中谷医工計測技術振興財団委託事業

医工計測技術の動向調査

「良く生きるための医工計測技術

～医工計測技術をめぐる諸問題」

最終報告書公開版

２０１９．１．１６．

写真の説明
　＜花時計＞金沢市役所前　中西美紀　撮影

主査
金沢工業大学研究支援機構
顧問
鈴木良次

「良く生きるための医工計測技術～医工計測技術をめぐる諸問題」

目次

はじめに　主査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

第１章　医工計測技術開発での日本の研究者・技術者・企業などの果たした役割
（事例調査）　有近紳志郎・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
第１節　はじめに　事例を選択する原則　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
第２節　超音波診断装置　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
（１）研究者・技術者（２）企業（３）中谷財団　（４）特許
（５）未来開拓事業からの課題（６）資料
第３節　内視鏡　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 14
（１）研究者・技術者（２）企業（３）中谷財団　（４）特許
（５）堀が 2002 年に提言した研究目標は進展したか？（６）資料
第４節　Ｘ線ＣＴ装置　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19
（１）研究者・技術者（２）企業（３）中谷財団　（４）特許
（５）横河電機における X 線 CT 事業展開　（６）資料
第５節　磁気共鳴撮像装置（ＭＲＩ）　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
（１）研究者・技術者（２）企業（３）中谷財団　（４）特許
（５）資料
第６節　光干渉断層撮影装置（ＯＣＴ）　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
（１）研究者・技術者（２）企業（３）中谷財団　（４）特許
（５）資料
第７節　パルスオキシメータ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
（１）研究者・技術者（２）企業（３）中谷財団　（４）特許
（５）資料
第８節　光脳機能画像計測法（ＮＩＲＳ）　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31
（１）研究者・技術者（２）企業（３）中谷財団　（４）特許
（５）資料

第２章　中谷医工計測技術財団による研究助成の実績
有近紳志郎・鈴木良次・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35
第１節　医工計測技術の構成　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35
第２節　ＮＦの助成課題からみた医工計測技術３５年の動向・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38
（１）計測対象と手法３５年の変遷
（２）基本研究と要素研究での分類
（３）第３１回、第３２回助成課題の実績（達成率）
（４）平成２９年度助成課題の分析
第３節　助成審査の視点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56

第３章　脳神経科学と計測技術　辰巳仁史 …… 58
第１節　はじめに：計測の重要性 …… 58
第２節　電気的測定法の展開：１チャネルから多チャンネルの記録法へ …… 61
第３節　光を用いた測定法と光を用いた神経への働きかけ …… 62
第４節　脳の表面から脳の深部へ:古典的な顕微鏡から多光子顕微鏡へ、そして fMRI や MEG …… 63
第５節　分子から細胞レベルの研究において導入された研究法 …… 64
第６節　今後必要となる測定技術 …… 65
参考文献
付録資料　さきがけ研究者へのアンケート調査結果
鈴木良次・辰巳仁史 …… 69

第４章　文献を通してみる医療技術史　鈴木善次 …… 79
本章のねらいと構成 …… 79
第１節　文明と医療 …… 79
（１）　文明および関連する言葉
（２）　医療および関連する言葉
（３）　文明と医療の関係
（４）　本節の文献
第２節　科学文明と医療 …… 85
（１）　科学文明の概観
（２）　科学文明と医療との関係
（３）　本節の文献
第３節　現代における「医学」・「医療」をめぐる議論（１）
～「医療の質」と「医療の不確実性」～ …… 89
（１）「医療の質」定義・概念登場の経緯と背景
（ｉ）「医療の質」の定義
（ⅱ）「医療の質」概念登場の経緯と背景
（２）「医療の質」をめぐる動向
（ｉ）日本病院会の活動
（ⅱ）全日本病院協会の活動
（ⅲ）聖路加国際病院の活動―ＥＢＭとＱＩ
（３）医療における満足度
（ｉ）日本病院会
（ⅱ）岩崎栄と高柳和江
（ⅲ）全日本病院協会

（ⅳ）聖路加国際病院
（ｖ）口腔衛生学の立場からの「満足度」と深井穫博
（４）医療の不確実性をめぐる議論
（５）「医療の質」と「医工計測技術」の関係
（６）本節の文献
第４節　現代における「医学」「医療」をめぐる議論（２）
～先端医療・終末期医療・その他～ ····· 107
（１）「先端医療」
（ｉ）移植医療・再生医療
（ⅱ）遺伝子治療
（２）終末期医療
（３）その他
（４）本節の文献
第５節　まとめ～文明史（医療技術史）における「医工計測技術」の位置づけ
····· 116
第６節　本章で参考にした文献リスト（本文で引用したものを除く） ····· 117

第５章　人類史の中の医療の現状と今後の課題　戸川達男····· 123
第１節　激動する時代としての現代 ····· 123
（１）　現代を俯瞰する時間スケール
（２）　大異変の後
第２節　平均寿命の延長と健康寿命の延長 ····· 130
（１）　平均寿命の延長と限界
（２）　健康寿命の延長と限界
第３節　健康な期間の医療 ····· 139
（１）　不健康への備え
（２）　健康の活用
第４節　不健康な期間の医療 ····· 144
（１）　不健康の軽減
（２）　不健康な期間の質の向上
第５節　終末期の医療 ····· 149
（１）　心のケア
（２）　心の科学の確立
第６節　激動の混乱と拾得 ····· 151
（１）　身体のケアと心のケアの乖離と収束
（２）　大異変が残した損失と知恵

第７節　大異変後の医工計測の役割 ･････････････････････ 154
（１） インフラストラクチャーとしての貢献
（２） 文明の監視役
第８節　まとめ ･････････････････････ 159
参考文献

第６章「良い生き方」の追求のために ･････････････････････ 163
第１節　「心の科学」をめぐる考察　戸川達男･････････････････････ 163
（１）心の科学という領域がすでにあるのか？
（２）なぜいま心の科学が必要なのか？
（３）心の科学は今後どのように発展していくことが期待されるのか？
（４）心の科学の発展と心のケアへの応用はどんな医工計測技術によってもたらされるのか？
（５）心の科学の発展が個人に不利益をもたらす恐れはないのか？
第２節　心の計測技術の現状と今後　鈴木良次･････････････････････ 170
（１）「心の計測」－「心理計測」技術の現状
（２）「心」を測るには
（３）文献に見る「感情の計測」
（４）表情の研究はどこまで進んでいるか
（５）学際的研究領域としての取り組み
（６）まとめ

あとがき　主査･････････････････････ 179
執筆者一覧 ･････････････････････ 185

はじめに

鈴木良次

本報告書「良く生きるための医工計測技術」は、中谷医工計測技術振興財団からの委託による「医工計測技術の動向調査事業」の報告書である。

調査の目的は、「医工計測技術の動向を調査し、今後の財団の事業方針策定の一助となる提言を行う」ことである。同財団は、「医工計測技術分野における先導的技術開発、技術の交流等を促進し、また、人材を育成することによって、医工計測技術の広汎な発展を促進し、我が国ならびに国際社会の発展及び生活の向上に寄与すること」を目的として、次の事業を行っている。すなわち、「先導的技術開発の助成、顕著な業績に対する表彰、内外研究者の技術交流助成、技術動向調査の助成、情報収集・データベース構築、科学教育の振興、グローバル人材育成のための国際交流プログラム」を行っている。

この枠組みの中で、本報告書のテーマをあえて「良く生きるための医工計測技術」としたが、その目標は、医工計測技術という「窓」を通して、人が「良く生きる」とはどういうことかを考え、そのための医工計測技術の役割を考察することにある。ここで、「良く生きる」の意味するところを付言する。「良く生きる」は同時に「良く死ぬ」ことを含んでいる。それは人には寿命があることによる。永遠の寿命を保証されることで人類の発展が抑えられるという筋書きは、アーサー・C・クラークのＳＦ小説「地球幼年期のおわり」でも語られているように、人類の持続的生存にとって望ましいことではない。誕生、成長、成熟、老化というプロセスを経て、個人も社会も世代交代をおこなうことで、人類はその持続的生存を可能としてきた。一つのシステムが衰退し、新しいシステムが成長する過程では、古いシステムの内部に、自己を否定して新しいシステムを成長させる萌芽が自己生成されるといわれている。このプロセスを「動的連続性」と呼ぶが、「そのプロセスに従って、良き人生を全うする」ことをここでは「良く生きる」という言葉で表している。

さて、現代工学体系の一分野としてみれば、「計測技術とは、対象を理解するためのツールの一つであり、対象の構造、性質、状態などを定性的、定量的に調べるためのもの」である。何を計測すればよいかを決めるのはもちろんユーザである。多くの場合、ユーザは作業仮説をたて、その検証としての計測、解析を行うが、時には、計測が先行し、得られたデータを解析し、そこからモデル化に進むということもある。いずれにしても、計測技術のユーザは、計測し、得られたデータを解析し、モデルを立て、それによって、対象を理解する。そのために使われる計測、解析、モデル化という一連のツールをここでは、計測技術として扱う。このように、計測技術は、現代科学技術を支える重要なツールの一つとして位置づけられる。

しかし、技術は、現代科学が発達する以前から、人間の生活を支え、大きくは人類の持続的生存を支えるツールとして活用されてきた。医療技術も然りであり、その中にある医

療用計測技術を考察する場合も、その視点を見失ってはならない。

医工計測技術の対象は、一義的には、人間の健康状態の把握であり、その目的は、健康の維持・増進、病態からの健康の回復（以下、健康ケアと呼ぶ）のための指針を得ることである。さらに、適切なケアの指針を得るには、対象となる人間、広くは生命現象の理解が必要であり、計測技術はそのためのツールとしても活用される。すなわち、医工計測技術の対象は、人間を含む生命現象であり、計測の目的は、大きく２つに分かれる。①　生命現象を理解するためと　②　健康ケアの指針を得るためとである。

この２つは、①をベースとして②が、また、②の経験を生かして①が、という好循環を経て、生命現象の理解と医療技術の進歩をもたらしたのは事実である。しかし、この図式に乗りにくいものもある。前者は、基本的には物理化学的・数理解析的手法が適用可能な「身体（の一部）」を対象として発達した「身体の科学」であり、それに基づく「身体のケア」には当然限界がある。そのことを端的に指摘したものの一つに、救急医療の現場に立つ医師からの指摘「不確かな状況下での意思決定」の問題がある（行岡哲男「医療とは何か」河出ブックス２０１２）。他方では、現代医療が抱えている大きな問題の一つとして「心のケア（メンタルヘルス）」があり、それへの対処として、「身体の科学」に対応する「心の科学」の発達が必要という指摘がある（戸川達男：本報告書第２部第５章参照）。

これらの課題を念頭において、医工計測技術をめぐる諸問題についての動向調査を行った。第１章「医工計測技術開発での日本の研究者、技術者、研究機関、企業などの役割」に続いて、第２章「中谷医工計測技術財団による研究助成の実績」を設け、医工計測技術の枠組み、当財団の研究助成の実績の分析、助成審査の在り方の提言を試みた。第３章は、脳神経科学という基礎科学で活用されてきた計測技術について、第４章は、文献を通してみる医療技術論・技術史、第５章は、人類史の中の医療の現状と今後の課題を取り上げる。第６章では、「心のケア」をめぐる考察を行う。

第１章は、医工計測技術開発での日本の研究者、技術者、研究機関、企業などの役割を取り上げる。第１部で取り上げた技術のいくつかについて、その開発、普及での我が国の研究者・技術者や大学・企業がどのような役割をはたしてきたか、あるいは果たせなかったかを、長年特許事務所を開設し、弁理士として活躍された有近紳志郎氏に、主に、特許申請の視点から調査し、その結果をまとめていただいた。対象とした装置は、われわれが接する機会の多い、超音波診断器、内視鏡、X 線 CT 装置、磁気共鳴撮像装置（MRI），光干渉トモグラフィー装置、パルスオキシメータ、また、今後認知症の診断に役立つと期待されている近赤外スペクトロスコープ（NIRS）である。これらの装置の多くが、我が国の研究者・技術者のアイデアから生まれているのも事実である。また、オリジナルは欧米からのものとしても、我が国において、その改良や利用技術を向上させた機器は数多くある。すでにそのことは既知のことではあるが、この際、整理して提示することは、今後の我が国における技術開発に有益な示唆を与えると考え、この章を設けた。取り上げた事例の基準は、（１）日本人が世界で初めて開発した技術、（２）外国で開発された技術であるが、

それを日本に初めて導入した、（３）日本で初めて国産化した事例である。

第２章中谷医工計測技術財団による研究助成の実績では、（１）医工計測技術・計測システムを構成する要素とその役割、システムとしての特徴を分析する視点、（２）助成対象を、計測の対象と手法という２つの軸で分類した時の、３０年間の変遷に見られる特徴、（３）助成の実績の分析結果を述べ、（４）今後の助成審査の視点についての提言を試みる。

第１部で取り上げた技術は、もちろん、医療の質の向上に役立っていると同時に、一方で、生命科学の急速な進歩を支えるツールともなっている。

第３章は、**「脳神経科学と計測技術」**と題して、脳神経科学での計測技術の最近の発展と今後の課題について、副査の辰巳仁史氏に担当していただく。また、JST さきがけ研究「知と構成領域」に集まった研究者を対象に行ったアンケート調査結果を報告する。

さて、「医療の質」という言葉を「患者の負担が少なく、診断の精度が高まるという程度」のものとして話を進めてきたが、当然議論の余地がある。

第４章「文献を通してみる医療技術史」では、文明史の中で医学・医療技術がどう変遷してきたかを、生物科学史を専門とする鈴木善次氏に、出版されている書籍（和書）を通して分析した結果を報告いただく。第一のステップは、医療が対象とする疾病が各時代、各地域におけるライフスタイル（文化、文明）と密接にかかわっていることから、文明と医療の関りを調査することであった。次いで、文明を科学技術文明に絞り、医療との関係を調査した。そして、最後のステップとして、医療史（医学史）と医療の関係の調査を行った。それぞれのステップで、代表的な著作を分析し、今後の医療のありかたについて考察した。これらの分析を通して、今後の医工計測技術の在り方にかかわる医療の質を考察した。

第５章「人類史のなかの医療の現状と課題」では、激変する時代としての現代をどうとらえるか、その中で、健康や寿命を再検討し、健康なとき、病気になったとき、終末を迎えたとき、それぞれでの医療の在り方と医工計測の役割を考察することとした。ここでは、いかに良く生き、人生を全うするかが問いかけられているが、それは人間とは何かという大きな問いかけが背景にある。この種の問いかけは、古来、哲学や宗教などの形で繰り返されてきたことではあるが、科学としての考察は決して十分とは言えない。ここであらためて「心の科学」の発達を期待する所以である。

さて、「生命科学」や「身体の科学」の急速な発展によって、「医療技術」が進歩し、平均寿命・健康寿命の延長というプラスの効果がもたらされたが、他方では、「医学」「医療」をめぐって人類が解決しなければならない課題も出てきた。例えば、延命治療である。第２部第４章では、人にとって医療とは何なのかを考察し、「医療の質」をめぐる議論の文献史的考察をおこない、同第５章では、人類史という長い時間のスケールの中での医療の問題の捉え方と、人の心の理解が必要であること、「身体の科学」に匹敵する「心の科学」の創出が必要であることが述べられる。「心のケア」が、現代医療では大きな課題となっているが、「良く生き、（良く死ぬ）」ためには、「心」を理解する必要があるとい

うことである。

「心」は脳という実体に担われた現象といえるが、従来の「身体に対する科学的アプローチ」は通用しないかも知れない。とはいえ、哲学や宗教ではない「科学的アプローチ」が求められている。「医療の現場での不確実な状況での意思決定」や「心のケア」についての議論を深めるため、**第６章「「良い生き方」の追求のために」**を設け、良質なケアのためには「心の科学」が必要なこと、そのために役立つ計測技術とは何かなどを取り上げる。

「あとがき」では、若干の考察とまとめを記す。

第１章　医工計測技術開発での日本の研究者・技術者・企業などの果たした役割（事例調査）

有近 紳志郎

第１節　はじめに　事例を選択する原則

１）医療機器の種類

我々が接する機会が多い（Ａ）超音波診断装置、（Ｂ）内視鏡、（Ｃ）Ｘ線ＣＴ装置、（Ｄ）磁気共鳴撮像装置（ＭＲＩ）、（Ｅ）光干渉トモグラフィー装置（ＯＣＴ）、（Ｆ）パルスオキシメータを取り上げた。また、今後の増加が不可避である認知症の診断に役立つことが期待される（Ｇ）ＮＩＲＳ脳計測装置を取り上げた。

２）研究者・技術者

日本人が世界で初めて開発した技術の事例を取り上げた。

３）企業

世界で初めて日本で開発された技術の事例、外国で開発された医療機器を初めて日本に導入した事例、日本で初めて国産化した事例を取り上げた。

４）特許

公開件数が確定している２０１２年までの１５年間（つまり、１９９８年から２０１２年まで）のデータを調査対象とした。テキスト検索を行ったため、ノイズ混入（例えば検索語を「超音波診断装置」とすると「超音波診断装置輸送用梱包袋」が混入してしまう。）や漏れ（例えば検索語を「超音波診断装置」とすると「超音波を用いた診断装置」は漏れてしまう。）が不可避であるが、よく使われる用語や複数の用語を検索語に選んだので、動向は概ね正しく表れていると思う。

なお、医療機器にかかわる５件の特許出願技術動向調査報告書を特許庁が発行しており、そこにおいて極めて詳細な分析が行われている。非売品であるが、特許庁、国会図書館、都立図書館で閲覧できる。

- 平成２６年特許出願技術動向調査報告書「内視鏡」
- 平成２６年特許出願技術動向調査報告書「低侵襲医療機器（循環器）」
- 平成２３年特許出願技術動向調査報告書「医用画像の利用技術」
- 平成１４年特許出願技術動向調査報告書「医用画像診断装置」
- 平成１２年特許出願技術動向調査報告書「医療機器」

第２節　超音波診断装置

・超音波診断装置は、原理的には魚群探知機の発展したものといえる。探索深さが異なるため、超音波診断装置の周波数は３．５MHｚ～３０MHｚ、魚群探知機の周波数は１５ｋHｚ～４００ｋHzが使用されている。血管や体内管腔に挿入しうる超音波プローブを持った超音波診断装置や、ポケットに入れて持ち運べる超小型の超音波診断装置も開発されている。

超音波診断装置は、体内組織で反射された超音波（エコーという）の方向と受信時間から２次元位置を特定し、エコーの強弱を輝度（Brightness）に変換して画像化している（Ｂモード）。例えば胎内にいる赤ちゃんの画像では、超音波反射が強い胎盤や赤ちゃんは明るく映り、超音波反射が弱い羊水は暗く映る。また、心臓の画像では、超音波反射が強い筋肉や弁は明るく映り、超音波反射が弱い心房や心室の内部（つまり血液）は暗く映る。

Ｂモード以外に、エコーのドプラシフトをカラーに変換して画像化するＣＦモードや、組織の変形前後のエコーの変化から歪量を求めその歪量をカラーに変換して画像化するエラストモードを備えた装置もある。

・１９５５年、順天堂大学の田中憲二らと（株）日本無線医理学研究所の内田六郎らは、電動自動走査式超音波装置を試作した。これが国内初の超音波診断装置（超音波断層像を得ることができる装置）と思われる。

（1）　研究者・技術者

（i）　電動自動走査式超音波断層装置の製作

１９５５年、田中憲二、和賀井敏夫、宮島玄史、内田六郎は、電動自動走査式超音波断層装置を製作し、生きた人間の脳室の断層像（Ｂモード画像）を得るのに世界で始めて成功した。しかし、水中に頭を入れる方式のため、患者の負担が大きく、実用化には至らなかった。（資料１）

（ii）　超音波ドプラの開発

１９５５年ころ、里村茂夫が工学面を担当し、岡部金治郎、仁村泰治、吉田常雄が医学面を担当し、心臓からのエコーに現れるドプラシフトが弁の動きに起因することを発見した。これが体内の動きをエコーのドプラシフトによって捉える「超音波ドプラ」の始まりである。また、１９５８年ころ、里村茂夫が工学面を担当し、金子仁郎が医学面を担当し、頸動脈からのエコーに現れるドプラシフトが血流に起因することを確認した。これが超音波による「血流の診断」の始まりである。（資料２）

(iii) カラードプラ法の開発

１９８２年、滑川孝六、小谷野明、河西千廣、尾本良三らが血流をリアルタイムに二次元カラー映像化する「カラードプラ法」を開発し、英国ブライトンでの第三回世界超音波医学会で発表した。

写真１のように白黒の断層像（Ｂモード画像）に重ねて血流をカラーで表示する。超音波プローブに近づく方向の血流は赤系で表示し、超音波プローブから遠ざかる向の血流は青系で表示している。これは、地球に近づいてくる星の光は青側にドプラシフトし、地球から遠ざかる星の光は赤側にドプラシフトするというのと逆の配色になっているが、近づくものはポジティブに感じるので赤系にし、遠ざかるものはネガティブに感じるので青系にした、とのことである。（資料３）

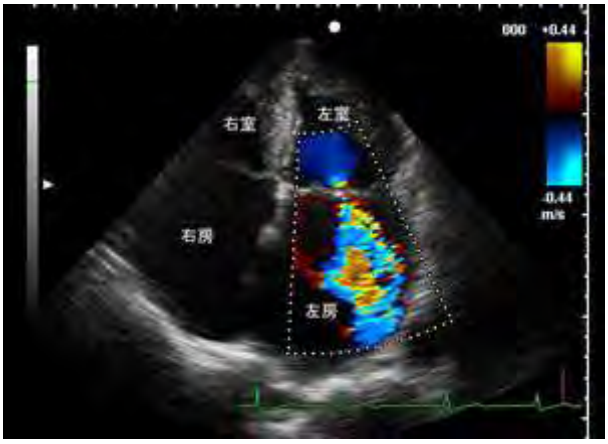


写真１． カラードプラ画像
宇部仁心会病院ホームページより

(iv) 超音波エラストグラフィの開発

超音波を用いて「組織の硬さ」を可視化する技術が「超音波エラストグラフィ」である。乳がんに対する触診の発展形とも言えるが、触診が難しい肝臓がんにも適用できる利点がある。

新たな演算処理法である複合自己相関法（combined autocorrelation method）を考案していた椎名毅と乳房に圧迫を加えて腫瘍の変形を見る動的検査（dynamic study）を考案していた植野映と日立メディコとが共同研究し、「超音波エラストグラフィ」を開発した。（資料４）

２００２年７月３１日、「超音波エラストグラフィ」は、椎名毅と（株）日立メディコの共同で特許出願されている（特願２００２－２２２８６８・特願２００２－２２２８６９）。発明者は「椎名毅、山川誠、新田尚隆」である。（資料５）

椎名毅らの「超音波エラストグラフィ」は組織の歪から硬さを検出するストレイン・イメージングと呼ばれるものであるが、組織を通過する音速から硬さを検出するシアウエーブ・イメージングも開発されている。（資料６）

２００１年４月１２日、フィリップスにより「シアウエーブ・イメージングによる超音波エラストグラフィ」は国際特許出願されている。（資料７）

（２） 企業

（i） （株）日本無線医理学研究所

（１９７６年にアロカ（株）に改称した。）

１９６０年、Ａモードの超音波診断装置とＢモードの超音波診断装置とを世界で初めて製作した。Ａモードはエコーの強弱を波形の振幅（Amplitude）に変換して時間波形を表示する。

１９７１年、電子リニア走査型リアルタイム超音波診断装置を世界で初めて試作した。

１９７５年、入江喬介は、スキャンコンバータを利用して諧調性を得る方法を世界で初めて考案した。

１９７６年、電子リニア走査型超音波診断装置を国内で初めて製品化した。

（ii） アロカ（株）

（２０１１年に日立メディコの子会社になり日立アロカメディカル（株）に改称、２０１６年に日立メディコに吸収合併され（株）日立ヘルスケア・マニュファクチャリングに改称した。）

１９７７年、長崎達夫は、ダイナミックフォーカス法を世界で初めて考案した。

１９７９年、デジタルスキャンコンバータ・ダイナミックフォーカス付き電子リニア走査型超音波診断装置を国内で初めて製品化した。

１９８１年、ＦＦＴ解析機能付き超音波ＰＷドプラ装置を世界初で開発した。

１９８３年、リアルタイム超音波血流映像装置（カラードプラ装置）を世界初で製品化した。

（iii） 日立レントゲン（株）

（１９７３年に（株）日立メディコに改称した。）

１９７０年、電池電源式ドプラ胎児心拍検出装置を世界初で開発した。

（iv） （株）日立メディコ

（２０１６年に（株）日立ヘルスケア・マニュファクチャリングに改称した。）

１９７８年、デジタルスキャンコンバータ付き電子リニア走査型超音波診断装置を世界初で開発した。

１９８４年、デジタルスキャンコンバータ付きポータブル電子リニア走査型超音波診断装置を世界初で開発した。

２００３年、リアルタイム組織弾性イメージング機能を搭載した超音波診断装置を世界初で製品化した。「組織弾性イメージング」は、日立メディコが、筑波大学 電子・情報工学系教授 椎名 毅および同大学臨床医学系 講師 植野 映の協力のもとに世界で最初に超音波診断装置に搭載した計測機能である。（資料８）

日立メディコの特願２００２－５２９２２（２００２年2月２８日出願）が「組織弾性イメージング」の最初の特許出願であるが、この出願は特許に至っていない。次に出願した特願２００２－２２２８６８（２００２年7月３１日出願）は、特許第４２５８０１５号になっている。

（v） （株）東芝

１９９７年、超音波診断装置の累計生産台数１０万台を世界初で達成した。

１９９９年、超音波診断装置 PowerVision 6000 の累計出荷台数１０００万台を世界初で達成した。

（vi） ＧＥメディカルシステム（株）

（２００９年に GE ヘルスケアバイオサイエンス（株）と合併しＧＥヘルスケア・ジャパン（株）へと社名を変更している。）

２００２年、４Ｄ（リアルタイム３Ｄ）機能搭載超音波診断装置を世界初で製品化した。

（３） 中谷医工計測技術振興財団助成研究の実績

超音波診断装置に関連のある助成研究は、１４件の実績がある。

（４） 特許

（i） 特許出願件数の推移

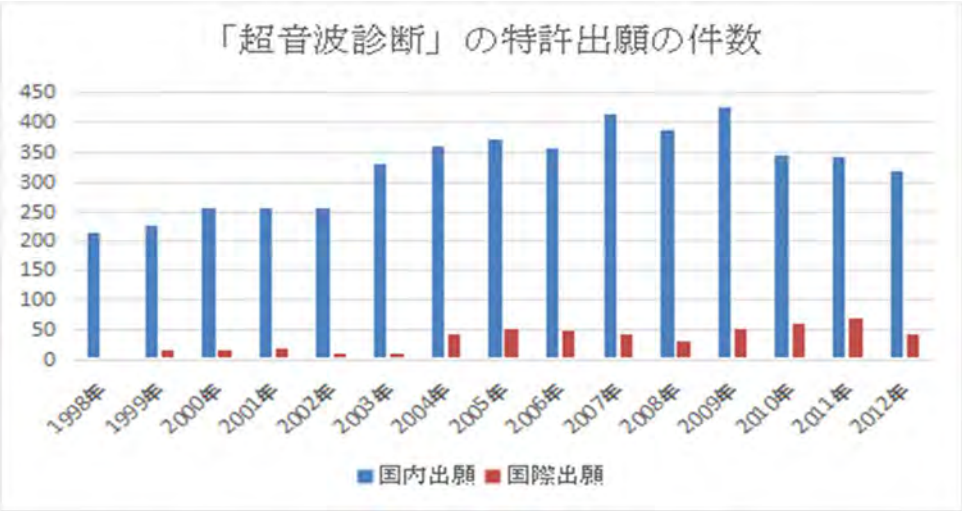


図１：特許請求の範囲または要約に「超音波診断」の文言を含んでいる特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の出願件数を示す。国内出願は十分多い。

（ii） 主な特許権者

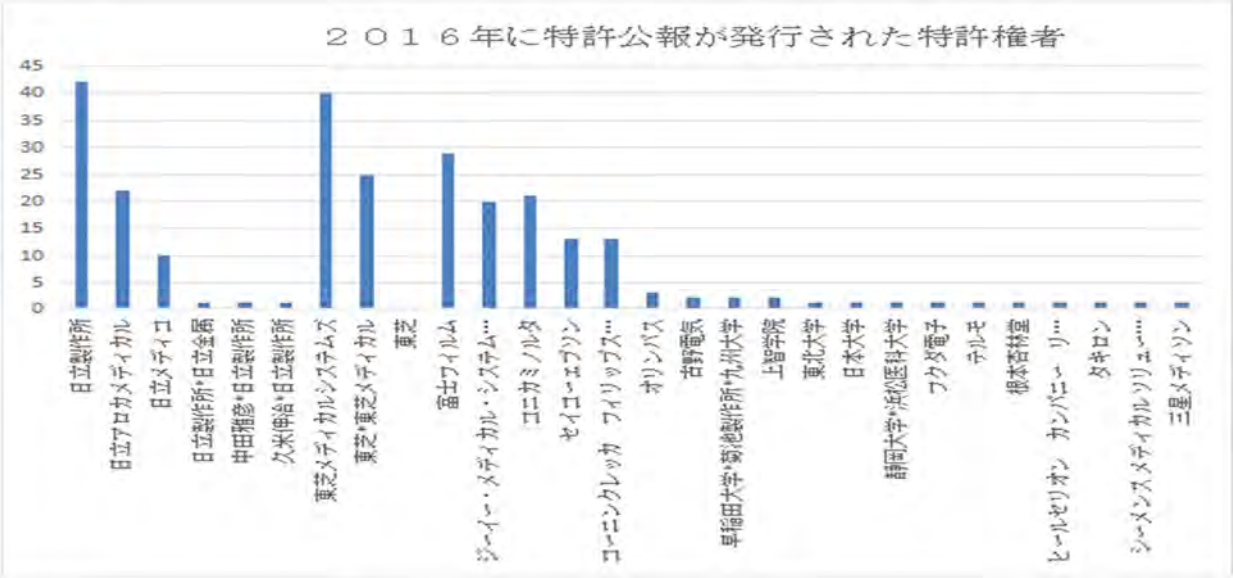


図２：特許請求の範囲または要約に「超音波診断」の文言を含んでいる特許出願であって２０１６年に特許公報が発行された件数を特許権者別に示す。日立グループが７７件、東芝グループが６５件で２トップである。富士フィルム、ＧＥ、コニカミノルタ、セイコーエプソン、フィリップスが１０件以上である。

（iii）特許出願の技術区分

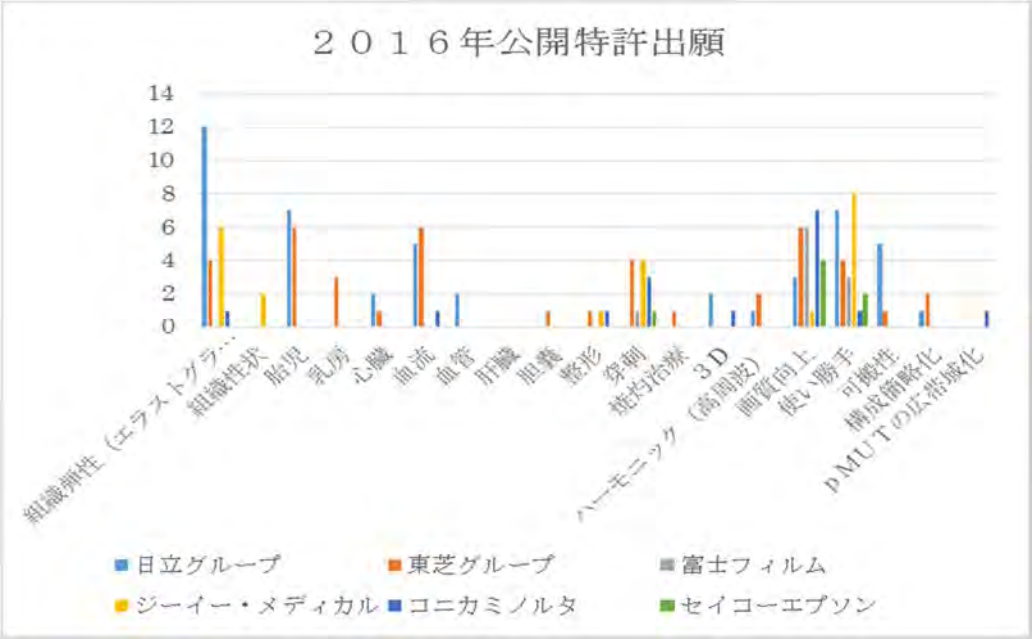


図３：日立グループ・東芝グループ・ＧＥメディカルシステム・富士フィルム・コニカミノルタ・セイコーエプソンの６社の特許出願であって２０１６年（１１月１７日まで）に発行された公開特許公報の内容を解析し、それぞれの技術カテゴリと目標カテゴリを判定した。

その判定結果に基づいて定めた技術区分ごとの特許出願件数をグラフ化した。日立グループは、エラストグラフィ、胎児、使い勝手、血流、可搬性の順に力を入れている。東芝グループは、胎児、血流、画質向上、穿刺、使い勝手の順に力を入れている。ＧＥメディカルシステムは、使い勝手、エラストグラフィ、穿刺の順に力を入れている。富士フィルム・コニカミノルタ・セイコーエプソンは、画質向上に力を入れている。

（５） 未来開拓事業からの課題

「古川俊之編：先端技術が拓く医工学の未来：アドスリー：２００２年９月」に収録されている堀正二「超音波診断治療の回顧と革新への研究目標」において堀がいくつかの研究目標を挙げている。そのうちの（１）ＩＶＵＳ、（２）３次元超音波診断、（３）組織性状診断について、特許出願の動向から進展を調べてみた。

なお、堀は、ファイバースコープの機能を持たず超音波走査の機能だけを持つものを「ＩＶＵＳ」と呼び、ファイバースコープの機能だけを持ち超音波走査の機能を持たないもの及び両方の機能を持つものを「血管内視鏡」と呼んでいる。「血管内視鏡」については「Ｂ．内視鏡」で述べる。

(i)　血管を覗く①：ＩＶＵＳ

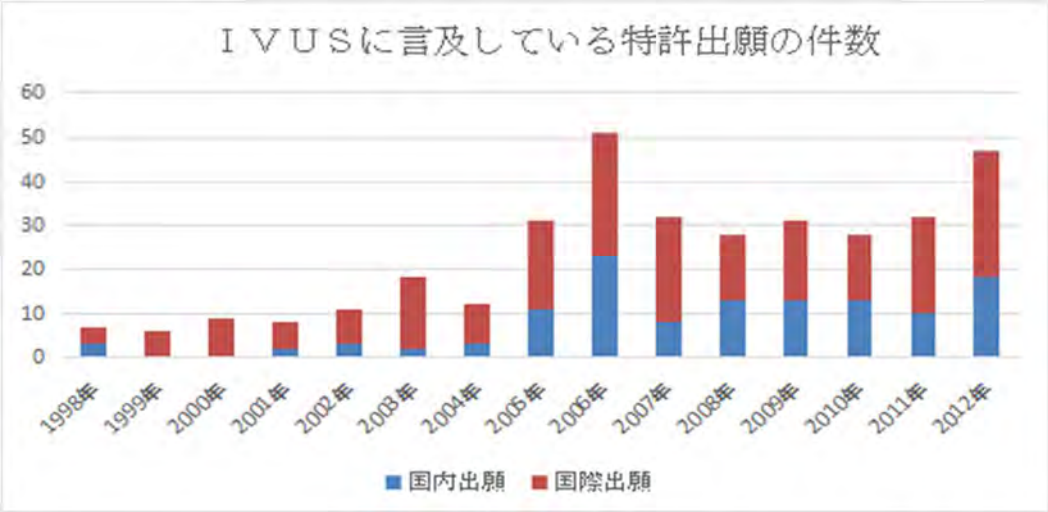


図４：特許出願書類のどこかで「ＩＶＵＳ」と「血管」と「プローブ／探触子」に言及している特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の出願件数を示す。「ＩＶＵＳ」に言及する特許出願が増加しており、研究が進んでいると思われる。国際特許出願の割合が高い特徴が見られる。

(ii)　胎児の表情を見る：３次元超音波診断

１９５９年ころから超音波が胎児の診断に利用されはじめた。（資料９）

２Ｄ（断層像を表示する）、３Ｄ（胎児の立体的画像を非リアルタイムに表示する）、４Ｄ（胎児の立体的画像をリアルタイムに表示する）の表示モードがある。

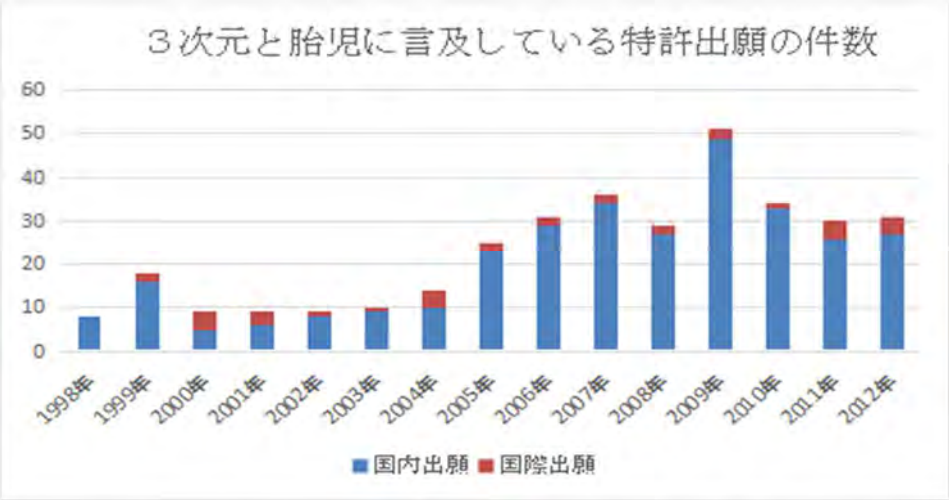


図５：特許出願書類のどこかで「３次元」と「胎児」に言及している特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の出願件数を示す。特許出願が増加しており、研究が進んでいると思われる。国際特許出願の割合が低い特徴が見られる。

なお、堀はほとんど「胎児の診断」について述べており、それ以外の臓器についてはごく僅かに言及しているだけなので、「３次元・胎児の診断」に絞って調査した。

（iii）超音波のはね返り：組織性状診断

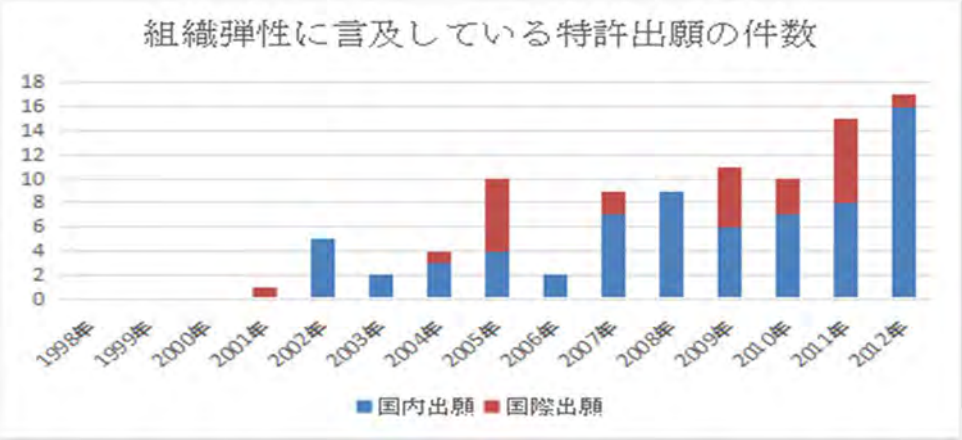


図６：特許出願書類のどこかで「超音波診断」と「組織弾性／エラストグラフィ」に言及している特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の出願件数を示す。まだ件数は少ないが、「組織弾性／エラストグラフィ」に言及する特許出願が増加しており、研究が進んでいると思われる。２００１年の国際出願１件はフィリップスによる「シアウエーブ・イメージングによる超音波エラストグラフィ」であり、２００２年の５件は日立メディコなどによる「ストレイン・イメージングによる超音波エラストグラフィ」である。高機能の超音波診断装置には、「シアウエーブ・イメージングによる超音波エラストグラフィ」と「ストレイン・イメージングによる超音波エラストグラフィ」の両方が搭載されている。

なお、堀は「散乱の高調波分析あるいはカオス解析により線維化を診断する」と述べているが、これは進展していない。現在は、その執筆当時には知られていなかった「組織弾性／エラストグラフィにより線維化を診断する」ことが主流になっている。また、「組織性状」は「血管内プラーク診断」なども含んでいるが、堀はそこまで広く想定していないと思われる。そこで、「組織性状診断」を「組織弾性／エラストグラフィによる線維化の診断」と読み替えて調査した。

（６） 資料

（資料１）

医用画像電子博物館「超音波診断装置」（日本医用画像システム工業会のＷＥＢ）
http://www.jira-net.or.jp/vm/aetas.html

（資料２）

仁村泰治「回想-超音波 Doppler 診断法の誕生外史」

https://www.jsum.or.jp/calendar/meeting/pdf/83th/essay%20119-122.pdf
（資料３）
吉川義博・尾本良三「世界初！！カラー・ドプラ開発よもやま話」第３０回日本超音波検査学会　講演会
http://www.jira-net.or.jp/vm/lecture/pdf/colordoppler_yomoyama.pdf
（資料４）
上野映「超音波エラストグラフィの開発と進化－Real-time Tissue Elastograhy の有用性と可能性」
http://www.innervision.co.jp/feature/interview/201304
（資料５）
特開２００４－５７６５２・特開２００４－５７６５３「発明の名称：超音波診断システム、歪み分布表示方法及び弾性係数分布表示方法」
（資料６）
椎名毅「超音波エラストグラフィの研究開発の現状・動向」MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY Vol.32 No.2 March 2014
（資料７）
特表２００３－５３０９４１「発明の名称：剪断波パラメータ評価のための超音波方法およびシステム」
（資料８）
「世界初、組織の硬さをリアルタイムで画像化する超音波診断法 ～組織弾性イメージング機能（Real-Time Tissue Elastography）の開発～」2003 年 11 月 26 日 株式会社 日立メディコ 執行役社長 猪俣 博 」
http://www.hitachi.co.jp/produs/healthcare/news/hmc/pdf/news031126.pdf
（資料９）
川崎医療福祉学会誌 Vol.14 No.1 2004 59-70
「超音波診断を含む妊婦健診の導入と普及要因」鈴井江三子
http://www.kawasaki-m.ac.jp/soc/mw/journal/jp/2004-j14-1/j14_suzui.pdf

第３節　内視鏡

・内視鏡は、硬性鏡（肛門鏡、膀胱鏡、胃鏡など）、軟性鏡（膀胱鏡、胃鏡など）、ファイバースコープ、ビデオカメラを体内に入れるビデオスコープと進化してきた。組織を切り取る鉗子、細胞に色付けする色素噴射ノズル、体内から超音波撮像する超音波デバイスを先端に取り付けた内視鏡も実用化されている。

なお、ここで云う内視鏡は、仮想内視鏡（Ｘ線ＣＴ装置などで得たボリュームデータから内視鏡で見たごとき画像をデジタル演算で生成する。）を含んでいない。

・明治期、硬性膀胱鏡が日本に持ち込まれた。１９３３年、軟性胃鏡が日本に持ち込まれた。１９６２年、ファイバースコープが日本に持ち込まれた。１９８３年、ビデオスコープが米国で誕生した。

（1）　研究者・技術者

（i）　軟性胃鏡

１９３７年１２月、ウォルフとシンドラーによる軟性胃鏡を改良し、器械技師武井勝に依頼して、桐原式軟性胃鏡を完成した。（資料１１）

１９４０年ころ、沖中重雄がドイツから軟性胃鏡を持ち帰った。東大第２内科で使われた。（資料１２）

胃鏡は、使っている人だけが且つリアルタイムでしか胃を覗けないため、広くは普及しなかった。しかし、リアルタイムに胃を覗く機能は、現在の内視鏡に受け継がれている。

（ii）　胃カメラ

１９５０年6月２７日、宇治達夫、杉浦睦男、深海正治は、胃カメラを世界で初めて開発した。（資料１３）

胃カメラは、超小型の写真機を胃に挿入して写真を撮るもので、内視鏡とは異なる。しかし、写真は、多くの人がいつでも見ることが出来るという有用性がある。このため、ファイバースコープが現れた後も、胃カメラが併用された。１９６４年、ファイバースコープ付胃カメラになり、その後、ファイバースコープを通して写真が撮れるようになり、１９７５年ころには、役目を終えた。（資料１４）

（iii）ファイバースコープ

１９６２年、近藤台五郎らは、輸入したファイバースコープを国内で初めて使用した。また、その改良を町田製作所に依頼した。（資料１２）

（2）　企業

（i）　オリンパス光学工業（株）

（２００３年、オリンパス（株）に改称。）

１９５０年6月２７日、胃カメラを特許出願した（特願昭２５－８３９４）。発明者は「宇治達夫、杉浦睦男、深海正治」。（資料１４、資料１５）

１９６４年、ファイバースコープ付ガストロ胃カメラを発売した。

１９８０年、超音波内視鏡の国内初の試作機を完成した。（資料１６）

１９８５年、ビデオスコープを発売した。

２００２年、ハイビジョン内視鏡システムを世界で初めて発売した。（資料１４）

２００３年、脳神経内視鏡システムを世界で初めて発売した。（資料１６）

２００６年３月１４日、脳室ビデオスコープを世界で初めて発売した。（資料１７）

オリンパスは、近年でも内視鏡のシェアが世界一である（**図７**）。（資料１８）

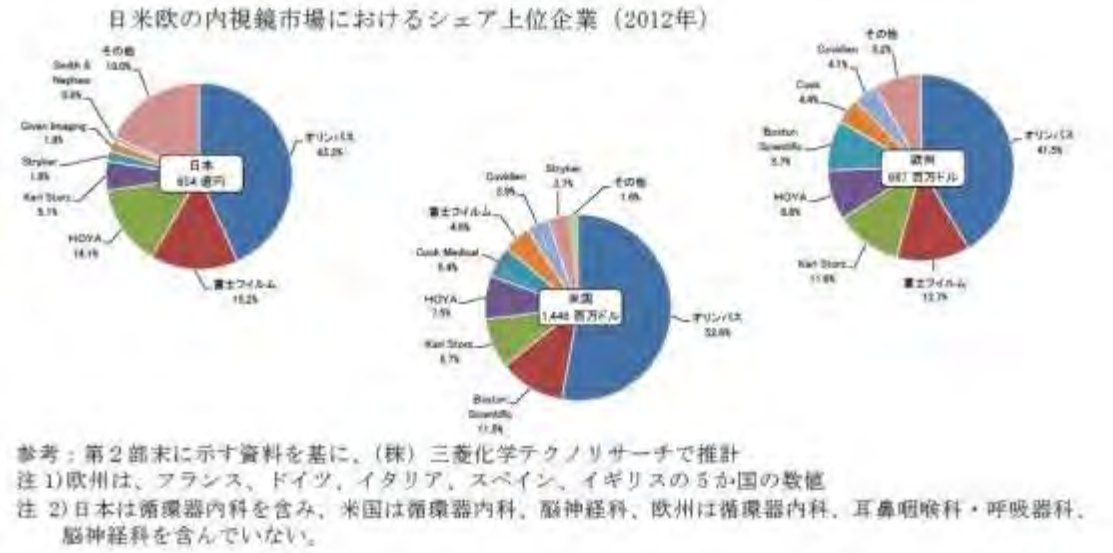


図７　内視鏡のシェア　　平成２６年特許出願技術動向調査報告書「内視鏡」より

（ii）　（有）町田製作所

（１９６７年３月、（株）町田製作所に改称。）

１９６３年、国産初の診断用ファイバーガストロスコープを製作した。（資料１２）

１９６４年、世界初の生検用ファイバーガストロスコープを製作した。

（３）　中谷医工計測技術振興財団助成研究の実績

内視鏡に関連のある助成研究は、５件の実績がある。

（４）　特許

特許庁発行の平成２６年特許出願技術動向調査報告書「内視鏡」において極めて詳細な分析が行われている。特許庁、国会図書館、都立図書館で閲覧できる。

（i）　特許出願件数の推移

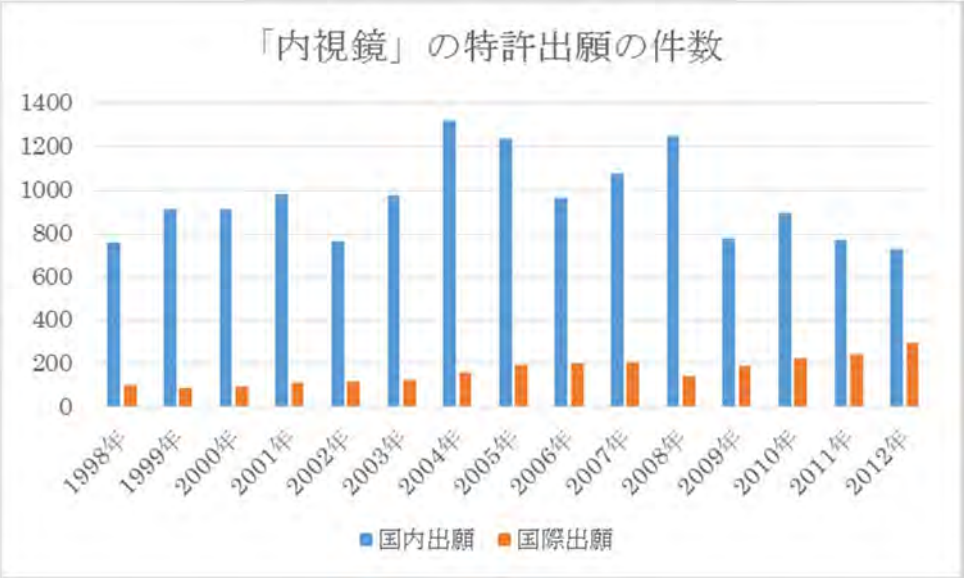


図８　特許請求の範囲または要約に「内視鏡」の文言を含んでいる特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の出願件数を示す。国内出願も国際出願も多数行われており、技術開発が活発であることがうかがえる。

（ii）　主な特許権者

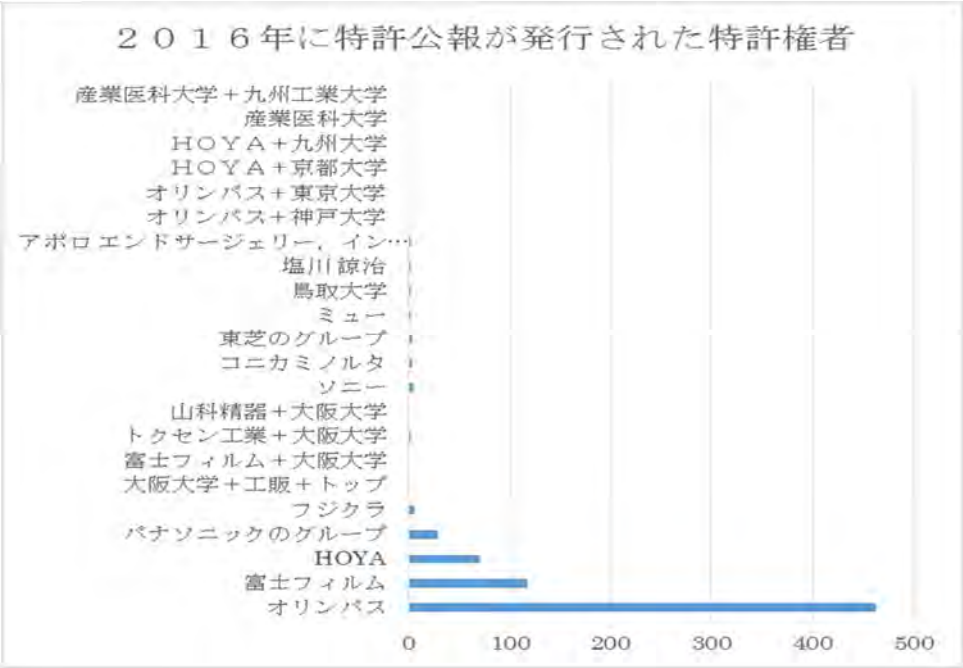


図９　特許請求の範囲または要約に「内視鏡」の文言を含んでいる特許出願であって２０１６年に特許公報が発行された件数を特許権者別に示す。オリンパスが４６３件で１位、富士フィルムが１１７件で２位、ＨＯＹＡが７０件で３位、パナソニックのグループが２９件で４位、フジクラが６件で５位、大阪大学関連が５件で６位、ソニーが４件で７位、コニカミノルタが３件と東芝のグループが３件でともに８位である。とりわけ、オリンパス、富士フィルム、ＨＯＹＡにおいて技術開発が極めて活発である。

（５）　堀が２００２年に提言した研究目標は進展したか？

（i）　血管を覗く②：血管内視鏡

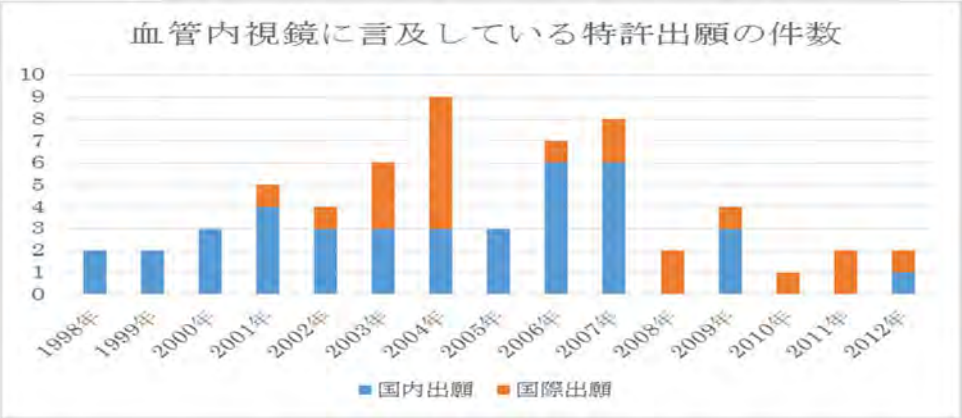


図１０　特許出願書類のどこかに「血管内視鏡」の文言を含んでおり且つ特許請求の範囲または要約に「血管」の文言を含んでいる特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の出願件数を示す。あまり技術開発が活発とは思われない。国際出願の割合が高い。

（６）　資料

（資料１１）

桐原教授と軟性胃鏡

http://www.med.nagoya-u.ac.jp/medlib/history/archive/print/1937ikyou_b.html

（資料１２）

消化管内視鏡を育てた人々

http://www.pariet.jp/alimentary/endoscope.html

（資料１３）

胃カメラを知っているか！胃カメラ開発者杉浦睦男のページ

http://ikamera.jp/

（資料１４）

内視鏡の歴史とオリンパス（オリンパスのＷＥＢ）

http://www.olympus.co.jp/jp/medical/gastroenterology/history/

（資料１５）

特公昭２６－５２２１「発明の名称：腹腔内臓器撮影用写真機」

（資料１６）

軽部大他「オリンパス 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」大河内賞ケース研究プロジェクト、一橋大学イノベーション研究センター

http://pubs.iir.hit-u.ac.jp/admin/ja/pdfs/show/590

（資料１７）

オリンパスのＷＥＢ→ニュース→新製品情報

http://www.olympus.co.jp/jp/news/newproduct.jsp

（資料１８）

平成２６年特許出願技術動向調査報告書「内視鏡」特許庁

第４節　Ｘ線ＣＴ装置

・Ｘ線ＣＴ装置は、Ｘ線撮影装置（いわゆるレントゲン装置）と同じく、Ｘ線が透過中に体内組織で吸収される強弱を利用して画像を生成する装置である。ただし、Ｘ線撮影装置では、見たい臓器を透視するようにコーン形状のＸ線ビームを照射し、Ｘ線ビームを２次元アレイの検出器で検出するので、透過したＸ線の強弱が反映された２次元投影データがそのまま画像（つまりレントゲン写真）になる。一方、Ｘ線ＣＴ装置では、見たい臓器を切断するように平面状のＸ線ビームを照射し、Ｘ線ビームを１次元アレイの検出器で検出するので、透過したＸ線の強弱が反映された１次元投影データはそのまま画像にはならない。そこで、Ｘ線ビームの方向を変えて（但し、同じ切断面を常に含むように）、異なる方向から平面状のＸ線ビームを照射し、複数の１次元投影データを収集し、これらをコンピュータで処理して、切断面の画像（すなわち断層像）を生成している。

なお、現在では、Ｘ線ＣＴ装置でもＸ線ビームをコーン形状にすると共に２次元アレイのＸ線検出器を用いているが、これは複数の切断面の断層像を高速に得るためであり、原理は上述と変わらない。

・１９７５年６月、東京女子医科大学にＥＭＩ社の頭部用Ｘ線ＣＴ装置が設置された。これが国内初のＸ線ＣＴ装置である。

（１）　研究者・技術者

(i)　高橋トモグラフィー

１９５０年ころ、高橋信次は、人体の周りにＸ線管とフィルムを回転させて、断層像をフィルム上に結像させることに成功している。これは、高橋トモグラフィーと呼ばれている。（資料１９）

１９７２年にＸ線ＣＴ装置が開発され、役目を終えた。

(ii)　ヘリカルスキャン

１９８２年、森一生は、Ｘ線管とＸ線検出器を患者の体軸周りに回転させつつ患者を体軸方向に移動させながらデータを収集するヘリカルスキャンを開発した。三次元的にデータが得られることから、Ｘ線ビーム方向に限定されない所望の断面（例えば体軸方向の断面）の断層像を生成できるようになった（**写真２**）。

写真２．体軸方向の断層像東京慈恵会医科大学のＷＥＢより

（２）　企業

（i）　（株）東芝

１９７５年６月、日本で初めてＥＭＩ社の頭部用Ｘ線ＣＴ装置を東京女子医科大学に設置した。

１９７８年、国産初の全身用Ｘ線ＣＴ装置を国立がんセンターに設置した。

１９８２年１２月１６日、ヘリカルスキャンの特許出願（特願昭５７－２２１３４９）をした。発明の名称は「Ｘ線断層撮影装置」、発明者は「森一生」である。（資料２０）

２００７年、世界で初めての４次元Ｘ線ＣＴ装置を発売した。（資料２１）

（ii）　（株）日立メディコ

（２０１６年に（株）日立ヘルスケア・マニュファクチャリングに改称した。）

１９７５年１０月１６日、国産初の頭部用Ｘ線ＣＴ装置を藤田学園名古屋保健衛生大学に設置した。（資料２２）

（３）　中谷医工計測技術振興財団助成研究

Ｘ線ＣＴ装置に関連のある助成研究は、１件の実績がある。

（４）　特許

（i）　特許出願件数の推移

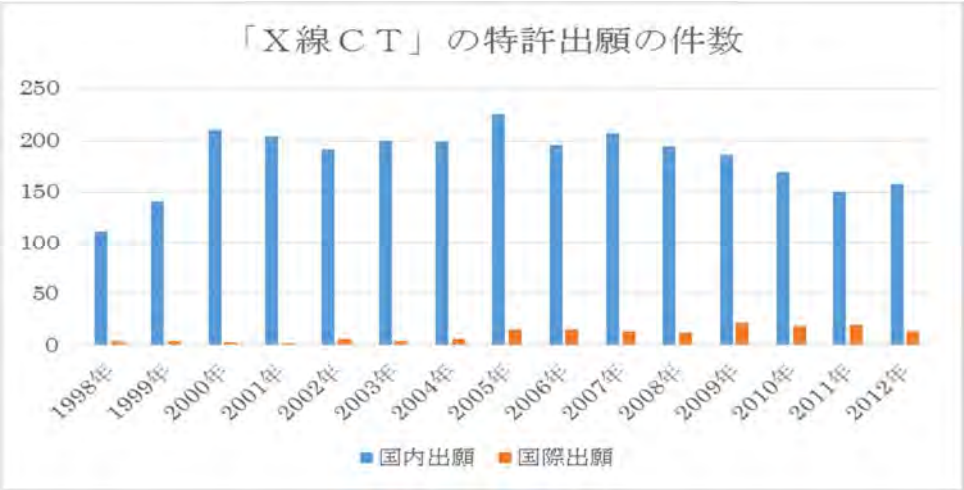


図１１　特許請求の範囲または要約に「Ｘ線ＣＴ」または「Ｘ線断層」の文言を含んでいる特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の出願件数を示す。国内出願の件数はまずまず多い。

