

Synthesiology

実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化

誰でも作れて携行できる長さの国家標準器

騒音計測の信頼性をいかに確保するか

循環発展的なプロジェクト構造を生むバイオインフォマティクス戦略

バイオ燃料を木材からナノテクで生産する

最先端の地質研究と国土の基礎情報

シンセシオロジー編集委員会



新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

研究者による科学的な発見や発明が実際の社会に役立つまでに長い時間がかかったり、忘れ去られ葬られたりしてしまうことを、悪夢の時代、死の谷、と呼び、研究活動とその社会寄与との間に大きなギャップがあることが認識されている^(注1)。これまで研究者は、優れた研究成果であれば誰かが拾い上げてくれて、いつか社会の中で花開くことを期待して研究を行ってきたが、300年あまりの近代科学の歴史を振り返れば分かるように、基礎研究の成果が社会に活かされるまでに時間を要したり、埋没してしまうことが少なくない。また科学技術の領域がますます細分化された今日の状況では、基礎研究の成果を社会につなげることは一層容易ではなくなっている。

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかせたままでは^(注1)、その成果の社会還元を実現することは難しい。そのため、社会の側から研究成果を汲み上げてもらうという受動的な態度ではなく、研究成果の可能性や限界を良く理解した研究者自身が研究側から積極的にこのギャップを埋める研究活動(すなわち本格研究^(注2))を行うべきであると考えます。

もちろん、これまでも研究者によって基礎研究の成果を社会に活かすための活動が行なわれてきた。しかし、そのプロセスはノウハウとして個々の研究者の中に残るだけで、系統立てて記録して論じられることがなかった。そのために、このような活動は社会における知として蓄積されずにきた。これまでの学術雑誌は、科学的発見といった基礎研究(すなわち第1種基礎研究^(注3))の成果としての事実的知識を集積してきた。これに対して、研究成果を社会に活かすために行うべきことを知として蓄積する、すなわち当為的知識を集積することを目的として、ここに新しい学術ジャーナルを発刊する。自然についての知の獲得というこれまでの科学に加えて、科学的知見や技術を統合して社会に有益なものを構成するための学問を確立することが、持続的発展可能な社会に科学技術が積極的に寄与するための車の両輪となる。

この「Synthesiology」と名付けたジャーナルにおいては、成果を社会に活かそうとする研究活動を基礎研究(すなわち第2種基礎研究^(注4))として捉え直し、その目標の設定と社会的価値を含めて、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスが記述された論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に活かす研究が実践できるのかを読者に伝え、共に議論するためのジャーナルである。そして、ジャーナルという媒体の上で研究活動事例を集積して、研究者が社会に役立つ研究を効果的にかつ効率よく実施するための方法論を確立することを目的とする。この論文をどのような観点で執筆するかについては、巻末の「編集の方針」に記載したので参照されたい。

ジャーナル名は、統合や構成を意味する Synthesis と学を意味する -logy をつなげた造語である。研究成果の社会還元を実現するためには、要素的技術をいかに統合して構成するかが重要であるという考えから Synthesis という語を基とした。そして、構成的・統合的な研究活動の成果を蓄積することによってその論理や共通原理を見いだす、という新しい学問の構築を目指していることを一語で表現するために、さらに今後の国際誌への展開も考慮して、あえて英語で造語を行ない、「Synthesiology - 構成学」とした。

このジャーナルが社会に広まることで、研究開発の成果を迅速に社会に還元する原動力が強まり、社会の持続的発展のための技術力の強化に資するとともに、社会における研究という営為の意義がより高まることを期待する。

シンセシオロジー編集委員会

- 注1 「悪夢の時代」は吉川弘之と歴史学者ヨセフ・ハトバニーが命名。「死の谷」は米国連邦議会 下院科学委員会副委員長であったバーノン・エーラーズが命名。ハーバード大学名誉教授のルイス・ブランスコムはこのギャップのことを「ダーウィンの海」と呼んだ。
- 注2 本格研究： 研究テーマを未来社会像に至るシナリオの中で位置づけて、そのシナリオから派生する具体的な課題に幅広く研究者が参画できる体制を確立し、第2種基礎研究^(注4)を軸に、第1種基礎研究^(注3)から製品化研究^(注5)を連続的・同時並行的に進める研究を「本格研究 (Full Research)」と呼ぶ。本格研究 http://www.aist.go.jp/aist_j/research/honkaku/about.html
- 注3 第1種基礎研究： 未知現象を観察、実験、理論計算により分析して、普遍的な法則や定理を構築するための研究をいう。
- 注4 第2種基礎研究： 複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究をいう。また、その一般性のある方法論を導き出す研究も含む。
- 注5 製品化研究： 第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。

Synthesiology 第2巻第4号(2009.11) 目次

新ジャーナル「Synthesiology - 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化 — 微細なものを思いのままに — ・・・大場 光太郎	264-275
誰でも作れて携行できる長さの国家標準器 — ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ共振器の機構設計 — ・・・石川 純	276-287
騒音計測の信頼性をいかに確保するか — 音の標準の開発と新しい供給体制 — ・・・堀内 竜三	288-298
循環発展的なプロジェクト構造を生むバイオインフォマティクス戦略 — 創薬ターゲット遺伝子の網羅的機能解析 — ・・・諏訪 牧子、小野 幸輝	299-309
バイオ燃料を木材からナノテクで生産する — セルロースの構造特性を利用した酵素糖化前処理技術 — ・・・遠藤 貴士	310-320
最先端の地質研究と国土の基礎情報 — 5万分の1地質図幅の作成 — ・・・斎藤 眞	321-331
インタビュー	
工学の克復とシンセシオロジー ・・・長井 寿、小野 晃	332-337
編集委員会より	
編集方針	338-339
投稿規定	340-341
2巻総目次(2009)	348-349
編集後記	350
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Development of real-time all-in-focus microscopes — WYSIWYG in the micro-world — --- K. Ohba	264
Portable national length standards designed and constructed using commercially available parts — An advanced mechanical design for the iodine stabilized He-Ne laser — --- J. Ishikawa	276
How the reliable environmental noise measurement is ensured — Development of acoustic standards and a new calibration service system — --- R. Horiuchi	288
A bioinformatics strategy to produce a project structure of spiral development — Comprehensive functional analysis of the drug design target genes — --- M. Suwa and Y. Ono	299
Bioethanol Production from woods with the aid of nanotechnology — Pretreatment for enzymatic saccharification using natural structure of cellulose — --- T. Endo	310
The advanced geological researches and fundamental national land information — Development process of the Geological Map of Japan 1:50,000 — --- M. Saito	321
Messages from the editorial board	342-343
Editorial policy	344-345
Instructions for authors	346-347

実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化

— 微細なものを思いのままに —

大場 光太郎

本論文では、マイクロ環境下での光学的なスケール効果の問題を“実時間”で解決する実時間全焦点顕微鏡の構成にあたり、システムを必要となる構成要素に分解し、その構成要素を製品として構築するためのいくつかの試みを紹介しながら、実時間全焦点顕微鏡のシステム構成方法について論じる。実時間全焦点顕微鏡の構成に際しては、マイクロ環境下での作業を前提とし、理論だけにとどまらず、製品化を見据えた実現を視野に入れながら構成した。

キーワード: 実時間、全焦点、顕微鏡、開発

Development of real-time all-in-focus microscopes

– WYSIWYG in the micro-world –

Kohtarō Ohba

In this paper, our struggle to realize a high-speed digital processed microscopic observational system for tele-micro-operation with a dynamic focusing system and a high-speed digital-processing system using the “depth from focus” criteria is reported. To realize the system, each functional element and its system configuration had been deeply discussed not only in the academic society but also with several companies, and the final product system had been developed after several trials.

Keywords: Real-time, Microscope, all-in-focus

1 実現しようとする技術的課題

近年、マイクロおよびナノテクノロジーへの産業的な興味が高まり、微細な環境を観測する装置や、微細な環境を観測しながら作業をするシステムの需要が高くなっている。観測装置として代表的なものは、光学顕微鏡、電子顕微鏡などが挙げられる。中でも、光学的な限界を超えないマイクロサイズの対象物を簡便に観測するためには、光学顕微鏡が広く使われている。マイクロサイズで大きな市場を持つと期待されるものとして、生体用途としては、光学顕微鏡画像を覗きながらの細胞やDNA操作等の需要がある。また、工業用途としては、LSI製品検査における、ワイヤーボンディングされたチップ表面とボンディング面を同時に観測・検査したいという需要等がある。

このような微細作業においては、実際に微細な物体の三次元位置をセンシングしながら作業することが求められる。通常環境と微細環境で大きく異なるのは、後者において(1)物理的なスケール効果により、物体の自重よりもファンデルワールス力などによる粘性が無視できなくなる、と同時に、(2)光学的なスケール効果により、光学顕微鏡で

見える光学的な限界に近づけば近づくほど、対象物の見える奥行き方向の範囲(被写界深度)が非常に浅くなる、という現象が特徴的である。本研究では(2)の光学的なスケール効果の問題を主に取り上げた。

光学的なスケール効果の結果、顕微鏡画像の様に被写体深度が浅い光学系では、図1にみられるように、ある奥行きに物体に焦点を合わせると、異なる奥行きにある物体に焦点が合わない。そのため、焦点距離を動かしながら

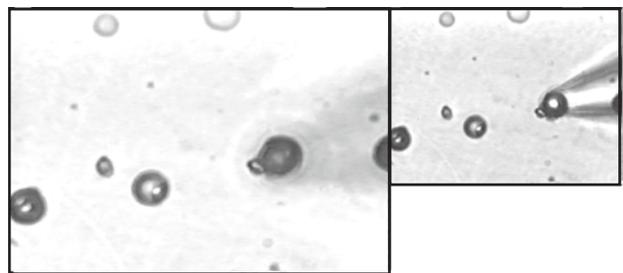


図1 微細作業下での顕微鏡画像(4 μm のガラス玉を操作している画像)

(a) ガラス玉とピンセットが別の高さ、(b) ピンセットとガラス玉が同じ高さ

産業技術総合研究所 知能システム研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2
Intelligent System Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan E-mail: k.ohba@aist.go.jp

Original manuscript received December 5, 2008, Revisions received August 20, 2009, Accepted August 21, 2009

異なる焦点距離で何枚かの画像を取り、画像処理を使って製品検査しているという例が多く見受けられる。そこで我々は、この光学的なスケール効果による問題をバーチャルに軽減することを目的として、光学顕微鏡など倍率の高い光学システムにおける微細作業において、光学的なスケール効果を“実時間”で解決する新しい微細視覚システム「実時間全焦点顕微鏡」の構成を技術的課題とした^{[1][4]}。

2 紆余曲折の歴史

ここでは、当初科学的な興味からスタートしたアイデアを、幾つかのFS (Feasibility Study) 期を乗り越えて製品化した経緯を、順を追って紹介する。最初の新規性のあるアイデアは通常の論文に、製品となってからは製品紹介記事として幾つか公開してきたが、シンセシオロジーの論文としては、アイデア段階期から幾つかのFS期を乗り越え、製品化に至った過程を紹介したい。このFS期の過程においては、幾つかの構成要素の取捨選択、その構成要素に特化したアルゴリズム開発、さらにはそれを実現するためのパートナーとの出会いなど、構成学として記されている「戦略的深化・選択型構成法」とも言うべき手法に相当するものと、それとは言い難い“幸運な偶然”に大きく左右されてきたことも、敢えて書き加えたい。というのも、暗中模索しながら迷路を彷徨し、ゴールに到達した後で、ここが大きな分岐点であったと後付けで理由はつけられるものの、当の本人は彷徨っている最中は夢中で、恥ずかしなが

ら決して戦略的な決定をしていたとは、当時を回想しても思えないためである。さらには、万が一この紆余曲折を理論づけしたとしても、次の暗中模索の機会では、そのシチュエーションなどが大きく異なり、その経験が生かされたと思うことが少なかったためである。そのため、この紆余曲折の歴史の部分（図2）は、論文の体裁にとらわれない、一つの製品化の過程を記した読み物として紹介させていただき、後述の節では、それぞれの期を技術的に紹介させていただきたい。

(a) アイデア段階期

人間が目で物を見る時、近い物体も遠い物体もピントが合っている様に感じる。これは目の焦点調整によるものである。それに対し、普通、カメラなどにおいてレンズを通して物を見るためには、レンズのピントを合わせる必要がある。オートフォーカス・カメラは自動的にピントを合わせることができるが、あくまで一定の距離だけにピントを合わせることができるものである。

微視的環境下において、倍率が低い場合の一眼レフカメラや実体顕微鏡などでは、絞りを絞ることで被写界深度を深くすることが可能であるが、光学原理から倍率が高くなると、全ての範囲をカバーすることは不可能になる。また、微視的物体の場合、被写界深度の深い画像では、物体の奥行き感は得られないという問題が生じる。そこで我々は被写界深度の浅いことを逆手にとって、微細環境下での作業効率を上げることを考えた。

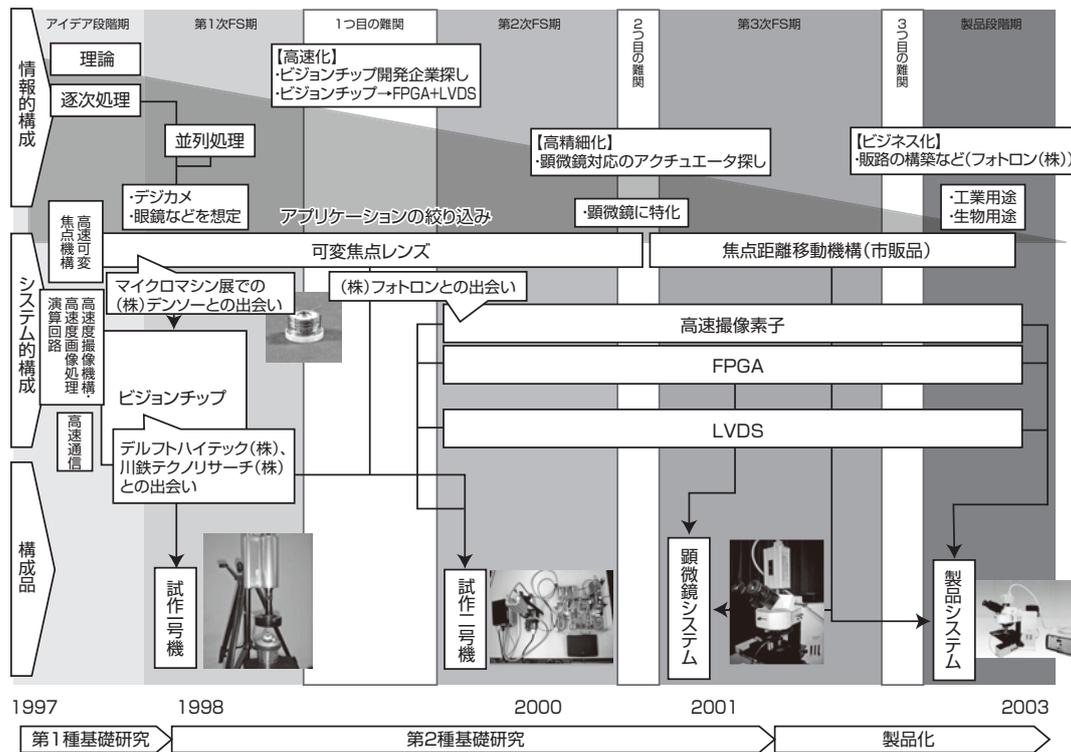


図2 構成の紆余曲折

そこで、ここで求められる仕様としては微細環境下での作業を効率化するために、

1) 被写界深度を理想的には無限大に広げた実体画像の動的観測 (30フレーム毎秒)

2) 対象物の三次元形状の実時間計測 (30フレーム毎秒) の二つの項目を同時に満たすシステムを開発することとし、理論的な検討と処理アルゴリズムなどの検討を行った。この時のアプリケーションとしては、漠然とデジカメや眼鏡に搭載されると面白いのではないかと考えていた程度で、特定の装置のイメージはなかった。

上記の仕様 1) と 2) も最初から仕様として挙がっていたものではなく、後で詳しく述べるが、画像処理技術を用いて 1) の画像を得る方法についての獲得する論文などを調べていくうちに、処理をする過程で物体の三次元位置情報を用いていないことに気付き、この情報を用いないのはもったいないという考えに至った。

(b) 第1次FS期

アイデアを実際のハードウェアシステムとするためには、体系的な構成として、高速可変焦点機構と、データを取得、通信、処理を実時間で行うための情報処理・通信技術が必要となる。一つ目の高速可変焦点機構については、30 フレーム毎秒での動的観測のためには、30 Hz での応答速度が必要となるが、既製品ではこれを1桁下回ったものしかなかった。しかし、当時株式会社デンソーがマイクロマシプロジェクトで開発していた可変焦点レンズに、マイクロマシ展で出会うことで解決された。情報処理・通信については、1枚の画像構成に必要な画像枚数をN枚とすると(N×30 フレーム毎秒×画像デジタルサイズ)が必要とされる。当時、オランダのビジョンチップ MAPP シリーズを輸入していたデルフトハイテック株式会社と、その開発を手掛けていた川鉄テクノロジー株式会社と出会うことで両方の技術課題を解決した試作1号機を開発した。

(c) 第2次FS期

しかしながら速度的には0.5 フレーム毎秒程度にとどまり、当初の目標である30 フレーム毎秒を満足することができず、さらなる高速化を目指してビジョンチップを開発してくれる企業を探すため、多くの企業への直談判に明け暮れる時期が1年余あった。これが一つ目の難関である。「超高速なビジョンチップを開発し、実装することでこの問題は解決できるはずである」と論文には書き、逃げるのが通常の研究であったのかもしれないが、最後までやり遂げたいという信念から、この一つ目の難関に船出した。しかしながら、実際にはこのような話を多くの企業に持ちかけても、ビジネス的なメリットが見えないこと、開発には数億円を要するなどから、断られ続けた。この難関

を抜けるきっかけとなったのは、フォトロン株式会社を訪ねたことである。同社は高速度カメラメーカーとして、秒速10,000枚以上の画像を高速撮像し、メモリ転送する技術を有しており、ビジョンチップで開発しなくても、同社が持つ高速撮像素子とLVDS^{用語1} (Low Voltage Differential Signaling) インターフェース、さらにはFPGA^{用語2} (Field Programmable Gate Array) 処理を使えば実現できるだろう、との心強い助言により試作2号機が1カ月程度で試作された。

(d) 第3次FS期

同時に、フォトロン株式会社と、将来のビジネス化を考え始めた時期でもある。多くの展示会などで展示を行うと、全焦点画像が最も求められているのは顕微鏡応用であることが分かったことから、この時期から顕微鏡応用に特化した開発を行い始めた。当初、株式会社デンソーの可変焦点レンズは手作りで作られており、顕微鏡の高精細な位置決めには適していないと同時に量産化が困難であることから、顕微鏡の焦点距離を電動で動かすドイツのPI社のピエゾアクチュエータを探し出し、その制御部分をいじることで希望の精度を得た。この高速に機械的な動きを高精度に実現することが二つ目の難関となり、これを克服した顕微鏡システムを実現したのが第3次FS期である。当初、高速な情報処理だけに頭が行き、高速な機械的な動きは何かとなると高をくくっていたが、実際に最後まで悩まされ続けたのは、どうやって高信頼に高速な機械的な動きを実現するかであった。

(e) 製品段階期

顕微鏡システムで、幾つかの実証を繰り返していくことで、その顕微鏡応用も工業応用と生物応用に分けながらさらにビジネス化を考えたが、顕微鏡システムは光学メーカーが研究者などを対象に訪問販売し、メンテナンスを行うという特殊な販売ルートであり、門外漢のフォトロン株式会社が入るためには従来の光学メーカーにOEM供給をしながら、ユーザーへの販売を行う販路の確立が重要なカギとなった。これが最後の難関となり、この販路の確立に1年余の歳月を要したが、無事2003年には製品として世の中に出る運びとなった。

3 アイデア段階期

前章で紹介したアイデアは、「どこでもピントの合った画像を作りたい」という単純な科学的な興味から発したものである。当初、想定していたアプリケーションとしては、デジカメや眼鏡などを漠然と考えていたが、それを実現するために、焦点距離の異なる幾つかの画像をパソコンによるオフライン処理を行うことで、その有効性を確認することか

ら始めた。

この期では、単純な処理をパソコンの持つメモリ容量と処理能力内で行うために、メモリ効率を上げるための逐次処理アルゴリズムと、処理能力を上げるための並列処理アルゴリズムの開発を行った。

3.1 理論的構成 (Depth from Focus 法)

光学顕微鏡画像の場合、被写界深度の浅さ問題は操作性に大きな問題を与えることを前述したが、これは同時に物体の三次元計測手法^[5]の一つである Depth from Focus 法^{[6][7]}を実現するためには大きな利点であると言える。つまり、全焦点カメラは被写界深度の浅さ問題を解決するためのものであると同時に、この問題を逆手に用いることにより、どこでもピントの合った全焦点画像が獲得できるだけでなく、Depth from Focus 法を用いることにより単眼であるにもかかわらず、物体の三次元形状を獲得することが可能となる。

図3に Depth from Focus 法 の概念図を示す。奥行き異なる物体を観測する場合、撮像面までの距離（ピント）を振りながら画像各点で画像の濃淡データの局所周波数を計測しピークを検出する。一度、ピントの合った撮像面までの距離が得られれば、ガウスのレンズ法則を用いることで、物体までの距離が算出できる。

ピントが合っているかどうかは、焦点距離： f 、物体距離： l 、もしくは画像距離： l' を動かしながら撮像した画像の観測点周りの局所空間周波数分析を行い、空間周波数が最大のところがピントの合ったところであるといえる。この方法は、オートフォーカス機構としても多く使われている手法であり、直感的にボケ部分は周波数が低く、ピントが合った部分は周波数が高いことがわかる。基本的には可変焦点機構でレンズのピントを動かしながら画像を1枚1枚取りこみ、それぞれの画像全ての画素点周辺での局所空間周波数分析を行い、周波数のピークの部分、つまり焦点が合った部分をピクセル単位で各画像からピックアップ

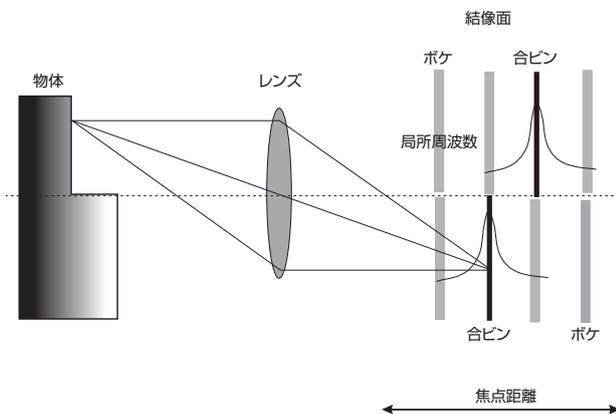


図3 Depth from Focus 法

し、1枚の画像として張り合わせていけば全焦点画像が得られる。また各点での焦点距離と画像距離からその三次元データも得られる。

画像のピントの合い具合の評価手法には、焦点距離を変えながら画像の明るさの変化をみる方法など、さまざまな方法があるが、本論文では、最終的な製品化を視野に入れ、画像処理のアルゴリズムをハードウェア的に実装しやすいなどの理由から、各画素の局所空間周波数分析は画像濃淡値の空間的な分散で評価するものとし、次式の Image Quality Measure (IQM) を定義する。この IQM 値は、本来、画像の鮮明度を示す指標の一つとして定義されているものであり、ピントが合っているか否かを判定するためのものではないが、画像をデジタル化し、その画像をデジタル処理することを前提に、処理アルゴリズムが将来的に高速化することが容易なこの IQM 値をここでは用いることとした。

$$IQM = \frac{1}{D} \sum_{x=x_i}^{x_f} \sum_{y=y_i}^{y_f} \left\{ \sum_{p=-L_c}^{L_c} \sum_{q=-L_r}^{L_r} |I(x, y) - I(x+p, y+q)| \right\}$$

ここで $(-L_e, -L_r) - (L_e, L_r)$ と $(x_i, y_i) - (x_f, y_f)$ はそれぞれ、分散評価と平滑化を行うための小領域である。また、 D は画素単位で正規化するための評価を行うすべての画素数である。焦点距離を動かしながら IQM の値のそれぞれ画素毎もしくは領域毎に評価し、IQM 値のピークを検出し、その時に焦点距離： f と画像距離： l から算出した物体距離： l を、それぞれの画素位置に対するマトリクス要素にそれぞれ代入することで、対象物の三次元データを作成する。

3.2 逐次処理による構成 (メモリの軽減のため)

前述のように全焦点画像と奥行き画像を理論的に同時に獲得するのは、Depth from Focus 法を使うことで可能であるが、実際に開発を始めた 2000 年当時、前節に述べた IQM 値を計算するアルゴリズムを構築すると、256 画素 × 256 画素、30 枚程度の画像から 1 枚の全焦点画像と奥行き画像をそれぞれ実時間で獲得するためには、2 Mbyte 程度の画像メモリと、1 秒間に 30 枚 × 30 フレーム = 900 枚の画像の獲得と処理能力 (2000 年当時のパソコンで 3 分程度) が必要とされた。

そのためには、まず、全焦点画像および奥行き画像を 30 フレーム毎秒で獲得するために N 枚の異なる奥行き画像を必要とする場合には、 $30 \times N$ フレーム毎秒での画像を撮像する高いダイナミックレンジの撮像素子が必要とされ、さらにはそれだけの画像データを処理・表示するための高速処理システムが必要とされる。

この IQM 値は、オートフォーカスカメラであれば 1 点もしくは数点だけを計算しその値に応じてピントを駆動すれば良いが、全焦点画像を得るためには各画素点において計算を 33 ms 以内に効率よく行う必要がある。

このハードウェアの限界を克服するために著者らが考えたアルゴリズムにより構成的にメモリを効率化する手法を以下して述べ、次章ではハードウェアの特性を使って処理速度を効率化した構成を紹介する。

この IQM 処理をすべての画素点で行う際に、焦点距離の異なる前画像を一時的に蓄えてから処理を行うのは非効率であることから、以下に示す (1) - (7) ステップの逐次型アルゴリズムにより構成を構築した。図 4、5 にはそれぞれ、代表的なシステム構成図とフローチャートをそれぞれ示す。

この逐次型アルゴリズムを用いて、焦点距離を変えながらこの逐次処理を行い、焦点距離を最後まで動かすことで、最終的に更新されたイメージメモリのそれぞれのマトリックスが全焦点画像 (AIF) と奥行き画像 (DEPTH) になる。IQM の算出式は複雑そうに見えるが、画像処理技術としてはラプラシアンと平滑化を行っているだけである。ラプラシアンは二次微分であり、デジタル画像の世界では微分は隣の画素との差分であり、これを 2 回行えばラプラシアンになる。平滑化はいわば平均である。この二つの処理は四則演算であり、高速化が可能なハードロジック回路に適している。通常は異なる奥行き画像の枚数分 N 枚のメモリを持ち、それぞれの IQM 画像を出した上で、同じ画素位置の IQM の値を比較することで、全焦点画像と奥行き画像を獲得していた (合計 $2N + 2$ 枚の画像メモリが必要)。これに対し、この逐次アルゴリズムでは得られた画像をその場で逐次比較するため、原画像と IQM 画像、全焦点画像、奥行き画像の 4 枚の画像メモリだけで済み、メモリの容量を軽減できるだけでなく、後述のハードウェアによる構成が容易となった。

(1) 初期化

init (IQM) ;

(2) 焦点距離移動

for (FV=0 to FVMAX) { (FV:焦点距離)

- mov (FV) ; 焦点距離移動
- (3) 画像入力
IO=input; 画像入力
- (4) ラプラシアンフィルタ
IL=lap (IO) ; 前処理
- (5) メディアンフィルタ (平均フィルタ)
IM=ave (IL) ; 前処理
- (6) 画像の各画素の輝度値の比較と、それに応じた画像データのコピー
if (IM (x, y) > IQM (x, y)) {
 IQM (x, y) =IM (x, y) ; 評価値更新

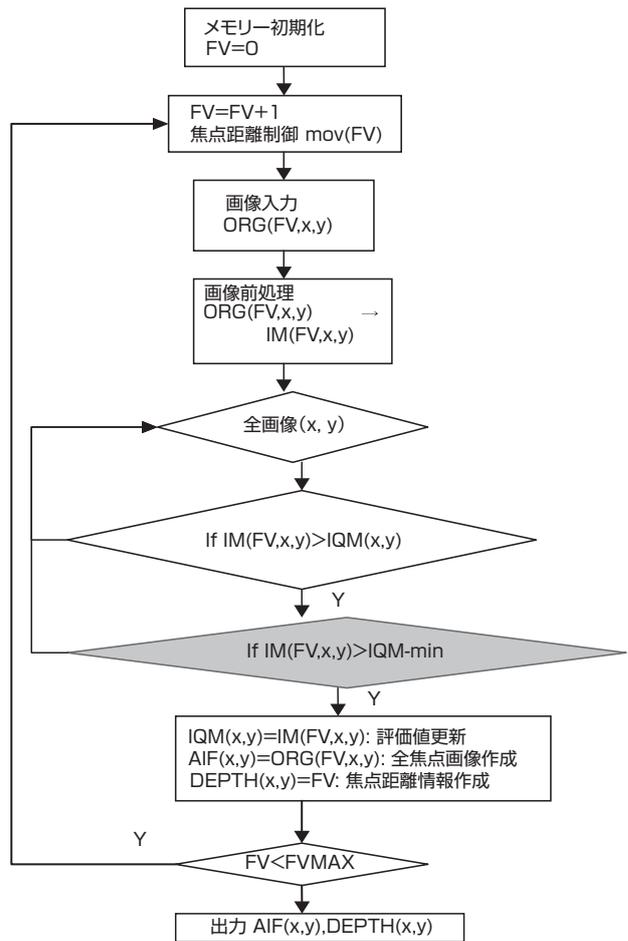


図 5 逐次アルゴリズムのフローチャート

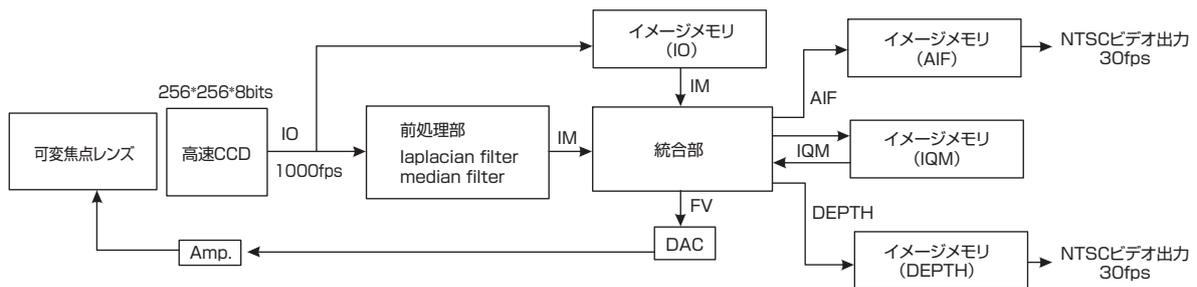


図 4 逐次アルゴリズムのためのシステム構成

AIF (x, y) = IO (x, y); 全焦点画像作成
 DEPTH (x, y) = FV; 焦点距離情報作成

(7) 画像データ出力

output (AIF, DEPTH); 画像データ出力

4 第1次FS期

上記の手法と情報処理を実時間で実現するためには、焦点深度を高速に移動させながら、同時に高速に画像を撮像し処理することが求められる。そこで、基本システム構成要素は次の三つであると分析した。

(a) 高速可変焦点機構

(b) 高速度撮像機構・高速度画像処理演算回路

(c) 高速通信

例えば、8段階の焦点距離で処理を行う場合、人間が観測するのに十分な滑らかさである30枚毎秒の実時間でその出力を得るためには、30 Hzでの焦点距離の高速移動と、それに同期しながら30×8で240コマ/秒の画像の取り込みと処理のスピードが要求される（図6）。モノクロ512×512画素で240コマの場合、ピクセルレートは100 MHzに近い周波数になる。同時に30 Hzでカメラの焦点

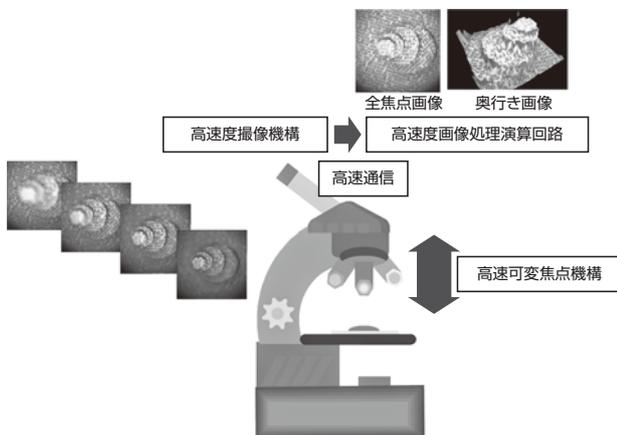


図6 全焦点顕微鏡のシステム構成



図7 可変焦点レンズ概観

距離、対物距離、もしくは画像距離を動かす必要がある。

(a) 高速可変焦点機構

後述の試作1号機、試作2号機では、高速可変焦点機構としては、株式会社デンソーで開発された可変焦点レンズを用いた^[8]。駆動は piezoelectric 素子で、これにける電圧を変えると焦点距離が変わる。構造は単純でモータ類は一切ない。構造はバイモルフアクチュエータでガラスダイアフラムを駆動させ、焦点距離を変える。PZT バイモルフに印加する電圧を変えることにより、このレンズは凸レンズから凹レンズに変化することも可能である。150 Hz 程度まで位相が遅れずにこの周波数に応答することが検証されている。図7が可変焦点レンズの写真、図8がその構造、図9がレンズ駆動機構の詳細である。このレンズは電圧を加えない場合は平板のガラスである。この可変焦点レンズの最大の特徴はその高速性である。piezoelectric 素子によりガラスダイアフラムを直接駆動させるので高速な焦点距離の移動が可能になった。

(b) 高速度撮像機構・高速度画像処理演算回路

3.1の試作1号機での高速度撮像機構と高速度画像処理演算回路については、撮像素子、ADC、処理システムが内包しているビジョンチップを用いた。ビジョンチップを用いることで、処理はビジョンチップの内部で完結し、高速

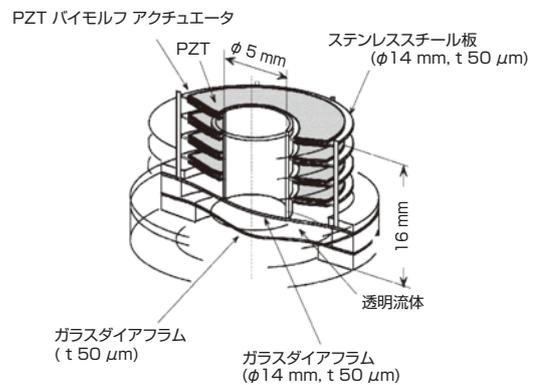


図8 可変焦点レンズ構造

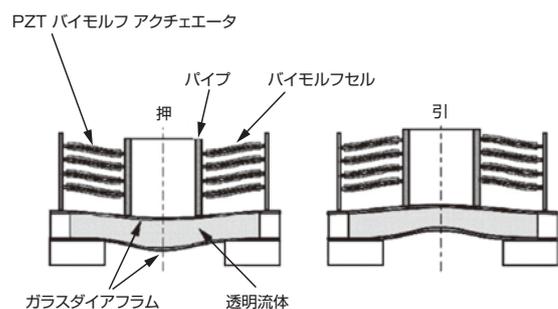


図9 可変焦点レンズ動作原理

通信は不要となる。ここでは単位時間あたりの画像データ量と画像処理能力の多さから、コラムパラレル型のビジョンチップである、スウェーデンのIVP社のMAPP2200を用いた。基本構成としては、256×256画素のCMOSイメージセンサと、256個のADC、256個の平行プロセッサからなる。前章で述べたように、SIMD^{用語3}（Single instruction Multiple data）処理が可能な画像処理アルゴリズムにより、画像の取り込みと処理が高速に行える。

(c) 並列処理による構成

開発を始めた2000年当時は、通常のフレームレートでのデジタル画像処理技術が当たり前のように実用化されてはいたものの、フレームレートを1桁近く上げた画像の撮像と処理は、特殊なビジョンチップを開発しなければ実現しないというのが現状であった。もちろんビジョンチップの開発には1億円程度の開発費用がかかるといわれ、複数の企業を当たってみたものの、快い回答をいただいた企業はなく、試作1号機ではスウェーデンで開発された汎用ビジョンチップMAPP2200を用い、後述する並列処理アルゴリズムを実装することで実現した。処理速度としては2秒程度で実現されたが、目的であるフレームレートでの実時間処理には程遠いものであった。

本手法に必要とされる、画像前処理部分のラプラシアンフィルタと平滑化フィルタは、高い処理能力を要する。この処理をハードウェア化したものとして、この章の後で紹介する試作1号機においてビジョンチップで実装した例を

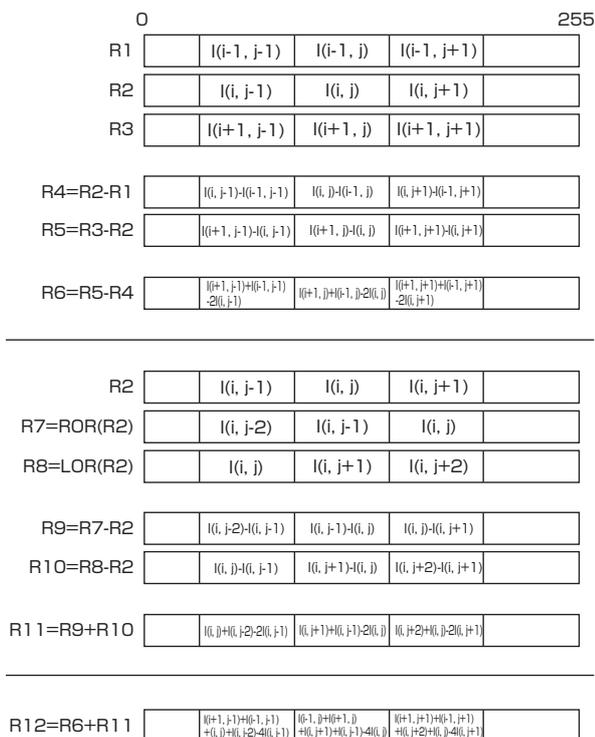


図10 SIMD処理によるラプラシアンフィルタ処理演算

図10、11に示す。用いたハードウェアはSIMD処理が容易なチップであることから、上記のIQM値を演算するためには、各画素点で各画素点周辺の画素値を用いた処理として、ラプラシアンフィルタと平滑化を並列計算することが求められる。それぞれの処理について、SIMD処理した例を示す。それぞれの演算結果を見ると、最終的に各画素点でラプラシアンフィルタ(図10のR12)と平滑化(図11のR5)の結果が得られていることが分かる。

また、最終的に製品化した際にはこの処理手法を参考にしながら、FPGAを用いてIQM値を算出するシステムを構成した。

1999年に試作した試作1号機システムの概観を図12に

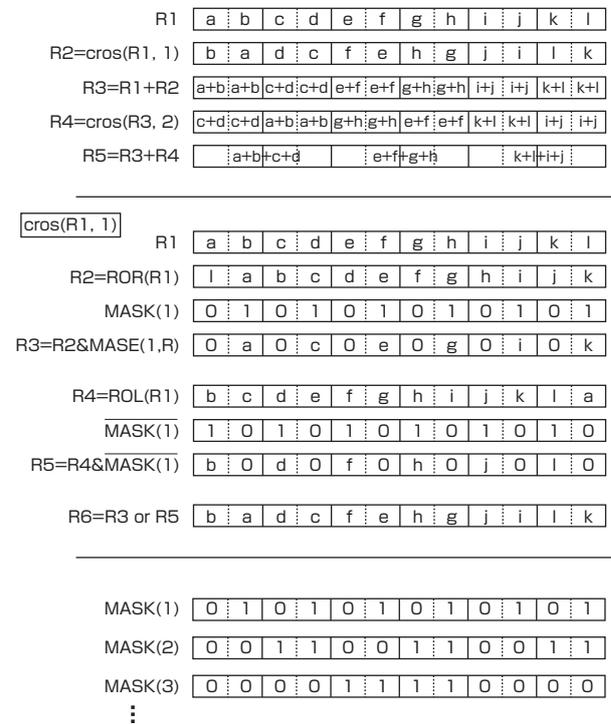


図11 SIMD処理による加算演算処理演算



図12 試作1号機

示す。

評価実験として、可変焦点レンズから 160 mm の場所に 35 mm の奥行きを持つ物体を置いて処理を行った。焦点距離を 35 mm の高さの物体をカバーする程度に移動するのに 21 枚の画像を取り込み処理していることから、奥行き解像度は 1.67 mm である。システムの空間解像度は光学機器の設定に依存するが、今回の場合、16 mm × 16 mm を画像解像度 256 × 256 で処理することから、62.5 μm/pixel の解像度を持つ。

ここで用いた対象物としては、高さ 35 mm の 4 段の人工的なピラミッド形状のもので、1 段目がφ 10 mm 高さ 10 mm、2 段目がφ 7 mm 高さ 10 mm、3 段目がφ 4 mm 高さ 10 mm、4 段目がφ 3 mm 高さ 5 mm である。

この時、焦点距離を動かしながら撮られた 21 枚の画像の一部を図 13 左に示す。前述のような処理を施すことにより、全焦点画像：図 13 右と VR 表示：図 14 がそれぞれ得られている。全焦点画像自体は適当であるものの、奥行き画像は平滑化する領域が小さいこと、奥行き方向の解像度が少ないことなどから、大きな分散した結果が得られた。

試作 1 号機の性能としては、領域の大きさの設定や取り込み画像枚数に依存するものの、処理時間は 2 秒間に 1 枚程度の出力しか得られていない、MAPP2200 での二値画像の取り込み・処理は 1 秒間に 2,000 枚から 3,000 枚をこなす能力を持つことから、処理時間の遅さの原因としては、1) コラム型 A/D が各画素で独立した参照電圧を与

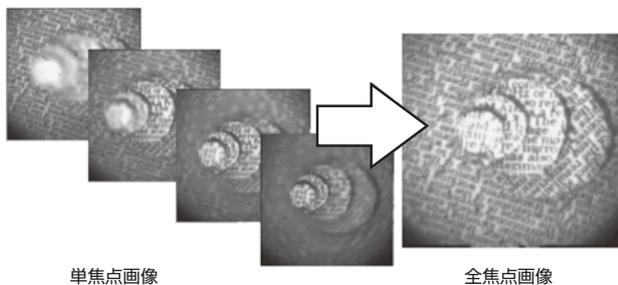


図 13 全焦点画像の生成概念図

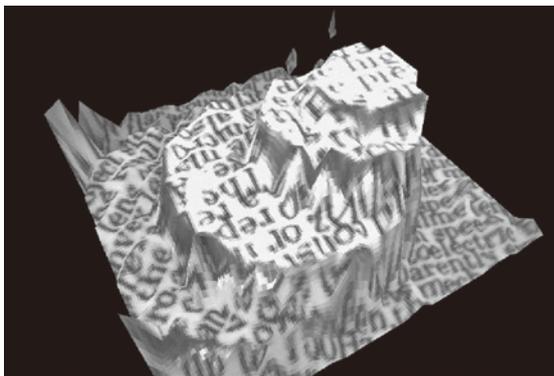


図 14 VR 表示例

えられないため、8 ビットの解像度で画像を取り込む際、256 回参照電圧を与え逐次比較する必要があること、2) SIMD プロセッサのアーキテクチャが二値画像に特化したものであること、などが挙げられる。

5 第2次FS期

ここでは、30 フレーム毎秒の実時間観測を可能とする全焦点カメラの試作 2 号機を実現するための第 2 次 FS 期について解説する。

後述の顕微鏡システムでは、高速撮像においては多くの実績を有する株式会社フォトロンとの協力を得ることができた。このシステムでは、高速度ビデオカメラのカメラヘッドを用い、撮像機構と画像処理演算回路とのインターフェースには高速画像転送を可能とする LVDS を用いることで、撮像機構と画像処理演算回路を分離することを可能とした。それぞれに市販の高速度撮像機構（高速ビデオカメラ）と画像処理演算回路（FPGA）を用いた。このように既存の製品をベースとして開発したことにより、製品化への道が大きく開けたと言える。

ここで開発した試作 2 号機の構成を図 15、概観を図 16 に示す。高速センサーの出力は CDS (Correlated Double Sampling)、ADC を経て高速デジタルインターフェースの LVDS に変換され、画像処理部分に転送される。ここま

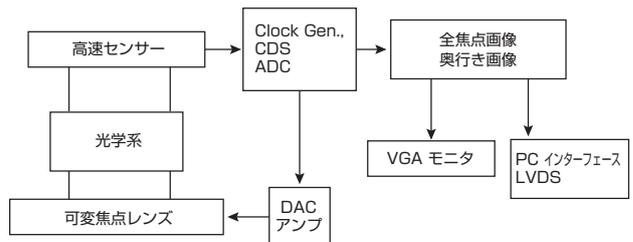


図 15 試作 2 号機ブロックダイアグラム

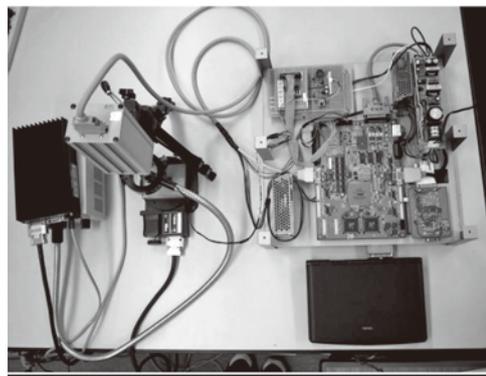


図 16 試作 2 号機概観

ディスプレイに使われている規格である。可変焦点レンズ用のノコギリ波発生回路は高速度カメラ部分のクロックジェネレータから同期信号を得て、30 Hzのノコギリ波を発生させ、レンズ駆動アンプでレンズを駆動する。画像処理部では入力デジタル映像信号でIQM演算、画像合成を行い、VGA (Video Graphics Array) 信号として出力する。三次元データはLVDS信号でPCに転送する。PCではPCIバスのLVDSキャプチャーボードでデータを受ける。

機械的に焦点距離移動は、試作1号機と同じものを使ったので問題なかったが、アルゴリズムの方は第1次FS期では特殊なビジョンチップに実装したことから、そのままFPGAには移植が不可能で、FPGA専用でアルゴリズムを修正する必要があるのと、FPGA処理を高速にするために内部メモリを使う必要があったため、メモリ容量を考慮した実装が必要となった。ここでは先に示した逐次処理を実装することでメモリ容量が抑えられ、結果的にFPGAの内部メモリだけで処理ができたため、目的仕様の30フレーム毎秒が可能となった。

図17には、試作2号機による出力画像例を示す。前述の試作1号機で示したものと同等の表示結果となっているが、実際には左の列に示した全焦点画像と右の列に示した奥行き画像が動画で観測されている。つまり、各フレームに対して8焦点での記録がなされ、試作1号機が0.5フレーム毎秒であったのに対し、試作2号機は30フレーム毎秒であることから、60倍の処理速度を得ていることになる。

6 第3次FS期

ここまでの開発で以下のことが明らかになった。

- ・既存の高速度カメラのカメラヘッドとLVDSを使うこと

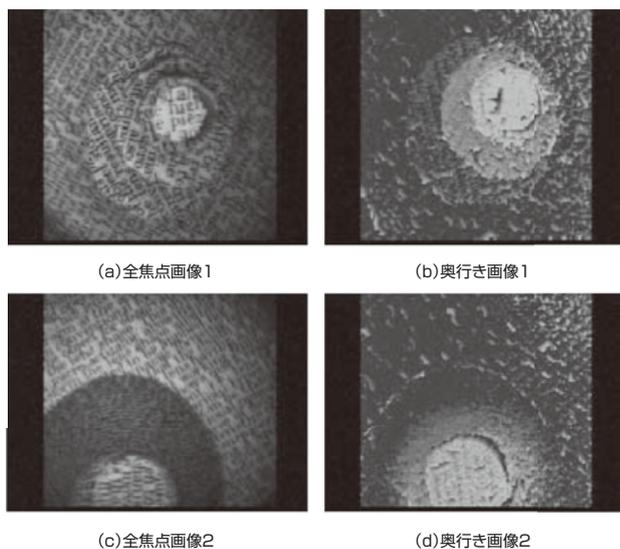


図17 試作2号機出力例

で、撮像、通信と処理の分離が可能となり、処理部には一般のFPGAを用いた高速並列処理が可能である。

- ・機械的な焦点距離移動には、可変焦点レンズで可能である。

企業との話し合いの中から、それらを高速処理部分はそのまま活かして、ビジネス的な応用が最も可能性のある顕微鏡用途に特化した開発をすることになった。しかし、上述の二つ目の機械的な焦点距離移動については、その精度などの問題から可変焦点レンズを使うことが出来なかった。ここでは第3次FS期において、顕微鏡用途に特化した顕微鏡システム開発について述べる。

顕微鏡システムにおいて焦点距離を動かすのに使ったのは、市販の焦点距離移動機構 PI Polytech 社製のPZTアクチュエータP-721、20とドライバE-612、C0で、顕微鏡の対物レンズの間に取り付けることにより対物レンズを平行に0-100 μ m動かすことを可能としている。ここで、4章、5章の試作機で用いていた可変焦点レンズを使わなかった理由としては、可変焦点レンズではレンズの厚みを変化させレンズのf値そのものを変化させているため、厳密には異なる倍率の画像を合成していることになり、高精度の全焦点画像を生成するには不相当であること等が上げられる。

図18には試作2号機をベースに、顕微鏡に実装した顕微鏡システムの概観図、図19には通常の光学顕微鏡画像例を、図20には顕微鏡システムで得られた画像をそれぞれ示す。

ここで測定対象としては、直径2 μ mのガラスファイバーを用い、三次元的に交差している画像である。10 μ m毎の画像を図に示す。1本目のガラスファイバーには30-40 μ mでピントが合い、2本目のガラスファイバーには60 μ mでピントが合っていることが見てとれる。

