

Synthesiology

フレキシブル太陽電池の高性能化技術開発

地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全性評価

圧力計測の信頼性向上と国際相互承認

微生物変換による活性型ビタミンD₃の効率的生産

シンセシオロジー編集委員会

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

Synthesiology 第4巻第4号(2011.11) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
フレキシブル太陽電池の高性能化技術開発 — 「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」の運営と成果 — ・・・増田 淳	193 – 199
地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全性評価 — 事象のシナリオに基づく長期予測の方法論 — ・・・山元 孝広	200 – 208
圧力計測の信頼性向上と国際相互承認 — 工業用デジタル圧力計の計量標準体系への組み込み — ・・・小島 時彦、小島 桃子、梶川 宏明	209 – 221
微生物変換による活性型ビタミン D ₃ の効率的生産 — 分子の改良から細胞膜改変までの包括的アプローチ — ・・・安武 義晃、田村 具博	222 – 229
座談会	
システムと構成学を考える ・・・桑原 洋、小野 晃、赤松 幹之	230 – 237
編集委員会より	
編集方針	238 – 239
投稿規定	240 – 241
4巻総目次(2011)	248 – 249
編集後記	250
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Development of high efficiency flexible solar cells — Management of “Flexible Solar Cell Substrates Consortium” and its achievements — --- A. MASUDA	193
Safety assessment of high-level nuclear waste disposal in Japan from the standpoint of geology — Methodology of long-term forecast using geological history — --- T. YAMAMOTO	200
Improvement of reliability in pressure measurements and international mutual recognition — Incorporation of industrial digital pressure gauges to the national metrology system — --- T. KOBATA, M. KOJIMA and H. KAJIKAWA	209
Efficient production of active form of vitamin D₃ by microbial conversion — Comprehensive approach from the molecular to the cellular level — --- Y. YASUTAKE and T. TAMURA	222
Messages from the editorial board	242 – 243
Editorial policy	244 – 245
Instructions for authors	246 – 247

フレキシブル太陽電池の高性能化技術開発

— 「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」の運営と成果 —

増田 淳

フレキシブル太陽電池開発に必要な要素技術課題を明らかにし、課題解決のための産学官からなるコンソーシアム体制を構築した。フレキシブル薄膜シリコン太陽電池の高効率化に必須のポリマー基材への凹凸形成技術を開発し、ガラス基板上と同等の性能をもつ薄膜シリコン太陽電池をポリマー基材上に作製することに成功した。現在は、コンソーシアム研究の段階から企業内での実用化研究の段階に移行している。当該コンソーシアムの設立過程、運営方針、特許戦略さらには若手人材育成の考え方について概説する。

キーワード: フレキシブル薄膜太陽電池、コンソーシアム、ポリマー基材、凹凸形成技術、若手人材育成

Development of high efficiency flexible solar cells

— Management of “Flexible Solar Cell Substrates Consortium” and its achievements —

Atsushi MASUDA

Elemental technological challenges required for the development of flexible solar cells have been clarified and a consortium system to solve the problems has been established based on industry-academia-government collaboration. The technology to form texture on polymer substrates indispensable for high efficiency has been developed, and we have succeeded in preparation of thin-film silicon solar cells on polymer substrates whose efficiency is comparable with that of cells prepared on glass substrates. The stage has already moved from research within the consortium to practical realization research in individual enterprises. Establishment process, management policy, patent strategy and training of young researchers of the consortium are described in this paper.

Keywords: Flexible thin-film solar cells, consortium study, polymer substrates, texture, training of young researchers

1 フレキシブル太陽電池開発の目的

太陽光発電市場は近年飛躍的な拡大を続けており、成長率は前年度比 40～50% 程度を維持し、2010 年の世界の年間生産量は 23 GW を超えた。この値はピークパワーで原子力発電所約 23 基分に相当する。今後も市場は順調に成長を続け、2030 年の年間生産量は少なく見積もっても 100 GW に達するものと予想される。太陽光発電の普及拡大には、軽量化による設置コストの低減ならびに設置場所の拡大も重要である。通常の太陽電池パネルは、受光面にカバーガラスが用いられているため、耐荷重の低い屋根等には設置できない場合も多く、また屋根の補強等で設置コストが高額になる場合もある。一方、基材にポリマーや金属シート等を用いたフレキシブル太陽電池は、ガラスを用いていないために、これまでの太陽電池に比べて重量を数分の 1～十分の 1 程度にまで軽量化可能であり、設置場所の拡大に資することができる。フレキシブル太陽電池の利点としては、この他にも、曲面への設置が容易であること、

ガラスのように割れることがなく安全であること、ロールトゥロール工程を適用できるために生産性に優れること、輸送や保管が容易であること等が挙げられる。

2 フレキシブル太陽電池開発の戦略とシナリオ

各種フレキシブル太陽電池のうち、フレキシブル薄膜シリコン太陽電池は、すでに国内でも量産が始まり、徐々に普及も進みつつある。薄膜シリコンは光吸収係数がさほど大きくなく、かつ光照射による性能の低下を抑制するためには光吸収層をさほど厚くできないことも知られているため、効率向上のためには、何らかの方法で光吸収層内部へ光を閉じ込めることが重要となる。一般的な薄膜シリコン太陽電池では、透明導電膜表面に形成された凹凸形状を用いた光閉じ込めにより、太陽光を有効活用している。例えば、ガラス基板上に酸化物透明電極、p 型シリコンドープ層、i 型シリコン光吸収層、n 型シリコンドープ層、酸化物透明電極、裏面金属電極の順に形成するスーパーストラー

産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター 〒841-0052 鳥栖市宿町 807-1
Research Center for Photovoltaic Technologies, AIST 807-1 Shuku-machi, Tosu 841-0052, Japan E-mail: atsushi-masuda@aist.go.jp

Original manuscript received January 31, 2011, Revisions received September 1, 2011, Accepted September 1, 2011

ト型薄膜シリコン太陽電池では、図1に示すように、光をガラス基板側から入射するために、酸化物透明電極表面に凹凸形状を設け、光を散乱させて光吸収層に光を閉じ込めることで、効率向上を実現している。

旭硝子(株)製 Asahi-U は、フッ素添加酸化錫透明電極を形成したガラス基板であるが、アモルファスシリコン太陽電池に最適な凹凸形状を有する酸化錫表面が得られることが知られている。Asahi-U では、最適な凹凸形状を形成するために、フッ素添加酸化錫の製膜時に 500℃程度の基板温度を要する。しかし、500℃程度の耐熱性を有する汎用ポリマー基材は存在せず、ガラス基板を用いる場合と同様の方法でフレキシブル薄膜シリコン太陽電池の高性能化を図ることはできない。

この課題を解決するために、ポリマー基材の耐熱性を上げる戦略も考えられるが、この研究では、ポリマー基材そのものに凹凸形状をもたせる新たな技術を開発することで、酸化物透明電極に凹凸形状を形成した場合と同等の特性を発現させることを検討した。このことにより、酸化物透明電極自体は、凹凸形状の形成に必要な高い基板温度で製膜する必要がなくなるため、製膜条件を大幅に緩和することが可能となる。

このような技術開発は産総研 太陽光発電研究センター(当時)だけで実施できるものではない。太陽電池の作製技術に関しては、太陽光発電研究センターでさまざまな経験やノウハウを持ち合わせているものの、フレキシブル太陽電池に重要なポリマー基材の技術やロールツーロール装置の技術は持ち合わせていないため、研究を円滑かつ迅速に遂行するため、これらの技術を有する部材メーカーや装置メーカーを中心に、広く産学官の知見を結集可能な産学官連携コンソーシアム型の共同研究を実施することを試みた。

コンソーシアム型共同研究の目的は大きく分けて二つあ

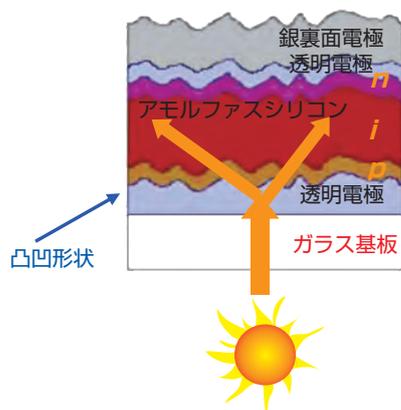


図1 アモルファスシリコン太陽電池における光閉じ込めの原理

る。一つ目は、複数の民間企業と集中研方式で研究課題に取り組むことにより、迅速な技術の集積で開発が加速され、その成果の産業界への移転も加速されることである。二つ目は、民間企業から産総研に派遣された共同研究員のOJTを通じた人材育成であり、複数の企業が連携して研究を行うことにより、研究面での成果のみならず人的ネットワークの構築も期待できる。上記シナリオに基づいて研究開発を遂行するために設立した「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」の実施体制について以下に紹介する。

「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」第一期の期間は2006年6月～2008年3月で、石川島播磨重工業(株)(期間中に(株)IHIに社名変更)、(株)石川製作所、(株)きもと、筒中プラスチック工業(株)(期間中に住友ベークライト(株)と合併し住友ベークライト(株)に社名変更)、帝人デュボンフィルム(株)、日本合成化学工業(株)、三菱瓦斯化学(株)、(株)麗光(五十音順)の8社が参加し、石川県工業試験場と太陽電池メーカー1社がオブザーバーとして加わった。第一期のコンソーシアムの体制を図2に示す。

第二期の期間は2008年4月～2010年3月で、(株)有沢製作所、(株)きもと、住友ベークライト(株)、帝人デュボンフィルム(株)、東芝機械(株)、日本合成化学工業(株)、三菱瓦斯化学(株)(五十音順)の7社が参加し、第一期と同じ太陽電池メーカー1社がオブザーバーとして加わった。第三期は2010年4月以降継続中であり、(株)きもと、帝人デュボンフィルム(株)、東芝機械(株)、日本合成化学工業(株)、三菱瓦斯化学(株)(五十音順)の5社が参加し、実用化を目指したフェーズでの研究を進めている。図3にはこの論文で紹介する内容に限定して、このコンソーシアムでの実用化シナリオを、当該課題にかかわったメンバーと役割分担を含めて図示する。

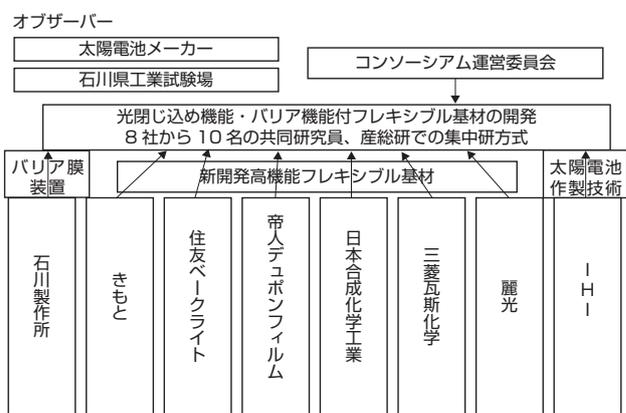


図2 「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」(第一期)の体制

3 フレキシブル太陽電池開発に必要な要素技術課題

「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」では、薄膜シリコン太陽電池の光閉じ込めに適した凹凸形状をポリマー基材そのものに形成することを基本的な要素技術とした。このことによって、透明電極に凹凸形状をもたせなくともよくなるので、透明電極製膜時の基板温度等の条件が緩和され、耐熱性の低いポリマー基材に適したプロセスになると考えられるからである。ポリマー基材自身に凹凸形状を形成するというアイデア自体は、このコンソーシアムでの研究で初めて得られたわけではなく、これまでもいくつか報告がある^{[1][2]}。例えば、凹凸形状を有するスタンプによる転写や、リソグラフィ等を用いる方法がこれまでに提案されてきた。しかし、スタンプによる転写は、対象が熱可塑性のポリマー基材に限定されるうえ、プリントされた凹凸形状に十分な精度や再現性が得られないことが課題である。また、リソグラフィを用いる方法では、理想的な凹凸形状を得るのが困難なうえ、リソグラフィ装置が高価なことも課題であった。この研究では、ポリマー基材の材料を選択しない汎用的な技術となり得ること、さらには光閉じ込めに適した凹凸形状を正確に転写できることを条件として、ポリマー基材上への凹凸形状の新しい作製法を検討した。その結果、モールド上に形成した凹凸形状を転写した紫外光硬化性アクリル樹脂をラミネートした基材が有効であるとの結論を得た。この論文では Asahi-U の凹凸形状を転写した基材ならびに無反射構造として知られるモスアイ構造の凹凸形状を転写した基材を比較検討した結果を示す。また、この論文では、ポリマー基材としてポリエチレンナフタレート (PEN) フィルムやポリアイミド (PI) フィルムを用いた例を示すが、この方法の対象は、これらのフィルムに限定されるわけではなく、ポリエチレンテレフ

タレート (PET) やポリカーボネート (PC) 等の他のポリマー基材でも有効なことを確認している。さらに、この方法は、ポリマー基材のみならず、ガラス基板に対しても適用できることを見いだしている。

4 コンソーシアムの構成と運営

4.1 コンソーシアムでの役割分担

フレキシブル太陽電池開発に必要な要素技術課題が明らかになったが、この課題を解決するためには、ポリマー基材や紫外光硬化性アクリル樹脂に関する材料技術、両者の貼り合わせに関する加工技術、最適凹凸形状のシミュレーション技術、量産化に必須のロールツーロール装置技術、薄膜シリコン太陽電池作製のためのプロセス技術やデバイス技術等を組み合わせることが必須である。これらの技術は太陽光発電研究センターがすべてを持ち合わせているわけではなく、第2章でも述べたように、産学官連携コンソーシアム型共同研究で実施するのが好適と判断した。本章では、コンソーシアムの具体的な運営方針について紹介する。

「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」では、産総研が研究を統括するとともに、ポリマー基材上での透明電極ならびに太陽電池作製条件の検討を担当し、参加企業はポリマー基材開発を担当した。参加企業の役割分担は図3にも示すように、主として、三菱瓦斯化学(株)がシミュレーションによる凹凸形状の設計、帝人デュボンフィルム(株)がPENフィルム(テオネックス[®])の開発とコンソーシアムへの供給、日本合成化学工業(株)が紫外光硬化性アクリル樹脂の開発とコンソーシアムへの供給、(株)きもとがポリマー基材表面へのハードコート、東芝機械(株)が枚葉方式またはロールツーロール方式でのナノインプリント技術によるアクリル樹脂への凹凸形状の転写を担当した。凹凸形状の設計については現在開発中の項目も多く、この論文では Asahi-U ならびにモスアイ構造の凹凸形状を転写した結果についてのみ示す。Asahi-U が自己形成で得られた形状を用いているのに対して、このコンソーシアムで開発した基材は転写により凹凸形状を形成しているため、任意の形状に対応することができる。したがって、凹凸形状の精密設計により、Asahi-U 基板を用いた場合を凌駕する性能の太陽電池が得られる可能性もある。このことは、ガラス基板上に作製された現行の薄膜シリコン太陽電池よりも高効率の太陽電池がポリマー上で得られる可能性を示唆するものである。このため、凹凸形状の設計は極めて重要な研究テーマとなる。

4.2 月次研究会の運営

このコンソーシアムでは、参加企業から産総研に研究員

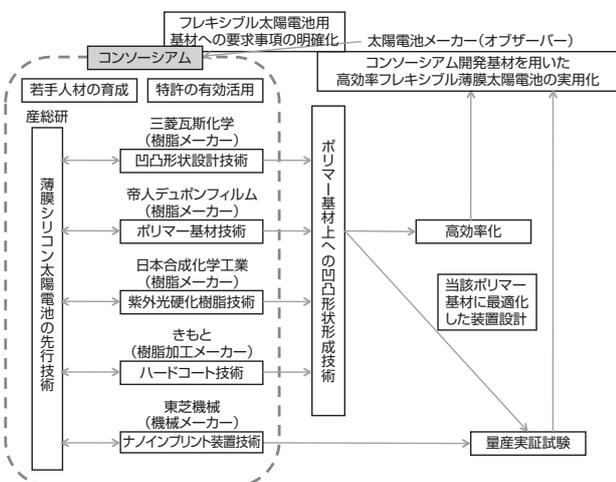


図3 コンソーシアム方式によるフレキシブル薄膜シリコン太陽電池の実用化シナリオ

を派遣する集中研方式を採用した。全社の研究員が参加する月次研究会を開催し、研究成果は全社で共有するとともに、研究会での議論を通じて、参加企業間の協業テーマの設定や、研究テーマの方向性を見直しも臨機応変に進めた。これらのことを通じて研究開始当初は想定していなかった派生的な成果も得られた。したがって、月次研究会での発言は極めて重要であり、発明の認定の証拠と成り得ることもあるので、研究会の議事録は充実させた。

このコンソーシアムには相互に競合となる企業も参加しているため、合同の月次研究会での発表には次のようなルールを設けた。つまり、このコンソーシアムの中心的メンバーである材料・部材メーカーが最も重要視する材料の合成法やノウハウについては研究会で開示しなくともよいこととした。材料の合成は基本的には参加企業が社内で単独で実施するものであり、原則として知見を共有すべきものでないと考えたからである。一方、太陽電池の作製に関する結果は参加企業で共有すべきものと考え、太陽電池性能に影響する部材の特性については開示を原則とした。また、部材を組み合わせる際には、構成材料の合成法等を知ることが必要になる場合もあるが、その場合は限られたメンバーで別途秘密保持契約を締結することで合意を得た。このように、各社が共同で保有する技術と個別に開発する技術を明確に区分することで、コンソーシアム参加の利点を最大限に引き出すとともに、各社の個別の利益も保護できたことが、コンソーシアム成功の一因と考えている。

4.3 運営委員会と特許戦略

さらに、参加企業各社と産総研の代表で構成されるコンソーシアム運営委員会を最高意思決定機関と定義した。成果の取り扱いや発明が生じたときの発明者の認定、さらには利害の調整等について課題が生じた場合には運営委員会を開催し、その裁決に従うこととすることで、コンソーシアム運営の公平性ならびに透明性を高め、円滑な運営が実現できた。コンソーシアムで生じた発明については、発明者の所属する組織が出願人となり、その持ち分比率は寄与度に応じるものとしたが、出願人とはならない参加企業も適正な実施料を支払えば当該発明を実施できるものとした。つまり、特定の企業の独占は認めないことをコンソーシアム参加の動機付けの一つとした。太陽電池に関する成果はコンソーシアムの共有財産であるという考え方と、参加企業の社内での研究開発を原則とする材料そのものに関する知見やノウハウはコンソーシアムに持ち込まないとの考え方の二つを基本とすることで、このような発明の取り扱いを可能にした。さらに、コンソーシアムで得られた研究成果は、特許出願後に速やかに公開することを基本とした。

4.4 若手人材育成の方針

このコンソーシアムは、公的資金は用いずに民間資金で運営されているものの、研究に使用している装置の大半はコンソーシアム設立以前に産総研の研究費で購入されたものであり、研究に適用しているノウハウ等も産総研でこれまでに開発してきたものである。また、民間企業からの共同研究費と同額を上限として、いわゆるマッチングファンドが産総研から支給されている。このような事情に鑑み、公的研究所としての使命を果たすためにも研究成果は積極的に公開しているところである。このような研究成果の公開を通じて、参加企業から派遣された共同研究員が国際会議等の学会で発表したり、英文の論文を執筆したりすることも、若手人材育成の観点から有益と考えている。学会発表の場で得られたコメント等により研究が大いに進展した例や、共同研究員が新たに構築した人脈により参加企業にとってもビジネスの機会が広がった例もあった。また、産総研に派遣された共同研究員が、産総研在籍中に太陽電池の知識を幅広く身につけることを目的に、研究活動の一環として関連のセミナー等も多数実施し、共同研究終了後も社内で太陽電池の専門家として活躍できることを心がけた。

5 コンソーシアム研究の成果

コンソーシアム研究の結果、PEN フィルムや PI フィルム上に、旭硝子(株)製酸化透明電極付ガラス Asahi-U の表面凹凸形状を転写した紫外光硬化性アクリル樹脂をラミネートした基材が開発された。図4には開発した基材の外観写真を示す。当該基材のベースフィルムは PEN であり、転写された凹凸形状により光の散乱が増強され、肉眼では白く見えることがわかる。

図5に基材の作製法の概略を示す。Asahi-U やモスアイ構造をそのまま転写したのでは、図5中に走査電子顕微鏡写真を示すように凹凸形状が逆転するため、所望の構造を



図4 Asahi-Uの凹凸形状を転写したPENフィルムの外観写真

いったん転写した型をモールドとして用いた。まず、モールド上に紫外光硬化性アクリル樹脂モノマーを塗布し、この上にPENやPI等の汎用フィルムをラミネートする。ラミネート後に紫外光を照射することで、モノマーがポリマーに変化する。フィルムをモールドから剥離すると、表面に凹凸形状の転写されたアクリル樹脂がラミネートされたポリマー基材を得ることができる。図5中の原子間力顕微鏡写真に示されるように、基材表面に凹凸形状が存在することがわかる。この方法は、図5に示す枚葉方式のみならず、図6に示すようなロールツーロール方式にも適用可能なことをすでに実証しており、量産化に際しての障害は見当たらない。

PIフィルムならびにPENフィルム上に作製したアモルファスシリコン太陽電池の電流密度-電圧特性を図7に、分光感度特性を図8に示す。アモルファスシリコン太陽電池はサブストレート構造とし、ポリマー基材/凹凸形状を有するアクリル樹脂層/ガリウム添加酸化亜鉛層/銀裏面電極層/ガリウム添加酸化亜鉛層/n型アモルファスシリコンドープ層/i型アモルファスシリコン光吸収層/p型アモルファスシリコンドープ層/酸化インジウム錫透明電極/銀集電

極の構成とした。凹凸形状を形成した基材を用いることにより、ポリマー基材上でも充分な光閉じ込めが実現し、電流密度が増大することが図7から示された。図7からは、凹凸には最適な形状があり、モスアイ構造を転写した形状を用いた場合の電流密度は、Asahi-Uの表面構造を転写した形状を用いた場合の電流密度に及ばないことも明らかとなった。また、図8からは、凹凸形状を形成した基材を用いた場合には、光閉じ込めにより、長波長側の分光感度が増加していることも示された。表1に示すように、ポリマー基材を用いた場合においても、Asahi-U上に作製した場合と同等の太陽電池特性が得られた。つまり、ガラス基板上に作製した場合と同等の性能を有するアモルファスシリコン太陽電池を、ポリマー基材上に作製することに成功した。このコンソーシアムの研究成果等で、参加企業の東芝機械(株)が nano tech 2009 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議にて、nano tech 大賞微細加工技術部門賞を受賞した。また、この論文では詳細は省略するが、コンソーシアム参加企業の住友ベークライト(株)が、同社が開発した有機-無機ハイブリッドフィルムであるスミライ

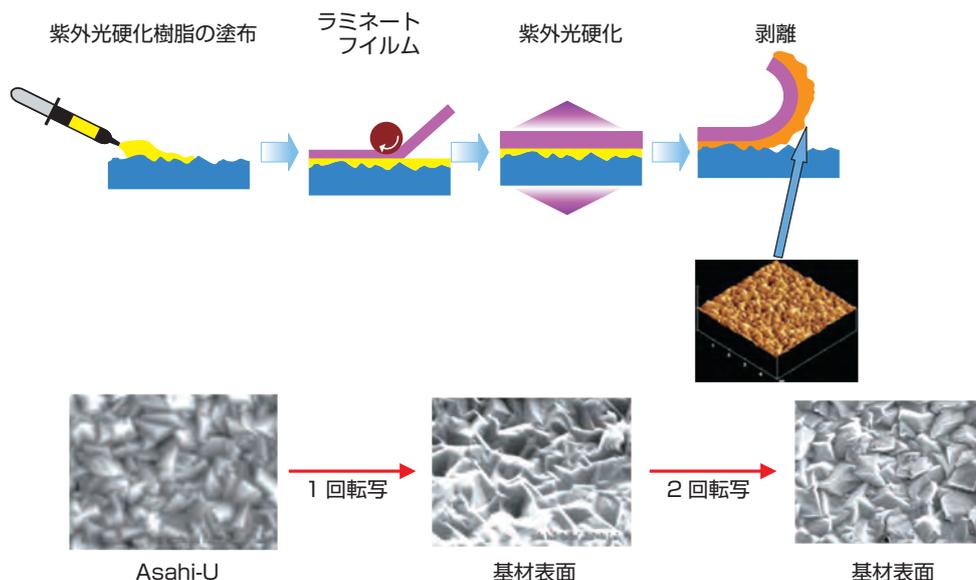


図5 枚葉方式による基材の作製法の概略ならびに Asahi-U および基材表面の顕微鏡写真

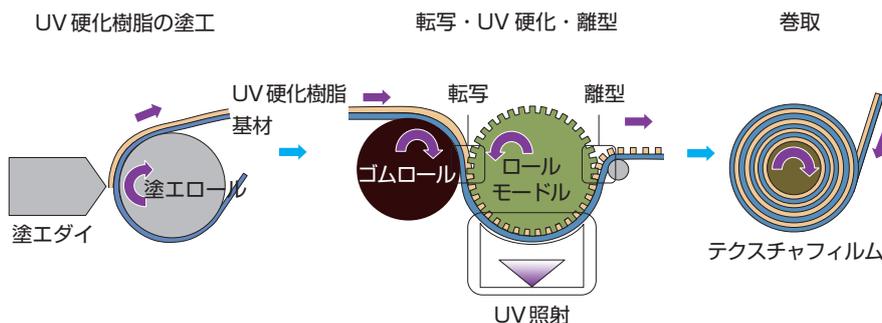


図6 ロールツーロール方式による基材の作製法の概略

表1 各種基材上に作製した太陽電池の特性

基材	短絡電流密度 (mA/cm ²)	開放電圧 (V)	曲線因子	効率 (%)
Asahi-U	15.7	0.88	0.59	8.2
Asahi-U 転写 PI	15.0	0.84	0.65	8.3
平坦 PI	11.7	0.83	0.68	6.5
Asahi-U 転写 PEN	15.6	0.87	0.60	8.1
モスアイ転写 PEN	14.1	0.87	0.62	7.7

ト[®]上に、この転写技術を用いてスーパーストレート構造のアモルファスシリコン太陽電池を作製し、その有効性を実証している^[3]。

この他、耐候性の高いフレキシブル太陽電池の作製を目的に、ポリマー基材上へのバリアー膜形成についても、このコンソーシアムで石川製作所ならびに石川県工業試験場を中心に研究を進めた。部材メーカーへの導入を容易にするために、化学気相成長法による窒化シリコン系バリアー膜の原料ガスに特殊高圧ガスであるモノシランを使わないことを目標とし、ヘキサメチルジシランを原料ガスに用いた場合でも、PEN フィルム上に堆積速度 40 nm/min で形成

したバリアー膜において、水蒸気透過率 0.02 g/m²day を達成した。

6 残された課題

「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」は開始から6年目を迎え、産総研とコンソーシアム参加企業の経験、知見を結集することで、研究段階、実験室レベルでの目標はおおむね達成できた。実用化のためには、太陽電池メーカーでの試作が今後重要となる。コンソーシアムで開発した基材を、現行の基材に置き換えるためには、太陽電池デバイス構造の設計変更も必要となる可能性があり、これからの段階では、太陽電池メーカーの意思決定も重要となる。今後は、コンソーシアム研究活動の段階から、オブザーバーとして参加した太陽電池メーカーとの協業による、実用化を視野に入れた開発段階に移行する時期にあり、産総研、コンソーシアム参加企業、太陽電池メーカーの間で、太陽電池メーカーへの技術移転を目的とした検討を開始したところである。また、「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」でのコンソーシアム運営方法の経験を活かし、2009年10月1日からは、民間企業33社、太陽光発電技

