

Synthesiology

マンモグラフィの安全を支える線量計測

西暦869年貞観津波の復元と東北地方太平洋沖地震の教訓

固体酸化物形燃料電池(SOFC)単セル/スタックの
発電性能試験方法の規格化における不確かさ評価

調光ミラーガラスの開発

有害化学物質の環境分析法の標準化

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せたままでは、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/information/honkaku/index.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5巻第4号(2012.11) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

i

研究論文

- マンモグラフィの安全を支える線量計測 — マンモグラフィ用 X 線の線量標準の確立と標準供給体制の構築 — 222–233
 . . . 田中 隆宏、黒澤 忠弘、齋藤 則生
- 西暦 869 年貞観津波の復元と東北地方太平洋沖地震の教訓 — 古地震研究の重要性と研究成果の社会への周知の課題 — 234–242
 . . . 岡村 行信
- 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) 単セル / スタックの発電性能試験方法の規格化における不確かさ評価 — SOFC の普及に向けた試験方法の規格化と測定結果の信頼性担保 — 243–252
 . . . 門馬 昭彦、高野 清南、田中 洋平、嘉藤 徹
- 調光ミラーガラスの開発 — 実用化のための研究戦略 — . . . 吉村 和記、田嶋 一樹、山田 保誠 253–260
- 有害化学物質の環境分析法の標準化 — 最先端の分析技術を用いた国際的化学品管理への貢献 — 261–276
 . . . 谷保 佐知、羽成 修康、堀井 勇一、山下 信義

編集委員会より

- 編集方針 277–278
 投稿規定 279–280
 5 巻総目次 (2012) 287–288
 編集後記 289

Contents in English

Research papers (Abstracts)

- Dose standard for safe and secure breast cancer examination** — Establishment of X-ray dose standards for mammography and construction of a calibration service system — --- T. TANAKA, T. KUROSAWA and N. SAITO 222
- Reconstruction of the 869 Jogan tsunami and lessons of the 2011 Tohoku earthquake** — Significance of ancient earthquake studies and problems in announcing study results to society — --- Y. OKAMURA 234
- Evaluating uncertainty in the standardization of SOFC cell/stack power generation performance tests** — Standardization of test methods and ensuring reliability of test results for the dissemination of SOFC — --- A. MOMMA, K. TAKANO, Y. TANAKA and T. KATO 243
- Development of switchable mirror glass** — R&D strategy toward its practical use — --- K. YOSHIMURA, K. TAJIMA and Y. YAMADA 253
- Standardization of environmental analysis methods of hazardous chemicals** — Contribution to international control of hazardous chemicals by using advanced technologies — --- S. TANIYASU, N. HANARI, Y. HORII and N. YAMASHITA 261

Messages from the editorial board

281–282

Editorial policy

283–284

Instructions for authors

285–286

マンモグラフィの安全を支える線量計測

— マンモグラフィ用X線の線量標準の確立と標準供給体制の構築 —

田中 隆宏*、黒澤 忠弘、齋藤 則生

乳がんの早期発見のため、乳房X線検査（マンモグラフィ）が2000年より乳がん検診に導入され、受診者数は増加の一途をたどっている。診断の高い信頼性と人体への十分な安全性を両立させるためには、X線照射を適切な線量に抑えた上で、高品質なX線診断画像を得ることが必要となる。マンモグラフィでは、乳房撮影に特化した通常とは異なる特殊なエネルギースペクトル（線質）のX線が用いられる。しかし、その線質は、これまでの線量計の校正に用いられているX線とは大きく異なるため、線量計の校正の信頼性が十分であるか心配する声が、学会や産業界から挙げられた。そこで、産総研ではマンモグラフィ用のX線の線質に基づいた線量の国家標準を開発し、それを産業界へ供給した。既存の研究設備や技術を最大限活用したり、現行の精度管理体制の中にこの標準を組み込むことにより、この標準の迅速な開発を可能にした。また、国内・国外の両方を意識した研究開発のシナリオをあらかじめ策定したことが、国際的な同等性の確認された標準の迅速かつ広範な供給へ結びついた。

キーワード: マンモグラフィ、線量、標準、線量計、信頼性、安全性

Dose standard for safe and secure breast cancer examination

– Establishment of X-ray dose standards for mammography and construction of a calibration service system –

Takahiro TANAKA*, Tadahiro KUROSAWA and Norio SAITO

Breast X-ray screening (mammography) was introduced in 2000 to detect breast cancer at an early stage. Since then, the number of examinees has increased steadily. X-ray dose must be optimized enough to obtain high quality images for diagnosis reliability without compromising safety. Mammography uses low-energy X-rays with a special energy spectrum for breast screening. This X-ray energy spectrum is significantly different from the reference X-ray spectrum used to calibrate dosimeters. Industry and academia were concerned about the reliability of dose evaluation for quality control of mammography. So, NMIJ/AIST has established the X-ray dose standard based on the X-ray energy spectrum for mammography, and has supplied this standard to industry. We have succeeded in rapidly establishing this standard by making utmost use of existing research equipment and technology, and setting the standard to the existing accuracy control system. Moreover, we drew up a preliminary R&D scenario with consideration for both domestic and international situations regarding mammography dosimetry, which enabled rapid and extensive dissemination of the standard with an international consistency.

Keywords: Mammography, dosimetry, standard, calibration, dosimeter, reliability

1 はじめに

近年の乳がん死亡率の増加に対処するため、乳がんの早期発見が期待される乳房X線検査（マンモグラフィ）が、2000年から我が国の乳がん検診に導入された。導入後、受診者数は増加の一途をたどっており、2009年度には250万人を超え、マンモグラフィは急速に普及しつつある。有効性の高い乳がんの診断には、高品質な診断画像の取得と、優れた読影技術（診断画像から病巣を見逃さずに読み取ること）が要求される。しかし一方で、最低限の適切なX線線量に抑えて撮影を行うことが、マンモグラフィにおける人体への安全性の配慮には欠かせない。このようなマンモグラフィの質の維持・向上を目的とした精度管理等

の活動が学会や産業界を中心に行われている。そのような中、関連する学会や産業界から、マンモグラフィのX線線量の評価に対してより一層の信頼性向上が要望された。その理由は、マンモグラフィ用のX線と、線量計の校正に使用されていたこれまでのX線との間でエネルギースペクトル（線質）に大きな違いがあり、両者の線質の間で線量計の感度が変わることが心配されていたためである。そこで、産総研ではこの問題に対応するため、マンモグラフィ用のX線の線質に基づいたX線線量の国家標準の開発とその供給を行うこととした。

計量標準は社会に広く活用されることによって初めて意味をもつが、そのためには、社会的要請（ニーズ）に対し

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第2
National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: takahiro-tanaka@aist.go.jp

Original manuscript received January 31, 2012, Revisions received August 7, 2012, Accepted August 15, 2012

て迅速に（タイムリーに）対応することが大切である。放射線の線量標準の開発の標準的な期間は3～5年であるが、この標準の開発では、既存の研究設備と技術を最大限活用することにより、開発の着手から供給開始までを約1年半という短期間で達成した。さらに、現行のマンモグラフィの精度管理体制の中にこの標準を組み込むことにより、迅速かつ広範な標準供給体制の構築に努めた。この論文では、マンモグラフィの精度管理におけるX線線量評価の信頼性の向上を目標として産総研が策定したシナリオから研究開発・成果までの一連の流れを述べる。

2 研究開発の背景

2.1 マンモグラフィの社会的な広がり

近年、女性の乳がんの年齢調整罹患率¹⁾、年齢調整死亡率²⁾は共に増加の一途をたどっている¹⁾。乳がんは早期に治療することにより予後の良いがんであるため、早期発見が死亡率低下へとつながる。我が国よりも先に乳がんの問題を抱えていた欧米諸国では、早期発見が期待されるマンモグラフィを乳がん検診に導入し、近年では乳がんの死亡率は低下しつつある²⁾。

我が国の乳がん検診においても、これまでの視診・触診に加えてマンモグラフィが2000年より導入されるようになった。2000年のマンモグラフィの乳がん検診への導入の際の厚生省（現、厚生労働省）からの通達³⁾では、受診の対象年齢が50歳以上とされていた（第4次老人保健事業）。2004年にこの通達が改訂され⁴⁾、対象年齢が40歳以上に拡大された（第5次老人保健事業）。2007年にはがん対策基本法が施行され、2008年3月から、がん検診は健康増進法に基づく健康増進事業と位置付けられている。このような、受診の対象年齢の拡大もあり、2000年の導入から受診者数は増加の一途をたどっていて、2009年度の受診者数は250万人を超えるようになった⁵⁾。

2.2 マンモグラフィ用X線の特徴

マンモグラフィを含めたX線診断では、X線源にはX線管球が使用される。X線管球とは、フィラメントから放出される熱電子を高電圧（数kV～数百kV）で加速し、金属板（ターゲット）に衝突させることによってX線を発生させる装置である（フィラメントとターゲット間に印加する高電圧を管電圧という）。X線管球から発生するX線には、ターゲット材と管電圧の組み合わせによっては、制動X線に加えて特性X線が含まれることがある。このX線管球から発生するX線を、純金属のフィルタ（付加フィルタという）に通すことによりエネルギースペクトル（線質）を変化させる。被写体に応じて最適な線質のX線になるように、管電圧、付加フィルタの材質、厚さを変えている。

胸部撮影等の一般X線撮影と比べるとマンモグラフィで使用されるX線には、①低エネルギーであることと、②特性X線を主体としたエネルギースペクトルを有すること、の二つの特徴がある。

まず、X線のエネルギーについては、一般X線撮影では管電圧が80kV程度であるのに対して、マンモグラフィでは30kV程度である。X線のエネルギーが低いほど、乳房組織と病巣の線減弱係数⁶⁾の差が大きくなるため、コントラストのある画像取得には低エネルギーX線が必要となる。しかし、X線のエネルギーが低くなりすぎると、皮膚によるX線の吸収が大きくなってしまいうため、線量と画質を両立した管電圧が30kV程度のエネルギーのX線がマンモグラフィでは利用される。この30～80kV程度の管電圧の領域では、X線のエネルギーが低くなるほど物質（線量計の材料のみならず空気等も含む）による単位長さ当たりの吸収量が大きくなり、高精度な線量計測を難しくする一つの要因となっている。

もう一つのマンモグラフィ用X線の特徴として、エネルギースペクトルが挙げられる。一般X線撮影でのX線管のターゲット材にはタングステンが使用されているのに対して、低エネルギー領域のX線を利用するマンモグラフィでは主にモリブデンが使用される。使用する管電圧が30kVとモリブデンのK殻のイオン化エネルギーに近いため、特性X線が多く放射される。マンモグラフィでは、モリブデンターゲットのX線管球と、モリブデンの付加フィルタが使用され（以下、ターゲット材/付加フィルタ材とし、Mo/Moのように元素記号で表記）、その結果、図1に示すような特性X線を多く含むエネルギースペクトルとなる。Moの付加フィルタを用いることにより、特性X線のエネルギー近傍のX線がカットされ、より単色性の強いエネルギースペクトルとなる。特性X線よりも低いエネルギー成分は皮膚に

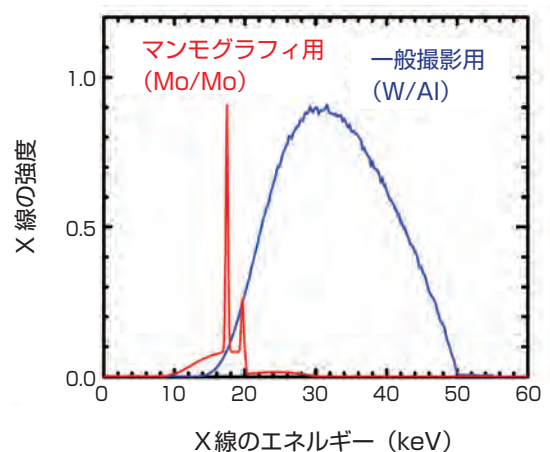


図1 マンモグラフィ用 (Mo/Mo) と一般撮影用 (W/AI) のX線スペクトルの例

よる吸収を、高いエネルギー成分については画像のコントラストの低下を、それぞれ招くため、このような工夫がなされている。

以上のように、マンモグラフィでは特性 X 線を多く含む低エネルギーの X 線が使われるという特徴がある。

2.3 マンモグラフィにおける線量評価

胸部撮影に代表される一般 X 線撮影における線量評価では、皮膚吸収線量が用いられる。一方、マンモグラフィでは、

- ・乳房に対してのみ局所的に X 線が照射されること
- ・乳房組織において、乳腺組織が放射線に最も脆弱であるとされていること
- ・使用する X 線のエネルギーが低いため単位長さ当たりの吸収量が大きく、乳房内で線量が急速に変化すること

等を理由に、平均乳腺線量という特別な線量により評価されている。この平均乳腺線量とは乳腺組織の単位質量あたりの吸収線量であり、乳房組織内の全乳腺組織に吸収される X 線のエネルギーを、乳腺組織の全質量で除した値として定義される。国際単位系では J/kg が単位であるが、特別な名称の単位 Gy (グレイ) が割り当てられている。平均乳腺線量は、乳房中の深さ方向 (X 線源から受像素子へ) の方向 (図2) に対して不均一な乳腺の吸収線量を代表する線量である。ただし、平均乳腺線量は、乳房中の乳腺の量 (割合) や分布、乳房の圧迫厚によって値は変わる。そのため、マンモグラフィの精度管理では、乳腺組織と脂肪組織の質量比が 1:1 の割合で均一に混合した厚さ 45 mm (42 mm 厚の場合もある) の乳房を標準乳房とし、この標準乳房に対する平均乳腺線量を評価している^{[6][7]}。関連学会等では、この平均乳腺線量に対してガイダンスレベル (または低減目

標値) を設け、線量の適正化 (低減化) が図られている。

この平均乳腺線量は実測が極めて難しい量であり、精度管理においては、関連学会等が推奨する標準乳房を模擬した物質 (ファントム) を利用して評価される。図2にマンモグラフィ装置を使った平均乳腺線量の評価の様子を示す。

線量計の基準面がファントムの表面と一致するように線量計を設置し、ファントムの表面 (X 線源側) に入射する X 線の線量を測定する。ただし、この時に線量計で測定される線量は「空気カーマ」^{[6][7]} と呼ばれる単位で測定されるため、空気カーマから平均乳腺線量への変換係数が必要となる。この変換係数はモンテカルロ計算により算出されており、X 線の線質ごとの数表として精度管理マニュアル等に掲載されている^{[6][7]}。そのため、平均乳腺線量の評価には、マンモグラフィ装置からの X 線の線質の評価も必要となる。ただし、エネルギースペクトルを医療現場で直接測定することは、手間やコストを考慮すると現実的でない。そのため、マンモグラフィの線質は、空気カーマの量を半減するのに必要な物質 (マンモグラフィではアルミニウム) の厚さによって表現される。線質を表すこの物質の厚さを半価層という。以上のように、平均乳腺線量の評価には、線量 (空気カーマ) と線質 (半価層) を線量計によって測定することが必要不可欠となる。

2.4 マンモグラフィ用線量計の現状

線量計には測定原理の異なるさまざまな種類が存在する。マンモグラフィの医療現場では、電離箱式線量計と、半導体式線量計の 2 種類が主に利用されている。電離箱式線量計は、X 線と空気との相互作用によって生じた電離量 (イオン-電子対) の測定を基礎とした線量計である。マンモグラフィでは診断用 X 線の中でもエネルギーの低い (物質による吸収が大きい) X 線が利用される。そのため、マンモグラフィ用 X 線の電離箱式線量計では、X 線入射面は透過性の高い薄膜 (主に金属蒸着した樹脂) が用いられる。電離箱式線量計は、空気カーマの定義に近い測定ができるため、二次標準線量計として使用される。一方、使用する温度や気圧等の環境条件によって放射線有感体積中の空気の質量が変化するため、環境条件に応じた補正が必要となる。また、X 線の入射面に薄膜を使用していることから、取り扱いに注意が必要となることに加え、薄膜による X 線の吸収が生じ、X 線のエネルギーが低いほど、線量計の感度が X 線のエネルギーに依存して変化しやすくなる。

半導体式線量計では主にシリコンが活用され、pn 接合 (逆バイアス電圧を印加) による空乏層を放射線に対する有感層として作用させる線量計である (pin 型もあり、その

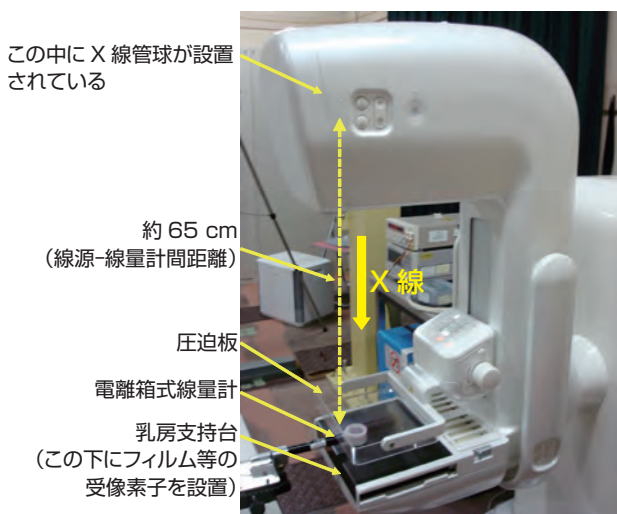


図2 マンモグラフィ装置の線量評価における線量計の設置例
ファントムの厚みの分だけ、線量計の基準面を乳房支持台から浮かせており、写真中では電離箱式線量計のみ設置。

場合は、真性半導体層 (i 層) が放射線に対する有感層として作用する)。電離箱式線量計では電離電流のキャリアが電子-イオン対であるのに対して半導体式線量計では電子-正孔対となり、半導体式線量計は固体の電離箱と例えられる。半導体式線量計は、電離箱式線量計と比べると堅牢性に優れ、温度・気圧の補正が不要等取り扱いの簡便性に優れているため、医療現場での線量評価に多く使われている。しかし、表層の SiO₂ 層や不感層等による X 線の吸収が大きいため、マンモグラフィ用 X 線のような低エネルギー領域では感度が X 線のエネルギーに大きく依存することが知られている。

電離箱式線量計、半導体式線量計ともに、マンモグラフィ X 線 (もしくは低エネルギー X 線) 用のものが開発されているが、線量計の構造上、感度のエネルギー依存性 (以下、エネルギー特性という) は避けられない。そのため、医療現場等で実際に測定する X 線のエネルギー領域において、正確に値が測定されている X 線の標準場を用いて線量計を校正することが学会等からは推奨されている。

2.5 国際的な動向

欧米諸国では我が国よりも早くから乳がんの問題に直面していたため、精度管理体系の構築も我が国よりも早くから始まっていた。アメリカでは 1986 年に米国放射線専門医会 (American College of Radiology; ACR) がマンモグラフィの精度基準を作成したことを契機に、精度管理が進められた。その後、1992 年にはマンモグラフィ品質標準法 (Mammography Quality Standard Act; MQSA) が連邦法として成立し、マンモグラフィ検査は法制化されている^[8]。この法律によって、マンモグラフィ検査を行うすべての施設が、米国食品医薬品局 (Food and Drug Administration; FDA) が承認した検査機関 (ACR や州政府等) の認定を受けた上で、FDA による医療監査と認可を受けることが義務付けられている。この法律の中では、線量計の校正は 2 年に一度行うことが義務付けられており、国家標準へのトレーサビリティを担保することも明記されている。アメリカの国家標準を担っている国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology; NIST) は、Mo/Mo 線質によるマンモグラフィの線量標準の供給を行っている。ACR によって発刊された精度管理マニュアル^[9]は、我が国の精度管理マニュアルを作成する際の基礎となっている。

欧州では、マンモグラフィの品質管理について、European Reference Organization for Quality Assured Breast Screening and Diagnostic Services (EUREF) が中心となって、ガイドラインが作成されている^[10]。このガイドラインでは、線量測定は 6 カ月に一度行うこととされて

いる。このガイドラインを基に、欧州各国ではそれぞれの方法で精度管理が実施されている。ドイツやイギリス等を中心に Mo/Mo 線質による線量標準が供給されている。しかし、欧州内においてマンモグラフィ用の線量計の校正を W/AI 線質によって実施している国や機関も多く、線質の違いが校正結果に影響を与えることが懸念されていた。そのため、欧州計量標準協力機構 (European Collaboration in Measurement Standards; EUROMET) に所属する国および機関の中で、マンモグラフィの線量計の校正に関する国際比較が行われた。

この国際比較では、複数の電離箱式線量計と半導体式線量計を巡回させ、各国もしくは各機関が校正に使用している線質 (Mo/Mo や W/AI 等を問わず) で校正し、その校正結果が比較された。その結果、マンモグラフィ用 (軟 X 線用) の電離箱式線量計のようなエネルギー特性が小さい線量計については、線質の違いによる校正結果の影響は、現場での線量測定に対して大きな問題にはならないという結論であった。しかし、半導体式線量計のようなエネルギー特性の大きい線量計については、Mo/Mo 等のマンモグラフィ用 X 線の線質に近い条件で校正することが望ましいと結論付けられた^[11]。

このような流れの中、国際度量衡局 (International Bureau of Weights and Measures) に対して、Mo/Mo 線質に準じたマンモグラフィ用の線量標準をもつよう、国際度量衡委員会放射線諮問委員会に参加する各国から要望が上がった。これを受け、国際度量衡局では、Mo/Mo 線質によるマンモグラフィ用 X 線の校正場を整備し、2009 年から国際度量衡局を幹事機関とした基幹国際比較が実施されるようになった^[12]。

2.6 マンモグラフィ用線量標準への社会的要請

マンモグラフィのような低エネルギー X 線では、線量計 (電離箱式線量計、半導体式線量計ともに) のエネルギー特性が大きいため、日本では、医療現場で測定する X 線に近いエネルギーで校正することが学会等から推奨されてきた。これまでは、マンモグラフィのエネルギー領域の X 線の線量標準は、W/AI 線質で供給を行ってきた。産総研で保管している電離箱式線量計のエネルギー特性を図 3 に示す (産総研の W/AI 線質の軟 X 線標準の半価層の範囲)。

比較的エネルギー特性の小さいとされる電離箱式線量計についても、マンモグラフィで使用される X 線のエネルギー領域では感度 (校正定数) の変化が、図 3 でデータごとの縦棒で表した校正の不確かさ (95 % の信頼区間) よりも大きく、また、変化の様子が線量計の型式によって異なることが分かる。この違いは、線量計の X 線入射面の材質およ

び厚み、また、線量計内部の構造の違いに起因している。医療現場では、エネルギー特性が電離箱式線量計よりも大きい半導体式線量計が多く使われていることから、このような線質の違いによる校正結果への影響を心配する声が、国内の産業界・学会から挙げられるようになった。この問題に対応するため、産総研ではマンモグラフィのX線の線質に基づいた線量標準の整備・供給に着手した。

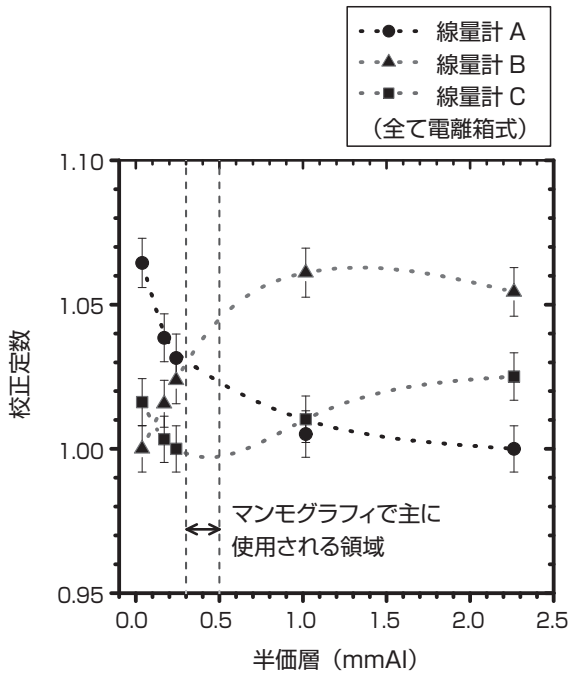


図3 電離箱式線量計のエネルギー特性の例

3 研究開発のシナリオ

マンモグラフィの医療現場における線量測定信頼性の向上には、現場で使われているX線の線質に基づいた線量標準の確立は当然のことながら、線量標準を社会に円滑に供給するための体制作りも必要となる。マンモグラフィの線量測定信頼性向上のために策定したシナリオを図4に示す。

社会的ニーズに素早く対応するため、マンモグラフィ用X線の線質に最適化した国家標準器を新たに開発せず、既存の国家標準器の活用による標準の開発期間の短縮化を図った。標準の主な供給先である医療現場での線量評価の不確かさの低減を図るため、実際のマンモグラフィ装置に近いX線場を開発した。また、標準の国際的な同等性の確保に必要な国際比較に参加するため、IEC規格に準拠したX線場の開発も同時に行った。開発した線量標準の校正能力を検証するため、国際比較への参加に加えて、この標準で校正した複数の線量計で実際のマンモグラフィの線量を計測し、それらの評価を行った。

マンモグラフィでは線量評価を含めた精度管理がすでに多くの医療現場で行われていたため、この中で利用されているガラス線量計を評価することにより、迅速かつ広範な標準供給を目指した。そのために、産総研は、精度管理で利用されているガラス線量計をそのまま校正する方式の確立に努めた。

また、これまでの線量標準供給体制では、校正事業者が所有する標準線量計（二次標準器）の校正を産総研が行い、この二次標準器を介して標準供給がなされていた。

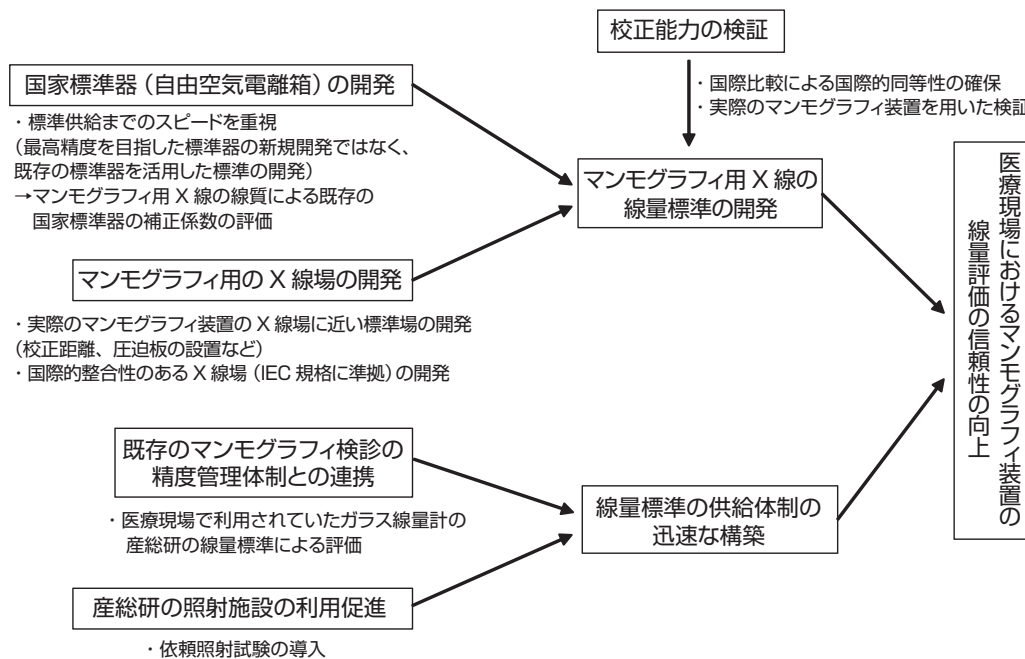


図4 マンモグラフィ用X線の線量評価の信頼性向上に向けたシナリオ

その際、医療現場の線量計の校正を行う校正場（X線場）が、校正事業者が保有するこれまでのW/AI線質のままでは、あまり意味がない。しかし、マンモグラフィ用X線の線質に準拠した校正場の整備には、照射装置の導入等に数千万円規模の設備投資が必要となってしまう。そこで、産総研は依頼試験制度により、産総研の照射装置を活用してスムーズな標準供給ができるような環境を整備した。

このようなシナリオを策定して、国際的な同等性のある線量標準が迅速かつ広範に医療現場に供給され、線量評価の信頼性向上につながることを意図した。

4 国家標準の開発

マンモグラフィに特化したX線線量の国家標準の整備には、線量の絶対測定（単位の定義に沿った測定）が可能な国家標準器の開発と、マンモグラフィ用X線の線質と同じX線標準場の開発が必要となる。以下では、国家標準器の開発とマンモグラフィ用X線標準場の開発について述べる。

4.1 国家標準器の開発

マンモグラフィを含めた軟X線（ここでは50 kV以下の管電圧）の場合、物理的に明確に定義された空気カーマ^{用語4}（もしくは照射線量^{用語5}）の単位Gy（もしくはC/kg）で標準供給がすでになされている。

照射線量の絶対測定が可能である自由空気電離箱が一次標準器として世界的に採用されている。現在のところ、産総研の軟X線の線量の国家標準も自由空気電離箱を採用している（図5）。

自由空気電離箱では、電離体積内で生成されたイオンの電荷を測定し、照射線量（または空気カーマ）を求めている。電離体積内の空気質量を m とすると、照射線量率 \dot{X} (C/kg/s) は次の(1)式によって得られる。

$$\dot{X} = \frac{I}{m} \prod_{i=1}^{10} k_i \quad \dots (1)$$

ここで、(1)式の I は自由空気電離箱で測定されるX線による空気の電離電流、 k_i は補正係数である。補正係数は、実際の実験条件を、線量の定義される理想的な条件に補正するための係数で、この標準では全部で10種類ある。マンモグラフィ用X線では、それらの補正係数のうち、規定面と集電極中心間の空気層による吸収に対する補正が約1.5～2%と最も大きく、その他に散乱線に対する補正が少し（～0.5%）あるのみで、他の補正係数に関してはかなり小さい（～0.1%未満）。散乱線に対する補正等の実測評価が困難な補正係数は、モンテカルロシミュレーションにより評価している。

図6に開発したマンモグラフィの線量標準の装置図を示す。マンモグラフィの国家標準を整備する際、マンモグラフィ専用の新しい国家標準器（自由空気電離箱）を開発せず、既存の自由空気電離箱（軟X線の線量の国家標準器）の補正係数をマンモグラフィ用のX線の線質で評価する方法を採った。これは標準の開発から供給までの時間を極力短くし、素早く標準供給の社会的要請に応えるためである。図6に示すように、自由空気電離箱はXYステージ上に設置し、軟X線（W/AI線質）の線量標準と共用できるようになっている。

4.2 マンモグラフィ用X線標準場の開発

標準場として設定するマンモグラフィ用X線の線質は、現場で最も利用されている線質から重点的に開発を進めた。前述のとおり、線質は主に、X線管球のターゲット材、管電圧、付加フィルタの材料と厚さによって決まる。ただし、線質を規定する際、国内だけでなく国外も意識した。国外を意識した線質とは、ISOやIEC規格等に代表され

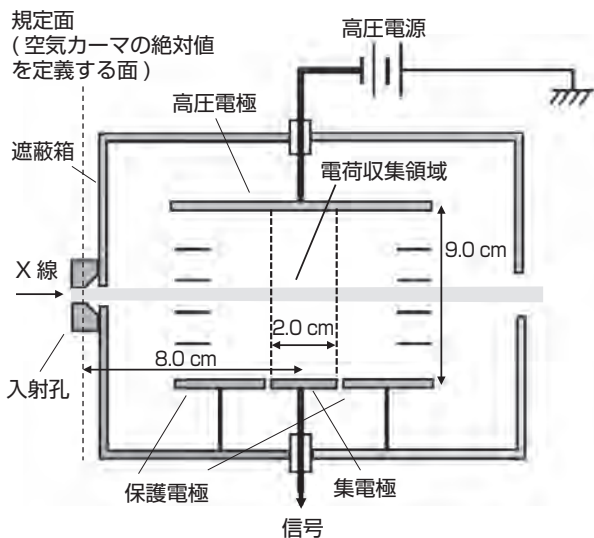


図5 国家標準器（自由空気電離箱）の概略図

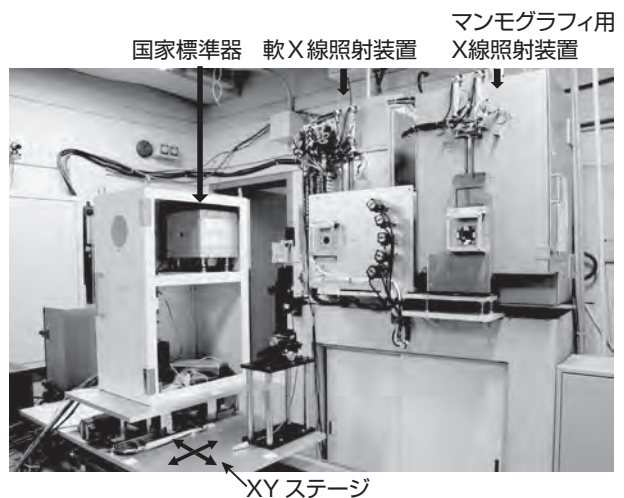


図6 開発したマンモグラフィ用X線の線量標準の装置図

る世界的に共通に使うことができる線質である（マンモグラフィでは、IEC61267で規定されている）^[13]。このような線質は、各国の線量標準の同等性を確認するために実施される国際比較に参加する際に必要となる。一方、国内の精度管理マニュアル等ではIEC規格以外の線質も使われていて、これに準拠することが円滑な標準供給へとつながる。このように、標準を整備する際に国外と国内の両方を意識することが、国際的な同等性の担保された線量標準の円滑な供給にむけた第一歩となる。

また、マンモグラフィに用いられる低エネルギーX線は空気による単位長さ当たりの吸収量が他の診断X線と比べて大きいので、校正距離（焦点-規定面間距離）による線質の変化が大きく、校正距離の設定も重要となる。我が国よりも先に標準供給を行っていたドイツやアメリカ等では校正距離は1 mであったが、実際のマンモグラフィ装置の照射距離を考慮して、産総研では校正距離を60 cmと設定した（その後に国際度量衡局も校正距離を60 cmに設定した）。

また、我が国独自の設定として、圧迫板を透過した線質に基づいた線量標準も開発した。実際の乳房撮影では圧迫板を透過したX線が乳房に照射される。マンモグラフィで使用されるようなエネルギーの低いX線は圧迫板に吸収されやすく、線質も大幅に変わる。乳房に照射する線量の把握も重要と考え、このような独自の線質も開発した。この線質は精度管理用に使われている線量計を校正するためにも必要であった。

5 線量標準の供給体制の構築

医療現場で評価される線量の信頼性向上には、標準供給体制の構築が必要不可欠となる。そこで、産業界・学会等の協力を得て、複数の標準供給体制を構築した。

5.1 精度管理に利用されるガラス線量計の性能評価

マンモグラフィが我が国の乳がん検診に導入される以前から、関連学会を中心としたマンモグラフィ検診の精度管理がされていた。この精度管理において必要な線量と線質を簡便に評価できるよう、マンモグラフィ用ガラス線量計が開発された。

ガラス線量計は、ラジオフォトルミネセンス現象^[14]を利用した積算型の線量計であり、蛍光ガラス素子には銀活性リン酸塩ガラスが用いられている。マンモグラフィ用のガラス線量計の写真を図7に示す。

マンモグラフィ用のガラス線量計は、蛍光ガラス素子と、素子の表面に4種類の厚さの異なるアルミニウムフィルタをかぶせた構造となっている。各アルミニウムフィルタの厚さは0.3、0.4、0.6、1.0 mmとなっており、1回の照射で減

弱曲線が測定できる。この減弱曲線から半価層と管電圧を求め、OW（open window、Alフィルタが無い）のガラス素子の蛍光量から空気カーマを求めることができる。つまり、このガラス線量計では1回の照射で精度管理に必要な平均乳腺線量の評価ができる。このガラス線量計の性能評価をこの標準場で行った。

その結果、半価層、管電圧、空気カーマともに、95%の信頼度で不確かさ2%以内で産総研の値と一致することを確認した^[14]。

5.2 産総研の照射施設の利用促進

マンモグラフィの線質での線量計の校正を校正事業者が実施するためには、マンモグラフィ用X線の発生装置が必要となる。しかし、X線発生装置の導入には少なくとも数千万円規模の設備投資が必要となり、事業として成り立たない可能性が予想された。そこで、校正事業者が産総研のマンモグラフィ用の標準場に、各自の標準線量計（国家標準とトレーサブルであることが前提）と校正事業者が依頼を受けた被校正線量計を持ち込んで校正を行う照射依頼試験を開始した。これまで産総研での校正料金は、被校正線量計の数に応じていたが、この試験では照射装置の使用日数に応じて課金するため、校正事業者の経済的な負担が軽減される。この照射依頼試験の導入により、校正事業者への負担軽減を図り、円滑な標準供給を促進した。