提案した全焦点顕微鏡カメラを用いることにより、図20に示すような全焦点顕微鏡画像が得られている。ちなみに



図18 顕微鏡システム概観図

この映像は動画であるので、測定対象物体が動いても全焦点画像は逐次更新される。さらに、奥行き画像も得られている。

7 製品段階期

今回ここで開発してきたシステムは、株式会社フォトロンから2003年度に製品化された。このシステムの概観を図21に示す。基本的な構成は試作機と変わらないが、カラー画像に対応したこと、システムの大きさを極力コンパクトに抑えるなど、実用に耐える工夫がなされている。

また、この製品システムで得られた全焦点画像の例を通

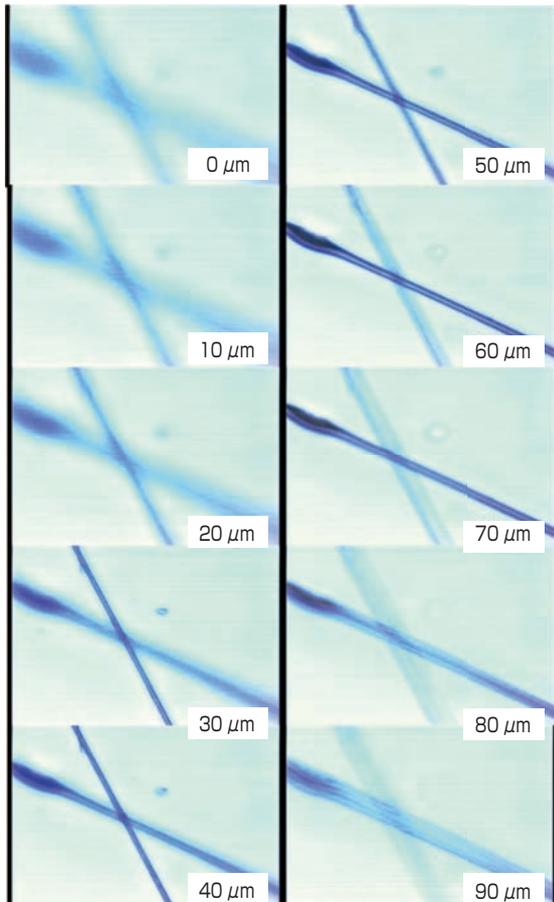


図19 典型的な顕微鏡画像例

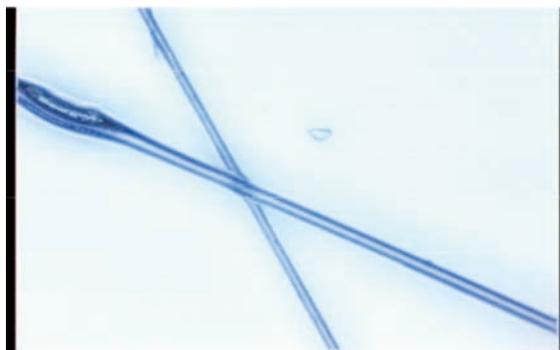


図20 全焦点顕微鏡画像例（動画）

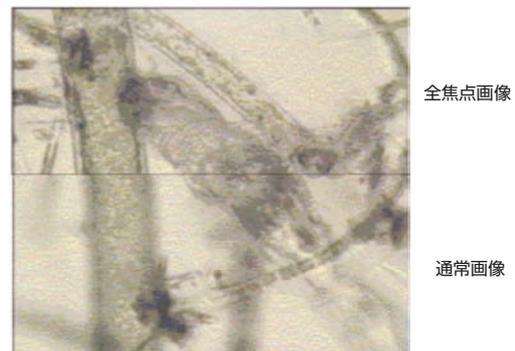
常の画像と比較して図22に示す。図22上にはICチップのワイヤーボンディング部分、図22下には透過光による珪藻と微生物をそれぞれ示している。どちらも対物レンズは50倍のものを用いている。実績としては、対物レンズの重さなどの関係から、100倍程度の対物レンズまでは稼働可能である。1mmから0.1mm程度の低倍率に関しては実体顕微鏡が、サブミクロンの高倍率になると電子顕微鏡が広く用いられており、光学顕微鏡の光学限界などから、生物などのバイオ系や、半導体検査などでは倍率がさほど高いものは必要とされないことから。そこで、程度の倍率で実用上問題がないことを確認した。



図21 製品版システム概観図



ICチップ検査



微生物観測

図22 製品版画像出力例

8 将来への課題

ここで開発した全焦点顕微鏡カメラは、通常の顕微鏡画像の問題である被写界深度の浅さの問題と奥行き情報が得られないという問題を同時に解決するため、どこでもピントの合った画像（全焦点画像）と、対象物体の三次元的構成を実時間で生成・表示することを目的としたシステムである。

全焦点画像と三次元構成を同時に獲得することにより、対象物体を詳細に観測することが可能となった。しかしながら、それと同時に通常の顕微鏡が得ている一方方向からの対象物体の異なる複数の焦点距離の映像から、ピントの合っている映像と、その時の一方方向からの奥行きデータだけを抽出することを特化的に行うことで、多くの情報を捨てるを得なかったのも事実である。例えば、半透明な物体に対して垂直方向に焦点距離を操作した際、ピントの合う部分が高さ方向に複数ある対象物体も存在するが、この手法では1か所だけを選択することで、無条件に他の部位の観測は不可能となる。

光学的なスケール効果をなくすもう一つの方法としては、図23に示すように多数の焦点距離の画像から、そのままボリュームレンダリング^{用語4}する技術についても発案している。これについても特許化している⁹⁾。

将来は、ハード的な制約を考えずに全ての奥行き画像をボリュームレンダリングすることで、どの方向からの画像スライスも生成できるような、ハイパー顕微鏡の開発も必要とされるものと期待する。

謝辞

この研究は、通商産業省工業技術院機械技術研究所（現

在の産業技術総合研究所）と、デルフトハイテック株式会社、川鉄テクノロジー株式会社、株式会社デンソーの共同研究により行なわれたものを元に産業技術総合研究所と株式会社フォトロンが実用化共同研究を行ったものである。また、本研究の可変焦点レンズの一部は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）から委託を受けた（財）マイクロマシンセンターの再委託業務として、株式会社デンソーが実施したものである。

用語説明

用語1:LVDS (Low Voltage Differential Signaling) インターフェース:ツイストペアケーブルを使って非常に高速に動作することができる電気信号の規格。高速カメラなどでは以前より、そのデータ量の多さなどから使われていた。パソコンでも液晶パネルとのインターフェースに使われている。

用語2:FPGA (Field Programmable Gate Array) 処理:利用者が独自の論理回路を書き込むことの出来るゲートアレイ (PGA) の一種で、ゲートアレイが二次元格子状に並んでいるもの。並列処理演算などに向く。

用語3:SIMD (Single instruction Multiple data) 処理:演算装置において1回の命令で複数データに対する処理を一つの命令で同時に行うもの。

用語4:ボリュームレンダリング:三次元の物体を二次元画像として表現する際に、物体の表面に陰影をつけてあらかず手法に比べ、物体内部の透過率、色などの情報を持たせることで三次元の物体を三次元的に見せる手法。

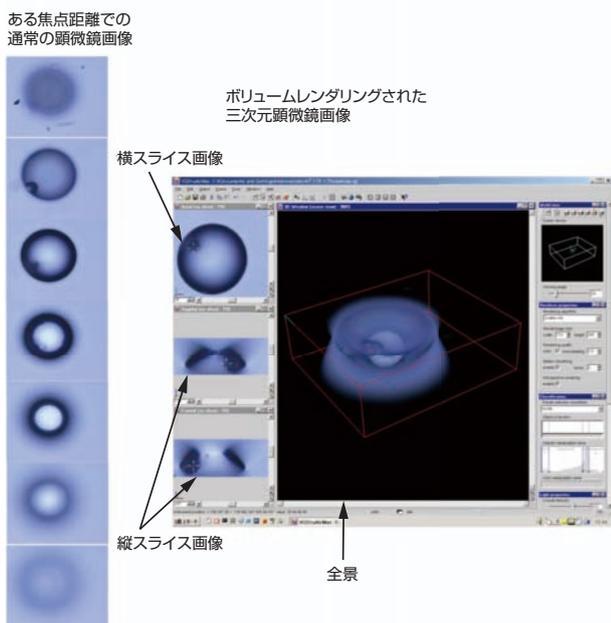


図23 ボリュームレンダリング手法の概要

参考文献

- [1] 大場光太郎, J.C.P Ortega, 谷江和雄, 林学明, 段木亮一, 武井由智, 金子 卓, 川原伸章:実時間マイクロVRカメラの試作, *電気学会論文誌E*, 120-E (6), 264-271 (2000).
- [2] K. Ohba, J. C. P. Ortega, K. Tanie, G. Rin, R. Dangi, Y. Takei, T. Kaneko and N.Kawahara: Micro-observation technique for tele-micro-operation, *Advanced Robotics*, 15 (8), 781-789 (2001).
- [3] 大場光太郎:実時間全焦点顕微鏡カメラシステム, *日本ロボット学会誌*, 21 (1), 43-44 (2003).
- [4] 特許3737483, 実時間全焦点顕微鏡カメラ
- [5] 石原満宏, 吉澤 徹:最近の光表面形状計測技術, *O plus E*, 20 (11), 1251-1258 (1998).
- [6] S. K. Nayer and Y. Nakagawa: Shape from focus, *IEEE Trans. on PAMI*, 16 (8), 824-831 (1994).
- [7] 児玉和也, 大西隆之, 相澤清晴, 羽鳥光俊:反復法に基づく複数画像からの任意焦点画像の生成, *映像情報メディア学会誌*, 51 (12), 2072-2081 (1997).
- [8] 金子 卓, 多矢信之, 川原伸章, 秋田成行, 服部 正:可変焦点レンズを用いた長焦点深度視覚機構, *電気学会マイクロマシン研究会* (1997).
- [9] 特許3627020, 三次元透過型顕微鏡システムおよび画像表示方法

執筆者略歴

大場 光太郎 (おおば こうたろう)

1991年東北大学大学院博士課程修了。博士(工学)、2009年より独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門 副研究部門長、兼 デイペンダブル・システム研究グループ長。最近は人間生活環境下で実際に使えるロボットを目指し、ユビキタス・ロボット、デイペンダブル・システムなどの研究に従事。IEEE、日本機械学会会員。現在、筑波大学 連携大学院 教授、芝浦工業大学 連携大学院 教授、東京大学大学院情報学環 客員准教授も兼務。



査読者との議論

議論1 構成方法

質問・コメント (小林 直人:早稲田大学研究戦略センター)

本論文で著者は、最初の部分の「実時間全焦点画像の構成」という、オリジナルな考えに基づいて情報的構成を行い、これをベースに「実時間全焦点画像の構成」を実現するためにハードウェアを含めたシステムの構成を行い、逐次目標を明確に向上することにより、最終的に実時間全焦点顕微鏡の製品化に持っていきましました。これは極めて貴重なことであり、ここでは①第1種基礎研究から製品化までの一貫性、②戦略目標の逐次的深化・明確化、③それに伴うシステム構成の向上、④以上を踏まえた実際の製品化とその後の商品としての維持、という他には無い極めてユニークな研究開発を、紆余曲折がありながらも継続して行い完遂したことが示されています。その意味でシンセシオロジーの論文に相応しいと考えられました。

一方、シンセシオロジーでは構成的手法の独自性が課題の一つです。本論文にあっては、技術の進展、あるいは構成の進展に伴って戦略が明確になり、それにつれてシナリオも明らかになってきたと推察されます。すなわち、最初から「実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化」という戦略目標があったわけではなく、実態は要素技術を構成している間に、戦略目標が深化し、そのために次のステップで行う課題が明確になり、要素技術の選択とシステム化の実現を経て、その次の戦略目標が深化するというサイクルを描くことになったと理解しました。すなわち、次のステップに進むたびに技術要素を選択していき、そのたび毎に戦略が明確にされ進化したと推察されます。したがって結果的には、要素技術の「戦略的深化・選択型構成法」とも呼ぶべき手法がとられたと推察されます。(下図参照) (シンセシオロジー、1巻2号 p.141の図に追加修正)。この認識は正しいでしょうか？

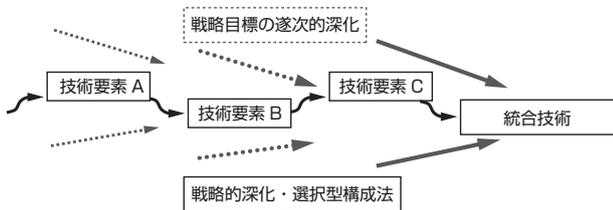


図 シンセシスの構造

回答 (大場 光太郎)

おそらく、製品化の過程でとってきた手法は、「戦略的深化」であったり、「選択型構成法」であるのかと思いますが、それらはいずれも個人の経験と周りの人脈に依存し、ロジックとしてきれいに書き下して共有化するの是非常に難しいと感じています。FS 期の過程においては、幾つかの構成要素の取捨選択、その構成要素に特化したアルゴリズム開発、さらにはそれを実現するためのパートナーとの出会いなど、上記の「戦略的深化・選択型構成法」ともいべき手法に相当するものと、それとは言い難い“幸運な偶然”に大きく左右されてきたことがあり、それらを敢えて書き加えました。というのも、暗中模索しながら迷路を彷徨し、ゴールに到達した後で、ここが大きな分岐点であったと後付けで理由はつけられるものの、当の本人は彷徨っている最中は夢中で、恥ずかしながら決して理論的な決定をしていたとは、当時を回想しても思えないためです。以上のようなことを、「第2章、紆余曲折の歴史」で述べておきます。

議論2 「死の谷」

コメント (中島 秀之:はこだて未来大学)

「死の谷」という記述が随所に見られますが、死の谷というのは技術的な見通しはあるが、製品化のための他の要件(主にコスト)が満たされない部分を言うのだと思います。原理的に解決しているので基礎研究としては面白くないし、企業としては開発コストがかかりすぎるため、誰もが手を出さない研究開発の狭間です。

回答 (大場 光太郎)

死の谷についてですが、若干、言葉の認識が私の意図しているところと違っているようです。査読委員は「死の谷というのは技術的な見通しはあるが、製品化のための他の要件(主にコスト)が満たされない部分を言うのだと思います。」と書かれているのですが、見通しがついたらそれは死の谷ではないような気がしています。ここでは、「死の谷は、青木が原の樹海のように、彷徨いこんだらゴールの方向が分からなくなり、まさに紆余曲折して出口に達するもの」という意識で死の谷を使っています。

コメント (中島 秀之)

研究の見通しが立たない部分(ブレイクスルーを必要とする場面)は「関門」「難関」とか「ボトルネック」という表現が良いと思います。「死の谷」については Wikipedia「デスバレー (研究開発)」の項目を参照されると良いと思います。

議論3 構成的記述

コメント (中島 秀之)

我々が通常の研究論文を書くとき、それは研究が完成した時点から振り返って、ある意味後付けの道筋を示すものです。つまり、いくつもの選択肢のうち1本を選んでやっとうり着いた結論が、あたかも最初からそうであったように、そこへの道筋を何の迷いもなく選択して辿り着いたように記述します。最終的に選ばれなかった選択肢や失敗の積み重ねは論文には記述されません。最初原稿は、そのような意味で通常論文のように記述されていたと思います。

通常の理論的・分析的論文はそのような構成が良いと考えます。何故なら、理解すべき現象がすでに存在しており、その理解の道筋を示すのが論文の目的ですから。しかしながらシンセシオロジーは構成の学問体系です。解は一つとは限りません。多くの可能な道筋の中から、特定のものを選ぶという選択それ自体が構成学における重要な要素であり、その記述が必須です。2章「紆余曲折の歴史」の冒頭に述べられている内容が重要であると考えています。

誰でも作れて携行できる長さの国家標準器

— ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ共振器の機構設計 —

石川 純

長さの国家標準として用いられるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの発振波長は、レーザ共振器の機械的長さで決まる。従来、機械的安定度の高い共振器を実現するためには特殊な材料や素子を使ったり、周囲環境を厳重に管理したりすることは当然と考えられてきた。しかし、レーザの動作や共振器に要求される性能を詳しく調べた結果、レーザ共振器の機構に要求される機械的特性の多くは、市販の汎用部品で十分実現可能であることが明らかとなった。汎用部品を多用して大幅な価格低下を実現しつつ、発振波長の安定度や周囲環境の変動に対する耐性を大幅に向上させることが可能となり、国家標準器として十分な精度で、かつ保守や移送が容易なものを実現した。この設計にもとづくヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザは、日本の長さの国家標準として長年用いられただけでなく、民間の校正事業者が持つ標準器として、また発展途上国の国家標準器としても用いられている。

キーワード: 機構設計、精密機構、防振機構、長さ標準、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ

Portable national length standards designed and constructed using commercially available parts

– An advanced mechanical design for the iodine stabilized He-Ne laser –

Jun Ishikawa

The iodine stabilized He-Ne laser at 633 nm is widely used as the national length (wavelength) standards in many countries. Since the wavelength emitted by the laser is directly proportional to the cavity length of the laser, extremely high mechanical stability is necessary for the cavity of the iodine stabilized He-Ne laser. Many special parts as well as special materials are adopted to achieve a sufficiently high stability in the conventional iodine stabilized He-Ne lasers while the adoption of such special parts and materials brings difficulty in the maintenance of the lasers. I developed and constructed a new iodine stabilized He-Ne laser with a special mechanical design. The assembly and adjustment of the laser is quite easy. Although most parts and materials of the laser are commercially available, it showed better stability especially against the ambient temperature variation. The new iodine stabilized He-Ne lasers were used for a long time as the national length standards of Japan.

Keywords: Mechanical design, fine mechanism, anti-vibration mechanism, length standard, iodine stabilized He-Ne laser

1 はじめに

長さは物理量のうちでも最も基本的なもので、長さの計測技術は科学や産業の場で高度に発達している。長さの国際単位はメートルであり、その標準としては19世紀の後半からメートル原器が使われてきたが、20世紀に入り1960年にクリプトンの放電ランプが発する橙色の光の波長に変更された。現在の長さの標準は1983年から用いられているもので、真空中を進む光の速度(光速)をもとにして実現するものである^{注1}。具体的には、特定の条件下で発振するレーザの波長を標準とする方法であり、最も広く用いられているものはヨウ素分子の吸収線に発振波長を安定化させたヘリウムネオンレーザである^{注2}。現在我が国を初めてして世界の多くの国が、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ

を国家標準として使っている。このレーザを国家標準とした場合の長さ計測のトレーサビリティ体系を図1に示す。

一般に国家標準には、産業界や学术界で必要とされる計測の精度を十分に上回る最高の精度が求められる。したがって、国家標準の開発過程においては最高の精度を達成するために最新・高度・特殊な技術が投入される。しかし、いったん研究開発が終了し国家標準器が完成すると、次のフェーズで求められるのは、それをもとにしていかに効率的に産業界や学术界に標準を供給して活用するか、またその国家標準器をいかに安定して維持し続けていくかということである。このフェーズに移行するとはしばしば最新・高度・特殊な技術は、高コストや入手の困難性から供給・維持業務において無視できない障害となる。

産業技術総合研究所 デジタルものづくり研究センター 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東
Digital Manufacturing Research Center, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan E-mail: j.ishikawa@aist.go.jp

Original manuscript received May 22, 2009, Revisions received September 24, 2009, Accepted September 25, 2009

筆者が1980年代に旧工業技術院計量研究所（現産業技術総合研究所計測標準研究部門）で精密干渉測定に関する研究を開始した際に、波長標準として使用したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ（これは2009年まで日本の長さの国家標準であった）は、ちょうどこの状態であった。当初は操作性の悪さや特殊部品の供給に問題を感じつつも、最高精度の国家標準器であればやむを得ないことと考えていた。そのようなときに、ニュージーランドの国立標準研究所の研究者がヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの国際比較を行うために、自らが開発したレーザをハンドキャリアで航空機の客室に持ち込み、各国の標準研究所を訪問し、計量研究所にも立ち寄るといった機会があった¹⁾。ラック1台分の制御装置と鋳鉄製のチャンネルベンチ上に設置されたレーザ本体で構成された日本のレーザと比較して、そのコンパクトさと操作性はまさに衝撃的であった。

この出会いをきっかけに、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの汎用化の研究を開始した。ここでいう汎用化とは、まずヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの各部分に要求される性能・特性を詳しく調べて明確にすること、次にその性能・特性を可能な限り一般的な部品を用いて実現することである。本稿では、研究を開始したときの状況、その状況の下で決定した要素技術開発の方針、どのような要素技術を開発したか、要素技術を統合してどのような国家標準を実現したかを述べる。

2 研究の目標

2.1 国家標準器の汎用化

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに限らず、標準器やその構成部品に要求される仕様・性能は一般の製品と比べると特殊なものである。基礎開発過程では必要とされる性能を実現することが最優先課題であるから、特殊かつ高価な材料・部品・加工法が採用されることはやむを得ない。

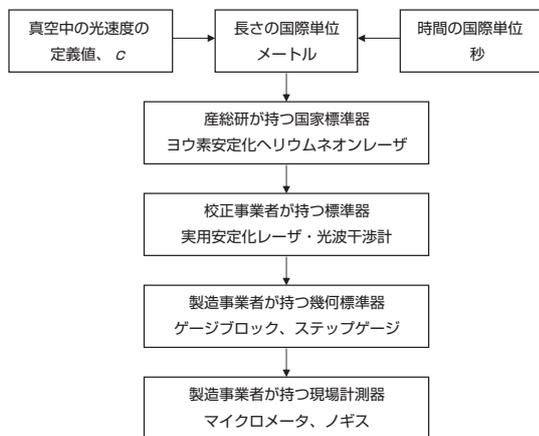


図1 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを国家標準とする長さ計測のトレーサビリティ体系

筆者は当初、標準器を開発する研究者の立場ではなく、1ユーザーとしてヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに関わり、その段階でニュージーランドのレーザと接する機会を得た。その経験から、基礎開発過程は標準器開発の全過程の半分にすぎず、本当の意味で開発を完了するためには引き続き汎用化を進めることが不可欠であると確信した。汎用化とは、先に述べたように必要とされる性能・特性を詳しく調査して明確化して、それを汎用部品を用いて実現する設計手法・技術を確立することである。すなわち、汎用化とは特殊部品（ハードウェア）から設計手法・技術（ソフトウェア）へと転換を図ることであると考えようになった。

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの動作原理は、ヨウ素分子の量子力学的性質を基準とするものである。ヨウ素分子の量子力学的性質は不変であるから、人工物のメートル原器とは異なり、用いるヨウ素の間で原理的な差は存在しない。しかし、ヨウ素分子の量子力学的性質から安定な発振波長を抽出する機構には、人工物であるが故の不完全性が存在し、発振波長の器物による差や不確かさとなって現れる。筆者は、標準の保有・維持とは単にヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ（ハードウェア）を所有することではなく、ヨウ素分子からレーザ波長を実現する技術の保有であると考えている。汎用化には、レーザ波長を実現する技術の精査と深い理解が不可欠である。すなわち、汎用化により得られた技術の保有が、標準の保有・維持に他ならない。

国家標準器を汎用化することによって多くのメリットが得られることが予想されたが、その中で中心的なものは各国の長さ標準の相互信頼性が向上すること、そして我が国の中で長さの精密計測の精度が飛躍的に向上することであった。これらを次の2つの節で述べる。

2.2 国際的な相互信頼性の向上

先進国の一部を除き、ほとんどの国立標準機関では、国家標準器として製品化された市販のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを購入している。この場合、簡単な調整以外の修理等はそのレーザの製造事業者に依存している。つまり、国立標準機関は単なるハードウェアの所有にとどまっていて、標準の維持はその製造事業者に全面的に依存している。製品としての完成度が高く、供給・維持サービスが滞ることがなければ大きな問題が生じることはない。しかしヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザのような国家標準レベルの機器は、高度な技術を必要とすること、需要が極めて限定的であることから、開発・製造・維持を営利事業として継続することは容易ではなく、事業化は実際多くの困難を伴っている。

筆者が考えたヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの汎用

化とは、標準器としての性能・操作性・経済性・維持管理の容易さに優れたレーザーの実現を目標としつつ、同時にレーザーについての詳細な技術情報をユーザーに開示するというものである。波長標準の本質は、ヨウ素分子の普遍的な量子力学的性質から安定なレーザー波長を実現する技術にある。汎用化によりもたらされるこのような技術を国際間で共有できるならば、それは国家間でそれぞれの国家標準が同等であることを認め合うための相互信頼を確立する基礎となる。

2.3 国内トレーサビリティの中流域の高度化

日本国内のトレーサビリティの中流域で波長標準の校正をビジネスとする事業者は現在何社か存在するが、その技術レベルは一部先進国以外の国立標準機関と類似している。したがって汎用化したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを構成事業者の標準器として採用することは、前節で述べたように標準を技術として保有するということを意味する。

ゲージブロックや分銅といった人工物の基準器は、校正を行って値付けすることによりトレーサビリティが確保できる。しかし、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、ヨウ素分子の量子力学的性質から波長を取り出す標準器であり、器差（不確かさ）は波長を取り出す過程の技術に依存する。このような標準においては、波長の値付けに加え、波長を取り出す過程の技術の保有とその評価、いうなれば「技術のトレーサビリティ」が本質的に重要である。技術の汎用化は、校正事業者などのトレーサビリティの中流域においても、ハードウェアの所有から技術の保有への転換を推進し、その信頼性の向上を実現するものである。

3 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの動作原理

ここでヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの動作原理を紹介しておく。図2はヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの構造の概略図である。普通のヘリウムネオンレーザーは、2枚の平面鏡（正確には僅かな凹面）で構成される光共振器の間にヘリウムとネオンの混合ガスが入ったレーザーチューブが置かれる。一方ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーでは、高純度のヨウ素ガスを封入した「ヨウ素セル」が光共振器の中に挿入される。2枚の平面鏡の光学的間隔（光共振器

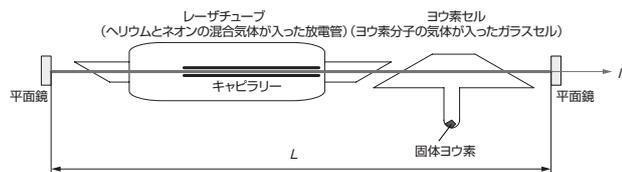


図2 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの概略図

長) L と波長 λ の関係は式 (1) で表すことができる。

$$\lambda = 2L / N \quad (1)$$

ここで N は整数である。 λ は L に比例するが、ヘリウムネオンレーザーチューブの光増幅効果が有効である波長範囲は極めて狭いので、発振波長 λ は限定されたある範囲に留まる。 L を有効波長範囲を超えて変化させると整数 N が一つずつ増加あるいは減少（モードホップ）し、 λ は光増幅効果の有効な一定の範囲内に留まる。今、モードホップが発生しない範囲で L を変化させると、レーザーの出力 I は図3の変化（破線）を示す。 I は λ がモードホップに近い両端では低下し、中央で最大となる。レーザーチューブに加えヨウ素セルが光共振器内に存在すると、ヨウ素分子による光の吸収が I に影響し、出力曲線は図3（実線）のように変化する。レーザー共振器内には高強度（10 mW）の光の定在波が存在するので、ヨウ素分子による光の吸収が飽和する。吸収の飽和により吸収波長中心では吸収が弱まるので、 I が僅かに増加し出力曲線上に小突起が出現する。この現象を利用すると、ヨウ素分子の運動によるドップラー効果の影響を受けない極めて分解能の高い分光（飽和吸収分光：saturated absorption spectroscopy）が実現できる。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、出力曲線に出現する飽和吸収による小突起をマーカーとし、その中心に発振波長を制御・安定化することにより高精度の波長基準を実現する。

出力曲線のピーク位置を検出する方法としては、通常位相敏感検出による微分法が利用される。図4に位相敏感検出による微分の原理を示す。微分を実現するために、 λ に僅かな変調をかける。 λ の変調により I も変動するが、その振幅と位相は出力曲線 $I(\lambda)$ の傾斜で決まる。図に示したように、出力信号と復調信号を掛け合わせて得られた信号から直流成分を取り出すと $I(\lambda)$ の1次微分 $I'(\lambda)$ が得られる。この微分がゼロになるように λ を制御すれば

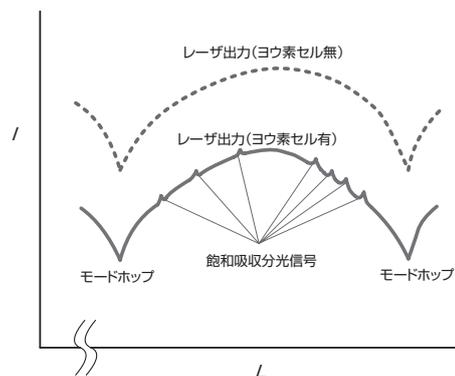


図3 レーザ共振器長 L とレーザー出力 I の関係 (1 縦モード内)

発振波長は $I(\lambda)$ のピークの位置に留まる。しかし、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーでは、ヨウ素分子の飽和吸収による小突起はレーザー出力曲線 $I(\lambda)$ の上に重畳して存在するので、ベースラインの傾斜の影響が避けられない。この影響を除去し純粋にヨウ素分子の飽和吸収の中心を検出するために、実際には3次微分検出が行われる。3次微分の信号 $I'''(\lambda)$ は、位相敏感検出の復調参照信号に変調信号（周波数 f ）の3倍波（周波数 $3f$ ）を用いることで得られる。レーザー出力曲線は飽和吸収による小突起と比較して遙かになだらかなので、3次微分によりその影響は十分除去される。図5はオシロスコープで観察したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの出力の、ヨウ素分子吸収成分付近の3次微分信号 $I'''(\lambda)$ である。この3次微分信号がゼロになるように発振波長が制御され、安定化される。

レーザーの波長 λ は、先に述べたようにモードホップが発生しない範囲では光共振器長 L に比例する。したがって発振波長 λ を制御や変調のために変化させるためには、 L を変化させればよい。例えば3次微分信号検出のための変調として、発振波長 λ には光の周波数に換算して6 MHz p-pの変調が掛けられる。 L が0.3 mの場合、6 MHzの変調に対応する L の変化は3.8 nmである。つまり平面鏡の片方を光軸方向に振幅3.8 nmで振動させれば、3次微分検出に必要な λ の変調が実現できることになる。また、発振波長の制御に用いる3次微分信号（図5）の幅は、光の周波数に換算して5 MHz程度である。振動や衝撃など

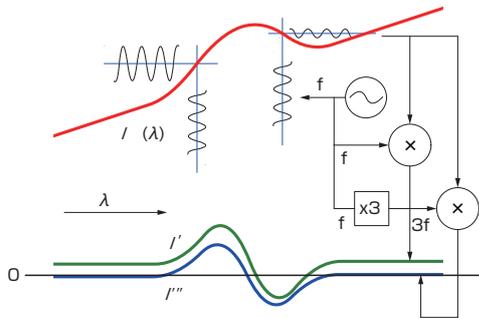


図4 飽和吸収によるレーザー出力 $I(\lambda)$ 上の小突起とその1次微分 I' および3次微分 I''' の信号

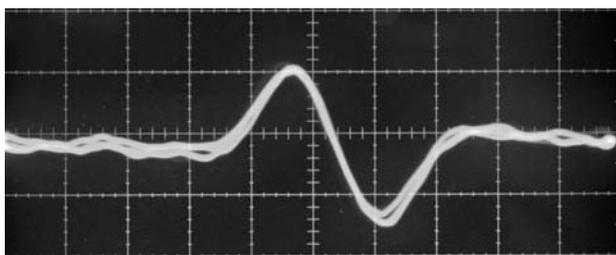


図5 オシロスコープで観察した実際の3次微分信号

により発振波長の変調範囲がこの幅を超えると制御は不能となる（これを周波数ロックが外れるという）。レーザーの波長安定化をうまく行うためには、 L の変動をこの幅の1/10程度、すなわち500 kHz程度に抑えることが必要である。500 kHzのレーザー周波数変動に相当する共振器長 L の変動は0.32 nmである。これは原子の直径に相当する長さである。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを安定に動作させるためには、振動による平面鏡の間隔の変動を原子の直径程度に抑えるという難しい技術が必要になる。

図6は筆者が最初に使用したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの共振器の機構である。平面鏡の1枚はそのままの状態、もう片方はリング状の積層ピエゾアクチュエータに取り付けた状態で、それぞれ精密な角度調整機構付の端板で保持される。2枚の端板は熱膨張がゼロに近い4本のスーパーインバー製のスペーサロッドで向かい合わせに固定される。共振器の中にはレーザーチューブとヨウ素セルをセットし、実際のオペレーションに際しては、防音ケースをかぶせ空気バネで支えた防振定盤上に設置することにより、振動の影響を上記の500 kHzの条件内に抑えた。図6において積層リングピエゾアクチュエータは1個であるが、変調信号と制御信号の両方をこのピエゾアクチュエータに印加し、変調と制御を同時に行った。

4 目標達成のための道筋

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの各機構に要求される性能・特性には、前章で述べたようになり特殊なものが多い。特殊な要求に対しては、汎用部品を普通に使ったのでは対応できない。特殊な性能・特性を、汎用部品を用いて実現するためには新しい特殊な使用法を考案・採用することが必要となる。特殊な使用法といっても、危険を伴うもの、寿命の著しい短縮を伴うものなど無理のあるものは採用できない。つまり、今まで使われたことのない利用法で理にかなったもの、さらに必要とされる性能・特性を実現できるものを考案・実現することにより、汎用部品の採用範囲を広げることができる。

一例として、制御装置の新しいバイアス調整回路について

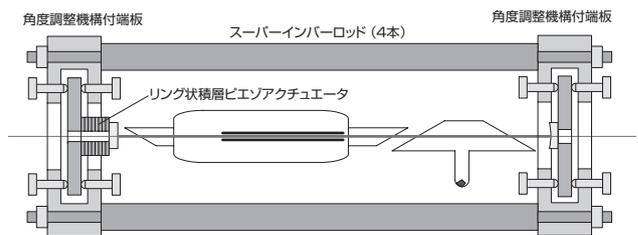


図6 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの共振器機構（従来型）

て述べる。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、吸収線を探索・選択するためにピエゾアクチュエータへの印加電圧を滑らかに変動させる必要がある。従来はこの変動をポテンシオメータを使って行っていたが、全行程にわたって十分な電圧分解能を有するポテンシオメータの製品は存在しない。したがって、変動範囲は一部の狭い電圧範囲に限定せざるを得ず操作性が悪くなっていた。図7は、ポテンシオメータを用いる代わりにDCギアモータと積分回路を用いて、極めて高い電圧分解能を実現した電圧調整回路である。DCギアモータは、本来、入力電圧に比例した回転数で回転するアクチュエータであるが、外力で回転させた場合には発電機として動作し角速度 ($2\pi \times$ 回転数) に比例した電圧を発生する。この発生電圧を積分回路に入力させると、その出力はギアモータの回転角に比例した電圧となる。回転角と積分回路出力電圧の比例定数は、積分回路の入力抵抗とコンデンサを選択することにより任意に設定できる。さらにギアモータは、ポテンシオメータと異なり制限なく回転させることができるので、全行程にわたる電圧調整を、例えば100回以上の回転で行うような設定も可能である。

しかし、このような汎用部品を用いて特殊機能を実現させることは、計画的・系統的に進めたわけではない。レーザの性能に直結する部分、安定した供給・維持の障害となる部分の開発が優先されることはいうまでもないが、実際にアイデアが浮かび問題が解決される順序は、必ずしも重要度とは一致しなかった。したがって、本開発を進めるに際して、当初計画的・系統的なシナリオというもの存在しなかった。一方、このような汎用化がいくつか成功するとボトルネックを正確に把握できるようになり、問題の重要度を認識して頭の片隅に置いておくことで、他の業務を遂行するかたわらでふと解決策が浮かんだときに改良・開発を進められるようになった。このような状況で、およそ10年で一通りの汎用化が完成した。

上述の電圧調整回路の例は、操作性向上に関するものであるが、汎用品を利用した新機構により基本性能（不確かさ・安定度）の向上を実現することもできた。以下の章では、レーザの基本性能を決定する光共振器長の制御機

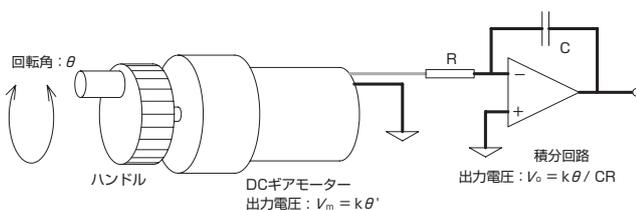


図7 DCギアモータと積分回路による広範囲の電圧微調整回路

表1 国家標準としてのヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの動作条件（国際度量衡委員会の勧告）

・ヨウ素セルの壁面の温度	(25±5)	℃
・ヨウ素セルコールドフィンガーの温度	(15±0.2)	℃
・周波数変調幅 (P-P)	(6±0.3)	MHz
・一方向共振器内光強度	(10±5)	mW
*ただし光周波数の共振器内光強度シフト係数は1.4 kHz/mW 以下であること		

構に関して述べる。

5 光共振器長制御機構の汎用化

レーザの共振器長制御機構は、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの基本性能を決定する最も重要な部分である。従来は超低膨張材料やピエゾアクチュエータといった特殊部品が多用されていた。共振器長制御機構は、波長を制御するための直進移動機構と、3次微分信号を得るための変調機構があるが、以下に両機構の汎用化について述べる。また、安定した共振器長制御を実現する上で重要な防振機構についても述べる。

5.1 平面鏡の直進移動機構

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの動作条件は、国際度量衡委員会 (CIPM) による勧告としてすでにまとめられている^[2]。表1に国際度量衡委員会が勧告したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの動作条件を示す。この勧告で規定されている4つの動作条件のうち共振器機構に直接関係するのは、先に述べた変調の深さ（光の周波数換算で 6 ± 0.3 MHz）であるが、共振器内の一方向光強度 (10 ± 5 mW) は平面鏡角度の影響を受けるので、共振器機構の問題ともいえる。従来型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、共振器長をリング状の積層ピエゾアクチュエータで制御していた。ところがピエゾ素子は必ずしも均一な材質でできているわけではないので、一定の電圧を印加しても伸縮量が場所ごとに異なるという不均一性が生じ、これが原因となって平面鏡の傾き角がわずかに変化するという現象が起きた。平面鏡の傾き角が変わると、光共振器の損失が変化するのでレーザの出力も変化する。レーザ出力は、共振器内の一方向光強度とレーザミラー透過率の積で決まる。表1からその変動の許容範囲は、規定出力（共振器内一方向光強度 10 mW）の $\pm 50\%$ と大きいため、ピエゾアクチュエータの傾き角の変動による出力変化は、通常はほとんどの範囲に収まる。

しかし、実際の実験から、発振波長の再現性と安定性に優れたヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを実現するためには、制御に伴う平面鏡の傾き角の変動を可能な限り小さくすることが極めて重要であることが分かってきた。この点で、国際度量衡委員会の勧告は発振波長に影響する重

要な条件が欠落しているといえる。筆者は以前に、発振波長 λ の平面鏡の傾き角に対する依存性を評価するために、レーザパワー I をほぼ一定に保ちながら平面鏡の角度を変えた測定を行った^[3]。その結果、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの全ての動作パラメータを国際度量衡委員会の勧告の範囲内に設定しても、発振波長 λ は共振器の調整（平面鏡の傾き）によっては勧告する不確かさ（周波数換算で 10 kHz）上変動することを実験的に確認した。このようにヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの発振波長の安定化のためには、平面鏡の移動機構には極めて高い直進性が要求されることが分かった。共振器長の制御に使用した piezoアクチュエータは、剛性が高く微小変位が可能という優れた特徴をもつが、上記のように直進性に問題があり従来型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの精度のボトルネックとなっていた。汎用化を進めるためには、直進性の優れた移動機構の開発が不可欠であることが分かり、新型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは高剛性で微小変位に優れた piezoアクチュエータと直進性に優れたガイド機構を組み合わせるという手法を採用した。

一般に機械的な直進ガイド機構は、平行バネ機構、摺動機構、転がり機構の三つに分類できる。piezoアクチュエータと組み合わせる直進ガイド機構として実績が多いのは、平行バネ機構である。平行バネ機構は、可動範囲は限られるが、遊び・摩擦・バックラッシュが存在しないので特に精密な位置制御に適していると考えられる。しかしながら、高度な直進性を実現するためには平行バネの構造をある程度大きくしなければならないこと、また系の剛性を高めると重量も増大すること、さらに高価であるという問題がある。摺動機構は原理的に遊びがあるので、本用途には適用できない。開発に際して、piezoアクチュエータ用のガイドとしての実績はほとんどないが、安価で軽量の転がり機構の採用を試みた。

5.1.1 ボールスプラインによる直進移動機構

転がり機構は、有限移動距離のもの、無限移動距離のものが存在する。有限移動距離転がり機構は、図 8a に示したように、対向する直線ガイドの間にボールやローラ等の回転体を挟んだものである。下のガイドを固定して上の

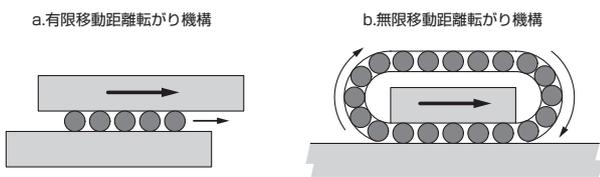


図 8 有限移動距離転がり機構 (a) と無限移動距離転がり機構 (b)

ガイドを移動させると、挟まれた回転体は上ガイドの半分だけ移動する。ガイドの移動量を確保するために、回転体はガイド全長の 50 ~ 70 % の範囲に配置される。有限移動距離転がり機構には、移動に伴い支点（回転体の位置）も移動していくという問題がある。転がり機構の剛性や荷重にも依存するが、支点位置の移動は避けられない姿勢変化の原因となる。

無限移動距離転がり機構は図 8b に示したように、上のガイドの移動に伴い後部から排出された回転体を、前部に戻し上下のガイド間に挿入するという機構を有するものである。長い移動量を容易に実現できるのに加え、支点の移動が小さい（回転体の間隔以下となる）ので、姿勢変化の少ない優れた機構とされている。

直進移動転がり機構として最初に試用したのは、円形中空軸構造をもつボールスプライン（THK 株式会社：LF13）^[4]である。ボールスプラインは無限移動距離転がり機構の一種で、高度な直進性が期待できることと、形状がリング状積層 piezoアクチュエータに近いのでレーザ共振器へ組み込みやすいことから採用を決定した。採用したボールスプラインのスプライン軸直径は 13 mm、中心には直径 5 mm の穴があり、レーザ出力光はここを通る。図 9 はボールスプラインを組み込んだ平面鏡直進移動機構である。平面鏡はスプライン軸端部にセットされ、スプライン軸は制御アーム内のプリロードスプリングにより前方に引っ張り出された状態である。平面鏡の調整機構をレーザ本体にセットすると、本体内のリニア piezoアクチュエータの先端がスプライン軸制御アームに接触し、スプライン軸は半分程度押し込まれた状態となる。リニア piezoアクチュエータに制御電圧を印加し、その伸縮によりミラー位置の制御を行った。

転がり機構は摺動機構と異なり、予圧をかけて遊びを取り除くことができる。試用したボールスプラインも本体・ボール・スプライン軸の隙間は -6 ~ -2 μm に調整され、ガタはない。しかし、レーザの発振中にスプライン軸を横方向に押しミラーの傾きが原因と考えられるレーザパワーの変動が観測された。ボールスプライン機構の回転モーメントに

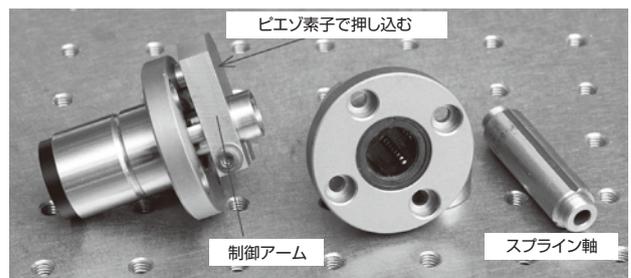


図 9 ボールスプラインを組み込んだ平面鏡直進移動機構

対する剛性は、明らかに不足していることが分かった。無限ストロークの転がり機構では、ボールは循環する。本体スプライン軸の間隔は仕様によればボール径より小さい（ $-6 \sim -2 \mu\text{m}$ ）ので、ボールがこの隙間に進入すると大きな抵抗力が発生し、スムーズな動きを妨げることが考えられた。しかしボールスプラインではボールの出入に伴う抵抗力変化はほとんど検知されない。つまり、両端付近ではボール進入時の抵抗力発生を防ぐために間隔が広がってあって、実際に予圧がかかっているのは中央部に限定されるものと推測される。その結果シフトに対する剛性は確保できててもティルトに対する剛性は不十分となる。メーカーの説明でも、モーメントのかかる場所では、2個直列に使用することが推奨されている。

5.1.2 クロスローラガイドによる直進移動機構

有限移動距離転がり機構では、支点位置の移動に伴う姿勢変化が避けられないことは先に述べた。この姿勢変化は、原理的にストローク全域にわたり徐々に進行していくものと考えられる。一方でレーザーの波長安定化に必要な移動量は、熱膨張によるレーザー共振器長の伸縮を補正することが目的なので、高々 0.05 mm 程度である。これは代表的な有限移動距離転がり機構であるクロスローラガイド¹⁵⁾、その小型のものに対しても、最大ストロークの $1/100$ 以下である。クロスローラガイドのストローク全域での姿勢変化は、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー用直進機構に要求される性能を満足しないとしても、 $1/100$ ストロークの移動量に対する姿勢変化は十分に小さいのではないかと、ということが期待できる。さらに、有限移動距離転がり機構では、回転体のガイド間への出入りがないので、無限移動距離転がり機構のようにガイド両端で間隔を広げる必要はない。したがって、ティルトに対する高剛性を有することも期待できる。共振器長制御の直進移動機構の使用条件・必要とされる性能と、その条件で使用したときの直進移動機構の

性能を熟慮した結果、クロスローラガイドが最適なメカニズムとして浮上してきた。

クロスローラガイドの形状は移動ステージに適しており、円筒形状メカニズムへの対応は難しい。クロスローラガイドの採用に伴い、レーザー共振器構造を端板とロッドといった従来の構造から図 10 に示したような板状の部材を組み合わせた箱状筐体へと大幅に変更した。さらに、平面鏡の移動量制御と直進性保持を別機構に分離したという特徴を活かし、図 11 に示したようにリニアピエゾアクチュエータをスーパーインバーロッドに固定し、さらにスーパーインバーロッドの反対側を、他方の平面鏡面の位置で箱形筐体に固定するという構造を考案した。この構造により、共振器長はピエゾアクチュエータとスーパーインバーロッドで決定されるので、箱形筐体板材の熱膨張を考慮する必要はなくなり、アルミニウムの採用が可能となった。アルミニウムは熱膨張率が大きいので、従来レーザー共振器筐体に用いられることはなかった。しかし熱伝導率も高いので、温度勾配に起因する熱歪みは発生しにくいという優れた特徴を持つ。スーパーインバーロッドと比較するとアルミニウムの熱膨張係数は 50 倍にもなるが、熱伝導係数も 20 倍近くあるので熱歪みの影響は 3 倍以内に収まると考えた。

クロスローラガイド、アルミニウム箱形筐体、リニアピエゾアクチュエータ+スーパーインバーロッドによる共振器長の制御機構を有する新型レーザーは、平面鏡の角度変化が極めて少なく、経時変化・環境依存性の小さい安定動作を実現した。現在、日本の国家標準器として保有している 5 台のレーザー（本新型レーザー）では適切な調整を行うことにより、それぞれの間での発振波長の差が光の周波数換算で $\pm 3 \text{ kHz}$ と、国際度量衡委員会の勧告の不確かさ $\pm 10 \text{ kHz}$ の $1/3$ に収まっている。また周囲温度の変化に対しても安定性が高く、 $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ という大幅な温度変動に対して

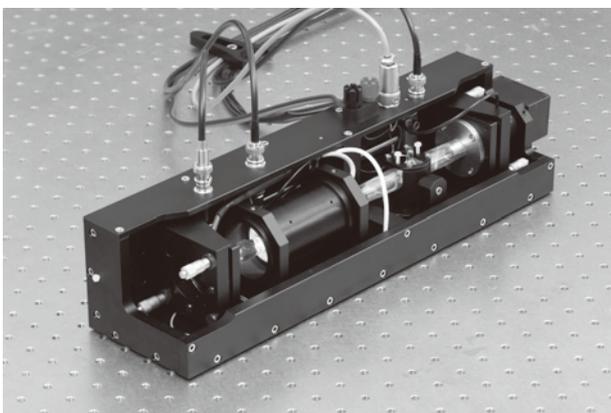


図 10 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの箱形共振器機構（新型）

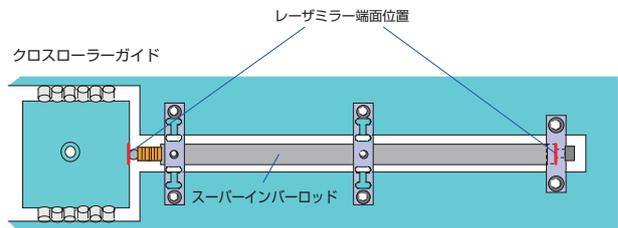


図 11 共振器長の制御機構

も、発振波長の変動は光の周波数換算で ± 5 kHz（相対的には 1×10^{-11} ）の偏差に収まるという優れた性能を有している。

5.2 レーザ共振器の変調機構

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、ヨウ素分子による飽和吸収信号を検出するために、発振波長に光の周波数換算で 6 ± 0.3 MHzの変調をかけている。この変調は、片方の平面鏡を光軸方向に正弦波で振動させることで実現する。共振器長が30 cmの場合、その振幅は (3.81 ± 0.19) nmとなる。また、先に述べたように、3次微分による制御信号を得るために第3高調波検出を行っている。もし平面鏡の振動に第3高調波が含まれると、3次微分信号に1次微分信号成分が混入し、結果として発振波長がシフトする。したがって、この平面鏡の振動は、高調波歪の極めて少ない純粋な基本波であることが求められる。さらに、位相敏感検出の感度を一定に保つため、駆動正弦波信号と振動の位相関係は変化しないことが求められる。このように、波長変調用のアクチュエータには、極めて高レベルの振幅安定性・超低歪・位相安定性が要求される。

