

# Synthesiology

1550℃に至る高温度の計測の信頼性向上

マイクロチップを用いたバイオマーカー解析コア技術の開発

石油流量国家標準の確立とわが国の標準供給体制

臨床情報学のための野外科学的方法

製造現場における熟練技能の抽出に関する研究

暗号モジュールの安全な実装を目指して

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、さらに今後の国際誌への展開も考慮して、あえて英語で造語を行ない、「Synthesiology - 構成学」とした。

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

シンセシオロジー編集委員会

- 注1 「悪夢の時代」は吉川弘之と歴史学者ヨセフ・ハトバニーが命名。「死の谷」は米国連邦議会 下院科学委員会副委員長であったバーノン・エーラーズが命名。ハーバード大学名誉教授のルイス・ブランスコムはこのギャップのことを「ダーウィンの海」と呼んだ。
- 注2 本格研究： 研究テーマを未来社会像に至るシナリオの中で位置づけて、そのシナリオから派生する具体的な課題に幅広く研究者が参画できる体制を確立し、第2種基礎研究<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3巻第1号(2010.3) 目次

|  |       |
|--|-------|
| 新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨   | i     |
| <b>研究論文</b>  |       |
| 1550℃に至る高温度の計測の信頼性向上 — 熱電対のための温度の標準体系構築 —<br>···新井 優、小倉 秀樹、井土 正也   | 1-15  |
| マイクロチップを用いたバイオマーカー解析コア技術の開発 — POCT デバイスとしてのマイクロチップ基<br>板の可能性を探る —<br>···片岡 正俊、八代 聖基、山村 昌平、田中 正人、大家 利彦  | 16-25 |
| 石油流量国家標準の確立とわが国の標準供給体制 — 信頼性のある効率的なトレーサビリティ体系の構築<br>への取り組み —<br>···嶋田 隆司、土井原 良次、寺尾 吉哉、高本 正樹  | 26-35 |
| 臨床情報学のための野外科学的方法 — 技術移転の方法論に向けて —<br>···木下 佳樹、高井 利憲  | 36-46 |
| 製造現場における熟練技能の抽出に関する研究 — 技能の可視化および代替に関する研究 —<br>···松木 則夫  | 47-55 |
| 暗号モジュールの安全な実装を目指して — サイドチャネル攻撃の標準評価環境の構築 —<br>···佐藤 証、片下 敏宏、坂根 広史  | 56-65 |
| <b>論説</b>  |       |
| “社会のための科学”と研究開発評価 — プログラム評価の構造と <i>Synthesiology</i> への示唆 —<br>···大谷 竜   | 66-76 |
| <b>座談会</b>   |       |
| シンセシオロジー創刊2周年を迎えて  | 77-82 |
| <b>編集委員会より</b>   |       |
| 編集方針   | 83-84 |
| 投稿規定   | 85-86 |
| 読者フォーラム・編集後記   | 93-95 |
| <b>Contents in English</b>   |       |
| <b>Research papers (Abstracts)</b>   |       |
| <b>Improving the reliability of temperature measurements up to 1550 °C</b> — Establishing the temperature<br>standards and calibration system for thermocouples —<br>--- M. Arai, H. Ogura and M. Izuchi   | 1     |
| <b>Biomarker analysis on microchips</b> — Development of POCT device for multi-marker analysis —<br>--- M. Kataoka, S. Yatsushiro, S. Yamamura, M. Tanaka and T. Ooie  | 16    |
| <b>Development of primary standard for hydrocarbon flow and traceability system of measurement in Japan</b><br>— Approach to construction of an effective and reliable traceability system —<br>--- T. Shimada, R. Doihara, Y. Terao and M. Takamoto | 26    |
| <b>A field-scientific approach to Clinico-Informatics</b> — Towards general models of technology transfers —<br>--- Y. Kinoshita and T. Takai  | 36    |
| <b>Acquisition of skills on the shop-floor</b> — Visualization and substitution of skills in manufacturing —<br>--- N. Matsuki   | 47    |
| <b>Secure implementation of cryptographic modules</b> — Development of a standard evaluation environment for<br>side channel attacks —<br>--- A. Satoh, T. Katashita and H. Sakane   | 56    |
| <b>Article(Abstract)</b>   |       |
| <b>“Science for society” and evaluation of research and technology development</b> — The framework of program<br>evaluation and implication for <i>Synthesiology</i> —<br>--- R. Ohtani  | 66    |
| <b>Messages from the editorial board</b>   | 87-88 |
| <b>Editorial policy</b>  | 89-90 |
| <b>Instructions for authors</b>  | 91-92 |

# 1550 °Cに至る高温度の計測の信頼性向上

## — 熱電対のための温度の標準体系構築 —

新井 優\*、小倉 秀樹、井土 正也

1990年代後半から、熱電対による1550 °Cまでの温度計測のための国家計量標準を整備し、それに基づく標準体系を構築して、高温域の温度計測の信頼性を向上させた。温度の国家計量標準が何段階かの校正の連鎖を経て、実際の計測に使われる熱電対に移転される仕組み（トレーサビリティ体系）を、標準器の利用の容易さ、校正事業者と産総研との役割分担など、多くの要素を考慮に入れて設計した。新しく開発した標準技術と、現在までに民間企業が培ってきた技術とを適切に融合させて、新しい技術の普及を見定めながら、全体として我が国にとって最も望ましいトレーサビリティ体系を構築した。

キーワード: 熱電対、計量標準、校正、温度定点、共晶点

## Improving the reliability of temperature measurements up to 1550 °C

### – Establishing the temperature standards and calibration system for thermocouples –

Masaru Arai\*, Hideki Ogura and Masaya Izuchi

Since late 1990's, the reliability of temperature measurements at high temperatures was remarkably upgraded by establishing the national metrology standards for calibration of thermocouples up to 1550 °C, and by implementing the traceability system. The traceability system, structured as a hierarchical link of calibrations between the national metrology standards and practical measurements, was designed in consideration of various elements such as availability of the measurement standards and sharing the responsibility with accredited calibration laboratories. The optimized scheme for industries in Japan was established by promoting a balanced combination of conventional techniques held by accredited calibration laboratories and progressive technology, taking into account the spread of the progressive technology.

Keywords: Thermocouple, measurement standard, calibration, temperature fixed point, eutectic point

### 1 はじめに

本稿は、産業界から温度計測の信頼性の向上が求められる中、1000 °Cから1550 °Cまでの温度範囲における温度の国家計量標準を整備し、それに基づいて提供される温度の標準が校正事業者を介してユーザーに至るまでの体系を我が国に構築したことを、構成学的に論述したものである。計量標準は社会で広く利用されて初めて意味をもつ。トレーサビリティの源となる国家計量標準を設定し、それを計測の現場にまで連鎖させる体系は、現在までに社会で培われた技術と、新たな目標を達成するために必要な新規技術を両立させて設計することが望ましい。ここでは、新しく開発した仲介標準器とその導入の技術的な背景を中心に、温度計測の信頼性確保のために必要な要素と、それらを統合して構築した我が国の高温度の標準体系について述べる。

### 2 高温の計測に対する社会的要請

1000 °Cを超え1550 °C付近に至る温度範囲は、鉄鋼業を始めとする素材産業、熱処理を行う部品製造業、半導体プロセス産業など多くの場面での温度管理に重要である。この温度範囲で使われる温度計としては現在熱電対<sup>用語1</sup>が最も多いことから、熱電対を校正するための温度標準のトレーサビリティ体系を作ることが必要であった。

我が国の産業界においては、比較的早い時期（1960年代）から温度計測の信頼性を確保するために関連の学術団体や工業会などで数多くの調査研究や共同実験が行われ、温度計の校正方法や試験方法の規格化が進められてきた。その一つの成果は貴金属熱電対をパラジウムの融解点（1553.5 °C）で校正する方法であった。この背景には、鉄鋼業において溶鋼温度の測定が1500 °C付近で行われるが、そのときに約2 °Cの測定精度が求められたことがあ

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

Original manuscript received September 1, 2009, Revisions received January 25, 2010, Accepted February 5, 2010

る。もう一つの成果は、同じく貴金属熱電対を1100℃以下で温度定点<sup>用語2</sup>を使って校正する方法の共同研究であった。この背景には、1980年代に半導体プロセス産業で要求が高まりつつあった、1100℃付近までの温度範囲で国際電気標準会議（IEC）の規格で導入された最も高い精度のクラス1熱電対<sup>11</sup>に対する技術的要求を確実にクリアしようという産業界の要請があった。

産業界においてこのような努力が払われた一方、当時その信頼性のよりどころとなる温度の国家計量標準は十分に整備されていなかった。このため、産業界で開発された校正方法と、それによって校正された温度計の信頼性を検証する手段がなかった。この問題を解決するために取り組んだのが、ここで述べる温度の国家計量標準の提供と標準体系の構築である。これは、温度の国家計量標準を整備し、それをユーザーの温度計にまで伝えていく仕組みを構築し、さらには温度計の製造事業者や校正事業者が表明する規格適合や校正値を認証する仕組みを構築することによって、世の中で広く使われている温度計の信頼性を確保していこうという活動である。

### 3 シナリオの設定と要素技術の選択

#### 3.1 熱電対のトレーサビリティ

1000℃から1550℃の間の温度範囲における温度の国家計量標準と、それをを用いた熱電対のトレーサビリティ体系の基本的な枠組みを図1に示す。

産総研は国家計量標準として温度定点群を保有する。純粋な銅の凝固点(1084.62℃)と純粋な銀の凝固点(961.78℃)は、従来から日本を始め各国の標準研究機関で多用されている温度定点である。凝固点の温度値は国際的な協約のもとで合意して決めたものである。純粋なパラジウムの融解点(1553.5℃)も高温の温度定点として各国でしばしば用いられている。

一方金属と炭素の共晶点は、最近日本から提案された新

しい温度定点である。銅の凝固点とパラジウムの融解点の間にある約500℃の広い温度範囲に新たな温度定点が利用可能になることは、温度標準を供給する観点からは大きな意義がある。そこで産総研では可能な限り早期にこれらの金属-炭素共晶点を国家計量標準として利用可能なものとするべく研究を進めてきた。

産総研が保有する国家計量標準を熱電対の校正を事業とする校正事業者に伝えるためには、産総研と校正事業者との間を行き来して温度の標準値を伝える何らかの「仲介標準器」が必要である。仲介標準器は精密な標準値を伝えるだけの高い性能を持っていなければならないし、移送に耐えて正確に標準値を保持し続けるだけの堅牢性がなければならない。また移送に当たっては軽いことや、入手に当たっては値段が過度に高くないことも現実には重要な項目である。これらの要件を考慮して、我々は2種類の熱電対を候補として検討した。一つは、ロジウム13%を含む白金ロジウム合金と純粋な白金とを素線に用いた熱電対（R熱電対）であり、もう一つは純粋な白金と純粋なパラジウムを素線に用いた熱電対（白金パラジウム熱電対：Pt/Pd熱電対）である。どちらも高温が計測できる熱電対である。R熱電対は従来から広く用いられているものであるが、高温での安定性にやや難点がある。白金パラジウム熱電対は最近新たに開発された熱電対で、安定性はR熱電対よりも良いと期待されるが、まだ使用実績が乏しく、安定性などの特性が十分に把握されるまでに至っていないのである。

校正事業者は産総研で校正された仲介標準器を受け取って、自社の実用標準器に温度の標準値を移すことになる。我が国では校正事業者の多くが自社の実用標準器として温度定点実現装置を持っている。この場合校正事業者は自社の温度定点実現装置を使って、一般の熱電対に対して校正サービスを行う。

#### 3.2 シナリオの設定

産総研としてはまず、仲介標準器として何を選択し、どの温度定点を使って校正サービスを行うかのシナリオを二つの観点から検討した。計量標準の設定方法は、世界各国の国立標準研究機関が研究開発を競い、新たな方法が提案されたり、これまでの方法の評価や改良が行われたりしている。これらの成果を積極的に取り入れ、質の高い計量標準を設定し、それを出発点とした標準体系を作ることが理想的である。一方、標準の受け手である校正事業者は、従来から使っている方法によって標準の供給を受ける方が、自社の設備や校正手順がそのまま使える点で対応が容易であると言える。この相反する二つの観点から、図2に示すような四つのシナリオを検討した。

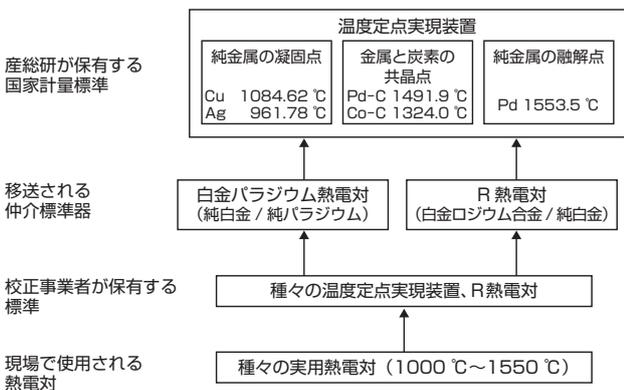


図1 熱電対のための高温トレーサビリティの基本的枠組み

- 仲介標準器としてR熱電対を用いる場合  
シナリオ (1)：産総研が三つの温度定点（銀点、銅点、パラジウム点）で1本のR熱電対を校正し、それぞれの熱起電力の値（校正值）に基づいて960℃から1550℃の間で温度と熱起電力の関係を数式の形で表し、この数式を標準値として校正事業者に供給する。  
シナリオ (2)：産総研が三つの温度定点（銀点、銅点、パラジウム点）で1本またはそれぞれ専用のR熱電対を校正し、それらの熱起電力の値（校正值）を標準値として校正事業者に供給する。
- 仲介標準器として白金パラジウム熱電対とR熱電対を併用する場合  
シナリオ (3)：産総研が二つの温度定点（銀点、銅点）でそれぞれ専用の白金パラジウム熱電対を校正するとともに、一つの温度定点（パラジウム点）でR熱電対を校正して、それらの熱起電力（校正值）を標準値として校正事業者に供給する。
- 仲介標準器として白金パラジウム熱電対を用いる場合  
シナリオ (4)：産総研が四つの温度定点（銀点、銅点、コバルト-炭素共晶点<sup>用語3</sup>、パラジウム-炭素共晶点）でそれぞれ専用の白金パラジウム熱電対を校正して、それらの熱起電力（校正值）を標準値として校正事業者に供給する。

これら四つのシナリオで重要なことは、仲介標準器に何を選択するか、そしてどの温度を校正温度として選択するかである。四つのシナリオは、技術的には(1)から(4)の順に難しくなる。

シナリオ(1)では、産総研が校正事業者を経由せずに、直接温度計のユーザーに校正サービスした方が効率的である。海外では、開発途上国の標準機関がしばしば選択するシナリオであり、四つのシナリオの中では、校正の不確かさが最も大きくなる。

シナリオ(2)は、仲介標準器を受け取る校正事業者にとつ

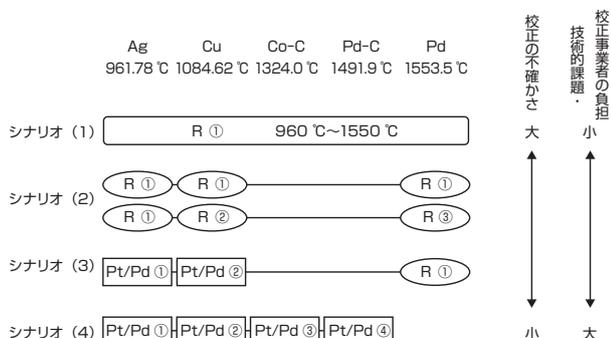


図2 熱電対のトレーサビリティを実現するシナリオの比較  
R および Pt/Pd は仲介標準器としての R 熱電対および白金パラジウム熱電対を表し、丸囲み数字は個体の識別を示す。

ては、従来から習熟している機器を用いればよいので利用しやすいものである。しかし、校正事業者が行う 1000℃での R 熱電対の校正サービスの不確かさを例えば 0.3℃と想定した場合、自社の実用標準器にはその約 1/3 の大きさの 0.1℃の不確かさが必要になる。このシナリオでそれを達成することは容易ではない。その理由は 4 章で詳述するが、仲介標準器として用いる R 熱電対の安定性に限界があることによる。

シナリオ (4) は、最新の研究成果である金属-炭素共晶点を国家計量標準に位置づけるもので、今後の研究の進展も取り入れることができる発展性に優れた方法である。しかし、このシナリオによる標準の供給は、受け手の校正事業者が新たな設備を導入し、新しい技術を習得しなければならないので負担が増加することになる。そこで産総研は、シナリオ (4) を将来目指すべき理想としながらも、温度計の製造事業者や校正事業者の利用しやすい温度定点を使うシナリオ(2) または(3) を現時点では選択し、将来シナリオ (4) へ向かう準備をすることとした。

産総研は温度をはじめ種々の量の標準整備計画を 2001 年から順次公表・更新している。それはどのような国家計量標準がいつ頃整備されるかを明示しているため、産業界側は校正事業に必要な設備や要員をあらかじめ準備し、国家計量標準の供給時期に合わせて校正事業を開始することができる。産総研は標準整備計画で、銀点と銅点を用いた熱電対の校正サービスの開始時期を 2002 年と公表し、それまでの期間を利用して、仲介標準器について検討した。温度関連の学術団体や工業会の研究会がほぼ毎月開催され、産総研における標準開発の状況を報告し、各校正事業者や温度計の製造事業者における温度計校正技術の現状などを議論しつつ、銀点と銅点での仲介標準器の校正について産総研で取得した技術データを示した。

このような情報交換と意見交換を繰り返して、産総研と産業界との間で次のような合意が形成された。R 熱電対を仲介標準器とすることは安易な選択ではあるが、熱電対の不均質による不確かさが大きくなる (4.2.1 項で詳述)。温度計の製造事業者からの要望は、IEC 規格に定められたクラス 1 の熱電対の製品保証に足る十分小さな不確かさであった。国家計量標準の整備のタイミングに合わせて、不確かさの小さい仲介標準器を開発し普及させることができれば、大きな利点となることが認識された。この研究開発の詳細は 4.2 節で述べるが、0.1℃程度の小さな不確かさが得られる技術的見通しが得られたことから、銀点、銅点に対しては、白金パラジウム熱電対を仲介標準器とするシナリオ (3) を採ることとした。

### 3.3 要素の選択

決定した方針は、産業界に早期に高度な標準を供給するためにシナリオ(3)を採り、将来の高度化に向けてシナリオ(4)に進んでいくものである。このために産総研にとって必要な要素として次の①から⑥を選んだ。

- ①高温度の国家計量標準である温度定点実現装置の製作とその不確かさの評価
  - ②仲介標準器としての白金パラジウム熱電対の安定化技術の開発
  - ③仲介標準器を温度定点で校正する技術と、その不確かさの評価
  - ④国際比較による国家計量標準の同等性の確認
  - ⑤定常的な校正サービスを確実にを行うための品質システムの構築と運用
  - ⑥合理的なトレーサビリティ体系の設計と技術文書の作成
- これらの要素を統合・構成して、高温度のトレーサビリティ体系を構築することを試みた。

上記の要素のうち①は、国家計量標準としての温度定点の設定に関するものである。銀の凝固点(961.78℃)、銅の凝固点(1084.62℃)、パラジウムの融解点(1553.5℃)の三つをシナリオ(3)の実現のための国家計量標準として開発した。さらに、将来シナリオ(4)に向かうための新たな国家計量標準としてコバルト-炭素共晶点(1324.0℃)とパラジウム-炭素共晶点(1491.9℃)を選択し、順次研究を開始した。各温度定点における熱電対の熱起電力を標準値として校正事業者へ供給するために、パラジウムの融解点での仲介標準器は、R熱電対を選択した。一方1500℃以下の温度においては、白金パラジウム熱電対を仲介標準器に選択した。要素②は、この白金パラジウム熱電対の開発である。

要素③は、実際に整備された温度定点実現装置を用いて、仲介標準器を校正するための技術と校正の不確かさの評価である。要素④は海外の国立標準研究機関との標準の比較に関するものであり、国家計量標準と校正技術の国際同等性を確認するために行った。国際比較を行うための仕組みが国際的に定められているが、この国際比較は、アジア太平洋地域内に組織されたアジア太平洋計量計画(Asia Pacific Metrology Programme、以下「APMP」という。)という国際組織において12機関が参加して行われたものである。

要素⑤は、確立した国家計量標準による校正サービスを産総研が定常的かつ確実にを行うための体制の整備とその運用についてである。要素⑥は、整備された計量標準が校正事業者へ利用されて、産業界が用いる温度計を校正するまでの温度標準のトレーサビリティの体系についてである。校正事業者の技術レベルを第三者が認定するための

基準となる技術文書の作成も重要な要素である。この文書に基づき、校正事業者の校正能力が確認される。

要素①から⑤の内容はそれぞれ次章の4.1節から4.5節で述べ、要素⑥の内容は5章で述べる。

## 4 国家計量標準の整備と仲介標準器の開発

### 4.1 温度定点実現装置の製作と評価

温度定点を実現する方法には、るつぼ中に鑄込んだ金属を融解・凝固させ、その融解点または凝固点の温度を実現する方法(るつぼ法)と、校正する熱電対の測温接点近くに定点物質の金属線を直接取り付け融解点の温度を実現する方法(ワイヤ法)がある。るつぼ法は定点温度の再現性が良く、また長時間定点の温度を持続できるので温度定点を精密に実現するのに一般的に用いられている方法である。ワイヤ法は定点物質を融解するためのるつぼが不要なため実現が簡易であり、また0.1g以下のわずかな量の定点物質で校正が可能である。ワイヤ法はるつぼ材料が定点物質を汚染することが懸念される場合や、貴金属のような高融解点の純金属を用いる定点校正に一般的に用いられている。産総研が熱電対の校正サービスを開始するにあたり、銀点、銅点、コバルト-炭素共晶点の実現には再現性の良い凝固点温度を持続できるるつぼ法を採用し、パラジウム点の実現にはパラジウムを定点物質とするワイヤ法を採用した。

#### 4.1.1 銀点実現装置

銀点実現装置の概念断面図を図3に示す。定点装置は大きく分けて、ヒーターと制御系から成る「定点炉」、および定点物質を含む「定点セル」から構成される。定点炉には密封型のナトリウムヒートパイプで温度の均一化を図つ

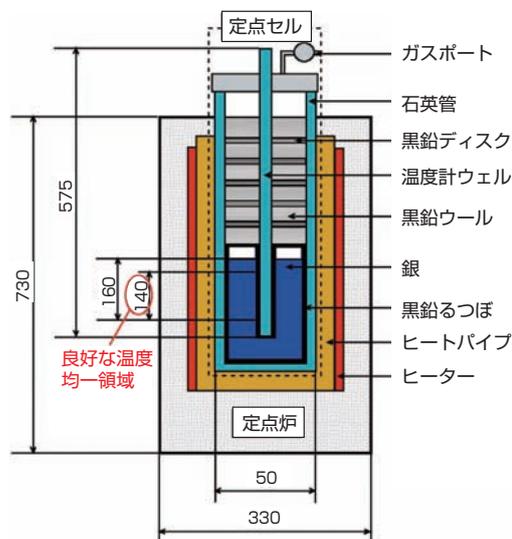


図3 銀点実現装置の模式図

た縦型電気炉を使用し、960 °C付近で9時間にわたり±25 mK以内の高い温度安定性と、高さ14 cmにわたり±6 mK以内の良好な温度均一性を実現した。定点セルは、銀に加わる気体の圧力を測定できるオープン型とし、公称純度99.9999 %の銀を黒鉛製のるつぼの中に1390 g封入した。凝固点の温度は±10 mKの範囲で5時間持続することが可能であり、再現性は14回測定して標準偏差が3.8 mKであった<sup>[2]</sup>。この装置を使用することにより、銀点において0.09 °Cの拡張不確かさ（約95 %の信頼の水準）で熱電対を校正できると評価した。

#### 4.1.2 銅点実現装置

銅点実現装置の概念断面図を図4に示す。この装置は前述の銀点実現装置と同様、ヒーターと制御系から成る「定点炉」、および定点物質を含む「定点セル」から構成される。定点炉は縦型とし、高さ方向に3分割したゾーンのそれぞれに発熱体を独立に設置して温度制御する電気炉とした。発熱体には無誘導巻のカンタル線を使用し、制御用熱電対としてR熱電対を各ゾーンの中央部に設置した。定点炉の設計において、従来の一般的な3ゾーン電気炉と比べて異なるのは、制御用熱電対と発熱体の熱接触を良くした点、断熱材を厚くして炉の保温性を向上させた点である。制御用熱電対はアルミナ管を介して発熱体と接触させて応答性を良くし、炉の温度制御性を向上させた。また、発熱体の周りの断熱材には高温用耐火繊維（セラミックファイバー）を用い、150 mm以上の厚さにして炉の保温性を向上させた。これにより、消費電力は1 kW以下に抑えることができた。定点セルは、銀点と同様のオープン型とし、公称

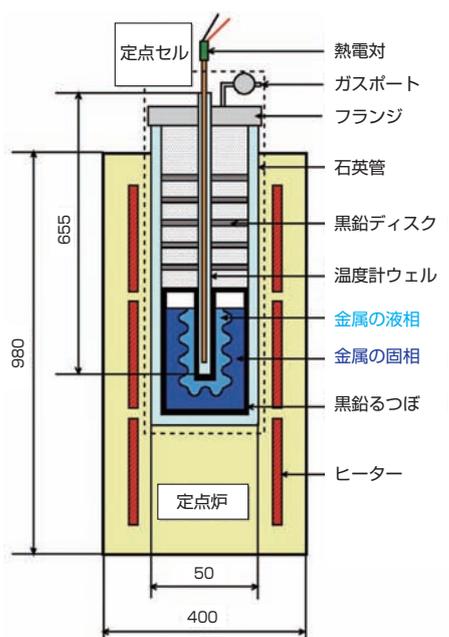


図4 銅点実現装置の模式図

純度99.9999 %の銅を黒鉛製のるつぼ中に1450 g封入した。図5は銅が凝固する時の定点セル内の温度の時間変化を示したものである。凝固点の温度は±2 mKの範囲で8時間持続した。融解・凝固を26回繰り返して測定した凝固点の温度の再現性は標準偏差で11.7 mKであり<sup>[3]</sup>、この装置を使用することにより、銅点において0.11 °Cの拡張不確かさ（約95 %の信頼の水準）で熱電対を校正できると評価した。

#### 4.1.3 コバルト-炭素共晶点実現装置

るつぼ法で1100 °C以上の温度定点がこれまで実用化されなかった大きな理由には、融解点・凝固点測定のために純金属を黒鉛製のるつぼで保持した場合、るつぼの構成元素である炭素が高温下で純金属中に溶け出し、純金属を炭素で汚染して融解点を降下させてしまうことが挙げられる。この問題を解決する方法として、金属と炭素をあらかじめ共晶合金の組成の比率で混合して黒鉛製のるつぼ中に保持することが発案された。これにより、るつぼ法で再現性の良い融解温度が実現でき、温度定点として利用可能になった<sup>[4]</sup>。金属-炭素共晶点は高温領域の新しい温度定点として世界の先進的な国立標準研究所で現在研究が進められている。この技術を用いて熱電対を校正するためのコバルト-炭素共晶点実現装置を開発し、それまで作製が困難であった大型のコバルト-炭素共晶点セルの作製に世界に先駆けて成功し、熱電対の校正に使用できることを実証した<sup>[5]</sup>。装置の設計においては、銅点実現装置の技術を応用した。ただし、銅点実現装置ではるつぼを保持するのに石英管を使用した。コバルト-炭素共晶点の温度では石英の失透もしくは軟化が起こるため、石英管の代わりにアルミナ管を使用した。

図6はコバルト-炭素共晶点の融解・凝固曲線を示したものである。不確かさ評価の結果、コバルト-炭素共晶点において0.53 °Cの拡張不確かさ（約95 %の信頼の水準）

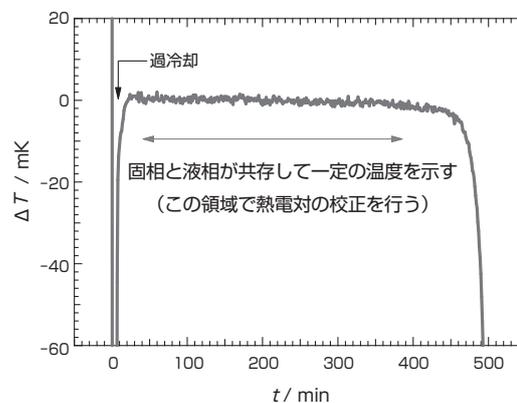


図5 銅点での凝固曲線

で熱電対を校正できることがわかった<sup>[6][7]</sup>。

#### 4.1.4 パラジウム点実現装置

パラジウムの融解点を実現するためにワイヤ法を選択することは前に述べたが、熱電対への定点物質の取り付け方には幾つかの手法がある。実験的な評価の結果、図7のようにコイル状のパラジウム線を取り付ける手法が安定した融解温度を実現するのに効果的であることがわかった<sup>[8]</sup>。図8は、コイル状のパラジウム線を取り付けたR熱電対をパラジウム点実現装置に挿入した後、徐々に炉の温度を上昇させたときのR熱電対の熱起電力の時間変化を示す。取り付けたパラジウム線の溶融に伴って150秒間で±0.05°Cの範囲で融解温度の持続が観測され、この領域の熱起電力の平均値をもってパラジウム点での被校正熱電対の熱起電力の校正値とした。測定の結果、約0.05°Cの再現性(標準偏差)で融解温度が実現できることが確認された。この装置を用いることにより、パラジウムの融解点において0.79°Cの拡張不確かさ(約95%の信頼水準)で熱電対を校正できた。

### 4.2 白金パラジウム熱電対の安定化技術

#### 4.2.1 熱電対のドリフトと不均質

温度定点から熱電対に温度の標準値を移すときに最も大きな不確かさの要因となるのが熱電対自身の安定性であ

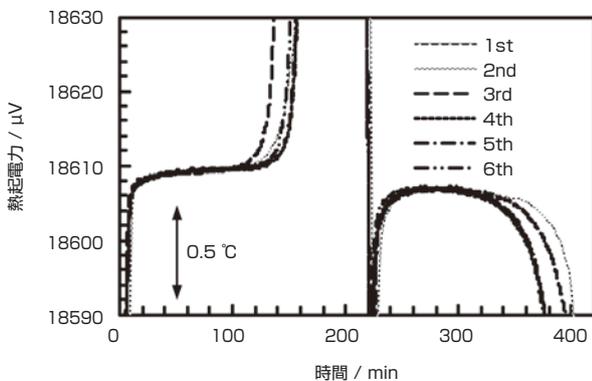


図6 コバルト-炭素共晶点での融解・凝固曲線

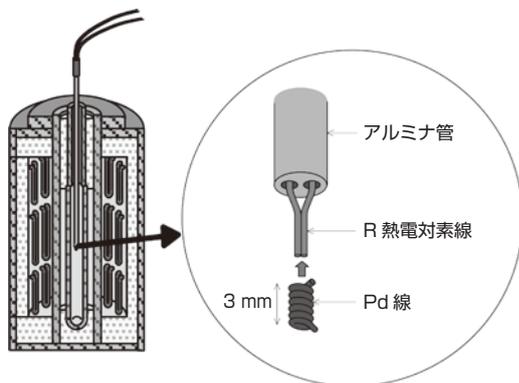


図7 パラジウムの融解点実現のためのワイヤ法

る。図9は、高温の炉中に新品の熱電対を挿入し、挿入長を固定したまま测温接点を長い時間高温に曝露した場合、熱電対の特性が時間の経過に伴いどのように変化するかを模式的に示している。Sはゼーベック係数と呼ばれる熱電対の特性であり、ここでは簡単のためにSは温度依存性をもたないと仮定して説明する。図中のEは温度勾配域で素線に発生した電場を示しており、Eを熱電対の素線に沿って積分したものが実際に観測される熱起電力となる。また、EとSには、 $E = S \cdot dT/dx$ の関係がある<sup>[9][10]</sup>。ここでxは熱電対の素線に沿った位置座標である。

新品の熱電対を炉中に挿入すると、最初は図9(c)の実線に示されているように、ゼーベック係数Sは位置xによらず一定の値を示す(これを均質であると言う)。この熱電対の挿入長を固定したまま、测温接点を高温に曝露し続けると、図9(c)の点線で示したように、高温に曝露された部分でのゼーベック係数が、熱電対素線の組成変化や構造変化などに起因して次第に変化し、場所によって一様ではなくなる。こうしたゼーベック係数Sの変化に伴い、図9(d)に示すように電場Eも変化し、結果として熱起電力の変化が観測される。このように、熱電対の位置を固定したまま测温接点を高温に曝露するとドリフトと呼ばれる熱起電力の変化が観測される。この熱起電力の変化の傾向と大きさは熱電対の種類によって大きく異なる。

测温接点と基準接点の温度をそれぞれ一定とした場合、図9(c)で示した新品の熱電対のように、ゼーベック係数Sが均質な熱電対では熱起電力は测温接点と基準接点の温度のみで決まるため、温度勾配が素線のどの位置にかろうとも挿入深さによらずに熱起電力は同じ値を示す。一方、炉内で長い時間高温に曝露してドリフトが観測された熱電対では、図10のように熱電対の挿入長を変化させると熱起電力が変化する。この熱電対のように素線の位置によってゼーベック係数が異なる熱電対を一般的に「不

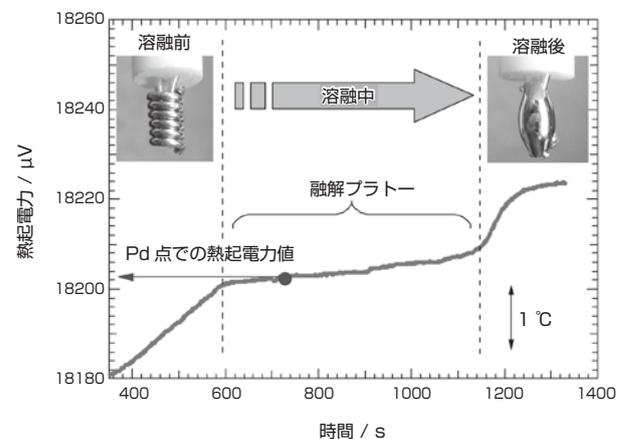


図8 パラジウム点での融解曲線

均質な熱電対」と呼ぶ。実際の温度測定では、熱電対の挿入長を変えるなどして、温度勾配がかかる位置を変化させたときに生じる熱起電力の変化量を「不均質」と呼ぶことが多い。不均質な熱電対では測温接点と基準接点のそれぞれの温度値のみで熱起電力は決まらず、炉の温度分布に依存するため、校正された仲介標準器であっても異なる温度分布で使用すれば、不均質は誤った標準値を与えることとなる。一般の熱電対のゼーベック係数  $S$  は温度依存性を持つが、同様の考え方が成り立つ。

#### 4.2.2 ドリフト・不均質の評価方法の確立

前述のように熱電対のドリフトと不均質は仲介標準器の安定性を評価するうえで非常に重要な項目となる。特に高温域では一般にドリフトと不均質は大きくなる傾向があるため、これらは熱電対の校正の不確かさの大きな要因となる。

熱電対の安定性の評価を行うにあたり、当初、米国立標準技術研究所 NIST とイタリア国立標準研究所 IMGC が合同で研究した報告書<sup>[11]</sup>を参考にして作製した白金パラジウム熱電対のドリフトと不均質を調べた。熱処理は NIST-IMGC の研究とほぼ同様に、熱電対素線への直接通電加熱により 1200 °C で 10 時間、熱電対として組み立てた後、炉中にて 1100 °C で 3 時間、その後、450 °C で 10

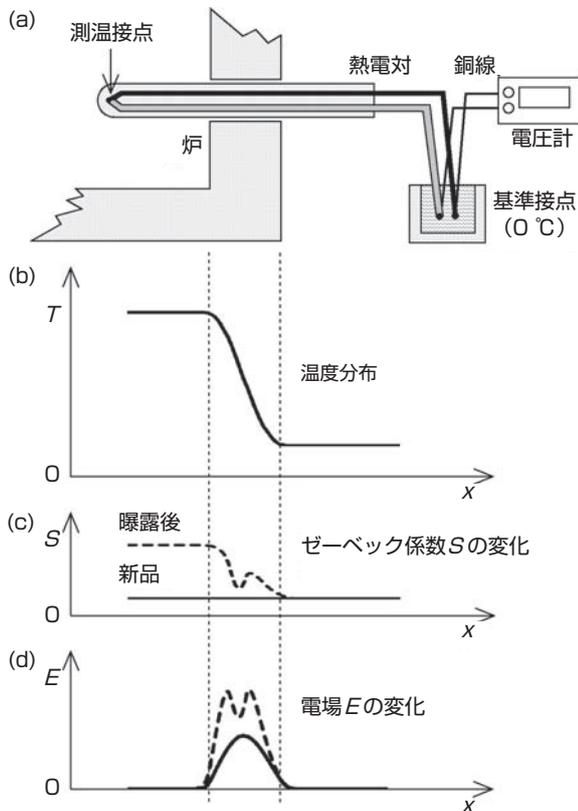


図9 熱電対の高温曝露による熱起電力の変化  
実線は新品時の、点線は高温に曝露した後の熱電対のゼーベック係数と電場を示す。

時間行った。

熱電対の測温接点を一定の温度に保つために銅点実現装置を使用し、定点実現装置の凝固温度の安定性と均熱性を利用して、熱電対のドリフトと不均質を同時に測定する方法をとった<sup>[12]</sup>。熱電対の測温接点を銅点実現装置の測温孔の最深部から 1 cm 上の位置まで挿入し、そのままの状態でも銅の凝固と融解を繰り返し実現させて、熱起電力の変化の様子をモニターした。このとき銅点実現装置は絶えず融解と凝固を繰り返すよう温度制御がプログラムされており、熱電対の測温接点は常に銅点温度に曝露されている。測温接点の位置を固定し、ドリフトを約 500 時間測定した結果が図 11 である。白金パラジウム熱電対の熱起電力は曝露開始後最初の 50 時間まで大きく変化しており、

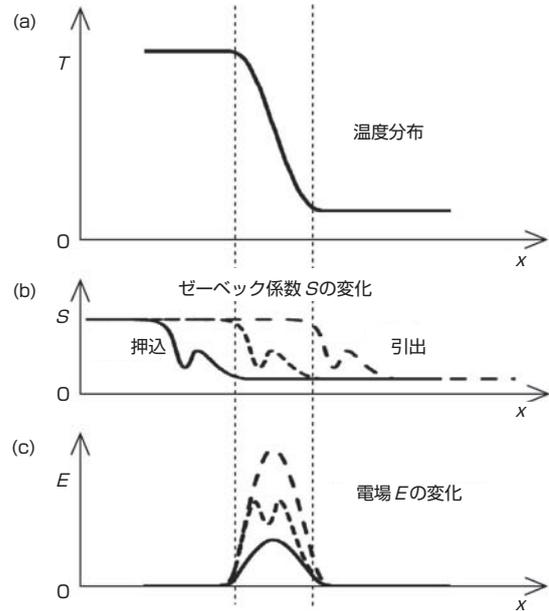


図10 熱電対の高温炉への挿入長を変化させた場合の熱起電力の変化  
実線は高温に曝露された熱電対を押し込んでいった時、破線は引き出した時のゼーベック係数と電場を示す。

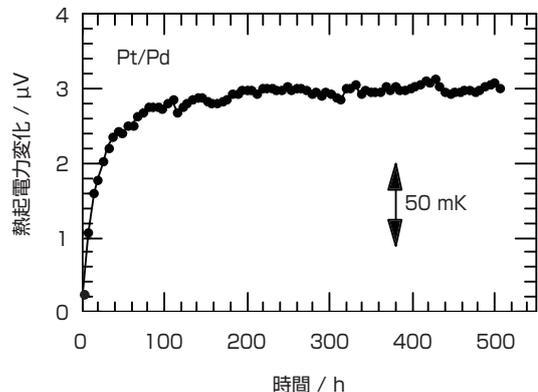


図11 銅点に曝露した場合の白金パラジウム熱電対のドリフト

100 時間以降はほぼ一定の値を示した。

図 12 は、ドリフト測定の中で銅の凝固が進行中に熱電対を上下に移動させたときの熱起電力の変化をプロットしたものである。ドリフトの測定を行うときの測温接点の位置を基準点 (0 cm) とした。図中の 0 h ~ 505 h は、曝露開始からの経過時間である。曝露開始時 (0 h) のデータは、熱電対を 0.5 cm/min の速度で下方に挿入しながら熱起電力変化を測定したものであり、その他のデータは図中に記した経過時間の時に熱電対を 0.5 cm/min の速度で上方に引き上げながら測定したものである。図 12 のデータを得るために行った「熱電対の挿入長を変える」行為は、測温接点の温度を同じに保ったまま「熱電対の素線に沿った温度分布を変える」行為と同等であり、この時の熱起電力の変化は熱電対の不均質を反映している。熱電対の不均質を定量的に評価するため、ここでは、図 12 の 7 h の例のように、0 cm から上方 8 cm までの熱起電力の変化を熱電対の「不均質」と定義した。

この方法を用いて、温度定点での熱電対の安定性をほぼ自動運転で大量に評価することができるようになり、これにより次節で述べる安定な伸介標準器の開発・評価を効率的に行うことが可能になった。

#### 4.2.3 安定な熱電対の作製方法

白金パラジウム熱電対は純金属である白金線とパラジウム線を素線として構成されているが、不均質に起因する熱起電力の変化は主にパラジウム線が関係していると報告さ

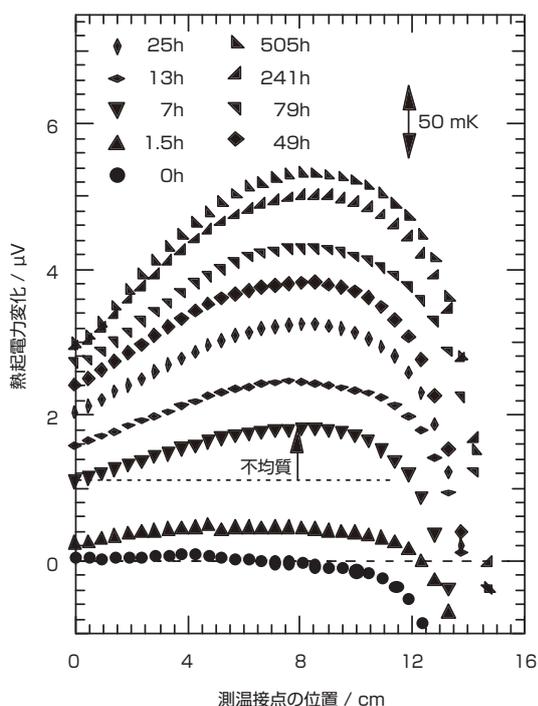


図 12 銅点に曝露した場合の白金パラジウム熱電対の不均質

れている<sup>[13]</sup>。そこで、パラジウム素線のロットの違いによる影響を調べるため、公称純度は同じ 99.99 %であるが、ロットが異なる 4 種類のパラジウム線を用いて 4 本の白金パラジウム熱電対を作製した<sup>[14]</sup>。ここで、作製した 4 本の熱電対をそれぞれ TC-a、TC-b、TC-c、TC-d と呼ぶことにする。4 種類の異なるロットのパラジウム線の中で TC-a と TC-b のパラジウム線は同じ素線製造会社にて同じ製造工程で作製されたものである。一方、TC-c と TC-d のパラジウム線は TC-a、TC-b と異なる別々の製造会社から購入したものである。素線の通電加熱は 1200 °C で 10 時間行い、熱電対組み立て後、炉中で 1100 °C で 3 時間、その後、450 °C で 10 時間熱処理を行った。

図 13 と図 14 はそれぞれこれらの熱電対のドリフトと不均質の測定結果である。TC-a、TC-b のように、同じ素線製造会社で同じ製造工程で作製されたパラジウム素線を使用しても、ロットが異なればドリフトと不均質の変化の様子は異なっていることが分かる。一方で、TC-d はドリフト、不均質ともに小さい。このことは、適切なパラジウム素線

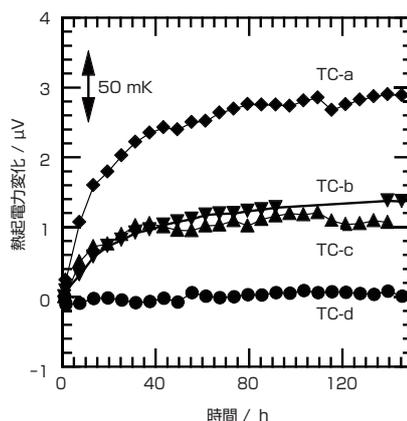


図 13 異なるロットのパラジウム素線を用いた白金パラジウム熱電対のドリフト

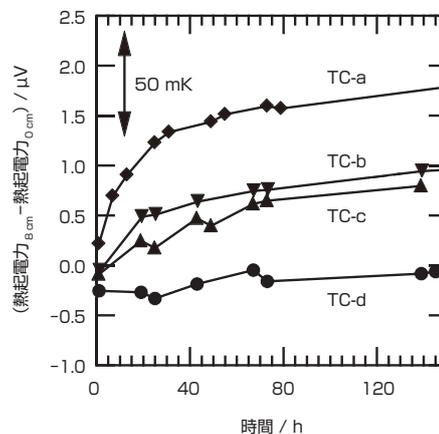


図 14 異なるロットのパラジウム素線を用いた白金パラジウム熱電対の不均質

のロットを選択すれば、ドリフトと不均質を大幅に減少させることができることを示唆する。ただし、TC-dで使用されているような素線を常に得ることは容易ではない。そのため、TC-a、TC-b、TC-cで使用されているような比較的取得しやすい素線を用いて、ドリフト、不均質を小さくする手法を調べた。

炉中での熱処理は、熱電対が実際の使用前に受ける熱履歴の最後の工程であることから、熱電対の特性に深く関わるのが予想される。そこで、素線の歪み除去のため炉中で1100 °Cで3時間の熱処理を行った後に、450 °Cから1080 °Cまでの温度範囲の1点の温度で最終熱処理を施すことにより、最終熱処理温度が異なる合計11本の熱電対を作製した。これらの熱電対のパラジウム素線には最も大きなドリフトを示したTC-aと同じロットのものを用いた。また、図11での白金パラジウム熱電対の熱起電力が100時間ではほぼ安定していることから、最終熱処理の時間は100時間を選んだ。

図15は、上述のように作製した11本の白金パラジウム熱電対に対して、銅点実現装置を用いて1085 °Cへ曝露した場合の熱起電力のドリフトを示し、図16は同じくその不均質を示す。図中に記す温度は最終熱処理温度である。参考のため、450 °Cで10時間熱処理した熱電対の結果も黒丸でプロットしてある。どの熱電対も1085 °Cへの曝露開始後100時間程で熱起電力は安定した。最終熱処理温度が730 °Cのとき、熱起電力は100時間で約4  $\mu\text{V}$  (約0.2 Kに相当) と最大の変化を示した。ここで注目すべき

は、850 °Cまたは1030 °Cで100時間最終熱処理を行ったものはドリフトと不均質がともに非常に小さくなっている点である。熱起電力の変化は150時間にわたって0.5  $\mu\text{V}$  (24 mKに相当) 以下となっており、この結果は、適切な熱処理を行うことによって、白金パラジウム熱電対のドリフトと不均質を抑えることができることを明らかにした<sup>[12]</sup>。

銀点実現装置を用いた962 °Cへの曝露についても同様なドリフトと不均質の測定を行った結果、850 °Cでの最終熱処理の効果は素線のロットが異なっても有効であることがわかった<sup>[15]</sup>。また、コバルト-炭素共晶点を用いた1324 °Cへの曝露についても同様の測定を行った結果、1030 °Cでの最終熱処理はコバルト-炭素共晶点でのドリフトの低減に有効であることがわかった<sup>[16]</sup>。銀点より低い温度への曝露では白金パラジウム熱電対のドリフトと不均質は急速に小さくなった<sup>[17]</sup>。以上の結果は、適切な素線と作製法、熱処理法を選択することによって、1330 °Cまでの温度で白金パラジウム熱電対のドリフトと不均質を非常に小さくできることを意味する<sup>[16]</sup>。これにより、銀点、銅点、およびコバルト-炭素共晶点の各温度でドリフトと不均質を小さくし安定化させる手法を見出すことができた。

#### 4.2.4 白金パラジウム熱電対とR熱電対との比較

R熱電対の場合、1085 °Cへの曝露では熱起電力は単調に減少し続けていく傾向を示し、300時間曝露し続けた場合0.2 °C程度ドリフトした<sup>[9][14]</sup>。それに対して、図15で示されたように、適切な最終熱処理を行った白金パラジウム熱電対では、1085 °Cの曝露を150時間行ってもドリフト

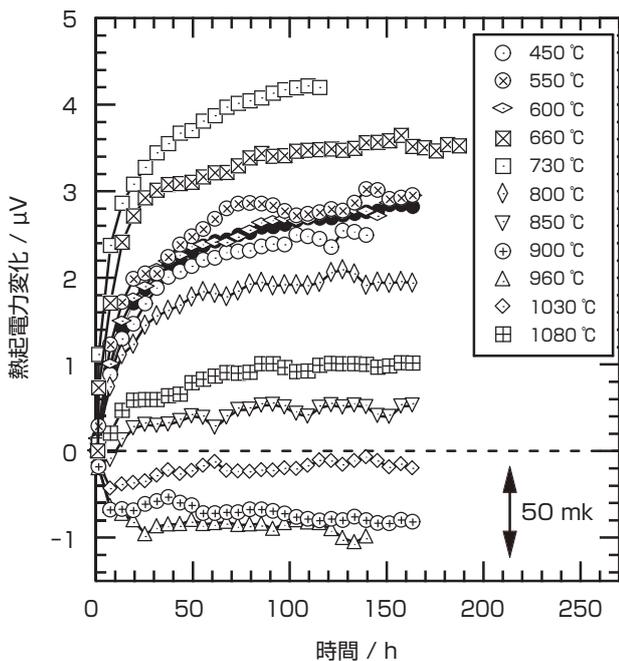


図15 異なる最終熱処理温度に対する白金パラジウム熱電対のドリフト

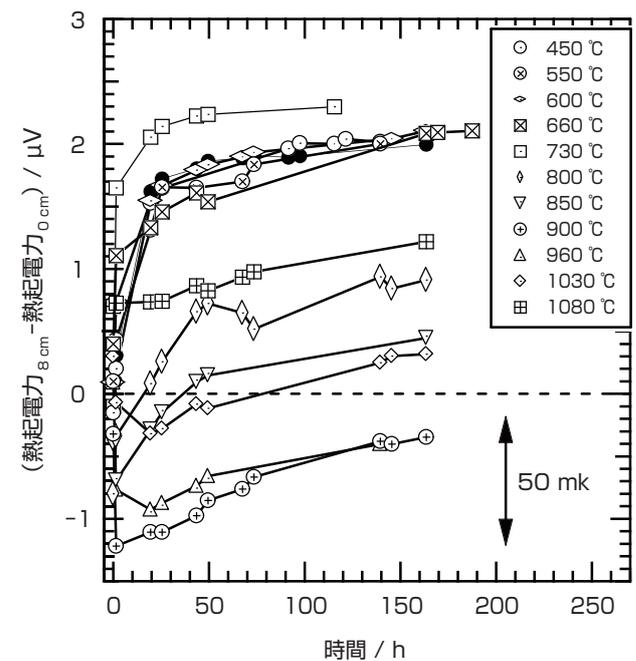


図16 異なる最終熱処理温度に対する白金パラジウム熱電対の不均質

は 0.03 °C 以内に収まることがわかった。不均質についてもドリフト同様、R 熱電対では単調に変化し続けていくのに対し、適切な熱処理を行った白金パラジウム熱電対では、図 16 で示されているように約 150 時間にて 0.04 °C 以内でほぼ一定の値を示した。これらの明白な違いから、銀点、銅点、コバルト-炭素共晶点では白金パラジウム熱電対を仲介標準器として選択することを決めた。一方、白金パラジウム熱電対は素線にパラジウムを使用しているため、パラジウム点の温度では融解して使用できない。そのため、パラジウム点の仲介標準器としては従来から使用実績に優れ、国内で最も普及している R 熱電対を用いることとした。