6 校正能力の検証

6.1 国家標準の国際的同等性の確認

各国の標準は国際的な同等性を確認するため、他国の標準との比較を行う必要がある。前述のとおり、国際度量衡局もマンモグラフィ用X線の線量標準を開発し、2009年より基幹国際比較^[15]を開始した。そこで産総研は、世界のトップバッターとして2009年にこの基幹国際比較に参加した^[15]。

放射線の線量標準の国際比較の場合、その方法は2通りある。一つ目は、各国の標準器同士を直接比較する方法である。例えば、産総研の国家標準器（自由空気電離箱）を国際度量衡局の放射線場に持ち込み、国際度量衡局の

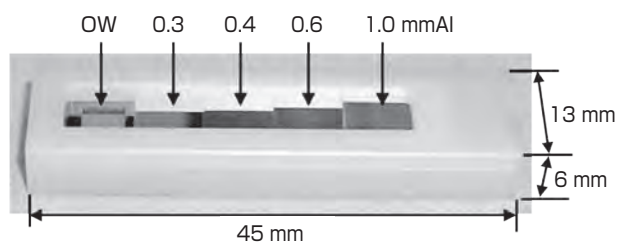


図7 マンモグラフィの精度管理用に開発されたガラス線量計（協力（株）千代田テクノル）

標準線量計（自由空気電離箱）との間で、測定された線量の絶対値どうしを比較する方法である。この方法は、標準器が持ち運び可能である場合に限られる。もう一つの方法は、線量計の校正を各機関で行い、その校正結果（校正定数）の比較を行う方法である。この方法は、標準器が大きい等運搬が困難な場合に有用な方法となる。

産総研のマンモグラフィ用のX線標準の標準器である自由空気電離箱は、これまでの軟X線（W/AI）の線量標準と共通である。この標準器は2004年に国際度量衡局の標準器との比較を直接行っており、十分な同等性を確認している^[16]。そこで今回の基幹比較^{冊7}では、仲介の線量計（3種類の電離箱式線量計を使用）の校正による後者の方法を選択した。3種類ともエネルギー特性の異なる線量計を選択することにより、両機関の線量標準の詳細な比較を目指した。図8に両機関で測定した3種類の線量計の校正結果の比較を示す。

図8から分かるように、どのエネルギー特性の線量計の校正定数も両機関で良好な一致を示している。3種類すべての線量計の校正結果について、国際度量衡局の不確かさ（図8のエラーバー）が産総研よりも小さいのは、国際度量衡局がマンモグラフィ用X線の線質に最適化された（式（1）の補正係数が小さい）自由空気電離箱を新規に開発したためである。

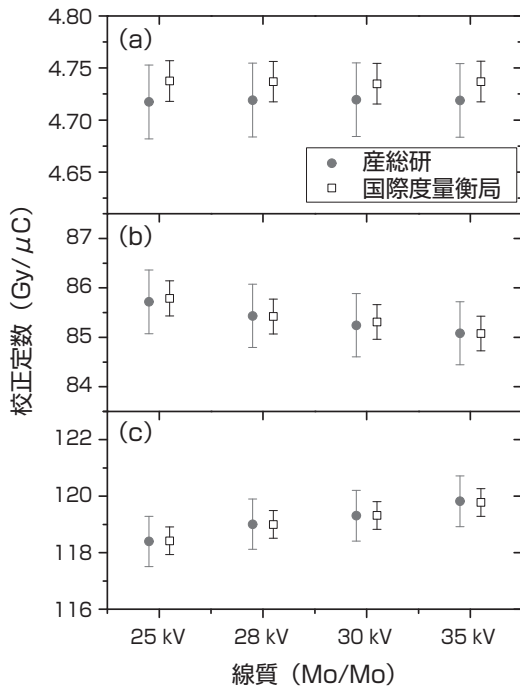


図8 3種類 (a,b,c) の線量計の校正定数の国際度量衡局との比較結果
 (a) の線量計のエネルギー特性はフラット、(b) は右肩下がり、(c) は右肩上がり、と3種類とも異なっている。

図9はこの基幹国際比較の全参加国との比較である。この基幹国際比較にはドイツ (PTB)、アメリカ (NIST)、カナダ (NRC、線質が若干異なる) が参加しており、全機関のマンモグラフィの線量標準の間で十分な同等性が確認された^[17]。また、産総研の不確かさが、諸外国の線量標準と比較して、遜色のないものであることが分かった。

6.2 実際のマンモグラフィ装置を用いた検証

医療現場で使われるマンモグラフィ装置では、X線の発生は時間的なパルスで行われる。一方、標準場には安定性が求められるため、線量率が時間に対して一定となっている。また、照射装置の構造も、実際のマンモグラフィ装置はコンパクトであるのに対して、標準場の装置は空間的な余裕がある。実際のマンモグラフィ装置と標準場とのこのような違いを検証することが、医療現場での線量測定の信頼性向上につながると考えられる。そこで、産総研では、医療現場で使われているマンモグラフィ装置を使い、電離箱式線量計（産総研で校正）とガラス線量計での線量の評価結果の比較を行った。

その結果、電離箱線量計とガラス線量計との間で、平均乳腺線量について不確かさの範囲で一致することを確認した（図10）。産総研の標準場で校正された線量計が実際のマンモグラフィ装置の線量評価に対しても信頼性があることが分かった。

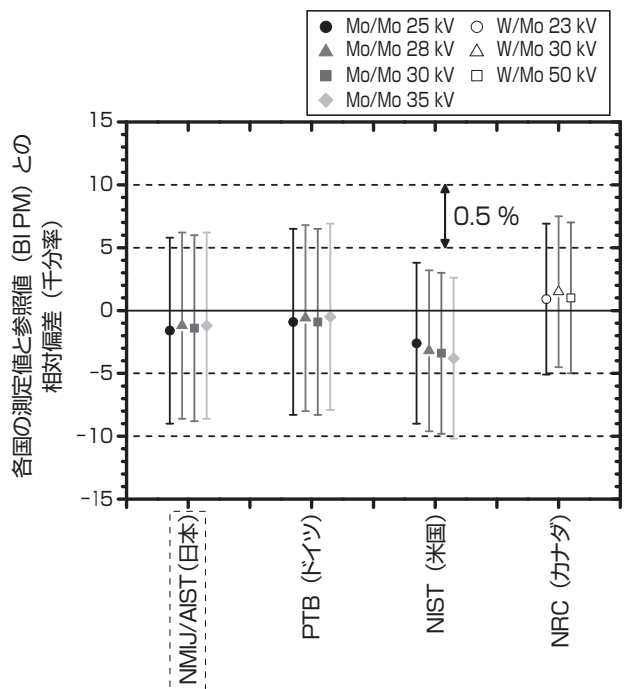


図9 マンモグラフィの線量標準の国際比較^[17]
 縦軸は、国際度量衡局の測定値からの偏差を1000分率で表す。データごとの縦棒は、不確かさを95%信頼度で表す。

7 おわりに

産総研では、マンモグラフィの現場における線量評価への信頼性向上を目標に、マンモグラフィの線質に準じた線量標準の開発と供給体制の構築を行ってきた。マンモグラフィの標準開発には、既存の軟 X 線用の国家標準器（自由空気電離箱）を活用することにより、開発に必要な期間を大幅に短縮することができた。また、この標準の国際比較にもいち早く参加し、主要国との間で国際的な同等性を確認した。供給体制の構築に際しても、既存の体制を最大限に活用することにより、迅速かつ広範な標準供給を行うことができた。今後も、学会や校正機関との連携を図り、さらなる供給体制の強化を目指していく。

また、現在、マンモグラフィでは、他の診断と同様にモニター診断化（診断画像をパソコン等のモニターに表示し診断）が加速している（マンモグラフィのデジタル化）。これまでのハードコピー（フィルムへの診断画像の焼き付け）に比べ、画像からの線量の判定が難しいとされ、精度管理における線量測定の重要性が一層増すことが予想される。また、マンモグラフィのデジタル化に伴い、多種多様な X 線の線質が利用されつつある。特に、医療現場で多く使われている半導体式線量計は、感度が線質に応じて大きく変化するため、校正場の整備が急務であると考えられる。現在、アメリカでもデジタルマンモグラフィ用の校正場の整備が進められ、半導体式線量計の評価について重点的な研究がなされている。産総研においても、現在、この状況に早急に対応するべく、標準場の開発を進めていき、高度化するマンモグラフィの精度管理および安全性に貢献したいと考えている。

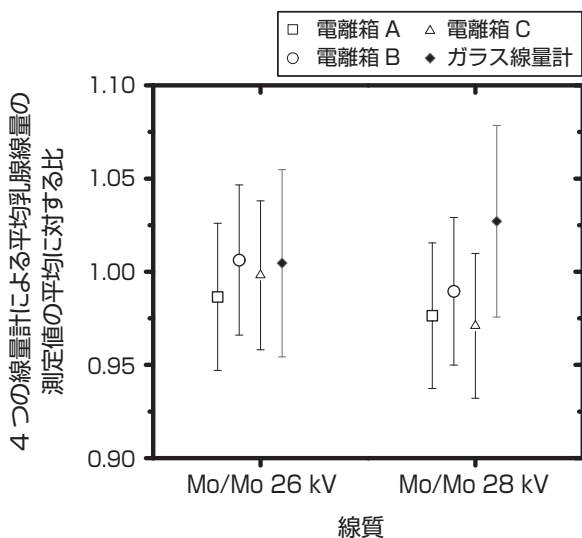


図10 実際のマンモグラフィ装置による線量の比較結果
データごとの縦棒は、不確かさを95%信頼度で表す。

謝辞

この標準の迅速かつ広範な供給には、我が国の優れた精度管理体制の協力が大きい。このような優れた精度管理体制を構築された方々に、深く感謝の意を表します。また、マンモグラフィ用ガラス線量計の開発・評価にご協力してくださった株式会社千代田テクノルの関係者の皆様にも深く感謝いたします。

用語解説

用語1: 年齢調整罹患率: 基準となる人口の年齢構成(昭和60年人口モデル)を考慮して補正した罹患率で、年齢構成の著しく異なる群間の比較を可能にする。

用語2: 年齢調整死亡率: 基準となる人口の年齢構成(昭和60年人口モデル)を考慮して補正した死亡率で、年齢構成の著しく異なる群間の比較を可能にする。

用語3: 線減弱係数: 強度 I_0 の単一エネルギーの光子が一樣な物質に入射して透過する際、透過する光子の強度 I は、物質の厚さ d (cm) とともに

$$I = I_0 \times e^{-\mu d}$$

のように指数関数的に減少する。この係数 μ (cm^{-1}) を線減弱係数という。

用語4: 空気カーマ: 非荷電粒子線の相互作用によって単位質量あたりの空気から発生した二次荷電粒子線の各発生時点での運動エネルギーの総和。SI単位系では、J/kgと表されるが、特別な単位 Gy (グレイ) が用いられる。

用語5: 照射線量: 単位質量あたりの空気と相互作用した光子が生成した二次電子が完全に停止するまでに空気中で生成するイオン対のうち、一方の符号の電荷を合計した電荷量の絶対値。SI単位系では C/kg で表される。

用語6: ラジオフォトルミネセンス現象: 放射線照射によってガラス中に生成した蛍光中心に対して紫外線を照射すると、ガラスに照射された放射線の線量に比例した蛍光が発生する現象。この現象を利用して、個人線量計としても使われている。

用語7: 基幹比較: 国際度量衡委員会 (CIPM) の下に設置されている各計量分野の諮問委員会では、その分野で中核となる国際比較を実施しており、これを CIPM 基幹比較 (CIPM Key comparison) という。放射線の線量関連では、現在、次の8つの量が基幹比較の対象となっている。

K1: ^{60}Co γ 線 空気カーマ

K2: 軟 X 線 空気カーマ

K3: 中硬 X 線 空気カーマ

K4: ^{60}Co γ 線 水吸収線量

K5: ^{137}Cs γ 線 空気カーマ

K6: 医療用電子線加速器 X 線 水吸収線量

K7: マンモグラフィ用 X 線 空気カーマ

K8: 高線量率 ^{192}Ir γ 線 空気カーマ率

これらの他に、個人線量当量や β 線吸収線量等が補完比較(Supplementary comparison)の対象となっている。

参考文献

- [1] 独立行政法人国立がん研究センターがん対策情報センター: http://ganjoho.jp/public/statistics/pub/statistics02.html#prg3_1
- [2] WHO死亡統計データベース: <http://www.who.int/healthinfo/morttables/en/>
- [3] 厚生省老人保健福祉局老人保健課長: 「がん予防重点健康教育及びがん検診実施のための指針」の一部改正について, 老健第65号通達, 2000年3月.
- [4] 厚生労働省老健局老人保健課長: 「がん予防重点健康教育及びがん検診実施のための指針」の一部改定について, 老老発第0427001号通達, 2004年4月.
- [5] 地域保健・健康増進事業報告(厚生労働省 人口動態・保健統計課保健統計室) <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do>
- [6] 日本放射線技術学会放射線撮影分科会乳房撮影ガイドライン普及班, 放射線医療技術学叢書(14-3)乳房撮影精度管理マニュアル(改訂版), 放射線技術学会, (2004).
- [7] NPO法人 マンモグラフィ検診精度管理中央委員会, デジタルマンモグラフィ精度管理マニュアル, 医学書院, (2009).
- [8] Mammography Quality Standard Act.
- [9] Committee on Quality Assurance in Mammography, American College of Radiology: *Mammography Quality Control Manual 1999*, American College of Radiology, USA (1999).
- [10] European Commission: *European guidelines for quality assurance in breast cancer screening and diagnosis, Fourth Edition*, European Communities, Luxembourg (2006).
- [11] J. Witzani, H. Bjerke, F. Bochud, I. Csete, M. Denoziere, W. de Vries, K. Ennow, J. E. Grindborg, C. Hourdakakis, A. Kosunen, H. M. Kramer, F. Pernicka and T. Sander: Calibration of dosimeters used in mammography with different x ray qualities: EUROMET Project No. 526, *Radiation Protection Dosimetry*, 108, 33-45 (2004).
- [12] C. Kessler, P. Roger and D. T. Burns: Establishment of reference radiation qualities for mammography, *Rapport BIPM 2010/01* (2010).
- [13] *IEC61267 Ed. 2.0, Medical diagnostic X-ray equipment-Radiation conditions for use in the determination of characteristics*, IEC (2005).
- [14] T. Tanaka, T. Kurosawa, N. Nouda, T. Matsumoto, N. Saito, S. Matsumoto and K. Fukuda: Reference X ray field for mammography dosimetry in Japan, *Proceedings of the International Symposium, Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry*, 2, 43-51 (2011).
- [15] C. Kessler, D. T. Burns, T. Tanaka, T. Kurosawa and N. Saito: Key comparison BIPM.RI(I)-K7 of the air-kerma standards of the NMJJ, Japan and the BIPM in mammography x-rays, *Metrologia*, 47, 06024 (2010).
- [16] D. T. Burns, A. Nohtomi, N. Saito, T. Kurosawa and N. Takata: Key comparison BIPM. RI(I)-K2 of the air-kerma standards of the NMJJ and the BIPM in low-energy x-rays, *Metrologia*, 45, 06015 (2008).
- [17] BIPM Key comparison data base. <http://kcdb.bipm.org/>

執筆者略歴

田中 隆宏 (たなか たかひろ)

2008年上智大学大学院理工学研究科物理学専攻修了。博士(理学)。同年、産業技術総合研究所入所。計測標準研究部門量子放射科放射線標準研究室研究員として現在に至る。軟X線およびマンモグラフィ用X線の線量標準の研究に従事。この論文では、主に、マンモグラフィの線量標準全般に関する研究開発・校正業務、国際比較、原稿執筆を担当した。



黒澤 忠弘 (くろさわ ただひろ)

2000年東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻修了。博士(工学)。同年、工業技術院電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)入所。2003年より3カ月間、ドイツの物理技術研究所(PTB)にて外来研究員としてベータ線標準に従事。2009年、産業技術総合研究所計測標準研究部門量子放射科放射線研究室主任研究員。 γ 線・X線標準の開発に従事。この論文では、主に、マンモグラフィの線量標準のモンテカルロ計算、国際比較を担当した。



齋藤 則生 (さいとう のりお)

1984年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了。同年工業技術院電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)入所。博士(理学)。1991年同所主任研究官、2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門量子放射科放射線標準研究室主任研究員、2005年同研究室長、2012年量子放射科長として現在に至る。1993年～1994年ドイツのフリッツハーバー研究所研究員。放射線標準、放射線計測の研究に従事。この論文では主に、マンモグラフィの線量標準の全体構想の策定と取りまとめを担当した。



査読者との議論

議論1 全体評価

コメント(小林 直人:早稲田大学研究戦略センター)

この論文は、「マンモグラフィのための低エネルギーX線の線量標準と供給体制の確立」という観点から、意義のある論文であると考えられます。特に、開発の着手から供給開始までを約1年半という短期間で達成したことは、大きな成果と言えます。

コメント(小野 晃:産業技術総合研究所)

マンモグラフィの信頼性と安全性を両立させるために、X線線量の国家標準の確立から標準供給体制の構築まで一貫したシナリオを設定し、それを短期間に成し遂げた優れた研究成果で、読者の参考になる点が多いと思います。また章立て等、論理の構成と展開がしっかりしていることが、内容の信頼性を高めていると同時に、読者の理解を容易にしています。

議論2 既存リソースの活用

コメント(小野 晃)

第1章「はじめに」で、この標準の開発では「既存の研究設備と技術を最大限活用する」ことにより、開発の着手から供給開始までを約1年半という短期間で達成したとあります。また「民間における現行のマンモグラフィの精度管理体制の中にこの標準を組み込んで迅速かつ広範な標準供給体制の構築に努めた」とあります。既存のリソー

スを活用したり、現行の体制を活用したりといった工夫が、研究開発を通常よりも迅速に進める鍵になったと思います。

既存のリソースを活用したり、現行の管理体制の中に組み込んだ際に、著者らが留意したことがあれば他の研究者の参考になると思いますので披露してください。今回の経験から得た著者らの教訓といったもので結構です。

回答（田中 隆宏）

既存のリソースを活用する場合の留意点は、そのリソースの可能性と限界を見極めることだと思います。つまり、この研究の場合のリソースである自由空気電離箱が、マンモグラフィの線質に対して国家標準としての性能を十分に発揮するかどうかの見極めが、研究者に求められるのではないかと考えられます。この見極めができるかどうかが本格研究の成否に関わってくると考えています。

また、標準供給体制の構築に際しては、産業界や学会から線量評価の状況を広く把握することが重要であると考えています。そして、最終目標であるトレーサビリティを現行の管理体制の中に組み込むことに対して、産総研と産業界・学会の双方に強い意気込みがあったと思います。

議論3 克服した技術的課題

質問（小林 直人）

この研究の目標を達成するための技術的課題に関して質問します。今回のマンモグラフィ用X線は約 30 keV の低エネルギーであることが特徴ですが、線量標準確立のため既存の自由空気電離箱の補正係数を決定するという方法で行ったことが技術的ポイントだと思います。しかし、その際の克服した困難な課題が何だったのでしょうか。

また、これまでの標準電離箱 A、B、C の校正定数には大きな違いがありますが（図3 参照）、この差の理由は何なのでしょう。

回答（田中 隆宏）

この標準開発において、いくつかの技術的課題はありましたが、特筆すべきものではありません。その理由は、これまでに産総研に蓄積された、低エネルギーX線の線量計測開発技術を応用することで十分解決できると判断したためです。具体的には、国家標準器は既存の軟X線（W/AI 線質）用のものを活用し、国家標準器の補正係数をマンモグラフィ用X線の線質で新たに評価しました。モンテカルロ計算によって、測定結果および不確かさに致命的な影響を与えないことが開発の初期段階で確認できたため、標準の開発にはこの方法を採用しました。

この方法以外に、マンモグラフィ用X線に特化した国家標準器を新規に開発する方法もあります。例えば、マンモグラフィの線質に最適化された（補正量が小さい）自由空気電離箱の開発です。これは、モンテカルロ法等で補正係数を計算し、自由空気電離箱の設計にフィードバックさせ最適化していく方法です。国際度量衡局はこの方法でマンモグラフィの線量標準を開発しました。当然、最適化した標準器を開発した方が不確かさは小さくなります（95 % の信頼度で不確かさは、産総研が約 0.6 %、国際度量衡局が約 0.4 %）。その反面、開発期間が長くなります。かなり極端な例にはなりますが、国際度量衡局は 2001 年に開発に着手し、2009 年から国際比較を開始しています。この標準のように社会的要望に迅速に応える場合には、最短の開発期間が最も大きなメリットであると判断しました。

これ以外の技術的課題としては、医療現場におけるマンモグラフィ装置の線量評価の信頼性の向上があります。産総研や海外の国立計量研究機関で構築されている標準場と実際のマンモグラフィ装置とは照射ジオメトリが異なるため、医療現場での線量評価の不確かさが大きくなります。マンモグラフィでは、医療用放射線の中でもかなり低いエネルギーのX線が利用されています。このような低エネルギーでは、線質の違いに加えて、照射距離や圧迫板の有無等、照射のジオメトリの違いが線量評価の不確かさに大きく影響します。そのため、照射のジオメトリがマンモグラフィ装置と近い線量標準の開発に努め、

医療現場での線量評価の不確かさを低減を目指しました。なお、この照射距離と圧迫板を考慮したことは、海外の標準には見られない産総研独自の取り組みです。ただし、この標準の国際的な整合性の確保にも留意し、IEC 規格に準拠した線質の整備も同時に進めました。

図3の線量計 A、B、C の校正定数の違いですが、X線の入射面の材質や中の構造の違いが主な原因と考えられます。精度の高い線量計として知られている電離箱線量計においても、このように校正定数のエネルギー依存性に大きな違いが見られるのが、低エネルギーX線の大きな特徴です。この論文に説明を加えました。

議論4 標準供給体制の確立のための新たな試み

質問（小林 直人）

標準供給体制について、今回新たな校正装置をつくることはせずに、校正事業者が顧客から校正の依頼を受けた線量計を産総研に持ち込んで校正（照射依頼試験）を行うことで、標準供給をスムーズに行うことができたことあり、実例としてガラス線量計の例が挙げられています。これに関してこれまでになかった試みや工夫はなかったのでしょうか。当たり前で、特に困難なこともないような印象を受けましたが、実態はどうだったのでしょうか。

回答（田中 隆宏）

線量計の校正によるこれまでの標準供給体制に加えて、それまで医療現場で利用されていたガラス線量計の評価によって信頼性向上を図ったことがこの研究の大きな特徴です。

標準の開発当初の予定では、線量計の校正を介したこれまでの標準供給方法を考えていました。つまり、①校正事業者等の所有する線量計を産総研で校正し、②その校正された線量計を標準器として、校正事業者のX線標準場でユーザーの線量計の校正をする、という流れを想定していました。ただし、この供給方法の場合、マンモグラフィの線質がそれまでの校正に使われていたX線と異なるため、①だけでは不十分で、②においてもマンモグラフィの線質のX線場が必要となります。しかし、標準に対する要望があるといっても、X線照射装置の導入に伴う設備投資は大きな負担になるという声が校正事業者から挙げられました。そこで、産総研の照射装置を校正事業者にも利用してもらうことにより、円滑な標準供給に努めました。

また、国内に流通しているマンモグラフィ用線量計が 1000 台程度と推定されているのに対して、校正事業者は数社しかないため、広範な標準供給にはさらなる工夫が必要と考えました。そこで、この標準の開発当時からすでに医療現場の線量評価に広く使われていたマンモグラフィ用ガラス線量計に着目しました。ガラス線量計を産総研の線量標準で評価することにより、多くのマンモグラフィ装置の線量評価に対して信頼性の向上が望めると考えました。ガラス線量計の評価をこの標準で行った際、苦勞した点が一つあります。ガラス線量計は、蓄積された線量の情報を読み取るための専用のリーダーが別途必要となるため、照射したその場ですぐに線量が分かりません。産総研の標準場でのガラス線量計の照射と、照射データの読み取り・解析が分離していたため、不確かさの評価等、一つ一つの課題の克服に時間がかかったことが苦勞した点です。また、このマンモグラフィ用ガラス線量計は日本独自の線量計であり、高いポテンシャルを秘めていると考えています。

議論5 国際比較における諸外国の状況

コメント（小林 直人）

今回の国際比較では、図9にみられるようにとても良好な結果が得られています。産総研は、世界のトップバッターとして参加し、良好な結果が得られていることは、国家標準の国際的同等性の検証ができたことであり、その意義は極めて大きいものがあります。そこで今回参加した諸外国の状況（検出器の種類や性能等）を合わせて述べていただくと、産総研の質の高さもより一層注目されると思います。

回答（田中 隆宏）

今回の国際比較では、産総研を含めたすべての機関が伸介器を利用した比較方法を採用しましたが、伸介器の選択に産総研独自の特色があります。産総研以外の機関は、マンモグラフィのエネルギー領域において、エネルギー特性がフラットな伸介線量計を1種類のみ選択しました。一方、産総研では、エネルギー特性の異なる3種類の伸介線量計を選択し、より綿密な比較を行いました。その結果、3種類すべてにおいて国際度量衡局と十分な整合性を確認することができました。

議論6 この研究のアウトカム

質問（小林 直人）

この研究のアウトカムについてお聞きします。今回、新たに低エネルギーX線の線量評価の標準の確立と供給ができるようになったわけですが、このことにより、どのような実質的なアウトカムが期待できるでしょうか。例えば、マンモグラフィの信頼性が上がり、受診率が上がる等の期待ができるでしょうか。もしそうならないとしたら、さらにどんな工夫をすれば、マンモグラフィの社会的普及に繋がると考えられますか。

回答（田中 隆宏）

この標準の開発により、マンモグラフィの線量評価の信頼性が向上しました。マンモグラフィ装置のメーカー各社は、低線量で高画質な装置の開発に努力しています。この標準では画質向上への貢献は難しいのですが、低線量化への寄与が期待されます。線量の定量的な評価には、線量標準が必要不可欠となるからです。

また、産業界、大学、学会等から共同研究のお話を数多くいただき、マンモグラフィの線量評価の高精度化に向けた研究を現在進めています。今後、これらの共同研究の成果の活用によってもマンモグラフィの低線量化に寄与できると期待しています。

議論7 研究目標に向かってのシナリオ

コメント（小林 直人）

当初図4のシナリオの図は一般的なX線線量計測の標準確立と精度向上の図になっていました。せっかくこの論文に詳述した今回のマンモグラフィ用X線の線量評価確立・供給のシナリオが、十分に記述されていないと思います。

マンモグラフィ用X線線量評価でこの研究は次のような特徴があると思います。これらを、シナリオの中にどのように位置付け対応を行ったかを付け加えて、今回の目標を達成するためのシナリオの図を示すのが良いと思います。

- (1) 国家標準器は既存の軟X線(W/AI線質)用のものを活用し、国家標準器の補正係数をマンモグラフィ用X線の線質で新たに評価した。
- (2) (1)については、技術的な新しさはないが、その際モンテカルロ

計算で測定結果および不確かさに致命的な影響を与えないことをあらかじめ確認した。

- (3) マンモグラフィ用の線質に最適化された標準器を始めから開発し、高精度を狙うよりは、精度を多少犠牲にしても、既存の標準器を用いた標準確立・供給の早さを重視した。（これはとても重要な研究開発戦略と言えます。）
- (4) 医療現場におけるマンモグラフィ装置の線量評価の信頼性の向上を目標に設定した。そのため照射のジオメトリがマンモグラフィ装置と近い線量標準の開発に努め、医療現場での線量評価の不確かさを低減を目指した。
- (5) さらに標準供給にあたっては、医療現場で利用されていたガラス線量計に着目し、ガラス線量計を産総研の線量標準で評価することにより、多くのマンモグラフィ装置の線量評価に対して信頼性の向上を図った。

回答（田中 隆宏）

ご指摘いただいたこの研究の特徴が明確になるように、シナリオの図を改訂しました。また、第4章以降の章立ておよびこの論文、シナリオの図に沿うように改訂しました。

議論8 この研究における標準の技術的特徴

質問（小林 直人）

確認の意味で、次の質問をします。これまでのX線線量標準との違いは、以下の理解でよいでしょうか。

- ①人体への放射線の影響をできるだけ低減するため、80 keVではなく30 keV程度の低エネルギーであることが必要。また、そのエネルギー領域のX線の単位長さあたりの吸収量(阻止能)は、中エネルギーX線よりも大きく、物質通過中にエネルギーが大きく変化する。一方、X線量評価の精度が下がるので、特別な工夫が必要である。
- ②30 keV付近のX線発生には、モリブデンターゲットとモリブデンフィルターが使われるので、そのエネルギースペクトルは単色に近くなり、物質に吸収後のエネルギースペクトルがW/AIを利用する80 keV付近のX線とは大きく異なる。

回答（田中 隆宏）

ご理解のとおりだと思います。乳房組織と病巣との間に十分なコントラストを得るためには、これまでの一般撮影よりも低いエネルギーがマンモグラフィでは必要となります。線量計の感度が変わりやすい低エネルギー領域のX線の線量計測では、一般撮影用X線とマンモグラフィ用X線の線質の違いが線量評価の精度に影響します。マンモグラフィ用X線の線質の特徴について、この論文を改訂しました。

西暦 869 年貞観津波の復元と東北地方太平洋沖地震の教訓

— 古地震研究の重要性と研究成果の社会への周知の課題 —

岡村 行信

歴史文書に記録されている西暦869年貞観地震を解明するため、地層に残された津波堆積物を詳細に調査し、津波の数値計算を組み合わせて津波規模を推定した。2011年東北地方太平洋沖地震は、その推定よりかなり大きかったが、津波堆積物が過去の巨大津波の証拠であり、巨大津波の警告であることを証明した。この貞観地震に関する研究成果は地震調査研究推進本部に提出され、2011年3月にはおよそ評価が終わっていたが、社会に周知する直前に地震が発生してしまった。このようなことを繰り返さないためにも、巨大地震に関する研究成果はできるだけ早く社会へ伝える必要がある。同時に、信頼できる研究を進めることも重要である。

キーワード：貞観地震、東北地方太平洋沖地震、津波堆積物、成果公表、減災

Reconstruction of the 869 Jogan tsunami and lessons of the 2011 Tohoku earthquake

– Significance of ancient earthquake studies and problems in announcing study results to society –

Yukinobu OKAMURA

To estimate the magnitude of the 869 Jogan tsunami (described in the historical record), we surveyed tsunami deposits and constructed a source-fault model by combining geological data with geophysical simulation. Although the 2011 Tohoku earthquake was much larger than the earthquake estimated by our Jogan model, there were similarities: the 2011 earthquake proved that deposits are evidence of tsunamis in the past, and reliable warnings of future giant tsunamis. Our study results on the Jogan tsunami were submitted to the Headquarters of Earthquake Research Promotion, and in March 2011, the evaluation was near completion. However, the earthquake occurred just before a giant tsunami warning could be issued. We need to announce our study results to society as quickly as possible so as not to repeat such a mistake. Moreover, we have to concurrently carry out reliable studies based on rigorous surveys.

Keywords: Jogan earthquake, Tohoku-oki earthquake, tsunami deposits, announcement, disaster mitigation

1 はじめに

地震研究の最終的な目標は地震災害の軽減につながることである。1995年阪神大震災以降、地震研究は防災・減災を意識した調査研究に力が入れられてきたが、その後も活断層として想定されていない場所で地震が発生し、2011年東北地方太平洋沖地震でも有効な警告を事前に出せなかった。特に我々のグループでは、数年前から西暦869年に仙台平野を襲った貞観地震に伴う津波の研究を行っていたが、その結果が地域の防災対策に反映される前にこのような大震災が発生してしまったことが、残念でならない。自然現象を予測することの難しさがあらためて浮き彫りにされたが、この震災によって、地球物理学に基づいた地震研究の弱点が明らかになり、対照的に産総研の地質学をベースとした過去の地震を明らかにする研究(古地震研究)が注目されたことも事実である。

この報告では、歴史学、地質学、地球物理学的研究を

統合して西暦869年貞観地震および津波を復元しようとしていた産総研の研究手法を紹介するとともに、東北地方太平洋沖地震によって明らかになった津波堆積物から津波規模を推定する研究の重要性と課題、さらにその成果を社会に周知して減災に結びつけるための問題点について紹介する。また、地震の前と後で、地震研究に対する社会の期待や要求がどのように変わったのか、その状況で産総研がどのように社会の要望に応じていくべきかを検討する。

2 地震の評価方法

1995年阪神大震災を契機に文部科学省(当時の科学技術庁)に地震調査研究推進本部(以下、地震本部と呼ぶ。)が設置され、その主導によって地震研究はそれまでの理学的な研究を中心としたものから、地震防災につながる研究へと方向性を変えてきた。その地震研究推進本部の最も重要な事業の一つが「地震の長期評価」である^[1]。

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

Original manuscript received March 1, 2012, Revisions received June 4, 2012, Accepted June 8, 2012

大地震は、およそ同じ場所で同程度の規模で繰り返すという前提に立ち、過去の地震の発生域、規模および履歴に関する情報に基づいて、将来発生する地震が予測されてきた。この場合、過去の地震についてどこまで信頼性が高い情報をもっているかによって、想定する地震の信頼性が決まってくる。

地震の記録として最も精度が高いものは地震計の記録であるが、過去約 100 年間の情報しか存在しない（図 1）。それ以前の地震記録としては、歴史記録がある。最も古い地震に関する歴史記録は、西暦 599 年の地震であるとされている^[2]が、古い時代ほど記録の頻度が少なく、情報量も少ないため、過去の地震規模を推定する情報として不十分な場合が多い。地震規模を推定するために十分な質や量の歴史記録が残るのは、多くの場合は、江戸時代以降である。歴史記録の最大の長所は地震被害を受けた場所と発生日がおよそ正確にわかることであり、過去の地震記録として広く活用されてきた。それより長い期間の過去の地震に関する情報を提供してくれるのが、津波堆積物や活断層等の地質記録で、地震に伴う地殻変動や津波が地形や地層に残されている。このような自然の中に刻まれた過去の大地震や巨大津波の記録は、発生年代に関してはかなりの誤差が含まれるが、数千年以上の期間にわたって過去の地震および津波に関する情報が得られることが大きな利点である。

一般に活断層の活動間隔は千年以上と長いため、歴史記録から最新の活動のみが明らかになる場合もあるが、多くの場合は歴史記録に見当たらず、自然が残した活動記録に頼るしかない。一方、海溝型地震は数十年から 200 年程度の発生間隔をもつことが多く、歴史記録を用いることによって複数回の地震発生履歴や地震規模に関する情報を得ることができる^[3]。東海地震や南海地震については、1000 年以上前の地震から 9 回の歴史記録が残されている^[2]。日本海溝ではほとんどの記録が江戸時代以降である

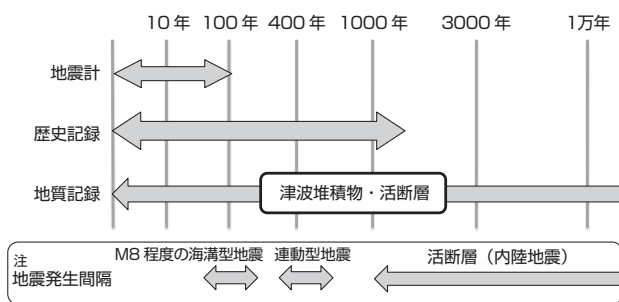


図 1 過去の地震に関する情報が存在する期間と地震の発生間隔
 巨大地震の発生間隔より長い期間の記録を確実にカバーできるのは地質記録だけである。注：地震発生間隔は、異なるタイプのおおよその地震発生間隔を示しており、地震の発生時期を示しているわけではない。

が、マグニチュード 7 から 8 程度の地震が繰り返し発生していた。このような歴史記録に基づいて、海溝型地震の予測が行われてきた^[4]。

歴史記録からは認識されていない巨大津波の証拠は北海道東部の太平洋沿岸域で見つかった。十勝、釧路、根室地方の太平洋沿岸域において、歴史上知られている津波の浸水域より奥深くまで分布する津波堆積物が広範囲で見つかったのである^{[5][6]}。この海域では、十勝沖地震や根室沖地震等マグニチュード 8 前後の地震が数十年から百年程度の間隔で発生してきているが、巨大津波はそれら複数の地震が同時に発生する連動型地震が原因であると考えられた^{[7][9]}。最後の巨大津波は 17 世紀に発生したと推定されているが、歴史記録が浅い北海道では、その状況がはっきりとわかる記録は存在しない。津波堆積物の調査と解析によって、巨大津波の原因となった地震はマグニチュードが 8.5 程度で、発生間隔は約 500 年と推定された。これら研究によって、地質学的な調査・研究から過去の地震・津波規模が再現できること、また、マグニチュード 8 程度の海溝型地震が繰り返し発生している場所でも、それらの規模を大きく上回る巨大地震と津波がまれに発生することが明らかになった。このような考えが正しいことは 2004 年スマトラ沖地震によって証明された。