（ii） 主な特許権者

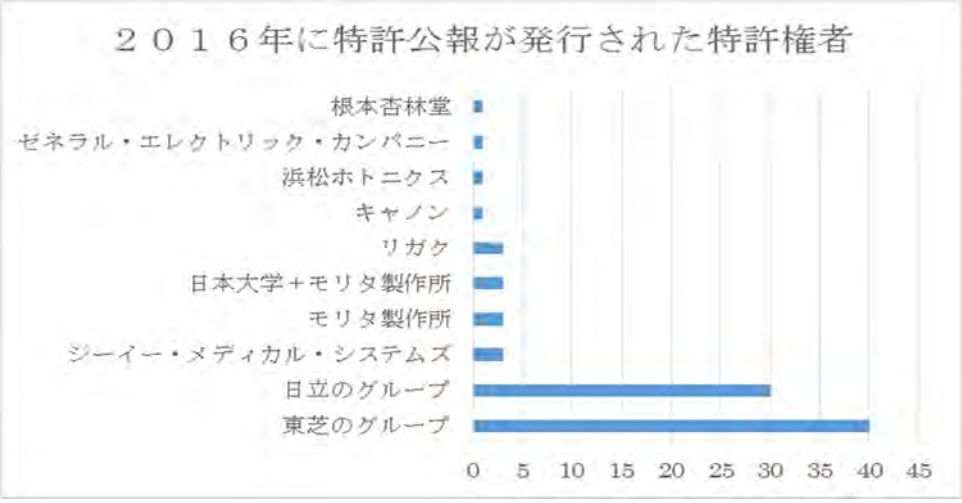


図１２　特許請求の範囲または要約に「Ｘ線ＣＴ」または「Ｘ線断層」の文言を含んでいる特許出願であって２０１６年に特許公報が発行された件数を特許権者別に示す。東芝グループが４０件で１位、日立グループが３０件で２位で、これら２社において技術開発が活発である。

（５）　横河電機におけるＸ線ＣＴ事業の展開

鈴木良次

１９７２年Ｘ線ＣＴがG.N.Housefield、A.M.Cormackによって研究発表された後、イギリスのEMI社が製品化し、我が国では東芝がいち早くＥＭＩ社と技術提携を結び、国内でのＣＴ製造の先端を走っていた。横河電機はその意味で後発であったが、ＣＴの開発がアメリカに移り、その主力となったＧＥが、製品の海外販売を日本に打診、約３０社の応募の中から選んだのが横河電機であった。

１９７６年、ＧＥと横河電機の間で、ＧＥのＸ線ＣＴの販売契約が結ばれ、治験のための一号機が、東京大学病院に設置された。医療機器の製造はもちろん販売の経験もない横河電機であったが、計測器メーカとしての実力を発揮し、トラブルの多かったＧＥ製品を何とか、国内の病院での使用に耐えられるようにまでこぎつけ、売り上げを順調に伸ばすことができたという。販売を開始した１９７７年には２３億円であった売り上げが、１９７８年／６７億円、７９年／１２６億円、８０年／１３６億円と伸びた。この間に、保守サービス体制を整え、これまで、修理は無償のサービスという考えが医療機器の世界では通っていたようであるが、それを有償化したというのは、医療機器事業にとっての進展の一つであったといえる。しかし、販売と保守サービスという事業にも当然限界があった。

１９８０年、横河電機は、医療機器の自主開発に踏み切る。その先端を切ったのが、超音波診断装置であった。これも東芝が先行していた分野であるが、横河電機独自の技術を動員して最初の独自開発機ＲＴ１００を完成、１９８０年販売。１９８１年に

は画質の優れたコンパウンド型ＲＴ２０００，１９８２年には聴診器に代わると期待されたポータブルのＲＴ３０を発売した。超音波診断装置について２０１０年、ＧＥがシェア世界一を達したというが、その技術基盤は横河電機にあったといえる。

それまで医療に無縁であった横河電機が、ＧＥとの販売契約を結ぶことに成功し、その後、販売台数を順調に伸ばせたのは、日米貿易のアンバランスを失くすという政府の追い風があったとはいえ、横河電機の技術者らの一体となっての努力があったことを、付記資料から読み取ることができる。

しかし、順調な販売の伸びも１９８１年に１３１億円と陰りを見せてくる。一つには、東芝、日立による国産機の販売開始の影響もあるが、基本的には、ＧＥ製品ＣＴ／Ｔ８８００の初期不良の多さ、設置工数の多さなどに原因があった。そこで、横河電機は、ＣＴの自社開発の検討を始めた。１９８１年のことである。そして翌年、ＣＴ８６００の販売に至る。１９８２年、ＧＥとの合弁会社横河メディカルシステム(株)が設立され、ＣＴ８６００の製造販売は同社に移ることになる。（資料２３）

横河メディカルシステムは、１９９４年にＧＥ横河メディカルシステム（株）に改称、２００９年にGEヘルスケアバイオサイエンス（株）と合併しＧＥヘルスケア・ジャパン（株）へと社名を変更している。

（６）　資料

（資料１９）

医用画像電子博物館「Ｘ線ＣＴ装置　開発の歩み：回転横断断層撮影法」（日本医用画像システム工業会のＷＥＢ）

http://www.jira-net.or.jp/vm/data/1951000001/1951000001_all.html

（資料２０）

特公平２－６０３３２「発明の名称：Ｘ線断層撮影装置」

（資料２１）

リアルタイム４Ｄイメージングシステムの開発「わずか０．３５秒で心臓全体を撮影可能な、４次元Ｘ線ＣＴ装置」（東芝メディカルシステムズ株式会社のＷＥＢ）

http://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201007toshiba_medical/pdf/toshiba_medical_f.pdf

（資料２２）

猪俣博「人に優しい医療をめざして 進化する医療機器・システムと日立メディコの挑戦」日立評論 ２００９．０５

（資料２３）

「横河電機 医療機器事業こと始め」ＭＥを語る会 編（２０１１年）

第５節　磁気共鳴撮像装置（ＭＲＩ）

・ＭＲＩ装置は、体内組織からの磁気共鳴信号の強弱を画像化している。磁気共鳴現象を生じさせる印加磁場の強さと印加ＲＦ信号の周波数には一意的な関係がある。そこで、所望の位置だけ他と異なる印加磁場の強さとし、その印加磁場の強さに対応する周波数のＲＦ信号を印加すると、その所望の位置からだけの磁気共鳴信号を受信できる。この所望の位置を所望の平面内で移動させて観測を繰り返せば、所望の平面全体をカバーする磁気共鳴信号を受信できるので、それらの磁気共鳴信号の強弱を明暗に変換すれば、画像化できることになる。なお、この方法ではデータ収集時間が長くなってしまうので、実際にはデータ収集時間を短縮するための多くの工夫がなされている。

・１９８２年、中津川市民病院に Fonar 社のＭＲＩ装置が設置された。これが国内最初のＭＲＩ装置である。

（１）　研究者・技術者

(i)　ＦＲ（Fast Recovery）法

１９８４年、岩岡秀人らは、高速イメージングの道を拓く新しいパルスシーケンス（ＦＲ法）を発表した。（資料２３）

(ii)　ｆＭＲＩ

１９８９年ころ、小川誠二は、脳からの磁気共鳴信号に脳の活動に依存する信号（ＢＯＬＤ信号）が含まれていることを発見した。そして、１９９２年、脳の活動を画像化しうるｆＭＲＩ（機能的ＭＲＩ）を開発した（**写真３**）。（資料２４）

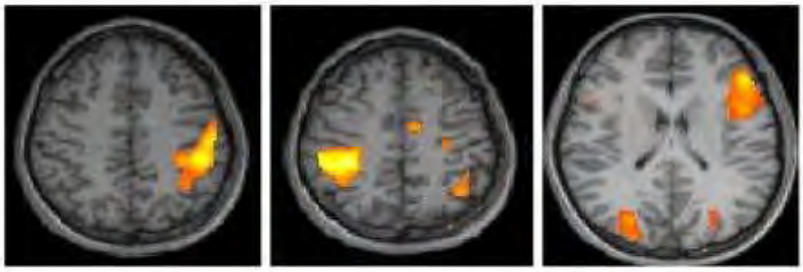


写真３．ｆＭＲＩによる画像　旭川医科大学　脳神経外科のＷＥＢより

（２）　企業

(i)　**（株）東芝**

１９８３年５月、世界初の商用機を慈恵医大病院に設置した。これは常電導磁石型ＭＲＩ装置であった。（資料２５）

（ii）　（株）日立メディコ

（２０１６年に（株）日立ヘルスケア・マニュファクチャリングに改称した。）

１９８７年、国産初の永久磁石型ＭＲＩ装置を発売した。

１９８９年９月には、永久磁石型ＭＲＩ装置は、国産ＭＲＩ装置６０６台１５２台を占める実績を上げた。（資料２２）

１９９５年、永久磁石型ＭＲＩ装置で２本柱のオープン型を発売した。

２００２年、永久磁石型ＭＲＩ装置で１本柱のオープン型を発売した。

（３）　中谷医工計測技術振興財団助成研究

ＭＲＩに関連のある助成研究は、１０件の実績がある。

（４）　特許

（i）　特許出願件数の推移

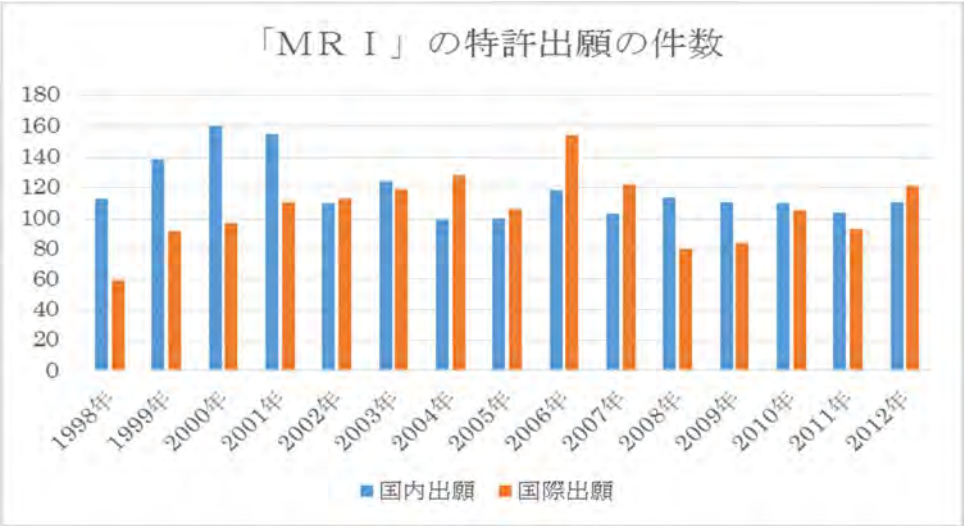


図１３　特許請求の範囲または要約に「ＭＲ」または「磁気共鳴」の文言を含み、全文のどこかで「勾配」または「グラジエント」に言及し且つ「パルス」に言及している特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の件数を示す。国際出願の割合が非常に高い。

（ii） 主な特許権者

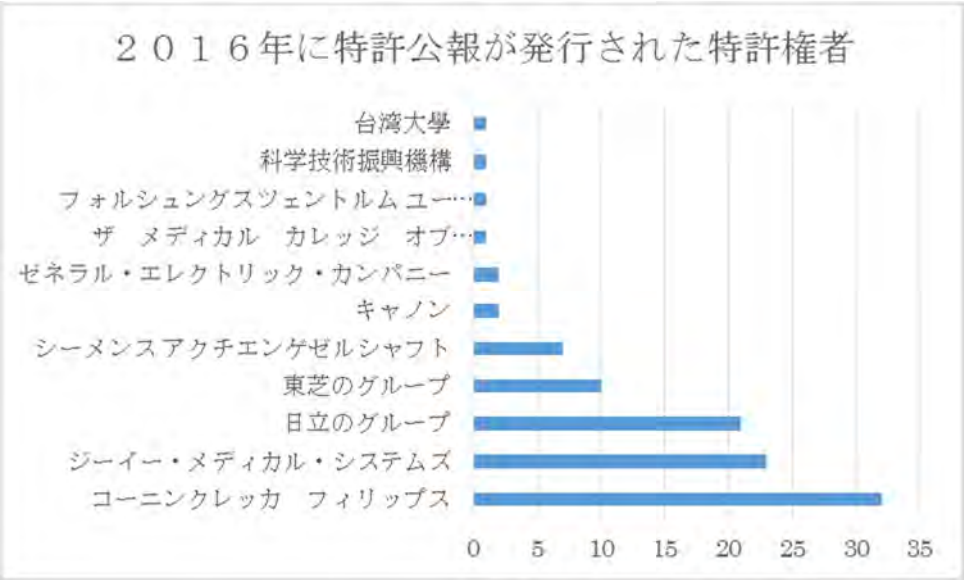


図１４　特許請求の範囲または要約に「ＭＲ」または「磁気共鳴」の文言を含んでおり且つ全文のどこかで「勾配」または「グラジエント」の文言を含み且つ「パルス」の文言を含んでいる特許出願であって２０１６年に特許公報が発行された件数を特許権者別に示す。フィリップスが３２件で１位、ジーイーが２３件で２位で、日立グループが２１件で３位、東芝グループが１０件で４位、シーメンスが７件で５位、キャノンとゼネラルがともに２件で６位である。外資系において技術開発が活発である。

（５）　資料

（資料２4）

小川誠二「ｆＭＲＩの基本原理（ＢＯＬＤ法）の発見」（Japanest NIPPON のＷＥＢ）

http://japanest-nippon.com/jp/feature/detail.php?id=24

（資料２５）

東芝未来科学館→学ぶ→１号機物語→１９８０年代→日本初のＭＲＩ装置

http://toshiba-mirai-kagakukan.jp/learn/history/ichigoki/1982mri/index_j.htm

第６節　光干渉断層撮影装置（ＯＣＴ）

・光源から可動ミラーを経由して光検出器まで届く参照光と光源から物体内で反射されて光検出器まで届く反射光とを合成した合成光の強度が、参照光の光路長と反射光の光路長が一致したときに強くなり、ずれると急に弱くなるような光を使うと、合成光から物体内の一つの反射位置における光学的特性を知ることが出来る。そして、可動ミラーを移動させれば、物体の奥行き方向の走査ができる。これを２次元的に位置を変えながら行うと、物体内部の光学的特性データを３次元的に得られる。この３次元的データか

ら所望の平面上のデータを切り出せば、断層像が得られる。なお、この方法ではデータ収集時間が長くなってしまうので、実際にはデータ収集時間を短縮するための多くの工夫がなされている。ドプラＯＣＴやＯＣＴアンギオグラフィーも開発されている。

ＯＣＴ装置は、特に眼科・歯科で使われている。今後、用途はさらに広がると思われる（**写真４**）。

・１９９７年、群馬大学医学部の岸治らは、米国ハンフリー社が試作した眼底断層撮影装置を日本に初めて持ち込んだ。ＯＣＴの原理は１９９０年に世界で最も早く日本で発明されていたが、日本では製品化への進展はなかった。

写真４． 眼底検査などに使用されているＯＴＣ撮影装置　ウィキペディア「光干渉断層像」より

（１）　研究者・技術者

（i）　光波反射像測定装置

１９９０年１１月６日、丹野直弘、市村勉、佐伯昭雄が「光波反射像測定装置」を特許出願した（特願平２－３００１６９）。発明者は同三名。（資料２６）

これがＯＣＴの原理を示す世界初の技術であった。しかし、ほとんど注目されず、活用されなかった。丹野らの特許出願は日本出願だけであった。

丹野らの日本出願の翌年、１９９１年に同様の原理が J.Fujimoto らにより米国特許出願され、ＯＣＴという技術用語が使用された。これは米国で活用され、米国カール・ツァイス社のＯＣＴ装置が世界シェアの９０％（２００５年）を占めるようになっている。なお、日本では、丹野らの特許第２００１０４２号が成立していたため、日本での販売に関してカール・ツァイス社から丹野らに特許使用料が支払われたということである。（資料２７）

（ii）　眼底断層撮影装置

１９９７年、群馬大学医学部の岸治らは、米国ハンフリー社が試作した眼底断層撮影装置１号機を購入した。米国ハンフリー社は、カール・ツァイス社の米国子会社である。（資料２７）

（２）　企業

（i）　マイクロトモグラフィー（株）

２００４年、国産初の眼底検査装置を販売した。（資料２７）

（ii）　キャノン（株）

２０１２年、解像度とスキャン速度を大幅に向上した眼科用ＯＣＴを発売した。

（３）　中谷医工計測技術振興財団委託事業の実績

ＯＣＴに関連のある助成研究は、７件の実績がある。

（４）　特許

（i）　特許出願件数の推移

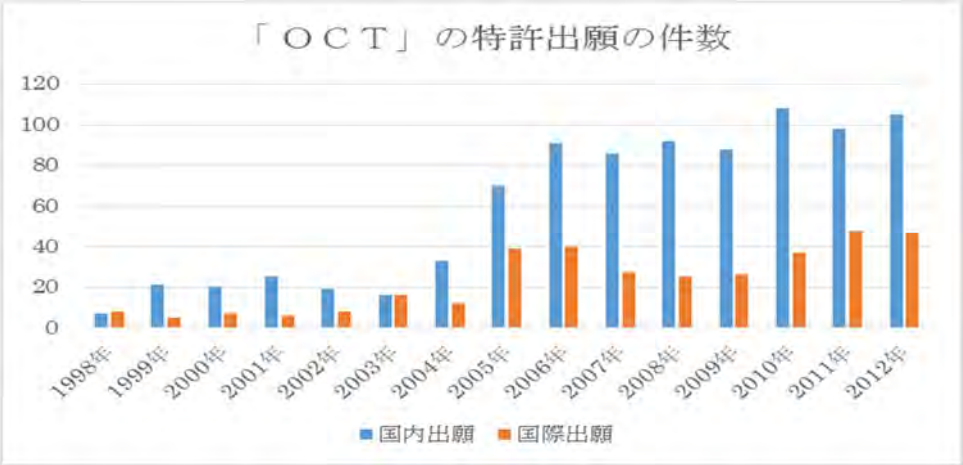


図１５　特許請求の範囲または要約に「光」を含み且つ「干渉」または「コヒーレンス」または「コヒーレント」の文言を含み且つ「断層」または「トモグラフィ」を含んでいる特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の件数を示す。技術開発が活発化している。

（ii） 主な特許権者

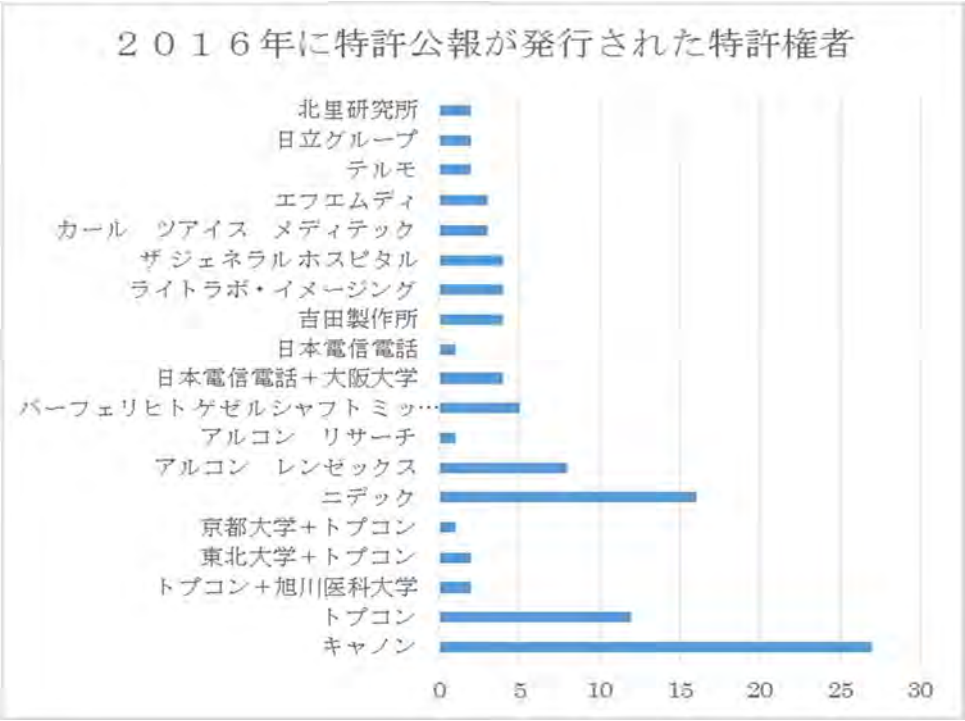


図１６　特許請求の範囲または要約に「光」を含み且つ「干渉」または「コヒーレンス」または「コヒーレント」の文言を含み且つ「断層」または「トモグラフィ」を含んでいる特許出願であって２０１６年に特許公報が発行された件数を特許権者別に示す。キャノンが２７件で１位、トプコンが共願も含めて１７件で２位で、ニデックが１６件で３位である。外資系も少なくない。

（5）　資料

（資料２６）

特開平４－１７４３４５「発明の名称：光波反射像測定装置」

（資料２７）

立野公男「日本の医工連携イノベーションの推進―ＯＣＴの産学官連携を事例に―」科学技術動向２００６年７月号

http://hdl.handle.net/11035/1746

第７節　パルスオキシメータ

・入院患者の指先に洗濯ばさみのようなものが取り付けられ、患者の脈拍や血中酸素濃度がモニタされているのを見たことがないでしょうか？　それがパルスオキシメーターである。家庭用のものは１万円前後で買えるので、体重計や血圧計のように家庭の備品となりそうである。**写真５**は、シスメックス社の製品で、アスリートのコンディション・チェックにまで用途が広がっている。

写真５．アスリート用のパルスオキシメータ　　シスメックス社のＷＥＢより

・１９７５年、日本光電工業が世界で初めて開発した。

（１）　研究者・技術者

（i）　光学式血液測定装置・オキシメータ

１９７４年３月２９日、日本光電工業（株）が「光学式血液測定装置」を特許出願した（特願昭４９－３６２２９）。発明者は「青柳卓雄、岸道夫」。（資料２８）

１９７４年４月２４日、ミノルタカメラ（株）が「オキシメータ」を特許出願した（特願昭４９－４６８５９）。発明者は「小西雅一郎、山西昭夫」。（資料２９）

これらが今のパルスオキシメーターの原型である。ただ、その価値を先に見出したのは欧米であり、日本は数年遅れた。このため、パルスオキシメーターの市場シェアは現在のところ欧米の手にある。

（２）　企業

（i）　日本光電工業（株）

１９７５年、耳たぶ測定タイプのパルスオキシメータを世界で初めて開発した。

（ii）　ミノルタ（株）

（２０１３年からコニカミノルタ（株）になった。）

１９７７年、指先測定タイプのパルスオキシメータを世界で初めて商品化した。（資料３０）

（３）　中谷医工計測技術振興財団委託事業の実績

パルスオキシメータに関連のある助成研究は、１件も実績がない。

（４）　特許

（i）　特許出願件数の推移

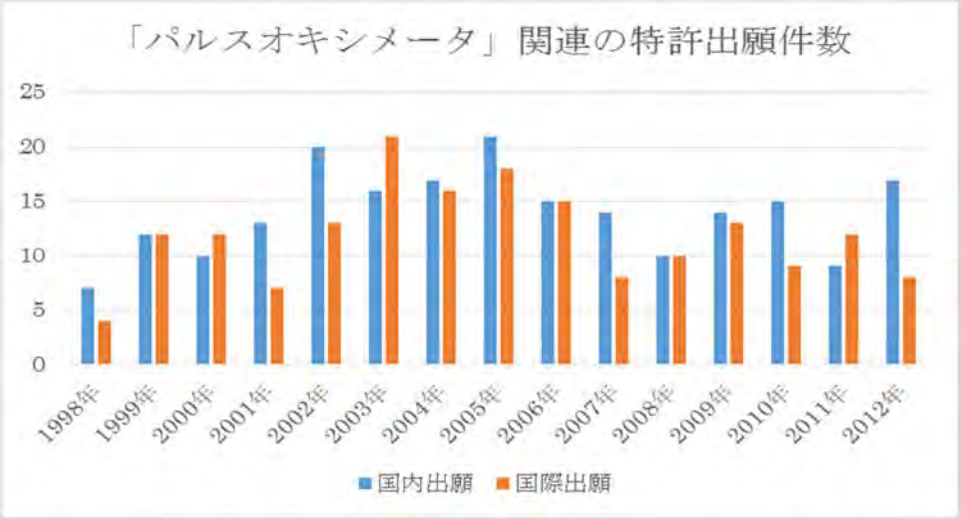


図１７　特許請求の範囲または要約に「パルス」または「脈」または「拍」を含み且つ「酸素飽和」または「酸素濃度」の文言を含み且つ「光」を含んでいる特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の件数を示す。国際出願の比率が高い。

（ii）　主な特許権者

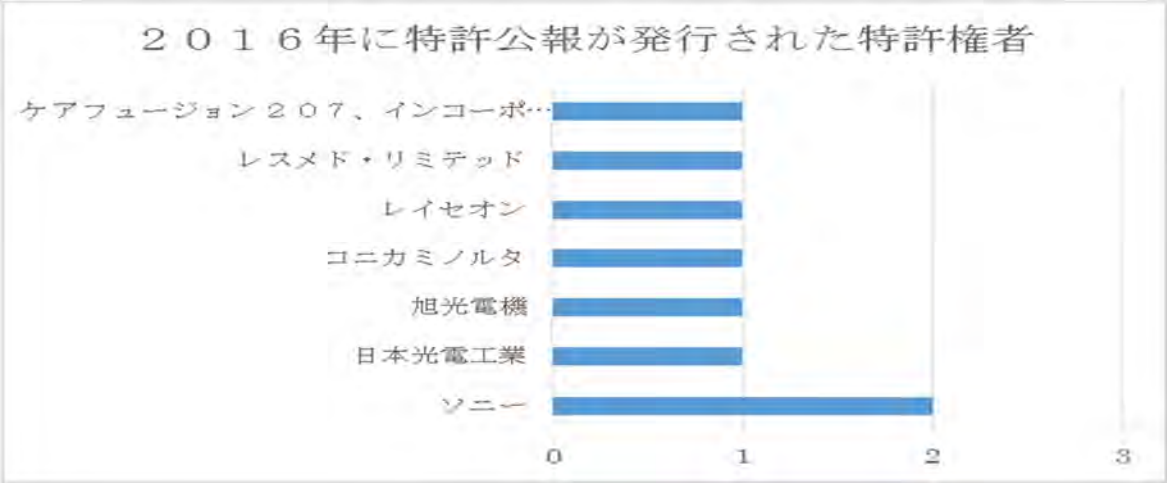


図１８　要約又は特許請求の範囲に「パルス」または「脈」または「拍」を含み且つ「酸素飽和」または「酸素濃度」を含み且つ「光」を含んでいる特許出願であって２０１６年に特許公報が発行された件数を特許権者別に示す。技術開発は不活発である。

（５）　資料

（資料２８）

特開昭５０－１２８３８７「発明の名称：光学式血液測定装置」

（資料２９）

特開昭５０－１４３３８０「発明の名称：オキシメータ」

（資料３０）

コニカミノルタのWEB

https://www.konicaminolta.jp/healthcare/knowledge/details/history.html

第８節　光脳機能画像計測法（ＮＩＲＳ）

・ＮＩＲＳは、「近赤外分光法を利用した脳機能画像計測法」を指すものとする。

・近赤外分光法による脳機能計測については１９９０年代の初めから論じられていたが、画像化する装置は、１９９６年、日立製作所が世界で初めて製作した。

（１）　研究者・技術者

(i)　光トポグラフィ法

頭部を覆うように多数の照射光用ファイバを配置し、それら照射光用ファイバから周波数変調した照射光を頭部内に照射する。照射光は、大脳皮質まで透過し、そこで散乱され、散乱光が頭部外に出てくる。この散乱光を照射光用ファイバの近傍に配置した検出光用ファイバで受光する。検出光を同期検波すれば、各照射光用ファイバに対応付けした各散乱光に分離できる。すなわち、各照射光用ファイバに最も近い大脳皮質の各部分に位置付けした各散乱光に分離できる。各散乱光の強度は大脳皮質の各部分の血液量を表しているので、大脳皮質における血液量の分布を表す２次元画像（断層像ではない）が得られることになる。これが光トポグラフィ法の原理である（実際はさらに改良されている。）。この光トポグラフィ法は、１９９４年、日立製作所の牧敦らにより開発された。（資料３１）

（２）　企業

(i)　浜松ホトニクス

１９８８年、世界で初めて脳酸素モニタＮＩＲＯを発売した。プローブ装着位置近傍の脳部分の酸素濃度の時間変化波形を表示する装置である。現在は最大１６チャンネルの「製品名：マルチファイバアダプタシステム」が販売されている。

（ii）　（株）日立製作所

１９９４年７月１４日、「吸収物質濃度の空間分布画像化方法」を特許出願した（特願平６－１６１８２３）。発明者は「牧敦、アディ・ボネン、伊藤嘉敏」。（資料３２）

１９９５年、脳にマッピングした血液量の２次元画像を表示する「製品名：光トポグラフィ装置」を世界で初めて発売した（**写真６**）。

写真６．光トポグラフィ装置　（株）日立メディコのＷＥＢより

（iii）　（株）島津製作所

２０１２年８月、可搬型光脳機能イメージング装置および研究用ポータブル光脳機能イメージング装置を発売した。

（３）　中谷医工計測技術振興財団委託事業

ＮＩＲＳに関連のある助成研究は、脳計測関連ではないが、２件の実績がある。

（４）　特許

（i）　特許出願件数の推移

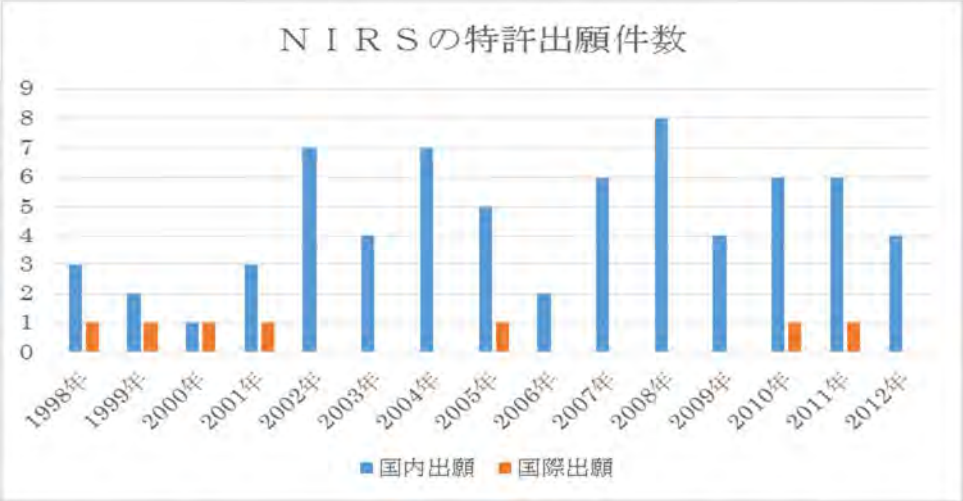


図１９　特許請求の範囲または要約に「光」「散乱」を含み且つ全文のどこかで「近赤外」「脳」の文言を含み且つ「画像」または「分布」を含んでいる特許出願の１９９８年から２０１２年までの各年の件数を示す。日本だけが関心を持っているように見える。

（ii）　主な特許権者

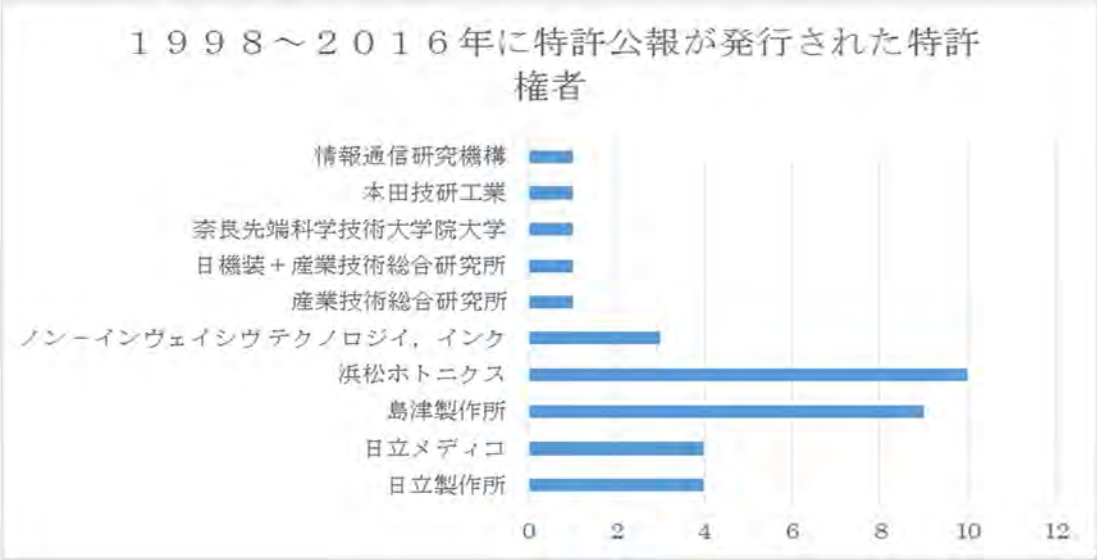


図２０　１９９８年から２０１６年に特許公報が発行された特許権者である。件数が少ないため、１９年間の合計を示した。日立グループ、島津製作所、浜松ホトニクスが御三家といえる。

（5）　資料

（資料３１）

牧敦「光トポグラフィの点と線―脳、そして人間科学へ―」日立評論２００６．０５

http://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/2006/05/2006_05_00_professional.pdf

（資料３２）

特開平８－２９３２９「発明の名称：吸収物質濃度の空間分布画像化方法」

第２章　中谷医工計測技術振興財団（ＮＦ）による研究助成の実績

有近紳志郎・鈴木良次

第１節　医工計測技術の構成

計測技術の一般的構成を**図１**に示す。

計測技術は、そのユーザが、ある対象の構造・機能・状態の解明に必要なデータ、情報を取得するためのツールである。このツールは、ユーザ自身が開発することもあれば、計測技術の専門家によって開発され､ユーザに提供されるものもある｡時代をさかのぼれば、ユーザと開発者が同一というケースが多いが、技術の高度化によって、計測技術の開発を専門とする技術者が出現し、開発者とユーザの分離が進んだ。その結果、多くの生産現場での生産性の向上が見られた一方、ユーザにとって必ずしも必要ではないと思われるツールも開発されるという事態も生じた。このことは医工計測技術を考える上で大切なことであるが、この議論は別途取り上げることとし、ここでは、計測技術の構成についての説明を続ける。

対象が発する情報をユーザが利用可能にするためのツールが計測技術である。最も単純な例の一つに、水銀体温計がある。体温は手の感覚でも大まかにはわかるが、熱による水銀の膨張とそれを水銀柱の上昇という方法で、ユーザに視覚情報として提示している。この場合、一次情報は熱として発せられ、水銀の膨張現象を利用した変換器によって水銀柱の長さに変換され､ユーザに表示される｡もう一つ､単純な例を挙げれば､聴診器がある｡体内の臓器や呼吸や血流の状態を知るため、そこで発せられている音の正常・異常を聴診する。体内から発せられる１次情報は音であり、それを医師に聞こえるように音量を拡大し聴覚に提示する装置が聴診器である。

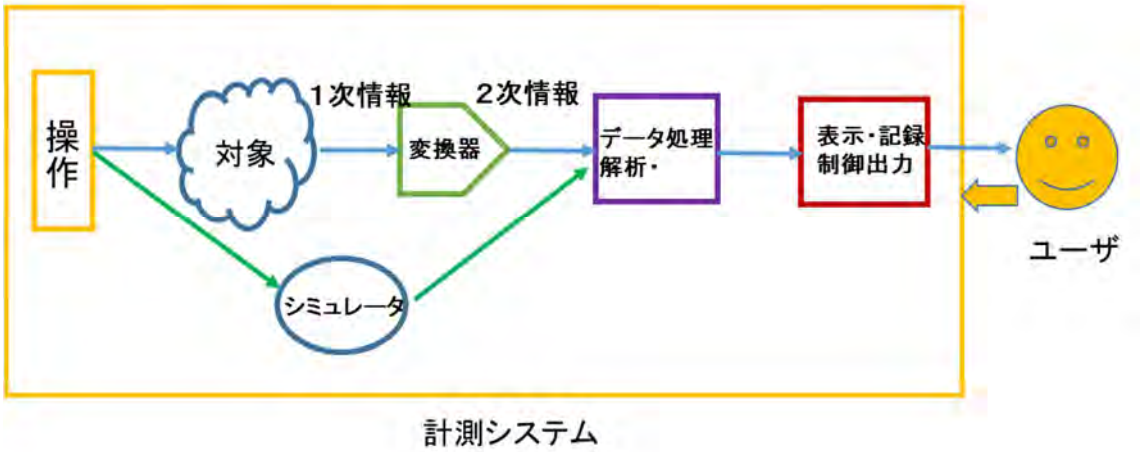


図１． 計測システムの構成

さて、本章で扱う医工計測技術は、体温計や聴診器のように単純なものではなく、図１にも示したように､複数の要素が組み合わさって一つのシステムを構成している｡そこで、

本章では以降、医工計測技術を**医工計測システム**と呼ぶことにする。

医工計測システムは、より複雑になれば、変換器も一つではなく、１次変換器、２次変換器と重なっていく。その場合、多くの計測システムでは最後の変換器の出力が電気信号になる。もちろん、体温計や聴診器の例でみたように、圧力、流量、変位、音響など力学量や音響量など電気信号以外の量を最終段階まで利用したものもある。しかし、電気量が多く利用されるのは、その後の処理・解析・表示また制御用出力としての取り扱いに便利だからである。第１部の脳を診る技術で取り上げた脳波計は、脳神経細胞の活動電流が計測対象であるので、電極を介して電気的情報をそのまま取り込んでいる。一方、ＮＩＲＳは、脳血流に生じる変化を近赤外光の散乱特性を利用して光量変化に変換し、さらに受光器で電気量に変換している。そのおかげで、画像処理と表示が容易になっている。

さらに、変換器からの出力（生データ）をそのままユーザに提示するのではなく、利用しやすい形に処理したり、解析したりする必要のある場合がある。また、必要に応じて、情報は記録される。計測システムとして、変換器だけでなく、データ解析、記録、表示装置も重要な要素である。ここで付け加えるなら、計測対象のモデル、シミュレータも、計測システムの構成要素として役立てられている。

変換器は英語の transducer をカタカナにして**トランスデューサ**と表記されるが、類似の用語でセンサ(sensor)も使われる。trans が一般的な「変換」を意味するのに対し、sense は「感じる」であることから、ここでは、計測対象からの１次情報を対象とした１次変換器を**センサ**と呼ぶことにする。

また、「計測」と類似の「測定」という用語もある。この違いについて、古い資料ではあるが、平成１２年７月１７日答申の日本学術会議工学共通基盤研究連絡会議計測工学専門委員会報告によると、『**「計測」**とは、計測の問題が生じ、目的に添って測定計画を立て、測定を実施し、データを解析し、測定結果を有効に活用するアクションを取るための体系である。その中での中核となるのが、「測定」という作業である。**「測定」**とは、対象の量を基準に照らし合わせて数値として表現する作業である。その数値は測定値として報告され、それに基づいて、判断が行われ、アクションを取ることになる』とある。つまり、「計測」は問題解決のための「測定」を含む行為の総体を指すことになる。「医工測定」ではなく「医工計測」という用語の使われていることに注目したい。

さて、計測技術の一つの分類法として、**受動計測**と**能動計測**という言葉がある。これは物理学の分野で使われた分類である。蒲生秀也［１］は、加速器による原子核の実験での観測を能動計測の例として挙げている。この実験では、高エネルギー粒子を原子核にたたきつけ、放出される粒子を観測している。一方の受動計測の例として挙げているのは、天文学での観測などである。そこでは自然に発生した変化を観測するのみで、外部からの操作はない場合である。これを医工計測分野にあてはめれば、前例の水銀体温計や対象からの熱輻射を計測するサーモグラフィーは受動計測の例といえよう。安静状態での脳波計測もその一例である。他方の能動計測は、計測対象に何らかの操作を加え、その結果、対象

が発する情報を計測するものである。脳波計測でいえば、被験者に感覚刺激を与え、その結果生じる脳波の変化を見る事象関連電位の計測が能動計測の典型例である。

ところで、上記の例では、外部入力が対象の動態に影響を与えるが、医工計測の分野では必ずしも動態に影響を与えないものもある。入力は与えるが、それはあくまで計測のための手段であり、対象の動態に影響を与えないことを前提とした計測が行われている。例えば、細胞内カルシウムの動態を調べるため、カルシウムと結合して蛍光を発する染料を細胞内に導入し、蛍光顕微鏡で観察するなどである。

そこで本章では、計測システムを、能動・受動という２分ではなく、計測対象に加える処理の有無、動態への影響の有無という４つの類型での分類を試みる。

図２に４つの類型を示す。

図２　計測システムの４類型

類型１　無処理・無動態変化

対象に何の処理も加えず、動態に影響のない入力（入力なしも含む）を与えての計測

（例：体温計測、自発脳波計測、超音波エコー、レントゲン写真など）

類型２　無処理・有動態変化

対象に何の処理も加えず、動態に影響のある入力を与えての計測

（例：知覚刺激に対する誘発脳波を計測、ツベルクリン反応など）

類型３　有処理・無動態変化

対象に処理を加え、動態に影響のない入力（入力なしも含む）を与えての計測

（染色剤、造影剤、蛍光分子などを付与しての計測）

類型４　有処理・有動態変化

対象に処理を加え、動態に影響のある入力を与えての計測
（例:光感応物質と抗がん剤を結合した薬剤をがん細胞近傍に入れ、光を当てがんの変化を診る。）

計測システムを評価するとき、何を対象としているか、どのような変換器、解析手法、記録手法、表示手法を使うかと並んで、どのような処理を施すかも、今や重要なポイントになったといえる。

医工計測技術とは

ここで、当財団による研究助成募集案内による医工計測技術の定義を見てみよう。そこでは「生体、その構成体（分子、細胞小器官、細胞、臓器など）および薬物動態を対象にした計測技術、情報解析技術などに関する研究であり、医療、健康管理、介護などに関して有用な情報を与えるもの」とある。また、交流事業の申請書には、医工計測技術とは「生命科学、医療が対象とするモノ・コトの構造、機能、状態などを客観的、定量的あるいは定性的に記述し、生命科学と医療の進歩に貢献することを目指す技術である。技術には、物理・化学・生物学的手法のみでなく、解析、シミュレーション、データ処理など数理的手法も含む」とある。両者の表現には若干の違いがあるが、まとめると次のようになる。

医工計測技術とは、「生命科学および健康管理・介護を含む医療が対象とする分子・細胞から個体・集団に至る生命現象の階層の各レベルとレベル間の関係で見られるモノ・コトの構造・機能・状態が計測の対象となる。その手法としては、物理・化学・生物学的手法とともに、数理的手法も含まれる」

この枠組みの中で、それぞれの申請課題が、図１、図２に描いた計測システムに照らしてどのように位置づけられるか、以下では、その分析を試みた。

［１］磯部　孝、蒲生秀也「測定の精度：岩波講座　現代物理学Ⅳ．A.　岩波書店 1955

第２節　ＮＦの助成課題から見た医工計測技術３５年の動向

（１）計測対象と手法３５年の変遷

３０周年記念誌に寄稿した「助成課題から見た医工計測技術３０年の動向」では、助成対象となった計測システムを、計測対象と計測手法の２つの軸で、５年毎に分類・集計し、動向を分析した。そこでは、計測対象を、階層性に従って、物質・分子、細胞、組織、器官、個体、集団・環境、その他・一般に分類した。他方、手法については、取り扱われる情報の種類によって、力学量、電磁気量、電子工学、光学量、熱学量、音響・超音波、放射線、化学・分子識別、画像、解析・モデル、その他・一般に分類した。これがきわめて不十分な分類法であることは、第１節の議論からも明らかである。まず、取り扱う情報の種類であるが、対象自体が発している情報と、計測システムが扱う情報の区別をつけてい

ないことである。例えば、体温計が対象としている熱量や聴診器が対象としている音は、対象自体から生じるものであるが、超音波エコーで扱う超音波やレントゲン写真でとらえられるＸ線は、もとは人体から出ているものではない。一方、計測システムの設計という視点から、計測対象を、階層性に沿って分類することにどのような意味があるかの検討も未着手である。計測対象こそ、物理量、化学量、形態などの幾何学量などによって分類する方が、意味があるかもしれない。

このような議論があるのは承知で、３０周年記念誌の分析のその後を調べ、改訂を試みた。

図３に、３０周年記念誌でも報告したが、１９８４年の第１回から２０１３年第３０回までの助成課題を、１０年ごとにまとめ、対象－手法の軸で分類した時の分布を３つのグラフで示す。また、それ以降の３１回から３４回までの助成課題について、同じく対象―手法別に分類した時の分布を４番目のグラフとして追記した。この図から、３０年間の課題についていえることは、光学計測関係は別として、初期において多くの課題があった、手法別では超音波や放射線などの物理計測がバイオセンサなどの化学計測へ、また、対象別では組織、器官などから細胞・分子への移行が大きな傾向としてみられるということである。この傾向は３１回以降、一層顕著に現れている。なお、光学計測については、多光子顕微鏡など新しい技術の開発が続き、それが細胞・分子を対象とした研究に多用されていることから、助成課題としては依然多数を占めている。また、バイオセンサについても、ナノテクノロジーとの結びつきが進み、従来の化学計測から物理計測への移行もみられる。これらの動向を反映した分析が今後必要である。

図３　助成研究課題（第１回から３４回まで）を対象―手法別に分類した時の分布グラフ

（２） 基本研究と要素研究での分類

計測システムの研究を基本研究と要素研究に分け、年度ごとの変遷を見た。

（ｉ）**基本研究**とはシステムの全体構成または方法の全体プロセスに関わる研究であるが、下記の通りいくつかの類型に分かれる。基本研究では計測対象・計測情報は、全体としての装置/方法により決まる。

a. 新たな計測装置、計測方法の原理を提示する研究。（新原理）
b. 既知の計測装置、計測方法を追試する研究。（追試）
c. 既知の計測装置、計測方法の未知の構成を提示する研究。（次世代型）＊1
d. 既知の計測装置、計測方法の既知の構成を追試する研究（追試）
e. 既知の計測装置、計測方法の未知の利用分野を開拓する研究。（流用）
f. 既知の計測装置、計測方法の既知の利用分野を追試する研究。（追試）
g. 外見的には「要素」の研究でも、その要素が基本の有用性を想定外に拡大する場合　または新しい原理の計測装置または計測方法を導く場合は「基本」としてもよい。

＊1 ある計測方法が既知であるときに、その計測方法の実施で使う材料（例えばクラゲ由来の蛍光物資）を別の材料（例えば、蛍由来の蛍光物質）に置換したり、その計測方法の実施で使うプロセス（例えば質量で分類する）を同等の結果が得られる別のプロセス（例えば大きさで分類する）に置換したり、その計測方法の実施で使う一つのプロセス（分子Ａに分子Ｃを付加する）を同等の結果が得られる２つのプロセス（分子Ａに分子Ｂを付加した後、分子Ｂを分子Ｃに置換する）に分けたりする事例などを想定。

（ⅱ）**要素研究**とは装置の部品または方法の一部のプロセスに関わる研究。当該研究が画期的進歩をもたらす場合でも「要素研究」とする。要素研究では着目する計測対象・計測情報は、基本研究の計測対象・計測情報とは異なることが多い。

例１） 基本の a（新原理）：サンプル液を電極上に流し、電極に吸着できた酵素量を電位で計測する研究（計測対象：酵素量、計測情報：電磁気量（電位）、酵素量を変化させ、それに対する電位の変化を見る。）

例２） 基本の c（次世代型）：全体をＩＣ化する。前処理プロセスと計測プロセスを連続化する。

例３） 要素：例１において、要素「電極」をコーティングし、「電極」の劣化を抑制する研究。

要素研究で着目する計測対象はコーティング材、計測情報は電極劣化速度。「一定酵素量のサンプル液を流し続け、電位の時間変化を見る」ことを、コーティング

材を変えて繰り返し、劣化の遅いコーティング材を見つける。

例４）　要素：例１において、要素「電極」を洗浄し、「電極」の劣化を抑制する研究。要素研究で着目する計測対象は洗浄液、計測情報は電極劣化速度。「一定酵素量のサンプル液を流し続け、電位の時間変化を見る」ことを、洗浄液を変えて繰り返し、劣化の遅い洗浄液を見つける。

この分類基準で、第１回から第３２回までのうち、１回から５回、１６回、２０回～２３回、３１回、３２回、３５回の１２回分について、助成課題を基本研究と要素研究に分類した結果を**図４**に示す。

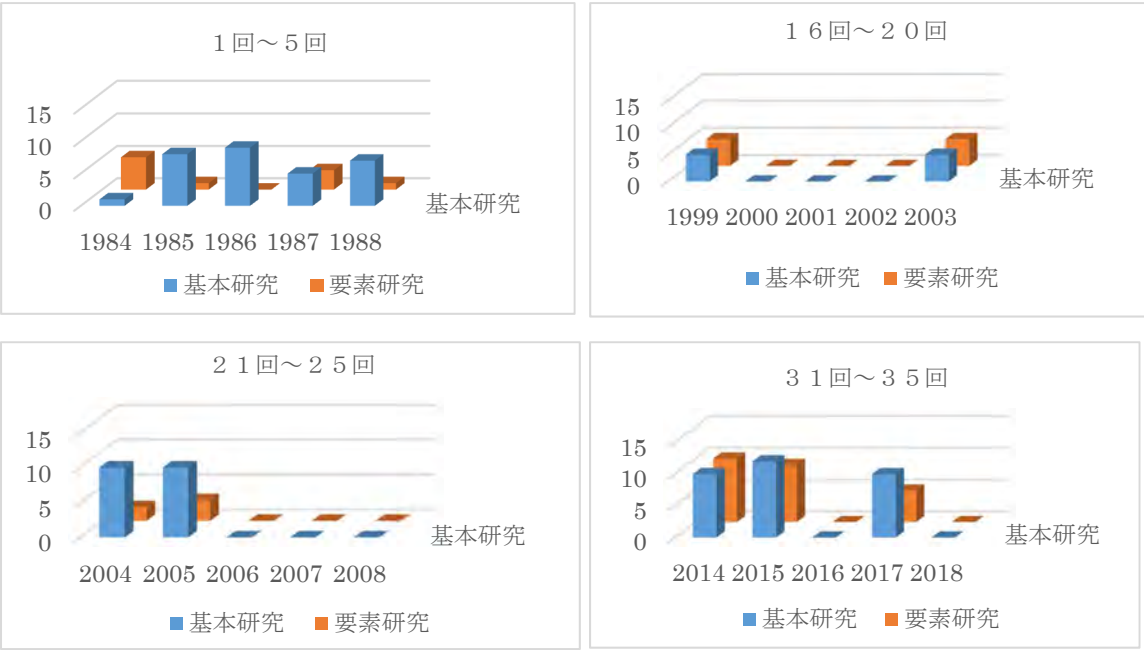


図４　助成課題の基本―要素別分類の変遷

大まかな傾向として、初期の５年間は、基本研究が平均７１．４％で、要素研究を凌いでいるが、その後は、基本研究が要素研究よりやや多いという傾向はあるが、両者はほぼ半々といえる。なお、研究対象、手法別での基本研究と要素研究の割合の傾向分析は今後の課題であるが、特定の傾向は見られていない。

（３）　第３１回、第３２回助成の実績（達成度）

３１回、３２回の特別研究、開発研究、奨励研究助成課題について、提出された成果報告書に基づき、研究開始時の目的と報告された研究成果から、達成度を分析した。

以下に課題ごとに、①計測対象、②計測情報、③研究のポイント、④研究開始目的、⑤研究成果、⑥達成度の順に記述する。

（ｉ）３１回特別研究　６課題全てで達成

課題１．①器官　②電磁気量　③装置　④生動物の蝸牛外リンパ液におけるループ利尿薬の濃度動態と内リンパ液電位の同時リアルタイム測定をおこなう　⑤ダイヤモンドマイクロセンサと微小ガラス電極を搭載した計測装置を構築し、５秒に１度の時間分解能でモルモットの測定に成功した。さらにラットの脳の薬物動態測定にも適用できた　⑥達成

課題２．①器官　②光学量　③画像解析　④移植前の角膜内皮細胞の品質管理と移植後の組織の予後評価の双方を行えるような定量指標を確立する　⑤細胞群に対して動径分布関数を用いた解析手法が有効であることを見出した　⑥達成

課題３．①物質・分子　②化学分子識別・電磁気量　③装置　④マイクロＲＮＡを超高感度に電気化学検出をする　⑤金蒸着したシリコンナノピラーに核酸プローブを固定化した電極デバイスを作成し、電気化学遺伝子（ＤＮＡおよびＲＮＡ）検出を超高感度化できた　⑥達成

課題４．①器官　②光学量　③装置　④生体内心内膜側冠微小血管を観察する　⑤近紫外線蛍光顕微鏡によりイヌ生体内心内・外膜側微小血管の観察が可能であった　⑥達成

課題５．①器官　②電磁気量　③装置　④表皮層の刺激に対する応答を観察する　⑤無痛注射針塩橋を用いた小型表皮電位測定プローブを作製し、マウス及びブタの皮膚表皮電位を測定した　⑥達成

課題６．①物質・分子　②化学分子識別・力学量（質量）　③装置　④マイクロＲＮＡ分子内メチル化修飾を一細胞内で計測する　⑤架橋型核酸をチップ基盤に搭載し、質量分析装置で網羅的に検出し、数理的統計的解析によって大容量データを処理するプラットフォームを世界初で構築した。特許申請中　⑥達成

（ⅱ）３１回開発研究　１７題中１３課題で達成。

課題１．①物質・分子　②化学分子識別・放射線　③プローブ材料　④Ａβイメージングプローブとしてのキノサリン誘導体を合成し、評価する　⑤キノサリン誘導体評価のための比較化合物としてのカルコン誘導体の合成と評価の報告だけであり、キノサリン誘導体の合成・評価は別論文で報告する予定としている　⑥中途

課題２．①細胞　②電磁気量　③装置・ＩＳＦＥＴ　④ＩＳＦＥＴを用いた細胞膜近傍微小環境ｐＨの測定による細胞膜障害性評価法を開発する　⑤ＩＳＦＥＴを用いた細胞膜障害性測定システムを構築し、新たな細胞膜障害性評価法を確立した　⑥達成

課題３．①物質・分子　②光学量　③装置・高圧顕微鏡　④高圧力光学顕微鏡を作製し、高圧下にある分子や細胞を観察する　⑤高圧機器と倒立型電動顕微鏡の組合せで、150Ｍｐａの静水圧下で微小管が短縮する様子を観察できた　⑥達成

課題４．①物質・分子　②電磁気量　③装置・アレイ電極チップ　④神経伝達物質とシナプス後電位を非侵襲かつリアルタイムに定量観測できる計測技術を開発する　⑤カーボンナノチューブ平面微小電極アレイを作製し、その電極上でドーパミンニューロンを培養

し、ドーパミン検出を行った。また、同電極上に３次元細胞集団をマウントさせてシナプス後電位を計測した　⑥達成

課題５．①物質・分子　②電磁気量　③装置・移送式マイクロアレイ　④無細胞蛋白質合成系で逆転写酵素を発現させ、その性状を解析するとともに、マイクロアレイ上で相補的ＤＮＡ合成反応を生じさせる　⑤大腸菌で発現させた逆転写酵素と同様の性状を有する逆転写酵素を無細胞蛋白質合成系で発現させた。また、マイクロアレイ上で相補的ＤＮＡ合成反応を生じさせた　⑥達成

課題６．①細胞　②光学量　③装置・マルティモーダル計測システム　④自然な状態で細胞の活動を計測する　⑤定量位相顕微鏡法とラマン分光法と自家蛍光イメージングとを併用しうるシステムを構築し、細胞の活動を計測した　⑥達成

課題７．①物質・分子　②光学量　③装置・センサチップとレーザ計測　④センサチップの各測定点にレーザを集光し反射光を計測するシステムを構築する　⑤ウェルチップを用いてグルコースを定量した。ＥＬＩＳＡチップを作製し、それを用いたＩＬ-6とＣＲＰの定量に成功した　⑥達成

課題８．①細胞　②光学量　③マウスに脳梗塞の病態を忠実に再現するモデル　④マウスによる脳梗塞モデルを作製し、脳梗塞急性期の病態を観察する　⑤マウスによる脳梗塞モデルを作製し、脳梗塞急性期の病態をＭＲＩで観察できた。また、アストロサイトの活動やＡＴＰの作用を観察できた　⑥達成

課題９．①器官　②音響超音波　③装置・リングアレイトランスデューサ　④超音波による多方向計測と多方向ドプラー計測を試行する　⑤超音波による多方向計測で無影撮像に成功した。多方向ドプラー計測については特許申請中のため記述が省略された　⑥達成

課題１０．①器官　②電磁気量　③装置・シルク電極　④シルク電極を利用した生体情報モニタリング機器を開発する　⑤密着性の高いシャツの内側にシルク電極を縫い付けて心電データを収集できた。鶏胚の脳に糸状シルク電極を刺入し、ガンマ波を観測できた　⑥達成

課題１１．①組織　②電磁気量　③装置・データ解析　④７ＴＭＲＩにおけるＩＶＩＭ-拡散強調イメージングに基づく脳循環代謝測定法の開発　⑤ラットでは脳循環代謝をある程度測定できた。ヒトでは、ソフトウエアの性能が不足で解析できていない　⑥中途

課題１２．①物質・分子　②光学量　③装置・有機ＥＬ型酸素センサ　④有機ＥＬ型酸素センサを開発する　⑤有機ＥＬ型酸素センサを試作し、酸素分圧測定が可能であることを確認した。試作品の課題も分かった　⑥達成

課題１３．①物質・分子　②光学量　③装置・微小還流針　④局所糖負荷試験システムを開発する　⑤微小還流針を試作し、グルコースの注入・回収が可能であることを確認した。しかし、正常な濃度測定は出来なかった　⑥中途

課題１４．①物質・分子　②光学量　③装置・ＰＭＴ　④自由行動に近い状態のマウスにおいて遺伝子の発現量の変化を長期的に捉える　⑤マウスに光電子増倍管を密着させて

ＰＥＲ２蛋白質の発現リズムを測定できた。５割以上のマウスで一週間程度の測定が可能だった　⑥達成

課題１５．①物質・分子　②光学量　③装置・オートトラッキング　④自由に運動している細胞集団の細胞活動を超高速に３Ｄで記録するシステムを構築する基盤をつくる　⑤高速トラッキングシステムとディスクタイプ共焦点システムを用いて、運動する細胞集団における細胞内のカルシウムイメージングを行った　⑥達成

課題１６．①細胞　②光学量　③装置・細胞伸展マイクロチャンバーアレイ　④顕微鏡下で細胞に伸展刺激を与えうるマイクロチャンバーアレイを試作する　⑤細胞に伸展刺激を与えて、変形とカルシウム濃度の変化を、蛍光指示薬を用いた実験で確認した　⑥達成

課題１７．①器官　②光学量　③装置・磁気刺激用微小コイル　④耳鳴りの発生機序を解明する。耳鳴りを事前に抑制する　⑤in vivo では神経活動を観測できず、in vitro では神経活動を観測できた。磁気刺激により神経活動に変化が見られた　⑥中途

（iii）３１回奨励研究　４課題中２課題で達成。

課題１．①物質・分子　②化学分子識別・血液生化学分析　③高分子抗がん剤補助材料　④一酸化窒素付加型ヒト血清アルブミン二量体の腫瘍内環境制御ナノ粒子としての有用性を評価する　⑤一酸化窒素付加型ヒト血清アルブミン二量体が高分子抗がん剤の効果を増大させる結果を得た　⑥達成

課題２．①物質・分子　②化学分子識別・蛍光　③計測手法　④MBD-luciferase を用いてゲノム全体のメチル化レベルを測定する　⑤MBD-luciferase を用いる手法により、非メチル化２本鎖ＤＮＡで 3.8 倍高い発光強度が観察された　⑥達成

課題３．①組織　②化学分子識別・超音波分子イメージング　③分子標的気泡　④Sonazoid-lactadherin 複合体の作成法を確立する。腫瘍血管および新鮮血栓に対する Sonazoid-lactadherin 複合体の分子標的性を評価する　⑤混合するだけで Sonazoid-lactadherin 複合体を作成する方法を確立した。腫瘍血管に対する分子標的性は確認できたが、新鮮血栓に対して一定の成果を得たものの更なる検討を要する　⑥中途

