数になる。一方、フーリエ変換とその逆変換を用いた周波数フィルターなどではノイズの除去と共に波形に歪みが生じることもある。こういった点でウェーブレット解析はフィルタとしても優れた効果が得られるものであると言える。

方 法

ウェーブレット解析では種々のウェーブレットを基底関数として用いることが可能であるが、ここでは周波数解像度のよい 4 級 B スプライン関数を用いることとした。図 1 に 4 級 B スプライン関数の mother wavelet (図 1A) と scaling 関数 (図 1B) のグラフを示す。この関数を基底関数として多重解像度解析 (MRA) を行うソフトウェアを構築し、既に記録されたいくつかの脳波波形に対して解析を試みた。ソフトウェアは

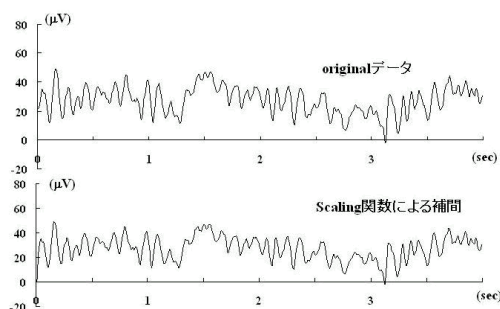


図2 補間の影響

Borland 社製 C++Builder Ver 5.0 professional を使用しコンソールからオフラインで解析するものとして構築した。

結果および考察

図2にはMRAの最初のステップとして原信号と、これを補間した関数を示す。図のようにほぼ完全に原信号が再現されることがわかる。図3には心臓ペースメーカーのスパイクの混入した脳波波形(上段)と、MRAにより最初の2つのウェーブレット成分を取り除いた波形(下段)を示す。この例では原波形をほぼ維持しながらペースメーカーのスパイクや高周波ノイズが除去されている。当初保持されるはずの低周波成分の一部であるベースラインのゆらぎが小さくなる問題が生じたが、後の検討で分解アルゴリズムにおける関数近似の次数が不足していることが判明し問題は解消した。また、解析の性質上解析した波形両端部には一部歪みが生じるため、リアルタイムで解析を行う場合にはいくらかの区間をオーバーラップさせながら解析する必要があることが判明した。

また今回のトライアルではオフラインで解析したが、今回の結果をみたところでは演算速度的にはリアルタイムでも可能な程度の演算量であると考えられた。今後は方法論を再検討すると共にリアルタイム処理を目指してシステムを構築して行きたい。

参考文献

1. 戸田 浩. Wavelet 最新信号解析技術の理論と実践. C Magazine 1998 12月号 28-65

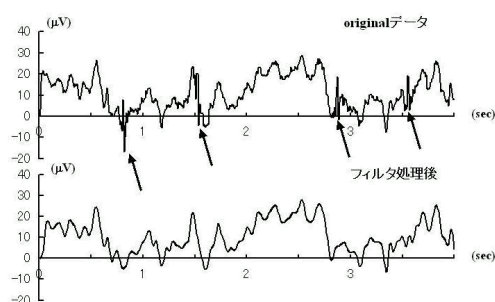


図3 ペーシングスパイクの混入した脳波波形

2. 榎原 進. ウェーブレットビギナーズガイド. 東京電気大学出版局, 東京

ABSTRACT

Artifact removal for electroencephalogram using wavelet filtering

Satoshi Hagihira¹, Masaki Takashina², Aya Nakae¹, Takahiko Mori³

Recently, the wavelet transform has been considered as an alternative to the Fourier transform in many fields. Unlike the Fourier transform, the wavelet transform is two-dimensional in time and frequency, and allows data in both domains to be analyzed at the same time. Thus wavelet analysis is superior to Fourier transform in some respects. We also can use wavelet transform as a noise filter. Here we made a software for wavelet analysis and tried to remove spike noise caused by cardiac pacemaker from EEG signals. We used rank 4 cardinal spline function as the mother wavelet. We analyzed EEG data recorded in the previous study. In this trial, we could successfully remove the spike noise without deforming the original signal. And the calculating speed seemed to be fast enough for on-line analysis. In conclusion, wavelet filtering would be a powerful tool to remove artifacts with high frequency from EEG signals.

key word: wavelet transform, electroencephalogram, rank 4 cardinal spline

¹ Department of Anesthesiology Osaka

University Graduate School of Medicine

² Surgical Center, Osaka University Hospital

³ Department of Anesthesiology, Osaka

Prefectural Osaka General Medical Center

雑誌や書類のデジタル保存

野上俊光*, 笹岡由香里*, 東 兼充†

はじめに

雑誌や書類は増え続けていく。雑誌をそのまま保存していくには、物理的・空間的制限が大きい。デジタル保存できれば保存空間の節約ができ、アクセスも容易になる。従来はデジタル化に時間がかかっていたが、専用のスキャナが開発され、実用レベルの短時間で変換保存できるようになってきた。我々は市販の安価な専用機を使用し、広く普及している PDF 形式に変換してパソコン内に取り込む「デジタル保存」を試みたので報告する。

方 法

専用のスキャナとして、富士通パーソナルズが販売している市販のコンパクト両面カラーズキャナ「スキャンスナップ」¹⁾を使用した。最新の製品は、マッキントッシュにもウインドウズにも対応しており、PC には USB ケーブルで接続する。今回は臨床麻酔 1 年分をデジタル化した。

雑誌はそのままでは両面スキャンできないので、手動断裁機 PLUS 社の PK-513 で背表紙部分を断裁した。この断裁機は実売 3 万円前後である。スキャンスナップ内蔵の自動原稿送り装置 ADF に載せ、連続的にデジタル化した。将来の文字認識操作に耐えるように、取り込み画質はスーパーファイン (カラー 300dpi, 白黒 600dpi, 毎分 5 枚) にした。取り込み画像は PDF 形式で保存した。ファイル名は「雑誌名+年+号 (月)+拡張子」とした。機器は専用の構成とし、ファイルサーバ機能を持たせた (図 1)。

結 果

1 冊 150 ページ、1 年分で 2000 ページほどの雑誌が、1 冊 40~80M バイト、1 年分で 500M~1G バイトほどで収納できた。要した時間は、業務の合い間の隙間時間を使用して、2 日で終わった。1 時間で 500 ページほどがスキャンできるので、スキャナーによる取り込みの実時間は 4 時



図 1 専用構成のデジタル保存機器

右から手動断裁機 PLUS 社の PK-513, 富士通パーソナルズ社の専用コンパクト両面カラーズキャナ, 「スキャンスナップ」, パソコン

*成尾整形外科病院

†くまもと麻酔科クリニック

間程度と計算された。人手を要する雑誌の断裁、ファイル名の設定、スキャナーへの設置などにかかった実時間は1冊5分程度、12冊で1時間程度であった。デジタル化されたファイルは、ファイル共有やインターネットサーバ機能により、院内LANから見れるようにできた。

検 討

デジタル化はどのくらい実用的か？

雑誌を数年分ファイルすると、本棚にメートル単位の空きスペースが出来上がるので、現段階でも十分実用になる。雑誌や書類のデジタル化は、以前から考慮されていたものの、デジタルカメラでの写真撮影や従来のスキャナ方式では自動化が困難で、時間もかかっていた。専用の高速スキャナは高価だが、スキャンスナップは個人やSOHOでも購入可能な値段である(実売5万円前後の価格で、アクロバットのソフトが付属している)。読み取りはカラー対応で両面同時にでき、毎分30ページから10ページと高速であり、自動原稿送り装置がついている。読み取り精度や速度は3種類から選択でき、ノーマル(カラー150dpi, 白黒300dpi, 毎分15枚:30ページ)、ファイン(カラー200dpi, 白黒400dpi, 毎分10枚:20ページ)、スーパーファイン(カラー300dpi, 白黒600dpi, 毎分5枚:10ページ)から選択できる。デジタル保存の形式は、広く普及し、標準形式ともいえるPDFファイルとなる。このスキャナーと断裁機の両者を利用する事により、短時間でデジタル化でき実用的になった。

PDF ファイルをより良く利用するには？

デジタルにして取り込むだけなら、パソコンの能力はそう高くなくとも良い。閲覧するには高い能力のPCが有利である。PDFファイルは拡大・縮小が任意にでき、画面で読むには不自

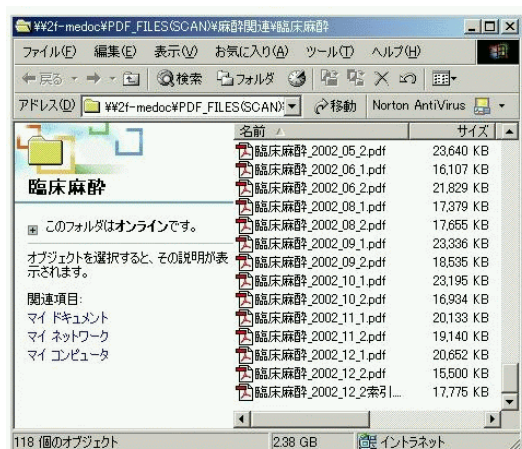


図2 ファイル共有でPDFファイルを利用する方法
ファイル名に工夫。1から9までは前に0を付け加えると、10の前に順番に並ぶ。

由しないが、大きなディスプレイの方が一覧性に富み、高速処理できるパソコンのほうが表示が早い。画面が見づらければ、必要な部分だけ印刷してもよい。取り込んだままのPDFファイルは画像であるため、文字として検索するには文字認識のOCRソフトを使って処理する必要がある。従来のアクロバット6.0では、日本語の文字認識の精度は低かったが、2004年12月にリリースされるアクロバット7.0では、エー・アイ・ソフト社の「読ん de!! ココ」の高精度なOCR機能が標準装備され、日本語の文字認識率が向上している²⁾。ソフトの進化は早いので、文字認識に関しては将来ますます改善されていくものと期待している。高速のパソコン、大きなディスプレイ、ソフトの進化で益々便利に利用できるようになる。

ファイル名の工夫。

ファイルを名前で整列表示させると、1から9までは前に「0」をつけていないと、1, 10, 11, 12, 2, 3, 4...の順に並ぶので、「01」のように「0」を付け加えると整列表示した時、順番に並ぶのでよい(図2)。

ファイル共有を使った利用.

院内 LAN で共有ファイルに置けば、LAN で繋がった場所から図書室の雑誌の如く取り扱える。MacOSX なら Windows の共有ファイルにもアクセス可能となるので、Windows から Macintosh から利用できる仮想図書室となる。

インターネット技術のサーバ機能を利用する方法.

サーバ機能を使い、保存ファイルをブラウザで見られるようにすると、PC の機種に依存せず、Mac, Windows, UNIX などの端末からも利用できるようになる。Windows 用の AN HTTPD サーバは設定が簡単で日本語を使用できるが、1M バイト以上の PDF ファイルでは動作が不安定であった。そこで Windows 用の Apache サーバ³⁾を入れて利用してみたところ、ファイル名に漢字があると不具合が生じるものの、英文字やひらがなに限定したファイル名を使えば実用化できた(図 3)。

デジタル化と著作権の問題.

保存ファイルを広く公開すると、著作権の問題が発生する可能性がある。正当な理由があれば侵害とならない場合として、著作権法、第二章、作者の権利、第五款、著作権の制限[第三十条―第五十条]には、「私的使用のための複製」「学校その他の教育機関における複製」「引用」などがある⁴⁾。従来のアナログ保存していた雑誌をデジタルに変えて、個人的な狭い範囲内で利用するのであれば「私的使用のための複製」であるので、問題とはならない。インターネットでの公開ならば、商用データベースサービスと競合するし明らかな著作権の侵害となる。仮想図書室としてイントラネットで公開した場合、「私的使用のための複製」あるいは著作権法(図書館等における複製)第三十一条の二「図書

館資料の保存のため必要がある場合」に著作物を



図 3 ファイル共有で PDF ファイルを利用する方法
ファイル名に工夫。1 から 9 までは前に 0 を付け加えると、10 の前に順番に並ぶ。

複製することができる、の記述に該当すると考えられる。ただし「図書館等」には制限があり、大学・高等専門学校の図書館はこれに該当するが、企業や高等学校の図書館は該当しない。したがって場合によっては違法とみなされる可能性もあり、まだ判然としない部分がある。図書室として従来利用していた様式をデジタル利用に移行する程度であれば、著作者や雑誌の販売・損益に及ぼす影響は従来と変わらないので、問題は生じにくいと考えられる。著作権の問題はデジタル化したファイルをどのように利用するかという方法とかがわってくる問題であり、今後も検討が必要である。

断裁して残った雑誌の再利用.

断裁後の雑誌は上質のプリントアウトと捕らえられる。一部は保存し、残りは廃棄できる。再製本すると雑誌全部を保存できる。再製本してみると背表紙部分の綴じ代が厚くなるだけで、断

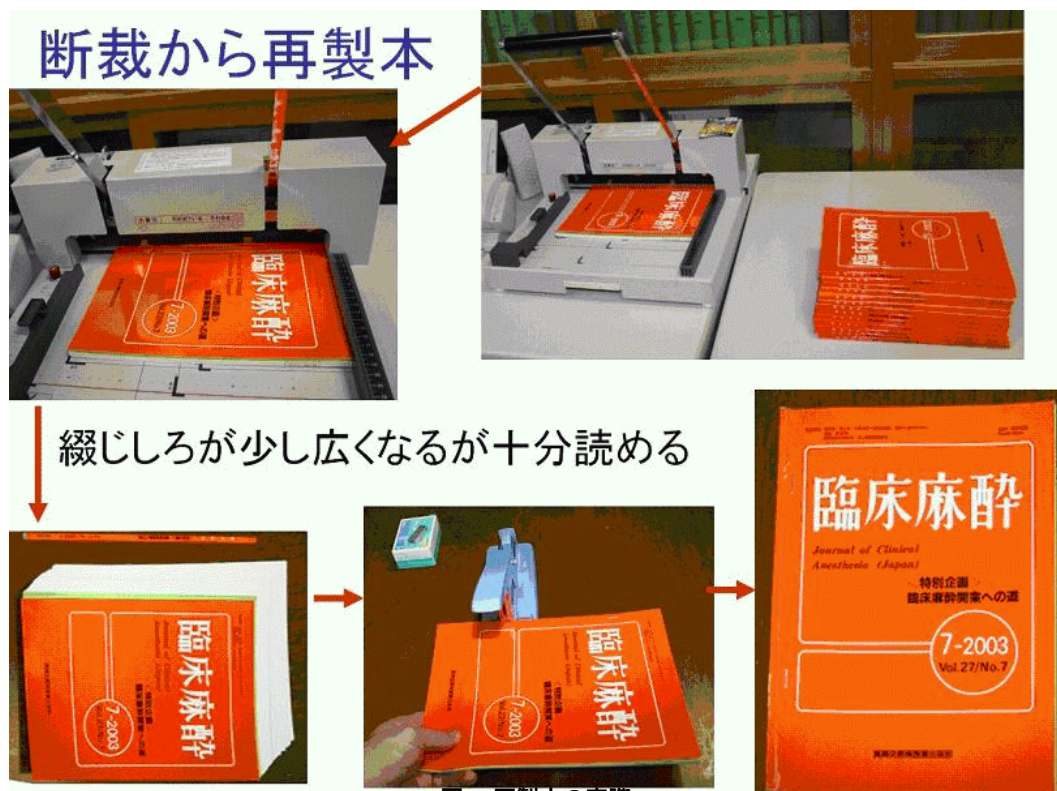


図4 再製本の実際

雑誌を断裁後、デジタル化し、再製本することもできる。綴じしろが少し広くなるが十分読める。

裁前の雑誌と殆ど変わらない(図4)。情報を得るという面からは同様に取り扱える。そこで再製本技術を最新号にも使えないか?というアイデアがでてくる。同じ部署内で、同じ雑誌を2部以上購入しているなら、1部のみ購入し、PDFファイルで保存共有できないかということである。購入経費削減にはなるが、雑誌製作社の収支を悪化させる可能性があり、著作権の問題が大きくなることが予想される。逆に、ファイル共有を実行するとしても、雑誌を購入し利用している消費者の意識は変わりにくく、ディスプレイでみる仮想雑誌よりも本棚の本がいいという意見に遭遇することもある。

何をどこまで保存するか?

デジタル化にも、それなりの時間がかかる。医

学中央雑誌や medline などの商業サービスが利用できるものなら、これらのサービスを利用したほうが時間節約の面からよい。雑誌によってはCD-ROM版やDVD版を年度末にサービスしているものがあるので、このようなサービスを利用するのもよい。個人で持っておきたいもの、商業サービスでデジタル化されるまで待てない物、捨てきれない雑誌や書類などに限定した選択処理はよい方法である。

デジタルデータ保存のリスクマネジメント。

NASAの宇宙計画では3重のバックアップを行っているという。生命にかかわる安全性を重視するためだ。通常業務のバックアップなら2重チェックでよい。我々はバックアップを定期的にする体制として、当初DVD±RWドライブを準備

したが、HD から HD へのバックアップの方が簡単・迅速に行える。バックアップソフトの定期的な利用、あるいは自動バックアップや、RAID 装備のパソコン採用などを検討する時期にはいったと考えている。

データベースとして使うには？

雑誌をデジタル化できたとはいえ、この段階では画像イメージであり、文字のファイルではないので、テキスト検索はできない。データベースとして使用するには以下の方法がある。(1)そのまま、印刷イメージのまま使う。(2)Web 上での検索サービスと併用する。(3)OCR 処理して使用する。

Web 上での検索サービスと併用する方法.

英文なら、種々の medline や PubMed サービスがある。邦文雑誌に対応したものでは医学中央雑誌があり、法人や団体を対象とした「医中誌 Web」や個人用の「医中誌パーソナル Web」などがある(文献 5)。雑誌数は減るが、より安価なメディカルオンライン(文献 6)などもある。検索サービスにより雑誌を特定できたら、自前のデータで全文を得ることができる。

OCR 処理して文字認識をする方法.

Acrobat6.0 に内蔵の文字認識機能では、英文の認識率は割合よいが、邦文はまだ不十分であった。2004 年 12 月に出された Acrobat7.0 では、日本語の文字認識率が向上している。全文をテキスト化するのが困難なら、雑誌の索引だけでも丁寧に OCR 処理すると有用度が向上するであろう。文字認識率は今後向上していくはずであり、ソフトの機能進化に期待したい。

文書への応用.

「e-文書法：法令上の保存義務のある民間企業の文書に対して、電子保存を容認するための法律の総称」が 2005 年 4 月から施行される予定であ

り、雑誌のみでなく、さまざまな文書の電子保存対策が今後広がっていくであろう。

まとめ

雑誌・書類を PDF のイメージファイルとしてデジタル化した。市販のコンパクト両面カラーキャナ「スキャンスナップ」を使用し、短時間で処理できた。オートドキュメントフィーダ ADF が使え、コンパクト、スピーディ、簡単、便利であった。

1 年分 2000 ページほどが、CD-R1 枚程度の 0.5G から 1GB で保存できた。イメージファイル内のテキスト検索には OCR 処理が必要であり、Web 上でのデータベースとの連携利用を含め、今後検討していきたい。

参考文献

1. スキャンスナップ: <http://scansnap.fujitsu.com/jp/index.html>
2. AcrobatR 7.0: <http://www.adobe.co.jp/products/acrobatstd/main.html>
3. Windows で Apache を使うには?: <http://www.din.or.jp/bigstone/cgilab/cgitips/apache.html>
4. 社団法人著作権情報センターのホームページ: <http://www.cric.or.jp/db/article/a1.html#021>
5. 医学中央雑誌: <http://www.jamas.gr.jp/>
6. メディカルオンライン: <http://www.meteo-intergate.com/>

ABSTRACT

Digital conservation of magazines and documents

Toshimitsu Nogami*, Yukari Sasaoka*, Kanemitsu Higashi**

The volume of magazines and documents increase and accumulate by time. We tried to store magazines and documents into digital files. The backbone part of every magazine is cut to separate individual paper by a cutting machine PK-513 of PLUS. Using automatic document feeder of a dedicated scanner

SanSnap of Fujitsu, magazines are rapidly digitized automatically into Portable Document Format files. The magazine of 2000 pages per year can be digitized into 600M bytes. This scanner can digitize 30 to 10 pages per minute. Time needed to digitize 2000 pages is calculated around 3 to 4 hours. A completed PDF file can be magnified voluntarily and easy to read on a screen. To search a PDF file by a keyword, process to a text by OCR software is necessary, because this PDF file is an image. At the present condition, character recognition precision of a Japanese sentence is low. As software is improving day by day, this problem should be dissolved in the future. After digitization of

magazines of several years, large space appears in a bookshelf. This is a practical digitization of magazines and documents.

key word: digital, conservation, magazine, documents

***Naruo Orthopedic Hospital*

Postal code 862-0958

12-24 Okada-machi Kumamoto city, Kumamoto Prefecture

****Kumamoto Anesthesia Clinic*

Postal code 861-2102

1-3-1 Numayamazu Kumamoto city, Kumamoto Prefecture

フェンタニル併用セボフルラン麻酔時の bicoherence の変化

森本康裕*, 萩平哲†

はじめに

Bispectral index(BIS)の普及に伴い、脳波の bispectral analysis が注目されている。Bispectral analysis により算出される脳波 bicoherence は脳波の各周波数コンポーネント間の phase coupling の程度を示す指標である。脳波の各 epoch から bispectral analysis により求められた triple product の和である bispectrum を規格化したものが bicoherence であり、bispectral analysis で最も重要なパラメーターと考えられる。これまでの研究で、脳波 bicoherence は周波数-周波数平面上の対角線付近に二つのピークが認められ、各々4Hz, 10Hz 前後であった¹⁾。そこで4Hz 付近の bicoherence の最大値を pBIC-low, 10Hz 付近の bicoherence の最大値を pBIC-high とすると麻酔薬濃度の変化によりこれらの値が変化す

ることを明らかにしてきた²⁾。

BIS では、bispectrum を元に算出したパラメーター (SynchFastSlow) が使用されている³⁾。Bispectrum は phase coupling 以外に脳波の magnitude に影響を受ける。フェンタニル併用セボフルラン麻酔時の脳波 bicoherence の変化について、BIS, SEF95 の変化と比較検討した。

方 法

予定開腹手術患者 17 名 (ASA 分類 I or II) を対象とした。前投薬は投与しなかった。麻酔は、セボフルラン (5%) で導入後、酸素-セボフルランで維持した。手術侵襲の脳波への影響を少なくするため、手術開始前からフェンタニル 2 μ g/kg を投与後 2 μ g/kg/h で持続静注した。

脳波の測定は、BIS モニタ (A-1050) を使用

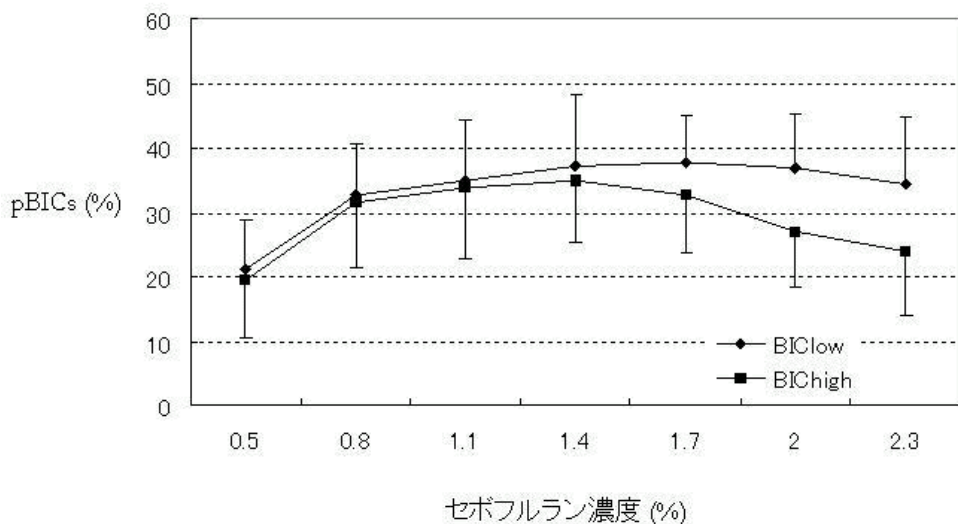


図 1 pBIC-low と pBIC-high の変化

*山口大学医学部 麻酔・蘇生学教室

†大阪大学大学院研究科 生態機能調節医学講座 (麻酔科学)

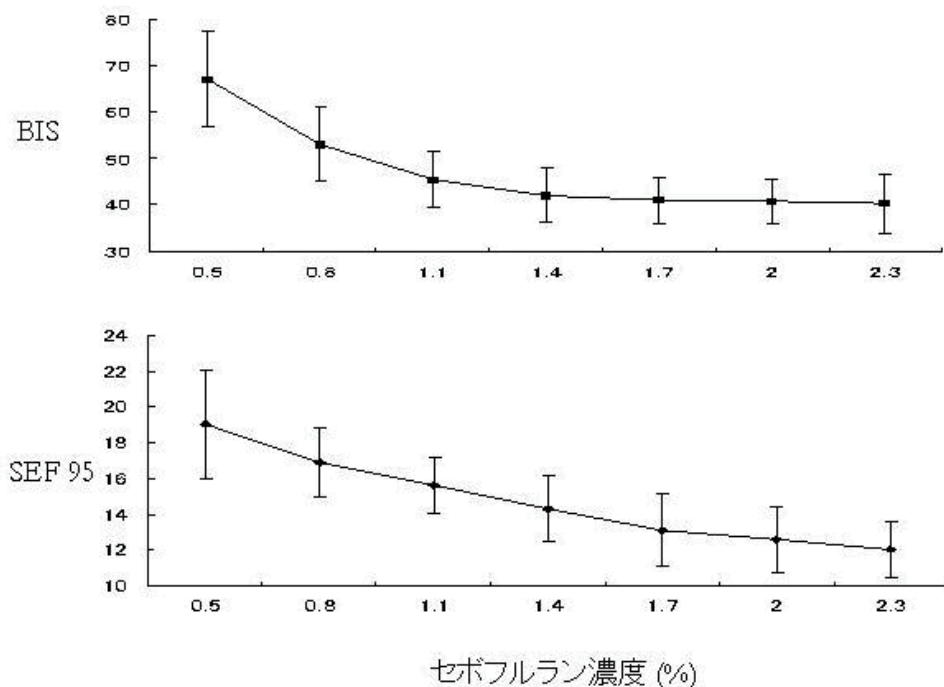


図2 BIS と SEF95 の変化

し, BSA for BIS(ver3.31B) を用いて脳波を解析した. 手術開始から少なくとも 30 分後より, 呼気セボフルラン濃度を 2.3% から 0.3% ずつ 0.5%まで低下させ, 脳波 bicoherence の指標である pBIC-low, pBIC-high, BIS, SEF95 の変化を記録した. 但し, 0.5%の測定は患者の覚醒時に行った.

結 果

患者の年齢は, 62 ± 9 歳. 男性 11 例, 女性 6 例であった. 患者の血圧, 心拍数は脳波パラメーター測定中有意に変化しなかった. 一例でセボフルラン濃度 2.3%の時に burst and suppression pattern を認めたため, 統計から除外した.

図 1 に pBICs(pBIC-low と pBIC-high) の変化を示す. セボフルラン 0.5%では, pBICs はどちらも低値だった. セボフルラン濃度が上昇すると pBIC-low は徐々に上昇し, 1.4%でプラトーとなった. pBIC-high も同様にセボフルラン濃

度が上昇し, 1.4%でプラトーに達した後は軽度低下した.

図 2 に BIS と SEF95 の変化を示す. BIS はセボフルラン濃度と同様に变化したが, 1.4% 以上ではプラトーとなった. SEF95 はセボフルラン濃度の変化とよく相関した.

考 察

これまでのわれわれの研究で, 脳波 bicoherence の指標である pBIC-low はデルタ波の, pBIC-high は睡眠紡錘波の活動を示していると考えられる⁴⁾. pBIC-low と pBIC-high はともにセボフルラン濃度が 0.5%から 1.4% までは濃度依存性に変化した. より高濃度では pBIC-low はあまり変化しないが, pBIC-high は低下した. これは以前のイソフルランでの結果と同様であった²⁾. pBIC-low と pBIC-high を組み合わせることでセボフルラン濃度の変化を説明できると考えられる.

BIS はセボフルラン濃度が 1.4%程度でプラトー

となりそれ以上の濃度では変化しなかった。これは Katoh らの報告⁵⁾と同様であった。SEF95 はセボフルラン濃度とともに変化し、セボフルラン麻酔時の鎮静度評価には BIS よりも優れている点もあることが示唆された。

今回の研究より、pBICs は、BIS や SEF95 と同様にセボフルラン麻酔時の患者鎮静度評価に有用と考えられた。pBICs の有利な点として、鎮痛の評価としても使用できる可能性がある⁴⁾。しかし、亜酸化窒素を使用すると pBIC-high は消失するため注意が必要である。

参考文献

1. Hagihira S, Takashina M, Mori T, Mashimo T and Yoshiya I: Practical issue in bispectral analysis of electroencephalographic signals. *Anesth Analg* 2001;93(4):966-70
2. Hagihira S, Takashina M, Mori T, Mashimo T and Yoshiya I: Changes of electroencephalographic bicoherence during isoflurane anesthesia combined with epidural anesthesia. *Anesthesiology* 2002;97(6):1409-15
3. Rampil IJ: A primer for EEG signal processing in anesthesia. *Anesthesiology* 1998;89:980-1002
4. Hagihira S, Takashina M, Mori T, Ueyama H, Mashimo T: Electroencephalographic bicoherence is sensitive to noxious stimuli during isoflurane or sevoflurane anesthesia. *Anesthesiology* 2004;100(4):818-25
5. Katoh T, Suzuki A, Ikeda K: Electroencephalographic derivatives as a tool for predicting the depth of sedation and anesthesia induced by sevoflurane. *Anesthesiology* 1998;88(3):642-50

ABSTRACT

Changes in Electroencephalographic Bicoherence During Sevoflurane Anesthesia Combined with Intravenous Fentanyl
Yasuhiro Morimoto, MD, PhD*,
Satoshi Hagihira, MD, PhD**

With introduction of bispectral index (BIS) as a monitor of patient's sedation during general anesthesia, bispectral analysis of electroencephalograph (EEG) has been paid attention.

The purpose of the present study was to evaluate the relation between EEG bicoherence derived by bispectral analysis and sevoflurane concentration. Sixteen ASA physical status I - II patients scheduled for elective abdominal surgery were enrolled in the study. Anesthesia was induced with 5% sevoflurane and maintained with sevoflurane and oxygen. Fentanyl (2 μ g/kg) was given intravenously just before the start of operation and followed by continuous infusion (2 μ g/kg/h). Using software we developed, EEG bicoherence, BIS, and 95% spectral edge frequency (SEF95) were recorded at each sevoflurane concentration (end-tidal concentration at 0.5, 0.8, 1.1, 1.4, 1.7, 2.0, and 2.3%). In a light anesthetic state, EEG bicoherence values were low. With increasing sevoflurane concentration, two peaks of bicoherence emerged along the diagonal line ($f_1 = f_2$). The peak emerged at around 4.0 Hz and grew higher as sevoflurane concentration increased until it reached a plateau at 1.4 % sevoflurane. The other peak observed at around 10.0 Hz, also increased significantly when sevoflurane concentration increased, reaching a peak at 1.4 % sevoflurane, however this peak tended to decrease slightly with a further increase in sevoflurane concentration. BIS value decreased as sevoflurane concentration increased until it reached to plateau at sevoflurane concentration of 1.4 %, and no further decrease in BIS value was observed. SEF 95 also decreased as sevoflurane concentration increased up to 2.3 %. These results suggest that the distribution pattern of the two bicoherence peaks are likely to be a better indicator for assessing the effect of sevoflurane than BIS during the surgery.

Key words:

bicoherence, bispectral index, EEG, sevoflurane

*Department of Anesthesiology-Resuscitology, Yamaguchi University School of Medicine.
1-1-1 Minami-Kagushi Ube City, Yamaguchi, Japan 755-8505

**Department of Anesthesiology, Osaka University Graduate School of Medicine.
2-2 Yamadaoka, Suita City, Osaka, Japan 565-0871

3 画面同時録画による喉頭鏡視野の比較検討システム

岩瀬良範*, 松島久雄, 崎尾秀彰

はじめに

昨年の本学会総会で、我々は非透過型ヘッドマウントディスプレイ (Sony:Glasstron, HMD と略) の前面に超小型 CCD(KPC-S700CPA3, KT&C Co.Ltd., Korea, $3 \times 3\text{cm}$, 41 万画素) を装着して、喉頭鏡操作時の試技者視野を中継・録画するシステム (CCD-HMD システム) を発表した。今回、同システム、ビデオ喉頭鏡映像、試技中の側面像を同一画面に録画するシステムを構築したので報告する。

方 法

CCD-HMD システムの詳細は前回発表を参照されたい 1)。これにより試技者は HMD を通してのみ外部を見ることができる。使用したビデオ喉頭鏡は、X-Lite(Rusch, Germany) と Fine View(ファイバーテック) である。側面像は市販のビデオカメラ (Sony:DCR-TRV18) で、三脚で固定しマネキン頭部と試技者が同一画面に収まるように設置した。これら 3 系統の映像をビデオマルチプレクサー (Sony:YS-DX504) に入力して画面を合成し、同時録画を実現した。この環境のもとで、気管挿管用マネキン HeartSim 4000 (Laerdal, Sweden) と Airway trainer(Ambu, Denmark) に喉頭展開を行ない、試技者視野とビデオ喉頭鏡による喉頭展開の一致度や、試技者視野が物理的に到達可能な範囲を解析し得るシステムを構築した。

結 果

CCD-HMD, ビデオ喉頭鏡, 側面像の同時録

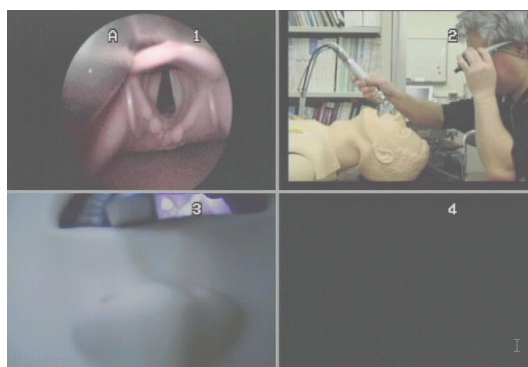


図 1 3 画面同時録画による喉頭鏡視野

画に成功した (fig.1)。ビデオ喉頭鏡で最良の喉頭展開を得たとき、試技者視野の喉頭展開の程度 (POGO: Percentage of Glottic Opening) はいかなる条件においても有意に低値を示した (83.8 ± 7.6 vs 58.5 ± 11.3 ない死角があることも判明した。各画面の同時性は、完全とはいえなかったが、実用上問題になるとは思われなかった。(0.1 秒未満)

考察と結語

ビデオ映像を多重化して解析する手法は、様々な分野で用いられている。我々は、以前より 2 画面同時録画機能により、ビデオ喉頭鏡とスタイルトスコープ映像の同時中継を実現し、挿管困難症例に役立ててきた。今回は、多重化数を増加させて喉頭展開の解析に応用したものである。

このようなシステムの構築は、ビデオ機器アクセサリーの応用と組み合わせによって実現可能である。民生用機器でも有用な機器が多数市販されているが、一般的な需要が少ないためか、本例のような特殊分野への応用例は多いとはい

*獨協医科大学救急医学 (*現:埼玉医科大学麻酔学)
獨協医科大学救急医学

えない。ビデオ技術は今後の医療のありかたを大きく変化させる可能性のあるテクノロジーであり、今後も進歩と応用が注目される。

参考文献

1. 岩瀬良範, 松島久雄, 崎尾秀彰: ヘッドマウントディスプレイと超小型CCDによる目視視野モニタリング. p.61-63, 麻酔集中治療とテクノロジー 2004, 2006.

ABSTRACT

Simultaneous triple view recording system for visualized tracheal intubation

Yoshinori Iwase, M.D., Ph.D.*,
Hisao Matsushima, M.D. and
Hideaki Sakio, M.D., Ph.D..

The efficacy of visualized tracheal intubation is getting established. Especially in education, the agreement of visual field between video intubating laryngoscope(VIL) and laryngoscopists view is important and essential. However, the measurement was difficult because of ethical and technical difficulties. We developed a video monitoring and recording system.

methods

Video system: This system synthesized the pictures of 1.VIL, 2.laryngoscopists view, and 3.lateral view of mannequin (HS-4000, Laerdal,

Sweden) to a monitor screen simultaneously by a video multiplexer(YS-DX504:Sony, Japan). The laryngoscopists view was obtained by micro CCD(KPC-S700CB, KTC Co.Ltd., Korea) which was mounted in front of right eye position of non-transparent head mount display(HMD; Glasstron Lite: Sony, Japan). Laryngoscopist could see outside view only through CCD. Lateral view was obtained by portable video CAM. VIL: Blade #3 and #4 of X-Lite (Rusch, Germany) and FLV-501 (Fibertech, Japan) were applied.

Results

Simultaneous triple view was obtained, and was able to analyze for glottic opening.(Fig.1)

The POGO (Percentage of Glottic Opening) from external view was significantly lower than all VIL 58.5 ± 11.3 vs 83.8 ± 7.6

Discussion and Conclusion

Versatile visual analysis during tracheal intubation may be possible through this system. Visualization of entire procedure may reveal the advantage of visualized tracheal intubation than conventional method.

key word: video, intubation, visualization, visual field, glottic opening

Department of Intensive and Critical Care Medicine, Dokkyo University School of Medicine, Mibu, Tochigi 321-0293, Japan .

**;Presently: Department of Anesthesiology, Saitama Medical University, Moroyama, Saitama 350-0495, Japan*

X-port(TM) によるシリアルデータのイーサネット 変換とその利点について

岩瀬良範*, 崎尾秀彰

はじめに

臨床モニタリングのデータ処理は、一般的には”All in one”の方向性で進歩している。しかし、オフラインのデータ処理は現在でも容易とはいえない。多くのモニター機器の出力はRS-232C等の「枯れた」技術であり、現在のパソコンでは標準装備されないものも増えてきた。一方、同じシリアル伝送でもイーサネットは着実な進歩を遂げ、現代のネットワーク技術の基礎として定着した。今回我々は、複数回線のシリアル・イーサネット変換を行い、そのデータ処理処理システムの構築を試みたので報告する。

方 法

X-port(Lantronix, USA) は、CPU、Web、e-mail サーバーを内蔵した、重さ 9.6g 大きさ 33.9x16.25x13.5mm の超小型シリアル・イーサネット変換インターフェースである(図1)。これを評価キット(デバイス・ドライバズ、東京)に搭載してRS-232C 機器との通信を可能にした(図2)。様々な通信設定は、telnet やRS-232C 通信でも可能であるが、Windows 上の X-port installer(標準装備)、ブラウザと Java applet で行うのが簡便である(図3)。X-port にモニター等のRS-232C 出力を接続し、そのイーサネット出力をスイッチングハブを介してパソコンに入力する。データ入力のためのソフトウェアは、マルチタスク OS である WindowsXP 上で起動し、

Winsock を用いて各 RS-232C 出力 (=IP アド



図1 X-port(Lantronix, USA)



図2 評価キット(デバイス・ドライバズ、東京)

レスごと) に対応して独立に入力を行う。さらに、データフォーマットに応じて切り出しを行い、DDE(Dynamic Data Exchange) サーバーとして機能させる。DDE クライアントソフトで、データの統合処理および記録を行う。発表時はデモンストレーションのために、2 系統の RS-232C を 2 台の X-port に接続して、1 台の非力なノートパソコンで 2 系統の通信を行った(図3)。

結 果

上記システムを構築できた。CPU の負荷は意外に軽く、Crusoe 600MHz 装備のノートパソコン

*獨協医科大学救急医学 (*現:埼玉医科大学麻酔学)
獨協医科大学救急医学

ンでも十分に対応できた。

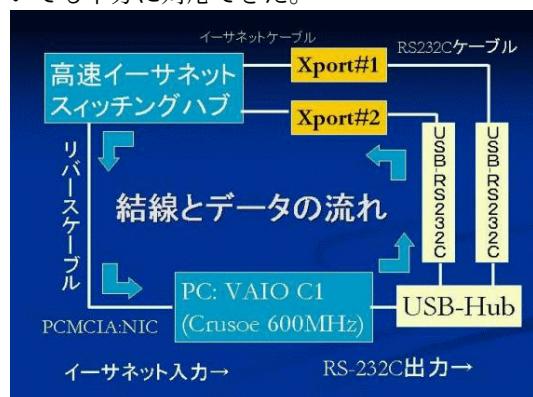


図 3 Java applet ブラウザ

考察と結語

20 世紀後半に、我々はモニター出力の多重化処理を行うために、多大な労力と費用を払って RS-232C の多重化入力を実現してきた。しかし、簡便なシリアル・イーサネット変換の発達により、その意義は歴史上のものにシフトしつつある。一方で、“All-in-one”に含まれないモニター機器の出力は依然として RS-232C が主力である。今回の手法と基本的構造は、かつて我々が RS-232C で追及したものと同様である。それを現在も進歩を続けるネットワーク技術に変換することで、通信速度、多重化、費用、発展性に多くの利点を見出すことができた。さらに、同社は無線 LAN 対応の同様のアダプタ (WiPort) も市販を開始した。医療における安全性が確立すれば、無線化の利点は膨大である。インフラストラクチャーの充実を受けて、“data acquisition”が患者の安全にどのように寄与すべきかを再び追及する時期に至った感がある。

参考文献

1. 田中義文：XPort を用いた手術室のネットワーク化の試み。J Anesth 18(Suppl):X08, 2004

ABSTRACT

Multiple data acquisition by Xport(TM), a serial-ethernet interfacing technology

Yoshinori Iwase, M.D., Ph.D.*,

Hideaki Sakio, M.D., Ph.D..

Recently, the progress of interfacing technology between ethernet and serial port enabled to acquire serial monitoring data into single computer with numerous advantages.

methods

Xport (Lantronix Inc, Irvine, CA) is a micro-sized (18.3x14.5x33.9mm) ethernet (RJ-45, 10/100Base-T) and serial (RS-232/422) interface including CPU, buffer memory and JAVA operated webserver. A Xport was embedded on an evaluation board then interfaced with 9-pin RS-232C. We provided 3 sets of Xport-RS-232C evaluation board. Their setup including serial (baud rate, data length, stop bit, etc.) and ethernet (IP address, port number) port was operated from “Xport installer” on Windows computer. A Visual Basic (ver5.0J) software was composed to control multiple Xport and to acquire data from monitoring devices through ethernet hub and Winsock TCP/IP. Data extracting, secondary calculating and recording functions were implemented in the same software.

Results

Serial monitoring data from multiple devices were successfully received into one computer software. For example, if a pulse oximeter and a SvO2 with CCO monitor were connected to this system, additional VO2 and O2 extraction ratio were calculated and recorded simultaneously.

Discussion and Conclusion

Applying network technology for serial data acquisition had numerous advantages; 1. Enable to exclude serial multiplexer from entire system, 2. Unlimited number of devices might connect, 3. Every connection established individually, 4. Saving space, and 5. Possibility to apply wireless connection. These technical advantage might be a new horizon for serial monitoring data acquisition in our field.

key word:

data acquisition, interface, RS232, ethernet
Department of Intensive and Critical Care Medicine, Dokkyo University School of Medicine, Mibu, Tochigi 321-0293, Japan.

*Department of Anesthesiology, Saitama Medical University, Moroyama, Saitama 350-0495, Japan.

私の音楽趣味：5歳から69歳まで

諏訪邦夫*



はじめに

2003年のJSTAの前夜祭の余興は、内田先生が「趣味の募集」をされました。その内容は「人に自慢できる、驚くような趣味や道楽(パソコンやプログラム以外)をご披露ください。ただし、以下の基準のうち最低1つを満たすものとします」という条件です。

- その趣味を20年以上、または年齢の半分以上続けている。
- その趣味に対して、年間50万以上、または総額で100万以上投資している。
- その趣味に関して、雑誌などで紹介されたことがある。
- その趣味に関する大会で入賞したことがある。

私の音楽趣味は、条件のはじめの二つに十分に合致するので、応募しました。実際のプレゼンテーションは、音楽をつけてクイズとして行いました。この文章はそれから2年以上後になって、少し手を入れてふつうの文章にしたものです

小学下級生まで

私は幼時より音楽好きで、5歳位まで童謡や軍歌を沢山(レコードで)聴いて育ちました。自宅にはいわゆる「電蓄」がありました。当時はまだゼンマイを手で巻いてレコードを回転させ、それを「サウンドボックス」と称する音量拡大の装置で機械的に音を聴くようにした装置が主流でしたが、「電蓄」というのは回転はモーターで、音量拡大は真空管アンプ、それでスピーカーを鳴らす訳で、基本は今日の装置と似ています。

当時は、「シェラック」という樹脂のレコード盤を鉄の針で擦って音を出すので、その針交換を自分でして、スイッチを入れて繰り返し聴いたようで、兄や姉と較べて「蓄音機好きの子供」だったと言われています。この時点ではいわゆる「洋楽」はまったく登場せず、少なくとも記憶にはありません。覚えているのは、童謡「私の人形」「池の鯉」、歌の入ったお話「桃太郎」、「かちかち山」、軍歌「月火水目金金」(「朝

だ、夜明けだ、潮のいぶき……」)、落語「兵隊落語：山下啓太郎(柳家金語楼)」などです。ほかにもいろいろあったのでしょうか。

その後、戦争から「疎開」という音楽に関する「暗黒時代」に入ります。私は小学校1年に入る1943年4月の少し前に浦和に越し、そこで3年生の初めまでの2年余りを過ごし、そこからさらに群馬県の富岡市に疎開して、戦後2年半を過ごしました。その浦和時代から終戦後の合計5年間、楽器はおろか、レコードもなくなりました。正確に言えば、浦和には電蓄そのものは残っていたのですが、具合が悪くなって修理ができず、それにレコードや針が入手できなくなって、電蓄を修理する意味もなかったのでしょう。

小学校1、2年はオルガンのある友人のお宅で、それを何回かいじった記憶があります。浦和の小学校にはピアノはなくて、「ピアノの音」はラジオでしか聞けませんでした。私の家は貧しくはなかったけれど、オルガンやピアノを買う雰囲気と経済力はなかったのでしょう

音楽らしいものは、学校の授業以外はラジオで聞こえる軍歌だけです。それでも「お山の杉の子」(昔、昔のその昔、椎木林のすぐそばに……)という楽しい歌を覚えています。

浦和から群馬県富岡市に疎開する時は、「慌てふためいて」の引越して多数のレコードも本もすべて廃棄したようです

1945年(小学校3年生)の4月に群馬県(現在の富岡市)に疎開し、ここはもっと「暗黒時代」で軍歌だけしかありませんでした。

戦後の流行歌とハーモニカ

終戦(1945年8月)以降になると、村で「演芸会」というのが催されるようになって、流行歌をたくさん知りました。「赤城の子守唄」「赤城時雨」「勘太郎月夜」「湯島の白梅」「旅の夜風」など、戦前から戦争中の流行歌です。他の情報が少なかった故もあるでしょうが、小学校3年生の記憶力は素晴らしくて、今でも

よく覚えています。

戦後、小学校4年になって新しい流行歌がラジオから流れ、誰もがいう「りんごの唄」「青い山脈」、「東京の花売り娘」、「東京ブギ」なども思い出します。もっとも、「りんごの唄」や「青い山脈」のような、内容は明るいはずの唄が何故短調なのか、当時も今も不思議に感じます。私の感性は、平均的日本人とずれているのでしょう。その頃、姉が女学校に入って「女学校愛唱歌」を友人たちと歌っていたのも覚えています。「故郷の廃家」や「故郷を離るる歌」などは、姉の歌で覚えたのではないのでしょうか。

戦後1年以上たって4年生の終わりか5年生になって、ハーモニカをやっと手に入れて随分楽しみました。今でも知っているメロディはすぐに出せるようです。当時、「鐘の鳴る丘」という放送劇があって、そのテーマソング(古関裕而作曲)が好きでよく吹いたのを思い出します。

私の母は音楽の素養は特にありませんでしたが、でも音楽は好きだったので。自分の知っているメロディーを歌って、カルメン前奏曲とか、天国と地獄とかでしたが、私がそれをハーモニカで真似た記憶があります。後で原曲を聴いたら、あまり違わないのに感心しました。「洋楽」を聴いた最初が、母の歌と自分のハーモニカだというのは考えてみると実に可笑しい!

中学生：洋楽レコードの聴き始め

6年生で東京に戻り、はじめてピアノの上手な音楽の先生(長妻莞爾先生)に遭遇しました。特別な指導は受けませんでしたが、男の子としては珍しく音楽好きなので、可愛がって貰った記憶があります。運動会の合唱で「新しき星」という歌の指揮をしました。ピアノを実際に聴いたのもこれが初めてで、この小学校は戦災を逃れて、グランドピアノが2台残っていました。

小学生から中学下級生の頃は相変わらず歌謡曲が好きで、「憧れのハワイ航路」「湯の町エレジー」など大好きでした。もっとも、こういうのは真面目な児童は歌うものではなくて、実際に声を出して歌うようになったのは大学生になり、さらにカラオケ時代に入ってからと記憶しています。ラジオ歌謡も好きで、「山小屋の灯」や「森の水車」などを覚えていて、最近では藍川由美さんの素晴らしいCDを何枚も入手して楽しんでいます。

西洋音楽を聴き始めたのは中学生になってからで、もう仕事についていた長兄が各種の洋楽が好きで、軽音楽も沢山ありましたが(タンゴとかビングクロスビーとか、灰田勝彦もありました)、クラシック音楽のレコードもけっこう持っていて、それを手回し(ゼンマイ式)の蓄音機で聴くようになりました。中学2年生の夏休みの宿題に「自分の好きな曲1曲の感想」があっ

て、「セヴィリアの理髪師序曲」を選びました。その時には、ベートーヴェンの運命(トスカニーニ/NBC交響楽団)と田園、シューベルトの未完成、モーツァルトのアイネクライネ(以上はワルター指揮ウィーンフィル)とトルコ行進曲(裏がヘンデルの調子の良い鍛冶屋で、ギーゼキングのピアノ)、シュトラウスのウィーンの森や青きドナウなどのレコードを聴いていた記憶があります。その時に好きになった「田園」は今も好きで、ワルター指揮の演奏は、オーケストラこそコロンビア交響楽団に入れ替わっていますが、今もよく聴く曲と演奏で、「明るい音楽が好き」という気分は五十年後の今も変わりません。

中学3年のときに、「カーネギーホール」という映画が上映され、ワルター(マイスタージンガー序曲)、ルービンシュテイン(英雄ポロネーズとファリャの火祭りの踊り)、ハイフェッツ(チャイコスフキーのヴァイオリン協奏曲の終楽章)、ロジンスキー(運命の終楽章)、ストコフスキー(チャイコスフキーの第5交響曲の終楽章)などの大音楽家が全曲演奏する姿をみせてくれて随分楽しく、大学生になってから再上映にわざわざ出かけたりもしました。ルービンシュテインが、腕を高く上げてドンチャカドンチャカ弾く「火祭りの踊り」が特に面白くて記憶に残りました。その後、テレビでも観たかも知れませんが、オーケストラは、ニューヨークフィルです。

高校生：音楽会に通いはじめる

高校生になって音楽会に通いはじめます。後に国文学者になった野山嘉正君という友人が誘ってくれました。当時は唯一に近かった音楽会場の日比谷公会堂で、園田高弘氏がブラームスの第2ピアノ協奏曲(山田和男氏指揮)を聴いたのが最初です(他に、大学祝典序曲と交響曲1番)。山田氏の身体の動きが力強く「カッコいい」と感じた記憶があります。同じ園田高弘氏が同じブラームスの2番のピアノ協奏曲をザヴァリッシュ氏の指揮で弾くのを、園田氏の亡くなる少し前の2000年頃にテレビで観て本当に懐かしく感じました。

この頃、「レコードプレーヤー」というラジオにつないでレコードを鳴らす装置を入手しました。まだSPレコード用(78回転)でしたが、後にLPを聴けるように自力で改造しました。

レコードを買うことを覚えて、はじめは上記の英雄ポロネーズ(演奏はホロヴィッツ)とか火祭りの踊り(こちらは映画と同じルービンシュテイン)といった一枚ものでしたが、次第に嵩じてモーツァルトのジュピター交響曲、ベートーヴェンの第7交響曲や「皇帝」、ブラームスのヴァイオリン協奏曲などの大物も買いました。「皇帝」はすりきれるまで聴いた記憶があり、シュナーベル(P)、サージェント指揮BBCオーケストラというものでした。1曲聴くのに10面の反

復が必要で、今でもどこで途切れて裏返したかを覚えています

上記の野山嘉正君が私を音楽に導いてくれた最初の友人で、何回か一緒に音楽会に行き、その後もずっと付き合っています。もう一人、中村孝司君とは高校3年間から東大教養学部時代も一緒に音楽会に通ったりしましたが、ずっと後に帝京大学市原病院で一緒に働きました(内科、消化器)。

大学教養学部時代 55-57

[レコードを借りる]

大学(教養学部)に入って(1955年)LPになり、音楽を楽しむクラブに所属して、会社からレコードを借りてはコンサートをやりました。自分でも少しは買いましたが、ラーメン一杯が25円位の時代に、当時のLPは今のCDと同じ2千5百円位でしたから、「会社から借りる」のは本当にありがたく、これでモーツァルトやベートーヴェンはもちろん、マーラーやオペラも沢山聴きました。「大地の歌」をこの時に好きになったのを覚えています。ドイツ語に凝っていて、シュベルトを中心にドイツ歌曲も一生懸命に聴きました。

この頃の自分のシステムは、古いSP用のターンテーブルの速度を強引に33回転に落とし、針とアーム(「ピックアップj」)だけ購入して、ラジオにつないだものです。

[歌声運動とロシア民謡]

当時の東京大学駒場キャンパスは「歌声運動」の全盛期でした。私は歌のサークルに所属はしていませんでしたが、それでもロシア民謡を中心にいろいろと歌ったものです。それで歌を沢山覚えたのと、重唱の面白さを知ったのはありがたいことでした。伴奏はアコーディオンが多かったのですが、私は触れる機会がなかったのが残念です。「青年歌集」という楽譜の本が数冊あってよく参照しました。ロシア民謡は、まもなくダークダックスが活躍し始めて、さらに美しい歌としてレコード・ラジオ・テレビで楽しむようになりました。

[無料の音楽会]

この頃の音楽生活を豊かにしたものに、NHKコンサートホールと土曜コンサートがあります。当時は、ラジオ放送だった「NHKコンサートホール」と「土曜コンサート」はいずれも公開で、前者はNHK交響楽団が、後者はいろいろでしたが主に東京フィルハーモニーが担当していました。往復葉書で申し込むと抽選で当たるシステムで、N響のほうは倍率が高かったのか、ほんの数回しか行っていませんが、「土曜コンサート」は何度も行きました。当時新橋(芝田村町)にあったNHKの第一スタジオでの録音で、担当のアナウンサーの方がいつも録音の前に「拍手は、強くなって良いから数を多くして欲しい」という注文をしていたの

を記憶しています。どうもプロデューサーを兼ねていたような印象ですが、そんなことがあるのでしょうか?