3 これまでの東北地方の地震想定限界

これまでの東北地方の太平洋側で発生する海溝型地震は、主に江戸時代以降の歴史記録に基づいて評価され、予測されていた。三陸沖を除くと、それらの地震はマグニチュード 7～8 程度の規模で、マグニチュード 9 前後のものは知られていなかった。三陸海岸では 1611 年慶長三陸津波、1896 年明治三陸津波、1933 年昭和三陸津波が発生していることから、津波に対する対策が行われ、意識も高かったと考えられる。しかし、仙台平野以南では、巨大津波に対する意識は極めて不十分であった。ただし、1611 年慶長三陸津波に関しては仙台平野の沿岸部が大きな被害を受けたことが知られており^[10]、それ以前にも巨大津波が来襲したことが歴史記録に残されている^[11]。それが、西暦 869 年の貞観地震とそれに伴う津波である。平安時代に京都の朝廷で作成された日本三代実録には、陸奥国で大地震があり、人が立ってられないほど揺れ、多くの建物が倒壊したと、津波が内陸部まで広く浸したことが記述されている。しかし、その記述は当時の陸奥国の国府があった多賀城の状況だと考えられ、津波の規模や被害の広がりについては十分には明らかになっていなかった。

4 貞観津波の復元

西暦 869 年の貞観地震によって発生した津波（以下、貞観津波と呼ぶ）を再現するための調査研究は、野外での津波堆積物調査、地質試料の分析、津波波源モデルの構築からなる。津波堆積物という地質学的な証拠を徹底的に明らかにし、地球物理学的手法を適用して過去の地震像を推定することが、産総研の古津波研究の大きな特徴である^[12]（図 2）。

野外調査では津波堆積物の分布域を明らかにする。津波堆積物がうまく保存されているかどうかは、さまざまな自然条件やその後の人間活動が関係していることから、現場で数多く掘削することが重要である（図 3）。多くの地点でのデータを積み上げることによって、津波堆積物の分布域を精度よく確認することができる。また、見かけが同じでも年代が異なる津波堆積物が複数枚存在することから、それらを間違いなく対比するためにも、密度の高い調査が必要となる。同時に波源モデルの信頼性を向上させるためには、できるだけ広域的な調査が必要である。

貞観の地震と津波については、吉田が 1906 年に歴史記録を考察し、注意を喚起した^[11]。仙台平野で貞観津波によって形成された津波堆積物が 1990 年以降に報告された^{[13][14]}。それらの調査結果を参考にしつつ、石巻周辺から福島県北部まで調査範囲を広げて津波堆積物の分布を明らかにするとともに、当時の海岸線位置を復元した（図 4）。

石巻では現在の海岸線から 5 km 以上内陸で貞観津波の堆積物が見つかった^[15]。貞観以前の津波堆積物も少なくとも 2 層が、また貞観後にも 2 層の津波堆積物が確認

できた。石巻平野は過去数千年間で次第に広がってきており、貞観津波来襲時には現在の海岸線より約 1.5 km 内陸に海岸が位置していたことも明らかになった。

仙台平野では現在の海岸線から 4 km 以上内陸まで津波堆積物が分布すること、当時の海岸線は 1～1.5 km 内陸にあったこと等が明らかになった。貞観の津波以前にも 3 回以上の、貞観後は少なくとも 1 回の津波浸水があったと推定された^[16]。

野外調査で得られた津波堆積物の分析によって、津波発生年代および地震に伴う地殻変動を推定することができる。年代を推定するため、津波堆積物の上位と下位に分布する泥炭層中から植物の破片を取り出して、放射性炭素¹⁴Cを測定した。この年代測定法は測定試料の選び方によって大きな誤差が出てしまうため、測定試料の選定に十分な配慮を行っている。年代測定の結果、津波堆積物はおおよそ 500 年程度の間隔で形成されていることが明らかになった。また、堆積物中の珪藻化石を分析することによって、福島県北部では貞観津波およびその前の津波発生時に沈降したことも推定した。

これらの津波堆積物分布域まで浸水する津波を発生させた地震の震源位置と規模を数値シミュレーションによって推定した。津波堆積物の分布域だけから震源域の位置を決めることは難しいので、日本海溝沿いで過去に発生したことのある地震を参考に、異なる地震のタイプと規模を想定し、それぞれの断層モデルについて震源位置と地震規模を変化させ（図 5）、それぞれ浸水域を計算し、津波堆積物の分布域と比較した（図 6）。その結果、津波堆積

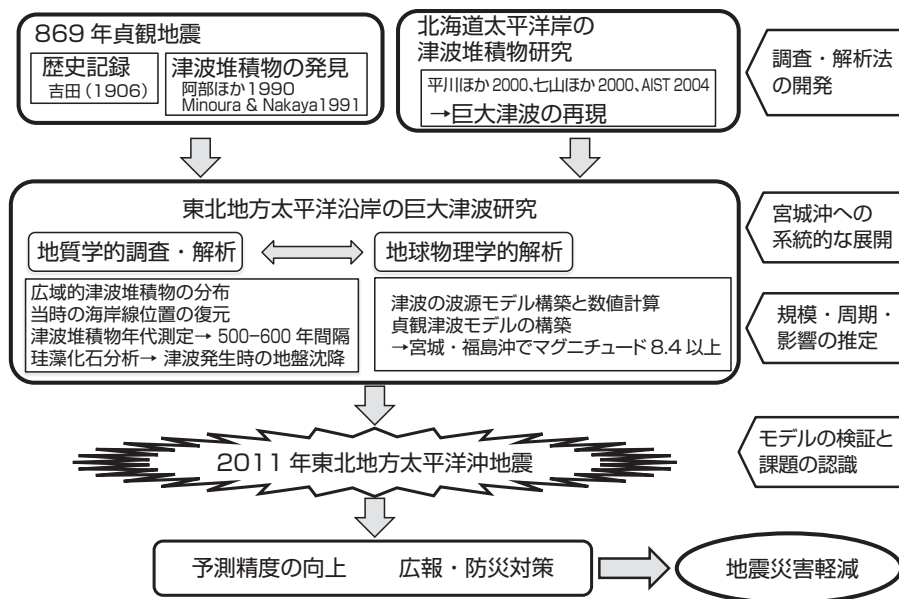


図 2 過去の巨大津波に関する研究の進展

物の分布域まで津波が浸水するためには、宮城県から福島県沖の深さ 15-46 km のプレート境界面上で長さ 200



図3 仙台平野における津波堆積物調査
収穫の終わった水田で、ジオスライサーを用いて地下の地層を抜き取る。

km、幅 100 km の範囲が 7 m の滑り（断層変位）を生じるマグニチュード 8.4 の地震が発生する必要があることを明らかにした^{[17][18]}。ただし、この震源断層モデルの構築に当たって、津波浸水域が津波堆積物の分布域より広いことは考慮されておらず、また津波浸水域の北限と南限も明らかになっていない等、地震規模がさらに大きくなる可能性も認識していた^[12]（図7）。

5 地震によって評価された貞観地震のモデル

地震の予測研究が進歩しない大きな理由の一つに、実際に実験ができないことがある。現在使われている科学技術は、実験の繰り返しによって築き上げられたものであるし、その陰には多くの失敗があったはずである。一方、地震に限らず自然現象のスケールはケタ違いに大きい。そのため、実験室内で岩石破壊実験はできるが、その実験結果だけを用いて自然の地震を予測することはできない。高温高压下での岩石破壊・変形実験によって、地下深部での

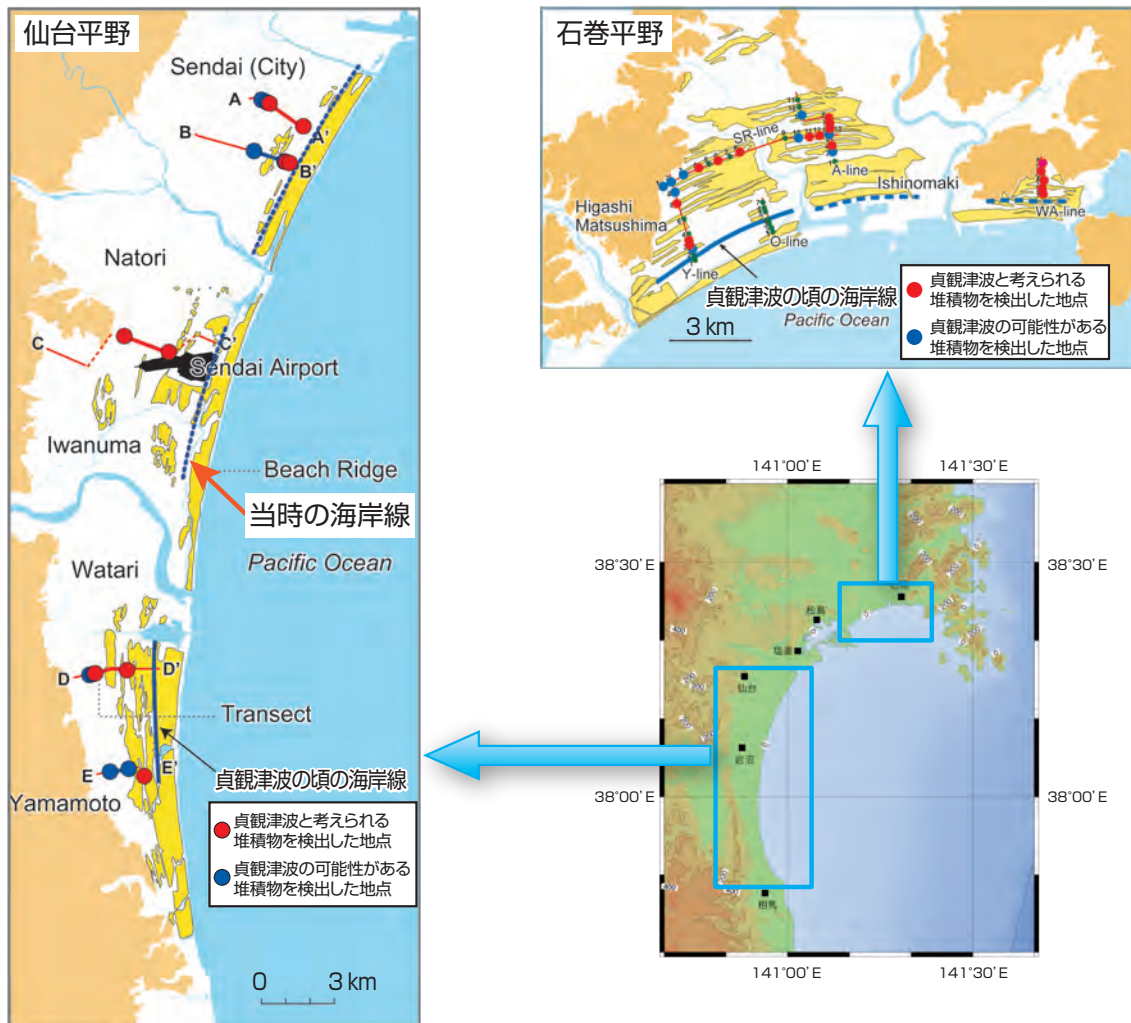


図4 石巻・仙台平野における貞観津波の分布域と当時の海岸線^[12]
いくつかの測線に沿って詳細な堆積物の調査を実施し、分布域を解明するとともに、当時の海岸線位置も確認した。

岩石の力学的な性質は明らかになりつつあるが、物質の多様性、流体の存在等地震が発生している地下深部の条件は未知のことが多くあり、それらの自然の条件を完全に実験室で再現することは不可能である。そのため、実際に発生した地震のデータを解析することによって地震学は進歩してきた。

津波堆積物等に基づいて過去の地震像を再現しても、それが正しいかどうかは、実際に地震が発生しないと検証できない。東北地方太平洋沖地震は、津波堆積物を用いた研究により過去の地震が推定されている場所ではじめて発生した巨大津波を伴う地震であり、古地震学的な研究の有効性が検証できる機会となった。

地震規模からみると、マグニチュード 8.4 以上と推定した貞観地震のモデルは、東北地方太平洋沖地震の震源域よりかなり小さいものであった。しかし、仙台平野では津波堆積物の海岸線からの到達距離には貞観地震と東北地方太平洋沖地震とは大きな違いはない^[19] (図 8)。さらに、東北地方太平洋沖地震によって形成された津波堆積物の調査から、津波堆積物(砂層)が形成された範囲より、津波(海水)は 1~2 km 程度内陸まで浸水していることが明らかになってきた^[19]。この知見は、津波堆積物の分布域から津波の規模を予測するために極めて重要である。この差を考慮して貞観地震の津波規模を再評価する必要があるし、他の海域での津波堆積物調査の結果にも適用することによって、津波規模の予測精度を向上させることができる。

このように、東北地方太平洋沖地震によって、津波堆積物が過去の巨大津波の証拠として信頼性が高いこと、その存在を自然からの重大な警告として受け止めるべきであることも実証された。一方で規模予測に関しては不十分な面があり、課題が明確になった。

6 地震研究の社会への周知

兵庫県南部地震前は、関西では地震が起こらないとの思い込みがあったといわれるが、六甲山が活断層の活動によって隆起してきたことや、神戸でいつかは大地震が発生する可能性があることは、地震以前から活断層の専門家の間では知られていた。しかし、そのような一部研究者の知見は地域の防災に活かされることはなかった。研究者による地震に関する研究成果を社会の地震防災に活かすためには、研究成果を客観的に評価し、防災上重要な信頼できる情報として国が社会に提供する必要があると判断され、地震本部が設置された(図 9)。

兵庫県南部地震の後、活断層の危険性が広く認識され、その活動履歴を明らかにするための調査が実施され、その結果に基づいて地震本部から活断層評価として公表されて

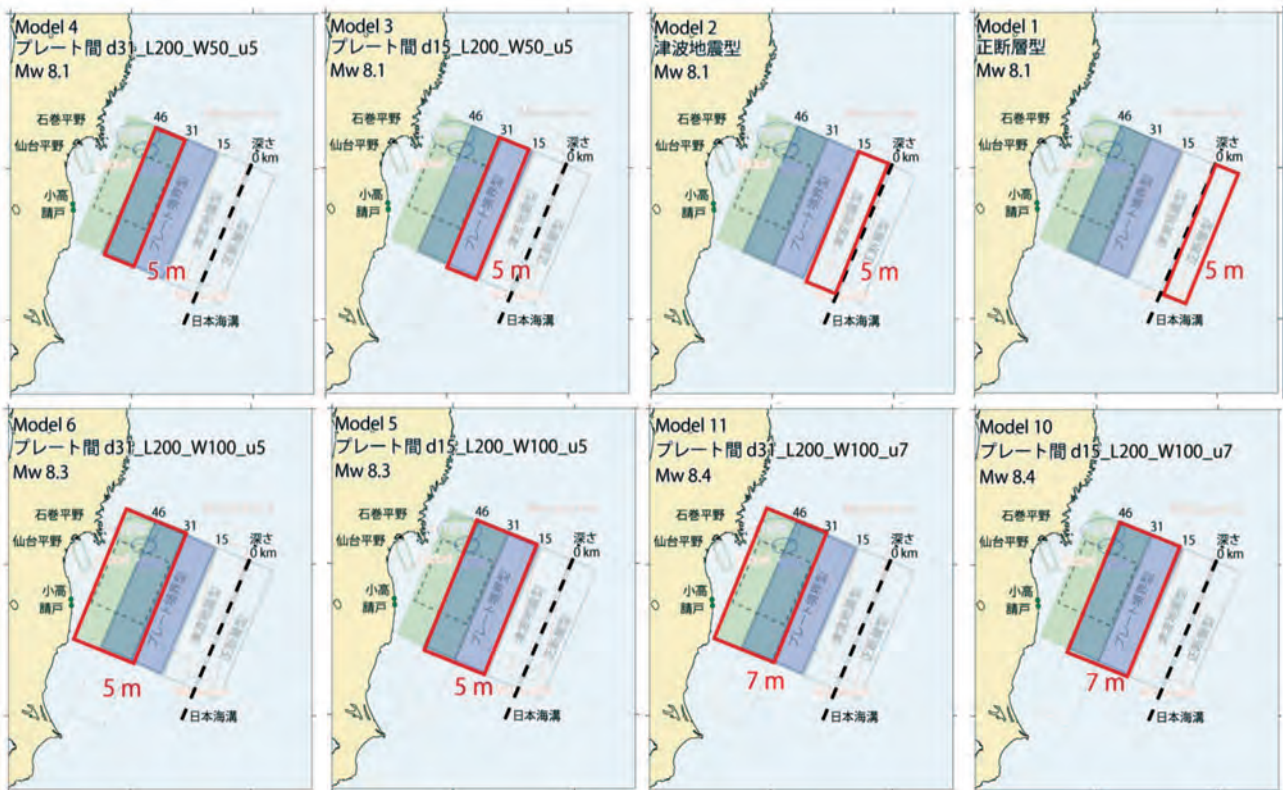


図 5 貞観津波の波源モデルの計算例（文献 [17][18] より編集）
東北沖で沈み込む太平洋プレート上に異なる規模の断層面を想定し、津波を計算。

きた。また、沈み込み帯で発生する海溝型地震についても主に歴史記録に基づいて評価が公表されていた。このように地震本部が地震の危険性を評価し、公表することによって、自治体や社会が危険性を認識し、対策を講じるという合理的なシステムが完成していた。

先に述べた貞観地震の研究成果についても、2010 年春に産総研から地震本部に研究成果が提出され、地震本部で約 1 年をかけて日本海溝全体の地震について評価の見直しが行われていた。東北地方太平洋沖地震が発生していなければ 4 月にも貞観地震の評価も含めて公表されていたと考えられる。公表されてもすぐに防災対策が実施できるわけではないから、被害軽減にどこまで役立ったかわからないが、少なくとも石巻平野、仙台平野、福島県沿岸に巨大津波が来襲する可能性があることを少しでも多くの人々に知ってもらえる機会にはなっていたはずである。

地震本部からの研究成果の公表が間に合わなかったことをとても悔しく思ったし、成果の公表や周知をより迅速にできていれば、少しでも被害を軽減することができたはずであったという悔いは消えないであろう。一方で地震発生前に我々は何もやっていなかったわけではない。研究成果は逐次学会で発表し、その内容はマスコミの関心を受けて、新聞・テレビ等でも報道されたが、地域の意識改革や防災対策に結びつくことはなかった。数は少ないが宮城県で一

般向けの講演も行った。参加者数は限られているが継続的に行っていれば、津波に対する意識を少しずつ変えることができたかもしれない。しかし、巨大津波の危険性を広く社会に警告することを産総研の研究者だけで行うことは能力を超えており、地震本部を中心とした情報伝達システムを活用することが最も効率的で効果的であると考えられる。地震本部を中心とした地震に関する情報の公表システムが存在する中で、そこからの最終的な評価が出る前に、自治体等が防災対策を積極的に推進することは困難であったと推定される。

地震本部が国としての地震の警告を社会に発信するというシステムは、やはりとても重要で必要である。しかし、国としての情報発信だけに、慎重になって時間がかかるという欠点がある。重大な災害になり得る研究成果については、最低限の客観的検証を迅速に行って公表するようなシステムがあってもいいのではないかと考えられる。

地震発生後、地震に対する社会の不安と関心が高まったため、多くの研究者による津波堆積物の調査や地震の予測に関する見解が、十分な検証がされる前からマスコミによって数多く報道されるようになった。しかし、研究途上の内容を社会に周知することには一長一短があると考えられる。長所はもちろん社会へ早く情報が流れることである。今回のような間に合わないという可能性をできるだけ小

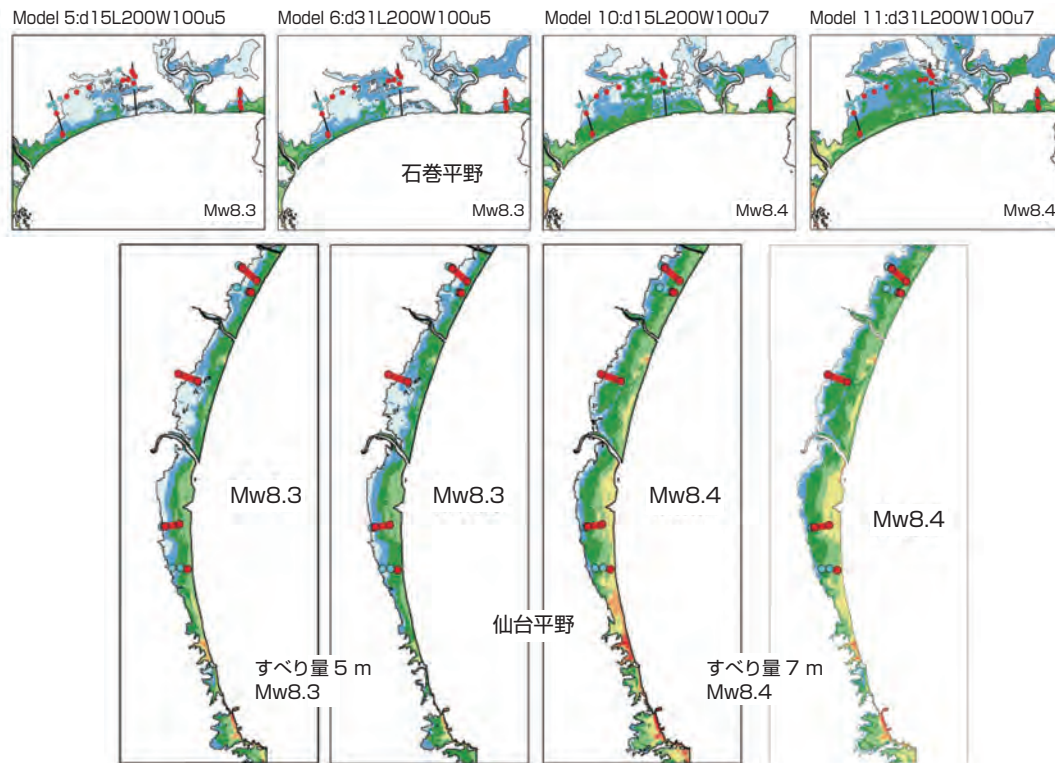


図 6 貞観津波の波源モデルに基づいた浸水域の計算例 (文献 [17][18] より編集)
 図 5 のモデル 5、6、10、11 による石巻平野 (上) と仙台平野 (下) の浸水域。最終的にモデル 10 (右から 2 番目) を貞観のモデルとした。

さくすることができる。一方で、信頼性が確認されていない研究途上の結果であることも忘れてはならない。マスコミは規模が大きな津波が予測されるという見解をすぐに取り上げるが、後になってその見解が否定された際には、その研究だけでなく、同様の研究に対する信頼性が低下する可能性がある。そのような混乱を避けるためにも、迅速に客観的評価を行うシステムが整備されることを期待する。

7 地震前後の社会の変化

東北地方太平洋沖地震の前は内陸地震が多発していたことから、日本社会では地震に対する意識は高かったと考えられるが、津波に対する意識は低かった。そのため、巨大津波が来襲する可能性があることへの理解を得て、対策に結びつけるために、説得力のある研究結果を示す必要があり、津波堆積物調査を時間をかけて丁寧に行った。また、津波堆積物調査の結果を用いて津波規模を推定する際にも、地震や津波の規模を根拠なく大きくすることは説得力を失うことから、明確な証拠がある範囲での地震や津波の想定を行ってきた。地震発生後は、これらの方針が正しかったか疑問に思った時期もあった。しかし、明確な根拠を示さずに巨大津波の予測を公表しても、地震前に社会がそのモデルを受け入る可能性は低かったであろう。地震本部からの成果公表が地震に間に合わなかったことは極めて

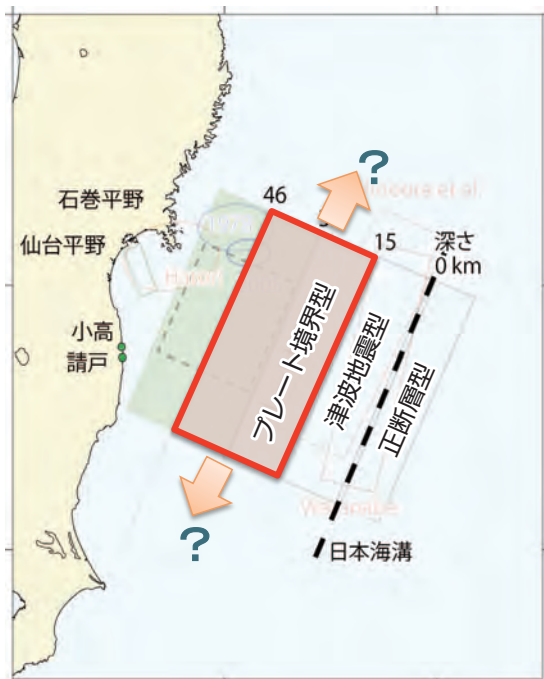


図7 地震前に想定した貞観津波の波源断層モデル（モデル10）¹¹⁷⁾¹¹⁸⁾
石巻平野から福島県北部までのデータに基づいて作成されているので、さらに北側および南側まで広がる可能性はあった。

残念であるが、上記の研究方針は間違っていなかったと考えている。

3月11日に東北地方の沿岸部を襲った津波によって、津波に対する不安が一気に高まった。地震前の国や自治体には、想定する地震の規模を十分な根拠もなく大きくすることに大きな抵抗があったが、地震後は最大規模の地震・津波を想定するという方針に変えた¹²⁰⁾。過去に実際に発生したことが確認された地震を想定するのではなく、これ以上大きな地震や津波は発生し得ないという最大規模の地震を想定するという方針である。地震の専門家は、どこまで想定規模を大きくする必要があるかについて、判断を迫られている。地震研究への要求が180度変わったといっても過言ではない。残念ながら、現在の地球科学は適切な最大の地震規模を決めることができない。結果として、必要以上に大きな地震および津波を想定する可能性が高い。最大の地震規模を適切に決める研究が必要とされている。

8 今後の課題

日本社会は東北地方太平洋沖地震の衝撃から当分の間

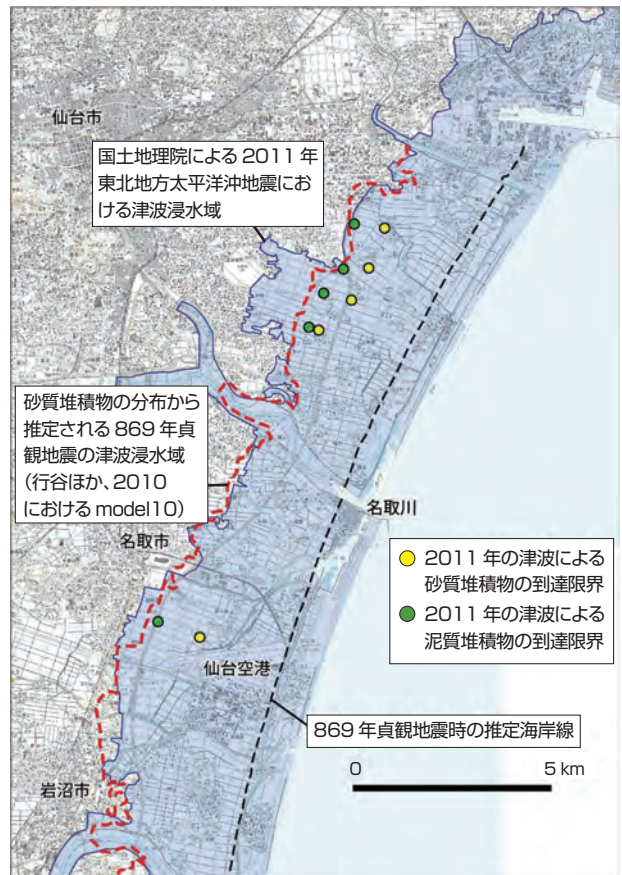


図8 貞観津波モデルで計算した浸水域と2011年東北地方太平洋沖地震の浸水域¹¹⁹⁾
貞観の津波堆積物分布域に基づいて計算した津波浸水域と、2011年の津波浸水域がおおよそ一致する。

逃れることはできないであろう。また、今後どのような想定がなされようと、地震や津波への不安が消えることもないと考えられる。被害をできるだけ軽減し、不安感をできるだけ小さくするためにも防災対策を着実に実施していくことが求められるが、適切なレベルの対策を決めることは容易ではない。また、防災対策を進めても、自然災害に対する危機意識を持続させることも忘れてはならない。そのようなことを念頭に産総研地質分野の役割を考えると、やはり過去の地震についてできるだけ詳しい調査を行い、どのような地震がどこで発生していたかを明らかにしていくことと、その情報を社会に発信し続けることが最も重要なミッションであろう。過去の地震に関する情報とともに、現在の自然科学のレベルで解明できること、できないことを提示する必要がある。その上で、どのように対策を行うかを社会全体で考えていくことが必要である。

産総研の研究成果が社会に広く活用されるためには、地震本部から国によって再評価され、周知されるシステムが今後も必要であると述べた。しかし、それだけでは地域社会全体に十分な情報が行き渡らない可能性が高いし、時間もかかる。地震本部の評価がどのような情報に基づいているのか、どのような課題があるのか等について自治体や地域社会等にもできるだけ詳しい情報を産総研から直接提供し、同時に情報交換を積極的に進めることも必要であると考えられる。さらに、国の評価が公表される前に自治体等への情報提供も考えてよいだろう。そのような、情報提供、情報交換を行うためには、県等の自治体との交流を定期的に行い、信頼関係を築いていく必要がある。

同時に、日本列島の地質学的な特性等の、地質一般に関する知識もわかりやすく提供することによって、自然を理解し、さまざまな災害を想定した上で、日本の都市計画や

国土利用の方法を考えていく必要がある。日本人は今までも数多くの自然災害による被害を受けてきた。その苦難を克服して今日の繁栄を築き上げてきた。例えば建築物の耐震性は世界的にも最も進んだレベルにあると考えられる。しかし、今の社会は全体として自然災害に対して脆弱になっていることは否定できない。その理由の一つに、自然への理解が足りなくなってきたことが挙げられるように思う。地質学に基づいた過去数万年からそれ以上の期間に起こってきた日本列島の変動を理解することによって、自然災害に対する心構えも根付くと期待される。そのために必要な情報を社会に提供していくことが、産総研地質分野のミッションであろう。

謝辞

貞観津波の研究は、産業技術総合研究所活断層・地震研究センターの、宍倉正展研究チーム長、澤井祐紀主任研究員、行谷佑一研究員、東京大学地震研究所佐竹健治教授らとの協力体制で実施されました。この研究の実施に当たっては、現地の地権者および関係機関にはご理解を頂き、ご協力をしていただきました。以上の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 地震調査研究推進本部:地震に関する基盤的調査観測計画 <http://www.jishin.go.jp/main/seisaku/hokoku97/s8kei.htm#1-1> (1997).
- [2] 宇佐美龍夫: 最新版日本被害地震総覧 416-2001, 東京大学出版会 (2003).
- [3] 石橋克彦, 佐竹健治: 古地震研究によるプレート境界巨大地震の長期予測の問題点-日本付近のプレート沈み込み帯を中心として-, *地震*, 50, 別冊, 1-21 (1998).
- [4] 地震調査研究推進本部: 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価の一部改訂について http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09mar_sanriku/index.htm (2009).
- [5] 平川一臣, 中村有吾, 原口 強: 北海道十勝沿岸地域における巨大津波と再来間隔, *月刊地球*, 号外 28, 154-161 (2000).
- [6] 七山 太, 佐竹 健治, 下川 浩一, 重野 聖之, 古川 竜太, 広田 勲, 牧野 彰人, 野島 順二, 小板橋 重一, 石井 正之: 千島海溝沿岸域, 霧多布湿原において確認された巨大地震津波イベント, *月刊地球*, 号外 28, 139-146 (2000).
- [7] F. Nanayama, K. Satake, R. Furukawa, K. Shimokawa, B. F. Atwater, K. Shigeno and S. Yamaki: Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench, *Nature*, 424, 660-663, doi:10.1038/nature01864 (2003).
- [8] 佐竹健治, 七山 太: 北海道太平洋岸の津波浸水履歴図, 数値地質図 EQ-1 (2004).
- [9] K. Satake, F. Nanayama and S. Yamaki: Fault models of unusual tsunami in the 17th century along the Kuril trench, *Earth Planets Space*, 60, 925-935 (2008).
- [10] 都司嘉宣, 上田和枝: 慶長16年(1611), 延宝5年(1677), 宝暦12年(1763), 寛政5年(1793), および安政3年(1856)の各三陸地震津波の検証, *歴史地震*, 11, 75-106 (1995).
- [11] 吉田東伍: 貞観11年陸奥府城の震動洪溢, *歴史地理*, 8 (12), 1033-1040 (1906).

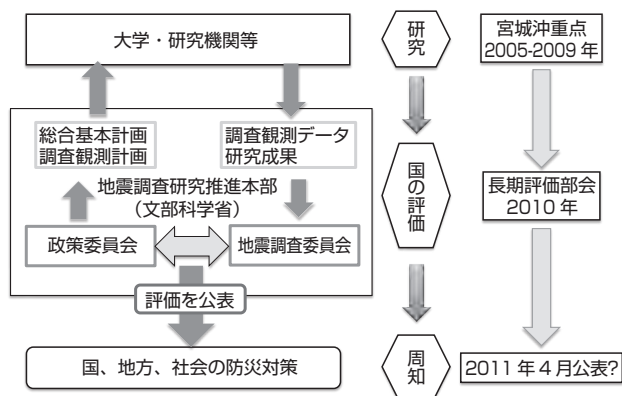


図9 地震調査研究推進本部の役割
文部科学省に設置された地震調査研究推進本部は、地震に関連した調査・研究機関の情報を収集し、再評価して将来発生する地震の規模や確率を公表している。

- [12] 宍倉正展, 澤井祐紀, 行谷佑一, 岡村行信: 平安の人々が見た巨大津波を再現する - 西暦869年貞観津波 -, *AFERC ニュース*, 16 (2010).
- [13] 阿部 壽, 菅原喜貞, 千釜 章: 仙台平野における貞観11年(869年)三陸津波の痕跡高の推定, *地震*, 43, 513-525 (1990).
- [14] K. Minoura and S. Nakaya: Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan, *Journal of Geology*, 99, 265-287 (1991).
- [15] 宍倉正展, 澤井祐紀, 岡村行信, 小松原純子, Than Tin Aung, 石山達也, 藤原 治, 藤野滋弘: 石巻平野における津波堆積物の分布と年代, *活断層・古地震研究報告*, 7, 31-46 (2007).
- [16] 澤井祐紀, 岡村行信, 宍倉正展, 松浦旅人, Than Tin Aung, 小松原純子, 藤井雄士郎: 仙台平野の堆積物に記録された歴史時代の巨大津波 - 1611年慶長三陸津波と869年貞観津波の浸水域 -, *地質ニュース*, 624, 36-41 (2006).
- [17] 佐竹健治, 行谷佑一, 山木 滋: 石巻・仙台平野における869年貞観津波の数値シミュレーション, *活断層・古地震研究報告*, 8, 71-89 (2008).
- [18] 行谷佑一, 佐竹健治, 山木 滋: 宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における869年貞観津波の数値シミュレーション, *活断層・古地震研究報告*, 10, 1-21 (2010).
- [19] 宍倉正展: 津波堆積物からみた869年貞観地震と2011年東北地方太平洋沖地震について, *日本地震学会ニュースレター*, 23 (3), (2011).
- [20] 中央防災会議: 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告, 中央防災会議 http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinihon/index_higashi.html (2011).

