

# Synthesiology

地球観測データの統合的利用のための国際連携

圧電体薄膜を用いた圧力センサーの開発

新機能性ゲル材料と試薬化

観光地の集客施策に対する効果測定を試み

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

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<sup>(注1)</sup>。これまで研究者は、優れた研究成果であれば誰かが拾い上げてくれて、いつか社会の中で花開くことを期待して研究を行ってきたが、300年あまりの近代科学の歴史を振り返れば分かるように、基礎研究の成果が社会に活かされるまでに時間を要したり、埋没してしまうことが少なくない。また科学技術の領域がますます細分化された今日の状況では、基礎研究の成果を社会につなげることは一層容易ではなくなっている。

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

# Synthesiology 第5巻第3号(2012.8) 目次

## 「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

i

## 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 — 152–161  
 ……岩男 弘毅
- 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 — 162–170  
 ……秋山 守人、田原 竜夫、岸 和司
- 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の試み — オープンサービスフィールドにおける行動調査技術 — 179–189  
 ……山本 吉伸
- 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 — 190–203  
 ……成松 久

## 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

## 編集委員会より

- 編集方針 211–212  
 投稿規定 213–214  
 編集後記 221

## Contents in English

### Research papers (Abstracts)

- International cooperation for the utilization of earth observational data in an integrated manner** — 152  
 Development of *de jure* standardization of the common infrastructure for the global earth observation system of systems — --- K. IWA0
- Development of a pressure sensor using a piezoelectric material thin film** — Application to a combustion 162  
 pressure sensor for mass-produced cars — --- M. AKIYAMA, T. TABARU and K. KISHI
- Novel functional gels and their commercial distribution as chemical reagents** — New development of 171  
 functional soft-materials — --- M. YOSHIDA
- Evaluating the effects of actions taken to attract visitors to sightseeing areas** — An Open Service Field 179  
 behavior survey technology — --- Y. YAMAMOTO
- Development of basic tools for glycoscience and their application to cancer diagnosis** — A 10-year strategy of 190  
 the Research Center for Medical Glycoscience of AIST — --- H. NARIMATSU

## Messages from the editorial board

215–216

## Editorial policy

217–218

## Instructions for authors

219–220

# 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

さまざまな地球観測データが世界各国で個別に取得・加工・利用されている中で、それらの情報の統合的な利用を容易にするための全球地球観測システムが必要とされている。そのため国際的な合意のもとに組織された地球観測に関する政府間会合が全球地球観測システムのための共通基盤を構築した。複数の機関から共通基盤を構成する要素の提供の申し出があったが、政府間会合は構成要素のそれぞれについて公正な評価を行い、最適な構成要素を組み合わせた共通基盤を推奨した。特定の構成要素を選定して共通基盤を推奨することは、全球地球観測システムに関連するいくつかのデジュール標準を策定することに相当した。日本は独自の構成要素の提供を申し出なかった関係で、構成要素を評価するにあたって中立的立場をとり、デジュール標準の策定においてイニシアティブをとることができた。その結果、日本で広く利用されている方法のいくつかをデジュール標準に採用することができた。今回の経験は、一つの事例として、日本にとって今後の国際標準化活動のあり方を示唆している。

**キーワード:** 国際標準、デジュール、デファクト、全球地球観測システム、地球観測に関する政府間会合、全球地球観測システム共通基盤

## International cooperation for the utilization of earth observational data in an integrated manner

### – Development of *de jure* standardization of the common infrastructure for the global earth observation system of systems –

Koki IWAO

While each country separately obtains, processes, and utilizes earth observation data, there is a pressing need for a common infrastructure to facilitate integrated use of these resources. At an intergovernmental meeting, an international agreement was reached to construct a common infrastructure for the global earth observation system. Several organizations have submitted components for this infrastructure. These submissions were fairly evaluated, and the most suitable components were recommended for inclusion into the infrastructure system, at the intergovernmental meeting. Recommendation of specific infrastructure components establishes *de jure* standards for the global earth observation system. Since Japan has not offered its own components, it has been able to take a neutral stance on formulating *de jure* standards. Consequently, the standards widely used as *de facto* in Japan have been selected as *de jure* standards. This experience could be a model case for the development of a strategy for international standardization activity.

**Keywords:** International standard, *de jure*, *de facto*, global earth observation system of systems, intergovernmental group on earth observations, GEOSS common infrastructure

### 1 はじめに

東日本大震災では地球観測の分野における科学技術のあり方に関し、いくつかの教訓が得られた。まず、世界規模の地球観測連携の重要性である。日本が運用する陸域用地球観測衛星 (ALOS) が震災後 1 カ月余りしか経過していない 2011 年 4 月 22 日に観測を停止した。これにより日本は宇宙からの“眼”を一つ失うこととなった。しかし、各国が衛星を用いた震災地域の集中観測を行い、データの欠落を補い、有効なデータ共有が図られた<sup>[1]</sup>。このような、地球観測の国際連携やデータの共有により、科学データの信頼性が向上した。一方で、地球観測で得られた科学的

知見が地震対策の政策の現場で十分に活用されていなかったという指摘もある<sup>[2]</sup>。地球観測データから得られた知見を政策に反映させる仕組みの重要性が再認識された。

### 2 地球観測データの利用の現状

地球観測では、地上や海洋の観測網から航空機や気象衛星までを含む各種観測機器が用いられる。地球観測で取得されたデータをもとに予測モデルや変動シナリオ、各種情報サービスが提供される。地球観測の目的は、生物多様性、エネルギー、健康問題といった地域規模から全球規模の各種問題解決のためのデータ収集であり、最終

産業技術総合研究所 地質調査情報センター 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7  
Geoinformation Center, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: iwao.koki@aist.go.jp

Original manuscript received October 31, 2011, Revisions received April 16, 2012, Accepted April 16, 2012

的には環境政策、エネルギー政策といった意思決定に反映されることである。

これまでの地球観測では、陸域、海洋、大気といった観測対象ごとに地上から衛星までを用いた観測連携が行われてきた。例えば、世界気象機関では全球観測システムを構築し、静止気象衛星から極軌道衛星、地上気象観測網の連携を図っている<sup>[3]</sup>。また、国際連合食糧農業機関を中心に全球陸域観測システムも構築されている<sup>[4]</sup>。さらには、統合地球観測戦略パートナーシップという地球観測衛星を開発・運用する宇宙機関とグローバルな観測システム間の協力と調整の強化も行われてきた<sup>[5]</sup>。このように分野ごと、あるいは衛星観測分野において観測の連携は進んでいた。

ところが意思決定の現場では、さまざまな観測データを組み合わせる必要が多数生じる。例えば、洋上風力発電の建設を考える場合、大気のみならず、海洋のデータが必要になる。これまでの意思決定では、こういった観測が目的別に行われることが多かった。

政策貢献、意思決定の視点に立った地球観測データの統合的利用のための国際連携を実現するには、さまざまな組織が個々の目的のために行っている観測データやサービスを共通に利用可能とする基盤システムが必要となる。これを全球地球観測システム共通基盤(GCI)と呼ぶ。図1に全球地球観測システム共通基盤概念図を示す。

地球観測データの共通基盤システムには主に以下の3つの基本要素技術が必要とされる。一つ目はウェブポータル(GWP)である。ウェブポータルはユーザーがさまざまな

機関が提供する地球観測データやサービスを利用するためのウェブ上のインターフェース機能を提供する。二つ目はクリアリングハウス(CL)である。クリアリングハウスはインターネット上に分散管理された地球観測データやサービスを一斉検索し、利用できるようにする機能を提供する。3つ目はコンポーネント・サービスレジストリ(CSR)である。レジストリは地球観測データやサービスを登録するデータベースである。これら3つの要素を組み合わせることで地球観測情報の利用システムが構成される。図2に地球観測データの利用システムの全体構成を示す。

2009年時点においては、共通基盤の構成要素としてのウェブポータルとクリアリングハウスについて、私企業を含む3機関がそれぞれ独自に運用しており、レジストリについては米国ジョージメイソン大学が米国地質調査所(USGS)の委託を受けて運用していた。世界のユーザーはこれら複数機関が提供する構成要素をそれぞれ組み合わせて利用し、地球観測データやサービスにアクセスしていた。

ウェブポータルやクリアリングハウスが複数あることは、システムの冗長性の観点からは望ましい。しかし、ウェブポータルについては、操作方法や対応可能なオペレーティングシステムやウェブブラウザが異なる、ウェブブラウザ利用時に独自のプラグインを要求する、あるいはとても高性能のパソコンでないと動作が不安定になるといった使い勝手の悪さの問題が指摘されていた。また、クリアリングハウスについては検索手法の違いにより、本来存在するはずの

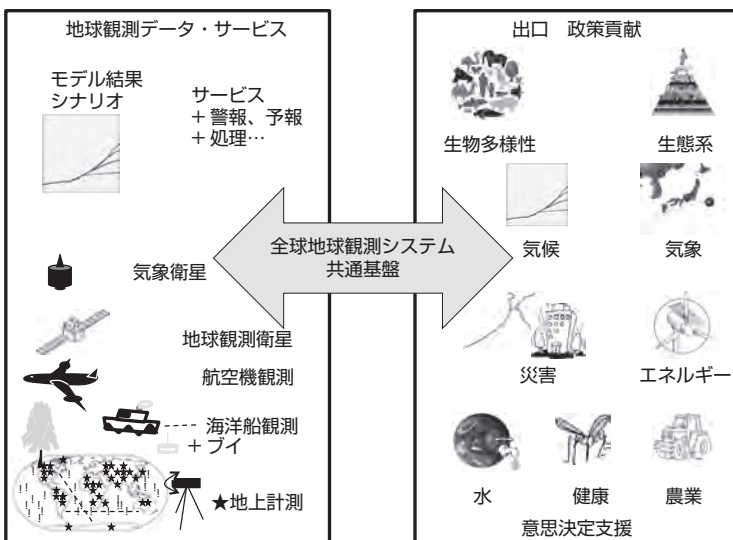


図1 情報とサービスの統合的利用における全球地球観測システム共通基盤の役割  
地球観測情報やサービスを国際的に連携し、ユーザーがさまざまな分野の政策決定に科学的知見を活用することを支援するシステム。

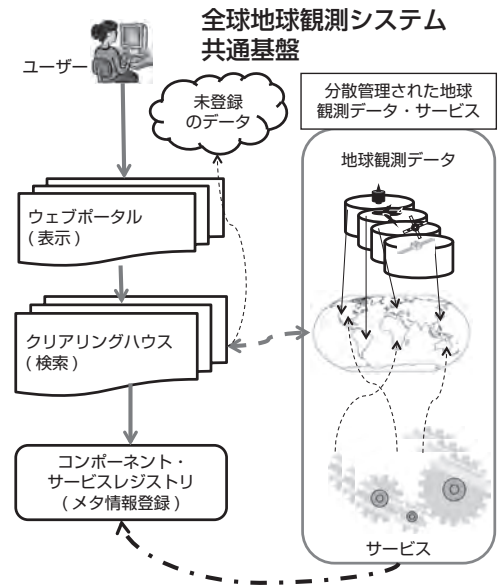


図2 標準化された共通基盤の構成とデータ・サービスへのアクセス  
共通基盤の主要構成要素はウェブポータル、クリアリングハウス、コンポーネント・サービスレジストリである。実際のコンポーネント(データ)やサービスは、各機関がそれぞれ分散管理し運用を行っている。

表1 地球観測の連携に関する国際的な議論の経緯

開催年	会議（開催地）	成果
2002年	持続可能な開発のための世界サミット RIO+10 (ヨハネスブルグ)	行動計画において地球観測の国際的な協力の枠組みの重要性を提起
2003年	G8 エピアンサミット (エピアン)	小泉首相（当時）が「全球地球観測システム」を提唱
2003年	第1回地球観測サミット (ワシントン)	持続的な複数システムからなる地球観測システムの発展へ向けて行動を起こすための政治レベルでの態度表明の重要性を説いた宣言文を採択 欧州委員会、日本、南アフリカ、米国が共同議長を務める臨時的地球観測作業部会設立
2004年	第2回地球観測サミット (東京)	全球地球観測システムの範囲と意図を定義した枠組み文書を採択
2005年	第3回地球観測サミット (ブリュッセル)	全球地球観測システム10年実施計画が策定されるとともに、国際組織「地球観測に関する政府間会合、通称 GEO」、およびその運営事務局が設立

データが検索結果に反映されない一方で、レジストリに登録されていないデータが検索結果に反映されている場合があるといった網羅性の問題が指摘されていた。これらの問題を解決するためには、システム提供機関や利用者であるさまざまな分野の意思決定者の双方から構成される、地球観測データを共有し各種政策に反映させるための国際連携の場が必要であった。

### 3 地球観測データの統合的利用のためのシナリオ

地球観測データの統合的利用を実現するため、世界各国の地球観測機関が提供するさまざまな観測データ・サービスの統合的な利用を可能とする共通基盤を構築することが最重要課題である。

地球観測データやモデル結果は数、量ともに現状でも膨大である。例えば産総研はアスター（ASTER）と呼ばれる地球観測機器で取得したデータをアーカイブしているが、2000年から2012年2月時点までのデータの数と量はそれぞれ約250万シーン、250テラバイトに達する。各国の保有する地球観測衛星の数は2012年に200機に達するとの試算もある<sup>6)</sup>。地球観測衛星には複数の地球観測機器が搭載されることが多く、例えばアスターが搭載されたテラ衛星には5種類の地球観測機器が搭載されている。したがって、これら膨大な地球観測データを一か所に集積し、管理することは現実的ではない。地球観測データやサービスは、それらを取得・加工した機関がそれぞれ分散管理するのが合理的である。その代わりに、各機関が提供するデータやサービスに関する情報を一か所に登録することとし、ユーザーは登録された情報をもとに各機関のデータやサービスにアクセスすることとする。各機関がすでに分散管理しているデータやサービスに対してアクセス可能とする共通基盤を構築することにより、既存のデータやサービスについて新たな仕様に基づき改変を求めず必要がなくなる。また、地球観測データの著作権やデータポリシーがそ

れぞれ異なるという運用上や政策上の理由からも分散管理が望ましい。

地球観測データの統合的利用を目的としたシナリオを、図3を用いて説明する。2章で紹介したとおり、全球地球観測システム共通基盤を通じ、各機関により分散管理された地球観測データやサービスへのアクセスが実現する。全球地球観測共通基盤は3つの要素で構成される。共通基盤の構築の要件としてはそれぞれの構成要素について、運用堅牢性が担保される必要がある。どこか一つの構成要素が財政上の理由から運用が困難になった場合、共通基盤が機能しなくなるためである。構成要素に関する要件としては、アクセスの容易さ、データの網羅性といった技術的要件とさまざまな目的をもったユーザーに対して使い勝手のよいシステムであることが要件としてあげられる。

## 4 国際的な連携活動

### 4.1 国際連携に関する経緯

地球観測の連携の重要性、さらに、科学的知見の政策

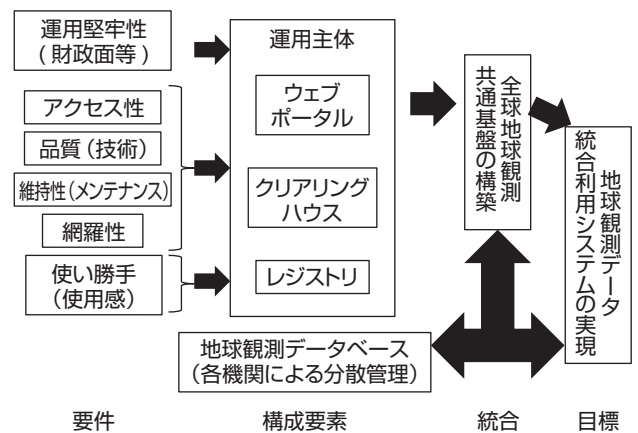


図3 地球観測データの統合的利用のためのシナリオ  
地球観測データの統合利用システムの実現を目標とした全球地球観測共通基盤の構築を行うに当たっての構成要素とその要件をシナリオとしてまとめた。

への反映の必要性に関する議論は2000年代初頭から提起されてきた。表1に地球観測のための共通の観測ネットワーク構築の国際的合意に至るまでの経緯をまとめた。2003年のエビアンサミットで小泉首相（当時）が全球地球観測システム（GEOSS）<sup>[7]</sup>を提唱したことが国際的な地球観測の連携の契機となった。

#### 4.2 全球地球観測システム

小泉元首相が提唱した全球地球観測システムは、地球を対象として各国がそれぞれ独自に有する衛星観測、航空機観測、地上観測、あるいは予測モデル等の地球を対象としたあらゆる観測システムや観測データ、予測モデル、サービスを連携させた全球規模の地球観測連携、すなわち「システム・オブ・システムズ」の構築を目指した。2005年にブリュッセルで策定された全球地球観測システム10年実施計画<sup>[8]</sup>は、地球観測の連携によって得られた科学的知見を政策の場に反映することを最終目標とした。具体的に9つの社会便益分野、すなわち、災害、健康、エネルギー、気候、気象、水、生態系、生物多様性、農業の各分野において10年以内に解決すべき喫緊の課題を設定した。

#### 4.3 地球観測に関する政府間会合

全球地球観測システムの実現のために「地球観測に関する政府間会合」（GEO）が2005年に国際的合意のもとに組織された。同時にその運営母体として地球観測に関する政府間会合事務局がスイスジュネーブに設置された。事務局は、全球地球観測システム実現のための作業計画<sup>[9]</sup>の策定、その進捗管理、地球観測事業への投資に関する国際調整等を任務とした。

この政府間会合は他の永続的な国連機関とは異なり、2015年までの課題解決を目的とした期限付きの組織とした。国連は決議に一定の拘束力があるのに対し、政府間



図4 地球観測に関する政府間会合への加盟国の分布（2011年10月時点）  
黒塗りの国が現在の加盟国、灰色は非加盟国である。国連加盟国193カ国（2011年）のうち87カ国と半分程度が参加する。スイスのように国連に加盟していない国が参加する一方で、アフリカからの参加が特に少ない。

会合の決議は拘束力をもたない。この政府間会合は2011年10月時点で87カ国の政府、および国連の専門機関等を含む61の国際組織・国際機関からのボランティアにより運営されている。現時点の政府間会合への加盟国を図4に示す。

政府間会合への各加盟国・加盟機関は、プリンシパルと呼ばれる者により代表される。日本政府では文部科学省が本業務を所管し、研究振興局担当の審議官が2012年時点での日本政府のプリンシパルである。政府間会合は拘束力のないボランティアな組織ではあるが、各加盟国・機関は積極的にその活動への参加を表明し、資金的貢献と人的貢献を行っている。その理由としては、一つには政府間会合が地球観測に関する国際的な運用調整機関として位置付けられることがあげられる。年に一度開催される政府間会合の総会と、3年おきに開催される政府間会合の閣僚級会合において各課題についての進捗が報告され、そこでの決議は各国の地球観測政策に直接的に反映される。なお、日本は文部科学大臣が閣僚級会合を担当することとなっている。各国の積極的な参加のもう一つの理由は、政府間会合の各加盟国・加盟機関で利用されている方式がいろいろな分野でデファクト標準となっているが、政府間会合がそれらをもとに統一したデジュール標準を策定する場となりうるためである。そのため、政府や公的機関のみならず、私企業も政府間会合の活動に対して技術援助等の支援を行う場合もある。ただし、私企業の場合は、メンバーシップはもたない。また、各国の地球観測に関連する公的機関は、加盟国のGEOへの貢献の一環として活動を行うこととなる。地球観測に関する政府間会合の組織を図5に示す。

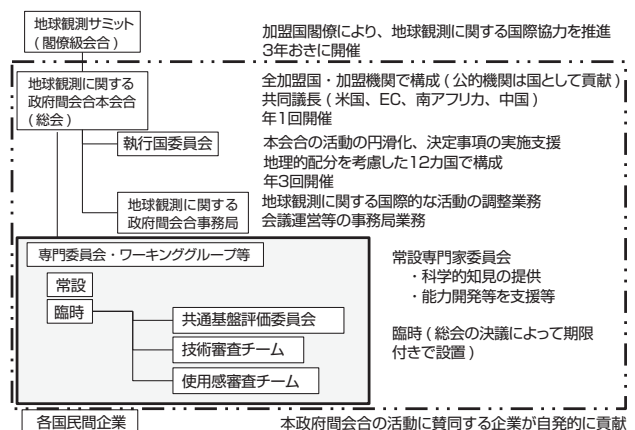


図5 地球観測に関する政府間会合の組織  
地球観測に関する政府間会合は年1回開催される全加盟国、加盟機関が参加する総会、3年おきに開催される閣僚級会合で、地球観測に関する国際協力を推進する。活動の円滑な運営を行うため、執行国委員会と調整役としての事務局が総会の下に位置づけられる。この他、科学的知見等を提供する常設の専門委員会や、今回の評価・選定を行うような臨時の委員会が総会の下に設置されることがある。

筆者は、政府間会合への人的貢献の一環で、産総研から日本政府を通じ2009年4月から2011年3月までの約2年間、専門家職員として政府間会合事務局の活動に従事してきた。この事務局は世界気象機関の建物内にあり、職員は準国連職員扱いである。筆者の在任期間中、米国からは地質調査所と海洋大気局、欧州からは欧州宇宙機関（ESA）、ブラジルからは国立宇宙研究所、南アフリカ政府、中国気象局、韓国気象局、および日本からは筆者の他に宇宙航空研究開発機構から職員が派遣されていた。これら派遣職員とともに事務局長を含む数名の直接雇用職員の総勢20名弱でこの事務局を構成した。

#### 4.4 共通基盤

全球地球観測の「システム・オブ・システムズ」の実現のため、世界各国の地球観測機関が提供するさまざまな観測データやサービスを利用可能とする共通基盤を構築することが地球観測に関する政府間会合にとって最重要課題であった。共通基盤の構築にあたっては、これまでどおり各機関が地球観測データやサービスをそれぞれ分散管理することを前提とした。共通基盤には各機関が提供するデータやサービスに関する情報を登録し、共通基盤を通じて各機関のデータやサービスにアクセスする。すでに各機関が運用している観測システムや情報システムの統合のようなことは求めないという全球地球観測システム（GEOSS）の基本理念<sup>[10]</sup>を採用した。

3章で述べたシナリオに沿って、共通基盤を3つの基本要素で構成した。すなわちウェブポータル、クリアリングハウス、コンポーネントおよびサービスレジストリである。これらの要素を組み合わせ、図3に示したような共通基盤全体を実現した。

#### 4.5 共通基盤構築に当たっての問題

理想的には、どのウェブポータルとクリアリングハウスの組み合わせを用いてもユーザーは同じ情報やサービスを利用できる。しかし、現実には既存のウェブポータルとクリアリングハウスの組み合わせ方によって検索結果や利用できるサービスが異なる場合が多数発生し、ユーザーに混乱が生じていた。

このような事態を受け、2009年の地球観測に関する政府間会合の総会では、混乱の原因を解明し、2章で述べた3機関がそれぞれ提供する既存のウェブポータルとクリアリングハウスについて評価・選定し、共通基盤としてのウェブポータルとクリアリングハウスを推奨することが決議された<sup>[11]</sup>。選定に要する期間は、翌年2010年の地球観測に関する政府間会合の閣僚級会合までという短期間であった。

以下この論文では、ユーザーの混乱の原因解明、および共通基盤を構築するために採用した評価手法とその結果を

紹介する。また、共通基盤の構築と地球観測分野において策定されたデジュール標準との関係を明らかにする。

共通基盤を構築することにより、地球観測データの一元管理が容易になり、統合的な検索が可能になるとともに、ユーザーの混乱が解消することが期待される。さらに、今回のデジュール標準の策定の経験が、今後国際標準を策定する際の日本の取り組み方に関するモデルケースを示唆することが期待される。

## 5 要件設定と構成の方法

### 5.1 共通基盤の構成要素の評価・選定のための要件

共通基盤の構成要素の評価・選定を行うにあたって以下のような要件を考慮した。1点目は、評価結果の公平性の担保である。ボランティアにウェブポータルやクリアリングハウスを開発・運用してきた機関に対して評価・選定を行うため、公平・公正な評価および結果に関する国際合意を担保することが要求された。2点目は、時間的制約である。評価報告書は地球観測に関する政府間会合閣僚級会合に先立ち、加盟国・加盟機関に提出する必要がある。このため、混乱の原因解明や各要素の評価は実際には1年に満たない期限の中で、検討する必要があった。3点目は、評価に用いる基準の設定である。通常システム評価では、例えば検索結果の表示に要する応答時間といった技術的な評価基準が設定される。今回の評価においても技術的な評価基準を設定した。

一方で、共通基盤を実際に利用するのは9つの異なる社会便益分野のユーザーである。その用途は多岐におよび、技術的な評価の組み合わせ結果が必ずしもユーザーの使用感を向上させることにはつながらない。インターネット回線速度の限られた途上国のユーザーと、インターネット網が整備された国のユーザーとでは共通基盤の使用感も異なることが想定された。通常インターネット検索では、テキストの検索結果が得られるだけであるが、共通基盤では衛星画像や地図といったデータのやり取りが必要となる。特に画像の表示に特殊な機能が加えられている場合には、検索結果が表示されるまでの使用感がウェブポータルごとに異なる可能性が考えられる。また、特殊なプラグインのインストールを要求するようなウェブポータルの場合、使用するパソコンの性能によっても動作の使用感が異なることが想定された。そのため、インターネット整備環境等ユーザーの作業環境に制約がある途上国のユーザーを含む9つの社会便益分野のユーザーの使用感についても評価基準を設定する必要があった。さらに、共通基盤は最低限2015年までの政府間会合の活動期間中は安定的に運用される必要がある。ウェブポータルやクリアリングハウス



等一つの機能が欠けても共通基盤が成立しなくなることから、安定した長期運用を担保する評価基準を設定する必要があった。

## 5.2 共通基盤の構築を行うための構成的方法

共通基盤の構築を行うため、地球観測に関する政府間会合事務局を中心とした共通基盤評価委員会を設置した。まず、評価結果の公平性を担保するため、政府間会合に加盟するすべての国や機関に評価委員会への専門家の参加を依頼した。国際合意形成を行ううえで、地理的バランスが重要視された。今回の構成要素の提供を申し出ているのは欧米の機関や組織である。独自技術の普及や標準化に関心の高いこういった地域からの評価委員会への参加申し出は委員会発足時点から予想された。一方で、アジア・オセアニア・アフリカといった地域からは構成要素の提供を申し出ている機関はなかった。さらに、途上国においては、欧米主導で決まったシステムを実際に利用する段階において、インターネット回線スピードに制約がある、あるいは実際にシステムを利用するには使用しているパソコンのスペックが不足し、利用に支障が生じることが考えられた。今回推奨したシステムが、加盟するすべての国で広く普及することを目指し、今回は特に、途上国に対し積極的な参加を求め、国際的な合意が担保されることを配慮した。ただし、評価委員は各プリンシパルから正式に推薦されたメンバーに限定した。これにより、政府間会合に加盟する国や機関を代表する意見を反映した結果であることを担保した。評価委員は以下の国や機関から推薦されたメンバーで構成した。なおカッコ内は参加人数であり、1名の場合は省略した。参加国：オーストラリア、オーストリア、ブラジル、中国、フィンランド、ドイツ、イタリア (2)、日本 (3)、マダガスカル (3)、パキスタン (2)、米国 (5)、欧州連合 (2)

参加機関：地球観測衛星委員会、欧州宇宙機関、欧州社会基盤プラットフォーム、欧州気象衛星開発機構、米国電気電子学会、米国環境保護局、欧州共同研究所、地理標準に関するオープンコンソーシアム、世界気象機関

上記 30 名の評価委員に加え、筆者を含む政府間会合事務局 2 名を評価委員会のメンバーとした。また、評価委員会メンバーを含む技術審査チームと使用感審査チームを政府間会合総会の下に設置した。この 2 チームは評価委員会が作成した技術評価項目や使用感評価項目に基づき実際に審査を行う。技術審査チームはブラジルと欧州共同研究所のスタッフで構成され、使用感審査チームは米国環境保護局のスタッフを中心として構成された。例えば、評価委員会が、検索応答時間を技術評価項目として設定し、技術審査チームは応答時間を計測するための条件や方法を検討し、実際の評価も行う。その結果を評価委員会に

報告することで評価結果のさらなる公平性を担保した。

今回、評価委員を募ったところ、利害関係を有する機関、すなわち共通基盤の構成要素であるウェブポータルを提供を申し出た欧州宇宙機関とクリアリングハウスの提供を申し出た米国地質調査所からの参加希望があった。政府間会合はボランティアな参加を前提とするため完全な排除はできないので、所属する機関が審査の対象となる場合は当該評価委員を議論から排除することとした。一方、日本は共通基盤の要素の提供を申し出ておらず、公正な立場からの発言機会が増すことが予想された。そこで、産総研から別途 3 名の専門家の参加を募り、調整役としての筆者と産総研からの専門家が連携を図ることにより円滑な議論を進めることができた。

2009 年 11 月下旬の政府間会合の総会から評価委員の正式な選出までに約 2 カ月を要した。評価委員が確定し、事前に電話会議およびメールでの意見交換を行った後、第一回の評価委員会会合を 2010 年 2 月政府間会合事務局内で開催した。会合では、この委員会の委託条項「Terms of Reference」を起草し、その中で技術、ユーザー使用感、長期運用性担保の 3 つの評価を評価対象と定めた。さらに、図 6 に示すとおり評価結果の報告書をまとめるまでの全体の流れを確認した。

評価に先立ち、混乱の原因解明を事前に行うとともに、毎週電話会議による審査基準に関する議論を続け、技術評価項目、ユーザー使用感評価項目のリストアップを行った。審査チームによる審査結果と、評価委員会による長期運用性担保に関する評価の総合評価により、評価委員会

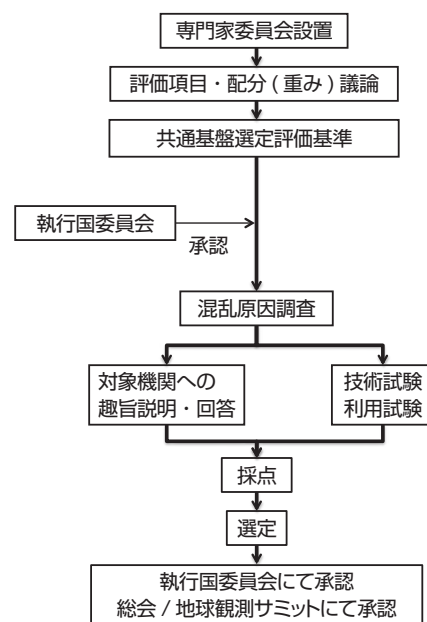


図 6 共通基盤の選定までの流れ  
評価委員会で設定した評価と承認の流れを示す。

表 2 共通基盤の選定評価基準表

評価項目	重み (%)	概要
技術	25	技術審査項目リストについての評価結果
使用感	25	ユーザー使用感の評価結果
長期運用		
財政面（提供機関）	10	2010-2015年の組織としての財政支援の確約
財政面（国または参加機関）	20	財政支援に対する加盟国や参加機関からの裏書
技術面	10	必須要求項目への対応の確約
システムの権利放棄	10	第三者機関へのシステム委譲が生じた際の権利放棄

が最終的な採点を行った。各評価項目および配点等の評価の詳細については、評価委員会から政府間会合執行国委員会に勧告の形で提出し、そこからの承認を得ながら進めた。

共通基盤としての評価を行うには、単独の要素技術の評価だけではなく、要素技術を組み合わせた際の動作も評価する必要がある。したがって、本来であればウェブポータルとクリアリングハウスについて各3機関が提供を申し出ていることから9通りの組み合わせの試験を行う必要がある。しかし、ウェブポータルとクリアリングハウスの組み合わせ方によって検索結果が異なる点についての原因解明を評価に先立ち進める中で、特定の組み合わせでしか共通基盤として機能しないことが判明した。そこで、時間的制約から、まずクリアリングハウスを評価・選定し、そのうえでウェブポータルを評価・選定するという2段階の措置をとることとした。また、評価試験のうち、特に使用感については、政府間会合に参加する多くのユーザーが集まる2010年5月に開催された政府間会合が主催するワークショップに間に合うよう準備を急いだ。ワークショップ期間中に使用感についての利用試験を行うことで、ネットワークやウェブブラウザが同じ条件下で、利用目的の異なるユーザーの使用感の違いを明確にするとともに、普段会議への出席が難しい途上国ユーザーの試験への参加を見込んだ。さらに、インターネット回線スピードが限られた途上国で会議が開催されたことから、このような条件下での共通基盤の使用感を関係者が評価することが期待された。使用感の評価については、インターネット上でのオンライン評価システムも準備し、全社会便益分野からの評価となるよう広くユーザーを募った。

評価基準については、技術、ユーザー使用感、長期運用性担保の3つの観点から総合評価を行うと定めたが、全体の配点の重みづけも決定する必要がある。表2に評価委員会が定めた評価項目とその配点割合を示す。評価委員会での議論の結果、技術とユーザーの使用感についてそれぞれ25%の配点と定めた。残りの50%は長期安定運用の担保に関する事項である。

技術評価は、必須項目とオプション項目で構成し、計

100項目以上の評価項目をリストアップした。ユーザーの使用感評価については、9つの社会便益分野すべてにおいて利便性を評価することを目標に、個別の評価項目をリストアップした。長期安定運用を担保するため4つの項目を設定した。1項目目は共通基盤の要素の提供を申し出た機関による2010年から2015年の財政的な支援に対する組織としての確約であり、10%を割りあてた。2項目目は共通基盤の要素の提供を申し出た機関が所属する政府間会合加盟国、あるいは加盟機関からの裏書であり、20%を割りあてた。私企業が要素を提供する場合も、いずれかの政府間会合加盟国・加盟機関が運用を担保（裏書）することを求めた。3項目目は共通基盤の要素を提供することになる機関による必須要求項目への対応の確約であり、10%を割りあてた。総合評価で選ばれたウェブポータルとクリアリングハウスは、技術評価で設定した必須項目をすべて満たしているとは必ずしも限らない。そこで、各機関に対してウェブポータルとクリアリングハウスの必須項目を満たすことを早急に行うことへの確約を求めた。4項目目は各機関がウェブポータルとクリアリングハウスとして開発したシステムの使用権の放棄であり、10%を割りあてた。ウェブポータルやクリアリングハウスを提供する機関が、何らかの理由でその運用ができなくなった場合に、第三者機関に円滑にシステム移管できることを担保するものである。

使用権の放棄に関する項目については、全システムのオープンソース化を求める意見がいくつか上がった。しかし、オープンソース化を求めることはせず、運用が不可能となった際に、移行が可能な状況を保証することの表記となった。これは、私企業の参加を考慮してのことである。その一方で、2項目目の政府間会合加盟国、加盟機関からの財政支援に関する裏書を求めることは、特に加盟国・加盟機関には属さない私企業に対して不利に働くことが考えられた。最終的に構成要素を提供する組織や私企業が、万一財政的に運用が担保できなくなった場合でも、加盟国・加盟機関が財政支援を確約することで、全球地球観測システムの基幹システムの安定運用を担保することが必要であると考えた。そこで、この項目には20%の重みをつけた。

今回の採点結果は一般には非公開とした。ただし、採

用されなかった機関を含む審査対象機関には、各機関の採点結果は求めに応じて開示可能とした。

## 6 評価結果

まず、ユーザーの混乱の原因説明を行ったところ、実際には特定のウェブポータルとクリアリングハウスの組み合わせでしか共通基盤として機能しないことが判明した。このことが、検索結果に違いをもたらす原因の一つと特定された。検索や表示に関する独自のシステムを各機関が開発し、それらの高速化等を行ったことにより、他の機関とのシステム連携が実現されていなかった。また、公式には一機関しか提供していないはずのレジストリについても、クリアリングハウスの提供を申し出た機関のうちいくつかは、独自のデータも検索可能としていることが判明した。これらの二つが、ウェブポータルとクリアリングハウスとの組み合わせによって検索結果や利用できるサービスが異なる理由であった。各機関に特化した機能や独自データを追加することで機能の独自性や利便性を追求した結果、汎用性が失われたと言える。

技術、ユーザー使用感、さらには、運用上の長期安定性を総合評価した結果、欧州宇宙機関と世界食糧機構が提供を申し出たウェブポータル、米国地質調査所が提供を申し出たクリアリングハウスを選定し、米国地質調査所が提供を申し出たレジストリを含むこれらの組み合わせを政府間会合の共通基盤として推奨した。評価結果報告書<sup>[12]</sup>は2010年に北京で開催された地球観測サミットにおいて承認された。結果的には、世界規模の地球観測をリードする欧米の機関が選抜された。

共通基盤の要素技術の評価・選定は結果として、地球観測情報やサービスへのアクセスを行うための仕様をデファクト標準に任せるのではなく、デジュール標準として選定することになった。すでに各機関が運用している観測システムや情報システムの統合のようなことは求めないのが全球地球観測システムの理念であることを考えると、ユーザーが実際にシステムを利用していく中で、汎用性の低い技術が淘汰され、デファクト標準が形成されることが望ましい。しかし、各国や各機関の利害にも発展しうる標準策定には今回のようなデジュール標準を選定するアプローチの方が有効であったと考える。

