

Synthesiology

札幌市庁舎ビルの空調システムの省エネルギー化実証実験

人の認知行動を知って製品やサービスを設計する

緊急時に飲料水を確保するための技術

自動車用ナビゲーションの総合的開発

軽元素原子を可視化する新型低加速電子顕微鏡の開発

シンセシオロジー編集委員会

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

Synthesiology 第4巻第3号(2011.9) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

i

研究論文

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

座談会

- システム科学技術の研究開発 176 – 181

編集委員会より

- 編集方針 182 – 183
- 投稿規定 184 – 185
- 編集後記 192

Contents in English

Research papers (Abstracts)

- Demonstration test of energy conservation of central air conditioning system at the Sapporo City Office Building** 132
— Reduction of pump power by flow drag reduction using surfactant — --- H. TAKEUCHI
- Designing products and services based on understanding human cognitive behavior** — Development of 140
cognitive chrono- ethnography for synthesiological research — --- M. AKAMATSU and M. KITAJIMA
- A novel technology for production of drinking water in emergencies** — Specific material for selective nitrate 151
adsorption — --- A. SONODA
- Integrated development of automotive navigation and route guidance system** — Product development for 157
realization of dreams and standardization for social acceptance — --- H. ITO
- Innovative electron microscope for light-element atom visualization** — Development of low-voltage electron 166
microscopes in “Triple-C” project —
--- Y. SATO, T. SASAKI, H. SAWADA, F. HOSOKAWA, T. TOMITA, T. KANEYAMA, Y. KONDO and K. SUENAGA

Messages from the editorial board

186 – 187

Editorial policy

188 – 189

Instructions for authors

190 – 191

札幌市庁舎ビルの空調システムの省エネルギー化実証実験

— 界面活性剤を用いた流動抵抗低減によるポンプ動力の低減 —

武内 洋

近年、二酸化炭素の排出量が民生業務部門でも増加している。この実験ではビルの冷暖房用循環水の搬送動力を低減させることを目的として、循環水に高分子や界面活性剤を混ぜると発現する流動抵抗低減効果、いわゆるToms効果を利用し、その有効性を検証した。この効果については、多くの基礎研究やビルへの適用例もいくつかあるが、複雑な配管路から構成される実際のビルの循環水に界面活性剤をどのように注入するか、注入後管内の流動や伝熱の性能はどのように変化するか、さらにこの効果を長期にわたり維持継続する方法等について明確にした報告がなく、この技術の普及の妨げとなっている。この論文では札幌市役所本庁舎の冷暖房システムを使用して行った実証実験で得られた知見を示し、それを一般化してこの技術の普及につなげたい。

キーワード: 界面活性剤、流動抵抗低減、ビル空調システム、省エネルギー、実証実験

Demonstration test of energy conservation of central air conditioning system at the Sapporo City Office Building

– Reduction of pump power by flow drag reduction using surfactant –

Hiromi TAKEUCHI

In recent years, the amount of carbon dioxide emission in the civilian sector has been increasing. In this experiment, the so-called Toms effect, i.e. the effect of flow drag reduction when surfactant is injected to circulating water, has been verified to reduce the transfer power of circulating water for air conditioning systems of buildings. Concerning this effect, much basic research and a few applications to buildings have been reported. There is no clear report, however, on how to add the surfactant to the circulating water in buildings constructed with complicated pipework, how the flow and heat transfer performance change after the injection of the surfactant, and how to maintain the effect for a long time. Consequently, the technology using this effect has not yet been put to practical use. This paper presents the findings of the demonstration test using the air conditioning system at the Sapporo City Office Building. Generalization of the results will hopefully lead to the spread of this technology.

Keywords: Surfactant, drag reduction, central heating/cooling system, energy conservation, demonstration test

1 研究目的

民生業務部門では、エネルギー消費量が徐々に増加している。つまり、民生部門ではトップランナー方式の導入で個別機器の省エネ化が図られる一方で、生活の利便性・快適性追求の流れや世帯数の増加等が原因となって、エネルギー消費は右肩上がりである。特に、業務部門ではオフィスのOA化等が進み、エネルギー消費は増大している。表1は業務用ビルのエネルギー消費構造を統計的に調べた結果^[1]である。これによると、照明・コンセントが42.4%と最も高く、熱源が31.2%で続いている。前者についてはOA機器の省エネ化やLED照明の導入で対策が取られつつある。後者については、20年以上前に設置導入された効率の悪い冷凍機やボイラ等が、エスコ事業等によってCOP(成績係数)の高い機器と入れ替えられ、徐々に改善

が進んでいる。このようなハードの入れ替えによる省エネ促進は効果的ではあるが、初期投資に大きな予算が必要となる点は否めない。この研究ではビルの空調には欠かせない熱搬送、その中でも循環水を用いた冷温水搬送の動力削減に焦点を当てた。

表1の中で冷温水1次ポンプおよび2次ポンプ動力の占める割合は2.6%以上と推測され、エネルギー消費の絶対値は少ない。しかし、界面活性剤を利用した流動抵抗低減技術を導入すると、既存の熱搬送システムを改造する必要なく使用電力を低減させることができる。この技術は1949年Tomsが界面活性剤の存在下で流動抵抗が数十%低減できると指摘^[2]した現象に基づいており、日本でも基礎研究やビル空調システムに導入する実用化がなされている。しかし、導入したデータの公表がほとんどなく、界

次世代化学材料評価技術研究組合 〒305-8565 つくば市東1-1-1 産総研つくば中央第5-2
Chemical Materials Evaluation and Research Base AIST Tsukuba Central 5-2, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan E-mail:
h-takeuchi@cereba.or.jp

Original manuscript received October 29, 2010, Revisions received August 22, 2011, Accepted August 24, 2011

表1 業務用ビルのエネルギー消費構造¹⁾

エネルギー用途区分			主たるエネルギー消費機器
項目	細目	割合 (%)	
熱源	熱源本体	26.0	冷凍機、冷水機、ボイラ、他
	補機動力	5.2	冷却水ポンプ、冷却塔、温水1次ポンプ、他
熱搬送	水搬送	2.6	温水2次ポンプ
	空気搬送	9.4	空調機、ファンコイルユニット、他
給湯	熱源本体	0.8	ボイラ、循環ポンプ、電気温水器、他
	照明・コンセント	21.3	照明器具
照明・コンセント	照明	21.1	事務機器、他
	コンセント	21.1	事務機器、他
動力	換気	5.0	駐車場ファン、他
	給排水	0.8	揚水ポンプ、他
	昇降機	2.8	エレベータ、エスカレータ、他
その他	その他	5.1	トランス損失、店舗動力、他

面活性剤注入方法、それにより起こりうる現象、達成された省エネ効果および界面活性剤の寿命も含めた日常管理方法等が明らかにされていないため、一般に普及するには至っていない。

この研究の目的は、流動抵抗低減効果を活用した技術の省エネ効果を実測し、ビル空調システムの省エネルギーにどれ程貢献できるかを明らかにすることである。そのため、札幌市と協力してこの技術を市庁舎の冷暖房水循環システムに適用し、省エネルギーの検証実験を行い、成果を公表することでこの技術の普及拡大を図る。

この論文では、研究が基礎的な段階でとどまり、あるいは実証されてもデータが公開されないため限られた施設にしか導入されていなかった技術を、技術の構成要素をなす分野の専門家を集め、技術統合のシナリオのもとで役割を分担し、実際に使用されている札幌市庁舎で実施した実証実験とその結果について述べる。

2 シナリオ

はじめに簡単に Toms 効果について説明する。1949 年、Toms は管内を流れる水に長鎖の高分子を 5 から 10 ppm 少量添加することによって、管内乱流の圧力損失を低減できることを示した²⁾。高分子は、流れのせん断力で構造が破壊され再生しないため、その効果は一時的である。一方

高分子に代えて界面活性剤を用いると、形成されるミセル構造が普遍的に再生されるため、この効果が持続する。すなわち、図1に示すように、界面活性剤の濃度の増加に伴い、単分子同士が接合し球状のミセル、さらには棒状のミセルが形成され、この棒状ミセルが三次元的なミセルネットワーク構造を呈することで流れの乱れが抑制され、流動抵抗が低減される。水路流れの速度ベクトルの分布を図2³⁾に示す。図2aが水のみの場合、図2bが界面活性剤を添加した場合である。界面活性剤の添加により、流れの中のたくさんの不規則な渦が消失し、規則正しい流れに変化することがわかる。この構造は、ポンプ、バルブあるいはエルボ部分等流路が大きく変化する箇所では破壊され、その効果は消失するが、比較的長い直管部で再び形成され流動抵抗低減に寄与する。冷水あるいは温水を循環し大規模なビルの冷暖房を行う際、水循環ポンプの動力に大きな電力が使われている。このエネルギーの大幅な削減を図るために、循環水に界面活性剤を注入し、流動抵抗の低減を図る上述の Toms 効果の適用が有効である。この方式による省エネルギーの原理は、界面活性剤の添加により流動抵抗が低減すると定格流量を超える循環水が流れるようになり、これを定格流量に戻すために循環ポンプの回転数をインバータを用いて下げ、その結果ポンプでの消費電力量が減少して省エネルギーが図れるというものである。

図3に示すようにどのような界面活性剤がこの目的に合致しているか、薬剤を設計して創製する技術が構成要素の一つとなる。さらにこの薬剤を注入した水が、循環水路内でどのような流体挙動および熱挙動を示すかを解明し、その省エネルギー効果を明確にすることも、もう一つの構成要素である。さらに、省エネルギー技術として継続的に運用・維持していくためには、添加した界面活性剤の長期的な安定性、省エネルギー効果の持続性、メンテナンスの手順を明らかにする必要がある。

日本では流動抵抗低減技術に関してこれまで多くの基礎研究がなされ、いろいろな薬剤が開発され、その流体力

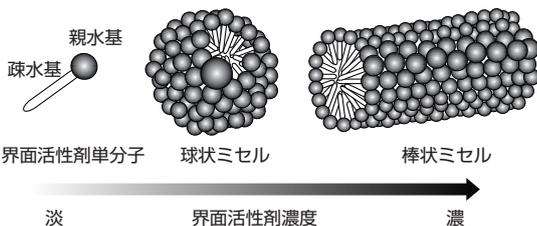


図1 濃度変化に伴うミセルの形状変化

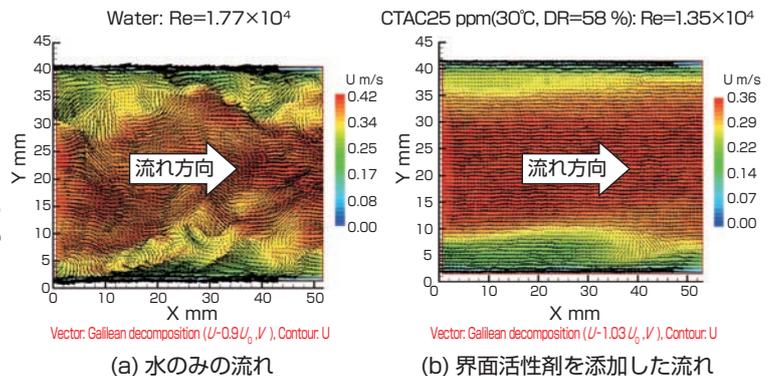


図2 ミセルネットワークによる流れの変化

学的特性が調べられてきた。実際のビルの循環水に注入された120件余りの実績もある。しかし、民間企業で実施されたために技術的情報が公表されず、省エネ効果のみならず流動、伝熱および長期安定性に関する技術の蓄積が欠落し、技術の普及につながっていない。この研究では、これら要素技術の統合化を図るため、薬剤添加による流動性能の発現、省エネルギー効果の評価、伝熱性能の維持および薬剤の長期安定性確保について、それぞれの専門家が役割を担い、公共施設で実証実験を行ってその成果の一般化を図り、ビル空調の省エネルギー化に貢献することを目標とした。

3 要素技術の開発

流動抵抗低減剤の開発は1992年、山口大学、(財)周南地域地場産業振興センター、企業4社が産学官共同研究の一環として着手し、1995年商品化に成功した。界面活性剤である塩化オレイルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウムと3次元ミセルネットワーク構造形成を促進する対イオン剤であるサリチル酸ナトリウムを主成分とし、さらに防錆剤等が含まれている^[4]（以後これを薬剤と表す）。また、通産省のエコエネルギー都市プロジェクトにおいても1997年から3年間、界面活性剤の開発を中心とする研究が産学官共同研究として進められ、工業技術院傘下の二つの研究所がメンバーとして参画している。また、1998年からはNEDOプロジェクトとして地域冷暖房システムに適用することを前提としたプロジェクトが1年半の間行われた。これらの動きの中で、研究機関での詳細な実験や企業を中心とした実際の建物への導入が行われるようになってきた。

商品化された山口県発の薬剤を用いたビル空調への導入もある程度行われているが、普及には程遠い状況である。2002年には「スムーズウォータ」実用化研究会が発足し、この技術に関連する産学官の専門家が集まり、技術シ-

ズをいかに実用化につなげていくかが検討され、その中で実証実験の必要性も指摘された^[5]。

流動性能の発現に及ぼす因子としては、配管径、配管直管部分の長さ、流速、水温、薬剤濃度、水質等が挙げられる。一般に現場の配管はとて複雑で、幾度か行われている修理・改修等により竣工当時の配管図面と異なることが稀ではない。また、古い現場ほど流量計や温度計等の計測器が設置されておらず、実験実施はおろか省エネ運転等の大きな阻害要因となっている。手元に研究機関で得られた流動性能データがあっても現場では活用し難い場合が多い。伝熱性能の維持については、実験室規模の研究結果として、薬剤が流動抵抗低減のみならず伝熱性能も低下させるという報告があるが^[6]、規模の大きい実機ではそのような報告は無く、その相違は解決しなければならない問題である。加えて、薬剤の長期安定性、すなわち寿命については公表されたデータは無く、現場での濃度管理の問題の上位にある課題として位置づけられる。

4 札幌市庁舎の空調システム

このシナリオに基づき、実際の水循環システムに薬剤を注入し、流動抵抗低減がどれ程発現するか、また、その際に伝熱性能の低下は見られないか、さらに長期間安定して効果が維持されるか等について要素技術を統合した検証が必要である。実施対象としては、検証後のデータ公表が必須となることから、民間の施設ではなく公的な施設として札幌市役所本庁舎の冷暖房水循環システムを用いて実証実験を行うこととした。背景には、産業技術総合研究所（以下、産総研）と札幌市がエネルギーの有効利用を目的として締結した基本協定と覚書があり、札幌市は無償で実験サイトを産総研に提供し、産総研はそこに実験装置類を持ち込んで実験を実施し、得られた成果を共有することが謳われている。図4に本庁舎の外観写真を示す。建物は

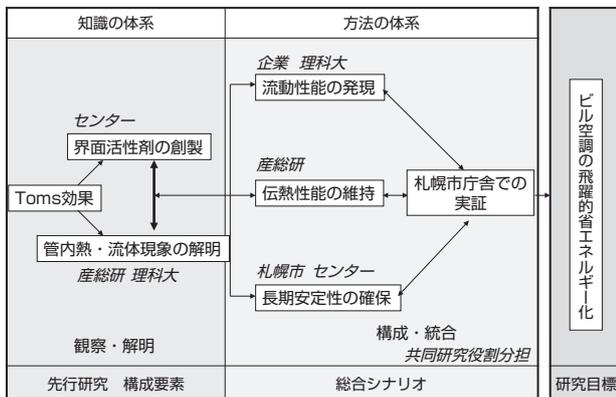


図3 界面活性剤を用いたビル空調の省エネシナリオ



- 庁舎
- ・1971年建設
 - ・地下2階、地上19階
 - ・2001年ステンレス配管
 - ・循環水量約32トン

図4 札幌市役所本庁舎外観

1971年に竣工し、その規模は、地下2階、地上19階、総床面積42,000 m²であり、第二種エネルギー管理指定工場^{注1)}として登録されている。図5に市庁舎の冷暖房用水循環システムの系統を示す。循環水は、地下2階機械室に設置されている夏、冬用それぞれ37 kWの循環ポンプから吐出され、8階空調機室にある5.5 kW4台、3.7 kW1台の計5台のプースターポンプを経由して19階の膨張タンクに至り、地下二階に戻る循環流路を形成しており、32 tonの水が循環している。

各部屋には個別空調が併設されておらず、日々稼動している庁舎内共通のシステムを使用する実験となることから、実験を優先してこのシステムを運転・停止することは不可能である。このような状況のため、研究室での実験と異なり、パラメータを自由に変えたりすることが困難であるばかりか、緊急時には実験を速やかに中止し原状復帰しなければならない。そこで実証実験に当たっては、薬剤の開発に当初から関与し、その性質を熟知していると同時に、これまで幾つかの施設での注入作業に実際に携わり種々の事例を経験している(財)周南地域地場産業振興センター、基礎研究のみならず薬剤注入後に起きる循環水の流動および伝熱現象の過渡的な変化を予測あるいは解明することのできる総合力を有する産総研および東京理科大学、複雑な配管群からなる冷暖房システムでの流量、温度、電力量測定が得意な(株)藤原環境科学研究所、システム全体に詳しく注入完了後もその安定的な維持・管理を行う電気系および機械系の技術系職員を中心とする札幌市役所の5者がそれぞれの役割を担うことにした。

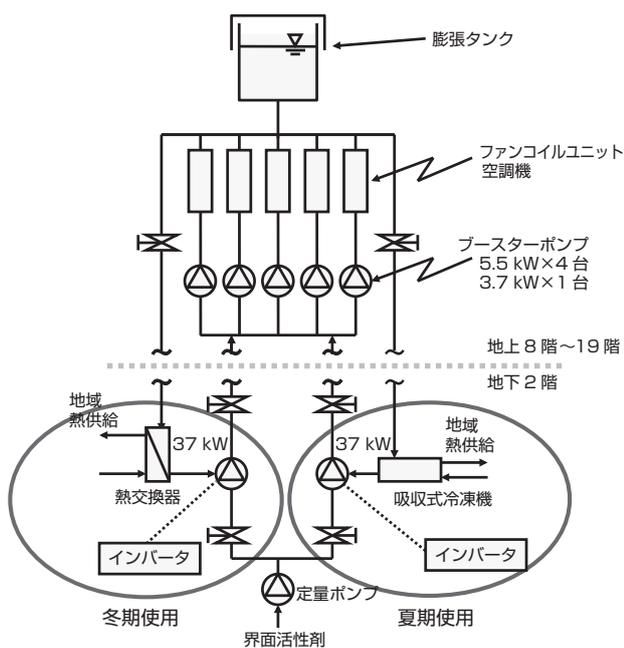


図5 札幌市役所冷暖房システム循環水系統図

5 実証実験の準備

5.1 流動特性の基礎的把握

使用する薬剤は5～65℃で流動低減効果を発揮するので、冷水を循環する夏期、温水を循環する冬期ともに継続して使用できる。ただし、流動抵抗低減効果には温度依存性があり、あらかじめ実使用範囲の7℃から45℃までの値を調べておく必要があった。また、既存の防錆剤が低減効果に及ぼす影響についても把握しておくことが有用である。これらについては、東京理科大の流路長1 m、内径10.7 mmのテストセクションを有する水循環実験装置で実測した。薬剤の濃度は3000～6000 ppmの間で変化させ、流動抵抗低減効果の流速依存性を測定した^[7]。

現場での界面活性剤使用に当たっては、発泡が原因で薬剤を使用できなくなる場合も考えられる。例えば、大気開放型の膨張タンクや空気を定常的に吸引してしまう箇所があげられる。それらを含め、複雑な流路特定については、日々システムのメンテナンスにあたっている市役所監視盤室スタッフが、事前に問題箇所がないことを確認した。

薬剤注入前には、それぞれのポンプ流路での流量ならびにポンプの消費電力量を測定した。流量計測にはトランジットタイム方式のポータブル型超音波流量計を、電力計測にはフィーダー電力レコーダーを用いた。

5.2 インバータ設置

薬剤注入により流動抵抗が低減し、その結果定格流量を超える循環水が流れるようになる。これを循環ポンプの回転数をインバータを用いて下げることにより、定格流量まで戻す。その結果ポンプでの消費電力量が減少し、省エネルギーが図れる。したがって、この技術導入にはインバータの設置が必須である。事前の流動特性実験および流量測定の結果から、薬剤注入後は8階のプースターポンプ5台の運転を停止しても十分な循環が得られると判断できたので、インバータは37 kWの冬期および夏期用循環ポンプそれぞれに1台ずつ設置した。なお、他の機器に影響を及ぼす可能性のある高調波流出電流を計算したが、対策は不要と判明した。

5.3 水質調整

サンプリングした循環水に、使用予定の薬剤を1000 ppm添加し攪拌したところ、綿状の沈殿物が生成した。これは今回使用する薬剤がカチオン系であり、循環水中に含まれていたアニオン系の防錆剤との反応で生じた水和物と推定された。したがって、循環水にこのままこの薬剤を注入すると水和物が生成し、配管の細部を閉塞させてしまう。これを回避するためカチオン系の防錆剤を用いることにし、休日等を利用して循環水を合計4回入れ替えアニオン系防錆剤の濃度を数十 ppmにまで下げ、カチオン系防錆

剤を所定量注入した。このように調整し直した循環水と薬剤を混ぜても水和物は生成しなかった。

薬剤の注入は地下2階循環ポンプ吐出部付近とした。注入には薬剤タンク内に投入された一定量の薬剤を併設したブランチポンプを用いて循環水に圧入する方式をとった。

採取した循環水に対して、予め薬剤濃度と導電率の検量線を作成し、注入後循環水の薬剤濃度を求めた。また、実証実験中は地下2階、8階空調機室および19階膨張タンクで循環水のサンプリングを行い、薬剤濃度からビル全体での薬剤の混合状態を推測した。

6 実証実験

6.1 流動性能の発現

冬期の注入実証実験は、2006年11月に実施した。詳細は文献^[8]にもある。本庁舎暖房システムは早朝に稼働し始め、夕方17時30分に停止される。したがって、循環水路全体が熱的に定常になったと考えられる9時に実際の循環水をサンプルし、それを用いて導電率と薬剤濃度の検量線を作成した。薬剤は粘度が高いため、一度に注入するとシステム内で濃度むらが発生し、極端な場合は高濃度の薬剤で細い流路に閉塞が生じてしまう可能性も考えられる。このため、はじめは10 kg/hの低速で薬剤を注入し、8階および19階での温水サンプリング、濃度測定および異常検出等に当たった。19階の膨張タンク内で少量の発泡を観察したが、問題にするほどの量でもなく、また増加傾向も認められなかった。3日間かけて合計100 kgの薬剤を注入した。この時点での推計薬剤濃度は3000 ppmである。

システム全体での薬剤濃度をより均一にするため、第2回の注入作業は1週間あけてから行った。2日間で80 kgの薬剤を注入し、推定薬剤濃度が流動抵抗低減効果の発現に十分な5400 ppmとなったため、注入作業を終了させた。

上記一連の作業中、薬剤濃度が0 ppm、3000 ppmおよび5000 ppmで、インバータ周波数を変化させて、流量およびポンプ消費電力量の値を測定した。この結果から、冬期間は薬剤濃度5000 ppm、インバータを35 Hzに設定し、定格流量に合わせると、65%の省エネルギーが達成できることが明らかとなった。

冷房期についても同様に流動抵抗低減効果を調べたところ、薬剤濃度3500 ppm、インバータ周波数40 Hzで47%の省エネルギーとなることが分かった。冷暖房期の実証実験結果をまとめて表2に示す。冷暖房期を合わせた通年での省エネルギー量を試算すると52,000 kWhとなり、本庁舎全体の電力使用量の1%強の節約に相当する。

表2 実証した夏期および冬期の運転条件と省エネ率

空調モード	薬剤濃度 (ppm)	設定周波数 (Hz)	定格流量 (L/min)	省エネ率 (%)
冷房	約 3500	40	6600	47
暖房	約 5000	35	6600	65

6.2 伝熱特性の維持

図5にある、冬期に使用する熱交換器内での伝熱性能の低下については、地域熱供給からの高温水蒸気が熱交換器チューブ内を、循環水が欠円型の邪魔板で仕切られている胴側を流れるため、循環水の流路は複雑で流れが大きく乱れており、流動抵抗低減も伝熱性能の低下も起こりえないと考えてよい。

夏期に使用する吸収式冷凍機蒸発部の熱交換器は、長さ6 m、内径16 mmのUチューブ型の銅管414本で構成されている。このヘアピン状の管内を循環水が流れており、直管部では流動抵抗低減が起きていると予想される。また、ここで伝熱性能の低下も起きていれば、循環水が十分に冷却されずにビル内を循環することになり、ビル全体の冷房能力低下をもたらす。この熱交換器管内の伝熱係数について、経験式^[9]から求めた値と熱交換器入口と出口の実測の温度差から求めた値を比較すると、実測値は13%程低い値を示す。一般に伝熱性能の低下は流動抵抗低減より大きいとされている。建物全体での流動抵抗低減が47%であった今回、約13%の伝熱係数の減少は熱交換器管内の伝熱性能の低下がそこまでは大きくないことを示している。また、冷凍機出口温度は夏期稼働中設定値の11℃を維持し続けており、流動抵抗低減による省エネルギー化が空調機の運用上問題ないことが明らかとなった。

6.3 長期安定性の確保

薬剤の注入後、薬剤濃度を適正に保つことが重要である。濃度が低下する一番の理由は、薬剤を含んだ循環水の系外への漏れである。パッキン等のつなぎから少量ではあるが定常的に漏出することもあれば、夏と冬の流路切り替えて比較的大量に一時的に流出してしまうこともある。いずれも真水を追加して流路内に空気が溜まらないようにするが、この作業により薬剤濃度が低下し流動抵抗低減効果も小さくなってしまふ。いずれの場合も追加した真水の積算量を測定し、極端に薬剤濃度低下が起きているようであれば不足分の薬剤追加注入を行わなければならない。札幌市役所の場合、前者、すなわちつなぎ目からの漏れは皆無であったが、夏の吸収式冷凍機から冬の熱交換器に流路を切り替える際には数トンの流出があったため、切り替え後、界面活性剤の濃度測定を実施し、その結果を基に追加注入を行っていた。さらに、何度か経験を積むうちに、切り替え作業に工夫を施し流出がほとんど無いように

表3 産総研への問い合わせと回答例

問合せ元	内容	回答
中央省庁	庁舎ビルに導入できないか。	配管の経年劣化がかなり進んでおり、管内壁の錆が問題である。界面活性剤が錆と結びつき効果が現れない可能性がある。
地方自治体	設備担当が図面を持参し、建設中の新庁舎で実験したいと問合せ。	クーリングタワー部が大気開放系であり、この箇所での発泡が起きるため使用できない。
大手飲料メーカー	工場で冷水循環に大きなエネルギーを必要としているので省エネ化を図りたい。また、食品添加物として認められている界面活性剤で流動抵抗低減効果のあるものはないか。	札幌市役所の現場見学をしながら原理およびMSDSを説明。食品添加物で流動抵抗低減の基礎実験をしたことはない。
個人宅	15年前から屋根裏に熱交換器を設置し、春から秋まで温水を得ている。小さなポンプでも同様な効果は得られるのか。また、熱媒体には凍結防止のため不凍液が入っている。界面活性剤入りの水は不凍液と同様の機能もあるのか。	どんな小さなポンプでも効果はある。例えば、Toms効果のデモンストレーションに用いている可搬型実験装置は、内径12mmのビニールチューブ18mを直径約30cmの輪状に束ねた流路であるが、約30%の省エネ効果を示す。ポンプは150Wを使用。この界面活性剤5000ppm程度では凝固点降下はあまり期待できない。不凍液の混在下での流動抵抗低減効果については小型の実験装置で確かめる必要がある。

作業できるようになった。その結果薬剤の追加投入は年に一度有るか無いかという現状である。界面活性剤の濃度測定は冷暖房切り換え後の年2回行っている。濃度は校正曲線を用いてサンプル水の導電率から現場でも間接的に推定できるが、最終的には依頼分析により、鉄、銅等の濃度と共に薬剤の濃度を求めている。

配管は、老朽化による錆の発生のため2001年に鉄からステンレスに変えられているが、熱交換器は鉄製そして各部屋のファンコイルは銅製であり、電食が起こる可能性がある。今回の薬剤に変えてからすでに1600日余りが経つが、循環水中の鉄および銅の濃度は安定しており系内に腐食は発生していないと判断される。

薬剤の長期安定性については、循環水中にすでに混入していた物質と薬剤との相互作用、温度履歴からくる失効、薬剤そのものの寿命等が影響すると考えられる。短時間で起こる不安定性は注入前に把握できることもあるが、長期的なものは実施例から判断せざるを得ない。しかし、これまで実施してきた注入で追跡調査は公開されておらず、1600日余り効果が持続しているこの例は、この観点からも貴重な実証である。

なお、薬剤の毒性については製品安全データシート（MSDS）が作成されており、河川に直接放流せずに廃水処理場を経由して処分すれば問題はない。

7 技術普及促進の効果

これまで3度の報道発表後の、流動抵抗低減剤の開発元であるL社への問い合わせ件数の推移を図6に示す。

2007年2月の暖房期の実験結果を5月に産総研でプレス発表^[10]したところ、その後の問い合わせ件数は増加している。また、翌年の冷房期の実験結果発表を札幌市役所で行ったが、発表が地方紙中心であったためか件数の顕著な増加は見られなかった。翌年の1月にNHKで全国

放送^[11]されると、件数は急増した。

図6に示した2年間で実際に導入が行われた箇所としては、民間の工場が最も多い9件、空港施設4件、公共施設3件そして民間ビル2件の合計18件であり、L社によれば明らかに産総研の実証実験の公表後導入件数が増加したとのことである。これまではL社が民間施設に導入しその省エネ効果について公表しても、民間会社が自社技術の宣伝を行っているとしか受け取られなかった面が強かった。しかし、今回のように産総研という公的研究機関が公共施設でその技術の有効性を実証したという報道は、客観的であり、省エネ導入を加速したい事業所に実現可能な情報を与え、その結果問い合わせ件数の増加とそのうちのいくつかは導入につながったと考えられる。また、問い合わせ内容は技術の概要を聞くこれまでのものとは明らかに異なり、導入対象と考えている建物の設備概要を示し、経費も含め導入を前提とした質問が多かったとのことである。

表3には2007年5月のプレス発表後、産総研に寄せられた約150件の問い合わせの中で典型的な例とそれへの回答を紹介する。問い合わせでは、より低温すなわち不凍液との共存下での流動抵抗低減について、さらには氷蓄

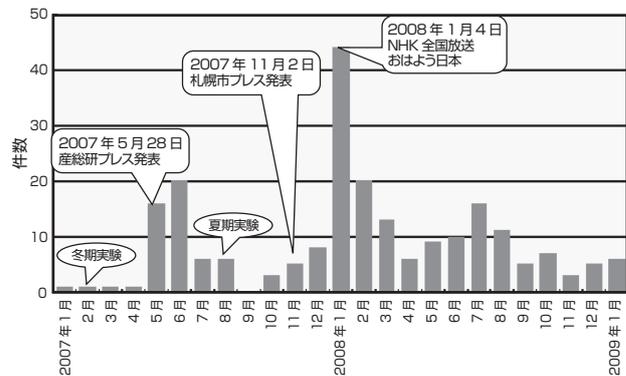


図6 L社への問い合わせ件数の推移

熱との併用について等、低温側での質問も多く、これらに対しては新規薬剤の開発等、基礎研究からのフィードバックが必要である。また、食品や飲料を扱う工場の冷房システムに導入したいとの問い合わせも多かったが、万が一循環水が漏れて食品等に混入してしまう可能性も皆無ではないので導入を見合わせた例もあった。東南アジアに展開している日本企業から、工場の冷房システムに使用できないかという問い合わせもあったが、現地での濃度管理体制に問題があり見送らざるを得なかった。

8 今後の展望

これまででは、薬剤を開発した会社が製造および販売はもちろんのこと、ビルへの導入検討、注入作業そして保守点検を一貫して行ってきた。今後は、ビルメンテナンス会社、ビル管理会社や設計事務所等が、水質や配管系等の事前チェック、薬剤注入および濃度管理を中心とした保守管理を適切に行えば、この技術の加速的普及につながるものと確信する。そのような視点から、この技術に詳しい講師による技術体験セミナーをメンテナンス会社等の技術者を対象に、年に一度程度定期的に開催することも有効かもしれない。

また、地域冷暖房システムへの適用も省エネ化を大きく促進するものであるが、伝熱性能の問題については残念ながら明確な結論が出ていないため、実証実験を前提とし、システムを構成する要素技術の専門家が集結して速やかに解決すべき問題と考えられる。

謝辞

実証実験はエネルギーの有効利用を目的とした産総研と札幌市との基本協定に基づき、札幌市総務局および環境局、東京理科大学理工学部機械工学科、(財)周南地域地場産業振興センターおよび(株)藤原環境科学研究所が共同研究契約を結び実施した。各機関の担当者に多大なご尽力をいただいたことを感謝する。また、薬剤使用にあたり技術的な指導をいただいたエルスピー協同組合および、現場での実験実施およびシステム維持管理に積極的な技術支援をしていただき、現在でもその維持管理に当たっている札幌市役所および(株)キタデンの皆様には謝意を表す。

注1) 第二種エネルギー管理指定工場：年度におけるエネルギーの使用量の基準値が燃料(熱)については原油換算で1,500 kL以上3,000 kL未満、電気については600 kWh以上1,200 kWh未満の施設が指定される。そして、エネルギー消費原単位を年平均1%以上の低減を図るという目標が課せられている。

参考文献

- [1] (財)省エネルギーセンター:「オフィスビルの省エネルギー」パンフレット(2009).
- [2] B.A.Toms: Some observation on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers, *Proc First Int. Congr. on Rheology*, North Holland, Amsterdam, 2, 135-141 (1949).
- [3] Y.Kawaguchi, et al.: Experimental study on drag-reducing channel flow with structure of surfactant additives—Spatial structure of turbulence investigation by PIV system, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 23 (5), 700-709 (2002).
- [4] 特許 第3671450 (2005).
- [5] 産業技術総合研究所産学官連携部門:「スームスウォータ」実用化研究会報告書(2003).
- [6] 例えば, H. Usui and T. Saeki: Drag reduction and heat transfer reduction by cationic surfactants, *J. Chem. Eng. Japan*, 26 (1), 103-106 (1993).
- [7] 中川浩哉: 抵抗低減用界面活性剤の実物大建物空調システムへの適用実験, 東京理科大学理工学部機械工学科卒業論文(2007).
- [8] H.Takeuchi, Y.Kawaguchi, K.Tokuhara and Y.Fujiwara: Actual proof test of energy conservation in central heating/cooling system adapting surfactant drug reduction, *Proc. of 8th International Conference on Sustainable Energy Technologies*, 218, 1-4, Aachen (2009).
- [9] 化学工学便覧(1999).
- [10] 例えば, 朝日新聞(2007.5.29).
- [11] NHKニュース(2008.1.4).