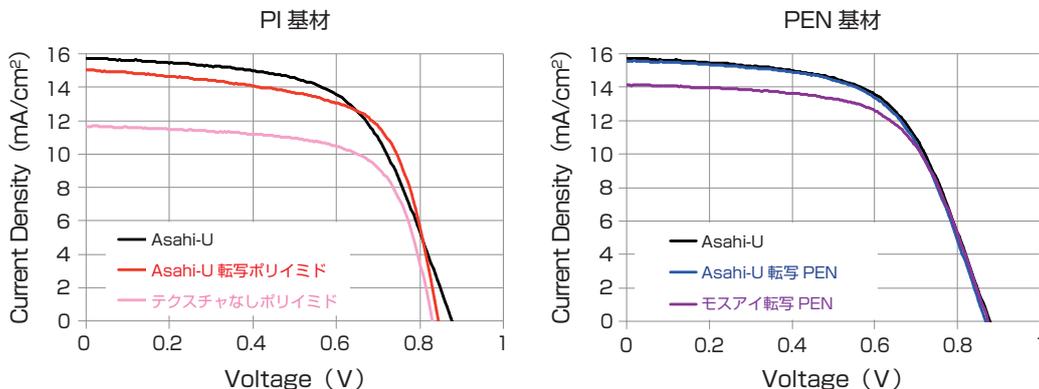


図7 PI フィルムならびに PEN フィルム上に作製したアモルファスシリコン太陽電池の電流密度 - 電圧特性

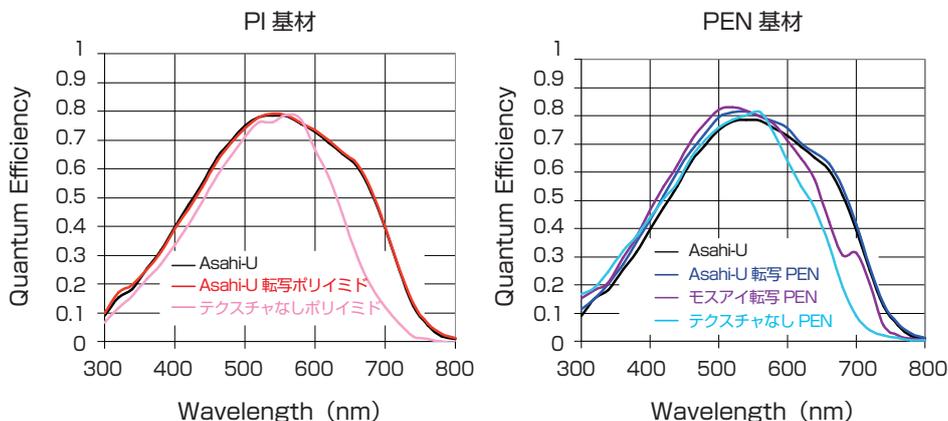


図8 PI フィルムならびに PEN フィルム上に作製したアモルファスシリコン太陽電池の分光感度特性

術研究組合等 44 機関と「高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」を設立し、太陽電池モジュールの長寿命化・信頼性向上による発電コストの低減ならびに信頼性を正確に可視化可能な試験法の開発に資する研究に取り組んでおり、現在は民間企業等 78 機関と第 II 期コンソーシアムで研究開発を実施している。

太陽光発電の技術開発には、材料、プロセス、デバイスからシステムに至るまで、幅広い分野の知識の融合が必要である。太陽光発電の分野では、第一次石油ショック直後に開始されたサンシャイン計画当初から緊密な産学官連携活動が展開され、今日の産業として花開いたことは周知であるが、太陽光発電産業の一層の発展のためにも、異なる分野の連携による技術開発がこれまで以上に重要になることは言うまでもない。さらには、産学官連携活動での OJT による民間企業の研究員やポスドク、学生といった若手人材の育成が、産業の継続的発展のために、技術開発と同等以上に重要である。産総研 太陽光発電工学研究センターで実施している産学官連携コンソーシアム型共同研究の取り組みが、新規技術開発・技術移転と人材育成の双方に資することができるよう、コンソーシアムの運営に鋭意取り組んでいる。

謝辞

この論文で紹介した「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」の研究成果は、(株)石川製作所の仁木敏一氏、(株)きもとの野辺丈司氏、栗嶋進氏、住友ベークライト(株)の井上雄介氏、榎田英雄氏、帝人デュポンフィルム(株)の西尾玲氏、中広貴氏、東芝機械(株)の萩原明彦氏、日本合成化学工業(株)の勝間勝彦氏、早川誠一郎氏、三菱瓦斯化学(株)の徳丸照高氏、産総研の原由希子氏、山本千津子氏、柄澤稔氏、武山洋子氏(現所属、東京工業大学)、保月奈々氏(現所属、太陽光発電技術研究組合)との共同研究によるものである。この研究に関して貴重な助言をいただいた、産総研 太陽光発電工学研究センターの近藤道雄センター長、鯉田崇主任研究員、松井卓矢主任研究員に感謝する。

参考文献

- [1] C. Ballif: *2nd Int. Plastic Electronics Conf. & Showcase, Frankfurt*, 2006, 1.9.5.
- [2] M. Fonrodona, J. Escarré, F. Villar, D. Soler, J.M. Asensi, J. Bertomeu and J. Andreu: PEN as substrate for new solar cell technologies, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 89, 37-47 (2005).
- [3] 井上雄介, 榎田英雄, 山本千津子, 増田 淳, 近藤道雄: 有機-無機ハイブリッドフィルムを用いたスーパーストレート型薄膜シリコン太陽電池の作製と特性, *第57回応用物理学関係連合講演会講演予稿集*, 20a-TG-4 (2010).

執筆者略歴

増田 淳(ますだ あつし)

1966 年生まれ。1992 年金沢大学大学院工学研究科修士課程修了。富士ゼロックス総合研究所勤務、日本学術振興会特別研究員を経て、1996 年金沢大学大学院自然科学研究科物質科学専攻博士課程修了。博士(工学)。1996 年北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科物性科学専攻助手。2005 年産業技術総合研究所太陽光発電研究センター産業化戦略チーム長、2010 年同太陽電池モジュール信頼性評価連携研究体長、2011 年同太陽光発電工学研究センター太陽電池モジュール信頼性評価連携研究体長、現在に至る。



査読者との議論

議論 1 標題

コメント(大和田野 芳郎:産業技術総合研究所環境・エネルギー分野)

産総研が独自に企画・組織した大規模な技術開発コンソーシアムの報告として、大変貴重な論文です。

標題の主題と副題を、開発内容とコンソーシアムで運営したことが分かるように修正してはどうでしょうか。

回答(増田 淳)

ご提案のとおり、

フレキシブル太陽電池の高性能化技術開発

—「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」の運営と成果—としました。

議論 2 内容の区分け、各章の題目

コメント(大和田野 芳郎)

・背景と技術開発のテーマ設定

・コンソーシアムの構成と運営の仕方

・得られた成果

等の点が分かりやすいように、各章のタイトルを具体的につけ、長い本文を内容ごとに段落分けして、読みやすく整理してはどうでしょうか。

回答(増田 淳)

各章の構成を整理し、題目を具体的に内容がわかるように変更しました。また、4 章につきましてご提案を反映して節に分けるとともに、一部加筆しました。

地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全性評価

— 事象のシナリオに基づく長期予測の方法論 —

山元 孝広

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、閉鎖後の処分システムの安全性評価の対象期間は数十万年を超えるとされるが、そのような長期の安全性をいかに示すのか、いかなる基準を設け規制を課すべきなのかが大きな問題となっている。特に日本は地震や火山活動が活発な変動帯にあり、安全性評価に必要な地質学的課題は多岐に及ぶ。この論文では、火山活動の噴火履歴の解析結果を例にして、一つの出来事がプロセスを経て次々に出来事を誘発するという一連の事象(シナリオ)に基づく課題の抽出と地質事象の成因に踏み込んだ長期の将来予測の方法論を提示した。

キーワード: 放射性廃棄物、地層処分、地震、火山、将来予測

Safety assessment of high-level nuclear waste disposal in Japan from the standpoint of geology

– Methodology of long-term forecast using geological history –

Takahiro YAMAMOTO

Concerning the geological disposal system of high-level nuclear waste, the term subject to safety assessment of the system after closure is considered to exceed several hundred thousand years. We are faced with the major issues of how to guarantee such long-term safety and on what kind of criteria the system should be regulated. Because the Japanese islands lie in the mobile belt where earthquakes and volcanic activities often occur, a variety of geological issues required for the safety assessment have to be taken into consideration. In this paper, issues are extracted from a series of facts or scenario where incidents occur one after another provoked by one incident, and one such example is given of analysis results of the eruption history of volcanic activities. A methodology for long-term forecast addressing the causes of geological phenomena is also presented.

Keywords: High-level nuclear waste, geological disposal, seismicity, volcanism, long-term forecasting

1 はじめに

地質学とは、19世紀前半に書かれたチャールズ・ライエルの「地質学原理」の冒頭にあるように、過去に地球で起きた一連の変化を研究する科学である。地質学の人類に対する最大級の寄与は悠久なる時間(ディープ・タイム)の発見であり、岩石や地層に残された記録から、約46億年に及ぶ地球の歴史をひもといてきた。地質学が得意とするのは数千年から数百万年という長期の時間尺度で自然現象をとらえて研究対象地域の成り立ちを理解することで、古くは石油・金属等の資源探査や近年は地震・火山等の地質災害の軽減へと成果が活用されることが多かった。

一方で、社会的な要請の変化から地質学が対処すべき新たな課題が生じている。それは原子力発電から生じた放射性廃棄物を人間の生活環境から隔離された地下に埋設する地層処分であり、この処分が安全であるためには将来数十万年を超える長期にわたって地下の地質環境が

安定であることが求められる。このような時間尺度の安全性を人工的な構造物で囲い工学的に担保することは不可能であり、地下の地質環境そのものが放射性廃棄物に対する天然のバリアとして十分に機能することで安全な処分が成立する。つまり地層処分で求められる長期の安定性評価に答えられるのは地質学的な知見であり、これを最大限に活用した安全規制・安全審査なくしては、地層処分はなし得ない。図1は地層処分立地調査の調査評価項目と閉鎖後の安全確保の関係を概略的に示したものである。この論文では、この安全確保の考えにしたがい、地層処分の安全審査で求められる地質学的な調査・評価項目の抽出と、対象となる地質事象のモデルの構築に基づく長期の将来予測の方法論について記述する。

2 地層処分とは?

日本の法令では、さまざまな放射性廃棄物を放射能レ

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7
Geological Survey of Japan, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: t-yamamoto@aist.go.jp

Original manuscript received March 31, 2010, Revisions received September 27, 2011, Accepted September 27, 2011

ベルによって二つの処分施設のいずれか、すなわち第一種廃棄物埋設施設または第二種廃棄物埋設施設に処分することが決められている。前者は、いわゆる地層処分と呼ばれるものであり、長期にわたり廃棄物を生物圏から隔離する必要のある場合にとられる処分方法で、地下 300 m 以深に廃棄物を埋設する。対象となる廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物の一部（長半減期低発熱放射性廃棄物）である。高レベル放射性廃棄物は、使用済核燃料を再処理する過程で生じた高レベル放射性廃液をガラス固化したもので、半減期の長い核種を含むため放射性廃棄物としての「寿命」はとても長いことに特徴がある。そして、このことが地層処分という人による管理を前提としない処分方法を選択する基本的な理由となっている。高レベル放射性廃棄物の放射能がもとのウラン鉱石（品位 1 % の高濃度のもの）の放射能レベルまで下がるのには発電後 10 万年程度を要するものとされている^[1]。一方、第二種廃棄物埋設とは、人の介入を前提とした管理処分であり、比較的浅い地下に前述以外の低レベル放射性破棄物を埋設する。

放射性廃棄物の処分の形態は廃棄物の種類によって異なるが、いずれの場合も廃棄物による一般公衆の被ばくを所定値以下にし、かつ合理的に可能な限り低く保つものでなければならない^[2]。これを基本的な安全性と考え、その安全性を確保するために、最終処分場では廃棄体そのものを含む人工的なバリア（「人工バリア」）とその周辺の地層等（「天然バリア」）から構成される多重のバリアが構築される計画である^[3]。人工バリアは放射性核種をできるだけ長く保持し、天然バリアへの放出を緩慢にさせる役割をもつ。また、天然バリアは単に物理的に放射性核種を生物圏から隔離するだけでなく、たとえば人工バリア環境を長期にわたり一定の環境に保つための安定した外部条件を提供することも期待されている。このように、これらのバリアは相補的に機能することが期待され、廃棄体そのものとそ

の周囲にある多重バリアの全体を一般に処分システムと呼ぶ。地層処分の場合、閉鎖後の処分システムの安全性評価の対象期間は数十万年を超えるとされるが、そのような長期の安全性をいかに示すのか、いかなる基準を設けるべきなのかが大きな問題となる。

日本における高レベル放射性廃棄物の地層処分の事業化は 2000 年 6 月に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（「特廃法」）に基づいている。この法律では、次に示す 3 つの段階を経てサイト選定を進めることが定められている。

- ① 概要調査地区の選定：文献その他の資料による調査（文献調査）を行い、文献調査の対象となった地区の中から概要調査地域を選定する。
- ② 精密調査地域の選定：概要調査地区について、地表踏査、ボーリング、トレンチの掘削や物理探査等地表からの調査を行い、概要調査地区の中から精密調査地区を選定する。
- ③ 最終処分施設建設地の選定：精密調査地域について、地上での詳細な調査に加え、実際に地下に施設を建設し、地層の物理的および化学的性質の調査等を行い、精密調査地区の中から最終処分施設建設地を選定する。

また、特廃法に基づき処分を実施する組織として 2000 年 10 月に原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立されている。同機構は 2002 年 12 月から全国の市町村に対し処分候補地の公募を行っているものの、2011 年 10 月現在、公募に応じた自治体はない。

3 FEP (Feature, Event and Process) に基づく日本の地層処分における地質学的課題の抽出

日本における地層処分の最大の関心事の一つは「地震等が頻発する我が国で安全性を十分に確保した地層処分が可能なのか」という点にある。地層処分の安全確保では、当然ながら、処分施設を設置する地域の地質環境が

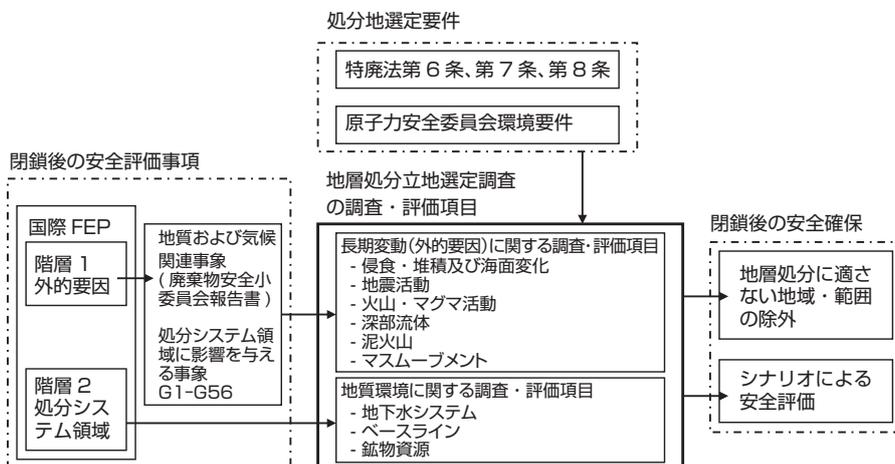


図 1 地層処分における立地選定調査の調査項目と閉鎖後の安全確保との関係

長期にわたり安定していることが必要である。特廃法でも「地震、火山、隆起、侵食その他の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと」、「将来にわたって、これらの自然現象による地層の著しい変動が生じるおそれが少ないと見込まれること」を処分候補地に求めている。すなわち、地層処分では、高レベル放射性廃棄物を地震等の自然現象の影響が及ばない安定した地質環境へと隔離することが重要となる。そのためには、地層処分システムが将来 10 万年を越えるような地質環境の長期変動によってどのような外的影響を受けるかを網羅的かつ定量的に評価することが求められよう。産総研深部地質環境研究コアおよびその前身の深部地質環境研究センターでは、経済産業大臣の諮問機関である総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会の下に設置された廃棄物安全小委員会での地層処分に関する安全規制の検討に必要な知見の取りまとめを行ってきた。

図 2 は、経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA) の作成した地層処分についての国際 FEP リストをもとに、我が国の場合の地層処分システムに外乱として影響を及ぼし得る事象を特定した相関図である^[4]。FEP は大きくは地球の内部エネルギーに原因がある「F1.2.01 構造運動・造山運動」を起因とする地質関連 FEP と、太陽の入射エネルギーに原因がある「F1.3.01 地球規模気候変動」を起因とする気候関連 FEP に区分される。図 2 では、これらを左右に配置し、下流の最下段に処分システム領域を置いている。一つの出来事がプロセスを経て次の出来事を引き起こし (図中の矢印)、これがさらに次のプロセス、出来事を誘発するという一連の事象 (シナリオ) ととらえられるようにしている。なお、図 2 中で因果関係の矢印で結

ばれていない括弧付きの FEP は、日本の場合、ほとんど影響を無視し得るとして検討から除いたものである。

上記の処分システムに影響を与える地質および気候関連事象の検討を経て、深部地質環境研究センターでは、さらに 2007 年に「概要調査の調査・評価項目に関する技術資料」を公表した (<http://www.gsj.jp/GDB/openfile/files/no0459/0459index.html>)^[5]。この資料は特廃法の定める概要調査 (精密調査地区選定段階における地表からの各種調査) において、閉鎖後の処分場の安全確保に必要な評価項目と調査手法を明示したことに特色があり、以下の項目を抽出している。

① 侵食・堆積および海面変化

- ・予測侵食量が埋設深度以上となり、廃棄物が地表に露出する可能性のある地域は、避ける必要がある。
- ・隆起・沈降および氷河性海面変化による相対的海面変化により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、相対的海面変化の影響について考慮する必要がある。
- ・隆起・沈降に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

② 地震活動

- ・第四紀に活動した断層の存在が明らかとなった地域では、断層沿いのずれ破壊により廃棄物が直接破損する可能性があり、その断層の影響の及ぶ範囲は避ける必要がある。
- ・第四紀に活動したものでなくとも、地表やその地下に大規模な断層が存在する場合は、その断層の再活動性や誘発変異の可能性が想定されるので、ずれ破壊

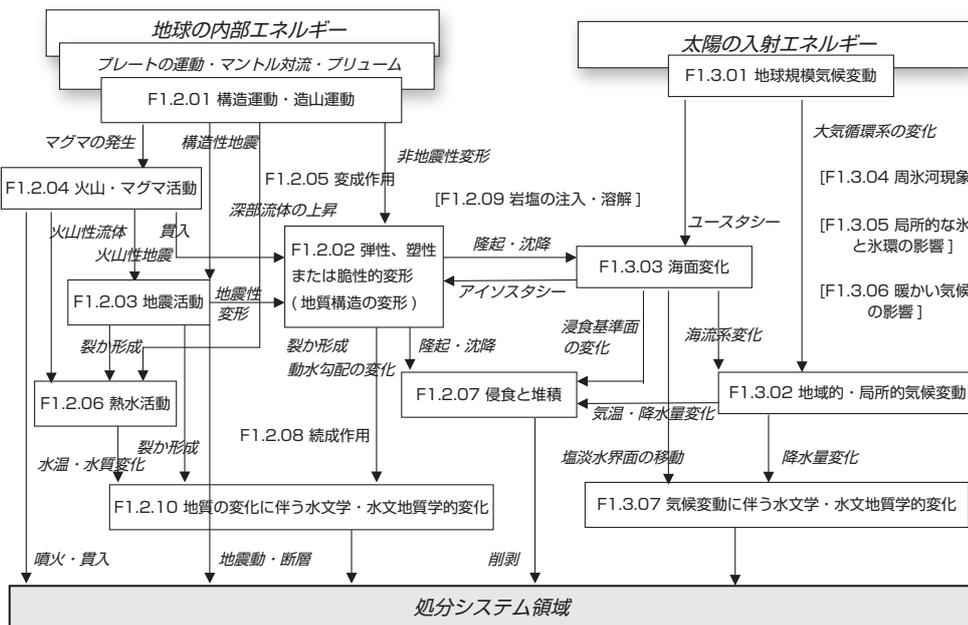


図 2 FEP (Feature, Event and Process) リストに基づく地層処分における地質および気候関連事象の相関図
F で始まる番号は、OECD/NEA の FEP 番号である。矢印は FEP 間の影響の伝搬を示している。山元・小玉^[4]を一部改変。

の影響が及び得る範囲を考慮する必要がある。

- ・地震活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、地震活動の影響について考慮する必要がある。
- ・地震活動に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

③火山・マグマ活動

- ・第四紀火山の存在が明らかとなった地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出される可能性があり、避ける必要がある。
- ・第四紀火山が存在しなくとも新たに火山が出現し得る地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出される可能性があり、避ける必要がある。
- ・第四紀火山の周辺あるいは巨大噴火の可能性のある範囲の周辺で、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動、水質の変化あるいは地温の変化が予想される地域は、火山・マグマ活動の影響について考慮する必要がある。
- ・火山・マグマ活動に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

④深部流体

- ・深部流体の活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、深部流体の活動の影響について考慮する必要がある。
- ・深部流体の活動に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

⑤泥火山

- ・第四紀に活動した泥火山の存在が明らかとなった地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出されることが懸念されるので、避ける必要がある。
(泥火山=異常に高い間隙水圧をもつ泥が、地下水、ガス、時には石油とともに地表に噴出する現象)

⑥マスマーブメント

- ・大規模なマスマーブメントの兆候が概要調査で明らかとなった地域では、斜面変動に伴うクリープやずれ破壊により廃棄物が直接破損することが懸念されるので、クリープやずれ破壊の影響が及ぶ範囲は避ける必要がある。
(マスマーブメント=地表における物質移動の総称で、地すべりや土石流等を含む)

4 長期的な将来予測の方法論

4.1 基本的考え方

すでに述べたように地層処分の安全性評価では、数十年以上先まで地質および気候関連事象の将来予測を行う必要がある。例えば地震活動の評価では、問題とする時間スケールによって、短期(直前～約1年)と長期(約1年～100年程度)の評価に分類されることがあるが、この区分けにしたがえば地層処分で行うべき予測は超長期と呼ぶべきものである。地震活動の評価の方法論は評価期間によって違いがあり、短期評価では地球物理学的・測地学的・地球化学的・水文学的観測が主な手法である。これに対し、長期評価では、過去の歴史からの統計的推論が主な手法となってくる。日本では、1995年の兵庫県南部地震以後、地震の長期評価が積極的に進められ、プレート境界地震や主要活断層沿いの地震については発生確率で評価できるようになってきた(地震調査研究推進本部; http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02.htm)。しかし、今回の東北地方太平洋沖地震(M9.0)が“想定外の事象”であったように、今の長期評価自体が防災上も十分に機能していたとは言いきれない。ましてや、既存の長期予測をそのまま超長期に外挿しようにも、長期評価の元になる初期条件や再来間隔が超長期に一定であるかどうか不確実性が大きく、信頼性のある評価とは現状ではなり得ない。それゆえ10万～100万年という超長期の時間を取り扱うには、統計的推論以外にも地質学的な各種の調査が必要となる。

地層処分における地質および気候関連事象の将来予測では、評価対象地域で過去に起きた事象の地質学的な変動傾向を明らかにし、これを将来に外挿することが基本となる。将来10万～100万年間に外挿するのであれば、これと同じかこれ以上の過去にまで遡る必要があろう。その上で統計的推論に十分な質・量の事象の活動履歴が得られれば、地震の長期評価のように確率的な評価もできるようになるかもしれない。しかし、すべての活動履歴が地質学的に保存されているわけではなく、十分な履歴が得られないケースのほうが圧倒的に多い。そのため、限られたデータから将来予測を行わなければならない、必ずしも定量的な扱いが可能ではないことは考慮しておく必要がある。例えばプレート境界地震では、活動履歴は歴史記録や津波堆積物に頼るしかなく、地質学的な痕跡を地表調査から長期間にわたり捉えることには限界がある。また、活断層沿いの大地震も、断層と被覆層の関係によっては、1万年内程度の活動履歴しか得られず、評価期間に比べて情報量が不足するケースが多いと予想される。変動地形的に侵食履歴を明らかにする場合も、評価期間に見合うだけの十分な編年された指標地形面が、評価対象地域やその周辺に

必ずしもあるとは限らない。水文地質学的変動に至っては、過去の変動がすべて合算された現在値のみが観測され、ここから個々の変動履歴を分離することが困難なケースがほとんどである。

このように統計的推論によって変動履歴を超長期の将来に外挿することが困難な場合には、超長期にわたる評価対象地域の地質環境の安定性を担保する別の説明が必要になろう。例えば地震活動や侵食を加速させる隆起運動の状態を記述できる評価対象地域の構造発達史のモデルを確立することで、定性的な将来予測像を示すことが求められる。また、水文地質学的変動では、年代軸の入った水質形成のメカニズムを確立することで、唯一定性的な将来予測が可能になる。具体的にどのような将来予測モデルが必要かは地域の地質特性によって異なるので、その場所に対応した予測論理を地域ごとに考える必要があろう。

4.2 日本の火山活動を対象にした長期変動履歴の解析例

日本の火山活動を対象にした長期変動履歴の解析・評価手法の開発のため、島弧の典型的な断面モデルとして、2004年から、東北南部の太平洋側から日本海側に至る地域の火山活動の時空分布に関する研究を実施してきた。この解析例を以下に示す。

日本には活火山（過去およそ1万年以内に噴火した、あるいは噴気活動の活発な火山）が100余個、“第四紀”（旧定義による過去170万年前から現在まで）に噴火した火山が200個を越えて存在する（図3）。ただし、火山は日本列島に一樣に分布するわけではなく、プレートの配置に支配され偏在する傾向が顕著である。すなわち、日本列島の第四紀火山は、プレートの沈み込み境界から陸側プレート

内に200～300 km離れた位置にある火山フロント上に最も密に分布し、火山フロントと沈み込み境界の間（前弧側）には火山が分布しない。また、火山フロントから反対の背弧側に離れるほど火山の分布がまばらになる傾向も顕著である。原子力発電環境整備機構では処分候補地の公募にあたって、火山活動の影響を避ける目的で「第四紀火山の中心から半径15 kmの円の範囲内にある地域が含まれない」ことを条件としている^[6]。しかし、数十万～100万年先の将来の火山活動を考える際に、このような排除要件だけでその影響を避けることは可能であろうか？次に火山活動の時空分布の具体的な解析例を基に考えることとする。

火山活動の噴火履歴を解析する際には、横軸に時間、縦軸に積算マグマ噴出量をとったいわゆる噴出量階段図を作成する。図4はその例として、東北日本南部の代表的な活火山である安達太良火山のマグマ噴出物を対象に作成したものである^[7]。各マグマ噴火イベントは地質学的には一瞬であるので縦の直線、非噴火時はマグマ噴出がないので横の直線で示される。図4.1)はおよそ10万年前まで遡った噴出量階段図で、破線で示した平均的な噴出率が示すように一定の頻度で噴火が繰り返されたことが階段図から視える。しかし、同火山について10万年を超える時間尺度まで履歴を拡張すると、図4.2)のように12万～20万年前に大きな活動休止期があり、10万年前までの平均的な噴出率は過去に延長できない。20万～26万年前、32万～43万年前には別のマグマ活動時期が存在したが、個々の平均的噴出率は活動期ごとに異なり、10万年前までの安達太良火山の活動がそのまま一定率を仮定して過去には外挿できないことが明らかである。言い換えると、個々の活動期を支えるマグマ供給系には寿命があり、10万年を超

