

# Synthesiology

不凍蛋白質の大量精製と新たな応用開拓

高齢者に配慮したアクセシブルデザイン技術の開発と標準化

高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ

異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略

個別適合メガネフレームの設計・販売支援技術

耳式赤外線体温計の表示温度の信頼性向上

創刊号

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<sup>(注1)</sup>。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<sup>(注1)</sup>、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<sup>(注2)</sup>)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<sup>(注3)</sup>)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<sup>(注4)</sup>)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、さらに今度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<sup>(注4)</sup>を軸に、第1種基礎研究<sup>(注3)</sup>から製品化研究<sup>(注5)</sup>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](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1巻 第1号 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
発刊に寄せて	
第2種基礎研究の原著論文誌	・・・吉川 弘之 1
研究論文	
不凍蛋白質の大量精製と新たな応用開拓 — 実用化を指向する蛋白質研究 —	7
・・・西宮 佳志、三重 安弘、平野 悠、近藤 英昌、三浦 愛、津田 栄	
高齢者に配慮したアクセシブルデザイン技術の開発と標準化 — 聴覚特性と生活環境音の計測に基づく製品設計手法の提供 —	15
・・・倉片 憲治、佐川 賢	
高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ — ガラスインプリント法によるサブ波長周期構造の実現 —	24
・・・西井 準治	
異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略 — 質調整生存年数を用いたトルエンの詳細リスク評価 —	31
・・・岸本 充生	
個別適合メガネフレームの設計・販売支援技術 — あなただけの製品をだれにでも提供できるビジネス創成を目指して —	38
・・・持丸 正明、河内 まき子	
耳式赤外線体温計の表示温度の信頼性向上 — 国家標準にトレーサブルな新しい標準体系の設計と導入 —	47
・・・石井 順太郎	
論説	
科学と社会、あるいは研究機関と学術雑誌：歴史的回顧	・・・赤松 幹之、井山 弘幸 59
座談会	
新しい形式の論文を執筆して	66
編集委員会より	
編集方針	74
投稿規定	76
————— English pages —————	
Messages from the editorial board	77
Abstracts of research papers	
Mass preparation and technological development of antifreeze protein — <i>Toward a practical use of biomolecules</i> —	79
--- Y. Nishimiya, Y. Mie, Y. Hirano, H. Kondo, A. Miura and S. Tsuda	
Development and standardization of accessible-design technologies that address the needs of senior citizens — <i>A product-design methodology based on measurements of hearing characteristics and domestic sounds</i> —	79
--- K. Kurakata and K. Sagawa	
Challenge to the low-cost production of highly functional optical elements — <i>Fabrication of sub-wavelength periodic structures via a glass-imprinting process</i> —	79
--- J. Nishii	
Strategic approach for comparing different types of health risks — <i>Risk assessment of toluene exposure using quality-adjusted life years</i> —	79
--- A. Kishimoto	
Design and retail service technologies for well-fitting eyeglass frames — <i>Toward the mass customization business</i> —	80
--- M. Mochimaru and M. Kouchi	
Improved reliability of temperature measurements with clinical infrared ear thermometers — <i>Design and establishment of a new measurement standards system traceable to the national standards</i> —	80
--- J. Ishii	

## 第2種基礎研究の原著論文誌

吉川 弘之

産業技術総合研究所で、新しいジャーナルが発行されることになった。ジャーナルの名前は、“構成学 (Synthesiology)”である。発行に至る経過は決して簡単でなかった。創刊にあたって、その経過を記すとともに、このジャーナルの固有性について編集委員会を中心に様々な議論が研究所でなされ、考え方が次第に集約しつづかると思われるが、ここでは筆者の考えをやや自由に述べることにしよう。

この新しいジャーナルは、本格研究、特にその中で第2種基礎研究の研究成果を発表する論文集である。本格研究は、産業に貢献するために有効な研究方法として産業技術総合研究所において位置付けられているものであるが、このような目的を持つ研究には従来から一つの問題があった。それは、このような目的のもとに行われた研究にはその目的に関連して重要な独創的成果をもつ部分が多いにもかかわらず、研究者に独創性 (オリジナリティ) を主張できる原著研究論文としてそれを発表する機会が与えられなかったということである。一方ではその結果として成果が社会の共有財産にならず、損失である。このジャーナルは、今まで発表の機会が正当に与えられなかった研究に対して発表の機会を作るものであり、産業技術総合研究所で研究を行っている研究者たちの努力によって誕生したものではあるけれども、この新しい発表の場が、産業技術総合研究所の研究のみならず、すでに広く世界に存在するこのような研究の自由な発表の場になることを期待する。

### 1 産業技術総合研究所の発足 —ジャーナルの背景

2001年に産業技術総合研究所が発足した。1882年設立という伝統的な研究所もその中に含まれる工業技術院傘下の15の研究所が、2001年に統合されて独立行政法人産業技術総合研究所が誕生する。研究員が3,000人に及ぶ、わが国では最大級の独立行政法人研究所である。しかも、機械、電気、電子、材料、化学、生命、情報、エネルギー、環境、地質、計量などの広い範囲を覆う文字通りの総合研究所となった。目的は基礎研究及び開発研究による産業振興である。もっとも古い歴史を持つ地質調査所

は、明治における我が国の建国にとって重要であった資源の探査をその使命としていた。それはただ探査するのではなく、それに必要な地球物理・化学的基礎研究を進めながら、その知見を使用して実地の探査をするというものであった。また、これも古い中央度量衡検定所は、物理的標準・単位の研究という最も基礎的な科学研究に基礎を置きながら、測定器の検定という実務を遂行していたのであった。次々と設置された研究所 (当時は試験所と呼ぶことが多かった) が、すべてこのように基礎科学の研究を遂行しつつ、一方で我が国がそれぞれの時代で求められた産業振興に貢献する知識を提供してきたのが、これらの研究所の歴史であった。

産業技術総合研究所が発足する直前においては、これらの研究所は通産省 (経済産業省) の外局であった工業技術院のもとにおかれる分野別の8研究所と、地域に設置された7研究所の15研究所であった。各研究所には研究所の固有の分野に対応する研究者がいて基礎的な研究を分野別に行うとともに、国家目的として取り上げられた課題のもとに研究者が結集し、それに産業界も加わってプロジェクト研究を行ってきたのである。これは明治の建国以来産業振興に大きく貢献し、第二次大戦後の産業復興、そして高度経済成長を支えた製造業の競争力強化に大きく貢献したのであった。そして高度経済成長を遂げた1980年代の後半からはわが国の工業製品輸出量が増え、世界市場の重要な地位を担うことになってゆく。しかしそのころわが国に対して、外国の基礎技術の応用で製品を開発し、それを高い生産技術によって高品質低価格で競争力の高い製品を大量生産して国際市場で勝利をおさめ、それを通じて経済を拡大してきたという見方が現れる。この見方は、競争で不利になった国々からの批判を招くことになった。それは、“基礎研究ただ乗り論”などと呼ばれたように、日本は他国で大きな投資のもとに得られた基礎的、科学的成果を、自らは基礎研究をすることなしに借用し、応用して経済的利益を上げたとするものである。このいわば情緒的批判は、現実には通商上の貿易摩擦などとして現象し、わが国にとって困難な状況を生むこととなった。その解決のために、我が国は国際政治的にも通商的にも様々な努力を払ったので

あったが、同時にその状況は我が国の研究政策にも影響を与えることになる。それは基礎研究の重要性の主張であり、工業技術院傘下の研究所でそれは“基礎シフト”と呼ばれ、研究に強い影響を与えたのであった。

このことは我が国の科学研究の歴史の上で重要な出来事であり、より詳細な分析と解釈が期待されるのであるが、現時点で結論を出すことはまだ早すぎると思われる。ここでは、現時点で言える問題のみを指摘しておくにとどめよう。第一に、基礎研究ただ乗り論という見方はあまりに一面的で我が国の功績から目をそらせるものであり、さらにより根源的な問題として、科学的知識の応用についての洞察を欠いているということである。基礎研究は新しい産業の源として極めて重要なものである。しかしそれだけでは人類のための恩恵にはならない。それを社会における価値とし、その上で多くの人の恩恵になるまでにすべきことがある。それは、産業革命で発明される織物の機械生産に始まり、米国の自動車の大量生産などの形で発展し、多くの人々が科学知識を使って豊かになる方法を進化させてきたのである。そして高度成長期に我が国が競争力を高めた最重要な要因としての生産技術は、その進化の過程で理解されるべきものである。例えば作業者が潜在的に持つ知的、情緒的、そして技能的能力を存分に発揮できるような環境は、機械の性能向上と共鳴して高品質、高信頼性、そして低価格の製品を作る生産を可能にした。そしてこの生産形式は現在、発展途上国が発展するために有用な方法として使用されるようになっただけでなく、欧米等の先進工業国においても用いられるようになってきて、現代における豊さを増す主要な方法の地位を得ているのである。したがって私たちは、ただ乗り論を恥じるどころか、世界を豊かにする方法の発明者として大いに誇りを持つべきであるのに、それは必ずしも人々を元気づけることにはならなかった。生産技術の進化への我が国の貢献は偶然ではなく、昭和初期の先人たちの、科学政策や教育政策の必然的な成果なのであるがそのことについてはここでは述べない。これが第一の問題である。

そして第二の点は、誇りを持つべきではあるにせよ、当時貿易摩擦の混乱が現実起きたことへの対応である。企業の現地生産などの個別的努力に加え、様々な政策や行政指導も行われた。それは輸入制限撤廃や調達制限などであるが、ここでも研究の世界に影響が及ぶ。それは、科学技術の研究における、応用・開発から基礎への傾斜であり研究機器の輸入促進ということであった。それは必ずしも基礎研究を重視するとか、基礎研究のどの分野に優先順位があるかを指定するというようなことでなく、統計上見える研究費の中で基礎研究費の比を大きくすることが主眼

とされた。わが国では、現在もその傾向が強いが当時はもっと顕著に、総科学研究費の中で占める企業出資の割合が多く国費負担が少なく、これが、我が国が基礎研究を軽視しているという論拠に使われることが多かった。したがって、少なくとも国費による研究はすべて基礎研究であると主張することが必要なのであった。その結果、工業技術院傘下の研究所はすべて基礎研究を行うとされ、これが基礎シフトと呼ばれて現実に研究の現場でも基礎研究を重視する傾向が強くなっていったのである。科学の進展を願う限り、基礎研究は時代や状況に関係なく重要なものである。したがってこの決定は基礎研究の成果で見る限り工業技術院傘下の研究所の水準を上げ、そしてまたその蓄積は現在においても貴重なものである。しかし、このことは一方で、研究所が明治以来培ってきた産業振興のために固有の使命を果たしてきたという歴史を考える時、現在はどうにしてその役割を果たすべきかという点をあいまいにしまうことを否定できなかった。一方諸外国では1990年代に入ると、新しく生み出される科学的知識の使用による産業振興を模索し始め、産学協同、公的プロジェクトなどを通じて、知識利用を制度的に促進する政策を取り始める。我が国が、貿易摩擦などで言われた知識の利用がうますぎることに対する批判をかわすために努力を重ねているうちに、世界の情勢はすっかり変わって、知識利用の方法を競う状況が出現したのである。これはかなり深刻な問題である。基礎研究重視という正しい政策をとりながら、一方で本来基礎研究とは矛盾するものでない知識利用の特技をあえて忘れることによって、国家的な基礎重視を強調しなければならなかった点が、第二に指摘しなければならない問題点である。このことを解決する使命を負って発足したのが産業技術総合研究所である。

## 2 本格研究 —ジャーナルの必要性

産業技術総合研究所への統合は、上述の問題に応えることを意図した変化であったということができる。ごく簡単にいえば、国際水準で高い評価を受ける基礎研究を遂行すると同時に、我が国の現実の産業振興にも資するという研究所の実現である。これは明治以来の工業技術院の研究所の目標であって特に新しいことではなく、むしろ原点への復帰といえる。しかし、研究所を取り巻く大きな環境変化を考えればただの復帰ではあり得ず、新しい視点が必要となる。例えば、世界のどこでも、企業は基礎研究によって生み出される独自の知識を使って競争力を増さなければならない状況となる。しかしメガコンペティションの時代といわれる中で、産業は基礎研究を行う余裕を失って行く。このような状況では、大学や公的機関が、産業の要請にこ

たえる基礎研究を実施することが必要となる。それは欧米にとどまらず、広く途上国でも一般的なこととなってきた。その中で、わが国も独自の変革が必要だったのであり、工業技術院傘下の研究所の統合はそれを満たすものの一つであった。この統合が真に変革である理由は、それが単なる組織の統合でなく、一人ひとりの研究者にとっての統合であったからである。15 研究所は解体され、3,000 人に及ぶ研究者が産業技術に貢献するべく定められた目的を持つ60の研究ユニットを作る。研究者は、かつて所属した研究所と関係なく産業への貢献を動機としてユニットを選ぶ。その結果、各研究ユニットは多くの研究分野の研究者が混在するものとなった。このようにして、学問領域によって組織するのではなく、目標によって組織された研究者集団が実現する。

この研究ユニットは、研究の自治をもち、ユニット長の責任において自由に研究を遂行する。しかし自由ではあるが、産業への貢献について明確な目標を持つことが要請される。それは、基礎研究を遂行すると同時に現実の産業にも資することである。したがって、ユニットの研究者（3,000人の研究者が60のユニットに分かれた結果、ユニット当たりの研究者数の平均は50人であるが、実際は分布し、10人から250人とさまざまなサイズの研究ユニットが存在する）には基礎研究に従事する者と産業化をおこなう者がいなければならないことになる。

伝統的には、両者はそれぞれ別種の研究者が遂行するばかりでなく、一般に組織としても分かれている。最大の区分は、基礎研究は大学で、製品化は企業でというものである。同じ基礎研究の中でも、大学の理学部と工学部のように、さらに細分される。基礎研究の成果を産業が使用するためには両者に効果的な関係がなければならない。それは、産学連携、知財のライセンス、ベンチャーなどであるが、それらが十分でないことは世界共通の認識で、さまざまな方法が試みられているが必ずしも成功していない場合が多い。基礎研究と産業化が連続的につながらないことは一般的に言われていたし、それぞれに従事する研究者が協力することが容易でないことも長い間問題とされながら解決できないものであった。しかし産業技術総合研究所で新しく生まれた研究ユニットには、基礎研究と産業貢献の同時実現が厳しく要請されている。ここで一般の基礎研究を第1種基礎研究と呼ぶことにすれば、第1種基礎研究者と産業化研究者とをつなぐ新しい研究者群の存在が不可欠である。それが第2種基礎研究と呼ばれる研究を行う研究者であり、その結果研究ユニットには異なる三種類の研究者、すなわち第1種基礎研究者、第2種基礎研究者、そして製品化研究者を擁するものとなる。この研究者集団が

推進するのが本格研究である。

### 3 第2種基礎研究と知識 —ジャーナルの使命

この第2種基礎研究を著者のオリジナリティを保証する原著論文として発表する場を創出するために発行するのが、新しいジャーナルである。したがってここで、第2種基礎研究を定義する必要があるが、それは多様なもので、現在のところ簡単に、しかも完全に定義する方法がまだできていない。このことについては、筆者がやや詳細に論じたものがあるので参照していただくこととし<sup>1)</sup>、ここでは一応次の定義をもとにそれを論文とすることの意義を考察することにしよう。その定義は、

“異なる領域知識を統合あるいは必要な場合には新知識を創出し、それを使って社会的に認知可能な機能を持つ人工物（ものあるいはサービス）を実現する研究”

というものである。改めてこの定義をみると、この行為は発明や産業における製品創出などにおいてすでに広く行われていることであって、特に新しいことではないことに気付く。しかし私たちはそれらを研究とは呼ばなかった。ことに、基礎研究と呼ぶことはまったくなかったと言えるであろう。したがって、ここでこれらを第2種基礎研究と呼んで基礎研究の一つの形態であるとするものの可能性をここで明らかにしておく必要がある。

まず基礎研究とは何かを考える必要がある。目的基礎研究という分類があることから言えば、形容詞のつかない基礎研究には目的性がないといえる。とくに限定して自然科学の基礎研究を考えると、それはすでに得られた自然科学知識体系を前提としつつさらに新しい知識を生み出すことによって、自然科学知識体系をさらに豊かなものにするものである。厳密に言えば、「豊かなものにする」という以上、どのような豊かさを求めるかによってきまる価値観に科学的知識体系は依拠しているのだが、それは個々の研究者には必ずしも意識されないことであり、その意味で目的性が無いといってもよいであろう。

研究する者の個々の研究においては知識体系充実以外の目的がない、言い換えれば現実の社会的行動に役立つことを当面の目的としていない基礎研究なのであるが、出来上がった知識体系は個々の研究者の意思とは関係なく大きな効用を現実の社会行動に対してもつのが一般である。それは、現代の技術のほとんどすべてが科学的知識を背景としていることを考えれば、自明のことである。このことから、次のように言うことができるであろう。基礎研究の“基礎”とは、その上に現実的な社会的行動を支持する基

礎なのである。現実的な社会的行動とは技術だけではない。それは、政治、行政、経済、金融、経営、医療、教育、産業、制作、報道などのほとんどの社会的に行動するものの基礎、すなわち行動の根拠として参照すべき基礎的知識なのである。そして同時に、科学において基礎研究で生み出された知識は公的なもの、すなわち社会における共有財産とみなすのが基本である。これは基礎研究を公的資金で行うことの根拠でもある。基礎研究の成果が知的財産として私有されることがあるのは現代の特徴でもあるが、それは一定の期間にとどまるものである。一般的には、研究成果は成果を出した研究者のオリジナリティを公的に認知する原著論文として領域別ジャーナルで公開され、そのうえで、その知識は公共的なものとなる。

このような基礎研究の基本的条件が、前述の本格研究における第2種基礎研究において満たされるかどうかを考える必要がある。その条件とは、それが、社会における共有財産とみなされる固有の知識体系の改編をもたらすかあるいは付加となること、個々の研究は当面の目的を持つことを必要条件とはしないが、その知識体系がその上に現実の社会的行動を支持する効用を持つこと、が基本である。その上で第2種と呼んで一般の基礎研究から区別するとすれば、その知識体系が既存の科学的知識の体系とは異なるものでなければならない。ここで、一般の基礎研究を第1種基礎研究と呼んだのであったが、それが作る知識体系は歴史的に作り上げられてきた既存の科学的知識体系である。ところが第2種基礎研究で作る知識体系はこれとは違うという点が二つの基礎研究の存在を主張することの根拠であり、したがってここで第1種と第2種の作り出す知識体系の違いを明らかにしておかなければならない。

第1種基礎研究が作り出す知識体系は現実に存在するものについての知識の体系であった。そしてその研究を駆動する動機は研究者の知的好奇心であるとされる。例えば物理学は、歴史的に言えば身近にある物質の性質を求める研究に始まり、現在は物質の発生、宇宙における物質の分散とその変遷の歴史的過程、地球及び若干の天体上の物質の性質などを相互に矛盾のない形で説明することに成功している。その説明は非生物を対象とするものであったが、現在は生物にまで及ぶ。すなわち物理学は、宇宙および地球上のすべての物質の存在と挙動について、矛盾のない知識体系を作り上げることに向かって大きな成功を収めている。矛盾がない、とは、たとえば目の前にある電球の光についての説明と、遠い天体の発する光の説明とが矛盾しないということである。

しかし物理学ですべてが説明されたわけではない。伝統的に言えば、自然を対象とする学問には化学、生物学、地

質学、気象学、海洋学、考古学などもあり、対象である自然に人を含めれば、言語学、心理学、人類学、社会学、経済学、文化人類学など、多様な学問があり、これらは学問領域と呼ばれる。各領域は、必ずしも共通の概念を使わず、同じ対象が相互に関係しない異なる説明を与えられるのが一般である。したがって相互に矛盾のない知識体系という表現をここで正確にしておく必要がある。矛盾のないのは学問領域内の説明の間で成立するだけであって、領域間では矛盾がないというよりも、関係がない、すなわち相互不干渉ということである。ただ物理学が物質間の反応や生命現象にまで対象範囲を広げて化学や生物学と合体する可能性を見せたり、生物学における脳科学の進展が言語学と関係を持ち始めて合体を予感させたりするのは、科学全般にわたる大きな流れではあるが、合体は複雑であり定型的でないのであって容易に達成できるものではなく、いずれ相互不干渉の部分がなくなるものなのかどうか、それは今のところ誰にもわからない。

さてここで、第2種基礎研究として定義された研究に、それを通じて作り出されてゆく知識体系があるかどうか、あるとすれば、それが第1種基礎研究の作り出す上述のような知識体系と本質的に違うものであるかどうか、を検証することで第2種基礎研究を独立の基礎研究と考えてよいかどうかが決まる。そしてその上で、両知識体系間の関係を見出すことが科学と社会との関係を考える上で重要なことなのであるが、それはここで話題ではない。第1種基礎研究の作る知識体系とは、簡単にいえば上述のように、我々の経験できる現象すべてを、相互不干渉の領域の創出とそれらのゆっくりとした統合という方法を使って理解あるいは説明する体系である。そして研究の動機は知的好奇心であった。これを前述の第2種基礎研究と同じ形式で定義すれば、

“ひとつの領域知識を使って、その領域知識と矛盾しない新しい知識を実現する”

ということになる。ここでは第1種基礎研究として、トーマス・クーン<sup>[2]</sup>の言う正常科学（normal science）を主として考えるが、彼がパラダイム・シフトと呼んだものはここでいえば領域の統合や新領域創出であって重要であるが特別のものとしておく。

両定義をみると、知識を使うという意味では同じであるが、第1種では単一の閉じた領域の知識であり、第2種では領域に制限がない。一般に特定の領域内ではその領域の知識の使い方は実験および論理的プロセスとして定型化しているが、多領域の知識を使う場合は定型的方法がな

い。また実現する対象が第1種では知識であるが第2種では人工物である。生み出されたものが知識である場合はその正当性が論理的に検証されるが、実在の人工物の場合はその正当性を社会における使用を通じて承認するしかない。この違いが次のような特徴を生む。

(1) 第1種では与えられた領域内知識群から何を選出し、またそれを使うためにその領域で許された方法の中から可能な方法（解析あるいは実験）を選択するのが研究者の独創であるが、第2種では、領域にこだわらずに知識群を自ら設定すること、その中から必要な知識を選出すること、そのうえでその知識を使う方法（解析あるいは実験）を知識ごとに違う多様な可能性の中から研究者自ら選択し、それらを統合して使わなければならない。

(2) 第1種では、実現したものは知識であり、良いものは領域ごとに既存の知識体系に組み込まれる。しかし第2種では実現したものは人工物であり、良いものは社会的に使われる。

さて、この二つの特徴をみると、両者の違いがいわば“二次元的”であることに気付く。ひとつは知識の使い方が違う点であるが、これは行為上の違いである。もう一つは実現した結果の意義であるが、これは受容者の違いである。これを表にしてみる。

受容	行為	単一領域知識	領域無限定知識
学界（知識体系）への効果		第1種基礎研究	(B)
社会（現実的価値）への効果		(A)	第2種基礎研究

この表で明らかになるように、二次元的差異があるから4つのカテゴリがあっても良いのに、(A) および (B) の欄が空欄である。このことはこれらの研究が第1種は知識生産を目的とし、第2種は社会貢献を目的とするという歴史的発生にたまたま依存しているだけであって、必然的なことではない。そしてそれは、社会と学界との隔離をもたらす原因ともなっていて、解消すべきものである。第1種基礎研究の場合、現代ではその社会的貢献が大きく期待されるようになり、知識提供だけでは不十分であると考えられている。この期待は、近年では気象学における気候変動への警告、あるいは生物学における生命倫理への寄与など、多様な科学者による助言という貢献が一般的となったが、これは (A) を充足するものである。一方、第2種基礎研究は、すでに述べたように知識体系への効果がなくては“基礎”研究とは呼べないのであり、(B) の部分の欠落は許されない。

ここで、この欠落している (B) の部分とはいったい何なのか明らかになさなければならない。伝統的には、人工

物を実現する研究では、上述のように実現した人工物が社会にその評価を委ねるべく研究者の手を離れてゆく。その結果、人工物そのものの構造や機能に関しては公共的に知られ共有財産となるが、その実現過程は記録されず消滅してしまう。ここで上述の第一の特徴が思い起こされなければならない。第1種では、その過程はほぼ研究者の間で定式化され共有されていて、選ぶ知識の新しさについての独創性はあるが選ぶ方法自体に固有の独創性はない。しかし第2種では、知識の選び方ははるかに多様で、定型化されたものは何もなく、そこにまず独創性が求められるのである。それなしには実現しようとする人工物が独創的なものとなるために必要な知識の独自性は期待できないのであって、選ぶ方法は研究の重要な要素である。それにもかかわらず、研究ごとに行われた努力を記録する方法がない。その結果、第2種基礎研究を行った者の評価が正当に行われず、報われることがない。このことは社会的に見れば研究者の努力の結果が社会の共有財産とならないことを意味し、多量の人工物を生み出すために多くの知的作業が行われている現代における大きな社会的損失といわなければならないであろう。これの解消、すなわち知識選択についての記録およびその体系化は、(B) の一つの充足である。

(B) にはもう一つの課題がある。上述のように複数の領域から知識が選ばれると、その知識を統合する作業に入る。これも定式化した方法はないのであって、研究ごとに固有の方法が求められる。統合された知識を“臨時領域”と呼べば、それが出来てはじめて人工物実現を目指した合理的な思考が研究者にとって可能となる。この臨時領域は一般に独創的なものである。しかしこれも一般には記録されず消滅してしまう。人工物が社会的に認知された大きな市場を持つ場合に限り、それは名前を与えられて記録されることもあるが、例外である。熱機関学、自動車工学、航空機工学、などはかなり成熟しているが、多くはあったとしても知識を並列に記したもので成熟度は低い。しかも新しい分野の新しい人工物については何もない。問題は、これらの工学と呼ばれる臨時領域は一般性を持っておらず、他の分野には適用できないばかりでなく、それを作る方法が示されていないことである。今必要なのは、過去に行われた臨時領域設定の経験に学びつつ、独創的な臨時領域の設定を個々の研究ごとに記録し、それらの一般的な方法を見出すことであり、それは (B) の課題である。

これらの課題が充足された時、私たちは第2種基礎研究を真に基礎研究であるといってよいことになる。その課題を充足するものが、新しいジャーナル、第2種基礎研究の原著論文誌である。

#### 4 第2種基礎研究の原著論文 –ジャーナルの特徴

ここまで明示的に述べてこなかったが、知識選択方法の決定、知識の選択、知識使用方法の決定、異なる領域知識の合体、臨時領域の設定などは構成的な行為であり、演繹、帰納などの大まかな論理の分類でいえば仮説形成すなわちアブダクションである。すなわちそこに、結果の一意性を保証するものはない。このことは、“何かを作り上げる”すなわち構成における本質的な性質である。構成されたものの正当性は必ずしも保証されず、ましてや最適性は望めない。その保証は、一般に構成とは別の過程で行われる。例えば理論研究における法則の導出は構成であるが、その正当性は従来の理論との整合性に関する演繹的分析や実験によって帰納的に検証される。人工物ではこのことは社会的使用によって行われる。このことからいって第1種基礎研究と第2種基礎研究とは全く違う。そして論理的構造を考えるといずれもアブダクションを含むが、アブダクションの全過程における重要性は第2種においてより大きい。しかも、第1種基礎研究ではこの検証の過程が、研究者自身か、そうでなくても同じ領域の研究者によって行われるのに対し、第2種基礎研究の場合は研究がおこなわれる世界とは関係のない一般社会で行われる。

アブダクションを含む過程には成功するかどうかについて不確かさが伴い、それこそが独創性が問われるところなのであるから、この検証の違いは両者の独創性評価の違いを示すことになる。第1種基礎研究においては、研究結果として新しく得られた知識の、既存の知識体系への貢献の大きさが独創性が測られ、例えば前提として用いた仮説としての法則の導出過程は背後に隠れ評価対象にならない。一方第2種基礎研究では、研究成果はいずれ産業で製品化され社会で使用されてから評価されるのであるけれども、それは時間のかかることであり、研究成果が出た時点での評価にはなり得ない。したがってそこでは別の方法が必要であるが、それは“アブダクションの妥当性 (validity of abduction<sup>[3]</sup>)”で評価することである。評価の対象は社会貢献の構想、知識選択の方法の決定、選択過程と結果、そして臨時領域の設定であるが、これらはみなアブダクションであり、このジャーナルに投稿される第2種基礎研究の原著論文はこれらの詳細が記録され、社会の共有財産となると同時に評価される。これらを実評価することがアブダク

ションの妥当性の評価であるが、その定式化もこのジャーナルの使命である。

第1種基礎研究でも、社会への助言の重要性が認知されるに伴って同様の問題が起きつつある。助言が必要と決定した時用いた背景知識の選択と、みずからの領域の知識適用とがアブダクションで、それが助言の独創性を決めており、その最終的な評価は社会における助言の採択を通してしか行えないから、助言がされた時点では、アブダクションの妥当性の評価が求められることになる。

この第一号に投稿されている論文は、研究所の歴史と2001年以後の本格研究への取り組みとを背景に、ここで述べたようなことについての様々な議論を経たうえ、第2種基礎研究とは何かについての一定の合意に基づいてそれぞれの著者が慎重に書き上げた初めての原著論文である。著者たちは、これも初めて選ばれた査読委員と数回の往復をする過程で、さらに第2種基礎研究の原著論文の概念を進化させつつ、ここ出版の運びとなった。前章までに述べたように定型化された表現方法が過去にない中で、一つの方法が共通にとられていることに注目していただきたい。それは設定した社会貢献の正当性を主張し、その実現のためのシナリオを描出し、シナリオを遂行するための知識選択の方法が案出され、そして明示的でないにせよ選択した知識を使用する場としての臨時領域の設定が行われていることである。設定された臨時領域では第1種基礎研究と呼べる研究もおこなわれている。ここには前述のように四つの構成的行為があり、したがって四重のアブダクションがある。これらの、主張、描出、案出、そして設定の方法や内容は論文によって異なっているが、これらはいずれも、行為を表現する伝統的方法としての作法、技能、慣習、儀礼などとは截然と違って、研究行為の論理的構造を明示しているのである。

#### 参考文献

- [1] 吉川弘之：科学者の新しい役割、136 - 185, 岩波書店, 東京 (2002).
- [2] T. Kuhn : *The Structure of Scientific Revolutions*, University Chicago Press, Chicago (1962).
- [3] C. S. Peirce : *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, Vol.2 (Elements of Logic), 59, Ed. by C. Hartshorne and P. Weiss, Thoemmes Press, 1931-58 edition.

# 不凍蛋白質の大量精製と新たな応用開拓

## — 実用化を指向する蛋白質研究 —

西宮 佳志、三重 安弘、平野 悠、近藤 英昌、三浦 愛、津田 栄\*

不凍蛋白質は北極や南極に生息する動植物に固有の生体物質と考えられてきた。我々は日本国内で捕獲される多くの食用魚類が不凍蛋白質を有することを発見し、それらの筋肉から実用化に必要な量の不凍蛋白質を精製する技術を開発した。筋肉から精製された不凍蛋白質は複数の異性体の混合物であり、遺伝子工学や化学合成から得られる単一の異性体よりも優れた機能を発揮した。現在、不凍蛋白質を用いた様々な実用化技術が検討されている。

### 1 研究目標

不凍蛋白質（英語名：Antifreeze protein）は、凍結寸前の水中に生成する無数の氷核に強く結合する機能と約0℃下で細胞の生存率を向上させる機能の2つを併せ持つ生体物質である。本研究の目標は、不凍蛋白質の機能を応用した技術を開発し、それを産業や医学の分野において実用化することである。図1に従来の技術と不凍蛋白質の応用が期待される技術の例を模式的に示す。一般に水は0℃で凍結すると思われているが実はそうではない。例えば、約-18℃に設定されている汎用の冷凍庫内に静置した水は凍結せずに-18～0℃の温度域にまで冷却される。このような水は一般に“過冷却水”と呼ばれている<sup>[1]</sup>。水の凍結は過冷却水の中に無数の氷の単結晶（氷核）が自然発生することによって開始する（図1A上）。氷核は周囲の水分子を結合して結晶成長しやがて水全体を埋め尽くす大きさになる（図1A下）。このように、我々の身近にある水は全て“結晶成長後の氷核の集合体（多結晶体）”である。ここで、約-7～0℃の温度範囲は最大氷結晶生成（温度）帯と呼ばれており、食品や細胞等の含水物がこの温度範囲に長く晒されるとそれらの内部に大きな氷が生成してしまう<sup>[2]</sup>。その結果、含水物の構造が破壊されて凍結前の品質や生理機能が失われる。従来、この問題は最大氷結晶生成帯を短時間で通過させる凍結技術によって克服されてきた。その技術とは“より低い温度を用いること”であり、例えば-80～-60℃の急速冷凍庫や-196℃の液体窒素を利用することである。すなわち、より低い温度を用いるほど氷核の成長は強く抑制される（図1B）。粒径の小さい氷核は食品や細胞の内部を破壊しにくいいため、含水物は凍結前の品質や生理機能を保持できる。この他にも氷核の結晶成長を

抑制する装置等が開発されてきた。しかしながら、何れの技術もエネルギー消費量の増加を伴うものであり温暖化ガスの排出量を削減する目的にはなっていない。

我々は、不凍蛋白質の機能は比較的少ない冷却エネルギーを使って水を凍結させる技術に応用可能と考えた。例えば、不凍蛋白質分子の氷結晶結合部位を無数に集積させた基板（不凍蛋白質固定化基板、図1Cに四角で示す）を作製すると、その表面は従来（図1A）よりも高い温度（-3～0℃、図1C）で水を積極的に凍結させる機能（氷核機能）を発揮すると予測された。また、不凍蛋白質には

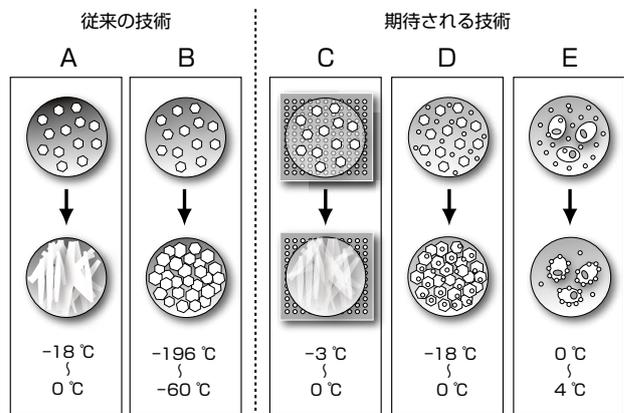


図1 従来の技術と不凍蛋白質の応用が期待される技術の比較  
A～Dの枠内の円は過冷却水を示し六角形は氷核を示す。C～Eの小さな白丸は不凍蛋白質を表す。Cの四角は不凍蛋白質固定化基板を表す。Eの円は不凍蛋白質を含む細胞保存液を示す。A. -18～0℃に冷やされた過冷却水の中に無数の氷核が発生し（上）それらが結晶成長して氷になる（下）。B. 大きな冷却エネルギー（-196～-60℃）を用いると氷核の成長は抑制される。C. 不凍蛋白質固定化基板（氷核基板）は-3～0℃の温度域で水を凍結させる。D. 不凍蛋白質は-18～0℃下で氷核の成長を強く抑制する。E. 不凍蛋白質は0℃付近で細胞の生存率を高める。

氷核の成長を効果的に抑制する機能（図 1D）や細胞の生存率を飛躍的に高める機能（図 1E）が認められている<sup>13,4)</sup>。これらは、同蛋白質を用いることによって極端に低い温度や特別な装置を使わずに含水物を凍結保存する新しい技術をもたらすと考えられた。我々は、不凍蛋白質を安価かつ大量に精製することによってこれらの技術の試行が可能になり、実用化に至ることができると考えた。そこで本研究では 1) 実用化に適した不凍蛋白質の探索と機能解析、2) 実用化量の不凍蛋白質を精製するための手法の開発、および 3) より現実的な不凍蛋白質技術の試行の 3 つを具体的な目標に設定した。

## 2 研究目標と社会とのつながり

蛋白質は生物の細胞内において絶え間なく合成されている L-アミノ酸の重合体であり、組成と重合度の異なる膨大な種類のものが代謝、運動、貯蔵、免疫反応、構造形成等の多様な生理機能を担っている。酵素等の蛋白質は生体外に取り出しても機能を発揮することから、食品産業、化学工業、および医学の分野において材料として用いられている。特に注目したいのは、火山、熱水帯、深海、砂漠地帯、北極・南極、有害物質中等に生息可能な生物が有する環境適応蛋白質であり、これらには現代の科学技術では容易に作ることでできない特殊材料としての用途が期待できる。1969 年に南極海に生息する魚類の血液から血清蛋白質として発見された不凍蛋白質はそうした特殊蛋白質の一つである<sup>15)</sup>。不凍蛋白質に匹敵するほどの強力な氷結晶成長抑制能（熱ヒステリシス活性<sup>13)</sup>）を示す化合物は他に見出されてはいないが、バイオサーファクタント<sup>16)</sup>やポリビニルアルコール<sup>17)</sup>には弱い氷結晶成長抑制能力が認められている。

現在、蛋白質分野の基礎研究は実験装置の高感度化によって極微量の試料があれば十分に完遂し得る。例えば 1 マイクログラムの量があると蛋白質の組成が解析され、数ミリグラムの量があると蛋白質の 3 次元分子構造解析が可能になる。構造生物学の分野では 10 ~ 20 ミリグラムの遺伝子発現実験のことを大量発現と呼ぶ習慣があり<sup>18)</sup>、多くの研究者はこの量を“大量”と認識している。このため、グラム量以上の蛋白質を得ることに関心をもつ人は少ないと言える。しかし、基礎研究の成果を材料工学、医学、食品などの異分野の研究と結びつけ、更に“実用化”という目標に到達しようとするならばこの量では不足する。例えば不凍蛋白質の場合、これを食品に混入してその凍結品質の時間依存性を解析する、あるいは種々の細胞の生存率の蛋白質濃度依存性を解析して再現性のある結論を得たいと考えれば、少なくともグラム量以上の試料が必要になる。

もちろん、極微量の試料を用いた研究成果をそのまま実用化できる例もあると思われるが、モデル実験やミニスケールで確認された性能がより現実的な系においても発揮されるのか否かを、それを専門とする研究者や技術者の協力を得て検討する過程が多くなると必要になる。すなわち、基礎研究の成果を異分野間の共同研究や実用化の段階にまで発展させられるか否かを決定付ける要因の 1 つは“量”ということができる。本研究の場合、グラム量以上の不凍蛋白質を精製することによって、同蛋白質に関する異分野との共同研究や実用化技術の試行が実現するものと考えられた。さらに、キログラム〜トンという量の同蛋白質の精製技術の開発によって実用化に至ることができると見込まれた。

一般に、蛋白質の大量生産を扱う研究分野は生物工学（またはバイオテクノロジー）と呼ばれている<sup>19)</sup>。生物工学が発展した引き金は 1973 年に勃発した石油ショックとされ、従来のエネルギー消費型の生産技術を生物の力を利用した省エネルギー型のものに転換する必要性がこの分野の研究背景にあった。近年の生物工学の柱は遺伝子工学と培養であり、目的物質を発現する遺伝子をもった菌株や細胞を大量培養することによって、少ないエネルギー消費量でその大量生産を達成している。世界でも特に生産量の多い洗剤用酵素、デンプン加工用酵素、医療用蛋白質、及びバイオエタノール等は“優良”菌株の培養が生産技術の要にあり、蛋白質生産といえば遺伝子工学（+培養）と考える人も多い。しかし、大量発現を担う優良菌株の発見や遺伝子組換え体の発現効率を工業レベルに上げることは容易ではない。幾つかの成功例を除けば、現実的な工業利用に至っている蛋白質の数は極めて少ないと言える<sup>19)</sup>。これらの事実を踏まえ、我々は先入観をもたずに様々な蛋白質精製の手法（遺伝子発現、化学合成、天然資源からの抽出等）を検討することが必要と考えた。

## 3 発見とシナリオ

これまでに生物学、遺伝子工学、生化学、氷物理学、生物物理学、構造生物学、計算機化学等の広範な分野の研究者が不凍蛋白質の分子機能解明を中心とした研究に取り組み、それらの成果は数百報以上の論文として発表されてきた。その中では不凍蛋白質の産業や医学の分野における潜在的な有用性も指摘され、90 年代には食品分野での不凍蛋白質技術の可能性も論じられた<sup>10)</sup>。しかし、現実的な不凍蛋白質の技術創出はなされなかった。その最大の理由は不凍蛋白質の希少性を克服することが出来なかったためと考えられる。現在までの不凍蛋白質の精製物（約 1,300 円/mg、重松貿易（株）、2007 年 10 月）の原

材料は、極地魚類の静脈から注射針を用いて採取した血液である。死んだ魚からの血液採取が困難であることも同蛋白質の希少性を一層高めたと考えられる。我々は、特に厳寒の季節がある北海道に不凍蛋白質を有する動植物が生息すると予測し、それらを含む日本国内の様々な低温適応動植物を集めて不凍蛋白質の有無を調べた。この目的のために、我々は1 μLの検体に含まれる不凍蛋白質を瞬時に検出する顕微鏡システムを構築した<sup>[11]</sup>。札幌医科大学医学部附属臨海医学研究所（利尻島）や北海道野付漁業協同組合等に魚類の提供を依頼し、我々自身も漁港、河川、市場、食品スーパー、昆虫専門店などから検体を集め、約160種類の動植物について不凍蛋白質の活性検出を試みた。その結果、予測的中し、カレイやカジカ等国内の50種類以上の魚類が不凍蛋白質をもつことを発見した。日本国内の植物（小麦）、昆虫（オオクワガタ）、菌類（担子菌）等にも不凍蛋白質が含まれていることが明らかになった。

興味深いことに、食品スーパーで売られている鮮魚の切り身にも、ワカサギ等小魚をすり潰した液にも、また珍味として売られているコマイやカレイの魚肉乾製品にも強い不凍蛋白質の活性が認められた。これらの結果は何を意味するのだろうか？ 果たして不凍蛋白質は血液からしか精製できないのだろうか？ 我々は特定の不凍蛋白質生産魚類について魚体の部位とそれから精製される不凍蛋白質の量の間の関係を調べてみた。その結果、図2Aに示すように筋肉のみを原材料とした場合にも相当量の不凍蛋白質が精製できることが示された。このことは医学者や専門家には常識なのかも知れないが、一般には良く知られていない事実と思われる。ここで、心臓部を含むcとdから精製される不凍蛋白質の量がaよりも多いことはcまたはdが原材料に適することを示唆する。しかしながら、cまたはdを

用いると脂肪や消化酵素等の共雑物が精製経路を汚すために精製効率の低下を招いてしまう。魚の頭部と内臓を除去する工程（ドレス処理）は産業的に確立されている。我々は不凍蛋白質を精製する原材料として魚体の筋肉を用いることができると考えた。

“日本産不凍蛋白質”は北極や南極の生物がもつ不凍蛋白質と同じ種類かどうか？ これは誰もが思う素朴な疑問であろう。我々は複数の日本産魚類由来の不凍蛋白質について遺伝子配列、3次元分子構造、氷結晶結合機能等の解析を進めた。その結果、これらは北極や南極に生息する動植物の不凍蛋白質と高い相同性をもつことが判明した。我々は、動植物が産生する天然の不凍蛋白質は複数の異なるアイソフォーム（アミノ酸組成が僅かに異なる分子種異性体のこと）の混合物であることに注目した。特に、北海道東部沿岸に生息するゲンゲ科魚類には13種類もの不凍蛋白質アイソフォームの発現が認められた。我々は最初その理由が理解できなかったが、実験を進めるうちに不凍蛋白質の混合物は単一のアイソフォームよりも優れた氷結晶結合活性を示すことが明らかになった<sup>[12]</sup>。単独では微弱な氷結晶結合活性（熱ヒステリシス）しか示さない不凍蛋白質アイソフォームが、活性の強いアイソフォームの微量添加によって強い活性を示すようになるのである（図2B）。このようなアイソフォーム間の協同的効果は細胞保護機能に関しても認められた<sup>[13]</sup>。遺伝子工学や化学合成からはアイソフォームの混合物が得られない。

これらの発見が、不凍蛋白質を実用化するまでのシナリオをもたらした（図3）。シナリオの出発点は、我々が発見した日本産魚類由来の不凍蛋白質に関する分子機能解明（A）である。シナリオの柱をなすのは魚類の筋肉を原材料として不凍蛋白質アイソフォームの混合物を大量に精製す