### 4.3 定点校正の不確かさの評価

熱電対を仲介標準器として国家計量標準である温度定点の標準値を供給する際、その不確かさの要因としては様々なものがあるが、大きく分類すると「定点実現装置に内在する不確かさ」、「熱電対を校正する時の測定系(電圧計、基準接点装置など)に内在する不確かさ」、「校正対象である熱電対自身のドリフトと不均質に起因する不確かさ」が考えられる。銀点、銅点、コバルト-炭素共晶点、およびパラジウム点のそれぞれにおける熱電対の校正の不確かさを表 1 に示す。拡張不確かさ(約 95 % の信頼の水準)は銀点、銅点、コバルト-炭素共晶点、パラジウム点でそれぞれ 0.09 °C、0.11 °C、0.53 °C、0.79 °C であり、次節で示すように世界でトップレベルの高い校正能力となっている。

### 4.4 国際比較による国家計量標準の同等性

実現した温度定点が他の国の国家計量標準と整合しているかを検証するため、アジア太平洋地域の国立標準機関の間での国際比較(APMP-T-S1-04)が行われた。R 熱電対を各参加機関に回送し、参加機関はそれを自己が保有する温度定点で校正し、その校正值を幹事機関の校正值と比較した。参加した国立標準機関は NMIA (オーストラリア)、NIM (中国)、SCL (香港)、NPLI (インド)、KIMLIPI (インドネシア)、KRIS (韓国)、SIRIM (マレー

表 1 各温度定点における熱電対の校正の不確かさ

| 仲介標準器                            | 白金パラジウム熱電対 |         |            | R 熱電対  |
|----------------------------------|------------|---------|------------|--------|
|                                  | 銀点         | 銅点      | コバルト-炭素共晶点 |        |
| 校正に用いる温度定点                       | 961.78     | 1084.62 | 1324.0     | 1553.5 |
| 定点の温度値 / °C                      | 961.78     | 1084.62 | 1324.0     | 1553.5 |
| 測定系の不確かさ / °C                    | 0.021      | 0.019   | 0.018      | 0.042  |
| 定点実現装置の不確かさ / °C                 | 0.014      | 0.021   | 0.260      | 0.231  |
| 熱電対自身の不確かさ / °C                  | 0.034      | 0.045   | 0.060      | 0.315  |
| 校正の合成標準不確かさ / °C (約 68 % の信頼の水準) | 0.042      | 0.054   | 0.267      | 0.393  |
| 校正の拡張不確かさ / °C (約 95 % の信頼の水準)   | 0.09       | 0.11    | 0.53       | 0.79   |

合成標準不確かさは、個々の不確かさを合成したもので、各成分の不確かさの二乗和の正の平方根で与えられる。

シア)、SPRING (シンガポール)、CSIR (南アフリカ)、産総研/NMIJ、CMS (台湾)、および NIMT (タイ) の 12 機関であった。

図 17 は、銅の凝固点である 1084.62 °C での比較結果であり、各参加機関と幹事機関である NMIA との校正值の差が各参加機関の校正の不確かさと一緒に示されている。産総研/NMIJ の校正の不確かさは参加機関の中でトップレベルの小ささであり、銅点での校正值は各国が主張する不確かさのレベルでほぼ一致することが確認された。

銀点での校正值の比較についても同じ国際比較の中で行われており、銅点と同様に、産総研/NMIJ の銀点での校正の不確かさはトップレベルの小ささで、各国の校正值はそれぞれが主張する不確かさのレベルでほぼ一致することが確認された<sup>[18]</sup>。

コバルト-炭素共晶点については、欧州の主要な国立標準機関である PTB (独)、NPL (英)、LNE (仏) が行っている共同プロジェクト Euromet project 857<sup>[19]</sup> に産総研/NMIJ も参加して、白金パラジウム熱電対とコバルト-炭素共晶点セルを回送する国際比較を行った結果、良好な一致を得ている<sup>[20]</sup>。

### 4.5 熱電対校正の品質システムの構築と運用

産総研が行う校正・試験サービスに関する品質システムに基づき、2004 年に熱電対の校正業務に関する技術マニュアルを作成した。校正・試験機関に関する国際規格である ISO/IEC 17025 の要求事項に適合するように、要員、施設と環境条件、校正方法、設備、トレーサビリティ、校正品目の取扱い、結果の報告などの各項目を規定し、それに

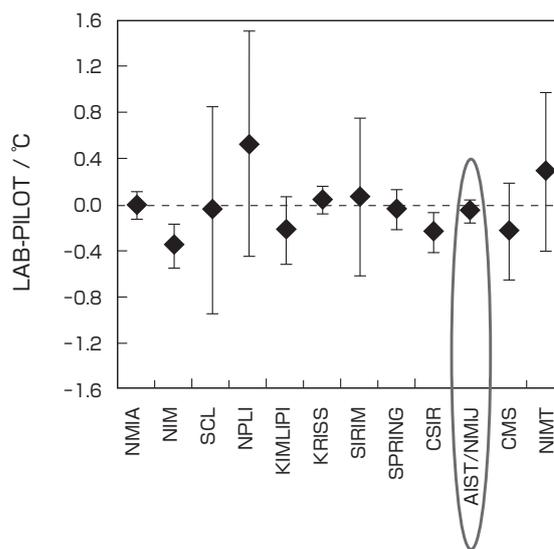


図 17 銅点 (1084.62 °C) における R 熱電対の校正值の国際比較の結果

◆は各参加機関と NMIA との校正值の差を、誤差棒は各機関の校正の不確かさを示す。

従って校正を実施し、記録を保管するようにした。特に、熱電対の校正に特有の不確かさの要因であるドリフトと不均質についての評価方法を詳細に規定し、それらが熱電対の校正値とその不確かさに与える影響を定量的に評価する手順を技術マニュアルで定めた。2006年5月には、独立行政法人製品評価技術基盤機構が運営する認定プログラムのもとで産総研の熱電対の校正業務が国際規格に適合すると認定された。慎重に不確かさの評価を行って熱電対の校正方法を確立し、さらに国際比較によって検証した技術を定常的に継続するために必要な要素が品質システムであり、産総研の行う熱電対の校正の信頼性を国内的・国際的に高めている。

## 5 トレーサビリティ体系の整備

### 5.1 熱電対のトレーサビリティ体系の設計

国家計量標準が校正事業者を利用され、産業界が用いる温度計を校正するまでの温度のトレーサビリティの体系を我が国の計量法のJCSS<sup>用語4</sup>制度に基づき構築した。国家計量標準として、産総研の銀点(2002年)、銅点(2002年)、パラジウム点(2005年)の各定点実現装置を計量法で定める特定標準器に順次指定し、産総研からこれらの3点での校正値を仲介標準器に与えて標準値として校正事業者へ供給した<sup>[21][8]</sup>。校正事業者においては仲介標準器から自らが保有する温度定点装置に標準値を移した上で温度目盛を作る方法を採用した。ただし、パラジウム点については、実用標準熱電対へ比較校正により標準値を移す方法も選択できることとした。

産総研が校正を行う仲介標準器は、計量法で定める特定二次標準器に相当し、銀点と銅点では白金パラジウム熱電対、パラジウム点ではR熱電対とした。熱電対を仲介標準器としてパラジウム点の標準値の供給を開始したことにより、図18に示すように、校正事業者は実用標準熱電対に対して1554℃までの温度標準を持つことが可能になり、R熱電対を始め各種の熱電対に対して、実用標準を用いた校正ができるようになった。現在、産総研では、特定標準器による特定二次標準器の校正を年間10件程度行っており、それらに対して特定標準器による校正の結果であることを示すため計量法に定められた「jcss」の標章を付けた校正証明書を発行している。

jcss校正に加えて、産総研では依頼試験としてコバルト-炭素共晶点の標準値の供給を開始(2009年)した<sup>[7]</sup>。これにより、校正事業者が作った温度目盛のより正確な検証が可能になった。

このようにしてJCSSに登録した校正事業者は、例えば、銅点までの各種の定点実現装置の校正、高温域について

は貴金属熱電対(R、S、B、Pt/Pd)、卑金属熱電対(N、K、E、J、T)および指示計器付温度計の銅点までの定点校正、最高1554℃までの温度範囲での温度計の比較校正など、自社の設備に合わせてさまざまな校正事業を柔軟に選択して行えるようになった<sup>[22]</sup>。

### 5.2 国内校正事業者との共同研究と技術文書の作成

標準熱電対としての白金パラジウム熱電対の技術を普及するために、日本学術振興会産業計測第36委員会温度計測分科会の作業部会で2001年6月から2002年3月にかけて、白金パラジウム熱電対の持ち回り試験を行った。銅点における校正作業に伴う熱電対のドリフトを評価することを目的として、同一ロットから取った白金素線とパラジウム素線から4本の白金パラジウム熱電対を同一条件で作製して試験に供した。これらの熱電対を「産総研→4事業者→産総研」と回送し、続いて回復アニールをした後に、再び「産総研→残りの4事業者→産総研」と回送し、各事業者での銅点校正作業によって校正値がどの程度変化するかを調べた。持ち回り試験に先立って、白金パラジウム熱電対を作製するための熱電対素線や絶縁管などの材料仕様条件、素線や絶縁管等の前処理および組み立て後の熱処理などに関する組立条件、ならびに使用条件について、各事業者の熱電対作製用設備および校正用設備、産総研の校正用設備などの仕様をもとに検討を行った。

また、同作業部会では2004年に、産総研を含む7事業者で「R熱電対のPd点校正を含む共同実験」として、2種類の共同実験を行った<sup>[23]-[25]</sup>。

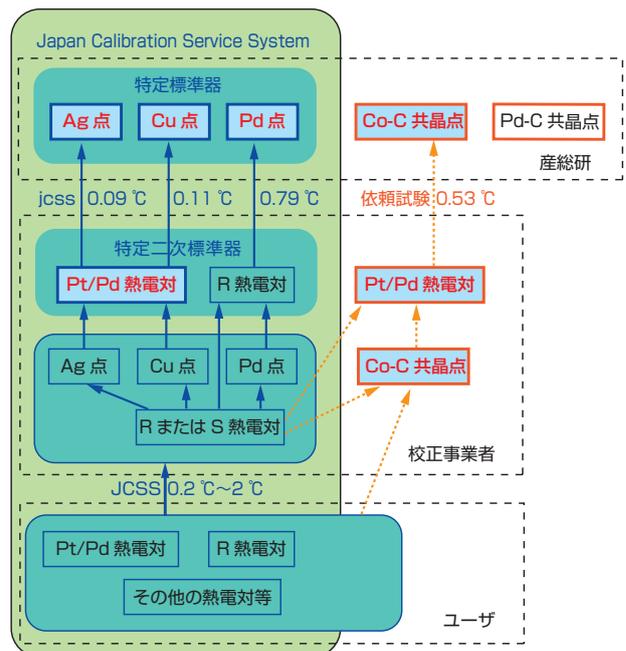


図18 高温域における熱電対のトレーサビリティ体系図 (2010年2月時点)

校正事業者が JCSS に登録されるためには、技術的要求事項適用指針に適合することが要件になっている。この指針は、校正事業者に対する国際規格である ISO/IEC 17025 に規定されている技術的要求事項を明確化し、解釈を示すものであり、独立行政法人製品評価技術基盤機構が発行して公開している技術文書である。またこれは校正事業者において校正が行われる際の技術能力を第三者が認定するための技術基準ともなっている。この中の特定二次標準器又は常用参照標準が具備すべき条件などは、上記の共同実験の結果を踏まえて規定した。不均質の取り扱いについての注意事項も多く記載された<sup>[26]</sup>。

## 6 標準整備の効果と今後の課題

### 6.1 熱電対のトレーサビリティ体系の整備による効果

熱電対のトレーサビリティ体系を構築したことによる現実の効果として、我が国の JCSS 校正事業の温度範囲が拡大し、さらには登録校正事業者が発行する JCSS 校正証明書 の件数が増加したことが挙げられる。JCSS 校正証明書の発行件数は 2002 年度には約 2000 件<sup>[27]</sup>であったが、2008 年度には約 10000 件<sup>[28]</sup>と 6 年間で約 5 倍となった。温度計の製造事業者や校正事業者が出す規格適合証明や校正値が、社会で広く使われている温度計の信頼性を確保することに寄与している。

### 6.2 白金パラジウム熱電対の産業界への普及

本研究では、仲介標準器として開発した白金パラジウム熱電対が、熱処理などを適切に行うことにより、極めて高い性能をもつことを示した。この熱電対は当初産総研から研究開発品として有料で頒布したが、頒布先は産総研に校正を依頼する校正事業者のみに限定されていた。こうした校正事業者以外のユーザーも広くこの白金パラジウム熱電対を使えるように、この熱電対の作製法を民間企業へ技術移転することを進めてきた。開発された白金パラジウム熱電対は、作製方法の技術移転を行った株式会社チノーから 2006 年 4 月に販売が開始された<sup>[29]</sup>。

また、白金パラジウム熱電対は仲介標準器としてだけでなく、一般の温度計測用熱電対としての使用も期待される。広く工業的な利用を促進させるため、産総研は IEC での標準化にも取り組み、2008 年に IEC 62460 として規格化された<sup>[30]</sup>。

### 6.3 パラジウム-炭素共晶点の開発

3 章で述べたように、将来的には四つの温度定点（銀点、銅点、コバルト-炭素共晶点、パラジウム-炭素共晶点）の標準値を、白金パラジウム熱電対を仲介標準器として供給することを目指している。そのために現在パラジウム-炭素共晶点の開発とその評価を精力的に進めている<sup>[5]</sup>。

コバルト-炭素共晶点と同様に共同プロジェクト（Euromet Project 857）に参加して欧州の代表的な国立標準研究所 PTB（独）、NPL（英）、LNE（仏）とパラジウム-炭素共晶点の温度値の国際比較も行っており、熱電対を仲介標準器とした標準供給の準備を着実に進めているところである。

表 2 に、パラジウム-炭素共晶点を含む各温度定点での校正値の不確かさが、将来どの程度小さくなるか予想を示す。現在、金属-炭素共晶点は 1990 年国際温度目盛（ITS-90）<sup>用語 5</sup> の定義定点には採用されていない。そのために、熱電対用に製作したコバルト-炭素共晶点セルの温度値は、ITS-90 に基づいて校正された放射温度計によって測定され、決められている。表 1 に示したコバルト-炭素共晶点における熱電対の校正の不確かさの要因には「定点実現装置の不確かさ」があり、0.26 °C と最も大きな不確かさの要因となっている。そしてこの不確かさの要因の中には、上述の放射温度計による測定の不確かさが含まれている<sup>[6]</sup>。今後、放射温度計による測定の不確かさがより小さくなる見込みであり、その結果、コバルト-炭素共晶点とパラジウム-炭素共晶点での熱電対校正の拡張不確かさ（約 95 % の信頼の水準）は 0.3 °C 程度になると予想される。これが達成されると、白金パラジウム熱電対を仲介標準器として、1500 °C までの温度域でより小さな不確かさで標準供給が可能になる。

## 7 おわりに-標準整備計画の意義

1990 年代後半から、我が国の社会ニーズに基づいた標準整備計画を策定し、それを基盤にしたトレーサビリティ体系を整備してきたが、それらは当然のことながら、産業界の動向と密接な関わりをもって実施されてきた。2001 年に開始した 10 年間の標準整備計画の実行は、現在終着点が見えた段階にあるが、この間産総研がいつまでに、どの計量標準を整備し供給するかを、校正事業者を始めとして品質管理を重視する企業に明示して、我が国に最も適した計量標準の体系を議論しながら構築してきた。すなわち、それまで産業界が作り上げてきた信頼性確保のための技術基盤と計量トレーサビリティを融合させる必要性を双方が意識して活動してきた。

温度標準の場合は、産総研が供給する国家計量標準の

表 2 今後予想される各温度定点における白金パラジウム熱電対の校正の不確かさ

| 温度定点                           | 銀点     | 銅点      | コバルト-炭素共晶点 | パラジウム-炭素共晶点 |
|--------------------------------|--------|---------|------------|-------------|
| 定点の温度値 / °C                    | 961.78 | 1084.62 | 1324.0     | 1491.9      |
| 校正の拡張不確かさ / °C (約 95 % の信頼の水準) | 0.09   | 0.11    | 0.3        | 0.3         |

範囲拡大と民間事業者が行う校正事業の範囲拡大が歩調を合わせた結果、JCSSの利用拡大が進んだ好例であると言われている<sup>[31]</sup>。その背景には、本稿で述べた国家計量標準の設定、仲介標準器の技術開発、不確かさの評価、品質システムの整備、国際比較の実施、トレーサビリティ体系の構築、校正に関する技術文書の作成といった、多くの要素技術が必要であった。1990年代末から始まった長期間の取り組みであったが、現段階において、日本国内には1550 °Cまでの温度計測の信頼性を担保する強固なシステムが作られた。今後も筆者らは、6.3節に述べた高度化への技術開発を続けるとともに、トレーサビリティ体系をより有効に使うための一層の普及活動に取り組みたいと考えている。

### 用語説明

用語1: 熱電対: 2種類の金属素線や合金素線から作られ、素線の選び方により-270 °Cの極低温から2400 °Cの超高温までを測ることができる実用的に優れた温度計。現在、日本工業規格 (JIS) ではT、J、E、K、Nの卑金属熱電対とS、R、Bの貴金属熱電対の8種類が規定されている。

用語2: 温度定点: 物質の相転移が一定の温度で起き、その再現性・安定性が良いことを利用して温度計の校正を行う熱平衡状態。代表的なものとしては、水の三重点(水の気相・液相・固相が共存する温度)、銅・銀・亜鉛などの純金属の凝固点がある。

用語3: 共晶点: 一つの融液から二つ以上の固相が分離して密に混合した組織となって凝固した合金などの融解、もしくは凝固温度。共晶組成で融解・凝固温度の極小点が得られる。

用語4: JCSS: Japan Calibration Service Systemの略で、正式名称は「計量法校正事業者登録制度」。1993年11月より計量法に基づく校正事業者認定制度として運営され、2005年7月より校正事業者登録制度となった。国際標準化機構 (ISO) および国際電気標準会議 (IEC) が定めた校正機関に関する基準 (ISO/IEC 17025 規格) の要求事項に適合しているかどうかを審査し、校正事業者を登録する制度。登録事業者は、JCSS 標章を付した校正証明書を発行することができる。

用語5: 1990年国際温度目盛 (ITS-90): メートル条約加盟国間の国際的な取り決めによる熱力学温度を近似する温度目盛。複数の温度定点の温度値と、その間の補間方法 (補間温度計と補間式) で定義される。国際温度目盛はおよそ20年周期で見直しが行われており、1990年にその時点での技術に基づき制定された温度目盛が現在まで使われている。

### 参考文献

- [1] JIS C 1602, 熱電対. 財団法人日本規格協会, 東京 (1995).
- [2] 沼尻治彦, 小倉秀樹, 井土正也, 新井優: 熱電対校正用銀点実現装置の不確かさ評価, *産業技術総合研究所計量標準報告*, 4 (1), 741-745 (2002).
- [3] 小倉秀樹, 沼尻治彦, 山澤一彰, 丹波純, 井土正也, 新井優: 熱電対用銅点実現装置の不確かさ評価, *計測自動制御学会論文集*, 39 (11), 1016-1021 (2003).
- [4] Y.Yamada, F.Sakuma and A.Ono: Thermocouple observations of melting and freezing plateaus for metal-carbon eutectics between the copper and palladium points, *Metrologia* 37 (1), 71-73 (2000).
- [5] H.Ogura, M.Izuchi and M.Arai: Evaluation of cobalt-carbon and palladium-carbon eutectic point cells for thermocouple calibration, *Int. J. Thermophys.*, 29, 210-221 (2008).
- [6] H.Ogura, M.Izuchi, J.Tamba and M.Arai: Uncertainty for the realization of the Co-C eutectic point for calibration of thermocouples, *Proc. ICROS-SICE International Conference 2009*, 3297-3302 (2009).
- [7] 小倉秀樹: 1000 °C以上での熱電対の長期安定性の評価技術, *産総研 Today*, 10 (1), 23 (2010).
- [8] 小倉秀樹: 熱電対による温度標準の供給, *産総研 Today*, 6 (1), 36-37 (2006).
- [9] R.E.Bentley: Theory and practice of thermoelectric thermometry, *Handbook of Temperature Measurement Vol.3*, Springer (1998).
- [10] 小倉秀樹: 熱電効果を用いた温度センサ, *計測と制御*, 45 (4), 306-311 (2006).
- [11] G.W.Burns, D.C.Ripple and M.Battullo: Platinum versus palladium thermocouples: an emf-temperature reference function for the range 0 °C to 1500 °C, *Metrologia*, 35, 761-780 (1998).
- [12] H. Ogura, H. Numajiri, K. Yamazawa, J. Tamba, M. Izuchi and M. Arai: Effects of heat treatment on the inhomogeneity of the Pt/Pd thermocouple at the Cu freezing point, temperature, *Its Measurement and Control in Science and Industry*, 7, 485-489 (2003).
- [13] G.W.Burns and D.C.Ripple: Variation in the thermoelectric behavior of palladium following heat treatment, *Proc. TEMPMEKO 2001*, 1, 61-66 (2001).
- [14] 小倉秀樹: Pt/Pd熱電対の定点における信頼性, *計測と制御*, 42 (11), 926-929 (2003).
- [15] H.Numajiri, H.Ogura, M.Izuchi and M.Arai: Effect of heat treatment on the inhomogeneity of the Pt/Pd thermocouples at the silver freezing point, *Proc. TEMPMEKO 2004*, 1, 477-482 (2004).
- [16] H.Ogura, K.Yamazawa, M.Izuchi and M.Arai: Emf changes of Pt/Pd thermocouples in the range from 1080 °C to 1330 °C, *Proc. TEMPMEKO 2004*, 1, 459-464 (2004).
- [17] M.Izuchi, H.Ogura, H.Narushima, H.Numajiri and M.Arai: Emf changes of Pt/Pd thermocouples in the range 420 °C to 1080 °C, *Proc. TEMPMEKO 2004*, 1, 477-482 (2004).
- [18] F.Jahan and M.Ballico: APMP regional comparison of Type R (Pt-Pt13%Rh) thermocouples from 0 to 1100 °C, *Metrologia*, 44, Tech. Suppl, 03004 (2007).
- [19] R.Morice, F.Edler, J.Pearce, G.Machin, J.Fischer and J.R.Filtz: High-temperature fixed-point facilities for improved thermocouple calibration-euromet project 857, *Int. J. Thermophys.*, 29, 231-240 (2008).
- [20] F.Edler, R.Morice, H.Ogura and J.Pearce: Investigation of Co-C cells to improve thermocouple calibration, *Metrologia*, 47, 90-95 (2010).

- [21] 新井 優: 温度の標準供給, *AIST Today*, 3 (4), 34 (2003).
- [22] 独立行政法人 製品評価技術基盤機構: ホームページ  
<http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/lab/index.html>
- [23] R熱電対のPd点校正を含む共同実験報告, 日本学術振興会産業計測第36委員会温度計測分科会 (2005).
- [24] M.Izuchi, S.Masuyama, H.Ogura and M.Arai: Inhomogeneity evaluation of Type R thermocouples at the palladium melting point, *Proc. SICE 2005*, 1499-1502 (2005).
- [25] T.Hamada, J.Ode and S.Miyashita: An uncertainty estimation of Type R thermocouples exposed at Pd fixed point, *Proc. SICE 2005*, 1090-1095 (2005).
- [26] 独立行政法人 製品評価技術基盤機構: 文書番号JCT21306 技術的要求事項適用指針(接触式温度計(熱電対)).
- [27] 独立行政法人 製品評価技術基盤機構: H14~16年度 JCSS校正証明書発行件数の推移  
<http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/pdf/H14-16.pdf>
- [28] 独立行政法人 製品評価技術基盤機構: H18~20年度 JCSS校正証明書発行件数の推移  
<http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/pdf/H18-20.pdf>
- [29] 産総研プレスリリース: 産総研開発の校正用熱電対が民間企業により実用化, 2006年3月27日.  
[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2006/pr20060327/pr20060327.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2006/pr20060327/pr20060327.html)
- [30] IEC 62460, Temperature - Electromotive force (EMF) tables for pure-element thermocouple combinations. International Electrotechnical Commission (2008).
- [31] 社団法人日本電気計測器工業会: *JCSSの知識 - 温度計の校正を例として-*, 日本工業出版株式会社, 東京 (2006).

#### 執筆者略歴

新井 優 (あらい まさる)

1984年工業技術院計量研究所入所。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門温度湿度科高温標準研究室長に就任。現在、計測標準研究部門副研究部門長、温度湿度科科长を兼務。高温用の白金抵抗温度計の研究を行うとともに、抵抗温度計、熱電対のための計量標準の開発と国際同等性確認の活動に従事。国際度量衡委員会の測温諮問委員会への日本代表。1998年市村学術賞受賞。日本電気計測器工業会を始め関連工業会や日本学術振興会などで温度標準と計量トレーサビリティの普及活動に取り組んでいる。本論文では、温度定点装置の開発と研究全体の統括を担当した。



小倉 秀樹 (おぐら ひでき)

2000年工業技術院計量研究所入所。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門温度湿度科高温標準研究室に配属。2007年から1年4ヶ月間、フランスの国家計量標準機関であるLNEに客員研究員として滞在し、高温用熱電対、および熱電対用共晶点の研究を行った。現在まで、熱電対、及び熱電対用温度定点の研究開発に従事。日本学術振興会産業計測第36委員会温度計測分科会の作業部会にて、現在、副主査として熱電対校正技術の検討、および信頼性の検証を校正事業者と協力して行っている。本論文では、熱電対の安定性の研究と共晶点の開発を担当した。



井土 正也 (いづち まさや)

1980年工業技術院計量研究所入所。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門温度湿度科高温標準研究室に配属。熱電対の温度標準の研究開発・校正業務に従事。トレーサビリティの信頼性確保のため、技術委員会分科会委員及び技術アドバイザーとしてJCSSの運営・審査に協力している。本論文では、不確かさ評価と熱電対校正の品質システムの確立を担当した。



#### 査読者との議論

##### 議論1 研究の動機

コメント・質問 (小野 晃: 産業技術総合研究所)

本論文は、我が国における熱電対のトレーサビリティ体系を俯瞰的に設計し、新たな要素技術を開発しつつさまざまな要素技術を統合し、国際的な動きとも連動させながら社会に受け入れられるトレーサビリティ体系を構成していった、優れた第2種基礎研究・製品化研究だと思います。身近なところで大量に使われている熱電対だけに、それによる温度測定の信頼性が向上することの社会的・産業的な効果は非常に大きいと思います。

ところで熱電対は高温域では信頼性に問題無きにしてもあらずという指摘が、従来鉄鋼業を中心とした技術者からしばしば出されてきましたが、一方では、熱電対は古くから使われている汎用の温度計であり、先進的な研究を行う余地はもはやないのではないかという見方もあって、日本では長く研究が下火になっていました。このような状況の中で著者らが、熱電対に新たな研究要素を見出し、従来よりも格段に優れた信頼性で熱電対のトレーサビリティ体系を構築したことを、ある種驚きをもって受け止めています。本研究を開始するに当たっての著者らの動機はどのようなものだったのでしょうか。また本研究の成功の要因は何だったと考えますか。研究の当事者としての経験に基づいてお聞かせ下さい。

回答 (新井 優、小倉 秀樹、井土 正也)

熱電対の不均質の問題を正面からとらえることを決意したことが最大の動機付けであったと思います。本文中で述べましたが、熱電対は不均質が原因で、温度分布による影響を受けてしまいます。このため、海外の標準機関においては熱電対の校正に対して、この値は熱電対が試験された時と同じ状況で使用される場合のみ適用される、という限定を付けている場合もあります。しかし、これでは、熱電対の校正を受けたユーザーは、その値をそのまま利用することができないことになってしまいます。取り組んですぐに、不均質が、ばらつきではなく、かたよりを生じさせることと、高温にさらされた時間の経過とともに増大することを、どのように不確かさ評価として扱うかという課題に直面しました。これを私たちは、①熱電対の不均質そのものを小さくする、②不均質を適切に評価する、③校正を受けるユーザーに事前にユーザーの保有する装置の温度分布のデータを提出してもらい、評価法の妥当性を確認する、という手順で解決を図りました。

成功した理由は、月並みな言葉ですが、「あきらめず徹底的に追求したこと」につけるのではないかと思います。不均質の増大を時間的に追跡することは、根気のいる作業ですが、高精度な校正装置を開発し、これらの装置を利用して効率的で精密な熱電対の評価方法を確立できたことが成功の要因の一つであったと思います。今回私たちが行った詳細なレベルまで精密に評価することは、時間と手間がかかるため、なかなか行われていませんでした。効率良く評価ができるようになったため、さまざまな条件で実験を行えるようになりました。これらの結果、従来よりも格段に優れた信頼性で熱電対のトレーサビリティ体系を構築できたのだと思います。

**議論2 白金パラジウム熱電対の安定化の要因**

コメント・質問（濱 純：産業技術総合研究所評価部）

白金パラジウム熱電対の校正の不確かさの要因とされるドリフトと不均質を低減させる熱処理条件などを見出し、その不確かさの評価方法の文書化から、校正方法や品質システムの確立までの一連のプロセスは、仲介標準器の開発および企業への高精度の温度計測の還元のポイントとなる成果です。なお、成果をより明確に理解し、さらに信頼性向上の可能性を推測する意味で、以下の点についてご回答願います。

白金パラジウム熱電対の場合、ドリフトや不均質の不確かさを抑制する熱処理条件等のガイドラインは説明されていますが、なぜ安定化するのかの要因はどのように考えたらいですか。また、R熱電対では、同様な熱処理温度ではドリフトや不均質が小さくならないのはなぜですか。

回答（新井 優、小倉 秀樹、井土 正也）

図9(c)では曝露によってゼーベック係数が増加する傾向のみを模式的に記載しましたが、白金パラジウム熱電対の場合は、室温から1300℃までの温度域では曝露によりゼーベック係数が小さくなる温度領域と大きくなる温度領域があります。そのため、事前に適切な温度で十分に長い時間熱処理を行うことにより、素線内部に発生した電場の熱電対素線に沿った積分値の変化をとでも小さくすることができます。さらに、白金パラジウム熱電対では、曝露によるゼーベック係数の変化は時間の経過とともに飽和する傾向があるので、熱起電力は最終的に安定化します。一方、R熱電対では、1000℃付近で白金ロジウム合金の組成が変化し続けるため、ゼーベック係数は飽和せずに小さくなり続け、その結果、ドリフト量も飽和せずに起電力は減少し続けることとなります。

**議論3 白金パラジウム熱電対の不安定性の微視的原因**

質問（小野 晃）

白金パラジウム熱電対を特定の温度で最終熱処理することによってドリフトと不均質を著しく低減できるということは、本研究の重要な発見だと思います。ドリフトと不均質の原因はパラジウム素線の方にあると思いますが、パラジウム素線は純金属であり、高温への曝露によって組成の変化はないように思います。そうするとドリフトと不均質の低減の原因は、パラジウム素線の微視的な構造変化が抑制されたのかと想像しますが、著者らの見解はいかがでしょうか。またパラジウム素線で起こる微視的な変化は、材料学や物性論の視点から現在の程度まで説明できていますか。

熱電対のドリフトと不均質を低減させるためには、熱処理条件を工夫すること以外に、原理的に異なる別の方法はないでしょうか。

回答（新井 優、小倉 秀樹、井土 正也）

パラジウム素線の微視的な構造変化が関係していることは間違いないと思います。現在、白金パラジウム熱電対のドリフトと不均質の原因は研究者から幾つか報告されており、大きく分けるとパラジウム素線に含まれる不純物の酸化、パラジウム素線中の結晶粒の成長、が考えられています。

パラジウム線中の不純物が原因であるとすれば、パラジウムに含まれる不純物が酸化して導体から絶縁体になり、その結果、熱起電力が変化すると考えられます。そのため、今後、更に精製技術が発達し、高純度のパラジウム線を作製する、もしくは不均質を成長させる不純物を除去することができれば、不均質の生成を抑制できる可能性があります。一方、もしパラジウム線中の結晶粒の成長が原因であるとすれば、事前の熱処理で結晶を十分に成長させておく方法や、結晶成長を抑制するために起電力が大きく変化しない程度の添加物を加えるという方法が考えられます。

以上のように、白金パラジウム熱電対のドリフトと不均質の原因は、完全にはまだ解明されていないのが現状であり、さらに熱電対校正

の不確かさを小さくするための今後の研究課題であると言えます。

**議論4 日本の産業界の貢献と水準**

コメント・質問（小野 晃）

今回我が国の産業界の技術状況をよく考慮して熱電対のトレーサビリティ体系を構築しましたが、諸外国の熱電対のトレーサビリティ体系と比べて特徴があるように思います。我が国では民間校正事業者の多くが、産総研の国家計量標準ほど高度ではないにしても、高温の定点実現装置を保有し、それぞれ校正事業に活用してきたという経験があるように思います。民間事業者のこの経験を著者らへうまく活用して、我が国に世界トップレベルの信頼性のトレーサビリティ体系を構築できたのではないかと考えるのですが、いかがでしょうか。著者らが論文の中で繰り返し、「現在までに民間企業が培ってきた技術」を強調されているのはこのあたりのことでしょうか。

国際比較によって産総研の技術レベルが世界的に高いことが示されましたが、もし民間校正事業者同士で国際比較があったならば、我が国の民間事業者の技術レベルは非常に高いはずと想像しますが、いかがでしょうか。

このような技術の信頼性の高さをもっと国際的にアピールしていくと良いと思います。

回答（新井 優、小倉 秀樹、井土 正也）

我が国では、早い時期から温度定点実現装置を保有して、温度計測の信頼性を高める努力がなされてきました。また、本論文でも述べた、最新の研究であるコバルト-炭素共晶点を用いた熱電対校正用装置についても、国内の事業者は産総研との共同研究で既に製品開発しており、いくつかの校正事業者が、この装置の導入を進めています。このように我が国の校正事業者の技術レベルは、極めて高いものです。もし、校正事業者同士で、校正技術の国際比較が行われれば、その信頼性の高さが明らかに示されると思います。さらに、日本学術振興会産業計測第36委員会温度計測分科会の作業部会では、産総研を含め国内の産業界の熱電対校正事業者が参加して、熱電対校正技術の共同研究を行っており、これらの研究結果を国際学会などで積極的に報告していきたいと考えています。

**議論5 1550℃以上での熱電対の信頼性**

質問（小野 晃）

本研究では1550℃までの範囲で温度のトレーサビリティ体系を構築しました。一方1550℃以上でも熱電対は重要な温度計として使われていますが、現状で熱電対の信頼性はどの程度と考えますか。今後1550℃以上の温度範囲で熱電対のトレーサビリティを構築していくとすれば、どのようなアプローチで研究を進めていくべきと考えますか。

回答（新井 優、小倉 秀樹、井土 正也）

熱電対は1550℃以上の高温でも重要な温度計です。産業界では、タングステン-レニウム熱電対が2000℃を超える温度まで使用されています。しかし、タングステン-レニウム熱電対は実際のところ、信頼性は良く分かっていないのが現状です。例えば、100時間程度の使用時間とした場合、おそらく1700℃付近では5℃程度、更に温度が高くなればそれ以上の熱起電力ドリフトがあると思われます。

この温度域では、安定で均一な温度場を作り出すことからして難しいのですが、加えて、物質の反応性も増すため、絶縁管や保護管が熱電対素線に与える影響を調べることも必要です。熱電対の安定性評価に必要なこれらの要素を解決して研究開発を進めていくことが、信頼性の高い熱電対トレーサビリティを構築するうえで重要になると思います。最新の研究成果である、金属-炭素共晶点の高い再現性を積極的に利用するなどして、研究を進めていきたいと考えています。

# マイクロチップを用いたバイオマーカー解析コア技術の開発

## — POCTデバイスとしてのマイクロチップ基板の可能性を探る —

片岡 正俊\*、八代 聖基、山村 昌平、田中 正人、大家 利彦

近年、「医療現場での臨床検査」Point of care testing (POCT) つまり患者の傍らでの即時検査が求められている。そして疾患関連バイオマーカーの迅速・省サンプルな測定デバイスの構築に向け、各種ナノバイオデバイスを用いたPOCTへの応用研究が多数なされている。我々は、臨床経験を踏まえた生物系ユーザーの立場から、市販のマイクロチップ電気泳動による血液中に存在する糖を対象とした解析への応用や、マイクロ流体を利用したマイクロ流路上での抗原抗体反応による迅速な血中タンパク質検出系の構築を行っている。これらの知見をもとに、本論文ではマイクロチップ基板を用いたPOCTデバイス実用化への可能性を検討した。

**キーワード:** 臨床検査、バイオマーカー、POCT、マイクロチップ電気泳動、マイクロチップ基板、多項目解析

### Biomarker analysis on microchips

#### – Development of POCT device for multi-marker analysis –

Masatoshi Kataoka\*, Shouki Yatsushiro, Shouhei Yamamura,  
Masato Tanaka and Toshihiko Ooie

Point of care testing (POCT), the analysis of biomarkers at patient's beside, is a continuously expanding trend in the practice of laboratory diagnosis. Although some POCT devices for the analysis of blood glucose and/or several infectious diseases have been developed, many laboratory tests in almost all hospitals are contracted out to laboratory diagnosis companies. However, outsourcing of biomarker analysis is time-consuming, high in cost, and requires much blood and reagents. Consequently we are constructing a biomarker analysis system on microchips for the POCT device. In this paper, we show the core technology for the analysis of biomarkers on microchips, and describe the problems and its solutions in the application of microchips for POCT device.

**Keywords:** Laboratory testing, biomarker, POCT, microchip electrophoresis, microchip, multi-marker analysis

## 1 緒言

健康長寿を達成し質の高い生活を実現するためには、糖尿病などの生活習慣病を中心とする各種疾患の発症を早期、あるいは予知診断して有効な予防を講じる必要がある。このためには、各種疾患に関連する複数のバイオマーカーを日常的に個人レベルでモニタリングし、得られたデータのネットワーク化と診断システムを確立することが必要になる。これらの実現に向けて、我々は個人で使うことができる複数のバイオマーカー測定デバイスの構築を目指している。そのため究極的には、各個人の日常生活つまり家庭などで血液などの体液中に存在する複数のバイオマーカーの検出技術の確立が必要になってくる。その実現には、血液採取とその前処理・分離・反応・検出を一体化し、一般家庭でも設置・使用できるよう操作が簡単でコンパクトな、さらに正確な診断のために複数のバイオマーカー解析が一

度に行えるデバイスが必要になる。ところで、ここで行われる血液中のタンパク質、糖、脂質など生体内での生物学的あるいは生化学的变化を把握するためのバイオマーカー解析は、病院受診時に行われている臨床検査にほかならない。

近年、臨床検査の分野では「患者の傍での臨床検査」Point of care testing (POCT)、つまり患者の傍らでの即時検査が求められている<sup>[1]</sup>。現状の臨床検査では、受診当日に検査の結果が得られることは少なく、結果判定に数日必要であり迅速な診断と治療が難しいことが多い。これはバイオマーカー測定自体に時間が必要な場合があるほかに、測定に大型・高価な精密測定機器が必要になることに加えて臨床検査技師などの人件費など医療機関への経済的負担が大きいため、多くの医療機関で検体検査などの臨床検査が外部の臨床検査会社に外注されているこ

産業技術総合研究所 健康工学研究センター 〒761-0395 高松市林町 2217-14

Health Technology Research Center, AIST 2217-14 Hayashi-cho, Takamatsu 761-0395, Japan \* E-mail: m-kataoka@aist.go.jp

Original manuscript received September 1, 2009, Revisions received January 18, 2010, Accepted January 20, 2010

とが原因である。この臨床検査の外部委託の模式図を図1にLundbergらにより提唱されたBrain to brain loopモデルをもとに示す<sup>[2][3]</sup>。一方、POCTでは医療現場において患者の傍らで検体採取・検査法の選択を行い、その検査から直接検査結果が得られる。これによって患者の最初の医療機関への受診時に確定診断が可能になり、迅速な治療の開始・治療効率の向上・通院負担の軽減、医療費の低減など患者自身と医療機関に、さらには社会にとって大きなメリットがあると考えられる。また臨床医側のメリットとして、緊急の外科処置が必要な場合などで、患者の感染症や全身疾患の有無あるいはその病態の把握など、処置方法を決定するのに有用な情報がその場で獲得可能になることである。現在は、心筋梗塞やインフルエンザ感染診断キットなど、特に急性の疾患や感染症など短時間で診断を要するもの、血糖値測定や手術室での血液ガス測定などを対象にPOCTデバイスが開発され臨床現場へ導入されつつあるが、特定の疾患関連バイオマーカーのみを解析対象としており、さらに定性的検出法が多いなどの問題がある。現状のこれらPOCTの問題点を解決して、複数のバイオマーカーを定量解析できるPOCTデバイスを開発することは、将来の個人レベルでの複数バイオマーカーモニタリングのための基盤技術になる。また、POCT技術を確立して医療現場でその有用性が認められてこそ、社会に対して個人の健康モニタリング技術を認識させようとする(図2)。そのためにもできるだけ早期に定量性を示す複数バイオマーカーの解析が可能なPOCTデバイスを実現させる必要がある。一方、最近のナノテクノロジーを利用した分析技術により、検査技術の迅速・省サンプル・高感度・機器の小型化が種々図られており、その典型的な技術開発の対象として各種マイクロチップを利用したデバイス開発がある。このデバイスは次章で述べるようにPOCT、ひい

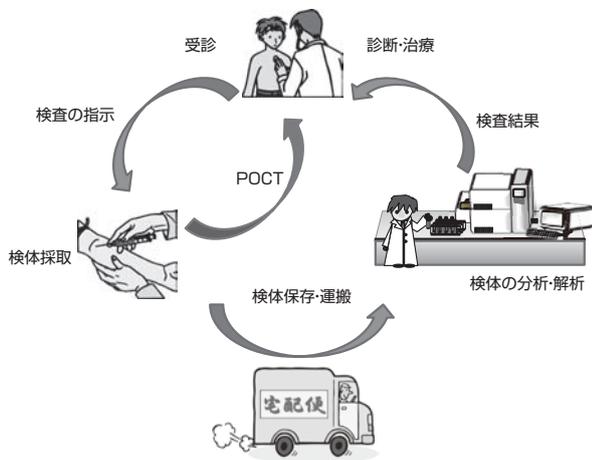


図1 現状の臨床検査会社に依存した検査の流れ。

ては個人レベルでのバイオマーカーデバイスとしてのメリットが多い。そこで上記の目標達成に向けたステップとして、この既存のマイクロチップ基板技術の組合せ、つまり市販の核酸解析用のマイクロチップ電気泳動装置を用いた糖解析や微小流体を取り扱うマイクロフルイディクスを利用したマイクロ流路上での抗原抗体反応系の構築など、POCTデバイス開発に向けたナノバイオデバイスの応用例を示す。さらに臨床経験を踏まえた生物系のユーザーの立場から残された課題について記載する。

## 2 POCTデバイスの必要要件

POCT デバイスには診察室や病室の患者の傍らで迅速にバイオマーカーの測定が可能になることが必須であり、30分以内での解析<sup>[1]</sup>、臨床診断に利用可能な検出感度と再現性を有して、現状の臨床検査法と同等ないしそれ以上に正確な測定、診察室などへの設置が可能なコンパクト性、医師が問診時にでも操作できることが求められている。一方、通常の血液検査では一検査項目あたり数 ml 単位の血液が必要で、患者自身に大きなストレスを与えたとともに、試験管レベルでの解析では大量の検査試薬が必要になるためにコストがかかる問題がある。そのため、POCTに限らず臨床検査では微量サンプルでの解析系が求められている。また血液などを検査対象とすることから、検査終了後は滅菌操作が簡単に行える材質であることなどが求められる。さらに複数の検査項目を一つのデバイスで検出可能とするニーズも考慮に入れて、我々はこれらの要件を満たす技術として、微細加工技術に基づくマイクロ化学チップ技術、つまり解析しようとするサンプルの前処理・分離・反応・検出などの化学や生化学分析のための操作を数センチ角のマイクロチップ上に集積化するマイクロ化学分析システムに注目した。そしてPOCTデバイスへの応用を

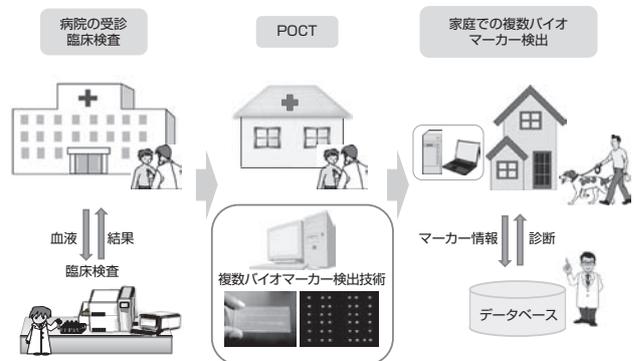


図2 POCTに必要な要件と集積化マイクロチップ基板の模式図。マイクロチップ基板上に血漿分離機構が組込まれ、マイクロチップ電気泳動とマイクロフルイディクス系の流路を有する。

目指して、すでに市販されているマイクロチップ電気泳動やマイクロフルイディクスを用いた個々のバイオマーカーの最適な検出のための条件を明らかにして、バイオマーカー検出系のオンチップ化を行っている。

### 3 マイクロチップ基板のPOCTデバイスへの応用

#### 3.1 マイクロチップ電気泳動による糖解析を利用したバイオマーカー測定法の構築

##### 3.1.1 マイクロチップ電気泳動の生物学・生化学的解析への応用

半導体作製技術に基づく微細加工技術を用いて、数センチ角のプラスチックやガラスを材料とするマイクロチップ上に  $\mu\text{m}$  単位の幅と深さでマイクロ流路を形成し、この流路上で電気泳動を行うマイクロチップ電気泳動装置が開発・市販されている。主に核酸やタンパク質の分離分析を行う従来の電気泳動法と比較して、マイクロ流路を用いることで省サンプル化されるとともに、流路内の体積に比較して表面積が大きくなることによる電気泳動時の熱発生・放出効率の上昇が可能になるため、マイクロチップ電気泳動は高電圧の印加による高い分離能を有する。さらに LED 励起の蛍光検出系を利用することなどによる高感度化が認められる。しかしながら、これらの装置は主なユーザーと考えられる大学などの生物学・生化学系の研究室に十分普及しているとはいえない。これは使用用途が主に核酸などの分離分析に限られる上に、既存のアガロース電気泳動などと比べて泳動装置本体価格が高価なこと、サンプルあたりの解析に必要なマイクロチップやゲルの価格が約 200 倍程度高くなることが主な原因と考えられる。そこで我々は、泳動用チップや泳動装置・解析装置と解析ソフトの変更を全く行わずに、泳動用ゲルや泳動用緩衝液組成の条件検討を行って泳動条件の最適化を図ることで、核酸などの分離分析以外への適用を試みた。そして日常的に生物学・生化学分野の研究室で行われている種々の実験法について、サンプルリザーバーを反応場として利用するオンチップ制限酵素処理に引き続いて電気泳動による解析を行なうことで、 $\text{Mg}^{2+}$  イオンなど制限酵素活性に必須のイオンや酵素などタンパク質の存在が電気泳動に影響しないことを明らかにした。この結果をもとにオンチップ制限酵素処理法を設計し、迅速な制限酵素切断断片長多型解析を行った。そのほかミトコンドリア膜電位測定、さらに合成 RNA 解析や DNA の Ligation 反応の解析などへの応用が、泳動装置本体や付属解析ソフトの変更を必要とせずに生物系の研究者でも簡単にできる泳動条件を変更するだけで可能となることを報告した。そして核酸の分離分析のみならず、各種酵素処理とその解析が迅速・省サンプル・高感度に行えるなど、マイクロ

チップ電気泳動の長所を生かした生物学・生化学的解析への応用性の高さを報告した<sup>[4]-[8]</sup>。これらの成果は、種々の実験操作にマイクロチップ電気泳動法が応用可能であることを示しており、結果的にコストダウンが期待される。

##### 3.1.2 マイクロチップ電気泳動の血糖値解析への応用

これらの知見をもとに、我々は POCT への応用を見据えて、市販のマイクロチップ電気泳動装置とマイクロチップを用いて血中バイオマーカー解析への応用を行った。各リザーバーの容量が 10  $\mu\text{l}$  であることからピペットマンによる溶液ハンドリングが簡単に行え、泳動ゲルや泳動用緩衝液の変更が容易な日立 SV1100 をマイクロチップ電気泳動装置として利用した。さらにマイクロチップ基板としては付属のチップを使用した。図 3 に SV1100 上で用いる付属のポリメタアクリレート (PMMA) 製 *i*-チップを示す。*i*-チップには幅 100  $\mu\text{m}$ 、深さ 30  $\mu\text{m}$  のマイクロ流路が 3 本形成されており 3 サンプルの同時解析が可能になる (図 3A)。泳動操作も簡単であり、ゲルリザーバー (GR) から添付のゲルを充填後、サンプルリザーバー (SR) に内部標準用 DNA を含む計 10  $\mu\text{l}$  のサンプル溶液を加えて導入泳動と分離泳動を行い、蛍光検出により DNA の分離・解析を行う (図 3B)。このマイクロチップ電気泳動では、従来のアガロース電気泳動に比べて省サンプルでありながら検出感度は約 10 倍、泳動開始から数分以内に解析結果が得られ、わずかな数塩基の誤差で DNA の分離分析が可能になる。我々はこのマイクロチップ電気泳動において糖構造を含む DNA の分離分析能の高さに注目し、付属の DNA 解析ソフトをそのまま利用して、血中バイオマーカーの中で糖構造を有するもの、あるいは酵素基質として糖を利用するものとして血糖やアミラーゼに注目し解析を行った<sup>[9][10]</sup>。

血糖測定では、血漿に蛍光色素 2-aminoacridone (AMAC) を加えてグルコースを直接蛍光標識した後、泳動用緩衝液としてホウ酸緩衝液を使用してグルコースにマイナス荷電を加え電気泳動時のドライビングフォースとして利

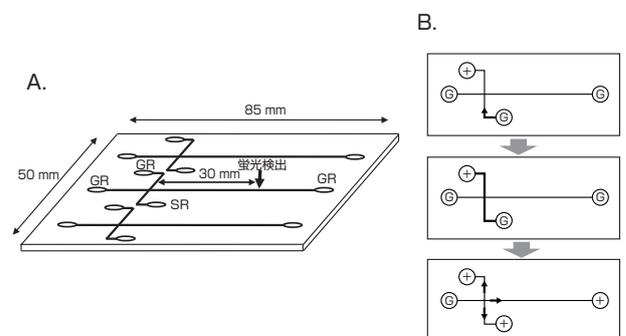


図 3 日立 *i*-チップの模式図 (A) とクロス流路におけるサンプル分離 (B)。+は陽極を、G はグラウンドを示し、矢印はサンプル DNA の泳動方向を示す。

用することで、特異的に血中グルコースが検出可能なことを報告した(図 4A)<sup>[8]</sup>。そして、種々雑多なタンパク質などが存在する血漿サンプル中で、蛍光標識されたグルコースの電気泳動による分離・分析が可能になったことが明らかになった。この検出法では検出限界は 0.92  $\mu\text{M}$ 、1 ~ 300  $\mu\text{M}$  の範囲で定量的検出が可能で、従来の臨床検査で得られる血糖値と全く遜色なく正確に血中グルコースの検出が可能であった。さらに同日再現性および日間再現性においても高い再現性を有しており、マイクロチップ電気泳動による血糖値測定の実用化の可能性が認められた。一方、既存の臨床検査で用いられる hexokinase-G-6-P-dehydrogenase 法では、輸液に含まれる 2 糖のマルトースの存在により実際より高血糖に測定されるという大きな問題があるが、マイクロチップ電気泳動を用いることで泳動時間の違いから容易に単糖のグルコースと 2 糖のマルトースの識別が可能になる<sup>[11]</sup>。その結果、マルトース含有輸液等投与患者での血糖測定における偽高値表示によって実際には低血糖になってしまう危険が防止される。