執筆者略歴

岡村 行信 (おかむら ゆきのぶ)

1980年名古屋大学理学研究科修士課程修了後、通商産業省工業技術院地質調査所に入所し、日本周辺海域の海底地質調査に約24年間かかわり、海洋地質図を作成するとともに、地質構造の形成過程について研究してきた。2004年から活断層研究センターで津波堆積物の研究に参加、2009年から活断層・地震研究センター長。



査読者との議論

議論1 全般的コメント1

コメント (富樫 茂子: 産業技術総合研究所)

この論文は、津波堆積物という地質学的な証拠を徹底的に明らかにし、これに地球物理学的手法を適用して過去の地震像を推定して、長期的な地震予測により防災に資する研究について、科学の社会貢献の方法を論じています。

具体的には、1) 津波堆積物の地質記録、歴史記録、観測記録等、時間スケールの異なるデータを統合し、地球物理的モデルとしてシミュレーションすることにより、過去の地震の復元モデルを提示し、現実には発生した地震によるモデルの検証を通じて、予測精度を向上させるという科学的方法論を示しています。さらに、2) 研究途上であっても最新の研究成果を、社会に迅速かつ不確定性の範囲も含めて正確に周知し、現実的な防災対策に貢献するための方法を論じています。

これらは、科学の社会貢献の方法論としての観点から、重要な問題を提起しており、*Synthesiology* 論文として適切と考えます。

査読を通じて、上記の方法論としての意義をより明確に記述するよう修正されました。

議論2 全般的コメント2

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

古地震を復元するという研究目標を達成するために、津波堆積物の地質調査という要素的な研究と地球物理的な方法とを統合した地震モデル構築の手法は、優れた第2種基礎研究だと思います。東北地方太平洋沖地震が起こる前に、この研究を高い完成度で仕上げていたことに敬意を表します。

この研究で貞観地震が高い信頼性で復元されました。研究成果の周知が、今次実際に起こった東北地方太平洋沖地震と津波に対して時間的に十分間に合わなかったことは残念ですが、一方で、構築した地震モデルが直ちに現実の事象によって検証されたことは、全くの偶然であったにしろ、今後の大規模地震への我々の対応に大きな意義をもつものと思います。将来あると考えられる大規模な東海、東南海、南海地震とそれによる津波を高い信頼性で予測する上で、今回構築された地震モデルが大いに役立つと思います。

議論3 地質学と地球物理学のアプローチ

コメント (小野 晃)

この論文で何か所か、産総研地質分野の役割、ミッション、あり方について言及されています。*Synthesiology* 誌が広い分野の読者から読まれることを考えますと、論点を「産総研」に閉じるよりも、「地震学」あるいは「地震研究」に広げることはできないでしょうか。

回答 (岡村 行信)

「地震学」あるいは「地震研究」の主流は地球物理学をベースとした研究で、産総研が進めている地質学をベースとする研究は少数派でした。その少数派の研究が東北地方太平洋沖地震で注目されたわけですが、主流の研究者達も事前に警告を出せなかったことの原因解明や、そのことを教訓とした今後の研究の方向性を議論しているところでは、この論文では、地質学をベースとする地震研究の重要性を強調し、また課題を議論することを目的としております。地震学全体のあり方で論点を広げることは本題から外れるうえ、私自身にも荷が重い課題です。「はじめに」で産総研の地震研究と、地震研究主流との違いを簡単に追記しました。

議論4 古津波研究についての科学的方法論としてのフローチャートの提示

コメント (富樫 茂子)

古津波研究についての科学的方法論としてやや一般化したフローチャートにさせていただけると理解しやすいのではないかと思います。

回答 (岡村 行信)

例を参考に、私なりにアレンジして、図2を作成しました。

議論5 「迅速に客観的評価を行うシステムの整備」に関するアクション

コメント (富樫 茂子)

6章末尾の「迅速に客観的評価を行うシステムの整備」の提案に関してのアクションはどのようなものでしょうか？

回答 (岡村 行信)

客観的評価は、地震調査委員会のような国の機関が行う必要があると考えられ、国の評価プロセスがスピードアップされることが最も効果的だと思いますが、その実現は簡単ではありません。もう一つの方法として、正しい津波堆積物調査の方法を論文文化して公表することを進めています。各研究者が信頼性の高い調査結果を公表するようになれば、結果として信頼性の高い津波評価が早く社会に広まることになると期待しています。

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) 単セル / スタックの 発電性能試験方法の規格化における不確かさ評価

— SOFCの普及に向けた試験方法の規格化と測定結果の信頼性担保 —

門馬 昭彦*、高野 清南、田中 洋平、嘉藤 徹

高効率発電が期待されるSOFCは、実用化の段階に近づきつつあるが本格的な商業化に向けて試験方法の国際規格を作成し、商取引の活性化による普及を考えなければならない段階に来ている。規格作成にあたってはその試験対象について中身を具体的に記述することや具体的な形を想定して作ることができないこと、さらに試験条件にしても規格化して統一することが適当でないことという制約があった。一方、試験結果の信頼性を担保するために試験結果の不確かさ評価を導入したが、その性能が多くのパラメータに依存するSOFCの試験結果の不確かさ評価については、規格においてその評価方法を具体的に規定しておく必要があると考えた。この論文では、我々がSOFCの試験方法の国際規格作成および試験結果の不確かさ評価にあたって行った取り組みを報告する。

キーワード：固体酸化物形燃料電池、SOFC、不確かさ、性能評価、規格標準化

Evaluating uncertainty in the standardization of SOFC cell/stack power generation performance tests

– Standardization of test methods and ensuring reliability of test results for the dissemination of SOFC –

Akihiko MOMMA*, Kiyonami TAKANO, Yohei TANAKA and Tohru KATO

SOFC (solid oxide fuel cell) is a very promising technology that achieves high power generation efficiency, while being very nearly usable. It is high time we considered enhancing commercialization and dissemination of SOFC by setting a standard for the evaluation method of SOFC cell/stack performance. In setting the standard, it is neither appropriate to describe the specific content or form of the test object, nor appropriate to unify the test conditions, because each type of SOFC has been developed for a different application owing to the diversity of SOFC. On the other hand, uncertainty evaluation of the test results has been introduced to ensure reliability. In setting a standard for the SOFC performance test, it is necessary that the method for uncertainty evaluation be specifically described in the text, because the performance of SOFC depends on many parameters. This report describes the approaches we have taken in order to set the international standard of the SOFC test method and to evaluate the uncertainty of the test results.

Keywords: Solid oxide fuel cell, SOFC, uncertainty, performance evaluation, standardization

1 はじめに

1970年代から我が国において国家プロジェクトとしても研究開発が進められてきた固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は、ここへ来て急速に実用段階に近づきつつある。すでに海外のいくつかのメーカーは1 kW ~ 数百 kW 規模のSOFCシステムを常に供給する体制を整えているものと思われ、日本においても昨年度から700 W 規模のSOFCがエネファームの中核技術として市場に出はじめた。

このようにSOFCの開発は、すでに一部のメーカーによりシステムが実用化・商業化されている状況ではあるが、実際にはセルやスタックレベルの製品が世間一般で

十分に信頼性にたつデータ付きで取引されているというわけではない。それらは依然、多くの企業において開発段階であり、実際、多くの場合、長期耐久性や製造コスト等の課題が残されている。これらの課題を克服するために欧州ではFCTESTNETやその後継プロジェクトであるFCTESQA^[1]において試験条件の統一化・標準化を図って、研究開発が加速してきた経緯がある。ここでの標準化の作業は、主に試験方法や試験条件の統一化によってラウンドロビンテスト等で行った試験結果の国際間の比較を容易にするために進められていた。そのため試験条件等は、とても具体的であり、想定しているセルやスタック (セルを

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2
Energy Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: mo.momma@aist.go.jp

Original manuscript received April 3, 2012, Revisions received May 2, 2012, Accepted May 11, 2012

積層したもの) も欧州が開発を進めている平板タイプのみが主たる対象となっていた。

これに対して日本においては NEDO 等による SOFC 関連の R&D プロジェクトは存在していたが、試験方法の規格・標準化の動きについては欧州等に対して遅れていた。

一方、日本では SOFC の特徴的な動作環境である高温において、さまざまな使用環境条件を想定し、機械的強度の確保や劣化速度の低減等による信頼性の確保をアプリケーションごとに実現するために、さまざまな指向性をもった研究開発が行われてきた。その結果として、さまざまなタイプ(幾何学的な形状、単セル当たりの大きさ)の SOFC が開発されつつある。それぞれのタイプのセルには適切な動作条件が存在するので、これらの条件を統一して試験条件を設定することは、さまざまなタイプの SOFC があらかじめ想定した使用条件を無視して比較することにつながり、適切な比較ではなく、比較することの意義も疑わしくなる。

上記のような事情により、商取引を想定した SOFC 試験法の国際規格の作成に当たっては、日本主導で行う必要があった。日本主導で行うことによってさまざまな使用条件を想定したさまざまなタイプの SOFC が公正に試験され、その結果としての試験データを踏まえて商取引が行われることによって、さまざまなアプリケーションに適切な SOFC が選ばれ、SOFC の発展・普及が加速されることが期待されるのである。

我々のグループでは、燃料電池の燃料として使用されることが期待されている水素や都市ガスについて流量標準の開発^[2]や SOFC システムの高精度効率測定手法の開発等^[3]を通して効率測定方法の JIS TS (Technical Specification:

技術仕様書)^[4]の作成等、SOFC の普及や開発促進につながる標準化についての研究をいち早く進めてきた(図 1)。また、さまざまなタイプの単セルの測定やスタック、システムの測定を通じて SOFC の計測技術を確立してきた^[5]。

これらの技術および経験のもと、SOFC の今後の展開を見越して 2007 年度から経済産業省の委託を受け、SOFC 単セル/スタックの試験方法の標準化・規格化の作業を開始した。実用化が近いと思われた SOFC の商取引の円滑化および SOFC の普及をそれによって加速させることが重要であると考えたからである。

SOFC の性能試験の国際規格を作成する際には、データの信頼性を担保するために、得られたデータの精度について言及する必要がある。IEC やその他の国際規格の組織では、国際標準や国家標準へのトレーサビリティが確保された概念である「不確かさ」を、測定結果の信頼性の定量的評価の尺度として用いることを提唱している。不確かさ付きの測定値を試験のアウトプットとして提出することによって、初めて試験結果の国際比較ができるようになり、規格が国際的な規定として意味のあるものとなる。

このような状況を踏まえて我々のグループでは、JIS TS や 2007 年度に実施した 10 kW SOFC 実システムを用いた効率測定において、入出力の計測値の不確かさ解析を行い、測定した効率を不確かさ付きで評価し、計測の不確かさ評価の導入を積極的に図ってきた^[6]。

ここでは、2007 年度から 3 年間の経済産業省の委託による SOFC セル・スタックの性能試験法に関する国際規格の作成と、その中で扱う不確かさ評価への我々のグループによる取り組みについて記す。

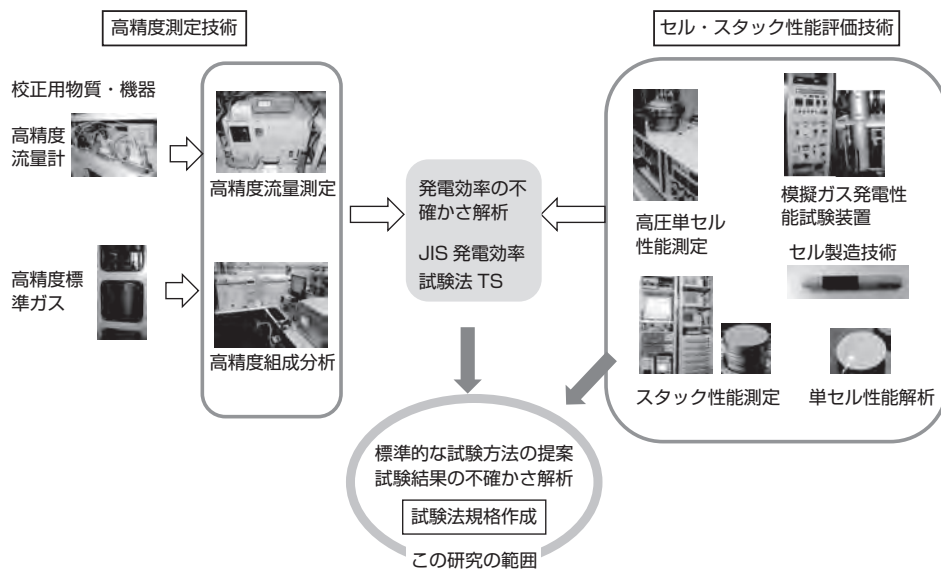


図 1 この研究における要素技術の統合と相互関係

2 研究目標とその実現に向けたシナリオ

これまで述べたとおり、この研究の目標は SOFC 試験法の国際規格提案であり、その中に現状レベルの技術において実施可能な不確かさ評価式・評価方法を盛り込むことである。

最初のステップは規格案を審議するための委員会を組織することであった。我々は委員会を組織するに当たり、事前にアンケート調査を含む聞き取り調査を行い、主に SOFC のメーカーが行っている試験方法や試験方法の規格化にあたって、彼らがどのような考えをもっているかについて調査を行った。委員会の委員の構成はメーカー、ユーザー、中立者からそれぞれ同数となるようにし、中立的な立場で委員会の議論が行われるように考慮する必要がある。しかし、SOFC が依然として開発途上の技術であり、正確な意味でのユーザーがまだあまり存在しないことにより、結果的に委員会での議論がどうしてもメーカー寄りに進む傾向があったことは反省点である。

第二のステップは規格の測定対象を確定することである。上述の様に SOFC ではさまざまな形状、大きさのセル/スタックが開発されつつあるので、規格においてセルやスタックの細部にわたって、試験における部品やその状態および試験条件を規定することは容易ではないし、現実的な方法ではない。ここは、我々が試験法の規格を作成し始めるにあたって最も悩んだ部分である。結果として我々が選択した方法は、以下のとおりである。

- ① 試験対象を「セル/スタックアセンブリー」とし、この呼称によって取り扱う対象がセルおよびスタックであることを明示する。
- ② 「セル/スタックアセンブリー」の中身をブラックボックスとし、任意の SOFC に対応可能なようにする。
- ③ 計測システムと「セル/スタックアセンブリー」のインターフェースを定義し、規定では必要なインターフェイスおよびそれらを介した入出力値の測定方法について記述する。

つまり、規格で試験対象の構成についてすべてを規定することが必ずしも最良ではないので、規格で決めるべきでない（製造者や試験者に判断を任すことが適当であると考えられる（任意性））部分を、セル/スタックアセンブリーというブラックボックスの中に入れて、計測系とのつなぎの部分だけを規定するという考え方である。こうすることによって、規格で扱う対象はセルだけではなくスタックにも広げることができた。

最後に、測定結果の妥当性を担保するために不確かさの概念を導入することにしたが、それをどのような形で規格に取り入れ、評価式をどうするかを検討する必要があった。不確かさ解析のよりどころとする指針 (GUM)^[7] には

不確かさの一般式が記載されているが、これをそのまま SOFC の性能試験において結果の不確かさ評価式とすることは適切ではないと考えた。一般式を具体的な式に展開するにはさまざまな任意性がある。また、一般式を正直にそのまま適用しようとすると、あまりに多くの作業を不確かさの評価者に課してしまうこととなり、結果として使えない（使ってもらえない）規格になる危惧があったからである。したがって、規格で規定する不確かさ評価式は簡便にし、具体的にその方法を記載して方法を統一する必要があると考えた。以下では、不確かさ評価式の導入にあたり我々が行った方法を示す。

3 SOFCの性能測定における不確かさ

3.1 不確かさ評価の方針について

SOFC の性能は測定の際に設定するさまざまな条件に依存するので、測定結果の不確かさを簡単に求めることができる訳ではない。そこで我々は、燃料電池関連の既存の国際規格や検討中の国際規格において不確かさ評価がどのように扱われているかについて調査した。

以下は、燃料電池関連の国際規格等における不確かさの取り扱い方について調べた例である。発行年からわかるように我々がこの研究を始めた 2007 時点において不確かさ評価付きで燃料電池の性能評価を推奨する規格がとて少なかったことがわかる。

(1) 定置用燃料電池システムの性能試験法 IEC (International Electrotechnical Commission: 国際電気標準会議) 62282-3-200 (2010 年回付 CDV, Committee Draft for Voting: 投票用委員会原案)^[8] においては、系統不確かさ（計測器の精度や校正時の誤差に由来する）と偶然不確かさ（データの変動に由来する）に分類して合成・評価する方法を Annex に例として記載し（コンピューターによる計算結果表等）、具体的な方法は GUM を参考に決めることとしている。この CDV における不確かさの扱いは ASME の同じく燃料電池システムの性能試験法 (ASME (American Society of Mechanical Engineers: 米国機械学会) PTC 50-2002^[9]) とおおよそ同じ内容となっており、試験は、steady state で行うとしている。

不確かさの計算は、得られた効率に対するもののみで、燃料ガス組成に対する感度係数は、理論上計算によって求めることが可能である。システムの評価はセルやスタックの温度を決めて行うわけではないので、その不確かさ評価を行う際の入力量はセルやスタックの評価よりも限定され、燃料組成や流量に依存する入力熱量と電気出力の不確かさのみを考慮すればよいということである。

(2) 前述の FCTESQA からは 2009 年末に IEC に PEFC

(polymer electrolyte fuel cell: 固体高分子形燃料電池) の I-V 特性試験法に関する DC (Draft for Comment: コメントを募るための資料。IEC 内の非公式文書のため参考文献にはあげない) が提出された。この試験法の中では、各測定値に対して "measurement uncertainty" の許容値を規定している。ただし、安定状態を定義する際に "measurement uncertainty" を引き合いに出して、変動がその範囲内に入ることとしている等、測定値の変動と測定値の不確かさを明確に区別していない状況がうかがわれる。もっとも、"measurement uncertainty" 自体は、入力パラメータの相関を含む一般式で定義している形をとっていたが、不確かさの求め方の具体的な方法については一切触れられていない。

(3) 2010 年に発行された PEFC の単セル試験法 TS^[10] は、我々が規格案を検討している段階では CD (Committee Draft: 委員会原案) であったが、その中で入力量の最大許容変動幅と試験機器の最大不確かさを規定していた。最終的に発行された TS においては、附属書の中に試験報告書のひな形として、測定の不確かさ (measurement uncertainty) を記載するように推奨しているが、具体的な求め方は GUM^[7] を参照するような記載となっている。

以上の様な状況を踏まえ、我々が提案する SOFC 性能試験法の国際規格案における不確かさ評価については、基本となる指針を以下のようにすることとした。

(a) 不確かさ評価は GUM を参考とし、評価式と具体的な求め方を記載することとする。不確かさ評価は統計的な解析による A タイプおよびそれ以外の手法による B タイプの不確かさを個別に求めて、それらを合成することによって行う。不確かさの一般式からは実際に不確かさ評価を行う手順を導くことが困難で、これを評価者任せにすると評価方法がばらばらになる (評価方法に統一性がなくなる) ことが考えられ、それを避けるためである。

(b) 入力量の許容最大変動幅および機器の最大不確かさを規定し、測定は入力量が許容変動幅に収まった安定状態で行うこととする。こうすることによって A タイプおよび B タイプの不確かさのいずれもおおよその許容値が定まることになる。また、安定状態で測定を行うことによって、不確かさを評価する際に入力量同士の相関を考慮する必要がなくなると考えた。

(c) 評価をする際にあまり多くの作業を評価者に強いるようなものとはしない。規格は商取引における性能試験のためのものであるため、不確かさを正確に求めること自体が要求されるわけではない。試験者がどの程度のレベルの正確さで試験を実施し、結果を提出しているかが判断できればそれで良いと考え、それを不確かさ評価の目的とした。

そして、この目的を達成するために、試験者に日常行っている試験手順からの大幅な逸脱を強いるものであってはならないと考えた。

これらの方針により、我々が行うべき作業は不確かさ評価の一般式から、不確かさへ与える影響が少ないと思われる部分を切り離し、また、具体的な評価作業を併記して、不確かさ評価者が平易に評価できるような形にすることとなった。

3.2 規格案における不確かさ関連の記載について

このような状況を考慮して作成した規格案における不確かさ評価に関連した内容について以下に述べる。

規格案に盛り込んだ性能試験の内容は、定格出力試験、電流-電圧特性試験、有効燃料利用率依存性試験、長期耐久性試験、内部インピーダンス試験等であるが、これらの試験の中には不確かさ評価がとても難しいものや手間がかかると予想されるものがあるので、規格案では定格出力試験の結果のみ不確かさ評価をすることを義務付けるようにした。ここで定格出力試験とは、電流あるいは電圧を 1 点に保った状態で電圧あるいは電流を測定する試験であり、それ以外の制御パラメーターもすべて一定に保持したうえで行う 1 点試験である。二つあるオプションのうち、以下では、一般的に行われているであろうと思われる電流制御による電圧測定の場合を例にとって説明する。

上記の方針により規格案では、規格で定めたすべての試験において満たすべき条件である電流、ガス流量等の入力値の変動の許容範囲を決めた (表 1)。実際に測定する際には、試験者が目標とする測定量の不確かさを得られるように、この範囲内で変動の許容範囲を決定することになる。これによって不確かさの偶然誤差に由来する許容値を定めたことになる。また、「安定状態」として、入力量が試験者の定めた変動の許容範囲以内で、しかも測定が目標とする不確かさを満足するレベルで系が安定した状態と定義し、すべての測定はこの「安定状態」を確認した後に行うこととした。これによって測定が系の急激な条件の変化に伴う過渡応答や種々のドリフト状態のもとで行われることを防止している。結果として測定値の変動は、主に偶発的なノイズや制御しきれない入力量の微小変動によるものと考えられることができるようになり、不確かさ解析において入力量の相関を考慮する必要が少なくなると考えた。

また、測定機器の不確かさ (系統誤差による) としてその最大許容値を定めた (表 1)。これは機器の校正時の不確かさを意図して定めたが、機器が校正されていることを条件として、簡便に機器の確度等のカタログ値から一様分布を仮定した B タイプの不確かさによって判断しても良いこととしている。

表1 規格案で定めた許容変動幅、機器不確かさおよび入力量の不確かさ評価への対応

入力量	変動の許容範囲	測定機器不確かさ	感度係数の測定	不確かさ評価への対応
電圧	電圧制御の場合 設定値の±1%	開回路電圧の±0.5%	実験により決定	○
電流	電流制御の場合 定格電流の±1%	定格電流の±1%	実験により決定	○
ユニット温度	設定値の±1% (°C)	定格温度の±1% (°C)	実験により決定 (定格温度±50°C程度で測定)	○
燃料流量	定格値の±1%	読み値の±1%	実験により決定 (定格流量±10~20%程度の流量幅で測定)	○
酸化剤流量	定格値の±1%	読み値の±1%	実験により決定 (定格流量±10~20%程度の流量幅で測定)	○
燃料組成	H ₂ , H ₂ O, N ₂ は±1 mole%, CO, CO ₂ , CH ₄ は±0.25 mole%	H ₂ , H ₂ O, N ₂ は±2 mole%, CO, CO ₂ , CH ₄ は±1 mole%	混合ガスの供給方式による。 単独で組成を変えることは出来ない	△(一部不可) ガス製造者が発行する組成表の提出等に対応
酸化剤組成	O ₂ ±0.3 mole% (N ₂ バランス)	O ₂ 濃度について±0.3 mole% (N ₂ バランス)	混合ガスの供給方式による。 単独で組成を変えることは出来ない	△(一部不可) ガス製造者が発行する組成表の提出等に対応
燃料温度	性能に影響を与えないような温度であれば問題ない	読み値の±1%	-	× (性能に影響を与えないような温度と規定)
酸化剤温度	性能に影響を与えないような温度であれば問題ない	読み値の±1%	-	× (性能に影響を与えないような温度と規定)
燃料ガス圧力		読み値の±1%	-	×
酸化剤ガス圧力		読み値の±1%	-	×
大気圧	通常は圧力を変えて測定できないので不確かさ評価に含めない。ただし、試験時の大気圧を測定する。また、不確かさに与える影響は少ないことを実験により確認したが、試験圧力が1気圧と大きく異なる場合等は問題となる可能性もある。		-	×
温度分布	サイズが大きなセル・スタックのように対象が複数の温度測定点を有する場合には許容温度分布幅を製造者が定めて、測定はその範囲内で行うこととし、不確かさ評価には含めない。100 cm ² 程度の平板セルでは温度分布が少ないことを実験により確認。		-	×

4 SOFCの特性測定における不確かさ

4.1 不確かさ影響因子の実験的検証による選別

SOFCの特性は、セル温度、燃料流量、空気流量、動作圧力、温度分布等に依存する。したがって、これら入力量の制御や測定の不確かさは、測定量の不確かさに影響を及ぼすこととなる。我々は、これら多くの入力量が測定量の不確かさに及ぼす影響を調査し、調査結果をもとに不確かさ評価に取り入れるべきものとそうでないものとに分けることとした。

図2(a)には例として雰囲気圧力を変えて測定した単

セルの電圧の圧力依存性を示す。測定は開回路電圧(電流=0 A)、燃料利用率50%(電流=24.4 A)、燃料利用率70%(電流=34.1 A)の3条件で行っている。それぞれの曲線の傾きは、電流やガス流量を一定に保ってセル電圧を測定したときに、圧力が設定値からずれた際の電圧測定値の不確かさへの寄与の大きさを示すことになる。図に示したデータから求めたセル電圧の圧力依存性は、1気圧付近では0.3 μV/Pa程度であり、通常の使用気圧の範囲内で測定が行われるならば、気圧変動による測定量Vの不確かさへの影響は小さいと考えることができることが分

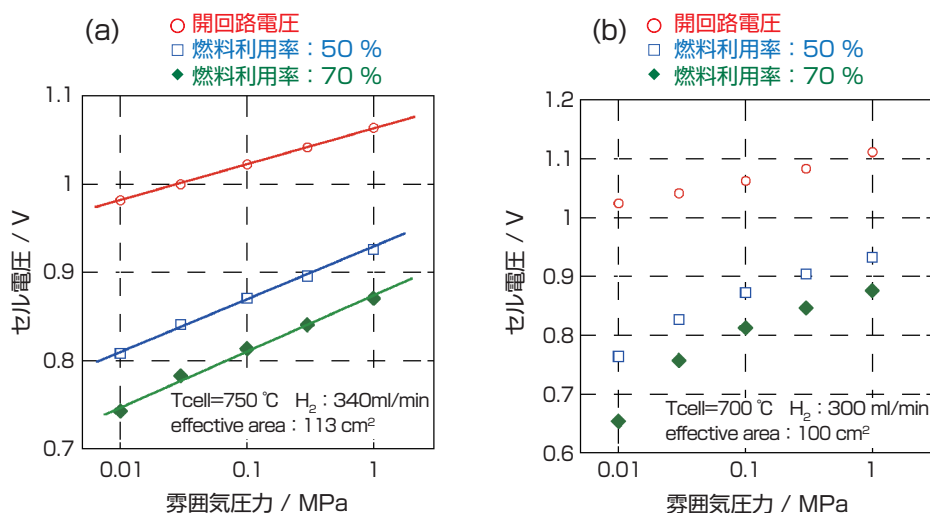


図2 セル電圧の各種燃料利用率における圧力依存性 (a) 電解質支持タイプセル、(b) アノード支持タイプセル

かった。ちなみに我々の規格においては、目安として、測定量の不確かさとして 1 % 程度以内を目標とすることを前提として考えている。

SOFC には幾何形状や大きさだけではなく、支持体にも何を使用するかによってもタイプの異なるものがある。先の図で使用したセルは電解質支持タイプであり、電解質の両面に成膜された電極は比較的薄く、電極多孔体中での反応種や反応生成物の拡散の影響を比較的受けにくいという特徴がある。これに対してアノード支持やカソード支持タイプの SOFC では、多孔体の厚みが厚くなるので、ガス拡散の影響を受けやすくなり、動作圧の依存性においても本質的に前者とは異なる影響を与える可能性がある。図 2 (b) には、アノード支持タイプの SOFC 単セルで測定したセル電圧の圧力依存性を示した。低圧側で先ほどの依存性とは大きく異なる様子が観測されるが、1 気圧におけるセル電圧の圧力依存性は $0.2 \sim 0.5 \mu\text{V}/\text{Pa}$ 程度であり、やはりこの場合も不確かさに与える影響は大きくないことが確認できた。

一方、SOFC の温度分布の問題は測定の不確かさを考える上でとてもやっかいな問題である。均一な温度に保たれた SOFC の性能を測定して、そこで得られた性能がその温度における特性であるとして行うことができれば理想的ではあるが、現実の測定では必ずしもそのような状態で測定することができるわけではない。また、SOFC が使われる状況を考えれば、温度分布がある状態こそが本来の使い方であるという考えもある。

そこで、実際に SOFC の単セルの温度分布を測定したが、その例が図 3 である。温度分布はセルを高温に維持するための電気炉への設置状況や温度制御の仕方によっても異なるが、ここでは我々が通常使用している実験装置系へ設置し、温度制御は 1 点制御で行っている。

内部改質反応があまり期待できない電解質支持タイプのセルに、燃料として水素を流した際の温度分布を示したのが図 3 (a) である。ガスの供給は円板形セルの中心部から行われており、そこから外周部へ向かって流れている。この場合の温度分布は負荷の状況にかかわらず、セルの平均温度から $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の範囲に収まっていることがわかる。これは設定値の $\pm 1 \%$ 程度までの変動を許容するとした規格案から判断すると、十分許容できるレベルであると考えられた。一方、SOFC の利点の一つとして期待される内部改質特性をもつアノード支持タイプのセルを使用して、燃料を部分改質メタンとした場合に測定した温度分布を図 3 (b) に示す。図では未改質メタンが内部改質される際の吸熱反応により、入り口付近で温度が下がることが確認されている。負荷状況によって多少の温度分布の違いはあるが、それでも平均温度 $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の温度分布に収まっており、温度分布をセル内の部分的な温度変動としてとらえることができると仮定するならば、内部改質反応が起こる場合でも、この程度の使用条件であれば十分許容範囲に収まると考えられた (実際には温度分布により局所的なインピーダンスの分布が生じ、電流分布が変化するので、温度分布の影響を評価するのはとても困難である)。

以上のように実験による検証を通じて、気圧や温度分布については、不確かさに与える影響は少ないものとして不確かさの評価式には入れないこととした。本来であればこれらが不確かさに与える影響は無視できる程度に小さいものとは言えず、不確かさ評価式に含めてしかるべきものである。しかし、セル製造者が製作する個々の型式のセルにおいて圧力の依存性や温度分布を測定することを期待することはできない (実際に実用セルにおいてこの論文で報告したような圧力依存や温度分布を測定した例はほとんど発表されたことがないのが現状である)。また、温度分布

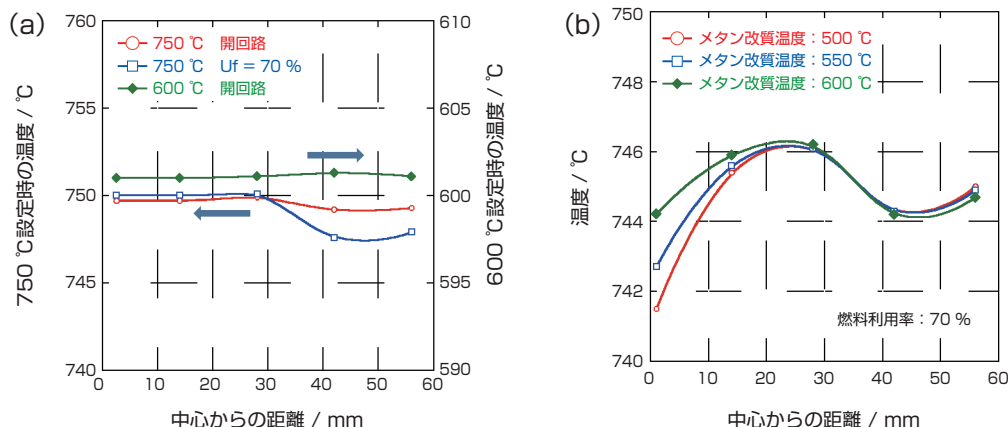


図 3 単セルの温度分布測定例
0.25 φ シース熱電対 (OKAZAKI SUPER COUPLE 1000H) による (a) 電解質支持タイプセル、有効電極面積：113 cm²、燃料：純水素 (b) アノード支持タイプセル、有効電極面積：113 cm²、燃料：部分改質メタン

を測定したとしても温度分布が不確かさに与える影響を見積もることはとても困難である。このような理由があるのでそれらが不確かさに与える影響は少なく、不確かさ評価式から省いても不確かさ評価の目的自体は達成できると判断できるレベルであったことは、結果的に幸運であった。

また、規格案では試験対象ユニットにおいて温度測定が複数箇所あるものの温度分布については、温度分布の許容範囲をあらかじめ製造者が決定することとして、測定はその温度分布の範囲内で行うこととした。つまり、その範囲内であれば不確かさを考慮する必要はないとした。

4.2 導入した不確かさ評価式

以上のような状況から規格案において提案した入力量 X_j を制御して SOFC の電圧 V を測定する際の不確かさ評価式を以下に示す。

$$u(V)^2 = u_i(V)^2 + u_F(V)^2 + \sum_j \left(\left(\frac{\partial V}{\partial X_j} \right)^2 (u_i(X_j)^2 + u_F(X_j)^2) \right)$$

ここで、 $u(X)$ は X の標準不確かさ、下付き I は、計測機器による不確かさ、同じく F は変動による不確かさ、 $\frac{\partial V}{\partial X_j}$ は測定量 V の入力量 X_j に対する感度係数を表し、実験によって決定する。また、入力量の平均値と設定値の差から感度係数を用いて測定量に対して補正を行うこととした。上述のような事情と実験結果により、不確かさ評価式で考慮すべき入力量は表 1 に示すとおりとした。

規格案では附属書にて温度計測、電流計測、流量計測、電圧計測について機器不確かさの求め方と、それらと変動による不確かさからそれぞれの測定値の不確かさの求め方を示した。このようにすることによって、上式がさまざまに解釈されることなく統一された不確かさ評価が行われるものと考えた。

4.3 測定量と入力量の関係 (感度係数の測定)

不確かさの評価式における感度係数は実測によって得ることとしている。前述のとおり不確かさ評価は定格点でのみ行うようにしたので、この測定は定格点のまわりで入力量を振って電圧測定を行うことになる。例としてユニット温度に対する感度係数を求める際の測定データを図 4 に示す。定格点が 750 °C で燃料利用率 70 % である場合には、図におけるその点での傾きが感度係数になる。ここで感度係数を求める実験での入力量の振り幅について述べておくと、一般に SOFC のメーカーは定格条件近辺で温度やガス流量を変えた測定を行っている。ユニット温度の場合、通常 50 °C 程度の間隔で行われている。そこで感度係数を求める際のユニット温度の振り幅については、規格案では ± 50 °C 程度で測定をするように推奨した。したがって図 4 に示すデータは定格温度とその ± 50 °C において電流 - 電

圧特性の測定を行うことによって得られるので、このような感度係数の測定がメーカーにとって新たな負担になることにはならないように配慮したということである。

一方、感度係数を測定することができないために不確かさ評価ができない場合もある。表 1 には、SOFC 試験における入力量に対する感度係数の求め方および不確かさ評価への対応を示したが、燃料組成や酸化剤組成については不確かさ評価をできない場合がある。混合ガスボンベ等を使用してガスを供給する場合等では、混合ガスを構成する 1 種のガスの濃度だけを独立に変化させて感度係数を測定することが実際問題としてできないために、組成の不確かさが電圧に与える影響を評価することができない。

5 SOFC性能試験における不確かさ解析の例

表 2 には、実際に我々が性能試験に使用している計測機器および制御機器を用いて、SOFC 平板単セル (100 cm²) の定格出力試験を行った際の不確かさ解析表 (バジェット表) の例を示す。測定値の変動が大きい場合には、繰り返し測定を行うことによって不確かさを抑えることができるが、30 回 (1 point/sec) 程度の測定を一通り行っただけでも系が安定している状態で測定すれば、測定値の変動が不確かさへ与える影響は小さいことがわかる。定格出力試験では、最終的に入力量である電流と測定量である電圧の積である電気出力をアウトプットとして算出する必要があるので、表 2 の右端の欄には出力換算の不確かさを示している。それらを比較すれば、不確かさの成分の大部分はセルの温度計測に由来するものであることがよく分かる。さらにその内訳では、使用した熱電対に由来する不確かさが大きいこともわかる。不確かさ解析の利点として、このような表を作成することによって、どの測定を改善すれば

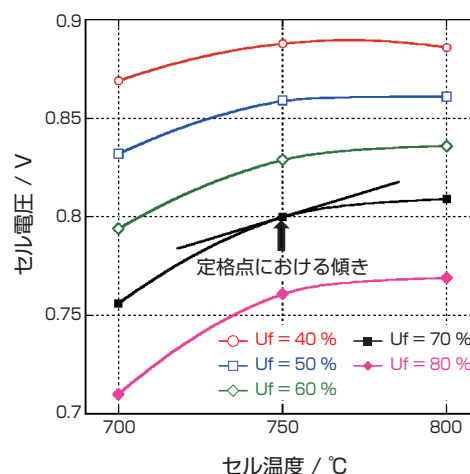


図 4 温度のセル電圧に対する感度係数を求める際の実験例 入力量の振り幅を ± 50 °C 程度とした。

表 2 SOFC 単セルを使用した電流制御定格出力試験の不確かさバジェット表の例

入力量および測定量	不確かさ要因	確度等	誤差限界	標準不確かさ	不確かさのタイプ	自由度	感度係数	電圧換算の標準不確かさ (V)	電力換算の標準不確かさ (W)
セル温度				3.20E+00 °C			1.29E-03 V/°C	4.13E-03	1.24E-01
変動	—	—	—	4.90E-03	A	29			
計測機器	熱電対 (K, クラス2)	±0.75 % of rdg in degree C	5.253 °C	3.03E+00	B				
	記録計	±(0.15 % of rdg + 0.7 °C)	1.751 °C	1.01E+00	B				
電流				7.85E-02 A			6.95E-03 V/A	5.45E-04	1.64E-02
変動	—	—	—	1.83E-03	A	29			
計測機器	分流器	±0.05 % of rdg	0.015 A	8.70E-03	B				
	記録計	±(0.05 % of rdg+12digits)	0.135 A	7.80E-02	B				
燃料流量				4.14E-01 Nml/min			4.23E-04 Vmin/Nml	1.75E-04	5.26E-03
変動	—	—	—	8.68E-02	A	29			
計測機器	MFC Dry cal を用いた校正による			4.05E-01	B				
空気流量				2.89E+01 Nml/min			3.32E-07 Vmin/Nml	9.59E-06	2.88E-04
変動	—	—	—	5.09E-01	A	29			
計測機器	MFC	±1 % of full range	50 Nml/min	2.89E+01	B				
	記録計	±(0.05 % of rdg+12digits)	0.87 Nml/min	5.02E-01					
セル電圧				1.07E-03 V			1.00E+00 V/V	1.07E-03	3.22E-02
変動	—	—	—	6.26E-05	A	29			
計測機器	絶縁アンプ	±(0.1 % of rdg + 0.1 mV)	9.25E-04 V	5.34E-04	B				
	記録計	±(0.05 % of rdg+12digits)	1.61E-03 V	9.31E-04	B				
合成標準不確かさ								4.30E-03	1.29E-01
拡張合成不確かさ (k = 2)								8.60E-03	2.58E-01