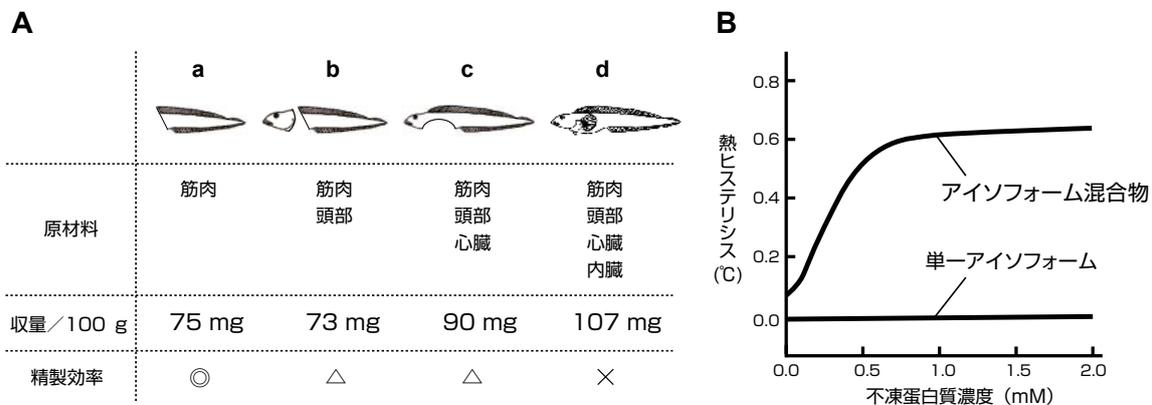


図2 A. 不凍蛋白質精製の原材料として用いた魚体の部位と収量の関係。B. 熱ヒステリシス活性（氷結晶結合能力）の不凍蛋白質濃度依存性を表す模式図  
熱ヒステリシス活性を示さない単一アイソフォームに対して微量の高活性型アイソフォームを混合すると前者にも強い活性が観測されるようになる<sup>[12]</sup>。

る技術の開発(B)である。これにより、異分野の研究者や企業の技術者の協力を得て精製不凍蛋白質を活用した応用技術の試行(C)が実現する。こうして不凍蛋白質技術の実用化が達成されると我々は考えた。

#### 4 技術開発に必要な要素と情報

蛋白質は純度の低い製品でも十分に工業レベルでの利用目的を果たす。従って、培養法等を用いて生産されている工業用蛋白質の多くはコスト性に優れた粗精製品である<sup>9)</sup>。不凍蛋白質も共雑物の影響を受けずに濃度に応じた氷結晶結合機能を発揮するため、その粗精製品を食品分野や冷蔵熱分野での技術に用いることができると考えられる。食品分野においては不凍蛋白質の粗精製品は天然抽出物に分類され、高純度品は食品添加物に分類される。前者は食経験の範囲内での安全性をきちんと確認した上でそのまま食品に応用することができるが、後者にはそれが許されていない。つまり、不凍蛋白質の高純度品は粗精製品の用途に使えない場合がある。一方、高純度品を必要とする実用化技術として細胞保存液や固定化技術がある。また、最終的には“粗精製品でも良い”という結論に至る場合でも、技術の基礎データを取得する段階では高純度品が必要である。従って、シナリオの柱である不凍蛋白質の大量精製技術は、より具体的には粗精製品と高純度品の2種類を精製するための技術である。用途の産業スケールを考えると、粗精製品を得る技術工程には特に大規模拡張性が要求される。

不凍蛋白質の大量精製技術と実用化技術の開発は図4のような表を基に進められている。横の欄(A、B、C、D、...)は、探索により見出された約50種類の魚類由来不凍蛋白質(注. アイソフォーム混合物)を示し、縦の欄(性能、資源量、...)は技術開発をもたらす要素を示している。

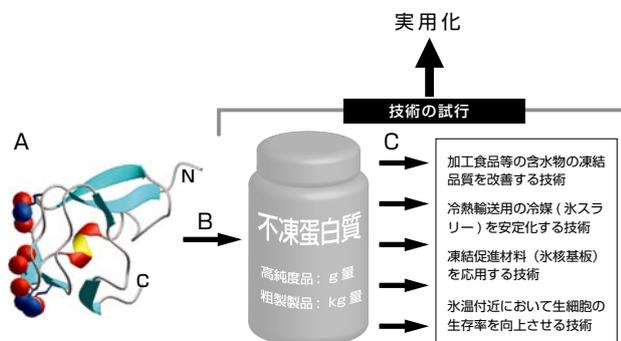


図3 本研究のシナリオ

A. 不凍蛋白質の分子機能解明(第1種基礎研究)、B. 不凍蛋白質大量精製技術の研究(第2種基礎研究)、C. 異分野の研究者や企業の技術者の協力を得て行う実用化技術の試行(製品化研究)。

最初の実験は極微量の不凍蛋白質 A を精製してその組成と性能を調べることである(図中の太い四角)。この実験によって表の幾つかの欄に◎、○、△、×の判定がなされる。性能、分子量、3次元構造などの欄を埋める行為は基礎研究そのものと言える。これに加えて、資源量やインフラ利用性(漁業組合、蒲鉾工場、保管倉庫、流通経路などの利用性を指す)など研究とは異質な要素に関する判定結果を含んでいることが図4の特徴である。こうして得られる一群の情報が技術開発の礎となる。ここで、性能は◎だが資源量が×のAに対しては技術開発がなされない。一方、BはAに比べて性能は劣るが、量(資源量)が性能をカバーすると考えられるために技術開発がなされる。そして、高い熱安定性の特徴を生かしたBの精製技術が開発されることになる。資源量が×ではないCとDについても精製技術の開発は可能だが、インフラ利用性に欠けるCには実用化の際のコスト高が懸念される。このように縦の欄は要素間で重みが異なるが、本研究においては資源量が性能に並ぶ重要な要素と考えられた。

大量精製技術開発の基礎になる図4の表はすでに存在していたものではなく、我々自身が実験結果と調査に基づいて作成したものである。すなわち、不凍蛋白質の種類A、B、C、D、...は発見に伴って増加する。要素にも、安全性(毒性)、品質保持期間、精製後の残渣の再利用性などが本研究の進捗に伴って付加されていく。図4中の要素を分割することが必要になる場合や、◎や×の判定が変わる可能性もある。より正確で詳細な図4の改訂版を作ることが実用化研究の本質と言えるのかも知れない。

#### 5 研究結果

我々が開発した実用化量の不凍蛋白質を精製するための技術工程を図5中の太線矢印で示す。「詳細技術2」の

	A	B	C	D	...
性能	◎	○	△	◎	
資源量	×	◎	△	○	
分子量	△	○	◎	△	
3次元構造	◎	×	◎	◎	
インフラ利用性	×	◎	×	○	
酸・塩基耐性	◎	△	△	◎	
熱安定性	◎	◎	◎	×	
⋮					

図4 精製技術と実用化技術の開発に必要な情報をまとめた表。横の欄(A、B、C、D、...)は異なる種類の不凍蛋白質(アイソフォーム混合物)を示し、縦の欄(性能、資源量、...)は技術開発をもたらす要素を示す。研究結果や調査に基づいて○×が判定される。基礎研究の典型的な例を太い四角で示す。この表は研究や技術開発が進む度に改訂される。

○は、筋肉の懸濁液から不凍蛋白質の高純度品又は粗精製品を精製するために必要な加熱、沈殿物除去、クロマトグラフィー、濃縮等の技術要素を示している。これらは図4に基づいて選択された後、コスト、時間、人力、収量等の条件を満たすように絞り込まれる。すなわち、安価で容易な○を試し、○の順序を精査し、また○の数を減らす実験によって詳細技術2の効率化が図られる。例えば高速液体クロマトグラフィー（HPLC）はコストと収量の点で問題があるために○からは除外される。詳細技術2の最初の工程はキログラム～トン量の不凍蛋白質の粗精製品を得る技術工程を兼ねている（注：原材料の量と設備は異なる）。

原材料として選んだ不凍蛋白質（I～III型）の生産魚類はいずれも北海道東部沿岸水域の主要海産物（ホタテと北海シマエビ）の捕獲時に網に掛かる極めて安価な混獲魚であり、現在でも我々の捕獲依頼分（約3トン/年）を除いた残りは産業廃棄物である。これらの魚類の筋肉すり身加工品が札幌市内の倉庫にトン単位で保管されており、その中の必要量を産総研北海道センター及び共同研究先企業に運び入れている。現在、北海道センターの実験棟内では複数の筋肉すり身約100kgからI～III型不凍蛋白質を精製するシステムが駆動している。III型不凍蛋白質の高純度試料の現在の精製効率は約3g/5日間/1名である。共同研究先企業はその200倍以上の効率で純度40～50%の不凍蛋白質の粗精製品を精製できるが、もちろんその効率が上限というわけではない。高純度のIII型不凍蛋白質試料の写真（約10g）を図6Aに示す。この高純度試料の現在の累計量は240gであり、市価に換算すると約3

億1千万円になる。しかし上述の通り我々の試料精製にかかるコストは極めて少ない。

グラム量の不凍蛋白質が得られたことによってその含水物に対する凍結保護効果を解析するための様々な実験が可能になった。含水物の例として、加工食品、スープ類、氷菓子類、めん類、パン類、清涼飲料水、酒類、医療品、化粧品、インク類、高分子ゲル、高分子膜、野菜、果実、種子、食肉、魚介類等が挙げられる。現段階では全てを試せてはいないが、原理的には製造過程で不凍蛋白質の粉末を直接混入するか不凍蛋白質水溶液を吸わせることによって、これらに強力な凍結耐性が付与されると考えられる。

食肉等含水物の構造が複雑な場合には不凍蛋白質を内部の隅々にまで浸透させることが難しいが、例えばミンチ状態にすると不凍蛋白質の効果が発揮される。なお、実用化段階では不凍蛋白質の粗精製品を用いる含水物に対しても、実験段階では高純度品を用いた効果の検証が必要である。実験結果の例を図6Bに示す。B1は、寒天ゲルを汎用の冷凍庫で凍結した後に室温に戻したときの写真である。ゲルの状態が保たれず水分が流れ出てしまうことが分かる（食肉の場合にはドリップと呼ばれる）。これは、凍結時に発生する氷核が成長して（図1A参照）ゲルの内部構造を破壊するためである。一方、B2に示すように極微量の不凍蛋白質添加によって凍結解凍後もゲル構造は保たれる。これは不凍蛋白質が氷核の表面に強く結合して氷結晶成長を止めるためにゲルの内部構造が破壊され難くなるためと考えられる（図1D）。このような凍結保護効果は最大氷結晶生成帯（-7～0℃）においても十分に発揮さ

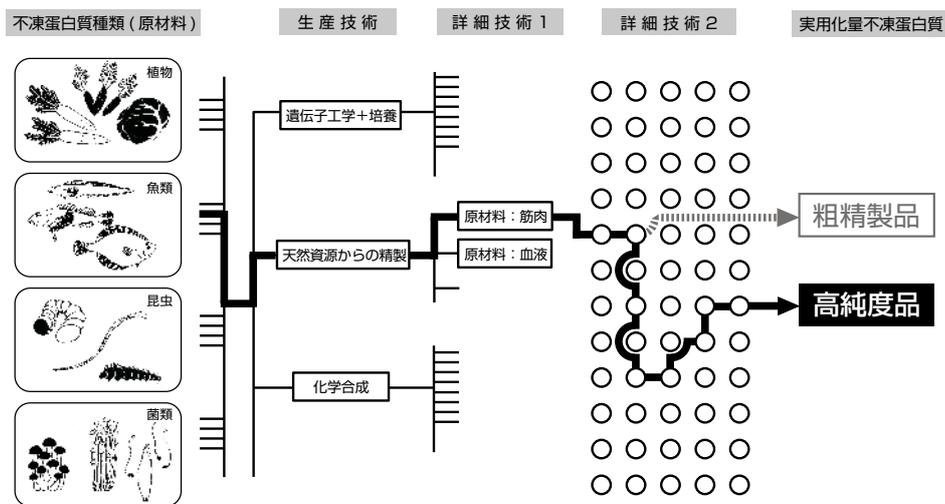


図5 実用化量の不凍蛋白質を精製するための技術工程  
○は魚肉すり身液から不凍蛋白質を精製するために必要な加熱、沈殿物除去、クロマトグラフィー、濃縮等の技術要素を表わす。詳細技術2の最初の工程はキログラム～トン量の不凍蛋白質の粗精製品を得る技術工程を兼ねている。

れる。このため本技術は凍結技術分野の省エネ化に役立つと期待される。

表面処理を施した基板表面に不凍蛋白質の高純度品の水溶液を吹き付けることによって同蛋白質を固定化する実験が電気化学分野の研究者により行われている。この実験には図3に示す魚類 III 型の不凍蛋白質が用いられる。氷結晶表面にある酸素原子の組に対して III 型不凍蛋白質の氷結晶結合部位（図3左、球で表示した原子団）は特異的に結合することが知られている<sup>[14]</sup>。我々は、この3次元構造の特徴に注目した。すなわち、III 型不凍蛋白質の N 末端残基のアミノ基を基板に固定化すると N 末端と対称の位置にある氷結晶結合部位が基板の外側を向くと考えた。無数の不凍蛋白質が固定化される結果、非常に大きな“氷結晶平面”が基板上に形成されると我々は予測した。図6Cに例として約 6,000 億個/cm<sup>2</sup> の III 型不凍蛋白質が固定化されているアルミニウム基板を示す。詳細説明は別の機会に譲るが、これまでの実験の結果は 1) 基板表面に接する水は -3 ~ 0 °C で凍結すること（氷核機能）、2) 基板表面から一方向凍結が起こること（透明氷を生成する機能）を示している。ここで、不凍蛋白質固定化の対象となる材料は特に基板状である必要はなく、容器状でも粒子状でも良いと考えられる。

図6Dは III 型不凍蛋白質を溶かした細胞保存液の写真である。ヒトや動物の細胞は生体外に取り出すとその生命機能が停止するが、移植や再生医学の分野では細胞や臓器を凍結状態あるいは非凍結状態で保存する試みが行われている。これらの凍結保存にエネルギー消費量の多い急

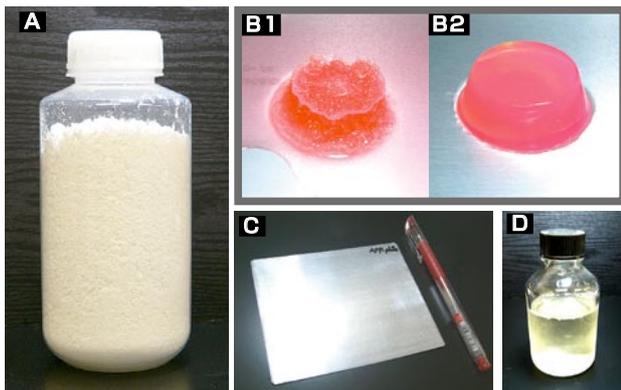


図6 本研究の成果

A. 不凍蛋白質高純度品の写真（約 11 g）。この試料の現在の精製効率率は約 3 g / 5 日間 / 契約職員 1 名である。B1. 汎用冷凍庫で凍結後に解凍した寒天ゲル。氷核の成長によってゲル構造が破壊され水分が流出してしまう。B2. 凍結解凍後の不凍蛋白質入り寒天ゲル。氷核の成長が抑制されるためゲル構造が維持される。C. 凍結促進機能（氷核機能）を発揮する不凍蛋白質固定化基板（素材：アルミニウム）。D. 魚類不凍蛋白質を含む細胞保存液（200 mL）。0 °C 付近（非凍結状態）において様々な細胞の生存率を飛躍的に向上させる。

速冷凍庫や液体窒素が使われる理由はすでに述べた。ここでは再生医学と電気化学の研究者らにより行われた非凍結保存実験の結果を紹介する。まず 1 万個程度のヒト由来培養肝細胞 HepG2 を非凍結温度（～ 0 °C）で市販の細胞保存液に浸して保存実験が行われた。その結果、この肝細胞の 90 % が約 12 時間後に死滅することが示された。一方、図 6D の液を用いて同じ実験を行った結果、不凍蛋白質存在下において肝細胞は 72 時間経過後もその 90 % 以上が生命機能を維持するという結果が得られた<sup>[13]</sup>。小腸、腎臓、臍帯、リンパ球、子宮頸管、胸水等に由来する培養細胞についても同様の不凍蛋白質の細胞保護効果が認められた。グラム量の高純度不凍蛋白質は細胞レベルでの効果を調べるには十分な量だが、組織や臓器に対する保護効果を調べるためには不足する。この問題を克服することが今後の課題の 1 つである。

## 6 評価と将来の展開

この研究は、バイオ分野の基礎研究をいかにして実用化に結びつけるかについて考える機会を我々に与えた。キーワードは「量」であり、蛋白質の性能が良くても量が不足していると実用化に向けたシナリオに乗れないことが明らかになった。グラム量の蛋白質が基礎研究と食品、医学、工学分野の研究を結びつけたことによって、技術の実証・試行（製品化研究）の段階まで進めることができたと考えている。我々が興味深く思っている点の 1 つは、実用化に向けて構築した不凍蛋白質の大量精製技術が、結果として“天然資源からの物質抽出”という古典的なものになったことである。しかし、技術開発の過程には、分子生物学から 3 次元分子モデリングまでの多くの基礎研究成果が活かされている。

不凍蛋白質の応用が見込まれる技術や製品の種類は多いため、今後の技術的精査に費やす時間も技術の実用化を支配する 1 つの要素になると考えられる。特に、医学分野で不凍蛋白質を用いるためには毒性試験、変異原性試験、発ガン性試験等の生物試験を行い厚生労働省等関係機関の使用許可を受ける必要がある。また、GMP 基準を満たす製造施設も必要になる。現在、これらの点に注意しながら慎重に医学応用研究が進められている。また、オフィスビル等で用いられている冷蓄熱技術への不凍蛋白質（粗精製品）の利用も我々が期待する実用化技術の 1 つである。現在の汎用の冷房空調は冷媒を配管に流すことによって建物を冷やす方式のものである。この冷媒を氷懸濁液（水スラリー）に置換することができれば従来よりも少ないエネルギー消費量で建物を冷やすと期待される。不凍蛋白質の粗精製品はこの水スラリーの凝集を抑制する効果を発揮す

るものと期待される。

シナリオの中に“大量生産”を課題として据えるだけで現実的な価値を生むバイオ技術は他にも数多くあると考えられる。バイオエタノールもその例であろう。北海道地域に固有の生物資源に着目した分子機能解明研究がこの技術を支えている点を最後に強調しておきたい。折しも2008年7月に北海道で主要国首脳会議(洞爺湖サミット)が開催され地球環境の問題が話し合われる。我々もエネルギー効率に優れるバイオテクノロジーを少しでも社会に役立てて行きたい。

## 謝辞

本研究を進めるに当たり、稲田孝明 博士(産総研エネルギー技術研究部門熱流体システムグループ)、松本秀一朗 博士、松下通明 教授、藤堂 省 教授(北海道大学医学部第1外科)に多くの御協力を頂いた。また、白石美美江、林 悦子、伊藤路子(産総研ゲノムファクトリー研究部門機能性蛋白質研究グループ)の3名には不凍蛋白質精製システムの構築に極めて意欲的に取り組んで頂いた。これらの方々にこの場を借りて深く感謝したい。

## キーワード

不凍蛋白質、3次元構造、氷結晶結合、大量精製、細胞保存、氷核基板

## 参考文献

- [1] P.V.Hobbs: *Ice Physics*, 18-39, Oxford University Press, London(1974).
- [2] 露木英男: *食品加工学第2版-加工から保蔵まで*, 14-16, 共立出版, 東京.
- [3] Y.Yeh and R.E. Feeney: Antifreeze proteins: Structures and mechanisms of function, *Chemical Reviews*, 92(2), 601-617(1996).
- [4] B.Rubinsky, A.Arav and G.L.Fletcher: Hypothermic protection - A fundamental property of "Antifreeze" proteins, *Biochem.Biophys.Res.Commun.*, 180(2), 566-571 (1991).
- [5] Z.Jia and P.L.Davies: Antifreeze proteins: an unusual receptor-ligand interaction, *Trends Biochem.Sci.*, 27, 101-106(2002).
- [6] D.Kitamoto, H.Yanagishita, A.Endo, M.Nakaiwa, T.Nakane and T.Akiya: Remarkable antiagglomeration effect of a yeast biosurfactant, diacylmannosylerythritol, on ice-water slurry for cold termal storage, *Biotechnol.Prog.* 17, 362-365(2001).
- [7] T.Inada and S.-S.Lu: Thermal hysteresis caused by non-equilibrium antifreeze activity of poly(vinyl alcohol), *Chem.Phys.Lett.*, 394, 361-365(2004).
- [8] 岡田雅人、宮崎香 編: *改訂第3版タンパク質実験ノート(上巻)-抽出・分離と組換えタンパク質の発現-*, 202, 羊土社, 東京 (2004).
- [9] 野本正雄: *「酵素工学」*, 学会出版センター, 東京 (1993).
- [10] R.E.Feeney and Y.Yeh: Antifreeze proteins: Current

status and possible food uses, *Trends.Food Sci.Tech.*, 9, 102-106(1998).

- [11] M.Takamichi, Y.Nishimiya, A.Miura and S.Tsuda: Effect of annealing time of an ice crystal on the activity of type III antifreeze protein, *FEBS J.*, 274 (24), 6469-6476 (2007).
- [12] Y.Nishimiya, R.Sato, M.Takamichi, A.Miura and S.Tsuda: Co-operative effect of the isoforms of type III antifreeze protein expressed in Notched-fin eelpout, *Zoarces elongatus Kner.FEBS J.*, 272, 482-492(2005).
- [13] Y.Hirano, Y.Nishimiya, S.Matsumoto, M.Matsushita, S.TODO, A.Miura, Y.Komatsu and S.Tsuda: Type III antifreeze protein from notched-fin eelpout enhances viability of mammalian cell during hypothermic preservation, *in preparation*.
- [14] Y.Nishimiya, S.Ohgiya and S.Tsuda: Artificial multimers of the type III antifreeze protein: effects on thermal hysteresis and ice crystal morphology, *J. Biol. Chem.*, 278(34), 32307-32312(2003).
- [15] Y.Mie, Y.Nishimiya, F.Mizutani and S.Tsuda: Assembly of antifreeze protein reveals the ice nucleation activity, *in preparation*.

(受付日 2007.9.18, 改訂受理日 2007.11.19)

## 執筆者略歴

西宮 佳志 (にしみや よしゆき)

ゲノムファクトリー研究部門 機能性蛋白質研究グループ

平成12年産総研入所。これまで一貫して不凍蛋白質の探索、機能解析、大量生産法の開発に取り組んできた。不凍蛋白質が新しい産業技術として社会に貢献する日を目指して日夜研究に勤しんでいる。専門は遺伝子工学や進化分子工学を駆使した蛋白質の機能改変。東北大学大学院工学研究科生物工学専攻修了(平成12年)

三重 安弘 (みえ やすひろ)

ゲノムファクトリー研究部門 生体分子工学研究グループ

生物系特定産業研究技術推進機構研究員、日本学術振興会特別研究員を経て平成17年に産総研に入所。主に蛋白質の電子移動制御のための機能界面の開発と直接電気化学法を用いた蛋白質の機能解析に従事してきた。現在は蛋白質分子を固体界面上に集積・配列した新しい機能性材料とその分析ツールの研究を進めている。熊本大学大学院博士課程修了(平成12年)

平野 悠 (ひらの ゆう)

ゲノムファクトリー研究部門 生体分子工学研究グループ

平成17年産総研入所。走査型電気化学顕微鏡(SECM)を利用して低温保存された細胞の評価を行う研究に従事してきた。現在、不凍蛋白質を配合した細胞保存液を調整しその細胞保護機能を単一細胞単位で評価している。不凍蛋白質の持つ細胞保護機能の解明と同蛋白質を利用した細胞保存液の開発を並行して行いたい。東北大学大学院工学研究科生物工学専攻修了(平成17年)

近藤 英昌 (こんどう ひでまさ)

ゲノムファクトリー研究部門 機能性蛋白質研究グループ

専門は蛋白質結晶学。主として酵素や不凍蛋白質等の産業応用可能な機能性蛋白質を研究対象とし、それらの立体構造の決定と機能発現メカニズムの解明に従事してきた。現在は、蛋白質の高機能化・機能変換に関する研究を行っている。平成10年入所。北海道大学大学院理学研究科生物科学専攻修了(平成9年)

三浦 愛 (みうら あい)

ゲノムファクトリー研究部門 機能性蛋白質研究グループ

平成8年に非常勤職員として入所。北海道産魚類由来の不凍蛋白

質の発見に関わりその探索対象を市販の魚類にも広げた。現在は同蛋白質を使った応用実験（食品）のほか高分解能 NMR 装置の運転および多次元 NMR スペクトル解析に従事している。特別技術補助職員（平成 12 年）を経て平成 17 年より二号契約職員

津田 栄（つだ さかえ）

ゲノムファクトリー研究部門 機能性蛋白質研究グループ

平成 7 年の入所以来、0℃付近での生命現象を解き明かす“低温生物学”の研究に従事してきた。専門は核磁気共鳴（NMR）法および X 線回折法による蛋白質の構造機能解析。水核蛋白質、不凍蛋白質、低温活性酵素などが低温下で発揮する特異的機能を解析し、それらの大量生産法を開発することによって、これまでに無い新しい産業技術を創生したいと考えている（北海道大学院生命理学専攻 客員教授）。

## 査読者との議論

### 議論 1 定量的な優位性

質問（水野 光一）

アルミニウム板への不凍蛋白質の吹きつけ表面での氷結現象ですが、0℃付近で氷結される水の量は他の方法で氷結する場合よりエネルギー的にどの程度優位かを数値で示すことができますか。

回答（津田 栄）

不凍蛋白質固定化基板の特性解析の結果は第 1 種基礎研究の成果として別の雑誌に発表する予定です。-1℃の水と-18℃の水がもつ

エネルギーの差は、水の体積を 1 mL とした場合に約 40 J と見積もられますが、生成した氷の分子構造が通常の氷のものと違う可能性もあり慎重な考察が必要と思っています。今後の知財獲得のため効果の詳細記述は避けていますので御承知置ください。

## 議論 2 生体保護作用のメカニズム

質問（水野 光一）

肝細胞の長期保存ができるのも不凍蛋白質による“高温=つまり 0℃付近”での保存でしょうか？市販保存液では 0℃付近保存で 90% 死滅とありますので、保存温度ではないように見受けられますがいかがでしょうか？この場合、不凍蛋白質が生体的な保護作用を発揮しているかも知れないと想像しますが、メカニズムは解明されているのでしょうか。

回答（津田 栄）

心臓、肝臓、脾臓などの臓器および組織断片を 0℃付近の非凍結温度下で 1～24 時間程度保存する技術は移植や再生医療の分野で実際に使われています。つまり 0℃は保存温度です（英語では hypothermic preservation と呼ばれる）。不凍蛋白質の細胞保護メカニズムですが、現状では“不凍蛋白質が本当に細胞保護機能を発揮するのかどうか”すら不確定な段階だと思います。細胞保存機能を調べるためには、細胞の種類、温度、前処理、後処理、保存液に含まれる他の成分などのパラメータを変えて実験を行い、その再現性を確認する必要があります。本研究により一定量の不凍蛋白質試料が確保されたことで、今後詳細な研究が進むと考えています。

# 高齢者に配慮したアクセシブルデザイン技術 の開発と標準化

— 聴覚特性と生活環境音の計測に基づく製品設計手法の提供 —

倉片 憲治\*、佐川 賢

近年の少子高齢化に伴い、消費生活製品等の設計において、高齢者を含むより多くの人々のためのデザイン（アクセシブルデザイン）が求められるようになってきた。筆者らは、高齢者の聴覚および視覚機能に関わる日本工業規格（JIS）の作成をとおして、アクセシブルデザイン技術の開発とその普及に努めてきた。本論文では、報知音の音量設定方法に関するJIS S 0014を例にとり、アクセシブルデザイン技術の標準化に至るまでの研究過程を本格研究の観点から論じる。

## 1 はじめに

近年の少子高齢化、すなわち若齢者人口の減少と高齢者人口の増加に伴い、家電製品をはじめとする消費生活製品や情報通信機器、事務機器等の主要なユーザが、若齢者から高齢者に移りつつある。従来、それらの製品の設計にあたっては、暗黙のうちにユーザ層として若齢者を想定することが一般的であった。しかし、少子高齢社会では「アクセシブルデザイン」、すなわち高齢者を含む、より多くの人々のためのデザインが求められるようになっていく。

これはデザインに対する世代間の好みの違いといった表面的な問題にとどまらない。高齢ユーザが増えるにしたがい、正しい使用に必要な情報の見落としや聞き逃しによる製品の誤使用の増加が懸念される。そのため、製品の使用方法に関する情報を適切に表示し、より高い安全性を確保することが、これまで以上に求められる。また、高齢者自身にも、安全に製品を使用できない不安から、新しい製品の使用そのものを避けようとする傾向がある。そのため、買い換え需要が落ち込み、製品の市場規模全体が徐々に縮小していきかねない。一方、見方を変えれば、人口構造が大きく変化することは、新しい市場を開拓する好機でもある。これまで対象としなかった高齢者という新たなユーザ層を狙って、新しい製品を開発したり設計仕様を変更したりする動きが盛んになってきている。1990年頃より、消費生活製品や事務機器等のさまざまな製品分野で、高齢者特性を考慮したデザイン手法に対する関心が急速に高まっている。

このような社会情勢を受けて、筆者らは日本工業規格

（JIS）「高齢者・障害者配慮設計指針」のうち、聴覚及び視覚機能に関わる規格の原案作成及び制定に携わってきた<sup>[1, 2]</sup>。本稿ではまず、アクセシブルデザイン技術の標準化の意義と必要性について説明する。次に、筆者らが制定に携わった規格の中から消費生活製品の報知音に関わるJIS S 0014<sup>[3]</sup>を例にとり、アクセシブルデザイン技術の標準化に至るまでの研究過程を本格研究の観点から論じてみたい。

## 2 標準化の意義と必要性

筆者らは、アクセシブルデザイン技術の開発当初から、JIS等の制定を通じた標準化を目指してきた。その理由の一つには、高齢者配慮の製品が市場に出回るにしたがって、製造者又は製品の種類によって設計仕様が異なることによる混乱や、高齢者対応を謳いながら実際には適切な設計がなされていない製品が徐々に増えてきたという背景がある。一連のJIS「高齢者・障害者配慮設計指針」の制定は、現状の改善を望む行政及び産業界の強い要請を受けてのことであった。

しかし、そのような背景は別にしても、アクセシブルデザイン技術のような人間工学関連の技術開発には、開始当初から標準化を意識して行うことの利点が少なくない。まず、人間の特性は多面的であるため、一つの技術を開発するにあたって検討すべき要因が非常に多い。報知音の場合、聴覚の加齢特性が研究の対象となるが、聞き取りやすく分かりやすい音を設計するためには、周波数・音圧レベル・時間パターンの少なくとも3つの要因の影響を順次検討し

なければならない。学術的には、個々の要因ごとに実験条件を設定し、各条件での聴覚特性をいくらかでも細分化して研究することができよう。しかし、設計現場で必要とされるのは、そのような細切れの知識ではない。デザイン技術として完成させるためには、最終的にそれら個々の研究の成果を一つの手法に“統合”していく過程が必ず必要となる。

また、現場で有効に活用される技術の開発を目標とするならば、それは研究者の独善的な成果物であってはならない。人間特性に関する複雑なモデルを立て、込み入ったデザイン手法を用いれば、設計の精度はいくらでも向上させることができよう。しかし、精密なモデルほど、一般にその適用範囲は狭くなりがちである。それでは、われわれの多様な生活環境に対応可能な技術の開発にはつながらない。さらに、精度の良さと手法の使いやすさは、相反することが少なくない。たとえ優れたデザイン技術であっても、設計現場で広く活用されるものでなければ意味がない。

規格の原案作成段階では、学術的な正確性と技術的な有効性の両側面からの検討が行われる。そして、研究者だけでなく現場技術者らの意見も取り入れながら、一つの標準的手法としてまとめ上げる作業が行われる。そのようにして標準化された手法は、長い期間にわたり、広い分野の設計現場で使用されるツールになるものと期待される。

### 3 消費生活製品の報知音とその問題

本稿で扱う「報知音」とは、製品の動作状況をユーザに知らせるために、製品本体やリモコンから発せられる音である。これには、操作パネルのボタンを押したときにフィードバックとして鳴らされる音、製品の動作終了を知らせる音、誤操作や機器の異常を知らせるための音などが含まれる。これら報知音は適切に設計することにより、製品の使いやすさを向上させ、誤使用の発生率を低下させることができ

る。

しかし、従来の報知音は必ずしも意図どおりの機能を果たしていないため、ユーザからの苦情の原因となる事態がしばしば発生していた。苦情の内容は、大きく2つに分けられる（図1）。(1) 報知音が聞こえない：「報知音が鳴ったようであるが、聞こえなかった。」(2) 報知音の内容が分からない：「報知音は聞こえるが、それが何を意味しているのか分からない。」

報知音の設計において、音響的には3つの次元での操作が可能である：(a) 周波数（音の高さ）、(b) 音圧レベル（音の大きさ）、(c) 時間パターン（音の時間変化）。各々の次元で報知音を適切に設計していれば、上記のような苦情は生じなかったはずである。

報知音が聞こえないのは、音の周波数と音圧レベルの選択が適切でなかったために起きた問題であった<sup>[4]</sup>。われわれの聴力は加齢に伴って次第に低下していく。若齢者には聞き取りやすい音であっても、聴力の低下した高齢者には聞き取れないことがある。一方、報知音の内容が分からないのは、製品の種類及び製造メーカーによって異なる時間パターンで報知音が鳴らされていたことが原因であった<sup>[5]</sup>。

そこで、2002年、(財)家電製品協会が中心となって、報知音の周波数と時間パターンを定めたJIS S 0013<sup>[6]</sup>が制定された。その規格では、高齢者には聞き取りにくい高い周波数の報知音を使用しないこと、報知音ごとに特定の時間パターンの報知音を使用することなどが推奨された。これによって、報知音設計において検討すべき3つの要素のうち、周波数と時間パターンの2つが規格化されたことになる。

残されたのは、音圧レベルの問題であった。報知音の音量を上げれば、たとえ聴力の低下した高齢者であっても聞き逃しが少なくなるのは確実である。しかし、それでは逆に若いユーザにとって“うるさい”音になりかねない。また、製品が使用される周囲の生活環境音も問題であった。静かな場所であれば十分聞こえる報知音であっても、周囲に妨害する音があると聞き取れないことがある。しかも、聞き取りの程度には個人差があり、特に高齢者でその差が著しい。報知音の音量設定の問題はJIS S 0013の原案審議の際にも指摘され、消費者及び障害者団体の代表者から解決が強く求められていたものであった。しかし、さまざまな生活場面で高齢者にも若齢者にも聞き取りやすい音量を適切に設定するのは容易でなく、対応が見送られていた。

そこで筆者らは、この3つの要因、すなわち(i) 加齢に伴う聴力低下、(ii) 生活環境音による妨害、及び(iii) 個人差の存在を考慮して、高齢者にも若齢者にも実際の生

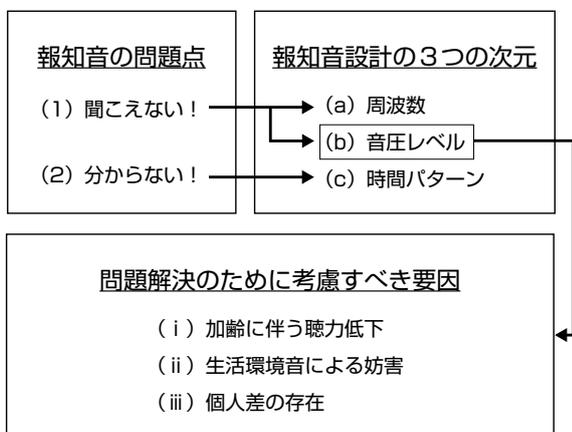


図1 報知音の問題点と解決すべき課題

活場面で聞き取りやすい報知音の音量設定手法の開発に着手した。その成果として提案し、制定されたのが JIS S 0014 である。

#### 4 報知音の音量設定手法開発のための課題

前節で挙げた、報知音の音量設定手法開発において考慮すべき3つの要因には、それぞれ技術的に解決すべき課題がいくつか存在していた。以下に、個々の課題に対して筆者らがとった解決方法を、測定結果の一例を示しながら概説する。

##### 4.1 加齢に伴う聴力低下への対応

開発する報知音の音量設定手法は、加齢に伴う聴力低下に適切に対応したものでなければならない。若齢者については、妨害音中の音の聞き取りに関する研究が古くから行われ、聞き取りの程度を予測するモデルも確立していた。すなわち、妨害音に対して目的の音のレベルがある一定以上大きいときに、その音が聴取可能となる。聴力の低下した高齢者であっても同様に、両者の音圧レベル差 (SN 比) に基づいて、目的の音が聞き取れるか否かが予測可能であると推測された。しかし、高齢者の場合に SN 比は少なくともいくら必要か、その値は若齢者とどの程度異なるかを測定した有効なデータは、当時まったく存在しなかった。

そこで筆者らは、高齢者及び若齢者を対象に、妨害音中の音の聴取能力について測定を開始した。図2は、その結果の一例である。同じ妨害音の条件下であっても、高齢者は若齢者に比べて少なくとも5 dB、聴力低下の大きい者まで含めると、周波数によっては約10 dB強い音でなければ目的の音が聞こえないことが分かる。本測定結果から、実環境における報知音の聴取の場合にも、同程度の年齢効果を見込む必要があると考えられた。

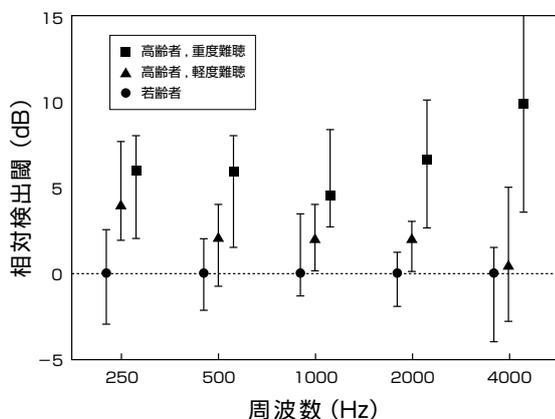


図2 妨害音中に提示された音の聴取に必要な音圧レベル (検出閾) 文献 [7] より改変。若齢者を基準 (縦軸, 0 dB) として、高齢者の検出閾の相対的な増加量を示す。

次に、以上の基礎的知見をもとに、現実の生活環境音がある場合に必要な報知音の音圧レベルを推定しなければならない。問題は、図2の実験に用いた妨害音は比較的単純な雑音であったが、生活環境音は時間的にも周波数的にも変動を伴うことであった。変動の種類や大きさによって、報知音の聞き取りやすさは異なってくる。しかし、あらゆる変動に対する聴感上の影響を実験的に検証することは現実的でない。音の検出プロセスに何らかの仮定をおいて単純化した、聴覚モデルを構築する必要がある。

筆者らが携わった雑音中の音の検出に関するこれまでの研究<sup>[8, 9]</sup>や聴覚特性に関わる基礎研究<sup>[10]</sup>を概観すると、音に含まれる細かな時間変動よりも平均的なエネルギー量の方が、多くの聴覚現象に対して大きく影響することが予想された。そこで、妨害音の種類や細かな音響的特徴にかかわらず、報知音と妨害音の平均的な音量の比 (SN 比) がある一定の値 (これを「下限値」とする) を超えると報知音が聞き取れると仮定した。

また、その値を超えてさらに報知音の音量を上げると、聴力の低下した高齢者であっても十分大きく聞こえるレベルに達するはずである。このことを実験的に調べると、ある一定のレベルに音が達したときに、高齢者も若齢者も同じように大きいと感じることが確認された<sup>[11]</sup>。このときの音のレベルを「上限値」とし、下限値と上限値の間に収まるよう報知音の音圧レベルを設定することによって、変動を伴う妨害音中であっても適切な大きさに聞こえる報知音が設計できるとして、モデルの単純化を図った。

これらの仮説の妥当性並びに上限値及び下限値は、4.3節に記述する聴取実験によって検証され、測定されることになる。

##### 4.2 生活環境音による妨害への対応

ユーザが製品を使用する場所はさまざまであり、環境条件はそれぞれ大きく異なっている。たとえ静かな実験室内で聞こえても実際の使用状況で聞き取れなければ、適切に

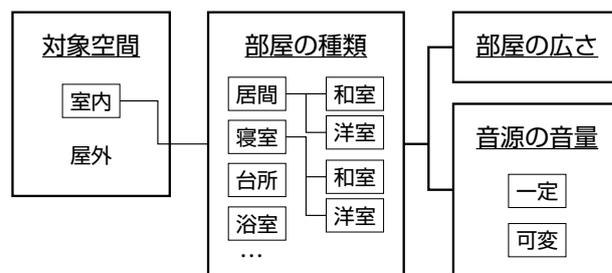


図3 生活環境音データベース TR S 0001<sup>[12]</sup>で対象とした生活環境音の範囲と考慮した要因

設計された報知音とは言えない。妨害する騒音の大きさ、周波数成分の構成、時間変動といった音響特性によって、報知音に求められる最適な音量は異なってくる。しかし、製品のすべての使用状態を網羅し、発生しうるあらゆる騒音に応じた音量設定方法を定めるのは、実質的に不可能である。そのため、製品の使用環境で発生しうる生活環境音の音響特性をできるだけ単純化し、検証可能な程度にまでモデル化することが必要となってくる。

そこで、JIS S 0014 の提案に先立って、さまざまな生活場面を想定し、その場で発生する典型的な騒音の音響特性を記述した生活環境音データベース TR S 0001<sup>[12]</sup> を作成した。測定の対象とした生活環境音の範囲と考慮した要因は図 3 のようにまとめられる。

まず、対象とする空間は室内に限定した。カメラのように室内外を問わず使用される製品もあるが、屋外環境までを含めると測定対象があまりに増えてしまう。多くの消費生活製品は室内で使用されることを考え、対象は室内で発生する音に限定した。しかし、対象を室内に限ってみても、一つの家屋には居間、台所などいくつもの部屋がある。さらに、和室か洋室かによる音響的な違いも無視できない。

部屋の容積もさまざまである。大きな部屋では室内の位置によって生活環境音のレベルも異なってくる。そこで、データベース作成に当たっては、室内の異なる位置で測定を繰り返し行い、その影響もあわせて記載した。また、台所の水音や居間のテレビの音など、使い方によって音量が大きく変わる音源もある。水音については水量を数段階に変えて測定し、テレビの音については高齢者の好む音量を、別途実験によって測定した<sup>[13]</sup>。

このような測定の結果、本データベースには、16 種類の生活場面について 350 件以上の測定データが収録されるこ

とになった。TR S 0001 に収録された生活環境音の分析結果の一例を図 4 に示す。生活環境音の場合、測定家屋の違いによる音響特性のばらつきは無視できない。そこで本データベースでは、同図のとおり、測定値の分布も併せて表示している<sup>[14]</sup>。このデータベースを活用することによって、生活場面ごとに騒音の特性はどの程度異なるか、家屋の違いによる特性のばらつきはどの程度か、といった検討が可能となる。

家屋が異なれば生活環境音の特性も大きく変動するはずであると想像するのが、おそらく一般的であろう。しかし実際には、図 4 に示されるとおり、1つの測定場面に特定して見れば、測定家屋によるばらつきは、たかだか 10 dB 程度に過ぎない（図 4 中、5 パーセントイル曲線と 95 パーセントイル曲線との間隔を参照）。むしろ、ある測定場面の音と他の測定場面の音（たとえば、流し台の水音と居間のテレビの音声）の特性差の方が大きい。そこで、個々の生活場面の音は 50 パーセントイル値の周波数特性（図 4 参照）で代表させ、典型的な生活場面を多数選択することで、家庭内で発生する生活環境音をほぼ網羅できると考えられた。そのようにして選択した種々の生活環境音を用いて、次節で述べる聴取実験のとおり、聞き取りやすい報知音のレベルを検証した。

#### 4.3 個人差への対応

4.1 節及び 4.2 節の検討結果をもとに、妨害音中での聴取に必要な報知音の音圧レベルの上限値及び下限値を求めることで、報知音の適切な音量設定方法を確立することができる。ここで最後に残った問題は「個人差」であった。人間の感覚特性には個人差がある。さらに、その個人差は一般に加齢とともに増大していく。したがって、測定データの平均値だけを眺めていたのでは、高齢者の多くに対応

