麻酔・集中治療とテクノロジー

2017

●編集

埼玉医科大学病院
麻酔科　教授
岩瀬　良範

京都府立医科大学附属病院
集中治療部 部長
橋本　悟

京都府立医科大学大学院 名誉教授
京都岡本記念病院 顧問
田中　義文

simulation
intranet
software
database
network

麻酔・集中治療とテクノロジー 2017

●編集

埼玉医科大学病院
麻酔科　教授
岩瀬　良範

京都府立医科大学附属病院
集中治療部 部長
橋本　悟

京都府立医科大学大学院 名誉教授
京都岡本記念病院 顧問
田中　義文

ご挨拶とご報告

2017 年 7 月

第 34 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会を、2016 年 11 月 25(金)〜26(土) 日に、ハイアットリージェンシー東京 (東京都西新宿) において「これまでと、これからに思いを込めて」をテーマに開催させて頂き、有意義な学術集会となりましたことを深く御礼申し上げます。

私の本学会への思い入れは多くの方々にご理解を得られると思います。本学会との出会いは、1 年目研修医だった 1984 年の第 2 回大会 (大阪) に、故奥田千秋 (獨協医科大学名誉教授) のお薦めで出席したから始まりました。シンポジウムでは、若かりし頃の田中義文先生 (当学会誌編集長) が血圧の自動制御をめぐって工学者と微分制御および積分制御についての大激論を目撃し、これが刺激になって毎年の出席と発表になり、いつしか皆様のおもてなしをすることが人生の目標になりました。今回の担当は、私自身この上ない喜びでした。

今回は、本学会にふさわしい、いくつかの新しい試みを行ってみました。本稿では、それらについてのコンセプトと結果についてもご報告させて頂きます。

1. 学術集会ポスター

「絵心」に乏しい私が、準備を開始してから最初に遭遇した鬼門は「ポスター」である。楽しく、テーマに沿った美しいポスターを描ける人材も周囲には見当たらない。無償の素材サイトを検索したところ、国際宇宙ステーションからの画像とアンドロメダ大星雲のものが目に留まった。特別講演が「はやぶさ」に決まりかけていた時期でもあり、これらに即決した。探査機「はやぶさ」のイラストは JAXA に許諾申請をしたところ、作者の池下章裕氏に直接申し込むようにご指導頂き、作者の明記を条件に許諾頂いた。

次に、広大な宇宙空間は「黒塗り」ではもったいない。本学会誌である「麻酔・集中治療とテクノロジー」に収載されている論文の図表で、ポスターにマッチしたものを収載したいと考えた。すでにすべて電子化されている過去の図表は、本学会の雰囲気を適切に表現してくれるに違いない。さらに、田中編集長が編集された 2005 年以降は、図表は最大解像度で電子化されていることを以前に伺っていたので、ポスターのような拡大印刷にも十分使用できると直感した。

学会誌図表の使用は、著者の皆様にご承諾頂き掲載した。そのため随時配置が変化している。同様に、展示・協賛・協力企業様の会社名とロゴも掲載し、最終的には図 1 のようになり、かなり見栄えのするものになった。また、学術集会半年前に、このようなお願いをすることで、参加者の皆様の「エンジン」を例年より少し早く始動して頂けたのではないかと感じている。

本ポスターは、図表やロゴを省いたものを、抄録誌の表紙と会場用ポスターに使用した。(図 2)

2. 事前登録

「大きな学会でもないのに、なぜ事前登録？」と思われた方も多かったと思う。むしろ、小さな学会だからこそ、おおよその参加者数を把握したかったことが最大の理由である。会場やサービスを無駄に大きく設定するより、予定した人数で運営する方が、結果的に参加者一人一人への手厚さは向上する。何回かの期限延長は行ったが、最終的には 95 %の参加者様に事前登録を頂いた。

また、参加証明書は、郵送した事前登録のネームカード提示でお渡ししたが、欠席された方は 1 名のみだった。郵送に伴う事故を想定して、事前登録カードは割印を入れて、一方 (ネームカード、領

収書、懇親会入場券) を抄録集とともに参加者へ郵送、もう一方 (ネームカード控え、参加証明書、懇親会入場券控え) を事務局で控えとして保存したが、1 名だけ郵送未着で事務局控えのネームカードを使用した。この方は、学会後の調査で最終的には配達された。

3. ネームカード

ネームカードは、事務局であらかじめ全項目を印刷した。文字情報の他に、支払情報を含んだ QR コードも印刷した。QR コードの作成は、QR Code Editor(株) サイテック様の提供するフリーソフト http://www.psytec.co.jp/freesoft/01/を使用した。これにより偽造を予防するだけでなく、展示企業が、顧客情報を必要とした場合、本人の同意を得れば容易に所属と氏名を得ることができるようにした。QR コードは、カメラ機能を持ったスマートフォンや携帯電話で簡単に読み取ることができて、その情報はすぐに電子メールで送ることができる。この QR コードは展示企業様の好評を頂いた。

4. ワイドスクリーン

本学会は、第 10 回の富山市での開催以来、いち早くスライドからビデオプロジェクターへの移行を完了していたが、その解像度は 4:3 の SVGA や XGA が主流だった。折しも、2016 年 8 月に香港で開催された世界麻酔学会 (WCA) では 16:9 の HDMI に対応しており、情報量の豊富さに驚いた。そのため今回は HDMI でのプレゼンにも対応できる環境を整え、多くの方が HDMI でインパクトのある発表をして下さった。我々の日常生活からも、4:3 テレビやディスプレイは、多くが 16:9 の横長のものに移行が完了しているため、丁度よい時期と判断した。

5. 左右のダブル演壇 (podium)

本学会の本番口演の進行で、最も不確定な要素は、演者の交代時のパソコンの接続変更と、それに伴うプロジェクター動作である。最悪の場合、パソコンの再起動を余儀なくされる場合もあり、進行が完全に停止することもあった。この対策を思案していたところ、先の WCA では演壇が聴衆の右手側、座長席が聴衆の左手側という、「いつもと逆」の配置で発表する機会を得た。自分自身では多少の違和感を感じながらも、「悪くない」印象だった。

もし、演壇を左右に配置したら、講演中と反対側の演壇は空いている。その時点から次演者の方にパソコンの接続等の準備を開始して頂けば、約 10 分間の準備時間が確保できる。

当初は、プロジェクターを 2 台準備する予定だったが、この構想をホテルの音響担当者に相談したところ、「シームレススイッチャーを使えば十分可能で見栄えも良い」との返答で、この方法で行くことにした。同様に、信号兼時間表示器も左右に配置可能だったが、モニターディスプレイだけは、演壇上には配置できないため、床置きで 42 インチのディプレイを会場前方中央に配置した。

しかし、発表者にとって演壇周囲の環境は最重要課題である。発表を障害するようなことはあってはならない。そのため、演題応募時に右演壇の使用については可否を伺った。抄録も、見開き左右の割り付けと演題および演壇が連動するようにした。

この結果、交代時の時間ロスはほぼ皆無になり、最終的には全日程も予定より約 20 分ほど早く終了した。

6. 学術展示

本学会の主題である「テクノロジー」は、口演だけでは伝えきれない情報も多い。そのため、学術

展示スペースを準備した。製作したものや実演したいものに、90 cm 幅のテーブルを提供し、3 件の利用があった。

こうして、私自身が手作りでプロデュースした第 34 回日本麻酔集中治療テクノロジー学会が終了しました。過去と未来を主題に考えた今回は、結果的には創造的な未来を強く意識させる本会の主題に沿った形で次回に引き継ぐことになりました。

最後に、本学術集会のためにご尽力頂いた個人および企業の皆様に心から御礼申し上げます。

図 1 学術集会ポスター

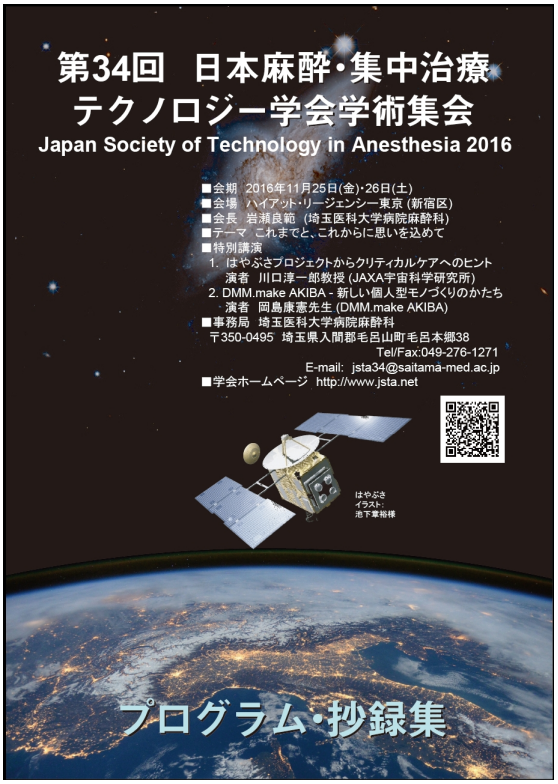


図 2 抄録集表紙

図 3 QR コード作成画面

第 34 回日本麻酔集中治療テクノロジー学会
埼玉医科大学病院麻酔科 教授
会長　岩瀬 良範

memo:

目　次

第 34 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会論文集

特別寄稿：
Anaesthesia, 麻酔という言葉は? 1
藤森　貢 (大阪市立大学 名誉教授)

一般講演：
熊本地震とテクノロジー 3
野上俊光 (成尾整形外科病院 麻酔科)　他

江戸時代後期の最新テクノロジー ── 華岡流全身麻酔について ── 8
土手健太郎 (愛媛大学医学部附属病院集中治療部)　他

バルン型酸素投与装置の使用経験 13
薊　隆文 (名古屋市立大学看護学部病態学 麻酔学)

ゲノムワイド関連解析を利用したオピオイドのテーラーメイド医療への試み 16
三枝　勉 (埼玉医科大学病院 麻酔科)　他

次世代手術室 Smart Cyber Operating Theater(SCOT) を
基盤とした新時代の麻酔テクノロジーの可能性 22
糟谷祐輔 (東京女子医科大学 麻酔科)　他

PaperChart, 電子カルテと連携した手術システムの紹介 26
中村　功 (北新東病院 麻酔科)

冠動脈攣縮で発生する早期再分極症候群はジギタリス中毒波形の ST 上昇型である． 32
田中義文 (京都岡本記念病院 麻酔科)　他

筋萎縮性側索硬化症 (ALS) 患者の意識変容と麻酔中の脳波 36
林　和子 (公立南丹病院 麻酔科)　他

ハミルトンの最小作用の原理による動脈の血行動態 40
横山博俊 (金沢医療センター 麻酔科)

Arterial Pulse Wave Analysis 法におけるオンライン
$\log_{10}$(SVV)-SVI プロットとリアルタイム回帰直線分析 48
佐和貞治 (京都府立医科大学麻酔科学教室)　他

ClearSight System^{TM} によるオンライン SVV–SVI プロット解析 54
竹下秀祐 (京都府立医科大学麻酔科学教室)　他

E-ICU 電子カルテの人工知能化の第一歩として予測死亡率の自動作成 60
財津昭憲 (社会医療法人 雪の聖母会 聖マリア病院 集中治療科)

APACHE II スコアリングプログラムの開発 76
菅原友道 (香川大学医学部附属病院 麻酔・ペインクリニック科)　他

ビデオ喉頭鏡 The McGRATH^{TM}MAC でのビデオ録画方法の考案 79
中尾正和 (JA 広島総合病院 麻酔科)　他

脊髄くも膜下麻酔のシミュレーションという視点から見たミエログラフィー 82
野上俊光 (成尾整形外科病院 麻酔科)　他

積層型 3D プリンターによる CT 画像からの脊椎骨造形 90
岩瀬良範 (埼玉医科大学病院 麻酔科)　他

安価な波形記録用ソフトウェアの開発 94
萩平 哲 (大阪急性期・総合医療センター 麻酔科)　他

フーリエ級数・フーリエ変換・ラプラス変換 96
田中義文 (京都岡本記念病院 麻酔科)　他

特別寄稿：
厚労省も陥ったか，ヒューマンエラーと二酸化炭素中毒にまつわる謎 (続) 118
佐藤　暢 (鳥取大学名誉教授)　他

QR バーコードを利用したシステム間情報参照ツールの作成 126
斎藤智彦 (独立行政法人 労働者健康安全機構 岡山ろうさい病院 麻酔科)

OPEN MRI 手術室での無線 LAN による生体情報記録システムの構築 131
讃岐美智義 (広島大学病院 麻酔科)　他

第 34 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会抄録抜粋 136

編集後記 140

Anaesthesia，麻酔という言葉は？

藤森　貢

An(a)esthesia という言葉や日本語の「麻酔」という言葉は何時頃から使用されたかということを振り返ってみた．

1846 年 10 月 18 日にマサチューセッツ総合病院で W.Morton がエーテル麻酔を行ったことは現在では衆知のことであるが，この出来事を学問的に報告したのは手術室で見学していた外科医 H.J. Bigelow である．1ヶ月後の 11 月 18 日発行の Boston Medical and Surgical J. に「Insensibility During Surgical Operations Produced by Inhalation.」という論文を発表した[1]．「On the 18th of Oct. 1846, an operation was performed at the hospital upon a patient who had inhaled a preparation administered by Dr. Morton, a dentist of the city, with the alleged intention of producing insensibility to pain. Produce a narcotism of an hour’s duration.」とのべられており Anaesthetic, Anesthesia という言葉は一言も使用されていなかった．疼痛に対して無感覚状態という表現であった．Morton によるエーテル麻酔から約１カ月後で Bigelow の論文掲載２日後の 1846 年 11 月 20 日にモートン夫妻が下宿していた Augustus Addison Gould の家に W.Morton, H.J.Bigelow, Jean Lois Rodolphe Agassiz, Oliver Wendell Holmes,Sr. が集まり，Holmes が「Anaesthesia」という言葉を提案したと述べられている[2]．しかし Morton が翌年 1847 年に書いた論文[3]・Remarks on the Proper Mode of Administration Sulphuric Ether by Inhalation. には Anaesthesia という言葉は使用されていない．英国の J. Y. Simpson は Morton のエーテル麻酔の翌年 11 月発行の Lancet に「On A New Anaesthetic Agent, More Efficient than Sulphurcic Ether.」というクロロホルム麻酔についての論文[4]を発表し anaesthetic という言葉を使用している．Narcotizing agent, Anaesthetic effect, Patients are quite anaesthetic.などの表現をしていることから英国では Anaesthetic という言葉はこの時代に使用されていたと考えられる．米国 Georgia 州で開業していた外科医・C. W. Long は Morton によるエーテル麻酔の 4 年前の 1842 年 3 月 30 日にエーテル麻酔で頸部の Cyst の摘出手術をしていたが，論文を発表したのは 1849 年であった[5]．その中では Morton の麻酔を Dr. Morton’s Letheon, as an anaesthetic, etherization と表現している．Letheon はギリシャ神レーテー，忘却の川　黄泉の国にあり，その水を飲むと過去を忘れるという語源だそうである．以上のことより当時は Anaesthetic という言葉は英国では使用されていたが Anaesthesia という言葉が普及するには長い年月を要したと考えている．

日本では 1804 年，華岡青洲が全身麻酔を行ったときのことは乳巌治験録に「正気恍忼乎不識人事終身麻痺不覚痒痛」と表現されて麻酔という言葉は存在しなかった．Morton によるエーテル麻酔の翌年の 1847 年にドイツの J.Schlesinger が Die Einathmung des Schwefel-Aethers in ihren Wirkungen auf Menschen und Tiere という本を出版し，これを J.Sartuis がオランダ語に訳した本を同年に出版したとされている．この本を杉田

大阪市立大学　名誉教授

玄白の孫の杉田成卿が 1850 年に訳し「麻酔」という言葉を表現したということである[6]．しかし華岡青洲の弟子の鎌田玄台が松岡玄声に口述して 1854 年に出版した外科記廃の麻沸湯論には麻酔という言葉は使われていないそうである[7]．

Anaesthesia や麻酔という新しい言葉が作られても普及するまでは長い年月が掛かるものである．筆者が米国で Morton のエーテル麻酔から 100 年経った 1956 年に麻酔科のレジデントをしている時に術前回診で「明日あなたに Anesthesia する」と言っても Anesthesia という言葉を理解できない患者もいた．昭和 40 年頃に日本で大新聞に「麻痺科」と書かれたこともあった．言葉や実績が認められるまでには長い年月が必要であると痛感する．

補遺

本文は第 34 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会（2016 年 11 月 26 日開催）の前日に行われた懇親会の卓話の要旨を纏めたものであるが，最近に発表された Rajesh P.Haridas: Earliest English Definitions of Anaisthesia and Anaesthesia. ANESTHESIOLOGGY 2017; 127:747-753 を読んだので少し加筆する．

外科医 H. J. Bigelow が Morton によるエーテル麻酔の１ヶ月後の 11 月 18 日に「Insensibility During Surgical Operations Produced by Inhalation.」という論文を発表したが，11 月 21 日にボストン在住の医師・Oliver Wendell Holmes が Morton に Anaesthesia という言葉を使用するように手紙を送ったとのことである．しかし Morton は 1846 年，1847 年に発表した彼の論文にこの言葉を使用しなかった．　1 年後にクロロホルム麻酔について発表した英国の J. Y. Simpson は Aaesthetic という言葉を使用している．C. W. Long も 1849 年の論文で Morton の麻酔を Dr. Morton’s Letheon, as an anaesthetic, etherization と表現している．R.P.Haridas の論文によると anaisthesia という言葉は 1684 年の A Physical Dictionary という専門用語辞書にあり，1708 年発行の Dictictionarium Anglo-Britannicum という一般向けの辞書に Anaesthesia として記載されていると述べている．

ギリシャ語に由来するラテン語が anaisthesia となり J. Kersey により編纂された Phillips’ dictionary　1706 年版では anaisthesia であるが同人により 1708 年に出版された Dictictionarium Anglo-Britannicum では anaesthesia と綴られているという．

参考文献

1. Henry J. Bigelow: Insensibility during Surgical Operations Produced by Inhalation. Boston Medical and Surgical Journal. 35:300-317 (Nov.18) 1846
2. 菊池博達: 行って見て撮った　Mount Auburn 墓地再訪　エーテル麻酔公開実演に関係した人物を中心に. LiSA.22：2015-9 (Sept.) 2015
3. William T. G. Morton: Remarks on the Proper Mode of Administration Sulphuric Ether by Inhalation. Boston, Dutton and Wentworth, Printers, 1847. 44pp
4. James Y. Simpson: On A New Anaesthetic Agent, More Efficient than Sulphurcic Ether. Lancet, 2: 549-550 (Nov. 20) 1847
5. Crawford W. Long: An Account of the First Use of Sulphuric Ether by Inhalation as an Anesthetic in Surgical Operations. Southern Medical and Surgical Journal (n.s) 5:705-713 (Dec.) 1849
6. 松木明知：日本麻酔科学史の新研究. 東京: 克誠堂出版: 2010. p. 48-51
7. 土手健太郎：世界最初の麻酔科学の教科書“麻沸討論”と鎌田玄台. 日本麻酔科学史研究会第二回大会　会長講演　2016. 11　高知市

熊本地震とテクノロジー

野上俊光，田中佳代，森　隆弘 , 東　兼充*

はじめに

2016 年 4 月 14 日と 16 日，最大震度 7 の大型地震が連続して熊本地方を襲った．テクノロジーとの関わりからこの災害を見直し，来るべき関東周辺や東南海トラフ地域の地震，津波対策について検討する．

経　過

地震の正確な予知はまだ出来ない．日本には陸のプレートが 2 つ，海のプレートが 2 つ集まっている．この 4 つのプレートの移動に伴いヒズミが溜まり地震が必発する (図 1)[1)]．

4 月 14 日午後 9 時 36 分の大きな地震のあと，余震が来るとの報道はあったものの 16 日未明に，より大きな地震に見舞われるとは思ってもいなかった．二日後の地震は長く続き，エネルギーは 16 倍程大きく，被害も甚大だった．このため 16 日の地震が本震と名付けられ，前の地震は前震と位置づけられた．

熊本市内のライフラインを見ると本震後には停電，断水に加え都市ガスの供給もストップした．熊本空港は閉鎖，高速道路は熊本周辺で全面通行止め，九州新幹線も脱線事故で動かなくなった．市内の路面電車も運休した．多くの橋脚が影響を受け，熊本駅前の白川橋は交通止め，阿蘇大橋の落下，俵山トンネルの崩壊などがあり一般道路も寸断された．このように，震災直後の熊本は陸の孤島状態になった[2)]．通勤路は液状化でマンホールが飛び出ていた．道路は倒れた壁にさえぎられ，信号機も動いていなかった (図 2，図 3)．

成尾整形外科病院 麻酔科
*くまもと麻酔科クリニック

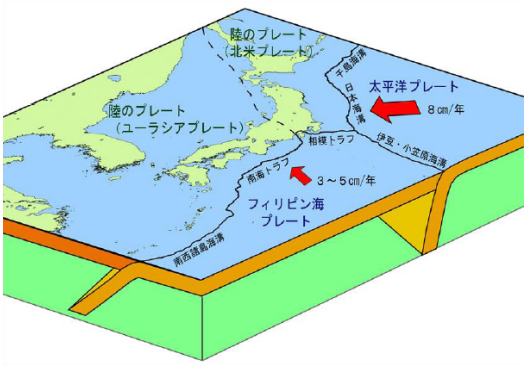


図 1 日本付近のプレートの模式図 [1)]
気象庁 ホームページから

図 2 液状化で周辺が陥没し，盛り上がってきたマンホール (歩行者が気付くよう散水リールが置かれていた)

図 3 本震後の通勤路上．壁が倒れ，停電で信号機は点かない．

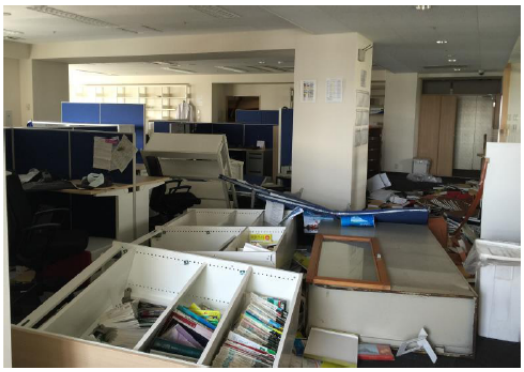


図 4 医局内の状態．スチール製の本棚からは書籍が落下したものの，壁に固定されていた本棚は残った。固定されていない本棚は本と一緒に倒れた．

当院の被害状況と対応

当院は救急指定病院ではないため外来は休診とし，予定手術はすべて延期した．本震後，病院内は停電を免れたものの断水し都市ガスも使えなくなった．幸い本震後も電力は使えたので地下水の供給を行った．ただし屋上の貯水タンクが倒壊したのでポンプの配管を変更し，1F 外来から 4F 病棟までの低層階へは直接送水した．5F 医局から 7F 食堂の上層階はポンプの能力を考慮し断水のままとした．水に濁りがでたため飲料水にはできなかったが，トイレや洗顔などには使用できた．お湯は使えなくなった．

応急被害診断で建物の継続使用には OK 判定がでた．増築部分との結合部 (エクスパンションジョイント：接合部) は，地震時には被害を低減するため割れるように設計されており，割れていた．割れた分離部は通行障害や雨漏れへの応急処置がなされた．

医局の本棚は壁に固定されていたものの，中の本は大部分が床に落下した．スチール製の本棚は地震後も固定されていたが，木製の本棚は固定していた釘を振り切って転倒した．机の上のパソコンやモニター類も転倒，落下した (図 4, 5)．7F 食堂床の給水・排水管が破断し，水が 6F にこぼれ，5F の電子カルテ用パソコンにまで落下した．

図 5 木製の本棚は固定の釘を振り切って書籍もろとも転倒しコピー機にぶつかっていた．

図 6 手術室内の電子カルテ用のパソコンや液晶モニターは台から落下し，垂れ下がっていた．麻酔器や生体情報モニター等には被害はでなかった．

手術室内は床に落下物がみられたものの，幸いにも麻酔器，生体情報モニター，手術台などへの損傷はみあたらなかった (図 6)．都市ガスが使えないため高圧滅菌器が動かなかった．19 日 (火) 都市ガスをボンベに詰めた LP ガスの手配を依頼．滅菌器の稼動チェックを始めた．4/20 (水) 西部ガスから都市ガス供給が開始され，都市ガスが使用できるようになった．滅菌器のテストで滅菌機能に異常はなく，翌 21 日 (木) から手術を再開できた．

熊本市内の関連病院から聞き取った範囲では，今回は夜間の地震災害であったため，予定手術は，ほぼ終了していた．前震時に熊本市内で行われていた手術は数件ほどで，熊本大学病院では 2 件行われていた．停電はなく，そのまま終了し事なきを得たという．本震時に行われていた手術は，殆ど無かった模様である．

熊本大学病院の被害報告では「耐震構造」の外来棟は物品が倒れ室内はぐちゃぐちゃの状況だったのに比べ「免震構造」の病棟と中央診療棟では棚や備品は殆ど倒れず室内の被害は目立たなかったという．

検　討

東京都地域防災計画 (震災編) ではライフラインを 95 %回復する日程目標が示されている (表)[3]．この復旧目標として電力は 7 日，通信は 14 日，上下水道は 30 日，ガスは 60 日と記されている．熊本地震での実績をみると，95 %回復に電力 3 日，上下水道 10 日，都市ガス 14 日と格段に早かった．ちなみに東日本大震災での実績は同じ順に 7 日，41 日，36 日，阪神淡路大震災では 3 日，43 日，71 日であった．電力の復旧は早く，ついで上下水道となり，都市ガスの復旧には時間がかかっている．

減災対策や災害への準備：地震対策として，東京都から提供されている防災ブック「東京防災」には有益な情報が盛り込まれている [4]．デジタル書籍にもなっており，kindle，kobo など多くの

表 ライフライン復旧のめやす
(95 %回復の実績と めやす)

	電力	上下水道	都市ガス
熊本地震	3日	10日	14日
東日本大震災	7日	41日	36日
阪神淡路大震災	3日	43日	71日
東京都防災計画	7日	30日	60日

電力の復旧は早く，ついで上下水道，都市ガスの復旧には時間がかかっている．東京都防災計画では 95 %回復のめやすを示す．(能島暢呂 [3] から改訂)

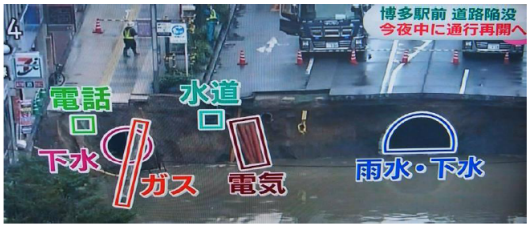


図 7 テクノロジーの基盤は地域の電力、上下水道，都市ガス，道路，通信などのライフライン・インフラストラクチャーに支えられている．(2016/11/8 に起きた博多駅前の道路陥没の NHKTV 報道から引用)

ネットストアにて「東京防災」は無料で購入できる．印刷された書籍もあり ¥ 140 前後と廉価である．

東京防災の内容を簡単に紹介する．「今やろう防災アクション」という章では 4 つの備えを紹介している．

① 日常で使いながら，少し余分に水や食糧を「備蓄」しておく．期限切れを更新しながら生命維持に必要な水や食料を備えられる．

② 家具や道具の転倒・転落防止や耐震化など「室内の備え」．室内での圧死や怪我などの被害を低減できる．

③ 地域の特性や避難所，危険な場所を把握するなど「室外の備え」．外出時の対策や避難が必要な事態に備えられる．

④ 家族の安否確認，職場や地域との関係を取り上げた「コミュニケーション」

以上の 4 項目が緊急のテーマとして取り上げられている．一読をお勧めする．

過去の大災害では死傷者に特徴がある．関東大震災では火災，阪神・淡路大震災では圧死・窒息死，東日本大震災では津波による死傷者が，それ

ぞれ 8 割以上を示した [5]．地域や時間帯により災害の特徴も変化する．

免許証，保険証，銀行口座番号，お薬手帳などは，コピーでも災害時には役に立つことが多い．スマホで撮影し保存しておくと有用である．停電などで銀行やカードが機能しない間は，手許に現金があると役に立つ [4,5]．

日本列島は 4 つのプレートの上にあり，世界でも地震，火山の噴火，風水害など自然災害の多い国である．一方でこの同じ大地は，はっきりとした四季を感じられ，美しい自然，豊かな水，五穀豊穣，海産物などに恵まれる立地でもある．災害は突然やってくるが比較的短い期間で過ぎ去り，後は比較的平穏な時間が長く続く．この日本列島で暮らす我々は，必ず起こる災害に対して防災・減災の知識を積み重ね，来るべき大災害への対策を怠らないことが肝要であろう [6]．

まとめ

テクノロジーの基盤は地域の電力, 上下水道, 都市ガス, 道路, 通信などのインフラストラクチャーに支えられている (図 7)．2 度の大地震と被害は予想外だった．熊本地震は夕食後，夜間帯の地震だったので，同程度の震度を示した阪神淡路大震災とは異なり，火災は少なく，倒壊家屋による圧死などでの死傷者も少なかった．

熊本地震の被害は大きかったが，全国からの応援，自衛隊の出動などで復旧が早かった．

引用文献

1. 気象庁 ホームページ http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/jishin/about_eq.html (プレートにより地震が起こる)
2. 熊本日日新聞特別縮刷版 平成 28 年熊本地震 1 カ月の記録 (2016 年 4 月 15 日〜5 月 15 日) 熊本日日新聞社編集局，熊本，2016
3. 土木学会地震工学委員会「ライフラインに係わる都市減災対策技術の高度化に関する研究小委員会」2016/5/3 岐阜大学工学部社会基盤工学科 能島暢呂 http://www1.gifu-u.ac.jp/ nojima/LLEQreport/160414-16-KumamotoEQ-LL-GUNN-ver.1.pdf
4. 東京都防災ホームページ http://www.bousai.metro.tokyo.jp/1002147/
5. FDMA 総務省消防庁ホームページ http://www.fdma.go.jp/concern/publication/higashinihondaishinsai_kirokushu/pdf/honbun/03-04.pdf
6. 鎌田 浩毅：西日本大震災に備えよ 日本列島大変動の時代,PHP 研究所,2015.

ABSTRACT

Kumamoto earthquake and technology

Toshimitsu Nogami, Kayo Tanaka,
Takahiro Mori, Kanemitsu Higashi*

Introduction

On April 14 and 16, two large earthquakes with maximum seismic intensity of 7 hit the Kumamoto district. We will review this disaster regarding its relationship with technology, and consider earthquake and tsunami countermeasures for the Kanto and Tonankai trough areas in the future.

Precise predictions of earthquakes are as-of-yet impossible. There are four tectonic plates directly influencing Japan; two of which incorporate the country's total land mass, and two more that lie to the east in the Pacific Ocean. With the movement of these four plates, energy accumulates ultimately resulting in earthquakes.

Elapsed

During the earthquakes of April 14th and 16th in 2016, some objects fell to the floor in our hospital's operating theater. Fortunately, there was no damage to the anesthesia machine, biological information monitor, operation table, etc.

High pressure sterilizer didn't work, because city gas supply was stopped. Life line and infrastructure are important.

Preparedness and Disaster

As a guide for countermeasures against earthquakes, the disaster prevention book "Tokyo Disaster Preparedness" provided by the city of Tokyo contains useful information.

Summary

The foundation of technology is supported by infrastructure such as regional electricity, water supply and sewerage, city gas, road, communication, etc.

Two major earthquakes and their ensuing damage were unexpected. Since the Kumamoto earthquakes occurred in the night (post-meal time), unlike the Hanshin Awaji earthquake which showed the same seismic intensity, there were few fires and fewer casualties caused by collapsed houses and others.

Although the damage of the Kumamoto earthquake was big, restoration was quick due to support from the whole country, which included the dispatch of the DMAT, SDF and others.

Key Words:
Kumamoto earthquake, countermeasures to the disaster, life line, infrastructure, technology

Division of Anesthesia, Naruo Orthopedic Hospital, 12-24 Okada-machi, Chuo-ku, Kumamoto City, 862-0958

**Kumamoto Masuika Clinic, 1st F Tuda-haitu 1-3-1 Nuyamazu, Higashi-ku, Kumamoto City, 861-2102*

江戸時代後期の最新テクノロジー ― 華岡流全身麻酔について ―

土手健太郎*，池宗啓蔵*，出崎陽子*，南立秀行*，
西原　佑†，北村咲子†，小西　周†，吉川武樹†，
惣谷昌夫†，萬家俊博†

はじめに

江戸時代後期の最新テクノロジーの一つに華岡流全身麻酔がある[1–4]．しかし，華岡青洲は自身の著書を残さなかったため，華岡流の麻沸散を用いた全身麻酔法については不明な事が多い．現在，華岡流全身麻酔法を知ることができるのは，弟子たちのいくつかの記述があったからである．一方，最近になり華岡流全身麻酔の研究が進み，その実際の状況が少しずつ明らかになったので，全身麻酔管理やその様子を報告する．

図 1 瘍科秘録の表紙 (右) と裏表紙 (左)

方　法

1837 年に著された瘍科秘録，1839 年に著された麻沸湯論，1840 年に刊行された外科起廃図譜，1857 年に著された続外科起廃の最初の章である麻沸湯論條評を用い，華岡流全身麻酔の実際の様子・状況を明らかにした．

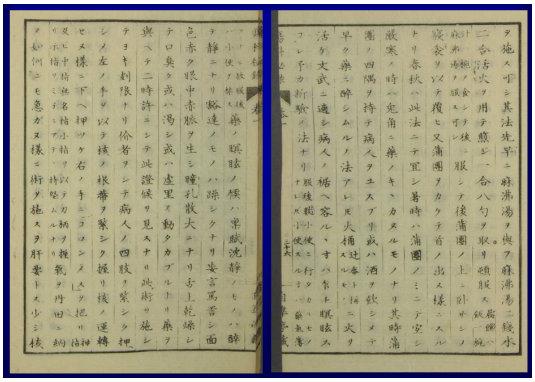


図 2 乳癌の中の麻酔に関した部分 (瘍科秘録)

結　果

1．瘍科秘録は 1837 年に本間玄調によって著された[5]．瘍科秘録では，全身麻酔だけをとりだした項目は無い．その代り，第一巻の中の乳癌の項に麻酔の記載がある (図 1，2)．全部で約 300 字であり，15 文と考えられる．そのうちの全身麻酔の状況に関する記載を以下に示す．麻沸湯を服用後は，布団の上に寝させる．布団や布団袋で体を覆う．首だけを出すようにする．麻沸湯服用後尿意を催す者がいる．排尿すると麻酔が効きにくくなるため，排尿させてはいけない．麻酔が効いてくると，静かなものはより静かになり，闊達なもの

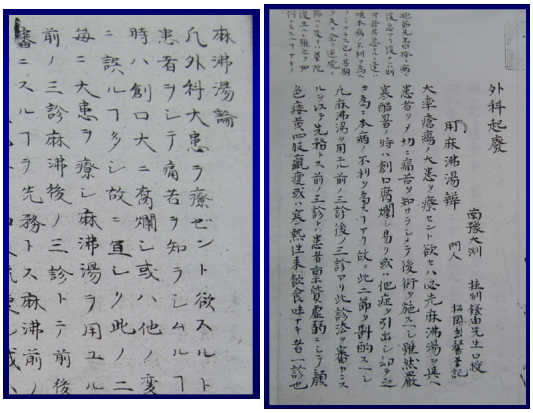


図 3 麻沸湯論の最初の頁 (写本)

*愛媛大学医学部附属病院集中治療部
†愛媛大学医学部附属病院 麻酔・周術期学

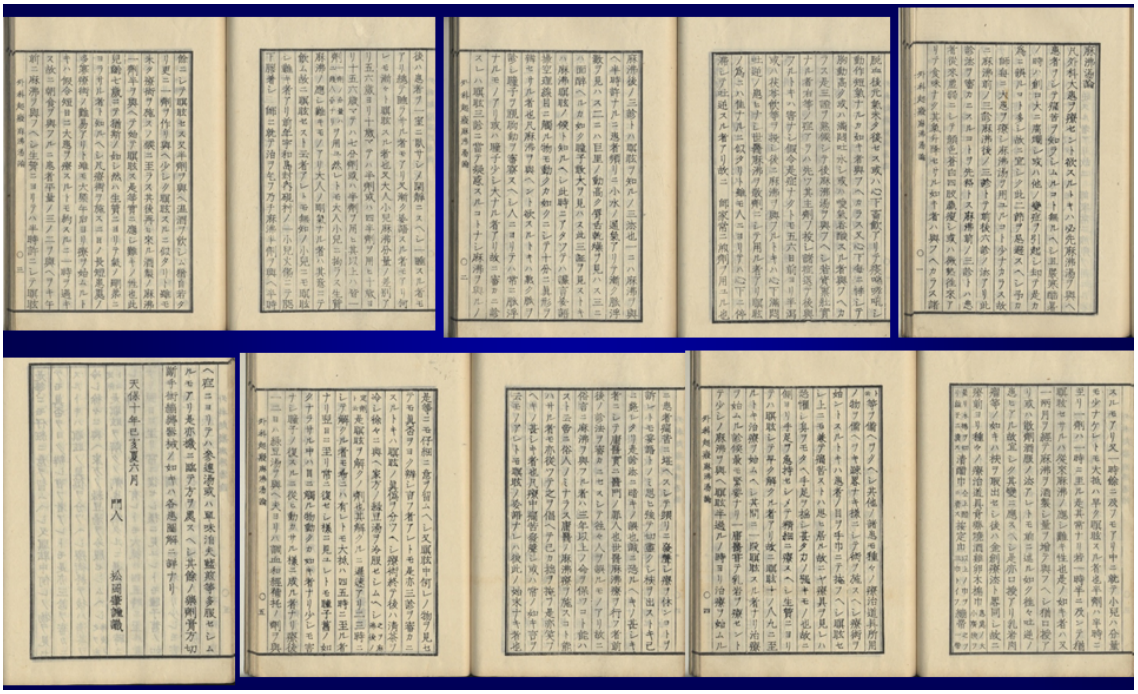


図 4 麻沸湯論の前頁（外科起廃）

はより騒がしく妄言を口にする．しだいに麻酔状態になる．顔が赤くなる．眼のなかの血管が赤く怒徴し，瞳孔が散大する．舌が乾燥し，口が臭く，心尖拍動が強くなる．これらで，麻酔深度が十分なことを確認する．

2．麻沸湯論は，1839 年に鎌田玄台と松岡肇によって著された [6]．麻沸湯論は，10 ページ，約 2500 字，80 文から成り，当時の書式で段落や句読点はない．(図 3，4) その内容は，麻酔の適応禁忌，麻沸湯による麻酔法及び適切な麻酔深度の徴候，術中術後の管理法などを，臨床経験を基に具体的に記載しており，実際に麻沸湯で全身麻酔を行う機会がない者も麻沸湯による全身麻酔ができるように書かれている．以下が，麻沸湯論の中の全身麻酔の状況に関する記載を抜粋したものである．麻沸湯を与えて 1 時間ばかりとすると **a)** 頻尿，頻脈，**b)** 心拍増加，口唇乾燥，**c)** 瞳孔散大となる．この三診が揃えば患者が「麻酔状態」に入ったと考えてよい．麻沸湯を投与した後は，患者を個室に寝かせ，静かな環境を整える．眠る者もあれば，一睡もしない者，うわ言を言う者もいるが，いずれも徐々に麻酔状態になる．手術を行う時は，目隠しをして，手足をしっかり抑制することが大切である．麻酔が効いていても，痛みはあると思い込んだり，手術道具を見て恐怖におののき，身もだえし，すごい力で手足を動かすからである．また予想より早く麻酔から醒める者もいるので，少し早めに手術を行うとよい．手術前にはそれぞれの手術道具，塗り薬，鶏卵，木綿布，包帯等を準備し，必要なものを揃えておき，おろそかにならないようにして手術を施す．麻沸湯を使った治療中に苦痛に声を発したり，ふつうのように会話をしたりすることがあるが，これは麻酔下のうわごとなので，あれこれ対処する必要はない．このような時も麻沸湯投与後の三診で確認することで麻酔の真偽を判断することができる

3．外科起廃図譜は，1838 年に鎌田玄台によって著され，1840 年に刊行された外科治療症例集である [7]．この書は，序文，凡例，目次，65 枚の図譜から成っており，腫瘍の切除や外傷の修復など，

図 5 外科起廃図譜の第 2 図 (乳腺腫瘍摘出術)

図 6 外科起廃図譜の第 10 図 (下腿切断術)

病症と治療法が簡潔な漢文と図で解説している．この図譜の殆どが手術を受けた患者のみを描いた図だが，その中に，手術の全体像を示している図譜や患者と術者たちをいっしょに描いた図譜が 4 葉ある．図 2，10，11，48，の 4 図 (図 5〜8) である．これは，当時の麻沸湯による全身麻酔の状況をはっきり著している．具体的には，目隠しが 3 場面，布団で身体を覆っているのが 1 場面，人や布で両手を抑制しているのが 3 場面で認められる．そして，2 つの図譜で，外科医のほかに患者の全身を観察している医師がおり，この麻酔科医らしき者が脈をとっているように見える．

4．麻沸湯論條評 1857 年に難波経直によって著された [8]．麻沸湯論條評は，5 ページ，40 行，892 字，約 60 文である．(図 9，10) 以下内容を示す．

図 7 外科起廃図譜の第 11 図 (陰嚢部分摘出術)

図 8 外科起廃図譜の第 48 図 (子宮内血腫摘出術)

図 9 外科小補

麻沸湯は酒か水で薬を煎じて飲ませる．五十年間毎年数十人，華岡流全身麻酔法は奏功している．上手に用いれば百にひとつの失敗もない．薬の作り方としては，成分である植物を細かく切り，三升の水を加え，とろ火で夏は 2 時間，冬は 3 時間一升に煮詰めて用いる．強壮な人に使用する時は，まず 3 日間飲食を調節し健胃薬を投与し，朝食は

図 10 麻沸湯論條評 (外科小補 上巻)

絶食とし薬を投与する．投与後，早い者は 1 時間，普通 2 時間で手術可能となる．早く効果の出た者は早く覚醒し，遅く出た者の覚醒は遅い．ただ，この薬を投与しても麻酔状態にならない者が，1000 人に 1〜2 人いる．これらは病苦に耐え，我慢強い人で，術中の事を覚えている．医師というものは肉を割って，長く治らない病気を治すもので，それには麻沸湯は欠くべからざるものである．この事を世の中に広く伝え，多くを救いたいと思う．また，初心者がみだりにこの薬を用いると禍が浅くない．この処方に詳しくなり，熟達してほしい．

考　察

華岡青洲は，自著を残しておらず，華岡流の麻酔を後世に伝えたのは青洲の弟子たちである鎌田玄台，本間玄調，難波経直らである．彼らの著した麻沸湯論，瘍科秘録，外科起廃図譜，麻沸湯論條評によって華岡流の全身麻酔術が現在まで伝わっている．

玄調の麻酔法は，華岡流に独自の工夫を多々加えていると考えられるが，麻酔に関する記載量が約 300 字と少なくはっきりしない．　一方，玄台の麻沸湯論は約 2500 字で，麻沸湯による全身麻酔の管理法を具体的に記載しており，実際に麻沸湯で全身麻酔を行う機会がない者も麻沸湯による全身麻酔ができるように書かれている．華岡流の麻酔の説明という点では，麻沸湯論が瘍科秘録に勝ると考える．しかし，両書に書かれている実際の四肢の抑制や目隠しがどのようなものかは不明であった．

これに対し，外科起廃図譜の 4 葉の図は全身麻酔中の全景が描かれており，両書に書かれている華岡流全身麻酔の麻酔中の実際の状況を画像として見る事が出来，布による目隠しや，布や布団を用いた四肢抑制の状況が明快に分かった．また，外科起廃図譜の 2 葉の図のなかに，数人の外科医のほかに，術野を見ずに患者の全身を観察している医師がひとりずつおり，脈をとっているように見える．この医師こそ，麻酔を担当し全身状態を観察する麻酔科医で，この 2 人は，おなじような服装や坊主頭であることから同一人物であると思われる．玄台は術者として手術を行っているので，この人物は，玄台門下で特に麻酔に才能を示した医師で，松岡玄声 (肇) であると考える．玄声は伊予吉田藩の藩医で華岡春林軒で学んだ後，玄台の高弟となり，玄台の著述に関して最も中心的な役割を示した人物である．1830 年代，玄台は玄声を麻酔科医に据え，外科，小児外科，形成外科，口腔外科，整形外科，泌尿器科，婦人科等，種々の手術を行った．外科起廃図譜を著した玄台は麻酔科医の重要性を認識していたと考えられる [9−11]．

麻沸湯論條評は，上記の 3 著より，約 20 年後に著された著書で，麻沸湯論を補完するべく書かれている．経直らの 50 年の麻酔歴の中で，100 例に一つの失敗もなく，1000 例に 1〜2 例の術中覚醒を認めたのみであると，熟練者が麻沸湯による全身麻酔を行うと安全であることを強調していた．

結　論

華岡流全身麻酔の状況が，瘍科秘録，麻沸湯論，外科起廃図譜，麻沸湯論條評により明らかになった．全身麻酔中に目隠しや四肢の抑制を行っていることが分かった．数人の外科医のほかに，術野を見ずに，患者の全身を観察している医師が脈をとっていた．麻沸湯論，外科起廃図譜を著した鎌田玄台は麻酔科医の重要性を認識していたと考えられる．

参考文献

1. 呉 秀三，鎌田玄台：華岡青洲先生及其外科 吐鳳堂書店 東京 大正 12 年
2. 松木明知：日本における江戸時代以前の麻酔科学史 麻酔 (臨時増刊号・日本麻酔科学会 50 年史) 53:2-16,2004
3. 土手健太郎：鎌田玄台研究　麻酔　60:　S164-S169,2011
4. 土手健太郎，他：私の鎌田玄台研究 喜多医師会報
5. 本間玄調：瘍科秘録 天保 8 年 (1837)
6. 鎌田玄台，松岡肇：麻沸湯論 天保 10 年 (1839)
7. 鎌田玄台，松岡肇：外科記廃図譜 天保 11 年 (1840)
8. 難波経直：麻沸湯論條評 (外科小補)，　安政 4 年 (1857)
9. 土手健太郎，他：麻沸湯論と鎌田玄台–世界で最初の麻酔科教科書は伊予大洲で著された！　愛媛医学 31:69-75,2012
10. Kentaro Dote, Toshihiro Yorozuya, Keizo Ikemune, Youko Desaki: Management of patients under general anesthesia with mafutsu-san in Hanaoka-style surgery:comparisons of illustrations from Geka-Kihai-Zufu with descriptions from Mafutsuto-Ron and Yohka-Hiroku Journal of Anesthesia 29:96-101,2015
11. Kentaro Dote Pre 1846 illustratrions of patient undergoing surgery during general anesthesia Aneth & Anal 116:1391-1392,2013

ABSTRACT

The newest technology in the late Edo era
–About Hanaoka style general anesthesia–

The situation of the Hanaoka style general anesthesia was newly found by Yokahiroku, Mafututoron, Gekakihaizufu and Mafututoron-josyo. The patients were blindfolded and inhibited limbs during general anesthesia. There were several surgeons in the operation room. On the other hand, there was a physician who observed the whole body of the patients taking the pulse without watching an operation field.Gendai Kamada who wrote Mafututoron and Gekakihaizufu was thought to recognize the importance of the anesthesiologist.

バルン型酸素投与装置の使用経験

薊　隆文

はじめに

市販のバルンとチューブを用いた簡易型「バルン型酸素投与装置」は，バルンの大きさとチューブの径で流量・持続時間を調整でき，軽く・操作方法が単純である．また修復が簡単で事故のおそれも低い．災害時などにも利用できる可能があり汎用性・有用性が期待できる[1)]．このバルン型酸素投与装置を標高約 3800 m，気圧約 650 hPa の高地で試用したので，その有用性を評価した．

試用したバルン型酸素投与装置の仕様と原理

バルン型酸素リザーバには市販の直径約 30 cm のビーチボールを用いた．容量は計算上約 14L となる．このバルンに 16 Fr (外径 5.33 mm)・長さ 150 cm のチューブの酸素マスクを接続した．バルンを用手的に圧迫することで最大約 5 L/分の酸素流量が得られる．その概要を図 1 に示す．

対　象

登山歴があり，高山病の既往のない健常成人と，間質性肺炎・肺切除後で肺機能の低下した成人の 2 名．詳細を表 1 に示す．また，両者の酸素化能の指標として機内での SpO_2 の変動を図 2 に示した．航空機内の気圧は約 0.9〜0.6 気圧に変動した．肺機能低下成人に対しては経鼻カニューラ・マスクを用いて酸素を 1〜10 L/分使用し，SpO_2 が 90 %を維持できるように努めた．しかし，酸素 3 L/min 使用していてもトイレへの移動時には SpO_2 が 50 %を下回ることがあった．この間，呼吸苦を認めることはなかった．

方　法

南米ボリビアのウユニ (気圧約 650 hPa) の低圧性低酸素の環境において，バルン型酸素投与装置

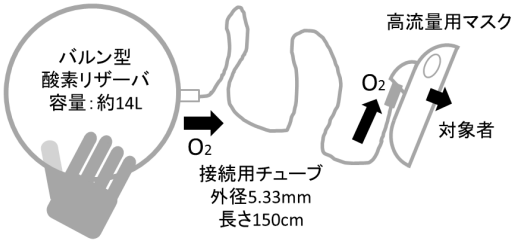


図 1 今回試用したバルン型酸素投与装置の概要
バルン型酸素リザーバに接続用チューブを装着し高流量用酸素マスクを装着した．

表　健常成人と肺機能低下成人の概要

健常成人 57歳 男性	• 呼吸機能正常 • 喫煙歴：なし • 登山歴：年1回、重症高山病の既往なし
肺機能低下成人 68歳 男性	• 間質性肺炎・肺切除後 • 呼吸機能　VC：2220ml（59%）$FEV_{1.0}$：2000ml（87%） • SpO_2 安静時：95%、歩行時：90% • 30分程度の歩行は可能だが、酸素濃縮器の携行が必要 • 喫煙歴：60本×40年 • 合併症：狭心症・糖尿病・高血圧 • 登山歴：あり（20代）、重症高山病の既往なし

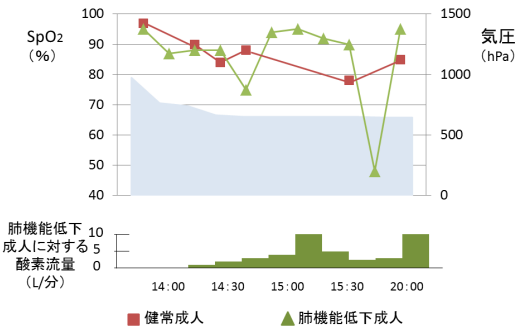


図 2 機内での SpO_2

気圧は航空機内で 0.9〜0.6 気圧 (973〜644 hPa) に変動した．高地では約 0.6 気圧 (650 hPa) であった．肺機能低下成人に対しては SpO_2>80 %となるよう酸素を投与した．機内での歩行時に SpO_2 は一時的に 48 %まで低下した．

の有用性を以下のように評価した．SpO_2 の測定には携帯型パルスオキシメータ (MMI パルスオキシメータ SB100) を用いた．気圧の測定には腕時計型気圧測定器 (Casio PRO TREK) を用いた．

名古屋市立大学看護学部病態学 (麻酔学)

測定は以下の通りである．

① 健常成人に対して，安静時での SpO_2 の改善の程度

② 肺機能低下成人に対して，移動時での SpO_2 の維持の程度

結　果

① 健常成人の高地での安静時の SpO_2 は 80 %で前後であったが，バルン型酸素投与装置を用いて酸素をマスクで投与した結果 SpO_2 は 90〜95 %に上昇した．

② 肺機能低下成人がウユニで航空機からの降機時に使用した．酸素約 5 L/min をマスクで投与したが SpO_2 は約 70 %まで低下した (図 3)．しかし，呼吸苦は認めなかった．

図 3 降機時にバルン型酸素投与装置を使用した．

考察とまとめ

健常人で酸素投与により SpO_2 の上昇が 95 %に留まったのは，バルンを片手で圧迫したため流量が最大ではなく 3 L/分程度であったためと考えられた．

機内での移動時よりも，飛行機からの降機時の方が時間的にも長く酸素の負荷も大きい．肺機能低下成人では機内の短時間・短距離の移動でも 3 L/分投与中で SpO_2 が 48 %に低下したことを考えると，降機時にバルン型酸素投与装置を用いて酸素約 5 L/分で SpO_2　70 %を保てたことはこの装置の有用性をある程度示したものと考えられた．

マスクによる酸素投与によって 0.6 気圧の環境で平地と同じ 21 %の酸素環境を作るためには，0.21/0.6 = 35 %の吸気酸素濃度が必要である [2]．平地でマスク 5 L/分のときの酸素濃度は約 40 %と言われている．今回試用したバルン型酸素投与装置ではチューブが 150 cm と長かったため用手的圧迫では 5 L/分程度が限界であったが，計算上は平地とほぼ同等の吸気酸素濃度環境を提供できていたものと考えられた．

肺機能が低下した状態では，運動時には短期的であってもより高流量の酸素が必要であると考えられる．高流量を可能とするためには，チューブをより太く・より短くする必要がある．高流量にすることで投与可能時間は短縮するが，必要があればより容量の大きなバルンを使用することで対処は可能である．今回は直径約 30 cm のバルンを使用したが，直径 50 cm 程度であれば携帯性には問題はないであろう，この場合の容量は約 65 L となる．

低肺機能患者に用いられる携帯型酸素濃縮器に付帯するデマンド型の酸素供給装置では酸素を温存することは可能であるが流量は最大 7 L/分程度と限界がある [3,4]．バルン型酸素投与装置は用手的に吸気に合わせてバルンを圧迫することで高流量を達成することができ，また不要時には容易に流量を節約できる．今回のように高地での移動時のみ高流量が必要となる状況では有用性は高いものと考えられた．

酸素は支燃性ガスで火災事故には注意する必要がある．しかし，実際の診療でも 100 %酸素でバッグを押して管理することは通常行われており，可燃性でない材質にするよう配慮する必要はあるが実用化は不可能ではないであろう．バルン型酸素投与装置は携帯性に優れ，操作性も大きな問題はなく，その構造から故障は考えにくく，ま

た不具合があっても修復は極めて簡単である．経済的にも安価であり，パルスオキシメータを使用して酸素が必要なだけ流れていることさえ確認できれば，有用性が期待できるものと思われる．

参考文献

1. 薊　隆文. バルン型酸素投与装置の開発，麻酔・集中治療とテクノロジー 2016; 59-61
2. Conkin J, Wessel JH 3rd. Critique of the equivalent air altitude model. Aviat Space Environ Med. 2008; 975-82.
3. Yáñez AM, Prat JP, Álvarez-Sala JL, Calle M, Díaz Lobato S, García Gonzalez JL, Rodríguez Gonzalez-Moro JM, Galera-Martínez R, Villasante C, Ramos I, Franco-Gay M, de Lucas P. Oxygenation With a Single Portable Pulse-Dose Oxygen-Conserving Device and Combined Stationary and Portable Oxygen Delivery Devices in Subjects With COPD. Respir Care. 2015; 382-7.
4. Díaz Lobato S, García González JL, Mayoralas Alises S. The debate on continuous home oxygen therapy. Arch Bronconeumol. 2015; 31-7.

ABSTRACT

Experience using the balloon type oxygen delivery device

Takafumi Azami

The balloon type oxygen delivery device is lightweight, easy to use, and can give sufficient oxygen delivery in short time. We evaluated its utility at an altitude of about 3,800 m and an atmospheric pressure of about 650 hPa.

Subjects and Methods:

A healthy adult and an adult with impaired lung function were enrolled. His VC is 59 %; he needs oxygen while walking at sea level, his SpO_2 fell to 48 % in aircraft even with oxygen through nasal prongs. Improvement of SpO_2 at rest for a healthy adult and maintenance of SpO_2 during transportation for an adult with decreased lung function were evaluated using this balloon type oxygen delivery device.

Results:

SpO_2 of the healthy adult improved from 80 % to more than 90 %. SpO_2 of the adult with impaired lung function did not fall below 70 % during stepping down from aircraft at high altitude of 650 hPa.

Discussion and Conclusion:

Since SpO_2 of adult with decreased lung function was maintained at 70 % during transport even at high altitude, this device is thought to be useful. Flow rate, balloon volume, and material need to be improved.