課題４．①物質・分子　②化学分子識別・蛍光顕微鏡　③発現ベクター　④生きた細胞内のゲノムＤＮＡで特定の染色体構造を可視化する　⑤Ted 応答型 dCas9-EGFP 発現ベクターを作製し、HeLa 細胞株に導入し、染色体異常を可視化できた。しかし、他の細胞での可視化では成功せず　⑥中途

（iv）３２回開発研究　１３課題中７課題で達成。

課題１．①物質・分子　②化学分子識別　③装置　④ナノ電気化学顕微鏡を開発し、細胞表面の化学物質のマッピングを行う　⑤FET センサの製作を行ったり、高速ＳＩCM を開発したりなどしたが、目的のマッピングまで至らず　⑥中途

課題２．①物質・分子　②化学分子識別　③応用　④「エクソソーム積荷定量法」を応

用して癌遠隔転移リスクの高精度な早期診断技術を実臨床レベルで開発する　⑤エクソソームの c-Met 含有密度と癌悪性度の相関関係が初めて示されたが、遠隔転移との相関関係の検証まで至らず　⑥中途

課題３．①物質・分子　②化学分子識別　③装置　④３つの方向から超高分解能顕微鏡による測定法の改良を行う　⑤インパクトステージ、ＱＤＯＴ、小サイズ・カバーガラスの３つで改良した　**⑥達成**

課題４．①物質・分子　②光学量　③材料　④電気泳動の支持体として用いうる新規なゲル材料の開発　⑤両親媒性トリスウレア化合物を設計、合成し、これによる超分子ヒドロゲルを作成した　**⑥達成**

課題５．①細胞　②光学量　③解析モデル　④血管壁損傷部位への血小板細胞接着の力学的定量理解を目指す　⑤動的３次元イメージングにより、流体力を受ける血小板細胞の接着構造を明らかにした　**⑥達成**

課題６．①器官　②力学量　③装置　④ＰVDF フィルムを用いた外径５mm のカテーテル型触覚センサを外径２mm に細径化する　⑤試作したカテーテル型触覚センサを血管モデルへ挿入し出力の確認を行った。また、アビジンとアビジンに結合能を有する機能性分子との相互作用を検出できることを確認した　**⑥達成**

課題７．①物質・分子　②光学量　③応用　④マイクロダイアリシス法を応用して心筋組織中の miRNA の動態を明らかにできる計測技術を開発する　⑤in vivo の拍動下の心筋組織間質から連続的に miRNA をサンプルリングでき、定量的 RT-PCR 法を組み合わせることで定量できた　**⑥達成**

課題８．①細胞　②光学量　③応用　④OCT 技術を応用した卵胞画像化システムの確立　⑤1 次卵胞およびそれより発達の進んだ卵胞のほとんどを画像化できた。ドップラーOCT 技術を取り入れることで解像度と解析能力を向上でき、卵母細胞の画像化にも成功した　**⑥達成**

課題９．①物質・分子　②化学分子識別　③ニューロン様活動を行わない細胞をニューロンへと分化転換する方法　④分化転換のメカニズム解析を行うとともに、瘢痕中心部に集積するミクログリアを標的として、機能的なニューロンへと直接分化転換することで、新しい神経疾患治療法開発を目指す　⑤ニューロンへの分化転換を誘導する転写因子 NeuroD1 は、ミクログリアからニューロンへの分化転換を誘導することがわかった。治療法まで至らず　⑥中途

課題１０．①器官　②電磁気量・超音波　③プローブ材料　④PA−MR デュアルイメージングプローブの開発　⑤D−glucosamine 表面被覆 MnO ナノ粒子が、PA−MR デュアルイメージングプローブとして有効であることが明らかになった　**⑥達成**

課題１１．①物質･分子　②化学分子識別　③応用　④乳癌の再発予測法 Curebest95GC は凍結検体で有効であるが、これをホルマリン固定パラフィン包埋組織検体にも応用可能にする　⑤高リスク群と低リスク群の凍結/ホルマリン固定パラフィン包埋組織ペア検体

５６例における判定一致率は 87.2% どまりであった ⑥中途

課題１２．①組織　②力学量　③装置　④細胞シートの力学的特性を計測する新たな装置を開発する　⑤医療用ポリウレタンシートの静的な力学特性を取得できたが、動的な計測はまだである。細胞シートは装置にマウントする方法を模索中である　⑥中途

課題１３．①物質・分子　②化学分子識別　③プローブ材料　④Nrf2 依存性の酸化ストレス可視化プローブを開発する　⑤Nrf2 依存性のレポータータンパク質を作成したが細胞内に殆ど浸透できず、失敗した。申請研究外になるが、ATF4 依存的な酸化ストレス可視化マウスの開発に成功した　⑥中途

（ｖ）３２回奨励研究　８課題中６課題で達成。

課題１．①物質・分子　②化学分子識別・蛍光　③プローブ材料　④RNA 二重鎖構造を捕捉しうる蛍光性プローブを開発する　⑤RNA 二重鎖との三重鎖形成反応を利用した新たな蛍光性プローブの開発に成功したが、実用化には課題が残る　⑥達成

課題２．①物質・分子　②化学分子識別・蛍光　③プローブ材料　④時間分解能、空間分解能が高い小胞体ストレスバイオセンサーを開発する　⑤複数のバイオセンサを作製したが、細胞内にトランスフェクションするだけで小胞体ストレスが生じてしまい、ストレス刺激によるバイオセンサの応答を検出することが困難であった　⑥中途

課題３．①物質・分子　②化学分子識別・Iontrap-Orbitrap 質量分析器　③計測手法　④ユビキチン化を受けた基質を同定・計測する　⑤目指した基質同定手法の有効性を確認した。定常条件のみならず、刺激依存的な基質候補の同定も可能だった。今後は、誘導型のプロモーターを用いるなどのさらなる改良が必要である　⑥達成

課題４．①物質・分子　②化学分子識別・ウエスタンブロット法・電子顕微鏡・ナノ粒子解析装置、プロテオーム解析・ヒトマップ解析　③現象発現確認　④神経変性疾患モデルを用い、疾患におけるエクソソーム分泌の変容を明らかにする　⑤PolyQ 病モデル細胞を解析し、凝集性 PolyQ タンパク質発現細胞におけるエクソソーム分泌数の亢進を確認した。また、PolyQ 病モデルマウスを解析し、発症後個体における血清中エクソソームプロテオームの変容を確認した　⑥達成

課題５．①物質・分子　②化学分子識別・蛍光　③プローブ材料　④ホウ素化合物を可視化する。発光効率の高い新規ホウ素センサの設計・合成を行い、それを用いたホウ素薬剤の簡便な定量方法について検討を行う　⑤細胞内のホウ素化合物を可視化することに成功した。有望なホウ素センサ化合物を見出し、簡便で低い濃度まで検出可能なホウ素薬剤の定量法を確立できた　⑥達成

課題６．①組織　②染色・蛍光　③装置　④運動ニューロンのシグナルで動く筋組織の収縮力変化を非接触・非破壊的に定量可能な細胞アッセイシステムの創製を目指す　⑤神経支配筋組織を構築し、運動ニューロンの細胞体に刺激を付加することで、筋組織を収縮させることに成功した。定量までは至らず　⑥中途

課題７．①物質・分子　②化学分子識別・蛍光　③計測手法　④肝臓癌に関連する腫瘍マーカータンパク質をナノ薄膜干渉基板上で高感度に検出する　⑤ナノ薄膜干渉基板がもつ蛍光増強効果により、低濃度の腫瘍マーカータンパク質を検出できた　⑥達成

課題８．①物質・分子　②化学分子識別・蛍光　③プローブ材料　④生きた動物の中での反応をリアルタイムかつ容易に評価するための分子イメージング法を開発する　⑤ANP と蛍光性量子ドットの複合体を作製し、マウスの血管に投与し、蛍光画像をニポウディスク方式高速レーザ共焦点顕微鏡で取得した　⑥達成

図５に、３１回・３２回助成課題数と１年間での申請書に記述されていた課題の達成数を示す。奨励研究はもともと挑戦的な課題への助成であるので、１年間での成果を云々すべきではないことを付記する。

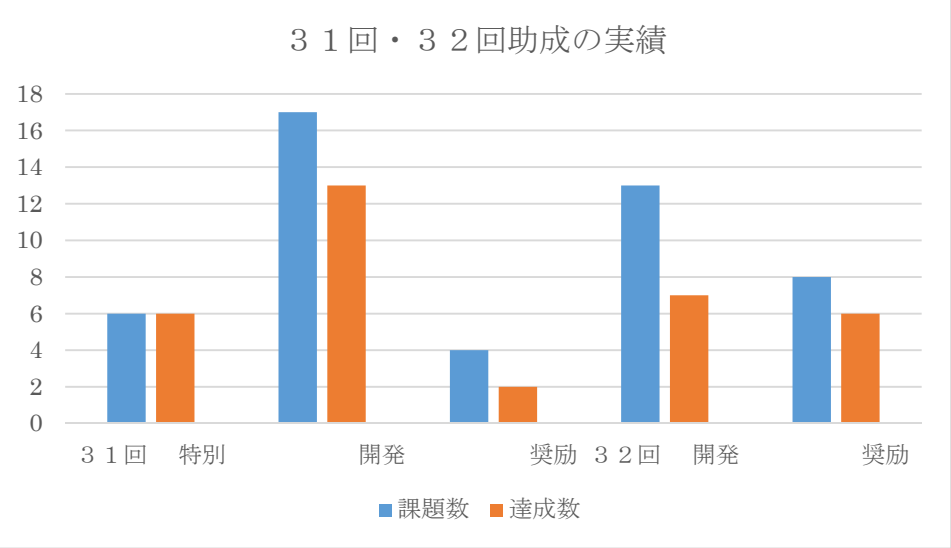


図５　３１回・３２回　助成の実績

（４）平成２９年度助成課題の分析

平成２９年度に採択された研究課題について、「要旨」　①計測対象　②計測する医工目的　③無処理・有処理（処理の内容）④計測時の対象の状態　⑤類型　⑥計測情報　⑦計測装置　⑧新規性について分析した。以下、課題ごとに記述する。なお、新規性については、筆者らの知識の範囲でのものであることをお断りする。

（ｉ）特別研究

課題１．サブ波長サイズの人工構造からなる光吸収体をナノ流路に組み込んだデバイスに分子を流し、光吸収体と分子の共鳴相互作用を利用して分光信号の増強と背景光の抑制を同時に実現することで、ゼプトモルレベルの検出感度を実現する。

①　微量の生化学分子（タンパク質や脂質など）②疾病に関連したマーカー物質の検出

環境汚染のモニタリング　③液体中に生化学分子が混在した試料液とする　④共鳴周波数の異なるメタマテリアル吸収体構造を流路内部に集積化したデバイスに試料液を流す　⑤有処理・無動態変化⑥赤外線スペクトル　⑦赤外波長可変量子カスケードレーザシステムに計測対象の吸収波長に対応するレーザモジュールを組み込み，レーザ分光光学系を構築する　⑧「マイクロデバイスにサンプルを流すこと」は普通に行われているが、それ以外は新規と思われる。

課題２．マウス腸内複数個所にあるペレットの菌叢分布の変化を調べて、菌叢分布に大きく影響を与えるマスター菌を同定する。(液塊中の菌の塩基配列から菌種を区別し、同じ菌種の計数用塩基配列の種類数から菌数を計数することで菌叢分布を得る。)
①菌叢分布　②マスター菌が見つかれば、そのマスター菌で正常（健康）な菌叢分布になるよう治療できる可能性がある　③個々の菌を液滴で包み、液滴ごとの菌に別個の計数用塩基配列を付加したのち、液滴を破砕し、液塊とする　④次世代シーケンサに導入する⑤有処理・無動態変化⑥菌叢分布　⑦次世代シーケンサ（DNA 断片をテンプレートとし、1 塩基ずつ再合成する時の蛍光強度を検出し、塩基配列を 決定する）⑧複数の腸内位置における菌叢分布の変化からマスター菌を同定しようと試みている点。(菌叢分布を得る方法は本研究者が別プロジェクトで開発した方法である。

課題３．微量尿を血液用自動前処理装置（島津製作所製）で前処理し続いて超高速トリプル四重極型質量分析装置で質量分析する計測システムを試作し、tRNA 修飾ヌクレオシドを定量的に解析できるかを検証する。
①tRNA 修飾ヌクレオシド　②ミトコンドリア病などの診断における患者や医師などの負担を軽減できる　③尿中の共雑物の除去および酸処理　④（質量分析装置による）⑤有処理・無動態変化⑥tRNA の修飾ヌクレオシドの同定と定量　⑦血液用自動前処理装置（島津製作所製）と超高速トリプル四重極型質量分析装置を組み合わせた計測システム　⑧前処理から質量分析まで行う計測システム。(計測原理は本研究者が開発済であり、前処理装置および質量分析装置はそれぞれ既存である。)

課題４．２つの光コムレーザ光源より光コムビートを得て、その光コムビートを２次元波長分散素子で波長に応じて２次元に空間分離し、それをサンプルに照射し、各波長の光コムビート信号によって励起された全蛍光をピンホールアレイを通してから集光し、光電子増倍管と高速デジタイザーで取り込み、フーリエ変換して波長ごとの信号に分離し、波長に応じた２次元位置の各画素に展開する。
①分子　②生きている細胞内部の分子の動きを直接観察できる　③顕微鏡用のサンプルにする　④２次元に配列された波長の異なる励起光を照射する　⑤無処理・無動態変化⑥蛍光:画像　⑦装置　⑧(既知の構成要素の組合せであるが、装置全体としては新規である。)

課題５． 蛍光測定が可能な実験系で全コロニー中最も早く蛍光を発するクローンを単離することを繰り返し、立体構造形成効率が最大限上昇した光増感タンパクを取得し、次いで同様のスクリーニングにより、分割後に再構成する効率が最高の光増感タンパクを取得し、その基本性能を検証する。
①内在性タンパク　②ゲノム配列等の２次元情報ではアプローチできない分子機能情報が計測できる　③標的タンパク質の遺伝子に光増感タンパク質遺伝子の一部をノックインし、光増感タンパク質遺伝子の残りの一部の発現細胞で標的タンパク質を発現させる　④光を照射し、標的タンパク質を不活性化する⑤有処理・有動態変化　⑥蛍光画像　⑦撮像装置　⑧性能を向上させた光増感タンパク質の開発（計測方法はＣＡＬＩ法として既知である）

（ⅱ）開発研究

課題１． RFP 遺伝子をマウス脱共役タンパク質（UCP-1）遺伝子座に挿入した遺伝子改変マウスを製作し、その脂肪組織中で発現している iRFP の蛍光を定量的に計測して UCP1 の発現量を明らかにし、体重との関係を観察する。
①脂肪組織中の UCP1 の発現量と体重　②UCP1 発現量と肥満/痩せの関係が定量的かつ継続的に計測可能となり、肥満治療の薬剤や対策方法をマウス個体で検証できる　③RFP 遺伝子をマウス脱共役タンパク質（UCP-1）遺伝子座に挿入した遺伝子改変マウスを製作する　④IVISSpectrum で iRFP 蛍光量を測定後、UCP1 量に換算する　⑤有処理・無動態変化　⑥蛍光強度　⑦IVIS Spectrum（パーキン・エルマー社の装置）⑧生体で非侵襲的に UCP1 量を測定できる遺伝子改変マウスを作製する点

課題２． ATFS-1 由来のミトコンドリア移行シグナルと Lon 分解認識配列を融合したレポーター遺伝子を作成し、それを内在性 ATFS-1 で転写誘導できるようにしておけば、ミトコンドリアストレスを可視化できる。PINK1 由来のミトコンドリア移行シグナルと PARL 分解認識配列を融合したレポーター遺伝子を作成し、それをミトコンドリア膜電位応答性遺伝子プロモーターで制御できるようにしておけば、ミトコンドリア膜電位異常を可視化できる。
①ミトコンドリア　②ミトコンドリアと健康（疾患）の関連性は医学研究および基礎生命科学研究を進める上で重要なテーマのひとつであり、ミトコンドリア（異常およびストレス）状態の動的変化を生体レベルで評価できる技術は多くの研究者から求められている　③遺伝子レポーターシステムを構築し、それを導入した動物モデルを作製する　④ミトコンドリアストレス剤を投与したマウスのシグナル測定、およびミトコンドリア異常関連疾患モデルを利用した病理部位での局所的なシグナル測定　⑤有処理・無動態変化　⑥発光または蛍光　⑦不明　⑧　ATFS-1 依存的レポーターまたは PINK1 依存的レポーターの開発

課題３． 膜リン脂質に特異的に結合する RNA アプタマー（抗体に代わる次世代分子標的医薬として注目されている）を、ランダム RNA ライブラリーからスクリーニングする。
①オートファジー活性変動の大きい細胞や肝臓　②膜リン脂質のイメージング技術開発、および脂質の外部からの操作、さらには膜リン脂質制御不全によって引き起こされる様々な疾患治療に向けたアプローチの道標となる　③不明　④不明　⑤不明・不明　⑥画像　⑦3 色同時取り込み可能なライブイメージング用蛍光顕微鏡　⑧膜リン脂質に特異的に結合する RNA アプタマーの開発

課題４． タンパク質間相互作用検出法を用いてチロシンキナーゼ特異的なペプチド配列を同定し、そのペプチド配列に特異的に結合する SH2 ドメインをスクリーニングし、ペプチド配列と SH2 ドメインとを用いてチロシンキナーゼ活性に応じて発光する蛍光バイオセンサを開発する。
①がん細胞内でのチロシンキナーゼの活性　②癌治療薬としてのチロシンキナーゼ阻害薬の癌細胞内での効果を治療前に判定できる　③患者から採取した癌細胞にチロシンキナーゼ活性に応じて発光する蛍光バイオセンサを注入する　④癌治療薬としてのチロシンキナーゼ阻害薬を癌細胞に注入し、光学顕微鏡で画像を得る　⑤有処理・能動　⑥画像　⑦光学顕微鏡　⑧チロシンキナーゼ活性に応じて発光する蛍光バイオセンサの開発

課題５．　階段状の石英ガラスである時間多重化プレートに励起光を入射して空間的に離散的な遅延時間を与え、空間コヒーレンスを低下させて焦点面外で誘起される多光子励起を抑制し、SI-TF 顕微鏡の観察可能な深さを向上する。また、時空間集光を用いたパターン照明により、光刺激の深さ方向の分解能を向上する。
①脳神経系の構造と機能　②光学顕微鏡の分解能を向上できる。また、観察可能な深さを深くすることが出来る　③なし　④なし　⑤無処理・無動態変化（有動態変化もあり）⑥画像　⑦SI-TF 顕微鏡+時間多重化プレート　⑧SI-TF 顕微鏡に時間多重化プレートを導入する点

課題６． 酸素透過性膜（PDMS）を用いた培養デバイスを作製し、小型肝細胞と胆管上皮細胞の共培養を行うことで、ヘリング管の生成（毛細胆管と胆管の結合）を試みる。このとき、培養組織内部の胆汁成分を蛍光反応によって可視化・計測・解析することで、ヘリング管の生成を確認する。
①胆汁成分　②胆汁排泄を有する肝臓培養モデルの開発は創薬研究・肝再生医療において喫緊の課題である　③酸素透過性膜（PDMS）を用いた培養デバイスを作製し、小型肝細胞と胆管上皮細胞の共培養を行うことで、毛細胆管と胆管を結合するヘリング管の再生を試みる　④培養組織内部の胆汁成分を蛍光反応によって可視化・計測・解析することで、

胆汁排泄（毛細胆管と胆管の結合）を確認する　⑤有処理・無動態変化　⑥画像　⑦共焦点レーザ顕微鏡を用いた蛍光タイムラプス撮影を行い、画像の輝度解析によって胆汁輸送を定量的に評価する　⑧胆汁排泄を有する 3 次元培養モデルの開発

課題７． 蛍光標識を得るためにクリックケミストリー法を用いてアルキン化した脂肪酸を培養細胞に取り込ませた後、細胞を急速凍結し、割断し、エッチングして、脂質の疎水性領域をむき出しにしたレプリカ膜を作製し、biotin-azide と反応させることにより蛍光画像を取得し、脂肪酸の分布を微細レベルで明らかにする。
①細胞内の脂肪酸　②脂肪酸が持つ生理活性化発現機序の解明を目指す　③アルキン化した脂肪酸を細胞に取り込ませた後、急速凍結し、割断し、エッチングして、脂質の疎水性領域をむき出しにしたレプリカ膜を作製する。生体膜に脂肪酸を投与してから急速凍結するまでの時間を変える　④biotin-azide と反応させることによりレプリカ膜の蛍光画像を取得する　⑤有処理･無動態変化　⑥画像　⑦電子顕微鏡　⑧エッチングすることにより、脂質の疎水性領域をむき出しにしたレプリカ膜を作製する点

課題８． 励起光を必要としない近赤外光発光カルシウムプローブを開発し、脳スライスに発現させ、光で視交叉上核の神経活動を操作しながら室傍核の神経活動の変化を光計測する。また、自由行動下マウスの室傍核の細胞種特異的に近赤外光発光カルシウムプローブを発現させ、睡眠覚醒に伴う神経活動変化を光計測する。また、遺伝子改変技術を用いて近赤外発光カルシウムプローブを組み込んだレポーターマウスを作成し、室傍核に発現させ、室傍核の神経活動を生体外から光計測する。
①室傍核のカルシウム　②無麻酔・無拘束動物の生体深部の神経活動を非侵襲的にリアルタイム計測できる　③励起光を必要としない近赤外光発光カルシウムプローブを組み込み、発現させる　④特になし　⑤有処理・無動態変化　⑥画像　⑦光電子増倍管　⑧励起光を必要としない近赤外光発光カルシウムプローブの開発

課題９． SMART プローブ（RIPK3 が MLKL と会合することで高次構造が変化することをモニタリングできる FRET プローブ）がネクロプトーシスを検出するメカニズムを解明する。また、SMART プローブが特異的にネクロプトーシスを検出するのか解明する。さらに、SMART プローブの応用や改良を試みる。
①ＲＩＰＫ３とＭＬＫＬの会合　②非アポトーシス細胞死の一つであるネクロプトーシスをイメージングできる可能性がある　③SMART プローブを細胞に発現させる　④ミトコンドリアの膜電位を低下させる CCCP 処理などによりネクローシスを誘導する　⑤有処理・有動態変化　⑥画像　⑦光学顕微鏡　⑧ネクロプトーシスを特異的に検出する SMART プローブの開発

課題１０．グルコース、ピルビン酸、乳酸に対するマルチカラーの輝度変化型センサを開発する。また、培養細胞への適用可能性を検証する。さらに、グルコース、ピルビン酸、乳酸の各センサをアストロサイトおよびニューロンに導入し、アストロサイト―ニューロン乳酸経路によるスパイン増大制御機構の解明を試みる。
①グルコース、ピルビン酸、乳酸　②グルコース、ピルビン酸、乳酸を同時に計測できる　③グルコース、ピルビン酸、乳酸に対する各センサを細胞に導入する　④特になし　⑤有処理・無動態変化　⑥蛍光強度　⑦蛍光強度の測定器　⑧グルコース、ピルビン酸、乳酸に対するマルチカラーの輝度変化型センサの開発

課題１１．「抗体に付加した光感受物質 IR700 の親水性が光により疎水性に急激に変化することで細胞膜上にて突然に凝集し、物理的な細胞膜障害として働き、浸透圧差により細胞が破裂する」との仮説を検証するため、（１）IR700 のスルホン基側鎖が光により遊離することを、質量分析計を用いて計測し、親水性が疎水性に変化することを検証する。（２）光により凝集体が形成されることを Aggregate Sizer や Aggregate Imager などを用いて定量的に検証する。（３）光により細胞表面から失われる蛍光（IR700 は凝集すると蛍光を失う）と細胞内のルシフェラーゼ（細胞死により発現する）の相関性を計測する。
①IR700 のスルホン基側鎖、凝集体のサイズ・質量、ルシフェラーゼ　②Photoimmunothreapy (PIT)によるがん治療の機序を解明することで、局所治療法の進展に寄与する　③がん細胞表面の抗原に特異的な抗体に光感受物質 IR700 を付加した分子による薬剤を投与する　④光を照射する　⑤有処理・有動態変化　⑥サイズ、質量、蛍光強度、画像　⑦質量分析、光学顕微鏡　⑧光治療のメカニズムとして従来提唱されていた酸化ストレス説と異なる仮設を検証しようとしている

課題１２．神経を接続した心筋の活動電位を計測できるように既存のモーションイメージング機を改造する。
①心筋細胞　②分化細胞の非侵襲診断を可能にする　③iPS 細胞などから分化した心筋細胞に、試作した細胞―神経接続デバイスを用いて、神経を接続する　④細胞―神経接続デバイスを、改造したモーションイメージング機にセットする　⑤有処理・有動態変化　⑥活動電位、画像　⑦改造したモーションイメージング機　⑧心筋細胞の画像と活動電位を同時計測する点

課題１３．全身循環をネットワーク構造として捉えた血流シミュレーションと、様々なモダリティからの医用計測データ等価手法を取り入れ、脳循環動態を予測するシミュレーション・システムの開発を行う。
①心筋細胞　②手術による形状変化に伴って変わる脳循環内の血行動態を予測できる　③様々なモダリティからの医用計測データを収集する　④特になし　⑤不適合・不適合　⑥

血管直径や長さ、末梢血管の抵抗値など　⑦コンピュータ　⑧様々なモダリティからの医用計測データを基にケース・スタディ的に脳循環動態を予測する点

課題１４．蛍光減衰波形の計測装置を開発し、ラットの皮膚でコラーゲンの糖化指標を得られるか、また、ヒトの口腔歯肉からコラーゲンの糖化指標を得られるかを検証する。
①ペントシジン　②コラーゲンの糖化が関与する生体老化を非侵襲的に評価でき、糖尿病の新しい指標を得られる　③特になし　④励起光をパルス照射する　⑤無処理・無動態変化　⑥蛍光減衰波形　⑦光電子増倍管　⑧コラーゲンの糖化最終産物の量を、糖化最終産物の一つであるペントシジンの蛍光に着目して定量的に評価する点

課題１５．本研究者が開発したキャピラリー型１ ステップイムノアッセイデバイスの信号検出膜（可塑化 PVC 膜）の発色基質分子を酵素反応発色基質分子で置き換えて変色コントラストを向上させ、目視およびスマートホンカメラによる画像から検出・定量を行う。
①ＣＲＰ，ＨｂＡ１ｃ，クレアチニンなど　②遠隔診療において医師が診断する際の信頼性向上・確定診断に寄与する　③微量の血液を採取し、デバイスに注入する　④目視およびスマートホンカメラにより画像を撮影・送信する　⑤無処理・無動態変化　⑥画像　⑦スマートホンカメラ　⑧疎水性のクマリン型 pH 色素を疎水性ホスホニウムカチオンと反応させて合成した「疎水性色素分子液体」の色素分子を酵素反応発色基質分子で置き換えた「酵素基質分子液体」を創製する点

課題１６．血漿中のバイオマーカー１分子を２つの金ナノ粒子で捕捉し、この二量体を光学的にデジタル計数することによりマーカー分子を定量する。二量体検出に夾雑物となるタンパクや脂質等をナノポア電気泳動・誘電泳動によりフィルタリングする
①血漿中のバイオマーカー　②リキッドバイオプシー　③２つの金ナノ粒子が ProbeDNA で結合した二量体を血漿中に混合し、ハイブリダイゼーションさせ、試料とする　④試料をナノポアフィルタ・チャンバーに入れ、電気泳動・誘電泳動によってフィルタを透過した二量体を計数する　⑤有処理・無動態変化　⑥二量体の数（バイオマーカーの量）　⑦偏光計測　⑧バイオマーカーの検出に夾雑物となるタンパクや脂質等をナノポア電気泳動・誘電泳動によりフィルタリングする点。金ナノ粒子の単体と二量体を偏光計測で識別する点

課題１７．DNA の特定のシークエンス部位に、ラマン用プローブ分子としてフラーレンを導入する。その DNA を金基板上で引き伸ばす。その DNA を銀ナノワイヤーを探針とした探針増強ラマン・蛍光顕微鏡で撮影し、DNA マッピングを行う
①DNA 上のフラーレン　②ターゲットシークエンスよりも小さな分子で修飾することで、ゲノム配列決定をも視野に入れた高密度なマッピングが可能となる　③メチルトランスフ

アーゼとクリツクケミストリーを組み合わせたラベリング技術を用いて、 DNA の特定のシークエンス部位に、ラマン用プローブ分子としてフラーレンを導入する　④D NA 溶液を金基板上に 滴下し、そのドロツプレツトをピペットで動かし、金基板上で DNA を引き伸ばす　⑤有処理・無動態変化　⑥画像　⑦銀ナノワイヤーを探針とした探針増強ラマン・蛍光顕微鏡　⑧ラマン用プローブ分子としてフラーレンを導入する点

課題１８．数十種のレクチンがアレイ状に固相化されている LMA(レクチンマイクロアレイ)・システムを用いて各レクチンのエクソソーム表層糖鎖に対する特異性を解析し、疾患特異的エクソソーム表層糖鎖の検出に適したレクチンを選抜する
①特定のエクソソーム表層糖鎖に特異的に結合するレクチンの選抜　②新たなバイオマーカーの発見に寄与する　③血中よりエクソソームを単離する　④単離したエクソソームを LMA に加え、エバネッセント波励起蛍光法により撮影し、特定のエクソソーム表層糖鎖に特異的なレクチンを探索する　⑤有処理・無動態変化　⑥各レクチンのエクソソーム表層糖鎖に対する特異性　⑦LMA(レクチンマイクロアレイ)システム　⑧LMA・システムを用いて、疾患特異的エクソソーム表層糖鎖の検出に適したレクチンを選抜する点。「レクチンーエクソソームー抗体ビーズ」によるエクソソーム定量法

課題１９．二硫化モリブデンの単分子膜に細胞接着能を有するペプチドを吸着・自己組織化させてバイオセンサを構築する
①ペプチドに接着した細胞　②細胞を動態観察できる　③バイオセンサのペプチドに細胞を接着させる　④励起光を照射し発光強度の増減・スペクトル変化および電気計測によって細胞の分子レベルの変化を観測する　⑤有処理・無動態変化　⑥発光強度および電位　⑦二硫化モリブデンの単分子膜に細胞接着能を有するペプチドを吸着・自己組織化させて構築したバイオセンサ　⑧2 次元ナノ材料によるバイオセンサに細胞を捉える足場としてペプチドを用いる点

課題２０．炭化ケイ素半導体表面の低欠陥エピ層の側面から X 線を吸収するように角度をつけて炭化ケイ素半導体を配置したフォトンカウンティング検出器を開発する
①臓器　②高感度・高速動作の X 線検出が可能　③特になし　④特になし　⑤分類に適さず⑥　線画像　⑦Ｘ線ＣＴ　⑧ケイ素半導体を用いてフォトンカウンティング検出器を作製する点

上記平成２９年度特別研究５件、開発研究助成課題２０件について、計測対象①と手法⑦を抜き取り、一覧を**表１**に示す。

29年度助成課題（対象・手法）データ

計測対象	計測手法
微量の生化学分子	レーザ分光光学系
菌叢分布	次世代シーケンサ
tRNA修飾ヌクレオシド	血液用自動前処理装置・超高速トリプル四重極型質量分析装置
生きている細胞内分子の動き	光電子増倍管・デジタイザー
内在性タンパク	撮像装置
脂肪組織中のUCP1の発現量と体重	IVIS Spectrum
ミトコンドリア	不明確 膜電位異常を蛍光などで検出
オートファジー活性変動の大きい細胞や肝臓	蛍光顕微鏡
がん細胞内でのチロシンキナーゼの活性	光学顕微鏡
脳神経系の構造と機能	SI-TF 顕微鏡+時間多重化プレート
胆汁成分	共焦点レーザ顕微鏡を用いた蛍光輝度解析
細胞内の脂肪酸	電子顕微鏡
室傍核のカルシウム	光電子増倍管
RIPK3とMLKLの会合	光学顕微鏡
グルコース、ピルビン酸、乳酸	蛍光強度の測定器
IR700のスルホン基側鎖、凝集体のサイズ・質量	質量分析器
心筋細胞	改造したモーションイメージング機
心筋細胞	コンピュータ
ペントシジン	光電子増倍管
CRP，HbA1c，クレアチニンなど	スマートホンカメラ
血漿中のバイオマーカー	偏光計測
DNA上のフラーレン	銀ナノワイヤーを探針とした探針増強ラマン・蛍光顕微鏡
レクチンの選抜	LMA(レクチンマイクロアレイ)システム
ペプチドに接着した細胞	バイオセンサ
臓器一般	X線CT

表１　平成２９年度助成課題の計測対象と計測手法

図６には、開発研究助成課題について、計測対象、計測手法別の統計を、**図７**には計測システムの類型、基本か要素かの統計を示す。

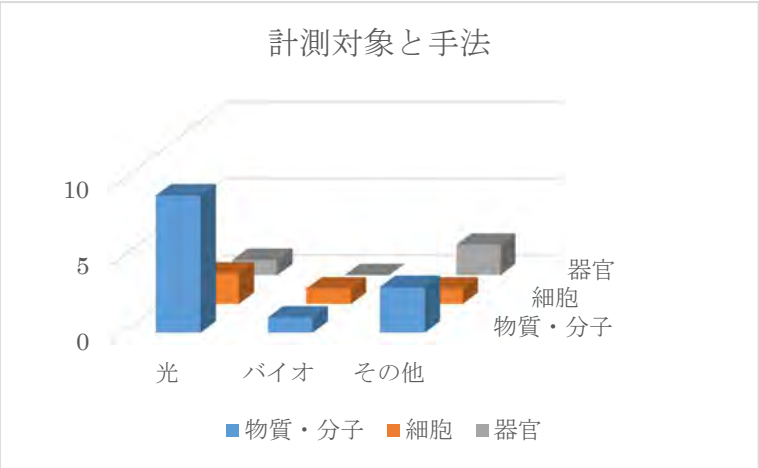


図６　開発研究２０課題の対象と手法

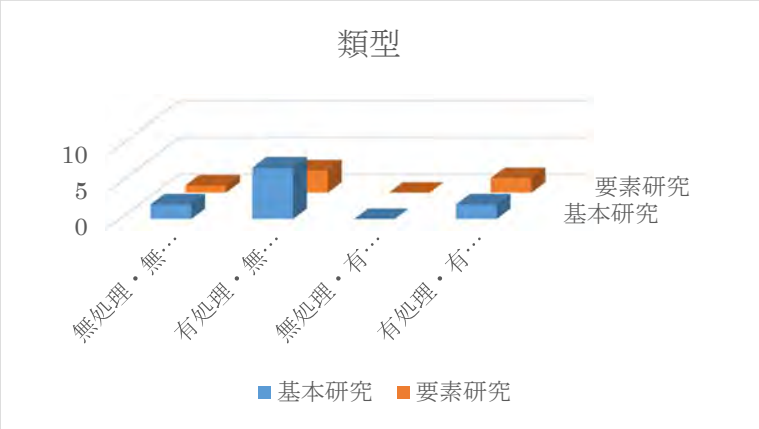


図７　開発研究２０課題の計測システムの類型（３課題は分類不可）

これらの図表から明らかなように、助成課題の多くは、分子・物質を対象として、事前の処理がなされていること、光学計測が主な手法であることが分かる。

第３節　助成審査の視点

助成課題についての分析を行ってきた。

当財団の事業目的である医工計測技術と関連分野の発展に資する研究への助成である以上、助成課題は、医学生物学の研究自体ではなく、そのためのツールである計測技術の開発研究でなければならない。

そうであるならば、申請課題は、図１、図２に示した計測システムの全体あるいは部分に関わる開発研究でなければならない。そのことが明確に伝わる申請書の提出が求められる。

審査のポイント

① ツール開発の目的・意義（要旨）:（本人を含めて）ユーザの研究の目的・意義と重なる部分もあるが、あくまでツール開発の目的・意義を簡潔・明瞭に記述する。

② 基本研究か要素研究か。そのタイプ（新原理、追試、次世代型、流用など）は。

③ 計測の対象は何か。例えば、細胞内のカルシウム動態、胎児の動き、誘発脳波の大きさなど、計測対象と対象の何を計測したいのかを具体的に記述する。

④ その上で、階層性に沿っての対象の分類（物質・分子、細胞、組織、器官、個体、集団・環境、その他）

⑤ 計測対象となる情報の類別（力学量、電磁気量、音響量、光学量、放射線、幾何学量、心理量など）を記述する。

⑥ 計測システムの類型は。無処理・無動態変化、無処理・有動態変化、有処理・無動態変化、有処理・有動態変化

⑦ 具体的な手法は。⑥の分類との対応を付け、提案する計測手法を具体的に記述する。

例えば、有処理・無動態変化計測であれば、対象に対しどのような処理を加え、どのような信号を計測するのか。計測可能な情報。

⑧ そのための装置は？

⑨ データ処理、解析、表示、記録、制御出力、シミュレータ、それぞれでの特徴、新規性があれば記述する。

⑩ 新規性は。②の分類と合せて具体的に記述する。

⑪ 研究期間と経費は？

⑫ 申請者の研究能力、医工計測技術の発展への意欲を知ることができる記述。

以上。

第３章　脳神経科学と計測技術

辰巳仁史

第１節　はじめに：計測の重要性

計測機器は科学研究を支える重要な要素である。また、科学者が工夫して作成した計測機器が医用工学の機器として生産され産業を支えている例もある。６年前ではあるが、独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター（JRDS）の報告では[1]、科学研究用の測定機器は大事な領域として位置づけられるべきであるが、日本において適切な位置づけがされてきたかは疑問であると述べられている。筆者には大学研究機関に設置されている高額な科学測定装置が海外の製品であることが多いように感じられる。この事は JRDS の報告書にも明確に述べられている。この状況は日本の産業界にとっても重大事であろうが広く認知されているかは疑問であろう。日本の行政・学術・産業の仕組み（システム）にその原因があろうと思われるが今後の研究調査が必要だと思われる。

米国の科学力がヨーロッパのそれに追いついていった時期（１９００年ごろ）に精密測定技術の発展があった。その例としては米国のマイケルソン、モレーの光の速度の精密測定があげられる。光の速度の正確な測定は、地球の公転の向きにたいしてどの向きに対して測定しても、光の速度は一定という事実を明らかにし、それが基となってアインシュタイン（在ヨーロッパ）の相対性理論に結実していく。最近では重力波の存在の確認も光の超高精度干渉計（米国 LIGO）によって行われた[2]。理論や仮説が科学の“父”とするならば、計測は科学の“母”であろう。

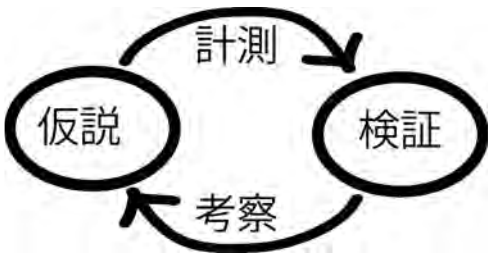


図１．仮説と計測の関係

生命科学に目を向けてみると、免疫学における重要な研究の進歩のマイルストーンは利根川進たちによって建てられた。彼らは研究における問題とそれを解くのに必要な計測技術を明確にした。当時の免疫学における最重要問題は自然界にある無数ともいえる“異物（ウイルスや細菌や毒物など）”を認識して有限な数の抗原認識機構と免疫反応を介して異物を体から排除することができる仕組みが不明であることであった。当時遺伝子の本体が DNA であることは分かっていたが、有限な遺伝子を使って作り出された免疫系の受容機構がほぼ無限ともいえる“異物”を認識して対処できるのは大きな謎であった。異物の認識に関わるのは免疫グロブリンであるのでグロブリンをデザイン（コード）している DNA の領域を正確に読むことができれば上記の謎が解ける可能性があった。DNA は四種類の塩基（AGTC）が順番に並んでいる。この AGTC の塩基の大きさと電荷はわずかに異なるので、これら塩基を DNA の端から切り離して一つずつ電気泳動し、それぞれの泳動動距離を計測することで塩基（AGTC）を決定できる。その結果 DNA を構成する塩基の並びを決定することができる。実際にグロブリンをコードする DNA が解読され、DNA の配列の並び替えがお

きることが分かった[3]。それは可変領域と呼ばれる。この可変領域の存在が無数にある抗原にたいする免疫応答を可能にしている仕組みであることが分かった。利根川たちの研究は重要な問題を解決するための仮説と仮説を検証するのに必要な計測技術の組み合わせを明確にすることが、重要であることを示している。

脳神経科学の研究の流れにおいても明確な仮説のもとに必要とされる計測が行われ、研究が大きく発展した。ホジキンとハクスレーは、神経細胞の興奮現象が特定のイオンの細胞膜通過性の変化によって起きるとする仮説の検証を高精度電気測定により達成した。その研究は開閉の２状態を持つイオンチャネルの存在を予見するものであった。イオンチャネル仮説はシングルチャネル電流記録法（パッチクランプ法）による１イオンチャネル記録によって証明され［4］。このイオンチャネルのイオンの選択性、つまり特定のイオンだけを通す仕組みはマッキノンたちが解明した。イオン選択性はイオンが通過する穴の大きさに依存する。穴の大きさがイオンの大きさと丁度ぴったりになると、その穴に入ることのできるイオンの種類は限られる。言い換えるとイオン選択性は高い。しかし、イオンは穴にぴったりとはまるので、イオンと穴の間で強い相互作用が生じてしまうので、イオンは穴に捉えられて、穴から抜け出すのに時間がかかる。そのため単位時間の間に穴を通過するイオンの数は少なくなってしまう。これではイオンチャネルとしては甚だ働きが良くないことになる。イオンチャネルを流れる電流値の正確な測定によりイオンの通過する穴の大きさが推定できるが､実際に測定するとなると必要な精度に到達することはできない。マッキノンたちはイオンチャネルを結晶化してＸ線回折分析によって、仮説検証に必要な構造情報を得ることができた。そこにはイオン透過の秘密が書かれていたのだがそれは文献にゆずる［5］。

本調査研究においてかなりの労力がヒトの“心”の測定についての考察でついやされた。生理学の教科書の中でヒトの中枢神経系における感覚や運動、記憶や人格などについての最重要な知見が、現在の日本の医療や科学研究の倫理基準では恐らく実行できない研究手法によってもたらされていることに気づく。ペンフィールドは患者の脳の外科的処置に先立って脳の様々な部位の電気刺激を行って脳の部位の機能地図を作成した。手術部の局所麻酔下で側頭葉を刺激すると患者は遠い過去の出来事を思い出して医師に語ることなどが記述されている［6］。患者の“心”がどのようにこの刺激と想起を統合的に理解するのかについても言及している。“心”の問題を考えるときに最も示唆に富んだ“心”に関する記録がこれら一連の研究の中にあると思われる。エクルス（ノーベル医学生理学賞）もペンフィールドもその研究生活の最後に“心”にたいして“二元論（心と体は別の存在とする考え方）”に行きついている。ペンフィールドの著作によれば興奮伝導とシナプス伝達だけでは“心”を理解できず、まだ発見されていない要素（グリア細胞？slow and late slow synaptic potentials? タンパク質分子の長時間状態遷移？あるいは戸川の取り上げている“気分”（第５章））が“心”に関わっているのかもしれない。

患者“HM”として有名な故人ヘンリー、モリゾさんは重度のてんかんの“外科的処置”

として海馬の摘出を受け、短期記憶の形成能力の大半を失った［7］。HM さんを被検者とした心理行動実験研究から海馬の機能の一部が明らかになった。これらの研究報告では測定はどのようになされたのだろうか？ペンフィールドの場合は脳の電気刺激を行い - その応答は患者の言葉で行われ記録された。HM さんの場合は心理行動学的なテスト課題とその評価である。

一方で、神経細胞の活動（興奮伝導）を担うイオンチャネルの研究の歴史は仮説とその証明というかたちで華々しく発展した。測定は仮説検証に必要であった。このトレンドは現在も進行していると思われる。一方でヒトの“心”に迫る上記のような研究は人権思想にもとづく患者の権利やインフォームドコンセントの広がりとともに研究は縮小していった。ペンフィールドの上記の著作においても引用された文献の多くは 1930 年代から 1950 年代に発表されている。ライフサイエンスと臨床医療分野について倫理面までも含めた俯瞰的でしかも豊富な内容の研究調査が公開されている［8］。

緻密な仮説とその検証は科学を進める王道であろう。検証は測定によってなされるので、このようなスタイルの研究は測定技術の発展を促す。中枢神経系の研究で緻密な仮説とその検証が続けられた例の一つは小脳学習の運動モデルと検証であろう。我々の体がスムーズに動くのは小脳学習のおかげである。小脳の神経回路の機能は学習機械パーセプトロンモデルで説明できるとするデビットマーの仮説［9］［10］は多くの神経科学者が検証を試みその姿が次第に明らかになりつつある。この仮説を検証するには小脳の神経シナプスでの情報の伝わり方が動物の学習に伴って変化することを示す必要があり、シナプスの構造や機能の詳細な測定が必要となった。伊藤たちはシナプスでの伝達の長期にわたる抑制を発見し上記の仮説の一部の検証に大きく貢献した［11］。北沢たちは学習中の動物の小脳の電気的な記録を行い上記の仮説の一部が実証された［12］。川人たちは脳のモデルや f MRI による脳の活動分析やロボット実験など広範な検証実験で運動学習の研究を推進した［13］。

ヒトの“心”を理解するには、まずは緻密な仮説とそれを検証するための測定法の両者の登場が必要である。

上記のように脳・神経科学の研究は大変に広い領域である。ここでは筆者の研究経験と見聞を元に、比較的最近の脳神経系や神経細胞の生理学的研究において使用されてきた計測機器の簡単な紹介を行う。近未来の研究にとって必要になる計測機器を想定するのは困難な課題である。ここではそのヒントとなるいくつかの話題を提供する。

脳・神経科学や細胞生物学や生物物理学の研究方法については優れた成書や総説も多数ある［14］［15］。詳しいことはそれらの文献を参考にされたい。また、ここで紹介する計測機器とその研究への利用については、科学技術振興機構さきがけ研究“知と構成”の OB、OG の懇話会で実施したアンケートや聞き取り調査からヒントを得たものも含まれている。（付録資料　さきがけ研究者へのアンケート）謹んでお礼申し上げる。

第２節　電気的測定法の展開：１チャネルから多チャンネルの記録法へ

微小電極法、パッチクランプ法は今でも大変強力な計測手法である。１ないし２チャンネルの記録によって神経細胞の興奮の仕組み、神経シナプスにおける情報伝達の仕組みが解き明かされてきた。その後、多チャンネル化によって脳の情報処理の機構の解明が進むと想定されたが、その道のりは簡単ではないことがわかってきた。微小電極法、パッチクランプ法、多チャネル記録法の具体的な内容についてはそれぞれの優れた総説をあげておく［16］［17］。

脳における情報処理の機構を解明するにはどれだけ多数の神経細胞の活動の同時計測が必要であるかは現時点では分からない。それはヒトを含めた高等動物の細胞レベルの脳の情報処理の機構の仮説が明解でないためである。仮説が比較的しっかりしている小脳の情報処理のパーセプトロンモデルにおいても学習に関わる教師信号である登上線維の発火頻度が低いので多数回の学習信号を集合として扱う必要があった（北沢たちの研究）。さきがけ研究“知と構成”の懇話会に北沢（大阪大学）やマルチユニット解析を専門としている桜井（同志社大学）が参加しているが、現時点においても、いくつの神経細胞から同時記録がとれれば脳の情報処理の原理が分かるかとの問に答えることは困難である。

小脳は小さい脳と書くがそこには巨大な数の神経細胞（1000 億個以上）とそれを上回る多数のシナプスが働いている。小脳運動学習の機構を解明するには、動物が小脳による運動学習をしたときに、シナプス伝達効率が実際に変化するシナプスを特定しなければならない。逆に正常な学習過程で変化するシナプス伝達の効率の変化を人工的に抑制すると、小脳の運動学習が起きないことを示す必要もあるだろう。このような実験ができるならばシナプスの伝達効率の変化が学習にとって必要十分であることが明確になるだろう。しかし特定のシナプスの伝達効率の変化を抑制する技術が現時点ではないので、この実験を行うことは困難である。また技術が進歩して望むだけのシナプス伝達を計測できるとしても、神経細胞やシナプス効率の変化をすべての神経細胞で記録をとる必要があるかも分からない。

比較的少数の神経細胞で生きているアプリジアなどの場合に神経節には数千個の神経細胞が含まれその内の数百については電位感受性色素（後述）による神経活動の同時記録が可能である［18］。それら多くの神経細胞は緩やかに興奮や抑制の相互作用をしており次第にスパイクの頻度が上昇してエラ引っ込めのような行動に移行するようだ。もし多数細胞からの多数の興奮パターンを見ることができても、アプリジアが次に行う行動を予見することは難しいだろう。多数の神経細胞からの同時記録ができれば神経節細胞群の行っている情報処理の仕組みが分かるわけではなさそうである。

線虫を用いた実験系では、一個体に約 300 個の神経細胞が含まれ、同時複数個の神経活動の記録がとられている［19］。しかしアプリジアと同様に、線虫が何を考えているかはその神経の活動記録を見ても明確に答えることは難しいようだ。動物の学習や記憶とシナプスの伝達効率変化の間の因果関係は実は明確ではないのだ。またヒトを含めた哺乳類の

記憶がどの様な形で脳に蓄積されているかも不明である。

単一細胞を用いた研究でも類似した問題は指摘されている。魚の表皮のケラトサイト細胞は細胞培養すると、培養皿の上を活発に移動する（基本的には直進移動）ことが知られていて多数の研究報告がある。同じ種類の細胞を同じ環境で培養しても早く移動する細胞、ゆっくり移動する細胞と、移動の速さは細胞ごとにまちまちである。薬品処理をするとその移動のスピードを一時的に抑えることができるが、薬品の効果が消えると再び速い細胞は早く、遅い細胞は遅い移動をつづける。細胞の中で“意思決定”と“記憶”が行われているように見え、それは薬品処理で影響されないように見える。しかしその実態を説明する仮説は現時点ではない［20］。

統計力学では個々の分子の振る舞いを調べ、それら分子をアボガドロ数の個数集めることで気体のもつ様々な性質が導かれる。統計力学で上手くいったように、細胞という要素（あるいはタンパク質分子のような単位部品）を集合させると生命現象のある側面が分かるといったことが起きれば良いのだが、何をどのように集めればいいかは分かっていない［21］。

第３節　光を用いた測定法と光を用いた神経への働きかけ

多数の電極を使うとしても、そこには自ずと限界がある。電極のサイズは神経細胞よりもはるかに大きいので多数の神経細胞の活動を調べるのには電極を使った方法には限界がある。そこで分子サイズの電位センサーとして電位感受性色素が登場した。電位感受性色素についても優れた総説がある［22］。電位感受性色素の問題点は膜電位の変化にたいする色素の光学的な性質の変化が大変小さい(0.3%程度)ことである。また神経細胞の興奮は短い時間で起きるので、１ms 程度の時間に変化する膜電位の記録ができる必要がある。脳のスライス標本を膜電位感受性色素で染色してスライスを透過する光の量の変化を特殊なカメラ（CMOS センサーアレー）で行うことが一般的である。今も色素の性能向上が行われていくと思われる。色素の吸光度変化が大きくなることで、哺乳類の一神経細胞レベルでの感度に達成できることが期待されている。

光を用いて神経細胞の膜電位変化を測定するだけではなく、光を用いた神経へ働きかける方法も近年開発された。チャネルロドプシンはもともと微生物の膜タンパク質である。面白いことに、チャネルロドプシンは光を受けて陽イオンを透過する。このチャネルロドプシンを哺乳類の神経細胞に遺伝子導入すると細胞膜に配置され機能する。遺伝子工学の技術を使って特定の神経細胞群にチャネルロドプシンを発現させることもできる。このようにして特定の神経細胞群にチャネルロドプシンを発現させておいて適切な波長の光を照射すると特定の神経細胞群を刺激し興奮させることができる。これとは逆にハロロドプシンやアーキロドプシンを膜に発現させ、光を照射すると神経細胞の興奮を抑えることもできる。このような技術は光遺伝学と呼ばれて盛んに研究に使われている。レーザー光を脳に照射するだけで特定の神経細胞群を興奮させたり活動を抑制したりできるのだ。この技

術を使って記憶を操作する試みも始まっている［23］。

第４節　脳の表面から脳の深部へ：古典的な顕微鏡から多光子顕微鏡へ、そしてfMRIやMEG

我々が顕微鏡を覗いて細胞を見ることを考えてみよう。ピントのあっている細胞が見えるが、同時にピントのあっていない細胞や組織の画像がピントのあった細胞の画像に重なっていることに気づくだろう。このピントのあっていない画像の重なりは顕微鏡観察において深刻な問題となる。このような顕微鏡は“古典的な”顕微鏡と呼ぶことができるだろう。脳細胞に蛍光タンパク質分子GFPなどを発現させて古典的な顕微鏡で観察する場合には上記のピンボケの蛍光が観察予定の細胞の画像に覆いかぶさって観察を阻害する。共焦点顕微鏡はピントのあった面だけを浮き上がらせて観察できる顕微鏡の手法である。これによってピントのあった標本の部分の蛍光を集めた鮮明な画像を得ることができる。しかし脳組織では共焦点顕微鏡で観察できる厚みには200ミクロン程度の限界がある。脳組織ははるかに大きな厚みがあるので、厚い脳の構造やその機能を探ろうとすると共焦点顕微鏡でも限界がある。この限界は蛍光励起に使われている緑や青の光を脳組織が吸収散乱してしまうことが原因である。赤外線は組織透過性が高い。そこで赤外線の強力なパルス光を使うことでより深い脳の部分にまで光を届け、そこにある蛍光色素を励起することができる二光子（あるいは多光子）顕微鏡が開発された。二光子顕微鏡では脳表面から600ミクロン程度の範囲を観察できる。

脳全体の姿や機能を調べることができる方法にfMRI（functional magnetic resonance imaging）法がある。またMEG（magnetic encephalogram)は神経の束に興奮伝導がおきたときに発生する磁束密度変化を捉える装置で、高い時間分解能を持ち脳の活動を調べることができる。fMRIは血液のヘモグロビンの状態の変化から脳活動を調べる装置なので反応が遅い。そしてMEGは神経束を流れる電気信号を捉えているので反応は早いが空間分解能がやや低い。これらの課題を克服することが求められている。 fMRIやMEGについては本報告書のそれぞれのセクションを参考にされたい。

第５節　分子から細胞レベルの研究において導入された研究法

細胞は分子でできている。生命科学は分子の間の相互作用に生命の本質を見出そうとしているが、何をどのように調べれば良いかは分かっていない［21］。それにしても、細胞を構成する分子を直接観察してその間の相互作用を調べることは比較的新しい分野であり、盛んに研究がなされている。

細胞の中で働いている分子を見る方法に近接場蛍光顕微鏡やそれを土台にして開発されたPALM型超高解像顕微鏡がある。超高解像顕微鏡はPALM以外にもあるので、詳しい内容については本報告書第１部第４章を参考にされたい。

細胞内分子間相互作用を知るのに必要な空間分解能と時間分解能については今のとこ

ろわずかしか分かっていない。特定の分子間の相互作用については分子サイズ程度の解像度があれば良さそうで１－２０nm ほどになると思われる。この程度の分解能があると分子間相互作用があったことを推定できるだろう。一方で相互作用の仕組みを調べるには原子レベルの分解能が必要になり現在の超高解像度顕微鏡でも歯が立たないだろう。その場合にはタンパク質複合体を結晶化して X 線解析をするか、クライオ電子顕微鏡（後述）による単粒子解析が必要になるだろう。高速 AFM によっても分子間相互作用をリアルタイム計測することもできるだろう［24］。

相互作用の時間は細胞内分子の種類によって大きく異なる。最も反応の速いタンパク質酵素は一秒に数万回以上の反応を媒介するので、この現象を時間分解するのは難しい。しかし分子相互作用によっては秒単位で起きる比較的ゆっくりしたものもある。アクチン線維とコフィリンの組み合わせの実験では空間分解能１８nm、時間分解能２００ms でアクチン線維とコフィリンの相互作用（結合乖離定数とアロステリック効果の及ぶ距離）を分析評価することが出来ている[25]。空間分解能と時間分解能はトレードオフの関係である。タンパク質分子にダメージを与えない程度の励起光の強度の場合、２００ms の時間の光情報を蓄積すると空間分解能が 18nm になる。

ひとつひとつの分子の位置推定を行いその位置を一点一点蓄積していくと画像が生み出される。分子の位置の精度を高めるには、光情報の蓄積時間を長くする。一つの分子から放出された光子の位置には揺らぎがある。しかし光子の位置の情報をたくさん集めるとガウス分布となり、ガウス分布の中心点（分子の位置）をより良く推定することができる。この原理を使って空間分解能を良くするのだ。一方で時間分解能を上げようとすると光情報の蓄積時間が短くなってその結果空間分解能が低下していく。蛍光励起を強めるとタンパク質が不安定（例えば切断や変性がおき）になって測定の信頼度が低下する。このように光測定には様々なトレードオフが関与している。研究にとっての必要な要件は強い光を受けても安定しているタンパク質分子を対象に、比較的ゆっくりした現象（例えは 100ms 程度の時間で観測可能）を 1-20nm の空間分解能（生体分子の位置が推定可能）で分析することであろう。このような測定の限界の中で魅力的な仮説の検証を行うことが大切だろう。蛍光分子や量子ドットのような発光粒子の進歩（例えば発光を強くするなど）によっても超高解像の世界は限界をおし進めて行くだろう。

第６節　今後必要となる測定技術

生命科学とそれを支える計測技術の進歩と変化が頻繁に起きるので、今後必要となる計測技術を予想することは難しい。さきがけ研究“知と構成”の OBOG のアンケートに登場したワードをヒントにいくつかの発展著しい領域を紹介する。日進月歩の領域なので詳しいことはネット等の検索で得ていただきたい。以下では、ミクロからマクロへ印象的なものを並べてみる。

クライオ電子顕微鏡によるタンパク質分子の単粒子解析は近年その空間解像度を高め、X 線結晶解析と同等のタンパク質分子の構造情報を得ることができるようになった［26］。X 線結晶解析では分析対象のタンパク質分子の結晶を得る必要があり、一般にタンパク質の結晶化は難しいのでタンパク質分子の正確な姿は限られたタンパク質分子でのみ可能であった。一方でクライオ電子顕微鏡によるタンパク質分子の単粒子解析では結晶化の必要がないので、タンパク質分子の正確な構造がどんどんと明らかになると思われる。タンパク質の構造情報はタンパク質分子に作用する薬品の予想を可能にし、新薬開発に役立つ。また生命科学においてはタンパク質分子間の相互作用を推測することが可能になるだろう。タンパク質分子の構造の大規模データは新しい研究分野を生み出しつつある。これに関連して連続フェムト秒結晶構造解析（SFX）法も上げておく。X 線のような光（電磁波）を当てると結晶構造は壊れたり歪んだりする。しかしごく短いフェムト秒の光のパルスを結晶にあてて分析すると構造が歪む前に構造情報を得ることができる。

分子マシンの設計と合成の技術（２０１６年ノーベル賞）はいずれ生命科学と融合して新しい研究領域を生み出していくだろう。この融合過程にはゲノム編集などの遺伝子改変の技術（Human Genome Project-Write（HGP-write））が貢献すると考えられる［27］。生命科学の研究と応用は今後も大きく進歩をつづけるだろう。

脳を透明にすると精密な光計測を脳全体に行うことができる［28］。脳のどの部位にどのようなタンパク質が発現しているか、脳の疾患モデルではどのような神経回路のつなぎ替えが起きていて、どのような伝達物質を含めた物質の分布の変化が起きるかが調べられている。今後、脳の透明化技術はさらに進むと思われる。現在は化学的に固定された（死んだ）脳が対象だ。

透明な生命体は進化の歴史の中で生存に有利に働くことがあるだろう。実際、ほぼ透明な生きものがいる。今後、この透明性を生み出している遺伝子とタンパク質の秘密が解かれれば、遺伝子工学の技術を使って脳を含めて全身が透明の生命体が生み出されるであろう。このような標本は光シート顕微鏡で観察されるだろう。脳全体の詳細なイメージングとその大規模データの高度な分析は脳の科学の本質的な進歩（例えば生きた動物の脳における細胞レベルでの情報の流れの詳細の解明）を促すことになるだろう。

参考文献

［1］　吉川弘之 *et al.* 科学における未解決問題に対する計測ニーズの俯瞰的調査.（独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター, 2011).

［2］　Abbott, B. P. *et al.* Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical review letters* **116**, 061102, doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102 (2016).