ウェブポータルに関しては、地球観測データを含む地理空間データの表示手法が標準化され、クリアリングハウスに関しては、地球観測データのメタデータの定義、さまざまな形式のデータを相互に利用できるようにする方式、データ検索の方式が標準化された。共通基盤の評価・選定の過程において、これらのデジュール標準が明示的に策定された。

## 7 考察

地球観測分野におけるデジュール標準が策定された今回の過程を振り返って、国際標準を作成するうえで留意した点をまとめる。

第1に、デジュール標準の議論を行うにあたって国際的な合意形成を促進する策定コミュニティを形成することに留意した。国際的に広く活用される技術と認知されるためには、各国の代表からなる技術専門家だけでなく、途上国を含む実務者・利用者が大きな影響力を発揮した。

第2に、時間的スピードに留意した。デジュール標準を決める必要が生じているということはさまざまな独自技術が世の中に存在し、そのことがユーザーに混乱を生じさせている可能性が高い。混乱を早期に収束させるために、明確な期限を区切り、限られた時間の中で最適なデジュール標準を決めたことがユーザーに確実に便益をもたらすことになった。

第3に、評価過程における公平性の担保に留意した。今回の例では、評価委員会とは別に審査チームを設置したこと、さらに政府間会合執行国委員会における評価指標の承認を経て実際の評価・審査を行うことで、評価結果の公平性の担保を幾重にも図った。国際標準を選定する過程において、このような評価の独立性や個々の審査の透明性の担保といった公平なプロセスにより、結果が広く受け入れられることになった。実際、今回選定されなかった私企業は、選定に関する不公平を表明することもなく、現在も政府間会合の活動支援を続けている。今回の評価が公正性を担保できたためであると考えられる。今回の評価・選定のプロセスは私企業のボランティアな参加を評価する際の指針とも位置付けることができるであろう。私企業にとっても今回の評価結果は世界中のさまざまな分野のユーザーによる評価をもとに行われており、自社の製品の利便性や問題点を整理するうえで有益な情報であったと考えられる。

国際的な技術開発を行う立場から考えると、この共通基盤の評価・構築の過程で決められた評価項目に関する配点の重みは、国際標準を検討するうえで、一つの指針を示したと言える。この共通基盤のように国際的にも広く利用されるシステムは、技術的な優位性よりも、汎用性の方が重視され、採用されるとその方式が国際標準となる可能性が高い。

今回の共通基盤の評価・構築は、欧米が推奨する地球観測に関するデジュール構築に関する国際合意形成の成功例としても位置付けることができる。例えばEUの科学技術研究開発制度である第7次研究枠組み計画（FP7）では、地球観測に関するすべての研究プロジェクトは、政府間会合へ貢献することが採択のうえでの必要条件と政策的に決められている。FP7は共通基盤に関する研究開発支援だけでなく、データやサービスの研究開発支援も積極

的に行い、結果として今回のようにFP7で開発した技術をデジュール標準に結実させることに成功している。日本においても公的な研究開発支援制度と一体となった国際標準化への体制を構築していくことが必要であろう。

その一方で、欧米から参加する専門家にとっては、彼らが所属する機関が提供を申し出たシステムが直接審査対象となることがあった。このため、第三者としての公平な立場をとりうる日本の意見が重要性を増した。実際には、日本においてもいくつかの技術はすでに広く利用され、デファクト標準化している。国際標準策定においては、国際的な動行を踏まえた公平公正な評価は必要ではあるが、今回のように日本で広く普及した技術を結果としてデジュール標準として採用できたことは、今後欧米主導の国際標準の策定の流れの中での日本の活動の指針になると考える。ただし、膨大な会議資料の中で特に注視すべき点を日本にしながら全てフォローすることは困難である。定例の会議は電話ベースで行われたが、地域的な条件からどうしても日本時間の深夜に開催されることとなる。国際交渉は1回の会議で決まるだけでなく、電話会議等の継続的な積み重ねが重要である。全体を統括する調整業務を行う側にも人員を配備し、特に重要な会議の際に適切かつ公正なコメントを日本から出せる体制を確保することで、国際標準化議論の中で、日本でデファクト標準となっていた要素技術をデジュール標準に組み入れることが今回できた。日本が国際標準策定の議論に加わる際には、このような体制の整備も必要ではないかと考える。

### 謝辞

2年間の国際機関への派遣を通じ、今回のような国際調整や国際標準化に関連する活動に従事する機会を得ることができた。このような機会を与えてくださった産総研および日本政府に謝意を示す。また、今回の成功は日本からの3人の専門家（産総研情報技術研究部門の関口智嗣氏（現在、情報通信エレクトロニクス分野副研究統括）、田中良夫氏、小島功氏）との連携なくしては実現することができ

なかった。あわせてこの場を借りて感謝の意を表す。最後に、地球観測に関する政府間会合事務局で共に調整役として活動したRob Koopman博士、José Achache 事務局長をはじめ全事務局員、および今回の選定にかかわったすべての選定メンバーに感謝の意を表す。

### 参考文献

- [1] Supersite Tohoku-oki: <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>, 2012年3月最終アクセス
- [2] D. Normile: Japan disaster -scientific consensus on great quake came too late, *Science*, 332 (6025), 22-23 (2011).
- [3] Global Observing System: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>, 2012年3月最終アクセス
- [4] Global Terrestrial Observing System: <http://www.fao.org/gtos/>, 2012年3月最終アクセス
- [5] Integrated Global Observing Strategy: <http://www.eohandbook.com/igosp/>, 2012年3月最終アクセス
- [6] (社)日本航空宇宙工業会: 産業競争力のための地球観測衛星戦略検討会報告書, 1-19 (2011).
- [7] What is GEOSS: <http://www.earthobservations.org/geoss.shtml>, 2012年3月最終アクセス
- [8] Group on Earth Observations: *10-Year Implementation Plan*, Brussels, Belgium (2005).
- [9] Group on Earth Observations: *GEO Work Plan 2009-2011*, Beijing, China (2010).
- [10] 柴崎良介: 全球地球観測システムGlobal Earth Observation System of Systems (GEOSS), ワークショップ21世紀の生物多様性研究資料 (2008).
- [11] Group on Earth Observations: *REPORT of GEO-VI*, Washington DC, USA (2009).
- [12] GCI Coordination Team: *GCI Coordination Team Report*, Beijing, China (2010).

### 執筆者略歴

岩男 弘毅 (いわお こうき)

1996年東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修了。2000年、同大学院にて学位取得（博士 工学）。アジア工科大学院（バンコク）、産業技術総合研究所（環境管理技術研究部門）、国立環境研究所のポストドクを経て、2007年より産業技術総合研究所情報技術研究部門地球観測グリッド研究グループに所属。2009-2011年度の2年間、地球観測に関する政府間会合事務局（スイス/ジュネーブ）にScientific and Technical Officerとして出向。2012年4月より地質調査情報センター地質・衛星情報整備企画室主幹。専門は衛星リモートセンシング/GIS技術を用いたグローバルデータセット（土地被覆図等）の作成、検証。



### 略語表

略語	正式名称	日本語訳
ALOS	Advanced Land Observing Satellite	陸域観測技術衛星
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer	アスター
CL	GEOSS Clearinghouse	全球地球観測システム・クリアリングハウス
CSR	Component and Service Registry	コンポーネント・サービスレジストリ
ESA	European Space Agency	欧州宇宙機関
GCI	GEOSS Common Infrastructure	全球地球観測システム共通基盤
GEO	(Intergovernmental) Group on Earth Observations	地球観測に関する政府間会合
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems	全球地球観測システム
GWP	GEO Web Portal	全球地球観測システムウェブポータル
USGS	US Geological Survey	米国地質調査所

## 査読者との議論

### 議論1 全般

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

この論文は各国や各機関が個別に取得し加工した種々の地球観測データを、ユーザーが統合的に利用できるように情報システムを構築した内容であり、優れた「製品」化研究と思います。でき上がった製品を「システム・オブ・システムズ」と表現しているように、さまざまな要素を統合して製品を組み上げた過程は *Synthesiology* 誌にふさわしいものです。

### 議論2 地球観測データの統合の重要性

コメント（内藤 耕：産業技術総合研究所サービス工学研究センター）

多くの読者にとって、地球観測データの統合の重要性は十分に理解されているとは限らないので、論文の最初に「はじめに」としてその点の記述をお願いします。東日本大地震においてもさまざまな科学的データが政策決定に使われなかったこともありました。

回答（岩男 弘毅）

「はじめに」の章を追記し、今回の東日本大地震に関連し、科学的データが政策決定に使われなかったことについて触れました。

### 議論3 技術的な視点の追記

コメント（内藤 耕）

「構成的方法」で記述されている取り組みが今回の論文の最も重要なポイントと理解しています。原稿にはその内容の説明が書かれていますが、どのような取り組みによって、そして技術的な視点を含め何がポイントとなり、最終的な選定結果の国際合意に至ったのかを記述願います。

回答（岩男 弘毅）

ご指摘のとおり、「構成的方法」が最も重要なポイントになります。この取り組みにあたり、技術的に必要とされた要件を最初にまとめ、それらに対する取り組みを各要件に対応させて記述し、選定結果の合意につながるよう構成し直してみました。「構成的方法」についての修正に伴い、結果および考察につきましても対応がとりやすいように修正を行いました。

### 議論4 シナリオの記述

コメント（小野 晃）

原稿では、著者が GEO 事務局に入り、そこでフレームワークを与えられ、その中でシナリオを作成し、それを実施したという書きぶりになっています。*Synthesiology* では題材を著者が直接実施したことに限定せずに、GEO 事務局や GEO 自身が実施したことを含めて、より大きなシナリオを著者の視点から記述することができます。読者にとってはその方が全体を理解しやすく、有益と思います。

回答（岩男 弘毅）

全体のシナリオを説明するために新たに図 3 を追加し、この論文で内容を説明しました。

### 議論5 他分野におけるデータベースの統合との比較

質問（小野 晃）

この論文の主旨は、いろいろな主体が別々の基準で構築した複数のデータベースを、ユーザーがあたかも一つのデータベースを使っているのと同じような感覚で統合的に利用できるようなシステムを作っ

たと理解してよいでしょうか。

複数のデータベースの統合的な利用への要請は、地球観測分野以外でも多く見られることと思います。そこで、他分野と比較して、地球観測分野に特徴的な課題や解決の方法があるようでしたら著者の見解を伺いたと思います。

回答（岩男 弘毅）

ご指摘のとおり、今回の論文の主旨は、複数の機関が運用するデータベースを連携させた共通システムの構築を行い、統合的に利用できるようなシステムを実現したことです。

他分野との比較ですが、現存する複数のデータベースの統合の例として、産総研プレス記事「4 省の生命科学系データベース合同ポータルサイト *integbio.jp* を開設」と比較してみたいと思います（2011 年 12 月 12 日 発表 [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2011/pr20111212/pr20111212.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2011/pr20111212/pr20111212.html)）。

この記事では、生命科学系データベースの統合を「カタログ、横断検索、アーカイブ、再構築」の 4 ステップで実現するとあります。

地球観測分野で今回実現を目指したのは主にカタログと横断検索です。カタログ（データベース単位のリンク集）が今回紹介したレジストリに相当すると思います。また、横断検索機能（複数のデータベースの中身を一括してキーワード検索する）は、クリアリングハウスに相当すると思います。このように異なる分野においてもデータベースの統合のステップには類似性が見られます。一方で、生命科学分野のデータベース統合における第 3 ステップであるアーカイブ（データベースのフォーマットの統一と権利関係の整理）は多少違いが見られると思われます。地球観測分野においてはデータベースのフォーマットを統一するよりも、その違いをクリアリングハウス側で吸収しようとしています。その際、およそすべての地球観測データは時間・位置情報を含む点で、検索条件を限定できることが特徴的と思われる。

地球観測データの権利関係の整理は重要課題として位置付けています。専門家委員会を総会の下に設置し、データ共有原則（地球観測データの共有化を促進）をまとめています。しかし、現状は、積極的にすべてのデータを公開すべき（フリー&オープン）という流れと、権利関係を尊重すべきという考えがあり、権利関係を尊重する考えの方が支配的で、現状の権利関係の整理も体系的には十分進んでいません。データのフリー&オープンを推進しているのは米国で、例えばランドサットという地球観測衛星データの完全無償化表明を皮切りに、積極的に地球観測データを無償公開しています（LANDSAT DATA DISTRIBUTION POLICY: [http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat\\_Data\\_Policy.pdf](http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat_Data_Policy.pdf)）。地球観測に関する政府間会合でもこのような流れを受けて、フリー&オープン化が可能なデータを GEOS Data-CORE と命名し、加盟国・加盟機関にデータ提供を呼びかけていますので、今後、権利関係の整理（積極的な無償化）もある程度進むことが期待されます。ただし、個別の研究者が行う現地観測データから各国の衛星画像まで、データの種類や権利関係が多様で整理にはまだ時間がかかるものと思われる。

第 4 ステップの再構築（横断検索よりもさらに高度な検索）に関連する活動としては、この論文では紹介しませんでした。対象とした 9 つの社会便益分野で利用されている用語の整理と意味付け（オントロジー）を行っており、生命科学系データベースの統合における再構築に準ずる効果が期待できるのではと思われます。また、地球観測では、データだけでなくサービスも連携を目指しており、例えばモデルウェブという活動に見られるように、複数のモデルを結合し、新たな目的に利用するといった活動も進んでいます（<http://www.uncertweb.org/>）。

# 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

この論文では、著者らが世界で初めて窒化アルミニウム (AlN) 系薄膜圧電体を用いて開発した、量産車用燃焼圧センサーの研究開発の経緯について述べる。この研究開発の構想当時 (2003年以前) は、単結晶を用いたセンサーが一般的であり、薄膜圧電体を用いた燃焼圧センサーは未開拓領域であり、その有用性は認識されていなかった。しかし、この研究開始以降、国内外の自動車部品会社や大学などが興味を示し、実用化に向けた共同研究を実施した。その結果、冷却を必要とせず、小型で高感度の燃焼圧センサーの開発に成功した。現在、著者らはセンサーの実用化を目指し、センサー信号の安定化、センサー構造の簡素化などの課題を解決するために研究を行っている。

**キーワード:** 燃焼圧センサー、量産車用、窒化アルミニウム薄膜、圧電型、積層構造

## Development of a pressure sensor using a piezoelectric material thin film

### – Application to a combustion pressure sensor for mass-produced cars –

Morito AKIYAMA\*, Tatsuo TABARU and Kazushi KISHI

In this paper, we show the process of research and development of a combustion pressure sensor using an aluminum nitride (AlN) thin film, which we developed for the first time in the world. At the time we envisaged the R&D in 2003, most sensors used a piezoelectric single crystal. The research of a combustion pressure sensor using an AlN thin film was an unexplored field, and the usefulness of an AlN thin film was not yet well recognized. However, since we started the R&D, domestic and foreign auto parts companies and universities showed interest, and we carried out joint research with a domestic company and a university toward practical use of the sensor. Consequently, we have succeeded in developing a sensor of small size, high sensitivity, and without the need of cooling. We now conduct research to resolve the problems such as stabilization of sensor signals and simplification of the sensor structure for practical use.

**Keywords:** Combustion pressure sensors, mass-produced cars, aluminum nitride thin films, piezoelectric type, laminate structure

## 1 はじめに

### 1.1 量産車用燃焼圧センサーの必要性

二酸化炭素等による地球温暖化や、2008年頃から続いている原油価格の高騰等の影響によって、自動車エンジンの燃費向上と低公害化への対応が喫緊の課題となっている。また、日本では2015年から「重量車燃費基準」、欧州では2014年から「ユーロVI」、米国では「新排ガス規制の完全実施」等の内燃機関の排出物に関する法的規制が段階的に実施される。そこで、これらの規制への対応として、各自動車メーカーは直噴エンジン車、クリーンディーゼル車、バイオ燃料車、ハイブリッド車、電気自動車、水素自動車および燃料電池車等のさまざまな新しい自動車の研究開発を実施している。しかし、少なくとも今後10~20年間は、石油を使用する内燃機関をもつ自動車主流であることに変わりはないであろう。車体の軽量化やタイヤの性能アップ等と共に、燃焼効率の向上や排気ガスの浄化技術は現在もおもな重要な課題であり、燃焼状態を電子制御する

技術等が活発に研究されている。これらの技術には圧力や温度、流量、振動等のさまざまな計測技術が必要である。特に圧力計測には、センサー開発の必要性、装着性、精度、応答性、経済性から判断して、得られる情報の量と質の両面で期待が大きい。特に燃焼室の燃焼状態の高精度制御のためには、燃焼室の圧力を直接・高速で測定することができる、400℃以上の耐熱性を有する新たな筒内型燃焼圧センサーの開発が必要とされている<sup>[1]</sup>。

### 1.2 燃焼圧センサーの現状

圧力センサーとして最も普及しているピエゾ抵抗式半導体圧力センサーは、小型で高感度であり、量産性が高く、市場の83.2% (数量ベース) を占めている<sup>[2]</sup>。しかし、このセンサーの使用限界温度は120℃程度である。そこで耐熱性向上のために、ゲージ下部への断熱層 (アルミナ) の挿入や、サファイヤダイアフラム (隔膜) の使用、耐熱性に優れた酸化クロムや炭化ケイ素 (SiC) 薄膜をゲージ素材に使用する等の研究が行われているが、いまだ十分な耐熱

産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 〒841-0052 鳥栖市宿町 807-1  
Measurement Solution Research Center, AIST 807-1 Shuku-machi, Tosu 841-0052, Japan \* E-mail: m.akiyama@aist.go.jp

Original manuscript received January 27, 2012, Revisions received March 21, 2012, Accepted March 23, 2012

性は得られていない。

1992年にトヨタ自動車(株)は、センサー構造と設置方法を工夫することによってセンサー素子の最高温度を120℃以下におさえ、世界で初めて半導体圧力センサーを燃焼圧センサーとして量産車に搭載させたが、現在は使用されていない。また、2009年からドイツのBERUが、半導体圧力センサーを組み込んだ燃焼圧センサーの機能ももつ、グロープラグをアウディ社やフォルクスワーゲン社の一部のクリーンディーゼル車に搭載させているが、まだ広く普及していない。

これに対して、圧電体の電気分極による電荷を検出して利用する圧電型センサーは、大学や企業等の研究室で一般的に使用されている。圧電型センサーはダイアフラムで受圧したエンジン筒内圧力を圧電体が検知する仕組みになっており、小型で、応答速度が高く、耐熱性に優れている等の長所をもつ<sup>[1]</sup>。

一般的な圧電型燃焼圧センサーの圧電体には、水晶(SiO<sub>2</sub>)が用いられている。しかし、水晶の相転移点が573℃にあるため、使用限界温度は350℃程度であり、400℃以上の高温での計測には冷却を必要とする。そこで、耐熱性に優れた新しい圧電体の検討が行われている。図1に示すように、高い圧電性を示すものは使用限界温度が低い傾向があり、高い圧電性と耐熱性を併せもつ最適な圧電体を探し出すことは容易ではない。1997年頃には930℃の理論推定キュリー点をもつリン酸ガリウム(GaPO<sub>4</sub>)単

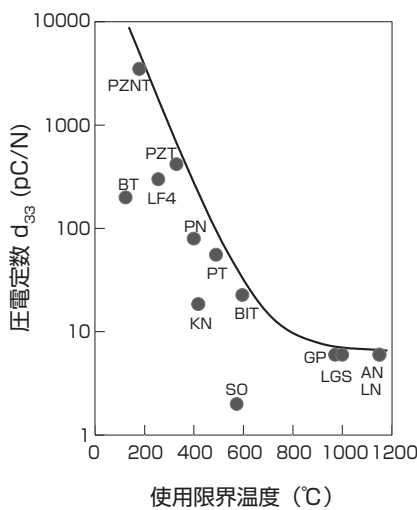


図1 圧電定数  $d_{33}$  と使用限界温度との関係  
 AN: AlN, BT: BaTiO<sub>3</sub>, BIT: Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, GP: GaPO<sub>4</sub>, KN: KNbO<sub>3</sub>, LF4: (K<sub>0.44</sub>Na<sub>0.52</sub>Li<sub>0.04</sub>)(Nb<sub>0.86</sub>Ta<sub>0.10</sub>Sb<sub>0.04</sub>)<sub>3</sub>, LGS: La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>, LN: LiNbO<sub>3</sub>, PN: PbNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, PT: PbTiO<sub>3</sub>, PZNT: 0.92Pb(Zn<sub>1/3</sub>Nd<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-0.08PbTiO<sub>3</sub>, PZT: Pb(Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>)O<sub>3</sub>, SO: SiO<sub>2</sub>

結晶を使用したものが<sup>[1]</sup>、2003年頃には1470℃までキュリー点(相転移温度)をもたないランガサイト(La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>)単結晶を使用したものが製品化されている<sup>[3]</sup>。最近では、酸化亜鉛(ZnO)単結晶を使用したものも提案されている。しかし、これらの単結晶を用いた燃焼圧センサーは、耐熱性には優れているものの一般的に高価であり、機械的な衝撃に対する耐久性が乏しく、センサー出力が低い等の問題点もあり、量産車には搭載されていない。

以上のように、400℃以上の耐熱性と優れた耐久性(最低でも10年間以上)を示し、高出力で低価格な燃焼圧力センサーを実現するためには、圧電体材料および素子構造、センサー形状等あらゆる面で、これまでとは全く異なる新たな技術開発が必要とされている。

このような状況において筆者らは、燃焼圧センサーの耐熱性と耐久性、高出力化、低価格化という困難な課題に同時に取り組み、量産車用燃焼圧センサーを開発することを目標として、2003年に産総研のハイテクものづくりプロジェクトの支援を受け本格的に研究に着手した。この研究は既存の燃焼圧センサーの改良・改善ではなく、耐久性と低価格化を実現するために、これまでの単結晶を用いたセンサーではなく薄膜を検知材料に応用し、高出力化のためにセンサー素子を積層させた構造を採用したという点において、世界初の燃焼圧センサーの研究開発である。

## 2 量産車用燃焼圧センサーを開発するためのシナリオ

この研究開発において、最終目標に設定した量産車用燃焼圧センサーの開発とそのための要素技術との統合のシナリオを図2に模式的に示す。

既存の燃焼圧センサーが抱える課題(耐熱性、耐久性、高出力化、低価格化)を踏まえ、この研究開発の第1段階で重点的に取り組む課題として、以下の5項目を設定した。

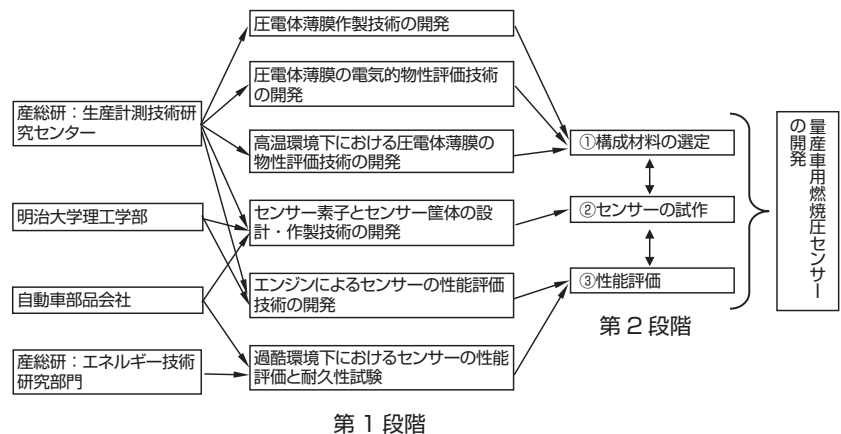


図2 量産車用燃焼圧センサーの開発のための要素技術と統合のシナリオ

- ・圧電体薄膜の作製技術の開発
- ・圧電体薄膜の電気的物性評価技術の開発
- ・高温環境下における圧電体薄膜の物性評価技術の開発
- ・センサー素子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発
- ・エンジンによるセンサーの性能評価技術の開発

現在も進行中の第2段階では、これらの要素技術の統合による量産車用燃焼圧センサーの構成材料の選定、センサーの試作、性能評価試験を継続して実施している。以上のシナリオのもと、次世代の高性能エンジン制御技術の開発に貢献することを目指している。

研究開発の開始当初は、AlN 薄膜の圧電特性を明らかにすることができれば、市販燃焼圧センサーの検知材料である圧電体部分の代替によって、量産車用燃焼圧センサーの開発は大きく前進するものと想定していた。しかし、実際に共同研究に取り組んでみると、自動車部品会社も圧電型燃焼圧センサーを研究した経験があまりなかった。そのため、圧電体薄膜の作製技術の開発から、圧電体薄膜の電気的物性評価技術の開発へと研究が進むにつれて、自動車部品会社や大学等との協力体制の下で、高温環境下における圧電体薄膜の物性評価技術の開発、センサー素子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発、エンジンによるセンサーの性能評価技術の開発までを平行して実施することとなってしまった。

性能評価試験においては、市販の圧電型燃焼圧センサーを評価の基準に設定した。圧電型燃焼圧センサーの出力（感度）はセンサーの形状に大きく左右されるため、センサー出力値を直接比較するのではなく、市販センサーの応答波形にどれだけ近づいたかという点で評価した。

量産車に搭載するためにはある定められた範囲のセンサー出力が必要であることから、性能評価後にはセンサー出力を調整できる構造も意識しながら研究開発を進めた。また同時に、初期段階の性能試験では問題とならなかった試作センサーの実用上の問題点を精査し、改良改善を行うことによって、より完成度の高い燃焼圧センサーの実用化を図っている。

以上の研究開発は独立行政法人産業技術総合研究所と自動車部品会社、学校法人明治大学が主に共同で実施し、薄膜作製技術や高温環境下における物性・現象、力学的解析技術、センサー設計技術等に関して、個々の専門知識と経験を集結させた。産総研生産計測技術研究センターチームは、圧電体薄膜作製技術の開発や圧電体薄膜の電気的物性評価技術の開発、高温環境下における圧電体薄膜の物性評価技術の開発、センサー素子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発、エンジンによるセンサーの性能評価技術の開発を担当した。明治大学チームはセンサー素

表1 代表的な圧電体の特徴比較

	AlN	SiO <sub>2</sub>	Pb(Zr,Ti)O <sub>3</sub>	GaPO <sub>4</sub>	LiNbO <sub>3</sub>	La <sub>3</sub> Ga <sub>3</sub> SiO <sub>14</sub>
圧電定数 d <sub>33</sub> (pC/N)	6	2	250	6	35	6
使用限界温度 (°C)	1200	350	250	920	1200	1000
薄膜の作製しやすさ	優	不可	可	不可	良	不可

子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発とエンジンによるセンサーの性能評価技術の開発を担当した。自動車部品会社チームは、自動車部品会社の立場から、センサー素子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発と過酷環境下におけるセンサーの性能評価と耐久性試験を担当した。産総研エネルギー技術研究部門チームは過酷環境下におけるセンサーの性能評価と耐久性試験を担当した。

なおこの研究開発を通じて、チーム間、メンバー間の情報共有と意見交換の場を設け、また性能試験や応用実験には積極的に相互に立ち会う等、共同プロジェクトのメリットを最大限に活用するよう務めた。

以下、この論文では燃焼圧センサーの研究開発のなかで、特に中核をなす要素技術開発および試作品の性能評価の概要を示す。

### 3 圧電体薄膜の作製および評価

#### 3.1 圧電体の選択および薄膜作製

筆者らの研究チームでは、表1に示すような理由、1) 圧電体の中で1200 °Cと最も高い使用限界温度を示す。2) 重金属等の有害元素を含まない。3) 水晶の3倍の圧電性を示す。4) 弾性率が高く(ヤング率:314 GPa) 高压に対しても圧電性の線形性を保持する等から、窒化アルミニウム (AlN) を検知材料として選択した<sup>[4]</sup>。AlN を検知材料に選択することによって、耐熱性という課題は容易にクリアできた。

また、圧電体の発生電荷をセンサーの出力信号にすれば、センサー出力が圧電体の厚さに全く依存しないことから、検知材料の形態を単結晶ではなく、薄膜にすることを考えついた。薄膜化することによって、単結晶の脆さという短所を克服できるという大きなメリットが得られ、機械的な衝撃に対する高い耐久性が期待できる。さらに、量産性に優れている半導体プロセスを使用することが可能となり、低価格化にも有効である。他の有望な圧電体と比較して、AlN は元素の数が少なく、薄膜化しやすいという長所もあることがわかった。したがって、筆者らの研究チームでは、当時としては世界に先駆けて AlN 薄膜を燃焼圧センサーの検知材料に採用し、AlN 薄膜の作製技術の開発に着手した。

まず、AlN 薄膜が報告されているような圧電応答性を示



すかどうかを調べるために、反応性スパッタリング法を用いて、AlN 薄膜をシリコン単結晶基板上に作製し、AlN 薄膜の圧電応答性を調べた。その結果、作製した AlN 薄膜の圧電応答性は、0.1 ~ 1.6 MPa の圧力範囲で良好な直線性を示し、0.1 ~ 100 Hz の領域で良好な周波数特性も示したことから、センサー材料として十分に可能性があることを確認した (2005 年)<sup>[6]</sup>。また、AlN 薄膜の電気モデルによる基本特性の解析を行い、エンジンの燃焼圧と同程度の 0.4 ~ 8.0 MPa の範囲で良好な直線性が得られ、測定値と電気モデルが一致することから、AlN 薄膜が燃焼圧センサー用検知材料として、使用可能であることを示した (2005 年)<sup>[6]</sup>。さらに、AlN 薄膜の電気抵抗は、温度が上昇するとアレニウス式にしたがって著しく低下していく。電気抵抗が低下すると、圧電体に生じた電荷は計測システムで検出する前に減衰してしまい、測定できなくなる。そこで、AlN 薄膜の体積抵抗率と比誘電率の温度依存性を調べた。図 3 にその結果を示す。AlN 薄膜の体積抵抗率は、851 °C においても  $10^6 \Omega \text{ cm}$  以上を示し、誘電率はわずかに増加しただけであり、AlN 薄膜は 800 °C 以上でも計測が十分に可能であることがわかった (2006 年)<sup>[7]</sup>。

しかし、単結晶のシリコン基板を使用したため、センサー素子は機械的な衝撃に弱く、耐久性に優れたセンサー素子の開発が必要となった。そこで、筆者らは金属基板上に AlN 薄膜を作製し、機械的な衝撃に対する耐久性の向上を図った。金属基板材料には、耐熱性に優れている超合金の一つであるニッケル系のインコネルを選択した。スパッタリング法によって、多結晶であるインコネル基板上に AlN 薄膜を作製したところ、結晶配向した薄膜を作製することに成功した (2006 年)<sup>[8]</sup>。図 4 (a) にインコネル基板上に作製した AlN 薄膜の断面の SEM 写真を示す。その薄膜の XRD パターンを図 4 (b) に示す。AlN 薄膜の断面部分からは、薄膜が基板表面に対して垂直に成長した、繊維構造の微細な結晶粒子から構成されていることが観察

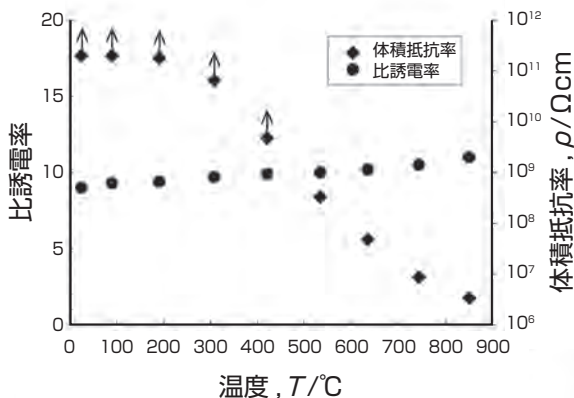


図 3 AlN 薄膜の比誘電率と体積抵抗率の温度依存性

された。インコネル基板が多結晶体にもかかわらず、得られた AlN 薄膜はウルツ鉱型の AlN の 0002 面の回折ピークのみを示し、c 軸配向性を示していた。ピエゾメーターを用いて測定した圧電定数 ( $d_{33}$ ) は 2.4 pC/N であり、単結晶の AlN の半分程度の値であったが、圧電性を示す AlN 薄膜をインコネル基板上に作製することができた。

図 5 に、フェライト系ステンレスとインコネル基板上に作製した AlN 薄膜に生じる面内応力の温度依存性と AlN の曲げ強度  $\sigma_b$  (AlN) を示す。いずれの基板を用いた場合にも、応力分布範囲が広く、両試料には明確な差が生じることがわかった。ともに 400 °C で作製しているが、作製後にはステンレスと比較して約 2 倍の圧縮応力がインコネル試料には作用している。また、AlN の熱膨張係数は両合

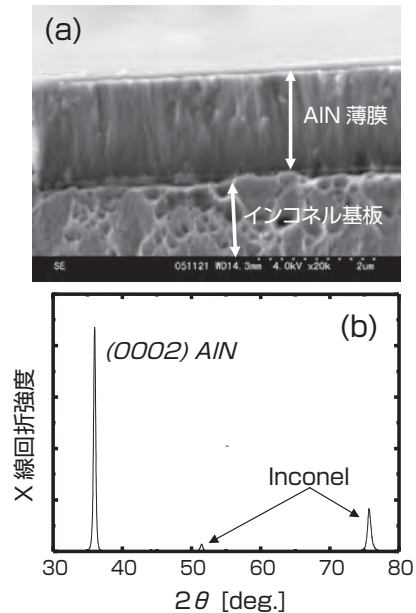


図 4 インコネル基板上に作製した AlN 薄膜の断面 SEM 写真 (a) と XRD パターン (b)

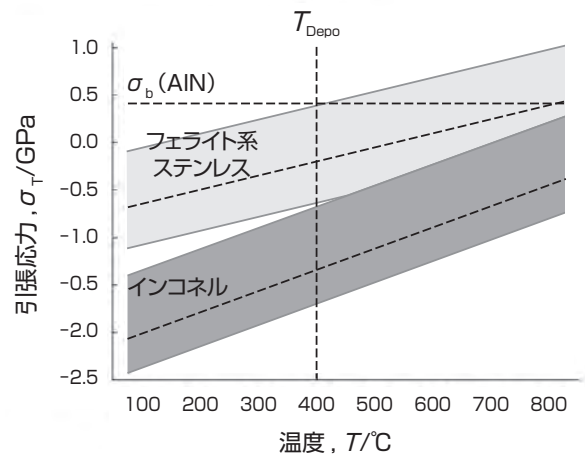


図 5 各基板材料上に成膜した AlN 薄膜の面内応力の温度依存性

金基板よりも小さいため、加熱によって引張応力が増加する。その結果、ステンレス試料では 400 °C を超えると AlN 薄膜の破断強度を超える応力が局所的に発生する可能性がある。これに対して、インコネル試料の場合には、800 °C においても AlN の破断強度を超えることはない。これらの結果により、AlN 薄膜の破断を防ぐためには、金属基板の材質を選択することが重要であることがわかった。

### 3.2 高温環境下における電気的物性の評価

インコネル基板上に作製した AlN 薄膜の高温環境下での圧電性を調べた。一定周波数で印加圧力の振動振幅を変えたときの AlN 薄膜の発生電荷の振幅変化を図 6 (a) に示す。AlN 薄膜は 10 ~ 300 MPa の高圧領域で直線性を示した。普通車の燃焼室内の最高圧力が数十 MPa であるため、AlN 薄膜は燃焼圧センサーとして十分な耐圧性をもっていることがわかった。

また、印加圧力の正弦振動振幅 300 MPa における AlN 薄膜の周波数応答を図 6 (b) に示す。ここでは、AlN 薄膜のゲインは 1 Hz での出力値で規格化している。高い周波数域 (3 ~ 30 Hz) ではゲインはおおよそフラットであり、位相のずれも小さかった。自動車のエンジンの回転数が数千 rpm (数十 Hz) であることから、AlN 薄膜は十分な周波数応答性を示すことがわかった。さらに、高温環境下での測定を行った結果、AlN 薄膜の圧電応答性が 450 °C で 54 時間全く変化しないことも確かめた (2006 年)<sup>[9]</sup>。

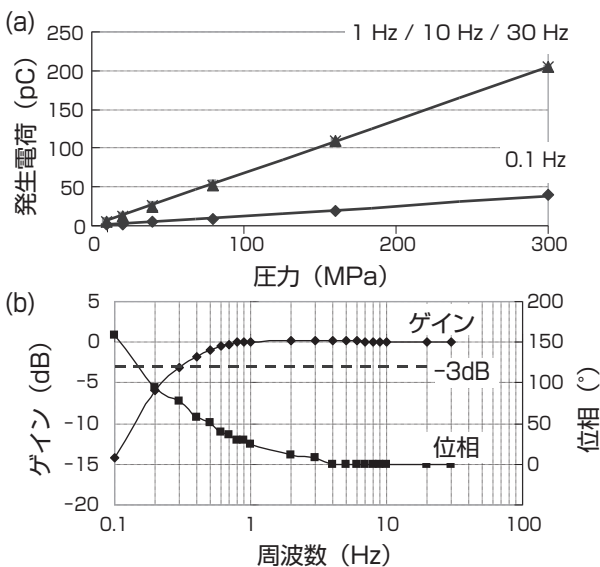


図 6 (a) 周波数 0.1 ~ 30 Hz 間における AlN 素子の発生電荷の圧力依存性、(b) 150 MPa の加圧変化に対する AlN 素子のゲインと位相の周波数応答性

