

# Synthesiology

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

戦略的システムデザインによる最適化設計法の提案

複雑システムの信頼性を向上させる開発手法

ものづくり産業の国際競争を支援する電気標準

遺伝子解析の精度向上と試薬の開発

安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発

シンセシオロジー編集委員会

## 新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

注1 「悪夢の時代」は吉川弘之と歴史学者ヨセフ・ハトバニーが命名。「死の谷」は米国連邦議会 下院科学委員会副委員長であったバーノン・エーラーズが命名。ハーバード大学名誉教授のルイス・ブランスコムはこのギャップのことを「ダーウィンの海」と呼んだ。

注2 本格研究： 研究テーマを未来社会像に至るシナリオの中で位置づけて、そのシナリオから派生する具体的な課題に幅広く研究者が参画できる体制を確立し、第2種基礎研究<sup>(注4)</sup>を軸に、第1種基礎研究<sup>(注3)</sup>から製品化研究<sup>(注5)</sup>を連続的・同時並行的に進める研究を「本格研究 (Full Research)」と呼ぶ。本格研究 [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/research/honkaku/about.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/research/honkaku/about.html)

注3 第1種基礎研究： 未知現象を観察、実験、理論計算により分析して、普遍的な法則や定理を構築するための研究をいう。

注4 第2種基礎研究： 複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究をいう。また、その一般性のある方法論を導き出す研究も含む。

注5 製品化研究： 第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。

# Synthesiology 第3巻第3号(2010.8) 目次

|  |           |
|--|-----------|
| 新ジャーナル「Synthesiology - 構成学」発刊の趣旨   | i         |
| <b>研究論文</b>  |           |
| 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 — 人間特性研究 / 映像分析技術 / 映像制作技術の融合による安心・快適な映像を提供するための環境づくり —<br>・ ・ ・ 氏家 弘裕   | 180 - 189 |
| 戦略的システムデザインによる最適化設計法の提案 — 排熱の再利用によるデータセンターと農業の CO <sub>2</sub> 排出量の削減 —<br>・ ・ ・ 福田 次郎、日比谷 孟俊  | 190 - 196 |
| 複雑システムの信頼性を向上させる開発手法 — アーキテクチャ設計手法とモデル検査の融合 —<br>・ ・ ・ 加藤 淳、浦郷 正隆、狼 嘉彰   | 197 - 212 |
| ものづくり産業の国際競争を支援する電気標準 — キャパシタンス標準の実現と計量トレーサビリティ体系の確立 —<br>・ ・ ・ 中村 安宏、堂前 篤志  | 213 - 222 |
| 遺伝子解析の精度向上と試薬の開発 — ライフサイエンスに用いる化学試薬の製品化 —<br>・ ・ ・ 小松 康雄、小島 直  | 223 - 230 |
| 安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発 — 無線センサーによる鶏健康モニタリングシステム —<br>・ ・ ・ 伊藤 寿浩、増田 誉、塚本 健司  | 231 - 240 |
| <b>インタビュー</b>  |           |
| イノベーションを推進する根本的エンジニアリング<br>・ ・ ・ 鈴木 浩、赤松 幹之  | 241 - 246 |
| <b>編集委員会より</b>   |           |
| 編集方針   | 247 - 248 |
| 投稿規定   | 249 - 250 |
| 編集後記   | 258       |
| <b>Contents in English</b>   |           |
| <b>Research papers (Abstracts)</b>   |           |
| <b>Developing an evaluation system of visually induced motion sickness for safe usage of moving images</b><br>— Fermentation of a social understanding to supply secure and comfortable images through integration of researches on human characteristics, image analysis technique and image production technique —<br>- - - H. Ujike | 180       |
| <b>An optimum design method utilizing a strategic system design concept</b> — Reduction of CO <sub>2</sub> emission at a data center by reusing emitted heat for agriculture —<br>- - - J. Fukuda and T. Hibiya  | 190       |
| <b>A methodology for improving reliability of complex systems</b> — Synthesis of architectural design method and model checking —<br>- - - A. Katoh, M. Urago and Y. Ohkami  | 197       |
| <b>National electrical standards supporting international competition of Japanese manufacturing industries</b><br>— Realization of a new capacitance standard and its traceability system —<br>- - - Y. Nakamura and A. Domae  | 213       |
| <b>Development of novel chemical reagents for reliable genetic analyses</b> — Process from an original idea to marketing of a chemical product used for life science —<br>- - - Y. Komatsu and N. Kojima   | 223       |
| <b>Development of a sensor system for animal watching to keep human health and food safety</b> — A health monitoring system for chickens by using wireless sensors —<br>- - - T. Itoh, T. Masuda and K. Tsukamoto  | 231       |
| <b>Messages from the editorial board</b>   | 251 - 252 |
| <b>Editorial policy</b>  | 253 - 254 |
| <b>Instructions for authors</b>  | 255 - 256 |