［3］　Tonegawa, S. Somatic generation of antibody diversity. *Nature* **302**, 575-581 (1983).

［4］　Neher, E. & Sakmann, B. Single-channel currents recorded from membrane of

denervated frog muscle fibres. *Nature* **260**, 799-802 (1976).

［5］ MacKinnon, R., Cohen, S. L., Kuo, A. L., Lee, A. & Chait, B. T. Structural conservation in prokaryotic and eukaryotic potassium channels. *Science* **280**, 106-109, doi:DOI 10.1126/science.280.5360.106 (1998).

［6］ ペンフィールド, ワ. *脳と心の神秘* 208（塚田裕三(翻訳）山河宏（翻訳）法政大学出版局, 2011).

［7］ フィリップ、J、ヒルツ. *記憶の亡霊—なぜヘンリー・M の記憶は消えたのか*（白揚社, 1997).

［8］ 浅島誠 *et al.* 研究開発の俯瞰報告書　ライフサイエンス・臨床医学分野. 706（独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター, 2015).

［9］ Marr, D. A theory for cerebral neocortex. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* **176**, 161-234 (1970).

［10］ Marr, D. A theory of cerebellar cortex. *The Journal of physiology* **202**, 437-470 (1969).

［11］ Ito, M. Cerebellar long-term depression. *Trends Neurosci* **19**, 11-12 (1996).

［12］ Kitazawa, S., Kimura, T. & Yin, P. B. Cerebellar complex spikes encode both destinations and errors in arm movements. *Nature* **392**, 494-497, doi:10.1038/33141 (1998).

［13］ 川人光男. *脳の計算理論.*（産業図書, 1996).

［14］ Carter, M. & Shieh, J. C. *Guide to Research Techniques in Neuroscience.* 418 (Academic Press, 2015).

［15］ Zaccai, N. R., Serdyuk, I. N. & Zaccai, J. *Methods in Molecular Biophysics: Structure, Dynamics, Function for Biology and Medicine.*（Cambridge University Press, 2017).

［16］ Sakmann, B. & Neher, E. *Single-channel recording.*（Plenum Press, 1995).

［17］ Spira, M. E. & Hai, A. Multi-electrode array technologies for neuroscience and cardiology. *Nature nanotechnology* **8**, 83-94, doi:10.1038/nnano.2012.265 (2013).

［18］ Wu, J. Y., Cohen, L. B. & Falk, C. X. Neuronal activity during different behaviors in Aplysia: a distributed organization? *Science* **263**, 820-823 (1994).

［19］ Tian, L. *et al.* Imaging neural activity in worms, flies and mice with improved GCaMP calcium indicators. *Nature methods* **6**, 875-881, doi:10.1038/nmeth.1398 (2009).

［20］ Keren, K. *et al.* Mechanism of shape determination in motile cells. *Nature* **453**, 475-480, doi:10.1038/nature06952 (2008).

［21］ Alberts, B. *et al. Molecular biology of the cell.* Vol. 6th (Garland Science, 2014).

［22］ Grinvald, A. & Hildesheim, R. VSDI: a new era in functional imaging of cortical dynamics. *Nature reviews. Neuroscience* **5**, 874-885, doi:10.1038/nrn1536 (2004).

[23] Nabavi, S. *et al.* Engineering a memory with LTD and LTP. *Nature* **511**, 348-352, doi:10.1038/nature13294 (2014).

[24] Ando, T., Uchihashi, T. & Kodera, N. High-speed AFM and applications to biomolecular systems. *Annual review of biophysics* **42**, 393-414, doi:10.1146/annurev-biophys-083012-130324 (2013).

[25] Hayakawa, K., Sakakibara, S., Sokabe, M. & Tatsumi, H. Single-molecule imaging and kinetic analysis of cooperative cofilin-actin filament interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **111**, 9810-9815, doi:10.1073/pnas.1321451111 (2014).

[26] Subramaniam, S., Earl, L. A., Falconieri, V., Milne, J. L. & Egelman, E. H. Resolution advances in cryo-EM enable application to drug discovery. *Current opinion in structural biology* **41**, 194-202, doi:10.1016/j.sbi.2016.07.009 (2016).

[27] Boeke, J. D. *et al.* GENOME ENGINEERING. The Genome Project-Write. *Science* **353**, 126-127, doi:10.1126/science.aaf6850 (2016).

[28] Deisseroth, K. A Look Inside the Brain. *Scientific American* **315**, 30-37, doi:10.1038/scientificamerican1016-30 (2016).

付録資料　さきがけ研究者へのアンケート調査結果

鈴木良次・辰巳仁史

１．はじめに

脳神経科学研究の第一線で活躍している研究者が、どのような計測技術を活用し、どのような計測技術を必要としているか、その動向を調査するため、科学技術振興機構「さきがけ研究２１（知と構成領域)」研究者へのアンケート調査を実施した。同「さきがけ研究２１（知と構成領域)」については、中間報告書を参照されたい。

以下に、アンケート内容と回答の集計結果を示し、考察を加える。

２．アンケート対象者　さきがけ研究者および関係者　１５名

３．アンケート実施日　２０１７年９月１６日

(参考　2016 年 12 月 17 日に第１回を施行)

４．アンケート調査内容

設問１．下記リストについて、将来性が特に高いと思われる技術について〇をつけてください。複数回答ありです。また、コメントがあれば項目のあとに記述欄を設けましたので、ご記入ください。

（リストは５．集計結果を参照ください。なお、このリストは昨年度のアンケート調査（中間報告書参照）をもとに研究者に関わりの深い計測技術として作成した。))

設問２．上記の技術に加えて、将来性のある測定技術があれば記載ください。

設問３．ご自身のお仕事で活用されている（された）計測・解析・モデルのツールについて、研究テーマごとに、該当する項目の記載をお願いします。

１．計測の対象　２．計測の手法　３．解析の対象（データ）　４．解析の手法

５．モデル化・シミュレーションの対象　６．モデル・シミュレータ　７．コメント

５．集計結果

設問１．将来性が高いと思われる計測技術　（　）内数字は回答者数、青字はコメント

数字が示されていないものは、2017 年の調査では選択されなかったが、前回調査（2016 年）で取り上げられたもの。

パッチクランプ法（２）

カルシウムイメージング法（４）

カルシウム測光計測（２）時間分解能、計測範囲は拡大しているが、なお、不十分

電位依存性色素＋光計測（７）　１ミリ秒の時間分解能をもつ電位感受性色素が欲しい

内因性光信号による機能イメージング（１）

単一細胞記録　これだけに頼る研究はそろそろ終了

マルチユニット記録（１）　多数ニューロンの活動パターンとその背景となる神経回路
多重極細胞外電位記録（５）
局所電場記録（３）
神経トレーサー（３）
構造磁気共鳴イメージング装置 MRI（１）
機能的磁気共鳴イメージング装置 f MRI（２）　計測環境の制約が多い・計測データの質・解析手法に課題がある。 f MRI だけでは限界がある。
脳波計 EEG（１）
脳皮質電位計 ECoG（１）
脳磁計 MEG（２）　計測環境の制約が多い・計測データの質・解析手法に課題がある。従来の計測技術でも解析技術の進歩で将来が開ける
光ポンピング原子磁力計 OPM
近赤外スペクトロスコピーNIRS
機能的光干渉断層計 f OCT
行動解析（KINECT２、アノテーション、ビデオ解析など）（３）
統計解析（３）
独立成分分析法 ICA（４）
主成分分析法 PCA（１）
クラスタリング解析（３）
Cross Frequency coupling 解析
モデリング（３）
一分子蛍光計測（１）
分子イメージング
高速液体クロマトグラフィーHPLC（２）
質量分析計
光学顕微鏡（１）
共焦点顕微鏡（１）
蛍光顕微鏡
光シート顕微鏡（１）
ビデオ顕微鏡によるタイムラプス撮影（１）
ATP＊高速イメージング　＊アデノシン三リン酸（生体内のエネルギー源）
抗体を利用した検出系
クライオ電子顕微鏡（２）
CELLO　＊遺伝子の情報処理能力を利用した演算回路用プログラム言語
遺伝子回路自動設計（２）

細胞リプログラミング（１）
quorum sensing（１）　＊細菌の集団感知を利用した抗がんシステム
ゲノム編集（４）ゲノム計測のもたらした具体的メリットは？　ゲノム編集は観察だけでなく操作に対する反応を調べることができるので、ゲノム理解が一段と進む

設問２．期待される計測技術

１．クライオ電子顕微鏡

タンパク質の分散液を急速凍結した自然な立体構造を対象に、多方向の単粒子像を取得、立体構造を再構成する手法。X 線結晶解析と同等の原子レベルの解像度（２オングストローム）を達成。ｔRNA の結合によるリボゾームの構造変化やペプチドへの翻訳に伴う複数の構造の撮像といった複雑なダイナミクスの分析も可能。タンパク質の新しい構造解析法としての地位を確立している。低価格化が課題。日経サイエンス２０１７年８月号

２．連続フェムト秒結晶解析法

フェムト秒の X 線パルスレーザを照射することで、従来の結晶解析の欠点であるタンパク質を破壊することなしに２オングストロームの構造解析に成功。日経サイエンス２０１７年８月号

３．構造化照明顕微鏡（光シート顕微鏡）

細胞や組織における分子の分布や動態を観察する一般的な手法であるレーザー共焦点顕微鏡は蛍光色素の退色の激しさで長時間観察に向かない。また、それを解決すると期待される２光子顕微鏡は高価で時間分解能が低いという問題がある。光シート顕微鏡は、標本の透明化技術などと組み合わせることによって、細胞・組織レベルの精細立体像や長時間ライブイメージングの主要武器になると期待されている。Bouchard,MB.,et al. (2014)　Nat. Photonics 9:115-119.

４．パッチクランプ法

研究者個人がガラス電極を用いる手技はほぼ完成。一方、薬物のスクリーニングを目的として開発された HSP マルチチャネル自動パッチクランプ法は急速な進展を見せている。最も成功しているのが、Nanion 社（独）とのこと。http://www.nanion.de/

５．超音波エラストグラフィー

人体組織の組成変化（線維化、石灰化など）に基づく粘弾性の変化は、形態や機能の異常が顕在化する前の早期診断あるいは良性・悪性の判別基準として有用な情報である。その計測ツールとして期待されるのが超音波エラストグラフィー。肝硬変、がん、動脈硬化の進行度や治療の評価に大きな力を発揮するという。

６．非侵襲脳内アミン分析システム

カラム充填剤の粒径が２ミクロン以下という超高性能液体クロマトグラフィ(UPLC)が開発され、従来の HPLC に比べ、分析の分離と感度がともに向上したとはいえ、採血

した血中アミンの前駆物質や代謝産物を含めた分析という間接的方法しかない。非侵襲で脳内アミン分析が可能なシステムの開発が期待される。

７．血中リチウム濃度の体表計測法

双極性気分障害の特効薬として炭酸リチウムが多用されるが、定期的な血中リチウム濃度の計測が必要である。採血を必要としない簡易なリチウム計測法が開発されれば、在宅医療などでのメリットが大きい。

８．血中脂肪酸計測法

常在細菌叢が合成し、血中に漏れ出る物質（脂肪酸など）を感度良く検出できる技術が開発されれば、常在細菌叢が関与する疾患の予防につながる。

９．運動時に計測可能な眼圧計

失明につながる緑内障の予防は、眼圧の検査と点眼薬による治療が重要である。この眼圧を左右する因子の解明が進んでいない。運動などさまざまな日常生活の中で眼圧を計測することができれば、姿勢や運動と眼圧の関係、また、最近増加している糖尿病網膜症と眼圧の関係などの解明が進むと期待できる。

１０．制約の少ない脳活動計測装置（簡便、安価、どこでも使用できる）

ｆMRI、MEG は、現在、脳活動の非侵襲計測装置として活用されているが、装置が大型であり、使用上の制約も多い。また、ｆMRI は時間分解能が、MEG は空間分解能がそれぞれ十分といえない。どこでも使用でき、計測課題に影響されにくい、安価で簡便な脳活動計測装置の開発が期待される。

１１．脳計測データの解析技術（信号源推定など）

動物に関しては遺伝学を用いた研究ツールが増えているが、健常成人の高次認知機能の研究ツールにはブレイクスルーが見えない。一方で、信号源解析に利用できる GPU 等のリソースは爆発的に増えていて、それを用いた MEG データからの情報も飛躍的に精密になっている。この方向の研究の進展にも期待。

１２．時間相関イメージセンサ

各画素ごとに時間変化を計測できるセンサ。安藤　繁「時間相関型イメージセンサの開発とその応用」電子情報通信学会技術研究報告。EID　電子ディスプレイ９７（３３６）１９－２４、１９９７、１０－２３．

１３．神経回路自動設計

AI の活用。

１４．アナログ演算集積コンピュータ

１５．全脳の透明化技術

金沢医科大学解剖学八田稔久教授らによる脳の透明化技術（特許出願２０１３．１０．３０）を利用し、主要分子の脳内分布を自動的にデジタルデータ化する。（脳の透明化技術は、国内では理化学研究所が、海外では、スタンフォード大学で進められているが、コネクトミクスの研究への活用を狙ったものである。

Nature ダイジェスト vol.10,No.7 原文：Nature (2013-04-11) See-through brains clarify connections　Helen Shen)

１６．インビボ(in vivo)測光電極

レーザー光を透過させるパッチ電極。種々のシグナル分子強度（濃度）を光学的にインビボ評価が可能。

１７．医用 DNA ナノテクノロジー

DNA コンピュータ、DNA ロボットの医学への応用。

１８．超高速一分子蛍光イメージング追跡法

生きた細胞内で働く分子機構を一分子レベルで追跡する技術

１９．遺伝子回路の自動設計プログラミング

遺伝子の情報処理能力を利用した演算回路。CELLO は、そのためのプログラミング言語であり、大腸菌専用。他の生物につかえるアルゴリズムの作成が課題。

２０．低分子化合物による細胞リプログラミング

細胞分化に影響する化合物を組み合わせたカクテルを線維芽細胞に加え、心筋細胞に似た細胞に分化させることに成功。

２１．ヒトゲノム合成計画

合成生物学。コンピュータを親に持つ人工生命 JCVI-syn3.0 誕生。ゲノム編集よりも有望な技術と考えられている。

２２．細菌の quorum sensing（集団感知）　を利用した抗がんシステム

細菌の遺伝子を操作することによって autoinducer を調節し、細菌自ら合成した抗腫瘍作用を持つタンパク質を一斉放出することでガン細胞を攻撃する。

２３．キメラ動物からの臓器移植

自分の人工多能性幹細胞から分化誘導し、膵臓などの望みの臓器を再生する技術。中でも動物の体内に作らせる再生医療が注目されている。

２４．ゲノム編集

DNA を切るはさみ CRISPR-Cas9 の登場で、生命科学に大革命をもたらしている。遺伝子治療、医薬品開発、農産物の品種改良への応用が進められている。ヒト受精卵への適用は生命倫理的に許されていない。一方で、醜い特許争いが生じている。

２５．行動解析

ハード面での進展もさることながら、画像やビデオ映像の解析ソフトの充実と普及も重要。昆虫などの個体識別、個体追跡に有用。パスツール研究所開発の Icy、NIH の ImageJ など。

２６．BMI(Brain Machine Interface)・ニューロフィードバック

高齢社会を迎えている現状で、脳や身体の機能復元や修正を促す方法の開発が重要かつ新事業としても有望。BMI およびニューロフィードバック技術の基礎研究と臨床応用が重要。

２７．ミリ秒の分解能を持つ電位感受性色素

２８．特定のニューロンを対象とした光計測制御技術

光遺伝学　特定のニューロンにだけ、光で開閉するイオンチャネルを発現させ、光で脳の特定のニューロンだけ刺激が可能な技術の開発

２９．計測項目の定式化のためのビッグデータ・AI 利用

行動心理実験で計測される心理量、社会科学的量等の定義依存量をビッグデータ＆AI を組み合わせた方法で再定義する研究の試みに期待。

３０．集団（の統計的解析）から個体の性質の計測へのシフト

「科学」というパラダイム自体の再考が必要

３１．多光子顕微鏡

微小電極に代って、生きた動物の大脳皮質の個々の神経細胞の活動を同時にたくさん記録する方法。神経細胞の活動に伴うカルシウムイオンの動態を、カルシウム感受性蛍光色素あるいは蛍光タンパク質の蛍光変化に変換し、多光子顕微鏡で観測する。覚醒サルの大脳皮質の２０００個の細胞の活動を同時に長時間記録したという報告がある（文献１）。この手法の制約になっている問題：（１）神経活動の持つ時間分解能がない(高々１００ミリ秒)、(２)計測可能な抑制性応答を反映する信号がない、(３)蛍光タンパク質の導入方法、(４）深部からの計測が困難（実質的には計測できる深さは組織表面から 0.5mm 程度)。深部からの計測を可能にする改良として、現在主に用いられている２光子吸収に代わって、３光子吸収を観測する試みもある（文献２、３)。優れたレーザー物理の研究者が日本にいるので、コラボを促すような仕組みがあれば、この分野は進展すると思われる（文献３)。

1. Li et al., Long-term Two-photon Imaging in Awake Macaque Monkey (2017) Neuron, 93, 1-9
2. Dimitre G Ouzounov, et al. Nature Methods In vivo three-photon imaging of activity of GCaMP6-labeled neurons deep in intact mouse brain. (2017) *Nature Methods* **14**, 388-390
3. 磯部 圭佑、緑川 克美、生体試料の深部イメージングを可能にする空間重なり変調非線形光学顕微鏡. (2015) 日レ医誌 (JJSLSM) 36, 210-215

設問３　さきがけ研究者の計測対象・手法　（今回の回答のみをもとに集計した。）

身体運動（手、腕、姿勢）	３次元運動計測装置　KINECT２
	多変量解析　時系列データ処理
	運動生成の計算モデル
視線・瞳孔	視線計測装置・瞳孔計測装置
脳活動	MEG　EEG
	ICA　PCA　統計検定　ニューラルネット

神経細胞活動および行動との相関	マルチ微小電極　局所電場電位
	パッチクランプ法　測光電極
	トレーサー法　単一神経細胞染色
	多光子顕微鏡　共焦点顕微鏡
	位相差解析　離散的ニューロンモデル
	一般線形化モデル　HH モデル
	行動学的手法　スパイク時系列解析
時間的に変化する形態	時間相関イメージセンサ
聴覚受容機構	金属電極　FFT
細胞内電気現象	電位感受性色素　光学計測
細胞内物質の動態	カルシウムイメージング
体内活性物質	ガスクロマトグラフィー　NMR　HPCL

６．調査結果の考察

さきがけ研究２１「知と構成」領域は、「知」の発現の自然科学的基盤と「知的システム」の設計原理を明らかにすることを目指した、萌芽的研究を支援するために１９９４年に設けられた領域である。そこには、「知の階梯」の基部に位置する脳神経細胞の細胞内プロセスを対象とした研究者から始まり、「階梯」を上にたどって、神経細胞とそのネットワーク、脳、感覚器官、運動器官それぞれの構造と機能を対象とした研究者、さらには、個体とその集団の行動を対象とした研究者が集まり、分子生物学、遺伝子工学、神経生理学、認知行動科学、情報科学の手法を織り交ぜての「共創的」研究がすすめられた。この特徴は、今回のアンケート調査にも反映されている。

以下、注目されるいくつかの計測技術を整理してみる。

（１） 細胞内プロセス：生体を構成するタンパク質の新しい構造解析法として、クライオ電子顕微鏡、連続フェムト秒結晶解析法が、また、細胞や組織における分子の分布や動態を観察する主要武器として光シート顕微鏡が注目されている。一方で、生きた細胞内で、一蛍光分子の追跡が高速で可能になり、細胞内情報伝達の分子機構を一分子レベルで追跡する技術の開発が期待されている。

その他、DNA 関連の技術が多数挙げられているが、ここでは省略する。

（２） 神経細胞と神経ネットワーク：微小電極を用いての１個の神経細胞を対象とした研究はほぼ尽くされ、多数の神経細胞の活動を同時に計測するマルチユニット計測技術へのニーズが高まっている。しかし、電気的測定には多くの困難が伴う。これに代わる手段としての電位感受性色素と多光子顕微鏡など光学計測を組み合わせた手法への期待も高い。覚醒ザルの２０００個の細胞の活動を長時間記録したという報告もある。しかし、時間分解能が不十分であり、１ミリ秒で生起する神経スパイクの電位変化を追える時間分解能をもつ色素へのニーズが大きい。個々の神経細胞

の活動を詳しく知る一方、脳全体の活動も同時に知りたいというのが、研究者誰しもの希望であるが、現状では、それに応えられる技術はない。脳の透明化と光計測の組み合わせは一つの方向かも知れない。しかし、辰巳が指摘するように、いくつの神経細胞から同時記録がとれれば脳の情報処理の原理が分かるかとの問いへの答えはまだ見つかっていない。これは計測技術以前の問題ともいえよう。

（３） 脳・感覚器官・運動器器官： 非侵襲でマクロな脳活動を計測する装置として、脳波計（EEG)、脳磁計（MEG)、ｆMRI などが活用されている。ｆMRI、MEG ともに、装置が大型であること、ｆMRI については時間分解能が、MEG については空間分解能がそれぞれ不十分という指摘がある。その一方で、信号源推定の計算に利用できる GPU 等のリソースが爆発的に拡大しているので、MEG データの解析から得られる情報は飛躍的に精密になっているという指摘もある。ｆMRI が脳活動に伴う血流の変化を計測しているのに対し、MEG は神経細胞の活動を直接計測しているという意味で、ダイナミクスを追えるという利点があり、信号源が推定できれば、脳機能解析のきわめて有力なツールとなるであろう。もう一つの課題は、小型化にある。小型軽量で使い勝手の良いツールとしては、脳波計があるが、信号源推定には不向きである。しかし、脳活動の何に注目するか、何を計測するか、どのようにデータを解析するかで、簡易脳波計の活躍場面は拡がると期待されている。NIRS も同様の装置であるが、ここでの注目度は大きくないという印象である。

一方、ミツバチ、コオロギなどの微小脳を対象とした研究では、上記の大型装置は使えない。これら微小脳をもつ生物を対象とした研究者からは、体内極微量化学物質の非侵襲測定技術のニーズが高い。この技術は、ヒトでも有用である。採血を必要としない血中リチウムや血中脂肪酸の計測法に生かされるかもしれない。

（４） 個体と集団の行動：人体や生物の個体の運動の計測は、運動がどのような原理に支配されているかを解析するために重要なデータを提供する。具体的な例として、到達運動や把持運動の生成原理の提案があげられる。これには、オプトトラック、データグローブなどの３次元運動計測装置が活用されている。また、人や生物の集団内での個体の識別や動きの追跡は、社会生物学的に貴重な情報を提供する。KINECT2、ビデオ装置などハード面の進展もあるが、解析ソフトの充実も見逃せない。具体例として、パスツール研究所が開発した画像解析ソフト Icy、アメリカ国立衛生試験所に起源を持つ ImageJ が挙げられている。

行動レベルの計測対象として、心理量・社会科学的量も重要である。具体的には、言語表現はもとより、動作（ボディーランゲージ)、表情などが挙げられる。これらは、これまでも、心理学や社会科学で取り上げられてきたものであるが、これらを、ビッグデータと AI を組み合わせた方法で再定義し、ヒトの脳活動の理解に生かす研究への期待も示されている。

付記：設問２「期待される計測技術」に対しては、多くの貴重な回答が寄せられた。そこには、すぐに取り組むべき喫緊の課題から未来の夢まで含まれている。貴重なアイデア集でもあり、その扱いは慎重にすべきである。そこで回答者に（１）発表は控えてほしい、（２）記名で発表してほしい、（３）無記名で発表してよい、（４）その他での意向を確認した。一部、記名希望および回答が届かないものがあったが、それらは割愛し、他をすべて無記名で記載した。

以上。

第４章　文献を通してみる医療技術史

鈴木善次

本章のねらいと構成

現代「医療」における「医工計測技術」の評価を試みる場合、これまでの人類史における「医療」の状況をも参考にすることが望ましい。それは「医療」の対象である「疾病」が人類史上各時代、各地域で展開されてきた人々の様々なライフスタイル（文化、文明）と密接にかかわっているからである。ちなみに私たちの多くは現在「科学文明」と呼ばれる時代のライフスタイルのもと日々を過ごしているが、「疾病」はそれ以前の「文明」下のものとは異なった状況（克服された「疾病」、新たに出現した「疾病」）になっているし、「医療」もそれに応じて変化してきている。将来の医療の在り方を展望するとき、こうしたライフスタイルと「疾病」の関係をしっかり見据えることが必要である。

本章のねらいを達成させるために、以下の項目を設け、それぞれについて検討する。検討に当たっては、主としてこれまで出版された関連図書における記述内容を参考にする。

(1)　文明と医療
　①文明および関連する言葉、②医療および関連する言葉
　③文明と医療との関係
(2)　科学文明と医療
　①科学文明の概観、　②科学文明と医療との関係
(3)　現代における「医学」「医療」をめぐる議論
　①「医療の質」と「医療の不確実性」
　②先端医療・終末医療・その他
(4)　まとめ：文明史（医療技術史）における「医工計測技術」の位置づけ
(5)　参考文献リスト（本文で引用したものは除く）

第１節　文明と医療

本章では主として「文明」と「医療」の関係を検討するのであるが、そのためにはこの二つの言葉について共通の認識を持つことが必要である。以下、「文明」、「医療」およびそれぞれに関係する言葉の意味などを取り上げる。

（１）　文明および関連する言葉

「文明」という言葉に関連してしばしば「文化」という言葉が登場する。日本では一般に「文化は精神的、文明は物質的」というように両者は「対立する概念」として使われる傾向があるが、アメリカに端を発した文化人類学では「文明とは高度に発達した文化、‥‥文化とは一つの民族の固有の生活様式、この様式には、生産技術、社会制度、行動様式と共に、価値観や民族特有のパーソナリティが含まれる」[1]など両者を「連続する概念」で

あると定義している。

科学史家で早くから文明史・文明論に取り組んできている伊東俊太郎は「文化」と「文明」という言葉について上記のように「連続的」と「対立的」という二つの立場があることを紹介した上で「連続的」立場を支持している[2]。また、同じ科学史家の村上陽一郎は「文明」と「文化」それぞれの英語「(civilization)、(culture)」から、いずれもが「自然の人為化」を意味しており、「「文明」は「文化」の一形態ということができる」[3]と述べて伊東同様「連続的」立場にある。

「文化」と「文明」という言葉の区別をめぐってはさまざまな議論があり、伊東もその経緯などについて検討しているが[4]、ここでは人々のライフスタイルと「医療」の関連などを検討するので、「連続的」概念としての立場で二つの言葉を使うことにする。すなわち、「文化」も「文明」も「人類のライフスタイル」を表す概念であり、そのうち「文明とは高度に発達した文化」であると。先の村上の言葉「自然の人為化」を借用すれば、「文化＝自然の人為化」、「文明＝高度に進んだ自然の人為化」ということになる。

ただ、ライフスタイルと医療の在り方を議論する場合、参考にしておきたい「対立的」立場からの意見がある。ギリシャ哲学の研究者吉田雅章は村上の「自然の人為化」という視点からの「文化」と「文明」の連続説に対して、「文化」の語源（culture）には「耕す」のほかに「気配り」「気遣い」「大切に扱う」などの意味があり、「文明」は「自然の脅威からの逃避」であり、「文化」には「気配り」などを持った「自然へのかかわり」があるとして批判している[5]。この「人類と自然とのかかわり」の在り方は「人間と疾病」との関係を検討するときにも大切な視点となるであろう。

では、「文明」と呼ばれる人類のライフスタイルは何時頃生まれたのであろうか。伊東俊太郎は人類史を「革命」というキーワードを使って、（ⅰ）「人類革命」（サルからヒトへ）、（ⅱ）「農業革命」（農耕生活の出現）、（ⅲ）「都市革命」（人口の集中化、都市の誕生）、（ⅳ）「精神革命」（哲学や宗教など人々の精神的変革）、（ⅴ）「科学革命」（近代科学の誕生）、（ⅵ）「環境革命」（環境という視点からの現代文明の問い直し）の 6 つの時代区分をしている[6]。

「文化」と「文明」の連続的概念という立場からすれば、当然「文明の誕生」以前に「文化」が生まれていることになる。上記の伊東による時代区分に当てはめると（ⅰ）の段階で人々が道具を発明したことに着目し、この道具作りが「遺伝的なものでなく、学習によって作られる人為的なもので、“文化”のはじまりである。したがって、人間はその成立の当初において文化をもった。いや文化をつくったからサルから人間になったといってもよいであろう」と述べ、そして②の段階に関しては農業による食糧の豊かさが「より高い意味での“文化”の基盤が作られた」[7]とも述べている。

伊東は「文明の誕生」に関しては「文明」の英語（civilization）の原初的意味の「都市化」を取り上げ、「都市革命」によって生み出された人々のライフスタイルが「文明」であるとし、あえて「都市的文明」という言葉を作り、それを「農業生産の高まりにより、

直接農耕に携わらないかなりの人口の社会集団が一定の限られた場所に集住し、そこに高度な統治体制が出現して階層が分化し（王―僧侶―書記―戦士―職人―商人）、宗教が組織化されて祭儀センターがつくられ、手工業が発達し、富の蓄積と交換がおこなわれること」と定義している[8]。

（2） 医療および関連する言葉

次に「医療」という言葉を一般の辞典で調べると「医術で病をなおすこと。療治。治療」[9]とか「医術によって病気を治療すること」[10]などとあり、その文中にある「医術」についても前者で「病気や傷を治すための技術」、後者でも「傷病を診察し治療する技術」と定義しており、常識的定義がされているが、医学辞典では「医師およびその他の医療従事者が医師の指示に基づいて行う、患者の治療、外傷の診断・治療の目的で行われる医行為」[11]と定義している。この文では前段階で「医師の医学的判断および技術をもってするのでなければ人体に危害を及ぼす恐れのある行為を医行為といい、医行為を業（反復継続すること）とすることを医業という。医師法 17 条は、医師でなければ医業をしてはならないと規定している」という解説がつけられており、医師法の枠のなかでの定義がされている。

著作のタイトルに「医療」という言葉が示されているものを何点か調べてみた。例えば日本における医学史分野の先駆的研究者の一人酒井シズは日本の原始時代から現代に至る「医療」の状況（制度、疾病など）を詳細に記述しているが、改まって「医療」という言葉の定義はしていない[12]。「医療」に関する歴史を扱った新村拓も同様である[13]。

これらに対して佐藤純一は医療社会学の研究の在り方を検討する文で「医療」という言葉の定義に「近代医療のみが医療である」とする立場と「その社会の一定程度の人に支持された形式化された＜病・治療・健康＞をめぐる社会的文化的行為」とする立場の二通りあることを指摘している[14]。

いずれにせよ、本章では大きく「文明」との関連性を取り上げているので、先の医師法の枠に捉われるのではなく、また佐藤の指摘する二つの立場も包含する形で「医療」という言葉を使うことにする。

ところで、「医療」という言葉に関連して「疾病（病気）」や「健康」という言葉も登場する。この二つの言葉を「医療」の際に参考にした一般的辞典[15]で調べると「疾病」では「身体の諸機能の障害」、「健康」では「すこやかなこと・達者」などとあり、医学辞典[16]では「健康」に関して WHO の定義の紹介がされるなど専門的枠内での定義がみられる。「医療」や「医学」の在り方をめぐってこれらの概念をどうとらえるかの議論はいくつかの著作[17]で見られているが、ここでは「医療」の場合と同様、広い概念で捉えることにする。

（3） 文明と医療の関係

「文明」と「医療」の関係を論じるためには当然「医療」の対象となる「疾病（病気）」

と「文明」の関係を取り上げる必要がある。この二つの関係を取り上げた古典的な著作[18]で医学史家のM.E.シゲリストは「その発展の過程において、文明はしばしば健康に有害な条件をつくり出した。文明には利点もあったが、多くの危険と病気の原因をもたらした。‥‥文明はまた医学と公衆衛生を生み出した。文明は病気と闘うための武器をつくりだした。‥‥文明は多くの健康の危険を取り除き、多くの病気の発生を非常に少なくし、人間の平均寿命を著しく長くすることができた。‥‥文明と病気の著しく複雑な関係を示すには、これらの若干の序の言葉だけで十分である。‥‥」（序章）と述べている。

これを要約すれば「人々の健康」にとって「文明」がプラス、マイナス両面の機能を果たしたということである。本節ではこの言説を参考にして「文明と医療」との関係がどのようなものであったかを、まず伊東の人類史区分による「科学革命」以前の「都市的文明」時代を大まかに「古代」と「中世」に分けて、それぞれの特徴的なことを中心に紹介する。

（i） 古代（都市革命～5 世紀ごろ）

「医療」といえば、医療にあたる人が必要であるが、古代文明時代はどうであったか。先に伊東[19]は「都市的文明社会」では階層分化が見られたことを述べていたが、その具体例ともいえるのが「医師」の誕生である。「古代社会に特徴的なことは、医師の誕生である。内科医は神職を兼ねた場合が多いが、外科医は専門技術をもつとして独立した。その身分は内科医に比べてはるかに低いが、ハンムラビ法典に記された手術の成功した場合に支払われる報酬は驚くほど高い。しかし、失敗した場合の罰則はそれ以上に厳しいのである」と記述した著書［20]があり、すでに「内科」、「外科」それぞれの「医師」と、それに対応した「治療」が存在したことがわかる。この「ハンムラビ」法典（メソポタミア文明、バビロンの初代王ハンムラビによる）にかかわる話は有名でイギリスの科学史家メイスンの著書[21]には外科医の手術成功報酬と失敗の罰則（手を切り落とす）まで紹介されている。なお、外科医の身分の低さは近代を迎えるまで続くことになる。

では、古代における病気の原因論やその治療方法はどのような状況であったのか。再びメイスンの言を引用するならば、「エジプト人と後期メソポタミア人との医学文書では、ともに＜病魔＞論がひろくおこなわれていた。病気そのものは悪霊として擬人化され、医者は、吐剤や下剤やまたは病魔を退散させるような胸くそのわるくなる薬を使って、患者からその悪霊を追いだそうとつとめた」[22]という。

そうした中でも「精神革命」をもたらした「都市文明」の国々では論理的な原因論が生まれるようになる。ギリシャでは、「医学の父」ともいわれるヒポクラテスが経験・観察を踏まえ、当時の物質観である「四元素説（すべての物質は火・水・空気・土からできているという考え）にも影響され、「血液・粘液・黄胆汁・黒胆汁」の四体液のバランス状態によって健康が保たれたり、病気になったりするとし、それを回復するのは体内に備わった自然治癒力であると考えた。彼は「医者は病人の自然治癒力を助長することが役割であるとし、そのために臨床での観察や経験を重んじた」[23]という。

また、インドではヒンズー教の聖典「ヴェーダ」の教えの下に伝統医学「アーユルヴェーダ」が誕生している。晩年に医学史書[24]を著した梶田昭によれば、「アーユル」とは生命とか健康、「ヴェーダ」は知識という意味とのこと。その三大古典の一つを編纂したチャラカはギリシャのヒポクラテスと同様、医学を呪術から解放した一人であるという。また、インド医学の病因論は三体液説で人間を悩ます病気のほとんどは、三つの悪い体液(胆汁、フレグマ、風）の作用であるとも紹介している。

さらに中国では 2 世紀ごろ、「中国のヒポクラテス」ともいわれる張仲景（AD.2 世紀の人）はその後の中国医学に影響を与える『傷寒論』(「傷寒」＜急性の熱性疾患＞に由来する病気の治療法）を編纂したが、症候に関して「陰」と「陽」を初めてはっきり区別したと言われている[25]。古代中国の医学はこの「陰陽」に加え、五行の思想も加えた「陰陽五行説」を基本的な思想として展開される。

なお、中国では現在日本でも行われている鍼治療が古くから行われてきている。張仲景と同じ時代、麻酔術と開腹術で重要な発見をしたという外科医華佗が曹操（後漢末期の武将、政治家）の頭痛を鍼治療で直したという。また、日本で漢方薬として知られる薬草・薬物に関する研究も古くから行われており、中国のレオナルド・ダ・ビンチと呼ばれる陶弘景（452-536）は『神農本草経』の注釈書を著し、そこに記されている鉱物性、植物性、動物性の薬物についての知見を後世に伝えている[26]。

(ii) 中世（5 世紀ごろ～科学革命以前）

西洋史では西ローマ帝国の滅亡を目安に古代から中世へ移行したとされている。その中世で医学・医療分野で顕著な出来事の一つといえばアラビア医学の興隆をあげることができる。7 世紀、アラビア半島にマホメットによってもたらされたイスラム教世界はヨーロッパ、アジア、アフリカに広がりを見せ、それらの地域の学問を積極的に吸収し、自分たちが持つ学問と結びつけた。そのうちの「医学」を指して「アラビア医学」(またはイスラム医学）というが、それは古代ギリシャの医学からばかりでなく、インドや中国の医学からも影響も受けたものになっている。その中でイブン・シーナー（AD.980～1037）の『医学典範』には一度途絶えたギリシャ時代の医学上の知見も含まれており、逆にヨーロッパにも影響を与え、12 世紀にはラテン語に訳され、パリのモンペリエ大学などで使用されるほどであった[27]。

また、薬に関しても初めは古代ギリシャの薬学の影響を受けたが、地理的条件の良いアラビアでは様々な薬物の入手が可能であったため薬学が発達し、それがヨーロッパに影響を与えている[28]。こうした医学・医療に関する知見や物品などの交流（大きくは文明の交流）は本項の初めに紹介したシゲリストから見れば「プラス」の評価に属することであろう。

そうした一方で、古代末から中世を経て近代にわたってヨーロッパを中心に３回、ペストが大流行し、多くの人たちの命が失われたことは「黒死病」という言葉とともに人々に

記憶されていることであろう。ある医学史書[29]を紐解くと、一回目（542 年ごろ）は中央アジアで商業を営んでいたイタリア人たちが追い出され、イタリアへ戻ってきてからヨーロッパ全土に広がったそうで、ほぼ 2500 万人が犠牲になったという。

二回目は 1348 年であるが、これに関連して環境考古学者の安田喜憲がその大流行の発生プロセス論を展開している[30]。彼によれば 13 世紀までの温暖な気候が 14 世紀になり寒冷化したという「気候変動」、それに伴う食糧生産力の減少、都市への人口集中、食糧不足、人々の免疫力の低下などの「人口変動」、農地拡大・都市の建設などによる「森林破壊」、それによる生態系改変（森林に生息するキツネなどペスト媒介に関わるクマネズミの天敵の減少）、これらの相互関連によって「ペスト大流行」が生じたという。そうした状況にもかかわらず、日本ではペストが大流行することはなかったことの一つの理由として彼は弥生時代から里山という二次林を生み出し、キツネなどの生息地を確保し、ネズミの大発生を防いだことを挙げている。

このペスト大流行は先のシゲリストの評価では、言うまでもなく「マイナス」である。気候変動という自然現象が一つの要素ではあるが、この場合、文明化（高度の人為化）の在り方に問題があることは安田の指摘にある日本の里山の例からも知ることができる。

（4） 本節の文献

[1] M.S.ガーバリーノ著、木山英明・大平裕二訳『文化人類学の歴史―社会思想から文化の科学へ』新泉社、1987、pp.248-249

[2] 伊東俊太郎「文化と文明」、東京大学公開講座『文明と人間』東京大学出版会、1981、pp.1-28.

[3] 村上陽一郎『文明のなかの科学』青土社、1994、pp.75-77.

[4] 伊東、前出[2]

[5] 吉田雅章「環境問題と文化」、長崎大学文化環境研究会編『環境と文化』九州大学出版部　、2000、pp.37-59.

[6] 伊東俊太郎「総論Ⅰ　文明の画期と環境変動」、伊東俊太郎・安田喜憲編『講座　文明と環境　第 2 巻　地球と文明の画期』朝倉書店、1996、pp.1-10.（新装版、2008）

[7] 伊東、前出[2]

[8] 伊東、前出[6]

[9] 新村出編『広辞苑』第二版、岩波書店、1971.

[10] 学研『新世紀大辞典』新訂第 7 刷、学習研究社、1973.

[11] 伊藤正男他総編集『医学書院　医学大辞典』、第 1 版、第 1 刷、医学書院、2003.

[12] 酒井シズ『日本の医療史』東京書籍、1985.

[13] 新村　拓『日本医療史』吉川弘文館、2006.

[14] 佐藤純一「医学」、進藤雄二・黒田源一郎編『医療社会学を学ぶ人のために』第 1 章、世界思想社、1999、pp.2-21.

[15] 新村、前出[9]
[16] 伊藤、前出[11]
[17] （イ）中川米造「病気論」、田島節夫・坂本賢三・市川浩・坂部恵・村上陽一郎編集『講座・現代哲学・4・自然と反自然』、弘文堂、1977、pp.232-269.
（ロ）アンドリュー・ストラサーン、パメラ・スチュワート著、成田弘成監訳『医療人類学：基本と実践』古今書院、2009、pp.4-6.
[18] H.E シゲリスト著、松藤 元訳『文明と病気』上・下、岩波書店、1973.（原書、1943）
[19] 伊東、前出[6]
[20] 石橋長英・小川鼎三・木村康一監修、酒井シズ構成・編集『薬と人間』株式会社スズケン、1982、第Ⅱ章「医術のあけぼの」,pp.24-45.
[21] メイスン著、矢島祐利訳『科学の歴史 上』岩波書店、1955、pp.12-13.
[22] メイスン、前出[21].p.13.
[23] 矢部一郎『西洋医学の歴史』恒和出版、1983、pp.11-20.
[24] 梶田 昭『医学の歴史』講談社、2003、pp.114-122.
[25] P.ユアール・M.ウォン著、高橋晄正ほか訳『中国の医学』平凡社、1972、p.33.
[26] P.ユアール・M.ウォン. 前出[25]、p.45.
[27] 鈴木善次・馬場政孝『科学・技術史概論』建帛社、1979、pp17-19.
[28] 石橋ほか、前出[20]、p.66.
[29] ロベルト・マルゴッタ著、小川鼎三序、岩本淳訳『図説 医学の歴史』講談社、1972、pp.138-145.
[30] 安田喜憲「ペスト流行」、速水融・町田洋編『人口・疾病・災害』（講座「文明と環境」第7巻）、朝倉書店、1995、pp.121-132.（新装版、2008）

第２節 科学文明と医療

前項では主として「科学文明」誕生以前における「文明と医療」の関係について検討したが、ここでは「科学文明」時代を中心に同じ課題について検討する。

（１） 科学文明の概観

まず、「科学文明」とはどのような文明を指すのか。鈴木善次は「科学文明とは科学的に考えることがよいことであるという認識が多くの人々に受け入れられ、また科学的知識を活用して開発された技術、すなわち科学技術が社会（政治・経済を含めた）に深く浸透している文明」であると定義づけている[1]。この文でさらに明確にしておく必要があるものとしては「科学」、「技術」という言葉の意味であろう。

「科学」(science) は語源のラテン語 (Scientia) では「知る」という意味で、広く「学問」を指す言葉であり、古代から存在していた人間活動（古代科学など）の一つにつけら

れたものである。その古代科学では「知る」方法として重視されたのが「論理性」であったが、ルネサンス期ごろから「論理性」のみでなく「実証性」をも重視した「知る」活動が登場した。それが「近代科学」と呼ばれるものであり、現在、一般に「科学」といえばこの「近代科学」を指している。そうなると「科学的」という言葉の意味も「論理的・実証的」ということになる。

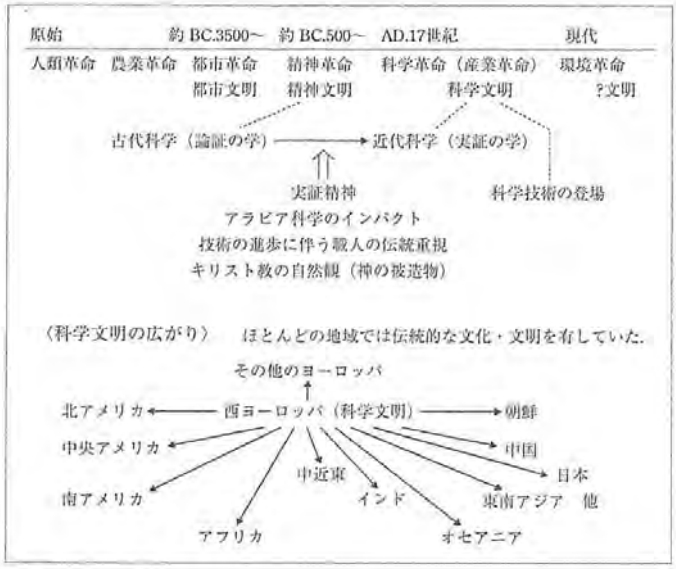
一方、「技術」(technique) はギリシャ語の「テクネ」に由来し、「物事をたくみに行うわざ」「目的を達成するための手段」などの意味であるが、英語の technology を含めて「科学を実地に応用して自然の事物を改変・加工し、人間生活に利用するわざ」[2]と説明する場合もある。

問題は「科学文明」の定義にある「科学技術」の意味である。ここでは定義文にあるように「科学的知識を活用して開発された技術」(いわゆる「科学的技術」) のことであるが、「科学・技術」(science and technology) という意味で使われている場合もある[3]。

近年では技術開発を前提にした科学研究が重視されてきている状況の反映でもあろう。これに関連するが「科学文明」という言葉の代わりに「科学技術文明」と呼ぶ人たちもいる。その一人市川惇信は「科学技術に関わる活動が社会に存在することを意味するだけでない。科学技術が社会の行動様式、すなわち行動規範と行動パターンの総体、の中に不可欠で基本的な要素として組み入れられている社会の形態をいう」と述べている[4]。

次に「文明史」全体の中での「科学文明」の位置を確認しておこう **(図１)**。先に取り上げた伊東は「都市文明」「精神文明」「科学文明」それぞれの発祥地とその文明の期間を示す図を掲載しながら「都市文明」と「精神文明」は世界のいくつかの地域に並行して発祥したのに対して、「科学文明」は西欧という一地域で生まれ、しかも現在では地球上の他のほとんどの地域に浸透し、世界の「知的」および「物質的」構造を一変させたと述べている[5]。ここで「知的構造」の変化とは 17 世紀に誕生した近代科学による宇宙観・自然観・生命観・人間観などの変化、「物質的構造」の変化は 18 世紀中ごろイギリスに始まった「産業革命」(科学技術の導入による農業経済社会から工業経済社会への移行) による「衣食住などでの物的豊かさ」を指しているのであろう。多くの人々がこの「文明」を歓迎した要因の一つがこの「物的豊かさ」であったと言われている。

しかし、「科学文明」は人々に「プラス」「マイナス」の両面を与えてきている。そのことについては次項で「医療」を事例に紹介、検討することにしよう。



(注)
都市文明発祥地：エジプト，メソポタミア，中国，アンデス，メソアメリカ
精神文明発祥地：ギリシャ，シリア，ペルシャ，インド，中国
科学文明発祥地：西ヨーロッパ

図１． 人類史における科学文明の位置とその広がり
出典：鈴木善次『環境教育学原論』東京大学出版会

（２） 科学文明と医療との関係

「産業革命」は人々のライフスタイルを大きく変えることになった。農村から都市、特に工業都市へ生活の場を変えた人々にとって影響は大きかった。経済史・経済統計学を専門にしている安元稔は産業革命期におけるイギリスの人口動態（出生率・死亡率など）や労働者の実質賃金指数、死亡原因ごとの都市と農村の比較などのデータに基づき、その状況を考察し、産業革命は人々の貧困からの脱却、生活水準の向上、豊かさなどをもたらした一方で、都市環境の悪化、伝染病の多発、死亡率の上昇など深刻な社会問題を生み出したと述べ、その対策の一つとして労働環境などの改善を目指して成立された「公衆衛生法」を「国民の健康・生命の維持に国家が責任をもつという現代においても、きわめて重要な原則をはじめてイギリス社会に、そしておそらく人類史上最初に導入したという点で、この法は画期的なものであった」と評価している[6]。

この「疾病」と「法律」の関係については先に紹介した H.E.シゲリストも同じ著書[7]で一つの章を当てて検討している。その中で「公衆衛生の分野は時代とともに広がってきていて、予防医学と治療医学の境界の消失とともに漸次国家医学へと発展している。‥‥公衆衛生行政は常に医学という学問の状態と有力な政治哲学の二つの要因によって影響されてきた。病気の原因、性質および治療について知られていることが多いほど、政府はより効果的に行動できた。しかし、政府が現在の知識を活用することができるか否か、またいかなる方法によるかを決定するのは政治哲学であった。」と述べ、当時の「医学」がおかれていた状況に言及している。

また、医療社会学の立場から黒田浩一郎は「近代医療」（近代社会における医療の主要な形態を指す言葉）の特徴は「知識・技術の側面での近代医学、治療者の側面での専門職としての医師、治療の場という側面での病院、医療への国家の大規模な関与という四点によって特徴づけられる。」と述べたあと、「公衆衛生」も社会の近代化の一側面を表しているという点で「近代医療」に入れられる活動であるという。その上で、「公衆衛生」は個々の患者ではなく、「人口」、つまり、全体としての人々の健康、生産力、戦闘能力、出産力を高めることを目指したものであり、国家の強制力が発動されやすいと指摘している[8]。先の安元の評価とやや異なったものである。

さて、「医療」にとって重要な役割を果たしている「医学」の「科学文明」期の動向について検討しよう。17 世紀物理学分野で始まった「論理性・実証性」を重視する近代科学は少しずつ時を置いて化学分野、生物学分野へと広がりを見せた。医学はそれら自然科学分野や心理学などの人間科学分野などで得られた知識（実験・観察用の技術も含む）などを活用して「医療」のための知識体系、いわゆる「近代医学」を作りあげてきた。

この流れの初期（17 世紀）に登場したハーヴェーによる「血液循環」の発見は後に輸血などの医療技術に活用された[9]。また、19 世紀になると、すでに 17 世紀に発明されていた顕微鏡の性能が向上、さまざまな細菌が発見され、それまでの伝染病に関する経験知を基に各種の病原細菌が特定されるようになった。この分野の代表的研究者といえばコレラ菌や結核菌などを発見したドイツのコッホであるが、伝染病に関する医療法は弟子のエールリッヒの化学療法、ベーリングや北里による血清療法などを待つことになる[10]。なお、先に登場したペスト（黒死病）の病原であるペスト菌は 1894 年、日本の北里柴三郎とフランスのイェルサンによって独立に発見された[11]。

こうした近代医療が、果たして感染症を克服してきたのかと疑問を投げかける文がある[12]。医療社会学者の佐藤純一は 19 世紀前半以降、イギリスの肺結核の死亡率がほぼ直線的に減少し続けており、抗生物質のストレプトマイシンによる化学療法開始以前に大幅に減少した例や日本でも化学療法開始前の方が感染症による死亡率の減少が大きいということを取り上げ、栄養状態の改善、教育の向上、近代的上下水道の普及、住環境の改善など「生活の近代化」が効果をもたらしたのではないかと述べている。

確かに上に示された感染症に対する細菌学の役割を過大評価するのは問題であるかもしれないが、「疾患を起こす原因となる細菌が同定された。二〇世紀に入ると細菌を特異的に抑える化学療法薬、抗生薬が開発された。人類は初めて疾患の原因を知り、それに基づいて効果的な対抗手段を手に入れることができた。こうして、人体についての客観的な理解によって、人間の健康と生命を守る手段を得られることが実証された」[13]という評価もあり、大きく医療史の流れで見ることが大切である。

ところで、上にも述べたようにこの時期の医学は物理学や化学からの影響が大きい。生物学史家の矢部一郎によれば、神経学の研究からスタートし、筋肉運動の際の物質の消費と発熱についての研究から「エネルギー保存の法則」を生み出したドイツのヘルムホルツ

は物理学的方法を取り入れて大きな成果をあげたが、フランスのクロード・ベルナールも化学的手法を取り入れて、生理学に新しい道を切り開いたという[14]。彼は『実験医学序説』(1865) を著し、医学の研究にあたっては科学的方法論が重要であると説いた。なお、医療に関連づけると彼は膵臓や肝臓の働きの解明に貢献している。

以上、「科学革命」後から 19 世紀までの医学・医療のいくつかの側面を紹介した。

（3） 本節の文献

[1] 鈴木善次『環境教育学原論―科学文明を問い直す』東京大学出版会、2014、pp. 24-37.

[2] 新村、前出（第 1 節[9]）

[3] 村上陽一郎『文明のなかの科学』青土社、1994、pp. 37-39

[4] 市川惇信『暴走する科学技術文明』岩波書店、2000.

[5] 伊東俊太郎『比較文明と日本』中央公論社、1990、pp. 236-259.

[6] 安元　稔「産業革命期のイギリスの人口と疾病」、速水融・町田洋編『人口・疾病・災害』(講座「文明と環境」第 7 巻)、朝倉書店、1995、pp. 133-153.（新装版、(2008)

[7] シゲリスト、前出（第 1 節[18]）、「Ⅳ. 病気と法律」、pp. 129-165.

[8] 黒田浩一郎「近代医療とは何か、それはどこから来たのか」、佐藤純一編『100 問 100 答　医療のふしぎ』河出書房新社、2001、pp. 70-72

[9] 村岡潔「近代医療の歴史（2）-注射と輸血」、国際文化研究センター　佐藤純一編『100 問 100 答　医療のふしぎ』河出書房新社、2001、pp. 75-77.

[10] 矢部、前出（第 1 節[23]）、pp. 193-201.

[11] 森岡恭彦『医学の近代史　苦闘の道のりをたどる』NHK 出版、2015、pp. 255-256.

[12] 佐藤純一「近代医療は感染症を次々に克服してきたのか」、村岡、前出（9）、pp. 92-94.

[13] 坂井建雄『人体観の歴史』岩波書店、　第 7 章　基礎医学と社会化、細分化－二十世紀　発展する医療技術と生命科学. 2008、p. 206.

[14] 矢部、前出（第 1 節[23]）、pp. 183－191.