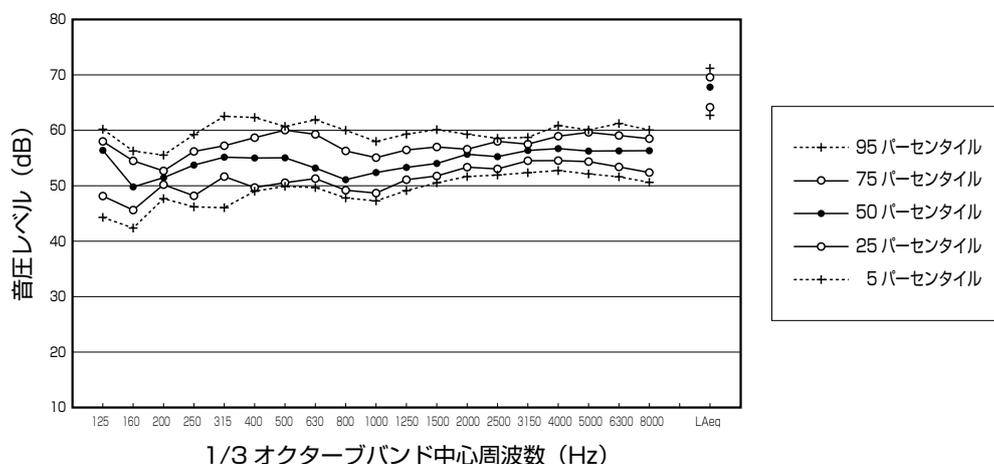


図 4 生活環境音データベース TR S 0001<sup>[12]</sup> の分析図の一例（流し台で皿を洗う音）  
複数件の家屋における測定値の分布を示す。

可能な基準値を見いだすことはできない。提案する音量設定手法は、十分な割合の高齢者の特性を満足すると保証されない限り、標準的方法として受け入れられない。そこで、個人差の統計的分布までを推定できるよう多数の測定値を精度良く求め、提案手法の一般化可能性を実験的に確認する必要がある。

本研究では、報知音をどの程度の音量に設定すれば何割の人が聞き取れるかを、種々の典型的な生活環境音（4.2節参照）を用いた聴取実験によって測定した。測定には、高齢者だけでなく若齢者も参加し、両者の聴覚特性の違いを比較検討した。そして、両被験者群で得られた測定値の統計的分布に基づいて、十分な割合（たとえば95%）の人が聞き取れる報知音のレベル（下限値）、および「よく聞こえる」と判断されるレベル（上限値）をそれぞれ推定した。一例として、上限値の推定に用いた測定結果の一部（1,000 Hz 報知音の場合）を図5に示す。

この測定では、高齢者群及び若齢者群が、報知音の聞き取りやすさを5段階で評定した。図中の各印は、各群の上位から95パーセンタイルにあたる評定値を示す。たとえば、図中矢印をつけた条件では、ある生活環境音を用いた測定条件において、各群の95%の者が「4:よく聞こえる」または「5:非常によく聞こえる」と回答したことを意味する。言い換えれば、「3:どちらでもない」以下の回答は5%未満であった。

この図によると、「4:よく聞こえる」との評定値（図中、横破線上の各点）は、報知音の音圧レベル75 dB（同、縦破線）より上の範囲に分布している。すなわち、どちらの被験者群でも、報知音のレベルが75 dBを下回ると、「報知音がよく聞こえる」と答える者の割合がすべての測定条件で95%を切ってしまう。逆に、このレベルを超えれば報知音を聞き逃す者の割合はさらに減少するであろうが、

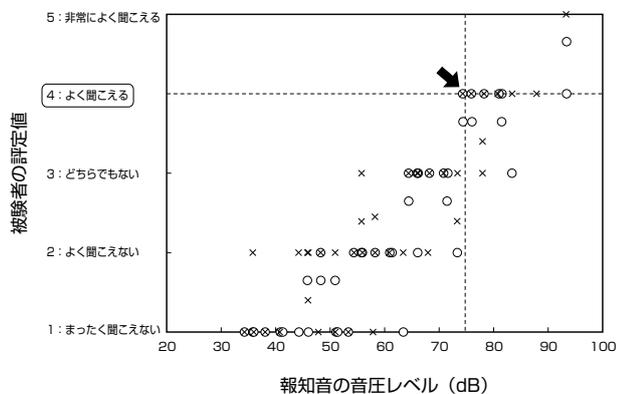


図5 報知音の上限値を求めるための評定結果の一例（1,000 Hz 報知音の場合）  
○印：高齢者群、×印：若齢者群。

一方で“うるさい”と感じる者が増加するため、日常的に用いる製品の報知音の大きさとしては望ましくない。そこで、75 dBを報知音の上限値と定めることとした。なお、下限値についても、聴取実験の結果に基づいて、さまざまな周波数の報知音に対して同様に推定を行った。

以上の分析結果全体を通して見ると、どの報知音の周波数および生活環境音を用いた測定条件でも、上限値及び下限値をある特定の値に定めることが可能であった。これによって、4.1節で立てた聴覚モデルの妥当性が確認されたことになる。測定に使用した妨害音は生活環境音の特徴をほぼ網羅したものであるため（4.2節）、本測定の結果は実際の生活場面にも精度良く当てはまるはずである。

なお、個人差を考慮して測定データを統計的に分析するために、実験は必然的に大がかりなものとなる。実際、図5は高齢者・若齢者あわせて80名が70種類の条件で音の聞き取りを行った計5,600個のデータに基づいている。このような大規模計測の結果が、報知音の音量の下限値および上限値を規定する際の根拠となっている<sup>[15, 16]</sup>。

## 5 JIS S 0014 による報知音の音量設定手法

以上の検討結果に基づいて、JIS S 0014に示す報知音の音量設定手法がまとめ上げられた。その手順は図6のとおりである。

まず、試作した報知音と、その報知音が組み込まれる製品の使用場面で発生する生活環境音（たとえば、台所で使用する製品であれば流し台の水音）の音圧レベルを測定する（図6①）。次に、両者の音圧レベルを比較し（同図②）、報知音が聞き取りやすい音量であるかを判断する（同図③）。生活環境音と報知音のレベル差（SN比）が下限値と上限値の間であれば、聞き取りやすい音量であると判断される。それ以外の場合は、報知音の音量を調整する（同図④）。下限値を下回れば生活環境音にかき消されて聞こえないと予想されるので、報知音の設定音量を上げる。逆に、上限値を上回るようであれば不必要に大きな音であるので、設定音量を下げる。以上の手続きを経ることによって、目的どおりの音量に設定された報知音を作成することができる（同図⑤）。

## 6 従来型の人間特性研究と比較したアクセシブルデザイン技術開発研究の特徴

以上、JIS S 0014 報知音の音量設定手法を例に、アクセシブルデザイン技術開発の過程を述べてきた。ここで、その特徴を明確にするために、本格研究の観点から従来型の人間特性研究と大きく異なる点を2つ指摘する（図7）。

まず一つめは、多数の被験者を対象として特性データを

収集する点である。ヒトの感覚機能のメカニズムを解明したり、そのモデルを検証したりする従来型の研究（第1種基礎研究）では、数名程度の被験者の測定データをもとに議論がなされることが多い（図7、矢印①）。そこでは、感覚の基本メカニズムはすべての人に共通であると考え、“平均的な”人間像が想定される。そして、個人差は一種の“誤差”として無視されるのが普通である。

一方、アクセシブルデザイン技術の標準化研究では、加齢変化を含め、感覚特性の個人差そのものが扱うべき研究対象である（矢印②）。そのため、数十名から、場合によっては100名を超える被験者のデータを収集する。個々の測定の方法や項目は、第1種基礎研究で用いられるものと大差ない。しかし、個人差の統計的性質を分析し、開発する技術の一般化を図ること（第2種基礎研究）によって、従来、実験室内に閉ざされていた人間特性研究を現場で役立つデザイン手法へと拡張する。

その目的のために、感覚特性データを収集する実験条件も、実験室的な限定された条件だけでなく、より実生活に近い条件を設定しなければならない。そこで、どのような条件を設定すべきか、果たしてそれが実際の生活環境を代表する設定になっているかの検討が必要となる。報知音の場合、製品が用いられる実際の生活場面で発生する騒音を収集し、その音響的な特徴を抽出する作業が必要であった（第2種基礎研究）。生活環境音の分析自体は研究の目的でないが、報知音の音量設定手法の妥当性を検証するために欠かせない過程であった。

二つめの特徴は、手法の単純化に重点が置かれる点で

ある。アクセシブルデザイン技術は、あくまで製品設計の現場において適用可能な手法でなければならない。人間の感覚機能に関する複雑なモデルを立て、込み入ったデザイン手法を用いれば、設計の精度は向上する（矢印③）。しかし、あまりに複雑な設計手法では、コスト削減や迅速さが求められる実際のデザイン現場では使えない（また、デザイナーは必ずしも聴覚や視覚の専門家ではない）。複雑なモデルや手法は、概してその適用範囲が狭くなりがちである。アクセシブルデザイン普及のためには、製品分野の垣根を超えてさまざまな製品に適用できなければならない。適用範囲を制限せず、かつ設計精度を維持しつつ手法をどこまで単純化できるか、それがアクセシブルデザイン技術の標準化における最も挑戦的な課題である（矢印④）。

モデルの単純化は試行錯誤的にも行えるが、人間特性に関する基礎的知見（第1種基礎研究の成果）を援用することが欠かせない。報知音の場合、騒音中の報知音の聞き取りに関する聴覚モデルを単純化する必要があった（4.1節）。しかし、あらゆる変動音に対する聴感上の影響を検証することは不可能である。聴覚特性に関わるさまざまな基礎研究の知見を統合的に検討して、騒音と報知音の音量比（SN比）が聞き取りやすさを決定するとモデルを単純化し、それを実験的に検証した（第2種基礎研究）。

## 7 アクセシブルデザイン技術標準化の今後の展開

### 7.1 新たな報知音や音声ガイドへの対応

JIS S 0013 及び 0014 の制定によって、消費生活製品の報知音の基本的仕様に関する規格化はほぼ終了したといえ

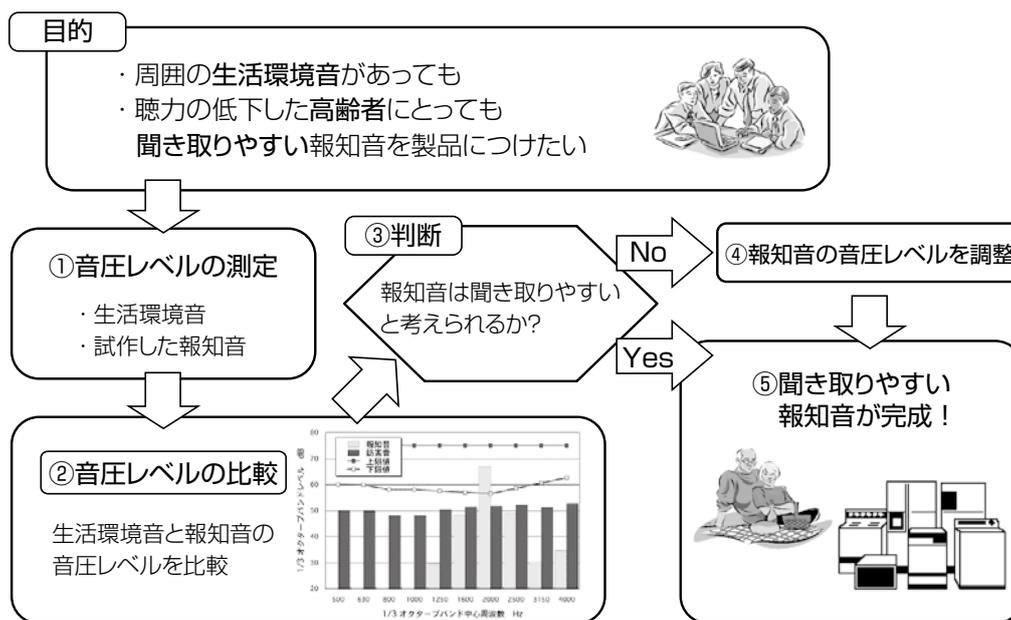


図6 JIS S 0014 に規定された報知音の音量設定方法の概略図（文献[17]より改変）

る。しかし、報知音が普及するに伴って、新たな標準化の要望が産業界から寄せられている。

一つめは、より複雑な音響的構造をもつ報知音に関するものである。現在のJISでは、音の高さと音量が一定の比較的単純な音を規定の対象としている。しかしその後、携帯電話の着信メロディに代表される新しい技術の進歩と普及によって、より音楽的で複雑な音を報知音に使用する動きが出てきた。二つめは、音声の使用に関するものである。製品の操作説明など、より多くの情報をユーザーに伝えるために、単純な報知音だけでなく音声ガイドを使用した製品が今後増えていくことが見込まれている。

JIS S 0014では、聴覚や音響の専門家でない現場のデザイナーでも使用できるよう、設計手法をできるだけ単純化してある。しかしそれでも、「難しい」という声が筆者らに寄せられることがある。手続きの煩雑さを増すことなく、音響的により複雑な報知音や音声ガイドに対応した手法へと現行のJISを発展させることが、今後の大きな課題である。

## 7.2 国際標準化への展開

JIS「高齢者・障害者配慮設計指針」は、幸いにもアクセシブルデザインを志向する多くの製品の設計において使用されるに至っている。JIS S 0014を含め、そのうちのいくつかについては、国内での標準化の段階として、ISO規格化の作業が現在進行中である<sup>[17]</sup>。本稿で取り上げた報知音の音量設定方法のように、人間の基本的な感覚特性に基づく設計手法は、原理的にどの国の製品にも適用可能なはずである。少子高齢化が進む日本以外の国々においても、このアクセシブルデザイン技術は有効に使われるものと期待している。

また、国際標準化作業にあわせて、筆者らはそれら規格を他の製品規格において引用するよう規格作成者らに働

きかけ、アクセシブルデザイン技術を広く普及させる取り組みも始めている。アクセシブルデザイン技術は、製品の種類や生産国を問わず共通化されることが望ましい。たとえ高齢者にとって使いやすい良いデザインであっても、互いに相容れないデザインが混在している場合は、ユーザーにとってはかえって不便だからである。

使用者の特性やニーズに合わせたきめ細かなもの作りは、もともと日本企業が得意とするところである。アクセシブルデザイン製品の分野においても、日本の産業が世界市場をリードしていくことができれば、本研究開発も成功であったと言えよう。

## 謝辞

筆者らが原案を作成したJIS「高齢者・障害者配慮設計指針」の多くは、独立行政法人製品評価技術基盤機構と共同で実施した標準基盤研究の成果に基づいている。特に、高齢者の感覚特性に関する大規模計測の実施には、同機構の協力が不可欠であった。記して、関係各位に謝意を表す。

## キーワード

高齢者、聴覚、視覚、報知音、標準化、日本工業規格

## 参考文献

- [1] 人間福祉医工学研究部門, 成果普及部門工業標準部: 妨害音及び高齢者の聴力低下を考慮した報知音に関する標準化研究, *産総研 Today*, 4(3), 33 (2004).
- [2] 人間福祉医工学研究部門, 成果普及部門工業標準部: 年代別相対輝度及び光の評価方法に関する標準化研究, *産総研 Today*, 4(5), 23 (2004).
- [3] 日本工業規格: JIS S 0014 高齢者・障害者配慮設計指針-消費生活製品の報知音-妨害音及び聴覚の加齢変化を考慮した音圧レベル, 日本規格協会 (2003).
- [4] 倉片憲治, 松下一馬, 久場康良, 口ノ町康夫: 家電製品の報知音の計測-高齢者の聴覚特性に基づく検討-第2報-, *人間工学*, 35, 277-285 (1999).
- [5] 倉片憲治, 松下一馬, 久場康良, 口ノ町康夫: 家電製品の報知音の計測-第3報-発音パターンの分析-, *人間工学*, 36, 147-153 (2000).
- [6] 日本工業規格: JIS S 0013 高齢者・障害者配慮設計指針-消費生活製品の報知音, 日本規格協会 (2002).
- [7] K.Kurakata, K.Matsushita, A.Shibasaki-K and Y.Kuchinomachi: Detection threshold for pure tones presented against a broadband noise - A comparison of young and elderly listeners -, *Proc. 17th International Congress on Acoustics*, 4, 3A.15.02 (2001).
- [8] S.Namba, S.Kuwano, K.Kinoshita and K.Kurakata: Loudness and timbre of broad-band noise mixed with frequency-modulated sounds, *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, 13, 49-58 (1992).
- [9] S.Kuwano, S.Namba, K.Kurakata and Y.Kikuchi: Evaluation of broad-band noise mixed with amplitude-modulated sounds, *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, 15, 131-142 (1994).

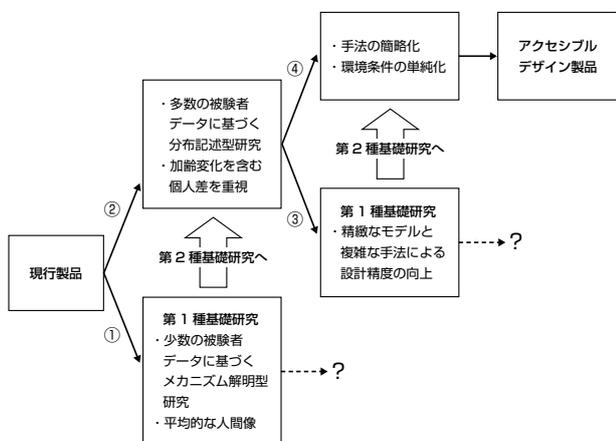


図7 従来型の人間特性研究との比較で表したアクセシブルデザイン技術開発の段階

- [10] 難波精一郎, 桑野園子: 種々の変動音の評価法としての Leq の妥当性並びにその適用範囲の検討, *日本音響学会誌*, 32, 774-785(1982).
- [11] K.Kurakata, A.Shibasaki-K. and Y.Kuchinomachi: Loudness functions of elderly adults for pure tones and low-pass filtered noises, *Proc. 7th Western Pacific Regional Acoustics Conference*, 191-194 (2000).
- [12] 日本工業規格: TR S 0001 消費生活製品の報知音等の設計指針-生活環境音データベース, 日本規格協会 (2002).
- [13] 倉片憲治, 久場康良, 木塚朝博, 口ノ町康夫: 高齢者の聴力レベルとテレビの聴取音量の関係, *人間工学*, 35, 169-176 (1999).
- [14] K.Kurakata, K.Matsushita and Y.Kuchinomachi: Database of domestic sounds for evaluation of auditory-signal audibility: JIS/TR S 0001, *Acoust. Sci. & Technol.* 24, 23-26 (2003).
- [15] 倉片憲治, 水浪田鶴, 松下一馬: 生活環境音中に呈示された純音信号の聞き取りやすさ評価-若年者と高齢者の比較-, *日本音響学会秋季研究発表会講演論文集*, 459-460 (2002).
- [16] K.Kurakata and K.Matsushita: Japanese Industrial Standards on designing auditory signals of consumer products for the elderly and for use in noisy conditions, *Proc. XVth Triennial Congress of International Ergonomics Association*, No.713 (2003).
- [17] アクセシブルデザイン製品の普及にむけて-聴覚・視覚に関わる標準化研究の成果を ISO 規格化提案, *産総研 Today*, 7(7), 19 (2007).

(受付日 2007.9.18, 改訂受理日 2007.11.26)

## 執筆者履歴

倉片 憲治 (くらかた けんじ)

1996 年、工業技術院生命工学工業技術研究所入所。現在、人間福祉医工学研究部門アクセシブルデザイン研究グループ、グループ長。高齢者の聴覚特性の研究を行うとともに、聴覚・音響分野の JIS 原案作成及び国際標準化活動に従事。ISO/TC 159 (人間工学) /SC 5/WG 5 コンビナー(議長)、ISO/TC 43(音響) /WG 1 エキスパート(専門委員) 等を務める。高齢者・障害者に使いやすい製品、生活しやすい環境を作ることが、すべての人に住みよい社会を創ることにつながると考え、アクセシブルデザイン技術の普及を目指している。

佐川 賢 (さがわ けん)

1975 年、工業技術院製品科学研究所入所。現在、人間福祉医工学研究部門、上席研究員。視覚の心理物理学的計測をとおして、測光や視環境評価の研究に従事。これまでに薄視測光システムの開発、色彩環境の快適性の定量化、高齢者・障害者の視覚特性計測等を行い、それらの研究成果を JIS や ISO などの標準化をとおして普及に努めている。現在、国際照明委員会 (CIE) 幹事、ISO/TC 159(人間工学) /WG 2 コンビナー(議長) 等、国際標準化活動に従事。

## 査読者との議論

### 議論 1 研究プロセスと論文構成

質問 (赤松 幹之)

アクセシブルデザインにとって「なぜ、標準化がベストチョイスか」という研究者としての考えが分かるような全体構成にすることが望まれます。アクセシブルデザインにおける標準化の有効性、そのための標準/規格の要件、それに基づくデータ収集、のように、ニーズを具体化して、それにシーズを提供していくというプロセスが明確に書かれていると、標準という方法をとることが得策なのか、標準という方法をとる場

合には、どのような標準がよく、そのために何をすべきなのか、といったことが書かれていると、読者に大いなる参考になると思います。

質問 (一條 久夫)

研究の流れは詳述されていますが、要素技術と、その選択・統合プロセスが若干分りにくいように思います。

回答 (倉片 憲治)

下記の修正を施したことにより、ご指摘のような全体構成になり、標準化研究の意義と利点が明確になったのではないかと考えます。

- ・標準化の意義と重要性に関する 2 章の追加
- ・報知音の設計上の問題を整理した 3 章の記述の整理
- ・規格の実際の活用に関する 5 章の記述の修正

### 議論 2 研究の課題について

質問 (赤松 幹之)

大枠の課題設定だけでなく、細かい課題についても触れられると良いと思います。例えば、現実の生活環境では、機器とユーザとの距離も様々ですし、機器とユーザとの間に家具などがある場合もあるでしょう。生活環境についても、反響の強い部屋もあればデッドな部屋もあり、それによる違いもあるかもしれません。どこまで課題として検討して、そのうちから研究対象とした範囲に選んだ理由などが明確になっていると良いと思います。

回答 (倉片 憲治)

ご指摘の生活環境音に関する細かな課題について、「4.2 生活環境音による妨害への対応」に記述を加えました。高齢者の聴覚特性に関しても、「4.1 加齢に伴う聴力低下への対応」にて技術的課題を詳述いたしました。これらの追加により、筆者らがたどった思考過程をより明確にお読みいただけるようになったものと考えます。

### 議論 3 研究成果の評価について

質問 (赤松 幹之)

当初設定した研究目標にどの程度達したのかを示し、自己評価してもらいたいと思います。著者から見て結果としての JIS が十分に満足に足るものであるのか、まだ不十分と考えていることがないのか、などの記載を期待します。

回答 (倉片 憲治)

JIS として制定した技術によって、当初設定した研究目標はほぼ達成されたと考えております。しかし、その後の技術的進展によって、当該 JIS では対応できない報知音の使用等、新たな課題が発生してきました。その点を、「7.1 新たな報知音や音声ガイドへの対応」に今後の展開として記述することで、現状の自己評価といたしました。併せて、JIS の普及策について、同節及び「7.2 国際標準化への展開」でより詳しく記述しました。

### 議論 4 モデルの単純化に対する考え方について

質問 (一條 久夫)

平均的エネルギー量が聴覚現象に大きく影響すること、この単純化がモデルの本質をついたものであると考えるに至ったプロセスについて記述されると良いと思います。

回答 (倉片 憲治)

このプロセスは、以前私自身が携わった研究の延長で考えに至ったものですので、その文献 [9, 10] を引用いたしました。また、「4.1 加齢に伴う聴力低下への対応」での記述を詳しくすることによって、筆者らがたどった思考過程がより明確になるようにいたしました。

### 議論 5 本研究と第 1 種基礎研究との相互関係

質問 (小野 晃)

図 7 で従来型の研究と今回の研究とを対比しており、②と④を第 2

種基礎研究に位置づけ、①と③を第1種基礎研究として位置づけています。著者らは本研究で意図的に第2種基礎研究の手法を取ることで、目標としたアクセシブルデザインの標準化に成功したことは高く評価されます。しかしながら一方で、第1種基礎研究と位置づけられている①と③の研究成果が、何らかの形で本研究に対して意味を持つ場合もあるのではないかと気がします。

たとえば、③の研究は精緻なモデルを提示できるがゆえに、簡略化・単純化された④の研究結果の妥当性を、その一部ではあっても、検証するものとして使えることはないでしょうか。

また①の研究は、人間の平均的な像を提示するものと思いますが、人間のばらつきや多様性を記述する②の研究を根幹の部分で支えていることにならないでしょうか。著者の見解をお聞かせ下さい。

なお査読者は、第2種基礎研究が、関連する第1種基礎研究の成果をベースとして、その上に展開されるというイメージを持っているために、本研究の場合にどのような相互関係になっているかという興味から、このような質問をさせていただきました。

回答（倉片 憲治）

的確なご指摘をいただいたと思います。ご質問のとおり、筆者らが手がけてきたアクセシブルデザイン技術の標準化研究も、「第2種基礎研究が、関連する第1種基礎研究の成果をベースとして、その上に展開される」という枠組みに当てはまると考えられます。すなわち、本研究の特徴は、人間特性に関する第1種基礎研究の成果を、環境条件の考察などの第2種基礎研究を通して、現実場面に適用可能なデザイン手法に“昇華”させた点にあると考えます。

また、図7では、本研究と従来型研究との対比が二者択一的に描かれていた点も不適切であったようです。第1種基礎研究の必要性・重要性は踏まえつつも、それが成熟しかかったある時点で第2種基礎研究と組み合わせ、本格研究への転換を図ったことが、アクセシブルデザイン製品の実現に有効であったことを図示すべきでした。

最終稿では、これらを考慮して、第1種・第2種基礎研究の関係をより明確にした図に差し替えました。

# 高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ

## — ガラスインプリント法によるサブ波長周期構造の実現 —

西井 準治

光の波長以下の周期構造からなる「サブ波長光学素子」において、製造コスト等の実用化を阻害してきた要因を、日本が得意とするガラスモールド法と、新たな成型プロセスとして知られるインプリント法との融合によって解決することを試みた。材料メーカー、家電メーカー、大学、産総研が役割分担を明確にして垂直的に連携することにより、波長板機能、反射防止機能などをガラス表面に形成することに成功した。

### 1 はじめに

高度情報化社会の構築に貢献したのは、半導体技術と光技術である。数百年の長い歴史をもつ光技術には、今なお、多くの期待が寄せられている。その理由は2つある。1つは情報媒体としての容量が極めて大きく、伝達速度が速いこと。もう1つは、人間が80%以上の情報を視覚から取り入れていることである。光通信ネットワークの普及によって飛躍的に向上した情報の送受信環境をプラットフォームとして、それを追うようにディスプレイ、ストレージ、撮像機器など、様々なハードウェアに関わる技術革新が連鎖的に起こり、今後のさらなる発展のために、光技術への期待は日増しに大きくなっている。それに応えるためには、「科学」として積み上げられた光学に関わる多くの成果を、いかにして揺るぎない「技術」に仕上げていくか、その手法論が問われる時代である。

本稿では、次世代の情報入出力技術に大きな影響を及ぼすと思われる、光学素子に着目する。向こう10～20年の間に、情報家電分野や情報通信分野で必要とされる光学素子に関わる技術を予測し、既に科学的に明らかになりつつある、あるいは明らかになっている要素を組み合わせることによって、屈折・回折光学素子の次の世代を担う、新たな素子化技術の産業化を目指した取り組みについて述べる。

このような次世代の情報入出力に関わる光学素子化技術が構築できれば、ユーザー側にとっては、高画質画像などの大容量データの高速かつ効率的な撮像、保存・読み出しが可能となる。一方、製造側にとっては、これまで膨大なエネルギーを要していた光学素子の製造プロセスが大幅に簡素化されるばかりか、部品数の削減にも繋がり、近

隣諸国をリードする高度な情報家電機器の製品化が実現する。

### 2 産業化に向けた新展開と研究目標

1600年以降に登場した光学素子および産業分野で貢献している製造方法を、図1に模式的に整理した。この分野のものづくりは「光学材料」と「微細加工」に集約される。屈折率や分散など、設計で決められた物性の材料を開発し、それを精密に加工、評価するという作業の繰り返しである。1600～1800年代は、レンズ、プリズム、回折格子という3つの光学素子を基盤として、幾何光学と波動光学の分野で様々な理論が構築された時期である。先行する理論あるいは光学設計がものづくりに指針を与え、ものづくりがニーズに確実に応え、かつ理論と設計の高度化を促すという状況が現在でも続いている。

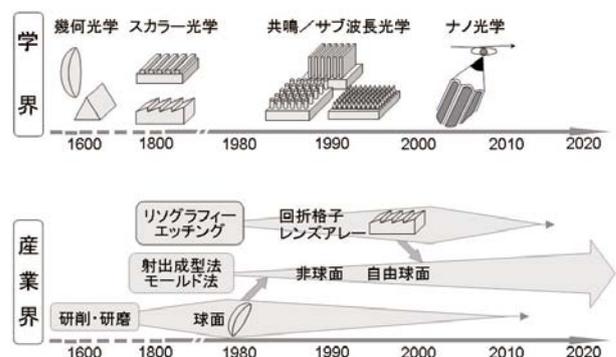


図1 1600年以降に登場した光学素子および産業に貢献している製造方法

## 2.1 コストの壁

1990 年前後に研究が開始された「共鳴・サブ波長」と呼ばれる分野に注目したい。光の波長レベルあるいはそれ以下の周期構造を高精度に作製できれば、従来よりもさらに高機能な素子が作製できることが、計算機シミュレーションによって次々に明らかにされ、その後、シリコン等の半導体微細加工技術の発達と共に、試作を伴った基礎研究が盛んに行われた<sup>[1]</sup>。

本稿で対象とする光の波長は、可視域から近赤外域（波長 400 nm ～ 2000 nm 程度）である。構造の周期が入射する光の波長の  $2n$  倍 ( $n=0,1,2,3 \dots$ ) の場合は、回折波が発生する他、周期構造内での光波の共鳴による強い反射や光の閉じこめ作用が起こる。構造の周期が短くなると、回折や光波共鳴は発生せず、微細構造は周期を構成する材料と空気の平均屈折率の物質とみなすことができる。これが、「共鳴・サブ波長」の原理である。

これまでにいくつかの共鳴・サブ波長光学素子が実用化されてはいるものの、その用途は限定的であり、情報家電製品などの汎用機器に搭載されるまでには至っていない。その理由は、月産数百万個以上の製造規模と低コスト化の障壁があまりにも高すぎたからである。

## 2.2 機能の壁

1980 年に発明されたモールド法や射出成型法で、それまでの研削・研磨法では作製が困難であった非球面レンズや回折格子が安価に製造できるようになった。精密なモールド作製技術が確立され、非球面等の様々な形状の光学素子の量産が可能になった。例えば、デジタルカメラのズーム光学系には、ほぼ 100 % の割合でガラスモールドレンズが使われており、日本および近隣諸国において、年間数億個のペースで生産されている。しかしながら、高精細化、小型・軽量化に加えて、ゴースト、球面収差、色収差の複合的な抑制等の新たなニーズが浮上してきた。一方、次世代光ディスクドライブには波長 405 nm の紫色の光が使われるため、従来からの CD（波長 785 nm）、DVD（波長 655 nm）を加えた計 3 波長の光に同時に対応できる新たな光学素子が求められている。これらの機能素子のニーズに応えるためには、屈折と回折の併用、波長依存性のない構造的複屈折、波長・入射角依存性の小さな反射防止などの機能を、従来からのレンズ等の光学素子に組み込むための新たな技術が必要である。

## 2.3 本研究の目標

従来のインプリント技術は、微細な構造を形成できることで知られているが、低温成型が可能な樹脂のみに対応可能で、数百度の高温が要求されるガラスに適用した事例はなかった。また、ガラスモールド法は、レンズなどの表面

が平坦な光学部材の製造に用いられており、光の波長より小さい構造の形成に使われた例はほとんど無い。そこで本研究では、学会で話題になっている樹脂材料のインプリント技術と、産業界で成熟したガラスモールド技術を組み合わせ、ガラスインプリント技術の開発に取り組み、これまで、微細加工技術を駆使して試作されてきた共鳴・サブ波長光学素子の新たな製造技術を開発することを目標とした。

## 3 目標達成のためのシナリオ

共鳴・サブ波長光学素子の作製に必要な加工サイズは数十 nm ～ 数  $\mu\text{m}$  の領域であり、可能な限り短時間で大面積の微細加工を行う必要がある。現在、産業界で使われているリソグラフィとエッチング、レーザー加工、機械加工等の手法では満足できない領域である。しかしながら、その様な光学素子は、レンズ、プリズム、窓材などの表面に形成する場合が大半であるため、既存の微細加工技術を使って耐久性のある微細構造モールドを作製することができれば、素子の表面にインプリント法の原理を応用して微細構造を転写できるはずである。モールド法およびインプリント法の概念を図 2 に示す。日本のモールド法の技術レベルは世界でも突出して優れており、人材、設備、ノウハウの十分な蓄積がある。また、インプリント法は、米プリンストン大学の Chou らが報告した技術であり<sup>[2, 3]</sup>、ナノスケールに微細加工されたモールドを樹脂に押しつけ、紫外線あるいは熱を用いて構造を転写する方法である<sup>[4]</sup>。これまでに、インプリント法によって微細構造を形成して製品化した事例としては、液晶ディスプレイ用導光板など、樹脂材料が主体であった。一方、信頼性に優れたガラス材料では、10  $\mu\text{m}$  以上の構造単位のマイクロレンズアレーや回折格子が知られている程度で、共鳴・サブ波長領域での製品化は未踏領域であった。

そこで本研究では、ガラスインプリント技術によるサブ波長光学素子の産業化を目指して、図 3 に示すシナリオに基づいて、複数の要素技術および中間統合技術に関する研究課題を設定した。要素技術については、組成開発や物性評価を得意とする産総研が材料メーカーを先導する体制

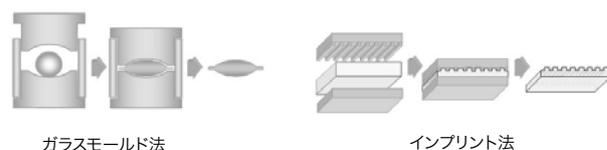


図 2 ガラスモールド法およびインプリント法のイメージ図  
ガラスモールドには耐熱超硬材料が、インプリント用モールドにはガラスあるいはシリコンが使われる。

の中で、過去の膨大な研究成果を活用しつつ取り組むことにした。一方、モールドの微細加工、離型処理、および精密成型の3つの技術については、家電メーカーのノウハウに依存する部分が多く、産総研が家電メーカーを支援する形で、慎重かつ戦略的に取り組むことにした。

#### 4 要素技術の統合による新規な光学素子の開発

独自のモールド法で製造した光学素子を最終製品に搭載している家電メーカーと、モールド法に相応しい材料を開発しているガラスメーカー、光学およびレオロジー分野で先端的シミュレーション研究に取り組んでいる大学との連携体制を構築し、各々の研究ポテンシャルを融合するために、産総研に集中研究室を設置した。ここで重要だったのは、ガラスやセラミックスの微細加工技術と評価技術に関するノウハウが、産総研の研究グループに蓄積されていたことである。以下に、素子の作製に成功した事例を述べる。

##### 4.1 構造型複屈折波長板の開発

光ディスクドライブには、光源からディスクへ向かう光と、ディスクから反射して検出器に戻る光を分離するために、波長板が使われている。現在の波長板の材料は樹脂あるいは水晶であるが、波長毎に仕様の異なる波長板を実装しなければならない。つまり、次世代ドライブには赤～青の

波長域で3枚必要となるため、機器の小型化、低コスト化の阻害要因として懸念されている。また、光源の短波長化に伴って、十分な耐光性を有する光学素子が求められている。これらの問題点を克服できる可能性があるのがガラス製の構造型複屈折波長板である。

透明材料の表面に波長よりも小さな周期の1次元微細構造を形成すると、透過する光の電場の向きに応じて屈折率が異なる、いわゆる「構造型複屈折」が発現する<sup>[5]</sup>。

光学的に等方的なガラスでも、表面に異方性のあるサブ波長構造を形成すれば、構造型複屈折の実現が期待できる。

有効媒質理論あるいは厳密結合波解析などの計算手法を用いれば、理論的に構造の最適化が可能である。重要なパラメーターは、微細構造の周期、溝幅、高さ、そして材料の屈折率である。また、溝幅は主に位相差の波長依存性に影響するため、波長無依存化のためには形状の最適化が必須である。さらに、構造高さは材料の屈折率が高いほど低くできる。ガラス材料は樹脂に比べて高屈折率化が容易であり、構造高さを低くできるというメリットがあるが、これまでモールド法でその様な構造を形成した例はなかった。

本研究では第1ステップとして、周期を500 nmに固定

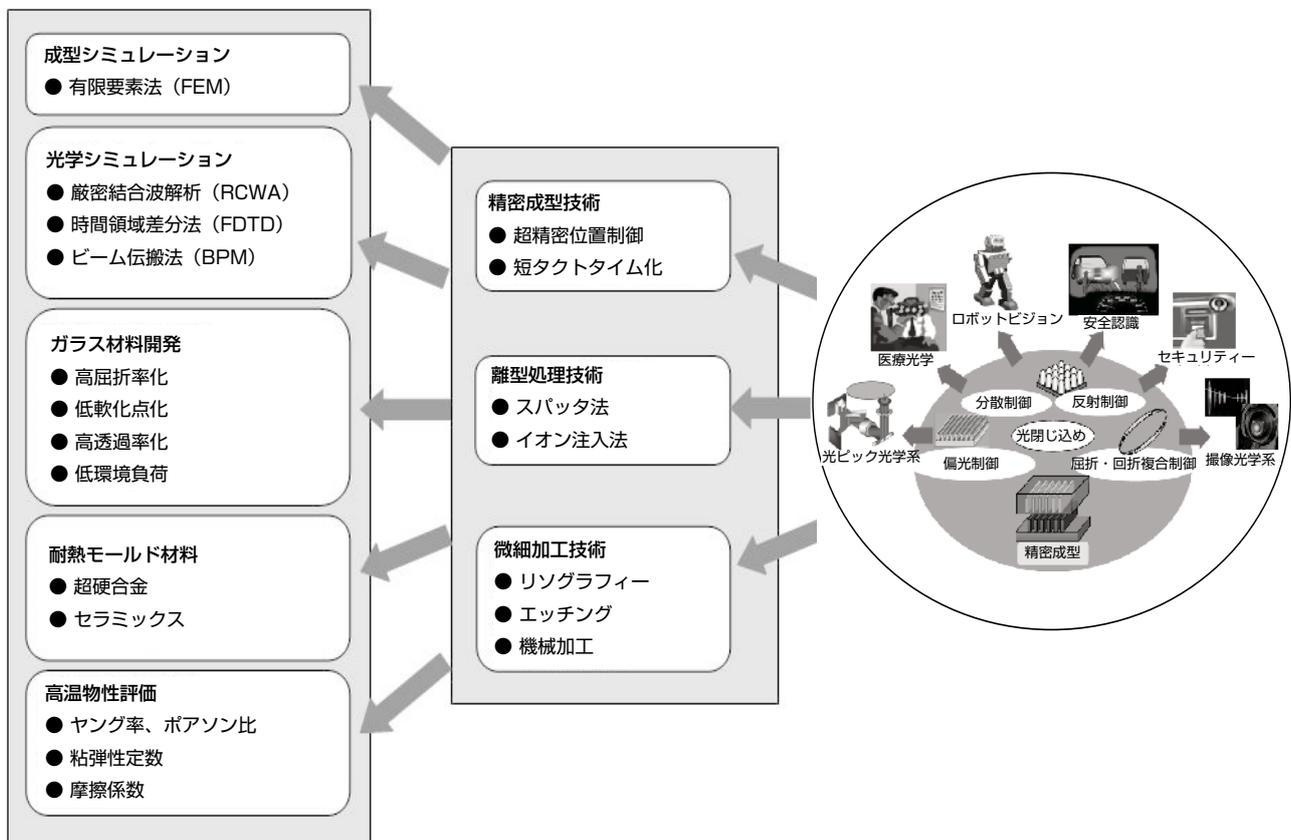


図3 モールド法によるサブ波長光学素子の製品化のためのシナリオ

し、様々な溝幅の耐熱モールドを試作して、ガラスの成型性について定量的に調べた。成型結果を図4に示す。溝幅330 nmのモールドの場合、得られるガラス成型体の構造高さは730 nmに達しており、極めて高精度な成型が可能になることがわかる。このようなモールド形状と、インプリントによって得られるガラス周期構造の形状との相関を定量的に明らかにしたのは、本研究が初めてである。ここで最も重要なポイントは離型条件であった。高温で離型すると、ガラス表面に形成された微細構造が熱変形する。また、低温で離型すると、モールドとガラスの熱膨張率の差に起因する機械的破壊が、モールドあるいはガラスのどちらか、あるいは双方同時に発生する。500℃以下の比較的低温での成型が可能で光学ガラスの場合、成型に伴うモールドの劣化が抑えられるという点では有利であるが、成型温度付近でガラスの粘度が急激に変化するため、離型のタイミングの見極めが極めて難しくなる。この問題に対して、モールド法に関して十分な経験を有する企業の研究員と、材料物性および微細加工に詳しい産総研の研究者との連携が功を奏し、短期間の内に世界トップの構造高さの離型に成功した。本研究では、図5に示すように6 mm × 6 mmの大面积化も実証済みであり、位相差0.1 λが達成できた<sup>[6]</sup>。ガラスモールド法で作製された周期構造で位相差を実現したのは本研究が初めてである。周期300 nmの構造体の成型にも成功しており、溝幅と構造高さの最適化によって、光ディスクドライブへの搭載条件である位相差0.25 λを、波長400～800 nmの全域で達成することが今後の目標である。

#### 4.2 サブ波長反射防止構造の開発

情報家電から照明に至るまで、幅広い製品に利用されているガラス部材には、光利用効率の向上、あるいは不要な反射光・迷光の抑制が求められている。現状の撮像光学素子やディスプレイパネルには、反射防止膜が施されているが、波長依存性、入射角依存性の無い反射防止という新たなニーズに対応することは、原理上難しい。一方、素

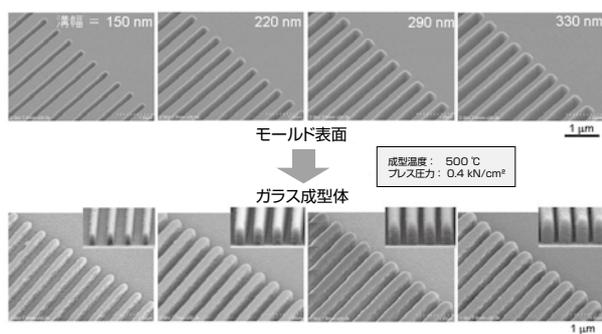


図4 1次元周期構造モールドとガラス成型品の電子顕微鏡写真

子表面へサブ波長周期の錘形構造を形成できれば、高度な反射防止が可能なることは以前から知られていた。

重要なのは、波長よりも小さな錘形を2次元的に配列することである。波長レベルの周期の錘形では光の回折が起こり、反射防止効果は得られない。波長よりも十分小さな錘形の場合、その先端の領域では、ガラスよりも空気の体積分率が大きい。光が構造の内部に進むに連れて両者の体積分率が徐々に逆転するため、様々な角度で入射する光にとって、ガラスと空気の界面が存在しないと見なせる。また、2次元的に等方的な配列によって偏光依存性も無くなる。

これまでに、サブ波長反射防止構造に関する多くの理論解析やものづくり研究の事例が報告されてきたが、そのほとんどが、アクリル系等の樹脂を用いており<sup>[7]</sup>、試作の域を出なかった。撮像機器等に必須の材料であるガラスへの反射防止構造としては、電子ビームリソグラフィとエッチング技術を利用した研究がいくつか報告されている<sup>[8,9]</sup>。しかし、作製に長時間を要し、大量生産は不可能であった。そこで我々は、これまでに全く報告例が無かったガラスモールド法による反射防止構造の形成を目指すことにした。