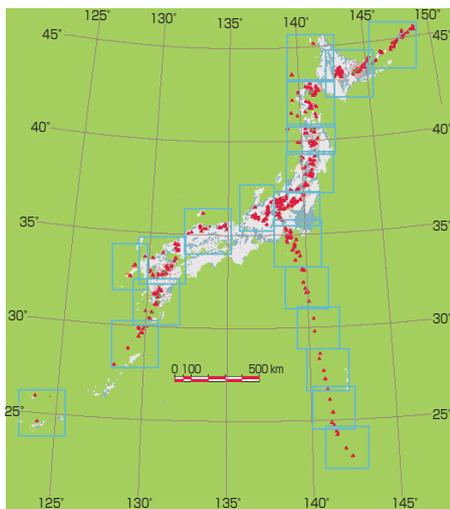


図3 産総研情報公開データベース「日本の第四紀火山」のインデックス図
赤色の三角が第四紀火山。

http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/index.htm

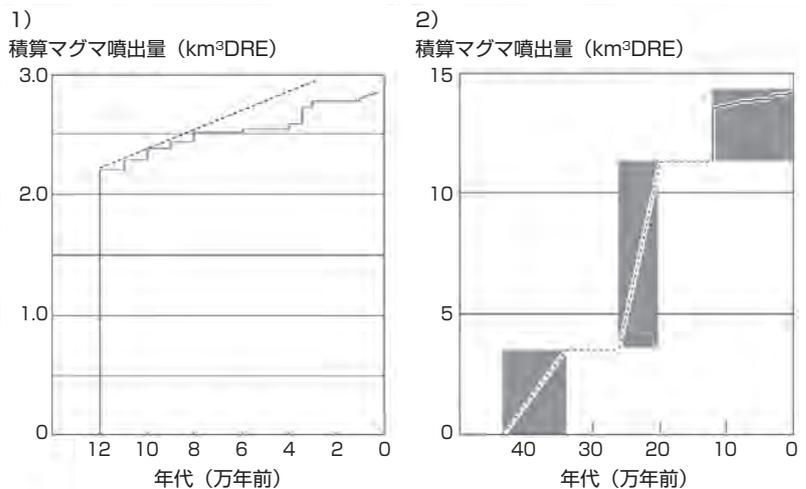


図4 福島県、安達太良火山の噴出量階段図

1)と2)とも同火山の噴出物を対象にしているが、横軸の時間尺度が異なることに注意されたい。2)のグラフは1)のグラフを包有している。山元・阪口^[7]を一部改変。

えるような将来予測においては、現在活動中の活火山ではなく、活動していない火山の再活動評価が重要になってくることを示唆していよう。

図5は、安達太良火山を含む東北日本南部における前期更新世初頭の約180万年前から現在までの火山の時空分布変遷を示している^[8]。この間の火山の分布パターンの特徴でまず重要なことは、火山フロントの位置はほとんど変化せず、フロント沿いには絶えず火山が存在していることである。一方で背弧域の火山の分布は区間ごとに大きく異なり、前期更新世に背弧域で活動していた火山は、中期更新世の前半には活動を停止している。中期更新世後半の30万年前以降になると新たな背弧域火山活動(沼沢火山・砂子原カルデラ火山)が始まるものの、その位置はそれまでの火山活動の空白域であることに注目しなければならない。すなわち、時間を30万年前まで遡ったとすると、沼沢火山や砂子原カルデラ火山は「既存の第四紀火山の中心から半径15 kmの円の範囲内」の外側に新規に出現しており、この要件だけでは火山活動を立地で排除できないことを意味している。図5の東北日本南部の火山の時空分布変化を理解するためには、さらに時間尺度を拡張して地域全体のマグマ噴出率の傾向を見てみる必要がある。図6はその結果で、横軸の時間目盛りは100万年単位、縦軸には火山フロント沿いの那須火山群から背弧側の沼沢火山にかけての会津地域におけるすべての火山からのマグマ噴出量の総和をとっている^[9]。図6の地域全体の噴出量階段図から明らかなことは、この地域の破線で示される長期的なマグマ噴出量率が100～200万年間隔で起きる一度の噴出量が100 km³を超える巨大噴火に支配されていることである。噴出箇所には直径が10 kmを超える大型の陥没構

造(カルデラ；図中のピンク色部)が60 km × 50 kmの範囲に折り重なるように形成されており、その活動は1000万年前にまで遡ることができる^[10]。沼沢火山や砂子原カルデラ火山の出現は、この火山活動域の中で起きたものであり、第四紀の火山に限定した活動履歴の調査のみからはその位置付けを捉えることはできないものである。ここで例示したような事象の階層構造の存在は、単純な変動履歴の外挿のみの将来予測の難しさをよく表している。数十万～100万年先の将来予測にある不確実性を軽減するためには、評価期間を大きく遡った対象地域の構造発達史を理解し、“想定外の事象”を極力避ける努力が求められよう。

4.3 確率論的評価の限界：事象の地質学的理解に踏み込んだ将来予測の必要性

米国では、2002年にネバダ州ユッカマウンテンが高レベル放射性廃棄物処分地として決定され、2008年9月より処分場の建設認可に関する安全審査が始められた。しかし、オバマ大統領のユッカマウンテン計画中止方針により、2010年3月に許認可申請の取り下げ申請が行われ、地層処分は事実上中断している。このような経緯は別にして、ユッカマウンテンでは安全評価において大きな地質学的問題があったことは、我が国の地層処分においても再考しておく必要がある。それは、ユッカマウンテン・サイトが第四紀にも活動している玄武岩マグマの単成火山群内にあるため、サイトを対象とした火山活動のさまざまな影響評価を行わざるを得なかったことである。実施主体である米国エネルギー省(DOE)は、カルデラを形成するような巨大噴火は起こらないとする前提のもと、過去の単成火山噴火履歴から平均的な噴火再来間隔を求め、サイトでの噴火確率を評価している^[11]。しかし、単成火山群の噴火活動は、

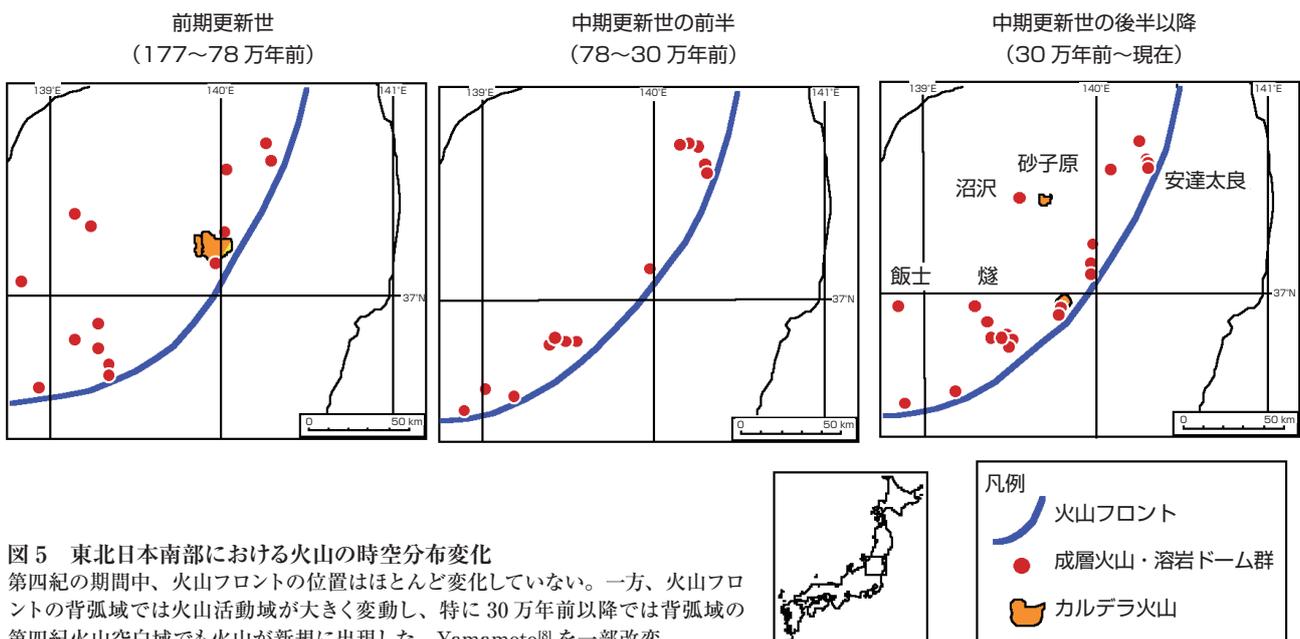


図5 東北日本南部における火山の時空分布変化
第四紀の期間中、火山フロントの位置はほとんど変化していない。一方、火山フロントの背弧域では火山活動域が大きく変動し、特に30万年前以降では背弧域の第四紀火山空白域でも火山が新規に出現した。Yamamoto^[8]を一部改変。

るためには必要となる。原子力安全委員会では、最近、第二種廃棄物埋設施設の一つである余裕深度処分の安全規制で、地震や火山活動を稀頻度事象として評価する考え方を提示している^[14]。しかし、現在の原子力安全委員会の考え方では、稀頻度事象の設定の仕方自体に任意性があり、多様な自然事象の中から評価線量を低く抑えられるような恣意的な事象の設定を除外する手だてが明確にされていない。ましてや非管理型の第一種廃棄物埋設施設である地層処分では、特魔法にあるように立地選定で懸念される自然事象が排除されていることが前提となっており、排除されたはずの地震や火山活動が稀頻度事象として安全評価されることには大きな違和感がある。繰り返しになるが、地層処分の安全評価では候補地のより正確な地質学的理解が基本であり、そのことによって不確実性をできるだけ軽減することにこそ、その本来の意義がある。

参考文献

- [1] 核燃サイクル機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次とりまとめ- (1999).
- [2] 長崎晋也, 中山真一: 放射性廃棄物の工学, 原子力教科書, オーム社 (2011).
- [3] 原子力発電環境整備機構: 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性-「処分場の概要」の説明資料-, NUMO-TR-04-01 (2004).
- [4] 山元孝広, 小玉喜三郎: 日本の地層処分で考慮すべき地質及び気候関連事象について, 月刊地球, 26, 452-456 (2004).
- [5] 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター: 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料-長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方-, 地質調査総合センター研究資料集, 459 (2007).
- [6] 原子力発電環境整備機構: 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, NUMO-TR-04-02 (2004).
- [7] 山元孝広, 阪口圭一: テフラ層序からみた安達太良火山, 最近約25万年間の噴火活動, 地質学雑誌, 106 (12), 865-882 (2000).
- [8] T. Yamamoto: A rhyolite to dacite sequence of volcanism directly from the heated lower crust: Late Pleistocene to Holocene Numazawa volcano, NE Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 167, 119-133 (2007).
- [9] T. Yamamoto: Origin of the sequential Shirakawa ignimbrite magmas from the Aizu caldera cluster, northeast Japan: Evidence for renewal of magma system involving a crustal hot zone, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 204, 91-106 (2011).
- [10] T. Yamamoto: Sedimentary processes caused by felsic caldera-forming volcanism in the Late Miocene to Early Pliocene intra-arc Aizu basin, NE Japan arc., *Sediment. Geol.*, 220, 337-348 (2009).
- [11] U.S. Department of Energy: Yucca Mountain preliminary site suitability evaluation, DOC/RW-0540 (2001).
- [12] I.S. Smith: Episodic volcanism and hot mantle: Implications for volcanic hazard studies at the proposed nuclear waste repository at Yucca Mountain, Nevada, *GSA Today*, 4-10 (2002).
- [13] S.H. Mahony, R.S.J. Sparks, L.J. Connor and C.B. Connor: Exploring long-term hazards using a Quaternary volcano database, *Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities*, 326-345, Cambridge University Press (2009).
- [14] 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会: 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方 (2009).

執筆者略歴

山元 孝広 (やまもと たかひろ)

1986年3月神戸大学大学院理学研究科修士課程修了。同年4月工業技術院地質調査所入所。1993年博士(理学)取得。2001年4月産業技術総合研究所深部地質環境研究センター長期変動チーム長。2007年4月原子力安全基盤機構 規格基準部 放射性廃棄物評価室 調査役。2009年4月産業技術総合研究所地質情報研究部門主幹研究員。地質学、火山学が専門。2001年からは地層処分の規制支援研究を担当している。



査読者との議論

議論1 一般的なコメント

コメント (富樫 茂子: 産業技術総合研究所評価部)

この論文は、構成学としては対象となるタイムスケールがかなり長い自然事象に対する人間活動の影響評価についての方法論という観点からとらえることができます。

地質事象は、稀頻度事象であっても、その事象が起きた場合の社会への影響が極めて大きくなり得ることは、今回の東北地方太平洋沖地震の教訓が示すところでもあり、今後の社会の対応が強く求められている重要な課題です。

この論文では、具体的には地層処分の安全審査で求められる地質学的課題を例として、一つの出来事がプロセスを経て次々に出来事を誘発するという一連の事象(シナリオ)に基づく課題の抽出の方法、対象となる地質事象の確率論的手法の限界、これを解決するための地質事象の成因モデルの構築に基づく長期の将来予測の必要性について記述しています。

内容としては構成学として極めて重要な視点を提供していると考えられます。査読の過程で、より一般化された方法論としての特徴を明確にするように改善がされました。

議論2 この研究の意義

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

原子力発電に伴う放射性廃棄物の処分に関して、安全性の評価のために地質学の要素技術を統合・構成し、評価の方法論を提示した優れた研究と思います。

福島第一原子力発電所の事故からも明らかになりましたが、原子力発電所の立地や廃棄物処分地の選定には規制当局の判断だけでなく、国民全体や関係する自治体の意向がとても重要です。そしてこれらの判断は、科学的な根拠に基づいてなされるべきと考えます。その意味で科学的研究の成果が、規制当局に対してだけでなく、広く国民に共有されることが望ましく、この論文が広く分野を超えて読まれ、参照されることを期待します。

議論3 廃棄物処分地の決定に至る全体プロセスとこの研究の位置付け

コメント2 (小野 晃)

放射性廃棄物の処分地を決定するまでには、多くの関係者が関わるとのことですので、決定に至るプロセス全体を示し、その中でこの

研究がどのような位置付けにあるかを示していただけると読者にとって分かり易いと思います。

回答（山元 孝広）

コメントにしたがい、この研究と地層処分における閉鎖後の安全確保の関係を示す図1を追加しました。地層処分事業の進め方、すなわち最終処分地選定手順は特廃法により規定されており、処分地の選定自体は実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）が実施しますが、安全規制の中身は確定していません。この研究の最終的な目標は、処分地選定調査における調査・評価項目の選定と各項目の判断指標を確立することです。例えばこの論文に示したように、火山活動が起き影響を被る場所や将来新たに火山活動が起こる恐れのある場所は処分地に相応しくありません。そのことをどのようにして評価法として確立するのかが方法論がこの研究の主題です。

議論4 将来世代に対する現世代の責任

質問（小野 晃）

この論文では、放射性廃棄物の処分の安全性を将来数十万年から百万年の時間範囲で評価する必要性があり、その根拠は、高レベル放射性廃棄物の放射能レベルが自然に存在する放射性物質のレベルまで減衰することと記述されています。この時間範囲を経過したときには、おそらく現生人類は別の進化段階にまで達している可能性がありますし、ましてや現在の文明や文化、民族等は跡かたもないと想像されます。この論文は、そのような遠い将来においても、現在の人類はその時の地球環境や生物圏に関して責任をもつべきだという考えに基づいていると思いますが、その考えの妥当性に関して筆者はどうお考えですか。

回答（山元 孝広）

今の原子力発電の恩恵に浴した世代が、その廃棄物の処分に責任をもつことは当然のことと考えます。福島第一原子力発電所の事故以

降、脱原発依存の世論が高まっていますが、廃炉のためには各原発にすでに存在する放射性廃棄物の処分を避けては通れません。単に発電を止めれば「脱原発」が達成されるわけではなく、廃棄物の最終処分まで私達の世代が責任をもつことが原発を継続する上でも、廃止する上でも必要になります。

さて、ご指摘の将来の人間活動についてですが、地層処分の閉鎖後の安全評価ではこのことも念頭においた検討を諸外国同様に日本でも行っています。例えば、図1の「地質環境に関する調査・評価項目」に鉱物資源とありますが、これは将来の人間活動による廃棄体との接触を避けるために、掘削の可能性のある地下資源の存在を排除要件として設定しているからです。

議論5 将来におけるリスク発現の評価のシナリオ

質問（小野 晃）

将来のある時点で、処分した放射性廃棄物がヒトに与えるリスクは、その時点の放射性物質の放射能のレベルと、放射性物質がヒトに影響を与える状況に成り得る可能性の積になるのではないかと考えます。

放射性物質の放射能のレベルは原子核物理のデータから対数的に減衰することが推定できます。一方廃棄物に由来する放射性物質がヒトに与える状況に成りうる可能性は地質学の問題ですが、具体的にどのようなシナリオでリスクを評価するのでしょうか。

回答（山元 孝広）

地層処分における天然バリアは、距離的な隔離のみを担うわけではありません。地下深部に埋設された人工バリアを含む廃棄体は埋設後の腐食により、いずれその機能が失われます。その後、放射性物質は地下水により天然バリア中を移動する過程で、鉱物の吸着能による遅延効果や、地下水による希釈等により、地表の生活環境に到達するまでに放射能が十分減衰することが期待されています。閉鎖後の安全評価はこのような地下水移行シナリオが基本となります。

圧力計測の信頼性向上と国際相互承認

— 工業用デジタル圧力計の計量標準体系への組み込み —

小島 時彦*、小島 桃子、梶川 宏明

信頼性の高い圧力の計測は社会と産業のあらゆる活動の基盤をなすとともに、国際貿易の中でも各国が高い関心を払っている。最近工業用デジタル圧力計の特性が進歩し、環境変化および輸送に対する安定性だけでなく、短期・長期の安定性が著しく向上した。産総研ではこれらの進歩に着目し、工業用デジタル圧力計の特性を詳細に評価した上で、それらを計量標準体系のいくつかの局面、すなわち圧力の国家標準の整備、国家標準の国際比較、国内標準供給に組み込んだ。これらの結果、産業現場での圧力計測の信頼性確保が効率的に行えるようになり、また、多くの国際比較を実施して圧力計測の国際相互承認の推進に貢献した。

キーワード: 圧力標準、デジタル圧力計、校正、国際比較、計量トレーサビリティ

Improvement of reliability in pressure measurements and international mutual recognition

— Incorporation of industrial digital pressure gauges to the national metrology system —

Tokihiko KOBATA*, Momoko KOJIMA and Hiroaki KAJIKAWA

Reliable pressure measurements provide the basis for all activities in society and industry, and every country shows considerable interest in them in international trade. Recently, characteristics of industrial digital pressure gauges and the short- and long-term stabilities as well as the stability under environmental change and during transportation have been improved remarkably. AIST focused its attention on the technological advancement, and, after evaluating the characteristics of digital pressure gauges in detail, incorporated them to some phases in the metrology system, which are the upgrading of national pressure standards, the international comparisons of the standards and the domestic traceability system. Consequently, the reliability of pressure measurements in industrial fields has been secured through an efficient process, and the international mutual recognition has been promoted by carrying out many international comparisons.

Keywords: Pressure standard, digital pressure gauge, calibration, international comparison, metrological traceability

1 はじめに

国民生活、社会、産業、科学技術の幅広い分野において、圧力の計測は欠かすことのできない計測の一つである。安全・安心に関係する圧力計測では、気象観測における大気圧測定、航空機の高度測定、医療・健康管理における血圧測定、高压ガスの管理のための測定、食品加工や製薬等の製造プロセスにおける圧力測定等が挙げられる。また、省エネルギー対策にとって重要な圧力計測では、建造物の空調管理、自動車の内燃機関やタイヤ空気圧の圧力管理等が挙げられる。さらに、半導体や精密機器製造に必要な高い空気清浄度を確保するためのクリーンルームの管理、各種プロセス現場における圧力の計測・制御、プラント設備の点検等をはじめ、多くの場面でさまざまな圧力の計測が行われている。科学技術の分野でも、圧力の制御と計測を利用したさまざまな研究開発が行われている。

産業現場の圧力計測では、1 Pa 以下の低圧力から 1

GPa 以上の高圧力までの広い圧力範囲で多種多様な圧力計が用いられている。中でも近年、工業用デジタル圧力計の性能が著しく向上してきている。具体的には、測定範囲の拡大、高分解能化、短期・長期の安定性向上、環境変化および輸送に対する安定性の向上等が挙げられる。

産総研では、これらデジタル圧力計の性能向上に着目して、デジタル圧力計の精密な特性評価に率先して取り組んできた。その結果、国家標準の整備や標準供給においてデジタル圧力計が有効に活用できるようになり、産業現場での圧力計測の信頼性が大きく向上した。他方、近年の国際通商において、計測結果の国際相互承認が必要となってきた。産総研は、デジタル圧力計を用いて、多くの国際比較を行う等、国家標準の国際的な相互承認のための技術データの提供に大きく寄与してきた。

この論文では、産業現場での圧力計測の信頼性向上と自由貿易のための国際相互承認への貢献を目標として進め

てきた、デジタル圧力計を活用した研究開発とその成果を、シナリオに基づく構成学的観点から述べる。

2 圧力計測の信頼性への要請

2.1 国内産業界からの要請

産業現場において、圧力計を用いて信頼性の高い圧力測定を行うには、その圧力計の目盛りをあらかじめ、産総研が保有している圧力の国家標準にトレーサブルな形で正しく校正しておく必要がある。一方、これまで産業界が保有する圧力の標準器は重錘形圧力天びん（重錘形圧力計）^{註1)}と呼ばれる最も精密なタイプの装置が主流であった。重錘形圧力天びんは長期安定性に優れるという特徴があるが、他方それ自体重く、またサイズもかなり大きいため、校正サービスを受ける側からすると、校正機関へ輸送するのが容易でないという問題があった。また校正機関での校正は、最長で2ヶ月程度かかる場合もあり、その間、標準器が手元で使えないことから、バックアップのために余分に標準器を用意する等、少なからぬ経費が発生するという問題もあった。このため産業界からは、重錘形圧力天びんを輸送することなく、これまでと同等の精度で効率的に校正が受けられる何らかの方法が要請されていた。

最近、工業用デジタル圧力計の特性が著しく向上し、環境変化および輸送に対する安定性だけでなく、長期の安定性も一定程度確保できる見通しが出てきた。このような状況の中で、工業用デジタル圧力計を標準体系に組み込んで有効利用することを試みた。通常、工業用デジタル圧力計は、校正機関において標準器を用いて校正された後、産業現場に輸送されるが、輸送後のデジタル圧力計の目盛りが十分に安定であれば、産業界は自社の重くて大きい重錘形圧力天びんのような標準器を校正機関に輸送することなしに、これまでと同等の精度で国家標準にトレーサブルな校正値を産業現場で維持することができ、校正業務が著しく効率化される。

標準体系においてデジタル圧力計の利用を促進するためには、工業用デジタル圧力計を日本国内のどこに輸送したとしても校正値の安定性が十分保たれること、そして、次の校正が行われるまでの一定期間内、十分な安定性が保たれることが必須の条件となる。産総研はこのような特性を工業用デジタル圧力計が有するかどうかを明らかにする研究に着手した。

2.2 国際的要請

経済、生産、通商等のグローバル化に伴い、種々の計測器による測定結果が各国間で整合しているかどうかに関心がもたれ始めた^{[1][2]}。例えば、成田空港や羽田空港では日本の航空会社の整備工場が、外国籍の航空機の整備を

請け負うといった国際ビジネスが増えてきている。一方、1990年代に米国で航空機事故が多発したことから、米国民の安全を確保することを目的として米国政府は連邦航空法を改正し、米国籍の航空機を整備する要件として、使用する圧力計等の計測器が米国の国家計量標準機関である国立標準技術研究所（NIST）の国家標準にトレーサブルであることを要求し、米国連邦航空局（FAA）の検査官が定期的に整備工場を現地検査することとなった。この米国政府の要求は米国の航空会社にとどまらず、米国籍の航空機を整備する外国の整備会社にも適用されたため、日本航空と全日空が自社の整備工場のほとんどすべての計測器をNISTトレーサブルにしなければならないという事態になった。もともと日本の航空会社の整備工場では、日本製の計測器が多く使われ、そのほとんどが産総研（当時は旧工業技術院の研究所）にトレーサブルになっていたため、国際問題となった。日本政府はこのとき米国連邦航空局に対して、日本の国家標準は米国のそれと同等であることが実証されているので、日本の国家標準にトレーサブルな計測器を使うことも許容されるべきであると主張し、個別事例として受け入れられた。

この問題は日本だけでなく、世界各国の航空会社にも波及した。このような問題を背景として1999年に、各国の国家計量標準機関が所有する国家標準の同等性を相互に認め合うために、メートル条約のもと国際度量衡委員会の相互承認協定（CIPM-MRA）が発足した^[3]。計量標準における国際相互承認の枠組みを図1に示す。

この枠組みでは国家標準を各国間で実際に比較（国際比較）することを相互承認のための技術的な要件とした。国際比較の結果と参加機関ごとに承認された校正・測定能力は、それぞれ国際相互承認協定の附属書BとCに登録され、それらは国際度量衡局（BIPM）の基幹比較データベース（<http://kcdb.bipm.fr/>）上で誰でも見られるようになっている。これらの技術情報から、各国が保有している国家標準の水準を知ることができる。

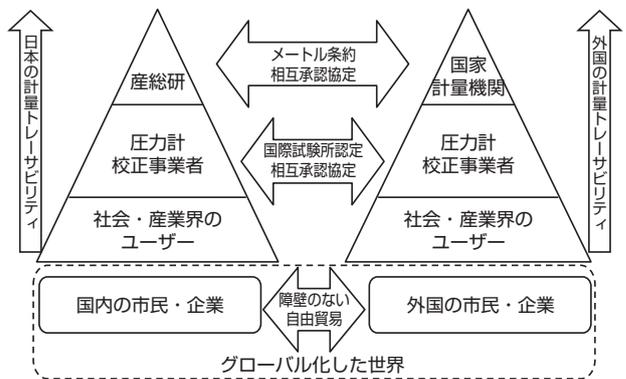


図1 計量標準における国際相互承認の枠組み

産総研は、我が国の国家計量標準機関として、圧力の国家標準の設定と供給、国内の圧力計測のトレーサビリティ体系の整備を担っている。また、国際比較に積極的に参加し、その結果から、日本の圧力の国家標準の国際同等性を上記の基幹比較データベースにおいて示し、さらに、各国から承認された形で校正・測定能力を示すことで我が国の国益を確保する責任がある。

このような背景の中で、私達は国家標準をより高度化して設定し、世界各国との間で国家標準の同等性を示すための活動に携わってきたが、その中で近年性能の向上が著しい工業用デジタル圧力計を活用することにした。

2.3 技術的課題

産総研が整備している圧力の国家標準^{[4][5]}は、気体あるいは液体を媒体とする静水圧性が成り立つ静止流体に対するものである。一般的に圧力標準の媒体には、低圧側では気体を、高圧側では液体を用いる。なお、絶対圧力が小さい圧力は、同じ産総研で真空標準としても整備している^[6]。

2001年の産総研発足当時、複数台の圧力標準器を用いて、5 kPa から 500 MPa の圧力範囲で国家標準を設定し、校正サービスを実施していた。しかし、科学・産業技術の進歩に伴い、2002年に実施した物理標準ニーズ調査では、圧力標準の種類増加、圧力範囲の拡大、不確かさの低減等の高度化が産業の現場から要望された^[7]。具体的には、空調管理、製薬、医療、半導体製造等に必要となる 10 kPa 以下の差圧標準および低圧力標準への要望が多く、また、内燃機関の開発や材料・製造、機械加工等の分野で 500 MPa を超える高圧力標準への要望もあった。

そこで、産総研では新たな技術開発を行って、これらの国家標準を整備してきた^{[8]-[10]}。現在、多くの圧力標準器を用いて、大気圧の約 10 万分の 1 の圧力 (1 Pa) から約 1 万倍の圧力 (1 GPa) までの圧力範囲をカバーしている。これらの国家標準器の発生圧力の整合性を確認するために、標準器同士の比較測定が必要となるが、多数の標準器を管理するため、その効率化、高度化も課題となっていた。

また、圧力計測の現場では、校正対象機器の増加により、効率的でユーザー負担の少ない校正および標準供給の手法も望まれていた。前述したように、近年、国内外企業



図2 各種圧力計の例

による新しい技術開発もあり、各種圧力センサを利用した工業用デジタル圧力計の信頼性が向上し、フルスケールに対して 6 桁以上の高分解能をもち、長期安定性に優れた高精度圧力計も利用可能となってきた。そこで産総研では、工業用デジタル圧力計のうち高精度のものを対象にして、圧力標準器の管理の効率化や高度化に用いることができるか、および、標準器として十分な要件を満たすかどうかに関して、その特性を実験的に調べることにした。