一度は、プログラムが随分進んでから録音がうまくいっていないことが判明して、その分を完全に演奏し直して、演奏者は大変だったでしょうが、聴いているほうは楽しみました。その曲目は、オッフェンバッハの「天国と地獄」序曲と、スメタナの歌劇「売られた花嫁」から何曲かでした。何故か、後者のほうに木琴が加わっていて、前に出て演奏しており、木琴の演奏を初めて観たと記憶しています。

「NHKコンサートホール」のほうで記憶に残っているのは、グリーグのパールギュント組曲で、あの有名な「朝」がとても美しく、それ以来ずっとこの曲が好きになっています。これは医学部に入ってからかも知れません。

それに関係して、こんな経験があります。私が大学一年生だった頃、私の姉は当時早稲田大学に通っていて、私より三歳年上で四年生だったはずですが、その姉が、大学の友人からこの貴重な「NHKシンフォニーホール」のチケットを二枚貰いました。一枚は音楽好きの弟、つまり私にという意味です。ところが姉はそのチケットを二枚とも私に譲り、私が自分の友人を誘って出かけました。チケットを呉れた姉の友人もきていて、ふつうに会話を交わして別れました。その友人とすれば姉を誘いたかったのに、大学に入りたての男が二人登場して残念だったろうとは後で気付いたことですが、それをあからさまに示して悟らせることがなかったのはたいしたものと感じています。私も鈍かったのですが、

この姉は、兄の友人と結婚して家庭をつくりながら、英語を教える仕事をずっと続けています。一方、私と一緒にいった友人の明石勝興君は、その後東京大学医学部を出て優秀な脳神経外科医になりましたが、1969年4月の高圧タンク爆発事故で亡くなりました。

東大医学部：ピアノを習う(1957～)

東京大学は医学部入学に試験があり、この試験に通ってはじめて心理的に余裕ができて、医学生としての4年間一生懸命にピアノを弾きました。ギクシャクでしたが、モーツァルトのK330とK331のソナタ、ショパンのワルツを2曲ほど何とかマスターしました。K545は音符はやさしいのに、速いパッセージが滑らかに弾けず「弾いた」という意識になれませんでした。他にベートーヴェンのロンド(ソナチネアルバムにあるハ長調の曲)もギクシャクながら弾きました。

そうそう、チェロとクラリネットの友人と合奏を試みましたが、人前で弾けるレベルにはなりません。ベートーヴェンの三重奏曲「町の歌」です。

その後、自分の弾けた曲を何とか思い出そうと、何度か努力しましたが、結局戻ってきません。

【アンプとチューナー】

医学部に入って間もなく、真空管アンプを作りました。多分1957年で、2A3という三極管を出力管に使ったのですが、スピーカーがボロで性能は出せなかったようです。2年後、FM放送が始まってチューナーを組み立てました。こちらは、高周波部分が自力では無理でキットを組み立てただけですが、無事に鳴ってしばらく使い10年後にバイト先の病院の手術室に持って行って聴きましたから、けっこう長寿でした。その頃使用したテスターが今も残って、つい最近もDVDプレーヤーのTV線の配線に持ち出しました。

どの時点か記憶にありませんが、赤井という会社がテープレコーダーを安く売り出して、長兄にねだった買って貰った記憶があります。オープンリールです。上記のアンプから直接録音できるように配線して、けっこう良い音でFM放送やレコードが録音できました。ここまではモノラルです。

【ハイフェッツなど】

音楽会としては、ハイフェッツ(クロイツェル)、ギーゼキング(得意のドビッシューもの「子供の領分」の他に、ベートーヴェンの後期のソナタがあったようですが、どれだったか覚えていません)などを聴いた記憶があります。そうそう、チボー(ヴァイオリニスト)のリサイタルの券を雨の中で行列して入手したのに、来日途中の飛行機事故で亡くなったのも記憶しています。

医学生だった頃、東フィルの会員だったことがあり、「グランドキャニオン」が大好きになりました。たしかプログラムは他にハイドンの「軍隊」とイベールのサクソフォン協奏曲で、会場にお客さんが少なく、「プログラムが貧弱すぎる」と非難されましたが、私は「グランドキャニオン」を堪能しました。

61年に医学部を卒業し、インターン・医師のはじめは時に音楽会に行き、LPも買いましたが、もうステレオLPが話題になり始め、一方で留学の話がはじまって音楽に情熱を注ぐ余裕はありませんでした。

インターンの時にタイプライターを習ったのは「私のパソコン史」に書きましたが、ピアノを習ったのが生きた気持ちを抱いています。

アメリカへ行く直前の1963年春に、若き日の小沢征爾氏指揮N響を聴く機会がありました。N響とケンカ別れする直前で、プログラムはシュトラビンスキーの「火の鳥」、ロイアンダーソンの数曲(「タイプライター」、「トランペットの子守唄」、「シンコペーション時計」他)、それにガーシュインの「パリのアメリカ人」です。小沢さんの踊るような指揮振りが印象に残り、今の怖い顔に違和感があります。小沢さんはボストンでは聴く機会がありませんでしたが、日本では数年後にもう一度聴いた記憶があります。

最初のアメリカ生活

アメリカ(63-66)では、ボストン交響楽団を中心に音楽は沢山聴きました。常任指揮者はラインズドルフでしたが、他にミュンシュを聴いたのを覚えています。他のオーケストラでは、カラヤン/ベルリンフィルでベートーヴェンの田園を聴きました。セル/クリーブランドやバルビローリ/ハレーも聴きましたが、印象の強かったのは、ザヴァリッシュ/ウィーン交響楽団(ウィーンフィルではない)がたしかシューマンのピアノ協奏曲などをやった後で、アンコールに演奏した碧きドナウの演奏です。ピアニストではグレンゲールド、リヒテル、アシュケナージ、ゼルキンも聴きました。そうそう、ゼルキンとは縁があって、フィラデルフィアでも東京でも聴いています。それからルービンシュテインも聴きましたが、この人は本当に観て楽しいピアニストだと痛感しました。舞台上上がって歩く姿から、ピアノを弾く様子などが美しいのです。

ボストンでは自分で音楽をすることはほとんどありませんでした。ピアノがあるといじってみて、「弾けなくなっている」のを確認する意味が大きく、私のピアノは身についていなかったのです。

ボストンから帰国するとき、ステレオLPが安いことに気付いて、50枚位も買ってきたでしょうか。ニューヨークへ行くと「Sam Goody」というレコード店に行くのを楽しみにしていました。ベートーヴェンの交響曲全曲(カラヤン/ベルリンフィル)やギーゼキングの弾くモーツァルトのピアノソナタ全曲などを持ちかえりました。

日本へ戻って早速ステレオ装置を一式購入しました。1966年暮れのことです。ラインアップは

- マグネフロート MF202 ターンテーブル
- グレースのアームとF8Lカートリッジ(アームは後にSMEに付け替えて現用)
- 山水777のアンプリファイアとチューナー
- トリオのスピーカーシステム(中音と高音はホーン)

そのセットは大部分二度目の渡米の際に、スピーカーは日本で、アンプはアメリカで処分しましたが、プレーヤー部分の基本は現在も使っており、最近もターンテーブルのベルトが切れましたが、2000円ほどで購入して無事動いています。

二度目のアメリカ生活(69-72)

二度目のアメリカ生活(69-72)では、アルテックの大きなスピーカーを手に入れ、沢山のステレオLPを聴きました。サンディエゴで購入した300枚のステレオLPはその後あまり買い足さないまま、CD時代になりました。

丁度、カセットステレオでドルビー付きが出始めて、ステレオLPやFM放送を録音して通勤(片道20分)の車の中で聴きました。当時のテープも随分いろいろ

あってその後しばらく聴きましたが、さすがにもう使いません

4チャンネルの実験をしたことがあります。安モノの大きな（つまり低音も出る）スピーカーをラ디오シャックで買い、それをガレージセールで買った箱にに入れて、ステレオの両チャンネルから差信号をとりだして部屋の後に置き、ボリュームコントロールだけつけて遊びました。音が厚くなったり、時には見事に部屋の中を跳びまわったりして面白かったけれど、「音が濁る」ことも多い点に気付いて結局止めました。1000ドルのスピーカーと20ドルのスピーカーを組み合わせるのは、所詮無理だったのでしょう。DVDの5.1チャンネルに魅力を感じないでいる遠因かも知れません。

二度目のアメリカ生活では、結婚して子供がおり、ボストンと違ってサンディエゴは音楽の豊かな町でもなかったの、音楽会にはまったく行きませんでした。しかし、ステレオ装置とLPとFM放送とテープのお蔭で音楽生活は豊かだったと感じています。

日本に戻って（73年以降）

1972年暮れに日本に戻り、持ち帰ったアルテックを中心にシステムを組みなおしました（上記の山水はアメリカを離れる時に、けっこう高価に売れました）。これが現在でも私のステレオシステムの中心です。アンプは1975年頃に購入したヤマハのC2(プリ)B2(メイン)で、先日B2が故障しましたが、無事に直りました。

日本に戻ってしばらくして、シンセサイザーに興味をもって本を読み、お店でもいじってみて、結局時間とエネルギーと多分お金も考えてあきらめました。残骸が書棚に残っています。その記憶が、MIDIにとりつづのを早めたでしょう。

音楽特に装置に力を入れたのはこの辺までで、1980年前後からパソコンに熱を上げて、ステレオ装置はその後ほとんど改良していません。CDは買いましたが、システムの基本は同じです。

いつのことでしょうか。読売日響の定期に入って東京文化会館に通った記憶があります。東大病院の私の部屋から東京文化会館までは歩いて10分位しかかからず、ぎりぎりまで仕事をして出かけると音楽の気分になれず、わざわざ遠回りしたこともありました。ある著名なバイオリニストがパガニーニの協奏曲1番を弾くので楽しみにして出かけたのに、神経質な音楽で楽しくなくてがっかりした記憶があります。もう一つ、義父から「バラの騎士」の切符を貰って、わざわざレコードを購入して勉強して出かけたこともあります。ウィーンだかベルリンだかのオペラの公演だったはずです。

1980年代の始めでしょうか。自宅の増築の際に音

楽を聴ける部屋を作りました。土地のせいもあって不整形で、ピアノとスピーカーをおくところは床下に石を積んで変な音の出るのは防いであります。

MIDI とパソコンと

MIDI を始めた事情はこうです。私はマッキントッシュはほとんど使いませんでしたが、1992年頃に大きなIBM互換機を入手し、ウィンドウズ3.1を使い始めてすぐのことです。（ノートパソコンは、1988年に東芝のIBM互換機（英語専用）を入手して使っていました。

当時のパソコンは、メモリ8MBでハードディスクは200MB、他に何も無い「裸」です。それに後からいろいろと機器を追加したのですが、その一つがCD-ROMドライブで、これを購入したら、Sound Blasterという簡単な「音源」が一緒についてきて、パソコンから音が出ることを知りました。しばらくはこれで音楽を聴きMIDIデータなどを入手していましたが、国立小児病院の近藤陽一先生に本格的な「MIDI音源」のことを教えられ、パソコンの本などで勉強してローランドのVS55を入手していろいろと遊びました。2006年の現在と違い1990年代初期のパソコンは弱体で「MIDI音源」は外付けが必要だったのです。

始めはNifty-ServeのFMIDICLAからダウンロードして聴くことが多かったのですが、偶然「Pianist」というデータを入手して感激しました。これは、MIDIのキーで「作った」ものではなくて、上手なピアニストがMIDIピアノを弾いて入力したもので、音楽としての質が上等で、しかも200曲以上入っていました。その中のいくつかを、楽器を変えたり速度を変えたり、音程を変えたりして「自作の変奏曲」を作って、それをテープに録音してウォークマンで聴くのが楽しみでした。5分の曲から30分の大曲ができるのです。ヘンデルの「調子のよい鍛冶屋」がその一つで、それ自体が変奏曲なのに、それをさらに変奏曲にするので、「二重の変奏曲」になります。今聴いてみても、なかなかよく出来ていると勝手に感心しています。

「Pianist」はその後5枚のCD-ROMにまとめられて合計1000曲近くもあり、モーツァルトのソナタやベートーヴェンのソナタが全曲入っており、パソコンに写して時々聴きます。

それより少し前の1980年頃です。子供たちが中学受験の学齢に達して、家で音楽を聴くことがむずかしくなり、ワイフにウォークマンを「着せられました」。当初はバカにしていたのですが、まもなくその素晴らしさのトリコになって、スピーカーから音を出す機会が急激に減りました。この時に入手したのは、ソニーの2代目のウォークマンでした。ウォークマンは携帯して使うので、落とすことがあって平均寿命は1年くらいだったと記憶していますから10台以上も購入した

でしょう

現在の状況

音楽趣味はクラシック音楽にほぼ限られています。ビートルズは聴きましたが、「好き」というレベルには届かず、持っているのはホワイトアルバムだけです。

ピアノはまったく弾きませんが、それでも少し弾いてよかったと思うのは、その後ピアノ音楽が際立って好きになり、しかもけっこう分析的に聴けるようになった点です。ですから、オーケストラを別にすれば、私は他の楽器の奏者はあまり聴いていないのに、ピアニストを多数聴いています。その中には、ギーゼキングやバックハウスやケンプのような今は歴史上の人物になっている大ピアニストや、リヒテルやグレングールドのように、演奏会の極端に少ないまま亡くなった方もいます。

私自身のピアノは浅草の家においたままで、甥や姪が弾いたようです。自宅にはワイフのピアノがあり、このほうが少し大型です。子供達はこれで育ち、特に長男はショパンを中心に沢山弾きました。ワルツから始まって、「幻想即興曲」「軍隊ポロネーズ」「スケル

ツォ3 番」「英雄ポロネーズ」などの大曲をマスターして、高校生の頃はいつも発表会で「とり」をとって弾いていましたが、今はあまり弾きません。むしろ途中からポピュラーに傾いた次男のほうが、今も時に弾いているようです。いずれにせよ自宅のピアノは今では弾く人がなくて宝の持ち腐れなのに、一応調律はしています。

携帯用の音楽プレーヤーは MD を経由することなく、2003 年の暮れに直接デジタルウォークマンに切り替えました。当初は Rio という 20GB の装置を使いましたが、2 年半で電池がダメになって交換が必要になったのを機会に、東芝の 60GB の装置を加えて併用しています。前者はファイル形式を変えませんが、東芝はファイルに修飾を加える点で少し不便ですが、大会社はみなこの方式のようです。CD やアナログテープから MP3 に変換する技術が進歩して、最近ではモノ録音のテープなども Wave ファイルを擬似ステレオ化して、ヘッドホンで聴いても違和感なく聴けるようにしています

以上

高機能患者シミュレータによる臨床実習の工夫

—いかに学生を本気にさせるか—

松島久雄, 岩瀬良範, 片塩 仁, 小野一之, 崎尾秀彰

はじめに

医学生に対する高機能患者シミュレータによる臨床実習の有用性は言うまでもない。しかし、実習を受ける学生の反応は様々であり、興味を持って積極的に参加する者もいれば、冷めた態度で接する学生もいる。積極的でもゲーム感覚になる場合やすぐに飽きてしまう学生も中にはいる。このような学生に対して効果的な実習を行うためには多くの努力を要する。独自のシナリオ作成, マンパワーの確保, 実習を行う理想的な場所の確保, 臨場感の向上など様々である。効果的な実習のためには「ちょっとした工夫」が必要であり, この努力によって学生の反応, 表情が変化してくる。

対象と方法

本学でのシミュレーション実習の対象は5年生の救急医学臨床実習学生が主であり, 1週間の実習期間のうち, 半日ずつ2回シミュレータによる実習を行っている。1グループ6~7人のため, 2~3人に分けて交代で実習を行い, 残りの学生は操作室で見学や, 操作と実習の「手伝い」をする。実習初日には, 患者シミュレータが「生きている」状態であると認識させることに努力している。問診や診察は音声システムで対応し, モニタを装着してバイタルサインを確認させる。患者シミュレータやシミュレーションに対する違和感を徐々に取り除き, 実際に人間と対応しているという感覚を植え付ける。実習2

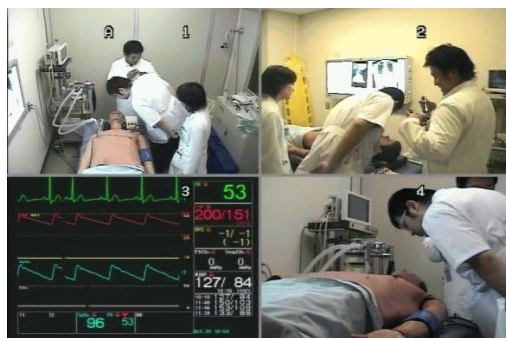


図1 録画映像

日目には植え付けた「生きている」という感覚もとにいくつかのシナリオを体験させる。実習後のフィードバックで使用するため, 実習の様子は学生の承諾を得た後にすべて録画している(図1)。

7つのキーワード

シミュレーション実習ではいかに実際に診療をしているような感覚にさせるか, そしていかに学生を本気にさせるかが重要である。そこで, 私達はこの目標を達成するために隔離, 反応, 急変, 役者, 参加, 時間, 成功の7つのキーワードを意識して実習を進めている(図2)。その結果, 無関心な学生やシミュレーションに抵抗感を持つ学生も積極的に参加するようになる。

隔離

臨場感やモチベーションの向上のために隔離された環境を作ることが理想的であると考えられる。隔離された環境を実現するためにまず, 2001年研究室の一部を改築して実習専用のシミュレーションセンターを新設した(図3)。シミュレー



図2 学生を本気にさせる7つのキーワード

シミュレーションの操作は隣接した操作室で全て行い、実習の様子を見学できるようにマジックミラーを使用した窓を設置した。マジックミラーにすることで実習を行っている学生から操作室は見えなくなり、外部の視線を気にすることなく実習ができるようになる。また、シミュレータの頸部に内蔵されたスピーカーからの発声も音声システムを使用して操作室より全て行う。この様に隔離した状況で実習を行うことで臨場感ならびにモチベーションは向上する。

反応

患者シミュレータは「生きている」ということを実感させるためには、リアルな反応が大切となる。実習では実際の患者様に接するように声をかけながら診察をさせる。診察のタイミングに合わせて痛がったり、診察を拒否したりする。このような細かい反応を示すことで本当の患者様に接しているような感覚になる。

急変

救急疾患におけるシミュレーション実習ではよりリアルな緊張感を体感するために急変は絶対必要である。たとえば突然のVTや意識消失発作などを起こし、短い時間でどの処置が第一優先となるか考えさせ、そして行動させる。どの様な状況においても急変を念頭に置いて対応していくトレーニングにもなる。すこしふざけ

てしまう緊張感のない学生でも急変すると、いつの間にか汗を流し真剣に実習に取り組むようになる。急変により全く動けなくなってしまう学生もいるが、ほとんどの学生が緊張感を体感しながら処置を開始する。

役者

現実味があり、学生の興味を引くようなシナリオにするためには役者が必要となる。しかし実際には役者を雇うのは困難である。マンパワー不足のため誰かに協力を要請することも困難である。そこで同一実習班の学生に協力を要請し、即席の役者をやってもらう。演技力に個人差はあるが、ほとんどの学生が真剣に演技をしてくれる。見学者も実習に参加できるため一石二鳥である。

参加

学生の中にはスムーズに実習に参加できるものもいれば、あまり近寄ろうとはしない学生もいる。グループ内に積極的な学生がいるとそれに隠れるように消極的になってしまう学生もいる。シミュレーション実習に上手く参加できない消極的な学生には参加できるような環境を作ってあげることが大切である。たとえば患者シミュレータから直接「〇〇先生痛みを何とかして下さい。」などと名指しで問いかける。問いかけられたことで自分が答えなければ、自分が何とかしなくてはという感覚が湧いてくる。消極的な学生との会話を成立させることで全員が参加できる環境となってくる。

時間

学生の力量に合わせてシミュレーションの設定を変化させ、診察、診断、処置をする時間の長さをそれぞれ調整する。スムーズに診察、診断が行えるグループではテンポよくシナリオを進行させる。一方、考えが上手くまとまらない

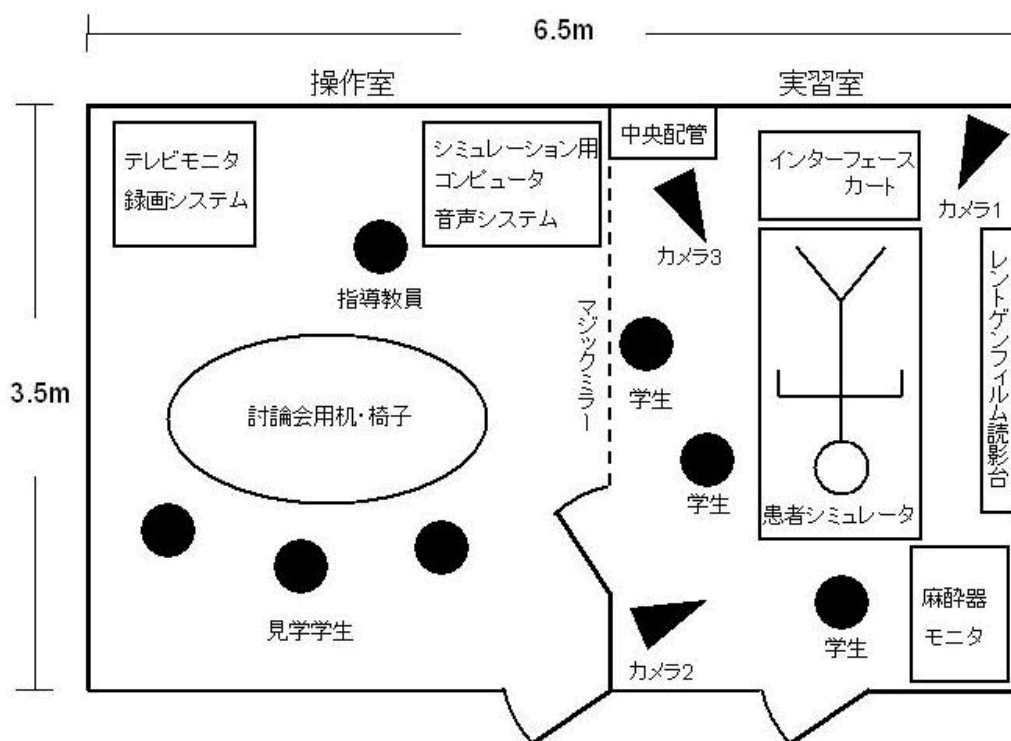


図3 シミュレーションセンターの図面

ようなグループには少し考える時間を持てるようにする。1つ1つのシナリオが短すぎると物足りないように感じてしまい、逆に長くなってくると飽きる学生が出てきてしまう。このため適切な時間調整が重要となる。時には通りがかりの医療関係者の「役者」を急遽仕立てて、検査や処置のアドバイスをして時間調整をすることもある。シミュレータ全体の機能を一時停止させるポーズ機能を使用して考える時間を作ってもある。また、グループ全体や個人の力量を上手く把握するためには指導教員同士で意見交換することも大変重要である。

成功

緊張感や臨場感をもたせるために実施するシナリオは重症例や、急変するものが多くなる。学生に厳しい状況を経験させ、上手いかわない悔しさを経験させることはシミュレーションならではの実習となるであろう。しかし、治療が成

功し救命できた喜びを経験させることはもっと大切であると考えている。いくつかのシナリオでは治療を成功にまで導き、そして成功を認めてあげることが重要である。失敗そして反省するだけではなく、成功そして喜びを味わうことで学生のやる気はどんどん湧いてくる。

debriefing (事後批評)

録画映像による”debriefing”は理解を深めるのに極めて有用である。自分の活躍や失態を見ることができ学生には好評で、教育効果の高い、楽しい”debriefing”となっている。指導教員と共に自分の行動は勿論のこと、全体の流れや見落とし点などを確認する。そしてシミュレーションと臨床での違いをグループ全員で検討するようにしている。ゲーム感覚で実習に取り組んでしまったグループも”debriefing”をすることで、改めて実習の重要性や臨床技能習得の必要性を実

感できる。

まとめ

学生が一般診療に関する基本的臨床能力を備えているかどうか評価するのに OSCE(Objective Structured Clinical Examination) がある。私達の到達目標は OSCE の手順に沿って診療の実践をできるようにすることである。7つのキーワードに沿って現実性があり緊張感あふれるシミュレーションを実施すれば、開始時には戸惑いを見せる学生も次第に緊張感をもって意欲的に実習に参加するようになる。結果的に、学生は本気になり、とても効果的な基本的臨床技能習得の訓練となる。最後に学生を本気にさせるためにはもう1つのコツがある。指導教員も本気になることである。手を抜かずに真剣にやればやるだけ、学生は真剣になってくる。

ABSTRACT

A conception of clinical training system for medical students using a whole-body patient simulator. How could we activate them?

Hisao Matsushima, Yoshinori Iwase, Hitoshi Katashio, Kazuyuki Ono, Hideaki Sakio

Computer-based education is now getting popular in the medical field. A whole-body patient

simulator, one of the computer-controlled mannequins, may be quite useful if we keep in mind to create an atmosphere of actual ward and to motivate the medical students highly. This mannequin is lying on the table in the single room, surrounded with bed-side monitor and anesthesia machine. It is possible to complain the symptoms by the operator's voice. We can examine their attitude in the emergency situation and their ability for diagnosis and treatment. These scenes are recorded in the hard disk, which is reviewed at the meeting later. In regard to the medical students, they perform as a medical doctor, and also act as a standardized patient occasionally. If they can not manage the mannequin smoothly or hesitate to ask to him, it is important to encourage them to participate this training system. If we are worried about their delayed diagnosis and treatment, we should give them appropriate information promptly. Their looks will become bright by these suggestion and assistance.

key word: simulator, clinical training system, medical students,

*Department of Intensive and Critical Care Medicine Dokkyo University School of Medicine,
Mibu, Tochigi 321-0293, Japan*

VMware Workstation を使用したシステム管理

斎藤 智彦

はじめに

施設内あるいは部門別イントラネットが普及するとともに、WEB サーバ、DB サーバ、メールサーバといったサーバには、Linux や FreeBSD をはじめとした PC-UNIX が使用され、各種サーバソフトウェアもオープンソースで構築されるケースが増加している。システム全体を構築するには、複数の PC に別々の OS やアプリケーションを導入する必要があり、開発環境の用意や、新しいシステムに移行する場合のハードウェアの準備に苦勞する場合が多い。また、システムのバックアップを行う場合も、個々のサーバ毎にバックアップを行う必要があり、運用上の効率が悪い。

PC 上で動作する仮想マシンソフトウェア VMware Workstation(以下 VMware) を用いることで、複数の PC をエミュレートし、ネットワークシステム管理を有用に行うことができた。VMware の紹介を含めて報告する。

方 法

VMware について

VMware Workstation(以下 VMware) は、PC 上で動作する仮想マシンソフトウェアである。VMware が提供する仮想マシン上では、i386 ネイティブコードの OS を複数インストールし、同時に動作させることが可能である。ハードウェアが仮想化されており、実行環境のマザーボードは Intel 440BX 相当、Network Interface は NE2100 互換、メモリーや HDD 容量は個々の OS 毎に設

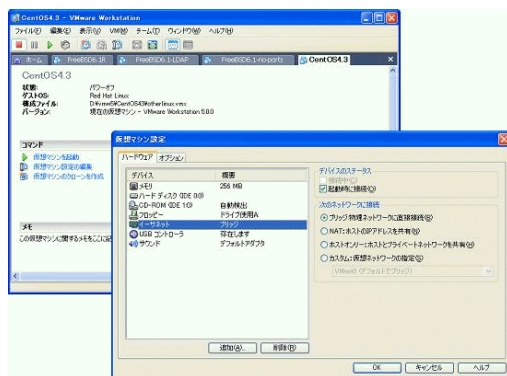


図 1 VMware による仮想マシンの構築

定可能であり、FDD や CD-ROM, USB, サウンドカードといった周辺機器の構成も自由に選択することができる。(図 1) VMware をインストールする本来の PC にインストールされている OS をホスト OS とよび、その仮想 PC 上にインストールされる OS をゲスト OS とよぶ。ゲスト OS として Windows, Linux, FreeBSD, MS-DOS などを実行することが可能である。最近の PC は、メモリー 1Gbytes, HDD 250Gbytes といった大容量の作業環境を構築することができる。VMware により 1 台の PC 上に必要な仮想サーバを構築し、複数 OS の混在した開発環境を準備し同時に実行させても実用的な速度で動作させることが可能である。また、インストールされた仮想 PC は、エミュレートされた同一ハードウェア上で動作し、仮想 PC 環境 (ゲスト OS) は VMware がインストールされた OS (ホスト OS) 上のファイルに過ぎないため、システムの環境設定を含めて容易にバックアップを行うことが可能で、VMware が動作する他のホスト

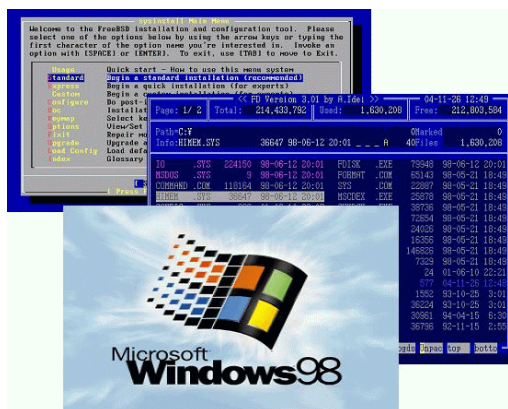


図2 VMware を利用したスクリーンキャプチャ

PCに移行しても、ほとんど設定を変更することなく仮想PC環境を移行しホストOS上で動作させることが可能である。その他の機能として、仮想PCはホストOS上のアプリケーションであるため、ゲストOSのインストール画面や、起動画面など、通常の方法ではスクリーンキャプチャ機能を利用できない状態の画面をスナップショットとして保存することができる。(図2)その他、旧バージョンのOSやアプリケーションの実行や、同じリソースを利用するため共存できないアプリケーションを共存させることも容易である。

システムの構成

VMwareを使用するにあたって、GUIを必要とするWindows ServerをゲストOSとしてインストールすることは、メモリーやディスク容量の点でホストPCへの負担も大きく、他のゲストOSへの影響も考慮し、キャラクターベースのPC-UNIXのみをゲストOSとして選択した。

ホストPCは、Pentium 4 (2GHz)、メインメモリー1 Gbytes、HDD250Gbytes、ホストOSとしてWindows 2000 Professionalを使用し、VMwareVersion4をインストールした。ホストOSはVMwareを起動するためのシステムにす

ぎないため、Windows Server機能は必要なく、通常のWindows Workstationにインストールすることができる。

サーバ (apache 2.0)、DBサーバ (PostgreSQL8.0)を構築した。インストール中は、インストールに必要な入力画面を適宜スクリーンキャプチャし、インストール設定書として利用した。

結果

実際の運用

現在稼動しているシステムと同じように、仮想PCにゲストOSとそれぞれのサーバアプリケーションをインストールした。仮想PC (ゲストOS)は、ネットワークに接続された別のPCから見ると、それぞれ異なるIPアドレスを持つ複数のサーバとして動作しているように見えるため、正しくインストールされたことを確認した後、通常の運用では、本来のサーバと別IPアドレスとして運用するか、一旦ゲストOSをシャットダウンしておく必要がある。頻回に更新が行われるDBサーバ以外は、ゲストOSの起動は行わず待機状態とし、DBサーバのみ別IPアドレスで起動し、本運用中のDBサーバからのバックアップを適宜保存した。構築した仮想PCをファイルごとコピーすることで、再度インストールすることなく開発用PCに同じサーバ環境を構築することができるため、クライアントPC上で、各々のサーバの動作を確認しながらアプリケーションの開発を行うことが可能となった。システムで運用しているサーバにトラブルが生じた場合、トラブルの生じたサーバマシンを停止しネットワークから切り離れた後、該当する仮想PCを起動することで、ネットワークのトラブルを解消することができるようになった。(図3)

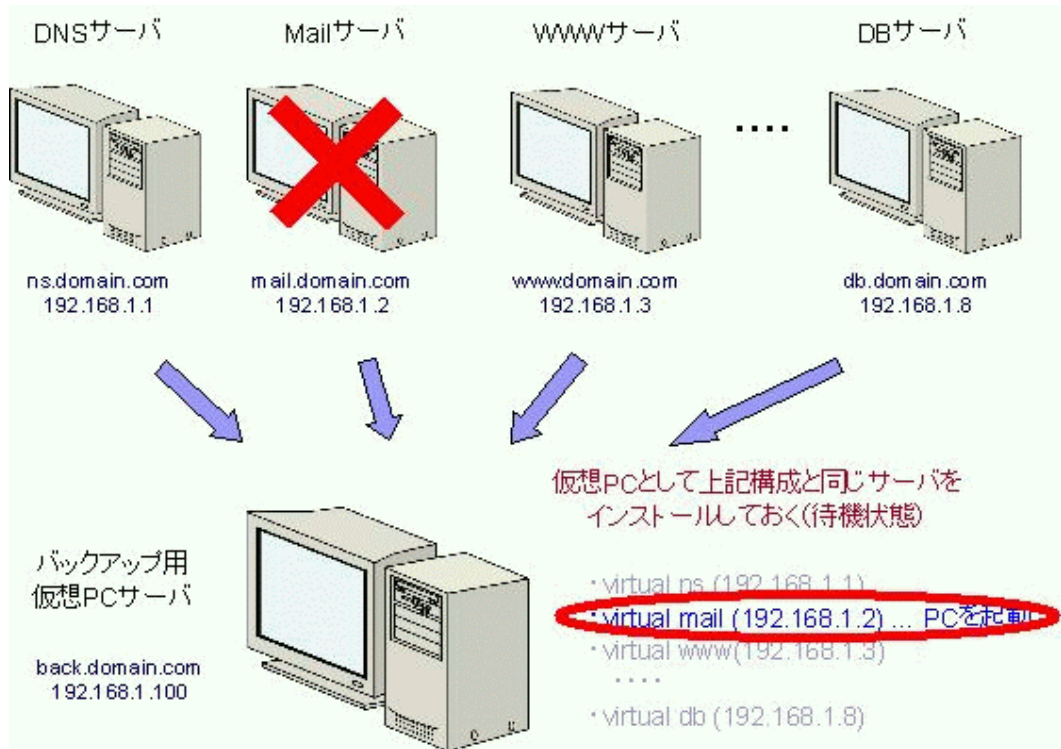


図 3 実際のシステム運用

考 察

ゲスト OS 上で動作するサーバソフトウェアは、当初考えていたよりも軽快に動作した。キャラクターベースのソフトウェアであればある程度の速度で実行することが可能である。体感上、一昔前の PC を利用している程度の感覚であり、OS のインストールに際しても、特に苦痛と感ずることはなかった。ネットワーク関連のデーモンやサービスプログラムであれば、ネットワーク関連の処理がボトルネックとなるため、仮想 PC 上のソフトウェアであっても十分に実用的な速度で動作した。多くのメモリーとディスク領域を必要とする DB サーバの場合、ある程度の速度低下は認められるものの、一瞬のタイムラグ程度であり、障害時のバックアップとしては十

分実用的であると思われた。

ゲスト OS のインストールは、本運用の OS と同時に行うことができず、別々にインストールする必要があるが、VMware では、インストール直後の OS をファイルで複製することが可能であり、個々のサーバは、必要なサーバアプリケーションだけを構築すればよく、インストール画面をキャプチャし利用できることや、サーバのバックアップを用意する必要がないことを考えれば、複数のサーバマシンを利用するより、効率的なサーバ管理を行うことが可能である。

現在のところ、WEB サーバ上のページを更新した場合や、DNS サーバの更新を行った場合、変更箇所は手動で仮想 PC に反映させなければならない。これらの作業は、設定ファイルの仮想

PC へのアップロードで済むためそれ程大きな問題とはならないが、未読のメールが残った状態のメールサーバの復旧は難しく、今後の課題である。

結 語

ネットワークシステム管理に、仮想 PC ソフト VMware を使用した。VMware を使用することで、1 台の PC 上に開発環境を構成することができるようになった。また、バックアップ用のホスト PC を作成することで、緊急時の代替サーバを用意することなく、システム運用を継続することができるようになった。

ソフトウェアのバージョンアップや、バックアップ、メンテナンス作業において、VMware は非常に有益なツールである。

ABSTRACT

Network system management with VMware Workstation

Tomohiko Saito*

VMware is virtual PC software which can be installed with two or more Operating Systems. The VMware was used for the network system management. DNS server, WWW server, Mail server and Database server were installed on one PC workstation. It came to be able to compose the development environment with VMware on one PC. Moreover, it came to be able to continue the system operation without preparing an alternative server when the server machine was troubled in the network systems. The VMware is a very useful tool, in the upgrade, the backup, and the maintenance of the applications and network systems.

key word: VMware workstation, LAN, Network system management

**National Hospital Organization Minami-Okayama Medical Center, Okayama, 701-0304*

Fick の拡散法則から統計力学まで

田中義文

はじめに

笑気麻酔で気管内チューブのカフ圧が上昇すること、また中耳炎、イレウスなど体内に閉鎖空間が存在すると笑気併用麻酔は禁忌であることを説明するのに「自然はエントロピーが増大する」とか言って今まで適当にごまかしてきた。しかし、いよいよ定年も近くなると、実は学生時代から理解出来なかった事柄をそのままにして退官するのは悔しく思い、まだ気力のあるうちに少し勉強することにした。

奇しくも今年は Fick の拡散法則発表後 150 年目にあたる。拡散という現象は麻酔医にとって大変馴染の深い現象であり、また、浸透圧、膠質浸透圧、Nernst の方程式、Donnan の膜平衡など全ての細胞の営みの基礎エネルギーとなっている。またそのキネティクスの応用である統計力学は、古くはブラウン運動、最近パッチクランプのランダムな電流スパイクの解析と大変なスピードで医学分野に進出している。これに乗り遅れないようにせめて歴史だけでも把握しようというのが本稿の目的である。

1. $PV = nRT$ の意味

理想気体の状態方程式 $PV = nRT$ の計算は高校時代に十分演習してきたが、文明がこの結論にたどり着くまでには随分と時間を費している。まず人類が気がついたことは物の重さと長さであろう。長さの延長上に位置する面積や体積についても含めてどの古代文明にも商談上の記録として残っている。体積と重さの関係(密度)に

ついては有名なアルキメデスの逸話があるからギリシャ文明では認識されていた。

気体の圧力についてはというと、揚水ポンプは 10m 以上水を上げることは出来ないことは昔からよく知られており、ガリレオ自身もそのことを認識していた。しかし、その理由が大気圧にあることに気づかなかったようである。彼は、紀元前 4 世紀にアリストテレスが述べた「自然は真空を嫌う」という概念から解き放たれることなく、この世を去った。トリチェリはガリレオが没した翌年の 1643 年に有名な水銀柱の実験を行って始めて大気圧を観測した。トリチェリの水銀柱の実験を知ったパスカルは、高山に登れば気圧が低くなることを確認し、大気圧の概念を不動のものとした(実験は 1653 年、発表は死後の 1663 年)。マグデブルクの半球で有名なゲーリケの公開実験は 1657 年に行われ、彼は水気圧計で嵐の予報を行った。気体の圧力と体積との反比例の関係を発見したボイルは 1660 年である。

一方、気体の圧力が一定であればその体積と温度との関係は正比例になると提唱したシャルルの発見は 1787 年であり、ボイルの発見から 120 年も後である。温度計そのものはガリレオが発明していたが、気密温度計でないため温度計測なのか気圧計測なのか区別出来なかったであろう。温度計の歴史を見ると、デ・メディチが 1654 年アルコールによる気密温度計を発表し、1714 年ファーレンハイトが水銀温度計と目盛りを発

表, 1742 年セルシウスが水の氷点と沸点を 100 等分した目盛りを発表している. 気体の体積が 1 度 C 上昇するにつれて $1/273$ ずつ体積が膨張することからケルビン卿が 1848 年絶対 (ケルビン) 温度の概念を打ち出している.

熱に関しては古来より人類は火を通して利用してきたが, 熱素 (カロリック) という熱物質の存在を信じていた. 水の成分が酸素と水素であることを証明し, また質量保存の法則を発見したラボアジェですら 1789 年に発刊した「化学の初め」で熱素を一つの元素として取り扱っている. 熱の本質を物質の構成微粒子の運動だと提唱したのは 1798 年に発表したランフォードの「熱源に関する研究」である. 彼は大砲の砲身をくりぬく作業で大量の熱が発生することに着目した. 運動エネルギーそのものが熱に変換することを積極的に実験したのがジュールで 1878 年羽根車による攪拌実験で, 今日ではカロリー単位は医学, 栄養学以外では使われなくなったが, 1948 年制定の国際度量衡委員会の 4.1855 に近い 4.1587 J/cal を示した.

以上で P, V, T の説明は終り, 問題を n に移す. n はモル数であって (分子, 原子, イオンなどの) 粒子の数である. 18 世紀末では種々の気体の反応が明らかになっており, 気体の重量, 体積などを計測して化学反応の定量解析を行っている. ドルトンは「原子説」を 1802 年発表し, 「すべての純粋原子は一定の性質と質量を持ち, 化合物の原子は単体の原子が単に結合しただけである」と唱え, 「倍数比例の法則」を予想した. また, ゲイ・リュサックは気体が化学反応するとき反応前と生成気体との間で, 温度と圧力を等しくすれば常に体積比が簡単な整数になることに気づき, 1808 年「気体反応の法則」を提唱した. しかし, 窒素ガスと酸素ガスとの反応において,

もしガスが単体元素で構成するなら N_2O , NO , NO_2 の説明で元素を 2 分しなければならないことに気付いたアボガドロは窒素ガスと酸素ガスをそれぞれ N_2 , O_2 とし, さらに「温度と圧力が同じであれば, 気体の種類が異なっても, 同じ体積の気体の中には同じ数の分子が含まれている」というアボガドロの法則を提唱した (1811). 個々の原子量の単位に関してはドルトンはもっとも軽い水素原子の質量を 1 として種々の原子の質量を比較する基準とした. その後原子量の単位設定に変遷があったが, 酸素原子を基準にその原子量を 16 としたのはスタス (1865) であり, この場合にはドルトンの数値にも近い値となる. 以来「原子量」は, 酸素の原子量 16 との関係により表されてきた. しかし, 酸素に同位元素が存在することがわかり, 炭素原子を 12 として今日に至っている. モルという単位を提唱したのは 1902 年オストワルドであり, molecule の略語を (mol) とした. 彼はまた 1 モルの単一元素からなる不活性ガスすべてが標準状態で 22.4 l になることを明らかにした. 従って, 1 モルを 22.4 l と定義したのではなく, 水素原子量を 1 とし, また g で表すと便利であるところから結果的に気体 1 モルが 22.4 l という半端な数値になったわけである.

理想気体の状態方程式 $PV = nRT$ の成立するまでの歴史を見ると, 多くの研究者の蓄積の成果であることがよく分かる.

2. 理想気体の分子量

0 度 C, 1 気圧の理想気体 1 モルの体積は 22.4 l である. それでは理想気体の分子量はいくらかとなると, 状態方程式から何も出てこない. それどころか, 不活性ガスはもとより, 水素, 窒素, その他多くの気体はおおよそ 22.4 l になる. そこ

で再度状態方程式 $PV = nRT$ の意味を考えることにする。

理想気体の分子量を m とし、すべての分子が v_M の速度を持つと考える。各分子の運動方向はばらばらであるから、 x, y, z の添字をつけて、

$$v_M^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2 \quad (2.1)$$

が全ての分子 ($i = 1, \dots, N$) において成り立つ。

いま、1 辺 L の立方体容器を考える。また、分子は壁に対して完全弾性衝突するが、分子どうしの衝突はなく、互いにすり抜ける程度の小さな存在だと考える。 Δt 秒間に x 軸に垂直な壁に対して分子は

$$\frac{v_{ix}}{2L} \Delta t \text{ 回}$$

衝突する。またこの分子は 1 回の衝突で

$$2mv_{ix}$$

の力積を壁に与える。従って、すべての分子の Δt 秒間の力積 $F \Delta t$ は

$$F \Delta t = \sum_{i=1}^N 2mv_{ix} \frac{v_{ix}}{2L} \Delta t = \frac{m}{L} \Delta t \sum_{i=1}^N v_{ix}^2$$

となる。一つの分子は y 軸、 z 軸にも同じ確率で衝突するから、全体の力積は 3 倍となる。従って、

$$\begin{aligned} 3F \Delta t &= \frac{m}{L} \Delta t \sum_{i=1}^N (v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2) \\ &= \frac{Nm}{L} v_M^2 \Delta t \end{aligned} \quad (2.2)$$

となる。いま壁にかかる圧力を p とすると、壁の面積は L^2 だから、

$$F = pL^2$$

を (2.2) 式に代入し、 $V = L^3$ を考慮すると、

$$pV = \frac{1}{3} Nmv_M^2 \quad (2.3)$$

となる。つまり、 $pV =$ 一定で示されるボイルの法則は、分子運動のエネルギーは変化しないという意味である。

また、気体分子の質量が大きくなると、当然運動速度は遅くなると考えられるが、理想気体であればその質量と運動速度の 2 乗とが反比例の関係の意味する。従って理想気体の状態方程式に分子量の項がなくても問題はないわけである。

分子数 N を n モルとして、再度、理想気体の状態方程式を書き直すと、

$$pV = \frac{1}{3} Nmv_M^2 = nRT.$$

この意味は、温度と分子の運動エネルギーとは密接な関係であり、正確に言えば、分子の平均 2 乗速度と絶対温度とは正比例している。また、圧力と容積は反比例し、分子の速度は変わらない。容積が大きくなれば壁に衝突する回数が減り、圧力が減少する。逆に容積が小さくなると分子の衝突回数が増えて圧力が上昇するのである。

3. シャルルの法則から得られるもの

質量 m で N 個の分子からなる理想気体の運動エネルギー U は、

$$U = \frac{1}{2} Nmv_M^2$$

で表される。前項の (2.3) 式を代入すると

$$pV = \frac{2}{3} U = nRT.$$

従って、

$$U = \frac{3}{2} nRT \quad (3.1)$$

となる。これは理想気体の運動エネルギーは温度と比例することを示し、その係数 $3/2 \cdot nR$ が n モルの熱容量 C_V になる。なぜ容積一定かというと、容積が変化すると外界の気圧に対して仕事をするためである。

余談であるが、今度から、体温上昇を見れば分子運動が活発なのだなと感じてほしい。

4. アボガドロ数

今までの議論では、 $pV = nRT$ の n については単なる分子数の比例定数として取り扱ってきた。しかし、ダルトンが水素の原子量を 1 と定めたことと、 $2g$ の水素ガス、すなわちオストワルドが定めた 1 モルに相当する水素ガスの体積は標準状態で 22.4 l になったことにより、 n の単位がモルとなり、 R の値も $8.314\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$ と確定した。

次は 1 モルに相当する分子の数は何個であるかという問題を解決しなければならない。これまで理想気体の議論で取り扱ったことは、分子には質量 m と速度 v_M が存在し、 pV が運動エネルギーであり、また熱容量が測定できたことだけである。1 モルに含まれる分子の数 (アボガドロ数) が決定されれば、分子 1 個の大きさや重量がわかり、同時にその速度も算出可能である。

ロシュミットは 1865 年に初めてアボガドロ数 (N_A) を具体的な数値で発表した。分子の直径を d 、分子の平均自由行程を λ 、アボガドロ数を N_A とすると、

$$\frac{\pi d^3}{6} N_A = 1 \text{ モルの液化ガス体積} \quad (4.1)$$

$$\lambda \pi d^2 N_A = 22.4\text{ l} \quad (4.2)$$

要するに、(4.1) 式は直径 d の球体が 1 モル分ぎりぎり詰まっていると考えると、分子の直径が算出できる。また、直径 d の球体は速度 v で走り回っているが、他の分子と衝突するまでの距離を平均自由行程だと考えると、分子 1 個の占有体積は半径 d の円柱になる (図 1 参照)。(4.2) 式に示すように、その円柱が N_A 個集まれば 1 モルの気体体積になり、 22.4 l になるという考えである。3 変数に対して式は 2 個しかない。ロシュミットは、(4.1) 式に対して N_2O と NO_2 の液化ガスから液体空気の体積を算出した。ロシュミットは、また、すでに公表されているマックス

スウェルの提唱した平均自由行程の値を (4.2) 式に代入することにより、アボガドロ数 (N_A) を求

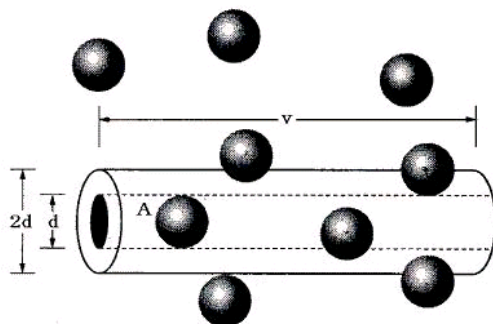


図 1 平均自由行程

平均自由行程 λ は速度 v で飛行する直径 d の分子が他の分子と衝突するまでの距離と考える。

め、その値を $0.194 \times 10^{23}/\text{mol}$ と発表した。今日、我々が高校で学んだ数値、 $6.0 \times 10^{23}/\text{mol}$ とはずいぶん違うが、分子の大きさを求めた彼の貢献は大きい。例えば水の分子量は 18 であるが、式 (1) をもちいることにより水分子の直径が算出できる。水の比重は 1 であるから水の体積は $18 \times 10^{-6}\text{ m}^3$ である。従って、

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \times 18 \times 10^{-6}}{\pi \times 6 \times 10^{23}}} = 3.86 \times 10^{-10}\text{ m}$$

となり、分子の直径がオングストローム ($\text{\AA}$) 単位であることがわかる。

平均自由行程の概念は 1857 年にクラウジウスが発表しているが、彼自身はその測定をおこなっていない、分子の大きさは不明としてきた。気体の粘性抵抗から平均自由行程を求めたのはマックスウェルである (1859)。

5. 粘性抵抗から平均自由行程

今日粘度は潤滑油の性状、食品、細胞工学と幅広く利用されている測定項目であるが、ニュートンに始まる粘度の概念はマックスウェルにより根本的に見直された。図 2 に示すように固定板 A、距離 d を離して速度 v_B で移動する可動板

Bで構成する。粘性のある流体では板 A の接触面では停止状態、板 B の接触面では速度 v_B で

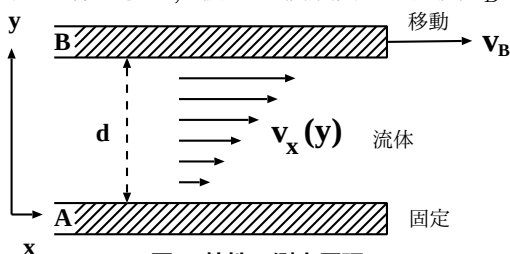


図2 粘性の測定原理

流体に対して幅 d のスリットを作成し壁面 A を固定、壁面 B を速度 v_B で移動させる。それぞれの壁面と接触する流体の速度は壁面と一致するため、 y 軸方向に速度勾配が生じる。そのため壁面 B の接線抵抗 (摩擦抵抗) より流体の粘性が測定できる。

移動し、 y 軸に沿って直線的な速度勾配が生じる。従って板 B の駆動で生じる摩擦力 (接線応力 p_{xy}) が粘性抵抗になり、式で示すと、

$$p_{xy} = \eta \frac{dv(y)}{dy} = \eta \frac{v_B}{d}$$

となり、粘性係数 η が求まる。マックスウェルはこの現象を分子の図3に示すように y 軸方向への分子の跳躍の障害が接線抵抗を生じさせると考え、平均分子速度を $\bar{v}$ 、平均自由行程を λ 、分子の数密度を ρ とすると、

$$\bar{v} = \sqrt{V_M^2}$$

として、 x, y, z 方向の分子速度を相当に等しいと仮定し、

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \lambda$$

となると考え、実際に図4のような装置で常温、常圧で酸素または窒素の平均自由行程を $0.1 \mu m$ 程度と発表した。分子の直径は $\text{\AA}$ 単位であることから平均自由行程は分子の直径に対して数百倍程度しか離れていないことから、ファン・デルワールスは分子の体積と、分子間引力を考慮して理想気体の状態方程式の補正を発表した (1873)。この方程式は現実の気体の液化とか相

転移の説明には役立つが基本的に実験結果から

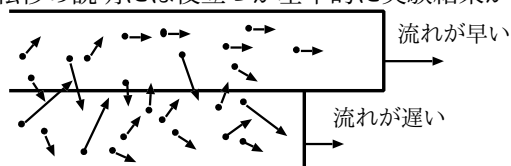


図3 ランダムな分子運動が粘性を引き起こす
分子はランダムな速度と方向で分子運動を行っているが流れの早さに異なりが生じると流れと垂直方向に均一な流れになろうとする抗力が生じる。

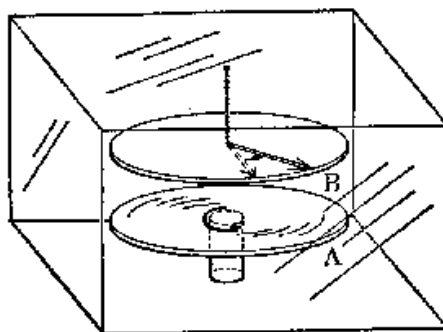


図4 マックスウェルが考案した粘度計

糸で吊した円盤 B の下に円盤 A を回転させる。すると気体の粘性により円盤 B も回転させようとするねじれ応力が生じる。そのねじれ抵抗を計測して気体の粘性を求めた。

(米澤富子著：ブラウン運動、共立出版、1989より引用)

定数を求める経験式であるため、これ以上の説明を省く。平均自由行程について逆の見方をすると、分子が浮遊している隙間は分子の直径からみて 1000 倍近い距離があり、その空間は真空の世界である。つまり、我々は大気の層に住んでいるが真空の世界に住んでいるのと殆ど変わらない。真空の世界だからこそ太陽の電磁波が地球に届き、暖をとることができる。また日常生活に多いに電波を利用している。もし生活空間が大気でなく、液体や個体のように分子間に隙間がなければ電波を利用することができなくなる。このように平均自由行程を考えると大気圏と宇宙空間との境界がなくなり、大変親し

みやすい存在となる。

6. 古典熱力学

これまでの話で明らかになったことは、分子とは、温度さえ与えればランダムに運動しだし、 pV の積そのものが運動エネルギーを表すこと、また、粘性とは、各分子がランダムな方向に飛び交うなかで、ある特定の方向に切断しようとしたときの分子運動の抵抗であることが理解できたと思う。従って、理想気体の状態方程式とは、分子運動そのものの運動状態を示す存在であって、対象となる物質は気体、液体、個体全ての分子に通じるものである。力学で例えると、宇宙から原子の中の電子軌道まで通用する「万有引力の法則」のような存在だといえる。

古典熱力学とは $pV = nRT$ で示すマクロ的なパラメータを用いた物質移動の理論であり、前述のミクロの分子や原子の運動まで言及しない学問である。ミクロの分子、原子、素粒子については統計力学、量子力学などの範疇に入る。ここでは熱力学の第一法則、第二法則にかかわるパラメータ、すなわち内部エネルギー、エントルピー、エントロピー、自由エネルギーと平衡状態、化学ポテンシャルなどをまとめることにする。古典熱力学ではいろいろとパラメータが表れるが、本質的には p, V, T の3変数のうち2個が定まれば常に状態方程式は満足され、最後のパラメータは求められる。言い換えると古典熱力学でのパラメータは上記の2変数から派生したものに過ぎない。

(1) 熱力学の第一法則

$$dU = dQ - dW \quad (6.1)$$

第一法則はエネルギー保存の法則である。対象となる系の内部エネルギーの増加量 dU は外界から与えられた熱量 dQ と系が外界へする仕

事量 dW の差で表される。

参考：接頭子の d と Δ の意味

上式において接頭子の d がついているが、これは数学で示す微小の変化量 (differential) を意味している。もし、 $U = Q - W$ と記述すると、注目している系について全ての履歴を知っておかなければならない。従って今までのことは別にして、これからの変化量だけを注目するという意味が式に込められている。

一方、 Δ は微小でない変化量の意味する。内部エネルギー U_1 から U_2 に変化すると、定積分を行って、

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \int_{U_1}^{U_2} du$$

の意味として使用する。

さて今まで内部エネルギーとは何かと理解できなかったが、前項までの説明で、単に分子の運動エネルギーに過ぎない (理想気体なら x, y, z 方向に運動する並進エネルギー) ことがわかる。また系が外界への仕事量として気体の膨張に注目すると、

$$dW = p dV \quad (6.2)$$

で表すことができる。 p は外界の圧力 (外気圧) であり、 dV は外界へ押し出した気体体積である。

参考：仕事量の意味

仕事量 (W) とは力 (F) $\times$ 移動した距離 (x) で表す。今、圧力 (p) で壁の面積 (S) を押すとその力 (F) は $p \times S$ で表される。そして壁の移動する距離を dx とすると、微小体積 ($dV = S dx$) を移動させたことになり、微小仕事量の関係は $dW = p dV$ となる。

ここで第一法則が適応できる2例を示そう。われわれがよく経験する例であるが、ガスボンベからガスを勢いよく放つとボンベが冷えて結露する。これは噴出したガスが大気に仕事 ($p dV$) を行い、ボンベ内の内部エネルギーが低下するためである ($dU = -p dV$)。

また, Joule の実験で有名な気体の真空フラスコによる膨張実験がある (自由膨張). 結果は温度変化が無かった. 理由は外界が真空であれば ($p = 0$), 仕事をせず ($dW = 0$), 外界とは断熱状態であるために ($dQ = 0$) 内部エネルギーに変化が生じなかったためである ($dU = 0$).