Key words:
oxygen delivery system, decreased lung function

Department of Pathophysiology (Anesthesiology) School of Nursing / Graduate School of Nursing Nagoya City University

ゲノムワイド関連解析を利用したオピオイドのテーラーメイド医療への試み

三枝　勉[1]，西澤大輔[2]，福田謙一[3]，
池田和隆[2]，北村　晶[4]，林田眞和[5]

はじめに

オピオイドの感受性 (鎮痛効果と副作用の発生様式と程度) に大きな個人差があることはよく知られており，これが効率的な疼痛治療を阻む原因となっている．そのような個人差には，年齢，精神状態や文化などの環境因子も関与するが，遺伝因子すなわち遺伝子の個人差も関与する事が明らかにされつつある [1)]．ヒトゲノム DNA 中の，アデニン (A)・グアニン (G)・シトシン (C)・チミン (T) の 4 塩基からなる塩基配列の個人差は遺伝子変異と称され，変異のなかでも特に集団中での発生頻度が 1 %以上のものは遺伝子多型と呼ばれる．遺伝子多型 (変異) には置換，欠失，挿入，一塩基のみの置換である一塩基多型 (SNP：single nucleotide polymorphism) などがある．2002 年にヒトゲノム全体に散在する数十万程度の遺伝子多型を同時に判定できるゲノムワイド関連解析 (GWAS：genome wide association study) が施行され，それ以降，解析チップの低価格化の影響もあり，各種の病態において GWAS の手法が広く使用されるに至っている．GWAS においては血液から採取されたゲノム DNA 試料を用いて，個々人における 30-100 万箇所以上の SNP の遺伝子型 (塩基の型) を網羅的に同定することが可能である．我々はヒトにおけるオピオイド感受性についての研究を施行してきたが，最近はその分野に GWAS の手法も導入している [2,3)]．本稿ではそれらの研究を紹介するとともに，考察においてはそれらの結果の応用や将来の展望についても概述する．

方　法

研究① セボフルランとレミフェンタニル使用の全身麻酔下で腹腔鏡補助下大腸切除術を受けた患者 350 名を対象とした [2)]．手術終了・麻酔覚醒前にフェンタニル 100 μ g を静注し，覚醒・抜管後に疼痛を訴えた場合はさらにフェンタニルを疼痛が緩和するまで追加投与した．術後鎮痛には Smith Medical 社製 Legacy CCD ポンプを用いた静脈内フェンタニル PCA 使用し，その設定は，フェンタニル充填量 1000 μ g，持続投与なし，1 回自己投与量 20 μ g，ロックアウト時間 5 分，最大投与回数 12 回/時とした．また，レスキューの鎮痛薬が必要な場合は，フルルビプロフェン 50 mg もしくはペンタゾシン 30 mg を使用した．10 mL の全血からゲノム DNA を精製し，Illumina 社製 HumanOmniExpressExome-8 のチップを使用して全ゲノム領域の 90 万箇所以上の SNPs を対象として網羅的ジェノタイピングを行い，術後 24 時間のフェンタニル必要量を第一エンドポイントとする表現型との関連を，偽陽性を防ぐための三段階の GWAS により，Additive model, Dominant model 及び Recessive model において解析し，術後フェンタニル必要量と強く関連する SNPs を同定し，そのうち最も強い関連を示した SNP に注目し検討を加えた．最終段階の統計学検定の有意水

[1]埼玉医科大学病院 麻酔科
[2]東京都医学総合研究所 依存性薬物プロジェクト
[3]東京歯科大学 口腔健康科学講座
[4]埼玉医科大学国際医療センター 麻酔科
[5]順天堂大学医学部 麻酔科学・ペインクリニック講座

準は False Discovery Rate(FDR) 補正後の P 値に対して $P < 0.05$ とした．

研究② 全身麻酔下で下顎枝矢状分割術 (sagittal splitting ramus osteotomy: SSRO) を受けた患者 354 名を対象とした [3]．研究①と同様に術後鎮痛には静脈内フェンタニル PCA を使用した．患者血液から DNA を精製し，全ゲノム領域の約 30 万箇所の SNPs を Illumina 社製 Human 1M-Duo 等のチップにより網羅解析した．その上で，術後 24 時間のフェンタニル必要量を第一のエンドポイントとする表現型と，遺伝子との関連を解析する GWAS を施行し，術後フェンタニル必要量と強く関連する SNP を同定した．また，この結果がわれわれのこれまでの研究の対象にも当てはまるかも検討した．

研究③ 研究②で見出された SNP と，同一対象においてわれわれの先行研究により既に見出されていた他のオピオイド感受性関連 SNPs[4–6] や他の臨床指標を独立変数，術後フェンタニル必要量を従属変数として重回帰分析を行い，術後フェンタニル必要量の予測式の構築を試みた．具体的には，SSRO の患者サンプルを対象として，*OPRM1* の遺伝子 rs9384179，R 型カルシウムチャネル遺伝子 *CACNA1E* の rs3845446，アドレナリン β 2 受容体遺伝子 *ADRB2* の rs11959113，*KCNJ6 (GIRK2)* 遺伝子の rs2835859，および *CREB1* 遺伝子の rs2952768 の 5 つの遺伝子多型の判定結果に加えて，年齢，性別，身長，体重および術前の冷水疼痛誘発試験における疼痛感知潜時の測定値を独立変数とした．さらに先行研究の開腹手術の患者サンプルも対象として，得られた回帰式からフェンタニル必要量を予測し，それを独立変数，開腹手術における周術期オピオイド投与量を従属変数として単回帰分析を行った．

結　果

研究① 手術終了時投与量を含む術後 12 時間のフェンタニル必要量は個人差が大きかった．年齢・性別・手術部位 (結腸 vs 直腸)・リンパ節郭清範囲・手術時間・麻酔時間などの各種臨床指標は術後 24 時間フェンタニル必要量には有意な影響を及ぼさなかった．GWAS では Additive model において 20 箇所の SNPs が術後 24 時間フェンタニル必要量と非常に強く関連する候補 SNPs として見出された (図 1，表)[2]．その中で，第 1 番染色体上の 1q32.2 領域における，*LAMB3* 遺伝子上の rs2076222 SNP が最も強く関連することが判明した．rs2076222 と同じくエクソン上の exm145728

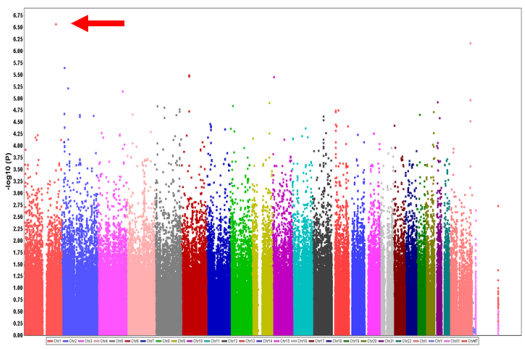


図 1 GWAS の結果：Manhattan Plot (Additive model)

GWAS で得られた各 SNP に対する P 値 (-log10) を縦軸に，染色体上の位置を横軸に取った図である．Additive model においては第 1 染色体領域に突出した飛び離れ点がみられ (矢印)，ここに 24 時間フェンタニル必要量と関連の高い SNP が存在することが分かる．

表：GWAS で選定された一塩基多型のうち上位 10 多型 (Additive model) [文献 2) より引用改編]

ランク	SNP	染色体番号	染色体上位置 (bp)	第一段階		第二段階		最終段階		全検体 (combined)			関連 (近傍) 遺伝子名
				β	P-value	β	P-value	β	P-value	Q	β	P-value	
1	rs2076222	1	209791929	−0.2999	0.01221	−0.3615	0.02074	−0.5176	4.15E−05	0.0115*	−0.3876	2.65E−07	*LAMB3*
1	exm145728	1	209797253	−0.2999	0.01221	−0.3615	0.02074	−0.5176	4.15E−05	0.0115*	−0.3876	2.65E−07	*LAMB3*
3	rs7858836	9	119956288	−0.1832	0.0135	−0.266	0.001975	−0.1792	0.04543	0.7249	−0.2069	1.21E−05	*ASTN2*
4	rs3114381	4	40533297	−0.2828	0.04123	−0.2364	0.0267	−0.4226	0.002325	0.2585	−0.3047	2.10E−05	*RBM47*
5	rs6517084	21	33596203	−0.2349	0.03817	−0.2498	0.006228	−0.2256	0.02334	0.7249	−0.2403	2.51E−05	−
6	rs11114518	12	76963921	−0.2153	0.003199	−0.1657	0.03812	−0.1741	0.03139	0.7249	−0.187	2.79E−05	−
7	rs10495704	2	20428737	−0.5969	0.04892	−0.4583	0.009032	−0.4416	0.01252	0.7249	−0.4695	3.96E−05	−
8	rs958804	9	119958853	−0.1613	0.047	−0.1891	0.04017	−0.3166	0.001707	0.2373	−0.209	5.32E−05	*ASTN2*
9	exm930047	11	66105194	−0.2134	0.02488	−0.1743	0.03535	−0.2185	0.01599	0.7249	−0.2045	6.10E−05	*BRMS1*
10	rs3123711	1	244544441	−0.1668	0.0322	−0.1627	0.04856	−0.2308	0.004339	0.4021	−0.1826	7.31E−05	*C1orf100 r*

Q, False Discovery Rate(FDR) 補正後 P 値; *, $Q < 0.05$

も同等の強い関連を示したが，rs2076222 と同一遺伝子の同一連鎖不平衡ブロック上にあるため，rs2076222 のみ検討すれば良いことが判明した．rs2076222 SNP における C アレル保有者 (AC+CC) では，非保有者 (AA) と比較して術後フェンタニル必要量とレスキュー鎮痛薬必要量が有意に多かった一方 (各 $P < 0.05$)，術後早期 (術後 2 時間後) の疼痛スコアが高い傾向を示した ($P = 0.09$) (図 2)[2]．

研究② 第 2 染色体上の 2q33.3-2q34 領域における *CREB1* と *METTL21(FAM119A)* 遺伝子の近傍に位置する rs2952768 SNP が SSRO 術後のフェンタニル必要量と最も強く関連することが判明した．この SNP における遺伝子型が CC の患者では，それ以外の患者 (TT+TC) と比較して，術後フェンタニル必要量が多かった (図 3)[3]．また，先行研究での消化器外科開腹術後においても rs2952768 SNP が術後フェンタニル必要量と強く関連することが判明した．SSRO と同様この SNP における遺伝子型が CC の患者では，それ以外の患者 (TT+TC) と比較して，術後フェンタニル必要量が多かった (図 3)[3]．この rs2952768 SNP の C アレルキャリアは，メタンフェタミン依存症，アルコール依存症，摂食障害に対する重症度が低いことも示された．つまり，rs2952768 SNP はオピオイド鎮痛薬の有効性と重篤な物質依存の両方に影響を及ぼすことが示された．

研究③ これまで見出されている他のオピオイド感受性関連 SNPs を含めた重回帰分析の結果，体重，術前疼痛感知潜時閾値時間および 4 つの遺伝子多型から術後フェンタニル必要量を算出する予測式を構築することが出来た (決定係数 $R^2 = 0.145$, 有意確率 $P = 5.66 \times 10^{-10}$，図 4)[7]．また，単回帰分析の結果，この予測式により算出された予測値は開腹手術におけるオピオイド必要量と有意に相関した (決定係数 $R^2 = 0.100$, 有意確率 $P = 1.09 \times 10^{-4}$)[7]．

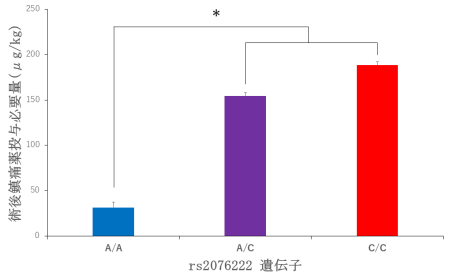


図 2 rs2076222 多型と腹腔鏡補助下大腸切除術症例における術後鎮痛薬必要量との関連*, *Q < 0.05　[文献 2) より引用改編]
rs2076222 SNP において C アレル保有者は C アレル非保有者と比較してフェンタニル使用量が多かった．

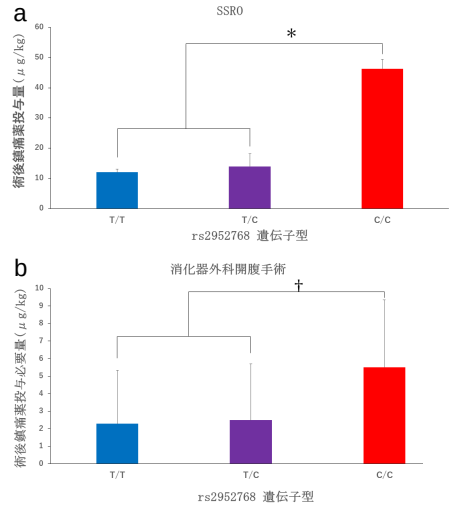


図 3 rs2952768 多型と SSRO (a) *, *Q < 0.05，消化器外科開腹術 (b) †, †P < 0.05 における術後鎮痛薬必要量との関係 [文献 3) より引用改編]
rs2952768 SNP における遺伝子型が CC の患者ではそれ以外の患者と比較して，SSRO と消化器外科開腹術において術後フェンタニル必要量が多かった．

考　察

周術期における疼痛の原因として術式の影響がある．腹腔鏡補助下大腸切除術は内臓痛と体性痛が混在し，SSRO では体性痛の影響が大きい．また，SSRO を受ける患者は手術を受けるまでは痛みを持たず若年者が多く，予定待機手術であるため状態が比較的安定しており，また，SSRO は画一的で強い痛みを伴う手術であることから，鎮痛薬感受性個人差の研究をするうえで理想的な対象であると考えられる[8]．一方，　腹腔鏡手術は傷

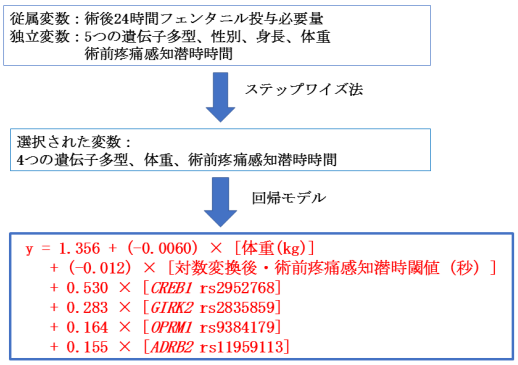


図 4 鎮痛薬感受性予測式の構築
[文献 3) より引用改編]
術後 24 時間フェンタニル投与必要量の予測値 y
(μ g/kg; log-transformed)

が小さいためしばしば低侵襲手術に分類される．しかし，腹腔鏡手術によって腹膜や内臓の炎症が生じるため術後痛は決して小さいものでなく，術後オピオイド必要量には大きな個人差が見られる [9]．

腹腔鏡補助下大腸切除術における術後オピオイド必要量の個人差における最有力候補多型として見出された SNP rs2076222 が位置する *LAMB3* 遺伝子によりコードされるラミニン β 3 は，α サブユニット及び γ サブユニットとともに細胞外マトリックスの基底膜を構成するたんぱく質 laminin-332 を構成する β サブユニットの 1 つである [2]．laminin-332 の機能損失を伴う Herlitz 接合部型表皮水疱症を含む表皮水疱症の患者では，顕著な疼痛を伴うことが報告されている [10]．laminin-332 の機能消失は感覚神経終末を増加させ，機械的刺激で誘発される神経電流の脱抑制，すなわち感覚神経の易興奮性をもたらす可能性がある．この機序によって laminin-332 欠損によって極端に強い痛みを経験する理由が説明できると考えられる [2]．

腹腔鏡補助下大腸切除術において，SNP rs2076222 の C アレルを有する患者では，それを有しない患者より術後のフェンタニル必要量が有意に多く，疼痛が強い傾向が見られた．これは，SNP rs2076222 の C アレルを有する対象では，麻薬感受性が低い，及び/または，疼痛感受性が高い可能性が示唆された．また，術後 24 時間における補助鎮痛薬の使用を比較しても SNP rs2076222 の C アレル保有者は非保有者と比較して，鎮痛補助薬が必要になった患者数が多いという結果にもなった．これらの知見を総合すると，この研究によって SNP rs2076222 の C アレルが，おそらく laminin-332 の機能を低下させ，痛みの感受性を増加させる機序を通して，痛みの感受性の個人差ないしはオピオイド感受性の個人差の原因となる可能性のある SNP であることが見出された [2]．

また，別の研究では同じ SNP が，内臓痛の術後痛と体性痛の術後痛における麻薬必要量に異なった影響を及ぼす可能性があることも指摘されている [11]．術式に応じてオピオイド感受性の原因となる SNPs が同定されれば，それを応用して個々人で適正量のオピオイドを投与することが可能になる．我々は，遺伝子検査を予め行い，患者ごとにオピオイド感受性を予測して，最適なオピオイド量で疼痛管理を行うテーラーメイド医療の開発に取り組んでいる [7]．例えば遺伝子検査でオピオイド感受性が低いことが分かっている患者であれば，PCA フェンタニルのデマンドドーズを多めに設定するなど手術開始前から術後鎮痛を考慮することができる．現在，SSRO の術後痛に関しては図 4 の予測式を利用してすでに実施されており，今後は他の術式やがん性疼痛においての応用も目指している．

おわりに

ゲノム解析法の進歩によってオピオイドのテーラーメイド医療を行うことが可能となった．今後，更なる包括的な検討を加え，簡便な遺伝子キット検査が行えるようになれば，オピオイドや術後鎮痛に限らず個々人の疼痛テーラーメイド医療を行うことも可能になり，疼痛患者の生活の質の向上が期待できると思われる．

引用文献

1. Ikeda K, Ide S, Han S, et al: How individual sensitivity to opiates can be predicted by gene

analyses. Trends Pharmacol Sci, 2005. 26(6): 311-7.
2. Mieda T, Nishizawa D, Nakagawa H, et al: Genome-wide association study identifies candidate loci associated with postoperative fentanyl requirements after laparoscopic-assisted colectomy. Pharmacogenomics, 2016. 17(2): 133-45.
3. Nishizawa D, Fukuda K, Kasai S, et al: Genome-wide association study identifies a potent locus associated with human opioid sensitivity. Mol Psychiatry, 2014. 19(1): 55-62.
4. Fukuda K, Hayashida M, Ide S, et al: Association between OPRM1 gene polymorphisms and fentanyl sensitivity in patients undergoing painful cosmetic surgery. Pain, 2009. 147(1-3): 194-201.
5. Nishizawa D, Fukuda K, Kasai S, et al: Association between KCNJ6 (GIRK2) gene polymorphism rs2835859 and post-operative analgesia, pain sensitivity, and nicotine dependence. J Pharmacol Sci, 2014. 126(3): 253-63.
6. Ide S, Nishizawa D, Fukuda K, et al: Association between genetic polymorphisms in Ca(v)2.3 (R-type) Ca2+ channels and fentanyl sensitivity in patients undergoing painful cosmetic surgery. PLoS One, 2013. 8(8): e70694.
7. Yoshida K, Nishizawa D, Ichinomiya T, et al: Prediction formulas for individual opioid analgesic requirements based on genetic polymorphism analyses. PLoS One, 2015. 10(1): e0116885.
8. 西澤 大輔, 福田　謙一, 林田　眞和, 他: 痛みの遺伝子多型についての基礎研究と臨床研究. 麻酔, 2015. 64(増刊): S177-S184.
9. 林田 眞和, 丸山 晃一: 術後痛の強さとオピオイド必要量の多様性をいかに克服するか. 麻酔, 2009. 58(9): 1086-1092.
10. Chiang L.Y, Pool K, Oliveira B.E, et al: Laminin-332 coordinates mechanotransduction and growth cone bifurcation in sensory neurons. Nat Neurosci, 2011. 14(8): 993-1000.
11. Amano K, Nishizawa D, Mieda T, et al: Opposite Associations Between the rs3845446 Single-Nucleotide Polymorphism of the CACNA1E Gene and Postoperative Pain-Related Phenotypes in Gastrointestinal Surgery Versus Previously Reported Orthognathic Surgery. J Pain, 2016. 17(10): 1126-34.

ABSTRACT

Attempts at personalized medicine of opioids using genome-wide association studies

Tsutomu Mieda[1)], Daisuke Nishizawa[2)], Kenichi Fukuda[3)], Kazutaka Ikeda[2)], Akira Kitamura[4)], Masakazu Hayashida[5)]

Background:

Opioid sensitivity is well known to vary widely among individuals and the underlying genetic factors are not fully understood. We explored genetic factors that would contribute to individual differences in opioid sensitivity.

Methods:

Study ①; We conducted a three-stage genome-wide association study (GWAS) by using whole-genome genotyping arrays with more than 900,000 markers in 350 patients undergoing laparoscopic-assisted colectomy (LAC), in whom postoperative pain control was managed with intravenous fentanyl patient-controlled analgesia.

Study ②; We performed multiple linear regression analyses using data from subjects who underwent cosmetic orthognathic surgery in an attempt to establish a formula to predict postoperative opioid requirements.

Results:

Study ①; As a result of GWAS in surgical patients, a single nucleotide polymorphisms (SNP) mapped to 1q32, rs2076222 had highly significant associations with postoperative analgesic requirements; the subjects with the C allele (A/C and C/C) required more fentanyl and more rescue analgesics for postoperative analgesia, compared with those without this allele(A/A), while C allele carriers tended to report higher pain scores during the early postoperative period, compared with non-carriers.

Study ②; Multiple linear regression analyses showed that the four SNPs, PPL (pain perception latencies), and weight were retained as independent predictors of 24-h postoperative fentanyl use ($R^2 = 0.145$, $P = 5.66 \times 10^{-10}$), resulting in successful establishment of a formula to predict postoperative fentanyl requirements.

Conclusions:

So far, advancements of the gene analysis methods have made it possible to perform personalized medicine of opioids to some extent. In the near future, more complete personalized pain medicine will be achieved using simple gene kits as a result of more comprehensive under-

standing of interactions between genotypes and pain and/or opioid sensitivity.

Key Words:
pioid, genome-wide association study, personalized medicine, single nucleotide polymorphism

1) Department of Anesthesiology, Saitama Medical University Hospital, 38, Morohongou, Moroyama, Iruma-gun, Saitama, 350-0495, Japan
2) Addictive Substance Project, Tokyo Metropolitan Institute of Medical Science, 2-1-6, Kamikitazawa, Setagaya-ku, Tokyo,156-8506, Japan
3) Department of Oral Health and Clinical Science, Tokyo Dental College, 2-9-18, Misaki-chou, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0061, Japan
4) Department of Anesthesiology, Saitama Medical University International Medical Center,1397-1, Yamane, Hidaka , Saitama, 350-1298, Japan
5) Department of Anesthesiology & Pain Medicine, Juntendo University School of Medicine, 2-11-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8421, Japan

次世代手術室 Smart Cyber Operating Theater(SCOT) を基盤とした新時代の麻酔テクノロジーの可能性

糟谷祐輔，尾崎　眞，岡本　淳*，
正宗　賢*，伊関　洋*，村垣善浩*

1. 背景

手術室には日々新しい機器が導入され，非常に多くの医療機器が存在している．ナビゲーションシステム，内視鏡などの光学機器や手術支援ロボット，術前画像情報を提示するモニタ，生理学的検査機器など多くの手術関連機器と，麻酔器，生体モニタ，シリンジポンプなど多くの麻酔関連機器が配置されている．特に脳神経外科手術では，最近は手術中 MRI 画像を撮影し，その情報をもとに手術ナビゲーションを行ったり[1]，腫瘍部位と危険部位を認識して摘出部位を指示したり[2]，術中フローサイトメトリーを行い，腫瘍の悪性度診断を迅速に行い，手術戦略を調整するなど，非常に多くの情報を手術室では取り扱っている．しかしながら，現状では，それぞれの機器からアウトプットされる情報は統合化されておらず，各々がスタンドアロンで稼働しているのが現状である．

図 1 SCOT における手術室機器のネット枠化の概念図
SCOT プロジェクトでは手術室内の様々な機器がネットワーク化されオンラインで制御管理可能となる．

東京女子医科大学 麻酔科
*東京女子医科大学　先端生命医科学研究所

経済産業省 NEDO プロジェクトとして事業課題「未来医療を実現する先端医療機器・システム開発/安全性と医療効率の向上を両立するスマート治療室の開発」を目標とした Smart Cyber Operating Theater (SCOT) の開発を東京女子医大が中心となって遂行している．SCOT の鍵となるテクノロジーは ORiN (Open Resource interface for the Network) である．ORiN はロボット工業会が開発した産業用ミドルウェアであり，自動車工場などの大型工業プラントなどにおいて多数のロボット機器を統括的にコントロールする機器間の通信制御の共通規格である．ORiN を介することで，機器間での情報共有，機器の連携や複数機器からの情報を統合したより高度な動作が可能となった．

個々の機器が新設された場合や，バージョンアップされた場合でも，ORiN を介することで容易にプラントに組み入れることが可能となり，各機器の保守点検やエラーの要因解析に必要な情報も統括的に扱うことが可能なのが利点である．医療機器においてはこのような ORiN に相当するミドルウェアが存在していないことが，機器メーカごとの独自規格にとどまり，複数機器間の情報共有が可能とならない要因であると考えられた．(図 1)

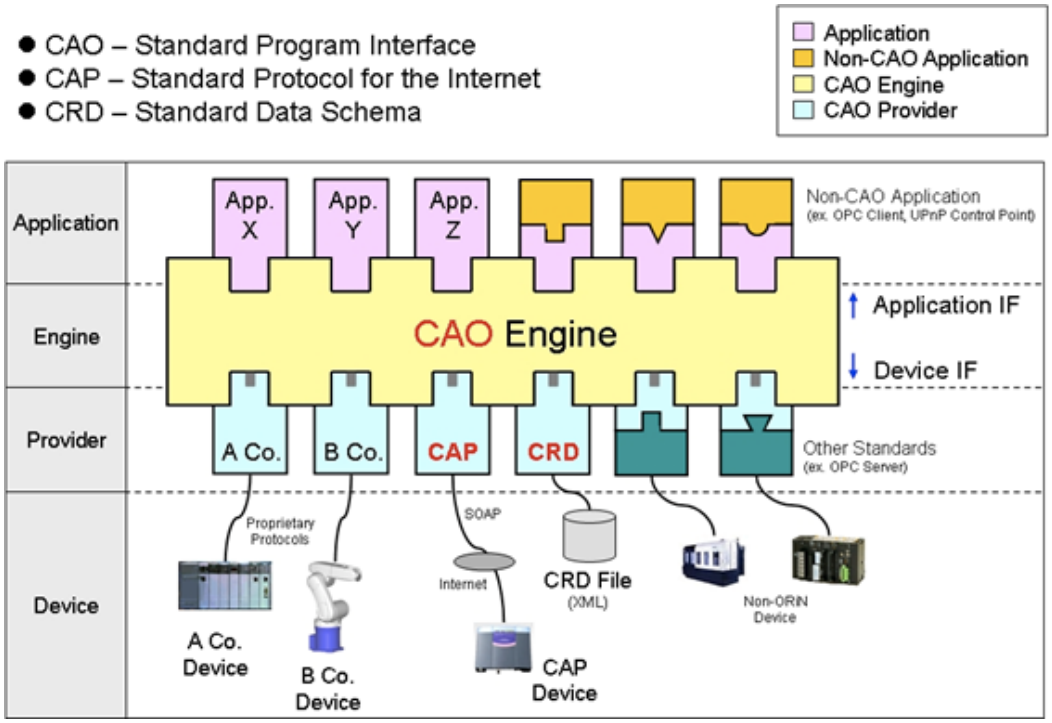


図 2 SCOT における ORiN のアーキテクチャ
アプリケーション層では各デバイスからのデータを共有して解析や機器の動作化確認，保守メンテナンスが可能となる．プロバイダ層ではデバイスマネージャーを介することでどのような機器でも接続が可能となる．

2．SCOT プロジェクト ～手術室における情報化～

5 大学, 11 企業の共同プロジェクトである SCOT では，このミドルウェアの技術を手術室にインストールすることで，手術室の IT 化を推し進めることが目標である．SCOT では術中内視鏡画像，マイクロ画像，術野映像，経食道心エコーなどの画像情報や，麻酔器，モニタ，シリンジポンプ，

手術台や電気メスなど手術室の医療機器すべてのオンライン化が可能となり，複数機器の情報を利用したアプリケーションの開発も可能となると考えられる．(図 2)(図 3)

現在のところ TCI による麻酔薬投与量の自動化や AIMS の導入など IT 技術による麻酔業務サポートが進んできているが，SCOT によって麻酔テクノロジーも大きく前進させることが期待できる．今後開発されるであろう，手術室麻酔関係のアプリケーションについて列挙する．

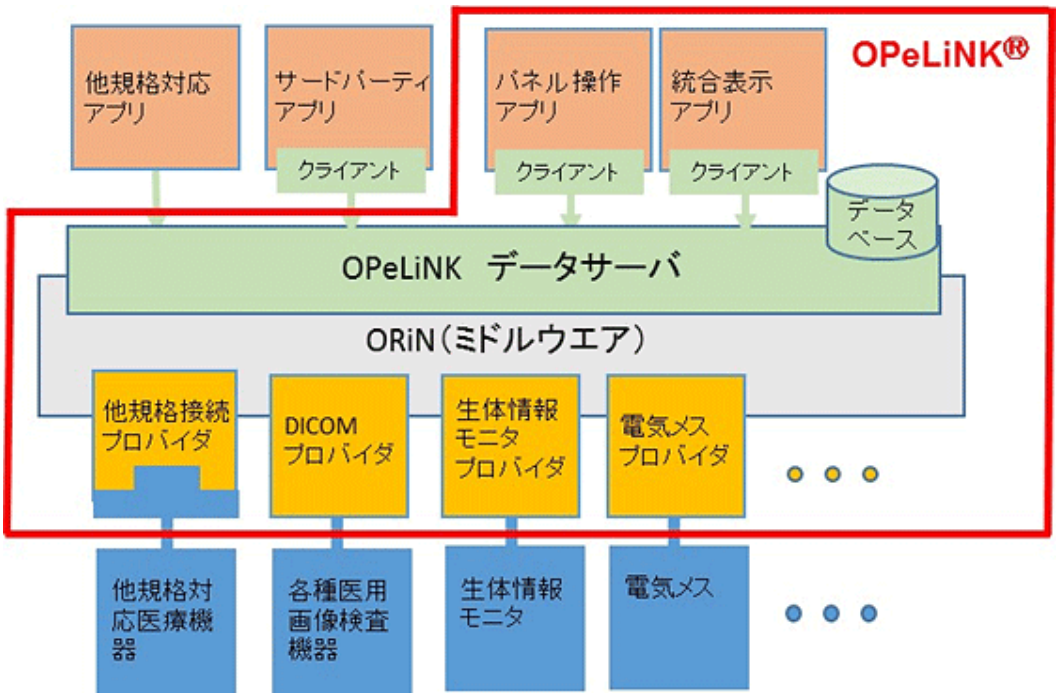


図 3 OPeLiNK システム
OPeLiNK は SCOT プロジェクトで開発しているデータサーバとミドルウェアを融合させたシステムである．これによって，手術関連機器がより効率的にネットワーク化される．

3．今後開発が期待される手術室，麻酔関連アプリケーション

① 手術，麻酔の質的評価システム

術後合併症と術中操作の相関関係の分析：術後に生じた合併症の原因を手術中の画像情報や生体情報が時間同期されたデータベースを解析することで，検討することが可能となる．

麻酔の客観的クオリティー評価システム AQi-S(Anesthesia Quality index System) を開発中である．AQi-S では全身麻酔の手技や管理について，気道確保や循環動態制御，体温代謝管理など項目ごとに管理目標を達成できているかを客観的に評価し，数値として，麻酔の質を表すようなシステムである．従来の麻酔チャートからだけでは把握できないような情報も加味して評価できるように評価関数を調整しているところである．

② インテリジェントモニタ

麻酔，手術の進行状況を認識した上でモニタのアラーム閾値を自動変更したり，危険性の事前予測を提供できるようなシステムも構築可能であろう．

③ 効率的手術室運営システム

セントラルモニタへ統合された多くの情報を提供可能となる．フェーズ分析，工程解析の手法を

取り入れることで, 手術プロセスを把握して, 手術の予測終了時刻を推定することができる．それにより効率的な手術室運営に必要な情報を提供する

④ 新しいコンセプトの AIMS

SCOT では動画情報や波形情報をオンライン上で取り扱うことができる．そのため超音波下神経ブロックや経食道心臓超音波などの動画情報を麻酔記録上に時間同期して記録することも可能となる．また，神経モニタリングの手術経過による変化なども AIMS 上に取り入れることも理論的には可能である．

⑤ 意思決定ナビゲーション

ミドルウェアによって統合された術中情報や生体情報の解析ソフトウェアを用いて監視することで，麻酔科医により早く的確に介入すべき事象の発生を認知させることや，対応方法を提案することが可能となる．麻酔科医がどのように意思決定を行っているかなど，意思決定プロセスや想定外の事態にどのような判断を与えるかなど，フェイルセーフの仕組みについての基礎的な研究が待たれる分野である．

⑥ 自動麻酔システムの構築への足掛かり

上記のようなアプリケーションの開発の積み重ねによって，高度な麻酔管理支援システムの構築が可能になるのではないか考えられる．

引用文献

1. Muragaki Y, Iseki H, Maruyama T, et,al., Information-guided surgical management of gliomas using low-field-strength intraoperative MRI. Acta Neurochir. 2011; 109: 67-72.
2. Saito T, Muragaki Y, Maruyama T, et.al., Intraoperative functional mapping and monitoring during glioma surgery. Neurol Med Chir (Tokyo). 2015; 55 (1): 1-13.

ABSTRACT

Smart Cyber Operating Theatre Project and future anesthesia technology prospect

Yusuke Kasuya[1], Makoto Ozaki[1], Ken Masamune[2], Jun Okamoto[2], Hiroshi Iseki[2], Yoshihiro Muragaki[2]

Smart Cyber Operating Theater (SCOT) project is the multi institutes development project funded by Japan Agency for Medical Research and Development. The goal of this project is to develop an integrated intra-operation room information system including biomonitor, medical imaging information and real time navigation system. This technology is based on the middleware ORiN (Open Resource interface for the Network), which has been developed in the manufacture plants and manage multiple industrial robots. This technology involves a potential in advancing anesthesia information technology brake through.

1) Department of Anesthesiology, Tokyo Women's Medical University
2) Institute of Advanced BioMedical Engineering and Science, Tokyo Women's Medical University

PaperChart, 電子カルテと連携した手術システムの紹介

中村　功

はじめに

大学病院，地域の基幹病院では，電子カルテの部門システムとして自動麻酔記録を含む手術システムあるいは ICU を含めた重症系システムの運用が行われるようになってきた．しかし，初期投資，維持管理を含め相当な費用がかかるため，中小の病院には普及していない．また，自動麻酔記録は，各メーカーごとに独自開発され，機能や使い勝手が異なるため，選定がむつかしい．当施設は，整形外科単科の小規模病院で，電子カルテ (CSI-Mirais) は整備されているものの，麻酔記録，手術看護記録など手術室業務はすべて紙面で運用されていた．2010 年麻酔科開設にあたり，フリーソフトウェアーの自動麻酔記録 PaperChart の導入を決め，これに連動した手術システムを独自開発し，現在まで運用してきた．

開発経過

2010 年

麻酔科着任とともに，WindowsXP と Windows サーバで手術室内単独のネットワークを組み，PaperChart による自動麻酔記録を開始．これに連動した手術予定表と麻酔台帳を開発し稼働させた．この時点では電子カルテから申し込まれた手術依頼内容を転記入力して手術予定表を完成させていた．入力は手術室看護師に依頼したが，転記ミスが時々発生していた．

2012 年

Linux(Ubuntu) サーバーを導入し，端末を WindowsXP から 7 へ更新した．

2013 年

電子カルテのネットワークへの接続が許可され，メーカーより参照系の ID とパスワードを発行してもらい，電子カルテのデータベースへアクセスが可能となった．手術予定表はこの時点から電子カルテのデータ取得で自動的に作成されるようになった．

2014 年

手術看護記録，手術伝票を作成し，更に諸記録を PDF 形式で電子カルテに貼付するプログラムを追加した．これにより麻酔科，手術室の業務は概ね電子化された．

2015 年

サーバーを Celeron から Xeon へ更新．OS は Ubuntu12.04LTS から 14.04LTS へ更新し，現在に至っている．

開発にあたり注意した点

1，データ入力が簡単で，麻酔科医の負担にならないこと．2，維持管理が容易であること．3，費用の節約．以上の 3 点である．

具体的には，入力項目を十分に検討し，必要最小限とした．電子カルテ，PaperChart のデータを活用し，極力，転記を行わなくてすむように工夫した．テンプレートを作成し，ルーチンの項目はセットを組み，まとめて入力できるようにした．

ウェブアプリケーションでは通常テキストボックスは自由入力，セレクトボックスはリストから選択する仕様になっている．医療では大部分はリスト選択で対応できるが，まれにリストに当てはまらない事項が発生する．このためテキストボックスに自由入力とリスト選択，両方の機能をもたせ，リスト内容はその場で編集できるように工夫した．リスト項目の編集はパスワードを入力し，マスターに入って行うという手順が一般的だが，セキュリティーに問題がなければ維持管理の面か

北新東病院 麻酔科

らは, その場で編集できる方が簡便である．Open-source software (OSS) を用いることで費用の節約に努めた．

手術システムの概要

サーバーサイドは PHP，クライアントサイドは主に jQuery で開発したウェブアプリケーションで，データベースには MySQL，サーバー OS は Linux (Ubuntu) を採用した．これらはいずれもシェアの高い安定した OSS で，参考資料が多い．サーバは富士通の Primergy TX100 を 2 台，各手術室に 2 台の Windows パソコン (麻酔科と看護師用) を設置し，電子カルテのネットワークに接続した．麻酔モニター，シリンジポンプは RS232C 変換器を介してパソコンに接続した．主な機能は，手術予定表作成，部屋，担当者の割当，術前診察，手術看護記録，手術伝票，麻酔台帳，術後回診記録である．JSA 偶発症例調査のテキストファイル作成や臨床実績の集計が可能であり，JSAPIMS へのデータ転送は現在行っていない．また，真正性確保のため，各種の記録を PDF 形式で電子カルテに貼付するプログラムを組んでいる．

運用手順

1，手術予定表

麻酔科着任前から, 手術申込は, 電子カルテに備わっているオーダー機能を介して行われていた．術者はこの操作に慣れているため，手術システム導入後も引き続き，電子カルテから手術申込を行ってもらうこととした．申し込まれた内容は，そのまま手術システムに転送され，手術予定表が完成される．手術予定表は 1 週間単位，または 1 日単位で表示される (図 1)．手術室では，この予定表をみて，部屋の割当，担当看護師の割当を決め，麻酔科医は，担当麻酔科医を入力する (図 2)．また，予定表には，麻酔科，手術室からの連絡事項を記入できる備考欄を設け，院内への業務連絡に使用している．

hproject/orm/schedule/schedule_edit.html#

2016/10/05 水 [備考]

No	患者	手術名/病名	入室/予定	順番/部屋	術者/助手	看護師(器/外)	麻酔
1	12345	人工骨頭挿入術	09:30	1	佐々木 拓郎	佐藤	麻酔科依頼
	***** 99 女	左大腿骨頸部骨折	1:30	2室		西條、外崎	中村 功
2	12345	UKA	09:45	2	島本 則道	和崎	麻酔科依頼
	***** 70 女	右変形性膝関節症	1:30	1室		赤石、加藤	上垣 慎二
3	12345	ACL再建術	13:30	3	島本 則道	赤石	麻酔科依頼
	***** 15 女	右膝前十字靭帯損傷、右膝半月板損傷	2:00	1室		加藤、和崎	中村 功
4	12345	THA	15:00	4	佐々木 拓郎	青山	麻酔科依頼
	***** 63 女	右変形性股関節症	2:00	2室		外崎、西條	上垣 慎二

2016/10/06 木 [備考] Dr小林応援あり

No	患者	手術名/病名	入室/予定	順番/部屋	術者/助手	看護師(器/外)	麻酔
1	12345	右 腱鞘切開術	09:30	1	山根 慎太郎	佐藤	自科局麻
	***** 73 女	右母指屈筋腱腱鞘炎	0:15	1室		外崎、西條	
2	12345	腱鞘切開術	09:30	2	吉岡 千佳	青山	自科局麻
	***** 74 女	左中指ばね指	0:15	2室		加藤、和崎	
3	12345	右 靭帯縫合術	10:00	3	山根 慎太郎	和崎	麻酔科依頼
	***** 17 男	右母指MP関節尺側側副靭帯断裂	1:00	2室		青山、加藤	中村 功
4	12345	観血的骨接合術(ORIF)	10:00	4	吉岡 千佳	佐藤	麻酔科依頼
	***** 80 女	右橈骨遠位端骨折	1:00	1室		西條、外崎	小林 繁明
5	12345	観血的骨接合術(ORIF)	11:30	5	吉岡 千佳	外崎	麻酔科依頼
	***** 64 女	左橈骨スミス骨折	1:00	1室		西條、佐藤	小林 繁明
6	12345	手根管開放術、腱鞘切開術	13:30	6	吉岡 千佳	青山	自科局麻
	***** 71 女	右手根管症候群、左環指ばね指	0:30	2室		和崎、加藤	
	12345	QRCB	14:00	Z	吉岡 千佳	西條	麻酔科依頼

図 1 週間手術予定表の一部を表示．

[北新東手術予定][今週の予定][検索]

<< 前　当日予定　次 >>　追加 緊急 中止　[台帳登録]

2016/10/12 水

No	患者	手術名/病名	入室/予定	順番/部屋	術者/助手	看護師(器/外)	麻酔
1	12345	TKA	09:30	1	島本 則道	佐藤	麻酔科依頼
	***** 81 男	左変形性膝関節症	2:00	1室			田 敦知
2	12345	THA	09:45	2	佐々木 拓郎		酔科依頼
	***** 71 女	左変形性股関節症	2:00	2室			寸 功
3	12345	ACL再建術	13:30	3	島本 則道		酔科依頼
	***** 16 男	右膝前十字靭帯損傷	2:00	1室		佐藤、外﨑	木田 敦知
4	12345	金抜	15:30	4	佐々木 拓郎	西條	麻酔科依頼
	***** 42 男	両踵骨骨折	1:00	2室		和崎、加藤	中村 功

青山
佐藤
赤石
加藤
和崎
外崎
西條
-編集-

図 2 手術予定表を表示し，部屋，看護師，麻酔科医の割当を行う．

2，術前診察

手術前日には，この予定表の「麻酔科依頼」と記された部分をクリックして，術前診察票を開き，所見を入力する．麻酔に必要な患者属性のデータ (身長, 体重, 血液型, 感染症など) は, あらかじめ電子カルテから転送されている．麻酔科医がチェックするのは，現病歴，既往歴，手術歴，内服薬，レントゲン写真，必要に応じて MRI などの画像，心電図，呼吸機能，血液検査所見などである．これらの情報は電子カルテ内のさまざまな場所に格納されており，必要なデータに到達するまでに何度もマウスをクリックしなければならない．麻酔科医にとって負担となる効率の悪い作業である．本システムでは，術前診察票のなかにカルテ参照として血液検査，心電図，呼吸機能，他科からの紹介状，前回の麻酔記録などを直接参照できるボタンを設置し，クリック 1 回で容易にデータにアクセスできるよう工夫した．PACS との連携はまだできておらず，画像データについては電子カルテまたはビューワーを開き参照しなければならない．術前所見の入力が完了したら，病室の電子カルテ端末の前で患者を診察し，説明，同意を得る．同意書は術前診察票から印刷できる．麻酔計画，準備薬剤は術式ごとにテンプレートを作成してあるので，一括入力することができる (図 3)．また，この画面には，看護師の術前訪問内容を入力するようになっており，情報をお互いに共有できるようにしている．術前診察が完了したら，診察票を印刷しておく．

3，手術当日

手術当日，印刷された術前診察票をみて，麻酔科医と看護師で麻酔準備について直接打ち合わせを行っている．看護師と情報を共有し，麻酔準備に間違いのないようにするためである．

患者が入室したら，麻酔科医は PaperChart を開き，予定表から該当患者を選択する．患者属性，術前所見，病名，予定手術術式など必要なデータが PaperChart に転送される．看護師は手術予定表の「担当看護師」をクリックして，手術看護記録，手術伝票の画面を表示する (図 4)．同時に，PaperChart の画面を表示し，麻酔記録を逐次参照できるようにしている．麻酔科医の記入漏れなどはその場で指摘してもらえるので，入力漏れや記入ミス対策に役立っている．看護記録，手術伝票では，ともに主な術式ごとのテンプレートを作成してある．看護師はテンプレートを選択することで一括入力し，必要に応じて，追加，訂正する方式である．手術が終わり，麻酔記録を終了すると，PaperChart のテキストデータからなる CSV ファイルが作成される．看護師は手術看護記録画面の一番下にある「記録取り込み」ボタンをクリックする．この操作によって，CSV ファイルを介し

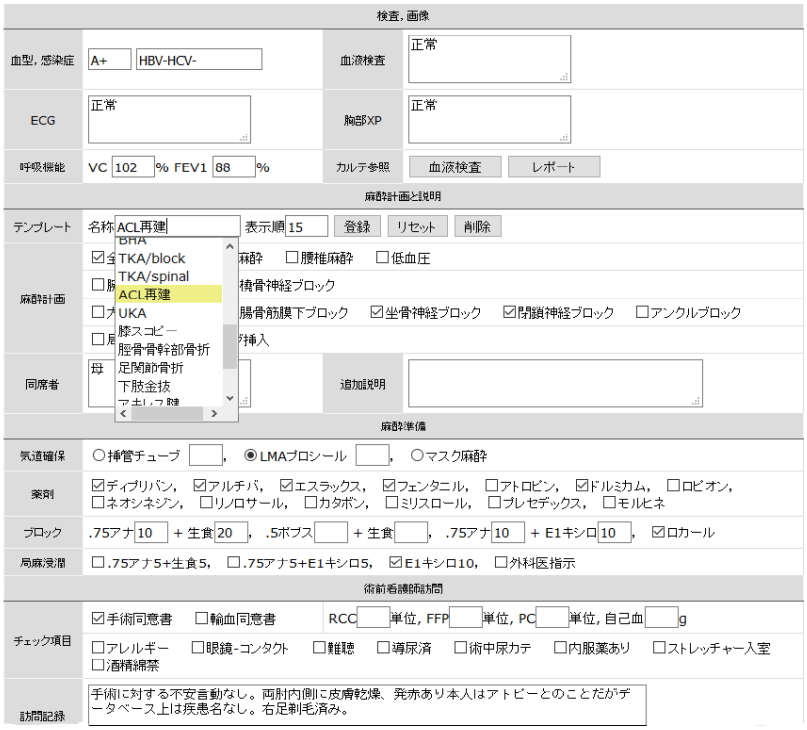


図 3 術前診察の一部を表示．テンプレートから ACL 再建を選択すると，麻酔方法と準備薬剤がまとめて入力される．

図 4 手術伝票の一部を表示．手術時間，麻酔時間など背景がグレーの部分は PaperChart から自動的に入力される．看護師は術中に使用した薬剤，医療材料などを入力する．

て，PaperChart のデータが，看護記録，手術伝票，麻酔台帳に転送される．麻酔科医は麻酔台帳の JSA 分類と麻酔方法の入力を行うだけで，台帳入力は完了する．夜中 23：00 にシェルスクリプトが稼働して，術前診察票，麻酔記録，看護記録，手術伝票が電子カルテにコピーされる．

4，術後回診

手術翌日, 術後回診を行い, 手術予定表の「担当麻酔医」をクリックして術後回診画面を開き，所見を入力する．画面下にある「電カル貼付」というボタンをクリックすると，術後回診の記録が電子カルテにコピーされ, すべての記録が完了する．

5，集計・報告

1 年間の記録が終了したら，麻酔学会の偶発症例調査報告のため，前年度の集計を行い，提出用のファイルを作成する．台帳にある「JSA 転送」ボタンをクリックし, ついでメニュ画面から「JSA 報告」を開き,「ファイル作成」ボタンを押すと，提出用テキストファイルがダウンロードされる．このファイルをそのまま CD にコピーして麻酔学会に提出する．

考　察

電子カルテが導入されても，麻酔科診療は必ずしも電子化されるとはかぎらない．これは，麻酔記録が他の診療録と異なり，特殊な要素，具体的には経時的なバイタルサインの取得，時系列で記録する薬剤，イベントなどの情報を含むので，現状の電子カルテでは対応出来ないからである．麻酔記録以外でも，術前診察所見，術後回診記録，手術看護記録，手術伝票などは，電子カルテに適切なフォーマットがない場合もあり，紙面での運用を余儀なくされることがある．

米国では，ここ数年自動麻酔記録を含む手術システム (AIMS) が急速に普及し，2014 年の報告では教育病院の 75 %が使用しているとされる．そして，この傾向は後戻りすることはなく，2020 年には 84 %に上昇すると推測されている [1)]．

日本では，日本光電，フクダ電子，Philips など大手の医療機器メーカーが手術システムを販売し，大学病院や基幹病院で採用されている．しかし，導入に伴う高額の費用は，中小規模の病院には大きな負担である

それほど大掛かりなものではなく，日常の麻酔診療を電子化し，検索や集計が容易で，診療技術の向上に役立つような小規模のシステムを導入したい場合には，PaperChart を利用すれば，自前で作成することも不可能ではない．施設内に JAVA，C #，PHP などのプログラム言語を扱える人材があれば，強力な助けとなる．著者は，前施設で，PHP，MySQL にて院内業務用のウェブアプリケーション作成の経験があったので，麻酔台帳の作成から始め，手術予定表，術前診察，術後回診と順次機能を追加した．Linux サーバの導入，電子カルテのデータベースとの接続などは初めての経験であったが, 手順を追ってすすめれば, それほど困難ではない．この時，電子カルテメーカーのエンジニアとの情報交換は，大きな助けとなる．

PHP は初心者が習得しやすいスクリプト言語でありながら，大規模システム構築も可能で，オラクルや SQL サーバなど電子カルテに採用される高機能データベースとも接続可能である．OS を選ばない点も好都合で，正式なプログラミング教育を受けていない世代の麻酔科医には一番学習しやすい言語であろう．

開発者はシステムのルートパスワードを知っているため，真正性確保の意味で諸記録をタイムスタンプ付きで電子カルテに貼付する方法をとった．電子カルテのルートパスワードは知らされてないので，データの保存と真正性は担保されたと考えている．

遠からず麻酔科診療は電子化されていくと思われる．その時には，単にシステムを利用するだけでなく，その開発にまで踏み込んだ議論ができる能力を身につけた人材が必要になってくるのではないだろうか．

まとめ

電子カルテ，PaperChart と連携した手術システムを作成した．OSS を利用することで，開発費用はサーバ，ネットワーク機器などのハードウェアー代のみに抑えることができた．当院に特化したものなので，汎用性はないが，必要最小限の機能とすることで，入力が簡単で，維持管理が容易なシステムとなった．

参考文献

1. Stol IS, Ehrenfeld JM, Epstein RH. Technology diffusion of anesthesia information management systems in to academic anesthesia departments in the United States. Anesth Analg 2014;118:644-50.

ABSTRACT

The in-house operating room management system conneted with the Paperchart and the hospital information system.

Isao Nakamura

The implementation of anesthesia information management system (AIMS) has been increasing in the academic centers of Japan. However clinics and small hospitals cannot afford to adopt AIMS because of the financial obstacles associated with the initial investment.

The PaperChart is a free software that automatically captures patient data from various monitoring devices and create an electronic anesthesia record. The PaperChart does not include modules for OR scheduling, pre- and postoperative documentation.

Therefore the author has developed the operating room management software that provides pre- and postoperative patient information, function of staff scheduling and sending data for billing. This software is a web based applicaion built with frontend program of jQuery and backend program of PHP. It can access to the data files of the PaperChart and the hospital information database. This system was deployed on April 1, 2010. In this article I discuss the benefit and the problem of the in-house operation room management system on the basis of more than 5 years experience.

Keywords PaperChart, AIMS, In-house operating room management system

Department of Anesthesia Hokushin-higashi Hospital Fusiko 5 jou 3 chome Higashi-ku Sapporo, Japan

冠動脈攣縮で発生する早期再分極症候群はジギタリス中毒波形の ST 上昇型である．

田中義文，原 美紗子，橋本壮志，松田知之

はじめに

めったにないが，手術中に三角形様の R 波が連続的に出現，低血圧と VT を併発し，蘇生に難渋する場合がある．これは早期再分極症候群と呼ばれ，右室で発生する Brugada 症候群と似たメカニズムで，冠動脈攣縮が原因である．われわれはこの心電図波形をシミュレーション[1]で再現し，その波形はジギタリス中毒と共通する性質を持っていると考察したので報告する．

図 1 早期再分極症候群 (Brugada 様 Coved 波形) 11:16 から 11:20 分までの II 誘導トレンドグラム．
11:16 後半に T 波増高が見られる．11:17 後半に J 点上昇に伴う盆状 ST 変化，2 相性 T 波が見られる．11:18 前半に典型的な早期再分極症候群波形から VT に移行する．11:19〜20 は上向き R 波と ST 上昇を伴った逆転 T 波が連続するが，一部小さな心筋活動電位のような波形 (墓石様波形) も見られる．(引用文献 2) より改変)

方　法

1) 早期再分極波形

症例は 60 才，男性，特記すべき既往歴なく，直腸癌根治術中に図 1 に示す心電図が発生し，心蘇生を繰り返した．手術終了後 ICU でも同様の症状を複数回繰り返した．心電図所見は 11:16 後半に T 波増高が見られ，11:17 後半に J 点上昇に伴う盆状 ST 変化，2 相性 T 波が見られた．11:18

京都岡本記念病院 麻酔科

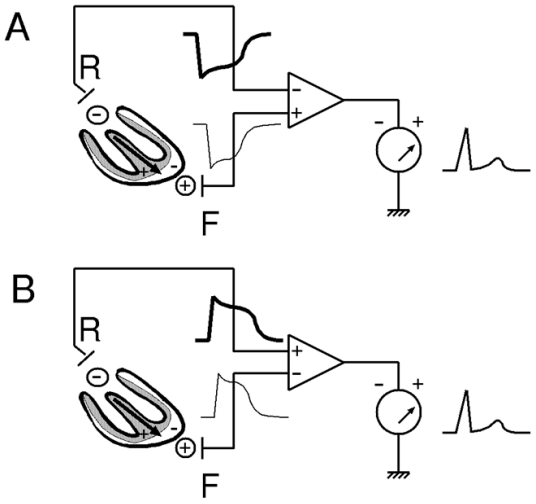


図 2 第 II 誘導とシミュレーション理論
図 2A：右肩 R 極は－，左脚 F 極は＋極に装着し心電図 II 誘導を計測．実際は細胞外電位の計測であり，活動電位の逆転波形になる．B：シミュレーション図．R 極は心内膜側心筋活動電位 (太線)，F 極は心外膜側心筋活動電位 (細線) を計測していると仮定．活動電位はスプライン補間で作成した．

前半に典型的な早期再分極症候群波形から VT に移行．11:19～20 は上向き R 波と ST 上昇を伴った逆転 T 波が連続するが，一部小さな心筋活動電位のような波形 (墓石様波形) も見られた [2]．

2) シミュレーション

シミュレーション技法を図 2 に示す．図 2A は第 II 誘導の概念図である．右肩 R 極は心内膜側細胞外電位を検出し，左脚 F 極は心外膜側細胞外電位を検出する．これらの電位は心筋活動電位の反転波形であると仮定し，図 2B に示すように差動増幅器 (心電計) の入力端子を逆に接続する．すると，われわれはそれぞれの活動電位の比較で心電図を描くことができる．本来は「心電図の逆問題は解けない」という理由から電極電位は測定できないが，任意の心筋活動電位をスプライン数値補間で作成し，心内膜側活動電位から心外膜側活動電位の引き算操作で体表心電図波形第 II 誘導を再現した．

結　果

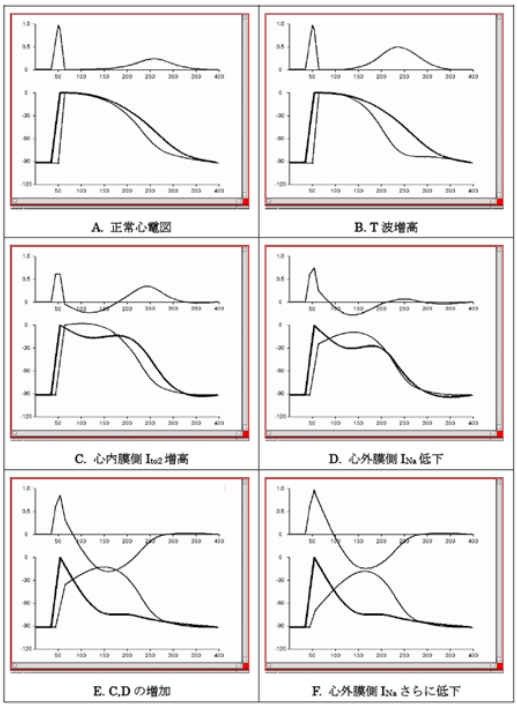


図 3 シミュレーション結果
各図下の太線は心内膜心筋活動電位，細線は心外膜側心筋活動電位．上図は心内膜側より心外膜側電位を引いた心電図を示す．

シミュレーション結果を図 3 に示す．図 3A は正常波形である．心内膜側心筋は Purkinje 細胞による特殊伝導系の興奮であり，心室筋の脱分極はそこより始まる．その興奮が心内膜側心筋に伝わって R 波の上向部を形成する．それと同時に，興奮が一般心筋，そして心外膜側心筋に伝わると，F 極の引き算効果で R 波の下向部が形成される．全ての心筋が興奮，収縮すると心内膜側，心外膜側共に同一電位になり，基線上に ST セグメントが形成される．再分極は心外膜側心筋より始まり，心内膜側との差の電位で上向きの T 波を形成する．図 3B は早期再分極波形の初期に出現する T 波増高を示している．心内膜側心筋の活動電位はそのままで，心外膜側心筋の脱分極時間 (APD) が短縮する．そのために再分極時での心内膜側と心外膜側との電位差が大きくなり T 波増高となる．その後，図 1 の 11:17 後半で盆状 T 波や盆状で 2 相性 T 波が出現する．これはジギタリス中

毒で得られる特徴的な波形で心内膜側心筋の I_{to2} の亢進による．シミュレーション波形を図 3C に示す．その後，0 相心外膜側脱分極電位が低下し，R 波の下向部が基線にまで戻らなくなる．一方，I_{CaL} は正常に保たれ，活動電位 2 相の電位は維持されてドーム状波形になる．そのため，図 3D に示すように ST 上昇と逆転 T 波が現れる．11:18 前半の心電図波形が相当する．心外膜側脱分極電位のさらなる低下のシミュレーションを図 3E および F に示す．11:19 後半で見られる墓石様波形の 3 連発はシミュレーションに示さなかったが，微弱な心内膜側心筋の活動電位である．これは心外膜側心筋の脱分極が発生しない状況で，心内膜側心筋が脱分極し，その活動電位が直接観測されていると考えられる．

考　察

シミュレーションで得られた心内膜側，心外膜側の活動電位が，実際に有り得るかどうかが最大の問題点である．幸いにして図 4[3] に示すように，イヌ心筋でジギタリス中毒での心内膜側，心外膜側での活動電位が報告されている．それを見ると，ジギタリス投与後 1 時間で Purkinje 細胞の活動電位 1 相は顕著に低下しているが，一般心筋では APD の短縮だけで 1 相の低下は見られない．そのことがシミュレーションに示す盆状 T 波の原因となる．さらに時間が経過すると，両心筋細胞の APD も短縮し，また心外膜側心筋の 0 相脱分極電位が低下する．そのこともシミュレーションに示す ST 上昇と T 波逆転と一致し，シミュレーションで求めたそれぞれの活動電位と実験値はよく一致する．

ジギタリスの薬理効果とは，心筋での Na-K ポンプ機能の抑制により，細胞内の Na^+ 濃度が上昇する．それが Na-Ca 交換体の回転を刺激し，細胞外へ Na^+ イオンの放出，細胞内に Ca^{2+} イオンの流入を増幅し，結果として細胞内 Ca^{2+} イオン濃度を上昇させて心筋収縮力を高めることにある．Na-K ポンプは細胞内 ATP をエネルギー源

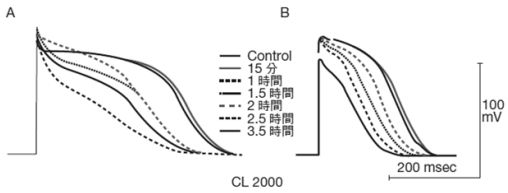


図 4 ジギタリスによる Purkinje 細胞と一般心筋の活動電位の変化

イヌ心臓 Purkinje 細胞 (A) および一般心筋 (B) のジギタリスによる活動電位の変化を示す．投与直後は APD の延長がみられるが，その後活動電位 1 相の低下 (I_{to2}) が強く現れ，一般心筋の APD の短縮が強くなる (文献 3 より改編)．

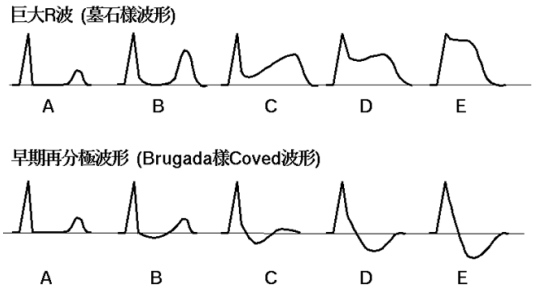


図 5 2 種類の冠動脈攣縮波形発生メカニズム

上図：巨大 R 波
A：正常心電図，B：ST 上昇により J 点が鈍になる．C：ST 上昇は強くなり，ST セグメントも右肩上がりになる．D：その傾向はますます強く，E：心内膜側活動電位波形に似る．
下図：早期再分極症候群
A：正常心電図，B：ST セグメントが盆状様になり，2 相性 T 波を示す．C：J 点の上昇と盆状状 ST セグメントが強くなる．D：J 点上昇はますます強く，盆状様 ST セグメントは幅の広い逆転 T 波になる．E：R 波としての棘波形は認識できず，下向部はスラー様になり，逆転 T 波と区別できない．

として作動する．同時にジギタリスの副作用として I_{to2} の亢進による 2 相活動電位の低下がある．I_{to2} は今日では CLCA1 チャネルであることが確認され，Cl^- イオンの細胞内流入を行い，2 相活動電位の低下の原因であることが知られている．一方，早期再分極症候群は突然の冠動脈攣縮により，心筋虚血に陥る．そのため酸素欠乏が細胞内 ATP 産生を抑止することになり，結果として Na-K ポンプの抑制となる．その類似点がジギタリス中毒の極限の心電図波形になると考えられる．

墓石様波形と早期再分極波形の特徴を図 5 に示す．両者とも冠動脈攣縮により発生し，攣縮が解除されると何の後遺症もなく正常心電図に戻る．墓石様波形は図 5 上図に示すように，心外膜側心筋の脱分極不全が原因となり，徐々に F 極の引き算効果が減弱し，R 波の下向部分から T 波の上向部分までが基線より上方に変位する．最後には心内膜側活動電位だけが表示される．一方，早期再分極波形は図 5 下図に示すように R 波の下向部分が存在することから，心外膜側心筋の脱分極は維持される．しかし心内膜側心筋の極端な APD の短縮のために逆転 T 波となる．いずれの波形にせよ，心電図 R 波の解釈は興奮電流によるスパイク波形と考えると説明ができず，R 波の上向部と下向部はその成り立ちの違いに意識する必要がある．J 点の上昇は心外膜側の活動電位 2 相の電位低下で発生し，T 波の上向部は心外膜側心筋の再分極波形，下向部は心内膜側心筋の影響を強く受ける．

おわりに

多くの成書に心筋興奮電流が＋である F 極に向かうために R 波が作成されると説明されている．これは双極誘導を無視した考え方であり，間違いである．R 波の上向部は心内膜側心筋の脱分極により発生し，下向部は心外膜側心筋の脱分極により発生する．もし心外膜側心筋の脱分極電位が低下すれば R 波の下向部は十分に低下できずに ST 上昇を伴った波形になる．図 1 の 11:19 後半部分に連発した小さな心筋活動電位が見られることは心外膜側心筋が全く脱分極できず，一部の心内膜側心筋だけの VT 波形と解釈すればわれわれのシミュレーションの考え方と矛盾しない．心電計の各電極電位を分離して測定出来ない状況で，スプライン補間で任意の活動電位波形を作成し，異常心電図波形を解析する方法は有効な手段である．

参考文献

1. 田中義文：心室心電図簡易シミュレーションプログラム．http://nsa.kpu-m.ac.jp/gijutu/new-ecg/new-ecg.php.
2. 田中義文：成り立ちから理解する心電図波形: 心筋の活動電位を読み解く．学研メディカル秀潤社，2012.
3. Mandel WJ, Bigger JTJr, Butler VPJr: The electrophysiological effects of low and high digoxin concentrations on isolated mammalian cardiac tissue: reversal by digoxin-specific antibody. J Clin Invest 51:1378-1387, 1972.

ABSTRACT

Etiology of early repolarization syndrome with J point elevation and sagging T wave might be same as those of characteristics in digitalis intoxication pattern.

Yoshifumi Tanaka, Misako Hara, Sousi Hashimoto, Tomoyuki Matsuda

An early repolarization syndrome in general anesthesia is the highest level of risk and is often associated with ventricular fibrillation storms. We recorded a time course of early repolarization syndrome from elevated T waves to J point elevation and sagging T waves and inferred mechanism of generating ECG patens. The simple simulation program[1)] revealed changes of endocardial and epicardial action potentials separately and these pattern was quite similar that of digitalis intoxication pattern[3)]. These results make a suggestion that abrupt deficiency of ATP inhibits Na-K ATPase and reduce the voltage of phase 0 action potential in epicardial muscles.