### 3.1.3 マイクロチップ電気泳動による血中アミラーゼ活性の測定

血中アミラーゼは膵炎や唾液腺炎などの診断に用いられるバイオマーカーであるが、アミラーゼはグリコシド結合を加水分解することで、デンプンをグルコース、マルトースおよびオリゴ糖に変換する。既存の臨床検査ではオリゴ糖を酵素基質として利用し、比色法で定量的測定が行われている<sup>[12]</sup>。アミラーゼはオリゴ糖であるマルトヘキサオース (G6) をマルトトリオース (G3) に加水分解することが既に知られていることから、血糖測定で明らかになったマイクロチップ電気泳動による蛍光標識されたグルコースの高い

分離分析能に注目して、8-aminopyrene-1,3,6-trisulfonic acid (APTS) で蛍光標識した APTS-G6 を基質として利用し、分解産物 APTS-G3 をマイクロチップ電気泳動で分離して、アミラーゼ活性を定量的に測定した(図 4B)<sup>[10]</sup>。ここでは、血糖分離と同様に、泳動用緩衝液としてホウ酸緩衝液を用いてドライビングフォースとした。本法では、検出限界 4.38 U/L で、5 ~ 500 U/L の範囲で血中アミラーゼ活性の定量的検出が可能になる。血中アミラーゼとして膵臓および唾液腺由来の 2 種類のアイソザイムが存在するが、膵臓疾患の鑑別診断では抗唾液腺由来アミラーゼ抗体で血漿の前処理を行うことで、特異的に膵臓由来アミラーゼ活性の測定が可能になった。血漿サンプルを用いた場合、高い再現性をもって既存の臨床検査法と同等に正確なアミラーゼ活性測定が可能であることが示され、マイクロチップ電気泳動によるアミラーゼ活性測定への実用化の可能性が認められた。

上述した血糖およびアミラーゼ測定では血中グルコースの標識や APTS-G6 の酵素処理に 1 時間程度必要で、POCT へ応用するには処理時間の短縮が必要である。したがって、蛍光物質あるいは検出系を変更することで高感度化による検出時間の短縮が必要になる。しかし、市販のマイクロチップ電気泳動装置と付属の泳動用チップを用いて血漿を蛍光標識して泳動した後、あるいは蛍光標識オリゴ糖を血漿と混ぜて泳動した後、付属の DNA 鎖長解析ソフトをそのまま使用して血糖や血中アミラーゼ活性が測定される。このように極めて簡単に定量的検出が行える点に大きなメリットがあり、さらに既存の臨床検査法と同等な正確性と再現性を有する。そして  $\mu\text{l}$  単位の血漿を使用するだけで解析ができる省サンプルであること、本体お

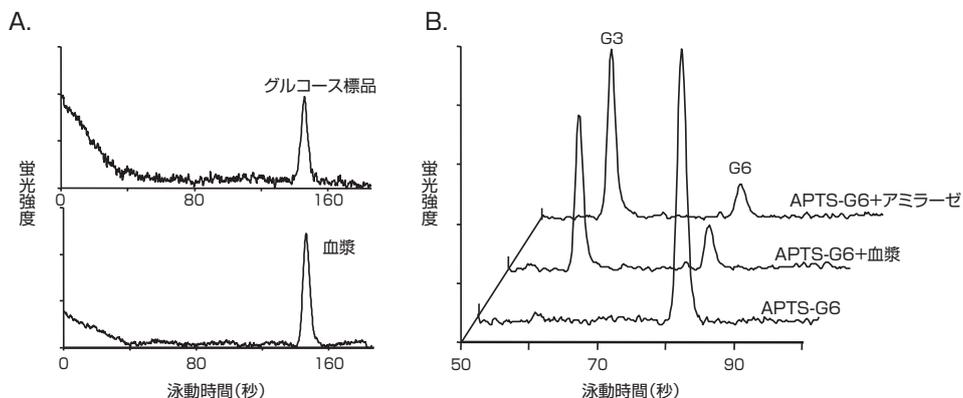


図 4 マイクロチップ電気泳動を用いた血中グルコース (A) とアミラーゼ活性測定 (B)。

(A) グルコース標品と同じ移動時間に血漿中グルコースのピークを認める。既知濃度のグルコース標品の蛍光強度から検量線を作製し、血中グルコース濃度(血糖値)を測定した。

(B) APTS-G6 単独の電気泳動で、単一ピークを認める。APTS-G6 を、精製アミラーゼと反応させることで、APTS-G6 とその分解産物である APTS-G3 の単一ピークを認める。APTS-G6 を血漿と反応させることで、血漿中アミラーゼにより APTS-G3 に分解される。既知濃度のアミラーゼと APTS-G6 を反応させ、APTS-G3 に相当する蛍光強度から検量線を作成することで、血中アミラーゼ活性が測定される。

よび解析装置がコンパクトであること、プラスチック基板はオートクレーブなどでの滅菌が可能であることなどを総合すると、血糖値やアミラーゼなどのマーカー解析へのマイクロチップ電気泳動のポテンシャルの高さを示している。ただし、血糖値やアミラーゼ測定は保険での検査費用が110円と比較的安価であり、マイクロチップ電気泳動を用いた単一項目としての検査適応では経済的メリットは低い。しかしながら、後述する各種血中タンパク質の検出など複数の項目検査と組合せた疾患別チップの1項目として測定することで十分な採算性が見込める。

### 3.2 マイクロチップ基板上での抗原抗体反応系構築

#### 3.2.1 マイクロ流路上でのサンドイッチELISA法の構築

血中に存在するバイオマーカーの多くが各種代謝産物やタンパク質であり、夾雑物が多数存在する血液の中であっても特異的検出が可能で、電気泳動による分子ふるいの必要がない抗原抗体反応系を用いた検査法が既存の臨床検査法では汎用されている。既存の臨床検査では96穴プレートを用いた抗原抗体反応が一般的であるが、その反応時間としては1時間以上必要であり、サンプル量としても数十 $\mu\text{l}$ を要する。そこでマイクロ空間の利用による分子拡散効果による抗原抗体反応時間の短縮、さらに省サンプル化を期待して、マイクロチップ基板上に形成したマイクロ流路上での抗原抗体反応系の構築を試みた。この際、バイオマーカー検出に広く利用され定量性に優れた Sandwiches Enzyme-linked ImmunoSorbent Assay 法 (サンドイッチ ELISA 法、図 5A) の検討を行った。

測定モデルとして、特異性の高い抗体が市販されている骨粗鬆症や癌転移のバイオマーカーである血中 I 型プロコラーゲン C 末端プロペプチド (PICP) を選択した。サンド

イッチ ELISA 法では、一次抗体を固相に固定を行う<sup>[13]</sup>。固相としては、従来の検査法では96穴プレート(図 5B)が主に用いられているが、これに対して、ここではマイクロチップ基板(図 5C)を固相として用いた。抗体の固定をしてから、ブロッキング<sup>[14]</sup>を行った後、血漿サンプルあるいは既知濃度の精製 PICP とペルオキシダーゼ標識二次抗体を加え、標識二次抗体に結合した PICP の一次抗体への結合を介して固相への固定を行う。抗原と結合していない標識二次抗体を洗浄後、ペルオキシダーゼの基質を加え化学発光を CCD カメラで検出する。POCT デバイスとして利用する場合は、ユーザーはブロッキング操作以降の操作を行う。従来法である96穴プレートでは、20  $\mu\text{l}$  の血漿を用いた抗原抗体反応時間としては3時間が必要になる。マイクロチップ基板としては1枚のマイクロチップ上にマイクロ流路3本を有して、表面にタンパク質固定用の表面処理が施された環状ポリオフィン (COC、住友ベークライト社製) 基板を使用した。以降の操作で、マイクロ流路への  $\mu\text{l}$  単位の各溶液導入はピペットマンを用いて行った。サンプルウェル①から②の方向に一次抗体を導入して固定した後にブロッキングを行い、③から②の方向に抗原およびペルオキシダーゼ標識二次抗体を導入する。抗原抗体反応後に洗浄し、①から②の方向に酵素基質を加えて化学発光を検出している。1本のマイクロ流路あたりに必要な血漿量は1  $\mu\text{l}$  以下で、抗原抗体反応時間は30分であり、従来法に比べ大幅な検出時間の短縮と省サンプル化が実現された。

マイクロ空間での抗原抗体反応としては、直径数  $\mu\text{m}$  のマイクロビーズ表面に抗体を固定して、ビーズをマイクロ流路に導入・固定する方法が既に報告されている。ビーズ法では、ビーズをマイクロ流路内に保持するための複雑な形

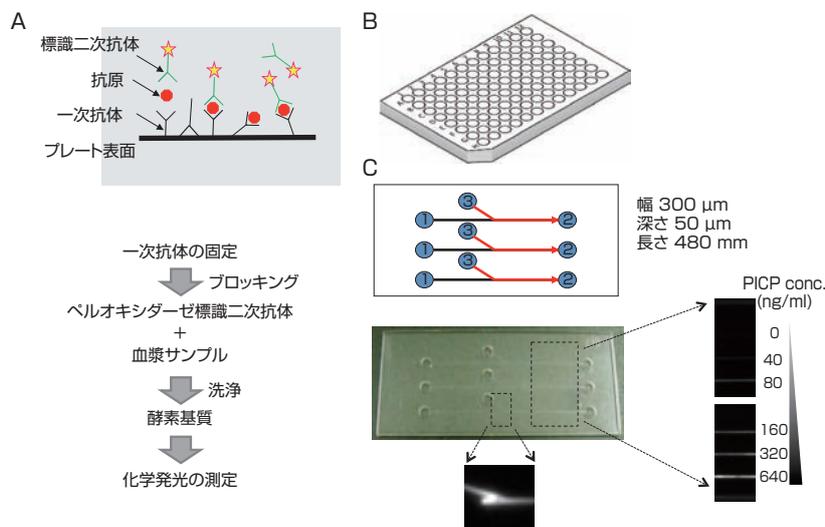


図 5 サンドイッチ ELISA 法による抗原抗体反応。サンドイッチ ELISA 法の原理と実験手順 (A)、96 穴マイクロプレート (B)、マイクロ流路上での PICP 検出 (C)。

状のマイクロ流路の設計が必要になるなどの問題があることから、我々は、直接マイクロ流路表面への抗体固定法を選択した。図 5C に示すように精製 PICP の濃度に依存して化学発光強度の増加を認めたが、同一流路内での発光の不均一性が認められており、定量性が確保されていないことが分かる。これは、1) 流路表面での不均一な一次抗体の固定や、2) ブロッキング、各段階での不十分な洗浄あるいは標識二次抗体の部分的な残留の可能性などが考えられる。今回用いた Y 字形の流路 (図 5C) では特にマイクロ流路分岐部において化学発光の増強傾向が認められ、より洗浄が容易な流路設計の必要性が認められた。そこで、1) についてはインクジェットを用いたマイクロ流路上で特定部分への一次抗体の固定、2) については流路設計変更による洗浄効率を高めることで、定量性の改善を試みた。

### 3.2.2 微細化インクジェットによるマイクロ流路表面への抗体固定の応用

一定量の抗体をマイクロ流路上の任意の部分に一定面積で固定するため、プログラムにより pL 単位の極微量の溶液の任意部分への吐出が可能で微細化インクジェットの利用を行った。微細化インクジェットは、ピエゾ駆動であるクラスターテクノロジー社製のパルスインジェクターを用いた (図 6)。このインクジェッターからは、65 pL の希釈した抗 PICP 一次抗体が 1 液滴容量として吐出が可能である。これを用いて 100 液滴の一次抗体を吐出・固定すると、ほぼ流路幅に相当する液滴直径となり、これによって抗 PICP 一次抗体の固定化を行った (図 6)。前述のように分岐部を有するマイクロ流路設計では、分岐部分で強く化学発光が求められるなどの

洗浄などの問題から非特異的の化学発光<sup>用語2</sup>が認められ、定量性の確保が困難であった。そこで容易にマイクロ流路の洗浄が行える直線状マイクロ流路 4 本を 1 枚の COC マイクロチップ上に形成して (図 7A)、定量的検出系の構築を行った。マイクロ流路表面へ一次抗体のインクジェットによる吐出・固定の後、①から②の方向にブロッキング、洗浄を行うことで抗体の非特異的吸着や残留を防止し、30 分間の抗原抗体反応の後に化学発光を CCD カメラで検出した (図 7B)。この反応系では 1 本のマイクロ流路あたり必要な血漿量は 1.8  $\mu$ l で、抗原抗体反応は 30 分であり、従来法の 96 穴プレート法と比較してそれぞれ 1/10 以下と 1/6 になり、省サンプル・高感度な検出系が構築された。ネガティブコントロールとして PICP を認識しない心筋梗塞マーカー Heart type Fatty Acid Binding Protein (H-FABP) に対する抗体をインクジェットにてマイクロ流路表面へ吐出固定を行ったが、非特異的な発光は認めず、0 ~ 600 ng/ml の濃度範囲で良好な定量性が認められる (図 7B、C)。血漿サンプルを用いた場合は、既存の 96 穴プレートによるサンドイッチ ELISA 法と同等に正確な測定が可能で、迅速・省サンプルで正確な検出系が構築された。このように、マイクロ流路上で抗原抗体反応を行うことで、POCT 技術への適用可能な血中タンパク質検出技術を構築することができた。

微細化インクジェットを用いて抗体をマイクロ流路上に吐出・固定する方法では、任意の部分に任意の量の抗体を吐出・固定化が可能になる (図 7D)。サンドイッチ ELISA 法による血中タンパク質の検出の原理は、バイオマーカーの種類にかかわらず基本的には同じであり、抗体溶液を含む

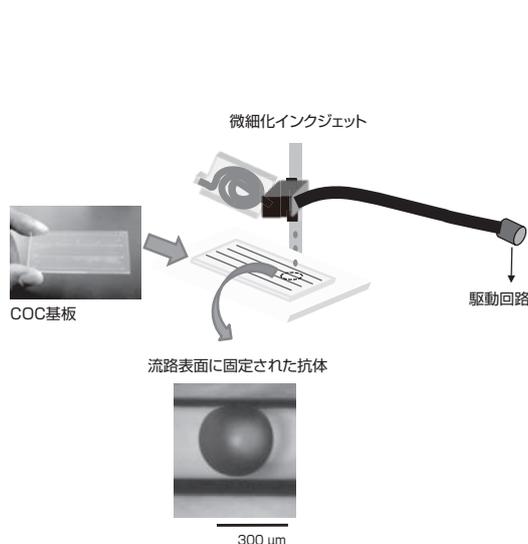


図 6 微細化インクジェットによるマイクロ流路上への抗体固定の模式図と流路表面に固定された抗体。

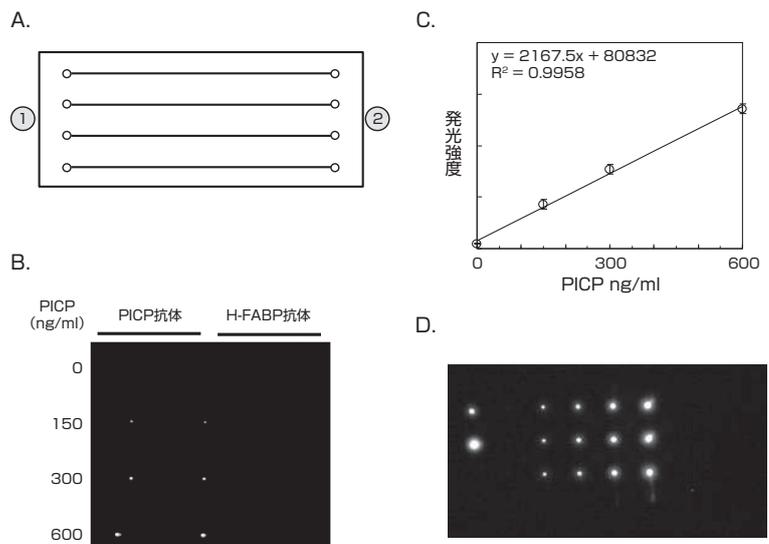


図 7 マイクロ流路を有するマイクロチップ基板の模式図 (A) と、これを用いた PICP 検出像 (B)。検量線 (C) と各流路へ任意量の抗体固定を行った際の化学発光像 (D)。

インクジェットのヘッド部分を交換するだけで複数種類の抗体溶液の吐出が可能になり、1本のマイクロ流路上でわずか1.8 µlの血漿サンプルから複数のバイオマーカー検出が可能になる。現在、我々は複数種類の血中バイオマーカーを同一マイクロ流路上で定量的に検出できる抗原抗体反応系の最適条件としての各種一次抗体や二次抗体濃度の洗い出しを行っており、マルチマーカー検出マイクロチップの構築、特に生活習慣病として注目される糖尿病や骨粗鬆症の診断チップの作製を目指している。糖尿病診断では、血糖値に加え、抗原抗体反応での検出が可能なインスリンや高感度CRP測定をオンチップ化することで、正確な診断が極微量の血液で可能になる。また骨粗鬆症では骨形成マーカーPICPと吸収マーカーNTxの双方を同時に測定することで、詳細な病態が明らかになる。さらにコスト面での長所を考えると、現状の検査ではインスリン検査に2640円、CRP測定に1560円が必要であり、血糖値測定を合わせ3項目で計4310円となる。また、骨粗鬆症ではPICP測定で1700円、NTx測定で2900円の計4600円が必要とされる。抗原抗体反応検出系のコストは、試薬としての抗体費用が占める部分が多い。したがって、インクジェットによる抗体固定法を用いれば、96穴プレート法に比べ、PICPの場合では抗体使用量は約1/10000となり、抗体費用は桁違いに削減できる。そのほか1本のマイクロ流路上に複数種類の抗体固定を行うことで、使用する検出試薬量も大幅に節約され、材料費の安価なプラスチック基板との併用により十分な採算性が見込める。

#### 4 今後の課題

我々は、生物系ユーザーの立場から前述のようにマイクロチップ電気泳動やマイクロチップ基板など、既存の技術を基礎にしてバイオマーカー検出系の構築を行ってきた。マイクロチップ電気泳動などでは、新たに装置やソフト開発に時間と労力をかけずに、市販のチップと泳動装置、解析ソフトをそのまま利用するだけでその生物学・生化学系の実験への適用や臨床検査への応用性を示すなど、比較的短期間で個々の既存技術のポテンシャルの高さを明らかにできたと考える。しかしながらPOCTデバイスの実現に向けては、以下に述べるように生物学的アプローチのみならず、微細加工を中心とする工学系や医学系、さらには将来のデータベース化などには情報系など、幅広い分野を超えた技術者・研究者による連携が必要と考える。

糖やタンパク質を対象としてマイクロチップ基板上でのバイオマーカー解析のコア技術は構築できたと考えるが、さらにこれをPOCTデバイスとして臨床の現場で実際に用いるには以下の課題が残されている。上述のマイクロチッ

プ基板では従来どおりの遠心分離による血球分離を行った後、血漿成分をマイクロチップに添加して解析を行っている。したがって、臨床の現場で医師が問診中に血液検査が行えるようにするには、血球分離の簡易化が必要となる。そのために、全血をマイクロチップに添加するだけで、血球分離を含めて解析できることが求められる。µl単位の極微量の血液で検査を可能にするため、既存のディスプレイな微量採血針によって採血された全血から血球成分を取り出すフィルターを組み込んだ、マイクロ流路上での血漿分離システムのオンチップ化を目指している。さらに、マイクロチップ電気泳動流路やマイクロフルイディクス流路のサンプルウェルへ自動的・定量的に必要な量の血漿を送り込むためのマイクロポンプによる送液系の構築が必要になる。また多項目バイオマーカー検出チップの実現には、1枚のマイクロチップ上に、物質の電荷、大きさ、形状による移動速度の違いで物質の分離を行う電気泳動系と、極微量の液体の送液を行い抗原抗体反応系で利用するマイクロポンプ<sup>用語3</sup>系という原理の異なる分離・分析系を併存させる必要から、複雑なマイクロ流路設計が求められており、プラスチック成型を含む微細加工技術に長けた企業などとの連携が必要と考えている。

上述の技術課題を含め、検出系や解析ソフトの開発など周辺技術の統合・構築を行い、POCTデバイスとして早期に医療用検査機器として試作機を製作する。この際、まずは対象疾患としては日本の成人の中で数百万人から一千万人に及ぶ患者が存在する糖尿病や骨粗鬆症などの疾患別診断チップを構築する。そして大学病院や専門病院との共同研究の中で既存の臨床検査データとの比較からPOCTデバイスとしての有効性の検証を行う。そして医療検査機器として薬事法に基づく厚生労働省の認可を得るようにデータ収集を進め、POCTデバイスとしての開発を進める予定をしている。POCTデバイスとして医療現場へ導入を行った後、家庭レベルでの健康モニタリングのバイオマーカー測定デバイスの基盤として導入を図る。

#### 用語説明

用語1: ブロッキング: 抗原タンパク質以外のタンパク質や固相表面に対する抗体の非特異的結合を防ぐことを意味する。ブロッキング剤としては、ウシ血清アルブミンやゼラチン、スキムミルクなどが用いられる。

用語2: 非特異的発光: ブロッキングや洗浄操作が不十分なために、ペルオキシダーゼ標識二次抗体が非特異的にタンパク質や固相面に結合後、ペルオキシダーゼの酵素基質を分解して発光すること。バックグラウンドノイズとなる。

用語3: マイクロポンプ: 微量液体を駆動するための圧力発生を目的とする液体制御素子のこと。

参考文献

- [1] G. D. Lundberg: How clinicians should use the diagnostic laboratory in a changing medical world, *Clin. Chim. Acta* 280, 3-11 (1999).
- [2] M. Plebani: Pre and Post examination aspects, *eJIFCC* 15, 1-5 (2004) <http://www.ifcc.org/ejifcc/vol15no4/150412200404.htm> (2004).
- [3] J. M. Hicks, R. Haeckel, C. P. Price, K. Lewandrowski and A. H. Wu: Recommendations and opinions for the use of point-of-care testing for hospitals and primary care: summary of a 1999 symposium, *Clin. Chim. Acta* 303, 1-17 (2001).
- [4] M. Kataoka, S. Inoue, K. Kajimoto, Y. Shinohara and Y. Baba: Usefulness of microchip electrophoresis for reliable analyses of nonstandard DNA samples and subsequent on-chip enzymatic digestion, *Eur. J. Biochem.* 271, 2241-2247 (2004).
- [5] M. Kataoka, Y. Fukura, Y. Shinohara and Y. Baba: Analysis of mitochondrial membrane potential in the cells by microchip flow cytometry, *Electrophoresis* 26, 3025-3031 (2005).
- [6] Y. Umemoto, M. Kataoka, S. Yatsushiro, M. Watanabe, J. Kido, R. Kakuhata, Y. Shinohara and Y. Baba: Sequential analysis of RNA synthesis by microchip electrophoresis, *Anal. Biochem.* (in press).
- [7] R. Akamine, S. Yatsushiro, S. Yamamura, J. Kido, Y. Shinohara, Y. Baba and M. Kataoka: Direct endonuclease digestion and multi-analysis of restriction fragment length polymorphisms by microchip electrophoresis, *J. Pharm. Biomed. Anal.* (in press).
- [8] Y. Umemoto, M. Kataoka, S. Yatsushiro, S. Yamamura, T. Ooie, J. Kido, T. Yamamoto, Y. Shinohara, and Y. Baba: Analysis of DNA ligation by microchip electrophoresis, *J. Pharm. Biomed. Anal.* (in press).
- [9] E. Maeda, M. Kataoka, M. Hino, K. Kajimoto, N. Kaji, M. Tokeshi, J. Kido, Y. Shinohara and Y. Baba: Determination of human blood glucose levels using microchip electrophoresis, *Electrophoresis* 28, 2927-2933 (2007).
- [10] E. Maeda, M. Kataoka, S. Yatsushiro, K. Kajimoto, M. Hino, N. Kaji, T. Tokeshi, M. bando, J. Kido, M. Ishikawa, Y. Shinohara and Y. Baba: Accurate quantitation of salivary and pancreatic amylase activities in human plasma by microchip electrophoretic separation of the substrates and hydrolysates coupled with immunoinhibition, *Electrophoresis* 29, 1902-1909 (2008).
- [11] E. Maeda, K. Hirano, Y. Baba, H. Nagata and M. Tabuchi: Conformational separation of monosaccharides of glycoproteins labeled with 2-aminoacrydone using microchip electrophoresis, *Electrophoresis* 27, 2002-2010 (2006).
- [12] 河合 忠、伊藤喜久、櫻林郁之介、屋形 稔、三國龍彦、木村 聡、櫻井晃洋、鴨井久司、杉田 収: *異常値の出るメカニズム*, 287-290、医学書院、東京 (2005).
- [13] P. R. Ebeling, J. M. Peterson and B. L. Riggs: Utility of type I procollagen propeptide assay for assessing abnormalities in metabolic bone diseases, *J. Bone Miner. Res.* 7, 1243-1250 (1992).

執筆者略歴

片岡 正俊 (かたおか まさと)

1990年徳島大学大学院歯学研究科修了。歯学博士。1990-2002

年徳島大学歯学部にて歯周病専門医として臨床に従事すると同時に歯周病病原因子の遺伝子解析の研究に従事。その後同ゲノム機能研究センター遺伝子発現分野助教授として2004年までマイクロチップ電気泳動の生物学的解析研究に従事。2006年から産業技術総合研究所健康工学研究センターに主任研究員として入所。2007年より同センターバイオマーカー解析チーム研究チーム長。電気泳動を含めマイクロチップ基板のバイオマーカー解析への応用研究に従事している。本論文では主にマイクロチップ基板を用いた生物学的解析法の構築と全体構想のとりまとめを行った。



八代 聖基 (やつしろ しょうき)

2001年岡山大学自然科学研究科博士後期課程修了。博士(薬学)。日本学術振興会特別研究員(PD)、就実大学薬学部助手を経て、2007年より産業技術総合研究所健康工学研究センター研究員。現在、感染症のバイオマーカー探索とマイクロチップを用いた感染症迅速診断デバイスの研究に従事。本論文では主に抗体選択とその最適な標識法の構築に従事。



山村 昌平 (やまむら しょうへい)

2002年北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科博士後期課程修了。博士(材料科学)。文部科学省知的クラスター創成事業:とやま医薬バイオクラスター博士研究員、北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科助教。2008年より産業技術総合研究所健康工学研究センター研究員。現在、感染症をはじめとする各種疾患の診断システムの構築を目指した細胞チップの研究開発に従事。本論文ではマイクロ流路設計および抗体固定法の構築に従事。



田中 正人 (たなか まさと)

1988年通商産業省工業技術院四国工業技術試験所入所。機械システムの制御、超音波利用計測技術などの研究に従事。2001年から独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員。2002年博士(工学)(徳島大学)。2005年から健康工学研究センターバイオデバイスチーム主任研究員。現在バイオデバイスの構築に関わる微細加工技術、微量液滴操作技術の研究に従事。本論文では微細化インクジェットを用いた抗体吐出・固定法の構築に従事。



大家 利彦 (おおいえ としひこ)

1993年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年通商産業省工業技術院四国工業技術試験所に研究員として入所。1997年主任研究官。2001年より独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員。2005年より同健康工学研究センターバイオデバイスチーム長。専門はレーザーを用いた微細加工。人間の健康状態を数値表現できるデバイスの実現に向け、血液による多項目診断ができるプラスチック製ディスプレイチップ、集積化チップ用組み込みユニットなどを開発中。本論文ではマルチマーカー解析に向けた微細化インクジェットを用いた抗体吐出・固定法の構築に従事。



## 査読者との議論

### 議論1 実用化

質問 (中村 和憲:産業技術総合研究所評価部)

筆者は、「さらにこれを POCT デバイスとして臨床の現場で実際に用いるには多くの課題が残されている」と述べているように、実際の利用にはまだまだ距離のある技術と考えます。その点が読者に理解されるように、論文タイトルおよび論文の導入部での工夫が望まれます。

そして、多くの残された課題の解析と、解決方法の整理、具体的な取り組みと今後の方向について取りまとめてください。また、実際に臨床検査機器、方法として認可されるまでには、定量性や信頼性のみならずコストも含めて厚生省の認可が必要となります。認可に当たっては保険点数が決まることから、既存の方法に比べてコスト面での優位性を確保することが重要となりますが、この点についての見解はいかがでしょうか。

回答 (片岡 正俊)

今後の課題を第4章に記載しました。技術的内容として①血球分離システムのオンチップ化、②マイクロポンプによる送液系の構築、③マイクロ流路設計があり、その後医療用検査機器として試作機作製後、臨床検査装置としての有用性を証明する。さらに業事法による医療用検査機器の認証の必要性などを記載しました。具体的なコストの問題は、保険点数も含め現状の検査費用と比較して十分な採算性が見込めることを記載しました。

タイトルについてはコア技術の開発を強調するように変更しました。

### 議論2 既存技術との比較

コメント (中村 和憲)

血糖やアミラーゼ活性の測定に応用していますが、特に血糖に関しては、既に患者が日常的に使用できる血糖センサーが広く利用されています。したがって、既存の方法の問題点の整理、それを解決するためにに行ったことなどを明記してください。また、本研究で開発された方法が既存の臨床検査法と同等の性能を有していると述べられていますが、既存の臨床検査にとって代わる方法となり得るのか、さらには POCT デバイスとして普及する可能性があるのか、コスト面も含めた実用化への道筋など、今後の展開についての記述が望まれます。

回答 (片岡 正俊)

ご指摘のように POCT デバイスとして既に血糖値センサーが市販されていますが、hexokinase-G-6-P-dehydrogenase 法による血糖値測定法では、二糖のマルトースを単糖のグルコースとして認識し実際よりも高血糖と表示してしまいます。これはマルトースを含む輸液を受けている場合、大きな問題となります(実際、低血糖のため死亡例があります)。このような際には、電気泳動による単糖と二糖を泳動時間で識別することは臨床的に大きな利点になります。

アミラーゼ測定については、定量性・易操作性・省サンプル・デバイスのコンパクト性・チップがオートクレーブできるなど、POCT デバイスとして必要とされる条件を具備していることを明示しました。コスト面については、マイクロチップ電気泳動装置の各種実験操作への汎用性の高さから結果的に泳動装置としてのコストが安くなること、さらに臨床検査においては血糖やアミラーゼ測定では保険での検査費用が安いので、これら単体の検査としてはコスト的に無理があるが、他の検査項目と組み合わせるとマルチ解析チップとして実用化することで十分なコスト面での競争性が確保されることを記載しました。

### 議論3 個々の技術の性能

コメント (中村 和憲)

現在用いられている、サンドイッチ ELISA の問題点は指摘されていますが、骨粗鬆症という長期疾患の診断に、開発手法の測定時間の短縮がどの程度有効であるのか必ずしも明確になっていません。反応時間が従来法の3時間から30分に短縮できるとしてはいますが、

測定原理が抗原抗体反応と酵素反応を利用した手法であり、基本的に同じ原理を利用しているにもかかわらず短縮できることの説明が不十分です。

コメント (赤松 幹之:産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門)

従来のアガロース電気泳動と比べてマイクロチップ電気泳動では少サンプルで済んで、検出感度が高い理由を簡単に結構ですので記述してください。

回答 (片岡 正俊)

抗原抗体反応系を構築する場合、抗体の抗原認識能の高さが問題になります。我々は、生活習慣病として罹患患者が多く社会的に問題になっている疾患(骨粗鬆症による骨折は寝たきり老人の原因になることが多い)で、さらに特異性の高い抗体が手に入りやすい(抗体単独で市販されている)、その他として健康人でも一定の血中濃度が測定可能なマーカー(血液サンプルから必ずデータが取れること、炎症性サイトカインなどでは健康人で測定限界以下が多くデータ解析が困難→実験系が成り立ちにくい)ということで PICP を選択しました。この点について記載しました。

抗原抗体反応の原理は基本的に対象とするマーカーの種類に限らず同じため、PICP であろうが他のマーカーであろうが基本は同じです。このためにも、特異性の高い抗体が市販されている骨粗鬆症のマーカーである PICP を対象に選択しました。3時間から30分への時間短縮は、POCT に要求される診察室などでの30分での解析に応用可能となります。抗原抗体反応は、抗体と抗原の空間内での衝突により特異的結合が始まりますが、マイクロ空間では分子拡散効果により拡散時間が短縮され結果的に抗原抗体反応時間の短縮が起こったと考えられ、これについても記載しました。

電気泳動については、「従来の電気泳動法と比較してマイクロ流路を用いることで省サンプル化、流路内の体積に比較して表面積が大きくなり電気泳動時の熱発生・放出効率の上昇が可能になるため、高電圧の印加による高い分離能を有する。さらに LED 励起の蛍光検出系を利用することなどによる高感度化が認められる」と記載しました。

### 議論4 臨床経験に基づいたアプローチ

コメント (赤松 幹之)

臨床経験を持つ生物系研究の立場からのアプローチは、大変有益なことと理解していますが、どの点が臨床経験に基づいた視点なのか明記されていません。例えば、処理時間やサイズなどは臨床経験に基づかなくても解決すべき課題であることは容易に分かると思います。したがって、臨床の立場からみたときのポイントを明記されることを期待します。

回答 (片岡 正俊)

家庭などでの個人レベルの健康モニタリングシステムの構築にあたり、日常生活で利用可能な血中バイオマーカーデバイスの構築に向けて、まず POCT デバイスの開発からアプローチを考えています。このため、既存技術であるマイクロチップ基板を用いてできるだけ早い実現を目指しています。さらに臨床の立場からの緊急の外科処置が必要な場合などで、患者の感染症や全身疾患の有無あるいはその病態の把握など、処置方法を決定するのに有用な情報がその場で獲得可能になるとの意見を加えました。

### 議論5 既存技術の組み合わせというアプローチ

コメント (赤松 幹之)

個別の技術はオリジナルではなく、その組み合わせ技術に本研究のオリジナリティがあると理解していますが、組み合わせ技術のオリジナリティを主張する時には、他の(採用しなかった)要素技術をなぜ選択しなかったのか、といった議論が論文に記載されていることを期待します。全体として、結果として採用した技術を用いて行なったことが書

かれています。シンセシオロジーの論文としては、どのように技術の選択をしたかについて記述していただきたいと思います。

回答（片岡 正俊）

ご指摘のように、市販のマイクロチップ電気泳動装置の本体や付属のチップ、解析ソフトをそのまま利用して、各種生物学的実験法へ応用可能なためコストダウンが期待されると考えます。この点について記載しました。要素技術の選択について、マイクロチップの選択についても既存技術の組合せに言及しました。また、日立 SV1100 形を選択した理由として、泳動ゲルや緩衝液の変更が簡単なことから選択したと記載しました。アミラーゼ測定で G6 と G3 の加水分解に注目した理由は電気泳動で容易に分離できるためです。PICP 選択の理由として、疾患特異性（骨粗鬆症やがん転移マーカー）が高く、特異性の高い（良い抗体）抗体が市販されているためですが、抗体特異性は重要で、この点を重視しました。そのほか、マイクロ流路などマイクロ空間での抗原抗体反応における抗体固定法としては、ビーズ法を比較検討した文章を追加しました。

また、既存技術を利用することで、そのメリットとして時間をかけずに個々の既存技術のポテンシャルを証明できたこと、逆に今後のデバイスとしての製品化には工学・医学などの分野との連携が必要なことを記載しました。

## 議論6 膵臓由来と唾液腺由来のアミラーゼ

質問（赤松 幹之）

3.1.2.において膵臓由来のアミラーゼと唾液腺由来のアミラーゼを分離する必要性が述べられていますが、実際の臨床においては膵炎と唾液腺炎では、現れる症状が全く異なる（腫れる場所が違う）ので、診断を間違える可能性は低いと思います。それでも両者を分離する必要があるのでしょうか？もちろん、症状が出る前に検知することができるメリットはありますが、実際の患者についてみると、炎症が起きる前に検知する必要性がある人は少ないような気がしますが、いかがでしょうか？

回答（片岡 正俊）

ご指摘のように膵炎、唾液腺炎では部位が全く違います。そのため腫脹や炎症などの臨床症状から簡単に鑑別診断は可能ですが、各々の疾患の病態を把握するためのマーカーとして血中アミラーゼを測定します。本文中にも記載しましたが、血中アミラーゼは膵臓と唾液腺由来の2種類があり、その約40%は膵臓由来、60%が唾液腺由来になります。この比率は年齢、性差など個人差があることが知られています。そのため、病態の把握、治療効果の判定にはそれぞれの臓器由来アミラーゼ活性を正確に測定する必要があります。急性膵炎、慢性膵炎、膵臓癌での経過観察においても膵臓由来アミラーゼはマーカーとして利用されます。

# 石油流量国家標準の確立とわが国の標準供給体制

## — 信頼性のある効率的なトレーサビリティ体系の構築への取り組み —

嶋田 隆司\*、土井原 良次、寺尾 吉哉、高本 正樹

膨大な石油製品の取引や課税の数量の根拠となる石油類の流量測定の計量標準は、通商上、省エネ政策実施の観点、プラントの高度な品質管理の観点から重要である。そこで、標準の信頼性、達成可能な不確かさ、利便性について石油流量の標準供給体制を調査・分析し、わが国に適した国家標準の性能および供給の仕組みを設計した。これに基づいて、校正技術の検討、安全対策と不確かさ低減のための技術開発を行い、中核となる液種と流量範囲で世界最高水準の国家標準を確立するとともに、校正事業者の国家認定制度を利用した標準供給体制の発足を技術的に主導した。さらに、国際比較による国家標準の同等性の検証などを通して本事業の評価を行った。

キーワード：流量、不確かさ、計測、トレーサビリティ、国家標準

### Development of primary standard for hydrocarbon flow and traceability system of measurement in Japan

— Approach to construction of an effective and reliable traceability system —

Takashi Shimada\*, Ryouji Doihara, Yoshiya Terao and Masaki Takamoto

It is of importance to establish the hydrocarbon flow standard which acts as the basis for vast dealings and taxation for hydrocarbons, enforcement of the policy on energy savings and high quality management of industries. As a result of investigation into calibration methods, reliability, and effectiveness, the specification of the national primary standard and the traceability system for hydrocarbon flow in Japan was designed. We took the technical initiative in establishing the traceability system using JCSS (Japan Calibration Service System) as basis of the national primary standard in the limited region of flow rates and various kinds of liquids. The national primary standard of high accuracy and safety has been developed. This project was evaluated through verification of international consistency by way of international key comparisons.

Keywords : Flow rate, uncertainty, measurement, traceability, national primary standard

#### 1 はじめに

石油類の流量測定は石油製品の取引や課税の数量の根拠として、また石油化学プラントの生産管理など様々な分野で重要である。流量測定に使用される流量計の精度は流体の物性、流量計の設置条件、流れの状態などに左右されるので、流量計を高い精度で使用するためには、流量計に使用する流体を標準となる流量で流し、標準値と流量計の指示値を比較することによって補正値を求める、もしくは流量計が正確な値を示すように調整する実流校正が必須である。また、使用中の流量計の性能を担保するためには定期的に実流校正する必要がある。

これまで、取引に使われる石油用流量計には法律に基づく規制に従い厳格な品質管理が行われてきたが、測定技術の進歩に伴い、高精度の流量計を利用した高度な品質管理

を自主的に実施できるようにすることが求められている。したがって、多種多様の石油類に対する高精度の流量標準確立への要請を始めとする精度・コスト・校正対象への要請、さらには国際整合化が求められているが、流量分野では、産業技術総合研究所（以下、産総研）に水流量と空気流量の国家標準があるのみで、石油流量の国家標準はなく、これらの産業界のニーズに対応できていなかった。

そこで、産総研では、2001年に新たに石油流量の国家標準施設を建設し、不確かさの評価、品質システムの構築を経て、2005年に計量法における石油流量の特定標準器の指定を受けた。さらに、石油流量の国家標準の範囲が限定されたものであることから、政府支援の研究プロジェクトのもと、石油関連の民間企業の協力も得て、校正事業

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3

National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan \* E-mail: t-shimada@aist.go.jp

Original manuscript received September 1, 2009, Revisions received February 5, 2010, Accepted February 9, 2010

者の有する二次標準の段階で、液種や流量範囲を拡大する技術を開発した。これにより、国内における計量のトレーサビリティ体系が完成し、民間活力を利用した石油流量の標準供給制度（JCSS：計量法校正事業者登録制度）が発足した。

## 2 石油流量標準を作る社会的な目的

我が国の年間石油取引はおよそ 29 兆円に達し<sup>1)</sup>、流通額はその数倍と言われている。この数量根拠となる取引証明用の石油流量計は日本国内の石油コンビナートなどでは数万台が稼働し、石油流量計による正確な測定が産業界、社会から要請されている。測定する流量の範囲は 1～1000 m<sup>3</sup>/h がほとんどであり、中でもタンクローリーの出荷場で使用される数百 m<sup>3</sup>/h 程度の測定が最も多いと言われている。また、石油の種類は、揮発油（ガソリン）、灯油、軽油、重油、原油など多岐にわたり、流量計の形式としては、容積流量計やタービン流量計が多く使われている。現場で流量計に求められる精度は厳しく、石油流量標準に対して要求される不確かさのレベルは高い。

これまでは、産総研が検査（合格もしくは不合格を判定）した基準器と呼ばれる標準器を用いて多くの石油用流量計が検査されてきた。この基準器は、日本国内の一般消費者に不利益を生じさせない、すなわち公平性を担保する目的で、通商用の計量器である小口径の石油用流量計を都道府県の検定所などが検査する機器である。この基準器を用いた制度では公的機関が適切な方法により定められた性能を検査することから、社会全体の計量器の管理費用を大きく削減することができると言える。

一方、測定技術の進歩に伴って、自主的な高精度の品質管理を実施するために、この制度の範囲外である高精度の流量測定、多様な液種および広い流量範囲の流量測定に対するニーズが最近高まっている。さらに、経済活動や生産活動の国際化に伴い、我が国の石油製品の国際取引が増大してきており、国家間の流量測定値の整合性を保証することが不可欠となっている。そのため、ユーザーに対して国際的に整合性のある標準を提供し、国際的なシステムに準拠した計量トレーサビリティを確保できる選択肢を与えることが求められているが、これまでは石油流量の国家標準として使用できる校正設備がないため、質量、体積、時間、密度、温度、圧力などの物理量を用いて流量を組み立てる作業は流量計のメーカーやユーザーに委ねられていた。また、計量トレーサビリティの定義が不確かさについて科学的に明確化されたので、不確かさが付随しない従来の制度では計量トレーサビリティを確保できなくなった。

さらに、石油製品の国内取引量に対して課税される石油

税も年間約 6 兆円<sup>1)</sup>と巨額であり、その計量は社会的に重要な意味をもっている。このため、石油税の数量測定に使用される税務メータ（石油流量計）には、器差（標準値から偏差）が± 0.2 %以内という高い精度管理<sup>2)</sup>が求められている。この税務メータは、前述のとおり全国の石油コンビナートなどで現在数万台が使用されていると言われ、その精度管理に多大な人的資源やコストを要するため、その合理化が強く求められている。

## 3 石油流量標準を作る技術的な目的

石油流量計は石油類の量（体積もしくは質量）を測定するため、校正装置の一部である体積タンク（体積計）もしくは秤量計（質量計）を高精度に校正すれば、容易に流量計を高精度に校正できると一部では誤解されている。体積もしくは質量の不確かさは校正の不確かさの主要因の一部であるが、温度測定、圧力測定、密度測定、また、校正に用いる接続管路にある分岐管からの試験液の漏れ、管路内の流速分布および流速変動が流量計の特性に及ぼす影響など、校正の不確かさに大きな影響を及ぼす要因が他にも数多くある。むしろ実際には、これらの要因の方が最終的な校正の不確かさに対して支配的である場合が多く、これらの不確かさ要因を評価することが必要である。さらに、実際の流量計を用いた測定では、その流量計が校正された条件と流量計が使用される条件が異なる場合が多く、流量計に及ぼす管路の形状、使用温度、使用圧力、試験液の物性値などが流量計の特性に与える影響を評価し、実際の測定条件における測定の不確かさを推定することが求められる。これらの評価をすべての測定条件に対して行うことは、費用や時間の関係上、困難であることから、不確かさの要求レベルに応じた不確かさ要因を特定し、効率的な不確かさの推定が求められる。

石油類は 1 °C で約 0.1 % の体積膨張が生じるが、石油製品の商取引では、測定環境によっては使用温度に応じて本来必要となる補正を行わずに、測定された体積をそのまま用いられることが多い。一方、エネルギー資源である石油類では質量で取引されることが技術的には妥当であると考えられ、新たな国家流量標準に対しては、体積流量に加えて質量流量でも流量標準を供給することが求められる。

## 4 石油流量標準供給を実現する方法の検討

### 4.1 石油流量標準の供給方法

石油流量を計測する現場では、少ない資源（コスト、時間など）で可能な限り小さな不確かさで流量を測定し、さらにその信頼性が担保されていることが求められる。一方、標準となる流量は質量、体積、時間、密度、温度、圧力

などの他の物理量を用いて組み立てることにより決められるため、国家標準を供給する上で、他の標準から標準流量の組み立てを「どこで、誰が」行うかを明確にする必要がある。これまで我が国では石油流量の国家標準として使用できる校正装置がなかったため、上述した他の物理量から流量を組み立てる作業は流量計のメーカーやユーザーに委ねられており、その信頼性は明らかではなかった。標準流量の供給方法はおおまかに次の三つに分類される。

(1) 国の計量標準機関 (National Metrology Institute) が流量標準を供給する方法

国の計量標準機関によって国家標準として流量標準を組み立てれば、信頼性が高く、理想的な標準供給体系を構築することができる。しかし、石油製品は多種多様であり、また必要とされる流量の範囲が非常に広いため、社会で用いられるすべての液種、流量範囲に対して流量標準を作成し、供給することは現実的ではない。仮に現場で使用される多様な流量計測条件に対応して、国家標準の水準で小さな不確かさをもつ流量標準を供給しても、それに伴って高い供給料金が課せられることになり、結果として、不確かさとコストのバランスを追求するユーザーは(2)で述べる校正事業者を選択することになると予想される。

(2) 他の物理量の標準（体積など）を用いて校正事業者が流量計の校正を行う方法

国家標準として流量標準を採用せず、例えば質量標準と密度標準を使用して校正事業者が流量計の校正を行う方法である。この方法では、校正事業者が質量標準と密度標準を用いても、不適切な組み立てにより流量計を校正した場合には、重大な補正量の見落しや不確かさを過小評価してしまうなどの問題が生じやすい。また、小さな不確かさを達成する技術の確立は個々の校正事業者にとって多大な負担となり、結局は計量管理のための社会的コストが増大することになる。また、信頼性を

担保することが難しく、ユーザーに不利益が生じる可能性が大きい。一方、この方法は拡張性が非常に高いため、校正事業者が必要とする多種多様の液種や流量に対して運用できるという特長がある。

(3) 外国の機関などから供給される流量標準を用いる方法

数多くの国々で採用されているが、他国の標準に依存するため、国内で必要とされる小さな不確かさを達成することは難しい。さらに、校正のために流量計を海外に輸送する必要があり、その過程で信頼性が低下する。

図1に代表的な石油流量の標準供給体制の概略を示す。ヨーロッパでは基本的に(1)の方法が採用され、流量標準が供給されていない範囲では、(2)の方法により認定機関が流量の組み立ての妥当性を検証する体制がとられている。校正事業者の能力を担保するために、国際基準規格 (ISO17025) では技能試験を要求しているが、これを適正に実施していない例が生じており、問題となりつつある。そのため、最近では、新たに石油大流量（最大流量 5000 m<sup>3</sup>/h）の国家標準相当の校正設備を建設するなど流量標準の供給範囲の拡大が進められている。

アメリカでは、(2)の方法が主に採用されており、市場の競争原理に従い、校正事業者によって流量の組み立てが行われている。認定機関により校正事業者の認定が行われているが、現状では、世界で最も小さな不確かさをもつ国家標準よりもはるかに小さな不確かさを表明するといった技術的に不適切な不確かさで認定されている事業者も散見されている。この問題に対処するために、アメリカでは、法律で石油製品の売り上げの一定割合を米国石油協会 (American Petroleum Institute : API) に集め、この資金を元に流量計の校正の信頼性を保証する技術基準 (API規格) の策定と実施を積極的に行っており、政府に頼らない小さな政府を志向した、民間レベルの標準の信頼性確保に対する努力が払われている。このような仕組みのない日本ではそのまま(2)の方法を導入することは難しいと考

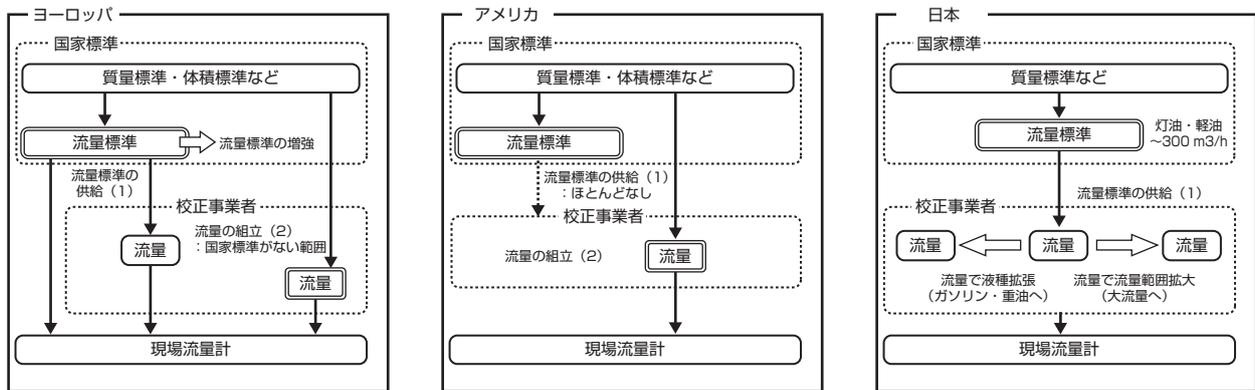


図1 石油流量の標準供給体制の概略

られる。

我が国ではこれまで石油流量の国家標準がなかったため、通商用など特定の計量器を対象とした校正・検査のために法律によって定められた基準器を用いた(2)の方法が用いられてきた。しかし、その方法ではカバーできない高精度の流量測定、多様な液種・流量範囲の流量測定、国際的な受け入れを保証された流量測定のための計量器を校正するニーズの最近の高まりを受けて、国家標準としての流量標準を確立することが必要となった。そこで、信頼性を確保できる(1)と拡張性を重視した(2)を組み合わせた方法、すなわち、中核となる流量範囲および液種で産総研が高精度(小さな不確かさ)の流量標準を供給し、JCSS(校正事業者登録制度)を活用することにより校正事業者が既に保有する校正装置で標準流量の範囲を拡大し、また校正液種を拡張する方法が選択された。図2に液種および流量範囲に関する産総研と校正事業者の分担関係の詳細を示す。台数が多いタンクローリーの出荷用流量計の流量範囲を想定して、この国家標準では流量標準の最大流量として300 m<sup>3</sup>/hを設定し、その液種は、粘度が中間にある灯油と軽油とした。

#### 4.2 国家標準の校正方法と要素技術の調査と比較

校正事業者が校正する液種や流量の範囲を広げる際には、その校正の不確かさは基となる国家標準のもつ不確かさに比べて増大する。不確かさを小さくしようとする校正事業者の負担を小さくするためには、国家標準による校正をできる限り小さな不確かさで行うことが求められる。石油類の課税標準などの数量の測定に使用される流量計には器差(標準値から偏差)を0.2%以内とする管理<sup>[2]</sup>が要求される。そこで、石油流量の国家標準の不確かさの目標値として体積流量基準で0.04%以下を設定した。この値は他国のNMI(計量標準機関)の国家標準と比較して

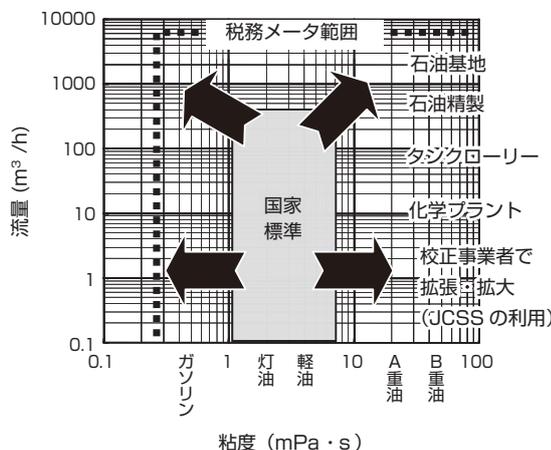


図2 国家標準と校正事業者との液種と流量範囲の分担概略図

も最高水準の目標値であり、多くの技術的な課題が予測されたが、それを乗り越えて国家標準を構築することとした。

流量計の校正は、校正対象の流量計を通過する標準流量と流量計の指示値とを比較することにより行われる。石油用の流量計を校正する代表的な方法<sup>[3][4]</sup>は下記に分類される。ここでは、流量計を用いて流量計を校正する方法(比較法)では標準となる流量計を校正設備で校正する必要性が生じるため、また、流量計を通過する瞬時流量を測定する方法(動的校正法)では不確かさを小さくすることが困難であるため、これらの方法を除いた。