# 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

## — 人間特性研究/映像分析技術/映像制作技術の融合による 安心・快適な映像を提供するための環境づくり —

氏家 弘裕

映像制作者が、自ら制作した映像によって生じ得る映像酔いの程度について、その時間推移を確認できる映像酔い評価システムの開発を行った。映像技術の進展に伴い映像酔いに対する社会的認知が広まりつつあり、娯楽や教育、医療など映像の有効な利用に対する可能性を損なわないために、映像制作者に理解を求めるためのツールとして本システムは有効である。この開発には、映像酔いの基礎特性を基盤として、これを一般の映像評価に適用するために、映像解析、映像制作、生体影響計測に関する研究協力が不可欠であった。

キーワード: 映像の生体安全性、映像酔い、生体影響、映像評価、映像ガイドライン

### Developing an evaluation system of visually induced motion sickness for safe usage of moving images

– Fermentation of a social understanding to supply secure and comfortable images through integration of  
researches on human characteristics, image analysis technique and image production technique –

Hiroyasu Ujike

We have developed an evaluation system of moving images by estimating temporal variations of discomfort levels of visually induced motion sickness (VIMS) caused by the images. The system is useful for making image producers understand the importance of reducing the possibility of VIMS. This activity will provide an environment that allows people to use moving images at ease in a variety of fields, such as entertainment, education and medical services. The system was developed by the collaborative research of image analysis, image producing and measurements of biomedical effects to apply the basic characteristics of VIMS for evaluating general images.

Keywords: Image Safety, visually induced motion sickness, biomedical effects, moving image evaluation, moving image guideline

#### 1 はじめに

映像酔いとは、一般に映像シーンの動きが比較的頻繁に含まれる映像を視聴した時に、以下に挙げる体調不良の症状を発症する状態をいう<sup>[1]</sup>。すなわち、めまいや発汗、眠気、唾液の増加、顔面蒼白、胃部不快感、吐き気、嘔吐など、運動酔い(いわゆる乗り物酔い)のような症状である。近年の映像メディア技術の革新的な発展は映像利用の可能性を飛躍的に増加させる一方で、同時に、この映像酔いに遭遇する機会をも増加させる可能性があり、早急な対策が必要である。

運動酔いについては、身体の動きに関する視覚情報や前庭情報など複数の感覚情報の間の関係が、身体の動きによって生じる通常の状態と異なる場合に、これを異変ととらえて症状が現れるとする考え方(感覚再配置説(Sensory rearrangement theory))<sup>[2]</sup>が有力である。これと同じ考え方が映像酔いについてもできる。例え

ば、椅子に座って身体が静止している時に、身体が空間を移動しているかのような映像による動きを与えられると、酔いを生じることがある。身体が移動しているという視覚情報が与えられる一方で、ふだんはこれに伴う加速度によって生じる前庭感覚情報や、椅子との接触面での圧力変化に関する触感覚情報などが伴わないことが、酔いの原因と考えられる。

近年の映像メディア技術の発達によって、映像制作にコンピュータ技術が導入され、小型で高精細なデジタルビデオカメラが普及することで、これまでになくダイナミックで迫力ある映像シーンの表現が可能となった。また大画面・高精細ディスプレイが家庭にも急速に普及し、ダイナミックでリアルな映像シーンを視聴できるようになってきた。こうした映像シーンの動きは身体運動情報として処理される可能性がある。したがって何も対策をとらなければ映像酔いを発症する可能性が増加すると考えられるため、早急な対

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  
Human Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan E-mail: h.ujike@aist.go.jp

Original manuscript received January 5, 2010, Revisions received June 1, 2010, Accepted June 2, 2010