Key Words:
Surface electrocardiogram, Mechanism, Epicardial potential, Endocardial potential, Differential amplifier, digitalis intoxication

Department of Anesthesia
Kyoto Okamoto Memorial Hospital
Email: tanaka@koto.kpu-m.ac.jp
〒 613-0034 京都府久世郡久御山町
佐山西ノ口 58 番地

筋萎縮性側索硬化症 (ALS) 患者の意識変容と麻酔中の脳波

林　和子，田中暁子，荒木竜平，槌田圭一郎，印藤孝介

はじめに

筋萎縮性側索硬化症 (Amyotrophic lateral sclerosis：ALS) は，従来は認知感覚機能が維持されると考えられていた運動神経系の進行性神経変性疾患であり，現在，国内での罹患数は，約 1 万人と言われる． ALS は，原因として，1) 遺伝子異常説；2) グルタミン酸トランスポーター異常，カルシウム透過性 AMPA 受容体の関与等による興奮性細胞死説；3) RNA 調節機構異常による異常蛋白の集積，細胞骨格蛋白の異常，特定蛋白 (TDP-43 蛋白) の代謝異常説，などが挙げられているが，ミトコンドリア障害，免疫異常，中毒・欠乏，感染，外傷などの関与も報告されており，未だよく解明されていない．

近年，ALS 患者の認識感覚機能が，運動ニューロンの神経変性に伴い低下することが報告された[1]．一方，ALS 患者の脳波は，他の痴呆や認識機能低下患者の脳波とは異なる特徴を示すと言われる[2−4]．今回，閉じ込め状態 (locked-in state: LIS) に近い終末期 ALS 患者の下顎骨骨折の修復手術の麻酔を担当した．セボフルラン吸入で麻酔を維持し，連続脳波観察を bispectral index (BIS) モニタリングにより施行したので報告する．

症　例

当 ALS 患者と引用患者の症例報告及び脳波解析に関して，患者，または患者の家族に書面で同意を得た．患者は 64 才男性で，13 年前に下肢筋力低下で ALS を発病した．10 年前から寝たきり状態となり，呼吸，嚥下障害が進行し，9 年前に気管切開と胃瘻造設がなされ，以後，9 年以上の歳月を在宅で陽圧補助換気 (TPPV：tracheostomy positive pressure ventilation) と経腸栄養で在宅管理されていた．以前は文字盤，PC を介した会話も可能であったが，そのようなコミュニケーションも不可能になって 5〜6 年の月日が経過していた．瞬きや開閉眼は可能であるが，指示に従い目を閉じることはほとんどできず，他人との意思疎通は稀であるが，妻は瞬きにより患者の意図が多少理解できると言われる状況にあった．ALS 治療薬であるリルゾールと，ベンゾジアゼピン系作動薬のフルニトラゼパム，セロトニン 5-HT2 受容体拮抗薬であるトラザロンが日常的に投薬されていた．

術前診察では，眼球運動障害を有しており，眼球は外転していて他人と目が合わせることはできなかった．また運動機能の中で，瞬きや開閉眼のみが可能であったが，指示に従う開閉眼は滅多にできず，LIS か minimal communication state (MCS:最小限コミュニケーション状態) にあった．周術期を通じた 20 回前後の麻酔科医の意思疎通の試みの中で，一度だけ，指示に応じて目を閉じることができた．開閉眼が可能なのに指示に従う開閉眼がうまくできないのが，聴覚器，聴覚野の問題なのか，聞こえていても指示を理解できないためなのか，指示に応答する意思を持たないためなのか，或いは，応答する意思を有していても運動機能への連携がうまくゆかないためなのか，その機序は不明であったが，本患者の意識認知レベルと意思伝達能力は，外界からの刺激に応答反応すること (responsiveness) が難しい状態 (意思伝達能力障害分類では，stage IV の ” 残存する随意運動はあるが yes/no の確認が困難なことがある “) にあった[5]．

麻酔経過

麻酔は，経静脈的にプロポフォール (50 mg)，レミフェンタニル (0.15 μg/kg/min) を投与すると同時に，気管カニューレから，セボフルラン

公立南丹病院 麻酔科

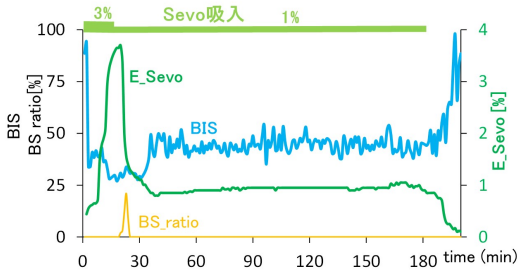


図 1 進行 ALS 患者 (64 才男性) における bispectral index (BIS), 呼気セボフルラン濃度 (E_sev), burst suppression ratio (BSratio) の麻酔中の推移

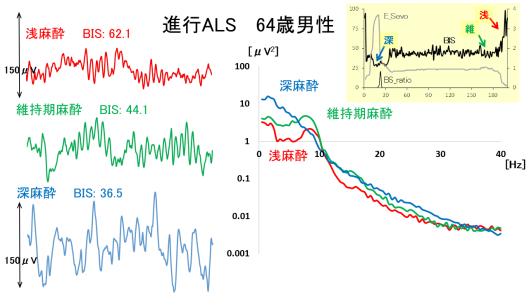


図 2 進行 ALS 患者 (64 歳男性) のセボフルラン麻酔下の脳波変化
浅麻酔 (呼気セボフルラン 0.5 %，BIS62); 維持麻酔 (呼気セボフルラン 1 %，BIS44); 深麻酔 (呼気セボフルラン 3 %，BIS36)

(5 %) を吸入させて導入した．Burst suppression が出現するまでセボフルラン 5 %で麻酔を深めた後，セボフルラン (1〜1.2 %)，レミフェンタニル (0.1〜0.2 μg/kg/min)，フェンタニル (計 450 μg) で麻酔維持した．筋弛緩薬は投与しなかった．脳波は，Aspect A-2000 BIS monitor を用いてモニタリングした．図 1 に麻酔経過を示す．

BIS 値は麻酔前には 90 を超えていたが，麻酔導入後，速やかに 50 以下になり，更なる吸入麻酔深度増加に伴い，30 未満まで低下した．呼気セボフルラン濃度が 3.7 %まで上昇した時点で burst suppression が生じた．その後の麻酔維持では，セボフルラン濃度を 1〜1.2 %に維持し，BIS 値は 45 前後で経過した．手術終了後，セボフルラン吸入を終了し，患者の覚醒を試みたところ，セボフルランの洗い流しに伴い BIS 値は次第に上昇し，

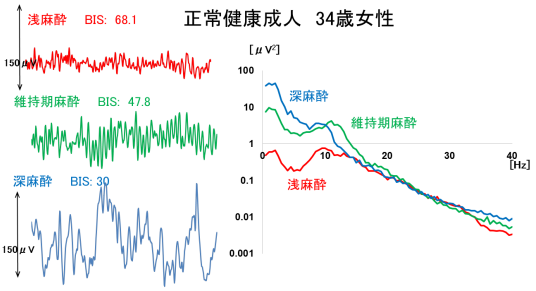


図 3 正常健康成人のセボフルラン麻酔下の典型的脳波変化 (34 歳女性)

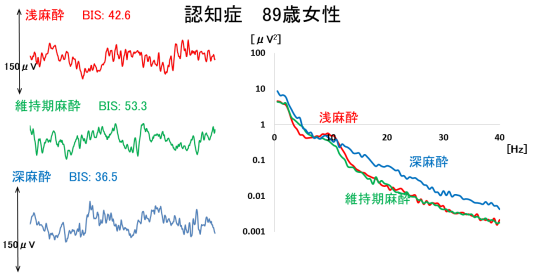


図 4 高齢認知症患者のセボフルラン麻酔下の典型的脳波変化 (89 歳女性)

約 6 分後に自然に開眼した．そこで患者の覚醒を判断し，麻酔管理を終了とした．図 2 に，当患者の浅麻酔，維持麻酔深度，深麻酔時の脳波とそのパワースペクトラムを示す．

比較参考のため，図 3，4 に正常健常者と高齢認知症患者の麻酔深度による脳波変化の典型例をそれぞれ，34 歳女性と 89 歳女性症例の脳波とそのパワースペクトラムで示す．一般に健常者では浅麻酔時の低周波成分は少なく，一方，浅麻酔から維持麻酔深度に至るまで，α 波が出現する．また，麻酔濃度依存性の脳波変化が大きい．一方，高齢認知症例では，浅麻酔時でも低周波成分が大きく，また，全麻酔域を通じて，α 成分は少ない．

これらの症例と比較して，ALS 患者では，高齢認知症患者同様に浅麻酔時も δ 域低周波成分のパワーが大きく，一方で，健常者同様かそれ以上に，浅-中麻酔域で α 成分のパワーが突出している特徴が認められた．この α 成分のピーク周波数は約 8Hz であり，健常者より若干小さかった．ただし，

これら ALS 患者の麻酔脳波の特徴には，抗精神病薬の影響も含まれると思われる．

考　察

ALS 患者の認知能力に関しては，5〜15 %に重度の認知力低下が認められ，また 33〜51 %に中等度の認知力低下が報告されており，前頭側頭型痴呆との関連が病理学的，疫学的にも指摘されている．一方，球麻痺等の ALS 進行度が認知機能障害や痴呆度と相関するといわれる [6]．完全な locked-in state に陥った ALS 患者の神経病理学的検索では，視覚路，辺縁系 (嗅覚路)，視床下部は比較的維持される一方で，体性感覚路，聴覚路，味覚路は障害され，網様体，賦活系の機能不全が示唆されている [7,8]．また，MCS 状態にある ALS 患者の残存運動機能に関しては，極度の随意運動の緩徐化，運動発動開始の遅延化や，随意運動，不随意運動，情動運動間の連携の円滑性低下などが報告されるが，治療や重要な意思決定時には，眼球運動や眼瞼機能運動から意思疎通を確信できることがあるという．当 ALS 患者が一度だけ指示に応じて閉眼できた背景には，このような連携機能不全も有していた可能性もあると思われる．一方，当患者の認知レベルの正確な評価は不可能であったが，10 年前より球麻痺症状が出現して，人工呼吸，経腸栄養で管理されていたことから，相当の認知力の低下が予想された．

一般に，脳萎縮の進んだ高齢者や認知症，痴呆患者の脳波は，先に図 4 に示したように，浅い麻酔状態でもδ成分有意であり，α成分が少なく，また麻酔深度依存性の変化も乏しい．しかし，当 ALS 患者の脳波は，認知能力の低下が予想されるにもかかわらず，浅麻酔から手術麻酔深度に至るまで，α成分が突出しており，脳波の麻酔深度依存性変化も明瞭であった．一方でα波のピーク周波数が 8Hz 前後と，正常健常者に比べて低い特徴が認められた．また，一般に痴呆患者や高齢者では，より低い呼気セボフルラン濃度 (2 %前後) で burst suppression を生じるが，当 ALS 患者では，呼気セボフルラン濃度が 3.7 %に達するまで burst suppression が惹起されず，むしろ健常者よりも高い麻酔薬濃度が脳波抑制に必要であると思われた．

ALS 患者の脳神経ネットワークに関しては，fronto-central regions, salience network, default mode network における脳神経連結性 (ネットワーク node) の増加や，α帯域成分の増加，近隣ノード同士の次数相関 (assortativity) 増加が示唆されている．ネットワークの assortativity が大きくなると，ネットワーク次数の近いノード同士が結合しやすい現象が見られ，ネットワークの頑健性が減少すると言われる．また，Resting-State EEG の検索では clustering coefficient 増加も報告され [2]，また，symbolic transfer entropy を用いた検討では feedforward connectivity 増加が示唆されている [9]．このように，ALS 患者では，一般の痴呆患者とは異なる脳神経ネットワークの特殊性が予想されるが，当 ALS 患者に認められた浅-中麻酔域でα活動亢進や burst suppression に必要な麻酔深度の高さは，ALS 患者における脳神経ネットワークの異質性を支持するものと考える．一方で，BIS 値の麻酔薬に対する反応性は，健康成人に類似しており，BIS モニターが ALS 患者においても有用に使用できることが示唆された．

まとめ

進行 ALS 患者の麻酔中の脳波は，浅-中麻酔域では高振幅なα波傑出を示し，痴呆，認知能低下患者や高齢者に認められる低振幅，低α活動の脳波特徴とは異なっていた． 脳波の麻酔反応性は，正常成人に近く，BIS 値は，セボフルラン濃度を反映した通常の変化を示し，BIS モニタリングは進行 ALS 患者の麻酔深度推定に役立つと思われた．今回認められたα振動傑出の機能的病理的な意味は未解明であるが，この周期的律動性が，ALS 患者の脳神経系ネットワークの変化に起因し，ニューロンの興奮性や注視処理能制御にも関係することが予想された．

参考文献

1. Phukan J, Pender NP, Hardiman O. Cognitive impairment in amyotrophic lateral sclerosis. Lancet Neurol 2007; 6: 994-1003.
2. Iyer PM, Egan C, Pinto-Grau M, et al. Functional Connectivity Changes in Resting-State EEG as Potential Biomarker for Amyotrophic Lateral Sclerosis. PLoS One 2015; 10: e0128682.
3. Xie T, He Y. Mapping the Alzheimer's brain with connectomics. Front Psychiatry 2012; 2: Article77 (1-14)
4. Purdon PL, Pavone KJ, Akeju O, et al. The Ageing Brain: Age-dependent changes in the electroencephalogram during propofol and sevoflurane general anaesthesia. Br J Anaesth 2015;115 Suppl 1:i46-57.
5. 林　健太郎, 望月葉子, 中山優季, 他. 侵襲的陽圧補助換気導入後の筋萎縮性側索硬化症における意思伝達能力障害―Stage 分類の提唱と予後予測因子の検討―　臨床神経 2013; 53: 98-103
6. Raaphorst J, de Visser M, Linssen WH. The cognitive profile of amyotrophic lateral sclerosis: A meta-analysis Amyotroph Lateral Scler, 2010; 11:27-37
7. Oyanagi K, Mochizuki Y, Nakayama Y. Marked preservation of the visual and olfactory pathways in ALS patients in a totally locked-in state. Clin Neuropathol, 2015; 34: 267-74.
8. 小柳清光, 望月葉子, 中山優季,　他. Totally locked-in state 患者の脳と脊髄における障害部位と保全部位. 臨床神経　2013; 53: 1399-1401.
9. Blain-Moraes S, Mashour GA, Lee,H. Altered cortical communication in amyotrophic lateral sclerosis. Neurosci Lett, 2013; 543: 172-6.

ハミルトンの最小作用の原理による動脈の血行動態

横山博俊

はじめに

古典物理学は物質と場を対象とする．動脈系の流体力学では，考察の対象は流体粒子 (物質) と血管壁が作り出す空間 (場) である．動脈系において終始一貫しているのは，大動脈弁から駆出された血液による壁のポテンシャルエネルギーと流体粒子の運動エネルギーである．動脈系を決定する基本原理はエネルギー原理である．エネルギーが一塊になって末梢側へ伝搬することは，動脈圧波動が壁の非線形性に由来する非線形波動であることによる．大動脈弁から駆出された血液が最初の壁の空間変動を形成するが，その後，圧力エネルギーの作り出した空間変動が流体粒子を運動させており，流体粒子の運動は血管壁の空間変動よって生じる 2 次的な結果である．したがって，流体粒子の運動を調べるためには，血管壁の空間変動に着目しなければならない．エネルギー原理であるハミルトンの最小作用の原理を用いることによって，動脈内の全流体粒子の運動の軌跡を算出することが可能になる．動脈系のトーラスモデルによって，動脈壁の運動，および流体粒子の運動の算出を行ったので，報告する．

方　法

動脈系を模倣するトーラスは，トーラスの 9 時の位置を大動脈弁とし，その部位を起点として圧力波動が出発する．また，動脈系の円柱モデルも作成し，同様の計算を行った．プログラムを作成したコンピュータ環境は Linux のディストリビューションの一つである ubuntu15.10 上において，QtCreater3.5.0 にグラフィックライブラリである OpenGL を組み込んで，C++によっておこなった．大動脈から出発した圧力波動は，大動脈弁から大動脈をみて時計方向の螺旋状回旋を行う設定とした．

結　果

内部の流体粒子は動脈内腔の螺旋状回旋に合わせて，螺旋状の回旋流となった．(図 1，図 2，図 3，図 4，図 5，図 6) また，円柱状の動脈モデルにおいても同様の結果であった．(図 7) また，流体粒子は動脈壁の運動と同期して運動を行った．(図 8，図 9)

考　察

心臓は重さが 250〜300 g の非常に小さな臓器である．このような小さな臓器であるにも関わらず，1 分間に約 60 回〜80 回，休みなく拍出を行っている．従って，非常に効率の良い仕組みを持っていることが必要である．

動脈系の血行動態が物理学的に解析困難である理由は，拍動にある．基本的に物理学では質点として，質量は持つが大きさのないものを対象とする．流体力学では，流体粒子群を対象としなければならない．対象の数が非常に多いため，計算は困難になると思われる．ここでの流体粒子は水 1 分子を指すのではなく，血液のある程度大きな集団を意味する．数学的に 1 つの塊として扱っても計算的には問題がない程度に充分に小さく，かつその中に多くの分子を含む流体要素の 1 集合である．通常の流体力学の計算では，血管壁のような弾性管を扱わない．弾性管に心臓が間欠的に血流を押し込む現象は，工学的に類似した対象を見つけることができない．動脈系を構成する壁運動，流体粒子の運動および間欠的拍出について検討しなければならない．

金沢医療センター 麻酔科

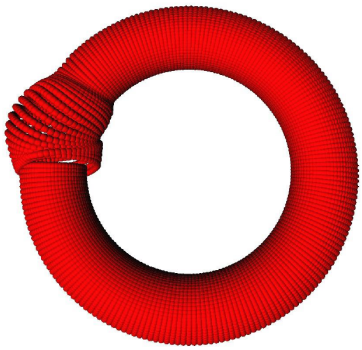


図 1

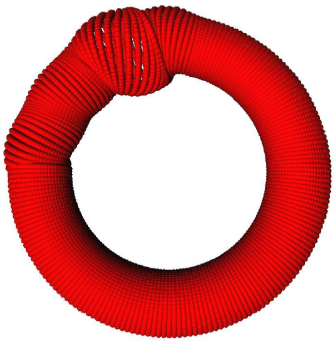


図 2

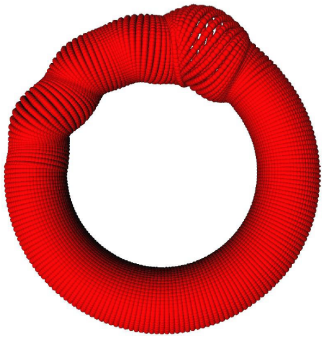


図 3

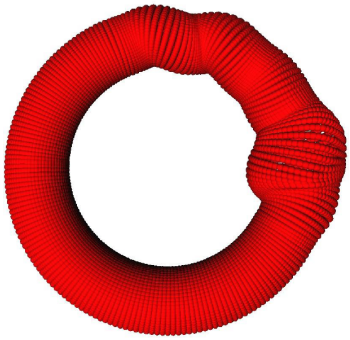


図 4

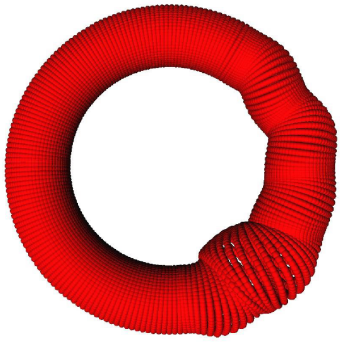


図 5

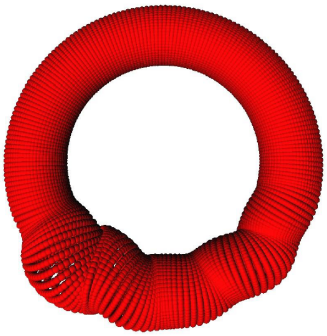


図 6

トーラスモデルにおける血管壁の運動

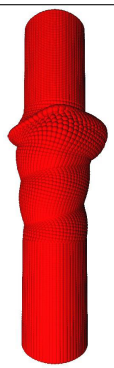


図 7

円柱状の動脈系モデル

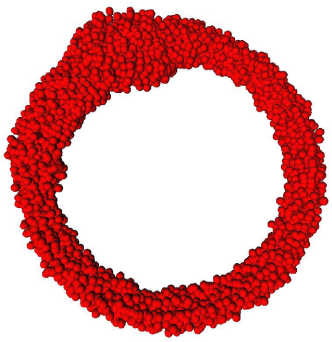


図 8

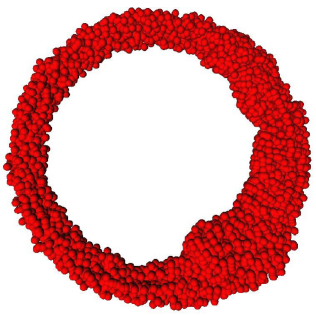


図 9

流体粒子の運動

[非線形弾性管]

動脈壁を構成する弾性管は，血管軸方向および円周方向に非線形の弾性応答を持っている．非線形の弾性応答とは，血管壁を断片的に切り出して調べた場合，引っ張り応力に対し，壁の伸展する長さが比例しない性質を意味する．バネで知られているのはフックの法則であり，これはバネを伸展させた場合に伸びた長さと伸展応力の間に比例関係があるというものである．従って，非線形の弾性応答とはフックの法則が成立しないものである．

大動脈弁から血液が拍出されて，大動脈内部に

圧力が加われば，大動脈壁には血管軸方向と円周方向に伸展応力が加わるということになる．つまり, 大動脈壁は拍動によって, 血管軸方向と円周方向に伸展する．大動脈が血管軸方向に伸展した場合, 大動脈が湾曲することになる．なぜなら, 大動脈に拍動が到達していない部分は動かないので，血管軸方向に伸展した部分は伸展している先端部分と後端部分の間に納めなければならない．大動脈弁から血液が駆出された時点で血管軸に沿って軸方向に全体が運動してしまうと，伸展の伝搬測度が無限大になってしまう．このため，大動脈は軸方向に湾曲していなければならない．軸方向の湾曲が一様であるためには，大動脈の屈曲は螺旋状屈曲が選択されなければならない．

円周方向の伸展は，自然に行われる．ただ，血管軸方向の螺旋状屈曲に注意しなければならない．血管壁が螺旋状に屈曲した場合，拍動の伝搬によって生じるためにその現象は螺旋状回旋として認められる．螺旋状回旋には 2 種類ある．大動脈弁から大動脈を見た場合，時計方向と反時計方向である．後に述べるように，大動脈の螺旋状回旋は大動脈内の流体粒子のスムースな移動に欠かせないものであるから，確実にどちらか一方が選択されなければならない．通常の場合，時計方向の回旋が選択される．この運動は，左心室壁の運動によって誘導されていると推定される．

[非線形発展方程式]

動脈壁に弾性的性質は, 伸びた長さとそれによって生じる壁応力が線形ではない関係にある．伸びた長さと応力の関係から，非線形の偏微分方程式が導かれる．この偏微分方程式は非線形発展方程式と呼ばれる．

[大動脈壁の螺旋状回旋]

大動脈壁の螺旋状回旋は左心室の運動と連携関係にある．心臓には線維性心臓骨格という特異な構造が存在し, 心筋は全てここに起始停止がある．線維性心臓骨格は強い輪状結合組織線維によって 4 弁を取り囲んでおり，心臓の中心にあって支持機能をもっており，弁口を強く締めるように取り囲み，その拡張を防いでいる．刺激伝導系のヒス束のみが線維性心臓骨格を貫いている．線維性心臓骨格は大動脈にぶら下がっている．心筋はすべて線維性心臓骨格に連結されているので，左心室は心臓のなかで最も大きな心筋を持つため，左心室心筋が心臓骨格の運動に強い影響をもつ．左心室の心筋は 2 重構造になっており，心内膜側と心外膜側に分けられる．向きの異なる 2 重の螺旋構造を持っており，心尖部から大動脈弁に向かってみると，左心室は心内膜側は時計方向の螺旋状配列であり，心外膜側は反時計方向の配列である．

左心室では心外膜側の螺旋状配列する心筋が 60 %を占めており，線維性心臓骨格にもっとも強い影響を及ぼすのは心外膜側心筋であると考えられる．心外膜側の心筋が収縮する際には心臓骨格に付着した部分と心尖部を結ぶ心筋が収縮するために, 心尖部から大動脈弁をみる方向で, 心臓骨格は時計方向に小さく回旋運動を行うと考えられる．この線維性心臓骨格の回旋運動は大動脈の螺旋状回旋が時計方向か，あるいは反時計方向かの決定因子であると推定される．

[弾性管を伝搬する非線形波動]

大動脈壁は非線形の弾性を持つと考えられるため，非線形格子 (非線形バネ) から構成されると考えることができる．非線形格子にはいろいろな関数が置けると考えられるが，ここでは以下の関数を置くことにする．形式は数値解析のために選択した．

$$\Phi(\mathbf{r_n}) = \frac{1}{2}k\left\{{\mathbf{r_n}}^2 + \frac{2}{3}\alpha{\mathbf{r_n}}^3\right\}$$

$\mathbf{r_n}$ は非線形格子の伸びた長さであり，$\Phi(\mathbf{r_n})$ はその結果, 非線形格子に生じた応力である．上記の関係では，非線形格子の伸展した長さと応力には非線形関係がある．

この非線形格子は数珠状に連なっており，数値解析的に計算することが可能である．前後の非線形格子の関係から，非線形微差分方程式を導出する．これを連続体近似によって，非線形偏微分方

程式に変更する．これに差分式を導入して，数値解析をおこなう．初期値として，大動脈基部で得られた波形を適当なデジタルデータとして入力した．

[大動脈基部に発生する秤動運動]

大動脈は血管軸方向に伸展しなければならないが，そのためには伸展は始点と終点の間に留めなければならない．このために，螺旋状回旋が選択される．螺旋状回旋ならば，軸方向に伸展した部分を始点と終点の間に収納することが可能であり，かつ幾何学的に変形が一様であるためである．しかし，螺旋状回旋には時計方向と半時計方向の 2 種類がある．動脈血流が安定したものであるためには，螺旋状回旋は時計回りなのか，あるいは反時計回りなのかが，常に確実にどちらか一方が選択されていなければならない．このために，線維性心臓骨格の回旋運動が，大動脈弁基部の秤動運動となって大動脈の螺旋状回旋の方向を決定していると推定される．

[ハミルトンの最小作用の原理]

ハミルトンの最小作用の原理はエネルギー原理である．この原理は系全体を大域的にみて，物質が運動する場合は可能な限り運動エネルギーを消費しない経路を選択するという概念である．この原理では始点と終点から物質がどのような運動経路を取るのかを決定する．始点と終点が予め決定されていなければならないため，未来の結果から途中の経路を算出しなければならないという点で，ニュートンの運動方程式より劣っている．しかし，動脈系の流体粒子の運動経路をニュートンの運動方程式で算出することはできない．なぜなら，系に含まれる流体粒子の数が膨大であるため，その一つ一つに運動方程式をたてて解くということは不可能であるからである．ラグランジュの解析力学では動脈系の流体粒子の運動を求める場合は，動脈腔に含まれる全流体粒子が同時に計算対象であり，これらの流体粒子は動脈腔の空間的変動とハミルトンの最小作用の原理に従うために，動脈系の全流体粒子の始点から，途中の運動経路および終点を一意的に算出することが可能になっている．従って，全流体粒子の解が初期設定から算出することが可能になる．

多数の流体粒子から構成される系では，系の持つ運動エネルギーは運動している流体粒子のもつ運動エネルギーである．血管壁の運動によって，空間変動が生じると，それまでは運動していなかった流体粒子が運動を開始し，それと同数の流体粒子が運動を停止する．これは全体の一部である．空間変動に従って，流体粒子は運動するが，その結果，運動している全体粒子の持っている運動エネルギーの合計は，空間変動前と比較するとほとんど変化していないか，もしくは非常に微小な減少を認めるだけである．運動の過程で新たにエネルギーが加えられないため，流体粒子の運動後に全運動エネルギーが増加しない．従って，系の運動エネルギーができるだけ減少しない経路が求める解である．

ラグラジアンとは系の運動エネルギーからポテンシャルエネルギーを引いたものである．始点と終点を固定して，積分したものを作用積分という．始点の時刻を t0，終点の時刻を t1 とすると，t0 から t1 にかけてラグラジアンを積分したものが，作用積分となる．ハミルトンの最小作用の原理では，物質の選択する運動経路は，作用積分が極大値，もしくは停留値をとる．この場合，始点から終点を結ぶ最も短い経路が必ずしも解にはならない．物質の運動エネルギーとは，動脈系の場合，壁の運動エネルギーと流体粒子の運動エネルギーを指し，ポテンシャルエネルギーは壁のポテンシャルエネルギーと流体粒子のポテンシャルエネルギーを指している．流体粒子のポテンシャルエネルギーとは圧縮によって生じるエネルギーである．血液を含めた液体の場合，圧縮性は存在するが，それは非常に小さい．血管腔内を圧力波動が伝搬するためには，流体の圧縮性が理論的に必要だが，実際には液体の圧縮性は非常に小さいため，それは無視することができる．従って，作用積分

の中には流体粒子のポテンシャルエネルギーは省略可能である．また，壁の運動は非線形波動である．伝搬の過程で，エネルギーが摩擦等によって消耗しないと考えれば，壁の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーは変化しない．従って作用積分のなかで重要なものは，流体粒子の運動エネルギーに他ならない．

ハミルトンの最小作用の原理は運動エネルギーをできるだけ保存しつつ，物質は運動するという原則である．動脈系は圧力波動によって，動脈腔内の解剖学的空間が変形する．すなわち，螺旋状回旋によって動脈内の空間は螺旋状に回旋することになる．内部の流体粒子は，最も運動エネルギーを消費しない経路を選択するから，隣り合う流体粒子同士が交差したり，衝突することがないスムースな経路が選択される．位相幾何学の写像を流体粒子の運動に例えるならば，イソトープな写像が流体粒子の運動に相当する．1 個の流体粒子に限局すれば，始点のみから終点を決定し運動経路を算出することは不可能であるように思われる．流体粒子全体を考察することによってのみ，始点のみから運動経路，終点を算出することができるのである．これは群衆が周りの人と衝突することなく移動するためには，整然とした行進が唯一の解となることと同等である．流体粒子が周りの流体粒子と衝突したり，追い越したりすることは明らかに運動エネルギーの浪費である．ハミルトンの最小作用の原理によって運動エネルギーを浪費する経路は選択されない．

ラグランジュ形式の力学でハミルトンの最小作用の原理を適用する場合，始点と終点から途中の経路を求めることが原則である．これは，始点から始まる解が 1 通りでないため，多くの解が考えられるからである．動脈系の場合では始点を選択すれば，一意的に解は決定される．すなわち，1 つの始点には 1 つの終点，および 1 つの運動経路が対応する．このことは運動系はラグランジュ形式の力学からハミルトン形式の力学への移行が可能であることを意味する．相空間，これは流体粒子の座標と，それぞれの運動量を座標値としてもつ空間である．配位空間における 3 次元空間の運動は，相空間は 6 次元空間の運動へと変換される．

ハミルトン形式の力学では，リュウヴィルの定理が成立する．動脈系では，運動する流体粒子の空間は，時間とともに形を変えていくが，相空間における体積は一定に保たれる．運動する粒子の数も一定である．この結果，動脈系の血流はハミルトン形式の力学では，非常に性質の良いものになっている．血流は乱流にはならず，整然とした形態を維持すると推定される．ハミルトン形式の力学では，流体粒子は変化の乏しい運動を行うと考えられる．

[多変数解析関数論の流体粒子への応用]

流体粒子の運動経路は関数に置き換えることができる．その場合，流体粒子には座標値と圧力値が伴っている．圧力値は座標に付随しており，座標ごとに圧力値を加えた 4 次元で表示することも可能だが，この場合だけ複素数の表現を用いて，座標値を実部，圧力部を虚部とすると，3 次元の複素数表示が可能になる．これは流体粒子の多変数関数表示である．ここで，証明したいのは流体粒子の運動の一意性である．流体粒子の運動曲線は解析関数となり，この運動曲線は滑らかであり，途中で途切れ途切れになることはないので，連続かつ微分可能である．したがって，関数は正則関数である．実数部を (x,y,z) とおき，虚数部は圧力 p をおく．この場合，虚数表示すると (x+pi,y+pi,z+pi) である．実数部の運動曲線 (x,y,z) が描く曲線が連続かつ微分可能であり，虚数部 p の圧力の分布曲線が連続かつ微分可能であるから，血流を複素数表示をすると流体粒子と圧力の分布を一体化した関数は正則関数であるといえる．

正則関数では，ある領域 D における関数 f(x) が関数 g(x) と領域 D において一つの近傍において一致すれば，f(x) と g(x) は領域 D において一致する．すなわち，f(x) と g(x) は同一の関数である．また，領域 D1 と領域 D2 が存在し，領域 D1 には f(x) が存在し，領域 D2 には g(x) が存在

するとする．D1 ∩ D2 の領域において空集合ではないとし，f(x) と g(x) が D1 ∩ D2 において一致するならば，f(x) と g(x) は解析接続であるとされる．いくつかの領域があっても正則関数が接続領域で一致するならば，それらの関数は同一のものであると考えることができる．すなわち，f(x) と g(x) は同一の関数であると考えることが可能になる．

流体粒子の運動を正則関数に例えることができる条件で，連続する領域において，その接続領域の近傍で一致するならば，これは逆に流体粒子の運動経路は一意的に決定できるということを意味する．流体粒子の運動が正則関数であるというためには，流体粒子の運動がハミルトンの最小作用の原理を満たすことが要求される．

正則関数の解を部分的に切り出せば，連続的な「層」に分解することができる．ある特定の部位から出発した初期値群からの関数は連続的な層を形成する．粒子の運動経路は空間を形成する壁運動の関数の層に誘導され，内部にも連続的な層を形成する．ハミルトンの最小作用の原理を満たすためには，流体粒子の集合は連続的な層に納まらなければならない．前の層の流体粒子を追い越したり，後ろの層へと入れ替わったりする交叉運動や逆走は存在してはならない．従って，関数の解の集合が形成する連続的な層に従って流体粒子は運動する．この結果，層の幾何学的な構成から，流体粒子の運動経路を精密に算出可能であり，それは一意的に決定されると考えられる．すなわち，解は 1 つ存在し，その 1 つのみである．

ここにおける「層」は数学的な「層」(sheaf) と同じであると見なすことが可能である．動脈系を微分可能多様体とみるなら，層は圧力のある一定の範囲毎に地層のように分割することが可能である．圧力のある範囲の層を Φ と置くと，Φ は動脈系に移す局所同相写像を定義することができる．流体粒子の運動は，3 次正方行列に置くことができるため，逆行列を求めることもできる．

[流体粒子の運動経路]

流体粒子は最初に大動脈弁から駆出された場合の血管壁の空間変動は血液自身が作り出すが，その後の血管壁の運動は血管壁の性質によって決定される．血管壁の空間変動によって流体粒子が移動するわけだから，流体粒子の運動経路は精密に算出できることになる．時刻 t0 における動脈系を多様体 M0，時刻 t1 におけるものを多様体 M1 とすれば，流体粒子の移動は多様体M 0 から多様体 M1 への写像と考えることができる．流体粒子の運動経路は粒子間の摩擦が限りなく少なくなければならないから，多様体 M0，M1 を結ぶイソトープな写像であると考えられる．イソトープな写像では，どのような中間点も 2 重点を含まない．また，多様体M 0 から多様体M 1 への写像は空間移動を示すアフィン変換となる．

動脈系の流体粒子の運動経路を探索する場合，運動エネルギーを失わない経路を取る．時刻 t0 の動脈系を M0，時刻 t1 の動脈系を M1 とおくと，流体粒子の運動経路は M0 と M1 を結ぶ等エネルギー面の測地線を移動することになる．この場合，等エネルギー面の測地線は必ずしも面の最短距離とはならない．これは系全体のエネルギー損失を最小限にする経路であるから，最小距離を選択されるわけではない．この運動は空間変動によって流体粒子が引き込まれているため，流体粒子の運動距離が長くなることが運動エネルギーの損失にはつながらないためである．粒子は集団的に移動するため整然とした集団的運動が重要であり，空間の動きに合わせた螺旋状回旋を行うと考えられる．

この写像は行列で表現可能だから単位元を持ち，かつ可換であるために群を形成する．この写像は多様体間の写像であり，かつ微分可能な解析関数となる．写像自身も多様体と考えることができるため，これらをリー群と見なすことが可能である．リー群にはリー環 (リー代数) が対応しており，動脈系の流体粒子の運動経路は代数的に扱うことが可能になる．動脈系における流体粒子の運

動をリー群と考えるならば，それは 3 次の正方行列であり，リー環はリー群をあらわす行列の対数化行列である．(ただし，行列は必ず対数を持つわけではなく，複数の対数を持つこともある．) 同時に，リー環はリー群が形成する多様体の接ベクトル空間であり，リー環を指数写像化するとリー群に復帰する．リー群は項に解析関数をふくむ行列であるから，幾何学的と同時に解析的な扱いが可能である．リー群とリー環は相補的な存在であり，リー環によってリー群，つまり流体粒子の運動の研究が可能になる．

[エネルギー原理]

物質の運動を対象とする物理学は，運動と場について考察する．動脈系においても，最も関心のある対象は流体粒子の運動経路である．しかし，動脈系において血行動態を解析する場合，大動脈弁から圧波動が発射され，実際に末梢へ血流が移動する全過程をみると，最初から最後まで一貫性を持っているのは，壁に加えられたポテンシャルエネルギーと流体粒子の運動エネルギーの合計である．

心臓から圧力波動が発射されるためには，血液の拍出が必要だが，大動脈弁から拍出された血液はしばらくで静止し，その後も運動し続けるのは，ずっと先の動脈壁と弁から離れているところに静止していた流体粒子である．動脈圧波形は伝搬の過程で付近の流体粒子を少しずつ運動させながら，末梢へ伝搬するのであって，移動する流体粒子は常に動脈圧波動が伝搬している部分の流体粒子に限られている．従って，流体粒子の運動速度は動脈圧波動の伝搬速度に比較すると遅い．

[大動脈における統計学的流れ]

大動脈の螺旋状回旋に乱れが発生し，運動エネルギーの消耗を最小にすることができなくなったとき，ハミルトンによる最小作用の原理に従う正準な流れは消滅し，統計学的な運動に移行すると推定される．流体粒子が最も運動エネルギーの消耗を最も最小限にする経路を取れない場合，壁のポテンシャルエネルギーと流体粒子の運動エネルギーは摩擦による熱エネルギーに変換され，末梢における血圧低下，血流速度の低下を起こすと推定される．この場合，流体粒子の運動経路の算出は不可能であり，その流れは乱流になるために流体粒子の運動経路には確率的な予測しかできない．規則正しい螺旋状回旋流が選択されなければ，動脈腔内の流体粒子の運動は統計学的な流動が選択されると推定される．

まとめ

動脈系をトーラスと考えて，拍動による変形，および流体粒子の運動の数値シミュレーションを行った．トーラスモデルの大動脈は螺旋状に変形し，ハミルトンの最小作用の原理によって，流体粒子は螺旋状に回旋運動した．螺旋状回旋には左右の 2 通りが存在するが，左心室による線維性心臓骨格の運動がどちらを選択するかを決定すると推定される．ただし，左心室の運動が大動脈壁の螺旋状回旋を決定することに関してはさらなる研究が必要である．

参考文献

1. V.I. アーノルド：古典力学の数学的方法　1980，東京，岩波書店
2. 河田敬義編：位相幾何学　1965，東京，岩波書店
3. 田村一郎：微分位相幾何学 I, II, III 1977，東京，岩波書店
4. 山本義隆，中村孔一：解析力学 I, II 1998，東京，朝倉書店
5. H. ザイフェルト，W. トレルファル：位相幾何学講義　2012，東京，丸善出版
6. スピヴァック：多変数解析学　古典理論への現代的アプローチ　1972，東京，東京図書
7. 松島与三：多様体入門　1965，東京，裳華房
8. 松本幸夫：多様体の基礎　1988，東京，東京大学出版
9. 志賀浩二：多様体論　1990，東京，岩波書店
10. 小平邦彦：複素多様体論　2015，東京，岩波書店
11. 伊勢幹夫，竹内勝：リー群論　1992，東京，岩波書店
12. ポントリャーギン：連続群論　上・下　1957，東京，岩波書店
13. 山内恭彦，杉浦光夫：連続群論入門　1960，東京，培風館

14. シュッツ：物理学における幾何学的方法　1987, 東京, 吉岡書店
15. 渡辺慎介：ソリトン物理入門　1985, 東京, 培風館
16. 川崎徹郎：曲面と多様体　2001, 東京, 朝倉書店
17. 水野芳成：連続体の解析力学　1997, 東京, 講談社出版サービスセンター
18. I.M. シンガー, J.A. ソープ：トポロジーと幾何学入門　1976, 東京, 培風館
19. M.W. ハーシュ：微分トポロジー　2012, 東京, 丸善出版
20. J.A. ソープ：微分幾何の基本概念　2006, 東京, シュプリンガー・フェアラーク
21. 村上信吾：連続群論の基礎　1973, 東京, 朝倉書店

ABSTRACT

Arterial hemodynamics by the principle of the least action of Hamilton

Hirotoshi Yokoyama

By a torus model of arterial system, I calculated the motion of artery wall and the motion of fluid particle. Blood ejected by an aortic valve forms the space change of the first wall, but the space change create the pressure energy lets a fluid particle exercise, and the exercise of fluid particle is a secondary result, thus, to produce the space change of the vascular wall afterwards. All fluid particles included in the artery cavity are targeted for a calculation at the same time, and these fluid particles can calculate an exercise course on the way and a terminal uniquely from the initial point of all fluid particles to follow the spatial change of the artery cavity and the principle of the least action of Hamilton.

The internal fluid particle became the spiral rotation style to the spiral rotation of the artery lumen. The aorta of the torus transformed it in a spiral, and, by a principle of the least action of Hamilton, the fluid particle worked on rotation in a spiral. When aortic spiral rotation is a determinative of a clock direction or the counterclockwise direction, the movement of the fibrous heart frame is estimated.

Key Word:
Arterial blood flow, Spiral laminar flow, Cardiovascular system, Least action of Hamilton, Pulsatile flow,

Kanazawa Medical Center, Division of anesthesia,1-1 Shimoishibiki, Kanazawa, Ishikawa, 920-8650, Japan

Arterial Pulse Wave Analysis 法におけるオンライン $\log_{10}$(SVV)-SVI プロットとリアルタイム回帰直線分析

佐和貞治，竹下秀祐，橋本悟*

要旨

Arterial pulse wave analysis (APWA) 法より求められた 1 回拍出量変動 (stroke volume variation, SVV) と 1 回拍出量係数 (stroke volume index, SVI) を二次元 XY プロット表示することは，肺動脈カテーテル法での Forrester 分類に相当する．Frank-Starling 心機能曲線を，左室拡張末期容量 (LVEDV) 増加に比例して一回拍出量 (stroke volume, SV) 増加量が漸減する関数モデルとして，”$SV=\log_{10}(LVEDV^{n})$, n=心陽性変力作用を示す定数 ”で近似できるとした場合，APWA 法により得られる SVV-SVI プロット上の心機能曲線は双曲線として描け，さらに $\log_{10}$(SVV)-SVI プロット上では，直線回帰として表せる．そこで今回，非侵襲性の APWA モニタである ClearSight™/EV1000 plus™(Edwards Lifesciences 社) から得られる SVV と SVI について，情報可視化言語である Processing にてオンラインで二次元 XY プロットして，リアルタイムに直線回帰分析を行った．複数の全身麻酔下での患者において計測を行った結果，高い蓋然性を持ってよい相関を示す直線回帰が得られた．$\log_{10}$(SVV) と SVI を用いた 二次元 XY プロットは，APWA 法からの情報をよりわかりやすく可視表示できることで，術中の簡便な循環動態管理の支援システムとなると考えられた．

はじめに

周術期の循環体液管理には，侵襲的な肺動脈カテーテル法に代わって，より低侵襲的な FloTrac™/Vigileo™ (Edwards Lifescience Co., USA) や ClearSight™/EV1000 Plus™(Edwards Lifescience Co.) などを用いた動脈脈波波形分析法 (APWA, arterial pulse wave analysis 法) の利用が一般的となってきた．人工呼吸管理下にある患者が対象となる APWA 法では，動脈圧波形より一回拍出量 (Stroke Volume, SV)，及び 1 回拍出係数 (SVI)，そして SV の呼吸性変動として 1 回拍出量変動 (SVV，Stroke Volume Variation) が算出される．著者らは，特に左室前負荷の指標としての SVV と心ポンプ機能としての SVI 値をそれぞれ xy 座標にプロットした 2 次元図は，肺動脈カテーテル法における肺動脈楔入圧 (PCWP，Pulmonary Arterial Capillary Pressure) と心拍出係数 (CI，Cardiac Index) を xy 座標にプロットした 2 次元図である Forrester 分類に相当するものとして，循環体液管理のガイダンスと視覚的理解に繋がるものとして有用である可能性を報告した [1,2]．一方で，前負荷の減少

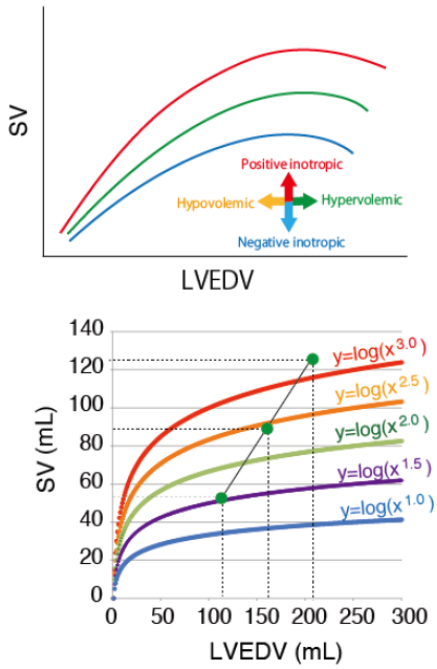


図 1 フランク・スターリングの心機能曲線 (上図) と関数 $y=\log(x^{n})$ での近似 (下図)

上図における緑の●は、報告された 40 歳代健常人の正常値範囲を示す [3]．

京都府立医科大学麻酔科学教室
*京都府立医科大学附属病院集中治療部

とともに SVV は増加することから PCWP とは逆相関する指標であるために， SVV-SVI xy-plots では，Forrester 分類とは異なる捉え方を理解する必要がある．今回，我々は SVV-SVI xy-plots について，数理解析的理解に加えて，ClearSight™/EV1000 plus™ による実測値の測定を当てはめて，$\log_{10}$(SVV)-SVI plots による表示がより簡便で理解しやすいことを見出したので以下に詳細を報告する．

数理解析的理解

左室前負荷の指標としての左室拡張末期容量 (LVEDV) と，左室一回拍出量 (SV) の関係を描くフランク・スターリング心機能曲線において，前負荷容量が過剰になって機能曲線が下方向に傾く部分を無視した場合，その曲線はログ関数 $y=\log_{10}(x^n)$ (x は LEVED, y は SV, n は心変力作用に相関する定数) で近似できる (図 1)．

その場合，陽圧式人工呼吸管理中の状況において呼吸サイクルにおける LVEDV の変動が，心機能曲線上で大きく変化しないと仮定すれば，SVV と SVI の関係は算術的に双曲線として概算できる (図 2)．

SVV は，フランク・スターリング曲線上では，呼吸サイクルにおける LVEDV 変動量に対する左室 1 回拍出量の変動% (Δ SV/SV) と捉えられ，1 回拍出量の差分成分を数式分子に含む．従って近似関数 $y=\log_{10}(x^n)$ を微分すれば，$dy/dx=d(\log x)/dx=1/x$ となり，双曲線で描けることが解る (図 3 上)．この場合，x 軸を対数軸に変換すれば，$\log_{10}$ (SVV) と CO(もしくは SV) の関係は，$\log_{10}(dy/dx)=\log(1/x)=-\log_{10}x$ と直線関係で描ける (図 3 下)．

そこで，SVV-SVI plots(図 2) の x 軸を対数軸に変換して，$\log_{10}$ (SVV)-SVI plots として表示した場合，$y=\log_{10}(x^n)$ で近似した個々のフランク・スターリング曲線由来の SVV と SVI の相関関係は単純に直線関係として描ける (図 4)．この場合，直線の傾きは心変力作用に相当し，y 切片は

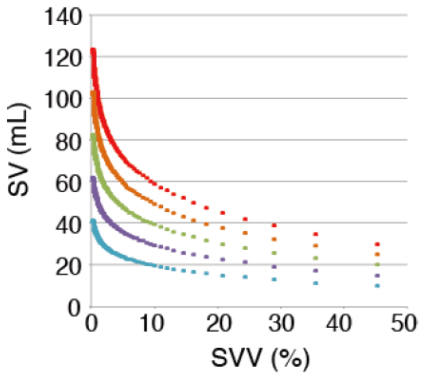


図 2 SVV-SVI Plots

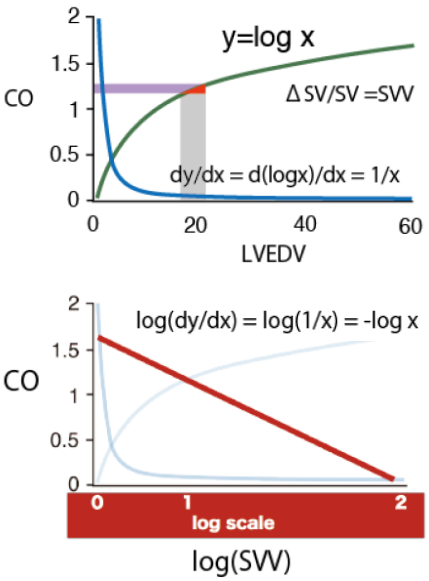


図 3 フランク・スターリング曲線と SVV の関係 (上図) と $\log_{10}$(SVV) と新拍出量の関係 (下図).

SVV=1 の場合の推定 SV 値となる．この理論が正しいかどうかは，ここに達するまでの幾つかの仮定のなかで，特に心機能曲線を $y=\log_{10}(x^n)$ で近似したことが適切であったかどうかが影響する．

Processing プログラミングでのポイント

これまでの数理的な近似がどれだけ実臨床に適合するかどうかを検証するために，APWA 法による SVV と SVI 測定の実測値によるプロットが，実際に $\log_{10}$(SVV)-SVI plots で直線回帰されるか

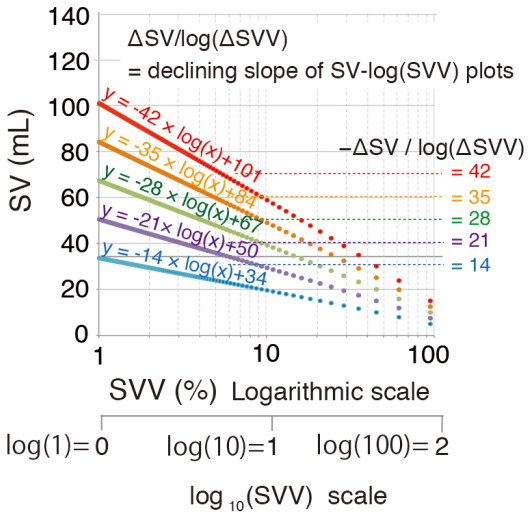


図 4 $\mathbf{Log_{10}}$(SVV)-SVI plots

どうかを調べることとした．そこで，情報視覚化言語 Processing[4–6] にて作成した FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System (Edwards Lifesciences Co., USA) からの情報をオンラインでパーソナルコンピュータに取得して，SVV-SVI plots として表示させる GDT 2D-Visualizer を改良した [1,7]．SVV-SVI xy 図において，x 軸にプロットされる SVV 値を $\log_{10}$ (SVV) 値に変換した．さらにオンラインで取得した複数の測定データ点から，リアルタイムに一次直線回帰を算出し，$\log_{10}$ (SVV)-SVI グラフ上に直線表示できるようにした．そのために，Processing の関数 linear_regression() を新たに作成して，保存された測定ポイントから相関係数 coefficeint，傾き slope，y 切片 y_intercept をリアルタイムに算定し，グラフ上に plots と重ねて表示できるようにした (図 5)．

実測からの分析

Finger Cuff を用いた血圧測定により上腕動脈波形を再構築する新しい非侵襲的 APWA 法モニタ ClearSight^{TM}/EV1000 plus^{TM}(Edwards Lifesciences Co.) と改良された GDT 2D Visualizer を用いた．循環体液管理を行った複数の症例にお

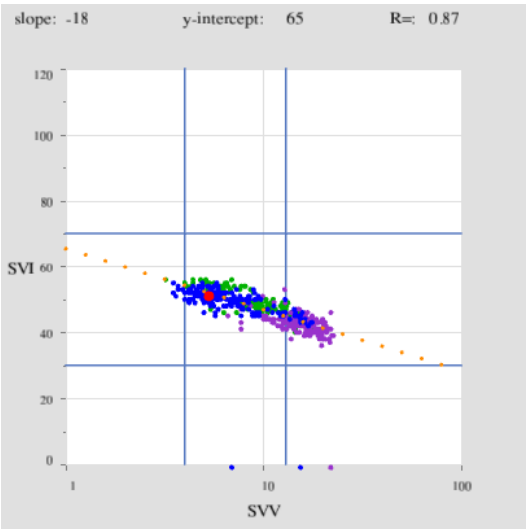


図 5 $\mathbf{Log_{10}}$(SVV)-SVI プロットと一次回帰分析による回帰直線表示

いて，実際に $\log_{10}$ (SVV)-SVI plots と直線回帰分析を組み込んだ新しい GDT 2D-Visualizer (ver. 2) を適応した．ここで問題となるのは，幾つのストアされたデータポイントを用いて回帰分析を行うかである．少ないデータポイントで行えば，理論的には測定時点前後数分の心機能直線を表示できることになるが，実際には前負荷量 SVV がある程度の幅で変動して始めて信頼できる相関係数を持った回帰分析が可能となることから，ある程度の時間幅でサンプリングされた変動幅を持つ相当数のデータポイントから回帰分析を行うことが望ましいと考えられた．

Vigileo^{TM} モニタでは，20 秒毎に SVV データの更新が行われるが，Vigileo^{TM} のシリアル通信から 2 秒毎にデータが送信されるため，1 分間では 30 データポイントが得られる (従って実際には 1 分間 3 データポイント相当となる)．そこで適応した 1 症例 (肝細胞癌，腹腔鏡肝部分切除，手術時間 9:24, 輸液: 3,600mL, 輸血: 0mL, 尿量: 860mL, 出血: 180mL) において，始めの 3 時間の計算について，サンプリング間隔を 180 分，60 分，30 分，10 分，5 分と変動させて，回帰直線の傾き (slope) と相関係数 (coefficient) を算出して

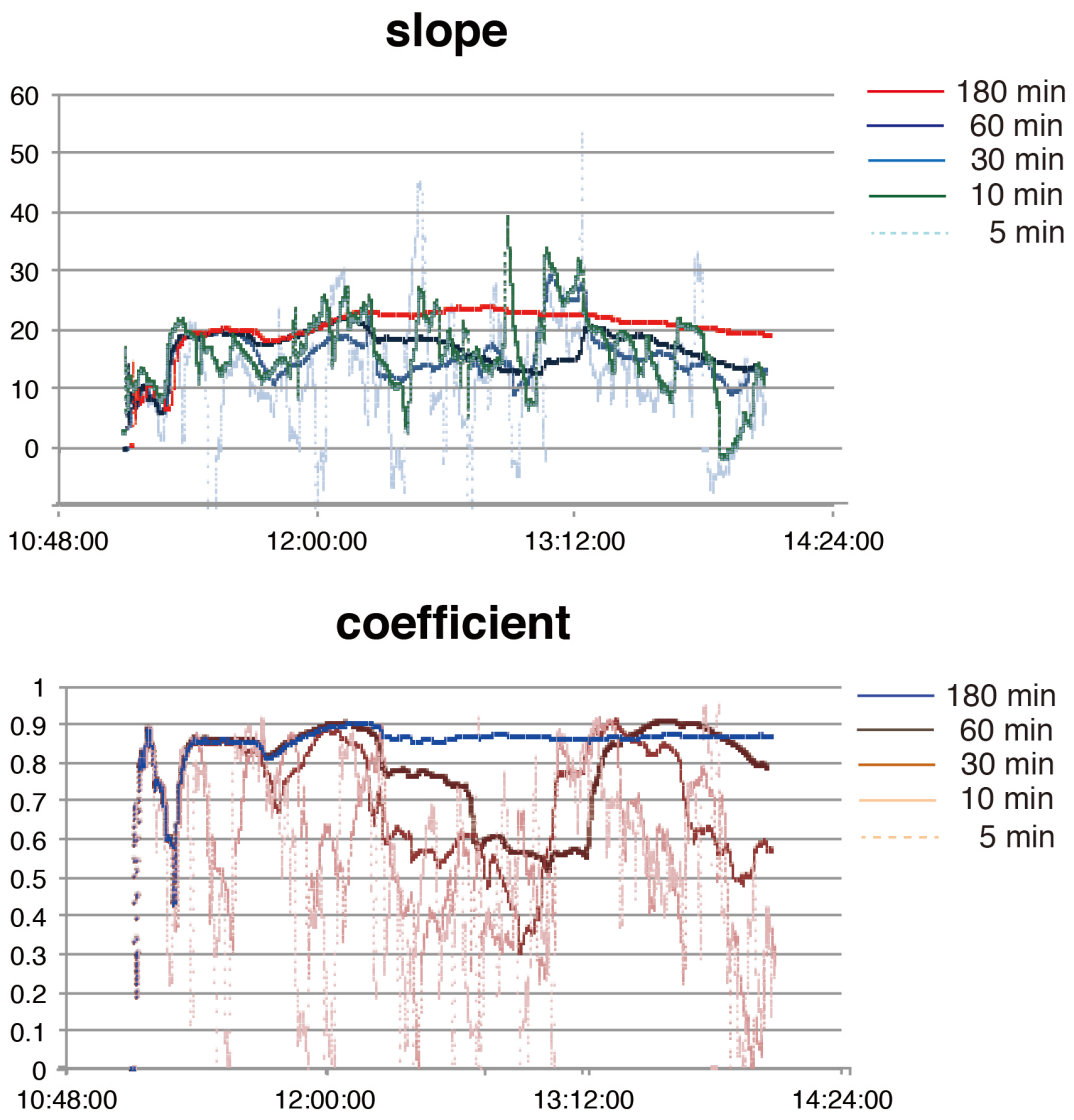


図 6 Log_{10}(SVV)-SVI plots における一次回帰分析と解析のためのデータサンプリング間隔の関係
180 分，60 分，30 分，10 分，5 分と変動させて，回帰直線の傾き (slope) と相関係数 (coefficient) を算出してグラフで比較表示した．

グラフ表示で比較表示した (図 6)．その結果，相関係数との関係などから，30〜60 分程度の間隔で計算を行うことが望ましいと考えられた．解析結果からは，直線の傾きが低下する場合には相関係数も一時的に低下する傾向にあり，心変力作用による心機能曲線の変動が起こった場合には，直線の傾きが変動し出して，相関係数の低下が発生することが推測された．

そこで，60 分毎 (1800 データポイント) のサンプリングにて，一時間毎のデータを解析してグラフ表示して，180 分 (5400 ポイント) での解析と比較してみた (図 7)．その結果，60 分毎の解析では，傾きは-12, -14, -18，相関係数は各々 0.9, 0.56, 0.87 と変動し，一方，180 分での解析では傾きは-13, 相関係数は 0.79 と算出された．現時点では傾きの変動が，どのような循環動態の変動からもたらされたのかについては今後のより詳細な分析が必要であるが，少なくとも何らかの心機

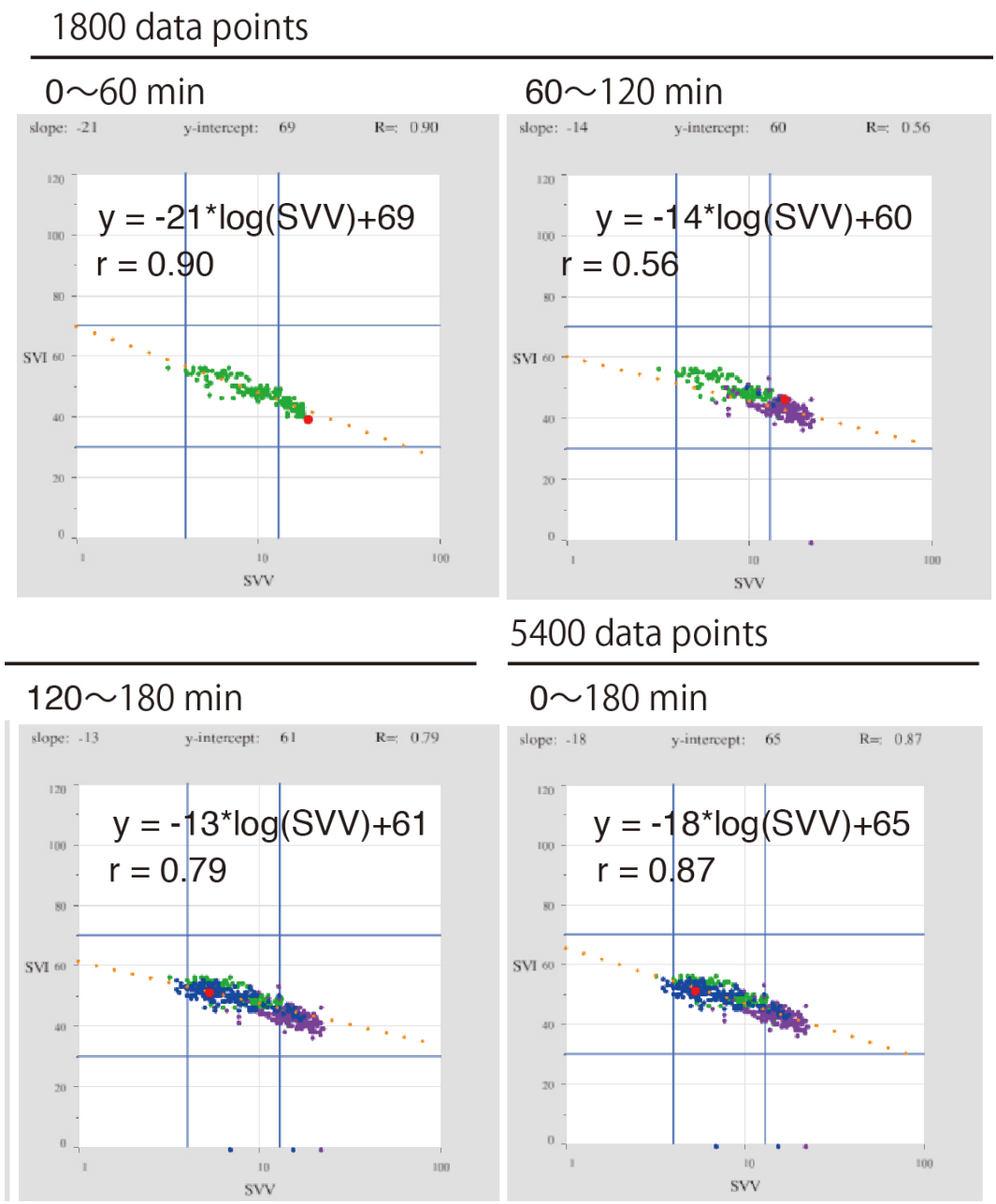


図 7 $\mathbf{Log_{10}}$(SVV)-SVI plot 解析

60 分毎 (1800 データポイント) のサンプリングにて，一時間毎のデータを解析してグラフ表示 (上段、中二段部分の図) して，180 分 (5400 ポイント) での解析 (最下段図) と比較した.

能の変動がこの 180 分間において発生し，その変化が log(SVV)-SVI 解析に反映されたものと考えられた.

まとめ

今回，APWA 法における SVV-SVI plot 解析を考察した．フランク・スターリング心機能曲線 の

数理的解析から，SVV-SVI 関係は，$\log_{10}$ (SVV)-SVI plot 表示により，一次直線回帰できることが推察された．実際の臨床において APWA 法モニタである ClearSight^{TM}/EV1000 plus^{TM}(Edwards Lifesciences Co.) を用いて，循環体液管理を行った複数の症例において検証を行い，直線回帰にて良い相関が得られることが確認できた．

参考文献

1. 佐和貞治, 橋本悟. 情報視覚化言語 Processing を用いたビジレオ ^{TM} モニターのリアルタイム・二次元データ・プロッティング. 麻酔・集中治療とテクノロジー 2016, 編集：白神豪太郎, 田中義文. 日本麻酔集中治療テクノロジー学会. 高松. In press.
2. Sawa T, Kinoshita M, Kainuma A, Akiyama K, Naito Y, Kato H, Amaya F, Shigemi K. Effective evaluation of arterial pulse waveform analysis by two-dimensional stroke volume variation-stroke volume index plots. J Clin Monit Comput. 2016 Aug 4. [Epub ahead of print] PMID: 27492429 doi: 10.1007/s10877-016-9916-7
3. Cain PA, Ahl R, Hedstrom E, Ugander M, Allansdotter-Johnsson A, Friberg P, Arheden H. Age and gender specific normal values of left ventricular mass, volume and function for gradient echo magnetic resonance imaging: a cross sectional study. BMC Med Imaging 9:2, 2009. PMID: 19159437 PMCID: PMC2657902 doi: 10.1186/1471-2342-9-2
4. Casey Reas, Ben Fry. Processing. A Programming Handbook for Visual Designers and Artists. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, USA, 2014. ISBN: 978-0-262-02828-8.
5. Ben Fry. ビジュアライジング・データ. Processing による情報視覚化手法. 増井俊之監訳, 加藤慶彦訳. オーライリー・ジャパン, 東京, 2008. ISBN: 978-4-87311-378-4.
6. 赤間世紀. Processing GUI プログラミング. 工学社, 東京, 2008. ISBN: 978-4-7775-9.
7. 竹下秀祐, 佐和貞治, 橋本悟. ClearSight^{TM} System^{TM} によるオンライン SVV-SVI プロット解析. 麻酔・集中治療とテクノロジー 2017, 編集：岩瀬良範, 田中義文. 日本麻酔集中治療テクノロジー学会. 日本麻酔集中治療テクノロジー学会. 東京. In press.

ABSTRACT

On-line $\log_{10}$[SVV]-SVI plots and a real-time linear regression analysis in the arterial plus^{TM}e wave method.
–The on-line SVV-SVI plot analysis using ClearSight^{TM} System?–

Teiji Sawa[1], Shusuke Takeshita[1], Satoru Hashimoto[2]

We investigated stroke volume variation (SVV)-stroke volume index (SVI) plots in the arterial pulse wave analysis. From the arithmetical analysis of Frank-Starling Curves, the relationship between SVV and SVI can be described as a primary linear regression in $\log_{10}$ (SVV)-SVI plots. We performed a clinical study for the $\log_{10}$(SVV)-SVI plot theory by using a non-invasive APWA monitor (ClearSight^{TM}/EV1000 plus^{TM}, Edwards Lifesciences Co., USA). The results in this study supported the validity of the linear regression analysis in $\log_{10}$ (SVV)-SVI plots.