3 種々の圧力計

図 2 に、圧力計測の現場で利用されている各種圧力計の例を示す。

他の計測器による校正をすることなしに、自分だけで物理量を絶対測定することができる計測器を一次計測器とよぶ。圧力に関する一次計測器（一次圧力計）としてはさまざまな装置が考案されてきているが、主なものには、重錘形圧力天びん^[11]と液柱形圧力計がある。図 3 に、重錘形圧力天びんと液柱形圧力計の原理図を示す。一方、自分だけでは物理量を絶対測定できずに、その目盛り付けには一次計測器による校正を必要とする計測器を二次計測器とよぶ。圧力に関する二次計測器（二次圧力計）としては、デジタル圧力計^[12]と機械式圧力計（ブルドン管圧力計^[13]）がある。

重錘形圧力天びんは、圧力を高精度に発生可能な計測器である。測定の信頼性が高く、多くの国で圧力の国家標準として用いられている。産業現場においても標準器として広く用いられている。重錘形圧力天びんの基本的な構成要素はピストンとシリンダ、質量が既知のおもり（重錘）である。ピストン外面およびシリンダ内面は、真円度と円筒度が良好に保たれるよう精密に加工されている。通常、重錘形圧力天びんで圧力を発生する時には、ピストンと重錘によって下向きの重力が負荷されたピストンを、上向きの圧力により適正な位置に浮上させた後、ピストンと重錘を回転させる。そうすることにより、ピストンとシリンダ間の機

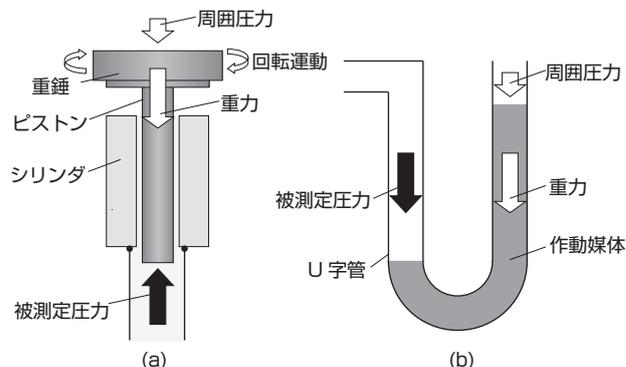


図3 重錘形圧力天びん (a) と液柱形圧力計 (b) の原理図

機械的な接触抵抗が大きく低減され、重錘とピストンにかかる重力が正確に圧力に変換される。

液柱形圧力計は、測定圧力と釣り合うU字管内の液柱の密度とその高さから、圧力を求める計測器である。通常、U字管内の作動媒体としては、密度が正確に知られている水、または水銀を用いることが多い。我が国の圧力の国家標準の根幹としている光波干渉式標準圧力計は、水銀を作動媒体とした液柱形圧力計である^[14]。諸外国の国家計量標準機関においても、同様の圧力計は、大気圧付近の国家標準器として用いられている。

デジタル圧力計とは、圧力センサと、その出力をデジタル表示する装置またはデジタル信号を出力する装置を備えた圧力計のことである^[12]。圧力センサの測定原理はさまざまであるが、ひずみゲージ等の抵抗変化、静電容量型センサの静電容量変化、水晶やシリコン振動子の周波数変化を検出する方法が典型的である。測定結果を連続的に、アナログ信号またはデジタル信号として外部出力できるものが多い。近年、技術の進歩が著しく、表示分解能が高く安定性に優れたデジタル圧力計が利用可能となってきた。

機械式圧力計は、弾性素子の圧力による変形量を機械的に拡大して圧力を測定する計測器である。このうち、扁平な断面をもち、管端を閉じた曲がった管を弾性素子に用いた指示圧力計はブルドン管圧力計と呼ばれ、比較的に低コストのため、社会・産業の現場で広く用いられている^[13]。

表1に、4種類の圧力計の特徴・特性をまとめた。一次圧力計である重錘形圧力天びんと液柱形圧力計は、測定圧力の不確かさが小さく、長期安定性に優れ、信頼性が高い。一方で、これらの圧力計は、一般的にはその取り扱いが複雑で、重量が重く、コストも高い。また、正確に発生圧力を求めるためには、設置場所の重力加速度の値が必要となる。圧力範囲に関しては、重錘形圧力天びん、機械式圧力計、デジタル圧力計は広い圧力範囲で利用可能であるが、液柱形圧力計はこれらの圧力計と比較すると、圧力範囲が限定的である。二次圧力計であるデジタル圧力計と機械式圧力計は、重錘形圧力天びんや液柱形圧力計に比較して信頼性は劣るが、取り扱いは簡単であり、重量も軽く、コストも低い。したがって、複数の計測器をそろえて冗長化することによる信頼性向上も容易である。また、上に記した一次圧力計の発生圧力は重力加速度により変化するのに対して、デジタル圧力計と機械式圧力計の測定値は、直接は重力加速度に影響されない。一般的に、連続測定や測定結果の伝送が容易なデジタル圧力計は測定の自動化・システム化に適しており、操作性や効率性の向上に役立つ。

表1 各種圧力計の特徴

圧力計の種類	計測器の種類	最大圧力	サイズ・重量・操作性	自動化・システム化
重錘形圧力天びん	一次	1 GPa 超	大・重・難	難
液柱形圧力計	一次	300 kPa	大・重・難	難
デジタル圧力計	二次	1 GPa 超	小・軽・易	易
機械式圧力計	二次	1 GPa 超	小・軽・易	難

私達は、デジタル圧力計の長所である小型・軽量の可搬性、簡単な操作性、自動化・システム化への高い適応性を活かせるよう開発を進めてきた。

4 研究開発のシナリオ

当該研究ではデジタル圧力計の活用により、産業現場の圧力計測の信頼性を向上し、国際相互承認に必要な国家標準の同等性を確認することを目標に設定した。

研究シナリオを図4に示す。当該研究の主要な要素技術は、デジタル圧力計の各種特性とその評価技術および校正技術である。デジタル圧力計の各種特性としては、その測定範囲、分解能、重量、サイズ、線形性、環境変化および輸送に対する安定性、短期・長期安定性等が挙げられるが、これらは計測器メーカーに大きく依存する。一方、デジタル圧力計の各種特性の評価や校正値の不確かさ評価は、国家標準器を保有して日常的に種々の圧力計を評価している産総研が得意とする技術である。

研究目標を達成するために、上述した要素技術を統合する。はじめに、デジタル圧力計の特性評価方法および校正方法の開発を行い、デジタル圧力計の標準器としての性能を詳細に評価する。このためには特に、デジタル圧力計の環境変化および輸送に対する安定性や短期・長期安定性の評価技術が必要である。次に、デジタル圧力計の標準

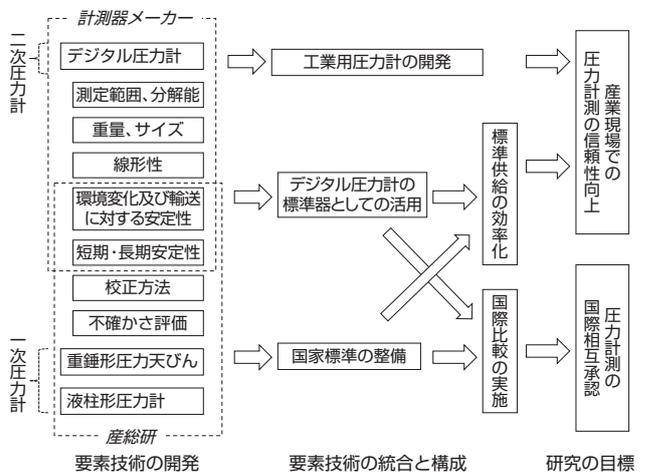


図4 圧力計測の信頼性向上と国際相互承認のための研究シナリオ

器としての活用を進めながら、要素技術をさらに統合させ、計量標準体系のいくつかの局面、すなわち圧力の国家標準の設定・管理、国家標準の国際比較、国内標準供給に組み込む。国家標準に関して、産総研では現在、1 Pa から1 GPa までの国家標準を多数の標準器を用いて設定・管理しているが、操作に手間のかかる標準器の高精度校正を、デジタル圧力計を有効利用して効率的に行えるよう技術開発を進める。国家標準の国際比較に関しては、主要な圧力範囲において、デジタル圧力計を活用して、国際比較を効率良く実施する。国内標準供給に関しては、校正依頼者の負担がより小さい標準供給方法を開発する。また、デジタル圧力計を対象とした産総研の圧力校正サービスの拡充を行う。さらに、圧力標準を社会・産業界の各方面へ効率良く供給するための国内標準供給体制の高度化および各種関連技術基準の整備を目指す。

最終的に、デジタル圧力計を利用した標準供給の効率化は、計測器メーカーで行われている工業用圧力計の開発と相乗的に、研究目標の一つである産業現場での圧力計測の信頼性向上を達成する。また、デジタル圧力計を利用した国際比較の実施は、もう一つの研究目標である圧力計測の国際相互承認に大きく貢献する。このような研究シナリオを設定した。以下、シナリオに沿って実施してきた研究開発の内容と結果について述べる。

5 デジタル圧力計の特性評価

信頼性を維持しながら、合理的で効率的な圧力の標準体系を構築するためには、デジタル圧力計の有効利用が鍵となる。そのため産総研では、圧力標準器を用いた各種デジタル圧力計の特性評価および校正方法の研究開発を行ってきた^{[15][17]}。デジタル圧力計が表示する測定値の不確かさの主な要因としては、以下が挙げられる。

- a) 印加した圧力の不確かさ
- b) 測定値のばらつきによる不確かさ
- c) 履歴効果による不確かさ
- d) 表示分解能または短期安定性による不確かさ
- e) 周囲温度の変動に起因する不確かさ（温度特性）
- f) 設置の姿勢に起因する不確かさ（姿勢特性）
- g) 供給電源電圧変動による不確かさ
- h) 入出力関係の直線性に起因する不確かさ（線形性）
- i) ライン圧力による不確かさ（差圧計の場合）
- j) 長期安定性（経時変化）に起因する不確かさ
- k) 周囲環境変化（相対湿度、大気圧、振動、衝撃等）に起因する不確かさ

デジタル圧力計を標準器として使用する場合には、上述した特性の評価を十分に行い、実際に使用する状況に

応じて校正值への補正や不確かさ評価について考慮が必要である。また、圧力計を輸送する場合には、輸送時に圧力計が被る周囲環境の変化によっても特性が影響を受けるので、これらについても考慮が必要である。

現在、広い圧力範囲において、優れた性能を有するさまざまなデジタル圧力計が利用可能であるが、当該研究において、特に重点的にその特性を評価してきた圧力計は、国内計測器メーカーが製造している感圧部にシリコンレゾナントセンサを用いた差圧計と、海外メーカーが製造している感圧部に水晶振動素子を用いた圧力計の2種類である。詳細な特性評価をした上で適切な補正を行い、定められた校正手法を用いて各デジタル圧力計を定期的に繰り返し校正し、安定性を評価した。その結果、使用方法を工夫することによってデジタル圧力計でも、既存の圧力標準器に匹敵する信頼性が得られることを明らかにした。各デジタル圧力計の安定性の評価データは、後述するデジタル圧力計の標準体系への組み込みにおける事例の中で示す。

6 デジタル圧力計の標準体系への組み込み

この章では、デジタル圧力計を圧力の標準体系に組み込んだ三つの事例を述べる。

6.1 国家標準の設定と管理

圧力の一次標準器として日本で国家標準器に位置づけられているのは、液柱形圧力計と重錘形圧力天びんである。一次標準器として用いるためには、各々の特性値を決定し、管理する必要がある。産総研で使用している圧力標準器の特性値は、質量、長さ、温度等の国家標準に対してトレーサブルになるように正確に測定され、管理される。産総研において、重錘形圧力天びんおよびそのピストン・シリンダは、圧力範囲ごとに複数台ずつ管理されている。それら多数の標準器を群管理することで、広い圧力範囲で国家標準を維持している。これら標準器の管理では、定期的に各標準器間での比較測定を実施し、相互の整合性を確認している。また、さまざまな組み合わせの比較測定の結果から、各標準器の発生圧力の長期安定性を評価している。圧力範囲にもよるが、一般的に、その長期安定性は相対的に年間 10^{-6} のオーダーである。

ここでは、民間校正機関が自己の標準器として用いる重錘形圧力天びんを、産総研の国家標準器である重錘形圧力天びんで校正するためにデジタル圧力計を利用した例を示す。産総研において重錘形圧力天びんを校正する場合、2台の圧力天びんを連通配管し、発生圧力を比較する。伝統的な校正では、2台の圧力天びんを同時に動作状態におき、両方のピストンの降下速度の変化を観測し、平衡状態が得られるまで、どちらかの圧力天びんに微小な分銅を負

荷し調整する。しかし、この方法は操作が複雑で、校正結果がシステムの構成や校正作業者の技術力に大きく依存する。そこで、産総研では、デジタル圧力計の高分解能性と連続測定機能を利用した二つの校正方法を選択し、高度化した。結果的にはいずれの方法でも、重錘形圧力天びんと使用するデジタル圧力計の性能が十分に良ければ、相対的に 10^{-6} 以下のオーダーで平衡状態の決定が可能であることを明らかにした。現在、産総研が維持している国家標準器をはじめとする多数の重錘形圧力天びんの校正と管理は、すべてこれらのデジタル圧力計を用いた方法により行っており、これまでより大幅に高度化、効率化された。

第一の校正方法は、2 台の重錘形圧力天びんの発生圧力差を高分解能のデジタル差圧計で直接測定する方法である。この方法においては、差圧計により測定される 2 台の圧力天びんの圧力差がゼロとなるまで負荷する微小分銅を調整する。

第二の校正方法は、デジタル圧力計を比較器として使う置換法である^{[17][18]}。図5に示すように、この校正方法では、2 台の重錘形圧力天びんの発生圧力を定積弁の切り替えにより交互にデジタル圧力計で測定する。2 台の圧力天びんの発生圧力にある程度の差があっても、その差を正確に求めて補正できるという利点がある。さらに、この方法は、3 台以上の圧力天びんに同時に適用することも可能である。第二の校正方法では、デジタル圧力計の高分解能性と連続測定機能に加えて、短期安定性を活用した。

6.2 国家標準の国際比較

通常、圧力の国家標準の国際比較では、仲介器と呼ばれる輸送可能な計測器を各国に順次回送し、その計測器に各国の参加機関が自己の国家標準に基づいて校正値をつける。各国が付けた校正値を相互に比較することにより、各国の圧力の国家標準値の違いを明らかにすることができる。最高精度の測定が必要な国際比較には、伝統的に標準器と同等な性能をもつ重錘形圧力天びんを仲介器として用いることが多かった。

そのような状況の中で産総研は、小型化・軽量化・低コスト化が可能で、取り扱いやすいデジタル圧力計に着目し、

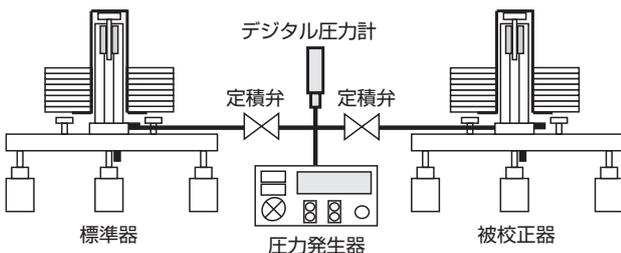


図5 デジタル圧力計を比較器として用いた置換法による校正

世界に先駆けて、高精度タイプの工業用デジタル圧力計を利用した国際比較用の仲介器の開発を進めてきた。そして、開発した仲介器を用いて、実際に、複数の国際比較を主催した^{[19][23]}。仲介器には複数台のデジタル圧力計を同時に用い、冗長化により信頼性を向上させた。通常1年以上にわたる国際比較の実施期間を通して、デジタル圧力計の長期的な特性の変化を詳細に把握し、それを校正値の補正に用いた。この補正により、仲介器の長期安定性の不足を補って、十分な比較精度を確保することができた^{[19][22][24]}。

国際比較におけるデジタル圧力計の利用例として、圧力範囲が 10 MPa から 100 MPa の液体ゲージ圧力の国家標準の国際同等性を確認するために 2002 年から 2004 年に行った国際比較(APMP.M.P-K7^[19])を紹介する。図6に、その国際比較で用いられた仲介器を示す。前述した水晶振動素子有感圧部に用いたフルスケールが 100 MPa で分解能が 0.1 kPa のデジタル圧力計を 2 台組にして仲介器とした。デジタル圧力計の利用により、輸送する仲介器の総重量は 50 kg 以下に抑えることができ、圧力天びんを使用した場合（通常 200 kg 超）よりも大幅に軽量化することができた。さらに同じ仕様の仲介器を 3 組準備し、それぞれ別々の回送ルートで同時に各参加機関に輸送することにより、国際比較に要する全測定期間を大幅に短縮させた。

測定期間中定期的に、仲介器を構成する合計 6 台のデジタル圧力計を幹事所である産総研に戻し、日本の国家標準器を用いて、これらのデジタル圧力計を再校正することで、仲介器としての安定性の評価を行った。図7に各デジタル圧力計の校正値の 1 日当たりの変化量を、測定圧力の関数として評価した結果を示す。同図に示されているように、最大測定圧力 100 MPa での変化量は、圧力計によっては 1 日当たり 50 Pa を超えている。国際比較の全測定期間は約 400 日であったので、最終的には、測定圧力値が最大圧力において 20 kPa 変化すると推定される。これは測定値に対して相対的に 2×10^{-4} の変化に相当する。一方、

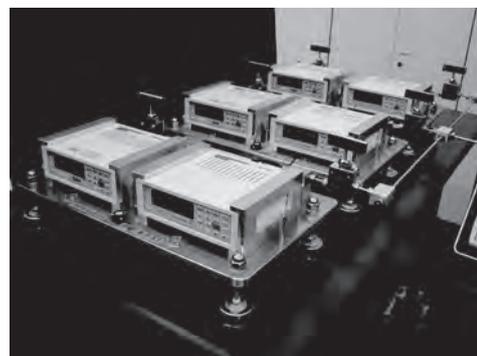


図6 デジタル圧力計を用いた液体圧力の国際比較用仲介器（2 台ずつ、計3組）の写真

この圧力範囲において、これまでの国際比較で使用されていた重錘形圧力天びんを伸介器とする場合、その安定性は相対的に 1×10^{-5} 程度と期待される。したがって、上記のデジタル圧力計の校正値を補正なしに使用する場合、国際比較の実施に必要な安定性を得ることはできない。しかし、詳細な評価により、各圧力における変化は経過日数の一次関数になっていることがわかった。これらを補正し、また伸介器を構成する2台のデジタル圧力計から得られる校正値の平均値を使用することで、最終的には、各伸介器の安定性は測定全期間を通して、 5×10^{-6} 以下にすることができた^[19]。このように、デジタル圧力計の伸介器としての特性を詳細に把握し、適切に補正することにより、国際比較に使えるだけの十分な比較精度を引き出した。

上述の国際比較を含む二つの国際比較（CCM.P-K7^[25]、APMP.M.P-K7^[19]）における各参加機関の100 MPaでの校正値の結果を図8に示す。横軸に参加機関の略称と国名、縦軸に各機関の校正値の国際比較参照値からの相対偏差を示す。参照値は、参加機関の校正値の一種の平均値として計算で得られたものである。各国のデータごとに付いているバーの長さは各参加機関が自ら表明した校正値の不確かさ（信頼の水準約95%）を表している。また、同じ国際比較から得られた結果は、同じ種類のマーカー（黒丸あるいは白丸）で示した。図8から、この圧力における各国の圧力の国家標準の同等性を知ることができる。日本の国家標準は、参照値からの偏差がほとんどゼロで、不確かさも主要国と同程度であった。したがって、現在、当該圧力範囲で設定・維持・供給している日本の圧力の国家標準が、優れた国際同等性を有していることを確認できた。

その他の国際比較においてもデジタル圧力計を伸介器として利用することが進んでいる。気体差圧の国際比較において、シリコンレゾナントセンサを用いたデジタル圧力計を使用し、同様に優れた比較精度を引き出した^[20]。このよう

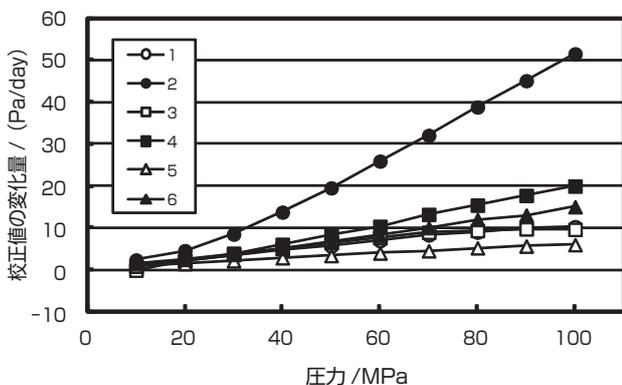


図7 液体圧力の国際比較に使用した6台のデジタル圧力計の校正値の1日当たりの変化量

に、さまざまな圧力範囲の国際比較において、デジタル圧力計の伸介器としての有効性を確認した。

6.3 遠隔校正による標準供給

これまで、産業現場で使われる圧力計の校正では、校正依頼者が圧力計を、使用している場所から校正機関まで持ち込む校正、いわゆる“持ち込み校正”が行われてきた。しかし、より広範な産業分野に圧力標準が使われているためには、より効率的な新たな標準供給の形態も検討していく必要がある。これまでNEDOプロジェクト「計量器校正情報システム(e-trace) 研究開発事業」で、デジタル圧力計とインターネット等の情報通信技術を活用し、圧力標準の供給を速く、安く、正確に行うための圧力遠隔校正技術の開発を行った^{[26][27]}。これは、圧力計を産業現場から遠くにある校正機関に持ち込まずに、産業現場で校正できるようにするための技術開発で、校正依頼者の負担軽減を図る新しい圧力標準の供給形態である。

現在、校正機関が、依頼者からの校正依頼を受けて校正を行う場合、その校正実施形態には大きく分けて、持ち込み校正、出張校正、遠隔校正の三つがある。各校正実施形態の主要な特徴を表2に示す。

伝統的に行われている持ち込み校正では、依頼者が圧力計を校正機関に持ち込んで校正が行われる。この場合標準器には校正機関の標準器を使用し、作業は校正機関の要員が行う。これに対して、依頼者の圧力計の持ち運びが現実的に難しい場合には、その圧力計が据え付けられている現場で校正が行われる。これまでに行われてきた校正機関以外の場所で行われる校正の形態として、出張校正(現地校正)がある。この場合、輸送可能な標準器(伸介器)を校正機関から現場まで輸送する。校正に必要な作業は、持ち込み校正と同様に、校正機関の要員が行う。

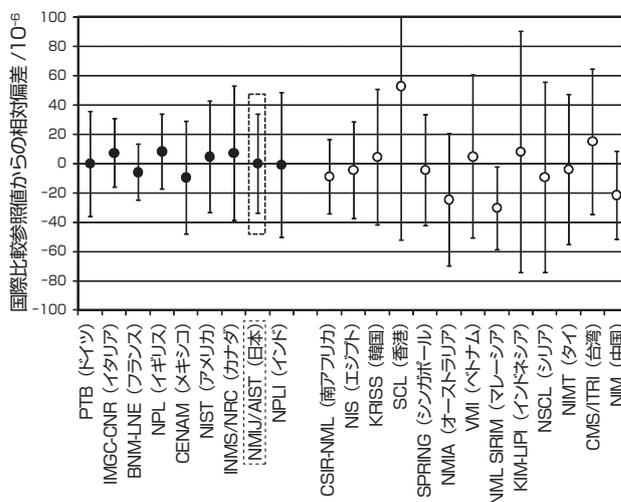


図8 圧力100 MPaにおける二つの国際比較の結果 (●: CCM.P-K7, ○: APMP.M.P-K7)

表2 圧力計の校正の実施形態と特徴

校正形態	持ち込み校正	出張校正 (現地校正)	遠隔校正
校正場所	校正機関	依頼者指定場所	依頼者指定場所
標準器	参照標準	仲介器 (仲介標準器)	仲介器 (仲介標準器)
現場作業	機関要員	機関要員	遠隔操作、 支援要員

遠隔校正では、出張校正と同様に、依頼者の圧力計の使用場所に仲介器を輸送し、校正が行われる。しかし、校正機関要員は現場には行かず、校正機関からインターネット等の通信技術を利用して、測定データ等をやりとりして校正作業を行う点が出張校正とは異なる。依頼者の圧力計（被校正器）の種類としては、デジタル圧力計を想定している。最低限行わなければならないが、校正結果には大きな影響を与えないと考えられる被校正器、仲介器の設置等の作業は、一定の技術講習を受けた依頼者側の支援要員が行うことができる。

図9に圧力の遠隔校正の実施手順を示す。校正機関が行う遠隔校正サービスに対して、依頼者から校正依頼があった場合の手順の一例を示している。この図において、点線で囲まれインターネットと記された部分は、情報ネットワーク技術を使用して実施可能な部分である。

これまでに、産業界からの校正需要が多く、また、過去の国際比較で実績のあるデジタル圧力計が使用できる二つの圧力範囲（気体差圧 10 Pa～10 kPaと液体圧力 10 MPa～100 MPa）において、遠隔校正技術の開発を進めた。気体差圧の開発に関しては横河電機株式会社から、液体圧力に関しては長野計器株式会社から、それぞれ技術協力を得た。開発の主な項目は、

- ① 遠隔校正用の仲介器の開発
- ② 遠隔校正に適した測定手順の開発
- ③ 国内外での実証試験の実施

である。

ここで項目①については、高精度デジタル圧力計と圧力

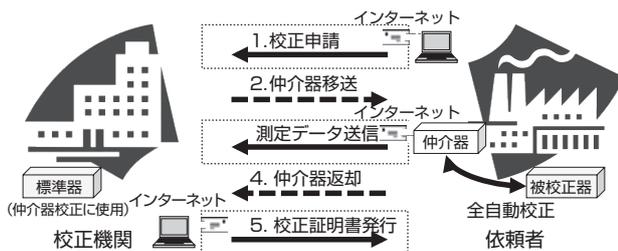


図9 圧力遠隔校正の実施手順

発生器、環境測定器を一体に組み込み、全自動で圧力の発生と測定が可能な可搬型の遠隔校正用仲介器を新たに開発した。仲介器の信頼性を向上させるため、各仲介器には複数の高精度デジタル圧力計を搭載した。気体差圧の仲介器にはシリコンレゾナントセンサを感圧部に持つ圧力計を、液体圧力の仲介器には水晶振動素子を感圧部に持つデジタル圧力計を採用した。なお、搭載したデジタル圧力計の長期安定性の不足を補うため、事前にその環境変化および輸送に対する安定性、短期・長期安定性等の特性を詳細に把握した。

項目②については、自動校正を行うためのプログラム作成、また、遠隔校正を行う際の校正機関の要員と依頼者側の支援要員の手順書を作成した。

項目③については、これまでに、開発した仲介器を用いて国内外で遠隔校正の実証実験を多数行ってきた。図10に気体差圧における実証実験の一例を示す。同図(a)に示すように、産総研を校正機関として、遠隔校正用仲介器を、山梨県甲府市に2回、中国の重慶市に1回輸送し、遠隔校正実験を行った。図10(b)は、フルスケールが10 kPaで、分解能が10 mPaのデジタル圧力計の校正結果であり、通常を持ち込み校正による校正値からの偏差で表している。各測定圧力における偏差の最大値は20 mPa以内であり、相対的に、校正された圧力計のフルスケールの