第 3 節　現代における「医学」「医療」をめぐる議論（1）
～「医療の質」と「医療の不確実性」～

前節まで人類史の中で「医学」・「医療」がどのような経緯をたどってきたかの概要を説明した。「科学文明」期の中でも 20 世紀後半から現在に至る間、「医学」・「医療」分野は大きく変貌を遂げてきた。そうした認識は多くの人に共有されているものと思う。例えば、この時期のうち、20 世紀に関して医事評論家の水野肇は「抗生物質の開発」、「臨床検査の確立」、「遺伝子組み換え技術」などを挙げ、「この五十年の医学の進歩というのは、医学の

発達の方向を考えるひまもないほど、やつぎばやに次々と新しい医療技術が開発されていった」と表現し、こうした発達には周辺のサイエンスの発達が大きくかかわっているとも述べ、放射線医学を事例に、理論物理学やコンピュータの発達によって CT スキャナーや MRI などが生まれたことなどを紹介している[1]。このあたりの状況は本報告書の他の章の記述からもうかがい知ることができる。

ここでは、そうした「医学」・「医療」の変化に関して今日、どのような話題が登場し、議論が展開されてきているかをいくつかの事項について調査した結果を紹介する。その場合、議論の対象とされる話題が「医学」・「医療」全体にかかわるもの（「医療の質」・「医療の不確実性」など）と、特定の事項に関するもの（「先端医療」・「終末期医療」など）があるので、前者について本節で、後者については次節で取り上げることにする。

（1）　「医療の質」定義・概念登場の経緯と背景

近年、「医療の質」が良いとか悪いとかという声を耳にするようになった。本報告書でも「はじめに」などで「医療の質」という言葉が登場している。では、「医療の質」とはどのようなことで、いつごろから使われ出した言葉であろうか。そのためには、まず「医療とは何か」ということについての共通認識を持つ必要があろう。これについては、本章第 1 節「医療および関係する言葉」で「狭義」、「広義」の「医療」の定義を取り上げたが、ここでも「医療の質」に関連してさらに「広義」の意味を与えているものがあるので紹介しよう。後でも取り上げるが日本の病院関連で組織されている団体の一つ「社団法人全日本病院協会」が刊行している報告書[2]では「医療とは、狭義には診療（診断と治療）、すなわち、医の行為（medical care）である。広義には健康に関するお世話（health care）である。Health care とは保健・医療・福祉を含む広い意味で療養ともいう。医療とは、治療のみならず、医療機関で行なうすべての業務をいう。すなわち組織運営、経営を意味する」というように幅広い定義をしている。

では、一方の「質」とはどのような意味なのであろうか。『広辞苑』（第 6 版、2016）にはいくつかの説明があるが、そのうち「内容のよしあし」、「価値」という意味がここでは適切なものであろう。少し、堅くるしい定義を『医療の質用語事典』[3]から紹介すれば「本来備わっている特性の集まりが要求事項を満たす程度」のことであり、その文中の「要求事項」とは「明示されている、通常暗黙のうちに了解されている、又は義務づけられているニーズ、若しくは期待」（質マネジメントの国際規格 ISO 9000）であるという。このように「質」の定義にも幅がある。

（i）「医療の質」の定義

そうなると、「医療」と「質」という二つの言葉を繋げた「医療の質」の意味は「医療」、「質」それぞれの意味付けによって、多様なものになるであろう。上に引用した『医療の質用語事典』[4]では「医療の質とは、診療だけでなく、医療機関で行うすべての業務の質

である。診療（看護も含む）の質、職員の質（知識・技術・接遇）、機器・設備の質、経営の質（運営）も含む広い概念である。組織の質であり、組織構成員全員の質そのものである。医療はお世話業であり、もてなし業であり、ホスピタリティが求められている」とあり、「医療」の定義は広義のものを採用している。ちなみに、同じく広義に「医療」という言葉を採用した全日本病院協会の報告書[5]では「医療の質とは、提供する医療の質、提供主体の組織の質、組織構成員全員の質であり、多面的である。医療を適切かつ円滑に行うためには、組織的運営が必要である。組織（チーム）医療とは診療部門と支援部門を含めた部門横断的な連携を言う」と記されている。印象的にはいずれも「病院」や大きい「診療所」における「医療」が対象の定義であるが、民間の個人が開業している「診療所」（医院）での「医療」にも当てはまることであろう。

「医療の質」を英語で表すと「quality of medical care」であるが、1966 年にこの言葉をタイトルに含めた論文がアメリカの Donabedian,A.（ベイルート生まれのアルメニア人、長くミシガン大学で活動、公衆衛生学）によって発表され、その論文で「医療の質」を「構造」、「過程」、「結果」の 3 つの側面で評価することができるという説が示された[6]。あとで取り上げるが、福井次矢（聖路加国際病院長）はこの三つの「側面」の内容を次のように説明している。すなわち、「構造：医療施設、医療機器、医療スタッフなど」、「過程：実際に行われた診療や看護」、そして「結果：行った診療や看護の結果としての患者の健康状態」であると[7]。ついで Donabedian,A は 1980 年に「医療の質」の定義や評価方法などに関する著書[8]を公にした。同書について訳者の東尚弘（国立がん研究センター・がん政策科学研究部長）は、「医療の質を考える上での出発点に立ち返り「医療の質とは何か」、「どうやって評価するか」という問題に真っ向から取り組んだ力作」（訳者前書き）と述べている。

Donabedian の定義

そこで、この著書での彼の「医療の質」の定義を調べてみたが、「医療の質とは医療が様々な程度で備えている性質である」（序章）という漠然とした表現から話を進めていた。その理由は「質」という言葉の曖昧さや「医療」の範囲も明確でない状況では、さまざまな「医療の質」の定義が存在しうるとして、それらすべてに共通する概念を取り出すことによって、より適切な定義を導くことができるであろうということである。その結果、「医療の質」を定義する基本的要素として「技術的医療」、「対人関係」、「アメニティ」という事柄を導き出している。「技術的医療」とは「医学及び他の健康科学における科学技術を個人の健康問題の管理へ応用すること」、「対人関係」については技術的医療に伴い顧客である患者と医療者の間に発生する社会的、心理的交流のことであり、「技芸（アート）としての医療であると呼ばれてきた」もの、そして　「アメニティ」は「快適で心休まる待合室」など「医療の行われる施設のより優しい面の性質といえる」とし、患者の満足度に関連しているとも述べている。彼はこれらを含め、その他検討の結果見出されたいくつかの要素（金銭コ

スト、利益、リスク、診療の整合性など）を組み合わせながら「医療の質」とは何かを考察している。なお、同書では彼が 1966 年の論文で提案した「医療の質」を「構造・過程・結果」という 3 つの側面から評価できるとした考えに対して、この間、何人かの研究者によって検討された結果も紹介し、自分の考えを再検討している。そのまとめとして「過程の要素は医療の質の指標として多くの利点がある」としながらも「必要な行動は、構造、過程、結果のお互いの関連性、全体性を再確認することになる。そして、全ての評価とモニターの方法は、最終的にはここ（構造、過程、結果のお互いの関連性、全体性を再確認すること；筆者の注）を出発点としなければならない」[9] と慎重な姿勢を示している。現在では「過程」を重視する研究者が多い。

「過程」を重視する一人、先に取り上げた福井次矢は「医療の質とは個人や集団を対象に行われる医療が望ましい健康状態をもたらす可能性をどれだけ高くするか、その時々の専門知識にどれだけ合致しているのか、それらの度合」であると述べている [10]。なお、最近出版された著書 [11] で、福井はこの定義が「米国の権威ある研究グループが作った」もので、「世界的に広く受け入れられている」と追記している。

（ii）「医療の質」概念登場の経緯と背景

ところで、Donabedian の活動からも知られるようにアメリカでの「医療の質」への関心は世界的にも早いものであった。そのことに関して高柳和江（医療管理学）は 20 世紀前半におけるアメリカでの質の悪い病院の乱立、それを改善するための検討などの状況を紹介した上で近年における「医療の質」への関心が高まった背景として「医療の質の向上は米国においては生き残りを賭けた病院の戦場である。質が良いと保障された病院にのみメディケアやメディケイドという政府の医療保険が認められる。病院の医業収入の大きな部分を占めるこの医療保険が受けられるかどうかは病院経営にとって大きな意味をもつ。質の悪い病院は患者数が減少し、赤字経営に陥る。病院倒産がどんどん起きている」と述べている[12]。アメリカの医療保障制度は日本と異なり主として民間が担当しているが、高柳が紹介している「メディケア」と「メディケイド」は 1995 年に「メディケア・メディケイド法」として議会で成立したものに基づく公的なものである。長年、医療保障制度の研究を行っている松田晋哉（産業医科大学医学部教授・公衆衛生学）の著書[13]によれば前者は 4100 万人、後者は 4000 万人がそれぞれ対象者となっているそうであり、病院側の「医療の質」への関心が高いことも頷ける。なお、松田の解説によれば、「メディケア」は 65 歳以上の高齢者と障害者及び腎透析を受けている患者が、「メディケイド」は貧困者が、それぞれ対象者であるという。

もう一つ、その関心の高さの要因として考えられるのが近年に見られた病院におけるさまざまな医療事故、医療ミスの多発である。これに関連して上原鳴夫（東北大学大学院医学系研究科、国際健康学）は著書[14]で、20 世紀末・21 世紀初めに国内外で起こった病院における主な医療事故を取り上げ、具体的な関連事例は示していないが、その背景に急速

に進んだ医療技術革新に旧来の医療システムが対応できていないことを指摘し、さらに「かつて、医療が有効な技術を持たなかった時代には、医療とは医師が行うケア(medical care)を意味し、医療の質は医師の能力に依存すると考えられていた。しかし医療が大きく様変わりした今日、重要なことは、医療を提供し医療の質を作っているのはひとり医師だけではなく、さまざまな職種とプロセスによって構成されるシステムであるとの認識に立つこと」であると述べ、人々の医療そのものや医療機関に対する意識の変革を促している。

（2） 「医療の質」をめぐる動向

Donabedian らによってクローズ・アップされた「医療の質」概念はその後、日本でも注目されることになった。ここではその動向の一端を二つの病院関係の団体と一つの病院に関連する情報から紹介する。

（i） 日本病院会の活動

日本における病院レベルでの「医療の質」への関心はどのような状況であったのか。日本の病院関係者で組織されている「日本病院会」（1951 年創立）が発行している『日本病院会雑誌』のタイトルにおける「医療の質」という言葉の初出を調べたところ、「論説　医療の質の管理と質の保証　左奈田幸夫」（1985.11）が該当するものであった。また、その前年に「放射線科の運営に必要なデータは何か一医療における質の改善と実践の一環として」（1984.5）というものがあり、内容を読むと「医療の質」に相当するものであった。なお、先に紹介した Donabedian の名著[15]が出版された翌年（1981.12）の雑誌に、「米国における病院情報システムの実情（調査団報告）」という記事が掲載されていたが、これは主としてアメリカの病院でのコンピュータ・システム導入に焦点を当てたものであった。もちろん、これも「医療の質」を探る一つの側面「構造」につながるものであり、日本病院会が「医療の質」への関心を抱いたのが 1980 年代初めであることが推察される。

日米における医療評価の比較検討を行った三好麻以ら（川崎医療福祉大学）の論考[16]によれば、「日本の病院機能評価の本格的な研究の始まりは、1980 年代に入ってからであり、‥‥当時は、日本医師会を中心に、欧米にならい、病院評価の手法についての検討と評価調査票の試作が行われると同時に日本病院会において、病院管理マニュアルが作成されている」という。「医療の質」、特に「病院医療の質」に関する日本病院会の積極的姿勢を見ることができる。

（ii） 全日本病院協会の活動

もう一つ、先に「医療の質」の定義で取り上げた「全日本病院協会」（1960 年設立）における「医療の質」関連の活動の一端を紹介しよう。この協会では 1998 年からほぼ 2 年間隔で『病院のあり方に関する報告書』（これまでに 7 冊）が出版されており、取り上げ方の濃淡はあるが、何らかの形で「医療の質」が論じられている。その中で 2011 年版[17]では

「医療の質」の定義、「医療の質」の要素、「医療の質」の評価、良質な医療、医療における継続的な質向上、医療経営の質などが論じられ、最後に「2025 年における医療の質」というまとめの言葉が示されていた。すなわち、「2025 年には医療基本法が制定され、医療のあるべき姿・ありたい姿とそれを達成する道筋が示され、継続的な改善がなされていよう。その基本的考え方は医療への TQM の導入である。国家、自治体、医療機関それぞれの段階で重層的に実施されていよう。質とは相対的なものであり、医療は社会の状況に適合させて実践されるものである。TQM 実践の努力をしている限り、医療の質（顧客の評価）は現在よりも高まるであろう。医療従事者が安心し誇りをもって働き、患者が安心して受療し、信頼関係が構築される。結果として医療崩壊、病院崩壊といわれた状況から医療再生、病院再生が実現していよう」と。このまとめの文中の初めに登場している「医療基本法」（医療に関する国の制度・政策に関する理念、基本方針を示し、それに沿った措置を講ずべきことを定める法律）についてもこの報告書の第 10 章で解説されている。1971 年に国会に提案されたときには廃案になったが、最近になって再び制定の必要性が論じられてきている。ただ、様々な意見があり、前途多難の状況である。果たして 2025 年までに成立するかどうか。「医療基本法」構想は「教育基本法」などと並んで人々にとって重要なテーマであり、しっかりした議論を経て成立されることを期待する。なお、文中の「TQM」とは「Total Quality Management」（総合的質経営：質を重視する経営）の略であり、このあたりに病院側の意識の変化を見ることができる。

（iii）聖路加国際病院（院長・福井次矢）の活動～EBM と QI

次に「医療の質」の定義でも登場した福井次矢の活動を通してこの分野における動向を探ってみよう。福井は先に提案した「医療の質」の定義にある「望ましい健康状態をもたらす可能性の高い診療」や「その時々の専門知識に合致した医療」について、それは「1990 年代以降、世界の医療を席巻している『(エビデンス）に基づいた医療（Evidence-based Medicine;EBM)』」［18］であるという。彼は「EBM」を「研究の成果（エビデンス）を知ったうえで医療現場の状況（医師の経験や医療施設の特性）や患者に特有の病状・意向（個別性）に配慮して行う医療」と定義している。この言葉（EBM）は福井の知人のカナダ・マクマスター大学ゴードン・ガイアット医師によって名付けられたもので、福井もその普及に努めて、ようやく日本でも定着してきたそうである。ただ、初めのころは医師の経験を無視しているとか、疫学や統計学を学んだだけの非専門家に何が分かるかという批判もあったようである。

さて、そうした EBM（「標準医療」ともいう）が実際の医療現場でどの程度行われているか、言い換えれば実際の医療と標準医療の差（Evidence-practice Gap）はどうかが問題になった。福井は、すでに欧米でその差を数値化した医療の「質指標」（Quality Indicator; 医療機関でそれぞれの臨床場面において標準医療が実践されている度合い）を導入し、勤務先の聖路加国際病院で 12 分野（病院全体、予防医療、心の健康、治療手技・手術など）

の 85 項目の「質指標」を導き、率先して公開したことを述べ、「多くの病院が医療の質を公開すれば、それぞれのやり方を比較･･･相互の触発が日本全体の医療の質の向上につながっていくはず」[19] と期待を込めて語っている。

その福井らの努力もあって厚生労働省では 2010 年に「国民の関心の高い 特定の医療分野について，医療の質の評価・公表等を実施し，その結果を踏まえた，分析・改善策の検討を行うことで，医療の質の向上及び質の情報公表を推進すること」を目的とした「医療の質の評価・公表等推進事業」を立ち上げた。この事業にはすでに国立病院機構や全日本病院協会，日本病院会、大学病院などが参加して「医療の質」の評価公表に努めている。

（3） 医療における満足度

「医療の質」に関連して、その評価の重要な視点になるのが患者および医療者の「満足度」である。すでに Donabedian は先の著書 [20] で「患者満足度からは、患者の価値観と期待という、患者が最終的な決定者である事項について、医療者がうまく応えたのかどうかの情報がわかるため、満足度は医療の質の評価として根本的な重要性を持つものである」（訳書）と述べ、ともすると、ないがしろにされる医療者側の満足度についても「患者の満足度と釣り合いを取るためには、特に理由がない限り、医療者の満足度が医療の質の定義と関連するのかどうかも考える必要もあるだろう」（訳書）と指摘していた。

そこで、ここでも前項「「医療の質」をめぐる動向」でも取り上げた病院関連団体や病院での動向や個人の立場からの論評などを紹介しよう。

(i) 日本病院会

まず「日本病院会」での状況。先に紹介した『日本病院会雑誌』で「満足度」という言葉が記事のタイトルに初めて登場したのが、同じくこの雑誌記事のタイトルに「医療の質」という言葉が初登場した 1985 年からほぼ 2 年後、ちょうど厚生省と日本医師会が共同で「病院機能評価マニュアル」を発表した 1987 年の「論説」においてであった [21]。ここでは、「近年、医療に対する国民の要求水準は高度化かつ多様化しており、各病院の供給する医療の質が真に問われる状況となってきている。そこで、医療の質をいかに評価するかがこれからの大きな懸案であり、このための具体的な第一歩が厚生省と日本医師会による「病院機能評価マニュアル」であるといえよう。だが、Donabedian によれば医療の質は健康の回復と患者の満足に医療がどれだけ貢献したかによって最終的には評価されるべきである。そして、これからの医療においては、病気を治すという医学医術的側面もさることながら、患者が受けた医療に対していだく満足という側面についても考慮する必要があるように思う。」という前書きに続き、「病院会」の会員施設を対象に患者の医療満足度調査を行った結果を報告している。その「まとめ」を要約すれば、調査方法は信頼性のおかれるものであった。患者の特性、病院の規模など外的要因には影響されなかった。患者全体の満足度は看護に対する評価と最も関係があったなどとあり、病院全体や各部門の業績を見る上で

「患者の満足度」は重要な指標であると述べ、こうした調査の必要性を指摘している。

（ii） 岩崎栄と高柳和江

そのあと、『日本病院会雑誌』ではタイトルに「患者満足度」という表現は見当たらないが、内容的にはそれに関連する記事もみられている。その一つが「医療の質」に関心を持っている岩崎栄（日本医科大学医療管理学教授）の日本病院会「総婦長セミナー」での講演「医療の質について」である［22］。この講演は看護婦（当時の呼び方）を対象に「医療の質」とは何か、またその質の改善のためにどのようなことが行われているかをこの分野の先進国アメリカの状況を紹介し、これからの日本でのあり方を考えようというものである。彼はその講演の中で「患者の満足度」の大切さを指摘している。実は先に取り上げた高柳の著書［23］の序章を担当したのが岩崎であり、「満足」という言葉と Donabedian が医療の質の 3 大要素の一つに挙げた「アメニティ」という言葉との共通性を指摘し、患者はアメニティ（岩崎によれば「快適さや心地よさの質」という意味）を求めて病院にくるのである。アメニティサービスにはソフト、ハード、システムという３種類があるが、特に大切なのはソフトなサービス、具体的には患者と医療者の間が対等な立場で向き合うことであり、ここではパターナリズム的な対応は一切生じないはずであるなどと述べている。

この序章を受けて高柳はアメリカの病院等で患者満足度調査が流行している理由や満足度調査を実施する上での注意、調査技法、調査後の統計処理などを具体的実践事例も含めながら解説している。その終わりで、「これからは患者が病院を選ぶ時代、患者は質の高い病院を求めている。患者満足度を高めること、それもペースメーカーとしての質の高い病院、患者の満足度が高い病院ができてくることは、ひいては、広い医療全体の中での患者の満足度を高めていく、つまり、医療の質を高めていくことにつながる。患者満足度調査という究極の医療の質の結果の評価を積極的に取り入れて医療の質を高めていってもらいたいものである。」と結んでいる。このうち、アメリカで「患者満足度調査」が流行している理由として、患者の権利意識の高まりのほかに、医療のパラダイム（かつてのパターナリズムの医療から病気に焦点を当てる医療を経て、患者中心の医療へ）」の変化を挙げている。こうした患者へのまなざしは序章を担当した岩崎の想いに通じるものである。

（iii） 全日本病院協会

次に、全日本病院協会での「患者・医療者満足度」の扱い方を紹介しておこう。ここでも「医療の質」のときと同様、調査資料として『病院のありかたに関する報告書』を採用するので、2000 年度以降のことになるが、その 2000 年度と 2002 年度の「報告書」［24］では全く同じ扱いで「医療の質」の項目内で「患者満足度、職員満足度」という小項目をおき、120 字あまりの文章で、患者・職員それぞれの満足度の向上には質の高い医療の提供、職場環境の整備、情報の不断の提供、教育が不可欠、また質の高い医療体制の確立には構成員として患者・職員が不可欠など解説されている程度である。しかし、2004 年度の

「報告書」[25]では、「患者満足度、職員満足度の評価」項目をさらに３つの項目にわけ、初めの「満足度」（約 1000 字）で「医療は産業分類ではサービス業に属し、サービスでは顧客（患者）満足が重視される。満足とは顧客の事前期待と事後の結果との相対的な評価である。不満や不信は事後の結果が事前期待より極めて低い場合に生じる」など関連情報をやや詳しく解説しているが、その中で、病院にとっては患者だけでなく、職員もお客であるという考え方があることを紹介し、「患者満足度」に加え、従来、なおざりにされる傾向のあった「職員満足度」両方の向上を目指すことの大切さが指摘されていた。これは本項のはじめに紹介した Donabedian の考えに通じるものである。その上で「患者の視点」（約 280 字）、「医療従事者の視点」（約 280 字）それぞれにおける調査の視点が示されていた。続く 2007 年度の「報告書」[26]では「医療の質の評価」という項目の中で「患者満足と職員満足」（約 700 字）と一括りにして、2004 年度と同様の内容を整理して紹介していた。

最近の 2 冊（2011 年度[27]と 2015～16 年度[28]）の報告書では、いずれも「良質な医療」という項目を新設し、その「良質な医療とは何か」については患者や医療者などそれぞれの立場から検討する必要があると指摘した上で、特に患者の立場を例にして、患者が医療に対して満足するかどうかにかかわる「要素」を「狩野理論」を参考に次の 5 種類に分類提示している。（イ）魅力的な要素（それが充足されれば満足を与えるが、不十分であっても仕方ないと思われる要素。患者が期待していない、あるいは期待した以上のものを提供した場合の要素）、（ロ）充足比例的な要素（充足されれば満足、不足であれば不足の度合いに比例して不満足と思われる要素）、（ハ）当たり前の要素（充足であれば当然、不足であれば不満と思われる要素。医療における基本的な要素）、（ニ）無関心な要素（充足していても不足していても、特に満足も与えず、不満も引き起こさない要素）、（ホ）逆説的な要素（充足されているのに不満を引き起こしたり、不足であるのに満足を与えたりする要素。例：出産では、元気な赤ちゃんが生まれて当然と思われている＜当たり前品質＞が、かつては、母児共に文字通り生死をかけていたので無事出産することは喜び＜魅力的品質＞であった）。

では、参考にした「狩野理論」とはどのようなものであろうか。山口晴巨（株式会社ファーマコライフ代表取締役 ヤマグチ薬局/大阪府吹田市）の論文[29]に依拠すれば、この理論は狩野紀昭（東京理科大学名誉教授）が 1980 年代に「品質に関する顧客満足を分析する手法」として提案したもので、品質及びニーズを①【BasicNeeds】当たり前品質要素（充足すれば当たり前、不充足で不満）、②[PerformanceNeeds】一元的品質要素（充足されれば満足、不充足で不満）、③【ExcitementNeeds】魅力的品質要素（充足されれば満足、不充足でも仕方がない）の三つの要素に分類し、それらを図 2（横軸：品質・ニーズ、縦軸：満足度）のように位置づけている。ただ、この図では先に紹介した「患者満足の要素」のうち、（ニ）「無関心な要素]と（ホ）「逆説的な要素」は示されていない。もともと「狩野理論」にはない「要素」なのか、あっても「線」として表現できないためなのか、現時点では不明である。

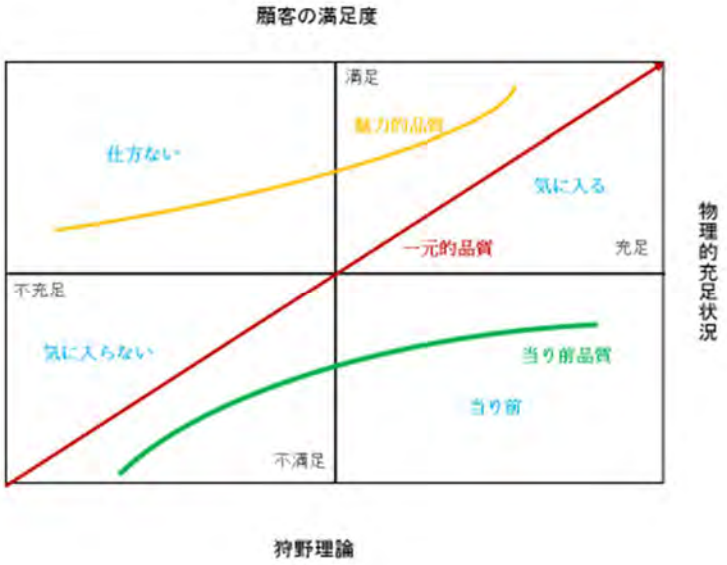


図２　狩野理論による顧客満足の概念図
『病院のあり方に関する報告書』2011 年版、2011.6、p.32.掲載図（転描）

いずれにせよ、これらの年度の「報告書」では「医療における満足度」についてかなり掘り下げた記述をしている。気になることは「医療従事者の視点」の扱いが 2011 年度の約 400 字から 2015～16 度の約 100 字へと減少していることであった。

なお、ネットで「全日本病院協会」のホームページから「病院支援事業」を経て「医療の質の評価・公表等推進事業」へ検索を進めると「患者満足度集計表」が現れ、2010 年度から 2015 年度までの年度ごとの「退院患者対象の満足度」（設問：今回の入院は全体的に満足のいくものでしたか？）を見ることができる。ちなみに選択肢 4 つのうち、「満足」；62.2％～69.1％、「やや満足」；24.3％～28.5％、「やや不満」；2.2～3.3％、「不満」；0.4～0.7％であった。

（iv） 聖路加国際病院

いっぽう、1998 年から患者満足度調査を行っているという聖路加国際病院ではそうした調査結果を積極的に公開することを目指してきており、2015 年に出版された著書[30]は 2005 年度から 2014 年度までの入院・外来患者の満足度（「全体として当院に満足していますか？」の設問に「満足、やや満足している」と答えた患者の割合（入院患者では一つの年度で 87.6％、あとは 90％台前半、外来患者でも入院と同じ年度で 78.4％、あとは 84％～90.6％）が紹介されている。また、同書に「意見箱投書中に占める感謝と苦情の割合」という調査結結果も載せられており、年ごとの「感謝」（20.0％～45.5％）と「苦情」（26.6％～61.8％）の割合が示されていた。病院側はそれを参考にして苦情の迅速な改善に努力したという。

ところでこれまで紹介してきた「患者満足度」調査公表の状況は最近ではネット検索などで知ることができるが、それに関連する「医療者（職員）側の満足度」調査結果は、ほとんど見ることができなかった。一つだけ、公立病院の「職員満足度」調査用の「仕様書」（未使用）が見つかり、そのアンケートでは、「患者に対して丁寧な接遇を心がけていますか」などの設問に５段階で答える形式の内容であった。そうした結果の公開をどの範囲までにしているのか、それを定めるのは難しいところもありそうである。

（v） 口腔衛生学の立場からの「患者満足度」と深井穫博

最後に口腔衛生学の立場から「患者満足度」を考察している深井穫博（深井保健科学研究所長、神奈川歯科大学客員教授）の論説[31]を紹介しよう。彼はこの論説の初めで「満足・不満足」は主観的なものなので、医療や病気に対する思いは患者それぞれであり、「満足」というスケールを医療の場面に使うことは容易ではない。しかし、慢性疾患では治療の過程や結果に対する患者の満足が得られなければ、治療やそのメンテナンスそのものが成り立たない。その意味で、患者の満足は、医療の最終目的の一つであるとともに、有効な医療を実践するうえでも重要な因子である。さらに患者の満足は、医療者側にも患者の家族にも喜びを与え、健康における分かち合う価値を喚起し、そのことがケアの質の向上につながることになると述べている。その上で、1980 年代以降盛んになったという「患者満足度研究」について国内外（主として国外）の文献を調査し、医療に対する患者満足度に影響する因子、患者満足度と保健行動との関連、医療者にとっての患者満足度研究の意義などを考察し、その結果を以下のように纏めている。

「医療に対する患者満足度を知ることは、医療者側にとっては医療の質の保証と改善のための有効な指標である。そして、この患者の満足は、健康における分かち合う価値を、医療者と患者が共有するための鍵概念であり、医療現場でのヘルスプロモーションに関わる要素となる。一方、患者の医療に対する期待や要求は、医療の現状や医療行為を投影したものであり、しかも、患者満足度が、歯科受診・受療に対する患者の態度を大きく左右することは、多くの研究報告から指摘されてきた。現在の歯科医療が患者の継続受診を前提として成り立つのであれば、医療者は患者満足度をさらに追及して、患者への対応に反映する必要があると考えられる。」

この論考は口腔医療関係、特に歯科関係の人々を対象に行われたもののようであるが、広く患者満足度に関心を持つ人たちにとっても示唆に富むものである。

（４） 医療の不確実性をめぐる議論

次に「医療の質」の議論を検討する過程で「医療の不確実性」、あるいは逆に「医療の無謬性」などという言葉に出会った。例えば、矢崎義雄は医学の進歩を高く評価した後、「医療の内容はますます高度複雑化し、その治療効果の不確実性はむしろ高まっているという側面があり、･･･医療への評価も必ずしも満足度が高まっているとは言えない状況があり、

大きな課題になっています。」[32]と述べている。また、福井も自著で「不確実性と確率の狭間で」という小項目を設け、医学とは不確実性のサイエンスであり、確率のアート（技）であるというカナダのウイリアム・オスラーの 100 年も前の言葉を紹介し、「この言葉はおそらくしばらくは真実であり続けると思う。人の身体と心の構造や機能が科学的に完全に解明されて、一人ひとりの身体や心でどのような異常がいつ起こるのか正確に予測できるようになるまでは、100％確実な医療、医学というものはありえない。‥‥医療の質は、患者さんの納得や満足度、それにプロセスとアウトカムなどの側面から評価されるが、アウトカムばかりが強調されるきらいがある。医師は確率的に最も良い結果をもたらす可能性の高い医療を行おうと努力しているところです」と述べている[33]。

福井とほぼ同じころ小松秀樹（虎の門病院泌尿器科部長）は、「医療とは本来、不確実なもの。しかし、この点について、患者と医師の認識には大きなずれがある。患者は、現代医学は万能で、あらゆる病気はたちどころに発見され、適切な治療を受ければ、まず死ぬことはない。医療にリスクを伴ってはいけない。‥‥しかし、医師の考えは、人間の体は非常に複雑。人により差も大きい。医学は常に発展途上、変化し続けている。医学には限界がある。医療行為は、身体へのダメージを伴う基本的に危険なもの、人はいつか必ず死ぬ、などの違いがある」という。また、「医療の基本言語は統計学であり、同じ条件の患者に同じ医療を行っても、結果は単一にならず、分散するというのが医師の常識。その上で、患者側、病院側を含め一般に広まっている医療の「無謬」という前提からの脱却が必要である」と[34]。なお、この著書の「第一章　死生観と医療の不確実性」で述べられている「日本人が死生観といえるような考えを失ったのかも」、「日本にも昔から「無常観」という、長い歳月のなかで磨かれた死生観がある」などの言葉は後で取り上げる「終末期医療」のことに繋がるものであり、注目しておきたい。

ここまで「医療の不確実性」についての何人かの考えを紹介してきたが、不確実なのは「医療」なのか「医学」なのか、それとも両方なのかという疑問を抱いた人もおられるであろう。そのことにもかかわるが、小松や福井の出版より早くに医学は科学ではないとする考えの著書[35]を公にした人がいる。作家であり医療活動をされている米山公啓。米山は その「まえがき」で「医学というものは、科学的根拠にもとづき、体系づけられた学問だと信じられている。ところが、実際の臨床の現場では、意外にも医者の経験に基づく判断であったり、いわゆるカンで治療が決められたりしている。EBM（実証に基づく医療）によって治療や診断が行われているのは、医療行為のうち半分にも満たない。それほど臨床医学は曖昧な部分を持っている。そこには医学の非科学的部分が存在し、それこそが医学の本質のように見える。‥‥医療というものが、すべて科学的な視点で理解できるものでなく、患者と医者の信頼関係が治療成績に大きく影響することもある。そこには私たちが誤解している、あるいは忘れている本来の医学の姿がある」と語っている。この「まえがき」に導かれて本書全体を読むと、当然「医学」も、それに基づく「医療」も不確実なものであると理解できる。ただ、「医学」全体が「科学」でないと否定するのは行き過ぎのよ

うに思える。なお、ここでいう「科学」は「論理性、実証性」を伴った「科学」、すなわち「近代科学」のことである。

次に紹介するのは先に非専門家として批判対象の一つにされた「統計学」(疫学) を前面に押し出し、「医学的根拠」の議論を展開した研究者の著書[36]である。著者は疫学・環境医学・因果推論・臨床疫学などを専門とする津田敏秀 (岡山大学大学院環境生命科学研究科教授) で、「長年、国際誌に掲載されたデータや理論を背景に、公害問題や職業病問題に関して、論文や意見書や法廷での証言で説明を続けてきた。しかし、根拠を明確にして説明しようとしても伝わらない状況も数多く経験してきた」(あとがき) という。では、津田が示した「医学的根拠」はどのようなものだったのか。本書によれば、欧米では 19 世紀前半から「医学的根拠」をめぐって「直感派」(医師個人の経験重視)、「メカニズム派」(動物実験など生物学的研究結果の重視)、「数量化派」(統計学の方法論を用い、人間のデータを定量的に分析した結果を重視) の 3 つのグループによる論争が繰り返され、20 世紀後半になって、国際的にはそれら 3 つのグループの優先順位が合意されたとある(序章)。実は、その合意順位のトップが福井によって取り上げられた EBM であり、津田は本書の一つの節のタイトルを「現代医学の柱は数量化、対象は人」として、そこで先のガイアットらの論文「Evidence-Based Medicine: A New Approach to Teaching the Practice of Medicine」を取り上げ、それを指して「EBM 宣言」ともいうべき文書であると述べ、その冒頭部分を次のように紹介している。すなわち、「根拠に基づいた医学は、直感、系統的でない臨床経験、病態生理学的合理づけを、臨床判断の十分な基本的根拠としては重視しない。そして、臨床研究からの根拠の検証を重要視する」と[37]。ここで「病態生理学的合理づけ」とは動物実験やその他の実験結果に基づく説明のことであり、「臨床研究」とは「医療における疾病の予防方法、診断方法、疾病原因および病態の理解、患者の生活の質の向上を目的として人を対象として行う医学系の研究」のことである。

さて、そこでもう一冊の著書を取り上げよう。長年救急医療に携ってきた行岡哲男 (救急医学、東京医科大学主任教授) は 20 世紀後半から見られてきた科学や技術の不確実さ(いろいろなリスク)を医学にも当てはめ、医療現場でそれにどう対応していくべきかを考え、これまで存在してきた「医療現場」で治療に関して「正しい判断」が可能だというのは誤解であり、特に時間的に制約される救急医療の場合は「不確実な状況下での意思決定」が強いられることになり、「正しい判断」は不可能であると。

行岡によれば、「二〇世紀の医学・医療が採用したのは病気を数値で概念化して、確率論を導入し、「正しい判断」の“正しさ”を数字化して客観的に示し、医師が治療方法を選択する場合、「確実な状況下での意思決定」を可能にすることを目指しているが、確率論を導入しても医療現場の「正しい判断」の不可能を解決することはできない。治癒率 90%という場合、10%に含まれる患者の視点に立てば新たな不条理になる」と。

そこで彼は現象学や言語ゲームを援用して「正しい判断」の代わりに「正しいと確信する判断」(医療現場のその都度の局面で、これしかないと確信する判断) という考えを導入

することを提案し、「確信」は「直観体験（または単に直観）」（患者を目の前にして「○○だ」など心の中に直接立ち現れるもの）と「これを支持する普遍的事項の存在」（例えば医学的知見、意図すれば誰でも利用することができるもの）という二つの条件で成り立つという。さらに彼は大切なこととして医者と患者（家族）との間での「確信」に関するコミュニケーション(「言語ゲーム」を利用した確かめ合いによる納得の共有)を挙げている[38]。

ここで行岡の見解を紹介したのは津田たちによって取り上げられたEBMにより「医学的根拠」から外された「直観」（EBM の訳語では「直感」）が重視され、逆に「確率論」の欠陥が指摘されているからである。先に取り上げた津田は「二一世紀の日本では、医学的根拠がまだ三つばらばらに存在し並立する。そしてそのどれを優先させるかの議論すらされていない」[39]と指摘していた。是非、日本でも「医学的根拠」とは何か、の議論を進めてほしい。その場合、「医療」にも多様な状況があるので、それぞれに応じて「直感」、「メカニズム」「数量化」の活用のあり方を検討するのが妥当ではないか。

（５）　「医療の質」と「医工計測技術」の関係

これまで「医療の質」や「医療の不確実性」という話題について取り上げてきたが、ここでは、そのうち「医療の質」と本報告書の主題である「医工計測技術」との関係を検討することにする。

先に取り上げたDonabedianは「医療の質」を定義するにあたって、その基本的要素として「技術的医療」、「対人関係」、「アメニティ」なるものが考えられると述べていた[40]。彼はこの３つの要素についてそれぞれ簡単な説明をしているが、そのうち、「技術的医療」については「医学及び他の健康科学における科学技術を個人の健康問題の管理へ応用することである」という。この文中に「科学技術」という言葉が登場しているが、まさに「医工計測技術」はその典型であり、ここに「医療の質」と「医工計測技術」とのかかわりを見いだすことができる。

では、具体的にはどのようなかかわりがあるのだろうか。まず、「医療」を狭い定義で考えると、それには「診断」段階と「治療」段階があり、それぞれに対応する「医工計測技術（機器を含む)」が存在することが知られており、本報告書第１部にもいくつかの例が紹介されている。例えば「内視鏡」は開発初期のころには「診断」段階の機器として、最近では「治療」段階の機器としても使われている。また、広義の「医療」に範囲を広げれば、病院・診療所での各部署間の情報交換や電子カルテなど病院管理、あるいは最近注目されている遠隔医療などでの「医療ＩＴ」も「医工計測技術」に含まれるが、ここでは、狭義の「医療」に絞って検討してみよう。

「内視鏡」・「超音波診断装置」と「医療の質」

まず「内視鏡」について。「内視鏡」は「胃カメラ」と呼ばれるように初めは消化器系の診断用機器として登場した。初期のころに比べれば管も細くなり、また管の挿入方法も経

口だけでなく、経鼻も行われるようになり、一般的には管挿入時における患者の苦痛がやわらげられている。またカメラ機能も向上し、バリウムによるＸ線検診に比べれば正確な診断が可能になり、その上検査中にモニターの画像を共有し、医療者と患者間のコミュニケーションも良好になっている。厚労省では胃の検診では両方併用することを奨励している。いずれにせよ、「内視鏡」の導入は「医療の質」（技術、対人関係、アメニティ）において向上していると評価できそうである。

次に「内視鏡」と同様に本報告書に載せられている「超音波診断装置」の場合について検討してみよう。本報告書で吉川も指摘するように超音波診断装置は被曝等が無く安全で、非侵襲であり、繰り返し検査が可能であるなど良い点が多く、いろいろな医療の場面で使われている。この場合でも「内視鏡」の時と同様、この「装置」導入によって「医療の質」の向上は見られているといえるであろう。そこで、「内視鏡」と「超音波診断装置」を併用した一つの治療事例を紹介してみよう。なお、この事例では「内視鏡」は治療段階に使われたものである。

この事例の患者 A 氏は消化器系の不良でしばしば診療所で診察を受けていたが、念のために超音波診断装置による「胆のう」検査を受け、胆のう内に十数個の胆石の小粒があることが発見された。早速、その診療所と提携しているＮ大学病院の専門医グループによって再検査が行われ、胆のう全体の切除が必要であり、その方法として「腹腔鏡下胆のう摘出術」が本人と家族に提案され、了承された。その後、間もなく手術が行われ、1 週間未満で無事に退院に至った。

こうした機器や技術が存在していなかったころの「医療」から見ると、開腹手術でなく、腹部の 3 か所に孔をあける方法であるので入院期間がそれまで平均 2 週間だったものが半分以下になるなどの進歩がみられた。この事例では、そこに使われた機器の進歩ばかりでなく、執刀医の“豊かな”な経験（この病院ではこれまでに同じような方法で胆のう手術が多く行われていた）に基づく説明が患者・家族に安心感を与えたこともあり、「技術的要素」だけでなく、「対人関係」「アメニティ」の要素においても向上が見られたといえよう。なお、Ａ氏へのインタビューによれば「患者満足度」評価は「満足」、「やや満足」、「やや不満足」、「不満足」という 4 つの選択肢のうち「満足」であったという。もちろん、この 1 事例で「医療の質」向上についての「内視鏡」や「超音波診断装置」の評価を一般化することはできない。あくまでもＡ氏の事例での評価である。

「質的研究」と「量的研究」

ところで、近年、そうした「インタビュー」や「観察記録」などから「言語データ」を導き出し、それらを分析して、結論を見出す「質的研究」という研究方法が心理学、教育学など社会科学の分野や本項で取り上げられている医学・医療（特に看護）などで見られている。では、「質的研究」とはどのような研究方法なのだろうか。この研究方法を率先して推進している大谷尚（名古屋大学大学院教育発達科学研究科）[41]は「そもそも医療で

扱うものには、個人や集団の気持ち、感じ方、意識、意欲、希望、信念、価値観などの「主観的あるいは間主観的」で、言語的で、動的かつ相互作用的なものが含まれ、それらは量的・客観的に測定・処理することが困難である」と述べ、 従来の研究方法を「量的研究」と呼び、量的研究者にとっての研究のイメージは、「対象を測定して数量的なデータを採取し、それを統計的に処理して結論を得る」ことであろうが、「量的に測定できるものすべてに意義があるわけでなく、意義あるものすべてが量的に測定できるわけでない。それゆえ、対象を「量」でなく「質そのもの」において把握する研究が必要となる。それが質的研究である。」と指摘する。その上で、研究の背景にある認識論が「量的・実証的研究」では「客観主義的実在論」、「質的研究」では「社会的構成主義」であり、インタビューの際にも前者の立場では「回答者は話すべき客観的体験や客観的知識を持っており、インタビュアーは中立的な立場でそれをそのまま引き出すべき」、後者の立場では「インタビュアーが自分にとってどういう存在か、このインタビュアーが自分にとってどういう意味を持つかによって、意図的・無意図的に話す内容を変えると考える。‥‥質的研究の立場では、この言語化（テクスト化）はインタビュアーと回答者とのつくりだす社会的関係や相互行為論的状況の上に初めて成立すると考える。」と解説している。

このように二つの立場での認識論をはっきり分けてはいるが、実際の「質的研究」は多様であり、「質的研究スペクトラム」とも言うべき大きな連続体を形成しており、その一方の端には実証主義的で客観的な、研究対象の個数（ｎ）の大きな研究が、他方の端にはｎは小さい（時にはｎ＝１）が、その対象に深い解釈を行う解釈学的な研究が、それぞれ位置づけられているという。そうなると、先に紹介した事例は形だけはｎ＝１の「質的研究」に相当するが、「深い解釈」が伴っていないという点で不十分である。今回のインタビューは患者側だけであったが、医療者側へのインタビューも実施すること、また同じような事例を複数調査することなどにより、「質的研究スペクトラム」の仲間入りを目指す必要がある。

いずれにせよ、大谷も述べていることであるが、「量的研究」と「質的研究」との併用によって複雑な医療分野における課題、ここでは「医療の質」の向上に「医工計測技術」がどのような役割を果たしてきたか、またこれから果たすべきかなどの研究が進展することを期待する。

（６） 本節の文献

［1］ 水野肇『医療はどこへ向かうのか』「序章　医学は人間を幸福にしているか」草思社、2006、pp. 13-20.

［2］ 社団法人全日本病院協会病院のあり方委員会編『病院のあり方に関する報告書』2011 年版、第 7 章「医療の質」、2011. pp. 24-37.

［3］ 飯田修平・飯塚悦功・棟近雅彦監修『医療の質用語事典』、「質」、日本規格協会、2005、p. 14.

[4] 飯田修平ら、前出、[3]、「医療の質」、pp.20-21.
[5] 社団法人全日本病院協会の在り方委員会編、前出[2].
[6] Donabedian,A.；“Evaluating the quality of medical care.”Milbank Memorial Fund Quart,44:166-206,1966. （次の記事に依拠＜ Heroes and Martyrs of Quality and Safety; M. Best, D. Neuhauser “Avedis Donabedian; father of quality assurance and poet” Qual Saf Health Care 2004; 13:472-473.doi:10.1136/qshc.2004.012591.＞
[7] 福井次矢監修、聖路加国際病院QI委員会編集『Quality Indicator 2015 「医療の質」を測り改善する 聖路加国際病院の先端的試み』、インターメディカ、2015,p.16.
[8] Donabedian,A；”Explorations in Quality and Assessment and Monitoring,” Volume1.The Definition of Quality and Approaches to its Assessment. (1980)、訳書『医療の質の定義と評価方法』東 尚弘訳、NPO健康医療、評価研究機構 2007
[9] Donabedian,A.、前出、[8]訳書、「3章 評価のための基本的な方法：構造、過程、結果；まとめと結論」、pp.132-134.
[10] 福井次矢「なぜ聖路加に人が集まるのか 医療の質、医者の資質』第5章「「医療の質」とは何か」、光文社、2008、pp.148～149.
[11] 福井次矢監修、前出、[７]、p.16.（出典：Lohr KN(ed).Medicine:”A strategy for quality assurance”. Vols Ⅰ and Ⅱ.Washington DC:National Academy Press.1990)
[12] 高柳和江著『医療の質と患者満足度』日総研出版、1996. 序章を除き、高柳が日総研情報誌「月刊ナースデータ」（平成6年、12か月）に連載した文を加筆修正したもの
[13] 松田晋哉『医療のなにが問題なのか 超高齢社会日本の医療モデル』勁草書房、2013
[14] 上原鳴夫「医療の質を極める」、矢崎義雄編『医の未来』第3章、岩波書店、2011、pp.37-53.
[15] Donabedian,A.、前出、[8]
[16] 三好麻以・坂本圭・植田麻祐子（川崎医療福祉大学）「医療評価の現状と課題～日米の比較を通して～」『川崎医療福祉学会誌』Vol.20,No.1、2010、pp.281～286.
[17] 社団法人全日本病院協会病院のあり方委員会編、前出、[2]
[18] 福井次矢監修、前出、[7]「医療の質を知るためには、アウトカムの評価よりも、プロセスの評価が望ましい」、p.16.
[19] 福井次矢、前出,[10]、第5章「「医療の質」とは何か」（「医療の質」を公開する）pp.151-154.
[20] Donabedian,A, 前出, [8]

[21] 池上直己・河北博文「論説　患者の満足度と病院の管理姿勢～日病の会員施設における実態調査～」、『日本病院会雑誌』1987 年 7 月号
[22] 岩崎　栄 「医療の質について」日本病院会・総婦長セミナー、『日本病院会雑誌』1993 年 1 月号.
[23] 高柳和江、前出, [12]「序章」
[24] 社団法人全日本病院協会病院のあり方委員会編『病院のあり方に関する報告書』2000 年版、2002 年版,
[25] 社団法人全日本病院協会病」院のあり方委員会編『病院のあり方に関する報告書』2004 年版、2004.10
[26] 社団法人全日本病院協会病院のあり方委員会編『病院のあり方に関する報告書』2007 年版、2007.3
[27] 社団法人全日本病院協会病院のあり方委員会編『病院のあり方に関する報告書』2011 年版、2011.6
[28] 公益社団法人全日本病院協会病院のあり方委員会編『病院のあり方に関する報告書』2015～16 年版、
[29] 山口晴巨「薬局における患者満足度に関する狩野分析 ―古き良き実践例と現代の課題への応用について」『社会薬学』Jpn. J. Soc. Pharm. 36 (2)、2017、pp. 126-129.
[30] 福井次矢監修、聖路加国際病院 QI 委員会編集『Quality Indicator　2015　[医療の質]を測り改善する』インターメディカ、2015
[31] 深井穫博「患者満足度研究の意義」、『ザ・クインテッセンス』、Vol. 22、No. 5、2003、pp. 36-45.
[32] 矢崎義雄「はじめに」、矢崎義雄編『医の未来』第 3 章、岩波書店、2011.
[33] 福井次矢、前出[10]、「不確実性と確率の狭間で」、pp. 159-161.
[34] 小松秀樹『医療の限界』新潮社、2007.
[35] 米山公啓『医学は科学ではない』筑摩書房、2005
[36] 津田敏秀『医学的根拠とは何か』岩波書店、2013.
[37] 津田、前出「36」、「第 1 章　第 2 節」、pp. 36-49.
[38] 行岡哲男『医療とは何か　現場で根本問題を解きほぐす』河出書房新社、2012.
[39] 津田、前出「36」、p. 12.
[40] Donabedian, A. 前出、[8]、
[41] 大谷　尚「質的研究とは何か」、『YAKUGAKU ZASSHI(薬学雑誌)』、2017、137 (6)、pp. 653-658.

第 4 節　現代における「医学」「医療」をめぐる議論（2）
～先端医療・終末期医療・その他～

すでに第 3 節のはじめで述べたように本節では「医学」「医療」をめぐる議論のうち、特定の分野に関しての動向を紹介することにする。その分野として、やはり注目したいのが一つは「先端医療」であり、もう一つは「終末期医療」である。さらに「その他」としてユニークな医療のあり方を提唱している二つの事例を紹介する。

（1）　「先端医療」

ここで「先端医療」という言葉であるが、大まかにいえば現時点で開発中の医療技術のことであり、そのための学問的基盤の研究が「先端医学」といえるであろう。最近ではいくつかの医科系の大学に「先端医学研究所」という名称の付属研究施設が作られているが、研究分野にいくらかの違いがみられる。なお、「先端医療」に似た言葉に「先進医療」というものがあるが、これは「先端医療」のうち、厚生労働省の承認のもと厚生労働大臣が定める施設基準に適した医療機関で実施される医療のことであり、医療制度上の言葉である[1]。生命科学・医学を中心とした科学政策論を展開している櫛島次郎と医療・介護制度、薬害エイズなどに関わるジャーナリストの出河雅彦の共著[2]によれば「先進医療は、健康保険の対象となっていない新しい医療技術について、安全性、有効性、効率性などを評価して、将来保険適用にするかどうかを検討するための制度」のもとで、「実験研究段階を抜けて医療と認められ保険がきくようになるまでの「待機候補」との位置付けだと考えてよいだろう」と。

では現在「先端医療」といわれるものにはどのようなものがあり、そこではどのような議論が展開されてきているのだろうか。

日本医学会では 4 年ごとに総会が開かれ、それに合わせた出版物を公にしている。前項「医療の不確実性」で紹介した矢崎義雄が編集した著書[3]もその一つであるが、その 4 年前にも同じ性質の著書[4]があり、「先端医学の現段階」という括りで「老化と痴呆の解明」、「ヒトはなぜがんになるのか」、「新しい感染症の流行」、「臓器移植の課題」、「遺伝子治療」という 4 つの論文が載せられている。これらは医学会から見てその時点での「先端医学」のテーマであったのだろう（なお、一つの論文タイトルに「痴呆」という言葉が使われているが、それを厚生労働省が「認知症」という言葉に変更したのがこの著書発行後の 2004 年であるためであろう）。

また、最近（2015）、同じく医学会総会に合わせて出版された著書[5]の第Ⅰ部「医学の最前線」では「再生医療と創薬」、「21 世紀のがん医療」、「革新的ロボット治療を創る」、「脳の発達と幼児教育」、「先制医療」、「トランスレーション医学とは何か」というテーマが並び、後半の第Ⅱ部「医療の現場から―きずなの構築のために」の中には「医療と情報技術」や「胃ろう問題と死生学」という論文も含まれており、これらは本章にとっていずれも興味深いテーマである。ここでは上の著書などを参考にして「先端技術」の例として「移植

医療・再生医療」と「遺伝子治療」を取り上げることにしよう。

（i） 移植医療・再生医療

2017 年 3 月 29 日付「朝日新聞」朝刊の一面に「失明の恐れがある網膜の病気の患者に、他人の iPS 細胞を網膜の細胞に変えて移植する手術」が行われたという記事が載せられた[6]。ご承知のように「iPS 細胞」（induced pluripotent stem cell）は胚性幹細胞（ES 細胞：embryonic stem cell）と同様に体を構成するあらゆる細胞に分化する能力を持った細胞で、後者が名前のように胚由来であるのに対して、前者は体細胞由来で、2006 年マウスを使って京都大学の山中伸弥らによって世界ではじめて作り出された（2012 年度ノーベル生理学・医学賞受賞）。すでに患者自身からの iPS 細胞を培養して作った網膜組織の移植は 2014 年に行われていたが、今回の場合は他人の iPS 細胞由来のものを用いたという点でニュースになった。同じ「新聞」に「世界初の iPS 細胞を使った移植手術から２年半。‥‥この間 iPS 細胞の人への移植報告はなく、事実上、臨床応用は滞っていた。今回の移植が順調に進むかどうかは iPS 細胞の医療利用の試金石となる」[7]とある。

ところで、上の場合は「組織」というレベルでの「移植」であるが、20 世紀後半、心臓という「臓器」レベルでの「移植」が行われ、医療界ばかりでなく、多様な分野の人々の注目を集め、議論が展開された。本章末に掲載した関連図書のリストからもその状況の一端を知っていただけるであろう。大きな議論の一つは臓器提供者の「死」とは何かということ、いわゆる「脳死」問題であった。

この「脳死議論」について、先に「先進医療」の説明のときに紹介した櫛島らは同じ著書[8]で日本では「脳死は人の死か否かについて世論を真っ二つに割る激しい論争を引き起こし、脳死者からの臓器移植の実施を阻む」ことになったが、そのことに火をつけたのがジャーナリストの立花隆（本章末尾の文献リスト参照）の論考であったという。立花は医学文献を精力的に調べ、専門家への取材も行い、厚生省（当時）の研究班が作成した「公定」脳死判定基準（班長の名をとって「竹内基準」という）は人の死亡を判定できていないと批判したという。ここで「竹内」とは杏林大学の竹内一夫（本章末尾の文献リストにあり）のことで、杏林大学のホームページには、「この基準はその厳格さから世界的に評価も高く、今も“竹内基準”の名で呼ばれ、日本の脳死臓器移植の確立という医療の歴史に 1 ページを築かれました。」と評価されている[9]。一方で、櫛島らは、立花と医学者たちとの間での議論の様子を「それまで絶対的だった「医の権威」を覆し、一般人も参加できる議論を導いた点で画期的だった」と表現している。物事の評価は立場によって異なるものである。

いずれにせよ、「脳死判定基準」は国会で「臓器移植法」として 1997 年成立したが、その前年、科学史・科学哲学専攻で広く科学論や生命論などに取り組んでいる小松美彦が「死の在り方と医学・医療の在り方への歴史批判を通じて、脳死・臓器移植問題を考察した」（あとがき）という著作を公にした[10]。この中で、①「脳死と死」を等値することの問

題点、②臓器移植が十全な医療であるという前提への批判、③「死の自己決定権」という説得力に満ちた推進論理への批判という三つの事柄を取り上げ、これらが「脳死・臓器移植問題」の核心でありながらこれまで正面から本格的に批判、検討されることがなかったと述べ、それらについて歴史的事象も含めながら議論を展開している。彼はこの著作を皮切りに脳死・臓器移植問題に関する著作を発表してきている（章末文献参照）が、脳死からの臓器移植には批判的である。

さて、話を再生医療の方へ戻そう。脳死からの臓器移植については国内外で倫理的問題や移植臓器の不足などから限界があった。そのとき、生み出されたのが「胚性幹（ES）細胞」を用いた再生医療である。1981 年にイギリスのマーチン・エヴァンスがマウスを使った発生学研究分野で ES 細胞を作り出すことに成功した。その後、1998 年になってアメリカのジェームス・トムソンらによって人間でも作り出され、それを用いての再生医療研究が進むことになった。

しかし、脳死・臓器移植の時と同様、ES 細胞利用の再生医療でも倫理的問題が起こった。それは ES 細胞を作るときの材料が受精胚や胎児からだったため、「人の命の始まり」を犠牲にするとして論争が巻き起こった。山中によれば、「二〇〇一年に当時のブッシュ大統領が、新たな ES 細胞（胚性幹細胞）研究に連邦政府からの支援を禁じた」[11]そうで、アメリカにおける幹細胞研究は大きな衝撃を受けたという。

その壁を破ったのが山中たちの「iPS 細胞」の登場であった。彼らは ES 細胞が持つ遺伝子の中で ES 細胞の特徴（自己増殖する能力、いろいろな細胞に分化する能力）を作り出す遺伝子をさがし、4 つの遺伝子を同定し、それらをマウスと人の皮膚細胞に組み込み、iPS 細胞を作り出すことに成功したのである。ふたたび、再生医療の研究が進み現在に至っている。その状況はここで紹介している著書のほかに先に取り上げた日本医学会からの著書でも簡単に触れられている[12]。

では、iPS 細胞による再生医療には問題はないのだろうか。櫛島らは、iPS 細胞は遺伝子を組み込んで作った人工的なものであり、自然界には存在していない。また、作り出された仕組みもまだわかっていない。そうしたものを人間の治療に使っていいのかどうか、そして安全性と有効性が試験管内や動物実験で十分に確証されなければならないが、日本発の成果ということもあって官民挙げての期待と圧力は相当なものである[13]と述べていたが、本項の初めに紹介したように臨床実験が行われた。

（ii） 遺伝子治療

つぎに「遺伝子治療」について紹介しよう。大阪大学分子遺伝研究分野教授の野島博によれば「遺伝子治療とは、遺伝子の異常により病気になった患者の細胞に外部から正常遺伝子を導入して働かせる（発現させる）ことで病気を治療すること」[14]であるという。こうした治療のアイデアは 1970 年代に始まったが、臨床試験としては 1980 年にはアメリカのクラインがサラセミアという重症貧血患者に対して行ったのが初めてである。この臨

床試験はリスクを伴う状態で行われ成功しなかったという。その後、アメリカを初め日本でも遺伝子治療のガイドラインが作られ、外部からの正常遺伝子の導入方法の安全性も確認され、さらに 1991 年に開始されたヒトゲノム解析の研究も 2003 年には精密な配列が決定され、いろいろな遺伝病に関わるゲノムの様子もわかるようになり、遺伝子治療への関心と期待が広がるようになった。ここでは、まずヒトゲノム解析が進みつつあったころに出版された何冊かの本を取り上げ、遺伝子治療に関してどのような議論が展開されたかを見てみよう。

はじめは、すでに取り上げたが、1999 年に日本医学会総会を記念して出版された著書[15]の中に登場する小澤敬也（自治医科大学・遺伝子治療・血液学）の小論（13 ページ)。彼は医学の進歩で病気の本態が分子レベルで解明され、遺伝子診断という科学的、客観性の高い診断法が生み出されてきているが､分子病態に基づく治療につなげられない難病(筋ジストロフィーなど）が多く存在する状況であると述べた後、遺伝子治療の歴史、この治療の対象となる疾患、臨床研究の実施状況と問題点を紹介し、最後に「臨床研究はかならずしも順調に進んでいるわけではないが、まったく新しい角度からの治療法を開拓することが可能になったという意味では、遺伝子治療が画期的な方法であることにはまちがいがない。今後の技術革新により、遺伝子治療をふくめた遺伝子操作技術が近い将来ひろく医療に取り入れられていくことは確実であると予想される」と期待していた。

この小澤よりも数年早く、1996 年に「生命科学は科学者だけにまかせておけばよい問題ではなくなっている。しかし、わかりやすい言葉で生命科学の現状を一般の人々につたえるのは、科学者の義務であろう」という思いで生物学者・サイエンスライターの柳澤桂子によって遺伝子医療の最先端のことを中心にした著書[16]が出された。生命の基本的単位の DNA、その塩基配列、さらにヒトゲノムの話に続き、当時まで知られていた病因遺伝子についての知見を紹介したあと、「遺伝子診断」や「遺伝子治療」の問題点をつぎのように論じていた。前者では診断結果の告知について、「研究はまだはじまったばかりで、わたしたちにはほとんど何もわかっていないのだということを肝にめいじるべきである。もっと研究が進んで、病因遺伝子の機能とか、発症の全体像があきらかになるまでは、できるかぎり慎重にことをはこぶべきであろう」と。後者でも「遺伝子治療に対する社会の目は過熱状態であるが、現実には、私たちは満足なベクターさえ、手に入れていない。」として慎重な取り組みの必要性を述べていた。ここで「ベクター」とは患者の細胞に外部から導入する正常な遺伝子を運ぶ働きをするウイルスなどである。

こうした著者の遺伝子操作などに対する慎重さはその著書の「おわりに」にある「人間の欲は、すでに地球を化学物質で汚染し、生態系を破壊してしまった。そのことに気づいて、やっと反省の機運が高まってきた中で、さらに遺伝子環境までも破壊しようとしているのである。‥‥遺伝子医療に関しても､手にした技術をすべて使ってよいとは限らない」という言葉を通して感じられる「科学文明の問い直し」という考えから来ているのではないか。

次に取り上げるのは日本筋ジストロフィー協会が「遺伝子医療における社会的、倫理的問題を考える」というテーマで平成10年度から12年度にかけて3回開かれたシンポジウムのうち、2000年2月と9月のものをまとめた著書[17]である。このなかの「シンポジウム②遺伝子治療」では遺伝子治療の専門家、遺伝学者、遺伝病の患者、地球物理学者、新聞社論説委員らが参加し、遺伝子治療の研究の現状や将来展望、倫理的、社会的課題などが話し合われていたが、その中で患者自身の「障害をもって生まれたことは不幸ではない」という話の最後にある「むしろ、逆に障害があったおかげでふつうの人には見えない部分とかがよく見えるし、チャレンジしようという気持ちさえあれば、幸せに生きることができると思います。人それぞれに考えは違うと思いますが、遺伝子医療を進めるにあたっては、こういう考えを持っている患者もいることを理解しながら、慎重に慎重を重ねて進めていただきたいと切に願っています。」という言葉は、同じシンポジウムで地球物理学者の松井孝典が地球の歴史という視点からこれまでの人間活動を特徴づけたうえで、「20 世紀という時代に根付いた人間観をさらに追求していく立場と、それ自身をもう一度見直すべきだという立場に大きく分かれると思うのです。遺伝子治療の問題を語るさいにも、根っこにはそういう問題があることを忘れてはいけないと思います」という言葉とともに重くうけとめる必要があるのではないか。後者は先に紹介した柳澤桂子の想いと通じるところがある。

そこで当時の遺伝子治療の状況がどのようであったかを知る一つの手がかりとして本橋登（明治薬科大学）の著書[18]を調べてみた。この著書は、現在最も緊急な必要課題である遺伝子病について紹介し、読者への認識を促す目的で書かれたそうで、いろいろな疾病についての従来の治療法と遺伝子治療法などを紹介する中で「代表的な臨床試験中の遺伝子病」という表を載せていた。その表には19の遺伝子病が取り上げられており、そのうち、現在、「臨床実験中」のものが8、「近い将来、臨床実験に入る可能性のあるもの」が4、そして残りが「前臨床研究中」という状況であった。ちなみに「筋ジストロフィー」では「デュシェンヌ型筋ジストロフィー」が「前臨床研究中」に含まれていた。先のシンポジウムの中でも「筋ジストロフィー」の遺伝子治療の研究はまだであると述べられていた。

それから十数年後、2016年に出版された小長谷正明（神経内科専門、国立病院機構鈴鹿病院長）の著書[19]の「はじめに」には、アメリカ食品医薬品局（ＦＤＡ）が 2016 年 9 月 19 日に「デュシェンヌ型筋ジストロフィー」の遺伝子治療認可の声明を出したことが記されていた。長年、こうした難病を診てきた著者は「条件づきではあったが、難病に対する史上初の遺伝子治療の認可で、快挙である。この病気のＤＮＡ異常がわかってから約三〇年もたってしまったが、いよいよ遺伝子治療が現実のものとなったのだ」（はじめに）と期待を膨らませている。本文中で神戸大学の松尾雅文によって考え出されたという「エキソン・スキッピング」という方法で筋ジストロフィーに罹っていたイヌがいくらか歩けるようになったという話を紹介し、この方法の人間への適用実験ではまだ成功していないが、この方法の可能性などが、今リアルタイムで検討されているという。

この筋ジストロフィーを初め、筋委縮性側索硬化症（ＡＬＳ：Amyotrophic lateral sclerosis)、パーキンソン病などの難病、その他の遺伝病などを対象に遺伝子治療の研究が進められてきている。ちなみに日本における遺伝子治療研究に関する状況の一端を知ることができるデータを国立医薬品食品衛生研究所のホームページから入手したので紹介しておこう。この研究所の遺伝子治療室長内田恵理子によってまとめられた「遺伝子治療臨床試験の承認件数推移」[20]（1995 年から 2015 年まで）によれば総数が 62 件、5 年ごとに纏めてみると、95-99（4)、2000-04（15)、05-09（10)、10-14（23)、05 のみで（10）というように最近になって増加傾向が示されている。

最近では「ゲノム編集」(ゲノム上の特定の部位を狙って改変する技術）が遺伝子治療との関係でも話題になっている。石井哲也（北海道大学）は、ゲノム編集は多様な遺伝子改変―遺伝子組み換えを含むーを高効率に達成できるものであり、ヒトゲノムに関する膨大な情報とゲノム編集を組み合わせ、従来の遺伝子治療とは異なるコンセプトの治療法を開発することができるという。2014 年、アメリカではエイズ患者 12 人を対象にした世界初の「ゲノム編集治療」の臨床実験結果が発表され、その安全性が確認されたそうである[21]。

石井も上記の論説の中で「ゲノム編集の医療応用を責任を持って進めるためには、遺伝子改変の慎重な検証は必須である」「ゲノム編集治療の開発は、被験者を守りながら適切に進めていくことが重要である。そのためには、リスク評価の在り方についてコンセンサスを形成する必要がある」などと述べているが、これらのことを含めて遺伝子レベルの人為的操作は先に松井や柳澤が述べていた「地球レベル」の視点を持った検討が必要ではないか。

（2）　終末期医療

医療の世界では、しばしば「終末期の」という言葉が使われる。黒田浩一郎によれば、「近い将来に死を迎えると予想されるという意味である」という[22]。人によっては、この時期は「医療」ではないので「終末期ケア」というべきだと。ここでは「医療」に「ケア」の精神を含めて従来通り「終末期医療」としておく。

これまで本章では日本医学会総会に合わせて出版された 3 冊の著書を紹介した。その中で、いわゆる「終末期」における医療のあり方について論じられたものといえば、一番最近（2015 年）出版された著書[23]に載せられた「ホスピス・緩和ケアービハーラ病棟から」（大嶋健三郎）と「胃ろう問題と死生学」（会田薫子）である。そこでまず、「ホスピス」に関わる課題と議論がどのようなことであるかを紹介しよう。

ホスピスという言葉は現在の病院（hospital）の語源にあたるもので、中世ヨーロッパにおける巡礼者の宿泊施設の名前であったが、現在では「終末期ケア」のプログラム自体、またはその施設を指すものである。ここに登場して頂いた「あそかビハーラ病院」の院長でホスピス・緩和ケア医の大嶋によれば、よくホスピスは死に場所だといわれるが、自分はそうは考えない。がんで死に逝く人たちは、死の瞬間まで生き抜く人たちであり、そし

てホスピスのスタッフはその人たちの死が訪れるまで、その人らしく生きてほしいと願っていると。そのためにスタッフたちのチームワークの大切さも指摘している。

最近では、一般の病院でなく、病院の「ケア病棟」や自宅ケアでの「終末期」を迎えたいという希望が増えているようであるが、ケア病棟の数は 1990 年の 5 病棟から 2012 年までに 257 病棟に増えた[24]とはいえ、その要望を満たすのには不足している。さらに先に大嶋が述べた「チームワーク」に加わる医師、薬剤師、看護師、メディカル・ソーシャル・ワーカー、栄養士、宗教家などの不足も課題のようである。今後の緩和ケア分野の専門知識・心などを持った人たちの養成に期待する。

次に「胃ろう」問題について。医療倫理学、医療死生学などを専門にする会田薫子は先に紹介した著書[25]の当該論文で死生学の視点から現在の「胃ろう」による治療の状況を検討している。「死生学」という学問に耳新しさを感じる人もおられるかもしれないが、簡単には「どのように生き、どのように生きおわるか、の学問」[26]であり、前項で取り上げたホスピスに関連付けると「医療死生学」という分野になる。

会田によれば、現在広く行われている「胃ろう栄養法」は 1979 年アメリカの小児外科医と内視鏡医との協働で開発された「ペグ」という術式（外科手術の方式）のもので 1990 年代から日本で徐々に施行され、2000 年代には保険点数の上昇もあって多くの医療機関に広がりを見せたが、そうした広がりに伴い、その光と影が日本社会に様々な問いを投げかけている。その問の一つは「胃ろう栄養法」の病気による適否の問題で、欧米では「アルツハイマー病の場合は終末期になるまで摂食可能なことが多く、可能な限り食事介助をし、その上で摂食困難になったときは本人の生命が終わりに近づいていることを意味しているので、胃ろうや経鼻経管による栄養法は本人の身体にはかえって負担になる」というガイドラインが示されているという。こうしたいくつかの病気についての例を紹介したうえで、医学的延命が患者本人にとって最善であるかどうかを捉えなおすことが必要であり、その捉えなおしの視点として患者が持つ思想信条、価値観、人生観、死生観などを反映した多様な人生の物語を尊重すること、その際、患者側と医療者側とのコミュニケーションが重要であることが述べられる。最後に「このような医療者の姿勢は、一人ひとりの価値観や死生観を踏まえて人生の集大成を支援する医療文化の創成にとって重要」であると結んである。

先に「医療の不確実性」の項で紹介したことであるが、小松秀樹は「日本人の死生観が変容したようである。あるいは日本人が死生観といえるようなものを失ったのかもしれない」と述べていた[27]。日本には仏教の影響もあって「無常観」という「死生観」がある（あったというべきか）。そこには静かに死を迎えるという気持ちがあるように思う。医師で日本尊厳死協会副理事長の長尾和彦らが言う「平穏死」に似たものであるかもしれない[28]。

（3）　その他

医療の在り方に関して「医療」の枠を広げた立場からの議論を紹介しよう。一つは中村桂子の「ライフステージ医療」(一生を支える医療）という考えである[29]。これは医療システムの一つの姿であり、中村によれば「人生のあらゆるステージを自分らしく生きられる社会でありたい」「そのような社会を作るには、個人の一生を見続ける医療が必要」「一人の人をずっと見守ってくれる医師がおり、病気の時は最適な処置をしてくれる（必要な時は高度の専門性を持つ専門医を紹介してくれる)という医療システムになっている」、「つまり「オーダーメイド医療」」、「オーダーメイド医療は、言葉通り、人間一人一人に向き合う医療」、「最先端の医療技術だけで実現されるものでなく、一人の人間の全てを見続けてくれる医療」であるという。かつては地域に存在した開業医が実践していた姿でもあるが、医療システムの在り方を考える上で大切な視点である。

もう一つ、医療にかかわる医学などの枠を広げた立場で医療を進めているグループ「日本統合医療学会」(理事長渥美和彦）の提唱する「統合医療」がユニークである。グループの仲間の「日本アリゾナ大学統合医療プログラム修了医師の会」によって著された著書[30]によれば「「統合医療」とは「既存の西洋医学（Conventional　Medicine)」と「西洋医学以外の医療である補完代替医療（CAM:Complemental and　Alternative Medicine)」を統合した「医療」のこと」であるという。別の言い方で「近代西洋医学を中心として、伝統医学、相補・代替医療を統合し、患者中心の医療を推進しながらクライアントの疾病予防に努め、健康推進に寄与しようとするもの　１．患者中心の医療、２．身体、精神のみならず、人間を包括的に診る全人的な医療　３．治療、疾病の予防や健康増進に寄与する医学　４.生まれて死ぬまでの一生をケアする包括的な医療を目指すもの」とも紹介されている。上に紹介した「アリゾナ大学統合医療プログラム」は1997年アリゾナ大学統合医療センターのアンドルー・ワイルによって生み出されたものであるという。

ここに示された統合医療の目標を見ると「補完代替医療」の中身や統合することのできる医療者の存否など課題は多いようである。

（4）　本節の文献

[1]　http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/iryouhoken/sensiniryo/index.html

[2]　櫛島次郎・出河雅彦共著『移植医療』岩波書店、2014、p.129.