従来型のレーザを含む多くのヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、変調にも共振器長の制御用と同じ構造を持つリング状積層ピエゾアクチュエータを用いる。従来型レーザでは、1個のリング状積層ピエゾアクチュエータを、変調・制御の両目的に兼用した。

積層構造のピエゾアクチュエータは、本来制御用（DC動作）であり、振動（AC動作）は想定されていない。特に問題となるのは、振動させたときの耐久性である。従来型レーザでは、変調のための振動が原因と考えられるピエゾ素子の接着面剥離が頻発した。ひとたび剥離が起ると修理不能で交換しなければならないが、当時使用していた米国製リング状積層ピエゾアクチュエータは、高価な上に供給が不安定であり（軍用に優先的に供給されていたため）、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを使用する上で大きな障害となっていた。

5.2.1 単層ピエゾ素子を用いた変調機構

剥離故障したリング状積層ピエゾアクチュエータは廃棄するしかない。あるとき、故障の状況を把握するために廃棄の前に分解を試みた。リング状積層ピエゾアクチュエータをアセトンに浸しておくと、剥離面以外の接着面も全て剥がれ容易に分解することができた。このリング状積層ピエゾアクチュエータは、両面に電極として金属が蒸着されたリング状のピエゾ素子を10枚重ねたものであることが判明した。アクチュエータのストロークは1000 Vの印加電圧に対して $10 \mu\text{m}$ であるので、素子1枚はその $1/10$ 、すなわち $1 \mu\text{m}$ である。

この分解されたアクチュエータを前にして、素子1枚を用いた単層の変調用アクチュエータの開発を思いついた。単層であれば剥離故障はない。変調に必要な振幅は先に述べたようにおよそ4 nmであり、単層素子のこの変位に相当する印加電圧は4 Vと、通常のおペンプを使用した回路で扱いやすい電圧となる。さらに剛性も大幅に増加するので動作の安定性向上が期待できる。

図12は最初に試作した変調用アクチュエータの構造である。2枚の真鍮固定リングネジの間に、リング状ピエゾ素子、アルミニウム製の平面鏡保持具、O-リングをケース内で挟んで締め付けるという単純な構造で、電圧は平面鏡保持具と固定リングの間に印加する。しかしながら、この機構をヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに組み込み、波長安定化を試みたところ、勧告された不確かさの10倍を超える大幅な波長シフトが観測された。3次微分信号のベースラインが目視でも判別できるほど傾いており、1次微分信号の混入、すなわち変調機構における3次高調波歪の著しい発生を伴うことが判明した。この構造は、静的な動作においては柔らかいO-リングが変形し、期待どおりの動作をする。しかし、振動動作では作用・反作用により、ピエゾを支えている真鍮固定リングも振動する。真鍮固定リングはネジ山で本体と接触している。通常のネジ同士の接触点は部分的であり、小さい変位に対する剛性が低く、非線形性も強いものと考えられる。ネジが直接物体を支えるような構造が歪発生の原因であると推測した。

5.2.2 変調機構の動的特性の改善

変調機構の動的特性を改善し高調波歪を低減するためには、機械的接触は丁寧な仕上げの平面同士として、剛性が高く安定した接触を確保することが必須である。さらに振動する平面鏡を支える保持具は、できるだけ動かないような構造とすることも重要である。図13はこの2点を考慮

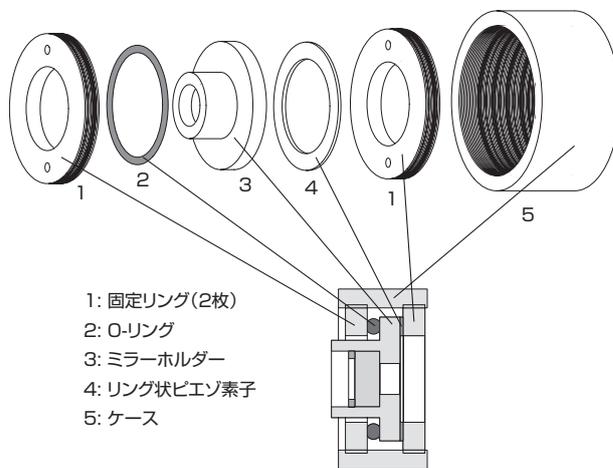


図12 変調用アクチュエータ（改良前、高調波歪が大きい）

し、高調波歪の低減と動作安定性の向上を図った変調用アクチュエータである。図12の変調用アクチュエータと大きく異なる点は、真鍮の固定台の質量である。この真鍮の固定台の質量はおよそ200gであり、平面鏡とその保持具をあわせた振動部質量4gのおよそ50倍である。この大きな質量比により、リング状ピエゾ素子が高速で伸縮しても平面鏡/平面鏡保持具のみが動き、真鍮の固定台はほとんど動かない。真鍮固定台・リング状ピエゾ素子・平面鏡保持具・平面鏡の間の接触面の仕上げには特に留意し、仕上げはとも擦り研磨を行って接触面積を増大させ、高調波歪を低減させた。さらに、組立前に真鍮固定台にリング状ピエゾ素子・平面鏡保持具を乗せる。接触面にアルコールを垂らしてから真鍮固定台を逆さにして、リング状ピエゾ素子・平面鏡保持具が貼り付いて落下しないことで、良好な平面接触を確認した。

平面鏡保持具は、リン青銅の薄肉円筒バネと真鍮丸ナットにより予圧が与えられ、リング状ピエゾ素子、真鍮固定台に密着させた。真鍮固定台とリン青銅薄肉円筒バネ・真鍮丸ナットはナイロンインシュレータにより電氣的に絶縁した。ピエゾアクチュエータの駆動電圧は、真鍮丸ナット(+)と真鍮固定台(G)間に印加した。

ナイロンインシュレータは、設計時には電氣的絶縁を目的としていたが、それ以外にも重要な働きのあることが明らかとなった。ナイロンインシュレータに替わる絶縁部品として、絶縁アルマイトコーティングしたアルミニウムインシュレータを試用したときに、絶縁機能には問題はないが変調機構の動作が不安定になった(著しい振幅の経時変化が起きた)。原因は、平面鏡保持具の振動がリン青銅薄肉円筒バネ、非線形性の強いねじ接触を経て真鍮丸ナットに伝わり、複雑に共振したことにある。柔らかいナイロンインシュ

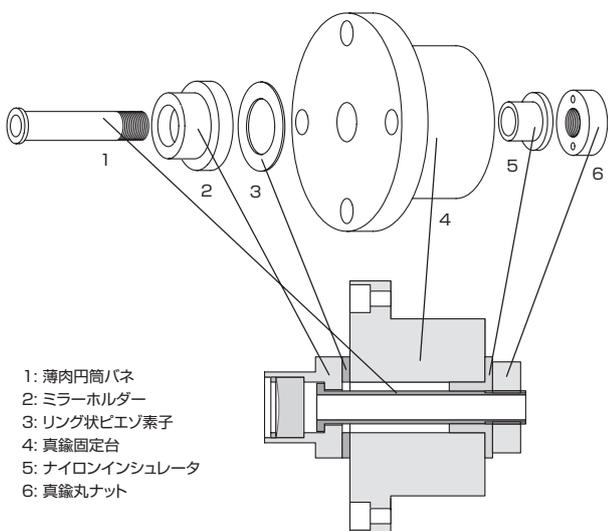


図13 変調用アクチュエータ(改良後、低高調波歪構造)

レータはダンパーとして働き、この共振を大幅に低減する重要な機能を担っていることが判明した。

5.3 防振機構

先に述べたように、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの安定動作を実現するためには、外部環境の振動・音響によるレーザ共振器長変動を、原子の直径(0.3 nm)以下に抑えなければならない。また、防振機構の開発の前提として、このような共振器長の微小な変動を検知・評価する手法の確立も必要である。以下に、共振器長の微小変動、および防振機構について簡潔に紹介する。

発振波長の安定化のためにレーザ出力光の強度変動を検出しているが、これを増幅してスピーカーに接続する。すると周波数 f (3 kHz)の波長変調(光の周波数換算で6 MHz)がもたらす強度変化が音として聞こえる。これは波長変調による波長の変化を、レーザ波長-出力曲線 $I(\lambda)$ で強度変化に変換して音として聞いているのであるが、同様に、外部振動による共振器長変動も波長変動をもたらす、それを音として聞くことができる。音の振幅は波長変化、すなわち共振器長の変化に比例するので、外部振動による音を波長変調による音の振幅の1/10(強度では1/100、-20 dB)に抑制できれば、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの安定動作が実現できる。ハニカム構造の光学定盤上(表面は厚さ5 mmのステンレス板)にヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの金属筐体を直に置き、定盤を貨幣等で引っかく・軽くたたくなどしたときにスピーカーから聞こえる音は、ちょうど人間が耳を定盤に押し当てたときに聞こえる音と類似している。

防振ゴム等の性能評価を行うために、厚さ1 cmのアルミニウム板(レーザ筐体の底板と同等)を用意した。この板を定盤上に置き、耳を押し当てながら定盤を引っかく・軽くたたくなどしたときの音の聞こえを確認した。次に、評価対象の防振ゴムを金属板の下に置き、音がどの程度低減したかを確認した。

新型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの箱形筐体の底面には、この簡単な試験で音の遮蔽に優れた効果を示した直径14 mmの半球型ポリウレタン製のゴム足を3個配置した(図14)。筐体に直置にすると定盤上で光軸調整等の操作を行うと振動の影響で波長安定化のロックが外れ

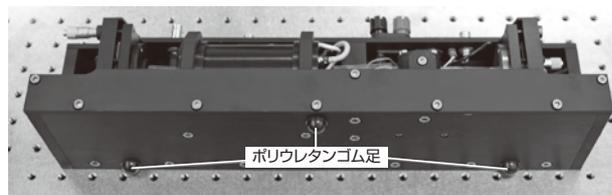


図14 サブナノメートル防振機構(ゴム足)

ていたが、ゴム足の防振効果は大きく、定盤上での通常の操作が波長安定化に及ぼす影響はほとんど無くなった。

6 開発した国家標準器の性能とその活用

新型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、産総研で日本の国家標準として、また波長標準の供給を行う校正事業者でその標準器として用いられている。このレーザーは、今まで紹介したような独自の新しい機構を有するものであるが、その最大の特徴は製品としてではなく、組立キットとして供給される点にある。最初に述べたように、ヨウ素分子吸収線の量子力学的性質を利用した標準において重要なのは、その性質から標準（波長）を取り出す技術である。この考え方を実践するために、筆者は新しいヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの詳細な仕様・設計図をまとめ、計量標準モノグラフとして刊行した⁶⁾。このモノグラフに基づけば、国際度量衡委員会の勧告を満足するレーザーの製作が可能である。しかし、汎用品がほとんどとはいえ、レーザー製作に必要な部品類を洩れなく調達するのは大きな負担である。そこで、必要な部品類をとりまとめてレーザー組立キットとして希望する事業者に有償頒布した。キットであるから、各部品類に関して仕様を満足するかは保証の範囲となるが、最終的な標準器としての性能（絶対波長やその不確かさ）は、所有者の技術に依存する。必要に応じて、組立の技術指導は行うが、キットで頒布することにより、レーザーヘッド・制御系（制御系はほぼ完成したかたちで供給される）一式でおよそ200万円という、国家標準器としては破格の低価格を実現した。

このような、波長標準を技術として伝える試みは、海外に対しても進めている。産総研ではタイ王国の国立標準研究所（NIMT）設立援助のプロジェクトを進めてきた。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーキットの1号機はこのプロジェクトを通して、NIMTに収められたものである。現在、NIMTを拠点として、ASEAN諸国の国立標準研究所に対して同様の技術供与を行うことを計画している。

本レーザーは国際比較にも用いたが、国際度量衡委員会の勧告に従った標準器として今までのレーザーにない優れた特徴を有することも分かってきた。前章の国際度量衡委員会が勧告する条件に、ヨウ素セルの管壁の温度を 25 ± 5 ℃に保つという規定がある。この温度は周囲温度とほぼ同じとなるので、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーも 25 ± 5 ℃の温度範囲で動作できるはずである。新しいレーザーはこの条件を満たす。 25 ± 5 ℃の範囲で波長安定化を継続可能であり、波長変動も国際度量衡委員会勧告の不確かさの半分以下（光の周波数換算で5 kHz以下）という良好な結果であった。一方、従来型レーザーを含めた多くのレー

ザーは、国際度量衡委員会が勧告する不確かさを満足するためには、周囲温度のより厳密な安定化を必要とする。多くのレーザーで用いられているように、リング状積層ピエゾアクチュエータの伸縮に伴う平面鏡の傾き角の変化は、発振波長の変動要因となる。傾き角の変化を防ぐためには、レーザー本体への超低膨張材料の採用に加え、厳密な周囲温度安定化を行い、アクチュエータの伸縮を最小限に留めることが必要となる。以前、各国の国家標準であるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを1箇所に集めて国際比較を行ったことがある。その最中にレーザーを設置した部屋の温度が、空調装置の不調からたまたま2℃程度変動したことがあった。そのとき多くのレーザーで安定化のロックが外れて動作不能に陥ったのに対し、新型レーザーでは安定化のロックが外れることなく動作し続け、その性能の高さの一端を証明することになった。

7 おわりに

筆者は最初に、ユーザーとしてヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーと関わるようになった。本来の研究テーマであった「精密干渉測定装置の開発」を円滑に進める上で、波長の基準光源であるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの使い勝手と信頼性を向上させることは潜在的な悲願であった。ニュージーランドの可搬型レーザーを見たことでその悲願が顕在化し、研究を開始したことは先に述べた。しかし、もしユーザーとしての立場ではなく、従来型レーザーの開発者としての立場であったならば、おそらく「国家標準器なのだからそこまで使い勝手にこだわる必要はない。それよりも、より精度の高い次世代標準の開発こそ重要だ」と判断していたと思う。

研究の初期に、汎用部品を従来にない特殊な使用方法で活用することにより、特殊な機能を実現するという研究の方向性を決定づけたのは、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの改良が正規のテーマではなかったことが最大の理由と考える。研究の初期段階において、極めて低予算であったこと、研究の期限と成果に対する義務が課せられていなかったことから、ある意味大胆な試みを行えたことが、研究の方向性を決定づけた。もし、最初から正規のテーマとして研究計画を作成し、予算を要求したのであれば、特殊部品や特殊材料を常識的に使用するという無難な選択を行っていたことは間違いない。

開発したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを、組立キットとして有償頒布することにより、破格の低価格を実現したことは前章で述べた。しかし、組立キットによる本当の意義は、ユーザーのモチベーションの向上にある。レーザーの組立は、研修という形で行っているが、多くの参加者は

時間を忘れて作業に没頭した。筆者は、研修を終えた参加者が、自ら組立調整を行ったヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを持ち帰る際に「このレーザは単なるモノであって標準ではありません。標準とは、あなたの身につけた技術と、標準を維持するという意志に他なりません」と伝えている。

注1) 現在の長さの国際単位はメートルであり、光が真空中を1/299 792 458秒間に進む距離を1メートルとしている。

注2) 現在の長さの一次標準としては、ヨウ素分子の特定の吸収線に発振周波数（波長）を安定化したヘリウムネオンレーザが多用されており、その周波数 $\nu=473\ 612\ 353\ 604\ \text{kHz}$ が勧告されている。波長 λ は光速 c (299 792 458 m/s) を ν で割ることにより算出される。 $\lambda = c/\nu$ 。

参考文献

- [1] R. B. Hurst, N. Brown, V. D. Dandawate, G. R. Hanes, J. Helmcke, H. P. Layer, L. Zhongyou, W. R. C. Rowley, T. Sakurai and M. S. Chung: International intercomparison of iodine-stabilized helium-neon lasers at 633 nm involving ten standards laboratories, *Metrologia*, 24 (1), 39-44 (1987).
- [2] T. J. Quinn: Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001), *Metrologia*, 40 (2), 103-133 (2003).
- [3] 石川 純: 633 nmレーザ波長校正と不確かさ, *産総研計量標準報告*, 4 (1), 71-77 (2005).
- [4] ボールスプラインシリーズ(カタログ), THK株式会社, 東京 (2008).
https://tech.thk.com/upload/catalog_claim/pdf/381_ball spline.pdf
- [5] *THK総合カタログ*, A8,B8, THK株式会社, 東京 (2008).
- [6] 石川 純: CIPM勧告準拠633nmヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの設計と製作, *産総研計量標準モノグラフ*, 2 (2003).

執筆者略歴

石川 純 (いしかわ じゅん)

1982年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。1983年通商産業省工業技術院計量研究所入所。精密干渉計開発の研究に従事し、波長基準光源としてのヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに接する。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門。2006年デジタルものづくり研究センターに異動、以後製造現場における熟練技能可視化の研究に携わる。現在、同センター計測分析技術研究チーム長。2006年市村学術賞（(財)新技術開発財団）。2007年文部科学大臣表彰。



査読者との議論

議論1 研究目標とシナリオの追記

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

シンセシオロジー誌としては「研究の目標」と「目標の達成のためのシナリオ」を追加して書いていただきたく思います。

回答 (石川 純)

ご指摘のとおりと考え、「研究の目標」と「目標の達成のためのシ

ナリオ」について新しい章を追加・記載しました。ただ、本研究は当初シナリオ（計画）なしに開始したという経緯があり、これに関しては事実に沿って当時の状況を率直に記載しました。

議論2 文献の「産総研計量標準モノグラフ」の活用

質問・コメント (小野 晃)

文献6は本技術の普及という意味では大変重要なものと思います。とかくオリジナルな技術のさわりだけを研究論文に記載しておしまいとする傾向が強い中で、機器を再現的に製作するための必要かつ十分な情報をすべて開示するということは、今までなかったように思います。文献6を書くことになった著者の動機と、その活用方法はどのようなものでしょうか。

回答 (石川 純)

人工物であるメートル原器とは異なり、ヨウ素分子の量子力学的性質を利用するレーザ波長標準において、その本質は、量子力学的性質から光波長を取り出すプロセスの技術に存在します。したがって、標準の維持・継承とは技術の維持・継承に他なりません。産総研計量標準モノグラフは、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに関する技術の維持・継承を目的に執筆しました。本論文においても、上記の考え方を反映するように改訂しました。

議論3 標準器の質量と大きさ

質問 (小野 晃)

国家標準器を航空機内に持ち込んで移送できるということは、国際比較をスムーズに行うために極めて有効と思いますが、開発した新型レーザの質量、大きさはどの程度ですか。これは航空機の客室に持ち込める重さ、大きさとして十分なものでしょうか。

回答 (石川 純)

レーザ本体は、長さ:420 mm、幅:105 mm、高さ:95 mm、重量:5.3 kgです。制御装置は、奥行:400 mm、幅:420mm、高さ:100 mm、重量:7.5 kgです。

航空機に搭乗する場合は、レーザ本体は手荷物としてキャビンに持ち込み、制御装置は預け荷物としました。小型軽量化のみに注力すれば、より小さく軽いレーザは実現できますが、製造・組立・調整等の容易性に重点を置き、この大きさに留めました。

現時点における航空機内持ち込み最大の障害は、9.11以降大幅に強化された機内持ち込みの規制です。波長安定化レーザという一般になじみのない特殊機器のため、その説明には大変苦勞します。

議論4 発振波長の不確かさ

質問 (小野 晃)

新型レーザの発振波長の不確かさはどの程度と評価していますか。それは国際度量衡委員会が勧告した不確かさの値よりも小さいのではないかと想像しますが、どうでしょうか。可能であれば不確かさの要因とともに、バジェット表で示していただけませんか。

回答 (石川 純)

表 a に国際度量衡委員会が勧告したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ不確かさのバジェット表を示します。筆者は、表に示された不確かさのうち、共振器内一方向光強度に起因する不確かさ見積は大きすぎると考えています。しかしこれは、制御機構の直進性に問題のある従来のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、分離して評価することも難しかったガスレンズ効果・ガスプリズム効果の影響を含めたものであると筆者は考えています。国際度量衡局で長年ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの研究に携わってきた研究者も、そのことを認めていました。

新型レーザは制御機構の直進性が非常に優れているため、ガスレンズ効果・ガスプリズム効果の分離が可能であり、不確かさバジェットは表 b のようになります。ガスレンズ効果・ガスプリズム効果による

不確かさを軽減するためには、レーザチューブ放電管の幾何形状を厳密に製作する必要があり、そのようなレーザチューブは現実的には入手不可能です。ヨウ素純度の影響に関しては、ヨウ素セル充填プロセスの改良により、ビート周波数計測不確かさについても計測技術の改良により小さくすることができました。

表a 国際度量衡委員会が勧告するヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ不確かさ

パラメータ	推奨値	許容範囲	比例係数	不確かさ (kHz)
ヨウ素セル関連				
壁面温度	25 °C	5 °C	0.5 kHz/°C	2.5
コールドフィンガー温度	15 °C	0.2°C	-15 kHz/°C	3.0
ヨウ素純度の影響				5.0
周波数変調深さ	6 MHz	0.3 MHz	-10 kHz/MHz	3.0
共振器内一方向光強度	10 mW	5 mW	<1.0 kHz/mW	5.0
ビート周波数計測不確かさ				5.0
合成標準不確かさ				10.0

表b 新型ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ不確かさ

パラメータ	推奨値	許容範囲	比例係数	不確かさ (kHz)
ヨウ素セル関連				
壁面温度	23 °C	2 °C	0.5 kHz/°C	1.0
コールドフィンガー温度	15 °C	0.1°C	-15 kHz/°C	1.5
ヨウ素純度の影響				2.0
周波数変調深さ	6 MHz	0.2MHz	-10 kHz/MHz	2.0
共振器内一方向光強度	10 mW	2 mW	<1.0 kHz/mW	2.0
ビート周波数計測不確かさ				0.0
ガスレンズ効果・ガスプリズム効果				5.0
合成標準不確かさ				6.3

議論5 校正事業者が持っている標準器の精度

質問（小野 晃）

国内数社の校正事業者がそれぞれの標準器としてヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを保有しているとのことですが、それらは定期的な校正のために産総研に持ち込まれると思います。そのときに産総研の国家標準器と波長（周波数）を比較して、差はどの程度ありましたか。それは新型レーザに対して評価した不確かさの範囲内に入っていましたか、あるいは中にはそれを超えるようなものもありましたか。

回答（石川 純）

新型レーザは全て産総研で、筆者の技術指導のもと組立調整を行いました。したがって、出荷時には特定標準器との周波数差は5 kHz 以下を確認しています。また、光学窓の汚れなどにより発振が止まった場合を除いて、ほぼ初期性能を維持していることを再校正時に確認しています。

議論6 海外の研究者のその後の展開

質問（小野 晃）

ニュージーランドの研究者は著者に対してアイデアを顕在化させる貴重なきっかけを与えてくれたと思います。その研究者はその後どのような研究の展開をたどったのでしょうか。差し支えない範囲でお答えいただければと思います。

回答（石川 純）

その後、ニュージーランドの行政改革により多くの研究所が縮小・統廃合され、その際に Dr. Hurst も民間企業に転出したと後任の方から聞きました。ニュージーランドのヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザも、現在はアメリカの製品を利用して Dr. Hurst が国際比較に用いたレーザは使われることなく、研究室の片隅に置かれているという少し寂しい話でした。

議論7 海外の国立標準研究所が行った製品化研究の事例

質問・コメント（小野 晃）

著者が今回行った国家標準器の汎用化の研究は製品化研究と解釈できることはすでに述べたところです。産総研の計量標準グループの中でも製品化を明確に意識して研究に取り組む例は従来あまり多くなかったように思いますが、校正事業者を巻き込んだトレーサビリティの中流域においては「遠隔校正」などでいくつかが研究が行われており、製品化研究の重要性はより強く認識されているように見えます。

世界的に見て、著者の知る限りで結構ですので、ニュージーランド以外に今回のような製品化研究を国立標準研究所が行った事例はあるのでしょうか。

回答（石川 純）

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ製品化の試みはごく初期の段階（1980 年頃）から行われていましたが、研究所の研究開発品を基にして、メーカーではそのままコピーし製品化するというものでした。その結果、価格、大きさ、操作性に問題があり、製品としての完成度は高くありませんでした。ニュージーランドのレーザは、研究者が国際比較に使用するという目的で、ユーザーの立場で開発したものであり、当時としては突出した携行性・操作性を有するものでした。実際にニュージーランドのレーザが製品化されることはありませんでしたが、ユーザーの立場で汎用化の研究を進めるというプロセスは、製品化を成功させるために不可欠であると思います。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザといったような特定目的の機器について、ユーザーの立場での汎用化研究を進めた例はあまり知りませんが、より一般的な機器類（ミラーホルダー等）では、国立標準研究所の開発品を基に製品化を実現し、従来のメーカー製品を超える優れた性能を有するものが存在します。

騒音計測の信頼性をいかに確保するか

— 音の標準の開発と新しい供給体制 —

堀内 竜三

騒音計測をはじめ音響分野での計測結果に対する信頼性を確保するため、産総研は必要となる要素技術を開発し、我が国の計量法に基づいて標準マイクロホンを頂点としたトレーサビリティ体系を整備した。この体系のもとで、新たな音の標準の供給サービスを開始したことにより、我々の日常生活の安全・安心を支えるために社会が必要としている、不確かさの小さな騒音計測が可能となった。

キーワード：騒音計測、標準マイクロホン、音圧感度、カプラ校正法、計測用マイクロホン、騒音計、自由音場感度、無響室

How the reliable environmental noise measurement is ensured

– Development of acoustic standards and a new calibration service system –

Ryuzo Horiuchi

To ensure the reliable results in acoustic measurement such as environmental noise measurement, NMIJ/AIST has developed essential calibration techniques and established a traceability system based on the Japanese Measurement Law with acoustic standards at the highest level of accuracy. A new calibration service for reliable acoustic measurements under this system realized a minimum uncertainty in the environmental noise measurements, indispensable to sustain high quality of our daily life.

Keywords: Environmental noise measurement, laboratory standard microphone, pressure sensitivity, coupler reciprocity method, measurement microphone, sound level meter, free-field sensitivity, anechoic chamber

1 はじめに

我々は日常、何らかの音に曝されて生活している。会話の妨げになる音、不快さをもたらす音は騒音とみなされる。騒音は、睡眠の妨害や作業効率の低下をはじめ様々な形で我々の日常生活に悪影響を及ぼし、場合によっては聴力損失という重大な健康被害を招く。

我が国の環境基本法では、国民の健康かつ文化的な生活の確保と、人類の福祉への貢献を目的とし、環境保全の基本理念と、その実現に必要な施策が定められている。騒音は、大気汚染などとともに取り組むべき公害の一つに挙げられ、環境騒音の規制や基準値が定められている。騒音規制法では特定の工場や建設機械、自動車から出される騒音が規制の対象となっている。また道路交通騒音、航空機騒音、新幹線騒音については、政府の達成目標値である環境基準が定められている。環境騒音の観点から我々の日常生活の安全・安心を維持するために、産総研に求められてきたことは環境騒音の計測における信頼性の確保であり、そのために必要な技術的課題の解決である。

音を物理現象として捉えると、音波とは音源の振動によって周囲の媒質（空気）が振動し、その振動が空間的に伝播していく現象のことである^[1]。振動の伝播に伴って媒質の密度は時間的・空間的に変化し、圧力変化をもたらす。音波の発生による、静圧からの圧力変化を音圧という。音圧は音に関する主要な物理量であり、音圧の計測が音響分野での計測の基本になっている^[2]。

多くの場合、音圧の大きさは音圧レベル^{用語1}で表され、音圧レベルの単位はデシベル、記号は dB である。人間の聴覚は周波数特性をもつため、音圧レベルが同じであっても周波数（音の高さ）が違えば違う大きさの音に聞こえる。聴覚の特性を模した周波数重み付け特性を A 特性といい、A 特性で補正した音圧レベルを A 特性音圧レベル、あるいは一般に騒音レベルという。騒音レベルの単位も音圧レベルと同じデシベルである（騒音レベルの単位として従来はホンも使われていたが、現在は国際的にデシベルに統一されている）。騒音レベルは環境騒音や機器から発生する騒音の評価に用いられる^[3]。

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3
National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan E-mail: ryuzo.horiuchi@aist.go.jp

Original manuscript received June 18, 2009, Revisions received September 24, 2009, Accepted September 25, 2009

音圧レベルや騒音レベルの計測には、図1に示す計測用マイクロホン^[4]や騒音計(最近では、サウンドレベルメータと称することが推奨されているが、本論文では一般的に用いられてきた名称を用いる)^{[5][6]}が音響測定器として用いられる。音圧のセンサである計測用マイクロホンを用いれば、その出力電圧から音圧を測定できる。あるいは音圧センサと演算の機能を合わせもった騒音計を用いれば、計測量である音圧レベルや騒音レベルを直接表示できる。

騒音計を用いて計測を行う代表的なユーザーとしては、次のものが挙げられる。①騒音レベルの計量値を公的に証明書に記載できる環境計量証明事業者、あるいはその要員として計量管理を行う環境計量士、②各地域で環境騒音測定を行う地方自治体、③開発した製品の音響特性を計測する必要のあるメーカー、④音響計測を行う大学や研究機関。

適正な計量の実施を確保するため、従来から我が国の計量法では、取引・証明行為に用いる重要な計量器を「特定計量器」として定め、特定計量器に求められる構造や測定精度に関する試験(検定という)の項目とその合格基準を定め、法的な規制を行ってきた。騒音計も特定計量器の一つに指定されており、検定が行われてきた。現在我が国では、約5万台の騒音計が検定に合格し、公的な騒音計測に用いられている。

騒音計の検定において、騒音レベルの表示値の正しさを評価するには、騒音計のマイクロホンに加わる音圧を精密に計測する必要がある。このため、標準マイクロホンと呼ばれる、安定性に優れた特殊な計測用マイクロホンが別途必要である(図2)^{[7][8]}。別の言い方をすれば、標準マイク

ロホンの音圧センサとしての感度(入力音圧に対する出力電圧の比)が音響計測におけるいわば「基準の物差し」、すなわち「音の国家標準」(音響標準)となる。検定で基準として用いる標準マイクロホンを「騒音基準器」という。産総研は、旧工業技術院時代(電気試験所や電子技術総合研究所)を含めるとほぼ半世紀にわたって騒音基準器の感度校正サービスを行ってきた^{[9][10]}。

検定に合格した騒音計のみが取引・証明行為への使用を許されるという、我が国の検定制度は今後も継続される。しかし一方で、近年国際的にしばしば使われるようになった不確かさの概念が検定には含まれておらず、騒音基準器としての標準マイクロホン感度の校正値には不確かさの値が明記されていない。また特定計量器としての騒音計の検定においても、騒音基準器による測定値との差が許容範囲内にあるかどうかだけで合否を判定している。

現在、測定器の仕様や校正法を規定するISOやIECの国際規格やJISには不確かさの考えが導入されるようになってきた。科学的な見地から言えば、本来、測定には多かれ少なかれ不確かさがつきまとう。人々が測定の結果を相互に信頼できるためには、測定結果の不確かさを適切に表明することが必須である。さらには、世界貿易機構における貿易の技術的障壁に関する協定(WTO/TBT協定)が、1995年に我が国も含めて締結された。このようにして、測定器の国際規格への適合性が、どの国でも同じように保証される体制作りが必要になった。このために、各国で当該測定器のトレーサビリティ^{[11][12]}が確保され、かつ各国の国家標準同士の技術的な同等性が検証されていることが不可欠となった。

音響分野においても状況は同じであり、音響測定器の規格適合性判定において不確かさ評価が不可欠となったため^[11]、測定のトレーサビリティ体系(図3)を構築しないと、ユーザーが用いる音響測定器の規格適合性を保証

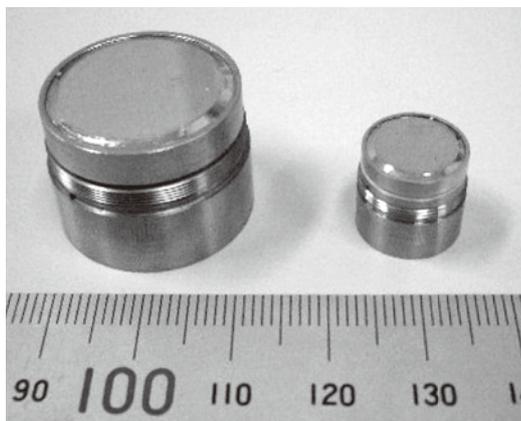


図1 計測用マイクロホン(左)と騒音計(右)

計測用マイクロホンは、振動膜(図では円形の上端面)に作用する音圧に比例した出力電圧を発生する音圧のセンサである。可聴周波数範囲(20 Hz ~ 20 kHz)で用いるタイプとしてI形とII形があり、筐体の外径と使用できる周波数範囲が異なる。左側の大きい方がI形計測用マイクロホンである。

騒音計は、先端(図では左端)に取り付けられた計測用マイクロホンで測定された音圧値から、計測量である音圧レベルや騒音レベルを演算して表示する機器である。マイクロホン、増幅器、周波数重み付け回路、演算回路、表示機構から構成される。

できない状況になった。

また最近では、環境騒音の測定だけでなく、家電製品（冷蔵庫、洗濯機、掃除機など）や情報機器（コピー機、パソコン、プリンタなど）から発生する騒音の測定が重要視されるようになった。これらの機器が出す騒音の測定には、音響測定器として計測用マイクロホンが使用される^{[12][13]}。

国際規格やそれと同等のJISに適合した音響測定器が供給されることではじめて、家電・情報機器メーカーは自社製品について測定した音響特性データの信頼性を確保し、製品の品質を国際的に保証できるようになる。産業界が今後の技術開発ロードマップに描いている、環境にやさしく安全・安心で、付加価値の高い製品を開発するためには、音響測定器のトレーサビリティ体系の整備が必須の基盤技術となった。こうした社会的ニーズの変化により、従来の検定制度とは異なる音響標準の供給体系を整備することとした。

ユーザーが信頼性の高い騒音計測を行うには、こうした測定器の性能確保はもちろんのこと、測定環境条件（温度、気圧、風）や、周囲からの反射音という測定現場に特有な要因の影響を評価することが不可欠である。しかし反射音の影響については、音場（音波が存在する空間）の不確かさ評価が未解決の技術的課題となっていた。反射音の影響は、音を反射する地面や建物と測定器との位置関係に依存する。この性質を利用して従来は、測定器の位置を変えて測定したデータを平均化する対策がとられていた。この方法では不確かさを減らすことはできるが、実際に不確かさがどの程度低減されたかを定量的に評価することはできず、データの信頼性は十分ではなかった。

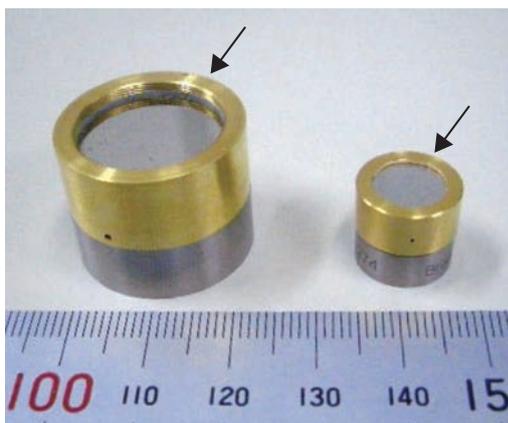


図2 標準マイクロホン

標準マイクロホンも計測用マイクロホンの一つであるが、音響標準としての信頼性を確保する必要があるため、感度の安定性について一般の計測用マイクロホンに比べて厳しい条件が課されている。また後述するようにカプラという治具に取り付けて感度校正を行うので、振動膜がカプラに触れて損傷しないよう、振動膜の外周には土手のような構造（図では矢印で示した、金色の部分）を備えている。左がI形標準マイクロホン、右がII形標準マイクロホンである。

全く同じことが音響測定器の校正においても課題となっていた。音響測定器の校正は通常、反射音の影響が少ないように設計された無響室の中で行われるが、高性能な無響室であっても全く反射音のない空間を実現することは極めて難しく、反射音の存在が音響測定器の校正における大きな不確かさの要因となっていた。この問題への対応として騒音計のJIS^[6]では、無響室の中で音源や騒音計の位置を変えて測定をくり返し、不確かさを減らすことが要求されている。しかしこの方法は騒音計の仕様が規格に適合するかを判定するための手順の一つに過ぎず、不確かさが適切に評価されていないことが依然問題として残っていた。産総研は、このような状況に鑑み反射音が存在する音場の不確かさを評価する技術を開発し、技術的課題の解決を図った。

また音響測定器の校正に関しては、もう一つの技術的課題が残されていた。これまでに実現してきた音響標準ではその不確かさの値が大きく、そのままでは一部の音響測定器の規格適合性が評価できない状況にあったため、音響標準の高度化（高精度化）による不確かさの低減が課題であった。

本論文では以降に、これらの課題を解決して騒音計測の信頼性を確保するために行った研究について述べる。

2 要素技術と研究シナリオ

騒音計測の信頼性確保という研究目標を達成するには、前章で挙げた二つの技術的課題を解決するための要素技術が必要である。

第一の要素技術は、標準マイクロホン感度の校正不確か

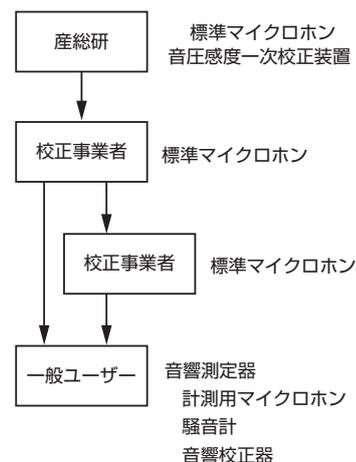


図3 音響計測におけるトレーサビリティ体系図

上位の校正事業者がもつ標準マイクロホンは、産総研が開発した一次校正装置によって校正される。下位の校正事業者がもつ標準マイクロホンは、上位の校正事業者の標準マイクロホンとの比較によって二次校正される。一般ユーザーの音響測定器は、校正事業者の標準マイクロホンとの比較によって二次校正される。

さの低減である。産総研が実現できる標準マイクロホン感度の校正不確かさは、これまでは0.1 dB程度が限界であった。しかしJISでは、騒音計の点検に用いるハイグレードの音響校正器^[14]（一定音圧を発生できる可搬型の校正用音源）の校正不確かさが0.1 dB以下と定められており、感度の不確かさが0.1 dBの標準マイクロホンでは音響校正器の性能を評価するための基準として使えないという問題があった。標準マイクロホン感度の校正装置を高度化することが不可欠になったため、デジタル信号処理技術の導入によるS/Nの改善などを行い、不確かさを0.04 dBにまで低減した。

第二の要素技術は、音響測定器の校正に用いる音場の不完全性（反射音の影響）に起因する不確かさの評価方法の開発である。反射音の影響を可視化して不確かさを定量的に評価するとともに、デジタル信号処理技術を駆使して反射音を除去する方法を開発した。

これらの研究成果を社会に還元するために必要になるのが、音響測定器のトレーサビリティ体系である。トレーサビリティ体系の構築によって、標準マイクロホンや音響測定器の校正技術を、エンドユーザーの測定結果の信頼性向上に結びつけることが可能になる。産総研がトレーサビリティ体系の頂点として音響標準を供給し、校正事業者はこれを基準にしてユーザーの音響測定器を校正するという体系を作り上げた。

さらにトレーサビリティ体系の階層ごとに、各組織（産総研および各校正事業者）の測定能力の妥当性確認が必要になってくる。このため産総研は、各国の国家計量標準研究所との間、ならびに校正事業者との間で各々持ち回り試験を行った。なおかつ各組織は、自らが実施する校正の手順や不確かさの評価方法について第三者機関による審査を受けることにより、測定能力の妥当性を客観的に証明した。

個々の要素技術を開発し、トレーサビリティ体系という形で統合したことにより、ユーザーが行う騒音測定結果の信頼性を国際的に確保するスキームを確立した。

3 国家標準としてのマイクロホン

3.1 音圧感度の一次校正

国家標準としてのマイクロホン（標準マイクロホン）は、その音圧感度^{用語3}が安定であること、ならびに音圧感度の絶対値を高精度に校正（一次校正）できる方法が確立されていること、の2点が要件である。標準マイクロホンの音圧感度の一次校正にはカブラ校正法^[15]を用い、音波を小容積の空洞（音響カブラ）内に閉じ込めた状態で校正を行う（図4）。これ以外の適用可能な校正法については、可聴周波数範囲（20 Hz～20 kHz）全てをカバーできない^[16]ことや、不確かさの点で劣る^{[14][17]}ことが理由で採用しなかった。

カブラ校正法による校正技術の改良のため、デジタル信

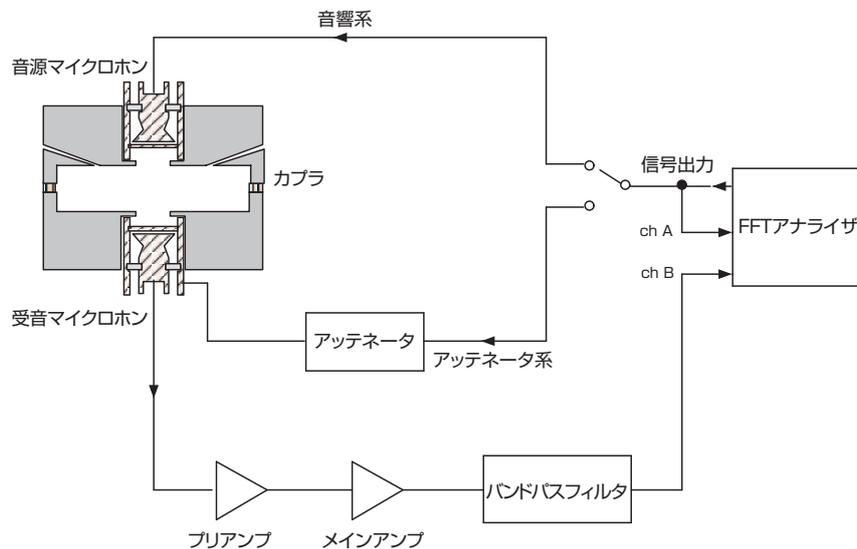


図4 カブラ校正法による校正システムのブロック図

カブラ校正法では、標準マイクロホンをまず2個用意し、一方は音源として、他方は受音用として用いる。音源側に入力電圧を加えた時に振動膜から発生する音波は、カブラ内の空洞を経て受音側の振動膜に到達し、出力電圧が発生する。音源として用いた時の感度が受音用として用いた時の感度に等しくなるという電気音響変換器の特性を利用すれば、音源側入力電圧と受音側出力電圧の比やカブラの内容積から、両マイクロホンの音圧感度の積が求められる。個々のマイクロホン感度を求めるには、標準マイクロホンをもう1個用意し、3通りの音源・受音マイクロホンの組合せについて同様に測定すれば、各々の感度を算出できる。

カブラ校正法では、受音マイクロホンの開放出力電圧を精密に測定するために、受音マイクロホンの出力インピーダンスや後段のアンプのゲインの影響を取り除く必要がある。このため音響系、アッテネータ系という二つの信号伝達経路を使用し、各経路で得られる出力電圧の比をとることにより、これらの影響をキャンセルする。

号処理技術を導入し、ノイズ除去法、アッテネータの校正法ならびにクロストークについて高度化を図った^[18]。

ノイズ除去法に関しては、従来の狭帯域フィルタによるアナログ信号処理ではフィルタの安定性が問題であったため、新たにFFTアナライザ^[19]によるデジタル信号処理を採用した。FFTアナライザの内蔵信号源を用いた同期加算法により、主要周波数範囲での測定再現性を0.02 dBから0.007 dBに、測定時間も従来の約半分までに改善できた。

また信号レベルの調整に用いるアッテネータの出力電圧(0.1～0.8 mV程度)を小さな不確かさで絶対測定する^[19]ことは難しいという問題があった。そのためアッテネータの減衰比をあらかじめ精密校正できれば、信号レベルの大きなアッテネータ入力電圧の測定だけで済むことに着目し、FFTアナライザを用いた精密校正法を開発した。その結果、減衰比の不確かさを従来の0.01 dBから0.001 dBにまで低減させた。

さらに不確かさ要因の一つであるクロストーク(信号が本来の経路以外の経路を通して混入する現象)が極力小さくなるように測定回路を設計した。高周波回路並みの厳密な対策をとったことで、クロストークによる不確かさを従来の0.01 dBから0.001 dBにまで低減させた。

3.2 音圧感度の不安定性

しかし校正システムを高度化してもなお音圧感度にばらつきが見られたため、校正対象であるマイクロホン自体に不安定性の原因があるのではないかと考え、様々な要因について検討した。その結果、マイクロホンとカプラの接触面をグリースで密着させる際に、マイクロホンに物理的な歪みが生じるため音響特性の変化が起こり、音圧感度が不安定になることを感度変化の周波数特性に着目して理論的に解明した^[20]。

またこの不安定現象は、国産の特定の型式の標準マイクロホンに顕著に現れることがわかったため、この型式の採用を極力避けることとした^[21]。現状では、マイクロホン感度の不安定性による不確かさはI形標準マイクロホンでは0.012 dB、II形では0.008 dBである(I形とII形の違いについては図1を参照)。

3.3 音圧感度の不確かさ

高度化の結果、改善可能な不確かさ要因については、その寄与が無視できる程度にまで低減できた。主要な不確かさ要因として残るものは、マイクロホン感度の不安定性とカプラの内容積である(I形標準マイクロホン用のカプラ(内容積20 cm³)では0.008 dB、II形用カプラ(同1 cm³)では0.015 dB)。このためI形、II形標準マイクロホンとも、主要周波数範囲における音圧感度の不確かさ(95%信頼

区間)は0.04 dBとなっているが、従来に比べて半分程度にまで低減された^[22]。

4 音場の評価

4.1 反射音

音響測定器の二次校正では、基準となる標準マイクロホンと音響測定器との比較校正を行う。これらの校正は通常無響室の中で行うが、無響室の内壁(天井や底面も含む)には音の反射を防ぐため多数の吸音くさびを取り付けてある。また測定器を無響室内に運び込むための作業用床面でも反射が起こるため、網床^[23]構造を採用している^[23]。産総研の大無響室(図5)では、吸音くさびや網床による反射音は直接音に対して1～2%程度存在する。それ以外にも基準マイクロホン(自由音場感度^[24]が既知の標準マイクロホン)や校正対象の音響測定器を保持するための治具による反射音加わる。反射音の存在による、音場の理想状態からのずれを理論的に評価することは非常に難しいため、不確かさの評価は実験的に行わざるを得ない。

4.2 音響測定器の二次校正

4章では以下、計測用マイクロホンの校正を対象として記述するが、騒音計についても同様に考えることができる。

音響測定器の二次校正法には置換法と並置法がある^[24]。どちらの方法も、スピーカーの前方に配置した基準マイクロホンと被校正マイクロホン(校正すべき計測用マイクロホン)の出力電圧比、すなわち感度比を測定し基準マイクロホンの感度を乗じて被校正マイクロホンの感度を求める点では同じである。違いはマイクロホンの設置方法である。

置換法では、基準マイクロホンを被校正マイクロホンに置き換え、出力電圧を順次測定する。この間、どちらのマイクロホンにも等しい音圧が作用すると仮定するが、実際にはスピーカーの特性が発熱で変化し、発生音圧が時間的

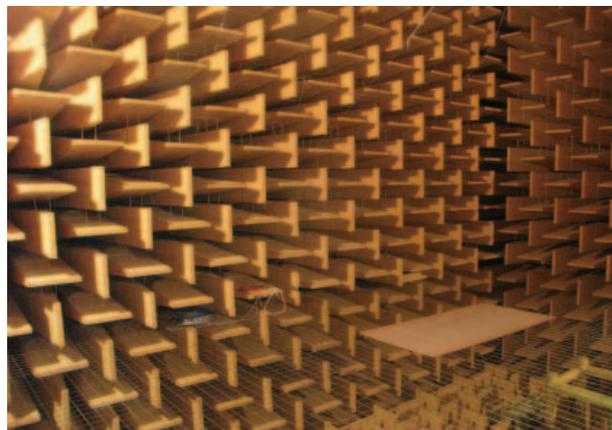


図5 産総研の大無響室
無響室の内壁には、グラスウール製の吸音くさびを多数取り付けてある。網床の上には、見やすさのためにベニヤ板を載せて撮影した。

に変動するため、それが校正の不確かさの要因になる。

一方、並置法では両マイクロホンを並べて配置し、同時に音場に曝す。両マイクロホンの出力電圧比をとれば音圧変動の影響はキャンセルされるため、スピーカーの不安定性の問題はなくなり、測定時間も半分で済む。しかし二つのマイクロホンが音場内の異なる位置にセットされるため、音圧分布の影響や他方のマイクロホンの存在によって音場が乱される影響が生じ、後述の音場に関係する不確かさが増大してしまう不都合がある。

置換法の問題点である発生音圧の変動は、変動をモニタするための第三のマイクロホンをスピーカーの前面に設置して補正することで解決できる。モニタ用マイクロホン導入のメリットを生かして、本研究では不確かさの評価がより確実に行える置換法を採用した。図6に置換法による計測用マイクロホンの二次校正法の概念図を示す。

4.3 反射音の影響の可視化

反射音は直接音とは異なるパスを經由してマイクロホンに到達し、干渉するので、周波数によって音圧に強弱が生じる。このためマイクロホンに反射音が作用すると、直接音だけであればなめらかであるはずの周波数特性に、細かな波打ちが現れるようになる。反射音の影響の大きさはスピーカーとマイクロホン、反射物体の相対的な位置関係に依存し、マイクロホンに一番近い物体からの反射音が支配的になる。

基準マイクロホンと被校正マイクロホンの感度比を測定すると、マイクロホンの形状や設置位置のわずかな差によっても反射音の影響は異なるため、例えば図7のように。波打ちの振幅は反射音の存在による不確かさに相当し、また波打ちの周波数間隔は反射物体とマイクロホンの距離

