

Synthesiology

シームレスな20万分の1日本地質図の作成とウェブ配信

熱電発電を利用した小型コジェネシステムの開発

だれでも構築運営できるコラボレーションシステムの実現

サービス工学序説

タンパク質のネットワーク解析から創薬へ

エアロゾルデポジション法

シンセシオロジー編集委員会

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

Synthesiology 第1巻 第2号 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

i

研究論文

- シームレスな 20 万分の 1 日本地質図の作成とウェブ配信 — 地質図情報の利便性向上と有用性拡大を目指して — 82 (1)
・・・脇田 浩二、井川 敏恵、宝田 晋治、伏島 祐一郎
- 熱電発電を利用した小型コジェネシステムの開発 — 新たな酸化物材料が拓く高温廃熱回収システム — 94 (13)
・・・舟橋 良次、浦田 さおり
- だれでも構築運営できるコラボレーションシステムの実現 — *qwikWeb* を用いたコミュニケーション・パターン
の実践 — 101 (20)
・・・江渡 浩一郎、濱崎 雅弘、西村 拓一
- サービス工学序説 — サービスを理論的に扱うための枠組み — ・・・吉川 弘之 111 (30)
- タンパク質のネットワーク解析から創薬へ — 超高感度質量分析システムをどのように実現したか — 123 (42)
・・・家村 俊一郎、夏目 徹
- エアロゾルデポジション法 — 高機能部品の低コスト、省エネ製造への取り組み — 130 (49)
・・・明渡 純、中野 禪、朴 載赫、馬場 創、芦田 極

インタビュー

- シンセシオロジーへの期待 ・・・リチャード レスター、小林 直人 139 (58)
- トヨタ自動車グループにおける基礎研究から製品化への流れについて ・・・梅山 光広、赤松 幹之 144 (63)

座談会

- 新しい形式の論文を査読して 149 (68)

編集委員会より

- 編集方針 157 (76)
- 投稿規定 159 (78)

English pages

- Messages from the editorial board 160 (79)

Abstracts of research papers

- Creation of seamless geological map of Japan at the scale of 1:200000 and its distribution on the web — *For maximum accessibility and utilization of geological information* — 162 (81)
K. Wakita, T. Igawa, S. Takarada and Y. Fusejima
- Development of small-sized cogeneration system using thermoelectric power generation — *Recovery system of high-temperature waste by new thermoelectric oxides* — 162 (81)
--- R. Funahashi and S. Urata
- Realization of collaboration system for everyone to develop and manage — *Practices of communication pattern using qwikWeb* — 162 (81)
--- K. Eto, M. Hamasaki and T. Nishimura
- Introduction to theory of service engineering — *Framework for theoretical study of service engineering* — 162 (81)
--- H. Yoshikawa
- From systematic analysis of protein interaction networks to drug discovery — *Development of ultra sensitive mass spectrometry analytical platform* — 163 (82)
--- S. Iemura and T. Natsume
- Aerosol deposition method — *For production of high performance micro device with low cost and low energy consumption* — 163 (82)
--- J. Akedo, S. Nakano, J. Park, S. Baba and K. Ashida

- Editorial policy 164 (83)

- Instructions for authors 167 (86)

シームレスな 20 万分の 1 日本地質図の作成とウェブ配信

—— 地質図情報の利便性向上と有用性拡大を目指して ——

脇田 浩二*、井川 敏恵**、宝田 晋治**、伏島 祐一郎**

地域ごとに異なる時代に作成された地質図を、統一した最新の凡例のもとに再構成し、同時に区画の境界を連続化して日本全体をカバーするシームレスなデジタル地質図を作成した。その研究過程を中心に、地質学の基礎研究から社会への情報発信技術に至る研究シナリオを構想した。また第 1 種基礎研究の成果としての地質図を、誰でも容易に利用できる情報に加工し、インターネットを通じて相互運用性の高い情報として国内外に発信するまでの第 2 種基礎研究としての研究方法を創出し、地質図研究における本格研究への道筋を提案した。

1 はじめに

地質学には、地表・地下における自然現象を解明する基礎科学としての側面と、地下資源探査など社会要請に密接に結びついて発展してきた応用科学としての側面がある。地質学の黎明期に作成された世界最初の地質図は、地下の不思議や謎を解き明かし、私たちの目の前に示してくれると同時に、石油・石炭・鉄・ダイヤモンドといった宝の山を人類にもたらす貴重な知見と情報を与えてくれた^[1]。現在においても、地質学は地球のシステムを理解する知識の体系を構築する学問として発展し続けるとともに、国際地球惑星年 2008 の標語「社会のための地質科学」にあるように、資源・環境・防災など多方面において、役立つ実学としての役割を担っている。

日本では、産総研地質情報総合センターの前身である地質調査所が設立された明治 15 年 (1882 年) 以来、様々な縮尺の地質図が作成され、明治初期から戦中・戦後にかけて産業振興を支える鉱物資源探査の基礎情報として重要な役割を果たし、近年では産業立地、防災や環境対策の基礎情報として利用されてきた。中でも 20 万分の 1 縮尺の地質図は、全国を網羅する最も詳細な地質図として、作成・利用されてきた。

このように地質図は国土の基本的地盤情報として整備されているが、同時に野外地質学の第一級の研究成果でもある。野外調査に基づき最先端の研究を実施し、日本列島の地殻の発達過程に関する地質学の最新成果を盛り込んで作成される地質図は、知識の体系の構築に寄与する第 1 種基礎研究の研究成果である^{[2] [3]}。

このように地質図は野外調査を通じて行われる第 1 種基礎研究の成果として作成され、その時代に最新とされる地質モデルに基づいて作成される。地質図作成の基となる地質モデルは研究の進展とともに変化し、改変・更新されていく性格のもので、異なる地質モデルで作成された地質図ではそれぞれ異なる地質区分や表現がなされている。従って隣接する地質図であっても、作成年次が異なる場合、地質区分や地層の分布が異なるという事態がしばしば生じる。

このような状況の中で、様々な年代で実施された第 1 種基礎研究の成果としての地質図を最新の地質モデルで集約し、周辺地域における地質調査で得られた新たな地質情報に基づいて再解釈することによって、地質図を最新の知識で置き換える必要が生じた。さらにこれを全国規模に展開することによって、より社会に役立つ情報として生まれ変わらせることができる。作成当時最新の地質モデルで作成された第 1 種基礎研究の成果としての地質図が、時を経て、古い地質モデルで描かれた使いにくいデータとなる状況を「死の谷」に擬えるならば、その「死の谷」を乗り越えて、社会に役立つ地質情報を創出する「第 2 種基礎研究」として本報告で紹介するのがシームレス地質図の研究である。

シームレス地質図の研究は単に利便性の高い地質情報を整備するだけではない。それは地質図を社会で広く活用してもらうためのインターネット配信技術の研究や、異なる種類の空間情報と相互に利用しあうための標準化の研究でもある。そして、情報整備・配信・利用を国内外のネットワークの中で実現するといった本格研究としての発展を目指している。さらにシームレス地質図を基盤として、世界標準

に基づいたデータ整備を行い、最新のウェブ配信技術の適用を推進している。これらを通じてより詳しくより正確な地質情報を迅速かつ広汎に流通させ、さらに他の情報・システムと相互運用することによって、インフラ整備や災害防止など、社会の安心・安全に寄与することができると期待される。

本報告では、地質図情報を基礎とした国土の知的基盤整備を積極的に推進するために第 2 種基礎研究として構想したシームレス地質図に関する研究シナリオと、社会に役立つわかりやすい地質情報の提供という研究目標達成のために創出した知識選択の方法を示す。ここで第 1 種基礎研究の例として示している地質図の研究は、古生物学・構造地質学・層序学・岩石学など様々な分野の知識を統合して地域社会に役立つ地質情報を創出している点で、第 2 種基礎研究という側面も併せ持っている。しかし、近年作成されている地質図では専門分野ごとにより高度な研究内容を盛り込んだ基礎研究報告書としての性格が過去に比べてより強くなっているという事実に基づいて、地質図研究の第 1 種基礎研究としての側面を特に強調して記述している。このような対比に基づいて、日本の国土の地質に関する様々な領域の知識に加えて、インターネット配信技術などより広範な知識の統合を通じて、社会生活における価値創出のための一般性のある方法論を導き出す「第 2 種基礎研究」としてのシームレス地質図の研究の特徴を以下に論述する。

2 シームレス地質図研究の背景と目標

2.1 新しい地質モデルによる古い地質図の更新

地質図は、河川沿いや山野にわずかに露出した地層や岩石の種類や構造の観察データに基づいて地質モデルを構築して、地層や岩石が草木や土壌に隠されて露出していな

い大部分の地域を推定して描かれる。まず重要なのは、露頭と呼ばれる地層や岩石が分布している場所での観察である。この観察の際においても、観察者が有する知識や地質モデルが重要な役割を果たす。ただ漫然と眺めるのではなく、現在世界で進行している地質学の最新の知識とモデルに基づいて、わずかな露頭の情報から地下全体にわたって、正確さを失わない範囲内で最大限に地質情報を抽出する。山野に点々と分布するわずかな点の情報から広大な地下の様子を描き出す地質図描画技術は、データとモデルが不可分な、いわばアナログ可視化技術としてコンピュータ誕生のはるか以前から発展してきた。

隣接する地質図が異なる地質モデルに基づいて作成された例として、岐阜県美濃地方を見てみる。岐阜県美濃地方では、1964 年発行の「根尾」、1984 年発行の「八幡」、1991 年発行の「谷汲」、1995 年発行の「美濃」という 4 つの 5 万分の 1 地質図が隣接している^{[4]・[7]}。地質学の世界では、新たなパラダイムである「プレートテクトニクス」が 1960 年代に確立した。このパラダイム転換の前に地向斜モデル^{用語 1}で作成されたのが「根尾」で、海洋プレートの沈み込みで形成された付加体モデル^{用語 2}に基づいて作成された他の地質図とは地質区分や表現方法が大きく異なっている。また、それ以降の地質図もそれぞれプレートテクトニクスの適用において、海底地すべり説^{用語 3}の「八幡」、泥ダイアピル説^{用語 4}の「谷汲」、構造変形説^{用語 5}の「美濃」のように異なる地質モデルを採用し、それに従って描かれているため、地質区分や表現方法が地質図ごとに若干異なっている(図 1)。

このように岐阜県美濃地方の地質図はそれぞれ時代によって異なる地質モデルが採用され、それに従って描かれてきた。地質図を利用するためには、それぞれの時代背景や研究成果の変遷などを理解する必要があるが、利用者

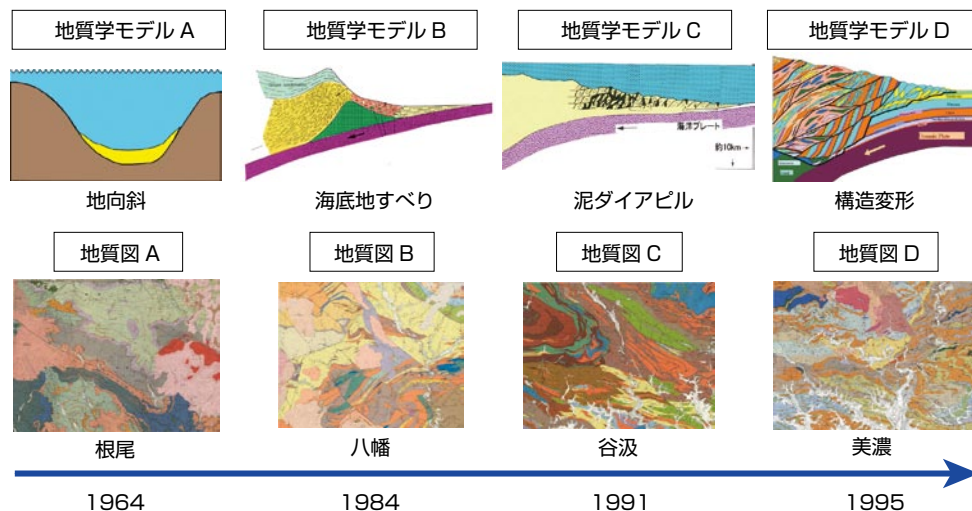


図1 美濃地域の地層の形成過程仮説

の多くは現在の地質学の知識はあっても、過去の研究経緯までは理解していないのが通常であるので、異なる説明や表現に戸惑い、利用に支障が生じる。この支障を解消するために、我々は最新の研究による地質モデルに基づいて「地質図のシームレス化の手法」を開発し、地質図を再構成した。ただし、我々が最初に着手したのは図 1 に例示した 5 万分の 1 地質図ではなく、全国規模ですでに相当程度整備されている 20 万分の 1 地質図である。

2.2 シームレス地質図の研究目標とシナリオ

地質図は社会で利用されてはじめて価値あるものとなる。本研究では、各地域ごとに個別に行われる地質研究の成果である地質図を全国的に統合した上で効果的に社会に発信して利活用を促進し、社会の安心安全に貢献するという研究目標を設定した。

この研究目標を実現するために、次の研究シナリオに従って研究を実施した (図 2)。

- ・区画ごとに異なる地質モデルで作成されている地質図を改訂し、最新の地質モデルに基づいた全国一律の基準 (統一凡例) で再構成し、境界のない分かりやすい地質図を作成する。
- ・作成された地質図を紙や CD-ROM 媒体ではなく、インターネットで配信し、広範な利用を目指す。
- ・地質情報の表現方法を標準化し、地質以外の国内外の様々な地盤情報との相互運用を図れるようにする。

3 シームレス地質図の作成過程

3.1 概要

地質図のシームレス化とは、過去の地質モデルを適用した古い地質図の、新しい地質モデルによる見直しである。

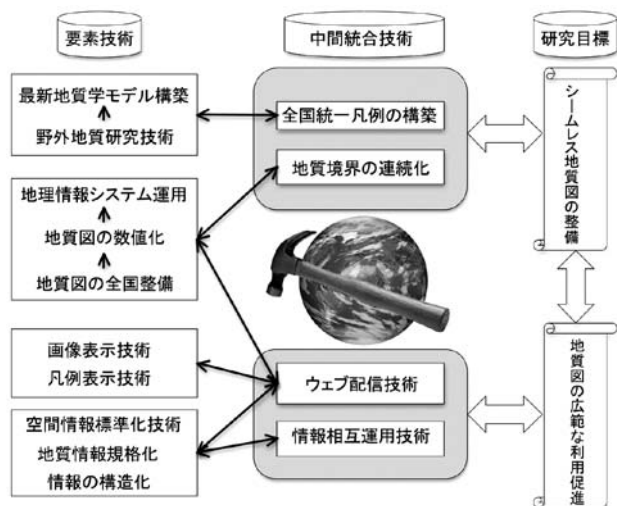


図2 日本シームレス地質図作成のための要素技術とシナリオ

この見直しは凡例の統一と地層境界や断層の調整などの手続きによって進められる (図 3)。今回の地質図のシームレス化の作業に当たっては、社会への迅速な情報提供を優先し、改めて現地の再調査は実施しないこととした。

全国規模でシームレス化を行うことが可能な地質図のうちで最も精度が高いのは 20 万分の 1 地質図で、日本国内の約 90 % (112 枚: 2006 年度末) が完成している。これらの地質図をベースに再構成して作成された「20 万分の 1 日本シームレス地質図」は、現在最も頻繁に利用されているシームレス地質図の代表例である^[8]。

このシームレス地質図は、2002 年度にプロジェクトが始動し、次のように地域ごとに順次作成し公開してきた。2003 年度は北海道地域・東北地域を、2004 年度は関東地域を作成し東日本地域が完成した。さらに同年度、北陸地域及び東海・近畿地域も相次いで作成した。2005 年度は中国・四国地域、九州地域及び南西諸島地域を作成し、西日本地域が完成した。それに加え、関東地域南部 (伊豆小笠原北部)、関東地域南部 (伊豆小笠原南部)、北海道地域東部 (道東・北方四島) を完成させ、北海道地域を改訂したことで全国版の初版が完成した。このようにして作成されたシームレス地質図は全国統一凡例を用いて描かれた地質図で、2007 年 5 月 12 日版において、面データ数 149,081、線データ数 371,528 の膨大な情報をもつデジタル地質図となった^[9]。

3.2 統一凡例の作成

地質図をシームレス化する第一歩は、統一凡例の作成である。地質図は凡例に従って地表面を隙間なく塗り分けて描かれている。凡例にはその地質図に表現するすべての地質体や記号などの説明が記述されている。このため、隣接する地質図に共通的に使える統一凡例を最新の地質モデルに基づいて作成することが重要である。ただし、古い地質図の情報量に限界があることから、最新版の地質図の凡例をすべての地域に適用することは不可能である。最新の地質モデルに基づきながら、古い地質図にも適用可能な、最

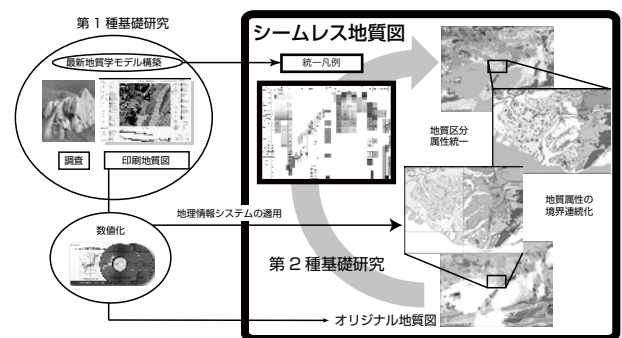


図3 シームレス地質図作成プロセス

新かつ最適な凡例を統一凡例として選択・決定した。

統一凡例は、二段階の研究過程を経て決定した。全国規模でシームレス化を行うためには、日本全域に渡って分布するすべての地層や岩石について、最新の研究モデルに基づいて、全国統一凡例を構築する必要がある。個々の地質図で採用された凡例は、その地域の地質情報を表示し、説明するためだけに作成されるため、独自の区分がなされていたり、地域に固有の名称が与えられることがある。全国統一凡例では地域固有の区分を排除し、岩石の種類と地質年代の 2 つの要素で区分することにした。そのような区分は、1992 年に作成した 100 万分の 1 日本地質図第 3 版^[10]で初めて採用された凡例システムである。統一凡例の第一段階では、この 100 万分の 1 日本地質図第 3 版の凡例を踏襲して区分することにした。この統一凡例は、シームレス地質図の作成を開始した 2004 年度においても、最も精度の高い地質モデルに基づいた全国規模の地質凡例であった。この区分を統一凡例の最初の規範(基本版)とし、この基本版統一凡例に基づいたシームレス地質図をこれまでウェブ上で公開してきた。100 万分の 1 縮尺の地質図の凡例は最新の地質モデルに基づいており、全国統一凡例の基礎として非常に優れているが、100 万分の 1 縮尺の地質図と 20 万分の 1 縮尺の地質図は情報量と精度が異なるため、この凡例では 20 万分の 1 縮尺に盛り込まれた地質情報を十分詳細に表示できない。そこでこの問題を解決するために、さらに地質区分を細分化した詳細版統一凡例を作成することとした(図 4)。

詳細版の統一凡例は、基本版凡例をベースに、20 万分の 1 縮尺で全国規模に区分できる岩石・地層区分を堆積岩・付加体・火山岩・深成岩・変成岩と 5 種類の研究対象別に検討した。変成岩の区分については、(1) 変成条件による区分、(2) 変成岩年代による区分、(3) 原岩岩相による区分という 3 つの区分にした^[11]。付加体については、構造ユニットごとの岩石の種類を細分、堆積岩については、層序の広域対比に基づいた地質年代の細分を中心に統一凡例を再検討した。火山岩や深成岩では地質年代以外に化学組成による区分をより詳細に実施し、詳細な統一凡例を作成した。また、人口密集地である平野地域では、完新世の堆積物の区分を成因に基づいて砂丘堆積物、湿地堆積物、扇状地堆積物、自然堤防堆積物、湖成堆積物、人工改変地堆積物として細分化した。

このような専門分野ごとの検討結果は、20 万分の 1 縮尺の地質図としては最新の地質モデルにもとづく理想的なものではあるが、様々な年代に作成された 20 万分の 1 地質図のすべてに適用できるわけではない。すべての 20 万分の 1 地質図の凡例をリスト化し、これらの理想的な凡例を

対応させて調整した結果、現状の地質図に適用できる詳細版の凡例として 384 の地質区分を採用するのが最適であるとの結論を得た。この結果、100 万分の 1 縮尺の地質図の凡例をベースにした第一段階の基本版統一凡例の凡例数 194 に比較して凡例数は倍増した。このような凡例の詳細化によってシームレス地質図は、より詳しい地質図として生まれ変わった。四国地方の例を図 5 に示す。

3.3 統一凡例の適用とデータ置換

次に統一凡例をそれぞれの地質図に適用し、凡例の置換と数値化されたデジタル地質図の属性データの再構築を行った。その際に我々は地理情報システム (GIS)^{用語 6}を援用することにした。紙に多色刷で印刷されている地質図を数値化し、塗り分けられたそれぞれの区画に本来の凡例を付与し、統一凡例との対応表に基づいて置換を行った。数値化した地質図データにベクタ形式^{用語 7}を採用することにより、個々の区画のデータを個別に演算するとともに、機械的な一括置換が可能となり、地質境界位置の精度・確度を維持しながら、データ編集の迅速化・コスト削減を実現することができた。

オリジナルの地質図は作成年代によって異なる様々な地質モデルに基づいて作成されており、最新の地質モデルに基づいた統一凡例との対応をつけることは容易ではない。また地質図は火山岩や堆積岩など岩石や地層の種類ごとに専門家が担当して作成しているほか、九州北部、東北南部など、研究者ごとに地域が限定されている。このため、統一凡例をデジタル地質図に当てはめる際には、九州北部の火山岩ならば A 研究者、東北南部の堆積岩ならば B 研究者と、その地域や専門で最も詳しい研究者が担当した。それぞれの専門家は、古い地質モデルで作成された地質図の凡例が最新の統一凡例のうちどれに該当するかについて、近隣の比較的新しい地質図やより広域の地質図から地層対比を検討したり、化石や年代測定などの最新情報から形成年代を判断することによって、対応関係を決定した。この場合、それぞれの岩石の種類ごとに広域の対比表や柱状図を作成することができる場合には、それらを使ってより精度の高い対比を行った。比較的新しい 20 万分の 1 地質図では基本凡例版に対応する地質年代が示されている場合があり、その場合はそれらを使って対比がより容易になった。

3.4 地質境界線の連続化と地質図編集

統一凡例への置換の次に行う手続きは地質境界や断層線の位置変更と連続化である。これによって研究精度や解釈の差異を調整する。すなわち隣接する地質図のうち、より新しい地質図を基準に新しい地質図に合致するように古いデータを改変し、最新の地質情報や地形情報などを考慮

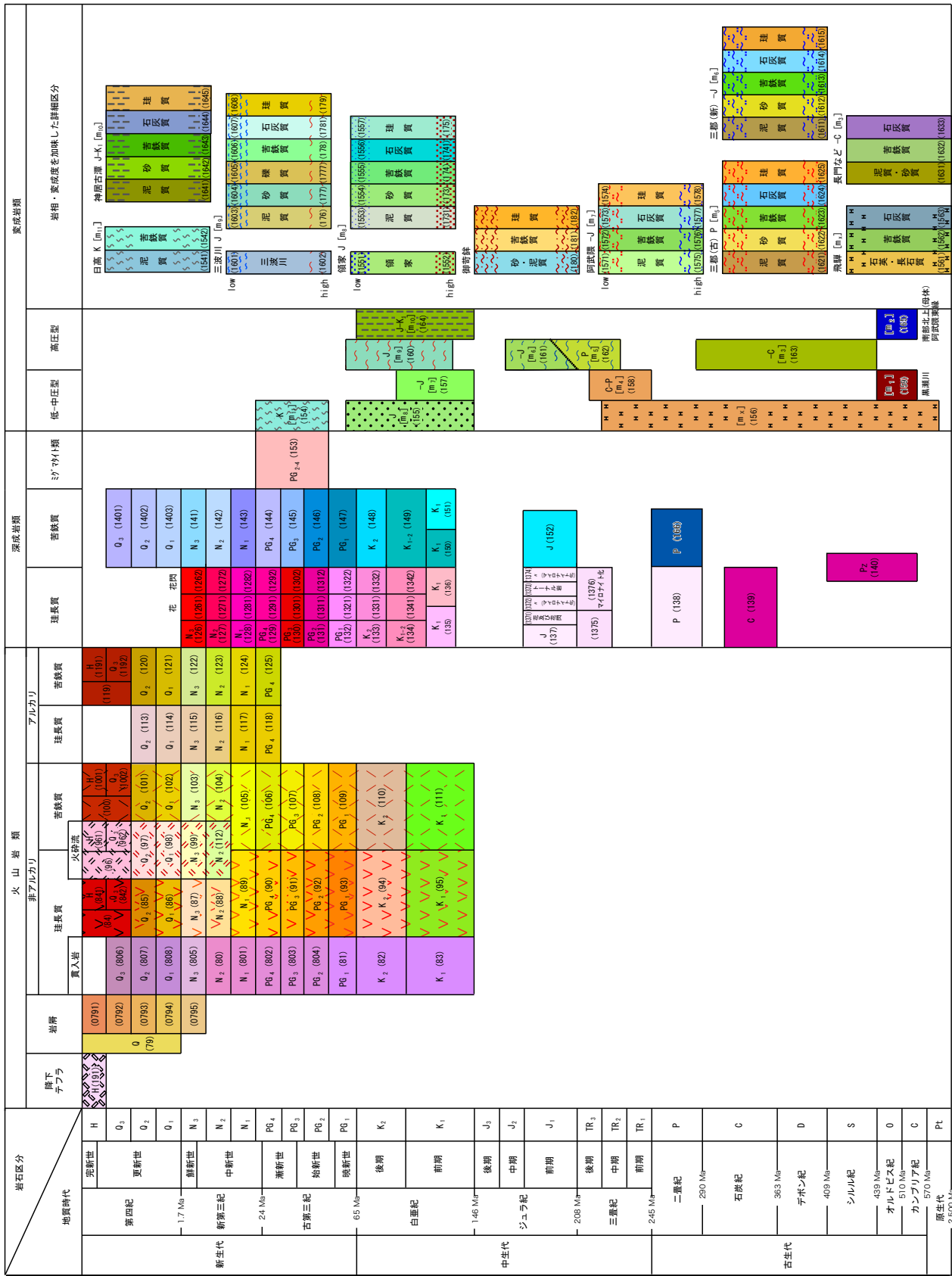


図4 20万分の1日本シームレス地質図の詳細版統一凡例 (b)

しながら地質境界を調整した (図 6)。また、最新の地質モデルに基づき、地質区分と地質境界について再検討することも必要とした。

隣接した区画の地質図から連続した地質図を作成する手法は、地質図編集として一般的に行われている。地質図編集では、20 万分の 1 地質図を作成する場合に 5 万分の 1 縮尺の地質図を使うなど、より大縮尺の地質図に基づいて広域の地質図を作成する場合が通常であり、本研究のように 20 万分の 1 縮尺の地質図を用いて、同じ縮尺の連続的な地質図を作成することはこれまで行われたことがない。大縮尺地質図から小縮尺地質図を編集する場合は、コピー機で縮小したり、目測で地質境界を定めたりして描いていく。これは位置精度が低くなるのが前提となっているから可能な手法である。

20 万分の 1 縮尺の複数のオリジナルな地質図を元に、同縮尺の連続した地質図を作成する場合、位置精度は同等に維持されなければならない。そのために、数値化されたデジタル地質図に地理情報システムを積極的に援用した。統一凡例に属性を置き換えられたデジタル地質図は、隣接する区画において同一の地質区分は同一の属性を有している。しかし、隣接する区画では位置精度が作成年度によって異なるため、単一の地質体の位置がずれて表現されている、あるいは地質区分の解釈が異なる場合がある。このような場合以下の手法で、地質分布の連続化を行った。

地質図は調査した範囲で得られた情報に基づいて個別に作成される。ある地質図が作成され、それに隣接した地質図が後年作成された場合、地質情報が飛躍的に増えているため、最初の地質図よりも後から作成された地質図の方が地層や岩石の分布に関してより正確である場合が多い。従って、隣接した区画で地層や岩石の分布の境界線が連続せず、その位置がずれている場合、より新しい地質図の境界線に一致させるように連続化を行った。さらに、5 万分の 1 縮尺の地質図や学術論文などに示されている地質年代や地質区分、そして地質分布などの新しい情報を考慮

して、地質境界線のより適切な連続化を行った。

また古い地質図はしばしば古い地形基図の上に描かれているため、地理情報システムを用いて新しい地形図の上に重ね合わせると、段丘や扇状地の位置が地形と微妙にずれる場合がある。このような場合には、新しい地形基図に基づいて修正を行った。海岸線にはもっと深刻な場合がある。古い海岸線に沿って描かれた地質図は新しい海岸線に合わせて次のように描き直した。島の海岸線の場合は、基準点を多数設けてアフィン変換^{用語8}によって位置調整を行った。その他は、最新の海岸線に合わせて地質境界の延長や縮小などの位置調整を地理情報システムを用いて実施した。

地層や岩石の分布境界ばかりではなく、隣接した地質区画における断層が実在か伏在かなど断層の性質の最新の情報に基づいた変更や再解釈を行った。地層や岩石の境界について断層であるか否かについての判断も、それぞれの地域を担当する専門家の意見や最新の文献などを考慮して行った。

4 紙からデジタルへ、CD-ROMからインターネットへ

4.1 デジタル地質図の意義

地質図は一般に紙面に描かれ、印刷図として出版されてきた。1990 年代から地理情報システムの普及により、数値化されたデジタル地質図への要望が社会で高まり、1993 年から「電子媒体による出版の手続き」について組織的な検討を行い、1995 年にはデジタル地質図が CD-ROM でも出版されるようになった。しかし、シームレス地質図は今のところ紙での印刷も CD-ROM による出版も行っておらず、シームレス地質図の配信は主にインターネット上で行ってきた。その主な理由は、①データアクセスが容易で、多く利用が望める、②データの更新を頻繁に行うことができる、③印刷物や CD-ROM 出版と異なり出版経費をかけず無料ないし安価に情報提供ができるなどである。

実際、2002 年に公開を開始した日本シームレス地質図はインターネットでのアクセスが 2006 年度において年間約 60 万件に達している。一方紙で印刷されている 20 万分の

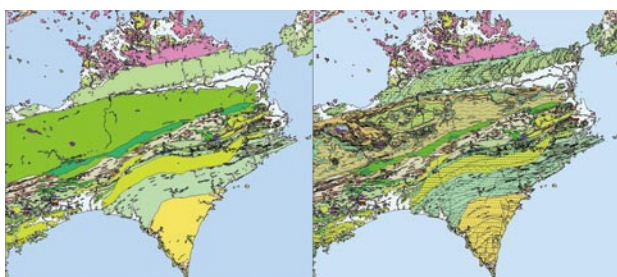


図5 異なる統一凡例を用いた場合の地質図の違い。基本版 (左) と詳細版 (右)。四国地方の例。

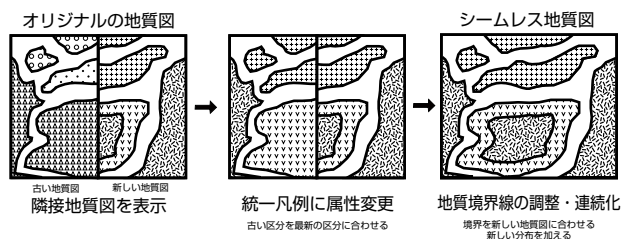


図6 凡例統一の適用と地質境界の調整

1 地質図幅の販売は、年間に約 900 枚程度に留まっている。繰り返し利用する印刷図の販売と直接の比較はできないが、3 桁の違いは非常に大きいと考えられる。実際、利用層も研究者以外にコンサルタント会社から不動産業界まで幅広い利用が認められる (図 7)。

4.2 ウェブ配信

シームレス地質図は、2003 年に産業技術総合研究所の研究情報公開データベースとして、<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/db084/index.html> において公開を開始した。オリジナルのデータは地理情報システムを利用してベクタ形式のデータとして構築されたが、初期のウェブ配信は画像形式に変換したデータによって実施した (図 8)。その第一の理由は、従来の地質図は紙の印刷物として作成されており、一般社会での利用は見る・調べるための画像による閲覧が主体であったことにある。またベクタ形式のデータを軽快に閲覧するための十分なインフラが整備されていなかったことも理由の 1 つである。

現在ウェブ配信している日本シームレス地質図の画像データは日本全国を 20 万分の 1 縮尺でカバーしている。この画像を本来の縮尺で印刷すると、高さ 3 m 幅 7 m 程度の大きさとなる。コンピューターの画面上では必要な部分の高精度の画像を拡大表示させる必要があるが、拡大しても閲覧に耐える精度 (400 dpi) で画像データを作成すると、ファイルのサイズが 4 GB くらいの大さになってしまう。これを一度にユーザーのコンピューターに配信するのでは重すぎるので、必要な場所に必要なデータのみを瞬時に配信する仕組みが必要である。この仕組みを実現する複数のソフトウェアが既に市販されていたが、コスト削減や表示機能の最適化を図るため独自のプログラム J-GeoView を開発した。ユーザーは地質図を自由に拡大縮小でき、さらにカーソルを置くと地質の説明が表示される。専門的な説明とともに、専門用語を用いない一般用の説明も併記しており、誰でも表示された地質図が理解できるように工夫した。

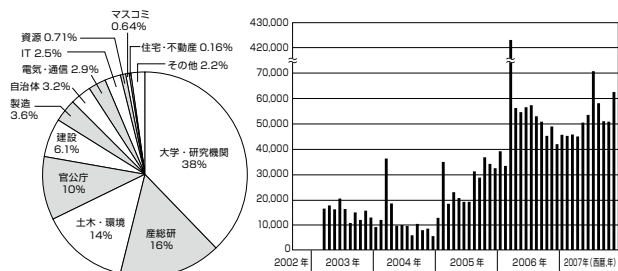


図7 日本シームレス地質図の主な利用者の区分 (左: 2007年11月分*) とアクセス件数の推移 (右: 2002年9月~2007年11月)
* 所属不明は除く

5 シームレス地質図の発展と将来の課題

5.1 地質情報の高精度化と情報の集積技術への発展

シームレス地質図の作成は、地質調査を実施せずに行ってきた。しかし、より精度の高い地質図を全国的に整備するためには、実際に現地調査を行い、新しい地質図を整備しながら、日本全域のシームレス地質図の岩石や断層などの分布の精度や確度を高めていく必要がある。そのためには、20 万分の 1 や 5 万分の 1 地質図を作成している研究グループとの協力・連携が欠かせない。産総研の第 2 期 (2005 - 2009 年度) では、20 万分の 1 地質図の全国整備後に出版済みの地質図を古いものから順次改訂していく、第 3 期以降に (2010 年度から) 新しい地質図を作成することにしている。これらの地質図作成計画と連動して、シームレス地質図のコンテンツは、より精度の高いものへと更新されていくことになる。

シームレス地質図のベクタ形式のデータは、2006 年度に整備されたウェブ配信サービス GeoMapDB によって配信されている。 (<http://igggis1.muse.aist.go.jp/ja/top.htm>)。ベクタ形式の特徴は、オブジェクト指向の概念のもとに地表面を構成する個々の要素を切り分けて、対応するデータを個別に管理する点にある。これにより、拡大・縮小や色・境界線の太さなどの見かけの変更や修正を自由に機械的に行えるようになる。また個々の地質体・断層などに地質年代・層厚・岩相など様々な属性のデータを付与することが可能になる。我々の開発した地質図シームレス化の手法は、まさにこの特徴を生かしたものである。今後シームレス地質図のデータを厳密に規格化し、データ間の構造をも規格化するデータモデルを構築することによって、空間リレーショナルデータベースとしての運用も可能となり、柔軟な検索や分析・描画・シミュレーション・自動制御など、多様な展開を導いていく [12]。



図8 20万分の1日本シームレス地質図データベースの初期画面

これらの特徴を組み合わせることによって、シームレス地質図の一組のデータセットから、初期の平面図としての地質図のみならず、地質断面図・3次元地質図などの多様な描画や、地質学的年表である地質編年表などの作成が将来的には可能になっていく。これらの実現を目指して、我々は様々な地質学データの規格化・標準化・データモデルの構築とデータ整備を開始している。

5.2 日本の共通基盤情報としてのシームレス地質図

シームレス地質図の目標は、単にシームレス化による利便性の向上やインターネット配信による広域配信だけではない。地質図を国民全体の共通財産として利用してもらえるように整備し、インターネットを通じて自在に利用できる“みんなのコンテンツ”として発展させていくことを目指している。

その一例として、国土交通省の土木地質図や表層地質図と産総研のシームレス地質図のデータ相互利用は、経費削減の経済効果をもたらすとともに、最新の地質図情報の相互交換などに寄与できる(図9)。実際日本シームレス地質図の作成には、四国地方など土木地質図^[13]を利用して地質図編集を行った。逆に日本シームレス地質図のベクタ形式のデータを利用して、東北地方では土木地質図が作成された^[14]。また、地質図とは異なる空間情報との相互利用もシームレス地質図が目指す重要な機能である。現在名古屋大学や東北大学等と環境分野の共同研究を推進している。産総研の内部でも日本シームレス地質図は活断層研究や土壤汚染研究等において基盤地質情報として用いられている。

20 万分の 1 日本シームレス地質図の作成を契機に、「情報相互運用性の高い統合地球科学図データベース構築のための基盤研究」という研究課題のもとに、20 万分の 1 縮尺で他の地質情報も全国整備する計画が開始された。

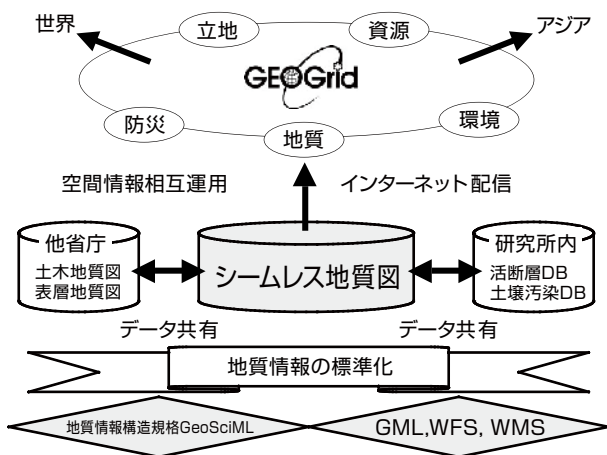


図9 シームレス地質図の将来の発展モデル

この研究では、日本シームレス地質図とともに地球物理図(重力図・空中磁気図)及び地球化学図^{用語9}を20万分の1縮尺で整備し、これらをセットで、日本の20万分の1縮尺での全国規模の地球科学シームレスアトラスとして整備しつつある。これは地質調査情報センターの様々な地質情報の基盤として位置づけられ、また日本の地質情報基盤として、他分野の情報との相互運用を容易にすることが期待される(図9)。

5.3 地質情報の国際標準化と相互運用

地質図情報をインターネット上でやりとりし、相互に利用するためには、ソフトウェアやファイルフォーマットの違いによらず利用できる仕組みが必要である^[15]。また、使われている用語や言語の意味が、誰でも、更にはどのシステムでも自動的に同じ意味として理解できるようにする必要がある。空間情報の国際標準化団体 Open Geospatial Consortium (OGC) は、空間情報全般に関する規格 GML^{用語10}と、その運用仕様 WFS や WMS^{用語11}などを国際標準として提案している^[16]。シームレス地質図も、これらの国際標準に準拠することによって、様々な分野の様々な形式の空間情報との相互利用を目指している(図9)。

地質図を初めとする多様な地質情報の相互運用実現を目指して、現在、国際地質学連合 (IUGS) の地質情報管理応用委員会 (CGI) に著者らが参加し検討しているのが地質情報国際規格 GeoSciML^[17]である。この規格は上記の GML 同様、データモデルを XML によって記述した XML ボキャブラリーの1つで、空間情報に関しては GML に準拠している^[18]。地質図を初めとした様々な地質関係電子文書を細かく切り分けて、それらに GeoSciML の多様なタグでメタデータを埋め込むことによって、組み合わせ可能な部品としてのデータ相互運用を実現する(図10)。GeoSciML をはじめ様々な XML ボキャブラリーの適用の為にはそれ

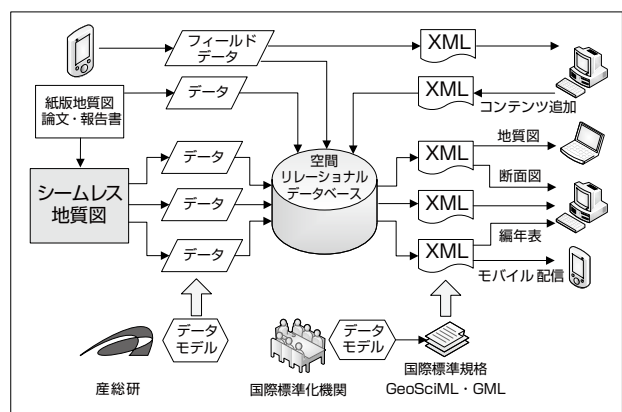


図10 地質情報の標準化とそれによって可能になる相互運用のフロー

らのデータモデルに従ったデータの整備が必要で、20 万分の 1 日本シームレス地質図にも GeoSciML を適用し、空間リレーショナルデータベースとしての再構築を目指している (図 10)。

シームレス地質図を初めとした地質情報の利用に関して、セキュリティが確保された利用の枠組みも今後必要となってくる。それを実現するのが産業技術総合研究所の融合課題である GEO Grid^{用語12}である (図 9)。GEO Grid では、現在日本国内ばかりではなく、アジア各国と協力して、国際間のデータ共有の検討を開始した。シームレス地質図はその重要なコンテンツの 1 つとなり、アジア各国の同様な地質図や関連情報は相互利用が可能になる (図 9)。資源や環境の問題は国境に依存しないので、日本周辺各国の地質情報は日本の安定した経済活動や安心安全な生活確保にとって重要である。アジア各国で頻発する地震や火山などの災害対応など、地質情報の GEO Grid 上での運用は社会の安心安全に貢献する重要な技術の 1 つとして期待されている。

6 まとめ

基礎研究としての成果である地質図から最新の地質モデルに基づいた全国均一地質情報コンテンツとしての「シームレス地質図」への情報革新と、その情報をウェブコンテンツとして相互運用するための技術について述べた。

シームレス地質図は第 1 種基礎研究の成果を一般社会への利用を進めた第 2 種基礎研究の成果とみなすことができる。日本全国を統一したシームレス地質図を 20 万分の 1 縮尺で整備し、インターネット上に配信した結果、年間約 60 万件のアクセス (2006 年度実績) があり、社会で広範に利用された。しかし、一般社会への本格的な普及のためには、20 万分の 1 より大縮尺のより精度の高い地質情報整備が必要となってくる。そのため、土木・建設の分野で必要とされる 5 万分の 1 シームレス地質図や、個人住宅や工場の立地の判断に必要な 2.5 万分の 1 シームレス地質図の作成を開始した。これらの精度の高いコンテンツを、携帯電話・カーナビといった一般ユーザーに利用しやすいツールに対応したきめ細やかな情報サービスへの対応も視野に入れて検討している。地質情報の本格研究の一環として、シームレス地質図の作成とその相互運用技術の研究を通じて、更に国民の安心安全のための情報と技術の整備を推進するつもりである。

謝辞

本研究を推進するに当たり、地質情報研究部門陸域地質図研究担当者の各位、地質調査情報センターの宮崎純

一氏及び Joel C. Bandibas 氏には、多くのご協力をいただいた。記して、関係各位に謝意を表したい。

用語説明

用語1: 地向斜モデル: 仮想的な巨大堆積盆地が造山運動によって山地を形成する元になったと考えた地質モデル。1800 年代後半から 1960 年代まで地質学の分野で支配的だった。

用語2: 付加体モデル: 付加体とは海洋プレートの沈み込みに伴って、陸からもたらされる堆積物と海洋底の岩石や堆積物が混合し、陸側に付け加わり形成される地質体のこと。日本の基盤を構成する岩石の基本はこれで成り立っているとする地質モデル。

用語3: 海底地すべり説: 1980 年代では、様々な種類の岩石が混在する地質体を形成する過程として海底での地すべりが有力視されていた。

用語4: 泥ダイアピル説: 中米バルバドス島周辺の海底などを説明するための仮説で、付加体中の泥が高間隙水圧によって上昇し、周囲の様々な岩石を混在させたとする。

用語5: 構造変形説: 海洋プレートが島弧や大陸縁辺で沈み込み付加体を形成する際に、陸側と海洋プレートの間で剪断変形が起こり、海洋底の岩石や地層、陸からもたらされた堆積物などが構造的に変形しながら混合するという説。

用語6: 地理情報システム: Geographical Information System (GIS)。本来は、地図に代表される空間情報を処理するためのコンピュータシステムであるが、空間情報処理のためのソフトウェアを指すことが多い。

用語7: ベクタ形式: 空間情報をコンピューター内で表現するオブジェクト指向のデータ形式。ポリゴン・ライン・ポイントなどから構成され、それぞれが位置や属性の情報を有する。

用語8: アフィン変換: ユークリッド幾何学的な線型変換と平行移動の組み合わせによる図形や形状の移動を行う変換形式。変換によって任意の直線間の平衡性が失われない性質がある。

用語9: 地球化学図: 日本全土において 10 km メッシュで採取した約 3000 試料に基づいて、試料採取地点に関する流域解析を行ない、53 元素の分布を示した図。

用語10: GML: XML でベクタ形式空間情報を記述する国際標準規格 (Geography Markup Language)。Open Geospatial Consortium (OGC) が提案している。

用語11: WFS 及び WMS: とともに OGC が提案したハードウェアやソフトウェアに依存しない空間情報運用仕様で、ベクタ形式には Web Feature Service (WFS) を、ラスタ形式には Web Map Service (WMS) を用いる。

用語12: GEO Grid: 地球観測グリッド (Global Earth Observation Grid) の意味で、グリッド技術を用いて、地球観測データや各種の観測・空間情報を融合し、ユーザーの利便性を高めることを目指したシステム。

キーワード

地質図、シームレス、ウェブ配信、標準化、GeoSciML、GEO Grid

参考文献

- [1] サイモン・ウィンチェスター (野中邦子訳) : *世界を変えた地図 ウィリアム・スミスと地質学の誕生*, 早川書房 (2004).
- [2] 小玉喜三郎, 磯部一洋, 湯浅真人: *見方・使い方 地質図*, オーム社 (2004).
- [3] 脇田浩二, 井上誠: *実務に役立つ地質図の知識*, オーム社 (2006).
- [4] 河合正虎: 5 万分の 1 地質図幅及び同説明書「根尾」, 地質調査所 (1964).
- [5] 脇田浩二: 八幡地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所 (1984).
- [6] 脇田浩二: 谷汲地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所 (1991).
- [7] 脇田浩二: 美濃地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所 (1995).
- [8] 脇田浩二, 井川敏恵, 宝田晋治: 新しいコンセプトによる 20 万分の 1 シームレス地質図, *地質ニュース*, 620, 27-41 (2006).
- [9] 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) : 20 万分の 1 日本シームレス地質図データベース 2007 年 5 月 12 日版 産業技術総合研究所研究情報公開データベース RIO-DB084, 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2007).
- [10] 地質調査所: 100 万分の 1 日本地質図第 3 版, 地質調査所 (1992).
- [11] 宮崎一博: 20 万分の 1 シームレス日本地質図の変成岩統一凡例 (試案), *地質調査研究報告*, 54, 295-302 (2003).
- [12] A.K.W.Yeung, and G.B.Hall: *Spatial Database Systems-Design, Implementation and Management*, Dordrecht Netherland: Springer (2007).
- [13] 建設技術者のための東北地方の地質編集委員会: *建設技術者のための東北地方の地質*, 東北建設協会 (2006).
- [14] 四国地方土木地質図編集委員会: 四国地方土木地質図, 国土開発技術研究センター (1998).
- [15] 脇田浩二: 地質図の数値化と標準化: 最近の国際動向, *地質ニュース*, 588, 40-54 (2003).
- [16] Z-R.Peng and C.Zhang: The roles of geography markup language (GML), scalable vector graphics (SVG), and Web feature service (WFS) specifications in the development of Internet geographic information systems (GIS), *Journal of Geographical Systems*, 6, 95-116 (2004).
- [17] S.J.D.Cox, E.Boisvert, B.Brodaric, T.R.Duffy, B.R.Johnson, J.L.Laxton, S.M.Richard and B.Simons: GeoSciML: a standards-based encoding for transfer of geoscience information from IUGS/CGI, *Proceedings, International Association for Mathematical Geology, XIth International Congress, Liege*, S05-04 (2006).
- [18] M.Sen and T.R.Duffy: GeoSciML: Development of a generic GeoScience Markup Language, *Computers & Geosciences*, 31, 1095-1103 (2005).