## 4 センサーの試作および評価

### 4.1 エンジンによる性能評価

AlN 薄膜素子を使用できる見込みが立ったため、燃焼圧センサーの試作を行った (2007 年)<sup>[10]</sup>。図 7 に作製した AlN 薄膜燃焼圧センサーの外観写真とセンサー構造の模式図を示す。このセンサーの受圧部は、AlN 薄膜素子を円板状の内部電極で押さえ、信号線で電荷を取り出す簡単な構造で、筐体と絶縁をとるためにアルミナ板とアルミナ管を用いている。AlN センサーの燃焼圧応答特性を調べるために、単気筒の 2 サイクルエンジン (HONDA LEAD 90, HF05) を使用し、図 8 に示すようにセンサーをシリンダーヘッドの頂部近くに設置し、燃焼室の圧力を測定した。性能比較を行うために、エンジンの研究用に最も普及している Kistler 社製燃焼圧センサー (型番 6001) を用いた。無負荷でエンジン回転数を約 4000 rpm にしたときの AlN センサーの出力を、市販センサーと比較して図 9 に示した。市販センサーの発生電荷量が 140 ~ 160 pC であることから、燃焼室内の圧力は 1.1 ~ 1.2 MPa である。AlN センサーの出力波形には外部ノイズがほとんどなく、また市販センサーとおよそ同じ波形が得られた。

さらに、AlN センサーの耐久性を評価するために、約 2000 rpm で 20 分間運転し、冷却後再度 20 分間運転することを繰り返したときのセンサー出力の変化を図 10 に示

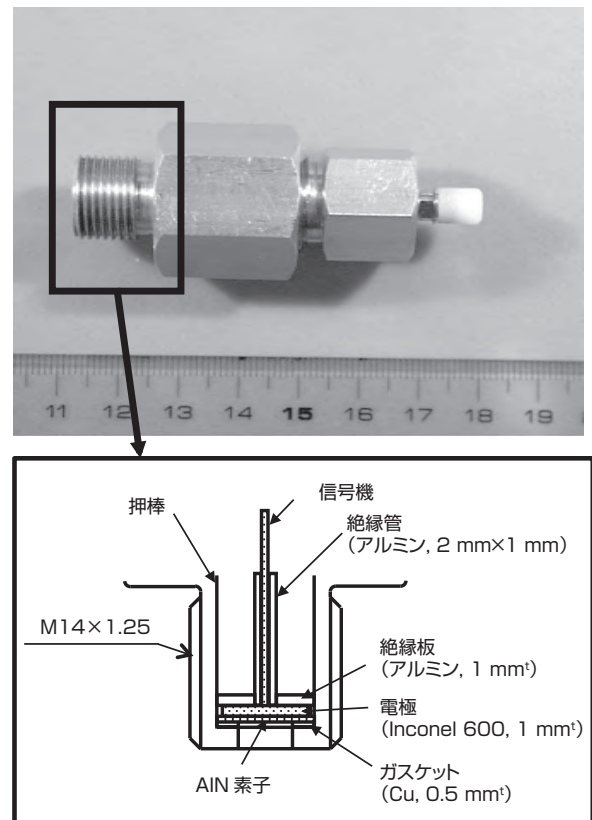


図 7 AlN センサーの外観と内部の模式図

す。エンジンの回転数を正確に一定とすることができないため、測定回ごとに出力値ばらつきはあるが、およそ一定の出力を示し、計40時間後でも出力の低下はほとんどなく、安定して動作した。

当初の目標は、実機エンジンで燃焼圧の測定が可能であることを確認することと、市販センサー並みの出力波形を得ることであったが、市販センサーとおよそ同様な応答波形を得ることができ、当初の目標は達成できた。

市販センサーは、脆い水晶の単結晶を細かく加工し、複数の単結晶片を組み合わせているが、結晶軸を揃えて切り出した小さい水晶の板を組み合わせる複雑な構造のため、素子の作製にはかなりの費用と技術が必要である。事実として、比較に使用した市販センサーは数十万円ととても高価なものである。一方、筆者らが研究開発を行っている AlN センサーは、金属板上に作製した AlN 薄膜を電極で押さえつけただけのとても簡単な構造であり、量産車用のセンサーとして1万円以下を目指している。

#### 4.2 車載に向けた小型化

開発が進むにつれて、量産車では電源の違い、使用条

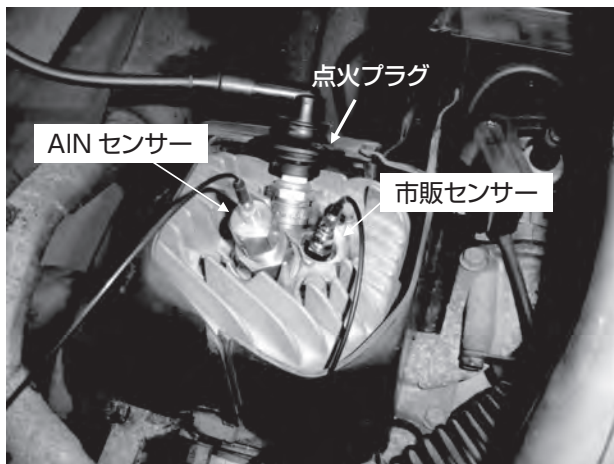


図8 センサーを2サイクルエンジンに取付けた様子

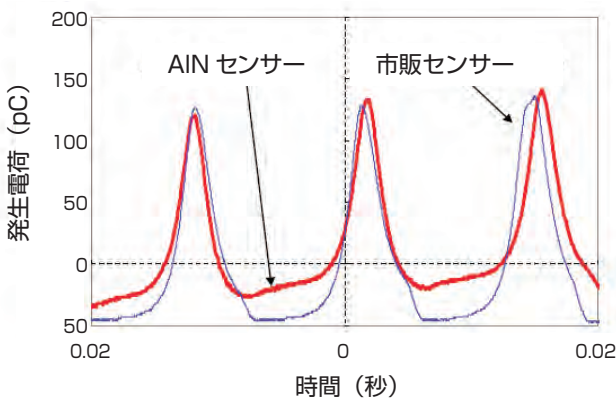


図9 2ストロークエンジン運転中のセンサーの出力波形  
エンジン回転数：約4000 rpm

件の過酷さ、価格等から、実験室で使用しているようなチャージアンプを搭載することができないという問題に直面した。そこで、すでに別の目的で車に搭載されているアンプを使用することになったが、そのアンプを使用するためには、数倍のセンサー出力が必要であった。また、近年の高性能なエンジンでは、高圧燃料噴射システムの採用やバルブ数の増加等によって、その構造がますます複雑化しているため、上記の実験で使用したような大きな匡体をもつ燃焼圧センサーを量産車のエンジンに取り付けるスペースがなく、匡体を小さくすることが求められた。圧電体の場合、発生電荷量は受圧面積に比例するため、センサー出力を増加させるためには受圧面積を増加させなければならない。しかし、受圧面積を広げると、センサー素子のサイズが大きくなり、エンジンに設置できなくなるという問題が発生する。

著者らはセンサー出力を高めつつ、体積を小さくする方法の検討を行った結果、センサー素子を縦に積み重ねることによって、センサー素子の表面積を増加させ、体積を小さくする方法を考え出した。しかし、この積層構造を実現するためには、薄膜表面または基板を匡体に接触させることなく積層させなければならないという問題が発生した。そこで、筆者らは図11に示す素子構造を考案した<sup>[11]</sup>。円形の金属基板の中心に孔を開け、その周辺を残して全面に AlN を成膜し、AlN 表面を銅箔で覆った素子を、中心の孔に信号線を通して積層する構造である。AlN は絶縁体であるため、信号線を匡体から絶縁すれば AlN 薄膜の基板側と表面が接触しなくなる。市販センサーと AlN センサーを比較して図12に示す。AlN センサーの外径は4.6 mm、センサー素子の厚さは0.2 mmの金属基板の両面に約3 μmの厚さで AlN を製膜した後、厚さ10 μmの銅箔電極で包んで図11に示した素子を作製し、図12のように組み立てた。AlN センサーの筐体外径は10 mm、ピッチ1 mmのネジになっており、これでエンジンに装着する。市販センサー(Kistler 6001)のエンジン取り付け用アダプターを装着した場合の外観とおよそ同じである。

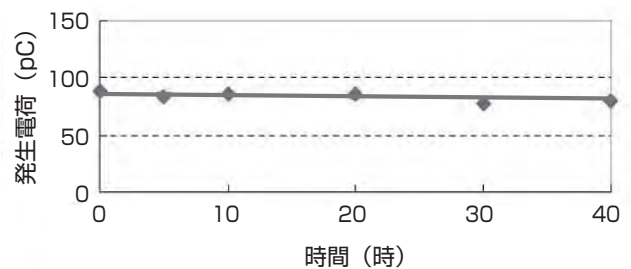


図10 AlN センサーの出力のエンジン運転時間依存性  
エンジン回転数：2000 rpm × 20 min の断続運転

AlN センサーと市販センサーをエンジンに取り付け、燃焼圧を測定した。AlN 素子を1枚、3枚および5枚積層したセンサーの出力波形を調べた。5枚積層したセンサーの出力波形を図13(a)に示す。市販センサーと同様な波形が得られ、発生電荷量は上回った。図13(b)に発生電荷量の枚数依存性を示す。素子1枚の場合の出力で40 pC、3枚では140 pC、5枚では210 pCで、枚数を増やすにつれて発生電荷量は直線的に増加し、3枚積層することで市販センサーとおおよそ同等の出力が得られ、発生電荷量が市販センサーと同等レベルならば車載用の実用的なセンサーとしての最低感度は満足していると判断している。さらに、この筐体では厚さ0.2mmの素子で最大15枚まで装着することができ、15枚使用した場合には市販センサーの4.5倍の出力を得ることが可能である。

2サイクルエンジンは、燃費や排気ガスに問題があるため、バイクやスクーター等で使用されている。量産車には

4サイクルエンジンが使用されているため、市販の4サイクルエンジン（富士重工業製ロビンエンジン（EY28DS））での評価も実施した。図14に示すように、エンジンのシリンダーヘッドバルブ側にAlNセンサーをアダプターを介して取り付け、右側に市販センサーを直接取り付け測定した。今回のAlNセンサーには、Scを加えて高感度化したAlN薄膜を3枚積層して用いた<sup>[12]</sup>。図15にAlNセンサーと市販センサーの出力波形を示す。市販センサーの出力は52 pCであり、AlNセンサーの出力は151 pCであり、市販センサーの3倍の出力が得られた。もし、最高の15枚の素子を使用した場合は、市販センサーの15倍もの出力が期待できる。また、市販センサーではブロードなピークに見える排気時のわずかな圧力変化も、AlNセンサーでは明確なピークとして観察された。これらの結果より、AlNセンサーは市販センサーの性能を大きく超えることができ、実用的な燃焼圧センサーと期待できる。

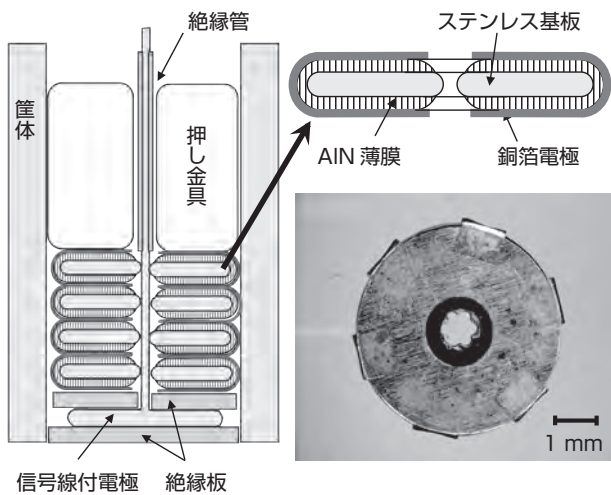


図11 AlN 薄膜センサーの素子の積層構造図と写真

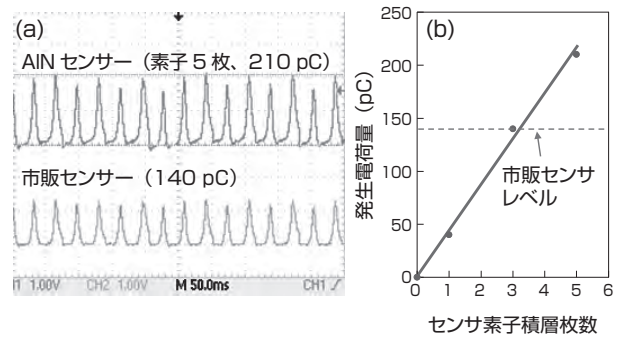


図13 (a) AlNセンサーの応答波形と(b) 発生電荷量のセンサー素子枚数依存性



図12 試作したAlNセンサーの外観



図14 センサーを取付けた4サイクルエンジンの外観

## 5 おわりに

この論文では、筆者らが世界で初めて薄膜圧電体を用いた、燃焼圧センサーの研究開発の経緯について述べた。この研究開発の構想当時(2003年以前)の燃焼圧センサー分野において、薄膜圧電体は未開拓領域であり、その有用性は認識されていなかった。しかし、この研究の開始以降、国内外の自動車部品会社や大学等が興味を示し、国内の自動車部品会社および明治大学と共同研究を行うこととなった。この薄膜燃焼圧センサーが量産車に搭載されるまでには、耐環境性や耐久性の実証試験や、センサー信号の安定化、高出力化、センサー構造の簡素化等まだ数多くの改善すべき課題が残されており、いまだ死の谷から抜け出してはいない状況ではある。しかし、これまでにさまざまな人たちの協力によって、一つずつ課題を克服し、一步一步前に進むことができてきている。この薄膜センサーの実用化と普及が進むことで、世界中で走り回っている多くの自動車からの排出ガス量が飛躍的に減少し、環境・エネルギー分野に大きく貢献することが期待される。また、船舶や特殊車両、発電機等の内燃機関への応用展開も可能であり、その波及効果は計り知れない。

## 謝辞

この研究開発を大きく促進させていただいた産業技術総合研究所の筒井康賢氏、立山博氏、エンジンによる評価方法やセンサー設計を指導していただいた明治大学の土屋一雄教授、共同研究を行っていただいた自動車部品会社の関係者の方々、産業技術総合研究所の野間弘昭氏、菖蒲一久氏、大石康宣氏、高橋三餘氏、古谷博秀氏およびその他の関係者の皆さまに深く感謝の意を表します。

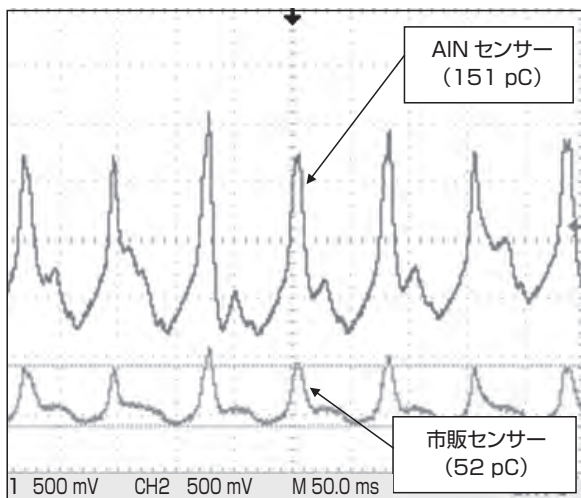


図 15 4 サイクルエンジンでの AIN センサーの応答波形

## 参考文献

- [1] 賀羽常道, 青柳友三, 皆川友宏, 柳原茂: 内燃機関の新しい圧力センサー技術, *自動車技術*, 58, 31-36 (2004).
- [2] 杉本武巳: 2002年セラミックス産業界の動き, *セラミックス*, 38, 686-693 (2003).
- [3] S. Uda, S. Q. Wang, N. Konishi, H. Inaba and J. Harada: Growth technology of piezoelectric langasite single crystal, *J. Crystal Growth*, 275, 251-258 (2005).
- [4] R. C. Turner, P. A. Fuierer, R. E. Newnham and T. R. Shrout: Materials for high temperature acoustic and vibration sensors: A review, *Appl. Acoustics*, 41, 299-324 (1994).
- [5] Y. Ooishi, H. Noma, K. Kishi, N. Ueno, M. Akiyama and T. Kamohara: Pressure response of aluminum nitride thin films prepared on silicon substrates, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 113, 700-702 (2005).
- [6] Y. Ooishi, K. Kishi, M. Akiyama, H. Noma and T. Tabaru: Analysis of the basic characteristic by electrical model of aluminum nitride thin film pressure sensors, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 113, 816-818 (2005).
- [7] 田原竜夫, 野間弘昭, 秋山守人: 800℃で動作可能な耐熱AEセンサーの開発, *エレクトロヒート*, 30, 7-13 (2009).
- [8] I. Ohshima, M. Akiyama, A. Kakami, T. Tabaru, T. Kamohara, Y. Ooishi and H. Noma: Piezoelectric response to pressure of aluminum nitride thin films prepared on nickel-based superalloy diaphragms, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45, 5169-5173 (2006).
- [9] Y. Ooishi, K. Kishi, M. Akiyama, H. Noma, T. Tabaru and D. Nishijima: High pressure and high temperature durability of aluminum nitride thin films prepared on Inconel substrates, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 114, 657-659 (2006).
- [10] Y. Ooishi, K. Kishi, M. Akiyama, H. Noma, Y. Morofuji and S. Kawai: Combustion pressure sensors using c-axis-oriented aluminum nitride thin films prepared on Inconel substrates, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 115, 344-347 (2007).
- [11] 岸和司, 秋山守人, 大石康宣, 稲垣正祥: 圧電素子, 圧電センサー, 圧電素子の製造方法, 金属箔電極部材, 特願2008-142490.
- [12] M. Akiyama, T. Kamohara, K. Kano, A. Teshigahara, Y. Takeuchi and N. Kawahara: Enhancement of piezoelectric response in scandium aluminum nitride alloy thin films prepared by dual reactive cosputtering, *Adv. Mater.*, 21, 593-596 (2009).

## 執筆者略歴

秋山 守人 (あきやま もりと)

1993年九州大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年工業技術院九州工業技術試験所(現産業技術総合研究所九州センター)入所。1997年英国リバプール大学客員研究員。2001-2003年高感度薄膜圧力センサー連携体長。2003-2006年佐賀大学大学院助教授。2011年九州大学非常勤講師。2007年より生産計測技術研究センター研究チーム長。圧電体薄膜、圧力センサー、振動センサー、生体情報計測センサー等の研究に従事。この論文では、主として圧電体薄膜の作製および評価および全体のとりまとめを担当した。



田原 竜夫 (たばる たつお)

1997年東北大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年東北大学金属材料研究所中核的研究機関研究員。1999年科学技術振興事業団科学技術特別研究員。1999年工業技術院九州工業技術研究所(現産業技術総合研究所九州センター)入所。2006年よ

り佐賀大学大学院客員准教授。2007年より生産計測技術研究センター主任研究員。耐熱合金、耐酸化コーティング、耐熱 AE センサー、異常放電検知、摩擦摩耗等の研究に従事。この論文では、主として圧電素子の高温特性評価を担当した。



岸 和司（きし かずし）

1979年愛媛大学工学部工業化学科卒業。同年農林水産省肥飼料検査所入所、翌年工業技術院九州工業技術試験所入所。現在（独）産業技術総合研究所 生産計測技術研究センタープロセス計測チーム主任研究員。工学博士。この論文ではセンサーの試作、積層構造の開発およびエンジンによる評価を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 市販車への燃焼圧センサーの搭載

質問（岡路 正博：（株）チノー、阿部 修治：産業技術総合研究所）

（1.2節）自動車エンジンの燃焼圧センサーが量産車に搭載された例として、トヨタ自動車のピエゾ抵抗式センサーが挙げられています。現在は既に使用されていないと書かれています。使用が中止された理由は何だったのでしょうか？ また、これが唯一の過去の事例であって、現在は（海外の自動車メーカーも含めて）どの量産車にも搭載されている例は無いと理解して良いのでしょうか？

回答（秋山 守人）

トヨタ自動車のピエゾ抵抗式センサーの使用が中止された詳細な理由はわかりません。また、詳細に調べた結果、ドイツのプラグメーカーである BERU が米国のテキサスインスツルメンツ社と共同開発したピエゾ抵抗式グロープラグ型燃焼圧センサーが、2009年からアウディ社やフォルクスワーゲン社のクリーンディーゼル車の一部に搭載され、欧州や北米で発売されています。この内容を本文中に反映させるために、一部修正を行いました。

### 議論2 圧電型センサーの短所

質問（岡路 正博、阿部 修治）

（1.2節）圧電型センサーは「絶対圧力計測ができない等の短所もある」と書かれています。これは実用上問題ではないのかどうか、お伺いしたい。

回答（秋山 守人）

自動車エンジンの燃焼圧は急激に変化しているために、圧電型センサーでも測定することは可能です。しかし、誤解を生じては困りますので、必要ない部分の「絶対圧力計測ができない等の短所もある」を削除しました。

### 議論3 産総研において研究を継続する理由

質問（岡路 正博、阿部 修治）

（5章）「数多くの課題がまだ残されており、いまだ死の谷から抜け出せていない状況」ということですが、耐久性実証試験等は、民間企業が開発すべきフェーズに入ったとも受け取れます。それとも、まだ産総研や大学での研究開発が必要であるという状況でしょうか？ もう産総研が行うべきステージが過ぎたのではないかという印象をもたれますので、産総研が引き続き研究を続けるべき理由を明確にする方が良いと思います。

回答（秋山 守人）

耐久性実証試験等は、民間企業が開発すべきフェーズに入っています。しかし、よりセンサーの完成度を高めるためには、センサー信号の安定化や高出力化、センサー構造の簡素化等まだ改善すべき点が残されています。そこで、産総研が行うべきこととして、5章の終わりにこの内容を追記しました。

### 議論4 当該センサーと市販センサーとの比較

質問（岡路 正博）

（4.2節）図13に示されているように、当該センサーと市販センサーとの比較で論理を展開されていますが、発生電荷量が市販センサーと同等レベルならば車載用センサーとしての条件を満足するのでしょうか？

回答（秋山 守人）

4.2節に「発生電荷量が市販センサーと同等レベルならば車載用の実用的なセンサーとしての最低感度は満足していると判断している。」という文章を追記しました。

# 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

種々の溶媒系を擬固体化できる新しいゲル化剤を開発した。水等の極性溶媒に親和性を有する電解質構造をもつこの材料は、極めて簡便に大量合成できる。さらに、イオン液体等電解液の擬固体化、歪崩壊後の自己修復性、さらにはカーボンナノチューブとの容易な複合化等、既存材料にはないさまざまな特性をもち、現在では新しいゲル化用化学試薬として販売が開始されている。

キーワード: ゲル、電解質、電解液、イオン液体、化学試薬

## Novel functional gels and their commercial distribution as chemical reagents

– New development of functional soft-materials –

Masaru YOSHIDA

We have recently developed novel gel-forming materials based on organic electrolytes. The organic electrolytes can be prepared by a simple one-pot reaction applicable to large scale production. The materials show the following remarkable characteristics. (a) They can be used for gelation of not only water but also electrolyte solutions of polar organic solvents including ionic liquids. (b) Rapid self-repairing of the formed gel is possible even after collapse by mechanical stress. (c) The formed gel can be used as an efficient dispersant for single-walled carbon nanotubes. The materials have been commercially distributed as chemical reagents for gelation.

Keywords: Gels, electrolyte, electrolyte solution, ionic liquids, chemical reagents

### 1 研究の背景

社会生活の基盤を支える多種多様な材料の中で、例えば軽く柔らかなプラスチック類の基になる有機高分子は、一般に「ソフトマテリアル」と呼ばれる物質群に属する。ソフトマテリアルは、無機固体の堅く強固なイメージに対して、有機物のしなやかな性質を巧みに利用した物質であるが、そのうち「ゲル」と呼ばれる固体と液体の中間的な性質をもつソフトマテリアルは、その生体適合性の高さから医薬品等のバイオ分野、食品・化粧品、ひいてはペンキやインク等各種塗料の粘度調節剤等、実社会の広範な分野で活用されている(図1)。

一般にゲルは、相対的に少量共存する物質が形成する化学的もしくは物理的なネットワーク構造によって大量の液体が保持(トラップ)され、固有の流動性を失った状態の擬固体物質である。溶媒である水が擬固体化したヒドロゲルとしては、食品であるゼリーやこんにゃく、また化粧品等に用いられるヒアルロン酸、衛生用品等に用いられる吸水性高分子等が例として挙げられる。また水以外の溶媒からなるゲルの例としては、有機溶媒の一種である食用油を擬

固体化する油固化剤の利用がすでに一般に広く知られている。このゲルを、材料としての機能に注目して考えた場合は、吸水性や保湿性にとどまらず、吸着・分離、各種センシング機能、防振・緩衝材、さらにはアクチュエータのような力学エネルギー変換材料への応用も期待されている。

これらのゲルにさまざまな機能を付与したいいわゆる「機能



図1 ゲルが利用されているさまざまな商品群

産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5  
Nanosystem Research Institute, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8568, Japan E-mail: masaru.yoshida@aist.go.jp

Original manuscript received February 7, 2012, Revisions received March 21, 2012, Accepted April 6, 2012

性ゲル」は、学術分野においても国内外で活発に研究が行われ、将来の高度利用が期待される材料として認知されている。一例として、経済産業省が編纂する「技術戦略マップ 2010」内の「ナノテクノロジー・材料分野」においては、環境・ライフサイエンス・IT 分野を支える基幹材料の一つとして、「機能性ゲル」が取り上げられ、その重要性が指摘されている<sup>[1]</sup>。さらに、最近発表された、(独) 科学技術推進機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) による報告書「ナノテクノロジー・材料分野 科学技術・研究開発の国際比較 2011 年版」においても、諸外国との比較から、日本がソフト材料 (超分子) の分野において優位性を保ち、特に「機能性ゲルにおいて、幾つかのブレイクスルーが遂げられており、周辺の研究を大きく押し上げている。」との重要な指摘がなされている<sup>[2]</sup>。したがって、我が国の基盤的な研究レベルの優位性をいかに高め、機能性ゲルを実践的な産業応用にどのように展開していくかが重要な課題といえる。

機能性ゲル開発の優位性を高めるためには、より一層の高機能化が求められる一方で、それらを実現する新材料は、工業的な見地から大量合成が可能な簡便な方法で調製されなければならない。この観点から筆者は、この研究の目標として、この二つのポイント (高機能化・簡便合成) を両立した新材料創製を目指し、合成化学の見地から課題解決に取り組んだ。その結果として、これまで全く知られていなかった物質群である「電解質ゲル化剤」を独自に開発するに至った。この論文では、その開発経緯と化学試薬としての販売開始に向けた取り組み、現状の課題等について述べる。

## 2 新規ゲル化剤開発に至った経緯と研究目標

ゲルには、大別して化学ゲルと物理ゲルの 2 種類が知られ、それぞれに特徴を有している。例えば、化学ゲルはゲルを形成するネットワーク構造が共有結合からなるため、一般に高い弾性率を有し力学特性に優れているが、その分、歪に対してもろい性質がある。他方、物理ゲルは、ネットワーク構造が非共有結合性の相互作用 (水素結合、 $\pi$ - $\pi$ 相互作用等) によって安定化されているため、加熱と冷却に伴い、可逆的にゾル-ゲル転移を起こすことが知られている。このような物理ゲルを形成する材料は、通常「ゲル化剤」と呼ばれ、天然物由来および人工ゲル化剤共に、すでに産業応用されている。表 1 にこの二つの特徴を大別した。寒天やゼラチンに代表される天然ゲル化剤は安全性が高く、とろみ用食品添加剤等として市販され安価に購入可能である。しかし、ゲル化の条件に制限があること、例えば、溶液の酸性度が中性であることが必須で、酸、アルカリ条件

表1 ゲル化剤の種類と性質の比較

	天然ゲル化剤	人工ゲル化剤
化合物例	・寒天、ゼラチン等	・各種合成高分子ゲル等
用途	・食品、医薬品等の生体適合性を生かした分野	・吸水材、分離用クロマトグラフィー、アクチュエータ等
利点	・安価に購入可能 ・生体適合性が高い	・化学修飾が可能 ・刺激応答性等機能付加が可能 ・基礎研究多数
課題	・酸性条件で不安定 ・水以外の溶液のゲル化には不適 ・化学修飾による機能化が困難	・一般に多工程合成が必要で、大量合成には製造プロセス設計が必要 ・使用可能な溶媒の種類が少ない

では分解が起こるため使用不可であること、一般の有機溶媒には溶解しないため、ゲル化できる溶媒に極端に制限があること等が知られている<sup>[3]</sup>。一方、化学的に合成された人工ゲル化剤は、適切な構造制御と官能基導入により、天然ゲル化剤には見られないさまざまな機能を付加することが可能である。その一方、一般的に人工ゲル化剤は多段階の合成と精製プロセスを必要とする。そのため、各段階における一定の収率が保証されない限り、総収率が低くなり、またカラムクロマトグラフィーといった大量に有機溶媒を使用する精製プロセスも大量合成には不適な場合が多い。その結果、学術レベルで活発な研究開発は行われているものの、合成スケール上は実験室レベル (収量で、多くても数グラム程度) での研究に留まっている例が多い。また、人工ゲル化剤の研究においてさえも、水と有機溶媒の両方ともゲル化できる「両親媒性ゲル化剤」の研究例は極めて少なく、1 種類のゲル化剤でいかに多種類の溶媒をゲル化できるかは大きな課題となってきた。

筆者は、2002 年から 2 年間の米国留学中に行ったデンドリマーと呼ばれる樹状高分子研究の展開として、偶然初めてゲル材料の研究に携わることとなった。当時用いた材料は、合成に多工程を有する点で、やはり依然として大量合成には適さない系であった。さらに、ゲル化できる溶媒は有機溶媒に限られ、最も一般的な溶媒 (液体) である水に対しては全くゲル化できなかった。これを契機に、筆者は帰国後、市販品として入手可能な出発原料を用い、できる限り少ない工程で合成でき、ゲル化機能を有する新材料を創製し、大量合成と商品化に耐える合成技術の開発を目標として研究を開始することとなった<sup>[4][7]</sup>。

## 3 構成学としての分子設計:ゲル化剤としての有機電解質の利用

化学の見地から考えれば、新しい材料とはすなわち新しい分子であり、その分子設計と合成に至る手法の最適化が一つの「構成学」と考えられるのではないだろうか。その意味で筆者は、比較的弱い相互作用によってゲルの形成が可



能な物理ゲル化剤に注目した。ゲル形成の際に生じる分子の自発的な集積と3次元ネットワーク構造の形成は、合成分子の「自己組織化」として現在のナノテクノロジー分野で注目される現象である。この自己組織化を高度に制御すれば、構造と機能の両面から多様性をもつゲルの開発が可能と考えられる。また物理ゲル化剤は、反応における触媒のように極少量の存在で、基盤となる溶媒の粘性を劇的に変化させ、その一方で溶媒の基本的な物性は保持できるものである。よって、新しいゲル化剤の開発により、これまで不可能であった溶媒系でのゲル化が可能となれば、それはゲルの応用を一層拡大するものと期待される。

この目的で筆者が、具体的に新材料の分子設計について指針とした考え方を、下記の図2に示す。

この研究で注目したのは、「有機電解質化合物」である。分子の自己組織化の駆動力として働く分子間相互作用としては、官能基間の水素結合や、さらに疎水性相互作用等が一般的に知られ、実際にゲル化剤の系にも利用されている(図2中、これまでのゲル化剤)。一方、その両方を容易に複合化できると考えられる有機電解質化合物の自己組織化は、DNAの二重らせん構造とそのさらなる高度集積のような極めて複雑な天然物系において、生物学の観点から盛んに研究されている。しかし、人工的に合成された物質群においては、中性化合物の自己組織化に比べてこれまであまり注目されてこなかった。溶媒が水であるヒドロゲルの調製には、ゲル化剤が親水的な部分と疎水的な部分の両方、すなわち両親媒性をもつことが重要であり、これまでのゲル化剤の場合には、主に親水性に係る特性は水酸基やカルボキシル基等の親水の官能基によって担われてきた。他方、各種アンモニウム塩に代表されるような有機電解質は、その

ような官能基をもたずとも、分子の塩構造(カチオンとアニオンの対になっている)によって親水性を示す点の特徴である。これを一つの重要な要素とした。他方、高分子電解質は、すでに機能性の高分子として電池の電解質や分離膜等広く応用が期待されているが、このような有機電解質に別途ゲル化のための相互作用が可能な官能基を組み込み、それをオリゴマー化(多重化)して多官能性とすることによりゲル化能の発現を期待した(図2中、下部)。この新しいコンセプトをできるだけ簡便に具現化する手法として、市販品として入手可能な出発原料を用いた、下記に示すワンポット自己縮合反応(一つの容器だけで反応可能、かつ分子が自発的に縮合して高分子量になる反応)を検討した。その結果、ゲル化能をもつ有機電解質オリゴマー(電解質ゲル化剤)の合成反応を確立した(図3)。

この材料は、①耐酸性、②相溶性、③自己修復性、④カーボンナノチューブとの複合化能、⑤抗菌性等のさまざまな特徴を実際に有することがわかった。これらも「分子設計上の予測の下に発現する機能」として、構成学上の重要なポイントとなる。以下にその詳細を示す。

## 4 電解質ゲル化剤の性質

### 4.1 合成

主鎖内に4級アンモニウム構造を有するポリマーは、イオノンポリマーと呼ばれ、通常はジアミン類(求核性)とジハロゲン化合物(求電子性)の2種類のモノマーの共重合法で合成される。我々は、分子内に求電子性と求核性の部位を同時に有し、分子内反応が起こらない剛直構造の両性モノマーを分子設計すれば、容易に新しい官能性有機電解質化合物の合成が可能と考えた。この方針に基

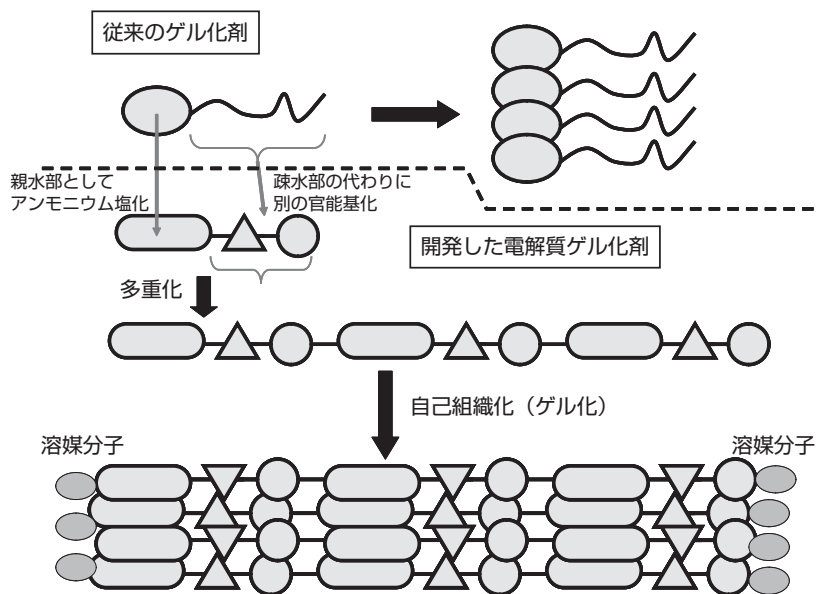


図2 新しいゲル材料に至る分子設計

づき、図3に示したように、化学試薬として購入可能な2種類の試薬(4-アミノピリジンおよび4-(クロロメチル)安息香酸クロリド)を、適当な塩基存在下で混合、加熱するだけの化学反応で合成を行った。前述した大量合成が可能な新材料実現のためには、「市販品として入手可能な出発原料を用いること」が構成学上の一つの要素と言える。この反応は、正確には最初のアミド化、続く分子間四級化反応の二段階の反応を経るが、最初の反応で生成する中間体の反応性が高く、速やかに二段階目の反応に至ることから、見かけ上は1段階の「ワンポット反応」である点が特徴である。なおこの材料は平均重合度( $n$ )が10から20程度の「オリゴマー」(比較的分子量のポリマー)であることがわかっている<sup>[4][5]</sup>。このような自己縮合による有機電解質の合成は極めて例が乏しく、これまで行われていた2種類のモノマーを事前に用意する必要がある共重合法とは、全く異なる合成化学的アプローチとして画期的である。これもこれまでの課題を解決するために特徴的な「少ない工程数」として、構成学上の重要な要素と考えられる。

## 4.2 ゲル化挙動

多くの物理ゲル化剤と同様な手法で、今回得られた有機電解質オリゴマーから水のゲルを簡便に作成することができる。すなわちこの粉末を1重量%程度以上の濃度で水に添加し、加熱→高温で溶解→(室温に放置して)冷却のプロセスを経て、水のゲル化が可能である(図4左)。