執筆者略歴

武内 洋(たけうち ひろみ)

次世代化学材料評価技術研究組合専務理事。1980年京都大学大学院博士後期過程化学工学専攻退学、同学部助手。工業技術院北海道工業技術研究所研究企画官、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門副研究部門長等を経て定年退職後、現職。流動と伝熱が専門。この実験はエネルギー技術研究部門所属中に行った。同時に同研究部門の10余名と札幌市内で過冷却蓄熱を利用したコジェネレーション実証研究も実施した。



査読者との議論

議論1 全般

コメント(小野 晃: 産業技術総合研究所)

この研究は基礎的な研究成果を社会に展開するために、自治体という普段研究者があまり付き合いのない相手とうまく共同研究を組んだ例であり、また実稼働中のビルを実験対象にするという難しい課題でもあったと思います。第2種基礎研究あるいは製品化研究の方法論を示す良い事例として、広く読者に参考にしてもらえるものと期待します。

議論2 公的研究機関で行う実証研究の意義

コメント(長谷川 裕夫: 産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門)

新しい省エネルギー技術が現場に導入され、普及していく過程ではそれを妨げるさまざまな要因があり、長い期間を要します。この論文は、公共の施設を対象として公的研究機関が導入手順と省エネルギー効果を実証してみせ、その後の普及促進に貢献したところに大きな価値があると思われます。

本実証研究の結果が、導入例の増加等に結びついた例があれば紹介し、その結果をもとに、公的研究機関における実証研究のもつ意味についてさらに考察を加えていただくと良いと思われま

回答（武内 洋）

この実証研究の結果を紹介した報道発表の後に問い合わせ件数が増加し、その後の導入につながっています。その概要を第7章で紹介し、公的機関で行う実証研究の意義についての考察を加えました。

議論3 自治体との共同研究

コメント（小野 晃）

自治体を共同研究者とした場合に特有のいろいろな工夫とか、実稼働しているビルを実験対象にする難しさを、どう解決したか等にも言及していただけたらと思います。

回答（武内 洋）

実稼働中のビルでは実験にともなう失敗が許されないので、水循環システム全体および構成機器の場所・性能等を入念に調べ上げました。また、休日の有効活用もしました。

技術的な観点ばかりではないので本文には直接記載しておりませんが、調整で一番大変だったのは、実証実験の大切さを自治体の方々に理解してもらい、その方々が日々仕事をしている建物で実施することを承諾していただくことでした。

人の認知行動を知って製品やサービスを設計する

— 構成的研究のための認知的クロノエスノグラフィ法の開発 —

赤松 幹之^{1*}、北島 宗雄²

単に開発者のアイデアだけで技術開発を行っている、人に受容される製品やサービスを実現することは容易ではない。それは、さまざまな個性を持つ利用者が実際にそれを使う状況下で何を考え、何を感じているかを、開発者が正しく知ることが困難だからである。そこで、実際の状況下での人の認知行動を把握する手法である認知的クロノエスノグラフィ法を開発した。この方法は、対象とする人の条件を明確化して選定したエリートモニターを用い、製品やシステムの設計につながる変数であるクリティカルパラメータを事前に検討して、それを統制したうえで実生活場面での行動を記録して、それを基に回顧的インタビューを行うことによって認知行動過程を明らかにする。製品やサービスの設計につながることを指向する構成的な研究プロセスの初期段階に適用する手法である。

キーワード: 行動実験、発話プロトコル、日常生活、回顧インタビュー、被験者選定、カーナビゲーション、野球観戦

Designing products and services based on understanding human cognitive behavior

– Development of cognitive chrono- ethnography for synthesiological research –

Motoyuki AKAMATSU^{1*} and Muneo KITAJIMA²

When technology development is conducted based only on a developer's idea, we face difficulties in realizing products and services that will be well accepted by people. This is because it is difficult for a developer to know precisely how various users think and feel while using products or receiving services under real life situations. In order to overcome these difficulties, we have developed Cognitive Chrono-Ethnography which is a new method to understand cognitive behavior under various situations. This method clarifies the cognitive behavior process by selecting "elite monitors" taking characteristics of target users into consideration, identifying "critical parameters" utilized in designing the products or services, recording the human behavior in real life situations under the control of the parameters, and retrospectively interviewing the participants. This method is applied in the early stages of synthesiological R&D processes oriented toward designing target products and services acceptable by people.

Keywords: Behavioral experiment, verbal protocol, daily life, retrospective interview, subject selection, car navigation system, baseball game watching

1 はじめに

科学技術の研究成果は最終的には製品やシステムまたサービスとなって人のために使われる。もちろん、システムの一要素の研究開発もあるし、部品に使われる素材の研究開発もあるが、いずれにしてもいつかは人のために使われることになる。したがって、科学技術の研究成果を社会に活かすための構成学として、人が日常生活で有益と感じる製品やサービスを設計するための研究開発方法が必要である。

産業革命以降、大量生産技術によって人々の生活のなかにさまざまな工業製品が入ってきた。しかし、生活が豊かになってくると、大量生産された既存製品では満足できなくなり、自分にあったものを手に入れたいという要求が生

まれてくる。十人十色の時代である。こういった多様化した人の好みに対応していくためには従来型の大量生産では無理があり、少量多品種生産やBTO (Built To Order) に対応できるミニマルマニユファクチャリング^[1]やオンデマンド製造技術^[2]の研究が進められている。一方、サービス産業では、同じ人であっても時と場合によって欲しいものが異なっていることが認識されており、一人十色の時代がきていると言われている^[3]。例えば、情報提供サービスにおいては、GPSや光通信等による位置情報を手掛かりとして、その時にユーザーに喜ばれる情報を提供することが期待されている^[4]。このように、さまざまな人のさまざまな要求に応えられる製品やサービスを開発することが産業技術に求められているが、どういった機能やサービスを実現す

1 産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6、2 産業技術総合研究所 サービス工学研究センター 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2

1. Human Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan * E-mail: akamatsu-m@aist.go.jp, 2. Center for Service Research, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan

Original manuscript received February 14, 2011, Revisions received May 31, 2011, Accepted June 1, 2011

べきかといった設計の方針を得るための方法論は確立されていない。

すでに社会に受け入れられている製品やサービスであれば、その技術の持つ性能の向上が研究開発の目的となり、それに関わる自然科学的知識を動員して研究開発シナリオを定めることができる。しかし、これでは新しい製品を生み出すことはできない。これまで新しい製品の技術開発を行う際には、開発者がアイデアを出し、それを検討してユーザーに受け入れられるであろうと判断して進めていた。しかし、必ずしもそれが高い確率で的中していたとはいえない。これは、開発者と使用者の個性が同じではないことだけでなく、開発している側にいると、利用者側に完全に視点を切り換えてものを見るができないことが挙げられる。開発者の視点から実際の使用場面を正しく想定することが困難であるのは、使用者自身を含めて状態が絶えず変化する日常のさまざまな状況のもとで、製品やサービスを使うためである。したがって、研究開発の早い段階で、個性を持った個人の実際の利用場面を理解し、そういった人のための製品やサービスの設計に必要な手掛かりを得るためのプロセスが含まれなければならない。

2 なぜ実生活場面の認知行動なのか

人間に適合した製品やシステムを実現するための学問である人間工学においては、まずはユーザーである人間の特性を正しく理解することが基本となる。そのために、心理学や生理学また医学そして機械工学や情報工学等の工学的な知識や技術を活用して人間の特性を理解する。これらはいわば自然科学的な枠組みで人間を理解しようという研究方法である。自然科学的な研究アプローチにおいては、対象とする現象の本質とは無関係な要因は外乱となるので、それをいかに統制するかが重要になる。外乱を統制し、製品使用時の生活環境を適切に再現した実験室実験が遂行できれば、例えば高齢者の感覚特性に適合した製品や環境を構成することができる^[6]。こういった研究アプローチは、表示のデザインや製品の形態等、人と製品・システムとの接点（インタフェース）を対象とする場合は有効な研究方法である。しかし、製品やシステムまたサービスが発揮する機能やコンテンツについては、このような方法には限界がある。なぜなら、実際に製品やシステムを使ったり、サービスを享受して価値を感じるのは、実験室のなかではなく、実際の生活のなかだからである^[註1]。

人間が生活を営みながら生きている間には、不断に環境が変化し、さまざまな刺激や情報が個体に浴びせかけられる。人間はそれを受容し、それに応じて脳や身体が適応的に変化するとともに、行動を発現する。すなわち、変化

し続ける環境と絶えずインタラクションして、個体自身も絶えず変化しているのが私達の生活である^[註2]。このために、私達が日常生活で機器等を使う時にも、その機器の状態だけでなく、機器が置かれている状況全体を手掛かりに行動する。例えばコピー機を使う時であっても、排出されている紙の状態や機器の蓋の状態、また自分が行ってきた操作等、コピー機のディスプレイに表示されているもの以外も手掛かりにする。このような行為は状況的行為と呼ばれている^[6]。したがって、実際の製品の使用場面やサービスを受ける状況下に人を置かないと、製品等をどのように使うか、サービスをどのように受け取るか等を正しく知るとは困難である。

実際の使用時の評価を得るために良く行われるのは、試作品を作り、展示会等の場を利用して想定されるユーザーに試用してもらい、それによって評価を受け、改良すべき点を見いだすことである^{[4][7]}。ところがこういったアプローチは、その意図に反して、実際の生活での使用場面における状況を十分に再現することが難しいだけでなく、そもそも開発者側が想定したニーズを具現化したものが出発点になっているために、それが適切でなければ、それを改良してもユーザーの真のニーズに応えられないことがある。したがって、ユーザーの使用状況をよく理解したうえでユーザーを満足させる可能性の高い製品を作ってみることから始めなければならない。このように考えると、開発者が想定したものではないユーザーの真のニーズ、つまり、実生活場面で、その人が何を必要としていたり、何を欲しいと思ったり、何を嬉しいと感じるかを明らかにしていく研究手法が必要である。この研究手法は、単に人の認知行動を理解するための認識科学的手法ではなく、研究から得られる理解の内容や水準が、製品やサービスに持たせる機能を構成するための設計につながるものでなければならない。

日常の人の行動の多くは無意識的な処理によって行われていることから、アンケート調査のような事後的な手法ではなく、その使用場面で人が何をどのように感じ、どのように判断したのかを分析できるような研究手法が必要になる。この論文では、認知科学的手法を基に、人と環境の経時的な変動を取り入れた人間の理解のために開発した認知的クロノエスノグラフィ法（Cognitive Chrono-Ethnography：CCE）について述べる。この方法における研究シナリオは、まず製品やサービス設計につながる重要な変数（クリティカルパラメータ）を検討して仮説を構築し、次にそれに基づいて統制をした実生活場面での実験・調査をして、その分析から人の行動選択についての仮説の妥当性を確認するとともに、製品やサービスで実現すべき機能を提案するプロセスからなる。

3 認知的クロノエスノグラフィ法の開発

3.1 回顧的インタビュー

1970年代に認知科学の分野で認知過程を分析する手法として発話プロトコル法が提唱された^[8]。これは、頭に思い浮かべたことを、その場ですべて発話して表出してもらう方法である。前述のように、人は状況の下で得られる限られた手掛かりを元にして連続的に行動を選択していることから、それは必ずしも目的達成のための最適な行動選択にはなっていない。しかし、事後に人が自分の行動を他人に説明する時には、自分自身の行動のつじつまがあうように、断片的に記憶されている自分の行動に全体合理性があるように説明してしまう。そのために、過去におきた出来事についての言語による表出は必ずしも信頼ができなるとみなされていた。発話プロトコル法の場合には、リアルタイムで発話させることから、後から再構成して合理的説明をすることができないという利点がある。この方法は、情報機器のユーザビリティ（使い易さ）の研究のために多く用いられたが、頭に浮かんだことを逐一言葉にして表出することに気がとられ、機器の操作が滞ることがおきる。そのため、実験室で機器操作を行う場合にはあまり問題にならないが、日常生活場面における認知行動を研究する場合には適用がしにくい。

リアルタイムで認知内容を発話できない場合には、後から振り返るしか方法はないが、それを本人の記憶だけに頼ることはできない。そこで、行動している時の環境の状況を行動と同時に映像で記録して、その映像を再生しながら何が行動のきっかけとなったかを行動した本人に報告させる方法を考案した^[9]。心理学における学習と記憶の研究では、その場に行ったり、その場に存在していたものを見せると、その時の出来事の記憶（エピソード記憶）がよく想起できることが知られており、これは文脈依存記憶と呼ばれている^[10]。行動とともに時々刻々変化していく本人の視点からの映像を見せることは、それぞれの瞬間の環境の状況を想起する手掛かりを与えることになることから、その状況下で自分の中におきた認知や判断を想起し、それを報告するために有効に働くと考えた。

過去の自らの行動を映像記録で再度体験しながらその時の認知過程を逐一発話させる場合には回顧的発話プロトコル法とみなせる。一方、実験実施者側が注目したい行動だけを取り出してその認知や判断過程を答えてもらう場合にはインタビュー形式になるので、それを回顧的インタビュー法と呼ぶことにした。製品やサービスを設計する目的で使う場合には、生活行動のすべてについて発話してもらう必要はないので、設計に関連する可能性のある行動をインタビュアーがピックアップして質問する回顧的インタ

ビュー法となる^[3]。

3.2 クロノエスノグラフィ

社会での人の営みを理解するために、エスノグラフィ（Ethnography）という社会学の方法論がある^[11]。人々（＝エスノ）を記述（＝グラフ）するという意味であり、社会集団の中に入り込んで社会の構成員の行動を観察して、その人達にインタビュー等をして、その社会での人々の営みを言語によって記述する研究方法である^[4]。実生活の状況の中での認知行動に注目して人の営みを記録・分析するという意味において、回顧的発話プロトコル法や回顧的インタビュー法は認知科学的手法とエスノグラフィの方法を組み合わせたものと言える^[5]。本来エスノグラフィはありのままの社会の営みを理解するためのものであるが、製品やサービス設計につなげていくためには、次節で述べるような実験的な統制も組み込んだ方法が有効である。人間を理解・認識するためだけの研究からは、製品やサービス設計に活かせる知見を得ることは難しいからである。

ある特定の人が製品やサービスを有り難いと感じるかどうかは、その人がどういった認知特性を持ち、どういった履歴を持ち、どういった経緯の下で現時点でのその人となったのか、という時間的履歴に依存することから、それを陽に扱うこととした。したがって、時間的に変化する人であることに注目して、その場の状況下におかれた人の認知過程を詳細に記述して明らかにするという意味で、時間を意味する Chrono- と認知を意味する Cognitive をエスノグラフィ（Ethnography）に付加して認知的クロノエスノグラフィ法（CCE）と命名した。

3.3 エリートモニターとクリティカルパラメータ

製品やサービス構築のために人の認知行動を明らかにしたいという企業との共同研究をきっかけとして、高齢者の駅内での移動や自動車運転といった生活場면을対象として、頭部等につけた小型カメラによって行動シーンを記録した映像を使った回顧的インタビュー法を実践的な方法として適用していくなかで、認知的クロノエスノグラフィ法を開発していった。紙面の制約上詳述できないが、調査対象者のタイプを、事前の仮説に基づいて選定して、それを実験参加者とするすることで、個人の特性ごとの行動特徴を明確化できることが分かった。高齢者の駅内での移動の場合でいえば、高齢者の認知機能の違いの仮説として、注意機能が衰えているもの、作業記憶機能が衰えているもの、プランニング機能が衰えているものがあるとして、この違いがでやすいような実験計画を立てることで、この仮説の検証を行った^[12]。さまざまな個性を持っている人を対象とする場合には、このようにその個性のタイプ分けについての仮説を設けて、その仮説に基づいて典型的なタイプの人を

選定する方法を考案し（上記の例では、AIST 式認知機能検査を開発）、選定された異なるタイプの人の行動を比較することで、その仮説を確認するかたちで個性による行動特性の違いを明確にできた。この典型的なタイプの人の実験参加者のことを、エリートモニターと呼ぶ。エリートモニターを用いることで、個性に対応した製品・サービス設計のための手掛かりを得ることができる^{注6)}。このように、個性の違いに対する仮説検証型の（アブダクティブな）研究方法と、回顧インタビュー法という研究方法を統合し、製品やサービス設計に有用な知見を提供する認知的クロノエスノグラフィ法を構築していった。

エスノグラフィ研究があるのままを記述することが重要であるとしているのに対して、製品・サービスを設計するための構成的方法がとるべきアプローチにおいては、設計のためのパラメータとして使う重要な要素（クリティカルパラメータと呼ぶ）を見いだすことが重要であると考えられる。クリティカルパラメータとは、例えば、実験参加者がターゲットユーザーであるかどうかを判断するためのパラメータや、提示した情報を有益と感じてもらえるための情報提供のタイミング等である。そのために、ありのままの観察等によってクリティカルパラメータの候補が見いだされたら、そのクリティカルパラメータを統制したり、クリティカルパラメータが記録できるようにしたうえで実場面を用いた実験を行った。この時、ターゲットユーザーとなりうる典型的な特性を持った人や研究の関心の対象としての典型的な特性を持った人（例えば、熟練したサービス提供者）を適切に選定して実験参加者とする中で、誰に対して喜ばれる製品・サービスにつながるかを明確化できることから、実験参加者としてエリートモニターを選定したのである。

3.4 研究手法としての実施手順

上述のような研究事例を通じて、研究の手法としての CCE を確立して行ったが、研究手法となるためには、特定の研究者だけが実施できるものではなく、広く使えるものでなければならない。そこで、研究事例を再検討して、研究手法として使えるよう全体のプロセスを明確化した。個別の事例に立ち返ると必ずしも最適な手法をとっていたとはいえない所もあることから、その改訂も含めて検討して、研究の実施手順を構築した。

大きな流れとしては、以下ようになる。調査に入る前には、関心対象の生活場面における人々や人との関係を観察・考察して仮説をつくり、それに基づいて適切な方法でエリートモニターを選定する。そして、実場面を用いながらもクリティカルパラメータを意識した統制下で行動を行わせ、モニターの視点からの映像を、統制できないパラメータ等他の関連するイベントとともに記録する。記録

された行動に対して回顧的インタビューを行って、認知行動過程を記述する。調査が完了した後、仮説の検証とともに製品・サービス設計のための知見を抽出する。

手順の詳細は参考文献の [13][14] に記載されているが、研究実施者の行うべき次の 6 つのステップに CCE を整理することができる。

- (1) エスノグラフィや行動観察等の基本的な調査法を用い、調査対象とする状況下の人の行動選択の構造の概略を明らかにする。
- (2) これまでに明らかになっている人の行動特性や認知特性を参考に、(1) での調査結果において、人の行動のどのような特性要素や知識また環境要因が行動選択に関与するかを考察し、クリティカルパラメータを定めておよその因果関係の構造の仮説を立てる。
- (3) この仮説を基に、調査対象の集団を構成するさまざまな人達から典型的な行動特性を備えたタイプを特定し、エリートモニターの選別基準と調査法を策定する。
- (4) エリートモニターを選定し、関心の対象となる状況を再現したなかで行動を行わせて、行動の記録を行う。
- (5) 記録された行動を手掛かりとして行動選択過程を分析して、(2) で立てた仮説と照合し、仮説の適否を考察する。
- (6) 調査結果が不満足なものであれば (2) に戻り調査法を再考して調査を行い、納得のいく結果に至っていれば、その結果から製品・サービス設計の参考になる知見を整理する。

以上は、研究手法としての認知的クロノエスノグラフィ法の開発の経緯とその概念的な整理である。第 4 章では具体例について述べる。

4 認知的クロノエスノグラフィ法の適用例

4.1 自動車運転時の気の利いた情報提供

運転を支援するために有益な情報提供をするカーナビを実現することを目的として、CCE を用いて自動車メーカーと共同研究を行った。有益な情報とは、運転者が嬉しいと思える情報と定義することができるが、そもそも実際に嬉しいと思える情報があるのかを検証することから始めた。機械であるカーナビと比べると、同乗している人間であれば嬉しいと思える情報提供ができるように思いがちであるが、実際には必ずしもそうではない。そこで、運転者が嬉しいと感じられる情報を提供できる助手席乗員を作り上げることを研究プロセスの一部とした。同じ情報であっても運転者によって嬉しいかどうか異なることから、助手席乗員が運転者を良く知っていることが要件となる。したがって、単なる助手席乗員と運転者ではなく、気の利いた情報を提供できる乗員と運転者との関係をエリートモニターを決めるクリ

ティカルパラメータとした。

運転者のことを良く知る助手席乗員を得るために、夫婦や友人等普段から頻繁に同乗している2人をWebアンケートで募り、1,600名の中から「おせっかい」「マメ」「気が利いている」といった質問に対する答え等を元に、エリートモニター候補として10組の運転者と助手席乗員になるペアを選定した。そして、インタビューを行って、2人のどちらも気が利く人であることを確認するとともに、2人のうちの一方は良く知っているが他の人は知らないような目的地を選定してもらい、良く知る方の人にそこへのルートにおけるアドバイスのポイントを記述させた。このインタビュー結果を精査し、気の利いた情報が数多く提供されることが期待される4組をこの実験に参加するエリートモニターとして選定した。

このようにして選定したモニターであっても、その人が気が利いていると思って提供する情報が運転者にとって本当に有り難いと感じられる内容であるかは明らかではなく、単にそう思い込んでいる可能性もある。そこで、この問題を解決するために、この研究では3回の走行を行う実験デザインとした。最初の走行では、気が利いていると助手席乗員が思っていることにしたがって、情報提供を行わせた。走行後に走行中の道路シーンも含めて記録された対話のビデオ映像を両者に見せ（図1）、運転者側からみて提供された情報が気が利いていたかの評価をさせた。そして、どの点が有り難かったのか、また、そうではなかった場合にはどこに問題があったか等を回顧的インタビューによって抽出した。これによって、運転者が何を有り難いと感じるかを助手席乗員に理解してもらい、第2回目の実験を行った。第2回の走行の終了後も同様のことを行ったが、他の組の実験から得られた知見も開示し、気が利くと感じるためのポイントを共有して、第3回目の走行を行った。さらに、運転者と助手席乗員を相互に入れ換わることも行い、両方の立場から気が利いた情報とはどういうものかを考えてもらえるようにした。目的地までの経路に詳しく、互いを熟知し、また運転者にとって嬉しいと思う情報提供がどのようなものであるかを知ったエリートモニターを用いることで、

表1 提供された情報を記述するための属性

属性	説明	値
提供内容	発話により提供された情報	具体的な内容
提供方法	情報の伝え方	タイミング、指示方法
道路状況	発話時の道路の状況	道幅、速度等
ドライバー状態	発話時のドライバーの状態	運転余裕度、前提知識

表2 助手席者の情報提供の動機

運転行動修正	助手席者は現在の状況において、ドライバーが運転を進めるのに際し、ある運転行動が必要だと考えるが、ドライバーがその行動をとらない可能性があると思ったとき
運転行動支援	助手席者は現在の状況において運転者が運転を進めるのに際し、ある運転行動が必要だと考えるが、運転手がその運転行動をとる可能性があるが、情報を与えることによって運転行動が促進されると考えたとき
補助情報の充実	助手席者は現在の状況において、運転手がある知識を得ることによって、ドライブの満足が高められると思ったとき

いわば理想化された運転支援のための情報提供を明らかにすることができた^[15]。

このような手順で抽出された対話内容は、右左折等の道案内に関するもの、安全でスムーズな運転のためのもの、周辺スポットの情報等に分類された。そして、それぞれの提供情報について、情報内容、タイミングや指示方法等の提供方法、道路幅等のその時の道路状況、余裕があるか等の運転者の状態を記述した（表1）。提供内容とともにこれらの事項によっても気の利いたものか否かが変わってくるので、クリティカルパラメータである。抽出された提供情報の中から、気が利いているとみなせる提供情報を、運転行動を修正させるもの、運転行動を支援・促進させるもの等に分類した（表2）。例えば、運転行動の修正とは、現在の状況においては運転者にはある運転行動が必要である（例えば、早めの車線変更等、その行動があると後が楽になること）と助手席乗員が考えるが、運転者がその行動をとらない可能性があると思った時に提供される情報のことである。交差点を過ぎて交通の流れがスムーズになった時等の適切なタイミングで、その情報を提供すると、気の利いたアドバイスと感じるの



図1 トリップ中のモニターの様子

である。このようにして、気の利いた情報提供の構造を明らかにすることができた。

4.2 野球ファンの成長過程

自動車運転における気の利いた情報提供では、知らない目的地へのトリップというシナリオを設定し、かつエリートモニターも作り上げる（すなわち育て上げる）研究方法であるので、シナリオ型の CCE と呼ぶ。これに対して、シナリオを用いずに、実生活場面での人の観察を中心としたアプローチもあり、それを非シナリオ型の CCE と呼ぶ。その例として、野球場での観戦行動の研究に適用した事例を示す。

スポーツ観戦の機会を提供するサービスにおいては、まず野球場やサッカー場に足を運んでもらうことが必要で、その上でどのような体験を野球場等で提供できるかが課題となる。スポーツ観戦に訪れる人は、初めて競技場に来る人もいれば、何回も訪れているいわゆるリピーターもいる。ただし、このリピーターであっても、いつかの時点では初めて来た時があったはずである。その前は、テレビを介してスポーツ観戦する人であり、それがさまざまな体験や情報によってリピーターとなったと考えられる。どのようにしてリピーターに成長していったか、その遷移の構造を明らかにすることが研究の目的である。

野球観戦のリピーターの野球の楽しみ方を決定するクリティカルパラメータを検討した。一つ目は野球場に行く目的や楽しみ方、二つ目は球団についての周りの人との情報交換の程度、三つ目は観戦における球団ファンとしての気持ちの強さ、四つ目はその人のパーソナリティ（行動性向）である。これらの観点から、球団のファンクラブの会員を対象とした 1,000 名規模の Web アンケート調査の回答を元に、30 名のエリートモニター候補を選定した。この時に、アンケート結果のクラスタ分析から分かった「観戦は自分の楽しみのため」「家族で楽しむ」「楽しむが本格的ファンになりたいわけではない」の三つの楽しみのタイプからそれぞれ男女 5 名程度選定し、それぞれに他のクリティカルパ