(受付日 2007.12.25, 改訂受理日 2008.2.22)

執筆者略歴

脇田 浩二 (わきた こうじ)

1977 年 3 月名古屋大学理学部地球科学科卒業、同年 4 月工業技術院地質調査所 (当時) 入所。現在、地質調査情報センター長。

2007 年度まで野外調査に基づく 5 万分の 1 及び 20 万分の 1 地質図幅の作成、付加体形成過程の研究、アジアのテクトニクスの研究等を担当した。世界地質図委員会アジア国際地質図編集委員・デジタル地質標準作業部会委員、国際地質学連合地質情報応用管理委員会評議員。2002 年より日本シームレス地質図データベースの研究プロジェクトをリーダーとして推進する。名古屋大学理学博士号取得 (1988 年)。本論文では主としてシームレス地質図のプロジェクトの統一凡例作成と日本全域の地質図編集及び統合を担当した。

井川 敏恵 (いがわ としえ)

2003 年産総研特別研究員として入所。2007 年より日本産業技術振興協会派遣職員。利用しやすい国土基盤情報の発信を目指し、20 万分の 1 シームレス地質図の作成に取り組んできた。他に、5 万分の 1 シームレス地質図及び 5 万分の 1 部分地質図の作成にも従事する。専門は炭酸塩堆積学。九州大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻を修了し、博士 (理学) を取得 (2002 年)。本論文では主として日本全域のシームレス地質図のデータ作成及びデータ編集を担当した。

宝田 晋治 (たからだ しんじ)

1991 年入所。火山体で発生する火砕流等の火山重力流の研究に取り組んでいる。雲仙火山、有珠火山等の火山噴火に関わってきた。また、八甲田山地域、北海道地域などの火山地域の地質図の作成を行った。2000 年以降は、20 万分の 1 日本シームレス地質図の作成に関わっており、RIO-DB 公開サイト開発を担当。最近では WebGIS を使った統合地質図データベースにも取り組んでいる。また、総合地質情報データベース構想による地質情報の統合化や GEO Grid プロジェクトの推進を行っている。北海道大学理学博士号取得 (1994 年)。本論文では主として北海道地域と火山岩類の編集、シームレス地質図のウェブ配信を担当した。

伏島 祐一郎 (ふせじま ゆういちろう)

1998 年旧科学技術振興事業団重点研究支援協力員として旧地質調査所活断層研究室に配属。活断層研究センター第二号契約職員を経て、2007 年産総研に入所。活断層の調査研究のかたわら、活断層データベースの構築を開始し、地震発生確率予測の社会的情報基盤として育て上げた。さらに対象を地球科学情報全般に広げ、その構造化と標準化によって、相互運用性を高める研究と実装を並行して進めている。本論文では主としてシームレス地質図の構造化と標準化を担当した。

査読者との議論

議論 1 第 1 種基礎研究へのフィードバック

質問 (小野 晃)

本研究は、第 1 種基礎研究としてそれぞれの地域で区画ごとに作成されたオリジナルな地質図を、日本全国をカバーするシームレスな地質図に統合するという優れた第 2 種基礎研究であると高く評価します。

部外者の想像ですが、個々のオリジナルな地質図はその時々々の規範に基づいて作成された優れたものと思いますが、一方でそれを担当した研究者個人の興味と能力に大きく依存した、ある意味非常に個性的なものにも思えます。今回の研究は、統一凡例という共通の規範のもとにそれら個別的な研究を再評価するという意味合いを持っていませんか。

今回の研究は、第 1 種基礎研究で作成されたオリジナルな地質図をベースとして、数年間にわたるシームレス化の第 2 種基礎研究として行われましたが、逆にこの第 2 種基礎研究が今後の第 1 種基礎研究 (オリジナルな地質図の作成など) に何らかの良い影響を与えたことはありませんか。このシームレス地質図の作成が新たな刺激となって、個性的で独創的な地質研究が多く出てくることを期待したいと思います。

回答 (脇田 浩二)

シームレス地質図は既存の 20 万分の 1 地質図に基づいて作成されるので、元の地質図において情報量が少なかったり、もしくは位置精度が低かったりする場合には、周辺の地質情報もそれに伴って情報量や位置精度が限定されます。第 2 種基礎研究として作成されたシームレス地質図は、どのような場所において重点的に第 1 種基礎研究を推進すべきか、どのような研究が必要かなどについて適確な指針を与えています。また、シームレス地質図では、広域の地質情報を従来よりも非常に詳しく表現しているため、異なる地層や岩石の関係などについて、基礎研究として見直すべき課題と調査研究対象の絞り込みにも役立っています。

議論2 これまでに行われたシームレス化

質問 (小野 晃)

隣接する地質区画の間で地質データを整合化すること(シームレス化すること)は、地質情報のデジタル化やインターネット配布が行われる以前のアナログの時代から行われていたのではないのでしょうか。デジタル化やインターネット利用が始まって、整合化が本格的に取り上げられるようになったと考えてよろしいですか。

回答 (脇田 浩二)

同縮尺の地質図におけるシームレス化はかつて行われていませんでした。大縮尺の地質図を小縮尺に作り直す、「編纂」が行われていたにすぎません。同縮尺の地質図におけるシームレス化は今回の研究の大きなチャレンジでした。

議論3 グーグルアースのシームレス化との比較

質問 (小野 晃)

グーグルアースがインターネットで利用されていますが、これの実現のためにはシームレス化が大きな問題の 1 つではなかったかと思われます。本研究とグーグルアースとの間で、シームレス化の方法で共通点や相違点があればご指摘ください。

回答 (伏島 祐一郎)

グーグルアース実現のために、シームレス化は大きな問題とはなりません。その最大の理由は、グーグルアースを構成する主要情報が、衛星画像や航空写真であるからです。これらは短期間に地表面を一様に写し取った情報で、時空間分布密度と精度は、地質情報に比べ圧倒的に均質です。撮影機材や雲量や日射や季節など、衛星画像や航空写真にもシームレス化(データの整合化)を行うべき要素は存在しています。しかしこれらの整合化も、地質情報とは比べものにならない程の膨大な情報量をもとにした、統計的なアプローチで順次解決に向かっていきます。目に見えない地中の限られた情報を、目に見える地表面の膨大な情報に比肩できる情報へと高められるように、地質図シームレス化のチャレンジがあります。

議論4 外国の研究動向

質問 (小野 晃)

シームレス地質図の作成は日本だけでなく、外国でも関心が高いのではないかと思います。外国の研究動向はどのようなものなのでしょうか。またそれらと比較して日本の研究レベルはどのようなものと評価されますか。

回答 (脇田 浩二)

シームレス化について欧米での判断は 2 つに分かれます。フランスは 20 万分の 1 ばかりではなく、5 万分の 1 地質図もシームレス化をしています。一方、英国はオリジナルをそのまま使うことを推奨しています。チェコなどの東欧や韓国などアジアの国々でも 20 万分の 1 に近い縮尺ではシームレス化が行われています。しかし、これらの国々と

日本の地質については決定的な違いがあります。諸外国の地質に比べて、活動的島弧からなる日本の地質は非常に複雑でユニークです。安定した大陸地殻からなる欧米諸国の地質図は比較的単純であり、岩石や地層の研究が学問的に進展しても、地質図に大きな違いはありません。従ってシームレス化は非常に容易であったり、しばしば不要であったりします。しかし、日本の場合は、非常に複雑な地質で独自の地質モデルが必要である上、植生や土壌が多く、研究の進展によって、地質図は著しく変化していきます。この状況は現在も同じです。従って、簡単にシームレス地質図ができる、もしくは最初から隣接地質図が連続的にできてしまう欧米に比べて劣っているのではなく、日本列島は特殊な地質状況に置かれているため基礎研究の進展が直接地質図の精度向上に反映され、シームレス地質図を作成しなければ、より正確で分かりやすい地質情報を国民に提供できないと考えています。このような日本の特殊な地質状況を勘案すると、日本のシームレス地質図に関する研究レベルは、国際的にも高いレベルにあると自負しています。

議論5 地質図幅の研究

質問 (佃 栄吉)

本研究論文が(第 2 種基礎研究としての)新たな方向性を示していることについて異論はありません。一方で、今までの地質調査がすべて第 1 種とする論理展開は無理があると思います。地質調査には第 1 種、第 2 種の両方の要素があり、「地質図幅」は第 2 種に軸足があるものと理解しています。単に科学的発見のために実施されているものではないと思います。今までの地質図幅はある地域で行われてきた第 1 種基礎研究の成果を集約し、新たな知見も加味して、個別に最適化したものではあるものの、それなりに死の谷を乗り越えてきたものだと思います。

シームレス地質図の研究は問題点を克服するための「新たな」死の谷を乗り越えているのだと思いますが、著者の見解はいかがでしょうか。

回答 (脇田 浩二)

地質図の研究が、第 1 種基礎研究だけではなく、第 2 種基礎研究の側面も有するという点には異論はありません。(その点は本文中に記述しました。)しかし、「地質図の研究が第 2 種基礎研究に軸足がある」という点には同意できません。私が考える現在の地質図幅プロジェクトの位置づけでは、現在の 5 万分の 1 地質図(幅)は研究報告書であり、20 万分の 1 地質図(幅)は一定の研究成果がその地域に集積されたときに出版される研究の集大成です。そのような位置づけであるため、それぞれの研究者がそれぞれのアイディアで記述しているため、同じ地層や岩石でも全く違った解釈が同じ時期の出版物に記載されています。研究者個人の判断で出版されない場合があり、データが少ない地域は社会的要請が高くても放置されます。地層区分の単位名でさえ、研究者の判断に委ねられ、統一されていません。その意味で、第 2 種基礎研究の社会的価値を高めるという努力がなされていないのが現状です。また、地質図(幅)の研究では、社会的価値を実現するための、一般性のある方法論を導き出すという「第 2 種基礎研究」の基本が行われていません。これらの欠点を補うために、シームレス地質図の研究を実施することになりました。

地質図(幅)の研究について、この数年議論した結果として、地質図幅(特に 5 万分の 1 地質図幅)は、それぞれの専門分野について最新の研究を盛り込んだ、野外地質図の研究成果としての性格を強調しています。それぞれの専門分野で最新の研究を行うのに最適な地質図の作成を行い、その野外地質研究技術という標準を社会に還元していくスタンスであると考えています。

本研究では、シームレス地質図の研究の特徴を際立たせるために、地質図幅の研究が第 2 種基礎研究の性格を有することを承知で、第 1 種基礎研究と単純化した側面もありますが、一方で、明治以来日本の地質図研究が担ってきた役割が、大きく変容している現実に即した対比であると認識しています。

熱電発電を利用した小型コジェネシステムの開発

—— 新たな酸化物材料が拓く高温廃熱回収システム ——

舟橋 良次*、浦田 さおり**

エネルギー、環境問題は日々深刻になり、生活スタイルの改善と共に、産業分野でのエネルギー利用率向上の必要性が増している。廃熱から発電できる熱電変換技術の実用化のために高温耐久性と高い安全性を有する酸化物熱電材料を新たに開発し、773～1173 Kで機能する小型コジェネシステムのプロトタイプを民間企業との連携により開発した。

1 研究の背景

エネルギーの中核である石油の産出は近年中にピークを迎えると予測され、エネルギーの安定供給と地球環境問題の早期解決に人類は迫られている。そのため新エネルギー、省エネルギー技術の研究開発が多くの機関で盛んに行われている。この困難な問題の解決策の1つとして、未利用のまま大気中に捨てられている廃熱の有効利用が挙げられる。日本では年間に原油換算で数億klもの一次エネルギーを輸入し、消費している。しかし、その約70%は最終的に熱エネルギーとして大気中に棄てられている(図1)^[1]。この未利用廃熱を利用し、エネルギー効率を向上することは石油代替エネルギーの開発と共に非常に重要な課題である。

廃熱は総量こそ莫大ではあるものの、1つの熱機関から廃棄されているエネルギー量は多くない。つまり、廃熱エネルギーは広く、薄く分散している。このようなエネルギーを電気エネルギーに変換できる最有力技術として熱電発電

は注目されている。なぜならば熱電変換にはスケール効果がないため、どれだけ小さな熱エネルギーでも、それに熱電変換効率をかけただけの電気エネルギーが得られるからである。例えば我が国において、自動車や工場、ゴミ焼却場等から排出される廃熱量の20%を電気に変換できたとするならば、1年間で3.5万GWhの電力が得られるとの試算もある^[2]。この値は中規模クラスの原子力発電所1基分の電力量に相当する。また、熱電発電システムはCO₂や放射性物質を排出せず、タービン等の可動部も必要ないクリーンでメンテナンスフリーで長寿命なエネルギー変換システムである。

熱電発電の研究は長年されており、新たな材料が見つかる度に大きな期待とその後の失望があった。そのため、ユーザーからは「また熱電か・・・」等という冷たい目で見られているのも事実であった。これは良い特性を持った材料であっても、民生利用において重要な安全性、耐久性、コスト、製造技術などに重大な問題があったためである。また、10年前のアメリカでは「ガソリンは安いから、熱電発電は重要でない」と言う風潮も、熱電発電の民生利用を遅らせていた。しかし、昨今のエネルギー、地球環境問題への意識の変化により、再び熱電発電への期待が高まりつつある。それは熱電材料の研究者サイドからではなく、ユーザーサイドからのニーズによって起きている。そのムーブメントを引き起こした1つのきっかけは筆者らも含めた日本の研究者による優れた酸化物熱電材料の発見である。

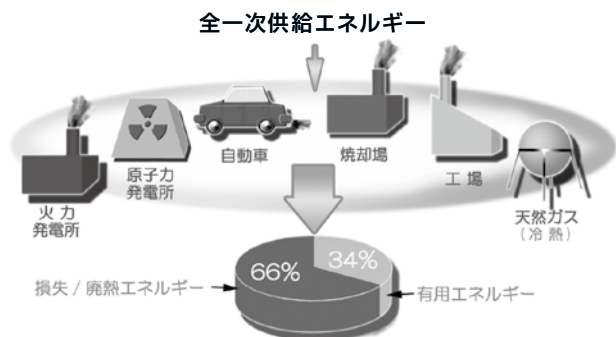


図1 莫大な廃熱量

日本では全一次供給エネルギーの約70%が廃熱として未利用のまま大気中に捨てられている。

2 熱電発電実用化に向けた戦略

エネルギー問題が深刻になるに従い、廃熱の有効利用への期待が大きくなっている。一口に廃熱と言っても約80

*産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 〒563-8577 池田市緑丘1-8-31 産総研関西センター **科学技術振興機構 〒332-0012 川口市本町4-1-8 川口センタービル * E-mail: funahashi-r@aist.go.jp

Kの冷廃熱から873 Kを越える高温廃熱まで温度差も広く、また気、液、固相熱と形態も様々である。温度差を利用する熱電発電にとって最も都合が良いのは高温廃熱を用いることである。しかし、一般にある程度まとまったエネルギー量の高温廃熱はボイラー等を用い熱交換器により回収可能である。そのため、熱電発電の研究においても700 K以下での作動を目指した材料開発が主に進められてきた。ただ、このような700 K以下の中低温廃熱のエクセルギー^{用語1}は高温廃熱と比べ低いため、それを回収するための熱電発電システムは大がかりなものとなる。また、中小規模コジェネレーションシステムやバイオマスを用いたボイラー等エネルギー変換の分散化が進む中、まとまった量の廃熱が得られないため、既存の熱回収システムでは効率、コスト面から廃熱の有効利用は困難であった。つまり、小規模システムからの廃熱利用のためにはできるだけ高温の廃熱を利用したい。しかし、それは熱電発電を搭載する熱システムの効率を低減させかねない。そこで筆者らは熱システムに必要な温度よりも高温で熱電変換によりエネルギーを回収し、その後で熱システムを作動させることを思いついた。発想の転換で、熱電発電からの廃熱を「母屋」の熱システムで利用する、トッピング熱回収システムを考案した(図2)。熱電発電と熱システムでのエネルギー利用率を最適化することでシステム全体のエネルギー効率を向上することが可能になると考えられる。トッピングシステムの開発において筆者らがまず注目したのが天然ガスを用いた給湯器である。

家庭用ガス給湯器において、天然ガスの燃焼温度は

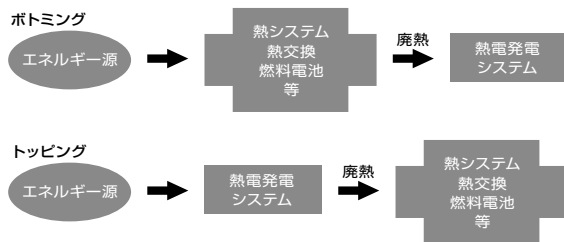


図2 ボトムング及びトッピング廃熱回収の概念

1473 Kにも達するが、給湯器から得られるのは高々323 K程度のお湯である。温度だけで見れば非常にもったいなく感じられる。そこで筆者らは、共同研究により大阪ガス株式会社とガス給湯器で熱電変換によるトッピング熱回収と給湯を同時に行うコジェネレーションシステムの作製を試みた。さらにこのコジェネレーションシステムからお湯だけではなく過熱蒸気を発生させることにも挑戦した。

3 ガス機器への熱電発電の必要性

家庭で用いられている、給湯器、コンロ、ファンヒーター

等のガス機器には着火用あるいは機器の制御用に電力が必要である。これではガス栓に加え、コンセントも近くに必要で、停電時に暖房を入れることも、お湯を沸かすこともできない、そして電気代もかかってしまうなどユーザーにとっては不便ことが多い。もしガス機器が発電し、コンセントからの電力供給が無くても自立運転可能になれば、非常に利便性が高まる。また、最近、調理機器やスチームサウナなど、過熱蒸気の一般家庭での利用が広がりつつある。小型蒸気発生器の開発は電気機器が先行しているが、エネルギー効率、加熱の瞬発力を考慮するとガス燃焼を用いた方が短時間で、大量の蒸気発生が可能となる。しかし、熱交換器の熱劣化、火災温度の低下による不完全燃焼(COの発生)が問題となり、天然ガスの燃焼を用いた小型蒸気発生器は広く実用化されていない。つまり、熱交換器表面を保護すると共に、火災温度を低下させ過ぎない技術の開発が天然ガスを用いた小型蒸気発生器開発の鍵を握っている。上記の問題を解決するためには、熱交換性能が劣化しない程度に酸化物等の耐熱性に優れた材料で被覆することが有効であると考えられる。さらにこの被覆層に熱電変換機能を持たせることができれば、ガス燃焼による蒸気と電力の同時生成が可能となり、ユーザーにとって非常に便利で、新たなコジェネレーションシステムが構築できる。

4 ガス・熱電コジェネレーションシステムに必要な技術課題

天然ガスを用いた小型コジェネレーションシステムの構築に必要な技術課題を図3に示す。「川下側」の技術から考えてみる。ガス燃焼により過熱蒸気とお湯を生成するためには熱交換により冷水を加熱する必要がある。そこで熱電モジュールの形状をパイプ型にし、パイプ外側を加熱、パイプ内に水を流し温度差を付けることで熱電発電と熱交換を同時に行えばよい。本研究で用いる家庭用元止め式湯沸かし器では熱交換器はバーナーから15～20 cm上部にあり、その間は空洞である。過熱蒸気を生成するためにはパイプ型モジュールをバーナーに接近させる必要がある。つまり、従来の熱交換器とバーナー間の空洞に熱電モジュール

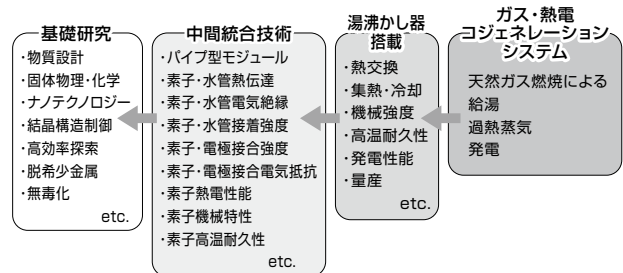


図3 ガス・熱電コジェネレーションシステムに必要な技術「川下側」からのニーズを元に「川上側」の技術を構築した。

を設置する。そして、パイプ型モジュール製造において必要な技術は、熱電素子の製造、p および n 型素子を低抵抗・高強度で接合する技術、高い熱伝達率、強い強度、電気絶縁性を有する素子とパイプとの接着技術、モジュールにガス燃焼熱を取り込む集熱技術、低コスト製造技術等である。これらの技術を構成する「川上側」の技術として、高い熱電性能を有するだけでなく、化学的にも機械的にも高温、天然ガス燃焼中で高い耐久性を有する材料、同じく高温で安定な電極及び素子と電極を接合するための材料が必要となる。さらにそれらには安全性とコスト面から毒性、希少元素が含まれないことが要求される。これらの物質を設計するため物理、ナノテク技術など作製するための化学といった基礎研究も不可欠である。本論文では熱電発電を用いた小型ガスコジェネレーションシステムの開発を目指し筆者らが取り組んできた基礎研究、それらをノウハウなどにより組み上げた中間統合技術、さらには湯沸かし器に搭載したパイプ型モジュールの発電性能について述べる。

5 基礎研究 ～新たな材料の誕生～

筆者らは 1998 年より高温、空気中でも安定で、安全、安価な酸化物熱電材料の探索を始めた。物質の設計概念は当時注目を浴びていた低次元物質、つまり層状構造である^[3]。筆者らのうち舟橋は元々層状構造を有する酸化物超伝導体の研究を行っており、そこから派生した Co 系層状酸化物を合成していた。しかし顕著な特徴も無いため開発対象の材料から除外したが、熱電特性を評価したところ、高温、空気中で良い p 型特性を示すことを運良く発見した。この酸化物の組成は $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ (Co-349) であり、結晶構造の模式図を図 4 (a) に示す^[4]。この酸化物は Co の周りに 6 つの O が配位した八面体により形成される CoO_2 層と岩塩 (NaCl) 構造を持つ Ca_2CoO_3 層が交互に積層した構造を有している。この酸化物の単結晶の 973 K における

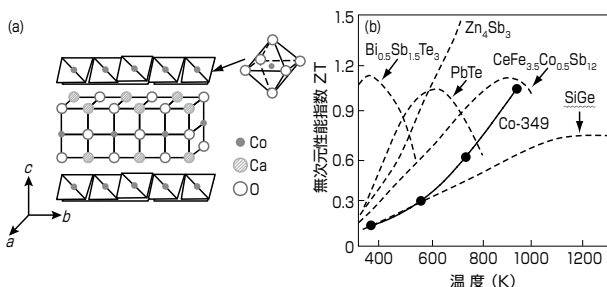


図4 $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ (Co-349) の結晶構造 (a) と無次元性能指数 ZT の温度依存性 (b)

Co-349は導電性の CoO_2 層と絶縁性の Ca_2CoO_3 層が交互積層した構造を有している。またこの酸化物の単結晶の ZT は973 Kにおいて1.1となった。これは10%を超える変換効率に相当する。高い ZT を示す金属系材料の性能についてもグラフに示す。Co-349を除き全ての材料の ZT は真空中で測定したものである。

無次元熱電性能指数 ZT [式 1] は約 1.1 となった。

$$ZT = S^2 T / \rho \kappa \quad \text{[式 1]}$$

ここで Z は熱電性能指数と呼ばれ、絶対温度 T を乗じた ZT を無次元熱電性能指数と呼ぶ。また、 S 、 ρ 、 κ はそれぞれ材料のゼーベック係数、電気抵抗率、熱伝導度で、 ZT が大きいほど良い熱電材料である。

Co-349 の ZT は従来のバルクの化合物半導体の最高値と同レベルであるが、それらの数値は真空中での測定結果であり、高温、空気中では Co-349 のみが高い熱電性能を示す (図 4 (b))。

効率の良い熱電発電システムの構築には n 型熱電材料の開発も不可欠である。しかし、上記のように優れた材料を見つけることは非常に困難であるため、筆者らは発見の確率を高めることを目的に、ゾル・ゲル合成法を用いた熱電材料の高効率探索技術を開発した。この技術を用い、これまでに ZT が 973 K においても 0.01 程度と、性能は不十分ではあるものの、高温、空気中で安定な n 型材料である LaNiO_3 (Ni-113) を独自に開発した^[5]。さらにこれらの酸化物の性能を十分に引き出すよう熱電発電モジュールの製造にも成功しているが、その変換効率は 1.5 ~ 2% 程度に留まっている。しかし、酸化物材料の大きな強みである高温耐久性を活かすことで、これまで実現してこなかった熱回収システムを構築できるものと考え、高温エネルギーの有効利用に向けた熱電発電システムの構築に取り組んでいる。

6 中間統合技術

6.1 接合技術

良い熱電モジュールを得るためには熱電材料と電極 (一般に金属) 材料間で、耐熱性に優れ、高い機械強度と低

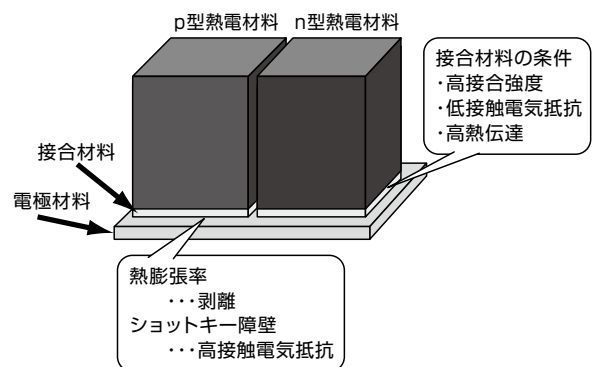


図5 接合技術における課題

接合技術は高い耐久性と発電性能を有するモジュールの作製には必要不可欠である。特に、強い接合強度と低い接触電気抵抗を実現するための接合材料と接合方法の開発が実用化において重要である。

い接触電気抵抗を有する接合を形成する必要がある。しかし、金属（本研究では Ag）と酸化物材料間の接合においては、それらのフェルミエネルギー及び熱膨張率の違いによる高い接触電気抵抗と剥離の問題が生じる（図 5）。そのため、接合材料にはこれらの問題を解決する特性が要求される。

6.1.1 素子作製

1 対の Co-349 及び Ni-113 の焼結体を Ag で表面をメタライズしたアルミナ基板に接合することで素子を作製し、接触電気抵抗と耐熱性を評価した⁶⁾。接合材料として、0~10 wt.%で Co-349 あるいは Ni-113 粉末を含む Ag ペーストを用いた。本来ならば p 型、n 型それぞれの素子に対して同じ粉末を用いる方がより良いと思われるが、スクリーン印刷により Ag ペーストの塗布には「二色刷り」の技術が必要となるため、本研究では p 型あるいは n 型の粉末を複合した Ag ペーストの一方を用い素子を作製した。酸化物複合 Ag ペーストを酸化物焼結体の表面に塗布し、アルミナ基板のメタライズ面に載せ、接合面に垂直方向に 65 kg/cm² の一軸加圧をしながら 1123 K で熱処理することで Ag ペーストを固化し、1 対の p 及び n 型焼結体から構成される熱電素子を作製した。用いた酸化物焼結体の組成は Co-349 及び Ni-113 の Ca と La の一部を Bi で置換した Ca_{2.7}Bi_{0.3}Co₄O₉ と La_{0.9}Bi_{0.1}NiO₃ で、これらの粉末をホットプレスすることで焼結体を作製した。それぞれの材料の Ca 及び La を Bi で置換した理由は p 型については S、 ρ 、 κ [式 1] の全てが改善されること⁷⁾、n 型については S を一定に保ったまま ρ のみを低減できる⁸⁾ ためである。

6.1.2 特性評価

Ag ペーストへの Co-349 粉末の複合は素子内部抵抗 R_I の減少に有効であることが分かった⁶⁾。Co-349 粉末の複合量が 6 wt.% で最も低い R_I が得られた。この低減は Ag ペーストと酸化物焼結体間の接触電気抵抗が低下し

たことに起因する。この原因については未だ解明できていないが、Ag ペーストと酸化物焼結体表面との濡れ性の改善による密着性の向上やショットキー障壁の影響の低減等が考えられる。

酸化物材料と Ag 電極を強固かつ密に接続するためには焼結体の接着面の平滑さも重要となる。そこで Ag ペーストを塗る前に焼結体表面をバフ研磨し、上記と同条件で 6 wt.% の Co-349 粉末を複合した Ag ペーストを用いアルミナ基板に接合した。その結果、焼結体表面の平滑化が良好な接合の形成に有効であることが明らかになった。

次に、熱電素子の加熱-冷却サイクルに対する耐久性について述べる。熱電素子を電気炉に入れ、空气中で 1073 K まで 3 時間かけ昇温し、そこで 1 時間保持した後、高温から直接炉外に取り出して室温まで急冷する操作を 5 回行った。加熱-冷却サイクル前後での R_I を測定し、その変化量を計算した。Ag ペーストのみで接続した素子では特に 600 K 以下でサイクル後の R_I の増加が顕著であった。一方、酸化物複合ペーストを用いた素子では加熱-急冷サイクルによる R_I の増加が非常に小さくなった⁶⁾。このことから Ag ペーストへの酸化物粉末の複合は加熱-冷却サイクルに対する耐久性の向上にも有効であることが分かった。走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察の結果、Ag ペーストのみで作製した素子では Ag ペースト部分に大きな空洞が見られた。一方、Co-349 粉末を 6 wt.% 複合した Ag ペーストを用いた熱電素子では微細な空洞が見られるものの、アルミナ基板と酸化物焼結体が密に接合していた。この微細組織の改善が加熱-急冷サイクルによる R_I の増加を抑制できた原因である。空洞生成の原因として、Ag の焼結による収縮、Ag と酸化物材料間の熱膨張率の差や悪い濡れ性による剥離などが考えられる。

6.2 電気絶縁技術

ガスコジェネレーションシステムに搭載する熱電モジュールは発電と共に、冷却に用いる水を過熱蒸気にしなければならない。そのためには、水管 (ステンレス管) と熱電素子間での高い熱伝達に加え、電気絶縁も維持しなければならない。水管と熱電素子は水管表面に溶射により形成した ZrO₂ 皮膜と電気絶縁性ペーストにより電気絶縁を維持している。ここで問題となるのが、素子と電極を接合する Ag ペーストから Ag が拡散し、ZrO₂ 層を貫通し、水管まで達することで電気絶縁の破壊が生じることである。そこでこの拡散を Ag ペーストへの他元素添加により防ぐことを試みた。特に Pd 粒子の添加により Ag の拡散を防ぐ技術は工業的に用いられているため、本研究では Co-349 粉末を複合した Ag ペーストへさらに Pd ペーストを複合する効果について調べた。

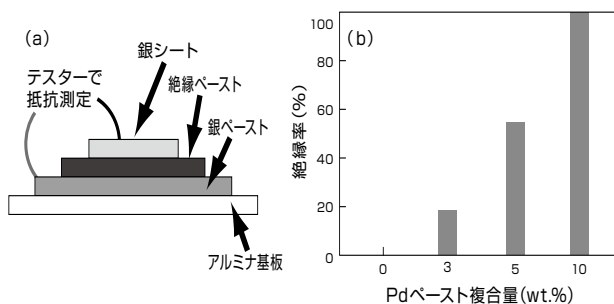


図6 多層構造の電気絶縁評価方法 (a) と 1023 K で 30 時間熱処理した後の多層試料の絶縁率の Pd ペースト複合量依存性 (b) 異なる Pd ペースト複合量で各々 5 試料を作製し、熱処理後の絶縁ペーストを介した Ag ペーストと Ag シート間での絶縁性を評価した。

6.2.1 試料作製と評価法

Agの絶縁ペーストへの拡散による電気絶縁破壊の評価法を図6(a)に示す。アルミナ板上にPdペーストを0～10 wt.%複合したAgペーストを塗布し、固化させた。その上に絶縁ペースト、銀シートの順で積層し、ペーストを固化させた。積層試料を1023 Kで30時間熱処理した後、テスターにより導電性を評価した。それぞれ異なるPd複合量で5試料を評価し、絶縁率を計算した。

6.2.2 電気絶縁率

図6(b)に各条件での絶縁率を示す。Pdペースト複合量の増加により電気絶縁率が増加し、10 wt.%の場合、1023 Kで30時間熱処理しても全ての試料で電気絶縁性を保持していた。また、SEMによる微細組織観察の結果、Pd複合がAgの絶縁ペースト中への拡散を抑制していることが分かった。

6.3 パイプ型モジュールの構造と作製

本研究で作製するパイプ型熱電モジュールの構造を図7に示す。パイプ型モジュールは27対の素子で構成される2つの素子列でステンレス水管を挟み込んだ構造になっている。p型素子には $\text{Ca}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Co}_4\text{O}_9$ 、n型素子には $\text{CaMn}_{0.98}\text{Mo}_{0.02}\text{O}_3$ の焼結体を用いた。本研究では小型湯沸かし器への搭載を試みた。湯沸かし器の燃料室内は狭く、モジュールにはコンパクト化も要求され、熱電素子数が制限される。しかし、熱電発電で高い電圧を得るためには多くの素子数が必要となる。このジレンマを解決するため、ここでは $\text{La}_{0.9}\text{Bi}_{0.1}\text{NiO}_3$ よりもゼーベック係数の高い $\text{CaMn}_{0.98}\text{Mo}_{0.02}\text{O}_3$ を用いモジュールを作製した。水管と熱電素子間の電気絶縁のために水管表面に厚さ60～70 μm の ZrO_2 皮膜を溶射により作製した。その上へさらに市販の絶縁性ペーストを塗布し、素子列と水管を接着した。絶

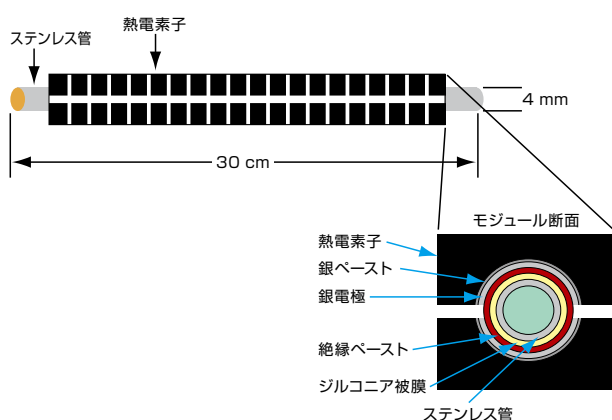


図7 パイプ型モジュールの概略図

パイプ全長は30 cmである。熱電素子とステンレス水管の間はAgペースト、Agシート、絶縁ペースト、 ZrO_2 の多層構造となっている。熱伝達性を良くするため薄い構造が望ましいが、AgペーストからのAg拡散による電気絶縁の破壊を防ぐことが必要である。

縁ペーストの固化後の厚さは150～300 μm であった。熱電素子は酸化物焼結体を切削によりアーチ状に加工し、6 wt.%でCo-349粉末を複合したAgペーストを用い、アーチ部にかかる圧力が50 kg/cm^2 の下、1123 Kで接合し、素子列を得た。この素子列を表面を絶縁処理した水管に接着し、全長が30 cm (54素子対) のパイプ型モジュールを作製した^[9]。

7 小型ガス・熱電コジェネシステムの構築^[10]

上記のモジュールを2本束ね、元止め式湯沸かし器に搭載した(図8)。湯沸かし器のガス燃焼により、モジュール外部を加熱すると同時に、湯沸かし器からの温水(約313 K)を16 $\text{cm}^3/\text{分}$ の流量で水管に流すことで、熱電素子に温度差を付け発電した。

ガス燃焼中、熱電モジュール周辺の温度は約1473 Kに達した。湯沸かし器の火力を最大にした時、開放電圧(V_o)と最高出力(P_{max})はそれぞれ1.3～1.5 V、0.28 Wとなった。モジュールの V_o が0.6 Vあるいは1.0 Vになる火力条件で1時間連続して発電させた後燃焼を止め、室温まで冷却する方法で発電特性を繰り返し測定した。その結果、1時間の加熱と冷却を繰り返しても、発電特性の劣化は見られなかった。また、モジュールの水管の終端からは約473 Kの過熱蒸気を得ることができた。このように、直接熱交換が可能なパイプ型熱電モジュールを取り付けることにより、普通の湯沸かし器が、多機能なコジェネレーションシステムとなった(図9)。さらに、熱電素子に覆われていない水管を湯沸かし器に装着した場合に比べ、パイプ型熱電モジュールを装着しガス燃焼を行った場合の方が、排気ガス温度は高く、CO分圧も低減していた。これは、水管を酸化熱電素子で覆うことにより、表面温度の低い水管を

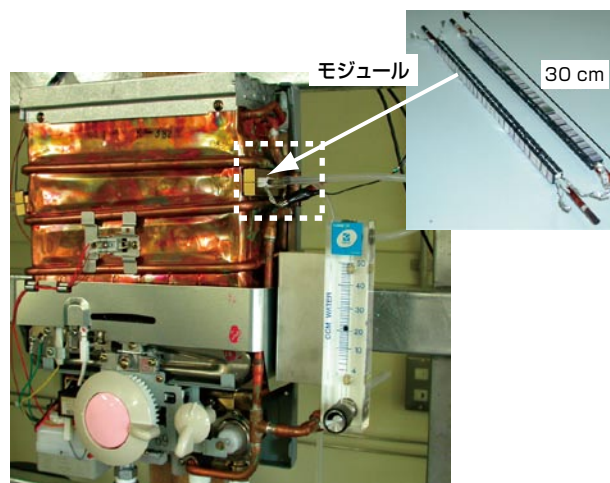


図8 パイプ型モジュールとモジュールを装着した元止め湯沸かし器。ガス燃焼により、湯沸かし器から温水、モジュールから過熱蒸気と電気が同時に得られた。

装着した時に起きているガス燃焼温度の低下を抑え、不完全燃焼を防いでいるためと考えられる。

一般に、廃熱回収とは熱機関のサイクルが終わった後の排気ガス等を用いるもの（ボトミング）と考えられている。しかし、天然ガスは約 1473 K で燃焼するものの、湯沸かし器から得られる温水の温度は高々 323 K 程度しかない。つまり、燃焼により生じた熱エネルギーを有効に使っていないことになる。そこで、まず使われていない高温の熱エネルギーを熱電発電で使い、その廃熱で水を加熱すれば、高いトータル効率での熱利用が可能となると考えられる。このようなトッピングによる熱回収は高温でも使用できる酸化物材料であるからこそ可能であり、新たな熱電発電の利用方法である。

8 今後の展望

ここでは、高温廃熱の有効利用を目指した酸化物熱電発電システムの開発について述べた。このシステムを構築するためには熱電材料の開発からスタートする必要がある。これについては幸運に恵まれ、優れた変換効率と耐久性を有する Co 系層状酸化物を見いだすことができた。この物質は高温、空気中での熱電発電の実用化を可能にただだけでなく、異なる機能を有するナノブロックの集積（ナノブロックインテグレーション）による高熱電性能発現の実証例として学会で高く評価された。しかし、発電システムの構築には新たな高性能物質の開発と共に、本論文で述べた接合、電気絶縁、伝熱技術など多くの技術、ノウハウを統合し、量産技術も開発しなければならない。さらに熱電発電を広く普及するためには、p 型材料の Co、n 型材料の La、ペーストに用いた Pd の使用量の低減あるいは非金

属による代替技術も将来的に必要となる。

熱電発電の市場はこれから構築されていく段階にある。実用化にはまずユーザーと共に廃熱による熱電発電の価値を創造しなければならない。そのためには、モジュールに熱電変換プラスアルファの機能を持たせる、あるいは熱電モジュールを搭載するシステムに新たな付加価値を与えることが必要である。酸化物熱電モジュールの場合、低温側の温度が高くできるため、トッピング熱回収により廃熱を有効利用することができる。この概念を用いれば、ボイラー、燃料電池等、高温で使用する熱交換、エネルギー変換機器のトータル熱効率の向上に期待が持てる。また、熱電変換の強みである高出力密度も自動車など移動体や携帯用電源等への応用に好都合である。ちなみに Co-349/Ni-113 熱電素子では約 2 MW/m³ の出力密度が得られる。

ここで述べた技術統合により開発された熱電発電システムを熱機関に取り付け、廃熱が有効利用できたとき、それを心待ちにしていたユーザーに新たな価値を与えると共に、エネルギー問題解決に大きく貢献するものと期待できる。

なお、ここで示した結果の一部は他誌でも紹介されている^[10]。

謝辞

パイプ型モジュールを作製するにあたり、役立つアドバイスを下さいました大阪ガス株式会社エネルギー技術研究所の久住喜徳シニアエンジニアと毛笠明志シニアエンジニアに感謝の意を表します。また本研究の一部は NEDO 産業技術研究助成事業 (ID06A39002d) により行われています。

用語説明

用語1：エクセルギー：他のエネルギーに変換可能な有効エネルギー。

キーワード

熱電発電、酸化物、モジュール、廃熱

参考文献

- [1] 平田賢：省エネルギー論、オーム社 (1994)。
- [2] 大熊謙治他：熱電シンポジウム99論文集、96 (1999)。
- [3] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus: Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit, *Phys. Rev. B*, 47, 12727 (1993)。
- [4] R. Funahashi, I. Matsubara, H. Ikuta, T. Takeuchi, U. Mizutani and S. Sodeoka: An oxide single crystal with high thermoelectric performance in air, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39, L1127 (2000)。
- [5] R. Funahashi, S. Urata and M. Kitawaki: Exploration of n-type oxides by high throughput screening, *Appl.*

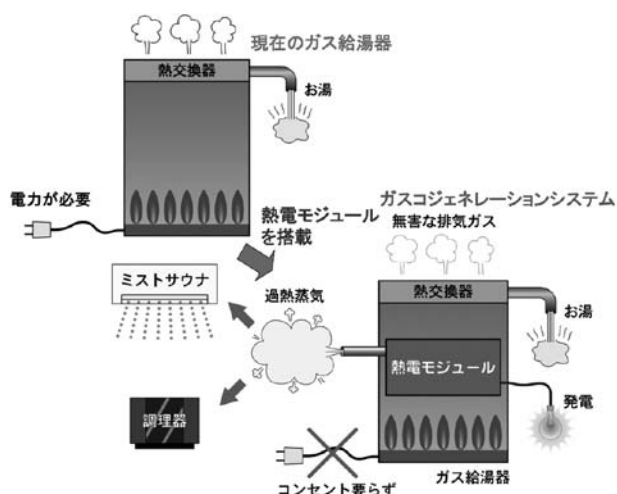


図9 湯沸かし器がコジェネレーションシステムに熱電モジュールを装着し、トッピング熱回収を行うことで、温水に加え電気と過熱蒸気を同時に生成することが可能となった。また、排気ガス中に含まれるCO量も低減することが出来た。

- Surf. Sci.*, 223, 44 (2004).
- [6] R. Funahashi, S. Urata, K. Mizuno, T. Kouuchi and M. Mikami: $\text{Ca}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Co}_4\text{O}_9/\text{La}_{0.9}\text{Bi}_{0.1}\text{NiO}_3$ thermoelectric devices with high output power density, *Appl. Phys. Lett.* 85, 1036 (2004).
- [7] S. Li, R. Funahashi, I. Matsubara, K. Ueno, S. Sodeoka and H. Yamada: Synthesis and thermoelectric properties of the new oxide materials $\text{Ca}_{3-\chi}\text{Bi}_\chi\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ ($0.0 < \chi < 0.75$), *Chem. Mater.*, 12, 2424 (2000).
- [8] R. Funahashi, M. Mikami, S. Urata, M. Kitawaki, T. Kouuchi and K. Mizuno: High-throughput screening of thermoelectric oxides and power generation modules consisting of oxide unicouples, *Meas. Sci. and Tech.*, 16, 70 (2005).
- [9] R. Funahashi, T. Mihara, S. Urata, Y. Hisazumi and A. Kegasa: Preparation and properties of thermoelectric pipe-type modules, *Proc. of 2006 Int. Conf. Thermoelectrics*, 58-61 (2006, Vienna).
- [10] 舟橋良次, 浦田さおり: 廃熱を有効利用する酸化物熱電発電モジュールの開発, *応用物理*, 77, 45-48 (2007).