物理ゲルの一般的特徴として、このゲルも熱的かつ可逆的ゲル-ゾル転移を示し、一旦擬固体化したゲルであっても高温にすると再び粘性を失った均一溶液となる。ゲル化の詳細なメカニズムははまだ明確になっていないが、静電相互作用が重要な役割を果たしていることが明らかになりつつあり、補完的に他の多様な相互作用が複合的に関与していると考えられる。なお、後述するが、このゲル化剤はカーボンナノチューブ(CNT)と親和性を有するためにCNTとの複合化が容易であり、単独物質でCNT含有のゲルを調

製することもできた(図4右)。

## 4.3 電解質ゲル化剤の多彩な機能

有機電解質オリゴマーは、以下のような既存のゲル化剤では達成困難、もしくは全く実現することのできない興味深い特徴をもつことがわかっている。

### 4.3.1 耐酸性

天然物由来のゲルは、酸性条件ではその主要な分子構造が分解するために、酸性溶液のゲルを作成することはできない。しかし、この材料はそもそも酸性条件下で分解する官能基をもたないことから、耐酸性をもつことが予想された。実際にこの材料を用いることでpH=1程度の酸性水溶液のゲル化が可能となり、これまで困難であった酸性廃液の擬固体化への適用が期待できる(なお、塩基性条件下ではゲル化剤の溶解性が低下するため、残念ながらゲル化には成功していない)。

### 4.3.2 アニオン交換による相溶性制御

電解質ゲル化剤は陽イオン性の有機部位と、それと対の陰イオンからなっており、調製直後の陰イオンは食塩と同じ塩化物イオンである。これを別のアニオンに置換することで、ゲル化剤の溶解性(相溶性)の制御が可能である。すなわち、母体化合物の塩化物イオンを、機性能性溶媒として知られるイオン液体であるPF<sub>6</sub><sup>-</sup>、N(SO<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>-</sup>等のフッ素系脂溶性アニオンに置換することでゲル化剤の相溶性の制御を行い、水以外の溶媒にも適用することができる<sup>[4][5]</sup>。これを利用して、水だけではなく種々の有機溶媒や前述のイオン液体もゲル化することが可能である(図5)。したがって、一旦合成した後に目的に応じて溶解性を簡便に調節できる点が、これまでの人工ゲル化剤とは一線を画す大きな特徴であり、単一の分子骨格を有するという意味では、これまで調製が困難だった「両親媒性ゲル化剤」の実現といえる。なお、例えばイオン液体のゲル化においては、固有のイオン伝導度はゲル化後も数%しか低下せず保持されることが明らかとなっている<sup>[4][6]</sup>。これまでイオン液体にお

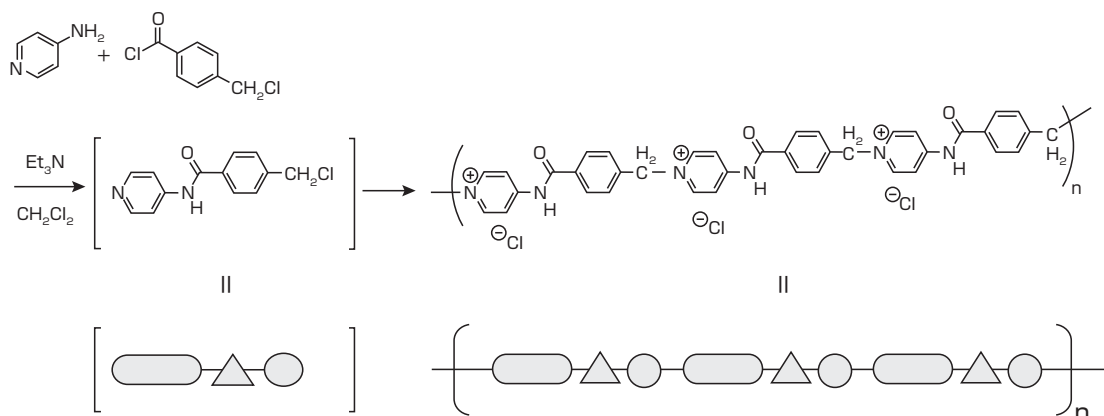


図3 電解質ゲル化剤の合成反応

いては、粘度が低い場合にはイオンの移動度が高くなるため電導度が上がる一方で密封状態で漏れやすくなるのに対し、漏れにくい高粘度のイオン液体では移動度の低下に伴って電導度が下がるというトレードオフの関係があった。この課題に対して、このゲル化剤の利用により、イオン電導度は保持したまま粘度のみを調節可能とする新しい技術が実現したといえる。したがって、イオン液体を電解液とする電気化学デバイス(色素増感太陽電池、キャパシタ、コンデンサ等)に利用することで、塗布プロセスの適用や漏れ防止による動作時間の長寿命化等、その性能向上に貢献が期待できる。

#### 4.3.3 自己修復性ゲル

一般にゲルはソフトな性状をもつが故に、機械的な応力により容易にその構造が破壊されてしまう。他方、ゲルの種類によっては「チクソトロピー性」として知られる性質を示す場合がある。これは、応力付加に対応して粘度が変化し、高応力条件で流動性をもつゾルに変化し、あらためて応力を除いた場合にはゲルに戻るような性質である。しかし一般にこのゾルからゲルへの復帰は長時間を要するとされており、唯一の例外としてカチオン性の電荷を側鎖に有するブロック共重合体からなるヒドロゲルでは、この構造復帰が速く起こることがすでに報告されていた<sup>[8]</sup>。筆者らはこの既存例と電解質ゲル化剤との構造類似性に着目し、同様の性質が見られるか検討したところ、予想したとおりゲル構造破壊後、ゲルの固体性を示す貯蔵弾性率が極めて高速(数秒単位)に復帰するという興味深い自己修復特性をもっていることを見いだした<sup>[4][7][9]</sup>。この構造復帰は高濃度であるほどその速度が速い。なお余談であるが、筆者らは当時、ゲルの弾性率に関するレオロジー測定の実績が皆無であり、ある測定機器メーカーに依頼してサンプルのデモ測定を行っていただいた。その際、これまで多種多様のサンプルを測定してきた技術者の方が、筆者らのサンプルの測定データを目にして、「とても珍しい現象だと思います。」と指摘し

たことをとても印象深く記憶している。我々はモデル化合物の結晶構造解析(未発表データ)等からこの現象を、水素結合のような短距離相互作用ではなく、電解質ゲル化剤が電荷をもつことに起因する長距離静電相互作用によるゲルネットワークの修復によって達成されていると考えている。一旦壊れたゲル構造が瞬時に復帰することから、このゲルはある種の「非崩壊ゲル」と考えられ、この高速構造復帰特性を生かした衝撃吸収材等さまざまな分野での応用が期待される。なお、上記のゲルの高速自己修復性は、筆者らの報告が先駆けとなり、その後数多くの例で知られるようになった。そのうち、東京大学の相田卓三教授、Justin Lee Mynar 特任助教(現 King Abdullah University of Science and Technology (KAUST, Saudi Arabia))らと筆者らが共同研究を行った機能性ゲル「アクアマテリアル」においては、相補的な電荷をそれぞれ有する粘土由来のナノ粒子と dendrimer の相互作用によって水のゲル形成が観察できた。このゲルにおいても高強度と自己修復性が確認されたことから、当該ゲル化の駆動力であり、さらに自己修復をもたらすと考えられる静電相互作用の重要性があらためて示唆された<sup>[10]</sup>。

#### 4.3.4 カーボンナノチューブとの複合化

電解質ゲル化剤は、前述したようにそのゲル化の機能のみではなく、ナノテクノロジーにおける次世代材料として注目される CNT に対しては特異的に「分散剤」として機能することがわかっている<sup>[4]</sup>。この結果は、唯一報告例が知られていた類似高分子電解質の例<sup>[11]</sup>から推察して見いだした機能であるが、筆者らはこの場合も CNT に関する研究蓄積は皆無の状況であった。しかし、たまたま同じ研究部門内に CNT 研究に携わる研究者がいたため、CNT の提供をお願いし、併せて分散評価の測定も依頼できたのが現象の発見につながった。このような、近傍での異分野研究者の存在がなければ、この現象は発見が大きく遅れたと考えている。実際に、CNT の一種である単層カーボンナノチュー



図4 倒立サンプル瓶中のヒドロゲルの写真(1 wt%濃度)  
左:純水ゲル、右:単層カーボンナノチューブを含有したゲル(文献5より転載)

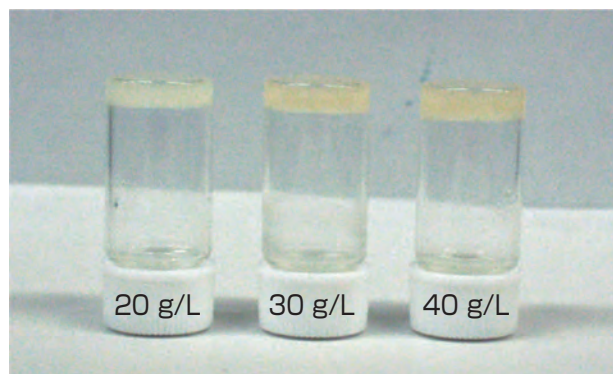


図5 倒立サンプル瓶中のイオン液体(EMIm-PF<sub>6</sub>)ゲル(文献4(サポーターイングインフォメーション)より転載(ACS許諾済))

ブ (SWCNT) と共に混合し、洗浄用の超音波照射器で一定時間超音波照射するだけで、水に不溶の SWCNT を溶解 (孤立分散) させることが可能である。CNT 分散が実現するためには、前述の既知文献<sup>[11]</sup>の例と同様に、有機電解質オリゴマーが SWCNT の  $\pi$  表面と相互作用することで錯形成が起こり、水中に分散すると考えている。この溶液は長期間にわたり全く沈殿が生成しない安定溶液であり、この液体を利用した SWCNT 薄膜の作成や、濃度を一定以上濃くした条件での SWCNT 分散ヒドロゲルの調製にも応用が可能である。これを利用することでプリンタブルエレクトロニクスにおける CNT インク調製や、ナノ炭素材料に期待されている ITO 代替としての透明電極炭素膜作成への貢献を期待している。

#### 4.3.5 抗菌効果

分子構造内にカチオン性のピリジニウム基を有する化合物は抗菌剤として働くことが知られ、実際に実用化されている。このゲル化剤も主鎖内に同様の官能基を有するため、その抗菌活性について外部機関に委託し評価したところ、グラム陽性菌 (大腸菌) と陰性菌 (黄色ブドウ球菌) の双方に対して、抗菌活性があることを見いだしている<sup>[12]</sup>。また、最小発育阻止濃度はそれぞれ  $32 \mu\text{g/ml}$ 、 $64 \mu\text{g/ml}$  と十分に小さく、一般的な界面活性剤型抗菌材料とおおよそ同等の値であることがわかった。

### 5 産業技術応用を念頭に置いた試薬化に向けた取り組み

これまでに述べたようなさまざまな特徴を有するこのゲル化剤材料については、当初は基盤研究として運営費交付金 (経済省から産総研に交付される機関助成資金) のもとで実施していた。その後、ある程度の結果を得た段階で、平成 17 年度の NEDO 産業技術研究助成事業 (ナノテク・材料分野) に採択されたことが、研究を大きく加速する契機となり、その後の研究展開につながった。NEDO への申請当時は関連特許が数件出願済ではあったものの、学術論文は一切発表していなかった段階であり、その条件下でもなお高い審査評価を受けられたのは大変幸運であった。この NEDO 支援を受けて、研究を開始した後は成果をできる限り広く知ってもらうことを目的に、産総研のプレス発表やナノテクノロジーに関連する展示会 (nano tech 2008、2009、2010、オルガテクノ 2008 等)、産総研オープンラボ等のイベント出展を積極的に行うことで、継続的に周知に努めた。それまで学会での発表と議論は経験していたものの、そのようなイベント出展の場で企業サイドの方々と直に具体的技術課題に関して議論することができたのは貴重な経験だった。そのような地道な活動の甲斐があつてか、さまざまな企業からゲル化に関する技術相談をいただき、そ

の中から実際に有償の試料提供契約を締結してゲル化剤の性能テストを行う企業も現れた。また、日本有数の化学試薬会社の一つであり、とりわけイオン液体の製造販売に実績をもつ企業より、研究発表初期段階から同ゲル化剤材料の商品化に興味をもっていただき、活発に意見交換を行うことができた。この後、産総研イノベーションズ (当時) を介して正式なライセンス契約を結び、当初は試料提供契約の希望があった企業に対するサンプル提供手段として受託合成を引き受けていただいた。その後、2009 年秋より化学試薬としての商品化に至った。当初筆者らは実験室レベルである 10 ~ 20 グラム収量程度の小スケールでしか合成反応を行った実績がなく、試薬とはいえこれまでより大スケールの反応において条件を最適化するのには労力を要した。しかし、上記企業の多くの研究員の方々の粘り強い検討により、論文発表した実験条件をある程度改善しながら、再現性や収率の向上を図った。その結果、種々のアニオン交換体を含めて、安定した性能を発揮する複数のゲル化剤の商品化につながったと考えている (図 6)。この論文の執筆にあたり、「新しい試薬として販売するための条件」について、当該企業に意見を求めたところ、1) 「これまでになかったことができるようになる：先進性」と、2) 「これまでになかったものが生まれる：発展性」を最重要視するとのことであった。また、我々の開発したゲル化剤の試薬化に際しては、そのさまざまな特徴から、電池用電解質用途、導電性材料、インク増粘剤、その他 (化粧品) 等広い分野への研究に利用できると判断したとのコメントもいただいた。参考までに、アメリカ化学会が運営する全化学物質のデータベース (CAS) によれば、現時点で有機および無機化合物を含め、6,536 万以上の化学物質が登録されている。他方、世界有数の試薬会社である Sigma-Aldrich の試薬データベースには、現在 18.7 万の商品が試薬として登録され実際に販売されている。他の化学会社を含めて、仮にこの 3 倍の数が試薬化されているとして、「全化学物質における試薬化率」を仮に計算すると 0.86 % となり、試薬化される化合物が世界的にみてもとても狭き門であることが、読者の方々にも十分ご理解いただけるかと思う。そのような現状のもと、幸運にも試薬として販売されることで、多くの分野で産学官のさまざまな研究者に実際に手に取って性能をテストしてもらうことが可能となった。また、新材料としての知名度アップにもつながったと考えている。

### 6 今後の課題と展開

化学試薬というニッチな市場レベルとはいえ、自らの開発材料が注目され、研究目標に掲げたように実際に商品

化される結果となったのは筆者にとって大きな励みとなった。試薬販売が開始されたことにより、研究開発用として外部研究機関にも試料を提供しやすい環境は整ったが、実践的な応用を考えた場合にはいまだ萌芽段階であることは否めない。根本的な課題として、率直に言えば、「ゲル化」そのものは極めて基盤的な化学現象であり、その現象自体から直ちに具体的な商品イメージが湧くという類の産業技術ではない。他方、これまでの多種多様な企業との技術相談を経て、「ゲル化」という基盤技術に対する期待が高いことは大きな確信につながっており、この技術を高めることで、さまざまな産業においては実社会に十分貢献できるものと捉えている。具体的には、産業応用上で実際にゲル化が望まれる溶媒または液体はさまざまな溶質を含んでいるケースがほとんどであり、それらへの適用のためには企業ユーザーのフィードバックを受けながら、個別にゲル化剤の性能をチューニングしていく必要があると考えられる。この点については、試薬販売のみではそのような相互理解まで含んだ十分な環境とは言えないため、その体制づくりが実践的応用に向けた大きな課題と考えている。

技術論的には、ゲル化のさらなる高効率化とゲル化できる溶媒の数の拡大が挙げられる。そのために、新しい電

解質ゲル化剤の調製にも積極的に取り組んでおり、2種類のモノマーを用いる共重合法により、種々の誘導体を合成しその高いゲル化能を確認している<sup>[13]</sup>。さらに、CNT分散機能については、その機能に特化した材料開発により、さらなる光応答性の付与等の高機能化に成功し<sup>[14]</sup>、現在CNTを利用した産業実用化のために企業との共同研究を開始している。他方、最近我々とは独立の研究グループから市販されたこのゲル化剤を用いることで、その溶液の攪拌方向に依存した不斉環境(円偏光(CD)活性)が誘起され(右回転と左回転の攪拌で、溶液の異なるCD活性が観測される)、その不斉場がゲル化によって固定化可能という前例のない極めて興味深い基礎的現象も報告され、大きな注目を集めている<sup>[15]</sup>。当初は新しいゲル化剤創製の目的で開発したこの材料はこのように多種多様な機能をもった新材料であることが明らかになりつつあり、今後の実用化に向けて、研究所内外の他の研究者と連携しながら、さらに研究に取り組んでいきたい。また、この論文の執筆作業に伴い、分子設計および合成手法の試行錯誤を行いながら化学的な見地から新材料の開発に取り組む上で、一つ一つの要素を最適化しながら組み上げていく「構成学」的考え方が重要であることを再認識した次第である。この論文が今後のそのような関連研究の一助となれば幸いである。

## 謝辞

この論文で紹介した新しいゲル材料に関する研究の内容は、以下に挙げる産総研内の共同研究者、甲村長利博士、三澤善大博士、松本一博士、玉置信之博士(現、北海道大学教授)、川波肇博士、カザウィ・サイ博士、南信次博士、Beena James 博士、栗田智香子氏、大山春美氏との長年の共同作業による研究の成果です。ここに感謝の意を表します。また、多くの助言をいただいた現ナノシステム研究部門スマートマテリアルグループ員各位に感謝します。ゲルの動的粘弾性測定に際して、測定の機会と貴重な助言をいただいたティーエーインストルメントジャパンの相川徹氏に感謝します。ゲルの構造解析に関する共同研究に協力していただいた東京大学物性研究所の柴山充弘教授、Shyamal Kumar Kundu 博士に感謝します。この研究は、NEDO 平成 17 年度第 2 回産業技術研究助成事業 (ID : 05A25710a)、および日本学術振興会科学技術研究費 (22550137) の支援を受けて行われています。このゲル化剤の化学試薬としての販売開始にご尽力いただき、試薬化に関する貴重なご意見をいただいた、関東化学株式会社の佐藤勝彦氏、桂木速人氏、金澤幸広氏、吉田昌彦氏、吉野和典氏、岩井良太氏、岩井新氏、菅孝剛氏、他関係者の皆さまに深く感謝します。



図6 試薬のパフレット(関東化学(株)作成)(上)と販売された試薬(下)

## 参考文献

- [1] 技術戦略マップ2010 経済産業省「ナノテクノロジー分野」
- [2] (独)科学技術推進機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS) 報告書「ナノテクノロジー・材料分野 科学技術・研究開発の国際比較 2011年版」(2011年6月).
- [3] 長田義仁, 梶原莞爾他:ゲルハンドブック, エヌ・ティー・エス (1997).
- [4] M. Yoshida, N. Koumura, Y. Misawa, N. Tamaoki, H. Matsumoto, H. Kawanami, S. Kazaoui and N. Minami: Oligomeric electrolyte as a multi-functional gelator, *J. Am. Chem. Soc.*, 129 (36), 11039-11041 (2007).
- [5] M. Yoshida: Ionic gelators: oligomeric and polymeric electrolytes as novel gel forming materials, *The Chemical Record*, 10, 230-242 (2010). (Invited Review)
- [6] N. Koumura, H. Matsumoto, H. Kawanami, N. Tamaoki and M. Yoshida: Tuning of solubility and gelation ability of oligomeric electrolyte by anion exchange, *Polym. J.*, 42, 759-765 (2010).
- [7] S. K. Kundu, T. Matsunaga, M. Yoshida and M. Shibayama: Rheological study on rapid recovery of hydrogel based on oligomeric electrolyte, *J. Phys. Chem. B*, 112, 11537-11541 (2008).
- [8] A. P. Nowak, V. Breedveld, L. Pakstis, B. Ozbas, D. J. Pine, D. Pochan and T. J. Deming: Rapidly recovering hydrogel scaffolds from self-assembling diblock copolypeptide amphiphiles, *Nature*, 417, 424-428 (2002).
- [9] S. K. Kundu, M. Yoshida and M. Shibayama: Effect of salt content on the rheological properties of hydrogel based on oligomeric electrolyte, *J. Phys. Chem. B*, 114, 1541-1547 (2010).
- [10] Q. Wang, J. L. Mynar, M. Yoshida, E. Lee, M. Lee, K. Okuro, K. Kinbara and T. Aida: High-water-content mouldable hydrogels by mixing clay and a dendritic molecular binder, *Nature*, 463, 339-343 (2010).
- [11] V. A. Sinani, M. K. Gheith, A. A. Yaroslavov, A. A. Rakhnyanskaya, K. Sun, A. A. Mamedov, J. P. Wicksted and N. A. Kotov: Aqueous dispersions of single-wall and multiwall carbon nanotubes with designed amphiphilic polycations, *J. Am. Chem. Soc.*, 127, 3463-3472 (2005).
- [12] 吉田 勝, 特開2010-143869
- [13] Y. Misawa, N. Koumura, H. Matsumoto, N. Tamaoki and M. Yoshida: Hydrogels based on surfactant-free ionene polymers with N,N'-(p-phenylene)dibenzamide linkages, *Macromolecules*, 41, 8841-8846 (2008).
- [14] Y. Matsuzawa, H. Kato, H. Ohyama, D. Nishide, H. Kataura and M. Yoshida: Photoinduced dispersibility tuning of carbon nanotubes by a water-soluble stilbene as a dispersant, *Adv. Mater.*, 23, 3922-3925 (2011).
- [15] K. Okano, M. Taguchi, M. Fujiki and T. Yamashita: Circularly polarized luminescence of rhodamine B in a supramolecular chiral medium formed by a vortex flow, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 52, 12474-12477 (2011).

## 執筆者略歴

吉田 勝 (よしだ まさる)

1994年3月東北大学大学院理学研究科化学専攻博士課程後期課程化学専攻修了、博士(理学)取得。同年4月工業技術院物質工学工業技術研究所(現 産業技術総合研究所)入所。2002-2004年 JSPS 若手研究者在外派遣制度により、米国カリフォルニア大学バークレー校化学科客員研究員(J. M. J. Fréchet 教授研究室)。2008年10月より、ナノシステム研究部門スマートマテリアルグループ研究グループ長。専門は、有機化学的手法を利用した新規機性能性材料の開発。



## 査読者との議論

## 議論1 構成学と分子設計

コメント (一條 久夫: ㈱つくば研究支援センター)

*Synthesiology* では、後に続く研究者の参考となるよう、研究目標を実現するために選択した要素技術、要素間の関係、それらの統合プロセス等を記すこととされています。その点に留意されると読者にとって貴重な論文となるのではないのでしょうか。

コメント (清水 敏美: 産業技術総合研究所ナノテクノロジー・材料・製造分野)

化学物質の Synthesis は、そもそも各種官能基の構成学を基本とするものであり、分子設計および合成手法の試行錯誤こそシンセシオロジーそのものだと思います。そこで、*Synthesiology* の構成学としての記述に編成し直すために、これまでのゲル化剤にはない高機能化と簡便合成を目標課題として行った分子設計について模式化して議論することをお勧めします。また、ゲル化剤の分子構造を要素ごとに分解し、これまでのゲル化剤の各要素を今回どのように変換し、さらに新たな要素をどのような理由や課題により追加し、分子設計を行ったかを図示してはいかがでしょうか。

回答 (吉田 勝)

「分子設計とその合成アプローチ」=「一つの構成学」という考え方は、とても参考になりました。この観点から模式図を新たに作成して、内容の加筆修正を全般にわたって行いました。

## 議論2 化学試薬としての出口

コメント (清水 敏美)

化学試薬としての販売という新たな実用化のための出口が示されています。可能であれば、化学会社あるいは試薬会社が試薬として販売するための判断あるいは判定基準等があれば明示してください。全世界において、これまで多種多様な有機化合物が合成されていますが、そのすべてが試薬化されているわけでは決してありません。すべての合成化学物質の試薬化率(何パーセントの合成化学物質が試薬として販売されているか)はどれくらいで、全試薬産業でどのような市場規模があるのか、それらに関する数値的情報があれば参考情報として記述が欲しいところです。

回答 (吉田 勝)

試薬化に至った企業側の動機付けについて担当者は、当該試薬を用いることで、①これまでに不可能であったことが可能になる(先進性)、②これまでになかったものが生まれる(発展性)といった要素が重要と語っています。この先進性と発展性を有する化学物質であれば、試薬として広く研究開発の場で使用されることで、市場性が生まれる可能性があります。

試薬化率に関しては、まず現時点で有機無機化合物を含めて約6536万の化学物質がCAS (Chemical Abstracts Service) データベースに登録されています。他方、世界有数の試薬会社であるSigma-Aldrichの試薬データベースには、現在18.7万の商品が試薬として登録されています。他の化学会社の試薬数を考慮して、仮にこの3倍の数が試薬化されているとして、試薬化率を仮に計算すると  $56.1/6538 = 0.86\%$  となります。したがって、試薬化がとても狭き門であることは間違いのないと思います。上記の内容を抜粋する形でこの論文に記載しました。

# 観光地の集客施策に対する効果測定の試み

## — 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

観光地では毎年なんらかの集客施策を実施しているが、施策の効果測定はほとんど行われていない。集客施策によって観光客がどれくらい変化したのか、回遊経路がどのように変化したのかを計測することは観光地づくりの基礎データになるが、合理的費用で定量的かつ継続的に回遊行動を捕捉する技術がなかった。我々は観光地等で定量的かつ継続的に観測・調査を実現する「オープンサービスフィールド型POS (Point of Service)」を開発し、実用化に向けたプロジェクトを実施した。この論文では、兵庫県城崎温泉における事例を、地元関係者と技術者との共同作業という観点から考察する。

**キーワード:** オープンサービスフィールド、回遊行動調査、アンケート調査、POS

## Evaluating the effects of actions taken to attract visitors to sightseeing areas

### – An Open Service Field behavior survey technology –

Yoshinobu YAMAMOTO

Every year, actions are taken to attract more visitors to sightseeing areas, yet the effects of these actions are rarely evaluated. Basic data for assessing effects can be obtained by measuring the change in visitation patterns upon the introduction of actions. We did not have the technology, however, to track the migration behavior quantitatively and successively with reasonable cost. To address this problem, we developed an Open Service Field Point of Service (OSF-POS) method that is practical and cost-effective. A case study of this method for the Kinosaki spa resort (Hyogo Prefecture, Japan), highlighting collaboration with local authorities, business circles, and engineering experts, is reported in this paper.

**Keywords:** Open Service Field, pedestrian research, questionnaire survey, POS

### 1 研究の目的—サービス品質改善に向けた最適設計ループ

GDPの7割を占めるサービス産業の生産性を向上させることは、活力ある日本を取り戻すうえで重要な課題である。サービス生産性を向上させるためには勘と経験に頼ってサービス改善を繰り返すのではなく、データに基づいたサービスの品質改善に向けた最適設計ループを現場に導入する必要がある<sup>[1]</sup>。一般的に観光地では毎年、集客関連イベントや集客施策を実施しているが、各イベントや施策の効果について客観的データを収集することはまれで、次年度の投資を決定する際には経験と勘による選定が行われている。そのため、効果的なイベントに注力するといった施策がとれないだけでなく、効果が疑わしいイベントであっても中止の決断が難しく、イベント数が年々増加することにもなりかねない。街づくりに責任のある人々にとって、これは大きな懸念事項である。

このような場合、合理的な判断で効果の高いイベントに

より資源を割り当てる品質改善の最適設計ループを作ることが求められる。しかも、そのループは中・長期にわたって持続されうるものでなければならない。

観光地とは一定地域内での「体験」を売るサービスであるから<sup>[2][3]</sup>、個々のイベントによってもたらされた人の増減や移動が、そのイベントの評価そのものと言える。ところがこれまでの歩行者流動調査<sup>[4]</sup>では中長期間継続して大規模な調査を実施することはもちろん、開催イベントごとに調査することすら(主に費用上の問題によって)困難であった。

そこで我々は、2009年4月から、典型的な観光地である城崎温泉を対象として、定量的かつ継続的に観光客の行動を観測する技術の実用化を目指したプロジェクトを開始した。

この論文ではまず、我々の興味の対象である観光地とはどのような場所なのかについて定義し、調査事業がなぜ困難であるのかを説明する。続いて、この困難を回避するために調査システムにインセンティブをもたせるという我々の

アプローチを述べる。そこでは、我々の開発した「オープンサービスフィールド型 POS (Point of Service)」を説明する<sup>[6][7]</sup>。その後、実用化に向けた試みにおいて重要な役割を果たした要因である、地元関係者と技術者との相互作用に関して考察する。

## 2 観光地歩行者流動調査

### 2.1 オープンサービスフィールドとはなにか

我々の対象とした観光地は、以下のような特徴をもつ地域として一般化できる。

1. 一定の地域内に、小規模サービス提供者が多数存在し、競争的に共存している。各サービス提供者は対等な関係であって、主従関係はない。
2. その地域には、特定の出入り口がない。顧客はどこから来てもどこから帰ってもよい。その流入・流出を個々のサービス提供者は把握していない。

このような特徴をもつ地域を「オープンサービスフィールド (Open Service Field)」と呼ぶ。

オープンサービスフィールドの例としては、商店街やショッピングモール、地方観光地がある。複数のサービスが集まった中を顧客が回遊する地域であっても、同一の運営主体のもとで運営されている場合にはオープンサービスフィールドには該当しない。著名なテーマパークの多くはオープンサービスフィールドに該当しない。

### 2.2 オープンサービスフィールドでの調査事業

イベントや集客施策の効果を調べる調査が観光地であまり積極的に行われていないのはなぜか。

もし単独の企業が調査事業を実施するのであれば、意思決定権者の判断がすべてである。その決定に従わない支店、という事態は一般的には想定する必要がない。これに対してオープンサービスフィールドでは多数のサービス事業者が独立してビジネスを行っているから、上意下達というわけにはいかない。それゆえ、街づくりに責任ある人々が調査の重要性を感じたとしても、個々の地元事業者が賛同しなければ実現できない。

ではなぜ調査事業に対して積極的に賛同する地元事業者が多数派になりにくいのか。この点、次のような構造的な要因を指摘できる。

#### (a) 関心の低さと費用の適切性判断の困難性

街の集客数を向上させる事業ということであれば賛同を得やすい。だが調査事業は、これを実施したからといって集客数が直ちに伸びるものではない。集客数が伸びるかどうかは個々の集客施策にかかっており、調査はその施策の結果を計測するだけである。効果的な集客施策を増やし、効果の低かった集客施策を廃することで翌年度はさらに効

率のよい投資が実施される。これが本プロジェクトの意義である。その意義を地元関係者に説明することに時間を割いたが、地元経営者にとっては直接的に自店の売りに連動する話題とはいえないことから総じて関心は低い。仮に売上げの向上が見込めるとしても、その増額分がいくらになるかは容易に見積もれず、調査費用が適切かどうかの判断は難しい。

#### (b) 公平な受益者負担の難しさ

街全体の利益になると判断できる事業であり、総額も見合うものだと判断できたとしても、その経費の平等な負担を合意することは容易ではない。オープンサービスフィールド内の競争関係の帰結として経済的格差が生じており、平等の意味すら共通ではないのである。小さい規模の店舗としては経済的余力のある者が応分の負担をすべきだと考える一方、大きな規模の店舗としては街全体の事業のときに常に負担が大きいのでは公平ではないと考えることになる。

#### (c) データ活用に関する一般的懸念

調査によって得られたデータを活用するためには、なんらかの分析が必要となるだろう。ところがその分析は一般的には特殊な技能を必要とするものと考えられている。

このことから、専門家に依頼する費用が別途必要になるのではないかと懸念が議論になる。得られたデータの活用方法が事前に明確に判っているものばかりとも限らないのだから、分析を引き受けるという宣言をすることは(地元で自分のビジネスを抱えている者にとってはなおさら)困難であろうし、多くの地方観光地にとって専門家を依頼する費用は小さくない。結果として合意を妨げる要因となる。

#### (d) 新しい方法論の導入に関する心理的不安

新しい技術や考え方に接する機会を、誰しもが歓迎するとは限らない。ビジネスを継続してきたとの自負がある店主や宿主にとって、サービス工学等の新しい概念を勉強する動機付けは高くない。また、これまでとは異なるやり方に対して最初から積極的である人は少数派であろう。自店舗を維持してきた人(これまでの方法で成功してきた人)ほど保守的であることはやむをえない。

街づくりの合意形成の場は、会議体の原則どおり「一人一票」である。それゆえ街全体で新規事業を導入することは一般に難しい。

## 3 インセンティブ付きの調査システムの提案

プロジェクトの目的は中長期にわたって利用できる顧客(観光客)行動調査の仕組みを観光地に導入することであったが、調査システムを調査システムとして持ち込んだとしても容易には受け入れられないことが予想された。地元経営者にとって、より受け入れやすいインセンティブが必要



である。一般的に、どのサービス現場でも「お客様が喜ぶこと」は経営者にとってインセンティブとなるが、「何がお客様に喜ばれるか」は個々のサービス現場によって異なる。

小川<sup>18)</sup>は、イノベーションを起こすためには「機能デザイン（ユーザーが抱える問題を発見し、それを機能要件に翻訳するという問題解決）」と「技術デザイン（その機能を実現する生産技術を含めた要素技術の組み合わせを創出するという問題解決）」の二つの問題解決が必要であると指摘している。「お客様に喜んでいただくサービスはなにか」は、機能デザインの問題であり、東京で活動するIT研究者が考えるより地元で営業する経営者が取り組むことが望ましい情報であることは明らかである。

とはいえ、一方的に地元がやりたいことを実現する、というだけではプロジェクトの目的は達成できない。それゆえ我々は「お客様が喜ぶ仕組みを提供するために導入すること」と「調査技術として機能する」ことを両立させる手法を考案する必要があった。

そこで我々はPOSシステム（販売時点情報管理システム）に着目した。小売店では「消費者が『いつ』『どこで』『なにを』購入したのかを知る」ためにPOSが使われているが、これを使う販売員にとっては調査システムというより日常の販売業務を潤滑に処理するための道具として認識されている<sup>19)</sup>。この先例にならい、本プロジェクトでは、「観光地内を回遊する観光客が、『いつ』『どこで』『どんなサービスを』受けたかを知る」観測技術をPOS（Point of Service）と位置付け、観光地で必要とされる各種サービスを構築できるクラウドサービスと、そのサービスにアクセスする小型端末「オープンサービスフィールド型POS（Open Service Field Point of Service。以下、OSF-POSと呼ぶ<sup>20)</sup>」を開発した（図1）。そして、そのOSF-POSを使うことを前提として、どのようなサービスを提供すれば「お客様に喜んでいただけるか」を宿や物販店舗の経営者に尋ねることとした。



図1 OSF-POS

### 3.1 機能デザインの発掘

我々はOSF-POSの物理的な機能（プリンターやディスプレイや音声再生機能、非接触ICカードの読み取り機能等）やソフトウェアで実現可能な機能の概要（メンバーカードが作れる等）を紹介しつつ、どのようなサービスを観光客に提供したいかを聞き取り調査した。

#### 町営クレジットカード

一番に要望として挙げられたのは「町営のクレジットカード（つけ払い）ができないか」というものであった。城崎温泉では古くから「つけ払い」の文化が根付いており、宿泊客がゆかたのまま飲食店等を訪れても、支払いは宿へのつけが効くのである（チェックアウトのときに料金をまとめて支払う<sup>21)</sup>。提案者である商工会長は、このつけ払いサービスを、少額のソフトクリームやジュースといったものに拡張して、より多くの人につけ払いサービスを提供したいと考えていた。

#### 外湯券

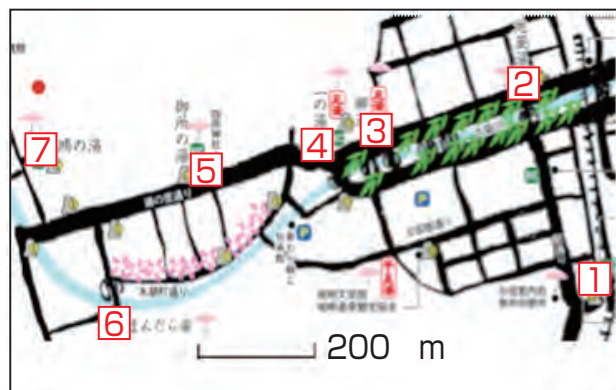
つけ払いの要望とおよそ同時に、複数の地元関係者が「外湯券の電子化」を要望として挙げた。城崎温泉では「外湯めぐり<sup>22)</sup>」がもっとも中心となる観光資源であり、およそすべての宿泊客が宿で外湯券をもらってから街中を歩く（図2）。