本稿では、耐熱モールド材料としてシリカを用いた事例を紹介する。基板表面に成膜した金属薄膜を電子ビームリソグラフィでパターニングし、その後、ドライエッチングによって目的とする周期構造をシリカ基板に形成した。成型したガラス表面の反射率が低くなるようにモールド形状の設計を行い、図6(a)に示す周期300 nm、高さ約550 nmの2次元周期構造を形成した。真空成膜法により、モールド表面に離型膜を形成し、リン酸塩系光学ガラス（屈折率1.6）を約500℃で成型したところ、図6(b)に示す高さ約500 nmの反転形状を形成することに成功した<sup>[10]</sup>。ここでも、離型のタイミングの見極めと、離型に適したモールド形状の実現が成功の鍵を握っていた。積分球を用いて

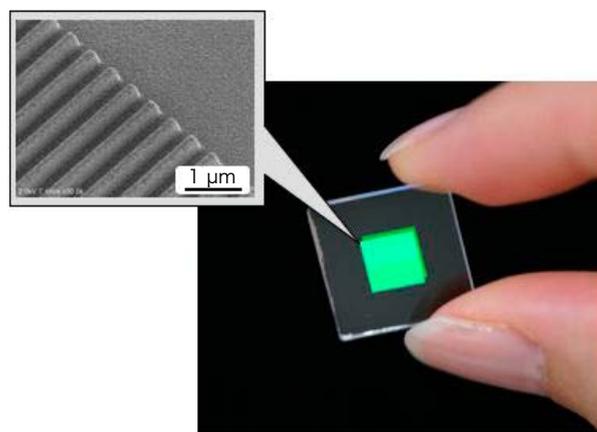


図5 位相差を発生する大面积1次元周期構造

周期構造を形成した光学ガラスの反射率を精密に測定した結果、入射角 $0^\circ$ 、波長462 nmにおいて0.56%であった。この値は、ガラス表面に単層の反射防止膜を形成した場合よりも低く、実用レベルの性能である。図6(c)は試作品の写真である。成型条件の最適化と共に反射率が低下し、斜めからでも下の文字がはっきりと見える。本研究の当面の製品ターゲットは光ディスクドライブ用ピックアップレンズやデジタルカメラ用レンズである。現在は量産性を考慮して、シリカに代えて超硬材料を用いた曲面モールドの開発を進めているが、本研究によって、実用化を阻害していた低コスト化と高い量産性を克服できる可能性が高まった。

## 5 考察

材料、微細加工、素子化の3つの研究分野において、企業、産総研の研究者が集まり、そこに大学を交えた垂直的な連携による研究は予想以上に効果的である。日本の光学ガラスの技術開発力は世界トップであり、インプリント法によってサブ波長光学素子を作製できる材料が市販品の中にいくつか存在する。しかしながら、量産化という観点では、今後も多くのハードルを超えなければならない。ガラス企業は、集中研究室の中で産総研や材料メーカー、家電メーカーと一体となって、組成改良-成型-素子評価の3つの研究課題に効率的に取り組んでいる。一方、モールド材料については、そもそも、微細加工によってナノレベルの構造を形成する目的で開発されていないため、製造元と摺り合わせながら材料及び製造方法を最適化しなければならない。これらの材料技術に関しては、得られる知見を特許によって権利化し、それが近隣諸国で機能すれば、研究戦略上の大きな問題にはならないと考えている。また、成型温度域のガラス材料は粘弾性的な挙動を示すことが知られているが、成型シミュレーションに必要な高温物性等のデータがほとんど存在しないのが実状である。場合によっては評価装置そのものを開発する必要があるが、これらも材料と同様に権利化が可能であろう。

一方、研究戦略上、非常に難しい問題を抱えているのが、モールド加工、離型膜、精密成型の3つの課題である。これらは、権利化できたとしても、それを保護することが極めて困難で、むしろブラックボックス化した方が得策

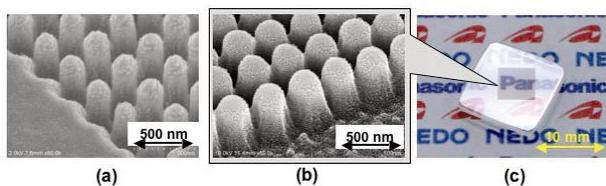


図6 (a) 成型用モールドと(b) 成型された反射防止構造のSEM写真、および、(c) 成型品の外観写真

だという考え方がある。昨今、このような製法に関わる情報を、加工、成膜、成型等の製造装置にレシピとして付属し、商品化する動きが見られる。本研究で導入した装置にもある程度のレシピが付属されており、汎用品であれば誰でも試作できる。これは、装置メーカーが、光学部材メーカーと摺り合わせながら性能を向上させる過程で知識を蓄積した結果であり、それがなければ装置の性能向上はあり得なかったであろう。今後、ガラスモールド法およびインプリント法の技術レベルをさらに向上させ、量産化に漕ぎ着けるためには、材料やシミュレーションを含む各種解析手法の進展だけでなく、加工、成膜、成型等の装置の高機能化が極めて重要である。その部分を光学素子メーカーが全てブラックボックスの中で個別に実施するのか、それとも、装置メーカーと情報を共有しながらノウハウをレシピとして搭載した商品にするのか、やがて選択を迫られる時期が来る。

## 6 まとめ

ここで紹介した研究事例は、情報家電の中でも比較的小型な光学部材の開発を目的としている。近い将来の応用先である撮像機器や光ディスクドライブなどの製品群は、近隣諸国の追い上げが非常に激しく、常にコストダウンと機能向上の2つの課題に直面しており、立ち止まることが許されない。「ガラスインプリント技術」には、機能向上と部品数削減の両立、あるいは、製造エネルギーとコストの大幅削減の可能性があり、次世代の光学部材製造技術の中核になると期待される。たとえば、本研究によって全波長対応の波長板ができれば、次世代CD・DVDドライブに必要な波長板の枚数は1/3になる。また、反射防止のために別途必要であった成膜プロセスが不要になる。

本稿で述べたサブ波長光学素子に関わる技術分野の研究開発は、やがて、大型ディスプレイや照明器具、太陽電池等の産業分野にも波及し、光の利用効率の向上に伴って、最終的には、情報入出力機器全般の消費エネルギーの削減に貢献することが期待される。そのためには、さらに高度な微細化技術と材料技術の融合が求められることは必至である。これまで、企業同士の連携が中心で、大学や公的研究機関が参画することが希であった本技術分野は、産総研が提唱する「第1種基礎研究」はもちろんのこと、「第2種基礎研究」の領域でも、既に完結した技術であると認識されていた。ところが、技術レベルが向上し、これまでの学問では解決できない新たな問題が生じ、それが障害となって技術的な壁に遭遇することが多くなった。すなわち、「第1種基礎研究」と「第2種基礎研究」の両方に立ち返り、問題点や取り組むべき研究課題の抽出を行い、効率的かつ

タイムリーに問題解決に取り組まなければならない状況が出てきた。ここで特に重要なのは第2種基礎研究をミッションの1つとする産総研の役割である。ニーズに直結した研究課題を設定し、企業および大学に潜在する技術を融合させることによって、研究成果を的確に提示できるポテンシャルを持ち続けなければならない。さらに、本研究事例のように、様々な材料や先端的インフラを集中的に管理・運営し続けなければならない。

## 謝辞

本研究のガラスモールドに関する研究は、革新的部材産業創出プログラム「次世代光波制御材料・素子化技術」の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受けて、松下電器産業株式会社、コニカミノルタオプト株式会社、日本山村硝子株式会社、五鈴精工硝子株式会社、大阪府立大学、京都工芸繊維大学、愛媛大学と共同で行われたものである。

## キーワード

光学素子、周期構造、インプリント、ガラス、微細加工

## 参考文献

- [1] 菊田久雄, 岩田耕一: 波長より細かな格子構造による光制御, *光学*, 27, 12-17 (1998).
- [2] S.Y.Chou, P.R.Krauss and P.J.Renstrom: Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers, *Appl. Phys. Lett.*, 67, 3114-3116 (1995).
- [3] S.Y.Chou, P.R.Krauss, W.L.Guo and L.Zhuang: Sub-10 nm imprint lithography and applications, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 15, 2897-2904 (1997).
- [4] T.Yoshikawa, T.Konichi, M.Nakajima, H.Kikuta, H.Kawata and Y.Hirai: Fabrication of 1/4 wave plate by nanocasting lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* B 23, 2939-2943 (2005).
- [5] 宮越博史, 森川雅弘, 増田修, 今榮真紀子, 山田基弘, 吉田和三: ナノインプリントを利用したサブ波長構造広帯域波長板の作製, *Optics Japan 2005 予稿集*, 24pD5, 東京 (2005).
- [6] T.Mori, K.Hasegawa, T.Hatano, H.Kasa, K.Kintaka and J.Nishii: Fabrication of sub-wavelength periodic structures upon high-refractive-index glasses by precision glass molding, *Proc. of 13<sup>th</sup> Micro Optics Conference*, B2, Takamatsu, Japan (2007).
- [7] S.J.Wilson and M.C.Hutley: The optical properties of 'moth eye' antireflection surfaces, *Optica Acta*, 29, 993-1009 (1982).
- [8] H.Toyota, K.Takahara, M.Okano, T.Yotsuya and H.Kikuta: Fabrication of microcone array for antireflection structured surface using metal dotted pattern, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, L747-749 (2001).
- [9] J.Nishii, K.Kintaka, Y.Kawamoto, A.Mizutani and H.Kikuta: Two dimensional antireflection microstructure on silica glass, *J. Ceram. Soc. Japan*, 111, 24-27 (2003).
- [10] 梅谷誠, 山田和宏, 田村隆正, 田中康弘, 西井準治: ガラ

ス表面に反射防止構造を形成する成型プロセスの開発, *精密工学会 2007 年度秋季大会学術講演会予稿集*, L33, 旭川 (2007).

(受付日 2007.9.19, 改訂受理日 2007.11.20)

## 執筆者略歴

西井 準治 (にしい じゅんじ)

昭和 57 年、東京都立大学大学院工学研究科修士課程を修了後、同年、日本板硝子株式会社に入社。在職中に基盤技術研究促進センターが実施するプロジェクトに出向し、その間の仕事をまとめて、平成 2 年に工学博士号取得。平成 5 年、工業技術院大阪工業技術試験所に入所し、平成 11 年からガラス構造研究室長。平成 14 年から、神戸大学連携大学院自然科学研究科教授を併任。平成 18 年から NEDO 次世代光波制御材料・素子化技術プロジェクトリーダー。また、平成 19 年から大阪府立大学大学院工学研究科客員教授を併任。

## 査読者との議論

### 議論 1 技術の統合の展開方法

コメント・質問 (小林 直人)

本研究論文は、「モールド技術」と「ナノインプリント技術」を統合して、従来にない高い性能の光学素子を実用に供するためのブレイクスルーを行ったと言う意味で、極めて価値の高い内容であると考えられます。この統合の実現こそ第 2 種基礎研究の本質を表しているといえます。

本研究例のように、従来統合が困難と考えられていた技術を組み合わせ、今までにない技術を創造したと言う経験を活かし、そのような新たな価値を実現するために、今後他の研究分野も含めて研究や技術の展開をどのように考えていけばよいか意見をお聞かせください。

回答 (西井 準治)

学術分野で盛んに取り組まれた「共鳴・サブ波長素子」が、大きな産業にならない理由は、「製造規模」と「コスト」に問題があることは明らかであり、そこをどのように解決するするのか、そのシナリオが重要と考え、本研究への取り組みを開始しました。そこでは、「本格研究」というミッションを掲げている産総研の役割をどのように考えるかが重要だったと思います。研究成果は、国民の生活に直接的に反映されるか、あるいは民間企業を介した製品として間接的に反映されると思いますが、ここで重要なのは、本格研究の課題設定とその後のシナリオであり、国が提示する施策と整合しているか、あるいは、逆に国が進むべき方向を提示するものであるべきだと考えています。つまり、本格研究の課題設定は、ひらめきや思いつき、あるいは思いこみによることなく、政策やニーズとの整合性を考慮に入れて決められることが望ましいと思います。

他の技術と同様に、今後の光技術においても省エネに向けた研究開発が必須だと思います。ここで紹介しました研究事例は、多くの光学機器における「光の有効利用」に関わる基盤になると考えています。

### 議論 2 共鳴・サブ波長光学の研究の発端

質問 (小林 直人)

今回の新技術の中心的課題である「共鳴・サブ波長」と呼ばれる分野は、1990 年前後に研究が開始されたとのことですが、なぜその頃開始されたのか (逆に言うと、なぜそれまで余り注目されなかったのか)、を教えてくださいませんか。

回答 (西井 準治)

光の干渉や偏光、回折に関連する研究者であれば「共鳴・サブ波長」の領域の光学素子の重要性に気づいていたに違いありません。しかしながら、それを設計する手段、作る手段が存在しなかったため、1900 年代後半まで、研究の対象として取り上げることができなかったのだと

思います。つまり、計算機シミュレーションと微細加工技術の進展がトリガーとなったことは明確です。そのように考えますと、半導体技術の今後の動向によっては、また新たな光技術が生まれてくる可能性があります。

### 議論 3 統合における技術的ポイント

質問（小野 晃）

本研究ではガラスインプリントの方法で構造的複屈折波長板とサブ波長反射防止構造の製造に成功しています。技術的には図3にある要素技術を統合して、「精密成型技術」、「離型処理技術」、「微細加工技術」の3つの中間統合技術を実現したことが成功の要因と理解します。それぞれの成果を得るために、ポイントとなった統合の方法を、差し支えない範囲で述べていただけますか。

回答（西井 準治）

本文の3の後半および4の前半に述べましたように、最終目標を達

成するために必要となる複数の要素技術に関する研究課題を的確に抽出し、それらを統合するためのシナリオを明確にすることが重要だったと思います。そのために、平凡なプロセスではありますが、研究成果を将来の製品化に活用したい企業、産総研、大学の研究者が納得するまでディスカッションを繰り返しました。その結果、限られた研究費を有効に活用するためには集中研方式が好ましいという観点では同意が得られましたが、「精密成型技術」と「離型処理技術」については、企業各社のノウハウに依存する部分が多く、産総研や大学はその領域に深く立ち入ることを控え、企業を支援する形で慎重かつ戦略的に取り組むことにしました。しかしながら、実際には、同じ場所で共同研究を実施しているため、お互いに知り得なかった様々な知見を共有できていることも事実です。現時点ではこれ以上の情報開示ができないことをご理解頂きたいですが、公的研究機関に公的資金を投入していることも認識しておりますので、権利化できない部分については、ノウハウ集等のかたちで残し、厳正な管理・運用をしていきたいと考えております。

# 異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略

## — 質調整生存年数を用いたトルエンの詳細リスク評価 —

岸本 充生

化学物質のヒト健康に対するリスク評価に関して、社会のニーズを、1) 基準値や規制値の導出、2) リスクの懸念のないものを選び分けるスクリーニング評価、3) 異なる種類の化学物質同士のリスクの比較や排出削減対策の費用対効果の評価、の3つに区別したうえで、1) と2) に応える形で設計された現行のリスク評価手法はそのままの形では、新たなニーズである3) を満たすことができないこと示し、トルエンを例に、3) を満たすための新しいリスク評価手法を提案した。質調整生存年数を健康リスクの指標とすることで、異なる種類の化学物質同士、さらには事故や疾病等の他のリスクとも比較することが可能となる。

### 1 はじめに

環境・安全・健康の問題に合理的に対処するためには、「リスク」という概念や「リスク評価」という手法が必要不可欠であるという認識は近年かなり定着してきた。化学物質のヒトに対するリスクは、その化学物質が持つ有害性(毒性、ハザード)の大きさと、ヒトがそれにさらされる曝露量(摂取量)を掛け合わせたものであり、毒性の強い物質でも摂取量が少なければリスクは小さいが、さほど毒性は強くなくても摂取量が多ければリスクは大きくなりうる。化学物質のリスク評価としては、動物実験やヒト疫学調査に基づく有害性評価から導出された無毒性量(ここまでなら摂取しても大丈夫な量)と、実際の曝露量とを比較して、対象となる化学物質の環境中濃度や摂取量が許容範囲内であるかどうかを判断する手続きが確立されてきた。この方法は、環境基準値の設定や、リスクの懸念のない物質を選び分けるためのスクリーニングに実際に使われている。

しかし、リスク評価に期待されている役割はそれだけではない。世の中のリスクを最小にするという大きな目標を達成するためには、それぞれの物質のリスクの大きさの定量化と相互比較、および、リスク削減対策ごとの費用対効果の計算とそれに基づく優先順位付けが必要である。このために必要な、しかるべき統計的手続きに基づくリスク評価の方法は確立されていない。

本稿では、リスク評価という学際的・統合的なプロセスの成り立ちに立ち返ることによって、新たな社会ニーズに応えるためのもう1つのリスク評価の試みを、トルエンの詳細リスク評価を例に示す<sup>[1]</sup>。それは、新たな社会ニーズから出発して、個別の要素技術を横断的に再検討したうえで、それぞれに対して必要な改訂を加え、それらを1つのシナ

リオに再統合していく試行錯誤の過程であった。

トルエンは、常温で無色透明な液体であるが、高い揮発性を有している。そのため、環境中に排出されたトルエンの大部分は、気体として大気中に移行する。日本において2001年度から始まった化学物質排出移動量届出制度(PRTR)において、すべての年で環境中への排出量が最も多い物質であり、ヒトの健康を損なう室内汚染物質としても知られている。2章では社会ニーズとリスク評価手法の関係について整理した。3章では新たな社会ニーズに対応するために実施した、要素技術ごとの手法開発・改良の内容とそれによって得られたリスクの評価結果について、4章では、トルエンの詳細リスク評価を通じて得られた考察と今後の課題についてまとめた。

### 2 社会ニーズとリスク評価手法

現行の化学物質リスク評価は図1のような手順で実施され、その目的(社会ニーズ)により大きく2種類に分けることができる。第一は、化学物質濃度の基準値や規制値といった参照値を導出するためのリスク評価である。これは厳密に言うと有害性評価であるが、環境中濃度の測定値と比較する形で用いられるのでリスク評価と呼んでもよいだろう。環境省による環境基準値や指針値、厚生労働省による室内濃度に関する指針値、残留農薬の基準値、作業環境中の管理濃度の設定などがこれに相当する。これらの参照値が想定している社会ニーズは、社会の中の感受性の高い人々(子供等の生物的弱者)や曝露量が特に多い人々をも確実に保護することであり、参照値は、動物実験などから得られた無毒性量を十分に大きな不確実性係数(安全係数)で割ることによって求められる。そのため、参照値

をわずかに超えた程度では多くの人にとっては何ら影響が出ない。

第二は、スクリーニング的なリスク評価である。環境省による環境リスク評価、経済産業省による初期リスク評価、食品安全委員会による各種リスク評価などがこれに相当する。ここでは、有害性の評価に加え、曝露量の推計にもワーストケース・シナリオが適用され、例えば実測値や予測値の95パーセンタイル値<sup>用語1</sup>が使われる。これが想定する社会ニーズは、有害性の大きさや曝露量を過大に見積もったうえでリスクの懸念がないと評価されるような物質をリストから除くこと、すなわちスクリーニングである。リスクの懸念があるとされた物質にはさらに詳細な評価が必要となるとともに、この時点で予防的な対策がとられることもある。

このような曝露評価や有害性評価の方法やリスクの判断基準は、参照値を定めたい、あるいはスクリーニング判定がしたいという社会ニーズに合わせて考案されたものである。図1に示したグレーの矢印が評価の手順であるのに対して、構成する要素技術は白色の矢印の方向で開発されたと想像される。つまり、現行の各要素技術は、ある特定の社会ニーズを満たすために最適化された手法であり、社会ニーズが違えばそれらは必ずしも最適な手法であるとは限らないのである。

近年、新たな社会ニーズが生じている。それは、例えば、ある化学物質とその代替物質の間でのリスクの比較、あるいは、化学物質のリスクと、事故や気候変動などの異なる種類のリスクとの間で、どちらを重視するかといった意思決定であり、また、リスク削減対策がその費用に見合ったものであるかという費用対効果の評価である。安全寄りの仮定（不確実性やばらつきがある場合には必ずリスクが大きく計算されるような仮定）のもとで行われた有害性評価と、ワーストケースを使って大きめに見積もられた曝露評価

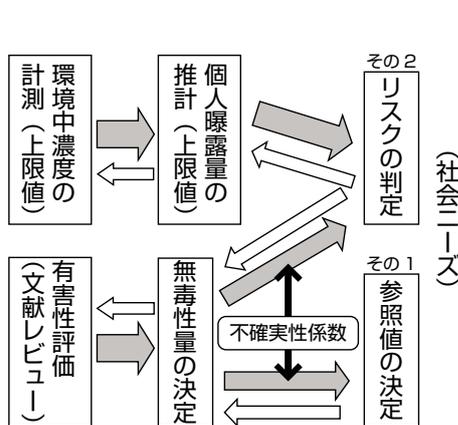


図1 現行のリスク評価プロセスと社会ニーズ

では、このような社会ニーズには応えることができない。しかし、評価目的と評価手法の間にある対応関係に自覚的でないならば、図1で確立されたリスク評価手法をそのまま他の社会ニーズに適用してしまうことになる。その結果、化学物質のリスクは過大に評価され、リスク削減効果は過大に推計され、対策の費用対効果は期待値（最もありそうな値）よりもずっと良いものとして計算されてしまう。また、化学物質同士でもそれぞれの安全寄りの程度（例えば不確実性係数の大きさ）が異なるために、相互の比較は困難である。第一、第二とは大きく性質の異なる第三の社会ニーズに応えるためには、リスク評価の手法が初めて開発されたときと同じように、もう一度、社会ニーズという最下流に立ち返り、そこから逆に上流側に位置する各要素技術へとたどってみることが必要である。

### 3 異なるリスクを相互比較するための定量化手法

#### 3.1 社会ニーズからのバックキャスト

リスク評価の作業手順とは逆向きに、新たな社会ニーズから出発し、それを達成するためにはどのような要素技術が必要になってくるかを順に検討していった。図2に白い矢印でその検討プロセスを示した。

ある化学物質のリスクを他の化学物質や他の種類のリスクと比較したり、費用対効果によってリスク削減対策に優先順位を付けたりするためには、リスクの大きさを共通指標で表すことが必要である。健康影響に関する共通指標に必要な条件は、死亡影響（死亡することによって余命を損失する）と非死亡影響（死亡には至らないが生活の質が下がる）の双方を考慮できることである。われわれは、医療分野で使われている生活の質（Quality of Life: QOL）を用いた質調整生存年数（Quality Adjusted Life - Year: QALY）を採用することにした。QALYとは、図3に示すように、横軸に年齢、縦軸にその時点でのQOL（健康を

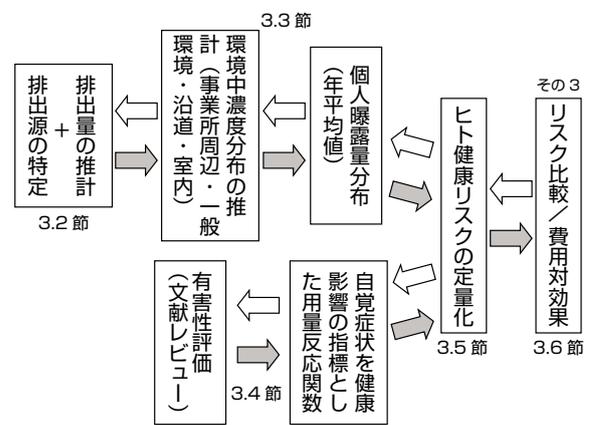


図2 新しいリスク評価プロセスのための要素技術の再検討

1、死亡を0)をとった場合のグレーの部分の面積に相当する。何らかの影響でQOLが点線まで下がった場合、損失QALYは面積の減少分に相当する。損失QALYは、QOLの低下分を含むことによって、損失余命だけでは捉えられない健康影響の大きさを表現することが可能になる。

化学物質に曝露されることによって生じるヒト健康リスクの大きさをQALYで表現するためには、年間平均曝露濃度を、摂取量と発症確率の間の関係式を表す用量反応関数<sup>用語2</sup>に代入することで求められた症状の発症件数に、死亡を0、健康を1として導出された症状ごとのQOLの重みを掛け合わせる必要がある。用量反応関数は、自覚症状を指標として慢性的影響を調査したヒト疫学データから導出されることが望ましい。計算に必要な個人曝露量は「年平均値」であり、屋外大気中濃度と室内空气中濃度を生活時間の比率で重み付けたものとして表される。屋外大気中濃度の全国分布を大気拡散モデルにより推計するためには、日本全国の大気排出量の分布データが必要である。これらはすべて上限値ではなく、中央推計値あるいは平均値（および可能ならばその分布）として推計されることが望ましい。

以上のようなニーズを前提に、各要素技術の現状について再検討を行った。その結果、以下に具体的に述べるように、既存の要素技術の多くは、そのままの形では適用することができないことが分かった。そのため、それぞれを目的に合うように修正したり、大胆な仮定を置くことで計算を進めたり、新たに手法を開発したりしながら、図2のグレーの矢印に沿って、トルエンのリスク評価を実践していくことにした。

### 3.2 排出量の推計

初期のリスク評価は、化学物質の濃度の実測値をベースに行われていたために、排出量の推計や発生源の探索は重視されてこなかった。しかし、排出削減対策の効果のシミュレーションを行うためには、発生源と排出量を量的に

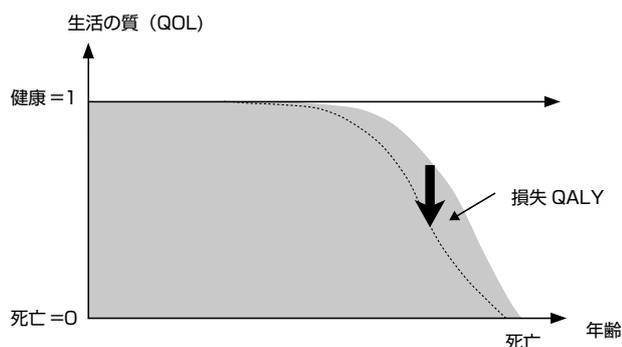


図3 質調整生存年数 (QALY) の概念

把握しておく必要がある。例えば、排出の大部分を占めていると想定した排出源で対策を実施したにもかかわらず、本当はそこからの排出量が占める割合が総排出量の半分に過ぎないとしたら、実際の効果は想定したものの半分にしかならないことになる。また、排出量が推計される場合でも、非意図的の排出や自然発生源からの排出などの不確実性の大きな項目は計上されないことが多いため、総排出量の推計値は過小評価になりやすい。トルエンの場合は、PRTRの開始当初は、自動車燃料からの蒸発分や、暖機前のエンジンからの過剰排出量（コールドスタート排出量）が計上されていなかったため、これらについては独自に推計を試みた。

### 3.3 個人曝露濃度分布の推計

化学物質の濃度の計測は、濃度の高そうな場所や条件のもとで実施される傾向があり、日本に住む人々が実際にどのような濃度分布に曝露されているのか分からなかった。計測データは、大気中濃度については当該化学物質を排出する事業所近傍、室内濃度については新築家屋に極端に偏っているうえに、大気環境と室内環境での評価は別々に実施されていた。また、室内濃度の計測データのほぼすべてが1家庭での1日平均値であり、年平均値やその家庭間変動に関するデータは皆無であった。

屋外大気中濃度に関しては、作成した排出量の分布データをもとに、産総研で開発された大気拡散モデル（AIST-ADMER）を用いて日本全国の5 km グリッドごとの大気中濃度を予測した<sup>[2]</sup>。屋外大気中濃度の全国平均値は1.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ で、最大値は67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ となった。室内濃度については、情報公開請求によって入手した日本全国の207家庭の室内濃度と屋外大気中濃度の1日平均値を利用した<sup>[3]</sup>。トルエンは室内からの排出量が多いため、室内空气中濃度が屋外大気中濃度よりも高くなる傾向がある。そのためまず前者から後者を差し引いたものを、室内発生源寄与濃度とし、これに対数正規分布をあてはめ、「(A) 1日平均値の家庭間変動」とした。これをもとに、年間平均値の家庭間変動を求めるために以下のような手順を考案した。

まず、1つの家庭における年間を通した室内発生源寄与濃度の日間変動の大きさ、すなわち「(B) 1日平均値の家庭内変動」を推計する。次に、「(A) 1日平均値の家庭間変動」は、「(C) 年間平均値の家庭間変動」に、「(B) 1日平均値の家庭内変動」が加わったものであると想定する。つまり、(C) は (A) から (B) を差し引いたものとして求められる。室内発生源寄与濃度は、室内発生量に比例し、換気回数に反比例すると考えられるが、両者の日間変動に関するデータは存在しなかった。そこで、専門家への聞き取り調査を行い、実際に人が住んでいる家屋について、「1

時間あたりの換気回数の1日平均値の日間変動」はその95%が含まれる範囲を0.5～10回、想定される温度範囲においては「1日あたりトルエン放散量の日間変動」はゼロと想定した。その結果、分散の加法性によって、室内発生源寄与濃度の年間平均値は幾何平均値  $15.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、幾何標準偏差4.28の対数正規分布に従うと予想された。

こうして導出された室内発生源寄与濃度分布と屋外大気中濃度分布を、室内と屋外が9対1であるという生活時間比率<sup>[4]</sup>で加重平均して、個人曝露濃度の分布を求めた(図4)。図は室内発生源のみの場合の曝露濃度分布、次に移動発生源や排出量が比較的少ない事業所からの排出量を加えた場合、最後に年間30トン以上排出している高排出事業所からの排出量を加えた場合を示している。

### 3.4 疫学を用いた用量反応関係の導出

現行のリスク評価では、疫学調査や動物実験から、無毒性量の値を得ることが有害性評価のアウトプットである。しかし、物質ごとに、指標とされる毒性影響の種類やその重篤度、不確実性係数の大きさが異なるために、無毒性量や参照値の値だけでは有害性の大きさを相互に比較することが難しい。そこで、疫学調査の結果を用いて、健康影響と曝露濃度の関係、すなわち、用量反応関数を導出することを試みた。グラビア印刷工場の労働者を対象に実施

された疫学調査<sup>[5]</sup>において調査された様々な自覚症状のうち、曝露量と発症確率に相関が見られた8症状を選び、これらに適合する関数形をあてはめ、用量反応関数を導出した。図5に示したのは8つの自覚症状の曝露濃度別の発症確率のデータである。曝露量が増えるにつれて、各症状の発症確率が上がるだけでなく、発症する症状の数も増えるという形になった。

### 3.5 ヒト健康リスクの定量化

3.3節で導出した個人曝露濃度分布を、3.4節で導出した用量反応関数に代入し、得られた症状の発症件数にこれらの重篤度を掛け合わせることによって、日本に住む人々のトルエン曝露による総健康リスクを「損失 QALY」の大きさ(単位は年)として表すことができる。各症状および症状の組み合わせの重篤度は、死亡を0、健康を1としたQOL指標で表した。QOLには、医療分野で用いられている多属性効用尺度であるHUI(Health Utilities Index)3を用いた<sup>[6]</sup>。HUI3は8つの属性(視力、聴力、発話、移動、手指機能、感情、認知、痛み)について、それぞれ5～6段階で評価し合計972,000通りの健康状態のQOL値が得られる。計算の結果、2001年度における健康リスクは、表1のように、日本に住む人々全員に対して、197年のQALY損失であると計算された。他の化学物質や他の

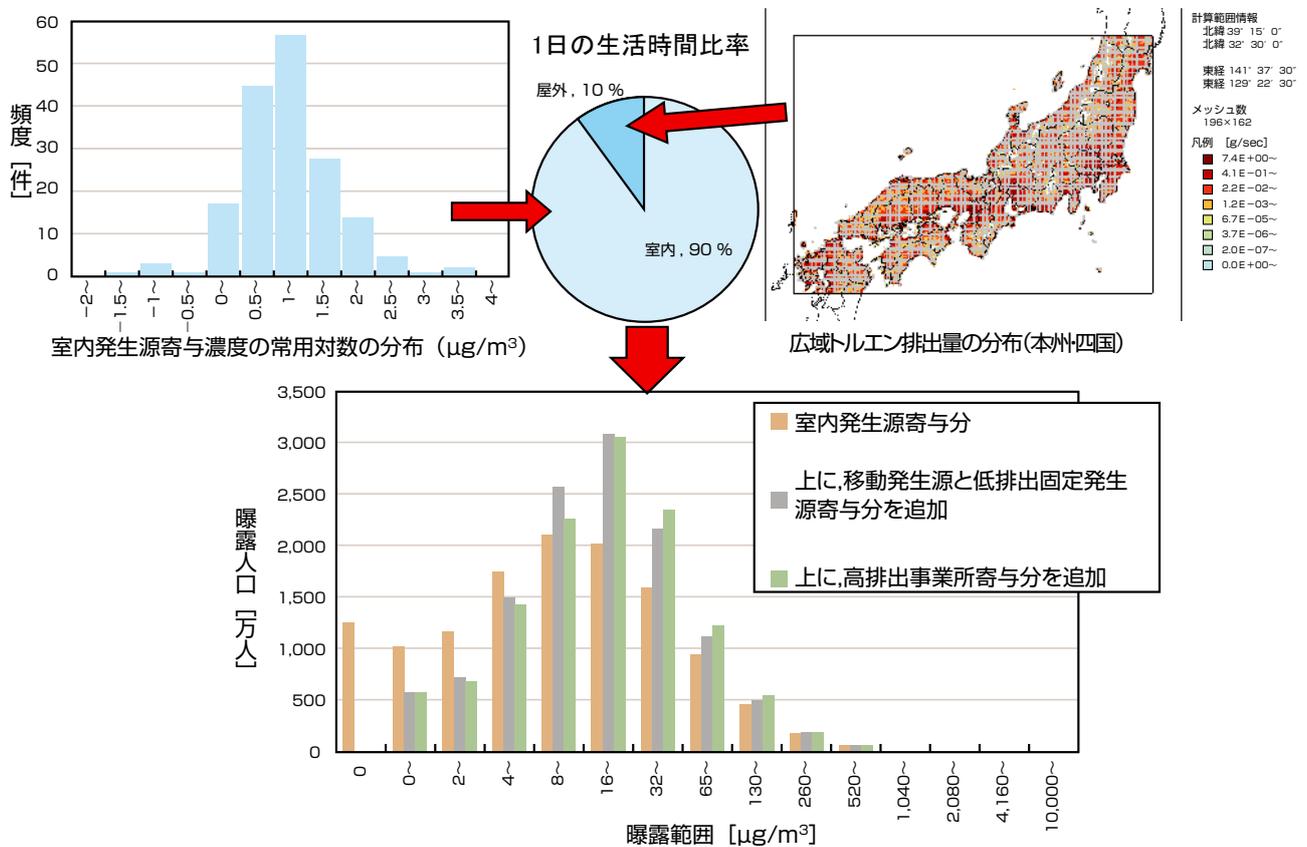


図4 日本人全体の個人曝露濃度(年間平均値)の分布  
「高排出事業所」とは年間30トン以上大気に排出している事業所を指す

種類のリスクについて同様な計算ができれば、リスクの大きさの相互比較を行うことができるので、本手法の有効性がさらに発揮される。

### 3.6 リスク削減対策の費用対効果

大気拡散モデルや用量反応関数を利用することによって、発生源からヒト健康リスクまでがつながったことで、発生源において排出削減対策を行った場合の健康リスクの削減効果をシミュレートし、「獲得 QALY」として定量的に表現することが可能となった。排出削減対策の1年あたりの費用を計算すれば「QALYを1年獲得するための費用」が計算できる。ここでは、トルエンの2001年度のPRTR届出排出量の10%を、蓄熱燃焼装置を設置することによって削減するという対策を行った場合の費用対効果を試算した。この対策による1年あたりの獲得QALYは約1.6年と推計された。蓄熱燃焼装置によるトルエン1トン排出削減費用は3.3万円(処理ガス量10万 m<sup>3</sup>N/時間)から10万円(処理ガス量7,500 m<sup>3</sup>N/時間)と推計されたため、これをPRTR届出排出量の10%に相当する約13,000トンに当てはめると、年間費用は4.3～13億円となった。以上から、「QALYを1年獲得するための費用」は約2.7～8.1億円と計算された。このような形で表された単位リスク削減費用は、異なる化学物質同士だけでなく、感染症、事故、災害といった他の種類のリスク削減対策とも比較可能であり、リスク削減の優先順位付けに有用な情報が提供できる。

## 4 考察と今後の課題

現行のリスク評価手法も最初は、環境基準値を設定したいという社会ニーズから逆にたどって、それぞれの技術要素が開発され、それらは標準的な方法として定着し、そこ

表1 トルエン曝露による日本人全体の1年あたり質調整生存年数(QALY)の損失

	質調整生存年数の損失(年)
室内発生源寄与分	159
移動発生源と低排出固定発生源寄与分	28
高排出事業所寄与分	10
合計	197

に専門分野と専門家が生まれた。そのため、リスク評価に関して社会において新たなニーズが生まれたとき、各分野の専門家は手持ちの技術要素をそのまま適用してしまうことは容易に想像できる。リスク評価のユーザー側も、専門分野の中身までなかなか吟味することができない。一度、専門分野として確立してしまえば、そこでは研究分野独自の論理で学問は自律的に発展していく。しかし、そこで生まれた最先端の研究が新しい社会ニーズを満たすことができるかどうかは自明ではない。新しいリスク評価において必要となる各分野の要素技術は、それぞれの専門分野の中からは内生的に生まれてくる必然性はないからである。

本研究では、異なる種類のリスクの間での比較、あるいは、リスク削減対策の経済効率性の評価といった新しい社会ニーズを満たすために必要なリスク評価の要素技術のそれぞれを、下流の社会ニーズの側から上流に向かって1つずつ検討し、必要な改訂を施していった。評価に用いた仮定には、それぞれの専門分野から見れば、根拠が薄いものも含まれていることも確かである。今後はこれらの課題を解決していくとともに、各分野の専門家に研究ニーズを正しく伝えることも必要である。また、本研究で採用した方法論が他の化学物質や他の種類のリスクの評価にも使えることを示していくことも課題である。

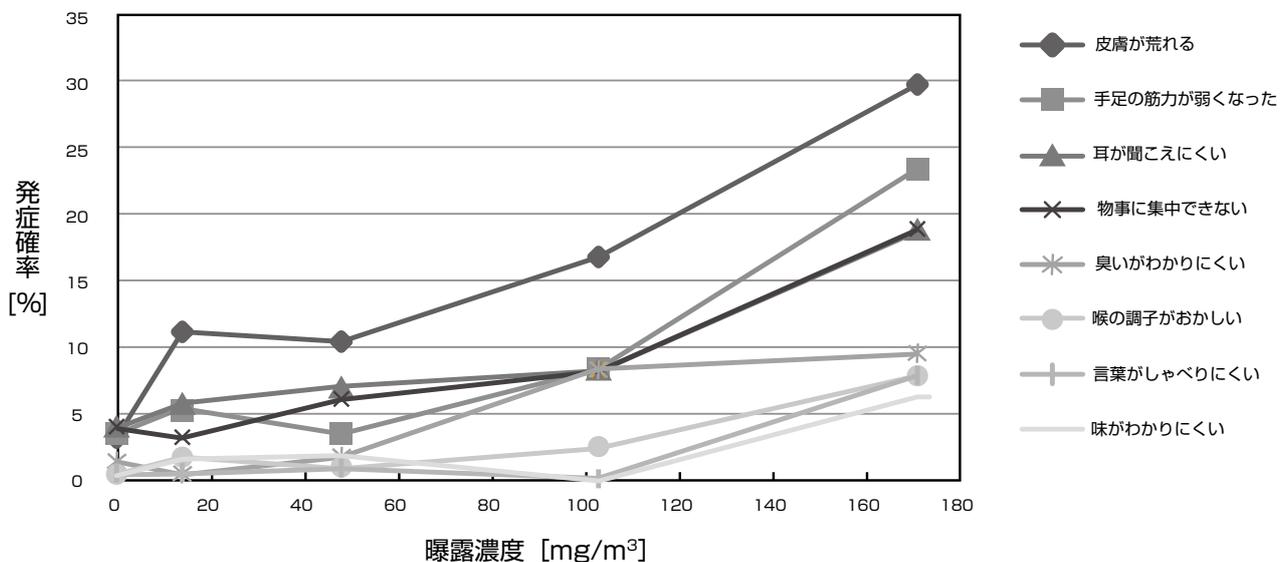


図5 自覚症状別および曝露濃度別の発症確率

リスク評価手法を常に社会ニーズに合ったものに革新していくためには、リスク評価のユーザー、つまりリスク管理を行う側が、リスク評価コミュニティに対して、積極的にニーズを訴えかけていく、あるいはリスク評価の手法について指示を出すことが必要である。リスク評価は、学際的な仕事であると言われるが、異なる分野の専門家の仕事を切り貼りするだけでは完成しない。社会ニーズに応えるというアウトプットを前提に、それに向けた首尾一貫した思考プロセスに貫かれていなければならない。

## 用語説明

- 用語1：計測値を小さい順に並べた場合に、小さい方から95% (大きい方から5%) に位置する数値
- 用語2：化学物質の摂取量(曝露量)を説明変数に、健康影響の発現確率を被説明変数とし、両者の関係を数式で表現したもの

## キーワード

化学物質、リスク評価、社会ニーズ、定量化、相互比較、費用対効果

## 参考文献

- [1] 中西準子, 岸本充生: 詳細リスク評価書シリーズ3 トルエン, 丸善, 東京 (2005).
- [2] 東野晴行, 井上和也, 三田和哲, 篠崎裕哉, 吉門洋: 曝露・リスク評価大気拡散モデル (ADMER) 全国版の開発と検証, *環境管理*, 40, 58-66(2004).
- [3] 厚生省: 居住環境中の揮発性有機化合物の全国実態調査について (1999).
- [4] 塩津弥佳, 吉澤晋, 池田耕一, 野崎淳夫: 生活時間による屋内滞在時間量と活動量: 室内空気汚染物質に対する曝露量評価に関する基礎的研究 その1. *日本建築学会計画系論文集* 511, 45 - 52(1998).
- [5] H.Ukai, T.Watanabe, H.Nakatsuka, T.Satoh, S.J.Liu, X.Qiao, H.Yin, C.Jin, G.L.Li and M.Ikeda: Dose-dependent increase in subjective symptoms among toluene-exposed workers, *Environmental Research*, 60(2), 274-289(1993).
- [6] D.Feeny, F.Furlong, M.Boyle and G.W.Torrance: Multi-attribute health status classification systems: Health utilities index, *Pharmacoeconomics*, 7(6), 490-502(1995).