測定量の不確かさを少なくすることができるかを、容易に把握できるようになることがあげられる。この測定では、温度測定に K 熱電対 (クラス 2) を用いているが、これをクラス 1 に変更することによって電力測定の標準不確かさは 0.13 W (0.52 %) から 0.08 W (0.33 %) まで改善される。

また、以上のことから安定状態を適切に判断して測定をすれば、測定値の変動が不確かさへ与える影響は小さいと思われるので、試験において使用される機器による不確かさだけでなく、試験結果の不確かさをおおよそ予想できることになる。そこで、規格案において規定した機器不確かさの最大許容値をもつ測定機器を使用したと仮定して、同一セルを試験した際の不確かさとして、相対拡張不確かさを 1.4 % と見積もることができた。規格案では、規定以内の不確かさをもつ機器にて測定するように定めているので、この規格案をもとに試験者が測定方法の計画を立てて実施すれば、相対拡張不確かさ 1.4 % 程度以下の測定結果を得ることが可能であることが確認できたことになる。ただし、この値は、測定対象によって異なり、異なった感度係数をもつ対象を試験する場合や、ガス利用率が高い状態を定格条件とする場合には、大きく変わる可能性があるので注意が必要である。

6 まとめ

規格案でまとめた入力量の最大変動幅や機器の不確かさは、我々がまずたたき台となる数値を示し、委員会での議論を通じて、各社が納得できる値として決定したものである。結論として、この規格案にもとづいて試験をすることによって、最大でも相対不確かさ 1.4 % 程度の測定ができることが確認され、SOFC の商取引を想定したものとして妥当な内容の規格案になったと考えている。

しかし、この規格案に盛り込んだ定格出力試験での不確かさ解析およびそのための不確かさ評価式は、NP (New Work Item Proposal: 新業務項目提案書) を準備する際の国内委員会にて最終的には規格案から省かれた。したがって、不確かさについては NP では入力量 (制御パラメータ) の最大許容変動幅と機器の不確かさだけが残りとなったが、その場合においても上述のような最大不確かさが確認されたのは幸いであった。

不確かさ解析が規格案から外れた最大の理由は、やはりまだ多くのメーカーにおいて不確かさの概念が浸透しておらず、不確かさ解析の煩わしさのみが先行してしまったことによる。我々は、不確かさの評価式の提案に当たっては、なるべく試験者の負担が軽くなるような式 (方法) を導い

たつもりであるが、不確かさ評価のメリットについての説明が十分ではなかった。不確かさの概念は、データの信頼性をトレーサビリティ体系のもとで国際的に保証するものであり、多くの国際標準化組織によって推奨されており、今後ますます国際規格等で導入されるものと考えられる。一方、不確かさ評価により期待される効果は、良い製品を製造するメーカーにとってはそれを行う価値が十分にあるということ、この分野のメーカーに認識してもらうまでには少し時間がかかるようである。

この規格案は現在、国際WGの場で審議段階であり、他国の提案によりいつ不確かさ評価の導入が提案されるかわからないような状況である。また、国内委員会に限ってみれば不確かさ評価については、委員会で我々が行った説明や議論を通じて、その概念が少しずつ浸透してきていると思われる。したがって、突然提案されるかもしれない不確かさ評価について、その是非を判断するための議論の下地づくりに貢献できたのではないかと考えている。

筆者らは不確かさについての専門家ではないが、不確かさ研究の専門家の間では「最も大きな不確かさは考慮されていない要因に存在する」というような格言(?)があるようである。今回の不確かさ評価においても、文中にも述べたように

①温度分布に起因する性能の変化

の他に

②試験者の違いによるバラツキ

③サンプル間のバラツキ

④経時変化によるドリフト

等がそれにあたる可能性があり、残念ながら上記格言の呪縛から逃れることができたわけではないと考えている。これらのうちの一部は我々の不確かさ評価の方針にしたがって外した部分でもある。さらに経時劣化によるドリフトについてはSOFCの耐久性を議論する際には不可欠であり、現在、耐久性の試験方法について検討を積み重ねているところである^[11]。

以上、グローバルに展開される技術の普及を見据えた場合に、避けて通れない国際規格化に臨んで我々が選択した方法論について記述したが、それが少しでも同様に技術開発に携わっている諸兄の参考になれば幸いであると同時に不確かさ評価についても多くのご意見・ご批判をいただきたいと思っている。

謝辞

この研究の成果は経済産業省「基準認証研究開発事業」および「国際標準共同研究開発事業」によって得ら

れたものであり、また、国際規格案の作成にあたりご協力いただいた「SOFC 単位セルアッセンブリー試験方法に関する標準化研究開発委員会」の委員の皆さまおよび関係各社・機関に感謝いたします。

参考文献

- [1] <http://fctesqa.jrc.ec.europa.eu/>
- [2] 嘉藤徹: 固体酸化物形燃料電池(SOFC)の開発と展望 *View and Development of Solid Oxide Fuel Cells*, 江口浩一監修, シーエムシー出版 (CMC books), 179-190 (2010).
- [3] NEDO 平成19年度成果報告書 固体酸化物形燃料電池システム技術開発 固体酸化物形燃料電池システム性能評価技術の開発 システム性能評価技術の開発「システム効率計測評価技術の研究」(2008).
- [4] JIS TS C 0054 メタンを主成分とする気体燃料を用いる固体酸化物形燃料電池発電システムの発電効率試験方法
- [5] 田中洋平他: Synthesiology投稿済み (査読中)
- [6] Y. Tanaka, A. Momma, K. Kato, A. Negishi, K. Takano, K. Nozaki and T. Kato: Development of electrical efficiency measurement techniques for 10 kW-class SOFC system: Part II. Uncertainty estimation, *Energy Conversion and Management*, 50 (3), 467-478 (2009).
- [7] ISO/IEC Guide 98:1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), International Organization for Standardization (1995).
- [8] IEC 62282-3-200 Ed.1 (CDV): Fuel cell technologies - Part 3-200: Stationary fuel cell power systems - Performance test methods.
- [9] ASME PTC 50-2002 Fuel Cell Power Systems Performance - Performance Test Codes -
- [10] IEC/TS 62282-7-1: Fuel cell technologies - Part 7-1: Single cell test methods for polymer electrolyte fuel cell (PEFC).
- [11] NEDO 平成22年度成果報告書戦略的国際標準化推進事業/標準化先導研究「固体酸化物形燃料電池セル・スタック耐久性試験方法に関する標準化」(2011).

執筆者略歴

門馬 昭彦 (もんま あきひこ)

1985年東京工業大学金属工学科博士課程修了。SRI インターナショナル客員研究員を経て、1989年電子技術総合研究所入所。固体酸化物形燃料電池の研究開発に従事。現在、エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ主任研究員。専門は、電気化学計測・評価。この論文では、委員会の運営、各種電気化学的測定、不確かさ評価式の検討、論文のとりまとめおよび執筆を担当。



高野 清南 (たかの きよなみ)

1966年徳島大学工学部電気工学科卒業後、通商産業省工業技術院電気試験所入所、MHD発電に関する研究開発に従事。1991年リチウム二次電池のシミュレーション技術の研究を経て、2001年より固体酸化物燃料電池の発電特性評価に関する研究に従事。現在、エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ客員研究員。この論文では、圧力依存性単セル試験や温度分布測定および不確かさ評価の検討等を担当。



田中 洋平 (たなか ようへい)

2005年京都大学大学院工学研究科物質エネルギー化学専攻博士課程修了。同年、産業技術総合研究所入所。現在、エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ研究員。専門は、触媒化学、燃料電池性能評価、エネルギー工学。この論文では、規格案におけるガス供給方法、不確かさ評価方法の導出等を担当。



嘉藤 徹 (かとう とおる)

1991年東北大学大学院修了、工学博士、1992年通産省工業技術院電子技術総合研究所入所。固体酸化物形燃料電池および高温水蒸気電解技術の研究に従事。現在は、経済産業省産業技術環境局 研究開発課 産業技術総括調査官。この論文では、国内委員会の立ち上げから委員会の運営、規格原案の作成・とりまとめ、およびセル・スタックアセンブリーユニットの概念の提案等を行い、研究全体の統括を担当。



回答 (門馬 昭彦)

ここでの記述は、いくつか規定した試験のうち定格出力試験の結果についてのみ、不確かさ評価を義務付けたということです。不確かさ評価をしなくてもよい他の試験結果については、試験報告書に記載することを義務付けた使用計測機器情報により、個々にデータの信頼性を判断してもらうようにしました。したがって、ご指摘のような定格試験結果の不確かさが、不確かさ評価を義務付けなかった他の試験結果に依存することではありません。定格出力試験以外のその他の試験のなかには、本当に不確かさ評価の難しいものもあり、また、我々でもどうしてよいかよく分からないものもあり、特に不確かさ評価を必須としませんでした。不確かさ評価に過度の負担をかけることは、委員会での意見にも逆行し、この規格を使いやすいものとして普及させたいという思いにもそぐわないとの判断です。

議論2 不確かさ評価ができない場合の対応

質問 (立石 裕)

「4.3 測定量と入力量の関係 (感度係数の測定)」の最後で「混合ガスボンベ等を使用してガスを供給する場合等では、混合ガスを構成する1種のガスの濃度だけを独立に変化させて感度係数を測定することが実際問題としてできないために、組成の不確かさが電圧に与える影響を評価することができない」と記載されていますが、「評価することができない」ことは問題ないのでしょうか？

回答 (門馬 昭彦)

規格案では、燃料ガスの供給方法に対していくつかのケースを想定して作りました。このうち混合ガスボンベを使用して供給する場合には、不確かさ評価を行うことが事実上難しく、不確かさ評価はできないと判断しました。この場合、ユーザーには試験報告書に記載することを規定した試験条件や混合ガスの組成分析表を参考にして、独自に試験データの信頼性を判断してもらうことになります。不確かさ評価ができないということは、確かに問題ですが、いたし方がないとの苦渋の判断です。

査読者との議論

議論1 不確かさ評価を行う項目の選択の妥当性

質問 (立石 裕: 産業技術総合研究所つくばセンター)

「3.2 規格案における不確かさ関連の記載について」の中で、「これらの試験の中には不確かさ評価がとて難しいものや手間がかかると予想されるものがあるので、規格案では定格出力試験の結果のみ不確かさ評価をすることを義務付けるようにした。」と記載されていますが、「難しいものや手間がかかる」評価を省略してよいロジックが明確ではありません。仮にここで除外した評価が不確かさに大きな影響を当たるとしたら、全体の信頼性が失われるのではないのでしょうか？

調光ミラーガラスの開発

— 実用化のための研究戦略 —

吉村 和記*、田窪 一樹、山田 保誠

「調光ミラー」は透明な状態と鏡の状態がスイッチングできる新しい薄膜材料で、これを窓ガラスに用いると、太陽光を効果的に遮ること、特に夏の冷房負荷を大きく低減できる省エネルギーガラスを実現することができる。この調光ミラーガラスを実用化するために、これまでどのような研究戦略を立て取り組んできたかを紹介する。単に材料自体の研究開発にとどまらず、実際にそれを建物に用いた場合の省エネルギー性能の計測も行い、その結果を材料研究にフィードバックすることで、より省エネルギー性能の大きな窓の開発を行っている。

キーワード: 調光ガラス、省エネルギー、冷房負荷、クロミック材料、耐久性

Development of switchable mirror glass

– R&D strategy toward its practical use –

Kazuki YOSHIMURA*, Kazuki TAJIMA and Yasusei YAMADA

“Switchable mirror glass” is a new thin film material that can be switched between transparent and mirror states. Using this material in window glass saves energy by effectively shading rooms from heat-generating sunlight, thereby decreasing cooling load in summer. In this paper, we introduce our R&D strategy for further development and practical deployment of this material. In addition to R&D of the material itself we also measured the amount of energy saved when the material was used in the windows of buildings. The results we obtained from such field tests will enable us to develop a window glazing with better energy-saving performance.

Keywords: Smart window, energy efficiency, cooling load, chromogenic material, durability

1 はじめに

サステナブルマテリアル研究部門では、民生部門におけるCO₂の排出量削減に役立つ材料として、「省エネルギー型建築部材」の研究に取り組んでいるが、環境応答機能薄膜研究グループでは、その中の窓ガラスの研究を受けもっている。民生部門のエネルギー消費の中で、冷暖房の占める割合は約30%に達するが、その冷暖房のエネルギーに大きな影響を与える部材が窓である。窓の目的は光を取り入れることにあるが、通常の窓ガラスでは可視光以外に熱も透過し、建物の断熱性を悪くする要因になっている。したがって、窓の断熱性を高めるだけでも大きな省エネルギー効果があり、最近では、断熱性の高い複層ガラスやLow-eガラスの普及が進んできている。しかし、夏暑い日本ではこの断熱に加え、外部からの日差しを効果的に遮る（遮熱する）ことでさらに省エネルギー効果を高めることができる。このような目的で、光や熱の出入りをガラス自身でコントロールする窓ガラスが調光ガラスである。

調光ガラスは、光学的性質を可逆的に可変できる薄膜材料（クロモジュニック材料）をガラスにコーティングすることで実現することができる。調光ガラスにもさまざまな種類があり、例えば、電氣的にスイッチングできるガラスはエレクトロクロミック（electrochromic）ガラス^[1]、温度によって変化するガラスはサーモクロミック（thermochromic）ガラス^[2]、まわりの雰囲気（ガス）で変化するガラスはガスクロミック（gasochromic）ガラス^[3]と呼ばれる。これらの調光ガラスの中でもエレクトロクロミックガラスは研究の歴史も長く、外国では一部商品化も行われている。

日本では、1990年代までは大手ガラスメーカーを中心にエレクトロクロミック調光ガラスの研究が盛んに行われ、筆者（吉村）も、産総研中部センターの前身である名古屋工業技術研究所の時代から、サンシャイン計画・ニューサンシャイン計画におけるパッシブ型省エネルギー材料の一つとして調光材料の研究に携わっていた。しかし、性能的には優れた物が作製できるようになったものの、コスト面等

産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98
Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST 2266-98 Anagahora, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan
* E-mail: k.yoshimura@aist.go.jp

Original manuscript received April 6, 2012, Revisions received May 16, 2012, Accepted May 18, 2012

で実用化のめどが立たないということで、2000年頃にはいずれも研究が終了してしまい、いわゆる「死の谷」（「悪夢の時代」）に入り込んでしまっていた。

その頃、筆者（吉村）が、この調光ガラスの研究を再び活発にする起爆剤になるかもしれないと着目した材料が「調光ミラー」である。調光ミラーは、1996年にオランダで発見された新しい調光材料^[4]で、これまでの調光材料が、透明な状態から濃い青色に変化するのに対して、透明状態から鏡状態に変化するという特徴がある。鏡状態では太陽光を反射して遮蔽できることから、実用化すれば、これまでの調光ガラスよりも、より遮蔽性能に優れた窓にすることができる。調光ミラー薄膜の研究を進めるにあたっては、当初から、単に材料の研究を行うだけでなく、省エネルギー窓ガラスとして実用化するという念頭において研究を進めてきた。この論文では、この調光ミラーガラスを実用化するために、どのように研究を進めてきたかを紹介する。

2 調光ミラーを実用化するための課題

産総研で調光ミラーの研究を始めた2001年当時、実用化するために解決しなければならない課題として、(1) 光学特性の改善、(2) 耐久性の改善、(3) エレクトロクロミック調光ミラーの開発等があり、これらに取り組んだ。

2.1 光学特性の改善

図1(a)に示したのが調光ミラーの基本構造で、調光層となるマグネシウム合金薄膜の上に薄い触媒層をコーティングした構造になっている。成膜直後の状態でマグネシウム合金層は金属状態なので鏡状になっているが、薄い水素を含む雰囲気にとさらすと、パラジウムの触媒作用で調光層が水素化され絶縁体になって透明になる。次に酸素を含む雰囲気にとさらすと、同じくパラジウムの触媒作用で水素化物中の水素が酸素と反応してH₂Oとして引き抜かれ、金属の状態に戻って鏡状になる。このように鏡状態と透明状

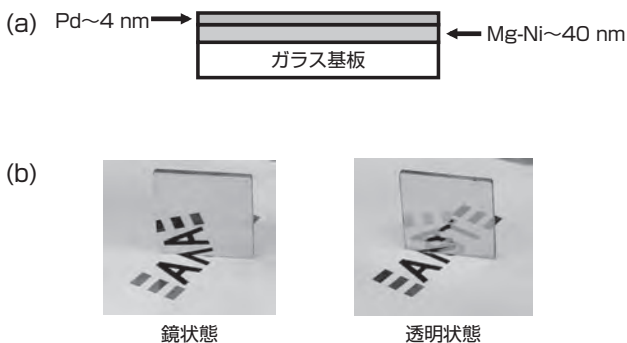


図1 (a) 調光ミラーの基本構造と、(b) 産総研で開発した光学特性に優れたマグネシウム・ニッケル系調光ミラー薄膜(Pd/Mg₆Ni)

表1 調光ミラー薄膜材料の種類

第1世代	希土類金属 Y ^[4] , La ^[4] 等 アムステルダム自由大学 1996年
第2世代	希土類・マグネシウム合金 Gd-Mg ^[6] , Sm-Mg ^[6] , Y-Mg ^[7] 等 フィリップス 1997年
第3世代	マグネシウム・遷移金属合金 Mg-Ni ^[8] , Mg-Ti ^[9] , Mg-Co ^[10] 等 ローレンス・バークレー研究所 2001年
第4世代	マグネシウム・アルカリ土類金属合金 Mg-Ca ^[11] , Mg-Ba ^[12] , Mg-Sr ^[12] 産総研 2009年

態がスイッチングする調光ミラー状態は、最初イットリウムやランタンといった希土類金属薄膜で見つかったが、その後、いくつかの新しい材料が見つかった（表1）。2001年にアメリカで見つかったマグネシウムと遷移金属の合金は、希土類を含むものに比べて耐久性が高いと考えられることや、材料がより安価であることから、大型ガラスへの応用により適した材料と期待され、産総研でもこの材料に着目し、日本で最初に研究を開始した。ただ、この材料が見つかった当時は透明時における可視光透過率は20%程度しかなく、色も焦げ茶色をしており、とても実用的に使えるものではなかった。産総研では、まず調光ミラーの透明時における可視光透過率を高める研究に取り組み、図1(b)に示したようなマグネシウムの比率の高いMg-Ni合金薄膜を用いることで、透明時の可視光透過率を50%程度まで高くできることを見だし^[13]、実用化に向けて大きく前進することができた。

ただ、調光ミラー層としてMg-Ni合金薄膜を用いると、優れたスイッチング特性をもった試料が得られるが、透明状態では少し茶色を帯びている。この系統の色は建物や乗り物の窓としてはあまり好まれない色とされている。そこで、この透明時の色を改善する研究を行った結果、調光層として、Mg-Ti合金^[14]やMg-Nb合金^[15]を用いると、水素化した場合に、およそ無色にできることを見いだした。ただ、Mg-Ti合金薄膜やMg-Nb合金薄膜は、透明時に無色ではあるが、可視光透過率はMg-Ni合金薄膜に比べて劣る。我々の研究グループでは、最近Mg-Ca^[11]、Mg-Ba、Mg-Sr等^[12]の合金薄膜を用いると、水素化時に無色であると同時に可視光の透過率も高くできることを発見した。図2に、それぞれの材料の透明状態における光学透過スペクトルを示す。マグネシウム・アルカリ土類金属系の材料は、これまでの調光ミラー薄膜のカテゴリーのものと異なり、いわば産総研オリジナルの第4世代材料と呼べるもので、その実用化が期待される。

透過率および反射率の変化幅をどの程度に設定するかは

用途によって変わるが、例えば、自動車のフロントガラスに用いるためには、透明時 70 % 以上の可視光透過率が必要で、現状でこの条件はクリアできていない。このレベルまで透過率を上げるためには、マグネシウム合金薄膜からなる調光層だけでなく、パラジウム層や保護膜層も合わせた多層薄膜全体の光学設計を行う必要があり、現在その開発に取り組んでいる。

2.2 耐久性の改善

調光ミラー薄膜材料では、その光学特性については、かなり実用に近い性能を持つものも得られるようになってきている。しかし、この材料の最大の問題点は、スイッチングの繰り返しに対する劣化が早いということである。例えば、図 3 (a) に示したのは、Pd/Mg₄Ni 薄膜について、アルゴンで 4 % に希釈した水素ガスを用いて、スイッチングを繰り返した場合の波長 670 nm における光学透過率の変化を示したものである。スイッチングの繰り返しに伴い、光学的な変化幅が段々と小さくなっていき、特に 140 回を過ぎてからは急激に劣化していることがわかる^[16]。調光ミラーの実用化にあたっては、この耐久性の向上が最も重要な課題であり、我々もさまざまな試みを行ってきた。

劣化はいくつかの要因が重なって起こっているが、一つは水素化・脱水素化の繰り返しにより、Mg-Ni 薄膜の中の Mg が Pd 層を抜けて表面に移動（マイグレーション）することにある。我々は、Ti 等の金属薄膜をバッファ層として Pd 層と Mg-Ni 層の間に挿入することで、この Mg の移動を抑制することができることを見いだした^[17]。図 3 (b) にみるようにバッファ層を挿入すると 400 回程度まで劣化が起こらなくなる。しかし、この試料でもその後急激な劣化が起こっている。これは水素化・脱水素化に伴う体積変化のために、Pd 層がダメージを受けてしまうためである。こ

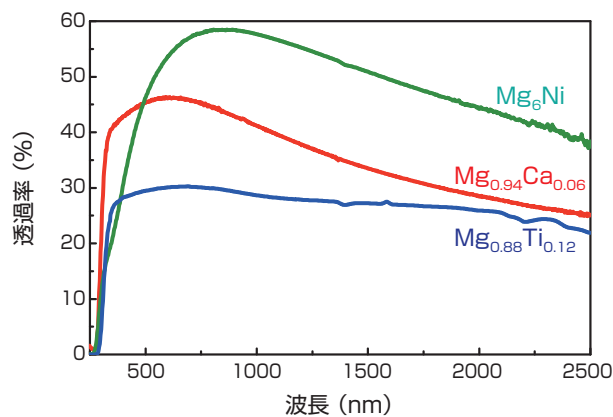


図 2 マグネシウム・ニッケル系調光ミラー (Mg₆Ni)、マグネシウム・チタン系調光ミラー (Mg_{0.88}Ti_{0.12})、マグネシウム・カルシウム系調光ミラー (Mg_{0.94}Ca_{0.06}) の透明状態における透過スペクトルの比較

れを防ぐにはある種の保護膜が有効で、例えば、Ti バッファ層を挿入した試料の表面にテフロン (PTFE) の保護膜を蒸着すると、1,500 回程度まで繰り返しができるものも作製することができた (図 3 (c))^[18]。とはいえ、実用的には 10,000 回程度の耐久性は必要であり、現在も耐久性のさらなる向上を目指した研究を続けている。

2.3 エレクトロクロミック調光ミラーの実現

調光ミラーをガスクロミックでスイッチングするためには、どうしても二重ガラス (ペアガラス) で使用する必要がある。用途によってはそれが難しい場合もあり、その場合には電気的なスイッチングが必要となる。エレクトロクロミック方式のスイッチングに関して、当初はアルカリ水溶液を用いたデバイスを研究したが、溶液を使用するデバイスでは、調光薄膜側にプラスの電位をかけるとマグネシウムが溶解してしまうことから、透明状態から鏡状態に戻すのに短絡するしかなく、実用的でないことがわかった。そこで我々は、溶液を用いない、全固体型エレクトロクロミック調光ミラーの開発を行った^[19]。

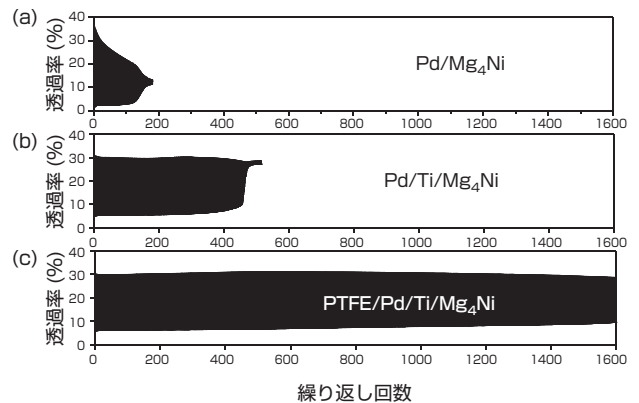


図 3 スwitching 耐久性の比較 (a) マグネシウム合金層とパラジウム層のみの調光ミラー薄膜、(b) バッファ層を挿入した調光ミラー薄膜、(c) バッファ層を挿入し保護膜 (テフロン層) をコーティングした調光ミラー薄膜

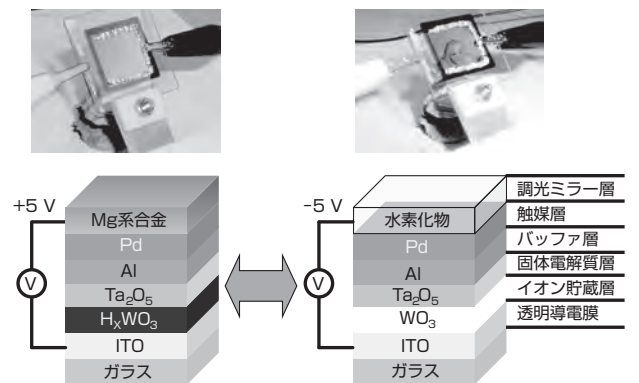


図 4 全固体型エレクトロクロミック調光ミラーデバイスの構造と写真

図4に、現在作製している全固体型調光ミラーデバイスの構造を示す^[20]。ガラス等の透明基材の上に、透明導電膜 (ITO)、酸化タンゲステン薄膜、酸化 tantalum 薄膜、Al 薄膜、Pd 薄膜、Mg-Ni 合金薄膜を積層した構造をもっている。それぞれの膜の作製はマグネトロン・スパッタ法を用いて行っている。酸化タンゲステン薄膜は水素イオンを貯蔵するための層、酸化 tantalum 薄膜は電解質層、Pd 薄膜は水素の出入りを促進するための層、また、Mg-Ni 合金薄膜は鏡の状態と透明な状態に切り替わる調光層である。Al 薄膜はバッファ層で、スイッチングの繰り返しにより Pd が酸化 tantalum 層の中に拡散するのを防いでいる。作製したデバイス（大きさ 3 cm 四方）のスイッチングの様子を図4に示す。調光ミラー薄膜側に -5 V の電圧をかけると、酸化タンゲステン薄膜中の水素イオンが移動して Mg-Ni 層が水素化し、20 秒程度で鏡状態から透明状態に変化する。逆に +5 V をかけると、Mg-Ni 層から水素イオンが抜けて酸化タンゲステン薄膜に移動し、15 秒程度で透明状態から鏡状態に変化する。

調光ミラーデバイスでは、成膜を行う上で基板を選ばないという特徴がある。したがって、ガラス基板の代わりに透明なプラスチック基板を用いると、折り曲げることのできる調光ミラーフィルムも作製することができる。すでに、ガラス基板同様のスイッチングができるデバイスの開発に成功している^[21]。調光ミラーフィルムが実用化できれば、既存のガラスに貼り付けるだけで調光ミラー特性をもたせることができるため、応用先を広げる上での意義は大きい。

ただ、ガスクロミック方式の調光ミラーでは、大型のスパッタ装置を用いるだけで大面積のサンプルが容易に作成でき、またスイッチング速度についても、メートルサイズでも 20 秒程度で行えるのに対して、エレクトロクロミック方式の調光ミラーの場合は、サイズが大きくなるとスイッチングの速度が急激に遅くなり、当初は、例えば 15 cm 角程度でも 1 時間程度かかってしまうという欠点があった。これまでさまざまな手法を用いてこのスイッチング速度の向上に取り組む、現在は 15 cm 角のサンプルを 30 秒程度でスイッチングできるようになっている。しかし、より大型のエレクトロクロミック調光ミラーを実現するためには、さらなるブレークスルーが必要で、現在もエレクトロクロミック方式の調光ミラーにおける最も重要な課題として取り組んでいる。

3 調光ミラーガラス実用化のため研究シナリオ

調光ミラーガラスを実用化するためには、ガラスメーカーとの共同研究が不可欠である。ただ、「はじめに」でも触れたように、日本のガラスメーカーは 2000 年頃までに調光ガラスに関する研究を打ち切ってしまった歴史的な経緯が

あり、調光ガラスの研究開発を再開してもらうためには、このガラスが実用化可能であり、また実用化に値するガラスであることを認識してもらう必要がある。そのため、現時点でまだ解決できていない課題の解決を急ぐとともに、このガラスを用いた場合にどの程度の省エネルギー性能が得られるかを示していくことが重要だと考えた。

サステナブルマテリアル研究部門では、単に部材そのものを研究するだけでなく、それらを用いた場合の省エネルギー性能についても実測するための専用の建屋をもっている。図5がその環境調和実験棟の写真で、名古屋にある産総研中部センターの中に建てられている。この実験棟の3階部分は1辺が約 2.5 m の小さい部屋に分かれており、各部屋の南側に窓が一つあり、2枚の窓ガラスが装着されている。また、各部屋に同じ空調装置があり、それぞれの空調装置で消費される電力が個別にモニターできるようになっている。したがって、各部屋の窓にさまざまな種類の窓ガラスを装着することで、ある設定温度にした場合の各部屋の空調負荷を比較することができる。次章で紹介するように、建物に実装できる調光ミラーガラスを実際に作製してその省エネルギー性能を評価し、これまでの省エネルギーガラスと比較して、大きな冷房負荷低減効果があることを実証した。また、この実環境での測定を行うことで、材料の研究だけを行っている場合には得られないような重要な知見、例えば、省エネルギーガラスでは窓の方位がとても重要なことや、太陽光の入射条件をよく考慮する必要があること等がわかり、それらを材料開発にフィードバックすることで、より省エネルギー性能の高いガラスの開発に生かしている。

一方、調光ミラー薄膜には、これまでになかった新しいスイッチングができる材料として、建物用ガラス以外にもさまざまな用途がある。図6に代表的な応用先を示したが、これらの材料の実用化については、比較的簡単に商品化できるものから、かなり難しいものまである。我々も、最終的には、調光ミラーを建物や乗り物の窓ガラスとして実用化することを目指しているが、そこに至るまでの過程で、実用化できるものから順次製品化していくということも重要な戦略とし

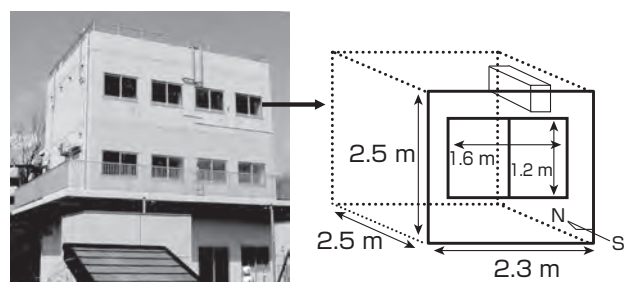


図5 環境調和実験棟

ている。

例えば、調光ミラー薄膜は水素を含んだ雰囲気と接すると光学的な変化が起こるため、これを観察することで水素の検知ができる^[22]。これまでの水素センサーは加熱して使用する物が多く、水素がもれた場合にセンサーが着火源になってしまう可能性もあるが、調光ミラー薄膜を用いた水素センサーは室温で水素と反応するため加熱の必要がなく、また、光ファイバーの先端に蒸着した調光ミラー薄膜をセンサーとして、もう一方のファイバー端でその反射率変化をモニターできるため、検知部に電気的な回路を一切もたず、着火源になる危険性の無い水素センサーになる。また、この材料独自のユニークな用い方として、リトマス試験紙のように水素が含まれているかどうかを目視でチェックする「水素可視化シート」にもなる。この用途については、比較的簡単に実用化できることから、共同研究を行っているアツミテック株式会社で商品化され、2010年から販売が始まっている。また、昨年度からは、サイズの比較的小さい応用先について具体的な商品への適応を目指した共同研究も開始している。

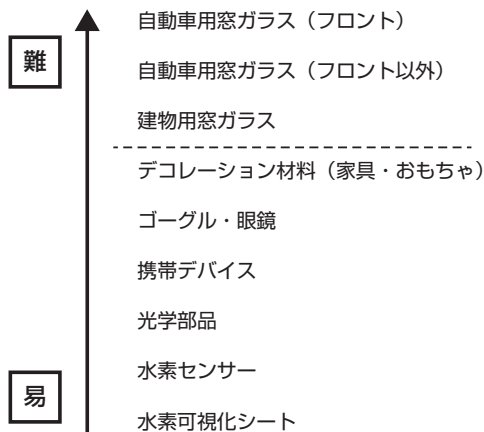


図6 調光ミラー薄膜の応用先

4 省エネルギー性能の実証

調光ミラーの薄膜の応用先の中で、最も大きな効果が期待されるのは省エネルギー窓ガラスとしての応用である。ただ、調光ミラーガラスを用いた場合に、どの程度の省エネルギー性能が得られるのかはこれまでわかっていなかった。そこで、我々は、建物に実装できる大型の調光ミラーガラスを作製し、その省エネルギー性能の実測を行った^[23]。

建物に実装できる窓ガラスとして、図7(a)に示したような構造をもつ調光ミラーガラスを作製した。厚さ5 mmの透明ガラスを8 mmの空隙をもったペアガラスとし、室外側のガラスの内側に調光層として Mg_4Ni 薄膜を用いた調光ミラー薄膜が蒸着されている。アルミサッシに装着した大きさは、縦1.2 m、横0.8 mとなっている。図7(b)と(c)が、作製した実サイズ調光ミラー窓ガラスの、それぞれ鏡状態と透明状態の写真である。これは建物の外から調光ミラー窓を見たもので、鏡状態ではおよそ完全な鏡に見え室内はほとんど見えない。これに対して透明状態にすると、室内を通して反対側の窓ガラスが見えており、透明なガラスに近くなる。また、鏡状態においても、室内側から室外を見ると外の景色が見えるのも調光ミラーガラスの特徴である。

作製した実サイズ調光ミラー窓ガラスを図5の環境調和実験棟に設置し、冷房負荷の測定を行った。図8は8月下旬に行った測定例を示したものである。測定に先立ち、まず二つの部屋に同じ透明2重ガラスを取り付け、設定温度を28℃にして、冷房負荷が同じになることを確かめた。次に、一つの部屋の窓ガラスを調光ミラーガラスに取り替えて鏡状態にし、その冷房負荷電力を測定した。この日、透明ガラス窓の部屋の冷房負荷は1,065 Whであるのに対して鏡状態の調光ミラー窓の部屋の冷房負荷は720 Whで、34%程度エネルギーを節約できたことになる。このように、窓ガラスを調光ミラーにして鏡状態にした場合、特に日射量の多い日では大きな冷房負荷の低減効果があることを実証することができた。

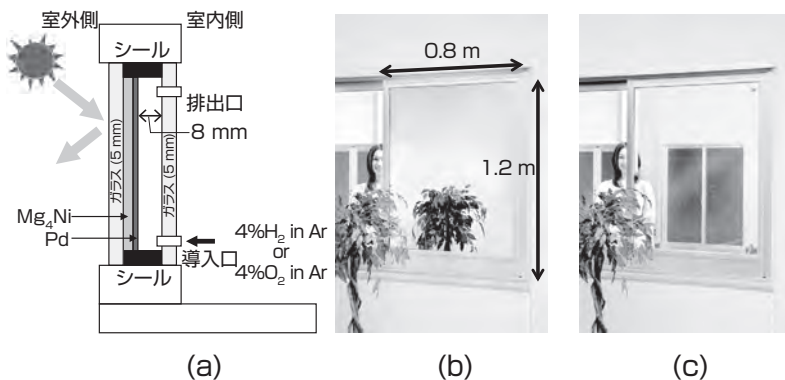


図7 実サイズ調光ミラー窓ガラス
(a) 構造 (b) 鏡状態 (c) 透明状態

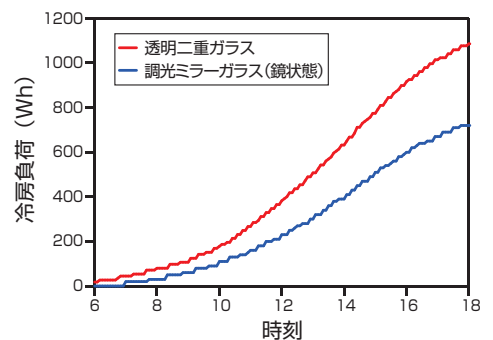


図8 透明二重ガラスと調光ミラー窓ガラスの冷房負荷比較

5 むすび

研究を開始してから約 10 年、調光ミラーを実用化するための研究を行ってきた。比較的実用化しやすい応用先については、一部商品化まで行うことができるようになった。

また、調光ミラー薄膜を省エネルギー窓ガラスとして用いるための研究では、材料自身の研究開発だけでなく、実際に建物に用いた場合の省エネルギー効果の測定も行い、その結果を材料開発にも反映させることで、より省エネルギー性能の高い窓ガラスの実現を目指した研究を行っている。

これまで得られた実験結果でも、調光ミラー窓ガラスを用いることによる冷房負荷低減効果は従来報告されているほどの省エネルギー窓ガラスの効果よりも大きいことがわかっており、これをできるだけ早く実用化することで、民生部門における CO₂ 削減に貢献したいと考えている。

謝辞

この研究の一部は（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成で実施されました。共同研究者だった包山虎産総研特別研究員（現在中国上海珪酸塩研究所）に謝意を表します。

参考文献

- [1] C. G. Granqvist: *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*, Elsevier, Amsterdam, (1995).
- [2] P. Jin, G. Xu, M. Tazawa and K. Yoshimura: Design, formation and characterization of a novel multifunctional window with VO₂ and TiO₂ coatings, *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 77, 455-459 (2003).
- [3] V. Wittwer, M. Datz, J. Ell, A. Georg, W. Graf and G. Walze: Gasochromic windows, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84, 305-314 (2004).
- [4] J. N. Huiberts, R. Griessen, J. H. Rector, R. J. Wijngaarden, J. P. Dekker, D. G. de Groot and N. J. Koeman: Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties, *Nature*, 380, 231-234 (1996).
- [5] P. van der Sluis, M. Ouwerkerk and P. A. Duine: Optical switches based on magnesium lanthanide alloy hydrides, *Applied Physics Letters*, 70, 3356-3358 (1997).
- [6] M. Ouwerkerk: Electrochemically induced optical switching of Sm_{0.3}Mg_{0.7}H_x thin layers, *Solid State Ionics*, 113-115, 431-437 (1998).
- [7] D. G. Nagengast, A. T. M. van Gogh, E. S. Kooij, B. Dam and R. Griessen: Contrast enhancement of rare-earth switchable mirrors through microscopic shutter effect, *Applied Physics Letters*, 75, 2050-2052 (1999).
- [8] T. J. Richardson, J. L. Slack, R. D. Armitage, R. Kostecki, B. Farangis and M. D. Rubin: Switchable mirrors based on nickel-magnesium films, *Applied Physics Letters*, 78, 3047-3049 (2001).
- [9] B. Farangis, P. Nachimuthu, T. J. Richardson, J. L. Slack, B. K. Meyer, R. C. C. Perera and M. D. Rubin: Structural and electronic properties of magnesium-3D transition metal switchable mirrors, *Solid State Ionics*, 165, 309-314 (2003).
- [10] T. J. Richardson, J. L. Slack, B. Farangis and M. D. Rubin: Mixed metal films with switchable optical properties,

Applied Physics Letters, 80, 1349-1351 (2002).