1) Department of Anesthesiology
2) Division of Critical Care Medicine
Kyoto Prefectural University of Medicine

ClearSight System^{TM} によるオンライン SVV–SVI プロット解析

竹下秀祐，佐和貞治，橋本悟*

要旨

ClearSight^{TM}/EV1000^{TM} System (Edwards Lifesciences 社) は，指に装着する Finger Cuff を介してボリュームクランプ法およびフィジオキャル法により得られる指動脈血圧をもとに上腕動脈圧を再構築して，連続的に測定連続的に血圧，心拍出量 (CO)，1 回拍出量 (SV)，1 回拍出量変化 (SVV) などのパラメータを測定できる動脈ラインなどの留置カテーテル不要な非侵襲の血行動態モニタリングシステムである．我々は，情報視覚化言語である Processing を用いて，FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System (Edwards Lifesciences 社) から得られた arterial pulse wave method (APWA) 法での SVV および 1 回拍出係数 (SVI) 値をオンラインでリアルタイムに二次元 XY プロットするアプリケーションソフトウェア GDT 2D-Visualizer をパーソナルコンピュータ上に構築し，麻酔管理中の循環・輸液管理の解析支援システムとして利用することを報告してきた．今回，このシステムをさらに拡張し，ClearSight^{TM}/EV1000^{TM} System からのオンライン・データ解析へ対応できるようにした．また FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System との同時サンプリングも可能として，両者の相関関係をリアルタイムに解析できるようにした．特に ClearSight^{TM}/EV1000^{TM} System による SVV と SVI を用いた XY 二次元プロット表示モニタである GDT 2D-Visualizer は，APWA 法からの情報をよりわかりやすく可視表示することで，より非侵襲的に術中の簡便な循環動態管理の支援システムとなると考えられた．

はじめに

ClearSight^{TM} System (Edwards Lifesciences Co. USA) は，指に装着する Finger Cuff を介してボリュームクランプ法およびフィジオキャル法により得られる指動脈血圧をもとに，接続する EV1000^{TM} クリティカルケアモニタ (Edwards Lifesciences Co.) により上腕動脈圧を再構築して，連続的に測定連続的に血圧，心拍出量 (CO)，1 回拍出量 (SV)，1 回拍出量変化 (SVV) などのパラメータを測定できる動脈ラインなどの留置カテーテル不要な非侵襲の血行動態モニタリングシステムである．

Nexfin System Technology 社が実用化した指動脈波形から心拍出量を測定する Nexfin CO-Trek を Edwards Lifesciences 社が引き継ぎいだものである．測定技術には，① ボリュームクランプ法による指動脈圧測定，② フィジオキャル法による自動キャリブレーション，③ 指動脈血圧波形より上腕動脈血圧波形を再構築，④ 血圧波形から心拍出量を算出，という 4 つのプロセスを得る．

④ に関しては，Edwards Lifesciences 社がすでに同社の低侵襲心拍出量モニタの FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System，もしくは FloTrac^{TM}/EV1000^{TM} System にて確立してきた技術であるが，今回，Nexfin CO-Trek を取り込んで，専用測定モニタ EV1000 Plus^{TM} として市販に至った．

麻酔や集中治療における循環動態の管理において，心拍出量 (CO, Cardiac Output)，一回拍出量係数 (SVI, Stroke Volume Index)，一回拍出量変動 (SVV, Stroke Volume Variation) のみならず収縮期・拡張期血圧を測定することから，FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System と同等の情報をより低侵襲的に提供するシステムであり，目標指向型輸液管理 (GDFT, Goal-Directed Fluid Therapy) 等への適応が期待される．

そこで今回，我々は 2015 年の麻酔・集中治療テクノロジー学会で報告した FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System 用に開発した動脈脈波分析法 (APWA, Arterial Pulse Wave Analysis) により測定される SVV と SVI のリアルタイム二次元 XY プロット化を行った情報可視化システム GDT 2D-

京都府立医科大学麻酔科学教室
*京都府立医科大学附属病院集中治療部

Visualizer[1] を ClearSight™ System に対応させた．FloTrac™/Vigileo™ System との比較において，ClearSight™/EV1000™ Plus System の測定精度等を含めて以下に報告する．

方　法

FloTrac™/Vigileo™ System で測定された循環動態指標を取り込むために，情報視覚化言語 Processing を用いて開発したソフトウェア GDT 2D-Visualizer のプログラミングを改良し，2 チャンネルのシリアル通信を通じて，FloTrac™/Vigileo™ System，並びに ClearSight™/EV1000 Plus™ System からの循環動態指標のパーソナルコンピュータへの同時オンライン取り込みを行った．2 チャンネルのシリアル通信には，USB-Serial 変換ケーブル (ICUSB2322F 2-Port USB to Serial RS232 Adaptor Cable, StarTech.com, Lockbourne, Ohio, USA) を用いた (図 1)．それぞれの機器から 2 秒毎に得られた循環動態指標データは，テキストデータとしてファイルに書き込み，Microsoft Excel に取り込んで分析した．

1) Processing 開発・実行環境

Processing は MIT メディアラボで開発された Java を単純化してグラフィック機能に特化したビジュアルデザインのためのプログラミング言語である [2]．sketchbook と呼ばれる必要最小限の統合開発環境 (Integrated Development Environment, IDE) とともに，オープン・ソースとして提供され，Microsoft Windows や Mac OS X, Linux 等の異なる OS 環境においても共通に作動するために，開発環境と作動環境を区別しないでソフトウェア開発を行える．今回，Mac OS X ver 10.10 Yosemite 上でこの MacOS X 用 Processing を用いて，GDT-2D-Visualizer ver.2 を開発した．実行環境は，安価なノート型パソコン (ASUS VivoBook E200HA) で，Microsoft Windows 10 環境にインストールした Windows 版 Processing にて作動させた．なお，Processing は動作環境を区別しないが，利用した Java の GUI (Graphical User Interface) library の version は，Processing の version に依存するものがあり，以下の表 1 に示す組み合わせが正常な動作に必要である．

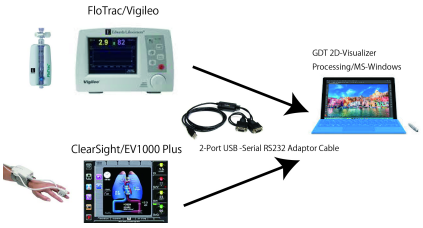


図 1 GDT 2D-Visualizer による FloTrac/Vigileo 及び ClearSight/EV1000 Plus からのオンライン同時データ取り込み

表 1

1) Processing 2.2.1 https://processing.org
2) ControlP5(GUI library for processing 2.1.2) https://code.google.com/archive/p/controlp5/downloads
http://www.sojamo.de/libraries/controlP5/
(ControlP5 をダウンロードして，Processing のデフォルトのデータファイルの Library に丸ごと入れる．)
3) FloatTable.pde (浮動小数点ライブラリー) Visualizing Data by Ben Fly. ビジュアライジング・データ—Processing による情報視覚化手法 [3] https://www.oreilly.co.jp/books/9784873113784/
4) Serial Selector (SerialSelector.pde) http://kougaku-navi.net/backyard/

2) Processing プログラミングのポイント

Processing プログラミングの全体の構成については，著者らの 2015 年の麻酔・集中治療テクノロジー学会での報告記録に報告済みである [1]．ここでは，データ取り込み・表示・記録に重要な点について以下にまとめておく．

①2 ポートシリアル通信データ取り込み

```
//シリアル通信ライブラリを取り込む
import processing.serial.*;
//二つのシリアルポートのインスタンス
Serial portA;
Serial portB;
void setup(){
//二つのシリアルポート設定
portA = new Serial(this, "/dev/tty.usbserial-A50019vD", 9600);
```

```
portB = new Serial(this, "/dev/tty.usbserial-
A40014iU", 9600);
}
//シリアル通信処理
void serialEvent(Serial p){
//portA の場合
if(p==portA){
  if(p.available()>0){
//値 0 を読み込み valA に代入
    valA=p.read();
//合図用データ送信
    portA.write(65);
  }
}
//portB の場合
if(p==portB){
  if(p.available()>0){
//値を読み込み valB に代入
    valB=p.read();
//合図用データ送信
    portB.write(65);
    }
  }
}
```

② シリアル通信で Vigileo もしくは EV1000 から送信されるデータからの各循環動態指標値の切り出し

```
//Vigileo や EV1000 から送信されている
//ASCII データ
N2759-0183-81C08.4c04.6b09.0S104s057z110L19f23.b
N2759-0183-81
C08.4 : APCO = 8.4
c04.6 : APCI = 4.6
b09.0 : SVV = 9.0
S104 : SV = 104
s057 : SVI = 57
z110 : Z = 110
L19 : L = 19
f23.b : f = 23
//シリアル通信関数
void serialEvent(Serial p) {
  inString = p.readString();    //読込みデータバッ
  ファセット
  if (inString != null) {
    p.write(inString);     //データ読込み
    write();
  } //以下読み込みデータを配列へ取り込む
  m1 = match(inString, "C([0-9]+).([0-9]+)");
  m2 = match(inString, "c([0-9]+).([0-9]+)");
  m3 = match(inString, "b([0-9]+).([0-9]+)");
  m4 = match(inString, "S([0-9]+)");
  m5 = match(inString, "s([0-9]+)");
  m6 = match(inString, "V([0-9]+)");
  m7 = match(inString, "v([0-9]+)");
  m8 = match(inString, "Q([0-9]+)");
  m9 = match(inString, "R([0-9]+)");
  m10 = match(inString, "r([0-9]+)");
  m11 = match(inString, "p([0-9]+).([0-9]+)");
}

if(m1 != null) {     //以下取り込んだデータを
整形して，各循環パラメータへ取り込む
  CO=float(m1[1] + "." + m1[2]);
} else {
  CO=999;
}
```

③ データのファイル書き込み

```
PrintWriter output;
//書き込み用ファイルセット
output = createWriter("data/data_vigileo.tsv");
GotData = time + TAB + SVV + TAB + SVI
  + TAB + CI;
void write() {    //データ書き込み関数
  if (GotData !=null){
    output.println(GotData);    // 読み込みデータ
      をファイルへ書き込む
  }
}
```

④ データファイルからデータ取り込み

```
FloatTable data;     //浮動小数点表クラス data
   宣言
void setup() {     //セットアップ関数
  ……..
//データファイル指定
  data = new FloatTable("data.tsv");
  ……..
}
//データ描画関数
void drawDataPoints(int col) {
//データ行数を取得
  int rowCount = data.getRowCount();
//データ行数繰り返し
for (int row = 0; row ¡ rowCount; row++) {
//指定行指定列値を value_x, values_y へ取り込む
  if (data.isValid(row, col_x) & data.isValid(row,
    col_x)) {
    float value_x = data.getFloat(row, col_x);
    float value_y = data.getFloat(row, col_y);
//x_value, y_value を座標変換
    float x = map(value_x, xdataMin, xdataMax,
      plotX1, plotX2);
    float y = map(value_y, ydataMin, ydataMax,
      plotY2, plotY1);
//x, y 座標値にデータを描画
```

```
    point(x, y);
    }
  }
}
```

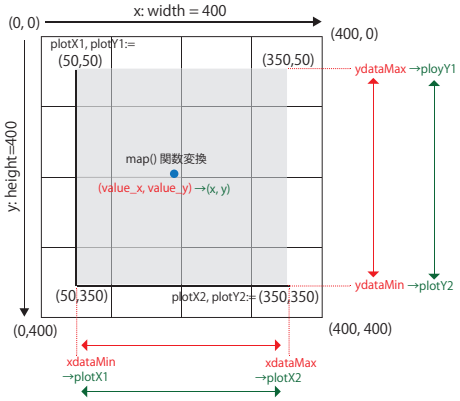


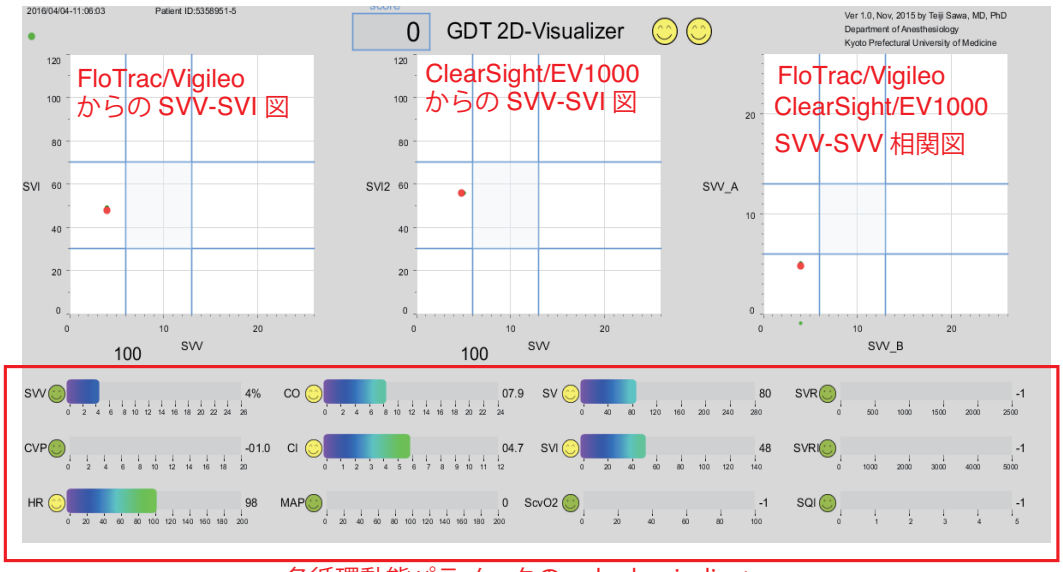
図 2 Processing による xy-plot 図の基本座標

⑤ 座標軸と map 関数変換

関数 map(a,b,c,d,e) を用いて，a 値の座標位置を範囲 b-c から別の範囲 d-e へ変換する．実際の座標は以下のように構成した (図 2).

3) GDT 2D-Visualizer ver. 2 の画面構成

オンラインで FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System, 並びに ClearSight^{TM}/EV1000 Plus^{TM} System から取り込んだデータは，それぞれの SVV-SVI xy 座標図に，2 つの機器から別々に算出された SVV 同士の相関を表示する xy 座標図を加えて，3 種類の xy 図表示とした (図 3).



各循環動態パラメータの color bar indicators

図 3 GDT 2D-Visualizer ver. 2 の画面構成

結　果

1) Case 1:

肝細胞癌に対する腹腔鏡下肝部分切除術 (65 歳男性, 手術時間 9:24 ，輸液: 3,600mL, 輸血: 0mL，尿量: 860mL，出血: 180mL) の麻酔管理にて， FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System，並びに ClearSight^{TM}/EV1000 Plus^{TM} System からのデータを GDT 2D-Visualizer にてオンライン表示させた (図 4)．その結果，ClearSight^{TM} からの SVI 値が，FloTrac^{TM} からの SVI 値より若干高い値となったが，麻酔経過における変動に関しては，両者の SVI と SVV 値はよい相関を示した．オフラインでの取得したデータ解析では，両者の SVV の相関は y = 1.031x + 0.953 (r = 0.886),

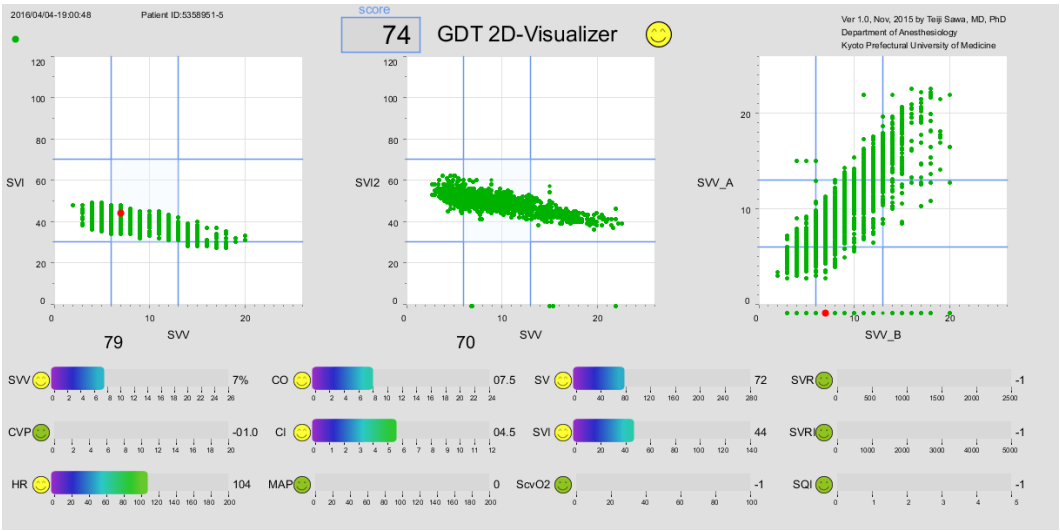


図 4 GDT 2D-Visualizer ver.2 (肝細胞癌に対する腹腔鏡下肝部分切除術)

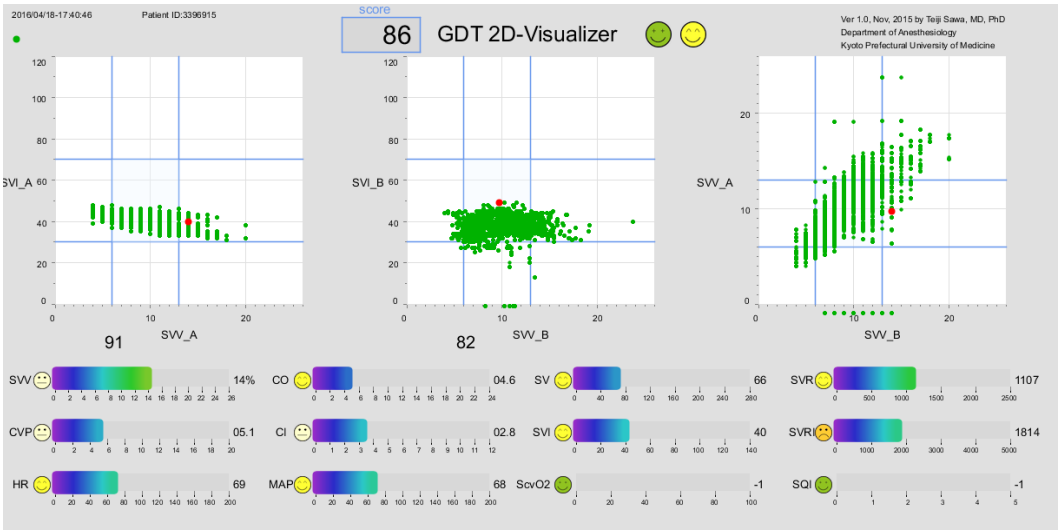


図 5 GDT 2D-Visualizer ver.2 (膵管内乳頭粘液性腫瘍（IPMN)、膵頭十二指腸切除術)

SVI の相関は y = 0.761x + 18.911 (r = 0.80) (x は FlowTrac, y は ClearSight) であった.

FloTrac により観血的に測定された血圧値と ClearSight により非侵襲的に測定された血圧値の手術経過中の相関に関しては，収縮期血圧 y = 0.809x + 18.092 (r = 0.916)，拡張期血圧 y = 0.675x + 20.519 (r = 0.734) (x は FloTrac, y は ClearSight) と良い相関を示した.

2) Case 2:

膵管内乳頭粘液性腫瘍 (IPMN)，膵頭十二指腸切除術 (67 歳男性, 手術時間 7:77 , 輸液: 2,300mL, 輸血: 0mL，尿量: 375mL，出血:　160mL) の麻酔管理にて，FloTrac™/Vigileo™ System，並びに ClearSight™/EV1000 Plus™ System からのデータを GDT 2D-Visualizer にてオンライン表示させた (図 5). その結果，ClearSight からの SVI 値が，FloTrac からの SVI 値よりばらついた

結果となった．その理由として，ClearSight に用いた Finger Cuff サイズ (L，M，S と 3 サイズ選択できる) が対象となった患者には少し大きすぎたことが原因と考えられた．麻酔経過における変動に関しては，両者の SVI と SVV 値はよい相関を示した．オフラインでの取得したデータ解析では，両者の SVV の相関は y = 0.810x + 2.636 (r = 0.768), SVI の相関は y = 0.539x + 15.986 (r = 0.365) (x は FloTrac, y は ClearSight) であった．

FloTrac により観血的に測定された血圧値と ClearSight により非侵襲的に測定された血圧値の手術経過中の相関に関しては，収縮期血圧 y = 0.997x + -8.452 (r = 0.880)，拡張期血圧 y = 0.768x + 17.855 (r = 0.811) (x は FloTrac, y は ClearSight) と良い相関を示した．

まとめ

今回，Processing による情報視覚化手法を取り入れて，ClearSight^{TM}/EV1000 Plus^{TM} System から得られる GDT のターゲットとなる SVI や SVV などの循環動態パラメータについて，FloTrac^{TM}/Vigileo^{TM} System 同様に 2 次元 XY プロットで可視化できるようにした GDT-2D-Visualizer ver. 2 を作成した．今回適応した臨床症例では， ClearSight から得られた血圧測定値，SVI や SVV 値は，FloTrac^{TM} から得られたデータとよい相関を示した．ClearSight^{TM}/EV1000 Plus^{TM} System は，非侵襲的なモニタとして今後，臨床への適応が期待できる．

参考文献

1. 佐和貞治, 橋本悟. 情報視覚化言語 Processing を用いたビジレオ ^{TM} モニターのリアルタイム・二次元データ・プロッティング. 麻酔・集中治療とテクノロジー 2016, 編集：白神豪太郎, 田中義文. 日本麻酔集中治療テクノロジー学会. 高松. In press.
2. Casey Reas, Ben Fry. Processing. A Programming Handbook for Visual Designers and Artists. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, USA, 2014. ISBN: 978-0-262-02828-8.
3. Ben Fry. ビジュアライジング・データ. Processing による情報視覚化手法. 増井俊之監訳, 加藤慶彦訳. オーライリー・ジャパン, 東京, 2008. ISBN: 978-4-87311-378-4.

ABSTRACT

The on-line SVV-SVI plot analysis using ClearSight System^{TM}

Shusuke Takeshita[1], Teiji Sawa[1], Satoru Hashimoto[2]

ClearSight System^{TM} (Edwards Lifesciences Co., USA) is a non-invasive arterial pulse wave analysis monitor using a finger cuff technology. By using Processing which is a Java-based programming language developed by MIT Media Lab for the visual design in specialized graphic arts, we developed application software named GDT-2D-visualizer (ver. 2) which allows us to store and display the hemodynamics data such as stroke volume variation (SVV) and strike volume index (SVI) from ClearSight/EV1000 Plus System (Edwards Lifescience Co.). In clinical application of ClearSight/EV1000 Plus System supported by GDT-2D-visualizer (ver. 2), the data from ClearSight demonstrated positive correlations with simultaneously collected data from FloTrac/Vigileo system.

1) Department of Anesthesiology
2) Division of Critical Care Medicine
Kyoto Prefectural University of Medicine

E-ICU 電子カルテの人工知能化の第一歩として予測死亡率の自動作成

財津昭憲

背　景

Open ICU では治療行為の全責任は主治医にあり，集中治療医は主治医に対する単なるアドバイザーに過ぎない．医者は出身大学が違い，さらに，専門分野が異なると，治療経験が大いに異なってしまう．集中治療室にはガイドラインに則る一般的治療では上手く治療できなかった症例が集まってくる．ゆえに，集中治療医には手こずらされた過去の失敗体験の記憶がごまんと残っているので何に対しても意外に懐疑的である．一方，一般医である主治医には手こずった患者よりも治療成功患者の方が圧倒的に多いので, 何事にも楽観的である．この経験の差を埋める共通言語として，1985 Knaus WA et al により考案された Acute Physiology and Chronic Health Evaluation (APACHE) -II score[1−5] という客観的重症度分類システムの院内予測死亡率が有効であった [6−7]．

我々は以前から血液ガス測定毎に APACHE-II と Sequential Organ Failure Assessment (SOFA) スコア [8−11] を計算して，それを基に院内予測死亡率を計算して，その推移を経時的にグラフ化する呼吸管理支援ソフトを Excel 上で運用してきた [6−7]．APACHE-II の院内予測死亡率推移グラフや SOFA スコア推移グラフは集中治療医の見立てとも良く符合し，主治医や患者・家族への説明に重宝した．しかし，グラフを描かせるために院内情報システム (Hospital Information System : HIS) や手書きの看護記録の情報を集めて，手入力をするとどうしても，患者 1 人に 15〜30 分も掛かってしまった [6−7]．これでは集中治療医の臨床研究には良いが，一般医の日常臨床には不向きである．ICU 部門の電子カルテ化を進めるときには，APACHE-II と SOFA スコアの経時的推移グラフの自動描画は必須アイテムであると実感していた．

当院は ICU 部門の電子カルテ化が全く進んで居なかったので，将来の人工知能化を目指した ICU 部門システムの導入を提案した．すると，運良く，ICU 系電子カルテを構築せよとの院長命令が下った．そこで，市販の ICU 部門の電子カルテソフトに，オプションとして APACHE-II と SOFA の経時的推移グラフを自動描画するソフトの開発をソフト会社に打診したが，色よい返事は貰えなかった．そこに，昔なじみのプログラマーが人工知能化ソフト開発のアイディアを持ち込んできたのを幸いに，ICU 系看護部門入力システムを含む Medical Expert System (MES) を構築し，HIS と連携させて，APACHE-II と SOFA スコアの院内予測死亡率推移グラフ自動描画ソフトを組込ませたプログラムを 1 年で構築する筈であったが，結局 4.5 年も掛かった．自前で MES 開発することは，製造物責任の問題は残るが，我々専門医の思考過程を可視化して，予後の推測や治療法のアドバイスなどの人工知能の開発の試金石になる試みでもあった．

目　的

ICU では医師が的確な治療方針さえ指示すれば，その治療はベテランの看護師，臨床工学士，理学療法士だけでも十分に実行できる．その意味で治療方針を決める専門医の知識と経験と勘とを集約した人工知能さえあれば日常業務はこなせる．その治療方針や方法が間違っていなければ，APACHE-II の院内予測死亡率は経時的に低下するのを観察できる．その意味では，院内予測死亡率の経時変化グラフは ICU

社会医療法人 雪の聖母会 聖マリア病院 集中治療科

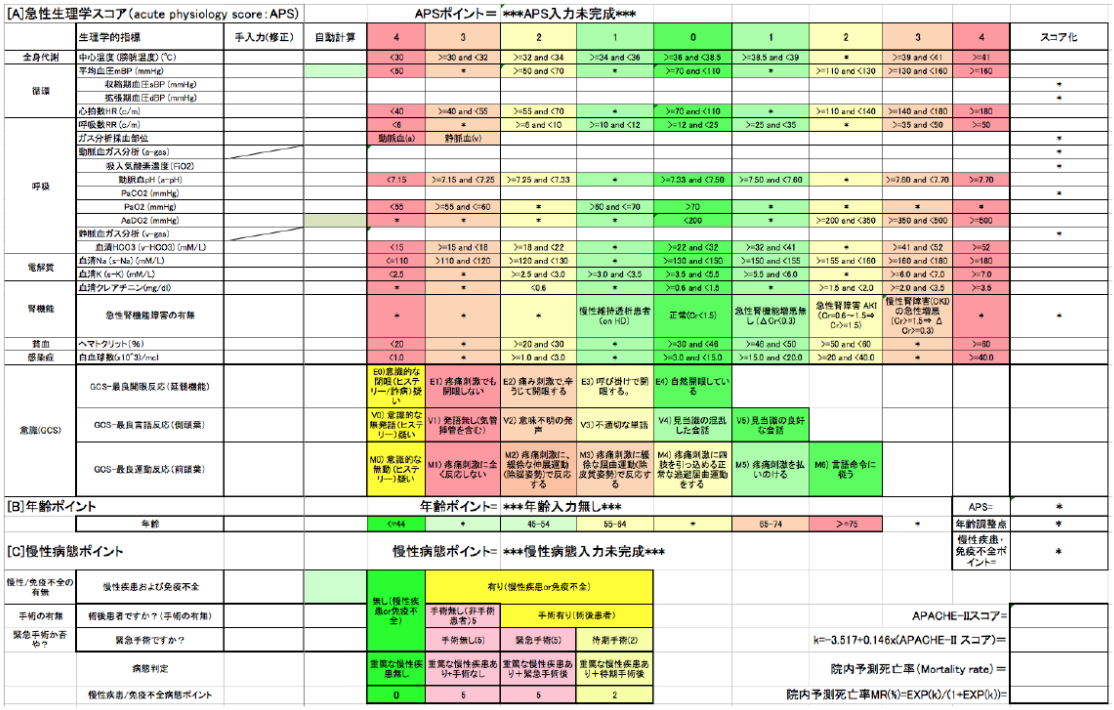


図 1 Excel で作成した RST 回診用 APACHE (Acute Physiology and Chronic Health Evaluation) II スコア計算ソフトの入力画面．入力前のスコア表

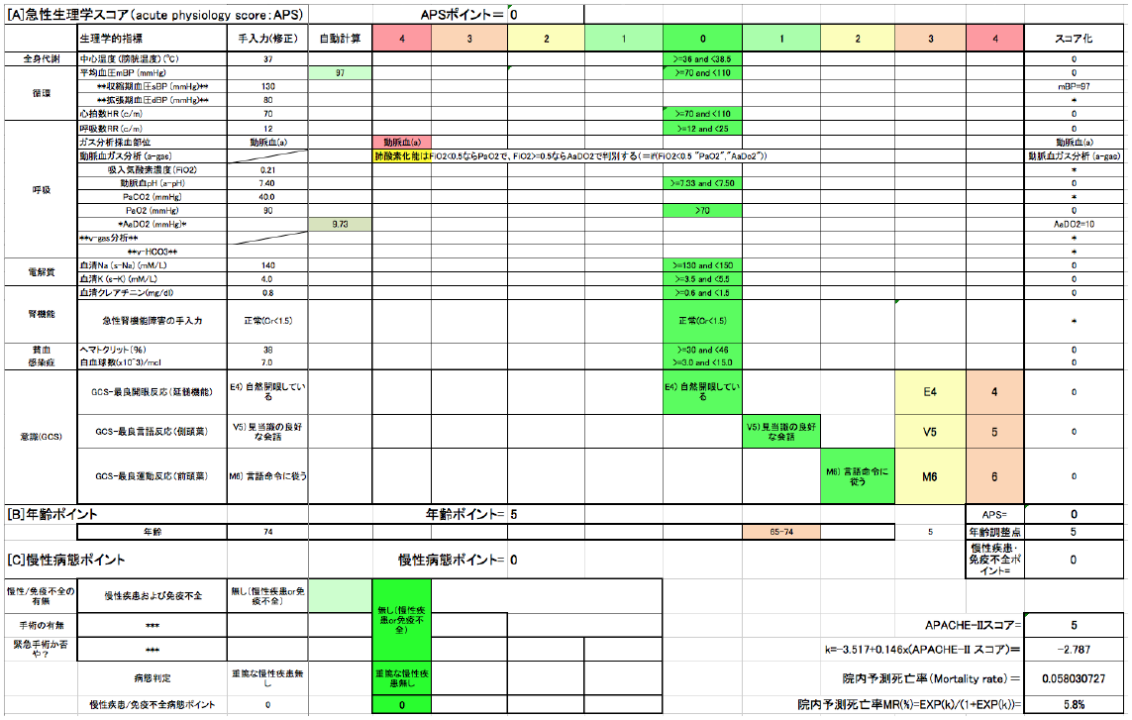
治療の素晴らしい監視役となる．

MES の看護業務ソフトが 4 年で動くようになったので，人工知能化への第一歩として，APACHE-II や SOFA スコアの経時的推移のグラフ化や院内予測死亡率の経時的推移グラフの自動描画ソフト開発に本格的に取り組んだ．

コンピュータは無限ループに入らない限り，アルゴリズムの間違いや入力ミスがあっても，平気な顔をして間違った答えを返してくるブラックボックスである．ゆえに，そのバグ取りがプログラムの良否を決める．そこで，MES の看護業務ソフトの裏側で動く APACHE-II や SOFA スコアの経時的推移グラフの自動描画ソフトと従来の手入力ソフトの結果とのずれを極力減らす改良を加えながら，その正確性を損なう原因を検証したので報告する．

方　法

APACHE-II や SOFA スコアの経時的推移グラフの自動描画ソフトは比較しやすいように E-ICU 回診で使用していた手入力方式の「ICU における呼吸管理支援 Respiratory Support Team(RST) ソフト」の APACHE-II および SOFA スコア表に似せてある．血液ガス測定時の APACHE-II と SOFA スコアを計算するために，MES 内で血液ガス測定時前後 1 時間以内の最寄りの Vital データや 24 時間以内の生化学・血液データを収集して，各生理学や生化学の臨床検査値データを自動計算欄に送り込み，各臓器の障害度区分を行い，APS ポイント，年齢ポイント，慢性疾患ポイントを割り出し，これらを合計して APACHE-II スコアを計算し，予測死亡率の計算・臓器障害度を自動描画させた．但し，24 時間前までにデータのないものは一応正常と見なし自動入力するが，その後，前後から判断して経過がおかしいと思われる時は，適宜，人的判断を加えて手入力修正を施せ



[A]急性生理学スコア(acute physiology score:APS)			APSポイント＝	0									
	生理学的指標	手入力(修正)	自動計算	4	3	2	1	0	1	2	3	4	スコア化
全身代謝	中心温度 (膀胱温度) (℃)	37						>=36 and <38.5					0
循環	平均血圧mBP (mmHg)		97					>=70 and <110					0
	収縮期血圧sBP (mmHg)	130											mBP=97
	拡張期血圧dBP (mmHg)	80											*
	心拍数HR (c/m)	70						>=70 and <110					0
呼吸	呼吸数RR (c/m)	12						>=12 and <25					0
	ガス分析採血部位	動脈血(a)		動脈血(a)									動脈血(a)
	動脈血ガス分析 (a-gas)			肺酸素化能はFiO2<0.5ならPaO2で、FiO2>=0.5ならAaDO2で判別する(=if(FiO2<0.5 "PaO2","AaDo2"))									動脈血ガス分析 (a-gas)
	吸入気酸素濃度(FiO2)	0.21											*
	動脈血pH (a-ph)	7.40						>=7.33 and <7.50					0
	PaCO2 (mmHg)	40.0											*
	PaO2 (mmHg)	90						>70					0
	AaDO2 (mmHg)		9.70										AaDO2=10
	v-gas分析												*
	v-HCO3												*
電解質	血清Na (s-Na) (mM/L)	140						>=130 and <150					0
	血清K (s-K) (mM/L)	4.0						>=3.5 and <5.5					0
腎機能	血清クレアチニン(mg/dl)	0.8						>=0.6 and <1.5					0
	急性腎機能障害の手入力	正常(0-<1.5)						正常(0-<1.5)					*
貧血	ヘマトクリット(%)	38						>=30 and <46					0
感染症	白血球数(x10^3)/mcl	7.0						>=3.0 and <15.0					0
意識(GCS)	GCS-最良開眼反応(延髄機能)	E4) 自然開眼している						E4) 自然開眼している			E4	4	0
	GCS-最良言語反応(側頭葉)	V5) 見当識の良好な会話							V5) 見当識の良好な会話		V5	5	0
	GCS-最良運動反応(前頭葉)	M6) 言語命令に従う								M6) 言語命令に従う	M6	6	0
[B]年齢ポイント			年齢ポイント=	5								APS=	0
	年齢	74							65-74		5	年齢調整点	5
[C]慢性病態ポイント			慢性病態ポイント=	0								慢性疾患・免疫不全ポイント=	0
慢性/免疫不全の有無	慢性疾患および免疫不全	無し(慢性疾患or免疫不全)		無し(慢性疾患or免疫不全)									
手術の有無	***											APACHE-IIスコア=	5
緊急手術か否や?	***											k=-3.517+0.146x(APACHE-II スコア)=	-2.787
	病態判定	重篤な慢性疾患無し		重篤な慢性疾患無し								院内予測死亡率(Mortality rate)=	0.058030727
	慢性疾患/免疫不全病態ポイント	0		0								院内予測死亡率MR(%)=EXP(k)/(1+EXP(k))=	5.8%

図 2 入力後の APACHE-II スコア表．正常値が入力された状態を示している．

るようにした．

同一患者で，自動入力による APACHE-II，および，SOFA スコアの経時的推移グラフがどの程度手入力グラフに一致するかを比較した．コンピュータが正しくデータ採取をすれば，両者のグラフに差は生じない筈である．しかし，その両者に差が生じた場合，その原因が何であるかを徹底的に追求することにした．

1) RST 回診用 APACHE-II スコアの表計算

自動描画ソフトの正確性を検証するための Excel で作成した RST 回診用 APACHE-II スコア計算ソフトの入力画面である (図 1)．APACHE II スコア表は 12 種類の Acute physiology score (中心温度，平均血圧，心拍数，呼吸数，動脈血 pH，および，肺酸素化能 ($FiO_2 < 0.5$ では PaO_2, $FiO_2 >= 0.5$ では $AaD0_2$)，静脈血なら HCO_3 のみ，血清 Na，血清 K，血清クレアチニン (急性腎不全ならダブル・スコアに)，意識レベル (15-Glasgow coma scale)) の生理学臨床検査データを入力する前の状態である．データが未だ入力されていないので，区分表は全て表示されている．

急性生理学スコア (APS) 表の左側から 3 列目の入力欄に入力する．入力欄に生理学数値データの入力が済むと，データ入力毎に入力データは区分分けされて，右端欄にスコア化され，スコア表にはスコア区分けされた領域分布だけが残り，正常値からのずれが視覚的に一目瞭然に捉えられる．正常区域の緑色から危険区域の赤色まで 5 段階に分類表示される．この画面では正常値を取り敢えず入力している (図 2)．そして，スコア化欄の最下段には APS ポイントが逐次計算されている．

次に，年齢と慢性疾患有無と手術の有無を入力欄に入力すると，年齢ポイントと慢性疾患ポイントもスコア化される．これらの値は右下の計算欄

SOFA (Sequential Organ Failure Assessment) Score				SOFAスコア区分						
臓器系	検査項目	手入力(修正)	APACHE連動自動入力	0	1	2	3	4	スコア化	臓器別スコア
呼吸器系	PaO2/FiO2 (mmHg)			>400	>300 and <=400	>200 and <=300	>100 and <=200（人工呼吸器補助下）	<=100（人工呼吸器補助下）		
凝固系	血小板数（万/μl）			>15.0	>10.0 and <=15.0	>5.0 and <=10.0	<2.0 and <=5.0	<=2		
肝機能	ビリルビン値(mg/dl)			<1.2	>=1.2 and <2.0	>=2.0 and <6.0	>=6.0 and <12.0	>=12.0		
心血管系	平均血圧(mmHg)			>=70 (mmHg)	<70 (mmHg)	*	*	*		
	Dopamine (mcg/kg/min)			0	*	*	>5 and <=15	>15		
	Dobutamine (mcg/kg/min)			0	*	>0	*	*		
	Epinephrine (mcg/kg/min)			0	*	*	>0 and <=0.1	>0.1		
	Norepinephrine (mcg/kg/min)			0	*	*	>0 and <=0.1	>0.1		
中枢神経系	Glasgow Coma Scale			15	14–13	12–10	9–6	<6		
腎機能	クレアチニン値(mg/dl)			<1.2	1.2–1.9	2.0～3.4	3.5～4.9	>=5.0		
	一日尿量(24時間換算尿量)(ml/day)			>=500	*	*	>=200 and <500 (ml/day)	<200 (ml/day)		
SOFA (Sequential Organ Failure Assessment) Score									SOFA合計点	

図 3 入力前の Sequential Organ Failure Assessment (SOFA) スコア表

に自動挿入され，APS ポイント，年齢ポイント，慢性疾患ポイントの合計が APACHE-II スコアとなる．

APACHE-II スコアを k = −3.517 + 0.146x (APACHE-II スコア) の式に代入して k を導き，院内予測死亡率 (Mortality Rate:MR) (%)=EXP(k)/(1+EXP(k)) の式に k の値を代入して院内予測死亡率が求められる．

血液ガスを測定した時点の各急性生理学スコアと APACHE-II スコアから予測院内死亡率を計算して，経時的推移グラフを Excel 上に描かせた．

この人的データ収集と Excel 上での手入力作業を，コンピュータに MES と HIS のデータを自動取り込みさせ，この表の左側から 4 列目の自動計算欄に自動入力化させることと同じソフトを MES の看護記録ソフトの裏側に構築した．人的収集データとコンピュータの自動収拾データが同じなら，同じ院内予測死亡率グラフが正しく描画されている筈である．それを検証するのが今回の目的である．しかし，現時点ではアルゴリズム的にも，プログラム不備による完全な自動入力には未だ 100 %の信頼性は置けないので，容易に修正が利くように手入力修正を最優先にしている．

2) RST 回診用 SOFA スコアの表計算

SOFA スコア表は 6 臓器系 (呼吸器系，凝固系，肝機能，心血管系，中枢神経系，および，腎機能) の障害を 0～4 ポイントで，正常区域の緑色から危険区域の赤色までの 5 段階スコア区分している (図 3)．数値入力前は全区分が表示されている．

APACHE-II に入力されれば，それに連動して自動的に P/F ratio，平均血圧，Glasgow Coma Scale，および，クレアチニン値は自動入力されている (図 4)．APACHE 連動自動入力されたデータ値は直ちにスコア化され，そのスコアに応じて SOFA スコア区分表にスコア区分された領域のみが残り表示される．

さらに，APACHE II とは連動していない残りの臓器機能障害変数データ値を手入力して SOFA スコア表の入力を完成させる (図 5)．

6 臓器系障害度の合計点が SOFA スコアになる．そこで，血液ガス測定時点での臓器別の障害度スコア区分の推移と SOFA スコアの推移を経時的グラフにした．手入力の SOFA スコアグラフと MES 上の自動描画 SOFA スコアグラフの一致性を検証する．

結　果

1) ICU 部門看護師入力ソフトに紛れ込ませた人工知能化ソフトの概要

SOFA (Sequential Organ Failure Assessment) Score				SOFAスコア区分						
臓器系	検査項目	手入力(修正)	APACHE 連動自動入力	0	1	2	3	4	スコア化	臓器別スコア
呼吸器系	**PaO2/FiO2 (mmHg)**		429	>400					0	0
凝固系	血小板数（万/μl）			>15.0	>10.0 and <=15.0	>5.0 and <=10.0	>2.0 and <=5.0	<=2		
肝機能	ビリルビン値(mg/dl)			<1.2	>=1.2 and <2.0	>=2.0 and <6.0	>=6.0 and <12.0	>=12.0		
心血管系	**平均血圧(mmHg)**		97	>=70 (mmHg)					0	0
	Dopamine (mcg/kg/min)			0	*	*	>5 and <=15	>15		
	Dobutamine (mcg/kg/min)			0	*	>0	*	*		
	Epinephrine (mcg/kg/min)			0	*	*	>0 and <=0.1	>0.1		
	Norepinephrine (mcg/kg/min)			0	*	*	>0 and <=0.1	>0.1		
中枢神経系	**Glasgow Coma Scale**		15	15					0	0
腎機能	**クレアチニン値(mg/dl)**		0.8	<1.2					0	0
	一日尿量(24時間換算尿量) (ml/day)			>=500	*	*	>=200 and <500 (ml/day)	<200 (ml/day)		
SOFA (Sequential Organ Failure Assessment) Score									SOFA合計点	0

図 4 APACHE 連動自動入力後の SOFA スコア表

SOFA (Sequential Organ Failure Assessment) Score				SOFAスコア区分						
臓器系	検査項目	手入力(修正)	APACHE 連動自動入力	0	1	2	3	4	スコア化	臓器別スコア
呼吸器系	**PaO2/FiO2 (mmHg)**		429	>400					0	0
凝固系	血小板数（万/μl）	20.0		>15.0					0	0
肝機能	ビリルビン値(mg/dl)	0.8		<1.2					0	0
心血管系	**平均血圧(mmHg)**		97	>=70 (mmHg)					0	0
	Dopamine (mcg/kg/min)	0.0		0					0	
	Dobutamine (mcg/kg/min)	0.0		0					0	
	Epinephrine (mcg/kg/min)	0.0		0					0	
	Norepinephrine (mcg/kg/min)	0.0		0					0	
中枢神経系	**Glasgow Coma Scale**		15	15					0	0
腎機能	**クレアチニン値(mg/dl)**		0.8	<1.2					0	0
	一日尿量(24時間換算尿量) (ml/day)	800		>=500					0	
SOFA (Sequential Organ Failure Assessment) Score									SOFA合計点	0

図 5 残りの臓器機能障害変数を手入力して SOFA スコア表の入力を完成

血液ガス測定の時点での APACHE-2 と SOFA スコアの計算に必要なデータを院内電子カルテ (HIS) からは検査データを，ICU 系部門システム (MES) からは Vital sign，意識レベル，人工呼吸器の実測値などを自動的に集めるソフトの励起させる隠しボタンは医師用のコンピュータソフト (MES 修正) にのみ配置され，予め使用申請をして登録された者のみがソフトを励起させ，且つ，修正が加えられる．このソフト励起で計算された結果は一般のベッドサイドの看護師入力用コンピュータの MES 画面で自由閲覧が可能であるが，こちらからは修正が一切加えられない作りである．

2) MES 修正ソフト上で，人工知能励起ボタン ON-OFF する (図 6)

HIS への情報収集命令は医師用の MES 修正ソフト上の看護記録画面の右上の監視ボタンを ON にして，次に検査ボタンを ON にすると情報収集を始める．監視ボタンを OFF にすると人工知能は OFF になる．

3) 収集データ一覧とグラフ表示・血ガス登録ボ

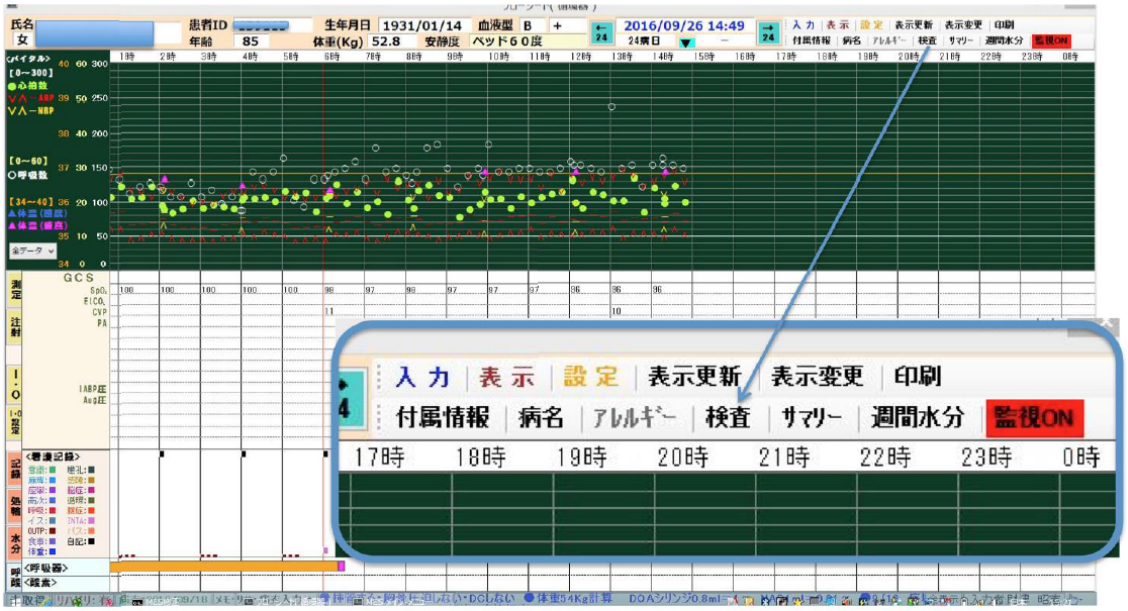


図 6 MES 修正ソフト上の監視の ON, OFF (Pass Word が必要)
背景色が緑の監視 OFF ボタンをクリックして Pass Word(PW) を入力すると，監視 ON になり，背景色が緑⇒赤に変わる．そこで，検査ボタンをクリックすると，情報収集を開始する．監視の OFF は監視 ON ボタンをクリックして PW を入力するか，MES 修正ソフト終了させるときに，監視を継続するか否か選択する．

タンが現れる (図 7)

監視 ON+検査ボタン ON にすると, HIS が持っている生化学・血算・尿検査．血液ガスデータを 15 秒以内に返答するので，それを MES 側で受けて直ちに収集データ一覧表に表示される．しかし，APACHE-II と SOFA の計算とグラフの描画は看護記録画面の裏で計算し，看護業務を邪魔しないように設計されているので，今のところ最短で 5 分後にしか結果を見られない欠陥を有している．5 分以上経過後に，再度，検査ボタンを押せば，APACHE-2 と SOFA の計算が終わっていれば，血ガス動脈血 (自部署) の上に SOFA, APACHE-II が表示される．表の下に配置された SOFA グラフや APAII グラフのボタンを押せば，オープン画面の日付から 1 週間毎遡ってグラフ表示がされる．

また，他部署などで自動収拾されなかった血液ガス結果を事後に登録する血ガス登録ボタンも表示される．

4) APACHE-II と SOFA スコアの経時的推移を追っかけた臨床症例

症例は Billroth-I 法の胃癌術後に再発して吻合部狭窄となり，十二指腸ステント留置され化学療法中の患者である．

現病歴は 8/10 動悸後，意識消失発作を数回起こした．8/25 意識朦朧となり転倒した．8/27 腰痛で○○整形外科受診し，第 10 胸椎圧迫骨折と診断されて即入院となった．8/31 頻脈性心房細動で，BNP=8500pg/ml の心不全のため，鹿○病院へ頻脈治療のために転院となる．9/03 頻脈治療継続中に突然，徐脈性心房細動のショック状態となり，急遽，転院搬送されてきた．当院では緊急体外式ペースメーカーを挿入し，IABP 装着して，Dopamine, Noradrenaline, ミルリノンを投与開始した．その後，本人と家族への Informed consent で，気管挿管は希望するが，心停止時には胸骨圧迫や除細動は希望しないことになった．そこで気管挿管を行い，人工呼吸管理を開始した．

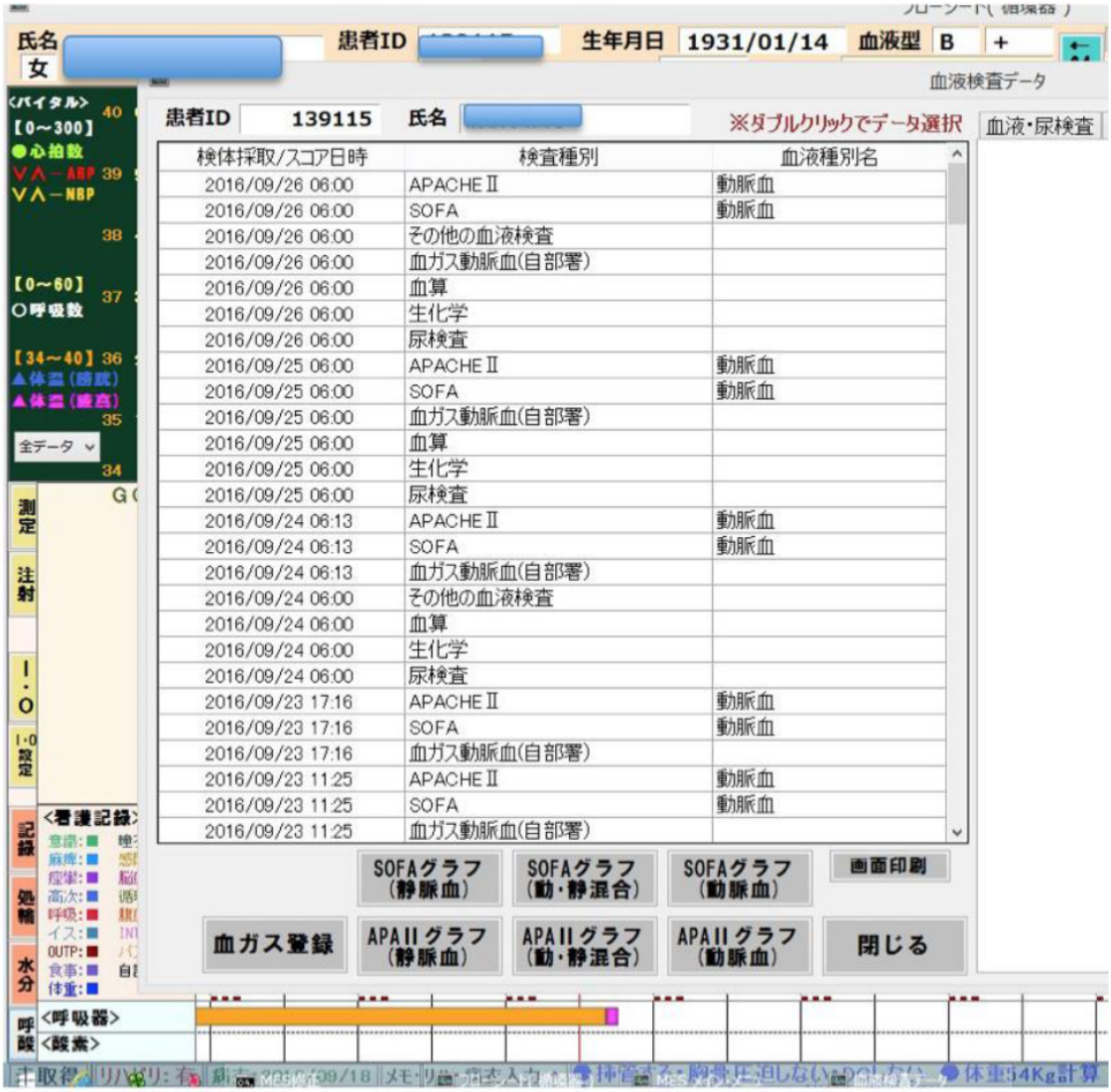


図 7 収集データ一覧表示とグラフ表示・血ガス登録ボタン.

APACHE-II と SOFA の自動計算が終わると，血ガス動脈血 (自部署) の上に SOFA, APACHE-II が表示される．APACHE-II や SOFA が表示されていないときは未だ計算はされていない．SOFA グラフや APAII グラフボタンを押せば，オープン画面の日付から 1 週間毎遡ってグラフ表示がされる．また，自動周されなかった血液ガス分析結果の事後登録用の血ガス登録ボタンもある．

入院時診断名は敗血症性ショック，急性腎障害，急性肝障害，急性膵炎，下部消化管出血であった．9/05 自己心拍が出現したので，ペースメーカーは VVI 50 ppm のバックアップに変更した．その頃 (9/04〜05) の APACHE-II (図 8-1) と SOFA スコア (図 8-2) の推移と予測死亡率の推移グラフを示す．

APACHE-2 グラフは APACHE II を構成する 12 の個々の生理学的変数ポイント (直腸温，平均血圧，心拍数，呼吸数，$AaDO_2(FiO_2 >= 0.5)$ または $PaO_2(Fi02 < 0.5)$，動脈血 pH，血清 Na，血清 K，血清クレアチニン，ヘマトクリット値，白

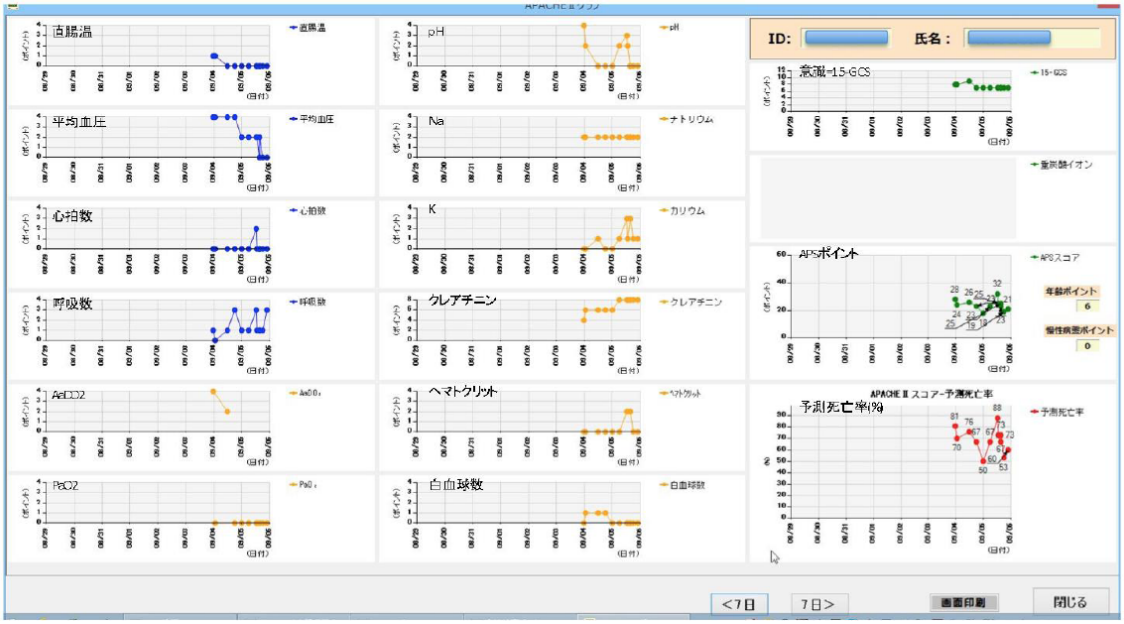


図 8-1 9/04〜05 の APACHE-II の 12 種類の急性生理学指標のスコア化グラフと その和の APS ポイントグラフ，それの予測死亡率の推移グラフ

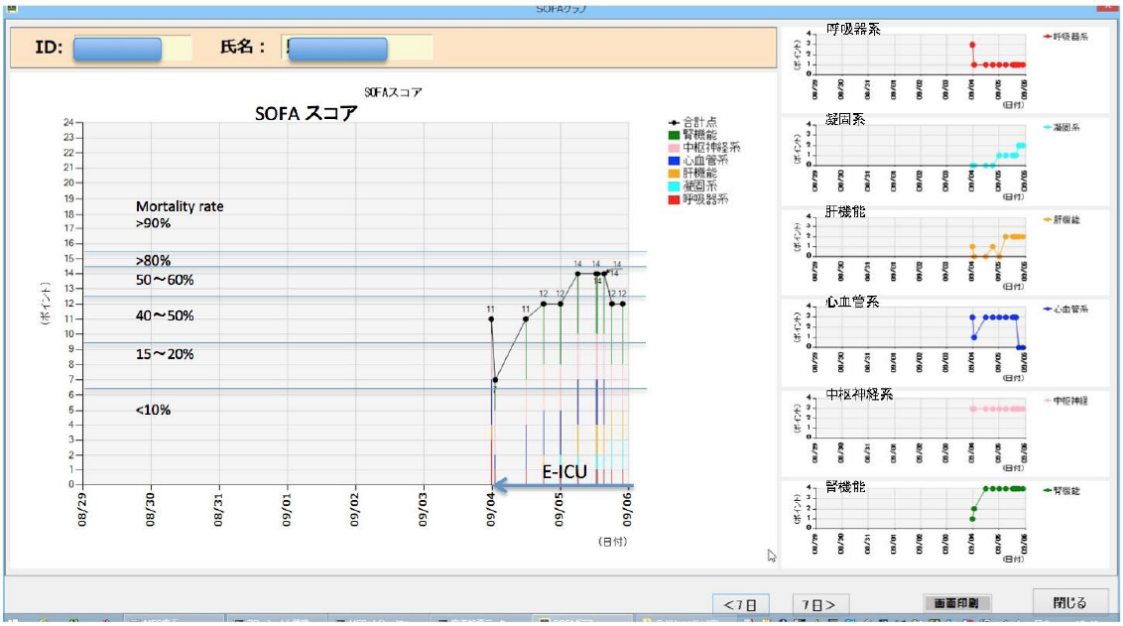


図 8-2 9/04〜05 の SOFA スコアと 6 臓器不全度の推移グラフ

血球数，意識レベル=15 − GCS) とその合計の急性生理学スコア (APS) ポイント，および，それから導き出される APACHE-II スコア予測死亡率 (%) の推移グラフを一画面で指定日から遡って 7 日分表示される．

SOFA グラフは 6 つの個々の臓器不全ポイント

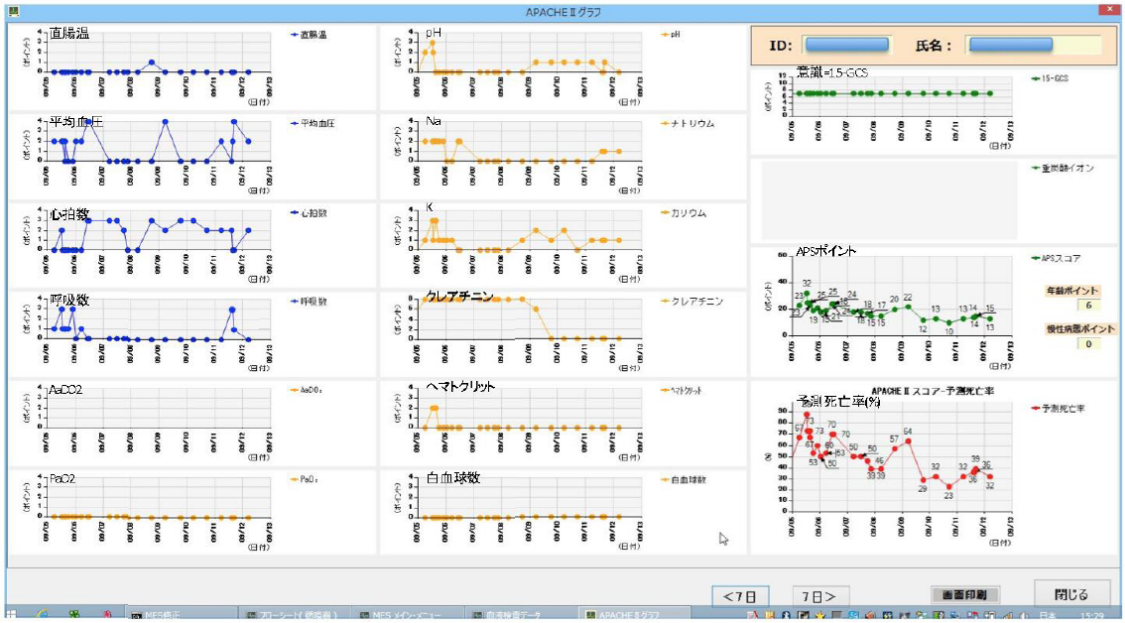


図 9-1 9/05〜12 の APACHE-II スコアの推移グラフ

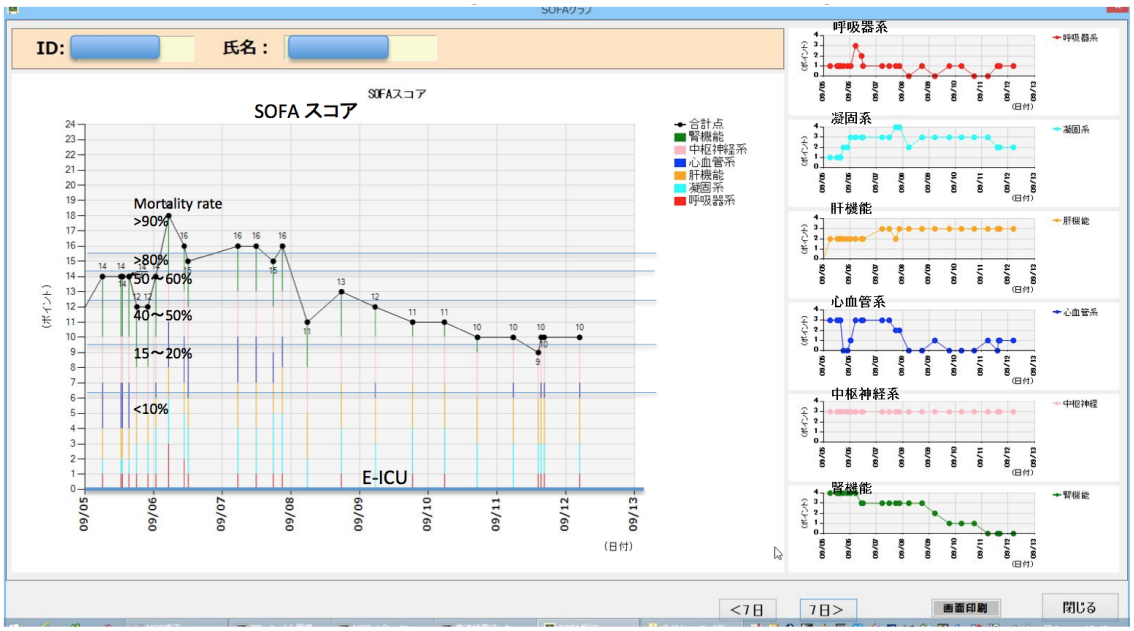


図 9-2 9/05〜12 の SOFA スコアの推移グラフ

の推移とその合計である SOFA スコアの推移を指定日から遡って 7 日分を一画面で見られる．これにより個々の臓器障害度および全臓器障害度の経時的推移が追える．

E-ICU 入室直後 9 月 4〜5 日は，集中治療に反応して APACHE II スコアの予測死亡率は改善を見せるも，集中治療に付加よる生理学的改善効果分を差し引いて評価する SOFA スコアは呼吸器系