(2) 理想気体の定容比熱

一般に比熱 C とは一定量の物質の温度上昇に必要な熱量を示し,

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

で表す. 今, 容積一定の条件, すなわち $dW = 0$ で dQ_V だけ加熱すると, 熱力学の第一法則より,

$$dU = dQ_V \quad (6.3)$$

となり, 内部エネルギーの増加が生じる. 内部エネルギーの増加は温度が指標となるから,

$$C_V = \frac{dQ_V}{dT} = \frac{dU}{dT}$$

で示される. 理想気体の内部エネルギーは前述の分子運動論で示した $U = \frac{3}{2}RT$ (3.1 式) が利用でき, 温度 T で微分すると,

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{3}{2}R \quad (6.4)$$

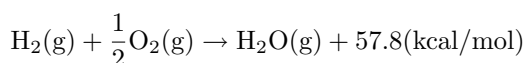
と計算できる. R 値は $8.314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ を利用して 0°C , 1 モルの理想気体の内部エネルギー U を求めると,

$$U = 8.314 \times 273 \times 3/2 = 3404.6 \text{ Joule}$$

となる. これは理想気体の並進分子運動エネルギーである. 温度だけの関数であり, その時の圧力, 容積に関係しない.

(3) エンタルピーの定義

高校の熱化学の授業で,



を習った. これは水素と酸素ガスから, 57.8kcal の発熱反応で, 1 モルの水ができるという意味で

ある.

熱力学の第一法則を考慮すると 1.5 モルの気体が 1 モルの気体になるわけであるから, 外界から仕事を受けることになり, 純粋の発熱反応に加えて気体の外界からの仕事量を考慮しなければならない. その不便を無くすためにエンタルピーの概念が導入された. 第一法則を変形すると,

$$dQ = dU + p dV$$

となる. そこでエンタルピーを,

$$H = U + pV \quad (6.5)$$

と定義して, 両辺を微分すると,

$$dH = dU + p dV + V dp$$

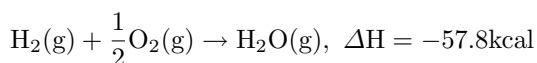
と表記できる. 反応する環境を 1 気圧などと定圧条件にすると $dp = 0$ であるから, 上式は,

$$dH = dU + p dV.$$

従って,

$$dQ_p = dH \quad (6.6)$$

となり, 一般の定圧反応の熱量を混乱なく表記でき, 重宝する概念である. 従って前述の熱化学式は



と書ける. 高校の熱化学のカロリー表示はエンタルピーの変化を示していたのである. なお第一法則の定義から, 発熱反応のエンタルピーの変化は負の値となる.

(4) 理想気体の定圧比熱 (マイヤーの関係式)

定圧下のエンタルピーの変化 (dH) は, 定圧吸収熱量 (dQ_p) に等しい. 従って,

$$C_p = \frac{dQ_p}{dT} = \frac{dU + p dV}{dT} = \frac{dH}{dT} \quad (6.7)$$

と書ける. 理想気体は $pV = RT$ よりエンタルピー H は,

$$H = U + pV = U + RT$$

で、温度 T で微分すると、

$$\frac{dH}{dT} = \frac{dU}{dT} + R$$

となり、理想気体の定容、定圧比熱の関係は、マイヤーの関係式とよばれる

$$C_p = C_V + R = \frac{5}{2}R \quad (6.8)$$

となる。従って、 0°C 、1モルの理想気体のエンタルピー H を求めると、

$$H = 8.314 \times 273 \times 5/2 = 5674.3 \text{ Joul}$$

となる。これは理想気体の並進分子運動に自分の持っている体積と圧力を掛けたものの和である。つまり、 0°C 、1モルの条件を付けた理想気体は、気圧や温度に関係なく同じエンタルピーになる。

なお、定圧比熱/定容比熱、

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$$

は断熱膨張の式などによく使われ、理想気体では $5/3$ である。

(5) 理想気体の等温膨張と断熱膨張

等温膨張や断熱膨張は次のエントロピー計算に重要であるから、十分に理解してほしい。理想気体の状態方程式 $pV = nRT$ はどのような状態でも常に成立する。つまり静的な状態でも膨張の途中経過でも成立する関数である。また、 p, V, T のうちの2変数を決めると残った変数は状態方程式から計算される。

一方、熱力学の第一法則 $dU = dQ - pdV$ は状態の変化に対応する微分方程式であって、その意味するところは、気体を膨張させると、それにみあった熱量 dQ を気体に与えなければ必ず内部エネルギー dU が低下し、それは分子の運動エネルギーが低下することになり、系の温度が低下することを意味する。そこで理想的な2つの状態変化を考える。一つは気体膨張にみ

あった熱エネルギー dQ を常に与えて等温膨張を行うこと、もう一つは熱エネルギーを与えないで断熱膨張を行うことである。

等温膨張

等温膨張では気体の膨張で系の温度が低下しないように外部から熱を適度に加える。従って温度変化は生じず、 $dU = 0$ での条件で第一法則を記述すると、

$$dQ = pdV$$

となる。ここで1モルの状態方程式 $pV = RT$ を p について代入すると、

$$dQ = \frac{RT}{V} dV$$

となり、 R, T は一定であるから積分できる。体積を V_1 から V_2 まで膨張させるのに必要な熱量 ΔQ は、

$$\Delta Q = RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

となる。この熱量 ΔQ は、温度を下げずにゆっくり膨張させているから等温可逆膨張過程であり、 Q_r という。 Q_r を温度 T で割ると、実は、後述するエントロピーの変化そのものになる。エントロピーの変化とは、系に仕事をさせずに究極の状態に陥ったときに吸収した熱エネルギーを外気温 T で割った値と定義されている。

断熱膨張

断熱膨張では膨張に必要な熱の補充は行わない。従って $dQ = 0$ での第一法則は、

$$dU = -pdV$$

となる。理想気体の内部エネルギーは温度のみの関数であるから、 $dU = C_V dT$ (6.4) 式を利用して、上式は、

$$C_V dT = -pdV$$

となる。 $pV = RT$ を p に代入、変形すると、

$$\frac{C_V}{R} \frac{1}{T} dT = -\frac{1}{V} dV$$

となり, C_V, R は定数であるから積分できる.

マイヤーの関係式 (6.8) を変形して,

$$\frac{C_V}{R} = \frac{C_V}{C_p - C_V} = \frac{1}{\gamma - 1}.$$

上式を利用して, 与式は

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{\gamma - 1} \frac{dT}{T}$$

となり, 積分すると,

$$TV^{\gamma-1} = \text{Const.} \quad (6.9)$$

となる. つまり, ある状態 T_1, V_1 より, V_2 へ断熱膨張させると, そのときの温度 T_2 が計算でき, 状態 2 における圧力 P_2 は $pV = RT$ から求められる.

再度, $pV = RT$ の T を (6.9) 式に代入すると, 「ポアッソンの式」と呼ばれる

$$pV^\gamma = \text{Const.} \quad (6.10)$$

が導かれる. 上記と同様の考えで, ある状態 P_1, V_1 より, V_2 へ断熱膨張させると, そのときの圧力 P_2 が計算でき, 状態 2 における温度 T_2 は同様に $pV = RT$ から求められる.

(6) エントロピーの定義

エントロピーという概念は, 1865 年クラウジウスによって打ち出された, 系の熱による変化を表す状態変数の一つであり, 平たくいえば, 仕事として取り出すことのできない熱エネルギーだと思えばよい. さらに第二法則を適用すると, 元に戻すことのできない熱エネルギーとなる. エントロピーを統計力学では確率論的に「場合の数」で定義されるが, 古典熱力学では以下に示す定義を使用する.

ある注目する系のエントロピーの変化 dS とは, その系に対して可逆的 (reversible) に影響を及ぼす熱エネルギー dQ_r を系の温度 T で割った

(温度で規格化した) ものである. 式で表すと,

$$dS = \frac{dQ_r}{T} \quad (6.11)$$

と表示される. dQ_r は前述の等温可逆膨張の熱量である. 繰り返しになるが, いま容器に 2 気圧の気体を注入しておく, 外部に仕事をせずに何時かは容器が膨張して 1 気圧になる. そのときに外部から吸収した熱量を示す. 従ってエントロピーそのものの定義式をただ眺めるよりも

$$dQ_r = TdS \quad (6.12)$$

として, 系が仕事をせずにいたら失ってしまうであろうエネルギーの総量計算ができると認識すべきである.

(7) 理想気体のエントロピー計算

理想気体 1 モルが状態 1 から状態 2 へ変化へ可逆的に変化するときの ΔS を求める. 状態 1 および状態 2 の温度, 体積, 圧力をそれぞれ $T_1, V_1, P_1, T_2, V_2, P_2$ とする. また定容, 定圧モル比熱をそれぞれ C_V, C_p とする.

第一法則 $dU = dQ - dW$ に対して, $dU = C_V dT$, また $dW = pdV$, 状態方程式 $p = RT/V$ を整理すると,

$$C_V dT = dQ_r - \frac{RT}{V} dV$$

$$\therefore dQ_r = C_V dT + RT \frac{dV}{V}$$

となる. dQ_r をエントロピーの定義式に代入すると, C_V 一定とみなして,

$$\Delta S = S_2 - S_1 = C_V \int_1^2 \frac{dT}{T} + R \int_1^2 \frac{dV}{V}$$

となり, 容易に積分でき, 任意の T_2, V_2 に対して,

$$\Delta S = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (6.13)$$

となる. 一般形で表示すると,

$$S(T, V) = C_V \ln T + R \ln V + C \quad (6.14)$$

となる.

次は、温度と圧力の変化によるエントロピー計算を行う。(6.13) 式の V_1, V_2 に対して $pV = RT$ を適応させると、右式第 2 項は、

$$R \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln \frac{T_2 P_1}{T_1 P_2} = R \left(\ln \frac{T_2}{T_1} + \ln \frac{P_1}{P_2} \right)$$

となり、

$$\begin{aligned} \Delta S &= (C_V + R) \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{P_1}{P_2} \\ &= C_p \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{P_1}{P_2} \end{aligned} \quad (6.15)$$

と計算できる。一般形で表示すると、

$$S(T, P) = C_p \ln T - R \ln P + C \quad (6.16)$$

となる。

圧力と体積だけ、すなわち P_1, V_1, P_2, V_2 を指定した場合のエントロピー計算は $pV = RT$ で温度 T_1, T_2 がわかるから、断熱過程で目的の温度 T_2 に一致させ、次に等温過程で目的の体積に一致させる。ところが断熱変化では熱の出入りが無いからエントロピーの変化は生じない。従って、断熱変化で温度 T_2 になった状態での体積 V_3 を求め、そこから体積 V_2 に至る等温変化のエントロピーを求めればよい。従って、エントロピーの変化は式 (6.13) を利用して、

$$\Delta S = R \ln \frac{V_2}{V_3}$$

となり V_3 を断熱過程で求めればよい。

V_3, P_3 と V_2, P_2 は等温変化であるから、

$$V_3 P_3 = V_2 P_2$$

であり、 V_3, P_3 と V_1, P_1 は断熱変化であるから、 $\gamma = C_p / C_V$ を利用して、

$$V_3^\gamma P_3 = V_1^\gamma P_1$$

となる。 P_3 を消去して V_3 を求めると、

$$V_3^{\gamma-1} = \frac{P_1 V_1^\gamma}{P_2 V_2^\gamma}$$

対数変換すると、

$$(\gamma - 1) \ln V_3 = \ln P_1 V_1^\gamma - \ln P_2 V_2$$

この $\ln V_3$ をエントロピーの式に代入すれば良

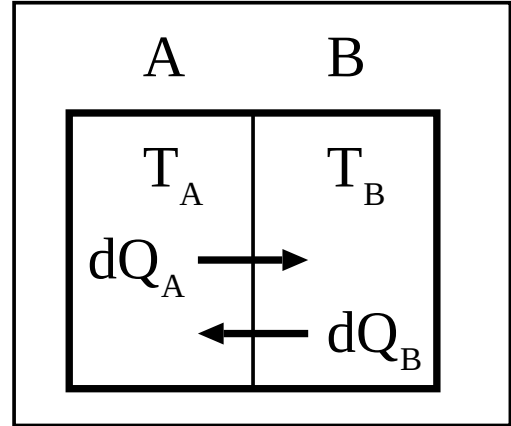


図 5 温度の異なる物質の熱伝導

温度遮蔽された空間内で高温物質 A と定温物質 B が接触し熱伝導する。最終的には両者とも同一温度になって平衡状態を保つ。

く、結果は

$$\Delta S = \frac{R}{\gamma - 1} (\ln P_2 V_2^\gamma - \ln P_1 V_3^\gamma) \quad (6.17)$$

となる。一般形で表示すると、

$$S(p, V) = \frac{R}{\gamma - 1} \ln p V^\gamma + C \quad (6.18)$$

となる。これで理想気体全ての $p-V$ 曲線上の状態 1 から状態 2 への可逆的变化のエントロピーの差が計算できる。

エントロピーの変化は始めと終りの状態だけで計算でき、途中の積分経路には関係しない。また状態方程式を用いれば温度、体積、圧力のうち 2 変数のみでよいこともわかる。

このエントロピーの定義をもちいて系の温度が均一になることや均一な圧力になることを述べる。

(8) 温度の均一化

いま図 5 に示すように高温物質 A (温度 T_A) が低温物質 B (温度 T_B) と接しており、外界から熱遮断されている状態を考える。温度とは物質の運動エネルギーを示しているから物質 A の熱 (運動エネルギー) は物質 B に伝導し、最終的に

両者共に均一の温度になることが予想される。この変化をエントロピーで表現する。

A の失う熱を dQ_A , B の得る熱を dQ_B とすると,

$$d_i S_A = \frac{dQ_A}{T_A}, \quad d_i S_B = \frac{dQ_B}{T_B}$$

添字 i は内部で起こった変化を示す。上式から系全体の变化は

$$d_i S = d_i S_A + d_i S_B = \frac{dQ_A}{T_A} + \frac{dQ_B}{T_B}$$

となる。外界とは熱遮断されているから,

$$dQ_A + dQ_B = 0$$

である。従って与式は $T_A \geq T_B$ を考えて,

$$d_i S = \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A} \right) dQ_B \geq 0$$

と書ける。系全体としてのエントロピーは増加する。 $d_i S = 0$ の場合は $T_A = T_B$ であって、熱平衡状態を示す。

例では物質 A と B との 2 物質を示したが、1 つの物質で部分的に温度差のある状態を考えてもよい。その中で熱移動が生じるからエントロピーの差が生じ、その差が無くなるまで熱移動が継続する。また例からもわかるように、熱力学は最終的な平衡状態は教えてくれるが、どの程度の早さで平衡状態になるかは問題にされない。

(9) 理想気体の自由膨張と断熱膨張

ジュールは図 6 に示すように、熱遮断された容器の中で一方のフラスコに空気、他方を真空にして連結部の活栓を開ける実験を行ったところ、気体の温度に変化を認めなかった。これを気体の自由膨張実験という。断熱状態だから $dQ = 0$ 、従って $dS = 0$ などと安易に考えてはいけな。い。フラスコ A の気体が B に拡散した状態はもはや元に戻らないからエントロピーは増大している。エントロピーの求める熱量は

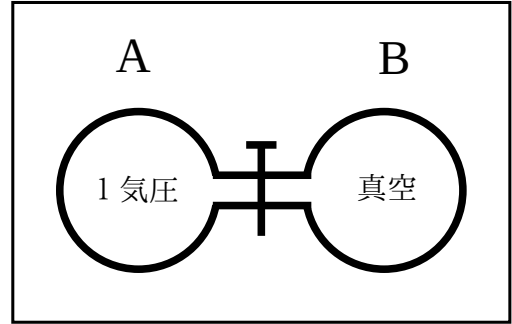


図 6 ジュールの真空フラスコ実験

温度遮蔽された空間内で 1 気圧の空気が入ったフラスコ A と真空フラスコ B を活栓で接続、活栓を開くと空気はフラスコ B に流入したが全体としての温度変化は認めなかった。

dQ ではなく、 dQ_r である。つまり、等温可逆膨張に必要な熱量を計算しなければならない。フラスコ A の気体は、活栓を開いて B に拡散しても温度変化が生じないことから $dU = 0$ である。従って、熱力学第一法則より

$$dU = dQ_r - dW_r = 0$$

$$\therefore dQ_r = dW_r$$

の関係となる。次に、理想気体 1 モルを体積 V_A から V_B に膨張する可逆の仕事量 W_r は

$$\int_A^B W_r dV = \int_A^B \frac{RT}{V} dV = RT \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$$\therefore \Delta S = \int_A^B dS = \int_A^B \frac{Q_r}{T} dV = R \ln \frac{V_B}{V_A}$$

となり、理想気体の自由膨張におけるエントロピーの増加量 ΔS が計算される。このような自由膨張は断熱非可逆変化とも呼ばれている。余談であるが、今日「全宇宙は膨張し、宇宙のエントロピーは増大する」といわれているが、望遠鏡で星の分光分析を行わなくても、ジュールの時代に既に結論できたことになる。

それでは断熱シリンダーに 2 気圧の気体を用意して、1 気圧の外界に対して断熱膨張させると、この場合は外界に対して pdV の仕事をさせているから、外部仕事に見合った内部エネルギー

が消費される．その結果，シリンダー内の気体温度は低下する．しかも外部より熱量 Q_r の供給を受けていないからエントロピーの変化 $\Delta S = 0$ であり，エントロピーは増加しない．

ところで，今まで圧力 p というものは単位面積あたりの壁を押す力と考えていたが，熱力学的にどのような存在であるかを考察する必要がある．再度熱力学第一法則の公式にエントロピーの定義を当てはめると，

$$dU = dQ_r - pdV$$

$$dQ_r = TdS$$

$$\therefore pdV = TdS - dU$$

両辺を dV で割ると，

$$p = \frac{TdS}{dV} - \frac{dU}{dV}$$

また等温変化だと考えると $dU = 0$ であるから，式の第 2 項は消えて，

$$p = T \frac{dS}{dV} > 0$$

となる．この式は体積が増すとエントロピーも増すことを意味している．つまり気体が圧力で壁を押している現象は，気体自身がそのエントロピーを増加させようと努力している現象であって，それが圧力として計測できると考える．

参考：エントロピーの感想

例 (8) での系の温度の均一化の問題，また例 (9) での真空への気体膨張の問題でもわかるようにエントロピーと呼ばれる熱量 (仕事量) の指標は系が均一化する場合には必ず増大する．何かエントロピーというものは無から有をつくり出す存在のように思えるが，統計力学の考え方ではエントロピーを「場合の数」という確率を示すに過ぎないから，自然は確率の高い方に落ち着くだけの話だと了解してもらいたい．

(10) 熱力学の第二法則

ある系の状態が変化すると，そこには必ずエ

ントロピーの変化が生じた後に，新しい状態に落ち着く．この時の系のエントロピー変化は減少することも増大することもあるが，その系を取り巻く系まで含めた全体の系のエントロピーは必ず増大する．

(11) エントロピーの要点

(a) エントロピーは状態量であって，系の現在の温度や圧力，体積などで定まり，現在の状態に至る道筋 (状態変化) には関係しない．

(b) 系の温度が変化するとき，その時々 reversible 熱量 dQ_r がわかれば，積分で計算する．

$$\Delta S = \int_A^B \frac{dQ_r}{T}$$

(c) 系の比熱 C がわかれば $dQ_r = CdT$ より，

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{CdT}{T}$$

(d) 系に熱の出入りがなくてもエントロピーは変化する (温度の均一化，自由膨張の例)．

(e) reversible 熱量 dQ_r は常に非 reversible 熱量 dQ_i より大きい．

(f) エントロピーは自発的に (自然と) 高くなり，平衡状態になれば $dS = 0$ となって極大値に達する．従って系のエントロピーは低いほど外部に仕事をさせることができ，価値が高い．(氷が溶けることによりビールが冷える．しかし氷とビールを含めた全体の系のエントロピーは上昇する．)

7. エントロピーの本質

これまでの要点をまとめると，内部エネルギーやエンタルピー，そして pV などのガスエネルギーそのものは状態量であって，それだけでは仕事には変換できない本質的な存在である．力学的に考えると質量みたいな存在 (束縛エネルギー) だと見ればよい．

一方、系が自発的に反応するとエントロピーが増大し、エントロピーの増大分 ΔS が仕事に反映できる可能性がある。2 気圧のシリンダーが外界 (1 気圧) に対してピストンを動かして仕事をする状況を検討してみよう。

図 7 は 0°C と -20°C の $p-V$ 曲線を示している。始めはシリンダー内に 0°C 、1 モル、2 気圧で存在する。外部環境を 1 気圧とするとシリンダーの断熱膨張と同時に温度低下がはじまり、また外部に対して仕事を行う (熱力学の第一法則)。外部仕事は全てシリンダー内へ熱エネルギーに変換して供給できるものとして、温度が -20°C になった時点でシリンダー内の気体を温める。体積を増加させなければ圧力のみが上昇し、再び 0°C の $p-V$ 曲線上に戻る。この熱フィードバック操作で、もし気体温度が 0°C 以上に上昇すれば、操作を繰り返すことにより高温の気体を生産することになるからエネルギー保存の法則に矛盾する。また、この操作を細かく行うことにより可逆膨張曲線が得られる。結局、可逆膨張曲線におけるエントロピーの増加とは、一旦仕事に変換して、その仕事を熱の形で理想気体にフィードバックして気体温度を初期の値に保つことである。また実際、能率 100 % の仕事熱変換などあり得ないから熱力学の第二法則が生まれることもわかる。

8. 自由エネルギー

ある系が自発的な変化により状態 I から状態 II に至るまでの過程で仕事をさせることができる。その仕事を W ($W > 0$) とする。自発的な変化とは系のエントロピー S が極大値にまで増大するという意味である。エントロピーは状態量であるから、当然 $S_I < S_{II}$ が考えられる。ここで、熱力学第一法則とエントロピーの定義よ

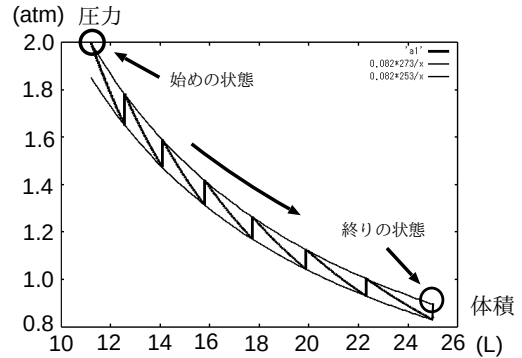


図 7 理想気体の可逆膨張

0°C 、2 気圧の気体を -20°C になるまでの断熱膨張する仕事を間歇的に熱変換させて気体の温度上昇としてフィードバックさせる。

り期待される仕事量を考える。第一法則は、

$$dU = dQ - dW$$

エントロピーは、

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

である。従って、

$$TdS \geq dU + dW$$

と書ける。

ここでヘルムホルツの自由エネルギーを、

$$F = U - TS \quad (8.1)$$

と定義して、両辺を微分すると、

$$dF = dU - (TdS + SdT)$$

となり、定温条件を設定すると ($dT = 0$)、

$$dF = dU - TdS.$$

従って熱力学の第一方程式は、

$$0 \geq dU - TdS + dW$$

$$0 \geq dF + dW$$

$$-dF \geq dW$$

$$\therefore dF \leq dW$$

となる。これは積分できて、

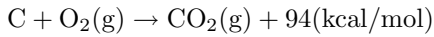
$$F_{II} - F_I \leq W.$$

一瞬ヒヤリとするが、良く見ると、

$$F_I - F_{II} \geq W$$

となって、状態 I から状態 II に至るまでに系はたしかに外部に仕事をする。

今、炭素の燃焼を例に考えると、



である。炭素は燃焼により熱エネルギーが発生する。この熱エネルギーで発電タービンを回し、電車を走らせれば仕事になる。一方気体である酸素 1 mol が炭酸ガス 1 mol に変換されるから気体としての仕事は行っていない。燃焼により気体が膨張するではないかと思っはいけない。等温になるまで待てばよい。

要約すると燃焼前、燃焼後の系はそれだけでは利用できない内部エネルギーとエントロピーを持っている。また、燃焼反応によりエントロピーは最大値に達する。従って、燃焼によるエントロピーの増加分から内部エネルギー量を引いたものが取り出せる最大仕事量だと考えればよい。式で表すと、

$$T\Delta S - \Delta U \geq W$$

となる。但し、 F の定義を考えると、 $F < 0$ であれば自発反応になると考えればよい。

次に、気体の体積変動が生じる場合を考える。外部仕事に pdV が加わることになるから定温、定圧条件で反応を考えなければならず、このために**ギブズの自由エネルギー G** が提案された。これは、

$$G = H - TS \quad (8.2)$$

と定義されている。 H はエンタルピーで $H = U + pV$ である。熱力学第一法則に気体膨張以外の仕事 W を追加して、

$$dQ = dU + pdV + dW = dH + dW$$

と表示すると、 $TdS \geq dQ$ より、

$$TdS \geq dH + dW$$

と書け、ヘルムホルツで使用した内部エネルギー dU がエンタルピー dH に変わるだけである。

一方、ギブズの自由エネルギー G を微分すると、

$$dG = dH - TdS - SdT$$

となり、定温条件から $dT = 0$ 、従って、

$$dG = dH - TdS \quad (8.3)$$

となる。後はヘルムホルツで計算した方法と同じようにすれば、最終的に

$$0 \geq dG + dW$$

が得られる。そして

$$G_I - G_{II} \geq W$$

となり、 $\Delta G < 0$ であれば自発反応が生じるという結果が得られる。つまりギブズの自由エネルギーの差、 ΔG が負の値を示す間、系は外向きに仕事をさせることができる。但し、定温、定圧条件であることを忘れてはならない。

理想気体の自由エネルギー

0 °C、2 気圧、1 モルの理想気体は 1 気圧の外界に対して自発的に膨張する。そのときのギブズの自由エネルギーの変化を計算する。定義 (8.2) より、

$$G_1 = H_1 - TS_1$$

$$G_2 = H_2 - TS_2$$

$$\therefore \Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

と書ける。ところが理想気体のエンタルピーは温度だけが関係し、圧力、体積には関係しない。つまり $H(T)$ の関数で、定温条件より $\Delta H = 0$ となる。従って、与式は

$$\Delta G = -T\Delta S$$

となる。エントロピーの変化は、理想気体のエントロピーの変化式 (6.15) を定温条件で適応すると、

$$\Delta G = -T\Delta S = -RT \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (8.4)$$

となる。 P_1 に 2 気圧、 P_2 に 1 気圧を代入すると、明らかに ΔG は負の値を示し、自発的な気

体膨張が発生する。

別法は、 $dG = dH - TdS$ (8.3) に後述する
 $dH = TdS + Vdp$ (9.3) 式を代入すると、

$$dG = Vdp$$

となり、 $V = RT/p$ を代入して積分すると、

$$G = RT \int \frac{dp}{p} = RT \ln p + C \quad (8.5)$$

となる。圧力 1 気圧のときの C を G° とおくと、
 任意の圧力 p でのギブズの自由エネルギー G は、

$$G = G^\circ + RT \ln p \quad (8.6)$$

と書ける。始めは 2 気圧、終りは 1 気圧である
 から、

$$\text{始め: } G_1 = G^\circ + RT \ln 2$$

$$\text{終り: } G_2 = G^\circ + RT \ln 1$$

従って、

$\Delta G = G^\circ + RT \ln 1 - (G^\circ + RT \ln 2) = -RT \ln 2$
 となり、負の値を得る。なお、(8.5) や (8.6) 式の
 表示形式は化学ポテンシャルの項で何度も表示
 されるから、よく理解して記憶してもらいたい。

そもそもエントロピーそのものが実態のない
 存在であるのに、それが定義に組み込まれてい
 るギブズの自由エネルギーとは何であろうか。そ
 こで図 8 に注目してエントロピーと自由エネル
 ギーとの関係を理解して頂きたい。図 8 A はシ
 リンダーとピストンがあり、中に 2 気圧で 1 の
 容積の気体が封入されている。外気は 1 気圧で
 あるから自発的膨張が生じる。それをギブズの
 自由エネルギー ΔG で膨張を抑制している。そ
 の抑制を外すと、図 8 B に示すように等温可逆膨
 張して、最終的にはシリンダー内の気体は 1 気
 圧で体積は 2 倍になる。ボイルの法則が成立す
 ると共に、シリンダー内の気体は Q_r だけの熱を
 外部から吸収してエントロピーが増加する。ピ
 ストンは右に移動するから、そこに何か仕事に

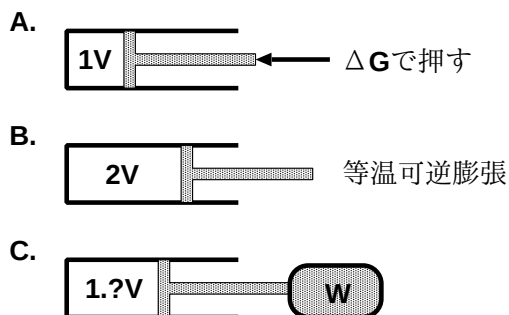


図 8 ギブズの自由エネルギー

A. 2 気圧の気体をピストンに封入するため
 には ΔG だけの力で外部から抑制しなけれ
 ばならない。B. 抑制を取り外すと、ボイル
 の法則により体積は 2 倍に膨張する。C. ピ
 ストンが右に移動するから、 W の負荷をピ
 ストンに加えて仕事をさせると体積は 2 倍ま
 では膨張しない。

変換できる装置を用意すれば気体膨張で仕事を
 行うことができる。しかし、実際は図 8 C のよ
 うに仕事を行わせるとピストンの移動は容積が
 2 倍にまで膨張しない。もし 2 倍に膨張させるに
 は、気体の温度を下げなければならない¹。前述
 の図 7 で述べた現象と同じことが現象としてあ
 らわれている。つまりエントロピーとは、系に何
 も外部に仕事をさせなかった状態において、系
 が最大どこまで変化するかを述べており、その
 仕事量を $T\Delta S$ または Q_r だとすると内部エネル
 ギー (エンタルピー) の分まで多く見積ることにな
 る。そこで最大変化できる可能性のある仕事
 量をギブズの自由エネルギー ΔG としたと考
 えるのである。 ΔG は自発的变化を行う系をその
 ままの状態に維持させるのに必要なエネルギー
 と考えると、次に述べるポテンシャルの概念が
 よくわかる。

9. 熱力学の基本式とパラメータ

ボイルシャルルの法則に端を発する理想気体
 の状態方程式 $pV = nRT$ は大変利用範囲が広

¹ 本稿では説明していないがカルノーサイクルを思い出してほしい。

い。しかも p, V, T の内、2 変数のみ指定すれば残りの変数は決定される。これまで説明してきた U, S, H, F, G などの熱力学パラメータはすべて 2 変数の関数で表示される。化学ポテンシャル μ を理解し、浸透圧、Nernst の方程式、平衡反応、その他諸々の有名な公式にたどり着くためには以下に示す公式を何度も自らの手で演算して確認してほしい。

まずは熱力学の第一法則 (6.1) である。

$$dU = dQ - pdV .$$

そして、可逆過程でエントロピーの定義を適用させる。

$$dQ = TdS . \quad (9.1)$$

この両者から、

$$dU = TdS - pdV \quad (9.2)$$

が生まれる。これを熱力学の基本式とよぶ。これは、関数 U を独立変数 S と V で示しているから、 $U(S, V)$ の関数でもある。一方 S, V の関数である U を全微分すると、

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S dV$$

とも書ける。従って、互いの変数の係数と比較すると

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad p = - \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S$$

となる。同様にエンタルピー H ,

$$H = U + pV$$

を全微分すると、

$$dH = dU + pdV + Vdp .$$

$dU = TdS - pdV$ を代入すると、

$$dH = TdS + Vdp \quad (9.3)$$

となって、エンタルピーは $H(S, p)$ と 2 変数で表せる。

ヘルムホルツの自由エネルギー F については、

$$F = U - TS .$$

同様に全微分して、 dU を代入すると、

$$dF = -SdT - pdV$$

となり、 $F(T, V)$ の関数である。上式を温度一定の条件を加えると、 $dT = 0$ より

$$p = - \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_T \quad (9.4)$$

となる。この式は統計力学的に理想気体の状態方程式を導くときに使用する。

ギブズの自由エネルギー G については、

$$G = H - TS = U + pV - TS$$

であるから、全微分と dU の代入により、

$$dG = -SdT + Vdp \quad (9.5)$$

となり、 $G(T, p)$ と 2 変数の関数で表すことができる。 dU で行った全微分と同じ操作を dG で演算すると、

$$-S = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p, \quad V = \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_T \quad (9.6)$$

が得られる。これらの 3 式はポテンシャル計算に利用する。

もう一つ G から H を計算するギブズーヘルムホルツの式がある。この式は氷点降下や沸点上昇の計算で利用するからここに示しておく。 $G = H - TS$ を H の関数に移項して先ほど求めた S を代入すると、

$$H = G + TS = G - T \frac{\partial G}{\partial T}$$

と書ける。一方、 G/T を T で偏微分すると、

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{G}{T} \right) = \frac{TG' - G}{T^2}$$

となり、分子の項を上記の H に代入すると、

$$H = -T^2 \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{G}{T} \right) \quad (9.7)$$

となる。これでようやく化学ポテンシャルへの準備が整った。

10. ポテンシャルの意味

日常用語で「ポテンシャルが高い，低い」とよく言われるが，ポテンシャルとエネルギーとの関係を正確に知ることは，次項で述べる化学ポテンシャルを理解する上で大変重要である。

化学ポテンシャル μ とは 1 モルの粒子にかかる総力 f_N がある関数 μ の場所的勾配として表されるような関数

$$f_N = -\frac{d\mu}{dx}$$

として定義されている。高さがポテンシャルになる山を想像し，その斜面の勾配が粒子にあたる力となる状態が想像できる。上式は，

$$d\mu = f_N dx$$

であるから，両辺を積分すると，

$$\mu = -\int f_N dx$$

となる。高校の物理で，質量を m の物質は $-mg$ の重力 (f_N) を受けるから，高さを x として積分すると，

$$\mu = mgx$$

となり，もし質量 m が 1 モルであるなら静止の位置エネルギーが化学ポテンシャルに相当する。

イオン価 z のイオン 1 モルは zF クーロンの電荷をもち，電場 E の環境では $f_N = EzF$ のクーロン力を受ける。電場 E は電位差を ψ とすると，

$$E = \frac{d\psi}{dx}$$

より，イオンによる化学ポテンシャルは，

$$\mu = zF\psi$$

となる。この式は電位差 (電圧) を求めるだけで化学ポテンシャルがわかるから便利である。また，電位差と化学ポテンシャルを混同してはならない。

静水圧も化学ポテンシャルになりうる。面積 ΔS ，距離 Δx に対して， ΔP の圧力差があると，左右の静水圧差は，

$$\begin{aligned} f_{hydro} &= P\Delta S - (P + \Delta P)\Delta S \\ &= -\Delta P\Delta S \\ &= -\frac{\Delta P\Delta S}{\Delta S\Delta x} \times \Delta S\Delta x \\ &= -\frac{\Delta P}{\Delta x} \times \text{粒子の体積} \end{aligned}$$

となる。従って 1 モルの粒子にかかる静水圧は

$$f_{n,hydro} = -\frac{dP}{dx}\bar{V}$$

となる。ただし $\bar{V}$ は 1 モルのモル体積である。従って静水圧の化学ポテンシャルは

$$\mu = \bar{V}P$$

となる。この考え方は浸透圧や沸点上昇のポテンシャル計算に利用する。

再度重力ポテンシャルに戻るが，重力であれば位置ポテンシャル μ は高さ x を測定して既知の重力の加速度 g と掛け合わせれば μ は計算できる。しかし月での測定を考えると，月の重力の加速度 g を知らなければ計算できない。そこでの μ の求め方は，実際に既知の質量 m ， N 個の分子で構成される物体を既知の高さ x まで持ち上げ，落下実験で衝突した物体の破損度から E_s を求め，そこから μ を計算することになる。すなわち，

$$\mu = \frac{E_s}{N} = \frac{\partial E_s}{\partial N}$$

である。上式を熱力学用語に変換すると， E_s はギブズの自由エネルギー G に対応し，質量 m は分子数 N に対応し，

$$\mu = \frac{\partial G}{\partial N}$$

となってポテンシャルの定義が生まれる。古典力学では内部エネルギーという概念はなく，静止

の位置エネルギーは可逆的に運動エネルギーになる。比喩的な表現になるが、位置エネルギーをジュール(仕事量)と考えて、可逆的な熱量 Q_r に対応できる。また同時に Q_r は符号は異なるが、自由エネルギー G に対応できる。

理想気体に注目すると、1 モル 2 気圧の気体はいつかは等温、1 気圧で体積を 2 倍に膨張させて落ち着こうとする。この落ち着き先とのエントロピーの差は (6.13) 式、または (6.15) 式を用いて $R \ln 2$ になり、確かにエントロピーの増大を認め、またギブズの自由エネルギーも (8.4) 式より $-RT \ln 2$ となり、自発的膨張を行う。この自発的膨張を阻止するためにはそれに対抗するエネルギーを 2 気圧の系に加えてエントロピーの増大を外部から下げなければならない。そのためのエネルギーは $-G$ である。その結果、全体の系は $\Delta G = (-G) - (-G) = 0$ となり、平衡状態が維持される。従って、圧力 p の理想気体 1 モルの化学ポテンシャルは

$$\mu = RT \ln p$$

となる。また希薄溶液は理想気体と同じ状態方程式が利用できるから、モル濃度 c の化学ポテンシャルは

$$\mu = RT \ln c$$

となる。化学ポテンシャル μ とは一つの粒子、分子、物体などが放置しておけば、重力、温度、圧力、電気作用、化学反応など様々な作用により最終到達点、すなわち自由エネルギーの変化率 (ΔG) を 0 にしようとする。そのエネルギー落差がポテンシャルだと思えばよい。次項では一般化された多成分についてのポテンシャルについて言及する。

11. 化学ポテンシャル計算法

これまでの議論では系の成分に変化はなく、分

子の数も変化しないと仮定し、いわゆる閉じた系について取り扱ってきたが、化学反応などでは分子数がダイナミックに変化する。これを開いた系とよぶ。開いた系については p, V, T の内、事実上 2 つの変数に加えて、複数分子の種類と量 (モル) の変数を考慮しなければならない。従ってギブズの自由エネルギー G は、

$$G = G(T, p, n_1, n_2, \dots, n_S)$$

で表される。全微分を G に適応すると、

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_{p,n} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_{T,n} dp + \sum_{i=1}^s \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,p,n_j} dn_i$$

となり、

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,p,n_j}$$

とにおいて、(9.6) 式に示す偏微分の項を代入すると、

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_{i=1}^s \mu_i dn_i \quad (11.1)$$

となり、ここで定温、定圧条件を設定すると、

$$dG = \sum_{i=1}^s \mu_i dn_i$$

となる。積分すると、

$$G = \sum_{i=1}^s \mu_i n_i \quad (11.2)$$

をえる。つまり、 μ_i とは系に物質 i の 1 モル当りの追加に必要な自由エネルギーを意味し、 μ_i を化学ポテンシャルとよぶ。 μ_i は物質 i の状態によって値が異なる。物質 i の液体状態が気体になる、イオンになるなど i を取り巻く環境の違いにより化学ポテンシャルの値がそれぞれ異なる。そして、ギブズの自由エネルギーとは、それぞれの物質が本来持っている化学ポテンシャルとモル数との積の和で計算される。

また平衡状態とは全体の自由エネルギー G が一定で、それは $dG = 0$ であることと対応する。従って等温、等圧下の G を全微分すると、

$$dG = \sum_{i=1}^s \mu_i dn_i + \sum_{i=1}^s n_i d\mu_i = 0$$

となる。 $\sum_{i=1}^s \mu_i dn_i = 0$ であったから、当然、

$$\sum_{i=1}^s n_i d\mu_i = 0$$

となり、一定温度、一定圧力での平衡状態でのそれぞれのポテンシャルの関係を示すことになる。

参考：ヘルムホルツの自由エネルギーから求める化学ポテンシャル。

通常化学ポテンシャルはギブズの自由エネルギーから導く。その理由は温度と圧力が一定であれば、体積 V 、自由エネルギー G 、内部エネルギー U がモル数 n に比例し、モル当りで標準化できるためである。一方体積一定の条件の系で新たに n モルの分子を追加すると、温度、圧力が変化する。そこで生じた熱を外部に放熱させて同一温度にすると、内部エネルギー U はもうモル数に比例することはない。しかし、ヘルムホルツの自由エネルギーは統計力学ではエンタルピーより扱いやすいこともあるので、そこから生まれる化学ポテンシャルを導く。

$$F = G - pV$$

が基本式で、全微分を行うと、

$$dF = dG - p dV - V dp = -S dT - p dV + \mu dn$$

となる。これから定圧定容条件をもちいて、

$$\mu = \left(\frac{\partial F}{\partial n} \right)_{T,V}$$

となる。つまり μ は温度、体積一定での分子 1 モル増加に必要なヘルムホルツの自由エネルギーとなる。内部エネルギー U は、

$$U = F + TS$$

より

$$dU = T dS - p dV + \mu dn$$

となり、

$$\mu = \left(\frac{\partial U}{\partial n} \right)_{S,V}$$

となる。同様の方法で化学ポテンシャルは計算でき、

$$\begin{aligned} \mu &= \left(\frac{\partial G}{\partial n} \right)_{T,p} = \left(\frac{\partial F}{\partial n} \right)_{T,V} = \left(\frac{\partial U}{\partial n} \right)_{S,V} \\ &= \left(\frac{\partial H}{\partial n} \right)_{S,p} = -T \left(\frac{\partial S}{\partial n} \right)_{U,V} \end{aligned}$$

のどれでも等しい。

以下に述べる最も単純な 2 個の成分で構成される系において平衡状態が維持されるなら、当然両者の化学ポテンシャルが等しい、すなわち $\mu_1 = \mu_2$ となる。すでに一般形で話を終えたが、復習の意味を込めて再度記述する。

例えば水と水蒸気が温度 T 、圧力 p で平衡関係を保っている。水のポテンシャルを μ_l 、水蒸気のポテンシャルを μ_g とし、水のモル数を n_l 、水蒸気のモル数を n_g として全体のモル数 $n = n_l + n_g$ は変化しない。従って、一方が増えたと一方が減るので、

$$dn_l + dn_g = 0$$

が成り立つ。また、ギブズの自由エネルギー G は $G(T, p, n_l, n_g)$ の関数になる。 dG を求めると、

$$\begin{aligned} dG &= \frac{\partial G}{\partial T} dT + \frac{\partial G}{\partial p} dp + \frac{\partial G}{\partial n_l} dn_l + \frac{\partial G}{\partial n_g} dn_g \\ &= -S dT + V dp + \mu_l dn_l + \mu_g dn_g \end{aligned}$$

である。温度、圧力一定での平衡状態は $dG = 0$ より、

$$\mu_l dn_l + \mu_g dn_g = 0$$

また、 $dn_l = -dn_g$ を代入すると、

$$(\mu_l - \mu_g) dn_g = 0$$

となり、平衡状態での両者の化学ポテンシャルは等しくなくてはならない。

12. 蒸発と気化熱

揮発性麻酔薬の蒸気圧をノモグラムから計算しながら麻酔を施行していた時代では常識であった**クラペイロン-クラウジウスの公式**を導出する。水と水蒸気は単一成分が2相で共存しており、平衡状態では両相の化学ポテンシャルが等しいと考えられる。そこで水のポテンシャルを μ_l 、水蒸気のポテンシャルを μ_g とすると、

$$\mu_l(T, p) = \mu_g(T, p)$$

となる。上式を全微分すると、

$$\frac{\partial \mu_l}{\partial T} dT + \frac{\partial \mu_l}{\partial p} dp = \frac{\partial \mu_g}{\partial T} dT + \frac{\partial \mu_g}{\partial p} dp$$

となる。この式を T で微分すると、

$$\frac{\partial \mu_l}{\partial T} + \frac{\partial \mu_l}{\partial p} \frac{dp}{dT} = \frac{\partial \mu_g}{\partial T} + \frac{\partial \mu_g}{\partial p} \frac{dp}{dT}$$

となる。 μ は物質モルあたりの G を示しているから、モル当りのエントロピーを s 、モル当りの体積を v とすると、(9.6) 式より、

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_{p,n} = -s, \quad \left(\frac{\partial \mu}{\partial p} \right)_{T,n} = v$$

を代入して、

$$-s_l + v_l \frac{dp}{dT} = -s_g + v_g \frac{dp}{dT}$$

整理すると、

$$s_g - s_l = (v_g - v_l) \frac{dp}{dT}$$

となる。モルあたりの水の気化熱を L とすると、

$$\Delta s = s_g - s_l = \frac{L}{T}$$

であり、体積変化を Δv とすると、

$$\Delta v = v_g - v_l$$

であるから、

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T \Delta v}$$

と**クラペイロン-クラウジウスの公式**が導出される。この公式は温度変化に対する蒸気圧の増加率を示しており、微分方程式を解くことによ

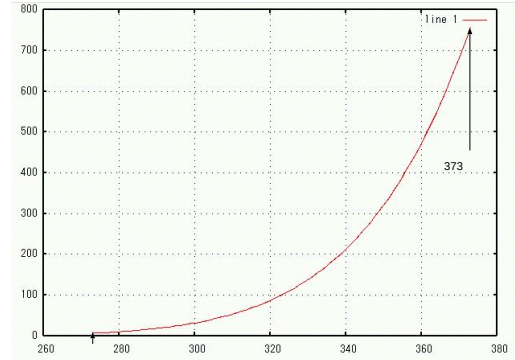


図 9 水の飽和蒸気圧

クラペイロン-クラウジウスの公式で求めた飽和蒸気圧。37 °C で 52.9 mmHg と実測値 46.6 mmHg に近い値を得る。

り全ての温度に対する飽和蒸気圧を求めることができる。

水の沸点は 373 °K, 気化熱 $L = 540 \text{ cal/g}$ を利用する, また Δv について水の体積を無視し, 理想気体の状態方程式から得られる体積 v を利用すると、

$$\frac{dp}{dT} = \frac{Lp}{RT^2}, \quad \therefore \frac{dp}{p} = \frac{L}{R} \frac{dT}{T^2}$$

と変数分離型の微分方程式となり、

$$\log p = -\frac{L}{R} \frac{1}{T} + \text{Const}$$

となり、指数表示で

$$p = Ce^{-\frac{L}{RT}}$$

となる。計算結果を図 9 に示す。実際は温度が下がるほど L 値は増加し 37 °C では気化熱は 572 cal/g となる。また、水蒸気の体積も理想気体より 1.3% ほど少ない値をしめすが、37 °C の飽和水蒸気圧が 52.9 mmHg と実測値 46.6 mmHg に近い値が算出できる。

肺胞内酸素分圧を計算するとき、大気圧からまず飽和水蒸気圧を引くことから始まる。大気圧が低くても高くても飽和水蒸気圧には影響をおよぼさない。例えば、エベレスト山頂でも 46.6 mmHg である。その理由は単に液相の温度のみが関係

するだけであることを学んだが、その根本は液相，気相の化学ポテンシャルが等しいという原理から導出される。

13. 平衡と自由エネルギー

化学ポテンシャルの話から少し後戻りするが、理想気体の自由エネルギーを考える。(9.5)式

$$dG = -SdT + Vdp$$

において、定温下での自由エネルギーを求めると、

$$G = \int dG = \int Vdp$$

である。理想気体の状態式 $V = RT/p$ を与式に代入すると、

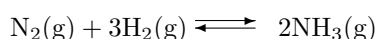
$$G = RT \int \frac{1}{p} dp = RT \ln p + C$$

従って、一定温度 T で理想気体 1 モル、1 気圧を標準状態として、その自由エネルギーを G° とすると、任意の圧力 p での自由エネルギー G は、

$$G = G^\circ + RT \ln p \text{ (理想気体 1mol)}$$

となる。

ここでガス反応で有名なアンモニアの合成反応を例にして、平衡反応と自由エネルギーとの関係を考える。



質量作用の法則をもちいて、平衡定数 K_p は、

$$K_p = \frac{[p_{\text{NH}_3}]^2}{[p_{\text{N}_2}][p_{\text{H}_2}]^3}$$

で表される。 $p_{\text{NH}_3}, p_{\text{N}_2}, p_{\text{H}_2}$ は平衡時における各気体分圧である。もし各成分が理想気体であるなら、モルあたりの各自由エネルギーは、

$$G_{\text{NH}_3} = G^\circ_{\text{NH}_3} + RT \ln p_{\text{NH}_3}$$

$$G_{\text{N}_2} = G^\circ_{\text{N}_2} + RT \ln p_{\text{N}_2}$$

$$G_{\text{H}_2} = G^\circ_{\text{H}_2} + RT \ln p_{\text{H}_2}$$

で表される。

ここで、 N_2 が dn だけ右へ反応すると、 H_2 は

$3dn$ が対応し、 NH_3 が $2dn$ 生成される。従って系全体の自由エネルギー変化は、

$$dG = 2dnG_{\text{NH}_3} - (dnG_{\text{N}_2} + 3dnG_{\text{H}_2})$$

$$= \{2G_{\text{NH}_3} - (G_{\text{N}_2} + 3G_{\text{H}_2})\}dn$$

となる。平衡状態では $dG = 0$ であるから、

$$2G_{\text{NH}_3} = G_{\text{N}_2} + 3G_{\text{H}_2}$$

の関係がなり立つ。ここで各成分のモル当り自由エネルギーを代入すると、

$$2(G^\circ_{\text{NH}_3} + RT \ln p_{\text{NH}_3}) = (G^\circ_{\text{N}_2} + RT \ln p_{\text{N}_2}) + 3(G^\circ_{\text{H}_2} + RT \ln p_{\text{H}_2})$$

また、 $\Delta G^\circ = 2G^\circ_{\text{NH}_3} - (G^\circ_{\text{N}_2} + 3G^\circ_{\text{H}_2})$ とおくと、

$$\Delta G^\circ = -RT \{2 \ln p_{\text{NH}_3} - (\ln p_{\text{N}_2} + 3 \ln p_{\text{H}_2})\}$$

$$= -RT \ln \frac{[p_{\text{NH}_3}]^2}{[p_{\text{N}_2}][p_{\text{H}_2}]^3}$$

$$= -RT \ln K_p$$

となり、各成分ガスが理想気体と仮定すると、平衡定数は実際に反応させなくても、各成分の標準自由エネルギーの計算だけで求めることができる。

上記の理論に物質移動を伴う化学ポテンシャルの概念が含まれていない。実は $G = \sum \mu_i n_i$ の関係があり、1 モルの化学ポテンシャルを G で代用して計算していたのである。そこで再度化学ポテンシャルをもちいて平衡反応を記述する。化学ポテンシャルは、

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G(T, p, n_j)}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j}$$

と定義していたから、全微分 $d\mu_i$ は (11.1) 式を n_i で偏微分することになる。従って、

$$d\mu_i = -\bar{S}_i dT + \bar{V}_i dp + \sum_j \mu_{ij} dx_j$$

但し、

$$\bar{S}_i = \left(\frac{\partial S}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j}, \bar{V}_i = \left(\frac{\partial V}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j}$$

であり, x_j はモル分率, μ_{ij} は

$$\mu_{ij} = \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right)_{T, p, x_i} = \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{T, p}$$

である. 従って温度と組成が一定であれば, $dT = 0$, $dx_i = 0$ より

$$d\mu_i = \bar{V}_i dp$$

となる. 今は全ての成分 i は理想気体と考えているので, 状態方程式より, 全圧 p は,

$$p = \left(\sum_{i=1}^r n_i \right) \frac{RT}{V}.$$

また, 成分 i の分圧 p_i は,

$$p_i = \frac{n_i RT}{V} = p x_i$$

である. 上式の対数をとると,

$$\ln p_i = \ln p + \ln x_i$$

となる. x_i は平衡状態を考えているから, 定数と考えて微分すると,

$$\frac{dp_i}{p_i} = \frac{dp}{p}$$

の関係がなりたつ. また成分 i の体積 $\bar{V}_i$ は,

$$\bar{V}_i = \frac{RT}{p}$$

で全て等しい. 従って,

$$d\mu_i = RT \frac{dp_i}{p_i}$$

積分すると,

$$\mu_i = \mu_i^* + RT \ln p_i \quad (13.1)$$

となり, ギブズの自由エネルギー G の式を μ に変更しただけの式が求められた. 但し, μ_i^* は 25°C などの標準化学ポテンシャルを示す. これで各組成の分圧 p_i は化学ポテンシャルで表せるから先程示した自由エネルギー G をもちいた理論で μ_i^* を利用して平衡定数まで説明ができる.