- [11] Y. Yamada, S. Bao, K. Tajima, M. Okada and K. Yoshimura: Optical properties of switchable mirrors based on magnesium-calcium alloy thin films, *Applied Physics Letters*, 94, 191910 (2009).
- [12] Y. Yamada, H. Sasaki, K. Tajima, M. Okada and K. Yoshimura: Optical switching properties of switchable mirrors based on Mg alloyed with alkaline-earth metals, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99, 73-75 (2012).
- [13] K. Yoshimura, Y. Yamada and M. Okada: Optical switching of Mg-rich Mg-Ni alloy thin films, *Applied Physics Letters*, 81, 4709-4711 (2002).
- [14] S. Bao, K. Tajima, Y. Yamada, M. Okada and K. Yoshimura: Color-neutral switchable mirrors based on magnesium-titanium thin films, *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 87, 621-624 (2007).
- [15] S. Bao, K. Tajima, Y. Yamada, P. Jin, M. Okada and K. Yoshimura: Optical properties and degradation mechanism of magnesium-niobium thin film switchable mirrors, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 116, 771-775 (2008).
- [16] K. Yoshimura, Y. Yamada, S. Bao, K. Tajima and M. Okada: Degradation of switchable mirror based on Mg-Ni alloy thin film, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, 4260-4264 (2007).
- [17] S. Bao, Y. Yamada, M. Okada and K. Yoshimura: Titanium-buffer-layer-inserted switchable mirror based on Mg-Ni alloy thin film, *Japanese Journal of Applied Physics*, 45, L588-590 (2006).
- [18] S. Bao, K. Tajima, Y. Yamada, M. Okada and K. Yoshimura: Metal buffer layer inserted switchable mirrors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 216-223 (2008).
- [19] K. Tajima, Y. Yamada, S. Bao, M. Okada and K. Yoshimura: Durability of all-solid-state switchable mirror based on magnesium-nickel thin film, *Electrochemical and Solid State Letters*, 10, J52-J54 (2007).
- [20] K. Tajima, Y. Yamada, S. Bao, M. Okada and K. Yoshimura: Aluminum buffer layer for high durability of all-solid-state switchable mirror based on magnesium-nickel thin film, *Applied Physics Letters*, 91, 051908 (2007).
- [21] K. Tajima, Y. Yamada, S. Bao, M. Okada and K. Yoshimura: Flexible all-solid-state switchable mirror on plastic sheet, *Applied Physics Letters*, 92, 041912 (2008).
- [22] K. Yoshimura, S. Bao, N. Uchiyama, H. Matsumoto, T. Kanai, S. Nakabayashi and H. Kanayama: New hydrogen sensor based on sputtered Mg-Ni alloy thin film, *Vacuum*, 83, 699-702 (2008).
- [23] K. Yoshimura, Y. Yamada, S. Bao, K. Tajima and M. Okada: Preparation and characterization of gasochromic switchable-mirror window with practical size, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, 2138-2142 (2009).

執筆者略歴

吉村 和記（よしむら かずき）

1986 年筑波大学物質工学専攻博士課程修了。工学博士。同年名古屋工業技術試験所（現産総研中部センター）入所。サンシャイン計画・ニューサンシャイン計画の基で調光ガラスの研究に従事。1993 年フリッツナー・ハーバー研究所（ドイツ）客員研究員。現在、サステナブルマテリアル研究部門環境応答機能薄膜研究グループ長。2010 年調光ミラーに関する研究で電気化学会会棚橋賞を受賞。2004 年より岐阜大学客員教授を兼務。この研究では、研究の総括および省エネルギー性能の評価を担当。



田嶋 一樹（たじま かずき）

2003年東北大学大学院工学研究科博士後期3年の課程修了、同年産業技術総合研究所特別研究員。2006年産業技術総合研究所入所。博士（工学）。以後、電氣的に駆動するエレクトロクロミック方式調光ミラーの研究開発に従事。現在、サステナブルマテリアル研究部門環境応答機能薄膜研究グループ主任研究員。専門は金属材料（薄膜、バルク）、機能性セラミックス材料、およびそれらを用いたデバイスの物性解析など。最近是有機高分子材料の適用など新規材料開発も行っている。2010年電気化学会棚橋賞受賞。この研究では、エレクトロクロミック型調光ミラーを担当。



山田 保誠（やまだ やすせい）

1998年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程材料機能工学専攻修了。博士（工学）。同年、名古屋工業技術研究所（現産総研中部センター）入所。2005年より1年間スウェーデン・ウプサラ大学オングストローム研究所客員研究員、帰国後1年間企画本部企画主幹を務める。2007年より5年間豊田工業高等専門学校非常勤講師を兼務。現在、サステナブルマテリアル研究部門環境応答機能薄膜研究グループ主任研究員。2010年電気化学会棚橋賞受賞。この研究では、薄膜の評価およびガスクロミック型調光ミラーを担当。



査読者との議論

議論1 Mg-Ca、Mg-Ba、Mg-Sr系調光ミラー用材料の発見の経緯

質問（村山 宣光：産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門）

Mg-Ca、Mg-Ba、Mg-Sr が調光ミラー用材料として優れた特性を持っていることを発見されたことは、すばらしい成果です。この発見の経緯を教えてください。ある程度予想された上で特性を評価されたのでしょうか。あるいは、セレンディピティ的な発見だったのでしょうか。

回答（山田 保誠）

全く目的の異なった研究ですが、サステナブルマテリアル研究部門の別の研究グループでは、発火しやすいことから扱いにくい金属であるマグネシウムを難燃性にする研究を行っており、マグネシウムにカルシウムを添加することで燃えにくくなるということを発見していました。調光ミラーでは、耐久性を高めるためにマグネシウムの酸化を抑える必要があるのですが、この成果を知って、カルシウムを加えることで燃えにくくなるのであれば、酸化もしにくくなるのではないかと考えたことが、この材料の研究を始めたきっかけです。作製して測定してみると、むしろ光学特性は優れていることがわかり、新材料系の発見につながりました。一般的に、カルシウムはとても活性が強く不安定な金属とされていますから、我々も、もしサステナブルマテリアル研究部門にいないければ、完全に異分野の研究である難燃性マグネシウムのことを知る機会はなく、したがって、元々活性の強いマグネシウムにカルシウムを添加する等という発想は思い浮かばなかったと思います。

議論2 Mg-Ca、Mg-Ba、Mg-Sr系調光ミラー用材料の知財戦略

質問（村山 宣光）

Mg-Ca、Mg-Ba、Mg-Sr 系材料の調光ミラー用材料としての知財取得で、可能な範囲で結構ですので、工夫された点や苦労された点を教えてください。

回答（山田 保誠）

調光ミラーに関する特許は、日本国内では我々のグループが基本的な材料特許を取得していますが、欧米では、マグネシウムとほとんどすべての遷移金属との合金薄膜の特許がすでに押さえられてしまっていました。そこで、この制約からのがれるため、マグネシウムとアルカリ土類金属の合金薄膜を用いた調光ミラー材料という形で特許出願しました。その際、これまでの遷移金属の添加に比べてアルカリ土類金属の添加がなぜ有効なのかということ詳しく調べ、その優位性について、単に現象論的に効果を述べるのではなく、理論的な観点から強調するようにしました。これにより、アルカリ土類金属を添加したマグネシウム合金薄膜が、調光ミラー材料として新しいカテゴリーの材料であることを主張しました。どうしても、基になる材料特許を押さえられてしまうと、それを用いたデバイスに関して、いくら構造等に工夫を加えても、ひっかかってしまうということがありますから、基本的な材料特許として独自の材料を申請できた意義は大きいと思います。

議論3 全固体型調光ミラーデバイスの新規性

質問（村山 宣光）

全固体型調光ミラーデバイスは、著者らのアイデアなのでしょう。

回答（吉村 和記）

酸化タングステン薄膜等を調光層に用いるこれまでのエレクトロクロミック材料においては、全固体型のデバイスが開発されていましたが、マグネシウム合金薄膜を用いた調光ミラーについてはまだ実現していませんでした。当初、これまでの全固体エレクトロクロミック素子の構造に準じて、調光層、電解質層、対極層と積層して作製したところ、動作するものができませんでした。なぜうまく動かないのかを検討した結果、調光ミラーでは積層順を逆にする方が良いのではないかと思いつき、その構造のデバイスの研究を行ったところ、良好なスイッチングを示すデバイスを開発することができました。この逆積みの多層薄膜構造が我々のオリジナルです。

議論4 調光ミラーガラスの実用化に向けた課題の整理

質問（五十嵐 一男：国立高等専門学校機構）

調光ミラーガラスを実用化するための3つの課題として、光学特性の改善、耐久性の改善、エレクトロクロミック方式の開発を挙げていますが、前者二つは、本質的にクリアしなければならない課題である一方、3項目は用途によって必ずしも実用化の必要条件ではないように思われますが、その点はいかがでしょう。

回答（吉村 和記）

ガスクロミックだけではどうしても用途が限定されてしまうため、エレクトロクロミック方式でスイッチングできることは実用化を目指す上で重要です。2002年の時点では、マグネシウム合金薄膜系の調光ミラーがエレクトロクロミックでスイッチングできるかどうかは全くわかっておらず、調光ミラーの実用化研究において重要な課題でした。

議論5 調光ミラーガラスの実用化にとっての大型化技術の位置付け

質問（五十嵐 一男）

実験室レベルから実使用レベルのサイズに大型化することによって光学特性、耐久性ともに新たな課題が生じることが想定されます。したがって、大型化も実用化にとっては大きな課題と思われるのですが、この論文では一切触れていません。実用化戦略の中で大型化の位置付けはどのように理解すればいいのでしょうか。

回答（田嶋 一樹）

ガスクロミック方式については、大型化は比較的簡単にできますが、エレクトロクロミック方式ではこれが問題になります。そのあたりの記述を追加しました。

議論6 調光ミラーの耐久性

質問（村山 宣光）

調光ミラーの実用化においては、スイッチングの繰り返しに対する耐久性は現在 1,500 回程度とのことです。耐久性を 10,000 回程度まで伸ばす見通しはいかがでしょうか。

回答（山田 保誠）

耐久性については、ごく最近ですが、大きな進展があり、ほとんど劣化しない調光ミラー材料も開発できるかもしれないということがわかってきました。この技術を発展させることで、10,000 回程度の耐久性をもつ材料についても、本年度中に開発できる見通しが立ちました。

議論7 調光ミラーガラスの実用化のための取り組み

質問（村山 宣光）

環境調和実験棟にて、調光ミラーガラスの省エネ効果を定量的に実証されましたが、その結果、産業界の調光ミラーガラスのとらえ方はどのように変わりましたか。また、調光ミラーガラスの実用化シナリオとして、企業コンソーシアムの設立等、ご検討されている計画がありましたら教えてください。

回答（吉村 和記）

調光ミラーについては、2003 年頃より特にガラスメーカーの方々に新しい調光材料として注目していただいていたのですが、この論文に書いたような歴史的な経緯もあり、本当に使える材料になるかを見定めたいとされていました。そのような状況の中、実際に建物に実装できる調光ミラーガラス窓を作製し、さらに、他の省エネルギーガラスと比較して大きな冷房負荷低減効果があることを実証したことは、かなりのインパクトをもって受け取っていただきました。現在ガラスメーカーの方でも、具体的に共同研究等に進められないかを検討いただいています。

調光ミラーガラスを、建物用の窓ガラスとして使える実際の商品までもっていくためには、調光ミラー薄膜以外の部分についても、例えば、実際の窓ガラスで使用できるスイッチングシステムの開発やスイッチング用電源供給システムの開発が必要です。現在、そのための研究を行っていますが、これらが解決できればかなり実用化に見通しがつきます。その段階でガラスメーカーにも積極的にアピールを行い、できればコンソーシアムを組んだような形で、実用化研究を加速的に進めていきたいと思っています。

有害化学物質の環境分析法の標準化

— 最先端の分析技術を用いた国際的化学品管理への貢献 —

谷保 佐知¹、羽成 修康²、堀井 勇一³、山下 信義^{1*}

有害化学物質の環境負荷量の把握、安全性評価、国際条約有効性の評価および政策立案を行ううえで、質の高い分析データの蓄積が重要であるが、そのためには信頼性の高い分析法と標準物質の開発・普及が必要である。我々は、特定の国や業界団体に限定したニーズが顕在化する前に、化学物質の有害性、使用量、環境残留性等に関する最新データを基に、必要とされる環境分析技術を予想することで国際的有害化学物質規制条約に先んじて国際規格を提供した。この論文では有害化学物質の環境挙動解明から分析法開発、そして2件のISO規格と2件のJIS規格の標準化に至るまでの研究過程とその意義について述べる。

キーワード：ISO 25101、PFOS、環境分析、ストックホルム (POPs) 条約、有害化学物質

Standardization of environmental analysis methods of hazardous chemicals

– Contribution to international control of hazardous chemicals by using advanced technologies –

Sachi TANIYASU¹, Nobuyasu HANARI², Yuichi HORII³ and Nobuyoshi YAMASHITA^{1*}

The development and dissemination of reliable analysis methods and reference materials, and the accumulation of high-quality analytical data are important to: (1) understand the environmental impact of hazardous chemicals; (2) evaluate the safety and effectiveness of international treaties regarding these chemicals; and (3) formulate policies accordingly. We published an international standard method for analysis of hazardous chemicals, using recent data on hazardous chemical usage and environmental persistence, before international regulations came into force. Here, we describe the development of our method, its adoption as ISO and JIS standards, and the significance of these achievements.

Keywords: ISO 25101, PFOS, environmental analysis, Stockholm convention on persistent organic pollutants (POPs), hazardous chemicals

1 はじめに

現在、我々の身の回りには、豊かで便利な生活を支えるために、数多くの化学物質が製造・使用されている。しかし、これらの化学物質には、環境中に存在する濃度は微量であっても、人や生態系に影響を及ぼす場合がある。この研究で対象としているノニルフェノール (NP、図1) やペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS、図2) およびペルフルオロオクタン酸 (PFOA、図2) もそれぞれ内分泌かく乱物質や残留性有機汚染物質 (POPs) と認識されており、ノニルフェノールに関しては、2012年に水生生物への影響を考慮して水質環境基準が制定されている。これらの化学物質による環境問題に適切な対策を打ち出すためには、環境負荷量の把握や地球環境動態を解明することが必須である。すなわち、これら化学物質による環境汚染の拡大を未然に防止するために、高感度かつ高精度で検出可能

な分析技術を開発させ、汚染を早期検出することが求められている。特に、極微量物質の測定においては、誤った測定値はいたずらに社会不安を高め、また誤った対策の実施にもつながることから、信頼性が確保された環境中の有害化学物質濃度分析データの蓄積が極めて重要となる。

しかし実際には、例えば残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約 (以後 POPs 条約) を議論する根拠となる有害物質のリスクプロファイル評価書 (リスクの概要をとりまとめた文書) においても、多数の文献・報告書がとり

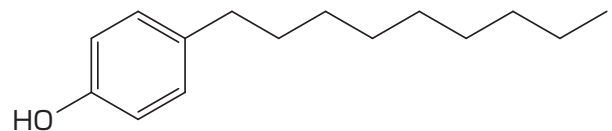


図1 直鎖型4-ノニルフェノール (NP) の構造式

1 産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西、2 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3、3 埼玉県環境科学国際センター 化学物質担当 〒347-0115 加須市上種足 914

1. Research Institute for Environmental Management Technology, AIST, 16-1 Onogawa Tsukuba 305-8569, Japan * E-mail: nob.yamashita@aist.go.jp, 2. National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan, 3. Center for Environmental Science in Saitama, 914 Kamitanadare, Kazo 347-0115, Japan

Original manuscript received June 27, 2012, Revisions received September 21, 2012, Accepted September 25, 2012

まとめられるが、個々の分析法とその QA/QC（精度保証／精度管理：Quality Assurance and Quality Control）まで厳密に議論されることはまれで、分析精度・信頼性まで考慮されていないのが現状である。

地球環境問題では、CO₂による温暖化でみられるように、世界の何処で測定された値であっても相互に比較可能な等しい信頼性を有することが不可欠である。このため我々は、まず分析法として信頼性の高い方法を開発すること、次に分析法を国際標準化することによって世界の環境研究者・分析従事者がこの方法ののっとって信頼性の高いデータを出すこと、さらに分析値をSI単位にトレーサビリティのとれたものにするため認証標準物質を作成することを目指した。なお、環境分析法の標準化について読者の参考とするため、ISOとJISの環境分析の体系について、以下、簡単に紹介する。

ISOの規格化は各分野の専門委員会（TC: Technical Committee）のもとで行われ、環境測定のISOには、TC146（大気）とTC147（水質）がある。それぞれのTCはさらに分科委員会（SC: Sub-Committee）、作業部会（WG: Working Group）に分かれ、各WGには国際会議の調整や規格原案の作成を行うコンピナーが決められている。この研究で規格化したノニルフェノール（ISO 24293:2009^[1]）およびPFOS/PFOA（ISO 25101:2009^[2]）はいずれもISO/TC147（水質）/SC2（物理的・化学的・生物的方法）の分科委員会に属し、それぞれWG17（フェノール類）およびWG56（PFOS/PFOA）の作業部会で議論し規格化された。

また、環境測定のJISには、環境指標や無機イオン、金属等を対象としたK 0101やK 0102、揮発性有機化合物を対象としたK 0125、農薬類を対象としたK 0128、ダイオキシン類を対象としたK 0312等がある。この研究で規

格化したノニルフェノール（K 0450-60-10:2007^[3]）およびPFOS/PFOA（K 0450-70-10:2011^[4]）はいずれもK 0450シリーズとして制定された。そもそもK 0450シリーズは、内分泌かく乱物質が世間で注目されていた1998年に、用水・排水中で微量で人および生態系に影響を及ぼす有機化学物質の測定の標準化を行うことを目的として規格化が始まり、一連の規格として、ビスフェノールA（K 0450-10-10）、アルキルフェノール類（K 0450-20-10^[5]）、フタル酸エステル（K 0450-30-10）、アジピン酸ビス（2-エチルヘキシル）（K 0450-40-10）、ベンゾフェノン（K 0450-50-10）が制定されている。なお、ノニルフェノールのJIS規格化はISO規格化とおよそ同時に開始し、PFOS/PFOAのJIS規格はISO規格の制定後に、MOD（一部修正規格）として規格化を開始した。

この報告では、有害化学物質の環境挙動解明から分析法開発、2件のISO規格^{[1][2]}と2件のJIS規格^{[3][4]}を具体例として、標準化に至るまでの研究過程とその意義について述べる。

2 国際的有害化学物質規制に対応した環境分析技術の必要性と標準化

地球環境問題に関する国際標準化は、国際機関や国立研究機関等の公的セクターの果たす役割が重要であり、我々もこの観点から国際標準化活動を行ってきた。一方で、環境分析法は公的な国際貢献の他にも、国内の産業界の排出実態の把握や、適切な環境対策の実施に有用であり、特に、化学物質の国際規制への対応が企業の存続にとっても必須となってきたことから、国内においても標準化の要望があり、JIS化を行った。

2.1 ノニルフェノールの環境分析技術の必要性と標準化

4-ノニルフェノール（NP、図1）は、ノニルフェノールエトキシレート（非イオン界面活性剤としてゴム・プラスチック工業、繊維工業、金属加工工業等さまざまな産業分野で使用）の工業原料として使用される一方で、内分泌かく乱作用が強く推察されている。また、NPは、下水処理や水環境中で好気・嫌気分解により、ノニルフェノールエトキシレートのエトキシ基が順次分解されて生成することが知られている。このため、工業界の自主規制によりノニルフェノールエトキシレートの家庭用品への使用は禁止されている。これらを鑑みて、2012年8月には水質汚濁に係る環境基準が改正され、水生生物の保全に係る水質環境基準として新たにNPが追加された。我々は、NPについて、外洋海水鉛直分布を1998年に初めて報告^[6]し、また、NP異性体について、分析法の開発と各異性体のエストロゲン様活性を明らかにする研究^{[7][8]}を開始するなど、分析法の開発、

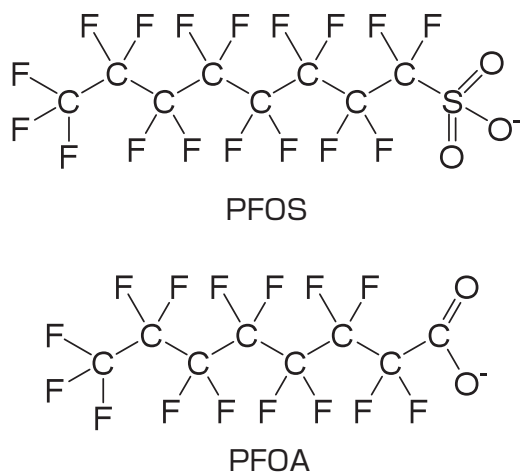


図2 ペルフルオロオクタンズルホン酸（PFOS）とペルフルオロオクタン酸（PFOA）の構造式

環境動態や毒性の解明に努めてきた。その後、2002年に、NPの水分析法の国際規格化の必要性を経済産業省へ説明し、基準認証事業（2002-2004年）「ノニルフェノール分析法の標準化」として採択され、分析法のISOおよびJIS提案を目指した研究を開始するに至った。

NPはアルキルフェノール類の一種であり、2002年当時は、JIS K 0450-20-10:2002^[5]があり、ISOもISO/CD 18857-1（現ISO 18857-1^[9]）として、ドイツがコンビナーとして策定中であった。両分析法とも、NPを単一の化合物として総量測定していて、異性体組成に関する情報はなかった。しかし、この研究で分析法を開発し規格化したISO 24293は、NPを内分泌かく乱作用が異なる13種類の異性体に分離し測定することを初めて可能にした分析法である。これは、ダイオキシン類（ポリ塩素化ジベンゾ-*p*-ジオキシンおよびポリ塩素化ジベンゾフランの総称）の分析において、210種類存在する異性体の中でも有害性が高くかつ有害性が異なる17種類の異性体を選別して個別に測定していることに相当する。NP異性体はそれぞれ異なるエストロゲン様活性を示すため、正確なリスク評価のためには、環境中における異性体別濃度を把握することが重要であり、環境試料中の異性体別濃度データの蓄積が重要であった。

開発した分析法をISOとして規格化するためには、すでにISO/TC147/SC2/WG17（フェノール類）においてNPの総量測定法を策定中（ISO 18857-1^[9]）であったコンビナーを務めるドイツとの調整が必要であった。そこで、ISO/TC147の議長（ドイツ）とWG17のコンビナー（ドイツ）と事前打ち合わせする場を設け、有害性の正確な評価を可能にする異性体別詳細分析の必要性を説明した結果、その意義が共有され、2003年のISO/TC147総会において、異性体別分析法の日本側の新規提案が承認された。結果として、国内JIS規格化^[3]を開始する前に、ISO新業務項目提案（NWIP: New Work Item Proposal）として2005年に採択され、フェノール類のワーキンググループWG17において国際標準化を開始した。ISO策定において、日本側の提案した分析法は専門委員との議論の過程でおよそ受け入れられたが、環境水試料中の懸濁物質（SS）の量と標準物質については議論があった。SSについては、環境水試料中に含まれるSS量の違いにより、分析精度への影響が焦点となったため、異なるSS量の環境水試料を用いて精度管理試験を行い、この結果をAnnex (informative)に掲載することで合意した。また標準物質については、市販の混合物を測定者自らが値付けする必要があったため、市販の5つのメーカーの混合物について測定した結果をAnnex (informative)に掲載することで合意に至っ

た。詳細は3.1章および4.1章に記載する。以上の議論のもと、2005年に作業原案（WD: Working Draft）、2006年に委員会原案（CD: Committee Draft）、2009年に国際規格原案（DIS: Draft International Standard）、同年に最終国際規格原案（FDIS: Final Draft International Standard）を経て、2009年7月に国際規格としてISO 24293が発行された。

2.2 PFOS/PFOAの環境分析技術の必要性和標準化

PFOSおよびPFOAは、図2に示すようにフッ素化アルキル基を有するペルフルオロアルキル化合物（PFASs）の一種である。PFOS/PFOA関連物質は、炭素-フッ素のとても強い共有結合を有するため、また、一分子中に疎水基（フッ素化アルキル基）と親水基（スルホン酸基やカルボキシル基等）を有するため、耐熱性、耐薬品性、界面活性、光透過性、イオン透過性等の多様な物理的・化学的性質に優れている。そのため、フッ素樹脂産業、先端電子機器材料、半導体、メッキ、エッチング、写真技術、乳化剤、撥水剤、防汚加工剤、消火剤あるいはそれらの中間原料等、機能性工業材料として多岐にわたり使用されてきた。図3にPFOS/PFOA関連物質に関係する社会動向および研究動向を示す。PFOS/PFOA関連物質は1940年代に製造法が開発され、1950年代から市販されてきた。しかし、2000年2月に野生生物からPFOSが高濃度で検出され、同年5月には米国3M社がPFOS関連物質の事業からの撤退を報告し、これを契機にPFOS関連物質による環境問題が一般に広く知られるようになった。その後、極域の野生生物からも高濃度で検出される等PFOS関連物質の環境残留性、生物への蓄積性の高さや長距離移動性、人や生物への影響の懸念が明らかになってきた^[10]。このような状況を受けて、国際的に使用や排出に関する規制が検討され、我が国ではPFOSとPFOAは2002年12月に化学物質の審査および製造等の規制に関する法律（化審法）の第二種監視化学物質となった。また、2006年1月には、米国環境保護庁（USEPA）が世界の主要製造メーカーに2015年までのPFOAおよびPFOA前駆体の自主的削減および撤廃を要請し、工場周辺の飲料水についてもガイドラインを設ける等、排出削減に向けた取り組みが始まった。PFOSは2005年6月以降、POPs条約による規制の検討が開始され、2010年にはPFOSとその原料となるペルフルオロオクタンスルホンフルオリド（PFOSF）が、POPs条約対象物質として、日本国内では化審法第一種特定化学物質として、一部のエッセンシャルユースを除き生産・使用が世界的に禁止されることとなった。しかし、規制が開始されてから分析法を標準化するのでは対応が後手に回ることになる。産業界および社会における対策を効率的

に行うためには、新規化学物質の危険性が一般に認識される前に、信頼性の高い分析法を確立し、適切なリスクプロファイル作成を可能にする必要がある。図4にPFOS/PFOAの分析法の標準化のシナリオについてまとめた。以下、標準化に至るまでの経緯を説明したい。

産総研環境管理技術研究部門の未規制物質研究グループでは、高度な機器分析技術と多数の国際共同研究体制から得られた知見・研究成果をもとに、さまざまな潜在的有害化学物質 (potential pollutants) について基礎研究を行ってきたが、PFOS についても国際規制が行われる以前から研究を行ってきた。当グループでは1995年より開始した米国ワズワースセンターとの国際共同研究の一環として、PFOS および PFOA の分析法開発を1999年より開始、2000年度には(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 産業技術研究助成事業として国内初のPFOS プロジェクトをスタートした。

2001年には、PFOS および PFOA の国内の環境残留濃度を、表層水および魚類について調査し、リスク評価を行ううえで重要な因子の一つである生物濃縮係数(水から生物への濃縮のされ易さをみる指標)を実環境において世界で初めて報告した^[11]。しかし、長距離輸送等、環境

動態を明らかにするためには、沿岸水や生物等の高濃度試料に比べ1000倍以上低濃度の外洋大気や外洋海水等の分析が必須であった。極低濃度レベルの分析法を確立するうえで、最大の課題はコンタミネーションの低減である。対象成分は撥水剤・汚れ防止剤・樹脂添加剤等として身の回りのあらゆる製品に使用されているためである。そこで、コンタミネーションを低減させるため実験環境・分析器具・機器・標準物質に至るまで系統的に汚染源を特定し、定量化することにより、そのレベルを1,000倍以上低減させ^[12]、また、世界で初めて弱陰イオン交換固相抽出カラム (Oasis®WAX) を抽出法に採用し、高精度・高回収率で抽出できる方法を開発してきた^[13]。その結果、外洋海水にも適用可能な、数 pg/L レベルの分析技術を確立した。

この分析技術をもとに、外洋表層海水・深層水の測定を開始した。我々は、PFOS/PFOA 研究を有害化学物質としての観点からのみ行ってきたこれまでの方法とは異なり、難分解性、水溶性で、超微量分析が可能であるという、3つの要件を有する地球規模の物質循環の化学トレーサーとしての有用性に着目し研究を行ってきた。2004年には世界で初めて外洋海水調査データを報告して、深層5,000 mの海水にも残留することを明らかにした^[12]。この研究の重

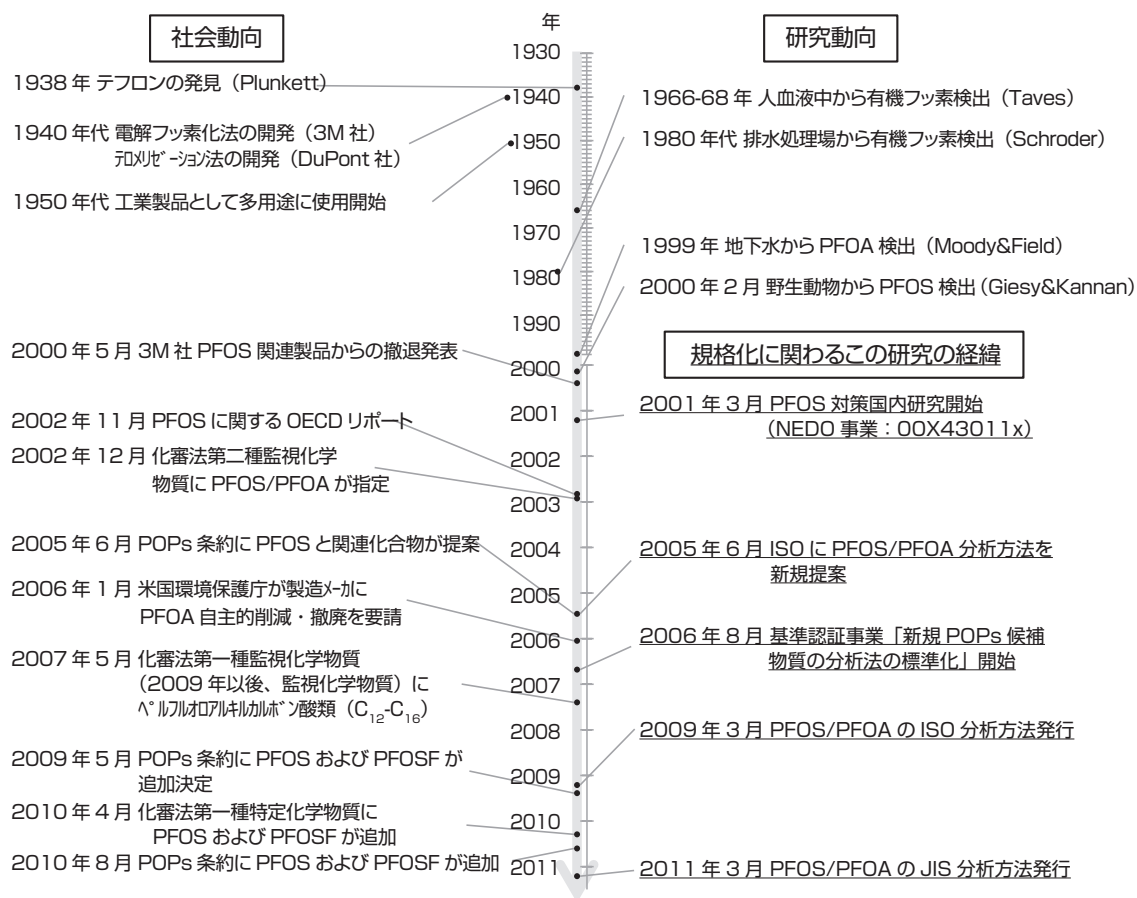


図3 PFOS/PFOA関連物質の社会動向および研究動向とこの研究の関わり

要性に注目したドイツ・ライプニッツ研究所、米国ワズワースセンター等、世界トップレベル研究機関との共同研究により、数度にわたり国際合同調査航海を行い、日本海、大西洋、南太平洋、ラブラドル海の表層から深層までの鉛直分布を測定し、各海域で鉛直分布濃度が異なることを発見した。特に、表層水が深層に一気に潜り込み、表層水と深層水がよく混合している北大西洋において、表層から深層まで一定濃度の鉛直分布を観測し、熱塩対流による地球規模外洋海水大循環メカニズムにより、PFOS 類の深層海水への供給が行われていることを発見した^{[14][15]}。これにより、大気経由輸送メカニズムしか議論されてこなかったこれまでの POPs 遠距離輸送メカニズムにおいて、海流による地球規模長距離輸送メカニズムの重要性を指摘した。現在では欧米の海洋学者を中心に、このメカニズムに関する調査が行われている。2012 年にカナダ PFOS/PFOA 研究の中心研究機関であるカナダ環境省等と産総研の連名で大西洋全域の表層海水分布を報告する^[16]等、産総研が開発した外洋調査研究手法が世界的に利用されている。

分析法の国際標準化において、これらの研究実績が高く評価され、2005 年 6 月に開催された ISO/TC147 総会において、日本がコンビナーとして作業部会 WG56 (PFOS/PFOA) を立ち上げ国際規格化を開始した。同年には PFOS とその 96 の関連物質が POPs 条約対象物質として提案されている。規格化に際し、基準認証研究開発事業（2006-2008 年）「新規 POPs 候補物質の分析法の標準化」により、研究開発（分析法の開発、分析性能の向上および精度管理試験による信頼性の確保等）や規格原案