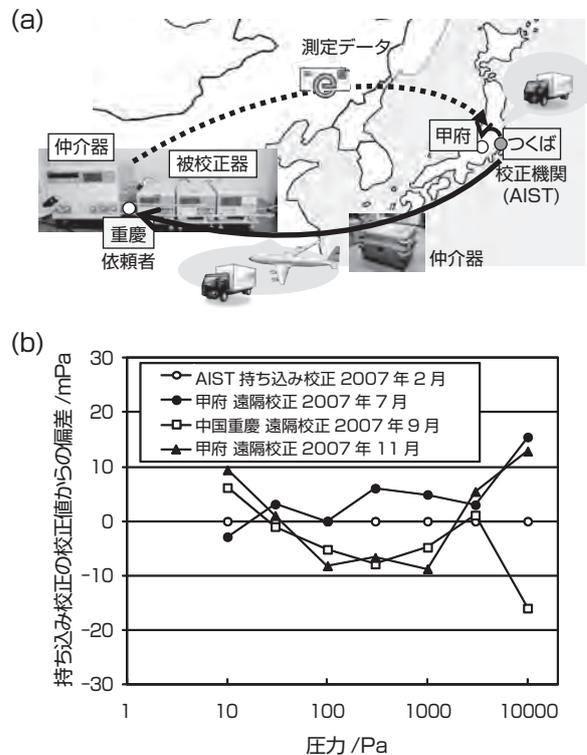


図10 気体差圧の遠隔校正の (a) 実証実験の仲介器回送ルートと (b) その結果（遠隔校正の校正値を持ち込み校正の校正値からの偏差で表した。）

2×10^{-6} 以下と十分に小さかった。この結果から、遠隔校正でも持ち込み校正と同等な結果が得られること、また、伸介器、校正されたデジタル圧力計ともに、環境変化および輸送に対する安定性も含めて、十分な安定性が得られることを示した。

今回開発した圧力の遠隔校正技術は、実証実験の結果からその信頼性が確認され、現在、産総研の校正サービスとして確立されている。その遠隔校正サービスにおける現状の不確かさ（信頼の水準約 95 %）は、気体差圧 10 Pa から 10 kPa の圧力範囲において 100 mPa または 0.01 % 以下、液体圧力 10 MPa から 100 MPa において 0.01 % 以下である。

7 社会・産業界への波及効果と今後の課題

7.1 産業現場での圧力計測の信頼性向上

現在、産総研では、1 Pa から 1 GPa の 9 桁に及ぶ圧力範囲で国家標準を整備し、社会や産業界からのさまざまな校正依頼に応えている。圧力の国家標準となる一群の圧力標準器の整備・高度化には、6.1 節で述べたデジタル圧力計の活用を進めている。現在、デジタル圧力計を用いて複数の重錘形圧力天びんの全自動校正技術を開発中である。これにより、群管理している国家標準器の整備・管理のさらなる高度化や効率化が期待できる。

産総研で現在運用している校正サービスの主要部分については、すでに外国の主要な国立計量標準機関から招いた専門研究者を審査員とした技術審査、および試験・校正機関への一般的要求事項である国際規格 ISO/IEC 17025 の適合審査を終了し、その校正・測定能力は世界各国から承認されている。

産業界の計測現場および国内ユーザーへの圧力の標準供給は、計量法の校正事業者登録制度（Japan Calibration Service System: JCSS）により登録された圧力の校正事業者を中心に行われている。図 11 にその体系の概略を示す。気体圧力と液体圧力の主要な圧力範囲で、産総研が JCSS 校正事業者の重錘形圧力天びんを校正することにより、国家標準の値が供給される。JCSS 校正事業者は産総研の国家標準にトレーサブルな自己の標準器をもつとともに、共通の要求事項、適用指針により品質システムを構築し、認定機関から審査を受ける。JCSS 校正事業者は自己の標準器に基づいて、種々の産業用圧力計を JCSS 制度のもとで校正する。産総研ではこれら JCSS の圧力分野における技術基準の作成、さらに、登録審査にも技術的側面から協力・支援を行っている。

現在、登録されている校正事業者とその最高測定能力の一覧は、(独) 製品評価技術基盤機構のウェブサイト (<http://www.nite.go.jp/>) の適合性認定分野、JCSS の項に記載されている。2011 年 9 月現在、JCSS の圧力区分に登録されている校正事業者は全部で 13 事業者である。また、全校正事業者の発行する JCSS 校正証明書発行件数は、過去 3 年間増加し続けており、2010 年度においては約 2,300 件であった。今後も発行件数のさらなる増加が見込まれており、国家標準にトレーサブルな圧力計測の必要性が我が国の社会・産業界において増大してきていることがわかる。なお、校正件数の多い圧力計の種類は、デジタル圧力計、機械式圧力計である。前述したとおり、これらの圧力計は測定値が重力加速度に直接影響されないため、その補正の必要がなく、簡便にトレーサビリティを確保できるメリットがある。また、通常、高圧力域において標準器となる重錘形圧力天びんは大がかりなものとなり、その設備の導入や維持は校正事業者やユーザーにとって大きな負担となる。しかし、デジタル圧力計を標準器とすることで、その負担を低減することができる。

この論文では詳しくは述べなかったが、圧力差の標準である差圧標準に関しては近年整備が進み、JCSS 校正された 2 台の重錘形圧力天びんを用いた方法^{[8][15]}により、JCSS 校正事業者が自ら差圧標準を設定することが可能な仕組みとした。しかし、重錘形圧力天びんを用いる方法は高精度ではあるが、日常的な校正業務に使うには、あまり簡便な方法ではない。そこで、差圧標準をより効率的に広く普及させるため、デジタル差圧計を利用した標準供給体系を開発した。2008 年より、JCSS 校正事業者によるデジタル差圧計の校正も開始され、差圧標準を効率良く供給することが可能となった。

研究開発により得られたデジタル圧力計の特性評価および

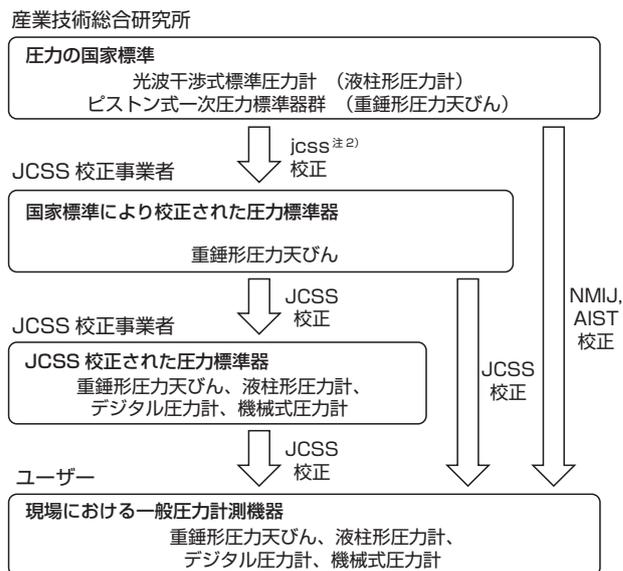


図11 圧力の国内標準供給体系

び校正方法に関する技術や知見を産業界や圧力計のユーザーが広く利用できるように、産総研は各種工業規格^{[11]-[13]}および各種技術基準の整備に技術専門家として協力してきた。特に、管理用のデジタル圧力計の特性試験方法および校正方法についてはJIS B 7547^[12]に規定した。

このように、デジタル圧力計を活用した校正方法および校正技術は、産総研の校正サービス、国内標準体系、各種規格および技術基準を通して、産業現場での圧力計測の信頼性向上に貢献している。この論文で述べた開発では、比較的に高精度なデジタル圧力計の活用が中心であった。今後、圧力計測の信頼性確保をより効率的に低コストで行うためには、一般の工業用デジタル圧力計に対しても、開発した特性評価および校正のための手法を適用し、標準体系へ広く組み込んでいくことが必要であると考えている。

遠隔校正は、依頼者の負担軽減を図り、標準の供給を速く安く正確に行うための技術開発であった。当該研究開発により、圧力遠隔校正に必要とされる基礎技術、すなわち産業現場において信頼性を維持しながら短時間で校正を行うための技術は開発された。しかし、遠隔校正の仲介器の製造コストが十分に抑えられていないため、現状では、その校正コストは持ち込み校正に対して十分に低価格とはなっておらず、利用拡大の障害の一因となっている。また、遠隔校正を行う校正事業者を認定するための枠組みをつくることも課題となっている。将来的には、校正事業者から産業現場の圧力計への校正において、関連技術の利用が進むよう整備を進めたい。

7.2 圧力計測の国際相互承認

産総研は、圧力の国家標準の国際的な同等性を確認するために、国際度量衡委員会（CIPM）の質量関連量諮問委員会（CCM）、および、アジア地域の計量組織であるアジア太平洋計量計画（APMP）の質量関連量技術委員会が行う圧力の国家標準の国際比較に参加してきた^{[19]-[23][25]}。これまでに参加した国際比較を、実施中のものを含め表3に示す。APMPの国際比較の大半において産総研は幹事所として国際比較を主催し、その実施スケジュールの作成、測定手順書の作成、仲介器の準備と特性評価、比較結果のとりまとめ、最終報告書の作成等を行った^{[19]-[22]}。また、産総研が主催した国際比較においては、6.2節で述べたように積極的にデジタル圧力計を仲介器に活用し、効率化を図った。

多くの圧力範囲の国際比較の結果において産総研の国家標準の国際同等性が確認されている^{[19]-[23][25]}。今後実施される国際比較にも積極的に参加し、我が国の国家標準の国際同等性を継続的に確保していく予定である。

産総研が幹事所として主催した国際比較の結果は、2.2

表3 産総研が参加してきた圧力国際比較（2001年以降）

識別記号	種類	圧力範囲	実施年
APMP.M.P-K6	気体ゲージ圧力	20 kPa - 105 kPa	1998-2001
APMP.M.P-K1.c	気体ゲージ圧力	0.4 MPa - 4 MPa	1998-2001
APMP.M.P-K9	気体絶対圧力	10 kPa - 110 kPa	2009-
APMP.M.P-K5*	気体差圧	1 Pa - 5 kPa	2005-2006
CCM.P-K7	液体ゲージ圧力	10 MPa - 100 MPa	2003-2005
APMP.M.P-K7*	液体ゲージ圧力	10 MPa - 100 MPa	2002-2005
APMP.M.P-K7.1*	液体ゲージ圧力	10 MPa - 100 MPa	2007-2009
APMP.M.P-K7.TRI*	液体ゲージ圧力	40 MPa - 200 MPa	2001
CCM.P-K13	液体ゲージ圧力	50 MPa - 500 MPa	2008-2011
APMP.M.P-K13*	液体ゲージ圧力	50 MPa - 500 MPa	2010-
APMP.M.P-S8*	液体ゲージ圧力	100 MPa - 1000 MPa	2007-2010

*産総研が幹事所の国際比較

節で述べたように、CIPMの国際相互承認協定の附属書Bに登録されている。また、参加した国家計量標準機関が国際比較の結果に基づいてそれぞれ表明した校正・測定能力が、国際的に承認されたのち、相互承認協定の附属書Cに登録されている。このように、国際比較に係わる活動に積極的に参加することにより、我が国はもとよりアジア地域を中心とする国々の校正・測定能力のスムーズな登録を支援することができたと考えている。

デジタル圧力計を活用することにより、仲介器の小型化、軽量化が可能となり輸送の障害を低減することができた。また、各仲介器には冗長化のため複数台のデジタル圧力計を用い、それぞれの長期安定性を評価することにより、十分な比較精度を引き出した。さらに、複数の仲介器を準備し、同時に回送することにより、国際比較の短期間での実施が可能となった。このように、デジタル圧力計を活用した仲介器を国際比較に利用することで、国際相互承認に必要な国家標準の国際同等性を効率的に確認することができた。

8 おわりに

デジタル圧力計を活用した産業現場の圧力計測の信頼性確保と国際相互承認のための国家標準の国際同等性の確認を目指し、研究開発を進めてきた。産業現場の圧力標準器としては、伝統的には、長期安定性に優れた重錘形圧力天びんや液柱形圧力計等が用いられてきたが、近年ではデジタル圧力計およびそれを搭載した各種圧力発生器の利用も増えている。この論文で述べてきたデジタル圧力計の特性評価および校正のための技術は、圧力標準体系の中で有効に用いられ、デジタル圧力計を標準器や仲介器として利用した効率的な標準供給体系の実用化が進んだ。さらに、JCSSの普及により、登録された圧力校正事業者を通して、圧力の国家標準にトレーサブルなデジタル圧力計の校正が、広い圧力範囲で、一般ユーザーでも利用可能となり、現場圧力計測の信頼性向上に資している。

高度化・多様化する社会・産業活動において、用途や要求精度に応じた圧力計測の信頼性確保が求められており、今後、デジタル圧力計の操作性や利便性を活かした合理的かつ効率的で、簡便・迅速・安価な圧力校正・標準供給方法の開発がより重要になると考えられる。

さらなる研究開発により、圧力標準供給体系の整備や拡充を進め、社会・産業の現場におけるさまざまな圧力計測の信頼性の確保や向上に寄与できるよう取り組んでいきたい。

謝辞

当該研究開発において、多くの貴重なご助言とご協力をいただいた計測標準研究部門力学計測科の大岩彰科長ならびに圧力真空標準研究室の関係者の皆さまに深く感謝の意を表します。

注1 「重錘形圧力天びん」は、「重錘形圧力計」とも呼ばれている。英名においては、「Pressure balance」、「Piston gauge」、「Deadweight tester」等の表記がある。この論文では、現在、JISをはじめとする各種規格、関連技術文書において一般的に使用されている「重錘形圧力天びん (Pressure balance)」を用いる。

注2 計量法の校正事業者登録制度 (JCSS) において、国家計量標準機関等が発行する校正証明書には小文字の「jcss」の標章、登録された校正事業者が発行する校正証明書には大文字の「JCSS」の標章が付けられる。

参考文献

- [1] 小野晃: グローバル化する計量標準, *産総研TODAY*, 4 (2), 21 (2004).
- [2] 田中充: イノベーションと計量標準, *産総研TODAY*, 10 (12), 2 (2010).
- [3] CIPM, *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes (MRA)*, (1999).
- [4] 大岩彰: 日本における国家計量標準とその供給体制: 質量及びその関連量-力学量-, *計測と制御*, 48 (4), 313-320 (2009).
- [5] 小島時彦: 圧力標準の開発・維持・供給と信頼性向上, *熱測定*, 38 (2), 57-64 (2011).
- [6] 圧力真空標準研究室: 圧力真空標準の研究開発と校正サービス, *精密工学会誌*, 77 (8), 755-756 (2011).
- [7] 平成14年度物理標準ニーズ調査報告書, 産業技術総合研究所計量標準総合センター (2003).
- [8] M. Kojima, T. Kobata, K. Saitou and M. Hirata: Development of small different pressure standard using double pressure balances, *Metrologia*, 42 (6), S227-S230 (2005).
- [9] T. Kobata and K. Ide: Development of pressure standard up to 1 GPa using a precise pressure multiplier, *Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, 3367-3371 (2006).
- [10] H. Kajikawa, T. Kobata and A. Ooiwa: Features of a new controlled-clearance pressure balance and *in situ* mass calibration of its weights, *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, 44 (3), 219-226 (2008).
- [11] JIS B 7610-1, -2, -3, *重錘形圧力天びん* (2000).
- [12] JIS B 7547, *デジタル圧力計の特性試験方法及び校正方法* (2008).
- [13] JIS B 7505-1, *アネロイド型圧力計-第1部: ブルドン管圧力計* (2007).
- [14] A. Ooiwa, M. Ueki and R. Kaneda: New mercury interferometric baromanometer as the primary pressure standard of Japan, *Metrologia*, 30 (6), 565-570 (1994).
- [15] M. Kojima, T. Kobata and K. Saitou: Study on calibration procedure for differential pressure transducers, *Proceedings of IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference*, ID-044 (2007).
- [16] H. Kajikawa and T. Kobata: Effects of pressurization procedures on calibration results for precise pressure transducers, *Meas. Sci. Technol.*, 21 (6), 065104 (2010).
- [17] T. Kobata and D. A. Olson: Accurate determination of equilibrium state between two pressure balances using a pressure transducer, *Metrologia*, 42 (6), S231-S234 (2005).
- [18] T. Kobata: Improved methods for comparing gas and hydraulic pressure balances, *Metrologia*, 46 (5), 591-598 (2009).
- [19] T. Kobata *et al.*: Final report on key comparison APMP.M.P-K7 in hydraulic pressure from 10 MPa to 100 MPa, *Metrologia*, 42 Tech. Suppl., 07006 (2005).
- [20] T. Kobata *et al.*: Final report on key comparison APMP.M.P-K5 in differential pressure from 1 Pa to 5000 Pa, *Metrologia*, 44 Tech. Suppl., 07001 (2007).
- [21] T. Kobata *et al.*: Final report on key comparison APMP.M.P-K7.1 in hydraulic gauge pressure from 10 MPa to 100 MPa, *Metrologia*, 46 Tech. Suppl., 07008 (2009).
- [22] T. Kobata *et al.*: Final report on supplementary comparison APMP.M.P-S8 in hydraulic gauge pressure from 100 MPa to 1000 MPa, *Metrologia*, 47 Tech. Suppl., 07009 (2009).
- [23] 小島時彦: 圧力標準の国際整合性の確保 10 MPaから100 MPaまでの液体圧力標準の国際比較, *産総研TODAY*, 6 (5), 34-35 (2006).
- [24] T. Kobata: Characterization of quartz Bourdon-type high-pressure transducers, *Metrologia*, 42 (6), S235-S238 (2005).
- [25] W. Sabuga *et al.*: Final report on key comparison CCM.P-K7 in the range 10 MPa to 100 MPa of hydraulic gauge pressure, *Metrologia*, 42 Tech. Suppl., 07005 (2005).
- [26] 小島桃子, 梶川宏明, 小島時彦: デジタル圧力計のための遠隔校正技術の開発, *計測標準と計量管理*, 58 (4), 56-61 (2009).
- [27] 小島時彦: 社会基盤を支える圧力標準における本格研究 圧力標準の整備・普及と新たな校正技術の開発, *産総研TODAY*, 10 (1), 18-19 (2010).

執筆者略歴

小島 時彦 (こばた ときひこ)

1995年筑波大学大学院工学研究科物理工学専攻修了。博士(工学)。同年通商産業省工業技術院計量研究所入所。1999年同所主任研究官。2000年(独)産業技術総合研究所計測標準研究部門力学計測科圧力真空標準研究室主任研究員。2011年同研究室長として現在に至る。2000年～2001年米国国立標準技術研究所(NIST)客員研究員。2008年～2009年



（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構研究開発推進部主任研究員。圧力標準、圧力計測の研究に従事。この論文では、研究統括、圧力全般に関する研究開発・校正業務、原稿執筆を担当した。

小島 桃子（こじま ももこ）

2003年東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻博士課程修了。博士（理学）。同年（独）産業技術総合研究所入所。同所計測標準研究部門力学計測科圧力真空標準研究室研究員として現在に至る。圧力標準、圧力計測の研究に従事。この論文では、主に気体圧力全般に関する研究開発・校正業務を担当した。



梶川 宏明（かじかわ ひろあき）

2006年京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻単位認定退学。同年（独）産業技術総合研究所入所。同所計測標準研究部門力学計測科圧力真空標準研究室研究員として現在に至る。博士（理学）。圧力標準、圧力計測の研究に従事。この論文では、主に液体圧力全般に関する研究開発・校正業務を担当した。



査読者との議論

議論1 全般

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

この論文は、近年高精度化した工業用デジタル圧力計を国家標準体系にうまく組み込むことにより、産業現場での圧力計測の信頼性を向上させ、また圧力計測に関する国際的な相互承認を促進した優れた研究だと思います。また圧力の標準体系全般を俯瞰的に見た上で、要素技術を特定し、それらを適切に統合して新しい圧力標準体系を構成していった過程が記されており、シンセシオロジー誌の論文としてふさわしいと思います。

議論2 デジタル圧力計の経時変化の原因

質問（小野 晃）

図7に国際比較に用いたデジタル圧力計の校正値の経時変化が出ています。個々の圧力計ごとに経時変化の程度が異なるので難しいかもしれませんが、経時変化の原因が何か、およその推定はできているのでしょうか。

回答（小島 時彦）

圧力計の校正値の経時変化の程度は、圧力計の種類、使用する圧力範囲、使用方法によっても異なります。一般的には、圧力計の校正値の経時変化は高压用の圧力計で大きくなり、低压用の圧力計では小さくなり、はっきりとした経時変化が見られないこともあります。また、図7の例にも示したように、一つの圧力計でもその経時変化の量が印加圧力の関数となる場合があります。

したがって、一概には扱えませんが、校正値が経時変化する一つの要因として挙げられるのは、その受圧部の塑性変形の影響です。受圧部が完全な弾性変形をするのであれば、印加された圧力の大きさに応じて変形し、圧力をゼロに戻せば元の形状に戻ります。しかし、実際の圧力計においては圧力を印加している間に、受圧部がともわずかな量ではあります塑性変形を起こすことがあります。この場合、圧力をゼロに戻しても完全に元の形状には戻りません。圧力ゼロから再度同じ圧力まで加圧する手順を繰り返すと、受圧部は同じ圧力に対しても次第に大きい変形を示すようになります。図7の例においても、6台の圧力計の校正値はすべて、時間と共に、同じ印加圧力に対して受圧部の変形が大きくなる方向に変化しています。

おそらく、これら校正値の経時変化は、上述した塑性変形の影響を含んでいると考えられます。

もっともこれらの変化量は、通常メーカーが主張している仕様精度に比べてとても小さいので、一般的な使用において問題になることは、ほとんどありません。しかし、国際比較では最高レベルの測定精度が必要となるため、その変化の補正が必要となります。

議論3 これまでの方法とこの方法の定量的比較

質問（濱 純：産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門）

高精度デジタル圧力計を伸介器として用いる校正技術は、製品開発、研究開発においてデータの信頼性を担保するよりどころとして、現場での圧力校正の負担軽減に大いに寄与していると思います。

その現場校正の簡便さ、効率化、低コスト化等、これまでの方法との比較で具体的に日数や費用等の校正の軽減の実例があれば、ご教示ください。

回答（小島 時彦）

効率性を示す事例としては、デジタル圧力計を校正対象とした場合、持ち込み校正では、被校正器の移送も含めて通常1～2週間程度の校正期間が必要となりますが、遠隔校正では、国内で実施した各種実証試験において、多くの場合に2日で校正を実施することができました。また、遠隔校正では校正担当者の拘束時間が短縮できますので、必要な人件費も低減できます。しかし、現状、遠隔校正の校正コストは持ち込み校正と比較して、十分に抑えられてはいません。遠隔校正に用いている多機能、高性能な伸介器のコストが主な原因です。今後、遠隔校正を普及させるためには、必要な不確かさに応じて機能を絞り込む等して、伸介器のコストを下げっていく努力が必要であると考えています。

議論4 デジタル圧力計の伸介器を活用できる地域

質問（濱 純）

デジタル圧力計を活用した簡便、迅速、安価な圧力校正・標準供給方法の開発のより具体的な取り組みについて、開示可能範囲でご教示ください。特に、産業現場遠隔校正手法の進展は一つの重要なキーワードと思いますが、そのカバーする地域は国内外どこまでをイメージしていますか。逆に、デジタル圧力計の不確かさの主な要因から、地域が制約されるのかもしれませんが。

回答（小島 時彦）

圧力の遠隔校正については、具体的な開発内容を6.3節に追記しました。今後、整備している国家圧力標準の値を広く、円滑に産業現場に供給することが、より重要になると考えています。将来的には、圧力計測の信頼性を一段と向上させるために、産業現場で使用されている圧力計の表示値の信頼性を、間欠的に行われる校正の結果だけから保証するのではなく、通常の使用時も含め時間的に連続にリアルタイムで保証する必要があると考えています。

また、遠隔校正がカバーする地域についてですが、基本的には伸介器を安全に輸送でき、安定に設置可能で、インターネット等の情報通信網が利用できる場所であれば、国内外問わず特段の制約はないと考えています。ただし、伸介器の輸送に時間を要するような地域では、遠隔校正のメリットである迅速な校正を行うことができません。また、ご指摘のとおり、遠隔校正では伸介器にデジタル圧力計を使用していますので、校正を実施する場所の環境に応じて5章で示した不確かさ要因を考慮しなければなりません。例えば、校正場所の空調の制御が良くない場合には、周囲温度の変化による影響で校正の不確かさも大きくなります。

議論5 デジタル圧力計の活用に関する諸外国の動向

質問（小野 晃）

高精度のデジタル圧力計を伸介器として標準体系に組み込むこと

は、諸外国でも同じような動きがあるのでしょうか、あるいは日本独自の取り組みなのでしょうか。

回答（小島 時彦）

この論文では、圧力の国家標準の設定・管理、国家標準の国際比較、国内標準供給にデジタル圧力計を組み込んだ事例を述べました。それぞれについて、状況を説明します。

はじめに、圧力の国家標準の設定・管理に用いられる、重錘形圧力天びんの比較測定におけるデジタル圧力計の利用についてですが、6.1節で述べた第一の校正方法であるデジタル差圧計を利用した方法は、特に気体圧力の校正において諸外国でも利用が進んでいます。しかし、第二の校正方法である置換法については、産総研が独自に開発してきた要素技術もあり、低圧から1 GPaまでの広い圧力範囲でこの方法を校正に適用しているのは、現在、産総研だけです。産総研で高度化してきたこれら二つの方法は、伝統的な方法による校正結果とも十分に整合することがすでに確認されていて、校正の自動化にも適しています。実際に国内校正事業者でも導入が進んでいて、今後、海外も含めて広く利用されていくと考えられます。

次に、国家標準の国際比較におけるデジタル圧力計の利用についてですが、こちらについても、近年その利用が広がっています。特に、通常、重錘形圧力天びんでは発生できない1 kPa以下の低圧力範囲においては、伸介器に複数の高精度デジタル圧力計を使用することが通例になっております。また、太平洋・アジア、アメリカ、アフリカのような広い地域での輸送が必要な国際比較では、6.2節で述べたように、大型で重量のある重錘形圧力天びん等よりも小型、軽量のデジタル圧力計を伸介器として利用した方が、輸送上大きなメリットがあります。

国内標準供給におけるデジタル圧力計の組み込み事例として示した遠隔校正については、世界において、いくつか類似の技術開発が報告されていますが、現在、圧力計の遠隔校正サービスとして確立されているのは、産総研における校正サービスだけです。この遠隔校正技術に関しては、外国の国家計量標準機関も興味を示しており、7.1節で述べた、校正コストの低減および校正事業者の認定のための枠組み構築のような課題が解決すれば、国内だけでなく諸外国においてもその利用の拡大が期待できます。

議論6 圧力以外の量における遠隔校正の開発状況

質問（小野 晃）

この研究で述べられたことは、伸介器の性能向上が、標準体系全体に大きな影響を与えた例と思います。圧力以外の量においてもこのような事例はあるのでしょうか。

また6.3節で述べられた遠隔校正に関するNEDOプロジェクトでは、圧力以外の他の量はどのようなアプローチをとったのか、簡単に紹介していただければありがたいです。

回答（小島 時彦）

近年、さまざまな量に対して、伸介器（伸介標準器）の性能向上のための取り組みが進められており、それぞれの標準体系において、伸介器の与える影響が増大しています。圧力以外の量において、伸介器の性能向上が、その標準体系に大きな影響を与えた一例として、このシンセシオロジーのバックナンバーの論文[Vol.3 No.1 pp.1-15 (Mar. 2010)]に掲載されている温度の計測における例が挙げられます。その論文において、新井らは、高温の標準体系を構築し、その計測の信頼性を確保するために、新たに開発した熱電対を伸介器として有効に利用しています。

NEDOのe-traceプロジェクトでは、各種計量標準の供給を効率的に行うため遠隔校正技術の開発を行いました。e-traceプロジェクトにおいて研究対象とした各種計量標準は、その形態により大きく二つに分類されます。一つはGPS（全地球測位システム）や光ファイバ網を利用して遠隔校正を行う標準、もう一つは輸送可能な伸介器を利用する標準です。前者に分類されるのは時間（周波数）標準、長さ標準（波長、光ファイバ応用）、電気標準（直流電圧）等、後者に分類されるのは、電気標準（交流電圧、低周波インピーダンス）、放射能標準、三次元測定機標準、振動・加速度標準、圧力標準、温度標準等となります。前者の典型的な例となる時間（周波数）標準では、GPS衛星を伸介とする方式により周波数の遠隔校正技術を開発しています。また、後者では、基本的には、6.3節で述べた圧力標準の場合と同様に、伸介器を依頼者の指定場所に輸送しインターネット等を活用して遠隔校正を行う技術を開発しています。

微生物変換による活性型ビタミン D₃ の効率的生産

— 分子の改良から細胞膜改変までの包括的アプローチ —

安武 義晃、田村 具博*

生体触媒を用いた物質変換プロセスは、一般に反応特異性が高く、効率的な物質生産を行う上で極めて重要な技術である。加えて、生体触媒は有害物質の排出が少なく、環境汚染のリスクが少なく、生産過程におけるエネルギー消費量が少ないという利点がある。この論文では、放線菌ロドコッカスエリスロポリス細胞を用いた生体触媒変換系による活性型ビタミンD₃の生産に関して記述する。この微生物変換の触媒反応を担う酵素の性能向上は、進化学および立体構造を基にした手法の組み合わせにより達成した。これにより、活性型ビタミンD₃の実生産効率を高めることに成功した。さらに、抗菌物質であるナイシンを用いて細胞を処理することにより、ビタミンD₃の細胞膜透過効率を飛躍的に向上させることに成功し、新たなビタミンD₃水酸化反応プロセスの基盤開発に成功した。

キーワード: シトクロム P450、ビタミン D₃、微生物変換、ナイシン、構造生物学、タンパク質工学

Efficient production of active form of vitamin D₃ by microbial conversion

– Comprehensive approach from the molecular to the cellular level –

Yoshiaki YASUTAKE and Tomohiro TAMURA*

Conversion processes of organic compounds using biocatalyst generally have high regio- and stereo-selectivity, and are becoming increasingly important for efficient production of chemicals. In addition, biocatalysis is less hazardous, less polluting and less energy-consuming than the conventional chemical method. We report the highly efficient bioconversion system using actinomycete *Rhodococcus erythropolis* to produce active form of vitamin D₃ currently used as a pharmaceutical. The improvement of performance of the enzyme used for the bioconversion has been achieved by the combination of evolutionary engineering and structure-based methods. Accordingly, the practical production efficiency of active form of vitamin D₃ has been substantially increased. In addition, we have succeeded in significant improvement of cellular permeability of vitamin D₃ by using nisin-treated cells, and have developed a new platform for vitamin D₃ hydroxylation process.