ラメータが異なるものが含まれるようにした。そして、30 名に対してグループインタビューを行い、これに基づいて、野球自体を楽しむのか、応援することを楽しむのか、という楽しみ方の軸と、試合だけでなくファンサービスイベントにまで行くファンなのか、野球は好きだがあまり観戦には行く時間がとれていないのか、というファンの熟成度の軸からなる 2 次元平面上にこの人達をマップして、そのマップ上で偏りがないように 9 名をエリートモニターとして選定した。そして、エリートモニターに実際に球場への観戦に行ってもらい、その観戦の様子として、モニターの状態、ゲームの進行状態、スタンドの様子をビデオで記録するとともに、観戦中での身体の興奮状態を測るための生理指標として心拍数を計測した。この映像を見せながら回顧的インタビューを行って観戦時に感じたこと等を抽出するとともに（図 2）、これを手掛かりにして各エリートモニターが過去にどのような観戦行動をとってきたのかについてもインタビューで調査した。

これらの調査から、ファンのステージとしては、「野球を知らない / 知っているがプロ野球の戦況には関心ない」といったプレファンの状態、「球団のことが好きになって球場に観戦に行くようになる」というファンの状態、そして「積極的に観戦に行き、自分の観戦スタイルを持ち、時間を作っても観戦に行く」というリピーターの状態の三つのステージに分けた（図 3）。そして、プレファンからファンになるきっかけは、スター選手の入団、リーグ優勝への期待、たまたま誘われて行った球場で見たファンの応援の様子に驚き感動したこと、等が挙げられた。ファンからリピーターになるきっかけは、テレビでは伝わらない球場での一体感のような体験や選手についての詳細な知識が増えた時、家族や同僚等と一緒に観戦する仲間ができた時、等があることが分かった。そして、これらの遷移はいくつかのパスがあるが、「野球を知らなかった人」は球場に行ってみてその盛り上がり驚いてファンになり、主体的に応援に参加する



図 2 野球ファンへの観戦後のインタビュー

か、応援と野球そのものを全体として楽しむ人になる、「野球を知っていて、プロ野球に関心のあった人」は生の試合を知って選手やチームに感情移入をし、試合を楽しむまたは試合と応援とを楽しむ人になる、といったパターンがあることが認められた(図4)。このようにCCEを用いることで、野球にほとんど関心がなかった人がどのようにリピーターになり、どのように野球を楽しむようになるのか、というファンの成長の構造を明らかにすることができた。

5 製品・サービス設計への応用

CCE法によってターゲットユーザーが欲しい、嬉しいと思う機能やサービスを設定するための手掛かりを得たのちは、それを製品やサービスの形にする研究開発プロセスに入る。例えば、気の利いた助手席乗員からのタイミングの良い有益な情報が、いつ何について提供されるかが分かった場合に、それをカーナビシステムから提供することを開発目標にしたとする。良いタイミングで情報が提供されるかが気が利いていると感じるかどうかのクリティカルパラメータであることから、そのタイミングをシステムが判断できる

かどうかは技術課題となる。そのために、情報提供の提示タイミングの判断や内容をルールに明文化し、それに正しくのっとって情報提供させる実験を行った。これは人間によって情報提供を行うが、臨機応変に情報提供を変えるのではなく、マニュアルにのっとることで、このルールに基づいて構築したシステムによる情報提供を模擬したものになる。さらに、この研究では、同乗しないと交通状況や運転者の状態によるタイミングの判断が不可能かどうかを検討するために、別の車両に乗車した情報提供者が、通信を介して得られるカメラ映像や音情報をもとに適切なタイミングで情報提供できるかどうかを検討した。この研究は現在も進行中であるが、別車両から通信を介して情報提供をさせることで、何を手掛かりとしてタイミングを判断しているかが明らかになり、センサー等を用いてシステムがタイミングを判断できる可能性があるものが分かってきている^[16]。機器による情報提供であれば、こういった研究プロセスを経て、製品が持つべき機能が明確になり、実現すべき製品の機能が具体化されてくる。

サービスの場合についても、例えば、野球ファンが「たまの観戦」から「リピーター」になるステージアップのきっかけが何であったかが明らかになった場合には、球団サイドが行うべき施策の検討を行う。どのようにして対象者にアクセスして、どのような形できっかけを提供できるか、またそのためのインセンティブをどのように設定するか等を決めることになる。もちろん、これらの案は一つではなく、複数考えられる。

製品であってもサービスであっても、このようにしてCCE法で得られた知見に基づいて設計案を構築し、実現すべき機能を備えたプロトタイプや施策の要求仕様の具体化を行う。そして、その実現方法を検討し、現在の技術レベルやサービス提供環境も考慮にいれ現実的に実現可能な

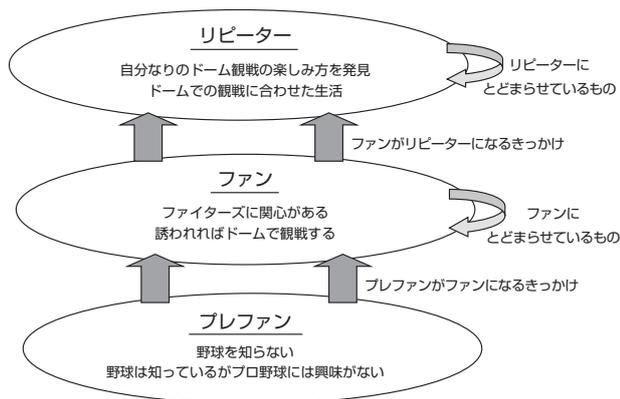


図3 ファンとしての成熟度を示す3つのステージ

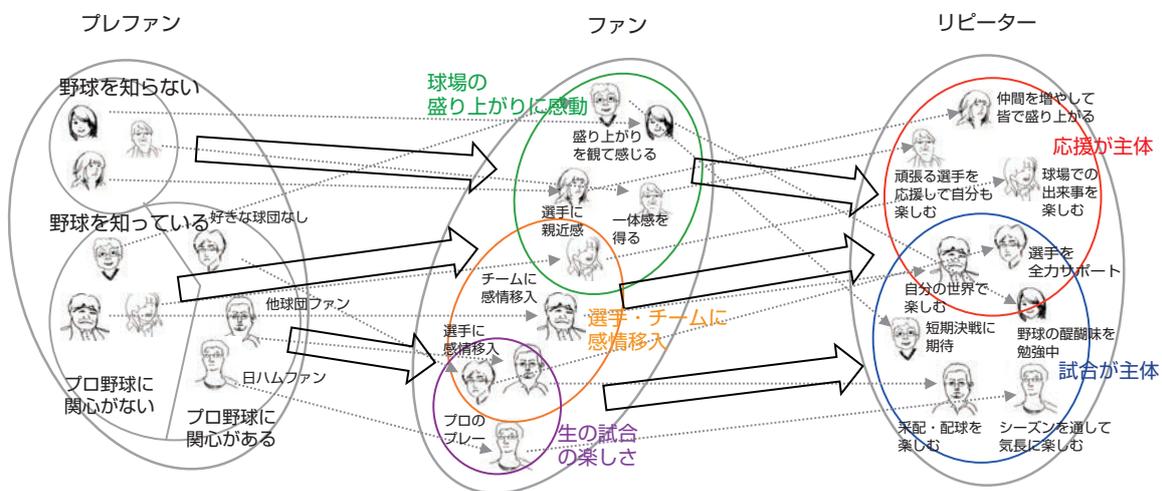


図4 ファン状態の遷移のパス

仕様に落とし込む。場合によっては、現在の技術レベルでは実現できないという判断をし、断念することもある。そして、その仕様に基づいたプロトタイプを構築し、想定されているターゲットユーザーを用いて、狙っている状況下で試用実験を行い、その評価を得ることになる。製品の場合には、時間を含めて開発コストがかかることから、最終的に誤った方向に行ってしまうように、開発プロセスのさまざまな段階で実験評価を行う必要があるが、サービスの場合には、製品に比べてサービスの施策を試行し易いことから、実際のサービス提供プロセスの中に早く組み込むことができる。そして、それを実行して、狙ったユーザーに対してサービス設計者が想定したサービスが提供できており、そのサービスの効果が上がっているかを調べ、効果が上がっていないかどこに問題があるかを把握して、施策を改良するといったサイクルを回すことで、仮説の検証を進めるとともに提供するサービスをよりユーザーに適合したものにすることを旨とする¹⁷⁾。

6 考察

技術を統合して社会で使われるものを実現する時の構成の考え方は、技術分野によって違いがあることを、シンセシオロジーの論文の分析から小林らは指摘している¹⁸⁾。例えば、ナノテクノロジーや材料・デバイスといった物質そのものを扱う研究分野であれば、自然科学の知識を駆使して、対象物に影響を与える要因や要素技術を明らかにして、それに基づいて構成のために何をなすべきかを選択して決めることができる。これに対して、ライフサイエンスの一部や人間生活を扱う研究分野では、要因が多だけでなく、未知の要因も多く残されていることから、製品やサービスを社会導入してその評価を得ながら進展させるといったスパイラル的なアプローチがとられることがある。しかし、この時に最初に導入される製品やサービスが社会に受容される見込みの高いものでないと、スパイラル的なアプローチであっても浸透はしていかない。そういった失敗をしないためにも、製品・サービスが受容されるための要因や要素技術を可能な限り明確化して、事前に検討できる方法が必要である。CCEはターゲットユーザーの実際の使用場面における変数をできるだけ抽出して構造化する方法であり、対象とする認知行動に影響を与える要因を明確化して構成のために何を選択すべきかを決めるという意味において、物質を扱う研究分野での構成的研究と同様のアプローチをとることを目指したものである。

物質を扱う研究アプローチと似ているとはいっても、自然科学的な厳密さをもつことはできない。エリートモニターやクリティカルパラメータの選定に対して、仮説検証的な

フィールド実験を行うが、その結果に対して統計的検定によって仮説の妥当性を示すことは困難である。CCEでは、エリートモニターのタイプごとの実験参加者はたかだか数名程度である。フィールド実験で状況がある程度一定にしようとするだけでも、1日に1～2回のチャンスしかないことが多い。例えば、鉄道利用であれば、混雑度の影響を避けようとする実験を実施できる時間帯は限られる。また、実生活場面で行った行動は全く同じ行動というものはなく、定性的な分析にとどまることが多い。例えば、あるタイプの実験参加者数名のうちの過半数が同様の行動をとり、かつ他のタイプではほとんどみられなければ、タイプ分けの仮説が間違っていないと判断することになる。したがって、自然科学的な意味での仮説検証にはなっていない。実験規模を大きくすれば自然科学的な仮説検証も可能との期待もあるが、実生活場面では同一の状況が繰り返して存在することはないと考えると、再現性という観点での検証は本質的にできないと考える方が妥当である。したがって、厳密な検証を目指すことに時間をかけても、無益な結果しか得られない可能性が高い。私達が製品やサービスを利用している日常生活は時々刻々変化しており、二度と同じ状況下におかれることはないことから、そもそも、自然科学的手法に頼ることの限界があることを認識しておく必要がある。しかし、だからといって、事象に対する影響要因をできるだけ精緻に理解するという自然科学的な研究態度を放棄しては、製品やサービスが社会に受容されるまでのギャップを短くすることはできない。

実生活場面を使うという点において、CCEは社会学的方法に似ているが、社会学の方法としてのエスノグラフィは社会における人の行動をできるだけありのままに記述することで、社会という人間集団内に共通する行動原理を見いだすこと、すなわち社会を理解することを目的としている^{14)注7)}。これに対して、CCEは個人特性の違いを明確化し、状況設定をする等実験的統制を行っている。これは製品やサービスを構築することを目的とした構成的研究アプローチのためであり、エリートモニターやクリティカルパラメータにより製品やサービスを設計する手掛かりを得ることができる。CCEによる知見に基づいて製品やサービスを構築して、その評価のサイクルを回しながら製品やサービスがユーザーにより受容されていけば、そのことが得られた知見の正しさを検証することになるとともに、社会に受け入れられる製品やサービスを導入することになる。

開発者の頭の中だけで考えて良い製品やサービスを構築することは容易ではない。CCEを用いることで、製品やサービスを効果的に設計することができる。また、その使用に対する評価においても、これに基づいて視点を明確化する

ことで、改良・最適化のサイクルが有効に働くものと考える。

注1) 実験室を使って刺激等を統制して人間の感覚知覚特性を明らかにする実験心理学は、1879年にライプチヒ大学のWundtによって始められた。しかし、Wundtは同時に思考や問題解決等の高次の認知機能については実験室的な研究方法では説明ができないとして、実場面での心理学の必要性を指摘している。

注2) こういった脳のメカニズムを考慮した行動選択過程の計算モデルとしてMHP/RTがあり、認知的クロノエスノグラフィ法の理論的枠組みを提供しているが、その説明はここでは紙面の都合上割愛した^[13]。

注3) 回顧的インタビューは行動選択時に活性化された記憶の内容を被験者に報告させるために行われる。行動選択時に活性化された記憶は、その時の状況とともに符号化されて記憶される。そして、その時の記憶を再生する検索時の文脈が、符号化時の文脈と同様な場合に、再生成績が良いことが知られている（記憶の文脈依存性）。また、被験者が報告する際には、インタビュアーの質問の仕方が報告の内容に影響を及ぼすことが知られている。何らかの出来事を経験した後にその出来事に関連した情報を与えられると、目撃者がオリジナルの出来事の記憶ではなく事後に与えられた情報もしくはオリジナルの出来事と事後の情報を混合した内容を報告する「事後情報効果」という現象が知られている。また、被験者の行動選択は意思決定の特徴である限定合理性（全体としてのゴールを考えた合理的な判断ではなく、限られた視点で限られた手掛かりだけから判断すること）のもとに行われる。CCEの重要なプロセスである回顧的インタビューは、限定合理性にしたがって認知行動過程を事後情報効果を受けずに取り出すことができるように構築したものである。

注4) 技術移転の手法として、対象組織に入り込んで問題解決する社会学的方法の有効性は、木下らによって主張されている^[19]。

注5) 認知科学におけるエスノグラフィ的研究として有名なものが、E. Hutchins らによる航空機の操縦室内のクルーの認知過程の研究であり、操縦室内に同乗して行動観察をしたのちに、インタビューを行っている。

注6) ある商品を利用するであろうと想定されている人達のことをターゲットユーザーと呼ぶが、個性を持ったターゲットユーザーを意識した製品開発のための手法としては、ペルソナ法が広がっている。しかし、この方法は開発プロセスにおいてターゲットユーザーを明示化するための方法であり、実際にその想定されるユーザーがその製品・サービスを使った時にどのように評価するかは、開発者の想像の範囲にとどまってしまう。

注7) 社会学でのエスノグラフィ的な研究方法のなかには、社会や組織における問題を見だし、その問題解決法を見出すことを目的としたアクションリサーチと呼ばれる研究手法がある。

参考文献

- [1] 明渡 純, 中野 禅, 朴 載赫, 馬場 創, 芦田 極: 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-, *Synthesiology*, 1 (2), 130-138 (2008).
- [2] 鎌田 俊英, 吉田 学, 小笹 健仁, 植村 聖, 星野 聰, 高田 徳幸: フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発 - 「どこでもデバイス、誰でもデバイス」の実現に向けて-, *Synthesiology*, 1 (3), 190-200 (2008).
- [3] 碓井 誠: サービス産業の進展と価値共創社会, *図鑑ゼン・イレブン流サービス・イノベーションの条件*, 160-170, 日経BP (2009).
- [4] 中島 秀之, 橋田 浩一: サービス工学としてのサイバーアシスト-10年早すぎた? プロジェクト-, *Synthesiology*, 3 (2), 96-111 (2010).
- [5] 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-聴覚特性と生活環境音の計測に基づく製品設計手法の提供-, *Synthesiology*, 1 (1), 15-23 (2008).

- [6] ルーシー. A. サッチマン, 佐伯 胖監訳: プランと状況的行為-人間-機械コミュニケーションの可能性, 産業図書 (1999).
- [7] 佐藤 雄隆, 坂上 勝彦: 安心・安全な次世代モビリティを目指して-全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす-, *Synthesiology*, 2 (2), 113-126 (2009).
- [8] 甲 洋介: 発話プロトコルによる思考過程の計測, *人間計測ハンドブック*, 朝倉書店 (2003).
- [9] 赤松 幹之, 笠原 亨, 小畑 貢: 運転行動の記録映像に対するドライバー自身による言語報告に基づく運転タスク分析, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 4 (2), 93-102 (2002).
- [10] S. M. Smith and E. Vela.: Environmental context dependent memory: A review and meta-analysis, *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 203-220 (2001).
- [11] U. フリック (小田 博志, 山本 則子, 春日 常, 宮地 尚子訳): *質的研究入門*, 春秋社 (2002).
- [12] 北島 宗雄, 熊田 孝恒, 小木 元, 赤松 幹之, 田平 博嗣, 山崎 博: 高齢者を対象とした駅の案内表示のユーザビリティ調査-認知機能低下と駅内移動行動の関係の分析, *人間工学*, 44 (3), 131-143 (2008).
- [13] 北島 宗雄, 内藤 耕編著: *消費者行動の科学-サービス工学のための理論と実践*, 東京電機大学出版局 (2010).
- [14] 北島 宗雄, 豊田 誠: *認知科学に基づく人の行動生態の調査手法-CCE(Cognitive Chrono-Ethnography)の実践的概説*, オンブックス (2011).
- [15] 丸山 泰永, 黒田 浩一, 加藤 和人, 北崎 智之, 箕輪 要佑, 稲垣 和芳, 梶川 忠彦, 北島 宗雄, 赤松 幹之: ドライバにとって有益な情報の要因に関する一考察, *自動車技術会論文誌*, 40 (2), 537-543 (2009).
- [16] 箕輪 要佑, 稲垣 和芳, 梶川 忠彦, 黒田 浩一, 大森 啓史, 北崎 智之, 北島 宗雄, 赤松 幹之: 「ドライバにとって有益な情報」の有効性を確認するためのナビゲーション疑似システムによる実験の検討, *自動車技術会2010年秋季学術講演会前刷集*, 99-10 (2010).
- [17] 内藤 耕編: *サービス工学入門*, 東京大学出版会 (2009).
- [18] シンセシオロジーワークショップ: オープンイノベーションハブに向けた技術統合の方法論, *Synthesiology*, 4 (1), 52-58 (2011).
- [19] 木下 佳樹, 高井 利憲: 臨床情報学のための野外科学的方法-技術移転の方法論に向けて-, *Synthesiology*, 3 (1), 36-46 (2010).

執筆者略歴

赤松 幹之 (あかまつ ともゆき)

1983年慶応義塾大学大学院工学研究科管理工学専攻博士課程修了(工学博士)。1986年4月工業技術院製品科学研究所入所。皮膚感覚の研究、感覚運動統合の脳機構の研究、コンピュータ入力デバイスの研究、ITSヒューマンインタフェースの研究、自動車運転行動の研究等を行う。現在、産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門研究部長。筑波大学連携大学院教授も務める。この論文では、他研究との比較や関連性を整理して、この研究の構成学としての位置付けを行い、全体の論旨を構成した。



北島 宗雄 (きたじま むねお)

1980年東京工業大学理工学研究科物理学専攻修士課程修了(工学博士(1986年早稲田大学))。1980年4月工業技術院製品科学研究所入所。視覚障害者用読書器の研究、ヒューマンコンピュータインタラクションにおける認知モデリングの研究、聴覚障害者を対象とした



ユーザビリティの研究、日常の行動選択の研究等を行う。現在、産業技術総合研究所サービス工学研究センター主幹研究員。この論文では、認知的クロノエスノグラフィ法の開発と適用を担当した。

査読者との議論

議論1 筆者らの考え方と行為の強調

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

この研究は大変興味のあるもので、筆者らは構成学の新しい学問領域を作りつつあるように見えます。それに対して、この論文の記述がやや解説的、平面的になっているのが気になります。筆者らがどういう意図で、何を選択し、何を決断したかについて、筆者らの考え方と行為を強調して記述していただいた方が、読者は構成学としてのこの研究の意義をよりよく理解できると思います。

回答（赤松 幹之）

この論文は自分たちの行ってきた研究を構成学としてとらえ直すだけでなく、構成学の全体像をおぼろげながらも考えながら、この研究を位置付けることを目指して執筆したものです。そのために、そもそも製品開発とそのユーザーである人間との間をつなぐ考え方をレビューしたうえで、自らの研究を位置付けようとしたことから、やや解説的な記述が多くなってしまったものです。そのために、主張点が不明確になったと思われるので、主張すべきところは明確になるように表現等を修正しました。

議論2 認知的クロノエスノグラフィ法の検証

質問（小野 晃）

認知的クロノエスノグラフィ法（CCE）の興味ある研究事例が二つ載っており、成果が着実に蓄積されていると思います。一方それらの成果をカーナビの設計や野球興行等に適用したのち、ユーザーによる評価を受けて検証するところまではまだ至っていない状態と理解してよろしいでしょうか。一方、これまでのCCEの研究方法が十分妥当であったのか、あるいはそうでなかったのか等、現時点でこれまでの研究成果をどのように検証・評価したらよいのでしょうか？

質問（持丸 正明：産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター）

量的な検証を議論しない点で、この研究の方法はプロセス標準の考え方に似ていると感じました。プロセス標準だと手続きと手続きを確認する方法が標準化され、プロセスをきちんとやったかどうかを現認できることと、さらにそのプロセスを考案した人以外が実施できることが不可欠です。これと同様に、CCEの手続きにしたがえば、誰にでもできるのでしょうか？

回答（赤松 幹之）

この研究の成果を市場に出す製品やサービスに反映させるためには、製品開発のための時間がかかることもあり、ご指摘のように実際のユーザーによる評価にまで至っていません。技術やサービスが社会に受け入れられることが検証となるという立場からすると、現時点では検証できていないと言わざるをえません。

しかし、社会に出す以前に、CCEで得られた知見に基づいて、製品化やサービス設計を実施するゴーサインを出すかどうかを決めるための根拠が求められます。そのために私達はさまざまな模索をしているわけですが、現在の私達の考えは、手順（プロセス）の妥当性と得られた結果の納得性で評価をすることです。手順の妥当性は、例えば実現したい製品やサービスのターゲットユーザーの特性が抽出できる手順になっているかどうかです。しかし、プロセスを正しく行えば、いわば機械的に正しい結論に至るはずであると考えているわけでもありません。したがって、何らかの手順や結果の評価が必要と考えています。この評価は、対象となる製品やサービスをよく理解している人でないと困難である可能性があります。それはいわばビ

レビューのようなものと言えます。このことから、このような研究においては、製品やサービスを良く理解している人、すなわちこれらを提供する企業の方でよく分かっている判断できる方々との共同研究を行うことが重要であると考えます。

議論3 他のSynthesiology論文の参照

コメント（小野 晃）

この研究論文では、*Synthesiology*誌に掲載された他の研究論文を引用しつつ、論を展開しています。構成学の研究が、内容は多様であっても、相互に得るものがあることが望ましいと査読者は考えますが、今回参考文献に引用してみ、それがこの研究に対してどのような効果を発揮したか、筆者の立場から表明していただけるとありがたいです。

回答（赤松 幹之）

この論文に記載した研究自体は10年以上前から行っていたものですが、当時から自分達の中では第2種基礎研究をしているという意識がありました。しかし、この研究は人間の行動特性を解明するという意味で分析的な研究であることから、要素技術を統合・構成して社会で使われるモノを実現するという構成的研究を掲載しているシンセシオロジーの論文としてどのような論旨で書くことができるか見通しがたっていませんでした。ところが、文献18として引用したワークショップにおいて、分野による構成学のアプローチの違いを議論し、物理学に代表されるような自然の原理が支配している分野の研究、要素技術を組み上げることを意識して行う工学的研究、そして製品の形で人に使ってもらうための研究という段階に分けて、それぞれのアプローチの特徴を議論したことで見通しがつきました。というのは、材料系の研究で物性を追求することで何が実現できるかが分かってくるという研究アプローチに、私達の研究との類似性を見出すことができたからです。分析によって人の認知行動が明らかになれば、どのような製品やサービスを実現できるかが分かってくるからです。よく知ることが、ものを作るための指針を得ることにつながるという点で共通していると言えます。私達の研究は人に使ってもらうための研究ですが、同じ人間生活分野であっても、まずモノを作ることを考える工学的研究と、私達のようなまず理解をすることから始める研究という対比ができるようになり、シンセシオロジーの論文としてまとめることができたと感じています。

議論4 認知的クロノエスノグラフィ法の理論的背景

コメント（持丸 正明）

この論文の技術の中核となっている認知的クロノエスノグラフィの特徴が、先行する他の方法と比較してよく整理されています。引用文献を読むと、CCEが認知科学に立脚して作られたという理論的背景まで理解できます。この論文でも、理論的背景に触れていただき、この論文を読むだけで理論的背景が把握できるほうが読者に有益だと思います。

回答（赤松 幹之）

CCEを開発した背景には、ある状況下での限られた手掛かりを用いた行動選択プロセスを事後にどのようにして把握するか、という課題を解決する必要があるとの認識がありました。実際には限られた手掛かりだけからの行動選択にもかかわらず、あたかも全体合理性にしたがった行動選択であったかのように記述してしまわないように、行動選択を行ったときの状態を再現し、その時と同じように作業記憶を使って認知プロセスを表出してもらうことによって、これを解決しようとしています。全体合理性による説明に陥らない方法は古くはバーバルプロトコル法にさかのぼり、回顧的インタビューやCCEも基本はこれに立脚していますので、3.1節の始めの部分に加筆して明示的に行いました。なお、理論的背景に関心をもつ関連研究者のために、理論的な側面については注4)として追記しました。

議論5 初期仮説

質問1 (持丸 正明)

行動観測にはある程度の初期仮説（調査、観察等によるクリティカルパラメータの設定とエリートモニターの選択）が必要であり、この初期仮説に基づいて設定した文脈、場に応じた結果しか得られないとも言えます。そういう意味では、初期仮説を構築した時点で、CCEによって「掘り起こせるであろう知見」の枠組みをあらかじめ決定している面があるのではないのでしょうか。初期仮説をできるだけきちんと構築するためのプロセスというのはできあがっているのでしょうか？

回答1 (赤松 幹之)

ご指摘のように、クリティカルパラメータの設定とエリートモニターを選択が大変重要で、これによって得られる結論の枠組みを決めることになりますが、CCEは初期仮説を検証することを目的とした仮説検証型の研究のための手法ではありません。なぜなら、検証する仮説はあくまでクリティカルパラメータやエリートモニターの選定といった製品やサービスの枠組みを決めるもの（カーナビや競技場での観戦）であって、その製品やサービスが提供するコンテンツの枠組みを直接的に決めるものではないと考えます。CCEの手順は、製品やサービスを設計するための手掛かりを得やすくするための手順であり、初期仮説を設けることによって、仮説なしでやっちゃって結論が見えてこないことを避けることができると考えています。

いずれにしても、初期仮説は極めて重要ですが、現時点における私達の考えは、初期仮説を構築するときには、研究者としての洞察力を可能な限り駆使しながら、できるだけ思い込みを排除して対象を眺めよ、ということになります。経験的に言えば、思い込みを排除して仮説を構築するためには、対象とする人の特性についての種々の知識や、構築することを想定している製品やサービスの特性への深い理解が重要になります。それは他のさまざまな学問領域において研究に取り組むときの、最初の洞察と全く同じことであり、その最初の洞察の深さが研究成果の質を左右することになると言えます。

質問2 (持丸 正明)

回答にある「CCEの手順は、製品やサービスを設計するための手掛かりを得やすくするための手順であり、仮説なしでやっちゃって結論が見えてこないことを避けるためのもの」という部分がこの論文の本質をよく表しており、これを基にして「研究者としての洞察を駆使し、可能な限り思い込みを排除して初期仮説をつくり、それに基づいてCCEの手順を使うことで、見通しよく製品やサービスの枠組みを構成できるようになる」という研究の進め方だと理解しました。しかし、初期仮説を構築した上でCCEを活用する「研究の進め方」は、やはり仮説検証型ではないのでしょうか？ その検証は難しいですが、例えば、製品やサービスの枠組みが適切に構成され、いままでない製品やサービスが利用者や社会に受け入れられ、社会の変容につながったことが、初期仮説とCCE手順に沿った枠組みの構築が適切であったことの検証になるということではないのでしょうか？

回答2 (赤松 幹之)

仮説検証型の研究手法ではないと述べたのは、厳密な「検証」にはこだわらずに、仮説が間違っていないようであれば、その仮説に基づいて製品やサービスの機能を設計する段階に研究を進める（あるいは、現状の技術では実現できないと断念する）という研究シナリオをとるということです。もちろん、設計した製品やサービスの機能がユーザーに適合することができ、結果的にユーザーや社会に受け入れられれば、仮説が正しかったという検証になるのですが、この論文での研究シナリオの目的は構成すること（構成学）であって、仮説

検証によって認識するためのものではない（認識学ではない）とあえて主張したいと思います。

具体的な例で言えば、高齢者の駅内の移動の研究では、仮説は「高齢者の認知機能低下は幾つかの異なるタイプがあり、それは注意機能、遂行機能等の低下による」というものでした。この仮説に基づいて実験計画を立ててCCE実験をした結果、仮説を支持するように認知機能低下のタイプによって駅内行動が異なっていることが見出されました。このように機能低下のタイプの存在は検証されたと言えますが、この研究の目的は「機能低下にはタイプがある」という仮説を検証することではなく、その機能低下に応じた支援方法を考案することでした。（必ずしも積極的な案がでるとは限りません。注意機能低下群にとっては、いくら駅内に案内サインを設置してもそれに注意を向けられないので、サインは支援方法にならないことが分かりました。）このように、研究シナリオの一部には仮説検証のプロセスが含まれますが、それ自体が目的ではない研究方法と言えます。

議論6 行動観察における介入と実験設定

質問 (持丸 正明)

行動観測には、なんらかの介入を伴う場合があると思います。その介入が将来構成するところの製品・サービスに近いものでないと、介入による行動観測の深い理解をしても、よい構成方法に展開できないでしょう。例えば、リアルタイムでかなりの情報を処理して提示するとか、遠隔の情報を統合して何かを返す等のサービスの場合は、介入そのものにITを使わざるを得ず、その実験用ITの構成の如何が行動観測に影響してくるものと思われまます。こういうケースはどう考えたらよいのでしょうか？

回答 (赤松 幹之)

一つのアプローチは、例えば遠隔情報といった技術的な制約を所与の条件として、実験設定を行うことです。例えば、通信遅れがある場合に、どういった情報提供の仕方が喜ばれるのかを把握したいときには、擬似的に遅れを作って実験をすることができます。この技術的な制約をどれくらい所与の条件とするかは、例えば、機器やシステムはそのまま使いたくて、コンテンツだけ改良したいのか、機器やシステムの基本構造を変えても良いのか等によって違ってくると思います。

構成学のための方法としてのCCEでは、介入における制約条件を、実現しようとする製品やサービスの構成に合わせて決めることが重要であると考えています。ただし、あまり最初の段階で製品やサービスの構成を決め、それを所与のものとしてしまわないで、できるだけ前提としての制約のない条件下でCCEのクリティカルパラメータを選定する方が、これまでになかったような製品やサービスが生まれるものと考えています。

議論7 製品設計のための定量データ

コメント (持丸 正明)

CCEで得られる質的な仮説やモデルを、最終的になんらかの量的なデータに置き換え、それらを製品・サービスの設計に活かしていくのが典型的な流れかと思います。質的なモデルを、どのように量的なデータ、設計につなげていくべきか、お考えがあれば聞かせて下さい。

回答 (赤松 幹之)

製品設計に必要な量的データについては、提供コンテンツがCCEによってある程度具体化した段階で、一般的な人間工学実験によって定めることができます。CCEという手法は、製品の定量的な仕様を決める前段階、すなわち製品やシステムが備えるべき要件を見いだすために有効に働く手法と考えています。

緊急時に飲料水を確保するための技術

— 硝酸イオン選択吸着「材」 —

苑田 晃成

地下水は古くから清浄な飲料水源として使用されてきたが、近年、硝酸性窒素および亜硝酸性窒素による汚染のため、飲料水として用いられなくなった井戸も少なくない。緊急時にこれらを活用し、安全な飲料水を確保するため、「機動的浄水システム」の開発を行った。これは、私達の健康リスクとなる物質を除去・無害化するために開発した「硝酸イオン選択吸着剤」と、企業が開発した機能性物質の性能を低下することなく取り扱いが容易な形に成形する「非接触担持成形技術」を組み合わせることによって成し得たものである。「機動的浄水システム」の技術要素である硝酸イオン選択吸着「材」の開発を中心に述べる。

キーワード: 硝酸イオン、イオン選択吸着剤、非接触担持、飲料水、浄水

A novel technology for production of drinking water in emergencies

– Specific material for selective nitrate adsorption –

Akinari SONODA

Underground water has been used as a suitable drinking water source for a long time. In recent years, however, not a small number of wells have become out of use as a drinking water source owing to pollution with nitrate or nitrite. A mobile water purification system has been developed with advantages in portability and cost to utilize the polluted wells in emergencies. The system has been achieved by the combination of nitrate ion selective adsorbent developed in our group and contactless supporting and shaping technology developed by a company which enables formation of a material into easy-to-handle shapes without decreasing the performance of the functional material. This paper mainly describes the development of the nitrate ion selective adsorbent material, which is the important elemental technology in the mobile water purification system.