(受付日 2007.12.25, 改訂受理日 2008.2.19)

執筆者略歴

舟橋 良次 (ふなはし りょうじ)

1992年3月名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程修了、同年4月工業技術院・大阪工業技術試験所入所(現 産業技術総合研究所関西センター)。1998年12月名古屋大学大学院工学研究科結晶材料専攻博士(工学)取得。これまで、超伝導、熱電など機能性酸化物の研究に携わっている。本論文では、主として材料開発と接合技術の開発を担当した。

浦田 さおり (うらた さおり)

1999年3月国立佐世保工業高等専門学校物質工学科卒業、2002年6月産業技術総合研究所関西センター派遣研究員、2006年4月科学技術振興機構CREST技術員。高専以来新たな熱電材料の探索や高性能発電モジュールの作製技術の開発に携わっている。本論文では、主として素子化技術の開発とモジュールの製造と評価を担当した。

査読者との議論

議論1 本研究開発の最大の困難点

質問 (小林 直人)

戦略的な見通しの下に小型ガスコジェネレーションシステムの開発を目指して、材料探索・開発等の基礎研究、それらをノウハウなどにより組み上げた中間統合技術、さらには湯沸かし器に搭載したパイプ型モジュールの発電など一連の意義ある研究開発を行ったと理解しました。この中で最も困難な点はどんなところだったのでしょうか。またそれをどのように克服できたのでしょうか。

回答 (舟橋 良次)

技術的に一番困難であるのは、材料開発です。新物質の発見は狙ってできるものではなく、運も味方につけなければなりません。p型材料についてはCo系層状酸化物を見つけることができましたが、n型材料の開発に苦勞しております。モジュール製品化の研究は本論文でも記載した通り、様々な連携や情報収集により思ったよりすんなり進めることができたと感じています。熱電発電を実用化するために本当に困難であるのは、技術的なことより、熱電変換技術の価値作りでした。いきなり、小型ガスコジェネレーションシステムへの応用を思いついたわけではありません。メリット、デメリットを見据え、多くの分野のユーザーの意見を集め、やっと出たアイデアがトッピングであり、

具体例としての小型ガスコジェネレーションシステムでした。

議論2 今後の研究の課題

質問 (小林 直人)

本文に書かれていたように、高温での効率的な熱電発電システムによる廃熱回収が出来れば、省エネルギーに向けた大きな貢献ができると思います。本研究開発はその一里塚になったと思いますが、今後克服すべき最大の課題は何でしょうか。

回答 (舟橋 良次)

モジュールの量産化と信頼性向上です。もちろん変換効率が低いため、新材料の探索も必要ですが、まず現状の性能で実用化できる熱電変換の市場を構築することが急務と考えております。

議論3 n型熱電材料開発の見通し

質問 (小林 直人)

本研究開発では、高性能のp型酸化物熱電変換材料に比べて、n型酸化物熱電変換材料の性能はまだそれほど良くなく、今後の研究の大きな課題だと認識しました。今後のn型熱電材料の開発の戦略や見通しを聞かせてください。

回答 (舟橋 良次)

材料開発には2つの戦略を持っております。1つは近い将来構築される熱電変換の市場で用いられる材料の開発です。これは全く未知の材料を開発するのではなく、ここで紹介したNi、Mn系酸化物の性能を元素添加、プロセス技術を駆使して向上させる予定です。さらに熱電変換の市場を大きくするためにはp、n型ともに今の材料の性能では不十分です。これに関してはナノテクによる結晶構造制御あるいはコンビナトリアル技術による高効率探索技術などを用い、全く新しい物質を創製していく必要があります。

議論4 高温からの熱回収システムの効果

質問 (小林 直人)

小型コジェネレーションの開発については、システムとしての実証を行ったという点で、大変大きな意義があったと考えられます。また、今回の小型実証システムは、高温における電気変換利用、中間温度における熱利用、さらに高温蒸気の利用など、総合的な熱エネルギー利用として効率的であると考えられます。実際の応用の場面ではこのようなトッピングによる高温からの熱回収は、湯沸かし器以外にどのような利用形態が考えられますか。

回答 (舟橋 良次)

基本的に水などと熱交換を行うシステムであれば搭載は可能であると思います。例えば湯沸かし器よりも大きな、ボイラーのフィンなどに用いることもできそうです。ただ重要なことは元システムの主目的を大きく損ねないことです。さらには固体酸化物型燃料電池(SOFC)も候補かもしれません。SOFCの作動温度は技術進歩により年々低下しています。そのため高温側に温度マージンが出来ます。このマージンを熱電変換で有効利用できるかもしれません。

議論5 本研究の成果の熱電発電市場への効果

質問 (小林 直人)

本研究成果による熱電発電市場への効果ですが、現状の他の技術や製品の現状と比べて、その中にどの程度の革新性を持ち込むことになると考えられますか？

回答 (舟橋 良次)

まだ熱電発電の市場はありません。そのためこの論文に書いたように、これまでとは違った評価軸で熱電発電の価値を評価し、熱電発電マーケットを構築することが必要であり、そのためのベンチャー創業を予定しております。

だれでも構築運営できるコラボレーションシステムの実現

— qwikWeb を用いたコミュニケーション・パターンの実践 —

江渡 浩一郎*、濱崎 雅弘**、西村 拓一**

だれでも構築運営できるコラボレーションシステムの実現のために、ユーザがグループ活動形態に適したシステムを容易に構築することを可能とするコミュニケーション・パターンを設計思想とした qwikWeb を提案する。また、本システムをデザイン、実装、運用改良し運用データの分析を行うことで本システムの妥当性と有効性を示す。

1 はじめに

現在、我々は通信技術やインターネット技術の進歩により、時空を超えた情報共有手段を手に入れている。2005年時点でも携帯電話等の移動端末の利用者数が推計6,923万人、パソコン利用者数が推計6,601万人^[1]であり、組織内も含め気軽に情報共有し協働作業するシステムを提供できたら、組織内活動、サークル活動、地域活動など様々な創造的活動や経済活動を活性化できると考えられる。しかし、既存のシステムでは、管理が困難であり、ユーザが知識の蓄積・構造化を効率的に進められないという問題があった。

そこで、本論文では、表1で示すような、複雑なアクセス制御を必要とせず、管理や習得が容易で知識を蓄積・構造化できるシステムを希望するユーザグループを対象としたコラボレーションシステム：qwikWeb を提案する^[2]。この設計思想として、ユーザ自身が好みのシステムを構築することを可能とするコミュニケーション・パターンを採用している。また、本システムをデザイン、実装、運用改良し運用データの分析を行うことで本システムの妥当性と有効性を示す。

本論文では、次章にて Web システムの本格研究について論じ、この開発プロセスに応じて、3章にてコラボレーションシステムの現状分析を行う。4章で qwikWeb のサービス

設計、5章で実装した qwikWeb を説明する。6章にて運用した qwikWeb のデータ解析と考察を行う。7章で関連研究を紹介して本研究の位置づけを明確にし、8章にてまとめと今後の方針を述べる。

2 Webシステムの本格研究

Web システムを開発し実用化するための本格研究プロセスでは、ユーザの利用形態を把握しユーザからのフィードバックを活用したシステム開発が重要である。基本的な設計開発手順は図1のように設計者、システム開発者、ユーザを含めたユーザ参加型のものとなる。

まず、現状分析フェーズにおいてサービスの概要や対象とするユーザを設定し現状の問題点を分析する。サービス概要やターゲットユーザは、現状の問題点を見極めることによって決定できるため、この現状分析における作業は同時並行的に進められる。また、既存システムの問題点の洗

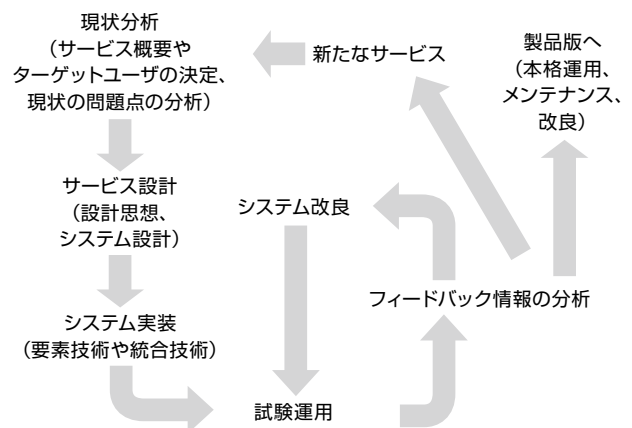


図1 Webシステムの開発プロセス

表1 既存のコラボレーションシステムとqwikWebとの比較

	管理の容易さ	知識の蓄積・構造化	複雑なアクセス制御
サイボウズ ^[3] など	×	△	○
qwikWeb	○	○	×

い出しは、機能レベルだけでなくコンセプトレベルで行う。これらの結果をもとに、新たなサービスの設計を行う。この設計ではサービスのビジョンを含む設計思想を決定し、要素技術の選択や改良、将来の拡張性や他システムとの連携を配慮したシステム設計を行う。システム実装はシステム設計に従い、ソフトウェア工学上コストパフォーマンスを配慮して開発する。次にある程度の規模のユーザを対象として試験運用を行う。このフェーズではユーザからのフィードバックを収集できるようにシステムのログを蓄積するだけでなく、ユーザからの直接の声を収集する。これらの情報を分析して随時設計を修正し、引き続き試験運営によりシステムの改良を進めて製品版を完成させる。これらの分析改良時に隠れたニーズを発見して新たなサービスを構築する知見を収集できる場合もある。製品版は運営会社に販売またはライセンスされて本格運営されるが、この中でも絶えずメンテナンス、システム改良が進められる。

以上が Web システムにおける本格研究の代表的なユーザ参加型プロセスである。qwikWeb でもこのプロセスに従って開発し、現在試験運用がほぼ終了した段階である。次章以降 qwikWeb の開発プロセスについて述べる。

3 コラボレーションシステムの現状分析

企業内やサークルなど組織内での連携や協働作業では、電子メールが重要な役割を果たしており、特にメーリングリスト（以下、ML）による連絡や協働が盛んに行われている。しかし、一連の協働作業においては、情報が構造化されておらず最新の情報の確認にも手間がかかる場合が多い。一方、Lotus Notes^[3] やサイボウズ^[4] などのような、スケジュール調整やテーブル機能、1つの文書を協働で作成する機能を持つコラボレーションツール、グループウェアが利用されている。しかし、このようなシステムの立ち上げ手続きや作業は煩雑であり、メンテナンスの手間も管理者に集中する。また、グループウェア内での連絡手段は、通常利用するメールアドレスと異なるため、メールでのやり取りを基に協働で文書や知識を構築する場合には、情報の移動の手間が発生する。組織外のメンバとの柔軟な連携も容易でない。

立ち上げや運営コストを低く抑える必要があり、少数の管理者に負担が集中しないコラボレーションシステムを欲しているユーザにとって、特にシステムに関するノウハウを習得しなくても、そのシステムを見ただけで利用方法が分かるくらい分かりやすいことが必要である。また同時に、すでに慣れ親しんだ環境を出発点として、徐々に自分の理想とする情報環境を実現できるような発展性を備えた構造にする必要がある。一方、このようなユーザにとっては、各文

書や知識のきめ細かいアクセス制御（どのユーザがどの文書を編集できるかなど）は不要である。これは、サイボウズ^[4] などは数 1,000 人のユーザを想定しているのに対し、管理者に負担をかけられないユーザは、数 10 人程度のコラボレーションシステムを必要としているからである。

筆者らは、ターゲットユーザの一例として、グループウェアの管理に時間をとることができない身近な研究者の協働作業に着目した。彼らは日常的にメールを主とする連絡手段を利用している。しかし、イントラでのグループウェアを利用した協働作業は、上司からの命令により文書を作成する場合などを省いて、自発的に行っていない。これは協働作業により文書等を作成した方がよい状況においても同様である。なぜこのようなことが起こるのであろうか。岡田^[5] は協調の階層モデルとして、コラボレーションの直下の階層にコミュニケーションを位置づけ、その重要性を示した。北川^[6] はオンラインコミュニティを、情報を得る、関係を結ぶ、協働を行う、という 3 つに機能分類し、大半は情報を得るだけのコミュニティだが、幾つかはメンバ間で親密になり、さらにその中の幾つかは協働を行うようになるのではないかと述べた。このように協働作業（コラボレーション）はその背景に密なコミュニケーションが不可欠であり、コミュニケーションによる情報交換や合意形成を経て、ようやく協働作業が生まれうると考えられる。実際に、報告文書の作成などのような協働作業はメールをベースに進められているものの、すべてのメールを読んで修正や統合をしないと最新の状況が把握できず、知識の構造化や共有上問題があった。そこで、グループ内で自然な連絡を基にグループ内知識の構造化、協働文書構築も容易に行えるシステムが求められていると考えた。

つまり、「管理の容易さ」「習得の容易さ」「知識の蓄積・構造化」が課題となっていたと言える。

4 qwikWebのサービス設計

4.1 qwikWebの設計思想

4.1.1 基本思想

3章で述べたコラボレーションシステムにおける課題をユーザの立場から捉えなおした結果、「ユーザがシステムやその利用形態を、思い通りに設計できること」が根本であると考え、これを qwikWeb の基本思想と設定した。

従来の Lotus Notes^[3] やサイボウズ^[4] などでは、一般ユーザがシステムを改変することはできず、この基本思想を取り込むことが困難である。一方、ウォード・カニングが開発した Wiki を調査した結果、本提案で目指す基本思想と密接な設計思想をもとに開発されたことがわかった。そこで、この Wiki の設計思想を「コミュニケーション・パターン」^{[7][8]}

と名付けて次項で紹介し、さらに qwikWeb の設計思想について論じる。

4.1.2 Wikiの設計思想「コミュニケーション・パターン」

Wiki には建築家クリストファー・アレグザンダーによるパターン・ランゲージ^[9]と呼ばれる思想が影響している。パターン・ランゲージとは、ある建築を実現するにあたって繰り返し表れる建築形態を集め、言語のようにまとめたものである。これを用いることによって、建築物の利用者が設計に関与することができるようになり、結果として良い建築が実現できるとされている。Wiki の開発者であるウォード・カンニングは 1987 年にこのパターン・ランゲージに興味を持ち、特に利用者が設計に関与するという観点から、ソフトウェアの実現にパターン・ランゲージを応用することを試みた。ユーザインタフェースにおけるいくつかのパターンを抽出し、そのパターンをユーザに提供することにより、比較的短期間に優れたソフトウェアの設計を行うことができたという^[10]。この実験は後にデザイン・パターンと呼ばれる開発者間の共通言語を実現する大きな潮流へと発展していった^[11]。カンニングは同じ 1987 年に発売された Apple 社の HyperCard を使い、発見したパターンを記録・編集するためのパターン・ブラウザを作成した^[12]。このパターン・ブラウザが後に Wiki へと発展した。つまり Wiki とはパターン・ランゲージを記録・編集するための基盤として考案されたものである。

カンニングは 1995 年にそのパターン・ブラウザを、それまでに蓄積されたコンテンツを元に、Web 上のシステムとして作り直し、それに WikiWikiWeb という名前を与えた。これが現在につながる Wiki の起源である。それまでの HyperCard によるパターン・ブラウザから Wiki への大きな違いは、インターネットにリアルタイムに接続されたという点である。そのため、Wiki は単に情報を蓄積する場としてだけでなく、蓄積された情報について議論するための場としての性格も同時に持つことになる。

一般にコミュニケーションに用いられるシステムは、情報がある定型的な形式にあてはめて管理する。典型的なものが掲示板であろう。1つの記事は、執筆者名、日付け、文章のタイトル、本文などといった項目に分かれて保持される。記事には権限が付与され、一般に執筆者のみが記事を書き換えられる。Wiki における情報の保持はそれとはまったく異なり、いわば 1 枚の紙を共有しているような状態になる。情報には定型的な形式はなく、どのような文章でも自由に書ける。権限という概念もないため、どの文章を誰でも編集できる。そのような環境で複数の執筆者が共同で文章の執筆を進めていくと、必然的に混乱が起こる。その混乱を解消するために、ローカルなルールが生まれる。

例えば「自分の意見を述べる際には文末に自分の名前を残す」などである。そのように当初は何もルールがない状態だった Wiki に、徐々に自然発生的にルールが生まれていった。そのようなルールはコミュニケーションに関わるルールが利用者間のつながりにおいて自然発生的に生まれたものであり、建築におけるパターンの発生と同様な構造を持つと言える。そのため、そのようにして生まれたコミュニケーションに関わるルールを、ここでは「コミュニケーション・パターン」という言葉で表すこととする。

Wiki は、当初の目的通り情報システムを実現するために必要なパターンを収集するだけではなく、そのようなパターンに興味を持つ人同士のコミュニケーションの場でもあり、またコミュニケーションを行うにあたってのルール（コミュニケーション・パターン）について議論する場でもあり、そのようにして自然発生的に作り出されたコミュニケーション・パターンを記録・収集する場でもあった。単にパターンを収集するだけではなく、情報を収集するためのルール（コミュニケーション・パターン）もまた同時に収集するというメタな意味を同時に持つ場として Wiki は成長していったのである。

Wiki において最も重要とされるコミュニケーション・パターンは、スレッド・モード（議論状態）とドキュメント・モード（文章状態）の区別である。スレッド・モードとは、そのページを用いて議論が進んでいる状態のことを指し、そこでは各利用者の意見が掲示板のように並んでいる状態となる。それに対しドキュメント・モードとは、ページに客観的な記述のみが置かれた状態であり、主観的な意見の記述は排除される。実際にはほとんどのページはハイブリッド状態となり、ページ上方には客観的な記述があり、その下の方で議論が進められる。各々のページは、そのページの位置付けを示す短い文章から始まり、それについて各々の意見がスレッド・モードとして追加され、議論が進んで個々の意見の違いが吸収されていき、それが最終的に 1 つのまとまった客観的な記述（ドキュメント・モード）へと成長していくものとされた。つまり、全てのページが最終的にはドキュメント・モードへ成長することが目標であるとされた。

このように、あらかじめルールを決めてそれに沿ってコミュニケーションを進めるのではなく、コミュニケーションをどのように進めていくかというルールそのものをコミュニケーションを進めながら決めていくという自然発生的なルールを重視するという姿勢をとっており、その意味でこのような姿勢こそが Wiki の最も特徴的な点であると考えられることができるだろう。Wiki の設計思想の根本的な部分を一言で表現するとすると「コミュニケーション・パターンの重視」であると言える。

4.1.3 qwikWebにおけるコミュニケーション・パターン

前節で再設定したWikiの設計思想「コミュニケーション・パターン」を基にqwikWebの設計思想を検討すると、「ユーザが各種のコミュニケーション・パターンを独自に組みあわせることで当該グループに適したコラボレーションシステムを構築していくことが可能なシステム」となる。その上で、「今までの知識をもとに説明なしで使うことができる」というユーザの立場を加味すると、すでに慣れ親しんだメールによるコミュニケーション環境を出発点として、徐々に自分の理想とする情報環境を実現できるような発展性を備えたコミュニケーション・パターンを実践することができるようなWebシステムとなる。

4.2 qwikWebのシステム設計

4.2.1 基本設計

今まで議論してきた「管理の容易さ」「習得の容易さ」「知識の蓄積・構造化」を考慮し、我々のターゲットユーザが利用している日常的なコミュニケーション手段を検討する。それは、主に電話、FAX、携帯電話、メール、Webブラウジングである。この中でテキスト情報などのインターネットで流通させる場合に整合性の良いデジタル情報によるコミュニケーション手段は、メール、Webブラウジングである。前節で設計思想の面で採用を決定したWikiはWebブラウジングの拡張であり、メールの使い方には何の変化ももたらさないため、ユーザは従来通りの手段でメールを使い続けると想定される。そこで、メールと知識の構造化、協働構築に利用されるWikiを連携することとする。つまり、Wikiの入口の画面を含めて、利用者が好みの利用規則を設定し、自由に編集することができるコミュニケーション・パターンを実践することができるWebシステムとして設計する。具体的には以下の点を重視して設計する。

- ・「管理の容易さ」

メールを送って、システムからのメールに返信するだけで開設できる。メンバの追加や削除など誰でも可能とし、従来のコラボレーションシステムでは困難であった組織外のメンバとの連携もすぐに行える。システムのメンバとWikiのメンバを一致させ、誰でも容易に管理できるようにする。

- ・「習得の容易さ」

メールによる手軽なコミュニケーションを入口として、徐々に自分が望む情報環境へと進めていくことができる。

- ・「知識の蓄積・構造化」

メールのやり取りがWikiに蓄積され、それを基に必要な知識構造化や協働作業を行うことができる。Wikiに対して誰がどんな操作をしたか通知される（メールで配信される）。

このため、グループにメールを配信するMLとWikiを密接に連携する設計とする。MLとは、複数の人に同時に電子メールを配信する仕組みである。ML宛にメールを送信すると、そのメールは登録されている全てのメンバに転送される。MLは非同期型のコミュニケーションシステムに分類できる。ML用のサーバソフトウェアにはfmlやmajordomoなど数多くあるが、設置の手間などから、現在はYahooグループ^[13]やfreeML^[14]などのホスティングサービスが多く用いられている。

MLを開設する際には、まずMLの管理者となるユーザがMLのメールアドレスを設定し、さらにメンバの登録を行う。一般にメンバの参加および脱退はMLの管理者によって管理されており、管理者へ依頼を出すことで参加/脱退が行われる。これには管理者が権限を持つことで、問題のある人物の排除が容易に行える一方、管理者に多くの負荷がかかるという問題がある。

そこで、MLとしてQuickML^[15]を採用する。このQuickMLは、平易な操作でMLの立ち上げや運用が行えるMLシステムである。

4.2.2 QuickML

QuickMLは高林哲と増井俊之らによって開発された、容易に開設・運用が行えるML管理システムである。QuickMLではメンバ全員がメンバの参加/脱退操作の権限を持つため、管理者1人に負荷が集中するという問題が発生しない。メンバが投稿したメールは各メンバに転送されるため、メールは各メンバがクライアント側で管理することになる。

5 qwikWebの実装

5.1 実装手法

qwikWebの実装では、要素技術としてQuickMLとWiki技術を用いているが、ユーザにとっては、MLとWikiの機能が巧みに連携したシステムと見え、QuickMLや従来のWikiを意識しないよう実装した。qwikWebでは、MLに送られたメールをすべてWikiページとして登録していくことで、知識の構造化を促進する。

ユーザはqwikWebシステムにメールを送るだけでMLとWikiサイトを開設できる。まずMLの名前を決め、「MLの名前@qwik.jp」にメールを送信する。その名前が未使用であれば確認メールが送られてくる。このメールに返信することで、MLとWikiサイトが開設される（図2）。もしMLとWikiサイトが1ヶ月以上使われなかった場合、警告の後に自動的に削除される。このように開設と閉鎖に際してユーザにほとんど負荷をかけない仕組みであり、ユーザはメールを投げる感覚でMLおよびWikiサイトの立ち上

げを行える。

ML に送られたメールは、新たな Wiki ページとして Wiki サイトに自動的に蓄積される。メールの件名がそのまま Wiki ページのページ名となり、同じページ名が既に存在していた場合はその Wiki ページの最後に新しいメールが付け加えられる。そのメールに対して返信したメールも同様に親メールの Wiki ページの最後に付け加えられる。そして同じ Wiki ページ内のメールは、日付と投稿したユーザ名で区切られて表示される。このように関連するメールは 1 つの Wiki ページに蓄積される。作成された Wiki サイトは ML のメンバだけがアクセス可能である。メンバの追加はメールでも Wiki でもいずれからでも可能である。ML 宛のメールに追加したいメンバのメールアドレスを cc するだけでメンバ追加は完了する。Wiki からは、メンバリストの Wiki ページを直接編集することでメンバの追加が行える。このメンバ管理操作はメンバであれば誰でも行うことができ、特定の管理者だけに負荷がかかることはない。

qwikWeb において Wiki はアーカイバの役割を果たすが、一般的な ML のアーカイバと異なり、Wiki であるために編集できる。例えば、わざわざメールで連絡するほどでもない小さな誤植も Wiki ページを直接編集すれば容易に修正できる。他には「日程調整するので、下記の候補日のうち都合の良い日に丸を付けてください」といったメールを ML に投稿した場合、返信せずとも Wiki ページにてそのメールに直接自分の都合の良い日を書き込むといったこともできる。メールにファイルが添付されていた場合は、Wiki 上にてそのファイルが共有される。

qwikWeb では、このように ML で行われたやりとりからシームレスに共同編集作業へと移行できる。なお、メールと違って Wiki は全員がチェックしているとは限らないため、このような編集が行われたことが他のユーザに気づかれない可能性がある。そこで qwikWeb では定期的な

Wiki ページの更新情報（更新したユーザおよび更新時刻）を ML にシステムが自動投稿する機能を備えている。また、全ての Wiki ページはバージョン管理されているため、誰かが誤って削除しても復帰可能である。さらに Wiki ページの編集状況を容易に閲覧できるタイムマシーン機能も付いている。これはスライドバーを左右に動かすことで、Wiki ページの時間変化を連続的に見ていくことができる機能である。

ユーザ参加型の場合は、セキュリティの問題が懸念される。そこでこの点も細心の注意を払って設計した。例えば、ID をメールアドレスとし、パスワードはシステムが自動生成したものにしているため、他人のメールアドレスを入力してもパスワードを入手できないため、なりすましは困難である。パスワードを忘れた場合は、メールアドレスを入力すると送られてくるが、そのメールアドレスに送られるため基本的に本人しか受け取れない。もちろん、パスワードを盗まれたり誤って他者に送ってしまった場合は、他の多くのシステムと同様になりすましが可能となる。しかし、なりすまして Web サイトを修正した場合には、その修正結果がメンバーに通知されるため、本人は他者が自分の ID とパスワードで不当な操作を行ったことが分かることになる。すべての Web ページは過去の履歴を保有しているため、希望の状態まで復帰可能であり、ID 登録を削除すれば今後なりすましをされることはなくなる。誤った入力をしてしまった場合にも過去の履歴を保有しているため容易に復旧可能である。

5.2 実装上の工夫

qwikWeb の開発は、単に実用的な Web システムとしてではなく、「Web システムとして理想的な解は何か」を考え、その理想にできるだけ近付けるよう開発を進めていった。具体的には、URL の設計において、Roy Fielding による REST Architectural Style に準拠した。qwikWeb 開発当初は使いやすい Web アプリケーションフレームワークは存在していなかったため、テンプレートやプラグインなどといったフレームワークに相当する部分から含めて自作した。インストールや保守を簡単にするために、あえて DB ではなくファイルシステムのみをストレージとして用いる仕組みとした。

実用に供するシステムとして安定度を高めることと、研究のためのシステムとして随時機能追加を行うことは、一般には相反する行為である。機能を追加すれば自ずとバグも発生し、システムは不安定になる。しかしその両者を同時に実現しなければ、研究であることと実用であることを同時に満たすことはできない。この相反する要求を実現するために、徹底した機能テストを記述することで極力バグを



図2 開設された Wiki MLでのやりとりがそのまま Wiki ページとなっている。

少なくすることにした。今回は、Webアプリケーションフレームワークを自作しており、その際にテストフレームワークも自作しているため、通常よりもWebシステムの機能テストを容易に記述することができるようになった。開発を進める際にも常に機能テストを先に記述するようにしたため、機能テストの伴わない機能はほとんど存在していない。このような工夫によって、長期間にわたってほとんどダウンタイム無しに運用し続けられる体制を実現することができた。開発・運用共に筆者（江渡）1人だけで、4年半に渡って運用を継続することができた。

6 qwikWebの運用

6.1 qwikWebのアクセス解析

実装したqwikWebを用いて2003年8月から研究ベースの運用を開始し、現在も稼働中である。ユーザは利用時に利用規約（個人を特定できない形でデータが研究上利用されることなど）を承認する必要がある。

図3には、ML数、閉鎖ML数、Wiki利用ML数の累積値を示した。2007年5月現在でMLの数は3,110、ユーザ数は18,519人である（開発者が開設したMLのデータは除く）。各MLのユーザ数は、最大が648人、平均は7.7人であった。半数以上が10人以下のMLであり、少数でも手軽にMLを利用するという設計意図に合った利用状況といえる。また約70%のMLにてWikiが利用されており多くのユーザはWikiも利用できる点を考えてqwikWebを選択していることがわかる。Wikiを利用したML（2,235個）の平均活動期間は145.1日であるのに対し、利用していないML（875個）は42.4日であった。長期間利用するものほどWikiが利用されていることがわかる。閉鎖ML数は現状で約10%となっており、QuickMLにおける閉鎖ML数の50%と比較して低い水準となっており、知識蓄積に貢献していると考えられる。

ユーザ数の累積値を図4に示した。ユーザ数、Wiki利用ユーザ数、ML作成ユーザ数、いずれも純増している。

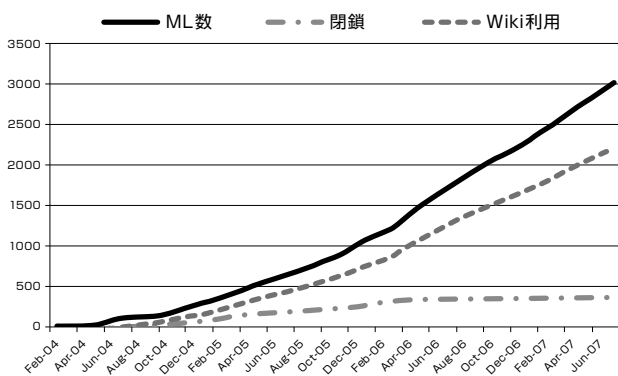


図3 ML数の時間遷移

Wiki利用MLが全体の約70%であり、Wiki利用ユーザは約40%となった。これは多くのユーザがMLから誘導されてWikiを利用していたためと考えられる。MLを作成したユーザ数は約10%（1,909人）となっている。1人が作成したML数の最大は40個、平均は1.6個であった。1人で最大40個ものMLを立ち上げるユーザがいることから、管理者のコストが比較的安く抑えられていることが示されていると考える。約25%にあたる505人が2つ以上のMLを作成している。一方、参加しているML数を見ると、18,519人のうち参加ML数最大は48個、平均は1.3個であった。こちらも約20%にあたる3,515人が2つ以上のMLに参加していた。複数のMLに参加するということは、qwikWebをある程度評価しているためと考えられる。

WikiとMLの違いを、時間帯ごとの利用状況の違いから調べた。図5は時間帯ごとの投稿数、Wikiアクセス数、Wiki編集数である。MLへの投稿には、9～11時、12～13時、17～19時、そして23～24時にピークがあることがわかる。それぞれ就業開始、昼休み後、就業終了、就寝前に当てはまると考えられる。対してWikiアクセス数や編集は、午後の就業開始から就業終了まで増加していき、17～18時にピークを迎える。これは、MLへの投稿はコミュニケーションであるため、生活における区切りの開

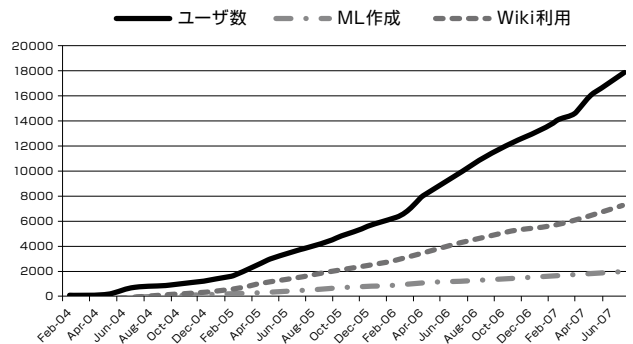


図4 ユーザ数の時間遷移

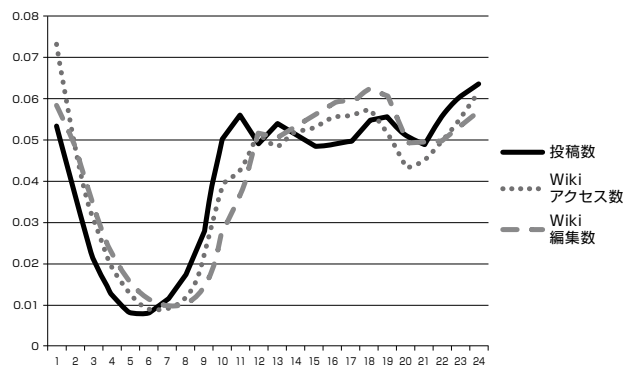


図5 時間帯ごとのMLとWikiとの利用状況の違い
グラフの実線は1日全体の投稿数を1.0としたときの時間帯ごとの投稿数が占める割合を示している。Wikiアクセス数、Wiki編集数も同様である。

始と終了時に頻繁に行われるが、Wiki へのアクセスや編集は作業と密接に関わるため午後の就業時間に頻繁に行われたり、就業終了時や就寝前などの区切りがついた時点でまとめ作業の場として用いられたりしたのではないかと考えられる。

次に、Wiki も ML も利用しているグループでの利用状況について見てみる。ここでは投稿数が 50 件以上、Wiki ページ編集回数 50 回以上、継続期間が 1 年以上の ML に注目した。この条件を満たす ML は全 3,110 個のうち 64 個あった。各月の投稿数と編集回数の大小を比べてみたところ、8 割にあたる 54 個の ML が編集回数よりも投稿数の方が多いう月が多かった。図 6 は幾つかの ML における投稿数、編集回数の累積値を示した値である。図 6-a は ML 中心、図 6-b は Wiki 中心の例である。全体的に最初の数ヶ月が最も活動的(投稿数も編集回数も多い)でそれ以降は少なくなるという傾向が多く見られた。特に Wiki はその傾向が強く、最初に編集があった後は小康状態に落ち着くことが多い。しかし幾つかの ML では突然 Wiki 編集回数が増えるという例もみられた。図 6-c1 および c2 はコンスタントに増加する投稿数に対して、Wiki の編集回数は一時期急増した沈静化したという例である。日常業務での連絡、協働知識構造化として利用している場合には ML も Wiki も定常的に利用され、特定のイベントのために利用

している場合にはそのイベントの前後での利用が多くなっていると考えられる。

以上、qwikWeb の利用状況と ML と Wiki の利用のされ方の違いについて運用結果データを基に述べた。研究ベースの運用にも関わらず qwikWeb 設計と実装の有効性が示せた。

6.2 qwikWebの実践例

技術評論社「Software Design」誌 2005 年 8 月号より 2006 年 7 月号まで、12 回に渡って Wiki に関する記事が連載され、連載の 1 つとして「qwikWeb 徹底解説」^[16] が掲載された。同時に連載を支えるコラボレーションシステムとしても qwikWeb は利用され、最終回において qwikWeb を利用した編集作業の実態^[17] が紹介された。連載において利用された qwikWeb のグループは、同様な利用者の参考になるように一般公開された^[18]。記事によれば、qwikWeb が選ばれたのは「後から追加されたメンバにもプロジェクトの見通しが良いこと」、「メールとドキュメントの両方が閲覧可能であること」などの条件があげられ、qwikWeb の目標が実現されていることがわかる。このことから、qwikWeb が研究ベースの運用であるにもかかわらず、実運用にも使えるクオリティを発揮していたことが確認できる。

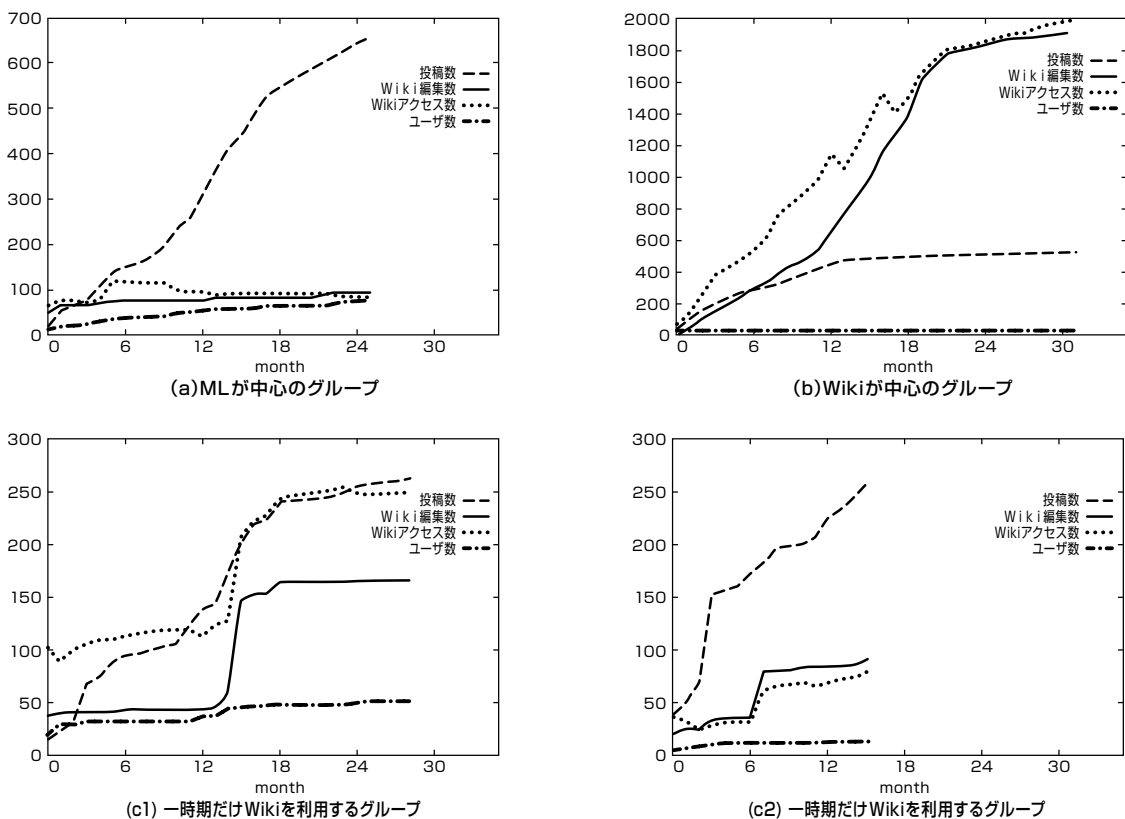


図6 グループによる利用状況の違い

7 関連研究

Wikiの基本コンセプトは誰もが容易に内容を編集できることであり、このコンセプトを踏襲したWikiクローンと呼ばれる同様のシステムが多数存在する。Wikiをより便利に使うために、メールとの連携機能を備えたWikiエンジンもある。JotSpot^[19]では、それぞれのWikiページに対応するメールアドレスにメールを送ることによって、Wikiページを更新できる。PukiWiki^[20]は、受け取ったメールをページへの書き込みとして扱う機能を追加できる。Hiki^[21]は、更新をメールで通知する機能を備えている。いずれもメールをWikiの補完的な機能として用いているが、qwikWebはMLと密に統合されているという点で大きく異なる。

目的を特化したWikiも多く存在する。おそらく最も著名なものはMediaWikiであろう。これはオンライン百科事典のWikipediaに用いられているWikiエンジンである。他にもSemantic Webデータを容易に作成するツールとしてSemanticWikiと呼ばれるWikiエンジンもいくつか提案されている^{[22][23]}。教育用途を目的としたWikiエンジンもある。Guzdialらは、ジョージア工科大学において、CoWebというWikiエンジンを開発し、教育環境において使用している^[24]。2年間の運用において、学内には120を超えるWikiが立ち上げられ、10台のサーバで運営されている。Wangらは、Wikiにページ所有者、書き込み権限、不可視モードの設定などの学習環境に特有な拡張を施した^[25]。Breretonらは、Wikiをベースとした学習支援環境を構築している^[26]。しかし、qwikWebのようにMLとのシームレスな融合システムは提案されていない。

8 まとめ

誰でも構築運営できるコラボレーションシステムの実現に向けて、情報伝達と知識の集約や構造化技術をスムーズに融合したqwikWebを提案した。また、このようなコラボレーションシステムの本格研究を実現するプロセスを明らかにした。本システムをデザイン、実装、運用した結果、約18,000人のユーザが約3,000のMLを利用した。運用データの分析を行うことで本システムの妥当性と有効性を示した。

今後の課題としては、企業による本格運用、ターゲットユーザの絞込みによる改良、携帯電話など、多様な情報環境に向けての改良などが挙げられる。

筆者（江渡）が手掛けている他のプロジェクトとして、仮想生物構築環境Modulobeがある。Modulobeでは、ユーザが作った仮想生物をネット上で共有し、他のユーザはそのモデルを改造して新しいモデルを作り上げることができる。モデルのパーツレベルでつけられたIDによって、モデ

ル間の再利用の関係が可視化される。ユーザ間のコミュニケーションを支援するシステムを運営し、そこから知見を引き出そうとしている点で共通点がある。

qwikWebとModulobeには、また「引き算によるデザイン」という共通点がある。ユーザにとって本質的に重要な機能は何かを考え、それ以外の機能は徹底的に削る。それによってターゲットとなるユーザがシステムを把握しやすくする。qwikWebでは、管理者を設定する機能がない、ページ毎に編集権限を変える機能がないなど、通常存在する機能を削ることでわかりやすさを実現した。これにより利用できない状況も出てくるが、新しいユーザがすぐに理解して使いこなせるようなシステムが実現できた。

今後はよりユーザ間のコミュニケーションを支援し、ネットワーク上の共有知の実現に寄与するような研究を続けていきたい。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興事業団「JST」の戦略的基礎研究推進事業「CREST」における研究領域「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」の研究課題「情報デザインによる市民芸術創出プラットフォームの構築」の支援により行いました。

キーワード

コラボレーションシステム、グループウェア、パターン・ランゲージ、Wiki、メーリングリスト

参考文献

- [1] 総務省: 平成17年「通信利用動向調査」の結果, http://www.soumu.go.jp/s-news/2006/060519_1.html (2006).
- [2] 江渡浩一郎, 高林 哲, 増井俊之: qwikWeb: メーリングリストとWikiを統合したコミュニケーション・システム, *インタラクティブ2005*, 13-20 (2005).
- [3] Lotus Notes: <http://www-06.ibm.com/jp/software/lotus/>
- [4] サイボウズ: <http://cybozu.co.jp/>
- [5] 岡田謙一: 協調作業におけるコミュニケーション支援, *電子情報通信学会誌*, 89 (3), 213-217 (2006).
- [6] 北山 聡: コミュニティを計量する, *人工知能学会誌*, 18 (6), 668-674 (2003).
- [7] B.Leuf and W.Cunningham: *The Wiki Way: Quick Collaboration on the Web*, Addison-Wesley, Reading, MA (2001).
- [8] 江渡浩一郎: なぜそんなにもWikiは重要なのか, *Mobile Society Review 未来心理*, 7, 50-57 (2006).
- [9] C.Alexander, S.Ishikawa and M.Silverstein: *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*, Oxford University Press, New York (1977).
- [10] K.Beck and W.Cunningham: Using pattern languages for object-oriented programs, Technical Report No. CR-87-43, <http://c2.com/doc/oopsla87.html> (1987).
- [11] E.Gamma, R.Helm, R.Johnson and J.Vlissides: Design patterns: Abstraction and reuse of object-oriented

design, *Proceedings of ECOOP'93*, Kaiserslautern, Germany, 406-431 (1993).