旧来の外湯券は紙で印刷されており、宿泊客は外湯に行くたびに1枚ずつ外湯券を渡して入浴する。

だが紙方式にはいくつかの問題があった。

券を渡す宿や、外湯を管理する行政部署である豊岡市温泉課にも不利益があったが<sup>23)</sup>、なにより宿泊者にとって不利益があった。

宿泊者であればフロントに山積みされた外湯券を何枚でも持ち出すことができる。ところが、「どうせそんなにたくさん入浴しないだろう」と考えて外出する宿泊客は意外と多い。券が足りず戻ってくることは（自己責任であるもの）



1. さとの湯 3. 柳湯 5. 御所の湯 7. 鴻の湯  
2. 地蔵湯 4. 一の湯 6. まんだら湯

図2 城崎温泉と外湯の位置

大きな不満となった。逆に、何枚でも自由に持ち出すことができるため、入手した外湯券をネット上で売る者も出ていた。そこで宿泊者以外の者が不正に入手しても入浴できないようにするため、宿泊者であることを別の手段（例えばゆかた姿）で確認する必要がある、本来は朝 10 時まで入浴可能であるべきところ（ゆかたを着ることができないために）「チェックアウト後は利用できない」という宿泊者にとっては不利益なルールを導入せざるを得なかったのである。

これらの要望を統合して、外湯券の電子化が企画された。

### その他のアプリケーション提案

外湯券の実証実験が始まり、一部の旅館でテスト的に発券が始まってからも、アプリケーションの要望を聞く機会は何度も開催された。そのなかで地元経営者から「観光案内ができないか」と提案が寄せられた。城崎温泉には「城崎案内人」という観光サービスがある。これは地元の「語り部」がいくつかの要所で観光案内を行うものである。しかし語り部を事前予約する必要がある、観光客にとって必ずしも手軽に楽しめるものとはいえなかった。また、近年増加しつつある海外からの宿泊客には対応することができなかった。そこで、外湯券を OSF-POS にかざすことで、その場所の観光案内が再生されるサービスが企画された。

そのほか「城崎メンバーズカードのようなものを実現したい」「レンタサイクルの貸し出しシステムに使いたい」といった提案が寄せられた<sup>注6)</sup>。

### 3.2 費用低減のための技術デザイン

一方、オープンサービスフィールドでは費用を低減させる技術デザインが必要となる。我々は、将来オープンサービスフィールドから提示されるさまざまな機能デザインを実装する上で費用低減に資する枠組みを OSF-POS に準備した。

#### ID の配布費用の低減

サービスの高度化・高品位化のために、顧客への ID 配布は必須である。顧客が ID をもつことにより、詳細な個別行動の収集・分析が可能になるし、その日使われた ID の総数をみれば、その日の顧客総数がわかる。ID 別の行動履歴を用いれば「この顧客がリピーターかどうか」がわかるので、特別なインセンティブを提示することも可能になる。リピーターかどうかの判断だけであれば紙のスタンプ帳を配布すればわかるのだから ID は不要と考えることもできようが、ID に対してポイントを与えることでポイントサービスを高度化できる。例えばポイント分布状況（現在、何ポイントもっている人がどのくらいいるのか）がわかり、ポイントの市場価値を正確に把握できるし（たくさんポイントをもっている人がたくさんいるなら、ポイント一つあたりのインセンティブは低くなる）、ID を付けることでポイントの流動性を制御することができる。つまり、ポイントの譲渡

を制限することで厳密に取り扱うこともできるし、他の人にプレゼントする仕組みを提供して新規顧客の開拓に活かすこともできるようになる。今日の店に訪れたのかがわかるので「あちらの店舗を訪れた人にだけ x x を謹呈する」等の相互送客の仕組みを導入することもできる。

ID の配布は顧客にとっても価値がある。リピーターに対するインセンティブを受けることができるし、たくさんのクーポン券や入場券等を束にして持ち歩く必要がなくなる（すべての権利をメンバーズカードに紐づけてしまえば、メンバーの ID を提示するだけで権利を行使できる）。万が一、券をなくしてしまっても ID で管理されていれば再発行も比較的容易となる。また、地域内で「特定個人に対して提供するサービス」を受ける際に、個々のサービス提供者に対して実名や住所を提示する必要がなくなり、匿名のままでサービスを受けることができるようになる。例えば宿でランダムに割り振られた ID 番号とクレジットカードを紐づけておき、この ID ですべての買い物ができるれば、地域内の個別の店舗でクレジットカードの番号や実名を開示する必要がなくなる。仮に観光地内に信頼できない店舗があったとしても、匿名を保持することができプライバシー保護に資する。

このように、ID を配布することは、強力なサービスインフラをもつことを意味する。それゆえ、ショッピングモールや百貨店等ではメンバーズカードを配布し、顧客を個別に把握するための投資を行う。

しかし観光地を訪れるほとんどの観光客は年に一度程度しかそこを訪れない。そのようなときに一人ひとりにメンバーズカードを発行しては費用が高つくき、現実的ではない。

そこで OSF-POS には、顧客がすでに所持している番号を顧客 ID として活用する機能がある。例えば FeliCa の製造番号を ID として使うことができる。FeliCa はおサイフケータイや交通系 IC カードで利用されている非接触 IC カードデバイスである。日本では、おサイフケータイ機能を搭載している携帯電話は出荷台数中 7 割に上る<sup>[11]</sup>。2010 年 8 月の調査によれば首都圏では電子マネーの保有率が 98.6 % に達し、近畿、札幌、福岡、東海等の地域においても 60 % を超えている<sup>[12]</sup>。FeliCa の製造番号を ID として利用することは ID を配布する費用を下げることに大きく寄与する。

一方、おサイフケータイ等をもっていない顧客のために OSF-POS には発券機能がある。当該観光地で最初に利用するサービス拠点で、そのサービスの利用券面上に顧客 ID を印字して配布するのである。このとき、当該 ID が電子的に読み取れること（バーコード等）が重要である。顧客がもっているケータイを利用するより費用は必要となるものの、レシート用紙等消耗品の費用はごくわずかである。

### ソフトウェア開発費の低減

観光地やショッピングモール等で実施されているサービスは多岐にわたる。それらのサービスを個別に開発するのでは効率的とは言えない。そこで我々は、オープンサービスフィールド内のサービスを「権利確認型サービス」「権利更新型サービス」に分けることを提案している<sup>[6][7]</sup>。あらゆるアプリケーションをどちらかに当てはめることで、用いるべきソフトウェアモジュールが決まり、ソフトウェアの開発効率は高まると期待できる。

#### (a) 権利確認型サービス

利用者がもっている ID が有効かどうかを判定してから提供するサービスである。権利確認型サービスは大量の観光客が次々と入場し、その後サービスが提供される施設で利用される。例えば、映画館や美術館、資料館等有料の施設は権利確認型サービスであり、その改札口に OSF-POS が設置される。

#### (b) 権利更新型サービス

利用のたびに情報を更新する必要があるサービスである。例えば、電子マネーは権利内容の変動（デポジット金額を消費する等）が発生するたびに情報を更新しなければならない。ID メディアが書き込み不可の場合、利用のたびにサーバーに権利変動を通知する必要がある<sup>注7)</sup>。

この二つのサービスは、要求される反応速度が異なる。権利確認型サービスは、大量の観光客が次々と訪れるような拠点なので、素早く反応しなければならない。顧客が ID を提示してからサーバーに問い合わせをするのでは時間がかかりすぎる。そのため、(a) のアプリケーションでは端末にサーバー上のデータをキャッシュして保持し、高速に反応を返すライブラリを用いる。一方 (b) のアプリケーションでは、一般的に利用者が端末の前にいる時間が長い。そのため、利用者の ID 提示に対して必ずサーバーに問い合わせを行ったとしても利用者にとって許容できる。例えば買い物のときに利用する場合は、レジの前にいる時間は 10 秒以上ある。既存のクレジットカードでの支払いでも数秒待つことは許容されている。(b) のアプリケーションとして構成すれば、そのロジックをすべてサーバー側に実装できる。端末のロジックを最小限にできるのでハードウェアに必要な費用を低減させることができるし、種類の異なる端末を用意する場合のメンテナンス費用を下げるができる。

### 合意形成費用の低減

街全体のサービス改善のアイデアは意外と多くの人々がもっている。個別にヒアリングすると「こうしたらいいのではないか」といったアイデアを聞かされることが多い。しかし街全体の会合でそのようなアイデアが語られることは多くない。理由はさまざまではあるが、その一つには合意形成

費用に対する認識がある。アイデアを出した人が実際にそれをやることになったとしても、街全体の合意を取りつけることが大変なので、実現には膨大な労力がかかる。結果として、多くの住民は「そこまでの苦労には耐えられない」と考える。どうせできないのであれば、最初からアイデアを出すことをためらうことになってしまう。

そこで OSF-POS には部分実施機能を実装している。例えば配布した ID を利用して「うちの店では予約サービスを作りたい」と思ったとする。このとき、このサービスをまず自分の店だけで実施する、ということができるようになっている。既存のサービスには一切影響を与えず、新しいサービスを特定の店舗だけでスタートさせることができるので、全体の合意を得る必要はない。他者がそのサービスを導入したいと申し出れば、直ちに展開することもできる。このような枠組みは街づくりのための IT には必須である。

### 3.3 機能デザインと技術デザインの架け橋

技術デザインの枠組みに機能デザインを当てはめる作業は主に技術側（研究者）が担当していたが、最終的なインタフェースが確定するまで、幾度も研究者側と地元関係者の間で試作と試用が繰り返された。具体事例は 5.2 節で詳細に検討する。図 3 は OSF-POS 上のつけ払いサービスによって買い物をしている様子である。

## 4 データ活用事例の提示

OSF-POS の導入以後、外湯の入場者数や混雑状況、街全体での売上高等はだれでも閲覧できるようになった。以下に、データ活用例を挙げる。

### 4.1 回遊行動のグループ構成推定

同じ宿から出発しておよそ同じ時刻に同じ拠点を移動している人々は同一グループである可能性が高い。昨年 12 月のデータを分析したところ、単独で行動しているのは 3,561 人 (12%)、大人のみ 2 人組 11,424 人 (40%)、うち男女混合の 2 人組 (大人のみ) は 8,284 人 (29%)、男女混合の 3 人～5 人の組 6,155 人 (21%)、大人と子供 (子供券) の両方を含む 3 人～5 人組 3,262 人 (11%) である



図 3 OSF-POS での買い物

ことがわかった。

これらの推測方法の妥当性を検討するため、12月16日～19日の4日間、全7か所の外湯の出口でアンケート調査を実施し、その中で同行者の人数と子供のいる家族かどうか等を尋ねた。アンケート印刷は合計2,444件、回収は1,619件（回収率66%）であった。

親子グループと推定された人のうち、一人でもアンケートに答えて、その人が子ども連れの家族であると回答しているものを正解としたとき、推定精度（正解率）は92%であった。OSF-POSのデータ分析から、実用的な精度でグループ構成を推定できることがわかった。

ところで11%の親子連れは多いのか少ないのか。文献<sup>[13]</sup>によれば、国内観光旅行に占める家族旅行の割合は51.4%と最大のシェアを占めている（（財）日本交通公社「旅行者動向2009」）。家族旅行といっても必ずしも子供券を必要とする子供がいる家族とは限らないし、親子連れの場合には宿から外出することを避ける傾向があると想像されるから、推定結果と直接比較することはできないが、その点を勘案しても11%は少ないと言える。城崎温泉では若いカップルか熟年夫婦をモデルにしたポスターしか作成していなかったが、本年度から親子連れをモデルとしたポスターも作成するようになった。

#### 4.2 滞留・経路分析

OSF-POSによるデータから分かる外湯への立ち寄り状況は直接的に利用されている。鞆店では付近の外湯の入浴者の男女比を確認し、男性客が多い日はビジネスバッグを店頭並べ、女性客が多い日はファッションナブルな製品を店頭並べる等の工夫がなされている。

ところで、改札口に設置されたOSF-POSでは、入場時の時刻しか記録できない。しかし、入場時の時刻の蓄積から各観光拠点の滞在時間を推定することができる。図4左は、「さとの湯」から「他の外湯」に移動した人数と、さとの湯に入場してから他の外湯に入場するまでの時間をグラフにしたものである。図4右は「地蔵湯」から「他の

外湯」の場合のグラフである。観光拠点ごとにこのようなグラフを作成することができる。このグラフから、さとの湯から他の外湯に行く人の多くが地蔵湯に向かっていることがわかる。また、地蔵湯からさとの湯への移動時間は49分であるのに対し、さとの湯から地蔵湯に移動する時間は76分であって55%も長い。これは、さとの湯に滞留する時間と地蔵湯に滞留する時間の差が表れており、さとの湯のほうが55%長く滞留していると考えられる。

これらの分析を通じて滞留時間を推測することで、混雑状況の将来予測が可能になる。

#### 4.3 閑散時間分析

地元飲食店にとって、昼食時間に町に人が多いことが望ましい。

図5は、7:00から23:00まで外湯が開いている時間中の利用者数をグラフ化したものである（2010年12月累計）。朝食前に外湯に行く人は一定数いるものの、10時を超えると全く人がいなくなる様子がわかる。10時までは宿泊客がいるのだから、滞在時間をあと2時間延長してもらえるような企画を推進すべきであると言える。現在、10時～14時に一度だけ入浴できる宿泊者向け（正確には、チェックアウトした人向け）の外湯券等が議論され始めている。

#### 4.4 イベント評価

図6は、2011年8月の「宿泊者数（図上）」と「街全体の売上高（図下）」である。8月の13日～16日はお盆休み期間なので宿泊者数はもっとも多かった。しかし街全体の売上高は決して多くない。街全体の売上高が最大だったのは26日である。しかし宿泊者数は必ずしも多いとはいえない。8月の晴天の平日は花火を実施したが、売り上げには影響は見られない。それに対して26日は「灯籠流し」があった。灯籠流しとは先祖の霊を送る趣旨で火の灯った灯籠を川に流す行事である。灯籠がゆっくりと川を下っていくのを見ながら、街中を比較的長く歩くイベントである。このイベントにかかるコストは花火よりも低い。よって、灯籠流しは花火よりも売り上げに貢献するイベントであると評価できる。

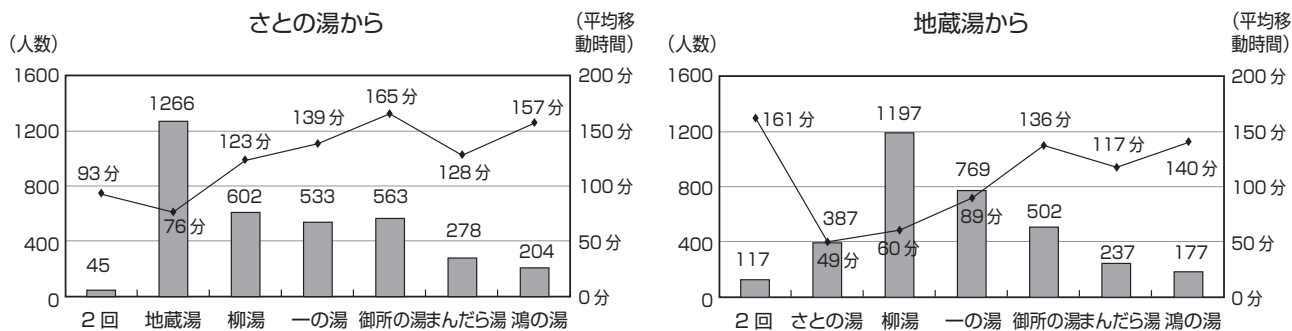


図4 さとの湯からの移動(左)、地蔵湯からの移動(右)

## 5 考察

1年間の実験運用を経て、城崎温泉は本プロジェクトで構築したシステムの継続的運用を決定した。2012年1月現在、城崎温泉のすべての宿(87軒)、すべての外湯(7か所)、35か所の店舗・観光拠点に端末が設置され、運用されている。

ここまで本プロジェクトを主に技術側から説明したが、プロジェクトの推進にユーザー側が果たした役割は大きいと思われる。そこで以下では、ユーザー側と技術側の相互作用と役割分担について検討する。

### 5.1 イノベーションに関する役割分担：知識の粘着性

複数の主体が共同プロジェクトを実施するとき、それぞれの有する知識によってプロジェクト内での役割が決まる。この点、小川の「知識の粘着性」に関する議論は興味深い<sup>8)</sup>。知識の粘着性とは、ある特定の現場で生じた知識（ノウハウや問題点の認識）の流動性（他の地域への伝達の容易さ）を表現した概念である。その知識が他の場所でも容易に活用できるものであれば粘着性は低い。一方、城崎温泉で生じていた外湯券の問題点は、他の地域で活用できる形で切り出すことは容易とは言えない。したがって粘着性が高い知識である。対照的に、情報技術をどのように利用するかという知識はPCやインターネット環境が普及している現在では、相対的に粘着性は低い。このような場合、粘着性の高い知識の現場に近いところでイノベーションが起こると説明される。城崎温泉がシステム完成の地であった本プロジェクトの結果は、小川の議論が妥当である。

小川<sup>8)</sup>は、この「粘着性」の概念に加えてニーズ・プッシュ（ユーザーが機能デザインを行うこと）とテクノロジー・プル（ユーザーが技術デザインを行うこと）という概念を用いて、ユーザーにとって技術情報の粘着性が低ければ低いほど製品イノベーションにおいてテクノロジー・プルの傾向が高まると指摘する。

このプロジェクトでの技術デザインは、おおむね研究者側にゆだねられた（テクノロジー・プルとはならなかった）。

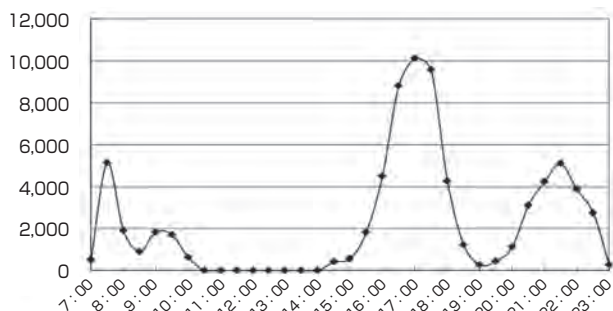


図5 7:00～23:00の外湯利用者数 (2010年12月累計)

提案された機能デザインを実装する方法はさまざまあり得たし、類例を探すことで技術に精通していない者でも実装方法を指定することは不可能とまでは言えなかった。しかし、どの技術を使えば費用を低減できるかという課題は技術情報の中でも個々の技術の難易度を理解している必要があり、技術者の技量が反映する知識でもあるから、粘着性の高いものと考えられる。

### 5.2 ユーザー側と技術側間の接点の調整

技術デザインの枠組みに機能デザインを当てはめる作業、すなわちユーザー側によるニーズ・プッシュおよびテクノロジー・プルと、技術側によるテクノロジー開発の接点の部分は技術デザインと機能デザインの両方に少なからず影響を与えたと思われる。

前述したとおり、インタフェース（現場での使い勝手）については最終形態が実装されるまで、幾度も研究者側と地元関係者の間で試作と試用が繰り返された。もし、完全にユーザーが機能デザインを記述しきることができるのであれば（どのように使うのかすべて事前に仕様書の形で書き下すことができるのであれば）、その状態はニーズ・プッシュにとどまらずテクノロジー・プルに相当するであろう。技術デザインに関する知識をもたないユーザーに対して機能デザインを促す場合には、こういうことをやりたい、という提案を受けて実装し、それを試行して問題点があるかどうかを検証し、再び改善策を検討する、という相互作用を作らねばならない。以下に、ユーザー側と技術側の相互作用が機能デザインや技術デザインの決定に影響を与えた具体例を挙げる。

#### 宿での操作インタフェース

地元関係者から外湯券を電子化するという要望が寄せられた初期の段階では、インタフェースに対する要望はまだ

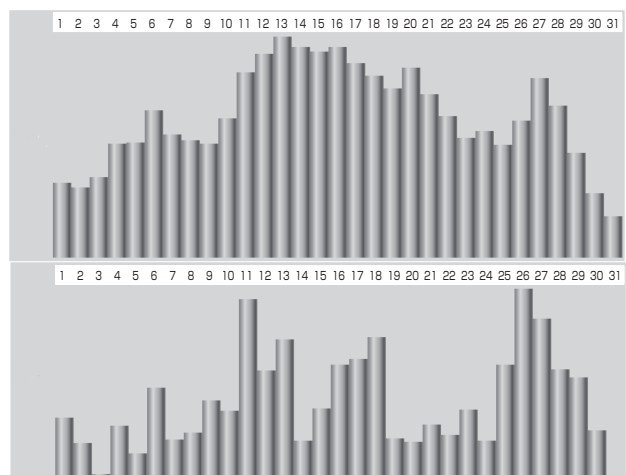


図6 2011年8月の日別宿泊客数(上)と日別売上高(下)

出されていなかった。そこで我々は外湯券発券時に「宿泊客の年齢層」等の付加情報を宿で入力してもらうことを期待した。データ分析のことを考えれば、宿でキーとなるデータを入れてもらうことはとても重要であったし、同様の入力をしているコンビニエンスストアのPOSはアルバイトの学生から高齢者までが使っているのだから、城崎温泉の宿でも十分に可能だと考えていた。

しかし、最終的には付加情報を入力するためのインタフェースは一切採用されなかった。例えば外湯券の発券だけならコマンド一覧の「発券バーコード」を読み込むだけにした。宿泊客がおサイフケータイ等非接触 IC カードを持っている場合は、宿の OSF-POS にタッチするだけで直ちにそれが外湯券化するようにした（2 連泊以上の人の場合は連泊日数をバーコードで読み込み、子供の場合は「子供券バーコード」を読み込んでから発券する必要がある）。

調査機能を重視していた我々としてはできるだけデータを取得するため、少しずつ操作を簡略化しつつも付加情報をできるだけ残した試作インタフェースを見てもらっていたが、そのたびに地元関係者は操作の簡略化ができないかを質問した。宿の経営者には高齢者も多く、新しいやり方（宿で発券する方法）に対する不安が大きかったのである。

最初はとてもあいまいな機能デザインが提示されていたが、技術デザインを当てはめる過程で徐々に機能デザインとして強い要請が絞り込まれたと考えられる。

### 外湯券の機能デザイン

OSF-POS にはおサイフケータイや非接触 IC カードを ID として利用できる機能がある。しかしこれらのカードの普及率は 100 % ではないから、レシートにバーコードを印刷する方式を併用せざるを得ない。ここで、すべての外湯券をレシート発券だけにしても機能的には十分に足りることが議論された。

しかし、次の二つの理由から非接触 IC カードとレシート発券を併用することになった。

一つ目の理由は「観光客がもっているケータイがそのまま外湯券になる」という宣伝文句が「魅力的な新技術」として受け止められたことである。ケータイは、最も身近な IT 技術の一つである。これは城崎の人々にとっても同様である。そのケータイを活用するのは（少なくとも温泉地にとって）まだ他の地域では実施していない最先端の取り組みとしてわかりやすい。しかも、顧客に喜ばれる可能性が高いと期待された。浴衣姿の外湯巡りではなるべくモノを持ち歩きたくないと考える観光客であっても、自分のケータイだけは持ち歩く。これは地元関係者にとって周知の事実であったから、ケータイが外湯券にできるのであれば宿泊客へのアピールができる。

もう一つの理由は不正利用の防止に役立つと考えられたことである。当時、城崎温泉では「一日券（当日に限り、どの外湯でも何度でも入ることができる券）」を企画していたが、購入された一日券がグループ内で貸し借りされて使われることを危惧して発券に踏み切れないでいた。顧客のケータイを外湯券として利用する方法ならば、同じ券を複数人で使いまわすという利用方法は少なくなると期待できる（これによって貸し借りを防ぐことができると期待された）。

そのため、コスト的にはバーコードだけに統一するほうがやや有利であったにもかかわらず、FeliCa を利用する技術が積極的に機能デザインに取り込まれた。ユーザー側が積極的に技術を選択したという意味において、テクノロジー・プルの要素が一部あったと言えるだろう。

### つけ払い機能付き外湯券

つけ払いサービスは、宿にとって負荷の純増である。宿泊客に対してつけ払いサービスの説明をしなければならないし、チェックアウト時には清算を行う必要がある。現時点では経済的には宿にメリットはなく、純粋に街全体のサービスとして取り組んでいる。それゆえ、つけ払い機能付きの外湯券を発券するかどうかは宿の任意である。

そこで少しでも宿の手間を少なくするよう、外湯券を発券する前に（宿泊者の）部屋番号を入力するだけでつけ払い機能付きになるようにした。チェックアウト時に料金を請求する際、部屋番号だけはどうしても必要で、これ以上操作を減らすことは困難であり、研究者側はこのインタフェースが最終形であろうと考えていた。

OSF-POS 導入後、多くの宿では、宿泊客が到着する前に外湯券を印刷しておく方式を採用していた（チェックイン後はとても忙しくなってしまうので、できるだけ準備は先にしておきたい）。ところが、外湯券を発券する前に部屋番号を入れておかねばならないとすると、つけ払いを希望する客のために発券済みの外湯券を廃棄して、つけ払い機能付き外湯券を発券しなおす必要があった。

これに気付いた研究者側が、「部屋番号を入力してから発券済み外湯券を読み込ませれば、その外湯券につけ払い機能を追加できる」という機能を追加した。この機能はとても好評を得て、後者の使い方のほうが主流になっている。発券済みの外湯券に後から機能を付加できるということは地元経営者にとっては想像の難しいところであったと思われる。また、つけ払い機能付き外湯券を発券する宿は街全体の取り組みに積極的に参加している宿なので、多少の不便があっても改善要望が出されなかったと想像する。この事例は、当然のことではあるが、技術側からニーズをうまく抽出することが必要なこともあることを示している。

### パスコード

バーコード外湯券は、無くす人があり得るので、パスコード（1ケタ～3ケタの数字）を使って本人認証を強化することが求められた。そこでシステムは発券時にパスコードを割り当てる（宿泊客が自分でパスコードを決める方式は、宿のフロント業務が混雑するとの理由から見送られた）。しかし、試行してみると「パスコードを忘れた」といって電話をしてくる宿泊客もいたし、宿の人も個別の宿泊客に「あなたのパスコードはここに記載されている番号です」と説明するのが手間になる、との意見が寄せられた。

これに対応して宿ごとに特定の数字を決めて設定しておくとその日のすべての宿泊客が同じ番号になる、という方法も使えるようにした。同じ日に同じ宿に宿泊したすべての宿泊客が同じパスコードというのは一見するとリスクが大ききようにも見えるが（このような方法を最初から勧める技術者は多くないだろう）、実務では多くの宿が固定のパスコードを使っている。これもテクノロジー・ブルの要因と考えることができるだろう。

OSF-POS が比較的短期間に導入された背景には、上述のようなユーザー側と技術側のやり取りが短期間に実施できたことが挙げられる。ユーザー側の要望を持ち帰り、技術上の改良を加えて（時には新しい機能を追加して）再び現地に持ち込むという相互作用を一件あたりおおむね2週間程度で実施した。この相互作用は、ユーザー側も技術側も事前に知り得なかった新たな知識（使い勝手のよいシステムはどのようなものか、等）を生み出すことに大きく貢献し、機能デザインを地元にとって魅力的なものにすることを可能にした。

### 5.3 ユーザーの「気づき」を支援する

品質改善の最適設計ループの実現に向けて「得られたデータを誰が分析するのか」は最大の難問であった。コンサルタントのような専門家が間に入ることが妥当であるとも考えられたが、その費用を負担できる観光地は多くないだろう。理想的には、地元の人々がアイデアを出し合っていく体制を作ることである。

アイデアを出すには、データに接する機会を増やす必要がある。そこで本システムではデータをプッシュ型で提示した。具体的には、城崎全体の観光客総数と売上総数のグラフ（のURL）を店主らにメールで送付した。加えて、気づいたことをメーリングリスト上で討論する体制を構築した。

4.4 節で紹介したイベント評価は、このメーリングリスト上で宿の経営者が指摘したものであった。

「昨日は旅館のつけ払いが11件合計21,625円ありました。11件のつけ払いは今まで最高です。全体のつけ払いも昨日が一番多かったようですね。お客様の数はお盆の方が多いのに、つけが多いということは、灯笼流し等のイベ

ントで町を散策されている人が多かったということでしょうか。」（8月26日のある宿の御主人のメールより抜粋）

この宿の経営者はまず自分の宿に宿泊している客の利用状況が多いことに気づき、街全体でも利用が多いというデータを確認しイベントの効果に思い至ったことがこのメールから推測できる。

このような「気づき」を生じる上で、経営者が日々データに接していることには意味がある。「今日はいつもと違う」とわずかに感じた印象は数日で薄れてしまうから、データを見に行くことに手間を感じる環境ではささいな変化に気づくチャンスは失われるだろう。

気づきを促進するという観点からは、本プロジェクトのようにデータプッシュによって「見る費用」を減らす方策の他に、経営者が毎日見たいデータ（例えば、地域内の同業他社全体の売り上げグラフや前年度比等の評価結果）を用意する方策もあり得るだろう。

一方、データに接する機会を増やすだけでなく、データそのものを「気づきを促しやすい」形に加工することも重要であると思われる。地元経営者は地元でその日になにが起こったかを熟知している反面、中長期での変動には気づきにくいことがあるから、グラフでの月間表示や年間表示は有効である。セブンイレブンでは店主が活用することを期待してPOSデータをグラフィック端末で提示している<sup>[8]</sup>。本件の事案はセブンイレブンの場合とは異なり、街全体のデータは直接的な意味では個別の事業者のビジネスの範囲とは言えないが、街全体の経時変化を日常的にグラフによって把握する環境の提供は、身の回りの変化だけでは気づかない街全体での変化の兆しに気づいてもらう可能性を高めるだろう。

### 5.4 地元のプロジェクト推進体制

#### キーパーソンの存在

城崎温泉の地元関係者にとって、技術者との共同プロジェクトは過去に経験のない事業であったにもかかわらず、実証実験を経て継続運用に至ることができたのはキーパーソンの積極的活動によるところが大きい。キーパーソンとは地域の意思決定に強い影響力をもつ人物のことである。さいわい、城崎温泉には本プロジェクトの価値を認識して建設的にニーズを語り、テクノロジーについて積極的に理解しようと努め、合意形成の実務を担当したキーパーソンが複数いた。合意形成に費用のかかるオープンサービスフィールドにおいては、共同プロジェクトの推進にキーパーソンの存在は不可欠であったと考えられる。

#### 関与者の広がり

いかにキーパーソンがいたとしても地域社会があらかじめ一枚岩になっているわけではないから、キーパーソンの

意見を支持する動きが広がることがプロジェクト推進には必須である。そのために地元説明会は頻繁に繰り返したが、ここでは5.2節の相互作用のもつ意味を指摘したい。前述したようにユーザー側からアイデアが出され、それを具体化して見せるという作業を短期間で繰り返した。これは「自分たちの出したアイデアが反映される」との認識をユーザー側がもつことに貢献した。アイデアを出した人はもちろんのこと、それ以外の人々にも自らが主体的に作っているのだという認識が広がった。結果として多人数のコミットメント（プロジェクトへの関与）を引き出した。

もう一つ、コミットメントを引き出すことに貢献したと考えられるポイントがある。それは「システムに名前を付けてもらう」ことである。独自の名前（城崎温泉湯めぐりパス「ゆめば」）は、命名直後から急速に街中で広まった。科学的因果関係は現時点では明らかではないが、独自名称を命名することは自らが主体的に作っているのだという認識につながると思われる。

#### 運営組織の設立

プロジェクトを長期に運営する体制は重大な論点の一つであった。合意しなければならぬ事項は街全体に及んでいたが、業種別の団体しか意見を取りまとめる組織が存在しなかったし、街づくり全体のためにOSF-POSを活用する議論の場がなかった。外湯券については財産区議会、つけ払いについては商工会、と所掌範囲が異なっており、OSF-POSの運用主体も分離したままだった。そこで、城崎温泉ではすべての業種別団体の代表者から構成される「街全体の意思決定機関」を新たに設立した。新組織は街全体のための事業を議論する場として機能するとともに、OSF-POSを継続運用する責任主体として機能する。将来の運営を担保する上で責任主体の明確化は必須である。

## 6 おわりに

観光地に品質改善の最適設計ループを導入するため、観光客の回遊行動データを中長期にわたって観測する必要がある。この論文では、我々の提案するインセンティブ付の調査システムが有効であることを示すとともに、本プロジェクトを地元関係者と技術者との共同作業という観点から考察した。

調査システムの実用導入にとって地元関係者の最大の懸念は「地元の人々だけでデータ活用は可能か」にあったが、得られたデータを頻繁にみてもらう環境を提供することで宿や店舗の経営者自身にも有益なアイデアが出せることを本プロジェクトは実証した。

より効果の高い集客施策とするために、仮説をもって来年度の企画を立案することが必要であるが、実際の企画決

定は交付金の有無や人間関係等も影響を与えるので、今後どのように運営されるかについては推移を見守りたい。

## 謝辞

この研究は経済産業省委託事業平成22年度「ITとサービスの融合による新市場創出促進事業（サービス工学研究開発事業）」の支援を受けて行われた。

**注1** 本来レジスターとPOSとは異なる（POSはデータ分析を目的としている<sup>[8]</sup>）が、レジとPOSをほぼ同義に使うことは多い。

**注2** この論文ではPOSと単に表記した場合は一般的なPOS（Point of Sales）を意味する。この論文で提案するシステム名（OSF-POS）に使っているPOSはPoint of Serviceを意味する。

**注3** これは大変好評なサービスではあったが、深夜や翌朝に個々の宿に代金の回収に回ることは飲食店等にとっては負担であるために、すべての飲食店がつけ払いに応じているわけではなかったし、飲食店以外ではごく一部の土産物店で実施されているにとどまっていた。

**注4** 旅館内にある風呂に対して、外にある共同温泉浴場を外湯と呼ぶ。城崎温泉には7つの外湯がある<sup>[10]</sup>。

**注5** 宿は、定期的に温泉課に券を受け取りに出向き、すべての券の裏面に宿の屋号のスタンプを押す手間がかかった。一人で10枚も20枚も持ち出す宿泊客もいるので、外湯券の消費が予想以上に早まって足りなくなることもある。ゆかたの袖に大量の外湯券が入っていることに気付かず洗濯してしまうことも宿の不利益である。温泉課は、入浴者数を調べるためには回収した紙の券を手作業で数えなければならず集計は常に3か月前のものであったし、一人がいくつの外湯を利用したのか、何時に利用したのか等、詳細な行動は把握できなかった。

**注6** 主に人的資源の問題から2012年1月現在で、これらの提案はまだ実装されるに至っていない。

**注7** 文献[6][7]では「権利確認型」と「権利更新型」の他に、IDを持たない者に対しても提供するサービス（「スタンプ型」）について述べている。たとえば、観光案内（来訪者のリクエスト操作に応じて音声や映像を表示するサービス）等である。しかしこの型はデータ蓄積に貢献しないので、この論文で示す二つの型に分けるべきである。

## 参考文献

- [1] 内藤耕(編), サービス工学入門, 東京大学出版 (2008).
- [2] J. W. Houghton: Online delivery of tourism services: developments, issues, and challenges, *Information and Communication Technologies in Support of the Tourism Industry*, Idea Group Pub, 1-25 (2007).
- [3] 塙 泉: 観光の本質と旅行者像に関する考察, *日本国際観光学会論文集*, 15, 29-34 (2008).
- [4] 野村幸子, 岸本達也: GPS・GISを用いた鎌倉市における観光客の歩行行動調査とアクティビティの分析, *日本建築学会総合論文集*, 4, 72-77 (2006).
- [5] 山本吉伸, 中村嘉志, 北島宗雄: サービスによるサービス調査手法(SSS)の提案, *第26回ファジィシステムシンポジウム論文集*, 800-805 (2010).
- [6] 山本吉伸, 北島宗雄: オープンサービスフィールド型POSの提案—観光地のサービス向上への適用—, *地域活性学会論文集*, 89-97 (2011).
- [7] 山本吉伸: オープンサービスフィールドにおけるPOSシステム, *観光情報学会第2回研究発表会論文集*, 19-24 (2010).
- [8] 小川進: *イノベーションの発生論理*, 千倉書房 (2000).
- [9] P.F. Drucker: *Innovation and Entrepreneurship: Practice and Principles*, Harper & Row, New York (小林宏治監訳,



上田惇生・佐々木実智男訳『イノベーションと企業家精神』  
ダイヤモンド社（1985）。

[10] <http://www.kinosaki-spa.gr.jp/yumepa/>

[11] 世界のNFC市場戦略2010～NFC・FeliCa最新動向～(株)  
シード・プランニング（2010）。

[12] 電子マネーに関するアンケート調査(第4回), (株)野村総合研  
究所（2010）。

[13] 国土交通省, 平成22年版 観光白書（2010）。

## 執筆者略歴

山本 吉伸(やまもと よしのぶ)

1994年慶應義塾大学大学院理工学研究科  
後期博士課程修了。博士(工学)。同年、通商  
産業省工業技術院電子技術総合研究所。2000  
年スタンフォード大学客員研究員。2005年シナ  
ジメディア社取締役、2006年JR東日本企画  
技術顧問、2008年サービス工学研究センター  
主任研究員、現在に至る。ヒューマンインタフェ  
ース、認知科学の研究に従事。情報処理学会、  
日本心理学会、日本認知科学会、各会員。