(受付日 2007.9.19, 改訂受理日 2007.11.16)

## 執筆者履歴

岸本 充生 (きしもと あつお)

1998年3月、京都大学大学院経済学研究科博士後期課程修了、通産省工業技術院資源環境技術総合研究所安全工学部を経て、2001年4月より、独立行政法人産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センター、リスク管理戦略研究チーム主任研究員。主な著作は『環境リスクマネジメントハンドブック』(編著、朝倉書店、2003年)、『詳細リスク評価書シリーズ3 トルエン』(共著、丸善株式会社、2005年)。

## 査読者との議論

### 議論1 質調整生存年数と健康寿命との関係

コメント・質問 (小野 晃)

異なる種類のリスクを、人の寿命の損失と言う共通評価軸の上で評価し、それらを相互に比較可能にしたことは大きな成果であると思います。これまでリスクに関する議論は、「絶対に安全である」とか、「事故は起こりえない」といった極端な理解に流れる傾向がありましたが、本手法が普及することによって、より合理的なリスクの判断がなされ、社会全体として柔軟な対策が可能となることを期待します。

図5で取り上げている自覚症状を見た場合、今回取り上げた共通評価軸は一般に「健康寿命」と言われているものと同じと考えてよいでしょうか。

回答 (岸本 充生)

健康寿命は、健康上の問題で日常生活に影響がない期間を指します。図3で言えば、生活の質(QOL)が1から大きく離れ始めるところを指しています。QOLが1よりも有意に下がったらそれをゼロと同等とみなしていることとなります。QOLがゼロになるところが通常の寿命です。この場合は、QOLがゼロでない(死亡していない)限り、QOLを1とみなしていることとなります。そういう意味では、本論文で採用している質調整生存年数(QALY)は、健康寿命と通常の寿命のちょうど間に位置し、健康状態を最も的確に反映した指標であると言えます。

### 議論2 他のリスクとの比較可能性

質問 (小野 晃)

本評価手法は、たとえば地震に対する原子力発電所の事故のリスクにも適用できるのでしょうか。またそのリスクを化学物質のリスクと共通の評価軸上で比較することは可能でしょうか。

さらに本評価手法は、鳥インフルエンザのような国境を越えたリスクや、グローバルな温暖化による地球環境の破壊のリスクにも適用できるのでしょうか。

回答 (岸本 充生)

質調整生存年数(QALY)は、死亡影響(死亡することによって余命を損失する)と非死亡影響(死亡には至らないが生活の質が下がる)を合わせたリスク指標であるので、ヒト健康リスクへの影響に関しては、原子力発電所の事故リスクも含めて、ほとんどのものに適用可能です。

多くの場合、リスクはワーストケースを想定して描かれます。どれくらいワーストであるのかもリスクごとにバラバラです。そうした場合に、相互の比較は困難です。本評価手法の特徴は、1) リスクを質調整生存年数(QALY)という共通指標で表現したこと、2) 中央推計値(期待値)ベースの評価を行ったこと、です。この2つの条件を満たせば、どのようなリスクとも比較可能です。

国境を越えたリスクに対しても、適用可能ですが、集計値だけでなく、リスクを受ける主体が誰であるかがより重要になってくると思われます。地球温暖化のような将来世代への影響については、時間を越えたQALY損失(計算できたとして)をどのように集計すべきかについては議論の余地があります。

### 議論3 質調整生存年数の結果の不確実性

コメント・質問 (小野 晃)

図2に示されているように、右側の新しい社会ニーズを満たすべく左側に向かって研究のシナリオを作成していく作業が、本研究では重要であったと思います。その結果新たな要素技術の開発が必要であることが徐々に明らかになったこと自体が、非常に大きな成果だと思います。

本研究は、それぞれの要素技術に関して新たな開発に着手しつつも、それがまだ完了していない(結果が必ずしもまだ十分でない)状況にあるのではないかと想像します。また評価の過程の中で大胆な仮定を置いてもいます。そのような状況の中で、ヒト健康リスクの定量化とリスク

比較／費用対効果の一応の「結論」を出さざるを得なかったと思います。

このように入力するデータや情報が不十分な場合には、最終的な結論に一定の不確かさをもたらすと思いますが、その不確かさを評価し、提示することは可能でしょうか。それができるとユーザーとしてはこれらの「結論」をどのような場面に使うべきか柔軟に対応できると思いますがいかがでしょうか。

回答（岸本 充生）

今回の試みは、社会ニーズから出発して、それを満たすためにひとりの手続きを完了させることが目標でしたので、おっしゃるとおり、多少の無理をしても数字を出すことを優先しました。そのため、数字自体の不確かさ、つまり分布の幅、に関しては十分考察ができていません。今後は不確かさ解析を行い、数字の確からしさについての情報を加えたいと考えています。それと同時に、情報量の少ない場合でも同様の解析が可能となるような方法を開発していきたいと考えています。

#### 議論 4 論文のジャーナルへの適合性

コメント（神本 正行）

バックキャストと QALY の採用によって新たなリスク評価手法の提案とトルエンへの適用を行ったこと、評価の各プロセスで様々な工夫を積み上げて有益な結果を得たことが記述されており、本ジャーナルの趣旨に合致した内容と思います。

#### 議論 5 他のリスクとの比較可能性

質問（神本 正行）

今後の課題に「本研究で採用した方法論が他の物質や技術の評価にも使えることを示していくことも課題である。」とありますが、推定値も含めデータが得られれば他の物質にも十分適用可能ではないでしょうか。

回答（岸本 充生）

データが得られれば適用可能です。統計データがそろっているリスク、例えば、自動車事故の場合では、健康影響の大きさを QALY を用いて示すことは現時点で可能です。化学物質に関しては、情報が少ない場合でも不確かさの大きさを含めて、比較可能となるような方法を現在進行中のプロジェクトで検討中です。

# 個別適合メガネフレームの設計・販売支援技術

— あなただけの製品をだれにでも提供できるビジネス創成を目指して —

持丸 正明\*、河内 まき子

あなただけに適合する製品を、だれにでも提供できるようなユニバーサルデザインビジネスの創成をグランドチャレンジとして、メガネフレームを具体例に、効率的にサイズ分類された製品の中から、ユーザ個人の顔のサイズに適合し、かつ、個人の感性に適合するフレームを選び出すシステムの研究について述べる。顔形状計測、サイズ適合、感性適合の要素技術は、すべて頭顔部相同モデルデータベースを基盤として統合した。このシステムが実店舗で運用されれば、それによりデータベースが拡充し、その統計データが製品設計・販売に再利用されるという持続的な循環が産み出される。

## 1 はじめに

ユニバーサルデザインの考え方のひとつに「One Fits All」というものがある。あるひとつの製品ですべてのユーザをカバーするという設計思想である。不特定多数のユーザが使いうるもの、たとえば、公共空間や公共物などはこの設計思想に適している。一方で、「One Fits All」はものづくりメーカーにとっても魅力的な考え方である。1種類の製品を大量生産すれば多様なユーザニーズをカバーできるからである。しかしながら「One Fits All」がすべての製品に当てはまるわけではないことも、また明らかである。たとえば、1種類・1サイズの靴で、すべてのユーザニーズに適合するのは極めて難しい。このように、特定個人が使用するような製品について、ユーザは「自分の体つきや使い方、個性」に適合することを強く求め、その製品が「他人の体つきや使い方、個性」にも適合するかどうかには興味がない。むしろ、公共物などに「One Fits All」のものが増える分だけ、個人使用物に対する個人適合への要望が強くなり、個人適合製品が価値の高いものと認識されることになる。

職人の技量とノウハウ、経験によって個人に適合する製品をつくる方法は大量生産よりも長い歴史がある。しかしながら、その方法は職人個人の技量や経験に依存しており、多様なユーザに対応する高価値な個人適合製品を、迅速かつ大量に提供する方法にはつながらない。そこで、製品の適合性に関係する人間特性を明らかにし、その人間特性の個人差に対して工学的手段を適用することで、個人適合製品を迅速かつ大量に提供する方法を創成することが本研究の目標である。すなわち、本研究のグランドチャレンジは「あなただけに」適合する製品を「だれにでも」提供でき

る新しいユニバーサルデザインビジネスを創り出すことにある。これは「One Fits All」を越えるユニバーサルデザインの設計思想を実現することにほかならない。

## 2 研究シナリオ

個人に適合する製品を提供する手段にはいくつかの方策があり得る。第一は、ユーザをグループ化してグループごとにサイズを用意する手段 (Population Grouping)、第二は、製品に多様な調節機能をつけユーザがこれを使って調整することで適合させる手段 (Adjustable Product)、第三は、ユーザの個人特性に応じて市販製品 (第一や第二の手段で用意された製品) から適切なものを選定・推奨する手段 (Finding Well-fitting Product)、第四はユーザの個人特性にあわせて製品全体あるいはパーツなどを設計・製造する手段である。第四の手段は伝統的な個別対応と似ているが、これを工学的手段で実現する (Mass Customization)。それぞれの手段の特徴を図1に示す。参考として旧来の大量生産 (Mass Production) と伝統的な個別対応生産 (Traditional Customization) を両端においた。図中の線は、それぞれ製品のコスト、提供に要する時間、ユーザの満足度を示している。あくまでも手段の得失を説明するための概念図であり、スケールに定量的な意味はない。

Population Groupingは靴や衣料品などで行われている手段であり、ワンサイズ商品に比べると生産・流通コストが多少かさむが、店頭在庫で対応できる場合が多く、提供に時間を要しない。Adjustable Productは、自動車シートやオフィスチェアなどに見られる手段で、調整機能の分だけ製造コストがかさむ。いずれにせよ、これらの手段は

適合するサイズを選択や調整をユーザ自身の判断に委ねる手段であり、ユーザの判断が適切でない場合には十分な適合性能を発揮できない。このことを示す筆者らの研究を紹介する<sup>[1]</sup>。十分なサイズバリエーションのあるシューズを用意し、その中からユーザ自身が「もっとも適合する」と判断するシューズを選ばせる実験を行った結果、足の細いユーザはゆるめのシューズを選び、足幅の広いユーザはきつめのシューズを選ぶ傾向があることが明らかになった。シューズの足囲サイズバリエーション(D、E、EEなど)は通常の市販製品には用意されていないため、ユーザは標準足囲サイズ(E)のシューズの適合感に「慣れて」しまったためと考えられる。実際にユーザが「適合している」と判断したシューズは、きつめであれば血行を阻害し、ゆるめであれば、靴内ずれが増大して衝撃吸収性能が低下することが確かめられている。

製品の選択をユーザ任せにせず、店頭でユーザの特性を測り適切な商品を選定・推奨するようなサービスを含めた手段が、第三の Finding Well-fitting Product である。サービスが付加される分だけ、第一、第二の手段よりコストがかさむ。また、多様な商品をすべて在庫として用意できない場合もあり、提供には商品取り寄せの時間を要する。Mass Customizationは、インソール（靴の中敷き）の個別対応などに見られる手段で、店頭でユーザの特性を測り、そのユーザ特性に応じたパーツをその場で設計・製造して提供する。パーツの設計・製造に相応の時間がかかる場合があり、提供には時間を要する。また、専用の製造工程を持つ必要があり、その分、コストもかさむことになる。

ユーザの満足度は、完全な個別対応部分を持つ Mass Customization が最も高くなると想定されるが、このシナリオをいきなり実現するのは困難である。それは2つの障壁による。第一は提供者側の投資の壁である。Mass Customizationを実施するには、製品の一部を個別対応可能なパーツ構成にする必要があり、さらにそのパーツを迅速かつ低価格に製造する手段を準備しなければならない。

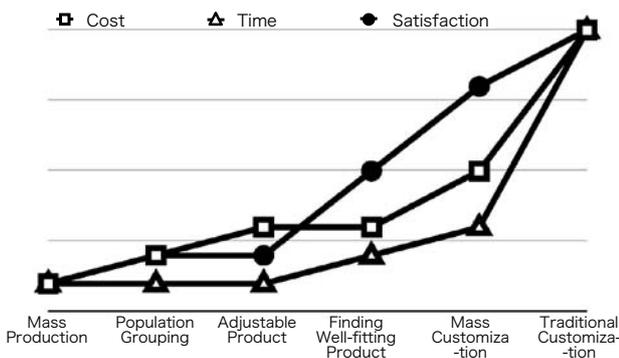


図1 個人に適合する製品の提供手段

これらの基盤整備に対する投資額は小さいものではなく、提供者側で容易に決断できるものではない。第二はユーザ側の投資の壁である。Traditional Customizationで製造された商品に高い投資をするユーザ層は存在する。一方で、Mass CustomizationというMass Productionより高価な商品を購入するユーザ層は顕在化していない。この市場を顕在化するには、Mass Customizationより低額の投資で、Mass Productionより高度な適合感を体験させることが有効な戦略であると考えている。そこで、本研究ではMass Customizationの前段階である Finding Well-fitting Productを具現化することで、ユーザ体験を実現することを目標とした。情報技術を活用した Finding Well-fitting Productシステムは、ユーザの人体特性と商品選択行動をログ情報として蓄積でき、その情報がMass Customizationの基盤ともなりうる。ユーザ体験は、ユーザの投資意欲形成に繋がり、それによって提供者側の投資意欲も高くなる。

本研究は、メガネフレームの個別適合性向上を具体例として、Finding Well-fitting Productを具現化するための要素技術の開発と技術の連携を目的とする。メガネフレームなど眼鏡矯正具類の市場規模は年間約1千億円（2002年度）で、海外輸出の比率が高く国際競争力のある産業である。メガネフレーム販売店舗は全国で15,000店ほどになる。これらの店舗で運用するシステムイメージとそれを構成する要素技術を図2に示す。ユーザはメガネフレーム店舗で、自分の顔写真を複数方向から撮影する。この多視点画像からユーザの顔の3次元形状モデルを構築し、その寸法情報に基づいて、あらかじめ用意されたサイズグループのどれに最も近いかを判断し、適切なサイズのメガネフレームを選定する。このようなシステムを具現化するための要素技術として、店頭で簡易に顔を計測するための計測技術（簡易計測）、さまざまな顔形状に適合するメガネフレームのサイズバリエーションを設計し、個人に適合するサイズを推奨す

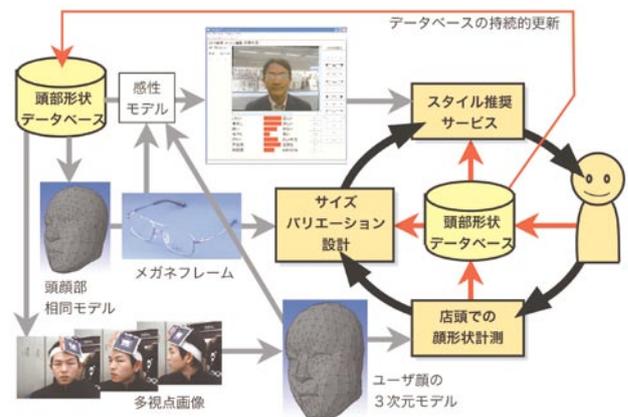


図2 個別適合メガネフレームの販売支援システムと要素技術

る技術（サイズ適合）が必要となる。図2ではさらに、自分のメガネをかけたまま、違うメガネをかけた自分を見る仮想装着とユーザ自身の顔形状とメガネフレームの組合せが第三者に与える印象を提示することで、ユーザの感性に適合するフレーム選択を支援する技術も付加している。このようなスタイル推奨（感性適合）は、Traditional Customizationにおいてノウハウとして付加されていたものである。ここでは、これを形式知化して実現する。本研究では、簡易計測、サイズ適合、感性適合の3つの要素技術を頭顔部形状データベースを基盤として開発するとともに、図2の右側のシステム運用サイクルを通じて基盤データベースが持続的に拡充していくシナリオを考えた。本論文では、基盤となる頭顔部形状データベースと、サイズ適合、簡易計測、感性適合の3つの要素技術開発について述べ、それらの要素技術の連携、産業的有効性について検討し、今後を展望する。

### 3 技術要素

#### 3.1 頭顔部相同モデルとデータベース

本研究で用いられる技術要素は、頭顔部相同モデルとそのデータベースを共通技術基盤とする。ここでは、まず、人体形状の計測と相同モデルに関する一般的な考え方を述べ、その後、頭顔部形状計測技術と頭顔部相同モデルについて述べる。

人体形状計測技術としては、体表面にレーザー光や可視光によるパターンを投影し、その反射光を投射方向と異なる方向のカメラで撮影して三角測量の原理で反射点の3次元位置を計算する方法が一般的である<sup>[2]</sup>。このような計測技術によって得られるデータは、人体表面上の大量の（通常は数十万点から数百万点の）座標値と、数十点の解剖学的特徴点座標値である。解剖学的特徴点は、個人間を対応付ける生物学的な特徴点であり、形状計測に先立って専

門の技量を持つオペレータが被験者の体表面を触察してマーキングした点である。人体形状計測装置では、このマーキングした点の座標値を別途取得できるようになっているものが多い。このようにして得られた人体形状データのうち、個人間で座標点の対応がついているのは解剖学的特徴点のみであり、体表面データ点座標は個人ごとにデータ点数が異なっている。それゆえ、形状データの個人間比較は容易ではなく、平均化などの統計処理も難しい。そこで、すべての個人の人体形状を解剖学的に対応付けられた同一点数、同一相幾何構造の多面体（ポリゴン）で表現する方法を提案した。これを人体相同モデルと呼ぶ。人体相同モデルではk個の座標列で形状を表現できるため、k×3の要素を持つ頂点ベクトル $\mathbf{T}$ で1つの個人形状が記述される。m人分の人体相同モデルデータがあれば、平均頂点ベクトル $\bar{\mathbf{T}}$ は容易に計算できる。また、頂点ベクトル $(\mathbf{T}_1 \sim \mathbf{T}_m)$ で構成される行列 $\mathbf{M} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_m]^T$ を主成分分析すれば、固有ベクトル $\mathbf{P}$ が取得できる。m人のデータは固有ベクトル空間上の主成分得点 $\mathbf{A}_1 \sim \mathbf{A}_m$ として表現できる。主成分得点 $\mathbf{A}$ の上位n成分で、十分な説明率が得られたとすると、これは、m人の人体形状の個人差が、n次元の固有ベクトル空間に圧縮して表現されたことになる。このような個人差の圧縮は、製品のサイズ適合を考える場合にはサイズバリエーションの効率化として有効な手段となるだけでなく、固有ベクトルと主成分得点を用いて任意の人体相同モデルを復元することも可能となる。 $\mathbf{P}(n)$ 、 $\mathbf{A}(n)$ をそれぞれ固有ベクトル $\mathbf{P}$ 、主成分得点 $\mathbf{A}$ の上位n成分とすると、人体相同モデルは

$$\mathbf{T} = \bar{\mathbf{T}} + \mathbf{P}(n) \times \mathbf{A}(n) \quad (式1)$$

で計算できることになる。

頭顔部の形状計測については、レーザー光やパターン光投影を用いる市販製品がある。しかしながら、市販製品には、耳の後ろの形状が計測できない、解剖学的特徴点が取得できない、相同モデルが自動的に構成されないなどの技術的課題があった。筆者らはこれを解決するために、可視光を投影し、12台のカメラによって死角を低減して耳裏形状まで計測できる頭顔部形状計測装置を独自開発した<sup>[3]</sup>。この頭顔部形状計測装置を用い、52名の日本人男性（20歳代）の頭顔部形状を計測した。得られたデータは約百万点のデータ点座標値と、データ点のカラー情報、および、約80点の解剖学的特徴点座標値で構成される（図3(a)）。ここでは、これらのデータに基づき、458頂点、838ポリゴンからなる多面体で外耳形状を含まない頭顔部全体形状を表現した（図3(b)）。これを頭顔部相同モデルと呼ぶ。

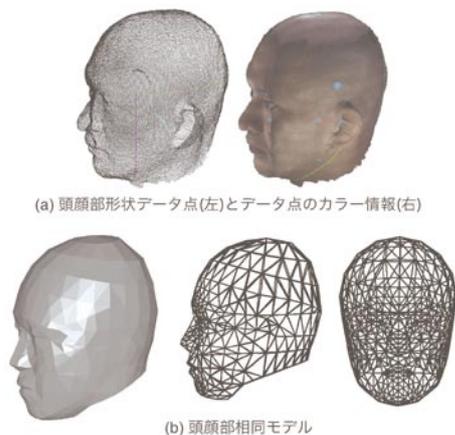


図3 頭顔部形状データと相同モデル

### 3.2 サイズバリエーション設計<sup>[4]</sup>

メガネフレームにもサイズバリエーションが存在する。ただし、従来のサイズバリエーションはメガネの玉(レンズ)の幅とつる(テンプル)の長さが比例的に変化するという単純なもので、実際のユーザ層の顔サイズバリエーションに適合していなかった。そこで、図4の頭顔部相同モデルのうち、メガネフレームが適合する中顔部211頂点からなる中顔部相同モデル(図4)を用いて、個人差を効率的にカバーするサイズバリエーション設計を行った。個人差を効率的にカバーするためには、3.1節で述べたように主成分分析を用いて個人差を固有ベクトル空間に圧縮する方法がある。ただし、主成分分析法は線形空間への圧縮であるため、圧縮効率は必ずしも高くない。そこで、ここでは非線形な圧縮を可能とする多次元尺度法を利用した。個人間の形状の違いを表すために、i番目の個人の相同モデルとj番目の個人の相同モデルとの対応する頂点間の距離の総和として形態間距離 $D_{ij}$ を式2のように定義した。

$$D_{ij} = |T_i - T_j| \quad (式2)$$

ここで、 $(T_i, T_j)$  はそれぞれi番目の個人の頂点ベクトル、j番目の個人の頂点ベクトルを意味する。m人のデータがある場合、 ${}_m C_2$ 個の形態間距離 $D_{ij}$ が計算され、 $m \times m$ の頂点ベクトル間距離行列が得られる。この距離行列を多次元尺度法で分析すれば、距離関係を再現する多次元空間における布置 $Q_m$ が得られる。中顔部相同モデルの場合、多次元尺度法であれば5次元解で95%を越える説明率が得られる。主成分分析で同等の説明率を得るには15成分以



図4 中顔部相同モデル

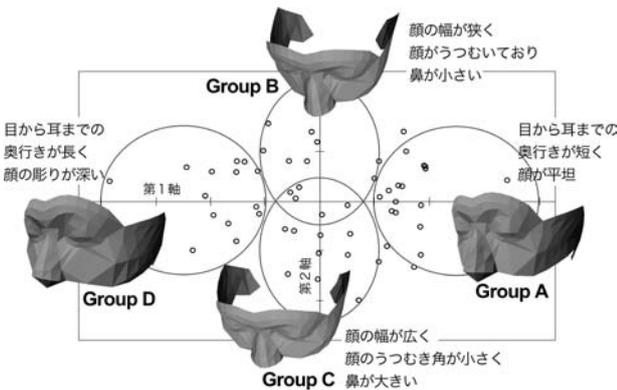


図5 日本人男性の中顔部形状分布図

上が必要であることと対比すると、多次元尺度法の圧縮率が高いことが分かる。多次元尺度法で計算した5次元解のうち、第1、第2次元の散布図を図5に示す。第1軸を頭部寸法の重回帰式で定式化した結果、第1軸は顔の前後方向の長さや顔面の彫りの深さの特徴を示していることがわかった。同様に、第2軸は顔の左右幅と顔面のうつむき方向の傾斜特徴を示している。この2軸で日本人の顔形状特徴の83%を説明できる。なお、第3軸は鼻形状、第4軸は瞳孔間距離と顔の幅の関係を示しており、メガネフレームの適合性とは強く関係しない。

生産・流通の採算性から男性のみで4つのサイズバリエーションを用意することと決め、日本人の顔形状分布を効率よくカバーするように、個人差の最も大きい第1軸を3分割、そのうち人数の多い中央のグループを第2軸に分割することで図5中に示した4つのサイズグループを設定した。それぞれのグループを代表する平均形状を計算し、そのデジタル顔形状データに基づいて適合フレームを設計、試作した(図6)。試作フレームの有効性を検証するために、顔形状データベースの被験者とは異なる男性被験者38名(平均年齢24.5歳)の被験者について、15箇所の中顔部寸法に基づく重回帰式から分布図上の布置を推定してサイズグループを決定し、そのサイズグループに適合するフレームと既存フレームをかけさせる評価実験を行った<sup>[4]</sup>。38名の被験者は4つのグループにほぼ均等に散らばるように選定した。該当するグループの平均形状と個人の主要寸法の差は±3mm以下であった。実験では、左右からの圧迫力計測、顔を振ったときのメガネと顔の相対ずれ量計測、主観評価を実施した。この結果、試作した適合フレームは既存フレームに比べて高いフィット感を与えることが分かった( $p < 0.01$ )。また、適合フレームは既存フレームより左右の圧迫力が小さく( $p < 0.01$ )、圧迫力が低くても相対ずれ量には差がみられないことが確かめられた。このことから、ユーザ個人が4つのサイズグループのどこに近いかを判別することで「左右からの締めつけ力が小さくとも相対ずれが起きず、フィット感が良好な」フレームを提供できることが分かった。

### 3.3 多視点カメラ画像からの頭顔部3次元形状復元<sup>[5]</sup>

ユーザ個人の頭顔部寸法15箇所計測することで、上記の重回帰式によりユーザ個人が形状分布図のどこに位置するかを知り、適切なサイズのフレームを提供できることが分かった。しかしながら、この頭顔部寸法の計測には頭顔



図6 試作した適合メガネフレーム

部の解剖学的特徴点の触察など専門的な技量が必要であり、実際の店頭での運用には問題があった。また、頭顔部寸法データのみではユーザ個人の3次元形状復元が難しく、図2のようなコンピュータグラフィクス表示などにも利用できない。また、3.1節で使用した頭顔部形状計測装置は大型かつ高額で店頭での利用には適さなかった。そこで、本研究では従来の形状計測技術とは発想を異にする、新しい人体形状計測技術の開発を試みた。

3.1節で述べたとおり、人体形状を相同モデル表現して主成分分析することで、人体形状の個人差を低次元空間で表現できるようになる。これは、個人の頭顔部形状特性を記述するのに、数十万点から数百万点の座標値情報は必ずしも必要ではなく、数十個の主成分得点があればよいことを意味する。そこで、相同モデルから得られた頭顔部平均形状を初期値とし、個人差を記述するための主成分得点を未知数として、主成分得点によって合成された3次元頭顔部形状と多視点から撮影した画像の画像特徴とのずれを評価し、両者の誤差が小さくなるように主成分得点を最適化する技術を開発した。あらかじめ光学校正された多視点のカメラで顔画像を撮影すれば、その顔画像と整合する3次元頭顔部相同モデルが生成できることになる。具体的には、3.1節の式1のA(n)を未知数として頭顔部3次元形状を合成し、これを多視点カメラの画像平面に投影し、多視点カメラ画像から得られる形状特徴（輪郭エッジ、顔パーツエッジ）と投影した頭顔部3次元形状の形状特徴の一致度を評価した。この形状特徴の差を最小化するような主成分得点A(n)を最適化計算することで、多視点カメラ画像にもっともフィットする頭顔部3次元形状を得た（図7）。3.1節で述べた頭顔部形状計測装置を用いて計測した頭部ダミーを、多視点カメラによる計測結果と比較した結果、誤差は平均で2 mm程度であった。

この技術は、正しくは形状計測技術ではなく、相

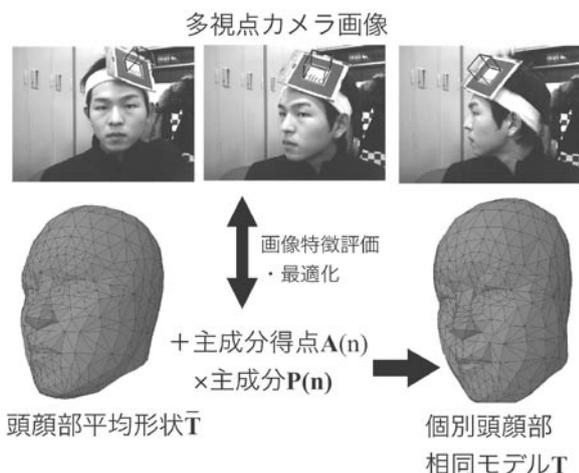


図7 多視点カメラ画像からの頭顔部形状復元

同モデルデータベースに基づく多視点カメラ画像からの人体形状復元技術である。結果的には多視点カメラ画像から2 [mm] の精度で頭顔部形状相同モデルを取得していることになり、形状計測技術と同様の機能を持つ。カメラと光源との三角測量を行っているわけではないため計測対象にパターン光を投光する必要がなく、複数台のカメラを設置し、同時にシャッターを切ることで瞬時に計測を完了できる。得られるデータはすでに相同モデルであり、すぐにそこからサイズ適合のための情報を得ることができる。また、計測対象の一部がカメラの死角になったとしても形状データが欠落することはない。

### 3.4 感性モデルによる印象推定<sup>[6, 7]</sup>

3.2節で構成したメガネフレームを、3.3節で開発した計測技術を用いて取得したユーザ個人の頭顔部形状に応じて提供することでサイズ適合を実現できる。ここではさらに、顔のかたちとメガネフレームのかたちの組合せが与える印象を評価するための感性モデルの要素技術開発について述べる。

メガネをかけた顔が与える印象の表現には、言葉を用いることとした。事前アンケートで抽出した42個の感性用語に関する予備実験の結果を因子分析し、印象を表現する対語4組「優しい-こわい」「涼しい-暑苦しい」「明るい-暗い」「若い-老けた」を抽出した。これに、共同研究企業が独自に実施したマーケット分析結果から得た「おしゃれな-ダサイ」「自然な-不自然な」「おおらかな-神経質な」の3つの対語組を加えた計7組を用いた。これらの感性用語の印象得点が、顔形状とメガネ形状の関数としてモデル化できるという仮説にしたがい、異なる顔に異なるメガネをかけた画像に対する印象得点を実験から取得し、そのデータに基づいて上記関数を同定した。

被評価者となる青年男性の顔画像には、頭顔部相同モデルデータベースから日本人の顔の個人差をカバーするように合成した仮想顔画像を用いた。3.2節で用いた多次元尺度法の4次元各軸上で±3標準偏差の布置、および、その中間布置に位置する頭顔部相同モデル形状を合成し、これを前額面に投影して18個の2次元顔モデルを得た。3.1節で述べた頭顔部相同モデルには、印象に大きな影響を与える眉や口唇が含まれていなかったため、頂点色情報を有する特定個人の頭顔部3次元形状オリジナルデータを頭顔部相同モデルに一致するように変形させ、前額面に投影して2次元正面画像を構成した。この正面画像の色情報を参考として、頭顔部相同モデルを前額面に投影した2次元モデルに、眉や口唇を加えた2次元正面顔モデル（図8）を構成し、これに別途入手した青年男性の平均テクスチャ<sup>[8]</sup>をマッピングして、18個の仮想正面顔画像を用意した。メガネは素材・形状で分類した12個を用いた。また評価者

1人当たりの回答時間を30分以内にするためにメガネをかけた顔画像216個（顔18×メガネ12）のうち18個を選んだ画像セットを12パターン選定し300名の青年女性に評価させた。評価者にはランダムに選ばれた1パターンを提示し、インターネットを使ったWebアンケートで評価実験を行った。評価方法はVisual Analog Scale法を採用し、評価者は△マークをドラックして得点入力をする（図9）。得られた印象得点を顔の形状特徴とメガネの形状特徴から推定するモデルを、重回帰分析（ステップワイズ法）によって構成した。目的変数に感性用語7組の得点、説明変数に顔の実寸・示数100個、メガネフレーム実寸・示数25個、メガネ玉型主成分得点5個を用いた。すべての感性用語において重相関係数0.784～0.901を得ることができた。重回帰式の変数には、すべての用語で顔寸法、メガネフレーム実寸・示数、メガネ玉型主成分得点が含まれていた（表1）。

実験で得られた感性モデル（重回帰式）の推定誤差ならびに実写顔画像への適用可能性を検証するために、(1) 実験で使用しなかった仮想顔 (2) 平均に近い仮想顔 (3) 変形した実写顔 (4) 実験で使用した画像にメガネを合成したメガネつき顔画像を12個用意した。このメガネつき顔画像を59名の評価者に提示して、同様のWebアンケートシステムを用いて印象得点を取得した。(4)の結果から検証実験の評価者が評価実験と同質であることを確認した上で、(1) (2)の結果を分析した。残差分析による推定誤差は、いずれの感性用語についても±10%程度であった。また(3)の実写顔画像での推定誤差も±10%程度の範囲に入り、実

写画像への適用も可能であることが確認できた。

### 3.5 感性モデルによるスタイル推奨システム

3.4節の感性モデルを組み込んだスタイル推奨システムを開発した。これは、図2上方のスタイル推奨部分に特化したもので、2次元のシステムとなっている。PCに接続されたUSBカメラから取得したユーザの正面顔画像から、図8の2次元正面顔モデルを自動的に構成する。ここでは、別途計測したユーザの瞳孔間距離を入力することで、画像の実寸換算を行っている。実寸換算はユーザの座位置とカメラの位置関係を事前に校正しておけば、あえて入力する必要はない。システムにはあらかじめ3.4節の実験に用いた12個のメガネフレームの画像と形状データが登録されており、ユーザの2次元正面顔モデルが得られれば、その顔寸法・示数と、登録されているメガネフレーム実寸・示数、メガネ玉型主成分得点から、即座に12個のフレームとユーザの顔を組み合わせ合わせた場合の印象得点が計算される。12個のメガネフレームの印象得点を相対得点化し、メガネフレーム画像と顔画像の合成画像とともに画面に提示した（図10）。

## 4 要素技術連携のポイント

本研究の目的は、メガネフレームの個別適合性向上を具体例として、Finding Well-fitting Productを具現化するための要素技術の開発と技術の連携、統合を実現することである。ここでは、図2のようなイメージを具現化すべく、頭顔部形状に適合するメガネフレームのサイズバリエーションを設計する技術、店頭でユーザ個人の頭顔部形状を取得す

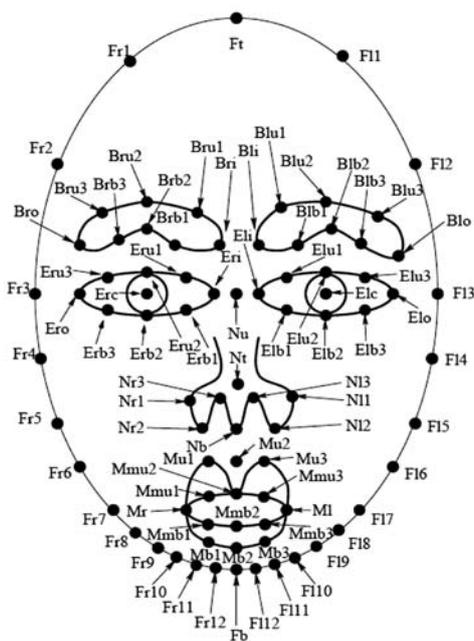


図8 2次元正面顔モデル

メガネの感性評価アンケート 17



左端のこぼと右端のこぼが対義語になっています。この顔かこのメガネをかけた写真は、左右のどちらのこぼに、どの程度当てはまると感じますか?どの程度当てはまると感じる位置に▲を移動して下さい。

明るい |-----▲-----| 暗い  
 自然な |-----▲-----| 不自然な  
 涼しい |-----▲-----| 暑苦しい  
 おしゃれな |-----▲-----| ダサい  
 優しい |-----▲-----| こわい  
 おおらかな |-----▲-----| 神経質な  
 若い |-----▲-----| 老けた

次へ進む

図9 Webアンケート画面

表1 感性モデル（重回帰式）に含まれる変数個数

	相関係数	顔寸法	メガネ寸法	玉型PCA
優しい—こわい	0.892	11	3	1
涼しい—暑苦しい	0.901	8	5	2
明るい—暗い	0.821	8	1	1
若い—老けた	0.784	8	3	2
おしゃれな—ダサい	0.834	5	6	2
自然な—不自然な	0.871	5	3	1
おおらかな—神経質な	0.863	9	1	1

る技術、さらに、顔形状とメガネ形状の情報からその組合せが与える印象得点を推定する技術を開発した。3章で述べた要素技術は、いずれも同一の頭顔部相同モデルとデータベースに基づいており、オフラインのデータレベルでは統合を実現している。また、3.5節で述べたとおり、技術の一部はデモンストレーションできるシステムとして完成している。

これらの要素技術の連携において、もっとも重要な基盤は頭顔部相同モデルとそのデータベースにある。フレームのサイズバリエーション設計も、多視点カメラによる頭顔部形状計測も、また、感性モデルもすべて頭顔部相同モデルとデータベースに基づいており、個々の技術と頭顔部相同モデルのデータベースを併せ持たなければ、システムは稼働しない。事実、3.2節で述べた多視点カメラによる頭顔部形状計測技術は、別の計測技術によってあらかじめ測られたデータベースがなければ計測ができない。この点で技術としては不完全に見えるが、逆に、データベースをもっている事業者にとっては、データベースの優位性を活かすことができる技術と言える。すなわち、本研究で開発した要素技術は、いずれも頭顔部相同モデルデータベースを必要とするもので、それは、データベースを有する事業者の優位性を確保するという事業戦略に基づくものである。

本研究のシナリオ自体も、この要素技術の選択の規範となった事業者の優位性をさらに高めるものとなっている。事業者が、本研究で開発した要素技術の統合システムを実際に店舗に設置して運用すれば、事業者は販売サービスを通じて、大量の顧客の頭顔部3次元相同モデルを蓄積していくことができる。これは、次のメガネフレーム設計におけるサイズグループ分類に活かせるだけでなく、より信頼性の高い多視点カメラ計測の実現にも繋がる。



図10 感性モデルによるスタイル推奨システム

## 5 評価と展望

個々の要素技術の精度、信頼性については3章各節で述べたとおりである。ここでは、本研究の産業的・社会的有効性について論じる。3.2節で述べたサイズバリエーション設計技術は、4つのサイズバリエーションとサイズ適合を具現化した製品として共同研究先の企業から市販され、その後も、同企業が他の製品群にサイズバリエーションの理論を適用しており、産業的な有効性が認められているものと考えられる。3.3節で述べた多視点カメラ画像からの頭顔部3次元形状復元は、機能的には形状計測技術と同様であり、顔部にレーザー光などを投光することなく、高速に隠れなく頭顔部形状を取得できる点で、従来のパターン光投影式の人体形状計測技術よりも優れている。取得できる形状の精度は2 mmで、従来技術の精度0.5 mm<sup>[3]</sup>よりも劣るが、サイズ適合や感性適合の目的であれば十分な精度である。システムは多数台のデジタルカメラだけで構成でき、プロジェクターとカメラの精密な配置と時間制御を必要とする従来技術よりも省スペースで低価格なシステム構築が可能となる。顔に投光しない、省スペースで低価格である、高速である、データの欠落がなくすぐに相同モデルが取得でき、サイズ適合や感性適合に利用できるという特徴は、店頭で設置する計測システムとして、従来技術に勝る大きな優位性であり、産業的な有効性が高い。3.4節で述べた感性モデルとそれを実装したシステムは、研究室でのデモンストレーション運用実績しかないが、システム体験者の反応は良好であり「メガネフレーム選びが楽しい」というコメントが得られている。

サイズバリエーション技術により既存の生産設備での効率的なサイズ適合を実現したことと、多視点カメラによる形状復元技術により低価格な計測システムを可能としたことで、実店舗でのシステム運用に関する提供者側の投資の壁をほぼ克服できたと考えている。このシステムを実店舗で運用すれば、ユーザの顔形状情報と感性検索ログ、メガネ選択行動に関する一貫したデータを蓄積することができ、これらのデータの蓄積が最終的なMass Customizationの基盤となりうる。一方、ユーザ側においても、サイズに適合するだけでなく感性にも適合するものをさがすという技術を実現したことが、付加価値製品に対する投資意欲の向上に繋がるものと思われる。このようなユーザ側と提供者側の投資意欲の連鎖が「あなただけ」に適合する製品を「だれにでも」提供できるように新しいユニバーサルデザインビジネス創成の第一歩になると期待している。

このようなシステムが実店舗に導入されていくことは、サイズ適合に関するユーザの投資意欲の形成だけにとどまらず、社会基盤としての意義があると考えている。3.1節で述

べたように、従来、人体形状の個人差に関する情報は専用の装置や技量を備えた公的機関が、拠点集中型で横断的にデータを収集し、それを外部に提供するかたちで整備されてきた。1992年から94年にかけて、(社)人間生活工学研究センターが実施した34,000人の人体計測や、2004年から06年にかけて、やはり(社)人間生活工学研究センターが実施した8,000人の人体寸法・形状計測事業などがその好例である。世界的に見ても、欧米人4,000人を計測したCAESARプロジェクトなど集中型・横断的なデータ収集が一般的である。これに対して、われわれが目標とするシステムは、ユーザの人体形状データを複数の店舗分散型で縦断的(同一ユーザの時系列変化を追跡する)に蓄積できる可能性を秘めている。人体形状データベースという社会の知的基盤整備を、税金に駆動された集中型・横断的計測から、ビジネスに駆動された分散型・縦断的計測に切り替えていく足掛かりになりうると期待している。蓄積された多数の人体形状データは、個人情報を持たない統計データとして、3.2節のサイズバリエーション設計に、3.3節の形状計測に、そして、ユーザの購買履歴と形状データの相関統計データが再び3.4節の感性モデルに再活用されることになる。今後は、企業とともに、オンラインのシステム統合、ユーザインタフェース開発、持続的・縦断的に蓄積されるデータベース管理システムの開発に関わり、実店舗でのシステム運用を目指したい。

## キーワード

人間計測、感性工学、サービス工学

## 参考文献

- [1] M.Kouchi, M.Mochimaru, H.Nogawa and S.Ujihashi: Morphological fit of running shoes, *Perception and Physical Measurements, the 7th Symposium on Footwear Biomechanics*, 38-39(2005).
- [2] 持丸正明, 河内まき子: 人体を測る一寸法・形状・運動, 東京電機大学出版局, 東京 (2006)
- [3] 持丸正明, 河内まき子, 大矢高司: 人体形状の高速・隠れなし計測装置の開発, 第19回センシングフォーラム, 47-52(2002).
- [4] M.Kouchi and M.Mochimaru: Analysis of 3D face forms for proper sizing and CAD of spectacle frames, *Ergonomics*, 47-14, 1499-1516(2004).
- [5] 伊藤洋輔, 斎藤英雄, 持丸正明: 単眼カメラ画像列からの解剖学的顔形状データベースを用いた顔形状復元, *MIRU2006 画像の認識・理解シンポジウム*, 764-769(2006).
- [6] M.Mochimaru and M.Kouchi: A KANSEI model to estimate the impression ratings of spectacle frames on various faces, *SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium 2005*, 2005-01-2693(2005).
- [7] 田中久美子, 河内まき子, 持丸正明: メガネフレームのスタイル適合性の感性モデル, 第8回日本感性工学会大会, 東京 (2006).
- [8] 向田茂, 蒲池みゆき, 尾田政臣, 加藤隆, 吉川左紀子, 赤松茂, 千原國宏: 操作性を考慮した顔画像合成システム: FUTON - 顔認知研究のツールとしての評価 -, *電子情報通信学会論文誌*, J85-A-10, 1126-1137(2002).