##### (1) 流れの種類による分類

- ・停止法：校正の前後で被校正流量計の流れを停止させる方法。校正設備を比較的安価に構築できるが、停止状態と校正流量との間の流れの過渡状態が流量計に影響を及ぼす可能性がある。
- ・通液法：校正作業の間に被校正流量計の流量を変えない方法。流れの過渡状態による影響はない。

##### (2) 参照する標準器の種類による分類

- ・体積法(体積タンク)：あらかじめ校正した体積目盛りを備えた体積タンクに試験液を流入させ、その体積を測定する方法。一般的な石油設備での実績はあるが、体積タンク内側壁面に残着する試験液の影響を評価することや、試験液の温度体積膨張による影響を小さくするために体積タンク内の試験液の温度を高精度に測定することが必要である。
- ・体積法(体積管)：管路内を移動するピストンが排除する体積をあらかじめ校正し、その管路を用いて流量計を校正する方法。大気開放部分がない(閉ループ)ため、蒸気の影響を考慮する必要がなく、多くの石油設備で実績がある。高精度を達成するためには、移動体の位置を検出する装置の影響、測定区間の温度測定、移動体と測定管路壁面との間の漏れ、移動体の膨張、圧縮の影響を検討する必要がある。
- ・秤量法：秤量タンクに試験液を流入させ、秤量計を用いて流入質量を測定する方法。高精度を達成できるが、高所から試験液を流入させると、秤量計は試験液の衝撃の影響を受ける。また、質量測定時には秤量タンクを外部から荷重をかけない仕組みにする必要がある。

##### (3) 通液法における流れの切り替え方法による分類

- ・高速バルブ法：バルブを高速で回転させることにより、試験流体の試験ラインからの流れを貯蔵タンク側と標準器側へと切り替える方法。転流器法に比べ安価であるが、切り替えを高速に行うと大きな

圧力変動が発生するため、切り替え速度に限界があり、被校正流量計に対する切り替えの影響を無視できない。また、流れの対称性に問題が生じやすく、高精度化に限界がある。

・転流器法：空気中に開放したノズルから噴流状態で流れる試験流体を貯蔵タンク側と標準器側とに切り替える装置。切り替え時の流量変動が小さく、被校正流量計に全く影響を及ぼさない。水流量標準施設で使用された実績があり、高精度化を図れる可能性がある。一方、ノズルから自由噴流で流れるため、噴流流速が大きくなると、ミスト発生に伴う静電気による爆発の危険性がある。さらに、大気中に放出される油蒸気および液滴が不確かさの要因となる。また、試験液を滴のように秤量タンクへ流し込むと気泡が大量に発生し、そのまま気泡を含む試験液を試験ラインに循環させると残存気体として不確かさの要因となる。

表1に石油流量標準に関する各国の計量標準機関の校正能力と校正方法を示す。ここでは、メートル条約の協力の下に実施される国際比較に基づいて決められた不確かさによって、校正能力を定量的に表した。これは、参加機関がそれぞれの不確かさについて示した技術的な根拠を全ての他の機関が承認しているという、最も権威のある国家標準の評価結果と言える。外国の国家標準として石油用流量計の校正では、体積管を用いた通液法や体積タンクを用いた停止法が数多く使用されている。しかし、これらの方法は前述したとおり高い水準の不確かさを達成するためには技術的な課題が多い。また、停止法では流量計の種類によっては流れの過渡状態が不確かさの大きな要因になるなど、被校正流量計の種類が限定される校正方法もある。一方、水用流量計の校正設備で数多く採用されている転流器を用いた通液式秤量法は、静電気による爆発の危険性から危険物である石油類に採用された例はまれであるが、この点を克服できれば、小さな不確かさが達成される可能

表1 各国の石油流量国家標準の不確かさと校正方法

| 国名     | NMI<br>(計量標準機関) | 流量<br>(m <sup>3</sup> /h) | 不確かさ**<br>(%) | 試験液               | 温度<br>(℃)   | 圧力<br>(MPa)  | 粘度<br>(mm <sup>2</sup> /s) | 校正方法       | 参照            |
|--------|-----------------|---------------------------|---------------|-------------------|-------------|--------------|----------------------------|------------|---------------|
| オーストリア | BEV             | 0.0018<br>~90             | 0.07<br>~0.1  | ガソリン、軽油           | 14<br>~17   | 0.05<br>~0.6 |                            | 体積法<br>停止法 | 体積タンク         |
| 台湾     | CMS             | 18<br>~360                | 0.05          | 軽油、<br>スピンドル油     | 10<br>~45   | <0.5         | 2.5<br>~150                | 秤量法<br>停止法 | 秤量タンク         |
| キューバ   | INIMET          | 3~<br>300                 | 0.1<br>~0.2   | ガソリン、灯油、<br>軽油、重油 | 成り行き        | <0.8         |                            | 体積法        |               |
| チェコ    | CMI             | 0.29<br>~396              | 0.15<br>~0.30 | 灯油、軽油、<br>石油、LPG  | 0<br>~85    | 0.1<br>~3.5  |                            | 体積法<br>通液法 | 体積管<br>(ピストン) |
| デンマーク  | FORCE           | 0.4<br>~400               | 0.03          | 石油類               |             |              |                            | 体積法<br>通液法 | 体積管<br>(ピストン) |
| ドイツ    | PTB             | 0.6<br>~250               | 0.1           | 揮発油               | 成り行き        | 0.35         | 0.77<br>mPas               | 体積法<br>停止法 | 体積タンク         |
| イタリア   | IMGC            | 0.0036<br>~3.6            | 0.1           | 灯油、軽油             | 成り行き        | 0.15         |                            | 体積法<br>通液法 | 体積管<br>(ピストン) |
| 日本     | NMIJ*           | 15(3)~<br>300             | 0.03          | 灯油、軽油             | 15<br>~35   | 0.1<br>~0.7  | 1.4~1.9,<br>4.4~7.8        | 秤量法<br>通液法 | 秤量タンク         |
| 韓国     | KRISS           | 1~<br>14.8                | 0.11          | スピンドル油            | 15<br>~30   | 0.1<br>~0.3  | 600~<br>2200               | 秤量法<br>停止法 | 秤量タンク         |
| メキシコ   | CENAM           | 0.002<br>~340             | 0.06<br>~0.08 | 石油類               | 0<br>~82    | 0.1<br>~0.4  | 0.5<br>~10                 | 体積法<br>通液法 | 体積管<br>(ピストン) |
| ポーランド  | GUM             | 0.4~<br>400               | 0.1           | 軽油                | 成り行き        |              | 0.3<br>~300                | 体積法<br>通液法 | 体積管<br>(ピストン) |
| スウェーデン | SP              | 0.36~<br>1260             | 0.1           | LPG、軽油<br>など      | -20<br>~120 |              | LPG~300                    | 体積法<br>通液法 | 体積管<br>(ブルーバ) |
| オランダ   | NMI<br>-VSL     | 0.001~<br>250             | 0.04          | ガソリン、灯油、<br>軽油    |             | 0.4          | 0.7, 1.8, 5                | 体積法<br>停止法 | 体積タンク         |
| 英国     | NEL             | 0.00012<br>~720           | 0.03<br>~0.08 | 灯油、軽油、<br>重油      | 5<br>~50    | 0<br>~0.8    | 2.2~30                     | 秤量法<br>停止法 | 秤量タンク         |

\*) NMIJ：産業技術総合研究所 計量標準総合センター

\*\*）不確かさ：ここでは簡便のため拡張不確かさ（95%の信頼度）の値を表記

性が高い。そこで、産総研では、世界最高精度の国家標準を実現するために、国家標準設備の校正方法として「転流器による通液式秤量法」を選択し、高精度化に向けた要素技術を開発するとともに、安全性を確保する対策を施すこととした。

## 5 石油流量標準の構築

### 5.1 石油流量校正設備

灯油および軽油を大量に保有・使用する設備となるため、安全性を確保する上で、危険物一般取扱所として消防法に準拠した設計であるとともに、保安管理体制を構築することが前提となり、周囲環境に配慮した試験液の屋外漏洩および流出を防止する方策が求められる。さらに、校正方法として選択した「転流器による通液式秤量法」では前章で述べたとおり危険要因が増えるため、十分な安全対策を施すことが必要である。国内では、危険物である石油類を大量に流す大型設備を屋内に設置した例はこれまでほとんどなかったが、国家標準の重要性と特別の安全対策の結果、消防当局から建設が認められた。図3に安全対策と不確かさに関連する要素技術の関係を示す。

まず、油の漏洩を防ぐために、施設全体を防油堤で囲み、さらに、建屋周囲にピットと油水分離器を設置した二重の対策が施されている。屋根は、万が一の爆発事故時に、上方へ圧力を逃がすための放爆構造とし、軽量スレート板で構成されているが、室内の温度安定の向上を図るために、断熱材をはさんだ構造とした。石油類が循環する試験ラインが設置される危険区域と制御用コンピュータなどが設置される操作室などの非危険区域とを明確に区分した。また、操作室から試験ラインを監視し、非常時に迅速な対応ができるように、耐火ガラスおよび耐火シャッターを設置した。危険区域では漏洩した油の地下浸透を防ぐために防油床とし、2基の43 m<sup>3</sup>貯蔵タンクは地下ピット内に、また地下ピットのある部屋に秤量タンクを設置し、万が一の漏洩時にも外部へ流出しない構造とした。

表2 国家標準における不確かさ要因（灯油試験ライン）

| 不確かさの要因  | 相対不確かさ                                   |
|--|--|
| 1) 流量計バルス計数時間                                  | 0.0028 %                                 |
| 2) 接続管路内の質量変化量                                 | 0.0008 %                                 |
| 3) 流量・密度変動の影響                                  | 0.0002 %                                 |
| 4) 試験液の質量計測<br>(うち 蒸気及び液滴の影響分)                 | 0.0054 ~ 0.0154 %<br>(0.0030 ~ 0.0146 %) |
| 5) 流量計内の試験液密度測定                                | 0.0124 ~ 0.0146 %                        |
| 6) 秤量タンク内への流入時間                                | 0.0032 ~ 0.0042 %                        |
| 体積流量基準の校正の不確かさ(相対)<br>: 1) +2) +3) +4) +5) +6) | 0.016 ~ 0.022 %<br>(簡略化して0.03 %)         |
| 質量流量基準の校正の不確かさ(相対)<br>: 1) +2) +4) +6)         | 0.008 ~ 0.016 %<br>(簡略化して0.02 %)         |

注) 相対不確かさ：流量計の表示する流量の不確かさを流量値で割った相対量(校正の不確かさ)の内、それぞれの不確かさの要因が原因となっていると考えられている成分を示す。

石油用流量計の実流校正設備である石油大流量校正設備<sup>[5]</sup>の概略図を図4に、また不確かさ要因を表2<sup>[6][7]</sup>に示す。この校正設備は灯油用および軽油用の2つの試験ラインから構成され、流量範囲はともに3~300 m<sup>3</sup>/hである。灯油用および軽油用の設備は完全に独立しているが、試験液の温度調整用設備を共用するため、両設備の同時運転はできない。

本設備では、転流器を用いた通液式秤量法を採用しており、被校正流量計を通過した試験液(灯油もしくは軽油)を転流器により所定時間の間、秤量計の上に配置された秤量タンクへ転流器ノズルから流入させ、秤量計で計測された流入質量を流入時間で除して標準質量流量を得て、さらに質量流量を試験液の密度値で除することで標準体積流量に換算する。これら標準流量と校正対象の流量計の指示値とを比較することにより校正を行う。

前章で述べたように転流器を用いた校正方法の特長として、バルブの切り替えによる流れの切り換え方法に比べ計測時の流量変動が少ないことが挙げられる。さらに、転流器には、新たに開発した新形式<sup>[8]</sup>を採用した。この転流器は秤量タンク側へ流れを転流させる計測開始時とパイ

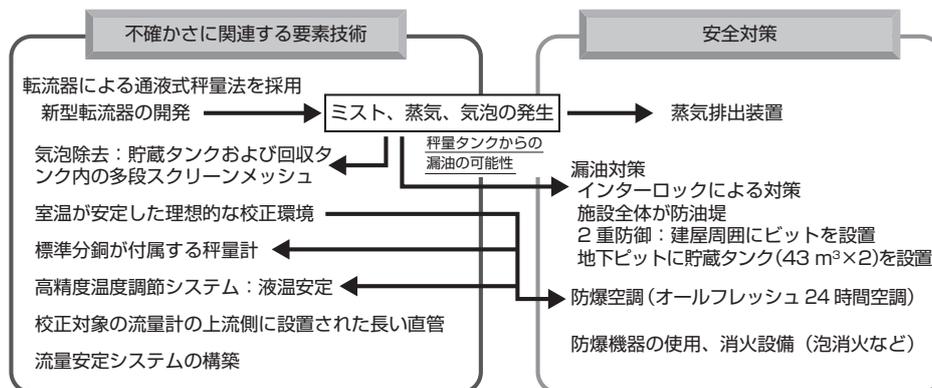


図3 石油大流量標準のために開発された要素技術

パス側へ転流させる計測終了時に転流羽根を自由噴流に対して同一方向に等速度で移動させるものであり、アメリカやフランスの国家標準（水流量）、国内の校正機関（水流量）でも採用され、液体の校正設備では世界標準となりつつある。そのままでは、安全性の観点から石油流量校正設備への適用は困難であったが、転流器内の自由噴流の出口面積を制御することにより、噴流流速の増大に伴う静電気の発生を抑制することに成功し、流量計の校正の不確かさに対する流入時間の不確かさの寄与を著しく低減させることに成功した。

また、自由噴流で発生する試験液の蒸気や液滴が測定室内へ流出することを防ぐために、転流器内が大気圧に対して微負圧になるように制御し、蒸気などを室外へ強制排気させ、油蒸気および液滴は凝縮、廃油として回収する構造とした。この蒸気および液滴の強制排気により灯油ラインでの校正の不確かさは悪化し、灯油ラインにおける一部の流量範囲では支配的な要因となることがわかった。なお、軽油ラインでは灯油ラインと比較すると蒸気および液滴の影響は小さい。さらに、転流器を利用した校正方法の採用により大量に発生する気泡を除去するために、43 m<sup>3</sup>の貯蔵タンクおよび回収タンク内に多段スクリーンメッシュを設置し、気泡が十分に除去できることを確認した。

校正対象とする流量計は、内径が50～150 mmである試験管路に設置される。流量計上流部で理想的な流れを形成させるために、被校正流量計の上流側に内径の100倍（15 m）以上の直管が設置されている。ポンプによる脈動を低減させるために、同一性能である3台の遠心ポンプを並列に運転させ、さらに、秤量タンク取込時の流量変動を低減させる方法<sup>[5]</sup>を開発した。

秤量計が設置されている秤量タンク室では、防爆型の空気調和設備により年間を通じて室温20±5℃以内の温度管理および静電気対策のために湿度30%以上に湿度管理されており、秤量システムの不確かさの低減に寄与している。10 t秤量計には1000 kg校正用分銅を10枚、1 t

秤量計には200 kg校正用分銅を5枚吊り下げ、試験前に秤量計を校正することにより、秤量計の経年変化の影響を最小限にしている<sup>[7]</sup>。また、同じ建屋内にポンプなど多数の振動源を設置することから、極微少な振動と密接に関連する秤量計の不確かさを向上させるために杭基礎工事で十分な防振対策を施した。

試験液の温度膨脹による不確かさを低減させるためには、試験液の温度を安定させることが必要である。防爆型の空気調和設備により室温も安定に保ち、さらに試験液の温度制御を行う熱交換器を通過する流量を一定にし、熱交換器にかかる負荷の時間変動を小さくする工夫の結果、十分な試験液の温度安定性（±0.05℃以下）が得られた。これらの技術開発の結果、表2中の「5）流量計内の試験液密度測定」および「2）接続管路の質量変化量」による不確かさを最小化することができた<sup>[6]</sup>。

実施される校正技術の妥当性を確認する目的で、再現性に優れたサーボ式容積流量計を開発<sup>[9]</sup>し、灯油および軽油用の試験ラインに3台常設した。このサーボ式容積流量計を被校正流量計の校正時にあわせて校正し、過去の校正値との比較を行うことで、校正の妥当性を常に確認することができた。

校正の前提として、管路内に気体残存がないことの確認と分岐管にあるバルブからの試験液の漏れがないことの確認を、日常の校正作業に取り入れている。

以上の安全対策と不確かさ低減のための要素技術を組み入れることにより、体積流量基準の校正の不確かさは目標値とした0.04%よりも優れた0.03%、質量流量基準では世界最高精度である0.02%を達成した<sup>[5]</sup>。

## 5.2 開発された流量標準の妥当性の検証

開発した石油大流量校正設備は計量法において石油流量の特定標準器に指定されており、校正される石油流量の絶対値と値に付随する不確かさの妥当性を検証し、その国際同等性を確認することは、我が国の石油流量計の信頼性を担保する上で非常に重要である。

まず、あらかじめSP（スウェーデン標準研究所）（表1参照）との2国間国際比較を実施した結果、NMIJとSPの校正設備での校正値が双方の不確かさの範囲内で一致した<sup>[5]</sup>。さらに、英国（NEL）が幹事国となり、メートル条約の協力の下で実施される石油流量の国際比較実験<sup>[10]</sup>に参加した。当初の参加国はヨーロッパ5カ国、アジア2カ国（台湾を含む）および北米2カ国の計9カ国であった。再現性および流量特性の優れた国際比較のための流量計が輸送の途中で破損したため、2005年から2007年までの2年間の長きにわたって実施された。参加したすべての国々での流量計の校正値を図5に示す。今回の比較実験

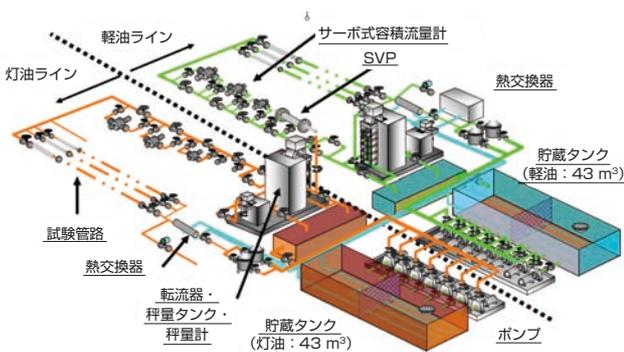


図4 石油大流量校正設備の概略図

からは途中から取り下げられたが、体積管を用いた校正装置 (Small Volume Prover) もしくは体積タンクを外部機関の施設 (例えば、石油会社) に持ち込むことにより校正作業を行った 2 カ国 (メキシコ、カナダ) の校正値は他の国々での値から大きく乖離していた。このことは、すでに述べたように体積タンクなどの個々の測定機器に対してトレーサビリティを確保することだけでは高精度の流量標準を組み立てることは技術的に難しく、校正環境を含めた校正装置全体の不確かさを低減する必要があることを示唆している。一方、我が国の国家標準値は、図 5 からわかるように、全体の校正値結果の中心部分に分布している。さらに統計的な解析から得られた国際的な合意値と不確かさの範囲内で一致していることが確認された<sup>[10]</sup>。

## 6 効率的なトレーサビリティ体系 (JCSS) の構築の取り組み

多種多様な石油類、広い流量範囲で流量計を使用する産業界のニーズに対応するためには、国家標準から、JCSS (校正事業者登録制度) を通じて流量範囲および液種を拡張する必要がある。このために、政府支援の研究プロジェクト<sup>[11]</sup>により、液体の粘度に依存する流量計の特性に高度な解析を加えることによって異なる液種へ容易な拡張を可能とする技術、流量計の並列化で流量範囲を拡大する技術開発を行った<sup>[11][12]</sup>。これらの新校正技術の妥当性を検証するために、国内校正機関 (校正事業者) の校正能力を調査した一例を図 6 に示す。2005 年実施の結果が示すように、従来国家標準値から  $-0.05\% \sim +0.10\%$  の偏差があった校正設備は、国家標準で校正された流量計で国内校正機関の校正設備を校正することにより、国家標準と  $\pm 0.03\%$  以内で一致するまで校正能力が著しく向上した

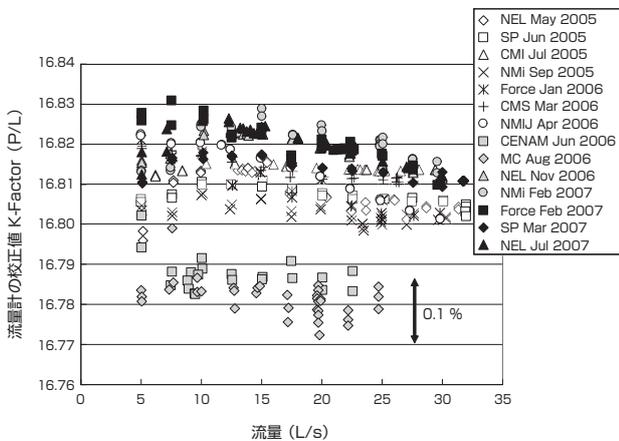


図5 石油流量の国際比較の測定結果

NMIJ: 日本, NEL: 英国, SP: スウェーデン, CMI: チェコ, NMI: オランダ, Force: デンマーク, CMS: 台湾, CENAM: メキシコ, MC: カナダ。国際比較報告書[10]の図2中のデータを読み取り、再プロットした。

ことがわかる。さらに、産総研の国家標準の校正範囲外である重油での値は外国校正機関での値と  $\pm 0.03\%$  以内で一致しており、プロジェクトで開発した液種を拡張する方法が妥当であることを示唆していると言える。

この他、国家標準から供給を受けた校正事業者の能力を担保するためにこれを認定する製品評価技術基盤機構 (NITE) を技術的に支援すべく技術的要求事項適用指針<sup>[13]</sup>の策定を主導した。その結果として、認定登録校正事業者が新たな事業としてその数が拡大しつつある。

また、液種の拡張技術を応用して、流量計のもつ粘度特性を要因とする不確かさの低減や作業効率の向上を図るべく流量計メーカーと共同で高精度流量計の開発を継続的に実施している。

さらに、JCSS 体制下の校正事業者との間で役割分担することで国家標準は限定的な範囲ではあるが、世界最高レベルの高精度な設備となっており、計量器産業の流量計開発プラットフォームとして、重要な役割を果たしつつある。

## 7 まとめ

本報では、石油流量標準における国家標準の位置づけを社会的な合理性を追求する観点から議論するとともに、石油流量の国家標準における校正方法の選択過程および不確かさ削減のための要素技術とそれに伴う安全性の確保について報告した。さらに、国家標準の妥当性とユーザーが利用できるトレーサビリティ体系の構築について報告した。現場で使用される流量計の精度管理の効率化に向けて、現在は、JCSS 登録事業者を希望する校正事業者への技術支援を行っている。環境問題などにより脱石油が推進されているが、近年の原油価格の高騰で見られるように石油製品の高価格化に伴い、さらなる高精度の計量が求

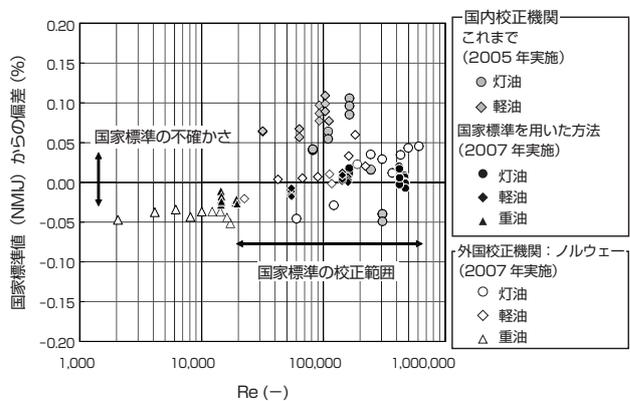


図6 国家標準値 (NMIJ) からの偏差

2005年と2007年で使用された流量計が異なるため、横軸のRe数は一致しない。また、国家標準の校正範囲は参考である。

められることが予想される。今後は、流量標準供給体制が整っていない低温流体であるLPGやLNG、また高粘度流体であるC重油のトレーサビリティ体系を設計する必要がある。さらに、高性能の質量流量計が開発されつつあることから、現在の主流である体積を用いた取引から質量へ移行する可能性がある。今後も社会ニーズにあわせて、新しい技術基準の策定、より適切な規制に向けた技術的な提言、トレーサビリティ体系の改良が必要であると考えられる。

## 謝辞

流量計校正事業、他国の計量標準機関の技術動向などの調査が本研究において重要な役割を果たした。これらは、社団法人日本計量機器工業連合会が主催し石油会社および流量計メーカーが参加した石油流量研究会での研究成果、独立行政法人製品評価技術基盤機構・認定センターの協力、経済産業省知的基盤課の協力、資源エネルギー庁石油精製備蓄課の協力に負うところが大きい。

## 参考文献

- [1] 石油連盟: 今日石油産業 (2009).
- [2] 国税庁: 揮発油その他の石油類の数量測定に流量計を使用する場合の取扱について, 蔵関第3223号 (2009).
- [3] 社団法人日本計量機器工業連合会: 流量計の実用ナビ (2005).
- [4] 日本工業規格: JIS B7552 液体用流量計-器差試験方法, 日本規格協会 (1993).
- [5] 嶋田隆司, 土井原良次, 寺尾吉哉, 高本正樹: 国家標準のための石油流量計校正設備の開発, 日本機械学会論文集B編, 71 (703), 854-861 (2005).
- [6] 嶋田隆司, 土井原良次, 武田一英, 寺尾吉哉, 高本正樹: 石油大流量校正設備の不確かさ解析 (第1報 流量計測に対する不確かさ解析), 日本機械学会論文集B編, 71 (712), 2956-2983 (2005).
- [7] 嶋田隆司, 土井原良次, 武田一英, 寺尾吉哉, 高本正樹: 石油大流量校正設備の不確かさ解析 (第2報 質量計測に対する不確かさ解析), 日本機械学会論文集B編, 72 (718), 1551-1558 (2006).
- [8] T.Shimada, S.Oda, Y.Terao and M.Takamoto: Development of a new diverter system for liquid flow calibration facilities, *Flow Measurement and Instrumentation*, 14 (3), 89-96 (2003).
- [9] T.Shimada, Y.Terao, M.Takamoto, S. Ono and S. Gomi: Development of a servo PD oil flow meter for a transfer standard, *Proc. 5th Inter. Symp. Fluid Flow Meas.*, (2002).
- [10] BIPM: *International Key Comparison of Liquid Hydrocarbon Flow Facilities CCM-FF-K2 (Final Report)*, (2008).
- [11] 独立行政法人産業技術総合研究所: 石油流通合理化のための流量計品質管理技術に関する研究, 経済産業省委託費平成19年度成果報告書 (2008).
- [12] 寺尾吉哉, 嶋田隆司, 土井原良次, 高本正樹: 石油流量標準と石油流量のJCSS, *計測標準と計量管理*, 59 (1), (2009).
- [13] 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター: 技術的要求事項適用指針 登録に係る区分: 流量・流速 校

正手法の区分(呼称): 液体流量計(石油用流量計)(第7版), JCT20830-07 (2009).

## 執筆者略歴

嶋田 隆司 (しまだ たかし)

1999年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年、通商産業省工業技術院計量研究所(現産業技術総合研究所)入所。これまで、石油流量の国家標準の開発・維持・供給、石油流量のトレーサビリティ体系の構築に従事。本論文では、資料の収集及び分析、論文骨子の組み立てを担当した。



土井原 良次 (どいはら りょうじ)

2001年九州大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年、産業技術総合研究所入所。これまで、石油の流量計測を研究の基軸として、質量流量計の開発、新型転流器の改良、国家標準の下限範囲を引き下げる石油中流量標準設備の開発に従事してきた。本論文では、効率的なトレーサビリティ体系の構築の中で、標準の範囲拡大技術の開発における実証実験を担当した。



寺尾 吉哉 (てらお よしや)

1983年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院計量研究所(現産業技術総合研究所)入所。液体流量及び風速の国家標準の開発・維持・供給、並びにトレーサビリティ体系の構築に従事。1997年、博士(工学)。2001年より計測標準研究部門・流量計測科・流量標準研究室長、2005年より同科・液体流量標準研究室長。本論文では、主としてプロジェクト進行管理を担当した。



高本 正樹 (たかもと まさき)

1975年広島大学工学研究科修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院計量研究所(現産業技術総合研究所)入所、流量と流速の標準と計測技術の研究開発に従事、現在に至る。この間、1986年インペリアルカレッジ航空工学PhDコース修了(PhD)、2001年産業技術総合研究所流量計測科長。2004年～現在国際度量衡質量諮問委員会流量分科会議長。1999～2002年石油流量の国家標準建設プロジェクトリーダー、2004～2007年経済産業省委託費による石油流量計の高精度化研究プロジェクトリーダーとして本研究に貢献。



## 査読者との議論

### 議論1 基準器と税務メーターの校正

コメント (田中 充: 産業技術総合研究所研究コーディネーター)

計量標準に関する研究では、行政当局がその体制運営の上で判断をする技術的根拠を示すための方法論がシンセシオロジーに当たると考えられます。一方、現論文の内容では、逆に行政の判断を前提とした意見にまで踏み込んで述べられており、読者が誤解することを恐れます。したがって、精度、コスト、校正対象・校正範囲の多様化、国際競争力などの客観的な属性からのみ技術を評価して、技術を構成した点に記述を絞ってはどうでしょうか？

回答（嶋田 隆司）

ご指摘の「1. はじめに」と「2. 石油流量標準を作る社会的な目的」について、従来の基準器制度では精度、液種、流量範囲の点から対象外となる範囲が新たなニーズとして現れてきたため、新しい石油流量の供給体制を構築したと修正しました。

## 議論2 論文の題名

コメント（田中 充）

原題名の「石油流量標準の確立」では、この論文が技術要素開発から政策的な決定に至るまでのどの点を記述しているのかわかりにくくなっています。シンセシオロジーの意味を汲んだ題名とし、また国内全体の計量標準を対象としているのか、産総研が担っている国家計量標準に限定しているのか、広く国際計量標準を対象としているのかが分かるように改訂してください。

回答（嶋田 隆司）

国内全体の体制と国家計量標準とを対象としているので、その視点からタイトルを見直しました。

## 議論3 既刊の研究論文との重複排除

コメント（長谷川 裕夫：産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門）

この研究の内容に関する詳細な論文が既に別途書かれていることから、またシンセシオロジーとしてのエッセンスを読者に理解してもらうために、既刊の論文と大きく重複する記述はできるだけ避け、簡潔にしてはどうでしょうか？

回答（嶋田 隆司）

図表を加えることにより、技術内容については簡潔な記述とするとともに、シンセシオロジー研究の成果と計量に係わる行政との関係がよく見えるように書き改めました。

# 臨床情報学のための野外科学的方法

## — 技術移転の方法論に向けて —

木下 佳樹\*、高井 利憲

情報処理に関するリスクを抱える現場に対して、情報学の研究成果を用いてそのリスクを軽減する活動に固有の学術としての臨床情報学を提唱する。本稿では特に、数理的なシステム検証技術のシステム開発現場への技術移転を例にとり、技術移転の過程の体系化を試みる。具体的には、技術移転のシナリオを野外科学的方法論のなかに位置づけ、シナリオで用いるフィールドワークやインタビュー、参与観察などの各要素技術の役割を論じる。

キーワード: 情報学、質的研究、リスク、フィールドワーク、数理的技法、モデル検査

## A field-scientific approach to Clinico-Informatics

### – Towards general models of technology transfers –

Yoshiki Kinoshita \* and Toshinori Takai

We propose Clinico-Informatics, as a research field for dealing with risks of information systems based on informatics. In this paper, we concentrate on extracting a general model of technology transfers from the author's experiences, i.e. transferring mathematical system verification techniques to the fields of system development. We consider a general scenario for technology transfers with the methodology of field-science. Moreover, we discuss roles of the elemental technologies used in the scenario such as ways for conducting fieldworks, interviews, and participant observation.

Keywords: Informatics, qualitative research, risk, fieldwork, formal method, model-checking

### 1 序にかえて: 臨床情報学とその社会的な目的

およそ、情報学の研究に携わるものであれば誰でも、情報処理に関するリスクを抱える現場があれば、情報学の研究成果を用いてそのリスクを減らすことに貢献したいと考えるのは当然であろう。リスクを軽減するために、次のような項目にわたる総合的な学術研究が必要であると考えられる。

1. 状況の分析手法に関する研究。分析は医療での診断に相当する。
2. 状況の改善手法に関する研究。改善は医療での治療に相当する。
3. 技術移転の手法に関する研究。技術移転は、医療の場合には研究成果を一般の医師が使える形にして、医師会などを通じて広めることに相当する。情報処理では、上記1および2の項目で研究された分析手法や改善手法のうちどれを用いるかを選択し、開発や運用の現場に普及させて遂行していくことが技術移転である。

情報システムに関して、このような研究を遂行する活動をここでは臨床情報学と呼ぶ。「臨床」という医学用語を借用しているが、医学のための情報学という意味では全くない。通常の医学が人を対象にしているのに対し、情報システムを治す臨床医学に相当するものが必要ではないか、という意図からの造語である。

技術移転は、上記のように臨床情報学が対象とする三つの活動の一つである。他の二つの活動、診断と治療に関しては臨床医学との類比が成り立つが、技術移転に関しては臨床情報学と臨床医学の類比は若干崩れる。臨床医学では、技術移転自体を考察の対象とはせず、技術移転の過程は臨床医学の外にあるものとされる場合が多いのではないかと。しかし、情報学の文脈では、技術移転過程をも考察対象に含めるのが自然であろう。技術移転では、情報の流れが重要な役割を果たしているからである。

さて、十六世紀のいわゆる大航海時代には、欧州の人々

産業技術総合研究所 システム検証研究センター 〒560-0083 豊中市新千里西町 1-2-14 三井住友海上千里ビル 5F  
The Research Center for Verification and Semantics, AIST 5th floor, Mitsui Sumitomo Kaijo Senri Bldg., 1-2-14 Shin-Senri Nishi,  
Toyonaka 560-0083, Japan \* E-mail: yoshiki@m.aist.go.jp

Original manuscript received September 2, 2009, Revisions received November 4, 2009, Accepted November 4, 2009

が全く異なる文化の人々と接する機会が生じた。当初は文化の違いをすべて、文化の先進、後進に帰着させる素朴な文化観が支配的であったが、二十世紀に入って、文化の先進性後進性よりも、地域的、歴史的理由によって生じた多様な文化を比較研究しようとする文化人類学、民族学が盛んになった。その結果、ものの見方が異なっていて相互理解が困難だというだけの理由で先進後進が論じられない場合も多々みられることが明らかになった。我々はこれと相似の状況に直面している。

リスクを抱えた現場において状況を分析し、改善するための手法が臨床情報学では研究の対象である。とはいっても、現場の状況分析、改善を実際に行う作業が手法研究には必須である。この作業において臨床情報学研究者と現場の技術者とが接触する。ところで、現代では情報技術は基本的方法論としてあまねく行き渡っているから、情報システムを取り扱っている現場の技術者の技術分野は電子工学から機械工学、化学プロセスまで千差万別である。このため、臨床情報学においてはさまざまな分野の技術者と接触し、膨大な数の要因が相互に影響しあう多様で複雑な状況の分析や、改善を行なうための情報交換を行わなければならない。後述するように我々の技術移転では、技術者に馴染みのない数理論理学などの背景知識を伝えることから始める必要があった。このような過程は一種の異文化交流であるといえよう。

そこで、本稿では技術移転過程を異文化交流の一つとみて考察を進める。ここに、民族学の研究手法を技術移転の考察に応用する根拠がある。このような多様で複雑な状況を取り扱うための研究方法論一般に関して、質的研究 (qualitative research)、エスノグラフィー (ethnography)、フィールドワーク (fieldwork) や野外科学 (field-science) が論じられ、インタビューや参与観察 (participant observation)、KJ 法<sup>[1][3]</sup>などの要素技術が、民族学をはじめ社会学、看護学などで用いられている。わが国におけるフィールドワークの中心地の一つである京都大学では、フィールド情報学が提唱されており、ここでは「フィールドで生じる諸問題に対して情報学の視点からその解決法を提案する」とされている<sup>[4]</sup>。

さて、著者らが所属する産業技術総合研究所システム検証研究センター（以下 CVS）は、情報システムが意図どおりに稼動するかどうかを確かめる検証の技術、とくに数理的技法を中心に研究を進めている。システムについて検証したい性質は、デッドロックに陥らない、サービスを適切に与える、計算が無限ループに陥らない、正しい結果を計算するなど多岐に渡るが、これらの性質を論理式で表現し、システムの実装がその性質をもつことを数学的に証明

することによって動作を保証するのが、数理的技法による検証法である。システムが不具合をもつ場合には、証明がうまく進まず、その場合には性質が成り立っていない反例を提出することが望まれる。証明あるいは反例の提出を、人間が行う場合（半形式手法）と、機械（コンピュータ）が行う場合（形式手法）がある。

CVS では、情報システムの検証にモデル検査と呼ばれる形式手法に関連する臨床情報学研究をフィールドワークと称して、研究センター設置以来数年にわたり、十指に余る数の共同研究プロジェクトとして行なってきた<sup>[5][6]</sup>。相手先企業との話し合いを通じた状況の分析から始めて、状況の改善に資すると思われるモデル検査の使い方を考察し、それを相手先の技術者に伝えることによって技術を移転することを試みた。そこでは、参与観察などの野外科学的方法が中心的な役割を果たした。野外科学的方法論は、川喜田二郎氏によって、仕事の進め方の一般論として議論されてきたもので、有名な KJ 法をその一部として含むものである。そこで本稿では、我々のフィールドワークを例にし、川喜田氏の野外科学的方法論を指導原理として、臨床情報学の対象として重要な情報技術の移転過程の体系化を試みる。

以下では次のように議論をすすめる。まず第 2 節では、我々の研究対象である情報システムのディペンダビリティについての用語整理と、技術移転の対象としたモデル検査と呼ばれる技法の解説を行う。第 3 節では、技術移転の過程を川喜田氏の W 型解決モデルを用いて体系化することを試みる。この体系に照らし合わせながら、第 4 節と第 5 節では臨床情報学における技術移転の一般的シナリオを提示する。我々が行ってきた技術移転のシナリオを第 4 節に記し、第 5 節では、そこで用いられた技術移転のための要素技術のいくつかについて概略を説明する。第 6 章では我々の経験した技術移転の事例のなかで最も大規模なものを二つ紹介して、そのアウトカムの評価を試みる。最後に第 7 章で我々の提示した技術移転の過程のモデルについて議論し、今後の課題をいくつかあげて結論を述べる。

## 2 技術移転の対象技術：モデル検査

本章では、我々が技術移転の対象としたモデル検査技術<sup>注1)</sup>の概要と現状を説明する。モデル検査技術は、ここではシステムの欠陥除去 (fault removal)<sup>注2)</sup>における検証や診断のために用いられた。数理論理学では、データやデータに関する命題を記述する人工言語、およびその言語で表された公理や推論規則（あるいは証明規則。前提となる命題から帰結となる命題を導く規則である）を与える「形式理論」と、その形式理論における人工言語で表現され

る数学的対象を与える「解釈」を考える。命題 $\psi$ が、解釈Mにおいて成立する、ということを書き、 $M \models \psi$ と書いて、 $\psi$ はMにおいて真である、という。形式理論の公理をすべて真にするような解釈を特に「モデル」という。どんなモデルに対しても $\psi$ が成り立つときには $\models \psi$ と書き、 $\psi$ は「恒真」(valid)である、という。形式理論が与えられた場合、多くの場合には、命題の恒真性に興味があるが、特定のモデルにおける真偽を調べることに興味がある場合もある。与えられたモデルの下での命題の真偽を調べることを「モデル検査」と呼ぶ。形式理論の中でも時相論理と呼ばれる論理に基づく理論におけるモデル検査は、制御プログラムの動的な性質の検査を調べるのに都合が良く、最近ではプログラムの検証での必須の技法の一つになっている。

モデル検査を効率よく自動的に実行する「モデル検査器」と呼ばれるソフトウェアツールがいくつも開発されている。モデル検査器は、情報システムの遷移系<sup>注3)</sup>としての表現と、期待される性質の二つを入力として受け取り、前者が後者を満足するかどうかをYESまたはNOの答えとして返すものである。遷移系が与えられた性質をもたない場合には、反例をも返すのが普通である。反例は、動作に関するシステムの状態系列の形で与えられる。

モデル検査器を用いて、システムの欠陥を次のようにして検出する。まず、システムを表現する遷移系を作る。システムは数学的世界とは独立に存在するものだが、それをもとに当面議論したい性質は保ちつつ、システムのその他の面は差し支えない程度に捨象(抽象化)して、数学的な対象である遷移系を作るのである。ここで、抽象化に失敗して元のシステムの性質をうまく保っていない遷移系を作ってしまった可能性もあるが、これについては後述する。以後はシステムそのものについてではなく、専ら遷移系について議論することになる。

さて、遷移系が期待する性質をもつかどうかを、モデル検査器を用いて検査する。モデル検査器がNOと答え反例を返す場合には、その反例に関して期待される性質が成り立っていないので、この反例を欠陥の候補とするのが妥当である。この場合には、反例を解析して遷移系の動きを実際のシステムに対応させることにより、(遷移系ではなく)システムの欠陥が生じているのかどうかを判断する。しかし、モデル検査器がYES(満足する)と答える場合には、それだけではシステムの欠陥が存在しない(つまり期待どおりに動く)とは言えない。モデル検査器に与える遷移系が現実のシステムの妥当な表現になっているかどうかは、必ずしも明らかではないからである。

このように、モデル検査器は数学的モデルを対象とした検査を行うものである。実際の情報システムの検査にモデ

ル検査器を用いるためには、システムと数学的モデルのずれを埋めるための工夫が必要である。例えば、モデル検査器がNOを返した場合でもすぐにシステムに欠陥があると結論することはできず、反例を解析すべきであるが、その解析には誰が当たるのか、という問題がある。検証(欠陥検出)に携わるものばかりでなく、開発チームの者も参加して最終的に欠陥か否かを決定するのは開発チームの者にすべきである、というのがわれわれの一般的結論であるが、いずれにしてもこの種の考察を加えるのがモデル検査のシステム検証への実用にかかる研究であり、フィールドワークを通じて行おうとしたのはこのような研究である。

### 3 技術移転の野外科学的方法論

本章では、川喜田二郎氏によるW型問題解決モデルと、産業技術総合研究所設立以来我々が議論してきた本格研究のモデルとを比較対照しながら、技術移転活動の体系化を試みる。

#### 3.1 川喜田氏によるW型問題解決モデル

川喜田二郎氏は科学研究の活動を、書齋科学、実験科学、野外科学の三つに分けて考えた<sup>[1]</sup>。書齋科学は、先人により体系づけられた情報を机上での考察や推論などの演繹により発展させる活動であり、数学などを典型とする。実験科学は、再現可能な現象を実験室内で引き起こして観察する帰納的活動で、実験物理学が典型である。両者が所与の理論に基づいた活動なのに対し、野外科学はそれらとは別の活動で、再現不可能な現象を現場に出かけて観察して理論をたてる、発想(abduction)を主眼とする。地震の直後に社会的に生じる現象は、このような観察の対象の好例である。野外科学における観察の現場をフィールド(野外)と呼ぶ。フィールドは必ずしも屋外に存在する必要はなく、例えば、ソフトウェアの開発現場は情報学にとってのフィールドと考えられる。三つの活動の関係は図1

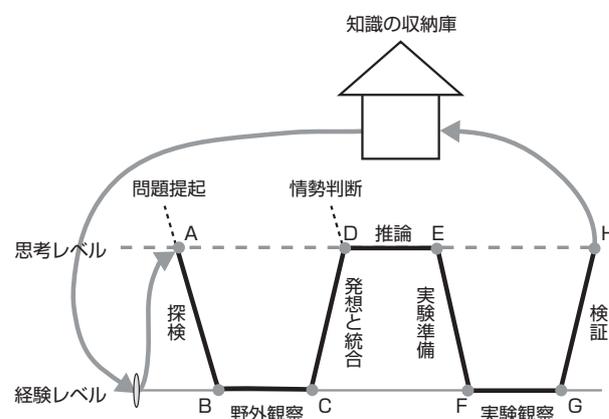


図1 川喜田氏によるW型問題解決モデル(参考文献[2]より再構成)

に図解されているようなW型問題解決モデルによって表現される<sup>[2]</sup>。

技術移転も一つの問題解決であるから、このW型問題解決モデルによって、技術移転過程を理解することができるはずである。この作業仮説に基づいて、著者らおよび著者ら周辺の経験に照らし合わせながら、W型問題解決モデルに基づいて技術移転過程の体系化を試みる。

W型問題解決モデルを技術移転に当てはめると、以下のようになるであろう。まず、何かの技術が社会の一定の場所に役立つのではないかという漠然とした期待（問題提起）のもとに、社会のその場所に出かけ（探検）様子を観察する（野外観察）<sup>注4)</sup>。観察の結果、当初想定していた技術をどのように役立てるのか、また同時に必要となる技術にどのようなものがあるのかなどを考え（発想と統合）、さらに研究室に戻って全体の状況を見渡して（情勢判断）、最初の期待を実行に移すかどうかを判断する。やることに決めたら、技術移転の具体的な手順を考え（推論）、その手順がうまくいくことの試験の準備を行い、実験して結果を観察する。実験結果を検証して評価する。

このような体系なしに、闇雲に技術移転に向かった場合、我々の経験では少なくとも三つの問題が生じる。

1. 社会の観察（野外観察）が不十分で全体の情勢を十分掌握しないまま何かの技術を移転しても、その状況に適合しない技術の押し売りになる可能性がある。
2. 技術移転は一般に数ヶ月から数年の長期間にわたる困難な活動である。過程全体の見通しをもたず、五里霧中の状態でその場その場の仕事を次々にこなしていくことは、当事者にとって大変苦しいことである。技術移転過程の全体像を描き、その場その場の仕事が過程全体のどの部分であるかを理解することによって、当事者が勇気付けられるとともに、周辺の利害関係者（とくにプロジェクトスポンサー）への説明もしやすくなる。
3. 技術移転過程は、一般に研究所と技術移転先との間に特有のものであるが、一つの技術に関して多数の技術移転先への技術移転過程を一括して議論したい場合がある。技術移転過程の一般論、つまりモデルがないとこのような一括の議論が困難である。

特に、著者らのように設計の方法論を産業に移転しようとする場合には、新しい製品の開発法を移転する場合に比べて、産業側の技術者への知識移転（トレーニング）の度合いが大きく、移転が困難であるように思われる。この困難の大きさに気づかずに方法論を移転しようとしてもうまくいかない。ここにある困難は一種の複雑系的課題であり、その克服には川喜田氏のW型問題解決モデルなどに基づく問題解決手法が効果的であると思われる。

### 3.2 本格研究とW型モデル

吉川弘之氏による第2種基礎研究<sup>[7]</sup>は、当初「抽象から具体へ」の知識の進展過程として提唱された。参考文献<sup>[7]</sup>の執筆後、産業技術総合研究所内での議論を経てでき上がった本格研究<sup>[8][9]</sup>と呼ばれる研究のライフサイクルは、第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化研究の三つの過程からできている。吉川氏の第2種基礎研究や本格研究の枠組と川喜田氏のW型モデルを対照して、我々には以下のような観察結果を得た。

川喜田氏のモデルは問題解決一般のモデルであるから、いろいろのレベルに入れ子状に適用することができる。実際、川喜田氏自身も大きな問題に対してはW型モデルの過程を6回繰り返す手法を提示している。本格研究に関しても、研究のライフサイクル全体に対してW型モデルを考えることもできるし、第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化研究などの個別の各過程に適用することもできる。

本格研究においても川喜田氏のモデルにおいてもabduction（発想法）が、演繹法（deduction）、帰納法（induction）とともに重要な役割を演じている。川喜田氏のモデルでは、帰納法のための「実験」、発想法のための「野外観察」の過程が設定されている。一方、吉川氏のモデルでは、「構成」と呼ばれる過程が設けられており、この過程では帰納と発想が混在して行使されるように思われる。

吉川氏のモデルで具体、抽象と呼ばれているものが、川喜田氏のモデルでそれぞれ経験レベル、思考レベルと呼ばれているものに相当するように思われる。だとすると、「抽象から具体へ」という第2種基礎研究のモットーは、川喜田氏のモデルでは思考レベルから経験レベルへの遷移に相当する。図1のように、この遷移は「探検」と「実験準備」の二つある。本格研究全体のライフサイクルのW字において、第2種基礎研究は左半分のV字に相当すると考えるのが妥当であろう<sup>注5)</sup>。推論、実験と検証を行なう右側のV字はむしろ第1種基礎研究ということになる。なお、この場合、第2種基礎研究の後に第1種基礎研究が行われることになるが、この順序は大した問題ではない。いずれにしろ、研究活動は循環するものと考えべきであり、第1種基礎研究の成果が川喜田氏のいう「知識の収納庫」に入れられて、次の第2種基礎研究に供されるからである。

本格研究に関してはこれまで、その活動の姿を明確にする議論がされてきたものの、方法論の議論にまでは至っていない。一方、川喜田氏のモデルでは、abductionを支援する手法がKJ法として提示されている。

なお、著者らは査読者から中島氏による参考文献<sup>[10]</sup>の存在を教示された。ここでもabductionの重要性が論じられていて興味深い。中島氏の論説に関する詳細の議論は

別の適切な場所で行いたい。

### 3.3 質的研究と量的研究

一方、科学研究のアプローチに、質的研究 (qualitative research) と量的研究 (quantitative research) がある。物質科学では定量的議論が容易な場合が多いためか、定性的議論は単に正確さに欠けた、精度の低い議論に過ぎないと暗黙のうちに見なされてしまう場合もあるが、これは正しくない。第一に、定量的議論のために用いられるパラメータおよびそのパラメータがどんな量をとるべきかの選択の妥当性の議論は定性的にならざるを得ないが、その後の定量的議論はすべてこの定性的議論に根拠をおくからである。第二に、量を表すために実数が必要だとは限らない。定量的議論が必要とされる場面を詳細に検討してみると、実数によって表される量の概念が必要とされているとは限らず、量の比較、極限 (上限、下限) などに関する議論ができれば十分である場合も多い。そのような場合には実数を導入せずに、もっと簡単な構造をもつ半順序や擬順序、あるいは束や完備束の構造を導入して比較や極限の概念を議論すれば十分である。この場合、実数は議論に現れなくなるので、いわゆる定性的議論と見なされるべきものとなる。

質的研究は、定性的議論を避けずに展開される研究のアプローチであって、民族学、社会学や看護学などで広く受け入れられている。これらの分野に共通することは、人間に関係する現象であって対象とする現象そのものに主観が含まれること<sup>注6)</sup>、したがって再現不可能あるいは再現困難な現象を対象とすること、対象が複雑なこと、などである。とくに対象が複雑な場合、安易にパラメータを選んで議論を進めるべきではなく、パラメータ選択の妥当性を十分に考察しなければならない。したがって、定性的議論のための方法論が重要である。定性的議論のための技法として、例えば、川喜田氏の KJ 法<sup>[11][3]</sup> や Glaser と Strauss によるグラウンデッドセオリーアプローチ (grounded theory approach) など多数が提案されてきた<sup>[11]</sup>。

臨床情報学における技術移転研究も、まず質的研究に基づいて大まかな方向付けを行うのが妥当であろう。技術移転は人間が関係する現象であって、すべての人間が関係する現象と同様、極めて多様かつ複雑なものだからである。実際、ニーズの分析や技術移転の形の決定は大変複雑な過程である。個別の企業がその新しい技術を採用するかどうかの判断は、すべての判断と同様に極めて主観的なものであること、個別の企業における技術移転は再現不可能な過程であることなども、現象の複雑さを増している。