策が必要である。

最近になって映像酔いと思われる事例がニュースメディアなどで報道されている。例えば2003年7月には、島根県内の中学校で授業中に講堂の大スクリーンにてビデオを視聴していた1年生294名のうち、36名が病院で手当を受けるという事例が発生した<sup>[3]</sup>。ビデオ映像は全編手持ちカメラで撮影されたもので、映像シーンに頻繁に含まれるさまざまな動きが映像酔いを発症した主要因であると考えられている。これとほぼ同様の事例は2006年11月にも三重県内の学校において発生している。

映像酔いは考えられている以上に影響が大きい場合がある。一般には、比較的軽度の症状の場合、映像視聴を中止することにより比較的短時間に症状が治まることが多いが、条件や人によっては耐え難い症状が1日程度継続することがある。こうした症状は業務によっては重大な危険につながる可能性があり、航空機シミュレータでの酔いの経験者はシミュレータ訓練後24時間以内の実機搭乗が禁止されている例もある<sup>[4]</sup>。

映像技術の発展により、娯楽分野だけでなく、教育や医療、福祉分野などさまざまな分野で映像の有効な利用の可能性が広がりつつある。これらの恩恵をできるだけ多くの人々が享受できるためには、映像酔いなど映像による好ましくない生体影響をできるだけ発生させないための環境作りが必要不可欠かつ急務となっている。産総研ではこれを実現するための概念として「映像の生体安全性 (Image Safety)」なる語を創造し、映像ガイドラインの作成とその国際標準化活動とを推進している<sup>[5]</sup>。この映像の生体安全性は単に映像の利用者にとって必要であるだけではない。日本の有力な映像産業がさらに健全に発展するためには、映像技術の開発と併せて車の両輪となるべきものであり、映像産業界関係者の視点でも必要不可欠なものである。したがって、映像の生体安全性は、映像制作や映像配信、映像表示機器開発など映像産業界の関係者との協力関係の下に進めていくべき課題であり、この問題に対するそれぞれの相互理解が必要不可欠である。筆者は、これを実現するためのツールである映像酔い評価システムについて、大学など外部研究機関や業界関係者との密接な協力・連携の下に共同研究を推進することで、その研究開発を進めてきた。本稿ではこの映像酔い評価システムの必要性とその開発に至るまでの研究シナリオを論じる。

## 2 研究開発の背景

### 2.1 研究開発に至る動機

映像酔いが生じる可能性を軽減するためには、映像酔いの影響要因とその影響の程度に関する客観的な知見に

基づいてガイドラインを作成することが必要である。しかしガイドラインがあれば十分というわけではない。ガイドラインは、国際標準化機構 (ISO) などで国際規格化が図られたとしても、基本的に強制力はない。

ガイドラインが有効に生かされるためには、これを利用する映像プロバイダとよばれる映像制作や配信に携わる関係者との協力の下に、ガイドラインの作成や見直しを行うことが必要不可欠である。そのために留意すべき点はいくつかある。第一に、映像酔いは必ずしも無視できない影響があることを、映像プロバイダに理解してもらうことである。一般的には、映像酔いはたいした問題ではないとの認識をもたれる場合があり、その対処が軽視される可能性がある。しかし、先述の島根県の中学校の例でも1割を超える生徒が病院で手当を受けたり<sup>[3]</sup>、状況によっては直後の業務において重大な危険につながる可能性がある。第二に、表現の自由や芸術的創造性の自由への十分な配慮が必要である。ガイドラインやその国際規格化は、しばしば映像制作への規制を生じるものと捉えられ、表現の自由や芸術的創造性の自由が不当に脅かされるのではないかという懸念が、映像プロバイダにはある。こうした事で映像の生体安全性に対する理解が妨げられないよう十分な配慮が必要である。その上で、以下の方法が有効であると考えられる。

(1) 映像酔い軽減に向けた映像ガイドライン作成に先立ち、こうした映像酔いを含む映像の生体安全性の問題の重要性を、さまざまな形で訴えていくこと。

(2) 個別の映像の視聴によって映像酔いがどの程度生じるのかを、具体的に映像プロバイダ自ら確認できる手法を開発し、その利用を通じて映像酔いに対する認識を深めてもらうこと。