[3]　矢崎、前出（第3節[31]）

[4]　高久史麿編『医の現在』岩波書店、1999.

[5]　井村裕夫「先制医療」、井村裕夫編『医と人間』岩波書店、2015、pp.91-109.

[6]　他人のiPS　初の移植」『朝日新聞』2017年3月29日付け朝刊、1面の見出し.

[7]　「iPS　医療利用への試金石　他人の細胞移植　実績の蓄積重要」同上：7面見出し.

[8] 櫛島、前出[2]、「序章」pp.1-17.
[9] 杏林大学ホームページ、(www.kyorin-u.ac.jp/cn/html/kyorin/00003/201502051)、2017年.3月.29日検索.
[10] 小松美彦『死は共鳴する　脳死・臓器移植の深みへ』勁草書房、1996、「あとがき」p.287.
[11] 山中伸弥『iPS 細胞が医療をここまで変える　実用化への熾烈な世界戦争』PHP研究所、2016、pp.91-94.
[12] 山中伸弥「再生医療と創薬」、井村裕夫編,前出[5]、pp.3-19.
[13] 櫛島、前出[2]、「終章：限界をどう超えるか」、pp.155-177.
[14] 野島博『絵でわかる遺伝子治療』講談社、2014、pp.2-4.
[15] 小澤敬也「遺伝子治療」、高久史麿、前出[4]、pp.74-86.
[16] 柳澤桂子『遺伝子医療への警鐘』岩波書店、1996、岩波現代文庫版（2002）.
[17] 貝谷久宣・日本筋ジストロフィー協会編『遺伝子医療と生命倫理』日本評論社、2001.
[18] 本橋登『ヒトゲノムと遺伝子治療』丸善株式会社、2002.
[19] 小長谷正明『難病にいどむ遺伝子治療』岩波書店、2016.
[20] 内田恵理子「遺伝子治療用製品の開発における国内と海外の規制動向―5 年間の進展」、ヒューマンサイエンス振興財団規制動向調査班勉強会、2016.6.16
[21] 石井哲也「ゲノム編集医療は社会に普及するか」、「特集　ゲノム編集の現在」『科学』vol.86、no.12、2016、pp.1249-1253.
[22] 黒田浩一郎、前出（第２節、佐藤純一[8]）、pp.158-160.
[23] 井村、前出[5]
[24] 宮下光令ほか「データでみる日本の緩和ケア」
http://www.hospat.org/assets/templates/hospat/pdf/hakusyo_2013_2_1.pdf
[25] 会田薫子「胃ろう問題と死生学」、井村、前出[5]、pp.215-233.
[26] 会田、井村、前出[5]、p.216
[27] 小松、前出(第3節[33])
[28] 長尾和宏『「平穏死」10の条件』ブックマン社、2012.
[29] 中村桂子＋山岸敦『「生きている」を見つめる医療　ゲノムでよみとく生命誌講座』講談社、2007. pp.2-11.
[30] 日本アリゾナ大学統合医療プログラム修了医師の会著『統合医療とは何か？がわかる本』ほんの木、2012.

第 5 節　まとめ～文明史（医療技術史）における「医工計測技術」の位置づけ

これまで本章では第 1 節で「科学革命」以前の文明期、第 2 節では科学文明期のうち 19 世紀まで、それぞれの時代における「医療」の状況を、そして第 3 節で科学文明期のうち 20 世紀以降の現代における「医療」をめぐるさまざまな議論を、それぞれ関連出版物を通して紹介し、これからの医療の在り方を検討する上での参考にしていただくことを目指した。こうした歴史的視点を取り入れるのは本章のはじめに述べたように人々の暮らし方(大きくは文明）によって「疾病」の状況、それに伴い「医療」の在り方も異なっており、それらの比較検討から何らかのヒントが得られることを期待するからである。ただ、今回は紹介した出版物の数が少なく、また時代によって取り上げたテーマも異なり、それぞれが事例紹介に終わっている傾向があり、全体の流れの紹介が不十分である。そこで、本節のタイトル「まとめ」の後に付けたテーマについていくらかの補いをすることにした。

ここに取り上げる「医工計測技術」は本報告書にとって中心的存在であり、その名前の示すように優れて「科学技術」の仲間である。したがって文明史、医療技術史に位置づけた場合、当然「科学文明期」の所産である。問題はその「科学文明期」をひと纏めにできない状況、具体的には科学技術そのものが初期段階と現代で大きく異なっている状況が生まれていることである。情報技術（IT）の登場がその大きな要因である。すでに 20 世紀末に「情報文明」という言葉がタイトルに付いた出版物が出されている[1]。そうなると CT など医工計測技術の大半は「情報文明」の所産ということもできる。そこで、以下、簡単に IT を導入した機器を用いての診断・治療技術に至るまでを振り返ってみることにする。

本章では文明期以後の状況を扱ったが、それ以前に関して先に取り上げた梶田の著書[2]の言説から始めよう。それは、そもそも「医療」とは何か、そのための「医療技術」はどうあるべきかを考える上で大切な事柄が含まれていると考えるからでる。彼によれば、医学は人間の「慰めと癒し」の技術であり、学問である。鳥やサルが互いにやっている「毛づくろい」はその原型であろう、と。ついで彼はネアンデルタール人に関する最近の墓所の遺跡に関する情報から彼らには個人の枠を越え、複数の人々の協力によって、社会の健康を維持しようとする「衛生」の行為があった可能性があると指摘し、さらに穴居家族の母親が病気の子供の頭を冷やしたり、戦争で置き去りにされた負傷者のわきに一握りの食べ物を置いたりした行為は「看護」の起源であるというオスラー（カナダ生まれの医学者）の講演内容を紹介し、ここにも「医療」（梶田は「医学」としている）の源があることを示唆している。

では、文明期以後の「医療」「医療技術」はどのような状況であったのか。その場合、「医療」には「診断」と「治療」という段階があり、それぞれについての「技術」があるので、例えば、上記の梶田の言説にある「慰め」、「癒し」、「看護」は広い意味で「治療」的技術であるが、その中で「看護」の行為で取り上げられている「母親が子供の頭を冷やす」前にはその子供の体温が普段より高いので病気ではないかという「診断」がされたはずである。現在であれば「電子体温計」を用いれば数十秒で体温を知ることができ、「診断」のた

めの一つの情報が素早く入手できるが、当時はおそらく母親の「手当て」（人の皮膚にある温点・冷点と言う感覚点の働き）がその役を果たしたのであろう。

この体温計の歴史を久保田博南（医療機器開発コンサルタント）の著書[3]に依拠して紹介すれば、17 世紀初めにガリレオの温度計を応用したイタリアのサントリオ・サントリオによって空気の膨張で体温を知る体温計が発明され、ついで 18 世紀の初めにドイツの物理学者ダニエル・ファーレンファイトによってアルコールや水銀など液体の熱膨張などを利用したものが作られ、19 世紀の中頃にはイギリスの医師トーマス・アルバットによってポケットサイズのものが作られたという経緯があり、その後、水銀を使った体温計が広く世界で使われてきた。

同様の流れは他の「情報文明」所産の医療機器、例えば患者の体内を知るための聴診器に該当する超音波診断装置、X 線 CT、心電計、内視鏡などの「診断」機器においても当てはめることができる。また「治療」段階においても人工呼吸器、透析器、内視鏡などが浮かび上がり、それぞれが医療活動に大きく貢献している。

しかし、こうした医療機器の開発に当たっては、「そもそも医療とは何か」という原点へ立ち戻ることが大切である。先に「医療の質」で紹介した上原のいう「技術本位の質から患者本位の質へ」、上に紹介した「母親と子供とのつながり」、「医療者と被医療者とのつながり」、広く言えば「人と人とのつながり」を大切にするという視点を維持した医療技術の開発であることを期待したい。

なお、本章で紹介した出版物の著者に付してある所属・肩書などは当該出版物が発刊されたときのものである。

本節の文献

［1］　公文俊平『情報文明論』NTT 出版、1994.

［2］　梶田、前出（第 1 節[24]）、pp. 21-22.

［3］　久保田博南『医療機器　生い立ち・役目と働き・望まれる姿』真興交易（株）医書出版部、pp. 104-108.

第６節　本章で参考にした文献リスト（本文で引用したものは除く）

（1）　文明史

湯浅赳男『環境と文明』新評論、1993.

根井康之『文明系と生態系：新しい地球文明を展望する』農山漁村文化協会、1993.

梅原猛・伊東俊太郎・安田喜憲総編集『「講座」文明と環境』［全 15 巻］朝倉書店

①地球と文明の周期、②地球と文明の画期、③農耕と文明、④都市と文明、⑤文明の危機⑥歴史と気候、⑦人口・疫病・災　害、⑧動物と文明、⑨森と文明、⑩海と文明、⑪環境危機と現代文明、⑫文化遺産の保存と環境、⑬宗教と文明、⑭環境倫理と環境教育、⑮新たな文明の創造. 1995. 5-1996. 9、新装版＜2008＞

P.F.ドラッカー（上田惇生訳)『ネクスト・ソサエティ　歴史が見たことのない未来がはじまる』ダイヤモンド社、2002.
中西輝政『日本人のこころとかたち：文明史の立場から』PHP 研究所、2007.
伊東俊太郎『伊東俊太郎著作集』. 第 7 巻（比較文明論 1）　麗澤大學出版会、2008.
安田喜憲『稲作漁撈文明―長江文明から弥生文化へ』雄山閣、2009.
本間孝『文明史観の系譜』文芸社,2009.
戸川達男『遠未来の人々との絆』東京図書出版、2014.

（２）　科学（科学技術）文明史・論

井塚正義『技術文明史論』ミネルヴァ書房、1972.
合田周平ほか『科学文明の復権：“巨大危機”からの脱出』日本経済新聞社、1978.
廣瀬　健・淵　一博『第五世代コンピュータの文化』海鳴社、1984.
井塚正義『技術文明史の年輪：英知と技術と位置』六法出版社、1985.
中川徹『文明史上における科学技術の歩み』青山社、1993.
佐久間章行『人類の滅亡と文明の崩壊の回避：高度技術社会のパースペクティブ』丸善プラネット、1996.
志村史夫『文明と人間：科学・技術は人間を幸福にするか』丸善,1997.
村上陽一郎『文化としての科学/技術』（双書　科学/技術のゆくえ）岩波書店、2001.
伊東俊太郎・広重徹・村上陽一郎『改訂新版　思想史のなかの科学』平凡社ライブラリー 2001.
小林傳司『誰が科学技術について考えるのか―コンセンサス会議という実験』名古屋大学出版会、2004.
鳥井弘之『科学技術文明再生論』日本経済新聞出版社、2006.
岡本暁子・西村吉雄・若杉なおみ編『科学技術は社会とどう共生するか：早稲田大学科学技術ジャーナリスト養成』東京電機　大学出版局、2009.
レイ・カーツワイル他『ポスト・ヒューマン誕生　コンピュータが人類の知性を超えるとき』日本放送出版協会、2007.
小林傳司『トランス・サイエンスの時代―科学技術と社会をつなぐ』NTT 出版、2007.
伊東俊太郎『伊東俊太郎著作集. 第 4 巻（比較科学史)』麗澤大学出版会、2009.
科学技術振興機構社会技術研究開発センター 編.『科学技術と知の精神文化 ： 新しい科学技術文明の構築に向けて』丸善出版、2009.
科学技術振興機構社会技術研究開発センター 編『科学技術と知の精神文化. 2（科学技術は何をよりどころとし、どこへ向かうのか)』丸善出版、2011.
ダン・セノール/シャウル・シンゲル（宮本喜一訳)『アップル、グーグル、マイクロソフトはなぜイスラエル企業をほしがるのか？　イノベーションが次々に生まれる秘密』ダイヤモンド社、2012.

佐藤文隆『科学と人間　科学が社会にできること』青土社、2013.
ジョン・フォージ（佐藤透・渡辺嘉男訳）『科学者の責任；哲学的探求』産業図書、2013.
池内　了『科学のこれまで　科学のこれから』　岩波書店、2014.
市川惇信『科学の眼で人の社会を観る　進化論的世界観』東京図書出版、2014.
新井紀子『ロボットは東大に入れるか』イースウトプレス、2014.
ルイス・ダートネル（東郷えりか訳）『この世界が消えたあとの科学文明のつくりかた』河出書房新社、2015.
島薗進・後藤弘子・杉田敦編『科学不信の時代を問う　福島原発災害後の科学と社会』合同出版、2016.
マレー・シャナハン（[監訳者：ドミニク・チェン）『シンギュラリティ：人工知能から超知能へ』NTT 出版、2016.
ウェンデル・ウォラック（大槻敦子訳）『人間　VS テクノロジー　人は先端技術の暴走を止められるのか』原書房、2016.

（３）　医学史・医療史・医学論・医療論

中川米造『健康の思想』潮出版社、1976.
宮川俊行『安楽死の論理と倫理』東京大学出版会、1979.
小泉　明「文明と健康」、平野龍一著者代表『東京大学公開講座文明と人間』東京大学出版会、1981、pp. 161-196.
山田正篤「近代文明とくすり」、同上、pp. 197-233.
鈴木善次『日本の優生学　その思想と運動の軌跡』三共出版、1983.
立花　隆『脳死』中央公論社、1986.
水谷弘『脳死論』草思社、1986.
竹内一夫『脳死とは何か』講談社、1987.
斎藤正男編『医療と工学技術』、講座代表・森亘『講座・21 世紀へ向けての医学と医療』、第 6 巻、日本評論社、1987.
森岡正博『生命学への招待　バイオエシックスを超えて』勁草書房、1988.
中川米造『医療の文明史』日本放送出版協会、1988.
中川米造『＜癒し＞のまなざし―中川米造対談集』福村出版、1989.
中川米造『医とからだの文化誌』法政大学出版局、1993.
速水　融・町田洋編『人口・疾病・災害』、梅原猛ほか総編集『講座　文明と環境』第 7 巻、朝倉書店、1995.
山口研一郎編『操られる生と死　生命の誕生から終焉まで』小学館、1998.
澤田愛子『今　問い直す脳死と臓器移植』東信堂、1998.
イヴァン・イリッチ著、金子嗣郎訳『脱病院化社会　医療の限界』晶文社、1998.
ハーバート・ヘンディン著、大沼安史・小笠原信之訳『操られる死―安楽死がもたらすも

の』時事通信社、2000.
米本昌平・松原洋子・櫛島次郎・市野川容孝『優生学と人間社会』講談社、2000.
米国医療の質委員会・医学研究所著、医学ジャーナリズム協会訳『人は誰でも間違える―より安全な医療システムを目指して』日本評論社、2000.
森岡正博『生命学に何ができるか　脳死・フェミニズム：優生思想』勁草書房、2001.
加藤尚武『先端技術と人間　21 世紀の生命・情報・環境』NHK 出版、2001.
山崎喜比古編『健康と医療の社会学』東京大学出版会、2001.
田中　博『電子カルテとＩＴ医療』ＭＥＤエム・イー振興協会、2001.
神田　明『質的研究入門―＜人間の科学＞のための方法論』東京大学出版会、2002.
米国医療の質委員会・医学研究所著、医学ジャーナリズム協会訳『医療の質―谷間を越えて 21 世紀システムへ』日本評論社、2002.
村上陽一郎『生命を語る視座―先端医療が問いかけること』NTT 出版、2002.
小松美彦『脳死・臓器移植の本当の話』PHP 研究所、2004.
M.ロック著、坂川雅子訳『脳死と臓器移植の医療人類学』みすず書房、2004.
広井良典『ケアのゆくえと科学のゆくえ』岩波書店、2005.
鯨岡　峻『エピソード記述入門　実践と質的研究のために』東京大学出版会、2006.
松原洋子・小泉義之編『生命の臨界　争点としての生命』人文書院、2005.
米沢彗『病院化社会を生きる―医療の位相学』、雲母（きらら）書房、2006.
ユルゲン・トールヴァルト著、小川道雄訳『外科医の世紀　近代医学のあけぼの』へるす出版、2007.
中島みち『「尊厳死」に尊厳はあるか―ある呼吸器外し事件から』岩波書店、2007.
島薗　進、竹内整一編、『死生学１　死生学とはなにか』東京大学出版会、2008.
米山公啓『医療格差の時代』ちくま書房、2008.
上杉正幸『健康不安の社会学　健康社会のパラドックス』{改訂版} 世界思想社、2008.
小川道雄『医療　崩壊か再生か　問われる国民の選択』NHK 出版、2008.
ケネス・W. グッドマン著、坂井孝　郎訳『医療ＩＴ化と生命倫理―情報ネットワーク社会における医療現場の変容』世界思想社、2009.
アン・ルーニー著、立木勝訳『医学は歴史をどう変えてきたか』東京書籍、2009.
仲正昌樹「先端医療は希望か？ 医学の進歩と患者のリスク」、東大社研・玄田有史・宇野重規編『希望学４　希望のはじまり』 東京大学出版会、第 9 章、2009、pp. 217-247.
野島良子『看護科学のパラダイム転換？　質的研究はいつ、なぜ登場したのか？　アメリカの看護科学者の社会文化体験をとおして』へるす出版、2009.
フランシス・S・コロンズ著、矢野真千子訳『遺伝子医療革命　ゲノム科学が私たちを変える』NHK 出版、2011.
週刊朝日編集部・永井貴子『「平穏死」は理想の看取りか？』週刊朝日、2012 年 11 月 30 日. 中村仁一『大往生したけりゃ医療とかかわるな　「自然死」のすすめ』幻冬舎、2012.

久保田博南『いのちを救う先端技術　医療機器はどこまで進化したか』PHP 研究所、2012.
加藤茂孝『人類と感染症の歴史―未知なる恐怖を超えて―』丸善、2013.
石飛幸三『平穏死のすすめ』講談社、2013.
村上智彦『医療にたかるか』新潮社、2013.
米国医学研究所著、飯田修平・長谷川友紀訳『医療 IT と安全　よりよい医療をめざした安全なシステムの構築』日本評論社、2014.
リッキー・ルイス著、西田美緒子訳『「永久に治る」ことは可能か？　難病の完治に挑む遺伝子治療の最前線』白揚社、2015.
横山　尊『日本が優生社会になるまで―科学啓蒙、メディア、生殖の政治』勁草書房、2015.
石井哲也『ゲノム編集を問う―作物からヒトまで』岩波書店、2017.

（4）　医療技術史・医療技術論など

ユルゲン・トールヴァルト著、小川道雄訳『外科医の世紀　近代医学のあけぼの』へるす出版、2007.
ヴォルフガング・エッカルト 著,今井道夫, 石渡隆司 監訳『医学の歴史』東信堂、2014.
坂井建雄『人体観の歴史』岩波書店、　第 7 章　基礎医学と社会化、細分化－二十世紀　発展する医療技術と生命科学、2008.
山中浩司『医療技術と器具の社会史　聴診器と顕微鏡をめぐる文化史』大阪大学出版会、2009.
C. J. トンプソン、川満富祐『手術器械の歴史』時空出版、2011.
由井秀樹『人工授精の近代：戦後の「家族」と医療・技術』青弓社、2015.
スティーブ・バーカー著、千葉喜久枝訳『医療の歴史―穿孔開頭術から幹細胞治療までの 1 万 2 千年史』創元社、2016.
ギル・ポール著、野口政雄訳『50 の事物で知る　図説　医学の歴史』原書房、2016.

第５章　人類史の中の医療の現状と今後の課題

戸川達男

第１節　激動する時代としての現代

（1）　現代を俯瞰する時間スケール

ここで取り上げるテーマは「良く生きるための医工計測技術」であるが、この課題の考察にはどれだけの時間スケールを考慮することが必要だろうか？　一個人が自分の未来のことだけに関心を持つのならせいぜい数 10 年でよいのに対して、未来の人類にまでも関心を持つなら、人類の存続期間全体を視野に入れなければならない。しかも、歴史的背景から現代の特徴を根源的に理解しようとするなら、未来だけでなく、過去の歴史も視野に入れなければならない。したがって、自分の一生の出来事が高々100 年の時間スケールに生起する事柄であるのに対して、自分の存在の起源と自分の生の波及するすべての可能性を視野に入れるには、おおまかに言えば、10 億年前から 10 億年後までを俯瞰する視野が必要である。

いまなぜこのような一見無意味とも思えるような考察を必要とするのかというと、「現代」という時代がまさにこれだけの時間スケールでなければ捉えられないほどの大異変の中心にあるからである。「現代」は過去の歴史の繰り返しではなく、生命の歴史の中で、最初でしかも最大級の出来事であり、未来の人類の生存の可能性を最大限長く見積もっても、二度と起こり得ない出来事の中心にあるからである。

生命の歴史の中の「現代」の姿を具体的に描くのは難しいことではない。生命の歴史の中の大きな出来事を挙げるとすれば、生命の出現、真核細胞の出現、多細胞生物の出現、脊椎動物の出現、恒温動物の出現、先人における文化の出現などであるが、これらに匹敵する出来事が産業革命以降の人類に出現し、生態系すべてを巻き込んだ大異変をもたらし、やがて生態系の異変が収束し、その後長く安定した生態系の中で人類が生き続ける可能性が、未来の希望的な生命の歴史の姿だと考えられる。遠未来の人々の目線で眺めるなら、いまの「現代」がまさに生命の歴史上の大異変の中心にあり、生命の歴史の中で唯一無二の人類の暴走によって起こされた出来事であると同時に、人類によって収拾され、以後二度と暴走が起こらないような知恵の獲得に到ったことが認識されるに違いない。

現代の大異変をさらに具体的に規定するなら、その始まりは産業革命が始まった 18 世紀半ばからである。産業革命がもたらした人間の活動の拡大により、世界の人口は急増し、環境が破壊され、対立と抗争が激化した一方、科学技術とくに医療が発展し、乳幼児死亡率が激減し、高齢社会が到来した。その結果、世界人口は地球環境による持続可能なレベ

ルをはるかに超え、生態系の破壊は生命の歴史の中の最大級の大絶滅を凌ぐ規模になりつつある。2000 年代に入り、大異変の修復がはじまりつつあるが、大異変が収束されるには少なくとも大異変の前半と同程度の時間を要すると思われるので、大異変の収束が 23 世紀半ばとすると、**図 1** のように、大異変の期間はおよそ 500 年となる。

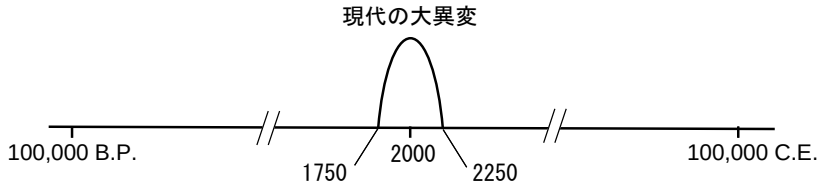


図 1　生命の歴史の中の現代の大異変

人類の暴走によって始まった大異変を収拾することは現代のわれわれの使命であり、その成否は遠未来までの人類の存続を希求する個々の個人の熱意による。たとえ人類の生存を保証する実現可能なシナリオが提案されても、大多数の人々の支持がなければ実行される見込みがない。そのためには人々の心を動かし、多大な犠牲を払ってでも未来の人々のためになることをしようとする強い衝動が起こらなければならない。それには、人の心についての科学的理解がぜひとも必要であるが、意識や感情の発現機構をはじめ心の科学的理解を基にした心の科学と言えるような領域がまだ確立されていないことが深刻である［1］。いまは、緊急に求められている人類の絶滅回避のための行動を起こさせるには、心の科学の支援なしに進めなければならないという困難に直面している。しかし、人類の絶滅を回避するというぎりぎりの選択においては、人類の持てる力が最大限に発揮されることを期待することができるかもしれないので、希望を捨てることはできない［2］。

このような大異変の中心にある現代において、医工計測というごく狭い特殊な領域がはたす役割は、遠未来から見れば一目瞭然であるに違いない。医工計測は現代の医療の発展の原動力となったことはすでに明らかであり、それによって個人のライフスタイルが一変したが、これから未来に向かって、個人の生を支える医療が、人類の未来に向かう活動の前提であることは言うまでもない。また、身体の科学の成功が心の科学の発展に貢献することも間違いない。さらに、今は個人のためにしか活用されていない個人の計測値が客観的なデーターとして保存されることによって、遠未来まで有効に活用され、データーの蓄積がその効用をさらに増すことが期待される。すべての医工計測データーは人類の共有財産であるという認識が定着すれば、一方では個人情報の管理を徹底し、他方ですべてのデーターを未来の人々に贈る貴重な遺産とすることができる。そのためには、最近話題となっているビッグデーターの保存と活用技術が役立つに違いない。

このように、現代を俯瞰する時代背景の認識から、医工計測の意義が再検討され、遠未来の人々の視点から見ることによって、新たな技術を生み出す可能性につながることをここで指摘したい。医工計測はもはや計測対象となっている個人だけのためのものではなく、人類の共有財産となる情報を獲得する手段である。そのために個人の不利益になることがないように配慮する必要はあるが、個人を守るためにデーターは、その用を果たしたからと言ってすべて捨てることは許されない。ことに、いま大異変のさなかにあるわれわれの日常的なデーターは、未来から見るとかけがえのない宝であり、その中から未来の人々は多くの知見を抽出することができる。

したがって、ここで取り上げるテーマ「良く生きるための医工計測技術」とはだれのための技術かを問うとすれば、それはいま生きているわれわれだけが良く生きるための技術ではなく、遠未来までも含めたすべての人のための技術だと答えることが最も肝心な点であり、このことがすべての技術開発の前提であることを銘記しておかなければならない。

未来の人のことに目を向けることは、激動の時代である現代においてぜひとも必要なことである。もし激動の現代において、自分中心の視点からしか物事を判断できないならば、自分の生存と生活の向上がつねに最優先の事柄となり、そのために未来の人々に不利益が及んでもはばかることがない。そこで、自分のための医療はつねに正当化され、その対価が未来の負担になっても顧みられることがない。それは枯渇資源の浪費にとどまらず、自分や近親者のために遺伝子に介入して、子孫に不利益な遺伝的性質を残すことにも配慮を欠くことになる。

未来のことに目を向けることは、激動の時代を生き抜くためにも必要である。未来の人の生存への配慮を欠くなら、生きることが困難な時代において、大きな犠牲を払わなければ人類の絶滅をくい止めることができないような事態になった時、人類は生き残ることができない。激動の時代にあっては、個人の生存か人類の存続かどちらを優先させるかの選択が問われる。現代の医療はもっぱら個人の生存だけに関わるように発展してきた活動であるだけに、命を守るという点では今の人の命も未来の人の命も同じであることを見失うことがないようにしなければならない。人類絶滅の危機がせまった激動の現代において、たとえ多くのものを失ったとしても、「人類が良く生きる知恵」を獲得することができたなら、未来に遺す遺産は大きい。

（２）大異変の後

現代の大異変が、産業革命から現在までの約 250 年と、その後の激変の収束までのおよそ 250 年の合計 500 年とすると、大異変の後の世界ははるか未来である。しかし、その後の人類の生存は、人類の出現から現在までの 10 数万年よりもはるかに長いことが考えられるので、もしそうなら人類の歴史の大部分は現代の大異変の後の世界である。もし人類が現代の大異変のような異常な出来事を二度と起こさないとすれば、大異変後の世界は現代の混乱にくらべればごく平穏なはずである。しかしその世界は大異変以前の世界とは大きく異なる世界である。

現代の大異変前後の世界の姿をごく簡単にまとめると、およそ**表 1** のようになると考えられる。

	１７５０年以前	２２５０年以後
世界人口	～７億	～４０億
出生率	～５．０	＝２．０
平均寿命	～４０歳	～１００歳
健康寿命	～４０歳	～　９０歳
健康でない期間	＜１年	～　１０年

表１　現代の大異変前後の世界の姿

世界の人口は、産業革命以前には 10 億人に満たなかったが、現在は 70 億人を越え、今後 100 億人を越えることが予想されている。しかし、地球環境が抱擁できる持続可な世界人口は 40 億人程度だと言われる［3］。現在すでに出生率の高い国では出生率を下げる努力がなされているので、世界人口はやがて減少に向かうことが予想されている。したがって、大異変の後には世界人口は持続可能なレベルまで減少して、以後はほぼ安定すると考えられる。それでも世界人口は産業革命以前に比べればはるかに高いレベルで安定すると予想されるので、大変異が収まっても大異変以前の状態に戻るわけではない。

世界人口が一定に保たれるには、出生率（合計特殊出生率）が一定でなければならない。しかし、近未来には生殖年齢以下の死亡率はほとんどゼロになると考えられるので、人口を一定に保つためには、出生率をほぼ正確に 2.0 に保たなければならない。それは容易なことではないが、近未来にぜひとも達成しなければならない不可避の条件である。

世界の平均寿命も、産業革命頃には 40 歳程度であったが、現在は 70 歳を越えた。後に述べるように、人間の寿命の限界はおよそ 120 歳と考えられているので、おそらく 100 歳くらいで限界に達するであろう。その変化は大異変の間に起こる。そして、その後人間

は一度獲得した長寿を捨てることは考え難いので延長した寿命はもとに戻ることはないであろう。

しかし、たとえ将来平均寿命が 100 歳になったとしても、だれもが 100 歳まで健康に生きられるとは限らない。後に詳しくのべるが、高度医療を駆使しても、若干の健康でない期間が残り、その結果健康寿命は 90 歳程度にとどまり、およそ 10 年程度の健康でない期間が残ることが予想される。これは大異変以前にはなかったことであり、大異変後の医療の大きな課題となる。

このように、大異変の前後の違いは非常に大きく、人口増加と寿命の延長だけを考えても、大異変の前と後では大幅に違ったレベルで安定することになり、大異変を境に、世界がまったく違う社会に変身することになる。しかも、大異変以降の社会は医学を含めてさまざまな科学技術の支えによってしか存続しえない構造になっており、あたかも強力な技術の支援によって人間の住める人工環境を維持している宇宙ステーションのような存在となる。

したがって、大異変以前には高度技術の支えが全くない自然環境の中で生き続けてきた人類は、大異変以降は、強力な科学技術の支援なしには存続できず、人工システムの中でしか生き続けられない人類に変身させられてしまう。大異変以前には、自然環境の中で生きていくさまざまな知恵が文化として蓄積されていたが、大異変以降の人類は自然の中で生きていくための文化をすべて捨て去ってしまったので、もはや生きるために必要な科学技術を捨てることができなくなったわけである。ことに、医学は生きるために必要な技術の主要な要素であるが、医学はまた多くの種類の技術の支援なしには存続しえないものになっていく。人類は自然環境の中で多くの生物種と共存関係を保って生きていく生物種のひとつであったが、大異変を境に、人工的な技術によって出現した巨大な人工環境の中でのみ生き続けられる生物種に変身したことになる。

人類の存続を支える人工環境には、さまざまな改良が加えられて、しだいに完成度が高いものになっていくに違いない。それは、置かれた環境の中で生き続けられるように適応的に進化した生物種と同様である。しかし人類には、人工環境に適応するような遺伝的な変化はおそらく起こり得ない。なぜなら、遺伝的進化は遺伝子の突然変異と淘汰によってのみ起こりうる変化であり、そのためには非常に多くの突然変異と淘汰を繰り返さなければならず、淘汰の過程で非常に多くの変異遺伝子、胎児、幼児、および成熟した個体を犠牲にしなければならない。なぜなら、環境に不適応な変異遺伝子の多くは、成長、成熟の後になってはじめて不適応な性質が発現するからである。しかし、人類は適応的進化のた

めに多くの個人に犠牲を強いることはもはやありえないと考えられる。したがって、人間の遺伝子においては遠未来までも適応的な進化は起こりえず、ただ技術の進化のみによって生存をより確かなものにしていくほかない。人類は、遺伝子を温存して、文化を付加していくことによって生存を確実にし、その上で良い生き方を追求していく。大異変の後においては、医療が生存に不可欠な文化として定着していなければならないことは間違いない。

大異変後の世界において、おそらく決定的に重要でしかもきわめて困難な事柄は、世界人口を一定に保つことであろう。これまでの世界では、多くの地域で出生率が 2.0 よりはるかに高く、人口は潜在的に増加傾向にあり、食糧などの生存に不可欠な資源の供給によって人口の上限が制限されていた。しかし大異変のさなかに人口が急増したため、資源の消費が環境の持続可能なレベルを大幅に越えて環境の大崩壊が起こった。それを収拾するには人口を減らすことが不可欠であるが、それには出生率を制御するほかに有効な手段がない。その結果、大異変が収束した後には、出生率を自然の成り行きにまかせることはできなくなり、出生率を厳密に制御する世界規模の施策が必要となる。そのためには少なくとも計画出産が必要であり、医療と社会政策の連携が不可欠となるであろう。それは人間の自然な生き方への介入であるが、おそらくそれなくして人口の制御は不可能であろう。それでも、人口を減らしてでも高い生活レベルを保とうとするところと、生活レベルを下げてでも多くの人口を保持しようとするところがあるかもしれない。そのような多様性を許容しながらも総人口を一定に保つには、出生率を一律に規定するのではなく、人口の微小な変動を増大させないようなきめ細かな介入が必要となる。

大異変の後に、出生率と世界人口が一定レベルに落ち着き、なお数世代を経過すれば、年齢構成すなわち人口に占める各年齢の比率は、平均寿命近くまで平坦となり、それ以上の高齢化も少子化も起こらない。そこで社会は一定の人口と一定の年齢構成という制約の中で、多様性に富んだ社会形成を目指すことになる。社会の施策は、出生率を一定に保ち、持続可能な範囲内で生活に必要な資源を分配し、未来の人々に不利益をもたらさないように監視し、最大限の寿命と健康を保持できるように計画、実行されなければならない。その中に組み込まれている医療は、高い技術力が要求される一方で、利用可能な資源の制約のため、実施できる医療は制限される。そこで、技術開発の目標は、技術レベルの向上よりむしろ、資源利用の最少化に重点がおかれる。そのため、医療に導入される新技術はしだいに少なくなり、医療の形態における一世代の間の変化はごくわずかとなる。したがっ

て、医療の新技術の開発は、自分自身がその恩恵にあずかるためではなく、何世代も先の未来の人々のための利他的な動機によってしか行われないことになるであろう。

このように、大異変後に長く続くであろう安定した社会においては、医療のほかさまざまな高度技術が駆使されているにもかかわらず、各技術が単独で評価されることはなくなり、すべての技術が総合的なインフラストラクチャーの中に組み込まれ、その総合の成果としてしか評価されなくなる。しかも、その総合の成果は過去と比較したときにしか目立つところがないので、何世代もほとんど変わらない世界の中の強大なインフラストラクチャーは、自然環境と同様に、その恩恵にあずかっていることさえ忘れられることだろう。その環境に生きる人間は、既存の環境の制約の中で生きられるように成長し、環境の制約の中で活動し、その環境で生きられる限界まで生きて死ぬ。そのライフスタイルは、環境に完全に制約されて生きることを強いられるという意味で、高度技術がまったくなかった過去の人間の生き方と、結局のところ大きな違いがないようにも見える。

そこで見えてくることは、大異変の後の社会の基盤となる高度技術を駆使したインフラストラクチャーは、昔と違った社会を成り立たせているだけであって、それ自体が「良い生き方」ではないという点である。もし人が良い生き方を追求するのであれば、置かれた環境に応じて追及され獲得されるものであるはずであって、環境そのものが良い生き方ではないということである。したがって、大異変後の世界では、強力なインフラストラクチャーが実現したとしても、それ自体が良い生き方をもたらすのではなく、その環境の中で良い生き方が追求されて、その成果によって良い生き方が獲得されるものである。その点で、大異変の激動が収束した時点は、未来社会のスタートラインであって、その後多くの世代を重ねてはじめて良い生き方が定着していくと考えるのが妥当であろう。

ここで、良い生き方を追求するために多くの世代を重ねる、と言うことは、良い生き方を追求することは自分がそれを享受するためではないということである。高々120 歳の最長寿命では、自分の知恵と力で良い生き方を獲得することはできない。しかしそれは生物的な個体つまり自分の身体と自分という主観的な概念とを同一視しているからで、もし自分の個体と主観的な自己を別な概念だと考えられれば、たとえ 120 歳の寿命しか持たない個体であっても、遠未来まで継続する自己の概念を持つことができる。このように、自己の概念を見直すことも未来の生き方の追求には欠かせないことの一つで、自己概念についても、いまはまだ未来社会のスタートラインに立っていると言ってよい。しかも、それはさし迫った課題である。個体と主観的な自己とを切り離せないなら、自分の個体寿命よりはるか先の未来の人々を救済することよりも、自分の寿命の間の安楽な生活の実現がつ

ねに優先されるので、自己犠牲なしに未来を救済することができなくなったとき、未来を救うことができず、人類は絶滅する。もし人類が絶滅せず、大異変の後まで存続したとすれば、それは自己犠牲を受け入れて未来を救済したからに違いない。したがって、遠未来から見れば、人類は絶滅の危機に遭遇したことによって、未来と一体となる自己概念を獲得することができたと見ることであろう。

そこで、医療の概念も変革されることが考えられる。いまの医療はあくまで個体の延命であり、人格に注目するとしても、やはり個体と一体の概念としての人格である。しかし、何世代も先の個体にまでつながっている自己概念が受け入れられるなら、医療の対象はもはや一個体に限定することはできない。そこで、大異変後の世界では、個体を対象とする技術において、新技術が発展する余地がなくなっても、個体に限定されない自己のケアがむしろ重要な要件となり、心の科学を基礎とした技術の発展が期待される。自己の概念については、第２節の平均寿命延長と限界の項および、第５節の終末期の医療においても必要な概念として再考する。

第２節　平均寿命の延長と健康寿命の延長

（１）　平均寿命の延長と限界

人間の個体寿命が近年著しく延長したことは、**図 2** に示す生存率曲線の推移を見れば一目瞭然である。

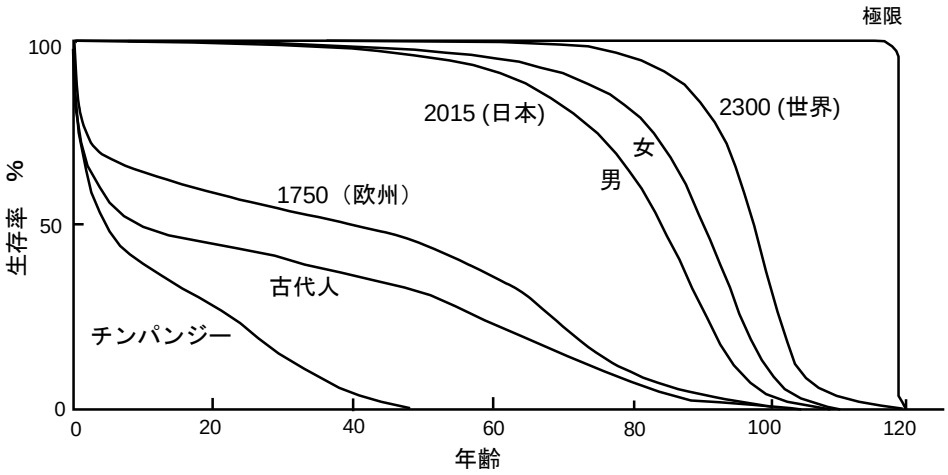


図 2　人間と近縁の動物の生存率の比較［4］［5］

人間の平均寿命が著しく延長したのは比較的最近のことで、西暦 1000 年ころにおいてはまだ 20 歳台であったと言われる。それが、乳幼児死亡率の減少などによって 20 世紀に急速に延長し、ことに日本では平均寿命が女性は８７歳、男性は８０歳を越え、世界の中の長寿国中の先頭集団となった。しかし、今後はこの勢いでさらに寿命が延長することは期待できない。それは、人間も他の動物も個体寿命を制限する機構が遺伝的に組み込まれているからである。遺伝子を操作して個体寿命をさらに延長させることが技術的に可能になったとしても、人間の欲望を満たすための遺伝子への介入は倫理的に受け入れ難いと考えられる。たとえ遠未来に若干の寿命の延長をもたらす遺伝子操作を容認することがあったとしても、まもなく次の限界に達する。したがって今後人間の寿命の大幅な延長は期待できないと考えてまず間違いない。今後の平均寿命の延長を予測した例として、国連の 2300 年の平均寿命の予測［4］を**図３**に示す。この予測では 2300 年の世界の平均寿命は約 100 歳であり、かなり楽観的な予測である。それでも 2015 年の日本の平均寿命より 20 年弱しか延長しておらず、平均寿命の延長はほぼ限界だと思われる。

これまで、医療の効用は延命で評価され、医療の介入によって生存率がどれだけ増加したかで個々の医療処置の効果が定量化されてきた。しかし、今後寿命の延長が期待できないなら、これまでの医療技術の発展を牽引してきた大目標が消滅するので、未来における

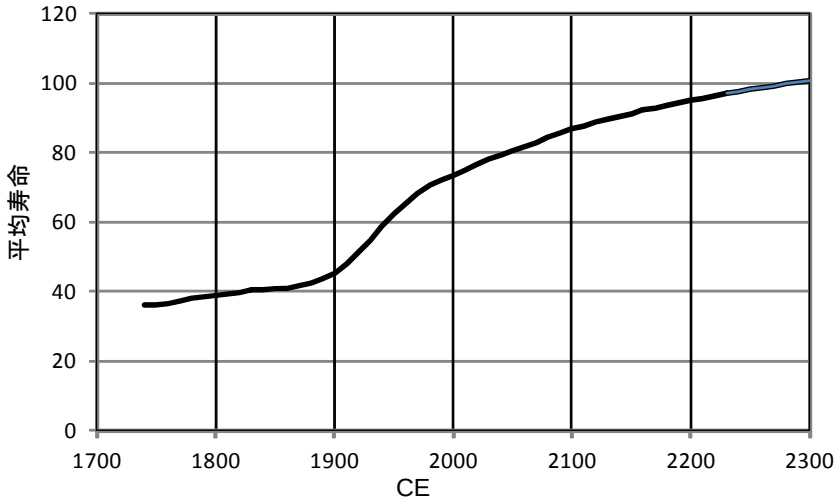


図３　世界の平均寿命の過去と未来予

医療のあり方を再検討しなければならない事態に至っている。もし今後もひたすら更なる延命をめざすなら、たとえ寿命を若干延長することができても、更なる苦しみをもたらすことに終始する可能性が高い。その結果、人類に恩恵をもたらすことを期待して発展させた技術によって、多くの人に長く苦しい期間をもたらすことになる。

寿命に限界があるのは、動物の一般的な性質であって、種によって寿命に違いがあるものの、最長寿命は遺伝的性質として決まっており、ヒトでは約 120 年である［6］。最長寿命を制限する理由として、有性生殖の効用を生かすためだとする説がある［7］。有性生殖は遺伝子のランダムな組み換えによって適応的進化を促進するのにきわめて有効であるが、親が死んで子に繁殖の余地を与えなければ、その効用を生かすことができない。そこで、有性生殖の出現と同時に、生殖期を過ぎた個体を排除する自己破壊の機構が遺伝的なメカニズムに組み込まれたと考えられる。その機構は、細胞分裂における DNA の転写の回数の上限を規定する機構として説明されている［8］。したがって、個体自身の細胞を最長寿命を越えて使い続けることは遺伝的性質として不可能だと考えなければならない。

それでもあえて種の最長寿命を越えて個体を生かし続けるには、再生医療や人工臓器のような生体機能の代替技術を用いる可能性がある。しかし、代替医療や人工臓器は身体の一部の器官の機能を代替することはできても、加齢によって全身の機能が衰えるのに対して適用するのは困難であろう。ことに脳機能の衰えに対しては、たとえ脳神経組織を再生したとしても、蓄積されていた情報を再生することはできないので、学習によって形成された存在としての人格を存続させることにはつながらない。また、カロリー制限や人工冬眠は、見かけ上は若干寿命を延ばせる可能性はあるとしても、活動できるキャパシティーが増すわけではない。また、人体冷凍保存が話題になっているが、蘇生の保証がないし、未来の人々に冷凍個体の保存と蘇生の負担を負わせることへの配慮なしに行うことは倫理的に許されるとは思えない。また、地球環境が悪化して他の天体に移住するために人体冷凍保存が検討されるかもしれないが、その時点においては技術的問題よりもむしろ、更なる延命を希求することの是非が問われることであろう。

このように、個体の延命についてさまざまな側面を話題にすることは、一見興味本位のように思われるかもしれないが、生物的最長寿命を越えて更なる延命を希求することの是非を、具体的な問題に遭遇した時にこそ真剣に検討するべきだとすれば、今がまさしく人間の寿命に向き合うにふさわしいときである。

ここで、人間の生物的寿命について、ほぼ確実だと考えられることを整理しておきたい。

1　人間の最長寿命は遺伝的性質として決まっており約 120 歳である。

2　世界の平均寿命は 2300 年ころには 100 歳くらいになると予想されている。

3　遠未来においてもさらに大幅な平均寿命の延長は期待できない。

4　生物的最長寿命を越えて個体を生かすことが技術的に可能だとしても莫大なコストがかかる。

5　寿命に限界があることを知りながらも、多くの人が更なる延命を追求する。

6　多くの人が寿命の限界を受け入れて、有限の寿命をより良く生きる生き方を追求する。

この６項目のうち、多くの人は１から４の項目はそれほど抵抗なく受け入れられるように思われる。問題は５と６の項目で、両者は相反するようでありながら、どちらも自然で捨てがたい。また、どちらも可能となる時が来て、自由に選択できるようになるという可能性も否定できないように見える。そこで、いまどちらかを選択することはやめて、両方の可能性を自由に追い続ければいいではないかという妥協案に落ち着きそうな雰囲気も感じられる。

しかし、ここであえて５を捨てて６だけをとるという提案をしたい。すなわち、いまほぼ確かだとされている最長寿命を越えてさらなる延命を追求することをやめ、有限の寿命をより良く生きる方向に進むことをはっきり決断しようという提案である。これは人間の決断であって、科学的な根拠に基づく選択ではない。しかし、決断しないことは決断によって得られるかもしれない結果を放棄することである。これは「二兎を追うものは一兎をも得ず」ということわざの意味するところに通ずる。有限の寿命をより良く生きるという選択は、選択すれば必ず良い結果がついてくるのではなく、それに専心しなければ結果がついてこないような困難な選択である。それをあえて選択することによってのみ、結果に近づくことができる。

良い生き方を追求することは、いま初めて起こったことではなく、過去においてはむしろそれが普通のことであった。大異変の前、すなわち産業革命以前には、かなり進んだ医術はあったものの、医術に寿命の大幅な延長を期待することはおそらく考えられなかった。そこで、与えられた寿命をいかに良く生きるかを求め続けた。良い生き方の追求は多くの哲学者、ことに倫理学者の中心課題であったが、生きる期間を延長することによって生きることの益を増そうというような発想はほとんど起こらなかったようである。高齢まで生きることを希求することはあっても、さらなる寿命の延長を医術に求めることはむしろまれで、不老不死の薬を探すことを徐福に命じたといわれる秦の始皇帝の話などはむしろ異常なこととして受け取られていたのではないだろうか。

ところが、近代医学の発展によって平均寿命が急速に延長した結果、医学に更なる寿命の延長が期待できそうに思われるようになった。その結果、昔の数倍にもなった寿命を享受することより、寿命が期待通り延長しないことへの不満が増す結果となったようである。いまここで決断しようとしていることは、今後寿命の更なる延長はないことをはっきり認め、いま現在の寿命をいかに良く過ごすかを追求することに専念することであり、それは

過去の人間の生き方への復帰であると同時に、未来に希望をもたらす新たな生き方の創出でもある。

寿命の上限を受け入れることは、医学への期待の重要な要件である寿命の延長という方向に限界があることを受け入れることである。しかも、現在すでにその限界が、遠い先ではなくかなり近くにせまっていることを認めなければならない。もし図３にある国連の予測のように 2300 年に世界の平均寿命が 100 歳となるとすれば、それはほぼ限界である。寿命の延長という方向に関する限り、医学の延命追求はあと 300 年足らずで終了する。その後の医療は、獲得した寿命のレベルを維持していくための保全活動であり、発展的活動の目標は、限られた寿命をいかに良く生きるかに向けられる。

そこで、個々の人の寿命より上の階層である人類の存続期間を考えることが必要となる。生物的に考えれば、個々の人の寿命は個体寿命であり、人類の存続期間は種の寿命である。個体寿命と種の寿命の関係は種によってまちまちであり、個体寿命の長い種は種の寿命も長いとは限らない。個々の種にとって、個体寿命は短すぎても長すぎても種の存続に不利であり、進化の過程で種にとって生存に最も適した個体寿命を持つように適応的に進化したと考えられている。すなわち、個体寿命は種にとっての適応戦略の一つだと見なされる［9］。ヒトも例外ではなく、ヒトの寿命はホモ・サピエンスの出現の時点で、種の生存に適した長さになるように遺伝的に進化し、そのまま定着したと考えられる。その後、人類は文化を発展させて生息環境を大幅に変化させたが、少なくとも遺伝的に決定されている最長寿命は変わっていないと考えられる。その結果、文化の発展によって人間の生活の様相が一変し、進化の過程で決定された最長寿命は適応戦略としての効用は失われたかに見える。

しかし、もし遺伝子を操作してヒトの最長寿命を大幅に延長することができたとしたら、それが人類の存続に影響を与える可能性がないとは言えない。人類の存続へのプラスの効果は人類の存続期間の延長につながるかもしれないが、人類はすでに地球環境の許される限界までも生きられる可能性を獲得しているので、もはやその可能性を補強する余地はほとんどないとしていい。逆に、最長寿命の延長が、人類の存続にとってマイナスとなる可能性はむしろ大きい。もし最長寿命を延長して平均寿命を延長したなら、社会はさらに高齢化し、その維持に莫大な資源を費やし、ただでさえ環境維持が困難になっている時に環境の崩壊に拍車がかかる。環境を守ることがさらに困難になれば、逆に平均寿命 100 歳という目標さえ切り詰めなければならなくなるかもしれない。環境崩壊の危機を乗り切るために、損なわれた環境が回復するまでは平均寿命を 90 歳程度に落とさなければならな

くなるかもしれない。それは医療活動の制限を伴うもので、多くの技術が使用可能であっても実際に使うことができなくなる。そんな状況においては、新技術の開発を積極的に助成することははばかられる。

更に、第１節で触れた自己の概念と個体寿命の関係をここで再度検討しておきたい。第１節では、個体と自己は同一ではないことを指摘した。個体と自己が同一でないなら、寿命は個体だけの概念で、自己は個体死より前に消滅することもあっていいし、また個体死より後まで存続することもあっていい。実際、科学技術が発展する以前には、個体と自己を別な存在としてごく自然に受け入れられていた。体から分離した自己は霊魂と呼ばれるような概念で多くの人々に共有されていた。霊魂の理解は人によって違っていたかもしれないが、現代の人と比べれば、はるかに身近に生き生きした姿を想像することができたように思われる。そして、霊魂のイメージを共有することによって死が寿命の終わりでないことを互いに確認することができたと考えられる。しかし、現代においては、個体死のあとに残る自己を想像することが難しくなった。そのため、自己の存在が終わるのを遅らせるため、寿命の延長に執着するようになったとも考えられる。

しかし、現代に至って平均寿命が何倍にも延長したにもかかわらず、その成果を喜ぶことはまれで、更なる寿命の延長を希求するようになった。いま、寿命の延長への期待は、平均寿命が短かった時代よりはるかに強くなっているのではないかと思われる。もしそうであるなら、将来寿命が延長したとしてもそれに満足することはなく、さらに長い寿命を求めようとするに違いない。寿命の延長が限界近くまで来てはじめてこの単純な矛盾に気づいたのだとしたら、われわれの知力の弱点を反省すべきであるが、それは別として、いまからでも過去にあった知恵を再検討する必要がある。

過去においてごく自然に受け入れられていた霊魂の概念は、いま多くの人に共有されることは期待できないし、それに代わる知恵を提供することもできない。それは今の科学の弱点だと言っていい。いまの科学は、多くの分野で驚異的な進歩を遂げたものの、これほど単純な知恵に代わるものを提供できない空白の部分がある。これは心の科学の空白である［1］。しかし、心の科学の空白に気づきさえすればそう遠くない将来には心の科学が大発展して、個体死を越えて存続できる自己概念を示し、未来の人々に共有されることを期待することができる。その暁には、もはや寿命の限界という概念は必要なくなり、遠未来に到るまでも拡張できる自己概念を持つことも可能になる。

いまは現実的な問題として寿命の限界をとりあげるとしても、遠未来には心の科学が驚異的発展をとげ、寿命の限界に直面して苦しんだ過去の人々のことを、同情をもって振り返るに違いない。

（2） 健康寿命の延長と限界

健康寿命とは、医療・介護の支援なしに自立して生きられる期間とされている。したがって、医療・介護の支援が存在しないところでは、健康寿命は個体寿命とほぼ一致する。医療が出現して以降、医療がもっぱら寿命の延長の追求であった過去においては、個体寿命が延長しても健康寿命の延長が計られなかったので、個体寿命と健康寿命の差が拡大していった。しかし個体寿命の延長が限界に近づいた今日において、こんどは健康寿命の延長が注目されるようになった。そこで拡大した個体寿命と健康寿命の差が縮小するようになってきたかと言えば、実はそうなってはいない。ＷＨＯの報告［10］［11］によると、諸国の寿命と健康寿命の 2000 年から 2015 年の推移は**表 2** のようになっている。

	国	個体寿命（年）			健康寿命（年）			寿命と健康寿命の差（年）		
		2000	2015	差	2000	2015	差	2000	2015	差
1	オーストラリア	79.5	82.8	3.3	69.3	71.9	2.6	10.2	10.9	0.7
2	ブラジル	70.5	74.3	3.8	61.9	65.5	3.6	8.6	8.8	0.2
3	カナダ	79.1	82.2	3.1	69.8	72.3	2.5	9.3	9.9	0.6
4	中国	71.7	76.1	4.4	64.6	68.5	3.9	7.1	7.6	0.5
5	デンマーク	76.9	79.2	2.3	69.7	71.2	1.5	7.2	8	0.8
6	フランス	78.8	82.4	3.6	69.7	72.6	2.9	9.1	9.8	0.7
7	ドイツ	78	81	3	68.7	71.3	2.6	9.3	9.7	0.4
8	インド	62.5	68.3	5.8	54.2	59.6	5.4	8.3	8.7	0.4
9	イタリア	79.4	82.7	3.3	70	72.8	2.8	9.4	9.9	0.5
10	日本	81.1	83.7	2.6	72.7	74.9	2.2	8.4	8.8	0.4
11	メキシコ	74.8	76.7	1.9	65.6	67.4	1.8	9.2	9.3	0.1
12	ロシア	65	70.5	5.5	58.3	63.4	5.1	6.7	7.1	0.4
13	スペイン	79.1	82.8	3.7	69.2	72.4	3.2	9.9	10.4	0.5
14	スウェーデン	79.6	82.4	2.8	69.7	72	2.3	9.9	10.4	0.5
15	米国	76.8	79.3	2.5	67.2	69.1	1.9	9.6	10.2	0.6
16	英国	77.8	81.2	3.4	68.6	71.4	2.8	9.2	9.8	0.6
	平均	75.7	79.1	3.4	66.8	69.8	2.9	8.8	9.3	0.5
			2300			2300			2300	
	予測		100			88			12	