著者らは、技術移転研究における量的研究を否定するものではない。量的研究による緻密な議論を開始する前に、どのような量を問題にすべきかをよく考察すべきであって、

そのような考察は必然的に質的研究になるであろう、というのが著者らの主張である。

## 4 技術移転のシナリオ

我々のフィールドワークの経験に基づいて、技術移転過程のシナリオを一つ提示する。

1. 【インタビュー】まず、技術を移転する先での仕事の詳細の説明を受けるために、インタビューを行なう。
2. 【適用実験】その後、移転先の技術者との混成チームによるモデル検査技法 (技術移転の対象となる技術) を実際のシステム開発現場への適用を試みる適用実験を通して参与観察を行なうことを繰り返す。
3. 【縁側から奥座敷へ】これらの適用実験の対象システムは、移転先にとって失敗してもリスクの少ないものから始めて、失敗したときのリスクが大きいものへと漸次移していく。初めは、以前に作ったプロトタイプなどを対象に行い、次第に開発中の製品で小規模のものから大規模なものに対象を移す。
4. 【技術教育】適用実験は、初めはCVSの研究者のみによって行なわれるが、漸次、技術移転先の技術者によって行なうようにしていく。これに並行して技術者に対する技術教育を行なう。ここでの技術教育は、適用実験を技術者だけで行うことができるようにすることを目的とする。
5. 【目標達成】技術移転の目標 (マニュアル作成、先端技術者育成など) を達成する。

以上のようなシナリオに達するにあたって、我々の共同研究における経験に基づいたいくつかの判断 (rationale) があった。それを以下に列挙する。

- a) ボタン一つでソフトウェアの検査を完全に自動的に行う検査器、といったものの開発の希望が相手先から寄せられることが再三あったが、我々は、これに同意しなかった。その理由は、

(I) どんな仕様書とプログラムが与えられても、後者が前者を満たすかどうかを証明するような一般的な手続きは存在しないことが数理論理学において知られていること (Churchによる一階述語論理の非決定性)。

(II) 検査する検査式を一定のパターンに限定すれば、それをボタン一つで検査することは可能であるが、システムの検証が一定のパターンの検査式に限定したモデル検査に帰着するかどうかは不明であり、我々は否定的な予想をしていた。

の二つである。(a) のような希望を企業が寄せるのは、モデル検査を用いて欠陥を検出する技術の移転を、単純な情報の流れとして捉えていたからではないかと思われる。しかし、実際の技術移転過程では、b) に記すように、

もっと複雑な情報の流れを経ることが必要であった。

b) 我々が技術移転の対象としたモデル検査技術は、設計技術の一部であり、したがって、単に技術情報や理論を書き物や講義の形で産業界の相手方に知らせるだけでは、知識が伝わらず、書物の周辺の知識や考え方をface to faceで伝える必要があると考えられた。これは一種の異文化交流が発生していることを意味する。これがフィールドワークによる共同作業という形をとって技術移転を試みた理由の一つである。

例えば、モデル検査において、システムが満たすことを期待する条件を表す論理式（検査式）を記述するためには、数理論理学の基本的な素養が必要である。しかし、わが国では、正規の情報技術者養成コース（大学や高専の情報系コース）でさえ数理論理学の基本が教えられていないため、技術者に対して論理式に関するtutoringに数ヶ月から一年程度の期間を要するのが普通であった。

c) 技術移転先の仕事の文脈の中で、モデル検査技術がどのように有効であるかを実際の作業を通じて相手に示すことも、フィールドワークという形態をとった理由である。

移転先が、技術移転の対象技術を本格的に採用するためには、技術を移転先自身の眼で評価することが必要である。そのためにリスクの少ない技術適用から始めて、次第にリスクの大きな適用に移っていくという構図をたどる。これを我々は「縁側から奥座敷へ」あがっていく、と称し、技術移転の作業が今どの段階にいるのかを技術移転担当者自身が考えるための枠組として利用した。

d) 当初はプロジェクト毎に個別に教育活動を行なったが、比較的短期間のうちに教育の重要性が明らかになった。そのため、技術者向けの教育コースを独立して開発し、プロジェクト参加者に対して適用することとなった<sup>[12]</sup>。教育コース開発では、利用者に必要な理論は技術者に対してよく教えること、特定のツールに依存した知識と一般論を区別して教えることに配慮した。

e) 技術移転の最終的な形（目標）は、同じ技術を適用しているにもかかわらず、移転先に応じて多様であった。例えば、技術をマニュアル化して属人性を排除しようとする例と、極端に属人化させ技術を習得する技術者を限定して、いわばエリート教育してその技術者を通して社内で技術を広げようとする例とが存在した。これは技術移転先の文化、判断による違いといっていよい。

最後にシナリオの各段階を、川喜田氏のW型問題解決モデルにどのように関連するか、について考察を加える。まず、1.のインタビューは、W型のはじめに思考レベルから経験レベルに向かう「探検」に相当する段階であろう。状況の分析を行なうための取材の段階である。2.の適用実

験には、野外観察を行なうためのものと実験観察を行なうためのものがある。後述の雛形実験や復元実験は野外観察のため、目隠し試験や技術者のみによる工数測定などは、実験室内での実験観察のためである。3.の縁側から奥座敷へ、と書いた段階は、このW型過程全体を循環させる様子を示している。KJ法においても、最も完全な問題解決は、W型サイクルを6回まわして行なうことになっている。4.の技術教育は、「知識の収納庫」からW型の左上の問題解決サイクルの出発点への道程に相当すると考えられる。知識を技術者に与えて、次のサイクルを始めるわけである。最後の5.は、「発想と統合」の道程に相当すると考える。例えば工程をマニュアル化したのち、そのマニュアルが妥当なものかどうかを実験で確かめていくからである。

## 5 技術移転の要素技術

本節では、前章に示したシナリオに用いられうる技術移転のための要素技術を列挙して解説する。

### 5.1 技術移転のフィールドワーク

技術移転は、フィールドワークと称する研究活動の枠組によって研究者が行う。先に述べたように、我々の意味でのフィールドワークは、民族学や社会学でのそれにくらべて未だ方法論が十分に体系化しておらず、不完全なものに過ぎない。特に取材の段階について、社会科学のフィールドワークにおける取材活動の方法から取り入れるべきことが多い。いずれにしろ、技術移転のフィールドワークは以下のようなスローガンを掲げて遂行する。

#### a) フィールドの価値観

技術移転のフィールドワークは学界の価値観ではなく、フィールドの価値観にもとづいて実施する。例えば、研究論文を執筆することよりもフィールドでの問題解決が優先される<sup>[7]</sup>。

また、技術移転のフィールドワークにおいては、自らの研究成果の応用にこだわるのではなく、採用する技術の選択はフィールドの価値観に基づいて行なわなければならない。しかしこれはフィールドの意見をいつものみにするべきだということではない。研究者側がフィールドの価値観に立ってこれを用いるべきだと考えるものがあれば、それを主張しなければならない。研究者からの批判的な意見も興味しつつ、研究者と技術者の間で合意に達することが重要である。

例えば、上記のように自動検証ツールの開発をフィールド側が主張するのに、フィールドの価値観に立って考えても研究者側にはそれがよい解決策だとは考えられず、採用しなかった例がある。別の例<sup>[13]</sup>では、通常数理的技法は、ソフトウェア開発工程のうち、要求分析や設計などの上流工

程での適用が効果的だとされるが、あるフィールドワークでは実装などの下流工程における問題を解決してほしいという企業からの要望が存在した。そこで、適用実験を繰り返した結果、実装工程に対してもモデル検査技術が効果的であることが、いくつかの要素技術を開発しながら確かめられた。これはフィールド側の意見がうまく取り入れられて成功に至った例である。

#### b) 四分六の原則

技術移転のフィールドワークに関わる者は技術的能力を持つだけでなく情報科学の研究者であるべきで、フィールドワークと同時に学術研究にも携わる体制を組むことが重要である。学術研究とフィールドワークに四対六程度の労力配分をせよという意図から、四分六の原則と呼ぶ。これによって、学術研究の最先端の手法がフィールドに活かされ、フィールドでの問題意識を反映した学術研究の新しい方向が生まれることによる、学界と社会の相互作用が生まれることが期待される。フィールドワークの結果を情報の科学の立場から正しく評価することが可能になるのも重要な点である<sup>注8)</sup>。

ここで、エンタープライズ系システムのソフトウェアに対する検証を試みたフィールドワークを例として取り上げる<sup>[14]</sup>。このフィールドワークでは、Webを用いたユーザーインターフェイスの設計が対象であり、その仕様書にはユーザーからみた画面の遷移に関する仕様と、プログラムの流れを記述したフローチャートの二つが存在した。現場からの要望は、それら二つの仕様書の間で「整合性」がとれていることを調べたいというものであった。そこで、まず現場で使われている整合性という用語について研究者が評価したところ、計算機科学におけるある種の模倣関係になっていることが判明した。フィールドワークに参加した研究者は、この模倣関係を判定するためのモデル検査の検査式群を発見することにより、効果的なモデル検査の現場導入を達成した。

技術移転のフィールドワークでは、我々は第4章に示す手順にほぼ従って進めた。以下では、この手順で用いられる要素技術を順に説明する。5.2節では、第1段階で用いられるインタビュー技術を説明する。5.3節では、フィールドワーク全般で用いられる参与観察について解説する。最後に5.4節では、適用実験に用いられる雛形実験、開発前実験、開発後実験、復元実験、目隠し実験などの手法を紹介する。

## 5.2 インタビュー

フィールドワークの開始時にはまず、技術移転先の仕事の内容を研究者側が学習しなければならない。書かれた資料を研究者側が受取り、それに関する質問をフィールド

側に投げかける形で説明が進む場合が多いので、この作業段階をインタビューと呼んでいる。研究者と技術移転先の領域知識や文化が異なるため、互いにもっとも一般的と思われる語彙で説明を試みるのに、最初はほとんど言葉が通じないことも多い。異文化交流を実感する段階である。インタビューの技術は、システムエンジニアリングにおける要求分析技術との重なりが大きい。

インタビューは開始時に限らず、フィールドワーク遂行中に随時必要になるので、そのことを勘定にいたした予定が必要である。また、インタビュー対象者はプロジェクト参加者であるとは限らないので、インタビューに対して好意的でない場合もあり、そのときのための準備が必要である。

## 5.3 参与観察

参与観察は、観察対象に影響を与えることをいとわずに、観察者が観察対象の一員になって観察する質的研究技法の一つであり、社会学や民族学などでは広く用いられている。

システム設計、開発の過程は、再現不可能な過程の典型例である。このような過程を対象に実験科学の手法を素朴な立場で適用しようとする、実験の再現可能性、観察対象への観察者からの影響などの面で、たちまち困難に陥る。しかし、観察対象に影響を与えることを前提とした参与観察のようなフィールドワークにおける質的研究の技法を用いることにより、対象の観察を進める可能性が拓ける。

## 5.4 適用実験

適用実験にはいろいろな目的がある。

- 1) 技術移転の対象技術の、フィールドの文脈における適用例をフィールド側の技術者が見て、その効果を評価する。
- 2) 技術を研究者が適用している様子を、手本として用いる。
- 3) 技術者が技術を学ぶために、研究者の手助けを得ながら自分で適用してみる。

このうち2)と3)のためには、特別な技法は必要としない。1)における評価のために、いくつかの技法が考えられる。(図2)

- a) 【雛形実験】過去のプロトタイプや過去の開発事例を対象とする適用実験。技術適用に失敗しても被害がないので、リスクが小さい。
- b) 【復元実験】過去に開発されたシステムで、一部が既に欠けてしまっているようなものについて、欠けたところを補って実験する。例えば仕様書がなくなったシステムについて、仕様書をソースコードなどから復元した上で、仕様書をソースコードが満たすかどうかを検証してみる、など。
- c) 【開発前実験】開発中の製品や、その製品の開発過程に対する適用実験。
- d) 【開発後実験】市場に出回っている製品に関する技術

の適用実験。例えば、市場から報告のあった原因不明の障害の解析を行なう、など。

e) 【目隠し実験】「解答」があるような技術適用について、過去の開発事例に関する解答を隠して、それに技術を適用し、正しい解答が得られるかどうかをみる。

また、1) における評価の体制がいくつか考えられる。

- a) 研究者のみからなるチーム
- b) 研究者と技術者の混成チーム
- c) 技術者のみからなるチーム

初期には a) によって技術を提示し、b) によって技術者に技術を漸次伝えて、最後には c) による適用実験を行って技術移転全体の評価をする。

## 6 二つの事例

CVS で行なわれた共同研究のうち、3年以上継続し、技術移転の中長期的なテーマに触れるものが二つあった。本節では、これら二つの共同研究の結果およびアウトカムの評価を試みる。

### 6.1 P社との共同研究

P社との共同研究は、高い品質のソフトウェアを開発する手法を求めるP社によるモデル検査導入への要請に応えるべく開始した。以下のような経過をたどった。

1. 小規模なプログラム事例について【雛形実験】を行った。一ヶ月程度をかけてモデル検査による検証を行いP社側でモデル検査による検証がどのような経過をたどるのかを理解すると同時に、我々の側ではP社が用いている仕様書の読み方を学び、P社の仕事の領域知識の初歩を身につけた。
2. 前項をいくつか繰り返した後、【目隠し実験】を行った。ここで発見すべき不具合はすべて発見し、モデル検査の効果を説得するための好材料を得た。
3. これまでは研究部門との仕事であったが、事業部での

開発過程にモデル検査を採用させるため、属人性を排したマニュアル化を行おうと考えた。そのため、事業部との共同研究に移り、【開発前実験】および【開発後実験】を重ねながら、一定日目に1モジュールの検証を終了するマニュアル作成のための検査手順の方針を作成した。その後マニュアルは事業部の技術者のみで完成させた。

この共同研究の後、P社事業部内で、モデル検査をどのように採用したかについてははっきりしたデータの提供が得られないが、大規模な採用には至っていないと推測される。

技術移転を成功させるためには、本稿で議論したような適用実験で解決できる問題以外にも、当然であるが他にも考慮しなければならないことが様々ある。例えば、研究所側としては、共同研究のできるだけ早い段階で、何がどのような形で知的財産や学術研究成果になるか、という見通しを立てておくことが重要であることを、この共同研究をとおして痛感することとなった。たとえば、上記3.でのマニュアル作成にあたって、最終的な成果物であるマニュアルは技術者のみで作成したが、これにより、技術者と研究者の情報共有が滞ることとなった。今から考えると、研究者側も、最終的なマニュアル作成も積極的に支援したほうがよかった。これらの情報は知的財産や学術研究成果としてよりも、マニュアル化して初めて価値の出るものだからである。

### 6.2 Q社への技術移転

Q社への技術移転は、Q社の技術者がモデル検査に興味を持ち、理解を示したQ社のトップが、技術者を1名、2年間にわたって産総研に移籍派遣したことに始まる。このときにQ社のトップがモデル検査の技術の有効性を証明するデータなどを一切求めず、技術者が魅力を感じるかどうかを重要視したのは印象的であった。

P社との共同研究が、マニュアル化して大量の技術者にモデル検査を広めることを意図したのに対し、Q社の場合では、1名の技術者に徹底的に技術を教え込むという、極めて属人的方法での技術移転を志すこととなった。CVS内でのいくつかの研究プロジェクトに参加し、【復元実験】や、【開発前実験】を繰り返した経験をQ社に持ち帰った。

その結果、関連共同研究終了後も当該技術者を中心に、企業間でモデル検査が研究会を結成される一方、社内でもモデル検査の教育コースを自作して教育にあたるなど、能動的な活動が見られた。

このように、同じ技術を同じソフトウェア開発という現場に適用する二つのフィールドワークでも結果は大きく異なった。これは、ソフトウェア開発現場の多様性によるものではないかと考えられる。一般に情報技術の技術移転には、フィールドワークのような質的アプローチが有効であるように思われる。情報技術を適用する対象が多様だからである。

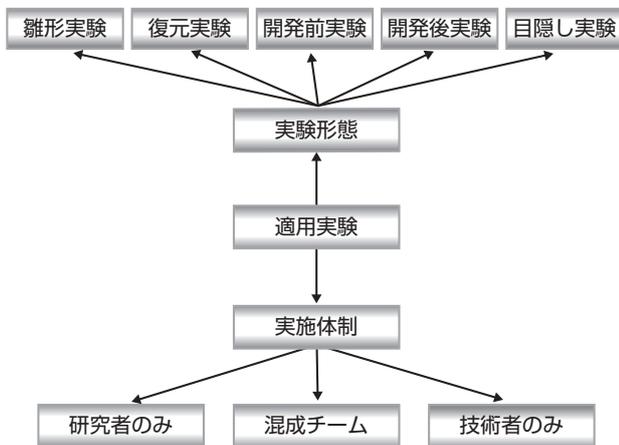


図2 適用実験の分類

## 7 議論と結論

### 7.1 課題

CVSにおいて、これまで行ってきたフィールドワークでは、不十分に終わっている研究方向も多い。本稿で提示したシナリオは、それを反映して暫定的なものにとどまっているといわざるを得ない。将来への課題が少なくとも二つある。

a) フィールドワークで得られた技術移転に関する知見に対して、さらに系統的な考察を加える余地がある。そのためにKJ法などの手法が有効ではないかと考えられる。

b) ソフトウェア開発工程の測定、定量的議論がさかんに行なわれているが<sup>[15][16]</sup>、技術移転においてそれをどのように活かしていくべきかが、課題として残っている<sup>[9]</sup>。

技術移転の一般論以外にも臨床情報学の課題がある。

臨床医学に、疾患の病因の究明、病気の成立機構の解明などの課題があるのと同様に、臨床情報学においても、リスクの原因の究明、欠陥の機構解明などの課題があり、情報科学の基礎研究との連携によってこれらを解決していかなければならない。もちろん、従来から情報システムに関するリスクは広く調べられているが、本稿に示したような情報処理の多様性と複雑さを意識したアプローチが求められる。

### 7.2 結論

本稿では、臨床情報学が対象とする三つの活動のうち技術移転について、その体系化を野外科学的方法論に基づいて試みた。川喜田氏が提唱した野外科学的手法を、我々はまだ使いこなしているとはいえない。特に、要求分析における取材に関する手法について、川喜田氏の野外科学は豊富な経験と実験に基づく体系を持っている。今後、それらの手法の情報システムの要求分析への応用などを通じて、臨床情報学の効果的な展開を図りたい。

### 謝辞

本研究は、産総研発足以来、情報科学連携研究体、システム検証研究ラボ、CVSなどにおいて行われてきた技術移転活動の経験の上に初めて可能になったものである。これらの技術移転活動に参加し、貢献されたすべての関係各社の技術者、産総研研究員の方々に感謝する。また、正副査読者として査読にあられた中島秀之教授と小林直人教授は本論文の草稿を精査され、数多くの本質的かつ構成的なコメントを寄せられた。査読過程での議論によって著者らの理解が深まった点もいくつかある。ここに記して深甚の謝意を表す。

**注1)** モデル検査は情報システム開発の科学技術の一つである。情報システム開発の科学技術一般は数理的技法、formal methodsなどと呼ばれる。その概観には参考文献[17]などを参照されたい。

**注2)** 欠陥、誤り、障害など、情報システムのディペンダビリティとリスクに関する用語については、参考文献[18]で概念整理がなされており、我々もその用語に従う。欠陥除去もそこで明確に定義されている用語で、これはいわゆる検証と呼ばれる作業を含む。

**注3)** 遷移系とは、集合（この集合の要素を状態という） $S$ とその上の二項関係 $R$ の対によって構成される数学的構造である。 $S$ の要素 $s, s'$ の間に $sRs'$ の関係があるとき、 $s$ は $s'$ へ遷移する、という。いわゆるオートマトンは遷移系に入力記号などの付加的なデータを付け加えて得られるものであり、プログラマが用いる状態遷移図は、そこで定義される状態の集合と、 $a$ から $b$ へ「遷移する」という関係からなる遷移系を定めていると見なすことができる。つまり、遷移系は、情報システムのよい数理モデルとして広く用いられている。

**注4)** このような場合、現場では明確な課題を抱えていると考えている場合もあるが、当事者が問題点の本質を理解しているとは限らず、実際には別の解決すべきもっと重要な課題があって、それを解決すると現場で抱えていると考えている課題も自動的に解決する、という場合も多い。したがって、研究者としてはまず、虚心坦懐に現場を「探検」し、観察すべきであろう。

**注5)** これは、主査読者によっても示唆された見立てである。著者らは当初異論を唱えたが、考えを進めた結果、この結論に戻るようになった。

**注6)** だからといって、これらの学問自体が主観的な議論を展開すると主張しているのではない。

**注7)** その結果、筆者らの周辺では、業績リストが貧弱に見えてしまう研究者も出現した。フィールドワークの困難さに理解を示し、学術論文中心の業績リストが貧弱に見えても、フィールドワークの形にしにくい成果を認める評価者がいることを特筆しておかなければならないが、形にならない成果は認められないとの立場をとるものも後を絶たない。

**注8)** 分子生物学などの基礎研究の訓練を受けていない臨床研究者が、臨床研究の結果を基礎研究につなげようとするとき、全体像を把握していないせいで、何年も同じ課題の周りを堂々巡りする場合がある。このような現象は、エイズをもじってペイズ（paralyzed academic investigator's disease, PAIDS）と呼ばれるという<sup>[19]</sup>。

**注9)** KJ法はまた、システムの分析（要求分析、安全分析ほか）自体の手法としても有効ではないかと思われる。例えば安全分析のために有向グラフに基づくGoal Structuring NotationやASCEなどのソフトウェアツールが用いられているが、KJ法はこれらの手法を含む、もっと範囲の広いものであるように考えられる。

### 参考文献

- [1] 川喜田二郎: 発想法, 中央公論社, 東京 (1967).
- [2] 川喜田二郎: 続・発想法, 中央公論社, 東京 (1970).
- [3] 川喜田二郎: KJ法-混沌をして語らしめる, 中央公論社 (1986). (川喜田二郎著作集, 5, 中央公論社 (1996) 所収).
- [4] 京都大学フィールド情報学研究会(編): フィールド情報学入門, 共立出版, 東京 (2009).
- [5] 木下佳樹, 高井利憲, 大崎人士: フォーマルメソッドのフィールドワーク, 情報処理, 49 (5), 499-505 (2008).
- [6] 高井利憲: システム検証技術における本格研究-数理的検証技術の実用化を目指して, 産総研TODAY, 8 (10), (2008). [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/aist\\_today/vol08\\_10/special/p16.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol08_10/special/p16.html)
- [7] 吉川弘之: 新しい科学者の役割, 岩波書店, 東京 (2002).
- [8] 吉川弘之, 内藤耕(編著): 第2種基礎研究-実用化につながる研究開発の新しい考え方, 日経BP社, 東京 (2003).
- [9] 吉川弘之: 第2種基礎研究の原著論文誌, Synthesiology, 1 (1), 1-6 (2008).
- [10] 中島秀之: 構成的研究の方法論と学問体系, Synthesiology, 1 (4), 305-313 (2008).
- [11] B. G. Glaser and A. L. Strauss: Discovery of grounded

- theory: *Strategies for qualitative research*, Aldine Publishing, Chicago (1967).
- [12] システム検証研究センター: *4日で学ぶモデル検査初級編*, エヌ・ティー・エス, 東京 (2006). (ナノオプトメディア社から再版予定).
- [13] 高井利憲, 古橋隆宏, 尾崎弘幸, 大崎人士: *環境ドライブを用いたモデル検査による検証事例*, 第4回システム検証の科学技術シンポジウム, 日本ソフトウェア科学会, 名古屋 (2007).
- [14] 崔銀恵, 河本貴則, 渡邊宏: *画面遷移仕様のモデル検査*, *コンピュータソフトウェア*, 22 (3), 146-153 (2005).
- [15] N. E. Fenton and S. L. Pfleeger: *Software metrics - a rigorous and practical approach*, PWS Publishing, Boston (1997).
- [16] 井上克郎, 松本健一, 鶴保証城, 鳥居宏次: *実証的ソフトウェア工学環境への取り組み*, *情報処理*, 45 (7), 722-728 (2004).
- [17] 荒木啓二郎: *フォーマルメソッドの過去・現在・未来—適用の実践に向けて*, *情報処理*, 49 (5), 493-498 (2008).
- [18] A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, and C. Landwehr: *Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing*, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 1 (1), 11-33 (2004).
- [19] 井村裕夫: *臨床研究イノベーション*, 中山書店, 東京 (2006).

## 執筆者略歴

木下 佳樹 (きのした よしき)

1989年東京大学大学院理学系研究科博士課程情報科学専攻修了。理学博士(情報科学)。テキサスインスツルメンツ、電子技術総合研究所を経て、現在、産総研システム検証研究センター長。本論文では、すべての章において、木下および高井が議論しながら両者で執筆した。



高井 利憲 (たかい としのり)

1996年九州工業大学情報工学部知能情報工学科卒業。2001年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程単位取得認定退学。科学技術振興機構CREST研究員などを経て、現在産総研システム検証研究センター研究員。博士(工学)。本論文では、すべての章において、木下および高井が議論しながら両者で執筆した。



## 査読者との議論

### 議論1 「臨床情報学」という名称

質問(中島 秀之: 公立はこだて未来大学、小林 直人: 早稲田大学研究戦略センター)

「臨床情報学」の意味は、本文を読めば非常によく分かるのですが、題名だけを見るとどうしても「臨床(医学)のための情報学」と理解されてしまう可能性が高いと思われます。「臨場情報学」というのはいかがでしょうか?

回答(木下 佳樹・高井 利憲)

医学以外でも、臨床心理学という語は、すでに広くいきわたっていますが、ご指摘のような誤解を避けるために当該箇所を書き直しました。臨床情報学は、システムのための医療という言い方も可能なように思います。

### 議論2 技術移転

質問(小林 直人)

本論文では、臨床医学との類比から、①状況の分析(診断)、②改善(治療)、③改善方針の決定と遂行(技術移転)の活動を臨床情報学と位置づけていますが、②の改善と③の技術移転の関係は、時間的にどちらが先だと考えればよいのでしょうか? 通常は、③が行われてから②の改善が行われるのかと思いますが、改善は研究者側が行ってしまい、その後、徐々に(あるいは改善と並行して)技術移転をしていくのでしょうか? 両者の時間関係が述べられているとよいと思います。

なお、「技術移転は臨床医学の外にある」との表現がありますが、医者と患者の間では治療や予防のアドバイスはあっても、治療技術の移転はそもそもありえない(法律で制限)と思いますが、そのような理解でよいのでしょうか。臨床医学におけるフィールドを看護師まで含めれば、技術移転はあるかもしれませんが。

回答(木下 佳樹・高井 利憲)

②は①の後ということになりますが、③は、①および②の技術を一般技術者(一般の医師)によって使うことができる形に仕上げて(改善方針の決定)、伝える(遂行)、ということですので、レベルが一段違う話だと考えております。時間的關係は特にありません。

私達が例に考えている技術移転は、研究所から一般医師への技術移転であって、患者に対するものではありません。医師免許を持つものに対する技術移転ですので、法律による制限も特になく考えられます。

箇条書きに少々説明を追加して、以下のようにしてみました。

1. 状況の分析(医療での診断に相当する)
2. 改善(医療での治療に相当する)
3. 改善方針の決定と遂行(技術移転医療の場合には研究成果を一般の医師が使える形にして、医師会などを通じて広めることに相当する。工学では技術移転に相当しよう。)

質問(小林 直人)

上記括弧内の説明はよく分かるのですが、「2.改善」の後に、「3.改善方針の決定と遂行」という言葉がくるのはやはり変な気がします。医者が患者を治療してから治療方針を決定するというのはおかしいと思います。「3.一般的改善方針の決定と遂行」あるいは「汎用改善方針の決定と遂行」などが適当でしょうか?

回答(木下 佳樹・高井 利憲)

ご指摘を受けて再考した結果、状況の分析や改善、技術移転などは、臨床情報学研究の「対象」であって、これらの活動が臨床情報学研究そのものというわけではないことをもっと強調すべきとの結論に達しましたので、問題の箇所を書き換えました。

## 議論3 「W型解決モデル」

質問(中島 秀之)

3節にW型とV型の対比が書かれています。W型はV型のループとは考えられませんか?(参考:中島秀之「構成的研究の方法論と学問体系」シンセシオロジー1巻4号)吉川モデルが間違っているというよりはその繰り返しだというのが当たっている気がするのですが。

回答(木下 佳樹・高井 利憲)

左のV字は理論をたてる発想 abduction の段階なのに対して、右はたてた理論に基づいて演繹や帰納をやる、というわけですのでループではありません。そのことを書き足しました。

吉川モデルが間違っているのではなく、発想段階の方法論などについてあまり議論されなかった、もっと言えば不十分だったというのが主張です。

質問(小林 直人)

吉川氏の提唱した本格研究の枠組みでは、W字の左側のV字が欠

けているという指摘がありました。もしそうだとすると、本格研究では研究として何をすべきか、というW字の左V字部分が既定のものとなっているとも考えられます。しかし、そのような状況は限られており、実際には研究者が社会や企業に出かけて行って状況を観察する左V字のプロセスが必要でしょう。ただ、フィールドワークとの違いは、フィールドワークでは左右のV字が常にシリアルに連結し何回もW字のプロセスを回すのに対して、本格研究では、左のV字はそう多くは行わず、ほとんどが右のV字のプロセスを回すことにより研究を推進する「左右V字の非対称性」が実態なのではないでしょうか。

回答（木下 佳樹・高井 利憲）

私達は、「研究として何をすべきかが決まっている」ということを言いたいのではなく、「研究として何をすべきか、を決める過程についての議論が欠けていた」と言いたいのです。したがって、「しかし、そのような状況は限られており、実際には研究者が社会や企業に出かけて行って状況を観察する左V字のプロセスが必要でしょう。」というのはまったくそのとおりだと思います。

ちなみに、本格研究と今回のモデルの違いは、左のV字を行う回数というよりも、上記のように、左のV字の存在の認識と、左のV字遂行の方法論の有無だと思います。本格研究に限らず、あらゆる活動において左のV字は存在しているわけですが、そこに目を向け

るかどうかが問題だと思うわけです。

質問（小林 直人）

川喜田氏の「W型解決モデル」では、特に最初のV字部分（「探検」「野外観察」「発想と統合」）が重要だと思われます。数理的技法の適用の過程では、「『社会の一定の場所に役立つのではないかという漠然とした期待』のもとにその場所に出かけ、様子を観察する」という記述があります。しかし実際には企業（クライアント）が明確な課題を抱えていて、それに対応する為に技術移転の適用を行うということではないでしょうか？あるいは、クライアントの要求は明確であるが、実際には何をすべきかが初めは漠然としているということでしょうか。もう少しその「漠然性」を説明していただけるとよいと思います。

回答（木下 佳樹・高井 利憲）

このような場合、現場では明確な課題を抱えていると考えている場合もありますが、当事者が問題点の本質を理解しているとは限らず、実際には別の解決すべきもっと重要な課題があって、それを解決すると、現場で抱えていると考えている課題も自動的に解決する、という場合も多いのです。したがって、研究者としてはまず、虚心坦懐に現場を「探検」し、観察すべきであろうと考えています。

# 製造現場における熟練技能の抽出に関する研究

## — 技能の可視化および代替に関する研究 —

松木 則夫

中小製造業の現場にある熟練技能者の技能を抽出し、後継者に円滑にその技能を継承するため、鋳造、鍛造、メッキなどの加工技術について、熟練技能者のもつ判断の技能を抽出する方法を提案する。この方法に基づき、各加工法の個別の技能について、その代替となる実際の加工現場で利用可能な計算機システムを開発した成果を報告する。また、将来の製造業における熟練技能者の在り方についても議論する。

キーワード: 技能、暗黙知、技能抽出、熟練技能者

## Acquisition of skills on the shop-floor

### – Visualization and substitution of skills in manufacturing –

Norio Matsuki

For the purpose of assisting skill transfer training in small and medium manufacturing industry, an acquisition method of judgment skills of experienced factory workers on shop-floors of metal processing such as forging, casting and plating is proposed. Several software applications based on the method have been developed and evaluated in the manufacturing factories. The future vision of skills and skilled workers in the manufacturing industry is also discussed.

Keywords: Skill, tacit knowledge, skill acquisition, skilled worker

### 1 はじめに

中小製造業の現場にある熟練技能者の技能を抽出し、後継者に円滑にその技能を継承することを目的として 2006 年から 2008 年まで実施された NEDO 事業「中小基盤技術継承支援事業」において研究開発された「技能抽出の手法」について、その研究シナリオの変遷に焦点を当てながら研究の成果を述べるのが本稿の目的である。なお、本稿に述べる内容は、NEDO 事業に参加したものの全員の成果であるため、事業のプロジェクトリーダーである筆者が代表してその概要を述べる。

本研究では、熟練技能の製造技術の物理的、工学的な側面に着目し、認知科学的、経営的な側面を極力排除したものとなった。このような技能に対する立場は、当初の研究シナリオでは明確に意図されていたわけではない。この立場を明確に意識することの意義を、迂闊にも当初は重要視していなかった。しかし、研究を進めるにしたがって、技能研究の位置づけを明確にする必要が生じた。

また、本事業は中小企業庁の補助事業でもあるため、中小企業支援が大前提である。つまり、事業のアウトプツ

トは中小企業で有効な技能継承ツールである。研究の新規性というよりは、企業現場での人気が重要な評価指標である。近年の競争的資金による研究開発は、事業終了後の市場創出への寄与度を重視する、いわゆる出口指向が一段と強化されている。基礎的な分野の研究者には大きな制約とを感じる人も少なくない。本稿では、「現場で使える技術を開発せよ」という要請が、研究開発のシナリオにどのような影響を与えたのかについても議論を行う。

### 2 対象とする技能の概要

#### 2.1 技能と暗黙知

本研究で対象とする製造に関する技能とは「理由を説明することができないが、設計から生産までの製造に関する有効な動作や判断ができる能力」と定義する。技能をスキルと呼ぶこともある。これに対立する概念として技術がある。技術とは、「動作や判断の根拠や仕組みを第三者に明確に説明でき、第三者がそれに基づいてその動作や判断を再現できるものである」と定義する。技術をテクノロジーと呼ぶこともある。熟練技能とは、長年の製造に関わる作

業で獲得された技能であって、一般に高度で有用性の高いもの、という意味で本稿では使用している。この能力をもつ製造企業の従業員が熟練技能者である。したがって、熟練技能の抽出の方法とは、技能を技術に置き換えていく方法にほかならない。これを、「技能の技術化」と呼ぶことがある。本研究における技能の抽出手法とは、技能の技術化手法ともいえる。

技能に関連した言葉として暗黙知がある。暗黙知を初めに提唱したマイケル・ポランニーは、自転車の運転方法に関する知のように言語化できない身体的な知の作用に関するものとして暗黙知を議論している<sup>[1]</sup>。一方、野中郁次郎氏のSECIモデルで使われる暗黙知<sup>[2]</sup>は「経験や勘に基づく知識で、言語表現が難しいもの」として暗黙知を定義している。すなわち、野中氏の暗黙知と本稿で定義した技能との違いは、動作に関する能力の取り扱いである。動作は当然、知識の影響を受けるため、その境界は明確ではないが、野中氏の暗黙知では、熟練技能者の手技を含めた議論はされていない。本研究で取り扱う技能は、ポランニー氏の暗黙知と野中氏の暗黙知を合わせたような知の能力に対応するのではないかと想定している。一方で、野中氏の形式知は技術の定義とかなりの程度重なる。したがって、動作の技能を除き、SECIモデルにおける暗黙知の形式知化と、技能の技術化は同義である。また、SECIモデルでは重要な働きを演じる集団の暗黙知を本研究では取り扱わない。

ところで、ある個人の暗黙知は、それ以外の人にとっても暗黙知なのだろうか。言語表現ができない、すなわち、理由を説明できないのは、ある個人だけで、すでにどこかで研究され形式知となっている場合があるだろう。これは、本研究を行う一つの前提である。材料や製造法に関する物理的、化学的、工学的な知見は膨大であり、製造現場の従業員がそれらすべてに精通しているという仮定は妥当ではないと考えるからである。というより、すでに人類が知りえた科学的工学的な知見の一部しか、個人は理解していないと考えることは自然である。本研究の前提として、多くの暗黙知、多くの熟練技能者の技能は、すでに形式知（技術）になっていると考えている。ここで、「理解していない」という言葉に、「原理は解明されているが、企業現場の現象にそれがどのように影響しているか、という『応用問題』が解けていない」というのも含めている。数値的で表現できる調査は実施していないが、企業において世界をリードする分野を専門とする技術者は、その特定の狭い分野の形式知をかなり理解しており、零細な町工場の作業者の形式知の範囲は一般に広いとは言いがたいと考えている。このような前提のため、本研究では熟練技能の

抽出の手法研究において、人類がまだ知りえていない暗黙知を解明し、その形式的な表現手法を追及することは対象外である。本来の意味での「暗黙知」を本研究では対象にしていない。

## 2.2 技能に関する従来研究

暗黙知の議論で述べたポランニー氏と野中氏の暗黙知について簡単に述べる。医学博士であり、化学博士であり、哲学者であるマイケル・ポランニーは人間の動作の中には、自転車の運転のように明示的に意識されず暗黙のうちに複雑な制御を実行する過程があり、この過程を暗黙知と呼んでいるようである。本質的に言語化できないとすると、ポランニー氏の暗黙知は形式化、技術化は不可能である。したがって、本研究では、野中氏の定義にならって「経験や勘に基づく動作で、その制御の仕組みの言語表現が難しいもの」という具合に再定義し、これを対象とする。工学的にはバイクの自動運転の制御の研究があり、自転車の運転の暗黙知の代替物としての制御機構は実現されている。このように考えると、ポランニー氏の意味での暗黙知は本研究の対象外となる。

経営学者である野中氏は、経営企業における知識マネジメント、特に日本の製造業を分析するキーワードとして暗黙知を定義し、個人と集団の暗黙知と形式知が知識スパイラルとして内容を変化させ発展させるというSECIモデルを提案した。ここでSECIとは共同化(Socialization)、表出化(Externalization)、連結化(Combination)、内面化(Internalization)の頭文字である。我々が興味をもつのは暗黙知で表現されている技能の内容そのものである。新たな状況に対応して有効に作用する熟練技能の工学的な意味内容を知ることが重要である。この意味で経営学が対象とする暗黙知とは立場が異なっている。

認知科学では、技能の獲得のメカニズムについて研究が行われてきた。例えば、Ericsson氏らは熟練技能獲得のために訓練の重要性を指摘している<sup>[3]</sup>。大変興味深い内容であるが、本研究では熟練技能者がどのように技能を獲得していったかについては対象外である。

工学的な側面では、VR(Virtual Reality)を用いた技能継承の支援の提案<sup>[4]</sup>や、企業におけるTIG溶接の技能についてデジタル化と可視化の試み<sup>[5]</sup>などの報告がある。いずれの研究もOJT(On-the-Job Training)を補完し支援する技術の研究である。

我々の立場は、前節で述べたように多くの熟練技能が形式知で表現可能ではないかと想定している。すなわち、現在までに明らかになっている形式知を使い、熟練技能を表現することが、本研究における熟練技能の抽出手法確立のための基本方針である。

### 2.3 対象とする技能の種類

熟練技能というと、マスコミは町工場で熟練工が匠の技で見事な部品を作り上げる姿を伝え、これが日本の製造業を支えている、というメッセージを送っている。この件については後に議論するが、本研究で対象にする技能は、このような動作に関する技能というよりは、主に様々な判断に関する技能である。

加工作業と対象とする製造現場の技能を整理すると次のようになる（表1）。本研究で対象とするのは、段取りなど作業開始前に実施する作業に関する技能が中心である。特に、注目するのは判断に関する技能である。判断に関する技能とは、ある動作の可否の判断だけでなく、具体的な数値を決める技能である。例えば、鍛造において、引き合いがきた部品の図面と材料から、必要となる加工圧力を推定する技能がこれに相当する。自社の加工機で製造できるかどうかの判断は鍛造業において大変重要であり、熟練技能者の判断に負うことが多い。

判断の技能を対象にする理由の一つに、本研究のアウトプットが企業現場で利用可能な技能継承ツールである、ということがある。ツール化のためには、数値を入力して何らかの数値やグラフが出力される、など計算機で実装が可能となる必要がある。このため、数値で表現できる技能を対象にする必要があり、判断についての技能が本研究の主たる対象になっている。

本研究が実施された NEDO 事業の目標は、基盤的な加工技術である鍛造、鋳造、メッキ、熱処理の4加工法を選択し、それらの加工法について、それぞれ10種類の異なった技能を選び、個々の技能を抽出し現場で利用できる技能継承ツールを開発することである。本事業は、産総研と理化学研究所との共同の事業であり、理化学研究所では切削と金属プレスを対象に実施した。なお、これらの加工法は、中小企業の基盤技術として中小企業庁が定めた中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する法律で定められた中から選定されている。

表1 加工現場における技能

| 能力分類   | 熟練技能者の能力           |                    |                    |                           |                  |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------|
|        | 段取り能力              |                    | 作業中能力<br>(感知力に基づく) |                           | その他              |
|        | 設計力                | 調整力                | 状況判断力              | 手わざ                       |                  |
| 現場技能の例 | ・加工方案設計<br>・押湯配置設計 | その日の天候に応じて添加剤の量を調整 | ・出湯タイミング「今、取り出せ」   | ・注湯作業<br>・研磨作業<br>・バリ取り作業 | 新たなトラブルに迅速に対応できる |
| 測定の難易度 | 容易                 | 比較的容易              | 比較的困難              | 困難                        | 困難               |

← 作業前      作業直前      作業中 →

### 3 研究のシナリオ

熟練技能者の技能を抽出する方法を開発する、ということは、抽出された技能は熟練技能者とは独立に、自律的に動作することを意味する。すなわち、図1に示すように熟練技能の代替物として、計算機システムを構築することに他ならない。このことは、漠然とは理解していたのであるが、実際に研究開発を実施して初めて明確に意識された。この代替物を構築することが、本研究における技能の抽出の方法論となった。本章の以下の内容は、研究を後から振り返り、辿った道筋を説明する形で述べる。

本研究では、まず熟練技能者がどのような判断を行っているのか、ということを知ることから研究を始めた。すなわち、企業における判断の事例を集め、その重要性と質を調べることから開始した。判断結果、すなわちアウトプットの収集である。次に、その判断を行うために利用したと思われる情報の総体を推定した。すなわち、判断のためのインプットの収集である。

熟練技能者が脳内で行った思考プロセスを想定することは、興味深い内容ではあるが、非常に困難である。そこで、インプットとアウトプットからそれを成立させるアルゴリズムを構築することを試みた。既知の形式知を利用して、計算機システムを構築することである。アウトプットからアルゴリズムを想定し、そのアルゴリズムを成立させるインプットを推定する。企業でのヒアリングでこれを検証し、アルゴリズムとインプットを見直す。このようにして、熟練技能者の判断の代替物を作ることが、本研究で行った技能の抽出の方法である。

このようにインプットとアウトプットしか対象としないため、熟練技能者の思考プロセスは、結果として全く考慮しないことになった。技能抽出でありながら、熟練技能者は分析対象としていない。このことを明確に認識するようになったのも、研究の終盤であった。本研究では、熟練技能者の動作観察のための機器も開発しており、常に熟練技能者を観察しているという気になっていたが、実際にはそうではなかった。判断の技能と制御の技能という、異なる

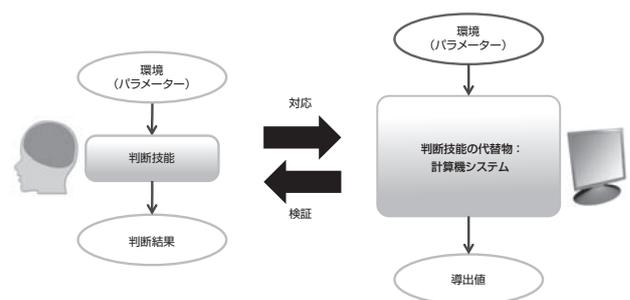


図1 判断技能の抽出モデル

技能の抽出の方法論の違いについての考察が、研究の初期段階では不十分であった。

経営学的な視点における暗黙知や技能に関する研究が、熟練技能者の役割やその知の創造過程に留意しているのと対照的に、我々の工学的な研究の立場は技能そのものに着目した。しかし、経営学的な研究も我々の方法も、熟練技能者の思考過程は考慮していない、という意味で同じであった。残された暗黙知の脳の問題は、認知科学や脳科学の課題と考えられる。

#### 4 研究の成果

本章では、最終的に整理された技能抽出の方法について述べる。正確にいえば、抽出するための枠組みを示す。この枠組は、抽出したい技能があったときに、その抽出を容易にするような技能抽出のメタ構造を提案できていない。しかし、技能の抽出を行う上で、そして、将来の製造業における熟練技能者の意味を考える上で、新たな視点を与えることはできたのではないかと考える。

##### 4.1 全体の構成

本研究の成果は図2に示すように整理できる。代替物としての計算機システムは、判断値を出力するための導出モデルをもつ。導出モデルは、作業環境から測定あるいは導出可能ないくつかの値を入力として判断値を算出する導出アルゴリズムから構成される。

この導出モデルを検討して明らかになった熟練技能者の優れた点は、「問題の簡略化の能力」であると考えられる。たとえば、鍛造では、対象とする製品を製造するために必要となる圧力を算出することが熟練技能者の重要な役割である。このとき、加工圧力を求めるという視点で、複雑な製品形状を熟練技能者は簡略化し類型化しているようである。これにより、考慮すべきパラメーターは大幅に削減し、

自社の加工機で鍛造可能かどうかを判断するために十分な精度で答えを出している、と推測される。我々が構築した代替物としての導出モデルは熟練技能者とは異なったものであるが、複雑な現象を簡略化しているという点において類似性がある。本研究を進める中で、このように物事を単純にして必要な精度の答えを迅速に出すことができる、というのが熟練技能者の大きな特徴であり、また、その単純化のプロセスを発見する能力こそが、熟練技能者の真の価値ではないだろうか、と考えている。

代替物の導出モデルも、この簡略化が重要である。現場の環境は複雑で、関連する要因の影響を全て考慮すると非常に複雑かつ不安定なシステムになることが多い。これら要因の中から、現時点で本当に優位な因子を選択して判断を行うことができるように、導出モデルを構築する必要がある。また、簡単な入力で有効な結果が得られる、ということは現場での操作が容易であることを意味する。「現場で使える技術を開発せよ」という制約は、実は、この簡略化を発見する上で重要な役割を果たしているように思われる。研究において現場で使えるという制約は、実は研究活動を健全にする上で有効であった。

これらの視点を踏まえて作成した技能継承ツールを見ると、いくつかの類型に整理できることが分かってきた。以下、その類型を説明する。

##### 4.2 理論式による導出

冷間鍛造の処理では、金属を高圧でプレスして求める部品形状を作製する。この金属の変形の過程で、図3に示すような変形抵抗と拘束係数が重要な役割を果たしていることが知られている。また、部品形状はそれぞれ異なった形状をしてはいるが、鍛造圧力という視点で見るといくつかの類型に部品形状をあてはめることで、十分有効な近似値を得ることができる、ということが様々な経験から推測

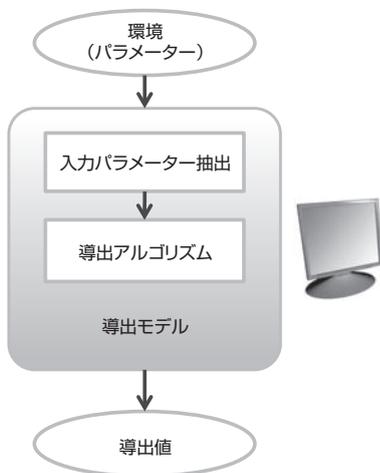
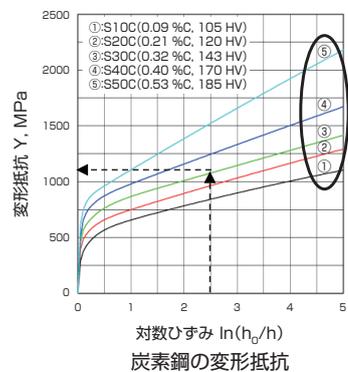
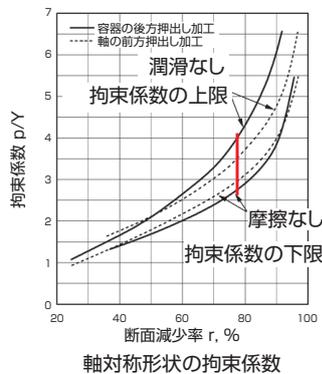


図2 判断技能の対応物の構造



$$\text{加工圧力} = \text{拘束係数} \times \text{変形抵抗}$$

図3 鍛造における加工圧力算出モデル

できた。材料も鉄を基準にして物性値を想定することでマグネシウムやアルミニウムの材料に適用可能であることが分かった。

これらの企業の経験と金属塑性の知識、さらに作成すべき部品の図面情報と材料から、冷間鍛造で必要となる圧力値の導出モデルが作成できた。これを計算機システムとして実装したもののインタフェースを図4に示す。鍛造中の被加工物の温度上昇についても導出モデルを作ることができた。

このように、加工圧力が拘束係数と変形抵抗の積で表現されるといった理論的なモデルと、経験に基づいた製品形状の簡略化モデルを融合することで、従来、熟練技能者の判断に頼っていた判断値を代替する計算機システムを構築することができた。さらに、この計算機システムには、実際に加工したときの圧力計測値を入れ、蓄積することができる。これにより、工場環境あるいは加工機械の特性と思われる値を推定することもできる。

この計算機システムは冷間鍛造シミュレーションの一種である。技能の継承において、この冷間鍛造シミュレーションは次のような役割を果たすことができる。まず、熟練技能者の代替物として利用することができる。仮にこのシミュレーションが完璧ならばそれで終りであるが、実際は材料も潤滑剤も時代とともに変化する。状況が変化すると以前と同じ処理では正しい結果が得られない。そこで後継者

は、このシミュレーションの元になる導出モデルとアルゴリズムそのものを理解する必要が生じる。計算の手順と原理を理解することで、新しい状況に対応することが可能となる。競争の激しい製造業において、昔と同じ作業ができるだけでは不十分で、新たな課題に対応できる能力が求められている。この意味で原理と処理内容が明らかになったシミュレーションは、技能継承を支援する大変有効な手法の一つであると考えられる。

#### 4.3 実験式による導出

鍛造では金属の凝固プロセスが重要な役割を果たす。鍛造技術とは、この金属凝固のプロセスを制御しつつ精度の良い形状を作成する方法といえる。このため、部品の詳細形状、製造条件や温度環境、鑄型の湿度や温度、溶融した金属の諸性質など、膨大なパラメーターを入力することで理論的な導出はある程度可能である。しかし、作業現場でそれらを測定し入力して理論式から求めるシミュレーションを導入することは大変困難である。また、鍛造では一回の注湯作業で何個の部品を作成できるか、ということが生産効率、結果としてコストに大きく影響する。品質だけを重視しては企業運営はできない。

このような諸条件を考慮すると、シミュレーションという形態ではなく、ある程度の推測に基づく実験式作成のアルゴリズムを含んだデータの取得と蓄積の仕組みが有効と考えられた。同様に、熱処理においては処理中に材料が変