- [12] <http://c2.com/cgi/wiki?WikiWikiHyperCard>
- [13] Yahoo! グループ: <http://groups.yahoo.co.jp/>
- [14] freeML: <http://www.freeml.com/>
- [15] 高林 哲, 増井俊之: QuickML: 手軽なグループコミュニケーションツール, *情報処理学会論文誌*, 44 (11), 2608-2616 (2003).
- [16] 江渡浩一郎: qwikWeb徹底解説, *Software Design 2006年5月号*, 102-111 (2006).
- [17] しばむらしのぶ: qwikWeb上のWikiつまみぐい—Wikiつまみぐい運用の舞台裏, *Software Design 2006年7月号*, 113-115 (2006).
- [18] <http://qwik.jp/wikibana-gihyo/>
- [19] JotSpot: <http://www.jot.com/>
- [20] PukiWiki: <http://pukiwiki.org/>
- [21] Hiki: <http://www.namaraii.com/hiki/>
- [22] 武田英明, ムリアディ・ヘンドリー: Semantic MediaWikiの構築に向けて, *人工知能学会研究会資料*, SIG-SWO-A404-06, 06-01-06-03 (2004).
- [23] 河本健作, 北村泰彦: Semantic WikiによるRDF自動生成, *人工知能学会研究会資料*, SIG-SWO-A501-02, 02-01-02-06 (2005).
- [24] M.Guzdial, J.Rick and B.Kerimbaev: Recognizing and supporting roles in CSCW, *Proceedings of the 2000 ACM conference on Computer supported cooperative work*, 261-268 (2000).
- [25] C.Wang and D.Turner: Extending the Wiki paradigm for use in the classroom, *Proceedings of the International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'04)*, 2, 255-261 (2004).
- [26] M.Brereton, J.Donovan and S.Viller: Talking about watching: Using the video card game and wiki-web technology to engage IT students in developing observational skills, *Proceedings of the fifth Australasian conference on Computing education*, 197-205 (2003).

(受付日 2007.12.26, 改訂受理日 2008.3.10)

執筆者略歴

江渡 浩一郎 (えと こういちろう)

1997年 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修了。同年、国際メディア研究財団に所属。メディアアーティストとしてネットワーク上のコミュニケーションをテーマとした作品制作活動を行う。1996年「WebHopper」を制作。1997年 アルス・エレクトロニカ賞グランプリを受賞 (sensorium プロジェクトとして)。1998年 Canon ARTLABとの共同制作として「SoundCreatures」を制作。1999年 アルス・エレクトロニカ賞 Honorary Mentionを受賞。2002年 産業技術総合研究所に所属。2003年より、「qwikWeb」の開発・運用を継続する。2005年、仮想生物構築環境「Modulobe」を発表する。ネットワーク上の共有知を支援する情報共有環境に興味を持つ。修士 (政策・メディア)。情報処理学会会員。本論文では主として qwikWeb の設計、開発および試験運用、論文作成を行った。

濱崎 雅弘 (はまさき まさひろ)

2000年 同志社大学工学部知識工学科卒業。2002年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2005年 総合研究大学院大学数物科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報学)。同年より、産業技術総合研究所情報技術研究部門勤務。情報推薦やオンラインコミュニティの研究に従事。人のネットワークを活用した情報システムに興味がある。人工知能学会、電子情報通信学会、

ACM、各会員。本論文では主として qwikWeb の試験運用データ解析および論文作成を行った。

西村 拓一 (にしむら たくいち)

1992年 東京大学工学系大学院修士 (計測工学) 課程修了。同年、NKK (株) 入社。X 線、音響・振動制御関係の研究開発に従事。1995年 技術研究組合新情報処理開発機構つくば研究センタに向向、1998年 NKK (株) 復帰。1999年 技術研究組合新情報処理開発機構つくば研究センタに所属。2001年 産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センターに所属、2005年 同情報技術研究部門実世界指向インタラクショングループ長、同年筑波大学大学院知能機能システム専攻 助教授 (連携大学院) を併任、現在に至る。博士 (工学)。時系列データ検索・認識、実世界情報支援に興味を持つ。電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会ヒューマンインタフェース学会、赤外線学会、ACM、各会員。本論文では主として本研究の位置づけおよび論旨展開の構築、論文作成を行った。

査読者との議論

議論1 ユーザ参加型の開発改良について

質問 (大蒔 和仁)

「システム設計には、利用者である末端ユーザも直接関与する仕組みを用意することが大変重要である」という観点が重要だと思いますので、その点を明確に記載されたらどうでしょうか。

回答 (江渡 浩一郎)

ご指摘の通り、情報システムではこのユーザ参加型の開発改良プロセスが重要な点ですので、「2. Web システムの本格研究」をより分かりやすくしました。末端ユーザの直接関与は非常に重要な点なのですが、今回の開発においては、ユーザにシステムを使っていたいただき、その様子を細かく観察し、観察結果を元に必要な機能を考えるという手順をとりました。ユーザはシステムに関しては素人なので、本当に必要な機能を提案できるかという点、必ずしもそうではありません。逆に末端ユーザは彼ら自身の仕事については専門家なので、彼ら自身の仕事のプロセスを元に開発者が必要な機能を決定いたしました。この点は2章に関連部分を記述いたしました。

議論2 ソフトウェアの権利関係について

質問 (大蒔 和仁)

qwikWeb の権利関係はクリアになっているのでしょうか。

回答 (江渡 浩一郎)

qwikWeb に関しては、直接開発に関与した人員は産総研職員のみであり、他者との権利関係は明確となっております。システムの一部として QuickML を利用しておりますが、こちらは GPL に基づいてフリーソフトウェアとして公開しているもので、qwikWeb も同様に GPL を選択していますので、権利関係上問題はありません。

議論3 ソフトウェアの学習について

質問 (大蒔 和仁)

査読者が、Wiki を使って感じるの、簡単だとはいつても「パターンランゲージ」をある程度学ばなければならない点です。このトレードオフをどう考えるか、という点の言及が欲しいと思います。

回答 (江渡 浩一郎)

良い御指摘ありがとうございます。まずパターンランゲージは Wiki の背景となる思想で、それを学ばないと Wiki を使えないわけではなく、簡単な使い方を学習すればまず使い始めることは誰にでもできます。その上で Wiki を Wiki らしく使うためには御指摘の通りある程度はパターンランゲージを学ばないといけないのですが、それは Wiki の背景となる思想を身につける必要があるということであり、

徐々に修得していくことができるという種類のものです。逆に言えば、そのように Wiki を使いこなしていくことで、徐々にパターンランゲージの思想に触れることができるようになっており、それが Wiki の利点の1つであると考えています。

Wiki では、Wiki 記法という独自のマークアップランゲージを使って文章の構造を明示する必要があるのですが、たしかにその学習のための負担も無視することはできません。しかし、Wiki 記法を使って文章を書いていくことによって、文章の構造に自覚的になるという利点もあります。実際に大学の授業で Wiki を教える際には、そのように文章を構造化して書く利点と共に Wiki 記法を教えることによって、自然と Wiki 記法を修得させることができました。トレードオフですが、Wiki 記法にはそのような利点もあります。

この点を御指摘の通り、説明を加えました。

議論4 開発の目標とシナリオと要素技術の選択プロセスについて

質問（赤松 幹之）

「2.3節」の最後にポイントとして4点を掲げていますが、1点目を除いて、ML と Wiki の連携が前提となった説明になっていました。できれば、この4点をシステム設計上の目標とする4点として記載して、それぞれを満たすために検討した結果、ML と Wiki の連携という方針で行くことにした、というシナリオを書けると良いと思います。（「シナリオ」の記載）同時に、要素技術の選択プロセスがあったと思いますので、ML や Wiki 以外を検討した結果、それらは採用しなかった、という「選択のプロセス」を書いていただければと思います。

回答（江渡 浩一郎）

シナリオに関して、ご指摘の通り元の論文では明確になっておりませんでしたので、図1のプロセスに則った章だてにし、現状のコラボレーションの問題点と解決策（ご指摘くださった「管理の容易さ」と「知識の蓄積・構造化」）、その解決のための基本思想、その基本思想に

近い Wiki を選択、システム設計における基本設計で QuickML を採用という流れに修正いたしました。選択のプロセスについては、4.1.1にて要素技術として Wiki を選択した理由を述べ、4.1.2にて Wiki について説明し、4.2.1にて要素技術として QuickML を選択した理由を述べ、4.2.2にて QuickML について説明しております。

議論5 運用における改良プロセスについて

質問（赤松 幹之）

「4. qwikWeb の運用」において、ユーザの利用データの分析の結果を示していますが、これが図1のなかの、フィードバック情報の分析、システム修正、システム運用、のサイクルに対応したセクションであると思われますが、このサイクルによってシステムの修正がどのように行われたかが書かれていません。そういった改良とのつながりが分かるようにできますでしょうか？

回答（江渡 浩一郎）

「6.2 qwikWeb の実践例」を設けて代表例を説明いたしました。この「フィードバック」に関しては図1の説明と対応させました。

議論6 研究開発の困難性について

質問（赤松 幹之）

この論文を読むと、簡単に qwikWeb が実現できたかのような印象を持ちます。実際には種々の苦勞があり、それらを解決した上で実現できているのではないかと想像します。そういった技術的な困難さがどこにあって、それをどのように解決したのかの記述があると、読者の大いなる参考になると思います。

回答（江渡 浩一郎）

5.2 節に実装上の苦勞と運営上の苦勞を記述いたしました。

サービス工学序説

—— サービスを理論的に扱うための枠組み ——

吉川 弘之

サービスを理論的かつ体系的に論じるための枠組みを提起する。その枠組みでは、一人の人（ドナー）が他の一人の人（レセプター）にするサービスを原始サービスとし、ドナーから発現したサービスをレセプターが受容することによって生じる結果をサービス効果とする。一般のサービスはそれが媒体によって増幅されたものであるが、経済の仕組みと関係なく存在する原始サービスが道具や様々な社会の仕組みによって増幅され、サービス産業を作り出す。

1 序

本論文は、サービスを工学的に論じるために必要な体系を述べるものである。その体系を、現実のサービスの向上に役立つ“製品”と考えて構成し、その構成過程をできるだけ明示的に示す。体系は、サービス工学の目的、適用範囲、関連する学問領域などを明らかにするとともに、サービスを理論的に取り扱うために必要な概念を抽出し、概念間の関係を明らかにするものでなければならない。一方、サービス工学は、サービスという視点からの社会、産業の再考、新しいサービスの創出とその産業化、サービスの要素技術の抽出とその改善、既存産業におけるサービス生産性の向上などに資するものであることを要件とする。

サービスについて考える本論文の基本的立場について触れておく。以下に述べることは、以前から筆者らが論じてきたことなのであるが^{[1]・[3]}、ここで本論文の出発点として整理しておくことにしよう。

- (1) 人は機能を発現する能力を持つ^[1]。
- (2) すべての物は機能を持つ^[1]。
- (3) 機能は人にとっての意味あるいは価値として認識される^[1]。
- (4) 自然も人工物も機能を持つが、人工物の機能の中には製作者の意図によるものが含まれる^[1]。
- (5) 物の価値は、物体そのものにあるのではなく、それが持つ機能にある^[2]。
- (6) 機能は潜在し、行動あるいは使用によって顕在化するが、行動あるいは使用の態様により異なる機能が顕在

する^[1]。

- (7) サービスとは顕在機能である^[3]。
- (8) サービスは産業の成立以前から存在する人固有のものであり、人が社会を作ることの最大の動機であった^[3]。
- (9) 人工物としての工業製品は、意図した機能の担体であるから、製造業とサービス業とは独立のものではなく、相互に複雑に関係し合う^[2]。
- (10) 製造業の作る製品はサービスを強化、あるいは増幅するためのものであるから、理念的には、サービス産業は製造業をその内に含む^[3]。

などである。すなわち、ここではサービスとは人にとって意味あるいは価値のあるものであり、したがってそれは物理学で論じることはできず、機能学で論じるべきものであることを主張している。しかしながら、物理学の整合性に匹敵する機能学があるわけではなく機能学は途上の学問であり^[4]、したがってサービス工学は基礎とすべき機能学の進展と並行して、ないしはその進歩を担いつつ、発展すべきものであることが理解される。この点は本論文においても現れる困難な課題である。しかし、その課題にしばしばぶつかることがあるとすれば、サービス研究が機能学の進歩に寄与する可能性が大きいことを示しているといえる。

サービス工学では、機能と価値を区別して論じる。ここでは機能を個人の主観によらないものとする。一方、価値は個人にとってのものであり、人の価値観に依存し、したがって人々が同一物に対して多様な価値を見出す問題と切り離して考えることができない。人の価値観はサービス工

学を超える問題であって、いずれ個別のサービス問題を論じるときに触れることを避けられないが、ここではそれに立ち入らない。ただし、価値という言葉を経済的に合意したものとして用いるときは、「社会的価値」としてここでも用いることがある。

現在、生態系サービス (eco-system service)^[6] や自然の価値^[7] などが指摘され、自然の人間に対して行うサービスという観点が注目を集めている。これは極めて重要な視点であるが、本論文の立場でそれは機能の問題としてのちに議論することとなる。ここでの基本的立場は、サービスは「人が人にする」ものである。

サービスの厳密な定義はここではせずに、ただ顕在した機能と考えておくと、あえて言えば、本論文全体がサービスの定義となっている。ただし、本文で注釈なしにサービスというときは、一般用語としてのサービスと考えておく。

2 基本的枠組

2.1 サービス一般

ある人が、ある動機に基づく意図を持って他の人に何らかの影響を与えようとして取る行動を、サービス行動という。一般にそれは時間的経過である。これは人が一人で生きているときにはない。人が社会を作ることで生じるもので、社会を作る根拠でもある。のちに、自分にするサービス、自然の恩恵としてのサービスなどを考えることになるが、それは特殊な、あるいは縮退したサービスとして取り扱う。

ある人が他の人にサービスする。これをサービスの提供行動という。すると他の人は受けたサービスにこたえて固有の行動をする。それを受容行動という。ある人がサービス提供者（ドナー）で、他の人がサービス受容者（レセプター）である。各行動は一般には時間的に特徴づけられた時系列である。全行動が終了したとき、サービスの結果として、提供者と受容者との変化に加え、外界にも変化が起

きる。この変化の総和をサービス効果という。この一連の過程を、サービス現象と呼ぶこともある。

ある人も他の人も一人のとき、そのサービスを原始サービスという。図1に若干の例を示す。原始サービスは、直接あるいは媒体（ビークルと呼ぶ）を通して行われる（直接する方法がなく、どんな場合でも媒体を通してしか行えないような原始サービスの場合は、のちに述べるように媒体はサービスを強化する場合があるので、原始サービス用の標準媒体を定めておく必要がある）。原始サービスは連鎖を作ることがある。原始サービスでない場合に次の呼称を与える。提供者が一人で受容者が二人以上の時を分配されたサービス、提供者が二人以上で受容者が一人のときを結合されたサービス、提供者も受容者も二人以上のときを社会化されたサービスと呼ぶ。この組み合わせを含む連鎖により、サービスはネットワークを作ることができるようになる。

各行動が終了したとき、提供者の提供を目的としたそれまでの行動の時間的な和をサービス提供量という。受容者に起きる変化は、提供者が動機に基づいて提供行動したことの成果であるが、それをサービス主効果と呼ぶ。サービス主効果は、受容者の受容行動の結果として起こる変化の時間的な和であるが、それは多様であり、物理的なもの、身体的なもの、精神的なものに分けられる。

提供行動の結果として起きる受容者以外の変化、それは提供者自身に起きる変化（例えば疲労）、用いた道具等の媒体に生じる変化（例えば摩耗）であり、副次効果と呼ぶ。外界に影響を及ぼした結果起こる外界の変化（例えば環境汚染）は波及効果と呼ぶ。それぞれの変化はそれぞれの行動（もの場合は反応）の結果であるが、それは多

D: ドナー R: レセプター効果: ①身体、②精神、③物質

意味 (コンテンツ)	Dの準備 (設計・計画)	Dの提供行動	Rの受容行動	Rの効果 (機能量)	Dの例	Rの例	
①	医療	診断	治療	健康量	母親	子供	
	介護	判断	介護	依存	若者	年寄り	
	補助	依頼	補助	協力	力自慢	力なし	
	移動	指定	移送	服従	運転手	同乗者	
	飲食	料理	提供	飲食	夫	妻	
②	美容	決断	化粧	容姿	人	自分	
	宿泊	準備	提供	睡眠	主人	客	
	教育	評価	説教	習得量	親	子供	
	情報	制作	配信	受信	情報量	知人	
	相談	分析	提案	解決	問題解決	長老	悩める人
③	音楽	演出	演奏	聴取	演奏者	聞き手	
	物語	制作	発話	楽しみ	拝聴	聞き手	
	娯楽	演出	演技	鑑賞	解放	家族	
	保管	評価	維持	委任	量×時間	預かり人	預け人
	輸送	梱包	配達	委託	量×距離	運搬車	受領者
保全	診断	修理	受取	回復性能	直せる人	直せない人	
生産	設計	製造	使用	利便	器用人	使用者	

図1 原始サービス例

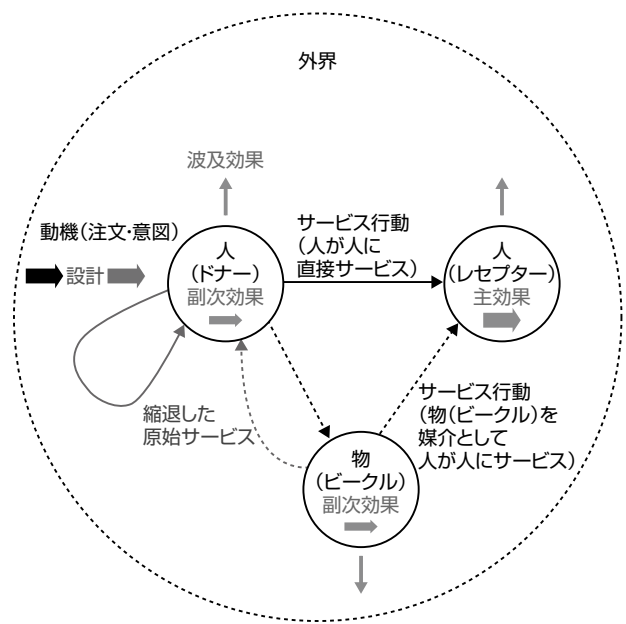


図2 原始サービスの基本系

様であり、人の場合は身体的なもの、精神的なものに分けられ、物の場合は物理化学的なものである。

以上の定義は、従来の刺激、応答の考え方と矛盾しない。サービスの提供行動が刺激で、受容行動が応答であると考えてよい。しかし、ここではこの考え方をとらない。それは、のちに述べるように、サービスにおいては刺激、応答とみなされるものが図2に示すような固有の構造をもっており、その構造の明示なしには、サービスの本質を論じることができないからである。その構造に配慮する必要がなく、いわば巨視的、現象的にサービスを論じる場合には、刺激、応答の図式を用いることもある。

2.2 サービス提供者 (ドナー)

サービスを提供するサービス提供者 (以下ドナーと呼ぶ) は、ある動機に基づいて行動する。動機は多様であるが、基本的に自律的なものすなわち意図と、他律的なものすなわち注文とに分けられる。意図あるいは注文は、サービス受容者 (以下レセプターと呼ぶ) の主効果を指定するものである。意図あるいは注文を受けて、効果を実現するのに有効なサービス行動を設計する。設計はだれがやってもよい。注文者であるレセプターがする場合もあるが、多くは提供するドナーがすることになる。のちに述べるように、サービスが社会化すると、サービス設計者という専門家が登場する可能性が生じるが、それはサービス問題の重要な特徴であるドナーとレセプターの間のコミュニケーションを弱める可能性があり、別に論じる必要がある (製造業における既製サービスの問題)。

ドナーが設計するとした場合、その設計に従ってドナーは行動するが、そのうちの一部が有効なサービスとなってレセプターに送られる。ここで、意図あるいは注文に対する設計の良さ、ドナーの行動における動作や表現の熟練度および伝達効率によって、注文からの提供サービスのずれが生じる場合がある。このずれは、ドナーに起因するずれであり、ドナーの総合的な能力に依存するのであるから、このずれを抑制する能力をドナーのサービス実現能力と呼ぶ。これらはあとで定義する。

2.3 サービス受容者 (レセプター)

レセプターは、ドナーからのサービスを受容すると、ある行動を起こしてその結果が効果となる。効果は物理的変化 (状況、場所の変化など)、身体・生理的変化 (病気回復など)、精神的変化 (知識増加など) があって、簡単な物理量では表現できない状態変化である。サービスを受けるレセプターは、受容することによって生起する主効果に期待を持っていて、それが注文として表現される。

ここで強調すべきことは、本論文で、レセプターの状態変化は与えられるものでなく、レセプター自身の行動が

作り出すものとする立場をとることである。すなわち、

提供サービス → レセプターの行動 → レセプターの状態変化

と考える。ここで行動とは必ずしもレセプターの意志的行動とは限らない。例えば麻酔した状態で手術を受けた患者が、麻酔が効いている状態のまま回復するのも行動と考える。意志的か否かにかかわらず、患者自身の生理的行動がなければ回復はないからである。したがって、この過程でのレセプターの行動には、物理的、身体的、精神的なものがある。

このことは、サービスという外からの刺激によって、受容者自身が持っていた潜在能力が発現して受容行動となり、それがレセプター自身に効果を引き起こすと考えることに他ならない。すなわち自分の行動で自分自身に効果を引き起こすという、生きているものが持つ基本特性にサービス問題を帰着させる。

このように考えるのは、ドナーの提供したサービスが直接にレセプターの状態変化を引き起こすと考えることは人を受動的な機械と考えることに近く、サービスの本質であるレセプターの主体性があいまいになってしまうからという理由もある。言い換えれば、ドナーからの刺激による、レセプターの潜在能力の主体的判断を伴う発現である行動をまず考え、次にその行動がレセプター自身に起こす効果を考えることに本質があるからで、この場合は反応の固有構造を無視してはサービスの本質を見失ってしまうことに注意しなければならない。そのことを理解した上で現象的に刺激と反応としてサービス提供と主効果の発現とを考えるときは、両者の直接的な関係をレセプターのサービス受容感受性とし、その値を受容感度と呼ぶこともできる。

この考えに立てば、自分が自分自身に対して行うサービスが次のように理解される。自分にある効果が生じるよう期待を持つとき、それが実現することを目的にしてある行動をとる。それは提供行動であるが同時あるいは連続して受容行動が起こる。その受容行動が効果を引き起こす。ここではドナーとレセプターが同一の人であり、これを一人の人が他の一人の人にする本来のサービスが縮退した場合と考える。この考えのもとでは、他の人からサービスを受ける理由は、縮退したサービスが出来ない、またはしたくないからであることになる。この、出来ない、あるいはしたくないという状況が起こり得ることが、サービスが社会的に存在することの根本的な根拠である。

レセプターにとって、受けたサービスに対する充足の程度は、提供サービスが結果としてレセプターの期待にどの

程度応えたかによって測られる。これをサービスの充足度という。レセプターの期待とは、レセプターの注文である。おそらくサービス問題の最も困難な点は、この注文がレセプター自身で完全には把握されていないことにある。それは、まず注文を出す動機としてのレセプターの判断による状況を基本とし、レセプターの価値観、感受性などを要因として決まるものであろうが、これらはいずれも主観的な性質をもっており、客観的に表現することが難しい。ここでは本論文の立場に立ち、それらの内部構造や内容の考慮には立ち入らず、それらをまとめて、レセプターの期待とはレセプターにとって“起きてほしい効果”であるとしておく。

この期待が起点となってサービスが生起する場合が一般的であるが、それは次のような遷移で構成される。

レセプターの期待（起きてほしい効果）→ドナーによる設計
→サービス提供→サービス受容→レセプターの行動→レセプターに起きた効果

ここで、上記の各遷移の“良さ”が、のちに検討するサービス生産性などに影響を与えるので、ここでそれらを定義しておく。生産性の向上は、上記の連鎖がループを作っていて、そのループの上での情報循環がサービスの進化を起こすことが基本である。

- (1) 設計の良さ（ドナーあるいはサービス設計者の能力）
効果で表わされたレセプターの期待に対し、それを実現すべく設計されたサービスが引き起こす効果が予想される時の、両効果の関係。ここには、レセプターの期待をレセプターが注文として表現する能力と、レセプターに起きてほしい効果をドナーが理解する能力との関係が含まれる。
- (2) サービス提供の熟練度（ドナーの能力）
設計に従ってドナーが提供するサービスの、設計に対する関係
- (3) 伝達効率（ドナーとレセプターを媒介するものの質）
ドナーが提供するサービスに対してレセプターが受容するサービスの関係
- (4) 受容行動係数または関数（レセプターの特性）
受容したサービスとレセプターの行動との関係
- (5) 効果実現係数または関数（レセプターの特性）
レセプターの行動と起きた効果との関係

これらを定量的に求めることは、サービス工学研究の重要な仕事である。

2.4 補助的な概念

以上に、サービスを考察するための基本的な概念について述べたが、ここで補助的な概念について述べておく。おそらくサービスを現実を考えるときに必要となるのは、起きた効果と起きてほしい効果との関係である。実用的には、これをサービス充足度と呼んでよいと思われる。期待（起きてほしい効果）は

(1) → (2) → (3) → (4) → (5)

の順で効果にまで変形されてゆくから、ここで考える充足度は、(1)と(5)との関係である。ところで(1)と(2)とはドナーの能力であり、(3)の媒体もドナーが選ぶのが一般であるから、(1)、(2)、(3)をまとめてドナーのサービス実現能力と呼ぶことができる。一方、(4)と(5)とはレセプターの特性であり、サービスを受容する能力であるとも言えるから、まとめて受容者の受容感度と呼んでよい。すると、レセプターに起きた効果を主効果として、

主効果 = ドナーの実現能力 * レセプターの受容感度 * 起きてほしい効果

の関係が得られる。*は現在のところ不明であるが、サービスを考える上で重要な関係である。ここで〈ドナーの実現能力 * レセプターの受容感度〉が得られるとすれば、それはドナーからみると与えられた期待に対する到達度であるが、レセプターからみるとサービス充足度と考えることができる。これはサービスを現象的に考察するときに便利な表現である。

この（ドナーから見た）サービス到達度と、（レセプターから見た）サービス充足度は同じものであるが、それはドナーの特性（能力）とレセプターの特性（能力）とを同時に含む両者の特性の総合的性質である。ところで、レセプターの受容行動係数と提供されたサービスの質とは独立とは限らず、依存関係があるのが一般である。上記の主効果に関する実用的、あるいは現象的表現は、両者が独立であるときに明解な意味を持つのであって、そうでないときはあまり有用ではない。したがって、両者が独立であるような特性の選定が必要であるが、それはサービス工学の研究課題である。また、

ドナーの提供能力 * レセプターの受容感度 = 1

というのは、到達度、充足度がともに1で、完全なサービスと呼ぶことができるが、それは完璧な設計、最高の熟練、損失のない伝達、正確な反応、習熟した機能発現のときにはもちろん実現するが（十分条件）、それは現実的でなく、他

の条件下で可能な実現方法を求めるのはサービス工学の課題である。

2.5 サービスの時間的考察

2.1で述べたようにサービスは時系列である。上述の議論ではそのことを明示的に述べることをしなかったが、それは時間を無視してよいことを意味していたわけではない。サービスの特徴のひとつはその時間的経過なのであって、それについての考察は最も重要な部分である。それをここまでの議論で保留していたのは、機能学における時間の取り扱いが定まっていないからであり、ここでサービスの時間的側面を議論するのは機能の時間的議論を含むことを意味し、極めて大きな問題を背後にもつことになる。したがってここでは、できるだけサービスに限定して時間的側面を原則的に考察することを試みる。

(1) 機能とサービスとの関係

人の行動や物の使用が、潜在能力を顕在化するのであったが、ここでは能力が作動することを機能発現と考えるので、潜在能力は潜在機能と言い換えられる。すると、行動や使用によって、機能が“ゆっくり”顕在すると考えることができる。その関係をここでつぎのように考える。潜在機能を L とし、顕在機能を F 、顕在機能の出現速度を f とし、

$$L_{d0} = L_{d1}(t) + F_{d1}(t)$$

$$f_d = -k_d \cdot d(L_{d1}) / dt$$

であるとする。dはドナー。 L_0 は潜在機能の初期値で、これがゼロになった時サービスがもはやできなくなると考えることにすれば、ドナーのそのサービスに関する寿命を決めるものと考えてよい。顕在機能 f は機能の出現速度であるが、これはサービス提供の時間速度であり、一般に言うサービスはこれに相当しているといつてよいであろう。 k は便宜的なもので、別に定義しなければならない。

(2) 効果とサービスとの関係

受容の場合も同様の定義が必要である。受容は、機能がある速度で流入する状態である。しかし f_r で流入した機能がそのままレセプターの潜在機能になるわけではなく、それは、レセプターがすでに持っていた潜在機能 L_r から f_r' を自らに対して発現させ、効果を生み出す。これがサービス効果 e である。すると

$$f_r = k_r \cdot d(F_{r1}) / dt$$

$$F_{r1} \neq L_{r1}$$

$$L_{r0} = L_{r1}(t) + F_{r1}'(t)$$

$$f_r' = k_r' \cdot d(F_{r1}') / dt$$

$$f_r' = -k_r' \cdot d(L_{r1}) / dt$$

$$F_{r1}(t) = (\text{設計のよさ、熟練度、伝達効率}) * F_{d1}(t)$$

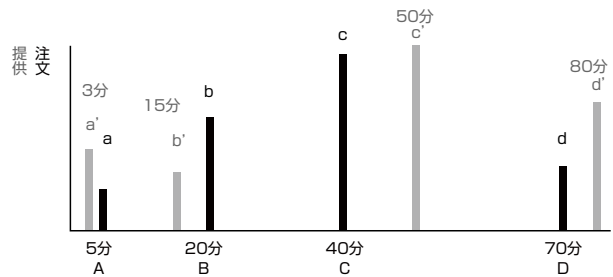
$$f_r' = (\text{受容行動係数}) * f_r$$

$$e = (\text{効果実現係数}) * f_r'$$

などとなる。 r はレセプター。提供サービス F_d はレセプターに届くとき F_r であり、それは f_r としてレセプターに流入する。それを受けたレセプターは、 L_r を時間速度 f_r' で発現して F_r' を増やしてゆく。これらの関係はもちろん両者が量的に表現された場合であり、量的表現は一般に容易なことではない。しかし、現実の場面では、知らず知らずのうちに量的考察をしている場合も多く、その厳密な考察は有用である。それはサービス工学の課題であるとしておき、ここでは1つの例題でその課題の輪郭を示す。

例題) レストランでの食事

ある人が食事をするためにレストランへ行く。席に着きメニューを見て食前酒(A)、前菜(B)、主菜(C)、デザート(D)を選択する。そしてそれらを注文する。これがレセプターの注文である。注文を受けた料理人は注文者の好みを考えてつつ料理の内容を組み立て(サービス設計)、実際に料理し(サービス動作)、配膳する(サービス提供)。ここで直ちに明らかになるが、配膳の時間計画が重要である。まず食前酒、前菜、主菜、デザートの順序が厳格に守られなければならない。しかしそれだけではなく、各料理の間の時間間隔も極めて重要である。しかしながら、通常その間隔を注文客が指定することはない。すなわちここでは、レセプターの期待をドナーが推定するという、設計行為が付け加えられる。この例では、ドナーの提供行動の動機は注文である。そこで簡単にするために、レセプターが注文時間を指定したことにして、注文通りに提供された時には完全に期待が満たされる、言い換えれば受容行動、効



R注文 美味しい食事を楽しみたい。メニューA、B、C、Dを選ぶ。それをa、b、c、dの時間経過で提供しよう期待し、それで注文する。

D提供 Rの注文にできるだけ合うように準備すなわち料理し、時間を見計らってa'、b'、c'、d'のように提供。

図3 レストランで食事

果実現が完全、すなわち両係数が1ということにしておく。

その結果が、例えば図3であったとする。注文に対して提供行動がずれている。ずれは、期待と提供の間の質ないし量のずれ（図中では質を評価して量化してあり、 x, x' とする）と時間的ずれ（期待が t 、提供が t' ）であり、到達度の低下を招いている。もちろん充足度も下がる。その値は、例えば次のように求めてもよいであろう。

$$\text{充足度、到達度} = 1/4 \Sigma (xx' / x^2) (1 - (|t-t'| / t)) = 0.69$$

充足度は70%程度になる。この例のように、サービスは時系列として考えなければ現実的な問題に対応できない。この例では、提供のうち配膳の時刻だけを示すにとどめているが、それは離散化による近似である。

本来は提供も受容も時間の連続関数になると考えられる。個別のサービスを、ドナーの行動やレセプターの挙動などに注目して、工学的に設計したり分析したりする場合は、サービスをより微視的に記述し、連続過程として考えることが必要になるであろう。今の例でいえば、ドナーの料理人は配膳のための設計、動作を伴う準備（提供に含まれる）の時系列を持つし、一方レセプターである客も、料理が出てくるまでの期待、飲食、配膳間の休憩などの受容の時系列を持っている。その間の時系列の表現には工夫が必要であるが、可能である。例えばその過程とは、ドナーが準備によって次第に“提供のための機能”を増やしてゆくこと（“作るための機能”はすでに発現している）、そして配膳によって提供行動が起こると、それはレセプターに対する機能の発現であり、顕在機能すなわちサービスとなり、蓄積である潜在機能は減る。準備によって蓄積した潜在機能の変化（時間微分）がサービスであるとは、このようなことである。配膳でレセプターの受容が一気に高まり、それによって食事という受容行動が起こり、充足が進み、食べ終わるとゆっくりと余韻を楽しむ中で新たな充足が起こるといような時間経過をたどる。ドナー、レセプターそれぞれの要素は独立でないし、また当然両者の要素間にはサービスを特徴付ける関係があるから、サービス問題は、自己相関性のある有限連続過程の間の相互関係になると考えられる。

3 サービスの増幅

ここで、サービスの増幅について述べる。これはサービスが現在産業あるいは経済問題として注目を集めていることと関係のある重要な課題である。サービスの生産性とも関係がある。これらの課題はいずれ議論することになるが、ここではその議論に必要な基本的な概念について

述べておく。

サービスは、増幅することができる。増幅は、媒体（ビークル）によって行われる。一人の人が他の一人の人に作る原始サービスをサービスの基本単位とし、それに対する比でサービスの増幅率を表す。

増幅には2つのモードがある。第一は原始サービスの条件の中での媒体による強化である。一人の人が一人の人に、直接でなく媒体（この場合は道具であることが多い）を通してサービスする時、直接の場合よりも道具によってサービスが高速化したり広域化したりすることがあるが（人を移送するとき、自動車を使えば背負って歩いて行くよりはるかに高速なサービスを提供できるように）、それを強化された原始サービスと呼ぶ。背負って歩くという原始サービスが、自動車という媒体（道具）の強化によって増幅されたのである。第二のモードは増殖である。媒体を使ってネットワークを作り、サービスを多数の人に、一人あたりの提供量を減らすことなく分配することができれば一人のサービス提供者が複数の受容者に同じサービスをすることになり（一人に語りかける落語は、テレビによって何万人が聞けるように）、サービスの総量は増大する。このようにサービスが分配される場合を、増殖による増幅と呼ぶ。

提供者と受容者を関係づける媒体（ビークル）には、装置や機械などの道具（ツール）、会場や建物などの状況（サーカムスタンス）、そして国家、行政府、地域、組織などが定める法律、制度、規則、習慣などの社会的仕組み（ソーシャルシステム）がある。それらは図4のような例が考えられる。これらの増幅率を定量的に求めるためには、それぞれの場合について工夫が必要である。簡単な例でいえば、上に述べたように、テレビの台数が増殖による増幅率と考えてもよいであろう。強化のほうは、例えば背負って30分かかったのを、自動車を使って5分で移動のサービスをしたとすれば、強化による増幅率は6である。しかし、このよ

増幅媒体	媒体の種類	サービス増幅媒体の例
道具 (Tool)	工具、機器、機械、 データベース、ソフト、 ウェア等	テレビ、マッサージ機器、自動車、 ワープロ、検索システム (すべての機器はサービス増幅器 である)
状況 (Circumstance)	構造物、空間配置、 ネットワーク等	劇場、ホテル、遊技場、 情報ネットワーク、道路
社会的仕組み (Social System)	法律、制度、規則、 組織、習慣等	政府、区役所、交番、銀行、店舗、 通信システム、交通システム、 病院、学校、企業 (行政・金融・流通・通信・運輸・ 医療・教育サービス)
合成による増幅 (Integration)	上記の合成	

図4 サービス媒体の例

うに計量できる場合ばかりとは言えず、質的な向上もあって、定量化は簡単でない。例えば前述のレストランで、料理の出来栄（例えば味付け）に対する充足度を簡単に数量化したが、それは必ずしも正確なものではない。この点については、サービス領域のそれぞれにおいて、関連する領域の知識を利用したり新しい視点を導入したりして、実際に有効な計量法を定めなければならない。

増幅のコストを考えると、視点は経済へと移ってゆく。そこにはサービス生産性を始め多くの課題がある。現在急速に関心が広まり検討が始められている課題は、この領域に属するものが多い。

4 まとめ：関連領域と研究課題

以上は、現実のサービスの向上に有効に使えることを条件として、サービスとは何かを考える基本的枠組みを述べたものである。それはいわばサービスの基本モデルであるが、このモデルの正当性を確認する作業はこれからである。このようなモデルが、科学的あるいは工学的モデルと呼ばれるためには、その正当性が客観的に検証できるような形式をもっていなければならない。本論文のモデルは、その形式を持っているものとして提起されているが、検証は実験室の実験で行えるようなものではない。この場合の検証は以下のような過程を必要とする。

まず関連分野を明らかにする。以下に述べるように、多くの分野がある。抽出されたそれぞれの分野で、既知の知識で説明可能なものと、新知識を必要とするものとを明らかにする。新知識の創出を必要とすれば、それはサービスの科学ないし工学的研究である。次に領域間の関係を明らかにする。異なる領域を統合する方法はまだ研究の途上であるから^[8]、現在のところサービスに固有の問題として解くほかはなく、サービスに関するシステム研究と呼べるであろう。

以下に、前節までに述べた枠組みの創出において明らかとなった関連分野を、その抽出理由、知識の完全性、不完全性ととも、サービス研究として何をすべきかについて簡単に述べる。まず原始サービスを念頭に置いて述べ、その後増幅について触れる。その上で、サービスに関するシステム研究の方向を示唆することにしよう。それはサービスの要素についての科学研究に基づいて、いかにして現実的によいサービスを作り上げるかという構成的研究を展望することにもなっている。

(1) 機能

1章で述べたように、サービスは顕在機能であると考えたのであるから、機能とは何か明らかにすることによって

サービスも明らかになるという関係がある。しかし長い間、機能はいろいろな分野で言及されながらその実体を把握するのが難しく、機能学と呼べるほど体系化もしておらず、まだ量的取扱いをすることに成功もしていない^{[1][4][5]}。したがって、一般的な表現を求めることはせずに、個別のサービスごとにその機能量を定義しつつ議論を進めることになる。例えば、2.5節で述べたように、客に配膳するサービスの潜在機能を料理人が料理することで高めると考え、料理時間で潜在機能が蓄積されると考えたのは、簡単な例である。このように量化することで、サービスは機能の時間微分という関係が現実的になる。

しかし、一般的には機能はもっと複雑で、この例のように簡単に処理されるとは考えられない。それは、以下に述べるようなサービスの基本構造に依拠した議論の結果として改めて明らかになっていくものと考えられる。

(2) サービス提供行動

ここには、提供行動の動機としての自らの意図あるいは他の人からの注文に基づくサービス設計、それに従うサービス動作などがあり、それぞれに、設計の良さ、動作の習熟度があった。意図や注文というのは、分野としては精神的なもの、身体的なもの、物理的なものがあり、また別の視点で、目前の個人的なものから、広く社会的なものまであるから、その理解とは多様な視点を必要とする。目前の注文には実時間で対応するのだから、それは人の独特な感受能力を支える素養や習熟が必要である。知識については、分野固有の専門的知識が必要で、教育サービスならそれぞれ専門課題の知識、医療サービスなら医学、生理学、薬学などが必要であることは言うまでもない。一方、一般的なものとして、語学はもちろんのこと、心理学、記号学の分野が有用である。もちろん経験による学習も必要条件である。一方、社会的なものになれば、それは社会学、行動学、社会調査などを必要とし、社会科学的手法が有効である。

そしてその理解に基づく設計は、それぞれの分野に固有の設計法を持つが、一般的には設計学を基礎とすることになる。またサービス設計向きの独自の手法も必要で、サービス関連のデータの集積、サービスCADの開発など^[9]が有用であると思われる。運動を含む人間の形態の完全な表現をつくる計画は^[10]、多様な分野に対応するサービス設計にとって極めて有効な情報源になりうると思われる。

設計に基づくサービス動作も独自の分野である。言語やしぐさの表現についての習熟が必要であり、その基礎としての表現学、スポーツ医学などが関係する。

(3) サービス受容行動

サービスの提供を受けた人がそれを受容するのであるが、2.3節で述べたように、受容は受け身でなく主体的な行動であるとしたのであるから、その受容行動は選択的である。したがってそこには受容者固有の選択がある。これはサービスの重要な特徴であるが、同時にサービスを難しくしている点でもある。サービスの提供があったとき、拒否も含めて、受容における選択とは何か。選択行為における影響因子、影響機構など、サービスの本質を決める要因を明らかにする必要がある。そしてそのうえで、受容者のとる行動と、その結果としての効果の発現の仕組みを理解するのでなければならない。ここには心理学、生理学、行動学など、そして最近の研究成果の豊富な生命科学、脳科学などに有用な知識があるはずである。しかし、受容者を理解したり、受容行動を向上したりするための知識や方法は現在のところ極めて不十分である。この理由としては、専門職業者が提供者になるという現在の社会的状況に対応して、従来の専門知識が主として提供行動のために準備され、受容者が使う形に整えられていないことを指摘しなければならないが、この点はサービス工学研究にかかわる学問的知識の構造論として、今後関心を払うべき点である。例えばアクセシブルデザインのような視点が強調され始めているが^[11]、このような分野の学問的深化が必要であると思われる。

(4) サービスの伝達

サービスは、原始サービスのように直接提供者と受容者との間で伝達される場合もあるが、現代では多くの場合媒体を経由する。それは、情報としてネットワークを伝わるだけでなく、さまざまな物体（製品）に乗って、伝わってゆく。物体に乗る時は、サービスは様々な形態をとるのであって、これについての整理された知見を我々は持っていない。それは物体の機能であるとも考えられ、ここにもサービスと機能との関係が現れる。

情報としてネットワークを伝わるサービスは現代を特徴づけるものであり、多くの研究があるし、現実の技術としてもその普及は目覚ましい。その発展はさらに望まれるが、普及の社会への影響を考えると、サービスという観点からは「情報倫理」を考えるべき段階が来ているように思われる。一方媒体としての物体に乗るサービスは、のちに述べる製造業のサービス増幅問題としてこれから明らかにしてゆかなければならない。

(5) サービスの波及効果

現実の社会でサービス現象が起これば、必ず外界に何

らかの影響が生じる。原始サービスのように、一人の人が他の一人の人にサービスする場合では無視することができても、それが産業として広く行われるようになると、環境負荷として十分配慮すべき問題となる。しかし、この点についても考察はあまりされておらず、今後の問題である。

(6) サービスの増幅

サービス問題が関心を持たれ始めた理由は、サービス産業の経済への影響が、先進国で特に、また途上国でもそれに劣らず大きなものとなってきたことがある。わが国でも、すでに長い間サービス産業の生産性が製造業に比べて低いことが指摘されて来たのである。しかし、サービス分野では、急速に進む科学の基礎研究の成果を製造業のように使用してその質や生産性を高めることは、情報分野を除いてはできなかった。

情報分野では、情報化社会といわれるようにさまざまな情報技術が広く普及している。その多くはサービス産業の生産性向上に寄与している。その結果サービス産業の進歩は情報産業の進歩によって行われるという見方が主流となった。それを支える基礎知識は、新しい素子を作り出す材料科学、計算機科学、通信科学などである。しかしサービスは、2.1節の図1に示した原始サービスの例で見ると、情報分野だけではない。より広く、生命科学、材料科学、環境科学、物理学、その他多くの科学、工学分野の知識が、人文社会系科学とともに使用されて、より広いサービス分野の生産性の向上が図られることが期待されるが、これらの多様な科学、技術が関与する生産性を考えるときは、経済問題としてとらえる前にサービスの増幅問題としてとらえることが、サービスの本質を失わずに考察を進めるためには都合がよい。

現代社会にとってサービス産業の生産性が重要であり、その向上のためにはサービス科学が必要であるという主張が、強くされるようになった^[12]。これらの議論は、経済問題としてのサービスを出発点としていて本論文とは立場を異にしているが、現在広くサービスが関心を持たれるようになったきっかけをつくったのは Spohrer らの属する IBM であり、そこで主張されるサービス科学は、多くの領域が統合したものとなるはずである。実際に IBM では SSME (Service Science, Management, Engineering) という呼び方をしている。今後はより多角的な議論が進められるようになると思われる。

ここでわが国が今、情報産業、そしてサービス生産性の後進国だといわれることの「不思議」について述べておかなければならない。わが国では、製造業における情報化、すなわち CAD-CAM (計算機援用設計生産)、FMS (多

種少量生産システム）、IMS（知的生産システム）などのような、製造作業への情報処理の導入によってその生産性を上げ、また国際的競争力の優位性を作り出すことに成功してきたのであるが、その成功と後進性とはどのような関係があるのだろうか。まず気付くことは、その情報技術が工場の外に出ることはなかったことである。実は、この工場内の情報化は、工場内のサービス行動の情報化による増幅だったのであり、それは抽象化を高めてみれば、工場の外でのサービス行動の増幅に使えたはずのものである。それができなかったのは、前述のように経済的視点からの評価しか行わなかったこともあるが、直接的には産業間の縦割りが壁となったからである。

工場では、情報化技術はまだ幼いものであったにせよ、わが国の造語であるメカトロニクス^{注1)}にみられるように、情報化技術は機械技術や電気技術、材料技術などと融合しながら新しい局面を開いてきたのである。それを我が国の製造業が国際的に先導したと考えてよい。とすれば、今、情報技術が突出しているサービス産業に対して、情報技術を超えてより広い先端技術の導入をするのは我が国であり、そこに我が国が率先して新しい環境時代の産業の姿を描き出す可能性がある。

サービスの増幅論を展開し、その視点でサービス産業や製造業を含む全産業の生産性、それは「地球生産性」であるが、それを高めることが、サステナブルな世界を作ることの必要条件であると思われる。

(7) 工学理論としての問題

本論文は、サービスを現実に向し向上するために有効な一般的方法として、体系的知識、それも体系内に矛盾がなく、しかも他の学問領域とも整合する知識系を作ろうとするものであり、それは“サービス工学理論”と呼べる。この目的の実現を今後の研究に待つのであるが、本論文で抽出された幾つかの課題をここでまとめておこう。

(A) サービスの定義

本論文では、サービスは潜在機能の発現であるとしている。（論文中で機能が微分可能として時間問題を論じているのは一つの例であって、本来はこの制限がなく、もっと一般に論じる必要があることは言うまでもない。）これは基本的な定義であるが、文中に述べているように、サービス問題を機能問題に置き換えているのであり、サービスを論じるためにはどのような性質が機能として明らかにされなければならないかという形で機能論に寄与している。機能論はより広い問題で、機能が質量と自由エネルギー（情報）の形態で表現されることが推定されているが、この点はむしろサービス問題として検討する方が問題の本質に迫れる

可能性がある。そこには、機能の“保存則”の可否という大きな問題があり、これはたとえばサービス経済にとっても深刻な視点であり、サービスの定義は機能の定義を参照しつつ、常に見直してゆくことが必要である。

(B) サービスの不確定性

本論文で提供者をドナー、受容者をレセプターとあえて呼んだのは、提供者は自己への効果を考慮せずに、また誰かに受容してもらえるかどうかも意に介さずに提供するからドナーであり、受容者は、自己のほしいものだけを選択的に受容するからレセプターと呼ぶのである。これはサービスの社会モデルとも呼べるが、現実のサービス現象を考慮して定めたものである。これに関連する基礎的モデルとして、本論文では、サービス受容に次のようなモデルを与えている。すなわち、サービスはドナーからレセプターへ流入するものであるが、流入するサービスが直接効果を生むのではなく、それによってレセプターの潜在機能が発現して自身に効果を与えるとする。このことは、上記の社会性に加え、生物の生命維持の基本との整合、レセプターの主体性保証、現実のサービス現象に対する説明性などを考慮して作られたモデルである。これらの結果は、社会におけるサービスは確定的に解けるものではなく、進化論的視点で考察することの必要性があることを示唆している。

(C) サービスに影響する因子

理論を現実に向し近付けるためには、影響因子をできるだけ忠実に抽出しておくことが必要条件であるが、本論文ではとても十分とは言えず、今後の研究に委ねられる。抽出においては、相互に独立なものを選ぶことが必要で、データの統計検定も有用であるが、基本的に有効なモデルを（アブダクションによって）導出することが大切なことなのである。これもこれからの研究者たちの大きな仕事である。

(D) 定量性

本論文で、サービスに関する諸性質を、しばしば量的なものとして扱っている。しかしこれも本論文で述べているように、機能、人の意思決定およびそれに基づく行動、などを主な因子とするサービス問題では、定量化についての議論は、慎重さを要すると考えている。安易な定量化、とくに、アンケートとか市場調査などの、非専門家の持つモデルに影響される調査によって定量的数値を得ることは有用ではあるが、それのみに基づく理論を立てることは、慎むべきであろう。サービス理論は、現在は観測されていない要素をも洞察し、それによって新しい要素の観測を促すことも大きな役割なのである。定量性、および計量は、理論の精緻化の上で必要なことである。ただしそれを求めるとき、モデルの精緻化と並行して行うことが条件である。

注) メカトロニクス (mechatronics) : 森徹郎 (安川電機) が1969年に命名した和製英語

キーワード

サービス科学、理論的枠組み、機能、増幅、サービス産業

参考文献

- [1] 吉川弘之: 一般設計学序説, *精密機械*, 45(8), 20-26 (1979).
- [2] 吉川弘之: 先端技術と人間, *世界*, 19-34, 岩波書店 (1988) (テクノグローブ再掲, 工業調査会, 20-49(1993)).
- [3] 吉川弘之: テクノロジーの行方, 63-173, 岩波書店 (1996).
- [4] R. K. Merton: *Social Theory and Social Structure*, Simon and Shuster(1947) (森東吾他訳: 社会理論と社会構造, 16-77, みすず書房(1961)).
- [5] 吉川弘之: 人工物観, *横幹*, 1(2), 59-65(2007).
- [6] R. Costanza et al.: The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387/15, 263(May 1997).
- [7] G. C. Daily, K. Ellison: *The New Economy of Nature*, Island Press (2002)
- [8] 吉川弘之: 一般設計学序説 (その2) (2008) (予定)
- [9] 下村芳樹 他: サービス工学の提案, *日本機械学会論文集 (C編)*, 71(702), 669-676(2005).
- [10] 金出武雄, 持丸正明: 医療のためのデジタルヒューマン技術, *情報処理学会誌*, 46(12)(2005).
- [11] 倉片憲治, 佐川賢: 高齢者に配慮したアクセシブルデザイン技術の開発と標準化, *Synthesiology*, 1(1), 15-23(2008).
- [12] J. Spohrer, P. P. Maglio, D. Gruhl: Steps toward a science of service systems, *IEEE Computer*, 40(1), 71-77(2007).