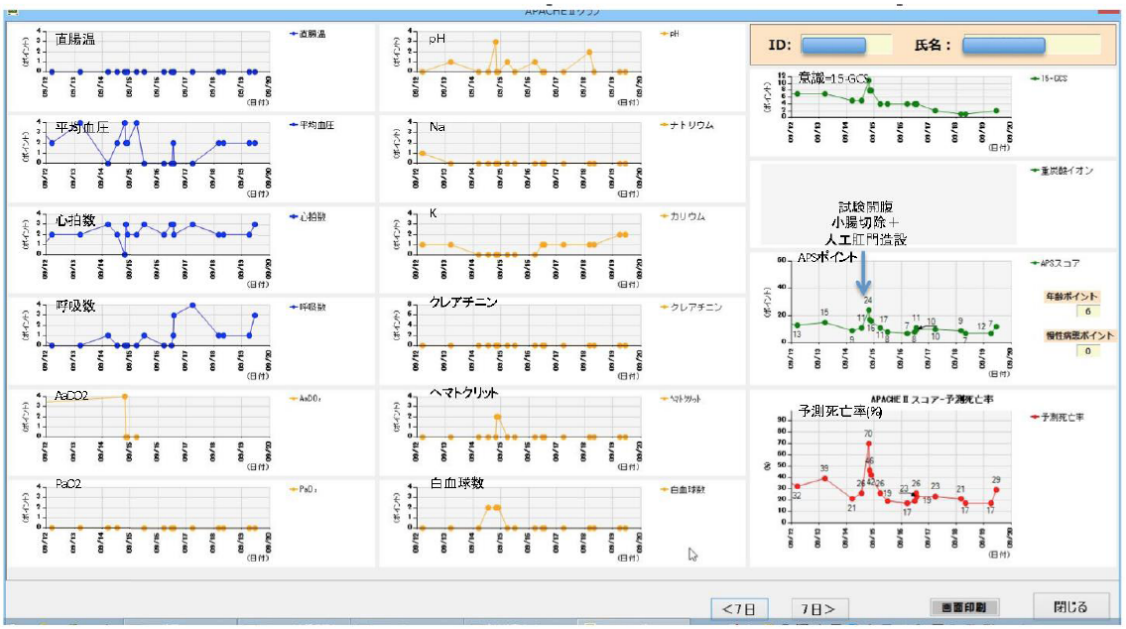


図 10-1 9/12〜19 の APACHE-II スコアの推移グラフ

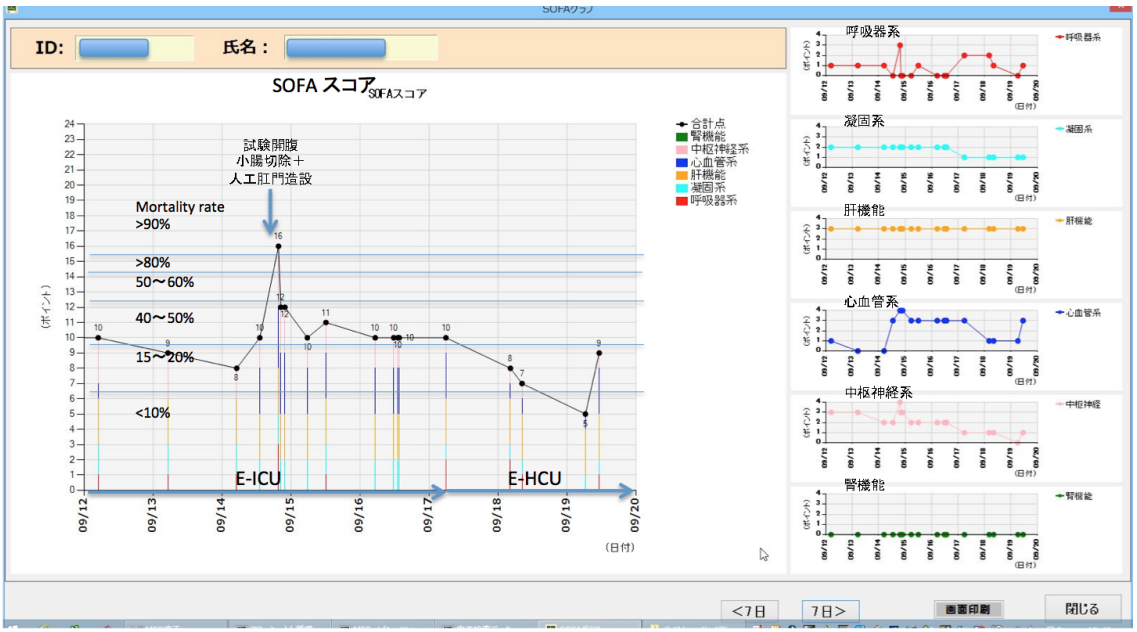


図 10-2 9/12〜19 の SOFA スコアの推移グラフ

のみ 3⇒1 ポイントに改善で，中枢神経系は 3 ポイントで不変，および，心血管系は 3⇒1 に改善したかに見えたが，再び 1⇒3 に戻り結局不変である．そして，腎機能は 1⇒2⇒4 と悪化，肝機能は 1⇒0⇒1⇒0⇒2 へと徐々に悪化，凝固能は 0⇒1⇒2 へと悪化傾向で，全体的には SOFA スコアは 11⇒7⇒11⇒12⇒14 と悪化傾向である．この両スコア乖離は病態悪化の根本原因が取

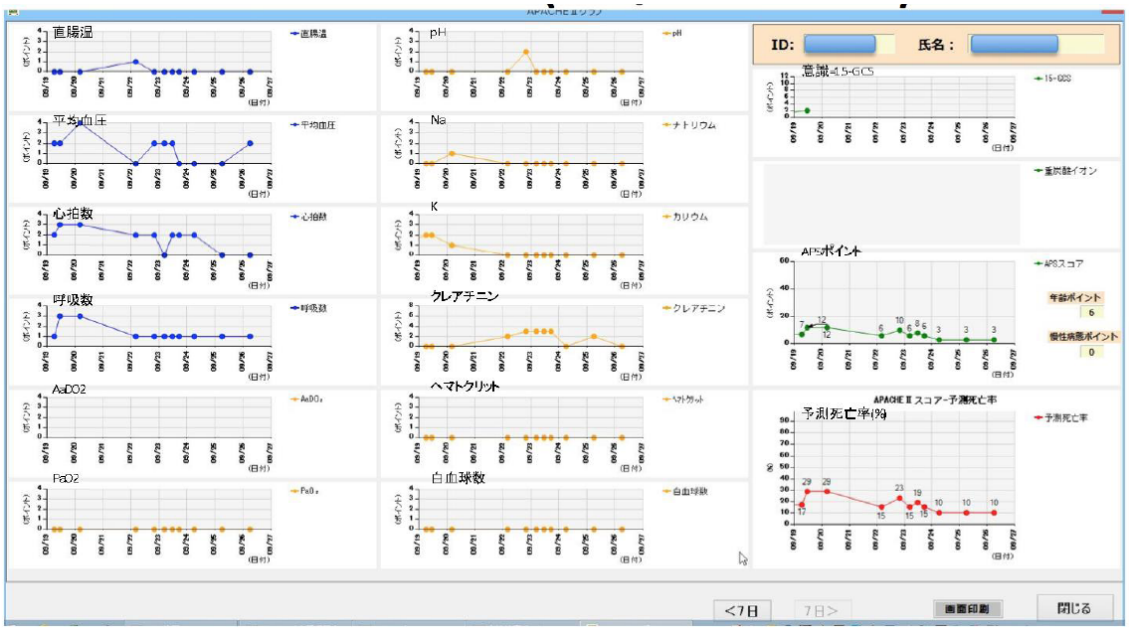


図 11-1 9/19〜26 の APACHE-II スコアの推移グラフ

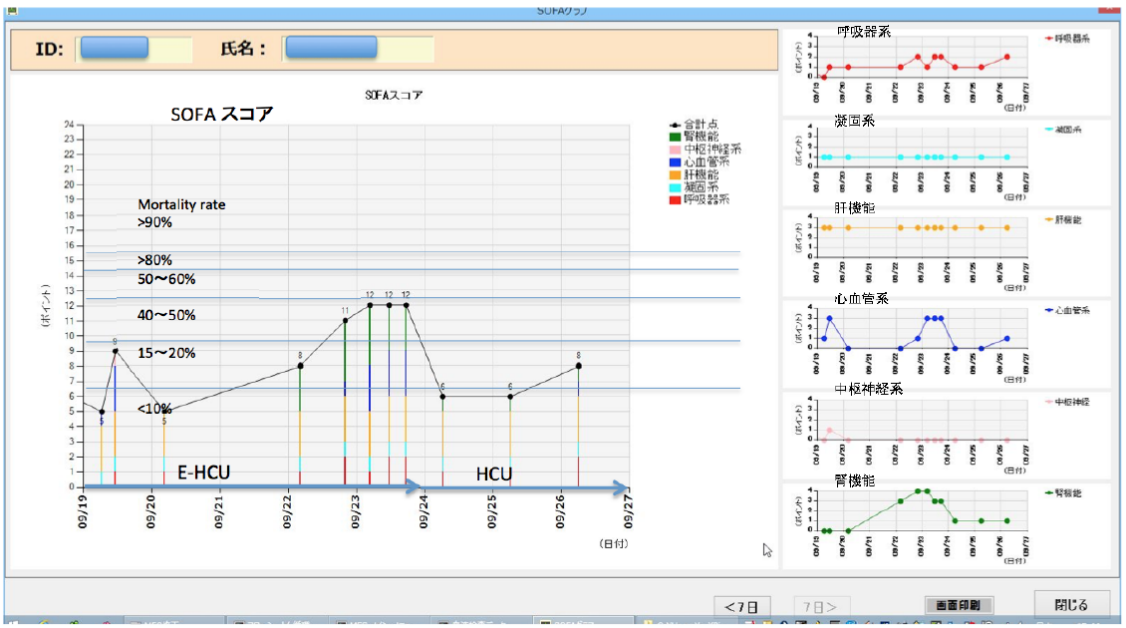


図 11-2 9/19〜26 の SOFA スコアの推移グラフ

れていないことを示唆しているようだ．

この悪化傾向のグラフを見て, Respiratory Support Team (RST) による ICU 回診時のアドバイスは酸素運搬能の改善と循環血液量保持の目的で濃厚赤血球輸血と凝固因子補充目的の FFP 補充であった．これらの処置で循環が安定化して，ミルリノンは中止され，Noradrenaline の減量が始められた．

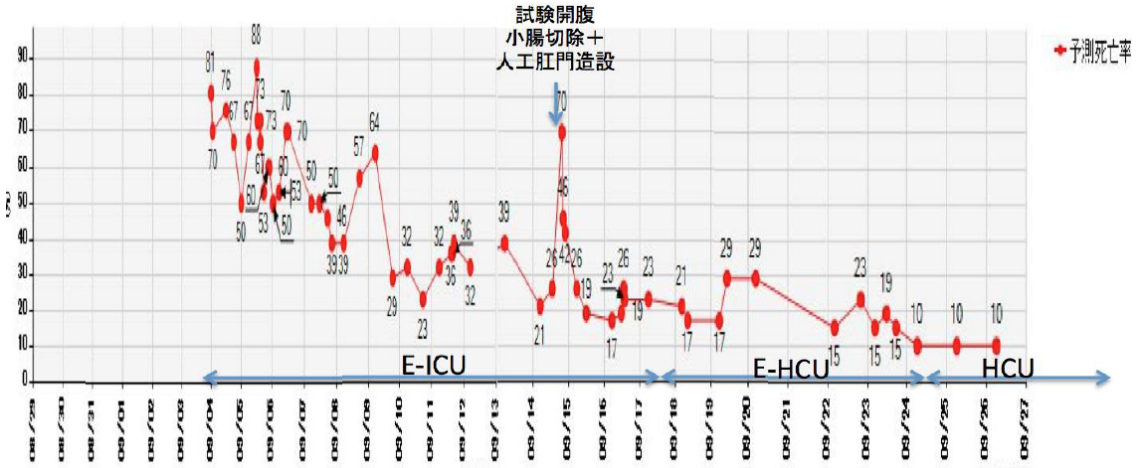


図 12 APACHE-2 院内予測死亡率 (9/26 から入院 (9/03) までを振り返って) の経時的推移グラフ

9/05 を peak に APS ポイントと予測死亡率が改善を示した．翌 9/06 の腹痛出現で一時悪化を見せた (図 9-1)．むしろ SOFA スコアはこの時点が最高になった (図 9-2)．イレウスや腸管虚血を疑って試験開腹手術を勧めたが，高齢で且つ終末期のため絶対適応でない限り侵襲的な治療を希望されず経過観察となった．腹痛は持続するものの概ね改善傾向に向かったので，経過を観察していた．

9/14 回復が低迷しだしたので腹腔穿刺をしたら血性腹水だった．試験開腹術を承知して貰って開腹したら絞扼性イレウスだった．回腸切除と 2 連銃式人工肛門造設，大量腹腔洗浄をおこなったら，術後一過性に APACHE-2 スコアも SOFA スコアも跳ね上がったが，術後 48 時間で正常化傾向が見られたので，9/17 急性期 E-ICU での治療から亜急性期 E-HCU へと治療の場を移した (図 10-1，図 10-2)．

9/22〜一過性に腎機能障害，それに 1 日遅れて 9/23〜心血管系の一過性障害が見られたが，9/24 には落ち着いたので，慢性期の HCU 病棟へと移された (図 11-1，図 11-2)．

そこで，9/26 から 1 週間毎の APACHE II の院内予測死亡率 (Mortality rate) の変化を入院 9/03 まで振り返った経時的推移グラフを合成した (図 12)．これを見ながら経過を考察すれば，Billroth-I 法の胃癌術後に再発して吻合部狭窄となり，十二指腸ステント留置され化学療法中の患者が敗血症性ショック，急性腎障害，急性肝障害，急性膵炎，下部消化管出血で緊急入院させた．高齢で終末期に近いことと，原因疾患の確定がつかなかったために，保存的治療で，APACHE-II と SOFA スコアで経過観察をしながら，原因究明に努めた．入院後 11 日目に血性腹水を証明して，試験開腹に漕ぎ着けた．絞扼性イレウスであったので，回腸切除，2 連銃式人工肛門造設と大量腹腔洗浄で救命に成功した．この APACHE-II (Mortality rate) グラフは血液ガス測定毎に計算した予測院内死亡率の臨床経過である．この症例で呈示したように，隠しボタンを押して 5 分後には院内予測死亡率の推移が自動可視化出来ることは極めて重症患者治療には有効である．

さらに，同患者の血小板の推移 (図 13) で重症度を考えると，敗血症性ショックに伴って血小板減少症は急激に進行して DIC が悪化していた．保存的入院治療開始 4 日目の 9/07 の 1.9 万/mcl を最低に次第に回復し始めたのは自然治癒力の賜物で非常に幸運であった．その回復途中で入院 11 日目の 9/14 に血性腹水を証明して，試験開腹の同意を得て，絞扼性イレウスを確定出来た．そこ

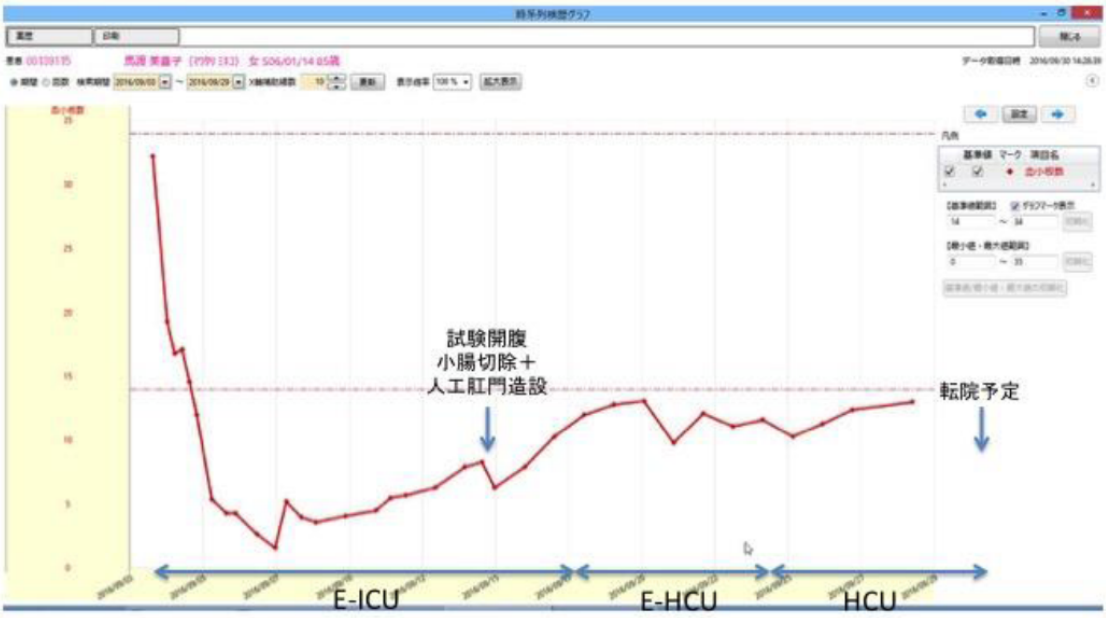


図 13 血小板数の推移

で根本治療の回腸切除＋人工肛門造設＋大量腹腔洗浄術を行った．その後に一過性の血小板数の減少はあったが，順調に回復し危機を脱した．しかし，結局，終末期医療中の高齢者の救命に時間を掛け過ぎたため，患者は家庭復帰は出来なかった反省は残る．

5) 自動描画ソフトと手入力ソフトとの不一致

自動描画ソフトは 95 %以上の一致性 (20 回に 19 回以上の正確さ) はあるが, 残念ながら 100 %の正確性は無いことが分かった．

第一の問題点は Vital sign データの平均動脈圧取得を直接動脈圧測定値からの取り込みにしていたことにある．コンピュータは血液ガス測定時間を起点に最寄りの最近点の平均動脈圧 1 点の取得である．偶々，動脈採血者と血液ガス測定者が別々に存在し，動脈ラインフラッシュ時刻と血液ガス分析時刻が重なった場合である．手入力の場合我々は無意識に前後関係を見て，即座に平均からかけ離れていると無意識に取捨選択して平均値に近い値を使っていた．この失敗を契機に，平均血圧をコンピュータで取得する場合の優先順位は間接血圧測定を第 1 位にして，直接血圧測定を第 2 位にする方が良いことが判明した．しかし，血液ガス測定の度に間接血圧測定されていないのが現実である．

また，患者の咳き込みや体動と重なると，コンピュータはこれらを判断出来ないので，誤入力することになる．これを防ぐには現ソフトでは Vital sign の平均血圧，脈拍数，呼吸数，体温が怪しいと感じたら，コンピュータが取得した時間帯の Vital sign 記録呼び出しボタンを押して，そのチャートを参考にその場で直ちに修正入力出来るように，収集データ一覧表示の APACHE-II や SOFA ボタンを押すと監視・修正画面が開くようにしている．

APACHE-II 監視・修正画面とバイタルグラフ・ボタン (図 14)

バイタルグラフ・ボタンを押すと，コンピュータがデータ取得した時間の 1 時間分の Vital sign チャートが描出される．これを参照しながら，直腸温度，平均血圧，心拍数，呼吸数を手入力で修正をすることが出来る．しかし，修正は何度でも

図 14 APACHE-II 監視・修正画面とバイタルグラフ・ボタン

可能だが，修正データは上書き保存なので，最終修正データしか残ってはいない．修正データは APACHE-II 計算で自動取り込みデータより優先度が高いだけで，自動取り込みされた生データは最後まで保存され，修正データによって消されることはない．

SOFA 監視・修正画面と呼吸器データ・ボタンとバイタルグラフ・ボタン (図 15)

呼吸器系領域の呼吸器データゥ椒織鵑魏，垢函 PaO_2/FiO_2 (P/F ratio) のデータを取得した時刻前後の人工呼吸実測データが 1 分刻みで参照出来る．これを参照しながら吸入気酸素濃度 (FiO_2) の修正が可能で，修正入力すれば PaO_2/FiO_2 は直ちに再計算される．さらに，PaO_2 を修正することも勿論可能である．

また，心血管系領域のバイタルグラフ・ボタンを押すと，平均動脈圧を取得した時刻を含んだ 1 時間分の看護記録チャートを描出するので，平均動脈圧, および, 心血管系作動薬の使用状況を参照出来る．平均血圧, および, 心血管系作動薬剤名とその投与量を入力すれば，平均血圧スコアと薬剤スコアを再計算し，その高い方を心血管系スコアとして再計算するが，これを修正登録して初めてデータの書き換えが完了する．修正データは自動取り込みデータより SOFA 計算で優先して使われるだけで，自動取り込みされた生データはずっと保存されている．しかし，修正データは次々上書き修正されるので，最終修正入力データしか残っていないのは APACHE-II と同じである．

考　察

院内予測死亡率の推移グラフは素人目にも治療経過が一目瞭然に分かる．患者家族や主治医への説明に非常に重宝である．一度，計算させて APACHE-II グラフや SOFA グラフを描き出せば，その後はいつでも瞬時に引き出せる．また，その後にデータが追加されれば，計算時間を節約するために追加分だけの計算をして，前のグラフに継ぎ足して表現している．また，入力ミスが見つかれば，その日時の部分だけの修正データ入力をして，再計算させれば，グラフは描き換えられる．また，日時を指定して ICU 看護チャートを開く

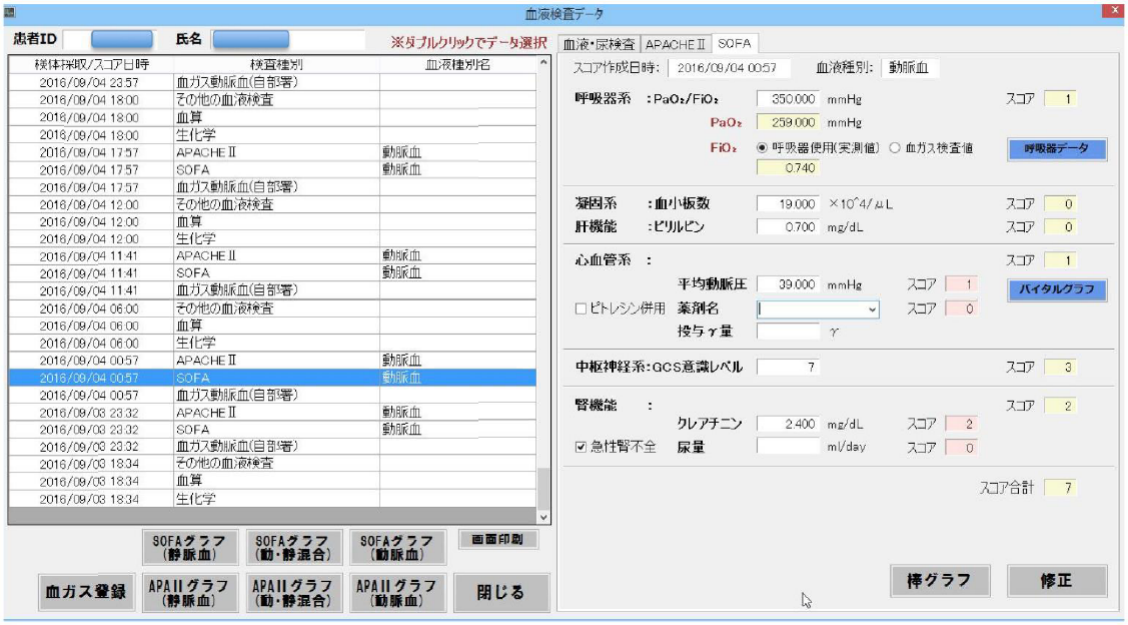


図 15 SOFA 監視・修正画面と呼吸器データ・ボタンとバイタルグラフ・ボタン

と，その日時を起点に 7 日毎遡って，APACHE-II グラフと SOFA グラフを描出出来て，印刷も可能である．紙カルテへのまとめとして挿入や家族への説明資料としても十分に機能を果たせる．さらに，臨床研究や研修医の症例実績としても役立つであろう．

Open 型の E-ICU に入室して，3 日以内に予測死亡率が 30 %以下にならない場合は ICU 専門医を中心にした Respiratory Support Team (RST) 回診による治療介入が行われている．これら上手く行かない症例には，1) 高齢者で貧血 (Hb<12g/dl) を放置してアルブミンや凍結血漿 (FFP) や細胞外液中心に循環血液量維持をするため積算水分出納バランスが 5,000ml 以上の過剰輸液になっている症例，2) 抗菌薬療法でグラム陰性菌を大量に殺菌して，患者の持っているエンドトキシン処理能力以上のエンドトキシンが放出されて warm shock なっている初期段階で過剰輸液をし過ぎてしまった症例，3) 左心不全で肺水腫なのに PEEP 不足と一回換気量不足の症例と，その逆に，4) 両心不全なのに過剰に PEEP を掛け過ぎて肺循環抑制によるショックと肺胞死腔増大による換気効率不全の症例などの医原性疾患が散見される．これら医原性疾患を早期発見し，軽症で回避させ，早期社会復帰を可能とする治療法のアルゴリズの確立にこの人工知能化の第一歩である院内予測死亡率自動描画ソフトを包含した E-ICU 電子カルテの部門システムは強力なツールに成るであろう．

市販されている ICU 部門の電子カルテには，血液ガス測定毎の APACHE-2 スコアと SOFA スコアの推移グラフ自動描画を標準装備にして欲しいものである．しかし，一般人が直接的に分かるような死亡率と言う表現が必要であろう．

我々は意識レベルの表現に Japan Coma Scale (JCS) を主に使ってきた．そこに Glasgow Coma Scale (GCS) や Richmond Agitation Sedation Score (RASS) を電子カルテ化と同時に組み込んだ．患者を観察した記入者が不慣れなのでそれぞれの分類表を表記して選択する方式にしている．しかし，同一時間に同一人がその 3 者の意識レベル評価をしているにも拘わらず齟齬が生じている現実に遭遇している．予後評価には意識レベルの

占める位置は極めて高いので，意識レベル評価判断も自動化するアルゴリズムの開発が必要に思われる．

結　論

95 %以上の信頼度のある院内予測死亡率の自動描画ソフトを開発できた．その予測死亡率の推移グラフは集中治療患者の治療の良否判定の物差しになり，且つ，治療サマリーになっていた．今後，100 %の信頼度を求めて人工知能化をするには，プロトタイプを動かしつつ，バグ取りをし，更に多くの臨床家のアイディアを盛り込んだ精度の高いアルゴリズムの共同開発が必要になるだろう．

参考文献

1. Knaus WA, Draper EA, Wagner DP. APACHE II: a severity of disease classification system. Crit Care Med. 1985:13(10):818-29
2. 稲田英一監訳 The ICU Book 第 3 版 付録 3 臨床的スコアリングシステム　APACHE II スコアリングシステム　865-868, メディカル・サイエンス・インターナショナル，2008，東京
3. www.fmu.ac.jp/home/masui/anesthesiologists/apache.html : APACHE (acute physiology and chronic health evaluation) II score
4. http://www.city.tonami.toyama.jp/tgh/departments/shinryo/kyukyu_icu_01.html#data00: 市立砺波総合病院｜集中治療における重症度評価と予後予測. 入院予測死亡率：
5. clinical.com :(APACHE II)Calculator-ClinCal :
6. 財津昭憲 ICU における呼吸管理支援ソフトの試作 第 40 回日本集中治療医学会総会　2013　松本文化会館
7. 財津昭憲，七田理恵子，今井明日香，和田麻美，竹内正志，籾木孝一朗，青野宏美，藤村直幸 我々の E-ICU の 2012 年度死亡率は世界標準の APACHE-2 による予測死亡率を下回っていた！　第 41 回日本集中治療医学会総会 2014 国立京都国際会館
8. Ferreira PL et al: Serial evaluation of the SOFA score to predict Outcome in critically ill patients. JAMA 2001:286:1754-58
9. 稲田英一監訳 The ICU Book 第 3 版 付録 3 臨床的スコアリングシステム APACHE II スコアリングシステム 869-870, メディカル・サイエンス・インターナショナル，2008，東京
10. http://www.fmu.ac.jp/home/masui/anesthesiologists/sofa.html#top：SOFA (sequential organ failure assessment) score
11. https://en.wikipedia.org/wiki/SOFA_score：SOFA score-Wikipedia

APACHE II スコアリングプログラムの開発

菅原友道，山鳥佑輔，齊田昌史，中野安耶子，
岡部悠吾，門麿義史*，浅賀健彦，白神豪太郎

はじめに

APACHE (Acute Physiology and Chronic Health Evaluation) II スコアは，ICU 入室患者の重症度を点数化 (スコアリング) したものであり，入院予測死亡率の算出に使用される [1]．スコアリングに用いられる項目は，意識レベル，生理学的パラメータの評価 (バイタルサインや血液検査)，年齢，合併する慢性疾患の有無である．スコアリングの作業は単純だが，確認する項目が多いため煩雑である．患者記録の電子化に伴い，この作業を簡略化できると考えた．

方　法

患者生体情報記録システムは「Prime GAIA®(日本光電株式会社)」(以下 GAIA®) を用いる．患者のバイタルサインに加え，実施した血液検査や血液ガス検査の結果が GAIA®に自動で取り込まれる．また，患者の意識レベルや呼吸音などの観察項目は，医師や看護師により GAIA®へ手動で入力される．GAIA®に取り込まれるデータのうち代表的なものを表 1 に示す．

GAIA®へ入力されたデータから，APACHE II スコアリングに必要なデータを自動収集するプログラムを作成する．APACHE II のスコアリングに必要な項目を表 2 に示す．収集されたデータを基準値に従ってスコアリングし，結果を出力するプログラムを作成する．一連の工程を図 1 に示す．

自動収集では正しくないデータ (ノイズ) を含んでしまう可能性がある (動脈血圧測定用のトランスデューサーがベッドサイドに落下して高い値を示す，など)．そこでスコアリングを行う者 (採点者) が自分で判断して，ノイズを除去 (手動カットオフ) できるように工夫を加える．具体的には，**1.** X 軸に経過時間，Y 軸に該当項目の数値 (血圧や心拍数) が表示されるグラフを用意する．**2.** グラフ上にマウスドラッグで上下に移動可能なバーを 2 本設置し 2 本の線の間のデータのみが有効となるように設定する．**3.** 採点者がバーを操作し，突出したノイズが 2 本の線の外側になるように調節する．その後有効なデータを並び替え (ソート) し，最高値と最低値を検索する．作業画面を図 2

表 1 GAIA®に取り込まれるデータの代表的なもの

【患者基本情報】
- 院内ID
- 身長/体重

【バイタルサイン】
- 心拍数
- 血圧
  非観血的/観血的
  収縮期/拡張期/平均
- SpO_2
- 体温
- 呼吸数
- BIS値

【検査結果】
- 動脈血pH
- 血清電解質値
- 血球数

【呼吸器関連】
- 酸素濃度
  PF比
- 一回換気量
- 気道内圧
- 気道コンプライアンス
- 呼気分圧
  酸素
  二酸化炭素

表 2 APACHEII のスコアリングに必要な項目

- 体温 / 平均動脈圧/ 心拍数/ 呼吸数
- A-a D_{O2} / P_{AO2} / 動脈血pH
- 血清重炭酸 / ナトリウム / カリウム
- 血清クレアチニン
- ヘマトクリット値
- 白血球数
- グラスゴー昏睡スコア
- 手術
  待機的 / 脳神経外科 / 緊急
- 慢性疾患
  肝硬変 / 心不全 / 慢性閉塞性疾患
  慢性透析 / 免疫不全状態
- 年齢
  44歳以下 / 44-54 / 55-64 / 65-74 / 74歳以上

香川大学医学部附属病院 麻酔・ペインクリニック科
*日本光電工業株式会社 IT ソリューション事業本部 生体システム技術部

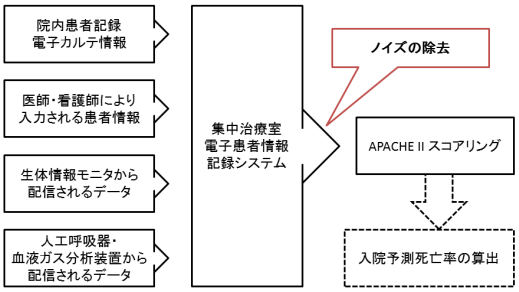


図 1 患者データからスコアリングを行うまでの流れ

電子カルテから転送されるデータの他，ベッドサイドのモニタ類から連続的に送信されるデータ等が，集中治療室の電子患者情報記録システムのソフトウェアへ記録される．記録された情報のうち，スコアリングに必要な項目に含まれるノイズを除去し，自動的に結果を計算する．

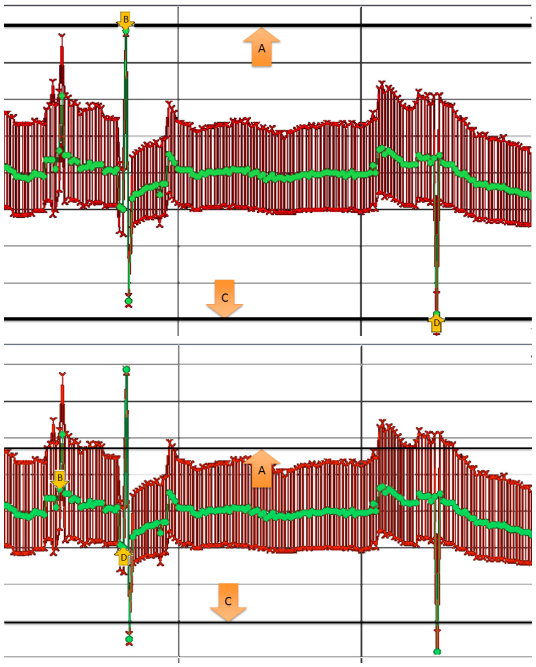


図 2 手動カットオフの作業画面–実行前/後

A の水平バーをマウスドラッグで移動させ，ノイズと思われるプロットよりも下側へ置く (最大値の閾値を決める)．B の矢印は水平バー以下のプロットのうち，最大値を示すプロットへと自動で移動する．同様に C の水平バーを移動させ，ノイズのプロットよりも上側へ置く (最小値の閾値を決める)．D の矢印は水平バー以上のプロットのうち，最小値を示すプロットへ移動する．

に示す．観察者は全てのスコアリング結果を確認し，必要と思われる場合に手動カットオフを行う．

表 3 項目別のノイズの原因

【心電図】
- 患者の体動
- 看護師や作業療法士による体位変換

【動脈血圧】
- 血液ガス検査用採血時
- トランスデューサーの位置異常
- 圧ラインの閉塞

【人工呼吸器】
- 自発呼吸出現時の呼吸数カウント異常
- 自発呼吸出現時の呼気二酸化炭素分圧の数値異常

【他】
- 人為的な入力ミス

結　果

自動で収集された値の多くはそのままスコアリングに採用された．一部にノイズがみられたため，採点者が手動カットオフを用いて除去を実施した．動脈血圧や呼吸数などのデータではノイズと思われるデータが多く，手動カットオフが必要であった．ノイズの原因は，患者の体動や血液ガス検査時の圧ラインの閉塞，トランスデューサーの位置異常などだった．主なノイズの原因を項目ごとに表 3 に示す．

考　察

今回我々が考案した手法は観察者による判定が必要ではあるが，臨床医の目を必ず通すという点において，得られた結果の正確性は高い．また，検査結果の数値データ一覧からスコアリングに該当する値を選び出すという従来の作業と比して，大幅に時間を短縮できる．この手法は従来のノイズ除去の手法と比較すると単純であり，プログラム設計上複雑な理論を要しないため組み込みやすく，SOFA スコアなどの同様のスコアリングシステムに応用が容易である．

観測対象から生ずるノイズにはランダムなものと周期的なものがあり [2]，ランダムなノイズは観測対象の周期を抽出することにより除去されることが多い [3]．今回問題となったノイズの多くはランダムに生ずるものであると考えられるので，既存のノイズリダクションの手法を適応することで除去が可能となるかもしれない．

まとめ

新しいノイズ除去の手法を利用して，APACHE II スコアを半自動で計算するプログラムを開発した．

参考文献

1. Knaus, William A., et al. : APACHE II: a severity of disease classification system. Critical care medicine 13 : 818-829, 1985.
2. 小杉幸夫, 武者利光:生体情報工学. 森北出版, 2000.
3. 吉田侑冬, 中川大輝, 辛島彰洋, 中尾光之, 片山統裕. 独立成分分析を用いた内因性光信号の光源ノイズ除去アルゴリズムと評価. 生体医工学, 53(6), 328-335,2015.

ビデオ喉頭鏡 The McGRATH^{TM}MAC でのビデオ録画方法の考案

中尾正和, 梅田絢子, 片岡宏子, 河本佐誉子,
本多亮子, 村上俊介, 佐々木幹子, 古賀知道

はじめに

ビデオ喉頭鏡 McGRATH MAC (Aircraft Medical, 英国. 以下 McGRATH と略) は古典的なマッキントッシュ型喉頭鏡に類似した形状で, 通常喉頭鏡と同様に直視での挿管も可能であり, ビデオ画面を利用した気管挿管もできる. 肉薄ディスポーザブルブレードでビデオ画面は視野角が多少上向きになっているため, 開口制限患者や直視視野での挿管困難症例にも有用である.

2011/10 に Covidien (現 Medtronic) と世界販売契約し世界中での販売が始まり, 2012 年秋には日本に導入され, 使いやすさと 20 万円の低価格戦略とがあいまって急速に普及してきた. しかし, 現時点 (2016 年) でも, 録画機能つき McGRATH は未だ市販されていない. そのため, 診療録や教育用として McGRATH での画像や動画を記録するには, 現状では次の **1. ビデオ画面の直接撮影**, **2. 鳥瞰図として全体像撮影** (ビデオ画面と挿管者を含めて広範囲を高解像度で撮影) の 2 方法しかない.

方　法

McGRATH のビデオ画面の直接録画

1 のビデオ画面の直接録画については, すでに 2014 年日本麻酔学会学術集会で惣谷昌夫 Dr が報告している (惣谷モデル)[1]. iPod のカメラにマクロレンズを装着したアクリル板製アダプター作成し, McGRATH のビデオ画面にゴムバンド固定する (図 1).

ゴムバンド固定ではカメラ位置がずれやすいので, 我々はビデオ画面に側面から差し込んで装着固定する撮影ボックス (鏡筒) 型に改良し段ボールで作成した (図 2). 鏡筒長は使用する iPod や

図 1 McGRATH のビデオ画面を iPod で撮影する惣谷モデル

図 2 McGRATH のビデオ画面に撮影ボックス (鏡筒) をスライドインして iPhone で撮影

iPhone カメラの視野角に合わせる. 段ボールは入手が容易で, カッターと接着剤のみで作成費用はほぼ人件費のみであった. (ちなみに現在市販されている iPod や iPhone のカメラにはマクロ撮影機能がありマクロレンズは不要である) McGRATH のビデオ画面は 2.5 インチだが, iPod や iPhone の画面が大きく, 老眼の麻酔科医にも優しい.

iPod や iPhone 用モデル以外に, さらに当院では研修医たちが利用している小型ビデオレコーダー JXD990[2] のカメラ専用版も試作した. こちらのカメラは固定焦点のため, 凸レンズ (100 円均一で売られている＋ 3.0 の老眼用レンズ) を加えてマクロレンズを代用した. このカメラでの

JA 広島総合病院麻酔科

静止画は診療メモにも十分利用できるが，動画はモニター画面が実時間よりも遅延しており，慣れを要するため初学者向けの実用性は低かった．

McGRATH 画面を直接録画するこつ

iPhone や iPod のカメラは右上端にあるため倒立させて装着するが (図 2)，録画時に天地を自動認識してくれるため撮影後の天地変換は不要である．録画開始時にカメラを立てて倒立位と認識させるのがポイントである．

2．挿管風景全体を撮影

2 の挿管風景全体を鳥瞰図として撮影するには，撮影を邪魔されないようにカメラ位置に注意がいる．挿管者の右上後方からだと，撮影カメラと McGRATH のビデオ画面の間に障害物が少なく，挿管介助も容易で撮影できた [2]．全体像の撮影には HiVision レベルの高解像度デジカメやビデオカメラで撮影すれば，McGRATH のビデオ画面を拡大して検証できる (図 3)．カメラの固定には大型三脚以外に，手術室にある点滴ポールへのカメラ固定する器具 [2] を使用すると準備が簡便になった．

周りに立つ見学者等がカメラの前に割り込むと撮影の確実性は落ちる．録画開始終了の操作にはリモコンが使えると便利である．

ウエアラブルカメラの可能性

McGRATH ビデオ画面と撮影カメラとの間に障害物を少なくするには，ウエアラブルカメラも選択枝になりうる．われわれのパイロット研究で，メガネ型カメラ (Full HD，カメラは中央にあるタイプ，画角水平 45 度，垂直 25 度)(図 4) を装着して撮影を試みた．9 名の被検者を対象に，挿管マネキンに対して McGRATH での 2 種類の挿管 (喉頭の直視挿管とビデオ画面での間接視挿管) した際の録画に McGRATH のビデオ画面が撮影できたか否かを確認した [3]．

撮影された動画には McGRATH のビデオ画面が含まれた例は，喉頭直視挿管時には 0/9 であった．喉頭直視では録画開始時には画面に入っていても，視点が喉頭に近づいて録画視野外になってしまった．ビデオ画面での間接視挿管では 4/9 と撮影率が増えた．

図 3 挿管風景全体を HiVision カメラで撮影

図 4 メガネ型カメラ（カメラは眉間中央にある）

挿管者が裸眼やコンタクトレンズであれば，メガネ型カメラは分泌物飛散防止のゴーグルと思えばよい装着感であった．また，挿管操作時には，挿管者によっては頭位ではなく眼球のみを動かすものもいた．メガネ型カメラで撮影するという予備知識／指導を行わなかったためと考えられられた．確実に McGRATH のビデオ画面をウエアラブルカメラで撮影するには，撮影者が録画することを意識し，眼球のみではなく頭位を McGRATH に合わせるように指導するのがポイントであった．さらに撮影の確実性をたかめるにはカメラはより広角 (垂直視野角 50 度) が望ましいと考えられた．

まとめ

McGRATH での録画方法を試みた．McGRATH のビデオ画面に撮影ボックスを装着する方法が現実的，経済的であった．録画機能つき McGRATH が出現するまででも，これらの小道具を利用すれば，一般の教育病院においても安価に安全で確実に気道確保技術を伝えられることはできそうである．

本論文の主旨は日本麻酔集中治療テクノロジー学会学術集会 2016 東京とメガネ型カメラについては日本麻酔科学会学術集会 2017 神戸にて発表した

参考文献

1. 惣谷 昌夫ら，ビデオ喉頭鏡の画像をより簡単に撮るためのアタッチメント．日本麻酔科学会 第 61 回学術集会 2014　横浜
2. 中尾正和　汎用喉頭鏡をビデオ喉頭鏡に変身させる小型ビデオカメラ利用の変遷麻酔・集中治療とテクノロジー 2013　44- 北斗プリント　京都, 2014
3. 中尾正和ら　ビデオ喉頭鏡 The McGRATH MAC でのビデオ録画方法の考案日本麻酔科学会学術集会 2017

ABSTRACT

The development of video recording devices for McGRATH^{TM}MAC.

Masakazu Nakao, Ayako Umeda, Hiroko Kataoka, Sayoko Kawamoto, Ryoko Honda, Shunsuke Murakami, Mikiko Sasaki, Tomomichi Koga.

Video laryngoscopes are getting popular to learn/teach skills for tracheal intubation. McGRATH^{TM}MAC (Aircraft Medical, UK) combines the friendly direct laryngoscopy (mimic to Macintosh blade) and video laryngoscopy. Thanks to the thin disposable blade and shifted wide video view, it is useful for difficult airway patients as well. The affordable price setting gets favor with many clinicians. The drawback of McGRATH is the lack of video recording capability. We developed video recording devices for McGRATH. Possible approaches are a direct recording of the display unit of McGRATH and the video recording in a bird's-eye view.

We developed the cardboard optical boxes attached with iPhone or iPod, which were fixed by sliding to the display units. We think this is a reasonable solution.

The high-resolution camera could record a bird's-eye view with tall tripods. But, the obstacle between McGRATH and camera could interfere with the view. Alternatives were wearable cameras. Tested wearing eyeglass camera (vertical viewing angle: 25 degree) revealed that McGRATH view were recorded only 4 cases out of 9 cases. Further developments are necessary.

Key words: McGRATH^{TM}MAC, video recording, video-laryngoscopy, education, tracheal tube intubation.

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

脊髄くも膜下麻酔のシミュレーションという視点から見たミエログラフィー

野上俊光，田中佳代，東　兼充*

はじめに

脊髄くも膜下麻酔 (Subarachnoid block: SAB) が無効な時，注入した局所麻酔薬がどこへいったのか不明である．SAB と同様の手技であるミエログラフィー (脊髄腔造影) では，レントゲンに写る造影剤をくも膜下腔に入れている．ミエログラフィーの像を観察すれば，SAB 時に注入した局所麻酔薬の動態について有用な情報が得られる可能性が高い．ミエログラフィーの画像は SAB のシミュレーション画像として捉えられるのではないかと考え検討した．

方　法

対象：腰下肢痛を訴えて当院へ来院し，2000 年 7 月から 10 月までの 4 ヶ月間にミエログラフィーを行なった全症例 210 例を対象とした．

ミエログラフィーは，造影剤イソビスト 240 (一般名：イオトロラン)10 ml を使用した．穿刺は患者左側臥位，TOP 社の 23 G カテラン針 (60 ミリあるいは 70 ミリ) にて 4 名の医師 (2 名は指導医クラスで麻酔科医と整形外科医，あとの 2 名は研修医クラスの整形外科医) が行なった．撮影後の画像は，毎週行うフィルムカンファレンス時にチェックし，明らかな造影剤の漏れを認めない例は成功例，脊髄腔以外に造影剤の漏れが認められる例は異常例とした．患者の年齢，性別を記録し，異常例は造影剤の漏れた部位を記録した．硬膜外に漏れた症例と硬膜下に漏れた症例の年齢と性別についても記録した．

統計処理は，2 群間の比較に unpaired t-test を，男女比の比較に 2 × 2 分割表の検定をおこない，5 %の有意差で判定した．数値は平均値±標準偏差で示した．

成尾整形外科病院 麻酔科
*くまもと麻酔科クリニック

殆どが硬膜外造影となった異常像が上記調査期間以後にあったので，この 1 症例は画像のみを採用し，統計処理には加えなかった．

結　果

対象症例 210 名の年齢は 14 歳から 78 歳，男性 146 例，女性 64 例であった．

造影剤の漏れを認めない成功例は 174 例 (82.9 %)．年齢分布は 14 歳から 78 歳．男女別では男 124 例，女 50 例であった (図 1)．

くも膜下腔以外に造影剤が漏れた異常例は 36 例 (17.1 %)．年齢分布は 21 歳から 73 歳．男女別では男 22 例，女 14 例であった．

成功例の平均年齢は 56.6 ± 15.9 歳，異常例は 43.1 ± 15.7 歳であり，両者の年齢には有意差があった (図 2)．成功例と異常例の男女比に有意差は無かった．

ミエログラフィーの異常所見：36 例の造影異常例に 59 件の異常注入所見が見られた (図 3)．硬膜外への漏れが 29 件 (49.1 %) と半数を占めた．硬膜下，すなわち硬膜とくも膜の間に造影剤がとどまる現象が 18 件 (30.5 %) にみられた．神経根に流れた像が 9 件 (15.3 %) に認められた．針の通過路に漏れた例が 2 件 (3.4 %)，椎間板内に注入された例が 1 件 (1.7 %) あった．

造影剤の漏れや溜まりがない成功例の一つを図 4 に示す．殆どが硬膜外注入となった例を図 5 に示す．硬膜下への溜まり，硬膜外への漏れ，神経根への流出などが認められた例を図 6,7,8,9 に示す．椎間板内注入あるいは椎間板造影追加の例を図 10 に示す．穿刺部位の刺入経路に造影剤が認められた例を図 11 に示す．

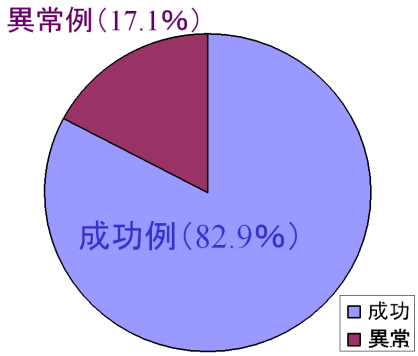


図 1．全 210 例のうち，成功例は 174 例 (82.9 %)．異常例は 36 例 (17.1 %) であった

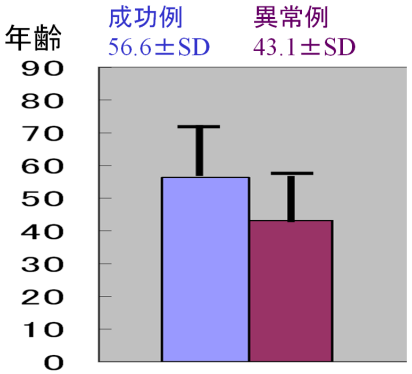


図 2．成功例の平均年齢は 56.6 ± 15.9 歳，異常例は 43.1 ± 15.7 歳であり，両者の年齢には有意差があった．両者の男女比に有意差は無かった．

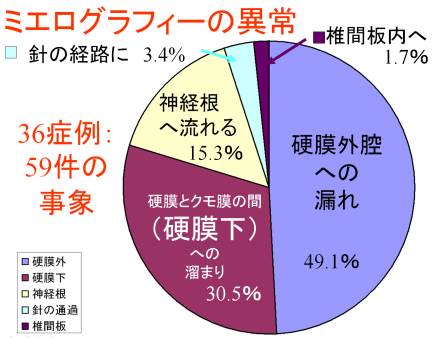


図 3．ミエログラフィーの異常所見

36 症例に 59 件の異常所見が見られた．硬膜外，ついで硬膜下への漏れが多い．硬膜外への漏れが 29 件 (49.1 %)，硬膜下，すなわち硬膜とくも膜の間に造影剤がとどまる現象が 18 件 (30.5 %)，神経根に流れた像が 9 件 (15.3 %) に認められた．針の通過路に漏れた例が 2 件 (3.4 %)，椎間板内に注入された例が 1 件 (1.7 %) あった．

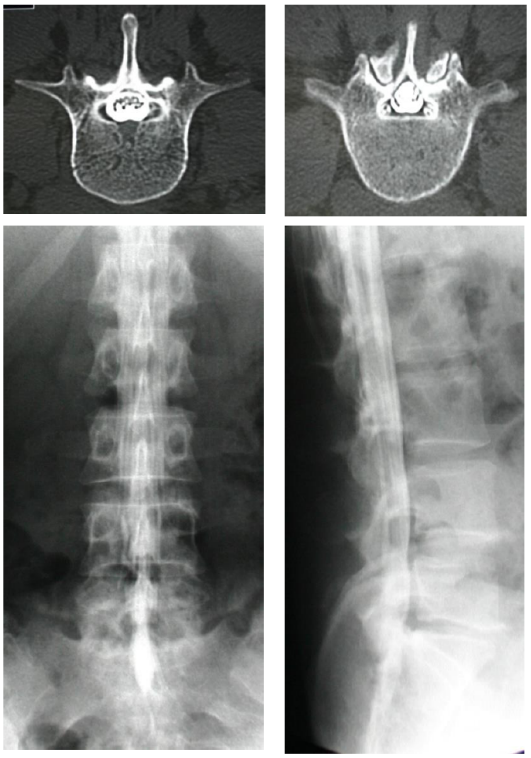


図 4．造影剤の漏れや溜まりの見られないミエログラフィー成功例

検　討

薬液が悪いのか，手技が問題か?

くも膜下腔に注入したはずの薬液はどこにいったのか?本当に針先はくも膜下腔にあったのか?SAB の効果が発現しないときにこれらの疑問が湧く．

SAB 施行者によっては局所麻酔薬の劣化や失効を疑う人もあり，製薬会社に問い合わせがいくこともある．局所麻酔薬のうち，コカイン，テトラカイン等のエステル型は劣化しやすいし滅菌時の加熱で効果が減弱しやすい．リドカイン，ブピバカインなどのアミド型は安定性が高く，日本でよく使われている．薬液の検査をした報告によると，薬液に異常が見つかった事例は，殆んどなかった[1)]．日本では安定性の高いアミド型の使用が殆どなので，SAB 時の無効例はくも膜下腔以外への誤注入が原因と考えたがよい．

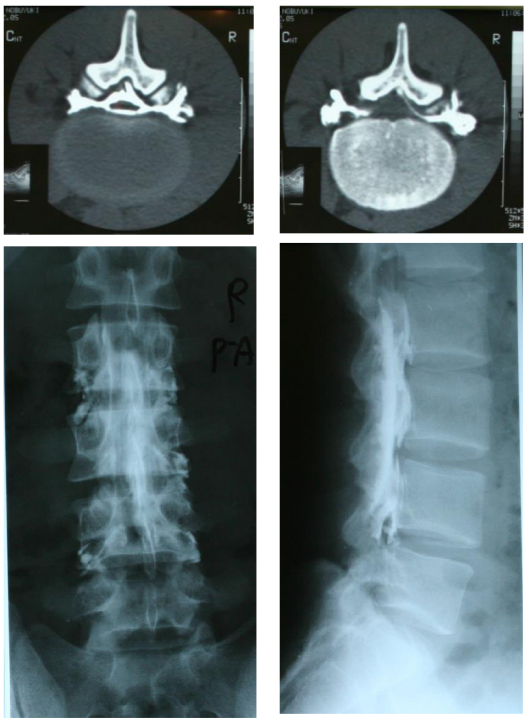


図 5．殆どが硬膜外注入となった例 (調査期間後の 1 例)

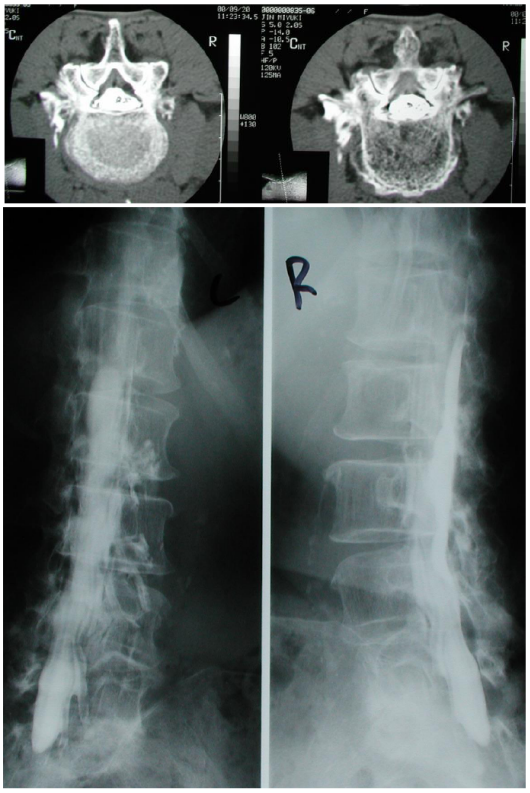


図 6．硬膜下への溜り (L2 から L4 にかけて強く，斜位で著明) と，硬膜外・神経根への漏出 (左側臥位で穿刺しているので，左側への漏出が多い)

どこに注入されているのか? 頻度は?

我々の結果ではくも膜下腔以外に造影剤が注入された割合は 17 %ほどで，その半分は硬膜外腔へ，3 割は硬膜下腔に注入されていた．

SAB 時に硬膜下に注入される頻度はどの程度あるのだろうか．ミエログラフィーの時に硬膜下造影になった報告を見ると，酒井ら [2] は 110 例の脊髄腔造影のうち 6 例に硬膜下腔が造影された (5.5 %) と報告し，Schultz ら [3] は脊髄腔造影 140 例中 9 例 (6.4 %) に造影剤が誤って硬膜下腔に注入されたと報告している．Jones ら [4] は 10〜13 %と報告しており，我々の症例では 210 例中の 18 例なので 9.6 %になる．

ミエログラフィーとは少し異なるが，Mehta ら [5]は硬膜外ブロック時にレントゲンで造影剤を使い針先を確認した．100 例の硬膜外ブロックを行い，17 例に硬膜外以外に漏れが見られ，そのうち 7 例が硬膜下に漏れていた．これらを俯瞰すると，ミエログラフィーや硬膜外ブロック時の硬膜下注入は 10 %前後あると推定され，決して少ない数字ではない．

なぜ誤注入が起こるのか

くも膜下腔の確認には，脳脊髄液の逆流が用いられる．脳脊髄液の逆流を確認した上で薬液を注入しているにもかかわらず，造影剤はくも膜下腔以外の硬膜外腔や硬膜下腔などに注入されていた．

針先ベベル面の穴は小さいものの，ある程度の面積を有している．この針穴から脳脊髄液が逆流しても，針穴全部がくも膜下腔に入っているわけではない．そのため薬液を注入すると，硬膜とくも膜の間 (硬膜下腔) や硬膜外腔にも薬液が入っていく．

針先の固定が不安定な場合も，くも膜下腔以外

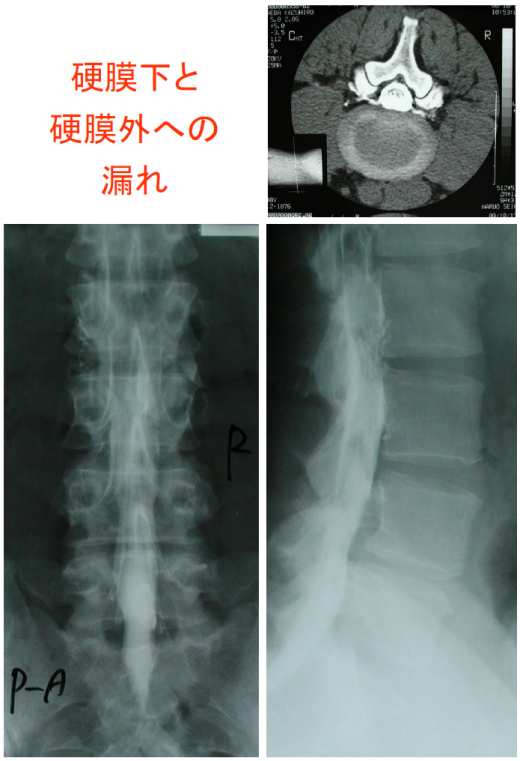


図 7．硬膜下と硬膜外への漏れ
穿刺部位と思われる L2/3 の硬膜管の前後に漏れが多い．硬膜下造影の特徴と言われる rail road track 様陰影が見られる．硬膜外にも漏れている．

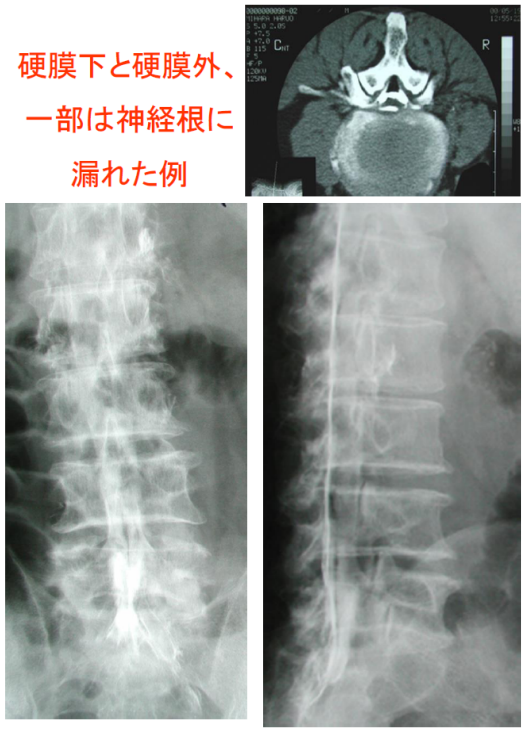


図 8．硬膜下と硬膜外、一部は神経根に漏れた例．
左の立位で撮影したと思われる前後像で，第 5 腰椎下部に白い造影剤が目立つ．穿刺部位の近所と思われる第 1，第 2，第 3 腰椎ちかくでは硬膜外から神経根のほうへも造影剤が流れている．右側の斜位像では硬膜外腔や背側の硬膜下に造影剤がたまっている．右上の CT 像では腹側と背側の硬膜下に造影剤がたまっており、黄色靭帯にも造影剤が付着しているので，硬膜外腔にも漏れていたのがわかる．

への薬液注入が生じやすくなる．術者が逆流を確かめようと注射器に陰圧を加えると，引く力で針先は浅くなり，注入操作では押す力で針先は深くなる傾向になる．

ミエログラフィーで注入する造影剤の量は 10 ml と SAB の時より多いし，粘性が高いので注入抵抗が大きい．そのため時々透視を入れ，くも膜下腔以外に漏れていないか確認して注入部位を修正したり，漏れた造影剤を回収したりしている．このとき硬膜下注入になった造影剤の回収を試みても，回収が困難であったり，針先の位置を深くしても，硬膜下注入の状態が続くことがある．

硬膜下注入を避けるには

硬膜下注入を避けるには，針先を脳脊髄液が逆流を始めた位置からもう少し進め，針先を回転させて脳脊髄液が安定して逆流する位置をさぐると，くも膜を貫いている確率が高くなるのでよい [1]．細い穿刺針では逆流が遅いので，ゆっくり観察する必要がある．

造影剤は粘稠なので注入抵抗が大きくなる．細い針を使うにも限度があるため，ミエログラフィーでは 23 G のカテラン針を使用している．近年の SAB では Post Dural Puncture Headache (PDPH) を減らすために 25 G や 27 G の細い穿刺針を用いたり，先端の孔をなくしたペンシルポイント針が使われるようになった．局所麻酔薬の粘度は造影剤より低いので，SAB 時には細い 25 G や 27 G 穿刺針を選ぶことができる．針穴の面積が小さくなるので，くも膜下腔以外への誤注入

図 9．硬膜外腔と神経根への漏れ
CT 画像では両側の硬膜外腔に漏れているのが分かる．前後像では造影剤は左側の神経根の方に多く流れている．

も減ると考えられる．それでもペンシルポイント針での誤注入に警告を発している報告がある [1]．

硬膜外腔に注入された薬液の効果は

硬膜外腔に漏れた薬物は，硬膜外腔のみでなく側臥位で下にしていた左側の神経根のほうにも流れていた．3 ml 前後の SAB 用局所麻酔薬注入であれば，硬膜外腔に誤注入されてもテスト量程度なので麻酔効果は期待できない．局所麻酔薬の殆どが神経根に流れた状態は，皮膚分節の一部のみに麻酔効果が出る状態と相似すると考えられる．

硬膜下腔に注入された薬液の効果は

硬膜下腔に注入された薬物の挙動はどうなるのか? 薬液の一部は，穿刺孔から硬膜外腔に逆流して広がりえる．透視下でみている限りでは，穿刺孔が小さいためか，硬膜下のまま留まった場合が

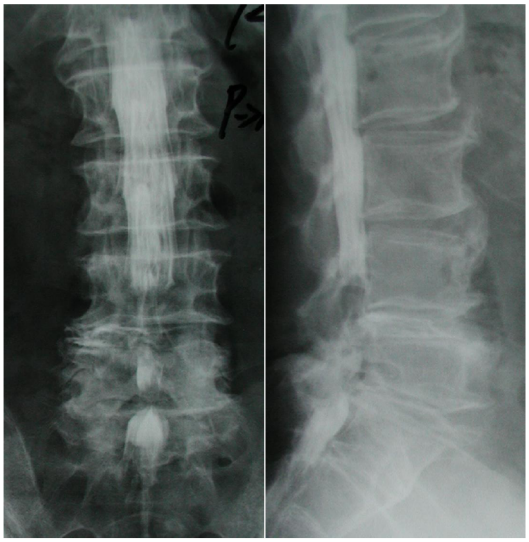


図 10．椎間板内注入、あるいは椎間板造影
L4/5 に椎間板ヘルニアがあり，造影剤は圧排されている．脳脊髄液が圧迫排除されているので，ドライタップになる事例．馬尾神経に針先が当たりやすいので施行中に痛がることが多い．

多かった．我々は腰部のミエログラフィーの後，頭低位にして頚部まで造影剤を移動させ，頚部の撮影をすることがある．透視下でみると，硬膜下に誤注入された造影剤は硬膜下のまま，腰部から頚部まで移動することが多かった．立位にすると硬膜下のまま腰仙部に移動してくる．その後の CT ミエログラフィー時にも，硬膜下に停滞したままの症例が多くみられた．

硬膜下腔に注入された薬液はどういう作用をするのか? SAB 時の硬膜下誤注入では少量なので合併症が出現しにくいためか文献は少ない．そこで硬膜外麻酔時の誤注入の文献を加味して検討した．硬膜下腔は硬膜とくも膜の間の漿液で満たされた狭い腔で，SAB に使用するような少量の局所麻酔薬を注入した場合は効果不明となり，SAB の失敗原因の 1 つと考えられている [6]．一方，硬膜外麻酔に使用するような局所麻酔薬の大量投与の場合は，遅発性の発現，広範な広がり，長時間作用を特徴とする作用態度を示し，硬膜外麻酔時の合併症の 1 つとして知られている [7]．

硬膜下腔の造影所見や局所麻酔薬の広がりにつ

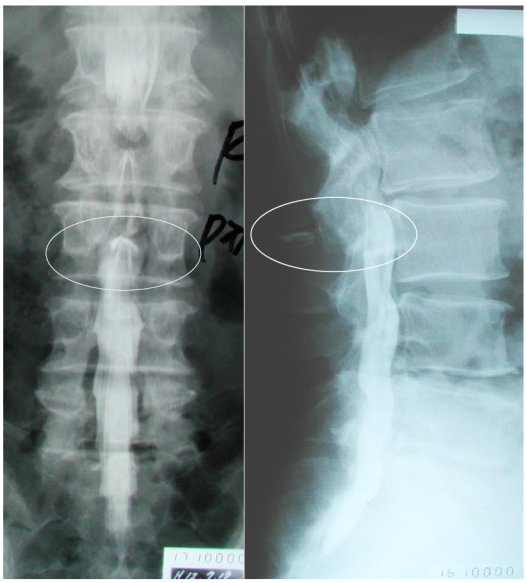


図 11．穿刺部位の刺入経路に沿って造影剤が見られた例（楕円内に示す）
L2/3 間，L3 の棘突起の上に造影剤がみられる．SAB の効果に及ぼす影響は殆ど無いと考えられるが，永久ブロック時の薬液だと，施行後の無用な疼痛の原因となりうる．

いて，嶋 [8] はくも膜と硬膜は前根では同一部位に付着するが，後根では別々に付着するため，硬膜下腔は後根付近が最も広い．そのため少量の造影剤を注入した正面 X 線写真では，後根付近に造影剤がプールしやすいため rail-road track 様陰影 (両側に線路のような線状陰影が認められ，椎間孔の位置に半月様の一部ふくらみがあり，中央は薄く均一な陰影)，側面像で脊柱管の前後縁に沿った線状陰影が特徴と紹介している．CT 像ではくも膜下腔と硬膜外腔の間に円形または半月状の陰影になるという．嶋は別の報告で注入の割合により造影所見や局所麻酔薬の広がりが異なると述べている [9]．嶋によると，造影剤や局所麻酔薬が多く注入されれば両側に数椎間広がる線状陰影となり臨床症状を示すが，片側や一部に線状陰影がみられる程度の量では，ごく一部が硬膜下腔に入った状態で臨床的な作用は出ないであろうという．

我々の対象症例は，くも膜下腔の造影が主体であり 10 ml と多量の薬液を使っているので，嶋らの硬膜外腔穿刺時とは少し事情が異なるが，造影剤の少ない硬膜下腔領域では rail-road track 様陰影がみられた．造影剤が多く入った硬膜下腔では塊として認められた．

持続硬膜外麻酔のチューブが硬膜下に留置された症例報告では，硬膜下腔に注入された薬物は脳脊髄液に拡散して遅延性や広範囲の麻酔効果を出すことがある．長時間の血圧低下や呼吸抑制を起こすこともある [10−13]．硬膜外麻酔に使用する局所麻酔薬の量は SAB 時より多いから，大半が硬膜下に誤注入されれば，くも膜から脳脊髄液への浸透や，くも膜の破綻による漏れ出しで，思いがけなく広範囲の麻酔効果や突然の血圧低下などの臨床症状や合併症が生じえる [14]．ディスポーザブルの Tuhoy 針が使われるようになってから硬膜下注入が増えてきたという意見もある [15]．

椎間板内への注入

椎間板内注入となった画像は，椎間板造影を意図的に追加したものか，偶発的におこったものなのか，今となっては明らかに出来なかった．著者が研修医の時の個人的な経験では，SAB 時に針先がやや深くなったところで抵抗消失を感じた事があった．脳脊髄液の逆流が無かったので，穿刺をやりなおしたが，高齢者の変性した椎間板は抵抗が減弱するので，くも膜下腔に入ったときのような抵抗消失を感じることがある．

CSF の逆流がない：ドライタップ

ミエログラフィーで，造影剤が排除されている図 10 に示した画像のような事例では，脳脊髄液の逆流が期待できないので，いわゆる dry tap に相当すると考えられる．穿刺部位周辺の狭窄が強いため，針先が馬尾神経に当たりやすく施行時に痛みを訴えることが多い．造影時は透視が使えるので，針先を少し引いて深さを確認し，痛がらない場所で連続透視をしながら造影剤を入れたことがある．針先より少し上方向や下方向の脊髄腔に造影剤が入っていくことがあった．通常の SAB 時には透視は使用していないので，穿刺部位を変更したほうが良い．

針跡の造影剤

針の通過した跡に造影剤が残っていた症例について考える．局所麻酔薬であれば僅かなので麻酔効果への影響はほとんどないと思われる．永久ブロックであれば，術後の無用な背部痛の原因になりえるので，液を漏らさないよう，内筒をいれてから抜針する丁寧さが必要になるであろう．

正常例と異常例の有意な年齢差について

我々の施設の対象患者は腰痛が多いため，変形性脊椎症や腰部脊柱管狭窄症の症例が多い．そのため，高齢者のほうに造影の異常例が多いのではないかと予想していた．しかし実際はミエログラフィーの成功例より異常例のほうが，平均年齢が有意に低かった．

高齢者はくも膜下腔への穿刺は困難なものの，穿刺後の薬液の注入に関しては成功例が多かった．造影検査の現場をみると，若い患者の方が痛みの感受性が高いため，針の刺入や薬液注入時に安静を保ちにくく，針の固定が困難となりやすい傾向がみられた．また若い患者の方が組織間の癒着がすくないと考えられ，硬膜下にも注入されやすいことなどが因子として考えられる．高齢者では，穿刺までは困難な症例があるものの，体動が若年者より少ないので，針先の固定はしやすい．

SAB の成功率を上げるには

SAB の成功率を上げるには，解剖を頭に入れ，頚椎も屈曲させて体位をしっかりととり，患者の体動によるズレを避け，針の先端が硬膜を過ぎ脳脊髄液の逆流を見た後，もう少し進めるか針を回転させてくも膜を抜けるようにする手間をかけ，薬液注入時には針の固定をしっかりと行い，必要十分な薬液量をくも膜下腔に確実に入れる基本手技の遵守が重要である [1]．薬液注入後は PDPH を減らすため，針の回転を戻し内筒を入れてから針を抜くことが勧められている [16]．ベベル面を持った針での穿刺については野上ら [17] の報告も参考になる．

近年の SAB 手技では硬膜穿刺後頭痛を減らすため，25 G，27 G などの細い針や，先端にカット面のないペンシルポイント針などが用いられている．針が細くなるほど先端の針孔面積も小さくなる傾向になるので，硬膜下や硬膜外腔への誤注入は減少する可能性がある．

まとめ

ミエログラフィーの造影剤漏れを検討し，SAB が無効になる薬物動態を類推した．硬膜外腔に漏れるものが多かった．硬膜外へ漏れた時，一部は神経根へ流れた．硬膜下 (硬膜とくも膜の間) に注入される事があった．針の刺入経路に残る事があった．椎間板内に注入される事があった．

ミエログラフィーの異常造影所見は，硬膜下や硬膜外への誤注入が可視化され，SAB のシミュレーションとして有用である．

本論文の一部は 2000 年第 38 回九州麻酔学会，2000 年第 20 回日本臨床麻酔学会全国大会 (佐賀) にて発表した．

引用文献

1. Fettes PD, Jansson JR, Wildsmith JA: Failed spinal anaesthesia: mechanisms, management, and prevention. Br J Anaesth 2009 ; 102: 739-48.
2. 酒井雅人，加藤康之，浜田恒ら：脊髄造影検査施行時の偶発的硬膜下腔造影について．日本ペインクリニック学会誌 2001; 8: 141.
3. Schultz EH Jr, Brogdon BG: The problem of subdural placement in myelography. Radiology 1962 ; 79: 91-6.
4. Jones MD, Newton TH : Inadvertent extra-arachnoid injections in myelography. Radiology 1963 ; 80: 818-22.
5. Mehta M, Salmon N: Extradural block. Confirmation of the injection site by X-ray monitoring. Anaesthesia 1985; 40: 1009-12
6. Sechzer PH: Subdural space in spinal anesthesia. Anesthesiology 1963; 24: 869-70.
7. Boys JE, Norman PF: Accidental subdural analgesia: A case report, possible clinical implications and relevance to ”massive extradurals”. Br J Anaesth. 1975 ; 47: 1111-3.
8. 嶋　武：硬膜下腔造影所見の検討．臨床麻酔 2000; 24: 1113-6.