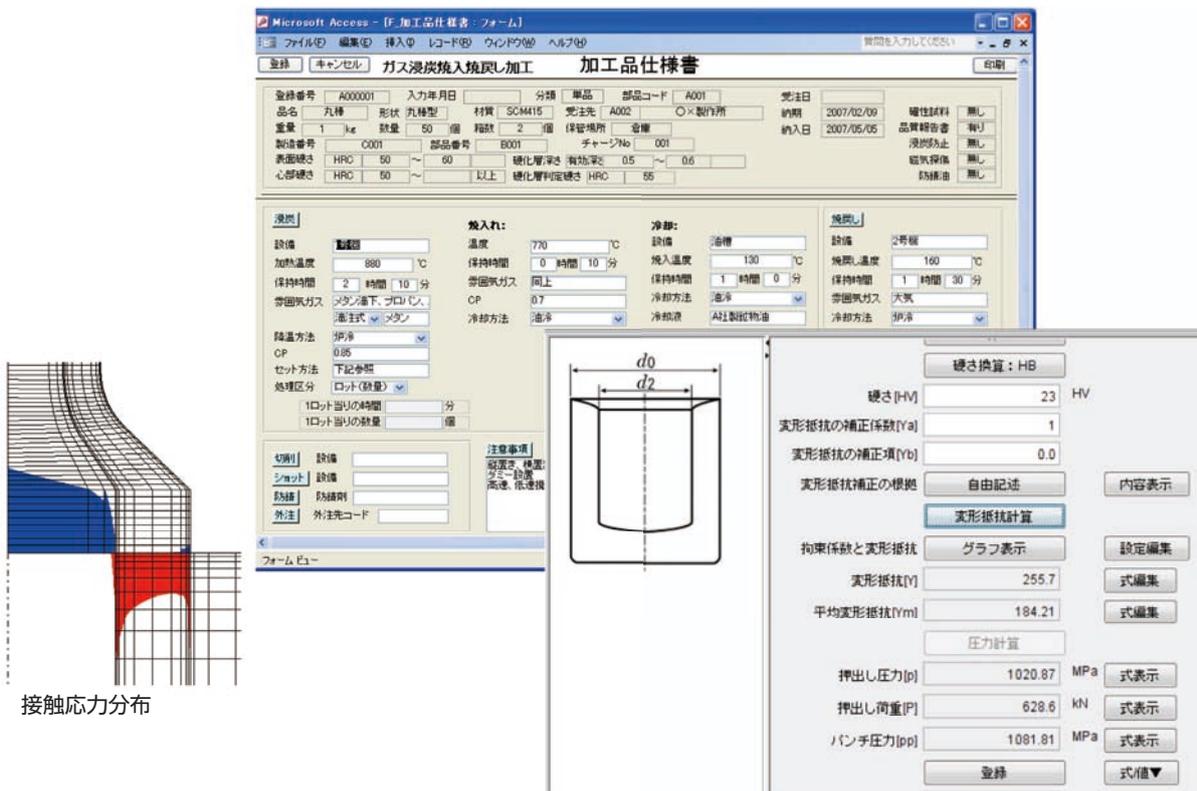


図4 判断技能に対応するシステム例

形する。その変形の度合を推定することも重要である。このためには、事前に研究所や企業で実験を行い、その曲がりの程度とそれを支配する主なパラメーターを想定し、その実験式を作成する必要がある。熱処理の曲がり予測という熟練技能の代替物として実験式に基づく導出モデルを採用した(図5)。

新しい状況に対応するために、後継者が実験式を導出モデルとする方法を発展させる必要がある。このためには、実験式の背景にある金属材料に関する物理的な知識の獲得と、どのような簡略化を実施しているのか、という工学的理解が必要である。これが、後継者が継承すべき技術化された技能であると考えている。

#### 4.4 データマイニングによる導出

製造業において、様々なトラブルへの対応というのは重要な技能である。メッキでは、発生したメッキの不具合を整理し、その不具合の原因と思われる候補群と、過去に実施した是正処置との関係を取得、蓄積する仕組みを構築した。

トラブルを類型化し、実際にトラブルが起こると、起きた不具合がどの類型に対応するかを判定し、不具合が発生した状況を付帯的なパラメーターとして、過去のデータを検索して対処する。これは、一種のデータマイニングである。すなわち、理論式も実験式も推定できないが、過去の膨大なデータから適切な情報を得る方法である。本研究では実施していないが、クラスタ分析、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズムなども有効になる可能性がある。鋳造では、過去の事例を検索するために、図6のようなインタフェースをもった検索手法を利用している。これは、セ

ンターで開発したイーグルサーチという手法で、検索キーを柔軟に変更できる特徴を持っている。

導出モデルがデータマイニングによるということは、対象としている導出モデルが十分に解明できていないということを示している。起きたトラブルから、常にその原因を理論的に追及し、対応関係が明らかにできるのであればデータマイニングではなく理論的な導出モデルを構築できる。しかし、実際のトラブルには、理論的な追及ができない、再現性がない、再現するためのコストが膨大でとても追及できない、ということが少なくない。このため、トラブル対応の技能については、過去の事例と解決方法の関係を蓄積し、それらを検索するデータマイニングによる方法は有効である。

以上、3種類の導出モデルを示したが、これらを比較すると、理論式に基づく方法が最も有効であり信頼性も高いと考えられる。それは、導出方法を理論的に説明できるからである。実験式による方法は、前提となるパラメーターとその相互関係が明らかになっているという点で、理論式に基づく方法の次に信頼性があるように見える。データマイニングによる方法は、因果関係が不明であるため最も信頼性が低いと思われる。したがって、導出モデルを常に見直し、できるだけ理論式に基づく方法に向かうことが望ましいと考える。

ただ、これらの方法の差は明確とはいえない面もある。理論式による導出と実験式による導出の差は、理論化が成されているか否かの違いである。データマイニングも、問題領域の次元が明らかになり、データが蓄積されれば実

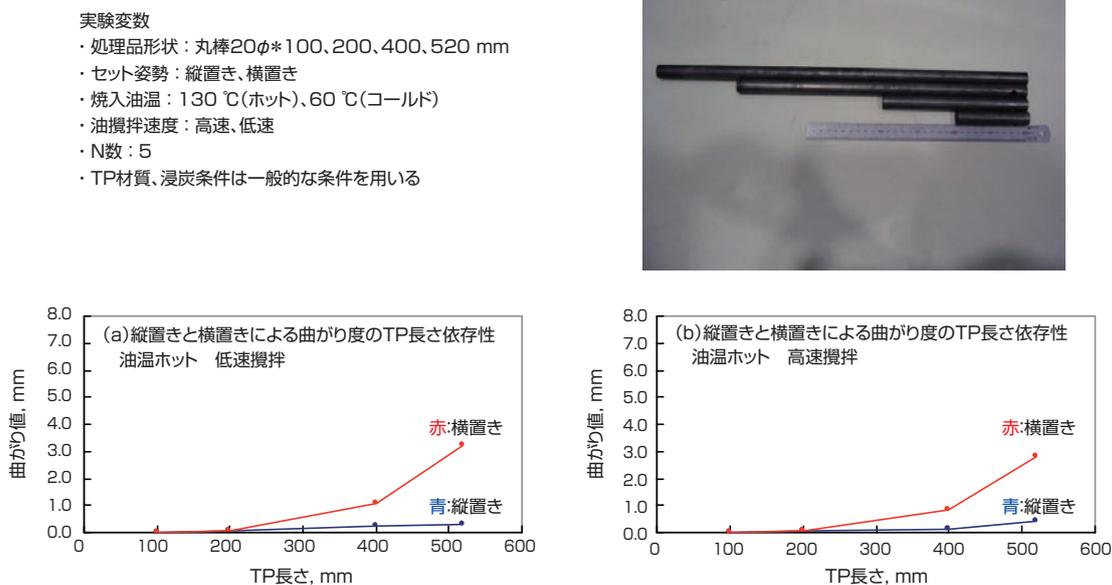


図5 熱処理における実験式の導出例

験式の推定も可能であろう。本研究成果を利用するとき、状況の変化に応じて導出モデルそのものを見直し、より信頼性の高い方法を探り続けることは有効であると考ええる。

#### 4.5 その他の導出法

判断技能については、上記の三つの方法が典型的であると考ええる。しかし、継承すべき技能は判断技能以外にもある。理化学研究所が担当した金属プレスにおいては、対象とする部品種類に応じて、採用すべき加工法案が異なる。すなわち、部品の特徴から加工法案を選択する技能、選択された加工法案において留意すべき点とその検討方法などが最も重要な熟練技能である。加工法案設計の選択は、単純な判断の連鎖というには複雑過ぎる。本事業ではメタフローモデルの作成による技能継承に取り組んだが、上記の三つの方法論の範囲で議論することは困難である。これは、今後の研究課題である。

#### 4.6 熟練技能者の動作計画

熟練技能者の動作に関する技能については、本研究で次のような取組みを行った。一つは鑄造における注湯作業の可視化である。図7のように、注湯を行うときに使用する取鍋（とりべ）の付け根にひずみセンサーを取り付け、溶融した金属の流量を測定する装置を開発した。これにより、「はじめは早く、途中はゆっくり、最後は押し込め！」と現場で云われている熟練技能の可視化を行った。

可視化は可能になったが、作製する部品の個数や部品を連結する形状などの状況により微妙な調整が行われていることが分かっていて、その制御のメカニズムは単純ではない。動作の解析のためには、何をどのように制御しようとしているのかの熟練技能者に対する、聞き取り調査と、実際の溶融した金属の流量や温度の関係の解析を行うことで、はじめて動作の意味が判明する。このように、動作の技能の解析は、制御の意味を明らかにすることが本質的に必要であるが、本研究においても、類似の溶接動作の研究においても、まだその段階には至っていない。

### 5 将来の製造業における技能

熟練技能者の判断技能の抽出のための研究シナリオと成果について議論を行い、判断技能と動作の技能の可視化の例について述べた。このような研究が進めば、企業における熟練技能者は不要になるのであろうか。将来の熟練技能者の育成、熟練技能の在り方を議論したい。

熟練技能の問題は、中小企業だけではなく大企業における問題でもある。例えば、自動車産業において塗装や溶接はほとんどロボットが行っている。動作の設定は、ティーチングと呼ばれる方法であり、その動作を決めるのは熟練技能者であった。しかし、実際の現場がロボット化することで熟練技能者の職場が無くなり、気がついてみると新しい材料、新しい塗料に対して適切な塗装条件や溶接条件を決められる人材が見当たらない、という問題に直面している。これは、企業がそれらの動作の制御の仕組みが十分理解できていない、ということに由来している。

理論式による導出のところで議論したように、判断技能の継承における後継者が、その動作の物理的工学的な意味を十分理解することが重要である。将来の熟練技能者は、少なくとも関連する分野において十分な工学的な知識をもった上で、判断や動作を行う必要があると考える。自らの動作を客観的に観察するとともに、自分自身が熟練技能者として、新たな環境に適応して、新たな技能を創出する役目を担うべきであると思われる。すなわち、現場における高度なエンジニアであることが熟練技能者の将来像ではないだろうか。

十分に解析された技能は技術化され、ロボット等による自動化を行い、自らは次の課題に取り組む。このようなエンジニアとしての役割こそが将来の技能者の姿であると筆者は考える。企業も、社会も、このような人材の地位、収入において優遇することがなければ、現在優位であるといわれている日本の製造業の未来が心配である。

現在の熟練技能者のもつ技能は、「金の卵」といわれて

| 欠陥事例検索            |   |
|-------------------|---|
| Select            | List  |
| 外観:               | 外観の穴   微細な孔   外観の凹凸   外観の線状欠陥   形状が不完全   異物混入   その他   |
| 工程:               | 鑄造後   加工後   |
| 発生位置:             | 全体   堰・押湯近傍   肉厚変動・交差部   中子接触部   冷し金接触部   |
| 材質(CAC**):        | 100   200   300   400   500   600   700   800   900   |
| 名称:               | 引け巣   湯廻り   フロ噛み   砂落ち   吹かれ   堰前引け   外引け   隅引け   内引け巣   ピンホール   ブローホール   ざく巣   収縮巣   砂噛み   錆こぶ   異物噛み   型ずれ   型割れ   打痕   亜鉛噛み   焼きつき   すくわれ   肌あれ   差込   面引け   湯境   熱間割れ   引き割れ   引け割れ   割れ   錆バリ   くいち   身食い   入れ干し   中子割れ   酸化物   非金属介在物   錫汗   汗玉   偏析   年輪模様 |
| 原因:               | 鑄物砂   中子   方案   造型   材料   溶解   注湯作業   冷却  |
| 対策:               | 鑄物砂   中子   方案   造型   材料   溶解   注湯作業   冷却  |
| 種別:               | 標準   社内例登録   社内例参照   統計データ  |
| 266件のデータが選択されました。 |   |
| リセット              |   |

図6 データマイニング操作画面例

地方から都会に上京し、その中の優秀な人材が長い時間、必死に働いた成果である。高校卒業生を技能者、大学や大学院卒業生を技術者として分けて育成する製造業の時代は終焉を迎えていると思われる。同時に、町工場における匠の技が日本の製造業を支えるというマスコミのメッセージも修正が必要であろう。要求精度とコストの関係において、それらの果たす役割は決して小さいものではないが、匠の技のイメージを増幅しても、何ら将来を切り拓く原動力とは成り得ないとする。

最後に、熟練技能は誰のものであるか、という議論を行う。青色ダイオードを契機に企業研究者の発明について、その帰属に対する考え方が整理されてきているが、熟練技能者のもつ技能の帰属については、整理されているとはいえない。必死に生み出した加工技術の技能が技術化されたとき、熟練技能者には何も残らないのであろうか。企業OBが海外の企業に招聘され現地教育を行うことによる技能流出が近年問題にされているが、技能の帰属についての議論を初めに行うべきであろう。様々な関係者が参加して議論を深める必要があると考える。

## 6 おわりに

熟練技能の抽出に関する研究の研究シナリオの概要と、研究結果について述べた。本研究で得られた成果は、

- (1) 技能抽出のため、技能を代替する計算機システム構築による方法を提案したこと、
- (2) 代替する計算機システムとして、理論式に基づくもの、実験式に基づくもの、データマイニングによるものがあることを示したこと、

である。また、将来の製造業における熟練技能の在り方についても議論を行った。

デジタルものづくり研究センターでは、「ものづくりを科学する」ということを目標として研究を行ってきた。熟練技能の抽出手法と可視化の研究開発は、熟練技能とものづくりの関係を、今まで以上に明確にできたのではないかと考えている。

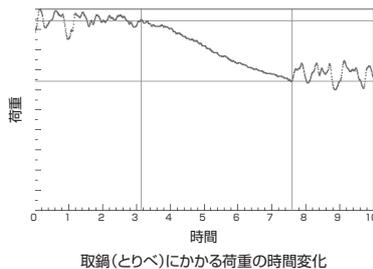


図7 铸造における熟練技能とその可視化

## 参考文献

- [1] P. Michael: 暗黙知の次元, 筑摩書房 (2003). (原著 “*The Tacit Dimension*”, 1966).
- [2] 野中郁次郎ほか: 知識創造企業, 東洋経済新報社 (1996).
- [3] K. A. Ericsson, R. T. Krampe and C. T. -Romer: The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance, *Psychological Review*, 100 (3), 363-406 (1993).
- [4] 綿貫啓一: VR技術を用いたものづくり基盤技術・技能における暗黙知および身体知の獲得, *人工知能学会誌*, 22 (4), 480-490 (2007).
- [5] 浅井知ほか: 溶接技能のデジタル化と溶接士支援システムへの展開, *溶接学会論文集*, 20 (1), 185-190 (2002).

## 執筆者略歴

松木 則夫 (まつき のりお)

1980年早稲田大学理工学研究科数学専攻修士課程修了。日本ユニバック(現日本ユニシス)を経て、2000年に工業技術院機械技術研究所入所。博士(工学)。2001年産業技術総合研究所ものづくり先端技術研究センターシステム技術研究チーム長。2006年よりデジタルものづくり研究センター長。専門は形状モデリングであるが、センターでは、加工技術、技能継承技術、ものづくりを支援するIT技術の研究開発プロジェクトを率いる。



## 査読者との議論

### 議論1 本論文の構成

質問(上田 完次: 産業技術総合研究所)

本論文のタイトル・目的・方法・成果・主張は、NEDO事業研究「技能抽出の手法」と全く同じなのか、前者は後者の一部なのか、あるいは別の視点から考察し直したもののかが不明です。

回答(松木 則夫)

本論文は、研究シナリオの紆余曲折という視点で、NEDO事業研究「技能抽出の手法」を述べたつもりです。ただ、その視点がどの時点のものであるかは曖昧となっていましたので書き直しました。

### 議論2 現場に即したシナリオの設定変更

質問(五十嵐 一男: 産業技術総合研究所生産計測技術研究センター)

当初想定したシナリオを現場の要望を無視して実行することはできない故に、当初のシナリオ以外の方法も許容して、有効なツールに専念することに方向転換をした、と記述されていますが、変化要因の内容から推定すると、ここで記載されている事項は、プロジェクト提案時の検討対象として当初から調査・議論されていなければならない重要なもののように思えます。

回答(松木 則夫)

ご指摘のとおり、事前調査すべき内容であったと思います。ただ、企業における技能の実際の状況は複雑で、プロジェクトを開始しなければ判らなかったことが多数ありました。本研究では、当初の想定でも十分有効な現場で活用できるツールになったと思いますが、開始後の状況に応じてシナリオを変更したことが、さらに良い結果となったと考えています。

### 議論3 構成要素の明確性

質問(上田 完次)

導出モデルに関して「導出モデルとして、理論式・・・、実験式、・・・データマイニング・・・がそれに続く」の内容は、本研究で得られた

結果ですか、それとも仮説または自明のことでしょうか。

回答（松木 則夫）

これらは本研究の仮説です。できれば技能の研究を続け、この仮説の検証を続けていきたいと思えます。

#### 議論4 熟練技能者の将来像

質問（五十嵐 一男）

結論として、判断技能に関しては、熟練技能者を継承することは十分な工学的な知識を持った上で、判断や動作を行う必要がある。また、現場における高度なエンジニアであることが熟練技能者の将来像としている。確かに、ここでの結論は1つの方向ではあると考え

ますが、人材確保の観点から、中堅・大企業には当てはまっても本研究が対象とした中小企業において必ずしも当てはまる状況ではないように思いますが、本論文のように一律的に結論を置くことは妥当でしょうか。

回答（松木 則夫）

製造業においては、企業規模に関係せず世界との競争下にあります。極端な結論のような印象があるかもしれませんが、中小零細企業においても、従来のような単純労働者の雇用の場という時代では無くなってきている、このような方向にならざるを得ないのではないかと考えています。

# 暗号モジュールの安全な実装を目指して

## — サイドチャネル攻撃の標準評価環境の構築 —

佐藤 証\*、片下 敏宏、坂根 広史

近年、暗号アルゴリズムを実装した暗号モジュールの利用が急速に拡大しており、その実装の安全性評価手法の標準化と、公的機関による評価・認証制度の確立が求められている。特に、暗号モジュールの消費電力や電磁波を解析して、その内部の秘密情報を盗み出すサイドチャネル攻撃が大きな注目を集めている。しかし、各研究機関における独自の実験環境が、その解析結果の追試や評価手法の標準化を妨げていた。そこで我々は、サイドチャネル攻撃の標準評価環境として暗号ハードウェアボードおよび解析ソフトウェアを開発し、世界中の研究機関での利用を進めながら、国を超えた産学官連携により、国際標準規格策定への貢献を行っている。

**キーワード:** 暗号モジュール、暗号回路、サイドチャネル攻撃、差分電力解析、故障利用解析攻撃、安全性評価手法、SASEBO

## Secure implementation of cryptographic modules

### – Development of a standard evaluation environment for side channel attacks –

Akashi Satoh\*, Toshihiro Katashita and Hirofumi Sakane

The use of cryptographic modules is rapidly expanding throughout the world. Because of this, it is necessary to standardize a security evaluation scheme and to establish a public evaluation and validation program for these modules. Side channel attacks, which extract secret information from the cryptographic module by analyzing power consumption and electromagnetic radiation, are attracting a lot of attention. Research activity on such attacks has intensified recently. However, it is difficult to compare evaluation schemes proposed by different researchers because of differences in the experimental platform or environment. This makes it difficult for other researchers to repeat and verify the results. Therefore, we have developed cryptographic hardware boards and analysis software to serve as a common, uniform evaluation platform for side channel attacks. We have distributed this platform to government, industry, and academic research labs throughout the world in order to facilitate the development of an international standard.

**Keywords:** Cryptographic module, cryptographic hardware, side channel attack, differential power analysis, fault injection attack, security evaluation scheme, SASEBO

### 1 はじめに

ブロードバンド・ネットワークの急速な拡大と、高性能・高機能な情報家電そして IC カード・RFID タグの普及により、ユビキタス情報社会が到来しようとしている。また一方で、生活のあらゆる場面において大量の情報がやりとりされるため、通信データの盗聴や改ざんといったセキュリティ上の脅威が顕在化していることも事実である。暗号はそのような脅威へ対抗するために欠かすことのできない基礎技術であり、民生品への利用が進むにつれて、アルゴリズムの論理的解析だけでなく暗号 LSI などの実装法の安全性に関する研究が活発に行われている。その中でも、LSI の動作時の消費電力や電磁波そして処理時間などを観測し、そこに漏れている情報から対象物を破壊することなくその内部の鍵を推定する物理的な攻撃が大きく注目され

ている。これは、本来の入出力チャンネルでないチャンネルの情報を用いるため、サイドチャネル攻撃と呼ばれる。現在、サイドチャネル攻撃に対する安全性評価の国際規格策定作業が進められているが、IC カードメーカーなどの企業に評価実験のための暗号製品の提供やその情報公開を求めることは困難であり、大学などの独自環境における実験結果を第三者が追試することも難しい。そこで産業技術総合研究所（以下、産総研）では、公的研究機関という中立的な立場からこの標準化活動へ貢献することを目的に、標準実験環境の整備と、さまざまなサイドチャネル実験に関する情報の公開を行っている。また、国内外の公的研究機関、企業、大学と、暗号モジュールの安全性評価制度の運用に向けた連携を進めている。本稿では、まずこれら標準化活動の全体像を示し、その中で我々の役割を明らかにす

産業技術総合研究所 情報セキュリティ研究センター 〒101-0021 千代田区外神田 1-18-13 秋葉原ダイビル 1003  
Research Center for Information Security, AIST Akihabara Daibiru 1003, 1-18-13 Sotokanda, Chiyoda-ku 101-0021, Japan \* E-mail: akashi.satoh@aist.go.jp

Original manuscript received November 30, 2009, Revisions received January 8, 2010, Accepted January 21, 2010

る。そして、サイドチャネル攻撃の標準評価環境構築への取り組みと、その環境における実験を通してサイドチャネル攻撃の現状を示す。さらに、より高度な技術が必要とされる故障利用解析や破壊攻撃の研究、セキュリティに加えてエラーや故障に対するシステムの信頼性・安全性確保に向けた今後の研究についても展望する。

## 2 暗号の利用拡大と安全性評価

### 2.1 暗号アルゴリズムの標準化

人類が文字を発明し、伝聞によらない遠隔地への情報伝達や、知識の蓄積が可能となると、その情報や知識を第三者に漏らさないためのさまざまな方法が考案されるようになった。その一つが暗号技術である。そして、暗号アルゴリズムとその解読手法は特に戦時下において急速な進歩を遂げた。推理小説やサスペンス映画に登場する暗号は、当事者だけが知る秘密のアルゴリズムが使用されており、情報セキュリティの分野における暗号とは異なる謎解きといったものが多い。しかしそのような暗号は、アルゴリズムや謎解きの秘密がわかってしまうと解読されてしまう。

これらに対し、現在利用されている暗号は、同じアルゴリズムでも、毎回異なる秘密の鍵をセットすることで、同じ文章でも異なる暗号文に変換することが可能である。したがって、一つの鍵が漏れてしまっても、他の鍵で暗号化した文章の秘密を守ることができる。第二次世界大戦においてドイツ軍が使用した機械式暗号装置の「エニグマ」も、その動作原理であるアルゴリズムと、装置の初期設定である鍵とが分かっている。しかし、その動作原理にも暗号解読にとって重要な手掛かりが含まれているため、鍵の管理だけでなく装置自体も守る必要があった。

戦後、銀行業務や政府関係の情報守秘にも暗号が利用されるようになったが、そのきっかけは1977年に米国標準技術研究所(NIST: National Institute of Standards and Technology)が連邦標準として制定したDES(Data Encryption Standard)<sup>[1]</sup>である。それまでの暗号の多くはエニグマのようにアルゴリズムと鍵の分離が明確でなく、特殊用途であったためアルゴリズムが積極的に公開されることがなかったが、DESはアルゴリズムを公開した画期的なものであった。また、同年には、マサチューセッツ工科大学のRivest、Shamir、Adlemanの3人が暗号化だけでなくデジタル署名という用途にも利用できるRSA暗号<sup>[2]</sup>(3人の頭文字を取って名付けられた)を考案している。DESは暗号化と、暗号文を元に戻す処理の復号に同じ鍵を用いるので「共通鍵暗号」と呼ばれる。これに対して、RSA暗号は暗号化と復号に異なる鍵を用い、暗号化の鍵は公開しても安全なため「公開鍵暗号」と呼ばれる。

暗号は90年代まで軍事技術に相当するものと見なされ、使用や輸出入に厳しい制限が課せられていたが、2000年前後から次第に規制緩和され、用途に応じたさまざまな暗号アルゴリズムが民生品に利用されるようになった。また、暗号解読法の進歩やコンピュータの計算能力の飛躍的な向上に伴って、DESの安全性に問題が生じてきたことから、2001年にAES(Advanced Encryption Standard)<sup>[3]</sup>が米国連邦標準として制定され、その後、さまざまな国際標準にも採用されている。AESの標準化においては世界中から暗号アルゴリズムを募り、3回の標準化会議<sup>[4]</sup>という公開の場において、専門家によるアルゴリズムの安全性や実装性能の評価が行われた。

AESプロジェクトを機に、日本の電子政府推奨暗号の安全性評価プロジェクトCRYPTREC(Cryptographic Research and Evaluation Committee)<sup>[5]</sup>や、欧州のNESSIE(New European Schemes for Signature, Integrity, and Encryption)<sup>[6]</sup>、そしてISO/IEC 18033<sup>[7]</sup>など、さまざまな暗号アルゴリズムの評価・標準化作業が進められた。かつてはアルゴリズムを秘密にすれば攻撃者に与える手掛かりが少なく済むという考えもあったが、何らかの経路で漏れたり、リバースエンジニアリングで解析されたりした独自アルゴリズムが、簡単に破られてしまうといったことがしばしば起きている。そのため通常、標準の暗号アルゴリズムはAESのように公開され、標準化の後にも安全性検証のためのさまざまな解析が世界中で続けられている。

### 2.2 暗号実装の安全性評価

標準暗号は専門家による安全性の検証が十分に行われているため、独自仕様の秘密アルゴリズムのように突然欠陥が露呈するような心配はまずない。しかし、安全なアルゴリズムを用いても、そのソフトウェアやハードウェアによる実装の欠陥から暗号の鍵が漏洩してしまうことがある。また、安全な実装が行われているかどうかを、利用者が検証することもほぼ不可能である。そこで利用者に代わって、公的機関がセキュリティ製品や暗号製品の安全性を評価するための国際規格として、ISO/IEC 15408(Common Criteria)<sup>[8][9]</sup>やISO/IEC 19790<sup>[10]</sup>が定められている。

ISO/IEC 15408は暗号製品を含む情報セキュリティ製品全般を対象としており、開発者が定めたSecurity Target(ST)に従って正しく実装されているかどうかを検証される。検証の深さを示す7段階のレベルEvaluation Assurance Level(EAL)は、EAL 1~4が商用、EAL 5~7が軍や政府最高機密機関用と大まかに分類されるが、これは製品がSTに沿ってどれだけ正しく実装されているかを示すもので、セキュリティの強度を表している

はないことに注意が必要である。ISO/IEC 15408 のセキュリティ評価は論理的な機能を中心に構成され、物理的セキュリティ機能、つまりハードウェアに関する記述が十分ではない。ハードウェアは安全に管理されるという前提を置く場合も多いが、暗号ハードウェアモジュールの代表である IC カードを攻撃者が解析する場合、この前提条件は成り立たない。そこで、欧州を中心とする IC チップメーカー、ユーザー、評価機関、認証機関から構成される作業部会である JIL (Joint Interpretation Library) Hardware Attacks Subgroup (JHAS) によって、IC カードの物理セキュリティが定義された補助文書<sup>[11]</sup>が作成されている。JIL は IC カードに対する具体的な攻撃・防御法の知識や技術の蓄積を行っているものの、その詳細を一般に公開することはない。

ISO/IEC 19790 は米国の連邦標準 FIPS (Federal Information Processing Standard) 140-2<sup>[12]</sup>を基にした国際規格で、暗号を組み込んだソフトウェア、ファームウェア、ハードウェアで構成される暗号モジュールを対象に、10 項目のセキュリティ要件が定められている。また、セキュリティ要件に対する試験項目は別途、米国の DTR (Derived Test Requirements)<sup>[13]</sup>をベースに ISO/IEC 24759<sup>[14]</sup>として規格化されている。ISO/IEC 24759 に基づいて行われるモジュール試験では、10 項目のセキュリティ要求それぞれに対して 1～4 のレベル付けが行われ、その中で最も低い数値がモジュール全体のレベルとして与えられる。ISO/IEC 15408 と大きく異なるのは、レベルがセキュリティの強度を示す点である。

国内では、独立行政法人情報処理推進機構 (IPA<sup>®</sup>: Information-Technology Promotion Agency) が認証機関として、ISO/IEC 15408 に基づく「IT セキュリティ評価および認証制度 (JISEC: Japan Information Security Evaluation and Certification Scheme)」<sup>[15]</sup>および、ISO/IEC 19790 の一致規格 JIS X 19790「暗号モジュールセキュリティ要求事項」に基づく「暗号モジュール試験および認証制度 (JCMVP<sup>®</sup>: Japan Cryptographic Module Validation Program)」<sup>[16]</sup>を運用している。

FIPS 140-2 が制定されてから既に 8 年以上が経過し、暗号モジュールの内部動作をさまざまな物理的手段で観察して秘密の鍵を導出するサイドチャネル攻撃の脅威が高まってきたことから、NIST は 2005 年から FIPS 140-3 への改定作業を始め、2007 年 7 月に FIPS 140-3 の 1st ドラフトを公開した<sup>[17]</sup>。ISO/IEC 19790 も今後、これと並行して改定作業が進められる予定である。国内では、CRYPTREC の中で、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT: National Institute of Information and Communications Technology) と IPA による暗号実装委

員会と、その下のサイドチャネルセキュリティ・ワーキンググループで、実装の安全性評価ガイドラインに関する検討が行われている。

標準化活動だけでなく学術の分野でもサイドチャネル攻撃は大きな注目を集めており、情報セキュリティやハードウェアに関する国際学会において、数多くのセッションが開催されるようになってきている。その中でも特に知名度の高い、暗号ハードウェアとシステム実装を専門とするワークショップ CHES (Cryptographic Hardware and Embedded Systems)<sup>[18]</sup>でも、発表の多くがサイドチャネル攻撃に関するものである。

### 3 ハードウェア実験環境の統一と評価手法の標準化

#### 3.1 研究の位置づけ

産総研では、情報ネットワーク社会の発展を支える基盤技術の一つとして、暗号ハードウェアの研究を進めている。その中で、暗号ハードウェアのさらなる利用拡大に向けて、小型・高速・省電力実装技術の開発を行うとともに、サイドチャネル攻撃を主とする物理的な攻撃への対策法と安全性評価手法の研究に取り組んでいる。

CRYPTREC では現在、2013 年の電子政府推奨暗号リスト改定に向けた活動を進めており、その中で我々は暗号アルゴリズムのハードウェア実装性能評価とサイドチャネル攻撃への耐性評価に協力している。現行の推奨暗号リストの策定にあたっては、アルゴリズムの論理的な安全性とソフトウェア評価が行われた。ソフトウェア性能は CRYPTREC が指定したプロセッサ上での実機評価であったが、ハードウェア性能はアルゴリズム提案者自身による実装などが参考情報として示されたに過ぎない。また、登場したばかりのサイドチャネル攻撃は評価対象外であった。その後、さまざまな攻撃手法や対策手法が提案され、ハードウェアによる実機評価も行われるようになったが、研究機関毎に異なる実験環境が用いられ、第三者による追試や検証が困難であるという問題が生じている。また、第三者にも入手可能な市販の暗号ハードウェアを共通の実験対象とすることは可能であるが、攻撃が成功したとしてもその結果を公表することはできない。

そこで、我々は、暗号ハードウェアの安全性評価のための統一した実験環境の構築を目的として、4.2 節で詳解する「サイドチャネル攻撃標準評価ボード SASEBO (Side-channel Attack Standard Evaluation BOard)」<sup>[19]</sup>を経済産業省の委託事業の中で東北大学と共同で開発し、国内外の研究機関での利用促進を図っている。それと同時に、我々もさまざまな実験を行い、新たに開発した対策手法や評価技術に関する情報を積極的に公開している。また、こ

これから暗号ハードウェア実装やサイドチャネル攻撃の研究を始めようとする大学や企業へは、国内ボードメーカーを通じて SASEBO の一般販売も行っている。これによって、サイドチャネル攻撃の研究の一層の促進が期待されるが、その一方でハッカーを育てる反社会的な行為ではないかと見られることもある。それに対する答えは、暗号アルゴリズムの安全性評価の例と比較すると分かりやすい。安全性評価手法の開発は、善意の研究者による攻撃手法の開発と言い換えることができる。前章では、暗号アルゴリズムを隠すのではなく、公開して専門家による第三者評価を受けることの利点について述べた。これと同じことが、暗号ハードウェア実装の安全性評価についても当てはまる。つまり、統一された実験環境における多くの研究者による評価を通じて、さまざまな提案の中から効果の高い対策と有効な評価（＝攻撃）手法を明らかにしながら、実装と測定ノウハウを蓄積・活用することで、情報セキュリティ製品の安全性向上とそれらを用いた信頼性の高い情報ネットワーク基盤の構築に貢献することが我々の研究活動の目的である。

### 3.2 国際標準規格策定と安全性評価事業への展開

上記の目的に向けて、産総研は公的研究機関として国内外の企業や関連団体と協力しながら、技術開発だけでなく図1に示すようなさまざまな取り組みを行っている。

まず、サイドチャネル攻撃に対する安全性評価の国際標準規格策定への貢献に向け、NIST へ研究者を派遣して共同研究を進めている。日米の公的研究機関による標準化活動というテーマが双方にとって重要であることに疑いの余地はないが、“共同”研究という立場を取るためには、この分野で先行する NIST に対して日本側のアドバンテージを示すことが重要であった。そこで、関連主要学会における産総研のアクティビティを紹介すると共に、SASEBO を用いた評価システムのプロトタイプを構築してデモンストレーションを行い、学術的な深い知識と高い技術力を有することのアピールに努めた。その結果、2009年12月に公開された FIPS 140-3 の 2nd ドラフト<sup>[20]</sup>では物理セキュリ

ティ・非破壊攻撃のセクションの記述を我々が担当し、またサイドチャネル攻撃の評価試験技術開発も我々が主体的に進めることとなった。

一方、国内では CRYPTREC 委員会において FIPS 140-3 および ISO/IEC 19790 改定に際し、サイドチャネル攻撃への安全性評価指針に関する議論が重ねられている。産総研は其中で中心メンバーとして参加するとともに、SASEBO ボードを始めとするさまざまな技術を国内の企業や大学へ提供している。このように、CRYPTREC 委員会活動における情報交換を通じて、国内の知識の集約と技術力の向上を図ると同時に、新たな暗号モジュールの評価制度の運営に向けた試験環境の整備を進めている。

ISO/IEC 15408 の中で前述の JHAS は、IC カードをターゲットとしたサイドチャネル攻撃を含むさまざまな物理的な解析手法の情報交換を行っている。しかし、製品個別の機密情報を含むため、その詳細が一般に公開されることはない。これは隠すことによって安全性を確保する考えのようにも思えるが、FIPS 140-3 や ISO/IEC 19790 の標準化における我々の研究活動も、製品個別の解析結果や実装ノウハウの公開を目的としたものではない。標準評価ボード SASEBO による実験を通じて、各種攻撃手法と対策手法の効果と汎用性を明らかにし、安全性評価規格の策定を行うものである。JHAS のメンバーであっても他社の IC カードを勝手に解析することはできず、技術の蓄積のために自由に解析実験を行える暗号 LSI や評価プラットフォームが求められている。そこで我々は、JHAS への国内窓口となっている IPA を通じて、今後 SASEBO の技術提供を行う予定である。

ISO/IEC 19790 と ISO/IEC 15408 では、その標準化の方向性は異なるものの、我々が開発した解析技術は、いずれの規格における評価事業にも適用可能である。このような解析技術のノウハウを、暗号製品の開発に携わる企業がオープンにすることは困難であると同時に、製品を評価される側の企業を中心となって評価規格化を進めることも公正性を保つ上で好ましくない。そこで、中立的な立場の産総研が NIST や CRYPTREC と協力し、かつ企業の意見もくみ上げながら、暗号モジュールの安全性評価技術の研究を進めることは、標準化活動において非常に大きな意味を持つこととなる。

ところで、評価制度の運用においてはいずれの試験機関も、対象となる暗号モジュールが同じであれば同じ評価結果を出すことが求められる。そこで、測定環境や解析能力を揃えるために、暗号回路を実装した SASEBO を用いて各試験機関の能力試験を行う予定である。また試験機関での利用を目的に解析ツールの開発も行っており、これ



図1 産総研における暗号モジュール評価の研究活動

らボードやツールを用いた試験要員のトレーニングも重要となってくる。それには多くの経費と人的リソースが必要となるが、そこに公的資金を投入し続けることは難しい。暗号製品のセキュリティ向上によって社会全体が恩恵を受けるのはもちろんであるが、その製品を開発する企業や安全性評価をビジネスとする試験機関も同じく受益者である。そこで、企業の活力を利用しながら、より高いセキュリティの実現と評価制度の発展につなげていくことが重要となる。そのためにもまず、評価・対策技術の普及に向けて国内複数のボードメーカーから SASEBO を製品化しており、今後は海外への流通チャネルの拡大も予定している。また、IC カード評価ツールのビジネスを展開している企業は欧州に 2 社、米国に 1 社存在するが、その 3 社と交渉を行い、全てのツールにおいて SASEBO がサポートされることとなった。さらに産総研が開発する解析手法を取り込みながら、3 社が試験機関に対して評価ツールの提供とトレーニングを行うことも検討されている。そして産総研は、公的研究機関として CRYPTREC や NIST と協力しながら、評価手法の標準化や解析技術の開発などの基本となる部分をコントロールし、より効率的な制度運用に向けて国内外の企業との連携をさらに進めて行く予定である。

## 4 サイドチャネル攻撃の実際

### 4.1 暗号モジュールへのさまざまな物理解析攻撃

暗号モジュールの物理的な解析手法は、図 2 に示したように破壊攻撃と非破壊攻撃に大別することができる。破壊攻撃は、暗号モジュールのコア部分である LSI のパッケージを開封し内部を直接解析するため、高価な装置や高い技術が要求される。これに対して Kocher らが提案したサイドチャネル攻撃<sup>[21][22]</sup>は、モジュールの改造は行わない非破壊攻撃であり、LSI の動作中の電力波形や電磁波そして処理時間など、正規の I/O チャネルではない“サイドチャネル”に漏れる内部処理の情報を利用する。情報の取得

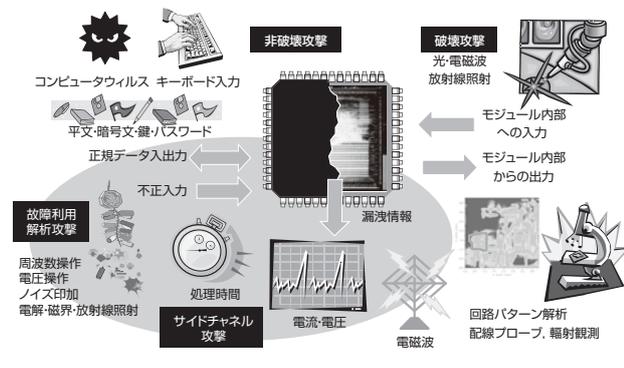


図2 暗号モジュールへのさまざまな物理攻撃

と解析にはオシロスコープや PC などの比較的安価な機器しか必要としないが、非常に強力な攻撃法である。サイドチャネル攻撃は LSI の動作状態を外部から観測する受動的な攻撃であるのに対して、故障利用解析攻撃は電源やクロックにノイズを混入するなどして LSI を誤動作させて、その反応を解析するより高度な解析手法である。故障利用解析攻撃もサイドチャネル攻撃に次いで、今後、安全性評価手法の標準化を進めていく必要がある。

### 4.2 サイドチャネル攻撃標準評価ボード SASEBO

安全性評価標準プラットフォームとして、我々がこれまで開発してきた SASEBO ボードおよび暗号 LSI を、図 3 と図 4 に示す。SASEBO-G と -B は、暗号回路実装にユーザーが回路の機能を書き換え可能な FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いたボードで、それぞれアーキテクチャの異なる Xilinx<sup>®</sup> 社と Altera<sup>®</sup> 社のチップを搭載している。これらのボード上でさまざまなサイドチャネル攻撃実験を行うために、ISO/IEC 18033-3 標準の全てのブロック暗号および公開鍵暗号の標準である RSA 暗号の回路設計を行い、そのソースコードを Web 上で公開している<sup>[23]</sup>。またハードウェアだけでなく、FPGA に内蔵さ

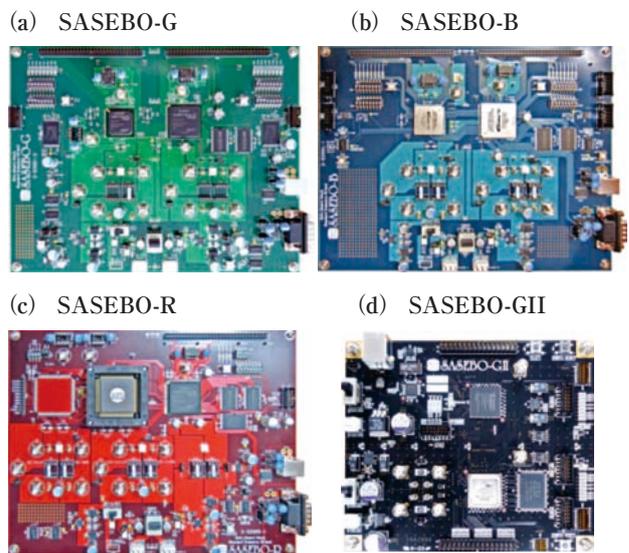


図3 SASEBOボード

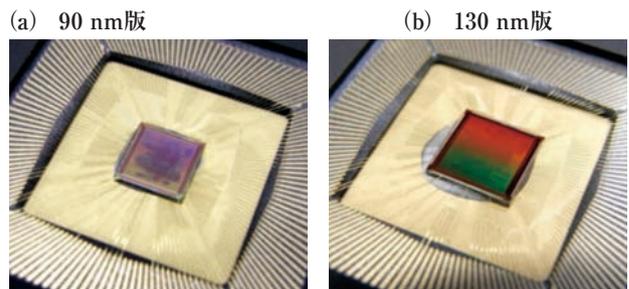


図4 暗号LSI

れたプロセッサやプロセッサマクロを利用することで、暗号ソフトウェアの評価実験を行うことも可能である。図4の暗号LSIは、Web公開した暗号回路を、90 nm および130 nm のCMOSスタンダードセルプロセスで製造したものである。このLSIはSASEBO-Rに搭載して使用する。SASEBO-GIIはXilinx<sup>®</sup>社のFPGAを用いた最新のボードで、SASEBO-Gに対して4～7倍のロジック容量を有しながら、ボード面積は1/3と大幅な小型化と高集積化を実現している。また、サイドチャネル攻撃実験以外の用途として最先端の部分再構成機能も有し、より高度なハードウェアセキュリティシステムの研究を可能としている。なお、初期のSASEBOボードは、ハードウェアモジュールとして初めてJCMVP<sup>®</sup>認証を取得しており<sup>[24]</sup>、その全ての設計情報とソースコードを安全な実装の例として、SASEBOのWebサイトで公開している。そして、SASEBO-GIIも同様にJCMVP<sup>®</sup>認証の取得を予定している。

### 4.3 RSA暗号回路への単純電力解析

ここでは実際のサイドチャネル攻撃の例として、RSA暗号をSASEBOボードのFPGA上に実装し、電力波形から暗号の鍵を直接読み取る単純電力解析(SPA: Simple Power Analysis)の実験結果を示す。

RSA暗号の暗号化処理と、その逆変換である復号処理は、それぞれ式(1)と(2)に示したべき乗剰余算で定義される。暗号化前のデータである平文 $x$ は公開鍵 $e$ と $n$ によって暗号文 $y$ に暗号化され、暗号文 $y$ は秘密鍵 $d$ によって平文 $x$ に復号される。ここで、各変数には1,024ビット以上と非常に大きな数が用いられ、公開鍵から秘密鍵を求めることは理論的に不可能ではないが、計算量的に困難とされている。

$$\text{暗号化} : y = x^e \bmod n \quad (1)$$

$$\text{復号} : x = y^d \bmod n \quad (2)$$

RSA暗号のべき乗剰余算では、指数 $e$ あるいは $d$ のビットパターンに応じて乗剰余算と自乗剰余算が繰り返される。SPAは、その演算の処理時間<sup>[21]</sup>やその電力波形の違いを調べて、秘密鍵 $d$ を求めようとするものである。図5

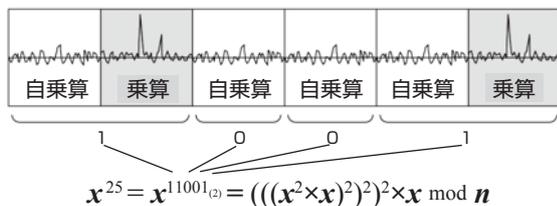


図5 左バイナリ法で実装したRSAに対するSPA

は指数 $d=25=11001_{(2)}$ を左側のビットから調べ、0ならば自乗剰余算を、1ならば自乗剰余算と乗剰余算( $\times x$ )を実行する左バイナリ法の例である。このとき自乗算と乗算の電力波形を見分けることができれば、それがそのまま秘密鍵となる。

しかし、毎回異なる中間値に対する乗算と自乗算の差が、常に観測できるとは限らない。そこで、入力データを工夫して、電力波形上の演算による違いを強調する手法が研究されている。図6は、SASEBO-Rに搭載された130 nmスタンダードセルライブラリによる暗号LSIおよび、SASEBO-G上のFPGAに実装されたRSA暗号回路が発生する電力波形の一部である。この回路は不特定入力に対して乗算と自乗算の波形を見分けることはできないが、回路アーキテクチャとして採用した1,024ビットのモンゴメリ乗算アルゴリズム攻撃に有効な $x=2^{-1024}$ という特殊な値を入力することで、乗算(M)と自乗算(S)をはっきりと見分けることが可能となった。

RSAのSPA対策法としては、秘密鍵のビットパターンが0のときにも乗算をダミーとして挿入するのが最も単純かつ基本的なものであるが、入力データを操作することでこのようなダミー乗算を見分ける攻撃法が提案されている。我々は、これらさまざまな攻撃法と対策法の効果をSASEBOの実験を通して明らかにすると同時に、新たな攻撃法と対策法の研究開発も行っている。

### 4.4 RSA暗号回路への差分電力解析

本節では、共通鍵暗号の標準アルゴリズムとして最も普及しているAESのアルゴリズムを示した後、複数の電力波形を用いた攻撃法である差分電力解析(DPA: Differential Power Analysis)について述べる<sup>[23]</sup>。

AESは、128ビットのデータを128～256ビットの鍵を用いて暗号化する。図7は128ビット鍵の場合の暗号化アルゴリズムを示している。128ビットのデータは $4 \times 4$ の16バイトの行列に配置され、SubBytes、ShiftRows、MixColumns、AddRoundKeyの4つの変換を1セットのラウンド関数として、10ラウンドの処理が行われる。128ビットの秘密鍵は鍵スケジューラによって簡単な変換が繰

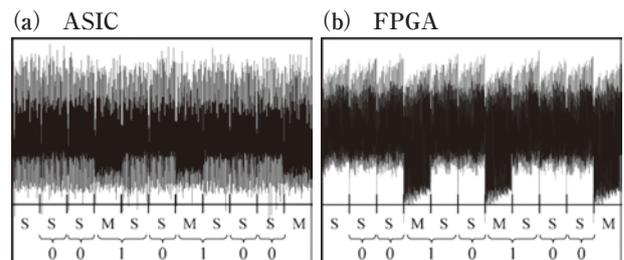


図6 SASEBO-RおよびSASEBO-G上のRSA回路に対するSPA ( $x=2^{-1024}$ )

り返され、各ラウンドに入力される128ビット×10のラウンド鍵が生成される。このラウンド鍵は AddRoundKey 関数においてデータとの排他的論理和 XOR に使用される。SubBytes は1バイトの非線形変換 S-box を16個集めたもので、4×4の各バイトで独立に変換が行われる。ShiftRows では4×4の各行が横方向に巡回シフトされ、MixColumns は各列4バイト単位の線形変換である。なお、最終ラウンドだけは MixColumns が実行されない。

AES の回路実装では通常、ラウンド関数を1ブロック用意し、10回繰り返し利用するループアーキテクチャが用いられる。図8は、SASEBO-R と SASEBO-G 上の暗号 LSI と FPGA に実装された AES 回路の電力波形であり、各ラウンドに対応した鋸型の電力波形が確認できる。RSA 暗号では、秘密鍵のビットパターンがそのまま電力波形に観測されるが、AES で128ビットの鍵が XOR される一瞬の電力波形の違いを読み取って、鍵を導出することは不可能である。そこで、数千～数万の電力波形を統計解析することによって、鍵を導出する手法が DPA である。DPA は鍵のビットをいくつか推定した電力モデルを立て、入力データを変えながら取得した複数の電力波形と最も高い相関を示したモデルを調べ、そのモデルの鍵ビットが最も確からしいと推定する手法である。SubBytes はバイト変換、ShiftRows はバイト境界のシフト演算、AddRoundKey はビット単位の XOR なので、MixColumns がスキップされる AES の最終ラウンドではバイト毎に独立した演算が行われることになる。したがって、128ビットの鍵を、バイト（8ビット）毎に独立に解析することが可能である。8ビットの値は0～255までの256パターンなので、8ビット部分鍵の推定には高々256個の電力モデルを調べればよく、128ビッ

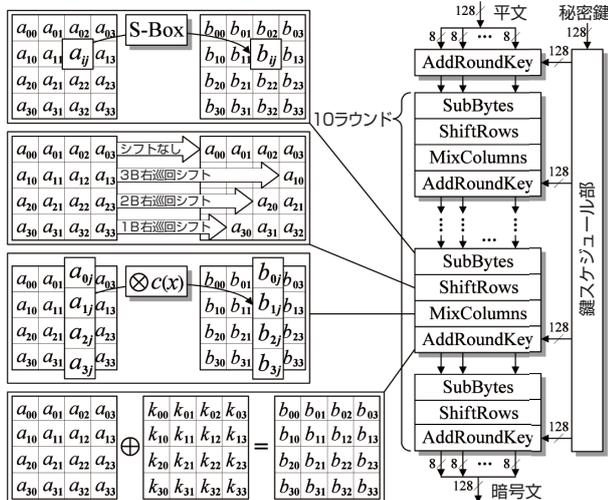


図7 AESの暗号化アルゴリズム

トの鍵全体では16回の独立した解析を行うだけでよい。8ビットの鍵を解析しているときに、残り120ビットの処理による消費電力はノイズとなる。しかし、暗号回路はある種の乱数生成器であるため、この消費電力は解析している部分鍵とは無相関になり、多くの波形を集めた統計処理によってその影響を低減することができる。

図9は我々が開発した、AES回路に対する電力解析攻撃評価ツールである。ここでは中間データを保持するレジスタに注目し、最終ラウンドで値の変化したビット数（ハミング距離）が消費電力と比例関係にあると仮定した電力モデルによる CPA (Correlation Power Analysis) <sup>[25]</sup> を行っている。画面下の16個の箱が、16バイトの部分鍵それぞれに対応しており、箱の中に256本の縦棒が表示されている。この各棒の高さが、部分鍵が0～255であったときの各モデルと実際の AES 回路の消費電力との相関値を表しており、最も相関の高い部分鍵を正解鍵と推定するようになっている。対策が施されていない回路に対しては、20万円程度のおシロスコープにより数千の波形を取得し、数万円の PC により解析する環境でも、わずか数分で鍵の導出が可能である。

AES に対する攻撃手法は CPA 以外にも多数提案され、また対策手法も次々と登場している。我々は、これらの効果を SASEBO によって検証すると同時に、評価ツールへの実装も順次行っている。

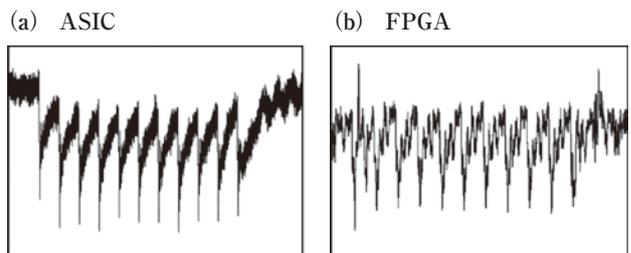


図8 AES回路の電力波形

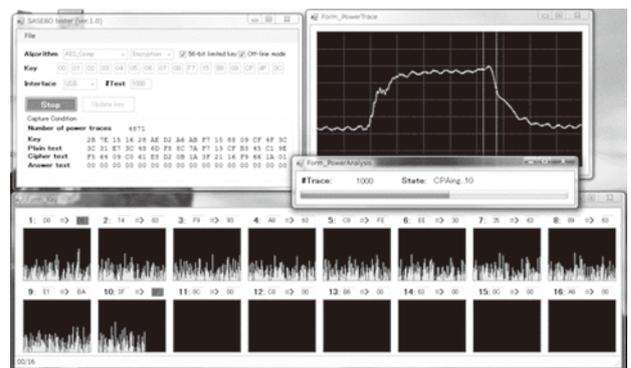


図9 AES回路評価ツール

#### 4.5 より高度な攻撃手法の開発と新たな評価指針の策定

LSI 解析技術の進歩とともに、故障利用解析攻撃や破壊攻撃といった能動的な攻撃に対する安全性評価手法の研究の重要性が増している。故障利用解析攻撃の例としては、ループアーキテクチャを用いた AES 回路で、カウンタを誤動作させて 10 ラウンドが終了する前の途中結果を出力させたり、特定のラウンドに起こしたデータでエラーがどのように出力に伝搬するかを調べたりといった手法が挙げられる。しかし、解析に都合のよい誤動作が起こせる保証はなく、どのようなエラーが発生するかは実装方法にも大きく依存する。そこで、故障利用解析攻撃の研究には、実際の暗号モジュールを用いた実験が求められ、これには自由に攻撃することができる SASEBO などの利用が不可欠である。

破壊攻撃では、LSI の全消費電力の中に埋もれている情報だけでなく、図 10 に示したような LSI 測定装置の利用により、暗号回路の局所的な信号を捕らえることも可能となってくる。しかし、既存の装置は攻撃目的で作られたものではないため、漏洩情報の観測により適した装置やより高度な計測技術の開発も進めていく必要がある。サイドチャネル攻撃においても、電力・電磁波形の質は解析結果を大きく左右するため、我々は新たな計測技術の開発と計測環境の標準化にも取り組んでいる。

さらに、各攻撃に対して成功・失敗といった実験結果を示すだけでなく、そこからサイドチャネル攻撃に対して安全な暗号モジュールを設計するためにはどのような条件をクリアすべきかといった指針を与えることが重要である。そのためには、情報漏洩のメカニズムを解析し、それを定性的かつ定量的に説明可能とするモデルの構築も今後取り組んでいかなくてはならない。

さらに、暗号モジュールの開発においては、常に完璧なセキュリティが求められるわけではなく、対策にかかるコス

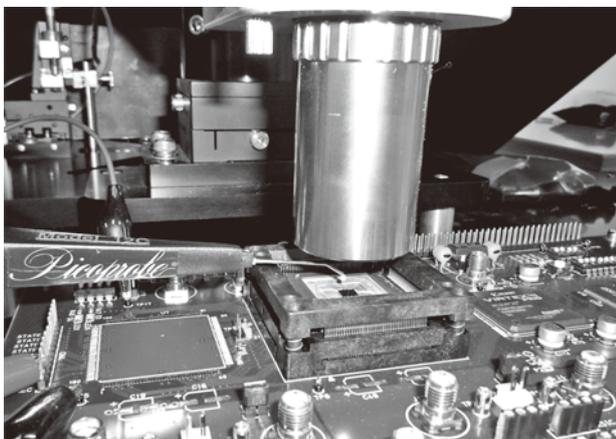


図10 SASEBO-R上の暗号LSIに対する破壊攻撃

トと守る物の価値とのバランスを考慮することが産業的に重要である。逆に攻撃者の立場からは、攻撃のコストに対して得られる利益が見合っているかが重視される。AES や RSA といった標準暗号アルゴリズムであっても論理的に絶対に安全ということはなく、鍵の全数探索ができれば必ず破れるはずである。しかし、その計算量があまりに膨大なため、現実的な時間とコストでは実行が不可能なのである。そこで、暗号モジュールの実装のセキュリティに対しても、攻撃コスト的に安全であるといった評価を可能とするような、多角的な視点からの検討を行っていく予定である。

## 5 むすび

本稿では、暗号モジュールの実装法の安全性評価に関して、サイドチャネル攻撃を中心に、産総研における国際規格策定への取り組みとその意義について論じた。また、標準実験環境整備の一環として開発した SASEBO ボードに暗号回路を実装し、対策を施さない場合は安価な測定装置でも電力解析攻撃が成功することを示し、早急な対応が求められることを明らかにした。また、故障利用解析攻撃や破壊攻撃など、より高い技術が求められる攻撃に対しても、対策と評価手法の開発に今から取り組む必要性について述べた。

暗号や情報セキュリティの研究は、悪意を持つ攻撃者に対する防御を目的としている。しかし、情報システムがますます複雑化する中、偶発的なエラーや故障によって生じる被害を防ぐための技術開発も重要である。例えばソフトウェアにバグがある場合はシステムを動かしたままネットワーク経由で修正することも可能であるが、ハードウェアのバグや故障はシステムを停止して復旧にあたる必要があり、また遠隔地に設置されている場合は迅速なメンテナンスも難しい。この問題に対する有効な解決策として、回路を動作させたまま部分的な書き換えを可能とする FPGA の動的部分再構成技術が挙げられる。最新の SASEBO-GII ボードは動的部分再構成の研究開発を行うための機能を実装しており、ネットワーク経由による回路書き換えの実用化に向けた研究も既に始めている。またネットワーク経由でハードウェア情報がやりとりできるようになると、その盗用や改ざんを防止する必要があり、さらにはシステム障害を引き起こすハードウェアウイルスが登場する可能性もある。これらを解決するための研究も同時に進めて行く必要がある。

このように、暗号ハードウェアのセキュリティに関する研究の延長として、ハードウェアシステム全体の安全性と信頼性の向上、いわゆるディペンダブルなシステムの構築を目的に、今後必要となる新たなハードウェア技術の研究開発に取り組んでいく予定である。

参考文献

[1] NIST, *Data Encryption Standard (DES)*, FIPS Publication, 46-3 (1999).  
<http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips46-3/fips46-3.pdf>

[2] R. L. Rivest, A. Shamir and L. Adleman: A method for obtaining digital signatures and public key cryptosystems, *Comm. ACM*, 21 (2), 120-126 (1978).