(受付日 2008.1.11, 改訂受理日 2008.3.16)

執筆者略歴

吉川 弘之 (よしかわ ひろゆき)

東京大学工学部にて、設計学、製造学、保全学を研究。設計学では設計過程を位相幾何学で記述する「一般設計学」を開拓し、知的CADの基礎を築く。製造学では製造業の共通基礎学問の存在を指摘して「国際知的製造プログラム (IMS)」を提唱し、10年にわたり主導。保全学では保全の一般構造を定義し、「保全ロボット (MOOTY)」を試作。2001年より産業技術総合研究所。理事長として研究経営10カ条に基づき、持続性産業への重心移動のための本格研究を実施する研究所の輪郭を産総研に確立した。1956年東京大学工学部卒、東京大学教授、東京大学総長、放送大学学長、日本学術会議会長、日本学術振興会会長、国際製造科学アカデミー (CIRP) 会長、国際科学会議 (ICSU) 会長、現在、産業技術総合研究所理事長。

査読者との議論

議論1 本論文のシンセシオロジーとの適合性について

質問 (赤松 幹之)

構成学の論文として本論文を投稿されましたが、論文中に構成学としての本論文の位置づけが書かれていると良いと思います。おそらく、サービス工学研究は、2つの面で構成学であると思います。1つはサービス自身が構成的であることで、もう1つは、サービス工学が関連領域を統合しながら学問体系を作っていく必要がある、という面で構成的であると考えられます。論文の最初の部分で、本論文が構成学的であることを明確に記述してあると、論文の位置づけが明確になると思います。

回答 (吉川 弘之)

第二種基礎研究は、手に入れることのできる知識を統合して意味のある人工物を構成する行為の背後にある一般的な、推論方法、知識、手法を抽出するための研究であり、それをできるだけ一般的に表現するのが *Synthesiology* の論文と考えます。そこで、“(人工物である) 理論を作る (構成する) 人” からの論文の学術誌としての位置づけを考える必要があります。

巨大な科学的知識体系は、部分体系から成り立っており、それは領域と呼ばれます。科学には、物理学、化学、生物学などがあり、これら領域は自身で閉じた無矛盾体系を作っており、同時に相互に矛盾のないものになっています。もちろん、各領域は他領域で説明できないことを含むだけでなく、自領域でも説明できない問題を抱えており、その解決が研究動機になっているのです。このような動機で行われている第一種基礎研究とは、トーマス・クーンの言うノーマルサイエンス (Normal Science) です。

そうではない理論研究、それは何か。クーンはノーマルサイエンスでない研究を「パラダイムシフトを起こす研究」と呼び、科学史上最も重要な研究と位置付けたのです。しかし、そのような科学史のスケールでないがノーマルサイエンスのように領域内研究でないもので、しかもパラダイムシフト研究よりもっと頻繁に、また広範に、また日常的に存在し、しかも現実に対する直接的な効果を持つ結論を創出する理論を作り出す研究があります。現実に効果する理論は意味のある人工物であると考えられることから、その理論を作る研究は構成的研究です。しかもそれは、パラダイムシフトを起こす研究と論理的構造に共通性があります。もちろん、科学史では、パラダイムシフトを起こす研究とは、その時代の共通の矛盾が公知となりつつあるときに、それを解決する理論ということですが。一方、日常的課題に対する理論研究は、その課題が時代の関心事でありながら、考える共通基盤がなく、それを作り出す理論に対する期待が動機です。違うけれども同型とも言えます。

理論を作る研究がパラダイムシフト研究として明示され考察もされているのだとすれば、たとえ日常的だとしても同型の理論を作る構成的研究を、あらためて新しいジャーナルである *Synthesiology* で受け付ける必要があるのか、という疑問がわいてきます。しかしここで次のことを想起しなければなりません。それは、科学史に重大な影響を与えたニュートンのプリンキピアの例でいえば、それは大変な独創であり、領域を創出したものであったのに、そのもっとも中心である3法則 (絶対座標、加速、作用反作用) の“構成”について何も説明がないのです。プリンキピアでは、法則を述べた後、「以上、数学者によって承認され、かつ豊富な実験によって確かめられる原理を述べた (Sir Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 中野猿人訳、プリンシピア、講談社、1977、p. 38)」としか述べていない。あとは法則から導出される定理が600ページという本 (日本語訳) がプリンキピアです。のちにこのことは、C. S. パースのアブダクション研究の重要なテーマとなったのですが、結局ニュートンがなぜあのようにすばらしい、そして有効な法則を“構成”できたのかかわかったとはいえなかった。

このように、理論を作るという知的な“構成”の重要性が明示的に指摘されながら、しかしその仕組みは論理研究者も科学史家も説明できないでいるのです。となると、理論構成の秘密を明らかにするのは第二種基礎研究を抽出しつつある私たち産総研の研究者の仕事であり、その場として *Synthesiology* があると考えられます。

もちろん、その上に考えなければならないことが多くある。理論であるかどうかに関係なく満たすべき条件があり、それは以下のように満たされている。

- (1) 目標が必要でかつ妥当か: サービスの理論が必要であることは理解されるようになった。
 - (2) 領域性は: 積極的に取り除く。
 - (3) 知識の統合の説明は十分か: 努力した。
 - (4) 記述 (理論) の整合性: 本論文の主目的である。
- そして理論としては、基本的に概念の定義と、その関係を作ること

を構成の主眼としているわけであるが、その理論的根拠は仮説形成として設定されているのであり、論文全体がアブダクションである。したがって主張はこれから実証されなければならないものである。このことから、実証のための形式をもっているかが主要な問題となるが、本論文はそれが可能なように、本質的に計測不可能と考えられる概念を排除した上で、その中から変数(概念)を採用したのである。

査読者が指摘するように、サービスそのものが構成的であることも考慮する必要もあるのですが、それを同時に考えるのは論理的に扱いきれない問題で、この点については著者の論文：一般設計学序説(精密機械、1979)を参照してください。

議論2 用語について

質問(赤松 幹之)

本論文はサービスを定式化することが主眼ですので、用語や変数についての定義をできるだけ明確にすることが重要だと思います。

その観点で見た時に、用語の不統一や意味が不明確なところがありますので、ご検討ください。例えば、類似のことを示していると思われる潜在能力と潜在機能が使われています。

回答(吉川 弘之)

潜在機能は潜在能力の一表現ですので、2.5節の(1)は、「人の行動や物の使用が潜在能力を顕在化するのであったが、ここでは能力が作動することを機能発現と考えるので、潜在能力は潜在機能と言い換えられる。すると、行動や使用によって、機能が“ゆっくり”顕れると考えることができる。」としました。この他の用語は統一しました。

議論3 レセプターの潜在機能について

質問(赤松 幹之)

2.5節(2)4行目に「レセプターがすでに持っていた潜在機能 L_r から f_r を自らに対して発現させて、効果を生み出す。これがサービス効果 e である。」という記述があります。しかしながら、その下に記載されている式では、陽にはそれが表現されていません。レセプターの潜在機能がサービス効果に影響するというのは、サービスの観点での重要なポイントですので、これが表現できるような定式化の工夫が必要だと思います。

回答(吉川 弘之)

ご指摘の点は、サービスにおける重要な課題ですので、具体的に、少し丁寧に説明します。レストランを例にとると、

f_d : 料理(食べ物)の提供速度

f_r : 料理(食べ物)の摂取速度

L_r : 食べられる容量(空腹量)

f_r' : おいしいと感じた料理(食べ物)を食べる速度(レセプターにとって意味のあるサービス)

F_r : 食べた量

F_r' : 食べた料理のうち、おいしかったものの量、 $\leq F_r$

ということでしょう。ですから、

$$L_{r0} = L_{r1} + F_{r1}'$$

とは、初期空腹量はおいしかった料理だけで満たされてゆく、と考えていることになります。それでは不味かったものでお腹が一杯になることはないのか、という基本的な疑問が出てきますが、ここではないとしています。この場合、満足、すなわち空腹量がゼロになるためには、シェフ(ドナー)が $L_{d0} > L_{r0}$ の準備をしなければならないなどの問題が生じます。

それから、査読者の指摘のように、 L_r と f_r' の関係は重要で、この場合は空腹感によっておいしさが違うという食事心理の基本問題です。しかし、それはこの段階では陽には触れないことにしてあり、将来の検討の可能性は

$$f_r' = (\text{受容行動係数}) * f_r$$

の、“*”に込めてしまっているのです。

著者としては、このような問題が見えてくるのが枠組みとしての理論の目的の1つであると考えており、今後の研究に期待したいと考えます。

議論4 サービスの時間的考察における f_r と F_r 、および f_r' と F_r' に関して

質問(赤松 幹之)

f を顕在機能 F の微分として定義していることから f を出現速度としており、「 f はサービス提供の速度であり、一般に言うサービスに相当する」と述べられ、これから f_d と F_d については何を指しているかが理解できます。しかしながら、 f_r と F_r と f_r' と F_r' については、式でしか記述されていないために、「 $'$ 」の意味が理解しにくいものになっていると思いますので、少し言葉で説明があると良いと思います。

回答(吉川 弘之)

食事の例で説明すると以下になります。料理がドナーによって配膳され(提供サービス: F_d)、それをレセプターが認識して(F_r)、食べる(f_r)。その時、レセプターの空腹感(L_r)が、レセプターにおいしさを感じつつ食べる(f_r')というサービスを受容する行動を起こさせる。それによって空腹感(L_r)は減り、満腹感(F_r')が増える。そこで次のような説明を加えました。

【提供サービス F_d はレセプターに届くとき F_r であり、それは f_r としてレセプターに流入する。それを受けたレセプターは、 L_r を時間速度 f_r' で発現して F_r' を増やしてゆく。】

議論5 体系化をする時の困難性や課題について

質問(持丸 正明)

本論文では、サービス工学を基本フレームワーク(提供者、受容者、時間概念)とサービス増幅に体系化し、工学体系を具体的に構築するための困難性と技術課題、さらには、解決のための糸口を示唆しています。すなわち、このような体系化がサービス工学を具現化し、目標を達成するためのシナリオであり、そのために課題として列挙された技術要素を選択し、あるいはあらたに研究して統合することの必要性を論じたものと理解しました。そこで、論文中に導かれている「困難性と技術課題」を「4.まとめ」において体系的に整理して記述いただくことで、本研究の目標である「要素技術を選択、統合して、サービス工学という本格研究を進めるための体系的な方法論の提示」が明瞭に訴えられるのではないかと思います。

回答(吉川 弘之)

「4.まとめ」の最後に、「(7)工学理論としての問題」として、(A)サービスの定義、(B)サービスの不確定性、(C)サービスに影響する因子、(D)定量性、などの課題を整理して述べました。

議論6 2.3節「レセプターの期待→…→レセプターに起きた効果」について

質問(持丸 正明)

遷移の“良さ”がサービスの生産性に影響を与えることに関し、(1)から(5)までの5つの因子を定義していますが、「レセプターの期待→…→レセプターに起きた効果」は循環しながらスパイラルアップしていくものと理解しています。この場合、最終的にレセプターに起きた効果に駆動されて、レセプターに新たな(より高次の)期待が生じ、レセプターはそれを表現(注文)するか、あるいはドナーがそれを表現(意図理解)することで、次のスパイラルが回り出すと考えます。このように考えると、(1)の「設計の良さ」の中に、レセプターとのコミュニケーションによりドナーがレセプターの期待を知り、それを起きてほしい効果として表現する工程が含まれると思われます。このようなコミュニケーションが重要であることは2.2節においても示唆されています。もし、そうであれば、その部分を(1)に明示的に追記いただく方が分かりやすいと思います。

回答（吉川 弘之）

査読者のご指摘の通りですので、遷移がループになること、および「設計の良さ」には、「表現された効果を実現すべく設計する能力と、その設計の結果引き起こす効果の予測との関係」だけでなく、「レセ

プターの期待をレセプターに起きてほしい効果として表現するドナー（意図理解）もしくはレセプター（注文）の能力と、真のレセプターの期待と表現されたレセプターに起きてほしい効果との関係」も含まれることを明記しました。

タンパク質のネットワーク解析から創薬へ

— 超高感度質量分析システムをどのように実現したか —

家村 俊一郎、夏目 徹*

生体を構成するそれぞれの細胞の中には、10万種類以上の様々なタンパク質が機能し生命現象をつかさどっている。これらのタンパク質はグループや組織を構成し、ネットワークとして機能している。毎分100ナノリッターという超低流速の液体クロマトグラフィー技術を独自に開発することにより、大規模なタンパク質ネットワーク解析を高感度で再現性高く、かつ高効率に行うことを可能にした。解析から得られた大量の結果は、生命現象の解明にとどまらず、疾患の発症メカニズムを分子レベルで理解することに貢献し、新たな診断・治療法の開発や、重要な創薬のターゲット発見へと直接的に連なる本格研究へと発展した。

1 研究の背景

人体は約30兆個の細胞からなり、それぞれの細胞の中には10万種類以上の様々なタンパク質が機能し生命活動をつかさどっている。そして、これらのタンパク質はバラバラに働いているのではなく、グループや組織を構成しネットワークとして機能している。このような細胞内の個々のタンパク質が生み出すネットワークをマッピングする作業を、タンパク質ネットワーク解析とよぶ。

ネットワーク解析の重要性は生命現象の解明にとどまらず、疾患の発症メカニズムを分子レベルで理解することに繋がり、新たな診断・治療法の開発や、創薬のターゲット発見へと直接的に貢献する(図1)。しかし、タンパク質ネットワーク解析は技術的に容易ではなく、これといった確立された方法論はない状況であった。それは、実際にタンパク質ネットワーク解析を行うには、数100あるいは数1000といった数のタンパク質を一挙に分析し切らなければならないという要請があったからである。

この要請に応えることは1990年代までの技術では現実的に不可能であった。しかし、鳥津製作所の田中耕一氏らが発明したタンパク質のイオン化質量分析法が成熟し、21世紀になって1つのターニングポイントを迎えた。これまでたった1つのタンパク質の同定に数10時間を費やさなければならない作業が、質量分析の手法を用いれば、ものの数分あるいは数秒で行えるようになった。また、感度も理論的にはこれまでの数100倍以上になり、試料を大量に精製しなければならないという制約からも解放されたかに思われた。しかし、タンパク質化学者が質量分析とい

うハイテク機器を手にした後でも、予想通りの高感度解析がたちどころに可能になったわけではない。それは、10万種類のタンパク質の1つ1つが、千差万別の形状と大きさをもち、化学的な性質も様々でかつ不安定だからである。微量なタンパク質は僅かな時間、容器に保持するだけで分解あるいは変性し、容器の壁に吸着し、検出不可能となってしまう。質量分析機自体は極めて高感度な「検出器」なのであるが、この試料の消失問題が分析感度とスループットの現実の限界点を決めていた。従ってこの問題を解決しない限り、質量分析機の現在の能力を十分に活かした形でタンパク質の微量解析を行うことができない。また将来質量分析機の能力がさらに向上したとしても、その利点を活かさない懸念された。

2 解決しなければならない真の問題(液体クロマトグラフィ技術)

微量なタンパク質を取り扱うときの最も重要な方法は、なるべく微小な空間になるべく濃縮した状態に試料を保持し続けることである。しかし、生物試料由来のタンパク質を質量分析により解析するには、脱塩・洗浄のプロセスが必要であり、それほど容易なことではない。そこでこれまで盛んに行われてきたのは、逆相の高速液体クロマトグラフ(HPLC)を質量分析機に直接連結してオンライン化することであった。試料をHPLCのカラム上で濃縮脱塩し、液体クロマトグラフの溶出分画をそのままイオン化し、質量分析装置に導入する。しかし、市場で入手できる既存のHPLC装置は、我々が目的とするタンパク質ネットワーク解

析を行うには満足できないほど低い感度とスループットであった。特に、既存のHPLCのポンプはせいぜい毎分マイクロリッターの流速が下限であり、その上分析の再現性が悪く、大規模な繰り返し解析を安定的に行うことは不可能であった。その大きな理由の1つは、毎分マイクロリッターという低流速での溶媒の均質な混合が困難だったからである。

液体クロマトグラフィを行うには、初期溶媒でタンパク質ペプチドをカラム担体に吸着・濃縮し、脱塩をした後に、溶出溶媒を流し、溶出されてきた試料を分析する。通常、溶出溶媒は少しずつ初期溶媒に混合し、濃度勾配を作り出して送液される。そのためには、初期溶媒と溶出溶媒の2系統のポンプを接続し、混合送液を行う流路が必要となる。このとき流路中には必ず逆止弁、ミキサー等のデッドボリューム（溶媒同士をよく混和するためのスペース）が存在する。そのため、1回の分析に長い時間がかかる上、低速では溶媒が均一に混合されない。1990年代になり、ポンプの送液速度を下げずに、送液をスプリットすることにより分析流速を下げるという試みが盛んになされた。送液流路の途中に分岐を作り、溶媒のほとんどを廃液し、一部のみを分析カラムに送る。すなわち、10対1にスプリットす

れば、9の溶媒を捨てて、流速を10分の1に下げることができる（図2の上部）。この方法は、分析カラムの背圧とスプリット部分の抵抗が常に一定でなければ定めた流速で分析することはできない。しかし、測定の実際には、試料の負荷量や容積により、分析カラムの背圧は必ずしも一定ではない。また、分析回数が増えるにつれてスプリット抵抗も増してしまうのが常であった。従って微量分析を再現的に行うのはほとんど不可能ということになる。これが本当に解決しなければならない問題であった。

3 新たなシナリオと要素技術開発（液クロと環境の問題）

我々が、この問題を解決するために採用したシナリオは、液体クロマトグラフィの高度化を原点とするものである。液体クロマトグラフィを高度化することを初めに行い、その結果順次出てくる個別の要素問題を解決して、最終的にタンパク質の高精度かつ効率的な解析手法を達成しようと考えた。

液体クロマトグラフィの高度化において、具体的には溶出溶媒に濃度勾配を作り出すためにポンプを2系統使用せず、1系統のポンプだけで実現する全く新規な方法を創出

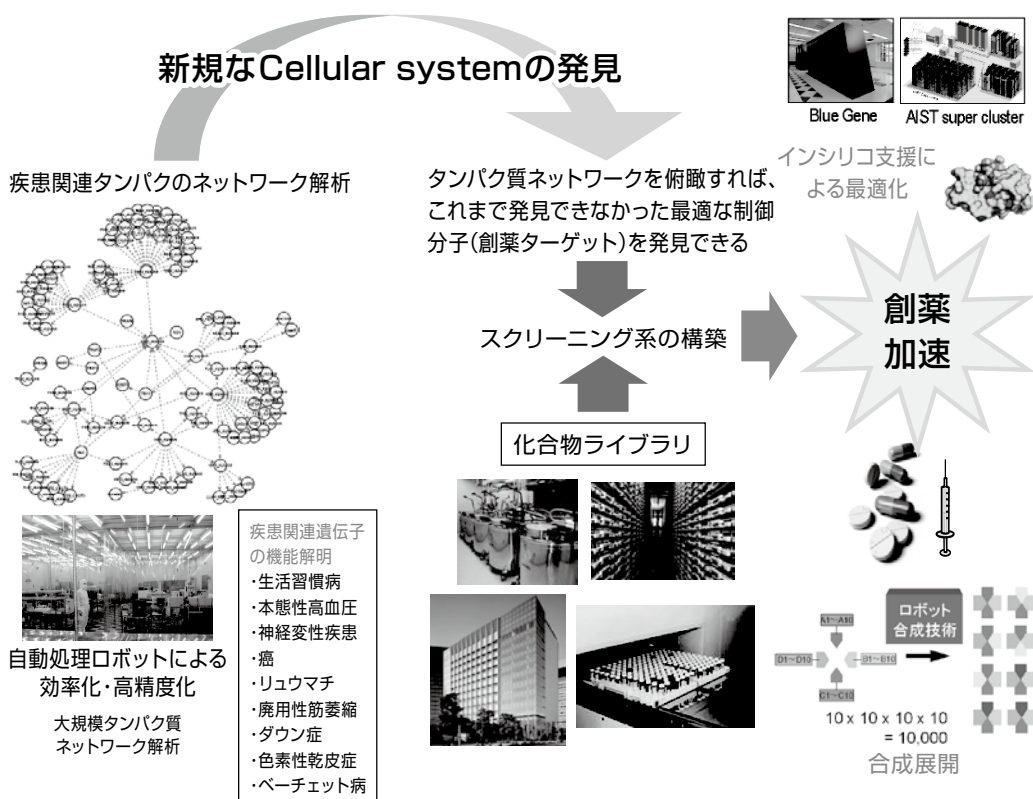


図1 タンパク質ネットワーク解析から展開する創薬
タンパク質は互いに相互作用し合い、ネットワークを形成している。このタンパク質ネットワークを知ることにより個々のタンパク質の機能が分かる。また、ネットワークを俯瞰することにより、疾患の発症メカニズムや新規な創薬ターゲットを発見出来る。これらの情報を基に創薬スクリーニングを展開する。

した。1 系統のポンプにすることにより流路を劇的に単純化することができ、低流速の送液を行う上での最大の障害であるデッドボリュームを最小化できる。また、これが可能であるならば送液スプリットを行わずとも低速送液は可能である。ここで我々が考案したのが、一定の濃度間隔でステップワイズにあらかじめ別のポンプで作っておいた溶出溶媒をリザーバーに蓄えておき、これを1 系統の低速ポンプで押し出す、というものである。各リザーバーは複数ポートを有する1つのバルブを経時的に切り換え濃度勾配を作り出す。

このアイデアを一言で言えば、「大きな世界であらかじめ十分均質に混ぜておいて、それをそのまま小さな世界にデリバリーする」という、ある意味「コロブスの卵」的なものである。また、あらかじめ作っておいた各ステップの溶媒を相互に混ざらない状態におくことは重要なことであるが、微小の流路中では溶媒が混ざりにくいという2 系統ポンプの欠陥を、ここでは逆手に取っている（図2 の下部）。この方法は、液体クロマトグラフの極めて高い再現性と連続運転・自動化を可能にした。これにより、スプリットを用いない直接送液で毎分 100 ナノリッター以下の HPLC を世界で初めて質量分析機とオンライン化した^[1]。この結果、実質的に従来の 20 ～ 50 倍の高感度化に成功した。

さらにこれらの高感度化を最大限に活かすための解析環境の改善を行った。なぜなら、微量の試料を解析できる感度が達成されても、通常の実験環境では人間由来の

大量のケラチンが存在するため、夾雑するケラチンにより微量な試料由来のシグナルがかき消されてしまうからである。また、デッドボリュームを極力排除した分析流路は内径 10 マイクロメートルという極小の配管であるため、空気中の発塵パーティクルで容易に流路が閉塞する。従って、人間が動き回る通常的环境での連続運転は不可能であった。発塵パーティクルとケラチンの排除は容易ではなかったが、開発したシステムを少しずつ稼働させ実際の解析を開始した。

2000 年、技術開発を行ってきた東京都立大学において実際の試料を使った解析を開始した。当時クリーンルームの設備はなかったため、解析室への人の出入りを極力制限することによって実験環境の問題を回避した。そして、解析室内を徹底的に整理整頓して発塵源を排除し、帯電防止シートで極力被い、静電気で塵が吸着しないようにした。また起毛した衣服で入室しないことにした。さらに、解析室の扉の開閉をした後、塵が静まるまでそのまま長時間待機して解析を行った。

このシステムを用いた解析で、初めて 100 を超えるタンパク質を瞬時に同定できたときの感激は何物にも代え難いものがあった。結果の優位性を理解した周囲の人々の協力を徐々に得て、その後解析室に簡易なクリーンブースを設置することができた。しかしながら現実問題としては、質量分析機から発生する熱量が大き過ぎ、ブース内の温度は容易に 35 ℃ 以上になってしまい、装置にダメージを与える

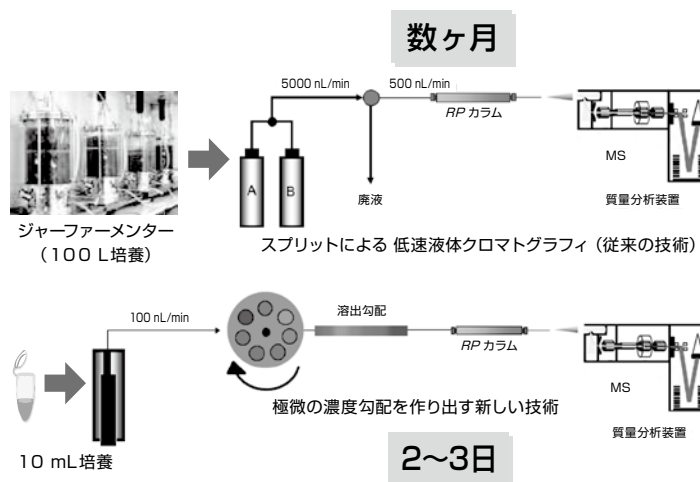


図2 新しい技術と従来の技術との比較

従来技術は、2 系統のポンプにより溶出勾配を作り出す。初期溶媒を送液する A ポンプと、溶出溶媒を送液する B ポンプの送液速度を変化させ濃度勾配を生み出す。しかし、この方法はデッドボリュームが大きく低速混合は出来ない。そのために分析カラムの間にスプリッターを設け、送液のほとんどを捨てることにより低速化を図る。図では 1/10 を捨てることにより、流速を 5000 nL から 500 nL/min にしている（上段）。

新技術は、複数に分岐した各リザーバーに、別系統のポンプシステムで予めステップの溶出溶媒を充填しておく。ポートバルブを回転させ、各ステップを 1 系統の低速ポンプで押し出していくことにより溶出勾配を作り出す。デッドボリュームがなく、スプリッターも必要としない（下段）。

従来の技術では1回の解析に大量培養によるサンプル調製が必要だった。ジャーファーマンターによる 100 L スケールの培養も珍しくなかった。そのため 1 回の解析に数ヶ月の準備期間を要することもあった。しかし、我々が開発した技術では 10 mL 培養由来のサンプルから数回の解析が出来る程の感度を達成した。このスケールとなるとサンプル調製は 2 ～ 3 日で可能であり、複数サンプルを同時並行的に調整することもできる。

恐れがあるため、長時間の使用には耐えなかった。安定的に連続解析を行うには本格的なクリーンルームが必要であると痛感させられた。

2001年の春、産総研臨海副都心センターが完成し、クリーンルームを設置するチャンスを得た。我々は幾つかの半導体メーカーのクリーンルームを訪問し、初歩からクリーンルームの知識を学んだ。しかし、最終的には臨海副都心センターの別館が2005年に完成し、第二世代のスーパークリーンルームができるまで塵の問題は解決しなかった。

4 第2種基礎研究の実行（試料調整の問題）

液体クロマトグラフィの要素技術の開発に成功した後、そのハードウェアを普及一般化するという製品化研究も重要と考えた。しかし前節で述べたように、開発した技術を活かす解析環境を構築しなければ役に立たないことも判明した。私自身の真の狙いは、世界最高感度の質量分析システムを構築し、タンパク質ネットワーク解析を大規模・高精度に行い、ここから疾患の発症メカニズムや新規な創薬ターゲットを効率的に発見することである。

実際に、開発した質量分析システムの効果は非常に大きいものであった。あらかじめ電気泳動などで試料を分離する必要がなく、たった1時間ほどで、サブ・フェムトのレベルで200以上の異なるタンパク質から構成される相互作用複合体を一網打尽に同定し尽くすことができた。すなわち、これまで数10～100リッターというスケールから試料調製し、数ヶ月かかる解析が、2～3日で行えるようになった。また、複数の解析を10～20件並行して行うことも可能であるため、大規模な解析をハイスループットに行うことが現実のこととなった。

ハイスループット化により、高精度な解析を行うための試料調製条件を詳細に検討することができるようになった。

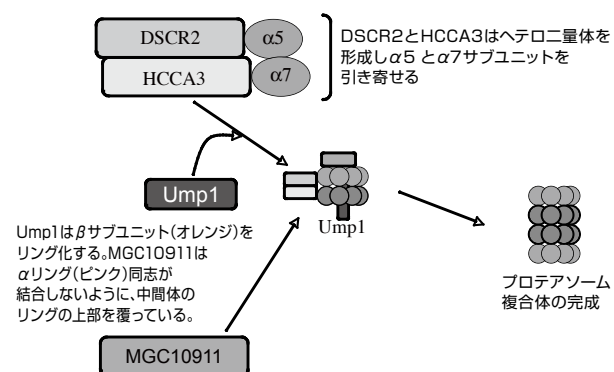


図3 プロテアソームのアッセンブル因子の発見
プロテアソームを組み立てる4つのアッセンブル因子を発見した。プロテアソームそのものを阻害するよりも、このアッセンブル因子を阻害する方が副作用がなく広範囲のガン細胞に有効である可能性が高く、よりよい創薬ターゲットである。

た。タンパク質のアフィニティ精製、反応時間、細胞の可溶化法等、様々なパラメータが存在する。これらの複数のパラメータを種々に組み合わせるには、数1000回の解析をしなければならない計算となり、従来の方法では1人の研究者が一生涯かかっても行えない程である。従って、このような網羅的で徹底した試料調整の条件検討はかつて行われたことがなく、各自の経験や直感に頼った試行錯誤的な試料調製が行われるのが通常であった。実際に、我々は数1000回の解析を通して試料調製の最適化を求め、極めて精度の高い、疑似陽性を極力排除する方法を得ることができた。

このプロセスで実に様々なパラメータを検討したが、得られた結論は単純であった。「素早く作業する」ことである。これまでの解析方法では感度が低かったため、試料の回収量を少しでも多くするように調製することが常識であった。しかし、回収量をあげようとするとその分だけ作業に時間がかかり、その間に不安定なタンパク質は変性・凝集し「汚い」データを生んでいたということが分かった。高感度な解析が可能となった暁には、もはや試料の「量」に過度にこだわる必要はない。それよりも「質」を高めるため、タンパク質が変性・凝集する前に少しでも早く試料を調製することが最重要の要件となった。しかし、これを実際に実行するのは容易ではなく、担当者は徹底的な試料調製の技法の開発を行った。それは試験管の持ち方や実験ベンチ上の試薬類の配置の仕方に始まり、作業者が最も合理的な動きができるように配慮した。また、実技者の動きをビデオに収め無駄な動きがないか何度も検討した。最終的には、数時間あるいは終夜で行っていた作業を、1時間以内で終えるプロトコルを完成させて実行した。

5 研究成果と産業化への展開

これらの技術開発を経て、我々は約5年間で、2,200個のヒトcDNAを用いた大規模なタンパク質ネットワーク解析を実施した。それに要した解析回数は16,000を超える。それによりタンパク質が生み出す新たな細胞の仕組みを明らかにすることができた。これらの成果は*Nature* 本誌2報、姉妹紙6報を含む30報近い論文として既に報告した。また当初の予想以上に多くの疾患関連遺伝子のタンパク質ネットワーク解析に成功した。癌、生活習慣病、神経変性疾患、色素性乾皮症、ダウン症、パーキンソン病、本態性高血圧等の原因・関連遺伝子の機能解析や、病態・発症の分子メカニズム解明や理解に繋がる知見を得た。また、疾患との関連が全く予想されなかったタンパク質も、ネットワークを解きほぐすことにより、全く新しい創薬ターゲットとなり得る例も幾つか発見した^{[2] - [14]}。その中で非常に象

徹的であったネットワーク解析について触れたい。

細胞の中にはプロテアソームと呼ばれる巨大なタンパク質複合体が多数存在する。これは細胞内の不要なタンパク質を分解する工場である。この巨大タンパク質複合体は60個以上のパーツから成るのであるが、これがどのように組上げられるかは長らく謎であった。我々はこのプロテアソームを組上げるアッセムブリー因子群と、そのプロテアソームとのネットワークを発見した。すなわち巨大なタンパク質複合体はタンパク質同士の助けを借りてでき上がる、という学問上非常に大きな発見であった^{[4][11]}。図3に示すように、DSCR2とHCCA3と呼ばれるアッセムブリー因子が協調し、プロテアソームの α サブユニットをリング状に配列させる。その後Ump1とMGC10911が β サブユニットをリング構造にし、 α と β リングが正しい方向で接着する。それと同時にこれは新規の創薬ターゲットの発見でもあった。

プロテアソームは、古くなりくたびれてきたタンパク質を分解するという「品質管理」の役割を担っているだけではない。多様な生体反応を統御するため、複数のタンパク質を厳密に制御するという重要な機能も担っている。細胞というものは、生体反応のために新たにタンパク質が必要になった場合、必要になったときに作り始めては間に合わない。そのような状況が生じるまで、必要になることが見込まれるタンパク質を常に作り続けており、その裏でプロテアソームがこれを常に分解し続けているのである。そして、必要な瞬間に分解を停止することによって必要なタンパク質をタイムリーかつ即時に出現させる。

例えば細胞が分裂するためには、多数のタンパク質が一方向に協調して厳密に働かなければならない。これをつかさどっているのがプロテアソームである。常に増殖し続ける癌細胞は正常の細胞よりもプロテアソームが沢山必要だとされている。プロテアソームの働きを阻害する薬が、強い抗癌作用を持つことは古くから知られている。しかし、このような阻害剤を作用させると、プロテアソームは正常細胞にも必須の機能であるから強い副作用を伴う。従って他に治療法のない特殊な癌にしか、この阻害剤は用いられない。ところが、我々の発見したプロテアソームのアッセムブリー因子の働きを阻害すると、新生プロテアソームの量が減り、やはり癌細胞にとっては致命的であるが、正常細胞にはほとんど影響を与えない。正常細胞は癌細胞ほどプロテアソームを必要としないので、少しぐらいプロテアソームの量が減っても耐えられるのであろう。また、プロテアソーム機能を完全に阻害してしまうのとは異なり、副作用も少ないことが予想された。このアッセムブリー因子は新規でより適切な創薬ターゲットと言える。

これらの成果は、直ちに産業化へと結びつけられると考え、2006年から、製薬企業に共同研究を提案した。その結果、国内大手・中堅製薬企業のほとんどが参画する創薬研究プロジェクトへと発展した。このプロジェクトの当初の提案は、各製薬企業が創薬ターゲットとして興味がある遺伝子・タンパク質のネットワーク解析を行い、より適切な創薬ターゲットを発見するというものであった。しかし、そこからさらに一步踏み込み、タンパク質ネットワーク解析から明らかになった情報をもとに、化合物スクリーニング系を構築し、実際に産総研内でスクリーニングを実施し、得られたヒット化合物を基に医薬品開発を試みるという形へと展開した。さらに、産総研内で当研究センターのみならず、同じ臨海副都心センター内の生命情報工学センターと共同^[注]、ヒット化合物のドッキング・最適化シミュレーションを、大規模な並列計算機を用いて効率よく行い、コンビナトリアルケミストリーへの橋渡しも行うことにした。このように、製薬企業、あるいは民間研究機関が単独では行いきにくい、タンパク質ネットワークチームのクリーン施設、大規模天然化合物ライブラリ、研究センターのブルージン^{用¹}等の研究リソースを産総研が提供し、ともに製品化研究、つまり「医薬品を創る」という実証研究を行うこととなった^[15]。

6 考察：本格研究へと発展させる戦略

我々が、タンパク質ネットワーク解析を立案しプロジェクトをスタートさせた時点で考えた最も基本的な戦略は、「奇をてらった新しいイノベーションを目指さない」、というものであった。どんなに素晴らしい技術・技法が創出されたとしても、それが解析法として定着し、データを生み出すにはどんなに早くても10年の月日がかかるのが普通である。実際、田中耕一氏が世界で初めてマトリックスを用いてペプチド・タンパク質をイオン化し質量分析をしたのは1980年代前半であり、この発見が契機となりMALDI法という形に発展し、世界中のタンパク質化学者やバイオリジストが盛んに使い始めたのは1990年代後半～2000年になってからである。

当時我々が10年の月日を解析技術の開発に費やすということは、非現実的と考えた。我々は現状の質量分析技術における最大のボトルネックを最小化する、という最も現実的かつ泥臭い、ある意味「正攻法」なやり方に固執した。その「正攻法」とは「微量の試料をロスなく質量分析機に送り込む」ことであり、その一点に徹底的にこだわった。その代わりに、質量分析装置の改良やイオン化の効率化であるといった新しい試みには手を出さないことにした。質量分析機自体は既に十分高感度であり、試料を失うことなくイオン化させられれば、目的とする感度が得られることに

賭けた。

このような徹底的な高感度化を達成することができれば、ハイスループットで大規模な解析が実現できる。タンパク質の実験の最大のボトルネックは、言うまでもなく試料調製である。そこで、「徹底的な高感度化」により解析のスループットを向上させ、限られた人員と時間で、欧米の50～150人規模のビッグプロジェクトに数人で立ち向かおうと考えた。実際に新たなグラジエント（濃度勾配）方式という要素技術を創出し「想定以上」の高感度化を達成したが、このままでは実際の役には立たなかった。環境からのノイズ等でS/N比はかえって悪くなったからである。あらためて高感度化とはS/N比の向上、すなわちノイズとの戦いであることを思い知らされると同時に、世界的にこのような極小の液体クロマトグラフィ技術の開発が十分に行われない理由も理解された。

プロトタイプの開発品は耐久性に劣り、その上発塵パターテリクルにより大きなダメージを受けるため、メンテナンスに大変な手間がかかった。すなわち、1つの成功は次の苦難の始まりだった。しかし、故障の多いプロトタイプの完成度を高める開発研究は後回しにし、「壊れたらすぐ直せる」体制を構築した。これはネジ1本から自身の手でデザインした装置であるからできることであった。そして、欠点だらけの装置・システムであっても、それを「使い、データを出す」ことが何より大事であると考え、最優先させた。また、解析の対象は当初、非常に良く研究された既知分子に絞った。未知の分子を研究対象にするのが常道であろうが、これには2つの考えがあった。1つは、自分自身が開発した解析システムが真に高感度でありハイスループットであるのなら、研究し尽くされたと考えられている分野からも必ず新しい発見があるはずである。また、新しい発見があった場合は、周辺情報が多いため考察が行いやすく、そのインパクトも大きい。これが我々の狙いであった。

7 おわりに

自身が開発したシステムを「高感度」あるいは「ハイスループット」であると謳うのであるなら、当然その結果、高精度なデータが大量に得られる訳である。従って、なるべく質の高い論文を、なるべく早く多く出版することを心がけた。これ以外には、新しく開発した研究手法の優劣を客観的に示す方法はないと考えていた。特に、我々のとった戦略が、地道な改良とノウハウの蓄積そのものであるからなおさらである。方法論の目新しさや、革新性などを謳い論文を出版し、知財等で成果として示すことが困難であった。実際、これまでの開発研究の中で、新規なイノベーションと呼べるものは、単一ポンプでのグラジエント（濃度勾

配）方式のみで、その他は全て、他分野（半導体・産業ロボット）の既存の要素技術の導入である。そしてこれらを駆使し、古典的な生化学実験手法を徹底的に最適化しただけである。しかし、幸いにして、この戦略・戦術は功を奏し、毎分100ナノリッター以下という極小の「流れ」が実現した。これが創薬という大河への一滴となることを期待している。

謝辞

新規グラジエント方式の開発は科学技術振興事業団、タンパク質ネットワーク解析はNEDOの支援を受けました。ここに深謝いたします。

注) 生命情報工学研究センター創薬分子設計チーム・広川貴次研究チーム長が参画

用語説明

用語1: 8,000CPUの超並列計算機、チェスの名人に勝ったというエピソードが有名

キーワード

プロテオミクス、質量分析、タンパク質ネットワーク、創薬、タンパク質微量解析

参考文献

- [1] T. Natsume, Y. Yamauchi, H. Nakayama, T. Shinkawa, M. Yanagida, N. Takahashi and T. Isobe : A direct nanoflow liquid chromatography-tandem mass spectrometry system for interaction proteomics. *Anal Chem*, 74(18), 4725-4733 (2002).
- [2] M. Komatsu, T. Chiba, K. Tatsumi, S. Iemura, I. Tanida, N. Okazaki, T. Ueno, E. Kominami, T. Natsume and K. Tanaka : A novel protein-conjugating system for Ufm1, a ubiquitin-fold modifier. *Embo J.*, 23(9), 1977-1986 (2004).
- [3] T. Higo, M. Hattori, T. Nakamura, T. Natsume, T. Michikawa and K. Mikoshiba : Subtype-specific and ER lumenal environment-dependent regulation of inositol 1,4,5-trisphosphate receptor type 1 by ERp44. *Cell*, 120(1), 85-98 (2005).
- [4] Y. Hirano, K.B. Hendil, H. Yashiroda, S. Iemura, R. Nagane, Y. Hioki, T. Natsume, K. Tanaka and S. Murata : A heterodimeric complex that promotes the assembly of mammalian 20S proteasomes. *Nature*, 437(7063), 1381-1385 (2005).
- [5] N. Matsuda, K. Azuma, M. Saijo, S. Iemura, Y. Hioki, T. Natsume, T. Chiba, K. Tanaka and K. Tanaka : DDB2, the xeroderma pigmentosum group E gene product, is directly ubiquitylated by Cullin 4A-based ubiquitin ligase complex. *DNA Repair (Amst)*, 4(5), 537-545 (2005).
- [6] T. Moriguchi, S. Urushiyama, N. Hisamoto, S. Iemura, S. Uchida, T. Natsume, K. Matsumoto and H. Shibuya : WNK1 regulates phosphorylation of cation-chloride-coupled cotransporters via the STE20-related kinases,

- SPAK and OSR1. *J. Biol. Chem.*, 280(52), 42685-42693 (2005).
- [7] K. Yoshida, T. Yamaguchi, T. Natsume, D. Kufe and Y. Miki : JNK phosphorylation of I4-3-3 proteins regulates nuclear targeting of c-Abl in the apoptotic response to DNA damage. *Nat. Cell Biol.*, 7(3), 278-285 (2005).
- [8] A. Hishiya, S. Iemura, T. Natsume, S. Takayama, K. Ikeda and K. Watanabe : A novel ubiquitin-binding protein ZNF216 functioning in muscle atrophy. *Embo J.*, 25(3), 554-564 (2006).
- [9] T.S. Kitajima, T. Sakuno, K. Ishiguro, S. Iemura, T. Natsume, S.A. Kawashima and Y. Watanabe : Shugoshin collaborates with protein phosphatase 2A to protect cohesin. *Nature*, 441(7089), 46-52 (2006).
- [10] J. Hamazaki, S. Iemura, T. Natsume, H. Yashiroda, K. Tanaka and S. Murata : A novel proteasome interacting protein recruits the deubiquitinating enzyme UCH37 to 26S proteasomes. *Embo J.*, 25(19), 4524-4536 (2006).
- [11] Y. Hirano, H. Hayashi, S. Iemura, K.B. Hendil, S. Niwa, T. Kishimoto, M. Kasahara, T. Natsume, K. Tanaka and S. Murata : Cooperation of multiple chaperones required for the assembly of mammalian 20S proteasomes. *Molecular cell*, 24(6), 977-984 (2006).
- [12] H. Iioka, S. Iemura, T. Natsume and N. Kinoshita : Wnt signalling regulates paxillin ubiquitination essential for mesodermal cell motility. *Nat. cell biol.*, 9(7), 813-821 (2007).
- [13] R.H. Lee, H. Iioka, M. Ohashi, S. Iemura, T. Natsume and N. Kinoshita : XRab40 and XCullin5 form a ubiquitin ligase complex essential for the noncanonical Wnt pathway. *Embo J.*, 26(15), 3592-3606 (2007).
- [14] M. Komatsu, S. Waguri, M. Koike, Y.S. Sou, T. Ueno, T. Hara, N. Mizushima, J. Iwata, J. Ezaki, S. Murata, J. Hamazaki, Y. Nishito, S. Iemura, T. Natsume, T. Yanagawa, J. Uwayama, E. Warabi, H. Yoshida, T. Ishii, A. Kobayashi, M. Yamamoto, Z. Yue, Y. Uchiyama, E. Kominami and K. Tanaka : Homeostatic levels of p62 control cytoplasmic inclusion body formation in autophagy-deficient mice. *Cell*, 131(6), 1149-1163 (2007).
- [15] 夏目徹 : 日本におけるケミカルバイオロジープロジェクト, *ファルマシア*, 42(5), 457-461 (2006).