Keywords: Nitrate ion, ion specific adsorbent, distributed without any contact, drinking water, water purification

1 研究の背景:地下水汚染の現状^[1]

地下水の水質については、環境省より「地下水質測定結果」として公表されている。2009年度の概況調査結果^[1]によると、環境基準を超過した井戸の割合は約6%で、項目別では、「硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素」の環境基準超過率(3.8%)が最も高い。次いで「ヒ素」(1.0%)、「フッ素」(0.5%)、「鉛」(0.3%)、「ホウ素」(0.2%)の順となっている。上位3項目は環境基準項目が追加された1999年以降順番に変わりはない(図1)。2003年以降、図1の「硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素」に減少傾向が認められる。概況調査において、地下水汚染が発見された井戸は対象から外れるためと思われ、逆にその分、図2の井戸本数は増加しているものと思われる。

概況調査で汚染が確認された井戸は継続監視調査^[2]の対象となり、汚染の改善が確認されれば調査対象から除かれるため、継続監視調査の結果から汚染の存在状況の概ねの傾向を見ることが出来る。「硝酸性窒素及び亜硝酸

性窒素」は2004年度以降基準超過本数が最も高く、増加傾向にある(図2)。

過去5年間で環境基準を超過した井戸がある市町村は530市町村で、全市町村の31%を占めている。「硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素」の汚染原因は主に施肥、家畜排せつ物、生活排水からの窒素負荷で、汚染原因が多岐にわたり、また汚染が広範囲に及ぶ場合が多い。

「硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素」が一定量以上含まれる水を摂取すると、乳児を中心に血液の酸素運搬能力が失われ酸欠になる疾患(メトヘモグロビン血症)を引き起こすことが知られている。「硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素」の「地下水の水質汚濁に係る環境基準値」は「硝酸イオン」濃度と「亜硝酸イオン」濃度を「窒素」濃度に換算した和で、10 mg/L以下である。

地下水において環境基準を超える汚染が判明した場合は、都道府県および水質汚濁防止法政令市によって、1)人の健康を保護する観点から飲用指導等利用面からの措

置（飲用不可）、2) 汚染範囲や汚染源の特定等の調査、また、3) 地下水の用途等を考慮しつつ浄化等の対策の推進が行われている。

陰イオン交換体を用いて「硝酸イオン」を除去する試みは行われていたが、共存陰イオンが存在すると、その効果は限定的であった。そこで、これまで知られていなかった「硝酸イオン」に選択的な吸着剤^{注3)}の開発に取り組んだ(図3、図4、図5)。硝酸イオンに選択的な吸着剤はアルミニウムとマグネシウムの層状複水酸化物(Layered Double Hydroxide、以下、LDH)で、ハイドロタルサイトと呼ばれる鉱物(Mg_{0.75}Al_{0.25}(OH)₂(CO₃)_{0.125})とはMg/Al比とイオン交換性の陰イオンが異なる無機イオン交換体(Mg_{0.80}Al_{0.20}(OH)₂Cl_{0.20})である。これまでLDHのアルミニウム含量を多くすることで、イオン交換容量を増やす検討が数多くなされていたが、逆にアルミニウム含量を少なくすることで、硝酸イオンに対する選択性が発現する事を明らかにした。また、塩化物イオン型なので、海水のように塩化物イオンが大量に存在する中からも硝酸イオンを吸着

することができた。

一方、阪神淡路大震災以降、防災意識が高まり、地方自治体等においては緊急時に備えて浄水システムを導入しているところも少なくない。しかし、海水から淡水を製造可能な逆浸透(RO)システムは動力を必要とし、一般市民が感覚的に操作できるものではないため、より簡易な浄水システムを求める声があった。この研究開発では、ROシステムとは明らかに異なる「動力源を用いず、人力のみで稼働できる簡便な装置」というマーケットを目指し、試作機の作成を行った。用いる原水として、河川水、井戸水、プール水の水質調査を行った。河川水には有害イオンは含まれておらず、簡単なる過と殺菌の組み合わせで十分飲用可能であった。井戸水に関しては、地域により硝酸イオンの水道水基準値を超過するものがあり、本硝酸イオン選択吸着材が有用と思われる。プール水によっては塩素殺菌剤の不純物である臭素酸イオンが検出される場合があり、臭素酸イオンの除去剤を用いる必要があることがわかった。

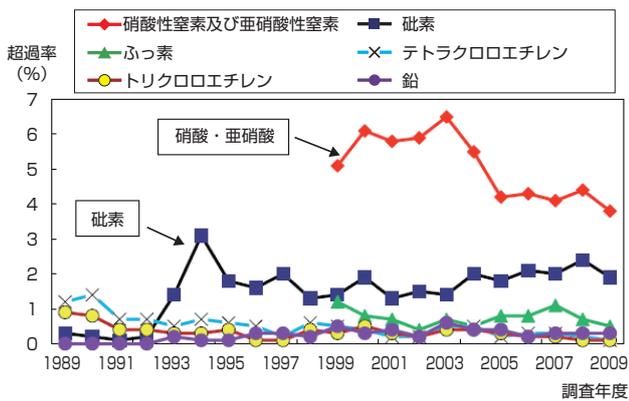


図1 地下水質概況調査における環境基準超過率の推移(主な項目)

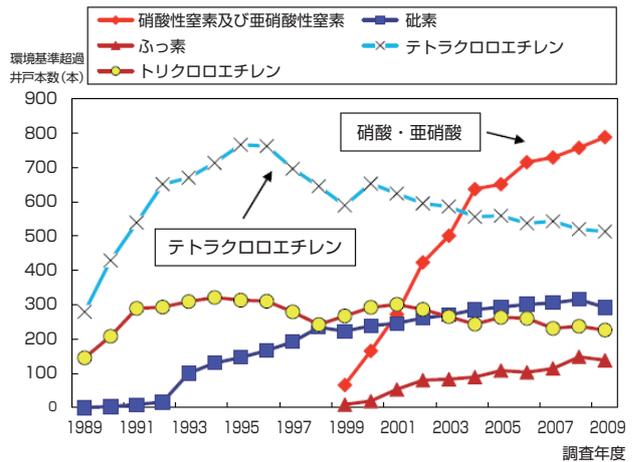


図2 地下水質継続監視調査の環境基準超過井戸本数の推移(主な項目)

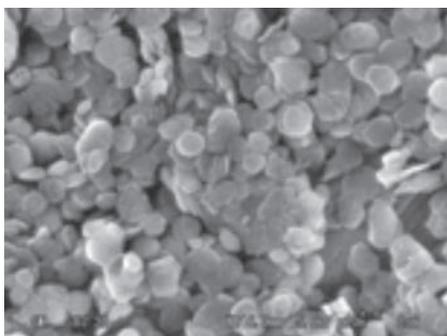


図3 粉末吸着剤のSEM写真
板状粒子の大きさは幅:約500 nm、厚さ:約20 nm

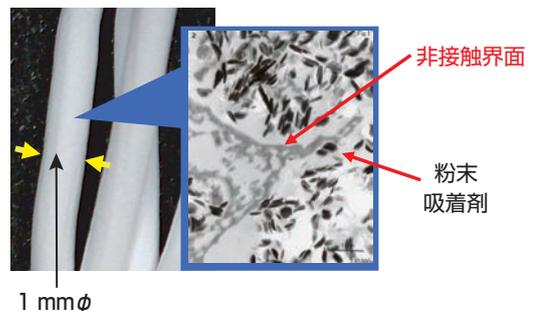


図4 繊維状吸着材のSEM写真およびTEM写真
繊維の直径:約1 mm、内部は多孔性ポリマーの壁に粉末吸着剤が非接触で閉じ込められた構造

2 研究開発の目標

2006年度の地域新生コンソーシアム研究開発事業に、帝人エンジニアリング（株）と産総研を中心に、大学、公設研、地元中小企業（協和化学工業（株）等）と共同研究体を組織し、「分離機能性ナノ粒子の非接触複合化による機動的浄水システム開発」という課題を採択いただいた。

産総研では、平常時は飲用不可となっている硝酸イオンで汚染された地下水を緊急時に飲用可能とするため、硝酸イオン選択吸着剤を用いて硝酸イオン除去システムの開発^[2]を行った。

実用化時の商品イメージとして、社会的要請を満たすために以下の目標を設定した（図6）。

- 1) 価格：システム1台あたり200万円（既存の商品より安めの設定）
- 2) 製造量：システム1台あたり飲料水20トン/日を製造（一人3Lとして約6千人分）
- 3) 水質：水道水と同程度（水道水基準の50項目を達成）
これらを達成するため、以下の目標をプロジェクト終了時に達成するべく設定した。

- 1) プロトタイプ：実機の1/10の製造能力（2トン/日/台）
- 2) 高速処理（83L/時間/台以上）：1時間あたりカラム体積（約4L）の20倍以上の速度
- 3) 機動性
 - ・小型化（スーツケースサイズ）：一人で簡単に移動可能な大きさ
 - ・微粒子除去フィルター（クリプトスポリジウム対策、1μmフィルター）、有機物除去カラム（臭い成分等）、硝酸イオン除去カラムの組み合わせ
 - ・省エネ：電気・エンジン等動力源を用いず、人力のみを想定（低騒音）
 - ・操作性：単純な原理とユニット化によるメンテナンスの容易性
- 4) 硝酸イオン除去：飲料水基準（<10 mg/L）を達成できる技術開発

研究開発のシナリオは、産総研が要素技術として持っている「硝酸イオン選択吸着剤」（図3）の機能（吸着容量お

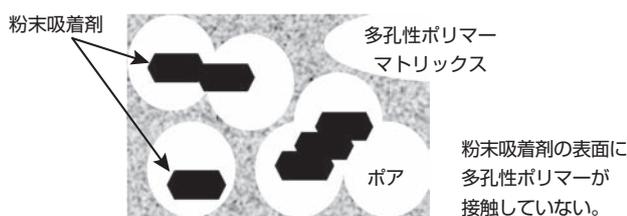


図5 非接触担持成形の模式図

よび選択性）を再現して大量製造する技術を確認（協和化学工業（株）し、帝人エンジニアリング（株）の非接触担持成形技術（図4、図5）を用いて、その機能を維持したまま硝酸イオン除去用吸着材を製造するというものであった。

また、帝人エンジニアリング（株）は、機能性物質として、粉末活性炭を同様に、非接触担持成形することで水処理に関するもっと大きな市場を狙っていた。

二つの機能（有機物除去と硝酸イオン除去）をもつ緊急時浄水システムとしての製品は、帝人エンジニアリング（株）主導で、スーツケースサイズの試作機（無動力、手動ポンプ、ユニット化）を作成するという明確な目標となった（図7）。

3 硝酸イオン選択吸着「材」（アウトカム実現のために必要な要素技術課題）

3.1 大量製造技術（機能の再現）

これまで、類似の化合物を大量製造した経験を生かし、協和化学工業（株）で、産総研の合成方法をベースに工業的手法を取り入れて大量製造に成功した。硝酸イオン選択性と結晶性（XRDのピーク強度、半値幅より判断）は経験的に正の相関があるものの、協和化学工業（株）では評価できない硝酸イオン選択性を産総研で評価することにより、合成の最適条件を見つける事ができた。また、成形する際に、ノズルの穴を詰まらせないようにするため、吸着剤の粉碎・篩い分けに関しては協和化学工業（株）のノウハウを活用し、帝人エンジニアリング（株）の要求するスペック（粒径45μm以下）を達成できた。

製品のスペック（硝酸イオンの吸着容量>1.7 mmol/g・粉末吸着剤、選択係数≒3000）を明確に設定することで、企業のノウハウを外部に漏らすことなく研究開発を行う姿勢は、技術力のある会社とお付き合いをする上で重要かもしれない。

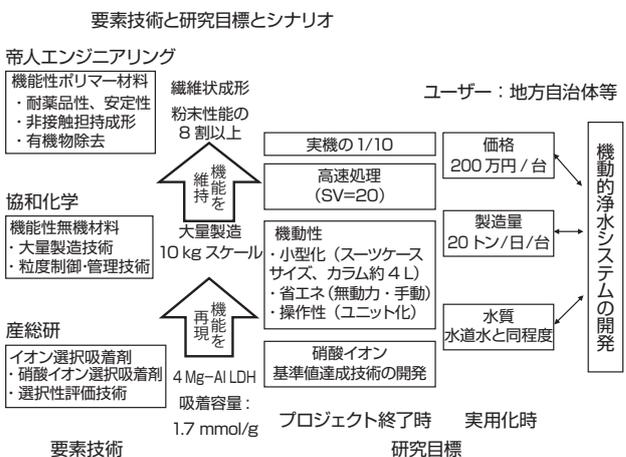


図6 要素技術と研究目標の鳥瞰図

3.2 成形技術（機能の維持）

粉末吸着剤を成形する場合、吸着剤とバインダを混合するだけの通常法だと吸着剤の表面をバインダ成分が覆い、吸着剤の性能が著しく低下する。海水からのリチウムイオン採取用吸着剤において液中硬化法による成形を行ったが、吸着剤性能の6割程度しか発現できなかった^[3]。帝人エンジニアリング（株）の開発した「非接触担持法」^[4]（帝人エンジニアリング（株）の研究員が産総研四国センターに常駐して数年間共同研究を実施）においても大量に処理することは難しく、一つの課題となっていた。

実際、ラボスケールではうまくできていた吸着材が、工場の大きな装置を用いると全く硝酸イオン除去性能が発現しないという事態が発生した。産総研で詳細に検討した結果、工場で使用している水（井戸水を直接使用）が怪しいという結論に達し、純水ラインを用いることで改善できた。硝酸イオン吸着剤は炭酸イオン選択性が高いため、炭酸イオンを含む大量の井戸水で硝酸イオン選択吸着材を洗浄していた際、イオン交換サイトがすべて置換され、硝酸イオンに対して不活性となってしまったことが原因であった。

硝酸イオン除去性能を発揮できなかった吸着材を高濃度の食塩水で再生する検討を行い、再生が可能ということが判明し、使用済み硝酸イオン吸着材が繰り返し使用できることが分かったことは、思いがけない成果の一つとなった。しかし、浄水システムとして製造できる飲料水以上に大量の純水を必要とするため、平常時に再生するとしても用途が限定されることが分かった。また、炭酸イオンが硝酸イオン汚染水に共存すると硝酸イオン除去性能が低下することが予想できる。

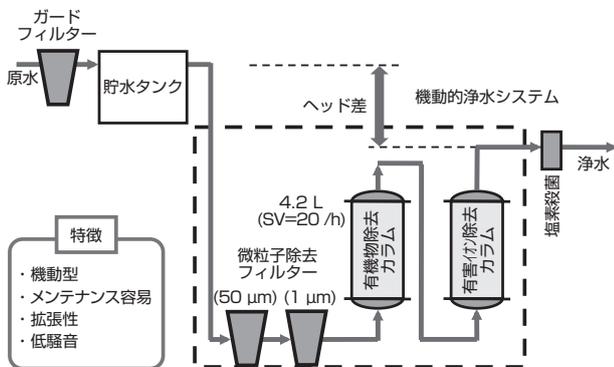


図7 機動的浄水システムの特徴とフロー図

4 コンソーシアムのメリットと事業化に向けた残課題（アウトカム実現のための構成的方法）

企業と共同研究を行っているだけでは、なかなか製品化に至る研究は難しかった。コンソーシアムを設立し、研究開発目標を共同で策定し、硝酸イオン吸着「材」を開発した。メリットとして、参画した産学官それぞれが連携のための接着剤としての研究資金を獲得したこと、製品化を強く意識することが挙げられる。公的資金を使って研究を行うことで、民間企業に対してタイムリミットと責任が発生し、結果として提案書を作成した際の数値目標を達成し、基本性能をもつ試作機（図8）を示すことはできた。

製品化に向けて、3年間フォローアップ研究を行ったが、この浄水システムが有効に使用できるか否か瞬時に判断するシステム、および浄水能力をリアルタイムモニタリングするシステムの開発が残されており、事業化主体となる帝人エンジニアリング（株）では、2010年度で、本製品の開発行為は終了となった。

5 おわりに（結果の評価と今後の展開）

到達度の自己評価について、結論から言えば、4合目程度となった。繰り返しになるが、商品化のための解決すべき課題はこの浄水システムが有効に使用できるか否か瞬時に判断する機能の付与と、浄水能力のリアルタイムモニタリングである。これらの課題を解決するため、引き続き地道に研究開発に取り組んでいきたい。

この研究をとおして最も感じたことは、「技術は人にあり、技術の継承は組織の責任」ということである。共同研究で協力していただいた人の中には、いわゆる「団塊の世代」で、現場の第一線を退いたがピカイチの技術を持っている方がいた。職人の匠の技があればこそ達成できた事もあり、組織がその技術を継承できなければ技術は消えてしまう恐れがある。

産総研にしても同様で、プロジェクトの際に実際に手を

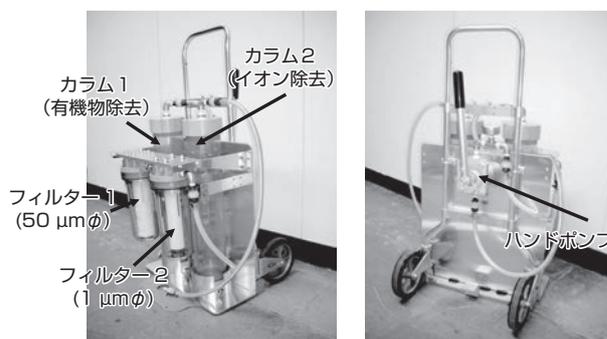


図8 機動的浄水システムの試作機（ハノーバ・メッセ2008に出展）

動かしてノウハウを蓄積した契約職員がプロジェクトの終了とともにその仕事から離れてしまう。端的な例では、留学生が技術を学び本国に帰った後、その研究のエキスパートとして活躍するのに対し、組織改変等で技術を次の世代に継承できなかった組織は技術を持った人が居なくなるとともに消えてしまう。

今後の展開として、リアルタイムで硝酸イオン等を検知できるセンサーの開発に注力する。また、これまで蓄積されたイオン選択吸着剤の技術を資源・エネルギー・環境・健康分野に適用し、イオン選択吸着剤の実用化研究を行い、一つでも商品となるものを生み出したい。

謝辞

この技術開発は、地域新生コンソーシアム研究開発事業「分離機能性ナノ粒子の非接触複合化による機動的浄水システムの開発」（2006～2007年度）の代表者であった健康工学研究部門廣津孝弘副部門長のリーダーシップにより得られた成果で、深く感謝致します。また、研究協力いただいた産総研四国センター、帝人エンジニアリング（株）、協和化学工業（株）の技術者・研究者の方々、プロジェクトに参画いただいた阿波製紙（株）、香川県産業技術センター、徳島県立工業技術センター、香川大学工学部、鳴戸教育大学の方々、管理法人としてサポートいただいた（財）四国産業・技術振興センター（STEP）の故田村恭弥氏、西山良一氏に謝意を表します。

注1) 地域の全体的な地下水質の状況を把握するために実施する調査

注2) 汚染が確認された地域について、継続的に監視を行うための調査

注3) ここで、吸着「剤」（図3）と吸着「材」（図4、図5）は、次の様に区別して、用いている。

吸着剤：化合物として、一つの一般式で表すことが出来るような物質。無機イオン交換体の場合に粉末状となる場合が多く、そのまま水処理に用いると相分離が容易でないことが多い。

吸着材：水処理に用いる際に相分離が容易となる様に粉末吸着剤をバインダー等で成形した材料。有効成分以外を含んでいるため、体積あたりの性能は粉末吸着剤に比べ低下する。

参考文献

- [1] 「平成21年度地下水質測定結果」、環境省 水・大気環境局 (2011.3)
<http://www.env.go.jp/water/report/h22-01/full.pdf>
- [2] 苑田晃成: 機動的浄水システムの開発, 産総研TODAY, 10 (3), 4-5 (2010).
- [3] 大井健太: 無機イオン交換体-選択的分離機能の発現と応用-, (株)エヌ・ティ・エス, 東京 (2010).
- [4] 特許第4339674号, 機能性粒子担持繊維とその製造方法, (2009. 7. 10)

執筆者略歴

苑田 晃成 (そのだ あきなり)

1993年九州大学大学院総合理工学研究科分子工学専攻博士課程修了。同年、工業技術院四国工業技術試験所入所。2001年から産業技術研究所海洋資源環境部門主任研究員。つくば企画本部企画主幹、環境管理技術研究部門、健康工学研究センターを経て、現在、健康工学研究部門健康リスク削減技術研究グループ長。ホウ素同位体に関する研究に従事。現在は、有害陰イオンに対して選択的な吸着剤、健康リスク物質を削減するための技術開発に従事。



査読者との議論

議論1 製品スペックの設定

質問 (村山 宣光: 産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門)

製品スペックについて、「製品のスペックを明確に設定することで、企業のノウハウを外部に漏らすことなく研究開発を行う姿勢は、技術力のある会社とお付き合いをする上で重要かもしれない。」は大変参考になる指摘だと思います。今回の研究開発では、製品スペックの設定において、どの機関がリーダーシップを取ったのか、また、製品スペック設定から各要素技術の目標設定へのブレークダウンにおける工夫等をお聞かせください。

回答 (苑田 晃成)

謝辞に記載していますように、今回の研究開発では研究代表者であった産総研の廣津主幹研究員（現、副研究部門長）のリーダーシップにより製品のスペックが設定されました。「2. 研究開発の目標」のところに記載しておりますように、製品のスペック設定において、既存の製品と競争して勝てるものを目標に設定し、そこから各要素技術へのブレークダウンが行われました。特に、流速に関しましては、SV=20という数値が掲げられ、何の確証もないまま実験をするしかありませんでした。結果的に、カラム体積あたりの処理量が少なくなりましたが、水道水基準を満たす飲料水を製造することができました。

議論2 製品化されなかった理由

質問 (景山 晃: 産業技術総合研究所イノベーション推進本部)

この論文は、企業と共同で行った緊急時に飲料水を供給するための硝酸イオン選択吸着「材」の開発を示したもので、統合的な研究開発を進めたことで技術的には目標を達成しています。その一方で、企業の最終判断で浄水システムの製品化は見送りとなっています。その理由として、技術目標だけでなく競合技術との総合コストの比較や市場の大きさ等も考慮すると、結果的に目標設定があまかったということはないのでしょうか。

回答 (苑田 晃成)

一つの原因は、「4. コンソーシアムのメリットと事業化に向けた残課題」に述べたとおり、リアルタイムモニタリング技術の開発を同期させておらず、ユーザー側で使用の可否を判断できないことです。

また、当初の目標設定で既存のROシステムと明確に異なる製品ターゲットを設定して研究開発・試作を進めました。しかし、研究開発の終了時点で振り返ってみると、技術開発の目標値だけでなく、1) 市場サイズの予測、2) コスト設定、3) 市場展開イメージの策定等において、当初の差異化点が必ずしも十分ではなかった、すなわち、目標設定が結果的に十分でなかったことが考えられます。

上記は推論を含めた考察ですが、製品化を目標とする研究開発では、パートナー企業の協力を得て、これらの点をしっかり検討して計画を立てることが重要と思います。

議論3 技術の継承

質問（村山 宣光）

「技術は人にあり、技術の継承は組織の責任」とのご意見は、大変重要な課題であると思います。技術の継承について、具体的なアイデアやご意見をお聞かせください。

回答（苑田 晃成）

産総研のように、組織名が残らないような改廃を繰り返していると、技術の継承は困難に思います。当然、すべての技術を継承していくことはできませんので、残すべき技術を選択する必要があるかと思います。例えば、新しい技術にとって替わられて、今後使われない技術は消えていくとしても、大きな柱となる技術はさまざまな世代（年齢）のグループを形成すべきです。定員制で補充採用をしていた工業技術院時代も、技術の継承という意味では悪くなかった制度に思います。技術の継承には、常に5～7人のグループで共通の技術があると理想的に思えます。グループを大ぐりにすることは一つのアイデアかも知れません。

自動車用ナビゲーションの総合的開発

— 夢の実現のための製品開発と社会受容のための標準化 —

伊藤 肇

自動車用ナビゲーションは、電子技術の急速な発展を背景として、目的地に効率的に行きたいというニーズが自動車開発の企画にのり、搭載する多くの技術、通信や道路データ等支える多くの技術が長年にわたる官学民の協力で実現し、普及してきた。またそれらの技術はITS標準化の名の下に国際的な整合が行われている。なかでもナビゲーションは運転中の視認・操作を伴う車載装置でもあり、安全性、特にヒューマンファクタが重要なアイテムになる。この論文は開発の歴史を紐解き、社会受容が可能になるヒューマンファクタの研究と標準化を紹介する。

キーワード: ナビゲーション、経路誘導システム、ITS、ヒューマンファクタ

Integrated development of automotive navigation and route guidance system

– Product development for realization of dreams and standardization for social acceptance –

Hajime ITO

The automotive navigation system has been realized and has become popular along with the rapid development of electronic technology. The needs of people to reach destinations efficiently have pushed its development along with the projects of automotive development. Many vehicle-mounted technologies and many technologies supporting the navigation system such as communication and road data have been realized through many years of collaboration of powerful and innovative people among government, academia and industry. The technologies are to meet Intelligent Transportation Systems (ITS) international standards. Since the navigation interface system is an onboard device observed and operated during driving, securing safety, especially that related to human factors is an important issue. In this paper, the history of the development of the navigation system, research on human factors and standardization to enable social acceptance are described.