Keywords: Cytochrome P450, vitamin D₃, bioconversion, nisin, structural biology, protein engineering

1 はじめに

ビタミン D₃ (VD₃) は脂溶性ビタミンの一種であり、人間の体内においてさまざまな生理機能を担う極めて重要な物質である^[1]。人間は VD₃ のほとんどを食物から摂取し、摂取された VD₃ は肝臓および腎臓において活性型 VD₃ へと変換される。この活性型 VD₃ はステロイド炭素骨格の 25 位が水酸化された 25-ヒドロキシ VD₃ (25(OH)VD₃)、さらに 1 α 位が水酸化された 1 α ,25-ジヒドロキシビタミン D₃ (1 α ,25(OH)₂VD₃) であり、人の体内においてカルシウムやリン酸の恒常性維持、細胞の増殖・分化、免疫調節等に深く関与する。遺伝的もしくは環境的要因による活性型 VD₃ の欠乏は、骨粗鬆症・くる病・乾癬・副甲状腺機能亢進症等の病気を引き起こすことが知られており、実際にこれらの病気の治療薬として活性型 VD₃ が使用されている^[1]。

現在、主に薬剤として使用されている 1 α ,25(OH)₂VD₃ は

有機化学合成の手法によって製造されており、コレステロールを出発物質として約 20 の反応ステップを経て合成することが可能であるが (図 1A)、その収率はわずか 1 %程度にとどまる^[2]。このような生産効率でも事業化されているのは、活性型 VD₃ が極微量の投与 (0.5 ~ 数 μ g/日以下) でその薬理効果を示すからであり、その価格はとても高価である (一般試薬として販売されている VD₃ の値段は 1 mg 当たり約 7 円であるのに対し、1 α ,25(OH)₂VD₃ は 1 mg 当たり約 13 万円となる (S 社カタログより))。このようなファインケミカルを大量に生産するためには、上記化学合成方法では低い反応効率のため精製方法が複雑となり、薬剤として使用するための高純度精製品を製造するためには高いコストを支払わなくてはならない。また、化学合成法ではステロイド骨格に対する部位選択的水酸化反応を行うことが困難であるため、薬効を示す可能性のある多様な活性型 VD₃ 誘導体を製造するには不向きな手法でもある。

産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門 〒062-8517 札幌市豊平区月寒東 2 条 17-2-1

Bioproduction Research Institute, AIST 2-17-2-1 Tsukisamu-Higashi, Toyohira, Sapporo 062-8517, Japan * E-mail: t-tamura@aist.go.jp

Original manuscript received September 7, 2011, Revisions received October 31, 2011, Accepted November 7, 2011

一方、この化学合成法に代わる手法として、微生物がもつ変換能力を利用した活性型 VD₃ の製造が実用化されている^{[3][4]}。この微生物変換反応を担う *Pseudonocardia autotrophica* という放線菌は、培地中に添加した VD₃ を活性型 VD₃ へと変換する能力をもつ。さらには、この微生物変換の過程で生まれる反応中間体 (25(OH)VD₃) は、医薬中間体としての利用価値があると共に 1 α ,25(OH)₂VD₃ 同様の薬理効果があり、この 25(OH)VD₃ の取得も同一のプロセスにおいて可能である（一般試薬として販売されている 25(OH)VD₃ の値段は 1 mg 当たり約 4 万円である（S 社カタログ））（図 1B）。

生物が所持する酵素を利用した生体触媒変換は、一般に高い部位選択性・立体選択性を示すことから、化学物質合成において大きなインパクトをもつ。加えて、これまでの有機合成法に比べて安全であり、汚染物質の排出量が少なく、かつ穏やかな反応条件（常温・常圧）であることからエネルギー消費量も低い。このような特徴を併せもつ生体触媒変換技術に対しては「グリーンケミストリー」という言葉が使われるように、環境調和型の物質合成手法として広く知られている。*P. autotrophica* による活性型 VD₃ の生産は、このような特徴をすべて兼ね備えた環境調和型の物質生産法である。しかし、後述するようなさまざまな問題点が存在しているため、その生産性は最大化されていない。この論文では、まず現在実用化されている微生物変換における問題点と開発目標を示し、その上でそれを解決するために適用した研究手法とその組み合わせ方、またどのような着眼点が有効であったかを示しながら、高効率・高性能な組換え微生物変換系の構築に至るまでを記述する。

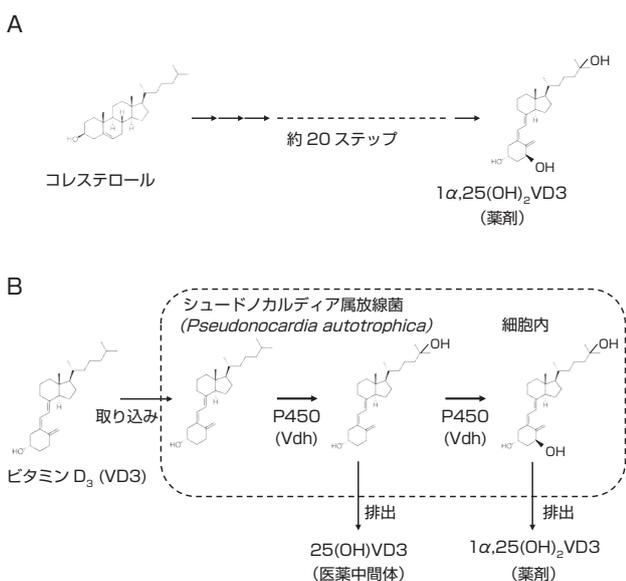


図 1 活性型ビタミン D₃ の生産法
有機合成法 (A) および *P. autotrophica* による微生物変換による方法 (B)。

なおこの論文では、企業が事業実施している VD₃ 水酸化体生産に関する情報をオープンにできないため、記述した開発内容がどれだけ実生産の効率化に寄与できるか数値で示すことができない点を了承いただきたい。

2 克服すべき問題点と開発目標

微生物変換による活性型 VD₃ の生産技術の利点は上述のとおりであり、現在、企業では VD₃ 水酸化能の高い *P. autotrophica* 育種株を培養し、培養液に VD₃ と VD₃ の溶解度を高める目的でシクロデキストリン (CD) を添加し、微生物を増殖させながら VD₃ 水酸化体を培地に蓄積させていく手法が採られている (図 1B)。研究初期は *P. autotrophica* 野生株を用いて検討が進められ、菌培養 2 日後に VD₃ を添加し (200 μ g/ml)、翌培養 3 日目に 45 μ g/ml の 25(OH)VD₃ の蓄積が確認されている^[4]。現在は育種株を使用した生産が行われており、その生産効率はかなり高くなっていると考えられる。

しかし、この手法には改良を施すべき問題点も存在しており、それらを解決することによって、飛躍的に性能が向上した微生物変換が可能になると考えられる。以下に、それら問題点、推定される原因を分析し、解決の指針をまとめる。

- ① 変換効率・・・現在実施されている微生物変換では、培地中に添加した VD₃ がすべて変換されず、未反応基質が残留している。実験室レベルでの解析では 30 % 以上の未反応物が確認される。変換可能量は細胞内の酵素の絶対量に大きく依存すると考えられるため、大量の酵素を細胞内に安定に発現・蓄積させる技術が必要である。これにより、添加した VD₃ の大部分を活性型に変換する変換系の構築が期待される。
- ② 変換速度・・・現在実施されている微生物変換では、1 回あたりの変換反応には 100 時間以上を必要としている。これは、微生物の生育速度が遅いことと、酵素の天然基質 (未特定) ではない VD₃ を基質として使用しているため酵素反応速度が遅いことが主な原因であると考えられる。反応速度を向上させた変異体酵素を創成し、増殖が速い微生物細胞中で反応を行うことにより、より短い期間で同一量の活性型 VD₃ を得ることが可能になると考えられる。
- ③ 副反応産物の存在・・・この微生物変換における最大の問題は、26 位炭素が水酸化された副反応産物が生じることである。この 26 位水酸化体は、高速液体クロマトグラフィーにより 25 位水酸化体と近接あるいは重なったピークとして溶出される。このため、医薬品としての 25 位水酸化体生産には、26 位水酸化体を完全に除去する必要がある。

り、25位水酸化体収率を下げる要因となっている。これは酵素反応の部位選択性が低いことが原因であるため、部位選択性の向上した変異体酵素を作製し、26位水酸化反応を抑制することが求められる。

- ④ 細胞膜透過の問題・・・VD3は脂溶性ビタミンであり、難水溶性の性質を示す。したがって、上述したように変換培地中にはVD3と共にシクロデキストリン (CD) を添加し、CDの環状構造中にVD3をトラップ (包接) させた状態で溶解させている。相対的に分子量の大きいCD-Vd3複合体は細胞膜を透過できないため、CDから解離したVD3が単独で効率良く膜を透過するか、もしくはCDごと膜透過させるような工夫が必要である。細胞膜透過効率は、この微生物変換反応の律速になっており、膜透過の問題が改良されれば、反応効率 (①) および見かけの反応速度 (②) の向上も同時に期待される。

解決されるべき上記問題点のうち、①から③に関しては、変換反応を実際に担っている酵素の性能が主な原因として挙げられる。そこで、まずは酵素の特徴付けと変異導入による改良、および酵素の細胞内での大量蓄積技術が必要となる。また後述するとおり、この酵素はシトクロム P450 と呼ばれる酵素群の一員である。シトクロム P450 とは、分子内にヘムをもち、外部から電子が供給されることでさまざまな物質の炭化水素鎖に水酸基を挿入する能力をもつ酵素群の名称であり、活性を發揮するために適切な電子供与タンパク質を必要とする。そこでこの酵素に効率良く電子を伝達できるようなレドックスパートナー遺伝子を探索し、この酵素と共に共発現させる必要がある。④に関しては細胞膜自体の構造、あるいは物質を膜透過させるトランスポータータンパク質の機能の問題に関係するため、そのような情報を取得できる細胞であることが望まれる。

以上の問題を解決するためには、VD3 水酸化能を有さず、組換え大量発現が可能で、培養が容易で増殖も速く、かつゲノム情報が利用できる微生物を変換ホストとして利用して情報収集を行い、*P. autotrophica* の系へフィードバックすることが望ましいと考えた。これらの条件を満たす生物種として、*P. autotrophica* と同じ放線菌に属する *Rhodococcus erythropolis* 宿主ベクター系^[5]を利用して研究を進めることとした (図 2)。

3 成果への道筋

3.1 酵素の単離と遺伝子の同定

希少放線菌である *P. autotrophica* に VD3 を活性型 VD3 に変換する能力があることが発見されたのは今から約 20 年前のことである。ステロイド骨格への水酸化反応を触媒するという特徴から、この反応を触媒する酵

素はシトクロム P450 の一種であると予想されたが、酵素の同定には長い間成功していなかった。そこで私達はまずこの酵素をコードする遺伝子の探索から着手した。*P. autotrophica* のゲノム配列解読はなされていなかったため、VD3 水酸化活性を指標に *P. autotrophica* 細胞抽出液から直接酵素の精製を試みた。VD3 水酸化活性は、一般に P450 が活性を發揮するために必要とする電子伝達タンパク質を共存させることで検出されたため、目的酵素は予想どおり P450 の一種であると確認されたが、精製途中で VD3 水酸化活性が検出できなくなる現象が障壁となり精製は難航した。試行錯誤の結果、この酵素が活性を示すために反応溶液中に塩 (NaCl 等) が存在しなければならないことを見出し、精製の最終ステップまで活性を追跡することが可能となった^[6]。得られた精製酵素より部分アミノ酸配列の決定を行った後、この酵素をコードする遺伝子のクローニングに成功した。

3.2 試験管内でVD3水酸化反応を再現

上述の方法により同定に成功した VD3 水酸化活性を示す酵素は、大腸菌を用いた一般的な大量発現系を利用して生産することが可能であった。ただし P450 酵素はヘムタンパク質であるため、ヘムを内包した活性型酵素を取得するためには、培地中にヘム前駆体である 5-アミノレブリン酸を添加する必要がある。これは大腸菌を利用して P450 酵素を大量生産する際に頻繁に用いられる手法である。一方、この酵素は *R. erythropolis* を利用した組換え大量発現も同様に可能であったが、その際培地に 5-アミノレブリン酸を添加することなく酵素の取得が可能であった。これは、放線菌がそもそも多くの P450 遺伝子をもつことから、ヘム生合成経路が安定に機能し、細胞内のヘムが枯渇することなく維持できているからだと考えている。5-アミノレブリン酸は高価な試薬であるため、組換え発現を行う場合、*R. erythropolis* を利用した微生物変換はこの点で有利である。

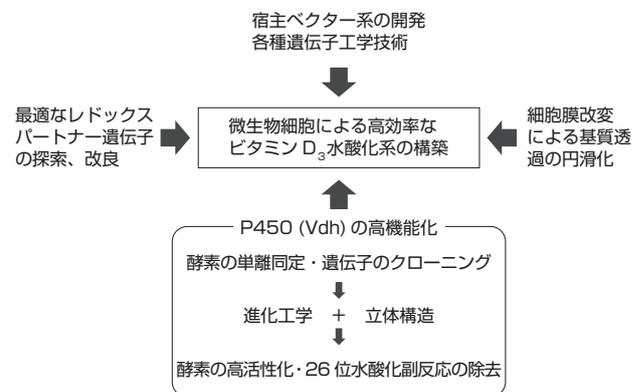


図 2 研究開発のアウトライン

次に、大量発現により取得された酵素の試験管内における活性測定を行い、酵素の機能を詳細に解析した。P450 は水酸化反応の1代謝回転を行うために2個の電子が必要であり、電子を供給するレドックスパートナータンパク質をアッセイ系に加える必要がある。ここでは、さまざまなP450のアッセイに対して汎用的に用いられている市販のハウレンソウ由来レドックスパートナータンパク質を利用した。その結果、この酵素がVD₃から25(OH)VD₃、および25(OH)VD₃から1 α ,25(OH)₂VD₃への二段階の水酸化反応を連続的に触媒することが明らかになった。1 α (OH)VD₃が検出されないことから、この酵素は必ずVD₃の25位炭素を最初に水酸化し、続いて25(OH)VD₃に対して1位炭素の水酸化を行うことが分かった。また、少量の26位水酸化体も検出され、これらの結果はすべて*P. autotrophica*細胞によるVD₃変換時に検出されるものと一致した。私達はこのP450酵素がこの微生物変換を実際に担っている酵素であると断定し、ビタミンD₃水酸化酵素(vitamin D₃ hydroxylase (Vdh))と名付けた。以下、このP450酵素をVdhと記すことにする。

3.3 組換え発現を用いた細胞内変換

次に、*R. erythropolis*の組換え細胞を用いてVD₃の水酸化を行う微生物変換系の構築を行った。Vdhの単独発現ではVD₃水酸化活性はとて低く、何らかのレドックスパートナータンパク質を共発現させる必要があった。そこで、抗生物質チオストレプトンによって発現が誘導される誘導型ベクターに、Vdhおよび*R. erythropolis*由来のレドックスパートナータンパク質(フェレドキシンおよびフェレドキシン還元酵素)をコードする3種の遺伝子を挿入し、*R. erythropolis*細胞内でこれらを共発現させ、培地にVD₃を添加してVD₃の変換試験を行った。結果、*R. erythropolis*細胞を用いた場合にも、活性型VD₃が生産されることを確認した。P450への電子供給を最も効率良く行うことができるパートナーは、必ずしもそのP450が本来の由来生物細胞内でカップルするタンパク質であるとは限らないことが報告されている^[7]。これは遺伝子の細胞内発現レベルや細胞内環境のわずかな差異によって電子伝達効率が著しく左右されるためと考えられている。そこで私達は、上記の共発現ベクターにさまざまな電子伝達タンパク質遺伝子を挿入して変換テストを行い、それらの中から高いVD₃水酸化活性を示すレドックスパートナーを探索した。その結果、*Acinetobacter*由来のAciB、AciCというタンパク質がVdhに対して最も相性のいいパートナーであった。

3.4 酵素改良への異なる二つのアプローチ

一般に生物が作り出す酵素というものは、ある基質を特

異的に認識し、特異的な反応を行うことに特化した触媒体である。しかし、*P. autotrophica*が生息する土壤中にVD₃は見出されないため、VdhはVD₃を水酸化し代謝するために進化した(特化した)酵素ではないと考えられる。事実、単離精製した酵素のVD₃水酸化活性は、何らかの物質の生合成に関与するような特異的機能をもつP450の活性よりもかなり低い。したがって、VdhのVD₃水酸化活性は酵素として全く最適化されておらず、まだまだ向上させることが可能だろうと考えられる。

酵素を改良するための変異導入を行う場合、全く異なる二つのアプローチがある。一つは、タンパク質の立体構造を解析し、その構造情報に基づいて変異を導入する論理的戦略(rational design)である。構造機能相関が明確である場合には強力な手法である一方で、タンパク質の立体構造は無数のパラメータから成る複雑系であるため、時にアミノ酸残基と機能との間に単純な相関関係がないことも多い。もう一つのアプローチは、ランダム変異を導入した遺伝子変異ライブラリーを作製し、性能の向上した変異体をスクリーニングする進化工学的アプローチである。こちらはライブラリーの作製とそれらすべてをアッセイして検証する必要があるため大変な労力が必要となる一方で、活性部位近傍に限らず、配列上のいかなる場所からも酵素の機能向上に貢献する変異が抽出されてくる可能性がある。当該研究では、これら二つのアプローチをどちらかに限定することなく、両方の手法を用いて酵素の改良を行った(図2)。結果的に、進化工学および構造に基づいた変異導入の両方の戦略において、それぞれの手法の長所が引き出され、有用な変異体を生み出すことに成功した。

3.4.1 酵素の高活性化

VD₃水酸化活性が著しく向上した変異体は、ランダム変異によるスクリーニングの後、活性が向上したクローンの変異か所を組み合わせることによって取得された。最も活性が向上した4重変異体(Vdh-K1)は、野生型Vdh(Vdh-WT)と比較して25位水酸化活性が約12倍、1位水酸化活性が約25倍、それぞれ向上していることが確認された^{[6][8]}。興味深いことに、これら4カ所の変異はすべて活性部位から遠く離れた場所に位置しており、このような変異をrational designによって見出すことは困難である。Vdh-K1の取得は、構造情報にとらわれない進化工学の利点が最大に生かされた結果となった。一方、立体構造解析を行うことで、なぜこれらの変異が大きな活性向上を生み出したのかを推察することができた。Vdh-WTとVdh-K1の間には大きな構造変化が観察され、変異4カ所のうち3カ所はその構造変化を誘発させるような変異であった。すなわちVdhの活性向上は、基質結合ポケットの基質の形状に

対する最適化ではなく、分子構造全体がとりうる二つのコンフォメーション (open form と closed form) の平衡を調節することで可能になった^[8] (図 3)。P450 は自然界において、二次代謝産物の生合成系あるいはさまざまな物質の解毒分解にかかわる酵素であり、広い基質特異性を示す分子種も多い。当該研究で観察された変異導入による構造変化の平衡移動は、自然界において新たな環境や物質に出会った時、これら P450 がわずかに数カ所の変異で迅速に適應するメカニズムなのかもしれない。この成果によって、VD₃ 水酸化体生産効率を著しく向上させられる可能性が生まれた。しかしながら後述する基質の膜透過性の問題により、酵素の性能アップだけでは VD₃ 水酸化体生産効率の大幅な向上には至っていない。

3.4.2 酵素副反応を完全に消去する

P. autotrophica による活性型 VD₃ 生産においては、約 10 % の割合で 26 位炭素が水酸化された副反応産物が生じる。これは明らかに酵素の基質認識に問題があり、より厳密に VD₃ を認識する酵素を作製するか、基質結合ポケット内での基質の結合方位を微調整する必要があると思われる。そこで、構造情報に基づいた基質結合ポケットへの変異導入を行うため、Vdh と VD₃ の複合体結晶構造解析を試みた。Vdh-WT は基質結合親和性が低く、基質複合体結晶を得ることができなかったが、一方で高活性変異体 Vdh-K1 は VD₃ との複合体の状態での結晶化に成功し、酵素がどのように VD₃ を認識するのかを明らかにすることができた^[8] (図 4)。基質結合ポケットを形成するアミノ酸残基のうち、VD₃ の 24 位から 27 位炭素の近傍に位置す

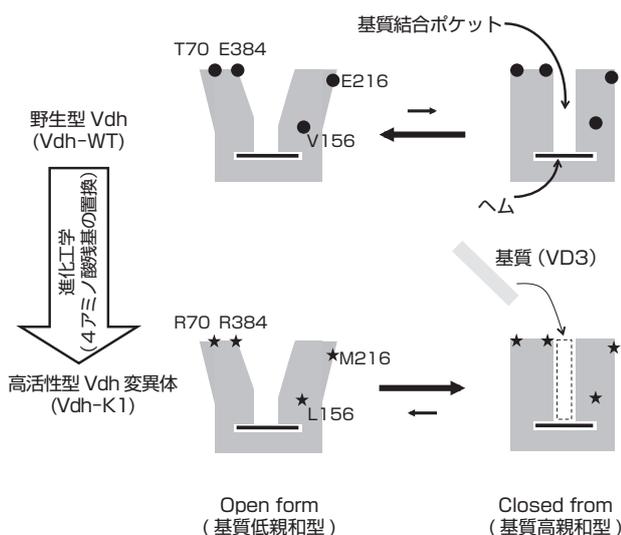


図 3 P450 Vdh の高活性化メカニズム

一般に P450 はオープン構造とクローズ構造の平衡にあり、基質はクローズ構造と結合しやすい。進化工学によって選ばれた変異によってこの構造間の平衡が大きく移動し、クローズ構造をとる分子の総数が増え、高活性化が達成された。

るアミノ酸残基に着目し、それらに対してアミノ酸総置換を行うことで副反応比率が低下した変異体 (I88V) を取得した^[9]。Vdh-K1 + I88V の 5 重変異体は、*P. autotrophica* による生体変換試験において、副反応比率が 1 % 程度にまで低下し、また単独 I88V 変異体の場合は、26 位水酸化体は検出限界以下にまで低下した。この成果は、立体構造情報に基づいてはいるが、完全な rational design ではない。どのアミノ酸残基のどのような変異が副反応を低減させられるのかを、論理的に推定することはとても難しい。したがって、変異を導入すべき場所 (アミノ酸残基) のみを立体構造を基に選定し、選定したアミノ酸残基に対してはランダム総置換の戦略をとることで、副反応低減を実現する変異を選び出すことに成功した。この研究成果により、25(OH)VD₃ の生産効率を高めることに成功し、現在実用化に向けた開発が進められている。

3.5 細胞を加工する

Vdh を組換え発現させた *R. erythropolis* により活性型 VD₃ を生産するにあたり、最後の大きな問題となる事象が物質の細胞膜透過効率である。これは *R. erythropolis* に特有の問題ではなく、*P. autotrophica* においても同様の問題が観察されていた。*R. erythropolis* においては、細胞内 Vdh 発現量を変動させても、細胞内酵素量と VD₃ 水酸化体の変換率に相関は認められず、ある一定の変換効率で固定される^[10]。また *P. autotrophica* では、試験管内での再構成系を用いたアッセイ結果では飛躍的な高活性化が確認された Vdh-K1 (3.4.1 参照) であっても、*P. autotrophica* 細胞内変換を行うと野生型と大きな差が生まれないのである。これは細胞内で酵素の性能が生かされていない状況を意味しており、基質である VD₃ の細胞膜透過が律速になっていると推測された。VD₃ は脂溶性のステロイドであり水への溶解度は極めて低い。そのため現在の微生物

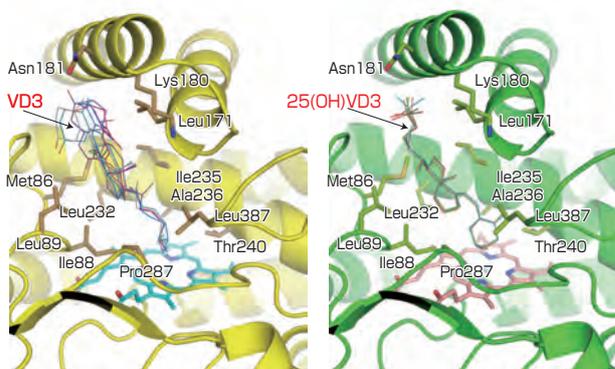


図 4 P450 Vdh による上下反転した異なる基質認識メカニズム。VD₃ (左) と 25(OH)VD₃ (右) はそれぞれ互いに反転した方位で酵素に結合することができ、それによって活性型 VD₃ への連続水酸化が可能となる。基質結合サイトの詳細情報から、副反応を除去するための変位候補のアミノ酸を選定した。

変換においては、CD を培地に添加し、CD の環状構造内に VD3 を包接させて溶解度を向上させている。実際に *in vivo*、*in vitro* 共に、溶液中への CD の添加によって Vdh の VD3 水酸化活性は劇的に向上する。しかし、分子量の大きい CD-VD3 複合体が細胞膜を透過することは難しいと考えられ、VD3 は CD から解離した後に拡散的に細胞内へと入ると考えられるが、実際の VD3 細胞内取り込み機構は全く不明である（図 5）。そこでまず、何らかの膜タンパク質（トランスポーター）によって VD3 が運搬されている可能性を考慮し、トランスポゾンを用いたランダム遺伝子破壊実験および *R. erythropolis* ゲノム情報を利用し、VD3 の変換活性を向上させるようなトランスポーターホモログ遺伝子の同定を試みた。しかし、現在までにそのような遺伝子を見出すことはできていない。