(受付日 2008.1.17, 改訂受理日 2008.2.8)

執筆者略歴

家村 俊一郎 (いえむら しゅんいちろう)

1991年鹿児島大学大学院農学研究科(農芸化学専攻)修士課程修了。1999年理学博士(基礎生物学研究所・分子生物機構論専攻)。2002年産業技術総合研究所入所。現在、バイオメディカル情報研

究センター主任研究員。本論文では質量分析計を用いたタンパク質相互作用の大規模解析に従事。直ぐに失われてしまうような微量タンパク質複合体の精製技術を開発し、クリーンルームにおけるハイスルーブット解析システムの構築と運用を担当した。

夏目 徹 (なつめ とおる)

4大学1企業1国研、合計9研究室を渡り歩いた後、2001年産総研入所。東大・九大・首都大客員教授。2006年よりNEDOケミカルバイオロジープロジェクト・プロジェクトリーダー。1986年東京大学大学院修士課程修了。タンパク質相互作用解析を極めることがライフワーク。本論文ではダイレクトナノLCの開発を担当した。

査読者との議論

議論1 要素技術の統合について

質問 (湯元 昇)

本論文のオリジナリティーは、「タンパク質のネットワーク解析のために超高感度質量分析システムを構築する」という目標に対して、①送液系の新しいシステム構築、②解析環境の改善、③デッドボリュームを極小化した分析流路の調製、④サンプル調製の至適化という要素技術の統合化に成功したことがあげられます。②③④についても①と同様に詳述し、選択した要素技術をどのように統合して目標を実現したのかを記述して下さい。

回答 (夏目 徹)

②③④にかけての技術は基本的にノウハウの蓄積や他からの技術の導入であり、既存のもの組み合わせとその最適化であるため、単なる苦勞話となる恐れがあるため割愛しました。しかし、ご指摘の通り重要であると考え、論文の内容がほげないよう最小限の内容を追加しました。

議論2 研究目標と社会とのつながりについて

質問 (一條 久夫)

課題の解決に向けた研究は非常に詳しく説得力がありますが、「研究目標と社会とのつながり」、「結果の評価と将来の展開」が若干不足しているように感じます。

「タンパク質ネットワーク解析を大規模・高精度に行い、疾患の発症メカニズムや新規創薬ターゲットを発見する」という目標が一部達成されていることをもう少し詳しく記されると分かり易くなるのではないのでしょうか。

回答 (夏目 徹)

新規創薬ターゲットの発見についての具体的な内容を、*Nature*誌に発表したプロテアソームのアッセンブル因子を例に取り具体的に記述しました。

エアロゾルデポジション法

— 高機能部品の低コスト、省エネ製造への取り組み —

明渡 純*、中野 禪、朴 載赫、馬場 創、芦田 極

エアロゾルデポジション法 (Aerosol Deposition method: AD 法) は、最近開発された粉末材料の噴射加工技術の1つであり、セラミックス微粒子を高温で焼結することなく、常温で固化・緻密化できる革新的なコーティング手法である。これにより、機能部品の製造プロセスにおいて、高機能化と大幅なエネルギー消費の低減、工程数の削減、ひいてはコストダウンをもたらすと期待される。このような AD 法の持つ特徴が、技術競争力と環境負荷低減という観点から、どのように位置づけられ、また、どのような可能性を持っているかを原理や具体的検討事例とともに、本格研究の視点から検証する。

1 はじめに

電子デバイス、実装分野における製造プロセスを取り巻く状況は、産業自体のグローバル化や環境負荷への懸念の流れの中で急速に変化してきている。製品サイクルの短期化や多品種・変量生産への対応である。現在、製品マーケットでは、急速に製品仕様の多様化が進んでおり、この波は、コネクタやセンサ、アクチュエータなどの実装品レベルにも波及し、一括大量生産の時代から極端な短納期、多品種・変量生産が要求されている。つまり、製品製造に要求される形態が市場ニーズの多様化により大きく変化してきているのである。例えば、MEMS デバイスを量産する製造ラインは、既存の LSI 製造ラインを利用しても、研究開発フェーズの段階から、現状で優に 10 億円以上の設備投資が必要で、製品開発に時間がかかる上、デバイスレベルで量産効果による低コスト化のためには、相当数の生産量が求められる。それゆえに、これを事業化する際のビジネスリスクは大企業といえども相当なものになる。これが、「MEMS 事業化にはキラーアプリが必要」といわれるゆえんである。一方で、MEMS デバイスなどは、一種の部品と考えられ、その実用化を考えると、本来、多品種・変量的な生産のフレキシビリティが求められるものだともいえる。仮説ではあるが、一般的に機能部品のモジュール化においても、集積度が増すにつれ、この傾向は高まると考えられ、製品競争力維持のためにコモディティー化を抑える観点からブラックボックス化とカスタム化を同時的に押し進めると、おのずと多品種・少量生産の必要性が生じ、この

中で低コスト化を実現するには、製造技術の観点からさらなるプロセス技術の進化も必要になると考えられる。

また、これからの先端デバイスの製造プロセスを考えると、多様な機能を持つ酸化物エレクトロニクス材料などを薄膜化、高集積化して高度な機能を実現することが、ますます求められるであろう。MEMS デバイスのような電子デバイスの集積化プロセスにおいては、スパッター法や CVD 法に代表される真空薄膜プロセスを多用する研究開発が各所で進められており、今後ますますこの流れは主流となるであろう。しかしながら意外なことに、このような半導体周辺部品の集積化で薄膜技術が実用レベルに到達しているものは数少ない。これは、キャパシターやフィルター部品の事例に見られるように、デバイス化したときの材料レベル

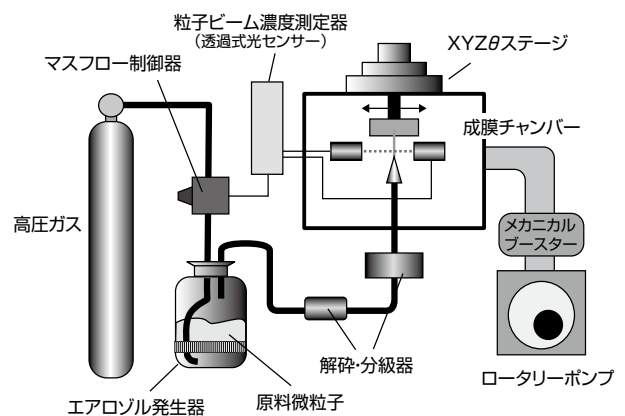


図1 エアロゾルデポジション (AD) 装置の基本構成

での特性と製造プロセスコストがトレードオフの関係になりがちで、現時点ではバルク材料を工夫、加工し利用するほうがコスト、設備、エネルギー消費面で現実的なことが多いということに由来する。真空プロセスでは、純度の高い原材料と超高真空の環境が求められており、これを量産レベルで実用化するには、設備コストやエネルギー消費、環境負荷などの観点から懸念される課題が多々あり、これをブレイクスルーすることも重要な課題になると考えられる。その意味で、これらに対応できるオンデマンド的な製造プロセスや製造システムの構築は、環境負荷低減という観点のみならず、産業競争力の強化という観点からも、今後、重要な課題になると考えられる。実際このような課題への検討は、センサデバイス用回路基板の実装などアセンブリレベルでは、小規模なセル生産システムという形で始まっている^[1]。

以上のような高機能デバイス製造を取り巻く環境の中、「どう機能を実現するか?」だけでなく「どのような作り方で実現するか?」という研究開発の視点もますます重要になる。本論文では、このような視点に立ちエアロゾルデポジション法をベースとしたオンデマンド製造プロセス実現の可能性を検討した。

2 エアロゾルデポジション (AD) 法とは

エアロゾルデポジション法 (以下 AD 法)^[2] は、あらかじめ他の手法で準備された微粒子、超微粒子原料をガスと混合してエアロゾル化し、ノズルを通して基板に噴射して被膜を形成する技術である。ガス搬送により加速された原料粒子の運動エネルギーが、基板に衝突することにより局所的な熱エネルギーに変換され、基板-粒子間、粒子同士の結合を実現するものと考えられてきた。しかしながら、そのエネルギー変換のメカニズムは十分理解されているとは言いがたかった。

図1に成膜装置の基本構成を示す。この装置は、細い搬送チューブで接続されたエアロゾル発生器と成膜チャンバーから構成され、成膜チャンバーは真空ポンプで50～1 kPa前後に減圧される。原料であるドライな微粒子、超微粒子材料は、エアロゾル発生器のチャンバー内でガスと攪拌・混合してエアロゾル化され、両チャンバー間の圧力差により生じるガスの流れにより成膜チャンバーに搬送、スリット状のノズルを通して加速、基板に噴射される。原料微粒子には、通常、機械的に粉碎した粒径0.08～2 μm程度のセラミックス焼結粉末を用いる。ガス搬送された超微粒子は、1 mm以下の微小開口のノズルを通すことで数100 m/secまで容易に加速される。成膜速度や成膜体の密度は使用するセラミックス微粒子の粒径や凝集状態、乾燥状

態などに大きく依存するため、エアロゾル発生と成膜チャンバーの間に凝集粒子の解砕器や分級装置を導入し、高品位な粒子流を実現している。

最近、このAD法でセラミックス原料粉末を用い、その粒径、機械特性等を調整し適切な成膜条件を選ぶと、図2に示すように高密度かつ透明なセラミックス被膜が常温で高速形成できる常温衝撃固化現象 (Room Temperature Impact Consolidation: RTIC)^{[2] [3]}が見出された。原料微粒子を基板に吹き付けるときに基板加熱や成膜後の熱処理は行っていない。また、この現象は、セラミックス材料だけでなく金属材料でも同様に生じる。

AD法による常温衝撃固化で形成したセラミックス膜の微細構造は、結晶粒子間にアモルファス層や異相はほとんど見られず、いずれの場合も室温で10～20 nm以下の無配向な微結晶からなる緻密な成膜体が得られている。また、10 nm以下の微結晶内にも明瞭な格子像が確認され、膜内部には歪みなどを含むものの、膜組織は基板界面から膜表面に至るまで均一な構造である。さらに、いずれの場合も原料微粒子は平均粒径で80～100 nm以上の単結晶構造であるが、形成された膜ではより小さな微結晶組織になっている。XRDやEDX分析の結果からも、形成された膜は組成変動も少なく原料微粉の結晶構造をほぼ維持している。粒子速度の測定、運動エネルギーの評価などから粒子衝突により原料粒子結晶が機械的に破碎、塑性変形することで微細化され、同時に粒子間結合も生じることでナノ結晶薄膜が形成されると考えられる^{[1] - [3]}。従来の粒子衝突を利用したコーティング手法では捉えられていなかった観点である。

以下に従来薄膜プロセスと比較したAD法の特徴をまとめる。

1. 常温、バインダーレスで緻密な成膜/成形体が得られる。
2. 高い成膜レート (5～50 μm/min)
(従来成膜法: 0.01～0.05 μm/min)
3. 蒸気圧の大幅に異なる複雑組成系に対し使用粉末と同一組成・結晶構造の成膜体が得られる。

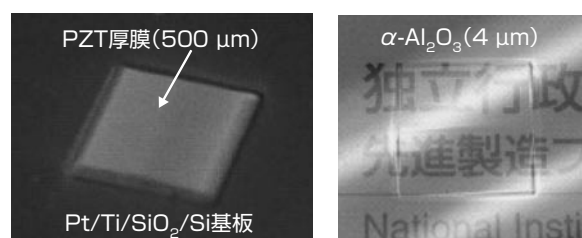


図2 AD法で常温形成されたセラミックス膜

4. 広範囲の膜厚が得られる。(0.5 μm ~ 1 mm)
5. 直接描画、マスク法、リフトオフ法などにより微細パターンが膜のエッチング加工無しで得られる。
6. 低真空(数 100 Pa 程度~大気圧) で成膜可能。

AD 法で常温衝撃固化された膜は、衝突による基板温度の上昇も一切観察されず、マクロ的には室温でセラミックス材料を固化できている。焼成工程を経っていないので一種のバインダーレス超高密度セラミックグリーンとも言える。

3 既存薄膜技術との比較と省エネルギー効果

3.1 従来の薄膜技術との原理的相違

低温で緻密性や結晶性の良いセラミックス膜が精度良く低コストで高速形成できれば、冒頭に上げたデバイス量産上の問題は解決する。AD 法は熱非平衡なプロセスで、溶射技術などと異なり原料微粒子をほぼ固体状態のまま常温で結合・薄膜化する。従来の薄膜法と比較した場合、粒子単位のビルドアップ加工であるため成膜速度は非常に速く、原料微粒子の結晶構造が成膜体でも、ほぼ維持される。このため、基板材料を選ばず、複雑組成の複合酸化物などの薄膜化が容易であることなどの大きな特徴がある。従って、他の成膜技術に比較して大幅なプロセス温度の低減が期待でき、本質的に異種セラミックス材料、金属材料、ポリマー材料との複合・集積化やナノ組織複合材料の開発に向くと考えられる。

プロセスの省エネ化という観点では、通常、数 100 Pa 以上の低真空環境下で成膜可能で、対象材料や使用目的によっては大気中でも成膜可能なことが最も大きな特徴である。一般に、従来の薄膜技術では、原材料を原子・分子レベルにいったん分解し、これを基板上で結晶成長させる。このため欠陥の無い高純度な結晶組織ひいては高性能な膜特性を得るには、基板到達前の状態で不純物原子などとの吸着、結合を抑制するために周囲環境を超高真空にする必要がある。これに対し AD 法では、図 3 に示すように、原材料はすでに結晶化した粉末で、基板への材料供給速度が速いだけでなく、基板到達前は原材料である微粒子表面は不活性で、基板衝突して初めて活性化粒子間結合が生じる。このため、高真空環境でなくとも、成膜過程で過剰な不純物を膜内に取り込むことがかなり抑えられる。厳密には、原料粉末表面には不純物吸着が残存するため、超高純度な結晶を得るには、表面を事前にクリーニングする必要があると考えられるが、このような処理が無くとも、多くの電子セラミックス材料に対して、既存の真空薄膜技術と同等かそれ以上の膜特性が得られることが、NEDO ナノテクノロジープログラム/ナノレベル電子セ

ラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクト (FY2002 ~ FY2006)^[4] の中で実証されている。

この様に、高機能な材料に対し、ロータリーポンプでの排気程度の低真空プロセスで成膜できる点は、工業的側面では画期的と考えられ、原理的に従来の真空薄膜プロセスと比較すると、製造設備導入コストやエネルギー消費量の削減、環境負荷の大幅な低減につながると考えられる。

3.2 静電チャック製造工程におけるAD法導入の省エネルギー効果

実際に、AD 法を導入することで、製品製造全工程での消費エネルギーがどの程度削減され、製品機能がどの程度改善されるかを、民間企業との共同研究を通して NEDO エネルギー有効利用基盤技術研究開発プロジェクト (省エネ先導研究: FY2001 ~ FY2003)^[5] の中で検討した。対象としたのは静電チャックである。これは現在、半導体製造においてウエハを吸着ハンドリングする装置として多用されており、フラットパネルなど大型部材を保持できる高い吸着力の製品が求められている。静電チャックは、図 4 に示すように放熱と電極をかねた金属ジャケットに静電気を発生するためのセラミック薄板が絶縁層として貼り付けられた構造になっている。このセラミック薄板の厚さが薄いほど印加電圧あたりの吸着力が増す。また、放熱性の観点から、一般に熱伝導性の良い窒化アルミ系材料が用いられている。プロジェクトでは、この窒化アルミの薄板を AD 法による金属ジャケットへのセラミックコーティングに置き換え、性能向上と全製造工程でのエネルギー消費削減効果を検討した。性能面では、絶縁層厚みをコーティングに置き換えることで 1/10 以下に薄くでき、このことで印加電圧あたりの吸着力を約 20 倍まで向上でき、さらに金属ジャケットへの熱伝導や吸着応答速度を大幅に上げることができた。また、付加的機能として熱伝導向上を窒化アルミと

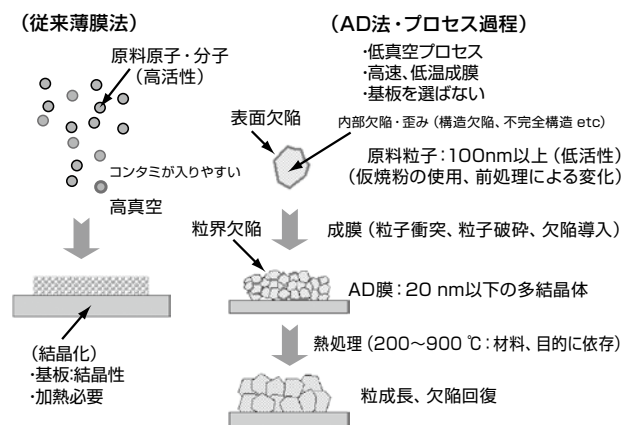


図3 AD法と従来薄膜法のプロセス過程の違い

いう材質に頼らなくとも実現できるため、材質をイットリアなどに切り替え、プラズマ耐食性を向上できるなどの新たな機能面の改良がはかれた。

この静電チャックの製造をAD法導入による消費エネルギー削減の観点から検証すると、図4に示すように製造工程トータルで約80%ものエネルギー消費量の削減が可能ながわかった。また、製造工程時間も1/10以下に抑えられている。このエネルギー削減について分析すると、非常に興味深いのは、単純に従来の工法でメインとなる焼成工程でのエネルギー消費が1000℃以上の高温から一気に室温になったという点だけでなく、製品製造の全工程数が減り、特に静電チャックの製品性能を決める吸着面の平坦性を出すための研磨工程でのエネルギー消費が大幅に減ったことが、全体のエネルギー消費の低減に大きく貢献している点である。従来の窯業プロセスでセラミック薄板をつくと、焼成時の収縮や反りがどうしても大きくなり、これを平坦化する工程でのエネルギー消費が意外にも大きいのである。AD法によるセラミックスコーティングを用いると、膜厚を薄くしても緻密なため十分な耐圧があり、また、薄い膜厚のため吸着面の反りは大幅に低減される。製造工程のエネルギー削減は量産設計の考え方とも深く関与しており、これらをトータルに考慮し、AD法の省エネプロセス技術としての有効性を検証すべきと考える。

以上の事例は、静電チャックという特殊な部品であるが、

その他の窯業製品においても、おおよそセラミックスに求める機能が耐食性や絶縁性、硬度などその表面だけが重要な用途では、AD法によるセラミックコーティングに置き換えることにより同様のエネルギー削減の効果が期待できる。

このほか、最近では、AD法で成膜されたイットリア膜を耐食プラズマコーティングとして半導体製造装置のチャンバー内壁や要素部品に適用することにより耐久性を向上させる用途展開が事業化されつつある。これまで材料ごとに装置が必要であったCVD工程を1台の装置でまかなえるようにしようとする検討も始まっている。半導体製造工場の規模や設備コスト、エネルギー消費を生産量に合わせて最適化できる可能性も考えられる。

4 MEMS光スキャナーへの適用における低コスト・省エネ化の可能性

4.1 Si-MEMSスキャナーへの適用と工程の単純化

「必要とところに必要なだけ」あるいは「多品種変量」という要求にこたえる考え方として、プロセスや製造システムのオンデマンド化の検討をおこなった。AD法はノズルからの噴射加工ということもあり、インクジェット技術のようなオンデマンドプロセスとしての可能性も持ち合わせている。

具体的な事例として、図5に示すような圧電駆動型の

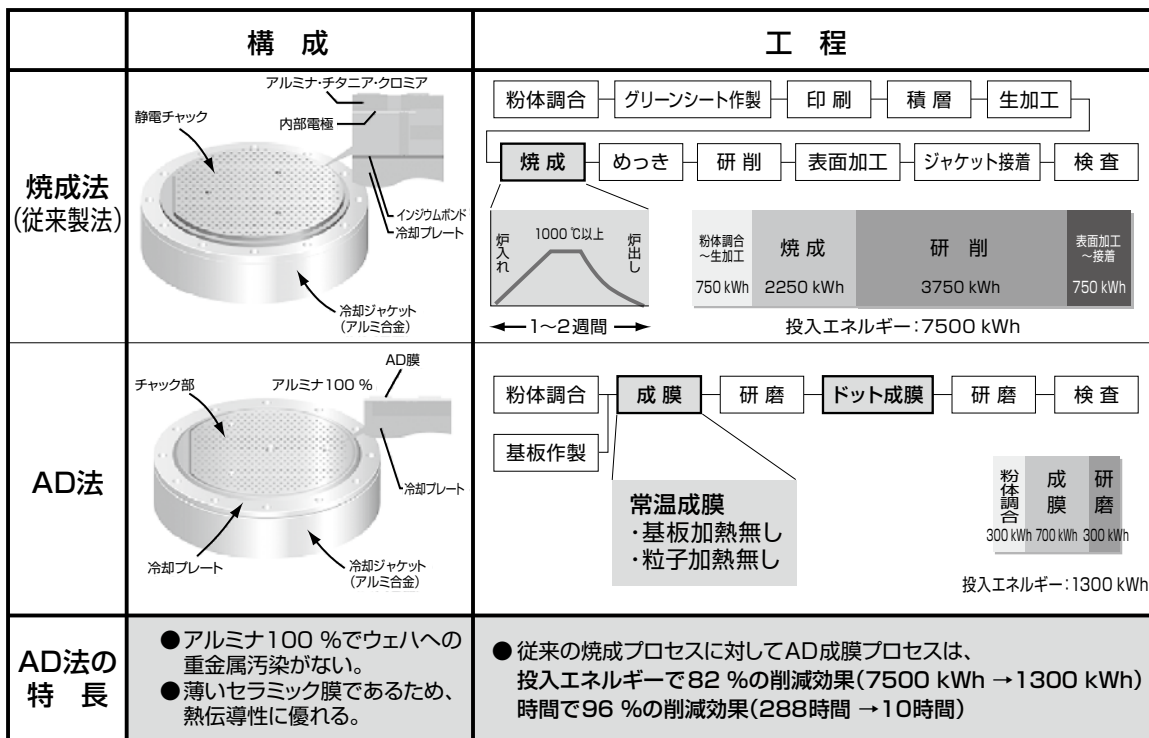


図4 静電チャックの構造とAD法導入による製造工程のエネルギー消費比較

Si-MEMS 光スキャナーへの適用を検討した。このようなスキャナーは、次世代レーザープリンターやバーコードリーダ、ITS 用レーザーレーダなどへの応用、さらにはマイクロプロジェクターや網膜投射型ディスプレイなど次世代表示デバイスのキーコンポーネントとして広範囲の応用展開が期待され、数 10 kHz 以上の高速走査と 20° 以上の大振幅動作、ミリメートルサイズのミラーと動作時の撓み（歪み）の低減や低電圧駆動が要求されている^[6]。

このデバイスの製造工程では、まず Si マイクロマシニングでスキャナー構造を形成し、駆動源となる圧電膜を必要な部位にだけ形成する。従来、このようなアクチュエータ構造を形成するには、ウェットやドライエッチングによるバルクマイクロマシニングで構造形成し、スパッター法や CVD 法、ゾルゲル法などを利用し上部・下部電極層や圧電層の堆積を行うが、圧電層の形成に基板加熱が必要となる。また、成膜材料の構造側面への回り込みを避けるため、工程数の少ないリフトオフ法やマスク法は用いられない。この時、各材料層を堆積するつどエッチングによりパターニングを行うことになり、高価な微細加工装置や成膜装置と 20 工程以上のプロセスが必要であった。これに対し、AD 法を用いた場合、微細加工された Si のスキャナー構造上の必要な箇所だけに圧電膜を精度よく形成できるので、圧電膜や電極層のエッチング工程が不要になり成膜速度の向上と相まって大幅な工程短縮や設備導入コストの低減が可能となっている。性能面では、走査周波数：33.4 kHz、光ビーム走査角 30° という結果が得られており、従来の静電駆動型 MEMS 光スキャナーや電磁駆動型 MEMS 光スキャナー、圧電駆動型 MEMS 光スキャナーを超える高速、大振幅走査の光スキャナーが実現できた^[7]。これは、圧電

膜の厚さをプロセス上簡単に厚くでき、その結果、駆動源の発生力が大きくなり、剛性の高い Si ねじれ梁構造を採用できたためである。

4.2 メタルベースMEMSスキャナーへの展開とデバイス設計への反映

AD 法が基板材料を選ばず高性能な圧電膜が形成できる点に着目し、より安価で耐衝撃性に強く実用的な小型アクチュエータを目指して、メタルベースのデバイス化を検討した^[8]。図 6 は、図 5 に示した MEMS 光スキャナーに対し、スキャナー部本体を Si からステンレス基材に置き換え、パンチ加工による打ち抜きでミラー部、ねじれ梁部などを含むスキャナー構造全体を形成し、これに AD 法で圧電膜を直接形成して製作された、板波共鳴型の高速マイクロ光スキャナーの製造工程である。基板部に形成された AD 圧電膜が外部電界で伸縮運動することにより、基板全体に曲

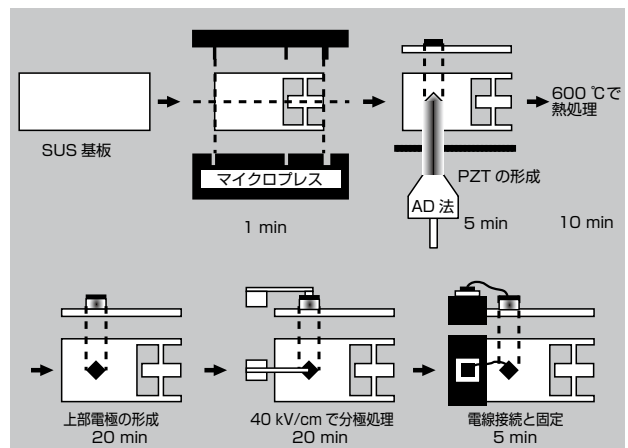


図6 AD圧電膜で駆動されるメタルベース光スキャナーと製造工程

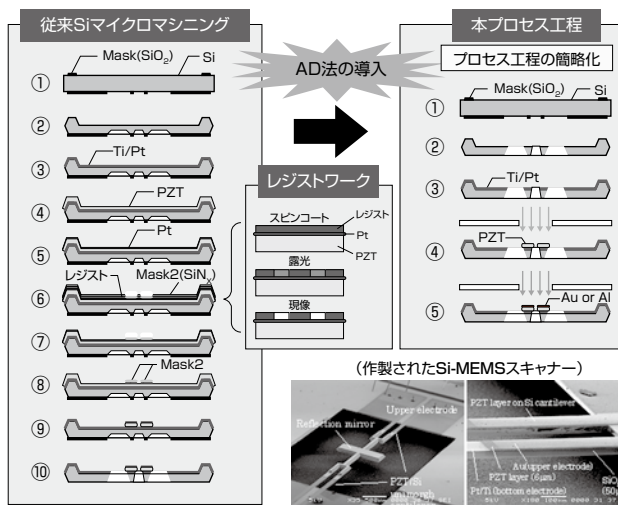


図5 AD圧電膜で駆動されるSi-MEMS光スキャナーと従来製造工程の比較

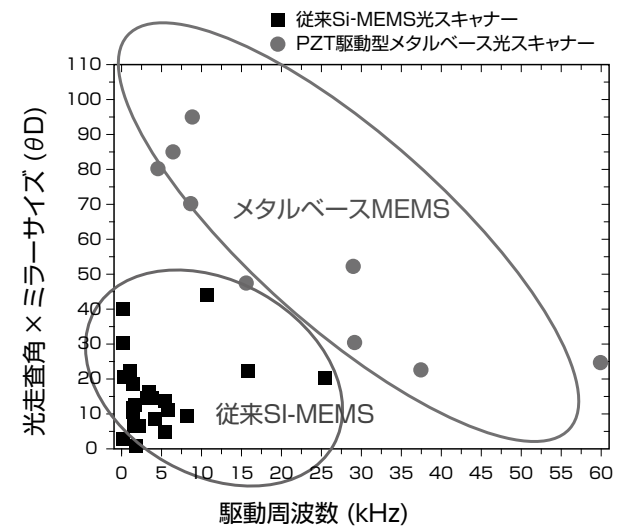


図7 板波共鳴原理によるメタルベース光スキャナーと従来Si-MEMSスキャナーとの性能比較

げ変位が誘起され（ユニモルフアクチュエータとして働き）、板波を発生させ、これでミラー部を共鳴励振してミラー部で反射したレーザー光を高速走査する。図7に従来のSi-MEMSで製作された光スキャナーとの性能比較を示す。同一駆動電圧で比較されており、横軸は共振周波数、縦軸はミラーサイズ×光ビームの走査角度で、ミラー部振れ角の標準的な評価指標である。共振周波数は空気中で100 Hz～90 kHzと広範囲に設計でき、光ビームの走査角度も最大95°が得られた。また、超精密研磨加工されたステンレス板材を用いることで、パンチで打ち抜き加工されたミラー部も2 mm角サイズに対し、 $\lambda/4 \sim \lambda/8$ 程度の平坦性が得られており、本光スキャナーの用途に適応できるレベルにある。Siウエハを素材として用いた場合、このような大きなミラー走査角度を、10 kHz以上で実現することは、降伏限界を超えたねじれ梁の破損や共振周波数の低下により実現困難である。図8に示すように、最大走査周波数：61 kHz、最大光ビーム走査角：75°で1年間以上の連続動作試験の結果、共振周波数の低下や光ビーム走査角度の劣化はみられず金属疲労という観点からも実用的な耐久性を有することが確認された。また、ステンレス素材を用いることで、耐衝撃性を大幅に向上することができ、モバイル機器、車載装置への応用が期待できる。さらに、スキャナー構造がステンレスであるので、それ自体を下部電極にできるため、スパッター法などによる3層構造の下部電極形成工程が省かれて製造工程は大幅に簡略化され、設備導入コストが従来のSi微細加工設備と比べて低く抑えられることなどでデバイスの低コスト化が期待される。

以上の結果から、大走査角の高速光スキャナーの実現という課題に対し、AD法が金属基板上に良質の圧電膜^[9]を直接形成できる点を最大限に生かし、かつ、従来機械加工技術と組み合わせることで、シリコンマイクロマシン

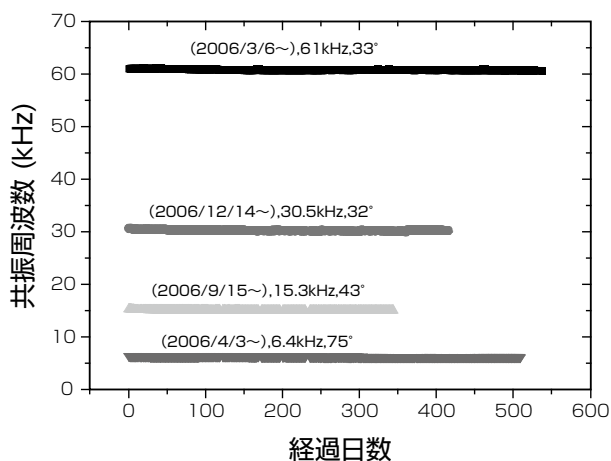


図8 メタルベース光スキャナーの耐久性

グをベースとした従来の設計思想を凌駕しうる高性能化と低コスト化が両立できることが確認できた。

4.3 多品種・変量製造システムへの適用

先の光スキャナー製造上のAD法の有効性を生産レベルで検証することと、カスタムメイドが要求される医療用マイクロデバイスなどさらに多品種・変量的な生産が要求されるセンサ、アクチュエータ部品に応用展開するための試みとして、図9に示すような機械加工の迅速、多様性とAD法やレーザー加工、インクジェット法など、オンデマンド性の高い機能材料の形成・加工技術を駆使した製造システムの開発を行った。電子機能デバイスの製造工程にもかかわらず、マスクレスで多品種・変量生産に対応できる製造プロセスを目指した仕様となっている。以下にその構成要素の詳細と検討結果を述べる。

AD法は、その原理の単純さから装置スケールをロールツールからデスクトップ規模まで容易にスケール変化さ

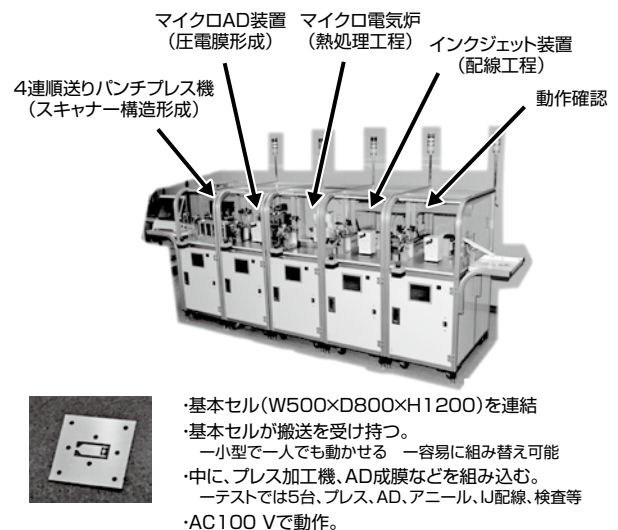


図9 オンデマンドMEMS製造システム

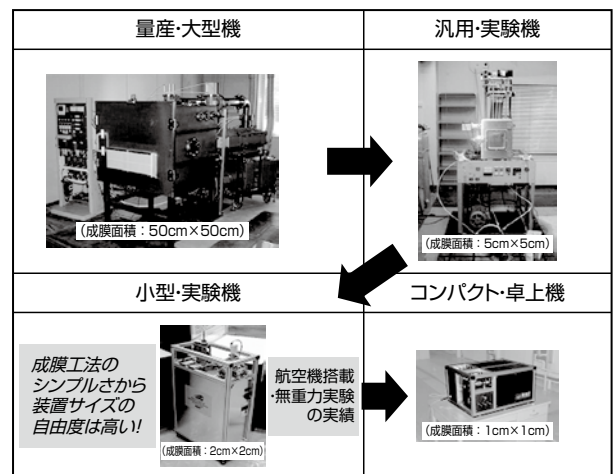


図10 様々なサイズのAD装置

せられる可能性を秘めている。図10は様々な大きさに対応したAD装置の試作例である。現状で最も大きいサイズは、50 cm 角の成膜面積に対応できる装置があり、最も小さいサイズでは、デスクトップサイズのものまで試作されている。また、このような小型AD装置は、宇宙ステーションなどに搭載することを目的に無重力航空機実験などでの成膜実績がある。注目すべきは、AD法の成膜には高真空が要求されないことと、成膜装置のダウンスケールによって、成膜チャンバーの排気、真空リーク時間が著しく低減されることが挙げられる。

今回上述のメタルベース光スキャナー製造用に試作したAD装置(図9)では、サンプルサイズとしては1デバイスが2 cm 角内に収まることを想定し、チャンバーサイズを決定した。また、実際の生産システムでは、図11に示すように前後の工程との間に、サンプルの自動搬送、自動アライメント機構を必要とすることから、チャンバー蓋部にサンプルホルダーを持つ機構とし、サンプルの出し入れのタクトタイムの短縮と位置決めを容易にしている。ホルダー付のチャンバー蓋部は、圧縮空気駆動のシリンダーにより上下させる。これらの機構により搬送アームがサンプルを設置し、退避後0.2秒未満の時間で蓋を閉じて真空引きになる。

真空引きについては、AD法に必要な真空度は(成膜時)100 Pa程度を見込めれば良いことから、低真空領域での高速排気がポイントとなる。全体のチャンバー容積(ゲートバルブまで)を先のサンプルサイズに合わせて、約75 cm³ときわめて小さく設計することで、図12に示すように排気量15~20 m³/min程度の卓上型ロータリーポンプ1台で2 Pa程度までの真空到達時間が約3秒で成膜が可能にな

る。リーク時間についても約0.1 Paから0.7秒で大気圧に到達する。また、膜形成速度についてはエアロゾル化室の性能にも依存し、現在必ずしも十分ではないが、この条件下で1 μm/sec前後の成膜レートが得られている。

以上の設計により、3ミクロン厚、5 mm角のPZT厚膜の成膜では、図11に示すように装置への基板挿入→真空排気→成膜→真空リーク→基板取り出しまでの一連の工程時間が約10秒と驚異的に短縮させることができた。これは、真空プロセスはバッチプロセスで扱うという従来の常識を大きく覆すもので、オンデマンド性を具現化する重要なポイントになる。

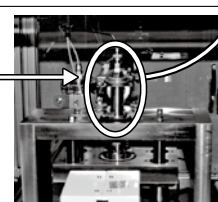
また、スキャナー本体構造の形成を行うパンチによる打ち抜き加工工程では、ミラーとねじれ梁の部位、スキャナーフレーム全体形状、位置決め穴などを4つの順送分割型にし、4台のマイクロプレス機構で順次ステンレスフープ材を打ち抜き、形状形成するような構成になっている。このことにより部分的な金型の変更、組み合わせの選択により、共振周波数の違いや、ミラーサイズの違いなど、多種類の製造に比較的安価に対応できる構成になっている。このほか、小型の熱処理装置、配線用のインクジェット装置などの工程ユニットも試作し、トータルで素材からデバイスまでの製造ができるシステムを構築した。現状では、実用的な

- ・高速成膜が可能：実際の成膜時間を削減 ~6 s
- ・常温衝撃固化現象：サンプル過熱などが不要 ~0 s
- ・必要な場所だけ成膜：チャンバーサイズが小さくなる
 - 真空引き/リーク時間が短縮 ~各2 s
 - サンプル取出(大気へ)時間も高速化 ~1.5 s

Total time(サンプル投入から取り出し可能までの時間)
~10 s



高真空必要(10⁻⁵~10⁻⁶Pa)TMP利用
低い成膜速度(20 nm/min以下)
長いタクトタイム(3~5時間)
高い基板温度(550~600℃)



チャンバー容積: ~1/2000
低真空: ロータリーポンプ1台

図11 小型化によるタクトタイムの向上

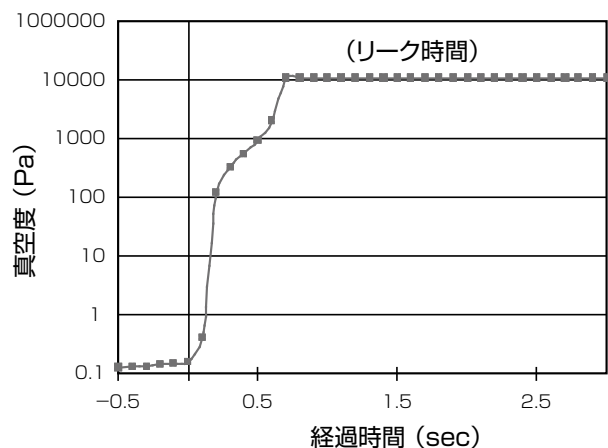
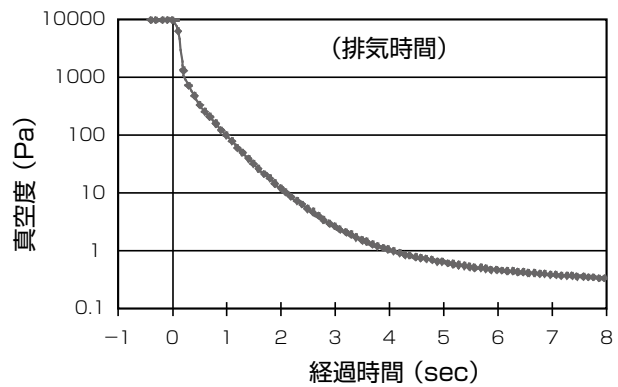


図12 小型AD装置の成膜可能真空度到達速度とリーク時間

製造装置としてはまだ多くの修正、改善が必要であるが、製造設備開発とデバイス設計の同時的な最適化、進化がはかれるところも利点と捉えている。

前節で述べたメタルベース光スキャナーは、この生産システムによる試行錯誤と計算機シミュレーションにより最適設計・製作された。その結果、1ラインあたり、1デバイス/min という生産スピードの実現に目処を得ている。これは月産約2～3万個の量産量に当たる。このような製造工程に置き換えることにより、デバイス性能を向上する中で、表1に示すように、従来 Si 微細加工設備を利用する場合と比較して、エネルギー消費、設備設置面積、製造時間の大幅な削減、環境負荷の低減が可能なのが確認された。

5 まとめと将来展望

AD 法の特徴を最大限に利用し、製品性能の高機能化と低コスト化を両立させ、環境負荷の小さなオンデマンド製造技術の構築を試みる検討を行った。AD 法は、機能性材料を利用する工程において、常温成膜が可能で、高い成膜速度、エッチングレスの局所加工などの特徴を持っている。静電チャックと光スキャナー製造について検討した結果、デバイス構造、製造工程の簡略化とプロセスタクトタイムの向上、プロセス装置の簡素化という要素が有効に働き、これを元に材料、素材レベルからのデバイス設計の見直しを行うことで、性能向上と低コスト化、あるいは製造過程での環境負荷低減を両立させたものづくりが可能なのが明らかになった。また、その過程で、量産装置としての改造も加えられ、製造設備開発とデバイス設計の同時的な最適化が図れるメリットもあることが判った。最小のインプット(省資源、省エネルギー)にして、高い実用性(高生産性、低コスト)を持ちながら、最大限の機能(新機能、高性能)を発揮するという「ミニマルマニユファクチャ

リング」のビジョンを示した一例といえよう。もちろん、ここで取り上げた MEMS デバイスなどは、一般的には AD 法の導入だけで効果的に最適化されるものではないが、逆に現在知られる要素プロセスに更なる進展があれば、より広い用途に対しても大幅な最適化(ミニマル化)が可能であろう。

今後は、このような思想に基づき、材料レベルからデバイス製造レベルまで見直しながら様々な新規プロセスの導入効果について検証を進めていきたい。

キーワード

エアロゾルデポジション、AD法、光スキャナー、オンデマンド、省エネ、電子セラミックス、圧電、MEMS

参考文献

- [1] 日経ものづくり編集部：部品実装にもセル方式、日経ものづくり 2007年1月号、日経BP社、93(2007).
- [2] 明渡純, M. Lebedev: 微粒子, 超微粒子の衝突固化現象を用いたセラミックス薄膜形成技術-エアロゾルデポジション法による低温・高速コーティング-, までりあ, 41(7), 459-466 (2002).
- [3] J. Akedo: Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: Densification mechanism of ceramic layers, *J. Am. Ceram. Soc.*, 89 (6), 1834-1839 (2006).
- [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構「ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術」第2回プロジェクトワークショップ講演資料, 新エネルギー・産業技術総合開発機構&製造科学技術センター(2007).
- [5] 新エネルギー・産業技術総合開発機構:平成16年度 NEDOエネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発「衝撃結合効果を利用した窯業プロセスのエネルギー合理化技術に関する研究開発」プロジェクト成果報告書(2005).
- [6] M. Bayer: Retinal scanning display - a novel HMD approach to army aviation head and helmet-mounted displays VII, *Proc. SPIE 4711*, Orlando, Florida, 4557(2002).
- [7] N. Asai, R. Matsuda, M. Watanabe, H. Takayama, S. Yamada, A. Mase, M. Shikida, K. Sato, M. Lebedev and J. Akedo: A novel high resolution optical scanner actuated by aerosol deposition PZT films, *Proc. of MEMS 2003*, Kyoto, Japan, 247-250 (2003)
- [8] J. Akedo, M. Lebedev, H. Sato and J. H. Park: High-speed optical microscanner driven with resonance of lamb waves using Pb(Zr,Ti)O₃ thick films formed by aerosol deposition, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, 7072-7077(2005).
- [9] Y. Kawakami and J. Akedo: Annealing effect on 0.5Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.5Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃ thick film deposited by aerosol deposition method, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, 6934-6937 (2005).