9. 嶋 武：X 線透視下硬膜外腔穿刺法と硬膜外カテーテル造影. 日本臨床麻酔学会誌 2011; 31: 202-8.
10. 柴田恵三，村上誠一，生垣正ほか：迅速なブロックの広がりを示した硬膜下ブロックの 1 例. 麻酔 1988; 37: 365-9.
11. 齋藤和彦，粕田晴之，平林由広ほか：バイタルサインと造影により診断された偶発的硬膜下ブロックの 1 症例. 麻酔 1995; 44: 252-5.
12. 福島　歩，奥谷　龍：偶発的硬膜下ブロックの経験. 麻酔と蘇生 1998; 34: 85-7.
13. 奥山　淳，斉藤芳儀，雨森英彦ほか：全身麻酔と併用した硬膜外麻酔における硬膜外カテーテルの硬膜下腔挿入. 麻酔 1995; 44: 1373-6,
14. Elliott DW, Voyvodic F, Brownridge P: Sudden onset of subarachnoid block after subdural catheterization: a case of arachnoid rupture? Br J Anaesth 1996; 76: 322-4.
15. 野中明彦，中込昌子，鈴木まほみ ほか：造影剤の硬膜外腔での広がりと造影像の比較検討. 日本臨床麻酔学会誌 1992; 12: 113-8.
16. Deibel M, Jones J, Brown M: Reinsertion of the stylet before needle removal in diagnostic lumbar puncture. Emerg Med J 2005; 22: 46.
17. 野上俊光，東　兼充：紙モデルを使った注射針の針先ベベル面と穿刺軸とのシミュレーション. 麻酔・集中治療とテクノロジー 2014, 89-99.

ABSTRACT

Myelography viewed as a simulation of spinal subarachnoid block

Toshimitsu Nogami, Kayo Tanaka, Kanemitsu Higashi*

When a spinal subarachnoid block (SAB) is ineffective, it is unknown where the injected local anesthetic travelled to. In myelography, which is the same procedure as SAB, a contrast medium is injected in the subarachnoid space during X-ray usage. Images of myelography can be considered as a simulation image of SAB.

We examined contrast medium leakage and analogized the pharmacokinetics that invalidated SAB. Myelography of 210 cases were examined, 82.9 % showed no leakage, while some leakage outside the subarachnoid space was seen in 17.1 % of the cases.

When the leakages were found, about a half of them were in the epidural space (49.1 %), followed by the subdural space(30.5 %), the nerve root(15.3 %), and the passway of the needle(3.4 %). When leakage into the epidural space occurred, a portion also flowed to the nerve root.

Images of contrast medium leakage of myelography are useful as a simulation of SAB by visualizing erroneous injection into the extradural space and/or subdural space. Images of myelography provide useful information on the dynamics of local anesthetics injected during SAB.

Key Words:
myelography, subarachnoid block, epidural space, subdural space,simulation, failure,

Division of Anesthesia, Naruo Orthopedic Hospital, 12-24 Okada-machi, Chuo-ku, Kumamoto City,862-0958

**Kumamoto Masuika Clinic, 1st F Tuda-haitu 1-3-1 Nuyamazu, Higashi-ku, Kumamoto City, 861-2102*

積層型 3D プリンターによる CT 画像からの脊椎骨造形

岩瀬良範，堀越雄太，長坂浩

はじめに

我々は，脊髄くも膜下麻酔や硬膜外麻酔を施行する際に，CT や MRI 画像を 3D ビューワーで検討する有用性 [1] を以前から説いてきたが，麻酔科の日常診療における 3D ビューワーの使用は必ずしも容易とはいえない．その大きな理由は，ビューワーの操作が必ずしも容易でなく，穿刺イメージと同一の状況が再現しづらいことにある．また，この 10 年の流れの中で，定型的診療における 3D ビューワーの操作は，放射線科技師によるルーチンワークとなり，本課題のような一部の個別対応は多くの医療機関で容易には実現可能とはいえない．しかし，一方で脊髄くも膜下麻酔や硬膜外麻酔は，多くの制約の中でも適応症例には安全な施行が求められる．穿刺イメージと同様の状況を再現する，という課題の実現には，実物のレプリカの作成が最適であろう．今回，我々は安価な積層型 3D プリンターを用いて，CT 画像から脊椎骨を造形してみた．

方　法

CT 画像は演者 (I) の DICOM 画像を用いた．これを MacOS X 下の 3D-DICOM ビューワーの Osirix Light (Pixmeo, Switzerland) に読み込み，骨レベルの 3D サーフェースレンダリングを行い (図 1)，3D プリント可能な STL 形式のファイルとして保存した．STL (Standard Triangulated Language) とは微小な三角形の集合により，立体を表現する方法である (図 2A,B)．出力された STL ファイルが 3D プリンタで矛盾なく造形可能かどうかを検査し，不合格の場合は修正のために netfabb basic，meshmixer (ともに Autodesk, USA) を用いた．3D プリンターは，Scoovo C-170 (Abee, 横浜市) を用い，同機を制御する G-code 作成には付属の Scoovo studio (Windows xp, 7-10

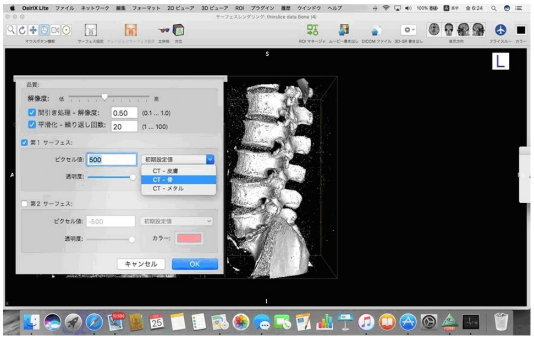


図 1 Osirix による骨レベルの 3D サーフェースレンダリング

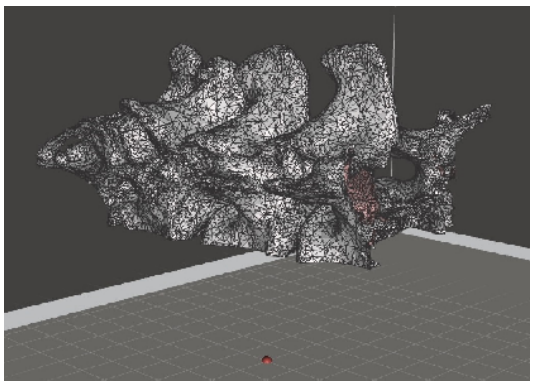


図 2A Meshmixer(R) による微小な三角形による立体の表現例

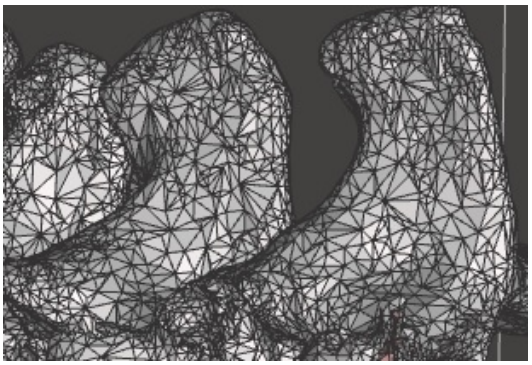


図 2B 棘突起部分の拡大例 (Meshmixer(R))．
微細な三角形の集合として立体が表現されている．

埼玉医科大学病院 麻酔科

写真 1A　造形成功例

水平断面を下から撮影．横縞は樹脂の積層で，規則正しい縦縞はサポート材，底面には薄くラフトが広がっている．脊柱管内および横突起直下のサポート材は除去した．

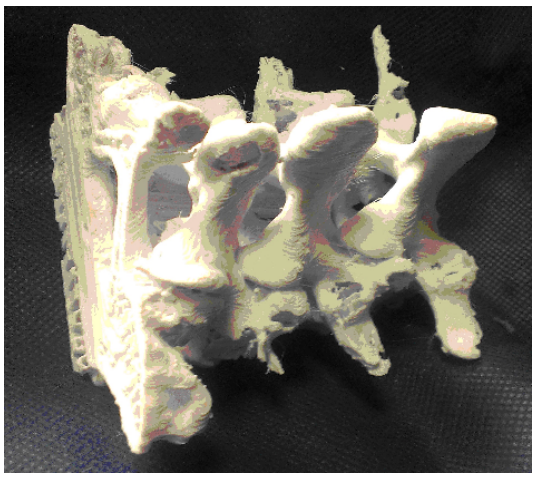


写真 1B 同成功例を右傍正中法の視点で撮影したもの

対応) を用いた．

結　果

著者らにとって，3D プリンターは全くの初心者からの入門だったため，機器の調整および造形ステージへの最初の固着 (「イニシエーション」という) に手間取り，なかなか造形に成功しなかった．結果的には，サポート材とラフト (raft「筏」の意味．最初の固着のための筏状の層) を付加することで，比較的安定した造形が可能になったが，「サポート材とラフト材の除去」という新たな課題が浮上した．(写真 1AB)

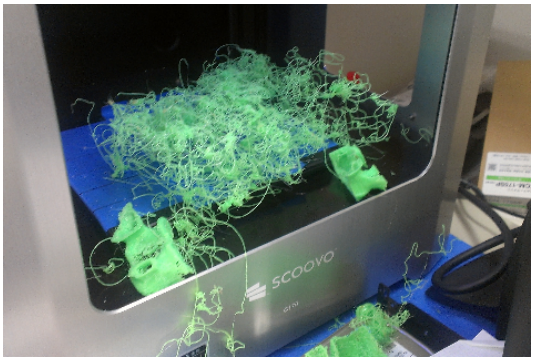


写真 2．失敗した造形例．

造形中途の脊椎骨が手前に見え，「五目かたやきそば」のような樹脂材が散乱している．

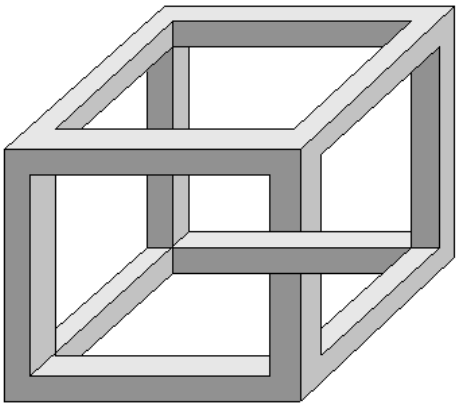


図 3 ネッカーの立方体 (Wikipedia より引用)

考察と結語

熱溶解積層法 (Fused deposition modeling: FDM，以下「積層型」と略) 3D プリンタは，1988 年 Stratasys 社 (米) による特許取得に始まったといわれている．同特許の保護期間 (20 年間) の終了と同時に低価格の 3D プリンタが数多く発売され，2013 年頃には政権の後押しもあり，百花繚乱の感があったが，一般ユーザーへの広く浸透したとはいえない．その要因の一つは，3D プリンタの扱いが必ずしも容易ではないことだろう．

積層型 3D プリンタは，一言でいえば「三次元座標の任意の場所で，エクストルーダーから樹脂を吐出し，それを積み重ねて造形する機器」であり，ハードウェアとしては，比較的単純な原理に

基づいている．しかし，実際の運用は必ずしも容易とはいえず，0.1 mm (紙 1 枚) 単位のエクストルーダーと造形ステージの間隔調整や整備を行っても，造形は常に成功するとは限らないし，造形物の複雑さによっては，10 時間以上の時間を要することも多い．造形の失敗をモニタリングする方法は，3D プリンタには備わっておらず，長時間の造形を常時監視は不可能である．造形の失敗は，エクストルーダーから吐出された「五目かたやきそば」のような樹脂の塊で初めて気が付くことが多い (写真 2)．造形初期には，まずデータの不備による造形の失敗を避けることを目標とした．

Osirix が出力する STL ファイル[1] は，微小な三角形を大量に当てはめることで立体物を表現する方法である．出力の際，微小な三角形の集合は，元の医療画像の条件によって，1. 穴が開いたり，2. 裏表が逆になることがある．「図形としては描画できるが，現実には存在できない」いわば，エッシャー (マウリッツ・コルネリス・エッシャー (Maurits Cornelis Escher, 1898-1972 年) オランダの版画家) の絵画に多用される「矛盾のある状態」(例. ネッカーの立方体 (図 3)) で出力されることが多い．そうすると正しい造形は不可能である．

そのため, STL ファイルに矛盾がないか検査し，修正するソフトウェアが必要になる．netfabb basic, meshmixer (ともに Autodesk, USA) などは，無償で使用できるソフトウェアで，これらにより検査と修正が大きく改善されたが，「修正」という操作が「元のデータとかけ離れる可能性」を内包することになった．

脊椎骨は，椎体の直径が最も広い部分で前頭断し，その後方を積層造形すればサポート材やラフトは不要なはずである．現在，その課題に向けて試行錯誤を繰り返している．本課題の造形には，1 回に数時間から半日を要するので，課題の達成にはまだ長い道のりが必要であろう．一方，今回使用したソフトウェアは，機器に付属またはフリーウェアとして入手可能で，多くが日本語化されている．医療・医学へはまだ導入中途であろうが，普及による利用技術のさらなる発展を望みたい．

参考文献

1. 岩瀬良範，星島宏，竹内理紗，菊地博達: 脊椎および硬膜外麻酔における医用 3D ビューワー応用の可能性．麻酔・集中治療とテクノロジー 2009: 68-73, 2012

ABSTRACT

Moldings of Lumbar Vertebrae from DICOM CT Image Applying Fused Deposition Modeling 3D Printer

Yoshinori Iwase, Yuuta Horikoshi and Hiroshi Nagasaka

[Introduction]

3D image viewing by DICOM CT or MRI pictures were already established, however, are not well applied in anesthesiology due to possible difficulty of interactive manipulation. Some3D DICOM image viewer enabled to output STL (Standard Triangulated Language) file for 3D printers. We attempted moldings of lumber vertebrae by fused deposition modeling 3D printer from DICOM CT images.

[Methods]

Own CT DICOM images were loaded into Osirix lite DICOM 3D viewer (Pixmeo, Switzerland) on Macintosh. STL image files for 3D printer were exported by its standard function. STL files were examined and corrected by Netfabb basic and Meshmixer software (Autodesk, USA) on Macintosh. STL files were converted into G-Code (G programming language) for 3D printer. Moldings were executed by Scoovo C170 (Abee Inc., Japan), G-code driven 3D printer.

[Result]

Moldings were mostly success after a numbers of failures. The models seemed consistent with actual vertebrae.

[1] Standard Triangulated Language STL は三次元形状を表現するデータを保存するファイルフォーマットのひとつである．名称の由来は光造形法を意味する 英: Stereolithography である．後付けだが，Standard Triangulated Language や Standard Tessellation Language の略称とされることもある．米国のスリーディー・システムズ (英語版) によって開発された三次元 CAD ソフト用のファイルフォーマット．多くのソフトにサポートされており，特にラピッドプロトタイピングシステムのファイルフォーマットとして利用されている．(Wikipedia より) https://ja.wikipedia.org/wiki/Standard_Triangulated_Language 2017/4/11

[Discussion]

Sometimes, anesthesiogists encounter difficult puncture of spinal or epidural cases with successful or failed result. Our aim of current study is to clarify whether punctures were easy, difficult or unable, objectively. Full scale vertebral model of actual patients enabled approaching more closely to our aim than previous methods.

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

安価な波形記録用ソフトウェアの開発

萩平 哲[1,2,3]，康 紅玲[3]，高階雅紀[4]，森 隆比古[2]

はじめに

臨床現場で波形データを取得するにはノート型パーソナルコンピュータで使用できる A/D コンバータが必要である．かつての Windows マシンには PCMCIA インターフェイスが標準で実装されており，PCMCIA カードの A/D コンバータも何種類か利用できた．例えば我々が以前脳波解析ソフトウェア開発に使用した Ratoc 社製の REX5054B や，National Instruments 社の DAQ-Card などが利用可能であったが, 近年の WIndows マシンには PCMCIA インターフェイスは実装されていない．また，上記の A/D コンバータも高価なものが多く利用するには価格が障害となることも多かった．

しかしながら近年，National Instruments 社が USB で接続できる安価な A/D コンバータを発売した．USB-6001 は 14bit, 8 チャンネル入力で最大 20kS/秒のサンプリングが可能である．価格は 21,800-である．USB-6002 は 16bit, 8 チャンネル入力で最大 50kS/秒のサンプリングが可能である．価格は 37,900-といずれもかつての PCMCIA インターフェイスのものより安価である．そこでこれらを利用してベッドサイドで波形データを収集するためのソフトウェアの開発を行った．

USB-6001/USB-6002 について

National Instruments 社の A/D コンバータはこれらの製品を含め，どれも共通のドライバーを介してデータが取得できるように作られている．NIDAQmx-API と呼ばれるアプリケーションインターフェイスがそれである．この API を利用すれば Windows XP 以降の Windows プラットフォーム上の ANSI C 企画の C や C++コンパイラで開発が可能である．Visual-C++や C++Builder などで開発できる．

図 1 日本付近のプレートの模式図 [1)] 気象庁 ホームページから

ソフトウェアの概要

今回開発したソフトウェアは Embarcadero 社の C++Builder XE8 で開発しており, 250/500/1000 Hz でのサンプリングが行えるようになっている．この周波数であれば心電図波形や動脈圧波形，脳波波形などを取り込むことが可能である．サンプリングと同時に画面には波形を表示できるようになっており，また記録された波形を再生する機能も備わっている．さらにログファイルにイベントを記録することもできるようになっており，同時に波形画面にもイベントマーカーが表示されるように作られている (図 1)．オフラインモードではイベントログ上で表示させたいイベント行をダブルクリックすると，その時刻の波形が表示されるようになっている．従って，リアルタイム測定時にイベントマーカーを記録しておけば容易にその時の波形を後から表示させることが可能である．

[1] 大阪急性期・総合医療センター [1] 麻酔科，[2] 医療情報部
[3] 大阪大学大学院医学系研究科　麻酔・集中治療医学
[4] 大阪大学医学部附属病院　手術部

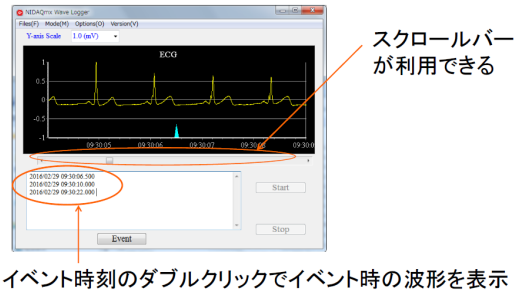


図 2 日本付近のプレートの模式図 [1)]
気象庁 ホームページから

さらに，オフラインモードでは波形表示の下にスクロールバーが表示されるようになっており，波形を自由に左右へスクロールできるようになっている (図 2)．なお，波形データはバイナリデータとして記録しているが，記録したデータは ASCII 形式で出力することも可能であり，他のシステムでデータ解析できるような仕様となっている．

Windows での無料の開発環境

Windows での開発環境は Microsoft Visual C++が標準的であるが，今回使用した Embarcadero 社の C++Builder は Visual C++よりも Windows の舞台裏を見ずに開発できるという意味でも開発しやすいシステムであると考えている．何の開発環境も有料であるが，Embarcadero 社は C++Builder Starter Edition を無料で配布している．この Edition には VCL(Visual Component Library) という GUI を構築するためのライブラリも含まれているだけでなく，有料版と同じように VCL デザイナという GUI のパーツを配置し，そのイベントハンドラと簡単にリンクできるデザイナも含まれている．また FireMonkey フレームワークという Macintosh の OSX などでも動作するソフトウェアを構築するための環境も付属しており，うまく使えば Windows と Macintosh で動作するソフトウェアを同じソースコードから作成することもできるようになっている．Windows 上での開発は敷居の高いところもあるが，こうした無料ツールをうまく利用すれば良いのではないかと思われる．

まとめ

National Instruments 社の安価な A/D コンバータを利用してベッドサイドで各種波形データを取り込めるソフトウェアを構築した．今回は Embarcadero 社の C++Builder XE8 で開発したが，C++Builder Starter Edition などを使用すればベッドサイドで使用する様々なソフトウェアを安価に開発することも可能であると思われる．

ABSTRACT

Development of a cheap and useful waveform data logger

[1,2,3]Satoshi Hagihira, [3]Hongling Kang, [4]Masaki Takashina, [2]Takahiko Mori

[1]Department of Anesthesiology,
[2]Department of Medical Informatics
[3]Department of Anesthesiology and Intensive Care Medicine,
Osaka University Graduate School of Medicine
[4]Surgical Center, Osaka University Hospital

Recently, some cheap Analog-to-digital converters with USB interface were released from National Instruments (NI) Inc.(TX, USA). Here we developed a software to gather waveform data on bedside using these A/D converters. NI provided common interface library for A/D converters named “NIDAQmx-API” which can be available from Microsoft Visual C++ or Embarcadero C++Builder. We developed our software by C++Builder XE8 (Embarcadero Inc., TX, USA). Our software can gather wave data sampled at 250/500/1000 Hz. It can display the waveform in realtime, and it also can record the event information. In offline mode, scroll-bar is displayed under the wave window which enables to show any part of the recorded window. It also can show the waveform on event by double-clicking the event-log data.

Finally, we developed a cheap and useful software to gather waveform data on bedside.

フーリエ級数・フーリエ変換・ラプラス変換

田中義文，山根毅郎，森下洋子，橋本壮志，松田知之

はじめに

本項は竹内 淳著の「高校数学でわかるフーリエ変換」の核心部分だけを述べる．講談社 BLUE BACKS シリーズの著書はフーリエの歴史的背景にも言及し，とても満足させる本であるが，本項では数学部分だけをまとめることにした．

フーリエ変換により，全ての振動波形は sin や cos などの三角関数で表すことができることは理解できるが，これが熱伝導方程式を導き，演算子法，ラプラス変換に到る過程は一段高いステップであって，その理屈は正直なところ理解出来なかった．門外漢には正規の教科書はやはり敷居の高いものである．そこで本書に出会い，3 日で読破して，漸く大学時代からのもやもやが晴れ渡った気分になった．会員のみなさまには是非一読を勧める名著である．

フーリエ級数とフーリエ変換

ある任意の周期関数 $f(\theta)$ $(-\pi \leq \theta \leq \pi)$ が

$$\begin{aligned} f(\theta) = \; & a_1 \cos\theta + a_2 \cos 2\theta + a_3 \cos 3\theta + \cdots \\ & + a_1 \sin\theta + a_2 \sin 2\theta + a_3 \sin 3\theta + \cdots \\ & + C \\ = \; & C + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad \cdots\cdots 1\text{-}1) \end{aligned}$$

で書けるとする (但し，n は正整数)．つまり基本周期と無限大までのその整数倍の周期の三角関数で表せると仮定する．

ここで a_n, b_nおよび C を求めるわけであるが，1-1 式の両辺に m を整数として，$\cos m\theta$ を掛け，$-\pi$ から $+\pi$ までを積分すると，

$$\begin{aligned} & \int_{-\pi}^{\pi} \cos m\theta \, f(\theta) d\theta = C \int_{-\pi}^{\pi} \cos m\theta \, d\theta \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \Big(a_n \int_{-\pi}^{\pi} \cos m\theta \cos n\theta \, d\theta \\ & + b_n \int_{-\pi}^{\pi} \cos m\theta \sin n\theta \, d\theta \Big) \quad \cdots\cdots 1\text{-}2) \end{aligned}$$

と書ける．

右辺の C の項は $-\pi$からπ までの積分だから 0 になる．

$\cos m\theta \cos n\theta$ の積分であるが，

$$\begin{aligned} \cos(a+b) &= \cos a \cos b - \sin a \sin b \\ \cos(a-b) &= \cos a \cos b + \sin a \sin b \end{aligned}$$

より，

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} \left(\cos(a+b) + \cos(a-b) \right)$$

となる．したがって，$(m+n)\theta$ の項は積分して 0，$(m-n)\theta$ の項は $m = n$ のときだけが意味があり，

$$a_n \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} \times 1 d\theta = \frac{1}{2} a_n [\theta]_{-\pi}^{\pi} \; = \pi a_n$$

となる．

また，$\cos m\theta \sin n\theta$ の積分であるが，

$$\begin{aligned} \sin(a+b) &= \sin a \cos b + \cos a \sin b \\ \sin(a-b) &= \sin a \cos b - \cos a \sin b \end{aligned}$$

より，

$$\sin a \cos b = \frac{1}{2} \left(\sin(a+b) + \sin(a-b) \right)$$

となる．したがって，$(m+n)\theta$ の項も $(m-n)\theta$ の項はも積分して 0 になり $\sum$ の項は n しか残らない．これらの結果から，

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos n\theta \, f(\theta) \, d\theta \quad \cdots\cdots 1\text{-}3)$$

が求められる．

京都岡本記念病院 麻酔科

今度は 1-1 式の両辺に $\sin\, m\theta$ を掛け，$-\pi$ から $+\pi$ までを積分すると，

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin\, m\theta\, f(\theta)d\theta = C\int_{-\pi}^{\pi} \sin m\theta\, d\theta + \sum_{n=1}^{\infty}\Big(a_n \int_{-\pi}^{\pi} \sin\, m\theta \cos\, n\theta\, d\theta + b_n \int_{-\pi}^{\pi} \sin m\theta \sin\, n\theta\, d\theta\Big) \quad \cdots\cdots\cdots 1\text{-}4)$$

と書ける．1-3 式を導いた同様の考え方で C の項，a_i の項は 0 になり，b_i の項は，

$$\sin a \sin b = \frac{1}{2}(\cos(a-b) - \cos(a+b))$$

より，$m = n$ のときに積分値は π になり，それ以外は 0 になる．したがって，

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \sin n\theta\, f(\theta)\, d\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}5)$$

が求められる．

最後に残った定数項 C は 1-1 式の両辺をそのまま $-\pi$からπまでθ で積分する．

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)d\theta = \int_{-\pi}^{\pi} Cd\theta + \int_{-\pi}^{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos\, n\theta + b_n \sin\, n\theta)\, d\theta$$

$\because$ 定数項に 1 周期の sin, cos を掛けると 0 だから

$$= 2\pi C$$

したがって，C は

$$C = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)d\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}6)$$

となる．C の値は $f(\theta)$ の 1 周期の平均値を示す．

1-1 式では n は 1 より始まるが，$n \geq 0$ にまで拡張すると，1-3 式より

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \cos 0 f(\theta)d\theta = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)d\theta = 2C$$

つまり，a_0 は 1-6 式の 2 倍になるから $C = \frac{1}{2}a_0$ と書ける．また b_0 については $n = 0$ を 1-5 式に代入すると 0 を積分することになり，$b_0 = 0$ である．したがって，フーリエ級数を示す 1-1 式は

$$f(\theta) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos\, n\theta + b_n \sin\, n\theta) \quad .\ 1\text{-}1')$$

と書き直せ，その係数 a_n, b_n は，

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \cos n\theta\, f(\theta)\, d\theta \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}3')$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \sin n\theta\, f(\theta)\, d\theta \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}5')$$

となる．

フーリエ級数の例

矩形波

θが $-\pi$から 0 までの間は $f(\theta) = 0$，そして，θが 0 からπまでの間は $f(\theta) = 1$ という矩形波のフーリエ級数を考える．

a_0 は 1-3' 式より $\cos 0 = 1$，また $-\pi$から 0 までは $f(\theta) = 0$, したがって，積分範囲は，

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} 1d\theta = \frac{1}{\pi}\left[\theta\right]_0^{\pi} = \frac{1}{\pi}(\pi - 0) = 1$$

となる．定数項 C は $a_0/2$ だから 0.5 となる．a_n について n が 1 以上の項に関しては $\cos n\theta$ を積分すると sin 関数になるから $0, \pi$ いずれも値は 0 になり，a_1 以上の項は 0 になる．

b_n については 1-5' 式より，

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \sin n\theta\, f(\theta)\, d\theta = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \sin n\theta d\theta = -\frac{1}{n\pi}\left[\cos n\theta\right]_0^{\pi} = -\frac{1}{n\pi}(-1-1) = \frac{2}{n\pi}$$

(但し n は奇数)

となる．したがって, 与式矩形波のフーリエ級数は

$$f(\theta) = 0.5 + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{(2n-1)\pi}\sin\big((2n-1)\theta\big) = 0.5 + \frac{2}{\pi}\sin\theta + \frac{2}{3\pi}\sin 3\theta + \frac{2}{5\pi}\sin 5\theta + \cdots$$

となる．

実際のグラフを gnuplot[2,3] で表示する (図 1).

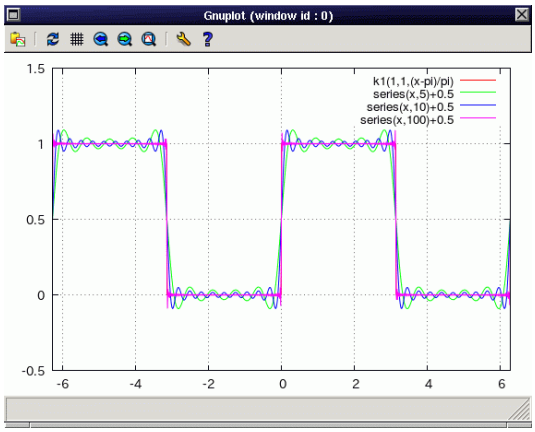


図 1 矩形波のフーリエ級数

-2πから 2π までを x 軸に，0, 1 の矩形波を表示した．5 項までの展開では振動波形が見られ，10 項までの展開でも振動は観察される．しかし 100 項になると，スパイク振動は残るが，立上りも鋭く矩形波に近くなる．

gnuplot のプログラムは以下の通りである．

矩形波とフーリエ級数プログラム

```
> gnuplot
f1(x)=floor(x)
set sample 1000
set yrange [-0.5:1.5]
set grid
k1(a,b,x)=f1((x+a)/(a+b))-f1(x/(a+b))
plot [-2*pi:2*pi] k1(1,1,(x-pi)/pi)
t(x,k) = 2/(pi*(2*k-1))*sin((2*k-1)*x)
series(x,n) = (n > 1 ? t(x,n)
+ series(x,n-1) : t(x,1))
replot series(x,5)+0.5
replot series(x,10)+0.5
replot series(x,100)+0.5
```

矩形波は立上りが厳しく，3 項程度の sin 波では近似ができない．しかし 100 項まで近似すれば相当似た波形になる．gnuplot は再帰法をもちいた．

ノコギリ波

$-\pi$からπ までの周期のノコギリ波は，

$$f(\theta) = \theta$$

で表される．1 周期の平均値は 0 だから $a_0 = 0$ である．1-3' 式に与式を代入すると

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \theta \cos n\theta d\theta = 0$$

となる．1-5' 式に与式を代入すると，部分積分法をもちいて

$$\begin{aligned} a_n =& \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \theta \sin n\theta d\theta \\ =& \frac{1}{\pi}\left[-\theta\frac{\cos n\theta}{n}\right]_{-\pi}^{\pi} + \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{\cos n\theta}{n}d\theta \\ =& -\frac{2\cos n\pi}{n} \end{aligned}$$

となる．$\cos n\theta$ は n が偶数の場合は 1 で，奇数の場合は -1 になる．したがって，

$$b_n = (-1)^{n+1}\frac{2}{n}$$

と書ける．その結果，ノコギリ波のフーリエ級数は，

$$\begin{aligned} f(\theta) =& \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\theta = \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{2}{n}\sin n\theta \\ =& 2\sin\theta - \sin 2\theta + \frac{2}{3}sin3\theta - \frac{1}{2}\sin 4\theta + \cdots \end{aligned}$$

となる． gnuplot プログラムとグラフを以下に示す．

ノコギリ波とフーリエ級数プログラム

```
> gnuplot
set sample 1000
set yrange [-pi-0.5:pi+0.5]
set grid
plot [-2*pi:2*pi] ((x-pi)/(2*pi)-floor((x-
pi)/(2*pi)))*2*pi-pi
t(x,k) = (-1.0)**(k+1)*2.0/k*sin(k*x)
series(x,n) = (n ¿ 1 > t(x,n)
+ series(x,n-1) : t(x,1))
replot series(x,5)
replot series(x,10)
replot series(x,100)
```

図 2 ノコギリ波のフーリエ級数

-2πから 2π までを x 軸に，$-\pi$からπ のノコギリ波を表示した．5 項までの展開では振動波形が見られ，10 項までの展開でも振動は観察される．しかし 100 項になると，スパイク振動は残るが，立上りも鋭くノコギリ波に近くなる．

フーリエ変換

フーリエ級数は周期関数に対して基本周期の整数倍の三角関数で近似できるという理論であるが，単一の過渡的な関数に対しての対応はフーリエ変換で可能となる．この理論を理解するためにはいくつかの乗り越えなければならないステップが必要であり，著書 [1] は上手く説明している．本項もそれに従って解説する．

三角関数を複素数形式に変換

オイラーの公式は，

$$e^{in\theta} = \cos n\theta + i \sin n\theta \quad \cdots\cdots\cdots 1\text{-}7)$$

である[1]．cos 関数は偶関数[2]であるため $\cos n\theta = \cos(-n\theta)$，また，sin 関数は奇関数であるため，$\sin(-n\theta) = -\sin n\theta$ となる．この関係を利用して n の代わりに $-n$ を代入すると，

$$e^{-in\theta} = \cos n\theta - i \sin n\theta \quad \cdots\cdots\cdots 1\text{-}8)$$

式が生まれる．1-7 式と 1-8 式を利用すると，

$$\cos n\theta = \frac{e^{in\theta} + e^{-in\theta}}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}9)$$

$$\sin n\theta = \frac{e^{in\theta} - e^{-in\theta}}{2i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}10)$$

が生まれる．フーリエ級数で得られた 1-1 式に 1-9, 1-10 式を代入すると，

$$\begin{aligned} f(\theta) =& \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos\, n\theta + b_n \sin\, n\theta) \quad \cdots\cdots 1\text{-}1) \\ =& \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \frac{e^{in\theta} + e^{-in\theta}}{2} + \, b_n \frac{e^{in\theta} - e^{-in\theta}}{2i} \right) \\ =& \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n - ib_n}{2} e^{in\theta} \, + \frac{a_n + ib_n}{2} e^{-in\theta} \right) \end{aligned}$$

となる．上式を $e^{-in\theta}$ から書き直すと，

$$= \cdots + \frac{a_1 + ib_1}{2} e^{-i\theta} + \frac{a_0}{2} + \frac{a_1 - ib_1}{2} e^{i\theta} + \cdots$$

となる．n は正の整数であったが，負にまで拡張することを考える．cos 関数は偶関数，sin 関数は奇関数を利用してであるから，1-3, 1-5 式より

$$\begin{aligned} a_n =& \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos n\theta \, f(\theta) \, d\theta \; = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(-n\theta) \, f(\theta) \, d\theta \\ =& a_{-n} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_n =& \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin n\theta \, f(\theta) \, d\theta \; = -\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(-n\theta) \, f(\theta) \, d\theta \\ =& -b_{-n} \end{aligned}$$

つまり，a_n の n 値が負であっても変らないが，b_n の場合は符号が反転する．この性質を利用して n の値を負の整数にまで拡張すると，上式は

$$= \cdots + \frac{a_{-1} - ib_{-1}}{2} e^{-i\theta} + \frac{a_0}{2} + \frac{a_1 - ib_1}{2} \, e^{i\theta} + \cdots$$

と書け．指数の係数は同じパターンになる．変数 c_n を

$$c_n = \frac{a_n - ib_n}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}11)$$

と定義すると，フーリエ級数 $f(\theta)$ は

$$f(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\theta} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}12)$$

[1] 補足 1
[2] 偶関数：y 軸に対して対象な関数．奇関数：原点に対して対象な関数．

と書ける．

c_n についても指数関数に変換すると，

$$\begin{aligned} c_n =& \frac{a_n - ib_n}{2} \\ =& \frac{1}{2}\Big(\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \cos n\theta\, f(\theta)\, d\theta \\ & - i\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \sin n\theta\, f(\theta)\, d\theta\Big) \\ =& \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)(\cos n\theta - i\sin n\theta)d\theta \\ =& \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)e^{-in\theta}d\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}13) \end{aligned}$$

となる．$n = 0$ の場合，b_nについては$\sin 0\,\theta$ となり，$b_0 = 0$ が成立ち，$C_0 = \frac{a_0}{2}$ となる．また 1-13 式の指数は 0 だから 1 周期の平均値を計算することになり，フーリエ級数で指定した C と同じ値になっている．また，$f(\theta)$ に減衰振動 e^{-at} が重積した波形も指数演算で容易に計算できる．

周期を2πから $2l$ へ

1 周期を $-\pi$からπ に限定するのは不便である．そこで任意の値 l を選ぶとフーリエ級数の拡張が広がる．つまり，

$$-\pi \leqq \theta \leqq \pi \longrightarrow -l \leqq x \leqq l$$

にすることになる．x とθ との関係は，

$$x \equiv \frac{l}{\pi}\theta \quad \Big(\therefore\ \theta = \frac{\pi}{l}x\Big)$$

となる．l もπ も定数であるから，その微係数は

$$dx = \frac{l}{\pi}d\theta \quad \Big(\therefore\ d\theta = \frac{\pi}{l}dx\Big)$$

となる．$f(\theta)$ についても

$$f(\theta) = f\left(\frac{\pi}{l}x\right) = \overline{f}(x)$$

と書ける．定数項 a_n, b_n, c_n について，

$$\begin{aligned} a_n =& \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \cos n\theta\, f(\theta)\, d\theta \\ =& \frac{1}{\pi}\int_{-l}^{l} f\big(\frac{\pi x}{l}\big)\ \cos\big(\frac{n\pi x}{l}\big)\frac{\pi}{l}dx \\ =& \frac{1}{l}\int_{-l}^{l} \overline{f}(x)\ \cos\big(\frac{n\pi x}{l}\big)dx \quad \cdots\cdots 1\text{-}14) \end{aligned}$$

と計算できる．b_n は，

$$\begin{aligned} b_n =& \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \sin n\theta\, f(\theta)\, d\theta \\ =& \frac{1}{\pi}\int_{-l}^{l} f\big(\frac{\pi x}{l}\big)\ \sin\big(\frac{n\pi x}{l}\big)\frac{\pi}{l}dx \\ =& \frac{1}{l}\int_{-l}^{l} \overline{f}(x)\ \sin\big(\frac{n\pi x}{l}\big)dx \quad \cdots\cdots 1\text{-}15) \end{aligned}$$

となる．c_n は

$$\begin{aligned} c_n =& \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)e^{-in\theta}d\theta \\ =& \frac{1}{2l}\int_{-l}^{l} \overline{f}(x)e^{-\frac{in\pi x}{l}}dx \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}16) \end{aligned}$$

となる．最後に，$f(x)$ のフーリエ級数は，元もと l の周期関数であって，θ に関係がないことを考慮すると，$\overline{f}(x)$ のアッパーバーを取り去って，

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{in\pi}{l}x} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}17)$$

と書け，フーリエ級数の逆変換式になる．

a_n, b_n は実数で，sin 波または cos 波の係数であるから，それぞれの絶対値は振動強度を表す．c_n に関しては複素周波数での複素係数であるから，ガウス平面における円運動の半径を示すが，z 方向に周波数軸を作るなどしなければ具体的なイメージが湧かない．しかし，その共役複素数との掛算により sin 波，cos 波を合わせたパワースペクトルが容易に計算できる．

パルス関数の周期を伸ばす

周期関数の 1 周期を無限大にまで伸ばせばフーリエ級数はフーリエ変換として考えることができる．逆に考えると基本周波数を 0 サイクルに設定するのと同じ意味になる．

本当は図 5 に示す単一矩形波のフーリエ変換を行いたいのであるが，まずは図 3 に示すように周期 $2l$, 高さが $0, 1$ の矩形波を考える．その矩形波の間隔を無限に延長すると図 5 になるからである．

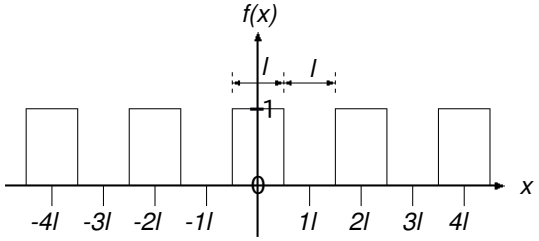


図 3 周期 $2l$ の矩形波

$-5l$ から $5l$ までを x 軸にして周期 $2l$，高さ 0, 1 の矩形波を表示した．偶関数にするために $-0.5l$ を立上りに選び，1 の幅と 0 の幅はそれぞれ l にしている．

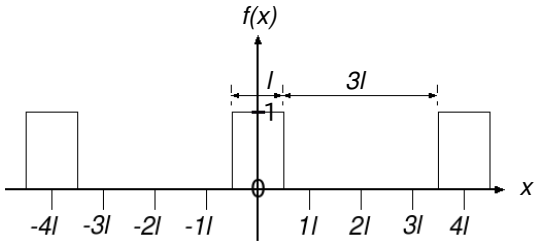


図 4 周期 $4l$ の矩形波

図 3 と同じ表示であるが，0 の幅を $3l$ に延長している．

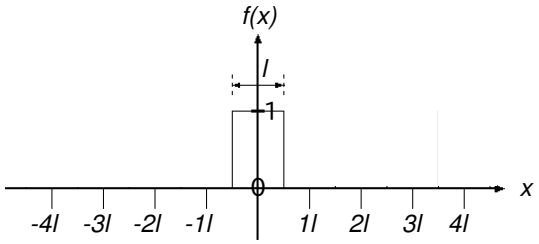


図 5 幅が l の単一矩形波

矩形波の 0 の幅を無限大にすると単一矩形波になる．

図 3 において 1 のパルスの中央を x 軸にするのは偶関数であれば sin の項すなわち b_n がなくなり，虚数項を考える必要がない．また高さ 0, 1 の矩形波は $f(x)$ の関数が最も単純になる．まずは図 3 のフーリエ級数の係数を求める．

1-16 式より，

$$c_n = \frac{1}{2l}\int_{-l}^{l} f(x)e^{-\frac{in\pi x}{l}}dx$$
$$= \frac{1}{2l}\int_{-l}^{l} f(x)\left(\cos\frac{n\pi x}{l} - i\sin\frac{n\pi x}{l}\right)dx$$

を利用する．sin の項は奇関数であるから積分すると 0 になる．しかも $-l/2$ から $l/2$ だけが $f(x)=1$ だから与式は

$$c_n = \frac{1}{2l}\int_{-l/2}^{l/2}\cos\frac{n\pi x}{l}dx$$

$n \neq 0$ のとき

$$= \frac{1}{2l}\left[\frac{\sin\frac{n\pi x}{l}}{\frac{n\pi}{l}}\right]_{-l/2}^{l/2}$$
$$= \frac{1}{2n\pi}\left(\sin\frac{n\pi}{2} - \sin\frac{-n\pi}{2}\right)$$
$$= \frac{1}{n\pi}\sin\frac{n\pi}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}18)$$

$n = 0$ のとき

$$= \frac{1}{2l}\int_{-l/2}^{l/2} 1dx$$
$$= \frac{1}{2l}\Big[x\Big]_{-l/2}^{l/2} = \frac{1}{2}$$

となる．1 周期が $2l$ から $4l$ になった場合を考えると (図 4)，1-16 式より，

$$c_n = \frac{1}{4l}\int_{-l/2}^{l/2}\cos\frac{n\pi x}{2l}dx$$
$$= \frac{1}{n\pi}\sin\frac{n\pi}{4} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}19)$$

となる．さらに 1 周期が $2ml$ になると，c_n は

$$c_n = \frac{1}{2ml}\int_{-l/2}^{l/2}\cos\frac{n\pi x}{ml}dx$$
$$= \frac{1}{n\pi}\sin\frac{n\pi}{2m} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}20)$$

となる．図 6 に 1-18，1-19 式，そして $m=8$ を代入した 1-20 式のグラフを示す．変数 n の代わりに x を置き換えた．横軸の単位は l，縦軸は c_n の値を示す．x が整数であればフーリエ級数になる．赤線は 1-18 式であり，$n=0$ では 0.5 を示す．1-19 式の緑線の $n=0$ は 0.25 を示し，1-16 式が示すように面積が半分になる．さらにスパイクの間隔が広くなると，$n=0$ での c_0 値が小さくなるとともに曲線の幅が広くなり，幅広い振動周波数で近似しなければならないことがわかる．

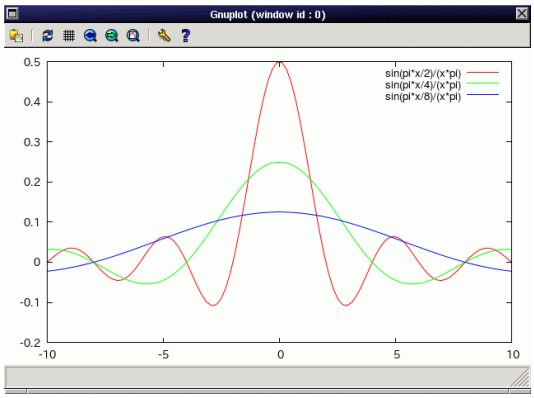


図 6 矩形波のフーリエ級数波形

横軸に n, 縦軸に c_n をとり, 1-18(赤), 1-19(緑), 1-20(青) 式を表示する．1-20 式の m には 8 を代入した．n 値を整数にするとフーリエ級数の c_n 値になる．

補足：

$n = 0$ のときの 1-20 式の c_0 値は代入すると 0/0 の形で不定になるが，分母分子を別々に n で微分すると解が得られる．

$$\lim_{n\to 0} \frac{\sin\frac{n\pi}{2m}}{n\pi} = \lim_{n\to 0} \frac{\frac{\pi}{2m}\cos\frac{n\pi}{2m}}{\pi} = \frac{1}{2m}$$

となり，C_0 の値を積分しなくても解が得られる．

m 値を無限大にして単一パルスにする考え方

矩形波周期を $2ml$ にすると，1-17 式であるフーリエ級数逆変換式は

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{in\pi x}{ml}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}21)$$

となる．ここで m 値を極めて大きな値にすると，指数項の変化はゆっくりとなると同時に，図 6 からも明らかなように c_n の値は $\pm\infty$ で 0 に収束するため，

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{in\pi x}{ml}} = \int_{-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{in\pi x}{ml}} dn \,. 1\text{-}22)$$

と書ける．また c_n については 1 周期を $2ml$ とすると 1-16 式をもちいて

$$c_n = \frac{1}{2ml}\int_{-ml}^{ml} f(x) e^{-\frac{in\pi x}{l}} dx \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}23)$$

と書ける．ここで，

$$k \equiv \frac{n\pi}{ml} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}24)$$

とすると，その微係数は

$$\frac{dk}{dn} = \frac{\pi}{ml} \qquad \left(\therefore dn = \frac{ml}{\pi} dk\right)$$

となり，また c_n は

$$c_n = \frac{1}{2ml}\int_{-ml}^{ml} f(x) e^{-ikx} dx \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 1\text{-}25)$$

となる．この関係を使うとフーリエ逆変換である 1-22 式は

$$\begin{aligned} f(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{in\pi x}{ml}} dn \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} c_n e^{ikx} \frac{ml}{\pi} dk \end{aligned}$$

上式に 1-23 式 c_n を上式に代入すると，

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{2ml}\int_{-ml}^{ml} f(x) e^{-ikx} dx\right) e^{ikx} \frac{ml}{\pi} dk$$

単一パルスを扱うために $m \to \infty$ にすると

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx\right) e^{ikx} dk$$

となる．括弧の中身はフーリエ変換で，その外側はフーリエ逆変換である．

要約すると，sin，cos で表すフーリエ級数は e^{ix} で表示すると，項が少なくなるので便利である．しかし，実際の計算に入ると sin，cos に変換するので，利益は無さそうである (量子論にはいると複素周波数が必要らしい)．フーリエ級数の考え方で 1-21 式まではたどり着ける．n が ∞ にまで拡張する意味は図 1 や図 2 を見ると 100 項程度の近似ではとても原波形 $f(x)$ に近づけないと考えれば，n を無限大にすることも納得できる．

問題は ml を広げて単一パルスにする方法であり，1-22 式がキモである．m を広げると離散値 n が非常に細かくなり n を連続関数として取り扱うことができ，また dn も積分として取り扱うことができる．この世界では，もうパルス間隔はほとんど周期関数とみとめられない程に幅が広がった状態と考えるのであろう．別の考え方は m が

非常に大きいために 1 周期が DC(直流) に近くなると考えれば納得できるかもしれない．

それさえ理解すれば，n は連続関数として扱うことができるし，その後の ml を消去するための k の取り扱いは算術の演算テクニックで理解できると思う．変数 k は単に離散的な周期関数 n を交換したものではなく，そこに角度成分 π が隠されている．それと同時に，そこに ml でノーマライズした関数であることを忘れてはならない．そのために使った恒等式 $\equiv$ の表現である．

フーリエ級数とフーリエ変換をまとめると以下の式になる．

フーリエ級数

$$f(\theta) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos\, n\theta + b_n \sin\, n\theta) \quad ..1\text{-}1)$$

と書き直せ，その係数 a_n, b_n は，

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \cos n\theta\, f(\theta)\, d\theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 1\text{-}3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \sin n\theta\, f(\theta)\, d\theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 1\text{-}5)$$

但し，n は 0 より始まる整数．周期 2πから $2l$ に変換し，さらにオイラーの公式を使い，指数関数に変換することは自力で出来るだろう．更に $l \to \pm\infty$ まで拡張するとフーリエ変換になる．

フーリエ変換

$$\mathscr{F}[f(x)] = F(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-ikx}dx \quad 1\text{-}26)$$

フーリエ逆変換

$$\mathscr{F}^{-1}[F(k)] = f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} F(k)e^{ikx}dk \;\; 1\text{-}27)$$

1-26 式の $1/\sqrt{2\pi}$ を取り払い，1-27 式に $1/(2\pi)$ を追加してもよい．そうすると $F(0)$ は 1 周期が無限大の単一パルスの面積と読める．それでも 1 周期は 2π に違いは無いから，フーリエ逆変換では $f(0)$ は 1 周期の平均の高さを示すことになる．したがって，整合性は合っている．このように考えるは恒等式 k の威力は絶大なものである．

フーリエ変換の応用

単一方形波パルスのフーリエ変換

話しは少し戻って，フーリエ変換である 1-26 式の分母分子に $2ml$ を掛けると，

$$\begin{aligned} F(k) =& \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-ikx}dx \\ =& \frac{2ml}{\sqrt{2\pi}} \times \frac{1}{2ml}\int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-ikx}dx \end{aligned}$$

となり，1-25 式を利用して，

$$= \frac{2ml}{\sqrt{2\pi}}c_n$$

と書ける．c_nに 1-20 式を代入すると，

$$= \frac{2ml}{\sqrt{2\pi}} \times \frac{1}{n\pi}\sin\frac{n\pi}{2m}$$

変数 n を 1-24 式に示す k に変換すると，

$$\begin{aligned} =& \frac{2n\pi}{k\sqrt{2\pi}} \times \frac{1}{n\pi}\sin\frac{kml}{2m} \\ =& \sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\sin\frac{kl}{2}}{k} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 2\text{-}1) \end{aligned}$$

となる．上式がパルス幅 $2l$ のフーリエ変換式である．変数 k は分母に ml を設定していることにより，$\pm$無限大の周期幅に対して k は圧縮して対応できる．また π を単位にしているため，n が整数であれば自然と π 周期になる．フーリエ変換 $F(k)$ にはこれらの性質が含まれていることを意識しなければならない．

ここで $k = 0$ の場合を考えると，補足で示した微分テクニックを利用して

$$\begin{aligned} F(0) &= \lim_{k\to 0}\frac{\sin\frac{kl}{2}}{k} \\ &= \lim_{n\to 0}\frac{l}{2}\cos\frac{kl}{2} \;\; = \frac{l}{2} \end{aligned}$$

となる．$2ml$ 周期の矩形波では m が無限に大きくなるとフーリエ級数の c_0 は 0 に近づくが，フーリエ変換では有限の値が得られる．1-26 式の $1/\sqrt{2\pi}$ を取り払って考えると，1-27 式の $1/\sqrt{2\pi}$ は周期 2π の底辺を示していることに気づかされる．

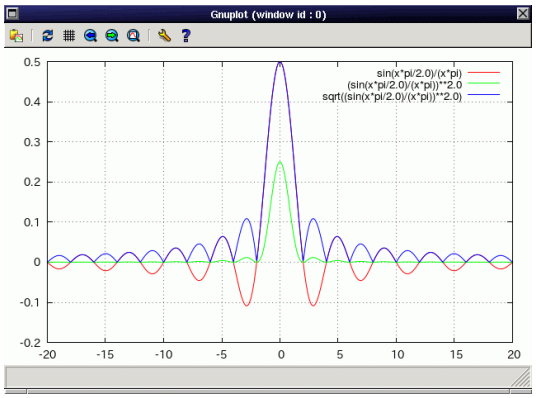


図 7 単一方形波パルスのフーリエ変換波形

横軸に πk，縦軸に c_k をとり，2-1 式 (赤)，その 2 乗 (緑)，2 乗の平方根 (青) を表示した．簡便のために $\sqrt{2/\pi}$ は取り去っている．l 値は 1 とした．その結果 c_0 値は 0.5 になっている．

図 7 に単一方形波パルスのフーリエ変換波形 $F(k)$ を示す．波形は図 6 のフーリエ級数波形 (c_n) と基本的に似ているが，図 6 は離散値 n の集合体であり連続関数ではない．単一波形はカミナリの放電による妨害電波で明らかなように全ての周波数を含んでおり，またその帯域も広い．赤線は $F(k)$ を示す．$-\sin$ 波形も放出周波数に違いないのであり，その絶対値の 2 乗は緑線で示し，その平方根青線は絶対値を示す．周波数スペクトルとはこの絶対値を示す．

gnuplot のプログラムは以下の通りである．

矩形波とフーリエ級数プログラム

```
> gnuplot
set grid
set sample 1000
plot [-20:20] sin(x*pi/2.0)/(x*pi)
replot (sin(x*pi/2.0)/(x*pi))**2.0
replot sqrt((sin(x*pi/2.0)/(x*pi))**2.0)
```

別解：矩形波を $-\tau$ から τ までとすると

$$\int_{\tau}^{\tau} 1\cdot e^{-ikx}dx = \frac{e^{-ik\tau}-e^{ik\tau}}{-ik} = \frac{2\sin k\tau}{k}$$

[3]

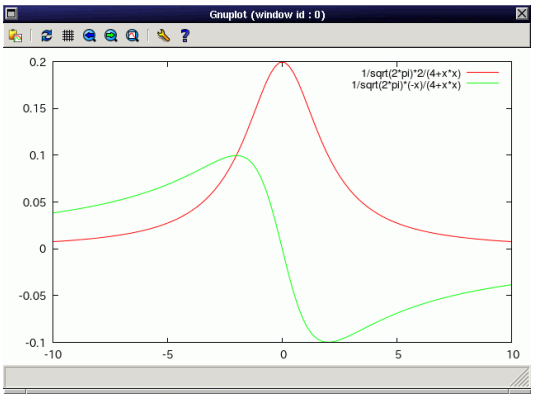


図 8 減衰関数のフーリエ変換波形

赤は実数の cos 関数の分布，緑は虚数の sin 関数の分布を示す．減衰関数もパルスと同様に全周期が含まれる．

指数関数のフーリエ変換

指数関数は以下の定義のごとく高さ 1 のパルスの減衰関数である．

$$f(x)=\begin{cases}0, & \text{if } x\le 0\\ e^{-ax}, & \text{if } 0\le x\\ \text{ただし, } 0<a & \end{cases}$$

この指数関数をフーリエ変換すると，

$$\begin{aligned}F(k)=&\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}f(x)e^{-ikx}dx\\ =&\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}e^{-(a+ikx)}dx\\ =&\frac{-1}{\sqrt{2\pi}}\left[\frac{e^{-(a+ikx)}}{a+ik}\right]_0^{\infty}\\ =&\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\frac{1}{a+ik}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 2\text{-}2)\\ =&\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\frac{a-ik}{(a+ik)(a-ik)}\\ =&\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left\{\frac{a}{a^2+k^2}+\frac{-k}{a^2+k^2}i\right\}\end{aligned}$$

となり，1-7 式に従って，実数は cos の係数，虚数は sin の係数となる．このスペクトルを図 8 に示す．gnuplot のプログラムは以下の通りである．