(1) については、本稿の主題の範囲から外れるが、(2) については、本稿で述べる映像酔い評価システムの開発を目指すに至った原点である。

### 2.2 研究開発の必要性

映像酔い評価システムは映像が人々にどの程度映像酔いを発症させるかを評価するシステムであり、評価したい映像を入力することで、それを視聴する人の映像酔いの程度を映像の時間推移に応じて表示するものである。映像プロバイダの人々に映像酔いの重要性を認識し、今後作成される映像ガイドラインを活用して、映像酔いの発生を軽減させるために、特に以下の観点からこのシステムは必要不可欠なものである (図1)。

第一に、映像プロバイダに映像酔いが生じる条件とその程度とを具体的に把握してもらうためのツールとなる。さまざまな映像をシステムで繰り返し検討してもらうことで、一般にはわかりにくい映像酔いの程度やその時間推移が「見

える化」されれば、映像酔いに対する理解が深まると考えられる。

第二に、映像プロバイダらが制作または配信する映像を、客観的に評価するための手段となる。映像酔いは、後で述べるように個人差が大きく、また慣れが生じやすいため、例えば特定の個人などが個別に映像を視聴して一律に評価することは困難である。そこで、客観的に映像を評価するシステムの存在が必要になる。

第三に、映像制作に携わる人々が、制作した映像についてその対処方針を具体的に検討することを可能にする。映像酔いが生じやすい時間帯とその程度が明確になれば、これを参考にして映像編集することができる。したがって、映像の生体安全性を実現するための手段を提供するものである。

また、映像酔い評価システムは、ガイドラインの作成やその標準化において、ガイドラインの実効性を検証する強力なツールとなる。ISOでの議論<sup>[6]</sup>では、筆者は単純な動きの映像を用いて明らかにしてきた基礎的なデータに基づいて(4.1節参照)ガイドラインの国際標準化を図っている。本システムは、こうした基礎実験データに基づくガイドラインが、複雑な視覚運動を含む一般の映像に対して適用可能であることを示すために必要不可欠である。また規格化議論では、理想論に基づいて、現実的には遵守が困難な、必要以上に厳しい基準が提案される場合がある。本システムは、種々の条件の映像を評価することで、こうした無用な基準作りを排し、遵守可能な必要最小限の要件を満たすガイドラインの作成に寄与するものである。さらに本システムは、映像ガイドラインの発行後、これを実際に遵守す

るための手段を提供する。ガイドラインに基づいた本システムによって映像を解析・評価し、個々の映像による酔いの程度を「見える化」することで、映像の制作・編集に対する方針を立てやすくなると考えられる。

映像酔い評価システムの開発については、これまでさまざまな場において関係各業界に情報を伝達する機会を得てきたが、実際に、多くの関係者から利用希望の声をいただいている。例えば、映像制作の現場で実際に映像酔いの軽減が課題となっており、経験的にどの程度動きを押さえるかを理解しているつもりでも、それを客観的に確認したいとの声もいただいている。したがって、映像酔い評価システムは映像酔い軽減の重要性を理解している人々にも必要性が高いと言える。

### 3 研究開発のシナリオ

映像酔い評価システムの開発は、(財)機械システム振興協会の委託事業として(社)電子情報技術産業協会「映像酔いガイドライン検証システムの開発(2006年度;2007年度は、同システムの実用化)に関するフィジビリティスタディ(2006~2007年度)」として行われた<sup>[7]</sup>。この研究開発委員会では、映像酔いなどの生体影響に関する大学などの研究者の他に、映像酔いに関心のある映像メディア関連企業や映像制作者の参集が得られ、実際に研究開発の実施過程において、それぞれの立場からより具体的な協力や共同研究による連携を図ることができた。例えば、後述するように、本システムに不可欠な視覚的グローバル運動解析の高速化や、映像制作者による酔いやすい映像制作などでの協力である。これにより、当初の目標以上に、より実効性の高い映像酔い評価システムを開発することができた。

本システムの構成を図2に示す。この構成要素のうち、映像酔い評価モデルについては、単純な視覚的グローバル運動を用いて生体影響を計測した結果を基に出力するものであり<sup>[8][10]</sup>、必ずしも、視覚的グローバル運動が複雑に混じり合う一般の映像に対して直ちに妥当な出力が保証されるわけではない。そこで、映像酔いの推定結果を、実際の生体影響計測によって較正する必要があるため、そのために研究開発に当たっては以下の手順を採用した(図3)。