## 査読者との議論

### 議論1 論文全体

質問・コメント1(馬場 靖憲:東京大学先端科学技術研究センター)

この研究テーマについては、小川 進著、イノベーションの発生理論  
メーカー主導の開発体制を越えて、千倉書房（2000）という有力  
な先行研究があります。同書を上手く利用すると分析の高度化によ  
って現象の理解が進み、さらに論文がより読みやすくなると考えら  
れるので、同書の一読を強く望みます。

回答1(山本 吉伸)

査読者のご指摘の文献をただちに買い求め、すぐに読みました。  
ご指摘のとおり、この文献の中で提示されている概念はとても重要  
かつ有用であると私も感じました。これまで自分の取り組みを技術移  
転やイノベーションという観点からはあまり捉えていなかったのです  
が、情報の粘性性という強力なコンセプトを援用すれば新たな観点  
からの考察ができると強く感じました。ご指摘の修正を加えるため  
には多少の文面の調整ではならず、大幅に見直すことになりました。

### 議論2 サービスの生産性

質問・コメント2(馬場 靖憲)

この論文は、著者が開発した OSF-POS の導入によってサービスの  
生産性が向上したことが、当該観光地における同機器の普及と継続  
的利用に貢献したことを示唆(主張)しています。この場合、何を  
もってサービスの生産性とするか、その内容をより明確にして分析を  
進めることが望ましいところです。生産性向上から誰が利益を得る  
か、という観点から、(i) 観光客をサービス享受者とした場合、生産  
性向上が観光客の動向(数、または、消費金額)にどのような影響  
をもたらしたか、また、(ii) 導入企業をサービス享受者とした場合、  
OSF-POS の導入が異なった特性をもつ企業の収益にどのような影響

を与えたか、非定量的であっても何らかの分析と考察が望ましいと思  
います。

回答2(山本 吉伸)

この論文でのサービス生産性向上の第一義的な意味は「集客施策  
の客観的評価による適切な投資判断を中長期にわたって実施するこ  
と」です。この点についても明確になるよう心がけました。

## 議論3 地元事業者におけるシステムの改善

コメント3(馬場 靖憲)

地元の事業者を導入したシステムを継続的に利用してもらうために  
は、地元のイニシアティブでシステムの改善ができる体制を構築する  
ことが鍵になります。これは重要な論点なので、他の箇所を適宜、カッ  
トして、節約した文字数を利用して、この論点の補強をしてください。  
例えば、地元の発想力をさらに活性化するための、技術的支援の可  
能性とか、システムにこういう機能が付加されれば、さらに面白い等、  
将来に向けた提案をお願いします。

回答3(山本 吉伸)

5.3節はタイトルを含めて見直しました。全体的に整理し、気付き  
を支援する方策として「頻繁にデータに接すること」と「気付きやすい  
形にして提示すること」を挙げました。「頻繁にデータに接すること」  
は具体化策として「メールで通知すること」の他、「毎日でも見たくな  
るデータを提供すること」を挙げました。

## 議論4 POSの意味

コメント4(内藤 耕:産業技術総合研究所サービス工学研究セン  
ター)

POS を「Pont of Service」「Point of Sales」の両方の略称として  
使っています。一般的には後者が POS の略称として認知されており、  
前者は OSF-POS として統一するか、別の略称にしてください。また  
論文の内容から OSF-POS の P は Point ではなく回遊行動等のサー  
ビスプロセスの把握が大きな特徴ですので、それを Process と表現  
するのも一案と思いますので是非ご検討ください。また「調査シス  
テムとして認識されることはほとんどなく」は実態を反映しておらず、  
むしろ調査システムとして十分に活用されていないのが事実です。

回答4(山本 吉伸)

Process に変更とのご提案ありがとうございます。たしかに意味  
的にサービス過程を含有することを表現できるように思います。しか  
し、そもそも POS という名称を説明のために導入した当初の趣旨は  
Point of Sales システムのメタファですので、その意味内容が異なるも  
のであって偶然略称が同一であった、ということとはやや趣を異にす  
るようにも感じます。それゆえ、意味内容に踏み込むためには一層の  
説明を必要とするのではないかと思料します。この論文の POS は、  
Point of Sales の略称として記述し、Point of Service の意味で使用  
する時は、POS (Point of Service) あるいは、開発したシステムの  
名称 OSF-POS に統一しました。より明確にするために注 2 を追加し  
ました。

「調査システムとして認識されることはほとんどなく」の部分は、趣  
旨を明確にするため以下のように変更いたしました。「これを使う販売  
員にとっては調査システムというより日常の販売業務を潤滑に処理す  
るための道具として認識されている」。

# 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

糖鎖研究という新しい科学技術領域を開拓するにあたり、10年間の長期戦略を最初に考案した。多くの研究者・技術者がこの領域に参入できるよう基盤ツールの開発を行った。まずは、糖鎖遺伝子の網羅的発見と機能解析を遂行した。この成果は、糖鎖合成技術、糖鎖構造解析技術、糖鎖の生物機能解析へつながる布石となった。開発された基盤技術ツールを応用して、癌診断等に有用な糖鎖バイオマーカー開発を実施した。肝線維化マーカー、胆管癌マーカー等の実用化に成功した。その他の種類の癌マーカーの開発も進行している。10年の長きにわたる研究成果はアジア諸国をはじめ世界へ輸出され、国内および諸外国との共同研究へと発展している。

**キーワード:** 糖鎖、*N*-グリカン、*O*-グリカン、糖転移酵素、糖鎖遺伝子、レクチン、レクチンアレイ、質量分析、IGOT、バイオマーカー、肝線維化、肝癌、胆管癌

## Development of basic tools for glycoscience and their application to cancer diagnosis

– A 10-year strategy of the Research Center for Medical Glycoscience of AIST –

Hisashi NARIMATSU

We proposed a 10-year strategy for the development of a new scientific field, glycoscience. Initially, we developed basic technological tools to help scientists and engineers enter this field. As the first project, we exhaustively discovered glycogenes and carried out their functional analyses. The fruits of this work led to several follow-on projects: 1) technology for enzyme synthesis of glycans, 2) technology for structural analysis of glycans, and 3) analysis of biological functions of glycans. The basic tools, developed in the first 5 years of our 10-year strategy, were applied to the development of more useful products, e.g., development of disease biomarkers, particularly for cancer diagnosis. We are also close to achieving the practical use of a liver fibrosis marker and a cholangiocarcinoma marker for diagnosis. Moreover, we are pursuing development of biomarkers for diagnosis of other cancers. The successful research results for these 10 years have now been transferred to the world, in particular, Asian countries, and have resulted in collaborative research contracts with domestic and overseas research groups.

**Keywords:** Glycan, *N*-glycan, *O*-glycan, glycosyltransferase, glycogene, lectin, lectin array, mass-spectrometry, IGOT, biomarker, liver fibrosis, liver cancer, cholangiocarcinoma

### 1 はじめに

生体高分子のうち、核酸（第一の鎖）、タンパク質（第二の鎖）に次ぎ、糖鎖は第三の鎖とよばれる。タンパク質は遺伝子（核酸）の直接的な産物であるから理解しやすい。また遺伝子からタンパク質への合成機構は種を超えて類似しているから、下等生物の原理原則を解明すれば人間にも適用できる。糖鎖は180種類以上にもおよぶ糖転移酵素とよばれる一群の酵素により逐次的に合成される。

糖転移酵素の基質特異性は、種の進化にしたがって劇的に変化しているので、下等生物と人間とでは糖鎖を構成する単糖の種類も違し、配列構造も大きく異なる。これは核酸やタンパク質を構成するヌクレオチド、アミノ酸が

ほとんど進化していないのと比べると不思議である。糖鎖の進化が生物の進化を反映していると言っても過言ではない。細菌とヒトの間では共有する単糖もあるがそうでないものの方が多い。動物と植物ではかなりの単糖が種類を異にする。ヒトを含む類人猿以上の動物と、ブタ、ウシ以下の哺乳動物にも差がある。

糖鎖はタンパク質や脂質に結合して存在し、それぞれ糖タンパク質、糖脂質と呼ばれる。膜タンパク質や血清タンパク質のほとんどが糖タンパク質であり、糖鎖が結合して初めて機能分子として完成する。1種類の糖タンパク質を取り出してみるとタンパク質部分は均一でも糖鎖部分は極めて不均一である。例えば、免疫グロブリンG (IgG) は2本

産業技術総合研究所 糖鎖医工学研究センター 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

Research Center for Medical Glycoscience, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan E-mail: h.narimatsu@aist.go.jp

Original manuscript received March 5, 2012, Revisions received April 13, 2012, Accepted April 25, 2012

鎖の簡単な構造の *N* 型糖鎖 (*N*-グリカン) をもつが、その構造のバリエーションは 36 種類にもなる。しかし糖鎖構造が均一な糖タンパク質を精製するのは極めて困難であり、かつ糖鎖構造の均一な糖タンパク質を合成することも不可能に近い。したがって現時点では、糖鎖構造の微細な違いによる機能の違いは、ほとんど解析されていない。

糖タンパク質に結合している糖鎖には、大別して、*N*-グリカンと *O* 型糖鎖 (*O*-グリカン) がある。*N*-グリカンのタンパク質への結合位置は、アスパラギン-X-スレオニン/セリン (Asn-X-Thr/Ser) であり、種を通して比較的保存されている。一方、*O*-グリカンはスレオニン (Thr) もしくはセリン (Ser) なら、どこにでも結合する可能性がある。*O*-グリカンの合成を開始する ppGalNac-T と命名された糖転移酵素は、ヒトでは約 20 種類が存在する。細胞の分化や癌化に伴って、20 種類の各酵素の発現パターンが大きく変化する。このことはとりもなおさず、*O*-グリカンの結合位置は、細胞の分化、癌化により異なっていることを意味する。残念ながら、現時点では *O*-グリカンの結合位置を正確に同定する技術はまだ開発されていない。

糖鎖分子として存在する限り、必ず何らかの重要な機能があるはずと考えるのは科学者として当然の発想であろう。しかし糖鎖が関与したタンパク質の機能解析となると、糖鎖機能解析のための基盤技術が存在しないため、ほとんどの研究者が避けて通る。

11 年前にヒト全ゲノム配列の解読が終了し、それを鋳型としてプロテオーム研究 (タンパク質の網羅的解析) が隆盛を極めつつあった。ゲノムからプロテオームという流れの後にくるのは、糖タンパク質 (糖鎖の結合した最終的な機能分子) の網羅的機能解析 (グライコプロテオーム) であ

ることを確信していた。そのためにはまず糖鎖研究に必要な基盤技術ツールを開発しなければならない。その後、グライコプロテオームの概念をもとに、糖鎖機能解析が可能となる。その結果が、バイオ医療分野すなわち診断や治療への応用とつながっていくと考えた。

## 2 糖鎖とは何か

「糖鎖とは、細胞あるいはタンパク質が羽織る衣服のようなものである。」と例えることができる (図 1)。糖鎖には次のような特徴があり、応用が期待できる。

①糖鎖は、細胞の分化・成熟・活性化とともに配列構造が大きく変化していく。正常細胞から癌細胞になれば、脱分化方向に細胞が進むので、糖鎖構造が大きく変化する。癌マーカーとして最適と予想される。また再生医療にも応用できるであろう。細胞が分化する方向にしたがって糖鎖構造が規則正しく変化する。細胞の分化系列を判定するのに有用であろう。生体内で最も早く成熟・分化するのは生殖細胞である。精子や卵子の糖鎖構造は時々刻々劇的に変化する。成熟にとって糖鎖が重要な機能を担っているに違いない。

また、細胞の活性化や休止化に伴って糖鎖構造はすばやく変化する。免疫系の細胞では、活性化、休止化を繰り返す度に糖鎖構造が変化している。

②産生する組織により糖鎖構造が異なる。一例として、肝細胞も脳の脈絡膜もトランスフェリンというタンパク質を産生する。タンパク質部分は全く同じであるが、糖鎖構造は大きく異なる。糖鎖構造を検出すれば、どの組織細胞由来かが分かるのである。また、癌細胞では、ある種のシアル酸転移酵素や硫酸転移酵素の発現が劇的に上昇

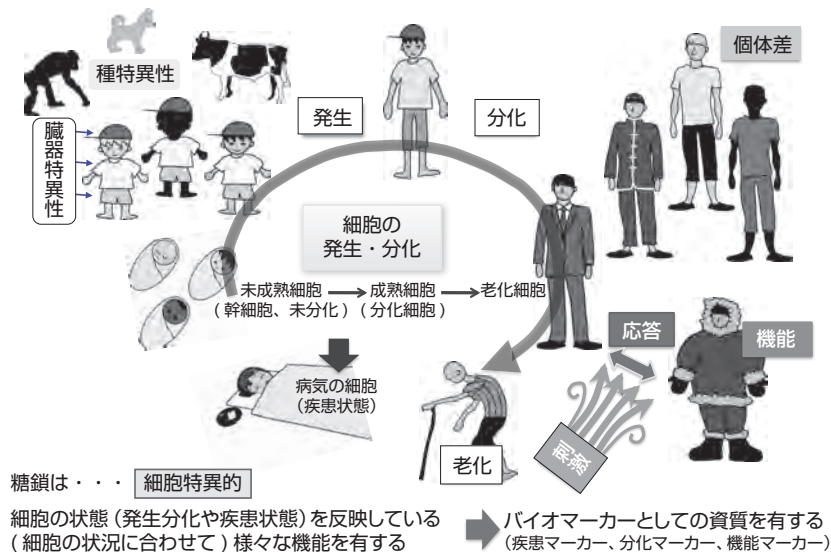


図1 糖鎖は細胞 (タンパク質) の洋服のようなもの

することがよくある。その結果、かなり多くの糖タンパク質にシアル酸や硫酸基が付加される。癌細胞表面にシアル酸や硫酸基が増加することにより、細胞表面には負電荷が上昇する。つまりほんの一握りの糖転移酵素の制御により多くの糖タンパク質の機能を制御しているらしい。その結果、細胞の性質を大きく変化させている。

③さらに、一個の細胞が産生する多種類の糖タンパク質の糖鎖構造は糖タンパク質の種類により異なる。一つの細胞が産生するのであるから、細胞内に発現している糖転移酵素の発現パターンは同じである。にもかかわらず、糖タンパク質の種類が異なれば、その糖鎖構造は異なる。これを決定するメカニズムは全く解明されていない。

④糖鎖には個体特異性がある。代表的なのは血液型である。ABO式血液型に限らず、ルイス式、P式、Ii式といった血液型は、糖鎖構造の個体間の違いである。それらを合成する糖転移酵素遺伝子に変異が起こり、酵素活性が失活したり基質特異性が変化したりすることにより、合成する糖鎖構造が異なっている。この変異遺伝子が親から子へ遺伝されている。ヒト間の臓器移植の最も大きな障壁は、ABO式血液型の糖鎖構造の違いである。

⑤糖鎖には種特異性がある。すべての遺伝子進化の中で、糖転移酵素遺伝子の進化は最も早い。これは外界環境の変化に直接に触れるのは、細胞表面上の糖鎖であり、環境変化に対応して糖鎖構造が選択されてきていることが想像できる。医薬品としての抗体や造血剤としてのエリスロポエチンは、現在、ハムスター細胞で産生している。糖鎖部分はヒト型とは異なり、ハムスター型の糖鎖構造となる。エリスロポエチンは運動選手がドーピングに使うことがある。ハムスター型の糖鎖を検出すればドーピング検査ができる。ブタの臓器を移植に使おうとする試みがある（異種移植）。この際も、ヒトにはない糖鎖構造をブタがもっているために、糖鎖構造の違いが急性拒絶反応を引き起こす。

⑥病原微生物は宿主細胞の特定の糖鎖構造に結合して感染を開始する。インフルエンザをはじめとする多くのウイルスが糖鎖に結合する。この逆の関係もある。病原微生物の糖鎖構造を、宿主側の細胞表面にあるレクチンが認識して結合し、細胞内に感染する。外界の環境と最も接触するのは糖鎖の末端である。多くの病原体は糖鎖に結合して感染を開始する（あるいはその逆）。外界の病原体から逃れるための個体選択が、糖鎖構造の進化速度が速い原因と考えられる。病原体から逃れるためには、糖鎖構造を変化させて遺伝的に種を保存する必要があるのだろう。インフルエンザウイルスは、末端の $\alpha$ 2,6シアル酸、ピロリ菌はルイス式血液型糖鎖、ノロウイルスはABO

式およびルイス式血液型糖鎖に結合して感染する。糖鎖を合成する糖転移酵素遺伝子に変異が起こり、病原体が感染しにくくなった個体が子孫を繁栄させる。この個体選択は数万年単位くらいで続いている。ABO式血液型は類人猿以上にあるが、ルイス式血液型はヒトにしかない。ルイス式血液型を決定する糖転移酵素遺伝子の変異は、2-3万年前に生じている。

### 3 糖鎖研究のシナリオと戦略

これまで述べたように、糖鎖構造は細胞の分化・脱分化（癌化）状態をよく反映する。また組織特異性をよく反映する。このことが、糖鎖バイオマーカー開発の基盤となっている。糖鎖構造を決定するのは、主に糖転移酵素の発現パターンであるから、糖転移酵素の転写制御機構、またはエピジェネティックな制御（遺伝子配列からは読みとれない遺伝子修飾によるその発現制御）が糖鎖構造を決定しているのであろう。しかし10年前には、この基礎的な研究はまだほとんどなされていなかった。

そのため、まずは糖鎖研究に必要とされる基盤技術を開発しなければならなかった。自ら基盤技術をまず開発することが、その研究分野の飛躍的な発展に貢献できる。このことは新規な研究分野の開拓者として最もやりたいことであり、またやらねばならないことであった。どの分野でもそうであるが、外国で開発された技術を使って研究を始めたのでは、どうしても外国の研究に遅れをとることは否めない。

遺伝子研究、タンパク質研究の分野と同様に、糖鎖研究分野でも基盤技術として要求されるのは、まずは合成技術、構造（配列）解析技術である。それらの技術は、「誰でも簡単に使える技術」でなければならない。10年前には合成・構造解析ともにまだまだ稚拙な技術しかなかった。また専門家でないと思えない技術ばかりであった。

そこで、図2にあるような10年がかりの長期展望をたてて、順序立てた一連の研究を推進することを計画した。最初の5年間は基盤技術開発に精力を注ぎ、残りの5年はその技術の応用編であった。一連の研究を次の順番で行った。1) ヒト由来の糖鎖遺伝子を網羅的に探索し解析する。→2) 網羅的に取得した糖鎖遺伝子からリコンビナント（遺伝子組み換え）の糖転移酵素を発現し、それを組み合わせて種々の構造の糖鎖を合成し糖鎖ライブラリーを作成する。→3) これら構造の判明した糖鎖を標準物質として、糖鎖構造解析技術の開発に供する。→4) 生体内における糖鎖機能を解析する。糖鎖構造の変化により糖タンパク質の機能および細胞の表現型がどのように変化するか、その解析には、以下の1)、2)、3)の基盤ツールが必須となる。

1) 糖鎖遺伝子:

糖鎖遺伝子ライブラリー構築プロジェクト (Glycogene Project: GG project) により、ヒト由来糖鎖遺伝子の網羅的探索と解析を行った。糖タンパク質の完成には、タンパク質部分は1種類の遺伝子発現で済むが、糖鎖部分は数十種類におよぶ糖鎖遺伝子発現の共同作業で合成される。とすると糖鎖遺伝子群がすべて解明されて生体内での糖タンパク質、糖脂質の生合成機構が明らかになるはずである。最終目的である糖鎖機能の解明に向けて、まずは糖鎖遺伝子の全容を解明する必要がある。

2) 合成:

網羅的に取得した糖鎖遺伝子からリコンビナント酵素として糖転移酵素を発見し、それを組み合わせて種々の構造の糖鎖を合成し糖鎖ライブラリーを作成した。有機化学合成法により糖鎖を合成するのはとても労力と時間がかかる。また画期的な有機化学合成法は考案されていない。有機溶媒を用いるので環境に負担がかかる。さまざまな構造の糖鎖を自由自在に合成するのは不可能であり、1種類の構造を合成するのに長い時間を要する。唯一の長所は、いったん合成法が確立できれば工業レベルの大量合成が可能なことである。

一方、酵素学的合成のために、網羅的に取得した糖鎖遺伝子をリコンビナント酵素として発現させた。種々の酵素の組み合わせにより、短時間にかなり自由自在に種々の構造の糖鎖を合成できるようになった。糖転移酵素は極めて基質特異性が高いので、1種類の酵素は1種類の構造しか合成しない。したがって基質特異性の判明した酵素を用い

れば、目的の構造の糖鎖を短時間で容易に合成できる。水系の反応なので環境にやさしい。短所は、ヒト由来の酵素なので極めて不安定であり、かつ酵素の生産にはコストがかかる。ヒトの糖鎖構造を合成するために下等生物の糖転移酵素で代替はできない。したがって大量合成はできないが、少量で多種類の糖鎖合成には酵素法が適している。

3) 構造:

糖鎖エンジニアリングプロジェクト (Structural Glycomics Project: SG project) において、構造の判明した糖鎖を標準物質として、糖鎖構造解析技術の開発に供した。数 mg の量ならば酵素法で多種類の構造を合成できる。

標準糖鎖(および糖ペプチド)を利用して二つの構造解析法を考案した。タンデム質量分析法(以下、MS<sup>n</sup>法)とレクチンアレイ法である。それぞれに長所・短所があり使用用途が異なる。MS<sup>n</sup>法の長所は、①誰でも簡単に解析ができる。②糖鎖構造を決定できる。短所は、①解析に比較的少量の糖鎖を必要とする(数μg程度)。②解析すべき糖鎖は精製物でなければならない。一方、レクチンアレイ法による構造解析技術の長所は、①感度がとても高い。②抗体オーバーレイ法を用いることにより、目的の糖タンパク質を完全精製する必要はない。③複数のサンプル間の糖鎖プロファイリング比較を簡便に行える。短所は、①糖鎖構造の完全決定はできない。②レクチンの供給体制がまだ完備されていない。

4) 機能・バイオマーカー:

糖鎖機能活用技術開発プロジェクト (Medical Glycomics Project: MG project) において、生体内で糖鎖構造の変化

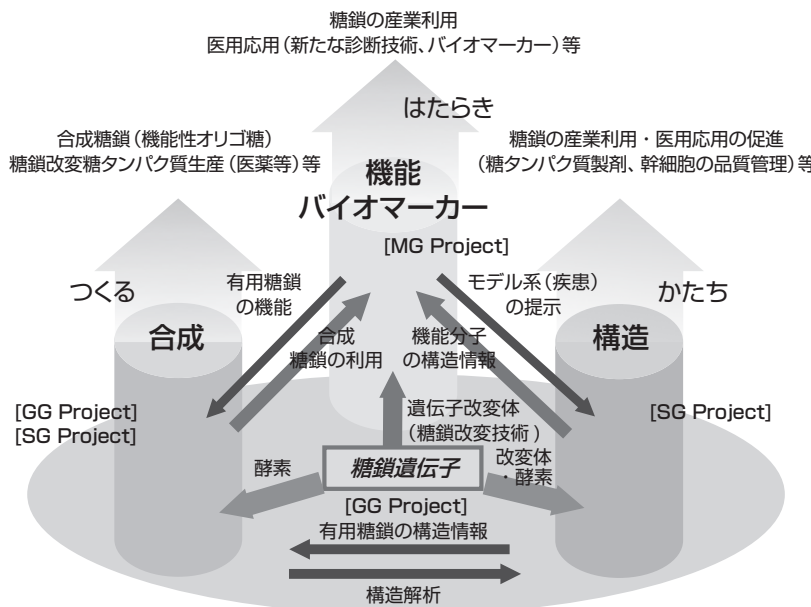


図2 糖鎖研究の三本柱

糖鎖遺伝子ライブラリー構築プロジェクト: GG project、糖鎖エンジニアリングプロジェクト(構造解析技術): SG project  
糖鎖機能活用技術開発プロジェクト(糖鎖機能解析、糖鎖バイオマーカー開発): MG project

により糖タンパク質の機能および細胞の表現型がどのように変化するかを1)、2)、3)の基盤技術を用いて解析した。

「合成」、「構造」、「機能・バイオマーカー」の3本柱は相互に連携しながら発展し、「合成」では機能性オリゴ糖の合成や糖鎖改変タンパク質生産等、「構造」では糖タンパク質製剤、幹細胞の品質管理等、「機能・バイオマーカー」では新たな診断技術等の産業応用、医用応用に展開している。

#### 4 基盤ツール開発のための各要素技術開発

図3に、今まで開発してきた糖鎖研究のための要素技術をリストにした。以下に各要素技術について概説する。

##### 要素技術1. バイオインフォマティクス技術によるヒトゲノムデータベース等からの糖転移酵素遺伝子の探索

最初にとりかかったのはバイオインフォマティクス技術を駆使して、糖鎖遺伝子の候補遺伝子を網羅的に探索することであった。(株)三井情報から出向していた菊池が、ゲノムデータベース等から、新規の糖鎖遺伝子候補を探しだすソフトウェアを開発した。このソフトウェアは、単にアミノ酸ホモロジーの探索にとどまらず、次のような特徴をもった糖鎖遺伝子を探しだした。①N-末端の近くに疎水性アミノ酸の膜結合部位をもつもの。その長さは、18～22アミノ酸残基くらいであり、細胞膜結合タンパク質より少し短い。②続いて幹部位が存在するもの。幹部位はプロリンに富みセリン・スレオニンの数も多い。③酵素活性ドメ

インに続くもの。300～400アミノ酸くらいの活性ドメインであり、システインが数個存在することが多い。2価カチオンの結合部位であるDXDの3アミノ酸モチーフがある。このような特徴をもつ新規の候補遺伝子を約100種類探しだし、主にヒト培養細胞のRNAからcDNAを作製し、PCR法により酵素の全長をコードする候補遺伝子をすべてクローニングした。

##### 要素技術2. 糖転移酵素遺伝子の各種発現ベクターへの組み替えとリコンビナント酵素の基質特異性解析

この要素技術開発には旧・糖鎖工学研究センター発足時の多くのメンバー（榎谷内、佐藤、後藤、工藤、立花、張、久保田、澤木等）が携わった。糖転移酵素はゴルジ膜や粗面小胞体（endoplasmic reticulum）膜に結合した膜タンパク質である。リコンビナント酵素として糖鎖の*in vitro*合成に使用するためには、可溶性の酵素にする必要がある。そこで候補遺伝子の膜結合部位を欠如させ、酵素活性ドメインと思われる部分をFLAGタグ付きのゲートウェイベクターにつなぎ替え、ヒト胎児由来腎臓芽細胞（HEK293T細胞）に導入し、リコンビナントタンパクとして上清中に分泌させ、抗FLAG抗体で粗精製した。多くの数の候補遺伝子由来のリコンビナント酵素の活性をいかにして網羅的に簡便にすばやく検出するか、にアイデアを絞った。ラジオアイソトープ（RI）でラベルされた9種類のヒトのドナー基質を購入して、それを混ぜ合わせた。アクセプター基質として、単糖、オリゴ糖を準備した。また培養細胞から糖脂質



図3 産総研・糖鎖医工学研究センターが開発・保有する糖鎖解析のための基盤技術（抜粋）

の混合物、糖タンパク質の混合物を準備してそれらもアクセプター基質とした。糖転移酵素のリコンビナントとしての発現には、ヒト胎児由来腎臓芽細胞 (HEK293T 細胞) を採用した。ヒト由来の糖転移酵素は極めて不安定でデリケートなタンパク質であり、活性をもたせたまま大腸菌や酵母で発現することは極めて困難であることは分かっていた。HEK293T 細胞はヒト由来であり、その糖タンパク質は高度に糖鎖修飾されていることから、もともと多くの糖転移酵素を内在的に発現しているらしい。ということは外部から導入されたヒト糖転移酵素を活性をもたせたまま発現するためのマシナリーがそろっていることを意味する。やはり現時点でも、ヒト由来リコンビナント糖転移酵素の発現には、ヒト由来の HEK293T 細胞が最適であるとの結論である。このプロジェクトで開発した新規糖転移酵素遺伝子は、物質特許申請の後、ほとんどすべて論文として発表した<sup>[1]-[29]</sup>。しかし将来的には、糖鎖の大量合成が求められる時期がくるはずである。そのためにはヒト由来糖転移酵素の安価な大量発現が必要とされる。動物由来の培養細胞ではコストがかかるし大量発現系は望めない。当センターの千葉らがヒト由来糖転移酵素の酵母での大量発現系の構築を試みている<sup>[30]</sup>。

これらは糖鎖遺伝子データベース (DB) として一般に公開している。日本糖鎖科学統合データベース (<http://jcgdb.jp/>) を参照されたい。この DB は、糖鎖遺伝子だけではなく、当センターの鹿内らが中心となりさらに多くの内容を含む発展型の DB を構築している。

### 要素技術3. 186種類の糖鎖遺伝子発現の定量測定法の開発

*N*-グリカンの根幹部を合成する糖転移酵素は、全細胞で発現しており、発現量も多く、細胞の状態によって変動することもない。その他の、特に糖鎖末端部を合成する糖鎖遺伝子の細胞での発現量は、他遺伝子と比べると極めて低い。通常の DNA チップでは検出できないし、検出できたとしてもその変動を正確に測定できない。186 種類におよぶ全糖鎖遺伝子の発現量を、網羅的、ハイスループットに正確に測定する技術を開発した。Quantitative real-time PCR 法 (qPCR 法) による糖鎖遺伝子の網羅的遺伝子発現解析の手法は実験技術的に成熟していて、検出感度や測定精度において最も信頼性の高い生物学的解析手法といえる。糖鎖遺伝子は経験的に発現レベルの低いものが多いことが分かっていたので、qPCR 法による発現解析系を開発した<sup>[31]</sup>。具体的には、当センターの澤木が中心になり、糖転移酵素や修飾酵素をコードする 186 糖鎖遺伝子について、カスタム qPCR アレイを構築した。キャリアレーターとして糖鎖遺伝子クローンライブラリーのプラスミ

ド DNA プールを用いることで、1 回の測定で全 186 糖鎖遺伝子の転写産物量をコピー数で知ることができる。糖鎖遺伝子の発現プロファイルに基づく細胞の分類は細胞の分化や癌化によく対応しており、糖鎖遺伝子の発現は、糖鎖の発現とも相関することがこれまでに分かっている。

### 要素技術4. リコンビナント糖転移酵素による糖鎖および糖ペプチドの *in vitro* 合成法の確立

ヒト由来の酵素であるので、ヒト由来 HEK293T 細胞でリコンビナント酵素を発現させると、ほとんどの酵素が活性をもったまま可溶性のリコンビナント酵素として精製できる。これを利用して、糖鎖および糖ペプチドの *in vitro* 合成を行った。ただし、細胞内の粗面小胞体 (ER) で合成される *N*-グリカンの根本構造に関与する糖転移酵素は、ほとんどが脂質膜を複数回貫通する酵素であるので、リコンビナント化は不可能である。*N*-グリカンの基本構造は天然からの抽出物が市販されているので、それを出発物質として利用した。*O*-グリカンに関しては、*O*-グリカンをもつムチン等の代表的なペプチドを準備して、これに順次、糖転移酵素を加えて糖鎖を伸長させた<sup>[30][32][33]</sup>。

二つの異なる目的に応じて合成した。当センターの伊藤が中心になり合成法を確立した。第 1 は、1 種類の糖鎖を可能な限り大量に合成する方法である。酵素反応の条件は一定に設定する。できるだけ多くの量の酵素を加えて、可能な限り長時間反応させた。目的物は最終的に液体クロマトグラフィーにて分離精製した。第 2 は、一つのチューブ内で、多種類の構造を同時に少量ずつ合成する方法である。各酵素の反応を、生成物が 50 % になった時点で、加熱により反応を止める。これに次の酵素を加えて同じく途中で反応を止める。これにより理論的には 2<sup>n</sup> 種類の糖鎖を 1 本のチューブ内で合成できる。前もって生成される各種の糖鎖の分子量は分かっているので、1 滴を取り出し質量分析装置で測定すると、目的の数だけの質量が検出される。この方法を、質量タグ付きの合成法と命名した<sup>[34][35]</sup>。

### 要素技術5. 液体クロマトグラフィー/質量分析 (LC/MS) を基礎とした糖タンパク質大規模同定技術の開発

ペプチド混合物を試料として 1,000 種類を超すタンパク質を一斉同定する LC/MS 分析法が開発されたので、タンパク質消化物から糖ペプチドのみをレクチン親和性クロマトグラフィーで捕集後、同様に分析して糖タンパク質と糖鎖結合部位を大規模に同定する方法の開発に取りかかった。糖ペプチドは衝突解離法で MS/MS 分析しても、かさ高い糖鎖の存在によりペプチド部分が断片化されず同定に至らなかったため、グリコペプチダーゼで糖鎖を切除し、脱糖鎖ペプチドとして多数同定できるようにした。この反応で糖鎖結合 Asn は Asp に変換され、質量が 1 増えるので

糖鎖結合部位の特定も可能となった。このとき Asn 脱アミド化した非糖ペプチドが混在して、脱糖鎖ペプチドと区別できなかったため、酵素反応を安定同位体酸素-18 標識水 ( $H_2^{18}O$ ) の中で行い、溶媒の酸素-18 をペプチドに取り込ませることによって糖鎖付加部位を標識し、高精度な糖タンパク質同定を可能とした (IGOT 法)。LC/MS 法と IGOT 法を組み合わせる方法により、当センターの梶らはきわめてハイスループットに大量の糖タンパク質同定を現在も精力的に推し進めている。現在の高速質量分析システムを用いると 1 mg の組織抽出タンパク質から 500-1,000 種の糖タンパク質が全工程 10 日ほどで同定できる<sup>[36][37]</sup>。

**要素技術6. MS<sup>n</sup>法による糖鎖構造同定法の開発**

タンデム MS<sup>n</sup> 法の原理は、測定したい糖鎖の質量を測定する (MS<sup>1</sup> の質量)。それにアルゴン、ヘリウム等の希ガスを弱いエネルギーで衝突させ糖鎖を壊し (Collision Induced Dissociation:CID)、生じた各フラグメントの質量を測定する (MS<sup>2</sup>)。さらに MS<sup>2</sup> で壊れた各フラグメントを別々に取り出し、それにもう一度、CID を行って MS<sup>3</sup> の質量を測定する。原理的には、サンプルの量さえ十分にあれば、MS<sup>n</sup> までの測定が可能である。実際には、どんな微細な糖鎖構造の違いも、MS<sup>4</sup> まで行えば CID による崩壊パターンの違いによって区別が可能である (図4)。

できる限り多くの標準糖鎖に関して、MS<sup>4</sup> までのデータを蓄積しデータベース (以下、DB) に格納した。未知の構

造を同定しようとする測定者が、まずその糖鎖の MS<sup>2</sup> のデータを取り、それを DB に送る。MS<sup>2</sup> のデータプロファイルから次にどのフラグメントを MS<sup>3</sup> 測定すべきか、DB は格納されているデータから即座に判断して測定者に指示をする。指示にしたがって MS<sup>3</sup> のデータを取り、再度 DB に送る。この時点で、答えが出る場合が多いが、さらに MS<sup>4</sup> のデータどりが必要な場合もある。

この MS<sup>n</sup> 法による糖鎖構造同定システムは、産総研の亀山、成松を中心に、(株) 島津製作所、(株) 三井情報の3者により共同開発され、(株) 島津製作所から市販されている。

**要素技術7. 抗体オーバーレイ・レクチンマイクロアレイの開発**

生体サンプルを用いて、糖タンパク質上の病気の進展にともなう糖鎖変化を検証するためには、「高スループット、高感度、高再現性、迅速性」に優れた比較糖鎖解析技術が必須である。このニーズに最も合致する技術は、当センターの久野、平林らが開発した抗体オーバーレイ・レクチンマイクロアレイである<sup>[38]</sup>。レクチンマイクロアレイとは43種の特異性の異なるレクチンを同一基板上に固相化したものであり、通常ガラス1枚あたり複数のサンプルを同時に分析できる形態をとる。抗体オーバーレイ検出法は、分析対象である糖タンパク質は蛍光標識等の処理をせずそのままレクチンマイクロアレイに添加し反応させ、基板上のレ