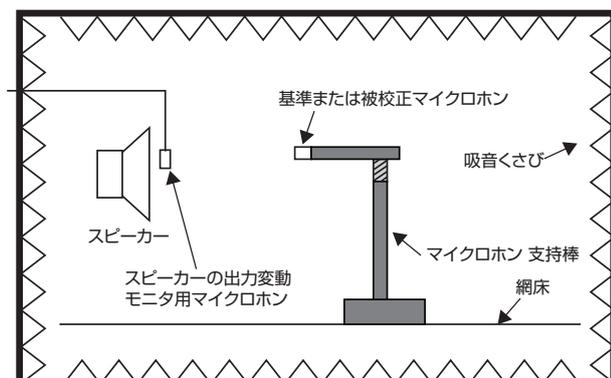


図6 置換法による計測用マイクロホンの二次校正法の概念図
無響室の内壁（図では測定系を囲む太枠）には、音の反射を防ぐために多数の吸音くさびを取り付けてある。しかし高性能な無響室であっても、全く反射音のない空間を実現することは極めて難しく、後述するように基準または被校正マイクロホンに一番近い物体からの反射音の影響が支配的になる。本測定系では、マイクロホン支持棒の垂直部分の上端（斜線で表示）からの反射音の影響が支配的である。

に対応する。感度比の周波数特性を調べることで、影響の大きな反射物体を特定し反射音の低減対策を行うことが可能になる。

従来は、周波数軸上において測定周波数の近傍で感度比を平均化し、反射音の影響を低減させる方法が用いられる場合もあったが、校正値、不確かさのどちらの観点からも適切な方法とはいえなかった。

4.4 反射音の影響の低減—吸音材の適用—

反射物体の周囲に吸音材を取り付けることにより、簡便に反射音を低減した。基準マイクロホンと被校正マイクロホンの型式が同じであれば、吸音材によって反射音を効果的に低減できたが、型式が違くと吸音材の効果は限定的であった。

4.5 反射音の影響の低減—信号処理技術の適用—

反射音が直接音よりも時間的に遅れてマイクロホンに到達することを利用して反射音を時間軸上で分離・除去できれば、反射音による不確かさを低減できる。しかし持続時間の短いパルス波形を用いたのでは、波形の性質上、測定周波数以外にもエネルギーが分散されてしまうため、十分なS/Nの確保が難しいという問題があった。そこで本研究では十分なS/Nを確保できる連続波形を用いた測定結果から、計算機シミュレーションによってパルス信号を入力したときに得られるはずの時間応答を求めるという仮想パルス法を考案した^[25]。仮想パルス法は、FFTアナライザによるデジタル信号処理の導入によって実現可能となった技術である。

仮想パルス法では、図7の青色のグラフで表される伝達特性をもった系に、仮想的なパルス信号を加えたときの時間応答を計算する。得られたパルス応答波形から、時間

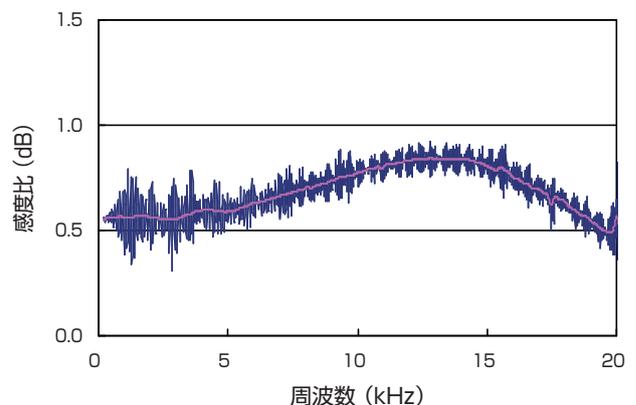


図7 基準マイクロホンと被校正マイクロホンの感度比の周波数特性
青色のグラフにおける、縦軸方向の細かな波打ちが反射音の影響を表す。桃色のグラフは後述する計算機処理によって反射音を除去したものであり、なめらかな周波数特性になっている。

窓を用いて直接音のみを切り出した後、周波数領域に変換すれば反射音を含まないなめらかな周波数特性が得られる（図7に桃色で表示したグラフとなる）。

信号処理技術を用いれば反射音をほぼ除去できるが、パルス波形の周波数帯域幅、反射音を切り出す時間窓の持続時間や中心位置、といった信号処理に用いるパラメータのわずかな違いによる影響は、信号処理にともなう不確かさとして評価した。

5 計量標準供給制度による音響測定器のトレーサビリティ体系の整備

1章で述べたように、騒音計の検定制度に基づく計量管理体制とは異なる音響標準の新たな供給体系が不可欠となった。新たな供給体系を構築するため、計量法の計量標準供給制度（JCSS：Japan Calibration Service System）に則った^[26]。具体的には、産総研が国家標準としてのマイクロホンを校正した場合の不確かさを評価し、それを用いて校正事業者の標準マイクロホンを校正する。校正事業者は後者を基準としてユーザーの音響測定器を校正することにより、国家標準へのトレーサビリティを確保する。体制の整備に当たっては、以下の点に留意した。

- ・校正事業者の主体的な計量管理体制の構築を可能にした。産総研から標準マイクロホンの供給を直接受ける以外に、上位の校正事業者を介して国家標準にトレーサブルな音響測定器の供給を受けることも可能である。また校正事業者は、標準マイクロホン以外の音響測定器を日常の校正業務に用いる基準器として管理を行うことも可能である。
- ・校正事業者が認定を受ける際に要件となる技術的な要求事項を随時見直すことにより、新しい技術の導入にも比較的迅速に対応できる体制とした。
- ・検定では騒音計の試験周波数範囲は20 Hz～12.5 kHzに限られていたが、計量標準供給制度では、可聴周波数範囲（20 Hz～20 kHz）全てで音響測定器の性能を担保することとした。
- ・校正事業者には、トレーサビリティ体系の担い手としてふさわしい技術力を備えていることを要求する。現在登録されている校正事業者は、騒音計の指定検定機関、あるいは指定製造事業者として長年の実績がある。

6 測定能力の妥当性検証

6.1 国家標準の国際的同等性の検証

1999年に計量標準の国際相互承認協定が結ばれ、我が国も署名した^[27]。この協定では各国の国家計量標準研究所が、互いの開発した国家計量標準の同等性を認め

合い、各々が発行する校正証明書を相互に承認しようとするものである。署名国の研究所は自らの測定能力を客観的に示すため、国際的に共通のルールであるISO/IEC 17025^[28]を満足する品質システム^{用語7}を構築し、かつ国際比較（いわゆる持ち回り試験）に参加して測定能力を証明することが求められるようになった。

産総研は、自らが開発した音響標準について品質システムを構築し、独立行政法人製品評価技術基盤機構の実施するASNITE-NMI（国家計量標準研究所認定サブプログラム）によって、規格適合性の審査を受け2003年1月に認定を取得した。

国際比較については、国際度量衡委員会音響・超音波・振動諮問委員会（CCAUV；Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration）が標準マイクロホンに関する4つの国際比較を計画し、産総研はそれら全てに参加した。I形およびII形標準マイクロホンの音圧感度の国際比較はすでに終了したが、主要研究所の宣言する不確かさ（95%信頼区間）は主要周波数範囲で0.03～0.05 dBの範囲にあり、産総研も同様の不確かさである^{[29][30]}。また測定結果に関しては、産総研の校正値は他研究所とも不確かさの範囲内で一致しており、国家標準の同等性を実証できた。

音響・超音波・振動諮問委員会が行う国際比較に参加できる機関の数は10前後に限定されており、世界中の国立標準研究所を網羅できない。このため世界をいくつかの地域に分割して、地域ごとに同種の国際比較が行われた。我が国が属するアジア太平洋地域（APMP；Asia Pacific Metrology Programme）内では、I形標準マイクロホンの音圧感度の国際比較が最初に行われたが、産総研が幹事研究所を務め国際比較のプロトコルの策定、仲介器（標準マイクロホン）の安定性の確認、校正結果の分析、ならびに対応する音響・超音波・振動諮問委員会の国際比較の結果とのリンク方法の開発を行った^[31]。I形標準マイクロホンの音圧感度の国際比較の結果を図8に示す。図8は、全ての参加研究所の測定結果が、各研究所が宣言する不確かさの範囲内で一致していることを示しており、このデータをもとにして参加各国の音響標準が相互に同等であることが確認された。

6.2 校正事業者の測定能力の検証

産総研は、ISO/IEC 17025に規定された技術的要求事項を音響精密計測に適用するための指針^[32]の策定を技術的にサポートしており、校正事業者はこれをもとに品質システムを整備している。また校正事業者の測定能力を担保するために技能試験が実施され、産総研は判定の基準となる参照値を提供している。製品評価技術基盤機構による

校正事業者の登録審査においても、産総研は技術的立場から審査を支援しており、2009年8月末現在、6事業者が計量標準供給制度の登録事業者として認定され、測定能力が担保されている。

7 研究成果

本研究では、安全・安心な社会を支える騒音計測技術の信頼性確保に必要な技術開発を行った。まず国家標準である標準マイクロホン音圧感度の一次校正システムを高度化し、音響標準の新たな供給サービスとして開始した。校正システムの電気的特性に起因する不確かさを現時点における限界まで低減させたことにより、マイクロホン感度の不安定性が不確かさの大きな要因となること、ならびにマイクロホンの型式によって安定性に違いがあることを明らかにした。

つぎに標準マイクロホンを基準としてユーザーの音響測定器を二次校正する際に問題となっていた、音場の不確かさの評価技術を確立した。デジタル信号処理技術の導入により、反射音の影響を低減させる方法を開発した。

こうした技術開発に基づき、国内では計量法に基づく標準供給体制を整備し、トレーサビリティ体系を確立した。音響標準の供給、技術的要求事項適用指針の審議、技能試験参照値の提供、校正事業者の審査支援を通じて、校正事業者の測定能力を検証した。

産総研自からも、審査を受けて認定を取得するとともに、国際的には複数の国際比較に参加し、主要研究所との間で国家標準の同等性を検証した。アジア地域内で最初に行われた基幹比較では幹事研究所を務めた。

これらの成果は、音響測定器の性能の担保だけでなく、ユーザーが行う測定結果の信頼性向上にも大きく寄与している。反射音の評価技術の開発によって反射音の原因やその程度が明確になり、反射の影響の低減対策を立てやすくなったばかりでなく、その効果を定量的に評価できるようになった。その結果、測定者の技量によって測定結果の信頼性に差が出てくるという問題が解決され、経験の少ない者でも容易に信頼性の高いデータを得ることが可能になった。

8 おわりに

標準マイクロホンをトレーサビリティ体系の頂点とする、計量法に基づく音響標準の供給体制を新たに整備し、時代の要求に即した新たな校正サービスを開始した。

今後の課題としては、音響標準の校正周波数範囲を可聴帯域外へ拡張することが残されている。我々の身の回りには、20 kHz以上の超高周波音を発生する機器が増えてきている。しかし超高周波域では音響標準が確立されていないため、音圧レベルの定量的な評価ができない状況にある。人間が強力な空中超音波に曝された場合の安全性の是非を議論する上で、音響標準の整備は不可欠である^[33]。

また20 Hz以下の超低周波域でも低周波音に関する苦情が増加してきている。低周波音の統一的な測定方法は策定されているものの、音響標準が供給されていないため測定結果の信頼性は確保されておらず、音響標準の整備はやはり不可欠である^[34]。したがって、今後は周波数範囲の拡大をめざした音響標準や計測技術の研究開発を進めていく。

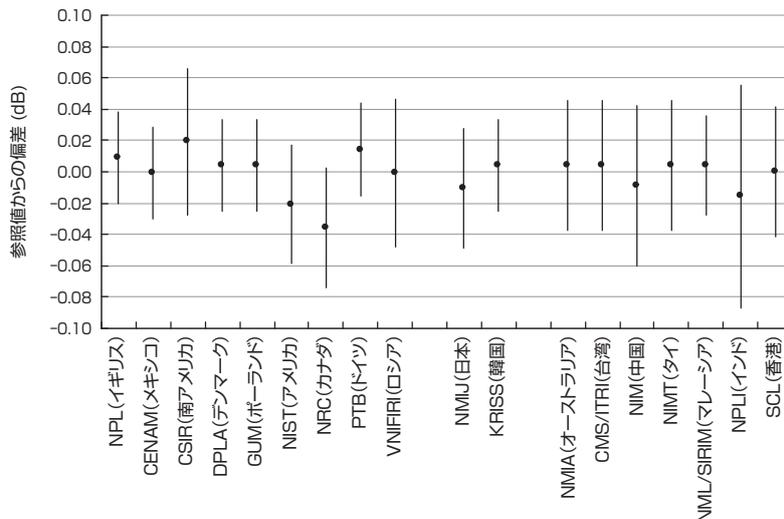


図8 国際比較の結果（周波数1 kHz）

横軸は参加した国家計量標準研究所の略称名、縦軸は国際比較で決定された参照値（参加研究所の校正值の算術平均値）に対する各研究所の校正值の差を表しており、この差が各研究所の宣言する不確かさ（95%信頼区間、バーで表示）内に入っていれば同等とみなす。

謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの貴重なご助言を頂いた、藤森威氏(前計測標準研究部門)、秋田県立大学佐藤宗純教授(前計測標準研究部門)をはじめとする関係者の皆様に感謝の意を表します。

用語説明

用語1: 音圧レベル: 健康者に聞こえる音圧は広範囲にわたるため、基準音圧20 μPa (1 kHzの正弦音波に対する最小可聴値の代表値)で規格化し、レベル表示したものである。音圧実効値を p 、基準音圧を p_0 、音圧レベルを L_p とすれば、

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$$

の関係がある。

用語2: トレーサビリティ: ある測定器の不確かさの根拠をたどっていったときに、国家標準とのつながりが明らかにされていることを表す。

用語3: 音圧感度: マイクロホンの振動膜に一樣に作用する音圧に対する開放出力電圧の比である。

用語4: FFTアナライザ: 入力信号の高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)を演算する機器であり、音響信号の周波数分析に必要な各種機能をもつ。

用語5: 網床: ピアノ線を格子状に編んだものに張力をかけて固定した、平面状の構造物である。音波は格子のすき間を通り抜けるので反射音を低減でき、かつその上を歩行可能なように強度が確保されている。

用語6: 自由音場感度: 平面波が進行する音場に置かれたマイクロホンの開放出力電圧に対する、マイクロホンを置く前のマイクロホン位置における音圧の比である。マイクロホンを音場内に置くと、マイクロホンの存在によって音波の反射や回折が生じ、マイクロホン位置における音圧が変化してしまう。自由音場感度がわかっているならば、マイクロホンの存在によって影響を受けないときの音圧を求めることができる。音響測定器の二次校正に必要な標準マイクロホンの感度は自由音場感度である。音圧感度と自由音場感度の比は、マイクロホンの形状や振動膜の音響特性で決まるため、マイクロホンの型式ごとに一定値となる。標準マイクロホンについては、比の実測値と不確かさが与えられている^[35]。

用語7: 品質システム: 品質管理(校正結果の信頼性確保)のために、当該規格に準じて不確かさの算出根拠、校正の実施手順、校正に用いる機器の管理、校正要員、校正記録の作成について文書化したものである。

参考文献

- [1] D. R. Raichel: *The science and applications of acoustics*, AIP Press, New York (2000).
- [2] JIS Z 8106, 音響用語 (2000).
- [3] 橋 秀樹, 矢野博夫: *環境騒音・建築音響の測定*, コロナ社, 東京 (2004).
- [4] IEC 61094-4, *Measurement microphones Part4: Specifications for working standard microphones* (1995).
- [5] JIS C 1509-1, サウンドレベルメータ(騒音計)-第1部: 仕様 (2005).
- [6] JIS C 1509-2, サウンドレベルメータ(騒音計)-第2部: 型式評価試験 (2005).
- [7] JIS C 5515, 標準コンデンサマイクロホン (1981).
- [8] IEC 61094-1, *Measurement microphones Part1: Specifications for laboratory standard microphones* (2000).
- [9] 高橋多助, 三浦 甫: 電総研新音響標準装置, 音響学会電気音響研資, EA-80-37 (1980).
- [10] 高橋多助, 三浦 甫: 標準コンデンサマイクロホンの音圧校正法の校正精度に関する研究, 電総研研究報告, 902 (1990).
- [11] 佐藤宗純, 藤森 威: 音響測定器の適合性判定における測定の不確かさの扱い, 音響学会誌, 59 (10), 628-633 (2003).
- [12] JIS Z 8732, 音圧法による騒音源の音響パワーレベルの測定方法-無響室及び半無響室における精密測定方法 (2000).
- [13] JIS Z 8736-1, 音響インテンシティによる騒音源の音響パワーレベルの測定方法-第1部: 離散点による測定 (1999).
- [14] JIS C 1515, 音響校正器 (2004).
- [15] IEC 61094-2, *Measurement microphones Part2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique* (2009).
- [16] R. Horiuchi, T. Fujimori and S. Sato: Development of a laser-pistonphone for an infrasonic measurement standard, *4th joint meeting of acoustical society of Japan and acoustical society of America*, 4aEA4 (2006).
- [17] IEC 61094-6, *Measurement microphones Part6: Electrostatic actuators for determination of frequency response* (2004).
- [18] 堀内 竜三, 藤森 威, 佐藤 宗純: 標準コンデンサマイクロホン・カブラ校正システムの電氣的精度の向上, 電総研彙報 60 (7), 7-16 (1996).
- [19] G. S. K. Wong and T. F. W. Embleton: *AIP handbook of condenser microphones: Theory, calibration and measurements*, AIP press, New York (1995).
- [20] R. Horiuchi, T. Fujimori and S. Sato: Instability of the voltage transfer function for an MR103 microphone in a coupler calibration technique, *Journal of Sound and Vibration*, 266-5, 981-991 (2003).
- [21] 堀内 竜三, 藤森 威, 佐藤 宗純: カブラ校正法におけるマイクロホン間電圧減衰量の測定誤差の要因(第7報), 日本音響学会秋季研究発表会, 643-644 (2001).
- [22] R. Horiuchi, T. Fujimori and S. Sato: Uncertainty analysis for pressure sensitivities of laboratory standard microphones, *Acoust. Sci. & Tech.*, 25 (5), 354-363 (2004).
- [23] 藤森 威, 三浦 甫: 電総研音響実験棟について, 信学技報 EA-80-19 (1980).
- [24] IEC 61094-8, *Measurement microphones Part8: Methods for free-field calibration of working standard microphones by comparison Working Draft 5* (2008).
- [25] 藤森 威, 堀内 竜三, 佐藤 宗純: II形標準マイクロホンの音響中心位置の測定, 音響学会誌, 58 (9), 579-585 (2002).
- [26] 堀内竜三, 藤森 威: JCSSにおける音響計測分野のトレーサ

- ビリティ, *騒音制御*, 30 (5), 381-383 (2006).
- [27] 瀬田勝男: 計量標準国際相互承認へ向けての活動, *AIST Today*, 1 (6), 26 (2001).
- [28] ISO/IEC 17025 (JIS Q 17025), *試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項* (2005).
- [29] R. Barham: Report on key comparison CCAUV.A-K1, *Metrologia*, 40-09002 (2003).
- [30] V. C. Henriques and K. Rasmussen: Final report on the key comparison CCAUV.A-K3, *Metrologia*, 43-09001 (2006).
- [31] R. Horiuchi, H. Takahashi, T. Fujimori and S. Sato: Final report on key comparison APMP.AUV.A-K1, *Metrologia*, 44-09001 (2007).
- [32] JCT 21500-05, *計量法校正事業者認定制度 技術的要求事項適用指針 音圧レベル* (2009).
- [33] 高橋 弘宜, 藤森 威, 堀内 竜三: 空中超音波帯域における音響標準の開発, *日本音響学会誌*, 65 (1), 34-39 (2009).
- [34] 堀内 竜三, 藤森 威, 佐藤 宗純: 超低周波領域における音響標準の開発の現状, *日本音響学会誌*, 62 (4), 338-344 (2006).
- [35] IEC TS 61094-7, *Measurement microphones Part7: Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones* (2006).

執筆者略歴

堀内 竜三 (ほりうち りゅうぞう)

1989年、早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了。1990年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年より産業技術総合研究所計測標準研究部門音響振動科音響超音波標準研究室主任研究員。研究分野は音響標準の開発をはじめとする音響精密計測。2000年～2001年、NPL(英国物理学研究所)において低周波音響標準の開発に従事。工学博士。



査読者との議論

議論1 カブラ法以外の一次校正法

質問 (小野 晃: 産業技術総合研究所)

一次校正法に関して本論文ではカブラ法以外は採用しなかったわけですが、他の一次校正法としてはどのような原理のものがありますか。また、国際比較に参加した他の国の標準研究所では、どのような一次校正法を採用しているのでしょうか。カブラ法以外のものを採用している国があれば、どのような校正法をどのような考え方で採用しているかご教示願います。

回答 (堀内 竜三)

音響測定器の二次校正において基準となる標準マイクロホンの自由音場感度は、通常は直接一次校正せず、カブラ校正法で一次校正した音圧感度に補正項を乗じて求めます(「音場」の読み方としては、「おんじょう」、「おんば」のいずれも使われています)。これは音圧感度の方が自由音場感度よりも容易に高精度な校正を行えるためです。自由音場感度を一次校正する場合には、カブラの代わりに無響室内で2個の標準マイクロホンを向かい合わせに配置し、カブラ校正法と同様の測定を行います。しかしこの方法では、低周波域でS/Nが極端に悪くなるため、長時間測定に加えて、より厳密なクロストークの低減対策が不可欠です。また無響室内での測定であるため反射音の影響の低減も必須です。こうした理由により、ルーチ的な校正サービスに適した方法とはいえ、通常は用いられません。他国の標準研究

所においても、カブラ校正法が標準マイクロホンの一次校正に用いられています。

なお低周波域に限定すれば、レーザーピストンホンという、音圧感度の一次校正法もあります。この方法では、加振器に取り付けたピストンを音源として使用し、カブラ内に音圧を発生させます。ピストンの振動変位を光学的に測定して音圧に換算するとともに、音圧に曝した標準マイクロホンの出力電圧を測定し、音圧感度を求めます。産総研は、超低周波域での一次校正装置として、レーザーピストンホンの開発を行っています。

議論2 外国の標準研究所における反射音評価方法

質問 (小野 晃)

二次校正における反射音の影響評価は優れた成果と思います。外国の標準研究所でも同様の方法をすでに採用しているのでしょうか。あるいは日本と異なる評価方法をとっているのでしょうか。

回答 (堀内 竜三)

音響測定器の二次校正における反射音の低減・評価方法として、他国の標準研究所では別の方法も用いられています。反射音の時間遅れに合わせて動作時刻を設定した狭帯域フィルタを用いて反射音を除去する方法(TDS; Time Delay Spectrometry)や、パルス応答を高速に求めるため特殊なランダム信号を用いる方法(MLS; Maximum Length Sequence法)があります。いずれの方法も、時間軸上で直接音と反射音を分離し、直接音のみを取り出すという点では共通ですが、国際的に統一された方法はありません。現在審議中の計測用マイクロホンの二次校正法の国際規格では、産総研が開発したFFTアナライザによる仮想パルス法をはじめ、複数の方法が取り入れられる予定です。

議論3 音響標準の世界水準と今後の日本の方向

質問 (小野 晃)

国際比較の結果の図を見ますと、国際度量衡委員会が主催した主要国の測定値と、アジア太平洋地域の国の測定値とで、ばらつきや不確かさにほとんど違いがないように見えます。むしろ、主要国には平均値からの偏差が大きいところがある一方、アジア太平洋地域の国々は平均値からの偏差が小さいとも見えます。これは音響の国家標準の技術が成熟して途上国にも十分に行き渡り、国の間の技術の差が小さくなったと見るべきなのでしょうか。ご意見をいただければ幸いです。

また日本が今後、音響計測の信頼性において世界で抜け出すためには、どのようなことに努めたらよいと考えますか。トレーサビリティの中流域(校正事業者)から下流域(計測現場)にかけて、あるいは音響計測器の製造事業者に対してサジェスションはあるのでしょうか。

回答 (堀内 竜三)

ご指摘のように、国際比較の結果である図8は、音響標準の開発を先導してきた主要国の標準研究所と、後発のアジア諸国の研究所との差が小さいことを表しています。この背景には、音響標準に特殊な事情が影響しています。多くの研究所が所有する標準マイクロホンの一次校正装置は、ある特定の音響機器メーカーが製造したものです。校正手順を習熟すれば再現性の良い校正値が得られますし、不確かさの評価に必要な技術情報の収集もそれほど難しくはありません。このため経験の比較的浅い研究所でも、一次校正装置を自力で開発した研究所と同等の音響標準を比較的容易に実現できます。同じメーカーの一次校正装置を用いていけば、国際比較における校正結果のばらつきが小さいのは自然な結果です。これに対して一次校正装置を開発できるだけの技術力をもった研究所は世界に5機関ほどしかなく、アジア地域では我が国(産総研)だけです。これらの研究所が開発した一次校正装置の構成は、当該音響機器メーカー製のものと異なりますので、国際比較への参加が唯一の同等性の検証方法です。異なる一次校正装置による校正結果は、現状ではよく一

致しているといえますが、今後は偏差の原因を追究していくことも、さらなる信頼性向上のためには必要と考えます。

我が国が今後、音響計測の信頼性の点で世界から頭一つ抜け出すためには、産総研が新しい標準の開発などによって技術的に先導していくことが必要です。本文で述べたように、我々の直近の課題は音響標準の校正周波数範囲の拡大です。空中超音波による健康被害や低周波公害のない社会の実現のための基盤を整備しています。

同時に、測定結果の信頼性を様々な角度から追究し続け、研究成果として発信していくことも不可欠です。同一の校正原理に基づいて国際比較を行い、同等性を検証することだけでなく、異なる校正方法による測定結果の整合性を検証していくことも必要です。例えば、一次校正されたI形標準マイクロホンを用いた測定結果とII形による結果の整合性の確認は、現状では十分になされているとはいえません。

音響測定器の校正事業者や製造メーカー、エンドユーザーに対しては、自らの測定結果の信頼性確保のために、国家標準へのトレーサビリティの確保だけでなく、測定方法に内在する様々な不確かさ要因の評価が不可欠であることを訴え続けることが必要です。反射音の影響はまさにその良い例といえます。

議論4 産総研の今後の国際的・社会的役割

質問(工藤 勝久:産業技術総合研究所評価部)

「音の標準」を必要とする多数の産業、学術・技術分野があり、その裾野には非常に多数のユーザーが存在しています。今後の技術的トレンドに関して、産総研が今後果たすべき「音の標準」に関する国際的・社会的な役割について、その展望をお聞かせください。

回答(堀内 竜三)

本文でも述べたように、最近では、家電製品や情報機器から発生する騒音の測定が重要視されるようになりました。これらの機器が出す騒音を評価する場合、従来の音圧レベルや騒音レベルに代わって、音響パワーレベルが測定されるようになってきています。騒音レベルは、測定点での騒音の状態を直感的に理解しやすいのですが、音響パワーレベルを求めておけば、騒音源が放射する音響出力全体を評価することができます。

音響パワーレベル測定の信頼性を確保するには、基準となる「基準音源」の精密校正技術の開発が不可欠です。基準音源とは、広帯域騒音を安定に発生できる、音響パワーレベル測定専用の音源です。校正済みの基準音源があれば、被校正機器との比較校正によって音響パワーレベルを求めることができます。今後産総研が基準音源の精密校正技術を開発し、音響パワーの標準として確立することで、ユーザーは測定結果の信頼性を確保できるようになります。

議論5 最も長い時間がかかった課題

質問(工藤 勝久)

これまでの標準開発から供給に至るプロセスで、最も時間を費やした課題とその解決に向けて行った取組みについてお聞かせください。

回答(堀内 竜三)

音響標準の開発において最も時間を費やした技術課題は、標準マイクロホンの音圧感度の不安定性の原因究明です。標準マイクロホンの一次校正システムを高度化し、校正システムの電気的特性に起因する不確かさを現時点における限界まで低減させたことで、マイクロホンそのものの感度が不安定なのではないかという疑いをもつようになり、その原因を追究しました。別の言い方をすると、システムの高度化によってはじめて、マイクロホン感度の不安定性を観察できるようになったということです。

不安定性の原因になり得ると考えた項目は、本文で述べた物理的な歪みの影響のほか、感度の環境条件(温度、静圧)依存性、マイクロホンの絶縁不良、マイクロホンとして動作させるために必要な直流電圧の印加、マイクロホンをプリアンプに接続したときにマイクロホンに加わる物理的な力です。しかし物理的な歪みの影響以外の項目は、いずれも測定結果を説明できるものではありませんでした。

この不安定現象は、測定を数回くり返せば必ず出現するというものではなく、通常は安定であったものが、あるときに値が大きく変化するという特徴をもっています。このため、ある測定条件で一連のデータを取得し、かつ測定条件を試行錯誤的に変えながら測定を完了するまでに膨大な時間がかかり、結論に到達するまでに3～4年の期間を要しました。

循環発展的なプロジェクト構造を生む バイオインフォマティクス戦略

— 創薬ターゲット遺伝子の網羅的機能解析 —

諏訪 牧子*、小野 幸輝

大量の生命情報データの情報洪水の中、バイオインフォマティクス技術の役割は高まり、実験上の大きなリスクを軽減し、実験の設計に資する情報を提供する形で貢献することが期待されている。この目的のもと、私たちは細胞膜に存在するGタンパク質共役型受容体(GPCR)を中心に、ゲノム配列から遺伝子を同定してそれらの機能解析を行うための計算パイプラインを構築し、その応用結果を網羅的な機能解析総合データベース(SEVENS)として練り上げてきた。このコア技術が共同研究の呼び水となり、その後循環発展的に展開しながら今日も続いている。この流れは、三つの要素(長期熟成されたコア技術、実験研究者との密な連携、技術インキュベーションを生む環境)を駆動力として進む研究の方向性と、進展の速いライフサイエンス分野の方向性の相互作用として進み続けるダイナミックな形態である。

キーワード: Gタンパク質共役型受容体、ゲノム、遺伝子同定、Gタンパク質共役選択性予測、循環発展的、SEVENS、GRIFFIN

A bioinformatics strategy to produce a project structure of spiral development

– Comprehensive functional analysis of the drug design target genes –

Makiko Suwa* and Yukiteru Ono

In the midst of the information flood of biological data, the role of the bioinformatics technology rises. This technology is expected to provide information to reduce the risk in the experiments and to help the designing of the experimental protocol. For this purpose, we mainly targeted a G protein coupling receptor (GPCR) and developed a computational pipeline which identifies these genes from genome sequences and performs their functional analyses. The applied results have been worked out into an integrated comprehensive functional analysis database (SEVENS).

This core technology has become the trigger of collaborative researches, which continues today in a spiral evolutionary form. This flow is the dynamic form that continues advancing by the interaction between the research direction determined by three elements as a driving force and the direction of the life science fields progressing rapidly. The three elements are the core technique matured for a long term, the close cooperation with the experiment researcher, and the environment producing technical incubation.

Keywords: G-protein coupled receptor, genome, gene finding, G protein coupling selectivity prediction, a spiral development, SEVENS, GRIFFIN

1 はじめに

2000年にヒトのゲノムドラフト配列が発表され^[1]、桁違いに大量の生物情報があふれ始めた。その後10年近く経つ間に、1,000種類近くの生物のゲノム配列が解読され、さらに最近では、2000年当時より約1,000倍速く配列を解読できる次世代シーケンサーの出現により、生物情報の洪水ともいえる状態になった。これらから、膨大な量の産業応用ターゲット(遺伝子、RNA、タンパク質情報等)が得られるのは明白であり、これらを高効率に機能解析する生化学的な実験技術が望まれているが、現時点では膨大なコストと時間がかかるため事実上不可能である。

この状況のもと、バイオインフォマティクス技術への期待は高まっている。バイオインフォマティクスとは、生物学、情報学、およびその他境界領域が融合した分野であり、計算機を用いて大量データを処理しつつ生命情報(暗号)をデジタル化・DB化し、その解読技術を開発・応用しながら新しい生物学的知見を得、生命現象を情報論的、物理的にモデル化して記述する学問である。生命情報を担う遺伝子等の挙動を予測・制御することが可能という強みを持つ。いわば、生化学実験では対応できない解析に対する答えを、予め計算機上で低コストかつ高速に用意できる可能性がある。これができれば機能解析実験を飛躍的に

産業技術総合研究所 生命情報工学研究センター 〒135-0064 江東区青海 2-4-7 臨海副都心センター別館
Computational Biology Research Center, AIST 2-4-7 Aomi, Koto-ku 135-0064, Japan * E-mail: m-suwa@aist.go.jp

Original manuscript received June 29, 2009, Revisions received October 13, 2009, Accepted October 20, 2009

効率化させるナビゲータとなると期待される。

多くの産業応用ターゲットの中でも中心的なものは、Gタンパク質共役型受容体 (G-protein coupled receptor: GPCR)^[2] と呼ばれる生体分子である。細胞膜に存在し、膜を貫通する7本の螺旋構造 (膜貫通ヘリックス) による管状構造を作り、細胞外側から神経伝達物質、ペプチド、匂い物質等の多様なリガンドが結合することで、細胞質側から共役するGタンパク質が活性化され、その種類によって細胞内への情報伝達の経路が決まる (図1)。多くの場合、この情報伝達システムの異常が、高血圧、心臓病、癌等の重篤な疾病を引き起こすことから、現在世界で出荷される薬の30%近くがこの受容体が関与するシステムの制御を目的としている。仮にGタンパク質の活性化を選択的に制御できる薬物を同定できれば市場に与えるインパクトは極めて大きい。例えば、GPCRを介して肥満病の発現機構を制御するペプチドは、薬剤の有効なシーズ、健康食品の基として大きな市場 (年間数百億円規模) を見込める。

しかしそれを目指した生化学実験には、巨額を水に投じようような極めて大きなリスクを伴う。例えば生理活性を持つ有用ペプチドの単離は、数年から数十年間かけても成功する保障はない。あるいは結合リガンドが不明であるオーファン受容体のリガンドを探索する場合、まずGPCRが発現し、Gタンパク質と結合して機能できるような細胞環境を樹立する必要があるが、GPCRにとって共役Gタンパク質種が不明なため、少なくとも代表的な数種類のGタンパク質と組合せた細胞環境の実験系を全て検討する必要がある、仮にここまでできて高効率化することがさらに難しい。

以下の章では、上述のようなリスクを可能な限り軽減するために、バイオインフォマティクスの立場から考えられるア

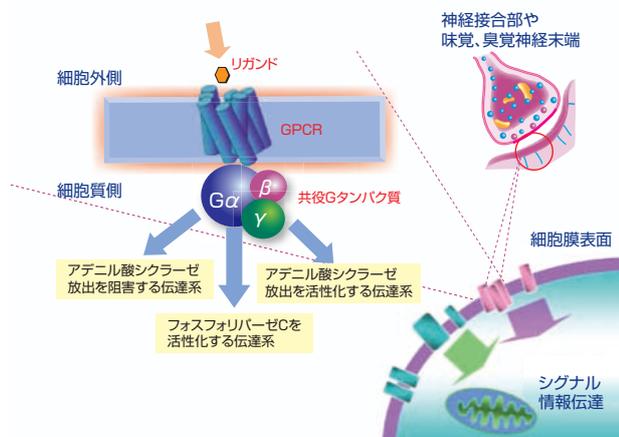


図1 Gタンパク質共役型受容体 (GPCR) の概念図
神経接合部等の細胞膜内に存在する。(図右)。7本の膜貫通ヘリックスによる構造に細胞外側から多様な種類の分子 (リガンド) が結合し、共役するGタンパク質を活性化するが、その種類に応じ細胞内への情報伝達の経路 (大別して3種類) が決まる (図左)。

プローチを、我々の従来から行ってきたGPCR研究 (以下、これを本プロジェクトと呼ぶ) をモデルケースとすることで示してみようと思う。

2 研究の目的・目標実現に向けた研究シナリオ

2000年に始まった本プロジェクトでは、「GPCR創薬関連の生化学実験上のリスクを可能な限り軽減するため、バイオインフォマティクス技術により実験結果を予測して、実験の設計に資する情報を提示する」ということが目的であった。

そのための具体的目標は、まず、①ヒトのGPCR遺伝子を新規遺伝子まで含め、網羅的にゲノム配列から同定、保有してデータベース (DB) 化すること、これらの遺伝子に計算手法で可能な限り高効率に機能・構造情報を付加することであった。これらの基盤ができれば、生化学実験で単離、発現するのが困難な新規GPCRをあらかじめDB中から容易に見出せるようになる。

もう一つの目標は、②リガンドやGPCR配列情報を入力するとGタンパク質の活性化を予測できるプログラムを開発し、結合リガンドが不明なオーファン受容体に応用することであった。これにより、GPCRとそれを制御する薬物の組合せを網羅的に探索することで、オーファン受容体に対するリガンドスクリーニング実験系の設計も可能になるものと期待できた。すなわち製薬分野の研究を加速させるような貢献ができる可能性がある。

本プロジェクトのスタート時に考えた目標はここまでであった。バイオインフォマティクスの研究サイクルは、基礎から応用へ移行するまでが短く、上記の成果はDBやプログラム等の“製品”になる。いわば見えやすい形で典型的な本格研究のサイクルを完結できるため、一応ここで一区切りになると考えた。

実際は、このサイクルだけで完了ではなくてであったがライフサイエンス分野の進展は極めて速いため、その先の研究シナリオを詳細に正しく書くのは不可能であった。ただ“製品”を基に、より大きな流れに対応していくことになるのだろうとは、おぼろげながら予測していた。それを行おうとすると、全体では数年以上かかるプロジェクトになることは当時から予測できた。

3 一巡目の本格研究

以下では、本プロジェクト開始当初の研究サイクル一巡目について示す。これはヒトゲノム配列から遺伝子を同定することから始まった。

3.1 ゲノム配列からの遺伝子同定

ゲノムとは、細胞核内の染色体に記載された生命の設計

図の総体である。この中から、計算機で遺伝子を同定することは、長大なテキストファイルとして記録された DNA（デオキシリボ核酸）配列情報から、遺伝子領域の特徴を持つ領域を検出することと同義である。（近年の解釈では遺伝子領域は、タンパク質をコードする領域とともに機能する RNA（リボ核酸）をコードする領域も含め、広い概念を持つが、本論文では、話の都合上それをタンパク質コード領域だけに限る。）

多くの場合、真核生物では遺伝子はゲノムの DNA 配列上でイントロンと呼ばれる複数の領域で分断される(図 2)。この情報が最終的にタンパク質情報になるまでに mRNA に転写され、その後イントロンが切り取られ、分断された側のエクソン領域だけが結合した成熟 mRNA になった後、アミノ酸配列に翻訳される。翻訳の際にアミノ酸の一字に対応する三つ組の塩基の並びをコドンという。

コドン単位で DNA 配列を順に区切りながら読んでいくときに、その開始点に対応するコドン列が出来るが、開始位置から一つまたは二つ塩基をずらした場合と逆側から読んだ場合も含めて 6 種類のコドン列が（読み枠）有り得る。計算手法で遺伝子領域を捉えるためには、各読み枠ごとにタンパク質のアミノ酸配列への翻訳を開始する場所のコドン（開始コドン）、終止するコドン（終止コドン）、エクソンとイントロンの境界等の特徴領域の文字列情報を学習してモデル化し、これに良く適合する領域を抽出する。

探索する対象が GPCR であれば、遺伝子としての一般的な特徴に加え、GPCR というタンパク質として共通する特徴領域をモデルに採用する。この特徴領域とは、7 本の膜貫通ヘリックスを持つこと、アミノ酸配列の NH₂ 末端側の糖鎖修飾部位、COOH 末端側の脂質結合部位、細胞質側の膜貫通ヘリックス末端にある三つのアミノ酸（Asp、Arg、Tyr の並び（DRY 配列））等、機能に関わる短い共通配列（機能モチーフ）や、数十残基の大域的に共通した

構造（ドメイン）等である。

遺伝子同定に用いるバイオインフォマティクスの要素技術は、上述のような遺伝子の特徴を捉えるプログラム群である。新規遺伝子を間違わずに見つけることに全力を傾けている実験研究者から見れば、ある割合の成功率で予測できるといわれてもまだ利用するのに躊躇されるだろう。予測したものはほぼ全て正しいといえるところまで迫ることが望まれている。そこで極めて高い精度で予測可能にするため、国内外の適切なプログラム群を選定し、各々の性能を評価した。

まず、エクソン-イントロン境界をモデル化して既知遺伝子配列をゲノムへ貼り付けるプログラム (ALN^[3]) と、核酸塩基の出現・遷移確率モデル (隠れマルコフモデル) を遺伝子構造に適用したプログラム (GeneDecoder^[4]) を評価した。既知の遺伝子のエクソン-イントロン構造が明らかになっている核酸配列領域の学習データから遺伝子領域の最大長を確認し、任意のエクソンから上流、下流側へどれだけ（付加伸展長）広げれば、遺伝子全体領域をカバーできるかという点、あるいは、エクソンを最も精度良く同定するための配列類似スコアを調査した。

次に、遺伝子配列候補が実際に GPCR か否かを判別するための道具として、配列検索プログラム (blastp)、GPCR 特有のモチーフ帰属プログラム (HMMER^[5])、膜貫通ヘリックス領域予測プログラム (SOSUI^[6]) を評価した。GPCR を選択するパラメータは、blastp ではタンパク質配列を検索するときの類似期待値スコア (E-値)、HMMER では、隠れマルコフモデルで表現した機能モチーフ (Pfam) を検索するときの E-値、SOSUI では予測ヘリックスの本数である。タンパク質配列 DB (UniProt、GPCRDB 等) 中の、既知 GPCR 配列と GPCR 以外の配列を含む学習セットから、正しい GPCR 配列を判別するためのパラメータの閾値を、感度 (正しいものの中から正しく予測した割合)、選択性 (予測した中に含まれる正解の割合) を評価しながら定めて行った。偽陰性 (正しい配列を予測できない場合) の結果を最小限に抑えながら、ほぼ 100 % の選択性を達成できる閾値を「最高選択性閾値」、一方、偽陽性 (GPCR とは異なる配列を予測してしまう場合) の結果を最小限に抑えながら、100 % 近くの感度を達成できる閾値を「最高感度閾値」と定義した。

以上のように、研究の問題解決に必要な基礎知識ともいえる各要素プログラムの特性を「理解」することを目的としたことから、この段階は第 1 種基礎研究といえる。

3.2 遺伝子同定・機能解析パイプライン

3.1 節の研究を基に、ゲノム配列から GPCR 遺伝子を網羅的に同定するシステムを開発した。これは、各要素プ

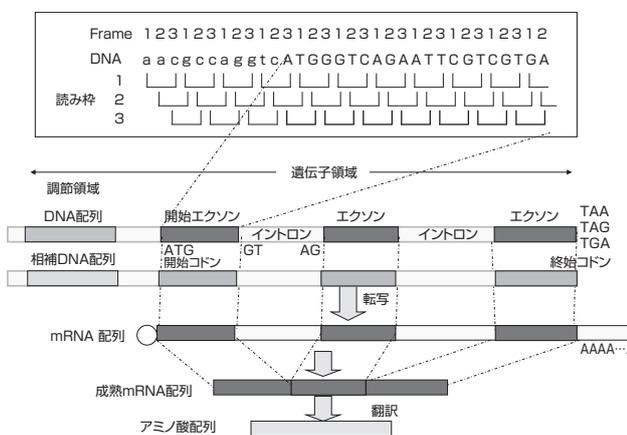


図 2 DNA 配列上の遺伝子領域の概念図

プログラムを、入力から出力を生じるパイプとみなし、各パイプを段階的に最適な閾値や順番でつなぎ合わせたもの（SEVENS パイプライン：図3）であり、ゲノム配列からタンパク質コード領域を抽出し（遺伝子発見段階）、これらの中からGPCR 遺伝子候補を確定させ（GPCR 遺伝子精密化段階）、機能・構造情報を付加する（機能解析段階）という各段階からなる。

この部分は、各要素プログラムを組み合わせるシステム化し、その結果としての制御を試みるという観点なので、第2種基礎研究といえる。

1) 遺伝子発見段階

ゲノムのDNA 配列を6つの読み枠ごとにスキャンし、それに対応するコドンを実験室に翻訳しながら、既知GPCRのアミノ酸配列と一定の類似スコア以上で合致する断片領域（エクソン領域に相当）を全てリスト化する（tblastn プログラム）。これで遺伝子が存在する領域が絞られるので、ALN^[3]により、その上流、下流1,000塩基まで探索領域を広げながら既知の配列に相当した全長遺伝子を構成する。この他にも、遺伝子領域を確率モデル化したGeneDecoder^[4]により得られた配列も同時に用意した。このため複数の配列が完全一致が部分一致で重なる領域が出てくるが、有意な重複がある部分をつながりながら最長になるアミノ酸配列を決定する。

2) GPCR遺伝子精密化段階

決定したアミノ酸配列を順次、配列検索プログラム（blastp）、機能モチーフ同定プログラム（HMMER^[5]）、膜貫通ヘリックス予測プログラム（SOSUI^[6]）に流していく（図3）。3.1節でプログラム毎に決定した最高選択性閾値と最高感度閾値を組合せ、様々な検出選択性と感度で得られるデー

タセットを作成できる。多少の擬陽性（誤予測）を許しても、GPCRを全て漏れなく抽出したいなら、blastp、HMMER、SOSUIの最高感度閾値（各々E値 $<10^{-30}$ 、E値 $<10^{-1}$ 、予測本数範囲6～8本）で得られる出力の和集合を求める。これは学習セットに対して20.4%の選択性ながら100%の感度を示す（レベルD）。一方、最も精密なデータセット（レベルA）は、blastとHMMERの最高選択性閾値（各々E値 $<10^{-80}$ 、E値 $<10^{-10}$ ）による出力の和集合となる。これは学習セットに対し99.4%の感度と96.6%の選択性を示す。また、この二つレベルの間に中間的存在としてレベルB（感度99.8%、選択性70%）、レベルC（感度99.9%、選択性48.4%）のデータセットを作成した。最後に、データセットをGPCR以外の配列データに照合し、間違えて予測した配列は除去する。

3) 機能解析段階

同定したGPCR配列で、互いにE値 $<10^{-30}$ で関連付けられる配列同士をグループ化し、各々を既知のファミリーに帰属させる。既知GPCR配列に対し100残基以上96%以上の類似度で整列できる配列は既知配列と同一とし、それ以外の配列を新規配列とみなした。またエクソン領域に終始コドンが含まれていれば、偽遺伝子とする。各々の配列には、GPCR遺伝子精密化段階で行った解析を基に、染色体上の座標、エクソン数、配列長、配列検索情報、膜貫通ヘリックス領域、機能モチーフ領域、ドメイン領域等の機能・構造情報を付加する。

3.3 プロジェクトのアウトプット

ヒトゲノムから全てのGPCRを同定し終えた段階では、配列セットのレベル（A, B, C, D）に従って827、1300、1517、2109配列を得た。配列が多いセットほど擬陽性（正

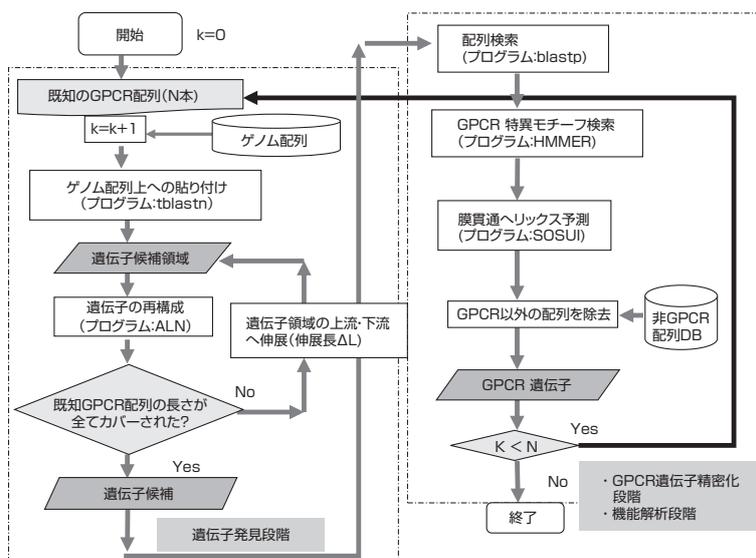


図3 SEVENS-パイプライン
ゲノム配列からGPCR遺伝子を網羅的に同定するために段階的に様々なツールを最適な閾値、順番で組合せた解析パイプライン。

しくないものを予測してしまう場合)が含まれる可能性が高い一方で、新規 GPCR を含む可能性が高くなる。興味深いことに 11 番染色体上に GPCR の大部分が集中し、嗅覚受容体がそのほとんどを占めることや、3 番染色体にケモカイン受容体が集中することなどが分かったが、これは網羅的な遺伝子同定により初めて可能になったわけである。これらの中で新規と判定した数百の配列について 2002 年に特許を出願したが、それに対してある製薬企業から内容開示請求があり、開示料収入を得た。つまり製品化研究としての成果が上がったのである。

計算手法で構造・機能情報が付加された GPCR 配列は、2003 年にデータベースに収めて公開した (SEVENS^[7] <http://sevens.cbrc.jp/1.20/>、一番最初のバージョン)。この時点では、コア技術が一応完成し、白紙状態からの最初のサイクルとしてのプロジェクトは一度区切りをむかえた。

4 循環的な発展を遂げるプロジェクト

4.1 ホップ: プロジェクト全体のコア技術開発

2000 年に始まった本プロジェクトは、要素技術の解析、システム化、製品化と一巡し、WEB 公開した後でも続いている。前節の“一順目の本格研究”が、跳躍でいうところのホップの段階だとすると、この後、ステップ、ジャンプと段階が上がっていく過程になる。以下に、その後の共同研究への展開と、それを通じての技術開発の進展を示す。

4.2 ステップ: 産学との連携からコア技術へのフィードバック

2002 年、企業と共同し SEVENS 中の新規 GPCR に関して、ヒトの複数の組織において多くの配列の発現を実験的に確認し、特に重要な配列に対し特許を出願した。計算手法で予測した遺伝子であっても発現が確認できたということは私たちの方針の妥当性を示すことになった。

しかし一方で課題も残った。遺伝子の発現確認には、微量な核酸配列サンプルを短時間に急増幅できるポリメラーゼ連鎖反応 (PCR 反応) という方法を用いたが、この反応解析を行うための配列は、その両末端部分が正確な完全長であることが望ましい。しかし、予測遺伝子には開始 (または終止) エクソンの同定に失敗して両末端が欠けていた例が多いことが分かった。このほとんどが、多くのエクソンからなる長い遺伝子で、非常に広い領域に広がっていたため、遺伝子領域周辺の付加伸展長のパラメータが、3.1 節で定めた値 (1,000 塩基) では十分ではなかったのだ。そこで改めて遺伝子存在領域を、常識的な想定範囲よりはるかに広げて検討したところ、驚くことに任意のエクソンの上流、下流 140,000 塩基までは考慮する必要があることが判明した。