Keywords: Navigation, route-guidance system, ITS, human factor

1 背景

1970年代は、自動車の保有台数が急速に増加し、また性能も飛躍的に向上した時代であった。移動という点で考えると、道路は質・量とも整備が不十分で、ネットワークを構成しておらず、また案内標識もわかりにくく少ない、市販道路地図も粗く、日本的な町名表記（欧米のような街路中心でない）も災いし、知らない目的地に行くにはそれなりの困難があった。

一方、自動車にはスピードメーター等運転に必須な機器以外で補助的に装備されていたのは、時計とAMラジオ程度で、ナビゲーションとは方位磁石と道路地図帳を併用するものであった。【ニーズの存在】

自動車用ナビゲーション（以下ナビゲーションと略す）の先達は、船舶用や航空機用であった。それらの航法は、現在地と航行方位の特定である。初期には六分儀と時計

が、その後、電波標識等が使われるようになったが、自動車は行動域が狭く、また走行する場所が道路に限定されるため、これらの手法は自動車用航法としては不十分であった。

そこで米国では、1960年代から衛星測位、ビーコン利用、Route Guidance Systemの研究開発が進められた^[1]。

【お手本の存在】

日本でも、1970年代後半から各省庁の交通管制やナビゲーション等のプロジェクトが推進され、ナビゲーションの技術要素、システムの研究が始まった。

1980年代はカーエレクトロニクスが車を制御する時代へ移行した時代で、電子技術の急速な発展に助けられさまざまな分野（半導体・回路技術、センサー技術、ソフトウェア技術、ディスプレイ技術、シミュレーション技術等）で高性能化、小型軽量化、低コスト化されていった。また通信

(株)トラスト・テック 横浜営業所 〒231-0012 横浜市中区相生町 6-104 横浜相生町ビル 2F
Trust Tech Inc., Yokohama Office Yokohama Aioi-cho Building 2F, 6-104 Aioi-cho, Naka-ku, Yokohama 231-0012, Japan E-mail:hajime_ito@trust-tech.jp, h.ito.n-s@ny.tokai.or.jp

技術と応用、普及、人工衛星の技術の急速な発展も見逃せない。【支える技術の発達】

ナビゲーションは、「初めて行く目的地に到達することをガイドしてくれる装置の実現」という技術者の夢が始まりであり、Door to Door Navigation（目的地の家の前まで誘導してくれる）が理想、しかも船舶や航空機と異なり使用者は運転や航法のプロでない場合がほとんどである。第2章では、上記キーワード【】を背景として、商品としてのナビゲーションの変遷を述べる。また、商品化していくプロセスで技術課題がどのように変わっていったのかを見る。第3章では、その技術課題をどのように解決していったかについて述べる。第4章では、ナビゲーションは運転中に操作や視認をするために、社会に根付かせるためには安全性を担保しなければならない。そのために行われた、ヒューマンファクタの研究開発、およびそれを支援するための国際標準化活動、および社会受容性を促進するためのガイドライン等の開発について述べる。

ナビゲーションを構成する技術は広い分野にまたがるため、図1のごとく、商品として成立するための技術と支える技術、そして社会導入のための作業、について述べる。すでに使用されなくなった技術は点線で図示した。池田^[2]らがナビゲーションに必要な車載、インフラ技術について、主として、ナビゲーションメーカーの立場で具体的に論じているが、この論文では車載機器としての成立性や社会導入を重要視しているカーメーカーの立場を中心に述べる。

2 企画・商品の変遷

カーメーカーの立場は、自動車そのものを売ることが一

つの目的で、自動車と搭載している機能・装備が、利便性、安全性、エンターテインメント性、デザイン性等商品性で、顧客に満足度をどれくらい与えられるかが重要である。すなわち価格 / 効果があるかである。

ナビゲーションは、お客様にこのような商品を提供すれば喜んでいただける、という技術者の夢の実現から開発が進んだものと考えられる。

ナビゲーションは、登場以降、高価格グレード車の標準装備へと拡大し、アフターマーケット（非純正部品や用品の市場）でも競って商品力を向上させた商品が追加された。その結果、ナビゲーションを搭載するインストルメントパネルの基本構造・設計、デザインに自動車企画初期から検討される要素になった。このことは、自動車のデザイン、強度、耐久性、走行中の見易さ・操作の安全性、着脱性、電磁環境両立性、衝突時の安全性等自動車開発の多くのデザイン・設計要件と評価要件、製造要件を満足して、多くの知恵と労力が注ぎこまれていることに他ならない。

2.1 初期の企画：【ニーズの存在】と【お手本の存在】を満たす技術の具現化

ナビゲーションの目的は前述のごとく、目的地へ誘導することである。運転中、見やすく、分かりやすく、精度良く、経路を指示する装備を提供することが商品企画になる。

第1の商品は1980年に導入された「電子コンパス」で、現時点の自動車方位を電子データとして取得、指示する。表示された自動車方位と道路方向と、ランドマークを参考に、道路地図帳で現在地と目的地をもとめる商品である。第2の商品は、「電子コンパス」の方位データと走行距離から現在位置を推定する推測航法（Dead Recognition）を

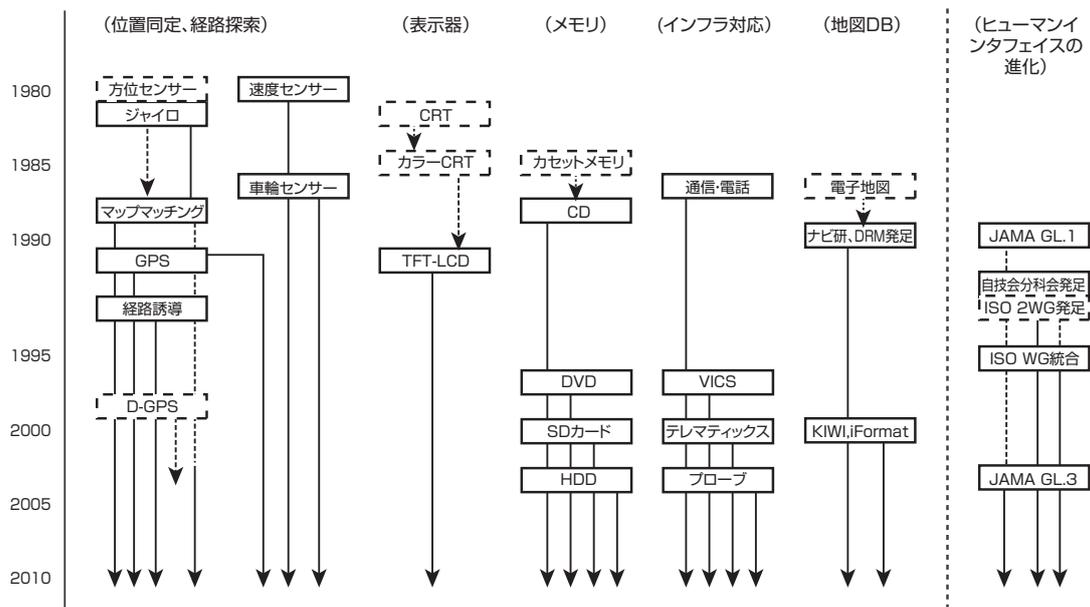


図1 技術の開発

用いて、出発地点（現在地）から目的地まで目的地方向と残距離を表示する「ナビコン」という商品で、1981年にセリカXXに搭載された。同時期に日産も同種製品を発売し、またホンダ「Electro Gyrocomator」ではガスレート・ジャイロを使って方位ではなく、方位角度変化を求める方式を採用した。このように同時期に類似製品が世に出されたことは、技術者の夢が社会的に共有されており、発達しつつあった電子技術を使ってそれぞれが実現しようとしたといえる。また「Electro Gyrocomator」はCRT^{注1)}を使ったディスプレイを採用することで後の地図の表示を決定付けた。1985年ソアラではカラーCRTを使った「エレクトロマルチビジョン」で故障診断表示、燃費モニタ、高速道路地図、走行情報（サスペンション状態）、自動車装備の取り扱いマニュアル、TV放送表示（停止時のみ描画可能）等、その後のナビゲーション機器が具備する情報表示機能の一部が搭載された。なお上記マニュアルや地図情報を提供するため、当時音楽用として一般的であったカセットテープがメモリ機器として搭載された。

2.2 市場導入後の発展期：【支える技術】の利用

1987年に、次の商品としてCRT表示と推測航法を活用した現在のナビゲーション機器に近い商品「エレクトロマルチビジョン」がクラウンに搭載された。ソアラで始まった車載情報機器の一つの機能として、ナビゲーション機能が追加されたのである。この車は地図情報を搭載したCD^{注2)}をメモリ機器として搭載、デジタル地図表示が可能となった。デジタル地図データは当初各メーカーで準備したが、開発・維持費用も莫大であるため共通化の動きが進んだ^{注2)}。メモリは前述のようにカセットテープからCD、DVD^{注3)}、その後SDメモリーカード^{注4)}やHDD^{注5)}に変化し、データの大容量・高速化につながり、多機能化に貢献できた。オーディオやコンピューター用のメモリが発展していったので、それを適宜採用してきたといえる。

1991年には、表示器がCRTからTFT-LCD^{注6)}へと大幅に薄型・軽量化・低電圧化し、自動車への搭載性が格段にようになった。一方、米軍専用技術と考えられていたGPS^{注7)}導入による位置精度向上が可能となった。推測航法では、センサーによる走行距離情報と方位角度/角速度情報を演算して現在地を出すため、センサー情報が誤差を含んでいればそのまま累積した位置誤差となるが、GPSは受信できる限りは連続的に自車位置を入手するので一時的な誤差は修正される。また走行軌跡と地図データを比較するマップマッチングで位置が補正されるケースもあり^{注2)}、位置精度向上と、経路探索のソフトウェア技術をベースにした経路案内、軌跡表示、地点登録等機能が充実し、32 bitマイクロコンピューター投入により実用的なナビゲーションがで

きるようになった。ナビゲーションが目指している Door to Door Navigation の第一歩へ進んだといえる。

2.3 転換期

2.3.1 経路誘導の転換：通信の利用

1) VICS等の展開

1996年に警察庁、旧郵政省、旧建設省の協力で道路交通情報通信システムVICS^{注8)}が導入された。VICSは光ビーコン、電波ビーコンとFM多重放送で送信される交通情報（渋滞情報、所要時間、事故・故障車・工事情報、速度規制・車線規制情報、駐車場の位置、駐車場の満車情報等）をナビゲーション機器で受信し、情報表示と最短のルートを選択するための情報とするもので、現在は約半数の自動車用ナビゲーション機器に搭載されていると推測される。このことは自動車が孤立して動いているのではなく、インフラストラクチャ側とリンクして情報交換し、最適ルートを選択決定するという機能ができたことになる。

またDSRC^{注9)}とナビゲーション機器を統合制御するITS^{注10)}車載機が導入されつつある。これはナビゲーション、VICS、ETC^{注11)}等、個別に提供されていたサービスを一つの車載器で提供することである。

2) 課題：センター型ナビゲーション

経路探索を個々の自動車がするより、現在地と目的地のデータをアップロードし、交通管制センター等のインフラストラクチャ側で渋滞緩和も視野に入れて経路誘導・ダウンロードを行ったほうが効率と精度が良いのではないかという検討もされており、今後の課題である。

3) 外部からの付加情報

ナビゲーションの表示器を使った多くのアプリケーションが期待されている。一つは衝突防止システムであり、路車間通信を使って交差点で見えない方向から近づいてくる自動車の警告表示や、見えないカーブ前方の渋滞警告、などが実証されている。

2.3.2 地図データベースの転換：運転制御への利用

地図データの自動車運転への応用である。道路データの内、道路の傾斜、カーブ等の情報を利用して自動変速機のシフトアップ/ダウンや速度制御、サスペンションのチューニングを自動的に行うもので、安全走行に役立つと思われる。すでに、カーブ手前での自動変速機のシフトダウン機能をもっている車種もあるが、この用途へのさらなる活用は次世代地図情報がもつべき情報にかかわるので、これからの大きな課題になると思われる。

2.3.3 新しいサービスの創造

Telematics^{注12)}が普及してきた。これはカーメーカーが自社の顧客に対するサービスとして、双方向通信、電話による対話で渋滞情報等情報交換を行って運転の手助けを

する。また事故、故障等の際の救助要請を行う緊急通報サービスも運用されている。

3 技術の変遷

3.1 航法技術：コア技術としての位置同定技術

2.1 節で述べたように、自動車のナビゲーションは方位コンパスの電子化から始まった。推測航法のために方位の電子データが必要で、採用したのが地磁気センサーである。地磁気は 3×10^4 nT 前後の小さな値で、自動車ボディーの着磁や、送電線、鉄道線路、山地付近等で誤差が大きくなる欠点があった。ボディー着磁の原因として、自動車生産時プレス工程にて鉄材が圧延されると部分的に磁化することに加え、走行中踏み切り通過時に架線に流れる電流によるが多かった。また地磁気の特徴として地球の南北極と磁極がずれているため、日本のように国土が狭く、その偏角がおよそ 5 度西から 9 度西に収まる場合は限定された精度で使えるが、海外、例えば米国では国土の東西端の距離が大きく、偏角が大きくなるため使用できない。そこで「電子コンパス」導入時には国内利用に限定することとし、更に自動車生産時の着磁の対策で自動車全体の消磁装置を作って完成車を消磁した。その後の走行時の着磁を随時補正するため、自動車を 360 度回転させ、電子的に地磁気センサー出力を補正する方法を導入した。

走行距離と速度（スピードメーター用車速センサー、その後車輪回転センサーから入手）と方位データ（電子コンパス）、を計算して現在地を推定し（推測航法）、目的地までの距離と方位を計算・表示することで「ナビコン」、そして初期のナビゲーション^[3]が実用化した。一方「Electro Gyrocompass」では方位角の変化をガスレート・ジャイロで求める方式を導入したが、その後、車載ジャイロは光ファイバージャイロ、振動ジャイロと小型化し進化した^[2]。

また米軍衛星を使った GPS の利用によって現在位置が常時受信できるようになったことにより状況が改善した。初期の GPS は軍用外の使用では精度が約 100 m と悪く、またビル影、地下、トンネル内等で受信不可の場合があった。そのために GPS データ、マップマッチングで現在地を推定したが、一般道路と高速道路が 2 層になっている等の間違いやすい道路構造の場合もある。このためナビゲーションは通常は自動車内蔵の車速・距離信号、左右タイヤ回転差の検出、機器内蔵の加速度センサーやジャイロ等で補正される。また位置が分かっている固定局（放送局）を利用し GPS データを補正する Differential GPS のシステムも運用されたが、その後 GPS 自体の精度が向上したため終了した。今後、日本で開発中の準天頂衛星「みちびき」による GPS データの補完では、位置精度向上が期待される。

3.2 道路地図データベース：コア技術2：地図上に自動車位置を載せる

第 2 の技術開発は道路地図データベースの開発である。データベースはユーザーのインターフェース部分である地図を描画するためのデータと道路のネットワークを定義付ける部分である。ネットワークはリンク（道路部分）とノード（交差点）で記述し、経路探索、所要時間計算、渋滞情報処理等に利用される。道路にはいわゆる生活道路から高速道路までさまざまなレベルがあり、道路管理者も異なるため、そのデータベースを作成することと追加・修正等の維持に多大の費用がかかる。このため当初各メーカー準備でスタートしたデータベースであったが、フォーマット、データ、登録方法の標準化をするため、ナビ研（現 IT ナビゲーションシステム研究会）、日本デジタル道路地図協会が組織された。その後、日本のカーメーカー、ナビゲーションメーカー、地図会社を中心になって、本格的なナビゲーション用地図データ「KIWI フォーマット」が誕生し、JIS D 0810、その後 ISO/TC204/WG^[13] 3 にて ISO/TS^[14] 20452 として規格化された（ISO/TC204 は 4.1 節参照）。また当初より走りもしない遠隔地の地図データを個々の自動車に搭載するのは不要との意見もあり、通信で必要な地図データを提供する仕組み、例えば i フォーマットが導入された。国土交通省国土地理院を中心に GIS^[15]も研究されており、今後この分野の発展が期待される。

3.3 ヒューマンインタフェースの進化：コア技術3：ドライバーへの経路情報提示と表示操作の安全性

地図表示ハードウェアは当初の CRT から、軽量・薄型・省電力の TFT-LCD が主流になって現在に続いている。地図表示技術は、これまでのあたかも地図を見ているような North up 表示のほか、進行方向を上に表示する Heading up 表示、交差点拡大図、Turn by Turn 表示（曲がる交差点までの距離と曲がる方向を指示）が採用されたが、広く受け入れられた手法にパードビュー表示がある。これは詳細な近傍の地図と粗いが遠方まで俯瞰できる、使い勝手の良い地図表示である。また多色利用による識別性向上、記号の利用、等表示方法にはさまざまあり、ディスプレイの解像度の向上にも伴って視認性、判読性向上が図られているが、選択はドライバーの好みに任されている。しかし、好みには国民性があり、海外では当初 Turn by Turn 表示が普及したし、ハードウェア面では安価で、小型、脱着容易な PND^[16]の普及が著しい。

操作では通常のスイッチから、画面を触るタッチパネル・スイッチ、音声認識、リモコン等が採用されている。

当初、ナビゲーションはセンタークラス下部に設置され、走行中視線移動に時間がかかる位置であった。ヒュー

マンファクタの研究から、もっと高い位置が良いことは分かっていたが、これまでの伝統的な内装デザインを変更することへの抵抗や、空調の吹き出し口やダクトの取り回しの問題もあった。TFT-LCD が登場し、搭載位置の検討が進み、運転そのものを邪魔せず、走行中にも視認性、判読性の良い位置、さらに衝突安全性を確保したセンタークラスタ上部に設置位置を確保している。またマジスタや BMW では HUD^{注17)}の中に Turn by Turn 表示も出しており、走行中の視線移動を減らしている。

3.4 国内外のプロジェクト：公的プロジェクトによるインフラと車載機器とのシステムアップ

第4の技術開発はナビゲーションを含む技術とシステムを検討する多くのプロジェクトの発足である。

米国では、1960年代後半における Robert French^{注1)}の新聞配達ナビゲーション、Route Guidance with Map Matching System、1970年代初期の FHWA^{注18)}主導の ERGS^{注19)}や IVHS^{注20)}、欧州では ALI^{注21)}や DRIVE^{注22)}、T-TAP^{注23)}等に始まる官学民協力の下に推進された研究開発プロジェクト^{注4)}があった。

日本では、1970年代から通商産業省大型プロジェクト「自動車総合管制技術」CACs^{注24)}、警察庁 AMTICS^{注25)}、建設省 RACS^{注26)}等のプロジェクトが始まり、更に1990年代には運輸省 ASV^{注27)}、建設省 ARTS^{注28)}、AHS^{注29)}、スマートウェイ、警察庁 UTMS^{注30)}、DSSS^{注31)}、通商産業省 SSVS^{注32)}等が ITS 時代の準備を行った。これらの開発項目は、研究開発、実証実験を通して日本の IT^{注33)}/ITS 戦略となった。1996年 ITS 関連5省庁は「ITS 全体構想^{注34)}」を発表、その中で「ナビゲーションの高度化」があげられた。そして、ITS Japan^{注35)}という官民学を纏め上げ、国を挙げて推進するという効率の良い体制ができ上がった。なお郵政省は電波行政でサポートした。

ナビゲーションはスタートして約30年経過したが、技術的にはまだまだ発展可能性があり、今後、現在地精度のさらなる向上、渋滞を避けるルートだけでなく、最も早く着く、また最もエコなルート提供や、運転技術に応じたルート等ルート提供の改良、新しい道路への対応や事故・工事中情報の折り込み、目的地への進入方向まで考慮した案内等、課題改善を期待したい。DSRC を利用した情報交換、プローブシステムによる渋滞検知精度の向上、前述の準天頂衛星「みちびき」等、日本の技術への期待は大きい。

4 国際的調和-ヒューマンインタフェース：社会受容性のための安全確保への取り組み

4.1 社会受容のためのガイドライン、国際標準化の整備

技術者達は夢としてもっていたナビゲーションを、前述し

たように多くの人々の力と技術で実現してきたが、単に製品を作るだけでなく、それを社会に受け入れてもらえるための努力もしてきた。ナビゲーションの機能は運転に役に立つものであるが、それと同時に、地図を始めとする情報を提示することは、道路から眼を離させることになり、いわゆる脇見運転を助長するのではないか、という危惧も早くからもっていた。商品開発だけをし、市場に投入すると、不適切な使用による問題が発生しかねず、そうなるに人に役立つ技術が社会から葬り去られる危険を認識していた。例えば欧州のプロジェクト DRIVE ではその危惧を明示し、ヒューマンファクタの検討を早くから始めた^{注5)}。日本でも、RACS の中で、視認タイミング等ドライバーがどのようにナビゲーションを利用するのか研究を行った^{注6)}。製品化の技術開発とほぼ平行してカーメーカーを中心にヒューマンファクタの研究が推進されてきた。そして、ヒューマンインタフェース設計の指針の標準化の活動や業界でのガイドラインの策定が進められた。

他国に先駆けてナビゲーションの市場導入を行った日本では、省庁の援助のもとで表1のように、市場導入後の間もない1990年に日本自動車工業会^{注36)}画像表示装置安全性分科会が業界内で守るべきガイドライン「画像表示装置の取り扱いについて」を策定し、公表した。ここでは、走行中での細街路表示を禁止し、目的地設定の操作もできない。これは、ナビゲーションという新しい技術を社会に導入するに際して、その利用の安全性も考慮して進めていることを社会に示すものでもあった。

また1990年頃には ITS 機器の将来の拡大を見越して、ITS の開発推進とその国際標準化の機運が盛り上がった。そして1993年 ISO/TC^{注37)}204 (TICS^{注38)}、現在 ITS に改名)が国際標準化推進団体として結成された。また、1994年には第1回 ITS 世界大会がパリにて開催され、その後、年1回アジア太平洋地域→北米→欧州→と3極持ち回りで学会と展示会が催され、技術・商品力の面での推進役を果たしている。ISO 活動が国際的調和のとれた基準作りを行い、ITS の発展を支える役割を担うことになったが、これらの機能ができたのは日本で拡大しつつあったナビゲーションが一つのきっかけになったことは疑いない。また日本では TC204 国内委員会(現 ITS 標準化委員会)、TC204 国内技術委員会が統制をとって対応したことは、技術の発展、標準化の面で国益に貢献したと考える。

ISO/TC204/WG11 (Route Guidance and Navigation Systems) はシステム、メッセージセットやインタフェース類の標準化を担当した。著者はヒューマンファクタとインタフェースの標準化を行う ISO/TC204/WG13 (Human Factors and MMI^{注39)}、以下 WG13 と略す)と ISO/TC22/

表1 主なヒューマンインタフェースガイドライン、規格、法規の標準化^[7]

1990年	JAMA ガイドライン 1.0：走行中の細街路地図画面の消去、目的他設定不可
1992年	ISO/TC204 の発足
1993年	ISO/TC204/WG13 の発足
1994年	ISO/TC22/SC13/WG8 の発足 対話管理（発行 2002）、聴覚表示（発行 2004、改訂 2010）、 視認行動計測（発行 2002）、視覚表示（発行 2002）、走行中の表示適合性（発行 2003）、 表示内容の優先度 Message Priority（発行 2004） 審議開始
1995年	JAMA ガイドライン 1.1：走行中の表示文字数の制限
1999年	JAMA ガイドライン 2.0：その道路上にいるときは細街路の表示可に変更 道路交通法 71 条：走行中の携帯電話の手持ち使用禁止、ビデオ画面注視の禁止
2002年	JAMA ガイドライン 2.2：表示装置は視角 30 度以内に設置 道路交通法 109 条：車載機器の表示・操作・提示情報の原則 ISO/TC22/SC13/WG8 にて Occlusion Method の審議開始（ISO 発行 2007）
2004年	JAMA ガイドライン 3.0：走行中に操作可能な機能の最大操作時間を規定 道路交通法 71 条改訂：走行中の携帯電話の手持ち使用に対する罰則強化 ISO/TC22/SC13/WG8 で LCT ^[注45] 法の審議開始

表2 標準化作業項目（TC204/WG13およびTC22/SC13/WG8スタート時）

No.	Title	内容	項目議長
1	ヒューマンファクタ文献集	TICS ヒューマンファクタのデータベース作成	米国
2	カーナビゲーションシステムのヒューマンファクタ	ヒューマンファクタからみた制約条件	米国
3	ドライバー-車システムのヒューマンファクタ	ACC ^[注47] 、FVCWS ^[注48] 等のヒューマンファクタからみた制約条件	米国
4	インテグレーション	表示の優先度 Message Priority、その後警報の統合化 Warning Integration 追加	日本
5	視覚表示	表示器視認要件	イタリア
6	聴覚表示	音/音声の警告	フランス
7	視認行動計測	走行中表示の気付きやすさの試験条件	英国
8	対話管理	ドライバーの負担を小さくするような情報の推奨値	スウェーデン

SC^[注40] 13/WG8（TICS on-board MMI、以下 WG8 と略す）の国際エキスパートを 1993 年から 2003 年まで務めた。欧州の国際エキスパートの当初の認識は、「日本では運転しながらテレビを見ているが、それで良いのか」、「道路標識や街路名、建物 No. を見ていれば目的地に着けるので、ナビゲーションは不要ではないか」というようなものであった。そこで 1994 年の第 1 回 WG8 パリ会議の際、自動車技術会ヒューマンインタフェース分科会（当時は MMI 分科会と称す）で準備した「日本ではなぜナビゲーションシステムが必要か」のビデオをもって説明した。なおこの分科会は日本を代表してヒューマンファクタ国際標準化の役割を担い、国内の意見調整やデータ準備、国際会議の結果の国内への展開の役割を担っている。

4.2 ナビゲーションの設計要件の国際標準化

ISO の二つの WG で国際規格の標準化が始まった（表 2）。検討のベースになったのは、日本が提供した前述の JAMA ガイドライン「画像表示装置の取り扱いについて」と、欧州が持ち込んだ DRIVE II の成果である HARDIE^[注41]

ガイドラインで「ルートをハイライトで表示した地図を表示してはならない」等、日本のナビゲーションの実態に合わない規格であった。ドライバーに考えさせてはいけない、こうしろという指示のみがよい、という理屈であった。その後の標準化作業の検討項目になった。

なお 1995 年に TC204/WG13 は廃止され TC22/SC13/WG8 に一本化された。当時、多くの情報が一斉にドライバーに提供されると、ドライバーは情報を処理しきれず安全情報を無視する可能性があるということで、情報の提供の仕方を検討することになったが、製品化が最も進んでいた日本が担当した。そのために情報の優先順位という考え方を表 2No.4 の一部である ISO/TS 16951 Message Priority で導入し、安全上重要なもの、直ちに行動を起こさなければならぬものの優先順位を高くする情報ごとのランキング法を明確にした。また警報の統合化について ISO/CD^[注42] 12204 Warning Integration を日米が中心で準備中である。

4.3 使用実態に即した自主ガイドライン改訂と法的整備
実際にガイドラインを運用してみた結果、表 1 のごとく、

JAMA ガイドラインは1995年と1999年に改定された。1999年道路交通法でテレビ映像等の動画の走行中の視認が禁止された。これは事実上野放しであったテレビ番組の視聴を規制するものであったが、ナビゲーション画面の視認も同時に規制対象にならないように、動画の定義が検討された。2002年には、JAMA ガイドライン Ver 2.0はVer 2.2に改訂されたが、ここでの主な追加点は表示装置の設置位置に関するもので、正面から視角30度以内にディスプレイを置くことを定めた。この年に、ガイドラインに沿った形で、道路交通法の改訂がなされ法的な整備が行われた。

また、4.1節で述べたように、運転中の視認・操作はいわゆる脇見運転を誘発することになることから、安全運転を阻害する脇見という観点から、規制すべき視認・操作を規定することの必要性がでてきた。

4.4 ドライバーの脇見 (Driver Distraction) への対応

討議のキーポイントは、走行中ドライバーが前方運転視界から視線を移動し、ナビゲーションの表示を読み／判断し／操作をするという脇見行為をどこまで許すかであった。この問題意識は米国でも持たれ、AAM^{註43)}でも検討が始まった。その結果、WG8において、2002年からDriver Distractionとして測定法、評価法の構築が始まった。JAMAではナビゲーションやメーター等への視認行動の計測、車内へ視線がいくことによる運転への影響等の実験を行った。また米国からの提案のあった液晶シャッターのついた眼鏡で視認・操作するOcclusion法をも並行して検討し、この方法によって運転中に許される範囲を実験的に検討した。これを基にして、JAMA ガイドライン Ver3.0が2004年に発行された。この試験法のISO 16673 Occlusion Methodが成立したのは2007年で、国際標準化活動に先駆けて、国内ガイドラインとして公表されたこと

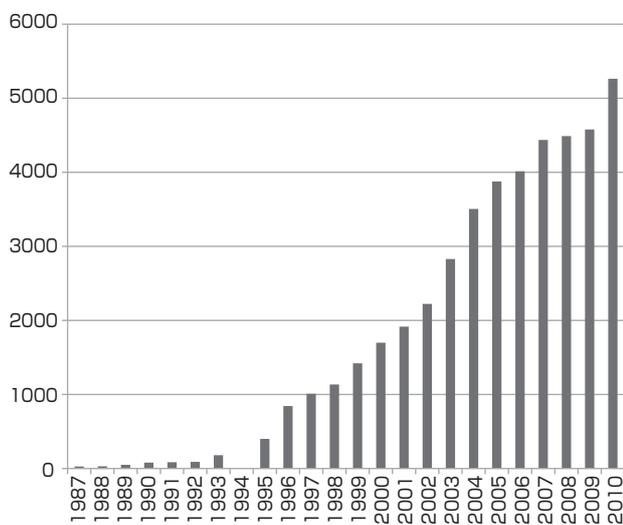


図2 出荷台数 × 1,000^{註8)}

になる。このように、ナビゲーション製品が世界を先駆けたと同様、安全のための基準作りも日本が世界をリードしてきたことを明記したい。

海外では他に国連欧州経済委員会のWP29^{註44)}、IHRA^{註45)}/ITS WG等で検討し、Standard (標準)、Code of Practice (服務規程)、ガイドライン、法律等強制力の異なるものにまとまりつつある。カーメーカーや部品・ナビゲーションメーカーが、国際規格等を満足したうえで、使いやすく安全を担保した形での商品開発と社会導入を図って活動をしてきたことが、官民学の連携の基盤となり、図2のごとく、広く市場に普及することに貢献してきた。

5 おわりに

ナビゲーションが世界に普及したのは、目的地にガイドしてくれる装置へのニーズの存在と、多くの分野の技術者がそのことに共感して先行検討してきたこと、また時代が必要な技術を提供してきたこと、メーカーに商品力向上の一環として開発しようとする意欲があったこと、自動車の販売が急速に伸び市場が成長したこと、新規産業創出への期待から行政組織からの支援を得ることができたこと、世界的なITS推進の動きに乗って各国に展開されていったこと等、人智を集約し、多くの技術や状況が融合・統合・発展し、成果を上げたと考える。今後の自動車に期待される知能化・自動化への貢献も望みたい。また第4章では、製品の技術開発と安全性のため技術開発を両輪として進めたことを紹介したが、氏家^{註9)}は立体映像の分野でも進めており、こういったアプローチは人が日常生活で使う製品の社会受容性を作り出すことに有効に働くものとする。

なお効率よい自動車の目的地への走行は、ドライバーの精神的・肉体的負担軽減だけでなく燃料消費等環境にも良い効果を導くことを明記したい。

世界をリードしてきたナビゲーションは、日本国内での装着率は約40%にもなり、また携帯電話、スマートフォンのパーソナルなナビゲーションにとって良いお手本になってきた。このように、日本はナビゲーションにおいて世界に先鞭をつけてきたが、車載用PNDの出現で、生産量、収益の点で海外企業に差をつけられているのが現状である。名ばかりでなく実をナビゲーションで得たいものである。

謝辞

この論文を作成するに当たり、情報のご提供と内容のご討議をいただいた、トヨタ自動車株式会社第1電子開発部 杉本浩伸氏、(独)産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門赤松幹之氏に御礼を申し上げます。

- 注1) Cathode Ray Tube (陰極線管、通称ブラウン管)
 注2) Compact Disc
 注3) Digital Versatile Disc
 注4) Secure Digital memory card
 注5) Hard-Disc Drive (ハードディスク)
 注6) Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display (TFT液晶)
 注7) Global Positioning System
 注8) Vehicle Information & Communication System
 注9) Dedicated Short Range Communication (短距離通信方式の一つ、ETCは応用例)
 注10) Intelligent Transport Systems (高度道路交通システム)
 注11) Electronic Toll Collection system
 注12) Telecommunication+Informaticsからの造語
 注13) Working Group (作業グループ)
 注14) Technical Specification
 注15) Geographic Information System (地理情報システム)
 注16) Personal Navigation Device
 注17) Head-up Display (ヘッドアップディスプレイ)
 注18) 米国運輸省の機関Federal Highway Administration
 注19) Electronic Route Guidance System
 注20) Intelligent Vehicle Highway System
 注21) Autofahrer Leit und Informations system
 注22) Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe
 注23) Transport Telematics Application Programme
 注24) Comprehensive Automobile Traffic Control System
 注25) Advanced Mobile Traffic Information and Communication Systems
 注26) Road/Automobile Communication System
 注27) Advanced Safety Vehicle
 注28) Advanced Road Traffic Systems
 注29) Automated Highway Systems
 注30) Universal Traffic Management Systems
 注31) Driving Safety Support Systems
 注32) Super Smart Vehicle System
 注33) Information Technology
 注34) 「高度道路交通システム (ITS) に関する全体構想」
 注35) 当初は路・交通・自動車インテリジェント化推進協議会 VERTIS
 注36) Japan Automobile Manufacturers Association (JAMAと略す)
 注37) Technical Committee
 注38) Transport Information and Control Systems
 注39) Man-Machine Interface
 注40) Sub Committee
 注41) Harmonization of ATT Roadside and Driver Information in Europe
 注42) Committee Draft
 注43) Alliance of Automobile Manufacturers (米国自動車工業会)
 注44) World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (自動車基準調和世界フォーラム).
 注45) International Harmonization Research Activities (国際協調研究活動)
 注46) Lane Change Task
 注47) Adaptive Cruise Control
 注48) Forward Vehicle Collision Warning System

参考文献

- [1] R. French: Automobile navigation in the past, present, and future, <http://mapcontext.com/autocarto/proceedings/auto-carto-8/pdf/automobile-navigation-in-the-past-present-and-future.pdf>.
 [2] 池田祥榮,小林祥延,平野和夫: いかにしてカーナビゲーション

システムは実用化されたか, *Synthesiology*, 3 (4), 292-300 (2010).