の作成を行った。日本側が提案した分析技術についてはおよそすべて受け入れられたが、専門委員との議論に挙げられた課題についていくつか触れたい。まずは、使用する分析機器の選定である。PFOS および PFOA の環境測定が始まったごく初期には、今日一般に用いられている液体クロマトグラフ/タンデム質量分析計 (LC-MS/MS) ではなく、液体クロマトグラフ/質量分析計 (LC-MS) いわゆるシングル MS を用いた分析も行われていたため、LC-MS の使用の適否が議論された。原案策定過程において LC-MS を規定に入れるようイギリスの専門委員より提案があったが、LC-MS は LC-MS/MS に比べ、選択性が低く、試料により妨害物質との分離が不十分な場合があり、国際精度管理試験でも 23 機関中 1 機関しか使用していなかったことから、Annex (Informative) に記載するに留めた。また、分析試料としては、排水試料も対象試料として検討されていたが、国際精度管理試験では分析値のばらつきが大きいことから対象試料から外すことになった。PFOS および PFOA 以外の関連物質については、同じ分析法を用いて測定できる点を指摘されたが、ISO 策定当初は PFOS および PFOA のみを対象に進められており、後からその他関連物質を加えると、規格化が大幅に遅れるため、早急な規格化が求められていた状況を鑑み、対象成分は PFOS および PFOA に限定することになった。以上の検討により、2005 年に作業原案 (WD: Working Draft)、2006 年に委員会原案 (CD: Committee Draft)、2007 年に国際規格原案 (DIS: Draft International Standard)、2008 年に最終国際規格原案 (FDIS: Final Draft International

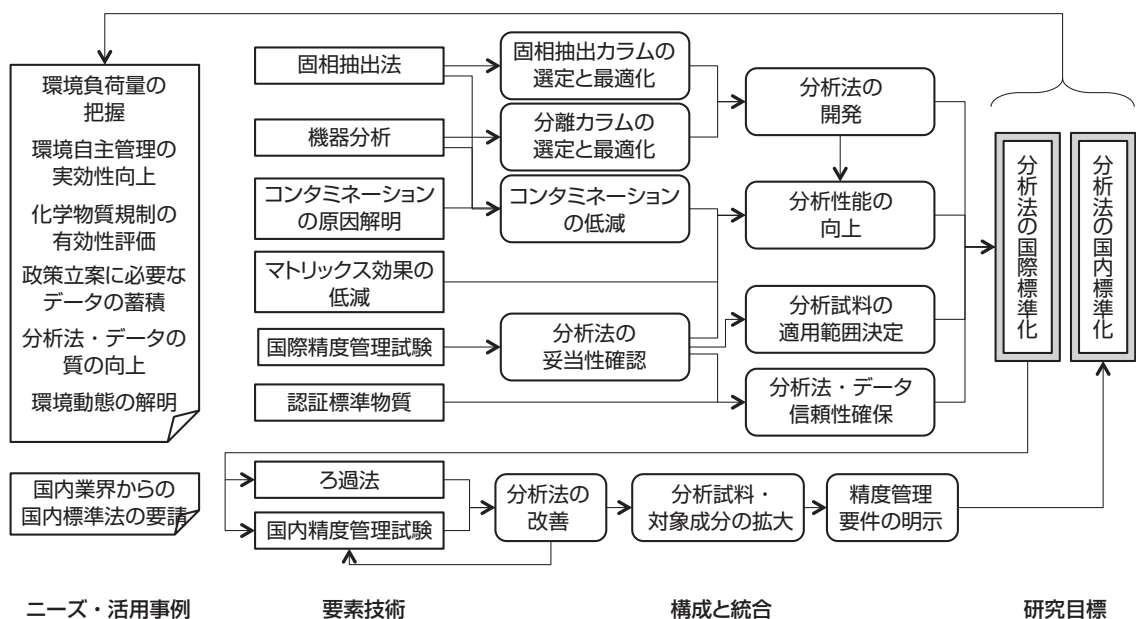


図4 PFOS/PFOA分析法の標準化のシナリオ

Standard) を経て、2009年3月に国際規格としてISO 25101^[2]が発行された。PFOSが国際的にPOPs条約に追加され、国内では化審法第一種特定化学物質に追加されたのはどちらも2010年であり、有害化学物質規制に先んじて国際規格を制定することができた。

また、ISO規格が確立したことにより、国際規格を基礎とした国内規格策定の原則(WTO/TBT協定)による国際整合化や、国内分析事業者からの国内規格の確立の要望を受け、国内連携体制・分析事業者への精度管理の普及を目的としてJIS規格化を行った(2011年3月22日発行^[4])。JIS規格はISO規格を基礎として、規定の追加、削除および変更して制定した(MOD)規格である。ISO規格からの変更点としては、LC-MSを使用しないことにした点(ISO 25101ではAnnex (Informative)に記載されていた)、SSの多い排水試料にも適用できるよう、試料のろ過操作を付属書(規定)に加えた点、またPFOSやPFOA以外の関連物質についても付属書(参考)にて測定できるよう記載した点等が挙げられる。これらの変更の際には、精度管理試験を2度行い、新しい分析法の妥当性について確認を行った。

2.3 標準化のタイミング

ISO 24293、ISO 25101に共通するのは、いずれも環境挙動に関する科学研究からスタートし、新しい分析法を開発することにより国際的に認められる成果を多数公表し、研究者コミュニティの間でデファクトスタンダードとしてコンセンサスができた段階で国際標準規格化を開始した点である。これは、経済・社会ニーズが顕現化してから国内規格化を行い、次に国際規格とのすりあわせを行うこれまでの流れとは逆の方向である。言い換えると、公的なセクターとしての地球環境保全・国際的な化学物質の適正使用を踏まえたグローバルな視点から求められる環境分析技術を判断し、国際的化学品規制が実効的に行われることを保証するために、できるだけ早く研究成果を発信することによって研究者コミュニティでの認知を高めながら、規制の発効と同時に国際規格を提供することで、国際的に信頼性の高い分析結果を得るよう努めた。特に、「有害化学物質管理には、信頼できる分析値とそれを可能にする標準分析技術が必須である」という考え方で研究を展開してきた。

3 分析法開発

3.1 ノニルフェノール分析法開発

NPは2002年当時、JIS K 0450-20-10としてすでに総量分析法が存在し、一般的な水試料の分析は可能であった^{[5][9]}。しかし、図1に示した直鎖型の4-NP以外にも、

NPは側鎖・置換位置の違いにより理論上211種類の異性体が存在し^[17]、環境試料からは環境分解性と有害性に差がある十数種類の異性体が検出されていた^{[18][19]}。したがって、信頼性の高いリスク評価を行うためには異性体ごとに正確に定量する方法を開発する必要がある。当時国内ではほとんど実績がなかったガスクロマトグラフ/preparative fraction collector (GC-PFC)^{用語1}を用い、混合物であるNP異性体を分離精製し、個々の異性体を液体窒素で冷却したガラスチューブへ捕集し、この操作を約100回繰り返してホルモン活性試験に必要な量を確保した6つの画分について、異性体ごとに内分泌かく乱作用が大きく異なることを確認した^{[6][7][18]}。次に市販されている多様なキャピラリーカラムを比較しNP異性体の高度分離に最適な分析条件を確立した。複雑な混合物であるNPを二次元ガスクロマトグラフ^{用語2}質量分析法(GC×GC-MS)を用いて、可能な限り分離分析する方法を検討し、NP製品中の102成分を分離することに成功した^[20]。

このように最新の分析技術を使用すれば、NPを相当数の成分に分離できるが、精度管理の観点からは大多数のユーザーが同じデータを得られる標準規格が必要である。そのためISO規格のNP異性体別分析法は、一般的なGCで分離可能な13種のNP異性体を分析の対象とした。抽出法には水分析において汎用性の高いスチレンジビニルベンゼン固相抽出法を用いた。NPは非イオン界面活性剤であるノニルフェノールエトキシレートの原料として使用され、ほとんどの水環境から検出されることから、コンタミネーションのコントロールには細心の注意が必要である。シリカゲルカラムカートリッジや固相抽出の目詰まり防止剤(ガラスビーズ)にもNPが含まれている可能性があった。

定量にはガスクロマトグラフ質量分析計(GC-MS)の選択イオン検出法(SIM)を使用し、異性体ごとに分離および感度の良いイオンを用いて定量した(図5)。これまでは、 m/z 135 (m/z : 質量電荷比、すなわち質量 m を電荷数 z で割った値) で検出される5~6本のピークを用いるが、この分析法では13異性体についてそれぞれ最適なモニターイオンを選択し、各NP異性体と内標準物質^{用語3}の相対感度係数(RRF)を求めることで、異性体別の評価が可能となった。NP異性体の選定イオンの検討については、堀井ら(2004)^[21]を参照されたい。NP異性体別の定量法が多少煩雑になってしまうのは、NPが複雑な混合物であること、異性体の市販標準品に限られること、さらに異性体によりフラグメントパターン^{用語4}が大きく変わることにある。個別の異性体標準品が供給されていない当時の状況では、定量にNP混合物を標準品として用いるしかなく、事前にNP混合物中の異性体組成をガスクロマトグラフ水素

炎イオン化検出器（GC-FID）^{用5}測定により求めておかなければならない。分析法開発に際して、複数の試薬メーカー（5社）から収集したNP混合物の異性体組成を確認しており、その変動係数（標準偏差を算術平均で割ったもの。相対的なばらつきを表す）は14%（異性体により若干異なる）であった。測定者が自分で異性体組成を値付けした混合物を定量標準物質として用いるのはISO規格として異例である。この点については国際規格原案（DIS）の段階で十分な討議が行われ、試薬メーカーの間で組成にほとんど差がないことを確認していること^[22]、また市販の5つのメーカーの混合物の組成をAnnex (informative) に情報を提供することで合意を得ることができた。

3.2 PFOS/PFOA分析法開発

PFOS/PFOAは、一般に研究が開始された2000年当時は高濃度試料である血液試料の分析がほとんどであり、環境水の分析はほとんど行われていなかった。報告

された分析値もコンタミネーションが原因で検出限界が高く、低濃度環境水について信頼性の高い分析技術はまだなかった。そこで、米国ワッツワースセンターと協力し、既存のオクタデシル基（C18）を用いた固相吸着剤法（SPE: Solid Phase Extraction）^[23]を基に2001年から研究を進めてきた^[11]。2005年6月にISO 25101を新規提案するまで、PFOS/PFOAの分析法の開発や開発した分析法を様々な環境試料に適用することで、信頼性の高い分析データを確保するための精度管理条件を明確化するための研究を行ってきた^{[11][12][14][24]-[29]}。PFOS/PFOA分析の最初の課題はコンタミネーションの低減である^[12]。なぜなら、高性能材料として我々の生活の至る所で使用されているポリテトラフルオロエチレン（PTFE）等のフッ素樹脂がPFOS/PFOAの汚染源となり、また最先端の分析機器ほどフッ素樹脂製部品が多いため、システムブランク（分析機器に起因するコンタミネーション）が高い傾向があったためであ

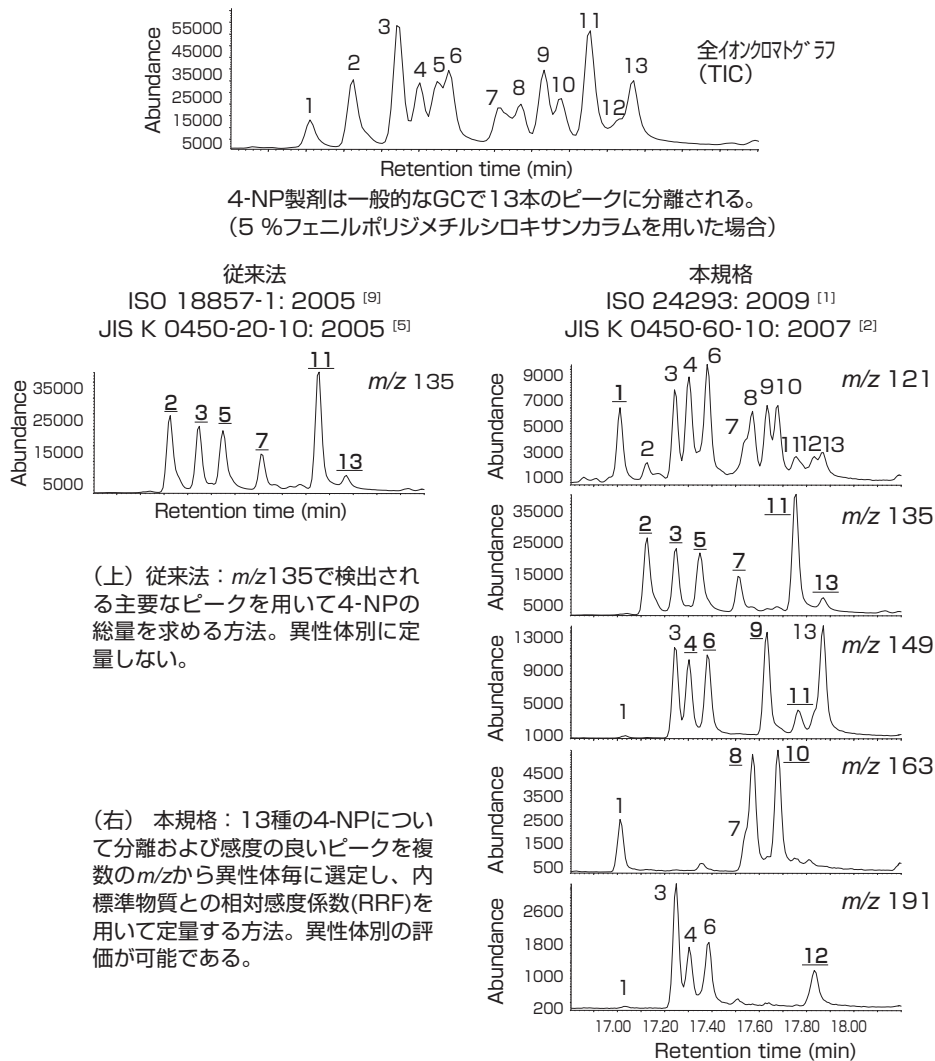


図5 GC-MSを用いたノニルフェノール分析法の比較
クロマトグラフ上に付した番号は各4-ノニルフェノール（4-NP）成分を表す。下線付き番号はそれぞれ定量に用いるようにISO規格で規定したピークを示す。

る。これを解決するために、測定に必須ではないパーツ、脱ガス装置やスイッチングバルブ等を液体クロマトグラフ/タンデム質量分析計から除くことにより、システムブランクを数十 fg ($1 \text{ fg} = 10^{-15} \text{ g}$) に低減した。また既存のオクタデシル基 (C18) を有する SPE カートリッジ^[23] は、コンタミネーションが高く低濃度の分析には使用できなかったため、親水性・親油性基を併せ持つ Waters 製 Oasis[®]HLB カートリッジを用いた PFOS/PFOA 分析法を開発し、オクタデシル基 (C18) を有する SPE カートリッジに比べコンタミネーションが低く外洋海水などの低濃度試料に適用できることを確認した^{[26][28]}。しかし、Oasis[®]HLB カートリッジは、PFOS/PFOA の測定に限定すれば高回収率で低コンタミネーションの優れた SPE カートリッジであるが、PFBA (ペルフルオロブタン酸) 等の短鎖化合物の抽出には適していない。そこで、我々は PFOS/PFOA の有機酸としての性質に注目し、酸性物質の吸着捕集に適した陰イオン交換能を有する Waters 製 Oasis[®]WAX カートリッジを用いることで、コンタミネーションを最小限に抑え、しかも PFOS や PFOA だけではなく、炭素鎖長が 2 から 18 までのカルボン酸、2 から 10 までのスルホン酸のすべてを一度に吸着回収できる分析条件を開発した (図 6)^{[13][30]}。使用する器具や試薬のコンタミネーションやシステムブランクの低減^[12]^{[24][25]} とその重要性については、ISO 25101 でも規定している。

液体クロマトグラフの分離カラムに、一般的な化学結合型シリカゲルを充填剤として用いると、短鎖から長鎖の順で溶出し、PFBA 等の短鎖化合物はピーク形状が悪く、

夾雑物質との分離も不十分である (図 7a)。一方、イオン交換能をもつ分離カラムでは、溶出順番が逆転し、長鎖から短鎖の順で溶出するため、ピーク形状と夾雑物質との分離が改善される (図 7b)^[30]。特に、異なった分離原理をもつ 2 種類の分離カラムによるクロスチェックは測定質量イオン強度比の確認と併用することで、これまでのシングルカラム測定と比較して大幅な信頼性向上につながる事が明らかとなった。ISO 25101 では、PFOS と PFOA のみを分析対象としているため、化学結合型シリカゲルカラムを分離カラムに使用している。一方、JIS 法も規定では PFOS と PFOA のみを対象としているため、ISO 25101 と同様に化学結合型シリカゲルカラムを分離カラムとして規定しているが、付属書 (参考) において、短鎖化合物を含む PFOS と PFOA 以外の関連化学物質の測定も可能で、そのためのカラムとして、化学結合型シリカゲル分離カラムとイオン交換能をもつ分離カラムを併記し、解説の中で 2 種類の分離カラムによるクロスチェックの重要性を説いている。

さらに重要な点は、検出感度が足りない場合、一般に試料量を増やすのに対し、我々は逆に試料量を減らすことで共存物による分析感度への影響 (マトリックス効果) を低減させ^[12]、結果として測定感度を向上させたことである。これにより、装置感度としては一世代前の機械であっても、コンタミネーションを低く抑えることで定量下限値を向上できる。フッ素樹脂を多用している最新の測定装置の方が一般に装置のシステムブランクが高いため、現状では PFOS 類の方法検出限界および精確さを決めているのは装置感度ではなく、いかに厳密な QA/QC を行っているかである。もともと、国内モニタリングの対象である一般河川・沿岸水についてはそれほど高感度の分析法は不要であるが、全球動態を理解するための外洋環境モニタリングでは高感度性に加えて、高度に厳密な QA/QC が必須となる。ISO 25101 はこれらの研究論文が骨子となっている。

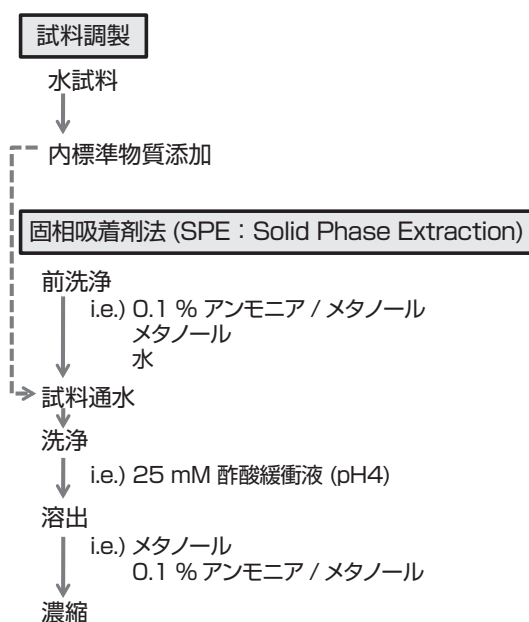


図6 弱陰イオン交換カートリッジ (Oasis[®]WAX) を用いた固相吸着剤法

4 開発した分析法の信頼性確保

ISO/TC147 (水質) / SC2 (物理的・化学的・生物的方法) では、規格となる分析法について、標準操作手順書 (SOP) を用いて複数の試験室で精度管理試験 (使用する分析法が妥当かどうか判断するための試験) を行い、得られた妥当性確認結果 (performance data) を規格内に含めることが必須となっている。一方、過去の国内規格では分析法の妥当性確認結果は必ずしも公表されていない。これに対して、社会ニーズ対応型基準創成調査研究事業「環境保全と産業競争力の強化に資する環境測定 JIS 体系の構築戦略事業」では水質と大気測定に関わる旧来の JIS 体系見直しの一環として、規格化された分析法の妥当性確認結果

の記載が必須である ISO 規格との整合性の観点から、精度管理試験による試験結果を記述する必要性が指摘されている。

4.1 ノニルフェノールに係わる精度管理試験

NP については、2008 年 7 月から 2008 年 9 月にかけて ISO/TC147/SC2/WG17（フェノール類）で日本のプロジェクトリーダー主催のもと、水試料中 NP 異性体分析の精度管理試験への参加を募集し、国内外 17 機関から応募があった。試験結果について統計処理を行った後に、結果を取りまとめて中間報告として各参加機関に通知し、同年 12 月に ISO/DIS 24293（規格原案）の妥当性確認結果として ISO/TC147/SC2/WG17 に報告書を提出した。同一の試験室内における分析値のばらつきをみる室内再現精度変動係数 (CV_P) は平均 10 %（最小値 4.4 %～最大値 21.6 %）で試料の種類、異性体組成の違いによる室内分析精度に差は認められなかった。一方で、異なる試験室間において測定する場合の分析値のばらつきをみる室間再現精度変動係数 (CV_R) はおおむね 30 % 以下であったが、異性体によっては 50 % を超えるものがみられた。特に NP 混合物中で組成の小さい異性体 (NP8 および NP12、図 5 参照) の試験室間のばらつきが大きく室間再現性が悪い傾向にあった。その原因として、同等の分離カラムを用いた場合でもメーカーが異なる場合や、カラムの劣化等により、異性体

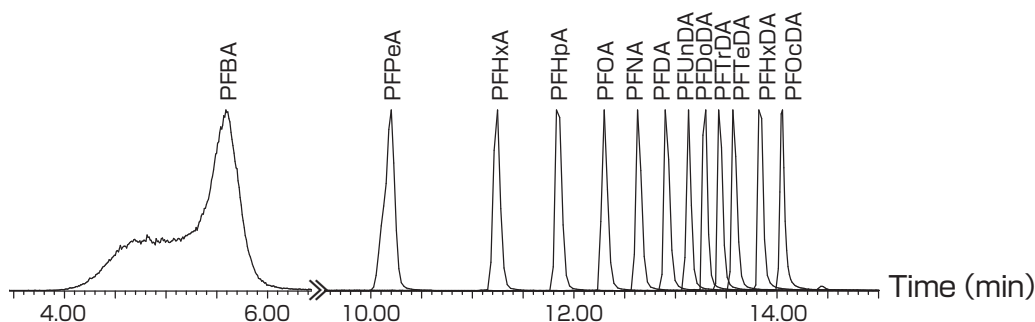
の分離に若干の差があることが報告されている。このように NP 混合物を定量標準品として用いる本分析法では、一部の異性体について若干のピーク分離能の差が定量値に影響を与えることを避けられなかった^[22]。

また、SS 量の差による分析精度への影響を確認するため、精度管理試験試料には、河川水 (SS 量 13 mg/L) と、SS を大量に含む下水処理施設の流入水 (SS 量 140 mg/L) を用いた。上述のように、一部の異性体 (NP8 および NP12、図 5 参照) について室間再現性が悪い傾向が見られたが、その他の異性体については CV_R 30 % 以内の良好な結果が得られている^[22]。

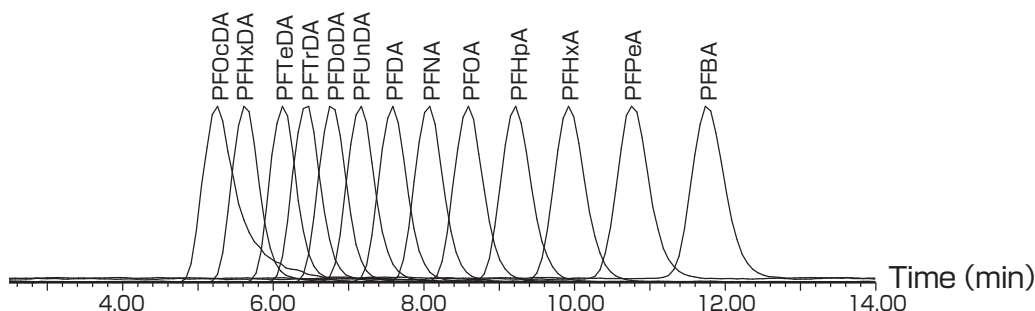
この分析法は、最終投票において 17 カ国中 15 票の賛成を得て 2009 年 7 月に ISO 24293:2009^[1] として発行された。この分析法が ISO 規格として立案されたのは 2005 年 2 月である。当時は NP 個別異性体の標準品はほとんど市販されていなかったが、ISO 24293 の確立により異性体分析の必要性が世界的に認められた結果、今日では ¹³C ラベル化体を含む複数の分岐異性体が試薬メーカーから販売されている。このため、次期改訂の際には市販標準物質を用いた信頼性の向上が期待できる。

4.2 PFOS/PFOAに係わる精度管理試験

この研究で実施した精度管理試験について説明する前に、2005 年に初めて行われた PFOS/PFOA 関連物質に



a) 化学結合型シリカゲル分析用カラム (Betasil C18) を用いた分離例 (短鎖から長鎖の順番で溶出)



b) マルチモード (逆相+陰イオン交換) 用カラム (JJ50 2D カラム) を用いた分離例 (長鎖から短鎖の順番で溶出)

図7 パルフルオロアルキルカルボン酸のクロマトグラムの分離例

関するインターラボラトリー試験について説明したい。インターラボラトリー試験では、参加者がそれぞれ選択したインハウスメソッド（規格として確立していない方法）を用いて行われる。精度管理試験とインターラボラトリー試験との違いは、前者は分析法の評価を行うことが目的のため、共通のSOPを用いて試験を行うのに対し、後者は分析値のばらつきや分析（事業）者の技術の評価することを目的としているため、使用する分析法の指定がない点である。2005年のインターラボラトリー試験は、Netherlands Institute for Fisheries Research、Örebro University、Water Services Corporationの3機関合同により企画・運営され、PFOS問題の初期から分析技術開発に取り組んできた37の国際的研究機関が参加、日本からは5機関（産総研、民間2、大学2）が参加した。この試験の結果、 CV_R が100%を超える分析値のばらつきが認められ、その原因としては純度の低い標準品の使用、試料容器によるコンタミネーション、測定機器の感度・検量線の差異による誤差等が指摘され、インハウスメソッドから得られる分析値の相互比較が困難であり、標準分析法規格化の必要性が明らかになった^[31]。当グループは、この試験において世界で初めて炭素数4のPFBAの測定データを提供している。

ISO 25101の妥当性確認のための精度管理試験は、産総研主催のもと2006年11月から2007年2月にかけて行われ、9ヶ国23機関が参加した。精度管理試験は分析法の妥当性を確認するための試験であるため、参加者は指定されたISO 25101の原案をSOPとして使用し、分析を行った。試験試料として、河川水、海水、低濃度標準品添加水、高濃度標準品添加水および標準品の分析が行われ、実試料中濃度がPFOSについて2.6-470 ng/L、PFOAについて9.4-4400 ng/Lの範囲で、それぞれの試料において CV_R が27%以下の精度を得ることに成功している（図8a）。排水試料についても同様に精度管理試験を行ったが、PFOSについて CV_R が40%になり、ISOが妥当性

の目安として設けている30%よりもばらつきが大きくなったことから、ISO 25101では排水試料を分析対象試料から外すことになった。

ISO 25101の制定により、国際規格を基礎とした国内規格策定の原則や国内事業者からの国内規格の要望を受け、JIS規格化を行うため、産総研主催のもと2回精度管理試験が行われた。2008年3月から7月に行われた第一回試験ではISO 25101と同一の分析法を用いて水道水、海水、河川水、低濃度標準品添加水、高濃度標準品添加水および標準品について試験を行った。参加機関は13機関であり、内11機関から提出された報告を基に試験結果の解析を行った。ほとんどの試料において、PFOS/PFOAおよびこれら関連物質の CV_R は30%以内と良好な結果が得られ（図8b）、ISO 25101が国内分析事業者においても使用可能なことが明らかになったが、低濃度水試料試験結果のばらつきや長鎖の化合物の低回収率等、いくつかの検点も認められた。2009年9月から2010年1月にかけて行われた第二回精度管理試験ではJIS規格化のために工業用水・工場排水を主な測定対象とした。参加機関は30機関であり、内23機関から提出された報告を基に試験結果の解析を行った。この試験でもPFOS/PFOAについてはすべての試料で満足の結果（ $CV_R < 30\%$ ）が得られ（図8c）、これは検量線作成用標準液も含めて、SOPを整備することでインハウスメソッドの違いによる分析誤差が抑えられたものと考えられる。

5 ISO規格を用いた国際的有害化学物質規制取り組みへのフィードバック

これらの国際規格はどのように役立てられているのだろうか。

まずISO 24293では、ノニルフェノール異性体別分析の必要性が国際的に周知され、試薬メーカーで異性体別標準品の販売が開始された。これにより、ドイツはISO 18857-1^[9]（ノニルフェノールを含むアルキルフェノール類を

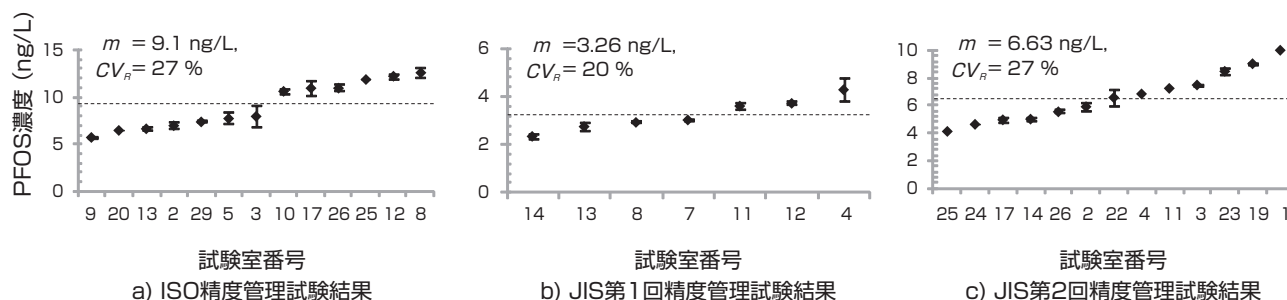


図8 ISOおよびJIS精度管理試験におけるPFOSの河川水試料結果
注) m = 測定平均値、 CV_R = 室内再現精度変動係数

液液抽出方法を用いて分析する方法で、ノニルフェノールは総量測定)のパート2となるISO 18857-2^[32](ノニルフェノールを含むアルキルフェノール類について固相抽出方法および誘導体法を用いて分析する方法)を規格化する際に異性体別測定を加えた。

ISO 25101については、国内半導体およびセットメーカーであるS社から、2003年より自社工場で使われていたPFOSについて、使用薬剤中のPFOS含有割合の調査や周辺への環境負荷の評価を産総研に依頼された。このように、まだ規制についての動きがない中、S社は他の企業に先駆けてPFOS問題対応を行い、2006年時点でそれまでのPFOS使用量や環境への負荷量等の情報の把握や代替物質への移行等を行い、2008年に行われた経済産業省からの聞き取り調査等においても十分な安全性確保を達成していた。一方で、2009年までPFOS問題に対応していなかった企業は使用量の把握や代替物質への移行等、規制へのカウントダウンをにらみつつ短期間での対応に苦慮することになった。また、精度管理データのない民間分析事業者の場合は、その報告値の信頼性に疑義が残る場合もあるが、国際規格であるISO 25101に準じた調査結果は所管の要請にも受け入れられ易く、化審法の適用除外・エッセンシャルユースの検討にも貢献している。

分析においては、測定値を決定するために正確に値付けされた標準物質が必要になる。これまでは試薬メーカーが保証する値を使うしか選択の余地がなかったが、産総研計量標準総合センター(NMIJ)において、ISO 25101にふさわしい、国際単位系(SI)へのトレーサビリティが確保された認証標準物質(certified reference material: CRM)^{用語6}を作製した。可能な限り国内外規格と標準物質の連携を強化するため、PFOSについては国際規格策定時から標準物質開発を併行し、その結果、PFOS関連CRMに関しては迅速な供給が実現した。CRM開発に関してNMIJは、標準物質の生産に関する規格である、ISO Guide 34^[33]およびISO/IEC 17025^[34]に適合したマネジメントシステムを運用しており、本CRMもこれにしたがって生産を行っている。SI単位へのトレーサビリティ確保には、一次標準測定法^{用語7}^[35]の適用が推奨されている。その一つである凝固点降下法は、一般に有機標準物質の純度測定に利用されている。ただし、今回確保した原料は精製操作が容易なPFOSカリウム塩(K-PFOS)であったため、融点がとても高く(約300℃)、これまでのNMIJが培った凝固点降下法^[36]^[39](150℃程度以下)による純度測定では正確な結果を得ることが困難であった。そこで、高温高压耐用の試料測定容器および高温の融解温度校正用の標準物質を凝固点降下法に適用することで、測定の再現精度が向上

表1 ペルフルオロオクタンスルホン酸カリウム標準液における不確かさ要因

不確かさ要因	相対標準不確かさ(%)
純度評価	0.059
標準液調製	0.515
均質性	0.474
安定性	0.066
溶媒ブランク	0.001

注) 相対標準不確かさ：標準偏差などで表される測定結果の不確かさ(いわゆる標準不確かさ)を、測定結果で割った相対量。

し、K-PFOS等の高融点物質のSI単位へのトレーサビリティを確保した純度決定が可能となった(図9)。このため、これまでの方法とこの方法との組み合わせにより、より多くの有害物質の純度評価が期待できる^[40]。一方、標準液の調製は、質量比混合法(国家計量標準機関等に頻繁に用いられている調製法の一つ^[41])を使用しており、標準液の濃度はK-PFOSの希釈率と純度を乗じることで算出された。この濃度(認証値)は、SI単位へのトレーサビリティを確保している。以上のように、認証値および不確かさ(表1)を決定したPFOS標準液の開発を2009年度に完了した^[42](図10)。これによりPFOSのPOPs条約追加(2010年8

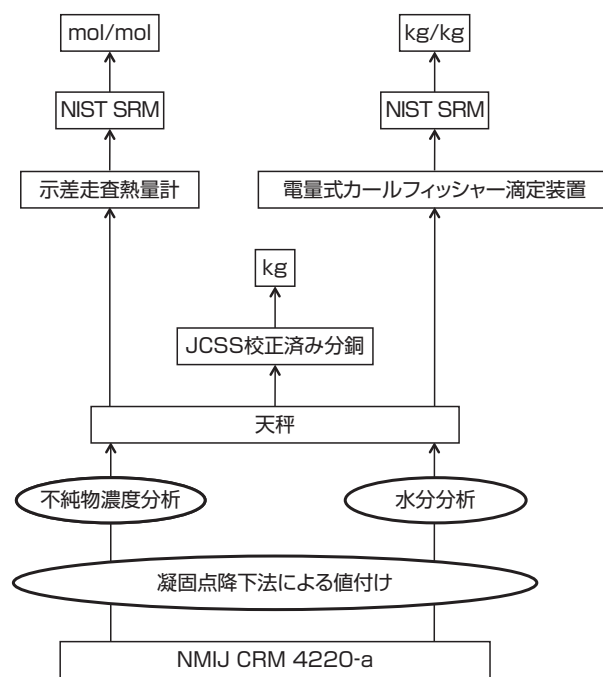


図9 ペルフルオロオクタンスルホン酸カリウム標準液(NMIJ CRM 4220-a)に関するトレーサビリティ体系図(原料)
注) JCSS: 校正事業者登録制度の略称、NIST SRM: 米国立標準技術研究所製認証標準物質の略称

月）とおよそ同時に、ISO 国際標準分析法（2009年3月）と世界初のCRM（2010年）が使用可能になった。

一方で、規格化したことで間接的に発生する弊害として、Oasis[®]WAX カートリッジの使用について指摘したい。ISO 25101によるPFOS/PFOA関連物質の分析は、分析法に関する基礎的な知見やISO 25101の基となる厳密な精度管理条件を前提としており、それらが不十分な場合には、分析値の信頼性・再現性の低下がみられることがある。SPEとして多用されるOasis[®]WAX カートリッジは、ISO 25101およびJIS K 0450-70やその基本技術となった原著論文^[13]に記載したように、低濃度試料について洗浄液として適切な緩衝溶液を用いればC2からC18までの多様なPFOS/PFOA関連物質について優れた結果が得られる。しかし、ギ酸等を用いる簡易溶出法(PFOS含有廃棄物ガイドライン(2010)等)に記載されている)を適用すると、マトリックスにより回収率が大きく変動することを我々は確認している。このため、ギ酸を用いる場合には、溶出条件の最適化を十分行わなければ信頼性は確保できない。Oasis[®]WAXカートリッジと類似の性質を有するSPEカートリッジを用いた場合、短鎖(PFBA)の回収率や再現性の低下が起きる原因は同じである。さらに、最近の研究ではこのSPEカートリッジを海水分析に使用する場合には特に厳密な脱塩操作・溶出条件管理が必要なことを確認している。高濃度試料中の炭素鎖8のPFOS/PFOAの測定に限定すれば、むしろ単純なC18系あるいはポリマー系のSPEの方が、コンタミネーションやPFOS/PFOA以外の関連化合物の低回収率などの問題はあがるが、初心者には使い易い。なお、ISO 25101およびJIS K 0450-70には、Oasis[®]WAXカートリッジ以外にも使用可能なSPEカートリッジ例として、