また, 各組成が液相と気相とに分布し平衡状態を保つと考えると液相での化学ポテンシャルと気相の化学ポテンシャルは等しいため, 溶質

i の濃度を x_i としてその化学ポテンシャル μ_i は気相と同じ方程式が使用でき,

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln x_i \quad (13.2)$$

となる.

非理想系気体の化学ポテンシャルは分圧 p_i の代わりに f_i を使用し, f_i はフィガシチーという. 当然 $f_i < p_i$ で

$$\gamma_f = \frac{f_i}{p_i}$$

をフガシチー係数という.

非理想系溶液の化学ポテンシャルは濃度 x_i の代わりに a_i を使用し, a_i は活量という. 当然 $a_i < x_i$ で

$$\gamma_f = \frac{a_i}{x_i}$$

を活量係数という.

それでは気化しない溶質の化学ポテンシャルはどうかというと, やはり気相と同じ方程式が使用でき, 無限小の溶質が気体になって平衡していると考ええる. ここまで拡大解釈して良いものかと疑問に思うが, 現在まで実験事実を矛盾無く説明できているから, 熱力学の第二法則と同じく, 経験的真実として認めている.

14. 沸点上昇と氷点降下

化学ポテンシャルの概念は沸点上昇や氷点降下にも利用できる.

いま氷点降下を例に考える. 溶媒 A , 溶質 B , 添字 (S) は個体, 添字 (L) は液体として, 個体と液体が共存すると, 各相の化学ポテンシャルは (13.2) 式より

$$\mu_A^\circ(S) = \mu_A^\circ(L) + RT \ln x_A = \mu_A(L)$$

で表される. 式を変形して,

$$\ln x_A = \frac{1}{R} \frac{\mu_A^\circ(S) - \mu_A^\circ(L)}{T}$$

を得る. 両辺を温度で微分すると,

$$\frac{d}{dT} \ln x_A = \frac{1}{R} \frac{d}{dT} \left(\frac{\mu_A^\circ(S) - \mu_A^\circ(L)}{T} \right)$$

$\mu_A^\circ(S)$ と $\mu_A^\circ(L)$ は純固体と純液体の 1 モルあたりの標準ギブズ自由エネルギーである。またギブズ-ヘルムホルツの式 (9.7) を参照すると、上式右辺は、

$$\text{右辺} = -\frac{H_A^\circ(S) - H_A^\circ(L)}{T^2} = \frac{\Delta H_f^\circ}{T^2}.$$

$H_A^\circ(S)$ および $H_A^\circ(L)$ は固体および液体の標準エンタルピー、また H_f° は固体の融解熱 (潜熱) である。従って、与式を積分すると、

$$\ln x_A = \frac{\Delta H_f^\circ}{R} \int_{T_f^\circ}^{T_f} \frac{dT}{T^2} = \frac{\Delta H_f^\circ}{R} \left(\frac{1}{T_f^\circ} - \frac{1}{T_f} \right)$$

となる。溶媒のモル分率を 1、溶質のモル分率を x_B として十分に希釈溶液だと考えると

$$\ln x_A = \ln(1 - x_B) \simeq -x_B$$

と近似でき、このとき $T_f < T_f^\circ$ 、かつ $T_f \simeq T_f^\circ$ なので、

$$\frac{1}{T_f^\circ} - \frac{1}{T_f} \simeq -\frac{\Delta T_f}{(T_f^\circ)^2}$$

これらの近似式を与式に代入すると、

$$\Delta T_f \simeq \frac{R(T_f^\circ)^2}{\Delta H_f^\circ} x_B$$

となり、氷点降下の温度を測定することにより溶質のモル分率がわかる。沸点上昇についても同様の演算で議論できる。要は、溶質が溶媒に溶けるという意味は溶媒のモル分率が薄くなることと同等である。

15. 浸透圧

溶媒は通すが溶質を通さない膜 (理想半透膜) の一方に溶媒、他方に溶液を置くと、溶媒は溶液相に移動する。その移動を制止する外圧を浸透圧という。化学ポテンシャルは分子 1 個づつに作用する静止の位置エネルギーから生まれた概念であったことを思い出してほしい。また、そ

れは外部の気圧もポテンシャルとして作用する。従って、系に外圧を含めた化学ポテンシャルを $\bar{\mu}$ 、溶媒相を I 、溶液相を II とし、活量を a とすると、

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_A^I &= \mu_A^\circ + RT \ln a_A^I + p^I \bar{V}_A^I \\ &= \mu_A^\circ + RT \ln a_A^{II} + p^{II} \bar{V}_A^{II} = \bar{\mu}_A^{II} \end{aligned}$$

となる。溶媒の標準化学ポテンシャルは一致、また各相での溶媒の部分分子容 (モル濃度) $\bar{V}_A$ はほぼ等しい。すなわち、

$$\bar{V}_A^I \simeq \bar{V}_A^{II} = \bar{V}_A$$

であるから、

$$p^{II} - p^I = \frac{RT}{\bar{V}_A} \ln \frac{a_A^I}{a_A^{II}}$$

となる。純溶媒では活量 $a_A^I = 1$ であり、浸透圧を Π とすると、

$$\Pi = p^{II} - p^I = -\frac{RT}{\bar{V}_A} \ln a_A^{II}$$

となる。溶質のモル分率を x_B とすると、

$$\Pi = -\frac{RT}{\bar{V}_A} \ln(1 - x_B)$$

となり、溶液濃度が薄いとき ($x_B \ll 1$)、

$$\Pi = \frac{RT}{\bar{V}_A} x_B$$

となり、溶液の濃度と浸透圧が比例する。浸透圧の例も溶質が溶媒に溶けるという意味は溶媒のモル分率が薄くなることと同等に扱われている。細胞膜はイオン、グルコースなど非脂溶性部室は通過しないため、細胞容積に浸透圧は重要な役割をはたす。毛細血管壁はタンパクなど高分子は通過しないから膠質浸透圧が循環維持に重要な役割をはたす。

16. 分配平衡と分配係数

水と油はまじりあわないが溶質の中には水溶性と脂溶性の両者を兼ね備えるものがある。麻酔薬はその代表的な存在で分配係数は良く知られて

いる。化学ポテンシャルで分配平衡は、 $\mu_I^\circ, \mu_{II}^\circ$ をそれぞれの相における標準化学ポテンシャルとし、活量を a とすると、

$$\mu_I^\circ + RT \ln a^I = \mu_{II}^\circ + RT \ln a^{II}$$

で表せる。従って分配係数 K は、

$$K = \exp \frac{\mu_I^\circ - \mu_{II}^\circ}{RT} = \frac{a^{II}}{a^I}$$

となり、各相の濃度を測定すれば分配係数より標準化学ポテンシャルが求められる。

17. 沈降平衡

メスシリンダーに色の付いた粒子の溶液を流し込むと、当初は均一な濃度であるが次第に上方の粒子が沈降し、下に行くほど濃度が濃くなって一定の濃度勾配で平衡に達する。この濃度勾配は重力による化学ポテンシャルで表すことができる。粒子は溶媒による浮力を考慮しなければならないから、溶媒の密度を ρ 、分子の体積を $\bar{v}$ 、分子量を m 、アボガドロ数を N とすると、溶媒中での見かけの重さ M は、

$$M = Nm(1 - \rho\bar{v})$$

で表される。従って重力の加速度を g 、基準の高さを z° 、任意の高さを z とすると重力ポテンシャルは Mgz で表せ、

$\mu_i^\circ + RT \ln x_i + Mgz = \mu_i^\circ + RT \ln x_i^\circ + Mgz^\circ$ が成り立つ。但し、 x_i° は基準点のモル分率、 x_i は高さ z のモル分率で、モル分率は濃度と同じと考えてよい。与式をよく見ると、重力ポテンシャルが増えるほど濃度が下がっている。従って与式から高さの変化の濃度分布は、

$$x_i = x_i^\circ \exp \left\{ -\frac{Mg(z - z^\circ)}{RT} \right\}$$

となり、粒子の濃度はシリンダーの底を x_i° とし、高くなるに従って指数関数的に薄くなる。遠心分離器を利用する場合は gz の代わりに回転半径 r 、角速度 ω を利用して $\omega^2 r$ を代入すれば

よい。この様に化学ポテンシャルの平衡条件は2相のみならず分布関数も容易に解を得ることができる。

18. 電気化学ポテンシャル

粒子がイオンに解離する物質を電解質とよび、粒子数を示す化学ポテンシャルに加えてイオンの荷電効果を含めて議論する。酸化還元の電池作用、濃淡電池である Nernst の方程式、酸塩基平衡の議論も電気化学ポテンシャルで説明されている。

系の電位を ψ とし、電荷 dq を無限遠から ψ まで運ぶ仕事量は ψdq である。極性を含めたイオンの価電数を z 、 F をファラデー定数とするとイオン量を dn とすると、

$$dq = zFdn$$

となる。従って、イオンの電気化学ポテンシャルを $\tilde{\mu}$ 、 μ を化学ポテンシャル、 μ° を標準化学ポテンシャル、イオンの活量を a とすると、

$$\tilde{\mu} = \mu + zF\psi = \mu^\circ + RT \ln a + zF\psi$$

となる。全ての金属はイオンと電子に解離できるが、そこに難易度がありイオン化傾向とよばれる。また、水素電極を基準電位にしてそれぞれ特有の電位が測定されている。

(1) 接触電位

電気化学ポテンシャルの最も簡単な応用例は、異種金属どうしの接触で生じる電位差で接触電位とよばれている。金属は、原子は移動出来ないが、電子は移動可能であり、自由電子とよばれる。その自由電子が放出するほど正に帯電する。電気化学ポテンシャルの活量 a は電子だけが自由に動けるため $a = 1$ とおける。また電子だから $z = -1$ とおいて、金属相 I と金属相 II との平衡状態では、

$$\tilde{\mu}^I = \mu^{\circ I} - F\psi^I = \mu^{\circ II} - F\psi^{II} = \tilde{\mu}^{II}$$

となる。従って接触電位 $\Delta\psi$ は、

$$\Delta\psi = \psi^{II} - \psi^I = \frac{\mu^{\circ II} - \mu^{\circ I}}{F}$$

で示される。

(2) 濃淡電池

細胞膜は特定のイオンしか通過できないチャンネルがあり、また膜内外でイオン濃度が異なる。従って細胞内外の間にイオン濃度差による起電力が生じる。ナトリウムやカリウムの価電数は1であるため $z = 1$ 、また体液の標準ポテンシャルは同等とすると $\mu^{\circ I} = \mu^{\circ II}$ であり、電気化学ポテンシャルは、

$$\tilde{\mu}^I = RT \ln a^I + F\psi^I = RT \ln a^{II} + F\psi^{II} = \tilde{\mu}^{II}$$

となる。起電力 $\Delta\psi$ は、

$$\Delta\psi = \psi^{II} - \psi^I = \frac{RT}{F} \ln \frac{a^I}{a^{II}} = \frac{RT}{F} \ln K$$

で示される。 K は細胞内外の濃度比を示し、平衡定数になる。カリウムイオンの細胞内濃度を 140 mEq/L 、細胞外濃度を 5 mEq/L とすると、

$$\Delta\psi = \frac{8.314 \times 310}{96500} \ln \frac{5}{140} = -0.0889$$

となり、細胞外電位を基準にして、およそ -90 mV の細胞内電位が得られる。細胞内静止電位を測定すると -90 mV に近い値が示されるが、このことは細胞が静止状態（分極状態）であれば、カリウムチャンネル（内向き整流）が開き、そこにカリウムイオンが漏出して濃淡電池を成立させていることの証明である。カリウムチャンネルが開いているために、細胞内外の濃度勾配に従って、大量のカリウムが流出するかというと、そうではない。本質的に陽イオンであるカリウムは静止電位に留まることを好むのであって、そのバランスが細胞内外での電気化学ポテンシャルを等しくし、静止電位が発生するのである。

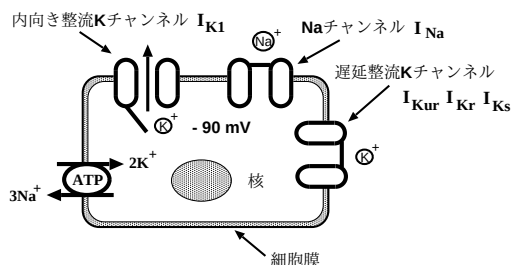


図 10 細胞内静止電位の理由

細胞が非興奮状態であれば K チャンネルが開き、Na チャンネルは閉じている。細胞内電位が負であるため、K イオンは濃度勾配に逆らって細胞外に漏出することはない。一方、Na イオンは濃度勾配も電荷も共に細胞内に流入するポテンシャルはあるが、Na チャンネルが閉じており流入できない。

生体では、ナトリウムイオンは細胞外に多く、細胞内には少ない。しかも細胞内電位が負であるために、ナトリウムイオンは細胞内へ流入する強い化学ポテンシャルをもつ。しかし静止時には、ナトリウムチャンネルは閉じているために、細胞内電位を上げることはできない。図 10 に示すように、なんらかの原因で細胞が活動状態になるとナトリウムチャンネルが開き、カリウムチャンネルが閉じる。そして細胞内外のナトリウム濃度比に従って活動電位が発生する。幸いにして、ナトリウムチャンネルの開放時間は大変短い。脱分極した細胞内電位は今度は別のカリウムチャンネル（遅延整流）が開き、細胞内カリウムを放出して細胞内静止電位に戻る（再分極）。つまり、ナトリウムチャンネルは1種類でもよいが、カリウムチャンネルは少なくとも2種類必要になる。今日では遺伝子解析により、もっと多くのイオンチャンネルが発見されている。

なお、生理学書の式で、

$$EMF \text{ (mV)} = \pm 61 \log \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

と記述されているが、その係数 61 は、

$$\frac{8.314 \times 310 \times 2.3 \times 1000}{96500} = 61$$

に由来する。また土の符号や log の項でどちらが分子かなどについて電気化学ポテンシャルの基本式を理解しておれば迷うことはない。

(2') Donnan の膜平衡

電解質などのイオンは容易に通過するが、タンパク質などの高分子は通過できない膜に注目する。生体では血管壁がそれに当たり、血漿と間質液、また血漿と原尿などとの関係である。一般にタンパク質 (Pr) は陰イオン化されており、各分画の電気的中性を維持するために膜を介して電気化学ポテンシャルが生じる。これを Donnan の膜平衡と読んでいる。

図 11 A は膜を介して初期状態を示す。左側には Na^+ と Pr^- が等量あり、右側には Na^+ と Cl^- が等量あり、それぞれ電気的中性を保っている。しかし図 B に示すように、 Cl^- は左側に無いため強力な濃度勾配で左側に浸入する。また、そのために左側の電位は陰性となり、 Na^+ も引続き浸入する。その結果、図 C のようなバランスとなる。それぞれの分画内では電気的中性を保ち、同時に膜を介して電位差が生じる。この現象もまた濃淡電池の化学ポテンシャルであり、起電力 $\Delta\psi$ は、

$$\Delta\psi = \frac{RT}{F} \ln \frac{\text{Na}^+_{\text{l}}}{\text{Na}^+_{\text{r}}} = \frac{RT}{F} \ln \frac{\text{Cl}^-_{\text{r}}}{\text{Cl}^-_{\text{l}}}$$

で示される。式を変形すると、

$$[\text{Na}^+_{\text{l}}][\text{Cl}^-_{\text{l}}] = [\text{Na}^+_{\text{r}}][\text{Cl}^-_{\text{r}}]$$

となる。タンパク質のイオンは電気化学ポテンシャルには反応しない。これは膜の透過性がないためであり、不活性状態のイオンチャンネルと同じである。

図 11 C を見ると、明らかに左側の分子数が右側より多い。従って Donnan の膜平衡の作用に

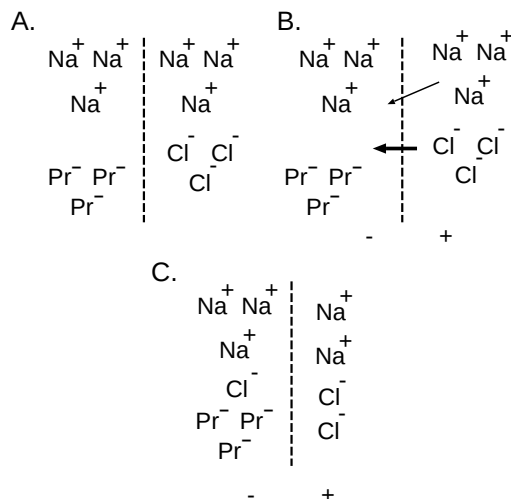


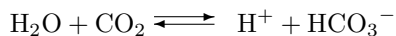
図 11 Donnan の膜平衡

図 A は初期状態で膜を介して左右の電気的中性を保っている。図 B に示すように Cl^- イオンは強力に左側に流入する。その結果、図 C に示すバランスで平衡になる。

より通常の膠質浸透圧以上に大きな浸透圧を発生させる。この作用は毛細血管壁での血液量の維持に重要な作用をもたらす。また、血漿ナトリウム濃度に比べてクロール濃度が低いこともこの作用による。間質液のクロール濃度は血漿より濃い。また腎原尿でナトリウム濃度が低く、クロール濃度が高いことも Donnan の膜平衡の作用である。

(3) 弱酸の解離平衡

電気化学ポテンシャルを使用した弱酸の解離平衡を考察する。生体で最も活発に反応している炭酸ガスの解離は、



で表される。この反応式を見ると水は $1000/18 = 55.5 \text{ mol/l}$ と大量に存在するから反応は右に移動するように思える。一方、炭酸ガスは容易に空気中に発散するために反応は左に向かう。そして炭酸ガスの水中と気相との関係は分配係数で説明できそうである。そのようにして平衡状

態になるのかと思いながら、とりあえず各成分に付いて電気化学ポテンシャルの基本式を記述する。 $z_{\text{H}_2\text{O}} = 0$, $z_{\text{CO}_2} = 0$, また $z_{\text{H}^+} = 1$, そして $z_{\text{HCO}_3^-} = -1$ を考慮すると、ポテンシャル ψ の項は消えて、

$$\tilde{\mu}_{\text{H}_2\text{O}} = \mu_{\text{H}_2\text{O}}^\ominus + RT \ln a_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\tilde{\mu}_{\text{CO}_2} = \mu_{\text{CO}_2}^\ominus + RT \ln a_{\text{CO}_2}$$

$$\tilde{\mu}_{\text{H}^+} = \mu_{\text{H}^+}^\ominus + RT \ln a_{\text{H}^+}$$

$$\tilde{\mu}_{\text{HCO}_3^-} = \mu_{\text{HCO}_3^-}^\ominus + RT \ln a_{\text{HCO}_3^-}$$

となる。 $\Delta G = \tilde{\mu}_{\text{右式}} - \tilde{\mu}_{\text{左式}} = 0$ が平衡条件だから、

$$\mu_{\text{H}^+}^\ominus + RT \ln a_{\text{H}^+} + \mu_{\text{HCO}_3^-}^\ominus + RT \ln a_{\text{HCO}_3^-} - \mu_{\text{H}_2\text{O}}^\ominus - RT \ln a_{\text{H}_2\text{O}} - \mu_{\text{CO}_2}^\ominus - RT \ln a_{\text{CO}_2} = 0$$

μ の項は標準化学ポテンシャルであるから $\Delta G^\ominus$ であり、 $RT \ln$ の項をまとめると、

$$\Delta G^\ominus = \mu_{\text{H}_2\text{O}}^\ominus + \mu_{\text{CO}_2}^\ominus - \mu_{\text{H}^+}^\ominus - \mu_{\text{HCO}_3^-}^\ominus$$

として

$$0 = \Delta G^\ominus + RT \ln \frac{a_{\text{H}_2\text{O}} a_{\text{CO}_2}}{a_{\text{H}^+} a_{\text{HCO}_3^-}}$$

つまり

$$\Delta G^\ominus = RT \ln \frac{a_{\text{H}^+} a_{\text{HCO}_3^-}}{a_{\text{H}_2\text{O}} a_{\text{CO}_2}}$$

と標準化学ポテンシャルを計算するだけで平衡定数が求まる。また水の活量 $a_{\text{H}_2\text{O}} \simeq 1$ を利用して、

$$K = \frac{a_{\text{H}^+} a_{\text{HCO}_3^-}}{a_{\text{CO}_2}}$$

となる。この常用対数をとると、

$$pK = pH - \log \frac{a_{\text{HCO}_3^-}}{a_{\text{CO}_2}}$$

となる。もちろん $pK = -\log K$ であり、

$pH = -\log H^+$ である。 $a_{\text{HCO}_3^-}$ を mmol 単位にすると a_{CO_2} も mmol 単位にしなければならないが、溶存炭酸ガスの生理的条件での溶解率が 0.03 mmol/mmHg であるところを利用すると、

$$pH = 6.1 + \log \frac{a_{\text{HCO}_3^-}}{0.03 \times \text{CO}_2}$$

と表される。

(4) 電極反応 (第 1 種)

pH, Na^+ , K^+ , Cl^- , そして Mg^{++} 電極と麻酔科医とは親しい関係にあるので電気化学ポテンシャルをもちいて電極を解説する。まず金属 M が電極となって同種の金属イオンの溶液中に浸された平衡関係を考える。金属相を相 I , 水溶液を相 II , 金属の荷電数を n , 金属の活量を 1, 溶液の活量を $a_{\text{M}^{n+}}$ として、

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_{\text{M}^{n+}}^I &= \mu_{\text{M}^{n+}}^{I\ominus} + nF\psi^I \\ &= \mu_{\text{M}^{n+}}^{II\ominus} + RT \ln a_{\text{M}^{n+}} + nF\psi^{II} \\ &= \tilde{\mu}_{\text{M}^{n+}}^{II} \end{aligned}$$

が成り立つ。電極電位 $\Delta\psi$ (水溶液相から見た電極電位) を計算すると、

$$\Delta\psi = \psi^I - \psi^{II} = g_{\text{M}|\text{M}^{n+}}^\ominus + \frac{RT}{nF} \ln a_{\text{M}^{n+}}$$

但し、

$$g_{\text{M}|\text{M}^{n+}}^\ominus = \frac{\mu_{\text{M}^{n+}}^{II\ominus} - \mu_{\text{M}^{n+}}^{I\ominus}}{nF}$$

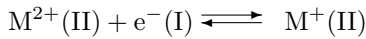
とする。電極電位は電解質活量の自然対数に標準電極電位を加えた値となる。つまり金属イオンと同種の電極を用いると金属イオン濃度が電位として測定できる。これを Nernst の式とよぶ。しかしこの一つの電極だけでは電極電位は測定できず、基準となる電極を別に作成しなければならない。ここで電解液の活量を 1 に設定 (1 規定) にすると電極電位は標準電極電位 $g_{\text{M}|\text{M}^{n+}}^\ominus$ となる。特に白金黒を触媒にして 1 気圧の水素ガスと 1 規定の塩酸を組み合わせた電極を水素電極と呼び、0V として基準電極にしている。現実には水素ガスを用いた電極は使用に不便であるため、銀-塩化銀電極 ($\text{Ag}|\text{AgCl}|\text{KCl}$) をもちいる。1 規定の (KCl を用いた) 相対標準電極電位は

25 °C で +0.236 V になる.

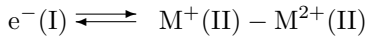
表に各種イオンの標準電極電位を示す. マイナスの電位ほど電子を放出しやすくなり, 自らは陽イオンになって酸化する. 水素イオンより低い鉄は錆び, それより高い銅が錆びない理由はそこにある.

(5) 電極反応 (第 2 種) ・酸化還元電位

荷電数の異なるイオン溶液に金属 (例えば Pt など) を浸した電極は金属より電子を供給して平衡に達する. 電極相を I, 溶液相を II として反応式は,



と書ける. 計算を分かり易くするために, 電極相と溶液相を区分して書き直すと,



とも表記できる. 電極からは金属イオンを放出しないことに注意して電気化学ポテンシャルを求めると,

$$\tilde{\mu}_{e^{-}I} = \mu_{e^{-}I\ominus} - F\psi^I = \tilde{\mu}_{M^{+}II\ominus} - \tilde{\mu}_{M^{2+}II\ominus}$$

である. 溶液相の各電解質ポテンシャルは,

$$\tilde{\mu}_{M^{+}II\ominus} = \mu_{M^{+}II\ominus} + RT \ln a_{M^{+}} + F\psi^{II}$$

$$\tilde{\mu}_{M^{2+}II\ominus} = \mu_{M^{2+}II\ominus} + RT \ln a_{M^{2+}} + 2F\psi^{II}$$

より,

$$\tilde{\mu}_{e^{-}I} = \mu_{M^{+}II\ominus} - \mu_{M^{2+}II\ominus} + RT \ln \frac{a_{M^{+}}}{a_{M^{2+}}} - F\psi^{II}$$

となる. 電極電位 $\Delta\psi$ は,

$$\Delta\psi = \psi^I - \psi^{II} = g_{M|M^{n+}\ominus} + \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{M^{2+}II}}{a_{M^{+}II}}$$

但し,

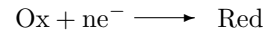
$$g_{M|M^{n+}\ominus} = \frac{\mu_{M^{2+}II\ominus} + \mu_{e^{-}I\ominus} - \mu_{M^{+}II\ominus}}{F}$$

とする.

実はこの電極反応は酸化還元反応でもある. イオン物質の酸化型を *Ox*, 還元型を *Red* と表示して,

標準電極電位 (還元電位) 25°C

電極反応	$U_H^{\ominus}[V]$
$Li^{+} + e^{-} = Li$	-3.045
$K^{+} + e^{-} = K$	-2.925
$Ca^{2+} + 2e^{-} = Ca$	-2.866
$Na^{+} + e^{-} = Na$	-2.714
$Mg^{2+} + 2e^{-} = Mg$	-2.363
$Zn^{2+} + 2e^{-} = Zn$	-0.763
$Fe^{2+} + 2e^{-} = Fe$	-0.440
$2H^{+} + 2e^{-} = H_2$	±0.000
$AgCl + e^{-} = Ag + Cl^{-}$	+0.222
$Cu^{2+} + 2e^{-} = Cu$	+0.337
$Fe^{3+} + e^{-} = Fe^{2+}$	+0.771



としても差し支えない. 従って還元電位 (酸化還元電位) は,

$$g = \Delta\psi = g^{\ominus} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Ox}}{a_{Red}}$$

但し,

$$g^{\ominus} = \frac{\mu_{Ox}^{\ominus} + \mu_{e^{-}\ominus} - \mu_{Red}^{\ominus}}{nF}$$

となる.

(6) 酸化還元反応

酸化還元反応は生命維持に必須の化学反応であるから, 無機, 有機化学を含めて理論を整理する.

銅を熱すると表面が黒くなり酸化銅 (II) になる. この化学反応は,



と書ける. この例から得られる酸化の意味は,

a) 酸素と結合するから酸化する.

また, 銅の荷電数に注目すると,



となるから,

b) 電子を遊離すると酸化する.

すなわち,

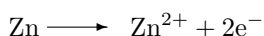
c) 自己の荷電数が上がれば酸化する

と結論でき、この逆反応は全て還元を意味する。

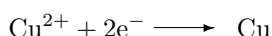
還元電位の表を見ると、電位が低いという意味は電子を放出しやすいという意味と同義語である。その状態とは自己が酸化されやすいことを示し、また酸化還元反応の意味からは、相手に電子を供給する能力を持っているから強い還元剤として作用する。

無機化学の酸化還元反応の例にダニエル電池を考える。ダニエル電池は

$\text{Zn}|\text{ZnSO}_4\text{水溶液}||\text{CuSO}_4\text{水溶液}|\text{Cu}$ の構造をしている。Zn と Cu との酸化能力を還元電位を比べると明らかに Zn の方が酸化され易い。従って Zn 電極では

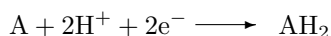


となり、Zn はイオンとなって溶液に溶け、電子は電極に溜ろうとする。また Cu 電極では



となり、Cu イオンは還元され、電極に析出しようとする。この状況で電極間に電子が通過できる電線などを接続すると電子は Zn 極より Cu 極へ移動し、電流は Cu 極より Zn 極に流れる。その起電力は $0.763+0.337=1\text{V}$ となる。

有機化合物での酸化還元反応は、

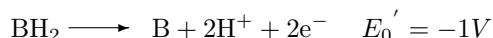
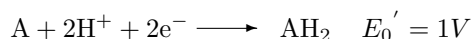


が標準形式である。A は酸化型で AH_2 は還元型である。物質 A と 2H^{+} を一括りにして陽イオンと同じと考えたと無機化学で示した化学式と同じである。また AH_2 に注目し、 H^{+} が結合したと考えると A の荷電数は -2 になる。従って自己の荷電数が減少するから還元されたと考えてもよい。しかし有機化学では簡単に**水素が結合すると還元する**と覚えるのが最もよい。

生化学での還元電位の基準電位は 25°C , pH7 での水素電位を -4.2V として計算し、慣例的に

E_0' と表示するが、標準電極電位と同等である。

生化学での酸化還元反応は、ダニエル電池の例でも明らかのように、2 個以上の酸化還元反応が必要で、これを共役反応という。



上記の反応では基質 A は水素を受け取っているから還元され、基質 B は水素を放出しているから酸化反応である。それぞれの反応がどちらに向かうかは還元電位で決定され、A より B の還元電位の方が低いためである。Na⁺ の還元電位を思い出せばすぐわかる。

還元電位差 $\Delta E_0'$ は次式に従って必ず正の値を示すように計算する。

$$\Delta E_0' = [\text{還元反応の}\Delta E_0'] - [\text{酸化反応の}\Delta E_0']$$

還元電位差 $\Delta E_0'$ よりギブズの標準自由エネルギーが求められる。

$$\Delta G' = -nF\Delta E_0'$$

また平衡定数 $K_{\text{平衡}}$ は $\Delta G' = -RT\ln K_{\text{平衡}}$ より

$$\Delta E_0' = \frac{RT}{nF} \ln K_{\text{平衡}}$$

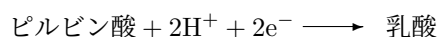
$$K_{\text{平衡}} = \exp \frac{nF\Delta E_0'}{RT}$$

となる。上記の共役反応の $K_{\text{平衡}}$ では、

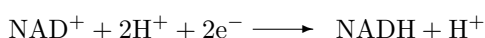
$$K_{\text{平衡}} = \frac{[\text{A}_{\text{還元}}][\text{B}_{\text{酸化}}]}{[\text{A}_{\text{酸化}}][\text{B}_{\text{還元}}]}$$

である。

解糖過程の最終代謝産物はピルビン酸であり、好氣的酸化では TCA 回路に進み、嫌氣的酸化では乳酸になる。乳酸反応の補酵素は NADH であり、以下の還元電位が知られている。



$$E_0' = -0.190\text{V}$$



$$E_0' = -0.320\text{V}$$

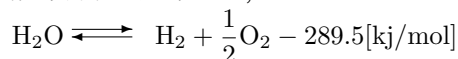
これらの還元電位より、NADH は酸化され、ピルビン酸は還元されて乳酸になることがわかる。 $\Delta E_0' = -0.190 - (-0.320) = 0.13V$ より 25°C , $pH = 7.0$ の環境では、

$$k = e^{\frac{0.13 \times 2 \times 96500}{8.314 \times 298}} = 2.5009e + 04$$

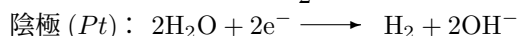
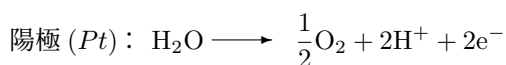
と 25000 倍も乳酸合成に傾く。

(7) 水の電気分解

1mol 当たりの水の電気分解における化学反応を熱化学方程式で示すと、



この吸収熱 $289.5[\text{kJ/mol}]$ はエンタルピーである。次いで、水の電気分解の陽極と陰極の化学反応を化学反応式で表すと、



という反応が生じている。各反応式の電子に注目すると 2mol 分の電子の動きによって電気分解が生じる。従って、「水の電気分解が起るには、電子 2mol 分を動かすエネルギーが必要である」と結論できる。水の電気分解に必要な電気量は、ファラデー定数 (F) を使って $2F$ より、電気分解に必要なエネルギー $= 2F \times \text{印加電圧}$ 。上式より、

$$\text{印加電圧} = 289500 / (2 \times 96500) = 1.5V$$

となる。従って水の電気分解に必要なポテンシャル (電圧) は最低 $1.5V$ 以上と計算できる。

陽極に+の電圧を荷電する意味は、陽極に存在する自由電子を少なくすることであり、その結果、水溶液相の水分子が分解されて電子 ($2e^-$) を陽極に供給すると共に酸素が生成される。また陽極の周りの水溶液相には水素イオン (H^+) が溜まる。

陰極に-の電圧を荷電する意味は、陰極に自由電子を供給することであって、陰極の周りの

水溶液相では陰極から放出された電子 ($2e^-$) を利用して水分子が分解されて水素ガスと水酸基が生じる。このように、電気分解とは ($\text{H}-\text{OH}$) 分子間結合が離断するに十分なポテンシャル (電圧) を加えることであり、水溶液中ではイオンは発生するが、自由電子が陰極から陽極に向かって流れるわけではない。また、陽極の周りの水溶液相では電子を放出しているから酸化反応であり、陰極の周りの水溶液相では電子を受け取るから還元反応である。

以上で酸化還元電位の項を終えるが、この程度の基礎知識でグルコースの解糖系、TCA サイクル、ミトコンドリアでの電子伝達系における酸化還元反応は理解できるので、演習問題として取り組んでもらいたい。

19. 統計力学から見たエントロピー

クラウジウスの提唱する古典熱力学エントロピーは $dS = dQ/T$ であるが、ボルツマンの提唱する統計力学でのエントロピー (ボルツマンの原理) は $S = k \ln W$ である。古典的熱力学は圧力、体積、温度という巨視的なパラメータより得られる結果を元にして、体系化された学問である。一方の統計力学は、分子運動について確率理論をもちいて体系化された学問であり、両者の式は一見異なる結論であるが、実は完全に一致する。また古典熱力学では始めと終りの状態については議論できるが途中の時間経過については言及できない。一方の統計力学はフィックの法則を導入することにより分子の拡散過程の時間経過をたどることができる。統計力学は量子力学へのステップアップになるのであるが、麻酔医の教養として 1900 年初頭までの理論は知っておきたいものである。

20. エントロピーは「場合の数」

分子の大きさと平均自由行程を思い出すと、空気分子は直径の 1000 倍近い距離を自由に飛行している。そこで体積 V に N 個の分子が存在するとして、小さな小部屋 $v = V/N$ を想定すると、各小部屋には 1 個の分子が入り込む勘定になる。 N 個の分子を N 個の小部屋に配置するには

$$S_2 = {}_N P_N = N!$$

の順列すなわち「場合の数」となる。

今度は体積 V を半分の大きさにすると、平均自由行程は同じであるから小部屋 v には 2 個の分子が共有しなくてはならない。先程の答えでは数え過ぎになる。つまり 1 つの分子に対する小部屋が 2 個になるため、分子 N 個に対しては 2^N 個で割らなければならない。従って、

$$S_1 = \frac{N!}{2^N}$$

となる。体積 $V/2 \rightarrow V$ はエントロピーの増加であって、その増加分は比例定数を k とすると、

$$\begin{aligned} \Delta S &= S_2 - S_1 = k \log_a N! - k \log_a (N!/2^N) \\ &= k \log_a 2^N = k N \log_a 2 \end{aligned}$$

となる。一方古典熱力学での体積増加によるエントロピー増加は

$$\Delta S = R \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln 2$$

であるから、両者を比較して $a = e$, $k = R/N$ とすると、改めて、

$$S = k \ln W$$

と記述できる。この k 値をボルツマン定数とよび、 W は確率でいう「場合の数」である。

21. マックスウェルの考え方

古典熱力学では個々の分子運動は均一と解釈して理論を展開しているが、統計力学は個々の分子に焦点を当てて確率論的に全体像を見る手法を行う。温度については、古典熱力学では分子の運動エネルギー、すなわち $\frac{1}{2}mv^2$ として各分子は均一の分子速度を持つと解釈したが、統計力学では分子速度はそれぞれで異なるが、全体の平均としての速度を考えることになる。従って分子の速度分布が定まり、その確率の加重平均としての分子速度の計算にたどり着く所までを当面の目標とする。

今、系の体積 V の中に分子が N 個あり、全エネルギーは E とする。そのうち速度成分が (v_x, v_y, v_z) と $(v_x + dv_x, v_y + dv_y, v_z + dv_z)$ の中にあるものの数を

$$F(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z$$

とする。つまり N 個の分子全てについて分子の速度を 3 次元とするグラフ (速度空間) を作り、

そこに存在する分子の数を関数 F としている。そうすることにより分子間衝突により斜め方向に飛ぶ分子も表示できる。また速度の絶対値 v で飛行する分子は $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ がなり立ち、 v_x と $v_x + dv_x$ の間に存在する分子の数は $f(v_x)$ だけの関数に比例し、 v_y および v_z 方向とは無関係である。従って、

$$F(v^2) = f(v_x)f(v_y)f(v_z)$$

が成り立つ。いま $f(0) = a$ と定数を置いて、上記の意味を式で書き直すと

$$F(v_x^2) = f(v_x)f(0)f(0) = a^2 f(v_x)$$

となり、確かに関数 F は $f(v_x)$ に比例する。また $f(v_x)$ は、

$$f(v_x) = \frac{1}{a^2} F(v_x^2)$$

となる。 v_y 方向、 v_z 方向にも同様の操作をすると

$$F(v^2) = \frac{1}{a^6} F(v_x^2) F(v_y^2) F(v_z^2)$$

が得られる。 $v_x^2 = X, v_y^2 = Y, v_z^2 = Z$ と置くと、上式は、

$$F(X + Y + Z) = \frac{1}{a^6} F(X) F(Y) F(Z)$$

と書き直される。演算テクニックになるが、 Y で偏微分すると、

$$\frac{\partial F(X + Y + Z)}{\partial Y} = \frac{1}{a^6} F(X) F(Z) F'(Y)$$

となる。ここで $Y = Z = 0$ を代入すると、

$$F'(X) = \frac{1}{a^6} F(X) a^3 F'(0) = \frac{F'(0)}{a^3} F(X)$$

となる。ここで、

$$\frac{F'(0)}{a^3} = -\alpha$$

とおくと、与式は、

$$F'(X) = -\alpha F(X)$$

$$\therefore F(X) = A e^{-\alpha X}$$

となる。 A は任意の定数である。 Y, Z に同様の操作ができ、元の関数に戻すと、

$$\begin{aligned} F(v_x, v_y, v_z) &= A e^{-\alpha v_x^2} e^{-\alpha v_y^2} e^{-\alpha v_z^2} \\ &= A e^{-\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} \end{aligned}$$

で表される。この速度空間の分子数は N であることから、

$$N = \iiint_{-\infty}^{\infty} A e^{-\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} dv_x dv_y dv_z$$

が成り立つ。公式 (1) を使うと、

$$A = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} N$$

と A の値が定まる。また全運動エネルギー E は、個々の分子が $m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)/2$ のエネルギーを持つことから、

$$\begin{aligned} E &= \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \\ &\quad e^{-\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} dv_x dv_y dv_z \end{aligned}$$

となる。この積分は極座標変換して求められる。すなわち、

$$v_x = v \sin \theta \cos \phi, v_y = v \sin \theta \sin \phi, v_z = v \cos \theta$$

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2, \text{ 微小体積} = 4\pi v^2 dv$$

とすると、公式 (2) を利用して、

$$\begin{aligned} E &= \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{m}{2} N \int_0^{\infty} v^2 e^{-\alpha v^2} 4\pi v^2 dv \\ &= 2\pi m \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{3}{8} \frac{\sqrt{\pi}}{\alpha^{5/2}} N = \frac{3m}{4\alpha} N \end{aligned}$$

となる。 $RT = \frac{3}{2} E$ を利用して、

$$\alpha = \frac{m}{2} \frac{1}{kT}$$

となり、 α が求められる。従って

$$F(v_x, v_y, v_z) = N \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m}{2kT}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}$$

となる。上式を N で割ると (v_x, v_y, v_z) の速度を示す確率である。以上がマックスウェルの導き出した速度分布則とボルツマン因子の導き方である。

統計力学および量子力学の世界では積分を利用する連続的なエネルギー分布は考えられず、ボルツマン因子を最小単位とする、離散的なエネルギー準位が定まっている。以下にエネルギー準位を利用したマックスウェルの速度分布則の解析法を示す。

22. エネルギー分布

今、系の分子が N 個あり、全エネルギーは E とする。系内の分子は離散的なエネルギー準位 $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \dots$ があり、そこには $n_0, n_1, n_2, \dots$ 個の分子が存在する。すると全体の分子数とエネルギーは、

$$N = \sum_{i=0}^N n_i$$

$$E = \sum_{i=0}^N \epsilon_i n_i$$

で表される。次に場合の数の計算である。 N 個の内、 n_0 個が ϵ_0 , n_1 個が ϵ_1 , ..., に入るから、

$$W_1 = \frac{N!}{n_0! n_1! n_2! \dots n_i! \dots n_j! \dots}$$

となる (公式 (6) 参照)。ここでエネルギー準位 i の 1 個をエネルギー準位 j に置き換えると、

$$W_2 = \frac{N!}{n_0! n_1! n_2! \dots (n_i - 1)! \dots (n_j + 1)! \dots}$$

となる。 W 比を計算すると、

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{n_i! n_j!}{(n_i - 1)! (n_j + 1)!} = \frac{n_i}{n_j + 1}$$

となる。もし $n_j \gg 1$ なら、

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{n_i! n_j!}{(n_i - 1)! (n_j + 1)!} = \frac{n_i}{n_j}$$

となる。次に移動する分子が各水準で複数個ある場合、すなわち、

i 準位 $\rightarrow i'$ 準位に m_i 個

j 準位 $\rightarrow j'$ 準位に m_j 個

k 準位 $\rightarrow k'$ 準位に m_k 個

とすると場合の比は

$$\frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{n_i}{n_{i'}} \right)^{m_i} \left(\frac{n_j}{n_{j'}} \right)^{m_j} \left(\frac{n_k}{n_{k'}} \right)^{m_k}$$

となる。 W 比はエントロピーの増加分計算に対応する。

さて全体のエネルギーが一定の条件で、個々の分子がどのような準位分布をしているかを知ることが興味ある問題である。全ての分子が均一のエネルギー準位を保つことはあり得ないし、低いエネルギー準位の方が多く配分されるだろうと予想がつく。そこで ϵ_0 を $E = 0$ の状態、 ϵ_1 を次の準位として、 ϵ_1 のグループより Δm 個の分子が ϵ_0 に落ちた、また Δn 個の分子が ϵ_2 に上昇したと想像すると、全体のエネルギーは変わらないから、

$$\Delta m \epsilon_1 = \Delta n (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

であり、以下のように書き直すことができ、エネルギー準位の差が等比級数となる。

$$\frac{\Delta m}{\Delta n} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1 - \epsilon_0}$$

また場合の比は

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{n_1^{(\Delta m + \Delta n)}}{n_0^{\Delta m} n_2^{\Delta n}} = 1$$

となり、

$$n_1^{(\Delta m + \Delta n)} = n_0^{\Delta m} n_2^{\Delta n}$$

が成立し、対数変換すれば以下のように書き直すことができ、各準位グループの分子数の差が等比級数となる。

$$\frac{\Delta m}{\Delta n} = \frac{\ln n_2 - \ln n_1}{\ln n_1 - \ln n_0}$$

従って、 Δm および Δn は消去され、 $\epsilon_0 = 0$ とすると、この式を満たす A と β を任意の定数として、

$$n_0 = A, n_1 = Ae^{-\beta\epsilon_1}, n_2 = Ae^{-\beta\epsilon_2}$$

となる。このことから任意のエネルギー準位 i における分子数 n_i は、

$$n_i = Ae^{-\beta\epsilon_i}$$

と書くことができる。また全分子 N のエネルギー E に対する特定のエネルギー準位 ϵ_i の割合は、

$$\frac{n_i}{N} = \frac{e^{-\beta\epsilon_i}}{\sum_i e^{-\beta\epsilon_i}}$$

と計算できる。この $e^{-\beta\epsilon_i}$ をボルツマン因子とよぶ。

参考: $W = N!/(n_1!n_2!\cdots)$ を最大にする条件
 W は「場合の数」でその最大値がエントロピーを示すことを学び、上記の説明で無条件で A と β の指数関数が適応できること示した。実際、 A と β の指数関数は公式 (10) のラグランジュの未定乗数法を用いることにより導出することができる。

W を公式 (4) のスターリングの公式で変換すると、

$$\ln W = N(\ln N - 1) - \sum n_i(\ln n_i - 1)$$

となる。これを最大にする条件は n_i について $\ln W$ の偏微分が 0 となる条件を求めればよい。

$$\frac{\partial \ln W}{\partial n_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial n_i} \left\{ N(\ln N - 1) - \sum n_i(\ln n_i - 1) \right\}$$

$$= - \sum \frac{\partial}{\partial n_i} (n_i \ln n_i - 1) = - \sum \ln n_i$$

従って、 $\sum \ln n_i = 0$ を求めることになる。

$$dN = \sum dn_i = 0$$

$$dE = \sum \epsilon_i dn_i = 0$$

n_i について再度考察する。 n_i とはエネルギー準位 ϵ_i のグループに入る分子の数であった。 n_i の数が一部変更して別のエネルギー準位のグループに属しても全体としてのエネルギーは変わらない。従って、が守られる条件となり、全ての i について、

$$\begin{aligned} \sum (\ln n_i + \alpha + \beta\epsilon_i) dn_i &= 0 \\ dN &= \sum dn_i = 0 \\ dE &= \sum \epsilon_i dn_i = 0 \end{aligned}$$

が求める条件となる。これを解く恒等式は、

$$\ln n_i + \alpha + \beta\epsilon_i = 0$$

となり、任意の定数 A をもちいて、

$$n_i = \exp(-\alpha - \beta\epsilon_i) = A \exp(-\beta\epsilon_i)$$

が $W = N!/(n_1!n_2!\cdots)$ を最大にする n_i の関数となる。

23. 統計力学で見る温度

ボルツマン因子の $e^{-\beta\epsilon_i}$ の β は、 $U = 3/2RT$ と 3 次元の運動を考慮すると、 $\beta = 1/kT$ となる (エネルギー等分配の法則)。従って特定のエネルギー準位 ϵ_i における分子数 n_i は

$$n_i = e^{-\frac{\epsilon_i}{kT}}$$

となる。つまり温度が低いと低いエネルギー準位は多く、高いエネルギー準位の分子は低く抑えられる。しかし温度が高くなると、低いエネルギー準位の分子数は少なくなり、高いエネルギー準位で運動する分子が多くなる。この様子を図 12 に示す。温度という存在は、ある決まった値の並進運動を持つ分子運動の集まりではなく、並進運動のエネルギー準位に幅のある分子運動の集まりであることを認識してほしい。

24. 理想気体の速度分布

体積 V に分子数 N をもつ理想気体の速度を考える。単位体積あたりの分子数 n は $n = N/V$ である。また、 x, y, z 方向の速度成分を u, v, w として、 u から $u + du$ まで、 v から $v + dv$ まで、 w から $w + dw$ までの狭い速度領域に存在する分子数は、

$$nf(u, v, w) du dv dw$$

とすると、ボルツマン因子の ϵ_i に運動エネルギー

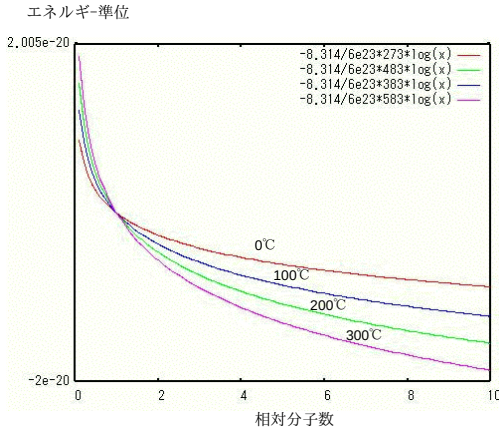


図 12 統計力学で解釈される温度と分子運動
温度は分子の並進エネルギーであるが、均一ではない。定温ではエネルギー準位の低い群に多くの分子が集まるが、高温になると、高いエネルギー準位の分子群が多くなる。

を代入して

$$f(u, v, w) = A \exp[-m(u^2 + v^2 + w^2)/2kT]$$

と記述でき、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A \exp \left[\frac{-m(u^2 + v^2 + w^2)}{2kT} \right] du dv dw = 1$$

を解いて A の値を求めることになる。3重積分であるが u, v, w が全て平等であるから上式は、

$$A \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-mu^2/2kT) du \right]^3 = 1$$

を計算すればよい。積分の解は公式 (1) を利用することにより、

$$A = \left\{ \frac{m}{2\pi kT} \right\}^{3/2}$$

となり、速度分布関数は、

$$f(u, v, w) = \left\{ \frac{m}{2\pi kT} \right\}^{3/2} \exp \left[\frac{-m(u^2 + v^2 + w^2)}{2kT} \right]$$

となり、統計で表れる正規分布やガウスの誤差曲線と同じ形をしている (図 13)。

図 13 に示す速度分布では速度 0 が最も頻度が高く、速度が上がるにつれて頻度が下降してい

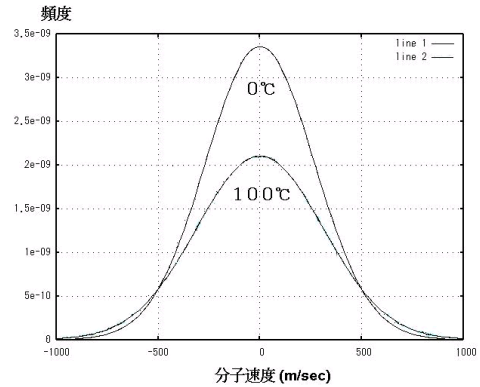


図 13 0 °C と 100 °C の酸素分子速度

0 °C と 100 °C の酸素分子速度、 u 軸成分だけを
表示している。速度 0 が最も頻度が高い。
(本文参照)

く。この理由は u 軸方向だけの成分を表示しているためであり、 u 軸の速度が 0 であっても、 v 軸、 w 軸方向には速度成分が存在するためである。従って各軸方向の速度を調べるより速度の絶対値 (速さ) $v = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ を調べると分かりやすい。速さには方向性が無いから原点から球形に分布する。従って球の半径 v に沿って、薄皮 dv についての速度確率を原点から無限大まで積分することになる。球の積分法は種々あるが、

$$\int_0^r 4\pi v^2 dv = \frac{4}{3} \pi r^3$$

が利用できる。そこで

$$f(v) = B 4\pi v^2 \exp[-mv^2/2kT]$$

とすると、

$$\int_0^{\infty} B 4\pi v^2 \exp[-mv^2/2kT] dv = 1$$

となり、公式 (2) をもちいて、

$$B = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2}$$

となり、

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} 4\pi v^2 \exp \left[-\frac{mv^2}{2kT} \right]$$

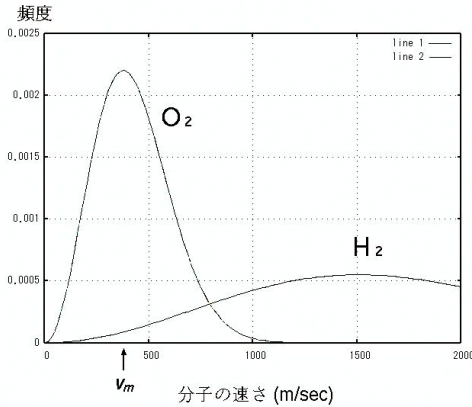


図 14 0 °Cでの酸素と水素分子の速さ分布
 v_m は酸素分子の速さの最大頻度を示す。

となり、0 °Cでの水素と酸素分子の速さ分布を図 14 に示す。水素の分子量は 2、酸素の分子量は 32 であるから、水素の方が平均速度も速くまた分散も広いことがわかる。図 15 は同じ酸素で温度上昇させたときの速度の比較である。最大頻度である v_m は右にシフトし、分散も広がる。速さの最大頻度 v_m を求めるには上式 $f(v)$ の微分値=0 として解を求めればよい¹。

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

となり、そのときの速さは、

$$f(v_m) = 4 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-1}$$

となる。速さの平均速度 $\langle v \rangle$ は、

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{2kT}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

となる。この計算には公式 (3) を使用する。

さらに速度の 2 乗の平均値 $\langle v^2 \rangle$ は、

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv = \frac{3}{2} \left(\frac{2kT}{m} \right)$$

となる。この計算には公式 (2) を使用する。

¹ この微分は筆算で確認してほしいが、ソフト mupad は `factor(diff(v2*exp(-m*v2/(2*k*T)),v))` の 1 命令で容易に微分演算を実行する。

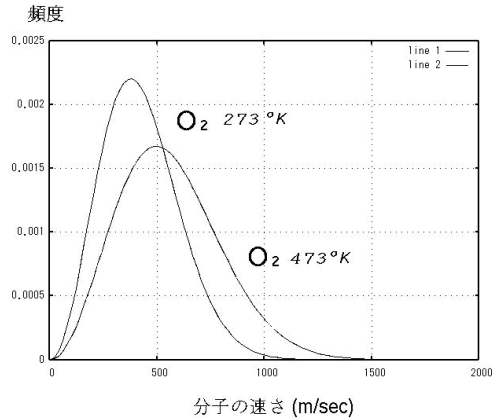


図 15 0 °Cと 200 °Cの酸素分子の速さ頻度
 最大頻度 v_m の位置が右方シフトすると共に分散も広がる。

25. ボルツマンの原理の証明

ボルツマンの原理で提唱されているエントロピーは $S = k \ln W$ である。この項ではどのようにしてこの式が導かれたのかを説明する。

エントロピーは「場合の数」の対数変換であり、場合の数は $\frac{N!}{n_1!n_2!\dots}$ で記述できた。

「場合の数」についてスターリングの法則とラグランジュの未定乗数法を適応させると、

$$\ln W = N(\ln N - 1) - \sum n_i(\ln n_i - 1)$$

$$N = \sum n_i$$

$$E = \sum \epsilon_i n_i$$

$$\ln n_i = -\alpha - \beta \epsilon_i \quad (n_i = e^{-\alpha} e^{-\beta \epsilon_i})$$

と記述できる。

方法 1.