(受付日 2007.10.2, 改訂受理日 2007.11.30)

## 執筆者略歴

持丸 正明 (もちまる まさあき)

1993年、慶應義塾大学大学院博士課程修了。同年、博士(工学)。同年、工業技術院生命工学工業技術研究所入所。組織改編により、2001年、産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究ラボ、副ラボ長。2003年より、デジタルヒューマン研究センター副センター長(現職)。人体形状・運動計測とモデル化、その産業応用に関する研究に従事。市村学術賞、産総研理事長賞など受賞。著書に「人体を測る一寸法・形状・運動」。

河内 まき子 (こうち まきこ)

1979年、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。同年、東京大学助手。1982年、理学博士。1987年、工業技術院製品科学研究所・主任研究官。改組により、1993年より、生命工学工業技術研究所。2001年より、産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究ラボ。2007年、上席研究員。人体形態計測とモデル化、その産業応用研究に従事。ISB Footwear Biomechanics Basic Research Award など受賞。

## 査読者との議論

### 議論1 研究の位置づけ

質問 (赤松 幹之)

個別適合の方法として Population Grouping、Adjustable Product と Finding Well-fitting Product、Mass Customization と Traditional Customization を適合方法として並べてありますが、Finding Well-fitting Product は Population Grouping の適合度を高めるための方法であって、Adjustable Product と Mass Customization の間に位置する方法ではないのではないのでしょうか。むしろ、Population Grouping、Adjustable Product のいずれもがユーザの主観的判断にゆだねられているために、真の適合に至らない欠点を補うための支援的な方法とみなすのが良いのではないのでしょうか。また、この手法は Mass Customization の基盤ともなるといえるのではないのでしょうか。

回答 (持丸 正明)

有益なコメントをありがとうございました。まさしく、御指摘の通りであり、原文では Finding Well-fitting Product が、Population Grouping、Adjustable Product と並ぶ手段として書かれていましたが、実際には、Population Grouping、Adjustable Product の欠点を補うための支援方法を含めた手段と言うべきです。そこで、原稿を修正し、Population Grouping、Adjustable Product を紹介した後、筆者らの研究例を例に選択をユーザに委ねるだけでは十分な適合性能を発揮できないことを述べ、それを補うために Finding Well-fitting Product というサービスを付加する手段があるという展開に変更いたしました。

また、コメントの後段は、「Finding Well-fitting Product を続けることで、ユーザ特性と製品特性の適合に関するエビデンスデータが蓄積され、それ自体が Mass Customization の基盤ともなる」という意味かと思えます。これも、まさしくその通りであり、御指摘の通り、投稿時原稿で十分に述べられていない部分でありました。本論文の「研究シナリオ」と「評価と展望」の箇所において述べることにしました。

### 議論2 グループ設定と評価実験の妥当性

質問 (赤松 幹之)

顔形状分布の第1軸と第2軸の空間の配置から、4つのグループを

設定していますが、グループ分けの考え方を具体的に説明するとどのようになるのでしょうか。また、38名の被験者が2次元分布上にどこに配置される被験者なのか、また平均形状と被験者の差異がどの程度なのか、などの評価実験の妥当性の検証は行っていますか。

回答（持丸 正明）

(1)「効率よくカバーする」について

そもそもガウス分布状になっている個人差をいくつかのタイプで対応しようと言うところに無理があります。理論的にはタイプが多ければ多いほど、個別のフィット性は向上するわけで最適値は存在しません。そこで、本研究では「製造・流通の採算性から想定される最大限のサイズバリエーション」を企業側に検討いただき、「4サイズ」という結論が導かれました。次は4サイズという制約の中で、いかに個人差の分布をカバーするかという課題です。ここでは、バリエーションがもっとも大きな第1軸を3つに、さらに、その中間について第2軸方向に2つに分けることで、2次元分布図をカバーするようにグルーピングしました。図5を見ていただくと、AとDの範囲が大きく、BとCが小さくなっています。これはサイズごとの出荷量に極端なばらつきが出ないようにするために、それぞれのグループを構成する人数がほぼ同数になるようにグルーピングしています。この考え方については、引用文献[4]に記載されていますが、本文中にも一部記載しました。

(2) 評価実験について

38名の被験者は2次元分布図のサイズグループにできるだけ均等に配置するように選定しました。38名については3次元形状を計測していないため、サイズグループを代表する平均形状との形状差は分かりませんが、寸法レベルでは±3[mm]程度の差異に収まっています。これらについては参考文献中に記載されていますが、本文中にも追記しました。

### 議論3 頭部形状の計測項目について

質問（赤松 幹之）

3.3節の1行目に、「頭顔部寸法15箇所計測することで」という記述がありますが、どのようなプロセスを経て、これを決定したのでしょうか。

回答（持丸 正明）

詳細は原著論文に記載されていますが、頭部の寸法項目50項目程度を被験者すべてについて実測し、ステップワイズの重回帰分析によって項目を減らしました。ただし、機械的に15に減らしたわけではなく、実際には計測しやすい項目を選ぶことを繰り返し、最終的に15項目に絞り込んでいます。スペースの都合から本論文では詳細な説明を省きました。

ちなみに、当初はこの15項目を店頭で計測することで、3次元顔形状を計測しなくともメガネが選べるというシナリオでした（引用原著論文にその旨記載）。しかし、店舗の反対にあい、断念しました。やはり、顔の寸法をノギスで接触計測するというのは無理がありました。そこで、低価格の3次元計測技術開発を行うことにしました。

### 議論4 今後の展開

コメント（赤松 幹之）

「評価と展望」の中の評価の部分に、良い面ばかりでなく、やり残した部分、研究者自身として不満足な部分、また技術的にまだブレイクスルーできていないところなどを書いていただきたく思います。

回答（持丸 正明）

ご指摘の通り、研究として不十分なところ、シナリオとして未完成なところがあります。研究としては、感性評価の顔モデルにおける髪型の問題が大きいです。髪型によって印象がかなり変わることは予備実験で分かっていたのですが、自然に髪型を変更するすぐれたCG技術がなかったことなどもあり、今回は見送っています。また、サイズバリエーション設計技術においても、全体的な大きさと形状の話だけでなく、鼻パッドや耳当て（モダン）の曲率設計、それらが顔と当たったときの圧力分布や触覚を推定する有限要素モデルなどもやり残した仕事です。シナリオ全体として未完成であるところは、この推奨システムを運用しながら蓄積される商品選択履歴データと商品満足度データの効果的な活用技術です。これがなければ、単なる販売支援システムに過ぎず、形状や感性データを持続的に蓄積しながら、サイズ設計や感性推奨技術をアップデートしていくサイクルが形成できません。これらについては、本研究で述べたようなシステムが実社会で実用化された後に、フィールドデータを使って研究していくつもりです。

### 議論5 研究成果の応用範囲について

質問（赤松 幹之）

同様な適合化システムは、メガネ以外にも、靴や衣服などにも適用可能と思われますが、本質的に共通の手法で良いのか、それともメガネに特徴的な面があるのでしょうか。

回答（持丸 正明）

人体形状を計測し、あらかじめサイズバリエーション設計された製品群の中から適切なサイズを選ぶという手段は汎用性が高いと考えています。すでにスポーツシューズに適用され、実用化されています。ただし、衣服となると、3次元形状計測するために店舗で脱衣しなければならないという技術的障壁が大きく、あまり普及が進んでいません。衣服に普及させるためには、着衣のまま体形を計測する技術開発か、あるいは、店舗ではない場所で体形を測るビジネス連携が必要になると考えています。

一方で感性の側面は、メガネやスポーツシューズではスタイルデザインとフィッティングの独立性が高い（テクスチャや飾りのようなスタイルデザインが多い）ですが、ファッションシューズや衣服では両者の関係が密接であり（カッティングやドレープなどフィッティングに影響するスタイルデザインが多い）、本研究のように体形の適合性と、感性の適合性を独立にモデル化して推奨する技術では対応しきれないと思われます。後者のような事例で、ファッション性（感性）とサイズ適合性を両立させるのは、将来的な課題です。

# 耳式赤外線体温計の表示温度の信頼性向上

## — 国家標準にトレーサブルな新しい標準体系の設計と導入 —

石井 順太郎

1990年代後半赤外線を用いた耳式体温計が開発され、国内において急速に普及するとともに、表示される温度の信頼性が一般消費者から問われるようになった。産総研ではこの新型体温計の校正・試験の基準となる国家計量標準を新たに開発するとともに、我が国の産業界・消費者のニーズに適合する標準供給体系を設計・整備し、その技術的検証を行って表示温度の信頼性を向上させた。また、ドイツ、イギリスとの間で国家計量標準の比較を行い、それらの同等性を実験的に検証して信頼性を国際的に確保した。

### 1 はじめに

体温は、血圧や心拍数などと共に、人体の最も基本的な生体指標の一つであり、医療診断や健康管理の目的で利用される。体温測定は、医師や看護師などがある医療機関だけでなく、一般の家庭内でも広く行われることから、体温計には計測器として高い信頼性と実用性が要求される。

体温計は、古くよりガラス製の水銀体温計が使われてきたが、ガラスの破損や人体に有害な水銀の使用が問題となっていた。その後、温度測定用素子として高精度のサーミスタが開発され、それを内蔵した電子体温計が市販されると、取り扱いの容易さや安全性などから急速に利用が拡大し、現在でも広く使用されている。しかしながら、電子体温計においても、正確な体温測定には、体温計の感温部を腋の下など測温部位に通常5分程度密着させておくことが必要であるため、救急患者や重症患者への負担が大きいことや、新生児や乳幼児などの検温が困難であること等が引き続き課題となっていた。

これに対し、1990年代に入り、米国メーカーによりセンサ部を耳に押し当てて測定を行う方式の赤外線体温計（以下耳式体温計）が開発され、米国、欧州などの市場に投入

された。図1は市販の耳式体温計の外観とその断面の模式図である。耳式体温計は、光学プローブ、赤外センサ、補償用内部温度センサ、信号処理回路、表示器などから構成されている。光学プローブの先端部を耳孔に挿入し、鼓膜や耳道の皮膚表面から放射される波長10 μm付近の赤外熱放射の強度（輝度<sup>用語1</sup>）を測定し、プランクの熱放射則<sup>用語2</sup>の関係から測定部位の温度を決定する。体温計の表示温度の校正は、温度が正確に分かっている黒体放射を耳式体温計に見させることで行う。

人体の皮膚表面は、赤外波長域で放射率<sup>用語3</sup>が1に近い値を持つことから、正確な赤外放射温度測定が可能な良い対象である。熱放射測定から皮膚の表面温度を測定する方法は、サーモグラフ（熱画像装置）による乳癌の診断技術などにも応用されてきたが、新型の耳式体温計では、測温部位を鼓膜とその周辺の耳道とすることで空洞を形成させ、測定部位の実効的な放射率（ $\epsilon$ ）をほぼ理想的な黒体条件（ $\epsilon=1$ ）に近づけ、体温測定の精度を大幅に向上させている。さらに、先進的な赤外センサ技術を導入することにより、1秒程度の短時間測定をも可能とした。この耳式体温計は、従来の接触式（熱平衡型）体温計の課題を克服し、“測定時間の短縮”、“非接触な測定”を可能にする第三世代の体温計として注目を集めた<sup>1)</sup>。

日本国内では耳式体温計は1990年代はじめ頃より医療専門家向けの機器として導入されたが、1996年頃より一般用の体温計として正式に医用機器承認を受けて販売が開始されると、国内事業者による製造・販売数が急速に拡大し、数年後には年間100万本に至るまでになった。この背景には、新型の耳式体温計がユーザーニーズを満たす製品であると共に、体温計製造メーカーにとって成熟市場となって

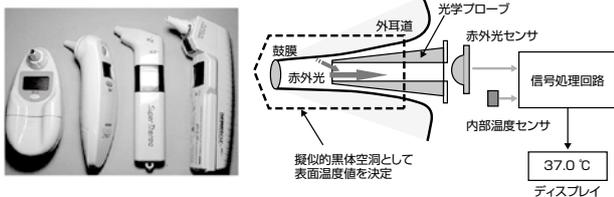


図1 耳式体温計の外観と構造

いた体温計マーケットにおいて、電子体温計の開発以来ほぼ四半世紀ぶりとなる画期的な新製品登場への大きな期待があったことも一因であった<sup>[2]</sup>。

一方、耳式体温計の急速な普及の拡大につれて、体温計ユーザや消費者団体などから、耳式体温計の表示温度の信頼性に対して疑問や苦情が寄せられるようになり、新聞や雑誌などのマスメディアにおいても取り上げられた。そこで産総研は我が国の計量標準研究機関として、新型の耳式体温計の測定精度を確保するための研究を開始し、製造メーカーやユーザ、行政機関との調整を経て、2002年までに標準供給体系を完成させて、耳式体温計の表示温度の正確さを保証する技術的・社会的基盤を整えた。

またこの研究の成果である耳式体温計校正用の国家標準器は、2003年にアジアを中心にSARS（重症急性呼吸器症候群）が流行した際に、アジア諸国の国立標準研究所に緊急に貸与あるいは技術供与され、感染の拡大阻止に貢献した<sup>[3]</sup>。

## 2 問題解決への官民の協力

現行の水銀体温計と電子体温計は表示温度の信頼性確保のために、経済産業省が所管する計量法の特定計量器に指定され、国の管理の下で型式承認試験とともに、体温計全数に対して精度確認が実施されている（検定）。これに対し、新たに開発・販売された耳式体温計については、当初、表示温度の信頼性の確保については、体温計製造事業者の責任の下で各社独自の技術基準に従った試験・検査が行われるにとどまっていた。

新型の耳式体温計は、その利便性の高さなどが注目され、製品化直後から急速に利用が拡大した。一方において、既存の体温計との測定原理や使用方法の違いなども含めて、その性能や信頼性に対して、ユーザからのクレームも拡大し、1998年には、消費者保護の観点から調査研究を実施する公的機関である国民生活センターから“注意！高めに出る傾向にある耳式体温計”との報告がおこなわれ<sup>[4]</sup>、その後、新聞・雑誌等においても、“表示温度のばらつきが大きい”、“検温値が高めに出る”などの指摘を受けるようになった<sup>[5]</sup>。

このような状況の中で国（通産省、厚生省）、医療専門家、消費者団体、体温計製造事業者、産総研（当時：工業技術院 計量研究所）などをメンバーとする「新型体温計調査研究委員会」が1998年に発足した。委員会では国内の実態調査のために、体温計の製造・販売事業者及び医療機関・一般消費者を対象としたアンケート調査を実施した。この調査からは、耳式体温計の国内製造・販売数が年間100万本近くに達している一方で、医療専門家や一般消費

者において、耳式体温計の性能、測定原理、使用方法、信頼性などについて十分な理解が得られていない状況が明らかとなった<sup>[2]</sup>。

産総研は委員会メンバーとも協力して、簡易型の黒体装置を用いて市販耳式体温計の表示温度をチェックしたが、そのうちの幾つかの型式の体温計では、表示温度に0.5℃以上の大きなばらつきや偏りを示す結果であった。これら調査研究を通じて、新型の耳式体温計の市場拡大に伴う技術課題として次の2点が明らかとなった。

- ①測定原理や使用方法などに関するユーザへの十分な情報提供
- ②耳式体温計のための技術基準の作成と、校正・試験用の計量標準体系の整備

このうち①については製造・販売事業者や業界団体を中心とした課題とされたが、②については産総研を中心とした国の迅速な取り組みが強く要請された。

委員会では、さらに耳式体温計の標準化や計量標準・トレーサビリティ<sup>[4]</sup> 体系の整備状況などについても調査を行った。耳式体温計への取り組みについては、世界的に最も早く市場へ製品が投入された米国と、その後、米国企業からの技術導入により普及が進んだドイツにおいて、先行的な取り組みが行われていた。米国では、産業界を中心に工業規格（ASTM規格）<sup>[6]</sup> が制定されていたが、一方で、国主導の国家計量標準の整備は進んでいない状況であった。欧州では、国内に大規模メーカを有するドイツが主導し、欧州規格（EN）<sup>[5]</sup> の準備作業が進められていた<sup>[7]</sup>。ドイツでは、国家計量標準機関である国立物理工学研究所（PTB）が計量標準の技術開発に積極的な取り組みを開始していた。

## 3 研究目標の設定と達成へのシナリオ

前章で明らかとなった産総研が取り組むべき課題に関して、ユーザニーズを満たすような耳式体温計の標準供給体系の確立を目標に設定し、また目標達成の過程で得られる技術開発の成果は耳式体温計の性能試験にも十分に活用できることが望ましいとした。具体的には耳式体温計の市販品レベルにおいて、表示温度（測定結果）の不確かさとして0.2℃（95%信頼区間）の目標値を設定した。現在水銀体温計と電子体温計（実測式）の計量法における検定公差は0.1℃に設定されているため、ユーザの一部には0.1℃の不確かさを要求するところもあったが、耳式体温計の現状の技術レベルを推定し、また米国やドイツなどで検討されていた技術基準案<sup>[6, 7]</sup>でも0.2℃の不確かさを採用

していることを考慮して、新型体温計調査研究委員会において我が国の目標を0.2℃とすることが妥当であると結論された<sup>[2]</sup>。

この目標を達成するために、産総研では必要な要素技術とシナリオを図2のように考えた。産総研の研究目標として、①適合性評価<sup>[4][6]</sup>のための性能試験技術の開発、②精度管理のための温度計の目盛校正技術の開発および、③トレーサビリティの基礎となる国家標準器の開発、を設定した。産総研はこれらの目標を達成するため、共通かつ最重要な技術として、“高精度な黒体装置（標準黒体炉）の開発”に着手した。黒体装置の開発においては、④安定かつ均一な温度場の実現に必要な精密恒温水槽装置に関する技術、⑤黒体空洞の放射性能の定量的な評価に関する技術、および、⑥耳式体温計を校正するために最適な黒体空洞を実現するための設計・製作技術を重要な要素技術として挙げた。

#### 4 我が国の計量管理体制の選択

図3は耳式体温計が、技術的な合理性の視点からどのような校正の連鎖を経て国家標準につながるべきか（すなわちトレーサビリティ体系）を示す。トレーサビリティの各段階において開発すべき主要な技術があり、また各段階の作業を誰が責任を持って行うかという計量管理の社会的な体制が問題となる。赤外放射测温を原理とする耳式体温計の校正・試験には、まず正しい温度目盛に基づいた黒体放射を実現する黒体装置が必要となる。黒体装置の主要な構成要素は、温度目盛の基準となる参照温度計と熱放射源となる黒体空洞及び恒温水槽装置である。従って、黒体

装置の品質管理のためには、これら構成要素をどのような体制の下で精度管理することが適切かを考察した。

一般に事業者で製造される耳式体温計は社内に設置された実用黒体装置で校正され、温度目盛りが付けられる。その実用黒体装置はより上位にある標準の黒体装置で校正され、さらにその標準の黒体装置は高精度の接触式温度計を介して温度の国家標準につながる。体温域の実用黒体装置には、黒体空洞の温度を正確に決めるための参照温度計が必要であるが、高精度の白金抵抗温度計が利用可能である。この温度計に関しては、既に産総研の国家標準にもとづく標準供給体制（トレーサビリティ体系）が整備され、現に運用されている。このトレーサビリティ体系を利用して、参照温度計には0.01℃以下の十分小さな不確かさレベルで温度目盛を設定・管理することが可能である。

体温計の表示温度の不確かさの目標値を0.2℃とする場合、体温計の校正や試験の基準となる製造事業者の実用黒体装置の不確かさは、体温計に求められる不確かさの概ね1/3以下（今の場合0.07℃以下）であることが要求される。さらにその上位に位置づけられる標準黒体装置については、体温計製造事業者の保有する実用黒体装置よりもさらに小さな不確かさが要求される（例えば0.04℃以下）。

つぎに、図3に示す校正の連鎖の各段階でさまざまな作業が必要となるが、その作業をどの機関が責任を持って行うかという選択がある。図3の下部に示すように、可能性のあるつぎの3つの計量管理体制を比較検討して、現在の技術状況と社会状況に最も適合する体制を選択することとした。

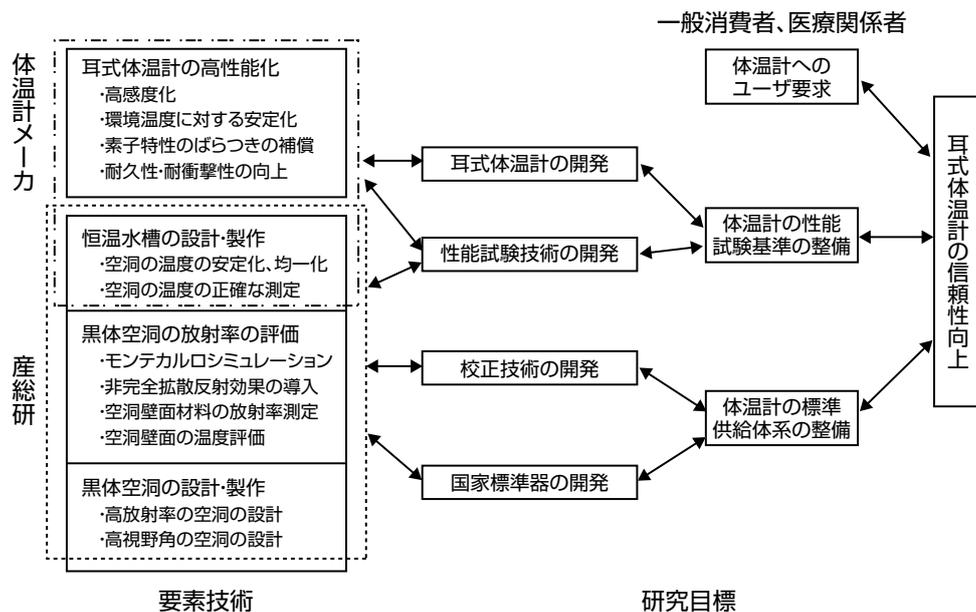


図2 耳式体温計の信頼性向上の研究目標とシナリオ

- ①計量法の検定制度に基づいて試験・検査を行う。(強制法規により国の管理のもとで全数検査を行う計量管理体制)
- ②工業規格によって製造事業者の実用黒体装置に対して温度の国家標準(産総研の高精度の接触式温度計)へのトレーサビリティを規定するとともに、黒体装置の仕様も同時に工業規格によって規定する。(民間製造事業者の自主的な活動に全面的に依存する計量管理体制)
- ③国(産総研)が新たに輝度温度<sup>用語7</sup>の標準供給サービスを行う一方で、製造事業者の実用黒体装置に対しては工業規格によって産総研の輝度温度標準へのトレーサビリティを規定する(国と民間製造事業者とが分担する計量管理体制)

上記のそれぞれの計量管理体制に対して以下の考察と選択を行った。

#### 4.1 計量法の検定制度による計量管理体制

計量法では、経済活動やサービス等において特に重要な計測器を特定計量器に指定し、計測器の構造と仕様に対して型式承認試験を実施するとともに、個々の計測器ごとに精度確認検査を実施することを定めている。体温計の場合、既存の水銀体温計や電子体温計はいずれも特定計量器の指定を受けて製造・販売が行われてきた。計量法による計量管理体制では、管理の主体は法を所管している国(経済産業省)であり、計量法で定められたルールに基づいて試験・検査が行われる。市場において販売される体温計はすべて、法に定められた一定水準の仕様と精度を持つことが国によって担保され、製品に関する技術的知見を持たない消費者やユーザでも、一定の品質の計測器を

入手・利用することができるかと期待される。

計量法に基づく計量管理を実施する場合、校正・試験の方法や設備についても、計量法の下で詳細に規則・基準が定められることになる。このことは、校正・試験の公平性・公開性という点からは極めて重要であるが、反面において、計量管理における製造事業者の技術的主体性は相対的に低下するとともに、新たな技術開発による製品の性能(精度)向上や新製品開発などの阻害要因となるリスクも内在する。言い換えると、計量法に基づく管理は、校正・試験の方法や設備が広く共通化され、製品技術としての成熟度も高い場合に有効であるといえる。

新型体温計調査研究委員会やその後2000年に設置された標準化(JIS規格)委員会等において、耳式体温計を特定計量器に指定することの適否について検討を行った。その結果、新型の耳式体温計については、(1)製造事業者の間において校正・試験の方法や設備の共通化が十分に進んでいない、(2)製品技術が引き続き開発段階であり、早期の法規制の導入は製品技術を固定化する危険性が高い、等の理由により、計量法による規制の導入は将来の検討事項と結論された。

#### 4.2 工業規格による計量管理体制

計量法による強制的な計量管理とは対極にある方式として、技術基準(工業標準文書)による製造事業者の自主的な活動に基づいた計量管理体制が考えられる。実用黒体装置の構成と仕様をJIS規格等の工業規格によって規定し、その管理方法を含めて技術を共有することにより、良質な実用黒体装置の製作が可能となる。併せて、国家標

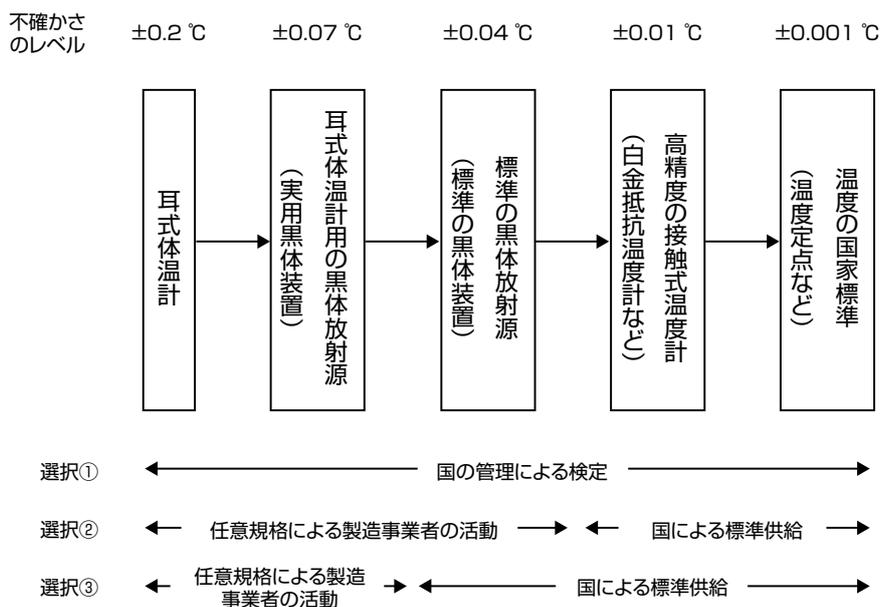


図3 耳式体温計のトレーサビリティと計量管理体制

準へのトレーサビリティが確保されている接触式温度計を参照温度計に用いることにより、体温計製造事業者が一定水準以上の校正・試験を実施することが可能となると期待される。

このような計量管理システムが導入できれば、(1) 国による新たな標準供給サービスを導入することがなく、国の負担は増加しない、(2) 計量法による規制の導入(4.1節)と比較して、将来の製品開発の進展に柔軟に対応した校正・試験技術や標準設備の高度化が容易であり、製造事業者における独自の試験技術の開発や効率化も阻害しない、などのメリットがある。しかし一方において、工業標準という任意の制度に全面的に依存する方法は、法規制のような強制力を持たないため、技術や設備の導入・運用は、あくまでも体温計製造事業者の判断と責任によることになる。さらに、標準設備を含む技術情報の共有については、文書化された情報にほぼ限定されるため、現場において適確に運用されないリスクも持つ。

産総研は、標準化委員会等の場を通じて、耳式体温計の製造・販売事業者の使用している標準設備や管理・運営方法についてのアンケート調査を実施し、また実際に製造事業所を訪問調査して、上述の計量管理システムの導入の適否について技術面からの検討を行った。その結果、多くの製造事業者では、すでに耳式体温計の製造・検査プロセスが大規模化しており、各社が独自に製作した標準設備(実用黒体装置)が数多く先行的に導入・運用されていた。このため当時の状況下において、産総研が主導して実用黒体装置の標準化を実施した場合でも、各社が直ちに標準設備を更新することは、経済的理由から困難であると判断された。さらに国内体温計製造事業者は、総じてそれまで、水銀体温計やサーミスタ型の電子体温計に関しては高い技術を持っていたが、原理的に大きく異なる黒体装置の管理・運用について必ずしも高度な技術的蓄積がなく、黒体装置の標準化のみによる計量管理体制で、国内市場に供給される耳式体温計の信頼性を長期的に確保することには限界があると結論された。

#### 4.3 国による輝度温度の標準供給にもとづく計量管理体制

上記4.1節と4.2節の検討結果を踏まえて、新たに実用黒体装置への輝度温度の標準供給(実用黒体装置の校正)サービスを産総研が行う計量管理体制について検討を行った。この体制は、前述の二つのケースの中間的な位置づけである。

4.2節のケースでは、実用黒体装置の構成要素のうち参照温度計については、国家標準へのトレーサビリティを確保した上で、黒体空洞部については工業規格(技術基準文書)で規定するものであったが、ここでは、さらに体温計

が計測する輝度温度について、国家標準への直接のトレーサビリティを確保する。輝度温度に関しては、接触式温度計のように既存の標準供給体制が整備されておらず、耳式体温計のために新たなトレーサビリティ体系の設計・整備が必要となるため、国に一定の負担が発生する。しかしながら、輝度温度について産総研からの直接的な標準供給が可能となった場合、体温計製造事業者は自身の保有する実用黒体装置の構造や運用に関して必ずしも高度な技術や知見を持たなくとも、産総研(国)の高い技術を背景として、装置全体の不確かさレベルを評価したり、基準への適合性を評価したりすることが可能となる。また、事業者は、実用黒体装置を含めて独自の技術開発が可能で、かつ既存の保有設備を有効に活用できることなどから、現状の技術的・社会的状況において、高い精度を確保しつつ、我が国全体としてコストを最小にできるとの判断のもと、この方法を最終的に選択することとした。

## 5 輝度温度の国家標準の開発

4.3節でのべた計量管理体制の選択を決定した結果、産総研の喫緊の課題となったのが、耳式体温計を適確に校正するための基準となる輝度温度の国家標準器の開発であった。それと同時にそれらの技術開発の成果が耳式体温計の校正を含めて性能試験にも広く活用できるならば一層望ましい。

従来の水銀体温計や電子体温計の場合は、感温部(センサー部)を人体の測定部位に接触させて熱平衡状態を実現して温度測定を行う接触式温度計であるため、高精度のガラス温度計や白金抵抗温度計を基準の温度計として、恒温水槽の中に一緒に浸して校正や試験を実施することが可能である。また目盛りの不確かさの評価や校正設備の管理も比較的容易に行えた。

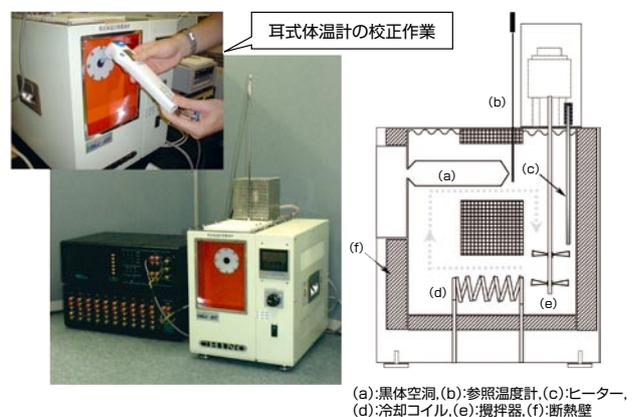


図4 産総研の開発した耳式体温計校正用の標準黒体装置(外観と断面構造図)

これに対して耳式体温計は、赤外波長域における放射輝度を計測し、プランクの熱放射則に基づいて体温を推定する赤外放射温度計であるため、ガラス温度計や白金抵抗温度計などの接触式温度計と直接目盛りを比較することは技術的に不可能である。このような赤外放射温度計の校正・試験においては、プランクの熱放射則に基づいて理想的な熱放射(黒体放射)を発生する標準の“黒体装置”(黒体炉)が必要となる。筆者らのグループでは、以前より常温域の精密黒体放射源の開発・評価技術の研究に取り組んでおり、それらの要素技術の成果を基盤として、新たに耳式体温計校正用の標準黒体装置の開発に着手した。

図4に産総研が開発した耳式体温計校正用の標準黒体装置を示す。温度目盛の基準(参照温度計)として高精度の白金抵抗温度計を採用し、精密恒温水槽の中に金属製の黒体空洞を水平に設置した。標準黒体装置が輝度温度を実現するとき、その不確かさの要因としては、

- ①参照温度計自身の校正の不確かさ
  - ②参照温度計による空洞温度測定の不確かさ
    - ②-1 水温槽温度の測定不確かさ
    - ②-2 水温槽温度と空洞内壁温度のずれ  
(空洞からの熱損失の効果)
  - ③黒体空洞の実効放射率(理想的な値である1からのずれ)
    - ③-1 等温条件にある黒体空洞の空洞放射率
    - ③-2 黒体空洞壁面の温度分布の影響
  - ④システムの安定性・再現性
- などである。

耳式体温計は、通常の赤外放射温度計に比較して広い測定視野を持つので、視野角の小さい一般の黒体装置を用いたのでは適切な校正ができない。このため、モンテカルロシミュレーションにより広視野の耳式体温計に対しても十分高い実効放射率を持つ黒体空洞を新たに設計した<sup>[8]</sup>。図5はモンテカルロシミュレーションを模式的に示したもので、外部から黒体空洞の中に光線を入射させ、その反射の様子を乱数を用いてシミュレーションし、最終的に空洞の中で吸収される確率から、空洞の実効的な吸収率(すなわ

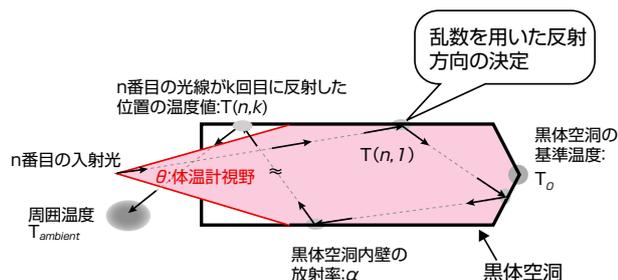


図5 モンテカルロシミュレーションによる黒体空洞放射率評価

ち実効的な放射率)を計算した。このとき空洞壁面の反射特性は、完全拡散的な反射分布と鏡面的な反射分布とからなるモデルで表現した。さらに空洞壁面に発生する温度分布の影響について、水温槽での実測データを反映したシミュレーションにより定量評価を行った。

空洞壁面材料の放射率に関しては、別途開発したフーリエ分光式の赤外域放射率測定装置を用いて測定した。分光放射率の測定精度はおおよそ1%以下と評価され<sup>[9]</sup>、空洞壁面の放射率の不確かさとして取り入れた。放射率データをモンテカルロシミュレーションのパラメータとして採用し、空洞放射率を評価した。さらに、黒体空洞内部での対流・放射による熱損失の影響についても、高分解能な赤外放射温度計による検証評価を行った<sup>[10]</sup>。

産総研が開発した輝度温度の国家標準器である標準黒体装置の性能(不確かさ)を表1に示す。参照温度計は、高精度な白金抵抗温度計を産総研の国家標準の温度定点装置で校正することにより、5 mK 程度の不確かさを確保し、図4に示す恒温水槽装置により、空洞の基準温度を5 mK 程度の不確かさで決定した。測定視野の広い耳式体温計に適した黒体空洞の形状を設計することにより、空洞の放射率は0.9995以上を実現し、これに起因する輝度温度値の不確かさを20 mK 以下とした。これらの技術開発により、体温域(32℃~42℃)において、おおよそ0.03℃の不確かさ(95%の信頼区間)で国際温度目盛(温度の国際単位)にトレーサブルな輝度温度目盛を実現した<sup>[11]</sup>。

開発した標準黒体装置に関する技術は、後述する耳式体温計に関するJIS規格においても推奨され<sup>[12]</sup>、標準設備の仕様として採用された。現在共同開発した黒体装置メーカーから体温域の黒体装置として製品化されている<sup>[13]</sup>。

## 6 標準黒体装置による実用黒体装置の校正

次に新たな計量標準体系における、産総研の標準黒体

表1 産総研の開発した標準黒体装置の不確かさ

	黒体空洞の温度			単位
	32℃	37℃	42℃	
不確かさの要因	不確かさ			
参照温度計の校正	5			mK
参照温度計による温度測定 (水槽の安定性を含む)	5			mK
空洞内部の熱損失	<1			mK
等温空洞の放射率	8	12	16	mK
空洞壁面の温度分布	2			mK
環境温度の変動効果 ( $T_{環境温度}=23\pm 2$ ℃)	2			mK
合成標準不確かさ	11	14	18	mK
拡張不確かさ(95%信頼区間)	22	28	36	mK

装置と製造事業者の実用黒体装置とを結ぶ具体的な校正方法の検討を行った。5章で述べたように、輝度温度の国家標準器として産総研は標準黒体装置を開発したが、製造事業者の実用黒体装置を産総研に移送して標準黒体装置で校正するか、あるいは産総研の標準黒体装置を製造事業者に移送して実用黒体装置を校正することとした。

### 6.1 校正の不確かさの推定

標準黒体装置によって実用黒体装置を校正するときの不確かさを推定するために模擬校正実験を行った。産総研に、国家標準器である標準黒体装置の他、模擬校正用の黒体装置を別途準備した。複数の体温計メーカーから提供された高分解能（表示分解能 0.01 °C）の耳式体温計を計 4 型式（各型式ごとに 3 個程度の体温計）準備し、それらを輝度温度の直接比較のための温度計として用いた。実験では、産総研の標準黒体炉と模擬校正用黒体装置を同時に運転し、輝度温度値を校正する温度（例えば、37.0 °C）に安定化させた。それぞれの参照温度計の温度値をモニターしながら、高分解能耳式体温計を用いて、2つの黒体装置の輝度温度の差を測定した。それぞれの体温計ごとに 10 回程度の測定を繰り返し行い、輝度温度差の平均とばらつきを評価した後、参照温度計の温度値のずれを補正し、校正結果を算出した。

図 6 に検証実験の結果を示す。2つの黒体装置の輝度温度差の平均値は、ばらつきの範囲内ではほぼゼロに近い値となっている。しかしながら、校正值のばらつき（標準偏差）については、0.03 °C 程度であった。このばらつきの値については、黒体装置の輝度比較校正において、付加的に発生する不確かさ要因となる。これらの結果から、標準黒体装置自身の輝度温度目盛の不確かさと比較測定の不確かさを合成した校正結果の不確かさとして、およそ 0.06 °C（95% 信頼区間）を実現した<sup>[11]</sup>。この不確かさは、実用黒体装置に要請される不確かさレベル（およそ 0.07 °C 以下）を

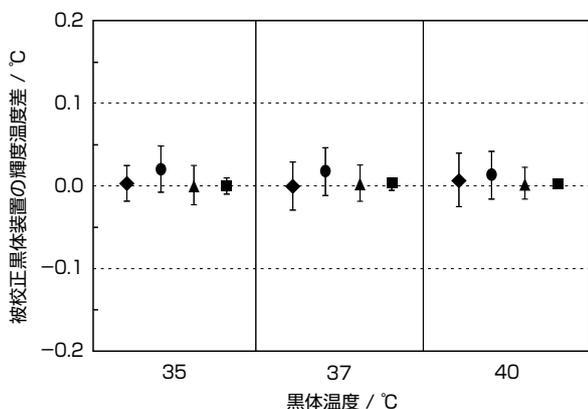


図 6 実用標準黒体炉の輝度温度校正の検証結果

満足するものである。

### 6.2 持ち回り測定による校正の不確かさの検証

前節で述べた模擬校正実験を通じて推定した不確かさのレベル、および校正スキームの妥当性を検証するため、産総研と体温計製造事業者との間で共同測定実験を行った。持ち回り測定実験では、産総研が移送可能な標準黒体装置を製作した。その標準黒体装置を国内体温計メーカー 7 社へ順次移送して持ち回り、各社の実用黒体装置の輝度温度との偏差を測定した。

図 7 に測定結果を示す<sup>[14]</sup>。比較測定結果は 0.03 °C 程度のばらつきを持つが、各社の実用黒体装置の輝度温度目盛が産総研の標準黒体装置のそれと比較して、概ね 0.05 °C 以内の偏差に収まることが確認された。このことは、体温計製造事業者の実用黒体装置の輝度温度が 0.07 °C 以下の不確かさで確実に校正できることを示しており、耳式体温計の校正・試験の要求が十分満たされると結論された。

### 7 校正サービスの体制と国際同等性の検証

計量標準の整備においては国家標準の開発・供給と併せて、我が国の国家標準と校正サービスが他の国と同等かどうかを検証することが重要な課題になっている。この目的のため、産総研において実施する耳式体温計用の実用黒体装置の校正サービスに対して、ISO/IEC 17025 規格<sup>第 8 条</sup>に準拠した品質システムを整備した。これにより第三者認証に基づいた校正サービスの質の確保を行っている。

産総研が開発した国家標準が他の国の国家標準と整合しているかどうかを検証するために、ドイツおよびイギリスの国立計量標準研究機関との間で国際的な比較測定を実施した。図 8 はドイツ国立物理工学研究所 (PTB) 及びイギリス国立物理学研究所 (NPL) との間で実施した国際比較測定の結果である<sup>[15]</sup>。産総研とドイツ PTB のそれぞれの標準黒体装置を英国 NPL に移送し、相互の輝度温度目

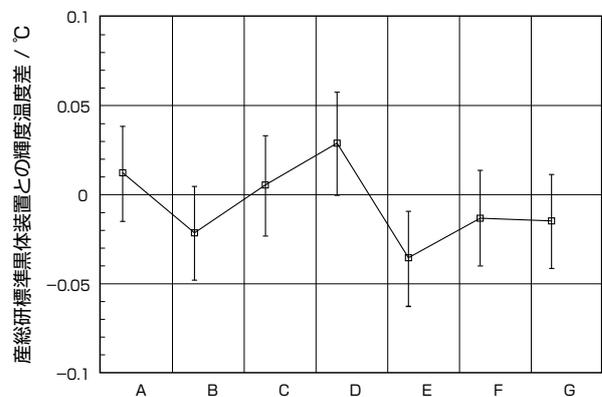


図 7 体温計製造事業者との持ち回り測定結果  
黒体温度は 37 °C。A ~ G は参加事業者。

盛の直接比較を行った。国際比較の測定結果から各国の標準が、それぞれが主張する不確かさレベル (0.03 °C 程度) で良く一致している事が確認された。この国際比較測定の結果は、体温域における標準黒体装置に関する世界的に初めての報告例として、その後の国際比較測定のモデルケースとなった。産総研ではその後、アジア太平洋地域においても、オーストラリア国立標準研究所 (NMIA) との間で同様の比較測定を実施して、良好な測定結果を得ている。

## 8 研究成果のまとめ

産総研では、新型の耳式体温計の信頼性確保に向けて、国家計量標準研究機関として研究開発に取り組み以下のような成果を得た。

- 高精度な (不確かさレベル 0.03 °C の) 国家標準器 (標準黒体装置) を開発した。
- 実用黒体装置の校正のために輝度温度のトレーサビリティ体系を考案し、整備した。達成した校正の不確かさレベルは 0.06 °C である。
- 外国の国立標準研究機関との間での比較測定によって国家標準器の国際整合性を検証した。また第三者認証制度によって校正サービスの品質を確保した。

これらの成果は、体温計製造事業者の保有する標準設備に一定の自由度を保ちながら、体温計の校正・試験に要求される信頼性 (不確かさレベル 0.07 °C) を確保するシステムとして運用されており、国内において製造・販売される耳式体温計の表示温度の信頼性向上に貢献するものである。

## 9 SARS の感染拡大防止への国際協力

産総研での耳式体温計の標準開発と評価技術への取り組みは世界的にも先進的なものであり、その成果は外国からも高く評価されている。2003 年にアジア地域を中心に

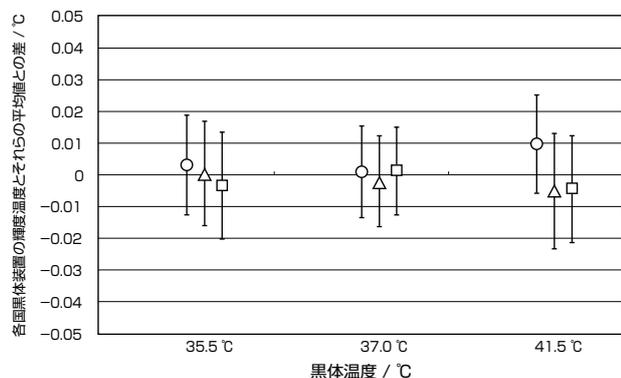


図 8 体温域標準黒体炉の国際比較の結果  
○産総研、△英国立物理学研究所、□ドイツ物理工学研究所

SARS (重症急性呼吸器症候群) が発生し、国際的な危機にみまわれたが、シンガポールや台湾などの国立計量標準機関の要請を受け、産総研の開発した標準黒体装置や技術をすみやかに提供し、空港や港湾における有熱患者のスクリーニングに貢献した。この活動は、安心・安全に関わる重大な社会問題に対する計量標準技術の国際的な研究協力の事例として高く評価された<sup>[3]</sup>。

## 10 おわりに

これまで、新型の耳式体温計のための計量標準の整備と技術の普及の取り組みについて述べてきた。赤外線方式という従来とは全く異なる測定原理による体温計に対して、体温計ユーザの信頼感の獲得と、国内の体温計製造事業者の国際競争力の強化という目的のために新たな計量標準の開発と整備を行った。産総研では、それまでに培って来た放射温度標準や精密赤外放射計測技術を要素技術として、世界的にも最高水準の国家標準器を開発するとともに、高品質の標準が広く産業界やユーザに利用されるためのトレーサビリティ体系を構築した。これらの成果は、産総研からの標準供給サービス・標準化プロセスなどを通じて、体温測定信頼性向上に大きな貢献を果たしたものと考えられる。

## 謝辞

本研究開発において、計測標準研究部門の福崎知子研究員をはじめとする産総研内外の多くの関係者の皆様の協力・支援を頂いたことに感謝いたします。

## 用語説明

- 用語 1：輝度 (放射輝度)：光源の光放射について、単位時間・単位面積・単位立体角あたりに特定の方向に放出される放射エネルギーの量。単位 [ $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ ]。
- 用語 2：プランクの熱放射則：理想的な黒体の熱放射特性 (温度と分光放射エネルギーの関係) に関する法則。1900 年にプランクによって定式化された。現実の物体では、放射率が 1 より小さいため、プランクの熱放射則に放射率を乗じた放射特性を有する。
- 用語 3：放射率：熱光源の放射性能を表す指標。理想的な黒体の場合には、放射率は 1 となり、現実の熱放射源は、0 と 1 の間の値となる。一般に、材料表面の放射率は材質とともに、波長、角度、表面粗さなどにも依存して変化する。
- 用語 4：トレーサビリティ：国際標準や国家標準を基準として、比較 (校正) の連鎖により、ユーザレベルの計測機器に至る計量管理システムの総称。
- 用語 5：欧州規格 (EN)：“European Norm” (European Standards) 欧州連合 (EU) の専門委員会である CEN (欧州標準化

委員会) や CENELEC (欧州電気標準化委員会) が発行する欧州統一規格。

用語 6: 適合性評価: 製品・サービス・プロセスなどが、規格などの要求事項を満たしているかどうかを確認する行為。そのための試験・検査・評価手順の総称として用いられることもある。

用語 7: 輝度温度: 光源がプランクの放射則に従う理想的な黒体であると仮定した場合、その輝度値から算出される温度。光源が黒体である場合には、その熱力学的な温度値と一致するが、黒体でない場合(放射率が1よりも小さい場合)には、光源の温度と異なる輝度温度となる。

用語 8: ISO/IEC 17025 規格: 試験所・校正機関等のサービスの品質管理に関する国際標準文書。産総研計量標準総合センターの実施する物理標準供給については、同規格に基づいた品質管理及び第三者認証が実施されている。

**キーワード**

標準、トレーサビリティ、赤外線、体温計、信頼性、黒体、輝度温度

**参考文献**

[1] J.Fraden: Medical infrared thermometry (review of modern techniques), Ed. by J.F. Schooley, *Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry*, vol.6, part II, 825-830, Amer. Institute of Physics, New York(1992).