SEVENS パイプラインの対象は GPCR だが、各段階のパラメータを替えれば、別の種類のタンパク質に対しても応用可能である。2002 年から東京大学のベンチャー研究所と始めた共同研究ではこれを狙った。慢性関節リウマチや多発性硬化症など難治性炎症疾患では、慢性的炎症個所に免疫細胞が過度に集積して組織を破壊する。これはケモカインというタンパク質がその受容体の GPCR (CCR2) と結合することで免疫細胞の遊走を誘発するためなので、ケモカインの結合を阻害する分子 (アンタゴニスト) の探索競争になっていた。しかし CCR2 と構造が類似し、臓器形成や細胞の分化・増殖時に作用するような別のサブタイプのケモカイン受容体同士でアンタゴニストが交差した際に起きると危惧される副作用を回避するため、アンタゴニストとは別ルートで CCR2 を制御する分子を探索することが望まれていた。

実験的研究からは、既に CCR2 の細胞内 C 末端に特異的に会合する新規遺伝子 (FROUNT) がその候補であることを示していた。一方私たちは、これが複数のヘリックスが繰り返し現れる構造からなる 600 残基の長いタンパク質であることと、短く弱いモチーフを複数持つという特徴を入れてゲノム中から探索した結果、この新規遺伝子自体と完全一致する領域は 2 か所しか存在しないが、弱いスコアながら一致を示す領域であれば複数存在することが分かった。この研究は Nature Immunology^[8] に掲載された。

以上、二つの共同研究で再検討した技術を SEVENS パイプラインに反映していくことになった。

4.3 ジャンプ: 新たな機能予測プログラムの開発

2004 年から、製薬企業との共同研究が始まった。ここでは、選択的に G タンパク質の活性化を制御できるリガンドを効率的かつ網羅的にスクリーニングする計算機システムを構築し、最終的に結合リガンドが不明なオーファン受容体のリガンドスクリーニングに応用することをめざした。

まず、SEVENS のレベル A データセットから 108 本のヒトの新規の GPCR を選び出したが、これらはオーファン受容体でもある。次に、スクリーニングする側のリガンドについては、遺伝子同定パイプラインをペプチド性リガンド探索用に最適化してから、既知ペプチド性リガンドを基にしてヒトゲノムから網羅的に同定した。

一方で、G タンパク質活性化をモニターできるプログラムを開発した。まず結合リガンドと共役 G タンパク質が既知の配列 ($G_{i/o}$ 型: 61、 $G_{q/11}$ 型: 47、 G_s 型: 23) を用い、認識性能が最も高いとされている機械学習手法の Support Vector Machine (SVM) 法により、リガンド、GPCR、G タンパク質の様々な部位の物理化学的パラメータから、共役 G タンパク質の種類を判別分類するのに効果的に効くパ

ラメータと最適な判別平面を決定した。最適化パラメータ^[9]と判別平面を用いて、リガンド分子量と GPCR を入力すると最初に G_s 結合タイプを選別後、残りから G_{i/o} か G_{q/11} かの 2 者判別を行うという階層判別のプログラム(GRIFFIN)にしたが、85%以上の感度、選択性で予測可能となった^[10]。

以上を使えば、GPCR に結合するリガンドデータベースを基に、特定のペプチド性リガンドが結合した受容体がシグナル伝達下流で活性化させる G タンパク質種を予測できるので、受容体を発現させる評価系の設計にも役立つ。GRIFFIN は、SEVENS の機能解析段階において、機能未知 GPCR 予測用に利用していくこととなった。

4.4 再ホップ：研究のスケールアップのため第1種基礎研究

これまではヒトゲノムだけを扱った内容だったが、原理的には他の生物ゲノムでも応用可能である。2005 年から、文部科学省の特定領域研究に参加し、本格的に比較ゲノム研究を開始したが、それには SEVENS パイプラインを他の生物用に改良する必要があった。当時、入手できた 200 を超える原核生物ゲノム、十数種の真核生物ゲノム配列を基に、既知遺伝子をゲノム配列にマップする際の類似期待値スコア (E 値) や遺伝子候補領域の上 / 下流への付加伸展長等を調査した。改良パイプラインを用いたところ、GPCR は原核生物からは殆ど同定されない一方、真核生物種では酵母で数個、植物で十数個、昆虫で約 200、魚類、鳥類では約数 100、哺乳類では約数 100 ~ 数 1,000 見出された。昆虫、線形動物、脊椎動物間で、神経伝達や細胞間相互作用等生命活動に最低限必要な受容体は全生物に保存されていたが、脊椎動物ではより複雑な機能に関連する受容体の種類が急増していた。また外界の化学物質の受容体は、水中、空気中など環境に対応して生物種ごとに特有な分布をみせた。例えば哺乳類では GPCR 遺伝子のうち嗅覚受容体の割合が多く 7 割程度にも及んだ。これらは高密度な遺伝子重複を繰り返して急増したことを示唆している^[11]。多生物種用 SEVENS パイプラインはこの時点でほぼ自動化し、生物の種類が増える度に解析し続けることが可能になった。

4.5 再ステップ：新規プロトコルを導入したパイプラインの活用

様々な生物種から GPCR を同定、公開していることが評価され、2007 年から日中共同研究によるカイコゲノムプロジェクトに参加するようになった。カイコゲノムは鱗翅目昆虫で最初に完成した配列で、解析により医療用タンパク質等や新機能絹糸の生産技術開発を加速することで、新しい農業開発等、昆虫産業の展開に貢献する可能性がある。

私たちは、東京大学、京都工芸繊維大グループと共同

し、カイコゲノムから 7 本膜貫通ヘリックス型受容体を同定し、ファミリー分布を明らかにした。特に嗅覚、味覚受容体に関しては他の昆虫 (ショウジョウバエ、ハマダラカ、ミツバチ) と比べてカイコ特有の性質をいくつか見出した^[12]。

ここでも、SEVENS パイプラインを昆虫用に改良することから始める必要があった。すなわち、既知遺伝子をゲノムに貼る際の配列類似度スコア、上流、下流へ広げる付加伸展長の調査、および昆虫嗅覚受容体のみに見られる共通配列の隠れマルコフモデル化等を行った。また同定遺伝子数をできる限り最大化することを目指したため、新しいプロトコルを導入した。通常のパイプラインでは、既知遺伝子を種にすると、それよりも多い数の新規遺伝子を含めた遺伝子候補が釣れてくる。そこで、これら新規遺伝子を改めてパイプラインの最初の種にすれば、さらに新規の数が増えていく。こうして予測遺伝子数が収束するまで逐次的に繰り返す (再帰計算) というものである。これを応用し、嗅覚受容体を 66 個同定したが、この中に含まれる新規受容体 18 個の発現、機能解析実験により、カイコが桑の葉に強くひき寄せられる要因となる匂い物質 (シスジャスモン) とその受容体を世界で初めて同定することができた。これは生物学分野で世界的成果となり、Current Biology 誌に掲載された^[13]。

昆虫用のパイプラインや再帰計算プロトコルは、現在の SEVENS に反映している。

4.6 現在の成果 SEVENSとGRIFFIN

2009 年現在、SEVENS は科学研究費補助金 (研究成果公開促進費) の支援のもと、43 種の真核生物種に対し 24,545 遺伝子を収納しており、様々な機能・構造情報を階層的にまとめ、視覚的に表現した総合 DB になっている。これまでの共同研究で改良された技術がその都度フィードバックされ、現在は情報量がとても豊富になっている。図 4 に現在の SEVENS の WEB 画面 (<http://sevens.cbrc.jp>) を示す。

トップページには真核生物のリストが表示され、生物種を指定すると、検索画面が表示される。ここでの染色体マップ、系統樹アイコン、検索条件入力フォームのいずれからも GPCR 詳細解析画面に移動できる。詳細解析画面では選択した GPCR の座標やエクソン配列、配列類似性検索、遺伝子発現パターン、リガンド結合、G タンパク質結合、アミノ酸配列の組成、予測膜貫通ヘリックス領域、機能モチーフ領域、ドメイン領域、不定形な構造になると予測した領域 (ディスオーダー領域)、エクソン-イントロン境界、偽遺伝子、新規遺伝子、立体構造モデリング等の情報が閲覧できる。

一方、機能予測のために開発した GRIFFIN は WEB で

も利用可能であり (<http://griffin.cbrc.jp/>)、リガンド分子量と GPCR 配列を入力すると、結合する G タンパク質を予測する。リガンド分子量は特定の値でも任意の刻み数で段階的に指定することもできる。段階的なリガンド分子量指定は、結合リガンドが不明なオーファン受容体の結合 G タンパク質予測に役立つ。

5 再ジャンプ：今後の研究展開

5.1 高次な生命現象の理解

これまででは、網羅的な観点ながらも個別遺伝子の機能解析に重点を置いていたが、今後は遺伝子全体のネットワークに根ざした高次な生命現象の理解に向けた研究が必要である。

この観点で、現在取り組み始めたのは、哺乳類 GPCR の大部分を占める嗅覚受容体に関与するシステムの研究である。嗅覚システムは、膨大な匂い分子種の組み合わせを媒介として記憶や感情を誘引するため、もしこのシステムを体系的に理解できれば、将来的には匂い分子のブレンドにより快適に感じる生活環境を生み出すための研究に繋がる可能性もある。

多様な匂い分子に反応する数百種の嗅覚受容体全てからの電気的な活性化信号が、嗅上皮組織で統合され 2 次元パターン（匂い地図）へと変換される。このような匂い分子、受容体、細胞、匂い地図の時間、空間的な因果関係を理解したい。具体的には匂い分子に対する全ての

嗅覚受容体の活性を予測するプログラム（活性化アレイ）を開発し、ヒトやマウスの全嗅覚受容体に応用する予定である。既に私たちは、SEVENS 中に嗅覚受容体を全て保有している。GRIFFIN を改良すれば匂い分子に対する全嗅覚受容体の応答シミュレーションができると考えている。

5.2 GPCRの新しい研究フェーズ

近年の GPCR の立体構造に関する急激な研究の進展も意識する必要がある。これまで長い間、立体構造が解かれたのは、唯一牛のロドプシンのみで、創薬の現場ではこれを鋳型にしたモデリング構造を解析することが当然視されていた。しかし 2007 年～2008 年に異なるファミリーの GPCR 構造^{[14][15]}が立て続けに決定されたことから、従来の研究法が急速に大きく変わると予想される。

新しい立体構造からは、リガンド結合部位、G タンパク質結合部位の構造の違いは、ファミリー間で無視できない程度広がっていることが分かったので、結局は鋳型として GPCR ファミリーの代表全ての立体構造を決める必要があることが示唆されている。しかし発現と結晶化がボトルネックとなり、すぐには実現困難であるため、予め立体構造決定とは別の切り口で構造情報を得ておきたい。そこで配列レベルでファミリーごとの立体構造を反映した情報を抽出、概観するのが重要であり、SEVENS は正にこの目的で利用できる。

5.3 統合データベースを意識した開発

生命情報を収めた DB はライフサイエンス研究を支える

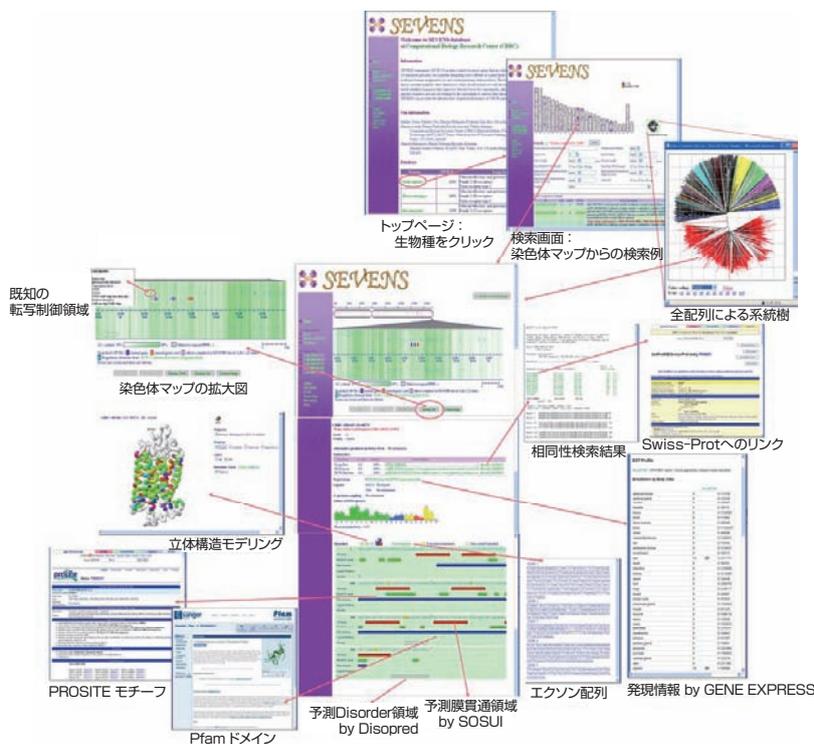


図 4 現在の SEVENS データベース (<http://sevens.cbrc.jp>)

基盤であるが、様々な研究機関に散在しているため利便性が低い。そこで各々のDBを一元的に管理する形で統合する体制作りが国として急速に進められている（例えば、文部科学省や経済産業省の統合DBプロジェクト等）。今後SEVENSもこの流れを意識して設計していく必要がある。すなわち恒久的な維持、管理を行うために更新を完全自動化し、なおかつデータの信頼度を高く保つ方策が必要である。

6 議論

6.1 研究シナリオ：循環発展的なプロジェクト構造

前章までに、本プロジェクトの成果と今後の展開を示した。ライフサイエンス分野の研究の進展は早いので、遠い将来までの“正しい”研究シナリオを書くのは困難であるということを最初に述べたが、振り返ってみると実に効率よく研究が展開していったように思える。2000年からスタートしたプロジェクトは、まずGPCRの網羅的DBの開発から公開までが、最初の段階の本格研究になっている。しかしこの段階は、より大きな研究発展段階の、ホップ段階（第1種基礎研究）として繰り返されておき、これに続く段階として、第2種基礎研究的な共同研究、製品化研究的な共同研究が循環的に発展を続け、今日に至っている(図5(a))。

なぜ直線的ではなく、このような発展形態になったのだろうか？次のような理由を考えている。まず、2章で示したとおりバイオインフォマティクス分野では成果に至るまでの

時間が短いので、図5(a)の各研究段階は1～2年で決着がつく小プロジェクトに成り易い。それら小段階の研究方向性を小ベクトルと考えると、それらとライフサイエンス全体の方向性の合成ベクトルが全体のプロジェクトの方向を決めるといえる。このような方向の決定は段階ごとになされていく。次に、そもそもライフサイエンス分野の方向性が、飛躍的な技術発展に伴いながら循環発展的な動きをするのでその影響を受けて発展していくことになる。

では、この小ベクトルを今日まで途絶えること無く進めてきた駆動力は何だったのだろうか？以下にその要素を示してみたが、これらが図5(b)のように働いて研究方向性が決まってきたと考えている。

1) 長期熟成のコア技術

プロジェクトは8年以上が経過している。通常は5年程度が常識で、研究打ち切りを言われていてもおかしくはない。しかし私たちの場合、コア技術を長期熟成することで、研究のステージが次々と上がってきたことを伝えたい。循環発展的構造が途切れなかった最も本質的な要因は、遺伝子同定パイプラインや、DB、プログラムに対して粘り強く改良を積み重ねることでSEVENS自体が信頼され得るものになったことだと思っている。一旦、完成してしまうと論文を1本書くだけで、後はメンテナンスがなされないDBが多い中、何年経過しても時流に対応して更新し続けて残っていること自体がブランド力となり、共同研究が舞い込んでくるように思う。

2) 実験研究者との密な連携

バイオインフォマティクス技術は大量のデータを短時間で

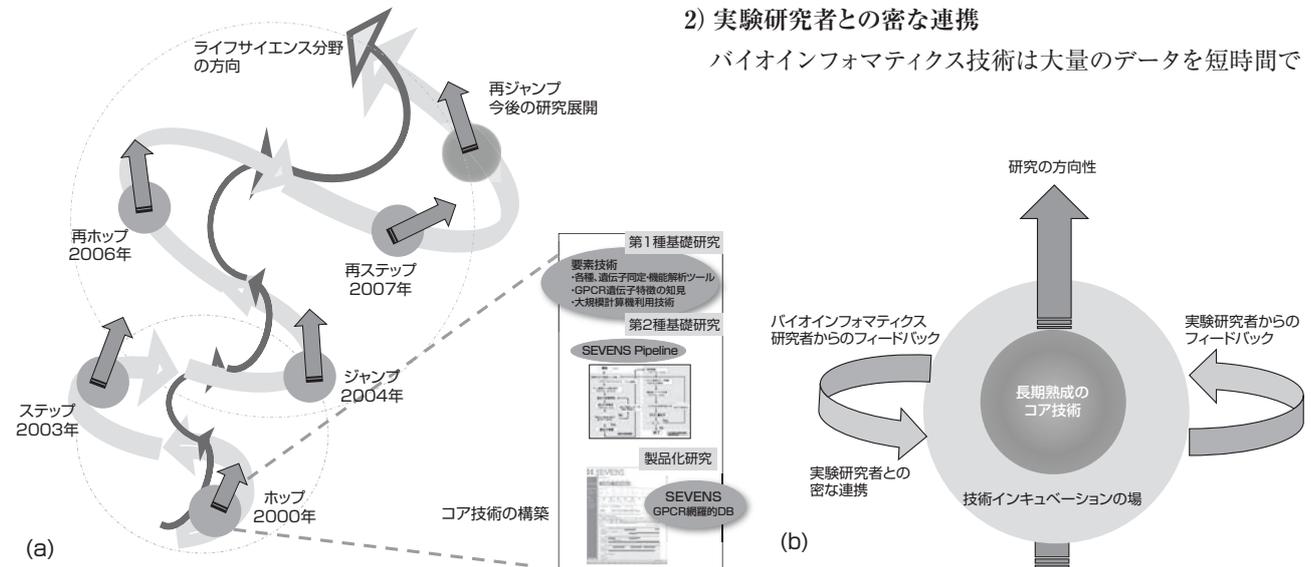


図5 循環的な発展をとげるプロジェクト構造の概念図

(a) プロジェクト開始時のGPCRの網羅的DBの開発から公開までが、小さな意味での本格研究だが、この段階はより大きな研究発展段階の第1種基礎研究的な段階（ホップ、再ホップ）として繰り返され、これに続き、第2種基礎研究的な共同研究（ステップ、再ステップ）、製品化研究的（ジャンプ、再ジャンプ）な共同研究が循環的に展開している。これは各ステップの共同研究の方向性と、自身が急速に進展するライフサイエンス分野の方向性の相互作用として発展し続ける形態である。

(b) 各ステップの共同研究の駆動力となる3要素の関係性。①長期熟成されたコア技術は、②技術インキュベーションを生む研究環境内で、さらに成長、熟成が進む。これをもとにバイオインフォマティクス研究者と実験研究者との③密な連携によるフィードバックがかかった回転運動が共同研究の方向ベクトルを決める。これはコマの回転が軸方向を決めるのに似ている。

処理して、結果を出すことは得意分野である。しかしながらその結果が真に意味をもつか否かは、実験的研究で確認しなくては検証できない。そして検証の結果からのフィードバックを受けることで、要素技術で設定したパラメータをより良い方向に修正することができる。一方、実験系研究者にとっては、予測結果を受けて、リスクやコストの低い、より良い実験系の設計に修正することができる。私たちのプロジェクトでは、実験研究者との様々な共同研究を通じて議論を重ね、この双方向からのフィードバックが何度も働き、解析・予測技術の改良作業が加速化されたのだと思う。私たちの研究ユニットとしては実験を行わないが、今後のあらゆる研究で、常に実験研究者と連携するのが必須であるぐらいの取り組みが必要だと感じている。

3) インキュベーションの場

生命情報科学研究センター（現在のセンターの前身）の設立と前後して2000年にプロジェクトはスタートした。しかし必ずしも順調な始まりとはいえなかった。当時としては、前例の無いことだったので、どこから手を付け進行するか、模索しながらの始まりだった。もちろん、プロジェクトの進行に関する見通しが全くなかったわけではない。細胞膜のタンパク質を長年研究してきた者として、“こうすればできる”というイメージは、当初からもっていたが、筆者一人では具体的に実現化する手段が掴めなかった。しかし、並列計算環境の専門家である秋山氏、数理モデルの専門家である浅井氏と共同することで、大規模並列計算環境や高度な数学的手法を応用した強力な解析ができるようになった。また、現在でも、様々な局面での周りの研究者との議論が参考になっている。このようなことは、様々なバックグラウンドを持つ研究者が1箇所に集まった生命情報工学研究センターでなければ実現できなかったことであり、この幸運に感謝している。

6.2 研究目標への到達度

本プロジェクト開始時の目的は、GPCR 研究に関しバイオインフォマティクス技術により、実験上の大きなリスクを軽減し、予め実験結果を予測して実験の設計に資する情報を提示することであった。2000年当初に比べ、最近ではKinaseなどのGPCRとは異なるタンパク質や、タンパク質複合体形成阻害剤等が創薬ターゲット中で占める割合が高まっている。しかしGPCRの重要性は未だ色褪せておらず、バイオ情報の増加に伴い、学術論文の本数はむしろ急増している。その中で私たちは目的を達成できたのだろうか？

SEVENSでは、実験ですでに発現を確認しているGPCRだけではなく、生体内で潜在的に発現しうる遺伝子まで把握していることから、本当の意味での網羅的解析ができるという点で独自性をもっており、GPCRの総合的な

理解や関連創薬に大きく貢献できると自負している。しかし実際に貢献できたか否かは、開発したツールがどれくらい利用され、フィードバックを受けたかが一つの指標になる。現在、国際学術誌、文科省や経産省の統合DB整備事業等のポータルサイトにもリンクされ、国内、国外（アメリカ、ドイツ、フランス、ブラジル、スペイン、イタリア、台湾等）の企業や、政府機関等から月平均1,000件程度の非冗長なアクセス数がある。また、創薬関連の代表的WEB DBの1つとして、国際書籍^{[16][17]}にもレビューされている。一方GRIFFINはGタンパク質結合予測のWEBツールとしてトップクラスを競っているところであり、これも国際書籍^[18]にレビューされている。

4章で示したように、これまで多くの産学官連携の共同研究が、循環的な発展をしながら展開し、重要な成果を得てきた。最初の段階では、想像もできなかったが、振り返ってみると実に効率よく研究が展開していったことに驚いている。プロジェクト開始当初では、企業との共同研究が主だったが、ここ3年ほどでアカデミックサイドとの共同研究が多くなった。これは、SEVENSのユーザーの裾野が広がってきたことを示している。最近では、大変うれしいことに、学会の懇親会等で、初めてお会いする製薬企業、大学等の実験系研究者からSEVENSやGRIFFINを利用しており、新規遺伝子の解析に役に立ったとの話を聞くこともある。以上を鑑みると、当初の目標はある程度達成され、自己評価としては満足のいくものと考えている。

SEVENSプロジェクトは今後も発展していく。これまで長い時間をかけて蓄積した機能データを基に、実験研究者と本格的にタイアップして、GPCRが関与する高次元生命現象の解明につながる成果を出していきたいと考えている。

謝辞

このプロジェクトは、多くの方たちとの共同研究である。秋山泰氏（東工大、前生命情報科学研究センター長）、浅井潔氏（東大/生命情報工学研究センター長）、有田正規氏（東大）、油谷浩幸教授（東大）、佐藤智之氏（みずほ情報総研）、大河内郁夫氏（みずほ情報総研）には、GPCR遺伝子同定技術導入に関してご助力をいただいた。広川貴次氏（生命情報工学研究センター 研究チーム長）、矢葺幸光氏（情報数理研究所）にはGRIFFIN開発に関してご助力をいただいた。藤渕航氏（生命情報工学研究センター 研究チーム長）、西澤達也氏（情報数理研究所）、奈良先端科学技術大学院大学の多くの学生には、GPCRの比較ゲノム解析に関してご助力をいただいた。以上の皆様に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] E. S. Lander *et al.*: International Human Genome Sequencing Consortium. Initial sequencing and analysis of the human genome, *Nature*, 409, 860-921 (2001).
- [2] A. Shenker: G protein-coupled receptor structure and function: The impact of disease-causing mutations, *Baillieres Clin. Endocrinol Metab.*, 9, 427-451 (1995).
- [3] O. Gotoh: Homology-based gene structure prediction: Simplified matching algorithm using a translated codon, (tron) and improved accuracy by allowing for long gaps, *Bioinformatics*, 16, 190-202 (2000).
- [4] <http://genedecoder.cbrc.jp/>
- [5] <http://hmmer.janelia.org/>
- [6] T. Hirokawa, S. Boon-Chieng and S. Mitaku: SOSUI, Classification and secondary structure prediction system for membrane proteins, *Bioinformatics*, 14, 378-379 (1998).
- [7] M. Suwa, T. Sato, I. Okouchi, T. Kumagai, M. Arita, K. Asai, Y. Akiyama, S. Matsumoto, S. Tsutsumi and H. Aburatani: SEVENS, *Nucleic Acids Research.*, 31, Online summary paper (<http://www3.oup.co.uk/nar/database/summary/summary373>), (2003).
- [8] Y. Terashima, N. Onai, M. Enomoto, V. Poonpiriya, T. Hamada, K. Motomura, M. Suwa, T. Ezaki, T. Haga, S. Kanagasaki and K. Matsushima: Pivotal function for cytoplasmic protein FROUNT in CCR2-mediated monocyte chemotaxis, *Nature Immunology*, 6, 827-835 (2005).
- [9] T. Muramatsu and M. Suwa: Statistical analysis and prediction of functional residues effective for GPCR-G-protein coupling selectivity, *PROTEIN Engineering Design & Selection*, 19, 277-283 (2006).
- [10] Y. Yabuki, T. Muramatsu, T. Hirokawa, H. Mukai and M. Suwa: GRIFFIN, a system for predicting GPCR-G-protein coupling selectivity using a support vector machine and a hidden Markov model, *Nucleic Acid Research*, 33, W148-W153 (2005).
- [11] Y. Ono, W. Fujibuchi and M. Suwa: Automatic gene collection system for genome-scale overview of G-protein coupled receptors in eukaryotes, *Gene*, 364, 63-73 (2005).
- [12] Q. Xia *et al.*: Silk worm genome consortium, The genome of a lepidopteran model insect, the silk worm *Bombyx mori*, *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 38, 1036-1045 (2008).
- [13] K. Tanaka, Y. Uda, Y. Ono, T. Nakagawa, M. Suwa, R. Yamaoka and K. Touhara: Highly selective tuning of a silk worm olfactory receptor to a key mulberry leaf volatile, *Curr. Biol.* 19, 881- 890 (2009).
- [14] M. A. Hanson and R. C. Stevens: Discovery of new GPCR biology, one receptor structure at a time, *Structure*. 17, 8-14 (2009).
- [15] D. T. Lodowski, T. E. Angel and K. Palczewski: Comparative analysis of GPCR crystal structures, *Photochem Photobiol.*, 85425-85430 (2009).
- [16] L. X. Yao, Z. C. Wu, Z. L. Ji, Y. Z. Chen and X. Chen: Internet resources related to drug action and human response: A review, *Applied Bioinformatics*, 5, 131-139 (2006).
- [17] L. J. Zhi, L. Z. Sun, X. Chen, C. J. Zheng, L. X. Yao, L. Y. Han, Z. W. Cao, J. F. Wang, W. K. Yeo, C. Z. Cai and Y. Z. Chen: Internet resources for proteins associated with drug therapeutic effects, adverse reactions and ADME, *Drug Discovery Today*, 8, 526-529 (2003).
- [18] A. Daskalaki ed.: Handbook of Research on Systems Biology Applications in Medicine, Vol I (Medical Information Science Reference Press) (2009).

執筆者略歴

諏訪 牧子 (すわ まきこ)

独立行政法人産業技術総合研究所生命情報工学研究センター主幹研究員。1986年青山学院大学大学院理工学研究科前期課程修了、博士(理学)。東京農工大学工学部、文部技官、助手、株式会社ヘリックス研究所主任研究員、工業技術院電子技術総合研究所主任研究員、産業技術総合研究所生命情報科学研究センター 研究チーム長、副研究センター長を経て、2007年より現職。専門：バイオインフォマティクス、生物物理学。本論文で記述したプロジェクトでは全体の統括を担当した。



小野 幸輝 (おの ゆきてる)

株式会社情報数理研究所バイオリサイエンスシステム事業部第8ビジネスグループマネージャー。1994年名古屋大学大学院理学研究科生物学専攻前期課程修了。株式会社ジャステックを経て、2001年より現職。専門：バイオインフォマティクス。本論文では主にSEVENSのWEBインターフェースの開発と共同研究で生じた改良点の実装を担当した。



査読者との議論

議論1 研究の進め方についての主張点

コメント (赤松 幹之: 産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門)

タイトルにあるように「バイオインフォマティクス戦略」的な内容になっていることがシンセシオロジー論文として期待されます。戦略的とは、ゴールを意図して研究のシナリオ(プロセス)を事前に定めてから研究をすることですので、もし、このような循環的な研究の進め方として意図的に工夫されたことがあれば、その記述をお願いします。また、著者自身が意図せずこのような展開になったのであれば、このような循環的なDBの発展が起きるために必要な条件は何であるか書いていただければと思います。また、DBの循環的な発展プロセスを述べるのが本論文のポイントだと思いますので、その発展プロセスを図示したものを含めていただくと、主張点が分かり易くなると思います。

コメント (中島 秀之: はこだて未来大学)

研究手法に関して「伝えたいポイント」を、一般読者層(外部の他分野研究者)も意識して、加筆していただけると良いと思います。

回答 (諏訪 牧子)

本文中で示したバイオインフォマティクス戦略とは、必ずしも、研究のシナリオを事前に定めてからそのロードマップに従って進めて行くものではありません。むしろ、振り返ってみると、意図せずとも実に効率よく研究が展開していったと感じますので、それを生み出すバイオインフォマティクス特有の駆動力があったことに注目したものです。

研究プロジェクト全体の発展の流れは、複数の要素(長期成熟されたコア技術、実験研究者との密な連携、技術インキュベーションを生む環境等)を駆動力として進む個別研究の方向性と、進展の速いライフサイエンス分野の方向性との相互作用としてスパイラルアップして進み続けるダイナミックな形態と考えられます。(この発展プロセスを図5(a)、(b)として図示しました。)

このような形態は、バイオインフォマティクスが研究ターゲットによる強い制限を受けないために、状況に応じて多様な方向性を定めることができるという性質と、基礎研究からその応用と実用化への期間が短いために個別の研究は1~2年で決着がつくという性質によるものだと思います。

議論2 タイトル

コメント (赤松 幹之)

シンセシオロジー的（構成学的）観点からの内容が推察できるように、共同研究によってDBがスパイラルアップして研究が進展していったことを論じた論文であることを示すようなタイトルをご検討ください。

回答 (諏訪 牧子)

最初のタイトル「創薬ターゲット GPCR の探索と機能解析－バイオインフォマティクスの戦略－」では、研究の中身は想像が付きませんが、ご指摘のように構成学という観点で見たときにバイオインフォマティクスの戦略なるものが、どのようにプロジェクト全体に関わってくるのかは読み取れない内容でした。そこでその点を明確にするべく、「循環発展的なプロジェクト構造を生むバイオインフォマティクス戦略－創薬ターゲット遺伝子の網羅的機能解析－」というタイトルに変えました。

議論3 第2種基礎研究

コメント (赤松 幹之)

「3.2 遺伝子同定・機能解析パイプライン」第1段落最後：「これらの組合せの研究は、正に第2種基礎研究といえる」とありますが、できれば、どういう点が第2種基礎研究であると考えられているのか解説していただけないでしょうか。

回答 (諏訪 牧子)

ご指摘の箇所は、遺伝子同定・機能解析パイプラインを開発する内容のところですが、すでに基礎研究を積み重ねて確立している各要素プログラムを組み合わせでシステム化し、それを制御しながら対象に応用するという観点なので、第2種基礎研究と言えるということであり、この趣旨の文章を加筆しました。

議論4 バイオインフォマティクス

コメント (中島 秀之)

1ページに出てくる「バイオインフォマティクス」の説明ですが、生物学の手段としての情報技術（つまり道具）という位置づけだけが強調されています。確かに本論文ではその側面が強いのですが、生命情報工学研究センターが主張してきたのは「単なる道具ではない」ということでした。情動的な考え方・アプローチが大事であるという点を追加しておいてはいかがでしょうか。

回答 (諏訪 牧子)

ご指摘の箇所では、実験研究的アプローチでの困難性を軽減させるという観点から見たときに、バイオインフォマティクス技術の持つ強みを強調しようとしたため、「単なる道具」に見えてしまうような偏った内容になってしまった感があります。そのため、バイオインフォマティクスの一般的な定義をまず先に示した後に、その中に含まれる一側面として、上記のような強みを記載する書き方に修正いたしました。

バイオインフォマティクスは多様なバックグラウンドを持った研究者が集まる広い学問であり、その定義の捉え方と、その中のどの側面を切り取って扱うかは、出身分野に従ってかなりの広がりを持っているのではないかと感じています。私の場合は、生物物理学出身ということもあり、生物学的知見を得ることに力点を置きます。そのための試行錯誤は研究対象に左右されて結構泥臭いものになり、この研究対象にはどのようなプログラムをどんな順番でどのように組み合わせるかという「道具を利用する」的な発想に必然的になることから、本文でもその色が滲み出ていました。これは、本来、対象を選ばずに、美しい体系を適用する方向性を持つ情報学的アプローチとは異なってきますが、このような捉えかたも容認されています。このような多様性こそが、バイオインフォマティクスという分野の発展に広がりを与えるものだと考えています。

バイオ燃料を木材からナノテクで生産する

— セルロースの構造特性を利用した酵素糖化前処理技術 —

遠藤 貴士

現在、木質バイオマスを原料として、セルロース成分等を酵素加水分解して糖に変換した後、発酵してエタノールを製造する技術が注目されている。そのプロセスではセルロースの反応性を高める前処理が必要となる。粉碎処理は効果的な前処理技術の一つであるがコスト高が課題であった。近年我々は、経済的な粉碎前処理方法として湿式メカノケミカル処理技術を開発した。この技術ではセルロース成分をナノサイズの繊維にまでほぐしている。生成したナノ繊維は、セルロースの結晶性が保持され、さらにリグニンが残存しているにもかかわらず、高い酵素反応性を示した。我々が開発した前処理技術は、木材やセルロースが持つナノ構造の特徴を活用した方法である。

キーワード: バイオエタノール、酵素糖化、前処理、メカノケミカル処理、ナノファイバー

Bioethanol Production from woods with the aid of nanotechnology

– Pretreatment for enzymatic saccharification using natural structure of cellulose –

Takashi Endo

Bioethanol production from woody biomass by enzymatic hydrolysis of cellulosic components and fermentation has attracted much attention. In this process, pretreatment is important to improve enzymatic degradability of cellulose. A milling process is one of the most effective methods for pretreatment, but its high cost has been a problem. Recently we have developed the economically-feasible wet-mechanochemical process as milling pretreatment, which can unravel cellulosic components into nanoscale fibers. Thus-obtained nanofibrous product showed a high enzymatic accessibility, while keeping the cellulose crystalline structure and the lignin content. This process is based on the understanding of the nanoscopic structural characteristics of wood and cellulose.

Keywords: Bioethanol, enzymatic saccharification, pretreatment, mechanochemical treatment, nanofiber

1 はじめに

近年、地球温暖化対策やエネルギーセキュリティの観点から自動車用燃料としてのバイオエタノールに大きな関心が集まっている。アメリカやブラジルでは、年間 2,000 万キロリットル以上が生産されている。しかし、これらの原料は食料系バイオマスであるトウモロコシやサトウキビであるため、バイオエタノールの大規模生産により、競合する関連食料品や飼料の高騰が問題となっている。そのため、非食料系バイオマス（セルロース系バイオマス）である木材、稲ワラ、牧草等を原料にできる技術の確立が重要となってきた。セルロース系バイオマスはトウモロコシなどのデンプン系バイオマスと比較して、原料の生産からバイオエタノールの使用までのトータルの環境評価（LCA: Life Cycle Assessment）でも炭酸ガス削減効果が高いといわれている^[1]。

一般的にバイオエタノールは原料から得られた糖を酵母等で発酵することにより製造する。そのため、最初に木材中のセルロース等をグルコースにまで加水分解（糖化）す

る必要がある。現在は酵素糖化法が注目されているが、ここでは木材やセルロースの酵素反応性を向上させるための前処理が重要となっている。

粉碎処理は古くから酵素糖化のための前処理として高コストではあるが効果が高いことが知られている。そこで、新しい前処理技術を開発するにあたって、まず有効であることが判明している粉碎処理を再検証して、セルロース等の酵素糖化性が、どのような機構により向上するのかについて新しい分析手法も取り入れて明らかにした。次に、得られた知見に基づいて新技術の開発を進めた結果、新しいコンセプトに基づく効率的かつ経済的な前処理技術の構築を進めることができた。

2 木材・セルロースを知る

我々の開発した酵素糖化のための前処理技術は、木材やセルロースの構造的特徴を利用した方法である。そのためこの章では、本技術開発のプロセスで重要な視点となる木材やセルロースの組織構造についてその概要を述べる。

産業技術総合研究所 バイオマス研究センター 〒737-0197 呉市広末広 2-2-2
Biomass Technology Research Center, AIST 2-2-2 Suehiro, Hiro, Kure 737-0197, Japan E-mail: t-endo@aist.go.jp

Original manuscript received September 1, 2009, Revisions received October 13, 2009, Accepted October 14, 2009

2.1 セルロースの本質

木材の主要成分はセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンである。セルロースとヘミセルロースは分子が糖で構成されているが、リグニンは複雑な芳香族系化合物である。木材中ではセルロースがもっとも割合が多く、40～50%含まれている。セルロースはグルコースが鎖状に繋がった生体高分子であるが、木材におけるセルロースの本質は、セルロースマイクロフィブリルと呼ばれるセルロース分子の集合体である。セルロース分子は生合成されると直ぐに、分子の板を積み重ねるように規則正しく自己集合して、幅3～5 nmのセルロースマイクロフィブリルを形成する（図1右下）。このマイクロフィブリルがセルロース結晶の本体であり、非常に安定であるため水や一般的な有機溶媒には溶解しない。しかし、セルロース分子の集合力は一般的には弱いとされている水素結合と分子間力のみである。デンプンに含まれるアミロースは、構成糖がグルコースであるにもかかわらず、セルロースとは異なった化学的・物理的性質を持っており、熱水にも溶解する。そのため、アミラーゼによる酵素糖化も迅速に進行してバイオエタノールも容易に製造することができる。

2.2 木材組織はナノ構造体

木材では、図1右上に示すようにナノサイズの「セルロースマイクロフィブリル」がヘミセルロースやリグニンを接着剤のようにして集合してより大きな「木材繊維」を形成し、さらに水を運ぶ導管や仮導管を中心に層状に積層することにより「木材組織」（図1左上）が形成されている。木材の強靱さは、この層構造により発現している。そのイメージは樽や桶に例えられる。桶は円形に並べた縦方向の板の周囲を板とは90度異なった方向にタガが巻いてあることにより、

丈夫な道具となっている。木材組織ではナノサイズのセルロースマイクロフィブリルが桶の板やタガのように高度に積層したナノ構造体となっている。このような強靱な木材組織構造も酵素糖化のための前処理を困難なものにしている。

3 従来技術の課題と新技術開発のシナリオ

3.1 酸糖化と酵素糖化

木材中のセルロース等の糖化方法は、酸糖化法と酵素糖化法に大別される。図2にそれぞれの利点と課題を示した。最も古くから行われているのは硫酸を用いた酸糖化法であり、現在も新しい技術を取り入れた大規模なバイオエタノール製造試験が行われている。硫酸糖化の最大の長所は安価な硫酸を触媒として短時間で反応が進行することである。

しかし、設備は硫酸耐性にする必要があり、また、糖化液や廃液からの硫酸回収・除去も課題としてある。これらはエンジニアリング技術の進歩で解決可能であるが、最も問題となるのは、生成した糖が共存する硫酸により、さらにフルフラールなどに变化する過分解が原理的にも起こりやすいことである^[2]。過分解が起こると、エタノール発酵ができる糖の収量が減るとともに、過分解物は比較的少量（数%）でも酵母等の発酵阻害を引き起こす。

一方、酵素糖化では原理的に副反応が起きないため、最終製品であるエタノールの収率向上が期待できる。酵素反応は50℃程度の穏和な条件で進行し、また、大量の薬品を必要としないため環境負荷も低い。一般的に、セルロースの糖化に関連する酵素は総称してセルラーゼと呼ばれ、これまでに500種以上が見出されているが、種類によってセルロースの結晶性や構造により反応性が大きく影響を

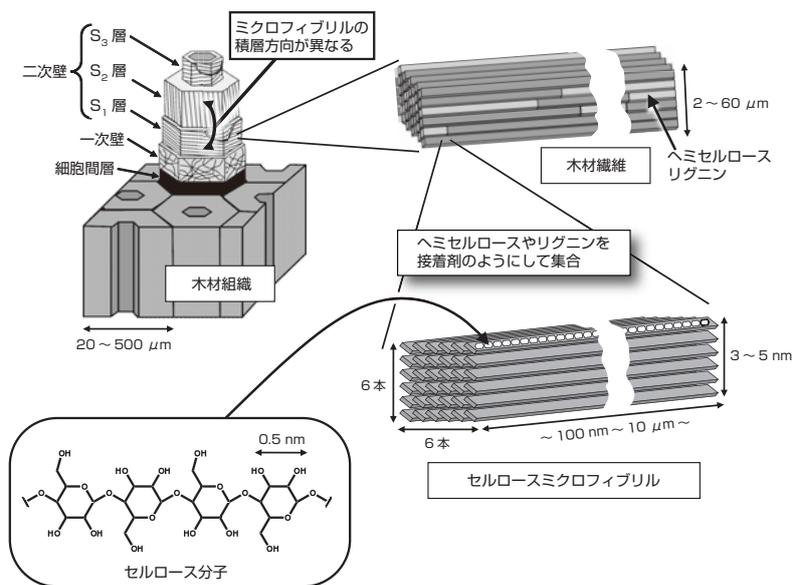


図1 セルロースマイクロフィブリルおよび木材組織の模式図

受ける。実際の酵素糖化は、単一の酵素ではなくヘミセルロースの糖化酵素も含めた複数の酵素の混合系が用いられている。

しかし、酵素糖化にも課題はある。酵素糖化反応は酸糖化と比べると極めて長時間を必要とする。また、セルラーゼは食品や繊維分野などで工業的にも利用されているが、現状はそれほど安価ではない。前述のようにセルロースの構造により酵素反応が影響を受け、大量の酵素を必要とする場合もある。

3.2 酵素糖化のための前処理技術

木材は未処理のままではほとんど酵素と反応しないため、酵素糖化を進行させるには、木材やセルロースの反応性を高める前処理が重要である。過去の研究開発などからまとめられた前処理の経験則は、木材の微細化による表面積増大、結晶性の高いセルロースの非晶化による反応性向上、酵素活性を阻害すると考えられる異質なリグニン成分の分解・除去が前処理のポイントとされてきた。これらに則った前処理技術としては、粉碎処理、蒸煮処理、爆砕処理などが知られている^[3]が、いずれの方法も課題がある（図2下段の表）。粉碎処理では、ボールミルなどの粉碎機が用いられ、操作も単純で前処理物の酵素糖化性も高い。しかし、電力消費が大きく、また、多くの場合バッチ処理であるために処理効率が低くコスト高になる課題があった。蒸煮処理は、薬品と水を用いて木材中のリグニンやヘミセルロースを分解・除去する方法であり、製紙におけるパルプ化方法と類似である。処理物の糖化性は高いが、廃液処理や樹種への依存性が課題としてあった。

爆砕処理は、原料を高温高压の蒸気中に一定時間保持した後、一気に大気圧に開放して、蒸気の急激な体積増大により木材を繊維状にほぐす方法であるが、高耐圧の設備や熱回収、樹種への依存性が課題となっていた。近年は、100℃以上の加圧熱水を用いる水熱処理も注目されている。この方法は、加圧熱水の加水分解作用を利用しているが、200℃以上の高温では、酸糖化と同様の過分解が起こりやすい。

そこで我々は、単純な操作であるが効果の高い粉碎処理について再実験を行い、木材化学やセルロース化学の観点から糖化性の向上機構について解析・評価を行った。さらに、得られた知見を基にして複数の技術を組み合わせることによって、最適な前処理技術の開発を目指した。

4 メカノケミカル処理技術

我々はこれまで、粉碎時の生成粒子の凝集を抑制（水素結合の形成抑制）してパルプ等のセルロース系物質を微粒化技術やパルプや木粉を樹脂と複合化する技術について研究開発を行ってきた^{[4]-[7]}。粉碎処理により物質が微細になっていく過程では、かならず化学結合の切断などの反応が起こっている。また、粉碎時の圧力やせん断力は結合を形成させて新物質を合成することもできる。このように、粉碎処理は機械的処理で化学的反応を起こすことから、メカノケミカル処理ともいわれている。我々は水素結合や疎水結合（分子間力）等の弱い結合までを広く含めた結合の形成や切断をメカノケミカル処理と捉えている。メカノケミカル処理は、元々無機物や金属の複合化やアロイ化技

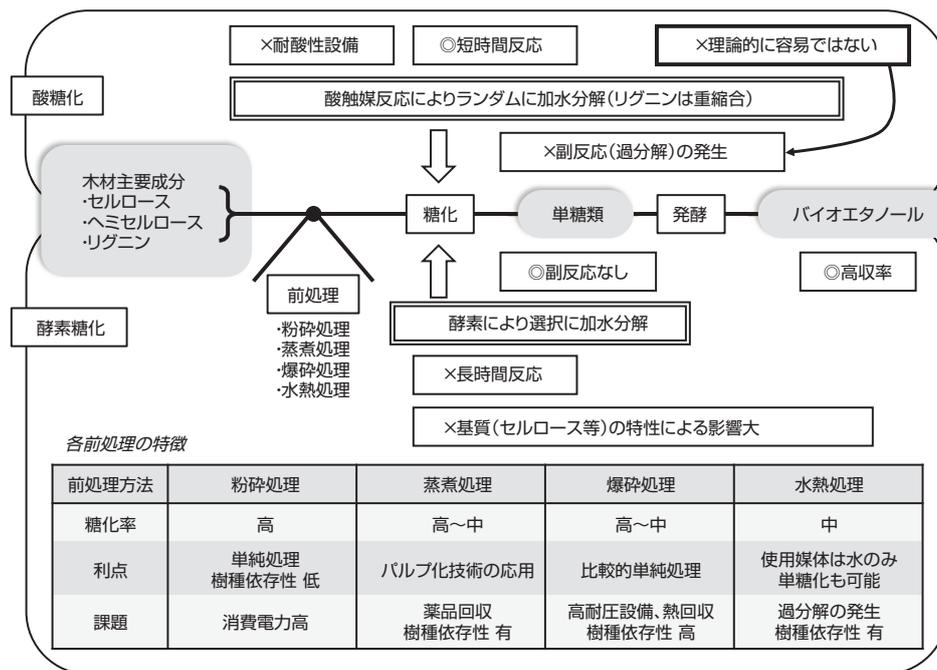


図2 酸糖化法および酵素糖化法の特徴

術として発展している。有機物についても、エステル化反応などの共有結合形成を起こすことができる。ただし、粉碎で起こる物質の変化には「しきい値」があり、化学反応を起こせるだけの粉碎エネルギーが印加されなければ、長時間粉碎しても微細化や複合化は進行しない。

これまで述べてきたように、前処理方法の中でメカノケミカル処理は比較的単純な機械的処理であるが、古くからセルロース等の酵素糖化性を大きく向上できることが知られている^[8]。そのポイントとしては、木材等を乾式でボールミルなどを用いて十分に粉碎し、微細な木粉を製造するとともにセルロースの結晶構造を破壊（非晶化）することが重要とされてきた。

このようなメカノケミカル処理による糖化性向上機構についてサイズの観点から考えると次のようになる。セルラーゼによるセルロースの糖化反応は、長さ1 nm 以下のグルコース同士の間での結合が、タンパク質であるセルラーゼの活性部位によって切断されることであるが、最初のステップとしてセルラーゼはセルロースに吸着する必要がある。つまり、セルロースの本質はマイクロフィブリルであるため、セルラーゼは最初にマイクロフィブリルに吸着することになる。セルラーゼは球に換算すれば5 nm 程度であるが、乾式粉碎によって得られる木粉は遙かに大きい。一般的な乾式メカノケミカル処理で得られる木粉は、処理条件を最適化しても10 μm 程度であり、長時間処理してもサブミクロンあるいはナノサイズの木粉はほとんど生成しない^[9]。この理由は、メカノケミカル処理により木材が微細になると同時に生成した粒子の凝集が起こるためであり、原料などによっ

ては逆に粒子径が大きくなる場合もある。

もう一つのサイズの観点としてセルロースの結晶性がある。その評価は粉末 X 線回折により行われる場合が多いが、前項 2.1 で述べたようにセルロースの結晶本体はマイクロフィブリルであるため、セルロースの非晶化は、3 ~ 5 nm 以下の領域での長さ1 nm 以下の水素結合の乱れを見ているに過ぎない。セルロースの結晶から非晶への変化はセルラーゼのサイズから見ると、より小さい領域の変化である。セルロースの酵素糖化については、これまで多くの報告がなされているが、セルロースとセルラーゼのサイズの観点からの反応機構については明確にされていなかった。

図 3 に従来から行われている前処理技術のポイントをサイズの観点からまとめた。これまでの認識では、図に示すように数10 μm レベルでの木材組織の破壊や繊維化、ヘミセルロースやリグニンの分解・除去による組成変化およびナノレベルでの結晶性の変化などが重要とされてきた。しかし、酵素糖化反応の最初の段階（セルラーゼのセルロースマイクロフィブリルへの吸着）である数 nm の領域での議論はほとんどなされておらず、マイクロフィブリルからの視点は希薄であった。