- (1) システム全体の構成を行う。
- (2) 酔いを生じやすい映像を用意し、これをシステムに入力した際の評価結果を得ると同時に、同一の映像を用いた視聴実験によって生体影響を計測し、両者を比較する。
- (3) 比較結果に応じて、システムの各構成要素を改良し

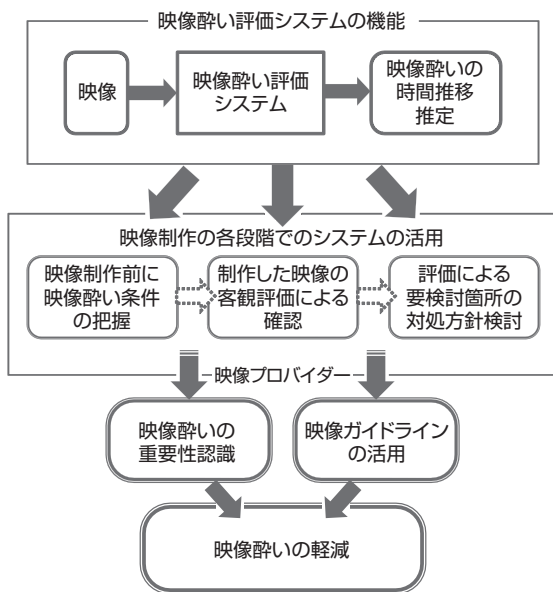


図1 映像酔い評価システムの利用による映像酔い軽減への効果

表1 映像酔いの影響要因

|         | 一次要因    | 詳細項目             | 二次要因 | 詳細項目   |
|---------|---------|------------------|------|--|
| 映像コンテンツ | グローバル運動 | 運動種類、速度、時間周波数、振幅 | 3D空間 | 両眼立体視、透視図法の整合性、<br>その他奥行き手がかりの存在               |
|         | ローカル運動  | 速度の空間分布、時間周波数、振幅 | 2D空間 | 空間周波数成分、輝度、コントラスト、色度成分                         |
| 映像表示条件  |         |                  | 時間的  | 提示時間、予測情報                                      |
|         |         |                  | 空間的  | 視距離、環境照度、提示サイズ、空間解像度、<br>輝度/コントラスト/色度の範囲、両眼立体視 |
| 視聴者属性   |         |                  | 時間的  | 時間解像度、表示器の携帯性(時間的位置変化)                         |
|         |         |                  | 感覚系  | 前庭動眼反射や視運動性眼振の特性                               |
|         |         |                  | 感受性  | 運動酔い感受性  |
|         |         |                  | その他  | 性別、年齢、視聴の構え、姿勢                                 |

評価の精度を向上させる。

(4) (2) に戻ること何回か繰り返す。

(5) 一定回数(4)を経た後に、映像酔い評価システムを業界関係者に試用してもらい、その試用アンケートを基に、ユーザー・インタフェースの使いやすさの向上を図る。

研究開発の進め方によっては、一般的な映像における酔いの特性を、数多くの映像を用いて十分に検証しておく、これを基にシステムの構築を図る方法も考えられる。しかし、映像酔いには数多くの映像要因がかかわるとともに、その時間的順序効果もあり、本質的な影響要因の解明には無数の条件の組み合わせを実現した無数の映像を用いる必要が生じる。さらに、個人差の影響を考慮すると多人数の実験参加者が必要である。したがって、実験回数は膨大なものとなり、その実施はほぼ不可能であると言ってよい。このような検討結果から、本研究開発では迅速なシステム構築を目指すために、基礎実験で明らかにされた映像酔いの基本特性を基盤としてまずシステムを構築し、その上で酔いを生じやすい一般的な映像を用いてシステムの評価精度の向上を図る手法を採用した。