(受付日 2008.1.29, 改訂受理日 2008.3.14)

表1 MEMS製造システムとしての比較

	シリコンリソグラフィ型 MEMSファクトリ	オンデマンドファクトリ
床面積	300 m ² (付帯設備込みだと 1000 m ²)	10 m ² (1/30~1/100)
電力(kWh/年)	360000	8000 (1/45)
製造時間	約12分/1個 (プロセス時間/ウエハーあたり個数) 約1.2分/1個 (10枚1バッチ)	設計目標値 1分/1個 (1/10~1/1)
環境負荷	レジスト等捨てる材料 プロセスガス 洗浄工程	ほとんど不要 (大幅削減!)

執筆者略歴

明渡 純（あけど じゅん）

1984年早大理工学部応用物理学科卒、1988～1991年同理工学部助手をへて、1991年通産省工業技術院機械技研入所、2001年から独立行政法人・産業技術総合研究所グループ長。工学博士。大学時代に光磁気記録、光センサーの研究で材料開発からデバイス開発まで幅広く関わり、バーコードリーダーを製造するベンチャー企業で商品開発も手がける。機械技術研究所入所後、1994年頃から現在の研究（AD法）を着想。2002年から5年間、NEDOナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクトリーダー。本論文では主にAD法とメタルベース光スキャナーの開発を担当、さらに省エネ効果の検証、全体構想の取りまとめを担当した。

中野 禪（なかの じずか）

1989年工業技術院機械技術研究所入所以来、イオン注入技術等を用いたマイクロマシン技術の開発に取り組む。材料表面の有効な機能発現を検討。2001年NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）出向を経た後エアロゾルデポジション法等の利用技術にも取り組み、微小重力実験やオンデマンド製造技術の開発に従事している。博士（工学）電気通信大学（2003年）。本論文では主に小型AD装置も含む、オンデマンド製造システム全体にわたる装置開発を担当した。

朴 載赫（ぱく じえいひよく）

2004年産総研入所。新規の光学材料開発及び光デバイスへの実用化に向け、AD法を用いた磁気・電気光学用透明ナノコンポジットに関する研究開発を行い、超高速マイクロMEMSスキャナーの実用化研究とこの光デバイスに関連したオンデマンドMEMS小型製造装置の開発も進めている。豊橋技術科学大学大学院工学研究科電子情報工学専攻修了（2003年）。本論文では主にメタルベース光スキャナーの開発を担当した。

馬場 創（ばば そう）

科学技術振興事業団プレベンチャー事業研究員を経て2003年産総研入所。NEDOプロジェクトの中で従来困難であった金属基板上の高性能圧電厚膜アクチュエーター実現のためにレーザー援用エアロゾルデポジション法の開発に従事してきた。現在はエアロゾルデポジション法を利用したオンデマンド製造及びプロセス高度化技術に関する研究を行っている。大阪大学大学院工学研究科マテリアル応用工学専攻博士後期課程修了（2001年）。本論文では主にオンデマンド製造システムの熱処理工程（レーザー援用AD法）の開発を担当した。

芦田 極（あしだ きわむ）

1998年千葉大学大学院博士課程修了後、通産省工業技術院機械技研入所。「小さなものは小さな機械で作る」というコンセプト「マイクロファクトリ」に基づいて、ポータブルファクトリなどの「小さな加工機械」の試作開発と、「小さな機械加工」を目指したマイクロ・ナノスケール機械加工技術に関する研究を進めている。本論文ではオンデマンド製造システムの開発において、共通小型ユニットセルの連結により生産ラインを自在に構築・再構築可能なシステムアーキテクチャおよび搬送装置の設計、並びに最初の工程となるマイクロプレス加工セルの開発を担当した。

査読者との議論**議論1 全体構成について**

質問（五十嵐 一男）

AD法の特徴とその適用例が製造革新に繋がることを現した論文となっており、本ジャーナルの主旨に適した内容となっています。しかし、各サブタイトルの付け方と内容の展開が必ずしも一致していないため理解を複雑化しています。適切なサブタイトルを検討することで論文タイトルにある低コスト、省エネ製造への取り組みがハッキリしてくると考えます。

回答（明渡 純）

ご指摘のとおりです。上記趣旨を汲んだ形で修正させていただきます。

議論2 AD法の導入・実用化に介在する問題点

質問（五十嵐 一男）

静電チャックの製造において、AD法を適用すると約80%の消費エネルギー削減と1/10の製造工程時間の短縮が図られたとされていますが、このような技術革新は実際の製造ラインにどの程度採用されているのでしょうか。進みつつあるのであればその辺を触れられてはどうでしょうか。一方、採用が進んでいないとしたらそれを阻んでいる要因は何かについても簡単に触れてはどうでしょうか。

回答（明渡 純）

原稿でも触れましたが、現在、プラズマ耐食コーティング部材で本格的な事業化が始まろうとしているところです。（4月13日付、化学工業日報に掲載）

工程消費エネルギーの低減や工程時間の短縮については、生産量や導入するAD装置の台数にも依存し、単純には評価できません。ここでは、企業さんの想定される設備導入コストと生産台数に基づいて換算しております。このほか省エネ性という点では製品歩留まりなど他のファクターも入り、非常に複雑で、実用化には、あくまで最終的な製品コストがどうなるかで決まると考えられます。

また、AD法のように、これまでに実績のない新規な製造プロセスの導入、実用化には、たとえ性能面、コスト面で十分に見合ったものであっても信頼性の検証には、サンプル出荷などを通して相当な時間をかける必要があり、実用化に時間がかかりました。ここで取り上げた光スキャナーでも、耐久試験に約1年半の時間を費やしております。

議論3 ミニマルマニュファクチャリングコンセプトとの対応

質問（五十嵐 一男）

まとめと将来展望において、トータルに最適化された（ミニマルな）および大幅な最適化（ミニマル化）と記載されていますが、これだけではミニマルの意味が良く理解されないように思います。これがミニマルマニュファクチャリングを指しているのであれば明確にするため注釈を加えてはどうでしょうか。

回答（明渡 純）

ご指摘のようにこの研究はミニマル化を目指したものです。その意味で、「最小のインプット（省資源、省エネルギー）にして、高い実用性（高生産性、低コスト）を持ちながら、最大限の機能（新機能、高性能）を発揮するという「ミニマルマニュファクチャリング」のビジョン」という文言を文中に追記しました。

シンセシオロジーへの期待

— MIT レスター教授へのインタビュー —

MIT の Richard K. Lester 教授は、イノベーションの実践において産業界や大学などの各セクターが果たす役割について豊富で深い調査に基づく独自の考えをお持ちです。その際、明確な問題を設定しその解決を図る従来からの分析的アプローチに加えて、会話によって方向性を探っていく解釈的アプローチが大切であることを主張しておられます。今回は、第2種基礎研究に関する論文を中心として新たに創刊した学術誌『シンセシオロジー』についてインタビューし、色々のご意見を伺いました。

シンセシオロジー編集委員会

インタビュアー：小林直人（編集副委員長）

「シンセシオロジー」について

小林 この度、我々が発刊した『シンセシオロジー』は第1種基礎研究^{注1)}ではなくて、概念や技術の構成や統合が重要な役割を果たす第2種基礎研究^{注2)}と製品化研究^{注3)}に関する論文を掲載しています。まず、このジャーナルについてどのような印象をお持ちですか。

レスター 非常に貴重な役割を果たしていると思います。私の理解したところでは、このジャーナルはいくつかの異なる理由で普通のジャーナルには掲載されにくいタイプの研究論文を扱っています。すでに実在するジャーナルは、実際的目標を動機とする論文を相応しくないと考え、特に学術誌では、実際的目標に言及することなく、テーマがその学問分野 (discipline) または知識の状態を前進させる研究が対象でなければならず、このタイプの研究は掲載されにくいのです。

もう1つの理由は、これらの研究は企業や組織内で行われていることです。そこでは研究が知的所有権の重要な役割を果たします。その研究情報が実際には独占権を持つ理由がないのに、組織内のほかの仕事が独占的なために、当然これらの研究も含まれると考えられているのです。ですから普通は公共の目に晒されないのです。このように、

普通は掲載されないこの種の研究に発表の機会を与えるこのジャーナルは、非常に歓迎されると思います。

小林 このような学術誌または論文集をご覧になったことがありますか。

レスター いくつか似たような目的を果たしているジャーナルはありますが、それらは普通は専門家による論文審査 (ピアレビュー) を行っていないと思います。例えば、アメリカには電力研究所 (EPRI) やガス技術研究所 (GTI) のように特定な実際の任務、研究任務を持つ組織がいくつかあり、それぞれジャーナルがありますが、これらはこの新ジャーナル『シンセシオロジー』とは少し違うと思います。なぜならば、今も言った通り、まず、ピアレビューが行われていません。それから、それらのジャーナルはあまり原理的や基礎的ではなく、より製品実現やサービス実現寄りな場合が多いです。

論文の執筆要件について

小林 我々はこのジャーナルのための執筆要件を作りました。それぞれの論文は社会における目標があり、その目標を達成するためのシナリオと、構成要素 (これは第1種基



礎研究からでもいいのですが)の選択、それら要素間の構成・統合の方法、そして評価と今後の課題を明記しなければならぬとしました。これらの要件の中で執筆者のオリジナリティが問われるシナリオと構成法が特に大事だと思っています。これらの要件についてどのように思われますか。

レスター これらの要件はここに掲載されている論文と、典型的な学術誌に掲載される論文を区別するものです。典型的な論文は目的を明記していることがあっても、社会との関連から見た適合性や開発から実用化までの方法を明記していることはほとんどありません。またこのような構成要素についてはほかの出版物にも見られるでしょうが、構成・統合に焦点を当てたことは大きな違いだと思います。学術誌のほとんどは専門分野に関するもののみなので、構成・統合はツールの1つと考えられていないのです。評価と今後の活動は従来の学術誌と似ていると思います。だから、社会的適合性、シナリオ、構成・統合が特有の条件だと思います。これらの条件を満たすと違うタイプの出版物に実際上なると思います。

小林 これらの要件が研究者の間で受け入れられると思われますか。

レスター これらの要件はそれぞれの研究者によって様々な受け止められ方をするでしょう。社会に関連した仕事への願望を動機としている研究者にはこの要件は歓迎されるでしょうし、研究者によっては、この要件では自分は新たな貢献はできないと思う人もいるでしょう。

査読の判断基準—論理性について

小林 問題はどのように研究目的、シナリオと社会的適合性を評価するかです。審査は客観的でなければなりません。

レスター でも実際の場合、特定の研究目的、シナリオや社会的適合性の質の高いものであるかどうかを判断する客観的な基準はないかもしれないとあなたは言われるのですね。あなたの見解では、これまでの既存の学術誌では、研究目的を述べればそれで十分であり、研究の社会的適合性や目的を用いて、あえて貢献の正当性を主張する必要はない、ということですね。そして、もし知識のフロンティアが広がるか先に進めば、良い貢献と判断するのに十分だということですね。

しかし、このジャーナルの場合、良い貢献かどうかを判断する基準が主観的になってしまう可能性があるとおっしゃっています。しかし、私はそうとは思いません。私は同

じ技術分野の研究者だけが社会的適合性、目的やシナリオが良いか判断ができるとは思いません。実際はその分野の研究者には判断がまったくできないと思います。本当にできるのはその技術を実践する人々です。理論化学者に、ある研究が工業を前進させるのに意義があるかどうか聞くのは、どの工業開発が大事か知らないため、無駄かもしれません。

何が良いか否かの客観的基準があると思いますが、それはその分野の研究者が知っているとは限らないので同じ研究領域の同僚は判断できないかもしれません。もしシナリオがきちんとした論理の積み重ねで構成されていれば、論理性は必ずしも分野の深い知識がなくても判断できると思います。

小林 論理的な流れは大事な要素です。例えば、21世紀にとって大事な環境問題を取上げてみましょう。二酸化炭素排出量を減らすことは優先度が極めて高く、ほとんどの人がこれを大きな目標と認めるでしょう。もしある論文が、例えばこの目標を達成する方法を段階ごとに論理的に説明できれば、そのシナリオは認められると考えられます。

レスター それがシナリオの例ですね。つまり、編集委員会が掲げる要件の1つは、執筆者が最終目標の排出量削減に到達するための各段階を示すことが必要ということです。

従って、私たちが「存在証明」(existence proof)と呼ぶものが欲しいのですね。目的に到達するのが論理的に可能であることを示したいということですね。

査読の判断基準—独自性について

小林 技術要素間の構成・統合の独自性も重要です。このジャーナルの創刊号には6つの論文が掲載されており、ある目標を実現するための技術統合が個々の執筆者によって、創意性、独自性をもって行われていると思います。もし誰でも思い付く方法であれば、それはあまり独自性があるとは言えません。

レスター ポイントは、分かりきったことであるべきでないということですか。もし組み合わせや構成の方法が一目瞭然であれば、それは良い貢献ではないということですか。

小林 そうです。たとえば西井さんによる論文、「高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ」の中で、西井さんはガラスモールド法の利用を提案しています。ただし従来の方法だけでは精巧な光学素子を作るのに十分ではあり

ませんでした。先端的なデバイスを作るのにレンズなどの部品に微細な構造をインプリントしなければなりません、光学素子にそれを行うのはとても難しかった訳です。しかし、最近彼がリードした研究プロジェクトの中で新しい方法が開発され、高性能で低コストの光学素子を作るために彼らはこのモールド法とインプリント法を合体させました。これはモールド法とインプリント法の良い組み合わせで、とても独自性があります。

レスター この例では、既存の技術と新技術を組み合わせたのですね。インプリント法の新しい進歩を識別し、それが従来の方法と結合できると判断したところが、執筆者の大きな貢献ですね。それはとてもよい貢献です。

もっと高いレベルの貢献、もっと最先端の統合も可能かもしれません。それは、執筆者が要素の1つまたはより多くの要素が修正されれば統合の可能性があることを明記し、結合する前に実際にその修正を提案するのです。これはより貴重で独自性の高い貢献になるかもしれません。

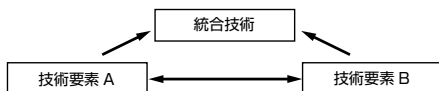
小林 執筆者と話すうちにいくつかの異なる構成の方法のタイプがあることに思い当たりました(下図参照)。ご存知だと思いますが、1つはヘーゲルが主張したアウフヘーベン(止揚)に似ていて、異なる2つのテーゼから新しいコンセプトを作り出すことです。

2つ目はブレイクスルー的なタイプです。重要な鍵となる技術を生み出し、それは単独では何もできないので、周辺の他のいくつかの技術を結合させます。

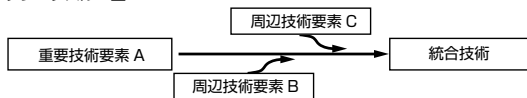
3つ目はもっとシナリオ主導か戦略主導で、選択と構成を行うタイプです。これらは物を製造するのとは少し違いかも知れませんが。これらの場合の要素技術の重要性はほぼ同等ですが、それらを選択し構成するのに戦略性が必要とされます。

全くの私見ですが、今回の『シンセシオロジー』の6論文は、概ねこの3つの構成方法に関連していると思います。

1. アウフヘーベン型



2. ブレイクスルー型



3. 戦略的選択型

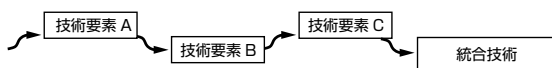


図 構成方法のタイプ

レスター 第2種基礎研究を第1種基礎研究から区別する特徴は、第2種基礎研究は結末から始めるところだと思います。つまり到達したい実践的な目標があり、それが構成の動機になります。第1種基礎研究でも構成は可能ですが、世の中での実践的目標によって導かれていないのです。

私の理解では、第1種と第2種の違いは第2種には統合があり、第1種にはないということではないと思います。構成・統合は双方にあります。第1種と第2種の違いは、第2種の統合の理由が「実践上の目標を達成する」ためであることで、その実践的な目標と統合の機会との間を探索する必要があります。

しかし、第1種の場合は、実践的な目標がなく、「構成や統合の機会」が動機になります。ご存知の通り、第1種基礎研究の中で生化学のように異なる分野が一体となることがあります。これは2つの分野の統合または合成です。しかし、この知識の前進は実践的な目標のためではなく、2つの分野で一体になる好機があったからです。

教授の著書「Innovation」との関連性

小林 イノベーションについてのあなたの著書^{注4)}の中で、分析的アプローチと解釈的アプローチについて述べておられます。今までの議論と何か関連している部分や似た部分がありますか。

レスター この本で私が述べた分析方法と解釈方法の違いは製品開発や新サービス開発に当てはまるもので、基礎研究の方法としてではないので少々難しいですが、関連付けて話すことは可能です。

研究でも製品開発でも、2つの状況がありえます。1つの状況は問題がよく理解されており、課題はその問題を解くことです。問題はとても難しいかもしれませんが。例えば数学で、一度も解かれたことのない定理があるとします。解くのに10年、あるいは50年かかるかもしれない、でもよく定義されているこのような数学の定理は第1種基礎研究の



リチャード・レスター 氏

課題だと思います。第2種でもよく理解された課題がありえます。例えば、様々な健康上のリスクを比較するための枠組みを開発しなければならないとします。これは実際的な問題で、難しいけれども、問題を定義し、一生懸命研究して解決するかもしれません。

しかし、第1種、第2種双方に問題が理解されず、また定理がはっきり分からない別な状況もあります。例えば数学でいくつかの違う部門が1つの状況に取り組んでいるがお互い一貫していないし、問題の一部しか見ていないとします。しかしお互いに話し合っただけで別な視点を持ち寄るうちに、解かなければならない問題があることを発見します。

第2種でも同じようなことがあります。例えば、ある企業、または企業の研究者やエンジニアが規制当局とある化学物質や製品の基準を設定する話し合いをします。規制側は開発中の化学物質を見て、他の企業が似たような物を開発していると思い、他の企業も引き込む会話が始まり、話し合ううちに異なる化学物質間の優劣やリスクの序列が見えてくるかもしれません。しかし話し合いを始めた時はそのような可能性は思い当たらなかったわけです。

第1種と第2種双方に当てはまるこの2つ目の状況では、問題が最初にははっきりしていないのです。そして私の本の中で明確にしたかった分析的アプローチと解釈的アプローチの違いは、この2つ目の状況では、後者のアプローチが、問題が理解されていない状況から理解される方へ移動させるということです。問題が不明確な状況から問題が理解される状況へ移動する過程を解釈過程と呼び、そして問題が理解されたら、分析方法で解くのです。そして、両方の過程が大事で、簡略化されずに行うことが大事だと説いているのです。

この分析的と解釈的アプローチは第1種と第2種基礎研究の双方で行わなければなりません。そして製品実現においても解釈と分析が必要なので関連があります。

小林 第1種基礎研究では解釈的方法より分析的方法



小林 直人 氏

の方が通常だという言われ方もされますがそうでしょうか。第2種基礎研究ではどうですか。

レスター 第1種でも両方法それぞれに役目があると思いますし、第2種でも同じです。ただ、解釈的方法是は会話のようなものです。実際には会話ではないが、会話に似たものです。第1種と第2種の違いは、第1種の場合、その会話は同じ学問分野 (discipline) の者か、生化学のように2つの分野の者との間で行われます。でも第2種の場合は、科学分野の人々と実践現場の人々との間の会話です。これが大きな違いです。その違いは、その会話の中に誰が含まれるかということなのです。

査読者と読者について

小林 査読者と読者についてご意見をお伺いしたいと思います。第1種基礎研究では、読者は学問分野 (discipline) 内の人で、知識の最先端がどこにあるかをよく知っている人がほとんどです。第2種基礎研究や『シンセシオロジー』の場合、読者は多種分野の人、分野外の人、企業の人などです。だから様々なタイプの査読者が必要だと思います。

レスター 論文の社会的適合性を判断するには、その適合性を評価できる人が必要です。新ジャーナルの難問は、内容が多数の分野、多数の適用領域にわたるため、とても広い読者層を持つことです。創刊号を見ても、健康管理、環境規制、個人の健康についての論文があります。難しいのは個人の健康管理について知識が豊富だが、環境規制について何も知らない読者をいかに引き付けるかだと思います。もし読者が構成方法に関心があり、論文が構成学的手法を記述しているのであれば、1つの論文のみならず、他の領域の論文にも興味を持つかもしれません。

小林 それこそ我々の目指すところだと思います。第2種基礎研究の概念がまだあまり世の中に知られていませんので、創刊号の査読者は全員産総研内の人ですが、これからは外の世界へ広げて行かなければなりません。次回以降では第2種基礎研究について知識と理解がある外部の人を査読者として招きたいと思っています。将来は審査過程を他の学術誌のように産総研外で行いたいと思っています。

技術構成の学術誌にするには

小林 最後の質問になります。先端技術を扱う日本の企業には技術者にとって役立つたくさんの公開または非公開の技術報告書があります。しかし、これらはレスター教授

が言われるようにおそらく学術誌としてピアによる審査を受けていません。『シンセシオロジー』は、そうではなく技術構成の学術誌を目指しています。そうなるには、どのような障害を取り払わないといけないでしょうか。

レスター もし企業に所属する執筆者を引き付けようと思っているのであれば、1つの障害は、企業が知的所有権を持つ研究の発表に関するものです。もう1つの課題は査読者です。何人かは目的を理解している実践家の人達でなければなりません。これが鍵になると思います。そして、何人かは目的をよく理解している産総研内の人達です。もしもっと広げたいのであれば、外部の人を引き込むことが必要でしょう。

小林 MIT、ハーバード大学やスタンフォード大学の教授の中には実際的な問題の解決法を知り、それをどのように現実的に適用していくかよくご存知の方がいます。

レスター 確かにMITでは、文化として実際の問題に関わる研究をする人が多くいます。だから何人かの学者はその知識を持っていると思います。

ジャーナルのもう1つの役割

レスター 最後に一言申し上げたいと思います。もしこのジャーナルが成功すれば、日本では大事な目標とされているものですが、研究者がより簡単に大学内外へ動けるようになると思います。第2種基礎研究を扱う論文審査をする学術誌があれば、産業界の研究者や産総研の研究者が大学へ、また大学から産業界へ移動し易くなるかもしれません。日本ではとても大事な「境界を越えた交流」を推進するかもしれません。循環を良くすることはとても大事な目標です。

アメリカでは行き来ができます。産業界の人間が第1種基礎研究ジャーナルに投稿できるから、行ったり来たりする機会があるのです。でも日本では、第1種基礎研究ジャーナルに産業界の人が投稿することは日常では少ないですよ。

最後に

小林 今日の結論としては、特に第2種基礎研究と製品化研究における良いジャーナルを作るためには、複数の領域(セクター)間の会話やコミュニケーションが重要ということですね。それはまた査読者や読者の間でも大事だということでした。学術誌であっても、複数の異なる分野の人たち間で行われる会話を基礎におくことが大切ということですね。最後に、新ジャーナルに対して何かアドバイスは

ありますか。

レスター こう指摘してよいかややためらわれますが、戦略的なことで貴重かもしれないことは、特定の領域をより強調することではないでしょうか。課題を産総研を越えて広げることですね。1つの方法は、最初のステップとして特定の適用領域、環境、健康やエネルギーに焦点を合わせることです。そしてこれらの領域に読者を引き付け、査読者も引き寄せます。次のステップは、その領域、適用の領域を増やすことかもしれません。このジャーナルの発展に、今考えられている研究のシナリオの方法が使えるかもしれません。ある面、ジャーナル自身も1つの製品、1つの研究かも知れませんか。

小林 ありがとうございます。このインタビューは非常に実り多いものでした。そして『シンセシオロジー』の将来を考える上で貴重なものとなりました。このディスカッションに参加していただきましてありがとうございました。

レスター どういたしまして。創刊号の発刊おめでとうございます。

本インタビューは、2008年3月3日(月)ボストンにおいてMITのレスター教授のオフィスで、英語で行われました。翻訳は、編集委員会の責任で行いました。

注1) 第1種基礎研究: 未知現象の観察, 実験, 理論計算により分析して、普遍的な理論を構築するための研究をいう。

注2) 第2種基礎研究: 既に確立された複数の知識を統合して特定の目的を実現するとともに、その一般性のある方法論を導き出す研究をいう。

注3) 製品化研究: 第1種基礎研究, 第2種基礎研究及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

注4) R.K. Lester and M. J. Piore, "Innovation"; Harvard University Press 2004. (邦訳は「イノベーション-「曖昧さ」との対話による企業革新」依田直也訳、生産性出版 2006年3月発行)

略歴

リチャード K. レスター

1954年生まれ。英国インペリアル大学化学工学科卒業。マサチューセッツ工科大学(MIT)原子核工学博士課程修了。1979年よりMITの教員となる。現在MIT産業生産性センター所長、原子核工学科教授。研究テーマはイノベーション、生産性、産業競争力など。

トヨタ自動車グループにおける基礎研究から 製品化への流れについて

— 技術統括部 梅山部長へのインタビュー —

トヨタ自動車(株)は世界最大級の自動車メーカーであり、日本で最も成功している製造業であるといっても過言ではないであろう。技術的には世界に先駆けてハイブリッド自動車を実用化するなど、社会のあるべき姿をにらみながら、従来の自動車という概念にとらわれずに新しい技術の社会への導入を行っている企業である。自動車に関係しない技術はないといわれるほど自動車は様々な技術の集合体であり、豊田中央研究所を含めたトヨタグループ自動車全体の技術の開発を統括しているのが同社の技術統括部である。その技術統括部の梅山部長にインタビューを行い、トヨタ自動車における基礎研究から製品化までの流れや、『シンセシオロジー』に対する期待などの話をうかがった。

シンセシオロジー編集委員会

インタビュアー：赤松 幹之(編集幹事)

トヨタ自動車は何をしたいか

赤松 企業から見ると、国の研究所や大学は基礎的な研究が多いわけですが、研究成果が実際の社会に出ていくまでに、どうしてもギャップがあり、場合によってはそのまま埋もれ去っていくこともあるわけです。我々は「産業技術総合研究所」ということで、研究開発の成果を産業に活かすために、いかにして「死の谷」や「悪夢の時代」を乗り越えることができるかを発足当時から議論してきました。研究にはいろいろなタイプがあります。1つのことを深く追求していく研究もありますが、実際の製品になるために、いろいろな技術を組み合わせることによって初めて使えるものになることもあります。

トヨタ自動車での基礎研究が実際に製品化されるというときに、どういうプロセスを経ているのでしょうか。

梅山 自動車という事業を軸にして、私たちは何を目標しているのか、ということがまずベースにあります。いい車をつくるだけでなく、「環境」「安全」「快適」を考え、人間と都市と車の調和を図る。「走れば走るほど空気がきれいになるクルマ」「満タンで世界一周できるクルマ」「絶対にぶつからないクルマ」「乗れば乗るほど健康になるクルマ」という、本当にできるのかな?と思うことでも目標にして考えてみようじゃないか、という提案をしています。それらを達成するために、必要になると思われる技術全体を俯瞰してコアの要素技術を定義します。

研究開発のプロセスとしては、先端研究、先行開発、製品開発があります。

研究開発への取り組み —キーマンを回す—

赤松 先端研究、先行開発、製品開発の3段階になっ



ているということですが、それぞれのかかわりはどのようになっているのでしょうか。先端研究の成果がそのまま先行開発に使われるということはないとは思いますが。

梅山 先端研究から先行開発へ、そして製品開発をして世の中に出していくというイメージですが、これがなかなか難しい。ありがちなのは、先端、先行、製品がバラバラで、「先端研究は難しい。自分がやれることはないな」と先行開発の人は思ってしまう、「先行開発は自由に考えているけど、製品にならないな」と製品開発の人は思ってしまう。この3つのフェーズをいかにうまく回していけるかが大事なのですが。そのために、コアになるキーマンをグッと回してやることでうまくいっている例が多いと思います。

私は歯車の研究に携わっていたのでそれを例に話すと、研究をしている人が、実際の自動車の音、振動問題について、先行開発の人と一緒に研究開発を進めていく体制にしてうまくいったことがあります。ニーズや実際に役立つ方法は、先行開発の現場にあるのです。先端研究の人も、現場で一緒にやってみて、何が問題かをしっかり体感し実験したりして体得することによって、自分の研究をもう少しステップアップしたほうがいいんじゃないかと気がつく、あるいはもっと広げるなり、違うテーマがあるとか、応用テーマがあるというのをどんどん拾っていけるようになるんですね。

先端研究と先行開発がお互いに会話をすることで、自分の理論の限界と可能性が見えてきて、研究の方向が定まってくると思うんです。

赤松 なるほど、逆の立場から言えば、先行側の持っている問題点について、先端研究の方と話し合うことによって、解決法が出てくることも期待できるわけですね。

梅山 ええ。それに、先端研究の人が、そういうところに新しい研究課題があることに気づくことができれば、現場は非常に楽しいネタの転がっている場所だと分かるんです。

赤松 先行開発と製品開発も同じような形でやっていると考えていいですか。

梅山 先行開発から製品開発にということでは、仕事のやり方が変わってきます。目標とする性能を満たすための構成を考えるとところが先行開発ですね。そこで、制約条件ばかり考えていたら成り立ちませんので、目標達成のためのブレイクスルーのアイデアを先行でやって、素性のいいものになってきたら、製品開発段階に落としていくという形で

す。

製品開発に移ると、今度は生産技術の要件とか、重量、信頼性、コストとか、製品であるべき要件を満たすための開発に移っていきます。先行開発の成果を製品開発側で受けるわけですが、かなり思い入れの強い先行の人がやったものは、受け取る側がどのように構えるかが大変難しいものなんなんです。すべての開発課題が解決された状態で製品開発に渡されるわけではないので、かなりハイレベルな要求を「達成してくれ」といって受け渡されちゃうと、受け取る側は苦勞することになる。開発情報も十分伝わらず、開発への思いも共有できていないままに突然渡されても、「そんなもの、できるか」みたいなことになりかねない。だから、そういう思いのあるリーダーが先行開発から製品開発においていて、一緒にやって、頑張ろうよと鼓舞してやって、製品に成し遂げたらまた戻るといような形が必要なんだと思います。例えば3年サイクルで、先行開発と製品開発を回していくようなものはあり得るかなと思います。

トヨタ自動車の統合型研究

赤松 自動車技術の場合、複数の研究開発が統合されて製品化に至るのではないかなと思うのですが、逆に基礎研究、先端研究の中で、ある1つのコア技術がそのまま製品になるようなケースというのはありますか。

梅山 例えば先程の歯車の話で続けさせていただきますと、研究成果を実用化しようと思って、そのまま製品化できるかという、そうはならないんですね。歯車にはシャフトが付いている。シャフトとベアリングがわからないと、製品にならないんです。自動車部品としては、1つのコアでというのはちょっと成り立ちにくいかなと思います。

赤松 やはり統合が必要だということですね。

梅山 統合が必要となる研究というと、車に乗った人がどう感じるか、肉体的、精神的な分析と、ハードウェアとしての車の挙動と制御の関係を明らかにすることがこれから必要になると思います。

赤松 なるほど、使う側である人間を含めた技術の統合ですね。

梅山 人間が使うためにモノが生まれたのに、なぜこういう形に決まっているのか、その形は道具として最適なのか、道具以上の輝きをどう持たせるのか、ということは、まだまだ十分でないかもしれませんね。今こそ、そういう

融合領域で、「そもそも僕らは何を指すのか」ということを基に、高い目標を掲げていくことでいろいろなアイデアを出し合っていけるんじゃないかと思うんです。

研究成果を統合するときに乗り越えなければいけないバリア

赤松 統合的な研究のバリアは何だとお考えですか。そもそも先端研究の人は先行開発の人のものの見方が理解できない、ということになるのでしょうか。

梅山 先端研究の人と先行開発の人が話し合うとき、使っている言葉が全然違う人達だと、お互いに映るみたいですね。例えば、研究のテーマ名を言って、「え、それも理解できないのか」と思う研究者と、「小難しく、わからないように言っている」という先行技術者との対戦(笑)。それが壁といえ壁。お互いの言葉の理解がまず壁だと、私は非常に強く感じますね。

でも、これはどこにでもある話で、例えば“研究開発”といった瞬間に、その意味づけは赤松さんと私では違うと思うんです。1つの言葉に頼るのではなく、「何々をどういうところにどうすること」というふうに、目的とタスクに置き換えて言わないと通じないんじゃないかと思うんです。

赤松 そうですね。ビジョンを示したロードマップみたいなものをつくることも1つの工夫ですね。ゴールを共有化することで、同じ方向を向いて、かつ同じ言葉でしゃべれるようになる、そういうふうに考えたらいいいということですね。

梅山 ええ。なかなか同じ言葉というのはないから、それを何回か言い直して、「それはこういう意味だよ」と念を押しながら、最後は共通語としての言葉が、先行と先端の各々のチームの間ででき上がってくると思うんです。何を指すんだ、どうするんだ、どこまでやるんだ、そういうところの基本的な握りがアイコンタクトみたいになって、スポーツじゃないですけど、わかるようになるのが一番いいですね。そうすると、「あうんの世界」ですから、これは勢いがドンとついてくるように思いますね。

技術を目利きして引っ張り込む

赤松 バリアを乗り越えるための研究管理者の存在も重要ですね。トヨタ自動車のチーフエンジニア制度は大変有名ですね。

梅山 車をつくるときに、いろいろな部品をコーディネー

トして、車に仕立てあげていくためのチーフエンジニアがいます。例えばエンジンはいいものができた、駆動トランスミッションもいいものができた、組み合わせたらどんなにいいものができるか、チーフエンジニアは日夜、考えています。でも、実際のところ、コンフリクトばかりなんですね。エンジンはそう言うけれども、駆動はこうはできないし、シャーシはそれでは無理ですよとってくる。そのときに、チーフエンジニアが「そうは言っても、車として成立させるためにこういうテーマについて考えてくれ」と言って、うまく開発者同士に領域を超えて話し合いをさせるんです。自分の知見も言って、「その圧力が3倍になるというんだったら、君は3倍を前提にして設計すればいいじゃないか」「それはできません」「なんでだ?」「別の問題が出てきます」「なら、その担当に前提条件を変えて設計し直してもらおう」とか言って仲裁案を出すわけです。

ですから、チーフエンジニアは議論の場を持って、共通語をつくらうとします。それぞれの言い分を聞いて、共通する課題を抽出し、それで問題解決を逆に投げ返すようなことをやっています。エンジンと駆動というとき、エンジンさえ作ってあればいいんだと思わずに、駆動と一緒にトルクを伝えるというシステムで性能を発揮するというタスクを負わせる。そうすると、業際が理まりはじめて、協業が始まる。

これからのクルマづくりには、システムチックにお互いを理解できる、「領域を超えた融合領域」のコーディネータみたいな人が大切ですね。

赤松 こういった研究を行う上で、必要な能力にどんなものがあるとお考えですか。あるいはどのような人材が必要でしょうか。

梅山 最終目標があったとしても、途中まで登っていったら、ここのところで何かに使えるんじゃないかと考える。さらに1 m上がったら、さらに何かいいものになるんじゃない



梅山 光広 氏

ないか、というふうに常に成果を活かすことを考えることができる人ですね。製品開発、先行開発側の人たちには、そういう目利きをして、引っ張り込む能力が必要ですね。研究者からそういうのを引き出すといったコーディネートする側の人がキーマンになっているといいなと思うんです。「これ、使えるじゃないか」と一言かけて、「あ、そうですね。それではやってみましょう」と、そういう連携がいいと思うんです。なかなか研究者側から「ほら、使えるでしょう」と言っても使う側の条件を満たさないことが普通だから、聞いてもらえないことも多い。「トータルバランスからすると、それは要らないんだよ」とか言われたら、研究者はガツカリですよ。

私は、先行開発と製品開発の間に立って、色々な技術を取り込んで問題解決に結びつけようとしてきました。メインモーターが1つのハイブリット車の開発に携わっていたことがあります。メインモーターが2つあれば、1個のモーターで車を走らせ、もう1個でエンジンを起動できるんですが、それができないので、エンジンを起動のために別のスターターシステムをつけたんです。エンジンのストップ&ゴー(アイドリングストップ)の開発をやっていた人がいたのですが、その話を聞いて、自分のシステム上で欠けているところを、この技術を導入して組み合わせることですまいシステムになるという考えに至って、問題を解決できたということがありました。

目利きには幅広い知識を、説明する側にはストーリーを

赤松 それが目利きですね。そういう目利きみたいなものがどうやったら身につくのか、目利きの素養はどういうものだとお考えですか。

梅山 いろいろなエリアのことを幅広く知っている人が、専門的な技術を眺めることだと思うんです。社内の研究報告会の中でのこと、研究者はやっていることを飄々と話しますが、それを聞いていた側が聞いた内容を基に自らの



赤松 幹之 氏

ストーリーを組み立てながら、「結局、この領域は将来のトヨタ自動車にとって大切な取り組み領域になるかもしれない。」とみえてくる。これは、1つの目利きだと思うんです。

赤松 目利きには研究経験があったほうがいいとお考えですか。研究経験がなくても目利きとして育つことができると思われませんか。

梅山 研究者の挙動や人間性、例えば「没頭する」ということを理解するためにも、少し違っている領域でもいいから、目利きの人は研究経験があったほうがいいですね。その一方で、研究者側の工夫も重要です。研究の内容を分かってもらうためには、これはどんなことを目的にして、どんなアプローチをして、その結果こんなことがわかったという「ストーリー」にして話すことが必要です。研究者にはわかりやすいストーリーを前提にして、ごく短いプレゼンをやってもらおうようにしているのですが、それが研究への理解を生んでいると思います。

受ける側が目利きをするためには幅広い知識が必要ですし、説明する側にはストーリーが要ると思います。

赤松 分かりました。ただ、ストーリーをつくり間違えてしまうと、全然伝わらないという危険もあると思いますね。たまたま目利きの琴線に触れるようなストーリーがうまく組んでいるとパッといくけれども、お門違いのストーリーをつくってしまうと、よく見えなくなってしまうという可能性はありますが、その辺はどうですか。

梅山 目的が明解で、アプローチの方向ができるだけシンプルなステップとして語られていることが大切だと思います。よく見えなくなってしまう時には、説明する側は聞く側の理解が深まるように工夫が必要と思いますが、説明する側と聞く側が根気よく繰り返し時間をかけて話し合うことで溝は埋まっていくと思います。

ジャーナル『シンセシオロジー』について

赤松 話を変えて、この『シンセシオロジー』というジャーナルなんですが、トヨタの中でどのような人が読者として考えられるでしょうか。どういう方がお読みになったらおもしろいでしょうか。

梅山 まず、目利きの人ですね。いろいろなエリアを無作為に知らないといけない人たちに、まずこれは役に立つだろうと思います。語られているのは、その目的とするところとか、ストーリーですからね。

赤松 そうですね。最終的なゴールを「夢」と呼んで、それにつなげるためにどういうふうに研究を進めていくかというのを「シナリオ」と呼んでいます。

梅山 どういった研究がどのように発展していくものなのか、そのシナリオがインデックスのようになっていて、それが体系付けられてここに述べられていると大変助かりますね。例えば、こういうことを領域として取り組んでいて、こんなところを目的としている、といったことが、かなりビジュアルで表現されていると、そこからグッと深く読み込んでいけるとと思いますね。

赤松 こういうことをやりたいのだけれども、それをやるために何と何が必要かということ、できるだけ図示して書いてもらうようにしているんです。シナリオを書く、自分がどの段階にいて、これまでの成果がこの流れのどこの段階になっているかということがわかると思うんです。

企業に技報がありますが、たしかに最終的な製品になった技術が書かれていますけど、どちらかというと要素技術の話が多いと思います。目利きの人がどうやって技術を組み合わせていったかという記事は、このジャーナルに向いているという気がするのです。

梅山 サクセスに至ったストーリーみたいなものが紆余曲折も含めて載っていると元気が出ます。研究者の行動自体の記録ですね。そういう類のものって、書き物として珍しいと思うんです。僕らが大事にしているのは、こういうことをやろうと思って、こんなアプローチをしたらだめだった、だからこういう方向から攻めたらうまくいった、そういう考え方があるのだと。そういうのが書けるといいですね

赤松 そのとおりだと思います。実際に研究開発をしている人間がどこに行き詰まって、それをどういうふうに考えて解決して、例えば、隣でやっている人の研究テーマがうまくつながることにある時気づいて、実際に形にしていってというような、実際に研究開発した人間の目で、最終的にうまくいったというようなことが書けるといいと思っているのです。

梅山 強い目的志向で、地に足の着いた研究の発展形みたいなやつが出るといいですね。趣旨はよくわかりますし、産総研さんのやっていることが、社会に役立たせるといふ思いと一緒に広く伝わることがいいですね。

赤松 幅広い様々な技術が詰まった自動車をつくり出すためには技術の統合・構成が欠かせないと思います。これに対しての組織的な取組みや必要とされる人材など、とても有益なお話を聞かせていただくことができました。今日はお忙しいところ、本当に有り難うございました。

本インタビューは、2008年2月14日、豊田市にあるトヨタ自動車(株)本社において行われました。

略歴

梅山 光広 (うめやま みつひろ)

1982年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年トヨタ自動車(株)入社。駆動設計課配属、クラッチ操作系の設計を担当。1985年より振り振動低減ダンパの先行開発およびドライブライン振動解析技術開発を担当。1994年より低騒音歯車の歯面修正法の関する研究に着手。1997年東北大学より上記テーマで学位を取得(工学博士)。同年よりハイブリッド車用駆動ユニットの開発を担当。2005年から技術統括部部長となり研究開発の統括業務を担当している。

新ジャーナル査読者座談会

新しい形式の論文を査読して

第1巻2号の発行にあたって、1号および2号の論文の査読者が集まって座談会を開きました。従来にない新しい形の論文を査読するという事は、査読者にとってもなかなか難しい作業でした。この座談会では新ジャーナルを査読した印象から、査読者の新たな役割、論文のオリジナリティ、論文の執筆要件の合理性など、多岐にわたる課題について忌憚ない意見を述べていただきました。