以上のことから、メカノケミカル処理によって、木材の酵素糖化性が向上する要因について、マイクロフィブリルレベルからの解析を含めて種々の観点から詳細に分析すれば、最適な前処理技術を構築するための指針が得られると考えられた。

4.1 古典技術の再検証

木材のメカノケミカル処理については遊星型ボールミルを

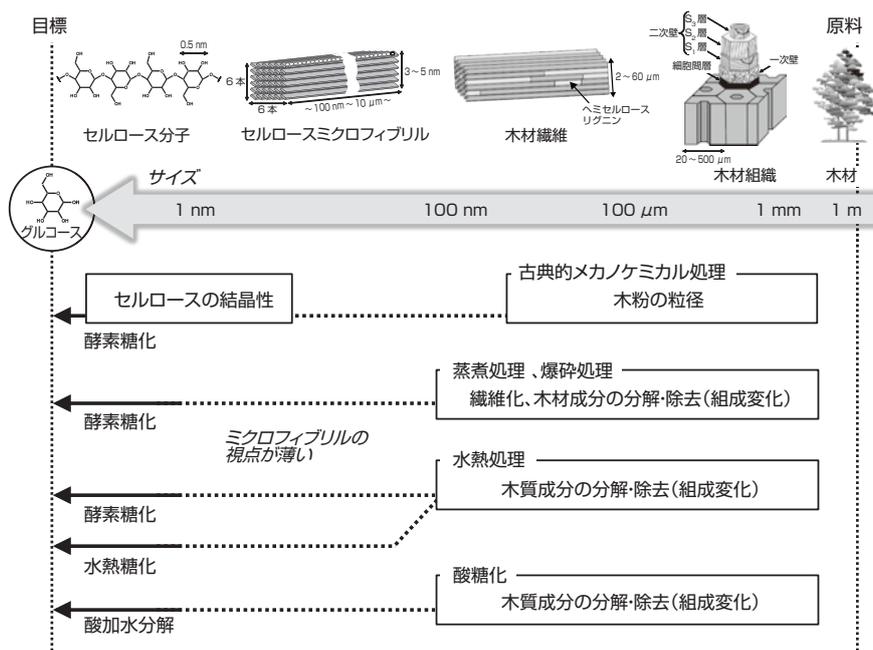


図 3 酵素糖化のための前処理技術（従来技術）のサイズイメージ

用いて基盤的な実験を行い、生成物の物性と糖化性の関係について調べた^[10]。まず、粗粉碎した広葉樹木粉(ユーカリ、 $<0.2\text{ mm}$)を原料としてメカノケミカル処理を行った結果、原料木粉の微細化は進行したが1時間以上粉碎しても生成物の平均粒径は $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度から変化しなくなった。このことは、微細化と生成粒子の凝集による平衡値が $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度ということを示している。得られた生成物の酵素糖化性を調べたところ、未処理原料は 0.2 mm 以下の微細な粉末にもかかわらず、その糖化性は極めて低かった。しかし、メカノケミカル処理時間が長くなるのに従って糖化性は向上し、粒径の変化がなくなった1時間以降も処理時間とともに糖化性は向上した。4時間後では、その糖化性は原料と比較して20倍以上となった。針葉樹である米松についても同様の傾向であった。しかし、比較実験として精製木材パルプ(繊維状、幅 $20\text{ }\mu\text{m}$ -長さ $200\text{ }\mu\text{m}$ 程度)を原料としてメカノケミカル処理を行ったところ、結果には大きな違いがみられた。パルプの場合、未処理試料でも糖化性は高く、メカノケミカル処理の効果はわずかであった(図4)。これらのことから、試料サイズのみから酵素糖化性は評価できないことが分かった。

次にX線回折によりセルロースの結晶性と糖化性との関係について調べた。その結果、木材の場合、メカノケミカル処理とともに結晶性は急激に低下したが、糖化性はゆるやかに上昇した。一方、パルプの場合、原料は高結晶性にもかかわらず糖化性は高く、木材と同様にメカノケミカル処

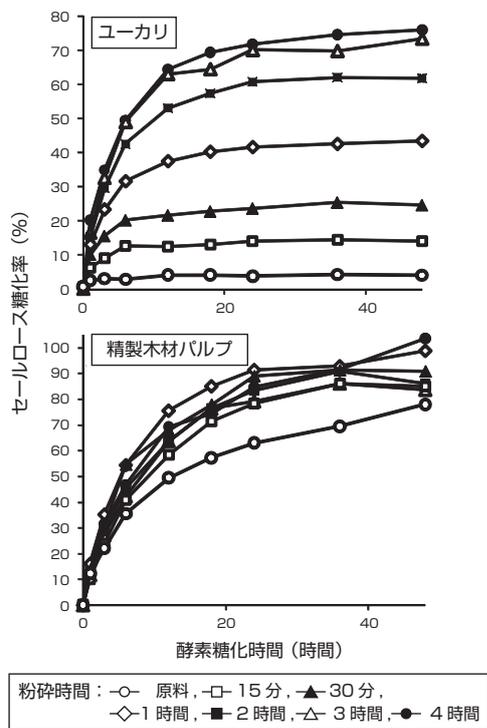


図4 粉碎時間による酵素糖化率の変化

理により結晶性は急激に低下したが、結晶性と糖化性との関連性は低かった(図5)。ユーカリなどの木材を原料として行ったメカノケミカル処理試験の結果は、従来からいわれているセルロースの非晶化が酵素糖化のために重要という認識と大きな矛盾はない。しかし、パルプを原料とした場合は、高結晶性試料でも高糖化性であり、矛盾している。メカノケミカル処理により非晶化したセルロースをさらに長時間処理すると、非晶にもかかわらず次第に酵素糖化性が低下してくる現象も従来から知られている。

以上のことから、メカノケミカル処理による生成物の粒径やセルロースの結晶性のみからでは酵素糖化性を十分に説明できないことが示された。上記の実験では、メカノケミカル処理物の精製等を行わずに酵素糖化試験を行っているが、酵素糖化性は高い。つまり、酵素反応を阻害するといわれているリグニンなどの木材成分がそのまま残存した状態でも酵素糖化は進行している。さらに他の実験から、メカノケミカル処理後もリグニン成分は未処理の木材中の構造と同様の高分子量体であることも分かった。また、固体NMR(核磁気共鳴)測定や赤外分光分析測定から、メカノケミカル処理では酸化などによる木材成分の変質もほとんど起こっていないことも確認された。

4.2 高分子化学のテクニックを応用

前述の実験結果は、従来技術の経験則である木材の微細化、セルロースの非晶化、リグニンの分離が木材の酵素糖化性を向上させるための重要ポイントではないということを示したものであることから、新しい視点からの解析が必要となった。

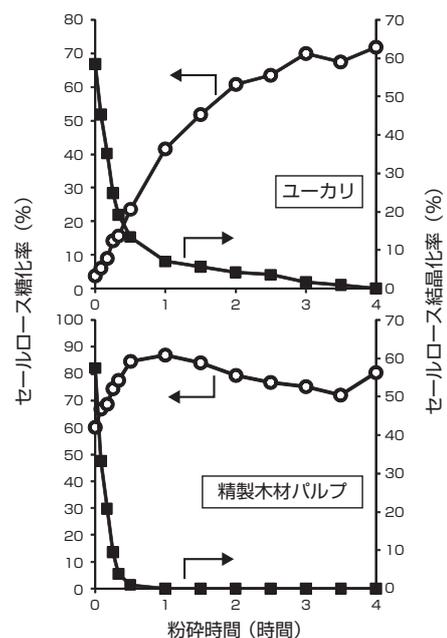


図5 結晶化度と酵素糖化率の関係

NMRは有機化学分野では分子構造解析装置として活躍しているが、高分子分野では固体NMRを用いた緩和時間測定により複合体における分子同士の混合の程度や分子の凝集サイズ（ドメインサイズ）の評価が行われている。緩和時間測定とは、ある物質にNMR装置によりパルス信号を照射し、その信号がどのようなスピードで減衰するかを調べる方法である。物質の集合体（ドメイン）が大きければパルス信号は遠くまで長い時間をかけて伝搬していく。ドメインサイズが小さければパルス信号は早く減衰する。また、異なる物質が分子レベルで混合して同じ環境に置かれている場合には、異なる物質でも同じ緩和時間をもつようになる。このような手法をメカノケミカル処理物の評価に用いた結果を次に示す。

固体NMR測定は酵素糖化反応と類似の湿潤条件で行い、セルロース分子等がもっている水素原子の緩和時間 (T_{1H}) を計測した。その結果、メカノケミカル処理とともに緩和時間は減少（セルロースのような高分子物質では分子運動性が向上）し、最も糖化性が高くなった4時間粉碎後では0.05秒になった（図6）。この値からドメインサイズを計算すると5.5 nmとなる^[11]。つまり、木材はメカノケミカル処理により見かけ上20 μ m程度の本粉になっているが、その本粉は実際にはさらに微細な5 nm程度のドメインから構成されていることになる。この5 nmというサイズは、セルロースマイクロフィブリルの幅と類似していたことから、メカノケミカル処理によってマイクロフィブリルが互いに分離し、酵素が吸着できる表面積が増大したことが、酵素糖化促進のために重要な要因であると推測された。以後の研究ではこの作業仮説に基づいて酵素糖化に有効なメカノケミカル処理を解明しつつ、新規な前処理手法を開発した。メカノケミカル処理によってセルロースは非晶化するが、実際にはマイクロフィブリルのようなセルロース分子の配列は残っていると考えられている^[12]。このフィブリルの

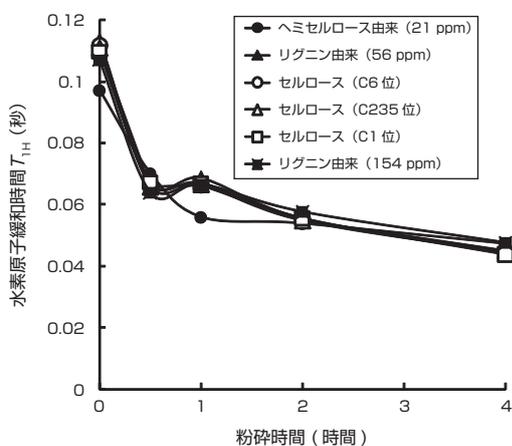


図6 粉砕時間による緩和時間 T_{1H} の変化（括弧内はNMRでの各木材成分の帰属）

分離というサイズレベルからみると、セルロースの結晶性はさらに下のレベルのこととなり、高結晶性か非晶かという問題は特に重要ではなくなる。

5 ミクロフィブリル化処理

セルロースの酵素糖化反応は、固体状のセルロースと水に溶けた酵素との固液反応である。一般的に、固液反応を効率的に進めようとするれば、固体を微細にし、液体との接触面積を大きくすればよい。木材中でマイクロフィブリルはセルロースの固体としての最小集合単位である。もし、セルロースを溶かして分子1本単位で分離できれば、酵素糖化はスムーズに進行すると考えられるが、セルロースを溶解できる溶剤中では酵素は容易に失活してしまう。

そこで前項の固体NMR測定により得られた結果を基にした作業仮説を確かめるため、実際に木材を微細な繊維であるマイクロフィブリルにほぐす方法について検討した。製紙技術では、紙の強度を増すために、パルプの水分散スラリーに機械的にせん断力を加えて繊維を毛羽立たせる叩解（こうかい）という処理が行われる。このプロセスではせん断力により水がパルプ繊維の微細な隙間に入り込みクサビのように作用して繊維をほぐすとともに周囲の水は毛羽立った微細な繊維の凝集を抑制している。このような叩解プロセスと類似の方法を用いれば木材をマイクロフィブリルにほぐすことができると考えられた。そこで、基盤実験として木粉を重量比で20倍量の水に分散させてボールミルを用いて湿式メカノケミカル処理したところ、粘性の高いクリーム状の生成物が得られた。生成物を乾燥して電子顕微鏡で観察したところ、マイクロフィブリル化が進行しており、100 nm以下、細い部分では20 nm程度の微細な繊維が生成していた（図7）。X線回折によりセルロースの結晶性を調べたところ、原料とほぼ同一の結晶性が保持されていることが分かった。マイクロフィブリルそのものがセルロース

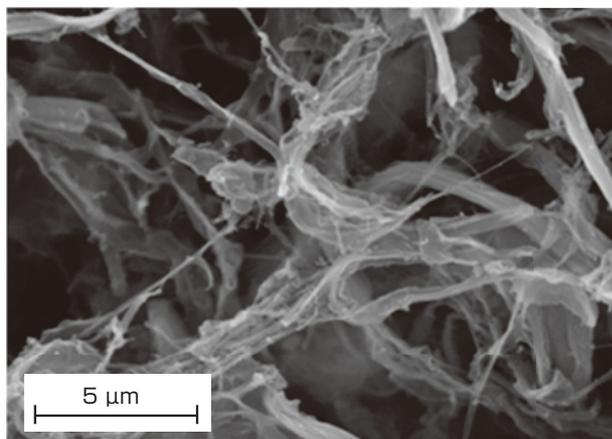


図7 湿式メカノケミカル処理物の電子顕微鏡写真

の結晶本体であるため、結晶性の保持はマイクロフィブリルがあまり損傷を受けることなくほぐれたことを示している。この湿式メカノケミカル処理物（マイクロフィブリル化物）は高結晶性であるが糖化率は70%以上あった。この結果は、酵素糖化性を向上させるためには、セルロースの結晶性を低下させることが重要なのではなく、マイクロフィブリルをお互いに分離することにより、酵素が反応できる表面積を増大することが重要ということを示している。また、この湿式処理物は固形分濃度が5%程度にもかかわらず、比重が1.5のセルロースマイクロフィブリルは、その周囲に水分子を保持して沈殿することなく分散している。そのためマイクロフィブリルの周囲には酵素が自由に活動できる空間も形成されていることになる。湿式処理が不十分で糖化率が低い試料では、糖化試験後の主な残渣は大きな繊維組織であったことから、木材を十分にマイクロフィブリル化すれば酵素糖化性を大きく向上できることが分かった。

以上のように、マイクロフィブリルの分離が酵素糖化に効果的であるという固体NMRに基づく作業仮説を、湿式メカノケミカル処理によって実際に木材をマイクロフィブリル化することにより証明することができた。この前処理では、セルロースの結晶性は重要ではない。前章4.1で、精製木材パルプは高結晶性にもかかわらず、酵素糖化性は高かったが、この場合、ヘミセルロースやリグニンを分解・除去する精製過程で、マイクロフィブリルはお互いに分離して、酵素が接近して反応できる面積が大きくなっていったものと考えられる。木材組織はマイクロフィブリルの集合体であり、その集合力は水素結合などの弱い結合のみである。そのため、湿式メカノケミカル処理により水分子をクサビのように利用して、集合力の元であるマイクロフィブリル間の水素結合を切断すれば、構成単位であるマイクロフィブリルに容易にほぐすことができる。この方法は木材化学的な観点からも無理がない。

6 実用化を目指したマイクロフィブリル化技術

6.1 連続・大量処理方法の検討

マイクロフィブリル化処理として基盤実験で用いたボールミルは少量の試料でも実験が可能であるが、バッチ処理であり大型化・低コスト化の点では実際的ではない。そこで、ボールミルのように湿式で原料にせん断力や圧力を印加できる処理方法を検討した結果、石臼と同様の粉碎機構を持つディスクミルを用いることにより連続・大量生産が可能と考えられた。

ディスクミル（増幸産業（株）スーパーマスコロイダー）を用いて木粉スラリー（木粉濃度5 wt%）を繰り返し粉碎処理したところ、ボールミルの場合と同様にマイクロフィブリル

化が進行し、生成物の酵素糖化性も大きく向上することが分かった。ディスクミル処理では上下のディスクを10 μm程度まで接近させて行ったが、処理効率はボールミルの10～20倍以上あった。しかし、ディスクミルでは、ボールミルでは顕著でなかった樹種への依存性が現れ、針葉樹と比較して広葉樹ではマイクロフィブリル化が十分に進行せず糖化性が向上しない場合があった。これはボールミルと比較してディスクミルでは、粉碎エネルギーが小さいためと考えられた。そこで、ディスクミル処理前に木材組織を脆弱化させる処理が必要と考えられた。

6.2 木材組織を脆弱化させる複合処理

木材の強度発現は、前述のようにその強固な積層構造にある。マイクロフィブリルは水素結合などの弱い結合で集合しているが、桶のような積層構造のためにマイクロフィブリル単位への分離は容易ではない。そこで、最初に桶のタガに相当するような組織を破壊し、内部への水の浸透性を向上させ、さらにマイクロフィブリル同士を接着しているヘミセルロースを取り除けば、木材組織は脆弱化して効果的にディスクミル処理が進行すると考えられた。

タガに相当する組織の破壊方法については、ボールミルを用いて予備検討した。実験は原料木粉を一定時間乾式メカノケミカル処理した後、水を添加して湿式メカノケミカル処理を行い、生成物のマイクロフィブリル化および糖化性を調べた。その結果、乾式メカノケミカル処理が15分以下の場合には特に大きな変化はみられなかったが、20分以上乾式処理を行った後に得られた湿式処理物では糖化性が著しく向上した。乾式メカノケミカル処理後の生成物を電子顕微鏡観察した結果、20分間の乾式メカノケミカル処理により、原料木粉の大きな木材組織はほとんど破壊されることが分かった。タガ相当の組織の破壊方法としてボールミル処理は実際的ではないため、比較的粉碎エネルギーが大きく大量処理が可能な方法について検討した結果、湿式カッターミルが効果的であることが分かった。我々が採用した湿式カッターミル（増幸産業（株）ミクロマイスター）は、1万rpm以上の超高速で回転するローター刃と固定刃による強いせん断力で、水に分散させた原料を1 mm以下に瞬時に微細化できる。この場合、水は粉砕物を流動化させて滞留を防止し、効率的に微細化を進行させる。また、処理中に水が木材組織内に浸透することにより、後段のオートクレーブ処理やディスクミル処理にも効果的に作用する。

次に、ヘミセルロースの接着剤効果を減少させる方法としては、オートクレーブを用いた水熱処理により行うこととした。水熱処理では、温度条件によりヘミセルロース成分を選択的に加水分解できる^[13]。これら湿式カッターミル

処理とオートクレーブ処理を組み合わせた複合処理方法について検討した結果、粗粉碎した原料木粉を湿式カッターミル処理（1 mm 以下）した後、オートクレーブ処理（135℃）を行い、最終段階としてディスクミル処理を行うことにより、樹種によらず効率的に前処理できることが分かった。3 mm 以下に粗粉碎したユーカリ原料を複合処理した場合の糖化率は、原料としてより微細な 0.25 mm の木粉をディスクミル単独で処理した場合と比較しても 4 倍以上になり、長時間の乾式ボールミル粉碎と同程度の糖化性を発揮させることができた（図 8）。

6.3 複合湿式メカノケミカル処理による酵素糖化性向上機構

前述の複合湿式メカノケミカル処理で酵素糖化性が向上する機構は次のように考えられる（図 9）。木材の細胞組織

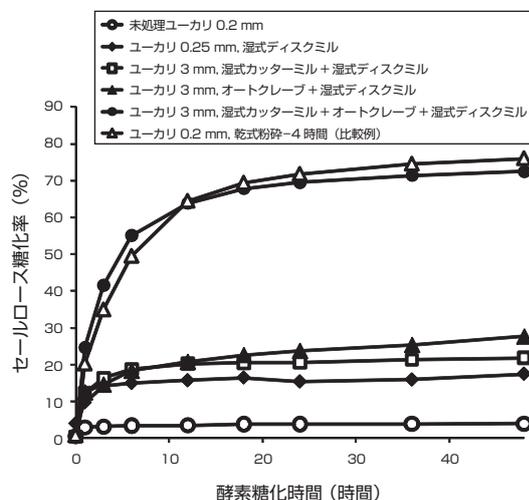


図 8 複合処理によるディスクミル処理の効率化

は 20-500 μm であるが、湿式カッターミルによる強いせん断力で木材組織は破壊され、タガに相当するマイクロフィブリルも部分的に切断される。次いでオートクレーブ処理によりマイクロフィブリル同士を接着しているヘミセルロースは部分的に加水分解（分解量は全ヘミセルロースの数%）される。オートクレーブ処理物を電子顕微鏡により高倍率で観察するとヘミセルロースが脱離したと考えられる数 10 nm の細孔が多数観察された。これらのステップを経て木材組織は脆弱になっているため最終段階のディスクミルにより容易にマイクロフィブリルにほぐすことができ、酵素糖化性も大きく向上したと考えられる。

以上はセルロース成分の酵素糖化性向上機構を中心に述べたが、バイオエタノール製造では、発酵原料としての糖の収量を増大させるためヘミセルロースの糖化も重要である。木材組織中でヘミセルロースはセルロースマイクロフィブリルの表面を覆うように存在しているため、我々が開発したマイクロフィブリルをお互いに分離する前処理プロセスでは、セルロースとともに、ヘミセルロースの糖化も容易に進行する。また、我々の前処理では過激な化学反応は起こっていないため、前処理後もリグニンが未処理の木材中の構造から大きく変化はしていない。酵素糖化後には、そのまま残渣として残ることになる。

7 メカノケミカル処理の利点

7.1 酵素糖化の低コスト化

前述のようにディスクミル処理は、処理効率が高く比較的 low cost 処理ではあるが、単純な熱処理と比較するとモーター等の駆動電力は回収も再利用できないため、劇的

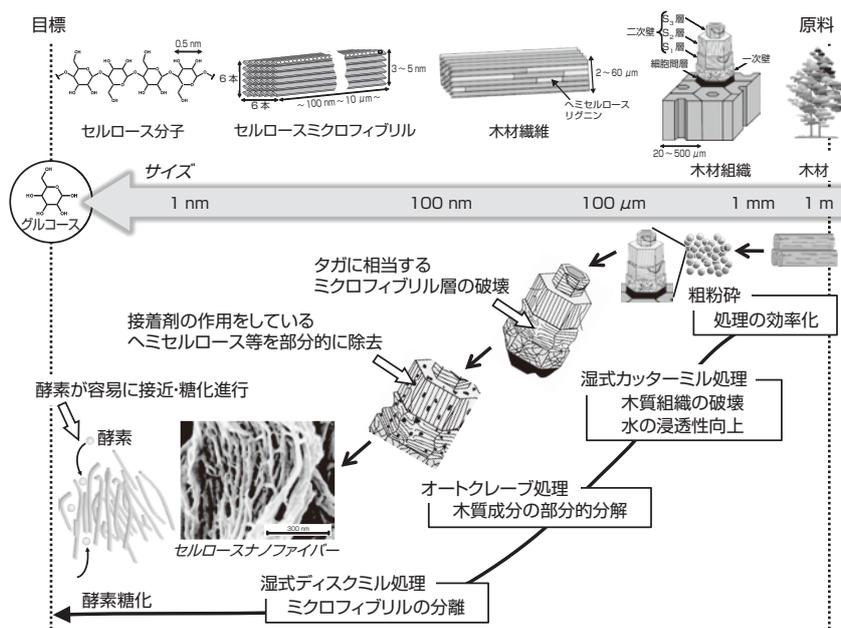


図 9 複合湿式メカノケミカル処理のサイズイメージ

な低コスト化は困難である。しかし、メカノケミカル処理ではバイオエタノール製造での他の工程のコストを大きく低減できる利点もある。メカノケミカル処理物は脱リグニンなどの化学的処理を行わなくても酵素糖化や発酵が高効率で進行する。また、原料への依存性も低く、広葉樹や針葉樹あるいは稲ワラ等の前処理として適応可能である。最も大きな利点は、バイオエタノール製造コスト中、場合により半分以上を占めるといわれるセルラーゼ等の酵素コストを低減できることにある。メカノケミカル処理物は比較的少量の酵素でも十分に糖化できる。図10に、異なる前処理による生成物について酵素添加量と糖化率の関係について示した^[14]。メカノケミカル処理と比較して、200℃の高温水熱処理では酵素量が少ない場合に大きく糖化率が低下する。この現象は、高温水熱処理の場合に木材成分の変性などにより、阻害物質が生成したためと考えられる。酸処理も水熱処理と類似反応のため同様の結果になると考えられる。比較的低温（160℃）の処理では、メカノケミカル処理時間を短縮できる効果もあるうえ、少量の酵素でも糖化は進行する。

7.2 従来技術との比較

我々の開発した酵素糖化のための前処理プロセスの特徴を従来技術（図2下段の表）と比較すると次のようになる。処理物の糖化率は古典的メカノケミカル処理と同程度に高い。利点としては、薬品を用いた化学処理のような高度な反応制御が必要なく、また、処理に用いるのは水のみであるため、薬品回収も必要なく廃液処理も容易である。同一の処理量で比較すると消費電力は従来型のボールミル処理の10から20分の1以下である。オートクレーブ処理も高温高圧処理ではないため消費エネルギーも低く、装置も高耐圧にする必要もない。前述のように、原料バイオマス種への依存性も低い。また、我々が開発した前処理プロセス

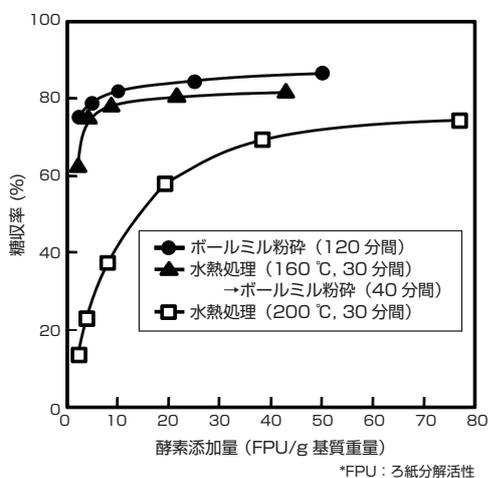


図10 前処理の違いによる酵素添加量と糖化性の関係

は湿式処理が基本であり、原料の乾燥等は必要なく、含水量の多い生原料でもそのまま用いることができる。濃硫酸糖化などでは、硫酸の希釈による発熱を防ぐために原料の乾燥が必要となる場合があり効率が悪い。

以上のように我々の開発した前処理プロセスは、従来技術が持っていた種々の課題を克服できるとともに、それらの利点も損なうことなく応用展開している。新たに発生した課題としては、本研究開発で用いた湿式カッターミルやディスクミルが比較的精密な粉碎機であるため、そのまま大型化するのが容易ではないことが挙げられる。しかし、我々の前処理プロセスは、製紙における機械パルプ化技術と類似点も多いため、製紙技術を応用・発展させることによる大規模化・実用化は進めやすいと考えられる。

8 まとめと今後の展開

産総研では、我々が開発した前処理プロセスと、これまで研究開発を進めてきた糖化・発酵プロセスを組み入れたバイオエタノールの一貫製造ミニプラント（1回200kgの多種多様なバイオマスが処理可能）を建設した。ここでは、各要素技術やプロセスの連続化における課題抽出、バイオマス種による課題、経済性評価等を実施している。現在、大規模プロセスによる商業化を目指して企業とともに研究開発を進めているが、そのプロセスでは製紙技術を取り入れている。

バイオエタノール製造技術の実用化では、残渣や副産物の高付加価値化も重要である。木材を前処理して得られるマイクロファイブリル化物は、ナノサイズの微細繊維であるためセルロースナノファイバーとも呼ばれている。同サイズの鋼鉄と比較すると5分の1の軽さで強度は5倍とされている。現在、この特性を生かした軽量高強度材料の開発が進められている^[15]。また、光学材料や化粧品への応用も研究されている。その他、濾過材や食品添加物としては以前より一部実用化もされている。また、我々の開発した前処理では、木材成分の大きな分子構造の変化などは起きない。そのため酵素糖化後のリグニン残渣は、製紙工程で排出される黒液（リグニン分解物）とは異なり、木材中と同様の構造や高い分子量を保持していると考えられる。そのため、このリグニン残渣は従来型の燃料としての利用以外に、黒液リグニンなどでは不可能であった高分子材料への転換や高付加価値素材としての活用も大いに期待できる。以上のことからセルロースナノファイバー製造を共通基盤プロセスとしてバイオエタノール（主）と高付加価値材料（副）の併産を行えば、極めて高い経済性を発揮させられると考えられる。

図11に我々の前処理技術開発の流れをまとめた。従来

技術を調査した結果、実用化できる前処理技術の開発には、対象としている木材についての木材化学やセルロース化学からの視点が重要であることが分かった。さらに高分子化学や製紙など他分野の知見や技術を組み合わせることにより、新しいコンセプトに基づいた前処理技術の構築を進めることができた。しかし、前処理により得られるセルロースナノファイバーについては、その特性や酵素の反応機構など未解明の部分が多く、先端的分析技術も必要としている。今後、バイオ技術、化学工学や熱工学、LCA 評価、さらには社会科学の分野など多分野の技術や知見の融合が進み、実際のバイオ燃料技術が確立されることが期待される。

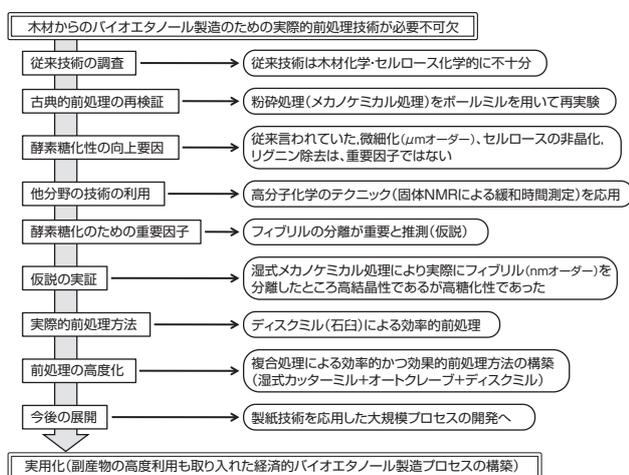


図 11 前処理技術開発の流れ

参考文献

- [1] A. E. Farrell, R. J. Plevin, B. T. Turner, A. D. Jones, M. O'Hare and D. M. Kammen: Ethanol can contribute to energy and environmental goals, *Science*, 311, 506-508 (2006).
- [2] J. F. Saeman: Kinetics of wood saccharification-Hydrolysis of cellulose and decomposition of sugars in dilute acid at high temperature, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, 43-52 (1945).
- [3] 志水一充: セルロース系物質の酵素加水分解, *機能性セルロース*, 195-229, シーエムシー出版, 東京 (1985).
- [4] 遠藤貴士: メカノケミカル反応による新規セルロース系複合材料, *Cellu. Commun. (セルロース学会機関誌)*, 7 (2), 63-66 (2000).
- [5] 遠藤貴士, 張 発饒, 篠原由寛: 成形材料としてのセルロース, *Cellu. Commun. (セルロース学会機関誌)*, 9 (2), 86-92 (2002).
- [6] 遠藤貴士, 吾郷万里子: メカノケミカル処理によるセルロースの構造変化, *Cellu. Commun. (セルロース学会機関誌)*, 11 (2), 74-78 (2004).
- [7] 遠藤貴士, 磯貝 明監修: 微粉碎化セルロースとプラスチックの複合化, *セルロース利用技術の最先端*, 298-309, シーエムシー出版, 東京 (2008).
- [8] R. Tanaka, F. Yaku, E. Murai and T. Koshijima: Enzymatic degradation on finely divided wood meal of *Pinus densiflora*, *Cell. Chem. Technol.*, 14, 859-868 (1980).

- [9] 遠藤貴士, 北川良一, 細川純: 機械的粉碎によるセルロース繊維の微粒子形成挙動, *高分子論文集*, 56 (3), 166-173 (1999).
- [10] 藤本真司, 井上宏之, 矢野伸一, 坂本 剛, 美濃輪智朗, 遠藤貴士, 澤山茂樹, 坂西欣也: リグノセルロース系バイオマスからの非硫酸バイオエタノール製造法の開発ーメカノケミカル前処理・酵素糖化法ー, *石油学会誌*, 51 (5), 264-273 (2008).
- [11] D. Ishii, D. Tatsumi and T. Matsumoto: Effect of solvent exchange on the solid structure and dissolution behavior of cellulose, *Biomacromol.*, 4, 1238-1243 (2003).
- [12] M. Ago, T. Endo and T. Hirotsu: Crystalline transformation of native cellulose from cellulose I to cellulose II polymorph by a ball-milling method with a specific amount of water, *Cellulose*, 11 (2), 163-167 (2004).
- [13] H. Ando, T. Sasaki, T. Kokusho, M. Shibata, Y. Uemura and Y. Hatate: Decomposition behavior of plant biomass in hot-compressed water, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39 (10), 3688-3693 (2000).
- [14] H. Inoue, S. Yano, T. Endo, T. Sakaki and S. Sawayama: Combining hot-compressed water and ball milling pretreatments to improve the efficiency of the enzymatic hydrolysis of eucalyptus, *Biotechnol. Biofuels* 1:2 1-9 (2008).
- [15] 矢野浩之, 磯貝 明監修: セルロースナノファイバー複合材料, *セルロース利用技術の最先端*, 258-269, シーエムシー出版, 東京 (2008).

執筆者略歴

遠藤 貴士 (えんどう たかし)

1992年広島大学大学院理学研究科化学専攻博士課程修了(博士(理学))。同年4月工業技術院四国工業技術試験所入所。以来現在まで、粉碎技術を用いたセルロースや木材の微細化や高付加価値化技術の開発を行う。2003年までは主に材料分野、2004年に現職場に異動後はバイオエタノール関連の研究開発に従事。2006年よりバイオマス研究センター研究チーム長、現在に至る。本論文は、入所以来研究してきたセルロースの粉碎に関する成果の一部をまとめたものである。



査読者との議論

議論1 従来法(蒸煮法、爆砕法、水熱法)と比較した利点

質問(水野 光一:産業技術総合研究所環境管理技術研究部門) 酵素糖化に限定した場合、木材からエタノールへの転化プロセス全体の中で、今回開発した湿式カッターミル/オートクレーブ処理/湿式ディスクミルの組み合わせは他の従来法(蒸煮法、爆砕法、水熱法)と比較した図2が示されています。これについて、利点や長所がどの程度進展し、また欠点や課題をどの程度克服したことになるのかを定量的または定性的に示して下さい。

回答(遠藤 貴士)

我々が開発した複合処理の長所は、低環境負荷で樹種によらず糖化性の高い前処理物が得られることにあります。従来技術であるボールミル粉碎と比較して消費エネルギーは10から20分の1以下です。また、我々の方法による前処理物は少量の酵素でも糖化が進行するため、酵素コストも低減できます。原料には伐採直後の水分含有量の高い木材も利用することができ、薬品等を大量に使用することもないため、将来的には原料が採取できる現地(東南アジア等も想定されます)での商業的バイオエタノール製造も可能性が高いと思っています。

ます。私の所属するバイオマス研究センターには経済性を専門に評価する研究チームがあります。このチームにおいて我々が実際に実験室で行った前処理プロセスと酵素糖化・発酵プロセスのデータを用いて、大規模商業化レベル（原料1,500トン/日）での経済性試算を行った結果では、従来最も低コストとされてきたNEDO濃硫酸法（他の方法は確度の高い経済性試算のデータが十分には公開されていません）よりも最終製品であるバイオエタノールを低価格化できる可能性が示されています。複合処理は多段処理であるため、設備はコスト高になるように思われますが、実際には濃硫酸法と同程度の設備償却費にすることができます。例えば、我々の前処理には水熱処理工程がありますが、温度は150℃（0.48 MPa）程度で十分であり、高圧ガス保安法の厳しい規制（1 MPa以上）も受けないため、実プラントを設備した際の維持管理も容易になります。今後、さらにプロセスを最適化すると共に、低コストで環境負荷が小さく、後段の糖化発酵等にも影響しない薬品等の使用による効率化についても検討する予定です。

議論2 バイオマスの総合的な利用

質問・コメント（水野 光一）

本研究では木材を出発原料として、セルロースやヘミセルロースが酵素糖化を経てエタノールへの発酵が示される一方で、リグニンから

高分子などの材料製造の道筋が示されました。これは、原油に代わるバイオマスリファイナリーの概念につながるものです。今後、バイオマスの利用を総合的に発展させるためには、どのような研究開発を進めることが最も有効であるかという考え方をお教えください。

回答（遠藤 貴士）

リグニンの利用技術については長い研究の歴史がありますが、決定的な技術や製品は未だに現れていません。しかし、本技術のようなバイオエタノール製造が商業化されると、従来の製紙プロセスとは異なる新しいリグニンが大量に生み出されることになります。現在の石油化学製品を見た場合、原油はアスファルトからガソリン、プラスチックまで無駄なく使用されています。これからのバイオマスリファイナリーにおいても、木材成分を無駄なく利用できる技術の開発やそれを受け入れられる社会システムの構築が大切だと思っています。それらを達成するためには、石油製品の代替ではない、バイオマス系のみで実現可能な特徴的な製品群の創成を目指すことも大切と思っています。そのためには、前処理により得られるセルロースナノファイバーや残渣リグニンの基本的な特性を機器分析等も駆使することによって正確に把握し、得られた知見や既に解明されている理論や原則に基づいて、革新的な製品化技術の確立を目指すことが重要だと思っています。

最先端の地質研究と国土の基礎情報

— 5万分の1地質図幅の作成 —

斎藤 真

地質図幅は、地層や岩石など国土の構成物を表した図面であり、人間が自分の周囲の地球環境を科学的に理解するための基本的な情報が記載されている。資源、防災、立地、環境、学術など、多種多様な用途がある。大学や企業が作成する地質図は、それぞれが興味をもつ特定の地層・岩石を対象にすることがほとんどであるが、産総研が作成する地質図幅は、その地域に分布するすべての地層・岩石に関わる調査結果を、その地域の形成史を矛盾なく表せるよう1枚の図面に統合したものである。地質図幅は個々の研究成果を統合して作成していくが、これまで作成の考え方と過程を記した研究論文がないので、著者が関わった5万分の1地質図幅を例に地質図幅の作成方法論を示す。

キーワード：地質図幅、付加体、作成方法、統合、5万分の1、砥用

The advanced geological researches and fundamental national land information

– Development process of the Geological Map of Japan 1:50,000 –

Makoto Saito

The Geological Map of Japan 1:50,000 shows fundamental national land information of the subsurface materials of the district, and is multifariously used for resources development, disaster prevention, industrial location, environment protection, and as the geological standard of the district. It is important basic information for understanding natural environments scientifically and is essential information for the sustainable development of society. While geological maps mostly made by universities or companies are for understanding specifically interesting strata or rocks, the 1:50,000 geological maps made by GSJ, AIST comprehensively integrate research results of all strata and rocks in the district and explain the geological evolution of the district without contradiction. There has never been any paper describing the process in developing the 1:50,000 geological map, which integrates geological researches for the district. The author shows his own development process with the 1:50,000 geological maps as examples.

Keywords: Geological map, 1:50,000, integration, geology, process, Tomochi

1 はじめに

地質図とは、地表の植生と土壌をはぎ取ったところにある地層・岩石の種類、形成年代、形状、相互関係について表した図で、国土の基本情報の一つである。日本の公的機関の中では国土交通省国土地理院が地表（内海を含む）の形を担当して地形図を出版し、海上保安庁海洋情報部は海底の形を担当して海底地形図を出版しているのに対し、産総研地質調査総合センターでは、地球の表面の下にある“もの”を対象に地質図を出版している。これらの地質図は、これまで国土の基本情報として、資源、防災、土木、環境、学術などさまざまな用途で活用されてきた。

地質調査総合センターの出版する地質図のうち基本となるものは、一定の緯度と経度で区切られた四角形の「地質図幅」である。主な縮尺には5万分の1と20万分の1があり、前者はそれぞれ独自の地質調査に基づいて作られた

基本的な図面で、後者は5万分の1の地質図幅を初めとする当該地域の地質情報を取捨選択し統合して作った（編纂と呼ぶ）広域的な地質図である。

緯度・経度で区切られた地質図幅の場合、その地域には様々な地層・岩石が分布していることが普通である。5万分の1地質図幅の場合、地質学があまり進んでいない時代は1人の地質学者が調査研究を行うことよって十分に作成することができたが、現在では学問が進展しそれぞれの地層・岩石ごとに調査研究に基づく専門的な研究成果と精度が要求され、かつそれらを統合して互いに矛盾なく形成史を示すことが要求される。本論文では、構成学的な観点から独自調査で作成する5万分の1地質図幅の作成について、近年出版されたこれまでで最も複雑な5万分の1地質図幅である九州中央部の「砥用」図幅（図1、6）を例に地質図幅の作成方法について述べるとともに、地質図

幅が社会で活用されるための方策について考察する。

2 「砥用」調査開始時の研究目標

5万分の1地質図幅の作成は、最先端の地質学的知見を用いて野外調査を行って作成することから、個々の地層・岩石に対する研究において新たな知見を得ることを目的としている。それとは別にその地質図幅全体として広域的な地質を解明したり、当該地域周辺の地質図幅を作成する時の基準となることも目的とする。それとともに日本の国土全体の実体を解明するために重点地域を設定しながら、順次5万分の1の地質図幅を整備していくという計画が立てられている。個々の地層・岩石に対する新たな研究成果がなくとも、地質図幅としてその地域の地質の全体像を明らかにすることは重要な研究成果であり、またその結果を地質図幅として出版することには大きな社会的意義がある。

本論文で例とした5万分の1地質図幅「砥用」は、九州中央部熊本県の五木の子守歌で知られる五木村より更に上流の平家の落人の村とされる泉村（現八代市）五家荘を含む山岳地域を対象としているため、現地調査に困難がともなう地域であるとともに、多種多様な地層・岩石が複雑に分布し地質の解明が困難な地域とされてきた（図1）。

すなわちこの地域には、次のような特徴的な地層・岩石が存在する。

1) 海洋プレートの沈み込みに伴って海洋プレート上の地

層・岩石が、大陸プレートの縁辺に付加されてできた付加体、

- 2) 古生代の岩石を含む蛇紋岩類、
- 3) 高い温度や圧力を受けて元の岩石から変化した変成岩、
- 4) SiO₂に富むマグマが冷え固まった花崗岩、
- 5) 大陸棚でたまった地層、
- 6) 阿蘇火山の噴火による火砕流堆積物 など。

これ以外の地層・岩石を含めると日本列島に露出する地層・岩石の種類のかなりの部分が、東西23.5 km、南北18.5 kmの地域（面積約435 km²）に分布し、極めて複雑な地質構造になっていることが予想された。このため、専門分野別に4名で研究グループを作り調査研究を行うこととし、それぞれが担当する地層で研究成果をあげることを目指した。この地域ではプレートテクトニクスの知見を導入した地質図はまだ作られていなかったことから、プレートテクトニクスに基づく地質図（例えば付加体を認定した地質図）を作ることを最低限の目標とした。

また、西南日本外帯と呼ばれる九州から関東山地の太平洋側の地域では、ジュラ紀（2億年前～1億4500万年前）に海洋プレートの沈み込みでできた付加体と蛇紋岩や変成岩、シルル紀～デボン紀（4億4000万年～3億6000万年前）の地層、ペルム紀～白亜紀（3億年～6500万年前）の浅海成（一部陸成層）の地層などが複雑に分布する部分

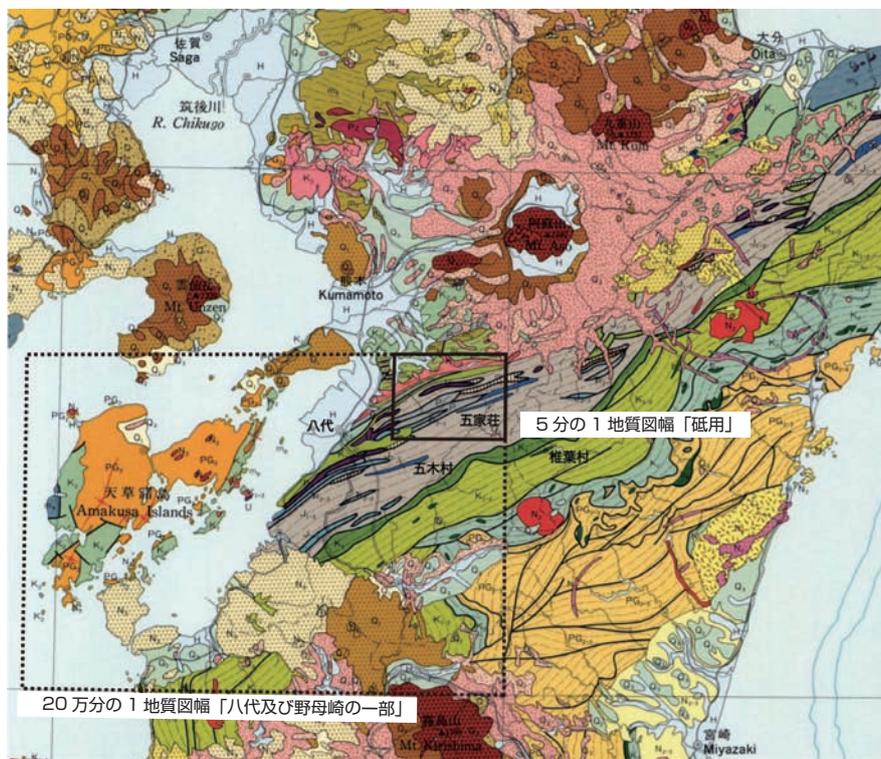


図1 5万分の1地質図幅「砥用」の位置とそれを基に作成中の20万分の1地質図幅「八代及び野母崎の一部」の位置。基図は100万分の1地質図第3版¹⁾。

がある。ジュラ紀付加体とそれ以外の蛇紋岩などの地層・岩石との関係や区分には諸説があり、ジュラ紀付加体以外の部分を黒瀬川構造体と呼んだり、ジュラ紀付加体も含めて位置関係だけから秩父帯南帯、中帯、北帯と呼んだりと研究者によって区分が異なり混乱していた。さらに1990年代前半になると、四国においてジュラ紀付加体の上に蛇紋岩や変成岩からなる地層（いわゆる“黒瀬川帯”の構成岩類の一部）が低角な構造で覆っていることが提唱された^{[2][3]}。「低用」地域には、蛇紋岩や変成岩、シルル紀～デボン紀の堆積物、ペルム紀～白亜紀の浅海成の地層が広く分布し、また、ジュラ紀付加体も広く分布することから、これらの相互関係を広域的に検証し、ジュラ紀付加体とそれ以外の地層・岩石との区分を明確にし、日本列島の形成史の大きな問題点を広域に地質を検討することによって明らかにするという目標も設定した。

この他にも、白亜紀の浅海成の地層の地質構造や、白亜紀の変成岩とその周囲との関係、白亜紀の高温型変成岩の形成史など、興味あるテーマが数多くあった。これらの課題を明らかにすることによって「低用」図幅が、周囲を含めた広域的な地質を判別するための基準になることを目指した。

3 地質図幅の社会的価値

5万分の1地質図幅を初めとする地質図幅の社会的価値については、既に産総研でも論じられている^[4]。また、米国地質調査所(USGS)でも地質図の社会的価値について論じられている^{[5][6]}。

地質図幅の場合、その用途は次のようなものである。

- 1) 土木、建設（道路、ダム、発電所、ビル、橋などの建設、住宅地の購入など）
- 2) 防災（活断層、火山噴火、河川の氾濫、地盤沈下、地すべり、軟弱地盤など）
- 3) 資源開発（石油、天然ガス、石炭などのエネルギー資源、地熱資源、温泉開発、地下水資源、金属、粘土などの鉱物資源、石材、骨材などの資源、観光資源など）
- 4) 地球環境対策（地下水の流動、放射性廃棄物・有害廃棄物の地層処分など）
- 5) 当該地域の形成史等の検討のための学術情報（日本列島の成り立ちの解明、地球環境の変遷の解明、シームレス（継ぎ目のない）地質図の編纂など）
- 6) 当該地域及び周辺地域の地質を検討する上での基準
日本では1800年代後半から地質図が作成されてきたが、当初は国内資源の開発が主たる目的であった。1950～60年代の高度成長期にはセメント向けの石灰岩の賦存地域が優先的に作られた。現在でも資源開発は骨材、温泉等で重要であるが、地質図幅の利用はそれ以外の多岐にわたる社会の基礎情報として使われるようになり、活断層や火山噴火等の災害の軽減や軟弱地盤対策、原子力発電所を初めとする産業立地、廃棄物の地層処分などの基礎的な情報として、多くの場合地質コンサルタントを経由して（地質コンサルタント会社が特定地域の地質を明らかにするときの基礎資料として）使われている。近年では一般の人々が訪れて興味ある地質を見学できるジオパークが全国的に指定されるようになり、その見学スポットであるジオサイトにおいて地質情報を観光資源に利用したり、企業の災害時の事業継続（Business Continuity Plan: BCP）の

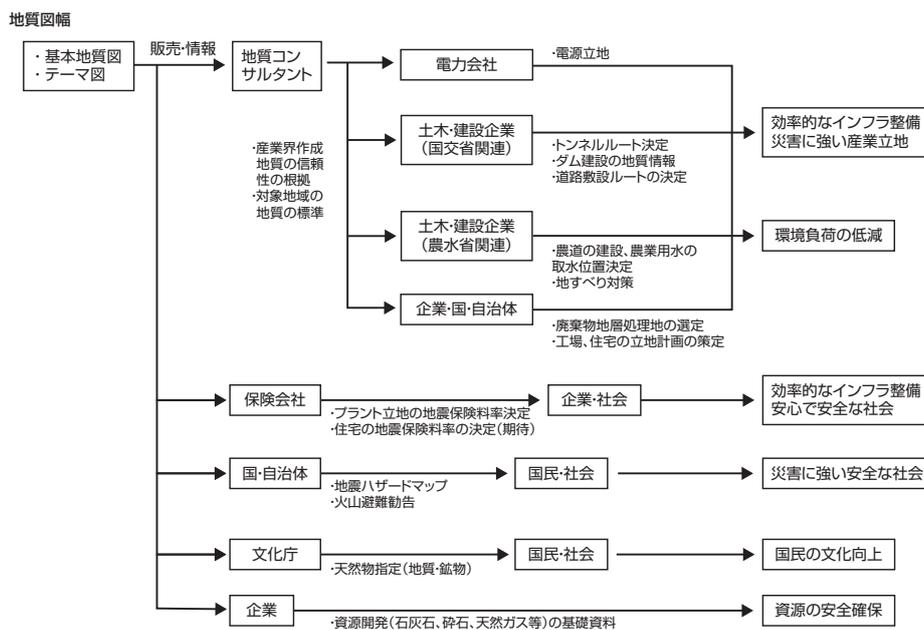


図2 地質図幅からアウトカム出現に至るプロセス^[4]