C18系^[23]やポリマー系SPE(Oasis[®]HLBカートリッジ^[26]^[28]など)について、それぞれAnnex(informative)および附属書(参考)として記載されている。

現状では、ISO 25101の基本概念である「固相抽出法と液体クロマトグラフ/タンデム質量分析計を用いたPFOS類分析技術」の信頼性をどのように確認するかという、最も重要なQA/QCの本質が十分理解されていない例も多い。ISOの問題点としては、JISのように巻末に「解説」がなく、その分析操作を行う理由や背景等の詳細な説明が少ないことである。JISでは、妥当性確認結果だけでなく、JIS策定審議中に議論された事項、規定の理由や背景を詳細に解説し、ユーザーが操作の一つ一つを十分理解できるようにした。分析化学の基礎に立ち返り、高水準の試験データを作成し、各国・各試験室間の試験データの相互受け入れを可能とする同水準の試験データを得るための優良試験所基準(Good laboratory Practice: GLP)^{用語8}を充実させることが必要である。

6 おわりに

近年、化審法が環境省・経済産業省・厚生労働省の3省管轄になり、POPs条約検討委員会も同様の枠組みで進められている。省庁間で適切な情報共有と領域横断的な国際規格のサポートが実現できれば、日本の有する環境汚染科学に関する貴重な知見・技術を元に多数の国際規格の確立が環境分析分野で期待できる。これは狭い意味での環境だけではなく、製品中に含まれる有害物質や越境汚染、バーゼル条約等、有害化学物質問題の国際的解決を可能にするための基礎でもあり、リスク・動態モデルや政策策定には、これらの実測値の信頼性を客観的に確保することが必要不可欠である。

また、日本がコンビナーとして最近確立した水質測定に関するISO国際規格には、ここで述べたISO 24293^[1]とISO 25101^[2]、加えてISO 22719^[43]の3件がある。さらに現在、海水のpH測定法の国際規格化も進行中であり、これらはすべて地球汚染・温暖化等、現在の国際社会の最重要課題の一つである地球環境問題に密接に関係する国際規格であることは注目に値する。これは、ISOの主目的である「国際規格を用いて国際問題を解決する」という概念を地球環境問題へ拡大し、国内産業・環境政策と国際経済問題の解決へ向けて動き出した一例と考えられる。今後、数多くの環境測定国際規格化を省庁の枠組みを超えて実現し、環境問題の解決策をいち早く見いだすことにより国際的な貢献を行うことは、「環境問題先進国」としての我が国の責務であると考えられる。また、近年においては環境問題等の課題解決技術の先行



図10 ペルフルオロオクタンスルホン酸カリウム標準液(NMIJ CRM 4220-a)

取得による産業競争力の強化のための標準化活動が求められており、今後は産業界とも緊密に連携した標準化が重要となる。

謝辞

この研究開発において、ISO/TC147 国内委員長の宮崎章氏、ISO/TC147 国内委員、ノニルフェノールおよびPFOS/PFOAの標準化運営委員会委員および委員長の土屋悦輝氏、ノニルフェノールおよびPFOS/PFOAの標準化運営委員会委員の中川順一氏、社団法人産業環境管理協会、財団法人日本環境測定分析協会および精度管理試験参加機関をはじめとする関係者の皆様のご協力およびご指導をいただいたことに深く感謝いたします。

用語の説明

用語1: GC-PFC: GC キャピラリーカラムの高分離能を利用して、複雑なマトリックス中に含まれる微量目的物質を集め、濃縮・精製する分取 GC システム。

用語2: 二次元ガスクロマトグラフ: 二つのキャピラリーカラムを用い、共溶出する対象化合物、または妨害物質を分離・精製する方法。その分離能は使用するキャピラリーカラムの長さ、径および液相の組み合わせにより決まる。この方法は化合物同士の高度分離を可能にするだけでなく、分析対象以外の有機化合物を分析ラインから除去することにより、検出器のバックグラウンドを低減し、その結果高感度な分析を可能にする。

用語3: 内標準物質: 試料の前処理操作、分析操作の段階における収率の補正、回収率の確認等のために添加される。目的成分と化学構造が類似した物質を用いる。

用語4: フラグメントパターン: 分子イオン等の開裂によって生成したイオンのパターンのこと。フラグメントパターンは化合物の化学構造を反映したものとなる。

用語5: 水素炎イオン化検出器 (FID): ガスクロマトグラフで用いられる標準的な検出器。水素の燃焼熱によって有機化合物の骨格炭素をイオン化し、そのイオン電流の変化を測定する検出器。

用語6: 認証標準物質 (certified reference material: CRM): トレーサビリティを確立した手順によって、一つ以上の特性値が認証された標準物質のこと (認証書が付属)。各認証値には、ある信頼水準での不確かさが付いている。

用語7: 一次標準測定法: “最高の質を有し、その操作が完全に記述され、理解され、かつ不確かさがSI単位を用いて完全に記述される方法で、その量についての他の標準を参照せずに測定結果を標準として使用で

きる方法”と定義されている手法。化学分析での一次標準測定法は、重量法、滴定法、電量滴定法、同位体希釈質量分析法、凝固点降下法である。

用語8: 優良試験所基準 (good laboratory practice: GLP): 各種安全性試験において、水準の試験データ作成を促進し、試験成績の信頼性や質を確保することを目的とし、計画、実施、監査、記録、資料保管および報告される際の組織的な手順およびその条件に関する品質システムである。1981年に経済協力開発機構(OECD)で制定、1997年に改訂され、化審法では1984年3月にGLP制度を導入し、OECDのGLP原則に整合している。

参考文献

- [1] ISO 24293:2009, Water quality -- Determination of individual isomers of nonylphenol -- Method using solid phase extraction (SPE) and gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) (2009).
- [2] ISO 25101:2009, Water quality -- Determination of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) -- Method for unfiltered samples using solid phase extraction and liquid chromatography/mass spectrometry (2009).
- [3] 日本工業規格: JIS K 0450-60-10:2007, 工業用水・工場排水中の4-ノニルフェノールの異性体別試験方法 (2007).
- [4] 日本工業規格: JIS K 0450-70-10:2011, 工業用水・工場排水中のペルフルオロオクタンスルホン酸およびペルフルオロオクタノ酸試験法 (2011).
- [5] 日本工業規格: JIS K 0450-20-10:2005, 工業用水・工場排水中のアルキルフェノール類試験方法 (2005).
- [6] N. Kannan, N. Yamashita, G. Petrick and J.C. Duinker: Polychlorinated biphenyls and nonylphenols in the Sea of Japan, *Environ. Sci. Technol.*, 32(12), 1747-1753 (1998).
- [7] N. Yamashita, K. Kannan, S. Hashimoto, A. Miyazaki and J.P. Giesy: Estrogenic potency of individual nonylphenol congeners isolated from technical mixtures, *Organohalogen Compd.*, 42, 121-125 (1999).
- [8] Y-S Kim, T. Katase, T. Inoue, S. Sekine, Y. Fujimoto and N. Yamashita: Variation of estrogenic activity in a commercial nonylphenol preparation fractionated by HPLC, *Organohalogen Compd.*, 53, 61-64 (2001).
- [9] ISO 18857-1:2005, Water quality -- Determination of selected alkylphenols -- Part 1: Method for non-filtered samples using liquid-liquid extraction and gas chromatography with mass selective detection (2005).
- [10] J. P. Giesy and K. Kannan: Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife, *Environ. Sci. Technol.*, 35(7), 1339-1342 (2001).
- [11] S. Taniyasu, K. Kannan, Y. Horii, N. Hanari and N. Yamashita: A survey of perfluorooctane sulfonate and related perfluorinated organic compounds in water, fish, birds, and humans from Japan, *Environ. Sci. Technol.*, 37(12), 2634-2639 (2003).
- [12] N. Yamashita, K. Kannan, S. Taniyasu, Y. Horii, T. Okazawa, G. Petrick and T. Gamo: Analysis of perfluorinated acids at parts-per-quadrillion levels in seawater using liquid chromatography-tandem mass spectrometry, *Environ. Sci. Technol.*, 38(21), 5522-5528 (2004).

- [13] S. Taniyasu, K. Kannan, M. K. So, A. Gulkowska, E. Sinclair, T. Okazawa and N. Yamashita: Analysis of fluorotelomer alcohols, fluorotelomer acids, and short- and long-chain perfluorinated acids in water and biota, *J. Chromatogr. A*, 1093(1-2), 89-97 (2005).
- [14] N. Yamashita, K. Kannan, S. Taniyasu, Y. Horii, G. Petrick and T. Gamo: A global survey of perfluorinated acids in oceans, *Mar. Pollut. Bull.*, 51(8-12), 658-668 (2005).
- [15] N. Yamashita, S. Taniyasu, G. Petrick, S. Wei, T. Gamo, P. K. S. Lam and K. Kannan: Perfluorinated acids as novel chemical tracers of global circulation of ocean waters, *Chemosphere*, 70(7), 1247-1255 (2008).
- [16] J.P. Benskin, D.C.G. Muir, B.F. Scott, C. Spencer, A.O. De Silva, H. Kylin, J.W. Martin, A. Morris, R. Lohmann, G. Tomy, B. Rosenberg, S. Taniyasu and N. Yamashita: Perfluoroalkyl acids in the Atlantic and Canadian Arctic Oceans, *Environ. Sci. Technol.*, 46(11), 5815-5823 (2012).
- [17] K. Guenther, E. Kleist and B. Thiele: Estrogen-active nonylphenols from an isomer-specific viewpoint: a systematic numbering system and future trends, *Anal. Bioanal. Chem.*, 384(2), 542-546 (2005).
- [18] Y.-S. Kim, T. Katase, M. Makino, T. Uchiyama, Y. Fujimoto, T. Inoue and N. Yamashita: Separation, structural elucidation and estrogenic activity studies of the structural isomers of 4-nonylphenol by GC-PFC coupled with MS and NMR, *Aust. J. Ecotoxicol.*, 11, 137-148 (2005).
- [19] M. Makino, T. Uchiyama, H. Saito, S. Ogawa, T. Iida, T. Katase and Y. Fujimoto: Separation, synthesis and estrogenic activity of 4-nonylphenols: two sets of new diastereomeric isomers in a commercial mixture, *Chemosphere*, 73(8), 1188-1193 (2008).
- [20] T. Ieda, Y. Horii, G. Petrick, N. Yamashita, N. Ochiai and K. Kannan: Analysis of nonylphenol isomers in a technical mixture and in water by comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry, *Environ. Sci. Technol.*, 39(18), 7202-7207 (2005).
- [21] 堀井勇一, 片瀬隆雄, 金倫碩, 山下信義: 相対感度係数を用いるノニルフェノール異性体測定法の開発と検証, *分析化学*, 53(10), 1139-1147 (2004).
- [22] 堀井勇一, 谷保佐知, 土屋悦輝, 中川順一, 高菅卓三, 山下信義, 宮崎章: ISO 24293:2009に基づく水試料中ノニルフェノール異性体分析の試験所間比較, *分析化学*, 59(4), 319-327 (2010).
- [23] K. J. Hansen, H. O. Johnson, J. S. Eldridge, J. L. Butenhoff and L. A. Dick: Quantitative characterization of trace levels of PFOS and PFOA in the Tennessee River, *Environ. Sci. Technol.*, 36(8), 1681-1685 (2002).
- [24] S. Taniyasu, K. Kannan, Y. Horii and N. Yamashita: The first environmental survey of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and related compounds in Japan, *Organohalogen Compd.*, 59, 311-314, (2002).
- [25] S. Taniyasu, N. Yamashita, Y. Horii, K. Kannan and T. Gamo: Perfluorooctane sulfonate and related compounds in the South China Sea, Sulu Sea and Japanese environmental samples, *Organohalogen Compd.*, 62, 339-342, (2003).
- [26] M. K. So, S. Taniyasu, N. Yamashita, J. P. Giesy, J. Zheng, Z. Fang, S. H. Im and P. K. S. Lam, Perfluorinated compounds in coastal waters of Hong Kong, South China, and Korea, *Environ. Sci. Technol.*, 38(15) 4056-4063 (2004).
- [27] N. Yamashita, K. Kannan, S. Taniyasu, Y. Horii, N. Hanari, T. Okazawa and G. Petrick: Environmental contamination by perfluorinated carboxylates and sulfonates following the use of fire-fighting foam in Tomakomai, Japan, *Organohalogen Compd.*, 66, 4013-4018 (2004).
- [28] E. Sinclair, S. Taniyasu, N. Yamashita and K. Kannan: Perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in Michigan and New York waters, *Organohalogen Compd.*, 66, 4019-4023 (2004).
- [29] K. S. Guruge, S. Taniyasu, N. Yamashita, S. Wijeratna, K. M. Mohotti, H. R. Seneviratne, K. Kannan, N. Yamanaka and S. Miyazaki: Perfluorinated organic compounds in human blood serum and seminal plasma: a study of urban and rural tea worker populations in Sri Lanka, *J. Environ. Monit.*, 7(4), 371-377 (2005).
- [30] S. Taniyasu, K. Kannan, L. W. Y. Yeung, K. Y. Kwok, P. K. S. Lam and N. Yamashita: Analysis of trifluoroacetic acid and other short-chain perfluorinated acids (C2-C4) in precipitation by liquid chromatography-tandem mass spectrometry: comparison to patterns of long-chain perfluorinated acids (C5-C18), *Anal. Chim. Acta*, 619(2), 221-230 (2008).
- [31] S. P. J. van Leeuwen, A. Karrman, B. van Bavel, J. de Boer and G. Lindstrom: Struggle for quality in determination of perfluorinated contaminants in environmental and human samples, *Environ. Sci. Technol.*, 40(24), 7854-7860 (2006).
- [32] ISO18857-2:2009, Water quality -- Determination of selected alkylphenols -- Part 2: Gas chromatographic-mass spectrometric determination of alkylphenols, their ethoxylates and bisphenol A in non-filtered samples following solid-phase extraction and derivatisation (2009).
- [33] ISO Guide 34:2009, General requirements for the competence of reference material producers (2009).
- [34] ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (2005).
- [35] M. J. T. Milton and T. J. Quinn: Primary methods for the measurement of amount of substance, *Metrologia*, 38(4), 289-296 (2001).
- [36] Y. Shimizu, Y. Ohte, X. Bao, S. Otsuka, Y. Kitamaki, K. Ishikawa, T. Ihara and K. Kato: Development of certified reference materials of high-purity volatile organic compounds: purity assay by the freezing-point depression method, *Accred. Qual. Assur.*, 13(7), 389-396 (2008).
- [37] N. Hanari, K. Ishikawa, Y. Shimizu, R. Iwasawa, S. Otsuka and T. Yarita: Certified reference material for determination of *p*-*n*-nonylphenol and *p*-*n*-heptylphenol from the National Metrology Institute of Japan, *Organohalogen Compd.*, 70, 1349-1352 (2008).
- [38] N. Hanari, K. Ishikawa, Y. Shimizu, R. Iwasawa, S. Otsuka, N. Fujiki, X. Bao, T. Yarita, K. Kato and N. Yamashita: Certified reference materials for determination of phthalates and alkylphenols from the National Metrology Institute of Japan, *Organohalogen Compd.*, 71, 1605-1609 (2009).
- [39] N. Hanari, K. Ishikawa, S. Otsuka, K. Higuchi, R. Iwasawa and T. Yarita: Certified calibration solution reference material for the determination of benzo[a]pyrene from the National Metrology Institute of Japan (NMIJ), *Polycyclic Aromat. Compd.*, 28(4-5), 302-319 (2008).
- [40] N. Hanari, N. Itoh, R. Iwasawa, M. Numata, S. Taniyasu and N. Yamashita: Purity evaluation of potassium perfluoroalkylsulfonate using differential scanning calorimetry, *Organohalogen Compd.*, 72, 271-274 (2010).
- [41] ISO 6142:2001, Gas analysis -- Preparation of calibration gas mixtures -- Gravimetric method (2001).
- [42] 独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター: NMIJ 認証標準物質 (NMIJ CRM), <http://www.nmij.jp/service/C/>
- [43] ISO 22719:2008, Water quality -- Determination of total alkalinity in sea water using high precision potentiometric titration (2008).

執筆者略歴

谷保 佐知（たにやす さち）

2006年3月金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年4月産業技術総合研究所環境管理技術研究部門未規制物質研究グループに入所し、残留性有機ハロゲン化合物の分析法開発および環境動態解明に従事。この研究ではペルフルオロオクタンスルホン酸およびペルフルオロオクタン酸類の分析法開発およびISO規格およびJIS規格化に携わった。



羽成 修康（はなり のぶやす）

2001年3月筑波大学大学院博士課程農学研究科修了。2004年7月産業技術総合研究所環境管理技術研究部門未規制物質研究グループに入所し、ダイオキシン類似物質の分析法開発に従事。2005年10月計測標準研究部門有機分析科に配属。有機標準物質（特に残留性有機汚染物質）の国家標準（NMIJ CRM）開発に従事。トレーサビリティ確保のため、一般供給のCRMだけでなく、JCSS運営には欠かせない基準物質も開発している。この論文では、ペルフルオロオクタンスルホン酸カリウム標準液（NMIJ CRM 4220-a）の開発を担当した。



堀井 勇一（ほりい ゆういち）

2006年3月茨城大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年5月より2年間 New York State Department of Health (Wadsworth Center) にポスドクとして在籍。2008年10月より現所属である埼玉県環境科学国際センターに入所し、残留性有機汚染物質の環境モニタリングや動態解析に従事している。現在の興味はカオリン粘土に関するダイオキシンの天然生成について。この研究ではノニルフェノール異性体別分析法の開発を担当した。



山下 信義（やました のぶよし）

1992年、愛媛大学連合農学研究科環境化学博士課程修了。同年、旧工業技術院資源環境技術総合研究所（現産総研）入所。一貫して環境分析化学分野における新規技術の開発とその応用研究に携わっている。多くの標準規格検討委員、TC147/SC2/WG56 コンビナー等、国内外の分析化学技術の信頼性向上のためにさまざまな国際的精度管理試験・研究の統括を行うとともに、多数の国外研究機関と連携し、地球規模の化学物質問題について幅広い応用研究を展開している。新規 POPs 等検討会委員等、化学物質管理政策諮問会議にも貢献。2010年 Highly Cited Author Award 受賞（2件）。この研究では総括を担当した。



査読者との議論

議論1 全体評価

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

この研究は、環境中の有害化学物質の分析技術に関する著者らの優れた研究成果をもとにして、国際共同作業をおして国際規格に結実させたものです。国際標準化を目指した明確なシナリオのもとに、構成的・統合的に研究が行われたことがよく分かる記述になっており、シンセシオロジー誌の論文にふさわしいものです。

この論文では、著者らが研究と標準化を一体的に進めてきたこと

も注目されます。また国際規格が発行された後、この規格が社会の多くの人たちから利用されていることも高く評価されます。

議論2 一般読者を意識した記述

コメント（小野 晃）

シンセシオロジー誌の研究論文は、特定の技術分野の専門家に読んでもらうだけでなく、広く他分野の研究者・技術者にも読んでもらうことを期待しています。今回の論文の趣旨は、幅広い読者に環境分析における国際標準化の考え方と進め方の事例を紹介し、それらを共有してもらうと考えます。

そのような観点からしますと、分析化学を専門にしない人には分かりづらい表現が散見されますので、文章表現の工夫をお願いします。

回答（谷保 佐知）

ご指摘のように、環境分析技術の専門外の研究者・技術者には、分かりづらい専門用語や表現があり、理解の妨げとなっていました。これら専門的な内容については、この研究で行った標準化プロセスの理解を深められるよう、本文または「用語説明」において説明を追加しました。

議論3 論文の構成（1）

コメント（小野 晃）

シンセシオロジー誌では以下のような論文の構成を要請していますので、ご検討をお願いします。

- ① まず研究目標が「社会的な価値」にどのように結びついているかを説明していただき、
- ② 次に研究目標を達成するための著者らの「研究シナリオ」を描いていただき、
- ③ さらに要素技術をどのように統合して研究目標を達成していったかという、「構成（シンセシス）のプロセス」を記述していただきます。

なお、上記②の「研究シナリオ」を1枚の図にまとめて全体を俯瞰していただくと、読者にとって分かりやすいと思います。査読者がこの論文を読んで理解した範囲で「研究シナリオ」の図（案）を作ってみましたので、参考にしてください。

回答（谷保 佐知）

- ① この論文の研究目標は「分析方法の標準化」です。したがって、産総研の開発した技術シーズを用いてISO、JIS等、国内外標準規格を確立した4件の事例の解説が主目的です。この研究で対象としている化学物質は、研究を開始した当時、環境有害化学物質として認識され始めていたものの、信頼性が確保された分析法がなく、適切な環境対策を行ううえで重要となる環境負荷量の把握が困難でした。このような環境分析における分析法の規格化の必要性と、各対象化合物の社会的背景について、1章および2章で具体的に記載しました。また、環境分析にかかわるISOやJISの体系と、今回の報告の位置付けについても記載し、よりこの研究の背景が理解できるよう加筆しました。
- ② 標準化の達成にあたり、この研究では、通常の標準化に多い、「業界のニーズ→分析法開発→精度管理→JIS化→ISO化」の流れと異なり、「化学物質を管理するために必要となる環境挙動の解明や環境負荷量の把握が出发点となり→分析法開発→精度管理→業界ニーズ→JIS化」の流れで研究を進めてきました。ご提案いただいた図を参考に、この研究のシナリオとして図4を作成しました。
- ③ ISO化やJIS化の過程において議論になった課題点や、それに対してどのような対処を行ったか分かるように、詳細に記載しました。また、これに対応して、どの点を規格のNormative（準拠すべき規範的）な事項とInformative（参考にするべき情報提供的）な事項として対応したのかについて記載しました。

議論4 論文の構成 (2)

コメント (田尾 博明・産業技術総合研究所環境管理技術研究部門)

論文の構成ですが、緒言、分析法開発、標準化、化学物質管理への貢献、結言となっていますが、環境挙動の解明の部分が抜けています。今回、標準化が成功したことの理由として、環境挙動解明に関して論文を発表し、国際的に優れた研究をしてきたと評価されてきたことが挙げられると思いますので、環境挙動の解明に関する章を設けたほうがよいと思います。

回答 (谷保 佐知)

第2章の「国際的有害化学物質規制に対応した環境分析技術の必要性とその標準化」の中で、研究要素やシナリオを説明する過程で、環境挙動の解明について大幅に加筆し、環境挙動解明においてこの研究で達成した成果について説明しました。

議論5 標準化の必要性

コメント (田尾 博明)

各化合物 (例えばノニルフェノール) の化学式、物性、用途、どのような環境問題を起しているかを説明し、この問題解決に既存の標準法では対応できない理由、今回の標準化提案を行った理由を記述すると、理解しやすくなると思います。

回答 (谷保 佐知)

環境分析技術の必要性を説明するうえで重要となる、各化合物の用途、環境問題や環境動態についての背景情報を追記し、「標準化」の経緯をより理解していただけるように修正しました。

議論6 規格の内容

コメント (小野 晃)

この論文では国際規格を作成したことが述べられていますが、規格の内容が詳細には述べられていません。国際規格の中で、「Normative な事項」には何を選択したのか、「Informative な事項」には何を選択したのかを記載してください。そしてその選択の理由や背景も記載してください。

回答 (谷保 佐知)

議論3のコメント③への対応と合わせて、規格の内容と制定の経緯や背景を記載しました。

議論7 標準化の必要性と標準化プロセス

コメント (田尾 博明)

国際標準化において、基準認証研究開発事業が果たした役割を説明すると、今後、同制度を利用して標準化を目指す人の参考になります。また、今回はISO化が先行し、後からJIS化していますが、その経緯と問題点を説明すると、通常とは逆のプロセスで標準化を実施する人の参考になると思います。

回答 (谷保 佐知)

基準認証研究開発事業で行った内容について追記しました。またご指摘のとおり、この研究では、ISO化がJIS化よりも先にスタートしたため、また、ノニルフェノールのISO化ではすでにドイツが類似の分析方法の規格の策定中であったことから、幹事国との事前調整等が必要でした。これらの調整についても、規格化において重要な過程ですので、その経緯について加筆しました。また、ISO化やJIS化の過程において議論になった課題点やどのような対処を行ったか分かるように記載しました。

議論8 標準化に対する公的研究機関と民間企業の関係 (1)

質問 (小野 晃)

環境分野ではありがちと思われるが、ある種の規格の作成に対して、関係する民間企業 (あるいは関連業界団体) の関心が高くな

いという現実があります。査読者は、民間企業が関心をもたない分野 (あるいは、もてない分野) では公的研究機関が率先して積極的に動くべきであり、国民が公的研究機関に期待しているのはその点だと考えます。このような公的研究機関の役割を踏まえたうえで、環境分野の規格作成における公的研究機関と民間企業との関係に関して、著者の見解はいかがでしょうか。

回答 (谷保 佐知)

地球環境問題に密接に関係する環境分野の標準化では、産業界からの支援が得られにくいこともあり、ご指摘のように公的研究機関が果たすべき役割は大きいと筆者も考え、この観点から標準化活動を行ってきました。一方で、環境問題等の課題について、いち早く解決技術を見出すことは、産業競争力の強化に繋がるとも考えています。したがって、環境保全の観点だけでなく、産業界の発展に貢献するためにも、今後は産業界とより緊密に連携して標準化を進めていくことが重要と考えています。

議論9 標準化に対する公的研究機関と民間企業の関係 (2)

コメント (田尾 博明)

産業界の支援が得られにくい原因の一つは、環境分析法の開発によって新たな環境汚染防止対策を求められる、すなわち産業界にとって負担増となることだと思います。しかし、最近では、環境問題の解決策をいち早く見出すことが産業競争力の維持にとって重要となっています。この課題解決技術の先行取得による産業競争力強化のための標準化は、環境分析法の標準化に産業界からの支援を得るための希望となると思います。この点についても記述するとよいのではないのでしょうか。

回答 (谷保 佐知)

ご指摘のように、規格化により新たな対策の採用というイメージから業界団体からの支援が得られにくい状況にありました。しかし、社会的に大きな問題となる前に、早急に対策を施すことが、環境問題の解決策をいち早く見出すことになり、長期的には産業競争力の強化や産業の健全な育成に繋がるため、今後、産業界と連携した標準化が重要であることを記述しました。

議論10 規格作成の効果

コメント (小野 晃)

5章の冒頭にある、「これらの国際規格はどのように役立てられているのだろうか」という問題設定は重要と思います。規格は作ることで自体が目的ではなく、どう使われるかが重要だからです。

この規格が成立し、国際社会で使われるようになって以後、社会の何がどう変わったのか、その効果は当初狙っていたものと比べてどうだったかを検証することは重要です。規格発行後に実際の効果がどうであったかに言及していただきたいと思います。

回答 (谷保 佐知)

ノニルフェノールの規格は、現時点でドイツ提案により2件、日本提案より1件のISO規格が制定されていますが、ドイツ提案の最初の規格 (ISO 18857-1) では総量測定で、ノニルフェノールの各異性体の測定は記載されていませんでした。しかし、日本提案の規格 (ISO 24293) において、異性体別分析の必要性が国際的に広く認識されたことから、試薬メーカーで異性体別標準品の販売が開始されました。ドイツ提案のパート2の規格 (ISO 18857-2) では、当初パート1と同様に総量測定が想定されていましたが、異性体別標準品が利用可能になったこと、また異性体別分析の重要性から、異性体別測定が加わることになり、より詳細なリスク評価を可能にする分析法になりました。また、近年PFOS/PFOAの依頼分析を受託するほとんどの民間分析事業者は、ISO 25101やJIS K0450-70-10に準じた分析を提供しており、質が高く、相互比較が可能なデータの提供を可能にしている等、この規格により一定の成果を挙げられたと思います。

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

項目	執筆要件	査読基準
1	研究目標 (「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を自己評価する。本研究をベースとして将来の研究展開を示唆する。
7	オリジナリティ	既刊の他研究論文と同じ内容の記述をしない。

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
 改正 2012年2月16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 図については画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則は、白黒印刷とする。

3.3.5 写真については画像ファイル(掲載サイズで350 dpi以上)で提出する。原則は白黒印刷とする。

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-ml@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: S. ICHIMURA
Senior Executive Editor: N. KOBAYASHI, M. SETO
Executive Editors: M. AKAMATSU, M. TANAKA, H. TATEISHI, S. TOGASHI, Y. HASEGAWA, K. NAITO, H. TAYA
Editors: H. AKOH, S. ABE, K. IGARASHI, H. ICHIJO, K. UEDA, A. ETORI, K. OHMAKI, Y. OWADANO,
M. OKAJI, A. ONO, A. KAGEYAMA, T. KUBO, C. KURIMOTO, K. SAKAUE, T. SHIMIZU,
K. CHIBA, E. TSUKUDA, H. NAKASHIMA, K. NAKAMURA, Y. BABA, J. HAMA, K. HARADA,
Y. HINO, N. MATSUKI, K. MIZUNO, Y. MITSUISHI, 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, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan

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

E-mail: synthesiology-ml@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

Revised February 16, 2012

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, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be in black and white.

3.3.5 For photographs, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be 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-ml@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-ml@aist.go.jp

Synthesiology 5巻総目次(2012)

5巻1号

研究論文

- 高品質なプロジェクトマネジメントを実現するトレーサビリティ・マトリックスの構築
 -プロセス中心から情報中心のプロジェクトマネジメントへの変革に向けた基礎理論の提案-
 ……榮谷 昭宏、狼 嘉彰、神武 直彦 1-15
- モノピボット遠心血液ポンプの実用化開発
 -製品につながる医工連携とは- ……山根 隆志、丸山 修、西田 正浩、小阪 亮 16-24
- マグネシウムおよびその合金中の不純物酸素分析手法
 -研究開発と併行した国際標準化への取り組み- ……柘植 明、兼松 渉 25-35
- Synthesiology論文における構成方法の分析
 -研究の成果を社会につなげるための構成学的方法論をめざして-
 ……小林 直人、赤松 幹之、岡路 正博、富樫 茂子、原田 晃、湯元 昇 36-52
- 家庭用固体高分子形燃料電池の実用的耐久性確保のための技術開発
 -固体高分子形燃料電池の劣化加速試験法のための劣化要因解明-
 ……谷本 一美、安田 和明、城間 純、秋田 知樹、小林 哲彦 53-61

報告

- 研究・技術計画学会構成学ワークショップ
 -シンセシオロジー(構成学): 知の統合からイノベーションへ- …… 62-68

5巻2号

研究論文

- サンゴ骨格分析による過去の気候変遷の復元
 -生体鉱物を用いた地球化学的手法による地球環境研究- ……鈴木 淳 80-88
- Development of methane hydrate production method
 -A large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests- ……Jiro NAGAO 89-97
- 鉄鋼厚板製造プロセスにおける一貫最適化に向けて
 -生産管理に関するマルチスケール階層モデルの提案-
 ……西岡 潔、水谷 泰、上野 博則、川崎 博史、馬場 靖憲 98-112
- 災害救助支援のための情報共有プラットフォーム
 -データ仲介による情報システム連携- ……野田 五十樹 113-125
- ロボット技術を用いたスピニング加工(へら絞り)
 -手作りの現場密着型ものづくり- ……荒井 裕彦 126-134
- 座談会
 科学技術政策と構成学、その具体化と価値への“つながり” ……有本 建男、小林 直人、赤松 幹之 135-140

5巻3号

研究論文

地球観測データの統合的利用のための国際連携

－全球地球観測システムの共通基盤の標準化－ . . . 岩男 弘毅 152-161

圧電体薄膜を用いた圧力センサーの開発

－量産車用燃焼圧センサーへの応用－ . . . 秋山 守人、田原 竜夫、岸 和司 162-170

新機能性ゲル材料と試薬化

－機能性ソフトマテリアルの新展開－ . . . 吉田 勝 171-178

観光地の集客施策に対する効果測定を試み

－オープンサービスフィールドにおける行動調査技術－ . . . 山本 吉伸 179-189

糖鎖研究のための基盤ツール開発およびその応用と実用化

－過去10年間の産総研糖鎖医工学研究センターの研究戦略－ . . . 成松 久 190-203

座談会

価値の創造とシンセシス . . . 石川 正俊、小野 晃、赤松 幹之 204-210

5巻4号

研究論文

マンモグラフィの安全を支える線量計測

－マンモグラフィ用X線の線量標準の確立と標準供給体制の構築－ . . . 田中 隆宏、黒澤 忠弘、齋藤 則生 222-233

西暦 869 年貞観津波の復元と東北地方太平洋沖地震の教訓

－古地震研究の重要性と研究成果の社会への周知の課題－ . . . 岡村 行信 234-242

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) 単セル / スタックの発電性能試験方法の規格化における不確かさ評価

－SOFCの普及に向けた試験方法の規格化と測定結果の信頼性担保－ . . . 門馬 昭彦、高野 清南、田中 洋平、嘉藤 徹 243-252

調光ミラーガラスの開発

－実用化のための研究戦略－ . . . 吉村 和記、田嶋 一樹、山田 保誠 253-260

有害化学物質の環境分析法の標準化

－最先端の分析技術を用いた国際的化学品管理への貢献－ . . . 谷保 佐知、羽成 修康、堀井 勇一、山下 信義 261-276

編集後記

Synthesiology 5巻4号をお届けします。本号には、研究論文を5報掲載しました。そのうち1報は地震・津波に関する論文、2報は燃料電池および有害化学物質と対象は違いますが、国際標準化に係わる論文、1報は計量標準の開発に係わる論文、そして1報は新しい材料開発に関する論文です。いずれの論文も、技術の波及する社会的価値を明確に設定した上で研究開発に取り組んできた成果を、本誌の特色とする構造的なアプローチ法に主眼をおいて書かれています。読者の皆様に読み応えのある論文として、ご満足頂けるものと考えています。

その中でも西暦869年に起こった貞観津波を題材とする巨大津波に係わる論文(著者：岡村行信氏)は、東日本大震災を契機として大きな社会的課題となった、災害予測・防災の観点から大きな問題提起を行っています。論文の副題にもなっている“研究成果の社会への周知”という課題です。貞観津波の規模について、「2010年春に産総研から地震本部に研究成果が提出」されましたが、「地震本部で約1年をかけて日本海溝全体の地震について評価の見直しが行われていた」時に東日本大震災が発生したため、「石巻平野、仙台平野、福島県沿岸に巨大津波が来襲する可能性があること」を伝えられなかった事を記述していま

す(「」内は、論文本文からの引用箇所)。研究開発サイドが自信を持つ研究成果であっても、言わばピアレビューの観点で客観的に評価されない限り、科学的成果とは認められない(従って社会的公表を控える)のがこれまでの基本的な常識です。一方で、“社会の中で、社会のために”が21世紀の科学技術の研究開発の目標の一つと認識されている事を踏まえれば、社会的な波及効果が大きい研究成果ほど、迅速な公表に務める必要性も理解できます。東日本大震災後の、特に地震・津波に関するマスコミ報道が頻繁に目につくのも、その迅速性の観点で研究開発サイドが積極的に動いていることの現れかもしれません。客観的・徹底的な研究成果の検証と、迅速な研究成果の公表・周知は、互いに矛盾する側面を持ちますが、オープンイノベーションのハブとして、技術の社会実証までを視野に入れる産総研にとって、同時に克服しなければならない大きな命題と言えます。Synthesiology誌においても、この問題を取り上げて考えていきたいと考えていますので、ご意見をお寄せ下さい。併せて、引き続きのご支援をよろしくお願い申し上げます。

(編集委員長 一村 信吾)

Synthesiology 5巻4号 2012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：一村 信吾

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事(編集及び査読)：赤松 幹之、田中 充、立石 裕、富樫 茂子、長谷川 裕夫

幹事(普及)：内藤 耕

幹事(出版)：多屋 秀人

委員：赤穂 博司、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、小野 晃、景山 晃、久保 泰、栗本 史雄、坂上 勝彦、清水 敏美、千葉 光一、佃 栄吉、中島 秀之、中村 和憲、馬場 靖憲、濱 純、原田 晃、檜野 良穂、松木 則夫、水野 光一、三石 安、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-ml@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

Dose standard for safe and secure breast cancer examination

-Establishment of X-ray dose standards for mammography and construction of a calibration service system-

T.TANAKA, T.KUROSAWA and N.SAITO

Reconstruction of the 869 Jogan tsunami and lessons of the 2011 Tohoku earthquake

-Significance of ancient earthquake studies and problems in announcing study results to society-

Y.OKAMURA

Evaluating uncertainty in the standardization of SOFC cell/stack power generation performance tests

-Standardization of test methods and ensuring reliability of test results for the dissemination of SOFC-

A.MOMMA, K.TAKANO, Y.TANAKA and T.KATO

Development of switchable mirror glass

-R&D strategy toward its practical use-

K.YOSHIMURA, K.TAJIMA and Y.YAMADA

Standardization of environmental analysis methods of hazardous chemicals

-Contribution to international control of hazardous chemicals by using advanced technologies-

S.TANIYASU, N.HANARI, Y.HORII and N.YAMASHITA

Editorial policy

Instructions for authors