シンセシオロジー編集委員会

小林 新しい形式の第2種基礎研究の論文『シンセシオロジー』の査読を皆さまにお願いしたわけですが、これまでの第1種基礎研究の論文の査読と様子が随分違っていたと思います。査読を通じて、最も強く感じられたことはなんでしょうか。

新ジャーナルを査読した印象

湯元 原著論文ですからオリジナリティが求められるわけですが、そこをどう出すのかというのが非常に難しかったですね。著者もそうだったろうと思いますが、査読者として、どうやってそこを引き出すのかということが非常に難しいなと感じました。

もう1つは、特許や会社との共同研究の関係もあったりして、なかなか書き切れない、誌面に出し切れない制約があるということも著者から聞いていまして、書ける時期に書いたほうがいいのかとも思うし、進行形のところで書いてもらうことにも意味があると思いますが、あまりに技術の中身が開示されないと、オリジナリティの判定が難しいといったようなところは感じました。

五十嵐 このジャーナルはオリジナリティを第1種基礎研究的なところに求めてしまうと難しいですね。理事長が

「シナリオをつくり、それに基づいて研究を進めるに当たって、第1種基礎研究では書けないようなものが多々あるのではないかと。そこをきちんと書き表すこともこのジャーナルの重要なところだ」とおっしゃっておられたと思いますが、その辺があまり出ていなかったのではないかと。そこは査読者が著者と意見交換をしながら広めていく必要があると思います。確かに、ノウハウの関係もあるでしょうし、書ける範囲が限られてくるのではないかとはいつつも、その点を感じたところです。

小野 査読者は著者の立場と読者の立場とを併せ持っていると思っています。私は、前のお2人よりは若干楽観的に見ていまして、著者に書きたいという思いがあって、それを出そうとしている、そして出せた、という感じがしているんです。前号の著者座談会でも、「ほかのジャーナルでは書けないようなことを今回初めて書けた」と何人かの著者が言っていましたが、そういう著者の意欲というのははっきりとあったのではないかと。ちょっと楽観的かもしれませんが、私は成功したかなという感じがしています。

それから、私は査読者として分野外の論文を1つ担当したのですが、ほかの分野の原著論文を読んだのは初めてで（笑）、今回、こういう立場ですから、ある意味、無理や



り読んだのですけれども、結果として無理なく読めたという、一読者としての驚きがありました。これまた楽観的なお話で恐縮ですけれども、第一印象としては、成功しているのではないかと、明るい希望を持っているんです。

持丸 ここに投稿される論文は、当然なんですけど、従来の学会誌のものとはスタイルが違ってきます。もちろん論文の記載要件は満足しているのですが、そもそもいろいろな論文スタイルが許容される、ということ意識して査読しました。一方、読む人の許容度が高いかということ、これはまた別の議論でありまして、執筆者がこの論文で言いたいことを、旧来の論文に慣れた読者にいかにわかってもらうか、かつその読者の意識も変えていかなければいけないということになると、こういうのも論文なんだ、ここのところにオリジナリティがあるんだということを読者に訴えていかななくては行けない。素直な感想を言いますと、その辺がバランスとしてなかなか難しいなと感じました。著者の言いたいことをうまく伝えるというところが悩ましかったですね。

小林 査読者との意見交換を論文の後に載せましたね。あれはいかがでしたか？

持丸 読者から「査読者との議論がおもしろかった」というコメントがありましたが、この『シンセシオロジー』を査読者と読者と著者でつくっていくのだというメッセージとしてはすごく良かったのではないかと考えています。この論文がどのようにシンセサイズしていくかということが読者に明快に伝えられるという意味で、私はおもしろい企画だと素直に思っています。

その一方で、公開されるということは、査読者もそれなりにしっかり論文を読まないといけません。2人査読者がいて、1人はろくなことを言っておらんなどというのは、名前が出るのはやっぱり重いので、そういうところもあります(笑)。

小林 ピアレビューと言うのは通常査読者は覆面をして



五十嵐 一男 氏

いるのですが、我々は名前を出しているの、それだけ責任が重いというのは確かに感じますね。

小野 「査読者との議論が一番おもしろい」という読者からの意見がたくさん来ました。論文本体がおもしろいと言って欲しいんですけど(笑)、どうやら読者は最初に「査読者との議論」を読むのだそうです。それでおもしろかったら次に本文を読む。

五十嵐 「内容は難しいが、この意見交換では、いわゆる第1種基礎研究ではなくて、もうちょっと曖昧にあるところをどうするのかということ聞いていて、それに対して著者が思いを書いている、それはものすごくいい」という意見は、私も聞きましたね。

小林 査読者との意見交換は、著者と読者の橋渡しをしているような、そういう効果があるのかもしれないね。

査読者の役割が変化して、査読者が共著者に

赤松 第一印象ということであると、査読者との意見交換の部分が重要だったと思いますね。ちょっと言い過ぎだったかもしれないけれども、相当口を出しました(笑)。ほとんど共著論文と同じくらいの口出しをしています。読者としての視点でまず読んで、読者がこの論文から何をくみ取るべきかということを考えると、「これじゃ、書けていないね」という気持ちになると、論文の構成からある種のロジックまで口出しをさせてもらったというのが通常のジャーナルの査読とは違ったところですね。

自分の中で査読の一番のポイントとしては、「シナリオが書けているかどうか」ということです。具体的には、どういう問題意識のもとで始めたのか、どこに注目したのかがちゃんと書けていることです。その分野でどういうことが問題意識としてあって、そのためにどういう研究をしなければいけなくて、というようなことが書かれていると、「こういう世界は、こうやってものを考えて研究するんだ」ということがほかの分野の人たちもわかるのではないのでしょうか。

小林 私は、第1号でデバイス関係1件、標準関係1件の査読を行い、今回は材料関係を1件査読しましたが、どれもどちらかと言うと物理系なものですから、個別要素がはっきりしていて、それをどう組み合わせるとどうしたかという、シナリオと構成方法がわりとわかりやすかったですね。ただ、共通事項として、製品化の段階なので、企業との関係から書けないという部分があって、著者もそうでしょうけれども、読んでいるほうももどかしい部分は若干ありま

した。

もう1つは、湯元さんも言われていたオリジナリティですが、私の場合、たまたまわりと専門が近い分野の人だったのでわかるのですけれども、そうでない人のときに、要素技術は完全にオリジナルではないけれども、構成方法のところでオリジナリティがあるのだというあたりは、なかなか判断が難しいかなという気はしています。

これまでの論文誌の査読者はあるディシプリンから見て、この知識が本当に新しいのかということを見るわけです。しかし、我々はそれが何の役に立つのか、という部分を見ているので、査読者の役割がこれまでと相当違っているのかなという印象がありましたね。

では、次に、著者が論文でアピールしたかったことがうまく表現されていたと思われませんか。読者から見たときに、役に立ったのか、面白かったのか、今後、どんなことがもっと必要なのか、そのあたりはいかがでしょうか。

論文が役立つということ

五十嵐 読者が「この論文が役に立った」と思うのは、まず、このジャーナルが求めているシナリオ性が役に立った、次に、内容的にこれまで第1種基礎研究では書き切れていなかったものがそれなりに書かれていて、技術的な内容で役に立った、もう1つは、産総研全体がこういう新たな動きをしているという、広い意味での役に立ったという、大きく考えると3つくらいあると思うのです。

私は2つ査読させていただきましたが、シナリオの部分は非常に役に立つ形で展開されていると思います。

持丸 実は、私は『シンセシオロジー』がどんなふうアナウンスされているのかよく把握していなかったんですが、突然、共同研究先の複数の人から「読んでみたい」と言われて、創刊号のコピーを渡しました。彼らは何らかの手段で「産総研がこれを出した」というのを知ったのだと思うんですが、読んだ人から「あなたの論文が出ているね」「わりとおもしろいね」という話をいただきました。メガネ



赤松 幹之 氏

屋とは関係ない人たちです。

赤松さんが言われたように、査読者が読者代表みたいな感じになって、幅広い人にいかに意図を伝えるかというアドバイスをしていることを考えると、読者受けをねらうという意味ではなくて、意図が伝わっているかどうかを確認していく作業はどこかで必要ではないかという気がするんですね。私からの提案なんですけど「指定読者」を、ずっと固定でなくてもいいですが、用意して、その方にしっかりコメントをいただくことを試みてはどうかという気がします。我々査読者も含めて、意図が果たして伝わっているのかどうかというのを、段階的に我々は確認していくべきだと思いますね。

赤松 先ほど五十嵐さんの言われた「シナリオ性」は、ほかの分野の人にわかってもらえるかということはずごく大きい要素だと思いますね。もう1つは、その分野の研究者のために役に立つことになっているかですね。第2種基礎研究の基礎をやっている人たちが、ある種の暗黙知というか、自分の中で何となく考えて、きっとこれが大事だろうというふうに進めていたものを、論文の形にして「なぜ、それをしたのか」という議論をすることによって、形式知化していくのではないかと期待があるわけです。こういう議論をすることによって、自分の中のロジックが実は正しくなかったということに気づく可能性もある。同一分野の人たちにとって、研究の次のステップに進むときに、どういふふうな考え方で次の条件を決めてやってよいのか、どこの部分にターゲットを持っていったらよいのか、ということが見えてくる。

この間の著者座談会ではポジティブな意見しか出ていませんでしたが、この論文を書いて、自分でやばいと思ったり、ここが足りなかったなとか、そういう自分の研究に対する「気づき」が出てきてもいいのかなと思ったりしますが、そうなる、覆面でやらなければいけないかもしれませんね(笑)。

小野 著者の皆さんは、それぞれ感じていると私は思いますよ。今までの第1種基礎研究は、完結したお話で100%の完成度で書いているのですけれども、このジャーナルでは100%の完成度のものは出せないと思うんです。「当初の目標はここなんだけれども、ここまでしかいない」ということに多分なって、そういう不完全な論文は、我々はこれまで書いてこなかった。それでもいいんだというところを受け入れた著者と、受け入れがたくて書けなかった著者がいるのかなという気はちょっとしているんですけどね。

小林 同様なことを私も感じまして、ある方に「持続的

発展可能な社会に向けて、これがどうつながるのかというシナリオが書けるのではないですか」と言ったんですが、そこは書けないということで、とりあえずここまでということになりました。シナリオは、吉川理事長がおっしゃるように「仮説の連鎖」になるわけですが、どこまで仮説を言っているのかという、研究者の逡巡みたいなものがあるじゃないですか(笑)。だけど、まさに21世紀のこういう時代には、読者からすれば、著者に俯瞰的なビューを見せてほしいということもあるわけですね、そこは、できるだけ頑張してほしいという部分はありますね。

小野 シナリオは研究グループの中では議論していると思うんです。シナリオを議論せずして、研究グループはまとまっていけませんからね。しかし、それは外に出てこない。それを今回外に出そうとしていることなのかなと思うんです。今までどうして出てこなかったかという、手段がなかったということもあるのですが、出すと盗まれるというんでしょうか、そういう手法あるいは考え方というのは、研究者や研究グループの財産ですから。今回著者は、ある意味、頭の中の構造を全部ぶちまけてくれたわけで、それが世の中のためにはなるだけだけれども、そこまでしてくれて著者にとって損失になっていないかという若干の懸念はありましたね。

持丸 小野さんのご心配と赤松さんの意見は、著者の私にとってはまさしくそのとおりで、書くことによって改めて自分の中で形式知にしてみても気づくことはあります。「このときとった手段は果たして最適だったのか」ということは、書くところからわかるのです。

それから、具体的な事例をどこまで一般化できるかということですが、これはなかなか勇気を持って論文の中に書けないです。査読者に「どうなのよ」ときいてもらえると、そこでまた少し書けるようなところがあって、私の論文では、最後にそれが査読者とのやりとりの中にかかれていました。この辺は、査読者の1つの重要なアドバイスでした。そういう意味では、自分の頭の中をぶちまけることでもあり

ながら、それを構造化することで書いた人にも必ずプラスになっている、私はそんな気がしました。

湯元 シナリオ性というところでは、バイオテクノロジーというのは少し違う部分があって、「シナリオありき」というよりも、1つのブレークスルーを核に見せていく。研究のねらいといっても、ダイレクトに真ん中をねらうというよりも、散弾銃のようにその周囲をねらってやっていると、何かブレークスルーがあるはずだと考えるスタイルです。未成熟な領域ですから、「最初から、そういうシナリオでやっていたんですか」と言われるとつらい部分があるんですね(笑)。我々は既存のジャーナルで、さもそれを最初からねらったように書くということをやってきたわけですが、将来のシナリオをあまりに具体化してしまうと、特許が出願できなくなるところもあり、非常に苦しい部分があります。

赤松 そこがオリジナリティの議論ということになると思うんです。今までの第1種基礎研究のオリジナリティは「個別の要素の新しさ」だったわけですが、それを汲み上げるのは別の人がやっていたわけですね。本格研究的の観点からみると、それが科学技術の社会への展開を遅らせていたと考えられます。つまり、個別要素の新規性だけで研究者の価値を評価していたこと自体に実は問題があるのではないかと。今まで、それを秘密だといひ、人から盗まれないようにしているものは、それをつくり出したプロセスみたいなもので、それを秘匿することは、社会でその成果が使われるためのドライビングフォースを弱めることになっているのではないかと思うんです。

何を言いたいかという、知識というのは、結局、だれかによってそれを次に援用してもらわなければならないわけですね。そのとき、ある構成されたプロセスをオープンにすることによって、次の人が次のプロセスに進みやすくなる。それが知としての価値の1つだろうと。そこで、そのある構成のステップをオリジナリティとして見なすべきだろうと思うんです。



湯元 昇氏

執筆要件は合理的に書かれていたか

小林 そうですね。今の赤松さんのお話は、執筆要件のかなり具体的な話に入っていますが、「研究目標の設定」「シナリオの提示」「要素技術の選択」「それらの組み合わせ」「評価」は合理的に書かれていたかどうか、プラクティカルなところも含めていかがですか。

小野 著者によって相当違っていましたね。要素技術を対等な形で並べて最初に見せて、それをどういうふうにし

たかという、最初に我々が考えていたようなやり方で書いてくれる人もあったし、一方で、特にバイオ分野は1つの要素技術が圧倒的に重要で、そこを突破したがゆえに次の段階に進めて、そこに進むときにほかの要素技術も必要になったので、主・従という言い方をすれば、従としての要素技術を後から付けて「製品」にしたという書き方をする人もいましたね。

五十嵐 シナリオをバックキャスト的に見ているところもあって、本当にフォアキャストで、執筆者が研究をするときに、ここの論文に書いたシナリオを頭に描いてずっとやってきたかというとなんかそうではなくて、あるところに行ったら突き当たり、ちょっと脇道にそれ、そこを解決してまた進み出す。一筆書き的にみればそのように見えるかもしれませんが、大きな流れで見ると方向性はたぶんシナリオに書かれたようなものにおさまっているんだろうなと思いますね。

それから、ジャーナルのアピール性ですが、1つ1つの中身は決して悪くないけれども、査読者から見ると、主たるところにポイントを書いてもらったほうがいいのではないかという思いがある。ところが、査読者も三者三様の意見が出てきて、これって、この先、どうすれば良いか(笑)。委員長に、最終的に「こうだ」と決めていただければそれでいいのかもしれませんが。

持丸 複数の査読者がいるわけですし、著者の立場からいうと、査読者からのコメントがコンフリクトしていると、「どうしたらいいんだ」ということになりますね。査読者の中にプリンシパルな人がいて、その人がほかの査読者の意見も聞きながら、最後は調整してくれるといいなという気がします。

普通のジャーナルに投稿すると、「査読者は自分の論文の生殺与奪の権利を持っている人だ」と著者は思っているわけです。基本的には、査読者には迎合するというのが、現実的な問題としてあるわけです(笑)。査読者が何か言っているから、それに合わせれば論文になるという思いが著

者にあるので、そこも徐々に変えていかなくてははいけなくてすね。

小林 今は、査読者は著者も知っている、かつディスカッションもしているからいいのですけれども、今後は、外から投稿があって、知らない人の論文を我々が査読しなければいけない。また将来的に、査読者を外の方にもお願いするようになると、そのあたりをきちんとルール化しておく必要があるでしょうね。持丸さんがおっしゃるように、最後はプリンシパルな査読者が査読の意見をまとめるという形にしたほうが良いような気がしますね。

赤松 執筆要件でいうと、「成果ってなんだろう」というところが一番難しいと思うんです。「成果」というと、今までのくせで第1種基礎研究的な成果を思わず書いてしまうのだけれども、それがこの論文誌における論文で主張する成果かというとはなはだ疑問というか、そこはちゃんと考えないといけない。具体的にはまだ明確には言えないのだけれども、構成学としての成果は何なのかということを書くべきなんですよ。

持丸 「学術雑誌としての意義」ということでもあるのですが、今回、ジャーナルという手段で構成学を蓄積しているということですね。赤松さんが「論文は1つ1つの構成学の事例のアーカイブで、そのアーカイブの中から構成学がだんだんできていこう」と書いておられましたが、ジャーナルを編集する側から見ると、放っておいて自動的にできるものではなく、積極的に取り組まなくてははいけなくてすね。

小野 構成の手法の新しさはもちろんあるんですけども、その一般化にはまだ遠いのではないかと考えていて、第2種的な成果の高さがあるんじゃないか。社会へ出ていくところでの「製品」のレベルの高さ、どのくらい役に立ったかということに、私は、こだわりたいと思うところがあるんですよ。

赤松 何をもって第1種、第2種とするか、その区別は微妙なところはあるのですが、1つ大事なことは、第1種基礎研究から第2種基礎研究にステップアップする人たちの営みを価値付けるということだと思えます。第1種基礎研究をやっている人たちが第2種基礎研究に移っていくところをエンカレッジする道筋をつける。

『シンセシオロジー』に論文として書いて、こうやったら第1種基礎研究から第2種基礎研究に移れる、というよう



小林 直人 氏

なことを見せるべきではないかと思うんです。

小野 それで、今、我々が求められている部分でしょうね、大賛成です。第2種の成果は、小さくてもいいから明確な形で言えるようになってほしい。

赤松 「第2種基礎研究としての成果を書いてください」といったときに、著者が書けるかどうか。先にも言いましたが、「成果とは何か」という話になるんですが、第1種基礎研究の成果は、インパクトの大きい発見、発明ですね。インパクトが大きいということは、その知識がほかの研究者の役に立っているはずですよ。

第2種基礎研究の成果を具体的な製品の形で説明してしまうと、社会の人たちに対する影響を与えたという意味では成果かもしれない。だけれども、第2種基礎研究をやっている人たちに対して強いインパクトを与えたかどうかと考えると、そういう意味での成果という面がなくなってしまう。著者にとってはちょっと辛いかもしれないけれども、「構成学としての成果は何ですか」というふうに著者に投げかけて、著者に書いてもらうという手もあるかなと。

持丸 そこはジャーナルとして、著者に求めるというのが1つはいいと思いますし、著者と査読者で、答えが出るかどうかではなくて、議論してみるのもいいと思います。せっかくこういう査読者公開という場面を持っているので、少し抽象的なことを考える場を設けるといいのではないのでしょうか。

論文と企業等の関係

小林 次に、論文を書くときの企業との関係ですが、特許とかノウハウがあって、書きにくかったことが随分あったと著者のほうでも言っておられるわけですね。それは今後どうするかということですが、このあたりは仕方ないですね。ただ「書けないんです」といったときに、査読者としてはどうしたらいいかという部分があります。ヒアリングとか評価でもそうなんですが、「これは言えません」と言われた



持丸 正明氏

とき、そんなら評価できませんよ、になりますね(笑)。

五十嵐 ノウハウ的なところって、企業はものすごくセンシティブですね。そこはより厳しく問われると思いますね。

湯元 しかし、投稿型に本当になってくれば、そういうところは少し解消されると思うんです。投稿型で、出したいと言ってきて、「もうちょっと書いてくれ」といって、「いや、それはできない」といったら、「載せませんよ」と(笑)。

小野 私自身は、たくさんの共同研究を企業とやった経験がないので、やや暴論になるかもしれないんですけども、今回、幾つかの論文を査読して、そんなことまで出せないんですか、といったようなことがありました。共同研究の枠組みの設定を大きくしすぎていませんか。自分の研究のオリジナルな部分まで共同研究に含めてしまって、一緒に守秘義務を課せられるというのは、それは研究者としてやり方がまずくないですか、と。暴論かもしれないとは思いつつ、何とかありませんかね。

持丸 私はたくさん共同研究をやっている部類なんですが、基本的に小野さんと同意見です。うちのセンター長も同じ意見で、基本的に我々は公務員的であって、企業のためだけに研究しているわけではないですから、企業と共同研究をしても、我々が活動して得られた基本的な知見や方法論はいずれ公開しますよというのは、もうこれは基本的な約束です。

共同研究のときに、皆さんがどうしているかわからないんですが、最終的な学術報告に関することについて相手先とよく詰めていないような気がするんです。

五十嵐 現実問題として難しい部分もいっぱいありますが、契約の段階でかなり詰めることができる状況だと思っています。しかし、特許関係で1年半待たなければいけないなど、これは飲まなければいけない部分もある。小野さんが言われることもよくわかりますが、そういうルールがもう少し明確になって、研究者として、これだけ時間がかかるんだということを頭に入れた中でシナリオをつくっていただければと思いますね。

オリジナリティと学としての構成学

小林 湯元さんが最初におっしゃった論文のオリジナリティの問題、それから「学としての構成学」の方向に向かっているかどうかという論文の本質論ですが、我々は、まず第1号を出してみてもうどうだったか、第2号を査読してみても

うだったか、総合的に方向性はどうかだったかというところですが、それらについてはいかがでしょうか。

湯元 第1号のとき、3回以上意見交換をして、さらに小野さんや小林さんの修正を経て出てきた中でわかってきたことですが、専門分野の人間としてはあまりオリジナリティがないようにも思った部分が、案外とほかの分野の方には構成学として意義があるのだなと思いました。

構成学ということをも自分自身で捉え切れていない部分があったために、最初は第1種基礎研究的な内容を期待したところがありました。査読者としても、構成学が何なのか、これで構成学の要件が本当に満たされているのかということを考えるのは、まだ遠い道のりだという感じはします。しかし、一步は近づいていると思います。

五十嵐 私は2報査読しましたが、1つに関していうと、分野が近いこともあって、あまり構成学的な意味合いを頭に描かないで読めてしまった。そこはもう少し構成学的なところを考えなければいけなかったかなという反省があります。もう1報は、内容というより、ジャーナルの趣旨に即してあるいはアピール性を高めるために構成的にこうしたほうがいいのではないかということ非常に強く査読者として印象づけられて、そこはかなり「こうしたらいかがでしょう」というところを返したところでした。

査読者もそうだし、著者も、読者も、回を重ねることによって構成学的な意識がより強くなっていくだろうなという印象は受けました。

小野 オリジナリティがどこにあるかということは難しいと思いますし、私も悩んでいるのですが、非常に有り体にいえば、「書いておもしろかった」と著者が言う、「読んでおもしろかった」と読者が言う。もう1つ、著者座談会でも話が出たんですが、「ほかの人でも情報を集めればこの論文が書けたか」という問いに対して、著者全員が「これは自分でないと書けない」と自信を持って、皆さん、言ったんですね。それが一番根底にあるオリジナリティなのか



小野 晃氏

など。その人でないと書けないもので、しかも書いておもしろい、読んでおもしろい。あと、何が要るんだと(笑)、居直って申しわけないですが。

しかし、それではあまりに暴論なので、では、解説とどう違うのか。解説では書き切れないということは何人かの著者が言っているし、私が解説を書くとしても、こうは書かないだろう。それから、大きい企業が出す『技報』がありますが、『技報』は新製品の特徴を科学技術の言葉で語っているが、ある意味、それ以上のものでない。その背景にある考え方や失敗作とか、ほかの選択肢については普通書かない。そこは企業のパワーの源泉なので、出すとヤバイわけです。そこをこの『シンセシオロジー』では実はぶちまけている。

ぶちまけて、本当に研究者としてのパワーの源泉を失わないですか、ということが心配になるんですが、ただ、それをぶちまけあう社会が、私はいいい社会じゃないかと思っているんです。第1種基礎研究の場合も17世紀に科学が芽生えて、学会ができてきたというのも、第1種基礎研究の成果を個人で秘匿しないで、学会員みんなで共有することから始まっているわけです。研究者がノウハウとかシナリオをぶちまけることで損をしたと思うのではなく、社会に大きな影響を与えたという名誉がしっかりと与えられていく。この人にこういうオリジナリティがあったのだということを称賛するということでしょうか、そういうふうになると、現在よりもう一段、科学技術の進歩がステップアップしていくのではないかと。

企業にいる技術者や研究者も企業の枠内だけで限定される存在ではないでしょうし、我々と同じように科学技術を進歩させるという志もあるでしょう。『シンセシオロジー』に企業の人を書いてくれるのはなかなか難しいだろうなと思いつつ、そこを乗り越えてくれないかなという夢を持っているんです。

持丸 『シンセシオロジー』の論文は、物語やストーリーをどうやって構成したのか、どうして選択したのかという「学」を書くことが基本的なところで、私もそれに苦労したんですが、著者の匂いがするような論文が書けていると思います。これは、これから先も意識して守っていかねければならないですし、構成学をアーカイブしていくわけですから、どうやって選択したのか、どうやって構成したかを書くことは大切です。

皆さんが書いたのを読ませていただきましたが、抽象化レベルまではまだいっていませんが、オリジナリティもあるし、出だしとしてはうまくいっていると思います。

赤松 歴史的にみると、第1種基礎研究的な研究では大発見や大発明をするのがオリジナリティで、それを論文で表現することによって、パトロン（雇用者）が「この人はまたきっとおもしろいものを見つけてくれるだろう」と思って雇用していたと思うんです。

それに対して、研究を社会につなげるための道筋をつくる場所にオリジナリティを持たせるということは、この人はこうやって物事を構成して、研究成果を役立てる力がある人であると示すことだと思います。今回の『シンセシオロジー』を見ていても、問題意識の設定や選択ということが書かれていて、そこにオリジナリティがあるというふうを考えていいと思うんですね。

それから、構成学になっているかというのは、僕も持丸さんと同じ意見で、まだ抽象化して一般化されるまでにはまだまだ時間がかかるだろうと思います。ただ、抛っておくとただ貯まっているだけになるので、少しずつ形にする努力をしなければいけないだろうと思いますね。

小林 構成学として積み重ねていって、まずはアーカイブをつくっていって分析する、抽象化するというのが、編集委員会の仕事なのか、産総研の仕事なのか、広くこういうものにかかわる人の仕事だろうと思うんですが、それができるといいなと思います。そういう意味では、それに役に立たせる第一歩は、とにかく踏み出したということだろうと思いますね。今後、所内だけではなく、産業界や外国からも論文を投稿していただいて、執筆要件も含めて、我々が考えていることはこういうものなのだとすることを少しずつわかっていっていただけるといいですね。きょうはありがとうございました。

座談会参加者 (50音順)

赤松 幹之、五十嵐 一男、小野 晃、小林 直人、持丸 正明、湯元 昇

(2008年2月22日)

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはしない。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	研究目標（「製品」、あるいは研究者の夢）を設定し、記述する。	研究目標が明確に記述されていること。
2	研究目標と社会とのつながり	研究目標と社会との関係、すなわち社会的価値を記述する。	研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。
3	シナリオ	研究目標を実現するための道筋（シナリオ・仮説）を科学技術の言葉で記述する。	道筋（シナリオ・仮説）が合理的に記述されていること。
4	要素の選択	研究目標を実現するために選択した要素技術（群）を記述する。 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

1. 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿を受け付ける。

2. 投稿資格

投稿原稿の著者は、本ジャーナルの編集方針にかなう内容が記載されていれば、所属機関による制限並びに科学技術の特定分野による制限も行わない。

3. 原稿の書き方

3.1 一般事項

- 1) 投稿原稿は日本語あるいは英語で受け付ける。
- 2) 原稿はワープロ等を用いて作成し、A4判縦長の用紙に印字する。表紙には記事の種類(研究論文か論説)を明記する。

3.2 原稿の構成

- 1) タイトル(含サブタイトル)、要旨、著者名、所属・連絡先、本文、キーワード(5つ程度)とする。
- 2) タイトル、要旨、著者名、所属・連絡先については日本語および英語で記載する。
- 3) 原稿は、図・表・写真を含め、原則として刷り上り6頁程度とする。
- 4) 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。
- 5) 和文要約は200文字程度とし、英文要約(75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。
- 6) 本文は、和文の場合は9,000文字程度とし、英文の場合は刷り上りで同程度(3,400ワード程度)とする。
- 7) 掲載記事には著者全員の執筆者履歴(各自200文字程度。英文の場合は75ワード程度)を添付する。
- 8) 研究論文における査読者との議論は査読者名を公開して行い、査読プロセスで行われた主な論点について3,000文字程度(2ページ以内)で編集委員会が編集して掲載する。

3.3 書式

- 1) 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。

- 2) 図・表・写真についてはそれぞれ通し番号をつけ、適切な表題・説明文(20～40文字程度。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) 図についてはそのまま印刷できる鮮明な原図、または画像ファイル(掲載サイズで350dpi以上)を提出する。原則は刷り上りで左右15cm以下、白黒印刷とする。
- 4) 写真については鮮明なプリント版(カラー可)または画像ファイル(掲載サイズで350dpi以上)で提出する。原則は左右7.2cmの白黒印刷とする。
- 5) 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。
雑誌：[番号] 著者名：表題, 雑誌名, 巻(号), 開始ページ-終了ページ(発行年).
書籍(単著または共著)：[番号] 著者名：書名, 開始ページ-終了ページ, 発行所, 出版地(発行年).

4. 原稿の提出

原稿の提出は段刷文書1部および電子媒体で下記宛に提出する。

〒305-8568

茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5. 著者校正

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

6. 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7. 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先:

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話: 029-862-6217、ファックス: 029-862-6212

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

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

At the end, we expect your active contributions of papers on technology integration to the journal.

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.Ono

Senior Executive Editor: N.Kobayashi

Executive Editors: M.Akamatsu, H.Tateishi, K.Naito, H.Taya

Editors: A.Kageyama, N.Yumoto, K.Ohmaki, K.Igarashi, E.Tsukuda,

M.Kamimoto, M.Tanaka, M.Mochimaru, N.Murayama, K.Mizuno,

H.Ichijo, A.Etori, H.Nakashima, P. Fons

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

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

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

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

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

Creation of seamless geological map of Japan at the scale of 1:200000 and its distribution on the web

– For maximum accessibility and utilization of geological information –

Koji Wakita*, Toshie Igawa**, Shinji Takarada** and Yuichiro Fusejima**

*Geoinformation Center, AIST

**Institute of Geology and Geoinformation, AIST Higashi 1-1-1 Tsukuba 305-8567, Japan

E-mail: koji-wakita@aist.go.jp

A seamless geological map was created with a unified legend at the scale of 1:200000 covering the whole of Japan. This seamless map was based on the harmonization of regional geological maps made in various ages. A research scenario from basic geological research to Information Technology (IT) for distribution of digital geological maps was designed. The Type 2 Basic Research was proposed to distribute the interoperable data set of geological maps, which were transformed from the results of the Type 1 Basic Research on geological mapping. Seamless geological mapping was finally proposed as a full research program in geological research field.

Development of small-sized cogeneration system using thermoelectric power generation

– Recovery system of high-temperature waste heat by new thermoelectric oxides –

Ryoji Funahashi* and Saori Urata**

*Nanotechnology Research Institute, AIST Midorigaoka 1-8-31, Ikeda 563-8577, Japan

**Japan Science and Technology Agency Honcho 4-1-8, Kawaguchi 332-0012, Japan

E-mail: funahashi-r@aist.go.jp

There is an urgent need to improve the lifestyle and efficiency of industrial energy use to solve energy and environmental problems, now approaching critical level. New thermoelectric oxides possessing high durability at high temperature and high safety were discovered and a prototype of small-sized cogeneration systems working at the temperature range between 773K and 1173 K was developed in collaboration with a private company. Thermoelectric modules composed of oxide devices, which have pipe-type shapes, were constructed using Ag

electrodes, paste and stainless steel pipes. Water flowed inside the stainless steel pipe for cooling. Power generation experiment was carried out. The module generated electric power of 0.27 W and hyper heated steam simultaneously by inserting the module into a water boiler of natural gas combustion type.

Realization of collaboration system for everyone to develop and manage

– Practices of communication pattern using qwikWeb –

Kouichirou Eto*, Masahiro Hamasaki** and Takuichi Nishimura**

*Center for Service Research, AIST

**Information Technology Research Institute, AIST Akihabara Daibiru, Sotokanda 1-18-13, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0021, Japan

E-mail: k-eto@aist.go.jp

A new collaborative communication system: qwikWeb is proposed. The qwikWeb is carefully designed to enable everyone to develop and manage his/her own collaboration site where every member can communicate and construct knowledge seamlessly. A strategy to achieve “Full Research” for realizing such collaboration system is also shown. The qwikWeb is designed, developed and opened for public use by a Web server. The detailed analysis of the qwikWeb usage and the effectiveness are mentioned.

Introduction to theory of service engineering

– Framework for theoretical study of service engineering –

Hiroyuki Yoshikawa

President, AIST

Kasumigaseki 1-3-1, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8921, Japan

E-mail: yosikawa@mb.rosenet.ne.jp

This paper proposes a framework for theoretical and systematic study of service engineering. In the framework, a service is called primitive service when a human (donor) offers a service to another human (receptor), and service effect occurs when a receptor receives the donated service. The primitive service is unrelated to economy. Conventional

service is amplified primitive service by some media. Service industry is generated by the amplification and networking of primitive services in economical society.

From systematic analysis of protein interaction networks to drug discovery

– Development of ultra sensitive mass spectrometry analytical platform –

Shun-ichiro Iemura and Tohru Natsume
Biological Information Research Center, AIST
Aomi 2-42, Koto-ku, Tokyo 135-0064, Japan
E-mail: t-natsume@aist.go.jp

One of the most powerful means for the identification of protein networks is LC (liquid chromatography) based electrospray LC-MS/MS (tandem mass spectrometry).

Even with such high-tech devices, large-scale protein interaction analysis is still a challenge. To enhance the sensitivity and resolution of LC-MS/MS analysis, we have developed a novel LC-MSMS system with direct nano-scale flow control. Using this system, we discovered new interactions of disease-related or causative proteins, uncovering precise molecular mechanisms of several diseases for drug discovery.

Aerosol deposition method

– For production of high Performance micro device with low cost and low energy consumption –

Jun Akedo, Shizuka Nakano, Jaehyuk Park, So Baba and Kiwamu Ashida
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST
Namiki 1-2-1, Tsukuba 305-8564, Japan
E-mail: akedo-j@aist.go.jp

AD (aerosol deposition) method is a newly developed spray coating of powder materials. High density consolidation of ceramic powder can be obtained at room temperature without sintering at high temperature. In a rapid and low cost production system (named as on-demand production system), a high performance optical micro scanner was fabricated using AD method for formation of piezoelectric thick layer, ink-jet printing for metal wiring and mechanical punching for structuring of micro scanner. The improvement of device performance, the reduction of energy-consumption and process steps will be simultaneously achieved, leading to reduction of production cost of the functional devices remarkably.

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 utilization of the product of research and development in the society. The authors of the papers are researchers and engineers of science and technology, and papers are documents that describe, using “scientific words”, the process and the product of research which tries to introduce the results of research to the 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 “knowledge of what ought to be done” to make use of the findings and results for the society. Our aim is to establish methodology for utilizing scientific research result and to seek general principle for this activity by accumulating this knowledge in the journal. Also, we hope that the readers of *Synthesiology* will obtain ways and directions to transfer their research results for society.

Content of paper

The content of the research paper shall be the description of result and process of research and development aimed to be delivered to the society. The paper shall state the goal of research, and what values the goal will create for the 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, shall be described. There shall also be 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 researches. That is, rather than describing the combination of elemental technologies as consequence, the description shall include the reasons the elemental technologies are selected, and the reasons why new methods are introduced (Item 4). For example, the reasons may be: because manufacturing method in laboratory was not sufficient for industrial application; because user demand was not wider applicability rather than improved accuracy; or because there were limits due to current regulations. The academic details of individual elemental technology shall be provided by citing published papers, and only important points can be described. There shall be description of how these elemental technologies are related to each other, what are the problems that had to be resolved in the integration process, and how they are solved (Item 5). Finally, there shall be description of how closely the goal is achieved by products and results obtained in the 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 product of research and development, there is no limitation on the field of research and development. Rather, the aim is to discover general principle regardless of the 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 quality that is acceptable to fellow researchers.

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

For those that had been introduced to the society, they do not have to be successful businesswise. Yet there shall be description of the process of how the technologies are integrated considering 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 of *Synthesiology* is different from the others. While conventional academic journals emphasize evidential matters such as correctness of the evidence or reproducibility of results, this journal emphasizes the rationality of integration of elemental technologies, clarity of criteria for selecting elemental technologies, and their efficacy and adequacy (peer review criteria is described in the Table).

In general, the quality of papers published in academic journals is determined by the 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 the society are described just enough. In other words, the role of peer reviewers is to see whether things necessary to know the process of introducing the research finding to the society are written out, and peer reviewers judge the adequacy of the description of what readers want to know as

reader representatives.

In ordinary academic journals, peer reviewers are anonymous for reason of fairness and the process is kept secret. That is because fairness is considered important in maintaining quality in established academic journals that describes evidential knowledge. On the other hand, paper, the format, yet content, manner of text, and criteria are not established for papers that describe 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 paper, may arise in the process of exchanges with peer reviewers and they will also be published. Moreover, the wish or desire of author that cannot be included in the main text will be presented in the exchanges. Quality of the journal will be guaranteed by making the peer review process transparent and by disclosing the review process that leads to publication. Also disclosure of peer review process is expected to indicate to what points authors should pay attention when they contribute to this journal. The names of peer reviewers will be published since the papers are completed by joint effort of authors and reviewers to establish the new paper format for *Synthesiology*.

References

As mentioned before, description of individual elemental technology shall 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 selection of elemental technologies and introduction to society. This will contribute in establishing the general principle of methodology.

Types of articles published

Synthesiology shall be composed of general overviews such as opening statements, research papers, and editorials. The Editorial Committee, in principle, shall commission overviews. Research papers are description of content and process of research and development conducted by the researchers themselves, and will be published after the peer review process. Editorials are expository

articles for science and technology that aim to be utilized in the society, and can be any content that will be useful for readers of *Synthesiology*. Overviews and editorials will be examined by the Editorial Committee whether their contents are suitable for the journal. Entries of research papers and editorials are accepted from Japan and overseas. The manuscript 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 dream).	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

1. Types of contribution

Research papers or editorials are submitted to the editorial committee.

2. Qualification of contributors

There shall be no limitation on authors contributing articles, regarding the affiliation and discipline as long as the content of the article meets the editorial policy of *Synthesiology*.

3. Manuscript

3.1 General

- 1) The articles may be submitted in Japanese or English.
- 2) The manuscript shall be prepared using word processors or other devices, and printed on A4-size portrait (vertical) sheet of paper. The category of article (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheet.

3.2 Structure

- 1) The manuscript shall have title (including subtitle), abstract, name of author(s), institution/contact, main text, and keywords (about 5 words).
- 2) Title, abstract, name of author(s), and institution/contact shall be provided.
- 3) Length of the manuscript shall be, about 6 printed pages including figures, tables, and photographs.
- 4) The title shall be about 10-20 Japanese characters (5-10 English words), and readily understandable to wide-ranging readership. Research papers shall have subtitle of about 15-25 Japanese characters (7-15 English words) to help recognition by specialists.
- 5) The abstract shall be about 200 Japanese characters (75 English words).
- 6) The main text should be about 9,000 Japanese characters (3,400 English words).

- 7) The article submitted shall be accompanied by profiles of all authors, about 200 Japanese characters (75 English words) for each author.
- 8) Discussion with peer reviewers for research paper shall be done openly with name of reviewers disclosed, and the Editorial Committee will edit the highlights of the review process to about 3,000 Japanese characters (1,200 English words) or maximum 2 pages. The edited discussion is attached to the main body of the paper as a part of the article.

3.3 Format

- 1) The text shall be in formal style. The sections and subsections shall be enumerated. There shall be indentation of seven-spaces at the start of paragraph.
- 2) Figures, tables, and photographs shall be enumerated. They shall have title and explanation (about 20-40 Japanese characters or 10-20 English words), and the position in the text shall be clearly indicated.
- 3) For figures, clear original that can be used for printing or image file (final size 350 dpi or higher) shall be submitted. In principle, the final print will be 15 cm x 15 cm or smaller, in black and white.
- 4) For photographs, clear prints (color accepted) or image file (final size 350 dpi or higher) shall be submitted. In principle, the final print will be 7.2 cm x 7.2 cm or smaller, in black and white.
- 5) References shall be listed in order of citation in the main text.

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title of Journal*, Volume(Issue), Start page-End page (Year of publication).

Book – [No.] Author(s): *Title of Book*, Start page-End page, Publisher, Place of Publication (Year of publication).

4. Submission

One printed copy or electronic file of manuscript shall be submitted to the following address:

Synthesiology Editorial Board Office
Public Relations and Publishing Division,
National Institute of Advanced Science and
Technology(AIST)
Tsukuba Chuo No.2 Bldg., 1-1-1 Umezono,
Tsukuba-shi 305-8568
E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp

The submitted article will not be returned.

5. Proofreading

Proofreading by author(s) shall be done once. In principle, only revision or correction of printing error is allowed in the proofreading stage.

6. Responsibility

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

7. Copyright

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

Inquiries:

Synthesiology Editorial Board Office
Public Relations and Publishing Division,
National Institute of Advanced Science and
Technology(AIST)
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212
E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp

編集後記

シンセシオロジー第1巻2号をお届けいたします。去る1月に1号を創刊してから、シンセシオロジーに対して各方面から好意のご意見や新しい試みへの励ましが多く寄せられ、厚く感謝申し上げます。査読者と著者との議論は当初編集委員会が考えていたよりも読者に好評のようです。

2号では1号と同じく6編の研究論文を掲載しています。研究論文の記述形式はそれぞれ大いに異なっており、型にはまらないいろいろな形式が試みられていることが分かります。おそらく第2種基礎研究の記述形式は多様であり、現在はその多様性を追及している段階と見てよいのではないのでしょうか。その中からやがていくつかの類型が現れてくるのを待ちたいと思います。

インタビューを快諾いただいたマサチューセッツ工科大学のレスター教授は、シンセシオロジーの試みの本質をよく理解していただいているお一人で、現代アメリカの科学技術研究の視点から、シンセシオロジーに対する見解を述べておられます。編集委員会が考えていたとは異なる観点からのご指摘もあり、シンセシオロジーの今後の展開をより豊かにしてくれています。

またトヨタ自動車株式会社技術統括部の梅山部長には、企業の立場から研究開発のプロセスを語っていただきました。当然のことながら企業でも、基礎研究と製品化との間の長いギャップをどう乗り越えるかは大きな問題です。産総研とはフェーズが異なることはありますが、共通の問題もそこにあります。産総研のような公的研究機関と民間企業とが、それぞれの研究開発をどのように効果的に「接続」するかが現代日本の大きな課題ですが、このインタビューを通じて解の一端が見えてくるように思えます。

査読者の座談会では、シンセシオロジーを特徴付けるいくつかのポイントが明示的に議論されています。今後の投稿者や査読者の参考にしていただければ幸いです。

なお来る5月13日に秋葉原コンベンションホールで、シンセシオロジー創刊記念のシンポジウムを開きます。共通の関心をお持ちの方々と、大いに議論ができればと期待します。

(編集委員長 小野 晃)

Synthesiology 1巻 2号 2008年4月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之、立石 裕

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：景山 晃、湯元 昇、大蒔 和仁、五十嵐 一男、佃 栄吉、神本 正行、田中 充、持丸 正明、村山 宣光、水野 光一、
一條 久夫、餌取 章男、中島 秀之、Paul Fons

事務局：独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部出版室内シンセシオロジー編集委員会事務局

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

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

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Creation of seamless geological map of Japan at the scale of 1:200000 and its distribution on the web

-For maximum accessibility and utilization of geological information-

K.Wakita, T.Igawa, S.Takarada and Y.Fusejima

Development of small-sized cogeneration system using thermoelectric power generation

-Recovery system of high-temperature waste heat by new thermoelectric oxides-

R.Funahashi and S.Urata

Realization of collaboration system for everyone to develop and manage

-Practices of communication pattern using qwikWeb-

K.Eto, M.Hamasaki and T.Nishimura

Introduction to theory of service engineering

-Framework for theoretical study of service engineering-

H.Yoshikawa

From systematic analysis of protein interaction networks to drug discovery

-Development of ultra sensitive mass spectrometry analytical platform-

S.Iemura and T.Natsume

Aerosol deposition method

-For production of high performance micro device with low cost and low energy consumption-

J.Akedo, S.Nakano, J.Park, S.Baba and K.Ashida

Interviews

Expectations for *Synthesiology*

R.K.Lester and N.Kobayashi

The flow from basic research to product realization in Toyota Motor Group

M.Umeyama and M.Akamatsu

Round-table talk

"After reviewing the new type of papers"

Editorial policy

Instructions for authors

———— English pages ————

Messages from the editorial board

Abstracts of research papers

Editorial policy

Instructions for authors