ための基礎情報としてなどの新たな利用も考えられるようになってきた。これらの地質図の活用の効果は、大きく見てプラス増大効果（資源など）とマイナス削減効果（災害や土木のための社会コストの軽減）に分けられる。

しかし、地質図幅の作成の場合最初からこれらの具体的な利用を想定して作成するわけではない。「低用」地域では、調査開始時に地質図幅の個別具体的な用途を想定して調査したわけではなく、その地域全体に関する正確な地質情報を包括的に提示することを目的として調査した。地質図幅が作成されると、直接ないしは別な目的別の地質図を介して、社会でその知識・情報が活用されることになる（図2）。産総研技術情報部門（当時）は地質図幅のアウトカムの特徴として、「地質調査総合センターから末広がり波及していくのが特徴」としている^[7]。

4 地質図幅作成の方法論

地質図幅を初めとする地質図に関する研究は、モデルを立て、実験を行って検証を行っていく演繹的な研究方法ではなく、その地域に露出する地層・岩石の観察から真理を見つけていく帰納的な手法を用いる。実際の地質調査では、観察した事象からその地域の地質モデルを頭の中で作りつつ、調査をしながら常にモデルを更新していく作業を行う。このため野外でどのような精度の情報を収集できるかは、調査を行う研究者の能力に依存する部分がある。野外での丁寧な観察は、新たな発見を生み研究成果に直結することが多々あるので、地質図作成の上でもっとも重

要なプロセスである。

また調査方法の進歩により調査し直すと過去の地質図は大きく変わることがある。精度が上がる理由として、新たな露頭（岩石・地層の露出地）が見つかる場合のほか、地層・岩石の観察や理解の方法が向上して分布精度が上がる場合がある。例えば、何かを測定するときに測定技術が高度化してノイズが減り、正確に測定できるようになるのと同じである。このことは過去の学問レベルが進んでいないときの地質図と現在の地質図を比較してみれば明白である（図3）。

このため、5万分の1地質図幅「低用」の作成においては、地質図幅がこの地域の最先端の地質学的知見に基づく地層・岩石判別の基準となり、かつ研究目標に示した学問的進展を得るために以下の3点の研究方法来に留意した。

1) 各作成担当者が最先端の地質学的知見に基づく地質情報を収集し、担当部分の地質図を完成した。著者が担当した付加体の地層・岩石を例に取れば、付加体では一般に地層間の境界が緩く傾く（形成当初は水平に近い）断層であることが多く、より上にある地層（上盤側）の方が、付加した年代が古いことが知られている（図4）。ただ付加体の認定には構造的に積み重なっている証拠や肉眼で認識できる化石が乏しいことから、微化石（プランクトンの化石）による地層の年代決定による証明を行った。また蛇紋岩とともに様々な岩石が低角な断層で付加体の上を覆っている地質構造が予想されたため、付加体の構造的上位に載る地層・岩石の同定とそれらの間や付加体との相互関係について野外で注意深く観察し、確実にルートマップを作

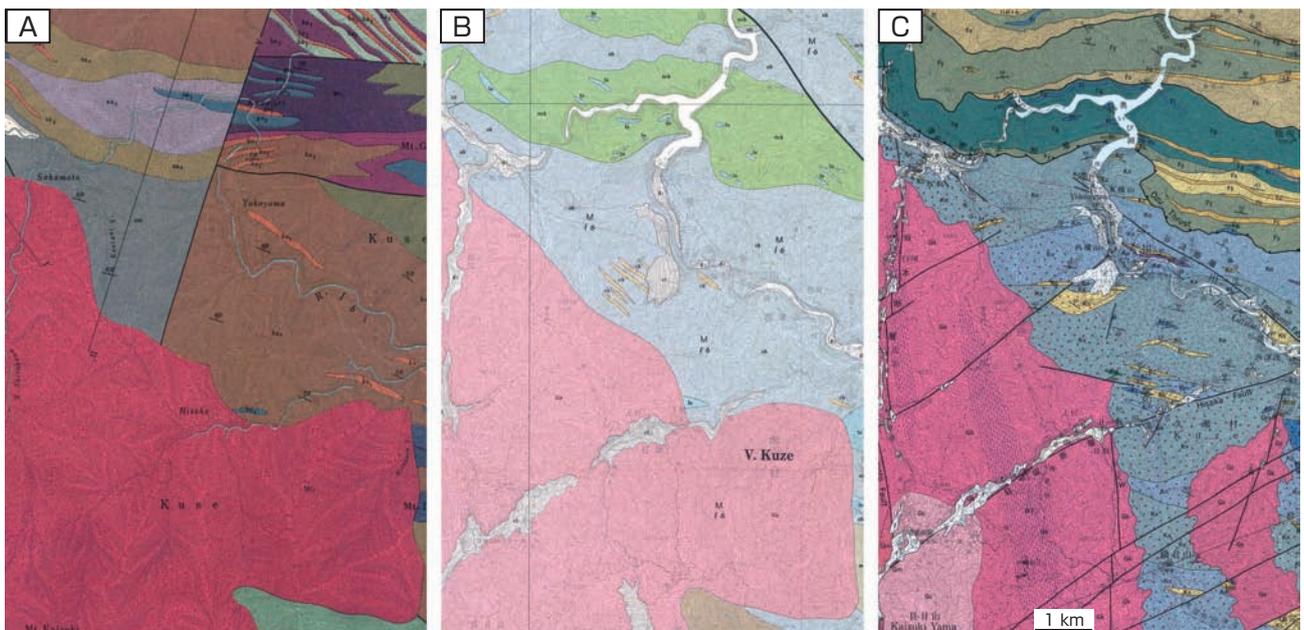


図3 地質図の変遷。5万分の1地質図幅「横山」の例 [文献8を改変]

- A: 1960年代に地質調査を行って作られた地質図^[9]。付加体の概念は導入されていない。
- B: 1990年代の土地分類基本調査（表層地質図）^[10]。十分な調査日数をかけずに作成したもの。
- C: 2000年に発行された5万分の1地質図幅「横山」^[11]

成した（図5）。

2) その地域の地質において、現状の位置に定置した年代の古い地層・岩石ほど、その地域におけるより若い地層・岩石に起きた断層や褶曲などの変形を重複して受ける。このため例えばある付加体が形成された後に起きた地層・岩石の変成、変形を正確につかむことによって、現在の地質構造との差分としてその付加体が形成される前に起きた変形を理解することができる。このためそれぞれの担当者間でルートマップ等の情報を共有し、また境界部は共同で、また重複して調査を行うなど担当者間の相互連携を確実に行った。

3) 地質図を作成する際に重要なのは、想定するその地域の地質の形成史（その地域の最も古い地層・岩石の形成時の姿から現状に至るまでの歴史）が、存在する地層・岩石の分布や相互関係と矛盾しないようにすることである。作成した地質図から、新しい地層・岩石や断層褶曲などの変形を順に取り除いて、時間をさかのぼるほど、それぞれの地層・岩石の形成時の姿に近い形に戻ることができるはずである。形成時の姿に戻したものが、現在知られている地層・岩石の形成の姿と矛盾がないことが地層・岩石の斉一説（現在起きていることは、過去にも起こっていたという考え方）の観点から重要である。そして、それぞれの地層・岩石の形成史に互いに矛盾がないようにしなければならない。「砥用」図幅では、このための議論を重ねて地質図幅全体を作成した。地質図幅の場合、異なる分野の研究者が一つの地質図幅を作るための議論を行うことから、作成された地質図はより精度の高いものとなる。大学等が研究

で地質図を作成する場合、研究者が自己の興味ある対象に特化して地質図を作成するため、他分野の研究者と十分に議論を尽くす機会が乏しく、地質図という観点からは精度の良い物を作成するのは難しい。

以上3点の他、地質図幅の発行主体としての地質調査総合センターは、地質図幅の精度を担保し、また科学技術の成果としての再現性（少なくとも地質図に含まれるデータの部分については誰がやっても同じ結果になる）を担保する必要がある。組織として精度を担保するために地質調査総合センター内部の決裁システムと連動した数段階にわたる査読システムがある。また地質学会等で書評の形で外部評価を受けている。再現性の担保については、ルートマップやボーリングなどの生データを研究報告書に掲載するよう努めており、採取した化石・岩石試料のうち、研究報告書に記載した試料については産総研の地質標本館に登録・保存して後からの検証が可能ないようにしている。今後さらにルートマップ等の生データをデータベース化できるようにする検討は必要である。

5 地質図幅「砥用」を構成する要素研究

一般的に5万分の1地質図幅を作成する際の技術（手順）と要素研究は以下のとおりである。この後、統合して1枚の地質図幅にまとめる。

1) 野外調査を行う前に、これまでの文献のチェック、段丘、活断層等の予測をつけるための航空写真、人工衛星写真の検討は必須である。「砥用」図幅の場合、国土地理院の発行する航空写真のほか1995年頃の調査開始時期に日本の

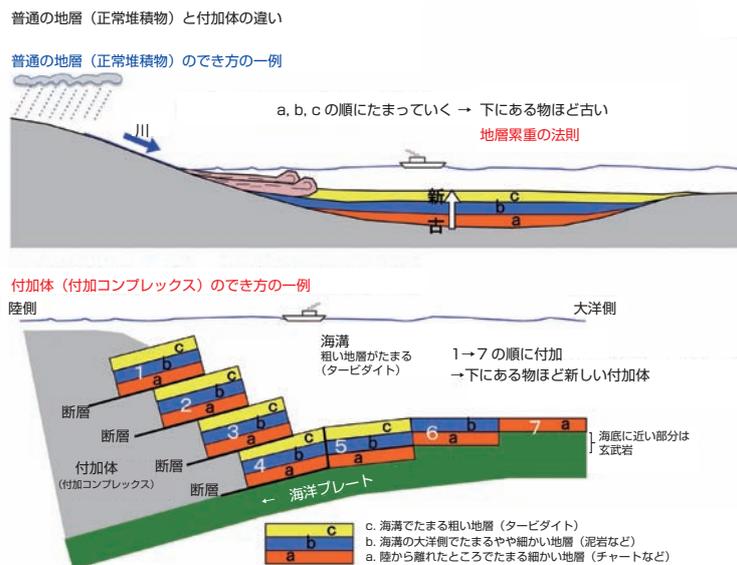


図4 普通の地層と付加体の地層との違い

普通の地層の場合は下から上に向かって順に新しくなるのに対し、付加体では海溝付近で堆積する地層(c)の年代に着目すると、断層で境されたa-b-cの地層のセットの年代が1c → 2c → 3c → 4cの順に下に行くほど新しくなる。普通の地層の見方にとらわれて、このようなでき方を理解しないと、付加体の地層は理解できない。

地球資源衛星1号 (JERS-1) の衛星写真を準備した。

2) 最も基本的な技術は野外調査である。野外を歩いて地層・岩石の露出する場所 (露頭) を探し、よく観察することが基本である。この部分に調査者の技術が最も要求されるが、文章で書きにくいノウハウはあまり残されていない。その理由は対象とする地層・岩石の種類によって精度のよい地質図作成のための野外調査のやり方が大きく異なるた

めである。山地や丘陵地が主たる調査対象の場合は一般にルート沿いに調査を行って地質図を作成する (図5A)。一方平野地域が主体の場合は地層の露出が乏しく、元々地層が水平に近いことから、地下の情報を得るためにも公的機関等が行ったボーリング情報を露頭情報と同様に収集する。

具体的には地質調査の際にその地域にどのような岩石・地層が分布するかを露頭情報から明らかにすることから地質

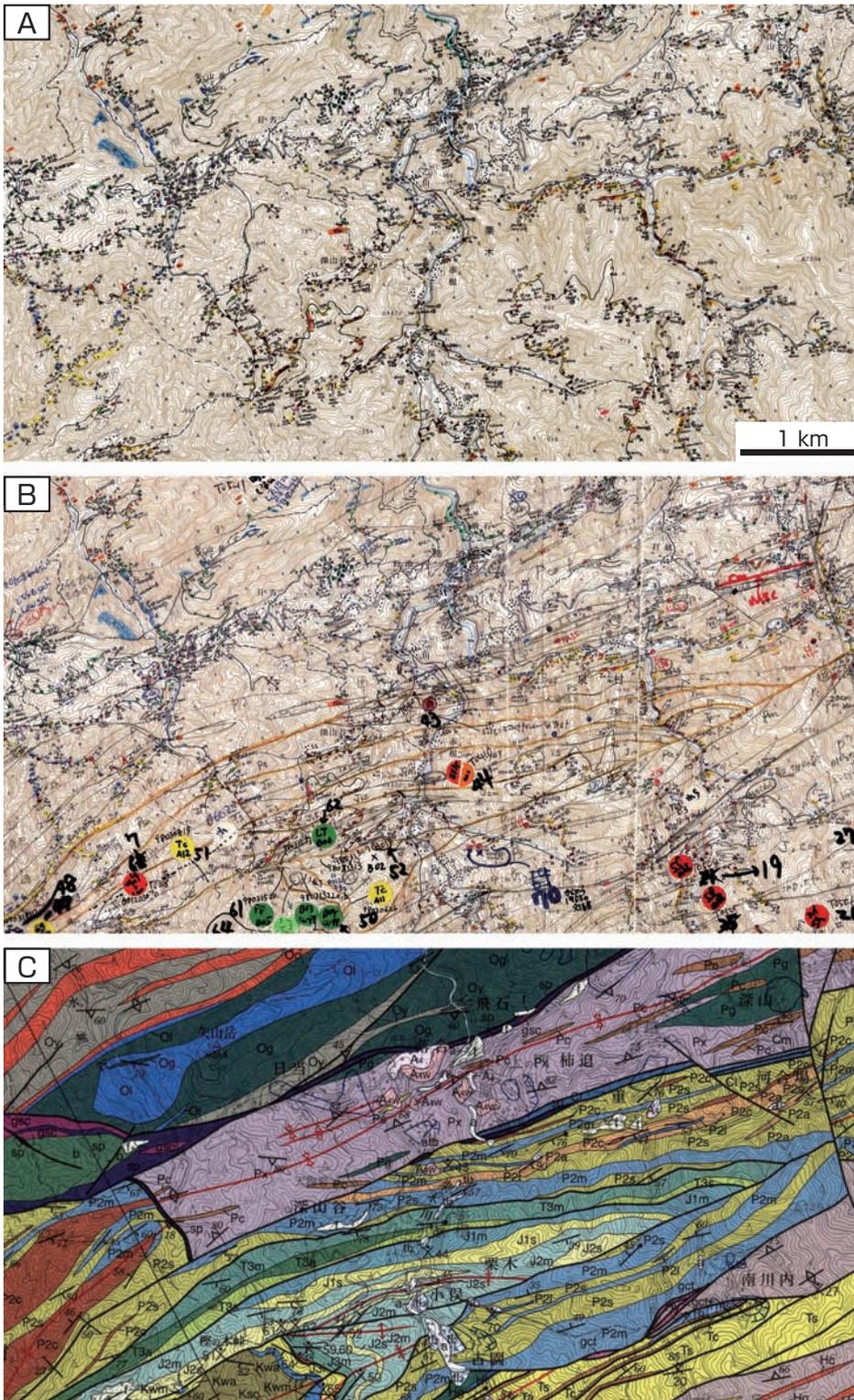


図5 ルートマップから地質図の作成までに至る道のり。「砥用」図幅^[12]南西部の例

A: ルートマップ
 B: 化石情報や地層境界、断層等を加えた地質図原図。微化石産出地は丸印。
 C: 5万分の1地質図幅「砥用」^[12]の一部。
 A,Bの基図は国土地理院発行1:25,000地形図「柿迫」。

調査は始まる。そして、それらの相互関係がどうかを明らかにするが、それが地質図作成には特に重要である。地層・岩石の性質は、少しでも露頭があれば最低限の情報は得られるが、地層・岩石の相互関係の認定には境界部を見つけることが必須である。そのためにはある程度、文献や地形から地質モデルを想定し、境界部のありそうなところを事前に予想して調査を行う必要がある。限られた日程の中で調査を行うために、事前に地質の予想を立て、最も効率的に調査を行う。また、地質調査は自然の観察であることから、予想どおりの結果が得られないことが普通である。そのため、一つの露頭情報が得られるごとに、予想される地質モデルを常時頭の中で改訂し、最も適切な調査方法を選択・変更して調査を行っていく。

「低用」図幅では、多くの地域が山岳地のため、道路沿い、谷底、尾根とルートをとるように調査を行い、地層岩石の分布を明らかにした（ルートマップの作成、図 5A）。特に他の地域に比べて地質の分布と相互関係が複雑と予想されたため、詳細な野外調査を行ったが、予想以上に複雑で予定より多くの調査日数を要した。

3) 野外での調査と平行して、地質図の作成のため岩石試料、化石試料を持ち帰り分析を行ってその結果を地質図に反映させる。岩石試料については0.02-0.03 mmの厚さのプレパラート（岩石薄片）にして、顕微鏡で観察し構成鉱物からみた岩石の種類や変形、変成の確認を行う。また、微化石の産出が想定される試料は薬品による処理を行って、顕微鏡下で微化石を探す。また、鉱物分離を行って、重鉱物の種類の検討、放射性元素を用いた年代測定など、必要な室内研究を行う。これらによって野外での観察だけでは得られない地層・岩石の形成年代、性質、形成場などの情報が明らかになり、それらを再度、現地調査の際にフィードバックさせる。これらそれぞれは、大学等で行われているような学術研究（第1種基礎研究）に相当する部分が多く、重要な結果が得られれば単独の論文として発表する。

低用図幅の場合、地質図幅の作成に至る前、また作成中に次の学術論文を発表した。

- (1) 下部白亜系低用層の層序と構造の解明^[13]
 - (2) 下部白亜系低用層の基盤がペルム紀付加体であることを認定^[14]
 - (3) 後期デボン紀シダ植物*Leptophloeum*の発見からデボン紀の地層の存在を認定^[15]
 - (4) 低用図幅北部の肥後変成岩の低圧高温型変成作用の解明^[16]
 - (5) 単斜輝石岩の巨晶の発見と記載^[17]
 - (6) ひすい輝石の産出地の発見と周囲の岩石との関係^[18]
- また、このほかに学会での口頭発表を行った。

6 要素研究の統合による地質図幅の作成

上述の個々の要素研究から、5万分の1地質図幅「低用」をまとめた（図 6）。この地域では、古生代初めのカンブリア紀の後期（約5億年前）から現在までの地層・岩石が存在することが明らかになった。このため異なる地質を分類するための凡例数は149になり、これまでの5万分の1地質図幅では最も多いケースとなった。また、付加体の概念を取り入れた地質図となっており、その他にも前出の研究に基づく最新の情報や、これまでに本地域で行われた数多くの研究成果（例えば大型化石の産出報告）に基づいて作成されている非常に精緻な地質図となった。そして、地質図幅とセットで出版された研究報告書（図 6）には「低用」図幅地域の地質区分の基準となる数多くのルートマップ、付加体の年代を決定するための微化石データなど、「低用」図幅の研究によって得られたデータが収録されており、現在印刷中の広域的な地質図（20万分の1地質図幅「八代及び野母崎の一部」^[19]）の基準となる地質図にもなった。

前述のように地質図を作成する際に重要なのは、その地域の地質の形成史が、存在する地層・岩石の分布や相互関係と矛盾しないようにすることである。このため、各担当者間で数多くの議論を行った。一例として、ジュラ紀付加体とそれらを低角な断層を介して覆う蛇紋岩や変成岩、浅海成の堆積物などとの関係や全体の形成史について議論した。これによって主たる研究課題の一つであった「ジュラ紀付加体の上に「黒瀬川帯」構成岩類が低角な構造で覆っているか否か」については肯定する証拠を得て断面図を描き（図 7）、西南日本の地質構造について重要な実証的な成果となった。さらに「黒瀬川帯」構成岩類の内部についてもある程度の区分ができるようになり、その結果、それらがジュラ紀付加体の上に低角な断層で重なってから現在までの地質構造の形成史についても結論を得ることができた。

また、「低用」図幅では、研究報告書に断層露頭の位置情報も示して、断層の確実性やその連続性の信頼度の向上を図るとともに、断層の認定の議論の過程で、「低用」地域内に伏在する活断層の位置の確定や、活断層の認定には至らないものの、地質学的に活断層の可能性が疑われる断層についても認定できた。

7 地質図幅「低用」の価値と利活用

5万分の1地質図幅「低用」の作成によって、地理的・学術的に調査が困難な地域であった本地域の地質について、基礎的な研究成果が上がり、最先端の情報に基づいて高精度の地質図が作成できた。これによってこの図幅が当該地域及び周辺地域の地質を判別するための基準にな

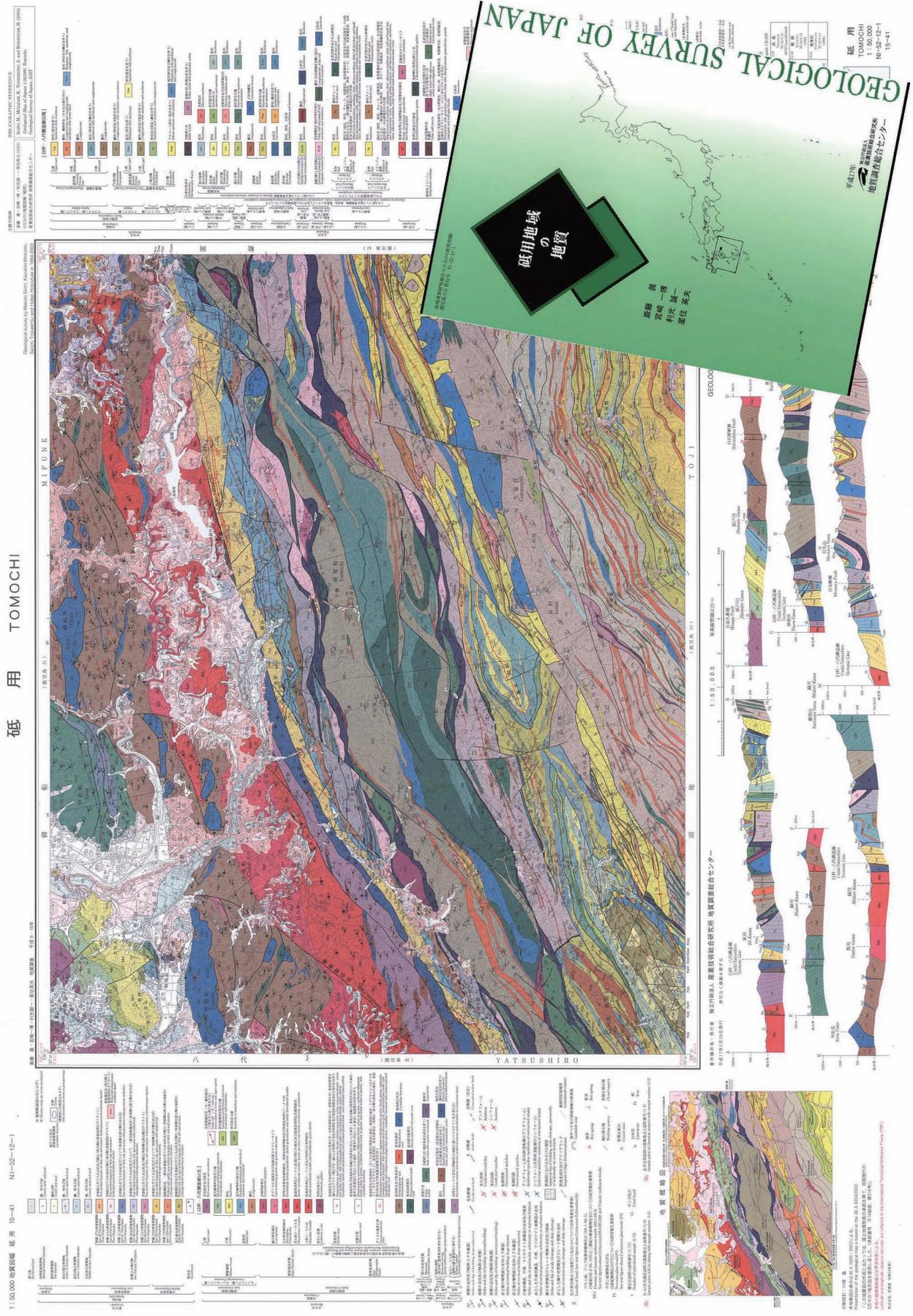


図6 印刷された5万分1地質図幅「砥用」200pを越える研究報告書(A4)とセット[12]。

るのは間違いでない。現在この「砥用」図幅を基にして、20万分の1地質図幅「八代及び野母崎の一部」(図1)^[19]を作成したところである。また西南日本の地質構造について実証的な結果を出したことによって、日本の地質の理解が進展するものと考えられる。

このように「砥用」図幅は、個々の地層・岩石についての基礎研究で成果が上がっただけでなく、それらから構成される地質図幅としても学術的に成果が上がったと考えられる。さらに、個別の成果をまとめて地質図幅として公表したことは、今後社会での活用を考えたときに大きな意義があると言える。

「砥用」図幅が、これから社会でどう使われていくか検討する。地質図幅は、完成・出版後、すぐに大々的に活用されるものではなく、社会の基盤情報として数十年にわたって活用されていく。その点で地質図幅は、工学的な研究成果に比べて息の長い研究成果である。しかし現時点でも次のようないくつかの利用が想定できる。

地層・岩石区分の基準としての活用例としては、著者を中心に作成した広域的な20万分の1地質図幅「八代及び野母崎の一部」^[19]の編纂に5万分の1地質図幅「椎葉村」^[20]とともに「砥用」図幅^[12]を用いたことが挙げられる。20万分の1地質図幅「八代及び野母崎の一部」は、その一角を占める5万分の1地質図幅「砥用」の地域が最も地質の区分が難しい所であったため、「砥用」図幅の完成が20万分の1地質図幅の編纂のためには必須であった。この20万分の1地質図幅によって、九州の20万分の1地質図幅の空白域が解消されることになった。

産業立地としての活用では、これまで理解が困難だったジュラ紀付加体と「黒瀬川帯」構成岩類との関係（「黒瀬川帯」構成岩類が低角な断層でジュラ紀付加体を覆う関係）

(図7)が「砥用」図幅で明らかになったことによって、同様の地質の分布する地域での産業立地、例えば鹿児島県の川内原子力発電所付近の地質の理解や、周辺の地質の理解に貢献するものと考えられる。

防災面では、斜面崩壊については蛇紋岩地帯の地すべりを中心に地質との関係を明らかにしたことから、今後の斜面崩壊の理解・予測にも貢献すると考える。また、活断層(後期更新世、すなわち12.5万年前以降に繰り返し活動し、今後も活動すると考えられる断層)のほか、後期更新世以降の地層が存在しないことから活断層の認定に至らなかった断層についても研究報告書の本文に記述したので、近年(後期更新世～現在)の広域的な地殻変動の検討に使うことができると考えられる。また、本地域では、国道から林道まで様々な道路の法面(道路脇の削りとった斜面)や路盤の崩壊がしばしば起こり、これらはこの地域に特徴的な地質に起因することが多い。これらの防止の基礎資料に活用が望まれる。

鉱産資源の面では、金属資源としては活用の見込みが乏しく、また山岳地に多量に存在する石灰岩の分布も初めて明らかになったが、現在採掘されている北部の交通の便の良い所以以外の開発の可能性は低い。その他の鉱産資源や碎石等の資源についても同様である。一方、温泉掘削業者からは、「砥用」図幅内の温泉調査の際に、「地質図幅があれば必ず使う」といわれており、今後活用され温泉開

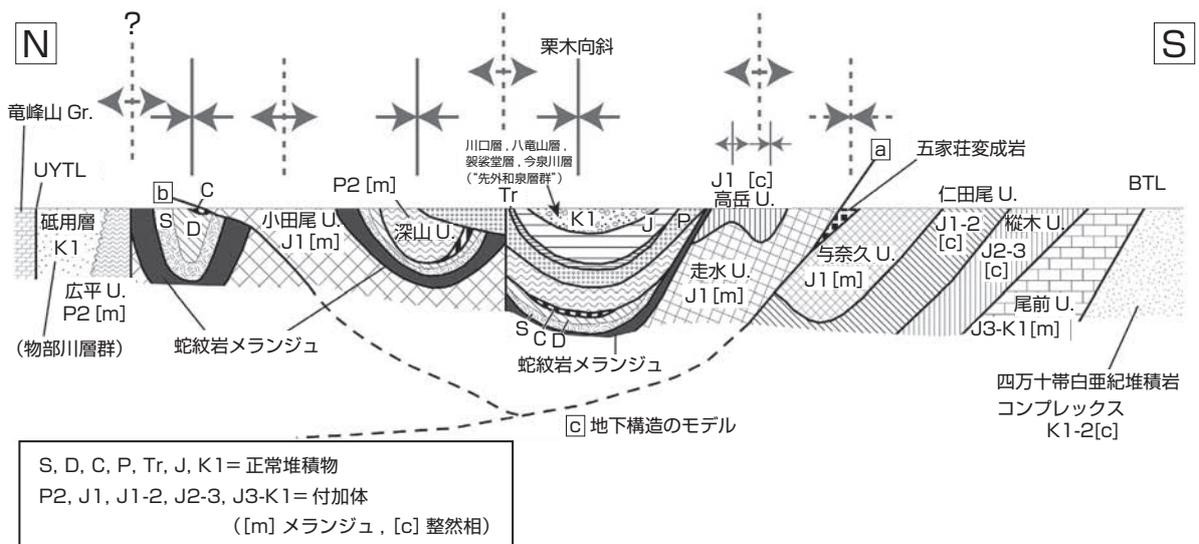


図7 「砥用」図幅中南部の概略的な断面図
 ジュラ紀付加体 (J1, J1-2, J2-3, J3-K1) の上に蛇紋岩 (図では蛇紋岩メランジュ)、正常堆積物、バウム紀付加体 (P2) が存在する。両者の境界はもともと水平に近い断層。現在は褶曲 (地層が曲がること) している。この図に「砥用」地域の地質の考え方や形成史が凝縮されている。

発されることが期待できる。

新たな活用方法として期待される観光を初めとする地域振興に対する活用については、これまで知られている鍾乳洞やこの地域特有の約9万年前の阿蘇-4火砕流堆積物の溶結凝灰岩を使った石橋等については研究報告書に記述した。「砥用」図幅内では、これまで知られている白亜紀アンモナイト等の大型化石の産出のほか、新たにデボン紀のシダ植物化石^[15]、巨大結晶からなる輝岩^[17]、ひすい輝石の発見^[18]等、天然記念物やジオパークの見学スポットであるジオサイトにできる要素も見つかった。また、国体の山岳競技に使われた山や、地元の特徴的な景観をなす山々の地質が明確になったことから、地域の自然の成り立ちを語る資料としても活用できる。

以上のように、地質図幅はその作成後、長期にわたって様々な形で活用されることが予想される。また、これまでの地質図の使われ方を考慮すると、現在想定していない活用方法が今後社会情勢の変化や、災害等で発生することも充分考えられる。そして、これからの社会が持続的発展をするためには人間が自分の周囲の自然環境を科学的に理解していくことが必要であり、地質図幅はそのために重要な役割を果たすであろう。

参考文献

- [1] 地質調査所: 100万分の1日本地質図第3版, 地質調査所(1992).
- [2] 磯崎行雄, 板谷徹丸: 四国中西部秩父累帯北帯の先ジュラ系クリッペー黒瀬川内帯起源説の提唱-, *地質学雑誌*, 97, 431-450 (1991).
- [3] 磯崎行雄, 橋口孝泰, 板谷徹丸: 黒瀬川クリッペの検証, *地質学雑誌*, 98, 917-941 (1992).
- [4] 産総研技術情報部門: 産業技術総合研究所におけるアウトカム事例調査(2)-ライフサイクルアセスメント(LCA)-, -地質図幅-, -シリコン半導体-, *産総研技術情報部門調査報告書* (2004).
- [5] R. L. Bernknopf, D. S. Brookshire, D. R. Soller, M. J. McKee, J. F. Sutter, J. C. Matti and R. H. Campbell: Societal value of geologic maps, *U.S Geological Survey Circular* 1111 (1993).
- [6] 小笠原正継, 大井健太(編): 地質図の社会的価値--米国地質調査所サーキュラー1111(日本語翻訳版)および米国における地質図の経済学的評価の動向--, *地質調査総合センター研究速報*, 37 (2006).
- [7] 産総研技術情報部門: 産総研におけるアウトカム事例調査【7】地質図幅, *産総研TODAY*, 5 (5), 40-41 (2005).
- [8] 斎藤 眞: 横山地域の地質図の変遷, *地質ニュース*, 561, 4-4 (2001).
- [9] M. Miyamura: Stratigraphy and geological structure of the Permian formations of Mt. Ibuki and its vicinity, central Japan, *Geol. Surv. Japan Report*, 224 (1967).
- [10] 岐阜県: 土地分類基本調査「横山」, 岐阜県 (1995).
- [11] 斎藤 眞, 沢田順弘: 横山地域の地質, *地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)*, 地質調査所 (2000).
- [12] 斎藤 眞, 宮崎一博, 利光誠一, 星住英夫: 砥用地域の地質, *地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)*, 産総研地質調査総合センター (2005).
- [13] 河野知治, 田中 均, 高橋 努, 利光誠一, 森 大輔: 熊本県秩父帯下部白亜系砥用層の層序と構造, *御所浦白亜紀資料館報*, 3, 11-22 (2002).
- [14] 斎藤 眞, 利光誠一: 九州中部に分布する下部白亜系砥用層の基盤から産出したペルム紀放射状化石, *地質学雑誌*, 109, 71-74 (2003).
- [15] 斎藤 眞, 斎木健一, 利光誠一: 九州中部, 熊本県砥用町の黒瀬川帯の整然層から産出した後期デボン紀 *Leptophloeum*, *地質学雑誌*, 109, 293-298 (2003).
- [16] K. Miyazaki: Low-P-high-T metamorphism and the role of heat transport by melt migration in the Higo Metamorphic Complex, Kyushu, Japan, *J. Metamorphic Geol.*, 22, 793-809 (2004).
- [17] 斎藤 眞, 宮崎一博, 塚本 斉: 九州中部, 熊本県泉村-砥用町地域の「黒瀬川帯」蛇紋岩メランジュ中の単斜輝石岩, *地質調査研究報告*, 55, 171-179 (2004).
- [18] 斎藤 眞, 宮崎一博: 九州中部, 熊本県八代市泉町の「黒瀬川帯」蛇紋岩メランジュ中の含ひすい輝石変斑れい岩, *地質調査研究報告*, 57, 169-176 (2006).
- [19] 斎藤 眞, 宝田晋治, 利光誠一, 水野清秀, 宮崎一博, 星住英夫, 濱崎聡志, 阪口圭一, 大野哲二, 村田泰章: 20万分の1地質図幅「八代及び野母崎の一部」, 産総研地質調査総合センター (2010). 印刷中
- [20] 斎藤 眞, 木村克己, 内藤一樹, 酒井 彰: 椎葉村地域の地質, *地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)*, 地質調査所 (1996).

執筆者略歴

斎藤 眞 (さいとう まこと)

1989年名古屋大学理学研究科博士前期課程地球科学専攻修了。1990年同博士後期課程中退。同年通商産業省工業技術院地質調査所入所。2001年産総研地球科学情報研究部門主任研究員。2009年より地質情報研究部門シームレス地質情報研究グループ長。専門は地質学。付加体を中心に九州～南西諸島北部の地質の研究を行っている。これまで5万分の1地質図幅筆頭4編、20万分の1地質図幅筆頭4編、非筆頭2編作成。博士(理学)。地質情報の普及活動も得意。



査読者との議論

議論1 他の機関が取得した地質データの活用

質問・コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

5万分の1地質図幅が、地質学の最新の成果に基づいて、また社会での利活用を想定しつつ、多角的な視点から調査・検討されて作成されることが分野外からも理解でき、構成・内容ともに優れた第2種基礎研究の論文となっていると思います。

ところで地質図の作成は、この論文でも述べられているように、わずかな数の地表に出ている露頭の地質データから、広大な地下空間の3次元構造を予測するという、ある意味大変野心的な作業であるとの印象を持ちました。たぶん数はもっと少ないでしょうがその地域にボーリングデータがあった場合、それはどのように利用されるのでしょうか。地質図を作成するための基礎データとして利用されるのでしょうか、あるいは作成した地質図の正確さを検証するためのデータとして使われるのでしょうか。またその地域の自治体や民間企業も、それぞれの必要性から独自に地質調査を行う場合があると思います。そのようなデータは、産総研による地質図幅の作成に当たって活用されるのでしょうか。

回答 (斎藤 眞)

1) 査読者はわずかな数の地表にでている露頭の地質データから予

測すると感じておられるようですが、面積的にはわずかも、うまく地層・岩石の全体像が観察できるように歩けば十分なデータを取ることには可能です。地質図幅を作成するには、粗い間隔でとったルートマップでも充分地質図が作成可能な所と、詳細なルートマップを取らないと地質図を作成できない所があり、日々の調査でコストも考えて地質図作成に必要な調査となるよう工夫しています。

2) 本文に書いたとおり、自治体等の公開できるボーリングデータがあれば、当然収集して地質図に反映させます。また、平野の地質図では露頭が少ない分、自治体等にボーリングデータがたくさんあることが多いので、それらを重要なデータとして手間をかけて収集・解析を行って地質図幅を作成します。これは平野では地下の地質が特に重要だからです。例に挙げた低用図幅では、温泉業者に非公開でボーリングデータの情報を閲覧させてもらっています。

3) 地質図のデータもあれば収集します。自治体や政府機関の行った公共工事の際の地質図が該当します。解釈に基づく地質図は、元になったルートマップや報告書があれば、それらを含めて解釈が妥当か検討します。また、ダムやトンネルではスケッチもありますので、それらも収集します。例に挙げた低用図幅では、自治体の温泉調査報告書の地質図を閲覧して、われわれの地質の検証に用いました（現実には小さな地域のルートマップが少し役に立った程度でしたが）。

議論2 5万分の1地質図幅の整備状況と更新周期

質問（小野 晃）

5万分の1地質図幅が地質学の最新の成果に基づいて作成されることは分かりましたが、日本の場合どの程度の周期で5万分の1地質図幅が再調査されて改訂されるのでしょうか。具体的に今回の「低用」以前の図幅はいつ頃作成されたのでしょうか。

調査には人手と時間がかかるものと思われる。5万分の1地質図幅は現状で日本全土をカバーしている状況でしょうか。整備に関する基本的な考え方をお聞かせ下さい。

回答（斎藤 眞）

1) 5万分の1地質図幅は基本的に再調査を行いません。それは、まだ全国カバーに至っていないからです。しかし、20万分の1地質図幅は2009年度で1回目の整備が終わり、随時最新の知見で作成した地質図幅に置き換えています。20万分の1地質図幅の改訂には、情報の乏しい地域やその地域の地質区分の基準となる5万分の1地質図幅は必要です。このため、現在では、原則空白域を優先するものの、20万分の1地質図幅の作成等に不可欠な所はわずかながら改訂しています。

2) 今回の5万分の1地質図幅「低用」は過去に作成したことはありません。ただ、元々経済企画庁が行い、国土庁を経て、現在国土交通省所管で各県が作成している土地分類基本調査の中に精度の悪い表層地質図は存在しました。

3) 5万分の1地質図幅は、現在の産総研の人員ではなかなか全国整備率の著しい上昇は見込めませんので、今後は、重点地域を決めて整備していく方向です。重点地域の例としては、(1)人口の多い都市及びその周辺、(2)活断層、火山等、防災上重要な地域、(3)ジオパーク等社会的な影響の大きい地域、(4)日本の地質の理解のために不可欠な地域（例えば20万分の1地質図幅の改訂に不可欠な地域）等が考えられます。

議論3 地質図幅の作成は第2種基礎研究か？

質問・コメント（小野 晃）

*Synthesiology*1 巻2号に「シームレスな20万分の1日本地質図の作成とウェブ配信」という題名で地質関係の研究論文があります。論文の後ろの「査読者との議論」に「議論5 地質図幅の研究」があります。そこでは地質図幅の作成は第2種基礎研究というべきか、あるいは第1種基礎研究というべきかの議論がなされています。本論文の著者はこの点に関してどのような見解をお持ちでしょうか。

地質図幅の作成において、もともとなる露頭の地質データは同じだと

しても、その地域を担当した研究者の知識と見解によって結果としての地質図自体が大きく変わりうるといったことがあるように思います。作成された地質図の内容が担当研究者の属性に大きく依存するという事になると、一方で地質図の信頼性を損なうことにもなると思います。地質図作成に標準的手順を可能な限り導入するとか、あるいは作成結果に対する他者からの査読、審査の仕組みがあれば、信頼性の向上に役立つと思います。この点の現状はどのようになっているのでしょうか、著者の見解があれば合わせてお聞かせ下さい。

回答（斎藤 眞）

1) *Synthesiology*1巻2号では、本文の「はじめに」で、著者は地質図幅を第1種基礎研究、シームレス地質図を第2種基礎研究とし、死の谷を「古い地質モデルで描かれた使いにくいデータとなる状況」においています。そして、はじめにの最終段落で、地質図の研究が第2種基礎研究の側面をもつが、近年高度な研究内容を盛り込んだ基礎研究報告書としての性格が強くなっていることから、第1種基礎研究の側面を強調して記述したと述べています。一方議論で、査読者は「今までの地質調査が全て第1種とする論理展開には無理がある」、「第1種、第2種の両方の要素があり・・・第2種に軸足がある」との意見を述べ、それに対して著者は第2種基礎研究に軸足があることを否定していません。その理由として社会的価値を実現するための、一般性のある方法論を導き出すという「第2種基礎研究」の基本が行われていないことを理由に述べています。

私は、この見解の違いは地質図幅の作成に関わってきた著者と、どちらかという側利用する側に近かった査読者の研究経歴によるスタンスの相違ではないかと考えます。私は、地質図幅が査読者の第2種基礎研究に軸足を置いているという見解には同調しませんが、かといって著者のように社会的価値を実現するための、一般性のある方法論を地質図幅内で導き出すことが第2種基礎研究をいうために必要とも考えていません。第2種基礎研究的要素としては、社会的に直接利活用可能な形で知識が示されていることが重要と考えるからです。

これまで地質図幅の利活用について、アウトカム調査（文献7）等を見ると、地質図幅の個々の内容または地質図幅全体を最終利用者が直接用いる場合と、コンサルタント企業等が直接利用して顧客に情報提供する場合、さらには地質図幅の成果を用いて作成した目的特化型の地質図やシームレス地質図などの別の地質図を利用して顧客に情報提供する場合まで、地質図幅を直接使う場合や間接的な地質図等を介して使う場合などさまざまな利用形態があることから、第1種と第2種の区切り線は引けず、第1種と第2種の両面をもつといえます。例に取り上げた5万分の1地質図幅「低用」は、作っている当事者の気持ちは第1種基礎研究的ですが、より利活用できるような具体的な岩相分布が精度よく示されている地質図であるべき、という意識も持って作成しています。

2) 地質図幅の信頼性を担保するための仕組みは本文にも書きましたがいづつか用意しています。その一つは内部での多段階のチェックで、地質図幅が産総研地質調査総合センターの信用の元に発行する出版物であることから、専門家による内部査読から、地質図幅を作成するプロジェクトの管理職による査読、そして、地質図幅を出版する部門でのチェックなど通常の論文よりも多くのチェックを経ないと出版に至りません。実際、地質図幅ができてきても決裁が降りず、出版に至らなかったものも存在します。また、出版後も学会等による評価を積極的に受けることにしており、例に挙げた低用図幅も地質学会Newsで書評を書いてもらいました。また、地質図自体の表現方法については、現在JISで表記が規定されてばらつきがないようになっています。それでも地質図幅は研究成果の著作物であることから、著者の能力に依存する部分は否めませんが、地質図幅には著者名が記されており、専門家であれば著者を認識することが可能であることから、著者名の表示も精度を担保する要素になっています。これらによって最低限のレベルは担保されていると考えています。

インタビュー

工学の克復とシンセシオロジー

日本工学アカデミーは工学に関するさまざまな事項を高い見地から検討・議論し提言をまとめているが、その中の「工学の克復研究会」は現代における工学のあり方をさまざまな角度から検討しています。工学のあり方はシンセシオロジーの理念とも深く関係していますので、研究会メンバーの一人である長井寿さんに本誌小野編集委員長がインタビューして「工学の克復」に関する考えを伺い、シンセシオロジーとの関係話を話しました。

シンセシオロジー編集委員会

長井 寿：日本工学アカデミー工学克復研究会 物質・材料研究機構

小野 晃：シンセシオロジー編集委員長 産業技術総合研究所

今なぜ、工学「克復」研究会なのか

小野 日本工学アカデミーの「工学の克復研究会」は、私たちのシンセシオロジーと同じ思いがあるのではないかと考えています。困難な状況を乗り越えるという“克服”ではなく、あえて元の状態に戻すという“克復”にされた意図は何でしょうか。

長井 昨今、「理科離れ」とか「さらば工学部」といわれますが、工学というのは非常に大事な分野なのに、なぜ若い人たちから見捨てられていくのか、おかしいではないかと思っていました。それともう一つ、日本工学アカデミーの会員は日本を代表する方々ですが、高齢化しています。日本の伝統ある学会は総じて会員数は増えず、高年齢化している。「このままで本当にいいのだろうか？」という意味で、オーバーカムの“克服”ではなく、病気になって、そして元の健康体を取り戻すという意味の“克復”を使っているわけです。もう一度健全な形に戻らないといけないのではないかという意味で、若い人たちにきちんと評価され、工学の価値が広まるきっかけをつくりたいという問題意識を持っています。

イノベーションの本質を研究者はもう一度考えるべき

小野 今、世界的にイノベーションに高い関心が持たれていますが、「工学の克復」はイノベーションとつながるところがあると思うのです。日本の産業界や社会・国民にとってのイノベーションをどのように捉えていらっしゃいますか。

長井 技術のブレークスルーは大事なことですが、日本ではある種のブレークスルーをイノベーションと同義語と捉え過ぎるという面があります。

産業界の方々は、手持ちの指導原理というか、科学の原理原則の限界が見えてきて、2020年～2030年くらいに全部利用し尽くしてしまうといっています。世界の変化や新しいニーズに対応するために手持ちのものでは限界だということがわかっているので、本格的なイノベーションを起こす手だてを求めています。

社会・国民にとっては、昨年のような資源・エネルギー価格の高騰はアメリカの経済破綻で何となく鎮静化しましたが、この流れは変わらないだろうという、むしろ確信が強まっています。資源・エネルギー、地球環境の社会的制約条件をどのように克服して、安心して暮らせる豊かな社会をつくるのかということが社会・国民からいわれているイノ



小野 晃氏(左)と長井 寿氏(右)

バージョンです。

一方、これは自己批判にもなるのですが、今、第4期科学技術基本計画の策定が始まろうとしています。科学技術に対する期待が高まり、大きな投資をされた。国民に還元され、産業も発展するという、具体的な投資効果を見なければいけないのではないかと非常に強い意見が技術政策サイドから出ています。これはある意味では当然だと思うのですが、研究者のレベルまで戻ると、先ほど申し上げたような「ブレイクスルーがイノベーションだ」と思っているようでは、これには応えられない。研究者は「自分は頑張っ、こんなにすばらしいものを発見・発明した」かもしれないけれども、あまりにも先端すぎて、日本の今の産業技術がそれを利用する力がないという、ギャップを埋められないときがある。うがったいい方をすれば、世界にはその先端シーズを利用できる力やマインドを持っている企業があって、日本から出たものが真っ先に他の国で利用されてしまうという問題も出てきてしまう。

一人ひとりの研究者のレベルまで戻って、どこにどう力を加えたらほんとうに国民の税金を使って日本の国のためになるのか、ということをもう一回考え直しなさいという形で、私は「イノベーション」といわれていると感じています。

小野 今のお話はシンセシオロジーの編集の立場からも非常に共感できるところです。「研究者一人ひとりのところまで戻って」というところは大変重要だと思います。

長井 産業界、社会・国民、技術政策サイドでいっているイノベーションはそれぞれ微妙に違いますが、新しい方向を求めて、いろいろなブレイクスルーが合わさった形でパラダイムが全く変わるということがまさに期待されています。日本でいえば、資源やエネルギーをどう確保していくのか。世界にとって邪魔者にならず、歓迎されるような方向やしっかりと見通しが必要です。そういう意味でも、工学がこれから活躍すべきときなのに、「理科離れ」とか「さらば工学部」といわれているのは、いかにも情けないということに戻るのです。

「工学」を「問題解決する科学」と定義しよう

小野 日本の工学といますか、技術は良かったはずなのに、それがどこで失われてきたのか、という思いがあります。「工学の克復」というとき、工学とはどのようなものとお考えですか。技術でもない、科学とも違う、工学独自の科学のようなものがあるとお考えでしょうか。

長井 「科学技術」という四字熟語もありますが、これ

をどう定義するかは結構難しい。工学と科学と技術をそれぞれの熟語で考え、今日的な意味を見直し、それから「科学技術」の意味を再定義したほうがいいのではないかと考えています。「日本的曖昧さがいい」という人もいますが、曖昧さを持った指導原理が敗北につながることもあります。

小野 まずは言葉の定義をしっかりとしないと。

長井 工学は、英語で「engineering」といい切ってもいいと思いますが、「science と technology と engineering」もしくは「science of engineering」を工学だという言い方もあって、私はいずれもわかるのですが、そういう意味でいうと「工学は問題解決する科学」だと理解しています。

ただ、私は工学の定義が日本の中では少し揺らいでいるのではないかと思うようになりました。こういうと叱られるかもしれませんが、日本の工学部はサイエンス寄りになり過ぎた嫌いが強い。「工学」という言葉の意味が拡散してしまっ、工学の牙城たるべき工学部が工学から実は離れていっているという指摘が産業界の方々からあります。最近、いろいろな報告書であからさまに「工学部が工学ではなくなっている。亜理学部や理学部の工学部になってしまっている」という人が増えています。問題解決するということで工学部を目指していた学生たちが、それだったら理学部や医学部や経済学部に行こうというふうになるのは、工学部が本来のあるべき姿を見失ってしまっているからではないか、といわざるを得ません。工学部は理学部から生まれ出たもので、実は工学部を世界で初めてつくったのは日本なのです。