$\sum n_i(\ln n_i - 1)$ に注目して、

$$\begin{aligned} \sum n_i(\ln n_i - 1) &= \sum n_i(-\alpha - \beta \epsilon_i - 1) \\ &= -\alpha \sum n_i - \beta \sum \epsilon_i n_i - \sum n_i \\ &= -\alpha N - \beta \sum \epsilon_i n_i - N \end{aligned}$$

この式を $\ln W$ に代入すると

$$\begin{aligned}\ln W &= N \ln N - N - (-\alpha N - \beta \sum \epsilon_i n_i - N) \\ &= N \ln N + \alpha N + \beta \sum \epsilon_i n_i \\ &= N \ln N + \alpha N + \beta E\end{aligned}$$

となる。ここで $\ln W$ について、 α, β, E で全微分すると

$$d(\ln W) = Nd\alpha + Ed\beta + \beta dE$$

となる。また、

$$N = \sum n_i = \sum e^{-\alpha - \beta \epsilon_i}$$

について対数変換すると、

$$\ln N = -\alpha + \ln \sum e^{-\beta \epsilon_i}$$

となる²。ここで $\ln N$ について、 α, β で全微分する。 $d \ln f = f'/f$ の公式を利用すると、

$$d(\ln N) = -d\alpha - \frac{\sum \epsilon_i e^{-\beta \epsilon_i}}{\sum e^{-\beta \epsilon_i}} d\beta$$

また、条件式に n_i 式を代入すると、

$$E = \sum \epsilon_i e^{-\alpha - \beta \epsilon_i} = e^{-\alpha} \sum \epsilon_i e^{-\beta \epsilon_i}$$

$$N = \sum e^{-\alpha - \beta \epsilon_i} = e^{-\alpha} \sum e^{-\beta \epsilon_i}$$

$$\therefore \frac{E}{N} = \frac{\sum \epsilon_i e^{-\beta \epsilon_i}}{\sum e^{-\beta \epsilon_i}}$$

を $d(\ln N)$ に代入し、体積一定と考えたと $d(\ln N)$ は 0 となり、

$$d(\ln N) = -d\alpha - \frac{E}{N} d\beta = 0$$

従って、

$$Ed\beta = -Nd\alpha$$

となり、 $d(\ln W)$ の式に代入すると、

$$d \ln W = \beta dE$$

となる。 $\beta = 1/(kT)$ を代入すると、

$$d \ln W = \frac{1}{kT} dE$$

$$kd \ln W = \frac{dE}{T}$$

体積一定での熱量 dQ の上昇は、 dE の上昇に等しいから、

² β の項まで対数変換してはいけない。

$$kd \ln W = \frac{dQ}{T}$$

$$\therefore dS = dk \ln W = \frac{dQ}{T}$$

となる。この方法は $S = k \ln W$ の代わりにその微分形 (エントロピーの変化量) を証明している。また β の値を無条件に $1/(kT)$ として取り入れている所に疑問点が残る。

方法 2.

いま、定数 $e^{-\alpha}$ を N/f とおくと、 N/f も定数、また N が定数だから f も定数となり、

$$n_i = \frac{N}{f} e^{-\beta \epsilon_i}$$

$$N = \sum n_i = \frac{N}{f} \sum e^{-\beta \epsilon_i}$$

となり、 f について、

$$f = \sum e^{-\beta \epsilon_i}$$

と書ける。また E については、

$$E = \sum \epsilon_i n_i = \frac{N}{f} \sum \epsilon_i e^{-\beta \epsilon_i}$$

$$\frac{E}{N} = \frac{\sum \epsilon_i e^{-\beta \epsilon_i}}{f} = \frac{\sum \epsilon_i e^{-\beta \epsilon_i}}{\sum e^{-\beta \epsilon_i}}$$

と書ける。つまり定数 α を消去し、 f, β の関数に書き代えると共に、1 分子の持つエネルギーを換算したわけである。

f は ϵ_i と β の変数を持っているため、 f の変分を考える。 $d \ln f = f'/f$ の公式を利用すると、

$$d(\ln f) = \frac{(\sum e^{-\beta \epsilon_i})'}{\sum e^{-\beta \epsilon_i}}$$

$$\text{分子} = - \sum \epsilon_i e^{-\beta \epsilon_i} d\beta - \beta \sum e^{-\beta \epsilon_i} d\epsilon_i$$

となり、

$$d(\ln f) = - \frac{\sum \epsilon_i e^{-\beta \epsilon_i}}{\sum e^{-\beta \epsilon_i}} d\beta - \beta \frac{\sum e^{-\beta \epsilon_i} d\epsilon_i}{\sum e^{-\beta \epsilon_i}}$$

となる。また dE については、

$$dE = d \sum n_i \epsilon_i \\ = \sum n_i d\epsilon_i + \sum \epsilon_i dn_i$$

であり、その第1項は各分子のエネルギー準位 ϵ_i の変化を示すから外部よりの仕事 W' に対応する。また、第2項はそれ以外のエネルギー変化と考える。従って、第1項については、

$$dW' = \sum n_i d\epsilon_i = \sum \frac{N}{f} e^{-\beta \epsilon_i} d\epsilon_i \\ = \frac{N}{f} \sum e^{-\beta \epsilon_i} d\epsilon_i = N \frac{\sum e^{-\beta \epsilon_i} d\epsilon_i}{\sum e^{-\beta \epsilon_i}}$$

と変形でき、再度 $d \ln f$ を書き直すと

$$N d \ln f = -E d\beta - \beta dW'$$

の結果を得る。

実は $d \ln f$ はヘルムホルツの自由エネルギーの微分形と対応できる。 U を内部エネルギー、 S をエントロピー、 T を絶対温度として

$$F = U - TS$$

$$U = TdS + dW'$$

より

$$dF = dU - TdS - SdT = dW' - SdT$$

となる。また、

$$d\left(-\frac{F}{kT}\right) = -\frac{dF}{kT} + \frac{F}{kT^2} dT \\ = -\frac{1}{kT}(dW' - SdT) + \frac{1}{kT^2}(U - TS)dT \\ = \frac{U}{kT^2} dT - \frac{dW'}{kT}$$

上式と $N d \ln f$ を見比べて、 dW' の項では

$$\beta = \frac{1}{kT}$$

となる。 β を T で微分すると、 $-1/kT^2 dT$ となり、

$$E = U$$

となる。従って、

$$F = -NkT \ln f$$

が算出される。すなわち統計力学でもちいたエネルギー E は熱力学での内部エネルギー U に対応でき、ボルツマン因子で用いた β を $1/kT$ に対応させて間違いは無かった。

以上の条件より $\ln W$ の式を整理すると、最も単純なスターリングの公式でも計算でき、

$$\ln W = \ln N! - \sum \ln n_i! \\ = N \ln N - \sum n_i \ln n_i \\ = N \ln N - \sum n_i \left(\ln N - \ln f - \frac{\epsilon_i}{kT} \right) \\ = N \ln N - \sum n_i (\ln N - \ln f) + \frac{1}{kT} \sum n_i \epsilon_i \\ = N \ln N - \sum n_i (\ln N - \ln f) + \frac{1}{kT} U \\ = N \ln N - \ln N \sum n_i - \ln f \sum n_i + \frac{1}{kT} U \\ = N \ln f + \frac{1}{kT} U \\ = -\frac{F}{kT} + \frac{1}{kT} U$$

となる。 $F = U - TS$ であったから、

$$S = k \ln W$$

となり、ボルツマンの原理と呼ばれる統計力学でのエントロピーが導かれる。すなわち熱力学で導入したエントロピーとは統計力学では色々な分子配列、そしてエネルギー配列のある中で最も「場合の数」が多い組合せを採択する状況を意味している。

β の値がせっかく出たので n_i の値を書き直すと、

$$n_i = \frac{N}{f} e^{-\epsilon_i/kT}$$

となる。この n_i の分布をマックスウェルボルツマンの分布とよぶ。また関数 f は分子の各エネルギー準位での分子数 n_i が算出できるところから状態和とか分配関数と呼ばれる。上式を書き直すと

$$\frac{n_i}{N} = \frac{1}{f} e^{-\epsilon_i/kT}$$

となり、分子がエネルギー ϵ_i をとる確率が $e^{-\epsilon_i/kT}$ に比例することがわかる。

26. 単原子分子理想気体のエントロピー

いままで分子のエネルギー ϵ_i を離散的なエネルギー準位として扱ってきたが、小正準集団とよばれる量子力学の考え方を導入すると、連続的な関数として扱うこともできる。分子の位置ベクトルを $\mathbf{x}$ 、運動量を $\mathbf{p}$ とすると、

$$\frac{1}{N} n(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \frac{1}{f} e^{-\epsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x})/kT} \quad (26.1)$$

と記述できる。離散的なエネルギー準位 ϵ_i に対して、 $\epsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ を対応させ、またそのエネルギー準位のグループに属する分子の数 n_i に対して、 $n(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ を対応させた。上式の左側はエネルギー準位 $\epsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の分子数の確率を示しているから、右式も確率を示すことに注意してほしい。統計力学の始めに述べたマックスウェルの考え方に従って1分子の相空間の体積(細胞)を a とすると、

$$f = \frac{1}{a} \int \cdots \int d\mathbf{p} d\mathbf{x} e^{-\epsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x})/kT}$$

$$d\mathbf{p} d\mathbf{x} = dp_x dp_y dp_z dx dy dz$$

と計算できる。つまり分子のエネルギー準位を6次元超空間をもちいて、位置や運動量に変換する考え方である。これで理想気体の状態方程式を統計力学的に導き出すことが可能になる。

体積 V の箱に質量 m の分子が N 個、温度 T の状態で存在する。各分子のエネルギーは

$$\epsilon = \frac{1}{2m} (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) \quad (26.2)$$

となる。 f は、

$$f = \frac{1}{a} \int \cdots \int e^{-\frac{(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)}{2mkT}} d\mathbf{p} d\mathbf{x}$$

$$= \frac{V}{a} \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{p^2}{2mkT}} dp \right]^3$$

公式(1)を使って、

$$f = \frac{V}{a} (2\pi mkT)^{3/2}$$

と計算できる。ここでヘルムホルツの自由エネルギー式の f に代入すると、

$$F = -NkT \ln \left[\frac{V}{a} (2\pi mkT)^{3/2} \right]$$

となる。再度、 $F = U - TS$ より全微分を行うと

$$dF = dU - TdS - SdT = -pdV - SdT$$

つまり、温度 T 一定では $dT = 0$ となり、圧力 p は自由エネルギーを体積 V で偏微分するから、うまく a, π, m などが消去され、

$$p = - \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_T = \frac{NkT}{V}$$

となり経験的事実として認識されてきた理想気体の状態方程式が統計力学的手法により導きだされる。内部エネルギー U については、

$$U = F + TS = F - T \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_V$$

$$= -T^2 \left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{F}{T} \right) \right]_V$$

が利用できる。始めに F/T を計算して、

$$\frac{F}{T} = -Nk \left(\ln \frac{V}{a} + \frac{3}{2} \ln(2\pi mk) + \frac{3}{2} \ln T \right)$$

$$\frac{\partial F}{\partial T} = -\frac{3}{2} Nk \frac{1}{T}$$

$$U = -T^2 \frac{\partial F}{\partial T} = \frac{3}{2} NkT$$

となる。また定容比熱 C_V については、

$$C_V = \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{3}{2} Nk$$

となる。これらは統計力学的に求めた熱力学の公式である。

いよいよ単原子分子理想気体のエントロピーの計算になるが、上記に用いた定数 a は実際のところプランク定数 h^3 に対応する。これは3次元速度空間で連続的な度 v を選んだが、不確定性原理によりプランク定数 h 以下に細かくできないためである。

$$\Delta p \Delta q > h$$

従って正しい自由エネルギーは

$$F = -NkT \ln \left[\frac{V}{h^3} (2\pi mkT)^{3/2} \right]$$

と記述される。自由エネルギーが負の値を示すことは自然な状態では膨張しようとする力が働いていることを示す。

化学ポテンシャル μ は、

$$\mu = \left(\frac{\partial F}{\partial N} \right) = -kT \ln \left[\frac{V}{h^3} (2\pi mkT)^{3/2} \right]$$

である。

エントロピー計算は F を体積一定の条件で温度 T で偏微分する。つまり、

$$S = - \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_V$$

を計算する。良く見ると、

$$\begin{aligned} F &= -NkT \ln \left[V \left(\frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{3/2} \right] \\ &= -NkT \left[\ln V + \frac{3}{2} \left(\ln \frac{2\pi mk}{h^2} + \ln T \right) \right] \end{aligned}$$

と変形できる。ここで T について偏微分すると、

$$\begin{aligned} S &= Nk \left[\ln V + \ln \left(\frac{2\pi mk}{h^2} \right)^{3/2} + \frac{3}{2} (T \ln T)' \right] \\ &= Nk \left[\ln V + \ln \left(\frac{2\pi mk}{h^2} \right)^{3/2} + \frac{3}{2} (\ln T + 1) \right] \end{aligned}$$

と計算できる。

実は上記のエントロピーで異なる気体の混合エントロピーは正しい答えを示すが、同種の気体では答えが合わない。これはギブズのパラドッ

クスと称して有名な話しになっている。速度空間の最外被膜での x, y, z の位置が区別できないためである。その補正を行うには得られたエントロピーの式を $N!$ で割らなくてはならない。この補正を行ったエントロピーの式を以下に示す。

$$S = Nk \left[\ln \left(\frac{V}{N} \right) + \ln \left(\frac{2\pi mk}{h^2} \right)^{3/2} + \frac{3}{2} \ln T + \frac{5}{2} \right]$$

これをザクル・テトロージェの式という。

ここに端を発して正準集団、大正準集団などの量子力学の展開がなされた。ここから先の量子力学は原子、分子の動向を越えて素粒子理論になるので、興味のある方は成書を読みたい。

27. 2 種類の理想気体の混合

本稿の始めに理想気体の状態方程式になぜ分子量の項がないかという問いかけに対して、運動エネルギーが同一であるからという答えを導いた。そして今マックスウェルの速度分布で、水素分子と酸素分子との間で大きな差が生じることも理解できた。分子量とか各分子の速度というものは物質本来がもつ物理特性である。

そこで図 16 に示すように、ある気体 A は膜を通過するが、気体 B は通過しないという理想の半透膜で囲まれた箱を用意する。ついで、箱の中に気体 B を封入し、気体 A で満たされた環境を考える。箱の中に気体 B を注入する様子を高速カメラで観察すると、注入口は B の濃度が高いが、しばらくすると箱の中の B の濃度は均一になる。これが熱力学第二法則、すなわちエントロピー増大の法則であって、統計力学での「場合の数」が極大値になる考え方と一致する。

一方気体 A を見ると、環境の中にまったく気体 A が存在しない空間がある。当然、熱力学第二法則に従って気体 A がその空間に入り込もう

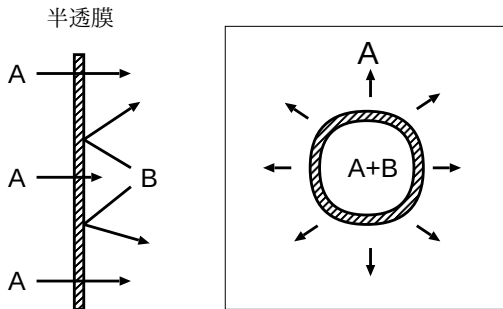


図 16 気管内チューブのカフ圧が上昇する理由

左図はカフの材質で、気体 A は通過するが、気体 B は通過しない半透膜で出来ている。気体 B を封入した容器を気体 A で充満した環境に入れるとカフ内気体 A が入り込み、カフは膨張する。

とする。幸い半透膜の性質で空間内に気体 A が流入する。そして外部と同じ圧力になるまで、気体 A が流入して平衡状態になる。従って箱の中の全圧力は環境の圧力より高くなり、気体 A と気体 B との合計の圧力になる。

ダルトンの分圧の法則は、単に「分圧の合計が全圧になる」というのではなく、ガス分子はそれぞれ独立して (互いに干渉することなく) 行動し、その結果、分圧の合計が全圧になると言ったのである。これがダルトンの提唱した分圧の法則であり、統計力学的には、それぞれの気体は独立した分子エネルギー (理想気体なら並進運動) で空間を均一に満たそうとするエントロピー的な力と解釈できる。

全身麻酔時に気管内チューブのカフ圧が上昇することは良く知られた事実である。カフ圧の上昇は 1 時間程で 15~20mmHg 程度に上昇して平衡状態に達する。また、その程度の圧で十分気管内上皮の血流障害をもたらすという。この現象を防止するには笑気ガスが通過しない材質のカフを作るか、もしくは全身麻酔時と同じ組成のガスをカフ内に注入すればよいことになる。

上記と同じ現象を溶液に適応すると浸透圧現

象になる。蒸留水を血管内投与すると、それに触れた赤血球は外界の水の濃度に対して血球内の水の濃度が薄いために、膜内に水が流入する。その結果、赤血球が膨化し、最終的には溶血する。また、漿質液を投与すれば膠質浸透圧が低下し、循環血液量の維持ができなくなる。我々の医療は熱力学の第二法則を意識して行っているのである。

28. ポテンシャル再考

空間に分子の濃度差があれば熱力学の第二法則により最終的に均一な状態になろうとする。この具体例としてカフ圧の上昇現象、浸透圧などのメカニズムを取り上げた。それでは分子が、その本来の熱運動に加えて別の力が付加された状態を考えてみる。例えば、遠心分離器を回すと分子の質量に比例した遠心力が生じる。また分子が電氣的に帯電しておれば電界を加えることにより電気泳動が生じる場合などである。

分子に力 ϕ が作用するときは分子のエネルギーは離散的なエネルギー準位 ϵ_i を考えるより連続的な運動エネルギーと位置のエネルギーの和として考える方が分かりやすい。(26.1) 式の

$$\frac{1}{N}n(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \frac{1}{f}e^{-\epsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x})/kT}$$

の確率式を利用する。例えば高さである z 軸方向に mgz の重力が加わると、(26.2) 式は

$$\begin{aligned}\epsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}) &= \exp \left[-\frac{1}{kT} \left(\frac{m(u^2 + v^2 + w^2)}{2} + mgz \right) \right] \\ &= \exp \left[-\frac{1}{kT} \left(\frac{m(u^2 + v^2 + w^2)}{2} \right) \right] \exp \left(-\frac{mgz}{kT} \right)\end{aligned}$$

となる。これを $dudvdzdx dydz$ で積分すると、 x および y 方向についてはボルツマンの速度分布の確率表示と同じ結果になり、最終的には平面方向の濃度差は無くなって均一の濃度になるが、 z 軸は速度分布の確率に加えて重力による影響

が生じる。従って、 $z = 0$ での密度を ρ_o とすると、高さ z での密度は

$$\rho(z) = \rho_o \exp\left(-\frac{mg}{kT}z\right)$$

となる。この式を空気密度と考えて、富士山山頂の条件で計算すると、 $z = 3776m$, 空気の分子量 = 29, 気温 0°C , $g = 9.8m/sec^2$ では

$$\frac{\rho(z)}{\rho_o} = \exp\left(-\frac{29 * 10^{-3} * 9.8}{8.314 * 273} * 3776\right) = 0.623$$

すなわち、下界の空気の 62% しかないことが計算される。また、上の式より気温が下がれば気圧も下がることも理解できる。

上記の例からもわかるように離散的なエネルギー準位を連続的な位置ベクトル関数で表記する場合には、

$$\frac{1}{N}n(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \frac{1}{f}e^{-\epsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x})/kT}$$

を使用する。そして各分子にポテンシャル場 ϕ が与えられれば、そのエネルギーについて

$$\frac{1}{f} \exp\left[-\frac{m(u^2 + v^2 + w^2)/2 + \phi}{kT}\right]$$

とするだけで確率計算が可能となる。 f については、前述のごとく定数であり、 $-NkT \ln f$ がヘルムホルツの自由エネルギーとなる。

29. ランダム歩行

オングストローム単位の気体分子が毎秒数百メートルの速さで飛行していることが判ったが、平均自由行程も 0.1 マイクロメータであることから毎秒 50 億回も衝突していることになる。それではある瞬間原点に位置していた気体分子は時間 t ののちでは、原点からどの位置に飛行しているかを検討してみよう。本質的には 3 次元の問題であるが 1 次元モデルを考える。

分子は 1 回のジャンプで 1 単位だけ前進または後退すると考え、その可能性は同様に確から

しい、すなわち確率 $1/2$ と考える。すると 2 項展開が利用でき、

$$\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)^N = \sum_{r=0}^N \frac{N!}{r!(N-r)!} \left(\frac{1}{2}\right)^r \left(\frac{1}{2}\right)^{N-r}$$

となり、展開した各項そのものが確率を示す。つまり、 N 回の試行のうち、右へ移動する回数を r 回とすると、左へ移動する回数は $N - r$ 回であり、その確率が

$$\left(\frac{1}{2}\right)^r \left(\frac{1}{2}\right)^{N-r}$$

で表せ、そのような組み合わせが

$$\frac{N!}{r!(N-r)!}$$

通りあることを示している。原点から出発して N 回のジャンプで m の位置に分子がいるとすると、

$$m = r - (N - r) = 2r - N$$

であるから、

$$r = \frac{1}{2}(N + m), \quad N - r = \frac{1}{2}(N - m)$$

である。従って分子が位置 m に存在する確率は、

$$W(m, N) = \frac{N!}{2^N \left(\frac{N+m}{2}\right)! \left(\frac{N-m}{2}\right)!}$$

となる。 $N!$ が十分に大きい場合の確率計算はスターリングの公式 (4)' を使用する。

$$\ln(W(m, N)) = -N \ln 2$$

$$\begin{aligned} &+ \left(N + \frac{1}{2}\right) \ln N - N + \frac{1}{2} \ln(2\pi) \\ &- \left(\frac{N-m}{2} + \frac{1}{2}\right) \ln \frac{N-m}{2} + \frac{N-m}{2} - \frac{1}{2} \ln(2\pi) \\ &- \left(\frac{N+m}{2} + \frac{1}{2}\right) \ln \frac{N+m}{2} + \frac{N+m}{2} - \frac{1}{2} \ln(2\pi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \ln\left(\frac{2}{\pi N}\right) - \frac{N}{2} \left[\left(1 + \frac{m+1}{N}\right) \ln\left(1 + \frac{m}{N}\right) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{m-1}{N}\right) \ln\left(1 - \frac{m}{N}\right) \right] \end{aligned}$$

となる。 $x \ll 1$ のとき、 $\ln(1+x) = x - \frac{1}{2}x^2$ を

利用して、最終的に

$$\ln(W(m, N)) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2}{\pi N} \right) + \frac{1}{2} N \left(\frac{m}{N} \right)^2$$

となり、大きな N , m に対する確率 $W(m, N)$ は

$$W(m, N) = \left(\frac{2}{\pi N} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{1}{2} N \left(\frac{m}{N} \right)^2 \right)$$

となる。

いま 1 単位のジャンプ、位置 m , 回数 N について物理的な意味付けを考える。ジャンプの時間間隔 (平均衝突時間) を τ , 1 単位 (平均自由行程) を l , 時間を t , 距離を x とすると,

$$t = N\tau, \quad x = ml$$

となる。従って、 N , m との関係は,

$$N = \frac{t}{\tau}, \quad m = \frac{x}{l}$$

となり、確率 $W(m, N)$ は,

$$W \left(\frac{x}{l}, \frac{t}{\tau} \right) = \left(\frac{2\tau}{\pi t} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{\tau x^2}{2l^2 t} \right)$$

と記述できる。ここで拡散定数 D を

$$D = \frac{l^2}{2\tau}$$

として、上式に D を代入すると,

$$W \left(\frac{x}{l}, \frac{t}{\tau} \right) = \left(\frac{1}{\pi D t} \right)^{\frac{1}{2}} l \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4 D t} \right)$$

そして時刻 t に分子が $[x, x + dx]$ に存在する確率を $P(x, t)dt$ とすると、変数 $m = x/l$ より

$$dm = \frac{1}{l} dx$$

また m 値により確率 W は±を含めて 2 倍の答えを返すことを考慮すると,

$$\begin{aligned} P(x, t)dt &= W \left(\frac{x}{l}, \frac{t}{\tau} \right) \frac{dx}{l} \cdot \frac{1}{2} \\ &= \left(\frac{1}{4\pi D t} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{x^2}{4 D t} \right) dx \end{aligned}$$

となり、原点より始まる時間ごとの分子のランダム歩行分布確率が導出される。

30. ランダム歩行からフィックの法則へ

分子のランダム歩行を微小時間で観察する。 $N + 1$ 回目のジャンプで位置 m に分子がいたと考える。それは N 回目には位置 $m - 1$ または $m + 1$ にいたはずである。式になおすと,

$$W(m, N+1) = \frac{1}{2} W(m-1, N) + \frac{1}{2} W(m+1, N)$$

である。 m, N が十分大きく連続関数と考えてテイラー展開を行うと,

$$W(m, N+1) = W(m, N) + \frac{\partial}{\partial N} W(m, N)$$

$$W(m \pm 1, N) = W(m, N) \pm \frac{\partial}{\partial m} W(m, N)$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial m^2} W(m, N)$$

と近似できる。これらを上記の差分式に代入すると,

$$\frac{\partial}{\partial N} W(m, N) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial m^2} W(m, N)$$

となる。再度 $t = N\tau, x = ml$ そして D を利用して確率分布 $P(x, t)$ で書き直すと,

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} P(x, t)$$

となりフィックの第二拡散法則が導かれる。すなわちある位置 x の濃度の時間変化はその位置の回りの濃度勾配 (一次微分) の微分に比例する。実はフィックの拡散法則はマックスウェルがランダム歩行を立案する以前に提唱した法則であり、その係数を D と置いた。そして D の分子運動論としての意味がランダム歩行の解析で明らかになったのである。再び D の式を見ると,

$$D = \frac{l^2}{2\tau}$$

であり、 l は一回の分子のステップ距離、すなわち平均自由行程であり、 τ は分子の衝突時間、分子の運動速度の逆数であるから拡散方程式の比例定数として納得できる。

ランダム歩行の物理的な意味付けを少し捕捉すると、まず平均自由行程 l が長いということは分子どうしの衝突までの距離が長いという意味である。つまり分子の密度が低いことであり、そのことは理想気体の圧力が低いという意味である。また、衝突時間が短いことは分子密度が濃い、すなわち圧力が高いという意味もあるが、これは平均自由行程の短さで相殺され、むしろ分子速度が速いと考えるべきである。つまり、系の温度が高いほど分子速度は速くなる。また分子質量が低いほど分子速度は高くなる。従ってマックスウェルの速度分布と矛盾しない。ランダム歩行とは各分子それぞれがマックスウェルの速度分布の性質に従いながら原点から拡散していく時間系化を表現しているといえる。またその形式はガウスの誤差関数に一致するところが興味深い。

31. フィックの法則

フィックの法則は 1855 年に発表されている。歴史的に見ると、まだ元素や分子の存在が明らかになる前の時代である。彼の提唱する法則は電気のオームの法則、熱伝導のフーリエの式と酷似しており、彼の提唱する法則がオームの法則の焼き直しではないかとの批判を受けたが、分子論、原子論的考察をしていた点で価値は高い。

再びランダム歩行のモデルを考える。図 17 上図のように断面積 A 、横幅 δ の箱が横に 1 列に並んでいる空間モデルについて、位置 x の箱には N 個の分子が存在する。分子は熱運動をしており、 τ 時間に x に存在する分子の半分が右の箱 $x + \delta$ に移動する。また右の箱の分子の半分が左に移動する。従って τ 時間に断面積 A を通過する分子数は右へ移動する方向を正にすると、

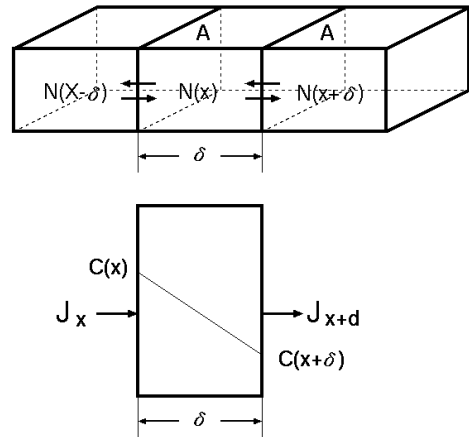


図 17 ランダム歩行よりフィックの法則

上図：断面 A 、幅 δ の箱を示す。分子の振動で隣の箱へ拡散していく。下図：断面 A 、幅 δ の箱を示す。左より分子の振動で J_x の流束で分子が流入し、右より $J_{x+\delta}$ の流束で分子が流出する。

$$\frac{1}{2}N(x) - \frac{1}{2}N(x + \delta)$$

となる。流束 J とは単位時間に単位面積を通過する分子数を示すから、上式を断面積 A と時間 τ で規格化すると、

$$J_x = -\frac{1}{2A\tau}(N(x + \delta) - N(x))$$

となる。ここで右辺の分母分子に δ^2 を掛けると、

$$J_x = -\frac{\delta^2}{2\tau\delta} \left(\frac{N(x + \delta)}{A\delta} - \frac{N(x)}{A\delta} \right)$$

となる。 $A\tau$ は箱の体積を示すから、括弧の中の分数は濃度となり、 δ は x 方向の微小数であることを考慮すると、

$$J_x = -\frac{\delta^2}{2\tau\delta}(C(x + \delta) - C(x)) = -\frac{\delta^2}{2\tau} \frac{\partial C}{\partial x}$$

と書ける。係数 $\delta^2/2\tau$ を拡散係数とよび、 D で表すと、フィックの拡散第一法則とよばれる式、

$$J_x = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

となる。この式は隣接する空間において濃度が同じであれば、分子の移動はなく、濃度差があれ

ば濃い部位から薄い部位に分子が移動し、その移動速度は濃度差に比例することを示す。流束 J の単位は (分子数/単位面積・単位時間) となる。これは分子数を電子の数と読み代えると電流と同じになり、オームの法則と一致し、拡散係数は電気伝導度と対応する。フィックの第二法則は第一法則より導く。図 17 下図に示すように、断面積 A 、幅 δ の空間を考える。時間 τ の間に左方より流入する分子数は $J(x)A\tau$ であり、また、 $x + \delta$ の壁より流出する分子数は $J(x + \delta)A\tau$ となり、その両者の差は $A\delta$ の体積に蓄積する分子数であるから、その濃度の時間変化を $C(t)$ および $C(t + \tau)$ とすると、

$A\delta(C(t + \tau) - C(t)) = (J(x) - J(x + \delta))A\tau$ となる。両辺の A を消去し、また両辺を微小数 δ, τ で割ると、

$$\frac{C(t + \tau) - C(t)}{\tau} = \frac{J(x) - J(x + \delta)}{\delta}$$

すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{dC(t)}{dt} &= -\frac{\partial J(x)}{\partial x} \\ &= D \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C(x + \delta)}{\partial x} - \frac{\partial C(x)}{\partial x} \right) \\ &= D \frac{\partial^2 C(x)}{\partial x^2} \end{aligned}$$

となり、フィックの第二法則が導かれる。

第二法則は濃度の時間変化は濃度分布の二次微分に等しいというものであるが、ある安定した濃度分布でいるということは時間変化が 0 であることを意味する。それは濃度分布の一次微分が定数であることを意味し、図 17 下図に示すように、濃度が直線的に変化することになる。濃度では判り難いから温度の例で示すと、一方が 100℃、他方が 0℃の恒温槽で遮断された均一な壁の内部での温度分布は、定常状態では直線的に変化するという当然の結果になる。

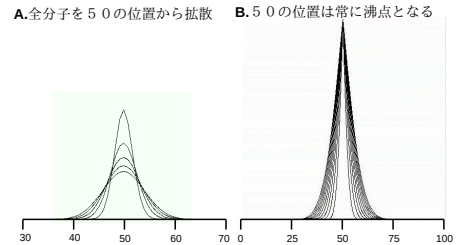


図 18 ランダム歩行のシミュレーション分析

A 図：50 個の箱の中央 (50) の位置に分子を一定数置き、左右に拡散させる。拡散に従って頂点は下がり、丸いガウス分布に似た曲線を描く。B 図：箱の中央 (50) の位置は常に一定の分子を保つ。つまり湧点としてシミュレーションすると、頂点が鋭く尖った減衰曲線を描く。断面 A、幅 δ の箱を示す。

さて、同じランダム歩行のモデルをもちいて、一方ではマックスウェルの速度分布のように丸い頂点の優雅な曲線美が得られ、他方では今回のような尖った指数曲線、そして直線にもなる。また優雅なガウス誤差関数でもフィックの法則が成り立っている。その理由について数値解析を行った。

プログラム上に小さな箱 (アレー) を 100 個作成し、中央の位置 50 に一定量の分子を置く。その箱の分子数に対して一定の割合で左右の箱に分子が流出する。隣の箱でも同様に一定の割合で左右の箱に分子が流出する。従って元の箱にも分子が戻ることもある。このようにして 100 個の箱全て処理することを 1 ループという。1 ループの処理時間が τ となる。このようにして 50 ループ毎に各箱の分子数をプロットした結果を図 18A に示す。確かにマックスウェルの速度分布に似た図が表示され、またループを重ねる毎に山は平坦化していく。

一方、上記と同じ箱アレーであるが、中央の位置 50 での分子数は左右に拡散しても同じ分子数が存在すると仮定して計算する。つまり左右

に拡散して少なくなった分子を補充するわけである．このようにしてシミュレーションした結果を図 18B に示す．結果は予想どおり位置 50 を頂点とする減衰曲線に似た曲線を描く．十分な時間が経てば直線に似た線分となることが予想される．またこのように、位置 50 のような点は分子を絶えず湧きだせているから湧点とか湧き出し口とよぶ．一方、もし分子を絶えず吸い込む場所があればそれを吸い込み口または吸点とよぶ．

繰り返しになるが、ランダム歩行から考えられるフィックの法則とは、単に高い濃度の分子が低い濃度に移動するという一方通行の考え方ではなく、低い濃度の分子も高い濃度の領域に拡散する両方向の考え方が根底にある．しかし、移動の量的な差だけを注目しているために一方通行のように見え、それを記述しているに過ぎない．化学平衡の概念が右にも左にも反応が絶えず繰り返してバランスを保っている概念と同じように認識する必要がある．しかも「自然は均一を好む」というエントロピーの概念に時間的要素を採り入れた本質的な概念を包括していると認識しなければならない．

32. フィックの方程式の定常解

フィックの第一および第二法則を再び記述すると、 $\mathbf{x}$ をベクトルと考えて、

$$J_{\mathbf{x}} = -D \frac{\partial C(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}}$$

$$\frac{dC(\mathbf{x}, t)}{dt} = -D \frac{\partial J_{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{x}} = D \frac{\partial^2 C(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}^2}$$

である．定常状態とは時間 t に関係なく濃度分布が安定した状態を示し、そのことは第二法則の時間変化が 0 の状態を意味する．すなわち、

$$\frac{\partial^2 C(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}^2} = 0$$

の偏微分方程式の解を求めることになる．この

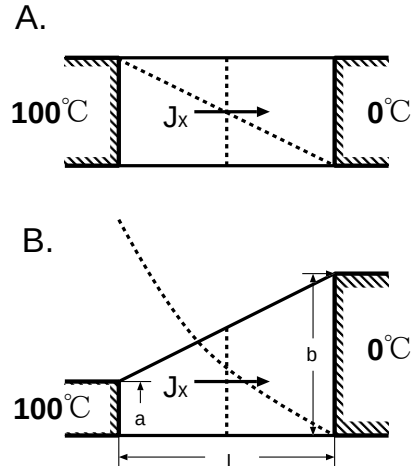


図 19 立方体、台形の熱伝導

A 図：立方体の板の左端を 100°C 、右端を 0°C の高温相に接触する．温度分布が定常になれば内部の温度は直線的に分布する．B 図：左端の辺を a 、右端の辺を b 、長さを l の台形の板の温度分布．温度変化は対数関数になる．

方程式を特にラプラスの方程式とよび、時間に関係しなくなるから当然、拡散係数 D の項は無くてもよい．

立方体熱伝導

いま図 19A. に示すように長さ l の熱伝導体の棒を 100°C と 0°C の恒温槽の間に接触させると、熱は高温から定温に流れて直線的な温度勾配が生じる．このときの温度勾配は $-(100 - 0)/l$ となる．フィックの第一法則に従って、熱伝導率は D と記述できる．等温線 $C(x)$ は x 軸と直角の方向であり、熱の等温線 $C(x)$ は一般にポテンシャルとよび、ポテンシャルの微分は流束となり、ベクトルでは常に直角の関係になる．次にこの図から読み取れることは熱伝導体のどの部分で切り取ってもそこに流れる流束は同じである．もし流束が異なればその部分で熱伝導が停滞し、温度差にむらが生じることになる．つまり任意の $J_{\mathbf{x}}$ は定数である．フィックの第二法則を見ると $J_{\mathbf{x}}$ の微分値は 0 となるから、この温

度分布は定常解を示している。

定常状態の熱伝導は、図 19A. に示されるように、全ての等温面で切断された流束は常に等しくなくてはならない。面積を $A(x)$ で表示すると流束 $J(x)$ は

$$J(x) = -\frac{D}{A(x)}$$

で表される。長さ l の棒では断面積が一定であるから流束 J は定数となる。また流束 J を積分することによりポテンシャルが計算できる。すなわちポテンシャルを ϕ とすると、

$$\phi(x) = -\int J dx = -Jx + C$$

となる。初期値 $x = 0$ で 100°C 、また $x = l$ で 0°C であるから、 J および C が求められ、

$$\phi(x) = -\frac{100}{l}x + 100$$

となる。

台形の熱伝導

図 19B のように、左辺を a 、右辺を b 、長さ l の台形は 100°C に接触する左側の温度勾配は大きく、 0°C に接触する右側の温度勾配は小さいことが予想される。温度分布は、 x に対する断面積の関数 $A(x)$ を求め、それを $J(x)$ 式に代入し、それを積分し、初期値を計算すれば求められる。厚さを 1 として断面積 $A(x)$ は

$$A(x) = \frac{b-a}{l}x + a$$

となる。これを

$$A(x) = mx + n$$

と代入して、流束 $J(x)$ は

$$J(x) = -\frac{D}{mx + n}$$

となる。従って温度分布 $\phi(x)$ は

$$\phi(x) = -D \int \frac{1}{mx + n} dx$$

$$= -\frac{D}{m} \ln\left(x + \frac{n}{m}\right) + C$$

となる。 m, n は既知であり、 D, C に対しては 100°C のとき $x = 0$ 、 0°C のとき、 $x = l$ の値を代入すれば求められる。

円盤の熱伝導

内径 a 、外径 b の円盤の内径側に 100°C 、外形側に 0°C の温度分布を考える。内径側の温度勾配は大きく、外形側に行く程温度勾配が小さい同心円状の温度分布が予想される。半径 r 、但し $a < r < b$ 、の円周は $2\pi r$ であるから、断面積 $A(r)$ は、

$$A(r) = 2\pi r$$

となり、流束 $J(r)$ は、

$$J(r) = -\frac{D}{2\pi r}$$

となり、温度分布 $\phi(r)$ は

$$\begin{aligned} \phi(r) &= -\frac{D}{2\pi} \int \frac{1}{r} dr \\ &= -\frac{D}{2\pi} \ln r + C \end{aligned}$$

となる。従って、 D, C に対しては 100°C のとき $r = a$ 、 0°C のとき、 $x = b$ の値を代入すれば求められる。

ガウスの積分定理へのアナロジー

フィックの法則が電気でのオームの法則に似ていることから、平衡状態の温度分布については、ガウスの定理の適応が可能となる。ガウスの積分定理は図 20 に示すように、

$$Q = \int_F D \cdot dF$$

つまり、熱源などの沸点、吸点を取り囲む表面と流束の積の和はどのように表面を囲っても常に等しく、沸点、吸点の能率に依存するという考えである。前記の立方体、台形、円盤などの例は周囲を熱遮断していただけであって、ガウ

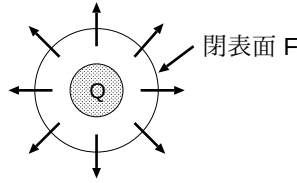


図 20 ガウスの積分定理

ある電荷 Q が空間に存在すると電気力線の密度 D と閉表面 F の内積は電荷に等しい。

スの積分定理を利用して解を求めている。ガウスの積分定理をうまく利用した例を以下に示す。

溶液の球体への拡散

例えば球形の細胞があり、溶液の酸素濃度が C_o 、そして球体の酸素濃度が 0 として、溶液の球体に接するまでの酸素濃度の変化を考える。球体の外側で半径 r の同心円状に仮想球体皮膜で被うとその表面積 $A(r)$ は

$$A(r) = 4\pi r^2$$

であり、流束 $J(r)$ は、

$$J(r) = -\frac{D}{4\pi r^2}$$

となり、温度分布 $\psi(r)$ は

$$\begin{aligned}\phi(r) &= -\frac{D}{4\pi} \int \frac{1}{r^2} dr \\ &= \frac{D}{4\pi r} + C = \frac{k}{x} + C\end{aligned}$$

となる。 $x = \infty$ で濃度は C_o であるから $C = C_o$ となり、球体の半径を a とすると、そのときの濃度は 0 であるから、

$$\phi(a) = \frac{k}{a} + C_o = 0$$

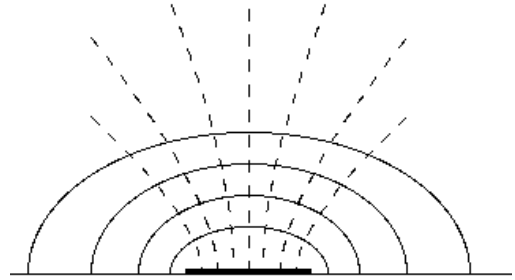
従って、 $k = -C_o a$ が得られ、酸素濃度分布は、

$$\phi(r) = C_o \left(1 - \frac{a}{r}\right) \quad (\text{但し } r \geq a)$$

となる。

溶液の円盤への拡散

細胞表面には糖輸送担体 (GLUT) などが存在し血液中の糖を細胞内に取り込んでいる。その

図 21 半径 s の円板の吸点

円板の吸点、温度分布は楕円状、流束は双曲線になる。

他に幾つもの受容体が細胞表面を覆っている。そこで、受容体の開口部を吸点として、血液濃度 $C = C_o$ との距離による濃度分布を考える。

この現象の理論的解析は電気のアナロジーでは「平板導体により生じる電解」の解析になり、複素関数の等角写像を用いなくてはならない、結果は図 21 に示すように、濃度分布は楕円形、流束は双曲線になり、拡散流は半径 s の円盤に対して、

$$I = 4DsC_o$$

で表される。このような吸点が n 個連なると理論解析は不可能で数値解析により考察しなければなくなる。幸い

$$\frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} = 0$$

の式を解けば定常分布はグラフ表示できる。

厚さ一定の x - y 平面で考えると幅を h に区分して、

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

を差分近似することになり、

$$u_{i,j} = \frac{1}{4} u_{i-1,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j-1} + u_{i,j+1}$$

を逐次計算して安定な状態で終了する。3 個の吸点を並べた濃度分布を図 22 に示す。吸点の直径を 4 コマで示すと、直径分の高さで 50% 程度

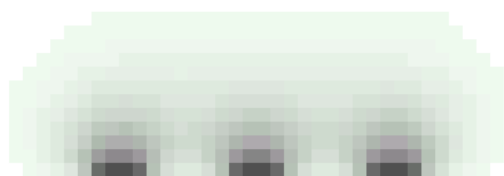


図 22 円板 3 個の吸点シミュレーション
3 個の円板の吸点を差分法での数値解析結果.

の濃度吸収になる．細胞表面の糖輸送担体の分布密度は知らないが，少なくとも Na チャンネルのパッチクランプでは数平方ミクロンに 1~2 個の Na チャンネルが存在することが知られている．しかも数 pA のイオン流入で細胞全体が十分に脱分極するだけの機能が備わっていることが知られているところから，細胞表面にはそれほど多くの受容体が分布する必要がないことがシミュレーション結果から感じとられる．

おわりに

今まで生体膜とは半透膜であり，水は自由に膜を通過するものと教えられてきた．しかし 2003 年アグレのノーベル賞受賞に示されるように，生体膜には水チャンネルが存在し，バゾプレッションにより水チャンネルの透過性が調節されていることも明らかになった．今後，腎集合管での細胞レベルの研究が大きく変革され，新しい輸液理論の発展につながるであろう．花粉粒子のブラウン運動が「生命力」ではなく，水分子との衝突であることを明らかにしたのは 1905 年アインシュタインによるものである．彼は浸透圧についても言及し，アボガドロ数研究の大きなヒントを与えた．同年，彼はその他 3 編の論文を仕上げ，光電効果でノーベル賞を受賞したことは有名である．

フィックの法則はオームの法則や，フーリエの熱伝導の法則と代わらないと考えるのではなく，

拡散現象に対して真正面から向き合った末に得られた法則であり，分子や原子の存在が定かでなかった時代では画期的な発見である．しかもマクスウェルの速度分布に応用され，ランダム歩行で証明されるなど，今日の科学の発展に多大な功績を築いたと言える．2005 年はフィックの拡散方程式の発見 150 周年記念であり，またアインシュタインの業績の 100 周年記念でもある．高校や大学で習った物理化学，そして熱力学を今，振り返ってみると素晴らしい科学の発展であったことを強く感じる．

最後に，理想気体の状態方程式， $pV = nRT$ の意味を再び取り上げたい．なんと，圧力と体積を掛け合わせるとエネルギーを示すのである．圧力とは「エントロピー的な力」と解釈する．そして，その力がどれほど存在するかが「体積」で示される．これはニュートンの運動方程式 $f = ma$ に匹敵するほどの重要な発見だと思う．

エントロピーとは何かとの間に対して「物質の均一化」と答えたい．全ての物質は均一になることを望み，その方向に力が注がれるのであって，その現象を「熱力学の第二法則」と呼び，その力をエントロピーと呼ぶのが筆者の知る妥当な答えである．

参考図書

- 1) ハワード・バーク，寺本，佐藤訳：生物学におけるランダムウォーク．法政大学出版局，1988.
- 2) 鬼頭史城：等角写像とその応用．オーム社，1977.
- 3) 米澤富美子：ブラウン運動．共立出版，1986.
- 4) 小出昭一浪：エントロピー．共立出版，1979.
- 5) 君塚英夫：化学ポテンシャル．共立出版，1984.
- 6) 和達三樹，十河清，出口哲生：ゼロからの熱力学と統計力学．岩波書店，2005.

7) 原島鮮；熱力学・統計力学．培風館，2004.

8) 西條敏美：物理定数とは何か．講談社，1997.