- [3] 伊藤 肇: カーナビゲーションの歴史, *ケータイ・カーナビの利用率と人間工学*, 61-66 (2002).
 [4] 小塚一宏: ITS (高度道路交通システム) の国内外の動向, *豊田中央研究所R&Dレビュー*, 33 (3), 53-68 (1998).
 [5] J. Michion (ed): *Generic Intelligent Driver Support*, Taloy & Francis (1993).
 [6] M. Akamatsu, M. Yoshioka, N. Imacho, T. Daimon and H. Kawashima: Analysis of driving a car with a navigation system in an urban area, *Ergonomics and safety of intelligent driver interfaces*, I. Noy (ed), Lawrence Erlbaum Associates, 85-86 (1997).
 [7] M. Akamatsu: Japanese approaches to principles, codes, guidelines, and checklists for in-vehicle HMI, *Driver Distraction Theory, Effects, and Mitigation*, ed. M. Regan, J. Lee and K. Young, CRC Press, 425-443(2009).
 [8] JEITA公表資料他から推計
 [9] 氏家弘裕: 映像の安心な利用を可能にする映像酔い評価システムの開発, *Synthesiology*, 3 (3), 180-189 (2010).

執筆者略歴

伊藤 肇 (いとう はじめ)

1971年名古屋大学大学院工学研究科修士課程応用物理学専攻修了後、(株)豊田中央研究所に入社、車載ミリ波レーダの研究に従事。1973年トヨタ自動車工業株式会社(現トヨタ自動車株式会社)に転籍、ESV用衝突予知レーダの開発に従事。その後クルーズコンピュータ、電子コンパス、ナビコン、オートワイパ、スピークモニター、バックソナー、デジタルメータ、HUD、オプティクロンメータ、センターメータ等新製品設計を主導。1991年東富士研究所第13研究部ボデー分野リーダー、1993年第1ボデー設計部室長。1998年矢崎総業株式会社に出向・転籍、商用車のITS開発に従事。2001年矢崎計器株式会社取締役、2006年同常務取締役。2010年(株)トラスト・テック技術顧問。1991年よりARTS、UTMS、ASVプロジェクトに参画。1993年よりISO/TC204、TC22 WGの国際エキスパート、(社)自動車技術会ヒューマンインタフェース分科会初代分科会長、TC204国内技術委員会委員、2004年ITS Japan 幹事、2005年経済産業省ITS産業振興研究会委員。



査読者との議論

議論1 国際標準等への採用

質問 (景山 晃: 産業技術総合研究所イノベーション推進本部)

商品企画の段階からヒューマンインタフェースの問題を重視し、基準策定から国際標準化にまで展開した論述は *Synthesiology* にふさわしい内容です。さらに、国際標準化は国益の対決という側面もあります。この点に関して、カーナビゲーションを統合的システムとして世界に先駆けて商品化した日本が提案した規格案のうち、どの程度がISO等の国際標準、規格として採用されたのかの目安を主要事項ごとに示すことは可能でしょうか。

回答 (伊藤 肇)

ご評価ありがとうございます。カーナビゲーションは、電子技術、通信技術のみならず、個人、会社組織、省庁、団体、委員会が見事に融合、作り上げた、日本の誇るべき成果と考えます。ご質問の標準化作業グループISO/TC22/SC13/WG8では、5か国以上が協力すると宣言したテーマが組上に登り、テーマ議長国がたたき台を作り、各国が修正を行うという形で進みました。日米豪以外はすべて

欧州であったため投票数の上では不利な状況はありましたが、「安全運転」という大義のためロジカルな議論が尽くされており、日本は国内での標準案の検証、JAMAの協力、省庁の法的整備等とおして、現在では、主要リード国として認められています。その結果、日本提案の Message Priority と Warning Integration は規格化へと進み、さらに Occlusion method のように日本以外の議長国テーマでも、日本は修正・合意し、10 件程度の ISO 化が行われています。すなわち国益を満足し、技術的にも世界中および日本国内が納得した形で ISO ができつつあります。

議論2 カーナビゲーションの普及

コメント（内藤 耕：産業技術総合研究所サービス工学研究センター）
カーナビゲーションの技術開発において、GPS システム利用の一般開放と電子地図の技術普及等が重要な役割を果たしたことは前半で論じています。一方、後半は筆者の主張の中心であるヒューマンファクタの研究や、その国際標準化の役割が記述されています。ここで議論しているカーナビゲーションの本格的な一般への普及が 1995 年頃から始まったということは、この筆者の仮説を補強しています。よって、JEITA で公表されているカーナビゲーションの普及台数と国際標準化の動きを合わせた記述をされれば、筆者の論点は説得力を増すと思います。

回答（伊藤 肇）

技術開発、GPS、VICS 等、環境整備に加え、使い勝手、安全への担保により商品力が向上したと考えます。そして、各メーカーの努力、研究所、学界の協力、そして標準化された使いやすさ、安全性が相まって、総合的に商品力が向上し、90 年代後半から普及したと考えております。そこで第 4 章に図 2 を追加しナビゲーション出荷数の伸びを表示しました。

議論3 技術の統合

質問（景山 晃）

カーナビゲーションの変遷を、どのような技術が統合されていったのかを、要素技術と時間軸との表であらわしていただくことは可能でしょうか。また、文章の記述を簡潔なものとし、技術～時間軸の表を併用することで、大変読みやすく、かつ、読者の理解を高められると思います。

回答（伊藤 肇）

図 1 に技術の開発として技術要素と時間軸を記入しました。この論文に出てくる技術要素等をできるだけ入れ、この論文の理解を助けるようにしました。新しい技術の追加や使われなくなった技術の代謝が読み取れるようになりました。

軽元素原子を可視化する新型低加速電子顕微鏡の開発

— “トリプルC” プロジェクトのねらいと取り組み —

佐藤 雄太¹、佐々木 健夫²、沢田 英敬²、細川 史生²、
富田 健²、金山 俊克²、近藤 行人²、末永 和知^{1*}

近年のソフトマター分野における単分子・単原子レベルの構造観察の需要に応えるためには、かつての分解能向上のみを追求した超高圧化とは一線を画する革新的な電子顕微鏡装置の開発が不可欠である。筆者らは低加速電圧の有用性にいち早く着目し、既存装置では到達し得ない大幅な低加速化と高性能化を同時に実現するため、軽元素物質の観察に特化したまったく新しい電子顕微鏡の開発に取り組んでいる。この論文では、球面収差 (Cs) 補正、色収差 (Cc) 補正、カーボン (C) ナノ材料、という三つの“C”に重点を置いた、この“トリプルC”プロジェクトのねらいと成果をまとめるとともに、将来の低加速電子顕微鏡の応用について展望する。

キーワード: 構造評価、電子顕微鏡、収差補正、ナノ材料、ソフトマター、単分子、単原子、電子状態

Innovative electron microscope for light-element atom visualization

– Development of low-voltage electron microscopes in “Triple-C” project –

Yuta SATO¹, Takeo SASAKI², Hidetaka SAWADA², Fumio HOSOKAWA²,
Takeshi TOMITA², Toshikatsu KANEYAMA², Yukihito KONDO² and Kazutomo SUENAGA^{1*}

In order to meet the demand for techniques to directly visualize atomic-level structures of nano-materials and so-called soft matter (organic molecules, bio-materials, etc.), development of innovative electron microscopes are indispensable. These innovative microscopes are totally different from conventional transmission electron microscope (TEM) and scanning TEM (STEM) with ultra high acceleration voltage mainly pursuing high resolution. We recognized the usefulness of low acceleration voltage very early, and have started the development of totally new electron microscopes specified for observation of light-element materials. We aim to realize simultaneously significant decrease of acceleration voltage and increase of performance which cannot be attained with conventional apparatuses. Here we report the aims and results of our “Triple-C” project to develop low-voltage TEM/STEMs equipped with new Cs (spherical aberration) and Cc (chromatic aberration) correction systems for carbon (C)-based nano-materials, and present our view on future applications of electron microscopes with low acceleration voltage.

Keywords: Structure characterization, electron microscopy, aberration correction, nano-material, soft matter, single molecule, single atom, electronic state

1 はじめに

近年、ナノ・バイオ分野の研究開発が加速する中で、電子顕微鏡による構造観察が担う役割は急速に拡大しつつある。カーボンナノチューブ (carbon nanotube, CNT) やグラフェン等のカーボンナノ材料、有機分子や生体関連物質等いわゆるソフトマターの構造を単分子・単原子レベルで直接観察することのできる透過電子顕微鏡 (transmission electron microscopy, TEM) や走査型 TEM (scanning TEM, STEM) の実現が強く望まれている。電子顕微鏡^{[1][2]}の装置開発は1970年代以降に大きな進展が見られたが、それらは一貫して超高圧化により空間分解能の向上を図ったものであった。電子線の加速電圧が

百万ボルト(MV)に達する巨大な装置に代表されるように、当時の最先端の電子顕微鏡は金属や無機化合物等の一般に照射損傷を受けにくいとされる結晶性材料の観察を前提として開発されていた。このような超高圧電子顕微鏡は上記のソフトマター等非結晶性の軽元素物質を対象とする場合には、照射損傷やシグナル検出感度の低下等によりそのポテンシャルを十分に発揮することができない。これらの問題を克服して単分子の動的挙動観察や軽元素単原子の検出・同定を実現するため、新たな電子顕微鏡の開発は最重要課題となっている。

責任筆者らの研究グループでは、軽元素で構成されるナノ材料の電顕観察にはむしろ低加速電子線の使用が極

1 産業技術総合研究所 ナノチューブ応用研究センター 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5、2 日本電子株式会社 〒196-8558 昭島市武蔵野 3-1-2

1. Nanotube Research Center, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan * E-mail:suenaga-kazu@aist.go.jp, 2. JEOL Ltd. 3-1-2 Musashino, Akishima 196-8558, Japan

Original manuscript received July 7, 2011, Revisions received August 22, 2011, Accepted August 23, 2011

めて有効であるという点にいち早く着目し、カーボンナノ材料の原子レベル構造評価において、当時としては比較的低加速の 120 kV 電子顕微鏡の有用性を世界に先駆けて実証してきた。カーボンナノ材料中に孤立させたガドリニウム (Gd) 単原子を、STEM 観察と電子エネルギー損失分光 (electron energy loss spectroscopy, EELS) 分析により検出・同定することに成功した^[3]ほか、CNT の炭素原子配列に由来する moiré 模様をはじめ TEM 像にとらえた (2004 年)^[4]。さらに TEM への球面収差補正装置の導入により、加速電圧 120 kV において CNT の炭素原子六員環構造の直接観察 (2007 年)^{[5][6]} を実現したのにつき、加速電圧を 80 kV まで低下させて高分解能観察を行うことにも成功している (2008 年)^[7]。これらの各段階で撮影した単層 (single-walled, SW) CNT の高分解能 TEM 像を図 1 に並べて示す。ここでは技術的な解説は省略するが、同一の TEM 装置を使用して撮影した像でありながら、収差補正の有無と加速電圧に応じた分解能とコントラストの差異が容易に見い出せる。

上記の成果を得る一方で、現状の TEM/STEM をさらに多様な試料、特に生体分子等ソフトマターの高分解能観察に応用することを想定すると、試料の照射損傷の低減や軽元素の検出感度と空間・時間分解能の向上が、依然として重要課題であることが明らかになりつつある。既存の電子顕微鏡装置で軽元素物質の観察のみに特化して開発されたものは皆無であり、単分子・単原子レベルの観察と分析の実現には過去の高加速化とは一線を画した革新的技術の開発が不可欠である。このような現状を踏まえて筆者らは電子顕微鏡の大幅な低加速化と原子分解能の達成という一見相反する困難な課題に同時に取り組み、ソフトマターの観察に最適な低損傷・高感度・高分解能観察を実現することを目標として、2006 年に JST-CREST^[8] の支援を受け本格的に研究に着手した。この研究は既存の電子顕微鏡の改良・発展ではなく、低加速専用装置の新規開

発を行うという点において、世界初のプロジェクトとなった。

2 目標を実現するためのシナリオ

このプロジェクトの構想段階において最終目標に設定した低加速電子顕微鏡装置の構成と、予想される応用事例を図 2 に模式的に示す。図中の Cs と Cc はそれぞれ球面収差 (spherical aberration) と色収差 (chromatic aberration) を表す。既存の TEM/STEM 装置の現状と課題を踏まえ、またこのプロジェクトが JST-CREST 課題^[8] として 5 年半の期間 (2006 年 10 月 - 2012 年 3 月) で実施されることを考慮し、プロジェクトの第 1 段階で重点的に開発を進める要素技術として、以下の 3 項目を設定した。

- ・低加速専用電子銃：加速電圧 30-60 kV で安定作動し、特に単色性と輝度の面で高性能をもつもの
- ・球面収差補正装置：既存の製品を超える収差補正能力をもち、低加速化による分解能面での不利を十分に補うもの
- ・色収差補正装置：過去に前例^[9]がほとんどない色収差補正を、独自の新方式により実現するもの

続く第 2 段階には、これらの要素技術の統合による低加速専用電子顕微鏡装置の試作と、その性能評価試験を位置付けた。プロジェクトの開始当初、試作機としては図 2 に示すように、TEM/STEM 両用の球面収差・色収差同時補正機能を有する、いわば万能機を想定していた。しかし第 1 段階での各要素の進捗状況を考慮し、より着実かつ効率的に開発を進めるため、実際には用途に応じて装置構成の異なる 2 台の試作機を整備することとなった。性能試験においては、既存の電子顕微鏡装置により達成された加速電圧 300 kV における最高の空間分解能である $d = 0.05 \text{ nm}$ ^[10] を評価の基準に設定した。もっとも、ここでは分解能の値を直接比較するのではなく、その加速電圧での電子線波長 λ によって定まる波長限界にどれだけ近づいたかという点で評価するため、 d/λ 比に注目した。例えば、

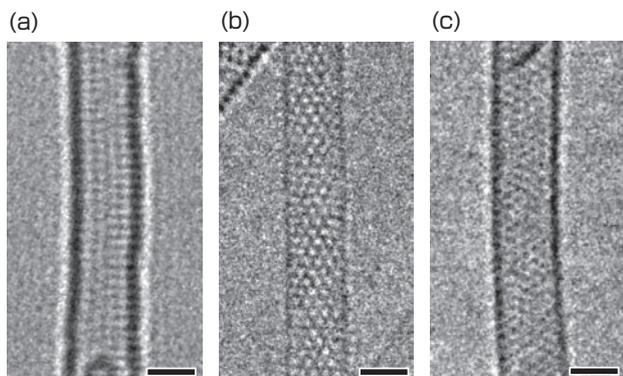


図 1 SWCNT の TEM 像の比較
(a) 加速電圧 120 kV、球面収差補正無し、(b) 120 kV、補正有り、(c) 80 kV、補正有り。スケールバーは 1 nm。

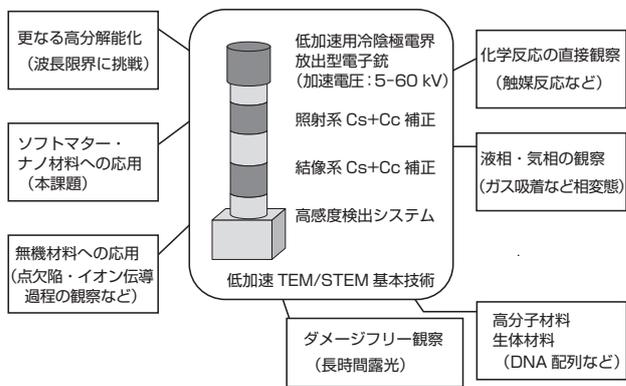


図 2 低加速 TEM/STEM と将来展望

上記の 300 kV の場合^[10]には $d/\lambda = 25$ となるが、このプロジェクトではさらに小さな値を目指した。

性能評価に続き、現在も進行中の第 3 段階では、実際に試作機を各種の軽元素試料やナノ材料の観察・分析に応用し、学術的にも価値の高いデータを収集することにより、低加速電子顕微鏡の有効性を幅広くアピールすることを目指している。特に、これまでの装置による観察結果と比較することも考慮し、責任著者らのグループにおいて実績も多いカーボンナノ材料を中心に観察を行い、TEM・STEM・EELS の各機能を駆使して低加速化の効果を検証することとした。また同時に、前段階の性能試験では見過ごされていた試作機の実用上の問題点を精査し、速やかに改良を施すことにより、完成度の高い分析装置としての自立を図っている。

以上のシナリオのもと、この研究は特に球面収差 (Cs) 補正、色収差 (Cc) 補正、カーボン (C) ナノ材料、という三つの“C”に取り組む“トリプル C”プロジェクトとして、我が国で開発した独自技術により、次世代の高性能低加速電子顕微鏡の実現を目指している。このプロジェクトは、独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）と日本電子株式会社（日本電子）、独立行政法人物質・材料研究機構（NIMS）が共同で推進しており、観察・分析法の理論や電子顕微鏡装置、観察対象とする物質・現象に関して、個々の専門知識と経験の結集を図っている。日本電子チームは、電子顕微鏡メーカーの立場から、プロジェクトの第 1 段階における要素技術開発と、第 2 段階の低加速電子顕微鏡の試作と性能評価試験を担当している。産総研と NIMS の両チームはプロジェクトの構想段階において予備検討を行ったほか、第 3 段階における低加速試作機の応用実験やこれまでの装置による参照実験を担当している。なおこの研究の実施期間を通じて、およそ 1、2 ヶ月毎に進捗報告会を開催する等、チーム間、メンバー間の情報共有と意見交換の場を設け、また性能試験や応用実験には積極的に相互に立ち会う等、共同プロジェクトのメリットを最大限に活用するよう努めている。

以下、この論文では“トリプル C”プロジェクトにおける低加速 TEM/STEM 開発のなかで、特に中核をなす要素技術開発および試作機の性能評価（日本電子チーム担当）の概要を記すとともに、現時点での代表的学術成果としてカーボンナノ材料への応用例（産総研チーム担当）を紹介する。

3 コアとなる要素技術

3.1 低加速電子銃

電子顕微鏡装置において、電子銃は電子線を安定に発生し、所定のエネルギーまで加速する重要な役割を担う。

特にこのプロジェクトにおける電子銃には、STEM-EELS による単原子の検出・同定を高いシグナル・ノイズ比 (S/N) で行えるよう、十分に大きな輝度（電流密度）をもつとともに、色収差による像のぼけを抑えるため、十分に小さなエネルギー幅をもつことが求められる。例えば加速電圧 E が $E+dE$ に変化する場合、色収差による像のぼけの大きさは dE/E に比例するが、これはすなわち、加速電圧 E が低いほど色収差の影響が大きくなることを意味する。したがって低加速電子銃の開発では、電子線のエネルギー幅 ΔE （通常、試料のない状態で測定した透過電子のエネルギー分布における半値幅で評価）を可能な限り小さく抑えることが、極めて重要である。

このプロジェクトでは、輝度とエネルギー幅の両面において有利な、冷陰極式の電界放出型電子銃 (FEG: field emission gun) を採用した。電子線の発生源であるエミッタの形状や電子線に電場を印加する加速管の構成を加速電圧 30-60 kV にあわせて最適化するとともに、高圧電源や各部の電気回路にノイズ対策を施して安定化を図った。この結果、図 3 の EELS ゼロスピーク図（透過電子のエネルギー分布図）に示すように、加速電圧 60 kV において 0.27 eV、加速電圧 30 kV において 0.30 eV という優れたエネルギー幅を実現した^[11]。

3.2 球面収差補正装置

電子顕微鏡の鏡筒を構成する電子レンズは、電子線に対して磁場が Lorentz 力による屈折作用をもつことを利用している。電子レンズを通過した電子線は光軸上の 1 点すなわち焦点に収束するのが理想的であるが、実際にはレンズがもつ各種収差により焦点にずれを生じ、像のぼけや歪みを引き起こす。特に対物レンズの球面収差は、高倍率観察において空間分解能を制限する大きな要因であった。近年、レンズ後方に複数段の磁場多極子を配置して負の球面

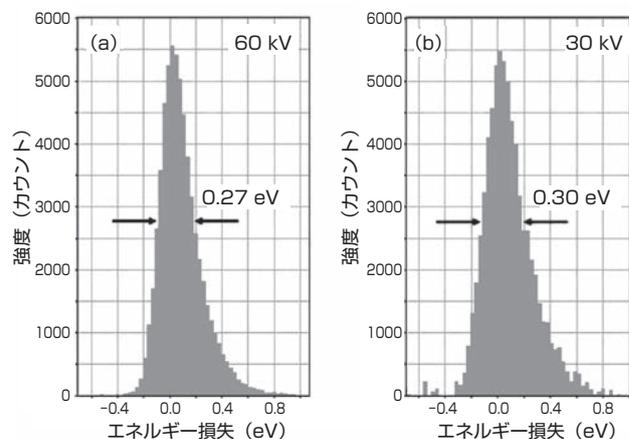


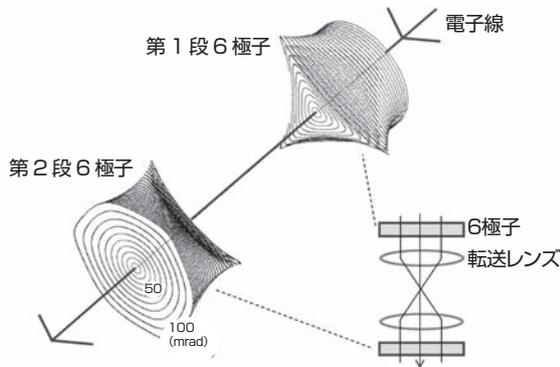
図 3 低加速専用電子銃のエネルギー幅の評価 (a) 加速電圧 60 kV、(b) 30 kV。

収差を発生させ、対物レンズが持つ正の球面収差を相殺して補正する方法が開発された^{[12][14]}。現在、TEM用およびSTEM用としてもっとも普及しているCEOS社製の球面収差補正装置は、2段の磁場6極子と転送レンズで構成されており、互いに向きの異なる3回対称磁場を順に印加することにより、球面収差や3回対称非点収差等の幾何収差を同時に補正する^[13]。

この既存の球面収差補正装置は、これまでの一般的なTEM、STEMにおける加速電圧すなわち100 kV以上においては有効に機能し、空間分解能の向上に大きく貢献してきた。一方、このプロジェクトにおいて加速電圧30-60 kVでの使用を想定した場合には、上記の2段6極子による補正の過程で不可避免的に発生する6回対称非点収差が空間分解能を制限する主要因となることがシミュレーションによって予測されていた。そこでこのプロジェクトでは、球面収差の補正に加えて、これまで実現していない6回対称非点収差までの高次幾何収差の補正も可能な方法を模索し、3段の磁場12極子と転送レンズで構成されたまったく新しい球面収差補正装置を開発した^{[15][17]}。

これまでの2段6極子型、このプロジェクトの3段12極子型(Delta型)の各球面収差補正装置について、構成の概略と電子線軌道の解析結果^[17]を図4に示す。上述の

(a) 2段6極子型



(b) 3段12極子“Delta”型

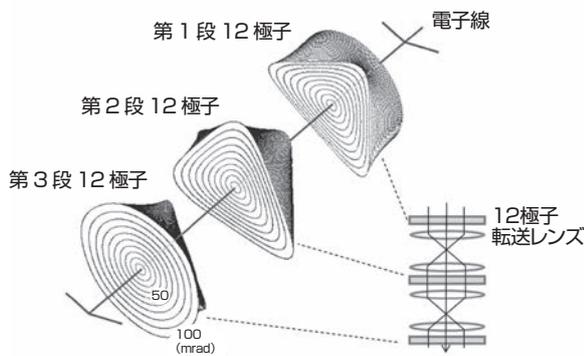


図4 球面収差補正装置の構成と電子線軌道のシミュレーション (a) 2段6極子型、(b) Delta型(3段12極子型)。

とおり、従来型(a)では2段の3回対称磁場の組み合わせによって6回対称非点収差が必ず発生するため、球面収差補正後の電子線において位相の揃った領域の大きさは、主にこの非点収差によって制限されることになる。この図においても、第2段の6極子を通過した高角度領域の電子線軌道が6回対称であることが示されている。一方、Delta型(b)でも同様に、第1段と第2段、第2段と第3段の3回対称磁場の組み合わせにおいて、それぞれ6回非点収差が発生するが、これら二つの6回非点収差が相殺されるように各段の磁場の方向を制御することで、最終的にはより広範囲の領域で位相変化を抑えることができる。第3段の12極子を通過した高角度領域の電子線軌道において、6回対称の形状が弱まっていることが示されている。

3.3 色収差補正装置

このプロジェクトでは、前項のDelta型球面収差補正装置の開発と並行し、より挑戦的なテーマとしてTEM用の新型色収差補正装置の開発にも取り組んでいる。3.1項に記したように、電子線のエネルギー幅 ΔE に起因する色収差は $\Delta E/E$ に比例するため、加速電圧 E が低いほどその影響が大きくなる。特に、このプロジェクトの目標とする加速電圧30 kVでのTEM観察においては、上述の高性能電子銃を使用してもなお対物レンズの色収差補正による空間分解能向上と像質改善の余地は十分にあると見込まれる。このプロジェクトでは、厚みを持った2段の4極子場によって生じる凹レンズ効果(コンビネーション凹レンズ効果)を利用して、TEMの色収差補正を実現した^{[17][19]}。この方式による色収差補正は他に例がない。

この色収差補正装置の構成の概略と電子線軌道の解析結果を図5に示す。装置は2段の厚い12極子と転送レンズにより構成されており、各段の12極子で電場4極子場と磁場4極子場を重畳させる。加速電圧の違いによる電子線の偏向感度が磁場(対物レンズ)と異なる電場を利用して。加えて、第1段で生じる2回対称非点収差を第2段

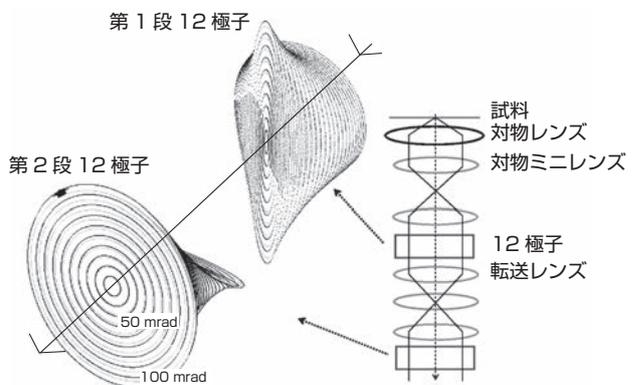


図5 新型色収差補正装置の構成と電子線軌道のシミュレーション

で相殺し、装置全体を負の色収差を持つ凹レンズとして作動させることにより、色収差の補正を行う。性能試験において、加速電圧を 30 kV を中心に ± 25 V だけ変化させても像の焦点外れ量（デフォーカス）がおよそ一定に保たれることから、所定の色収差補正機能が発揮されていることを確認している。

4 要素技術の統合による目標の実現

4.1 低加速電子顕微鏡の試作

このプロジェクトでは、上記の電子銃や収差補正装置をはじめとする新開発の要素技術の統合により低加速電圧専用の電子顕微鏡を試作し、その性能評価を進めている。個々の新機構の動作確認や問題点の検証を効率的に行い、できるだけ速やかに実用的な低加速顕微鏡装置としての完成を目指すため、用途に応じて装置構成の異なる 2 台の試作機を整備した。表 1 に装置構成を示すように、一方の試作機（1号機）は加速電圧 60/30 kV に対応する球面収差補正 TEM/STEM 両用機であり、他方（2号機）は加速電圧 30 kV に特化した色収差・球面収差補正 TEM 専用機である。いずれの試作機も低加速電圧専用として世界に先駆けて開発された電子顕微鏡装置であり、以下に記すように性能評価試験において良好なデータが得られつつある。

4.2 低加速球面収差補正 TEM/STEM の性能評価

試作電子顕微鏡の 1 号機（図 6）は、新開発の Delta 型球面収差補正装置を STEM 用と TEM 用に各 1 基搭載しており、2008 年に稼働を開始した。暫定的に 200 kV 級の汎用電子銃を使用し実施した予備実験において、STEM と TEM の両モードで、球面収差および 6 回対称

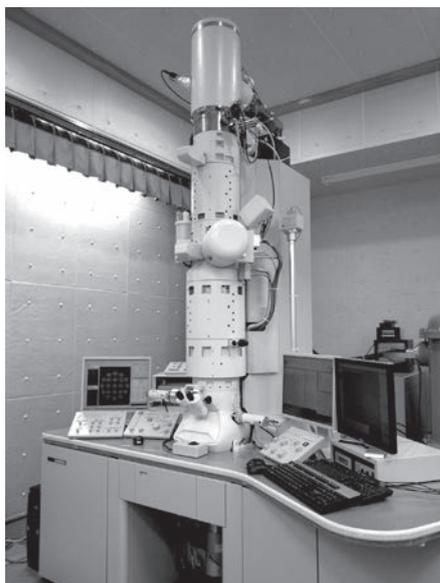


図 6 試作 1 号機（球面収差補正低加速 TEM/STEM）の外観

表 1 低加速電子顕微鏡試作機の機能と構成

	1号機	2号機
機能	TEM, STEM, EELS	TEM
加速電圧(kV)	60, 30	30
低加速専用電子銃	○	○(換装中)
球面収差補正装置(STEM用)	○	-
球面収差補正装置(TEM用)	○	○
色収差補正装置(TEM用)	-	○
EELS用分光器	○	-