表 2　寿命と健康寿命の 2000 年から 2015 年の推移　　WHO Global Health Observatory

このデーターで見る限り、2000 年から 2015 年までの期間ですべての国で個体寿命も健康寿命も延長しているが、個体寿命と健康寿命の差はいずれの国も若干拡大している。

2000 年から 2015 年までの期間は高度医療の導入が進んだ期間であることは確かだが、その結果は個体寿命と健康寿命の差の縮小にはまったく貢献していない。

2000 年から 2015 年までの期間の個体寿命および健康寿命の延長が高度医療の導入による変化を反映しているとすると、高度医療は健康寿命の延長よりも個体寿命の延長により大きく寄与してたことになる。これは、健康寿命の終わりにおいてよりも、個体寿命の終わりにおいて、高度医療がより強力に効果を発揮するであろうと考えれば、むしろ当然のことである。新技術は、困難な状況においてこそ延命の効果を発揮することが多いと思われるので、将来もまだしばらくこの傾向は続くであろう。仮に 2000 年から 2015 年までの個体寿命と健康寿命の伸びが 2300 年まで続くと仮定すれば、2300 年には個体寿命は約 100 年となり、健康寿命は約 88 年となるので、2015 年に約 9.3 年であった個体寿命と健康寿命の差は、約 12 年になることが予想される。

個体寿命が遺伝的に決定されている最長寿命にさらに近付けば、もはや個体寿命の延長は止まるが、その後は健康寿命の延長がなお続き、その結果個体寿命と健康寿命の差が、短縮する方向に転じることは期待できないことではないかもしれない。しかし、それだけに期待して、究極的に個体寿命と健康寿命の差をゼロにしようとすることは行き過ぎではないかと考えられる。なぜなら、もし個体寿命と健康寿命の差をゼロに近づけたとしたら、健康寿命の終わりはつねに突然死となり、健康を支えるために高度の技術が用いられている一方で、突然死を防ぐ技術を全く欠いているという不自然な状態を追求することになるからである。

高齢までも健康に生き、ごく短期間床に臥して枯れるように死ぬことは一つの理想像であり、「人生百歳、臥して十日」とも言われる［12］。もしこのような生き方が一般的になれば、個体寿命と健康寿命の差はごくわずかになり、死は突然死ではなく、ほとんど理想的な自然死で、不自然さはまったくない。しかし、このような自然死にいたるのはごくまれだといわれ、そのためにさまざまな備えをしたとしても、自然死に到る前に老年症候群に見舞われ、健康でない不本意な期間を生きなければならなくなることが圧倒的に多いに違いない。したがって、「人生百歳、臥して十日」を目標に養生に励む一方、健康でない生き方への備えも同時に進めることが現実的な選択肢であろう。

では、健康寿命の延長の達成目標は何か、と問われれば、健康寿命を個体寿命に近づけることだけではなく、健康寿命の質を高めることではないかと考えられる。健康寿命が延長されるということは自立して生活できる期間が延長することだが、それに加えて仕事に復帰して社会貢献ができるところまで達成目標に掲げることができる。ことに加齢変化や

成人病によって医療の支援が必要となった高齢者にリハビリテーションや支援機器の有効な活用によって、社会復帰して医療支援の社会負担を上回る社会貢献ができるところまで含めた目標設定があっていい。

かつてバトラーらはプロダクティブ・エイジングという概念を提唱して、高齢者が社会に貢献し高齢者自身もそれによって満足して生きられるようになることを目指してさまざまな活動を促進した［13］。このように、身体機能が自立して生活ができるレベルにあるだけでなく、自己の能力を発揮して社会貢献ができるレベルを目標にした健康寿命の延長を考えれば、たとえ健康寿命の時間的長さが延長しなくても、健康寿命の質的充実を期待することができる。

健康寿命の延長の評価は、したがって時間的長さだけではなく、質の評価が必要である。身体活動については、日常生活動作（ＡＤＬ）による評価があるが、個々の人間の活動の質の評価には、平均的な日常生活動作では評価できない特性の把握が必要となるに違いないので、将来的には高度の計測技術が必要となると考えられる。

結局、健康寿命の良さの評価は、健康でない期間の生き方の質にどう反映されるかを考慮して考えなければならない事柄である。もし、健康を損なってからの生活が苦痛に満ちたものとしか考えられないならば、健康な期間だけに価値があると見なすことになり、健康な期間はやがて健康を損なう時が来るまでのつかぬ間の平安であり、たまたま自分が所有することができたいくらかの時間と資源を無駄に消費しないように自分をせきたてる生き方に終始することになるかもしれない。しかし、もし健康でない期間の苦痛を除くための十分な配慮がなされ、さらに健康でない期間にもそれなりの良さがあることが期待できるならば、健康を損なうことを恐れることなく、健康な期間を十分に生きることに専念することができ、さらには健康な期間も健康でない期間も自分だけで独占することなく、現在および未来の他者と共有しようという発想に到ることも考えられるであろう。したがって、健康寿命をその長さだけで評価して、より長い健康寿命を追求することに専心することは、もはや賢明な選択ではないことが明らかとなる。

以上のように、これから先、健康寿命の大幅な延長は期待できず、しかも個体寿命と健康寿命の差が少なくともこれから数世代にわたって拡大し、平均として約 10 年程度の健康でない期間を生きなければならないことがほぼ確実となった。そこで、健康な期間を延長することにのみに強力な技術の支援を期待することは、人間の生き方のうちで、まだ明確にとらえられていない健康でない期間の生き方を探究する可能性を見失うことにつながり、強力な技術が健康でない期間の苦痛を増大させる恐れのあることも考慮すべきである。

医療に限らず、強力な技術が導入されるところでは、その影響する範囲が拡大する。したがって、技術力の拡大に応じて安全確認の範囲を広げていかなければいけない。より高速な運転ではより遠方までの安全確認が必要なことと同様である。より大きな力を持つことは、より高い益をもたらす可能性とともに、より深刻な損失をもたらす可能性を孕んでいる。寿命の延長も健康寿命の延長も、その影響の拡大を伴う。影響範囲が拡大すれば、生命の歴史における進化の過程のような試行錯誤の繰り返しはもはや許されない。近い将来、強力な技術の支援によって、世界の平均において個体寿命 100 歳、健康寿命 90 歳というような時代が到来する。それまでに、人類が獲得した長寿が、どんな形で、どれだけ先の未来にまで影響を与えるかを十分に検討しておかなければならない。

第３節　健康な期間の医療

（１）　不健康への備え

健康であれば、医療の支援なしに生きて思いのままに活動することができる。しかし、健康な期間に限りがあり、そのあとに平均 10 年余りの不健康な期間を生きなければならないことがあるとすると、健康なときに不健康への備えをしておくことは有効である。不健康への対策を提供することは、予防医学として医療の重要な領域に位置づけられている。とくに、高齢になれば加齢変化による身体機能の衰えとともに、老年病の発症の危険も増す。とくに、高齢者がかかりやすい疾患の早期発見のための高齢者健診を欠かさず受診することや、健康に良いとされる生活習慣を心がけることは常識になっている。ことに、医療が進んでいなかった時代にあっては、自己管理によって健康を維持していくことに関心が高かったことは、貝原益軒(1630-1714)の「養生訓」が当時のベストセラーだったことからもうかがえる。

さまざまな疾患の発症を抑制するために、各疾患について知られている危険因子を避けることが有効だとされている。危険因子を特定するのは主に疫学的研究による。たとえば食習慣と特定の疾患の発症頻度との因果関係を、大規模な統計データーを分析して、定量的に決定する。さらに進んで、疾患の発症の原因を物質レベルで特定できれば、より確かに危険因子を特定することができる。また、疾患の発症を予防するための物質を特定することも、疫学研究の主要な課題である。しかし、多くの危険因子はあくまで統計的に因果関係が認められるということで、危険因子があるからと言って必ず疾患が発症するわけではなく、予防においても、危険因子を避け、予防に有効だとされたものを摂取していれば

疾患が確実に予防できるわけではない。効果があると言ってもあくまで統計的に因果関係が認められるということである。

このことは、平均的には一生の間に健康でない期間が 10%くらいあるということとも関連している。それは疾患を確実に予防することができないことのほかに、加齢変化のような予防の手立てのない身体的変化があるため、未来においても健康でない期間をゼロにすることはできないという現実があるので、養生訓も危険因子も予防因子もそれなりに有効であるとしても、それだけでは不健康への備えとしては万全ではないということを認めなければならない。それは、言いかえれば、生きることは常に若干のリスクを背負っているということである。

それにもかかわらず、不健康への備えは不可能なことではない。不健康への備えは不健康を回避することではなく、不健康を受け入れることだとするなら、不健康を回避する手立てとともに、不健康を受け入れる手立てをも身につけることによって、不健康への万全の備えとすることができる。そこで、どのようにして不健康を受け入れるかが問われるが、すでにその答えを見出す前に、不健康を受け入れることを決断したことによって、不健康への備えの第一歩を踏み出している。不健康を、受け入れることができない悪者だと見なしている限り、不健康から逃れることができないが、不健康も生の営みの一部分であることを認めるなら、健康な期間も不健康な期間も含めた生き方を追求するという難度の高い課題に取り組むことになり、より高度な生き方を追求する、より魅力的な課題へのチャレンジとなる。

かつて、ストレス医学という学術誌が英国で刊行されたとき、初代の編集長のディビッド・ウィートリーが創刊号の巻頭言の冒頭で、「ストレスは悪者ではない」ということを宣言した［14］。当時、ストレスは悪者だと見なされ、ストレス医学はストレスから逃れる方策ばかり追求していたし、ストレス医学という雑誌が刊行されたのもストレスから逃れる方策の研究を推進しようとする意図からであったようだ。しかし、ウィートリーはその理解が誤りだと宣言したわけである。人間にはストレスに遭遇してもストレスに対処できる力が備わっているのだから、まずその持てる力を発揮させるべきで、安易にストレスを取り除こうとするべきではなく、ストレス医学はストレスに対処する力が限界を越えたときにのみ適用されるべきものだと述べている。しかも、巻頭言の冒頭にはマーティン・ルーサー・キングの言葉が引用されていた。それは「人間の究極的な尺度は、その人が愉快で好都合な瞬間にはなく、挑戦と論争の時にこそあるのだ。」（蓮見博昭訳）というもので、ストレスは悪者でないどころか、ストレスの中にあることは人間の究極の価値

だと言う過激な表現をあえて冒頭に掲げている。老年病や加齢変化も一種のストレスだと見なして、老年病や加齢変化を排除しようとするのではなく、老年病や加齢変化に対抗して生きようとする生命力を引き出すことが不健康への備えであると考えられる。

このことは、ヒトが他の動物と比較して異常に長い寿命を持つことと関係している。寿命を成長期、生殖期、後生殖期に分けると、ヒトとほかの動物との違いがあることがわかる。ヒトとチンパンジーでは成長期と生殖期の長さにあまり違いがないが、ヒトは後生殖期が異常に長い。後生殖期は子孫を残すことには直接的には関与しないが、このような遺伝的性質が進化したのは、ヒトでは後生殖期を延長することが間接的に子孫を残すことに寄与していたことを示している。おそらくヒトの遺伝的性質が進化したホモ・サピエンス出現以前の先人においては今日以上に高齢を生きることに困難があったに違いないが、それに打ち勝って長く生きた高齢者の存在が、集団の存続に貢献したのであろう。もしそうであれば、人間はさまざまな攻撃に打ち勝って長く生きる力を遺伝的に持っているに違いない。したがって、まずその本来の力を引き出すことが、不健康への備えの第一歩であるはずである。

高齢になって老年病や加齢変化のために不健康になったとき、不健康に対処する力を発揮できるかどうかは、不健康になってからの努力よりむしろ、不健康になるまでの健康な期間の生き方によるに違いない。あえて不健康を意識して備えをするのではなくても、健康な期間を十分に生き、生きることの良さを体験し、生きることが自分のためだけでなく、同世代の他者や未来の子孫のために貢献できることを体験によって知ったならば、不健康の攻撃に打ち勝って更なる貢献のために生きようとするであろう。その力は体力のような物理的な力よりむしろ、生きようとする動機を持ち続けることである。同世代および未来への貢献という明確な目的をもって不健康に対処することは、不健康への恐れを回避するためにのみ養生や老年病の危険因子を避けることよりはるかに有効な不健康への備えである。

（２） 健康の活用

動物の個体にとって、生きることの最も重要な活動は子孫を残すことである。子孫を残すために活動する期間は生殖期であり、一生の間で身体機能が最も高い期間が生殖期と一致するように進化した。この点ではヒトも他の動物も同じである。子孫を残すためには、生殖期に生殖の機会を獲得する必要があり、そのために他の個体と競って生殖の機会を勝

ち取らなければならない。そこで、生殖期には個体の生存に必要なレベルよりはるかに高い活動能力を必要とする。

人間は文化を獲得して、生きるための知恵を蓄積したことによって、身体活動能力と文化の継承によって得た知恵の総合力を生殖の機会獲得に当てるようになった。その結果、生殖のための争いはより厳しくなったが、一方では生殖のためにエスカレートさせた身体活動能力と文化の継承によって得た知恵を、子孫を残すこと以外にも振り向けられる様になった。ことに、医療の発達により乳幼児死亡率の減少によって女性の出産と育児の負担が大幅に減少した、図 2 に見られるように、古代には生殖期を迎えるまで生きられる個体は 50%程度であったのが、今日ではほとんど 100%が生殖期まで生きられるようになった。したがって、子孫の存続のために必要な出生率は 4.0 以上必要であったのがほとんど 2.0 で十分となり、出産育児の負担はほぼ半分になった。そこで、生殖期の身体機能の最も高い期間の少なくとも半分を自由に使うことができるようになったわけである。その結果、生き方の可能性が拡大し、原理的に多様な生き方を享受できるようになった。

動物の身体機能は、生きて子孫を残すために 100%用いられるように進化したが、人間においては生き残るための必要をはるかに超えて、極限まで追求されることがある。スポーツ競技はその典型で、ドーピングのような人為的な強化手段を用いず、トレーニングによって獲得できる身体機能の限界を競う。また、冒険家が前人未踏の難事に挑むように、自身の生存のためではなく、むしろ自身の生存を危険に曝してまで身体機能の限界に挑戦する。このような行為の動機には、生存の限界を賭した活動に駆り立てる好奇心があることが窺え、その傾向が文化を獲得した先人において文化進化を促すことから、好奇心が遺伝的性質として進化したことが考えられる。

もしこのような身体機能の限界に挑戦する傾向が人間の遺伝的性質の中にあるとすれば、スポーツや冒険は人間の正常な性質に由来する活動であり、生きることの質の向上のために有効であるばかりでなく、今日の環境破壊をくい止めて人類の長期生存を計るための極限の活動への貢献が期待される性質である。そのため、身体機能の限界に挑戦する活動の技術支援があっていい。スポーツにおいてはすでにスポーツ医学が効力を発揮していて、安全のためのだけではなく、記録更新を目指すための研究も盛んである。宇宙医学も同様であり、遠未来において地球環境が悪化して他の天体に移住しなければ人類が絶滅するというような事態を想定して、成功の見込みが小さくても挑戦がなされることは，現実に考えられないことではない。人類の歴史の過去においても、氷河期を生き延びた先人の挑戦があったに違いない。また、人類の歴史では戦争のような種内の争いが絶えず、戦いに勝

利するため、あるいは戦火を生き延びるための多くの挑戦がなされてきた。激しい争いの要因として、多くの動物に見られる遺伝的性質としての攻撃性のあることが動物行動学者ローレンツの指摘しているところである ［15］。たとえ将来において世界平和が実現し、戦争の脅威がなくなったとしても、攻撃性の遺伝的性質は失われないことから、限界を競い合う活動は続けられる。

これらの多様な活動の動機はさまざまであり、必ずしも人類の存続に必要な活動ではないとしても、人類の生存を脅かさない限り、技術の支援がなされて当然であろう。極限の追求には生命を危険に曝すことも起こりうるので、安全の確保のために医療の支援が求められ、そのための医療技術を発展させることは将来の医療の大きなニーズとなることが考えられる。

また、遠未来までの人類の存続にとどまらず、遠未来の人々に、より豊かな環境をもたらそうとする活動にはできることが限りなくあるに違いない。現在の人間の活動による自然破壊を食い止め、破壊された生態系を修復して現代の大異変以前の環境に戻すには、個人レベルの活動から世界規模の取り組みまでさまざまな活動が想定され、それぞれの活動のための安全とより効果的な推進のための支援として多様な活動に特化した医療支援が開発されてしかるべきである。大異変の収集とその後の人々の生活をより豊かにすることは、今現在生きている人よりはるかに多くの人に恩恵をもたらす。もし、「最大多数の最大幸福」を追求する功利主義の目標を、未来のすべての人にまで拡張して適用するなら、現在の医療のすべてよりはるかに規模の大きい医療を目指すことになり、冒頭に述べた、「想定する時間のスケールによって技術の効用が異なる」と言う指摘の通り、遠未来にまで及ぶ活動を支援する医療の効用は、想定する時間スケールに応じて拡大して考えなければならない。

さらに遠未来においては、生命の歴史に起こったと考えられている大絶滅の要因となった大火山活動や小惑星の衝突のような大自然災害がふたたび起こることも想定されるので、自然の大災害を生き延びるために、莫大なスケールの時間と労力をかけた事業が実行されることも想定される。そのためには、当然身体機能の限界への挑戦が求められるに違いないので、そのための医療支援の必要が想定される。

このように考えると、健康である期間は医療の支援が必要ない期間ではなく、むしろ健康な期間における医療支援の効用は、不健康な期間を支援することの効用よりはるかに大きいことがわかる。ことに、現代の大異変の時代にあっては、大異変を収束させて未来の人類を絶滅から救済する活動を最優先させるべきときであり、たとえ現在のわれわれがリ

スクを負ってでも大異変の収束を成功させなければならない。それにもかかわらず、今日はまだ未来の人類の救済の活動があまりに少なく、そのための医療の需要が現れていない。しかしやがて大異変がさらに進行し、人類の存続が危ぶまれる事態になった時、医療需要の大きな転換をせまられ、もっぱら不健康な高齢者の支援にあてていた医療活動を、あたかも戦時のように、健康で元気な若者を人類の救済活動に動員しなければならない時が来ることが予想されるので、そこに医療の潜在的な需要があることを想定しておくことが賢明だと考える。

第４節　不健康な期間の医療

（１）　不健康の軽減

不健康は、疾病、外傷、加齢変化などによって起こる。不健康を客観的に評価するためには、不健康の基準がある。たとえば日常繰り返される食事・更衣・移動・排泄・整容・入浴などの動作ができるかできないかを点数で表した指標が日常生活動作（activity of daily living: ADL）と呼ばれ、その点数で健康か不健康かを区別する。**表 1** の健康寿命も、寿命から ADL によって不健康とされた期間を除いた残りの期間として客観的に評価されたデータに基づく。

客観的な意味での不健康は、介助によって生活への影響を軽減することができる。たとえば自分では歩行ができなくても車いすへの移乗を介助すれば自力で移動ができるかもしれない。動力付きの車いすであれば、さらに長距離の移動が可能となる。日常動作の多くは、若干の介助によって身体機能の低下を補うことができる。すべての日常動作に介助が必要な全介助になっても、介助によって生き続けることができ、全介助になってから長期間にわたり、社会的に貢献できる人も少なくない。

さらに、介助にさまざまな技術を導入し、不健康の影響を軽減することには多くの可能性がある。一方では、前節に述べたように、不健康の原因そのものを除くための予防医学や、不健康をもたらす身体的変化を、人工臓器や再生医療などの技術によって解消することにも多くの可能性がある。それらの技術を駆使すれば、不健康に陥ることは不可逆的な変化ではなく、たとえ不健康に陥っても、日常生活において不健康の影響をかなりの程度軽減することができ、それらの可能性を実現する技術開発に期待できるところが多いことは確かである。それでも、すべての不健康を完全に解消することはかなり遠未来においてさえ実現できるとは思えない。遠未来に到っても不健康な期間が存在し、ひとたび不健康に陥れば、その影響によって日常生活や社会的活動が制約されることは避けられない。

しかし、たとえ客観的に重度の不健康と判定されても、生き方の主観的側面は多様であって、客観的評価と対応しているとは限らない。それはいろいろな事例から明らかなことである。宇宙物理学者スティーヴン・ホーキング（1942-2018）は、20 代のはじめに筋萎縮性側索硬化症（ALS）を発症し、余命数年と診断されたので学業を放棄する気持ちになったが、その後 ALS の進行が遅くなって、もっと生きられる可能性があることがわかり、就職のために必要な学位取得のための研究にとりかかり、その後宇宙論と一般相対論の関わる領域で画期的業績を挙げた。その後も ALS の進行により、四肢の筋は全く動かすことができず、発声もできない状態でありながら、最先端の研究を続け、著作も多く、幅広い領域で活躍している。それらの成果によっても不健康そのものは全く解消されないが、主観的領域である心の世界においては、身体の不健康とは関係なく、研究の成果によって数々の心が満たされる体験をしたに違いない。一般向けの著作［16］では、膨張する宇宙の発見者ハッブルを称える一方、万有引力の発見によって膨張する宇宙の可能性が考えられたにもかかわらず、ニュートンもアインシュタインも、そのほかのだれひとり膨張する宇宙の考えに到らなかったことを指摘しており、超一流の頭脳を持った天才でさえその知的能力に盲点があったことに注目している。このことは、不健康には欠陥があるが健康には欠陥がないと見なすのは誤りであることを示唆しているようでたいへん興味深い。

主観的側面である心の世界の拡大によっては、客観的な不健康そのものを軽減することはできない。しかし、当事者にとって不健康を軽減しようとする究極の目的は、客観的な不健康を解消することではなく、不健康を解消することによって得られるであろう心の世界の充足なのだと考えられる。そうであれば、客観的な不健康を軽減する手段がまったく期待できないときに、主観的な心の世界における救済の可能性を求めることは理にかなっている。心の世界は虚構ではなく、言葉で表現し、多くの人がその内容を共有し、それによって活動の動機が与えられ、客観的世界に影響をおよぼすことのできる実在の現象である。したがって科学的分析の対象となり、心を発現する機構、それについての法則、心の内容の観察と記述、心の制御など、物理的な系と同様の科学的扱いができるようになることが期待できる。

しかし残念ながら心を解明しようとする科学的研究はまだその糸口さえ見つからない段階にある。かつて、DNA の二重らせん構造の発見者のひとりであるフランシス・クリックは、心の解明の空白を憂慮し、意識発現のメカニズムを解明する問題に取り組んだが、ほとんど成果を挙げることができなかった［17］。また、なぜ彼のチャレンジが失敗したのかを分析しようとする試みもほとんどなく、結局は貴重な失敗の経験も生かされていな

い。このことからも、心の科学がいかに深刻な空白であるかが分かる。心の科学の空白は、解消する手立てのない不健康の救済においてその必要が明らかとなったにもかかわらず、心の科学を発展させなければいけないという機運が起こってこないことは、後世から見ればその異常さは明らかであり、並はずれた才能を持つ人が少なくなかった時代に、こんな大きな盲点が残っていたことをこの時代にあってはならなかった大失態だと思うに違いない。心の発現のメカニズムは、わかってみればそれほど複雑なものではく、現代の生物学で解明されている分子レベルの機構と比べてとくに際立って難度の高い問題ではないので、ホーキングが指摘した膨張する宇宙をだれも予見できなかったことと比べても、むしろ簡単な論理で理解できることのように思われる。

心の科学的理解がまだ確立されていないことは、死の問題ではさらに深刻なので第5節.終末期の医療でも触れる。また、心の理解のためには、医学、生物学的計測が役立つ可能性もあるので、医工計測が心の解明に貢献できるところがあるかもしれない。ただし、脳の活動を可視化する脳画像は、意識の内容のような脳が担っている情報にまで立ち入ることができないので、脳画像技術が単独で心の内容の観察に役立つことは期待できない。心の理解に到るには、まだ越えなければならない溝が数多くあるので、近未来には心の科学の成果に期待することはできないと考えてほとんど間違いないように思う。

そこで、不健康の軽減の問題に戻ると、そこに心の理解が必要なことは確かでも、いま現在の技術で心の内容を客観的にとらえることができないので、客観的な手法で得たデーターをもとに構成した論理による根拠に基づく医療（evidence-based medicine: EBM）のような手法は、心の問題に対しては適用することが今はできない。しかしながら、心の問題に科学は立ち入ることができないのではない。将来心の科学が確立し、心が科学的に扱えるようになり、心を客観的に計測し、心に介入する工学的手法が開発されることを期待したい。

（２） 不健康な期間の質の向上

今後医療技術が進んでも、遠い未来まで不健康な期間が寿命の10%程度残ることは避けられない。しかし、その期間をかろうじて生きられる状態から充実して生きられる状態にまで向上させることができれば、その貢献は非常に大きく、寿命を10%延長することにも匹敵するか、あるいはそれ以上の成果だと言ってもいい。近未来に寿命の延長が限界に到達し、健康でない期間を短縮することもできないとすれば、健康寿命も限界に達し、

健康寿命を充実して生きる知恵も蓄積されれば、残るところは不健康な期間の質の向上だけになる。

しかし、このような量的拡大の論理は、功利主義的で浅はかな印象をうける。良い生き方の概念が明確でなくても、生き方の良さは時間の長さに良さをかけた合計で評価できるようなものではないと考えたい。そうであるなら、個体寿命にも健康寿命にも関係なく、不健康な期間の長さにも関係なく、不健康な期間の一部でも質の向上があったならそれを良しとする視点に立ちたい。それは、ある人のある時であっても、そのことをだけをもって良しとすることである。しかし、その評価は無条件ではない。たとえある人に施された介入の結果が良いものであっても、そのために他者が不利益を受けたり、未来の人に不利益が及んではならない。すなわち、どんな医療行為もリスクを無視して行うことは許されないし、リスクを見積もらないで成果を評価すべきではない。そのような配慮は当然のことであって、あえてとりあげるまでもないと言われるようであってほしい。それでも、たとえリスクの見積もりが甘くても、良い面を評価することに躊躇する必要はないように思う。

不健康と向き合うことは医師の役割だと考えられるが、現実には医師は患者の身体的側面だけに向き合うことが圧倒的に多く、患者もそれだけを期待していることが多い。そこで、患者の主観的世界である心の領域に向き合うことは看護士にゆだねられることが多かった。しかし、これから不健康な期間の質の向上が重要となるので、患者の心の領域に向き合うことは医療の一環として不可欠な事柄となるに違いない。このような方向への組織としての取り組みとしてはチーム医療のような発想があるが、肝心な点を明らかにするためには、良い事例についての考察がむしろ重要ではないかと思う。

ベナー/ルーベル著「現象学的人間学と看護」［18］では、「気づかい」（caring）を主要な概念としてとりあげているが、その具体例としてひとつの事例を紹介している。1983 年に 14 歳で骨髄性白血病と診断された女児ラーラがサンフランシスコのカリフォルニア大学医療センターに入院し、小児がん専門の看護婦クレイマーが担当となり、８週間にわたって看護にあたった記録が、家族やほかのスタッフの回想とともに綴られている。クレイマーはラーラを受持つにあたり、時間をかけてラーラとその家族から話を聞き、病院でできることをくわしく説明した。そして看護の方針をまとめた。その第一はラーラを電話の使える病室に移すことだった。スタッフが病室に長く居るようにつとめ、ラーラの話を聞き、自分のことも話した。ラーラの誕生日には病院の一室で誕生会をすることを提案し、はじめ乗り気でなかったラーラを元気づけ、家族と医師やスタッフとともに誕生会

を催した。病状が悪化してからもラーラを元気づけようと、週末に外出させる計画を立て、主治医の許可を取り、赤血球と血小板の点滴をつづけたままで車で外出させることができた。やがて呼吸困難になり、気管挿管による人工呼吸が必要となったとき、ラーラの希望により、人工呼吸からの離脱（extubation）を祝うパーティーが家族とスタッフとともに行われ、皆に感謝の言葉（I love you all very much.）を告げ、その2時間後に安らかに息を引き取った。

この事例では、身体に対しては当時の最高の医療が施されたものと思われるが、病状を改善することはできなかった。その一方で、看護においては心の状態に沿った対応がなされ、その効果に患者が満足したことは最後の感謝の言葉からもわかる。また携帯電話もEメールもなかった当時に、電話端子のある病室に移すことを看護計画の第一に挙げたことは良い配慮であって、母親の回想にも「それはラーラを外の世界とつなぐ生命線になりました。彼女の気力を高める手段として、それはわたしたちが見出し得た中で最も有効なものでした。」とあることから、その配慮がきわめて有効であったことがわかる。

このように、不健康な期間はたとえ病状を改善することができなくても、適切な看護によって、心の状態において嬉しさを体験し、自分が孤独ではないことを意識し、家族やスタッフに感謝の気持ちを持つことができた。それは、看護という積極的な介入の結果であり、身体的な医療の介入をはるかに超える効果をあげることが可能であることを示している。

しかし、このような効果的な介入は、現状では医療処置のように客観的なデーターの蓄積をもとに構築される論理に基づく EBM のような手法として確立することは期待できず、ベナーらもそれには「経験豊富な看護士を評価すること」が必要であることを指摘している。また、看護の効果は看護計画を実行することによって得られるのではなく、看護する者との人格的なつながりを認識することが必要であるとも考えられ、したがって看護計画のマニュアルを作り、マニュアル通りに実行すれば成果が期待できるものではないようだ。

これらの考察からわかることは、不健康な期間の質の向上は適切な介入によって効果を挙げることができるということである。しかし、適切な介入をどのように行えばいいか、現状では明確に記述できないことが難点である。それは、心の科学的理解が皆無であるからだと考えられ、現状では経験豊富な者の直感に頼らなければならない。そこで、不健康な期間の質の向上のためには、無理にマニュアルを作ることより、具体的事例の分析から有効な知恵を見出す地道な努力とともに、そのような知見の蓄積から、心の科学を構築する基本原理を発見する機会を模索することではないかと考える。

第５節　終末期の医療

（1）　心のケア

人間の寿命がその限界近くまで延長しても、最後に死期をむかえることは以前と変わるところがなく、今のところ死の迎え方には高度医療の顕著な貢献が見られない。それは、医療がもっぱら延命を目指してきたため、死を先に延ばすことには努力がなされてきたものの、死の時点ではもはや医療が貢献する余地がなかったとも考えられる。しかし、医療を身体の延命に限定せず、心の在り方を支援する働きにまで広げるならば、死期を迎える心のケアに関わらないわけにはいかない。たとえ死期を迎える心に介入しても延命には貢献しないので、死期を迎える心の問題に関わるには、延命を越えた人間の在り方に関わることである。

死期を迎える心への介入を医療の立場として取り上げた考察としては、エリザベス・キューブラー・ロスの「死ぬ瞬間」［19］などの著作が広く読まれている。キューブラー・ロスは精神科医であったが、死に瀕した多くの患者と関わった経験から得た知見をもとに、死を告げられた患者の心を分析し、死に到る過程に介入する可能性について「彼らに近づき、彼らが人生の最後の時間を過ごす手伝いができるようになること」だと述べている。キューブラー・ロスの分析には、当時の精神医学の背景によると思われるところ、たとえば無意識の概念などに若干疑問な点はあるが、基本的に、死を迎える人の心に介入することが重要だとする立場は今も変らない。

終末期の心のケアが必要な状況としては、がんなどの死に至る疾患の告知がある。がんの告知については、日本では告知をすべきかすべきでないかが議論されることがしばしばあったが、欧米では告知が早く一般的になり、告知をどのようにしたらいいのかが問題にされた。告知をする場合には、告知を受けた患者の心のケアについての配慮が求められる。その一例として、Robert Buckman の How to Brake Bad News ［20］は告知のしかたの手引きであり、告知において配慮すべき点が 6 ステップにまとめられている。

ステップ１：　適切な状況、個室で、他人に聞かれないように、適当な間隔で一緒に座る、テーブルをはさんだりしない、ドアを閉める、気分が良くないようなら切り出さない、などの配慮を要する。

ステップ２：　患者が自分の病状についてどの程度知っているかを適切な質問によって確かめる。

ステップ３：　患者に自分の病状についてもっと知りたいかどうかを問う。もし知りたくないと言われたら告知はしない。

ステップ４：　病状を正確に話す。専門用語を使わず平易に、患者の理解力に合わせて、要点はくりかえし、患者の反応に注意して。
ステップ５：　患者の気持を尋ね、話してくれたなら謝意を表す。
ステップ ６：　これからできることは何かを話す。治療計画、今後の生活、心構え、など。

各ステップについてさらに詳しい解説があり、具体的事例も数多く示されていることから、終末期の心のケアについてはかなり深い考察と多くの事例の分析が行われてきたことが窺える。それにもかかわらず、心のケアに失敗した事例も取り上げられている。その原因として、心の科学の未熟なことは指摘されていないが、終末期の心のケアのような困難な問題と取り組むには、心の科学の空白が重大な問題であることが認識されてよいように思われる。

（２）　心の科学の確立

心の科学が未熟であることは以前から指摘されていた。前に触れたフランシス・クリックが意識の解明に取り組んだ動機も、心の理解の必要を切実に感じていたからであったようだ。1950 年代に認知科学（cognitive sciences）が注目されたことも、心の科学の空白の解消への期待があったようだ。そのころには、20 世紀前半のアメリカの心理学会で主流となっていた行動主義（behaviorism）への批判が高まり、行動主義に代わる論理を模索しようとする時代背景があった。行動主義は、20 世紀初頭に理論物理学などの精密科学の大発見が続いたことなどが刺激となって、心理学も精密科学にしなければいけないという焦りから、客観的なデーターのみを対象として論理を構築しようとする立場として注目され、それが主流となった。しかし、あまりに客観性に固執したために、客観的に観察できない事柄、たとえば意識の内容を口頭で伝えることなどには、触れることさえできないような雰囲気になったようだ。それから半世紀も経って、1950 年代に興った行動主義批判から、行動主義に代わる論理として認知科学が注目されるようになった。その頃の雰囲気は Howard Gardner, The Mind New Science – A History of the Cognitive Revolution ［21］によく描かれている。

しかしながら、認知科学は行動主義を批判したものの、行動主義に代わる画期的な論理を構築するには到っていない。その原因は、心を発現するメカニズムの生物学的理解が皆無であることにほぼ間違いないが、その困難を克服しようというチャレンジがあまりに少ないことが危惧される。前に触れたフランシス・クリックは、この難題に向かって果敢なチャレンジを試みたが成果は得られなかった。その原因のひとつは、心の発現機構を解明

するために、まず意識を攻略しようとしたことが戦略的な誤算であったのではないかと思う。たしかに心は意識の内容に深く関連しているように見えるが、心の進化的起源は高等動物の脳の進化よりはるか以前の段階であるかもしれない。もしそうなら、たとえ意識が攻略できても、心を発現する基盤の構造の理解にはほど遠いので、心の理解には容易には到達できないことになる。それなら、意識という壁を迂回して、原始的生物に心の起源を探索する戦略があっていいはずである。

心の理解のためには、進化の道筋を心の出現の時点にまで遡る必要がある。そこで、人間だけを対象にしてきた心理学のような分野よりむしろ、動物一般を対象とする動物学、とくに動物行動学の知見に注目したい。動物行動学は、その創始者のコンラート・ローレンツに負うところが多い。ローレンツは動物の意識に触れることを避け、動物の行動を起こさせる機構を意味する Stimmung という概念を導入した［22］。この語は英訳では motivation となっているが、日高敏隆は気分と訳した。この訳が名訳ではないかと思う。この訳は、繁殖気分が繁殖行動を引き起こすという理解につながる。そこで、環境が繁殖に適した条件になると繁殖気分になり、繁殖行動が誘発される、というような説明ができる。この説明であれば、最も原始的な生物にさえ無理なく当てはめられるので、生命の歴史の最初にまで遡ることができる。もし気分が心の出発点だとすると、原始的生物の気分の分子機構を突き止める研究にねらいを定めることができるし、より進化した動物では、気分を担う神経回路を特定する方向に研究のねらいを定めることもできる。このような心のメカニズムを攻略する戦術が立てられるようになれば、たとえ失敗が繰り返されても、着実に成果を積み重ねていくことが期待できる。

心の科学をゼロから立ち上げて、心の理解という難題を攻略するには、100 年以上もかかるかもしれないが、200 年か 300 年後には心の科学が完成の域に達していて、臨床に役立つ手法も数多く提供できるようになるに違いない。

第６節　激動の混乱と収拾

（１）　身体のケアと心のケアの乖離と収束

医療に身体のケアと心のケアが不可欠だとすると、現在の医療は身体のケアが高度に発達した一方で心のケアが立ち遅れている偏った状態にあることは明らかである。その要因のひとつは、生命科学の進歩によって身体のケアの技術が飛躍的に発展したことによる。もうひとつの要因は、心の科学の空白のため心のケアを発展させる基礎が確立していないことである。もし近未来に生命科学に匹敵するように心の科学が発展するとすれば、心の

ケアの技術も急速に発展し、やがて身体のケアと心のケアが極限まで発展して、未来の新しい医療が確立されることが期待できる。もし心のケアの発展が身体のケアの発展と同様の経過をたどるとすれば、**図４**のように、身体のケアレベルと心のケアレベルは一時的に乖離したとしても、やがて両者は極限のケアレベルに達したところで安定し、その後は高いケアレベルが維持されていくことが期待される。

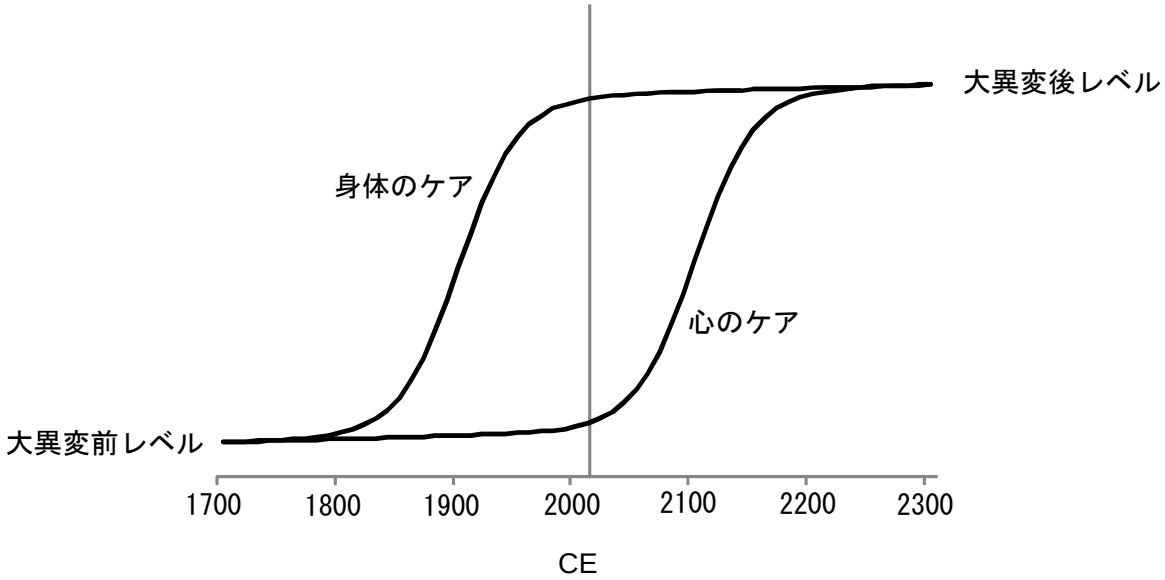


図４　身体と心のケアレベルの推移

心のケアについては、現在ではまだ向上の兆しが見られないが、身体のケアとの乖離が著しいこと、今後未来にわたって不健康な期間の短縮が期待できないこと、健康な期間においても更なる良い生き方が追求されることなどから、心の科学の発展のニーズが高まってくるので、近い将来に心の科学的解明が急速に進むことは間違いないように思われる。したがって、身体のケアと心のケアの乖離が遅くとも 300 年後までに収束するという予測は妥当ではないかと考えられる。

このような見方が正しいとすれば、21 世紀初頭は身体のケアと心のケアの乖離が最も大きい時である。強力な技術を駆使して延命がはかられれば、その介入の結果として起こってくる心の苦痛に対処できず、延命が苦痛の期間を長引かせるだけの効果しか生まないことになり、医療は良い生き方の追求とは正反対の行為と見なされかねなくなる。ことに終末期においては、医療によって病態が改善される見込みがまったくないにもかかわらず、死期を先に延ばすための強力な措置が施行されることが問題となる。たとえば、経口的な食物摂取ができなくなった時点で胃瘻が作成され、栄養状態が一時的に改善されるので延命がはかられるが、その結果、患者は低栄養による自然死よりはるかに悲惨な状態に長く

置かれた後に死に至る。このような問題を提起した著作であるリッダーの「わたしたちはどんな死に方をしたいのか？」［23］は、身体のケアと心のケアの乖離の時代を象徴する著作だと言われるようになるであろう。

心の科学が驚異的進歩をとげ、それによって心のケアが限界に至るまで発展したころには、現代の大異変も治まり、その後長く平穏な時代が続くと考えられる。しかしそれは、完成に至って何も付け加える必要がなくなるわけではなく、二度と大異変を繰り返すことがないという意味では平穏であっても、平穏を保つために並々ならない努力が必要であるに違いない。なぜなら、地球環境の持続可能な資源やエネルギーの制約内で極限の身体のケアと極限の心のケアを維持していくには高度の知恵が必要であり、その完成には地質年代の時間スケールを要するかも知れないからである。その上、良い生き方の追求という課題にも応えていくことが求められるので、大異変後の人類の歴史は安泰な時代ではなく、つねに未来に介入して未来をより良いものにしていくための終わりのない作業を続けていくことになる。その「未来」とはどんな未来かという問いに答える言葉としては、１冊の宗教書のタイトル　The Future as the Presence of Shared Hope,（共有される希望の実在としての未来）［24］が相応しい。

（２）　大異変が残した損失と知恵

およそ 500 年に及ぶ現代の大異変が、過去 5 億年に 5 回あったと言われる大絶滅を凌ぐ規模の傷跡を残すことになることはほぼ確実である。陸上生物も海洋生物も激減し、絶滅種の割合は優に 90％を越えるかもしれない。化石燃料のような枯渇資源のほとんどは使いつくされ、自然の浄化が期待できない物質による海洋汚染は地質年代にわたって続く。生物の繁栄に適した陸地はすべて人類によって占有され、野生生物が進化する環境が失われるため、絶滅種の回復は過去最大の大絶滅からの回復よりも長い期間を要するかもしれない。もし数百万年にわたる困難な時代を耐えて人類が生き残るとすれば、それは現代の大異変の結果を早く予見して、できる限りの対策を施した場合に限られるであろう［2］。

現代の大異変の結果、数百年後に何がどの程度失われるかは、人間の活動によって大幅に異なる。それは、今の人間が未来の人間社会に介入できるということで、その介入の時期と程度によって未来の人類に残される環境の量と質が大幅に異なる。介入が早ければ傷は浅くてすむかもしれないが、介入が少しでも遅れれば傷は深くなり、介入が遅すぎればその傷は致命的となる。それは大災害における救急医療と同様で、障害の要因を取り除くとともに、生存のための処置を早く適切に行わなければ多くの命を救うことができない。

しかし皮肉なことに、現代の大異変から人類を救うためには、現代の高度に発達した医療技術は、少なくとも直接的にはほとんど役に立たない。

それでも、大異変を生き延びた人類にとって、大異変の体験から多くを学ぶことは間違いない。少なくとも、大異変による生態系の破壊については、二度と同様の失敗をすることがないように万全の備えをするに違いない。その結果、人類が太陽の寿命近くまで存続するとしても、現代の大異変のようなことは二度と起こさないであろう。そのためには、人口を安定に維持するための施策はもちろんのこと、資源の管理、汚染の防止、廃棄物処理などの対策は万全となる。また大異変をひき起こしその対策が遅れたことから、人間の活動における意思決定を左右する心の科学的理解の必要を痛感し、心の科学を興して極限まで発展させたことも大異変のさなかに獲得した成果であるだろう。その副産物として、人間が争いを起こしやすいことの心のメカニズムが解明され、その結果として平和がもたらされることも期待できるかもしれない。

さらに、人類の存続を確実にすることに加えて、良い生き方の追求にも心の科学の成果が反映され、良い生き方が多様化し、新たな生き方を創出できることも明確に説明されるかもしれない。それによって、人類は環境や遺伝子の制約にもかかわらず多様な生き方を創出し、生態系の豊かさを超えた生き方の多様性を実現させるかもしれない。

人類は大異変を生き延び、取り返しのつかない多くのものを失った一方、その損失に優る知恵を獲得し、遺伝子進化では生じえなかった多様性に富んだ新たな生態系を出現させる。さらに、人間の良い生き方の追求に始まる活動から、その新たな生態系の中に、ただ生きて子孫を残す以上の良さを持つ構造が出現し、現代の大異変を境に、人類と他のすべての種で形成される生態系が新たな性質を持った世界に変質する。

第７節　大異変後の医工計測の役割

（1）　インフラストラクチャーとしての貢献

ここまでに、未来の医療ことに現代の大異変が収束して以降の医療についてのあるべき姿について考察してきたが、その中では個々の医工計測についてはほとんど言及していなかった。しかし、現代の医療の中にはすでに多くの医工計測が用いられているので、現代の医療のレベルを維持していくためには、今後も現代の医工計測の技術レベルを維持していかなければならないことは当然である。

それでは、現代の大異変が収束して以降の医療において、どんな医工計測を新たに導入する必要があるか考えると、医療の形態が現代とは大きく異なる以上そこで必要となる技

術が求められるには違いないが、むしろ未来の医療の中では技術の位置づけが違ってくるために、個々の技術の必要や効用の程度が現代とは違ってくるのではないかと考えられる。それは、技術だけではなく、医療そのものがもはや単独でその必要や効用が評価されるものではなくなるに違いないと考えられる。未来においては寿命も健康寿命もその限界に到達し、出生率も一定に維持されるため年齢構成も一定となり、健康な期間の健康の維持、不健康な期間に必要な医療や介護・介助もつねに必要が満たされ、終末期にも必要なケアが施され、ほとんどだれもが医療の恩恵にあずかるようになるが、それをあえて意識するまでもなく、当然の社会のしくみだとみなされるようになる。それは成熟した社会に備わっている資源やエネルギー供給、廃棄物の処理、安全管理、情報管理、流通、教育、経済活動、文化活動、娯楽、スポーツ、その他もろもろの公共サービス、文化活動、娯楽などと同様に、成熟した社会を成り立たせている要素のひとつにすぎない。それらの要素は、目に見えるところはごく一部分であり、目に見えないところに高度の技術が駆使されている。それらはインフラストラクチャーであり、優れたインフラストラクチャーほど目にとまることが少なく、陰で社会を支えている。

したがって、未来の社会においては、医工計測は医療に欠かせない存在でありながら人の目にとまることは少なくなり、完成度の高い機器はもはや改良する余地はほとんどなくなり、社会の構成要素のひとつとして役割をはたしていく。そして、その貢献が非常に大きいにもかかわらず、特別に高い評価を受けることなく、むしろ目立たないことがその完成度の高さを示すゆえんであることを意識して、その維持にあたる人々に自信と満足をもたらす。いわば、宮沢賢治の「雨ニモマケズ風ニモマケズ・・・」の詩に示された人物の通りの存在となると考えればよいだろう。

しかし、完成度の高いインフラストラクチャーが構築され維持されるには、社会が安定していなければならない。人口が急増するような都市ではインフラストラクチャーの構築が間に合わないし、人口が激減すれば既存のインフラストラクチャーを維持していくことさえできなくなる。したがって、激動の現代は完成度の高いインフラストラクチャーが育たない時代であるが、大異変の後の安定した社会は成熟した社会となり、完成度の高いインフラストラクチャーが構築されるに違いない。しかも、200 年後か 300 年後以降の未来社会は、安定した社会であると同時に、人類史上の最大の異変を経験した直後であり、激動の社会がいかに大きな困難をもたらしたか、また遠未来にまで及ぶいかに大きな損失をもたらしたかをまのあたりにした時代であり、安定した社会を強く希求する時代であるに

違いない。そこに完成度の高いインフラストラクチャーが構築されることは自然ななりゆきである。

したがって、いまの時代に未来のインフラストラクチャーの構成要素のごく一部である医工計測の具体的な姿を単独に描くことはできないことではないかもしれないが、もし未来像を描くなら、むしろ全体像から部分を描いていく方向がわかりやすい。それには、まず大異変の後の社会を考える。現代の大異変が収束し、そこに大異変の体験から得た貴重な知恵を駆使して安定な社会が築かれ、医療をはじめさまざまなインフラストラクチャーが構築されていく。その形態は目先の要求を満たすだけのものではなく、恒久的なシステムとして高い完成度を目標に、時間をかけてでも未来のためのデザインが追求される。その中で用いられる個々の技術は、目先の新規性ではなく、恒久的な技術が求められる。したがって、技術の効用を一面的に評価するのではなく、その時代の社会における効用にとどまらず、遠未来までの時間スケールの中での効用が追求される。そこに計測という技術特有の役割が見出されるかもしれない。

医工計測は、体液調節のような身体の恒常性を保つための制御系の受容器にたとえられる。視覚や聴覚のような体外からの情報を感知する感覚器のほかに、体液の性状を感知して正常な体液環境を維持するような制御機構を働かせ、体内の組織・器官が正常に動作する環境を保つ。そう考えれば、安定した社会は、健康な体において体内のすべての臓器・組織・細胞が正常に保たれる体内環境制御機構が働いているように、社会を構成するひとりひとりに、自由に活動して充実した生涯をすごすことのできる自然環境および社会環境の制御機構が整えられているところでなければならない。そのためには完成度の高いさまざまな機構が必要であり、医療・福祉もその中の不可欠な機構の一つである。

医工計測によって収集されるデーターは、当人の健康維持に役立つだけでなく、同世代の多くの人の健康維持に活用される。それは疫学の分野の課題であり、すでに膨大なデーターを保存して健康維持に活かするために、ビッグデーター解析の手法の活用が期待されている　[25]。さらに、生体のビッグデーターは、環境や社会の計測データーとの関連性を解析することにより、環境や社会を健康に保つためにも活用されるべきもので、環境疫学および社会疫学と呼ばれるような分野が発展することが期待される。そのためには、医工計測の手法と経験が、環境計測や社会計測にも適用できるように発展、それによって、自然環境、社会環境、およびその中で生きる人の身体と心を健康に保つ、完成度の高いインフラストラクチャーが構築されることを期待したい。

（2） 文明の監視役

自然環境は現代の大異変によって崩壊の危機に瀕しているが、もし人間の知恵によってその危機を脱することができれば、もう二度と同じ誤りを繰り返すことはないに違いない。現代の危機が産業革命を契機に始まったとすれば、それは人類が築いてきた文明がもたらした結果にほかならない。その事実に気付いた人類は、文明が二度と暴走することのないように、できるかぎりの信頼性が保証される文明の監視役を立てることになるに違いない。

しかし、将来の人類の活動は、ただ今現在の文明が暴走しないということだけにとどまっていられるはずはない。文明は必然的に発展する性質のものであり、文明の発展を止めることはできない。したがって、ますます発展する文明を絶対に暴走することがないように監視し、確実に必要な制御を施すことは、未知の未来の挑戦を受けて立つきわめて困難な事業である。しかも、そこで弱気になって、未来を放棄して過去に回帰することは許されないし、時間を反転することができないように、文明を過去に回帰させることはできない。そこで、文明の監視役は、文明の中から出現する未知の敵の攻撃に備えて、つねに監視を怠らず、環境と社会の崩壊につながるかすかな前兆も見逃してはならない。

ここで文明の監視役は何を監視するのかという疑問が起こるかもしれない。文明の暴走を環境破壊のような目に見える事柄だけだと考えると、環境計測で十分なように思われるかもしれないが、現在の環境危機を見れば明らかなように、目に見える変化が現れてからでは手遅れであり、文明の暴走は欲望の高まりのような心のレベルで検知されなければならない。そのために心の科学が不可欠である。

その一方で、文明の発展を抑制することは最小限にとどめ、安全な方向には自由に発展できる余地を残したい。なぜなら、文明の発展は、生命の歴史における生物の進化にもたとえられるように、各生命体はただ同じ姿で生き続けるだけではなく、進化の過程で多様化し、複雑だがきわめて安定な生態系を出現させたので、文明の将来にも同様の期待を抱くことをさまたげることはできないからある。生命は共通祖先である生命の出現に始まり、進化の過程で多様な生き方が出現し、多様な生命体を出現させた。そこに、未来の文明の可能性を垣間見ることができる。

生命の歴史における種の多様化は、近縁の種を存続させるために極めて有効な方策であった。多様化の特性を持ち得なかった多くの種が絶滅した中で、多様化の特性を持ったものの中から環境に適応した種が生き残ってきたと考えられている［26］。人類の歴史においても、多数の異なった文化を持つ集団が現れ、その中には消滅したものが多かったが、強力な社会が生き残り、完成度の高い文化を生み出した。その結果、異なった文化や伝統

を持つ多様な社会が形成され、あたかも多様な種によって成り立っている豊かな生態系のように、多様な文化を持つ社会によって形成される人類の世界が存在していた。

ところが今、産業革命以来、生産技術のほか、経済、流通、情報、通信、移動などの技術が世界規模に拡大し、世界があたかも一つの文化圏のような様相を呈している。そこでは、かつての社会の多様性は失われた。したがって、一つとなった世界文化圏に弱点があれば人類の絶滅に至る危険が著しく高まっている。それはごく単純な事柄であって、その危険を未来の人々が見落とすことはあり得ない。したがって、未来の人々は社会の多様性をとり戻すように努めるに違いない。その結果、未来の世界は、それぞれが固有の文化を持った多くの社会によって構成されるようになり、それぞれの社会は固有の文化を伝統として継承する。それは個々の生物種において、種の固有の性質が遺伝子によって子孫に継承されていくことと同様で、かつて心理学者E・H・エリクソンは固有の伝統を持った社会を疑似種（pseudo-species）と呼んだ［２７］。また、遺伝学者R・ドーキンスは、継承される文化の担い手を遺伝子ジーン（gene）になぞらえてミーム（meme）と呼んだ［28］。このような概念は未来の世界にもあてはまり、世界は多様性に富んだ社会の集合となり、個々の社会の伝統が子孫に受け継がれていく。

そして、未来の社会は完成度の高いインフラストラクチャーによって維持されるので、もはや新技術を導入する必要はほとんどなくなる。医療もインフラストラクチャーに組み込まれ、各人は出生から最長寿命近くまで固有の文化によって身体の健康が支えられて、加齢などによる不健康の期間も良く生きることができ、終末期に至っても平安に生涯を終える状況が整えられる。しかも、各人の一生はそれぞれ違い、社会の伝統とともに一つの社会の中の多様性によって、多様な生き方が可能になる。多くの人が最長寿命近くまで生きられる社会の中でも、リスクの大きい冒険に挑むこともあるし、寿命の限界まで生きなければ達成できない目標を目指す人もある。医療は一律ではなく、それぞれの生き方に応じて支援できるように、柔軟な技術が整えられる。

完成度の高い社会は、遠未来までの人類の存続を可能にするように構築される。それには現代のような自己中心、現在中心の生き方はなじまない。平等の原則は未来の人々とも平等であることを前提とする。自由の原則は、未来の人々に不利益が及ばないことを前提とする。そのためには、今生きている人の合意のみで物事を決する今日の民主主義の原則は通用しない。そこに未来の人の代表を加えるという発想もある［29］。しかし、まだ必要な改革の第一歩にも至っていない。この点だけを考えても、未来はまだ遠いことがわかる。

そんな遠い未来が、いま切実な問題としてわれわれに迫っている。いまもし人類を絶滅させてしまえば、これから産まれてくるはずのすべての未来の人々から、産まれてくる機会を奪うことになる。その人数は、これまでに生まれたすべての人の数よりはるかに多い。その反対に、いま人類の絶滅を阻止するだけでなく、未来の人のために絶滅生物種を減らすことができれば、それはこれまでに生まれたすべての人の数よりはるかに多い未来の人々へのかけがえのない贈り物となる。いま進行している現代の大異変は、いまの問題ではなく、遠未来にまで及ぶ人類の最大級の問題である。それにもかかわらず、いまほとんどすべての人が、未来の人のことを心配するのは自分の利益になることではないと思っている。

今の常識からすれば、医療は人々に恩恵をもたらすことに間違いはない。したがって、医療に役立つ技術は、人々に恩恵をもたらすために役立つ。医工計測は医療に役立つ技術の一つであり、人々に恩恵をもたらすことに間違いはない。そうであれば、医工計測の優れた技術はビジネスとしての成功が期待される。そのほかに、未来の人のことを心配するのは自分の利益になることではないと考えることは、あと 10 年か 20 年は大目に見られるかもしれない。しかし、世界人口の増加による社会問題や環境問題がさらに深刻になれば、未来のことについてもっと真剣に考えなければならなくなることは明らかである。そのとき、ビジネスの見通しについても見直しをせまられる。そこで今、確実にやってくる大異変後の未来に向けてのビジネスモデルの検討をはじめることを提案したい。

いまその只中にある大異変において、すでに高度に進歩している生体計測の技術を動員して、環境と社会の監視役を担える技術を確立することができる。環境と社会がわれわれの身体と心にどれだけの影響を及ぼしているかの客観的なデーターが、これからの環境対策と社会構築に役立つ。さらに、大異変以降に安定した社会が到来したなら、医工計測の活動は医療の一端を担うと同時に、環境と社会の監視役として、未来の完成度の高いインフラストラクチャーに組み込まれ、その不可欠な要素となって、人類が存続するかぎり人類に仕えるビジネスとしての役割が保証される。

第８節　まとめ

この章は以下のような内容である。

１．現代は激動の時代の只中にあって、現代を俯瞰して観るには、少なくとも産業革命が始まった約 250 年前から、世界人口、出生率、平均寿命、健康寿命などがほぼ安定する約 250 年後までの、約 500 年を大異変の時代としてとらえる必要がある。

2．大異変の後には、世界人口はおよそ 40 億人以下の持続可能なレベルで安定し、出生率はほぼ 2.0 一定となり、平均寿命の延長はほぼ 100 歳で止まり、それ以降はほとんど変わることがない。しかし、その状態を維持するには高度の科学技術を駆使したインフラストラクチャーが不可欠であり、また良い生き方を追求するために、心の科学の発展が不可欠である。

3．世界の平均寿命は 2300 年ころにはおよそ 100 歳に達するが、それ以上の寿命の延長には人間の遺伝子操作が必要であり、将来たとえそれが技術的に可能になったとしても、それを用いることはなく、限られた寿命をより良く生きる生き方が追求されると考えられる。

4．寿命の延長とともに健康寿命も延長するが、寿命と健康寿命の差の不健康な期間はゼロにはならず、10 年くらいの不健康な期間が残る。不健康な期間を短縮する努力が払われるとしてもそれには限界があり、むしろ不健康であっても良く生きることのできる生き方が追求されるようになる。

5．健康な期間には、加齢によって生じる不健康な期間への備えがなされるが、それよりむしろ健康を最大限に生かして活動することに重点がおかれる。健康な期間は自分のためだけではなく、未来の人々により良い生き方ができるように、未来に遺す負の遺産を少なくし、良い遺産を増すことに努めるようになる。

6．不健康な期間の質の向上が医療の大目標となり、身体的側面だけでなく、心への介入の重要性が認識される。そのためには心の理解が必須であり、今後は心の科学の確立とその分野の大発展が不可欠である。

7．人間の寿命には限界があり、未来においても死を迎えることに変わりない。しかし、死期にある者への心のケアには、心の科学の発展によって大きな可能性が拓ける。科学的な心の理解に基づく適切な心のケアによって平穏に死を迎えることができるようになる。

8．200 年から 300 年後に形成される安定した未来社会には、だれもが充実した生涯を送ることのできる完成度の高いインフラストラクチャーが構築されており、その中に医療および医療を支えるさまざまな技術が組み込まれている。医工計測も、目立たないところで重要な働きを担う。

9．未来社会は高度に発展した文明の支えなしには存続しえない。また、未来社会を支える文明の存続には、かつての大異変のような暴走を二度と繰り返すことのないように、

つねに監視が必要である。健康の監視役として発達した医工計測技術は、将来において文明の監視役としてさらなる発展をとげる。

１０． 現代の大異変を境に、人とすべての生物種で構成される生態系の中に、ただ生きて子孫を残す以上の良さを持つ構造が出現し、生態系が新たな価値観を持った世界に変質する