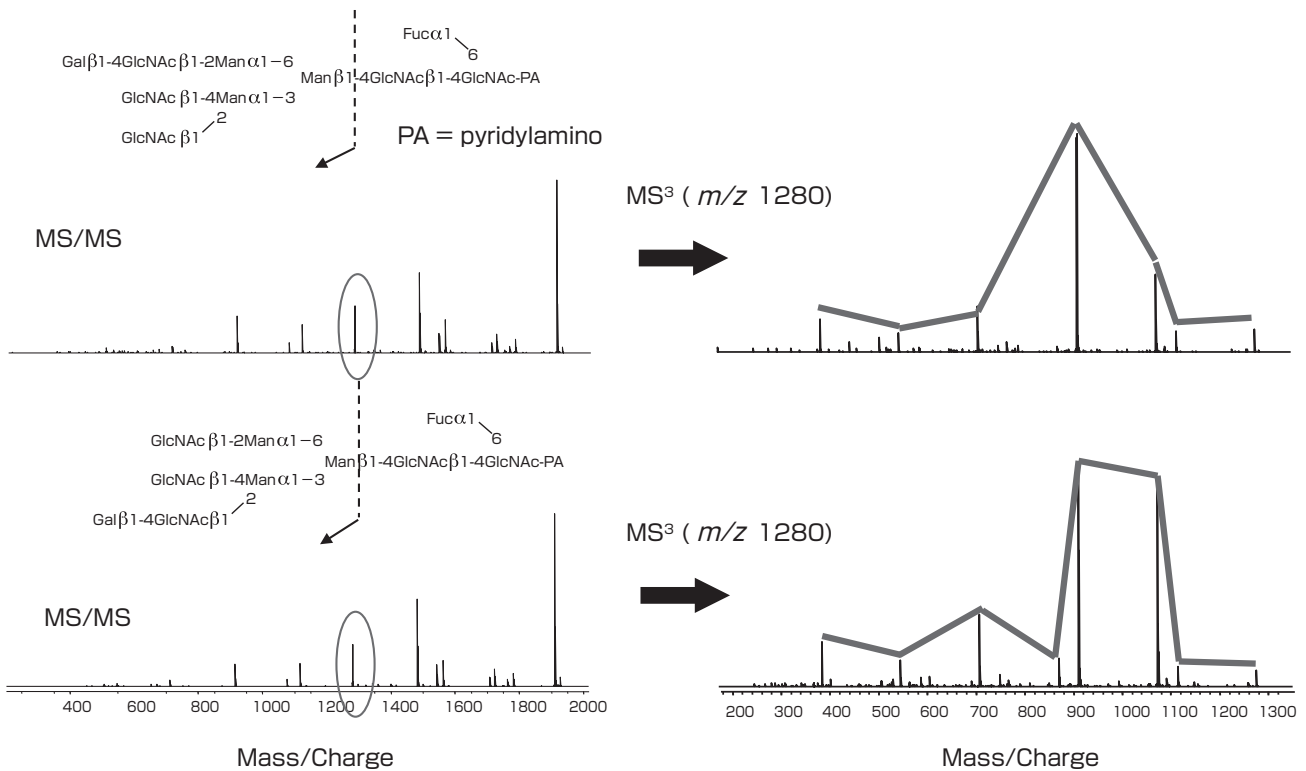


図4 多段階タンデム質量分析による異性体の判別



クチンへ結合した糖タンパク質をコアタンパク質認識蛍光標識抗体で検出する。ガラス面断片から励起光を入射し全反射させることにより、ガラス面の周囲 200  $\mu\text{m}$  くらいの厚みでエバネッセント波を発生させる。この厚みの中に入った蛍光物質だけがシグナルを出すように設計している。このアレイは極めて感度が高く微量の糖鎖でも検出できる（図5）。これまでの液体クロマトグラフィーや質量分析器を用いた糖鎖解析では、糖鎖をタンパク質から切り離して蛍光標識しなければならず、多くの工程数と時間を要していたため、それと比較すると圧倒的に簡便な手法である。感度は抗体の質に依存するが、おおむねウェスタンブロットで検出可能な量（ng 程度）の標的糖タンパク質があれば分析できる。また抗体により標的糖タンパク質の結合シグナルのみが特異的に検出されるため、サンプル調製は免疫沈降等の簡易精製程度で問題なく分析が可能である。事実、我々はこれまでに 50 種を優に超える糖タンパク質を、血清や細胞培養上清や組織切片中から数 10 ng 程度を効率よくエンリッチし、抗体オーバーレイ・レクチンマイクロアレイで比較糖鎖解析することに成功している。この技術の候補分子検証試験への活用により、実効性の高い糖鎖バイオマーカー開発パイプラインが確立された<sup>[31][33][38][39]</sup>。この研究戦略については詳解したものがあるのでそちらを参照されたい<sup>[40]</sup>。

このレクチンアレイ糖鎖プロファイリングシステムは、産総研の久野、平林を中心に（株）GPバイオサイエンスとの共同で開発され、同社より市販されている。

## 5 開発した糖鎖研究基盤技術を駆使しての疾患バイオマーカーの探索と実用化

### 5.1 疾患糖鎖バイオマーカー探索の戦略

プロテオミクス技術により疾患バイオマーカー探索が盛んに行われている。プロテオミクスでは、タンパク質の定量的な差を見だしてバイオマーカーとしている。しかし我々の基本的概念はそれとは根本的に異なる。我々のグリコプロテオミクスによるバイオマーカー探索では、疾患になるとタンパク質部分は同じでも糖鎖部分の構造が変化することを指標にして、質的に変化した糖タンパク質を見いだすことに主眼を置く。疾患により糖鎖構造の変化した糖タンパク質は、いわば翻訳後修飾異性体とも呼べるだろう。

生体内の糖鎖バイオマーカー（翻訳後修飾異性体）は極めて微量なはずである。特に、癌の早期診断マーカーは、早期であればあるほどその量は極めて微量であり、いきなり血清から探索しても発見には至らない。そこで、これまで開発した技術を駆使して、図6にあるように癌マーカー開発戦略を提案した。

- ①まず癌組織、非癌組織からRNAを抽出しReal-time PCR法により網羅的に糖鎖遺伝子の発現量を調べる。結果、癌において変化している糖鎖構造が推定できる。
- ②癌組織から抽出された総糖タンパク質、培養癌細胞が分泌する総糖タンパク質の糖鎖をレクチンマイクロアレイにより糖鎖プロファイル比較解析を行う。特徴的なレクチンをプローブとして選び出す。

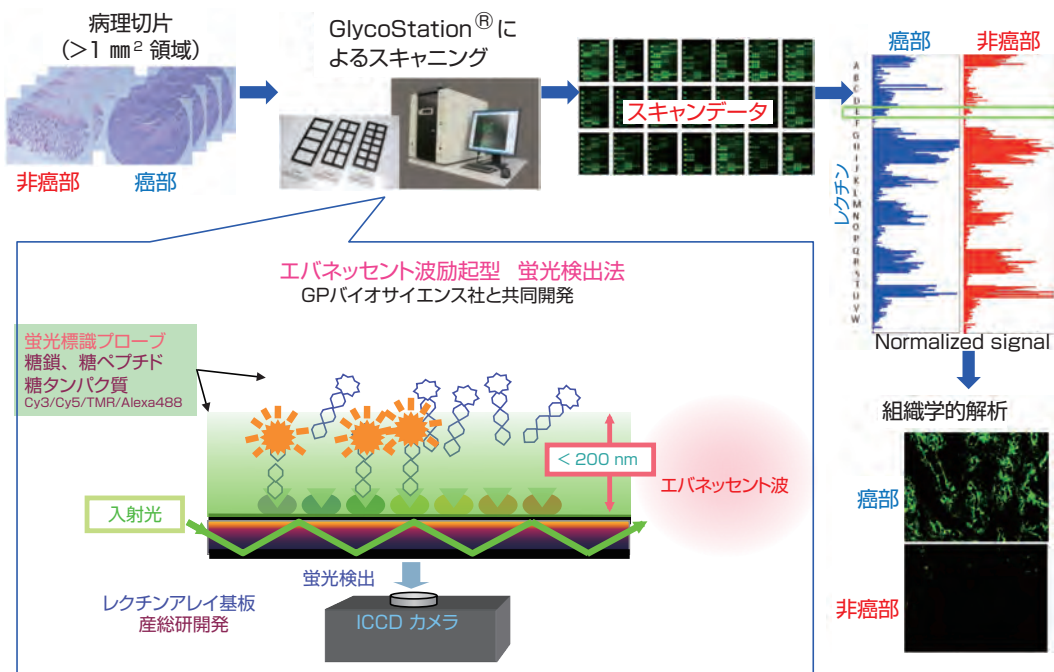


図5 レクチンマイクロアレイ  
使用例：微小組織切片中糖タンパク質の比較糖鎖解析でエンリッチに有用なレクチンを絞り込む。

- ③その選択されたレクチンを用いて、LC/MS/IGOT法により網羅的に癌マーカー候補の糖タンパク質を同定する。この時点で数百以上におよぶ候補分子が同定される。
- ④血清中のマーカーを検出するには、もともと血清中に分泌量の多い糖タンパク質が有利である。バイオインフォーマティクスを用いて、(i) 各種の候補糖タンパク質の血清量を推定し、量の多いものを選ぶ。(ii) 目的の組織から分泌されているかどうか。目的の組織以外からも多量に分泌されている場合は、血清中で薄まってしまうので避ける。(iii) *N*-グリカン、*O*-グリカンの結合サイトが多いかどうか、多いものほどプローブとの結合力が高まるから、多いものから選ぶ。これらのパラメーターから候補分子に優先順位を付ける。
- ⑤優先順位にしたがって市販の抗体を購入し、候補分子である糖タンパク質のウエスタン解析を行い、血清中の量を推測する。
- ⑥この時点で有力な候補を選び出し、免疫沈降により粗精製する。粗精製した分子をもう一度、レクチンマイクロアレイにより解析し、癌患者と対象者との間でレクチンプロファイルの最も異なるレクチンAを選び出す。
- ⑦市販の抗体は結合力が弱いものが多いので、その場合は、目的の糖タンパク質のタンパク部分に対して、自ら抗体を作製し直す。
- ⑧強い結合力と特異性をもつ抗体の作製の後、抗体と糖鎖に対するプローブ（例えばレクチンA）のサンドイッチ・キットを開発し、100以上のサンプルで検証をする。
- ⑨統計解析により、既存のマーカーよりも良い成績が得られたなら、1,000以上の多数検体での評価を行う。
- ⑩さらにMS<sup>n</sup>により糖鎖構造の変化を検出する。患者サンプルは微量しか手に入らないことが多いので、MS<sup>n</sup>により患者サンプルの糖鎖構造を同定することが難しい。その

場合は、培養癌細胞が同じレクチン反応性を示すことを確認した後、培養細胞上清から目的の糖タンパク質を多量に生成した後、MS<sup>n</sup>により糖鎖構造を決定する。

- ⑪この段階で、全国の臨床医に協力を求める。多数の臨床医に測定をしてもらい、極めて客観的にデータを作製し、既存のバイオマーカーとの比較の後、連携先の企業が製造承認申請から健康保険承認へと進むことにより、最終的な実用化を目指す。

これまでさまざまな疾患を対象としたが、ここでは成功例として肝線維化マーカー、胆管癌マーカーの開発について次に述べる。

## 5.2 肝線維化マーカーの開発

肝臓線維化マーカーに関して、現在、連携先企業から製造承認申請の直前まできている。

B型肝炎ウイルス (HBV) とC型肝炎ウイルス (HCV) は共に、感染の後 20 ~ 30 年間に、急性炎症→慢性炎症→肝硬変→肝臓癌の発症の経過をたどる。世界中で数億人にのぼる感染者がいる。日本人口の7%(約8百万人)、中国人口の10%(1億5千万人)が感染者である。感染後炎症により肝実質細胞が壊れ、フィブリン等の線維分子と置き換わることにより、肝臓が硬化していくことを肝線維化とよぶ。線維化の診断は針バイオプシー（生検法）により確定診断されるが、これは患者にとり大きな負担であり、2、3日の入院を余儀なくされる。肝線維化（肝硬化度）の程度により、針バイオプシーによる病理診断の結果、F0（fibrosis 0）、F1、F2、F3、F4の5段階に診断される。線維化が進行するにしたがって、肝臓の発症率は高まっていく。F3は慢性炎症の結果、線維化がかなり進んでいる状態であり、F4はさらに肝硬変にまで至っている状態である。F3までの線維化にはインターフェロンやリバビリン等の薬効が期待できるが、F4に至るとあまり効果が期待で

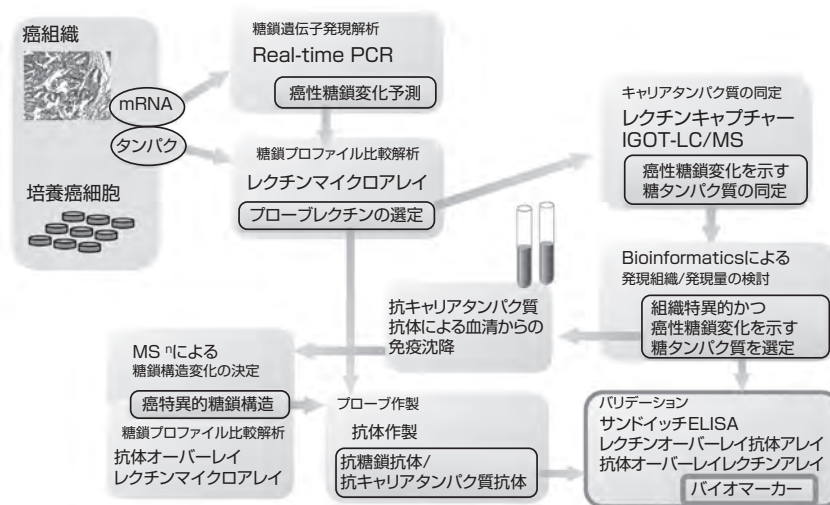


図6 疾患糖鎖バイオマーカー探索の戦略

きない。治療効果の判定のためにも、また肝臓癌の発症を予測するためにも、血液診断により簡便に肝線維化の程度を判断できるバイオマーカーが開発されなければならない。

前述した我々の開発戦略にのっとり、alpha-1 acid glycoprotein (AGP) が線維化マーカーの筆頭にあげられた。AGPは血液中に豊富な糖タンパク質であり、主に肝臓から血中に分泌されるので、肝臓の線維化状態をよく反映するに違いない。5本のN-グリカンをもつのでレクチンとの結合力も強いはずである。線維化に伴ってAGPの糖鎖構造が変化することが古くから知られていた。バイオプシーにより線維化レベルが診断されている患者血清が臨床医から提供された。AGPを免疫沈降し、レクチンアレイで解析することにより、F3とF4を鑑別するのに最適なレクチンが選出された。AOL、MAL、DSAの3種のレクチンにより、極めて高い精度で線維化レベルを判断できることが分かった<sup>[41][42]</sup>。(株)シスメックス社との共同研究により、抗AGP抗体とそれぞれ3種のレクチンとのサンドイッチ系を組み上げ、HISCL((株)シスメックス社が生産している血清生化学検査の自動分析装置)機器に適應させた。これによりわずか17分で1サンプルを測定できる。しかしAGPも臨床診断にするには最適ではなかった。血清からAGPを免疫沈降する必要があり、この前処理に2時間を要する。前処理を要せず、血清を直接にHISCLで測定できる糖タンパク質分子をさらに探索したところ、X(未発表なので分子名は出せない)という分子を発見した。X分子上の糖鎖をYという特別なレクチンで検出すると、見事に肝線維化度を反映した。Xに対するモノクローナル抗体を作成し、抗X抗体-レクチンYのサンドイッチアッセイ系を組み上げ、前処理なしに血清を直接にHISCLにより17分間で測定できる。これが実用化されれば、患者さんが外来を訪れ、まず採血をして線維化を測定する。医師の診察を受ける時には、すでに当日の線維化レベルの値が医師の手元にある。

### 5.3 胆管癌マーカーの開発

画像診断により肝臓内に腫瘍が認められた場合、肝内の胆管上皮より発症する肝内胆管癌は、肝細胞由来の肝細胞癌と鑑別されなければならない。管内胆管癌は予後が悪く、治療指針も肝細胞癌とは全く異なる。

前述した癌マーカー探索の開発戦略にのっとり、まず胆管癌組織をマイクロダイセクションにて癌部、非癌部より直径1mmの小さな組織片をかきとった。糖タンパク質抽出液を蛍光ラベルしてレクチンアレイにより解析した結果、WFAレクチンのシグナルの差が癌部、非癌部の間で顕著であった。IGOT法により、WFAに結合する胆管癌マーカー

の候補分子を多数(230種類の糖タンパク質)同定した。これらの分子を、バイオインフォーマティクス手法により、血中量が多いと思われる順番に優先順位を付けた。上位10位までの糖タンパク質に対する抗体を購入して、胆管癌患者の胆汁中および血清中の量をウエスタン解析および免疫沈降により推測した。患者の癌組織を免疫染色することにより、標的分子が確かに癌細胞により産生されていることを確認した。現在、抗MUC1抗体&WFA、抗protein Y&WFAの二通りのアッセイ系を確立し、胆管癌患者の胆汁中のマーカー量を測定した。現在、最も用いられている胆汁中の癌細胞検出率は、わずか20-30%の低い診断率であるが、我々の診断法は、85-90%にもおよぶ高い正診率を示した<sup>[43]</sup>。この方法論は、胆汁のみでなく患者血清を用いても有効であることが判明しつつある。

### 6 おわりに

全く同様の方法論を用いて、他種の癌に対しても癌マーカーの開発を進めている。肺癌、卵巣癌、膵臓癌、前立腺癌等の癌マーカー開発に向け、臨床診断に真に役立つマーカー開発の成功を収めたい。

疾患バイオマーカー開発に最も重要な点は、信頼のおける臨床医との綿密な共同研究体制である。次の点を熟慮しながら研究を進める必要がある。①臨床サイドで真に必要なとされるマーカーはどのようなものか、②そのためには、何と何を比較対象にすべきか。それ用のサンプルセットを臨床医が準備できるかどうか。③病歴のはっきりとした患者のサンプルを臨床医が保存しているかどうか。④可能ならば同一患者の長期間に渡る経時的サンプルがあれば極めて有効である。⑤同一患者の治療前、治療後のサンプルも極めて有効である。

癌バイオマーカー探索の悪例を一つ掲げる。末期癌患者の血清中には、癌由来の分子以外に、末期であるが故の悪液質に基づく異常分子が山ほど存在する。末期癌患者と正常人の血清を比較すれば、すぐに数百種類以上にもおよぶ異常分子を発見することができる。しかしそのどれも臨床的に何の役にも立たない。疾患の進展のマーカーとなる「真に役立つバイオマーカー」は、末期癌患者と正常人の比較では見つけることができない。

10年以上にもおよぶ産総研での糖鎖研究は、一生のうちで最も充実した研究人生であった。その要因は、①NEDOを通して潤沢な研究資金を獲得できたこと。②外部からの人材をけっこう自由自在に獲得できたこと。③医学、農学、理学、工学とあらゆる異なる分野の研究者を集めることができたこと。④最初は、30人規模で始めた糖鎖研究が次第に発展し、最後は100人の世帯になり、

目標に向かって一丸となって糖鎖研究に邁進できたこと。

また、糖鎖研究領域のアジア地域での連携も進展させていきたい。11年前に糖鎖遺伝子プロジェクトを開始した時に、10年後の中国における科学の大発展を予想した。10人ほどの中国人のポストドクを雇用し、彼らに一から糖鎖科学を教育した。彼らは、2-3年間で十分な研究成果をあげ、帰国後、中国内の教授職に就き、中国での糖鎖科学発展の中心人物として活躍している。昨年、上海交通大学に産総研糖鎖医工学研究センターの分室を設立し、より一層の共同研究を深めている。頻繁な人的交流を促し、共同研究テーマを推進している。また、産総研への国内、海外からの大学院生、ポストドクの受け入れと教育を通じて、さらに連携を深めていきたい。21世紀はアジアの時代となることは間違いない。糖鎖科学分野でもアジア連携を深めるために、3年前にアジア糖鎖科学コンソーシアム(ACGG)を創設し、つくばで第1回ACGGシンポジウムを開催した。その後、第2回は台北、第3回は上海で開催され、ACGGへの参加者数は急増している。

#### 参考文献

- [1] L. Cheng, K. Tachibana, H. Iwasaki, A. Kameyama, Y. Zhang, T. Kubota, T. Hiruma, K. Tachibana, T. Kudo, J.M. Guo and H. Narimatsu: Characterization of a novel human UDP-GalNAc transferase, pp-GalNAc-T15, *FEBS Lett.*, 566(1), 17-24 (2004).
- [2] L. Cheng, K. Tachibana, Y. Zhang, J.M. Guo, K. Tachibana, A. Kameyama, H. Wang, T. Hiruma, H. Iwasaki, A. Togayachi, T. Kudo and H. Narimatsu: Characterization of a novel human UDP-GalNAc transferase, pp-GalNAc-T10, *FEBS Lett.*, 531(2), 115-121 (2002).
- [3] K. Fujimura, H. Sawaki, T. Sakai, T. Hiruma, N. Nakanishi, T. Sato, T. Ohkura and H. Narimatsu: LARGE2 facilitates the maturation of  $\alpha$ -dystroglycan more effectively than LARGE, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 329(3), 1162-1171 (2005).
- [4] M. Gotoh, T. Sato, T. Akashima, H. Iwasaki, A. Kameyama, H. Mochizuki, T. Yada, N. Inaba, Y. Zhang, N. Kikuchi, Y.D. Kwon, A. Togayachi, T. Kudo, S. Nishihara, H. Watanabe, K. Kimata and H. Narimatsu: Enzymatic synthesis of chondroitin with a novel chondroitin sulfate *N*-acetylgalactosaminyltransferase that transfers *N*-acetylgalactosamine to glucuronic acid in initiation and elongation of chondroitin sulfate synthesis, *J. Biol. Chem.*, 277(41), 38189-38196 (2002).
- [5] M. Gotoh, T. Sato, K. Kiyohara, A. Kameyama, N. Kikuchi, Y.D. Kwon, Y. Ishizuka, T. Iwai, H. Nakanishi and H. Narimatsu: Molecular cloning and characterization of  $\beta$ 1,4-*N*-acetylgalactosaminyltransferases IV synthesizing *N,N'*-diacetylglucosamine, *FEBS Lett.*, 562(1-3), 134-140 (2004).
- [6] M. Gotoh, T. Yada, T. Sato, T. Akashima, H. Iwasaki, H. Mochizuki, N. Inaba, A. Togayachi, T. Kudo, H. Watanabe, K. Kimata and H. Narimatsu: Molecular cloning and characterization of a novel chondroitin sulfate glucuronyltransferase that transfers glucuronic acid to *N*-acetylgalactosamine, *J. Biol. Chem.*, 277(41), 38179-38188 (2002).
- [7] J.M. Guo, Y. Zhang, L. Cheng, H. Iwasaki, H. Wang, T. Kubota, K. Tachibana and H. Narimatsu: Molecular cloning and characterization of a novel member of the UDP-GalNAc:polypeptide *N*-acetylgalactosaminyltransferase family, pp-GalNAc-T12, *FEBS Lett.*, 524(1), 211-218 (2002).
- [8] T. Hiruma, A. Togayachi, K. Okamura, T. Sato, N. Kikuchi, Y.D. Kwon, A. Nakamura, K. Fujimura, M. Gotoh, K. Tachibana, Y. Ishizuka, T. Noce, H. Nakanishi and H. Narimatsu: A novel human  $\beta$ 1,3-*N*-acetylgalactosaminyltransferase that synthesizes a unique carbohydrate structure, GalNAc $\beta$ 1-3GlcNAc, *J. Biol. Chem.*, 279(14), 14087-14095 (2004).
- [9] N. Inaba, T. Hiruma, A. Togayachi, H. Iwasaki, X.H. Wang, Y. Furukawa, R. Sumi, T. Kudo, K. Fujimura, T. Iwai, M. Gotoh, M. Nakamura and H. Narimatsu: A novel I-branching  $\beta$ -1,6-*N*-acetylglucosaminyltransferase involved in human blood group I antigen expression, *Blood*, 101(7), 2870-2876 (2003).
- [10] H. Ishida, A. Togayachi, T. Sakai, T. Iwai, T. Hiruma, T. Sato, R. Okubo, N. Inaba, T. Kudo, M. Gotoh, J. Shoda, N. Tanaka and H. Narimatsu: A novel  $\beta$ 1,3-*N*-acetylglucosaminyltransferase ( $\beta$ 3Gn-T8), which synthesizes poly-*N*-acetylglucosamine, is dramatically upregulated in colon cancer, *FEBS Lett.*, 579(1), 71-78 (2005).
- [11] T. Iwai, N. Inaba, A. Naundorf, Y. Zhang, M. Gotoh, H. Iwasaki, T. Kudo, A. Togayachi, Y. Ishizuka, H. Nakanishi and H. Narimatsu: Molecular cloning and characterization of a novel UDP-GlcNAc:GalNAc-peptide  $\beta$ 1,3-*N*-acetylglucosaminyltransferase ( $\beta$ 3Gn-T6), an enzyme synthesizing the core 3 structure of *O*-glycans, *J. Biol. Chem.*, 277(15), 12802-12809 (2002).
- [12] T. Iwai, T. Kudo, R. Kawamoto, T. Kubota, A. Togayachi, T. Hiruma, T. Okada, T. Kawamoto, K. Morozumi and H. Narimatsu: Core 3 synthase is down-regulated in colon carcinoma and profoundly suppresses the metastatic potential of carcinoma cells, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 102(12), 4572-4577 (2005).
- [13] N. Kikuchi, A. Kameyama, S. Nakaya, H. Ito, T. Sato, T. Shikanai, Y. Takahashi and H. Narimatsu: The carbohydrate sequence markup language (CabosML): an XML description of carbohydrate structures, *Bioinformatics*, 21(8), 1717-1718 (2005).
- [14] N. Kikuchi, Y.D. Kwon, M. Gotoh and H. Narimatsu: Comparison of glycosyltransferase families using the profile hidden Markov model, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 310(2), 574-579 (2003).
- [15] T. Kudo, T. Iwai, T. Kubota, H. Iwasaki, Y. Takayama, T. Hiruma, N. Inaba, Y. Zhang, M. Gotoh, A. Togayachi and H. Narimatsu: Molecular cloning and characterization of a novel UDP-Gal:GalNAc( $\alpha$ ) peptide  $\beta$ 1,3-galactosyltransferase (C1Gal-T2), an enzyme synthesizing a core 1 structure of *O*-glycan, *J. Biol. Chem.*, 277(49), 47724-47731 (2002).
- [16] H. Mochizuki, K. Yoshida, M. Gotoh, S. Sugioka, N. Kikuchi, Y.D. Kwon, A. Tawada, K. Maeyama, N. Inaba, T. Hiruma, K. Kimata and H. Narimatsu: Characterization of a heparan sulfate 3-*O*-sulfotransferase-5, an enzyme synthesizing a tetrasulfated disaccharide, *J. Biol. Chem.*, 278(29), 26780-26787 (2003).
- [17] H. Narimatsu: Construction of a human glycogene library and comprehensive functional analysis, *Glycoconj. J.*, 21(1-2), 17-24 (2004).
- [18] H. Narimatsu: Human glycogene cloning: focus on  $\beta$ 3-glycosyltransferase and  $\beta$ 4-glycosyltransferase families, *Curr. Opin. Struct. Biol.*, 16(5), 567-575 (2006).
- [19] C. Peng, A. Togayachi, Y.D. Kwon, C. Xie, G. Wu, X. Zou, T.

- Sato, H. Ito, K. Tachibana, T. Kubota, T. Noce, H. Narimatsu and Y. Zhang: Identification of a novel human UDP-GalNAc transferase with unique catalytic activity and expression profile, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 402(4), 680-686 (2010).
- [20] T. Sato, M. Gotoh, K. Kiyohara, T. Akashima, H. Iwasaki, A. Kameyama, H. Mochizuki, T. Yada, N. Inaba, A. Togayachi, T. Kudo, M. Asada, H. Watanabe, T. Imamura, K. Kimata and H. Narimatsu: Differential roles of two *N*-acetylgalactosaminyltransferases, CSGalNAcT-1, and a novel enzyme, CSGalNAcT-2. Initiation and elongation in synthesis of chondroitin sulfate, *J. Biol. Chem.*, 278(5), 3063-3071 (2003).
- [21] T. Sato, M. Gotoh, K. Kiyohara, A. Kameyama, T. Kubota, N. Kikuchi, Y. Ishizuka, H. Iwasaki, A. Togayachi, T. Kudo, T. Ohkura, H. Nakanishi and H. Narimatsu: Molecular cloning and characterization of a novel human  $\beta$ 1,4-*N*-acetylgalactosaminyltransferase,  $\beta$ 4GalNAc-T3, responsible for the synthesis of *N,N'*-diacetyllactosylamine, galNAc  $\beta$ 1-4GlcNAc, *J. Biol. Chem.*, 278(48), 47534-47544 (2003).
- [22] T. Sato, M. Sato, K. Kiyohara, M. Sogabe, T. Shikanai, N. Kikuchi, A. Togayachi, H. Ishida, H. Ito, A. Kameyama, M. Gotoh and H. Narimatsu: Molecular cloning and characterization of a novel human  $\beta$ 1,3-glucosyltransferase, which is localized at the endoplasmic reticulum and glucosylates *O*-linked fucosylglycan on thrombospondin type 1 repeat domain, *Glycobiology*, 16(12), 1194-1206 (2006).
- [23] A. Togayachi, T. Akashima, R. Ookubo, T. Kudo, S. Nishihara, H. Iwasaki, A. Natsume, H. Mio, J. Inokuchi, T. Irimura, K. Sasaki and H. Narimatsu: Molecular cloning and characterization of UDP-GlcNAc:lactosylceramide  $\beta$ 1,3-*N*-acetylglucosaminyltransferase ( $\beta$ 3Gn-T5), an essential enzyme for the expression of HNK-1 and Lewis X epitopes on glycolipids, *J. Biol. Chem.*, 276(25), 22032-22040 (2001).
- [24] A. Togayachi, N. Kikuchi, T. Kudo and H. Narimatsu: Comprehensive study on glycosyltransferases which determine glycosylation, *Tanpakushitsu Kakusan Koso*, 48(11 Suppl), 1542-1549 (2003).
- [25] A. Togayachi, T. Sato and H. Narimatsu: Comprehensive enzymatic characterization of glycosyltransferases with a  $\beta$ 3GT or  $\beta$ 4GT motif, *Methods Enzymol.*, 416, 91-102 (2006).
- [26] H. Wang, K. Tachibana, Y. Zhang, H. Iwasaki, A. Kameyama, L. Cheng, JM. Guo, T. Hiruma, A. Togayachi, T. Kudo, N. Kikuchi and H. Narimatsu: Cloning and characterization of a novel UDP-GalNAc:polypeptide *N*-acetylgalactosaminyltransferase, pp-GalNAc-T14, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 300(3), 738-744 (2003).
- [27] T. Yada, M. Gotoh, T. Sato, M. Shionyu, M. Go, H. Kaseyama, H. Iwasaki, N. Kikuchi, YD. Kwon, A. Togayachi, T. Kudo, H. Watanabe, H. Narimatsu and K. Kimata: Chondroitin sulfate synthase-2: molecular cloning and characterization of a novel human glycosyltransferase homologous to chondroitin sulfate glucuronyltransferase, which has dual enzymatic activities, *J. Biol. Chem.*, 278(32), 30235-30247 (2003).
- [28] T. Yada, T. Sato, H. Kaseyama, M. Gotoh, H. Iwasaki, N. Kikuchi, YD. Kwon, A. Togayachi, T. Kudo, H. Watanabe, H. Narimatsu and K. Kimata: Chondroitin sulfate synthase-3: molecular cloning and characterization, *J. Biol. Chem.*, 278(41), 39711-39725 (2003).
- [29] Y. Zhang, H. Iwasaki, H. Wang, T. Kudo, T.B. Kalka, T. Hennet, T. Kubota, L. Cheng, N. Inaba, M. Gotoh, A. Togayachi, J. Guo, H. Hisatomi, K. Nakajima, S. Nishihara, M. Nakamura, J.D. Marth and H. Narimatsu: Cloning and characterization of a new human UDP-*N*-acetyl- $\alpha$ -D-galactosamine:polypeptide *N*-acetylgalactosaminyltransferase, designated pp-GalNAc-T13, that is specifically expressed in neurons and synthesizes GalNAc  $\alpha$ -serine/threonine antigen, *J. Biol. Chem.*, 278(1), 573-584 (2003).
- [30] K. Amano, Y. Chiba, Y. Kasahara, Y. Kato, M.K. Kaneko, A. Kuno, H. Ito, K. Kobayashi, J. Hirabayashi, Y. Jigami and H. Narimatsu: Engineering of mucin-type human glycoproteins in yeast cells, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105(9), 3232-3237 (2008).
- [31] H. Ito, A. Kuno, H. Sawaki, M. Sogabe, H. Ozaki, Y. Tanaka, M. Mizokami, J. Shoda, T. Angata, T. Sato, J. Hirabayashi, Y. Ikehara and H. Narimatsu: Strategy for glycoproteomics: identification of glyco-alteration using multiple glycan profiling tools, *J. Proteome Res.*, 8(3), 1358-1367 (2009).
- [32] M.K. Kaneko, Y. Kato, A. Kameyama, H. Ito, A. Kuno, J. Hirabayashi, T. Kubota, K. Amano, Y. Chiba, Y. Hasegawa, I. Sasagawa, K. Mishima and H. Narimatsu: Functional glycosylation of human podoplanin: glycan structure of platelet aggregation-inducing factor, *FEBS Lett.*, 581(2), 331-336 (2007).
- [33] Y. Kato, M.K. Kaneko, A. Kuno, N. Uchiyama, K. Amano, Y. Chiba, Y. Hasegawa, J. Hirabayashi, H. Narimatsu, K. Mishima and M. Osawa: Inhibition of tumor cell-induced platelet aggregation using a novel anti-podoplanin antibody reacting with its platelet-aggregation-stimulating domain, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 349(4), 1301-1307 (2006).
- [34] H. Ito, A. Kameyama, T. Sato, K. Kiyohara, Y. Nakahara and H. Narimatsu: Molecular-weight-tagged glycopeptide library: efficient construction and applications, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 44(29), 4547-4549 (2005).
- [35] H. Ito, A. Kameyama, T. Sato, M. Sukegawa, H.K. Ishida and H. Narimatsu: Strategy for the fine characterization of glycosyltransferase specificity using isotopomer assembly, *Nat. Methods*, 4(7), 577-582 (2007).
- [36] H. Kaji, H. Saito, Y. Yamauchi, T. Shinkawa, M. Taoka, J. Hirabayashi, K. Kasai, N. Takahashi and T. Isobe: Lectin affinity capture, isotope-coded tagging and mass spectrometry to identify *N*-linked glycoproteins, *Nat. Biotechnol.*, 21(6), 667-672 (2003).
- [37] H. Kaji, Y. Yamauchi, N. Takahashi and T. Isobe: Mass spectrometric identification of *N*-linked glycopeptides using lectin-mediated affinity capture and glycosylation site-specific stable isotope tagging, *Nat. Protoc.*, 1(6), 3019-3027 (2006).
- [38] A. Kuno, Y. Kato, A. Matsuda, M.K. Kaneko, H. Ito, K. Amano, Y. Chiba, H. Narimatsu and J. Hirabayashi: Focused differential glycan analysis with the platform antibody-assisted lectin profiling for glycan-related biomarker verification, *Mol. Cell Proteomics*, 8(1), 99-108 (2009).
- [39] A. Kuno, A. Matsuda, Y. Ikehara, H. Narimatsu and J. Hirabayashi: Differential glycan profiling by lectin microarray targeting tissue specimens, *Methods Enzymol.*, 478, 165-179 (2010).
- [40] H. Narimatsu, H. Sawaki, A. Kuno, H. Kaji, H. Ito and Y. Ikehara: A strategy for discovery of cancer glyco-biomarkers in serum using newly developed technologies for glycoproteomics, *FEBS J.*, 277(1), 95-105 (2010).
- [41] A. Kuno, Y. Ikehara, Y. Tanaka, T. Angata, S. Unno, M. Sogabe, H. Ozaki, K. Ito, J. Hirabayashi, M. Mizokami and H. Narimatsu: Multilectin assay for detecting fibrosis-specific glyco-alteration by means of lectin microarray, *Clin. Chem.*, 57(1), 48-56 (2011).
- [42] A. Kuno, Y. Ikehara, Y. Tanaka, K. Saito, K. Ito, C. Tsuruno,

S. Nagai, Y. Takahama, M. Mizokami, J. Hirabayashi and H. Narimatsu: LecT-Hepa: a triplex lectin-antibody sandwich immunoassay for estimating the progression dynamics of liver fibrosis assisted by a bedside clinical chemistry analyzer and an automated pretreatment machine, *Clin. Chim. Acta*, 412(19-20), 1767-1772 (2011).

- [43] A. Matsuda, A. Kuno, T. Kawamoto, H. Matsuzaki, T. Irimura, Y. Ikehara, Y. Zen, Y. Nakanuma, M. Yamamoto, N. Ohkohchi, J. Shoda, J. Hirabayashi and H. Narimatsu: Wisteria floribunda agglutinin-positive mucin 1 is a sensitive biliary marker for human cholangiocarcinoma, *Hepatology*, 52(1), 174-182 (2010).