そこで着想を大きく転換し、細胞に物理的に穴を開ける

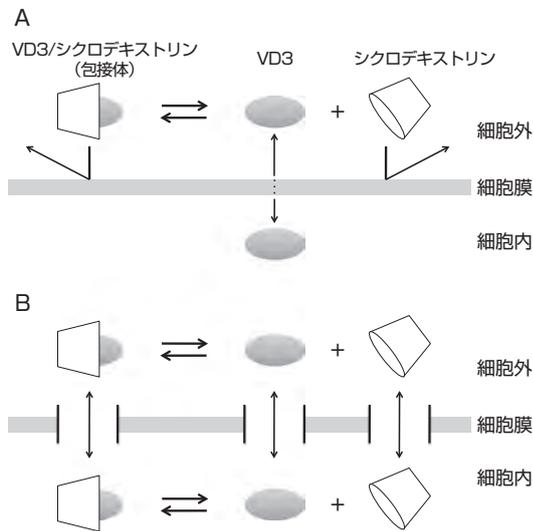


図 5 細胞膜の物質透過の概念図

通常の状態の細胞膜 (A) では、VD3 のみが自然拡散的に膜を透過できると考えられる。ナイシン処理により孔が生じた細胞膜 (B) では、シクロデキストリンを含め低分子量物質は自由に移動できるようになる。

ことで CD-VD3 複合体を細胞内の酵素に直接的に送り届けることはできないか検討を行い、ナイシンという抗菌物質に着目した^[11]。ナイシンは *Lactococcus lactis* 由来の 34 アミノ酸から成る抗菌ペプチドであり、食品添加物としても認可されている。ナイシンの作用機序はよく研究されており、主にグラム陽性菌の膜に直径 2-2.5 nm 程度の孔 (pore) を生じさせ、細胞内低分子物質が細胞外に漏出することで抗菌活性を示す^[12]。過剰のナイシン添加は溶菌作用を示すが、*R. erythropolis* 細胞は他の細菌と比較して溶菌しにくい性質をもっている。そのため、ナイシンの添加量を調節することにより、孔は形成されながら一方で細胞構造は維持され溶菌しないというユニークな状態を作り出すことが可能となる。この状態の細胞は、理論上フェレドキシンや P450 等のタンパク質は細胞外に出られず、酵素が高濃度にパックされた反応容器として利用できる。この孔を通して CD や VD3 が細胞内に自由に出入りすることができるかどうかを実験的に調べるために、ナイシン処理を施した細胞に対し、緑色化学発光 γ -シクロデキストリン (Green Chemi-luminescence CD) を添加し、その細胞内取り込みを調べた。その結果、ナイシンの濃度、および処理時間に依存して細胞からの発光レベルが高くなり、孔が CD の通り道として利用可能であることを確認した。

次に、実際にナイシン処理した細胞を用い VD3 水酸化反応の実験をさまざまな条件下で行ったところ、ナイシン処理した細胞は未処理の生細胞とは異なり、細胞内に存在する酵素量に依存して水酸化能が上昇することを見出した。さらに、反応系に NADH 再生系を要求すること、そして細胞内に安定なレドックスパートナーを発現させておくことが重要であるということが判明した^[10]。NADH 再生系にはグルコース脱水素酵素 (GDH) を用い、また安定性の高いレドックスパートナーとして *Acinetobacter* 由来の

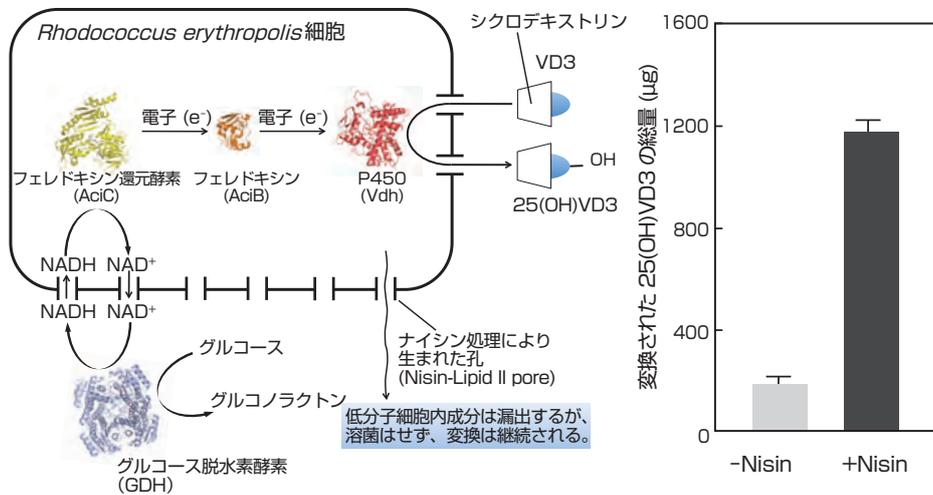


図 6 ナイシン処理を行った *R. erythropolis* 細胞による水酸化 VD3 生産の概念図

AciB, AciC を発現させて野生型 Vdh を利用した反応系を構築し (図 6)、この系を用いてナイシン処理細胞の VD₃ 水酸化体生産性を検討した。その結果、ナイシン処理細胞は同未処理細胞に比べて数倍高い水酸化効率を得られることが確認された。さらに、ナイシン処理細胞を 16 時間の反応を 1 サイクルとして繰り返し反応を行うと、1 回ごとの VD₃ の水酸化率は最大 90 % 近くまで向上し (ナイシン未処理細胞では 50 % 未満)、また 4 サイクル反応後の VD₃ 水酸化体総収量は、ナイシン未処理細胞に対し約 6 倍高くなることを見出した^[10]。このナイシンを使用した変換反応系は、短時間で VD₃ を 90 % 変換することが可能であり、VD₃ 水酸化体の生産効率を著しく向上させた。さらに、ナイシン処理細胞は反応液としてバッファー系を利用するので培養液での反応とは異なり夾雑物を少なくできるほか、細胞を回収し再利用できるので、溶解度の低い基質を用いて反応数を増やして生産性を上げる場合において有効な手法であると考えられる。当該技術を *P. autotrophica* に反映することができれば、高活性型酵素 Vdh-K1 を最大限活用した生産系が可能になると考えられる。

4 今後の展開と課題

この研究開発は、活性型 VD₃ の生産を微生物変換によって効率的に行うことを目指し、とりわけ現在企業において実施されている野生型菌株による変換の問題点を克服し、効率・コストにおいてそれより優れた変換系の構築を目指して行った。この研究において構築されたナイシン処理を行った *R. erythropolis* 細胞による変換系は、現在実際に企業で事業化されている *P. autotrophica* による系をはるかに超えた生産効率を実現していると思われる。現在は、レドックスパートナーと P450 間の電子伝達のさらなる効率化が可能であるか検討を行っている。構築した高活性型酵素は、変異導入により酵素の構造安定性が低下しているため、酵素の安定性をそのままに活性を促進させる系の構築が必要と考えられるからである。P450 における電子伝達効率の向上を達成し、活性向上につなげた研究成果はすでにいくつか報告されており^[13]、電子伝達部位の加工がさらなる変換性能アップにつながることは十分に期待できる。一方、ナイシン処理による細胞孔の形成と CD を組み合わせた物質変換技術は、疎水性の高い難溶性物質や、CD をキャリアとして用いることが可能な物質の変換系において広く適用が可能である。一般に、脂溶性物質の微生物変換は高効率を実現することがとても難しく、そのような用途に対して高い利用価値があるものと考えている。今後、他の微生物変換系において、ナイシンおよび CD の利用価値を評価していきたいと考えている。

謝辞

当該研究は、メルシャン株式会社医薬化学品事業部 (現日本マイクロバイオファーマ株式会社) との共同研究により、また NEDO プロジェクト「微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発」からの研究資金のサポートを受けて行われた。ここに謝意を表したい。

参考文献

- [1] G. Jones, S. A. Strugnell and H. F. DeLuka: Current understanding of the molecular actions of vitamin D, *Physiol. Rev.*, 78 (4), 1193-1231 (1998).
- [2] G. D. Zhu and W. H. Okamura: Synthesis of vitamin D (calciferol), *Chem. Rev.*, 95 (6), 1877-1952 (1995).
- [3] J. Sasaki, A. Miyazaki, M. Saito, T. Adachi, K. Mizoue, K. Hanada and S. Omura: Transformation of vitamin D₃ to 1 α ,25-dihydroxyvitamin D₃ via 25-hydroxyvitamin D₃ using *Amycolata* sp. strains, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 38 (2), 152-157 (1992).
- [4] K. Takeda, T. Asou, A. Matsuda, K. Kimura, K. Okamura, R. Okamoto, J. Sasaki, T. Adachi and S. Omura: Application of cyclodextrin to microbial transformation of vitamin D₃ to 25-hydroxyvitamin D₃ and 1 α ,25-dihydroxyvitamin D₃, *J. Ferment. Bioeng.*, 78 (5), 380-382 (1994).
- [5] T. Nakashima and T. Tamura: A novel system for expressing recombinant proteins over a wide temperature range from 4 to 35 °C, *Biotechnol. Bioeng.*, 86 (2), 136-148 (2004).
- [6] Y. Fujii, H. Kabumoto, K. Nishimura, T. Fujii, S. Yanai, K. Takeda, N. Tamura, A. Arisawa and T. Tamura: Purification, characterization, and directed evolution study of vitamin D₃ hydroxylase from *Pseudonocardia autotrophica*, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 385 (2), 170-175 (2009).
- [7] Y. Khatri, M. Girhard, A. Romankiewicz, M. Ringle, F. Hannemann, V. B. Urlacher, M. C. Hutter and R. Bernhardt: Regioselective hydroxylation of norisoprenoids by CYP109D1 from *Sorangium cellulosum* So ce56, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 88 (2), 485-495 (2010).
- [8] Y. Yasutake, Y. Fujii, W.-K. Cheon, A. Arisawa and T. Tamura: Structural evidence for enhancement of sequential vitamin D₃ hydroxylation activities by directed evolution of cytochrome P450 vitamin D₃ hydroxylase, *J. Biol. Chem.*, 285 (41), 31193-31201 (2010).
- [9] K. Nishimura, Y. Fujii, A. Arisawa, T. Tamura and Y. Yasutake: Improvement of vitamin D hydroxylase, Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 2011-115078 (June 16, 2011).
- [10] N. Imoto, T. Nishioka and T. Tamura: Permeabilization induced by lipid II-targeting lantibiotic nisin and its effect on the bioconversion of vitamin D₃ to 25-hydroxyvitamin D₃ by *Rhodococcus erythropolis*, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 405 (3), 393-398 (2010).
- [11] W. Liu and J. N. Hansen: Some chemical and physical properties of nisin, a small protein antibiotic produced by *Lactococcus lactis*, *Appl. Environ. Microbiol.*, 56 (8), 2551-2558 (1990).
- [12] H. E. Hasper, B. Kruijff and E. Breukink: Assembly and stability of nisin-lipid II pores, *Biochemistry* 43 (36), 11567-11575 (2004).
- [13] L. S. Koo, C. E. Immoos, M. S. Cohen, P. J. Farmer and P. R. Ortiz de Montellano: Enhanced electron transfer and lauric acid hydroxylation by site-directed mutagenesis of CYP119, *J. Am. Chem. Soc.* 124 (20), 5684-5691 (2002).

執筆者略歴

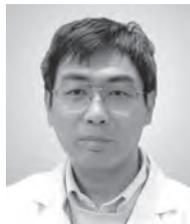
安武 義晃（やすたけ よしあき）

2004年北海道大学大学院理学研究科博士後期課程修了。北海道大学大学院理学研究科産学官連携研究員を経て、2005年4月より産業技術総合研究所ゲノムファクトリー研究部門研究員。2010年4月より、生物プロセス研究部門研究員。博士（理学）。現在、この論文で記載したVD₃水酸化反応系の他、新規抗生物質の生合成酵素や医療診断酵素等有用機能タンパク質の構造機能解析と高機能化に向けた研究に取り組んでいる。この論文では、微生物変換を担うタンパク質全般の構造学的研究および機能解析、機能改変を担当した。



田村 具博（たむら ともひろ）

1993年徳島大学医学研究科生理学系専攻修了。学術振興会特別研究員を経て同海外特別研究員として1994年よりマックスプランク生化学研究所構造生物学部門にてポストドク。2000年工業技術院北海道工業技術研究所（現産業技術総合研究所）入所。2002年北海道大学大学院農学研究科教授併任。2011年産業技術総合研究所生物プロセス研究部門遺伝子発現工学研究グループ長。北海道大学大学院農学院客員教授。博士（医学）。現在、ロドコッカス属放線菌を多目的用途に使用可能な発現プラットフォームの開発を行なっている。この論文では、VD₃水酸化反応全般における研究立案と総括を行った。

**査読者との議論****議論1 全体的なコメント**

コメント（中村 和憲：産業技術総合研究所バイオメディカル研究部門）
論文全体として、具体的な反応系が明示されていないと思います。また、これまでの手法の効率やコストの具体的な数値も明示されていないため、この研究によってどの程度の生産性のアップやコスト削減が可能になったのか定量的な判断が困難です。

回答（安武 義晃、田村 具博）

ご指摘いただいた反応系に関する説明をこの論文へ追記いたしました。しかし、この反応系は現在実生産されている技術であり、企業の秘密情報となっております。よって生産効率等の具体的な情報はいかなるものも開示することができません。現時点で記載できる範囲での追記・修正を行いました。

議論2 具体的な生産方法の明示

コメント（中村 和憲）

変換速度に関する記述の中で、これまでの手法では、微生物の生育速度と酵素の反応速度が遅いことが問題点として挙げられていますが、具体的な生産法が記載されていないため、どの段階がどの程度問題なのか理解することが困難です。たとえば、微生物を培養した後に静止菌体を使って変換するのか、微生物を増殖させながら変換反応を行うのか等、具体的な生産方法をもう少し詳しく記述して下さい。

回答（安武 義晃、田村 具博）

議論1でも述べたように、現在の活性型VD₃生産系に関する諸情報は非公開であるため、直接数値を用いた比較について記載することが困難であることをご了承いただければ幸いです。記載できる範囲での修正・追記を致しました。

議論3 実用化における今後の課題

質問（赤松 幹之：産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門）

この研究によって、非常に生産効率が高い生産方法を開発したとありますが、「4.今後の展開と課題」において、電子伝達のさらなる効率化を目指す書かれています。さらなる効率化が必要なのはどのような理由によるのでしょうか？また、これに関連して、この研究は日本マイクロバイオファーマ（株）との共同研究ということですが、実際の製品の生産に使われる道筋ができていないのか、製品製造にはさらなる研究開発が必要なのでしょうか。これのバリアになっているのが電子伝達効率なのでしょうか。それ以外にも障壁があるのでしたら、記載していただくと、成果の位置付けが明確になるとと思います。

回答（安武 義晃、田村 具博）

この研究開発は、既に実用化されている*P. autotrophica*を用いた物質生産法をさらに洗練された効率的なものにしようという取り組みです。進化学および立体構造に基づく酵素の改良、および生物種の変更によってその生産性は大きく向上しました。しかし、変異を導入することで活性が向上した酵素の熱安定性は低下しており、細胞内に大量に蓄積させることができないという問題も明らかになっています。そこで、酵素の安定性を維持したまま活性を高めるための方法として、P450に対する電子伝達の効率化が必要だと考えており、VdhとAciB、Cの系において改良する余地があると推察しています。電子伝達効率の高度化が達成されることで、現在の生産効率をさらに超えることが可能になると考えられます。一方、私たちが開発した*R. erythropolis*による反応系を実生産に用いる場合の障壁は、生産効率の問題ではなく、むしろ組換え微生物を用いる点だと考えられます。企業では現在、育種した菌株を用いており、組換え微生物による生産は行っておりません。使用する菌の種類を変更し、かつ組換え微生物による生産系を立ち上げるには、安全試験をはじめとする各種手続きが必要になりますし、またそのようなプラントを導入するための設備投資が必要になります。活性型VD₃の市場はさらに拡大することが見込まれており、近い将来私達が開発した技術を用いた生産が可能になることを期待しています。コメントに対してこの論文を修正いたしました。

議論4 生産プロセスにおける酵素高活性化の意義

コメント（中村 和憲）

酵素の高活性化において酵素そのものの活性の増加が記載されていますが、この活性の増加が実際の生産プロセスにおいてどの程度有効であるのか、ある程度の説明が必要だと思います。最終的にコストをどの程度下げることにつながるのか等イメージできるとよいです。

回答（安武 義晃、田村 具博）

実験室レベルでの解析では、酵素の高活性化あるいは酵素の細胞内蓄積量の増加が達成されても、活性型VD₃の生産量が劇的に改善するには至っていません。それは、VD₃が脂溶性物質であるが故に、水溶性分子に比べ細胞内外の移動が大幅に制限されるためと考えられます。これまで、VD₃をシクロデキストリンに包接させ、溶解度を向上させることで変換効率は著しく改善されましたが、細胞内酵素の蓄積量に依存した活性の向上は確認できていませんでした。この論文に示したように、抗菌物質ナイシンによってVD₃の細胞膜透過に対する障壁を取り払い、変換活性を高めるという成果が得られましたが、このナイシン処理細胞を使用した場合には、細胞内酵素の蓄積量に依存して、VD₃水酸化体の生産量が上昇するという結果を得ています。高活性型酵素を使用した場合にも同様の効果が得られると予想しています。近い将来、ナイシンを利用して膜透過効率を改善した系を実生産に利用することができれば、高活性型酵素はそのポテンシャルを十分に発揮することができるのではないかと考えています。

システムと構成学を考える

総合科学技術会議の前議員であり、元日立製作所副会長で現日立マクセル名誉相談役の桑原洋氏のもとを、本誌の小野編集長と赤松編集幹事が訪問しました。桑原氏は前号で対談を行った科学技術振興機構（JST）木村英紀上席フェローが主宰したJSTのシステム科学技術委員会の委員でもあり、これまでの多くのシステム開発の実績をもとに、同委員会での提言作りを主導してこられました。そこでシステムと構成学をキーワードとして座談会を行いました。

シンセシオロジー編集委員会



座談会出席者

桑原 洋	株式会社日立製作所名誉顧問、日立マクセル株式会社名誉相談役
小野 晃	産総研副理事長（シンセシオロジー編集委員長）
赤松 幹之	産総研（シンセシオロジー編集幹事）

赤松 産総研では第2種基礎研究を推進しています。それは、分析的な研究だけでは社会に研究成果を十分に生かすことができないのではないかと、"もの"をつくるための科学、つまり構成的研究の方法の確立が必要なのではないかと考えているからです。

桑原さんは、システム構築の重要性を強調されておられます。"もの"をつくるということはシステムアップすることにつながりますし、要素還元に限らずにどのように組み上げていくかという意味で言えば、言葉は若干違うかもしれませんが、シンセシオロジーと同じようなことを目指しているのではないかと考えて、桑原さんにお話をお伺いしたいと考えた次第です。

お二人のご経験を踏まえて、まず小野さんから、産総研のシンセシオロジーについてご紹介いただき、そののち、桑原さんからシステム構築についてお話ししていただきたいと思っています。

構成的研究と分析的研究

小野 私は理学部物理学科の出身なのですが、旧工業技術院計量研究所でプロセス計測の御三家と呼ばれる温度、圧力、流量のうち、温度の計測と標準を研究してきました。10年前に産総研に組織変更したのですが、初代理事長の吉川先生が提唱された第2種基礎研究にとっても感銘を受けました。

私が計量や標準の仕事をする中で、成果が、そのまま研究論文として、学会でなかなか受け入れられないという経験をしました。私達の使命は精度の高い国家標準を作って、世の中にある一番高い精度の計測器を校正することで、校正業務は民間のビジネスにもつながっていきますので、そういうトレーサビリティ体系を社会の中につくるために、標準の精度を上げたり、より簡便に校正作業ができるようにしたり、コストパフォーマンスを考えたりしながらやっているのですが、このような成果が学会で研究論文として受け入れられません。技術のオリジナリティや新規性がどこにあるのか、と言われてしまいます。

私達とすれば、日本の社会に一番フィットするようなトレーサビリティ体系のシナリオを考案します。例えばどういう事業者がどういう技能をもっていて、現にどういう装置をもっていて、何人くらい技術者がいるのかということまで考えながらトレーサビリティ体系を設計します。ところがそういう話は研究論文になじまないと言われてしまいます。国家標準に新しい要素技術を導入したときに、その部分だけを抜き出して研究論文にすることでしのいでいました。

分野毎に多少違うかもしれませんが、日本の学会は「学」の会でして、アメリカのように「エンジニアズ」のソサエティではないものですから、学としての新しさを常に求めます。そのために、かえって社会との接点が見失われがちだと、これは健全でないと考えていました。社会的に

価値のあるものができれば、そのことを研究論文に書きたい、書かせてほしいと思うのですが、学会がそういう仕組みになっていませんでした。

ところが、吉川先生が「第2種基礎研究がある」というわけですね。これまでの要素技術の研究だけでなく、それらを統合してものをつくる過程自身が大事なのであって、それこそ新しい研究なのだと言われました。そういう研究が今までの科学アカデミーの中では軽んじられてきて、レベルの低い研究と思われてきたけれども、そうではないという話を聞きまして、まさにこれだと思いました。社会との接点のところを研究論文にすべきだと思ひまして、シンセシオロジーの編集長をやらせていただいております。

現在の科学は長い歴史の上に成立したもので、自然や存在物を観察し、階層化し、要素に帰着させて分析することによって多くの事実に知識を体系化してきました。その手法はすばらしい成功を収めてきたのですが、今日の地球環境問題や原発事故を見ると、これらの複合した問題を解決するためには、要素還元主義や分析主義を主流にしてきた現在の科学だけでは現実とうまく向き合えないのではないかと。現在の科学アカデミーが細分化された個々の領域の中だけで仕事をしているという弊害が出ているのではないかと思うようになりました。

実際には、企業の方々が「構成」とか「システム」といった行為をたくさんやられているのに、「科学」がそこまで到達していなかったのではないかと、「そこまで含んで」科学だというふうにしたいと思ひました。つまり、システムの設計科学であり、統合や構成の科学であり、これらを第2種基礎研究と呼んでいます。産総研がそこをしっかりとすることによって産業界の方々とコミュニケーションもよりうまくいくのではないかと考えています。研究開発の一つの手法として、分析的研究と対比して構成的研究が認知されるようになればと思っています。

民間企業が主として担う開発や商品化については、構成的行為としては第2種基礎研究と共通していますけれども、産総研等公的研究機関と民間企業では目的が同じでも手法や立ち位置は違うかもしれません。それぞれシステ

ムや製品を作るという過程をしっかりと研究の中に位置付けていければという思いで、試行錯誤しているところです。

目的遂行のためのシステムの思考

桑原 ご意見はおよそ同感です。私は電気の出身なのですが、電気と機械の間をやりたいと入社しました。入社当時は、「システム」という言葉はあまり一般的ではなかったのですが、以来、化学プラント、化学製品や食糧製品等のバッチ制御、シーケンス制御、火力発電プラント、原子力発電プラント、原子力運転訓練用シミュレーター、自動車やタイヤ、建材等の生産管理システムというふうに、システム以外にやったことがないくらい、システムをやってきました。

火力発電所については、システムとしてアメリカが先行しており、日本はアメリカのライセンスとしてやっていました。ところが、運転の自動化をやりたいというお客さまの希望があり、この面でも挑戦的努力をしていたアメリカから技術導入をしようと、1年間、留学して勉強したのですが、思ったほどすばらしいものはありませんでした。ですから、私達が身を入れて学んだのは彼らの「失敗」です。過去にどのような失敗をしているかということに克明に学んで、日本の発電所の自動化に役立て、結果的には日本が火力発電所の自動化で世界一になったのです。

ただ、そのとき困ったのは、プラントが予想外の故障をしたときにどうするか、ということです。コンピュータでは制御できないので、人間に戻さなければいけない。そうすると、その教育というのは自動化ばかりやっているとできないわけです。異常時のプラントの制御については、「止める」ということは基本理念に持っていたのですが、安全に止めなければいけないですから、運転員がそのつど判断するのでは的確な判断ができません。いざというときの教育は別途きちんとやらなければいけないということを学びながら、自動化をやりました。

また、戦後30年余にして日本の鉄鋼技術が世界一になったのは制御のおかげで、制御をいかにやるかという、システムの問題なのですね。アメリカでは膨大なデータをとって



小野 晃氏



桑原 洋氏

解析する手法を用いていましたが、日本では計算機によって理論解を求めるというアプローチによる制御システムの独自開発が発達したわけです。目的は操業効率の向上、製品品質の向上でした。

このように、研究開発におけるシステムの思考やシステム技術の重要性については論を俟ちませんが、企業にとって科学技術の出口は、あらゆる場合において科学技術の複合体としての「システム」です。システムの思考とはシステムや製品を生み出すことではなく、ある目的をもったとき、その解を出すために必要となるものです。企画、計画、仮説形成の先頭にとっても明確に「目的」があるわけですから、その目的から持続的競争力のあるシナリオを作ることができたら、あとは簡単なのです。こここのところに、猛烈に私達チャレンジすべき人間の行為・行動がなければいけないと思っているのですが、今、どうでしょうか。

論文については、私はよくわかりませんが、大河内賞は生産工学や生産技術の研究開発および高度生産方式の実施等の功績に対するものですから、実用化の世界で表彰しているわけです。小野さんもおっしゃるように、これまでの学会の論文は大変重要ですが、いわゆる第2種基礎研究の領域について、研究者の評価も含め、どうやってその市民権を確立するかということがとても大切ですね。

ただ、第2種“基礎研究”と書いたのは、僕に言わせると一種の逃げなのですね。もちろん重要性は100%わかりますが、「基礎研究」というと「応用研究ではない」ということを含蓄するわけです。けれども、第2種基礎研究もあるけれども、応用研究もあるという感覚を持ちたいのです。その両方を含蓄することで市民権を与えなければいけません。今日本では、自然科学だけでも750学会を越えていますから、例えばシステムの大きな会か何かをつくって表彰する等、別の大きな動きをしたほうがいいのではないのでしょうか。

小野 確かに今の細分化された学会では難しいですね。

赤松 これらシステムの思考やシステム構成能力はどのようにして身に付けることができるのか、あるいはどのような資質が必要とお考えですか。

桑原 重要なのは、研究者や設計者の“システムで勝つ”という“負けじ魂”です。日本の国を世界から尊敬される国にしたい、ということはシステムで勝たなければいけないのです。この“負けじ魂”、目的を完遂するために妥協しない、勝たねばという心のもちようが大事だと思うのです。では、そういう気持ちがあればだれでもできるかというと、

その人にシステムをつくる能力があるかです。能力のある人は、想像もしないようなことを考えて役に立つシステムを作ります。ですから、「人の教育」ということを、実践も含めて、しばらくは（“しばらくは”という意味は、学問的に体系ができるまでということです）きちんとやっていくということが必要です。そういう人達は、過去の経験や広範な知識がいっぱい頭の中にあって、目的に応じてそれを引っ張り出してシナリオを作っていると思うのです。その思考プロセスがもっと論理体系化できないか、と考えています。

その他には、人の力を借りられる協調性、取りまとめ力、そして適切な妥協力も必要でしょうね。

赤松 研究者にとっても、研究を進める上でゴールをぶれずにもち続けることが大切です。とかく「まあ、いいか」と思うときは、ゴールも緩くなっているし、自分自身の評価が甘くなっているのですね。

桑原 産業の場合、安易な妥協は必ず落第します。負けたら完璧にわかるのも、厳しくもあり、冷徹です。

小野 企業は評価軸がとてもはっきりしているということですね。学のほうがそこははっきりしていないのかもしれませんが。客観的自己評価が大切ですね。

システム構築とシナリオ

赤松 先ほど桑原さんから「目的が明確にあるので、シナリオになったら、あとは簡単」というお話がありましたが、シンセシオロジーでは編集方針として「シナリオをちゃんと書いてください」とお願いしておりまして、ここがなかなか難しいのです。