以上のように、現代を俯瞰することから未来社会を垣間見ることができ、そこに科学技術の今後の発展による大きな貢献が期待される。

参考文献

[1] 戸川達男『動物の心人間の心 - 科学はまだ心をとらえていない』コロナ社 (2008)

[2] Togawa T, Rolfe P: Reach Across Time to Save Our Planet. Grosvenor House Publishing (2017)

[3] M. Wackernagel et al. :Tracking the ecological overshoot of the human economy. PNAS, 99:9266-9271 (2002)

[4] “World Population to 2300,” Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations. http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf. (2004)

[5] Finch CE: Evolution of the human lifespan and diseases of aging: Roles of infection, inflammation, and nutrition. Proc. National Acad. Sci., vol. 107, suppl. 1, pp. 1718-1724 (2010)

[6] Carey JR and Judge DS: Longevity Records: Life Spans of Mammals, Birds, Amphibians, Reptiles, and Fish. Odense University Press, (2000)

[7] 田沼靖一『ヒトはどうして老いるのか一老化・寿命の科学』ちくま書房 (2002)

[8] Hayflick L: How and Why We Age. Ballantine Books (1994)

[9] 巌左庸『生物の適応戦略』サイエンス社 (1981)

[10] Life expectancy, Global Health Observatory Data, World Health Organization, http://apps.who.int/gho/data/node.main.688. (2015)

[11] Healthy life expectancy, Global Health Observatory Data, World Health Organization, http://apps.who.int/gho/data/node.main.HALE?lang=en. (2015)

[12] 祖父江逸郎『天寿を生きる』角川書店（2011）
[13] Morrow-Howell N, Hinterlong J, Sherraden M: Productive Aging. The Johns Hopkins University Press (2001)
[14] Wheatley D: Editorial, Stress Medicine. 1:1-3 (1986)
[15] K・ローレンツ（日高敏隆、久保和彦訳）『攻撃―悪の自然誌』みすず書店（1970）
[16] HawkingA: A Brief History of Time. Bantam Book (1988)
[17] Crick F: Astonishing Hypothesis - The Scientific Search of the Soul. Touchstone (1994)
[18] P・ベナー、J・ルーベル（難波卓志訳）『現象学的人間学と看護』医学書院（2000）
[19] E・キューブラー・ロス（鈴木晶訳）『死ぬ瞬間―死とその過程について』中公文庫（2001）
[20] Buckman R: How to Brake Bad News. The Johns Hopkins University Press (1992)
[21] Gardner H: The Mind's New Science - A History of Cognitive Revolution, Basic Books (1985)
[22] K・ローレンツ（日高敏隆訳）『動物行動学』思想社（1989）
[23] M・デ・リッダー（島田宗弘、W. R. Ade 訳）『わたしたちはどんな死に方をしたいのか？』教文館（2016）
[24] Muckenhirn M ed.: The Future as the Presence of Shared Hope. Sheed and Ward (1968)
[25] Moony SJ, Westreich DJ, El-Sayed AM: Epidemiology in the era of big data. Epidemiology, 26, 3, pp. 390-394 (2015)
[26] E・O・ウィルソン、（大貫昌子、牧野俊一訳）『生命の多様性』岩波書店（1995）
[27] Erikson EH: Ontology of ritualization in man. Philosophy. Transact. Royal Soc., 251B 337-349 (1966)
[28] R・ドーキンス（日高敏隆、岸由二、羽田節子、垂水雄二訳）『利己的な遺伝子』紀伊国屋書店（1991）
[29] Dobson A: Representative democracy and the environment, in Lafferty WM and Meadowcroft J eds., Democracy and the Environment. Edward Elgar, 124-139 (1996)

第６章　「良い生き方」の追求のために

第１節　「心の科学」をめぐる考察

戸川達男

第 2 部第 5 章「人類史の中の医療の現状と今後の課題」の中で、終末期の医療に関連した事柄として心の科学の必要を指摘した。しかし、ここでは医療に限定せずに心の科学について考察したい。医療に限定しない心の科学によれば、健康であるかないかにかかわらずよく生きることができる知恵の発見に到達できるかもしれない。もしその可能性があるなら、計測技術の適用領域が、医療による良い生き方の追求から、医療を超えた良い生き方の追求に拡大することになる。その可能性を視野に入れて、「心の科学」についての疑問に答える応答形式の論述により、「心の科学」の現状と将来の可能性についての考察を提示したい。

（1）　心の科学という領域がすでにあるのか？

心に関係する事柄を少しでも含むという意味で広くとらえるなら、すでに多くの科学の領域で心にかかわる事柄を扱っているので、心の科学はすでにあると言っていいかもしれない。たとえば：

- 臨床心理学　　心に問題があると思われる事例の観察、類型分類、原因究明、治療、社会復帰など。
- 精神医学　精神疾患の病理、検査、診断、治療、予防など。
- 看護学　　身体のケアを担う医師と共に患者の心のケアを担う。
- 文化人類学　　さまざまな社会に認められる人間の特性を調査、比較、分析する。
- 動物行動学　　動物の行動を観察、分析する中で、心の進化的起源を考察する。
- 人間科学　明確に定義されていないが、心にかかわる問題を広くとらえる分野として認知されている。

しかし、これらの領域は心に関する事柄を扱っていても、意識、感情、気分などのような心の現象のメカニズムを解明することを研究課題とするとは限らないので、心を科学的に解明しようとする研究が主要な活動となるとは限らない。

「科学」を広い意味に解釈するなら、哲学には心の理解にせまろうとした多くの探究がある。しかし、哲学では、たとえば１元論か２元論かというような概念を前提として論理が展開されることが多く、そのような前提の違いにより多くの理論が提起されるものの、共通理解のレベルがきわめて低い。また、そのような前提を排除して、対象の現象のみから出発する現象学もあるが、前提を排除することはひとつの前提ともとれるので、本質的な違いがあるとは思えない。また、心は人間の性質のひとつで、人間の性質が生物進化の過程を経て形成されたことは疑う余地のない事柄であり、それを前提としないことは科学

的態度とは言い難い。むしろ、科学は確からしい前提から出発して、もし不都合な結果が出れば、（相対論の出現の場合のように）その時点で前提を修正することをいとわないので、生物進化をはじめ諸科学の成果のほとんどをむしろ前提として、そこから出発することが、心の科学に必須な条件であろう。

このような視点から見る限り、心の科学的解明を主要な研究課題だと位置づける領域としての心の科学はまだないと言っていい［1］。しかし、心の科学にはほかの科学の領域にはない特別な困難があるという理由（そのような主張はないわけではないが）もほとんど見当たらないので、これから心の科学が興り急発展して、やがて現在の生物科学を基礎とした身体の科学に匹敵する心の科学が近未来に出現することが期待でき、むしろその可能性はないとする理由が考え難い。

（２）　なぜいま心の科学が必要なのか？

科学は、生きるために不可欠な知識ではなく、どんな領域の科学も存在しなかった過去においても、人は生き繁栄した。過去には、今日のような科学が存在しなかったにもかかわらず、経験をもとにした知恵が蓄積され、文化として継承された。医術においても、経験をもとにした莫大な知恵の集積によって、高度の身体のケアが実現し、同時に心のケアの知恵の蓄積によって、高度な心のケアも存在していた。身体の科学が高度に発達した今日においても、心の科学が未発達であるにもかかわらず、経験に基づく心のケアが存在し、たとえば第５章第４節に紹介した白血病患者ラーラの看護の事例［2］のように、質の高い心のケアが行われてた事例は少なくない。したがって、未来においても患者ケアのためには心の科学が必須であるとは限らない。

しかし、心の科学的理解なしに質の高い心のケアを実現することは容易ではなく、心のケアが十分に行われないケースが多いことも確かである。ことに未来において、先天性の障害を持って長く生きる人や、高齢者が加齢によって身体機能が低下し、また老年症候群に罹り要介護となった後に長く生きる人が多くなり、心のケアを必要とする人が現在より大幅に増すことは明らかである。また、高度医療によって死期を遅らせることが可能になるため、より困難な状況での心のケアが要求されるようになる［3］。

そこで、これまでは経験豊富な看護士のような心のケアのエキスパートにしかできなかった高度の心のケアを、より多くのケアスタッフが心の科学に基づく技術によってより容易にまた確実に実施できるようになることが望まれる。心の科学の発展によって、これまで患者とのコミュニケーションや表情などから察していた患者の心を、計測技術や情報処理技術によって客観的データとして示すことができるようになり、身体のケアの場合と同様に心のケアの EBM の実現も期待できる。その結果、心のケアが量質ともにこれまでとは格段に向上することが期待できる。その結果、20 世紀後半の医療技術の発展が身体のケアのレベルを劇的に向上させたのと同様に、これから半世紀か１世紀の間に心の科学が大発展し、心のケアも劇的に向上するに違いない。

（3） 心の科学は今後どのように発展していくことが期待されるのか？

心の科学によって、心のメカニズムがすべて解明され、心の内容がすべて計測され、心に介入して心を自由に操れるようになるわけではない。それは身体の科学でも同様で、生体のメカニズムにはまだ解明されていない多くの課題があり、メカニズムが解明されても生きたままの状態で計測できない項目も多く、人為的に操れる部分は限られている。それでも、現代医療は生物科学の成果を用いて大発展をとげた。心の科学も、心の現象が完全に解明されなくても、心のメカニズムについて重要な知見が得られれば、終末期や不健康な期間の心のケアに応用されることが期待できる。

心の出現は、進化的起源から考えれば、個体の生存のための活動とともに、子孫を残すための生殖行動を支配する機構として出現し、神経機構の進化により、主要な機構が脳に集中するようになったと考えられる。したがって、心は脳に集約された種の存続と個体の生存のためのさまざまな機構の総体と見なすのが妥当であり、そのような理解によって、心のさまざまな機構を科学的に分析して、基礎生物学の知見と同様に、医療に活用することが期待できる。

心の活動でとくに重要な機構はおそらく気分であり、気分は感情より根元的ともいわれる［4］。気分の進化的起源としては、原始生物においてすでに、繁殖に適した環境条件が整ったときに繁殖を開始するような状態に遷移するスイッチ機構があり、それが気分の原型とも考えられる［5］。人においても、活動的な状態と活動が抑制される状態があり、うつ病や双極性障害ではその状態の遷移がスイッチのオンオフに相当し、この意味でうつ病や双極性障害を総称した気分障害という呼び方が一般的になっている。また、うつ病や双極性障害のような気分障害ではグリア細胞の状態に異常が見られることから、グリア細胞と気分の関係が注目されており、「気分障害はグリア障害だ」というタイトルの論文も見られる［6］。身体のケアにおいては、気分障害の場合にとくに気分の動態の異常が問題にされるが、心のケアにおいては、むしろ気分を安定させることが求められるので、よりきめ細かな気分の分析が必要となり、気分のより深い科学的理解が求められる。

感情も心の重要な機構として認識されているが、感情を発現する機構はまったく解明されていない。それでも感情には多くの種類があり、エクマンの提唱した４基本感情（恐れ、怒り、嫌悪、喜び）のほか、いろいろな感情の分析が行われて来た［7］。また、感情は表情や身振りに現れることから、感情が他の個体によって認識されることが個体の生存および種の存続に役立っていることが動物行動学の研究から明らかにされている。人においても表情から他者の感情や気分を察することは円滑な生活を営むために重要であり、表情の客観的計測が可能になれば、医療の場においても役立つに違いない。

心の現象は意識と不可分であり、感覚情報が意識の内容となり、意識の内容が気分や感情に反映される。したがって、意識は心の現象の理解の基本であるはずだが、意識の発現機構はまったくわかっておらず、いまだに意識の発現機構を解明しようとする研究は少な

い［8］。また、他者の意識の内容を知る手段としては、言語によるコミュニケーション以外に有効な方法がない。脳科学が進歩しても、意識の内容を客観的に計測することは将来も不可能であるに違いない。このように断定するのは大胆すぎるように思われるかもしれないが、意識の内容が個々のニューロンの活動によることは確かで、その計測には現在の脳画像計測の分解能では体積で百万倍以上も粗いことや、ニューロンの入出力に数千以上あるシナプス結合の重みを計測する方法は原理的に考え難いことなどから、意識のリアルタイムの計測が将来も不可能であることはほとんど間違いない。しかし、意識の内容は記憶に残り、他者に報告できるので、意識は観測できない現象ではなく、直接的な計測ができないにもかかわらず、そこに意識があることを本人も他者も認めて疑わない。この関係は、心の科学が飛躍的に発展し、意識の発現機構が明らかにされてもおそらく変ることがない。心の科学の進歩によって、ひとりの人間が他者から直接覗かれることがない自分だけの心の世界を持っていることが明確になり、身体の他のすべての部分が可視化されても失われることのないプライベートな世界を持っていることによって人格が尊重されるようになることが、むしろ心の科学の大きな成果だと考えられる。

意識の内容そのものは計測にかからなくても、意識の内容によって引き起こされる気分や感情は表情のような生理現象に現れるので、計測にかかる。したがって、生理現象を観察することによって、心が落ち着いているか過敏な状態かというようなことがわかり、心のモニタリングが可能となる。いわゆる読心術も、表情や身振りのような観察できる情報から心の内容を推定する技であり、読心術レベルの心のモニターは将来実現されると考えられる。意識の内容は外部刺激がなくても活動が起こり、怒りや喜びのような感情が起こることもありうるので、患者のケアの目的には、意識の内容に立ち入らずに気分や感情のモニターができることはむしろ好都合だとも考えられる。

意識の内容によって引き起こされる現象として、感動を覚えることは外部刺激によるだけではなく、過去の記憶の回想によっても感動が起こる。感動は、感情が表情に現れるように生理現象を伴う。たとえば、大きな感動に伴って涙を流す。したがって、感動は計測にかかる現象であり、客観的な観察や記録が原理的に可能である。また、感動は喜びに伴うことが多いと言われる［9］。したがって、良い生き方の一つの側面だとも考えられるので、心のケアのために有効な指標となりうる。

（4） 心の科学の発展と心のケアへの応用はどんな医工計測技術によってもたらされるのか？

心の活動は心の中にとどまっているだけではない。心が表情や身振りのような身体の現象に反映されることについては、すでにダーウィンの詳細な観察によって明らかにされている［10］。また心は意思決定を支配し、心の活動が行動に反映する。心が出現した進化の過程を考えれば、行動に反映しない心のメカニズムが進化することは考え難い。したがって、心の活動は生理機能への反映を介して原理的に計測可能であると考えてよい。

将来、心の活動に関するさらに多くの情報が脳画像パターンから読み取れるようになることは考えられるが、むしろ心に支配される生理現象に現れる情報こそ生きるための心の働きとしての重要な側面である。気分や感情が表情や身振りに現れるのは、社会性動物にとって生きるために必要なゆえに進化した特性であり、笑顔検出ソフトが小型カメラにも搭載されるようになったのと同様に、人が見て察することができる程度には生体情報の処理により、人程度に感情を読み取ることができて当然である。さまざまな計測技術によれば、人の感覚以上の感度でさまざまな部位の筋の活動を計測することができ、声の質や発話の内容の解析もリアルタイムで分析が可能となる。ことに発話の情報からその内容を読み取るには、心の科学がもたらす心の解明が役立つことは明らかであり、心の解明が自然言語理解に貢献するならば、その成果も患者の訴えから心の状態を把握することを通して、心のケアに貢献する。

心の状態は時々刻々変化するので、心の計測には連続計測が必要であり、心のモニターにはウェアラブルモニターなどの技術が必要であろう。また、非接触であることも望ましい。その点では、表情の観察は有望であり、そのほか声の調子から心の状態を察するのは、やはり非接触でできる点でケアへの応用が期待できる。

心の計測の困難は、心の活動自体が人によって大きく違い、また心の動きの生理機能への反映も人によって違うことである。これは身体に比べて心において個人差が大きいためで、心の形成は脳の可塑性により、身体よりも心では成長過程の影響が大きいことによる。したがって、臨床検査の正常値のような概念で心が正常か否かを簡単の判定することはおそらくできない。しかしこれは個人の過去のデータが蓄積されていれば本質的な困難ではなくなるかもしれない。

このように、心の計測にはまだ確立された方法はまったくないが、それは計測が難しいからだけではなく、心の計測が心のケアに不可欠と見なされるような状況に至っていないからでもある。しかし、心の計測とその活用分野の発展の可能性が明らかであるなら、いまその技術開発を始めるのに早すぎることはない。また、心の科学の基礎を確立するためには、研究用機器としてまず心が反映されるような生理機能の連続計測機器を開発することはすでに始めなければならない時である。いまウェアラブル生体計測がブームになりつつある。とくにスマホのようなに常時携帯する機器が普及していることから、日常の生活情報、健康情報に心の情報を加え、心の計測情報が多方面に活用できるようになれば、心のケアの技術支援にも大きく貢献するに違いない。

（５）　心の科学の発展が個人に不利益をもたらす恐れはないのか？

科学の発展が人類に不利益をもたらすことは、すでに多くの事例から明らかである。生活を豊かにするために開発された多くの科学技術が、自然破壊、環境汚染、資源の枯渇、病原体の拡散、攻撃性の危険の増大など、さまざまな解決困難な問題をひき起こし、人類の絶滅さえも招きかねないことが危惧されるようになった。心の科学も、将来もし大発展

が起こるとすれば、心の科学の成果によって心を不当に操作される危険が増すような事態を生じないとも限らない。ことに、良い生き方の実現のために開発された心に介入する技術が、逆に心を攻撃する手段に利用される危険を生じないとも限らない。しかし、優れた技術が重大な危険につながることは技術の発展においてつねに起こりうることであり、危険を回避するために技術の発展を制限することよりも、危険を防ぐ技術を開発することによって安全を守ることが将来の方向であるに違いない。

心の科学は、将来医療の一環として心のケアを充実させるために活用されることが期待できるとともに、心をさまざまなストレスや意図的な攻撃から守るために活用することも期待できる。増大する危険因子に対処するという点では、身体の守りと心の守りにますます高度の技術が要求されるようになっていくという点で共通であり、技術自体にリスク要因があるからと言って技術の発展を制限することは賢明でない。しかし、心の科学の発展がどんなリスクをもたらすのか今正確に予想することは困難なので、今後の心の科学の急発展にともなって、リスクの可能性についてつねに配慮していくことが必要である。

しかし、心には安全地帯があることを指摘しておきたい。前に（３）で、心には他者から見られることのないプライベートな世界を持っていることを指摘した。それは、意識の内容が計測にかからないことによる。たとえ計測技術が進歩しても、自分の意識の内容を他人に覗かれることはない。意識の内容は他者からの介入によって損なわれたり操られたりすることはあっても、計測によって心の内容を読みとられることはない。心は、どんなセキュリティーレベルの高いコンピューターよりも堅いガードによって守られている。心の科学の発展は、心に安全地帯である自己の世界があることをより明確に示し、他者に優る何物も持たなくても人格が尊重される根拠があることを明らかにすることが期待され、その１点のみにおいてでも心のケアにきわめて高い貢献が期待できるので、少々の不利益を危惧するには当たらない。

文献

［1］ 戸川達男『動物の心人間の心ー科学まだ心をとらえていない』コロナ社（2008）

［2］ P・ベナー、J・ルーベル、現象学的人間学と看護、難波卓志訳、医学書院、1999、327-340.

［3］ M・デ・リッダー（島田宗洋、W・R・アーデ訳）『わたしたちはどんな死に方をしたいのか？』教文館（2016）

［4］ Beedy CJ, Terry PC, Lane AM: Distinction between emotion and mood., Cognition and Emotion, 19:847-878 (2005)

［5］ K・ローレンツ（日高敏隆、丘直通訳）『動物行動学』思索社（1989）

［6］ Schroeter ML, Abdul-Khaliq H, Sacher J, Steiner J, Blasig IE, Mueller K: Mood Disorders Are Glial Disorders: Evidence from In Vivo Studies, Cardiovasc. Psychiat. Neurol., ID 780645 (2010)

[7] Turner JH: On the Origin of Emotion. Stanford University Press (2000)
[8] Chalmers DJ: Facing up to the Problem of Consciousness, Shear J ed., Explaining consciousness - The 'Hard Problem'. The MIT Press (1998)
[9] 戸梶亜紀彦：「感動」喚起のメカニズムについて. Cognitive Studies, 8:360-368 (2001)
[10] C・ダーウィン（浜中浜太郎訳）『人及び動物の表情について』岩波書店（1931）

第２節　心の計測技術の現状と今後

鈴木良次

（１）「心の計測」―「心理計測」技術の現状

「身体の科学」の発展が計測技術の進歩に支えられていたことは間違いない。同じことが「心の科学」の発展についていえるとすれば、「心」の計測技術が現在どのような状況にあるのかを調べることが、「心の科学」の発展を占う一つの道といえる。

ここでは、まずネット検索によって、「心の計測」関連の書籍や資料の調査から始めた。

ヒットした範囲の中で最初の書籍は、浅井邦二「こころの測定法―心理学における測定の方法と課題」である。個別の内容は、後で紹介する菱谷晋介・田山忠行「心を測る」と重なるところがあるので、そちらに譲るが、紹介文にある「測定（アセスメント）は心理学における基本的な研究法であり、モノであれヒトであれ比較検討する場合の大事な根拠となるものである。本書は心理学の各分野の専門家がその分野における「測定」を具体的に上げ、専門分野における測定とはどういうものであるかを理解しやすく記述している。心理学の各分野を理解するためにも、測定という研究方法が心理学の根底にあることを理解するためにも、大切な良書といえる」という記述は、心理学における「計測」の重要性を明確に物語っている。

さて、上記２つの書物も書名に「こころ（心)」を謳っているが、前節で取り上げた「心の科学」の「心」を必ずしも意味しない。ここでの「こころの計測」の内容は、心理学で取り上げる諸現象の数値化の試みである。菱谷らの書では、感覚、知覚、パターン認知と注意過程、記憶、思考と学習、言語の認知・理解、音楽の知覚と認知、イメージと認知・感情、空間認知、認知機能の発達、パーソナリティ、社会的認知、心の健康が取り上げられ、それぞれにおける数値化の実験課題が紹介されている。「こころ」という抽象的なものから、計測の対象が具体的になったとはいえ、いずれも心理現象であり、物理的・化学的対象を扱うのとは異なる。時間感覚を例にとれば、物理的には同じ時間の経過であっても、心理的には状況によって長くも短くも感じることがあるということである。

このような心理量の不安定さをできるだけなくそうとする工夫が心理計測の分野でなされてきた。

１つは、心理物理関数の計測である。たとえば、ヒトは音の周波数の違いをどこまで弁別できるかという課題を考えたとき、標準音と比較音を用意し、比較音の周波数をいろいろと変化させたときの正答率を求め、横軸に物理的な周波数の差を、縦軸に正答率をとって描いたものが心理物理関数である。実際には、比較音の周波数のかえ方、提示の仕方など、結果に不用意な偏りが入らないような工夫が施される。心理物理関数は、典型的には、S 字曲線を描くことが知られている。

この例のように、刺激の性質が物理的に明瞭に規定される場合はよいが、それが容易でない場合もある。たとえば、道具の使い心地や住まいの快適さなどである。それらの場合については、質問紙を工夫し、多次元尺度構成法による分析が行われている。また、言語的デー

タについては発話のプロトコルデータの分析を通して被験者の内的認知過程を分析するプロトコル分析などが考案されている。詳しくは文献に譲る。

以下、Google 検索で「心の計測」をキーワードとして検索された書籍・文献およびアマゾンの「心理学入門」のリストの最初の１２００件の書籍から検索された関連書籍を以下に列記する。世に出版されている関連図書・文献の一部に過ぎないことは承知しているが、心理学入門および一般向け心理学の解説書１２００冊の中に、「こころ」の計測を謳った書籍が２１冊あるということは、「計測」を心理学の基礎の一つとして位置づけようとする関係者の意識の高さを物語っているととらえている。

[1] 片山順一、八木昭宏「心をはかる　感覚と感情の測定　精神物理学的測定法」繊維製品消費科学　31(12)1990
[2] 浅井邦二「こころの測定法」実務教育出版 1994
[3] 市川伸一、南風原雅和「心理学研究法入門」東大出版会　2001
[4] 吉野諒三「心を測る一個と集団の意識の科学―」朝倉書店 2001
[5] 堀　洋道（監修）「心理測定尺度」Ⅰ～Ⅵ　サイエンス社　2001～2011
[5] 熊田孝恒、遠藤信貴「心理量の計測」計測と制御 42 巻、12 号、2003.
[6] 菱谷晋介、田山忠行「心を測る」八千代出版 2005
[7] 友枝敏雄「心と社会をはかる、みる一人間科学への招待」九大出版会 2005
[8] 村上宜寛「心理尺度のつくり方」北大路書房 2006
[9] 吉野諒三「数理心理学―心理表現の論理と実践」培風館 2007
[12]竹内健児「事例でわかる心理検査の伝え方、活かし方」金剛出版 2009
[13]ウベフリック「質的研究入門―人間の科学のための方法論」春秋社　2011
[14]高橋順一ほか「人間科学研究法ハンドブック」ナカニシヤ出版 2011
[15]特集「心を測る」日本知能情報ファジイ学会 2012,8
[16]山下利之「心を測る手法の新たな展開」人間工学 49,3(2013)
[17]宮本聡介「質問紙調査と心理測定尺度」サイエンス社 2014
[18]鈴木淳子「質問紙デザインの技法」第２版 ナカニシヤ出版 2016
[19]心理学研究法―実証的研究の方法論　補訂版 2017
[20]平井明代「教育心理系研究のためのデータ分析入門」東京図書 2017
[21]坂上貴之、井上雅彦「行動分析学」有斐閣 2018

（２）「心」を測るには

このように多年にわたって、心理学の分野では、「感覚」「知覚」「認識」「記憶」「思考」「感情」などの個々の現象の数量化が試みられてきたが、我々が目指す「心の計測」にはなお距離がある。しかし、着実な一歩かもしれない。

本章第１節で、戸川は、「心は脳に集約された種の存続と個体の生存のためのさまざまな

機構の総体と見なすのが妥当」「心の活動で特に重要な機構はおそらく気分であり、気分は感情より根源的」「気分のより深い科学的理解が求められる」と述べている。また、「心の現象は意識とは不可分であり、感覚情報が意識の内容となり、意識の内容が気分や感情に反映される。意識は心の現象の理解の基本であるはず。しかし、その解明の研究は少ない。他者の意識の内容を知る手段は言語によるコミュニケーション」とも述べている。

そうであるとすれば、「気分」や「意識」に直接切り込むのが本来とるべき道であろうが、残念ながらその道はまだ見えていない。そこで、先ず、「感情」の計測から取り組むことにした。「感情」は、その人の「表情」や「身振り」に反映されるであろうし、血圧、体温、脈拍、血中アミンの量など自律神経系に関わる生理的指標、さらには、脳の活動を反映した脳波の変化として表出されると考えられる。そして、これらの量は、物理的・化学的手法によって計測可能となる。

このような観点から、以下では、まず「感情の計測」についてその状況を調査した結果を報告する。

（３）文献に見る「感情の計測」

感情に関する英語に、emotion、feeling、affection、sentiment、passion がある。それぞれニュアンスの違いがあるが、ここでは、emotion を採用して調査を行った。

Web of Science を用い、1990 年から 2018 年 1 月までの emotion　measurement をキーワードとした検索の結果、1852 件の論文をヒットした。論文数の年次推移は**図 1** のとおりである。以下では、「感情」という言葉を「emotion」と同意語として用いる。図に示すように件数は、指数関数的に増大している。

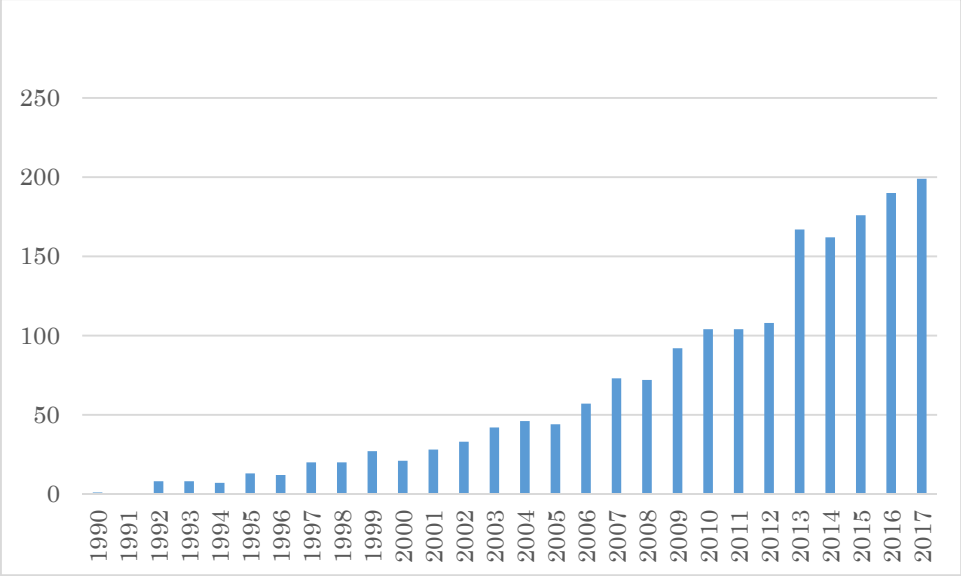


図１　emotion measurement　論文数の推移

この中で、2017 年度,2018 年度の一部について、参考のため、以下に、論文題名と概要を列記する。

[1] MM.Khan et al: Toward Use of Facial Thermal Features I Dynamic Assessment of Affect and Arousal Level. IEEE Trans Affective Computing 8,3,412-425(2017) サーモグラフィーを用い、顔の温度分布から情動と覚醒レベルを連続測定。
[2] KX Zhuang, et al: A distinction between two instruments measuring Dispositional mindfulness and the correlations between those measurements and the neuroanatomical structure. SCIENTIFUC REPORTS, 7, 6252,(Jul 24,2017) 注意の性向に関する MAAS、FFMQ ２つの質問紙の結果と特定の脳部位の灰白質の体積との相関を調べた研究
[3] HY.Shi et al: Differences of Heart Rate Variability Between Happiness and Sadness Emotion States: A Pilot Study. Journal of Medical and Biological Engineering.37,4,527-539(2017) 幸福と悲嘆の感情状態における心拍変動率や自律神経活動などの差を調べた研究
[4] G.Cartocci et al: Electroencephalographic, Heart Rate, and Galvanic Skin Response Assessment for an Advertising Perception Study: Application to Antismoking Public Service Announcements. Jove-Journal of Visualized Experiments. 126, e55872 (Aug.2017) 禁煙公告への反応を見る研究。脳波のアルファー波、シータ波、心拍、GSR などを測定。
[5] Y.Wei et al: A real-time wearable emotion detection headband based on EEG measurement. Sensors and Actuators A-Physical 263, 614-621(Aug.2017) 実時間ウエアラブル感情検出用ヘッドバンド型脳波計
[6] S.Balters et al: Capturing emotion reactivity through physiology measurement as a foundation for affective engineering in engineering design science and engineering practices. Journal of Intelligent Manufacturing. 28,7, 1585-1607 (Oct 2017) Affective Engineering をここでは感情工学と訳す。この論文は、感情工学分野に進もうとする人のために、感情に関わるどのような生理的計測が有用であるかを解説している。心電、脳波、筋電、パルスオキシメトリー、血圧、呼吸、体温、GSR などである。
[7] BG.Lee et al: Wearable Mobile-Based Emotional Response-Monitoring System for Drivers. IEEE Trans. Human-Machine Systems, 47, 5, 636-649 (Oct 2017) 交通量の多い場所でのドライバーの負の感情（ストレスと疲労に起因する感情反応）をモニターする着用可搬型感情モニターシステム。筋電図、光電脈波計、加速度計を用いた頭部の動きなどの情報から SVM を用いての学習結果を利用、リラックス状態、ストレス状態、疲労状態を識別。
[8] SW.Hsiao et al: An aesthetic measurement method for matching colors in product design. Color Research and Application. 42,5,664-683 (Oct 2017). 製品デザインでの

カラーマッチングのための審美的計測。
[9] L.Rinke et al: Facial emotion recognition deficits in children with and without attention deficit hyperactivity disorder: a behavioral and neurophysiological approach. Neuroreport 28, 14, 917-21(Sep 2017) ADHD と非 ADHD 児童における顔の感情認識の欠如についての行動学的及び神経科学的研究、すなわち、マッチング課題と事象関連電位の測定。両者に顔認識能力の差は見いだせず。むしろ年齢差によることが判明。
[10]J.Zhang et al: Different Neural Correlates of Emotion-Label Words and Emotion-Laden Word: An ERP Study. Frontiers in Human Neuroscience. 11, 455 (Sep.21, 2017) 悲哀、幸福などの感情用語と、死、結婚などの感情用語がそれぞれ感情を引き起こす神経機構の ERP による研究。
[11]MJ Guesgen, CJ Bench: What can kinematics tell us about the affective states of animals? Animal Welfare, 26, 4, 383-397 (Nov.2017) 動物の動作の解析から感情状態を測る研究。
[12]S.Kanoga, Y.Mitsukura,: A Study of Pattern Recognition in Children Using Single-Channel Electroencepharogram for Specialized Electroencepharographic Device. Electronics and Communications in Japan. 100, 11, 43-53 (Nov.2017)
単一チャンネル脳波計によるデータをフーリエ変換、ウエブレット変換、経験的モード分解の手法を用いて解析し、子供の集中力の評価に活用。
[13]R.Zangroniz et al: Electrodermal Activity Sensor for Classification of Calm/Distress Condition. Sensors, 17,10,2324 (Oct 2017). 健康関連コンピュータシステムでの利用を想定したもので、被験者の静穏/条件を見分けるための皮膚電位センサの研究。
[14]J.Prescott: Some considerations in the measurement of emotions in sensory and consumer research. Food Quality and Preference. 62, 360-368 (Dec.2017) 感覚・消費科学における科学的エビデンスを得るための感情の２次元モデル (Valence:感情の正負の度合い、Arousal:感情の興奮度合い) そのほか感情を成り立たせる変数についての研究。
[15]F.Mosciano et al: An array of physical sensors and a regression strategy for emotion recognition in a noisy scenario. Sensors and Actuators A-Physical. 267,48-59, (Nov.2017) ノイズの多い環境でも、感情の自動評価を客観的な計測をもとに確実に行うためのセンサと適応型回帰戦略の研究。音声、表情、心電図・皮膚電位など生理指標を用いる。
[16]MLR Menezes et al: Towards emotion recognition for virtual environments: an evaluation of eeg features on benchmark dataset. Personal and Ubiquitous Computing.21,6,1003-1013 (Dec.20179 仮想環境でのユーザの利便性を高めるには、ユーザの感情を知る必要がある。Russell’s Circumplex Model にもとづいて脳波の特徴から感情状態をモデル化する研究。
[17]TD Cannon et al: Reliability of an fMRI paradigm for emotional processing in

a multisite longitudinal study: Clarification and implications for statistical power. Human Brain Mapping. 39, 1,599-601 (Jan.2018)
[18]SK Kim, HB Kang: An analysis of smartphone overuse recognition in terms of emotions using brainwaves and deep learning. Neurocomputing, 275, 1393-1406 (Jan. 2018) 脳波と深層学習を用い、感情のレベルを求め、スマートフォンの使い過ぎの評価を行う。

以上、１８編の論文を例示したが、「感情」の「物理的」計測の具体的対象となっているものは、脳波が８件と最も多く、次いで心電図の３件である。筋電図、皮膚電位、体温、脈波、動作はそれぞれ２件、血圧、ＧＳＲ、表情、音声、質問紙がそれぞれ１件である。

これはあくまで２０１７年の Web of Science のデータベースでの検索結果であるが、この分野の全体の流れを見るに適切な書として、Herbert L. Meiselman 編「Emotion Measurement」(Woodhead Publishing 2016) と題する成書を紹介する。

Ⅰ 感情の基礎的研究、Ⅱ 感情研究の方法、Ⅲ 実際場面での感情の研究、Ⅳ 感情の比較文化的研究の４部からなり、５１名の執筆者による２６章 約７００ページの大作である。

Ⅰ部にある感情の定義、感情における感覚の役割、感情の心理生理学的議論も重要であるが、「計測」という視点から、Ⅱ部に取り上げられている「行動を通しての感情の計測」「顔の表情に現れる感情の計測」「感情を惹起する刺激（言葉、イメージ、表情、映像)」は、「心の計測」の道を探るうえで参考になる良書といえよう。

（４）表情の研究はどこまで進んでいるか

感情の表現として着目される表情の研究がどこまで進んでいるのか。Meiselman の上記の書物Ⅱ部６章「Measuring Emotions in the Face」に詳しいが、ここでは、そこに言及されている表情研究のツールＦＡＣＳ(Facial Action Coding System)について簡単に紹介する。

ＦＡＣＳは、その前身となるものが存在するが、1978 年にＰ．エクマンと W.V.フリーゼンによって改良された人の表情を分類する記号化システムである。彼らの著作「表情分析入門」（工藤 力訳編 誠信書房 1987）の日本語版への著者の寄せ書きによると、５年以上にわたる開発、検査、改良の試みの後に完成したＦＡＣＳは、６つの感情（驚き、恐怖、怒り、嫌悪、悲しみ、幸福）がどのような形で顔にあらわれるかを最も完璧に記述できるツールであると自負している。

ＦＡＣＳは、解剖学的に見て互いに独立していて、しかも視覚的に識別可能な最小単位となる４４個の顔面の動きの単位（action unit AU）から成り立っている。どのような顔面の動きでも、その動きを生み出す特定のＡＵを用いて記述することができる。例えば、幸福(happiness)はＡＵ６＋ＡＵ１２となる。因みに、ＡＵ６は「眉の外側を持ち上げる outer brow raiser」動作であり、ＡＵ１２は「唇両端を水平に引く lip corner puller」である。

ついでに、他の感情についてのＡＵとその内容を示す。

悲しみ　　１＋４＋１５
驚き　　１＋２＋５Ｂ＋２６
怖れ　　１＋２＋４＋５＋７＋２０＋２６
怒り　　４＋５＋７＋２３
嫌悪　　９＋１５＋１６

ＡＵ１：眉の内側を持ち上げる　ＡＵ２：眉の外側を持ち上げる
ＡＵ４：眉を内側に下げる　　ＡＵ５：上瞼を上げる
ＡＵ７：瞼の下だけを鼻の方向に引く　ＡＵ９：鼻に皺を寄せる
ＡＵ１５：唇の端を押し下げる　ＡＵ１６：下唇を下方に下げる
ＡＵ２０：唇を水平な形に広げる　ＡＵ２３:唇を固く結ぶ
ＡＵ２６：顎を落とす　　ＡＵ５Ｂ：少しだけ上瞼を上げる

その後、彼らは、もっと細かなＡＵのリストを作成し、純粋な感情、混合した感情、統制された感情、擬態された感情、隠蔽された感情などをあらわす顔面の動きの測定に有効なことを示した。さらに２０１１年には、コンピュータを用いて、ビデオの中の顔を検出し、幾何学的特徴を抽出し、顔の動きに合わせて時間的なプロファイルを自動的に作り出すシステムが開発され、２０１８年には、Freitas-Magalhaes によって、F-M FACS 3.0 が創出されるに至る。

ＦＡＣＳの出現によって、感情の物理的表現を系統的に分類できることは、心理学者にはもちろん、アニメータにとっても便利なことが分かった。また、表情の自動認識の技術は、認知科学、臨床医学、ロボット工学など広範な分野での活用が進められている。

（５）学際的研究領域としての取り組み

Emotion Measurement の序文で Meislman が書いているが、感情の研究は爆発的に広がっているという。そしてその表れの一つが、２０１４年に立ち上げられた感情科学（Affective Science）学会であるという。また、MIT メディアラボにおいては、感情に関するコンピュータ技術(Affective Computing)の研究が盛んに行われている。

ここでも、Affective Computing　というキーワードで Web of Science を検索すると、この分野の急速な発展が目に見えてくる。

図２は、ヒットした論文数の年次推移を示している。２０１８年は年度途中であるので少ないのは当然であるが、ここでも指数関数的増大が見られる。

その中の一つの論文　A-AI Nafjan et al　“Review and Classification of Emotion Recognition Based on EEG Brain-Computer Interface System　Research: A Systematic

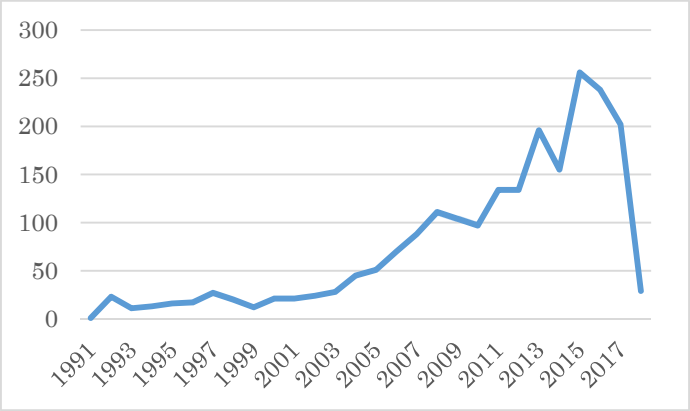


図２　Affective computing でヒットした論文件数の推移

Review”　Applied sciencs-Basel,7,12（Dec.2017）は、脳波を利用したＢＣＩのユーザの感情状態の識別に関する２８５編の論文のサーベイによって、この分野の動向を探ろうというものである。その傾向の一つとして、応用分野が、通信、教育、エンターテイメント、医療へと拡大しているという。

このように、感情を扱う学問領域は、心理学にとどまらず、多くの領域を巻き込みつつ展開している。

実は、このような動きは、決して最近に始まったことではない。その一つは、１９９８年に設立された「日本感性工学会」である。学会の目指すところを紹介すると、「人間の根源的な能力としての感性を中心にした科学技術としての『感性工学』の創成に挑戦。当面の課題として、感性を活用した哲学の実践、感性豊かな人々を育む教育、美しい風土の実現などを初めとして、感性の計測と定量化に関する手法の開発、揺らぎ・ファジイ・フラクタル・複雑系というような新しい解析法の導入、情報工学・人間工学・認知科学・心理学・デザイン学などの諸領域にわたる学際的研究、さらにはこれらの成果の事業化や産業化への検討など」とある。先の心理計測についていえば、製品のユーザビリティや環境の快適性の評価への応用がニーズとして出てきた。従来の解析法に加え、人間の心理という複雑な現象を対象とし得る解析法も登場している。

「感性」は英語では sensitivity であり、emotion や affection と同じではない。当学会が厳密な使い分けをしているのかどうかは確かめていないが、当学会の活動の成果も「心の計測」の道筋をつける上で期待したい。

（６）まとめ

おおざっぱではあるが、「心の科学」の「大発展」を支えるであろう「心の計測」の現状を調べた。ここでは「心」の活動の重要な機構である「気分」や「意識」を直接の計測の対象とはしないで、「感情の計測」の現状を調査した。「感情」も「心」の働きの重要な機構の一つであり、将来「感情の計測」から「心の計測」の道が見えて来るかもしれないからで

ある。

「感情の計測」の具体的な対象として取り上げられているものは、「表情」「身振り」「音声」「発話内容」「血圧、体温、脈拍など自律神経系にかかわる生理的パラメータ」「脳波」などであった。次に、これらの計測データから情報を取り出す解析方法の開発も進んでいる。今後、「心の科学」を発展させるための計測技術と解析技術として何が必要か。正直、調査は緒に就いたばかりであり、「心の計測」技術を作り出すための戦略をあらためてたてる必要がある。

あとがき

主査

本報告は「良く生きるための医工計測技術」をめぐる諸問題をまとめたものである。では「良く生きる」とはどういうことか。執筆者の間で十分な議論を交わし、コンセンサスを得たわけではないが、「良く生きる」と同時に「良く死ぬ」ことを含意していた。そうでなければ、単に「健康に生きるための医工計測技術」で済むことである。「良く生き抜く」という表現の方がより分かりやすかったかもしれない。いずれにしても、ヒトには寿命があり、その中で懸命に一生を過ごしている。その生き方はさまざまであるが、多くは、人類が持続的に存続していくことを願って活動していると考えたい。その願いをかなえるためにはすべての人が、健康を維持し、寿命を全うできることが望まれる。ここでいう寿命には、第５章（戸川）に述べられている２つの寿命がある。個体寿命と健康寿命である。個体寿命は、人が生まれてから死ぬまでの期間、健康寿命は、医療・介護の支援なしに自立して生きられる期間である。それぞれの統計データが平均寿命、健康寿命として公表されていて、いずれも急速な伸びを示している。ただし、平均寿命には限界があり、健康寿命も平均寿命に向かって伸びているが、その差は０にはならない。すなわち、人の一生には、将来にわたって不健康な期間が残ると戸川は予測している。ここに、「人間には健康な期間と不健康な期間があるということを前提に、良く生きるにはどうしたらよいか、そのための医工計測技術は何か」を検討することが一つの大きな課題になった。第５章、同第６章で扱ったことである。このことについては、後ほど再考したい。

平均寿命、健康寿命の延長に、「身体の中を診る技術」が貢献したことは間違いない。第１章では、その開発に日本の研究者や企業がどのように貢献しているのかをとりあげた。特許事務所を開き、弁理士としての経験の長い有近は、超音波診断装置、内視鏡、Ｘ線ＣＴ装置、磁気共鳴撮像装置（ＭＲＩ）、光干渉トモグラフィー（ＯＣＴ）、パルスオキシメータ、ＮＩＲＳを取り上げ、これらの装置について、（１）日本人が世界で初めて開発した事例、（２）外国で開発されたが日本にはじめて導入した事例、（３）初めて国産化した事例について、諸資料をもとに調査した。また、これらの技術について、その動向を、１９９８年から２０１２年までの特許公開データを対象に調査し、その結果をまとめている。これらの技術開発で日本の研究者・企業の貢献は大きい。ここで「あとがき」としては少し長くなるが、概要を紹介しよう。

超音波診断装置であるが、１９５５年の順天堂大の田中憲二、日本無線の内田六郎らは、電動自動走査式超音波断層装置を開発し、世界で初めて生きた人間の脳室の断層像の撮影に成功した。１９５８年には、大阪大学里村、岡部、仁村らが心臓弁の動きによる超音波ドプラをはじめて観測した。１９８２年には、滑川らがカラードプラ法を開発、２００２年には、筑波大の椎名と日立メディコによる超音波エラストグラフィーの特許出願が行われている。

企業による貢献も大きい。日本無線が１９６０年に世界ではじめてＡモードおよびＢモードの超音波診断装置を製作したのをはじめとして、アロカは１９７７年ダイナミックフォーカス法を世界ではじめて開発し、その機能を付けた電子リニア走査型超音波診断装置を国内ではじめて製品化している。日立メディコは上記椎名との共同研究のほか、デジタルスキャンコンバータ付き電子リニア走査型超音波診断装置を世界ではじめて開発している。そして、東芝は、１９９９年に、同社の製品ＰｏｗｅｒＶｉｓｉｏｎ６０００の累加出荷台数１０００万台を世界初で達成している。さらに、ＧＥメディカルシステムは、２００２年に４Ｄ機能搭載超音波診断装置を世界ではじめて製品化している。特許出願件数も２００件を超える件数を維持している。技術区分で見るとエラストグラフィーがトップにあり、今後に期待するところが大きいが、産科領域に一つの革命をもたらしたともいえる胎児の超音波映像技術改良の挑戦も続いているとみることができる。

超音波診断技術については、本財団の支援も多く行われた。支援を受けた一人、大阪大学（当時）の堀　正二が２００２年にまとめた超音波診断装置開発の課題の中で、（１）血管を覗く技術ＩＶＵＳ、（２）胎児の表情を見る―３次元超音波診断、（３）組織性状診断の３つについて、その後の進展がどのようなものであったかを、有近は特許出願の状況から調査し、結果をまとめている。いずれの課題も精力的な研究・開発が進められているようである。

内視鏡は、その前身に胃カメラがある。超小型のカメラを胃に挿入して写真を撮るものである。１９５０年、オリンパス光学の宇治らによって世界で初めて開発された。ファイバー技術が導入されるとファイバースコープ付き胃カメラが開発され、また、ファイバースコープでの写真撮影が可能になると今日の内視鏡に切り替わる。オリンパスは２００２年にはハイビジョン内視鏡システムを世界で初めて発売するなど、内視鏡のシェアで世界のトップを走っている。なお堀が提言した超音波内視鏡についての特許出願件数は年間数件に留まっている。

Ｘ線ＣＴ装置についても日本の研究者の貢献は大きかった。１９５０年代に開発された高橋トモグラフィーである。人体の周りにＸ線管とフィルムを回転させ断層像をフィルム上に結像させるというもの。コンピュータ技術を駆使したＸ線ＣＴが、１９７２年、ＥＭＩ社から発売され、高橋トモグラフィーの役目は終わったが、断層像を撮るために線源とセンサの対を人体の周りで回転させるというアイデアは、高橋のものである。ＥＭＩ社と技術提携を結んだ東芝は、Ｘ線ＣＴのメーカとして国内で先陣を切り、１９７８年には、国産初の全身用Ｘ線ＣＴ装置を国立がんセンターに設置している。同社の森　一生による１９８２年のヘリカルスキャン装置の開発、２００７年、世界初の４次元Ｘ線ＣＴ装置の発売など、東芝のこの分野への貢献は大きかった。東芝と並んで日立・日立メディコもＸ線ＣＴの開発に力を入れている。２０１６年に発行された特許公報で特許権者をみると東芝が４０件、日立が３０件で、ＧＥメディカルの３件など、他を大きく引き離している。

磁気共鳴撮像装置（ＭＲＩ）のキーとなる技術は傾斜磁場の導入である。Lauterbur ら

がこの発明で２００３年にノーベル賞を受賞しているが、１９７３年に北大の阿部善右衛門も傾斜磁場の研究発表を行っているという。

１９８３年の東芝による世界初の常伝導磁石式ＭＲＩ商用機の設置、１９８７年の日立メディコによる国産初の永久磁石型ＭＲＩ装置の設置など、この２社の貢献は大きい。その中で、１９８４年の横河メディカルシステムの岩岡による Fast Recovery 法の発明は、ＭＲＩの利用技術の一つパルスシーケンスを工夫することによって可能となったもので、高速イメージングの道を拓いたものとして注目される。

日本人の貢献として挙げられている小川誠二によるＢＯＬＤ信号の発見は、ＭＲＩによる脳の構造だけでなく、機能の計測を可能としたもので、大きな貢献といえよう。ｆＭＲＩを可能とするＭＲＩ装置は高磁場のものほど有効である。残念なことに、現在ｆＭＲＩには３Ｔのものが利用されていて、その市場は、ＧＥ、フィリップス、シーメンスの３社によってほぼ占められている。

ＯＣＴ（光干渉断層撮影装置）の原理に相当するものが１９９０年に日本の丹野らによって特許出願されていたが、国内特許のみであったため、注目されなかった。ところが、翌年同様の内容の特許が米国で申請され、その特許による商品化に先を越されたというのは残念なことである。現在ＯＣＴは、眼底断層撮影装置として、高齢者に発症しやすい網膜の病気、加齢黄斑変性症などの診断に欠かせないツールの一つになっている。２００４年のマイクロトモグラフィー社による国産初の眼底検査装置の販売開始、２０１２年のキャノンによる解像度とスキャン速度を大幅に向上した眼科用ＯＣＴの発売など日本の企業も頑張っているが、今後のさらなる貢献を期待したい。

パルスオキシメータも１９７４年の日本光電の青柳ら、同年のミノルタカメラの小西らによって、それぞれ特許出願がされた日本発の技術である。しかし、その価値を見出したのは欧米とのこと。これも残念な話である。

ＮＩＲＳ（光脳機能画像計測法）は、第１部第２章でも取り上げたが、装置としての開発は日立製作所が世界で初めてである。その後、島津製作所も参画、２０１２年には可搬型ＮＩＲＳを販売している。２章でも論じたが、軽量化、小型化によるウエアラブル化、低価格化によって、テーラメイド医療、リハビリ、教育、ＢＭＩなど用途が広がると期待されている。

第２章は、当財団による研究助成の実績の分析である。長年、研究助成の審査に関わらせてもらっている立場から、医工計測技術のイメージをよくとらえておく必要を感じているからである。当財団による助成の対象は、あくまで医工計測技術の進展に寄与する研究への助成である。言いかえれば、医療や医学研究そのものへの助成ではなく、そこで使われる計測というツールへの助成である。そうであれば、何を計測の対象とし、その対象の何（幾何学的構造、成分、動き、温度など対象から得られる物理量など）を計測するのか、そのための手法は何か、新たな提案か、あるいは既存の手法の改良か、計測システム全体

に関わる提案か、要素に関わる提案かなどが審査員に容易に理解できるような申請が望ましい。

そのことを念頭において、有近の経験を生かし、計測システムの類型化を試みた。ここで特徴的なことは、計測対象への計測前の処理の有無と、入力が計測対象の動態に影響を与えるか否かの４通りの分類を行ったことである。

これらの基準を設けた上で、過去の助成課題の分析を行った。

（１） 計測の対象と手法による分類と３５年の推移

（２） 基本研究と要素研究に分けたときの３５年間の推移

（３） 第３１回・第３２回の助成の課題達成率

（４） 平成２９年度助成課題の計測対象・目的・計測システムとしての類型・計測情報などの分析

最後に、助成審査の視点として１２のポイントを提示した。

申請される助成課題には、しばしば計測のツール開発への助成ではなく、生命科学、基礎医学、臨床医学そのものの研究への助成を期待したものがある。これらの研究自体は大切なものであるが、当財団の助成への申請としては適当ではない。しかし、計測は科学研究の基本的な要素の一つであるという見方もある。この見方に筆者も賛成する。第３章で辰巳は、科学研究における計測の重要性を述べ、脳神経科学の研究の過程で開発された計測技術の動向を紹介している。そこで強調されていることの一つは、仮説の設定、計測による検証、結果の考察と仮説の修正あるいは次の仮説の設定という循環である。例として辰巳は、神経細胞の興奮現象が細胞膜のイオン透過性の変化によるというホジキン・ハックスレイの仮説が膜電流の高精度の測定によって検証されたこと、その結果、膜には開閉の２状態をもつイオンチャンネルが存在するという予見につながり、パッチクランプ法によって証明されたという経緯をあげている。

引き続きこの章では、脳神経科学での計測のツールの発展を紹介している。すなわち、微小電極法に始まる電気的測定法の展開、光を用いた測定法と光を用いた神経への働きかけ、古典的顕微鏡から多光子顕微鏡やｆMRI、MEG などを用いての脳の表面から脳の深部への計測対象の変化、分子・細胞レベルで導入された研究法などである。

辰巳と筆者は、脳神経科学者が必要とする計測のツールは何かについて、科学技術振興機構さきがけ研究「知と構成」領域に集まった３１名の研究者にアンケート調査を行った。１５名からの回答を得たが、今後期待される計測技術として３１項目が挙げられた。具体的な内容は本文に譲るが、これらの技術が「良く生きる」ことにどう貢献するか、評価はいろいろに分かれている。その検証には、さらなる時間を必要とする。

とまれ、ここで財団の事業を考えたとき、あえて強調したいのは、研究とそのためのツール開発の区別である。辰巳の述べるように、研究と計測法の開発が一体となっている状況は多い。しかし、既存のツールを用いての研究と、研究の過程で既存のツールの改良あ

るいは新たなツールの開発の必要性を感じて、そのことにまず取り組むということとでは、計測技術の展開という点から大きく異なると考えるからである。

「良く生きるため」には「心身が健康であること」が前提である。従って「良く生きるための医工計測技術」の役割は人々の「心身を健康に保つ」ことであり、そのための「医療」に活用されることである。第１章でも見たように、そこで取り上げた医工計測技術は、人類の健康寿命の延長に大きく貢献した。しかし、課題も多くある。それは技術的なものばかりではない。良い医療は、患者と医療者の良い関係がベースとなる。このような視点から「医療の質」を考え、その文献調査と考察を、科学史が専門の鈴木（善）が行った。「医療の質」「患者満足度」など、過去から多くの研究が行われていることを知ったが、「良く生きる」という観点からは、やはり「終末医療」の在り方が気になる。

このことに関連して注目した文献が第３節[38]の行岡哲男『医療とは何か　現場で根本問題を解きほぐす』河出書房新社（2012）である。救急医療に携わる行岡は、医療現場」で治療に関して「正しい判断」が可能だというのは誤解であり、特に、時間的に制約される救急医療の場合、「不確実な状況下での意思決定」が強いられることになるとして、現象学や言語ゲームを援用して「正しい判断」の代わりに、「正しいと確信する判断」という考えを導入することを提案している。このこと自体は、終末医療と直結する話ではないが、「不確実な状況下での意思決定」は、終末医療の選択でも出会う問題ではないかと思う。

第５章「人類史の中の医療の現状と今後の課題」（戸川）は、本人による適切なまとめがあるので、それを再掲する。

現代は激動の時代の只中にあって、現代を俯瞰して観るには、少なくとも産業革命が始まった約 250 年前から、世界人口、出生率、平均寿命、健康寿命などがほぼ安定する約 250 年後までの、約 500 年を大異変の時代としてとらえる必要がある。

大異変の後には、世界人口はおよそ 40 億人以下の持続可能なレベルで安定し、出生率はほぼ 2.0 一定となり、平均寿命の延長はほぼ 100 歳で止まり、それ以降はほとんど変わることがない。しかし、その状態を維持するには高度の科学技術を駆使したインフラストラクチャーが不可欠であり、また良い生き方を追求するために、心の科学の発展が不可欠である。

世界の平均寿命は 2300 年ころにはおよそ 100 歳に達するが、それ以上の寿命の延長には人間の遺伝子操作が必要であり、将来たとえそれが技術的に可能になったとしても、それを用いることはなく、限られた寿命をより良く生きる生き方が追求されると考えられる。

寿命の延長とともに健康寿命も延長するが、寿命と健康寿命の差の不健康な期間はゼロにはならず、10 年くらいの不健康な期間が残る。不健康な期間を短縮する努力が払われる

としてもそれには限界があり、むしろ不健康であっても良く生きることのできる生き方が追求されるようになる。

健康な期間には、加齢によって生じる不健康な期間への備えがなされるが、それよりむしろ健康を最大限に生かして活動することに重点がおかれる。健康な期間は自分のためだけではなく、未来の人々により良い生き方ができるように、未来に遺す負の遺産を少なくし、良い遺産を増すことに努めるようになる。

不健康な期間の質の向上が医療の大目標となり、身体的側面だけでなく、心への介入の重要性が認識される。そのためには心の理解が必須であり、今後は心の科学の確立とその分野の大発展が不可欠である。

人間の寿命には限界があり、未来においても死を迎えることに変わりない。しかし、死期にある者への心のケアには、心の科学の発展によって大きな可能性が拓ける。科学的な心の理解に基づく適切な心のケアによって平穏に死を迎えることができるようになる。

200 年から 300 年後に形成される安定した未来社会には、だれもが充実した生涯を送ることのできる完成度の高いインフラストラクチャーが構築されており、その中に医療および医療を支えるさまざまな技術が組み込まれている。医工計測も、目立たないところで重要な働きを担う。

未来社会は高度に発展した文明の支えなしには存続しえない。また、未来社会を支える文明の存続には、かつての大異変のような暴走を二度と繰り返すことのないように、つねに監視が必要である。健康の監視役として発達した医工計測技術は、将来において文明の監視役としてさらなる発展をとげる。

現代の大異変を境に、人とすべての生物種で構成される生態系の中に、ただ生きて子孫を残す以上の良さを持つ構造が出現し、生態系が新たな価値観を持った世界に変質する

以上のように、現代を俯瞰することから未来社会を垣間見ることができ、そこに科学技術の今後の発展による大きな貢献が期待される。

最後の 6 章「良い生き方の追求のために」では「心の科学をめぐる考察」（戸川）と「心の計測技術の現状と今後」（鈴木良）を載せた。「心の科学」を発展させるための計測技術と解析技術として何が必要か。正直、調査は緒に就いたばかりであり、「心の計測」技術を作り出すための戦略をあらためてたてる必要がある。

以上、「良く生きるための医工計測技術」の諸問題をとりあげた。まだそれらは顕在化されているとは言えないが、その前に予見できることが肝心である。それには、人間の文化や生き方についての深い考察がぜひとも必要である。作業は始まったばかりである。

ＮＦ報告書公開版執筆者一覧　（アイウエオ順）

有近紳志郎　（元　有近特許事務所所長　弁理士）
鈴木善次　（大阪教育大学名誉教授　科学史・科学教育・環境教育学）
鈴木良次　（金沢工業大学・大阪大学名誉教授　生物情報論・生体計測学）
辰巳仁史　（金沢工業大学教授　生物物理学・神経科学）
戸川達男　（早稲田大学人間総合研究センター招聘研究員、
元　東京医科歯科大学医用器材研究所所長　生体工学・人間科学）