公式集

$$(1) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

有名なガウスの誤差関数である．この積分の証明にはテクニックが必要で，どの数学書でも紹介されている．まず， $ax^2 \rightarrow t^2$ としても一般性を損なわないので，

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-t^2} dt$$

を考える． $t^2 = u^2 + v^2$ と変数を増やすと，

$$\begin{aligned} I &= \iint_D e^{-(u^2+v^2)} du dv \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-v^2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{-u^2} du \right] dv \end{aligned}$$

[] の中積分値が N とすると

$$I = N \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-v^2} dv$$

となり，残りの積分についても u と v が交換されるだけだから積分値は同様に N となる．従って，

$$I = N \times N = N^2$$

計算される．よって I が計算できると答えはその平方根となる．

次に，座標空間 (u, v) を極座標 (r, θ) で考えると， $u^2 + v^2 = r^2$ を利用して，与式の積分は

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} r e^{-r^2} dr d\theta = 2\pi \int_0^{\infty} r e^{-r^2} dr \\ &= 2\pi \left[-\frac{1}{2} e^{-r^2} \right]_0^{\infty} = \pi \end{aligned}$$

となる．従って， $N = \sqrt{\pi}$ と計算される．

次に dx と dt との関係を考える．

$$ax^2 = t^2$$

$$x = \frac{t}{\sqrt{a}}$$

$$dx = \frac{1}{\sqrt{a}} dt$$

より N に $1/\sqrt{a}$ を掛けたものが求める解となる．

$$(2) \int_{-\infty}^{\infty} x^{2n} e^{-ax^2} dx = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n-1)}{2^n a^n} \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

$$(3) \int_{-\infty}^{\infty} x^{2n+1} e^{-ax^2} dx = \frac{n!}{2a^{n+1}}$$

$$(4) \ln n! \simeq n \ln n - n$$

この式をスターリングの近似式とよぶ．

$$\log \prod_{i=1}^n i = \sum_{i=1}^n \ln i = \int_1^n \ln x dx$$

と和は積分に置き換えて

$$[x \ln x - x]_1^n = n \ln n - n + 1$$

となり， $n \rightarrow \infty$ では第3項の1は無視できる．

対数の逆変換を試すと，

$$\ln n! = n(\ln n - \ln e) = n \ln \frac{n}{e} = \ln \left(\frac{n}{e} \right)^n$$

となる．従って，

$$n! = \left(\frac{n}{e} \right)^n$$

とも記述できる．

$$(4)' \ln x! \simeq \left(x + \frac{1}{2}\right) \ln x - x + \frac{1}{2} \ln(2\pi)$$

このスターリングの近似式の方が精度が高く，2項分布よりガウスの誤差関数の導出に適している．

同様に対数の逆変換を試すと，

$$\begin{aligned} \ln x! &\simeq \left(x + \frac{1}{2}\right) \ln x - x + \frac{1}{2} \ln(2\pi) \\ &= x \ln x - x + \frac{1}{2} (\ln x + \ln(2\pi)) \\ &= \ln \left(\frac{x}{e} \right)^x + \ln(2\pi x)^{\frac{1}{2}} \\ &= \ln \sqrt{2\pi x} \left(\frac{x}{e} \right)^x \end{aligned}$$

よって，

$$x! \simeq (2\pi x)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{x}{e} \right)^x$$

となる．

(5) 順列 (permutation)

n 個の異なるものから, r 個を取り出して並べたものを順列という. その総数は ${}_nP_r$ で表す.

$${}_nP_r = \frac{n!}{(n-r)!}$$

例: {a b c} より 2 個ずつ取り出すと, 順列は 6 組できる. 但し順番が異なると別のものとして勘定する. {a b} と {b a} は別である.

(6) 同じものを含む順列

n 個のもののうち, p 個, q 個, r 個が同じである. これら全部を 1 列に並べる順列は,

$$\frac{n!}{p!q!r!}$$

(7) 組合せ (combination)

n 個の異なるものから, k 個を取り出して並べるが, 順番には拘らず要素が同じであれば 1 組と勘定する時は組合せという. その総数は ${}_nC_k$ で表す.

$${}_nC_k = \frac{{}_nP_k}{k!} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \binom{n}{k}$$

例: {a b c} より 2 個ずつ取り出すと. 組合せは 3 組できる. 但し順番が異なっても同じものとして勘定する. {a b} と {b a} は同じである.

(8) 2 項係数

$(p+q)^n$ は 2 項式よばれ, その係数は同じものを含む順列の特殊な状態, または組み合わせと考える.

$$(p+q)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} p^k q^{n-k}$$

(9) 確率 (probability)

ある事象が p の確率で起きる. n 回試行で k 回事象が発生する確率を $P(r)$ とすると,

$$P(k; n, p) = {}_nC_k p^k (1-p)^{n-k}$$

p の確率で起きることは $(1-p)$ の確率で起きないことであり, $q = 1-p$ となる. $p+q = 1$ とすると, 2 項式の各項が確率を示すことになる.

例: 確率 $1/2$ が 3 回続く.

$p = 1/2, n = 3, r = 3$ より,

$$P(3) = \frac{3!}{3!(3-3)!} \left(\frac{1}{2}\right)^3 \left(1 - \frac{1}{2}\right)^{3-3} = \left(\frac{1}{2}\right)^3$$

(10) ラグランジュの未定乗数法

条件 $\phi(x, y) = 0$ の下で, 関数 $f(x, y)$ を極値にすることを考える. そのためには新しい関数,

$$h(x, y, \lambda) = f(x, y) + \lambda \phi(x, y)$$

を作り,

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial \lambda} = 0$$

を解く.

例: 面積 $A = 2m^2$ の長方形がある. 辺の長さを最小にするには?

辺の長さを x, y とすると, $\phi(x, y) = xy - 4 = 0$, また $f(x, y) = 2(x+y)$ となる.

$$h(x, y, \lambda) = 2(x+y) + \lambda(xy - 4)$$

より,

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 2 + \lambda y = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 2 + \lambda x = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial \lambda} = xy - 4 = 0$$

よって, $x = y, xy = 4$ となり, $x = 2, y = 2$ が極値となる. 極値が最大, 最小であるかは別に吟味する必要がある.

(11) 微分公式

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{f(x)} \right) = -\frac{f'(x)}{f(x)^2}$$

$$\frac{d}{dx} \left(e^{f(x)} \right) = f'(x) e^{f(x)}$$

$$\frac{d}{dx} \ln f(x) = \frac{f'(x)}{f(x)}$$

(12) 分布関数

100 点満点のテストで 10 点毎に得点を得た人数を $n(x)$ と頻度表記述する. 全員で N 人いた

とすると,

$$N = \int_0^{100} n(x) dx$$

である. 一般に分布関数 $g(x)$ は確率関数を示すから,

$$g(x) = \frac{1}{N} n(x)$$

である. 従って,

$$1 = \int_0^{100} g(x) dx$$

である. その平均値は, 分布関数と代表値をもちいて,

$$\bar{x} = \int_0^{100} x g(x) dx$$

で計算できる. 一般に物理量 $A(x)$ とすると, その平均値は

$$\bar{A} = \int_0^{100} A(x) g(x) dx$$

である.

(13) *div* と *grad*

div は divergence(発散) の略, *grad* は gradient(勾配) の略で演算子である. ベクトル $\mathbf{v}$ (例えば流れ) を x, y, z 方向で示すと,

$$\text{div } \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{v}$$

と書け, 演算結果はスカラーである. ∇ はナブラと読む.

ポテンシャル ϕ はスカラーであって方向性はない. 例えば, 温度, 気圧, 電圧, 高度はポテンシャルである. ある位置 s のどちらの方向にポテンシャルが高いかということは山頂を目指すことと同じで意味のあるベクトル情報であり, それを勾配といい, ベクトルである.

$$\text{grad } \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = \nabla \phi$$

ポテンシャルと勾配は直交する. また電圧の勾配は電場 (電気力線) である.

(14) ∇ 演算子

3次元デカルト空間

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

2次元極座標 (動径 r , x 軸より θ)

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \right)$$

3次元極座標 (動径 r , x 軸より ϕ , z 軸より θ)

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}, \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \right)$$

3次元円柱座標 (動径 r , x 軸より ϕ , $x-y$ 平面の射影 ρ)

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial \rho}, \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \phi}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$\mathbf{v}(s, t)$ のように流れが位置 s と時間 t の関数であれば, ある位置の Δt 時間の流れの変化量は

$$\frac{\partial v}{\partial t} \Delta t$$

で計算できる. また同一時刻における2点間の流れの変化量は

$$\frac{\partial v}{\partial s} \Delta s$$

で計算できる. 従って, 時間, 位置を含めた変化量 (全微分) は

$$\Delta v = \frac{\partial v}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial v}{\partial s} \Delta s$$

となり, その時間変化率は dt で両辺を割り,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial s} \frac{ds}{dt}$$

となる.

(15) マイヤーの関係式

定圧比熱と定容比熱の関係,

$$C_p = C_V + R$$

をマイヤーの関係式とよぶ (6.2 式参照). 断熱過程の計算にマイヤーの関係式の変形を利用するから準備をしておく. $C_p = C_V + R$ の両辺を R で割ると,

$$\begin{aligned}\frac{C_V}{R} &= \frac{C_p}{R} - 1 = \frac{C_p}{C_p - C_V} - 1 \\ &= \frac{C_p - C_p + C_V}{C_p - C_V} = \frac{C_V}{C_p - C_V}\end{aligned}$$

となり,

$$\frac{C_V}{R} = \frac{C_V}{C_p - C_V}$$

が導かれる.

(16) 熱力学公式

理想気体状態方程式

$$pV = nRT$$

内部エネルギー

$$U = \frac{3}{2}nRT$$

熱力学の第一法則

$$dU = dQ - dW$$

外界への仕事量

$$dW = pdV$$

エンタルピー

$$H = U + pV$$

エントロピー

$$dS = \frac{dQ_r}{T}$$

ヘルムホルツの自由エネルギー

$$F = U - TS$$

ギブズの自由エネルギー

$$G = H - TS$$

定容熱容量

$$C_V = \frac{dQ_V}{dT} = \frac{3}{2}R$$

定圧熱容量

$$C_p = \frac{dH}{dT} = C_V + R = \frac{5}{2}R$$

理想気体の γ

$$\gamma = C_p/C_V = 5/3$$

マイヤーの関係式

$$\frac{dQ}{dT} = C_p = C_V + R$$

断熱過程

$$pV^\gamma = \text{Const.}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{Const.}$$

私の音楽趣味：5歳から69歳まで

諏訪邦夫*



はじめに

2003年のJSTAの前夜祭の余興は、内田先生が「趣味の募集」をされました。その内容は「人に自慢できる、驚くような趣味や道楽(パソコンやプログラム以外)をご披露ください。ただし、以下の基準のうち最低1つを満たすものとします」という条件です。

- その趣味を20年以上、または年齢の半分以上続けている。
- その趣味に対して、年間50万以上、または総額で100万以上投資している。
- その趣味に関して、雑誌などで紹介されたことがある。
- その趣味に関する大会で入賞したことがある。

私の音楽趣味は、条件のはじめの二つに十分に合致するので、応募しました。実際のプレゼンテーションは、音楽をつけてクイズとして行いました。この文章はそれから2年以上後になって、少し手を入れてふつうの文章にしたものです

小学下級生まで

私は幼時より音楽好きで、5歳位まで童謡や軍歌を沢山(レコードで)聴いて育ちました。自宅にはいわゆる「電蓄」がありました。当時はまだゼンマイを手で巻いてレコードを回転させ、それを「サウンドボックス」と称する音量拡大の装置で機械的に音を聴くようにした装置が主流でしたが、「電蓄」というのは回転はモーターで、音量拡大は真空管アンプ、それでスピーカーを鳴らす訳で、基本は今日の装置と似ています。

当時は、「シェラック」という樹脂のレコード盤を鉄の針で擦って音を出すので、その針交換を自分でして、スイッチを入れて繰り返し聴いたようで、兄や姉と較べて「蓄音機好きの子供」だったと言われています。この時点ではいわゆる「洋楽」はまったく登場せず、少なくとも記憶にはありません。覚えているのは、童謡「私の人形」「池の鯉」、歌の入ったお話「桃太郎」、「かちかち山」、軍歌「月月火水金金」(「朝

だ、夜明けだ、潮のいぶき……」)、落語「兵隊落語：山下啓太郎(柳家金語楼)」などです。ほかにもいろいろあったのでしょうか。

その後、戦争から「疎開」という音楽に関する「暗黒時代」に入ります。私は小学校1年に入る1943年4月の少し前に浦和に越し、そこで3年生の初めまでの2年余りを過ごし、そこからさらに群馬県の富岡市に疎開して、戦後2年半を過ごしました。その浦和時代から終戦後の合計5年間、楽器はおろか、レコードもなくなりました。正確に言えば、浦和には電蓄そのものは残っていたのですが、具合が悪くなって修理ができず、それにレコードや針が入手できなくなって、電蓄を修理する意味もなかったのでしょう。

小学校1、2年はオルガンのある友人のお宅で、それを何回かいじった記憶があります。浦和の小学校にはピアノはなくて、「ピアノの音」はラジオでしか聞けませんでした。私の家は貧しくはなかったけれど、オルガンやピアノを買う雰囲気と経済力はなかったのでしょう

音楽らしいものは、学校の授業以外はラジオで聞こえる軍歌だけです。それでも「お山の杉の子」(昔、昔のその昔、椎木林のすぐそばに……)という楽しい歌を覚えています。

浦和から群馬県富岡市に疎開する時は、「慌てふためいて」の引越して多数のレコードも本もすべて廃棄したようです

1945年(小学校3年生)の4月に群馬県(現在の富岡市)に疎開し、ここはもっと「暗黒時代」で軍歌だけしかありませんでした。

戦後の流行歌とハーモニカ

終戦(1945年8月)以降になると、村で「演芸会」というのが催されるようになって、流行歌をたくさん知りました。「赤城の子守唄」「赤城時雨」「勘太郎月夜」「湯島の白梅」「旅の夜風」など、戦前から戦争中の流行歌です。他の情報が少なかった故もあるでしょうが、小学校3年生の記憶力は素晴らしくて、今でも

よく覚えています。

戦後、小学校4年になって新しい流行歌がラジオから流れ、誰もがいう「りんごの唄」「青い山脈」、「東京の花売り娘」、「東京ブギ」なども思い出します。もっとも、「りんごの唄」や「青い山脈」のような、内容は明るいはずの唄が何故短調なのか、当時も今も不思議に感じます。私の感性は、平均的日本人とずれているのでしょう。その頃、姉が女学校に入って「女学校愛唱歌」を友人たちと歌っていたのも覚えています。「故郷の廃家」や「故郷を離るる歌」などは、姉の歌で覚えたのではないのでしょうか。

戦後1年以上たって4年生の終わりか5年生になって、ハーモニカをやっと手に入れて随分楽しみました。今でも知っているメロディはすぐに出せるようです。当時、「鐘の鳴る丘」という放送劇があって、そのテーマソング(古関裕而作曲)が好きでよく吹いたのを思い出します。

私の母は音楽の素養は特にありませんでしたが、でも音楽は好きだったので。自分の知っているメロディーを歌って、カルメン前奏曲とか、天国と地獄とかでしたが、私がそれをハーモニカで真似た記憶があります。後で原曲を聴いたら、あまり違わないのに感心しました。「洋楽」を聴いた最初が、母の歌と自分のハーモニカだというのは考えてみると実に可笑しい!

中学生：洋楽レコードの聴き始め

6年生で東京に戻り、はじめてピアノの上手な音楽の先生(長妻莞爾先生)に遭遇しました。特別な指導は受けませんでしたが、男の子としては珍しく音楽好きなので、可愛がって貰った記憶があります。運動会の合唱で「新しき星」という歌の指揮をしました。ピアノを実際に聴いたのもこれが初めてで、この小学校は戦災を逃れて、グランドピアノが2台残っていました。

小学生から中学下級生の頃は相変わらず歌謡曲が好きで、「憧れのハワイ航路」「湯の町エレジー」など大好きでした。もっとも、こういうのは真面目な児童は歌うものではなくて、実際に声を出して歌うようになったのは大学生になり、さらにカラオケ時代に入ってからと記憶しています。ラジオ歌謡も好きで、「山小屋の灯」や「森の水車」などを覚えていて、最近では藍川由美さんの素晴らしいCDを何枚も入手して楽しんでいます。

西洋音楽を聴き始めたのは中学生になってからで、もう仕事についていた長兄が各種の洋楽が好きで、軽音楽も沢山ありましたが(タンゴとかビングクロスビーとか、灰田勝彦もありました)、クラシック音楽のレコードもけっこう持っていて、それを手回し(ゼンマイ式)の蓄音機で聴くようになりました。中学2年生の夏休みの宿題に「自分の好きな曲1曲の感想」があっ

て、「セヴィリアの理髪師序曲」を選びました。その時には、ベートーヴェンの運命(トスカニーニ/NBC交響楽団)と田園、シューベルトの未完成、モーツァルトのアイネクライネ(以上はワルター指揮ウィーンフィル)とトルコ行進曲(裏がヘンデルの調子の良い鍛冶屋で、ギーゼキングのピアノ)、シュトラウスのウィーンの森や青きドナウなどのレコードを聴いていた記憶があります。その時に好きになった「田園」は今も好きで、ワルター指揮の演奏は、オーケストラこそコロンビア交響楽団に入れ替わっていますが、今もよく聴く曲と演奏で、「明るい音楽が好き」という気分は五十年後の今も変わりません。

中学3年のときに、「カーネギーホール」という映画が上映され、ワルター(マイスタージンガー序曲)、ルービンシュテイン(英雄ポロネーズとファリャの火祭りの踊り)、ハイフェッツ(チャイコスフキーのヴァイオリン協奏曲の終楽章)、ロジンスキー(運命の終楽章)、ストコフスキー(チャイコスフキーの第5交響曲の終楽章)などの大音楽家が全曲演奏する姿をみせてくれて随分楽しく、大学生になってから再上映にわざわざ出かけたりもしました。ルービンシュテインが、腕を高く上げてドンチャカドンチャカ弾く「火祭りの踊り」が特に面白くて記憶に残りました。その後、テレビでも観たかも知れませんが、オーケストラは、ニューヨークフィルです。

高校生：音楽会に通いはじめる

高校生になって音楽会に通いはじめます。後に国文学者になった野山嘉正君という友人が誘ってくれました。当時は唯一に近かった音楽会場の日比谷公会堂で、園田高弘氏がブラームスの第2ピアノ協奏曲(山田和男氏指揮)を聴いたのが最初です(他に、大学祝典序曲と交響曲1番)。山田氏の身体の動きが力強く「カッコいい」と感じた記憶があります。同じ園田高弘氏が同じブラームスの2番のピアノ協奏曲をザヴァリッシュ氏の指揮で弾くのを、園田氏の亡くなる少し前の2000年頃にテレビで観て本当に懐かしく感じました。

この頃、「レコードプレーヤー」というラジオにつないでレコードを鳴らす装置を入手しました。まだSPレコード用(78回転)でしたが、後にLPを聴けるように自力で改造しました。

レコードを買うことを覚えて、はじめは上記の英雄ポロネーズ(演奏はホロヴィッツ)とか火祭りの踊り(こちらは映画と同じルービンシュテイン)といった一枚ものでしたが、次第に嵩じてモーツァルトのジュピター交響曲、ベートーヴェンの第7交響曲や「皇帝」、ブラームスのヴァイオリン協奏曲などの大物も買いました。「皇帝」はすりきれるまで聴いた記憶があり、シュナーベル(P)、サージェント指揮BBCオーケストラというものでした。1曲聴くのに10面の反

復が必要で、今でもどこで途切れて裏返したかを覚えています

上記の野山嘉正君が私を音楽に導いてくれた最初の友人で、何回か一緒に音楽会に行き、その後もずっと付き合っています。もう一人、中村孝司君とは高校3年間から東大教養学部時代も一緒に音楽会に通ったりしましたが、ずっと後に帝京大学市原病院で一緒に働きました(内科、消化器)。

大学教養学部時代 55-57

[レコードを借りる]

大学(教養学部)に入って(1955年)LPになり、音楽を楽しむクラブに所属して、会社からレコードを借りてはコンサートをやりました。自分でも少しは買いましたが、ラーメン一杯が25円位の時代に、当時のLPは今のCDと同じ2千5百円位でしたから、「会社から借りる」のは本当にありがたく、これでモーツァルトやベートーヴェンはもちろん、マーラーやオペラも沢山聴きました。「大地の歌」をこの時に好きになったのを覚えています。ドイツ語に凝っていて、シュベルトを中心にドイツ歌曲も一生懸命に聴きました。

この頃の自分のシステムは、古いSP用のターンテーブルの速度を強引に33回転に落とし、針とアーム(「ピックアップj」)だけ購入して、ラジオにつないだものです。

[歌声運動とロシア民謡]

当時の東京大学駒場キャンパスは「歌声運動」の全盛期でした。私は歌のサークルに所属はしていませんでしたが、それでもロシア民謡を中心にいろいろと歌ったものです。それで歌を沢山覚えたのと、重唱の面白さを知ったのはありがたいことでした。伴奏はアコーディオンが多かったのですが、私は触れる機会がなかったのが残念です。「青年歌集」という楽譜の本が数冊あってよく参照しました。ロシア民謡は、まもなくダークダックスが活躍し始めて、さらに美しい歌としてレコード・ラジオ・テレビで楽しむようになりました。

[無料の音楽会]

この頃の音楽生活を豊かにしたものに、NHKコンサートホールと土曜コンサートがあります。当時は、ラジオ放送だった「NHKコンサートホール」と「土曜コンサート」はいずれも公開で、前者はNHK交響楽団が、後者はいろいろでしたが主に東京フィルハーモニーが担当していました。往復葉書で申し込むと抽選で当たるシステムで、N響のほうは倍率が高かったのか、ほんの数回しか行っていませんが、「土曜コンサート」は何度も行きました。当時新橋(芝田村町)にあったNHKの第一スタジオでの録音で、担当のアナウンサーの方がいつも録音の前に「拍手は、強くなって良いから数を多くして欲しい」という注文をしていたの

を記憶しています。どうもプロデューサーを兼ねていたような印象ですが、そんなことがあるのでしょうか?

一度は、プログラムが随分進んでから録音がうまくいっていないことが判明して、その分を完全に演奏し直して、演奏者は大変だったでしょうが、聴いているほうは楽しめました。その曲目は、オッフェンバッハの「天国と地獄」序曲と、スメタナの歌劇「売られた花嫁」から何曲かでした。何故か、後者のほうに木琴が加わっていて、前に出て演奏しており、木琴の演奏を初めて観たと記憶しています。

「NHKコンサートホール」のほうで記憶に残っているのは、グリーグのペールギュント組曲で、あの有名な「朝」がとても美しく、それ以来ずっとこの曲が好きになっています。これは医学部に入ってからかも知れません。

それに関係して、こんな経験があります。私が大学一年生だった頃、私の姉は当時早稲田大学に通っていて、私より三歳年上で四年生だったはずですが、その姉が、大学の友人からこの貴重な「NHKシンフォニーホール」のチケットを二枚貰いました。一枚は音楽好きの弟、つまり私にという意味です。ところが姉はそのチケットを二枚とも私に譲り、私が自分の友人を誘って出かけました。チケットを呉れた姉の友人もきていて、ふつうに会話を交わして別れました。その友人とすれば姉を誘いたかったのに、大学に入りたての男が二人登場して残念だったろうとは後で気付いたことですが、それをあからさまに示して悟らせることがなかったのはたいしたものと感じています。私も鈍かったのでしょうか。

この姉は、兄の友人と結婚して家庭をつくりながら、英語を教える仕事をずっと続けています。一方、私と一緒にいった友人の明石勝興君は、その後東京大学医学部を出て優秀な脳神経外科医になりましたが、1969年4月の高圧タンク爆発事故で亡くなりました。

東大医学部：ピアノを習う(1957～)

東京大学は医学部入学に試験があり、この試験に通ってはじめて心理的に余裕ができて、医学生の4年間一生懸命にピアノを弾きました。ギクシャクでしたが、モーツァルトのK330とK331のソナタ、ショパンのワルツを2曲ほど何とかマスターしました。K545は音符はやさしいのに、速いパッセージが滑らかに弾けず「弾いた」という意識になれませんでした。他にベートーヴェンのロンド(ソナチネアルバムにあるハ長調の曲)もギクシャクながら弾きました。

そうそう、チェロとクラリネットの友人と合奏を試みましたが、人前で弾けるレベルにはなりませんでした。ベートーヴェンの三重奏曲「町の歌」です。

その後、自分の弾けた曲を何とか思い出そうと、何度か努力しましたが、結局戻ってきません。

【アンプとチューナー】

医学部に入って間もなく、真空管アンプを作りました。多分 1957 年で、2A3 という三極管を出力管に使ったのですが、スピーカーがボロで性能は出せなかったようです。2 年後、FM 放送が始まってチューナーを組み立てました。こちらは、高周波部分が自力では無理でキットを組み立てただけですが、無事に鳴ってしばらく使い 10 年後にバイト先の病院の手術室に持って行って聴きましたから、けっこう長寿でした。その頃使用したテスターが今も残って、つい最近も DVD プレーヤーの TV 線の配線に持ち出しました。

どの時点か記憶にありませんが、赤井という会社がテープレコーダーを安く売り出して、長兄にねだった買って貰った記憶があります。オープンリールです。上記のアンプから直接録音できるように配線して、けっこう良い音で FM 放送やレコードが録音できました。ここまではモノラルです。

【ハイフェッツなど】

音楽会としては、ハイフェッツ(クロイツェル)、ギーゼキング(得意のドビッシェもの「子供の領分」の他に、ベートーヴェンの後期のソナタがあったようですが、どれだったか覚えていません)などを聴いた記憶があります。そうそう、チボー(ヴァイオリニスト)のリサイタルの券を雨の中で行列して入手したのに、来日途中の飛行機事故で亡くなったのも記憶しています。

医学生だった頃、東フィルの会員だったことがあり、「グランドキャニオン」が大好きになりました。たしかプログラムは他にハイドンの「軍隊」とイベールのサクソフォン協奏曲で、会場にお客さんが少なく、「プログラムが貧弱すぎる」と非難されましたが、私は「グランドキャニオン」を堪能しました。

61 年に医学部を卒業し、インターン・医師のはじめは時に音楽会に行き、LP も買いましたが、もうステレオ LP が話題になり始め、一方で留学の話がはじまって音楽に情熱を注ぐ余裕はありませんでした。

インターンの時にタイプライターを習ったのは「私のパソコン史」に書きましたが、ピアノを習ったのが生きた気持ちを抱いています。

アメリカへ行く直前の 1963 年春に、若き日の小沢征爾氏指揮 N 響を聴く機会がありました。N 響とケンカ別れする直前で、プログラムはシュトラビンスキーの「火の鳥」、ロイアンダーソンの数曲(「タイプライター」、「トランペットの子守唄」、「シンコペーション時計」他)、それにガーシュインの「パリのアメリカ人」です。小沢さんの踊るような指揮振りが印象に残り、今の怖い顔に違和感があります。小沢さんはボストンでは聴く機会がありませんでしたが、日本では数年後にもう一度聴いた記憶があります。

最初のアメリカ生活

アメリカ(63-66)では、ボストン交響楽団を中心に音楽は沢山聴きました。常任指揮者はラインスドルフでしたが、他にミュンシュを聴いたのを覚えています。他のオーケストラでは、カラヤン/ベルリンフィルでベートーヴェンの田園を聴きました。セル/クリーブランドやバルビローリ/ハレーも聴きましたが、印象の強かったのは、ザヴァリッシュ/ウィーン交響楽団(ウィーンフィルではない)がたしかシューマンのピアノ協奏曲などをやった後で、アンコールに演奏した碧きドナウの演奏です。ピアニストではグレンゲールド、リヒテル、アシュケナージ、ゼルキンも聴きました。そうそう、ゼルキンとは縁があって、フィラデルフィアでも東京でも聴いています。それからルービンシュテインも聴きましたが、この人は本当に観て楽しいピアニストだと痛感しました。舞台上上がって歩く姿から、ピアノを弾く様子などが美しいのです。

ボストンでは自分で音楽をすることはほとんどありませんでした。ピアノがあるといじってみて、「弾けなくなっている」のを確認する意味が大きく、私のピアノは身についていなかったのです。

ボストンから帰国するとき、ステレオ LP が安いことに気付いて、50 枚位も買ってきたでしょうか。ニューヨークへ行くと「Sam Goody」というレコード店に行くのを楽しみにしていました。ベートーヴェンの交響曲全曲(カラヤン/ベルリンフィル)やギーゼキングの弾くモーツァルトのピアノソナタ全曲などを持ちかえりました。

日本へ戻って早速ステレオ装置を一式購入しました。1966 年暮れのことです。ラインアップは

- マグネフロート MF202 ターンテーブル
- グレースのアームと F8L カートリッジ(アームは後に SME に付け替えて現用)
- 山水 777 のアンプリファイアとチューナー
- トリオのスピーカーシステム(中音と高音はホーン)

そのセットは大部分二度目の渡米の際に、スピーカーは日本で、アンプはアメリカで処分しましたが、プレーヤー部分の基本は現在も使っており、最近もターンテーブルのベルトが切れましたが、2000 円ほどで購入して無事動いています。

二度目のアメリカ生活(69-72)

二度目のアメリカ生活(69-72)では、アルテックの大きなスピーカーを手に入れ、沢山のステレオ LP を聴きました。サンディエゴで購入した 300 枚のステレオ LP はその後あまり買い足さないまま、CD 時代になりました。

丁度、カセットステレオでドルビー付きが出始めて、ステレオ LP や FM 放送を録音して通勤(片道 20 分)の車の中で聴きました。当時のテープも随分いろいろ

あってその後しばらく聴きましたが、さすがにもう使いません

4 チャンネルの実験をしたことがあります。安モノの大きな（つまり低音も出る）スピーカーをラ디오シャックで買い、それをガレージセールで買った箱にいて、ステレオの両チャンネルから差信号をとりだして部屋の後に置き、ボリュームコントロールだけつけて遊びました。音が厚くなったり、時には見事に部屋の中を跳びまわったりして面白かったけれど、「音が濁る」ことも多い点に気付いて結局止めました。1000 ドルのスピーカーと 20 ドルのスピーカーを組み合わせるのは、所詮無理だったのでしょう。DVD の 5.1 チャンネルに魅力を感じないでいる遠因かも知れません。

二度目のアメリカ生活では、結婚して子供がおり、ボストンと違ってサンディエゴは音楽の豊かな町でもなかったの、音楽会にはまったく行きませんでした。しかし、ステレオ装置と LP と FM 放送とテープのお蔭で音楽生活は豊かだったと感じています。

日本に戻って（73 年以降）

1972 年暮れに日本に戻り、持ち帰ったアルテックを中心にシステムを組みなおしました（上記の山水はアメリカを離れる時に、けっこう高価に売れました）。これが現在でも私のステレオシステムの中心です。アンプは 1975 年頃に購入したヤマハの C2(プリ)B2(メイン)で、先日 B2 が故障しましたが、無事に直りました。

日本に戻ってしばらくして、シンセサイザーに興味をもって本を読み、お店でもいじってみて、結局時間とエネルギーと多分お金も考えてあきらめました。残骸が書棚に残っています。その記憶が、MIDI にとりつづのを早めたでしょう。

音楽特に装置に力を入れたのはこの辺までで、1980 年前後からパソコンに熱を上げて、ステレオ装置はその後ほとんど改良していません。CD は買いましたが、システムの基本は同じです。

いつのことでしょうか。読売日響の定期に入って東京文化会館に通った記憶があります。東大病院の私の部屋から東京文化会館までは歩いて 10 分位しかかからず、ぎりぎりまで仕事をして出かけると音楽の気分になれず、わざわざ遠回りしたこともありました。ある著名なバイオリニストがパガニーニの協奏曲 1 番を弾くので楽しみにして出かけたのに、神経質な音楽で楽しくなくてがっかりした記憶があります。もう一つ、義父から「バラの騎士」の切符を貰って、わざわざレコードを購入して勉強して出かけたこともあります。ウィーンだかベルリンだかのオペラの公演だったはずです。

1980 年代の始めでしょうか。自宅の増築の際に音

楽を聴ける部屋を作りました。土地のせいもあって不整形で、ピアノとスピーカーをおくところは床下に石を積んで変な音の出るのは防いであります。

MIDI とパソコンと

MIDI を始めた事情はこうです。私はマッキントッシュはほとんど使いませんでしたが、1992 年頃に大きな IBM 互換機を入手し、ウィンドウズ 3.1 を使い始めてすぐのことです。（ノートパソコンは、1988 年に東芝の IBM 互換機（英語専用）を入手して使っていました。

当時のパソコンは、メモリ 8MB でハードディスクは 200MB、他に何も無い「裸」です。それに後からいろいろと機器を追加したのですが、その一つが CD-ROM ドライブで、これを購入したら、Sound Blaster という簡単な「音源」が一緒についてきて、パソコンから音が出ることを知りました。しばらくはこれで音楽を聴き MIDI データなどを入手していましたが、国立小児病院の近藤陽一先生に本格的な「MIDI 音源」のことを教えられ、パソコンの本などで勉強してローランドの VS55 を入手していろいろと遊びました。2006 年の現在と違い 1990 年代初期のパソコンは弱体で「MIDI 音源」は外付けが必要だったのです。

始めは Nifty-Serve の FMIDICLA からダウンロードして聴くことが多かったのですが、偶然「Pianist」というデータを入手して感激しました。これは、MIDI のキーで「作った」ものではなくて、上手なピアニストが MIDI ピアノを弾いて入力したもので、音楽としての質が上等で、しかも 200 曲以上入っていました。その中のいくつかを、楽器を変えたり速度を変えたり、音程を変えたりして「自作の変奏曲」を作って、それをテープに録音してウォークマンで聴くのが楽しみでした。5 分の曲から 30 分の大曲ができるのです。ヘンデルの「調子のよい鍛冶屋」がその一つで、それ自体が変奏曲なのに、それをさらに変奏曲にするので、「二重の変奏曲」になります。今聴いてみても、なかなかよく出来ていると勝手に感心しています。

「Pianist」はその後 5 枚の CD-ROM にまとめられて合計 1000 曲近くもあり、モーツァルトのソナタやベートーヴェンのソナタが全曲入っており、パソコンに写して時々聴きます。

それより少し前の 1980 年頃です。子供たちが中学受験の学齢に達して、家で音楽を聴くことがむずかしくなり、ワイフにウォークマンを「着せられました」。当初はバカにしていたのですが、まもなくその素晴らしさのトリコになって、スピーカーから音を出す機会が急激に減りました。この時に入手したのは、ソニーの 2 代目のウォークマンでした。ウォークマンは携帯して使うので、落とすことがあって平均寿命は 1 年くらいだったと記憶していますから 10 台以上も購入した

でしょう

現在の状況

音楽趣味はクラシック音楽にほぼ限られています。ビートルズは聴きましたが、「好き」というレベルには届かず、持っているのはホワイトアルバムだけです。

ピアノはまったく弾きませんが、それでも少し弾いてよかったと思うのは、その後ピアノ音楽が際立って好きになり、しかもけっこう分析的に聴けるようになった点です。ですから、オーケストラを別にすれば、私は他の楽器の奏者はあまり聴いていないのに、ピアニストを多数聴いています。その中には、ギーゼキングやバックハウスやケンプのような今は歴史上の人物になっている大ピアニストや、リヒテルやグレングールドのように、演奏会の極端に少ないまま亡くなった方もいます。

私自身のピアノは浅草の家においたままで、甥や姪が弾いたようです。自宅にはワイフのピアノがあり、このほうが少し大型です。子供達はこれで育ち、特に長男はショパンを中心に沢山弾きました。ワルツから始まって、「幻想即興曲」「軍隊ポロネーズ」「スケル

ツォ3 番」「英雄ポロネーズ」などの大曲をマスターして、高校生の頃はいつも発表会で「とり」をとって弾いていましたが、今はあまり弾きません。むしろ途中からポピュラーに傾いた次男のほうが、今も時に弾いているようです。いずれにせよ自宅のピアノは今では弾く人がなくて宝の持ち腐れなのに、一応調律はしています。

携帯用の音楽プレーヤーは MD を経由することなく、2003 年の暮れに直接デジタルウォークマンに切り替えました。当初は Rio という 20GB の装置を使いましたが、2 年半で電池がダメになって交換が必要になったのを機会に、東芝の 60GB の装置を加えて併用しています。前者はファイル形式を変えませんが、東芝はファイルに修飾を加える点で少し不便ですが、大会社はみなこの方式のようです。CD やアナログテープから MP3 に変換する技術が進歩して、最近ではモノ録音のテープなども Wave ファイルを擬似ステレオ化して、ヘッドホンで聴いても違和感なく聴けるようにしています

以上

第 22 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会

プログラム・抄録集

会長： 崎尾 秀彰（獨協医科大学救急医学教授）

会期： 2004 年 11 月 27 日（土）

会場： 獨協医科大学開大 30 周年記念講堂

栃木県下都賀郡壬生町北小林 880

第 22 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会プログラム

--- 獨協医科大学開大 30 周年記念講堂 ---

開会の辞 8:55～9:00

一般演題 1 9:00～9:50

座長： 杵淵嘉男（東海大学開発工学部）

1. 血液ガス電子博物館作成と問題点
諏訪邦夫（帝京大学）
2. MS - Word 2000 マクロをもちいて製本する方法
田中義文（京都府立医科大学麻酔科）
3. Data Dictionary Task Force (DDTF) と Operating Room of Future Plug
- and - Play standardization (ORFPnP) について
菅井直介（茅ヶ崎徳洲会病院麻酔科痛みセンター） 他
4. 麻酔科医師不足の解決法。一模範を英国に求める論理 -
浅山 健（ASA 会）

一般演題 2 9:50～10:30

座長： 安本和正（昭和大学麻酔科学）

5. 喉頭鏡にクリップオン型パイプアダプタを装着し汎用気管支ファイバースコープを
挿入して利用する簡便なビデオ喉頭鏡システムの試作
中尾正和（JA 広島厚生連 広島総合病院麻酔科）
6. 気管挿管教育訓練用喉頭鏡システムの開発
松本尚浩（九州厚生年金病院） 他
7. 3 画面同時録画による喉頭鏡視野の比較検討システム
岩瀬良範（獨協医科大学救急医学） 他

一般演題 3 10:30～11:20

座長： 豊岡秀訓（筑波大学麻酔科学）

8. フェンタニル併用セボフルラン麻酔時の bicoherence の変化
森本康裕（山口大学医学部 麻酔・蘇生学教室） 他
9. ウェーブレット解析による脳波アーティファクト除去の試み
萩平 哲（大阪大学大学院医学系研究科生体機能調節医学講座（麻酔科学））
10. 大動脈・模骨動脈間の圧較差現象のその後 (I)
杵淵嘉夫（東海大学開発工学部医用生体工学科） 他
11. 大動脈・模骨動脈間の圧較差現象のその後 (II)
杵淵嘉夫（東海大学開発工学部医用生体工学科） 他

一般演題 4 11:20～12:10

座長： 野坂修一（滋賀医科大学麻酔科学）

12. Python による麻酔薬濃度シミュレータの製作
河辺 聡（別府厚生連鶴見病院麻酔科） 他
13. 母体一胎児薬物動態モデルに基づくプロポフォル全身麻酔中の児血中濃度の推定
長田 理（東京女子医科大学麻酔科学教室） 他

14. コンパートメントモデルを表す微分方程式の一般解から,
静脈麻酔薬投与中止後の効果部位濃度減少曲線を考える
増井健一 (諏訪中央病院麻酔科)
15. シリンジポンプ用赤外線通信アダプタの開発
内田 整 (国立循環器病センター) 他

総会 12:10~12:30

特別講演 (1) 13:00~14:00

「マイクロプロセッサの誕生と創造的開発」

座長: 諏訪邦夫 (帝京大学)

演者: 嶋 正利 (会津大学)

特別講演 (11) 14:00~15:00

「夢・クリエーションのテクノロジー」

座長: 橋本 悟 (京都府立医科大学集中治療部)

演者: 片瀬健二 (株式会社バンダイ 開発統括部 兼 プロダクト保証部)

一般演題 5 15:00~15:50

座長: 風間富栄 (防衛医科大学麻酔科学)

16. 雑誌や書類のデジタル保存
野上俊光 (成尾整形外科病院) 他
17. 赤外線通信による JSA 麻酔台帳と Palm 間のデータ転送
讃岐美智義 (県立広島病院麻酔・集中治療科)
18. VMware Workstation を使用したシステム管理
斎藤智彦 (独立行政法人国立病院機構南岡山医療センター)
19. X-Port (TM) によるシリアルデータのイーサネット変換とその利点について
岩瀬良範 (独協医科大学救急医学) 他

一般演題 6 15:50~16:30

座長: 森 隆比古 (大阪府立急性期・総合医療センター麻酔科)

20. 高機能患者シミュレータによる臨床実習の工夫—いかに学生を本気にさせるか—
松島久雄 (独協医科大学救急医学) 他
21. 実体型患者シミュレータ環境を用いた更新医療機器の選定に関する試み
上農壱朗 (兵庫医科大学麻酔科学教室)
22. 獨協医科大学病院救命救急センターにおけるヘリコプター搬送の実際
片塩 仁 (独協医科大学救急医学講座)

閉会の辞 16:30~16:35

麻酔・集中治療領域におけるインテリジェントアラーム

片山勝之 手稲溪仁会病院麻酔科

近年、麻酔・集中治療領域のリアルタイム生体現象測定テクノロジーの進歩には目を見張るものがあり、とくに麻酔領域では麻酔関連死亡率の低下に大きく貢献してきたものと考えられている。しかし、モニターが多様化し複雑になるにつれて、単純な測定値の表示やグラフ表示ではその情報が十分に生かされず、臨床の現場における様々なアーチファクトによって生じる多くの偽陽性アラームにより臨床業務が妨げられるため、適切なアラーム設定がなされなくなってしまうという弊害が発生してきている。この偽陽性アラームの発生率は68～86%にのぼる一方、真陽性アラームはわずか5.5～8%に過ぎないと報告されている。このような弊害を無くするために、適切なデータ処理を行い、偽陽性アラームの発生率を抑制することは医療事故を防ぐための急務の課題となっている。この目的を達成すべく様々な試みが行われてきているが、中でもソフトウェアによるアラーム制御はとくにインテリジェントアラームと称されている。インテリジェントアラームを構築するために、ニューラルネットワーク、ファジー論理、エキスパートシステム、クラスタリングテクニック、カルマンフィルタなどの手法が用いた報告が1990年以降なされてきた。これらの手法によるインテリジェントアラームは、従来のアラームシステムに比べ、1) 偽陽性アラームの発生率は1%程度に減少し、2) 真陽性率は97%まで高まり、3) ヒトが異常に気が付くまでの時間を短縮したと報告されている。これらのアラームシステムに加え、異常データの原因を示したり、治療法を示して、麻酔科医の意思決定を補助しようという知的CAI(Computer Assisted Instruction)の試みも一部になされている。本シンポジウムでは、これらの報告を紹介するとともに、これからのインテリジェントアラームの進むべき方向性に関して展望を示してみたい。

麻酔科医師不足の解決法—模範を英国に求める論理—

浅山 健 ASA 会

始めに:病院の麻酔科組織を定義する時、英国麻酔科学会の公式の紙文書をデジタル化する作業の、内容を紹介して、麻酔科専門医の役割を明らかにしよう。目的:一般社会が、麻酔科の診療の求める内容とは、1日24時間、週7日、手術に対する応召責任と義務である。これに必要な体制とは、交替勤務であり、診療責任は専門医の役割、及びこの専門医を補佐する診療の補助者であろう。目的を果たす手本を英国の病院麻酔科に求めた。方法:4分の1世紀前の紙に記す内容を、現代のIT技術を用いて、スキャナーに取り込んで画像に納めた。画像を専用ソフトで処理化し、0 臨 ce2003に読み込んで、編集した。この作業によって、紙の公式文書は、公開、保存に便利なデジタル文書に変換できた。結果:先ず、英国の麻酔科学会が1980年に公開する病院麻酔科医師の役割を記す。麻酔科が診療の責任を果たすのに、必要な条件として、1. 外科とは完全に分離 2. 麻酔科医に対する専門職の確立 3. 外科手術に対する診療報酬の請求権 4. より多くの患者を麻酔するべきと。麻酔科診療を患者の視点で考えると、患者は手術を受ける目的に入院して、麻酔の目的で入院はしないと。麻酔科従事者の視点で、麻酔とは周期的に循環し、作業の開始点と終了点が明確な大事な作業の認識と言う。診療責任には組織診療が必須。15人程度の組織で対応する事で、交替勤務は可能になる。麻酔科各人には、仕事の重要性を自覚する必要。次に、この10年後の1990年に、同学会が公開する麻酔科専門医の仕事の責任を記す。専門医の責任とは、1. 部下の診療に対する責任 2. 手術室での臨床の責任 3. お産に対する痛みの管理と、帝王切開手術への応召 4ICUや重症患者の管理 5 痛み緩和と言います。そして、普遍的に通用する義務として、手術前及び手術後に患者を病室で診る事であると。勤務時間中に手術室の時間を3と仮定すると、病室での時間を1とする時間比の決まりがある。例えば、週に21時間に手術室勤務するとき、病室の勤務時間は7時間。緊急手術への対応を組織として別途に考えるべきと。この外、蘇生業務、部下への教育・訓練・判定の責任を言う。更に臨床に関連する研究と、訓練医に対する指導がある。考察及び結語;麻酔科の診療責任を果たす目的に英国麻酔科学会が決めた役割範囲を、IT技術を利用して、紹介した。診療範囲を決めて、病院から独立して、診療報酬の請求権ある条件で、麻酔科専門医が、診療補助者の助けを得て、責任と義務を果たす事態を記した。

大動脈・横骨動脈間の圧較差現象のその後 (I)

杵淵嘉夫, 長谷川晋也, 斉藤聡, 金沢正浩, 福山東雄, 鈴木利保

東海大学開発工学部医用生体工学科, 東海大学医学部外科学系麻酔科学

大動脈から枝骨動脈まで血管壁の弾性率が次第に変化することは、解剖学的にも脈波伝搬速度の計測結果からも明らかである。また、血管内壁の弾性率は血管内圧に依存して非直線的に変化することも知られている。これらの弾性率の変化が、スティーブニング・ピーキング現象や体外循環後の圧較差現象に関与していることは疑いない。つまり、弾性率の血管長軸方向の変化と半径方向の両方向の変化が相乗して血管内圧の分布を構成していると考えべきであろう。ここでは、ウレタンを用いた壁肉厚が均一でない血管モデルを作成し、壁弾性率の変化とモデル内圧分布を測定し、弾性率の変化との関係を考察した。このモデルに拍動流を流し、ポンプの回転数を変えながらモデル各部の内圧の変化を測定した。その結果、圧波形の伝搬とともに、内径が細く

なる場合には波高値が高くなる現象と、その逆の場合には波高値が減少する現象が明瞭に認められた。モデルの内圧分布は軸方向の弾性率分布に対応している。その数理解の詳細は省略するが、定性的には末梢側に伝搬していく弾性エネルギーの振る舞いと考えることができるのではないかと。作成したモデルでは弾性率の圧依存特性が血管のそれと異なるため、伝搬する圧波形の変形は血管のそれと同じにはならない。分布定数回路上でシミュレートすると回路上の各点のCを固定値と見なす扱いについて検討の余地はあるが、軸方向の圧分布は明らかにすることができる。

大動脈・横骨動脈間の圧較差現象のその後 (II)

杵淵嘉夫, 嶋田勝斗, 斉藤聡, 金沢正浩, 福山東雄, 鈴木利保

東海大学理工学部医用生体工学科, 東海大学医学部外科学系麻酔科学

大動脈から枝動脈まで血管壁の弾性率が次第に変化することは、解剖学的にも脈波伝搬速度の計測結果からも明らかである。また、血管内圧の弾性率は血管内圧に依存して非直線的に変化することも知られている。このような血管長軸方向と半径方向の弾性率の変化と血管内圧の分布との関係を明らかにするためウレタンを用いた壁肉厚が均一でない血管モデルを作成した。しかしながら、一般的なプラスチックの応力・歪み特性は血管壁のそれとは全く異なり、外力が大きいかほど伸びやすい。この特性によって、半径方向弾性率の変化が圧波形に与える影響を検討することができないのみならず、むしろ、スティーブニングやピーキングの形成が阻害される。しかし、血管の構造を模したプラスチックの複合構造の作成は現状では非常に困難である。そこで、可変容量ダイオードを用いた電気回路上のシミュレーションのによって検討した。可変容量ダイオードはダイオードに加える電圧によってその容量が変化する。この特性は内圧によって弾性率が変化する血管壁の特性との間に概ね相似が成り立つ。可変容量ダイオードの容量の変化を血管内圧の分布の大きさに対応させる回路上の工夫によってスティーブニングやピーキングを再現することができる。また、血管長軸方向の変化は可変容量ダイオードの分布定数回路として実現可能である。数理解の詳細は省略するが、圧波形の伝搬とともに、波高値の増減が再現された。

Pythonによる麻酔薬濃度シミュレータの製作

河辺 聡 1, 北野敏明 2, 野口隆之 2

1 別府厚生連鶴見病院麻酔科, 2 大分大学医学部 脳・神経統御講座 麻酔科

【初めに】現在、フリーウェアとしてソースファイルを参照できる麻酔科学領域の薬物血中濃度シミュレータは極めて少ない。そこでオブジェクト指向言語であるPythonを用いて、簡単に利用できる麻酔薬の3コンパートメントモデル・シミュレータを作成したので公開する。【内容】アルゴリズムとして4次のルンゲ・クッタ・メソッドを用いた。使用法は、薬物名、パラメータ名、体重、など必要な引数をクラスに指定してインスタンスを生成する。ボラス投与量、経過時間をメソッドの引数としてインスタンスに受け渡せば、その都度、クラス属性の薬物濃度値が変更される。このライブラリーを用いて、投薬スケジュールを記述したテキスト・ファイルに従って、血中濃度を計算するサンプル・プログラムも同時に公開する。【結語】記述性・判読性に優れたPythonを用いることで、教育・研究目的に使用可能なライブラリーを容易に作成することができた。

母体一胎児薬物動態モデルに基づくプロポフォル全身麻酔中の児血中濃度の推定

長田 理, 田中久美子, 岩切裕子, 尾崎 真

東京女子医科大学麻酔科学教室

妊娠母体に対して薬物を投与すると、薬物は臍帯を通じて血行性に胎児へ移行する。このため帝王切開を全身麻酔で管理する場合には、授与された麻酔薬の胎児移行が必ずと言って良いほど議論される。しかしながらこの議論は定性的なものに止まることが多く、臨床現場で起こる現象を定量的に説明されることはほとんどない。我々は母体・胎児をそれぞれ3コンパートメントモデルと見なし臍帯を通じた薬物移動で両者を結んだ母体一胎児薬物動態モデルを作成し、本モデルの妥当性と胎盤移行定数、母体・児中央コンパートメント分布容積について報告した。そこで今回は本モデルを用いて母体をプロポフォル全身麻酔で管理した際の児血中濃度を計算・推定した。【対象と方法】母体一胎児薬物動態モデルとして、母体・胎児をそれぞれ3コンパートメントモデルと見なし、臍帯を通じた薬物移動として母体中央コンパートメントと胎児中央コンパートメント間での薬物移行定数 (K_{mu} , K_{um}) により両コンパートメントモデルを結合した。母体・胎児の薬物移行定数はMarshらの定数 (成人, 小児) を用い、母体・胎児の中央コンパートメント分布容積を V_m , V_u とした。プロポフォル全静脈麻酔で管理された帝王切開症例において、子宮血流途絶時の母体動脈血、臍帯動脈血を採取しプロポフォル濃度を測定し、各症例の V_m , V_u , K_{mu} を数値シミュレーションにより求めた。このようにして得られた薬物動態モデルを用いて、プロポフォルをDiprifuorによる目標制御注入法 (TCI) で母体 (BW50kg) に授与した場合の児 (BW3kg) 血中濃度の経時変化を算出した。【結果】プロポフォルを $3 \mu\text{g/ml}$, $4 \mu\text{g/ml}$, $5 \mu\text{g/ml}$ で投与し続けた場合、投与開始から6分程度でほぼ一定となり、10分後の児血中濃度は $1.08 \mu\text{g/ml}$,

1.44 μ g/ml, 1.80 μ g/ml と算出された。10 分後に臍帯血流途絶したと仮定した場合、児プロポフォール濃度は速やかに減少し 5 分後にはそれぞれ 0.19 μ g/ml, 0.26 μ g/ml, 0.32 μ g/ml と算出された。【考察】本モデルでは母体に授与したプロポフォールの胎児移行を児の血中濃度として推定できるため、児で発現する薬物効果を把握するのに優れている。又、分娩（子宮血流途絶）後の児血中濃度についても推定できるため発現した薬物効果が消失するまでの時間についても推定することができる。今回の検討から、臨床で使用されるプロポフォール目標濃度では、児娩出時間が 10 分程度であっても児血中濃度は危険なほど上昇しないことが示された。今後、分娩時に限らず胎児麻酔の際に母体へ授与する薬物量及び作用発現までに必要な時間を予測する等、本モデルの応用が期待される。