[3] 別解は 2-1 式と異なるように見えるが，$r=l/2$，式を $\sqrt{2\pi}$ で割れば同じ解になる．

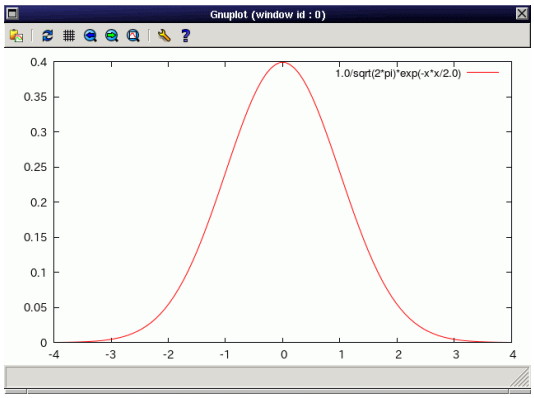


図 9 ガウシアン（正規分布）
$\mu = 0, \sigma^2$ の標準正規分布 $N(0,1)$.

```
> gnuplot
plot 1/sqrt(2*pi)*2/(4+x*x)
replot 1/sqrt(2*pi)*(-x)/(4+x*x)
```

ガウシアンのフーリエ変換

ガウシアン (Gaussian distribution) とは確率や統計に用いられる正規分布のことで，その確率密度関数は，平均を μ，分散をσ^2 として

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

して表されるが，その本質は $a > 0$ のもとに，

$$f(x) = e^{-ax^2}$$

で表される．単に減衰曲線の指数 x が x^2 になっただけである．ガウシアンは統計解析に留まらず，光速光通信などの単位ビットパルスのシミュレーションなどに利用される．単位時間に多くの情報量を送るためには幅の狭い矩形波を転送する必要があるが，現実的にはガウシアンに似たパルスになるため，その 0,1 の分解能が問題になる．

ガウシアンのフーリエ変換の演算は相当長くなるので先に結果を示しておく．

$$\mathscr{F}[e^{-at^2}] = \frac{1}{\sqrt{2a}} e^{-\frac{\omega^2}{4a}} \quad \cdots\cdots\cdots 2\text{-}3)$$

またガウシアンのフーリエ逆変換は

$$\mathscr{F}^{-1}[e^{-a\omega^2}] = \frac{1}{\sqrt{2a}} e^{-\frac{t^2}{4a}} \quad \cdots\cdots\cdots 2\text{-}4)$$

である．式の形式は同じで，変数だけが代わるのが特徴である．もちろん $t \to x$, $\omega \to k$ と読みかえても構わない．

BLUE BACKS のテキストは道すじが分かり難いから別解を紹介する．フーリエ変換を

$$\mathscr{F}[e^{-at^2}] = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-at^2} e^{-i\omega t} dt$$

とする．$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$ は定数だから後から掛ければよい．まず上式を ω で微分すると，

$$\begin{aligned}\frac{dF(\omega)}{d\omega} &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-at^2} \frac{d(e^{-iwt})}{d\omega} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-at^2} (-it) e^{-iwt} dt\end{aligned}$$

ここで

$$\frac{de^{-at^2}}{dt} = (-2at) e^{-at^2}$$

であるから，両辺に i を掛けて，$2a$ を移項すると，

$$\frac{i}{2a} \frac{de^{-at^2}}{dt} = (-it) e^{-at^2}$$

となる．先に ω で微分した式を書き直すと，

$$\frac{dF(\omega)}{d\omega} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-at^2} (-it) e^{-iwt} dt$$

準備した式を代入すると，

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i}{2a} \frac{de^{-at^2}}{dt} e^{-iwt} dt$$

部分積分の形になっているから

$$= \left[\frac{i}{2a} e^{-at^2} e^{-iwt} \right]_{-\infty}^{\infty} - \left(\frac{i}{2a} \right) (-i\omega) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-at^2} e^{-i\omega t} dt$$

$\left[\ \right]$ の項は $\pm\infty$ で 0 だから

$$= -\frac{\omega}{2a} F(\omega)$$

となる．これは変数分離型の積分ができ，

$$\frac{dF(\omega)}{f(\omega)} = -\frac{\omega}{2a} d\omega$$

両辺を積分すると

$$\ln F(\omega) = -\frac{\omega^2}{4a} + C$$

したがって,

$$F(\omega) = e^C e^{-\frac{\omega^2}{4a}} = Ae^{-\frac{\omega^2}{4a}}$$

となる．定数項 A は $F(0)$ より求められる．

$$F(0) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a\omega^2} e^{-i0\omega} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a\omega^2} d\omega$$

これはガウスの積分公式とよばれ，ガウス分布の面積を算出するものである．これもテクニック満載の解法である．

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2} dx$$

とし，別に y についても同じ式を作る．

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ay^2} dy$$

二つの式を掛算する．

$$\begin{aligned} I^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2} dx \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ay^2} dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-a(x^2+y^2)} dxdy \end{aligned}$$

ここで x-y 座標を極座標に変換すると

$$0 \le r \le \infty, \quad 0 \le \theta \le 2\pi$$

で無限大までの全平面が描写できる．また微小面積 $dxdy$ と極座標との関係は

$$dxdy = rd\theta dr$$

である[4]．したがって，上式を極座標で示すと

$$I^2 = \int_0^{2\pi}\int_0^{\infty} e^{-ar^2} r dr d\theta$$

ここで内側の積分を計算する．$r^2 = t$ とすると $2rdr = dt$ を利用して

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} e^{-ar^2} r dr &= \frac{1}{2}\int_0^{\infty} e^{-at} dt \\ &= \frac{1}{2}\left[\frac{e^{-at}}{-a}\right]_0^{\infty} = \frac{1}{2a} \end{aligned}$$

となる．したがって，与式は

$$I^2 = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2a} d\theta = \left[\frac{\theta}{2a}\right]_o^{2\pi} = \frac{\pi}{a}$$

となり,

$$I = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

が答えである．この結果を A に代入すると,

$$F(\omega) = \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-\frac{\omega^2}{4a}}$$

となり，始めに抜かしていた $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$ を掛けると,

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2a}} e^{-\frac{\omega^2}{4a}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{2-3')}$$

になる．

フーリエ変換の性質

線型性

線型性とは関数どうしの加算が関数変換 (フーリエ変換) を行っても可能であることを示す．つまり $f(t) + g(t)$ が $F(\omega) + G(\omega)$ で表せることを示す．式で書くと,

$$\begin{aligned} \mathscr{F}[f(t) + g(t)] =& \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (f(t) + g(t))\, e^{-i\omega t} dt \\ \because \text{括弧内の積分は別々に積分できるから}& \\ =& F(\omega) + G(\omega) \cdots\cdots\cdots \text{2-5)} \end{aligned}$$

である．この性質から各関数に係数 a, b を掛けてもよい．

$$\mathscr{F}[af(t) + bg(t)] = aF(\omega) + bG(\omega)$$

となる．

推移則

推移則とはある関数 $f(t)$ が時間的に移動したとき，すなわち $f(t - t_0)$ と表されるとき，フーリエ変換は，$t' \equiv t - t_0$ とおいて,

[4] 補足 2

$$\begin{aligned}&\mathscr{F}[f(t-t_0)]\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t')e^{-i\omega(t'+t_0)}dt'\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-i\omega t_0}\int_{-\infty}^{\infty} f(t')e^{-i\omega t'}dt'\\&=F(\omega)e^{-i\omega t_0}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 2\text{-}6)\end{aligned}$$

である．この時間の推移則は逆変換して周波数の推移にも利用できる．$\omega' \equiv \omega - \omega_0$ とすると，

$$\begin{aligned}&\mathscr{F}^{-1}[F(\omega-\omega_0)]\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega')e^{i(\omega'+\omega)t}d\omega'\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{i\omega t_0}\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega')e^{i\omega' t}d\omega'\\&=f(t)e^{i\omega t_0}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 2\text{-}7)\end{aligned}$$

となる．

2-5, 2-6 式は放送電波の基本原理になる．ω_c を搬送波，s を送信情報とすると AM は搬送波を s で振幅を変化させるから $(\cos\omega_s t+1)\cos\omega_c t$，FM は搬送波の周波数を変化するから $\cos(\omega_c+\omega_s)t$，PM は搬送波の位相を変化させるから $\cos(\omega_c t+s(t))$ となる．PM は 1 周期の位相だけをずらすため組み込める情報量が少なく，ディジタル通信が主な用途になる．

相似性

関数 $f(t)$ の t が a 倍になる状態を考える．$a>1$ にすると時間軸のグラフが縮むことを意味する．$\tau \equiv at$ とすると，

$$\begin{aligned}&t=\frac{\tau}{a}\quad\text{したがって, } dt=\frac{1}{a}d\tau\\&\mathscr{F}[f(at)]\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(at)e^{-i\omega t}dt\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)e^{-i\frac{\omega}{a}\tau}\frac{1}{a}d\tau\\&=\frac{1}{a}F\left(\frac{\omega}{a}\right)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 2\text{-}8)\end{aligned}$$

である．

微分のフーリエ変換

微分 $\dfrac{df(t)}{dt}$ のフーリエ変換は部分積分をもちいて，

$$\begin{aligned}&\mathscr{F}\left[\frac{df(t)}{dt}\right]\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{df(t)}{dt}e^{-i\omega t}dt\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\Big[f(t)e^{-i\omega t}\Big]_{-\infty}^{\infty}+\frac{i\omega}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt\end{aligned}$$

$f(t)$ は $\pm\infty$ で 0 に収束する条件で

$$\begin{aligned}&=\frac{i\omega}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt\\&=i\omega F(\omega)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 2\text{-}9)\end{aligned}$$

となる．

2 階微分のフーリエ変換

2 階微分 $\dfrac{d^2f(t)}{dt^2}$ のフーリエ変換は $\dfrac{df}{dt}$ を関数と見立てて，また 1 階微分公式を利用して，

$$\begin{aligned}&\mathscr{F}\left[\frac{df(t)}{dt}\right]=\mathscr{F}\left[\frac{d}{dt}\left\{\frac{df(t)}{dt}\right\}\right]\\&=i\omega\mathscr{F}\left[\frac{df(t)}{dt}\right]\\&=(i\omega)^2F(\omega)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 2\text{-}10)\end{aligned}$$

となる．

積分のフーリエ変換

この導出には微分公式を上手く使う．

$$g(t)\equiv\int_{-\infty}^{t} f(\tau)d\tau$$

と定義する．$-\infty$ から現時点 t までの積分値を $g(t)$ と定義したことになる．両辺を微分すると，

$$\frac{dg(t)}{dt}=f(t)$$

となる．イメージとしては，$f(t)$ の過去から現在値までを積分した積算値を $g(t)$，そして $g(t)$ の勾配を辿ると $f(t)$ が再現されると考えればよい．

$g(t)$ のフーリエ変換を $G(\omega)$ とする．上式の両辺をフーリエ変換すると，

$$\begin{aligned}&\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{dg(t)}{dt}e^{-i\omega t}dt\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt\end{aligned}$$

この式の右辺は $F(\omega)$，左辺に微分公式を使って

$$i\omega G(\omega) = F(\omega)$$

となり，まとめると

$$G(\omega) \equiv \mathscr{F}\left[\int_{-\infty}^{t} f(\tau)d\tau\right] = \frac{F(\omega)}{i\omega} \quad \text{..2-11)}$$

となる．微分の時はフーリエ変換に ω を掛け，積分では ω で割る．これらの特徴は $i\omega$ の代わりに s をもちいれば全てラプラス変換に通じる．

たたみ込み積分

たたみ込み積分とは

$$f(t) * g(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t-\tau)d\tau$$

の演算を意味する．* はたたみ込み積分の演算子である．結論を先に述べると，$f(t)$ のフーリエ変換を $F(\omega)$, $g(t)$ のフーリエ変換を $G(\omega)$ とすると，

$$\mathscr{F}[f(t) * g(t)] = \sqrt{2\pi}F(\omega)G(\omega) \quad \text{.... 2-12)}$$

である．

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t) * g(t)e^{-i\omega t}dt$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t-\tau)d\tau\right\} e^{-i\omega t}dt$$

τ と t の積分順序を交換すると

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)\left\{\int_{-\infty}^{\infty} g(t-\tau)e^{-i\omega t}dt\right\}d\tau$$

$t' \equiv t - \tau$の変数変換をすると

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)\left\{\int_{-\infty}^{\infty} g(t')e^{-i\omega t'}\ e^{-i\omega\tau}dt'\right\}d\tau$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)e^{-i\omega\tau}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} g(t')e^{-i\omega t'}dt'\right\}d\tau$$

$\{\}$の中は$\sqrt{2\pi}G(\omega)$ なので，

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)e^{-i\omega\tau}G(\omega)d\tau$$

$f(\tau)$ をフーリエ変換すると

$$= \sqrt{2\pi}F(\omega)G(\omega) \quad \text{.....2-12')}$$

と演繹され，周波数と周波数の掛算結果がたたみ込み積分になり，後述するデルタ関数と共にシステム解析に利用される．

デルタ関数と階段関数の性質

ディラックのデルタ関数とは幅が無く，高さ無限大のスパイクであってその面積は 1 である．式で表すと，その x 軸上の位置を a とすると

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-a)dx = 1 \quad \text{.....2-13)}$$

と書ける．一方，位置 a までは 0, それより右は 1 を維持する階段関数がある．この関数は u を使って表し，

$$u(x-a) = \begin{cases} 0, & x < a \\ 1, & x > a \end{cases} \quad \text{.....2-14)}$$

となる．この関数の微分はデルタ関数になる．

$$\frac{du(x)}{dx} = \delta(x) \quad \text{..... 2-15)}$$

このデルタ関数 $\delta(x-a)$ にある関数 $f(x)$ を掛けて積分すると $f(a)$ になる．部分積分をもちいて，$\alpha < a < \beta$ とし，

$$\int_{\alpha}^{\beta} f(x)\delta(x-a)dx$$

$$= \left[f(x)u(x-a)\right]_{\alpha}^{\beta} - \int_{\alpha}^{\beta} \frac{df(x)}{dx}u(x-a)dx$$

1 項の u 関数に a を入れると 0 になり $f(\beta)$ が残る，2 項は $x > a$ が $u(x-a) = 1$ となり，積分範囲も a からでよい．

$$= f(\beta) - \int_{a}^{\beta} \frac{df(x)}{dx}dx$$

$$= f(\beta) - \left[f(x)\right]_{a}^{\beta} = f(a) \quad \text{.....2-16)}$$

となる (サンプリング)．$x = a$ が成り立てば関数変数は 0 だから，以下の式は成り立つ．

$$\delta(x-a) = \delta(-x+a)$$

ここまでデルタ関数の準備をしたので，本題のフーリエ変換に入る．

デルタ関数のフーリエ変換

$$\begin{aligned}&\mathscr{F}\left[\delta(x-a)\right]\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\delta(x-a)e^{-ikx}dx\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-ika}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 2\text{-}17)\end{aligned}$$

である．一瞬にして解けたが，ある関数にデルタ関数を掛けて積分したから，その変数 a の値が答えである．

デルタ関数のフーリエ逆変換は

$$\begin{aligned}&\mathscr{F}^{-1}[\delta(x-a)]\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-ika}e^{ikx}dk\\&=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}e^{ik(x-a)}dk\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 2\text{-}18)\end{aligned}$$

となる．$a=0$ にすると，さらに単純になって，

$$\delta(x)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}e^{ikx}dk$$

となる．つまり sin, cos の全ての周波数の振動がデルタ波である．x や k でなく時間軸 t と角速度 ω で記述すると，

$$\delta(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}e^{ik\omega}d\omega$$

になるから分かり易い．

ある系にデルタ波 (インパルス) を与えると反響が生じる．その反響 (インパルス応答) をフーリエ変換すると周波数スペクトルがえられ，逐一発振周波数をスイープしなくても，その系の性質が把握でき，コンサートホールの特性や NMR による化学物質特定に応用されている．

サインとコサインのフーリエ変換

sin や cos は周期関数であるため，本来のフーリエ変換はできないはずである．しかし指数関数とデルタ関数を利用すると変換は可能になる．

$$\begin{aligned}&\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\cos axe^{-ikx}dx\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{e^{iax}+e^{-iax}}{2}e^{-ikx}dx\\&=\frac{1}{2\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i(a-k)x}dx\\&\quad+\frac{1}{2\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i(-a-k)x}dx\quad\cdots\cdots 2\text{-}19)\end{aligned}$$

となる．デルタ関数の積分変換を利用すると，

$$=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\Big\{\delta(k-a)+\delta(k+a)\Big\}$$

と解が求められる．サイン関数も同様の方法で

$$\begin{aligned}&\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\sin bxe^{-ikx}dx\\&=\sqrt{\frac{\pi}{2}}i\Big\{\delta(k+b)-\delta(k-b)\Big\}\quad\cdots\cdots 2\text{-}20)\end{aligned}$$

となる．勝手な解釈であるが，特定の角速度で全周波数を発振し，その逆の角速度 (逆の回転) で全周波数を発振すればその特定の音だけが聞こえるのかもしれない．サイン関数に関しては，i を掛けることにより，位相が 90 度ずれると考える．

熱伝導のフーリエ変換

フーリエ級数やフーリエ変換の発想は熱拡散の単純な微分方程式を解くために生み出された数学手法である．今日われわれは熱とは分子運動の結果であることを知っているが，フーリエの時代，熱のもたらす現象をどのように正確に表現できるかについて心血を注いだ [4]．その成果は今日の科学で縦横無尽に利用されている．

1 本の長い棒の中央が高い温度 h_0 であり，その熱が伝導していく様子を考える．温度を h，棒の位置を x，時間を t，熱伝導系異数を a で表すと，拡散方程式と呼ばれる

$$\frac{\partial h}{\partial t}=a\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

で表され，この解はガウス分布になる．温度分布は位置と時間が変数になるから，初期条件は

$$h(x,0)=h_0\delta(x)$$

とする．時間 $t=0$ でのデルタ関数の性質を利用して，x 軸すべての温度を指定することになる．ここで $h(x,t)$ のフーリエ変換を $H(k,x)$ とすると，t を定数と考えて，

$$\mathscr{F}[h(x,t)] = H(k,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} h(x,t)e^{-ikx}dx$$

と書ける．この意味はフーリエ逆変換して

$$h(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} H(k,t)e^{ikx}dk$$

と考えれば分かり易い．温度分布はいくつもの周波数をもった三角関数で表されるという意味である．

次に，本来の微分方程式のフーリエ変換を行う．右辺の 2 階微分方程式は，2 階微分のフーリエ公式 2-10 式を使って

$$\begin{aligned}\mathscr{F}\left[a\frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2}\right] &= a(ik)^2 H(k,t)\\ &= -ak^2 H(k,t)\end{aligned}$$

となる．

左辺のフーリエ変換は

$$\mathscr{F}\left[\frac{\partial h(x,t)}{\partial t}\right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\partial h(x,t)}{\partial t}e^{-ikx}dx$$

微分と積分の順序を入れ換えると，

$$\begin{aligned}&= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\frac{\partial}{\partial t}\int_{-\infty}^{\infty} h(x,t)e^{-ikx}dx\\ &= \frac{\partial H(k,x)}{\partial t}\end{aligned}$$

となる．微分方程式はフーリエ変換後も『左辺＝右辺』が成り立つから，

$$\frac{\partial H(k,t)}{\partial t} = -ak^2 H(k,t)$$

が成り立つ．k を単なる変数で，t に対する 1 階微分方程式と考えれば世界で最も単純な微分方程式である．答えは

$$H(k,t) = H(k,0)e^{-ak^2 t}$$

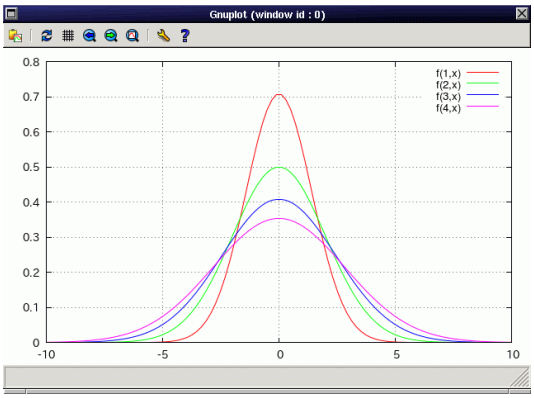


図 10 フーリエ熱伝導の解

熱伝導の解 $h(x,t)$ を適当な定数で時間 1, 2, 3, 4 での変化を図示した．縦軸は温度，横軸は位置を示す．温度変化はガウス分布を示す．

である．この微分方程式は，物質の時間変化量はその時の物質量に比例するという考え方で借金の返済表だと思えばよい．

初期の温度分布関数である $H(k,0)$ はデルタ関数であるから，その公式より，

$$h(x,0) = \frac{h_0}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx}dk$$

となる．また $H(x,t)$ の $t=0$ からも求められるからフーリエ逆変換して

$$h(x,0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} H(k,0)e^{ikx}dk$$

が成り立つ．その両者は等しいから

$$H(k,0) = \frac{h_0}{\sqrt{2\pi}}$$

となる．これで

$$H(k,t) = \frac{h_0}{\sqrt{2\pi}}e^{-ak^2 t}$$

が求められた．これをフーリエ逆変換すると，

$$\begin{aligned}h(x,t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} H(k,t)e^{ikx}dk\\ &= \frac{h_0}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-atk^2}e^{ikx}dk\end{aligned}$$

となる．この積分は，ガウシアンのフーリエ変換 2-3 式をもちいて，

$$= \frac{h_0}{\sqrt{2\pi}}\frac{1}{\sqrt{2at}}e^{-\frac{x^2}{4at}}$$

となり図 10 の様にガウス分布を示す．gnuplot のプログラムを以下に示す．

```
>gnuplot
set grid
set yrange [0:0.8]
f(t,x)=1/sqrt(2*t)*exp(-x*x/(4*t))
plot [-10:10] f(1,x)
replot f(2,x)
replot f(3,x)
replot f(4,x)
```

ラプラス変換

ラプラス変換は，微分方程式を四則演算で解が得られる実用的な数式処理法であり，応用範囲が広い．その定義は，

$$F(s) \equiv \mathscr{L}[f(t)] = \int_0^\infty f(t)e^{-st}dt \quad \ldots 3\text{-}1)$$

で与えられ，一見フーリエ変換の定義に似ている．しかし，時間 t は 0 以上，パラメータ s は複素数になっており，フーリエ変換では複素数表現の三角関数に限定されていることが大きな違いである．多くの成書にラプラス変換表が記載されているが，いくつかのラプラス変換を以下に示す．

$f(t) = t^n$

パラメータ s を $s = \alpha + \beta i$ として，$f(t) = 1$ のラプラス変換は，

$$\begin{aligned}\mathscr{L}[f(t)] &= \int_0^\infty 1 \cdot e^{-st}dt \\ &= -\left[\frac{e^{-st}}{s}\right]_0^\infty \\ &= -\lim_{t\to\infty}\left(\frac{e^{-\alpha t}e^{-i\beta t}}{s}\right) + \frac{1}{s} \\ &= \frac{1}{s} \quad \text{となる}. \quad \ldots 3\text{-}2)\end{aligned}$$

但し，$\alpha > 0$ が条件になる．$f(t) = 1$ は無限大まで 1 だからフーリエ変換はできない．

$f(t) = t$ はフーリエ変換では不可能であるがラプラス変換は出来る．部分積分を利用して，

$$\begin{aligned}\mathscr{L}[f(t)] &= \int_0^\infty te^{-st}dt \\ &= \left[t\frac{e^{-st}}{-s}\right]_0^\infty - \int_0^\infty \frac{e^{-st}}{-s} \\ &\quad a > 0 \text{ なら 1 項が 0 になり} \\ &= -\left[\frac{e^{-st}}{s^2}\right]_0^\infty \\ &= \frac{1}{s^2} \quad \text{となる}. \quad \ldots 3\text{-}3)\end{aligned}$$

$f(t) = t^n$ の場合，

$$\begin{aligned}\mathscr{L}[f(t)] &= \int_0^\infty t^n e^{-st}dt \\ &= \left[t^n\frac{e^{-st}}{-s}\right]_0^\infty - \int_0^\infty nt^{n-1}\ \frac{e^{-st}}{-s}dt \\ &= \frac{n}{s}\int_0^\infty t^{n-1}e^{-st}dt \\ &\quad \text{となる}.\end{aligned}$$

つまり，$A_n = \frac{n}{s}A_{n-1}$の関係となり，

それを解くと $= \frac{n!}{s^{n+1}}$が得られる．

デルタ関数 $\delta(t-a)$

$$\begin{aligned}\mathscr{L}[f(t)] &= \int_0^\infty \delta(t-a)\cdot e^{-st}dt \\ &= e^{-as} \quad \text{となる}.\end{aligned}$$

但し，$a \geq 0$ の条件が付く．これはデルタ関数のサンプリング定理 2-16 式を考えれば納得がいく[5]．

$f(t) = e^{at}$

指数関数の場合，

$$\begin{aligned}\mathscr{L}[f(t)] &= \int_0^\infty e^{ax}e^{-st}dt \\ &= \left[\frac{e^{(a-s)t}}{a-s}\right]_0^\infty \\ &= \left[\frac{e^{(a-\alpha)t}e^{-i\beta t}}{a-s}\right]_0^\infty \\ &\quad a - \alpha < 0 \text{ の条件で}, \\ &= \frac{1}{s-a} \quad \text{となる}. \quad \ldots 3\text{-}4)\end{aligned}$$

[5] $a = 0$ の場合 $\mathscr{L}[\delta(t)] = 1$ となる．

$a=0$ にすると $f(t)=1$ となり，3-2 式と同じになる．また s を ik に変換すると係数は異なるが，フーリエ変換 2-2 式と同じになる．

$f(t)=\sin\omega t$

サイン波の場合，部分積分を用いて，

$$\mathscr{L}[f(t)]=\int_0^\infty \sin\omega t e^{-st}dt$$
$$=\left[\sin\omega t\frac{e^{-st}}{-s}\right]_0^\infty-\int_0^\infty \omega\cos\omega t\frac{e^{-st}}{-s}dt$$

$\alpha>0$ であれば 1 項が 0 になり

$$=\frac{\omega}{s}\int_0^\infty \cos\omega t dt \quad \text{となる．}$$

ここで再度，部分積分で

$$=\frac{\omega}{s}\left[\cos\omega t\frac{e^{-st}}{-s}\right]_0^\infty-\frac{\omega}{s}\int_0^\infty \omega\sin\omega t\frac{e^{-st}}{-s}dt$$
$$=\frac{\omega}{s^2}-\frac{\omega^2}{s^2}\int_0^\infty \sin\omega t e^{-st}dt$$

と再度サイン波のラプラス変換式が出てくる．この式を解くと

$$=\frac{\omega}{s^2+\omega^2} \quad \text{が得られる}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 3\text{-}5)$$

コサイン波 $f(t)=\cos\omega t$ の場合も，同様に部分積分を用いて，

$$\mathscr{L}[f(t)]=\int_0^\infty \cos\omega t e^{-st}dt$$
$$=\frac{s}{s^2+\omega^2} \quad \text{が得られる．}$$

サイン波もコサイン波もフーリエ変換ではデルタ関数を使用しているため，s を ik または $i\omega$ にすることはできない．

ラプラス変換の線型性

フーリエ変換と同様に積分内の和算は分離でき，

$$\mathscr{L}[f(t)+g(t)]=\int_0^\infty\{f(t)+g(t)\}e^{-st}dt$$
$$=\int_0^\infty f(t)e^{-st}dt+\int_0^\infty g(t)e^{-st}dt$$
$$=F(s)+G(s) \quad \text{となる}\ldots\ldots\ldots 3\text{-}6)$$

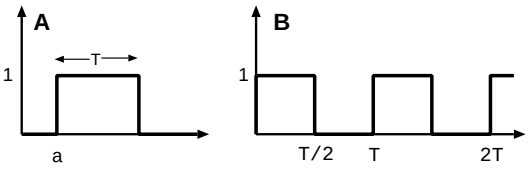


図 11 推移則の例

図 A は高さ 1 で，位置 a より幅 T の単一矩形波を示す．図 B は高さ 1，周期 T の連続する矩形波を示す．

したがって，係数を掛けた式，

$$\mathscr{L}[af(t)+bg(t)]=aF(s)+bG(s)$$

が成り立つ．

ラプラス変換の推移則

$f(t)$ を $f(t-\tau)$ に推移するには，単位階段関数 $u(t)$ も同時に推移しなければならない．

$$\mathscr{L}[f(t-\tau)u(t-\tau)]=e^{-s\tau}F(s)\ldots\ldots 3\text{-}7)$$

となる．

$t'\equiv t-\tau$ とすると，

$$\mathscr{L}[f(t-\tau)u(t-\tau)$$
$$=\int_0^\infty f(t-\tau)u(t-\tau)e^{-st}dt$$
$$=\int_0^\infty f(t')u(t')e^{-s(t'+\tau)}dt'$$
$$=e^{-s\tau}\int_0^\infty f(t')u(t')e^{-st'}dt'$$

$u(t')=1$ なので

$$=e^{-s\tau}F(s) \quad \text{となる．}$$

フーリエ変換の推移則 2-6 式はラプラス変換と同じで s を $i\omega$ にすればよい．

推移則は便利な法則で，図 11 に単一と連続する矩形波の例を示す．単位階段波形に sin 波，のこぎり波，三角波など任意の波形で変化させることも可能である．

例 A：単一矩形波．

a から始まる単位波形から $a+T$ から始まる単

位波形を引けばよい．したがって，

$$\begin{aligned}&\mathscr{L}[u(t-a)-u(t-(a+T))]\\&=e^{-as}\frac{1}{s}-e^{-(a+T)s}\frac{1}{s}\\&=\frac{e^{-as}}{s}(1-e^{-Ts})\quad\text{となる．}\end{aligned}$$

例 B：連続する矩形波．

1 周期の関数を $g(t)$，1 周期を T とすると，周期関数 $f(t)$ は

$$f(t)=g(t)+g(t-T)+g(t-2T)+\cdots$$

で表される．これをラプラス変換すると，

$$\begin{aligned}F(s)=&G(s)+e^{-Ts}G(s)+e^{-2Ts}G(s)+\cdots\\=&G(s)+e^{-Ts}G(s)+e^{-2Ts}G(s)+\cdots\\=&G(s)(1+e^{-Ts}+e^{-2Ts}+e^{-3Ts}+\cdots)\end{aligned}$$

の無限等比級数になる．したがって，無限等比級数の和の公式から

$$F(s)=\frac{1}{1-e^{-Ts}}G(s)$$

が得られる[6]．$G(s)$ は

$$\begin{aligned}g(t)&=u(t)-u(t-\frac{T}{2})\\G(s)&=\frac{1}{s}-e^{-\frac{T}{2}s}\frac{1}{s}=\frac{1}{s}(1-e^{-\frac{T}{2}s})\end{aligned}$$

を $F(s)$ に代入すると

$$F(s)=\frac{1}{1-e^{-Ts}}\frac{1}{s}(1-e^{-\frac{T}{2}s})\ =\frac{1}{s(1+e^{-\frac{T}{2}s})}$$

が求める矩形波のラプラス変換式である．

s 領域の推移

s 領域の推移は

$$\mathscr{L}[e^{at}f(t)]=F(s-a)$$

というもので，$f(t)$ の減衰曲線に利用出来そうである．証明は簡単で，

$$\begin{aligned}\mathscr{L}[e^{at}f(t)]&=\int_0^\infty e^{at}f(t)e^{-st}dt\\&=\int_0^\infty f(t)e^{-(s-a)t}dt\\&=F(s-a)\quad\text{となる．}\end{aligned}$$

例に，単位階段波 $f(t)=1$ に指数関数 e^{at} を掛けると，$f(t)=\frac{1}{s}$ であるため $\mathscr{L}[e^{at}]=\frac{1}{s-a}$ となる．

微分のラプラス変換

関数 $f(t)$ の微分は，

$$\mathscr{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right]=\int_0^\infty\frac{df(t)}{dt}e^{-st}dt$$

の意味であり，部分積分を利用して，

$$\begin{aligned}&=\left[f(t)e^{-st}\right]_0^\infty-\int_0^\infty f(t)\frac{de^{-st}}{dt}dt\\&=\left[f(t)e^{-st}\right]_0^\infty+s\int_0^\infty f(t)\frac{de^{-st}}{dt}dt\end{aligned}$$

となる．ここで $t\to\infty$ で $f(t)e^{-st}\to 0$ だと，

$$\mathscr{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right]=sF(s)-f(0)\ldots..\text{3-8)}$$

となる．$f(0)$ は初期値で，特に $f(0)=0$ なら，

$$\mathscr{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right]=sF(s)$$

となり，$F(s)$ に s を 掛ければよい．

微分のフーリエ変換 2-9 式は s を $i\omega$ に変換する部分は同じであるが，$-\infty$ で 0 という条件がついている．

積分のラプラス変換

関数 $f(t)$ の不定積分は，

$$\mathscr{L}\left[\int_0^\infty f(t)e^{-st}dt\right]\ =\frac{F(s)}{s}+\frac{\int f(0)dt}{s}$$

[6]補足 3

と $F(s)$ を s で割ることと，初期値 $f(0)$ での積分値を s で割って求める．丁度，不定積分の C に対応する．

この証明は $f^{(1)}$を微分，$f^{(-1)}$ を積分記号として，

$$F(s)=\mathscr{L}[f(t)]=\int_0^\infty f(t)e^{-st}dt$$
$$=\left[\int f(t)dt\cdot e^{-st}\right]_0^\infty-\int_0^\infty\left\{\int f(t)dt\right\}\frac{d}{dt}e^{-st}dt$$
$$=\left[\int f(t)dt\cdot e^{-st}\right]_0^\infty+s\int_0^\infty e^{-st}\left\{\int f(t)dt\right\}dt$$
$$=\left[f^{(-1)}(t)\cdot e^{-st}\right]_0^\infty+s\int_0^\infty f^{(-1)}(t)e^{-st}dt$$

となる．1 項の $t\to\infty$ で $f^{(-1)}(t)\cdot e^{-st}\to 0$ なら，

$$F(s)=-f^{(-1)}(0)+\mathscr{L}\left[f^{(-1)}(t)\right]\ldots 3\text{-}9)$$

となり，整理すると，

$$\mathscr{L}\left[f^{(-1)}(t)\right]=\frac{F(s)}{s}+\frac{f^{(-1)}(0)}{s}$$

となり不定積分が求められる．

関数 $f(t)$ の定積分は，

$$\mathscr{L}\left[\int_0^t f(t)dt\right]=\int_0^\infty\left\{\int_0^t f(\tau)d\tau\right\}e^{-st}dt$$
$$=\int_0^\infty\left\{f^{(-1)}(t)-f^{(-1)}(0)\right\}e^{-st}dt$$
$$=\int_0^\infty f^{(-1)}(t)e^{-st}dt-\int_0^\infty f^{(-1)}(0)e^{-st}dt$$

となる．1 項は不定積分，2 項の $f^{(-1)}(0)$ は定数

$$=\frac{F(s)}{s}+\frac{f^{(-1)}(0)}{s}-f^{(-1)}(0)\int_0^\infty e^{-st}dt$$

3 項は定数項になるため

$$=\frac{F(s)}{s}+\frac{f^{(-1)}(0)}{s}-f^{(-1)}(0)\int_0^\infty e^{-st}dt$$
$$=\frac{F(s)}{s}\quad\text{が解になる}.\ldots\ldots\ldots\ldots 3\text{-}10)$$

フーリエ変換の積分 2-11 式は s を $i\omega$ に変更するだけでよい．

たたみ込み積分のラプラス変換

たたみ込み積分のフーリエ変換は

$$\mathscr{F}[f(t)*g(t)]=\sqrt{2\pi}F(\omega)G(\omega)\ldots.2\text{-}12')$$

であった．これは係数を気にしなければ，周波数領域の掛算がたたみ込み積分で行えることを意味する．割算については分数に変換して掛算をすれば良く，たたみ込み積分のラプラス変換が可能であれば応用範囲が広がりそうである．証明はフーリエ変換と同様の計算法でできる．

$$\mathscr{L}[f(t)*g(t)]=\int_0^\infty f(t)*g(t)e^{-ist}dt$$
$$=\int_0^\infty\left\{\int_0^\infty f(\tau)g(t-\tau)d\tau\right\}e^{-ist}dt$$

τ と t の積分順序を交換すると

$$=\int_0^\infty f(\tau)\left\{\int_0^\infty g(t-\tau)e^{-ist}dt\right\}d\tau$$

$t'\equiv t-\tau$の変数変換をすると

$$=\int_0^\infty f(\tau)\left\{\int_0^\infty g(t')e^{-ist'}\ e^{-is\tau}dt'\right\}d\tau$$
$$=\int_0^\infty f(\tau)e^{-is\tau}\left\{\int_0^\infty g(t')e^{-ist'}dt'\right\}d\tau$$

$\{\}$の中は $G(s)$ なので，

$$=\int_0^\infty f(\tau)e^{-is\tau}G(s)d\tau$$

$f(\tau)$ をラプラス変換すると

$$=F(s)G(\omega)\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 3\text{-}11)$$

と証明された．

今システムの入力関数を $I(s)$，出力関数を $O(s)$ とラプラス変換で表示できるとすると，システムの伝達関数を $T(s)$ として，

$$O(s)=T(s)I(s)\quad\text{また}\quad T(s)=\frac{O(s)}{I(s)}$$

と表示できる．$I(s)$ がデルタ関数 $\delta(t)$ であればそのラプラス変換は $\mathscr{L}[\delta(t)]=1$ であるから，誠に都合良く，$O(s)=T(s)\times 1$ となり，出力そのものがシステムの伝達関数 $T(s)$ を表す．実際，コンサートホールで拍手を 1 つすると，その残響でホールの性質がわかる．

ラプラス変換の実例

一般に大量出血に際して静脈内への急速輸液で血圧低下を防ぐが，同時に細胞間質にも輸液が漏出する．実際に輸液で血液量がどの程度増加するかをイヌで 30 秒間隔の連続測定を行った．60 分のサイクルで 40, 80, 125ml の乳酸リンゲル液を 10 分間等速輸液を行った血液量の増加量を相対座標で図 12 に示した．輸液が血管外に漏出しなければ直線に示す増加になるが，実際は輸液終了時で 60 %，50 分後に 35 %が血管内に残存し，ほぼ同じ曲線を描いた．

この結果から，血管と間質との水分移動は線型性を示すことが明らかになり，図 13 に示す CR 電気回路で各パラメータを推定した．この関係をラプラス変換で示すと，$I(s)$ は輸液速度，$I_1(s)$ は血管槽への輸液流入速度，$I_2(s)$ は間質槽への輸液流入速度，R は血管全体の水分透過抵抗，$O(s)$ は血管内水分蓄積量で，輸液速度は実験設定で既知であり，$O(s)$ は血液量測定結果からわかる．10 分間の輸液速度を F とすると，推移則をもちいて，

$$
\begin{aligned}
I(s) &= \frac{F}{s}(1 - e^{-10s}) \\
I(s) &= I_1(s) + I_2(s) \\
\frac{I_1(s)}{C_1 s} &= RI_2(s) + \frac{I_2(s)}{C_2 s} \\
O(s) &= \frac{I_1(s)}{s}
\end{aligned}
$$

となり，輸液による血液量変動の伝達関数 $T(s)$ は，$T(s) = O(s)/I(s)$ で表される．実際の解析は 10 分目の 60 %の残留量と C_1 の値 2ml/kg-mmHg を代入し，間質のコンプライアンス約 6ml/kg-mmHg と血管全体の水分透過係数 0.3ml/min-kg-mmhg を得た．実測値とシミュレーション結果との重複波形を図 14 に示す [5]．

おわりに

ラプラス逆変換は

$$
f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\alpha - i\infty}^{\alpha + i\infty} F(s) e^{st} ds
$$

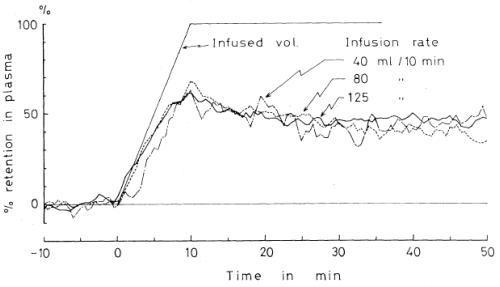


図 12 血液量の時間変化

60 分毎の間隔で 40, 80, 125ml の乳酸リンゲル液を 10 分間等速輸液を行った相対的変化を示す．輸液が血管外に漏出しなければ直線に示す増加になるが，実際は輸液終了時で 60 %，50 分後に 35 %が血管内に残存していた．

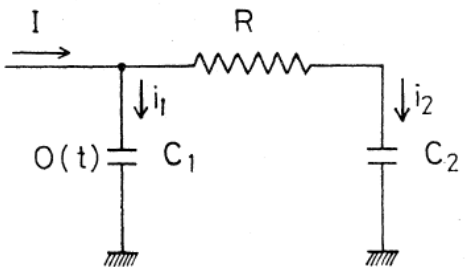


図 13 血液槽と間質槽のシミュレーション図

I は等速輸液を行うから定電流電源と考える．C_1 は血液槽のコンプライアンス，C_2 は間質槽のコンプライアンス，R は全身の水分透過係数の逆数 (抵抗) を示す．

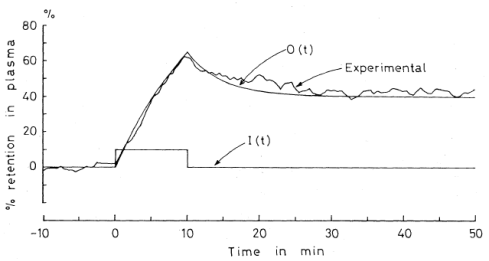


図 14 血液量の変化の平均値と シミュレーション結果

血液量の連続測定から得た逐次平均値とシミュレーション結果はよく一致した．

である．t が定数になっているから $f(t)$ の式に戻る．実数 α の x 座標で，虚数の $-i\infty$ から $+i\infty$ までを積分するから，複素関数論を知っていなければ演算できない．α については多分共役複素数

の定積分だから互いに打ち消しあって，$f(t)$ には表れないのだろう．この演算子法をあみだしたヘビサイド自身もよく理解できなかったために，あまり評価されずに晩年を送ったようである．20 世紀に入ってブロムウィッチらにより，ラプラス変換演算子法は証明されたようである．実際のところ，ラプラス逆変換表をたよりに $f(t)$ は四則演算で解けるから実用的には問題は生じない．ラプラス変換の実例で，血管–間質間の水分移動システムを解析したが，ラプラス変換表を頼りにして論文にまでこぎつけた．

BLUE BACKS の本書のよい所は一般教科書では理解出来なかったハードルを実に上手く説明して読者を納得させる所にある．例を上げると，フーリエ級数で $\sin m\theta$ と $\cos n\theta$ の掛算で係数が消えるところ (直交性), sin と cos の 2 関数では演算が大変なので，オイラーの法則を用いて，一挙に複素関数表現にしたところ，1 周期を 2π から $2l$ へ変換するところ，フーリエ変換の説明にパルス周期を無限大にまで延長すると，フーリエ級数から無理なくフーリエ変換に導入できる説明などは秀逸の解説で，教科書には記載されていないように思う．

改めて，フーリエ級数の積分範囲は $\pm\pi$ であるが，フーリエ変換は $\pm\infty$ に変換し，それを 1 周期と考えて 2π で割っている．ラプラス逆変換は虚数軸を $\pm i\infty$ にして $2\pi i$ で割るところを見ると，複素関数論をかいまみる必要性を感じる．

数学の話しではないが，フーリエがエジプトでロゼッタストーンの拓版を作り，それをシャンポリオンに渡したために古代エジプト象形文字 (ヒエログリフ) が解明できたことなど，小生が知らなかった逸話が満載である．そのような時代背景も味わいながら読むと，年老いた小生でも今後の生活に楽しめるように思う．繰り返すが，紙と鉛筆を用意して，一読を勧める名著である．

参考文献

1. 竹内 淳：高校数学でわかるフーリエ変換．講談社, 2009.
2. http://slpr.sakura.ne.jp/qp/periodic-analytical/
3. www.sic.shibaura-it.ac.jp/ sasano/lecture/math /2013/fourier.pdf
4. 西村重人：フーリエの生涯と熱伝導の研究．数理解析研究所講究録, 1583:220-231, 2008.
5. Tanaka Y.: Whole Body Transvascular Filtaration Coefficient and Interstitial Space Capacitance. Jpn. J. Physiol, 29, 181-193, 1979.

補足 0：テーラー展開

ある関数 $f(x)$ が $x = x_0$ の近傍で，

$$f(x) = a+b(x-x_0)+c(x-x_0)^2+d(x-x_0)^3+\cdots$$

で表せると仮定する．$x = x_0$を代入すると，a の値は $f(x_0)$ になる．

上式を微分すると

$$f'(x_0) = b + 2c(x - x_0) + 3d(x - x_0)^2 + \cdots$$

となり, $f'x_0) = b$ となる．さらに微分を続けると，

$$f''(x_0) = 2c + 3 \times 2d(x - x_0) + \cdots$$

となり，

$$f''(x_0) = 2c$$
$$c = \frac{f''(x_0)}{2}$$

となる．この微分操作を繰り返すと，

$$\begin{aligned} f(x) &= a + b(x - x_0) + c(x - x_0)^2 + d(x - x_0)^3 \\ &\quad + \cdots \\ &= f(x_0) + \frac{1}{1!}f'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2!}f''(x_0)(x - x_0)^2 \\ &\quad + \frac{1}{3!}f'''(x_0)(x - x_0)^3 + \cdots \end{aligned}$$

の多項式ができる．これをテーラー展開という．

特に $x_0 = 0$ の場合は，

$$f(x) = f(0) + +\frac{1}{1!}f'(0) + +\frac{1}{2!}f''(0) + \cdots$$

と簡単な式となり，これをマクローリン展開という．

補足 1：オイラーの公式

e^x, sin x, cos x をテイラー展開すると，

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots$$
$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} \cdots$$
$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \cdots$$

となる．ここで e^x の x を ix にすると

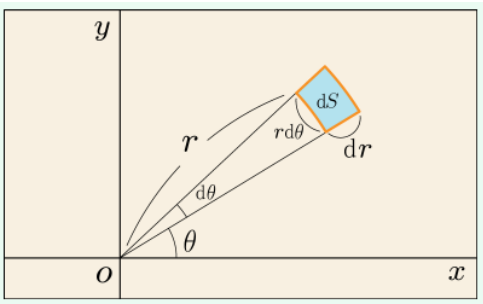
$$e^{ix} = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{(ix)^2}{2!} + \frac{(ix)^3}{3!} + \cdots$$

書き直すと

$$\begin{aligned} e^{ix} =& 1 + \frac{x}{1!}i - \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!}i + \cdots \\ =& \left(1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \cdots\right) + i\left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \cdots\right) \\ =& \cos x + i \sin x \end{aligned}$$

となる．

補足 2：$rdrd\theta = dxdy$ の証明



補足 2： $rdrd\theta = dxdy$ **の証明**
θ の角度から $d\theta$ の角度で r と $r + dr$ の微小円弧を作り，その面積を dS とする．(http://eman.hobbysite.com/math/calculus04.html より引用)

微小面積 dS を正確に計算すると，

$$\begin{aligned} dS =& \pi(r + dr)^2 \times \frac{d\theta}{2\pi} - \pi r^2 \times \frac{d\theta}{2\pi} \\ =& rdrd\theta + \frac{1}{2}(dr)^2 d\theta \end{aligned}$$

第 2 項の $(dr)^2$ を無視すると答えが得られる．

補足 3：無限等比級数の和

等比級数の和を，

$$S_n = a + ar + ar^2 + ar^3 + \cdots + ar^{n-1}$$
$$rS_n = ar + ar^2 + ar^3 + ar^4 + \cdots + ar^n$$

両辺をそれぞれ引くと，

$$S_n - rS_n = a - ar^n$$

になり．したがって，

$$s_n = \frac{a(1 - r^n)}{1 - r}$$

が得られる．$|r| < 1$ の場合，

$$S = \lim_{n \to \infty} \frac{a(1 - r^n)}{1 - r} = \frac{a}{1 - r}$$

となる．

特別寄稿：　厚労省も陥ったか，ヒューマンエラーと二酸化炭素中毒にまつわる謎 (続)

二酸化炭素 (炭酸ガス) を不活性気体と見るのは危険ではないか

佐藤 暢，飯野守男*

はじめに

著者らは，昨年の本誌[1]「厚労省も陥ったか，ヒューマンエラーと二酸化炭素中毒にまつわる謎」において，日本薬局方二酸化炭素 (炭酸ガス，CO_2) は，日本薬局方解説書[2]で「【本質】医療材料，置換用ガス，【副作用】特別なものは知られていない」と記載し，また同様の表記が，日本薬局方窒素 (N_2) についても「【本質】置換用ガス，【副作用】特別なものは知られていない」と記載されていることを指摘した．これらの記載が，長年続いてきたので，二酸化炭素 (炭酸ガス)[1] も窒素と同じく不燃性であることから，炭酸ガスも窒素と同じく無毒で，特別な副作用がない不活性ガス (inert gas) であるとの誤解から，炭酸ガスが濃くなるほど施設内の空気を置換して吸気中の酸素を稀釈することによる単純窒息性の酸素欠乏症を招くものと誤解して，高濃度炭酸ガスの毒性ないし副作用を見逃しているのではないかと警告した[1]．

その間違った解釈は，同じ本誌に載った「二酸化炭素ボンベ誤用事故 (5)」[3]の追記 3 で述べたように，2016 年 6 月 1 日付の日本産業・医療ガス協会会長の「医療用ガスボンベ誤認事故防止に関する取り組みの徹底について」の中の「二酸化炭素ラベルの作成例」で，函の中でヒトが両手を挙げて倒れている形の「単純窒息性」を表す警告マーク (図 1) を見たことにより明らかになった．これでは，高濃度炭酸ガスを吸入して起こる急性炭酸ガス中毒の病状は，窒素などの不活性ガスが過剰濃度になった気体を吸入した場合の低酸素血症とは明らかに異なる[1]のに，高濃度炭酸ガスの混入が引き起こす空気中の酸素濃度の低下による酸素欠乏症とする誤った見方が長く続いてきたことを示している．更に，炭酸ガス吸入の事故防止対策を適正に計り，また急性炭酸ガス中毒症の理解と予防，そして適切な治療の推進に障害となっている可能性をも懸念する．

図 1 「単純窒息性」を表す警告マーク

この経緯を内藤は，著書[4]のなかで「何故，二酸化炭素の毒性が無視され，18 %未満が酸素欠乏とされたか，どこでボタンの掛け違いが起きたのか，おそらくは以下のような事情によるものと思われる．旧労働省安全衛生部労働衛生課の“酸素欠乏危険作業主任者テキスト”によると，二酸化炭素は，ヘリウム，窒素，アルゴン，フロンと並んで，不活性ガスとされている．そこで，“不活性”を“無毒”と解し，二酸化炭素を使って酸素欠乏実験を行った．すなわち，ネズミを入れた箱の中に二酸化炭素を放出し，ネズミが倒れる酸素濃度を測定したところ，酸素濃度が 18 %になっ

鳥取大学名誉教授
*鳥取大学医学部社会医学講座法医学分野教授

[1] ここでは，労働安全衛生法施行令などでの記載に合わせて，気体状の二酸化炭素を炭酸ガスと記すことにする．H_2O を氷，水，水蒸気と言うように，CO_2 をドライアイス，液化炭酸ガス，炭酸ガスと相の区別を示すためである．但し，元文書によるべき箇所では，二酸化炭素と記載する．

掲載許可日 2018 年 2 月 10 日

たところでネズミが倒れた．そこで，酸素濃度 18 %以下は危険と判定し，現在の規則ができた．しかし，ネズミが倒れたのは酸素欠乏のためではなく，その時の二酸化炭素 (13.9 %) によってである．筆者らの実験によると，酸素濃度を 20 %に保っても，二酸化炭素が 10 %を超えると，ネズミはふらふらし始める.」と述べている．

更に内藤の説明を要約すると，「3,776 m の富士山頂での酸素分圧は 102 mmHg で，1 気圧での 13.5 %の酸素分圧に相当して通常の活動に大きな障害はなく，また高度 10,500 m を飛ぶ旅客機の客室内の酸素分圧は 130 mmHg で，1 気圧での 17 %の酸素分圧に相当して，妊婦や心臓に持病がある人でも十分耐えられる．一方，放出した炭酸ガスが溜まって 30 %に達した時の室内の酸素濃度は 70 %× 20.9 %＝ 14.6 %となり，ヒトの生命に危険が及ぶ程の低酸素濃度ではないが，30 %の炭酸ガスは脱出限界濃度をはるかに上回り，即時に意識消失する致死濃度である．つまり，“ 酸素欠乏症等防止規則 ” では，炭酸ガスの発生・混入によって酸素濃度が 18 %に低下すると，その時の炭酸ガス濃度はヒトの致死濃度を上回る 13.9 %であるから，ヒトは酸素欠乏ではなくて，炭酸ガス中毒で死亡する.」[4] ということになる．

労働省の酸欠症対策では炭酸ガスは不活性とされてきた経緯と最近の変化

そこで，その経緯を知るべく旧労働省発行の「酸素欠乏危険作業主任者テキスト」第 24 版 (1982)[5]，中央労働災害防止協会発行の「酸素欠乏症等防止規則の解説」の第 7 版 (2004)[6]，第 8 版 (2007)[7]，第 9 版 (2012)[8]，第 10 版 (2016)[9]，さらには，変遷後誌である中央労働災害防止協会発行の「酸素欠乏危険作業主任者テキスト」第 2 版 (2015)[10]，第 3 版 (2017)[11] までを経時的に調べた．

それら [5–9] によると，明治以降本邦における炭鉱開発で坑内ガス突出による重大災害が頻発し，船倉，サイロらの密封空間での労災事故を含めて有毒ガスの発生によるものとして処理されてきたが，戦後にそれら災害の本態は酸素欠乏によるものとの認識が広まった．昭和 30 年代後半からは都心部を中心に各地の地下工事が急増して事故も相次ぎ，その本態も酸素欠乏によるものと判明して早急な対策が望まれた．そして昭和 42 年には旧労働省から「酸素欠乏症の防止について」が通達され，そこで，①酸欠が発生するおそれがある業種・作業が広範囲に列挙され，②労働者を立ち入らせても良い酸素濃度が従来の 16 %以上から 18 %以上とされ，③酸欠作業主任者の選任と労働者の教育が進められた．しかし，地下の建設工事における圧気工法による酸欠空気の発生など災害性が濃くかつ致命率の高い事故が増えて，昭和 46 年には労働基準法の規定に基づき「酸素欠乏症防止規則」が公布・施行された．

更に，昭和 47 年には「労働安全衛生法」が公布され，その規定に基づき新たに「酸素欠乏症防止規則」が公布され，「労働安全衛生法」と「同施行令」の施行に伴い，大幅に改正された「酸素欠乏症防止規則」が施行された．その際に酸素欠乏危険場所の項目が拡大されて「酸素欠乏症防止規則」第 2 条 (定義) のなかで，「労働安全衛生法施行令」の**別表第 6　酸素欠乏危険場所** (以下「酸素欠乏危険場所」) における作業が「酸素欠乏危険作業」と定義された．

そこでの問題は，「労働安全衛生法施行令」第 6 条 (作業主任者を選任すべき作業) と第 21 条 (作業環境測定を行うべき作業場) に指定される「**別表第 6 酸素欠乏危険場所**」の中の，

「**10** ドライアイスを使用して冷蔵，冷凍又は水セメントのあく抜きを行っている冷蔵庫，冷凍庫，保冷貨車，保冷貨物自動車，船倉又は冷凍コンテナーの内部」　「**11** ヘリウム，アルゴン，窒素，フロン，炭酸ガスその他不活性の気体を入れてあり，又は入れてあったことのあるボイラー，タンク，反応塔，船倉その他の施設の内部」

の記載である．この記載は，総務省の電子政府の総合窓口 (e-Gov) の法令検索でも，厚労省のホームページでも現状を確認できることから，昭和 47

年 (1972) の「労働安全衛生法施行令」**別表第 6** から現在まで変わっていないことが推定される．

すなわち，現在まで長らく変わらないまま，当局 (厚労省労働基準局安全衛生部労働衛生課に代わって特別民間法人中央労働災害防止協会) の「酸素欠乏危険作業主任者技能講習」[2] に使用され，酸素欠乏危険作業主任者の選任と作業場の監督が行われてきたものと思われる．

これこそが炭酸ガスを窒素と同じ不活性ガスとする誤解を広げ，ヒトが高濃度の炭酸ガスを吸入した場合におこる急性炭酸ガス中毒症を見逃して，不活性ガスによる置換で単に吸気中の酸素を希釈することによる窒息性酸素欠乏症と誤った認識を社会に残している原因ではないかと考えた．

一方で，中央労働災害防止協会発行の「酸素欠乏危険作業主任者テキスト」[10,11] では，二酸化炭素とオゾンは，単純窒息性ガスのリストから除かれ，さらに前者については「高濃度では，それ自体に毒性がある」と修正されている．しかしながら，「労働安全衛生法施行令」**別表第 6** がそのまま掲載されているため「炭酸ガスは不活性の気体」の記述が残ることとなり，同じテキスト内での記載に矛盾が存在する．つまり，現行の「酸素欠乏危険作業主任者テキスト」[11]では，炭酸ガスはそれ自体に毒性があり，窒素と同様な不活性気体ではないことが認められたが，政令である「労働安全衛生法施行令」**別表第 6** の改正には至っていないと考える．

炭酸ガスは不活性気体ではない

岩波理化学辞典第 3 版では「不活性気体 (inert gas)：① ＝希ガス，② 希ガスおよび反応性に乏しい気体，たとえば窒素などをいう.」とあり，最新医学大辞典第 2 版 (医歯薬出版) では「不活性ガス：一般に希ガス，すなわち周期律表の 0 族元素気体 (ヘリウム，ネオン，アルゴン，クリプトン，キセノン，ラドン) を指すが，希ガス以外の反応性の低い気体 (たとえば窒素) を含むこともある．0 族元素は電子配列の最外殻が閉殻になっているため反応性は極めて低い.」とある．また，科学大辞典第 2 版 (丸善) にも「一般に 0 族元素をさすが，窒素も実用上不活性ガスに分類されることが多い.」と記してある．一方で，化学大百科 [12] では，「不活性気体」の項目で，「0 族に属する奇ガス (貴ガス) (rare gas, noble gas) の 6 元素が化学的反応性に乏しいことに由来する名称である.」としか触れていない．その他，図書館で当たって見たところ，不活性ガスの項目で窒素に言及していない辞典は少なくないことがわかった．なお，フロンおよび炭酸ガスを不活性気体と記している科学辞典は見当たらなかった．

炭酸ガスの化学的特徴は，水に対する溶解度が窒素や空気の 20〜50 倍も多く，しかも低温になる程その差が大きくなることである．その大部分は水と化学的に反応して主に重炭酸イオン (HCO_3^-) として溶解しているが，これが炭酸ガスを多く含んで発泡性となる炭酸水で，清涼飲料として頻用されているものに他ならない．炭酸は弱酸性で鋼材をも腐蝕するが，酸素との共存や高圧下では腐蝕が一層進み易い．また，近年は地球温暖化の主因物質の一つとされ，炭酸ガスの削減は地球規模での最重要課題となっている．

炭酸ガスは，熱容量 (heat capacity: 一定量の物質の温度を 1 ℃上げるのに必要な熱量) が比較的大きい気体で，一般の火災では不燃性で分解しないことからこれをもって化学的に不活性と書いた例もある [13]．また，この性質から消火剤とし

[2] 昭和 57 年から硫化水素中毒の防止対策を追加して「酸素欠乏症防止規則」は「酸素欠乏症等防止規則」に改められ，酸素欠乏危険作業を第 1 種と第 2 種の 2 区分としたが，平成 15 年からは「酸素欠乏危険作業主任者技能講習」と「酸素欠乏・硫化水素危険作業主任者技能講習」という名称が使われている．従って「酸素欠乏症等防止規則」の第 21 条 (作業環境測定を行うべき作業場) に「**別表第 6** に掲げる酸素欠乏危険場所において作業を行う場合の当該作業場」で，作業環境での酸素濃度の測定を行うよう指導されてきたが，肝心の炭酸ガス濃度測定は行われていないので，作業場における炭酸ガス中毒の実態解明と防止対策が遅れているのが実情である．

ても利用される．その消火作用は，① 燃料と空気の混合によって形成される可燃性混合気中の酸素濃度を低下させて燃焼反応を不活発にする作用と，② 炭酸ガスの大きい熱容量で火炎から熱を奪い，炎の温度を低下させて燃焼反応を不活発にする作用とが複合した消火効果とされるが，③ ボンベ内に液化して貯蔵されている炭酸ガス消火剤が，放出時に気化する時の潜熱も火炎の冷却に寄与し，また④ 炭酸ガスが空気の 1.5 倍ほど重いために低い所に溜まりやすく，火元を包み込むようになって火災防止に有利に働く場合もあるとされる．更に，炭酸ガス消火剤が特に有利な点は，使用後には炭酸ガスが逃げてしまって，水または砂などを消火に用いた後に見られる悲惨な財産上の損害状態を起こさない点である．その他，炭酸ガスは非導電性の気体であるので，電気絶縁性に優れており，感電の心配がないなど有利な点も多いが，何よりも危険な点はヒトが高濃度の炭酸ガスを吸った場合に起こる強力な毒性による急性中毒症での死亡事故であり，二酸化炭素消火設備の誤作動による死亡例も繰り返し起きている [1]．また，消火剤以外ではドライアイスによる死亡例の報告も少なくない [1]．

ヒトにおける炭酸ガスの毒性と窒息死

著者らは，高濃度の炭酸ガスを多量に吸入した場合に繰り返された多くの災害事故死に関する報告を総合的に見て，その場の酸素濃度は 17 %以上 (非危険域) であったのに炭酸ガス濃度がいずれも 8〜40 % (危険域) であったことから，死因は急性二酸化炭素中毒によるものであって，炭酸ガスが空気中の酸素を希釈して酸素欠乏状態 (窒息) になったが故ではないと考えた [1]．

二酸化炭素消火設備の誤作動による死亡事故について，消防庁は「二酸化炭素消火設備の安全対策について (通知)」[13] において「10 %以上の炭酸ガス濃度を吸入すると数分以内に意識喪失し，その後急速に呼吸停止を経て死に至る」などの症状から高濃度の炭酸ガス吸入の危険性を説く一方で，アルゴン及び窒素については炭酸ガスのような人体に対する危険性はないとしたのに対して，厚労省の安全衛生部は「二酸化炭素消火設備による酸素欠乏症の防止について」[14] と題して，5 例の事故について一様に「酸素欠乏空気により被災した」と記載している．

「二酸化炭素と人体」の関係については，高橋が書いた同じ表題の論文 [15] がある．その中で「二酸化炭素の毒性」について表「吸気中の炭酸ガス濃度と症状」と表「酸素欠乏に対する症状」を対比して，炭酸ガス濃度が 10 %以上ならば，酸素欠乏が無くても直ちに意識を喪失して致死的になるとしたので，炭酸ガスがヒトに対して不活性との説は否定されるが，酸素濃度が 10 %未満ならばそれ自体で間もなく意識を喪失して生命の危険に至ることを示した．一方で，高橋は，「炭酸ガスに対して毒性という表現を使うことに多少の抵抗を感じる.」とも述べている．その理由は，「一酸化炭素 (CO) などと異なり，後遺症を残すことは少ない．また，体内で代謝の結果生み出される物質であり，その点からも毒性という表現は好ましくない.」と記している．

しかし，著者らは，生理的範囲と純炭酸ガスとの間に約三千倍という濃度差があり，約 10 %以上の高濃度炭酸ガスの吸入では強い毒性があることから，生理的効果とは区別する必要があると考える．これは，アルコールやジギタリスなどすべての医薬品についても高濃度，或いは多量になると毒性が強く表れるのと同じことである．

また，高橋は，高濃度の炭酸ガスの麻酔作用 (CO_2 narcosis) にも触れ，程度によって呼吸中枢などを麻痺させるが，個人差が大きいことを指摘している．麻酔作用は，笑気 (N_2O) やキセノン (Xe) ではガス麻酔剤として臨床に使用されているが，キセノンは前述したように希ガスであり，不活性でもあり，両者とも生体内では代謝・分解など化学的変化はないとされる．キセノンが生体内で膜界面の水と結合してできる水和物が意識を消失させるとの水和水晶説 (hydrate crystal theory)

として有名である [16]．ここで解ることは，不活性 (inert) とは化学反応性が乏しいことに限定すべきであって，麻酔や中毒など生体に対する作用までも混同すべきではないということである．

正常な空気の炭酸ガス濃度である 0.03〜0.04 (v/v) %で吸入され，呼気中ではその 100 倍の約 3 %炭酸ガス濃度の間で変動して呼吸を調節しながら，大量に血液に溶けて重炭酸係の緩衝作用によって生体組織の pH を 7.35〜7.45 に保つのがおよその生理的範囲である．そして, 吸気中の炭酸ガスが労働衛生上の許容濃度とされる 0.5 % (5,000 ppm) (局方二酸化炭素の添付文書) までは慢性的に, 更に化学物質毒性データ総覧 (RTECS) でヒトの炭酸ガス最小致死濃度 (1 分間) とされる [1]10 % 辺りまでは呼吸促進などで対応する病的な急性呼吸性アシドーシスであるが, この点でも, 炭酸ガスが人体に対して極めて活性に働くので，ヒトに対して不活性な窒素とは全く異なる．呼吸障害 (肺の換気障害) によって体内の酸素が欠乏して炭酸ガスが病的に蓄積してくる呼吸性アシドーシスのことを一般に窒息と呼び，肺での換気を改善できない状態が続くと究極的には窒息死に至る．

一方で，純度 99.5 %以上の炭酸ガスをボンベ [3] から誤って吸ったような場合には, 生理的な吸気の約三千倍も濃い炭酸ガスが無尽蔵に肺から血液に溶け込んでくるために血液の緩衝活動 (buffer action) が直ちに破たんして急激な酸血症 (acidemia) となり，脳や心臓を始めとして各種臓器や細胞の機能異常から呼吸停止や心停止，或いは致死的不整脈などから死に至る．その際には生理的な呼吸とは逆方向に肺から格段に高濃度の炭酸ガスが血液中に浸透して来るので炭酸ガスによる中毒性アシドーシスと呼んで呼吸性アシドーシスとは区別すべきと考えて提案した [1]．この場合は素早く肺の換気を回復して純酸素で炭酸ガスを肺 (人工肺も含めて) から洗い出すことができれば，意外に早く酸血症から回復できて，低酸素血症による脳機能障害を残すことなく蘇生が成功する可能性も考えられる．このような異常な事態についてヒトでの実験的研究はできないまま，同じ窒息死と言っても千差万別である災害事故や医療事故での報告から見れば，二酸化炭素中毒症についての正確な実態把握や適切な治療法の確立には程遠いとの思いが強い．最終的な病態生理は，心肺停止から低酸素でかつ高炭酸ガスの組織環境で脳などの細胞が死を迎える点では窒息死と同様かもしれないが，それまでの経過は桁違いに高い炭酸ガスレベルによる異常に早い心肺脳機能不全による死亡と考えられる．例えば，池田らのイヌの実験による純 CO_2, 80 % CO_2+20 % O_2, または 50 % CO_2+50 %空気の吸入における 1 分経過後の急激な変化は，単なる窒息による低酸素症では見られない心肺脳機能の異常であり [17]，それらの終末結果を一様に窒息死と呼ぶよりも，急性二酸化炭素中毒症 (acute CO_2 poisoning or intoxication) による死亡と診断すべきではあるまいか．

このような事態が特別に明瞭になったのは，炭酸ガスが血液や組織液に溶けやすくて気泡化しにくい点や，肺からは大量に素早く呼出しやすい特性を利用して腹腔内視鏡手術や開心術などにおいて医療現場で直接人体にボンベからの炭酸ガスが使用されるようになってからである．すなわち，緑塗色の液化炭酸ガスボンベの (酸素ボンベとの) 誤認事故における肺への純炭酸ガスの誤用であり [3], 人体内で気泡化しやすい空気や窒素の欠点を補うための使用である．

ボンベ内の液化炭酸ガスの取り扱い

「労働安全衛生法施行令」**別表第 6** に関する更なる問題は，その「解釈例規」第 11 号関係にある「本号に掲げる気体がボンベに入って格納されている施設の内部は，本号に含まれないこと.」という記載である (昭和 57 年 6 月 14 日付け基第 407 号).