○：搭載、-：非搭載

非点収差までの幾何収差が実際に補正可能であることを確認した後、低加速電子銃への換装と EELS 分光器の搭載を行った。

1号機の STEM モードでの空間分解能の評価は、通常の高分解能 STEM 装置の場合と同様に、シリコン (Si) 単結晶の $\langle 110 \rangle$ 面の原子配置の観察によって行った^[11]。60/30 kV のいずれの加速電圧においても、シリコンの原子位置(2次元の投影位置)が間隔 0.136 nm の対を成す、いわゆるダンベル構造が環状暗視野 (ADF) 像に明瞭に捉えられた(図 7)。さらにこれらの ADF-STEM 像に高速フーリエ変換 (FFT) を施すと、加速電圧 60 kV では 0.096 nm、30 kV では 0.111 nm の構造周期に対応するスポットを確認した。これらの値を各加速電圧における空間分解能 d と見なし、電子線波長 λ との比によって評価すると、 d/λ はそれぞれ 20 (60 kV)、17 (30 kV) となり、既存の STEM 装置により加速電圧 300 kV で達成された最高分解能 $d = 0.05$ nm^[10] に対応する値 ($d/\lambda = 25$) を凌駕している。すなわち、波長比としては世界最高の分解能を達成したことになる。

一方、TEM モードでの空間分解能の評価は、金 (Au) のナノ粒子の観察によって行った^[11]。加速電圧 60/30 kV のいずれにおいても、 $\langle 200 \rangle$ 面の格子縞(面間距離 0.204 nm)を明瞭に捉えることが可能である(図 8)。これらの TEM 像の FFT 図には加速電圧 60 kV では 79 pm、30

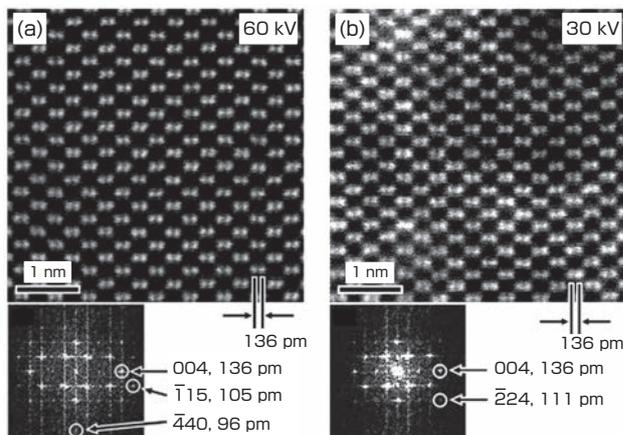


図 7 試作 1 号機 STEM モードの性能評価 (a) 加速電圧 60 kV、(b) 30 kV。試料は Si $\langle 110 \rangle$ 。

kV では 91 pm に対応するスポットも現れており、この機が TEM モードにおいても優れた分解能を発揮することが実証されている。また、30 kV で撮影した SWCNT の TEM 像 (図 9) をこれまでの装置による像 (例えば図 1) と比較しても、同機が 120 kV 稼働の既存の球面収差補正 TEM と同等以上の性能を有することが容易に理解できる。

4.3 低加速色収差・球面収差補正TEMの性能評価

試作電子顕微鏡の 2 号機は、前項の 1 号機において性能実証が進む Delta 型球面収差補正装置に加え、新開発の色収差補正装置を直列に搭載した TEM 専用機であり、2010 年に本格的な稼働を開始した。前述のとおり、この色収差補正装置は電場・磁場重畳によるコンビネーション凹レンズ効果を利用した画期的機構を有しており、現在はその動作確認とノイズ対策を進めつつ、各種の標準試料を使用した TEM 像の撮影を行い、色収差・球面収差の同時補正の効果を検証している。

暫定的に汎用電子銃を搭載し、加速電圧 30 kV で撮影したシリコン単結晶の <110> 面の TEM 像を図 10 に示す。FFT 図には 0.125 nm の構造周期に対応するスポットが現れていることから、現段階ですでに、1 号機の TEM モード

(30 kV) に匹敵する空間分解能が得られていることがわかる。2011 年 8 月現在、2 号機では低加速電子銃への換装作業が行われており、また各レンズと収差補正装置のアライメントの最適化が進むことにより、TEM 専用機としては 1 号機をも上回る高性能を発揮することが見込まれる。

5 低加速電子顕微鏡試作機の応用と課題

このプロジェクトにおいて試作した上記の低加速電子顕微鏡のうち、先行開発した 1 号機については所定の性能評価試験を完了し、すでに応用実験での使用を開始している。本章では、これまでに 1 号機を使用して得られた代表的な成果を紹介するとともに、その過程で明らかになった課題について記す。

5.1 フラワー内部の金属単原子の元素分析

1 号機の STEM-EELS 機能を利用し、フラワー内包カーボンナノチューブ (いわゆるナノピーポッド) 試料を対象として、フラワー内部に閉じ込められた金属単原子イオンの検出と元素分析を試みた。100 kV 以上の加速電圧では電子線照射ダメージによりナノチューブ内のフラワーが速やかに重合・開口する^{[20][21]}ため、過去の STEM 観察^[22]

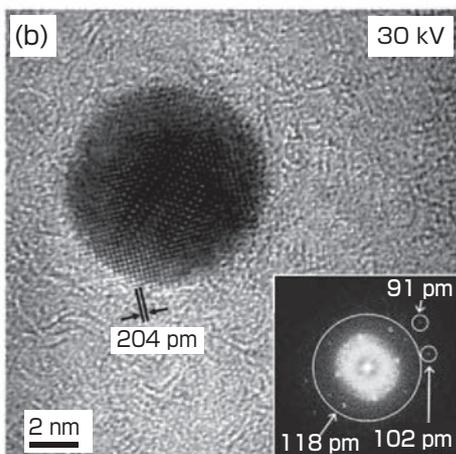
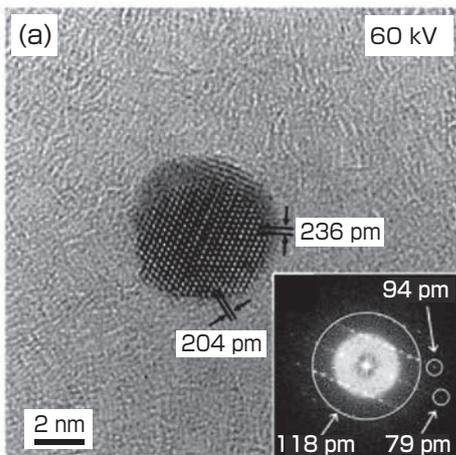


図 8 試作 1 号機 TEM モードの性能評価
(a) 加速電圧 60 kV、(b) 30 kV。試料は金ナノ粒子。

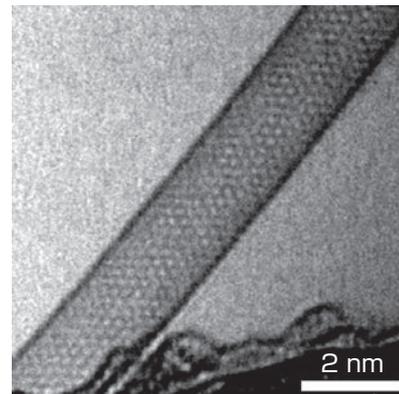


図 9 加速電圧 30 kV における SWCNT の TEM 像

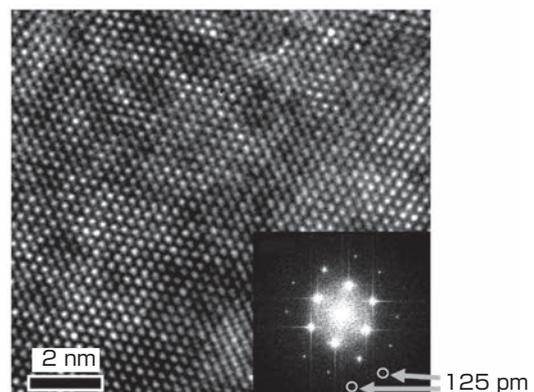


図 10 試作 2 号機 (TEM) の性能評価
加速電圧 30 kV。試料は Si<110>。

では内部に存在する金属単原子の孤立状態を直接観測することは不可能であった。これに対し、今回の1号機による加速電圧 60 kV における観察では、ピーポッド試料の構造変化を軽微に止めつつ STEM-EELS 分析が可能であることが実証された^[23]。

カルシウム内包フラーレン (Ca@C₈₂) のナノピーポッド試料に対する STEM-EELS 分析の例を図 11 に示す。(a) の明視野 (BF) STEM 像には、7 個のフラーレン分子が捉えられているが、それらの内部に 1 個ずつ存在するカルシウムイオン (Ca²⁺) の姿は判別できない。一方、(b) の EELS 元素マッピング像では、矢印で示す位置に七つのカルシウムイオンを捉えることに成功している。このように試料のダメージを抑制しつつ個々のカルシウムイオンの検出・同定が可能な分析手法は、今後特に生体試料、例えば神経伝達を司るイオンチャネルのメカニズムの解明にも大きく貢献することが期待される。電子顕微鏡によるイオンチャネルの構造観察は過去にも数多く試みられてきたが、試料が電子線によるダメージを受けやすいため、内包イオンの元素分析やチャネル構造の高分解能観察に成功した例はない。高性能の低加速電子顕微鏡の実現はこのような生体試料の構造と機能を原子レベルで解明するうえで重要な足がかりとなるであろう。

5.2 グラフェン端の炭素原子の電子状態観測

グラフェンは炭素原子の 6 員環網面の単一層であり、電子特性等優れた物性が予測または実証されているため、次世代エレクトロニクスを担う機能性材料として幅広い応用が期待されている。グラフェンの電子特性は末端部 (エッジ) の原子配置に大きく依存することが知られており、局所構造とその電子状態を正確に把握することは重要な課題である。このプロジェクトでは 1 号機の STEM-EELS 機能を利用し、電子線ダメージを大幅に低減しつつ高感度でグラフェ

ン端の電子状態分布を測定することに成功した^[24]。

加速電圧 60 kV におけるグラフェン端近傍の STEM-EELS 分析の例を図 12 に示す。(a) の ADF-STEM 像に 3 色の矢印で示した 3 個の炭素原子はそれぞれ (b) の模式図に示すような局所構造に存在しており、これらの原子からは (c) に示す EELS スペクトルが得られている。ここで注目すべきは、グラフェン端に位置している炭素原子 (青色および赤色) では、グラフェン内部の炭素原子 (緑色) からは観測されない EELS ピークがそれぞれ異なる位置 (黒矢印) に観測されている点である。これらの EELS ピークはグラフェン端の局所構造に由来する電子状態を反映していると考えられる。この成果は、グラフェン端に位置する炭素原子が同一のグラフェン面の内部にある炭素原子とは全く異なる電子状態にあることを、単原子レベルで初めて実証するものである。

5.3 応用実験で明らかになった課題

上記の応用実験では、低加速化と収差補正が進展したことにより、いくつかの新たな課題も明らかになっている。例えば、照射電子が試料中の原子を直接たたき出すこと (ノックオン) によるダメージは、低加速化によって大幅に低減される一方で、顕微鏡装置内の残留ガスが関与する試料の損失が、相対的に大きな問題となっている。また球面収差や高次幾何収差等のかつての空間分解能の制限要因が Delta 型収差補正装置により十分に補正された結果、新たに電子銃のエミッタ形状等わずかな条件の差異が分解能や像質に反映されやすくなり、性能の頭打ち要因となりうることも明らかになっている。現在、これらの問題に対しては、装置鏡筒部の真空排気系の強化やエミッタ形状と印加電圧の最適化等の個別の対策を進めて解決を図っている。今後は、性能試験において実証した高い性能を実際材料の開発の研究現場における使用条件でも安定かつ容

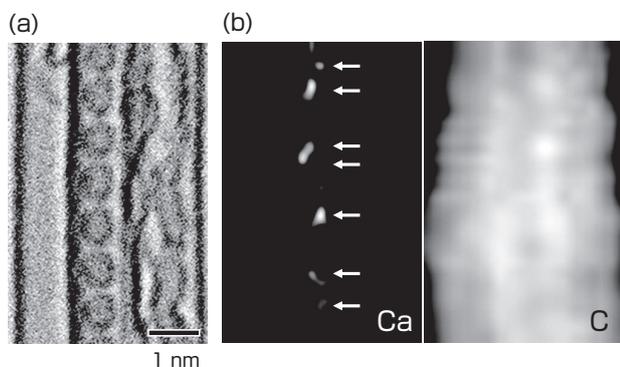


図 11 低加速 STEM-EELS による元素分析例 (a) ADF-STEM 像、(b) カルシウム (左) と炭素 (右) の元素マップ。試料はカルシウム内包フラーレン Ca@C₈₂ のナノピーポッド。加速電圧 60 kV。

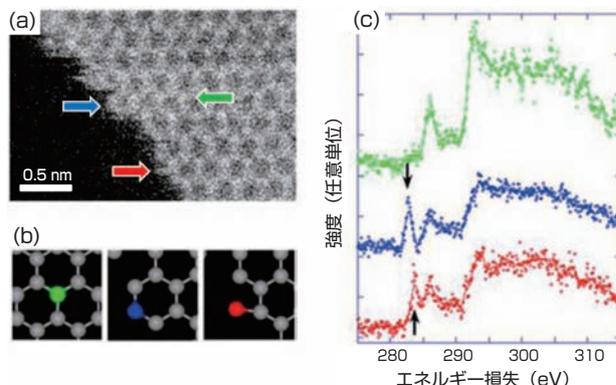


図 12 低加速 STEM-EELS による電子状態分布の測定例 (a) ADF-STEM 像、(b) 局所構造のモデル、(c) 炭素単原子の EELS スペクトル。試料はグラフェン。加速電圧 60 kV。

易に発揮できる製品へと発展させることが低加速電子顕微鏡の普及に向けた最大のテーマとなる。

6 今後の展望

この論文では、“トリプルC”プロジェクトにおける世界初の低加速専用電子顕微鏡開発のねらいと経緯について記した。このプロジェクトの構想当時（2006年以前）のTEM/STEM分野において、低加速電圧はいわば未開拓の領域であり、その有用性は決して幅広く認識されてはいなかった。しかしこのプロジェクトの開始以降、海外でも同様の着想に基づいた低加速装置開発^[25]がスタートしたほか、当初は80-300 kV級の中加速装置の高性能化を目的に立ち上げられていたプロジェクト^{[26][27]}が、新たに低加速もターゲットに盛り込む等、わずかに数年間に状況は大きく変化した。今や低加速TEM/STEMは最先端の電子顕微鏡装置開発におけるメインストリームの一つとして、世界的にも大規模プロジェクトが競って展開されている。これらの多くは、このプロジェクトと同様に、色収差対策とエネルギー分解能の向上のため、独自に色収差補正装置の開発を行い、あるいは既存のモノクロメーターを導入することで、50 kV以下の加速電圧において0.1 nmにせまる空間分解能の達成を目指している。今日の低加速電子顕微鏡の開発競争は球面収差補正装置の実用化と普及に代表されるハード面の技術革新とナノ物質や有機単分子等あらたな応用範囲の拡大であり、1990年代以降の電子顕微鏡分野の流れを振り返ると必然的に生じるものであったと見ることもできる。

近い将来、低加速電子顕微鏡の本格実用化と普及が進むことで、電子顕微鏡の観察対象が飛躍的に拡大し、特に化学・生物分野において大きく貢献することが期待される。単分子・単原子の動的観察がより簡便になると、例えば上述のイオンチャネルの構造解析や触媒反応の直接観察等の数多くの重要課題に直ちに着手することが可能になる。金属クラスター存在下での各種分子の再構成挙動の観察が実現すれば、触媒反応機構の原子レベルでの解明にもつながり、社会的なインパクトは極めて大きい。また、特定の官能基が光や熱で励起・活性化される過程や着目する原子の電子状態変化をリアルタイムに捉えることができれば、原子レベルでの化学反応メカニズムの解明につながる等、その波及効果は計り知れない。

また、低加速化により照射ダメージを極力低減した電子顕微鏡・電子分光技術はソフトマター以外の物質へ応用するうえでも有用な点が多い。例えば結晶材料に関しては、点欠陥の生成・消滅過程の観察等のこれまでの物性研究

にも原子レベルでの新しい視点を提供するであろう。また、CNTやフラーレン等個別の量子物体に対しても、高精度分光がこれまでよりも容易に行えるため、個々の量子体の正確な構造解析と電子状態との関連付けによって多くの知見が得られることが期待される。

謝辞

このプロジェクトを共同で推進していただいている物質・材料研究機構の木本浩司氏、低加速電子顕微鏡によるEELS実験にご協力いただいた日本電子株式会社の奥西栄治氏、観察試料の作製にご協力いただいた産業技術総合研究所の片浦弘道氏、岡崎俊也氏、飯泉陽子氏、小林春花氏に、この場を借りて謝意を表す。低加速顕微鏡試作機による応用観察実験の一部は科研費（19054017、23750250）の支援を受けた。

参考文献

- [1] 堀口繁雄: 高分解能電子顕微鏡, 共立出版 (1988).
- [2] D. B. Williams and C. B. Carter: *Transmission electron microscopy (2nd Ed.)*, Springer (2009).
- [3] A. Hashimoto, H. Yorimitsu, K. Ajima, K. Suenaga, H. Isobe, J. Miyawaki, M. Yudasaka, S. Iijima and E. Nakamura: Selective deposition of a gadolinium(III) cluster in a hole opening of single-wall carbon nanohorn, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 101, 8527-8530 (2004).
- [4] A. Hashimoto, K. Suenaga, A. Gloter, K. Urita and S. Iijima: Direct evidence for atomic defects in graphene layers, *Nature*, 430, 870-873 (2004).
- [5] K. Suenaga, H. Wakabayashi, M. Koshino, Y. Sato, K. Urita and S. Iijima: Imaging active topological defects in carbon nanotubes, *Nat. Nanotechnol.*, 2, 358-360 (2007).
- [6] Y. Sato, K. Suenaga, S. Okubo, T. Okazaki and S. Iijima: Structures of D_{5d} -C₈₀ and I_h -Er₃N@C₈₀ fullerenes and their rotation inside carbon nanotubes demonstrated by aberration-corrected electron microscopy, *Nano Lett.*, 7, 3704-3708 (2007).
- [7] Y. Sato, K. Yanagi, Y. Miyata, K. Suenaga, H. Kataura and S. Iijima: Chiral-angle distribution for separated single-walled carbon nanotubes, *Nano Lett.*, 8, 3151-3154 (2008).
- [8] <http://www.busshitu.jst.go.jp/kadai/year03/team03.html>
- [9] B. Kabius, P. Hartel, M. Haider, H. Müller, S. Uhlemann, U. Loebau, J. Zach and H. Rose: First application of Cc-corrected imaging for high-resolution and energy-filtered TEM, *J. Electron Microsc.*, 58, 147-155 (2009).
- [10] H. Sawada, Y. Tanishiro, N. Ohashi, T. Tomita, F. Hosokawa, T. Kaneyama, Y. Kondo and K. Takayanagi: STEM imaging of 47-pm-separated atomic columns by a spherical aberration-corrected electron microscope with a 300-kV cold field emission gun, *J. Electron Microsc.*, 58, 357-361 (2009).
- [11] T. Sasaki, H. Sawada, F. Hosokawa, Y. Kohno, T. Tomita, T. Kaneyama, Y. Kondo, K. Kimoto, Y. Sato and K. Suenaga: Performance of low-voltage STEM/

- TEM with delta corrector and cold field emission gun, *J. Electron Microsc.*, 59, S7-S13 (2010).
- [12] H. Rose: Outline of a spherically corrected semiaplanatic medium-voltage transmission electron-microscope, *Optik*, 85, 19-24 (1990).
- [13] M. Haider, S. Uhlemann, E. Schwan, H. Rose, B. Kabius and K. Urban: Electron microscopy image enhanced, *Nature*, 392, 768-769 (1998).
- [14] F. Hosokawa, T. Sannomiya, H. Sawada, T. Kaneyama, Y. Kondo, M. Hori, S. Yuasa, M. Kawazoe, Y. Nakamichi, T. Tanishiro, N. Yamamoto and K. Takayanagi, Design and development of Cs corrector for a 300 kV TEM and STEM, *Proc. IMC 16* (Sapporo), 582 (2006).
- [15] H. Sawada, T. Sasaki, F. Hosokawa, S. Yuasa, M. Terao, M. Kawazoe, T. Nakamichi, T. Kaneyama, T. Tomita, Y. Kondo, K. Kimoto and K. Suenaga: Correction of higher order geometrical aberration by triple 3-fold astigmatism field, *J. Electron. Microsc.*, 58, 341-347 (2009).
- [16] H. Sawada, T. Sasaki, F. Hosokawa, S. Yuasa, M. Terao, M. Kawazoe, T. Nakamichi, T. Kaneyama, Y. Kondo, K. Kimoto and K. Suenaga: Higher-order aberration corrector for an image-forming system in a transmission electron microscope, *Ultramicroscopy*, 110, 958-961 (2010).
- [17] H. Sawada, F. Hosokawa, T. Sasaki, T. Kaneyama, Y. Kondo and K. Suenaga: Chapter 6-Aberration correctors developed under the Triple C project, in P. Hawkes (Ed.): *Advances in Imaging and Electron Physics*, 168, 297-336 (2011).
- [18] 細川史生, 沢田英敬, 佐々木健夫, 近藤行人, 末永和知: 厚みのある4極子場を持つ凹レンズ効果を利用した, 対物レンズの色収差補正, *日本顕微鏡学会第66回学術講演会発表要旨集(名古屋)*, 14 (2010).
- [19] H. Sawada, F. Hosokawa, T. Sasaki, S. Yuasa, M. Kawazoe, M. Terao, T. Kaneyama, Y. Kondo, K. Kimoto and K. Suenaga: Chromatic aberration correction by combination concave lens, *Microsc. Microanal.*, 16(S2), 116-117 (2010).
- [20] K. Urita, Y. Sato, K. Suenaga, A. Gloter, A. Hashimoto, M. Ishida, T. Shimada, H. Shinohara and S. Iijima: Defect-induced atomic migration in carbon nanopeapod: Tracking the single-atom dynamic behavior, *Nano Lett.*, 4, 2451-2454 (2004).
- [21] Y. Sato, T. Yumura, K. Suenaga, K. Urita, H. Kataura, T. Kodama, H. Shinohara and S. Iijima: Correlation between atomic rearrangement on defective fullerenes and migration behaviors of encaged metal ions, *Phys. Rev. B*, 73, 233409 (4 pages) (2006).
- [22] K. Suenaga, M. Tencé, C. Mory, C. Colliex, H. Kato, T. Okazaki, H. Shinohara, K. Hirahara, S. Bandow, and S. Iijima: Element-selective single atom imaging, *Science*, 290, 2280-2282 (2000).
- [23] K. Suenaga, Y. Sato, Z. Liu, H. Kataura, T. Okazaki, K. Kimoto, H. Sawada, T. Sasaki, K. Omoto, T. Tomita, T. Kaneyama and Y. Kondo: Visualizing and identifying single atoms using electron energy-loss spectroscopy with low accelerating voltage, *Nat. Chem.*, 1, 415-418 (2009).
- [24] K. Suenaga and M. Koshino: Atom-by-atom spectroscopy at graphene edge, *Nature*, 468, 1088-1090 (2010).
- [25] <http://www.salve-project.de/>
- [26] <http://ncem.lbl.gov/TEAM-project/>
- [27] <http://www.superstem.org/>

執筆者略歴

佐藤 雄太 (さとう ゆうた)

2004年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了。博士(エネルギー科学)。同年産業技術総合研究所ナノカーボン研究センター(現ナノチューブ応用研究センター) 研究員。この論文では、低加速電子顕微鏡試作機による応用実験と本文の執筆を担当。



佐々木 健夫 (ささき たけお)

2006年東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年日本電子株式会社入社。現在、同社EM事業ユニットEM第1技術グループ主任。この論文では、主に低加速電子顕微鏡試作機の性能評価と応用実験を担当。



沢田 英敬 (さわだ ひでたか)

2002年東京大学大学院工学系研究科材料科学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年日本電子株式会社入社。現在、同社EM事業ユニットEM第1技術グループ副主任研究員。この論文では、主に収差補正装置の開発と低加速電子顕微鏡試作機の性能評価を担当。



細川 史生 (ほそかわ ふみお)

1984年九州大学理学部(量子化学専攻)卒業、理学士。1984年日本電子株式会社入社。現在、同社EM事業ユニットEM第1技術グループ主幹研究員。透過電子顕微鏡の光学系開発に携わり、この論文では主に収差補正装置の開発を担当。



富田 健 (とみた たけし)

1972年九州大学理学部物理学科卒業。同年日本電子株式会社入社。現在、同社EM事業ユニットEM第1技術グループ所属。この論文では、主に低加速電界放出形電子銃を担当。



金山 俊克 (かねやま としかつ)

1987年東北大学大学院理学研究科物理学第二専攻修士課程修了。1987年日本電子株式会社入社。現在、同社EM事業ユニットEM第1技術グループ長。装置開発の全般にわたり統括を担当。



近藤 行人（こんどう ゆきひと）

1978年東京工業大学大学院・総合理工学専攻・電子化学専攻修了。工学修士。1979年日本電子株式会社入社。現在、同社EM事業ユニット技師長。装置開発の統括を担当。



末永 和知（すえなが かずとも）

1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程材料学専攻修了。博士（工学）。同年エコーレデミンバリ材料研究所博士研究員。1997年バリ南大学固体物理研究所博士研究員。1998年科学技術振興事業団国際共同研究事業研究員。2001年産業技術総合研究所新炭素系材料開発研究センター（現ナノチューブ応用研究センター）研究チーム長。2010年同センター上席研究員。JST-CREST研究代表者として本プロジェクトの全般にわたる立案・計画と運営を行うほか、低加速電子顕微鏡試作機による応用実験と、この論文の基本構想を担当。



た。ただしその開始直後から、海外のいくつかの開発グループも、同様の着想のもとで新たなプロジェクトに着手し、あるいは既存プロジェクトの低加速への拡張を行っています。このプロジェクトの1号機は、低加速専用として新たにつくられた世界初の装置で、その成果は他の競合プロジェクトにも、直接的・間接的に影響を与えていることは間違いありませんが、影響の範囲を明確に線引きすることは難しいのが実情です。しかし、ご指摘のとおり初稿では、世界動向に関する説明が不十分でしたので、6章に加筆しました。

議論3 「ソフトマター」

質問（阿部 修治）

「ソフトマター」というキーワードが頻繁に出てきますが、この論文で対象としているカーボンナノ材料は高強度材料としても期待されているもので、必ずしもソフトマターとは言えないと思います。今後は生体材料等のソフトマターにも対象を広げる計画なのでしょうが、それは現在の性能でも十分に可能なのか、それともさらに一段の技術開発が必要なのか、見直しをお聞かせください。

回答（佐藤 雄太）

ソフトマターの低加速観察はこの研究の最終到達目標ですが、現在までの観察実験では、その準備段階として既知の物質であるカーボンナノ材料を使用し、低加速化の効果の検証を主な目的としてきました。ここで使用したCNTやグラフェンは、優れた機械的強度でも知られており、また電子線照射に対しても、ソフトマターに比べると安定であると思われます。しかし、これまでの電子顕微鏡装置を使用した研究では、120 kVや80 kV等の低加速設定を行ってもなお、深刻な照射ダメージのため、学術的に重要な多くの観察・分析テーマを未解決のまま断念せざるを得ない状況でした。今回、新開発の低加速専用装置により、例えば炭素単原子に対するEELS測定の実現をはじめ、低加速化による照射ダメージの大幅な低減と高感度化を達成することができました。低加速顕微鏡試作機の性能は、特に空間分解能の点では当初の目標にすでに到達しており、今後は照射ダメージの低減効果をさらに検討するため、装置を実際にソフトマターの観察に応用する段階へと移行します。この過程では、低加速顕微鏡の装置本体の完成度をさらに高めることも当然必要ですが、実際の試料観察を通じて、ソフトマターにおける照射ダメージの有無やその未解明のメカニズムを検証し、加速電圧や電子線照射量等、観察条件の最適化を図ることが最大の課題となります。これは、低加速装置の応用と普及を促進するための重要なステップであり、特に産総研チームが中心となって、開発者とユーザーの双方の視点に立ちながら取り組むべき課題であると認識しています。

査読者との議論

議論1 筆者の役割分担

質問（阿部 修治：産業技術総合研究所評価部、清水 敏美：産業技術総合研究所ナノテクノロジー・材料・製造分野）

この論文の筆者は8名の連名で構成されていて、主たる研究成果は産総研と日本電子の共同研究による成果と思いますが、関連する研究としてJST-CRESTプロジェクト（産総研と日本電子、物質・材料研究機構との共同研究）があります。論文最後に筆者略歴が記述されるとは思いますが、各機関および構成メンバーのこの論文における役割分担についてお聞かせください。

回答（佐藤 雄太）

この研究は、筆者を含めて産総研と日本電子から各8名、NIMSから2名の研究者（いずれも技術員を除く延べ人数）による共同プロジェクトとして推進されています。これは、着想当時まったく前例のなかった低加速専用電子顕微鏡を限られた期間で実現するために、観察・分析法の理論や電子顕微鏡装置、観察対象の物質・現象（固体物理学、材料科学、ナノ・バイオ）に関して、専門知識と経験を結集する必要があります。日本電子チームは電子顕微鏡メーカーの立場から、個々の要素技術の開発と低加速電子顕微鏡の設計、試作を担当しています。産総研とNIMSの両チームは、低加速化の着想に基づく予備検討、これまでの装置による参照実験、低加速試作機による応用実験を担当しています。以上の役割分担に関して、2章に追記しました。

議論2 開発競争

質問（清水 敏美）

球面収差補正や色収差補正機能をもった低加速電圧専用の電子顕微鏡を独創的に世界に先駆けて開発したことがこの論文から伝わってきます。一方、6章には最近では当該研究が電子顕微鏡装置開発のメインストリームであり大規模プロジェクトが進んでいるとあります。この世界動向はこの研究成果を受けての動きなのか、それとも新たな独自の要素技術の統合による動きなのか不明です。世界的な動向とこの研究のベンチマークに関する記述を追加していただければ、より研究の特徴が出るものと思います。

回答（末永 和知）

この研究は、低加速に特化した電子顕微鏡の独自開発プロジェクトとして世界初のものですので、修正稿においてこの点を明記しまし

議論4 実用化と普及

質問（清水 敏美）

種々のソフトマターが低加速電圧でしかも高感度に電子顕微鏡観察できることは関連する研究者にとっても、さらには学術的分野を問わず、材料、ライフサイエンス、他の分野への波及効果は計り知れないものがあります。1号機の成果事例をみると、すぐにでも実用化が可能のようにみえます。実用化への工程、問題点、解決すべき課題は何かをもう少し言及すれば、本格研究としての位置付けもさらに明確になると考えます。