[2] 新型体温計の開発動向把握と技術基準適合に関わる調査研究報告書, 日本計量機器工業連合会 (1999).

[3] 体温計校正器 SARS で緊急貸与, 日経産業新聞 (2003年5月27日).

[4] 注意! 高めに出る傾向にある耳式体温計, *苦情処理テスト*, No.5, 国民生活センター (1998).

[5] 毎日新聞(1998年4月22日), 朝日新聞(1998年4月27日), 京都新聞(1998年5月1日), 産経新聞(1998年5月7日), 読売新聞(1998年5月7日) など

[6] ASTM designation E-1965-98, ASTM committee, E20.20 (1998).

[7] prEN 12470-5, CEN TC205 (2000).

[8] 石井順太郎, 福崎知子, 藤原哲雄, 小野晃: 広視野赤外線放射温度計校正用黒体空洞の放射特性評価, *計測自動制御学会論文集*, 37, 468-470(2001).

[9] J.Ishii and A.Ono: Uncertainty estimation for emissivity measurements near room temperature with a Fourier transform spectrometer, *Meas. Sci. Technol.*, 12, 2103-2122(2001).

[10] J.Ishii and A.Ono: Low-temperature infrared radiation thermometry at NMIJ, *Temperature: Its measurement and control in science and industry*, vol.7, ed. D. C.Ripple, AIP, 657-662(2003).

[11] J.Ishii, T.Fukuzaki, T.Kojima and A.Ono: Calibration of infrared ear thermometers, *Proc.TEMPMEKO 2001*, 607-612(2002).

[12] 日本工業規格: JIS T-4207 耳用赤外線式体温計, 日本規格協会 (2005).

[13] (株) チノー 製品カタログ

[14] 耳式体温計標準供給研究会報告, 日本計量機器工業連合会 (2002).

[15] J.Ishii, T.Fukuzaki, H.C.McEvoy, R.Simpson,

G.Machin, J.Hartmann, B.Gutschwager and J.Hollant: A comparison of the blackbody cavities for infrared ear thermometers of NMIJ, NPL, and PTB, *Proc. TEMPMEKO 2004*, 1093-1098(2005).

(受付日 2007.10.3, 改訂受理日 2007.11.27)

**執筆者略歴**

石井 順太郎 (いしい じゅんたろう)

1996年慶応義塾大学大学院理工学研究科(物理学専攻)博士課程修了。同年 工業技術院計量研究所入所。2001年より産業技術総合研究所(計測標準研究部門)主任研究員。2005年より同部門温度湿度科、放射温度標準研究室長。この間、2002年英国立物理学研究所(NPL)客員研究員、2006年 APMP Iizuka Prize 受賞。研究分野は、放射温度標準、赤外放射計測、表面温度計測など。博士(理学)。

**査読者との議論**

**議論 1 耳式体温計の信頼性向上のための今後の技術的課題**

質問 (小野 晃)

技術開発の側面だけにとどまらず、検定・標準供給・工業規格といった社会制度との調和も考慮した総合的な論述になっていることは、本論文の優れた点と思います。

市販の耳式体温計の許容誤差を±0.2℃に収めるためには、本研究の成果に基づいて整備された標準供給体制はかなりの程度満足すべきものように思えます。一方耳式体温計自身に関して、その長期安定性はどの程度のレベルでしょうか。

また市販の耳式体温計を確実に±0.2℃以下の許容誤差に収めるためには、今後どのような点に関して研究開発が必要と考えますか。体温計自身の技術開発と計量標準の技術開発の両面で著者の見解をお聞かせ願います。

回答 (石井 順太郎)

産総研では、1999年当時、製品化されていた複数の耳式体温計を産総研の標準黒体装置を用いて、およそ1年半に渡って定期的に目盛校正を実施し、耳式体温計の長期安定性と再現性の検証を実施しました。この結果から、多くの耳式体温計では、およそ0.2℃以下の長期安定性を持つものの、いくつかの耳式体温計では、半年程度の期間においても0.2℃を超えて、最大0.4℃程度まで温度目盛が変動してしまうものがあるとの結果を得ています。(図aに結果を示します。) 長期的な不安定性の原因を特定することは困難ですが、一般的には、赤外光センサ感度の変動、補償用温度センサの特性変化、光学素子の性

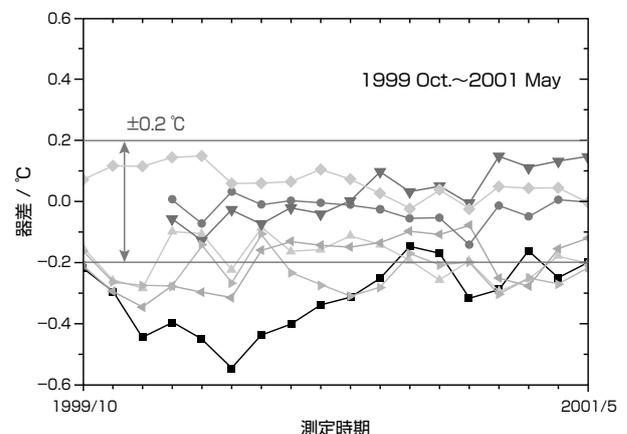


図 a 市販耳式体温計の温度目盛の長期安定性

能劣化などが理由と考えられます。

市販の耳式体温計を確実に $\pm 0.2$ ℃以下の許容誤差に収めることを目標とする場合、耳式体温計自体の技術開発目標として、標準温度に対する最低1年程度の長期安定性が確保される構造・仕様とすることが必要であると考えます。

さらに、医療機関などで使用される体温計の精度管理のためには、製品出荷時の精度確認だけでなく、年1回程度の定期的な性能チェックの実施も有用です。このような性能チェックのためには、医療機関の現場や体温計の販売代理店などにおいて、使用できる簡易型の黒体装置の開発・普及なども必要であると考えます。

また、本文中にも述べたように、現在の黒体装置に対する輝度温度のトレーサビリティ体系においては、黒体装置同士の比較校正のときに発生する不確かさが相対的に大きな値(ばらつきが標準偏差で0.03℃程度)となっており、体温計メーカーが自社内において、黒体装置(群)の階層的な精度管理を実施することは困難な状況であると認識しております。これに関しては、不確かさの小さい黒体装置同士をより小さな不確かさで比較測定するための技術開発が必要であると考えます。これまで市販の高分解能な耳式体温計群を輝度比較器として使用してきましたが、現在、耳式体温計よりも測定のみより小さな不確かさな赤外放射温度計の開発に取り組んでおり、0.01℃程度のより小さな不確かさでの輝度比較校正の実現に向けて良好な実験結果を得ております。

## 議論2 実用黒体装置の校正における他の方式

質問(小野 晃)

産総研の標準黒体装置に対して体温計製造事業者の実用黒体装置を校正する方式には、本論文で述べられている直接の比較校正方式のほかに、移送標準器として体温計自身を使う方式が考えられると思います。また体温計製造事業者の黒体装置から黒体空洞を取り外し、それを産総研に移送して標準黒体装置で校正する方式も考えられると思います。直接校正方式と比べて、これらの校正方式をどのように評価していますか。

回答(石井 順太郎)

輝度温度目盛のトレーサビリティ実現のための移送標準器と校正スキームを図bに示します。

・耳式体温計を移送標準器とする方法について

耳式体温計を移送標準器とする場合、より大型の黒体装置と比較して移送の負担が小さく、事業者等において、標準の体温計を用いて、複数の黒体炉装置を校正することも比較的容易であるなどのメリットを持ちます。ただし、標準の輝度温度目盛は、移送標準器となる耳式体温計に設定・維持されるため、温度分解能などの基本性能に加え、優れた移送安定性や長期安定性が要求されます。

産総研では、黒体装置の移送による直接比較校正スキームと併せて、耳式体温計を移送標準器とする校正スキームについても、実験的な検証を行いました。実験の結果、体温計群を移送標準器とするスキームでは、校正結果のばらつきの程度が0.05℃～0.1℃と大きな値となることが示されました。このばらつきの大きさは、耳式体温計の安定性・再現性の程度に起因するものであり、黒体装置の校正結果の不確かさ

として直接反映します。従って、開発目標である0.07℃以下の校正不確かさの実現が困難となることから、校正スキームとして導入はできませんでした。この方法については、将来、安定性・再現性に優れた仲介標準器(放射温度計)の開発が成功した場合、あらためて検討対象となるべきものと考えております。

・黒体空洞の移送による方法について

耳式体温計用の黒体装置の場合、装置構成として、温度分布の十分に小さい恒温水槽装置に熱放射体となる黒体空洞を設置して、空洞底部付近の水温を参照温度計により測定します。恒温液槽装置は、市場において入手可能な機器を用いて0.01℃程度の温度均一性を実現することが可能であり、長期的な機器管理についても、参照温度計用のような温度分解能の高い接触式温度計を用いて槽内温度分布等のパラメータを定期的にモニターすることが容易です。

一方、黒体空洞については、性能指標である空洞の放射率が、空洞の形状・材質だけでなく、空洞内壁の塗装・コーティングの性状とその劣化によって大きく変化することが想定され、体温計製造事業者や試験検査機関が独自にこれを定量評価することは容易ではありません。従って、事業者の黒体装置から黒体空洞のみを取り外して、産総研に移送し、性能の確認されている産総研の恒温水槽装置に設置して、国家標準の黒体装置(黒体空洞)との間で輝度温度の比較測定を実施することができれば、実質的に黒体空洞の放射率値を校正することが可能と考えられます。この場合、校正依頼者は、大型の精密恒温水槽装置を移送することが不要となるとともに、交換可能な(標準)黒体空洞を複数校正して、群管理を行うことにより社内での長期的な計量管理も可能になるなどのメリットを持ちます。

この標準供給スキームが実現すれば空洞放射率の校正という世界的にもユニークで合理的な標準供給システムとなると期待されましたが、調査の結果、体温計製造事業者が保有する既存の黒体装置では、黒体空洞の形状や仕様によりばらつきが大きく、空洞部を取り外して移送することについても困難なケースが報告されたため、実際の導入には至りませんでした。

## 議論3 国際標準化の動向

質問(小野 晃)

今回の論文は耳式体温計用の計量標準の話がメインでしたが、標準化も重要なポイントだと思います。耳式体温計の国際標準は現在どのような状況ですか。

回答(石井 順太郎)

本文中にも紹介したように、耳式体温計の標準化については、我が国のJIS規格の他、米国ASTM規格、欧州EN規格等が製品規格として制定されています。

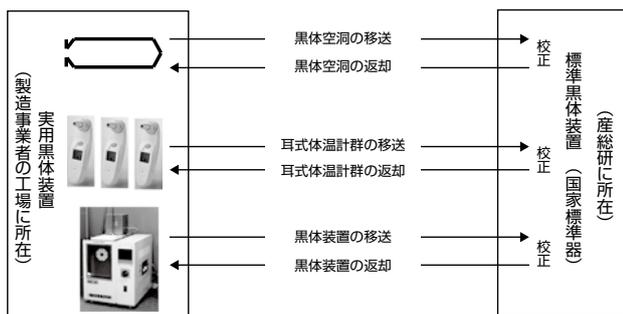
2005年より、電子体温計と耳式体温計を主な対象として、新たな国際規格化の作業がISOとIECの共同提案により進められています。この国際標準化作業については、筆者もエキスパートメンバーとして、国際ワーキンググループ活動に参画しております。2007年10月時点において、下記委員会提案文書が作成されています。

ISO/IEC CD.2 80601-2-56, "Medical Electrical Equipment - Part 2-56, Particular requirements for basic safety and essential performance of clinical thermometers for body temperature measurement", ISO/IEC (2007).

## 議論4 感染拡大防止への耳式体温計の活用方法

質問(小野 晃)

鳥インフルエンザのウイルスが突然変異して世界に蔓延した場合、人類に及ぼす大きな脅威が警告されています。2003年にアジア諸国でSARSが流行したときに、国内に感染が広がった台湾、シンガポール、中国、香港などの経験は、将来の日本にとって参考になるのではないかと思います。公共の場における体温測定では、どのような点が重要になると考えられますか。またそのときの耳式体温計はどのような役割になると考えられますか。



図b 移送標準器の選択

回答（石井 順太郎）

2003年にアジア地域においてSARS流行が社会問題となった直後に、筆者は、実際にシンガポールや台湾の標準研究機関を訪問するとともに、国際空港などにおける発熱感染患者のスクリーニングの実例について情報収集を行いました。各国とも、スクリーニングの対象は、概ね38.0℃以上の発熱患者とされており、赤外熱画像装置や耳式体温計などを使用した検査が行われていました。

それらの事例や関係者の話などから、パブリックスクリーニングの実施における技術的な課題として、①熱画像装置や耳式体温計などの安定性の確保、②機器の組み合わせによる効率的かつ信頼性の高いスクリーニングの実施、などが想定されます。①については、環境条件の安定した実験室とは異なり、温度・湿度などの環境条件の変動の激しい場所において、機器（表示温度）の信頼性を確保することが重要となり、実際にシンガポールの空港では、入国審査場への通路に、改良されたサーモグラフ（赤外熱画像）装置を設置し、スクリーニングを実施していましたが、熱画像装置の表示温度の安定性が十分ではないため、歩行者通路の背景に、簡易式の黒体装置を設置し、歩行者と黒体空洞が同時に観測されるような工夫がされていました。②については、大勢の人々のスクリーニングを効率的に実施するため、熱画像装置による一次スクリーニングを旅行者に実施し、発熱の疑いのある者に対して耳式体温計による検温検査を実施することにより、大勢の旅行者にストレスを与えることなく、信頼性の高いスクリーニングを目指した取り組みが行われていました。

これらの事例や課題は、我が国におけるスクリーニングの実施に対して有益な示唆を与えるものと考えます。

### 議論5 標準黒体空洞の形状と表面コーティング

質問（小野 晃）

モンテカルロシミュレーションを行って広視野角の黒体空洞を設計したとありますが、産総研が推奨し、JIS規格に採用された空洞はどのような形状ですか。また標準黒体装置の黒体空洞の内壁は通常どのような材料でコーティングされ、それは赤外域でどの程度の放射率ですか。

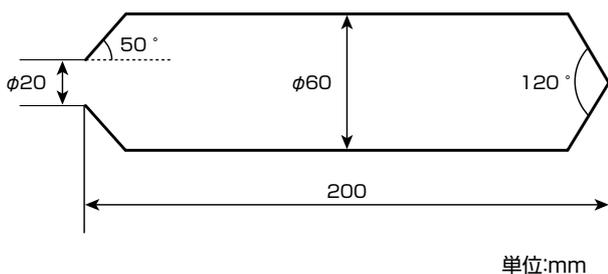
回答（石井 順太郎）

産総研の開発した耳式体温計校正用の標準黒体空洞の断面図を図cに示します。黒体空洞は、熱伝導率の高い無酸素銅を材料とし、空洞壁は、0.5 mm以下の厚みとなるように製作します。黒体空洞内壁は、赤外波長域で0.95以上の高い放射率を持つ黒化処理が必要となります。産総研では、国内外で市販されている多くの黒色塗料・コーティング材料について、独自開発した放射率測定システムを用いて、赤外波長域の分光放射率データを取得し、5～12 μmの波長域において、0.96以上の分光放射率を持つ黒色塗料（Nextel社製 Velvet coatings）を採用しています。

### 議論6 耳式体温計の開発の経緯

質問（小林 直人）

耳式体温計は非接触計測を短時間に出来ると言う点で画期的な温度



図c 産総研の開発した耳式体温計用標準黒体空洞

計であると思われます。これは、1990年代米国メーカーによって開発されたとのことですが、当時わが国や他の国ではこの方式の体温計の開発は行われていたのでしょうか。完全に米国メーカーのオリジナルなものであるとすれば、そのみが出来て他では出来なかった理由は何でしょうか。また開発競争の結果であったのなら、なぜわが国や他の国のメーカーでは競争に勝てなかったのでしょうか。

回答（石井 順太郎）

人体から放射される赤外線を計測して、皮膚や体表面の温度を知る方法については、以前からよく知られた計測技術であり、サーモグラフ（熱画像装置）などを用いた、乳癌診断技術などにも応用されていました。一方、鼓膜温の計測については、鼓膜温が脳の温度に近い指標となることから、医学的にも重要な“深部体温（中核体温）”として、計測の対象とされてきました。しかしながら、従来の方法では、細線型の熱電対やサーミスタなどの温度センサを鼓膜に直接接触させて測定していたため、患者（被験者）への負荷が大きく、医療専門家による特別な体温測定法とされていました。

現在の耳式赤外線体温計の開発経緯の詳細については、把握していませんが、製品化に至る技術的なポイントとしては、“高感度かつ低価格な赤外センサの開発”と“周囲環境温度変化や人体との密着による体温計の温度変化に対する補償技術”の2つであったのではないかと考えます。耳式赤外線体温計の基本的な方法論については、以前より知られていたものと考えられ、米国のみならず、欧州や日本国内でも製品化を目指した技術開発は行われていたのではないかと考えられます。米国では、防衛・宇宙分野の中核技術として、赤外線センサや精密な赤外計測技術の先進的な研究開発が行われており、それら的高度な赤外線技術を基盤として、実用性の高い耳式体温計が世界に先駆けて製品化されたのではないかと思います。あくまで想像ではありますが、水銀体温計やサーミスタ体温計を製造してきた日本や欧州の体温計メーカーでは、赤外線計測の技術基盤を持っていなかったことも影響して“電子体温計と競争できるような低価格で信頼性の高い赤外線体温計の製品化は、相当先の話”と認識していたのではないとも思います。そのような状況において、米国ベンチャー企業が実際に競争力のある耳式体温計を開発し、米国市場においてもユーザーからの支持を得た事実をみて、日本及び欧州メーカーの製品開発の動きが急速に高まったのではないかと考えております。

### 議論7 耳式体温計の市場テスト

質問（小林 直人）

現実の耳式体温計の信頼度は、どの程度と考えればよいでしょうか。公的な消費生活センターが行った耳式体温計の比較テスト（平成17年度）では0.5～0.7℃もの測定値の差が報告されている例があります。この結果は、長期安定性が悪いために最大0.4℃程度まで温度日盛が変動してしまう現状では仕方のないことなのか、現在の耳式体温計のトレーサビリティがより普及すれば改善されることなのか、興味のあるところですので、ご意見をお聞かせください。

回答（石井 順太郎）

耳式体温計の性能に対するユーザーレベルでの信頼性については、ご指摘のように現在でも、十分にユーザーの満足を得られていない部分があることは事実であると認識しております。この点については、①物理的な計量器（温度計）としての体温計の性能及び、②人体を測定対象とする医療機器としての体温計の性能の2つに整理して検討することが必要であると考えます。

このうち①については、本文中でも述べたように、赤外線式（放射）温度計として、温度の国際単位（SI）にトレーサブルな標準黒体装置を基準として、目盛校正や適合性評価を行うことにより、測定結果の信頼性を検証し、製品の性能向上へフィードバックすることが可能であり、既に、産総研の研究開発の成果が信頼性の向上に貢献しているものと理解しております。実際の製品の中には、長期的な安定性などの問題点を持つものがあることも事実と考えますが、これらについても、標準

黒体装置などを用いて、検証・評価を行うことにより、トレーサビリティの普及と併せて、将来的にはより安定な体温計が開発されることが期待できると考えます。

これに対し、②については、人間の体という“ばらつきを持つ測定対象”に対する信頼性を確保するものであり、①のケースとは、異なるアプローチが必要となります。本文中でも述べたように、現在の耳式体温計では、型式ごとに異なる測定視野を持ち、測定部位についても、必ずしも“鼓膜”そのものではなく、多くの場合“鼓膜を含む耳道内面”を測定しています。一般的に、鼓膜とその周囲の耳道部には、有意な温度差（温度分布）が生じることがあり、さらに、鼓膜と周辺耳道部の皮膚表面では、放射率にも違いがあります。従って、1個の耳式体温計で同一の被験者を繰り返し測定した場合でも、耳式体温計の押しつけ方向の違いなどから、測定データが大きなばらつきを示すことが起きやすく、さらに、測定視野の異なる耳式体温計の指示値に不整合が生じることも現状では、やむを得ない部分があります。

これらの問題については、①のように、“物理的に正しい黒体装置”による工学的評価では、必ずしも検証を行うことはできず、医学的知識を前提とした臨床的評価を実施して、信頼性向上を図ることが不可欠となります。耳式体温計の開発の立場からは、“鼓膜だけを選択的に測定するような体温計”や“一度の測定の間、一定数の測定を繰り返し行い、その中の最高温を測定結果とする方法”さらには、“測定結果をそのまま結果とせず、体温計の特性に基づいたデータ処理を行い、腋下温や舌下温へ変換した値を表示する方法”などが研究開発されています。一方、現在進められている国際標準化（ISO/IEC規格）作業においても、耳式体温計を臨床的評価の必要な体温計として分類し、標準黒体装置による工学的評価と併せて、有熱患者を含む被験者を対象とした臨床的評価を実施し、統計的な方法による臨床的信頼性の検証の実施が提案されています。この場合、工学的評価結果については、本文でも述べたように0.2℃の不確かさの実現が厳密に要求されますが、臨床的評価については、統一的な数値規定ではなく、ユーザーに対する評価結果の適切な情報公開が要求されています。

将来的には、これら2つの性能評価がそれぞれ適切に行われ、製品技術へフィードバックされることにより、ユーザーレベルでより高い信頼性の確保が可能となると考えます。

#### 議論8 将来の検定制度導入の可能性

質問（小林 直人）

議論7の質問とも関連しますが、最終的には耳式体温計も検定により全品検査が行われることが望ましいのでしょうか。そのためには技術開発が飽和し、いわば「枯れてくる」ことが必要なのだと思われるのですが、それはいつ頃になりそうでしょうか。あるいは技術がどの程度の段階にまで達すれば、そうなると思えばよいのでしょうか。

回答（石井 順太郎）

本文中にも述べたように、検定とは、計量器の性能を法律（計量法）に基づいて国の責任と権限の下で検査し、国内において一定水準以上の計量の実施を確保するものです。国の直接的な関与が大きい制度であるため、ユーザーにおける信頼感が高い反面、メーカーへは、製品開発や市場化に対する規制要因となる場合も想定されます。前記回答2でも述べたように、耳式体温計に関しては、長期的安定性の向上を始め、臨床的評価に対する信頼性を向上するための製品技術開発が引き続き行われており、技術的拘束力の強い検定制度への移行には、少なくとも5年程度の時間をかけて製品技術の動向を精査することが必要であろうと思います。さらに、最近、耳式体温計の原理を応用した新型の皮膚体温計などの製品も開発されており、これら新型機器を含めた技術的な検討を行うことも将来の課題となると考えられます。

本文では、国内において耳式体温計の製造・販売が急速に拡大した当時の検討内容をその技術面から紹介していますが、将来、耳式体温計を計量法の特定制量器としてあらたに指定する場合には、技術的な評価だけでなく、国内メーカーの企業活動に対する経済的な影響や海外メーカーの国内市場参入への影響の他、医療機器を対象とした薬事法（厚生労働省所管）との関係などについても十分な検討が必要となります。FTA（自由貿易協定）に代表される貿易自由化の世界的な流れの中では、国の関与の大きな検定の実施は、国民の安全や通商の信頼性の確保において、必要かつ十分な対象にとどめ、国際規格への適合性やトレーサビリティの確保などを条件としたルール作りが国際的にも強く求められています。また、前記回答2においても述べたように、ユーザーレベルでの最終的な信頼性の確保のためには、計量標準の整備や工学的評価方法の確立に加えて、医学的な知見を含めた臨床的評価も重要となるため、計量法と薬事法の双方において、より合理的なアプローチを検討することも重要な課題となると考えます。

# 科学と社会、あるいは研究機関と学術雑誌：歴史的回顧

赤松 幹之\*、井山 弘幸\*\*

## 1 はじめに

本稿では、この新しいジャーナルの発刊に際して、科学技術の研究におけるジャーナルの役割を科学史の観点から顧みる。現在は数えきれない数の学術雑誌があるが、そのうえに更に新しいジャーナルを発刊するからには、その意義を明確にしておく必要がある。そのことは、我々が目指す科学技術の社会への貢献のためにジャーナルが目指すべきあり方を模索するための糧になると考える。そのために、科学史を紐解き、我々の研究活動の発表の場として当然のように存在する学術ジャーナルが、いかなる経緯によって生まれて来たかを明らかにして行くことにする。

近代科学の誕生はガリレオやニュートンら知の巨人と呼ばれる人達の卓越した業績によるところが大きい。17世紀に彼らが知識の変革をなし得た背景には、科学知識を広く世に伝える研究機関とその手段となったジャーナルの存在があった。ニュートンは後に会長の地位に就くことになるロンドン王立協会の機関誌『フィロソフィカル・トランザクションズ』に古典力学や光学に関する論文を寄稿したし、デルフトの毛織物商人でアマチュアの生物学者レーウェンフックは、自製の顕微鏡を駆使して史上初の微生物観察を報告するレター論文を送った。ロンドンの王立協会やローマの実験学会は、会員相互のコミュニケーションを活発におこない、鮮度の高い情報をリアルタイムで報告しうる雑誌を刊行していた。社会学者マートンが20世紀に提唱した科学者集団のエートス（集団が持つ性格や習慣）の重要な一つである「共有性」（communalism）はすでにこの科学革命の時期に成立していて、集約的な事実の収集とそれらの情報の開示がやがて人類の福利厚生に役立つと推測していた。

こうした知識の迅速で積極的な開示が科学者相互の研究交流に益し、延いては人類社会に貢献しようという思想は、フランシス・ベーコンの『ノヴム・オルガヌム』（1620年）に淵源する。古代近代論争のさなか、アリストテレスを代表とする古典的知識のなかに真理が語られているとする古代派に抗して、近代派のベーコンは偉大な先哲の業績

の上に立って、いわば「巨人の肩の上に乗って」さらに遠方を俯瞰するためには、新しい知識すなわち実験や観察による経験的知識を蓄積する必要性を訴えた。遺著となった著作『ニュー・アトランティス』では、遙か後に実現する科学立国構想が表明され、社会に貢献する知識制度のひな形が語られていた。王立協会などの学会の創設理念はこのベーコンの新構想の影響を多分に受けていたのである。

研究成果を論文という形式で雑誌に掲載し、会員相互の知的交流を促すシステムは、このように17世紀に創設されたが、その内実は博物的な新奇性や天変地異を扱うものが多く、科学的成果の産業的有意性を求めるものは見られず、虚心坦懐に事実を報告しつつも、高次の理論に基づく演繹的推論を含むものは少なく、ましてや産業的応用に言及するものは殆どなかった。科学雑誌が真に社会に眼を向けるようになるのは、専門分野が成熟し個別の学会とその機関雑誌が刊行される19世紀になってからである。科学雑誌の性格は産業革命を経て一変し、知識の有用性をめぐる議論も活発になってゆく。ベーコンの構想から二百年の時を経てようやく「有用知識」という尺度で知識を評価する視座が生まれた。その後、国家的規模の助成制度や研究機関、さらに理系大学の誕生を得て、科学者集団は研究の自由を保障される自律的な知識団体として制度化され、国家計画の枢要な地位を占めるにいたった。しかし、20世紀末のイグ・ノーベル賞創設に象徴的に表われているように、現在では、ともすると知識のための知識が追究され、実社会との関連性を欠いた「役に立たない」研究が量産されるようにもなった。こうした現状において、科学雑誌の本来の機能をその歴史の原点までたどって回顧することは、現代科学と社会との関係を見直すためには欠かすことのできない作業となるだろう。

## 2 科学の社会的有用性

古代に最も発展した分野の一つは天文学である。たとえば最も古い日蝕の予言は紀元前585年にタレスによってなされている。古代社会では祭祀を重視し、そのために精確な

\*産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門 〒305-8566 茨城県つくば市東1丁目1-1 中央第6 産総研つくばセンター  
E-mail: akamatsu-m@aist.go.jp

\*\*新潟大学 人文学部 人間学講座 〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050

観測が不可欠であった。エジプトではパピルスに残された断片から死体処理および防腐技術が用いられていたことが分る。そしてピラミッドの建造においては他に比類のない高度な測量技術を披瀝した。初期のどの文明においても基幹技術として金属精錬の技術である冶金学が確立していた。当然のことながら軍事関連の技術については、古代より盛んであり、アルキメデスの開発したクレーンや投石機はローマとシチリアの戦闘で用いられ成功を博したし、諸葛孔明は指南車を考案して魏軍を脅かしたことが記録されている。このように古代の科学技術は国家的な必要性と緊密に結びついてことが分る。換言するならば、国家にとって有用な知識のみが育成され制度化されていた。

近代以前の科学技術はその起源を求めれば大抵は偶発的なものであり、有用な知識を新たに得るための研究体制は葉草をもとめる本草学などの一部の例外を除いて整っていなかった。すなわち有用な科学知識はあっても、それらを組織的、系統的に獲得するためのシステムは存在していなかった。そして、中世においては、これらの古代の遺産を継承し保存することに終始した。

近代において、科学的知識が人間生活の益をもたらすという考えは哲学者フラシス・ベーコン（1561-1626）に始まる。1620年に書かれた『ノヴム・オルガヌム』において、科学研究のもつ公益性や変革性、また人間生活に対する効果を主張し、技術や職人のもつ知識の有益性も強調した。1627年に書かれた『ニュー・アトランティス』というユートピア小説において、ベーコンは科学者が集まって研究を行う「ソロモンの家」なる国立研究所を構想し、知識は権力の拡大に貢献することをうたい、ひいては自然哲学によって人間帝国の領域が拡大できることを主張した。ここに現代に至る社会貢献を目的とした科学技術の思想が胚胎する。

では、このような自然科学の社会貢献の思想はどこから来たのであろうか。今で言う所の科学は当時は自然哲学と呼ばれており、神学、人文学とともに哲学すなわち知を獲得する学問の一つとみなされていた。そして、自然は神が創造したものであることから、神の創造した自然を知るとは神の行いを知ることであり、自然は第2の聖書とみなされていた。自然哲学において、自然を知り、神を知るとは、全人類に幸福を与えるものである、というキリスト教的博愛主義が根底にあったといえよう。ガリレオの地動説に対する宗教裁判という出来事から、科学と宗教は対立関係にあったと思いがちであるが、ベーコンの思想においては自然哲学すなわち自然科学は神を知るための営みだったのである。

もう一つベーコンの思想が科学に与えた大きな影響を忘れてはならない。ベーコンは一般原理から推論する演繹主

義は偏見や先入観などの誤謬（イドラ）に陥りやすいとして、事実の観察に基づいて原理に到達する帰納法であるべきと主張した（経験論）。それゆえ、自然哲学を推し進めたのであるが、それとともに、観察や実験から得られた事実の蓄積が自然の中に隠されている原理を明らかにする、という考え方が科学の基本的な方法論となっていたのである。

### 3 学会や科学アカデミーの設立

近代科学の確立を見た17世紀には、自然科学的な知識を交換・蓄積する場として学会・科学アカデミーが西欧の主要都市で生まれた。神学、数学、法学の三学部しかなかった大学においては、自然科学を専門にあつかう学部は存在せず、現代の教養課程に相当する自由学芸という呼称のもとで、わずかに幾何学や天文学が教えられているにすぎなかった。ここでの自然科学は古典を通じて学ぶものであり、古代の哲人の著書を金科玉条のものとして権威化し、実験や観察によって新たな事実を知るという経験主義的な方法は採られていなかった。したがって、客観的事実を蒐集し、そこから一般的な理論や法則を得ようとする態度は育まれず、当然ながら、大学は科学的発見を公表する場には不向きなものであった。

このころ自然科学者は、貴族や王室をパトロンに持ったり、別の職業を持つ傍らに趣味的に研究をしていた。これらの自然科学者の発見や発明などを公表したり、実験をして、議論する場として、いわゆる学会が始まる。ガリレオが活躍したイタリア山猫学会（アカデミア・デイ・リンチェイ）、実験学会（アカデミア・デル・チメント）が最初の学会であり、イギリスではニュートンやボイルが会員となったロンドン王立協会（1662）、フランスはパリ王立科学アカデミー（1666）がそれに続く。ロンドン王立協会は今日でも存続する最古の学会でもある。学会というと今日の日本の学会のように、大学や研究機関の一部などに事務局だけがある組織を思い浮かべるかもしれないが、これらの科学アカデミーは、互いの研究成果を発表する場としてだけでなく、実験設備を揃えて、そこで会員が実験をできる研究所の性格ももっていた。（図1）。このことから分るように、今日の学会の起源となった科学アカデミーは研究機関すなわち研究所であった。

研究者が集まって実験をしたり研究報告をする場として作られた科学アカデミーはベーコンの「ソロモンの家」を具現化したものであり、特に大法官ベーコンを輩出したロンドン王立協会は彼の影響を強く受けていた。もっとも、王立協会は国王の勅許を得て創設されたという意味では「王立」ではあったが、資金的スポンサーシップは得ていたわけで

はなく、実際には会員の共同出資によって運営されていた、という意味では「民営」制であった。他方、パリの王立科学アカデミーはルイ 14 世からの助成を得ることに成功して、王室から給料をもらって研究をする施設、すなわち世界最初の国立研究所となった。

自然科学における原理を見いだすためには科学的知見や発明の蓄積をする必要があると認識されていたこと、そして、科学的知見や発明の蓄積には、権威主義の場である大学はふさわしくなく、科学的発見は対等であるという平等な立場での知識の蓄積がなされる研究機関という場が、（実際には権威争いがあったにしても）ふさわしいということを強調しておきたい。

#### 4 学術ジャーナルの発刊

これらの学会や科学アカデミーは会員のための会報を発行した。それが自然科学研究の成果報告を掲載する学術ジャーナルとなった。現在まで続く最も古いジャーナルは『ロンドン王立協会紀要』（*Philosophical Transactions of Royal Society of London*, 1665-）である（図 2）。これは 1662 年に設立された王立協会の事務局長のオルデンバ



図 1. パリ王立科学アカデミーでの会員活動上の図は会員が王立図書館で研究をしているところで、下の図は実験室で実験をしているところ。図はマクミラン『世界科学史百科図鑑』（原書房）より<sup>[14]</sup>。

ムの自主的活動として始まった。

オルデンバームは創刊号のまえがきに、なぜこの科学ジャーナルを発行することに至ったかを記している。

#### 序

本誌刊行にあたって、科学的な問題に関する研究や研鑽に関わることや、発見されたり他の人間によって実用に供されたりしたことを、広く人々に伝えることほど、科学知識の改善を推し進めるのに必要なことはない。それゆえ、印刷して出版することは、科学にたずさわる人びとを喜ばせる最も相応しい方法となるだろう。研究への取り組みや学問の進歩や有益な発見に関わることに喜びを享受する者は、本誌によって、イギリス王国および世界各国がときおり提供してくれる知識に接する権利をもつことになる。また同種のことがらに関する愛好家や学識者の研究、苦勞、試みの進歩についても、あるいは熟練した発見や実演に関しても知ることになるだろう。こうした成果が明確に正しく伝えられたならば、確実に有用な知識への願望はいつまでも絶えることはないだろう。賢明に構想された試みや精巧な行ないはつねに求められ、こうしたことがらに病みつきになったり、精通した者は、（本誌によって新たな情報を得ることによって）刺激を受け、勇気づけられて、さらに新しいことを探求し、実験し、発見することを望むようになり、そうして得た新たな知識を他者に分け与えたいと望むだろう。そして自然に関する知識を改善するという大いなる計画（グランドデザイン）にあたる限り貢献し、すべての学芸や諸科学を完全なものとするに役立つことになる。そのすべての企図が神の栄誉を讃え、神の王国の名誉と繁栄、人類の普遍的善につながるだろう

雑誌というメディアによって、世界中の科学者や天才達によって得られた科学的知識（発見やアイデア）を集積することで、自然科学の理解を完全にすることができると考えていること、またこれらの科学的知識は国家に貢献し、国家の繁栄に寄与することを述べている。まさに、ベーコンの経験論である多くの事実の集積による共通的本質の理解を

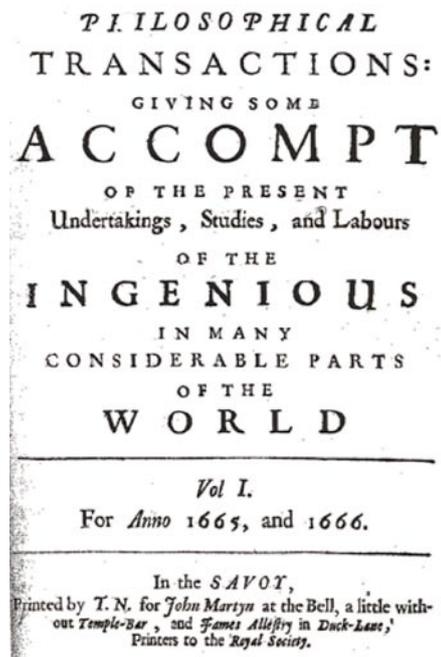


図 2 ロンドン王立協会紀要創刊号の表紙

実践する場としてのジャーナルの発刊であった。

印刷技術はグーテンベルグによって15世紀に発明が行われたが、次第に広まり、17世紀までは書物が科学的な知識の伝達の媒体であった。一方、雑誌という伝達媒体は、書籍の出版情報誌である『ジュルナル』が17世紀にパリで発刊されたのが始まりである。一冊で完結している書籍ではなく、様々な知見を定期的集積する雑誌という印刷媒体が、世界中で行われている科学者の研究成果を知識として蓄積する最も適切な媒体であるとオルデンバームは考えたのである。

## 5 ピアレビュー制度とオリジナリティ

現在の学術ジャーナルで論文掲載の可否を決定するための査読制度（ピアレビュー：同業者による審査制度）は、すでに王立協会紀要で取り入れられた制度である。会員の興味をそそりそうな報告はオルデンバームによって選択されていたが、紀要に掲載するためには一部の会員の承諾がないと掲載されなかった。これは、オルデンバーム自身が自然科学者ではなかったことも影響しているかもしれないが、いまでいうところのエセ科学やオカルト的な内容のものや、実際には見てもいない奇妙な生物の噂話なども報告として送られていたことから、これらの報告の信憑性を判断するためであったと思われる。

このように、ジャーナルという形態をとった自然哲学は査読制度も導入することで、アリストテレスの自然学の遺産とそこからの命題論理学による推論によって真理を求めた、それまでのスコラ哲学とは異なる知識獲得の形態を帯びていた。「論証的な正当性」ではなく、まずは「経験的事実」であることを重視する態度が、自然哲学の基本的な態度となった。しかしながら、それと同時にピアレビュー制度は、レビューヤーに理解できないものは掲載されないという、一種保守的で権威主義的な面を持たざるを得なかったことも忘れてはならない。

科学ジャーナルによって導入され、今でも研究という営みに大きな影響を与えているもう一つのもは、発見・発明の先取性である。定期的に発行されるジャーナルによって、発見・発明が報告された時点でタイムスタンプを押すことになった。ルネッサンス期からオリジナリティという考えがでてきたが、オリジン＝起源という語から、オリジナリティ＝独創性という個人の能力をさす意味になったことは、ルネッサンス期の個人主義への変化を良く表しているといえよう。しかし、当時はタイムスタンプを押す手だてがなく、剽窃か否かの論争が多くなされていた。そして、17世紀に発刊されるようになったジャーナルに研究が掲載されることで発見・発明の先取性が明確になり、その科学者個人の研

究能力の証（あかし）とされることになった。このことは、個人主義の現れとみることができ一方で、科学者の雇用形態とも大きく関係があったと思われる。先に述べたように、一部の科学者は科学アカデミーによって雇用されていたり、大学の教授職をもっていたが、多くは貴族などをパトロンに得て生計を立てていた。ルネッサンス期のレオナルド・ダ・ヴィンチ、近代のケプラーやガリレオもパトロンに支えられていた。したがって、自分がいかに科学者として能力があるかを示すことが、良いパトロンを見つけることにつながったのであろう。

学術ジャーナルは、人類全体のための福利のために自然に関わる科学的知識を集積する場とする、という集団主義な目的で始められながら、オリジナリティという個人主義的さらには利己的な面も持つことになり、ある種の矛盾を抱えたものとなった。

## 6 科学の知識の細分化の道

ロンドン王立協会紀要の話に戻ると、王立協会の事務局長であったオルデンバームは、協会での口頭発表を筆記して論文として紀要に掲載しただけでなく、世界中から送られてくる発見や発明の報告を英語に翻訳して掲載した。オルデンバームはドイツ人であるが、王立教会の事務局長の職に就く前には、イギリス貴族の家庭教師として子息の見聞を広めるために欧州大陸を旅行するグランドツアーに同行する仕事をして、ヨーロッパ全土に人脈を作りあげていた。王立教会の事務局長となってから、彼の堪能な語学とこの人脈のおかげで、様々な自然科学の発見と発明を集めることができ、ジャーナルを成り立たせていたのである。

当時の王立協会の紀要の記事をみると、どこかで発見された植物の話、レンズの作り方、木星の話など、特定分野に限定されたものではなかった。現代の我々からすると、これだけの幅広い内容に眼を通し、翻訳することができたオルデンバームの能力は驚嘆に値する。しかしながら、そもそも「知」とは本来は全体知を意味しており、自然科学は自然の真理を理解するための学問であることから、自然の営みを全体として理解するためには、様々な自然現象を扱うのが当然であった。

ベーコンは先に挙げた著書のなかで、単に事実を集めればよいと考えていたわけではなかった。存在者・不在者のリストをつくり、対象は綿密に調べては分類する姿勢が推賞された。彼のこの情報分類システムは自然界の分割を結果的に招来し、科学知識の専門分化を促すものであった。自然現象をもっとも単純な要素にまで分解する、この知のシステムでは不可避的に要素還元論の性格を帯びる。還元された要素について成立する法則や理論を解明するために

は、十分な量の知識が蓄積されることは当然として、綿密な分類体系のなかに事実を整理する必要があった。そのためこうした要素主義は知識の細分化を伴い、その結果、知識の集積の場である学術ジャーナルも分割された自然の領域ごとに必要となっていった。19世紀には、科学分野別の学会が成立し、その分野ごとの学術ジャーナルが相次いで刊行されるに至った背景には、ベーコン流の知識分類体系が厳として存在していたのである。

真理を追究するためには、対象を要素に分けて研究することになり、自然哲学としての本来の目的である全体知から遠ざかることになる。我々にとって耳慣れた科学者 = Scientistという言葉は、19世紀にイギリスの知識人ヒューエルによって作られた。「知」を意味する Scientia というラテン語と、特殊技能を持つ者という意味のギリシャ語である ist と組合せた語である。哲学者のように全体知を目指す人達とは違って専門のことしか分らない知識人という意味を持つ呼称であるが、結局は自然科学者達に受け入れられ、現在に至っている。専門のことが分っていれば良いという科学技術研究者にしばしば見られる態度には長い歴史があるのである。

細分化されてしまった科学の研究は、その要素によって構成される全体に対して、ごく一部しか担わないことになる。しかしながら、研究者はその要素が全体における本質的な要素であると信じて研究を進めている。しかし、構成要素が多くなればなるほど、個別要素の研究が社会への貢献につながるまでには長い道のりがあるように思われる。

## 7 科学の知の統合

科学の還元論的方法論に従うならば知の細分化は避けられなかったと同時に、研究のオリジナリティの獲得、言い換えれば研究能力の証の獲得のために、対象の細分化が推し進められた面もある。ジャーナルに投稿する論文のオリジナリティを確保するためには新しい知を主張しなければならないが、それは対象を細分化することでもある。自己の研究能力を示すために多くの論文をジャーナルに投稿するという科学者の社会的行動の力も加わり、科学は細分化の道を辿っていった。

一方、17世紀において、細分化とは反対の意味を持つ体系 (system) という語も使われるようになった。しかしながら、ここでの知識の体系とは、いかにきれいに分類またカテゴリー化できるかというものであり、理解のために知をどこに位置付けるかという、ベーコンによって推奨された分類による理解であるといえる (図3)。何も整理されていない知を全体として理解することは難しいが、大分類 I に