小野 「なぜその研究をやるのかと思ったか、あなたが過去に考えたことや描いていたシナリオを書いてほしい」ということと、そのために「どういう素材や部品を選んだか」、この二つが揃ってシンセシオロジーの論文ですと言っているのです。ただ、ほとんどの研究者は第1種基礎研究のスペ



赤松 幹之 氏

シャリストですから、書くのには相当苦勞しています。自分がやった研究にもかかわらず、「どうして自分がそのシナリオを考えついたかわからない」というわけです。

桑原 そこがポイントなのです。答えを出してきているわけですから、そこをきちんと考えるべきなのです。これは僕らも経験があるのですが、仕事とは全く関係ない人と付き合ったり、遊びの中からシステムのヒントがパッと思い浮かんだりすることがあるのです。いろんなインプットがシナリオ構築の源流にあると思いますね。

小野 そうだと思います。一種、思いつきのような面があるのですけれども、思いつきも何かベースがないと思いつかないはずなので、そのベースが何かということを書きたいと言っているのです。これがなかなか難しいのですが、それをゆくゆくは体系化したいという思いがあるのです。

桑原 そういう論文になっていたかな(笑)。

小野 その点は今一つピンとこなかったかもしれません。編集者と筆者の間の意思の疎通が未熟であるという言い訳なのですが。

桑原 シナリオにいく前に、「あなたはどのような知識をもって、この目的のためにどういう他の知識も入れましたか」というふうに分解して書くということもいいかもしれませんね。そういう努力は大事ですし、目指していることは大賛成です。

もう一つ感じたのは、研究者の評価が今までずっと論文、論文できていますが、それでは出口論につながらないのではないのでしょうか。第2種基礎研究はこれでいいと思うのですが、システムの財産というのは発明であり、それは結果的に特許になるわけです。そこに価値観をもう一つ置いたほうがいいのではないのでしょうか。

小野 これまでの論文は、分析であり、分解なのです。時計を分解したら何が出てきたかというところを書く。そうではなくて、この部品を組み合わせると時計になるというのを書く論文がなかったわけです。

桑原 ただ、学者の方々に第2種をやってほしいといったときに、自分のやった第1種からの展開はやってくれます。しかし、他人の第1種からは絶対にやらない。これでは日本は進化しません。ここは私が産総研に期待したい一

番のお願いです。

小野 まさにそこが産総研の第2種基礎研究の真骨頂です。産総研ではたこつば的な考え方から脱し、細分化された科学アカデミーの枠組みを超えて、物事をトップダウンで俯瞰的に見ることを奨励しています。

先ほど、桑原さんから「システム思考が出口を生み出すのではなく、目的に対する解を出すためにシステム思考が必須なのだ」というお話がありましたが、まったく同感です。それは共同研究の場合も同じではないかと思います。共同研究をやること自体に価値があるのではなくて、社会的な価値を実現しようと思うと単独ではできないので、共同でやらざるを得ません。システムのシナリオを考えざるを得ないということになります。

企業の方々のシステムの思考や考えているシナリオと、産総研の研究者が考えているシナリオは、ややレベルが違いかもかもしれませんが、共通の部分をシェアすることによって、必ずよい共同研究が生まれるだろうと思っています。私達はこれまで技術の細部にこだわるあまり、シナリオの共有にはあまり熱心でなかったように思っています。企業の方ももう少しシナリオを語っていただけると、私達のシナリオと何が違って、何が同じで、何をどう共有したらいいかという議論がよりかみ合うのかなと期待するのですが、いかがでしょうか。

桑原 一つの例ですが、海水淡水化というシステムがあります。これは現在RO(逆浸透)膜という膜を使って海水をろ過していますが、そもそもどういう原理なのかということの説明してもらえると、その原理が分かっていなくてやっていることがいっぱいあって驚いています。そうではなくて、物理的現象等について、こういうことなのだということを知り、これを理解した上で、こういう膜あるいはこういう生物学的処理ではどうか、またはこういう中間処理をしたほうがいいのかとあれこれ考えなくてはなりません。これを今JSTのプロジェクトで真剣にやっているのです。できたら3年、だめでも5年後には日本の海水淡水化は圧倒的強みを持つようにしようということで今取り組んでいます。

私達は原理・原則の整理された考え方をもっていないし、学の方々はシステムやシンセシオロジーをご存じでない方が多いので、お互いのエリアをいい形で詰めていくには、「システムとは何か」というのをみんなで勉強することが重要ではないかと考えています。このために今、科学技術振興機構研究開発戦略センター(CRDS)のプロジェクトで“システム技術”の勉強会がスタートしています。産総研の方

にも参加していただけたらいいですね。基本的には共同作業がベスト解でしょう。

赤松 昭和40年くらいまでは大学の先生と企業の方はすごく密接に同じ問題に取り組んでいろいろな課題を解決するというをやっていたと思うのです。それが昭和40年代、50年代くらいになってくると、企業の力がどんどんついてきて、企業が先に行き、大学の先生方がついていけなくなって、という状況になり、それがまだ続いているのではないのでしょうか。この状態は何とかなければいけないと思っています。

桑原 私は塑性加工学会の会長をやっていたのですが、「こういうものを作りたい」という目的がしっかりとできると、およそ、塑性加工技術だけで検討ができ、答えが出せるのです。ところが、安心・安全社会や環境という、ITも関連するし、警察システムも関連するし、いろいろなサービスも関連します。細分化された、縦割りの学会では対応できません。

今、日本がシステムとして海外に出ていくことを国が推進しようとしています。国の予算でここになんぼと言いだしたら動きます。語るだけで予算に反映できなかったら動かないですから、これはチャンスです。日本には、水、環境、食料等高い技術がありますし、輸出産業として考えても、ここで議論されているようなことが集まってくると、いい貢献ができるのではないかと思います。

効果的な産学官連携のために

赤松 産総研は産業界、大学、公的研究機関との連携を推進しようと努力しています。今後、産学官連携がますます重要になると思うのですが。

小野 実は、私は現在日本で産学官連携がとてうまくいっているとは思ってなくて、その理由として予算制度の問題があったり、体制の問題があったりするのですが、それ以前に、それぞれ働いている研究者や技術者の意識の問題というのでしょうか、何を目的にしているか、お互いに違いは違いとして理解して、同じ目標に向かってシェアできるものは何なのかということをもっと少しよく理解していくと、もっと良い産学官連携ができるのではないかと考えています。

産総研側も研究グループリーダーくらいになるとシナリオをそれぞれ持ってやっていますので、それをもっと社会に出して企業の方に理解していただけるようにして、シナリオのレベルでもコミュニケーションできるようにしなければいけ

ないと思っていますが、企業の側からも、そういう努力は期待できませんでしょうか。企業秘密とか、そういうところで障害はございますか。

桑原 そのバリアーは大きいです。秘密保持契約を結んでいただいて、とても端的に言えば、特許を出してから論文を書いて学会発表してほしいとか、今何をやっているかを絶対に言わないでほしいという類の制約はつけざるを得ないですね。研究者は学会で早く発表したいということはあるでしょうから、そこは私もいい答えをまだ持ち切れていません。しばらくは個別論で、プロジェクトごとに答えを出していくことになるのではないのでしょうか。

赤松 小野さんから産学官連携がそれほどうまくいっていないという話がありましたが、実効ある産学官連携のためにどういうことを考えたらいいのでしょうか。

桑原 産学連携を強化し、社会の発展のために科学技術が寄与するためには、この第2種基礎研究を総合科学技術会議が認め、国がこの分野に予算を回すということ、つまり市民権を得るようにしないとイケないですね。そのときに、これまでの基礎研究は引き算しないという暗黙の了解も必要です。

小野 最近、産総研では多くの企業と連携したコンソーシアム方式を奨励しておりまして、太陽電池等でやっています。産総研とそれぞれの会社が個別の契約を結びまして、企業から企業へは直接情報は流れないように体制を工夫して、しかし基本的な部分では目的や情報を共有するといったやり方をしています。

産総研にシステムの研究を期待する

赤松 システム的思考の重要性についてお話いただきましたが、システムの形にする前に当然シナリオがあるわけですから、システムをつくるためのシナリオの方法論が私達のシンセシオロジーだと思っています。

桑原 今のご意見には全く異論がありません。20世紀はシステムの時代と言われますが、日本は火力、原子力、化学プラント、ほとんど人真似でしょう。日本で初めてできたシステムは鉄鋼とJRです。

ですから、産総研にはシステムの研究をしてほしいのです。一つの例としては太陽光発電です。第2種基礎研究としてそこをやるというなら、システム化の内容を3分の1くらいやってほしいですね。そうするとシステムの人が

育つのです。

赤松 モノそのものではなくて「システムを考える力」をどうやってつくるかということだと思います。今までの科学技術は「モノ」をやるのが学問だと思っているけれども、そうではなくて、ほんとうはどのように「もの考えるか」ということが大事で、そこをちゃんと学問の一部として位置付けていく必要がありますね。発明力の“力”のところが大事です。

小野 発明力の切磋琢磨を民間の方々と一緒に推進したいと思います。

桑原 いいですね。私の提案は、「実際にはこういうふうにやっている」ということを概観できるように整理して、どういうことがこれからさらにエンハンスされて必要なのか、学術的にはどういう位置付けなのかということを検討する道筋を双方協調してつけていきたいと思っています。

赤松 努力したいと思います。今日はありがとうございました。

(この座談会は、2011年5月9日に東京都千代田区にある日立マクセル株式会社において行われました。)

座談会後の寄稿

座談会で語りきれなかったところを出席者に寄稿をお願いしました。(編集委員会)

桑原 洋:

システム技術の開発を急ぐ

科学技術研究開発成果の社会への還元、出口を見据えた研究開発の推進等、科学技術と社会とのかかわりを重視する基調が日本で急速に芽生えてきたことは誠に喜ばしい。

科学技術と社会の接点は、産業分野においてはすべてがシステムである。それは単純なシステム(家電品等)から大規模・複雑なシステム(原子力プラント、各種スマートシステム等)まで極めて幅が広い。

よって社会との接点を考えるとき当然のことながらシステムこそ重要なのであるが、これまでこの分野での研究開発に力が大きく注がれてこなかったのは残念であるし、これからの日本の発展を考えるとき、急ぐべき緊急課題である。

さて、ならば“システムとは何か?”、“システム構築技術とは何か?”これらは今後のシステム関連の研究開発にとっ

て欠かすことのできない重要な基本認識事項であるが、この解析活動がほとんど手つかずの状況にあり、急がねばならない。これらが皆でよく理解されて、初めて次のステップにつながっていく。今、初期段階から理論構築を図ろうとするのは、あまりにも無謀と言わざるを得ないであろう。

そこで、少しはシステム構築経験が深いと考えている者として、以下に大胆な仮説を設定してみようと思う。議論を期待したい。

システム構築における典型的手順

第1段:対象となるシステムの目的を明確に定義する。

第2段:システムの中で処理される対象物に対し、物理的、化学的あるいは社会科学のどのような原理のものを、どう処理しようとしているのかを探求し、事の真髄を見極める。

第3段:第2段に基づいて構築に必要となる可能性のある具体的な知見、知識、研究成果を幅広く収集する。

第4段:その中から必要なものを抽出し、あるいは欠けている場合は、欲しい実現可能性のある新技術を仮定し、いくつかのシステム構築案を設計する。

第5段:これらを目的に応じて定量的に評価し、関係者で集まって評価議論をし、追加するところがあれば追加し最終案を定める。この場合、価格、実現可能時限等も重要な評価項目として上る。

いろいろな人達が、研究者も含めて過去に大小似たような経験をされていると思う。これらを持ち寄って議論を重ねていく中で、求める型が浮かび上がってくるのではないかと期待する。実体験から議論を始めないと空理空論になると危惧する。

今回産総研の方々と議論する貴重な機会を得たが、極めて有意義であった。一方このままでは双方とも自我流の考えに固まりながら、異なる方向へと離ればなれの検討をしかねないと感じた。

CRDSでのシステム技術検討、産総研での検討、横断型基幹科学技術研究グループ(連合、協議会)での検討、総合科学技術会議でのシステム重視、産業競争力懇談会(COCN)でのシステム検討等、いくつもの活動が活発化する機運にある。

これらの間での、またこれから出てくる活動との相互連携こそ重要であり、有意義であり、産学連携活動がすばらしい成果を生むことを期待している。

略歴

桑原 洋(くわはら ひろし)

1960年東京大学工学部電気工学科卒業。(株)日立製作所 大みか工場長、電機システム事業本部長、常務、専務、副社長、副会長を歴任。元 内閣府 総合科学技術会議議員。日立マクセル、日立電線、日立国際電気 各社 会長を経て、日立製作所 特別顧問。有限責任事業組合 海外水循環システム協議会 前理事長。日本工学会 前副会長。現 日立製作所 名誉顧問、日立マクセル 名誉相談役。

小野 晃：

システムと構成学の今後に向けて

ずっと官と学の中で過ごしてきた私にとって、総合科学技術会議の議員を務められ、民間における研究開発のオピニオンリーダーたる桑原さんとのくらしい接点を持てるのか、対談前に懸念がなかったわけではない。だが、座談会を終えてみると多くの点で議論がかみ合い、大変有意義な機会をいただいたことに感謝している。

シンセシオロジーが強調する「シナリオ」や「統合的・構成的な研究」のエッセンスは、システム研究やシステムの思考と関係が深いことが改めて理解できた。産総研等の公的研究機関や大学の研究者が、企業の研究者や技術者と今後より良い連携をしていくための、道筋と課題が見えてきた気がする。

科学は17世紀にヨーロッパで「サイエンス」として生まれたが、要素還元主義がととも成功した。いろいろな事象を細かく分解し、階層化して、一番下のレベルまで分かることが重要だとの信念で、分析を主たる手段として研究をやってきた。その研究の手法は300年以上の時間経過の中でよく確立され、現在でも大いに役に立っている。しかし地球環境問題や福島の原子力発電所の事故をみると、システムや複合的な問題を解決するためにはこれまでの要

素還元主義だけでは太刀打ちできないことも見えてきた。そのような社会のニーズに対して、現在の科学がうまくかみ合っていない。また要素還元主義を徹底した結果として、一方で、科学アカデミーが著しく細分化され、それぞれの狭い領域の中で研究することで十分だとする風潮ができてしまったことも弊害ではないだろうか。

図 a は分析的手法と統合的・構成的手法のプロセスを対比して描いたものである。分析的手法を主とした現在の科学(第1種基礎研究)のプロセスを上部に描いた。それに対して、統合的・構成的研究(第2種基礎研究)を下部に描いた。現在の科学は右側にある自然や存在物(人間も存在物の一つである)を出発点として、それらを学問領域ごとにそれぞれ異なる視点から分析する。例えば物理学、化学、生物学、機械工学、電気工学等である。それぞれの視点から自然と存在物を観察して、それを階層化し、要素に分解し、それぞれの学問領域の中で整合的に理解できるように、いろいろな知識要素を体系化する。例えば領域 A では物理学の法則と公式とデータベースを整備し、領域 B では機械工学の法則と公式とデータベースを整備する。

一方で科学とは独立に、人類は自然や存在物に手を加えたり、あるいは社会的に意味のある「人工物」を技術により創造してきた。現実の複合的な課題を解決するに当たっては、さまざまな学問領域の科学的成果を使っていかないと、図 a の右側にある「人工物」を作るという最終目的、すなわち社会的な価値のところまで到達しない。それでは統合的・構成的な研究開発はどういうプロセスで進めるのかというのが、図 a の下部である。何か作り上げたいと思う人工物があると、それを実現するためのシナリオを考え

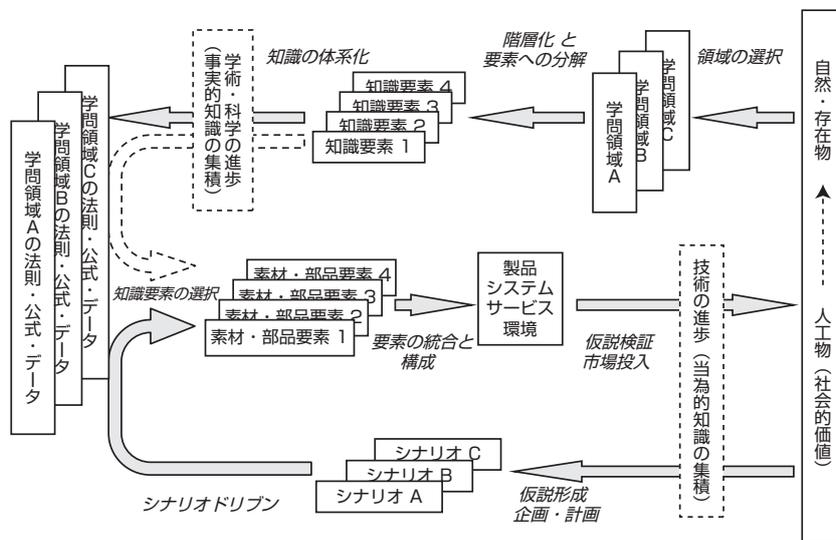


図 a 分析的研究と構成的研究のプロセス

る。それは企業で言えば企画であったり、計画であったりするが、一般的には「仮説形成」と言えるだろう。目的の人工物を作るための仮説を研究者・技術者が自ら考えて、いろいろなシナリオを作る。研究者・技術者は自身が最良と信じるシナリオに基づいて、シナリオドリブンという形で研究開発を進める。そのとき学問領域ごとに蓄えてある知識要素の中から最適なものを用いて、素材要素や部品要素を作り、そして製品やシステム、サービス、あるいは環境を「人工物」として作り上げていく。

作った人工物は市場に問い、批判を受けて、また企画、計画、仮説形成に戻るというループを繰り返して進歩していくと考える。また作られた人工物を改めて「存在物」として認識すれば、科学(第1種基礎研究)の分析の対象となって上部のループにも組み込まれる。

現在の学会の研究論文は図 a の上部のプロセスを記述し

たものがほとんどである。いかに重要な知識要素を発見したか、いかに重要な法則や公式を発見したか等、知識を体系化していくことが学問的に高く評価される。一方、下部のプロセスも人類の高度な知的行為であり、筆者はそれを科学の延長線上にあると理解したい。そのためには下部のプロセスのオリジナリティーや新規性を別途定義する必要がある。それがシンセシオロジーの挑戦である。

桑原さんからは、作りたい人工物が決まったとき、それをいかにシナリオに落とし込むかが重要とのご指摘をいただいた。これもまたシンセシオロジーの挑戦である。ただ筆者は、社会的に価値のある良い研究開発をやった人は、そのとき必ず良いシナリオをもっていたに違いないと考える。そのシナリオを現時点から振り返って再構成し、それを記述してもらいたい。このようにして産学官がシナリオを共有することによって相互理解が進み、連携が一層効果的に進むことを期待する。

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おくか、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（すなわち事実的知識）として記載したものが学術論文であったが、このジャーナルにおいては研究開発の成果を社会に活かすために何を行なえば良いかについての知見（すなわち当為的知識）を記載したものを論文とする。これをジャーナルの上で蓄積することによって、研究開発を社会に活かすための方法論を確立し、そしてその一般原理を明らかにすることを目指す。さらに、このジャーナルの読者が自分たちの研究開発を社会に活かすための方法や指針を獲得することを期待する。

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

項目	執筆要件	査読基準
1	研究目標 (「製品」、あるいは研究者の夢) を設定し、記述する。	研究目標が明確に記述されていること。
2	研究目標と社会とのつながり	研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。
3	シナリオ	道筋 (シナリオ・仮説) が合理的に記述されていること。
4	要素の選択	要素技術 (群) が明確に記述されていること。 要素技術 (群) の選択の理由が合理的に記述されていること。
5	要素間の関係と統合	要素間の関係と統合が科学技術の言葉で合理的に記述されていること。
6	結果の評価と将来の展開	研究目標の達成の度合いと将来の研究展開が客観的、合理的に記述されていること。
7	オリジナリティ	既刊の他研究論文と同じ内容の記述がないこと。

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

改正 2010年8月5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。なお、原稿の受付後、編集委員会の判断により査読者と著者とで、査読票の交換とは別に、直接面談（電話を含む）で意見交換を行う場合がある。

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なくても良い。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、英文の場合は刷上りで同程度（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 広報部広報制作室内

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 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.ONO

Senior Executive Editor: N.KOBAYASHI, M.SETO

Executive Editors: M.AKAMATSU, K.NAITO, H.TAYA

Editors: S. ABE, K. IGARASHI, H. ICHIJO, K. UEDA, A. ETORI, K. OHMAKI, Y. OWADANO, M. OKAJI, A. KAGEYAMA, T. KUBO, T. SHIMIZU, H. TATEISHI, M. TANAKA, E. TSUKUDA, S. TOGASHI, H. NAKASHIMA, K. NAKAMURA, Y. HASEGAWA, Y. BABA, J. HAMA, K. HARADA, N. MATSUKI, K. MIZUNO, N. MURAYAMA, M. MOCHIMARU, A. YABE, H. YOSHIKAWA

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Website and Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

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

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

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

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

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

1 Types of contributions

Research papers or editorials and manuscripts to the “Readers’ Forum” should be submitted to the Editorial Board. After receiving the manuscript, if the editorial board judges it necessary, the reviewers may give an interview to the author(s) in person or by phone to clarify points in addition to the exchange of the reviewers’ reports.

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 Website and Publication Office, Public Relations Department, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

Synthesiology Editorial Board

c/o Website and Publication Office, Public Relations Department, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

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

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

Synthesiology 4 巻総目次 (2011)

4巻1号

研究論文

レーザー援用インクジェット技術の開発

-高スループットとファイン化の両立を目指した配線技術- . . . 遠藤 聡人、明渡 純 1-10

研究戦略の形成とそれに基づいた構成的な研究評価

-創造的営みとしての研究プログラム評価にむけて- . . . 小林 直人、中村 修、大井 健太 11-25

有機化合物のスペクトルデータベースの開発と公開サービス

-大規模データベースの運用の継続と成功の秘訣- . . . 齋藤 剛、衣笠 晋一 26-35

マイクロ燃料電池製造技術開発への挑戦

-革新的セラミックス集積化プロセスを活用するコンパクトSOFC- . . . 藤代 芳伸、鈴木 俊男、山口 十志明、濱本 孝一、淡野 正信 36-45

座談会

日本のものづくりとシンセシオロジー . . . 成合 英樹、柘植 綾夫、矢部 彰 46-51

報告

シンセシオロジーワークショップ: オープンイノベーションハブに向けた技術統合の方法論 . . . 52-58

4巻2号

研究論文

適応学習型汎用認識システム: ARGUS

-その理論的構成と応用- . . . 大津 展之 70-79

ヒューマノイドロボットのコンテンツ技術化に向けて

-クリエイターによる多様な表現の創出が可能な二足歩行ヒューマノイドロボットの実現- . . . 中岡 慎一郎、三浦 郁奈子、森澤 光晴、金広 文男、金子 健二、梶田 秀司、横井 一仁 80-91

水素センサーの研究開発

-水素安全技術から国際規格まで- . . . 申 ウソク、西堀 麻衣子、松原 一郎 92-99

超高精細映像送受信を支える光通信ネットワークの実証実験

-ダイナミック光パス・ネットワーク映像配信実験- . . . 来見田 淳也、並木 周 100-110

論文補遺: PAN系炭素繊維のイノベーションモデル

-励振モデル; 研究者の活動とマネジメントの相乗効果- . . . 中村 治、大花 継頼、田澤 真人、横田 慎二、篠田 渉、中村 修、伊藤 順司 111-114

座談会

シンセシオロジー3周年記念座談会 . . . 115-120

4巻3号

研究論文

- 札幌市庁舎ビルの空調システムの省エネルギー化実証実験
 -界面活性剤を用いた流動抵抗低減によるポンプ動力の低減- . . . 武内 洋 132-139
- 人の認知行動を知って製品やサービスを設計する
 -構成的研究のための認知的クロノエスノグラフィ法の開発- . . . 赤松 幹之、北島 宗雄 140-150
- 緊急時に飲料水を確保するための技術
 -硝酸イオン選択吸着「材」- . . . 苑田 晃成 151-156
- 自動車用ナビゲーションの総合的開発
 -夢の実現のための製品開発と社会受容のための標準化- . . . 伊藤 肇 157-165
- 軽元素原子を可視化する新型低加速電子顕微鏡の開発
 -“トリプルC”プロジェクトのねらいと取り組み-
 . . . 佐藤 雄太、佐々木 健夫、沢田 英敬、細川 史生、富田 健、金山 俊克、近藤 行人、末永 和知 166-175

座談会

- システム科学技術の研究開発 . . . 176-181

4巻4号

研究論文

- フレキシブル太陽電池の高性能化技術開発
 -「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」の運営と成果- . . . 増田 淳 193-199
- 地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全性評価
 -事象のシナリオに基づく長期予測の方法論- . . . 山元 孝広 200-208
- 圧力計測の信頼性向上と国際相互承認
 -工業用デジタル圧力計の計量標準体系への組み込み- . . . 小畠 時彦、小島 桃子、梶川 宏明 209-221
- 微生物変換による活性型ビタミンD₃の効率的生産
 -分子の改良から細胞膜改変までの包括的アプローチ- . . . 安武 義晃、田村 具博 222-229

座談会

- システムと構成学を考える . . . 桑原 洋、小野 晃、赤松 幹之 230-237

編集後記

この号には、日立製作所元副会長で日立マクセル名誉顧問の桑原洋氏とシンセシオロジー編集委員会の小野編集委員長と赤松編集幹事との間で行われた座談会が掲載されています。

桑原氏は、研究開発における「システム思考やシステム技術」だけでなく、あらゆる場面における科学技術の複合体としての「システム」の重要性を指摘されています。総合科学技術会議の前議員でもある桑原氏は、今後、第2種基礎研究を総合科学技術会議が認め、市民権を得ることが必要であるとも述べられています。

座談会後の桑原氏の寄稿では、システム構築に必要な可能性のある知見や知識等を収集すること、不足ならば新技術を仮定すること、案を設計し評価することの重要性が示されています。また、小野編集委員長の寄稿では、創りたい人工物を実現するためには複数のシナリオによる企画・計画が必要であることが示されています。両氏の指摘は、社会に価値をもたらす人工物を創造するには、システム論的な仮説形成と検証が不可欠であり、それが「システムと構成学」の本質であると受けとめることができます。

前号の編集後記で書きましたが、人工物は、実社会の環境で作動し機能を発現し、市場で取引され、人の主観的効用を満たすものです。そうでなければ単に人工的なモノでしかなく、価値を生み出すことにはなりません。そして価値には市場普及だけでなく、社会受容、文化波及という形相があり、いずれも、価値は“広がり”の本質をもつという意味で社会的であると言及しました。この号に掲載された4論文は、市場普及、あるいは社会受容に強い関連があり、いずれも社会的価値をもたらすことを想定しています。

ここで、一つの問いが立ち上がってきます。「このような『社会的価値』は構成学の対象となるか」、です。構成された人工物は社会に出力されますが、入力される実社会は不完全情報に満ちています。価値は事前に確定できず、価値は社会的に構成されると言えます。社会におけるネットワーク外部性がますます拡大する現在、「価値の構成論」がシンセシオロジーのチャレンジすべきテーマとなるのではないのでしょうか。

(編集委員 上田 完次)

Synthesiology 4巻4号 2011年11月 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）：多屋 秀人

委員：阿部 修治、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、岡路 正博、景山 晃、久保 泰、清水 敏美、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、馬場 靖憲、濱 純、原田 晃、松木 則夫、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 広報部広報制作室内 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広報制作室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Development of high efficiency flexible solar cells

-Management of "Flexible Solar Cell Substrates Consortium" and its achievements-

A.MASUDA

Safety assessment of high-level nuclear waste disposal in Japan from the standpoint of geology

-Methodology of long-term forecast using geological history-

T.YAMAMOTO

Improvement of reliability in pressure measurements and international mutual recognition

-Incorporation of industrial digital pressure gauges to the national metrology system-

T.KOBATA, M.KOJIMA and H.KAJIKAWA

Efficient production of active form of vitamin D₃ by microbial conversion

-Comprehensive approach from the molecular to the cellular level-

Y.YASUTAKE and T.TAMURA

Round-table talks

Systems and synthesiology

Editorial policy

Instructions for authors