回答（佐藤 雄太）

1号機による応用実験は現在も進行中ですが、同機が安定して高性能を発揮している実績からも、決して遠くない将来にその実用化が達成されるという見通しを持っています。その一方で応用実験では、装置内のいくつかのファクターが当初の想定以上に大きな影響を及ぼし、場合によっては観察を妨げたり、性能の頭打ちの主要因となることが明らかになっています。実用化に向けては、これらの問題の解決も重要と考えられますので、5.3節を新たに設け、課題と対策に関して記述しました。

システム科学技術の研究開発

科学技術振興機構（JST）の研究開発戦略センター（CRDS）では、システム科学技術推進委員会を設けて、システム科学技術研究として何を推進すべきかを検討してきました。研究領域が細分化に進むのに対して、システムとは統合することであることから、シンセシオロジーが目指しているところと共通しているものがあります。システム科学技術推進委員会を牽引されてこられた木村英紀上席フェローにお話を伺いました。

シンセシオロジー編集委員会



座談会出席者

木村 英紀	JST 研究開発戦略センター上席フェロー
小林 直人	産総研（シンセシオロジー副編集委員長）
赤松 幹之	産総研（シンセシオロジー編集幹事）

赤松 木村先生が推進されているシステム科学技術は、社会に科学技術を生かすという意味でシンセシオロジーと近い気がいたします。システム科学技術について、シンセシオロジーとシステム技術の関係、今後の社会課題を解決するために必要な技術についてお伺いしたいと思います。

小林 今回の東日本大震災や原発事故について、評価がまだ決まっていない段階ですので話題に取り上げるのは時期尚早な気もしますが、システムの問題がとても色濃く出ている事象に思えます。

木村 事実関係が今どれだけわかっているのかということではありますが、一つ、ロボットの問題が議論が挙がりました。海洋、宇宙、災害、原子力等の分野で用いられる極限作業ロボットを目標としたプロジェクト（1983～1990）があったのですが、それらが表立って投入されなかったのは技術の問題なのか、人の問題なのかということです。研究が要素技術に偏ってしまっています。「こういうことができる」ではだめで、システム技術が重要だということが明確になった一例と言えます。

小林 今回の原発事故では、ハードウェアとしてのシステム、ハードウェアと人の相互作用のシステム、政治も含めて人々がどう対応するかという人間群のシステム、この三

つのシステムそれぞれに問題があったのではないかと気がいたします。そういう意味で、システムとしての課題をきちんと抽出し、それへの対応の方法を考えることが今とても大切です。

科学技術システムは課題解決のためにある

赤松 JSTにおいて、システム科学技術を取り上げた背景と言いますか、なぜ、今、システム科学技術なのでしょう。

木村 現代は「システムの時代」と言っていると思います。現代はシステムの中であっふあっふしている状況です。そこにサイエンスとしての筋道をつけていくことが重要だと思いました。「システム技術」がシステムを解析・設計・実装するためのツール、「システム科学」はそれを普遍的な人工物の科学として体系化したものと考えれば、システム科学技術は複雑な社会に大規模なシステムを構築し発展させるためのものと言えます。

小林 システム科学技術とは、課題を解決するための科学技術ということですね。私達もシンセシオロジーの中で、目標が何かということを決め、それに対してどうシナリオを描いていくか、そのための構成方法は何かということを描述しています。漠然と、単に要素を組み合わせれば良いと

ということではありません。それがこの分野の科学の特徴だと思います。一方で、「設計科学」ということを木村先生も吉川先生もよく言われます。システム科学技術はそういう範疇にあると考えて良いでしょうか。

木村 まさに設計科学の一つだと思います。

赤松 「システム技術」ありき、なのですね。課題解決に必要なシステム技術があって、その基礎となるものがシステム科学だと。システムはそもそも課題解決のためのものだという事ですね。

小林 要素技術だけでは課題解決はできませんから、システムが必要ですね。日本は、システム科学技術、システム思考も含めてこの分野では弱いと言われますが、明治以来これまで百何十年、それなりに世界に伍してやってきたと思います。なぜ、システムの分野では弱いと言われるのでしょうか。

木村 ある特定のフェーズではとても強いと思いますし、日本のシステム科学技術が輝いていた時代もありました。例えば、1960～70年代にかけての新幹線システムや、電電公社のデータ通信用計算機 DIPS、製鉄所の年産1,000万トン一貫生産管理です。これらはシステム的な思考がないと作れないですね。

小林 私の専門分野の一つで言いますと、日本はわりと早い時期から光通信技術は進んでいます。なぜかと言うと、個別技術であるファイバー技術、半導体材料や光デバイス等の研究開発のポテンシャルが高く、その性能がとても良かったことと、ネットワークにしてシステムにするところまで世界に先駆けてもっていくことができたからです。新幹線も光ネットワークも、必ずしもキャッチアップ型ではないものを60年代から80年代初頭までに作り上げているというのは、とても興味深いです。

木村 あの時期は、システム技術は名実共に強かったと思います。私が学生の頃は数学が好きなやつが幅を利かせていましたし、そういう類の学科も大学にたくさんあって、時代精神に合っていたのではないのでしょうか。これは日本だけでなく、アメリカ等もそうだったかもしれません。しかし、80年代以降、要素技術の深掘りが極めて大きな価値をもつようになりました。

小林 世界のアカデミアがそちらの方向にいったということでしょうか。

木村 日本だけでしょう。“ものづくり”という言葉が現れたのが90年代初めくらいですから、あの頃からです。まだ分析はできていないのですが、一つは、“驕り”でしょう。日本の製造業が世界を制覇しましたが、そのときに目立ったのは要素技術でした。要素技術において勝った、という認識があったのだと思います。

赤松 「勝った」理由が実はシステム技術だったというふうに認識しなかったわけですね。海外に輸出することが「勝った」基準になっている場合は、どうしても要素技術になります。

木村 鉄を例に挙げますと、60年代の半ばに日本で年産1,000万トンの一貫製鉄所が世界で初めてできました。それより前はUSスチールで500万トン程度だったので、一気に倍増しました。なぜ500万トンで抑えられていたかと言うと、システムが難しかったのです。鉄鋼は注文生産なので一品生産です。生産ラインを個々の注文品が追っていかねばいけなから、目視でやらざるを得なかったのですが、それを完全にコンピューターライズすることによって、スケールメリットが出ただけでなく、品質もはるかにいいものになりました。しかし、システム技術の貢献は結果として評価されませんでした。これは人事を見ればよくわかります。そういう人は役員になっていないですよ(笑)。日本の鉄が世界を制覇したのは品質が良かったからだ、鉄は素



小林 直人氏



木村 英紀氏

材産業として生きるのだというふうになってしまいました。他の業界もそうだと思います。

赤松 製造システムの価値でありながら、「もの」という要素的技術に帰着して、そこに価値があるのだと思ったということですね。

木村 あのころ日本人にそういう“驕り”があったということ、本質を見極めて、次に備えようという気がなかったのです。このまま日本は世界をずっと制覇し続けるだろう、そして経営も日本的経営が世界を制覇したというふうに思っていました。

日本の産業を転換するとき

小林 今回の大震災で、製造業は相当打撃を受けていると聞いています。1970年代初頭の石油ショックで、それまでの鉄鋼、造船等を中心とする重工業による高度成長は終焉し、産業の主体が自動車や電機産業に移ったと言われています。今は自動車もこのような状態ですし、将来EV(電気自動車)が主流になるとどうなるかわかりません。たぶんこの大震災を機に日本の産業は転換をする必要があるのだろうと思うのですが、まさにシステム科学技術をもう一度取り戻すときではないでしょうか。

赤松 とかく物事がうまくいかなかったときに、人災というふうには、人に原因を求めることが多いのですが、それはすごく危険です。人に帰着するというのは要素へ帰着するという思想です。震災からのリカバリーのときに、どこがミスをしたとか、ある1点にその問題点を帰着させて議論が進んでしまうということは、その発想自身がシステムの的を見えていないということです。

システム技術が輝いていた例として、新幹線のシステムを挙げられましたが、新幹線の技術面の開発をマネージしていた国鉄の島技師長が「ごく当たり前のこと。行き届いてものを考えることに尽きる」と言っておられます。新幹線を動かすために必要なものは何なのかということを考えてひ



赤松 幹之 氏

たすらちゃんと作ったという意味だと思うのです。その頃の優れた人は、当たり前のように、システムのものを考えて、ものを作っていたわけですね。ただ、「これがシステムなのだ」と言ってくれなかったために、それが伝わらなかったのです。当時は、“計算機システム”とおよそ同じ意味の言葉として使われ始めていたので、そこがシステムのものの考え方というふうに広まっていきませんでした。教育の中にうまく組み込まれなかった感じがします。

木村 システムという言葉もそんなに多用されなかったかもしれません。ただ、新幹線やNTT-DIPSはとても先進的でしたし、鉄鋼の1,000万トン一貫生産、これはシステム技術の勝利で、世界の先端を走っていました。“驕り”があったのでしようが、これからもう一度頑張らなければいいのです。

赤松 過去を見てそこから何を学ぶかというときに、要素で勝っていたと思っていたために、課題の設定自身を要素に落としてしまいました。課題がシステムになっているのだということをお問わないと、いくら課題解決型とうたったところで解決できないということですね。

システム構築のための戦略研究が必要—やみくもにやらない

小林 「課題がシステムになっている」と言うのは、とてもいい分析ですね。システムというと、初めからある構造を設計して、それをロバストに作っていくものもありますし、部分最適化を自律分散的に作っていくようなシステムもあると思います。それは、まさに課題をどう解決するかによって違ってくると思うのですが、システムをデザインする方法論はさまざまにあるのでしょうか。

木村 部分的最適化に陥ってはだめです。自律分散にするにしても、あらかじめこういう自律分散にしようという事で設計しないとイケません。

私達が提案したのは「システム構築戦略研究が必要である」ということです。これはCRDSのシステム科学技術推進委員会の終わりのほうの議論で出てきたのですが、日本の科学技術に欠けているものです。私は制御屋ですが、制御系の設計では、大きなプラントにコントローラーをインプリメントするときに、やみくもにやりません。モデルベースと言って対象を徹底的に解析し、モデルを作って、コンピューターの中にそのモデルを入れて、パラメーターを最適に設計して、これでいいかというシミュレーションを何度もやって、いいとなったら実装するわけです。これが鉄則です。

ところが、我が国では、すぐに実証研究を始めます。要素技術について基礎研究はしますが、システムのなものについて基礎研究は必要ないと思っているのです。もちろん、あるフェーズで説得力をもたせるために実証研究は必要ですが、その前にやるべきことがあるのではないのでしょうか。実証研究をパッとやっても、一つのシナリオに関してこうなったというだけで、環境が変わったら全然別の話になります。徹底的にシステム構築戦略を練り、いろいろなシナリオを想定してからやるべきです。諸外国ではほとんどのケースでそうやっています。

赤松 ファンディングの話に少し絡んでしまうのですが、何かモノを作るというお金がつくれども、システムを設計したり、シミュレーションしたりするのに対して、お金がつきにくいですね。どうしても要素技術にお金がつきやすい傾向がありますね。なぜこの研究が必要なのか、どういうことに繋がるのか、というシナリオは重視されず、速さが何倍になるといった技術要素の性能指標を出さないと納得してもらえません。

木村 それは行政組織の大きなマイナスの伝統だと思いますね。

社会的期待に添う科学技術とは

小林 いわゆる学術論文誌は、世の中の学術水準の上に何か一つ新しい知識を加えることが評価されます。シンセオロジーでは、もちろん新しい知識は必要なのですが、何のためにどのような要素技術を選択し、それらの構成方法を構築したのかということも前提にして、その研究成果の社会という場での実用を目指すということが最終的な目標です。研究目標と社会とのつながり、シナリオ、そのためにどういう要素を選択して、それを統合して実現しようとしたかということを論文の必須アイテムに入れています。きょうのシステム科学技術の研究開発のお話に近い部分があるような気がします。

赤松 シンセオロジーでシナリオを書く部分は、対象なり、研究課題をいかにシステムとして見ていくかです。そもそも要素が一体どういう構造になっているかという部分に注目しています。

木村 システム科学技術は、さまざまな機能をもつ要素を統合して一つの全体機能の実現をうたっていますが、これはシステムの思考がとてたけている人でないといけないですね。

第4期科学技術基本計画が課題解決型になっていることに対し、学会会議はとても大きな危惧の念を公表しています。課題が与えられるということは科学者の自立性はどこにいくのか、という疑問です。課題解決型の科学技術の中で、科学者、技術者の自立性がいかに守られるべきかということですが、研究目標と社会のつながりを吉川先生は「社会的期待に添う科学技術」と言っています。そこは大きな問題提起ですね。

小林 そのためにも、まず戦略を考えなければいけないと思います。課題解決の課題は、自分達が設定する、そこにアプローチする方法は自由でいい、という考え方が重要だと思います。例えば、研究を社会との関係でレイヤーで考えた場合、基礎だろうが、応用だろうが、どのレイヤーにおいても、初めにみんなで合意した研究戦略を立てたら、それで研究成果は研究戦略との関係で評価すればいいのではないかというのが私の主張です。ですから、まず重要なことは「研究目標と社会のつながり」を研究戦略の中にきちんと埋め込んでおくことだと思います。

木村 科学技術はキュリオシティドリブンとプロジェクトオリエンティッドに分けられるわけがありません。科学研究の中に戦略は絶対ありますし、ある意味、どんな純粋科学技術でも課題を解決しているのです。

赤松 課題が生まれる前にキュリオシティがあって、おもしろいと思ったから課題にしているのであって、それを解決するという事は、そもそも自分が面白いと思ったことの構造がどうなっているかをブレイクダウンして考えていくことを系統的にやっているわけなのだけれども、そのことに気づいていないということですね。

木村 好奇心がない研究なんてないですものね。

システム構築戦略に必要な教育と法律

小林 昔は新幹線やDIPS等、日本にはそれなりにシステムのしっかりした部分がありましたが、システム思考あるいはシステムを考えるポテンシャルが下がってきてしまったというご指摘でした。今、私達に必要なことは何でしょうか。

木村 ものづくり基盤技術振興基本法が1999年にでき、ものづくり大学ができ、ものづくり基本白書を毎年出すことをあの法律は定式化したわけです。まさに世界の技術がシステム化、ソフトウェア化という「モノからコトへ」へいったときに、日本はそれと逆行したようなことになりま

した。ですから、今のこの時代に、私はシステム基盤技術振興基本法くらい、作るべきではないかと思うのです。

赤松 教育もあるかもしれませんね。研究室の博士課程の大学院生が教授から与えられたテーマをやっているようでは、課題を具体的にシステムとして理解するのは難しいでしょうね。

小林 国際機関や諸外国の政策を形成する中枢には PhD をもった人が大勢います。今、日本の中央省庁の行政官で PhD をもっている人は極めて少ないのではないのでしょうか。もう少し PhD のコースを充実させて、大学の教育自体を変えていかないといけないと思います。教育からいうと先生も変わらなければなりませんね。要素技術はもちろん重要なのですけれども、それをいかにシステム化するかというところが大切です、というふうにもっていけるといいですね。

構成学もシステム科学技術もスパイラルが重要

赤松 そうですね。システムを設計するということが、どういう順番でそのシステムを動かしていかを決めることにもなるので、いったん設計して、それで動かしていくことによって解決できることがたくさんあると思うのです。実世界とインタラクションしながらスパイラルしていくのです。

木村 全くそのとおりですね。私達も今回の災害でなぜシステムがうまく作動しなかったかを調べているのですが、最大のポイントは、防災という概念と救助が結びついていなかったのではないかという気がしているのです。スパイラルが動いていなかったのですね。一方で、災害救助特別措置法や災害救助法等、法律はいっぱいあって、そこではこういう災害が起こったら対策本部を立ち上げて、次にどうするというプロトコルはけっこう書かれているのですが、防災体制は時々刻々変わっていきます。人も移動するし、都市環境も変わっていくので、それらをアップデートしていかなければいけません。

災害が起こったら、まず地震のスケールと震源地がわかれば、第一次の被害予測をします。さらに情報が集まってくれば、被害予測を精密にしていく一方で、それをベースにして、どういう救助体制を組むか、これらをループで回すことが必要です。

赤松 正常の状態に対する防災はあるかもしれないけれども、大震災の後の状態に余震が来たときの防災は考えていないということは、スパイラルを回していないということ

ですね。

小林 木村先生がおっしゃったように、最初にモデルベースでアナリシスをして、シミュレーションしてシンセシスをするというプロセスを何回も回すことが重要ですね。

木村 そうです。シンセシオロジーは、研究が終わった後もスパイラルを回すのですか。

赤松 まだそこまで至っていません。世の中に出したときにその研究を評価する力が必要になってきます。要求仕様が出てきたらそれに対応するレベルではなく、その先に行かないといけない。1回スパイラルを回すと、制約条件が最初のレイヤーと全く変わっていくので、もう1回、設計し直さなければいけません。スパイラルを回すということはそういうことなのですね。

小林 社会実装は産業界を巻き込まないとだめですから、産業界のまさに実装した人たちが振り返って、その方法論の論文を出していただけるといいなと考えています。

システム科学技術は文理融合の促進剤

赤松 システム科学技術委員会活動は去年で一応終わりになって政策提言が出されましたが、こういう考え方なり、学問が伸びていくためにどんなことが重要だと考えておられますか。

木村 イノベーションの中にシステム科学技術を入れ込んでいくということですね。具体的に提案して、その中でちゃんと実績を作っていくのです。文科省にそういうことを担当する原課がないので、今、いろいろお話をしているところです。

小林 科学技術をシステムと考えると、いろいろな分野や異業種のシステム化が必要になってくると思います。大学で昔から文理融合が必要とか言われてはいるものの、なかなかうまくいきません。理系に比べると文系の社会科学系の先生方はあまりのってくれません。ただ、今後システムと考えると、今はたぶん理工学の分野だけの話だけではなくなっていますね。

木村 システムが文理融合の促進剤になる可能性はありますね。文のほうでもシステムというのは大問題になっています。社会システムとは一体何なのか、喧々囂々の議論を社会科学でやっています。

小林 欧米あるいはアジアで文理融合あるいはシステム科学技術の取り組みがうまくいっている例はありますか。

木村 オーストリアのIIASA(国際応用システム解析研究所:International Institute for Applied Systems Analysis)は70年代の初めにできましたが、そこは文理のどちらもいます。『成長の限界』が発表された後、当時の東西冷戦下で、協力できるテーマがないかということで、国連の肝入りで作られました。人口問題やCO₂の低減にも随分力を入れています。権威があるRAINS(越境大気汚染の輸送に関するシミュレーションモデル:Regional Acidification Information and Simulation)というモデルももっていますし、一つの成功例ですね。それから、中国もシステム科学は強いのです。科学院にシステム科学研究所がありまして、とても大きい。それと、複雑系研究所のメッカと言われるサンタフェ研究所は、物理学者だけでなく経済学者や社会学者もいます。日本には、システム科学の研究所はないですね。

小林 新幹線のような成功例が出るといいですね。あんなに大きくなくてもいいと思うのですが。

木村 ほんとうにそう思います。私が今提案したいのは、救援組織のシステム化、救助体制のハイテク化ですね。今度の災害以来、日本の科学技術は国際的に評価を下げました。救助システムの普遍的なものを作って、他の国にこういうふうにやればいいということを示せればと思います。

赤松 対応できるシステムを作っておけば、どれが機能するかしないかということがわかります。システム化することによって、状況が変わったときに判断ができるはず。復興のプロセスを系統的にやれるといいですね。

小林 システム科学技術とシンセシオロジーはかなり重なっていると思っています。シンセシオロジーの論文を元に議論した中で、スパイラルやフィードバックがとても重要だというのが最近の私達の認識なのです。木村先生がおっしゃったように、初めからリジットに設計するだけではなく、システムでも回していくということが大切ですね。

木村 日本はいったん計画を立ててしまうと変えられません。この欠点を補って時間的な進化を担保する必要があります。

赤松 “課題研究”がキーワードだと思います。課題と言うと与えられたものというように思いがちなのですが、そんなことはなくて、自発的に課題を捉える力があって、それをシステムとしてブレイクダウンして初めて解決できる。構成学もシナリオを作る方法論を目指しているの、ねらっているところはすごく近いと思います。

木村 システム科学技術、構成学が存在感をもつことがこれからの科学技術においては求められます。産総研におけるシンセシオロジーのウケはどうですか。

赤松 認知度はまだまだかもしれませんが、3年前からイノベーションスクールというポストドクの教育を始めて、シンセシオロジーを教材にしています。ドクターを出たばかりの若手研究者に、研究全体の流れを捉えて、どうやって研究を構築していくか、そういう観点でものを見ることが大切だという話をすると、けっこう評判がいいのです。

木村 徐々に広がりつつあるということですね。JSTの中ではシステム科学技術に対する理解はまだまで、システムって研究になっているの？こんなものはやろうと思えばだれでもきるんじゃないの、というような考えの人は多いです。ただ、第4期基本計画の中にシステム科学技術が振興分野の対象に書かれましたので、何かがこれから起こってくるだろうと思いますね。

小林 科学技術のあり方も、モデルベースでアナリシスをきちんとし、シミュレーションをして、その上で貴重なお金をつぎ込むというふうにしなないとはいけませんね。システム科学技術が広まることを期待しております。

この座談会は、2011年4月22日に東京都千代田区にある(独)科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センターにおいて行われました。

略歴

木村 英紀(きむら ひでのり)

1970年東京大学大学院工学系博士課程修了、工学博士。大阪大学工学部教授、東京大学大学院工学系研究科教授、理化学研究所生物制御システム研究チームリーダー等を経て、2007年より理研BSI-トヨタ連携センター長。横断型基幹科学技術研究団体連合監事、科学技術振興機構研究開発戦略センター首席フェロー。IFAC、IEEEフェロー、IEEE CSSよりGeorge Axelby Award、IFACよりPaper Prize Award等受賞多数。2011年IFAC(国際自動制御連盟)よりGiorgio Quazzaメダル受賞。

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ない。むしろ幅広い分野の科学技術の論文の集積をすることによって、分野に関わらない一般原理を導き出すことを狙いとしている。したがって、専門外の実験者にも内容が理解できるように記述することが必要であるとともに、その専門分野の実験者に対しても学術論文としての価値を示す内容でなければならない。

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

改正 2009年3月23日

改正 2010年8月5日

1 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿、および読者フォーラムへの原稿を受け付ける。なお、原稿の受付後、編集委員会の判断により査読者と著者とで、査読票の交換とは別に、直接面談（電話を含む）で意見交換を行う場合がある。

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

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

3.2.5 タイトルは和文で10～20文字（英文では5～10ワード）前後とし、広い読者層に理解可能なものとする。研究論文には和文で15～25文字（英文では7～15ワード）前後のサブタイトルを付け、専門家の理解を助けるものとする。

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

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

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

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

3.3.4 図についてはそのまま印刷できる鮮明な原図、または画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則

は刷り上りで左右15 cm以下、白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.ONO

Senior Executive Editor: N.KOBAYASHI, M.SETO

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

Editors: S. ABE, K. IGARASHI, H. ICHIO, K. UEDA, A. ETORI, K. OHMAKI, Y. OWADANO, M. OKAJI

A. KAGEYAMA, T. KUBO, T. SHIMIZU, H. TATEISHI, M. TANAKA, E. TSUKUDA, S. TOGASHI,

H. NAKASHIMA, K. NAKAMURA, Y. HASEGAWA, J. HAMA, K. HARADA, N. MATSUKI,

K. MIZUNO, N. MURAYAMA, M. MOCHIMARU, A. YABE, H. YOSHIKAWA

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

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

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

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

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

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

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

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

1 Types of contributions

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

will be reviewed by the Editorial Board prior to being approved for publication.

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

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

3.2 Structure

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

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

3.2.3 The manuscript shall be prepared using word processors or similar devices, and printed on A4-size portrait (vertical) sheets of paper. The length of the manuscript shall be, about 6 printed pages including figures, tables, and photographs.

3.2.4 Research papers and editorials shall have front covers and the category of the articles (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheets.

3.2.5 The title should be about 10-20 Japanese characters (5-10 English words), and readily understandable for a diverse readership background. Research papers shall have subtitles of about 15-25 Japanese characters (7-15 English words) to help recognition by specialists.

3.2.6 The abstract should include the thoughts behind the integration of technological elements and the reason for their selection as well as the scenario for utilizing the research results in society.

3.2.7 The abstract should be 300 Japanese characters or less (125 English words). The Japanese abstract may be omitted in the English edition.

3.2.8 The main text should be about 9,000 Japanese characters (3,400 English words).

3.2.9 The article submitted should be accompanied by profiles of all authors, of about 200 Japanese characters (75 English words) for each author. The essential contribution of each author to the paper should also be included. Confirm that all persons who have made essential contributions to the paper are included.

3.2.10 Discussion with reviewers regarding the research paper content shall be done openly with names of reviewers disclosed, and the Editorial Board will edit the highlights of the review process to about 3,000 Japanese characters (1,200 English words) or a maximum of 2 pages. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as part of the article.

3.2.11 If there are reprinted figures, graphs or citations from other papers, prior permission for citation must be obtained and should be clearly stated in the paper, and the sources should be listed in the reference list. A copy of the permission should be sent to the Publishing Secretariat. All verbatim quotations should be placed in quotation marks or marked clearly within the paper.

3.3 Format

3.3.1 The headings for chapters should be 1, 2, 3..., for subchapters, 1.1, 1.2, 1.3..., for sections, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3.

3.3.2 The text should be in formal style. The chapters, subchapters, and sections should be enumerated. There should be one line space before each paragraph.

3.3.3 Figures, tables, and photographs should be enumerated. They should each have a title and an explanation (about 20-40 Japanese characters or 10-20 English words), and their positions in the text should be clearly indicated.

3.3.4 For figures, clear originals that can be used for printing or image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be 15 cm x 15 cm or smaller, in black and white.

3.3.5 For photographs, clear prints (color accepted) or image files should be submitted. Image files should specify file types: tiff, jpeg, pdf, etc. explicitly (resolution 350 dpi or higher). In principle, the final print will be 7.2 cm x 7.2 cm or smaller, in black and white.

3.3.6 References should be listed in order of citation in the main text.

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title*

of journal (italic), Volume(Issue), Starting page-Ending page (Year of publication).

Book – [No.] Author(s): *Title of book* (italic), Starting page-Ending page, Publisher, Place of Publication (Year of publication).

4 Submission

One printed copy or electronic file of manuscript with a checklist attached should be submitted to the following address:

Synthesiology Editorial Board
c/o Website and Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Industrial Science and Technology(AIST)
Tsukuba Central 2 , 1-1-1 Umezono, Tsukuba
305-8568

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

既存対象の全体から部分知を抽出するAnalysisと、部分知から新奇対象の全体を構成するSynthesisには本質的差異があります。

この号の各論文はいずれも興味深いものです。対象とされたのは、空調システム、浄水システム、自動車用ナビゲーション、電子顕微鏡、サービスであり、すべて新たな人工物の創出を扱っています。既知の構成要素の統合を実践するコンソーシアムや共同研究について、あるいは、必要な構成要素の新規開発について述べたものです。

ところで、何故人工物を創出するかと言えば、それがなんらかの価値を生み出すと期待されるからです。構成された人工物は、環境との相互作用で機能を発現します。しかし、優れた機能性が、自明的に価値の増大をもたらすわけではありません。環境で作動し機能を発現し、市場で取引され、人の主観的効用を満たし、社会的価値を増大しなければ、単に人工的なモノでしかなく、価値を生み出すことにはなりません。そして価値には、市場普及だけでなく、社会受容、文化波及という内容があります。いずれも、価値は“広がり”の本質をもつという意味で社会的です。そっと秘匿されるのは宝物であっても、価値ではないからです。それ故、社会的価値は、機能最大化とコスト最小化だけで論じることはできません。

この点から、論文「自動車用ナビゲーションの総合的開発」では、社会受容のための国際標準化に向けた筆者らの体験が詳細に述

べられ、得られる知見の多い貴重な論文です。また、論文「人の認知行動を知って製品やサービスを設計する」における、複雑な開放系である実世界における価値創成には人工物と人の相互作用が不可欠であり、その認識を通じて社会に受容されるという主張は、重要です。

木村英紀教授を交えた座談会「システム科学技術の研究開発」ではいくつかの重要な論点が示されていますが、その中で吉川弘之産総研最高顧問の「社会的期待」にも言及があります。「社会的期待の発見」は、観察者によるアナリシスなのか、あるいは行動主体の参入によるシンセシスなのか、シンセオロジーの今後のテーマでもあると思います。

最後に、シンセオロジーで扱われる論文のポジショニングに触れたいと思います。Analysis（解析）には、方法としての分析と目的としての解明の意味があり、Synthesis（構成）には、方法としての統合と目的としての創成の意味があります。したがって、Analysis by Analysis、Analysis by Synthesis、Synthesis by Analysis、Synthesis by Synthesisの四つのカテゴリーができます。本誌に投稿される各論文が、いずれのカテゴリーにポジショニングされるかを明示した上で論理展開すれば、論文の主張がより明確となると思われます。

(編集委員 上田 完次)

Synthesiology 4巻3号 2011年9月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：阿部 修治、五十嵐 一男、一條 久夫、上田 完次、餌取 章男、大蒔 和仁、大和田野 芳郎、岡路 正博、景山 晃、久保 泰、清水 敏美、立石 裕、田中 充、佃 栄吉、富樫 茂子、中島 秀之、中村 和憲、長谷川 裕夫、濱 純、原田 晃、松木 則夫、水野 光一、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2 産業技術総合研究所広報部広報制作室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Demonstration test of energy conservation of central air conditioning system at the Sapporo City Office Building

-Reduction of pump power by flow drag reduction using surfactant-

H.TAKEUCHI

Designing products and services based on understanding human cognitive behavior

-Development of cognitive chrono-ethnography for synthesiological research-

M.AKAMATSU and M.KITAJIMA

A novel technology for production of drinking water in emergencies

-Specific material for selective nitrate adsorption-

A.SONODA

Integrated development of automotive navigation and route guidance system

-Product development for realization of dreams and standardization for social acceptance-

H.ITO

Innovative electron microscope for light-element atom visualization

-Development of low-voltage electron microscopes in "Triple-C" project-

Y.SATO, T.SASAKI, H.SAWADA, F.HOSOKAWA, T.TOMITA, T.KANEYAMA, Y.KONDO and K.SUENAGA

Round-table talks

Research and development of system science and technology

Editorial policy

Instructions for authors