属する中分類 A 中の小分類  $\beta$  であると整理することで知として理解することができる。

知を体系付けることによって理解の手助けになるが、ここでの理解とは位置づけを理解することである (図4)。しかしながら、体系化による知の理解も結局のところ細分化の上での理解でしかなく、科学的知識を社会へ役立てるための架け橋とはならなかった。事象の分類・整理は、同質のものを集めることであり、事象間の関係を明らかにしてくれるものではない。人や社会に働きかけるものを創造するためには、事実や事象を関係づけ、統合・構成していかなければならない。しかしながら、そのための、「有益な知」を得る、または「知を有益化」するための活動については、これまでの科学の歴史を概観したところで、ほとんど何も教えてはくれない。自然科学が追い求めてきた知とは、自然に関する事実の知識であり、事実的知識に対する科学の基本的な方法論が還元論的要素分解であった。事実的知識の理解は、それが「何であるか」という理解であって、「何ができるか」という機能的・構成的理解ではない。科学的知識が社会に貢献できるためには知識によって何ができるかが理解される必要があるにもかかわらず、要素分解的に事実を追求するプロセスにおいては事象の持つある特定の機能的側面にしたがって要素分解が行なわれることから、事象がどのような機能的・構成的側面を持っているかが科学的知識の形で蓄積されることはなかった。

事象の持つ機能的・構成的側面は多様であることから、それを知識とする作業においては、期待や思い込みなどがおきかねない。製品化事例をみれば分かるように、しばしば成功物語として美化されてしまい、事実としての統合や



図3 ウォーム博物館の内部<sup>[14]</sup>

17世紀のコペンハーゲンの医師ウォームによって作られた博物館。動物の剥製だけでなく、道具類また石器などの人工物も蒐集してある。一見すると雑多に並べられているが、実際にはウォームの考えに基づいてカテゴリーに分類されている。

構成のプロセスを見失うことになる。まさに、ベーコンが避けるべきとしたイドラとの戦いがある。しかしながら、科学的知識を社会に役立てるための原理原則が見いだせていない現在において、まず行なうことができるのは、科学技術の社会還元のための当為的知識、すなわち何をなすべきかに対する知識を蓄積していくことである。これまでの自然科学における事実に知識の蓄積の方法である細分化に陥ることなく、その方法を模索していかなければならない。

## 8 おわりに

科学技術と社会とのギャップを埋めるための学術ジャーナルの発刊にあたって、学術ジャーナルの意義について、科学史を手掛かりに探ってみた。何故、学会ではなく公的研究機関が学術ジャーナルを発行するのかと疑問を持っている方も多いと思うが、学会と研究機関とは起源が同じであると考え、互いに対等な立場で成果を出し合える研究機関が研究成果を集積するための学術ジャーナルを発行することは、何ら不思議なことではないと理解いただけたことと思う。また、科学技術の社会還元という考えは、

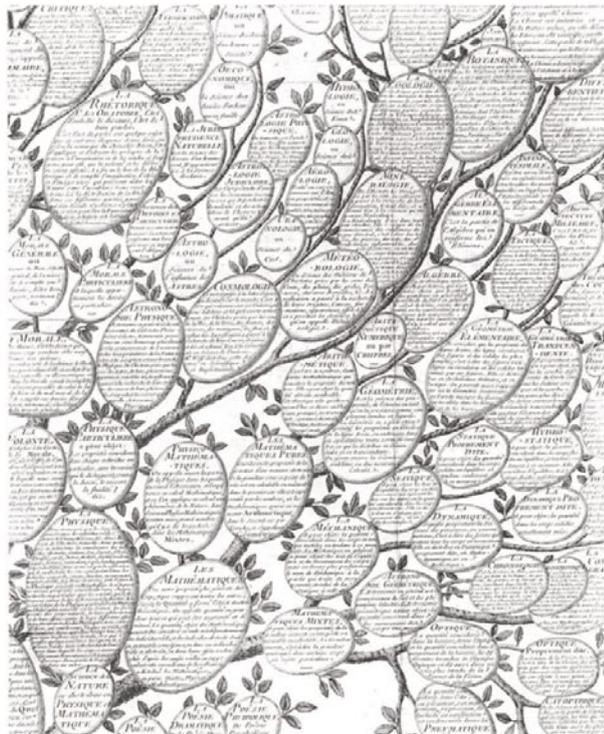


図4 知識の樹：デイドロの『百科全書』<sup>[14]</sup>  
『百科全書』は18世紀にドニ・デイドロによって編纂された、科学技術を中心とした芸術や歴史を含むあらゆる知識を体系立てて網羅した壮大な辞書である。この知識の樹は知識の分類を表している。「自然の科学」は数学と自然学 (physic) に分かれ、自然学はさらに個別自然科学で分けられ、天文学、気象学、植物学、動物学などに分類されることが、この図の樹木の枝分れによって表現されている。

近代科学を興したといえるベーコンの思想そのものであり、科学の原点ともいえ、その目的のために学術ジャーナルが始まった。しかし、例えば要素還元論などの科学のこれまでのいとなみに、科学と社会との間にある死の谷また悪夢と呼ばれるギャップを超えられなかった一因があるのであれば、ギャップを乗り越える新たな科学技術の方法論を構築していかなければならない。技術シーズを探すとといった社会の側からのギャップを埋めるアプローチに頼るのではなく、科学技術の側からのアプローチとしての方法論を確立していくことが科学技術の研究者集団としての責務であるといえる。そのために原点に立ち戻ろうというのが、このジャーナル発刊という試みであろう。

## 参考文献

- [1] 伊東俊太郎, 村上陽一郎編: 西欧科学史の位相, 培風館, 東京 (1989).
- [2] マーク・エイブラハムズ (福嶋俊造訳): イグ・ノーベル賞, 阪急コミュニケーションズ, 東京 (2004).
- [3] D.S.L. カードウェル (宮下晋吉, 和田武監訳): 科学の社会史: イギリスにおける科学の組織化, 昭和堂, 京都 (1989).
- [4] H. カーニイ (中山茂, 高柳雄一訳): 科学革命の時代: コペルニクスからニュートンへ, 平凡社, 東京 (1983).
- [5] 金子努: オルデンバーム: 17世紀科学・情報革命の演出者, 中央公論新社, 東京 (2005).
- [6] I. Bernard Cohen: *Revolution in Science*, Harvard Univ. Press, (1985).
- [7] Lisa Jardine: *Ingenious Pursuits: Building the Scientific Revolution*, Anchor Books, (1999).
- [8] スティーヴン・シェイビン (川田勝訳): 科学革命とは何だったのか, 白水社, 東京 (1998).
- [9] ピーター・バーグ (城戸淳, 井山弘幸訳): 知識の社会史, 新曜社, 東京 (2004).
- [10] ポーラ・フィンドレン (伊藤博明, 石井朗訳): 自然の占有: ミュージアム、蒐集、そして初期近代イタリアの科学文化, ありな書房, 東京 (2005).
- [11] メルヴィン・ブラッグ (熊谷千寿, 長谷川真理子訳): 巨人の肩の上に乗って, 翔泳社, 東京 (1999).
- [12] 古川安: 科学の社会史, 南窓社, 東京 (1989).
- [13] J. R. Jacob: *The Scientific Revolution; Aspirations and Achievements, 1500-1700*, Humanities Press, (1998).
- [14] バーナード・コーエン編 (村上陽一郎監訳): マクミラン世界科学史百科図鑑2, 原書房, 東京 (1993).

(受付日 2007.10.3)

## 執筆者履歴

赤松 幹之 (あかまつ もとゆき)

1978年慶応義塾大学工学部管理工学科卒業、1984年同大学院博士過程修了。工学博士。1986年製品科学研究所(当時)入所。現在、人間福祉医工学研究部門部門長。これまでに、触覚機能、バイオメカニクス、ニューラルネット、大脳生理、ヒューマンインタフェース、認知行動モデルなどの研究に従事。常に、技術を使う側の人間という立場から技術や科学を見てきた。最近、企業との共同研究を多数実施。

井山 弘幸（いやま ひろゆき）

1978年東京大学理学部化学科卒業。1983年同理学系大学院博士課程、科学史・科学基礎論専攻単位取得退学。理学修士。1984年新潟大学人文学部助手。1992年同教授。専門は、科学思想史、科学論、ユートピア論、笑芸史。主な著書に、『偶然の科学誌』（大

修館書店、1995年）、『鏡のなかのアインシュタイン』（1997年、化学同人）、『お笑い進化論』（青土社、2005年）、共著書に『現代科学論』（金森修と共著、新曜社、2000年）、翻訳に、『科学が裁かれるとき』（化学同人、1993年）、『ハインズ博士 超科学をきる』（化学同人、1994年）他。

## 創刊号著者座談会

# 新しい形式の論文を執筆して

第1巻1号の研究論文の査読が一巡終了した11月初めに、著者と編集委員とで座談会を開きました。第2種基礎研究の成果とプロセスを研究論文として書き下すことは誰もやったことがない試みでしたので、著者の側には大きな苦勞をかけたと思います。また査読者自身このような論文を書いたことがないので、著者とのやりとりにも試行錯誤が多かったと思います。座談会では、それぞれの執筆の跡を著者に振り返ってもらいました。

シンセシオロジー編集委員会

**小野** 全く新しい形式の論文ということで、著者の皆さん方も大変ご苦勞されたと思うのですが、今回の論文執筆で一番強く感じたことはなんでしょうか。また、アピールしなかったことはこの論文で十分に書き切れましたか。

### 新形式のジャーナルを執筆して

**倉片** 前例のない形式の論文を執筆することの困難さは感じましたが、書いていておもしろかったです。研究成果を説明しつつ本格研究の方法論を語るの、与えられた紙幅では難しかったです。結果的に自分の研究を振り返る、よい機会になりました。

臨床医学は別にして、人間を対象とした研究の成果がさまざま何か社会の役に立つことは必ずしも多くありません。そのため、この分野の研究者は人間は複雑だからとか生活環境は多様だからと言い訳しがちで、役に立つ研究を目指そうとする意気込みが欠けている気がしていました。こ

の論文の執筆をとおして、我々が蓄積してきた人間特性に関する知識はこのように役に立つのだということ、アクセシブルデザイン技術の標準化研究を例に主張したつもりです。これまで言いたくても言う機会がなかなかありませんでしたので、今回、このような執筆の機会がいただけたのは願ってもないことでした。

**津田** 私は、倉片さんの感想に加えて、産総研内の研究者以外の方々が私達の研究をどうとらえているのかということもこの執筆を通して知ることが出来たと思います。私達が書こうとしたことと査読者の方のリクエストとの間の差を理解するまでが大変でした。

この論文でアピールしなかったことは、実用化研究には必ず「量の壁」を克服する段階があるのではないかとということです。バイオの研究者が日常使っている検体量はミリグラム、ピコグラムと少ないですが、実用化を考えたら、



グラム、キログラム以上に量を増やさなければいけません。量を増やすことでバイオ研究はどれだけの広がりを持つのか、たくさんつくることがどのように社会の役に立つのか、ということの説明したいと思いました。

でもそれを書くのは難しかった。例えば、不凍蛋白質がアイスクリームに使えるというような実例を詳細に書くことで、「この研究はアイスクリームの研究なのか?」と思いきましても困るし、冷熱技術への応用を詳細に書くことで「エネルギーの研究である」と決めつけられても困る。かなり応用範囲の広い研究ですので、具体例を示すよりもなるべく技術の動作原理を書くように心がけました。「量の壁」に関する説明も難しかったですが、現在進んでいる技術の検証に関する箇所なども執筆が難しかったです。

**西井** 解説記事と論文の狭間に置かれているような気がしました。また、(専門が近い)研究者以外の第三者が査読されるので、分野以外の人にわかるような言葉にすることにも苦労しました。

吉川理事長と懇談する機会がありましたが、そのとき、「大学でできない、企業でもできない、産総研独自でできることは何か。産総研だけではできないが、企業の力を借りればできることは一体何か。」と言われました。私は、現在取り組んでいるNEDOプロの話をしたのですが、産総研だけでNEDOプロを実施することは困難で、企業を集める必要がありました。つまり、集めることによって、何ができるのかということを書いたつもりです。

**岸本** 最初は、専門外の人を読んでもおもしろく書こうと思っていたのですが、書いているうちに、専門分野内の人、もっと言うと同じ研究ユニット内の人に読んでほしいという気にどんどんなってきた、欲張って二兎を追いつぎすぎた感じになったかなと反省しています。

化学物質のリスク評価の結果を“製品”にとらえると、製品をつくるプロセスはアメリカを中心に開発され、ほぼ完成しています。そのプロセスをガイドラインに従って行えばリスク評価ができるので、社会のニーズが変わってきてもあまり深く考えずに、単に手順を組み合わせで「リスク評価をした」となりがちです。定着してしまったものを、もう一回崩して、目的に向かって再度組み立てるというプロセスを、初心に戻った形でアピールすることを目的にしました。

**持丸** 共著者に、この論文は「あなたが書いている解説ほどおもしろくない」と言われて、喧嘩に近い議論をしながら細かく字句を修正しましたが、残念ながら、おもしろく書き切れなかったところはあるかもしれません。学術的な

アーカイブのようになってしまっていて、ちょっと堅苦しい感じになってしまったような気がします。

優等生的な答えになるかもしれませんが、研究のメタな方法論を、しっかり、おもしろく書きたい、アーカイブしたいというのが一番にあったんですね。そのために、中にある一つのシナリオをどうして選んだのか、それに対してどういうアプリケーションをさらに選んで、技術を組み合わせでいったのか、という「考え」「プロセス」を書きました。幅広い異分野に、この研究全体のプロセスの組み上げ方のおもしろさを訴える、というところは難しかったですが、第一弾のアーカイブとしての価値はあると思っています。

**石井** 第1稿を書いて、査読のコメントをいただいて、こういうことを書けばよかったのかとわかった気がしました。また、「読者」のイメージをどこに置くのかなかなか難しく、「分野を超えて、広くわかっていただけるように」という趣旨は理解したつもりだったのですが、そうはいつでも、標準分野とか、その周りにいる人向けになったかなという感じがしています。

「計量標準の分野では」ということになりますが、精密度や高精度な技術という出口はふだんからアピールしているのですが、社会や産業に使ってもらえる技術である、というあたりを知っていただく機会があまり今までなかったように思います。計量標準が社会に広まっていくための考え方や取り組みについて、ある程度書けたかなという感じはしています。

#### 想定する読者へどのようにアピールするか

**小野** 読者としては、自分の研究分野以外の一般の研



津田 栄氏

究者、技術者も想定して書いていただきましたが、同じ専門分野の人が読んで、言い方は悪いのですが、馬鹿にされてはまずいという気だっていますね。

**倉片** 論文を査読してくださったのは、私の研究分野外の方だったと思いますが、本質を突いた的確な意見をいくつも提示してられました。そのことから考えますと、自分の研究分野以外の人々にも十分理解してもらえ論文が書けたのではないかと思います。

一方、先ほども言いましたように、同じ研究分野の人たちに対しては、社会の現場で必要とされている技術をうまく使えるような形にして見せる、実際に役立つ研究の一つの例を見てもらいたかったということもあります。

**津田** 私はバイオ分野の研究者に読んでもらうことを想定しました。ミリグラムでは試薬だけれども、グラム、キログラムになると材料になってバイオ研究の範疇から飛び出し、材料化学や食品、医学の研究者らと結びつくことができる、そこを伝えたいと思って書きました。

また、産総研の中の様々な人にも、あまり知られていない研究現場の実情を伝えたいという思いがありました。また、私達の研究が現実的な価値をもつためには、バイオエタノールの例と同じように、安く大量につくることは必要なのだということも伝えなかった。バイオ技術の長所である発熱を伴わない物質生産能力は現代の科学技術のリクエストにかなうものということも大事。それから“バイオと言えバゲノム創薬”といったような特定の先入観をもつ人にも、バイオ研究の裾野の広さをアピールできれば良いと思いました。



倉片 憲治 氏

**西井** 私は光学素子に着目して、歴史的にどのように変遷してきたかを解説して、そこから専門的な記述に入りました。そういう意味ではうちの家内が理解できるくらいの文章で最初は書き始めました。

**小野** 奥さんが査読者ですね(笑)。

**西井** いえいえ、査読ではないですが。ただ、内容を詰めていくと、どうしても専門用語が多くなりましたので、途中で抑えました。やさしい解説からやや専門的なところを記述していますので、トップランナー的な専門家にとっては、百も承知のことも書かれていると思います。

実は、秋の応用物理学会で、論文に書いた内容を30分間講演したのですが、聴衆の顔色を窺っていると、皆さん、それなりに聞いてくれているなという印象がありましたね。

**岸本** 内容に関しては、正直、内輪向けというか、リスク評価をやっている人に言いたいことを書いたのですが、途中から、自分の専門分野以外の人にアピールする点として、学際的な研究のあり方に重点を置こうと考えました。

それぞれの専門分野が定着すると、学際的な研究をするときに、お互いに遠慮したり、また専門分野の論理が必ずしも社会ニーズに適切でないときがあります。ですから、一番下流にいるユーザーからそれぞれの専門分野に「こういう研究開発が欲しい」と積極的に言ったり、極端にいうと、自分から乗り込んでいくべきだということを最近強く感じています。これは必ずしもリスク評価ということだけではないのですが、他分野の読者の方にも何らかし示唆できることがあれば、と思って書きました。

**持丸** 私の場合は特殊かもしれませんが、なんといってもわかりやすいですから。細かいことはともかく、何をやろうとしていて、どんないいことがあるのかというのは、だれが読んででもわかるだろうし、専門家が読んで「この辺が新しい」ということがわかります。

私が共著者とディスカッションしたのは、どの分野の人が読むかではなく、どの「層」の人たちがこのジャーナルを読むだろうか、ということです。私が委員会で会うような大学教授たちは、新しい産学連携をつかっていかなければいけないと思っているので興味があるだろうし、企業の人たちは、産総研や大学の人たちがどうやって自分たちのシナリオをつかっていくのかということに興味があるだろう。そこで、大学教授と企業の人たちをターゲットにして、その人たちに、我々がどうやって技術を選んで、組み立てていこうと考えたのか、ということ伝えたいと思いました。

**石井** 一つは、分野外あるいはより広い読者たちに、計量標準分野の仕事はこういうことなんですよ、ということを理解していただけるように書きたいと思っていました。

もう一つは、「標準分野の研究と産総研の標榜する本格研究がしっくりしない」と感じる方もいるようなので、私の一つの事例を見ていただいて、計量標準の研究活動が産総研の本格研究にどうはまっていくなか参考になるように書きたいと思いました。外の人が読んで、「とてもおもしろい」「次、読んでみよう」と思っていただけるのか、かなり心配しているんですけど(笑)、その辺は第2号の方に頑張っていたいただきたいと思っています。

### 解説と新ジャーナルの違いはオリジナリティ

**小野** この論文形式における「オリジナリティ」とは何かは、難しい問題だと思うのですが、今回の論文は、研究を自ら行った皆さん方自身でなければ書けなかった内容になっていると思いますか。あるいは、他の研究者が皆さんの今までの論文や解説を見て、レビューとして十分書ける内容でしょうか。

**倉片** 既存の解説やレビュー記事と違うオリジナリティがあるとしたら、通常は文面に表れない、研究の過程で「選択しなかったこと」をどれだけ書き込めたか、ということがポイントだと思います。

また、執筆の過程で、自分が行ってきた過去10年余りの研究を振り返って、それらの成果を有機的につなぎ合わせる作業が必要でした。すると、当時は漫然と考えていた個々の研究が実はうまくつながっていて、無意識のうちに一つひとつの問題点を解決する作業をしていたことに気づきま

した。ですので、この論文には、私自身でなければ書けなかった研究過程の内面が含まれていると思っています。

**津田** この論文では、どうしてそういうことをしようと思ったか、社会とのかかわりを持つに至るまでに、どのように組み合わせて製品という形にするかのシナリオが書ければいいと思いました。オリジナリティについて述べるという点とシナリオを示すという点において、この論文は第三者には書けないように思います。また、実用化を目的としたときにどんな問題が生じたのかも実際にやった者でないとわからない。多くのバイオ分野の基礎研究はミリグラム量でまっとうな研究生活を送っていますから、そういうコンセンサスができていくところへ、「ミリグラムという量は、大変に少ないと思いませんか。」という異端の文章を書くこと、そのために私自身のモチベーションを高めることが必要でした。

**小野** ほんとうにそのとおりだと私も納得してお聞きしますね。いみじくも「異端」とおっしゃったのですが、ある意味、現在のアカデミアのバイオ研究者と摩擦を引き起こすかもしれないと心配しておりました(笑)。

第2種基礎研究に踏み出したものの、パイオニアとして、理解されないかもしれないという不安もあるし、理解してほしいという気持ちも大変強いということですね。大量合成や大量精製は、基礎的なアカデミアから見ると魅力あるテーマではないのですが、あえてそれを掲げ、若い研究者の時間とお金を注ぎ込むのは勇気が要ります。皆さん方も同じようなご経験をお持ちだと思いますね。

**西井** この論文は、ある目標に向かって走っている途中で、「なぜ走り始めたのか」、「今どこまで行ったのか」、「これからどこに行くのか」を論文とは違った書きぶりをする必要があって、研究が一段落した解説記事とは区別されると思います。

研究に関して、オリジナリティがなければ国の予算をもらえないと思いますし、ニーズも明確だと思います。ジャーナルについても、内容的にオリジナリティがなければ書けませんし、私は第三者がとても書けるものではないと自負しています。

**小野** 西井さんの場合も、モールド法とインプリント法が結合できるのかということは、最初はわからないわけですから、冒険ですね。

**西井** 私は関西センターに勤務していますが、旧大阪工業技術試験所は日本のガラス研究のメッカだったし、それ



西井 準治 氏

を私は誇りに思っています。今でも産業界への波及効果は非常に大きなものがありますので、そこもオリジナリティの一つだと思うし、産総研として、これからどこに向かおうとしているのかということアピールしたつもりです。

**岸本** 私は、社会科学系で（産総研に）入って、各種のリスク評価の結果を使って安全環境対策の評価や費用対効果の評価をしようと思っていたのですが、そのままリスク評価の方まで踏み込んでいったという側面が強いです。ユーザの側からリスク評価をやってみるという事例は、私以外になかなかないと思うし、検討の結果も、あまり見たことがないパターンだと考えています。解説ではまったくないし、むしろ「異議申し立て」というか、新しい提案のような形になっていると思っています。

**小野** 産総研の化学物質リスク管理研究センターからは、『詳細リスク評価書』という大変立派な本が出ています。それと今回の論文はどう違うのでしょうか。サマリーという位置づけになりますか。

**岸本** サマリーではないです。評価書はリスク評価を実際に進めていく手順に近い形で書かれています。新ジャーナルは、むしろ「なぜそういう手順になったか」というところを書いています。今回、初めからそういう目的でリスク評価をしたような書きぶりになっているのですが、後知恵的な面もありまして、リスク評価書をつくっているときにはあまり意識になかったことを、今回改めて意識的に自分のやったことを確かめていくような側面もありました。漠然と考えていたことをまとめるすごくいい機会だったと思います。



岸本 充生 氏

**持丸** 解説は、あくまでもあるメッセージに絞って、発想のおもしろさを伝える。新ジャーナルでは、そうではなくて、研究プロセスをしっかりアーカイブして、それをジャーナルとしてためていくことでメタな研究論がいずれ構成できるのではないかと、その違いだと思います。今回はなぜそういう技術をつくっていったのか、それをどうやって選択したのかを書くのだから、奇をてらうより、素直に、論理的な順番の中でどうやっておもしろさを伝えるかに腐心すべきだろうと考えました。

他の人が書けるのか、というと、私たちでなければ書けなかったと思います。それはどうやってその方法を選んだのか、どういう考えでそれを組み立てていったのかということです。これは初めて書いた部分です。

**石井** 普通の論文は、何かして、そこでいいことが起きて、これはいいのだ、というスタンスで書くのが一般的ですが、今回は、A、B、Cというチョイスがあって、Bが選択されたけれども、Aではなぜ良くないのか、Cをなぜ選択しないのか、というところをかなり丁寧に書いています。解説や技術論文とは圧倒的に違う書き方をしていると思います。

オリジナリティということでは、自分以外の人が書けるかといったら、書けないだろうと思います。それは研究論文や報告として外に出しているものを束ねたのではなく、どうしているかを考えてきたかということが書かれているからです。

ただ、一点、私個人の名前で書く単著の論文なのかということですね。標準化の話や、いわゆる研究開発の周りにあることもかなり拾って書いているので、個人名をあげると言われるとなかなか難しいのですが、ちょっと気になる感じもあります。

**赤松** 第1種基礎研究の場合は、成果に対するオリジナリティだけでなく、考え方に対するオリジナリティみないなところがあるので、その考えのもととなるものは人のものを使っていることがあるわけですね。その人を取り込むべきなのか、それとも考えたということが自分自身のオリジナリティだったら、単著でもいいと考えることもできます。なぜ、そういうふう考えたか、というオリジナリティが意識されていることが大切ですね。

**内藤** 今回、第1号の著者と編集委員が協力しながら雑誌をつくるという意味で、非常に大きな作業を著者をお願いしたと思って、感謝しています。

きょうのお話や論文を読んで感じたのは、岸本さんは「消費者の視点」という観点で見たときにリスク評価が変わった。持丸さんも「消費者の視点」という形で技術をもう一

回見直した。津田さんは「大量生産の視点」で見たときに、バイオの研究が違うふうに見えた。石井さんは「社会制度の視点」、西井さんは「ものづくり設計の視点」で見たときに、これまで研究のやり方が変わってきた。

執筆要件の中に、組み合わせとか、選択した理由とか、方法論とか、非常に曖昧な言葉で書かれていることが、どういう視点で自分の研究を見たときに、どのように技術の体系が変わっていくのか、技術の組み合わせが変わっていくのかということところが、それぞれの方のオリジナリティのかなと、今日お聞きしながら感じました。

### 連携企業との関係 ーどこまで書けるか

**小野** 私が査読した範囲で言いますと、特許や共同研究の内容に引っかけるので書けないということがありました。そこが書けないがゆえに論文の魅力が落ちる、成果の高さをはっきり示したいけれどもそこは言えない。大変残念な思いがあります。

**倉片** 私の場合は、既に JIS 規格として制定された研究内容をまとめましたので、その点での困難さはまったく感じませんでした。そもそも、標準化には、技術をオープンにして誰もが使えるものにならなければならないという側面がありますし、むしろ規格書に書けなかった背景を紹介する、よい機会になったように思います。

**津田** 私の場合、例えば査読者から「原価を書いて下さい」といったリクエストもあったのですが、事業展開との関係を考慮する必要があり、数値を書くことは差し控えました。



持丸 正明氏

また、将来の展開の項では、大量の不凍蛋白質が将来的になにに技術に使える可能性が高いとか本当はいろいろ書きたいのですが、「それを書いてしまうと特許が出願できなくなりますよ。」と知財部の人に言われました。この論文を最後に研究はおしまいということにするのであれば、もう何もかも書いてしまって(笑)、それによって他人の知財獲得をできないようにするという戦略もあるのかもしれませんが……。

ジャーナルを出すということは「情報を発信して共有する」ということですから、可能な限り何でも書こうとは思いましたが。

**小野** 第1種基礎研究は、自分がやり終えたことを書くわけですから、今、実際にやっていることは書かないわけです。ですけれども、今回の論文は、その先も書いていただいているんですね。情報を開示しすぎて、今後の競争で不利になるとまずいという懸念も若干ありまして、そこはこの論文のアキレス腱かなと私も思っています。

**西井** そのような査読者とのやりとりを掲載することによって、勘弁していただけるといいかなと思います(笑)。

もう一つは、ある課題設定をして、それを実行したらこのようになりました、という考え方を社会に示して、そういう研究が一つの産業化の流れを作るのが新ジャーナルの役割ではないでしょうか。敢えてノウハウを公表するようなミッションは、このジャーナルにはないと思っています。

**小野** 岸本さんはそういう感じはないですか。

**岸本** ないです。

**持丸** 私は、書けるタイミングにあったものをテーマとして選びました。これは私の分野の特性もあるかもしれませんが、常に、共同研究先には「私は書く使命を持っているので最後は書きます。そのときにどこを隠すかという議論は一緒にしましょう」という話をしています。今回のケースでは、特許が出ていないところもあるのですが、それは企業も承知の上です。最初から何を隠したらいいのかという議論はしてしまっていて、数式の構成は書いてあるんですが、係数を書いていませんし、全体の考え方がわかって、データがなければできないので、データベースが手に入らない人には再現ができないだろう。そのような知財戦略を立てた上で今まで我々はやってきたし、そういうタイミングのものがたまたま我々にあったということで、今回、そんなには苦労しませんでした。

**石井** 標準は、オープンにしている部分が多いので、手法のノウハウの出せないものはあまりないです。ただ、査読者とのやりとりの中で、どこかのメーカーの体温計の性能が良くないという評価データを持っているはずだから、それを入れなさいという要望がありました。データは持っていますが、当時、メーカーとの信義のもとに提供してもらって評価したので、それを出すことは非常に難しい。それに、私たちはそういうものをテストする機関ではなく、トレーサビリティとか、計量法を実施している機関ですから、商品テスト的なデータを出すことによる影響も非常に懸念されるので、データは出さないということでご了解いただきました。

### 今後の新ジャーナルへ期待すること

**小林** 編集委員会として、特に外部の方、企業の方、大学の方、場合によっては外国からも投稿をいただきたいと思っています。この雑誌に今後期待すること、編集委員会への注文、あるいはこれからの執筆者に対するアドバイスを一言ずつお願いできますか。

**倉片** 私の場合、2人の査読者の意見が食い違って困ったことはなかったのですが、査読者とのやりとりを通して、本格研究なり本ジャーナルなりの将来につながる建設的な議論ができたかとなると、かなり疑問に感じています。それは、査読意見に対して、「おっしゃるとおりです。」といった回答しかできなかった私の力不足が原因かと思いますが(笑)、「これについてはどう考えるのか」といったような議論を喚起するものがあつたら、論文の最後に掲載すれば、読者にも楽しんで読んでもらえるのではないのでしょうか。



石井 順太郎 氏

**津田** 例えば、食料として社会に供給することを目指してカニやマグロなど特定の動物種を大量に養殖するといった研究と今回の私達の研究の間には多くの共通点があると思っています。まず1匹の動物を世代交代するまで育てるというミニスケールの基礎的研究が必要で、それをスケールアップ、つまり「量の壁」超えを果たさないと、現実的な価値には繋がりませんよね。特に、生態が良く分かっていないけれど市場価値のある動植物の養殖技術の研究などは、非常に価値のある成果をもたらすにも関わらず、その技術要素自体は科学的な新知見かどうか微妙であり学術論文にはなりにくい、といったことがあるのではないかと思います。そういう人たちにもこのジャーナルを読んで頂いてはどうかと思いました。

編集委員への注文としては、執筆者に査読コメントを送る前に、レフェリーの方々の中で意見を一度調整していただけといいのかなと思います。

**西井** 私は、このジャーナルは産総研にとってメリットがないと意味がないと思うので、外部の人が書いてくださるのはいいと思うのですが、我々にある種の指針を与えてくれる、あるいは我々が指針を出し得る場であってほしいと思います。産総研の考え方を明確にした上で、外部の人にそれに関連する様々な情報を提供して頂ける、そんなジャーナルになってほしいと思います。

**岸本** 今思いついたのですが、レフェリー同士が事前には話し合うというよりも、レフェリー同士のやりとりを載せる、あるいは執筆者と3人というのもおもしろいかなと(笑)。

**持丸** 自分が読んでみたいと思ったのは、DARPA 主催の Urban Challenge (完全自動制御の無人ロボット車レース) がありまして、勝つと200万ドルもらえるんです。今回、CMU が勝つらしいんですが、個々の技術はそれぞれ論文が出ていると思うんですが、装甲車で勝つために10万行のプログラムをどうやったのか、ビジョンの技術をどうしたのか、なぜそのトラックを選んだのかという統合がけっこうおもしろくて、プロジェクトリーダーがいるのですが、将来、ああいう人たちが書いてくれるとおもしろいと思います。

**石井** 計量標準の場合産総研以外の方に書いていただくという機会はあまりないと思うんですけど、分野の中を見ても、ふだんなかなか外部に発表したり、アピールしたりする機会がないような活動をきちんと書いて、読んでいただいて、産総研全体や外の方にも知っていただけるとい

メリットは皆さん感じるでしょうし、それなりのモチベーションはこれからもあると思います。

ただ、査読基準みたいなものを示されて書けと言われてもかなり難しいところだと思うので、事前の査読者なり、編集委員会とのコミュニケーションみたいなどころからスタートする仕組みがうまくなれば、書くネタはたくさんあると思います。

**小野** 新しい挑戦ということで、皆さん、大変ご苦労さ

れたかと思います。ありがとうございました。

#### 座談会参加者

著者 (50 音順)

石井 順太郎、岸本 充生、倉片 憲治、津田 栄、西井 準治、  
持丸 正明

編集委員

小野 晃、小林 直人、赤松 幹之、内藤 耕

(2007年11月6日)

# 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（すなわち事実に基づく知識）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、専門外の実験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、その専門分野の実験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（「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が合理的に記述されていること。
3	シナリオ	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	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	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

## 1 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿を受け付ける。

## 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。

## 3 原稿の書き方

### 3.1 一般事項

- 1) 投稿原稿は日本語あるいは英語で受け付ける。
- 2) 原稿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。表紙には記事の種類(研究論文か論説)を明記する。

### 3.2 原稿の構成

- 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。
- 2) タイトル、要旨、著者名、所属・連絡先については日本語および英語で記載する。
- 3) 原稿は、図・表・写真を含め、原則として刷り上り6ページ程度とする。
- 4) タイトルは和文で10～20文字前後とし、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。
- 5) 和文要約は200文字程度とし、英文要約は和文要約の内容とする。
- 6) 本文は、和文の場合は9,000文字程度とし、英文の場合は同程度とする。
- 7) 掲載記事には著者全員の執筆者履歴(各自200文字程度)を添付する。
- 8) 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。

### 3.3 書式

- 1) 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「、」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。

- 2) 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)を記載のうえ、本文中における挿入位置を記入する。

- 3) 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350dpi以上)を提出する。原則は刷り上りで左右15cm以下、白黒印刷とする。

- 4) 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350dpi以上)で提出する。原則は左右7.2cmの白黒印刷とする。

- 5) 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, 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, 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部および電子媒体で下記宛に提出する。

〒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

著者校正は一回行うこととする。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論文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@ma.ist.go.jp

## MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

There has been a wide gap between science and society. Over three hundred years of the history in modern science indicates us that a number of research results disappeared or took long time to become useful in society. Due to the difficulty to bridge this gap, it has been recently called the valley of death or the nightmare stage <sup>(Note 1)</sup>. Rather than passively waiting, therefore, researchers and engineers who understand the potential of the research should be active.

To bridge the gap, technology integration <sup>(i.e. Type 2 Basic Research — Note 2)</sup>, in addition to analytical research, has been one of the wheels <sup>(i.e. Full Research — Note 3)</sup>. These technology integration research activities have been kept as personal know-how, however. They have not been formalized as universal knowledge. Traditional journals, on the other side, have been collecting a lot of analytical type knowledge and establishing many scientific disciplines <sup>(i.e. Type 1 Basic Research — Note 4)</sup>.

As there are 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 the origin in Greek means integration. Ology is a suffix attached to scientific disciplines.

Each paper in this journal will present scenarios toward societal value, identify elemental knowledge and/or technologies to be integrated, and describe procedures and processes of integration for the goal. Through publishing papers on this journal, researchers and engineers can enhance the capacity to transform scientific outputs into the prosperity and make technical contribution to the sustainable development. This could increase the significance of research activities in society.

At the end, we expect 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<sup>(Note 3)</sup> to Product Realization Research<sup>(Note 5)</sup>, centered by Type 2 Basic Research<sup>(Note 4)</sup>.
- 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  
Executive Editors: M.Akamatsu, K.Naito, H.Taya  
Editors: A.Kageyama, N.Yumoto, K.Ohmaki, K.Igarashi, E.Tsukuda,  
M.Kamimoto, M.Tanaka, H.Tateishi, K.Mizuno, H.Ichijo  
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](mailto:synthesiology@m.aist.go.jp)  
URL: <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

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

### **Mass preparation and technological development of antifreeze protein**

– Toward a practical use of biomolecules –

Yoshiyuki Nishimiya, Yasuhiro Mie, Yu Hirano, Hidemasa Kondo, Ai Miura and Sakae Tsuda

Research Institute of Genome-based Biofactory, AIST  
Tsukisamu-Higashi 2-17-2-1, Toyohira-ku, Sapporo  
062-8517, Japan  
E-mail: s.tsuda@aist.go.jp

Antifreeze protein has been known as an extraordinary biomolecule having the potential to both bind ice and preserve cell structure; the molecule was isolated from the blood serum of Arctic and Antarctic fishes. We have recently found that Japanese food fishes also contain an antifreeze protein, and have established a method of collecting the protein from fish muscle. The collected antifreeze protein is a mixture of many isoforms, which were found to be more active than any single isoform. Mass preparation of antifreeze protein is currently in progress to allow researchers in different fields to develop a variety of new technologies utilizing the functions of this protein.

### **Development and standardization of accessible-design technologies that address the needs of senior citizens**

– A product-design methodology based on measurements of hearing characteristics and domestic sounds –

Kenji Kurakata and Ken Sagawa  
Institute for Human Science and Biomedical Engineering, AIST  
Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8566, Japan  
E-mail: kurakata-k@aist.go.jp

As a consequence of both the declining birthrate and the growing fraction of elderly people among the population in recent years, a new trend in consumer product design has emerged, the so-called accessible design, and has become increasingly important to address the needs of a wider breadth of the population including senior citizens. The authors have developed and propagated accessible-design technologies by establishing Japanese Industrial Standards (JISs) based on older adults' auditory and visual functions. This paper describes the research process for

standardization of accessible-design technologies from the viewpoint of "Full Research," using as an example a method for adjusting the sound volume of auditory signals, as established in JIS S 0014.

### **Challenge to the low-cost production of highly functional optical elements**

– Fabrication of sub-wavelength periodic structures via a glass-imprinting process –

Junji Nishii  
Photonics Research Institute, AIST  
Midorigaoka 1-8-31, Ikeda 563-8577, Japan  
E-mail: junji.nishii@aist.go.jp

Factors, such as production cost, which impede the practical application of "sub-wavelength optical elements" with periodic structures smaller than the wavelength of visible light, were targeted through a combination of advanced Japanese glass molding methods and a novel imprinting process. Collaboration between materials companies, consumer-electronics companies, universities, and AIST under a precise distribution of roles enabled the realization of properties such as polarization rotation and antireflection effects from glass surfaces.

### **Strategic approach for comparing different types of health risks**

– Risk assessment of toluene exposure using quality-adjusted life years –

Atsuo Kishimoto  
Research Center for Chemical Risk Management, AIST  
Onogawa 16-1, Tsukuba 305-8569, Japan  
E-mail: kishimoto-atsuo@aist.go.jp

It is important to consider social needs when developing a methodology for the risk assessment of chemical substances. We classified the purposes of the risk assessment into the following three categories: (A) derivation of reference values, (B) screening assessment for the removal of chemical substances of low importance, and (C) setting priority based on comparisons of health risks and cost effectiveness of risk reduction measures among different chemical substances. On this basis, we show that while the existing methods of risk assessment are designed to fulfill purposes A and B, they do not satisfy purpose C. Therefore, each step of the risk

assessment methodology in the current study was revised to fulfill purpose C; the effectiveness of this new methodology was demonstrated by using toluene as an example. Since the loss of quality-adjusted life years is adopted as an indicator of human health risks, we could compare health risks for not only different chemical substances but also compare between chemical substances and other types of risks such as accident or infectious disease.

### **Design and retail service technologies for well-fitting eyeglass frames**

– Toward the mass customization business –

Masaaki Mochimaru and Makiko Kouchi  
Digital Human Research Center, AIST  
Aomi 2-41-6, Koto-ku, Tokyo 135-0064, Japan  
E-mail: m-mochimaru@aist.go.jp

Mass customization that enables any consumer to easily obtain a custom-fitted product is the ultimate goal of this research. As the first step towards this goal, an IT-based product recommendation system for eyeglass frames was developed. Using this system, a customer's 3-D face shape is measured, frame(s) of the proper size are recommended, and a simulation of the customer wearing the eyeglass frame is generated as a style recommendation. Technologies such as face measurement, size recommendation and impression simulation were integrated based on a 3-D face shape database. When the system is utilized on a retail level, the contents of the 3-D face shape database will be expanded, and statistical information on face shape and/or

impressions of the face and eyeglass frame will be utilized for product designing and retailing services.

### **Improved reliability of temperature measurements with clinical infrared ear thermometers**

– Design and establishment of a new measurement standards system traceable to the national standards –

Juntaro Ishii  
National Metrology Institute of Japan, AIST  
Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8563, Japan  
E-mail: j-ishii@aist.go.jp

Since the late 1990's clinical infrared ear thermometers based on infrared radiation measurements have been on the Japanese market and are rapidly increasing in sales. As the use of these ear thermometers has become more widespread, the discontent of users of the performance of ear thermometers is increasing. AIST has developed a new national standard for the calibration and conformity assessment of ear thermometers and have also established a traceability system to meet the demand for improved reliability of the measured temperature. An international comparison of radiance temperature scales based upon the standard blackbodies of AIST, PTB (Germany), and NPL (United Kingdom) was performed to verify experimentally the equality of the national primary standards for ear thermometers.

## 編集後記

新しい形式の研究論文誌を刊行することになりました。雑誌名は Synthesiology (シンセシオロジー)、その日本語は「構成学」です。

Synthesiology という言葉は、「構成」という意味を持つ Synthesis と、「学」を意味する -logy をつなげた造語です。Synthesis はギリシャ語由来の語で、Syn (一緒に) + the (置く) + sis (こと) であり、-logy はやはりギリシャ語の logos (神の言葉) から来た語で、logic (論理) などと同じ語源です。科学を社会に活かすためには、要素技術的な科学的知見をいかに「構成」していくかが重要という考えから Synthesis という語を基にし、研究開発成果を社会に還元するための統合的・構成的な営みをジャーナル上に蓄積することによって、その論理や共通方法を見いだすことを目的としていることから -logy をつけて、「Synthesiology 構成学」としました。その内容については、「発刊に寄せて」に詳細に論述されています。

Synthesis の対語として当然ながら Analysis が意識されました。17世紀に科学や学会が生まれ、その後、要素還元主義が科学の成功を導いてきました。しかし現代に至ってその限界が強く認識され、統合や構成の重要性が学術界でも語られるようになってきました。もう一度科学の原点に立ち戻り、社会との関係を見直そうと言う気持ちがあります。その辺りの歴史的背景が「論説」で述べられています。

新しい雑誌の刊行では、どのような読者を想定するかが最大の問題です。現在の学術誌のほとんどが、細分化された個別の学問領域の中でのみ流通していることから、本誌は科学技術の研究開発とその応用に関心を持つ社会の各方面の方々に理解し

てもらえ、共通の興味をもってもらえることを目指しました。縦と横という表現をすれば、縦方向は科学技術の研究者から研究開発のマネージャーや技術者まで、横方向は科学技術の全分野とそれに関連する人文・社会科学の一部まで視野に入れています。このねらいが効果的に達成されているかどうかは、本号に掲載されている6つの「研究論文」を見ていただくほかには、編集子が見るところ、相当程度達成されているのではないかと期待するところです。

また編集子が注目していることの一つとして、著者の動機があります。今回の研究論文の著者は、これまで様々な学術誌に論文が掲載されるなど、基礎研究で顕著な成果を出してきた方々ですが、その著者が、本誌でなければ書けなかったことはあるのか、本誌で初めて書けたことは何か、を語っています。「創刊号著者座談会」をぜひご覧いただきたく思います。

編集上の難しさを挙げるならば、本誌の研究論文は現行の学術論文とは形式が全く異なったものなので、著者と査読者とが何度もやり取りしながら共同で仕上げた点です。執筆要件と査読基準は「編集方針」に記載した通りですが、論文形式は未だ開発途上にあり、今後試行錯誤を経て次第に洗練され、いくつかのスタイルに収束していくことを期待しています。特に研究論文のオリジナリティに関しては、一つひとつの論文ごとにそれを確認し、積み上げていくほかには、と思っています。

科学技術に関係する広い分野の研究者、技術者の方々が本誌へ積極的に投稿されることを期待しています。

(編集委員長 小野 晃)

Synthesiology 1巻 1号 2008年1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

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：景山 晃、湯元 昇、大蒔 和仁、五十嵐 一男、佃 栄吉、神本 正行、田中 充、立石 裕、水野 光一、一條 久夫

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

〒308-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2 産総研広報部出版室内

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。