コンパートメントモデルを表す微分方程式の一般解から、静脈麻酔薬投与中止後の効果部位濃度減少曲線を考える

増井健一 諏訪中央病院麻酔科

【はじめに】静脈麻酔薬の予測血中濃度、予測効果部位濃度の計算は、薬理学的モデルである 3 コンパートメントモデルに基づいて行われる。3 コンパートメントモデルは微分方程式によって表現され、通常 Runge - Kutta 法や Euler 法により解が求められる。今回、この微分方程式の一般解を計算したので、その結果から静脈麻酔薬投与中止後の効果部位濃度減少曲線について考察した。【方法】3 コンパートメントモデルにエフェクトコンパートメントを含めた 4 つの連立微分方程式の一般解を、静脈麻酔薬の投与速度は一定として、ラプラス変換を利用して計算した。求められた一般解からグラフを作成し、静脈麻酔薬投与中止後の効果部位濃度減少曲線について検討した。【結果】効果部位薬物量 $Q(e)$ を表す一般解は $Q(e) = A \cdot \exp(-\alpha t) + B \cdot \exp(-\beta t) + C \cdot \exp(-\gamma t) + D \cdot \exp(-\delta t) + E \cdot \exp(-keo \cdot t) + F$ となる。ただし、A, B, C, D, E, F は初期条件、投与速度（一定）、薬物動態学的パラメータから計算される定数、 α , β , γ , δ , keo は効果部位の平衡速度定数、 t は時間である。上記 $Q(e)$ の式を別の形で整理すると、効果部位濃度 $C(e)$ は $C(e) = CoefCl \cdot Cl(0) + CoefC2 \cdot C2(0) + CoefC3 \cdot C3(0) + CoefCe \cdot Ce(0) + CoefDose \cdot Dose(0)$ と表される。ただし、Coef... は初期条件、薬物動態学的パラメータ、時間から決定される変数、... (0) は初期条件である。また、CoefCl, CoefC2, CoefC3 の最大値（最大値を示す時間）は Propofol: 0.37(3.9min), 0.27(14.3min), 0.21(71.8min), Fentanyl: 0.11(3.9min), 0.32(17.2min), 0.59(85.8min), Remikntanil: 0.34(1.8min), 0.21(5.6min), 0.02(15.6min) である。減少曲線の形状は、Remikntanil では初期条件にかかわらず同様であったが、Propofol, Fentanyl では 3rd コンパートメントの薬物量により異なった。【考察】今回求められた一般解から、Propofol, Fentanyl では 3rd コンパートメントの薬物量が減少曲線の形状に大きく影響することがわかった。また、CoefCl, CoefC2, CoefC3 のグラフは、薬剤の投与経過が減少曲線の形状にどのように影響するかを考察するための情報を提供することもわかった。Context Sensitive Decrement Time や Context Sensitive Half Time(CSHT) ではボーラスや投与濃度の変更などが薬物濃度の減少にどの程度影響するかを考えることは困難である。今回の一般解は減少曲線の理解の際に、CSHT を補うことができると考えられた。

シリンジポンプ用赤外線通信アダプタの開発

内田 整, 畔 政和 国立循環器病センター

薬物動態シミュレーションによる血中あるいは効果部位濃度の予測は、静脈麻酔における非常に有用なテクノロジーの一つである。TCI (Target Controlled Infusion) 機能を持たないシリンジポンプを使用する場合、オンラインシミュレーションのためにはポンプとパソコンを RS 232C ケーブルで接続することが一般的である。しかし、このような有線接続ではケーブルの取り回しやパソコンが占有されるなどの欠点もある。今回、シリンジポンプとパソコンあるいは PDA 間の通信をワイヤレス化する目的で、シリンジポンプに付加する赤外線通信アダプタを試作した。アダプタの開発には、16 ビットワンチップマイコン、H8 / 3048 (ルネサステクノロジー) を搭載したマイコンボード (AKI - H8 / 3048F, 秋月電子) を使用した。H8 / 3048 に装備されている 2 ポートのシリアルインターフェイスのうち、1 ポートを使用して RS232C インターフェイスでシリンジポンプ (Graseby3500) に接続し、他方を赤外光送受信モジュールに接続した。アダプタとホスト (パソコンあるいは PDA) 間の通信には標準の IrDA 規格の赤外線通信を使用し、ホストからのリクエストに応じて投与情報を転送するプログラムを開発した。有線接続によるオンラインシミュレーションでは、一定の間隔でシリンジポンプの情報をパソコンに読み込んでシミュレーションを行うが、手術室で赤外線通信を行う状況を想定すると常時接続が確保できるとは限らない。そこで、本アダプタでは定期的にシリンジポンプと通信を行って、その時刻のポンプの投与速度と総投与量をメモリに記憶しておき、通信が確立した時点で記憶されている情報をホストに転送するように設計した (試作したアダプタでは、1 分ごとに約 2 時間分の投与情報を保持できる)。今後、本アダプタに対応するパソコンや PDA のプログラムも併せて開発する計画である。

赤外線通信による JSA 麻酔台帳と Palm 間のデータ転送

讃岐美智義 県立広島病院麻酔・集中治療科

本学会で発表してきた AS ン OS をコアとする電子麻酔台帳が、第 3 次偶発症例調査の麻酔台帳 (JSA 麻酔台帳) として 2004 年から日本麻酔科学会より配布されている。各病院の諸事情 (病院情報システムの介在、既存の麻酔台帳の存在) や技術的な理由で移行ができない場合には仕方ないが、自作の麻酔台帳より少し便利な程度では JSA 麻酔台帳への移行に積極的になれない場合もあると思われる。そのためには JSA 麻酔台帳を入力するだけの麻酔台帳から、毎日有効に活用できる麻酔台帳に進化させる必要がある。そこで、麻酔科医が術前術後回診に JSA 麻酔台帳のデータを持ち歩くことが可能のように、Palm などの携帯端末に標準アプリケーション中で取り扱うことができるデータを赤外線通信で転送できる仕組みを考案した。【ソフトウェア】 JSA 麻酔台帳 2005 年版 (ファイルメーカーランタイム版) 【ハードウェア】 [pC 側] Windows98SE 以降 USB 一打 (IO データ社製) [palm 側] 赤外線通信をサポートした PalmOS 機 動作確認: CuETH - 55 【症例データ転送の実際】 (1) 術前回診、術後回診時の症例リスト 抽出できる別プログラムを開発 (2) カレンダーより症例を抽出し、複数 症例を vCAL 形式で 1 つのテキストファイルとして出力 (3) pC に USB - Ir を接続し、Palm と対峙 させるとファイル転送可能となる (4) palm 側にデータ転送後、自動で標準 アプリケーションの予定表の該当日時に貼 り付く (図 1)

【一般演題】【症例データの仕様】 (vCAL 形式) BEGIN: VCAIJENDAR

BEGIN: VEVENT SUMMARY; ENCODING = QUOTED - PRmIJE: 麻酔科医/指導医 科名/病棟 年齢/性別 氏名 (m) 術式/病名 DESCRmON; ENCODING = QUOTED - PRmIE: コメント DTmT: 開始日 (半角 8 桁) T 開始時刻 (半角 6 桁) z DTEND: 終了日 (半角 8 桁) T 終了時刻 (半角 6 桁) z END: VEVENT (以下 BEGIN: VEVENT~END: VEVENT 繰り返し) END: VCAIJENDAR (注) DTmT: と DTEND: のデータ例 20040630TYM33000Z (日本標準時より 9 時間前) 【発展性と応用】 vCAL 形式のデータであるため、赤外線通信では Palm 以外に携帯電話などにも転送が可能である。また、赤外線通信でなくともファイルを転送できれば vCAL 形式に対応した汎用のスケジュールソフトウェア (Outlook, iCal など) で取り扱うことが可能になる。SUMMARY: と DISCRmON: に記述する形式を統一すれば、JSA 麻酔台帳に書き戻すことも可能である。【検討事項】患者データ (個人情報) を転送するため転送先の端末のセキュリティを含めた対策が必要である。また、個人データ保護に対する取り扱う側の意識を高める必要がある。【一・川 'H JSA 麻酔台帳に登録した症例を赤外線通信で Palm などの携帯端末に転送して利用できるようになった。利用に当たっては、個人データ保護に注意する必要がある。本プログラムはフリーソフトウェアとして <http://msanuki.com/masuidb/> よりダウンロード可能である。

独協医科大学病院救命救急センターにおけるヘリコプター搬送の実際

片塩 仁, 崎尾秀彰 独協医科大学救急医学講座

独協医科大学病院救命救急センターは、平成 13 年 11 月 1 日救急医療センターが設置され、平成 14 年 4 月 1 日に救命救急センターに組織変更がなされた。ヘリポートは、平成 12 年 10 月 17 日に設置された。それ以前は独協医科大学のグラウンドをヘリポートとして代用していた。当院救命救急センターへのヘリコプター搬送はヘリポートが設置されて以来増加傾向を示し、平成 15 年度のヘリ搬送件数は、5 件を数えた。そのうちの多くは、ツインリンクもてぎからであり、山間部からの搬送も認めた。ツインリンクもてぎは、世界自動二輪選手権 (MOTOGP)、トライアル世界選手権、全日本ロードレース、インディカーレース、フォーミュラ・ニッポン、GT 選手権、F3 選手権、スーパー耐久など世界的に有名な二輪、四輪のレースが行われる。この他にもアクロバット飛行世界選手権、アマチュアレースも多く開催されている。これらのうちヘリコプターを待機させ緊急に備えている大会は、当院救命救急センターから医師を派遣し、その場で待機し緊急搬送にそなえている。ツインリンクもてぎから当院救命救急センターへのヘリコプターによる搬送時間は約 15 分 (最大速度約 300km/hr, 最大高度約 2400m) であり、救急車による搬送時間 90 分と比較すると明らかに短く、救命率の向上、予後の改善、治療期間の短縮に大きな影響を与えていると思われる。また発生現場から治療が開始できることも利点である。今回我々は平成 15 年度から平成 16 年度にかけてのヘリコプター搬送の実際を今後の展望とあわせて発表したいと思う。

第 4 回

麻酔科医のためのパソコンセミナー

(東京会場)

会期：2004 年 10 月 8 日 (金) 19:00～21:00

会場：KFC ホール

〒130-0015 東京都墨田区横綱 1-6-1 Tel. 03-5610-5800

(大阪会場)

会期：2004 年 10 月 16 日 (土) 13:30～15:30

会場：リーガロイヤル NCB

〒530-6691 大阪市北区中之島 6-2-27 Tel. 06-6443-2255

代表世話人： 内田 整 (国立循環器病センター麻酔科)
讃岐美智義 (県立広島病院麻酔・集中治療科)

後援：日本麻酔・集中治療テクノロジー学会

第4回 麻酔科医のためのパソコンセミナー プログラム

東京会場 会期：2004年10月8日（金） 19:00～21:00
会場：KFC ホール
〒135-0015 東京都墨田区横網 1-6-1 Tel. 03-5610-5800

- 19:00～19:40 デジカメで学会を取材する … 8
県立広島病院麻酔・集中治療科 讃岐美智義
- 19:40～20:20 基礎から学ぶ電子メール … 20
独立行政法人国立病院機構南岡山医療センター麻酔科 斎藤智彦
- 20:20～21:00 無線 LAN の基本と応用 … 32
国立循環器病センター麻酔科 内田 整
-

大阪会場 会期：2004年10月16日（土） 13:30～15:30
会場：リーガロイヤル NCB
〒530-6691 大阪府大阪市北区中之島 6-2-27 Tel. 06-6443-2255

- 13:30～14:10 デジカメで学会を取材する … 8
県立広島病院麻酔・集中治療科 讃岐美智義
- 14:10～14:50 基礎から学ぶ電子メール … 20
独立行政法人国立病院機構南岡山医療センター麻酔科 斎藤智彦
- 14:50～15:30 Excel のグラフ機能を使いこなす … 38
諏訪中央病院麻酔科 増井健一
-

世話人（順不同）

片山勝之（手稻溪仁会病院）
尾崎 眞（東京女子医科大学）
長田 理（東京女子医科大学）
原 真理子（平塚共済病院）
増井健一（諏訪中央病院）
橋本 悟（京都府立医科大学）
内田 整（国立循環器病センター）
萩平 哲（大阪大学）
太田吉夫（岡山大学）
斎藤智彦（国立病院南岡山医療センター）
中尾正和（JA 広島総合病院）
讃岐美智義（県立広島病院）

後援：日本麻酔・集中治療テクノロジー学会

デジカメで学会取材する

県立広島病院 麻酔・集中治療科
讃岐美智義

学会演題を聞いているとき、後で見返すためにメモ代わりにスライドやポスターを撮影したくなるときがあります。Auto モードで撮影するのは手軽でよいですが、画面がぼやけたり真ん中が光ったり、スライドが小さすぎて読めないなど、よい写真が撮れないと思ったことはありませんか。実は、スライドやポスターの撮影は意外と難しいのです。部屋の暗さの条件、スライドの背景の明るさに依存することも多く、様々な場面で手ぶれを起こして、かなり撮りにくい被写体であることは間違いありません。失敗したと思って、何枚も同じ写真を撮っていたりすることがあります。また、多く撮影しすぎると整理に困ったり、パソコンで見直すのが面倒になったりします。応用編として、スライドやポスターを撮影するためのデジカメの条件や、ビューワーを使った整理法など、本セミナーではデジカメで学会の取材を行うことに焦点を当てた解説を行います。

1. デジカメの選び方／カタログの読み方（表1）

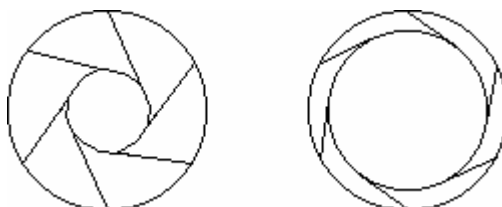
解像度(画素数)	デジカメでは、色情報を持った小さな点（画素、または、ピクセル）の集合で写真を表現します。画素数が多いほど精度が高く大きな画像を写すことができますが、画像ファイルのサイズは比例して大きくなります。
CCD	銀塩カメラのフィルムに相当するのが CCD（Charge Coupled Device）という半導体素子です。カタログでは CCD は 1/2 インチのようにサイズで表現されています。一般に解像度が同じ場合、CCD のサイズが大きいほど精度の高い画像が期待できます。
レンズ	単焦点レンズ／ズームレンズ。室内撮影が中心の場合はズームレンズタイプが便利。
記録媒体	現在では、コンパクトフラッシュ、SD カード、メモリスティックの 3 種類がメインです。コンパクトフラッシュを使用する機種の場合、メモリのアクセス時間が性能差に表れます。動画や連写の場合は高速のコンパクトフラッシュが必要です。
バッテリー／電源	バッテリーの種類、連続撮影枚数。
動画性能	画像サイズとフレーム数。プレゼンに使用する場合は、フルサイズ（640x480 ピクセル）の動画が撮影できる機種がベターです。
手ぶれ防止機能	手持ちではとれないとされる 1/8 秒～1/15 秒でのブレを補正することができるかどうかのポイント。これは店頭で実機で試してみるのをおすすめします
起動時間など	起動時間やシャッタータイミングの“ずれ”。これらは、店頭で実機に触れて確認する方がよいでしょう。

※光学 3 倍ズーム以上、200 万画素以上が目安

2. デジカメの基礎

- ①レンズの焦点距離 レンズの中心から CCD までの距離。デジカメの焦点距離はフィルムカメラの焦点距離より短くなります。焦点距離が短いレンズでは、画像は小さく写り、長ければ大きく写ります。焦点距離が短いほど広い範囲が写り（広角）、焦点距離が長くなると写る範囲は狭くなります。画像の写る範囲を「画角」といいます。
- ②レンズの F 値 大文字の F。F 値とはレンズの明るさを数字にしたもので、F 値が小さいほど明るいレンズであることを示します。F 値が小さいものでは多くの光が取り込めますが、F 値を小さくすると大きくて重いレンズになります。
- $$F \text{ 値} = \text{焦点距離} \div \text{レンズの有効口径}$$

- ③シャッタースピード シャッタースピードを変えることにより CCD に当たる光の量を調節します。シャッターを長く開ければ（シャッタースピードが遅い）たくさんの光を取り込むことができますが、手ぶれをおこしやすくなります。
- ④絞り レンズの前に付いている光量を調節するための羽根。絞りをあけると光が多く入り、絞ると光の量は減ります。調整される値をレンズの明るさと同じF値といい「F1, F1.4, F2, F2.8, F4, F5.6」と1.4倍きざみになっています。これは、F値1.4倍で絞りの開いている面積が半分になり入ってくる光の量が半分になるためです。



- ⑤露出 カメラに取りこむ光の量のこと。露出は、シャッタースピードと絞りにより決まります。
- ⑥フィルム感度 昔は ASA といったが、今は ISO という数値が大きいほど光を感じやすく、少ない光りで感光します ISO 感度はフィルムの光に対する感度を表し、100, 200, 400 などの種類があります。感度の値が大きいほど暗いところでも撮れますが、色の鮮やかさや滑らかさが損なわれてしまいます。

⑦露出のパターン(EV 値) 表.2

- ⑧ピントと被写界深度 通常ではカメラのレンズは被写体に 1 カ所にしかピントが合いません。しかし、絞りを絞ったり、焦点距離の短い広角レンズを使うとピントが合っている範囲が広がります。ある被写体にピントを合わせた時、その前後のある範囲はピントが合います。その幅を被写界深度といい、前に浅く後ろに深い特徴があります。

同一レンズでも、絞りが開放では深度は浅く、絞り込むと深くなる

また、レンズの焦点距離が長いと浅く、短いと深くなる

- ⑨ズーム ズーム機能は、レンズの焦点距離を変えることによって望遠の効果をつくります。これを「光学ズーム」と呼び、焦点距離が長いと被写体は大きく写り短いと小さく写ります。35mm フィルムを使うカメラの場合、焦点距離が 50mm 前後のレンズを標準レンズ、35mm より短いレンズを広角レンズ、85mm より長いレンズを望遠レンズと呼んでいます(カタログに 35mm 判換算とあるところの数値です)。「デジタルズーム」という別の仕組みで、画像の一部を切り取り内部の計算で拡大する機能があります。これを使うと、プリント時や閲覧時に画質が悪いのに気づくでしょう。

3. 撮影時の注意点

- ①カメラの持ち方、かまえ方
- ②カメラの固定
- ③手ぶれ防止のテクニック

デジカメ写真でも“ブレ”の補正は容易ではありません。シャッター速度が遅い場面で“ブレ”がない写真を撮るためには、三脚を使用することを考慮してください。少なくとも両手もちが必要です。

【撮影前の設定】**(1)スライド撮影**

- ・場所 真ん中，一番前
- ・電池 予備を2－3本
- ・メモリ 256MB 以上
- ・オートパワーオフ 30分
- ・フラッシュ撮影 禁止 (OFF)
- ・液晶画面 OFF (ファインダー)
- ・操作音, シャッター音 OFF
- ・画像サイズ 1280×960, 1600×960
- ・三脚の工夫 (少なくとも両手もち)

(2)ポスター撮影

- ・場所 正面 (照明の加減でテカる場合は，移動して)
- ・電池 予備を2－3本
- ・メモリ 256MB 以上
- ・オートパワーオフ 1分
- ・フラッシュ撮影 禁止 (OFF)，きれいにとれないときはフラッシュ ON (側方から撮影)
- ・液晶画面 OFF (ファインダー)
- ・操作音, シャッター音 OFF
- ・画像サイズ 1280×960, 1600×960
- ・両手持ち撮影

(3)ビデオ撮影(エコーセミナーなど)

全部取るのは大変 (DV ビデオが必要)

・デジカメの動画機能(チェックポイント)

画素数 640×480, 320×240

コマ送り数 30fps, 15fps

記録メディア最大容量／予備 512MB, 1GB 複数枚

予備の電池 2-3 本以上＋充電器 (電源コンセント)

記録メディア吸い出し用ハードディスク 40GB, 80GB

ノートパソコン (確認用)

高画質 DV という手もあるが，現行機種は編集が大変なため，根性がある方にしか推奨しない。

DV 救世主？ 2004 年 10 月発売 **Everio (Victor 社)**

http://www.jvc-victor.co.jp/dvmain/gz-mc100_200/index.html

動画 130 万画素，静止画 200 万画素，MPEG-2 記録 (720×480)，SD カード，4GB ハードディスク (マイクドライブ)，光学 10 倍／デジタル 200 倍，重量 355g

→ 今後の方向性を示す DV 製品か？ 市場価格¥

動画デジカメ 3機種

2004年9月発売

DMX-C4(SANYO)

動画 400 万画素, 静止画 400 万画素, MPEG-4 記録 (640×480, 30fps), SD カード
動画と静止画の同時記録, 光学 5.8 倍, デジタル 10 倍, 重量 178g, 市場価格 ¥59,800
<http://www.sanyo-dsc.com/dsc/c4/index2.html>

2004年11月発売

DSC-M1(SONY)

動画 510 万画素, 静止画 510 万画素, MPEG-4 記録 (640×480, 30fps), メモリスティック Duo
動画と静止画の同時記録, 光学 3 倍, デジタル 10 倍, 重量 220g, 市場価格 ¥63,000
<http://www.sony.jp/CorporateCruise/Press/200409/09-0909B/>
<http://www.sony.jp/products/Consumer/DSC/DSC-M1/index.html>

2004年9月発売

SV-AS30(Panasonic)

動画 320 万画素, 静止画 320 万画素, MPEG-4 記録 (320×240, 30fps), SD カード
動画と静止画の同時記録, 光学 1 倍, デジタル 4 倍, 重量 58.5g, 市場価格 ¥32,000
<http://panasonic.jp/d-snap/as30/index.html>
http://panasonic.jp/d-snap/line_up/index.html

3. デジカメ写真をパソコンに転送する

USB ケーブルでパソコンと接続する方法もありますが, 記憶媒体をカメラから外してアダプタでパソコンへ転送する方法が一般的です. 外付けの USB リーダライタは, USB2.0 対応の機種 (この場合, パソコン自体が USB2.0 に対応していることが必要です) が高速で快適です. ノートパソコンでは, メモリスティックや SD カードのスロットを装備した機種もありますが, そうでない場合でも PC カードアダプタがあれば転送に便利です.

(直接, ストレージに転送する)

ポータブルフォトストレージプレーヤー デジタルアルバム(Transcend)

PhotoBank 40GB TS40GPB, 市場価格¥38,800

http://www.e-trend.co.jp/topics/photo_bank.html

http://www.e-trend.co.jp/shopping/pickup.php?item_14126=1

4. 撮影した画像を整理する

パソコンに転送して整理します. Windows の縮小画像でも全体像の確認はできますが, ほとんど字は読めません. すばやく整理, 編集するためには専用のビューワーやレタッチソフトが必要です. また, 画像を小さく切り出したり, アルバムとして保管するためにはユーティリティソフトの活用も有効です.

【整理の要点】**①時系列にフォルダー単位で管理**

(フォルダー名: 20041008_PC セミナー 20041008_PC セミナー加工1)

②オリジナルはコピーしてから修正

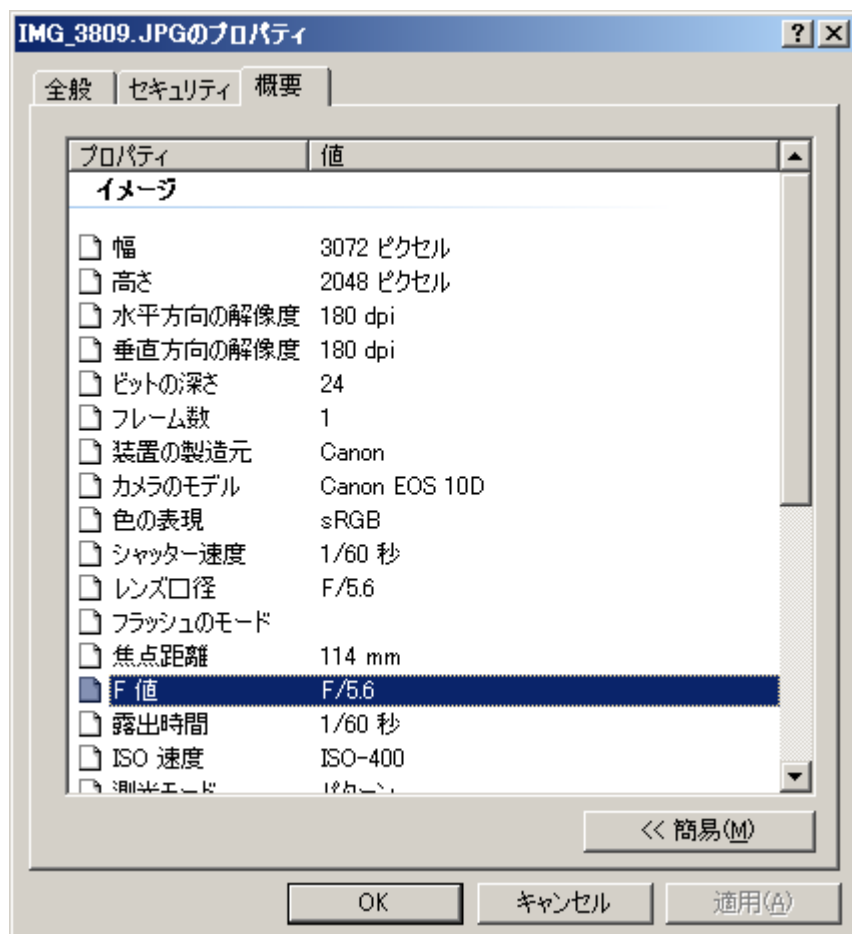
③縮小, レタッチは一括で → フォトショップ Elements, ちびすな

④同一画像はよい方を残す→AbleCVなどで検索

⑤Exif 情報の活用

画像ファイルを右クリック→[プロパティ]→[概要](→[詳細設定])

■ ビューワー



ACDSee(パッケージ版 ¥7,140, ダウンロード版 ¥6,090)

ACDSee PowerPack (パッケージ版 ¥13,440, ダウンロード版 ¥11,340)

超高速デジカメソフト。ブラウズ・表示速度・検索などの充実。容易なデータベース構築を実現!!

PowerPack には PicaView (アイコン右クリックでプレビュー表示), FotoAngelo (レタッチソフト) などがついています。

<http://www.poladigital.co.jp/product/ACDSee/>

AbleCV(シェアウェア¥1,000)

シンプルな操作体系と速度を重視して開発した、高性能・高機能な画像閲覧・整理・印刷・検索・類似検索・管理ソフト。画像の表示・補正, カタログ表示はもちろん, スライド機能やアルバム機能, ファイル名の一括変換, サムネイル画像の一括作成, 画像・カタログの印刷, 条件検索・類似画像検索, カタログHTMLの作成機能なども備えています。

http://homepage3.nifty.com/h_c_yoda/ablecv/index.html

チビすな!! (フリーソフト)

画像の縮小を目的としたソフト。640×480, 480×360 ドットの固定サイズに加え, ユーザー設定サイズも設定可能。画像の回転や画像フォーリックの変更, PEG ファイルは画像の選択にも対応。

<http://homepage3.nifty.com/metis/contents/soft/>

すなねいる!! (フリーソフト)

画像を HTML 形式で表示するソフト. web でサムネイルアルバムのスライドショーを簡単に作れる. 作成する HTML ファイルのオプション設定やファイル名の指定など詳細なオプションがある.
<http://homepage3.nifty.com/metis/contents/soft/>

Sna Code!! (フリーソフト)

デジカメ画像から Exif 情報を抽出して表示するソフトです.
<http://homepage3.nifty.com/metis/contents/soft/>

■フォトレタッチソフト

デジカメの場合, 撮影した写真に対する“ある程度の”露出や色の補正ができます. また, トリミングなどの加工も容易です. 撮影したデジカメ写真に対して修正や加工を施すことをフォトレタッチ (Photoretouch) といい, フォトレタッチをパソコン上で実現するのがフォトレタッチソフトです. Adobe 社の Photoshop は代表的なフォトレタッチソフトです. 主なフォトレタッチソフトには以下のような製品があります.

フォトショップ Elements (Adobe) ¥12,800

Photoshop の機能限定版です. 複雑な処理はできませんが, デジカメ写真の処理には十分な機能があります. Windows 版と Macintosh 版が同梱されています. 最近では, このビューワーが AcrobatReader に附属しているので, 知らず知らずのうちに一部の機能を使用しているかもしれません.

<http://www.adobe.co.jp/products/photoshopel/main.html>

デジカメ プロフェッショナル・プリント for Windows ¥9,800

FUJIFILM 「Image Intelligence™」 の最先端自動補正エンジン搭載!

<http://www.ifour.co.jp/product/dcproprint/>

Paint Shop Pro (Jasc Software) ¥14,800 (パッケージ版), ¥9,800 (ダウンロード版)

Windows 版のフォトレタッチソフトです. 低価格ですが, Photoshop に匹敵する機能があります.

<http://paintshoppro.jp/>

Microsoft Digital Image Pro 9 (Microsoft) ¥12,800

2003 年 9 月から発売されているデジカメ写真処理ソフトです.

<http://www.microsoft.com/japan/pictureit/dip/default.msp>

Irfanview32 日本語版 (フリーウェア)

オーストリア人の Irfan Skiljan 氏が開発した多機能画像処理ソフトです. 日本語版もあります. 動作が軽快で, デジカメ写真の処理には十分な機能があります.

<http://www8.plala.or.jp/kusutaku/irview/>

<http://www.irfanview.com/> (本家)

5. 画像処理 (用語集)

- | | |
|------------|--|
| トリミング | トリミングとは, 周辺を削除して必要な部分のみを切り出す作業のことです. Photoshop ではメニューから [イメージ] → [切り抜き] です. トリミングにより, 画像のファイルサイズは小さくなります. |
| リサイズ/リサンプル | 画素数, すなわち解像度を下げる作業です. リサイズは, 単に画素を間引くだけです. リサンプリングでは画像の再構築を行って, できるだけオリジナルに近い画像にします. 適切な解像度の画像を得るには, トリミングの後にリサンプリングを行います. |

コントラスト	画像の明るい部分と暗い部分の差を調整すること。コントラストを上げると、画像の明部と暗部の差がはっきりとするようになり、文字などは見やすくなります。
ブライトネス	画像のそれぞれの画素に対して明度を一応に増減する処理。
ガンマ補正	ディスプレイ、プリンタ、スキャナなどの画像入出力装置の応答特性（入力信号に対する出力信号の強度）を表すガンマ値という数値に対して、機器の特性に合わせて補正する処理のこと。ガンマ補正では明度が中間の部位を中心に画像が補正されます。
色調補正	光源の影響などで、色調が自然に見えない場合は色調補正をします。赤、緑、青の3原色のそれぞれについて、画像が見やすくなるように微調整します。

6. デジカメ写真を印刷する

撮影した写真は、トリミング→リサンプリング→画像補整の順に処理を行います（最近のソフトウェアでは、この工程は一発補正できるものもあります）。

画像サイズで注意すべき点は、表3を参考にして画像を適切な解像度に変換してから使用することです。そうすれば、どんなときにもファイルサイズが巨大になることを（ある程度）防止できます。例えばA4用紙（210x297mm）に印刷するのであれば、200万画素の解像度が必要です（表3参照）。もちろん、解像度（dpi）が高いほどきれいな写真になりますが、通常300dpi以上にする必要はありません。

7. 最後に

学会発表で使われるスライドやポスターには著作権があることを忘れないようにしましょう。撮影した画像は、著者に断りなく使用することはできませんので個人的に見ること以外の目的で公にすることはできません。また、スライド投影中のフラッシュ撮影は禁止です。フラッシュ撮影を行う方がいれば、発表は台無しになりますので気をつけましょう。また、ポスター発表中の撮影も演者のじゃまになるので控えましょう。

		DMC-FX7	DMC-FX2
レンズ	構成	ライカ DC VARIO-ELMARIT レンズ 6 群 7 枚 (非球面レンズ 3 枚)光学式手ブレ補正機構内蔵	
	光学ズーム	3 倍	
	デジタルズーム	最大 4 倍 バリアブルデジタルズーム(光学と合わせて最大 12 倍)	
	開放絞り値	F2.8(ワイド端)～F5.0(テレ端)	
	焦点距離	f=5.8～17.4mm (35mm 判換算 35～105mm 相当)	
	撮影可能範囲	通常:50cm～∞、マクロ/かんたんモード時:W 端 5cm/T 端 30cm～∞	
カメラ有効画素数		500 万画素	400 万画素
撮像素子		1/2.5 型 CCD 総画素数 536 万画素、 原色フィルター	1/2.5 型 CCD 総画素数 423 万画素、 原色フィルター
フォーカス		通常/マクロ(モードダイヤル) 9 点/3 点/1 点/スポット AF 補助光	
記録	ISO 感度	オート/80 / 100 / 200 / 400	オート/ 64 / 100 / 200 / 400
	ホワイトバランス	オート/ 晴天 / 曇り / 白熱灯 / セットモード	
	ホワイトバランス 微調整	±10 ステップ(オート時以外)	
	露出	プログラム AE	
	露出補正	1/3 EV ステップ、-2～+2EV かんたんモード時:逆光補正	
	オートブラケット	1/3～1 EV ステップ、3 枚	
	撮影モード	かんたん / 通常撮影 / マクロ / 動画 シーン(ポートレート / スポーツ / 風景 / 夜景 / 夜景ポートレート / 花火 / パーティー / 雪 / 自分撮り)	
	測光方式	評価測光	
	絞り	2 段切換え(ワイド端:F2.8/F5.6)	
	シャッタースピード	8～1/2000 秒	
記録	セルフタイマー	10 秒/2 秒	
	オートレビュー	○(1 秒/3 秒/ズーム)	
	レビュー	4 倍/8 倍 拡大表示可能	

クイック削除	○	
	ナチュラル/標準/ヴィヴィッド	
画像調整		
画像ファイル形式	静止画:JPEG(DCF/Exif2.2 準拠)/DPOF 対応、音声付き静止画:JPEG(DCF/Exif2.2 準拠)+QuickTime™、動画:QuickTime Motion JPEG	静止画:JPEG(DCF/Exif2.2 準拠)/DPOF 対応、動画:QuickTime Motion JPEG
記録画素数(静止画)	2560×1920 画素、2048×1536 画素、1600×1200 画素、1280×960 画素、640×480 画素 1920×1080 画素(HDTV)	2304×1728 画素、1600×1200 画素、1280×960 画素、640×480 画素 1920×1080 画素(HDTV)
画質モード	ファイン/スタンダード	
動画撮影	320×240 画素、30コマまたは10コマ/秒、音声付動画※1:連続記録時間はメモリーカード使用可能容量に依存	320×240 画素、30コマまたは10コマ/秒、音声なし動画:連続記録時間はメモリーカード使用可能容量に依存
連写撮影	高速連写(H)3コマ/秒 最大7コマ(スタンダード) 最大4コマ(ファイン) 低速連写(L)2コマ/秒 最大7コマ(スタンダード) 最大4コマ(ファイン) フリー連写モード(∞) カード使用可能容量いっぱいまで 連写可能、連写速度はカード書き込み速度に依存	高速連写(H)4コマ/秒 最大10コマ(スタンダード) 最大5コマ(ファイン) 低速連写(L)2コマ/秒 最大10コマ(スタンダード) 最大5コマ(ファイン) フリー連写モード(∞) カード使用可能容量いっぱいまで 連写可能、連写速度はカード書き込み速度に依存
音声付き静止画撮影	5 秒	-
アフレコ	最大10 秒	-
フラッシュ	オート/赤目軽減オート/強制発光/赤目軽減スローシンクロ/発光禁止	
フラッシュ撮影範囲	0.3～4.0 m(広角側)、0.3～2.2 m(望遠側)/ISO オート設定時	
その他の撮影機能	コマ撮りアニメ機能、カラーエフェクトモード、リアルタイムヒストグラム表示、撮影ガイドライン表示 エコモード(節電モード)、スローシャッター切換え(1/8、1/4、1/2、1 秒)、手ブレ補正切換え(OFF/MODE1/MODE2)	
液晶モニター	2.5 型 11.4 万画素 低温ポリシリコン TFT 液晶 視野率約 100% パワー-LCD 機能	2.0 型 13 万画素 低温ポリシリコン液晶 視野率約 100% パワー-LCD 機能
再生	再生モード	9 画面再生、ズーム再生(最大16倍)、画像回転表示、DPOF プリント設定、プロテクト設定、スライドショー リサイズ、トリミング、撮影情報表示、再生画像ヒストグラム表示、携帯送信画像作成

削除	1 枚削除/複数削除/全画像削除	
記録メディア	SD メモリーカード/マルチメディアカード	
インターフェース	DC 入力、AV 出力(NTSC/PAL)、USB (マウスストレージ/PTP)	DC 入力、ビデオ出力(NTSC/PAL)、USB (マウスストレージ/PTP)
プリンター連携	PictBridge	
電源	リチウムイオンバッテリーパック (付属、3.7V、710mAh) バッテリーチャージャー/AC アダプター (別売、100～240V 対応)	
電池寿命	CIPA 規格※2: 約 120 枚(付属バッテリーパック)	CIPA 規格※2: 約 130 枚(付属バッテリーパック)
外形寸法	幅約 94.1 × 高さ約 50.0 × 奥行き約 24.2 mm(突起部を除く、最薄部約 19.9mm)	
質量	約 135 g(本体) / 約 153 g (メモリーカード、バッテリー含む)	約 130 g(本体) / 約 148 g (メモリーカード、バッテリー含む)

表 2. EV 値表

EV (ISO100)		絞り値 f									
		1	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22
シ ヤ ツ タ 速 度	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1/4	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1/8	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1/15	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1/30	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	1/60	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1/125	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	1/250	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	1/500	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1/1000	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

表 3. 画素数と DPI(Dot Per Inch)

画素数(横ドット×縦ドット)	72dpi	150dpi	300dpi
130 万画素(1280×960)	45.2 cm × 33.9 cm	21.7 cm × 16.3 cm	10.8 cm × 8.1 cm
200 万画素(1600×1200)	56.4 cm × 42.3 cm	27.1 cm × 20.3 cm	13.5 cm × 10.2 cm
300 万画素(2048×1536)	72.2 cm × 54.2 cm	34.7 cm × 26.0 cm	17.3 cm × 13.0 cm
400 万画素(2272×1704)	80.2 cm × 60.1 cm	38.5 cm × 28.9 cm	19.2 cm × 14.4 cm
500 万画素(2592×1944)	91.4 cm × 68.6 cm	43.9 cm × 32.9 cm	21.9 cm × 16.5 cm

MEMO

基礎から学ぶ電子メール

独立行政法人国立病院機構南岡山医療センター 麻酔科
斎藤 智彦

はじめに

普段何気なく使用している電子メールですが，その仕組みを知って利用している人はあまり多くないかもしれません．まず，電子メールの簡単な仕組みについて説明します．これらの知識を元に電子メールをより便利に，より安全に利用する方法について説明してゆきます．

電子メールが届けられるまで

電子メールの配送も，通常の郵便物と同じように考えることができます．

- 1) まず，自分の利用しているメールサーバにメール送信を依頼します．
- 2) 依頼されたメールサーバは，相手が所属するメールサーバにメールを送ります．
- 3) 相手先のメールサーバは，送信相手のメールボックスにメールを格納します．
- 4) 送信相手が自分のメールボックスからメールを受けとります．

携帯電話の場合個々の端末までメールが配信されますが，パソコン端末の場合，自分の私書箱であるメールボックスに配信されると考えるといいでしょう．この私書箱には，他のユーザから利用できないように鍵がかけられています．

自分の私書箱にあたるメールボックス名が「アカウント」，鍵は「パスワード」に相当します．

メールアドレス `testuser@anesth.or.jp` の場合，@より右の `anesth.or.jp` の部分がメールサーバ(ドメイン)名を示し，@より左の `testuser` がそのメールサーバ内でのアカウントに相当します．

メールサーバにメール送信を依頼したり，メールサーバが他のメールサーバにメールを送信したりする場合に使用される取り決め(プロトコル)を SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) といい，メールボックスに届いたメールをパスワード認証により読み取るプロトコルを POP3(PostOffice Protocol3)といいます．送信用プロトコルが SMTP，受信用プロトコルが POP3 となります．受信用に IMAP というプロトコルがありますが，これは，メールボックスから自分宛のメールを受け取るのではなく，サーバ上のメールボックスを使用してメール管理を行う方法です．

相手のメールアドレスを間違えた場合，送信できないため返信されてきますが，アカウント名を間違えた場合 'User Unknown ...' というエラーが相手のメールサーバから返ってきます．一方，相手のメールサーバ名を間違えた場合，しばらくたってから 'Host Unknown ...' というエラーが送信したメールサーバから返ってきます．

メールソフトの設定をみてみよう

代表的なメールクライアントソフトである Outlook Express を見てみましょう。

仕事用メールのプロパティ

全般 サーバー 接続 セキュリティ 詳細設定

メール アカウント

これらのサーバーに覚えやすい名前を付けることができます。(例: 仕事、Microsoft メール サーバー)

仕事用メール

ユーザー情報

名前(N): Tomohiko Saito

会社名(O):

電子メール アドレス(M): saito@nsok.hosp.go.jp

返信アドレス(U):

☒ メールの受信時および同期時にこのアカウントを含める

OK キャンセル 適用(A)

利用者を設定します
ローマ字が望ましいでしょう

差出人のアドレスです
返信の際に使用されます

返信先を差出人以外に設定
する場合に指定します
通常設定する必要はありません

通常 POP3 です
IMAP を使用する場合は変更
してください

送受信とも同じメールサーバ
を使用することが多いですが、
別々に設定することも可能

受信の際に使用するユーザ名
(アカウント)とパスワードを
設定します

仕事用メールのプロパティ

全般 サーバー 接続 セキュリティ 詳細設定

サーバー情報

受信メール サーバーの種類(M): POP3

受信メール (POP3)(U): mail.nsok.hosp.go.jp

送信メール (SMTP)(U): mail.nsok.hosp.go.jp

受信メール サーバー

アカウント名(O): saito

パスワード(P):

☐ パスワードを保存する(W)

☐ セキュリティで保護されたパスワード認証でログオンする(S)

送信メール サーバー

☐ このサーバーは認証が必要(U)

設定(E)...

OK キャンセル 適用(A)

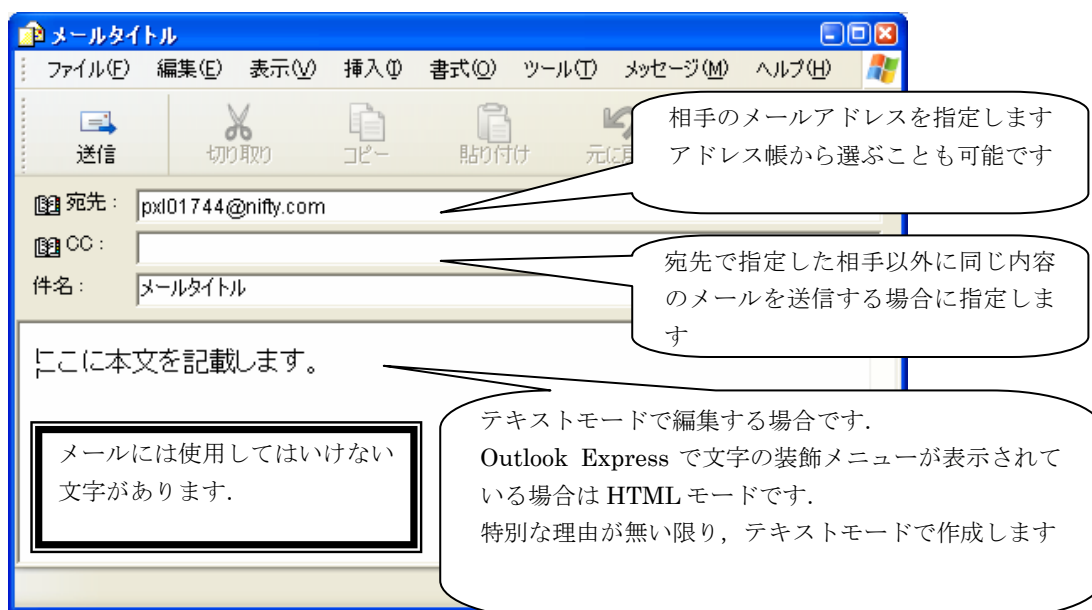
メールソフトの設定には、メールそのものに対する設定(図上)と、メールサーバの利用に対する設定(図下)があります。

メールサーバを利用するための設定は、プロバイダや各施設から与えられたものを正しく入力してください。自分が使用するメールサーバを正しく指定して、私書箱にあたるメールボックスを管理するアカウント(ユーザ)名とそのパスワードを設定します。パスワードは個人で使用する場合は設定して保存しておいてもかまいませんが、共同で利用する場合は空欄にしておくほうがいいでしょう。

一方メールそのものに対する設定は、個々のメールに設定される差出人の情報になります。通常の郵便と同じくこの部分は自由に記述することができます。悪意を持って他人を偽ってメールを送ることも簡単にできてしまうのです。差出人の名前は日本語でもいいのですが、文字化けする可能性を考えてローマ字を使用するほうがいいでしょう。電子メールアドレスは、自分が主に使用するアドレスを記載します。このアドレスはメールサーバの設定に使用したアドレスでなくても構いません。勤務先とプライベートなど複数のアドレスをもっておられる方は、自宅からでも勤務先のアドレスを記載したメールを送ることが可能となります。返信先アドレスは、受信した相手がメールを返信するときに自動的に設定されるアドレスです。通常、差出人アドレスが使用されますが、どうしても別のアドレスに返信してもらいたい場合のみ設定するようにしましょう。メーリングリストに参加する可能性がある場合は設定してはいけません。メーリングリストによって配信されたメールは、差出人は投稿したメンバーのアドレスですが、返信アドレスはメーリングリスト宛に書き換えられて配信されるからです。

メールを作成してみよう

Outlook Express のメール作成画面をみてみましょう。



宛先には、正しいメールアドレスを記載します。施設内で利用する場合のように、自分と同じメールサーバを利用している相手(@より右側が送信用メールサーバと同じ)の場合、アカウント名を記述するだけでかまいません。よく利用する相手の場合、アドレス帳を利用するといいいでしょう。

複数の相手にメールを出す場合、宛先欄にコンマで区切りって複数のアドレスを記述することができます。また CC (Carbon Copy) 欄に 同報メールを送るアドレスを記述することもできます。これらの方法では、同じメールを他の宛先に送っていることが受け取った相手にわかってしまいますが、BCC (Blind Carbon Copy) を使用すると、宛先には同じメールを送ったことを伝えずに、同じ内容のメールを他の相手に送ることができます。これを利用して自分自身にメールの控えを送ることも可能です。

Microsoft Outlook や Outlook Express をメールソフトとして利用されている方も多いと思いますが、これらソフトウェアのインストール直後はデフォルトで HTML メールを送信するように設定されています。この場合、本文の入力枠の上部にフォントの選択や装飾用のツールが表示されます。HTML の名称からもわかるように、ホームページを記述するのと同じタグを使用したメールが作成され、フォントサイズを変更したり画像を貼り付けたり見栄えのするメールを作成することができますが、特別な目的が無い限り、HTML 形式のメールは送信すべきではありません。テキスト文字列だけであれば、多くのメールソフトウェアで安全に読み書きすることが可能ですが、HTML メールは読めないメールソフトも存在します。また、HTML 形式のメールには、スクリプトというプログラムの実行機能がありますので、ウイルス感染の温床にもなっています。受け取る相手によっては HTML 形式のメールは読まずに捨てられる場合もありますので、必ずテキスト形式で送るようにしましょう。

電子メールには使用することのできない文字があります。具体的には、半角カタカナ、①②(丸付数字)、ⅠⅡⅢ(ローマ数字)など機種依存文字ですが、これらの文字をメールで使用すると、相手のメールソフトによっては、文字化けして全く読めなくなってしまう。Microsoft Outlook 同士では問題なく読むことができるので、他のユーザには厄介な問題を起こしてしまいます。

詳しくは以下の URL を参照ください。

<http://www02.so-net.ne.jp/~hat/imap/cover.html>

電子メールの中身

通常の手紙が、封筒と中身の文書に分かれるように電子メールもヘッダと本文に分けることができます。ヘッダは、メールソフトによって自動的に作成され、差出人、送信時刻、返信アドレス、中継したメールサーバ、使用したメールサーバ、文字コードの種類、添付ファイルの設定等いろいろな情報が付加されます。封書に印刷されたり押印されたりした情報に似ています。

続いて作成した本文が挿入されます。添付ファイルがある場合は、本文の後ろに添付内容が付加されます。

メールの中身を覗いてみましょう。

1) オリジナルメール

差出人: "Osamu Uchida" uchida@hsp.ncvc.go.jp
宛先: msanuki@ff.ij4u.or.jp, kenichi@masuinet.com, saito@tomosan.org
件名: PC セミナー原稿 日時: Mon, 20 Sep 2004 18:14:25 +0900

内田@国立循環器病センターです。

PC セミナーまで残り 3 週間を切りました。

... 以下略 ...