[3] NIST, *Advanced Encryption Standard (AES)*, FIPS Publication, 197 (2001).  
<http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf>

[4] NIST, AES home page  
<http://csrc.nist.gov/encryption/aes>

[5] CRYPTOREC (Cryptography research and evaluation committees)  
<http://www.cryptrec.go.jp/index.html>

[6] NESSIE (New european scheme for signatures, integrity and encryption)  
<https://www.cosic.esat.kuleuven.ac.be/nessie>

[7] ISO/IEC 18033-1/-2/-3/-4, "Information technology - Security techniques - Encryption algorithms" Part 1: General / Part 2: Asymmetric ciphers / Part 3: Block ciphers / Part 4: Stream ciphers.

[8] ISO/IEC 15408-1/-2/-3, "Information technology - Security techniques - Evaluation criteria for IT security" Part 1: Introduction and general model / Part 2: Security functional requirements / Part 3: Security assurance requirements.

[9] Common criteria - Common criteria portal  
<http://www.commoncriteriaportal.org/>

[10] ISO/IEC 19790:2006, "Information technology - Security techniques - Security requirements for cryptographic modules."

[11] Common criteria supporting document: *Mandatory Technical Document - Application of Attack Potential to Smartcards*, 2.7 (1), (2009).  
<http://www.commoncriteriaportal.org/files/supdocs/CCDB-2009-03-001.pdf>

[12] NIST, *Security Requirements for Cryptographic Modules*, FIPS Publication 140-2 (2001).  
<http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips140-2/fips1402.pdf>

[13] NIST, *Derived Test Requirements for FIPS 140-2*, Security requirements for cryptographic modules (Draft), (2004).

[14] ISO/IEC 24759:2008, "Information technology - Security techniques - Security requirements for cryptographic modules."

[15] IPA, ITセキュリティ評価及び認証制度 (JISEC)  
<http://www.ipa.go.jp/security/jisec/index.html>

[16] IPA, 暗号モジュール試験及び認証制度 (JCMVP)  
<http://www.ipa.go.jp/security/jcmvp/index.html>

[17] NIST, *Security Requirements for Cryptographic Modules*, FIPS Publication 140-3 (Draft), (2007).  
<http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips140-3/fips1403Draft.pdf>

[18] CHES (Cryptographic hardware and embedded systems), <http://islab.oregonstate.edu/ches/>

[19] (独)産業技術総合研究所情報セキュリティ研究センター, サイドチャンネル攻撃標準評価ボードSASEBO  
<http://www.rcis.aist.go.jp/special/SASEBO/index-ja.html>

[20] NIST, *DRAFT Security Requirements for Cryptographic Modules* (Revised Draft), (2009).  
[http://csrc.nist.gov/publications/drafts/fips140-3/revised-draft-fips140-3\\_PDF-zip\\_document-annexA-to-annexG.zip](http://csrc.nist.gov/publications/drafts/fips140-3/revised-draft-fips140-3_PDF-zip_document-annexA-to-annexG.zip)

[21] P. Kocher: Timing attacks on implementations of diffie-hellman, RSA, DSS, and other systems, *CRYPTO'96*, LNCS1109, 104-113 (1996).  
<http://www.cryptography.com/resources/whitepapers/TimingAttacks.pdf>

[22] P. Kocher, J. Jaffe and B. Jun: Differential power analysis, *CRYPTO'99*, LNCS1666, 388-397 (1999).  
<http://www.cryptography.com/resources/whitepapers/DPA.pdf>

[23] 東北大学大学院情報科学研究科青木研究室  
 Cryptographic Hardware Project  
<http://www.rcis.aist.go.jp/special/SASEBO/index-ja.html>

[24] 東北大学・産業技術総合研究所 暗号ハードウェア開発プロジェクト, SASEBO-AES暗号FPGAボード, 暗号モジュール認証製品リスト, 認証番号F0003.  
<http://www.ipa.go.jp/security/jcmvp/val.html>

[25] E. Brier, C. Clavier and F. Olivier: Correlation Power Analysis with a Leakage Model, *CHES 2004*, LNCS3156, 135-152 (2004).

執筆者略歴

佐藤 証 (さとう あかし)

1989年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年日本アイ・ピー・エム(株)東京基礎研究所入所。1999年博士(工学)(早稲田大学)。2007年産業技術総合研究所情報セキュリティ研究センター入所。情報セキュリティに関するアルゴリズムおよびその高性能VLSI実装の研究に従事。本論文では、研究全体の統括およびハードウェア開発を担当した。



片下 敏宏 (かたした としひろ)

2006年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了、博士(工学)。産業技術総合研究所情報技術研究部門特別研究員を経て、現在、同研究所情報セキュリティ研究センター研究員。高速演算、セキュリティに関する回路やソフトウェア設計の研究に従事。本論文では、ハードウェア/ソフトウェア開発およびサイドチャンネル攻撃の実験を担当した。



坂根 広史 (さかね ひろふみ)

1992年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所主任研究員。同年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士後期課程情報ネットワーク学専攻修了。博士(工学)。並列計算機アーキテクチャに関する研究の後、現在、暗号実装の安全性に関する研究に従事。本論文では、NISTとの協業による安全性評価標準規格の策定作業部分を担当した。



査読者との議論

議論1 構成学的な記述

コメント (中島 秀之: 公立はこだて未来大学)

本研究の構成学的側面の記述はやや弱いのですが、一般にはあまり認知されていない暗号のサイドチャンネル攻撃の解説として良く書けていると思います。

コメント（持丸 正明：産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター）

専門家以外にも分かりやすく書かれており、暗号化の考え方、安全評価の考え方、サイドチャネル攻撃など、本論文の理解に必要な項目が歴史的背景も含め、よく書かれています。本誌は「Synthesiology」という構成学の論文誌であり、執筆者の取り組みの構成学的なポイントがより明確に伝わると、異分野の読者にも「研究のアプローチや構成論」として有益な情報になると思います。

産総研のアクションが、関係するステークホルダーをどのように巻き込み、最終的な目標を達成するように構成したのか、というのが「構

成学」の核になると思います。ステークホルダーをどのように変え、社会をどのように変えて、ゴールに繋がっていくのかが明確に記述されると良いと思います。

回答（佐藤 証）

3章の後半部を、「3.2 国際標準規格策定と安全性評価事業への展開」とし、産総研のアクティビティに関する大幅な加筆を行い、図1との連携をより明確にしました。また「サイドチャネル攻撃標準評価ボード SASEBO」は4.2節へと移しました。

# “社会のための科学”と研究開発評価

## — プログラム評価の構造とSynthesiologyへの示唆 —

大谷 竜

“社会のための科学”が叫ばれて久しいが、そのような研究開発をどのように評価すればよいのであろうか。本稿では、研究開発評価のそもそもの考え方に立ち戻って概念整理することで、“社会のための科学”研究に有効な評価とは何かについて分かりやすく解説することを試みた。そのポイントは、評価はそれ単独では意味をなさず、研究開発を通じて実現させたいことへの道筋（戦略）と一体となって初めて機能すること、そして評価の役割は、戦略をより良く実行していくために実態をつまびらかにすること、などである。

キーワード：社会のための科学、研究開発評価、プロジェクト、プログラム、ROAMEF、ターゲット設定、戦略策定

### “Science for society” and evaluation of research and technology development

– The framework of program evaluation and implication for *Synthesiology* –

Ryu Ohtani

This article intends to give a basic logical framework of “research & technology development (RTD) evaluation” for the realization of “science for society”. Although the RTD evaluation is to be designed for promoting the evolution of strategies that utilize the knowledge derived from science and technology for the well-being of society and for solving public issues, some confusion emerges due to misinterpretation of concepts and/or verbal abuse when putting evaluation into practice. Through conceptual mapping of previous studies with original daily-life examples, this article shows that the role of evaluation is to reflect the current state of affairs in order for strategies to be better reformulated cyclically and circularly.

Keywords: Science for society, evaluation of research and technology development, *project*, *program*, ROAMEF, target setting, strategy-making

#### 1 はじめに

近年、ブダペスト宣言などに見られるように、科学研究において“社会のための科学 (Science for society)”の重要性が指摘されている<sup>[1]</sup>。これは、人間活動に伴う地球環境の悪化への対処や、複雑化・脆弱化する社会の持続的成長のために、科学的知見を使って社会問題を解決していくことが社会から要望されていることを背景としている。我が国でも、独立行政法人（以下、独法）産業技術総合研究所（以下、産総研）ではその憲章の中心において「社会の中で、社会のために」を据え、本格研究という考え方を軸に、科学技術を用いて社会の持続的発展に貢献することを謳っている<sup>[2]</sup>。また、2005年から開始された第3期科学技術基本計画において、科学技術を用いたイノベーション創出が大きな柱になっているが、これはまさに科学によってもたらされた知見を社会のために活用しようという試みに他ならない。

こうした“社会のための科学”を意識した研究開発が活発になる一方、研究開発から得られた成果を確認し、目的に照らして効果的な科学研究が遂行されているか、不断に見直しを行う必要性も言われている<sup>[3][4]</sup>。そのため、我が国においては近年、公的研究機関や大学などにおける研究開発評価が盛んに行われるようになってきた。

しかし、こうした研究開発評価に関する各種制度や仕組みが確立される一方、それが“社会のための科学”の実現のために、有効に機能しているかどうかは必ずしも明確ではない。特に、評価を受ける現場の研究者側からさまざまな疑問が呈されていることが指摘されている<sup>[5]</sup>。例えば、「自分の専門分野を評価できる程深い知識や経験をもった研究者が他にいるように思えない。そんな中、妥当な評価ができるのか？ いわんや、研究領域のことをよく分かっていない評価機関が何で口出しできるのか。」といった反論はよく聞かれる。また、“国の研究開発全般に共通する評価

産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7  
Active Fault and Earthquake Research Center, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: ohtani-ryu@aist.go.jp

Original manuscript received November 2, 2009, Revisions received January 4, 2010, Accepted January 15, 2010

の実施方法の在り方についての大綱的指針（以下、大綱的指針）”では事前評価の重要性についても触れられているが、多くの研究者は次のような疑問を口にするのではなからうか。「そもそも事前評価なんかできるのか？それは意味があるのか？研究も開始せず、何も出てきていない段階で、一体全体評価なんかできるはずがないではないか？」と。

これらの疑問に対して評価者と被評価者とが評価の意義と目的を共有し、共通の理解の地平に立って評価を実施していくことは、“社会のための科学”を実現させる上でもきわめて重要である。そのためには、評価そのものの考え方や思考の枠組みに立ち返って考える必要がある。そこで本稿は、こうした評価の論理構造について、親しみやすい例を使って分かりやすくまとめ、提示することを目的とする。以下、これまで研究開発評価論などで言われている基本となる概念を参考文献（入手しやすい日本語のもの）とともに示し、そうした概念や親しみやすい例を用いて筆者自らの論理展開を加えて説明していくことにする。

なお、本稿では研究開発の中でも、大学の理学系の分野で行われるような純粋基礎研究ではなく、科学技術の知見を使ってどのように社会問題の解決や政策課題の実現に結びつけていくかを目的とするような研究の評価を対象を限定する。こういった分野の評価の上でポイントとなるのが次の三つである。第一に評価には大きく分けて4種類の視点があること、二番目に、評価対象の階層性に関わる問題、三番目に、評価の局面（フェーズ）の位置づけ方に関する点である。

これらを考える際、研究開発評価においては注意深い用語の使い方が大変重要となるため、本稿で使用する用語の提示の仕方を以下のように定めることとする。まず、日常使われる用語であるが本稿においては独自の意味で使用され

ているものについては、斜体で示す（例えば、“プログラム”）。それに対して、特に独自の意味を有するわけではないが、それを強調したい場合や、ひとまとまりの用語や長い法令名等であって前後の区切りを明確にしたい場合には、クォーテーション(“”)で提示するものとする。一方、カギ括弧(「」)で囲われるものについては、文献からの直接引用、もしくは問いかけなどの“発言”に関するものに限るものとする。

なお、本稿で述べられている見解は筆者の個人的なものであり、筆者の所属する活断層・地震研究センターとは一切関係のないことをお断りしておく。

## 2 研究開発評価に必要な視点

### 2.1 四つの評価の視点

評価の視点について平澤氏<sup>16)</sup>は、達成度評価、価値評価、見直しと修正のための評価の三つを挙げているが、本稿ではこれに説明責任のための評価も加えた四つに整理した<sup>註</sup>。それぞれは必ずしも独立ではないが、本稿では第一近似的に以下のようにその内容と特徴を整理する（表1）。

一般に評価と言われるとすぐに想起されるのが、達成度評価である。これは文字どおり、ある目標に対してどれだけ達成されたか、ということを見るもので、達成の可否について査定的になるのが特徴である。要するに達成具合を（多くの場合数値的に）管理し、査定することを、大きな目的とするものである。当然、達成していなければベケをつけられるので、これは“切る”ことと密接に関連する。

達成度評価は、達成すべき内容が分かっている、しかもその達成方法が既知であるような事象に対して、大変有効な方法である。典型的な例は、高校の定期試験である。高校の試験問題は、出題範囲も限定されていて、かつ出される問題の素材も教科書に書かれているなど、

表1 研究開発評価の視点とその特徴。評価の視点は主に<sup>16)</sup>による。

| 評価の視点      | 有効性:<br>方法<br>が既知 | 有効性:<br>方法<br>が未知 | 特徴   |
|------------|-------------------|-------------------|--|
| 達成度        | ◎                 | ×                 | ・管理、査定(○×△付け)が目的<br>・「切る」ことがキー<br>・「ルーチン」な対象・作業に有効                       |
| 価値         | ◎                 | △                 | ・価値を定めるのが目的<br>・「比較」、「目的」がキー<br>・「目的や基準が共有」されれば有効                        |
| 説明責任       | ◎                 | ×                 | ・出資者への説明責任が目的<br>・納得されるかがキー<br>・費用対便益分析が可能ならば有効                          |
| 見直しと<br>修正 | 必要なし              | ◎                 | ・達成方法が未知の時のその方法の解明や、変化する環境への適応が目的<br>・自分の行動から「学習・改善」がキー<br>・「分からない」対象に有効 |

既に答えもしくは答え方の分かっているものが出題される。試験においては、そうした内容を受験者がどれだけきちんと勉強して身に付けたかが問われるわけで、これはまさに達成度評価に他ならない。

ところが研究開発のように、未だ達成方法が検証されていない対象に関しては、達成度評価の視点から評価するのは適切ではない。なんとすれば、分からないから研究開発を実施するのであって、既に分かっている対象を取り上げて研究開発を行っても、それはもはや研究開発に値する行為とはいえないからである。それにもかかわらず、強引に達成度評価の視点を導入してしまうと、わざと目標を下げて、達成しやすいような安易な目標を設定して、想定目標に対して十分達成できた、と主張するような風潮が跋扈しかねない状況が生じる恐れがある。これは研究開発の促進のためには、はなはだ具合の悪いことである。

更に敷衍すれば、この達成度評価はともすると「どれだけ頑張ったか」という尺度が潜在的に入ってきて、たくさん量を達成すればするほどいいという傾向を助長しかねない特徴を有する。即ち、達成方法は既知であるのだから、成果の量が多ければ、その分だけよく頑張った（だから素晴らしい）、という論理が潜在的に助長され得る。例えば、インパクトのある論文1本よりも、重要度は低くても100本も論文があれば凄い、という風潮の跋扈する土壌になりかねない。当該分野の専門外の人からみれば、1本しか論文がないよりも、100本も量があったらそれは凄そうに見えるからである。

二番目の評価の視点が、価値評価と言われるものである。これは文字どおり、対象や物事の価値を定めるのが目的であり、一般に、「～が非常に高く評価される」というような表現でよく使われる意味での評価である。価値評価は、評価者が評価対象を自らの価値観（価値基準）で判断する評価なので、極端な話、ノーベル賞を受賞した研究であっても、評価者にとって興味がなかったり価値がないと思われれば、“その人にとっては”価値評価は低いものとなる。よって、目的や判断の基準を共有しないと、評価者によってばらばらな評価になってしまうという特徴を持つ。「基礎研究と応用研究、どちらが評価できるか？」という議論が一つの例であり、これに対する答えは、全体の目的に即した議論が行われな限り、評価者同士の単なる価値観の押し付け合いに終始してしまう。また価値評価は、同じ対象でも、置かれている“状況”や“目的”によって、変化するというのも特徴である。例えば、かつて日本企業で基礎研究よりも応用研究の方が盛んに行われていたのは、後者の方が企業利益をより上げられるという価値評価のために他ならない。しかし、時代“状況”が変わってしまった現在、

同じ価値評価では立ちゆかなくなっていることは周知のとおりである。

三番目の評価の視点は、説明責任のための評価である。これは主に、研究開発費用の出資者（財政当局や納税者）に対しての説明責任を果たすことを目的とするものであり、出資してもらえるかを納得させられるかが重要となる。説明責任のための評価の一番わかりやすい形は、貨幣換算し費用対便益分析を行って、費用C（インプット）と便益B（アウトプット）の比(B/C)が1以上であることを示すことで、さまざまな経済学的算出手法が提案されている<sup>[7][8]</sup>。しかし金銭に換算されにくい研究課題や対象については計算が困難であり、更に、この説明責任のための評価は「費用対便益比B/Cが1以上であるかどうか」という“指標”が達成されているかという意味で達成度評価の一つの形態に過ぎない。そして、B/C>1でない場合にこれを改善するためには次に何をすればよいかという必然的に出てくる疑問について、一切答えが得られないという根本的な問題を有している。

## 2.2 内省評価について

そこで重要になってくるのが、見直しと修正のための評価である。これは研究開発のように、答えの分かっている対象を取り扱う場合や、動的に変化する周りの環境に適応することを目的とするための評価であり、同じ“評価”という名前がついても他の三つの評価とは、全く様相の異なるものである。我々が今取り扱っているように、解決方法がよく分かっている場合、あれこれ考えては試し、考えては試し、というtrial and errorをやっていかねばいけない。といって無闇に行っても効率が悪いので、ある試みを行った結果、もしそれがうまくいかなかった場合、何がいけなかったのか自分の行為から学習して、次の行動への見直しのために活かしていくことが必要になってくる。しかし、うまく見直すためには、当然自分がどんな行為を行って、その結果発生した事象との間がどんな因果関係で結ばれているのか、ということをつまびらかにしなければならない。この“実態を「つまびらかにする<sup>[3]</sup>」行為”こそが、ここでいう見直しと修正のための評価に相当する。

ここでいう見直しと修正のための評価に係わる内容とは、冒頭で述べた本稿のとる立場から、個別具体的な研究開発の内容の詳細に係わるものではない。こうした点を強調するのは、見直しと修正のための評価と言った場合、多くの研究者は次のような状況を想像しがちだからである。例えば、「ある夢の材料を作ろうと試験管を振ったができない。何故だろう？ そうだ、クエン酸を加えてみよう」、といったものである。研究者はこの状況において、達成方法が分からない事項（この場合は、ある夢の材料を作るこ

と)に対して、見直しと修正を行っている、と主張するのである。しかし、我々が取り扱っている研究開発の目的は何であったのか、今一度振り返ってみると、それは研究の“結果”、それを“使って”どのように社会問題の解決につなげるか、ということであった。つまり、見直したい内容とは、個別具体的なプロジェクトではなく(またそこに留まるのではなく)、それらの研究なりプロジェクトを実施した“結果”、その成果を“使って”、どのように政策課題を実現せしめるかを目的とした“システム”の設計が、我々が真に目指すべきことであった。そして、システムの改善へとつなげるため、実態をつまびらかにするものとしての評価があったはずである。科学技術研究の実施はそのための一手段であって、それ自体が目的ではない。もちろん研究開発はこのシステムのコアであり、よい研究結果は必須のものであるが、一方で、社会問題の解決のための時間も資源も有限であるのだから、「研究はやってみなければ分からない」ということでエンドレスに研究が続けられ、いつまでたっても必要とされる社会問題が解決されないのであれば、それは社会にとっては困った事態となってしまう。

このように、我々がここで対象とするところの評価は、社会問題の解決といった“意図した結果”<sup>9)</sup>を実現せしめる、“システム全体の見直しと修正”であることを強く認識する必要がある。もしシステムではなく、個別具体的な研究の専門分野(本例で言えば試験管の実験)を見直しと修正の対象とするならば、それは冒頭で述べた研究者の反論、「専門外なのにどういう資格で、当該専門分野を評価できるのか?」という疑問に突き当たることになる。それは当該分野の専門領域内のピアレビューに付すべきものであって、ここでの評価が口出しできるものでもないし、すべきことでもない。

ところで、一般に日本語の“評価”という言葉は、必ずしもこの意味を明示的に示すものではないという問題がある。即ち、評価というどうしても、どこかの偉い学者とか行政官などといった人達が高いところから見下ろして、

何かお墨付きを与えるような印象を拭いきれないのが現実ではなかろうか(例えば<sup>10)</sup>)。更に、それが査定という意思決定と潜在的に結びついて、評価される側からすると、通常とは異なることをすれば何か断罪されてしまうというような恐怖を無意識的に含んでしまう可能性がある。そうではなく、見直しと修正のための評価はより良くするために行うものであり、しかもそれは本来的に主体的な行為のほずである。そこで今後、見直しと修正のための評価を指すのに本稿では“内省評価”と呼ぶことにする。即ち、「自分の考えや行動などを深くかえりみる」(大辞泉より)という“内省”という言葉の有する意味を借用して、この言葉を使用する。

こうした内省評価という視点を導入すると、評価における“実績の把握”において、必ずから注目すべきものが達成度評価とは大きく違ってくる。このことを文献<sup>9)</sup>の概念整理を援用して、以下説明する。一般に評価といった場合、我々はずいつい、成果(Product)に気を取られてしまい勝ちである。しかし実は成果(Product)というのは実績(Performance)の一部を構成しているに過ぎず、実績には他にも、その成果に至るまでの過程(Process)も含むことに注意しなければならない(図1を参照;<sup>9)</sup>の図を一部改変)。即ち、達成度という観点のみに限定した評価だと、目標値に対してきちんと達成したかをみればいいわけなので、どうしても成果、その中でも更に狭い、主題に直接かわる部分に限定した“主題的な成果”にしか着目しないことになる。先の試験勉強の例でいえば、要は合格するのに必要な点数をとれたかどうかしかみないことであって、そのためにどのように勉強したか、どれだけ勉強したかというのは達成度評価にとっては預かり知らぬもので、注目の対象とはならないのである。

しかし内省評価(見直しと修正のための評価)の視点に立つ場合、もし点数が目標よりとれなかった場合、どのように見直していけばいいのを知るためには、何が悪くてその点数を得るに至ったのか、そのプロセスをつまびらか

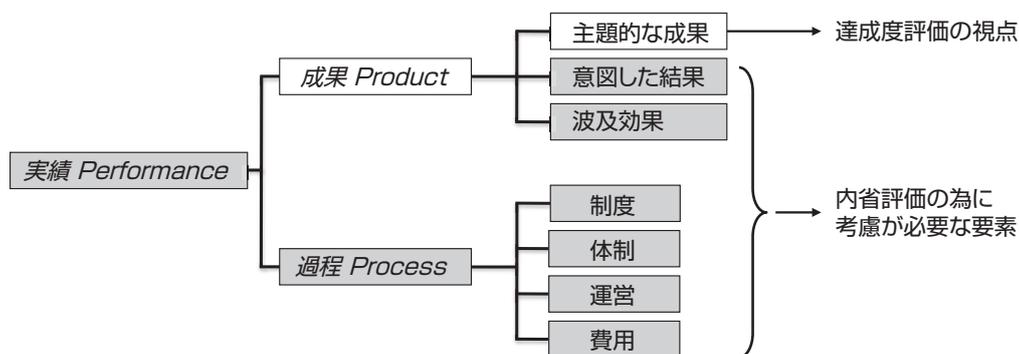


図1 研究開発評価の実績の分類。<sup>9)</sup>からの図を引用・一部改変。

にする必要が必然的に出てこよう。また成果の中でも、“主観的な成果”だけでなく、それが“意図した結果”<sup>[9]</sup>に最終的にどのようにつながっていくのか、そして得られた“主観的な成果”はその中でどういった位置づけになるのかという視点で捉えないと、試験の点数を得た“結果”、何を實現したいのかという、より上位の目的の實現にまで結びつかないことが往々にしてあり、注意が必要である。この点については後述する。

### 3 評価対象の階層性—プログラム化の重要性—

さて、二番目のポイントは、評価対象を階層的な体系で考えることである。これは一言で言うと、評価対象を一括くたにして扱うのではなく、階層性をもったシステムとして捉え、それぞれの階層に応じてそれらの階層に固有の属性を把握することが、効果的で有用な内省評価につながる、ということである。

ある研究課題の評価を展開しようとした時に考えられる階層構造とは、例えば図2に示すようなものである。まず最上位には総合戦略があり、これは科学技術基本計画や全体戦略に相当するものである。次にその元に“政策”が展開され、更にそうした政策の元に、“プログラム”（後述）があり、その元でようやく研究者がよく馴染んでいる個別の“プロジェクト”が位置づけられる、という階層構造である。ここでプロジェクトとは、“研究課題の集合体としての研究事業”を指すことにする。それに対して、プログラムとは、より上位の階層に属する政策と、個別事業としてのプロジェクトを結びつける“仕組み”のことで、これが間に入らないと、政策的な課題解決に資するような研究開発が効果的・効率的に展開しにくい、というのがこの図の意味するところである。

このプログラムの重要性は、平澤氏<sup>[11]</sup>の説明を借りて、次のような思考実験を行うことで理解される。即ち、科学技術に関する個別のプロジェクトの成果をかき集めただけで、果たして上位の階層にある、社会問題の解決や政策課

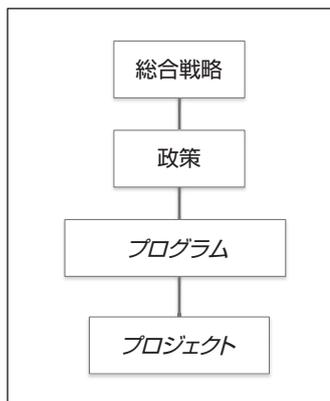


図2 研究開発評価対象の階層性。

題を實現できるか、と考える。身近な例を思い浮かべれば分かるように、科学技術を使ってモノを開発したところで、それだけでは単にモノがあるだけである。政策課題を實現させるためには、政策と研究開発プロジェクトとの間をつなぐ仕掛けを両者の間に作り、「政策意図を具体化する仕組み」<sup>[11]</sup>を導入することが不可欠である。それは、個別プロジェクトを構造化し、場合によっては技術以外の補助装置を導入するなどして、研究成果がシームレスに政策課題へと受け渡しができるようにするといったことである。こうした仕掛けこそがプログラムと呼ばれるものの基本的な考え方である。そうした仕掛けを作っておかないと、研究プロジェクトを實施していわゆる“成果”はいっぱい出てきたけれど、それが社会問題の解決に全然貢献しない、というような事態が発生してしまう可能性がある。

さて、今与えられた研究開発課題に対して、プログラムという仕組みが埋め込まれているかどうか、それを判定する効果的なリトマス試験紙が存在する。それは次のような問いを發することである。即ち、「研究開発プロジェクトを實施したその結果、何？」という問いである（この問いかけは、文献<sup>[12]</sup>を参考にして定式化したものである）。研究開発が下位のプロジェクトレベルにとどまっている限り、そこから出てくるものは科学技術としてのモノや知見でしかない。それが、より上位に属する政策課題へと、どのような道筋で明確に結びつけられているかを明らかにしようというのが、この質問の意図である。この問いに明瞭に答えられず、あるいは抽象的で具体性に欠ける回答しか得られないということは、最終的に意図する結果（本稿では“社会問題の解決”）への具体的な道筋が見えてこないということであり、プログラム化が十分に行われていないことを示唆する。詳しいプログラムの内部構造については後述する。

## 4 評価の局面の位置づけ

### 4.1 事前・中間・追跡評価の一体化

さて、評価の三つめのポイントは、評価の局面（フェーズ）の位置づけ方である。今、図3にあるように、ある研究開発のライフサイクルにあたって、戦略策定、実施、検証、見直しというステージを設定すると、内省評価のためには、事後評価や中間評価などをどのように位置づけたら良いかを以下、考える。

まず、内省評価のためには、事後評価とは別に、“追跡評価”と呼ばれる新たな局面を導入する必要がある。一般に事後評価と呼ばれるものは研究開発の終了直後になされるので、厳密には直後評価と呼ぶべきで、この時にはまだ成果もきちんと定まっていなく、特に成果が出てくるまでに時間がかかるものは、直後評価で最終的な成果を見極め

るのは困難である場合が多い。また仮に成果がすぐ確定できる場合でも、どのような研究運営の結果そうした成果が出てくるに至ったのか、更なる改善のためにはどうしたら良いのかを知るには“分析”をする必要があるが、これもやはり時間がかかる作業である。これらのことを考えると、実は直後評価というものは、「当該プロジェクトの今後をどうするか」という“意思決定”が行われる場としては大きな意味を持つが、実態を「つまびらかにする」という内容においては、中間評価と大きな違いはないと言える。以上のように考えると、最終的な成果を“確定”し、得られた知見や教訓を“発掘”し、それを次にどう活かしていくかの“分析”をする作業は、事後評価とは別に改めて実施しなければならないことに気づかされる。こうした作業のことを、“追跡評価”と呼ぶ<sup>[3][5]</sup>。

しかし追跡評価を加えても、内省評価としてまだ十分な設計になっていない。例えば、TOEICの勉強というプロジェクトを考える。ここでは、TOEICで800点以上とるという目的のために、英単語を1日100語覚える、という計画を策定したとする。この場合に理想的な内省評価とは、実際にこの計画を実施してみて、成果の確認を行い、改善点を探し出して、また次の計画に戻すことである。しかし、改善点を見つけ出して次の計画に反映させるといっても、何も見当がつかないままの状態やみくもに計画を改善しようとしても効果的な見直しは期待できない。例えば1日100語覚えられなかったとしたら、それでは少し覚える単語の数を減らしてみる(再計画する)ということがまず思い浮かぶが、ではいくつに減らせば適当であるかについては、実態を把握していなければ、直感的・感覚的にしか判断できず、このままでは有効な見直しが行えない。

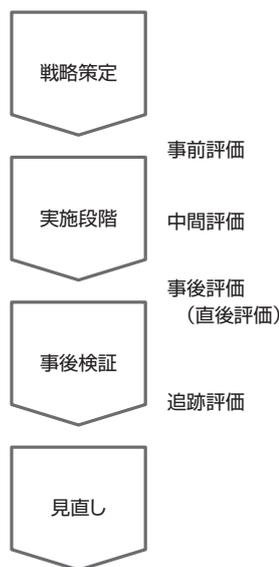


図3 研究開発のサイクルと評価の局面。

この見直しを真に効果的なものにするには、見直しを見据えて全体の評価のあり方を当初から有機的に設計する必要がある。つまり、図4にあるように、まず何故できなかったのか、どうすれば改善できるのかを“分析”するという行為が入らないといけな。本例で言えば、1日何語くらいしか覚えられなかったのか、それは何故なのかについて考察することに相当する。更に、より深い考察のためには、勉強しない日があるとしたら何で時間を確保できなかったのか、あるいは勉強しても全然暗記の効率が上がらなかった日はどういった日でどんな状況だったのか、という点について、分析を深めていかないと、何故できなかったのかつまびらかにならない。このデータに基づいた分析や考察に当たるのが、追跡評価である。しかしこうした分析を行うには、当然データに裏付けられていないと良い分析はできない。そうしたデータは、後から思い返したのでは信頼性のあるものは得られないので、課題を実施しながら、データも同時に集めなければいけない。これがいわゆる“モニタリング”といわれるもので、中間評価で実施する重要な内容の一つである。しかしこうしたモニタリングを行うためには、ではどういった項目についてモニタリングするのか、あらかじめ実行課題（この場合は英単語を100語覚えること）を実施する“前”に設定されていなければならない。即ちこれが事前評価に相当するもので、事前評価は実行課題を策定・採択するだけでなく、追跡評価ができるようにモニタリング項目を定めることも含まれるわけである。このように、効果的な見直しに結びつけるためには、事前、中間、追跡の各評価がばらばらにあるのではなく、有機的な設計と運用が必要である。

#### 4.2 ROAMEF

では以上の構造を満たせば内省評価として十分かという、更にもう一つ重要な要素が必要になってくる。先に説明したように、効果的な研究開発のためには、プログラムという仕組みが導入されていることも重要であった。そうした視点で今、図4を見てみると、これには「TOEICで800

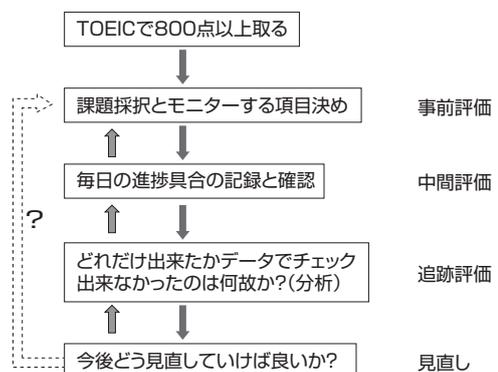


図4 プログラム化の例。

点とったその結果、それで何？」という問いに答えられていないことに気づく。そこで、上位階層としてここでは例えば、「英会話ができるようになりたい」という項目を設定するものとする、この目的のために、TOEICで高得点をとるのは確かに一つの方法であり、両者は意味ある関係として接合される（図5）。ただ、これは「英会話ができるようになりたい」という目的に対しての一つの方法であって、この目的の実現のためには、例えば“英会話資格の取得”など、ほかにも候補となりえそうな活動が考えられる。このようにして考えるとこれらは、“英会話の上達”という一つの大きな目的（意図する結果）の元、それを具現化させる指標となる、複数のより具体的な活動からなる構造になっており、言ってみればこれらは、“ターゲットセッティング”であると言える。そしてこれらのターゲットの実現のために、より下位の実行課題（英単語の暗記など）が位置づけられ、展開されている、と捉えることができる。

しかしこうしたターゲットを設定するためには、その根拠となる要素、即ち、“何故”そうしたターゲットを設定したのかという理由がないと、有効なターゲットセッティングができない。本例で、何故「英会話ができるようになりたい」のかの理由として、「アメリカ人の恋人を作りたい」という理由があるとしよう。それは、ここで設定した人物の人生設計から与えられるものとし、“アメリカ人の恋人を作る”ためには、会話ができないとコミュニケーションができないので、“英会話の上達”というターゲットが設定された、とするのは論理的な展開として十分想定されるものである。この何故（WHY）に相当するものは、英国の評価制度で言われるところの *Rationale* に相当する<sup>[3]</sup>（図5）。

*Rationale* とはターゲットセッティングの WHY を説明するものであり、論理的根拠、正当性、根本的理由などといっ

たものが挙げられる。“論理的根拠”とは文字どおりその根拠としてロジックに基づくものである。本例で言えば、英会話は今後ビジネスでも必須の武器であり、国外に限らず国内の就職のためにも英会話がますます重要になる、という今後の世の中の状況を分析した上での論理的考察から、“英会話ができるようになる”というターゲットを設定する、といった場合のものである。一方、残りの二つについては必ずしもロジカルな根拠を必要とするものではない。“正当性”においては、規則や法律を根拠とするもので、決まりの上で道理にかなってさえいればよい。本例では、例えば産総研の職員は英会話ができないと解雇される、という内規がもし存在するならば、産総研職員に留まっていたいのであるならば、英会話を上達させる、というターゲットが導かれ、これは *Rationale* なものになる。最後の“根本的理由”というのは、ロジックにも規則にもその根拠を持たないが、行動者である個人あるいは集団の切実な理由（例えば情緒的なもの）があって設定されるものである。本例で挙げた“アメリカ人の恋人を作る”はまさにこのケースである。

このようにして捉えると、この *Rationale* と次の“ターゲット”の両者は、実は“戦略策定”にかかわることであり、これらが明確に設定されて初めて、その元でより有効で具体的な課題が選定できるという構造になっていることが分かる。英国の評価制度では、ここで言う“ターゲット”は *Objectives* と呼ばれ、プログラムの内容（WHAT）に相当するものに他ならない<sup>[3]</sup>。それは今までみてきたように、実現させたい“意図した結果”であるところのもの（本例では“英会話ができるようになりたい”というような大きなターゲット）と、その指標となるようなもの（より具体的な小さなターゲット：本例で言えば“TOEICで800点以上

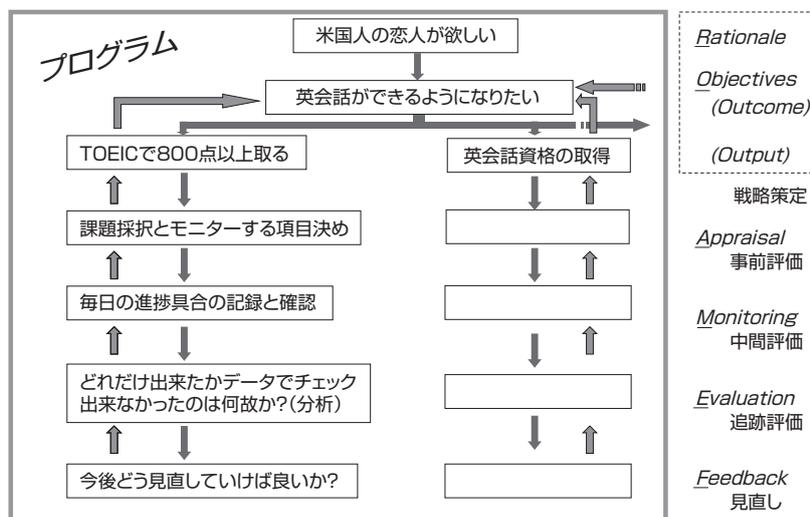


図5 プログラム化の例。図4の続き。

とる”ことや“英会話資格の取得”）とから成る（前者が *outcome*、後者が *output* と“定義”されるが<sup>[9]</sup>、こうした用法は大きな混乱をもたらすことが多いのでここでは使用しない）。そして以下、これらをどのように（HOW）実現させるかについて、より具体的な活動事項（例えば英単語を1日100語覚える）たる実行課題が選択されると同時に、効果的なモニタリング項目を設定するという *Appraisal* が行われることになる（これは“事前評価”に相当する）。その上で、実際に実行しつつ、モニタリング項目のデータを収集するという *Monitoring*（“中間評価”にあたる）を経て、課題実施後にデータに基づいた運営上の教訓や知見の発掘などの分析を行うという *Evaluation*（ここでは日本語の訳語である“評価”よりは狭義の意味で、“追跡評価”にあたるもの）が行われ、改善点を見出して計画を見直していく、という *Feedback* につながっていく、という構造になっている。英国の評価制度では、この一連の流れは、それぞれの要素の頭文字をとって ROAMEF（“ロアモフ”と発音する）と呼ばれており<sup>[3]</sup>、実はこうした構造を満たすものがプログラムの一つの必要条件となる。

#### 4.3 プログラム評価の意義

ROAMEF に基づいたプログラム評価が優れている点は、ターゲットセッティングの有効性も含めた戦略策定の見直しを可能としている点である<sup>[3]</sup>。これは ROAMEF を逆から辿ると分かりやすい。先に説明したように有効な見直し (*Feedback*) のためには、データに基づいた分析などの *Evaluation* が必要であり、*Evaluation* のためには、データの収集という *Monitoring* が必要である。そして *Monitoring* のためには、“実行課題の採択”と“モニタリング項目の設定”の二つからなる *Appraisal* が必要だが、実行課題の選択のためには、そもそも何を目的としてそのプログラムを実施するのが明確になっていないと設定のしようがないため、プログラムの *Objectives* が必要となってくる。そして有効な *Objectives* を設定するためには、そもそも何故そうした *Objectives*（ターゲット）を設定するのかという根拠が *Rationale* である必要があった。このように、ROAMEF には、*Rationale* と *Objectives* という大元の戦略策定まで問うことが構造的に埋め込まれており、ROAMEF に基づいたプログラム評価を行うのは、最終的には戦略策定の質的向上につなげるためのものであることが分かる。

このことが重要なのは、特に“社会のための科学”の研究開発においては初期最適化というのは非常に難しいためである。むしろ、最初から完璧な戦略策定ができていれば個別の課題の実施の上で全く問題ないのであるが、現実には戦略策定時においては調査が不十分であったり、戦略

策定に不可欠な情報が欠如していたり、また当初想定していたのは状況が変わってしまって、最初に設定した戦略策定では考慮に入っていなかった要素が出てくるなどからである。特に研究開発は、実際にやってみないと分からないという不確定な要素が強いため、将来予測は大変難しくなる。よって、実際に実行しつつ、周囲の状況や実行具合をみながら、軌道修正していくことが不可欠となる。

そしてその軌道修正には、プログラムレベルでのターゲット (ROAMEF においては *Objectives*) の設定の有効性まで含めることが非常に重要になってくる。*Rationale* な階層にまで遡って検討することにより、ターゲットそのものについての代替案を検討することが可能になるからである。本例で言えば、“英会話ができるようになる”ことの実現のために、TOEIC をはじめ英語に関する勉強をしたけれど、結果的になかなか上達しなかった場合を考えてみよう。そうした場合でも、“アメリカ人の恋人を作りたい”ということ自体を諦める必要は全然ないことに気づく。例えば、アメリカ人の中でも日本語を話せるアメリカ人を選べば本来の目的は達成される、という代替案が検討できるのである。こうした点がプログラム評価の非常に強力な点であり、何故 *Rationale* という要素まで含めて考えなければいけないかの理由はここに存在していたわけである。また、そこまで問わないと、いつまでたっても非効率的な下位 (プロジェクトレベル) の活動でもたもたしていて実効性が上がらず、結果的に無駄な投資ばかりして、かつ上位の政策実現に結びつかないというような事態が起きうる可能性がある。

プロジェクト評価だけでなく、プログラム評価も同時に実施する重要性は、特に産総研のような、“社会のための科学”を標榜する公的研究機関においては強調しすぎることはないであろう。我が国の公的研究開発では、「どうしてこういうプロジェクトが施策として出てくるのか」というような研究課題が選ばれることがあるとも言われる<sup>[10]</sup>。よって、もし行政から与えられたターゲットが妥当でなかったり、戦略策定が適切でない場合、プログラム評価を実施することによって、そこで得られた明確な証拠とともにそうした点を政策担当者などに指摘し、上位の政策側が変わる契機を作っていくことが非常に大切になってくる。そうでないといつまでたっても、社会問題の解決という社会からの期待に対して、個々の研究活動が非効率的にしか結びつかないことになりかねない。そうした意味で、社会から公的役割を付与された研究開発型独法は、独法化によって獲得した自由度を最大限に活用し、そうした点についても示していくことが、研究自体の遂行とともにもう一つの重要な役割であると考えられる。

## 5 プログラム評価としてのSynthesiology

実はこうした ROAMEF の原理に基づいた研究開発のプログラム化の実例集として、本誌 *Synthesiology* が挙げられる。*Synthesiology* に求められる論文の要件を、その「研究論文の記載内容について」からまとめてみると、以下のようになる。

- (1) 研究目標の設定→(2) 研究目標と社会との関係(社会的価値)の説明→(3) 研究目標を達成するためのシナリオの提示→(4) 要素の選択と要素間の記述(要素技術群の選択とその選択の理由)→(5) 要素間の関係と統合(構成)の考え方およびプロセスの記述→(6) 結果とその自己評価→(7) 将来の展開

これらの項目は、これまでみてきたプログラムの構造と以下のように対応する。まず冒頭の二つは、プログラムを始める上での *Rationale* な理由(2)と、それに基づく *Objectives* の設定(1)に相応する。そして、(3)のシナリオとは、*Objectives* 達成までの道筋の設計においてしばしば使われる“ロジックモデル(ロジックチャート)”に他ならない。次の(4)、(5)は、プログラムの *Objectives* を実現するために、具体的な課題(プロジェクト)を選定し、組み合わせ、プログラムとして有効な仕組みを作りあげる作業(*Appraisal*)に他ならない。(6)の“自己評価”は文字どおり *Evaluation* に相当し、最後の(7)は、展望として一種の *Feedback* を記述していると言える。

特に注目したいのは、*Synthesiology* が、社会の中の研究の“目標”(Objectives)の提示と、そもそもそうした研究課題を設定した意義を社会的な文脈の上で説明する(WHYを説明する *Rationale*)という点を強調し、冒頭にそれらの記述を求めているという記載順位である。というのは、これはまさにプログラム設計や評価の順番と対応する重要な点だからである。即ち、社会の中での *Rationale* な理由が設定できて、有効な研究の目標(Objectives)が決められる、というプログラムの構造である。その元で初めて、社会のために有効なものとなりうるプロジェクト選定の基盤が整うのである。別の表現をすれば、最初に研究開発プロジェクトがあって、そこから社会的な価値が何かを探すのではなく、*Rationale* に基づいた目標(Objectives)が設定できて初めて、有効な研究プロジェクトが選定できるのである。*Synthesiology* の求める論文の執筆要項は、まさにこの論理展開と軌を一にしている。

こうした視点からみると、*Synthesiology* の持つ意義は次の3点に集約される。一つめはプログラム化を通じて、個々の研究開発プロジェクトを社会に接続する試みが実践され、その結果が“記述”されていることである。これはまさに、産総研の憲章にある「社会の中で、社会のために」

という理念の具現化そのものである。二つめは、研究開発のプログラム化の具体例の提示である。筆者の知る限り、研究開発の実際の例について ROAMEF を軸として体系的に記述された文献は余り見られない。よって *Synthesiology* は、研究開発評価の方法論を深める評価研究者のためだけではなく、プログラムの実践的な深化に取り組むプラクティショナーにとっても大変貴重なサンプルを提供するものと考えられる。そして三つめは、研究開発の深化のためのフィードバックである。*Synthesiology* がプログラム化の実践と分析を提示する場と捉えると、*Synthesiology* へ研究成果をまとめることで、当該研究の内省評価が半自動的に行えることを意味している。そのことで、当初の研究戦略の見直しと修正が図られ、プログラムの更なる深化が促されることになろう。このように *Synthesiology* は、プログラムという視点から研究開発を記述することで、“社会のための科学”に向けて自らの研究実践から学び、見直しと修正を可能とする場を提供していると考えられるのである。

## 6 おわりに

以上見てきたように、研究開発評価というのはそれ単独では意味をなさないものであり、戦略策定と一体となって互いに作用しながら進化していくものであることが分かる。

むしろ、社会問題の解決や政策課題の実現は、科学技術のみでできるものではなく、行政や社会などによる幅広い取り組みも必要であることは確かである。しかし、今日的な意味での科学研究において重要なことは、単に研究の成果を“ごろり”と外に出すのではなく、目的に応じて使いやすいように加工した上で、研究開発の成果を受け取り手が積極的に使うようになり、それを通じて社会構造の変革が促されるような“仕掛け”をあらかじめ作っておくことが研究開発の範疇に含まれてきていることである(例えば、<sup>[13]</sup>)。でないと、研究の論理のみが先行してしまっ、得られた成果のその後の使い方については「後はどなたかにおまかせします」ということにもなりかねない。そうではなく、研究成果の受容者、あるいは顧客(カスタマー)のニーズを見越し、先取りした“仕掛け”を作っておく必要があるが、その“仕掛け”こそプログラムに他ならない。

以上のように、今後、“社会のための科学”をより強力に推進する上において、研究そのものの質的・量的な向上とともに、戦略策定と一体となった評価が重要な役割を果たすと考えられる。我が国においては、先進主要国と比較してこうした評価人材の集積や養成に立ち後れがあることが指摘されており<sup>[14]</sup>、今後、戦略策定や評価において一層の充実が必要だと考えられる。

なお本稿の更に詳しい内容について、<http://staff.aist.>

go.jp/ohtani-ryu/ に掲載する予定なので興味のある読者は参照されたい。

## 謝辞

本稿は、経済産業省産業技術環境局技術評価室の私的懇談会である「アウトカム懇談会」で筆者が行ったレビュー発表を元にしたものです。発表に対する大井健太氏、中村修氏、大久保泰邦氏、小笠原一紀氏のコメントは本稿の作成の上で大いに参考になりました。また産総研の小玉喜三郎特別顧問、小野晃副理事長、加藤碩一フェローおよび、岡村行信活断層・地震研究センター長と小泉尚嗣同チーム長には初稿を読んでいただき、貴重なフィードバックをいただきました。平澤冷未来工学研究所副理事長には、過去の報告書からの図の転用を快く許可いただきました。最後に、担当編集委員の小林直人早稲田大学教授（産総研特別顧問）には本稿を丁寧に読んでいただき、大変本質的な指摘をいただけたことで、本稿の飛躍的な改善ができました。ここに記して感謝します。

**注** その他にも例えば、“ダイオキシンの健康への影響評価”や“アウトカム評価”などといった、“算定”や“見積もり”といった意味で“評価”という言葉が使われる場合があるが、本稿では考察の対象とはしない。

## 参考文献

- [1] 日本学術会議科学者コミュニティと知の統合委員会: 提言: 知の統合—社会のための科学に向けて— (2007).
- [2] 独立行政法人産業技術総合研究所: 産総研憲章 制定の意味, 産総研TODAY, 5, 8-11 (2005).
- [3] 文部科学省(委託調査): 研究開発評価の質の向上のための調査・分析 (2008).
- [4] 日本学術会議研究評価の在り方検討委員会: 我が国における研究評価の現状とその在り方について (2008).
- [5] 経済産業省(委託調査): 研究開発プロジェクト等の評価手法に関する調査 (2002).
- [6] 平澤冷: 研究開発における戦略策定と評価, シンポジウム「戦略的な研究評価について」報告書, 13-28, 独立行政法人産業技術総合研究所 (2006).
- [7] 文部科学省(科学技術振興調整費): 経済性効果分析手法とコスト算定手法の開発 (2004).
- [8] 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 米国における定量的研究開発評価手法に係る調査報告 (2005).
- [9] 文部科学省(科学技術振興調整費): 研究開発のアウトカム・インパクト評価体系 (2006).
- [10] 総合科学技術会議: 総合科学技術会議第31回評価専門調査会議事概要(案) (2004).
- [11] 平澤冷: 政策のプログラム化とアウトカムの把握・評価, 経済産業省第5回研究開発評価フォーラム配布資料 (2008).
- [12] 産業技術総合研究所研究評価検討委員会: 産総研の研究開発評価のあり方(中間まとめ) (2004).
- [13] 吉川弘之: オープンラボによせて, 産総研TODAY, 9, 2-9 (2009).
- [14] 文部科学省(科学技術振興調整費): プログラムオフィサー等の資質向上に資する国内セミナー等の開催 (2005).