「技術」と共に発展する「科学」が求められる時代

小野 本来の日本の工学というのがあったはずではないか、ということですね。工学のあるべき姿を目指すということは、まさに工学の克復の原点です。

科学と技術ですが、この二つは融合しつつある時代だといわれますが、その一方で、未だに相互に独立していて、互いに別々に発展している面もあります。融合と独立について、どのようにお考えになりますか。

長井 東洋における科学史や技術史は意外と勉強されていません。西洋で西洋技術史もあまり勉強されていないのですが、西洋科学史は非常によく研究されています。

東大名誉教授の村上陽一郎先生がわかりやすい説明をされていますが、「西洋には神様が作りたもうた二つのものがあって、一つは聖書であり、もう一つは自然である。ここに神の啓示がある。この神の啓示を解明するのが学問の目的であるということから西洋の科学は生まれている」。

小野 西洋科学の源流の一つにキリスト教の神の世界を実現する、あるいは探求するということでしょうか、神学と非常に結びついていたということですね。

長井 はい、大陸では科学者は王家に支えられていたが、技術者は比較的卑しい身分だった。それに対して、イギリスでは科学者がお高くとまっていてあまり役立たないというので技術者・技能者が優遇されていたようです。その後、ルネッサンス時代に、「神様は非常に系統的に自然をつくったのではなく、気まぐれでいろいろなものをつくられた。気まぐれにつくられたものをすべて理解すれば、神様に近づく」という形で百科全書ができました。このあたりから、例えばガリレオ・ガリレイが、望遠鏡がないと科学ができないとか、いわゆる考えて科学をするのではなく、実験をして科学をするということで道具との結びつきが科学史を読んでも明快に見えてきます。

村上先生によれば、なぜ西洋科学が変化を遂げたのかということ、イスラムと戦ったからです。イスラム教徒が残したものを勉強して吸収したことから、実は自分たちはソクラテスやヘレニズム文化をきちんと吸収していなかったということがわかり、異文化を勉強し直すことによって、大きな転換が起こった。これは、まさにシンセシオロジーの起源のようなものですね。そして、神学の一部から百科全書という形に、系統性がなくてもいいのだという形になったわけです。

小野 事実の収集がまず大事ということですね。

長井 はい。産業革命のころに科学と技術が本気で出会います。技術は“もの”さえ作ればいいのです。印刷術にしろ、火薬にしろ、羅針盤にしろ、一説によれば水車も東洋から生まれたといわれていますが、つくれて使えればいい、理屈なんかなくてもいい。これは技術のすばらしいところだと思います。

一方の科学は、神様が作りたもうた深遠なる真理を追

求するのですから、ある意味では成果がなくても構わない。これもすばらしいと思うので、両方とも無理やり自己規制する必要はないと思うのですが、ただ百科全書派からも一回変わろうとしていると思います。

まず、今の時代をどのように規定するかという話ですが、一つは大衆グローバル化といわれるように、フラット化したことです。そして、交通手段や通信手段の発達によって、世界は非常に小さくなっています。情報はあつという間に世界に広がってしまう。そういう点でも、新しい時代になってしまったといえます。

2050年くらいに、世界の人口は今の1.5倍くらいに膨らむといわれていますから、資源やエネルギーは今の2倍くらい必要でしょうし、二酸化炭素の排出量も2倍以上になってしまうでしょう。資源やエネルギーの残寿命は縮まり、人口はピークの2050年を過ぎると世界的に平均寿命が高くなってきます。地球自体が年をとっていくというのが21世紀です。

その一方で、科学や技術の発展速度は今よりもっと速まります。

小野 科学や技術の発展を速めなければいけない、ということでしょうか。

科学に裏付けられた技術が産業に求められる

長井 いえ、速まってしまうということです。研究論文の発表数を見ても、中国やインドが参加することで格段に増加しました。参加人数が増えれば増えるほど、すごいスピードで世界の新しい情報が出てくる。セレンディピティの確率がそれほど変わらず、数を撃てば当たるということであれば、新しいものがどんどん出てくる。それを先に利用したものが勝ちだという時代になるわけです。まさに科学者とか技術者といわれている人たちが大儲けできるかもしれないけれども、社会や人類に対してとんでもないことをしてしまうかもしれない。科学や技術が非常に重要な役割を果たさざるを得なくなるという意味では、全く新しい時代が来



長井 寿氏



小野 晃氏

るかもしれない。

小野 技術と科学がより接近していく時代ということでしょうか。

長井 新しい科学的な知識や技術が生まれ、それを習得するスピードはどんどん速まっていくでしょうから、優れた技術で、最初からそれが科学的に裏付けられたものでないと産業的には弱くなります。必然的に技術は科学に裏付けられていなくてはいけないですから、科学と技術は接近せざるを得ないと私は思います。しかし、科学の立場から見ると、技術と接近しなければいけないというつもりはあまりないのです。科学を縛りたくないですし、小柴さんのように、何千年たっても、好きなことをやっていたほうがいい、というのはかなり納得します。

日本の科学と技術そして工学

小野 日本の科学と技術、それから工学教育も含めて伺いたいのですが、一時、「ものまね技術」といわれていた日本の技術ですが、世界で技術革新が最も成功している国として評価されています。

長井 海外では日本の技術が非常に優れていると評価されていますが、これは三つくらいの側面があると思っています。軍事技術は、アメリカが圧倒的に優れており、日本は優れていません。そういう点で、いわゆる民生技術といわれているものは、世界や国内のコンペティターから厳しい目で見られるという環境があり、それに日本もしくは日本人が対応する能力を持っている限り、圧倒的にすごいものをつくっていく、ということです。

小野 日本はユーザーの意識が高いということも寄与していると思いますが。

長井 はい。二つ目は、世界に向けて日本の商品を売っていくというマインドが非常に高い。三つ目は、これは意外と見落とされているのですが、私は金属材料屋なので、そういう観点からいうと、日本ほど人が多く住んでいて、地震の被害が大きい国はありません。だから、そこで使う材料は世界一強い。

必然的に日本の技術はやはり強くならざるを得ない幾つかの要因を持っていると思いますが、それが事故に対しても強いとか、ロバスト性が高いという効果を持ち、そして日本ブランドができたという構図が今まであったし、これからはあると期待しています。

小野 技術は世界の各地域でそれぞれ発展してきましたから、それぞれの論理を持っています。日本は、地震などの自然環境プラス少子高齢化という社会的状況、エネルギーの課題によって技術が育てられるという仕組みがあって、そこにもう一つマインドが乗り、今まで非常にうまく回ってきたということですね。

技術がすばらしいのに対して、日本の科学はいかがでしょうか。

長井 「何のために科学をするのか」というところが非常に難しいところがあって、世界の一流科学と戦うという意味では、日本はあまりいいポジションにいません。今のところ、材料分野は1位だと思うのですが、中国などから追い上げられています。

世界は大衆グローバル化時代になり、すべての情報が行き渡るようになったといいましたが、最適なソリューションを目指していくと、地域性が非常に重要になると思うのです。他の国のまねをしていては問題解決ができない。これは科学においてもそうです。しかし、「他の国のまねをするな」というと、まねをしない人ばかりになるので、まねもしなければいけないし、多様性があるべきですが、日本の技術の優れたところをもう一回見つめ直したら、いろいろ新しいテーマが出てくるのではないかと考えています。

小野 日本の技術に関しては、それがすばらしいことの要因は幾つか説明ができるけれども、それと同じことを科学に求めても見つからない。今のところ、「まねをしない」ということだけくらいしか出てこないというのが、ちょっとつらい現実ですね。

日本の工学ですが、かつて輝いていた時代がありました。

長井 日本の戦後の工学の一番優れたものは何かを我々の研究会で分析したのですが、自信を持っていえるのは工場です。サプライチェーンというか、工場の管理、運営、操作技術トータルですが、これは完璧にすごい。世界から見ても、日本の工場技術はお手本中のお手本です。

小野 産業用ロボットを入れるとか入れないとかいう話だけではなく、ということですか。

長井 逆にいうと、産業用ロボットを入れるのに何のためらいもないという、それだけの見識というか土壌を持っています。産業用ロボットを入れることによる労働者の削減等々は別の問題として捉えなければいけないのですが、もともと技術革新というのは非常に苛酷なものであり、必

ず犠牲者を出すという必然もあります。これからも技術革新がすべての人を幸せにするという事はあり得ないと思うし、必ず被害をこうむる人がいるのですが、社会トータルのウェルフェアを考えて、この方向でいいのだという見極めの見識が必要とされます。

工学教育とは「科学」を勉強させるのではなく「科学とは何か」を勉強させること

小野 日本の工学教育について、今は「さらば工学部」といわれ、非常に憂うべき状態であるというお話を伺いました。では、なぜかつて工学部は輝いていたのでしょうか。

長井 工学部を世界で初めてつくったのは日本というお話をしましたが、明治の初頭、工部省が工部寮をつくって、そこでまさに世界初の工学部をつくったとき、スコットランド人のヘンリー・ダイアーが日本に招かれて、教育の設計をしました。当時、各省が大学的なものを持っていた時代があって、今でいうと経済産業省が大学を持っていたという形になります。

ヘンリー・ダイアーの最初の卒業式での記念講演が東京工業大学の図書館にありましたので読んだのですが、「大陸では科学の地位が高く、技術が下に置かれていて、あまりいいものが出てこない。イギリスでは技術が非常に高い地位を持っているが、科学と無縁で、非常にいいものを出しているけれども試行錯誤を無限に行うため開発コストは高いという問題点がある。両方のいいところをとって新しい教育をしたいと思って日本に呼ばれて来た」ということでした。そして、技術の伝承と世界最先端のサイエンスを教えるという新しい大学教育をしたいということで、実習と講義を非常にうまく組み合わせ、6年間のうち最後の5年生と6年生は工部省の現場に行き実際に仕事をして、それを卒業論文にするという形で実践されました。

その講演の中には、図書館や資料室を大学がきちんと整備して、学生がいつでも先人の残した一番いいものをすぐ勉強できるような体制をつくっておかなければいけないとか、学会をつくらなくてはいけないとか、外国語を勉強するのは先端的な知識を身につけるという意味で当たり前だが、文学や宗教を積極的に勉強しないとダメと。何のために自分たちが勉強しているかを考えるには、そういうことなしにはできないし、もっといえば、「あなた方が仕事について、よその国の人たちと会ったときに、その国の文学作品を一つでもいえるといえないのでは、相手の対応が違う」といわれています。

小野 そういう話は今ではよく聞きますが、当時から既

にそういわれていたのですか。

長井 理想を話されたのだけれども、私はその理想は今でも輝いていると思います。それに、大陸の批判ですが、「工学というのは知識を詰め込めば詰め込むほどいいものをつくれなくなる。“科学とは何か”を勉強させればいいので、“科学”を勉強させる必要はない」と既にいつているのです。大いに納得します。

協調と競合の時代、21世紀に「工学」ができること

小野 日本の工学が2度目に輝いたのは、戦後の工業技術をはじめとする「ものづくり」でしょうか。

長井 「ものづくり」そのものだと思います。「技能の伝承」というと非常に個人的なイメージが付きまとい、私はしっくりこないのですが、ものづくりの魂がないと、技能を伝承しても、たぶん「要らない」といわれるだろう。これは、アメリカの工学アカデミーが使っている「これから科学者を目指す者たちのために」にも書かれているし、ヘンリー・ダイアーもいっていますが、私の言葉でいうと、人間というのは夢というか、こういうものがあつたらいいなという好奇心を持って、それで周りにあるものを使って、そういうものを作り、実現してしまうということが出来る唯一の動物だと思うのです。どういときに好奇心が生まれるかということ、自分のイメージになかった、違ったものや違った考えを見たときです。私の世代だと、鉄腕アトムの漫画で当時の世の中にないものを見せられて好奇心を持ちましたが、違ったものと触れ合い、そして実際に自分で試してみる。試してみても、うまくいくと自分が天才だと思ひ込むところがあるわけですが、それは大事なことで、そうしたら他流試合をするという形で外に出ていかなくてははいけない。「協調と競合の時代」というのはまさにそういうことだと思います。

一つのアイデアで問題を片づけることができない時代になったとき、壁を取り払い、お互いに知恵や力を出し合うことは、人間だけが本来持っているものだと思うのです。もちろん基礎は大事です。知識を詰め込むばかりではだめですが、そのための教育は大事です。

小野 今おっしゃったことは、まさにシンセシオロジーの精神でもあります。これは日本の3度目の工学の成功に結びつくと思いますが。

長井 シンセシオロジーの立場でいうと、そういう仕組みや具体的な行動をあらゆる階層、あらゆる場所で行きあげていくということだと思いますし、一番のキーポイント

は高校以降の教育の工夫です。違ったアイデア同士が戦い合うという環境をつくるということです。それは「夢」、「好奇心」を持つということです。

デザインこそが人間の本質的能力であり、工学の源泉

小野 今のようなお話は、「デザインこそが人間の本質的能力である」ということと関係があるのでしょうか。

長井 そのつもりで申し上げました。極端ないい方をすると、今の日本の経済学部、法学部と工学部をひっくり返して新しい工学部をつくってもいいのではないかというくらいに思います。

小野 それを総称してデザインということになるわけですね。

きょうのお話の中で、科学と技術の対比が非常に興味深かったです。西洋の科学は神のためという明確な目的があるが、日本では科学は何のためにあるか明確には語られていないし、面白いというだけではこれからもたないだろう。しかし、日本の工学はこれまで2度輝いてきたし、3度目

を目指しているという、優位な位置にあるという状況がよくわかりました。これを明確な言葉にし、旗幟鮮明に掲げることが必要ですね。これは戦略作りと同じことかもしれません。

長井 戦略作りは大事だと思います。これは第3の工学の輝ける時代のための課題です。

小野 貴重なお話をありがとうございました。

本インタビューは、2009年8月19日、つくば市にある物質・材料研究機構において行われました。

略歴

長井 寿 (ながい ことぶ)

1977年東京大学工学系大学院修士課程修了後、同工学部助手を経て、1981年金属材料技術研究所(2001年より物質・材料研究機構)に配置換えとなり、その後、力学研究室長、超鉄鋼研究センター長等を経て、現職(領域コーディネータ 環境・エネルギー材料担当)。工学博士(1981年、東大)。日本学術会議連携会員。専門分野は金属材料学(微視組織と力学特性の関係解明、低環境負荷と高機能の両立設計などが基本テーマ)。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

本ジャーナルは、個別要素的な技術や科学的知見をいかに統合して、研究開発の成果を社会で使われる形にしているか、という科学的知の統合に関する論文を掲載することを目的とする。この論文の執筆者としては、科学技術系の研究者や技術者を想定しており、研究成果の社会導入を目指した研究プロセスと成果を、科学技術の言葉で記述したものを論文とする。従来の学術ジャーナルにおいては、科学的な知見や技術的な成果を事実（すなわち事実に知識）として記載したものが学術論文であったが、このジャーナルにおいては研究開発の成果を社会に活かすために何を行なえば良いかについての知見（すなわち当為的知識）を記載したものを論文とする。これをジャーナルの上で蓄積することによって、研究開発を社会に活かすための方法論を確立し、そしてその一般原理を明らかにすることを目指す。さらに、このジャーナルの読者が自分たちの研究開発を社会に活かすための方法や指針を獲得することを期待する。

研究論文の記載内容について

研究論文の内容としては、社会に活かすことを目的として進めて来た研究開発の成果とプロセスを記載するものとする。研究開発の目標が何であるか、そしてその目標が社会的にどのような価値があるかを記述する（次ページに記載した執筆要件の項目1および2）。そして、目標を達成するために必要となる要素技術をどのように選定し、統合しようと考えたか、またある社会問題を解決するためには、どのような新しい要素技術が必要であり、それをどのように選定・統合しようとしたか、そのプロセス（これをシナリオと呼ぶ）を詳述する（項目3）。このとき、実際の研究に携わったものでなければ分からない内容であることを期待する。すなわち、結果としての要素技術の組合せの記載をするのではなく、どのような理由によって要素技術を選定したのか、どのような理由で新しい方法を導入したのか、について論理的に記述されているものとする（項目4）。例えば、社会導入のためには実験室的製造方法では対応できないため、社会の要請は精度向上よりも適用範囲の広さにあるため、また現状の社会制度上の制約があるため、などの理由を記載する。この時、個別の要素技術の内容の学術的詳細は既に発表済みの論文を引用する形として、重要なポイントを記載するだけで良いものとする。そして、これらの要素技術は互いにどのような関係にあり、それらを統合

するプロセスにおいて解決すべき問題は何であったか、そしてどのようにそれを解決していったか、などを記載する（項目5）。さらに、これらの研究開発の結果として得られた成果により目標にどれだけ近づけたか、またやり残したことは何であるかを記載するものとする（項目6）。

対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはしない。むしろ幅広い分野の科学技術の論文の集積をすることによって、分野に関わらない一般原理を導き出すことを狙いとしている。したがって、専門外の研究者にも内容が理解できるように記述することが必要であるとともに、その専門分野の研究者に対しても学術論文としての価値を示す内容でなければならない。

論文となる研究開発としては、その成果が既に社会に導入されたものに限定することなく、社会に活かすことを念頭において実施している研究開発も対象とする。また、既に社会に導入されているものの場合、ビジネス的に成功しているものである必要はないが、単に製品化した過程を記述するのではなく、社会への導入を考慮してどのように技術を統合していったのか、その研究プロセスを記載するものとする。

査読について

本ジャーナルにおいても、これまでの学術ジャーナルと同様に査読プロセスを設ける。しかし、本ジャーナルの査読はこれまでの学術雑誌の査読方法とは異なる。これまでの学術ジャーナルでは事実の正しさや結果の再現性など記載内容の事実性についての観点が重要視されているのに対して、本ジャーナルでは要素技術の組合せの論理性や、要素技術の選択における基準の明確さ、またその有効性や妥当性を重要視する（次ページに査読基準を記載）。

一般に学術ジャーナルに掲載されている論文の質は査読の項目や採録基準によって決まる。本ジャーナルの査読においては、研究開発の成果を社会に活かすために必要なプロセスや考え方が過不足なく書かれているかを評価する。換言すれば、研究開発の成果を社会に活かすためのプロセスを知るために必要なことが書かれているかを見るのが査読者の役割であり、論文の読者の代弁者として読者の知りたいことの記載の有無を判定するものとする。

通常の学術ジャーナルでは、公平性を保証するという理由により、査読者は匿名であり、また査読プロセスは秘匿される。確立された学術ジャーナルにおいては、その質を維持するために公平性は重要であると考えられているからである。しかし、科学者集団によって確立されてきた事実的知識を記載する論文形式に対して、なすべきことは何であるかという当為的知識を記載する論文のあり方については、論文に記載すべき内容、書き方、またその基準などを模索していかなければならない。そのためには査読プロセスを秘匿するのではなく、公開していく方法をとる。すなわち、査読者とのやり取り中で、論文の内容に関して重要な議論については、そのやり取りを掲載することにする。さらには、論文の本文には記載できなかった著者の考えなども、査読者とのやり取りを通して公開する。このように査読プロセスに透明性を持たせ、どのような査読プロセスを経て掲載に至ったかを開示することで、ジャーナルの質を担保する。また同時に、査読プロセスを開示することによって、投稿者がこのジャーナルの論文を執筆するときの注意点を理解する助けとする。なお、本ジャーナルのように新しい論文形式を確立するためには、著者と査読者との共同作業によって論文を完成させていく必要があり、掲載された論文は著者と査読者の共同作業の結果ともいえることから、査読者氏名も公表する。

参考文献について

前述したように、本ジャーナルの論文においては、個別の要素技術については他の学術ジャーナルで公表済みの論文を引用するものとする。また、統合的な組合せを行う要素技術について、それぞれの要素技術の利点欠点について記載されている論文なども参考文献となる。さらに、本ジャーナルの発行が蓄積されてきたのちには、本ジャーナルの掲載論文の中から、要素技術の選択の考え方や問題点の捉え方が類似していると思われる論文を引用することを推奨する。これによって、方法論の一般原理の構築に寄与することになる。

掲載記事の種類について

巻頭言などの総論、研究論文、そして論説などから本ジャーナルは構成される。巻頭言などの総論については原則的には編集委員会からの依頼とする。研究論文は、研究実施者自身が行った社会に活かすための研究開発の内容とプロセスを記載したもので、上記の査読プロセスを経て掲載とする。論説は、科学技術の研究開発のなかで社会に活かすことを目指したものを概説するなど、内容を限定することなく研究開発の成果を社会に活かすために有益な知識となる内容であれば良い。総論や論説は編集委員会が、内容が本ジャーナルに適しているか確認した上で掲載の可否を判断し、査読は行わない。研究論文および論説は、国内外からの投稿を受け付ける。なお、原稿については日本語、英語いずれも可とする。

執筆要件と査読基準

(2008.01)

項目	執筆要件	査読基準
1 研究目標	研究目標（「製品」、あるいは研究者の夢）を設定し、記述する。	研究目標が明確に記述されていること。
2 研究目標と社会とのつながり	研究目標と社会との関係、すなわち社会的価値を記述する。	研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。
3 シナリオ	研究目標を実現するための道筋（シナリオ・仮説）を科学技術の言葉で記述する。	道筋（シナリオ・仮説）が合理的に記述されていること。
4 要素の選択	研究目標を実現するために選択した要素技術（群）を記述する。 また、それらの要素技術（群）を選択した理由を記述する。	要素技術（群）が明確に記述されていること。 要素技術（群）の選択の理由が合理的に記述されていること。
5 要素間の関係と統合	選択した要素が相互にどう関係しているか、またそれらの要素をどのように構成・統合して研究目標を実現していったかを科学技術の言葉で記述する。	要素間の関係と統合が科学技術の言葉で合理的に記述されていること。
6 結果の評価と将来の展開	研究目標の達成の度合いを自己評価する。 本研究をベースとして将来の研究展開を示唆する。	研究目標の達成の度合いと将来の研究展開が客観的、合理的に記述されていること。
7 オリジナリティ	既刊の他研究論文と同じ内容の記述をしない。	既刊の他研究論文と同じ内容の記述がないこと。

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

改正 2009年3月23日

1 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿、および読者フォーラムへの原稿を受け付ける。

2 投稿資格

投稿原稿の著者は、本ジャーナルの編集方針にかなう内容が記載されていれば、所属機関による制限並びに科学技術の特定分野による制限も行わない。ただし、オーサーシップについて記載があること（著者全員が、本論文についてそれぞれ本質的な寄与をしていることを明記していること）。

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

3.1.1 投稿原稿は日本語あるいは英語で受け付ける。査読により掲載可となった論文または記事はSynthesiology (ISSN1882-6229) に掲載されるとともに、このオリジナル版の約4ヶ月後に発行される予定の英語版のSynthesiology - English edition (ISSN1883-0978) にも掲載される。このとき、原稿が英語の場合にはオリジナル版と同一のものを英語版に掲載するが、日本語で書かれている場合には、著者はオリジナル版の発行後2ヶ月以内に英語翻訳原稿を提出すること。

3.1.2 研究論文については、下記の研究論文の構成および書式にしたがうものとし、論説については、構成・書式は研究論文に準拠するものとするが、サブタイトルおよび要約は不要とする。読者フォーラムへの原稿は、シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また読者への有益な情報提供などとし、1,200文字以内で自由書式とする。論説および読者フォーラムへの原稿については、編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

3.2.1 タイトル（含サブタイトル）、要旨、著者名、所属・連絡先、本文、キーワード（5つ程度）とする。

3.2.2 タイトル、要旨、著者名、キーワード、所属・連絡先については日本語および英語で記載する。

3.2.3 原稿等はワープロ等を用いて作成し、A4判縦長の用紙に印字する。図・表・写真を含め、原則として刷り上り6頁程度とする。

3.2.4 研究論文または論説の場合には表紙を付け、表紙には記事の種類（研究論文か論説）を明記する。

3.2.5 タイトルは和文で10～20文字（英文では5～10ワード）前後とし、広い読者層に理解可能なものとする。研究

論文には和文で15～25文字（英文では7～15ワード）前後のサブタイトルを付け、専門家の理解を助けるものとする。

3.2.6 要約には、社会への導入のためのシナリオ、構成した技術要素とそれを選択した理由などの構成方法の考え方も記載する。

3.2.7 和文要約は300文字以内とし、英文要約（125ワード程度）は和文要約の内容とする。英語論文の場合には、和文要約は省略することができる。

3.2.8 本文は、和文の場合は9,000文字程度とし、英文の場合は刷り上で同程度（3,400ワード程度）とする。

3.2.9 掲載記事には著者全員の執筆者履歴（各自200文字程度。英文の場合は75ワード程度。）及びその後、本質的な寄与が何であったかを記載する。なお、その際本質的な寄与をした他の人が抜けていないかも確認のこと。

3.2.10 研究論文における査読者との議論は査読者名を公開して行い、査読プロセスで行われた主な論点について3,000文字程度（2ページ以内）で編集委員会が編集して掲載する。

3.2.11 原稿中に他から転載している図表等や、他の論文等からの引用がある場合には、執筆者が予め使用許可をとったうえで転載許可等の明示や、参考文献リスト中へ引用元の記載等、適切な措置を行う。なお、使用許可書のコピーを1部事務局まで提出すること。また、直接的な引用の場合には引用部分を本文中に記載する。

3.3 書式

3.3.1 見出しは、大見出しである「章」が1、2、3、…、中見出しである「節」が1.1、1.2、1.3…、小見出しである「項」が1.1.1、1.1.2、1.1.3…とする。

3.3.2 和文原稿の場合には以下のようにする。本文は「である調」で記述し、章の表題に通し番号をつける。段落の書き出しは1字あけ、句読点は「。」および「、」を使う。アルファベット・数字・記号は半角とする。また年号は西暦で表記する。

3.3.3 図・表・写真についてはそれぞれ通し番号をつけ、適切な表題・説明文（20～40文字程度。英文の場合は10～20ワード程度。）を記載のうえ、本文中における挿入位置を記入する。

3.3.4 図についてはそのまま印刷できる鮮明な原図、または画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則は刷り上りで左右15 cm以下、白黒印刷とする。

3.3.5 写真については鮮明なプリント版（カラー可）または画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）で提出する。ファイルタイプ（tiff, jpeg, pdfなど）を明記する。原則は左右7.2 cmの白黒印刷とする。

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

雑誌：[番号] 著者名：表題, 雑誌名 (イタリック), 巻 (号), 開始ページ-終了ページ (発行年)。

書籍 (単著または共著)：[番号] 著者名：書名 (イタリック), 開始ページ-終了ページ, 発行所, 出版地 (発行年)。

4 原稿の提出

原稿の提出は段刷文書1部および電子媒体に原稿提出チェックシートを添付のうえ、下記宛に提出する。

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

著者校正は1回行うこととする。この際、印刷上の誤り以外の修正・訂正は原則として認められない。

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

There has been a wide gap between science and society. The last three hundred years of the history of modern science indicates to us that many research results disappeared or took a long time to become useful to society. Due to the difficulties of bridging this gap, it has been recently called the valley of death or the nightmare stage ^(Note 1). Rather than passively waiting, therefore, researchers and engineers who understand the potential of the research should be active.

To bridge the gap, technology integration ^(i.e. Type 2 Basic Research – Note 2) of scientific findings for utilizing them in society, in addition to analytical research, has been one of the wheels of progress ^(i.e. Full Research – Note 3). Traditional journals, have been collecting much analytical type knowledge that is factual knowledge and establishing many scientific disciplines ^(i.e. Type 1 Basic Research – Note 4). Technology integration research activities, on the other hand, have been kept as personal know-how. They have not been formalized as universal knowledge of what ought to be done.

As there must be common theories, principles, and practices in the methodologies of technology integration, we regard it as basic research. This is the reason why we have decided to publish “*Synthesiology*”, a new academic journal. *Synthesiology* is a coined word combining “synthesis” and “ology”. Synthesis which has its origin in Greek means integration. Ology is a suffix attached to scientific disciplines.

Each paper in this journal will present scenarios selected for their societal value, identify elemental knowledge and/or technologies to be integrated, and describe the procedures and processes to achieve this goal. Through the publishing of papers in this journal, researchers and engineers can enhance the transformation of scientific outputs into the societal prosperity and make technical contributions to sustainable development. Efforts such as this will serve to increase the significance of research activities to society.

We look forward to your active contributions of papers on technology integration to the journal.

“*Synthesiology*” Editorial Board

- Note 1** The period was named “nightmare stage” by Hiroyuki Yoshikawa, President of AIST, and historical scientist Joseph Hatvany. The “valley of death” was by Vernon Ehlers in 1998 when he was Vice Chairman of US Congress, Science and Technology Committee. Lewis Branscomb, Professor emeritus of Harvard University, called this gap as “Darwinian sea” where natural selection takes place.
- Note 2** *Type 2 Basic Research*
This is a research type where various known and new knowledge is combined and integrated in order to achieve the specific goal that has social value. It also includes research activities that develop common theories or principles in technology integration.
- Note 3** *Full Research*
This is a research type where the theme is placed within the scenario toward the future society, and where framework is developed in which researchers from wide range of research fields can participate in studying actual issues. This research is done continuously and concurrently from *Type 1 Basic Research*^(Note 4) to *Product Realization Research*^(Note 5), centered by *Type 2 Basic Research*^(Note 2).
- Note 4** *Type 1 Basic Research*
This is an analytical research type where unknown phenomena are analyzed, by observation, experimentation, and theoretical calculation, to establish universal principles and theories.
- Note 5** *Product Realization Research*
This is a research where the results and knowledge from *Type 1 Basic Research* and *Type 2 Basic Research* are applied to embody use of a new technology in the society.

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

Published by National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.Ono

Senior Executive Editor: N.Kobayashi, M.Seto

Executive Editors: M.Akamatsu, K.Naito, T.Ishii

Editors: K. Igarashi, H. Ichijo, K. Ueda, A. Etori, K. Ohmaki, Y. Owadano,

A. Kageyama, K. Kudo, T. Shimizu, Y. Jigami, H. Tateishi, M. Tanaka, E. Tsukuda,

S. Togashi, H. Nakashima, K. Nakamura, Y. Hasegawa, J. Hama, K. Harada,

P. Fons, K. Mizuno, N. Murayama, M. Mochimaru, A. Yabe, H. Yoshikawa

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Publication Office, Public Relations Department, AIST

Tsukuba Central 2, Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan

Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212

E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp

URL: <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

*Reproduction in whole or in part without written permission is prohibited.

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

The objective of *Synthesiology* is to publish papers that address the integration of scientific knowledge or how to combine individual elemental technologies and scientific findings to enable the utilization in society of research and development efforts. The authors of the papers are researchers and engineers, and the papers are documents that describe, using “scientific words”, the process and the product of research which tries to introduce the results of research to society. In conventional academic journals, papers describe scientific findings and technological results as facts (i.e. factual knowledge), but in *Synthesiology*, papers are the description of “the knowledge of what ought to be done” to make use of the findings and results for society. Our aim is to establish methodology for utilizing scientific research result and to seek general principles for this activity by accumulating this knowledge in a journal form. Also, we hope that the readers of *Synthesiology* will obtain ways and directions to transfer their research results to society.

Content of paper

The content of the research paper should be the description of the result and the process of research and development aimed to be delivered to society. The paper should state the goal of research, and what values the goal will create for society (Items 1 and 2, described in the Table). Then, the process (the scenario) of how to select the elemental technologies, necessary to achieve the goal, how to integrate them, should be described. There should also be a description of what new elemental technologies are required to solve a certain social issue, and how these technologies are selected and integrated (Item 3). We expect that the contents will reveal specific knowledge only available to researchers actually involved in the research. That is, rather than describing the combination of elemental technologies as consequences, the description should include the reasons why the elemental technologies are selected, and the reasons why new methods are introduced (Item 4). For example, the reasons may be: because the manufacturing method in the laboratory was insufficient for industrial application; applicability was not broad enough to stimulate sufficient user demand rather than improved accuracy; or because there are limits due to current regulations. The academic details of the individual elemental technology should be provided by citing published papers, and only the important points can be described. There should be description of how these elemental technologies

are related to each other, what are the problems that must be resolved in the integration process, and how they are solved (Item 5). Finally, there should be descriptions of how closely the goals are achieved by the products and the results obtained in research and development, and what subjects are left to be accomplished in the future (Item 6).

Subject of research and development

Since the journal aims to seek methodology for utilizing the products of research and development, there are no limitations on the field of research and development. Rather, the aim is to discover general principles regardless of field, by gathering papers on wide-ranging fields of science and technology. Therefore, it is necessary for authors to offer description that can be understood by researchers who are not specialists, but the content should be of sufficient quality that is acceptable to fellow researchers.

Research and development are not limited to those areas for which the products have already been introduced into society, but research and development conducted for the purpose of future delivery to society should also be included.

For innovations that have been introduced to society, commercial success is not a requirement. Notwithstanding there should be descriptions of the process of how the technologies are integrated taking into account the introduction to society, rather than describing merely the practical realization process.

Peer review

There shall be a peer review process for *Synthesiology*, as in other conventional academic journals. However, peer review process of *Synthesiology* is different from other journals. While conventional academic journals emphasize evidential matters such as correctness of proof or the reproducibility of results, this journal emphasizes the rationality of integration of elemental technologies, the clarity of criteria for selecting elemental technologies, and overall efficacy and adequacy (peer review criteria is described in the Table).

In general, the quality of papers published in academic journals is determined by a peer review process. The peer review of this journal evaluates whether the process and rationale necessary for introducing the product of research and development to society are described sufficiently well .

In other words, the role of the peer reviewers is to see whether the facts necessary to be known to understand the process of introducing the research finding to society are written out; peer reviewers will judge the adequacy of the description of what readers want to know as reader representatives.

In ordinary academic journals, peer reviewers are anonymous for reasons of fairness and the process is kept secret. That is because fairness is considered important in maintaining the quality in established academic journals that describe factual knowledge. On the other hand, the format, content, manner of text, and criteria have not been established for papers that describe the knowledge of “what ought to be done.” Therefore, the peer review process for this journal will not be kept secret but will be open. Important discussions pertaining to the content of a paper, may arise in the process of exchanges with the peer reviewers and they will also be published. Moreover, the vision or desires of the author that cannot be included in the main text will be presented in the exchanges. The quality of the journal will be guaranteed by making the peer review process transparent and by disclosing the review process that leads to publication.

Disclosure of the peer review process is expected to indicate what points authors should focus upon when they contribute to this journal. The names of peer reviewers will be published since the papers are completed by the joint effort of the authors and reviewers in the establishment of the new paper format for *Synthesiology*.

References

As mentioned before, the description of individual elemental technology should be presented as citation of papers published in other academic journals. Also, for elemental technologies that are comprehensively combined, papers that describe advantages and disadvantages of each elemental technology can be used as references. After many papers are accumulated through this journal, authors are recommended to cite papers published in this journal that present similar procedure about the selection of elemental technologies and the introduction to society. This will contribute in establishing a general principle of methodology.

Types of articles published

Synthesiology should be composed of general overviews such as opening statements, research papers, and editorials. The Editorial Board, in principle, should commission overviews. Research papers are description of content and the process of research and development conducted by the researchers themselves, and will be published after the peer review process is complete. Editorials are expository articles for science and technology that aim to increase utilization by society, and can be any content that will be useful to readers of *Synthesiology*. Overviews and editorials will be examined by the Editorial Board as to whether their content is suitable for the journal. Entries of research papers and editorials are accepted from Japan and overseas. Manuscripts may be written in Japanese or English.

Required items and peer review criteria (January 2008)

	Item	Requirement	Peer Review Criteria
1	Research goal	Describe research goal (“product” or researcher’s vision).	Research goal is described clearly.
2	Relationship of research goal and the society	Describe relationship of research goal and the society, or its value for the society.	Relationship of research goal and the society is rationally described.
3	Scenario	Describe the scenario or hypothesis to achieve research goal with “scientific words” .	Scenario or hypothesis is rationally described.
4	Selection of elemental technology(ies)	Describe the elemental technology(ies) selected to achieve the research goal. Also describe why the particular elemental technology(ies) was/were selected.	Elemental technology(ies) is/are clearly described. Reason for selecting the elemental technology(ies) is rationally described.
5	Relationship and integration of elemental technologies	Describe how the selected elemental technologies are related to each other, and how the research goal was achieved by composing and integrating the elements, with “scientific words” .	Mutual relationship and integration of elemental technologies are rationally described with “scientific words” .
6	Evaluation of result and future development	Provide self-evaluation on the degree of achievement of research goal. Indicate future research development based on the presented research.	Degree of achievement of research goal and future research direction are objectively and rationally described.
7	Originality	Do not describe the same content published previously in other research papers.	There is no description of the same content published in other research papers.

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board
Established December 26, 2007
Revised June 18, 2008
Revised October 24, 2008
Revised March 23, 2009

1 Types of contributions

Research papers or editorials and manuscripts to the “Readers’ Forum” should be submitted to the Editorial Board.

2 Qualification of contributors

There are no limitations regarding author affiliation or discipline as long as the content of the submitted article meets the editorial policy of *Synthesiology*, except authorship should be clearly stated. (It should be clearly stated that all authors have made essential contributions to the paper.)

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

Accepted articles will be published in *Synthesiology* (ISSN 1882-6229) in the language they were submitted. All articles will also be published in *Synthesiology - English edition* (ISSN 1883-0978). The English edition will be distributed throughout the world approximately four months after the original *Synthesiology* issue is published. Articles written in English will be published in English in both the original *Synthesiology* as well as the English edition. Authors who write articles for *Synthesiology* in Japanese will be asked to provide English translations for the English edition of the journal within 2 months after the original edition is published.

3.1.2 Research papers should comply with the structure and format stated below, and editorials should also comply with the same structure and format except subtitles and abstracts are unnecessary. Manuscripts for “Readers’ Forum” shall be comments on or impressions of articles in *Synthesiology*, or beneficial information for the readers, and should be written in a free style of no more than 1,200 words. Editorials and manuscripts for “Readers’ Forum” will be reviewed by the Editorial Board prior to being approved for publication.

3.1.3 Research papers should only be original papers (new literary work).

3.1.4 Research papers should comply with various guidelines of research ethics.

3.2 Structure

3.2.1 The manuscript should include a title (including subtitle), abstract, the name(s) of author(s), institution/contact, main text, and keywords (about 5 words).

3.2.2 Title, abstract, name of author(s), keywords, and institution/contact shall be provided in Japanese and English.

3.2.3 The manuscript shall be prepared using word processors or similar devices, and printed on A4-size portrait (vertical) sheets of paper. The length of the manuscript shall be, about 6 printed pages including figures, tables, and photographs.

3.2.4 Research papers and editorials shall have front covers and the category of the articles (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheets.

3.2.5 The title should be about 10-20 Japanese characters (5-10 English words), and readily understandable for a diverse readership background. Research papers shall have subtitles of about 15-25 Japanese characters (7-15 English words) to help recognition by specialists.

3.2.6 The abstract should include the thoughts behind the integration of technological elements and the reason for their selection as well as the scenario for utilizing the research results in society.

3.2.7 The abstract should be 300 Japanese characters or less (125 English words). The Japanese abstract may be omitted in the English edition.

3.2.8 The main text should be about 9,000 Japanese characters (3,400 English words).

3.2.9 The article submitted should be accompanied by profiles of all authors, of about 200 Japanese characters (75 English words) for each author. The essential contribution of each author to the paper should also be included. Confirm that all persons who have made essential contributions to the paper are included.

3.2.10 Discussion with reviewers regarding the research paper content shall be done openly with names of reviewers disclosed, and the Editorial Board will edit the highlights of the review process to about 3,000 Japanese characters (1,200 English words) or a maximum of 2 pages. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as part of the article.

3.2.11 If there are reprinted figures, graphs or citations from other papers, prior permission for citation must be obtained and should be clearly stated in the paper, and the sources should be listed in the reference list. A copy of the permission should be sent to the Publishing Secretariat. All verbatim quotations should be placed in quotation marks or marked clearly within the paper.

3.3 Format

3.3.1 The headings for chapters should be 1, 2, 3..., for subchapters, 1.1, 1.2, 1.3..., for sections, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3.

3.3.2 The text should be in formal style. The chapters, subchapters, and sections should be enumerated. There should be one line space before each paragraph.

3.3.3 Figures, tables, and photographs should be enumerated. They should each have a title and an explanation (about 20-40 Japanese characters or 10-20 English words), and their positions in the text should be clearly indicated.

3.3.4 For figures, clear originals that can be used for printing or image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be 15 cm x 15 cm or smaller, in black and white.

3.3.5 For photographs, clear prints (color accepted) or image files should be submitted. Image files should specify file types: tiff, jpeg, pdf, etc. explicitly (resolution 350 dpi or higher). In principle, the final print will be 7.2 cm x 7.2 cm or smaller, in black and white.

3.3.6 References should be listed in order of citation in the main text.

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title of journal* (italic), Volume(Issue), Starting page-Ending page (Year of publication).

Book – [No.] Author(s): *Title of book* (italic),

Starting page-Ending page, Publisher, Place of Publication (Year of publication).

4 Submission

One printed copy or electronic file of manuscript with a checklist attached should be submitted to the following address:

Synthesiology Editorial Board
c/o Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Science and Technology(AIST)
Tsukuba Central 2 , 1-1-1 Umezono, Tsukuba
305-8568

E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

Proofreading by author(s) of articles after typesetting is complete will be done once. In principle, only correction of printing errors are allowed in the proofreading stage.

6 Responsibility

The author(s) will be solely responsible for the content of the contributed article.

7 Copyright

The copyright of the articles published in “*Synthesiology*” and “*Synthesiology English edition*” shall belong to the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST).

Inquiries:

Synthesiology Editorial Board
c/o Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Science and Technology(AIST)
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212
E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp

Synthesiology 2巻総目次(2009)

2巻1号

研究論文

大規模データからの日常生活行動予測モデリング

-実サービスを通じたベイジアンネットワークの学習と推論- ……本村 陽一 1-11

食品・環境中の有害成分分析のための有機標準物質の拡充

-定量NMR法による効率的な計量トレーサビリティの実現- ……井原 俊英、齋藤 剛、杉本 直樹 12-22

産業技術の社会受容

-既存の3モデルを統合した環境製品普及評価モデルの構築- ……松本 光崇、近藤 伸亮 23-31

グリッドが実現するE-サイエンス

-地球観測グリッド(GEO Grid)の設計と実装- ……田中 良夫 32-41

ユビキタスエネルギーデバイス開発のための材料基礎解析

-リチウムイオン電池正極材料、燃料電池電極、金触媒での展開- ……香山 正憲、秋田 知樹、田中 真悟、前田 泰、田中 孝治、岡崎 一行、吉川 純 42-50

蒸留プロセスのイノベーション

-理想状態からの「デチューニング」によるプロセス強化- ……中岩 勝、大森 隆夫 51-59

創薬の効率を飛躍的に高めた化合物スクリーニング計算

-3次元構造の化合物データベースの開発- ……福西 快文、杉原 裕介、三上 義明、酒井 広太、楠戸 寛、中村 春木 60-68

座談会

システムデザイン工学と構成学 …… 69-74

シンセシオロジー 創刊一周年を迎えて …… 75-80

2巻2号

研究論文

遺跡が語る巨大地震の過去と未来

-境界領域「地震考古学」の開拓- ……寒川 旭 91-100

ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定

-計量トレーサビリティ体系の構築と標準化- ……大澤 尊光、高辻 利之、佐藤 理 101-112

安心・安全な次世代モビリティーを目指して

-全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす- ……佐藤 雄隆、坂上 勝彦 113-126

部材の軽量化による輸送機器の省エネ化

-難燃性マグネシウムの研究開発- ……坂本 満、上野 英俊 127-136

セラミックス製造の省エネプロセスの確立を目指して

-新規バインダー技術の開発- ……渡利 広司、長岡 孝明、佐藤 公泰、堀田 裕司 137-146

高感度分子吸着検出センサーの開発

-高度な診断・診療のためのバイオ分子検出技術の開発- ……藤巻 真、栗津 浩一 147-158

PAN系炭素繊維のイノベーションモデル

-励振モデル;研究者の活動とマネジメントの相乗効果- ……中村 治、大花 継頼、田澤 真人、横田 慎二、篠田 渉、中村 修、伊藤 順司 159-169

インタビュー

米国の固体照明による省エネ政策と標準研究 ……ヨシ 大野、小野 晃、田中 充 170-175

座談会

シンセシオロジー 研究について …… 176-182

2巻3号

研究論文

活断層からの地震発生予測

- 活動セグメント固有カスケード地震モデルによる活断層の活動確率予測- ……吉岡 敏和 194-200
- 2タイプのリード・ユーザーによる先端技術の家庭への導入モデルの提案
- IH技術に対する調理システムの開発と普及- ……久保 友香、馬場 靖憲 201-210
- スピントロニクス技術による不揮発エレクトロニクスの創成
- 究極のグリーンIT機器の実現に向けて- ……湯浅 新治、久保田 均、福島 章雄、薬師寺 啓、長浜 太郎、鈴木 義茂、安藤 功兒 211-222

ガス中微量水分測定の高信頼性の飛躍的向上

- 計量トレーサビリティの確立と計測器の性能評価- ……阿部 恒 223-236
- 乾電池駆動可搬型高エネルギーX線発生装置の開発
- X線非破壊検査におけるイノベーションを目指して- ……鈴木 良一 237-243

報告

学問と技術の統合

- 横幹連合・統数研・産総研合同ワークショップ- …… 244-252

2巻4号

研究論文

実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化

- 微細なものを思いのままに- ……大場 光太郎 264-275
- 誰でも作れて携行できる長さの国家標準器
- ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー共振器の機構設計- ……石川 純 276-287
- 騒音計測の高信頼性をいかに確保するか
- 音の標準の開発と新しい供給体制- ……堀内 竜三 288-298
- 循環発展的なプロジェクト構造を生むバイオインフォマティクス戦略
- 創薬ターゲット遺伝子の網羅的機能解析- ……諏訪 牧子、小野 幸輝 299-309
- バイオ燃料を木材からナノテクで生産する
- セルロースの構造特性を利用した酵素糖化前処理技術- ……遠藤 貴士 310-320
- 最先端の地質研究と国土の基礎情報
- 5万分の1地質図幅の作成- ……斎藤 真 321-331

インタビュー

- 工学の克復とシンセシオロジー ……長井 寿、小野 晃 332-337

編集後記

第2巻4号が発行されました。今回も、これまでと同じように様々な研究論文が掲載されています。そして、いずれの論文を読んでも、必ず何らかの示唆を得られることが、このシンセシオロジーの特徴です。特に感じたことを三つほどここで述べたいと思います。

まず、一つ一つの論文を読むと、それぞれの論文が、どの学術分野に属するのかを直ちに特定することができません。執筆者の所属や略歴、研究の対象から無理に特定することは可能かもしれませんが、それにはほとんど意味がありません。なぜなら、ある目的のために、複数の技術要素等を組み合わせることは、伝統的な分野の枠を超えることを意味し、そのような研究を伝統的な分野の中で分類することができないからです。したがって、分野を明確化できない論文ほど、シンセシオロジーらしい研究と位置づけることができるのではと、それぞれの論文を読んでみてあらためて感じました。

二つ目は、前号の編集後記にも書きましたが、分野単位に出されている学術雑誌と比べると、このシンセシオロジーに掲載されている学術論文には異なることが多く書かれています。前回はステークホルダーについて触れましたが、今回は価格、不確かさ、循環的發展、実時間、社会活用といった用語が目につきます。これらの用語も、これまでの学術雑誌では触れられないことがない用

語です。一般に分析的な研究が発見やチャンピオンデータを重要視するのに対して、シンセシオロジーが社会的有用性を求めることの違いが、結果として論文の書き方や主張の違いをもたらしているのです。つまり、分野を特定できないこと、そしてこれまでとは異なる視点や論点加わり始めたことが、論文を投稿してくれる研究者や論文を査読する査読者が、シンセシオロジーが目指すところを理解してくれ始めたことを感じさせてくれます。

最後に、今はまだ産総研の研究者による論文投稿が中心ですが、今後は産業界や学界の関係者の投稿が増えていくことを期待しております。そのために、編集体制をどのようにすべきなのか、特に産業界の投稿を増やすにはどのような工夫を行うべきか、日々、編集委員会で議論しております。また、非常に野心的かもしれませんが、これまでのように技術の構成を目指す実践的研究論文を掲載するとともに、一歩引いたところから、シンセシオロジーの論文自身を研究の対象にし、その方法論の確立を目指す論文も出てくることを、私は期待しております。シンセシオロジー、つまり新たに構成学の確立を目指すのであれば、やはりその方法論の一般化も並行して行っていかなければなりません。

(普及担当幹事 内藤 耕)

Synthesiology 2巻4号 2009年11月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：石井 武政

委員：五十嵐 一男、一條 久夫、上田 完次、餌取 章男、大蒔 和仁、大和田野 芳郎、景山 晃、工藤 勝久、清水 敏美、
地神 芳文、立石 裕、田中 充、佃 栄吉、富樫 茂子、中島 秀之、中村 和憲、長谷川 裕夫、濱 純、原田 晃、
Paul Fons、水野 光一、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

事務局：独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部出版室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2 産業技術総合研究所広報部出版室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp ホームページ <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Development of real-time all-in-focus microscopes

-WYSIWYG in the micro-world-

H.Ohba

Portable national length standards designed and constructed using commercially available parts

-An advanced mechanical design for the iodine stabilized He-Ne laser-

J.Ishikawa

How the reliable environmental noise measurement is ensured

-Development of acoustic standards and a new calibration service system-

R.Horiuchi

A bioinformatics strategy to produce a project structure of spiral development

-Comprehensive functional analysis of the drug design target genes-

M.Suwa and Y.Ono

Bioethanol Production from woods with the aid of nanotechnology

-Pretreatment for enzymatic saccharification using natural structure of cellulose-

T.Endo

The advanced geological researches and fundamental national land information

-Development process of the Geological Map of Japan 1:50,000-

M.Saito

Interview

Restoration of engineering and *Synthesiology*

K.Nagai and A.Ono

Editorial policy

Instructions for authors