2) 上記メールのヘッダを含む本文

Return-Path: <uchida@hsp.ncvc.go.jp>
Delivered-To: tomosan.org-saito@tomosan.org
Received: (qmail 3152 invoked from network);
20 Sep 2004 18:16:29 +0900
Received: ... << 途中略 >>
Mon, 20 Sep 2004 18:14:26 +0900 (JST)
Date: Mon, 20 Sep 2004 18:14:25 +0900
From: "Osamu Uchida" <uchida@hsp.ncvc.go.jp>
Subject: PC セミナー原稿
To: msanuki@ff.ij4u.or.jp,
kenichi@masuinet.com,
saito@tomosan.org
Message-id: <200409200914.AA00552@vulcan.hsp.ncvc.go.jp>
MIME-version: 1.0
X-Mailer: AL-Mail32 Version 1.13
Content-type: text/plain; charset=iso-2022-jp
Content-transfer-encoding: 7BIT
内田@国立循環器病センターです。
PC セミナーまで残り 3 週間を切りました。

返信アドレス(Return-Path)と
配信先アドレス(Delivered-To)

中継したメールサーバとその時刻

差出人メールアドレス

件名(タイトル)

宛先アドレス (複数の場合)

メールに付加される一意の ID

本文の種類はテキストメール, 文字
セットが日本語(iso-2022-jp) 7bit

実際の本文

たった1行のメールでも、メールには多くの情報が付加されます。

ヘッダの詳しい説明は、省略させていただきますが、興味のある方はメールソフトのヘッダ表示でご覧になってください。もし文字化けしたメールを受け取った場合、日本語の変換方式を示す部分

```
MIME-version: 1.0
Content-type: text/plain; charset=iso-2022-jp
Content-transfer-encoding: 7BIT
```

が正しく設定されているか確認してください。

本文を書くときの注意点

今まで述べてきた HTML 形式で送信しない、使用できない文字を使わない、といった注意点の他にメールを利用するには、一定のルールがあります。こうでなければならない、というルールではありませんが、今後のメールを書く際に参考にいただければと思います。

まず、自分がどこの誰であるかを名乗ります。続けて用件に入り、最後に署名を入れて本文を完成させます。「送信者を見ればわかるから」と、名乗らない方もおられますが、プライベートなメールならともかく、正式なメールでは書いておくことをお勧めします。封筒に差出人を書いても、本文中に自分の名前を入れるのが礼儀だと思います。

本文の長さは、全角文字で 36 文字程度とし、適宜改行を入れます。ダラダラと横に長い文書は読みにくいですし、受け取る相手の環境によって表示できる画面のサイズも違います。携帯電話などに送る場合を除いて、一般には 36 文字程度で改行しましょう。メールソフトによっては、自動的に決まった文字数で改行してくれるものもあります。うまく利用してください。

相手の文書を引用する場合は、適当な引用符を使用しましょう。引用するばあいには、相手の文書が改行されないまま続いていると、うまく引用されない場合があります。引用される場合を想定して、改行を適切に設定しましょう。

最後に自分の署名を入れます。記号文字などを使用して自分なりの署名を作成、利用しておられる方も多いと思います。署名を複数作成し、切り替えて使用できるメールソフトが多いですから、職場・プライベートによって使い分けると便利です。文字化けに備えて、この部分には漢字の他にローマ字で記述した氏名を併記しておくことをお勧めします。

なお、電子メールは公開されたメール以外は基本的に私信です。メーリングリストなど多数の参加者に送られるメールであっても私信であることに変わりはありません。自分に送られてきたメールであっても、送信者の許可なく第3者にメールを閲覧させるのはマナー違反です。十分に気をつけてください。

受信メールの管理

携帯電話と違い、パソコンで利用する電子メールは、自動的に自分のパソコンに配信されるわけではありません。メールサーバから受信するという作業が必要になります。自分宛に届いたメールのチェックと、サーバ上のメールボックスへの負担を考えると1日に1回程度は最低でもチェックを行ったほうがいいでしょう。

メールの受信設定で、「POP3 サーバ上にメールを残す」ことが可能ですが、2 箇所以上で同じメールを読む必要があるときなど特別な用途の場合のみ設定すべきではありません。この場合も必要が無くなったらサーバ上のメールは削除しましょう。

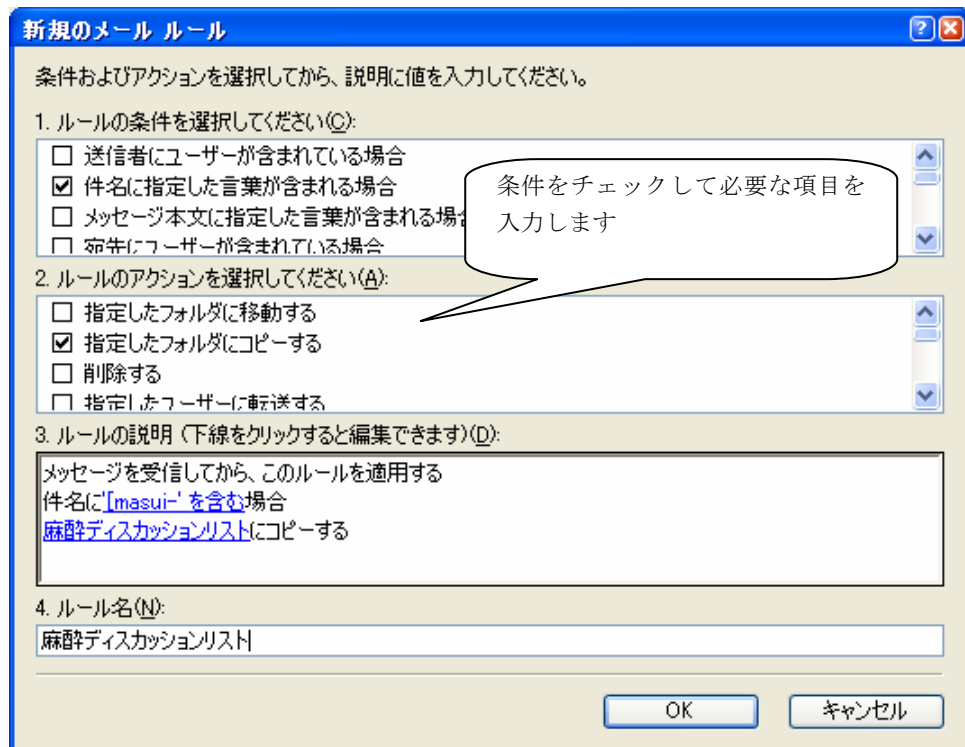
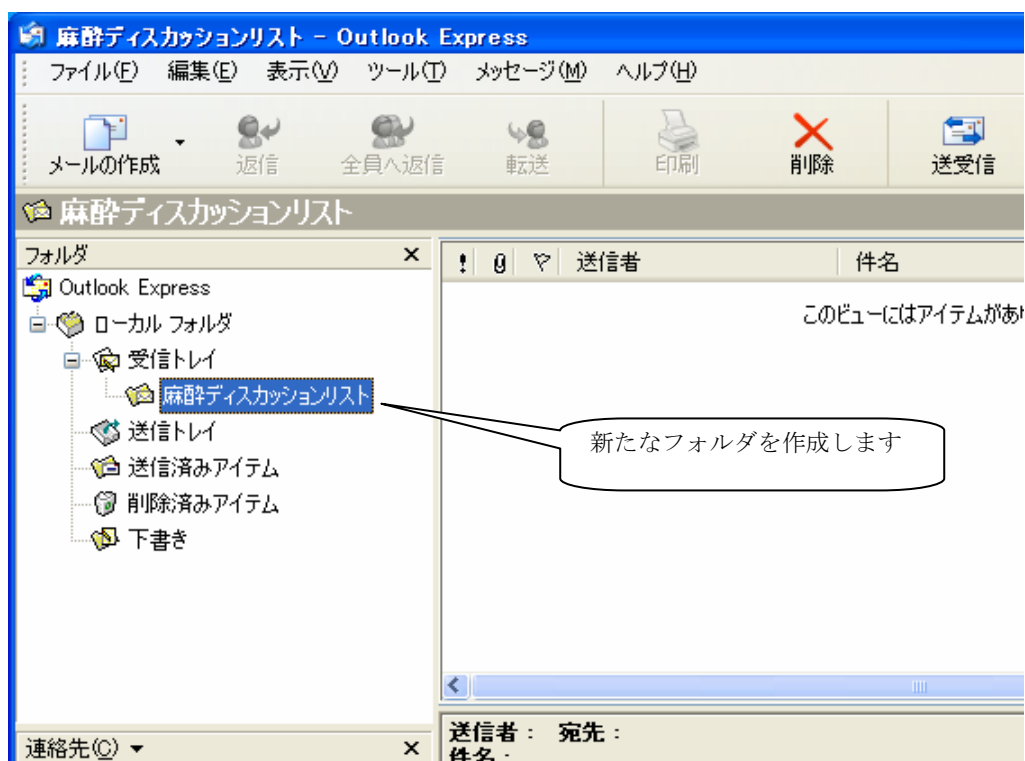
Microsoft Outlook 系メールソフトは、メールを受信するとすぐにプレビューを表示するものがありますが、これらの設定は必ずオフにしてください。通常のテキストメールと **HTML** メールを同じように扱い、クリックひとつで添付ファイルまで閲覧できるこれらのメールソフトは、きわめてウイルスに感染しやすい欠陥を持っています。できるだけ最新のバージョンを利用し、テキスト表示以外の便利そうな機能は設定しない、他の市販メールソフトに変更するなどの対策が必要です。

受信したメールは、一般に受信ボックスというフォルダに保存されます。デフォルトでは受信したメールはすべてこのフォルダに保存されますが、多くのメールソフトは自分でフォルダを作成し、分野ごとにメールを管理することができます。ドラッグ&ドロップや右クリックでファイルを移動できます。用件や、相手別に適当なフォルダを作成し分類することをお勧めします。

受信メールが少数の間は確認の意味を含めて手動で振り分けてもいいのですが、メーリングリストに参加するなどメールの数が多くなると大変です。し、広告メールなど読みたくないメールは自動的に削除したいものです。受信メールを自動振り分けする機能がほとんどのメールソフトには付いています。メールの差出人や、件名に特別な文字列が含まれる／含まれないといった条件に合致したメールを指定したフォルダに自動的に振り分けてくれます。

図は **Outlook Express** の場合ですが、受信トレイの他に適当なフォルダを作成します。

その後メニューから、メールルール設定を選択し、含まれる文字や移動先のフォルダを設定します。サンプルとして、麻酔ディスカッションリストのメールを別フォルダに分ける設定を行っています。他のメールソフトでも、フォルダの振り分けルール といった設定ができます。ごみメール対策も含め、新規フォルダの作成と振り分けルールの設定をおこなってください。



添付ファイルについて

メールにファイルを添付するには、メール作成の画面から、ファイルの添付を選択し、必要なファイル指定すればいいのですが、ファイル添付に際してはファイルの種類に制限はありません。実行可能ファイルもウイルスファイルもすべて添付することが可能です。ファイル添付で注意すべきことは、ファイル名に特殊な文字を使用しないこと、実行可能形式のファイルの添付は極力避けること等ですが、最も大切なのは、メール本文に、ファイル添付の事実とそのファイル名をきちんと明記することだと考えます。そうすることで、送信者の意図と反して送られた添付ファイルの不正実行を防ぐことが可能だからです。

ファイルの添付は、**MIME** という規格でメール本文の後ろに追加する形で行われます。メール自体は1通で、本文の後ろに添付したファイルの数だけ **MIME** 規格でエンコードされたコードが続きます。通常のメールで送ることのできないコードを含むファイルを添付するために、通常 **BASE64** という変換方式がとられます。これは、コンピュータ上で使用するすべてのデータを、数字とアルファベットの大文字と小文字および英字記号の 64 文字で表現する方式です。このため、添付ファイルは、もとのファイルサイズの 1.3 倍程度の大きさになります。送受信のメールサイズに制限がある場合、添付ファイルはオリジナルの 1.3 倍サイズになるということ意識して利用する必要があります。

添付ファイルを受信した場合、直ちにそのファイルを開くのではなく、いったんディスクに保存し適当なウイルスソフトでチェックすることをお勧めします。たとえよく知った相手からのメールであっても、不審な添付ファイルを直接実行するのは危険です。たとえ送信者には悪意が無くても、知らないうちにウイルスに感染し、送られたメールが感染している危険性があるからです。感染の拡大を防ぐ意味からも、添付ファイルを送信する際は、添付ファイル名をきちんと相手に本文中で伝えることが大切です。

いずれにしても巨大な添付ファイルは送信・受信ともにネットワークに負荷がかかります。ファイルの添付は最小限とし、メーリングリストなど多数の参加者に送るメールにはファイルは添付しないといった心遣いが必要です。

メール送受信とユーザ認証について (POP before SMTP, SMTP 認証, APOP)

最初にお話したように、メールを送信するときと受信するときでは使用されるプロトコルが異なります。受信時 **POP 3** ではユーザ認証が行われますが、送信時 **SMTP** ではユーザ認証は行われません。このため、適切な対策が行われていないメールサーバは、誰からのメールであっても無条件で受け付けてしまいます。手紙を投函する場合、誰がどこで出しても受け付けてくれるのと同じと考えられます。

メールを使用する多くのユーザが善人であった時代はそれでよかったのですが、電子メールの特徴であるコストをかけずに何百人もの相手に同じメールを送りつけることを悪意に利用され、無防備なメールサーバを踏み台とした迷惑メール(**SPAM** メール)が現れるようになりました。

本来 **SMTP** にはユーザ認証が無いため、仕事場のインターネット環境からプロバイダのメールサーバに配信を依頼することも原理的には可能ですが、これでは悪意を持った第 3 者からのメールも無制限に配信してしまわなければなりません。プロバイダの中には、自社の回線から接続したユーザ以外の送信は受け付けないところがあります。しかし、これでは正当な利用者が別回線からインターネットに接続している場合メールが利用できなくなります。

これに対する方法として、受信動作にはユーザ認証があることを利用して、送信する前に一度受信動作を行い、その後しばらくは同じ接続先からの送信を受け入れる **POP before SMTP** 方式を採用するプロバイダと、新たな送信規格である **SMTP 認証** を利用するプロバイダが現れました。

POP before SMTP, SMTP 認証 の利用については、プロバイダからの指示に従って、メールソフトの送信オプションを設定してください。

受信プロトコル **POP3** には認証機構があると前述しましたが、インターネット回線を通じて受信する場合にはセキュリティ上の問題があります。パスワードがそのままの形でネットワーク上を流れますので、悪意のある第 3 者がネットワークを監視していると容易にパスワードが盗まれてしまいます。これを防ぐためにパスワードのやりとりを暗号化したものが **APOP** プロトコルで、インターネット経由でアクセスすることのできるプロバイダ

が採用しています。

送信時の認証を行う方法として POP before SMTP や SMTP 認証が、受信時のパスワードを暗号化する方法として APOP が利用されているわけです。

いずれの方法も、メールの内容はインターネット上を平文で流れます。これをホームページで利用されるセキュリティプロトコル https と同じ暗号化技術 SSL(Secure Socket Layer) を利用した方式も一部では利用されていますが、インターネットメールの標準にはなっていません。

メールサーバ上の設定

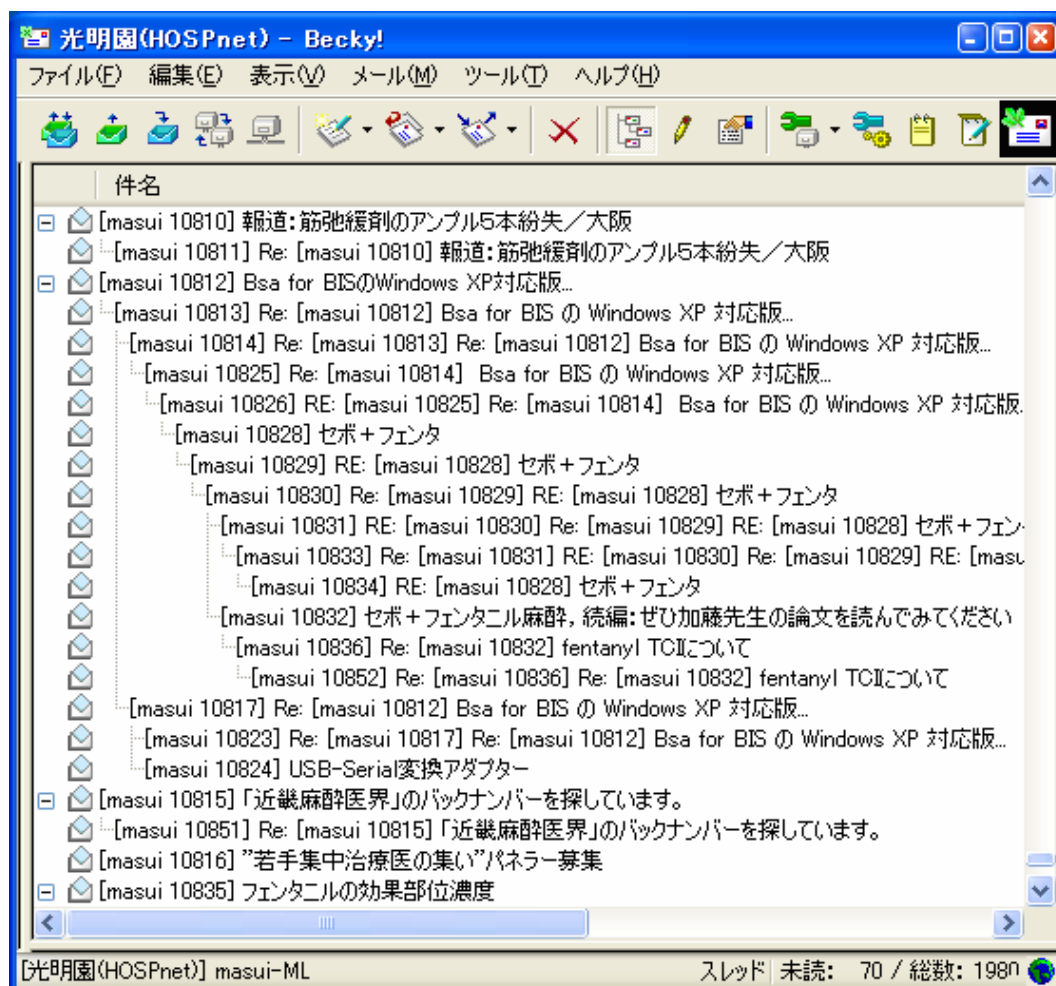
今までクライアント側のメールソフトの設定についてみてきましたが、メールサーバ上で設定できるサービスがあります。代表的なものはメール転送設定でしょう。プロバイダが対応していれば、受け取ったメールをそのまま別のメールアドレスに自動的に転送することができます。転送先を複数指定しておけば、同じメールを複数のアドレスに配送することも可能です。施設内のメールサーバが外部からの受信プロトコルを受け付けない場合、プライベートアドレスに転送しておくことで、自宅からメールを読むことが可能となります。

そのほかのサーバ上で設定できるサービスに「メーリングリスト」があります。メーリングリストについてはよくご存知のことと思いますが、あらかじめメンバーを登録しておくことで、決められたアドレスに送信されたメールは、そのメンバー全員に配信されます。通常、発言者はメンバーに限られますが、外部からのメール許可や、逆に管理者からのメールのみをメンバーに配信するといった制限を行うことも可能です。プロバイダの提供サービスを確認してください。

メーリングリストに参加するときの注意事項を書いておきます。

- 1) メールはテキスト形式とし、引用されることを想定して 36 文字程度で改行する
- 2) メールの最初で、必ず氏名と所属を明らかにする
- 3) 機種依存文字や半角カタカナなどは使用しない
- 4) ファイルの添付は行わない
- 5) 必要な部分のみ引用し、全文引用は避ける（相手の署名を引用するのはすごく失礼です）
- 6) 配信されるまでに時間がかかることがあるため、急いで重複送信をしない
- 7) ファイル転送を行っているアドレスでは参加しない（エラー発生時に対応できません）
- 8) メールを送信するときは、登録されているアドレスから送信する
- 9) 話題が続くときは該当メールに返信し、新規話題は必ず新たに送信する（スレッド表示のため）
- 10) 個人を誹謗中傷するような発言はしない。リスト内の発言は外部には公開しない。

メーリングリストに参加すると、非常に多くのメールが届くため、受信メールの振り分けは必須です。また同時に複数の話題が論議されることがあるため、関連するメールを表示することのできるスレッド機能を利用すると便利です。以下は私が通常使用している Becky! のスレッド表示です。



おわりに

メールの設定には難しい用語がたくさん出てきますが、送信するメールに対するヘッダの設定と、接続するプロバイダに関する設定に分かれます。それさえマスターすれば電子メールを使用する環境が整ったことになります。

使用禁止文字などの基本的なルールを学べば、あとは通常の社会のルールと同じです。メールを送る相手も同じ人間ですから、その気持ちさえ忘れなければ大きな失敗は無いはずです。

最近は電子メールを介するウイルスが猛威をふるっています。メールソフトのアップデートをこまめに行い、アンチウイルスソフトのパターンファイルの更新を行っていれば、それほど恐れることはありません。しかし、HTMLメールの表示や、添付ファイルの実行は、潜在的に危険な行為であると認識しておく必要があります。

本質的にメールの内容は暗号化されていないテキストファイルです。セキュリティを必要とする業務への利用は、よく検討する必要があります。

私たちの生活の中で、電子メールも無くてはならないインフラになりました。

みなさまが、電子メールをより便利に、より安全に利用できるよう、願って・・・

MEMO

麻酔科医が知っていると役に立つ 無線 LAN の基本と応用

国立循環器病センター 麻酔科
内田 整

はじめに

無線 LAN とは、文字通り、LAN ケーブルに代わって無線通信を使用して構築するネットワークのことです。近年、無線 LAN 通信方式の標準化による接続性の向上、パソコン用無線 LAN 機器の低価格化、さらに Windows XP が無線 LAN を標準サポートしたことなどにより、無線 LAN が急速に普及してきました。有線 LAN と比較すると、電波の届く範囲であればどこでもネットワークに接続でき、また、配線設備が不要であるなど、無線 LAN には多くの利点があります。最近では、医療施設においても無線 LAN を導入する事例で増加しています。

無線 LAN は便利である反面、電波という目に見えない媒体を使用しているため、接続に関するトラブルやセキュリティへの懸念もあります。本セミナーでは、無線 LAN を安心して活用できるように、無線 LAN に関する基礎的な知識、接続や導入のノウハウやセキュリティの設定について解説します。

無線 LAN の規格

無線 LAN の規格、IEEE 802.11、は IEEE（米国電気電子学会）が策定したもので、赤外線やマイクロ波など、すべての電磁波を使用する無線 LAN を包括しています。しかし、単に“無線 LAN”という場合は、そのうちのマイクロ波帯の電波を使用する規格を指します。無線 LAN は、当初、2.4GHz 帯の電波を使用し、最大通信速度 11Mbps の IEEE 802.11b の仕様が策定され、普及してきました。その後、通信速度が 54Mbps に向上了 IEEE802.11a と IEEE 802.11g に対応した機器が登場しました。無線 LAN のそれぞれの規格の比較を表 1 に示します。5.2GHz 帯を使用する IEEE 802.11a は 2.4GHz 帯を使用する IEEE 802.11b/g と互換性はありませんが、IEEE 802.11g は IEEE 802.11b と上位互換で IEEE 802.11g 対応の機器は IEEE 802.11b のアクセスポイントに接続できます¹。なお、アクセスポイントや無線 LAN カードのパッケージなどでは、802.11b あるいは 11b などのように省略して表記されている場合もあります。

無線 LAN が普及し始めた頃には、各メーカー間の仕様の差により、通信がうまくできないこともありました。その後、Wi-Fi（Wireless Fidelity, <http://www.wi-fi.org/>）という組織が結成され、製品間の互換性が保証されるようになりました。が付いている機器を購入すれば、メーカーが異なっても接続上の問題は少ないと言えるでしょう。

無線 LAN のチャンネル

無線 LAN は単一の周波数を使用するのではなく、テレビのように複数のチャンネルを使用して通信を行います。それぞれのアクセスポイントにはチャンネルが与えられ、無線 LAN の端末は順番にチャンネルを調べて接続できるアクセスポイントを探します。802.11b/g の場合、1 から 14²のチャンネルがあります。それぞれのチャンネルは 22MHz の幅がありますが、これらは完全に別の周波数ではなく、隣接するチャンネルでは周波数がオーバーラップしています（図 1）。従って、複数のアクセスポイントを敷設する場合は、相互の干渉を避ける目的で 5 チャンネル空けて（例えば、1, 6, 11, 14）設定する必要があります。

802.11a では互いに重複のない 4 つのチャンネルを使用します。

¹ ただし、802.11g と 802.11b が混在する場合は通信速度が低下します。

² 11b と 11g で使用している周波数帯には 14 個のチャンネルがありますが、一部の製品では 14 番目のチャンネルが設定できないようになっています。

表 1. 各無線 LAN 規格の比較

	IEEE 802.11a	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g
周波数帯	5.2GHz	2.4GHz	2.4GHz
チャンネル数	4	14	14
通信速度 (最大)	54Mbps	11 Mbps	54 Mbps
電子レンジの影響	なし	あり	あり
障害物の影響	強い	中等度	中等度
屋外での使用	禁止	可	可
802.11b との互換性	なし	—	あり

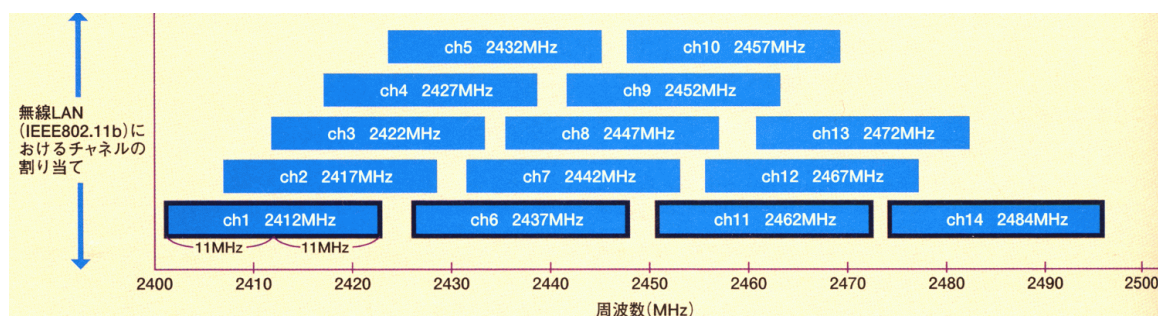


図 1. IEEE 802.11b のチャンネル割り当て

無線 LAN の通信モード

無線 LAN 通信モードには、infrastructure モードと adhoc モードがあります。Infrastructure モードは有線 LAN の末端にアクセスポイントを設置し、それを介して端末が通信を行う方式で、アクセスポイントは有線 LAN におけるハブの役割を果たします。病院、家庭内、公共施設などの無線 LAN はほとんどがこのモードです。これに対して、adhoc モードは無線 LAN 端末同士で通信を行うモードで、有線 LAN においてクロスケーブルでパソコン同士を接続する形態に相当します。

無線 LAN の設定とセキュリティ

LAN ケーブルでパソコンを個々に接続する有線 LAN とは異なり、無線 LAN では電波が届く範囲にあるパソコンはどれでも通信可能になります。従って、無線 LAN でネットワークを構築する場合は、不正アクセスを防止するために特定のパソコンのみに接続許可を与える仕組みや暗号化したデータを使用して無線通信を行う仕組みなど、さまざまなセキュリティ対策が必要になります。

1. ESS-ID (SS-ID)

ESS-ID は Extended Service Set Identifier の略で SS-ID と表記される場合もあります。ESS-ID は無線 LAN におけるネットワークの識別子で、最大 32 文字までの任意の英数字で構成します。ESS-ID は、いわば無線 LAN のグループ名のようなもので、無線 LAN のアクセスポイントは ESS-ID が一致する端末とのみ通信を行います。しかし、ESS-ID は端末のグループ管理の意味合いが強く、これだけでセキュリティを期待することはできません。

無線 LAN の端末を設定する際には、接続先のアクセスポイントの ESS-ID を調べて入力します。Windows XP の場合、ワイヤレスネットワーク接続のプロパティで表示されるネットワーク名が ESS-ID です (図 2)。

ESS-ID ステルス機能 (ESS-ID 隠蔽機能)

アクセスポイントは一定周期で自己の ESS-ID を送信しています。そのため、電波の届く範囲に端末があると、パソコンの設定画面には接続可能なアクセスポイントの ESS-ID が表示されます。しかし、この機能により、無線 LAN が無断使用される危険性もあります。無線 LAN のアクセスポイントには、ESS-ID の送信を停止して存在を周囲に知らせないように設定する機能があります。これを ESS-ID ステルス機能といいます。

ANY 接続拒否機能

無線 LAN の端末の ESS-ID を ANY にすると (ESS-ID が空白のままも ANY になります), あらゆる ESS-ID のアクセスポイントに接続できるようになり、セキュリティ面からは好ましくありません。ANY 接続拒否機能とは、ESS-ID が ANY に設定されている端末からの接続を拒否する機能です。

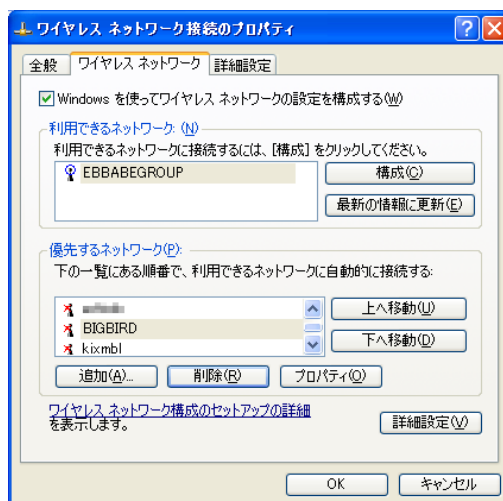


図 2. プロパティシート上の ESS-ID 一覧

2. MAC (Media Access Control) アドレスフィルタリング

MAC アドレスとは、個々のネットワークアダプタに対して与えられている固有の番号で、16 進数 12 桁の数値です。ネットワークでは、この MAC アドレスを使用してデータの送受信を行っています。Windows XP では、スタートからコマンドプロンプトを起動し、ipconfig /all と入力するとパソコンに設定されているネットワークの MAC アドレスが表示されます (図 3)。

無線 LAN のアクセスポイントには MAC アドレスを使用して、端末のアクセス制限を設定する機能があります。この設定を行うと、MAC アドレスが登録された端末のみがアクセスポイントと通信を行うことができるようになります。この設定は不正アクセス対策として非常に有効です。ただし、端末から送信される電波の傍受を防ぐ効果はありません。

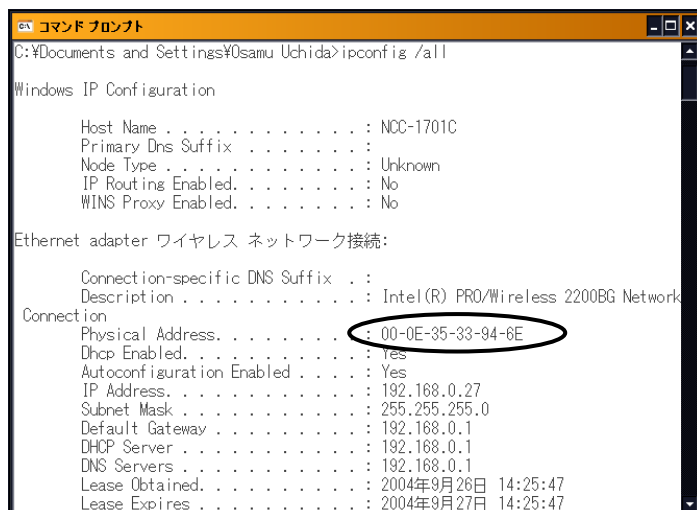


図 3. コマンドプロンプトで MAC アドレスを表示する

3. 暗号化通信機能

a. WEP (Wired Equivalent Privacy)

無線 LAN では電波を盗聴される危険性があるため、セキュリティ上、通信の暗号化が重要な機能になります。WEP とは暗号化技術のひとつで、ユーザが設定したキー（暗号鍵）をもとに送信するパケットを暗号化します。

WEP で使用されるキーには、40 ビット（5 文字）と 104 ビット（13 文字）のデータを使う方式があります³。それぞれ 24 ビットのランダム情報が追加されるため、64 ビット WEP および 128 ビット WEP と呼ばれることもあります。一般に、ビット数が多いほど暗号が破られる危険性が少なくなりますが、その反面、暗号解読に時間がかかるため実効通信速度は遅くなります。

WEP キーは、アクセスポイントと接続する端末の双方に同じ文字列（または 16 進数字）の設定を行います（図 4）。パスワードと同様、セキュリティの観点からは WEP キーを一定期間ごとに変更することが推奨されます。

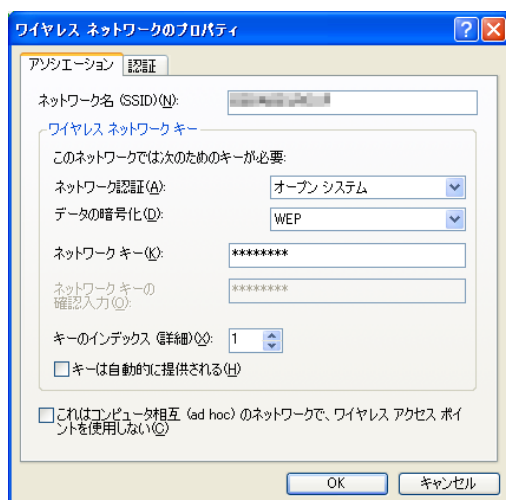


図 4. Windows XP における WEP キーの入力

b. WPA (Wi-Fi Protected Access)

WEP は IEEE で標準化された規格ですが脆弱性も指摘されています。WPA はセキュリティを強化した暗号化方式で、Pre-Shared Key（事前共有キー）を使用するユーザ認証と暗号化キーを自動的に変更する TKIP（Temporal Key Integrity Protocol）という技術により高度なセキュリティを実現しています。最近の無線 LAN 機器のほとんどは、WEP 以外に WPA による暗号化も設定できるようになっています。また、Windows XP では OS レベルで WPA をサポートしています。

無線 LAN の設定の実際

1. 麻酔科医局に無線 LAN を導入する

ほとんどの場合、infrastructure モードによる運用になるでしょう。アクセスポイントはできるだけ部屋の中央付近で高い位置に設置します（窓際は外部に電波が漏洩する危険性が高いので避けるのが賢明です）。部屋が広くて、電波の死角（特に金属製のロッカーに遮られている場合など）が生じる状況や無線 LAN ユーザが多い（アクセスポイント 1 台につき 10 台以上）場合はアクセスポイントを複数設置します。

使用する規格は通信速度からは 802.11a または 802.11g が候補となりますが、価格面および金属の遮蔽

³ 最近では 128 ビット（16 文字）を設定する 152 ビット WEP が設定できる機種もあります。

物が多いことを考慮すると 802.11g が推奨されます。なお、802.11b/g でアクセスポイントを複数設置する場合は、前出のようにチャンネルを 5 つ空けます。

次に、以下のようにアクセスポイントの設定を行います。

ESS-ID

適当な文字列で構成します。ユーザが限定される場合がほとんどですから、ステルス機能を ON に設定することをおすすめします。

MAC アドレスフィルタリング

必ず設定します。

WEP

外部の人間があまり入らないのであれば設定を省略することも可能ですが、無線 LAN の電波は廊下や壁を越して以外と届いているものです。最低、128 ビット WEP の設定を行います。

2. 手術室における無線 LAN

手術室は周囲が金属の壁や扉で囲まれ電磁的にシールドされた空間です。そのため、手術室に無線 LAN を導入する場合はいくつかの注意が必要です。2.4MHz 帯を使用する 802.11b や 802.11g の場合、通信可能範囲は屋外で 50m、屋内でも 25m とされていますが、手術室ではこれよりもかなり狭くなります。図 5 は国立循環器病センター手術室で通信可能範囲を実測したものです。図のように、手術室の入り口を開放した状況では、近傍の手術室を含めてかなりの範囲に電波が到達するようになります。これに対して、入り口を閉めると通信可能範囲はアクセスポイントを設置した手術室内と入り口周辺に限定されます。

手術室に無線 LAN を導入するプランとして、各手術室に 1 台ずつアクセスポイントを設置することが推奨されます⁴。この場合、各アクセスポイントのチャンネルは、相互の干渉が最も少なくなるように設定します。また、送信出力が変更できるアクセスポイントでは、出力を可能な限り抑えるほうがチャンネル間の干渉が少なくなります。無線 LAN の規格に関しては、5.2MHz 帯を使用する 802.11a のほうが、電波の直進性が高いために他の手術室への混信が少なくなります。

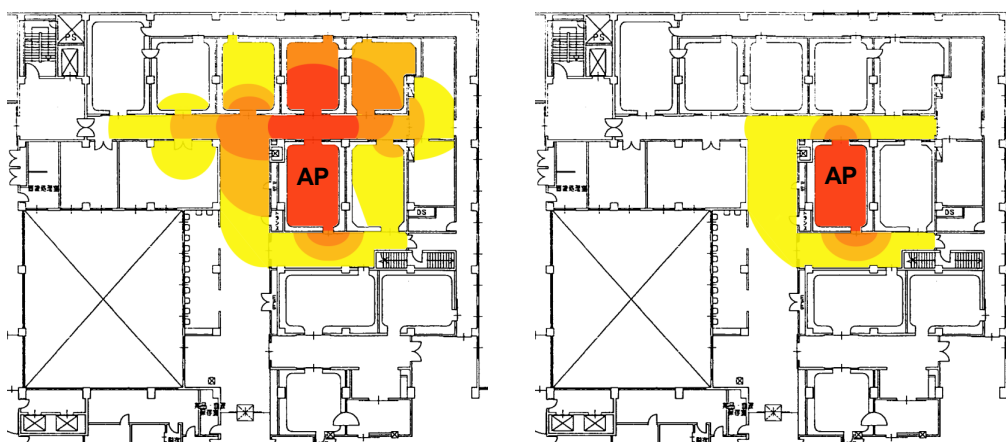


図 5. 手術室における無線 LAN の通信エリア。左：手術室入り口を開放，右：入り口を閉鎖。

⁴ 代替プランとして、見通しのよい手術室の廊下にアクセスポイントを設置する方式もあります。この場合、手術室の扉の隙間から電波が入りますので、802.11a よりも周波数が低い 802.11b/g が適しています。また、電界強度を上げるために外部アンテナを設置することを推奨します。

モバイル運用における無線 LAN

最近では、駅や空港などの公共施設、あるいはホテルや喫茶店など、さまざまな場所で無線 LAN が接続できるようになっています（ホットスポットと呼ばれています）。これらのホットスポットには、無料で提供されているものと有料のものがあります。以下の代表的なサイトから行動範囲にあるホットスポットを調べてみると便利です。

フリースポット	http://www.freepspot.net/
無線 LAN 倶楽部	http://www.ntt-bp.net/pc/index.html
HOTSPOT	http://www.hotspot.ne.jp/

通常、ホットスポットへのログインはブラウザからユーザ名を入力して認証を行います（図 6）。従って、メールを読む際にも一度ブラウザを起動する必要があります。また、WEP キーを入力するスポットでは、予め会員サイトなどから WEP キーを取得しておきます。

病院や家庭内とは異なり、公共施設の無線 LAN では不特定多数の人間がアクセスします。また、これらの場所は盗聴されやすい条件下にあります。従って、このような場所で無線 LAN を使用する際には、セキュリティに十分気を配ることが重要でしょう。

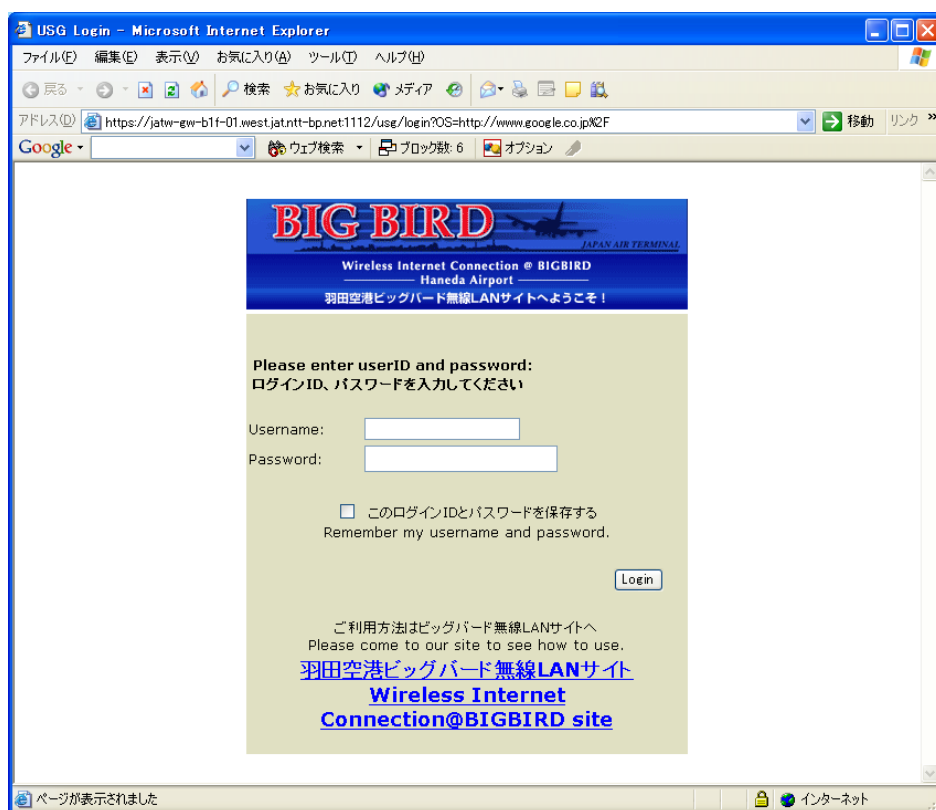


図 6. 羽田空港のホットスポット，BIGBIRD，へのログイン画面

おわりに

最近の無線 LAN 機器は初心者でも簡単に設定ができるようになってきました。しかし、機器を購入したままで使用するとセキュリティが十分ではない危険性もあります。設定内容を理解し、適切なセキュリティ対策を行えば、無線 LAN が仕事／家庭の両方において非常に便利な道具になることは間違いありません。

Excel のグラフ機能を使いこなす

諏訪中央病院 麻酔科
増井 健一

日常，研究データを入力するときには，Excel を使う方が大多数でしょう．入力したデータは，論文や学会で公表するためには，必要であれば統計ソフトで処理をした後，表もしくはグラフを作成します．表の作成には，再び Excel が利用されることが多いと思います．グラフの作成にも Excel を利用する方は少なくないでしょうが，Excel で直感的に操作してもなかなか思ったようなグラフが描けず，不便を感じたことのある方は多いと思います．前回の「麻酔科医のためのパソコンセミナー」で，Excel の利用法についてデータ入力からグラフ等の作成方法について紹介しましたが，今回は特にグラフ機能に焦点を当てて Excel の活用方法について紹介します．

1. 作成できるグラフの種類を知る

ツールバーにある「グラフウィザード」アイコン（図 1）または，メニューの「挿入」－「グラフ...」（図 2）をクリックすると，グラフウィザードのウィンドウが開き（図 3），グラフの作成を開始できます．

Excel ではこのグラフウィザードウィンドウに表示されているグラフを作成できます．



図 1. グラフウィザードアイコン

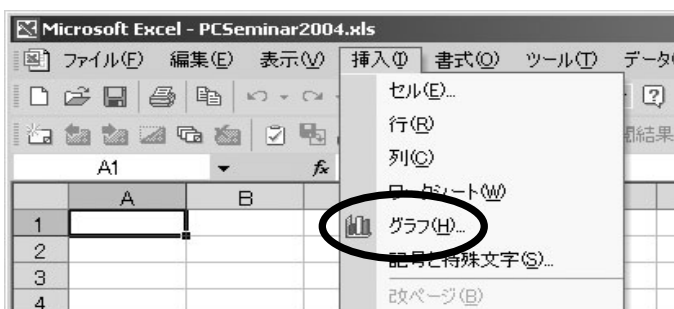


図 2.

メニューからでもグラフウィザードを開ける



図 3. グラフウィザード

Excel で作成できるグラフは，縦棒，横棒，折れ線，円，散布図，面，ドーナツ，レーダー，等高線，バブル，株価，円柱，円錐，ピラミッドです．このうち研究用途で便利な，棒グラフ（縦棒・横棒），折れ線グラフの仲間（折れ線・散布図・面），円グラフの仲間（円・ドーナツ）をセミナーでは解説します．

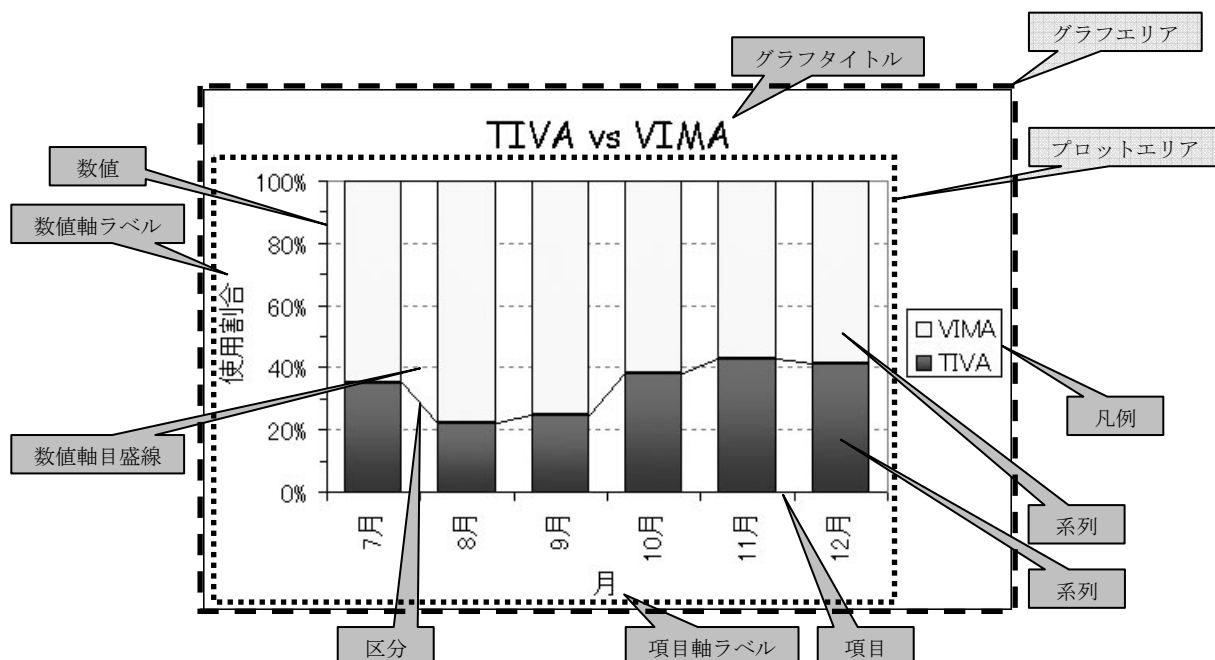
2. グラフの基本設定を変えるには？

Excel でグラフを使いこなすためには、

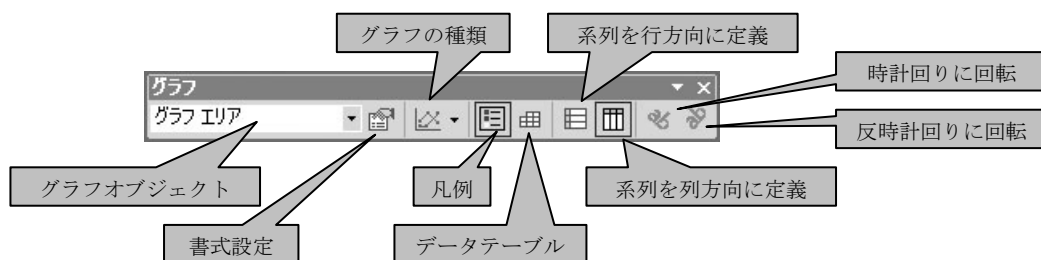
- ① グラフ各部（グラフオブジェクト）の名称
- ② グラフツールバー（Mac ではグラフツールバーまたは設定パレット）
- ③ 書式設定
- ④ グラフオプション
- ⑤ 元のデータ

を理解し、基本設定の変更方法を知っておくと便利です。

① グラフ各部（グラフオブジェクト）の名称



② グラフツールバー



グラフツールバーは、グラフオブジェクトをクリックすると表示されます。

グラフツールバーでグラフオブジェクトを選択し、書式設定アイコンをクリックすると、選ばれているグラフオブジェクトの書式設定ダイアログが表示されます（例：図5～7）。

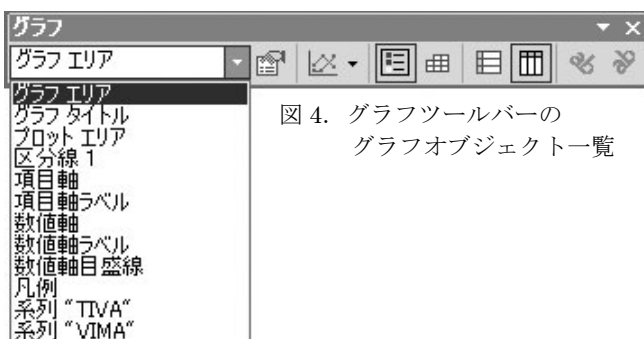


図4. グラフツールバーの
グラフオブジェクト一覧

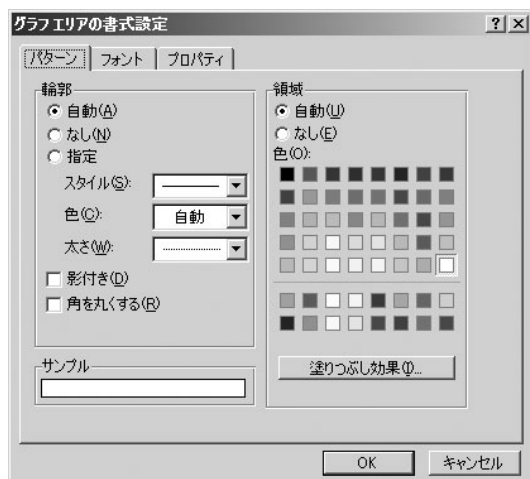


図5. グラフエリアの書式設定



図6. 軸の書式設定

③ 書式設定

書式設定は、グラフオブジェクトによってバリエーションがあります。例えば、グラフエリアの書式設定（図5）では、パターン、フォント、プロパティを設定でき、軸の書式設定では目盛、表示形式などが設定できます。それぞれ、どのような設定ができるかを大まかに知っておくと、思ったようなグラフを作成しやすいでしょう。

なお、書式設定のウィンドウは、グラフオブジェクトをダブルクリックすると表示されます。



図7. データ系列の書式設定

④ グラフオプション (図 8)

グラフオプションウィンドウでは、グラフ全体の表示に関する設定ができます。具体的には、タイトルやラベルの表示、目盛線や凡例の表示の有無などを設定します。

このウィンドウを表示するには、メニューバーで「グラフ」－「グラフオプション」をクリックします(メニューバーに「グラフ」が表示されていない場合は、あらかじめグラフエリアをクリックしておきます)。Windows の

場合は、グラフエリアの何もないところ、プロットエリアの何もないところ、または系列オブジェクト(例えば棒グラフそのもの)を右クリックし、表示されたメニューの中から「グラフオプション」をクリックしてもグラフオプションウィンドウが表示されます。

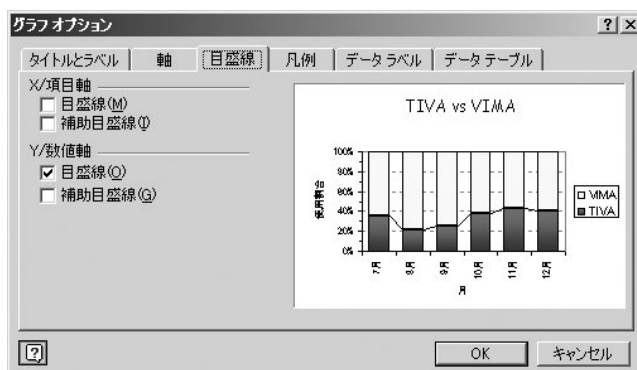


図 8. グラフオプション

⑤ 元のデータ (図 9)

元のデータウィンドウでは、グラフの元になっているデータの参照範囲の変更や、参照データを変更せずに凡例の文字列の変更ができます。

例えば、図 9 の名前の右のところに「静脈麻酔」と入力すると、凡例の「TIVA」という表示は「静脈麻酔」に変更されます。

このウィンドウを表示するには、メニューバーで「グラフ」－「元のデータ」をクリックします(メニューバーに「グラフ」が表示されていない場合は、あらかじめグラフエリアをクリックしておきます)。Windows の場合は、グラフエリアの何もないところ、プロットエリアの何もないところ、または系列オブジェクト(例えば棒グラフそのもの)を右クリックし、表示されたメニューの中から「元のデータ」をクリックすれば、元のデータウィンドウが表示されます。

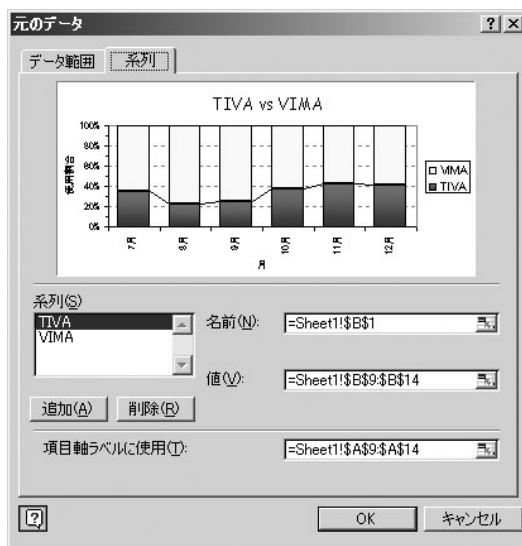


図 9. 元のデータ

3. いろいろなグラフを作ってみる

以上の項目を知っていれば、工夫次第で Excel でもいろいろなグラフを作ることができます。セミナーでは、具体例を挙げながら学会発表などで役に立つグラフ作成法を紹介します。具体的なグラフの作成方法については、付属の CD-ROM をご参照ください。

投 稿 規 定

麻酔・集中治療とコンピュータ誌の投稿規定は従来より本誌、または雑誌「麻酔」に準拠した方針を行っています。以前は投稿原稿をそのまま印刷業者に渡していたのですが、印刷費削減の方針で学会が印刷可能な PDF 原稿まで作成することにしました。その作業中に投稿原稿に御注意願いたいことがいくつか発見しました。以下に項目を上げましたので御配慮の程お願い申し上げます。

1. 原稿はマイクロソフト Word でお願いします。上付き、下付きの文字表示ができ、印刷原稿作成の参考になります。また品質のよい画像原稿作成のためパワーポイントファイルで画像をまとめていただくと有難いです。
2. 文字句読点は英文引用文献、ABSTRACT など以外は全角「, .」を使用してください。半角カタカナ、半角「」, 半角・は使用しないでください。
3. 画像を一枚ずつ"jpg"形式で作成し、Word 文章に組み込むのはよい方法です。しかし、部分画像と Word の円、直線、ボックス、などの描画ツールを組み合わせで作成した画像はスケールを変更すると配置が乱れるので悪い方法だといえます。必ず全画面を 1 枚の jpg ファイルとして作成してから張り付けてください。発表時に作成するパワーポイントファイルなどを画像原稿として添付していただくと編集部で"jpg"変換できるので大変ありがたいです。また、CRT 画面いっぱいの絵に細線で描写されると縮尺時に線が消えることも予想されますので御注意ください。
4. 数式は出来るだけ Word 付属の数式エディタを使用せずに記述してください。特に分数、微分、積分などで誤解の生じ易い箇所は数式エディタでもかまいません。数式を多用する原稿は TeX で書いていただく方がよいかとも思います。但し特殊なマクロファイルは使用しないでください。
5. 原稿はフロッピーファイルで京都府立医科大学麻酔学教室までお送り下さい。また、メールで tanaka@sony3.anesth.kpu-m.ac.jp まで添付してください。マイクロソフトの画像ファイルである"bmp"はファイル容量が大きいので、できれば"jpg"変換して下さい。また、マッキントッシュの画像ファイルは改行命令が異なるため障害が発生することもありました。しかしメール添付は安全に読み取ることができました。
6. お送り頂いた原稿は出来るだけ早く印刷原稿"pdf"にしてメール返送いたします。その過程で校正などの操作を行います。また麻酔関西地方会ホームページの技術情報に掲載します。印刷完了まではパスワード制限を付けていますが、発行すれば一般公開も視野に入れて検討しています。過去の学会誌の著作権は克誠堂にあり、今回からはテクノロジー学会の著作権となります。
7. 麻酔関西地方会 HP の URL は <http://kansai.anesth.or.jp> です。左のタグ下方に技術情報があり、それを選択、テキストエディタの項の左上端の MACPU が閲覧入口です。現在テクノロジー 2006 の原稿を受け付けていますが、まったく原稿がない状態です。至急原稿提出をお願いいたします。新規原著、総説も歓迎します。

2006 年 11 月 15 日 (水)

日本麻酔・集中治療テクノロジー学会
編集部 田中義文

ISBN4-89467-158-1

C3047 ¥3000E



9784894671584

定価（本体3,000円＋税）



1923047030009

**麻酔・集中治療と
テクノロジー
2005**