## 執筆者略歴

大谷 竜 (おおたに りゅう)

1999年3月東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻博士課程修了。博士(理学)。同年4月通商産業省工業技術院地質調査所入所。2001年4月独立行政法人産業技術総合研究所地球科学情報研究部門研究員。2009年4月より、同活断層・地震研究センター研究員。この間、2003年2月から2005年2月までスタンフォード大学客員研究員。これまで、主にGPSを使った精密計測手法による地震や地殻変動、大気圏変動に関する研究に携わってきた。



## 編集委員からのコメントとその回答

### コメント1 整理と主張の区別

コメント (小林 直人: 早稲田大学研究戦略センター)

本論説の一番のポイントになると思うのですが、①すでに研究評価論などでいわれていることを整理して提示した部分と、②著者の独自の視点で新たに述べた他の部分が、混在して分かりにくいと思われます。特に後者の部分、たとえば「反省評価」などは著者の独自の主張としてとりわけ強調して述べる点だと思いますが、今のままの記述だと単に他の人の主張を整理して述べた「解説」と受け取られかねないので、表現を工夫してはいかがでしょうか。

なお、「反省評価」という言葉は、どうしても「反省」という言葉に含まれる倫理的な印象が入ってくると思います。ここでは研究開発をより進化発展させるという意味で「進化のための評価」(Evaluation for evolution) などというのは如何でしょうか？

回答 (大谷 竜)

一研究者として日頃感じるのは、研究開発評価では、基本となる概念や言葉の使い方に注意しないと容易に混乱する要素が数多く含まれ、それが研究現場において適切な評価を遂行する上で時に大きな障害になっているのではないかと、ということです。そこで本稿では、研究開発評価の中でも特にプログラム評価に関する基本的な“考え方”を著者なりに整理し、分かりやすい言葉で表現し直すを試みました。紹介した個々の概念については既知のものですが、筆者の知る限り、それらを首尾一貫した形でコンパクトに親しみやすい形で概観したものがなく、そういった形で論説化することに多少なりとも意義があるのではないかと思います、本論説を著した次第です。この試みがうまくいっているかどうかは読者の判断を待たなければなりません、本稿を通じて、多忙な現場の研究者がプログラム評価の考えを理解する一助になり、被評価者と評価者と同じ理解のグラウンドに立つための足がかりになれば、と思っております。

一貫しているテーマは、“社会のための科学”研究の実現に資するような評価とはどういうことかであり、そのためには、実態をつまびらかにすること、最初に目指すべき戦略をもつこと、実態に応じてそれを柔軟に修正していくこと、の重要性を強調しております。以上の趣旨を冒頭で簡単に説明し、ご指摘の①と②の違いが分かるよう書き直しました。

なお「反省評価」というネーミングですが、確かに「何か悪いことをした」というような倫理的なニュアンスが含まれる場合もあります。一方、ご提案していただいた“進化のための評価”は、まさに究極的に目指すものであり、本稿で述べている評価の理念そのものですが、もう少し具体的で、実際の行動を表すような言葉の方が、特に評価の現場でイメージをもつためには良いように思えます。“改善評価”も考えましたが、“改善”という言葉には、そのインクリメントの意味が転じて、頑張っつこつこつと努力するニュアンスが含まれ、内容よりもその姿勢の意味でとられる可能性があることから、あまり適切ではないように思えます。

ここで原点に立ち返って、“反省評価”の内容である見直しと修正

のための評価は何のために行うかという、「より良くする・なる」ためであったわけですが（その意味でまさに“進化のための評価”という理念になるわけですが）、「より良くする・なる」の主体は誰かといえば、その行為を行う当事者に他なりません。“社会のための科学”研究でいえば、研究実施者であり、それは他者に強要されるものではなく、自らが主体となって行うものだと考えられます。以上のことから、多少なじみの薄い言葉ではありますが、“内省評価”という言葉を使いたいと思います。大辞泉によれば、“内省”とは「自分の考えや行動などを深くかえりみること」とあります。よってこの言葉には、“反省”という言葉がもつ倫理的な色彩が少なく、暗黙的に含む“謙虚に”、という意味で「つまびらかにする」ということにも通じ、何よりも実施者自らが行う行為としての意味も含まれていると考えます。多少哲学的で奇異な響きもありますが、それ故に常にその意味に立ち返って考えさせられるメリットもあります。

## コメント2 価値評価

質問（小林 直人）

第2章に「価値評価」の説明が出てきます。この「価値評価」の内容について記述をもう少し充実していただけるとよいと思います。平澤先生の資料にあった言葉だと思いますが、実はなかなか重要な言葉です。是非執筆者なりの考えを述べていただくことを期待します。

回答（大谷 竜）

研究開発評価には、通常の研究開発とは異なる固有の論理体系がありますが、こうした考えに慣れていない評価の現場で時々混乱が見られるように思えます。その中でも、自らの個人的な価値観を（しばし無意識に）援用した評価が行われている場面があるようにも思われます。本文でも説明したように、価値評価は「～が高く評価される」といった文脈で使われる評価ですが、「高く評価するかどうかは評価者たる自分」であるからには、自分の価値観、極端な場合、その人の人生観を反映したものが色濃く出る場合があります。問題は、こうした価値評価が研究開発の促進と深化の観点から有効かどうかで、それを問おうというのが価値評価という概念を導入した狙いです。その旨を本文に追加しました。

## コメント3 追跡評価

質問（小林 直人）

第4章に研究開発直後に行われる事後評価とは異なる「追跡評価」の重要性が述べられています。しかしその内容は、「時間をおいた上でデータに基づいた事後評価」という内容のように見受けられます。内容は結構なのですが、一方、通常 NEDO などで行われている追跡評価とは、プロジェクト終了後1年から5年の間にプロジェクトの成果をどう活かして事業化にもっていったのか、などの波及効果を評価するいわば「アウトカム評価」に近いものと考えられます。そこには、そのプロジェクト以外の促進要素が多く入ってくるのが通常です。本稿でいう追跡評価は評価論で通常いわれているものでしょうか。そうでなければ、別の言葉で述べた方が誤解を招かないと思われませんか。

回答（大谷 竜）

2001年に内閣総理大臣決定された“国の研究開発評価に関する大綱的指針”によれば、「研究開発においては、終了後、一定の時間を経過してから、副次的効果を含め顕著な成果が確認されることもまれではない。こうした点を踏まえ、学会などにおける評価や実用化の状

況を適時に把握し、必要に応じて、研究開発施策、研究開発課題などについて追跡評価を行い、成果の波及効果や活用状況などを把握するとともに、過去の評価の妥当性を検証し、関連する研究開発制度などの見直しに反映する。」（下線は著者によるもの）とあります。

また、NEDOが2004年に定めた“追跡調査・評価の進め方について”にも追跡評価の観点として、「1）成果の説明責任の観点：研究開発の波及効果、売上の発生、市場の形成など、2）運営管理の見直しの観点：各種評価、実施体制、基本計画などの妥当性など、3）技術開発戦略への反映の観点：国としての取り組みの必要性など」（下線は著者によるもの）、を挙げております。

以上のことから追跡評価は、“研究開発成果の波及効果の把握”という側面とともに、少なくとも国レベルでは、研究開発の運営(制度)や戦略策定の改善に資することも目的としていると考えられ、本稿でもこの立場を採りたいと思います。

本文中でいわゆる事後評価(直後評価)と、追跡評価との区別が分かりにくいという点についてはご指摘を踏まえ、新たに直後評価についての内容の説明を加え、上記のような意味での追跡評価の独自性を浮かび上がらせるように書き直しました。

## コメント4 ROAMEF

質問（小林 直人）

第4章に、「評価の局面の位置づけ」として4.1事前・中間・追跡評価の一体化、4.2 ROAMEF、などの、重要な論点が記されています。ここでプログラムの中の戦略が極めて重要であることを指摘したいと思います。特にRationaleで問うWhy?のみでなく、Objectivesを設定するWhatとHowも重要ですね。これをどのように設定するか記述があるとよいと思います。なお、プログラムの戦略は、いわばプログラム戦略と呼ばれるもので、それはより上位の戦略-いわば政策戦略の中に含まれるという理解でよいでしょうか。

回答（大谷 竜）

ご指摘のとおり、Objectivesはプログラムのターゲットそのもの（そのプログラムで“何を”実現させたいのか）なので、まさにWhatに相当します。またAppraisal以下の要素は、ターゲットを“如何に”実現させるかという意味でHowそのものになります。その旨分かるよう、書き加えました。

後者の質問に答えるには、評価の階層構造に立ち返る必要があります。評価対象が階層構造をもつということは、実は上位階層に対して下位階層が目的-手段の関係として位置づけられる、ということです。プログラムの場合、その上位階層である政策に対して、プログラムがその目的達成の手段になっている、ということに他なりません。したがって、ROAMEFの内部構造と同じように、プログラムは、上位にある政策の目的を境界条件として定められることとなります。プログラムの“戦略策定”(RationaleとObjectives)自体はプログラム内部に含まれますが、その根拠は、上位の政策から由来するという事です。

このように考えると、政策-プログラム-プロジェクトとは全てが関連していて、本来切れ間がないものですが、そこに政策やプログラムなどといった“区分”を設けるのは、“目的-手段”の間で区切ることで評価の重複を避けるとともに、担当者の所掌を明確にすることで、効率的で分かりやすい評価を実現するためです。別の角度から見れば、プログラムを設定する際、できるだけ政策を展開させる際の“一つの単位”となるように設計することが、効果的な評価体系を構築する上でポイントになると考えられます。

# シンセシオロジー創刊2周年を迎えて

2008年にシンセシオロジーを創刊して2年が経ちました。この間1巻と2巻をそれぞれ4号ずつ発行し、全部で研究論文を49編、論説やインタビュー記事などを14編掲載しました。また毎号のアンケートを通じて読者の皆さんからいろいろな反響をいただきました。創刊2周年を迎えて、編集関係者でこの2年を振り返り、今後を展望しました。

## シンセシオロジー編集委員会



### 座談会出席者

|       |               |
|-------|---------------|
| 吉川 弘之 | 産業技術総合研究所最高顧問 |
| 小野 晃  | 編集委員長、産総研     |
| 小林 直人 | 編集副委員長、早稲田大学  |
| 赤松 幹之 | 編集幹事、産総研      |
| 内藤 耕  | 編集幹事、産総研      |

### 創刊2周年を迎えて

**小野** 『シンセシオロジー』を2008年1月に創刊して、2周年を迎えました。今日は吉川産総研最高顧問をはじめ編集に携わる方々に集まっていただきましたが、まず皆さんから「創刊2周年を迎えた感想」をお願いします。

**赤松** 掲載された研究論文すべてに一通り目を通していますが、「シンセシオロジーとは何か」ということを強く意識して書くケースが増えています。そういった論文では、通常の論文とは違う書き方で、いかに研究を進めてきたかということ“熱く”語っていただいています。その一方で、まだこれまでの論文の書き方から発想をなかなか切り換えられない人もいないわけではありません。産総研のすべての人が『シンセシオロジー』を理解しているのか、気になるのですが、ある程度読めばどういふふうを書いていいかわかっていただけたと思っています。

**小林** 昨年、アメリカのIEEE技術経営評議会の会長に『シンセシオロジー』を2冊お送りしたら、「非常に感心した」という丁寧な返事をいただきました。また、フランスからも投稿があるなど、英語版を出している努力が少しずつ実を結びつつあるのは嬉しいことだと思います。国際的にもっと認知度を上げることができるといいと思います。

私は今年の春に大学に移ったのですが、大学は専門分

野ごとに組織されていますので、横串を貫くような研究がなかなか難しいところです。私が移った大学では昨年4月から研究院をつくって全学にまたがったような研究プロジェクトをどうつくるかという議論をされていて、まさに「研究をつくる」ことは構成の一つなのですが、「構成学」を学術として成長させることが必要だということを感じました。

**内藤** 編集後記を書くに当たり、その号の論文を全部読み直すと、皆さん、これまでの分析的な研究論文にない書き方をされているし、分野を超えて“気づき”を得ています。論文の書き方、読み方が定着しはじめたのではないか、ということ強く感じたところです。『シンセシオロジー』を創刊した2年前、もしくは本格研究という議論を始めた8年前には想像もつかなかったことで、こういうことが少しずつ



内藤 耕氏

定着していくことはすごく嬉しいなと思いながら、編集委員の仕事をしていただいています。

**小野** 最近の出来事で二つほどお話ししたいのですが、昨年9月に台湾の台北で「構成学的研究とイノベーション」という講演をし、その後新竹の工業技術研究院 (ITRI) に寄りましたら、急遽、同じ題名で講演してほしいという話になり、ITRIの院長初め100人くらいの研究者が聴いてくれました。「本格研究とそれを表現するためのシンセシオロジー」という話をしたのですが、関心が高く、多くの質問が出ました。「アメリカではどうか?」という質問には、「アメリカはプラグマティズムの国で、実態的に本格研究みたいなことはやっているのではないかと私は思っている。昔から大学の先生がベンチャーを興すなど、アカデミアと産業界との間の心理的な壁はアメリカにおいては薄いと思う。しかし、産学連携やベンチャーの活動を研究だと思っていない。つまり、研究とビジネスを境目なくやっているが、それはあくまでも研究とビジネスであり、ビジネスに向かう過程を研究として捉える、つまりシンセシオロジーを彼らは出していないし、知を集積しようということは考えていない。言い過ぎかもしれないが、ビジネスとして成功すれば、それがどう研究と関連するかを別に突き詰めて考える必要はないと思っているのではないかと」答えました。またもう一つの質問で、「シンセシオロジーを始めた動機は何か」と聞かれました。「我々は工業技術院時代から実態として本格研究や第2種基礎研究をやってきたと思う。それらの研究を改めてはっきりと定義し直し、第2種基礎研究や製品化研究をしている人たちの成果を正当に評価し、そこに光を当てようという気持ちで始めた」と答えたのですが、そこは私の気持ちだったかなと思っております。ITRIの人たちも産総研と同じ目的をもっていますので、思いとしては共通なものがあり、大変良く理解していただけた講演会でした。

二つ目ですが、アメリカ化学会の『Langmuir』という有名な学術雑誌の編集長が来日し、お話をする機会がありました。私の方からは『シンセシオロジー』の話を出しまして、「我々、最近こういうのをやっているのです」と説明しましたら、彼が一番驚いたのは査読の公開の部分でした。実は、その前に「雑誌を良くするためにどのような努力をしているのですか」と私が聞きましたら、彼は「査読の部分に非常に気がつかっている。査読者は匿名だが、同時に査読者に対して著者も匿名にしようとしている。また、著者が査読者を指名したり、拒否したりできるようにして、査読システムをより緻密にやろうとしている」と言っていたのです。私が「シンセシオロジーでは査読者は名前を出して、公開しています」と言ったところ、驚かれたので、しばらくグッ

と詰まって「大変興味ある」とおっしゃっていただいた、そんなことがありました。

### 科学と社会が対話するための言語

**吉川** 私は若いころから「構成」が学問にならないかということをやってきた人間ですから、大きな夢がここで実現できたと思っています。これは産総研で本格研究が実態的に行われたということが背景になっており、産総研で大勢の研究者が「シンセシス」をいかに体系学問にするかという努力をした一つの結晶がこの『シンセシオロジー』だということは間違いのないわけで、これは将来に大変期待したい。しかも編集者、査読者が極めて熱心で、本当に産総研で素晴らしいと思う部分も重ねて、それが第一印象です。

やや具体的な話になると、研究者から同一専門研究者以外に対する言語が開発されつつあるということです。「科学技術と人類の未来に関する国際フォーラム (STS フォーラム)」は科学者、政治家、ビジネスマンが集まるのですが、一番の問題は言語がないことです。専門家が専門的な話をすると、政治家は「全くわからん」と怒ってうまくいかない。私が主張していたのは、「専門家が研究に必要な言葉で話す、それは自分たちのジャーゴンである。外部に対して話をするということは、研究の結果が何を生むのかということ語ることでは、自分がしていることを語れないのではないかと。それは極めて難しく、ある場合は予測になるし、ある場合は曖昧になるかもしれないが、その曖昧さをいかに少なくし、その予測を正確化していく努力をしないといけない」ということです。『シンセシオロジー』を読んで他の分野のことがよくわかるというのは、「言語性」という意味で非常に価値の高い方法論を生み出しているということで、いわば科学と社会がコミュニケーションをするための言語ができつつあるということですね。これは、私は100点というか、非常に高い評価を与えたい。

今度は0点とは言いませんが(笑)、論文はみんな面白いし、「熱」を感じる。言語性はその熱を通じて伝わってくるわけですから、何をやりたいかはよくわかる。「熱」は必



吉川 弘之 氏

要条件だけれども、「構成学」という説明可能な構造がまだ出てきていない。一つずつの論文を読むとわかるけれども、第三者が見て、そういうものが抽出できるかという、なかなか難しい。私は、1巻2号の「サービス工学序説」の論文で書いたように、それは臨時領域だと思っているわけです。臨時領域とは、ある問題を解くために、自分がその場で考えた一つの論理体系みたいなものですね。面白いデバイスがあったとして、それをどうやって抽象的な基礎原理から具体的な装置までもってくるか、装置メーカーとどう議論するかというのは、言語性を論理性にまで高めておくことです。だけど、そこが眼光紙背に徹しても見えない。それがもう少し出てくるといいと思います。

### 構成学を深化させる

**小野** 我々は構成的・統合的な研究活動の成果を蓄積することによって、論理や共通原理を目指すという「構成学」を志向していますが、これを深めていくことが必要です。赤松さんは人間工学シンポジウムで「構成学としての人間工学に期待すること」という演題で発表しておられますね。

**赤松** 内視鏡とX線の発展を比較して、内視鏡は実用化までに100年以上かかったが、X線は1年もしないうちに医療に利用されたため、ネガティブな部分を知らずに被害を与えてしまった、死の谷的な時間がある程度必要なのかもしれないという話をしました。その後、「学問領域」「社会の期待と学問の関係」「なぜ構成学が困難なのか」「構成学と工学」「構成学としての人間工学」について述べました。

「学問領域」ですが、吉川最高顧問は、自然科学の「科学領域」に対して問題の対象をある程度絞って「臨時領域」を作り、それが成熟して「成熟領域」になる、これを「工学」と呼ぼうとおっしゃっている。具体的な人工物を対象として実際の問題を解決しようというのが「臨時領域」ですが、領域を作れば作るほど抽象化して、臨時領域から成熟領域になって、科学領域になっていくと分析の方法に走りがちになる。いかに適切に臨時領域に留まっていられるかということが構成のために必要です。なぜなら、領域の中の言語を作り出し、中の法則性を見出そうとすると、その法則性をより精緻化する方向に研究者の活動は向かう。自然とその領域の中の整合性をとり、美しい体系を作ろうとして分析側の方向に行き、社会に出すダイナミクスが弱くなる危険があるのではないかと話をしました。それは「なぜ構成学が困難なのか」とも絡んでいるのですが、言葉が通じなくなると統合がしにくくなり、分析的になるということです。

「構成学と工学」では、工学と我々が呼んでいるのは“engineering”を訳したのですが、語源は「賢い巧みな人が物を作ること」であり、本来、工学という学問はなのだけれども、それを構成学は学問にしようとしているという対比で説明しました。複雑な人工物を作る能力のある人の営みから臨時領域である工学が生まれる、それがまさに構成学が狙っているところです。

「構成学としての人間工学」ですが、科学的知識を社会に導入することをイノベーションと定義すると、「人間工学とは人間に受け入れられるような人工物を作るための学問」として構成学の一つの重要な役割を果たすのではないかということになります。人間を調べれば人間に向くものができるかということ、そう簡単なことではない。人間の特性がわかればそれに基づいた製品の評価はできるのですが、残念ながら、クリエイティブに物を作ることは、少なくとも今の人間工学ではできていない。何が欠けているかということ、例えば、「うるさい」というのは物理的な音圧との関係ですが、今、問題になっているのは、静かにならばなるほど上の階の音が気になるということです。生活環境が悪いときは物理、いわゆる自然科学の言葉で語れたものが、生活環境の悪さが解決すると自然科学の言葉で語れないものが出てくる。ここで初めて、人間のことをきちんと調べないと本当の人間のためのものがない、ということがわかるわけです。社会科学、要するに自然物を対象とした科学の領域を作るのではなく、社会という人間の営みを理解するための領域、吉川最高顧問の言う“社会”科学、「使われる」ことを念頭に置いた、物を作る構成学をやっつけていかなければいけないということですよ。

**小林** 最近の経験ですが、大学でエネルギーのプロジェクト計画を手伝いました。結果的にはプロジェクトは実現しなかったのですが、自動車メーカー、電池メーカー、電力ネットワーク等々の方々と議論をして、要素技術からだんだんシステム化していき、最後までプロジェクトのイメージを割りとかリアに描くことができました。シンセシオロジーで



赤松 幹之氏

訓練されたのか、産総研にいたから訓練されたのかわかりませんが、研究プロジェクトやプログラムを作るときには、構成的に作っていかねばいけないということは非常に感じました。

### 構成的研究の方法論を引用する

**小野** 内藤さんも「構成学の研究」をこれからやるべきだというふうに思っておられるようですが。

**内藤** 今のところ、事例研究の延長というふうに見られてもしょうがないのではないかと思います。将来的には、『シンセシオロジー』自身が研究の材料になって、小林さんが作ったモデルに持ち上げて、そこからさらに教育、設計に持っていき、ある種の設計の手順書みたいなものがアウトプットとして出てくると、本当の理論ができ上がってくるのではないかと思います。私個人としては、もっと事例を集めないといけない時だし、ある程度まとまってくると、これを研究しようという研究者が集まり、最終的に一つの学問、アプリケーションとしての教育と設計ができ上がってくるのではないかと強く思っています。

**赤松** 著者には「自分が書いた『シンセシオロジー』の論文は、過去に掲載されたこのタイプの研究のアプローチと同じです」という記述をしてほしいですね。内藤さんが言ったのは、第三者がこれを材料にして研究をするということですが、本来、研究領域であれば、研究者が自分の論文を引用するときに「自分のやり方はこういう研究アプローチと似ているが、違うところはここです」というふうに自分自身で位置付けしないとイケない。そうすることで蓄積されてくると思うのです。熱く語ることはできているのですが、そこが今足りないなと思っています。

**小野** 私も同じ問題を感じていますが、研究者はシナリオの設定においてシンセシオロジー的思考方をしていないので書けないのか、それとも自ら行ったシンセシスのプロセスを自分で振り返ったときうまく再整理できないのか、どちらでしょうか。

### 銅鉄実験方法論と構成的方法論

**吉川** 後者だと思いますね。我田引水的可能かもしれないけれども、いいシンセシスをやった、それを独創した人は、シンセシオロジー的な思考回路が働いたというふうに思わざるを得ないでしょう。

工学で、ある材料で実験したとか、機械工学でスピードを速くして形の変化を非常に詳しく観察して、その理論を

作った。それを銅でやり、他の人は鉄でやった。同じ方法でも論文を書けるわけですが、それは表層的なプロセスを真似している。しかし、最初にやった人は、決して表層ではなくて、背後にどうやって材料の本質を調べようかという、プログラムを立てたうえで分析研究をやるわけでしょう。本物の研究には必ずシンセシオロジー的なものがあるわけです。

**小林** ある論文の査読をしたときに、著者自身はあまり構成的な考え方を取ったという意識はなかったのですが、私が「戦略的選択型の中で戦略をだんだん絞って行って、こうなったのではないですか」と言ったら、「あ、そういうことですね」と、著者と査読者がディスカッションする中で見つけた事例もあります。

**小野** もう一つ深読みすれば、実はそもそも著者が構成的考え方をもっていたのであって、このような論文を書くチャンスがあったので顕在化しただけ、という言い方もできるわけですね。

**小林** 2巻2号の「PAN系炭素繊維のイノベーションモデル」の論文は、1960年代に旧工業技術院大阪工業技術試験所で進藤昭男博士が発明したポリアクリルニトリル(PAN)系炭素繊維が今ビジネスに結びついているということの中村治氏たちが書いてくれたものですが、幾つかポイントがあります。もともと炭素繊維という素材が良かったのですが、アメリカ軍関係者に「これは機械的強度がすごい。それが使える」と言われて、初めに考えたシナリオとは全然違うところで「構成」が始まったそうです。大切なのは「人との出会い」だと思うのですが、論理だけではうまくいなくて、偶然も含んで最終的にモノになっていくところがあるような気がします。

### シンセシオロジーはsocial wishを目指す

**吉川** その話は非常に重要で、アメリカ軍関係者の「力



小林 直人 氏

が強いものが必要だ」という、私はそれを“social wish”（社会的期待）と呼ぶのですが、そういったものが研究の外の世界にあって、それを研究者は必ずしも知らないのです。Social wish と scientific ability が両方からきて、私は“邂逅”といているのですが、それらがどうやって出会うか。19世紀、20世紀は、新しい発見が新しい機能を生み出すところに集中的にシンセシオロジーは向いていたけれども、今は social wish のほうが大きくなって、こういうものがなければ地球が壊れてしまうという危機感、言い換えればその危機を乗り越える力に対する期待が研究を主導する。

**赤松** 炭素繊維の研究をしていた人は、炭素繊維の性質をいろいろな側面から見ようとしていて、強度という話があったときに、それが使えることが理解できた。それがうまく伸びたのは social wish があったからですね。要素技術はたくさんあるし、組み合わせの可能性もあるので、研究者主導で炭素繊維の性質のどこに注目して研究を進めるかというときに、エイヤでやっていくと、重箱の隅をつつく危険があるわけですね。

**吉川** 重箱の隅に入ってしまうということは、論文で書きやすいものを研究するということでしょうか。要するに、研究のモチベーションというのは、過去にないものをやらなければ成果にならないのだから、抜けている部分を見つけるとどんどんそこに入ってしまう。それに対して、シンセシオロジーは、論文は決して書きやすくはないけれども、social wish があるからそっちにいくということになります。

### 産業界の製品化研究への拡大

**小野** 『シンセシオロジー』を「構成学の研究」として見ている方々はけっこう多く、そのような論文の投稿もきているのですが、「多分野にまたがる研究」を研究している、あるいはその成果に基づいて新たな研究をしようという人たちが興味をもって来ています。産業界からも論文投稿が欲しいですね。

**赤松** 私も産業界から論文投稿が欲しいと思って、「製品化研究論文（仮称）」を考えてみました。産業界で実際に製品化された例で、かつ構成学的に価値のある論文を投稿してもらい、製品化事例集みたいな感じのものを集めたらどうかと思っています。

**吉川** 企業が製品開発したということは、売る製品とは別に、目に見えない思考方法論という製品も出しているの

だけれども、それは全部捨てているわけでしょう。頭の中に残っているから、経験者のスキルとしては残っているけれども、第三者には見えない。

**小野** その部分は雲散霧消しているのですが、それこそ企業のパワーの源泉みたいなところではないかと思うのです。企業が出版する「技報」は、まさに成功したものが何であるかを科学的なバックグラウンド付きで示すという、ある一断面を示しているのですが、もう少し奥のほうを書いてもらいたい。それを共有することは日本の企業の強さを倍加させるだろうと思うのですが。

### イノベーションスクールでの教材の試み

**小野** 産総研イノベーションスクールで若手のポスドク研究者の研修をしています。10人ごとのクラスに分けて『シンセシオロジー』の輪講を行ったところ、「社会的な流れを踏まえて全体を把握し、自分がどの位置にあるのかを確認できた」という意見や、非常に新鮮な驚きがポスドクの人達にあったようで、大きなインパクトを与えたと思っております。赤松さんもモデレーター役を務められましたが、いかがでしたか。

**赤松** 輪講では、こちらが解説しながらやっていくことで「構成学とは何か」という観点でポスドクの人たちが読み込んでくれるようになりました。モデレーターが6人いるのですが、「受講生たちが本当に真剣に考えて発表してくれて、やっと、私、構成学が何かわかりました」（笑）と言った人もいます。また、「第2種基礎研究において第1種基礎研究にときどき戻ることが大事だ」という論文がいくつかあるのですが、受講生はそういう観点は喜んでいました。自分のテーマに固執するという、自分が意識しない内に聖域を作っていたと思うのですが、輪講で目先のものにとらわれず、全体を見てシナリオを作って進めることの大切さについても学んだようです。



小野 晃 氏

**吉川** それがイノベーションスクール最大の目標だったわけですね。凝り固まった専門至上主義みたいなものを壊して実際のものを作る、社会との接点を幅広く持つこと、それが学べたのは大変いいですね。

**小野** ポスドクの人たちを企業に数カ月送り出して企業でのOJTを経験してもらっていますが、我々と企業との間の新しい対話のチャンネルにもなっていて、我々にとっても非常に貴重な経験です。受講生を受け入れていただいた企業の方々に、OJTの評価とコメントをつけてもらっているのですが、大変好意的です。普通ですと企業も若い博士研究者と接する機会が少なく、「こんなにいい人がいたのか」という驚きやチャンスと捉えているようです。

**吉川** 企業も勉強になっているという、それはいい話ですね。イノベーションスクールは仕事をしながら伸びることができるという一つのモデルです。受講生は、『シンセシオロジー』によって「狭い分野にこだわってはいけない」ことや、一方でシンセシオとは何なのかということも感じ取っているでしょう。そして、新しい仕事をするというのは「思考」なのだということもわかるわけですね。

#### 今後の期待・展望

**小野** シンセシオロジーに対する今後の期待、展望についていかがでしょうか。

**赤松** イノベーションスクールの受講生から「今は査読者のクオリティが高いからいい論文になっているのではなか。いいジャーナルとして持続するためには、シンセシオロジーとは何かということを考えながら査読できる良い査読者を作っていくか」といけな」というコメントがあって、それは大事なことだと思いました。査読者はある種の目利きとして動いているわけです。論文の背後にある「構成」を見出そうとするのは査読者がやっていることなのだけれども、我々が世代交代をしたときにそれができなくなると困るので、将来の課題だと思います。

**小林** 私も全く同じことを考えていまして、2年経って我々自身も成長したと思いますが、構成学としてのシンセシオロジーを共有する人たちをもっと増やさないといけな、と感

じています。そのためにはシンポジウムやワークショップを増やして、口で伝えていくことも大切です。また査読者を増やす努力、特に産総研外の人をどのように巻き込んでいくかということと、『シンセシオロジー』の認知度を高めていくことも必要です。

**内藤** 私は、査読する過程で著者といろいろ議論するのはすごく楽しいなと思っているのですが、こういうダイアログを通じて投稿者と編集委員の両方の質が上がってきていると思います。投稿者と編集委員との間のダイアログをどんどん増す仕組みを作り、外部の人と積極的にこういうダイアログをやっていくことができれば、もっと投稿が増えていくのかなと。その一環として、シンポジウムやセミナー、講演会みたいなものも位置付けていけば、両方がいろいろなことを学ぶことができると思います。

**小野** 皆さんの意見とほとんど同じです。査読をすることによって、査読する側も新たな発見や触発があったりして楽しいし、他の研究分野の価値観がこんなによくわかるのかと驚いています。

**吉川** 日本は人口が少ないからGNPの比率が小さくなり、今は9%国家と言っているけれども、2050年には3%国家になり、プレゼンスがない国になってしまう。それを防ぐにはどうすればいいかという、やはり研究者を増やすしかない。同じ人口の中で研究者の数が多くなれば、少なくともサイエンスという意味ではプレゼンスが出てくるわけでしょう。私は「研究者倍増説」と言っているのですが、閉鎖的・縦割りの研究者を倍に増やしてもしょうがないので、まさに技報にものを出すような開発者まで含めて拡大解釈した研究者をもっと作りたいですね。同時に、閉鎖的研究者から企業開発者までの間の職業的な連続性を生み、そこで人が流動する社会的な一種のパスが必要です。そういったことをやるためにこのシンセシオロジーが強力なツールになるでしょうし、そういう一種の社会的運動という面も持っているという気がします。

**小野** 今日は非常に幅広いお話をありがとうございました。

# 編集方針

シンセシオロジー編集委員会

## 本ジャーナルの目的

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

## 研究論文の記載内容について

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

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

## 対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはしない。むしろ幅広い分野の科学技術の論文の集積をすることによって、分野に関わらない一般原理を導き出すことを狙いとしている。したがって、専門外の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          | 研究目標（「製品」、あるいは研究者の夢）を設定し、記述する。                                       | 研究目標が明確に記述されていること。                                    |
| 2 研究目標と社会とのつながり | 研究目標と社会との関係、すなわち社会的価値を記述する。  | 研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。                            |
| 3 シナリオ          | 研究目標を実現するための道筋（シナリオ・仮説）を科学技術の言葉で記述する。                                | 道筋（シナリオ・仮説）が合理的に記述されていること。                            |
| 4 要素の選択         | 研究目標を実現するために選択した要素技術（群）を記述する。<br>また、それらの要素技術（群）を選択した理由を記述する。         | 要素技術（群）が明確に記述されていること。<br>要素技術（群）の選択の理由が合理的に記述されていること。 |
| 5 要素間の関係と統合     | 選択した要素が相互にどう関係しているか、またそれらの要素をどのように構成・統合して研究目標を実現していったかを科学技術の言葉で記述する。 | 要素間の関係と統合が科学技術の言葉で合理的に記述されていること。                      |
| 6 結果の評価と将来の展開   | 研究目標の達成の度合いを自己評価する。<br>本研究をベースとして将来の研究展開を示唆する。                       | 研究目標の達成の度合いと将来の研究展開が客観的、合理的に記述されていること。                |
| 7 オリジナリティ       | 既刊の他研究論文と同じ内容の記述をしない。  | 既刊の他研究論文と同じ内容の記述がないこと。                                |

# 投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

改正 2009年3月23日

## 1 投稿記事

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

## 2 投稿資格

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

## 3 原稿の書き方

### 3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

### 3.2 原稿の構成

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3 書式

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

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

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

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

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

#### 4 原稿の提出

原稿の提出は紙媒体で1部および原稿提出チェックシートも含め電子媒体も下記宛に提出する。

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

#### 5 著者校正

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

#### 6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

#### 7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

## MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

There has been a wide gap between science and society. The last three hundred years of the history of modern science indicates to us that many research results disappeared or took a long time to become useful to society. Due to the difficulties of bridging this gap, it has been recently called the valley of death or the nightmare stage <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> of scientific findings for utilizing them in society, in addition to analytical research, has been one of the wheels of progress <sup>(i.e. Full Research – Note 3)</sup>. Traditional journals, have been collecting much analytical type knowledge that is factual knowledge and establishing many scientific disciplines <sup>(i.e. Type 1 Basic Research – Note 4)</sup>. Technology integration research activities, on the other hand, have been kept as personal know-how. They have not been formalized as universal knowledge of what ought to be done.

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

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

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

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

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

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

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

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

E-mail: [synthesiology@m.aist.go.jp](mailto:synthesiology@m.aist.go.jp)

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

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

## Editorial Policy

*Synthesiology* Editorial Board

### Objective of the journal

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

### Content of paper

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

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

### Subject of research and development

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

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

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

### Peer review

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

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

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

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

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

## References

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

## Types of articles published

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

## Required items and peer review criteria (January 2008)

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

## Instructions for Authors

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

### 1 Types of contributions

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

### 2 Qualification of contributors

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

### 3 Manuscripts

#### 3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

#### 3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3 Format

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 4 Submission

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

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

E-mail: [synthesiology@m.aist.go.jp](mailto:synthesiology@m.aist.go.jp)

The submitted article will not be returned.

### 5 Proofreading

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

### 6 Responsibility

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

### 7 Copyright

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

Inquiries:

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

## 『読者アンケート』から

シンセシオロジーは2008年1月の創刊以来、各号の差し込みの葉書（読者アンケート）で皆様からご意見をいただけてきました。アンケート結果からは、多くの方々にシンセシオロジーの発刊の趣旨をご理解いただいていることがうかがわれます。ここでは創刊号以来これまでにいただいたご意見を抜粋して紹介します。貴重なご意見に感謝いたしますとともに引き続きご意見を賜りますようよろしくお願い申し上げます。

## シンセシオロジー編集委員会

## 1巻1号(2008年1月発行)

- (企業)産総研を網羅する言葉は全くないように、研究を1つの言葉でまとめることができない中、このような刊行物の発刊は大変だったと思います。非常に有益な情報ですので継続的な活動になるよう期待しています。(研究開発職、男、50～59歳)
- (企業)先端技術の紹介と利用可能な技術として大変有意義なことで、今後の発展を期待しています。(研究開発職、男、60～69歳)
- (企業)新しい技術を、産業界レベルの人に興味を持てるように分かりやすく書いていただいている点及び応用、適応例、分野を書いていただけて勉強になる。時々、このような新しい有望な情報に接する事は楽しい!!(技術職、男、60～69歳)
- (企業)専門性の強い研究を産業界技術にどう統合させるかは難しいことだと思います。個人的には「個別適合メガネフレーム…」が一番興味を引きました。また、査読者の意見も面白かったです。(技術職、男、50～59歳)
- (企業)興味があった「不凍蛋白質…」及び「高機能光学素子…」を読みましたが、部外者でも、目的、成果、課題、特に実用化の取組みが分かりやすく記載されて面白かった。産学官連携の一環として時宜を得た素晴らしい企画です。発展を祈ります。(管理職、男、60～69歳)
- (企業)査読者との議論が興味深かった。興味深い議論誌になることが期待されます。(管理職、男、60～69歳)
- (企業)当社には地質学関連の論文が多く蓄積されているが、他分野の技術情報(基礎研究)を得ることにより、今後への技術の応用が広がると思われる。(研究開発職、男、40～49歳)
- (公設研究機関)「査読者との議論」が新鮮でした。個人的にメガネフレームの論文に関心があります。(研究開発職、50～59歳)
- (公設研究機関)紙媒体で発行されることが少なくなった学術誌ですが、新しい試みとして、公的試験研究機関がやる価値があると考えます。発刊のねらいも同様で造語のタイトルに意気込みが感じられます。今後の充実を期待します。(事務職、50～59歳)
- (教育機関)具体的な社会への貢献方法が興味深い。(教育、男、60～69歳)
- (法人団体)企業の研究開発部門を担当していた時、研究はanalysis、開発はsynthesisであり、企業はsynthesisに重点と言ってきた。学会論文でも企業からの論文はsynthesisが多

いが、産総研からそれを宣言したジャーナルが生まれたことに敬意を表したい。編集方針が明確に示されており、この主旨での論文が読めることを嬉しく思います。(研究開発職、男、60～69歳)

## 1巻2号(2008年4月発行)

- (企業)新ジャーナルにリニューアルされ、更に読み易くなりました。内容も論文形式で充実され、産総研の幅広い研究がより理解し易くなり、とても参考になります。(管理職、男、60～69歳)
- (企業)構成学という今までの研究者にはレベルが低いとされていた世界に目を当てた点は評価したい。産業界では常識であったことが研究界でも認識されたことは、今後の科学技術の発展が身近なものとなりそうで大いに期待している。(男、50～59歳)
- (企業)「タンパク質のネットワーク解析から創薬へ」が大変参考になりました。(研究開発職、男、70歳以上)
- (企業)私自身以前開発に携わっていたが、今回のサービス工学には新鮮で興味をもった。当社は商社及び製造業機能を持っており、当然製品を売るのでこのサービス工学は非常に役に立つと思う。また、サービスを科学するという観点が非常に面白い。今後これに関する連載、書籍などがあれば紹介していただきたい。(事務職、男、40～49歳)
- (国立大学)本学の研究者にも意見を聞いたところ「査読者との議論」がユニークであるとのことでした。(事務職、男、30～39歳)
- (その他業種)査読者の所属を紹介してほしい。研究所外からの投稿に期待する。(その他職種、男、60～69歳)

## 1巻3号(2008年10月発行)

- (企業)シンセシオロジーを目指す(目的)とした論文が多く欲しいと思う。「うまくいったこと」の紹介が目的ではないはずなので、「うまくいかなかったこと」やその原因追求も十分に本ジャーナルの趣旨に合うものと考えます。(研究開発職、男、40～49歳)
- (企業)査読者との議論やコメントがあるのは論文内容を理解する上で、助けになり非常に良い。今後の課題、今後の展望があるのも通常の論文と異なり実用性重視の取組みが特色として見受けられて良い。(研究開発職、男、70歳以上)
- (国立大学)発刊の趣旨を理解した上で、学術誌(いわゆるジャー

ナル)と違った論文構成で、興味深く拝読した。(研究開発職、男、50～59歳)

•(マスコミ)再生医療など新しい分野に取り組んでいることに産総研の力強さを感じました。生命、バイオ、医学などの取り組みに期待します。(営業・企画・マーケティング、男、60～69歳)

#### 1巻4号(2008年12月発行)

•(企業)大変分かりやすい文章で難解な技術が説明されており、大変興味深く読ませていただきました。また、「ホテルの光の基礎研究から製品化研究へ」はタイムリーな論文と高く評価いたします。(技術職、男、60～69歳)

•(企業)編集方針が述べられており、中でも「研究論文の記載内容」、「査読について」に興味を引かされた。(事務職、男、60～69歳)

#### 2巻1号(2009年2月発行)

•(企業)研究の狙いや、苦労されたことが想起され、非常に参考になる。(研究開発職、男、50～59歳)

•(産業界の研究機関)読みやすい。中身も濃いと思う。(研究開発職、男、60～69歳)

#### 2巻2号(2009年6月発行)

•(企業)「地震考古学」論文は非常に参考となった。日本書紀の記載の検証などは興味につきない。(研究開発職、男、50～59歳)

•(企業)将来取り入れられたら良いと思う技術もあり読ませていただきました。インテリジェント電動車イスの技術は、安全な製品作りに応用していくことができる技術だと思います。(研究開発職、男、50～59歳)

•(企業)査読者との議論を入れているのは大変ありがたい。構成学の考えに沿っている。産業界に読者を増やす広告など考えてはいかがか。(技術職、男、50～59歳)

•(企業)産総研の社会的な位置づけを会社内に理解させるために役に立ちました。(研究開発職、男、40～49歳)

•(その他業種)最新の研究開発と実社会とのクロスポイント(関わり合い)がよく示されている内容と思い、高く評価しています。(自営業、男、50～59歳)

#### 2巻3号(2009年9月発行)

•(企業)非常に視覚的な活断層が記載されていて、分かりやすい。(研究開発職、男、60～69歳)

#### 2巻4号(2009年11月発行)

•(企業)騒音計測の信頼性に関し、自社内での騒音測定方法では、バラツキが生じ基準値を越えてしまいますが、今回の内容で理解が得られたので、信頼性の高いデータ測定が今後できると思います。(事務職、男、50～59歳)

•(国立大学)産総研のスローガンが「技術を社会に」であり、研究成果がそのものずばりのテーマであり素晴らしいと思った。具体的には長さ標準が「携行できるサイズでかつ手作り」で完成された研究者がいる団体のパワーを知り、改めて産総研について深く考える機会となった。シンセシオロジーの編集方針が広い対象の読者を見据えているものになっており内容がとても理解しやすい。(専門・短大・大学・大学院、男、20～29歳)

•(教育機関)環境関連の論文があり満足している。今後も、エネルギー、環境関連の充実を希望します。福祉関連、特に医療、高齢者などの論文の計画をお願いします。(研究開発職、男、50～59歳)

•(法人団体)「バイオ燃料を木材からナノテクで生産する」とインタビュー「工学の克復とシンセシオロジー」がとりわけ面白かった。(研究開発職、男、60～69歳)

•(その他業種)研究開発の視点について参考になります。(研究開発職、男、60～69歳)

•(その他業種)研究開発を進めた経緯が記述されていますので、読み応えを感じます。(研究開発職、男、60～69歳)

## 編集後記

シンセシオロジーを創刊してから2年が過ぎ、多くの皆様のご協力やご支援、ご理解をいただきながら3年目を迎えることができました。関係された皆様に感謝する次第です。

本号ではこれまでの2年を振り返ろうと、シンセシオロジーの編集に中心的に携わったメンバーと吉川産総研最高顧問による座談会を記事として紹介しています。シンセシオロジーの目指す方向や「構成学」の確立に向けた熱い思いが語られています。この中で吉川最高顧問から“social wish (社会的期待)”というキーワードが出され、社会の期待に応える、その期待を意識する、社会との接点という視点で改めてシンセシオロジーの意義が整理されており研究開発に関わる者すべてにとって一つの示唆を与えてくれています。

この号でも、その社会的期待に応えるという視点での論文が多く掲載されています。その中で、流量標準、温度標準に関する論文は、最高レベルの標準づくりという技術的な問題と標準供給という社会システムの中に組み込むための現実とのすり合わせという両方の問題を解決して標準供給体制を整備してきたことが述べられています。まさに、社会との接点で進められた研究開発の典型的な事例を示しています。

製造現場における熟練技能の抽出に関する論文では、ものづくり現場での熟練技能者の技能抽出とその代替方法についての成果が論じられています。この論文の中で“「現場で使える技術を開発せよ」という制約”の中で研究開発が進められたこと、この制約が“実は研究活動を健全にする上で有効であった。”と

述べられています。研究開発の現場では時として研究の本来の目的を忘れる、何の役に立とうとしているのかを忘れる、または意識しないことが起こるわけですが、研究開発、技術開発の本来の精神を思い出させてくれる論文であり、社会に受け入れられる研究を強く意識した論文であると思います。

研究開発と社会との係わりについて、研究評価という視点から今号では論説が寄せられました。この中で興味を引くのは、プログラム評価の重要性について論じている点とそのプログラム評価をシンセシオロジーのもつ意義と対比して論じている点です。産総研の進める研究開発は常にその社会的な意義に立ち返りながら進めていかなければならないと思いますが、研究評価はそのためにこそ重要であるという思いを強く持ちました。

今号では多様な分野からの論文等を掲載しましたが、シンセシオロジーの発展によって分野にかかわらず共通に、自らの研究を学術的な面からだけでなく、“social wish (社会的期待)”という文脈で構成的・統合的に、“自然に”語れる、実践できる研究者が一人でも多く生まれることを願いたいと思います。

この度シンセシオロジー誌がエルゼビア社のデータベース「Scopus」に収録されることになりました。検索によりSynthesiologyの論文がヒットすれば、Scopusの画面上で見ることができることとなります。

シンセシオロジー編集委員会では皆様からの投稿をお待ちしております。

(編集副委員長 瀬戸 政宏)

Synthesiology 3巻 1号 2010年3月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

---

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：石井 武政

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

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

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

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



## Messages from the editorial board

### Research papers

Improving the reliability of temperature measurements up to 1550 °C

*-Establishing the temperature standards and calibration system for thermocouples-*

M.Arai, H.Ogura and M.Izuchi

Biomarker analysis on microchips

*-Development of POCT device for multi-marker analysis-*

M.Kataoka, S.Yatsushiro, S.Yamamura, M.Tanaka and T.Ooie

Development of primary standard for hydrocarbon flow and traceability system of measurement in Japan

*-Approach to construction of an effective and reliable traceability system-*

T.Shimada, R.Doihara, Y.Terao and M.Takamoto

A field-scientific approach to Clinico-Informatics

*-Towards general models of technology transfers-*

Y.Kinoshita and T.Takai

Acquisition of skills on the shop-floor

*-Visualization and substitution of skills in manufacturing-*

N.Matsuki

Secure implementation of cryptographic modules

*-Development of a standard evaluation environment for side channel attacks-*

A.Satoh, T.Katashita and H.Sakane

### Article

“Science for society” and evaluation of research and technology development

*-The framework of program evaluation and implication for Synthesiology-*

R.Ohtani

### Round-table talk

Reviewing the second year of *Synthesiology*

### Editorial policy

### Instructions for authors