炭酸ガスがボンベに入っている場合は液化炭酸ガスとして「高圧ガス保安法」の適用を受けるが，ボンベ内の高圧から出て大気圧に減圧すると気化して炭酸ガスとなる．一方，固形のドライアイス

から昇華しても炭酸ガスとなる．また，火災から，自然災害から，食品の貯蔵・熟成から，地層からなど，どんな発生源からであろうと炭酸ガスには変わりはない．

ボンベ内の液化炭酸ガスは気体ではないから，第 11 号から除外する，従って液化炭酸ガスのボンベには単純窒息性の警告マークを貼る必要がないという解釈であると聞いたことがあるが，これは間違いである．なぜならば，液化炭酸ガスボンベ内では高圧で液化していても，ボンベから出れば必ず気化して炭酸ガスになるので，火災やドライアイス等によって発生する炭酸ガスと同じ性質であるので，ボンベが格納されていた施設の内部で炭酸ガスが高濃度になると毒性があり，窒素のように不活性ではありえないからである．

労働災害における人体に対する炭酸ガスの吸入効果は，窒素のように空気中の酸素を置換・希釈しての酸素欠乏だけであると政府当局が解釈しているとすれば，ボンベから高濃度の炭酸ガスを吸入した場合の急激な中毒作用を見逃しており，労働者の健康を危うくしかねないので，「労働安全衛生法施行令」**別表第 6** の第 11 号の訂正を急がなければならない深刻な問題ではないか．ボンベに入っている炭酸ガス [3] は，通常 70 気圧前後の高圧下で，そのほぼ全体が液化した状態であるが，ボンベから出る際に減圧気化して高い純度の炭酸ガスとなり施設の内部に入るので，ドライアイス等ボンベ以外から発生した炭酸ガスと性質が違うと区別する解釈が成り立つはずはない．

もっとも，昭和 57 年 6 月 14 日付け基第 407 号は，現在の中防災の安全衛生情報センター通達一覧 (昭和 50 年代)<http://www.jaish.gr.jp/user/anzen/hor/tsutatsu.html> には見当たらないが，現在のテキスト [11] には記載されている．

おわりに

ヒトは，酸素欠乏状態でない環境でも，約 10 %以上の炭酸ガスを含むガスを呼吸することにより，炭酸ガス自体の人体に対する毒性によって急性炭酸ガス中毒症となり死亡に至るので，炭酸ガスが人体に対しての窒素のように不活性と言うのは誤りである．従って，著者らは，労働作業現場において，誤解に基づく炭酸ガス中毒症をこれ以上発生させないためにも，以下の提言を行う．

提　言

1. 「労働安全衛生法施行令」**別表第 6　酸素欠乏危険場所**から，第 10 号の全文「**10** ドライアイスを使用して冷蔵，冷凍又は水セメントのあく抜きを行っている冷蔵庫，冷凍庫，保冷貨車，保冷貨物自動車，船倉又は冷凍コンテナーの内部」を削除すること．
2. 同第 11 号の「**11** ヘリウム，アルゴン，窒素，フロン，炭酸ガスその他不活性の気体を入れてあり，又は入れてあったことのあるボイラー，タンク，反応塔，船倉その他の施設の内部」から，「フロン，炭酸ガス」を削除すること．
3. 炭酸ガス中毒の防止対策を目的とした，「炭酸ガス危険作業」の対策を別に設けること．

炭酸ガスは，既に鳥インフルエンザの防疫対策で大量の鶏を一気に安楽死処分するために有効に使用されている．また，マウス，ラット，モルモットなどの実験用小動物を安楽死させるためにも使用され，また豚の人道的屠殺前の意識消失にも有効に活用されている [18]．これらの効果は，不活性ガスである窒素で空気を置換しての酸素欠乏症では，有効・迅速な効果が得られないことは明らかであり，動物の種による特異性があるにしても，炭酸ガスの急性中毒症の結果であることを証明している．

また，保健所などで行われる行政的な動物の殺処分では，イヌで濃度 30〜40 %炭酸ガスを 1〜2 分，ネコでは 60 %炭酸ガスを 1 分以内で昏睡に陥り間もなく死亡するが [19]，これも炭酸ガスの急性中毒症であり，窒素による酸素欠乏症ではありえないことである．

ドライアイスの直接気化 (昇華) による倉庫などの閉鎖空間での死亡事故例では，その事故の再

現実験等による酸素濃度が致死的まで低くなく，炭酸ガス濃度の方が致死的レベルより高かったので[1]，閉鎖空間の空気を炭酸ガスで単に置換した故の酸素欠乏症のリストから第 10 号を除き，新たに炭酸ガス危険作業の防止規定を追加するように提案する．

どうか労働安全衛生法の趣旨・目的に沿って適切な処置 (これまで酸素欠乏危険場所とされていた作業環境での炭酸ガス濃度測定など) が早急に整備されるよう切に希望する．そして著者らの提言により，「労働安全衛生法施行令」が修正され，一刻も早く炭酸ガス中毒の防止措置を目標とした「炭酸ガス危険作業」の対策が適切に取られることを願ってやまない．

追　記

追記 1．本論文は日本薬局方二酸化炭素の毒性に関する論文[1] の続きであるが，著者らはその引用文献 1 の追記 ＜94 頁の下部＞ に「JP 二酸化炭素そのものは，医薬品ではなくて，毒薬 だということを行政は，」と書いた．これを「JP 二酸化炭素そのものは医薬品というよりも毒薬に匹敵するほど危険なことを，行政は」に訂正させて頂きたい．これは，印刷，発行された本誌[1] での訂正で，電子版では 2017 年 7 月に訂正済みである (JP=局方)．この訂正の理由を以下に述べる．

毒薬とは，医薬品の中で，特に急性・慢性毒性が強いもの，安全域の狭いものなどを，「医薬品，医療機器等の品質，有効性及び安全性の確保等に関する法律」(旧薬事法) の第 7 章　医薬品等の取り扱い　第 1 節　毒薬及び劇薬の取り扱い　第 44 条 (表示) の第 1 項に「毒性が強いものとして厚生労働大臣が薬事・食品衛生審議会の意見を聴いて指定する医薬品は，その直接の容器又は直接の被包に，黒地に白枠，白地をもって，その品名及び「毒」の文字が記載されていなければならない．」とある．つまり，毒薬も医薬品の中に含まれる．但し，同法施行規則の別表第 3 の投与法に，およそ 20 mg/kg 以下の経口，皮下，静脈注射 (動物の 50 %致死量 LD_{50} を基準に) とあり，気体の吸入については記載がないので，炭酸ガスは毒薬ではないからである．

別に，医薬品でない毒物に関して，「毒物及び劇物取締法」があり，そこでの判定基準には，経路が吸入 (ガス) での毒物基準：50 %致死濃度 (LC_{50}): 500ppm (4hr) 以下，劇物基準が LC_{50}: 500ppm (4hr) を超え 2,500 ppm (4hr) 以下とある．それを見て，炭酸ガスの労働衛生上の許容濃度 (1 日 8hr, 週 40hr 労働) とされる 5,000 ppm (NIOSH, ACGIH, 日本産業衛生学会，局方二酸化炭素の添付文書)[20] との近さを改めて痛感する．

追記 2．別に，炭酸ガス測定に関する規定には，以下のようなものがある．

労働安全衛生法　第 65 条 (作業環境測定)
　事業者は，有害な業務を行う屋内作業場その他の作業場で，政令で定めるものについて，厚生労働省令で定めるところにより，必要な作業環境測定を行い，及びその結果を記録しておかなければならない．

労働安全衛生法施行令　第 21 条
　法第 65 条第 1 項の政令で定める作業場は，次のとおりとする．
4. 坑内の作業場で，厚生労働省令で定めるもの

労働安全衛生規則 第三編 衛生基準
第一章 有害な作業環境 (坑内の炭酸ガス濃度の測定等)

(坑内の炭酸ガス濃度の基準)
第 583 条 事業者は，坑内の作業場における炭酸ガス濃度を，1.5 %以下としなければならない．ただし，空気呼吸器，酸素呼吸器又はホースマスクを使用して，人命救助又は危害防止に関する作業をさせるときは，この限りでない．

(作業環境測定を行うべき作業場)
第 589 条　令第 21 条第 4 号の厚生労働省令で定める坑内の作業場は，次のとおりとする．
1. 炭酸ガスが停滞し，又は停滞するおそれのある坑内の作業場
第 592 条 事業者は，第 589 条第 1 号の坑内の作業場について，1 月以内ごとに 1 回，定期に，炭酸ガス濃度を測定しなければならない．

つまり，炭酸ガスの作業場での測定は，坑内での定期的な測定に限り要求されているが，その他の作業現場でも炭酸ガスの濃度が上がるおそれのある場所は少なくないので，「炭酸ガス中毒危険場所」での作業現場での炭酸カス濃度測定を，炭酸ガス中毒症の防止措置として適切な法制化を期待する．

謝辞:炭酸ガスボンベの取り扱いに対する警鐘について，御理解とともに掲載の機会を頂いた本誌編集長田中義文先生に心から感謝する．

引用文献

1. 佐藤 暢，飯野守男：厚労省も陥ったか，ヒューマンエラーと二酸化炭素中毒事故にまつわる謎．　白神豪太郎, 橋本悟, 田中義文編，麻酔・

集中治療とテクノロジー 2016, p87-96, 日本麻酔・集中治療テクノロジー学会 京都 2017. http://www.jsta.net/pic/magic.pdf
2. 日本薬局方解説書編集委員会編：第 17 改正日本薬局方解説書．二酸化炭素．pC3716-C3719 廣川書店 東京 2016.
3. 佐藤 暢：二酸化炭素ボンベ誤用事故 (5)一特に従来の対応と医薬品ラベル等の問題点． 麻酔・集中治療とテクノロジー 2016, p72-86, 日本麻酔・集中治療テクノロジー学会 京都 2017. http://www.jsta.net/pic/sato-5.pdf
4. 内藤裕史：中毒百科一事例・病態・治療一(改訂第 2 版) 43. 二酸化炭素. p181-186 南江堂 東京 2001.
5. 労働省安全衛生部労働衛生課編：酸素欠乏危険作業主任者テキスト．中央労働災害防止協会，東京 1982.
6. 中央労働災害防止協会編：酸素欠乏症等防止規則の解説 (第 7 版)．中央労働災害防止協会 東京 2004.
7. 中央労働災害防止協会編：酸素欠乏症等防止規則の解説 (第 8 版)．中央労働災害防止協会 東京 2007.
8. 中央労働災害防止協会編：酸素欠乏症等防止規則の解説 (第 9 版)．中央労働災害防止協会 東京 2012.
9. 中央労働災害防止協会編：酸素欠乏症等防止規則の解説 (第 10 版)．中央労働災害防止協会 東京 2016.
10. 中央労働災害防止協会編：酸素欠乏危険作業主任者テキスト (第 2 版) 中央労働災害防止協会 東京 2015.
11. 中央労働災害防止協会編：酸素欠乏危険作業主任者テキスト (第 3 版) 中央労働災害防止協会 東京 2017
12. 今井淑夫 他 5 人訳：化学大百科 (初版) 朝倉書店, 東京 1997.
13. 消防庁予防課長, 消防庁危険物規制課長：二酸化炭素消火設備の安全対策について (平成 8 年 9 月 20 日通知)．消防予第 193 号, 消防危第 117 号．1996.
14. 労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課長：二酸化炭素消火設備による酸素欠乏症の防止について (平成 10 年 10 月 12 日付 内翰)http://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-39/hor1-39-25-1-0.htm
15. 高橋正好：二酸化炭素と人体．安全工学 37(5):352-357,1998.
16. 小栗顕二：麻酔の理論．稲田 豊, 藤田昌雄, 山本 亨編:最新麻酔科学 上巻 (改定第 2 版)p31-57, 克誠堂出版 東京 1995.
17. Ikeda N, Takahashi H, Umetsu K, Suzuki T：The course of respiration and circulation in death by carbon dioxide poisoning. Forensic Sci Int. 41: 93-99. 1989.
18. 鈴木 真, 黒澤 努. 米国獣医学会: 安楽死に関する研究会報告 2000 (III). 日本獣医師会雑誌 58: 443-446, 2005.
19. 子猫のへや．猫の安楽死．www.konekonoeya.com/rouka/euthanasia.html
20. 日本産業衛生学会編：許容濃度の勧告 (2009 年度) 化学物質の許容濃度 産衛誌 51:102, 2009.

Key Words
単純窒息性，酸素欠乏症防止規則，酸素欠乏症等防止規則，労働安全衛生法施行令，酸素欠乏危険場所，窒息死，炭酸ガス，毒性，不活性気体，二酸化炭素中毒，硫化水素中毒，中央労働災害防止協会 (中労基)．

連絡先：
satotoru@orange.plala.or.jp
iino@med.tottori-u.ac.jp

QR バーコードを利用したシステム間情報参照ツールの作成

斎藤 智彦

はじめに

多くの医療施設では, 電子カルテなどの外部ネットワークと切り離された医療情報系ネットワークと，インターネットに接続されているオフィス系ネットワークの 2 系統のネットワークシステムが存在している．これらのネットワークはセキュリティ上の問題から，物理的に遮断されている場合が多く，システム間の情報共有は，医療情報部に依頼する必要があり，他システムの情報を利用するには煩雑な手続きが必要である．手術関連情報など小規模なテキストデータを別系統のシステムで利用する場合，印刷した紙情報や PC のディスプレイを見ながら，手入力を行っているのが現状である．

多くの医療情報系 PC では，セキュリティ上 USB メモリーや HDD などの USB Mass Storage Class の使用は，多くの場合禁止あるいは制限されているが，電子カルテ端末で利用されるキーボードやマウスなどの USB Human Interface Devices(HID) Class は使用可能であることが多い．

今回，別々の 2 系統ネットワークに接続された 2 台の PC 間でテキストデータを参照するために，提供側 PC 上で QR コードを生成，利用側 PC で 2 次元バーコードスキャナを使用し情報を共有するユーティリティプログラムを作成した．

開発の経緯

当院では，paperChart で作成した麻酔記録をもとに，医事用の麻酔関連伝票を作成し，医事係ではその伝票を元にデータを手入力している．

面倒であるうえに，誤入力への対応は難しい．オンラインで連携を行うには医事システム改修が必要となるが，費用的に多額となるため導入には至っていない．

Code128 バーコード

図 1 QR コード

1994 年にデンソーが開発した 2 次元コード．Quick Response に由来．高速読み取りが出来る．QR コードの容量（最大文字数），数字のみ 7089 文字, US -ASCII 4296 文字, バイナリ 2953 バイト，漢字・カナ (SJIS) 1,817 文字．ただし，バージョンを最大にし，謝り訂正レベルを最低 (L) にした場合．

電子カルテ端末などの医療用 PC では, キーボード, マウス, バーコードスキャナなど USB HID の使用は許可されている．キーボードタイプの USB バーコードスキャナであれば制限無く使用することが可能である．読み取った情報は，フォーカスのあるフィールドへ「キーボード入力」＋「Enter」として入力される．バーコードに Code128 を使用すれば，ASCII 文字列ほぼ全てを扱うことが可能で，必要な情報を「キーボード入力と同じ形式」でバーコード出力すれば，簡単にデータの共有を行うことが出来る．

日本語文字列への対応

英数字やスペース，コンマの入力が出来るなら，カナ文字のデータや，術式など漢字を含むフリーテキストの情報を共有したいといった要望や，マスター情報の編集もオフィス系の使い慣れた PC で行って，結果を電子カルテ上に送信したいという要望が出てくる．

独立行政法人 労働者健康安全機構 岡山ろうさい病院 麻酔科

図 2．使用した USB 接続 2 次元バーコードスキャナ (左) と，デバイスとして認識されている状態 (右)

しかし，1 次元バーコードでは Code128 を使用しても 30〜40 文字程度の出力が限界であり，カナや漢字を扱うことは出来ない．2 次元バーコード (QR コード) を使用すれば，1000 文字以上扱える上，仕様ではカナ・漢字も使用できるため，バーコードスキャナさえ準備すれば対応可能と考え，試験的に 1 台購入し検証した (図 1).

USB 接続 2 次元バーコードスキャナ

USB 端子に接続すれば自動的に HID として認識される．特殊なデバイスドライバは必要ない．バーコードを読み取った結果はキーボードからの入力として扱われるため，入力が必要なフィールドにカーソルを移動してバーコードをスキャンすれば直接データを入力することが出来る．

しかし，HID として利用可能であるものの，日本語テキストの入力に利用できるわけではないことが判明した．英数字はすべて正しく入力できるが，読み取った文字は US キーボード配列のキーコードとして入力されるため，一部の記号文字が文字化けする．カナなど対応する US キーが無い文字は入力することが出来ない．「漢字」「かな」を直接入力するキーは存在しないため，当然，漢字・カナはバーコードスキャナからは直接入力することが出来ない．

試しに，本学会総会で使用されたネームカードに印字されている QR コードを読み取ると，通常の 2 次元スキャナ (携帯電話など) では「19_斎藤　智彦_岡山ろうさい病院　麻酔科_R_B_1019」と正しく読み込むことが出来るが，今回使用した 2 次元バーコードスキャナでは「19=”qF=Ra””=R=B=1019」と入力されてしまう．

バーコード作成アプリケーション

バーコード作成 (提供側) アプリケーションは Microsoft Visual Studio 2013 Community 版の C# および.NET Framework 4.5 を使用し，QR コードの作成には，フリーのバーコードライブラリ ZXing を使用した．このライブラリは PC 以外に Android 端末でもよく使用されている．

プログラムは，コピー＆ペーストの感覚で情報参照出来るように対応するため，1) クリップボードの監視，2) テキストのドラッグ＆ドロップ，3) ファイルのドラッグ＆ドロップに対応した．

短い英数文字列の場合，1 次元バーコード作成も可能とした．日本語などキーボード入力で対応できない文字の場合，文字列を Base64 エンコードした結果を出力するようにした．800 バイトを越える文字列の場合，複数のバーコードに分割し，表示されるイメージを切り替えるようにした．

```
#using ZXing;
private void MakeQRcode(string str)
{
    ZXing.BarcodeWriter wr = new ZXing.BarcodeWriter();
    var encOptions = new ZXing.Common.EncodingOptions();
    encOptions.Height = pbxQR.Height;
    encOptions.Margin = 20;

    wr.Format = ZXing.BarcodeFormat.QR_CODE;

    pbxQR.Image = wr.Write(str);
}
```

図 3．ZXing ライブラリを用いた C#プログラム

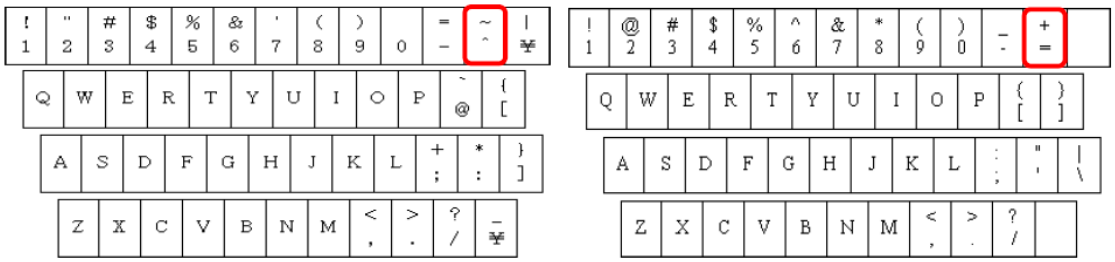


図 4 JIS キーボード (左) と US キーボード (右) の配列．赤で囲んだ部分が誤入力される．

ZXing ライブラリを使用したバーコード作成は簡単で，数行でバーコードが表示される (図 3)．

バーコード読み取りアプリケーション

Base64 エンコードされていない通常のバーコードを読み込む場合，入力が必要なテキストボックスにフォーカスを移動し，直接バーコードスキャナで読み込むため，アプリケーションは必要ないが，Base64 エンコードされているバーコードを読み込む場合，デコード用のアプリケーションが必要となる．アプリケーションは MS Visual C# 2013 で作成した．ZXing 等の外部ライブラリは不要であり，電子カルテ端末で利用する場合にも影響は少ないと考えられる．

Base64 で使用するキャラクタは ”0-9A-Za-z+/=” の 65 文字であるが，US キーボードとの対応で，誤読み取りされる “ ^ ~ ”2 文字を修正し，ホワイトスペースを除去した後に Base64 デコードを行い，デコードされた文字列はそのままクリップボードへコピーするようにした (図 4)．電子カルテの入力用フィールドでは貼り付け作業だけでデータが入力できる．長いデータの場合，複数のスキャン結果を結合して結果をクリップボード，あるいはファイルとして保存するモードを作成した．

今回の抄録の最初の会長挨拶は，次項のごとくバーコードに変換される．

結果ならびに考察

QR コードと 2 次元バーコードスキャナを使用し，必要に応じて Base64 変換を行うことで，漢字や制御文字列も含めてデータを共有することができた．

今回使用した 2 次元バーコードスキャナは，安価な中国製で，日本語キーボード配列への設定変更が確認できなかった．デンソーなど日本製のバ

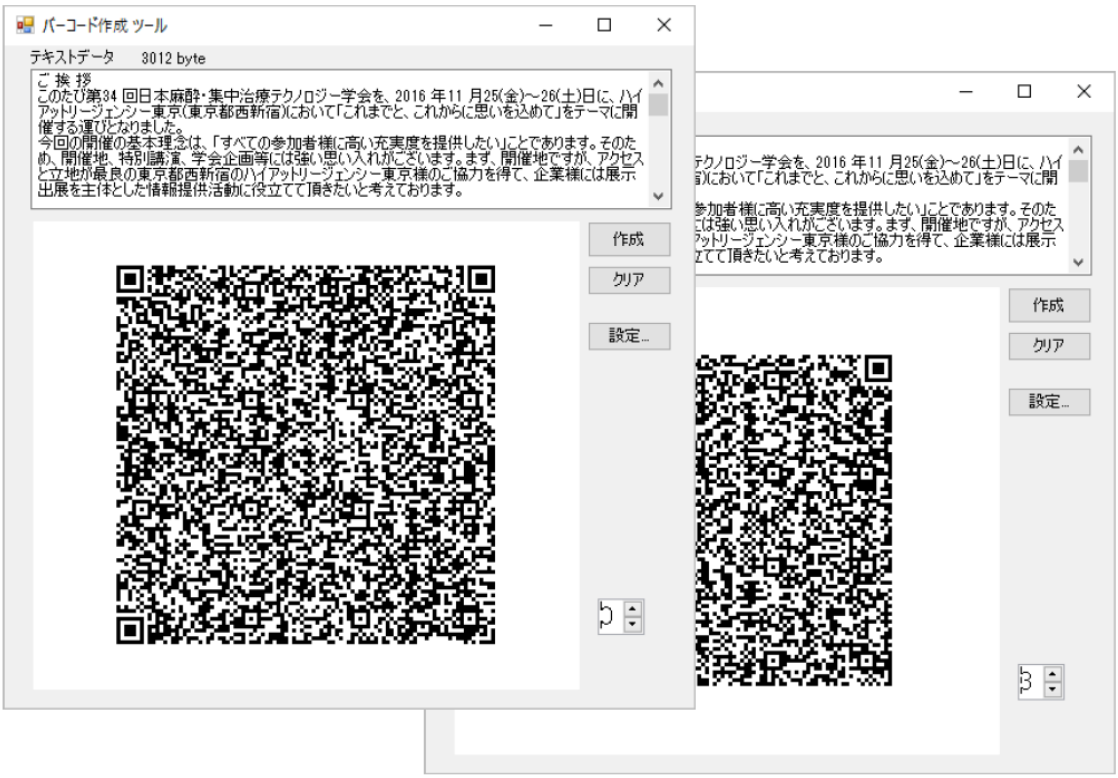


図 5．本プログラムの実行画面

ーコードスキャナであれば，読み込んだ文字を日本語キーボードとして処理することができたと思われる．

QR コードは約 4000 文字を扱うことができるが，Base64 エンコードでは 1.33 倍にデータが伸長されるため，3000 バイトの変換前の文字列を使用することが可能である．QR コードのサイズは最大サイズを使用すると，バーコードのサイズが大きくなり，スキャナからの距離や傾きの調整が必要で，読み取りに時間がかかるため，1000 バイト以内が妥当と考えられた．今回本プログラムでは Base64 変換前データを 600 バイト，結果を 800 バイトに制限した．

2 次元バーコードスキャナは CCD による画像解析でデータ処理しているため，ディスプレイ上のデータも直接読み取ることが可能である．バーコードによる情報共有に際して，用紙に印刷する必要がなく，印刷の手間とコスト，さらに情報漏洩のリスクが減少した．

ディスプレイのドット間隔が小さい高精細のノート PC では一部読み取りが出来ない機種があった．また画素数と解像度が一致しない設定だと，バーコードの読み取りに失敗することが多い．紙に印刷したバーコードが読み取り精度は最も高くエラーが生じにくい．

データの転送速度は，キーボード入力として 70～100 文字/秒程度であり，ほぼ 1200bps のパソコン通信の速度であるが，手入力よりは圧倒的に速く正確である．転送速度，転送容量，転送方式から，ウイルスによる感染リスクはほぼゼロと考えられる．

まとめ

QR バーコードを利用したシステム間情報参照ツールを作成した．USB 接続 HID タイプの 2 次元バーコードスキャナと本プログラムを使用する

ことにより，コピー&ペースト感覚でテキスト情報を参照することが可能となった．1 バーコードに表示できる文字数とバーコードスキャナの読み取り速度の限界から，大量のテキスト情報を送るためには今後さらなる工夫が必要であるが，手入力で行われていた程度の情報を迅速・正確に共有するためには有用なツールだと思われる．

ABSTRACT

A data convert program between two network systems with QR-barcode. Tomohiko Saito.

In our hospital, there are two network systems. One is the hospital information system (HIS) and the other is the office network system which is connected to the Internet. Each network can't connect to each other due to security concerns. It takes time and effort to re-enter the data entered on one network system in another network system.

In the hospital information system, USB Mass Storage Class can't be used, but USB Human Interface Device like 2D barcode scanner can be used. In one system, we created a system that displays text strings as QR barcodes, and on the other system we read data with a USB 2D barcode scanner to mutually use data.

With QR-barcode, ASCII characters can be sent, but control characters and Japanese characters (such as Kanji) can't be sent directly because they can't be input from the keyboard. By using Base64 conversion, all binary characters can be represented as printable characters, so we can now send Japanese texts including tabs and line breaks.

Key word： barcode scanner, QR code, base64 conversion

Japan Organization of Occupational Health and Safety: Japan Labour Health and Welfare Organization: Okayama Rosai Hospital, Okayama, 702-8055

OPEN MRI 手術室での無線 LAN による生体情報記録システムの構築

讃岐美智義，河本昌志

要旨

術中に MRI 画像を撮影する際は，撮像中は生体情報モニター等が MRI の影響を受ける一方，これら電子機器のノイズが MRI 画質に影響を与えることを考慮しなければならない．本院で新設した OPEN　MRI 手術室で，シリンジポンプ，麻酔器から出力されるデータを，無線 LAN を用いて AIMS(Anesthesia information management system) にノイズの影響を受けずに自動記録するシステムを構築した．MRI 対応であるが無線 LAN 対応でない麻酔器はシールドボックスに収納した無線 LAN の送信機から，MRI 非対応で無線 LAN 対応シリンジポンプは，シールドボックスに収納して無線 LAN 経由で 10 秒間隔の自動記録を可能とするシステムである．

はじめに

OPEN MRI 手術室 [1] での医療機器および電子機器の使用は，MRI 機器の影響で電子機器の故障を引き起こすことより，むしろ MRI 撮像中の画像にノイズが混入することに問題がある．いわゆる MRI 対応ではないモニターやシリンジポンプ，自動麻酔記録装置 (AIMS) の端末などすべての電子機器 (MRI 非対応機器) は，MRI 画像にノイズを混入させる可能性がある．それらの機器は，MRI 撮像中には，電源を切る必要があるため AIMS への自動記録は MRI 対応機器からのデータに限定される．そこでノイズを遮蔽するシールドボックスを作成し，シールドボックス内に収納した MRI 非対応機器を無線 LAN で接続することで，MRI 撮像中も画像ノイズを混入させることなく自動記録を可能とするシステムを構築した．

OPEN MRI 手術室での問題点と無線 LAN 接続

OPEN MRI 手術室で，MRI 非対応機器を使用することによる問題点は 2 つある．1 つは，磁場の磁束密度が 5 ガウス (SI 単位系では 0.5 ミリテスラ) を上回る範囲 (5 ガウスライン内) で電子機器を使用すると，MRI 磁場の影響を受けて電子機器自体が故障する可能性があること．もう一つは，MRI 撮像中に MRI 非対応機器からのノイズが画像に混入することである．術中の迅速診断のため行う MRI 撮影において，ノイズの混入により画像が乱れることは目的とする手術の遂行に重大な支障がある．

図 1 RF レシーバー
0.1〜1299.995 MHz が送受信可能で，16.155 MHz にチューニングして使用する

MRI 対応機器は，MRI 撮影中でも使用可能であるが，それらの機器からのデータを外部出力するために金属線 (メタルケーブル) を使用するとそれ自体がノイズ源となるため，通常は光ファイ

広島大学病院 麻酔科

図 2 シールドボックス (シリンジポンプ用)
左：MRI 撮像中の状態　右：手術時の状態

バーによる有線接続か内蔵の無線 LAN 接続が用いられる．OPEN MRI 手術室では，手術場所と MRI 撮影装置は同室ではあるが離れており，手術台を MRI ガントリーまで移動させることが求められるため，有線接続の医療機器を取り回すことは煩雑である．また，MRI 非対応機器は，MRI 撮像中のノイズ源とならないようにするには磁場を遮閉するシールドボックス内に格納して使用する必要があるため，MRI 非対応機器の有線接続によるデータ取得はさらに煩雑である．

通常の無線 LAN で用いる周波数帯は，0.3-30 GHz：極超短波 (UHF) からセンチメートル波 (SHF) で，MRI で利用される周波数帯は，3 MHz-0.3 GHz：短波 (HF) から超短波 (VHF) である [2] ことから，無線 LAN の電波自体が MRI 画像へのノイズ源とならないと考えられたため，MRI 非対応機器からのデータ取得には有線接続ではなく無線 LAN(IEEE802.11g：2.4GHz 帯) を用いることとした．

MRI 画像に影響を与える機器の同定とシールドボックスの効果

MRI 画像に影響を与えるかどうかは，0.1〜1299.995 MHz が送受信できる RF レシーバー (図 1) を，16.155 MHz にチューニングしてアンテナを MRI 非対応機器に近づけることにより共鳴するかどうかで調査した．AIMS のノート端末 (富士通社製)，シリンジポンプ：スマートポンプおよび TCI ポンプ (テルモ社製)，iPad(Apple 社製)，無線 LAN 送信用 PC(DELL 社製) は，共鳴した

図 3 麻酔器側面のシールドボックス

上段：閉じた状態　下段：開いた状態
光コンバータ，無停電電源，無線
LAN 送信用 PC が収納されている

が，本院で標準として設置している無線ルーターのアクセスポイント (Cisco 社製) は共鳴しなかった．共鳴した機器は，すべて電源を遮断するか，機器をシールドボックスに収めた状態でテストを行い，共鳴が起こらないことを確かめた．このことより，シリンジポンプは，シールドボックス (図 2) に収めて 5 ガウスライン外で使用することとした．また，MRI 対応麻酔器ファビウス (ドレーゲル社製) は，有線接続ポートしかなかったため，光ファイバーで無線 LAN 送信機を収納したシールドボックス (図 3) まで有線で引き込み，無線に変換した．

実際の運用

当院のスマート治療室 [3] に導入された MRI (Apert Lucent：日立社製) は，0.4 T の永久磁

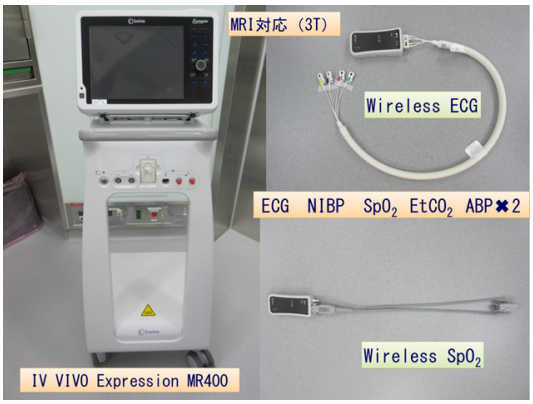


図 4 MRI 対応生体情報モニター

石オープン MRI で，5 ガウスライン外で一般手術道具が使用可能である．主たる手術は，5 ガウスライン外で行い，MRI 撮像時には，MRI 用手術台 (ミズホ社製) を OPEN MRI 装置に接触させ，ガントリー内に患者をスライドして患部を撮影することができる．手術時には，5 ガウス外であれば，MRI 非対応機器を有線接続で使用できるため，生体情報モニターは 2 台体制とし，MRI 撮影時は MRI 対応の生体情報モニター Invivo Expression(PHILIPS 社製)(図 4) を，MRI 非撮影時は，他室で通常の手術時に使用している MRI 非対応の B 850(GE 社製) を有線接続で用いた．それ以外の機器は MRI 撮像中も電源供給コードを使用せず，バッテリー駆動で使用した．麻酔器とシリンジポンプには，各々，無線 LAN の発信器などを格納するシールドボックスを作成し MRI 撮像中のノイズを発生させないように配慮した．無線 LAN の電波はシールドボックス内から外に通過し，手術室内のアクセスポイントに十分な電波強度で無線 LAN のアクセスポイント間通信が可能であった．シリンジポンプのシールドボックス内には，無線 LAN が標準装備のシリンジポンプ (スマートポンプ：テルモ社製)2 台と輸液ポンプ (スマートポンプ：テルモ社製)，TCI ポンプ (TE-371：テルモ社製) と無線 LAN 送信機および 4 時間動作する無停電電源 Goal Zero Yeti 150 Solar Generator (GOAL ZERO 社製) を格納した．麻酔器のデータは，麻酔器側面に搭載したシールド

図 5 MRI 撮像中の配置 (左からベッド，シリンジポンプ (シールドボックス)，生体情報モニター，麻酔器)

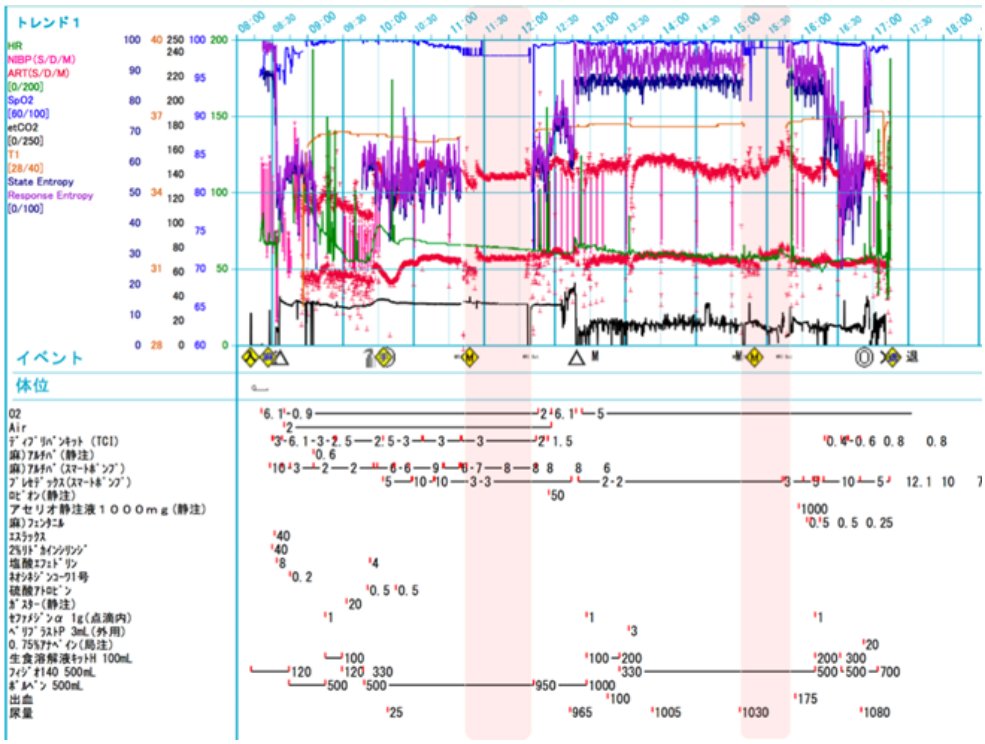


図 6 システムからの記録を PDF ファイル出力
オレンジ色は MRI 撮影中 手術中に 2 回撮影を表す．生体情報モニター，麻酔器，
シリンジポンプからのデータが 10 秒間隔で記録されている．

ボックスまでは光ファイバーで接続し，シールドボックス内にバッテリーと無線 LAN 送信機を搭載し，無線 LAN でデータ転送を行った．これらの機器は，MRI 撮像時 (図 5) には 5 ガウスライン近接し，金属製の電源コードがノイズ源になるのを避けるためバッテリー駆動で動作させた．AIMS 端末は，無線 LAN とバッテリー内蔵する 17 インチノート PC 端末を用いた．MRI 非撮影時には通常に使用し，撮像時にはたたんで，Sleep 状態としたが，USB ポートからノイズが発生していたため，周波数：100kHz-1GHz のノイズ対策用シールド生地であるイソキルメッシュ (富山電気ビルディング社製)[4] で包んでノイズ除去対応した．自動麻酔記録および看護記録は，無線化した ORSYS を使用し，MRI 撮影時はモニター，麻酔器，シリンジポンプからのデータの無線取得のみとし，リマークスなどの手入力項目は，MRI 手術室外から入力するか時刻と記録内用をメモして，MRI 撮影終了後に転記した．

MRI 対応，非対応機器にかかわらず，外部出力可能なすべての項目のデータについて，MRI 撮影中であっても MRI 非撮影時と同条件 (10 秒間隔) で，無線 LAN 経由でデータの欠損なく自動記録 (図 6) が可能であった．

結　語

OPEN-MRI 撮影中に無線 LAN 経由で，生体情報モニター，麻酔器，シリンジポンプからの 10 秒間隔のデータを記録可能なシステムを構築した．

引用文献

1. 八杉幸浩：治療対応 MRI の現状と将来. 医器学 81:273-281,2011
2. 電波の周波数による分類 https://ja.wikipedia.org/wiki/電波の周波数による分類 (参照 2018.3.4)
3. スマート手術室ソリューション http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/solution/intelligent/index.html(参照 2018.3.4)
4. イソキルメッシュ http://www.eletex.jp/item/contents9.html (参照 2018.3.4)

ABSTRACT

Construction of biological information recording system using wireless LAN in OPEN MRI operating room

Michiyoshi Sanuki, Masashi Kawamoto

When performing an MRI examination during surgery, it is necessary to take into consideration that a biological information monitor or similar device will be influenced by the MRI apparatus during use. In addition, interference from those electronic devices will introduce noise to any obtained MR images, thus affecting image quality.

For the newly established OPEN MRI operating room at our hospital, we constructed a system that automatically records data output from syringe pumps and anesthesia equipment to an anesthesia information management system by use of a wireless LAN network, which eliminates the influence of noise from other devices in the room.

Data from anesthesia equipment that is MRI compliant but not wireless LAN compliant are automatically recorded by use of a wireless LAN transmitter housed in a shielded box via wireless LAN. In addition, a wireless LAN compliant syringe pump that is not compatible with MRI is housed in a shielded box and data are transmitted via the wireless LAN network. We have found that this system enables automatic recording at intervals of 10 seconds via the network.

Department of Anesthesiology and Critical Care, Hiroshima university hospital

第 34 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： 岩瀬 良範（埼玉医科大学病院麻酔科）
会期： 2016 年 11 月 26 日（土）
会場： ハイアットリージェンシー東京

プログラム
8：55 〜 9：00　開会挨拶
会長 岩瀬 良範（埼玉医科大学病院麻酔科）

9：00 〜 9：40　一般演題 1
座長：　応用テクノロジー 長田理（がん研究会有明病院 麻酔科）
1-1 熊本地震とテクノロジー
　野上俊光（成尾整形外科病院 麻酔科）他
1-2 江戸時代後期の最新テクノロジー 〜〜 華岡流全身麻酔について
　土手健太郎（愛媛大学医学部附属病院集中治療部）他
1-3 バルン型酸素投与装置の使用経験
　薊 隆文（名古屋市立大学看護学部 病態学（麻酔学））他
1-4 ゲノムワイド関連解析を利用したオピオイドのテーラーメイド医療への試み
　三枝 勉（埼玉医科大学病院麻酔科）他

9:40〜10:20　一般演題 2：手術室管理 座長：太田吉夫（香川県立中央病院）
2-1 OPEN-MRI 設置手術室での無線 LAN による生体情報記録システムの構築
　讃岐美智義（広島大学病院麻酔科）他
2-2 次世代手術室 Smart Cyber Operating Theater(SCOT) を基盤とした新時代の
　麻酔テクノロジーの可能性 糟谷祐輔（東京女子医科大学 麻酔科学教室）他
2-3 PaperChart, 電子カルテと連携した手術システムの紹介
　中村 功（北新東病院）
2-4 QR バーコードを利用したシステム間情報参照ツールの作成
　斎藤 智彦（岡山ろうさい病院 麻酔科）

10:20〜11:00　一般演題 3：生体波形・その他 座長：増井健一（防衛医科大学校麻酔学講座）
3-1 簡便なマークシート埋め込みによる手書き文書の整理と集計法の開発
　高橋（今村）敏克（鹿の森デンタルクリニック）
3-2 安価な波形記録用ソフトウェアの開発
　萩平 哲（大阪府立急性期・総合医療センター麻酔科）他
3-3 冠動脈攣縮で発生する早期再分極症候群はジギタリス中毒波形の ST 上昇型である.
　田中義文（京都岡本記念病院 麻酔科）
3-4 筋萎縮性側索硬化症（ALS）患者の意識変容と麻酔中の脳波
　林 和子（公立南丹病院）他

11:00〜11:40　一般演題 4：生体波形・血圧（4 題）座長：内田 整（千葉県立こども病院）
4-1 観血的動脈圧の左右差によりトランスデューサー中継ケーブル損傷に気付いた一症例
　君安 貴寛（宮崎大学医学部附属病院）他
4-2 ハミルトンの最小作用の原理による動脈の血行動態
　横山博俊（金沢医療センター 麻酔科）
4-3 Arterial Pulse Wave Analysis 法におけるオンライン log10[SVV].SVI プロットと
　リアルタイム回帰直線分析 佐和 貞治（京都府立医科大学麻酔科学教室）他
4-4 ClearSight System によるオンライン SVV.SVI プロット解析
　竹下 秀祐（京都府立医科大学麻酔科学教室）

11:40〜12:10 受賞報告：座長：岩瀬良範
　IEEE Medal 受賞報告 演者：青柳卓雄

12:10〜12:20　総会　　事務局
12:20〜13:10　昼休み

13:10〜14:10　特別講演 1：座長：片山勝之（手稲渓仁会病院）
　はやぶさプロジェクトからクリティカルケアへのヒント
　演者 川口淳一郎（JAXA 宇宙科学研究所）

14:10〜15:10　特別講演 2：座長：岩瀬良範（埼玉医科大学病院麻酔科）
　DMM.make AKIBA で何が起きているのか・新しい個人型ものづくりのかたち
　演者 岡島康憲（DMM.make AKIBA）

15:10〜16:10 一般演題 5：OR/ICU の臨床 座長：白神豪太郎
　（香川大学医学部附属病院 麻酔・ペインクリニック科）
5-1 人工知能化の第一歩としての ICU 予測死亡率グラフの自動作成
　財津昭憲（聖マリア病院集中治療科）
5-2 APACHE II スコアリングプログラムの開発
　菅原友道（香川大学医学部附属病院 麻酔・ペインクリニック科）他
5-3 ビデオ喉頭鏡 The McGRATHR MAC でのビデオ録画方法の考案
　中尾正和（広島総合病院麻酔科）
5-4 脊髄くも膜下麻酔のシミュレーションという視点から見たミエログラフィー
　野上俊光（成尾整形外科病院 麻酔科）他
5-5 積層型 3D プリンターによる CT 画像からの脊椎骨造形
　岩瀬良範（埼玉医科大学病院麻酔科）他

16:10〜16:15　閉会挨拶 会長 岩瀬良範（埼玉医科大学病院麻酔科）

抄録抜粋
IEEE Medal 受賞報告
青柳卓雄 日本光電工業 (株) バイタルセンサ部 青柳研究室
電気系の世界最大の学会である IEEE から Medal を受賞しました．それは，私がパルスオキシメトリの原理を，1974 年に発表したことに対するものです．
1) 私は，1974 年に学会発表で，パルスオキシメトリの原理と，試作品の簡単な特性を示しましたが，しかしその後，約 10 年の間，その仕事から離れました．ミノルタの山西昭夫さんは，私とは違う経過で，パルスオキシメトリの着想に至り，指先で測定する手法をあみだし，SaO_2 をデジタル表示するようにし，採取した血液で求めた SaO_2 で校正し，すぐれた性能のものに仕上げました； 今日のパルスオキシメータの精度は，そこで実現されました．それがあったからこそ，米国の Dr. New が，それの医療上の有効性を理解して，更に改良して，臨床に使いやすい，今日の形にしました．
ミノルタの山西昭夫さんがいなければ，私の IEEE Medal の受賞はありませんでした．
2) パルスオキシメータの使われる場面が広がるとともに，パルスオキシメータの性能を改善すべき点が明らかになってきました．具体的には，第 1 には，SaO_2 測定精度を改善すること，第 2 には，体動によるウソの警報をなくすことです．ウソの警報をなくすには，SaO_2 測定値を表示することを遅らせればいいのですが，それでは SaO_2 の急変を見出すことができません．つまり，SaO_2 測定の即応性を犠牲にせずに，ウソ警報をなくすことが必要です．私は以上の 2 つの問題をほぼ解決しました．これについては，また別の機会に，JSTA でご紹介することになるかと思います．

特別講演 1 はやぶさプロジェクトからクリティカルケアへのヒント
川口淳一郎教授 JAXA 宇宙科学研究所
2010 年，様々な困難を乗り越えて，小惑星イトカワへのサンプルリターンを実現した「はやぶさプロジェクト」は大きな感動を呼びました．一方，我々のクリティカルケア領域も，患者様それぞれに対する医学的管理がチーム医療によるプロジェクトと捉えることができます．困難だったはやぶさプロジェクトを成功に導いたヒントを，同プロジェクトリーダーの川口淳一郎教授にご講演頂き，ご聴講の皆様のチーム医療の一助になることを願っております．【事務局記】 【はやぶさパンフレットは以下の URL よりダウンロードできます↓→】 http://www.jaxa.jp/projects/sat/muses_c/index_j.html 以下は「小惑星探査機「はやぶさ」地球へ帰還」パンフレットから抜粋 PDF(6.3MB)

特別講演 2 DMM.make AKIBA で何が起きているのか．新しい個人型ものづくりのかたち
岡島康憲 DMM.make AKIBA エヴァンジェリスト
エンジニアが「本気で作り本気で売る」を目的に, IoT やデジタルデバイスをキーワードにしたハードウェアを開発できる場所として 2014 年 11 月 11 日にオープンした「DMM.make AKIBA」．今回は DMM.make AKIBA の目的や目指すべき形はもちろん, 入居されている会員様や企業様の紹介, 現在のハードウェア/ソフトウェア開発の現状についてご紹介します．本講演を通じて参加者の方には DMM.make AKIBA の現状や今後のものづくりのかたちについて知る機会をご提供します．DMM.make AKIBA Web ページ: https://akiba.dmm-make.com/

一般演題
簡便なマークシート埋め込みによる手書き文書の整理と集計法の開発
高橋 (今村) 敏克 鹿の森デンタルクリニック
【背景】現在，文書のデジタル化は過渡期であり，文書の作成はデジタル化されているが，書類への記入に関しては，依然紙媒体による場合も多い．特に記入者が不特定多数の場合この傾向が強い．こうした手書き文書をデジタル保存する場合，ドキュメントスキャナを介して画像として保存することも多いが，保存対象の文書が多量な場合，一貫性をもったファイル名を付与したり，特定の順序にファイルをソートしたり，文書から一部の情報を抜き出してテキスト化したりといったことに多大な労力を要することも少なくない．そこで演者は，文書に埋め込まれたマークシートを読み込み，読み込んだマークデータを活用してファイル名の更新，データの収集を可能にするソフトウェアを開発した．【方法】ソフトウェアは，Embarcadero Technologies 社 (米国) 製 C++統合開発環境 C++Builder XE を使用して開発した．マークシートの読み取りは，用紙左上の任意の点を起点として等間隔にグリッド状に配列していることを条件とし，縦間隔，横間隔，マーク領域の広さ，読み取り濃度の閾値，塗りつぶし面積の閾値を設定できる様にした．また，レイアウトに柔軟性を与えるため，任意のマーク欄の読み取りを無視できるようにした．読み取ったマークデータは，画像データのファイル名更新及び，データ集計に利用するが，その際のファイル名及び集計データに関しては簡単なスクリプトにより柔軟な書式で出力できるようにした．性能確認として，Microsoft 社 (米国) 製 Word 2010 で作成したテスト用マーク

シート 30 枚に，常識的な範囲で雑なマークを行い，PFU(石川県) 製ドキュメントスキャナ ScanSnap iX500 で JPEG ファイルとしてスキャンし，マークデータの読み取りを行った．【結果】性能確認のための読み取りでは，すべてのマークシートが正常に読み取り可能で，マークデータによりファイル名を更新することでランダムな順番で読み取ったファイルをマークデータ順にソートすることができた．【考察】本ソフトウェアは単純な構造ながら，マークデータによるファイルのソート，データの集計を行うことが可能であった．マークシートを埋め込んだ文書の作成はワードプロセッサや表計算など任意の文書作成ソフトで作成可能である．また，アンケートのようにマーク欄と質問文が交互に入った文書も作成可能であった．読み取ったマークデータは簡単なスクリプトによる書式付けにより，コンマ区切りや HTML(の一部) など柔軟な形式で出力可能であり，その後の表計算での処理やブラウザでの表示など用途に応じて簡便に利用できた．

観血的動脈圧の左右差によりトランスデューサー中継ケーブル損傷に気付いた一症例

君安 貴寛，森 信一郎，指宿 昌一郎 宮崎大学医学部附属病院

術中に観血的動脈圧測定用圧トランスデューサー中継ケーブル (日本光電， JP-910P) 損傷により左右の橈骨動脈圧の測定値が大きく解離した症例を経験したのでこれを報告する．症例は 77 歳男性．弓部大動脈瘤に対し弓部大動脈人工血管置換術が予定された．モニターは日本光電社製 BSM-9101 を使用した．圧ラインは計 5 本用意し，左右橈骨動脈，右内頚静脈，右大腿動脈へと接続し，分離脳循環時に術野より左総頚動脈へと接続した．また左橈骨動脈のカテーテルはフロートラックセンサー. と接続し，右内頚静脈にはプリセップ CV オキシメトリーカテーテルを留置し ScvO. 計測を行った．その他にも経食道心エコー，INVOS.，BIS. モニターを使用した．麻酔導入後に左右橈骨動脈へ 22G カテーテルを留置したところ，左右の観血的動脈圧の測定値が大きく解離していることを発見した．この時マンシェットによる右上腕非観血的動脈圧は右橈骨動脈圧と等しいことを確認した．併せて左橈骨動脈圧の 0 点を確認したところ基線がほぼ 100mmHg であることが判明した．このため左橈骨動脈圧に異常があることが予想された．まずは耐圧管内に異常が無いか確認したが，明らかな気泡は存在せず，インライン吸引システムを使用しての血液の吸引もスムーズに行えた．血液とヘパリン加生食の境界ははっきりと拍動しており，カテーテル閉塞による異常ではないと考えられた．ヘパリン加生食で回路内フラッシュを行ったが，モニター上の数値の改善は認められなかった．次に JP-910P 接続部を確認したが，外見上は接続部に問題点は認められなかった．0 点校正をやり直し測定再開したところ，左観血的動脈圧で基線の上方ドリフトが認められた．再度 0 点校正行ったが，基線ドリフトのため校正が行えない状態となった．圧トランスデューサーに他のケーブルを接続し直したところ左右の圧格差が消失したことから，JP-910P 自体に異常があることが判明した．今回は弓部大動脈人工血管置換術であり複数の観血的動脈圧ラインを確保していたことからケーブルトラブルの早期発見が可能となった．しかし，単独の観血的動脈圧ラインでは回路異常の早期発見は難しく，血圧上昇と誤認したり，血圧低下をマスクしてしまう可能性もある．以上のことを踏まえ，観血的動脈圧測定を定行う場合には，定期的に非観血的動脈圧測定値や身体所見と照らし合わせ総合的に測定値を判断することが重要だと再確認した．

編集後記

2016 年，東京での第 34 回日本麻酔・集中治療テクノロジー学会冊子が，予定の期限で発行できました．ご協力を感謝します．

他の学会と同様に本誌も電子版公開しています (http://www.jsta.net)．公開日は 2017 年 11 月 6 日にしてください．ページは確定しております．業績，引用文献などにご利用ください．印刷本では経費の都合上カラーが出来ませんので御了解ください．印刷までに若干の時間があります．投稿される方は至急ご連絡下さい (tanaka@koto.kpu-m.ac.jp)．追加投稿のページは抄録抜粋の前からになります．

例年，100 ページ以上の冊子の発刊を目標に努力しておりますが，原稿が少なく苦労しているのが実状です．学会員のみなさま，そうでない方も発表の有無にかかわらず，気楽に編集長までマイクロソフト Word で記述いただき，メール投稿していただければ有りがたく存じます．段組み，印刷 PDF 原稿は当方で行います．掲載および印刷費は無料です．

1 テーマの報告だと 4〜6p 程度になります．少しまとまった総説だと，6〜10p 程度が適当，系統だった内容だとそれ以上のページになります．冊子は全て PDF でウェブ公開しております (http://www.jsta.net/txt/syoroku.htm)．それを利用すると，カラーで詳細な図を入手することも可能ですし，また，必要な別冊を独自にカラー印刷することも可能です．

昨年度の「麻酔・集中治療とテクノロジー 2016」に引き続き，鳥取大学名誉教授佐藤暢先生より，飯野守男教授 (鳥取大学法医学) と連名で「特別寄稿：厚労省も陥ったか，ヒューマンエラーと二酸化炭素中毒にまつわる謎 (続)」を頂きました．二酸化炭素を窒素と同様な不活性ガスと考えてはいけない．単なる窒息性酸素欠乏症とは別に，本当に恐ろしいのは，”高濃度の炭酸ガス” 吸入による急性二酸化炭素中毒症なのだということを，ボンベに貼るラベル，添付文書や安全データシートに記載する，更には作業現場に明示するなどして，緊急に対策を講じる必要があるのではないかと考えて，掲載させて頂きます．

どうぞよろしくお願いいたします．

本冊子発行に際して，株式会社三笑堂ならびに株式会社増富からの御支援をいただきました．ここにお礼を申し上げます．

2018 年 3 月 25 日

日本麻酔・集中治療テクノロジー学会事務局
編集長　田中 義文
tanaka@koto.kpu-m.ac.jp
京都府立医科大学麻酔科学教室
〒 602-0841
京都市上京区河原町広小路梶井町 465

TERUMO®
人にやさしい医療へ

Smart Infusion System

テルフュージョン®輸液ポンプ LM 型 / テルフュージョン®シリンジポンプ SS 型

薬剤投与を、スマートに。

煩雑な投与ラインや電源コード、

多くのポンプへの流量設定とその記録 .....

高度化・複雑化する輸液管理の課題を解決するために、

テルモは IT 機能を搭載した新しい輸液システム

“Smart Infusion System” を開発しました。

安全性と使いやすさの融合が

輸液管理のワークフローを、ベッドサイドを、

スマートに変えます。

※ IT 機能を省いたよりシンプルなスタンダードポンプも用意しています。

一般的名称：汎用輸血ポンプ　販売名：テルフュージョン輸液ポンプ LM 型
医療機器承認番号：22400BZX00229　特定保守管理医療機器
一般的名称：注射筒輸液ポンプ　販売名：テルフュージョンシリンジポンプ SS 型
医療機器承認番号：22400BZX00231　特定保守管理医療機器

製造販売業者　テルモ株式会社　〒151-0072 東京都渋谷区幡ヶ谷2-44-1　http://www.terumo.co.jp/

Ⓣ、TERUMO、テルモ、テルフュージョンはテルモ株式会社の登録商標です。
©テルモ株式会社 2013 年2 月

EVERY BREATH IS PRECIOUS.

McGRATH™

TaperGuard™

Nellcor™

INVOS™

販売名　McGRATH MACビデオ喉頭鏡
医療機器認証番号　224AABZX00112000

販売名　TaperGuard 気管チューブ
医療機器認証番号　221AABZX00145000

販売名　ネルコアオキシセンサⅢ
医療機器届出番号　13B1X00069PS006A

販売名　無侵襲混合血酸素飽和度監視システム
医療機器認証番号　223AABZX00011000

製造販売元
コヴィディエン ジャパン株式会社
RMS (Respiratory & Monitoring Solutions) 事業部
Tel : 0120-998-971
medtronic.co.jp

Medtronic
Further, Together

making the exceptional routine

NEW

FLOW-i
麻酔システム

医療機器承認番号：22400BZX00385000

Layout Free

生体情報モニタ等
フレキシブルな設置が
可能

麻酔器本体の
高さ調節が可能
(C-30タイプ)

Volume Reflector

パワフル且つ
繊細な換気を
可能にした新開発の
再呼吸システム

Servo Inside

人工呼吸器
サーボベンチレータの
換気性能を搭載

※生体情報モニタ、麻酔記録端末はオプションになります。

FUKUDA DENSHI

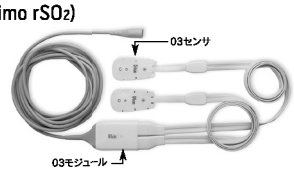
〒113-8483 東京都文京区本郷3-39-4 TEL (03) 3815-2121 (代) http://www.fukuda.co.jp/
お客様窓口… ☎ (03) 5802-6600／受付時間:月～金曜日 (祝祭日,休日を除く) 9:00～18:00
●医療機器専門メーカー フクダ電子株式会社

---

2 in 1

Root® with O3® (Masimo rSO2)
RD SedLine®

O3® (Masimo rSO2)



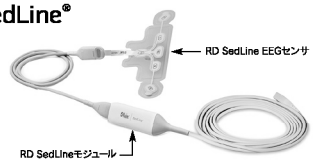
動脈血酸素飽和度だけでは把握できない **脳の酸素化をモニタリング**

- SpO2だけでは把握できない脳の酸素化をモニタリング
- リアルタイムのrSO2とベースラインの差を表示
- rSO2がアラーム下限値を下回った時間及び差を指標化

製品番号	品　名
9637	O3モジュール
3756	O3センサ

販売名：マシモ ルートモニタ(O3モジュール)
医療機器承認番号：22500BZX00344000

RD SedLine®



脳波データを解析し **左右の脳の活動をカラー表示**

- 4チャンネルEEG波形をリアルタイム表示
- PSI(患者状態指標)にて患者さんの催眠レベルを表示
- DSA表示で左右の脳の活動をカラー表示

製品番号	品　名
9513	RD SedLineモジュール
4248	RD SedLine EEG センサ

販売名：マシモ SedLine モジュール
医療機器承認番号：22600BZX00069000

脳オキシメトリ＋脳機能を同時に測定

MASIMO

マシモジャパン株式会社
東京都新宿区北新宿 2-21-1 新宿フロントタワー 24 階
TEL 03-3868-5201　FAX 03-3868-5202

麻酔・集中治療とテクノロジー　2017　　〈検印省略〉

電子版：2017年11月 6日（http://www.jsta.net/txt/syoroku.htm）
印刷版：2018年 3月31日　第1版発行
定価（本体3,000円＋税）

編集者　岩 瀬 良 範
　　橋 本　悟
　　田 中 義 文
発行者　田 中 義 文
発　行　日本麻酔・集中治療テクノロジー学会
発行所　㈱北斗プリント社
〒606-8540　京都市左京区下鴨高木町38-2
電話（075）791-6125　FAX（075）791-7290

ISBN4-89467-158-1

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
2017