## 執筆者略歴

成松 久(なりまつ ひさし)

1974年慶應義塾大学医学部卒業、同年医師免許取得。1979年慶應義塾大学医学研究科大学院・微生物学専攻・修了(医学博士)。1991年慶應義塾大学医学部助教授、同年4月創価大学・生命科学研究所・教授、2001年産業技術総合研究所分子細胞工学研究部門総括研究員を経て2006年産業技術総合研究所糖鎖医工学研究センター研究センター長、現在に至る。筑波大学・医学医療系・連携大学院教授、慶應義塾大学・医学部・客員教授、中国・上海交通大学・顧問教授を兼務。専門分野は、糖鎖生物学、生化学、免疫学、微生物学、腫瘍生物学。2007年に日経BP技術賞、2010年に化学バイオつくば賞、2011年につくば賞を受賞。日本糖質学会評議員、日本糖鎖科学コンソーシアム常任理事、国際プロテオーム学会(HUPO)理事、日本プロテオーム学会(JHUPO)理事、日本生化学会評議員、日本分子腫瘍マーカー研究会評議員、日本学術会議連携会員、日本癌学会所属。



## 査読者との議論

### 議論1 全般

コメント(小野 晃:産業技術総合研究所)

糖鎖という新しい領域を先駆的に開拓してきた研究に関して、その全体戦略(シナリオ)が明確に記述されています。また必要な要素技術を適切に選択し、それぞれの開発についても大きな成果をあげています。さらに要素技術を統合し、癌診断技術を構成していったプロセスも優れたものです。

糖鎖という新しい領域を今後開拓するために、多くの研究者・技術者が容易に使えるような基盤ツールの開発を第1の研究目標に掲げたことは素晴らしいことと思います。とかく実がなっている木の下は足の踏み場もないくらいに混み合い、流行りの領域で研究のエンドユーザーにはなりたがるのに、種をまいたり、苗木を育てたりする基盤的な研究にはあまり興味を示さない研究者が多い中で、この研究は先駆的な研究のあるべき姿を示したものと称賛されます。

また図2にあるような機能、合成、構造からなる3本柱のシナリオを最初にしっかりとたてたことが、その後の研究の着実な進展を支えたように思います。明確なシナリオに基づく大規模なプロジェクトを遂行するためには、6章「おわりに」で著者が述べているように、産総研の研究センターのように大規模な研究組織が一丸となって10年という長期間取り組むことが必要だったと思います。

コメント(湯元 昇:産業技術総合研究所)

分野融合的に糖鎖構造解析のための要素技術を開発し、疾患バイオマーカーの実用化に向けてシナリオをもって要素技術を統合したことは優れた第2種基礎研究の事例となっていると思います。

## 議論2 基盤ツールの国内外での活用事例

質問(小野 晃)

この研究で開発された基盤ツールが国内外で広く利用されることで、糖鎖研究がさらに加速されることを期待します。現状国内外の他の研究機関や企業でこの研究の成果がどのように活用されているか、著者が知る限りで結構ですので、事例を紹介していただけないでしょうか。また国内外の他機関との共同研究のような形をとっているのでしょうか。差し支えない範囲でお教え願います。

回答(成松 久)

産総研で開発した基盤ツールの外部への波及に関して、筆者の知る範囲で一部を以下のようにリストとしてまとめました。

### 糖鎖遺伝子

- ・約30遺伝子の特許出願を行い、そのうち13遺伝子についてはグライコジーン社に実施許諾しました。
- ・特許に関連しない糖鎖遺伝子を国内外20研究機関に配布するとともに、より広範囲な研究機関に配布するため(独)製品評価技術基盤機構(NITE)に寄託しています。
- ・我々が開発した糖鎖遺伝子のデータベースであるGGDBへの年間アクセス数は172,570件(平成23年度)あります。
- ・糖鎖遺伝子のノックアウトマウス13種を作製し、疾患モデルマウスとしての応用を目指し国内5機関、海外3機関との共同研究を実施しています。
- ・糖転移酵素を活用した糖鎖合成を行い、糖鎖アレイ等への応用を目指した共同研究を国内外の研究機関と実施しています。
- ・酵母で発現した安価な糖転移酵素を用いて、某企業と糖タンパク質合成の共同研究を行っています。
- ・上記の共同研究の成果として多数の論文発表を行っています。

### レクチンマイクロアレイ

- ・GPバイオサイエンス社が実用化しました。
  - ・すでに数十件の関連論文が外部機関から出されていますが、下記に極めてインパクトのある3件を記載しました。
- 例えば、京都大学山中伸弥教授がiPS細胞の評価に使っている例として

YC. Wang *et al.*: Specific lectin biomarkers for isolation of human pluripotent stem cells identified through array-based glycomics analysis, *Cell Res.*, 21(11), 155-1563 (2011).

それ以外には、

EL. Bird-Lieberman *et al.*: Molecular imaging using fluorescent lectins permits rapid endoscopic identification of dysplasia in Berrett's esophagus, *Nature Medicine*, 18(2), 315-321 (2012).

SA. Fry *et al.*: Lectin microarray profiling of metastatic breast cancers, *Glycobiology*, 21(8), 1060-1070 (2011).

- ・レクチンに関するデータベースであるLfDBへの年間アクセス数は23,605件(平成23年度)ありました。
- ・産総研から、レクチンアレイを用いた糖鎖バイオマーカーに関する特許を7件出願済みです。

### 質量分析による糖鎖構造解析

- ・すでに島津製作所/三井情報から解析システムを販売しています。カタル、北京、上海、アメリカに各1台、国内で3台(国立がんセンター、岐阜大学、JADAに各1台)販売実績があります。
- ・糖鎖構造解析に関連する二つのDBの年間アクセス数は、GMDBが18,256件、GPDBが36,729件(平成23年度)ありました。
- ・糖鎖構造解析の共同研究の成果は多数ありますが、下記に主な発表論文を記します。

T. Fukuda *et al.*:  $\alpha$ 1,6-fucosyltransferase-deficient mice exhibit multiple behavioral abnormalities associated with a schizophrenia-like phenotype: importance of the balance between the dopamine and serotonin systems, *J. Biol. Chem.*, 286(21), 18434-18443 (2011).

N. Watanabe *et al.*: Clinicopathological features of 171 cases of primary thyroid lymphoma: a long-term study involving 24 553 patients with Hashimoto's disease, *Br. J. Haematol.*, 153(2), 236-243 (2011).

T. Nakagawa *et al.*: Glycomic analyses of glycoproteins in bile and serum during rat hepatocarcinogenesis, *J. Proteome Res.*, 9(10), 4888-4896 (2010).

N. Sasaki *et al.*: High levels of E4-PHA-reactive oligosaccharides: potential as marker for cells with characteristics of hepatic progenitor cells, *Glycoconj. J.*, 26(9), 1213-1223 (2009).

H. Suzuki *et al.*: Computationally and experimentally derived general rules for fragmentation of various glycosyl bonds in sodium adduct oligosaccharides, *Anal. Chem.*, 81(3), 1108-1120 (2009).

H. Shirato *et al.*: Noroviruses distinguish between type 1 and type 2 histo-blood group antigens for binding, *J. Virol.*, 82(21), 10756-10767 (2008).

YY. Fan *et al.*: Identification of further elongation and branching of dimeric type 1 chain on lactosylceramides from colonic adenocarcinoma by tandem mass spectrometry sequencing analyses, *J. Biol. Chem.*, 283(24), 16455-16468 (2008).

T. Nishie *et al.*: Development of IgA nephropathy-like disease with high serum IgA levels and increased proportion of polymeric IgA in  $\beta$ -1,4-galactosyltransferase-deficient mice, *Contrib. Nephrol.*, 157, 125-128 (2007).

T. Nishie *et al.*: Development of immunoglobulin A nephropathy-like disease in  $\beta$ -1,4-galactosyltransferase-I-deficient mice, *Am. J. Pathol.*, 170(2), 447-456 (2007).

J. Iijima *et al.*: Cell-cell interaction-dependent regulation of *N*-acetylglucosaminyltransferase III and the bisected *N*-glycans in GE11 epithelial cells. Involvement of E-cadherin-mediated cell adhesion, *J. Biol. Chem.*, 281(19), 13038-13046 (2006).

#### 定量PCR

・共同研究で2件の論文発表があります。

K. Moriwaki *et al.*: Combination use of anti-CD133 antibody and SSA lectin can effectively enrich cells with high tumorigenicity, *Cancer Sci.*, 102(6), 1164-1170 (2011).

M. Miyata *et al.*: Membrane sialidase NEU3 is highly expressed in human melanoma cells promoting cell growth with minimal changes in the composition of gangliosides, *Cancer Sci.*, 102(12), 2139-2149 (2011).

・共同研究で特許1件を出願済みです（阪大、名大、GPバイオサイエンスと共願）。

# 価値の創造とシンセシス

東京大学の石川正俊教授は、分析的な真理の探求だけではなく新しい社会的な価値の創造が必要であると主張され、2004年4月から2006年3月まで東京大学の副学長を務められ、独創性の高い研究成果を社会に導入していくための制度作りをされてきました。シンセシオロジーが目指す研究成果の社会導入を大学の立場で実践されている石川教授と小野編集委員長(当時)と赤松編集幹事が座談会を行い、価値創造に向けた社会づくりについての議論を行いました。

## シンセシオロジー編集委員会



### 座談会出席者

- |       |                               |
|-------|-------------------------------|
| 石川 正俊 | 東京大学大学院情報理工学系<br>研究科教授        |
| 小野 晃  | 産総研(シンセシオロジー編集<br>委員長(現編集委員)) |
| 赤松 幹之 | 産総研(シンセシオロジー編集<br>幹事)         |

**赤松** 石川先生は、21世紀の知的生産構造は、実験や理論的証拠を積み重ねることによって「論=真理」を形成するアナリシス的方法と、独創性の高い仮説を提起し、それを実証することによって社会での価値を生み出すシンセシス的方法があり、この二つは相反するものではなく双対構造を成すものである、と主張されておられます。

『シンセシオロジー(構成学)』の趣旨も相通じるころが大いにあるのではないかと思います、小野さんから紹介いただけますか。

**小野** 『シンセシオロジー』を発刊して丸4年が経ちました。産総研内部だけでなく外部にもかなり知られるようになってきて、外部からの投稿も増えつつある段階です。

科学技術の研究方法としてアナリシス(分析)的方法や要素還元的方法だけでなく、“シンセシス”(構成)的方法や“統合”的方法の必要性は以前から語られてはいるのですが、では実際に構成的研究や統合的研究をどう進めたらいいのかというと、中身はなかなか明確になっていなかったような気がします。産総研も工業技術院の時代から産学官連携を重視して大いに進めてきましたが、アカデミックなマインドの強い研究者たちからすると産学官連携はサイドワークのように見えていました。それではまずかろうと吉川

(弘之)先生も思ったと思うんですね。これまで応用研究といわれてきたものにも立派な魂と論理があって、研究者が全力をつぎ込むだけの価値ある仕事のはずである、それをもっと浮き上がらせて、そこでいい仕事をしようじゃないか、という思いでこのジャーナルをつくりました。

研究論文の投稿要件として、研究目標を明確に設定してほしい、研究目標と社会とのつながりを説明してほしい、つまり研究の社会的な価値を主張してほしい、目標を実現するために描いたシナリオを提示してほしい、選択した要素技術(群)を記述してほしい、要素技術間の関係とそれらを統合したプロセスを記述してほしい、結果を自己評価し将来の展望を書いてほしいといっています。現代に特有の複合的な問題に取り組む場合、単一の技術領域だけでは解決がむずかしく、研究に多様な領域の技術が巻き込まれてくるのは必然です。研究の駆動力は学術的な好奇心に対して社会的な価値の実現になります。研究の結果得られる解も唯一でなく、複数の同等解があり、その間には優劣はあるかもしれないけれども、本質的に○、×はないと考えています。

では、ある研究結果が正しいかどうかをどう評価したらよいか。構成的研究はどういう基準で評価したらよいか、どういう観点から査読するかについてはむずかしい問題ですが、我々としてはある一定の方向性をもってやってい



るところです。これまで学術論文の価値はピアレビューによって評価しました。著者の研究に一番近くにいる研究者を査読者を選びます。なぜならば、論文で主張されていることが本当に新しく、論理的に検証されているかを見るためには近くにいる研究者でないと分からないからです。ですが、ピアレビューには限界があります。社会が見えないのです。自分たちの周りの小さなコミュニティの論理しか見えなくなってしまう。これは学問が社会と乖離する一つの原因ではないかと思えます。

そこで、我々はメリットレビューと呼んでいるのですが、論文で主張されている研究成果を使うことによって利益を受けるとされる人たちが、その利益の大きさを判断基準にして査読するのが本来ではないかと考えました。査読者には近い分野の専門家を排して、関連する大きな分野と別の分野からの二人の査読者を選んで行っています。意外だったのですが、このような査読が結構ちゃんとできることに驚いています。査読者の実名を出して、著者と査読者とのやりとりを論文の後ろに掲載して、読者の理解を助けるという方法をとっていますが、これが結構読者の評判が良いのです。

**赤松** シンセシオロジーの論文では、なぜそれを問題設定したのか、設定した問題を解くためになぜこの方法論を導入しようと思ったのか、というシナリオを書いてもらっています。全体のストーリーがわかることが大事で、それは研究というものに対する一つのファクトであり、それらをたくさん集めようというのがこのジャーナルの目的でもあります。それによってどういうふうに研究を進めたらいいかということが見えてくるのではないかと。

細分化して、分析的に要素還元論的にやっていると全体が見えなくなってしまうので、研究者がタコソポに入らないためにはどうしたらいいかという問題意識をもっています。

### 価値創造のための真の独創性

**石川** 今の科学で足りないことは、「価値創造」という



石川 正俊氏

世界です。組織論や研究の方法論はプロセスなので、それだけでは不十分で、その先にある価値を創造できるかまでを考える必要があります。

この際、「価値」を誰が評価するか、「創造」をどう評価するかという二つの問題があります。研究者個人は、主観的な評価は別として、価値を客観的に評価することはできないし、そもそもその立場にはいないわけで、組織体としても同様に価値を評価することは原則として難しいと思います。ここでの私の強い主張は、「価値を評価するのは社会である」ということです。

そのことから考えますと、社会が価値を認める成果を生み出すための研究はどうあるべきかという観点が必要です。キャッチアップではない、本当の意味での創造とは何かをもう一度考え直す必要があると思うのです。社会が研究成果の価値を評価するのですから、研究組織体は社会に対して社会が評価できる価値で発信しなければいけません。発信と同時に、社会がどれを価値と認めるかということを受け取る組織体でなければならぬし、組織体の中にそれを受け取るメカニズムがなければいけないのですが、これがなかなか難しいわけです。多くの研究者が考えるように、研究成果を学会で発表すれば、それが価値として評価されるかという、そうではないでしょう。

例えばノーベル賞も構成的なものにも出している。私が構成的だと思っているのはゴッドフリー・ハウズフィールド、アラン・コーマックのX線CT、ジャック・キルビーのIC等ですが、このような受賞はこれから増えてくると思っています。こんなことを言うのと叱られるけれども、彼らの研究は、最初に課題が与えられていたわけではなく、最初は「できたらいいな」というただのほら吹きだったわけですが、実際に実証したというすごさもさることながら、研究者としては「成果としてこれができるはずだ。そこに価値があるはずだ」という論を張った、その偉大さに注目すべきです。この点は、強弱の違いはあるにせよ研究者として必ずやらなければいけないことであって、その先が「社会の評価」につながるのですが、論を張ったけれども使われないというのは、社会が価値を評価する限り、つまり、研究者が価値の評価ができない限り、私は「正当な失敗」だと思っています。論理的、技術的に正しいことを主張し、そこに価値が生まれる可能性がある、まだが正当であればやるべきなのです。それが実際に価値をもつかというのは、社会が判断するわけですから、論文を書いたり、特許を出すのはその途中段階でしかありません。社会に発信して、それが社会で価値をもてば、さかのぼってノーベル賞なり、何らかの評価を受けるわけで、このメカニズムを研究者が理解しなければいけないと思います。

もう一つの「創造」ですが、キャッチアップは創造ではありません。通常の学術論文は、イントロに「社会でこういうことが必要と言われている。これに対して他の研究者はこれをやったけれども、欠点がある。その欠点を私はこういう新しい方法で解決し、ここまでの性能を出しました」といったことが書ければ、極めて通りやすい論文になるのですが、よく考えると、与えられた課題を解いているだけで、新しい価値の創造という観点からはキャッチアップ以外の何ものでもなく、こんな論文に独創性はないと考えています。私が本当に独創性のある論文と考えているのは、例えば「私はここに価値があると思うけれども、社会はまだ認めていない。比較する論文は何もない。でも、ここまでできるはずだし、その一部はできました」、といった論文で、本当はこのような論文を書かなければいけないと思っています。現実的に優れた論文は、これらの中間あたりにあるのかもしれませんが、後者、すなわち未来のニーズや未来のマーケットを開拓する力をどう評価していくか、という観点は、今後の科学技術に課せられた大きな課題だと思います。論文という成果の主張自体は、前述したように、評価としては途中段階のもので、その時点で正当なかつ独創的な主張があればとりあえず100点満点ですが、何年かたっても社会が評価しなかったら100点満点は取り下げて50点にする、ただし研究者の活動としては正当なもので、これが正当な失敗だと思います。もちろん、社会が価値を認めてくれたら100点満点、いや200点の成果として評価すべきだと思います。

このことから、私は、「創造」をきちんと社会の中で認めていくようなプロセスに日本が変わっていかねばいけないと思っています。これは口で言うのは簡単ですが、相当に難しい話です。そもそも「イノベーション」を目指すということはアメリカのイノベーション政策のパクリなわけで、そのことを独創的な科学技術政策の中心等と標榜すること自体パラドックス(笑)。創造とは、みんなが右へ行ったら、自分は左に行くのだと。ほら吹きと紙一重のところに独創性があるわけですが、これを組織体あるいは社会がどう認めていくかです。シンセシオロジーは「ほら吹きでない論理があるでしょう」ということですから、私は実に面白い試みだと思いますが、何らかの答えを急ぐのではなく、その先の社会の価値の評価は全くわからない、わかるようなものはキャッチアップであるという、その心意気が必要だと思うのです。

### 「正当な失敗」を評価する

**小野** 時代が変化すればその技術が浮かび上がるかもしれないし、社会の変化によってどの技術がベストになる

かは分からないというところがあるので、我々としては全部受け入れていいんじゃないかという気がしております。ちょっと甘すぎるかもしれませんが。

**石川** その前提として、正当な失敗がいっぱいあって、その先は社会が決めるのだということが受け入れられていれば、今の小野さんの論理は素晴らしい。ところが、社会に受け入れられずに、失敗は失敗だろう、という話になってしまうと、この論理は正論とならないのです。

**小野** ええ。産総研のやった、あるいは経済産業省の施策は全部成功したかというとなんかそうじゃないわけで、それを外に対してちゃんと提示して議論できないがゆえに、自分の小さな論理の中で処理してしまい、次の展開につなげていくという力が弱くなってしまいます。みんな、小さくまとまってしまう危険性があります。

**赤松** 「正当な失敗」はすごくいいと思うのですが、失敗かどうかを判断すべきなのかどうか、ということもあるのではないのでしょうか。失敗の中を分析しはじめるあまりいいことはなくて、これがうまくいかなかったのが最終的にモノが出なかったのだという、小さな論理の中で正当性を言い出しかねないと思うのですが、そこはどうしたらいいのでしょうか。

**石川** 私の言う「正当な失敗」は、主張の独創性があり、研究のプロセスはちゃんとしている研究のみが対象であって、研究のプロセスで失敗したのは能力がない失敗です。能力のある人たちは研究をある程度行えば必ず成果を出す。ただ、成果を出したことをもって、今までは全部成功と言ってきたけれども、そうではない。成果を社会に出したときに、まだ見ぬ社会の評価とのミスマッチがあったら「正当な失敗」といっているわけです。これは独創性は大事にしなければいけないし、正当な失敗は蓄積することが価値を生み出す可能性があります。何年かたったら、もしかしたらこれがまた活きるかもしれない。ですから、蓄積された成果が、変わり続ける社会のなかでいつの日か価値をもつようにしよう、という力を働かせなければいけないわけです。社会とのマッチングがとれないということに関しては、偶然も作用するし、時代の流れも関係するので、その中でミスマッチは、独創性との紙一重の世界で許容しましょうと考えるべきです。

### 研究をいかに社会とつなげるか

**赤松** 研究としては成功したけれども、社会で受け入れ

られるかどうかというプロセスに研究者自身がどこまで関与するか、についてはいかがでしょうか。「私は研究をしてちゃんと成果を出したのだから、あとは誰かに任せます」という態度の人も多いような気がします。

**石川** 私は高速の画像処理をやっているのですが、デバイスや理論をつくるだけでなく、社会が理解できるシステムまで組んでいます。要素技術を醸成させるだけでなく、例えば、高速画像処理を使ってバッティングロボットまで作ります、というやり方をしています。研究者の大部分は、論文を書いたらあとはだれかが使ってくれる、特許を書けば、誰かが理解してくれて特許は買ってくれると思っています。そういうふうに研究者が思っている間は何も新しい分野は起こりません。理由は簡単で、そのできた成果を一番わかっているのはその成果を出した本人だからです。よくわかった本人を超えるほど、成果を理解し、社会の価値に繋げることができる人はいません。前述した研究成果を社会の価値に繋げるインフラが整備されていない中で、研究成果を示すだけで「あとお願い」と言うのは、自分の成果をどぶに捨てるようなものです。現状では、インフラの整備ができるまで待つか、自分でやるか、だけの選択肢しかないのであって、インフラの整備がない限りは、自分で、ある程度までやらざるを得ないわけです。

本来は、このことに対して、研究者としては文句を言ってもいいと思います。ある部分は、研究者のやるべき仕事ではありませんし、インフラを整えば、研究者はアイデアを出すだけでいいわけです。ただし、このインフラ整備は組織の理解が足りない中では、大変難しく、東大でも知財、共同研究、ベンチャー等の支援組織を体系的に整備するのに5年かかりましたが、それでもまだまだやるべきことが残っていて、意識改革も含めて時間はかかります。現状としては研究者がやらざるを得ない、このことは、科学技術の発展にとって、日本特有の悲哀だと思います。

**小野** まさに死の谷ですね。



小野 晃氏

## 研究者がシナリオを描くこと

**赤松** 研究者が成果を世の中に出すプロセス自体にもセンスが要りますね。売れるものになるのはまた別問題かもしれないけれども、こういう価値があるということ具体的に社会に示していくのはすごくセンスがいることです。将来にわたって、研究者もそういうセンスを伸ばすという考え方もあると思うのです。インフラに任せてしまうと、こういうセンスを伸ばす機会が減ってしまうのではないかという気がします。

**石川** それはいろいろです。そういうセンスに対して、私は「art」という言葉が当てはまると思っています。コンピューター分野のクヌースの The art of programming を引き合いに出すまでもなく、科学技術も芸術性、獨創性、センスが求められます。私の分野はセンシングなので、この用語をバクって、The art of sensing だと言っています。掘り下げるし、構成的なものもやるし、全体の絵を描いているのが私だぞ、と。ちょっと言い過ぎかな(笑)。

**赤松** まさに我々のシンセシオロジーも art of research みたいなものと言いたいのです。今のお話でいえば、そういう art のセンスをもっている人には発信してほしいし、もっていない人にもある種の教育を含め経験してもらい、そういう人たちの比率を上げたいと思っているのです。

**小野** とても楽観的な言い方をすると、社会的な価値がある研究成果を出した人はそれなりのシナリオをもっていたはずだ、と思いたい。シナリオなしで社会的な価値というのは生み出せないのではないかと考えています。ただし、後から振り返ってみるととてもいいシナリオをもっていたのに、自分ではそれに気がつかない研究者たちも結構たくさんいるように思います。シンセシオロジーの研究論文を書くことで、著者が自分にシナリオがあったことを発見することが何度かありまして、我々も驚いています。そうだったら、最初からシナリオを自分なりに作り、それを熟成しながら研究を進めていってほしい、という気持ちですね。

**石川** 今の時代、シナリオなしで研究をやるのは無謀です。社会の価値へ繋げる獨創的な「シナリオがある」ことは絶対条件ですが、そのシナリオの書き方はいろいろあって、その多様性は維持すべきです。例えば、思考実験として、研究成果を元にベンチャーを仮につくったとして、あるいはどこかの会社に技術移転したと仮定して、自分の技術がどういふふう社会に還元され、評価を受けるかというシナリオを書くのも一つの方法ですね。足りないものや今ま

で気が付かなかった価値が見えてくると思います。

**赤松** シナリオを書くことで、自分の中にあったシナリオが見えてきて、それを繰り返すことで未来的な意味のシナリオが書けるようになる、そういうスキルが獲得できるような気がします。

**小野** シナリオをつくるのが第一歩で、それを他の人に提示して、批判を受けたり、切磋琢磨したり、優劣をつけられたり、というプロセスが本来あってしかるべきなのですが、現状は最初のシナリオ作りの段階からブアなのです。

**石川** その使命を担っているのは産総研だと思います。企業は利益の最大化を狙っているから、シナリオを出さない。大学は、普通に考えて、シナリオをもっている人がほとんどいない(笑)。産総研は研究開発をやるだけでなく、シナリオという形で社会に対してどんどん発信してほしい。

**小野** そうなのです。それが産学官連携だと思っています。

**石川** 産総研が大きなシナリオを幾つも出す。このシナリオは、研究成果から、マーケットから、技術予測から書いてあるというようにいろいろなパターンがあって、なおかつ否定されるようなシナリオ、あるいは8割の人は賛成したけれども2割の人から反対されるようなシナリオ、そのほうが全面的に賛成されるシナリオより独創的です。

### 価値創造のための人材の評価とは

**赤松** 評価の話に移りますが、失敗を認める評価というのは当然難しいし、評価がそもそもできない可能性もありませんか。

**石川** これは、「やる・やらない」の問題です。社会が認める価値は偶然が作用する、時として技術的には正しい



赤松 幹之氏

評価ではない、価値を生み出したかどうかの評価であるということの評価する側も、評価される側も、みんなが認める必要があります。もっと言うと、現代において新たなマーケットや価値を生み出した技術の中には、その原因は「シナリオがよくてうまくいったからだ」と言えるものが多く存在します。そう考えれば、この評価はできないできないの問題ではなく、やるかやらないかの問題です。

**小野** 評価をするということは、リスクをとることですね。

**石川** そうです。前提として「不当な失敗」の人の評価を下げるが必要ですが、正当な失敗はゼロかプラスアルファ、うまくいった人は、例えば給料をポンと上げる。今の日本の文化は公平性や積み上げの根拠を言いがちなので不満が出るでしょうが、そこは共通の理解として、多少の偶然性が働くということをみんなが理解すれば、「あれは宝くじが当たったようなものだ」と。むしろ価値を生み出した人の評価が高くなったことをもって、全体のベクトルを動かすという力にもなる。

**赤松** どうしても評価というと、評価する側の態度が「ダメ出し」に走るじゃないですか。褒めるマインドをどうやってつくるかということも大きな課題ですね。

**石川** 加点主義に直さないといけない。「これ、いいじゃないか」と。それで残りを引っ張る。加点主義の形としては給料、賞等があります。

**小野** 表彰は業績を顕彰することによって、どういうことが今社会や組織に求められているのかを明示する効果があります。賞というのはもらう人のためにあるのではなく、もらわないその他の人たちのためにあるのだと思っています。

**赤松** 評価もある種の文化なので、文化をつくっていくことが必要です。それには、やはり普段から声を出して主張しつづけるということなのでしょうね。

**石川** 文化ができれば評価も楽になる。そこはニワトリとタマゴの問題をどう解決するかです。

**赤松** 組織運営にも大きく関わります。

**石川** 研究組織としては、プル型の組織とプッシュ型の組織とがあると思います。プッシュ型は、組織設計や意識

醸成といった地固めから始めて、全体が動く力を付けた上で、研究者に後ろから「みんなで、ここへ行きましょう」という運営手法で、プル型は、突出したアクティビティを許容して「俺についてこい」という運営手法を行っているのですが、両方とも、いい点と悪い点があると思います。プッシュ型は地固めをしてからドンといくので全体が動くので力が強いが、動きが遅い。反対に、プル型は迅速性がある、幾つかの尖ったものがうまくいくが、全体が動かない。結局のところ、研究組織の運営は、時期や内容に応じて、両方要るわけで、プッシュ・プル型の運営が必要ということになります。文化の醸成や政策誘導的な評価は、プッシュとプルを繰り返しながらの組織運営が必要ではないかと思います。

### 人材育成に企業、大学と産総研がタッグを組もう

**小野** 人材育成は、大学にとっても産総研にとっても大きなミッションの一つです。ただ、ドクターコースに学生がなかなかいかないという話を聞いたりするのですが。

**石川** 大学と産総研がタッグを組んで、こういうキャリアパスがありますということを明確に出すといいかもしれないですね。東大から産総研にハイウエーが通っていますという怒られるけれども、農道が通っています、くらいなら大丈夫でしょう(笑)。

東京大学の優秀な修士の学生がなぜドクターコースにいかないかという、修士でも就職先として給料の高い、厚遇するところがあるからです。例えば外資系です。外資系のアクティビティは、極めてアグレッシブで、迅速な評価を行うので、例えば、私の研究成果が新聞に載ると、最初に問い合わせがくるのが海外の企業です。前は韓国人から連絡があったのですが、先日は日本の企業から数年前に移ったという日本人が来ました。若者を含め、今まで日本を支えてきた優秀な中堅技術者、研究者の外資系への流出は問題だと思っています。ここに評価の問題があることもみのがせません。日本の大企業も最初はベンチャーでした。iPhone、Google、フェイスブック等を対岸の富裕層だと思わずに、日本でもあれに匹敵する価値の創出のためにはどうしたらいいか考えなければいけない時期だと思う人が増えてほしい。

### 価値創造のための国の組織設計

**赤松** 国の政策は変化しているのでしょうか。

**石川** 文部科学省では大学発新産業創出拠点プロジェクトというものを2012年度から開始しています。大学の研究成果を社会の価値に結びつけることに、国がリスクマネー

を呼び込む場をつくり、積極的にチャレンジするプロジェクトです。施策全体としては成功を目標としていますが、リスクマネーを呼び込むことからわかるとおり、「正当な失敗」は仕組みの中でリスクテイクする、というものです。文科省の担当者は、「これは文部科学省にとってはチャレンジだ」と言っています。文科省の担当者が、こういう言葉を言うこと自体が画期的で、イノベティブだと思います。

今、産業界とのインターフェースを考えると、現状は産業界のニーズを受け取りすぎていると思うのです。今、産業界が持っているニーズは、今のニーズです。企業が言っているニーズをまとめ上げて、日本のこれからはこのニーズを取り込むことが重要施策だ、とやった瞬間に日本が国としてキャッチアップしていることになるわけで、現状の改良研究に走ってしまうことになります。もちろん改良は必要なのですが、未来を創る施策というときにはリスクを官が冒さないといけない。官がリスクをどうマネジメントできるか、が問われているのです。ここで“官”というのは経済産業省と入れたり、産総研と入れたりしていただきたいのですが(笑)、官がリスクをどうやってリスクテイクするかという構造を構築するのは、アイデアの問題だと思います。それこそ吉川先生が言うように設計の問題でしょう。その構造を入れないと、これからの研究組織は改良研究だけのものになってしまいます。

**小野** 確かに新しい技術は、実は現在の企業をつぶす技術でもあるのです。それが自社から出るのか、他社から出るのか、その違いです。本当は自社から出さなければいけないのだけれども、それは怖いものだからニーズではないと思ってしまいます。社会の活力が弱くなると、現状肯定になってしまっても変わろうとする力が弱くなってしまいます。

話が飛んで恐縮ですが、私は標準化の仕事をしているのですが、「日本の今の技術を肯定するような国際標準をつくってくれ」と言われることがままあるのです。でもそれは違うのです。今後世界が必要とする標準をつくって、日本がいち早くそこに変化していくというやり方でなければいけないのだけれども、いまだにそういう現状肯定の論調が多くて、弱ったものだと思っています。

**石川** 標準のときはたぶん「変える」勇気が必要だと思います。だけれども、組織には時として「変えない」勇気も必要です。文化を変えるにはいろいろな勇気が必要ですが、変えない雰囲気の中では変えるための勇気が要りますし、変えようという雰囲気の中では変えないという勇気が必要です。作り上げようとする文化には何が必要で何が不要であるかを、社会の要請を的確に捉えることで選択・展

開していくことが肝要かと思えます。

**赤松** こういうジャーナルをつくったことによって、文化作りに寄与したいと思っています。制度をつくることを組み合わせ、日本全体でまとめあげていければと思っています。

**石川** こういう活動はチャレンジという意味で積極的にやるべきだし、大賛成。それから全体システムを配慮した構成的アプローチという方向性も大賛成で、あとは組織体としてどういう方向性のスキーム、あるいは施策として具体化していくかというアイデアが必要かと思えます。私が東京大学や文部科学省で組織や制度の設計を行った経験からすれば、産総研には、社会に新たな価値を創造するための重要な役割があり、それを生み出すための新たなチャレンジが期待されていると思いますので、今後の活躍を祈念致しております。

**赤松** 大学と研究所とでは組織形態に違いがありますから、それぞれに合ったやり方を実践しながら、タッグを組んで進めていきたいですね。今日はありがとうございました。

この座談会は、2012年2月24日に茨城県つくば市にある産総研にて行われました。

#### 略歴

石川 正俊 (いしかわ まさとし)

1977年東京大学工学部計数工学科卒業、1979年同大学大学院工学系研究科計数工学専門課程修了、同年通商産業省工業技術院製品科学研究所入所、1989年東京大学工学部計数工学科助教授、1999年同大学工学系研究科計数工学専攻教授。2002年度、2003年度東京大学総長特任補佐、2004年度同大学副学長、2005年度同大学理事・副学長として、東京大学の産学連携の組織制度設計と運用に従事。工学博士。2011年紫綬褒章受章。現在、同大学情報理工学系研究科創造情報学専攻教授、産業技術総合研究所研究参与。

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



# 投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日  
 改正 2008年6月18日  
 改正 2008年10月24日  
 改正 2009年3月23日  
 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 <sup>(Note 1)</sup>. Rather than passively waiting, therefore, researchers and engineers who understand the potential of the research should be active.

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

*Synthesiology* Editorial Board

Editor in Chief: 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. ICHIO, 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, Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan

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

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



## 編集後記

Synthesiology 5巻3号をお届けします。この号には、通常の研究論文5報に加えて、東京大学大学院情報理工学研究科の石川正俊先生とSynthesiology誌編集担当者(小野晃前編集委員長、赤松幹之編集幹事)との座談会が掲載されています。座談会の主題は「価値の創造とシンセシス」です。1999年の国際学術連合会議(プタベスト)宣言として採択されたように、21世紀の科学技術の特徴付けるキーワードの一つは「社会の中の科学、社会のための科学」と言われています。それと類似の観点で「新しい社会的価値の創造」の必要性を主張しておられる石川先生のお考えが、編集担当者との意見交換を通して明確に示されています。座談会の中でご紹介いただいた「正当な失敗」という新しい言葉は、価値創造という観点でこれまでよりも一段高いレベルの研究成果を敢然と追求した上で、その成果に対する社会的評価を従容として受け入れる研究者を勇気付ける魅力的なものと感じました。また価値の創造をしっかりと認識・設定したシナリオのもとに展開する研究アプローチ法は、構成的な立場でシナリオ構築を目指すこの学術誌の研究論文とも親近性が高いものと、私も一読者の立場で興味深く拝読させていただきました。

話は前後しますが、この4月から小野前編集委員長の後を引き継ぎ、二代目の編集委員長に就任致しました。これまでSynthesiology誌の編集経験は無く、言わば無知からのスタートですが、それだけに新鮮な思いで各号の研究論文に接しています。この号に掲載されている5報の研究論文は、主たる研究展開対象で分類すると、データベース検索に係わる情報技術分野、新機能の発現・利用を目指した材料科学分野と計測分野、オープンフィールド調査に係わるサービス工学分野、そして糖鎖に係わるライフサイエンス分野と、非常に多岐な分野にまたがります。このような幅広い分野に係わる論文を、「ピアレビューではなくメリットレビュー(上記座談会における小野前編集委員長の発言)」の観点で査読し、共通の土俵に載る論文として掲載しているところに、Synthesiology誌の最大の特徴があります。今後もその特徴を継続し、より幅広い層からの論文投稿の受付と情報発信に努めたいと考えています。小野前編集委員長のこれまでのご尽力にこの場を借りて御礼申し上げるとともに、Synthesiology誌に対する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3号 2012年8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

International cooperation for the utilization of earth observational data in an integrated manner

*-Development of de jure standardization of the common infrastructure for the global earth observation system of systems-*

K.IWAO

Development of a pressure sensor using a piezoelectric material thin film

*-Application to a combustion pressure sensor for mass-produced cars-*

M.AKIYAMA, T.TABARU and K.KISHI

Novel functional gels and their commercial distribution as chemical reagents

*-New development of functional soft-materials-*

M.YOSHIDA

Evaluating the effects of actions taken to attract visitors to sightseeing areas

*-An Open Service Field behavior survey technology-*

Y.YAMAMOTO

Development of basic tools for glycoscience and their application to cancer diagnosis

*-A 10-year strategy of the Research Center for Medical Glycoscience of AIST-*

H.NARIMATSU

### Round-table talks

Value creation and synthesis

### Editorial policy

### Instructions for authors