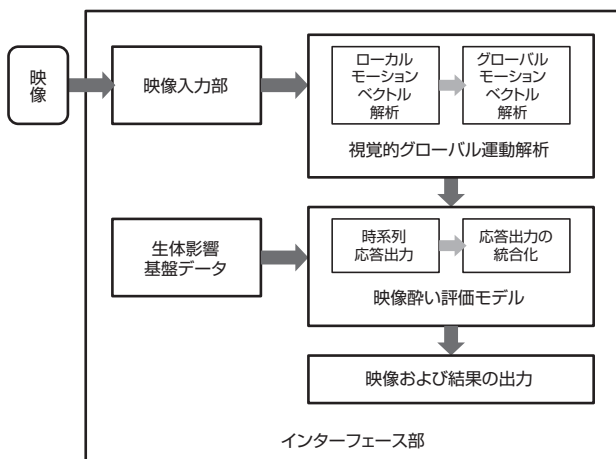


図2 映像酔い評価システムの構成

#### 4 技術要素と課題

映像酔い評価システムの研究開発を実施するために選択した技術要素と課題は以下の四つである。システムの構築におけるこれら要素技術の関係を図4に示す。

- (1) 視覚的グローバル運動による生体影響に関する知見
- (2) 映像の視覚的グローバル運動解析
- (3) 映像酔い評価モデル
- (4) 映像制作手法に基づく酔いやすい映像制作
- (5) 映像酔い評価モデル精度向上のための生体影響計測

##### 4.1 視覚的グローバル運動による生体影響に関する知見

映像酔いの影響要因として、さまざまなものが挙げられるが、映像酔い評価システムを構築するために対象とすべき第1の影響要因は視覚的グローバル運動である。視覚的グローバル運動とは、視野の大部分の領域に生じる全体としてまとまった動きのことで、基本的には、観察者の身体とその周囲の環境との相対的な運動によって生じる視野内の視覚的運動である。したがって、視覚的グローバル運動が大視野で提示されるとあたかも観察者自身が運動しているように感じられる。観察者と周囲環境との相対的な運動については、一般的に観察者を中心とする直交座標系に

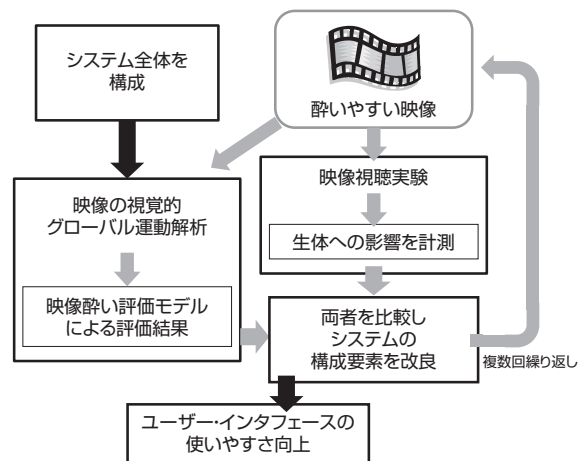


図3 映像酔い評価システムの研究開発手順

おけるヨー軸(垂直方向の軸)、ピッチ軸(左右に水平な軸)、ロール軸(前後に水平な軸)に対して、並進運動と回転運動とが挙げられる。したがって、視覚的グローバル運動もこれらに対応した運動を考えることができる。

映像酔いの影響要因は、表1に示すとおり、映像コンテンツ、映像表示条件、視聴者属性に分類されるとともに、映像酔いのきっかけとなる一次要因と、それを増強・減弱させる二次要因とに分類される。この表によれば、映像酔いのきっかけとなる一次要因は映像コンテンツに分類される視覚的グローバル運動である。この基本には、冒頭で述べた感覚再配置説の考え方があり、実際には身体が静止している状態で与えられる視覚的グローバル運動が身体の運動情報となって、体性感覚や前庭系からの感覚情報との間に乖離を生じることで酔いが生じるとする考え方<sup>[2]</sup>に基づく。そこで映像酔い評価システムでは、視覚的グローバル運動に関わる生体影響についての知見を第一の構成要素

として選択した。

視覚的グローバル運動による生体影響の基本特性については、経済産業省基準認証研究開発事業「映像の生体安全性評価法の標準化（2003～2005年度）」において、筆者らが明らかにしてきた。筆者らは実験においてCGにより仮想的な部屋を設定し、その中心に観察者が立位する状況を想定した。ここで、観察者の頭部の中心で直行する3軸（前述のピッチ、ヨー、ロールの各軸）を設定し、各軸回りの往復回転運動（振動）が与えられた際に観察される映像をCGによって作成し観察者に提示した。提示視野サイズは82 deg × 67 deg、提示時間は約1分間として、観察者から映像酔いに関連する11段階の主観評価を求めた。その際に、各軸回りの往復回転運動の条件として、2種類の振幅（30, 90 deg）と6種類の時間周波数（0.03, 0.06, 0.12, 0.24, 0.49, 1.0 Hz）を用いた。この結果、図5に示すように、映像酔いの影響

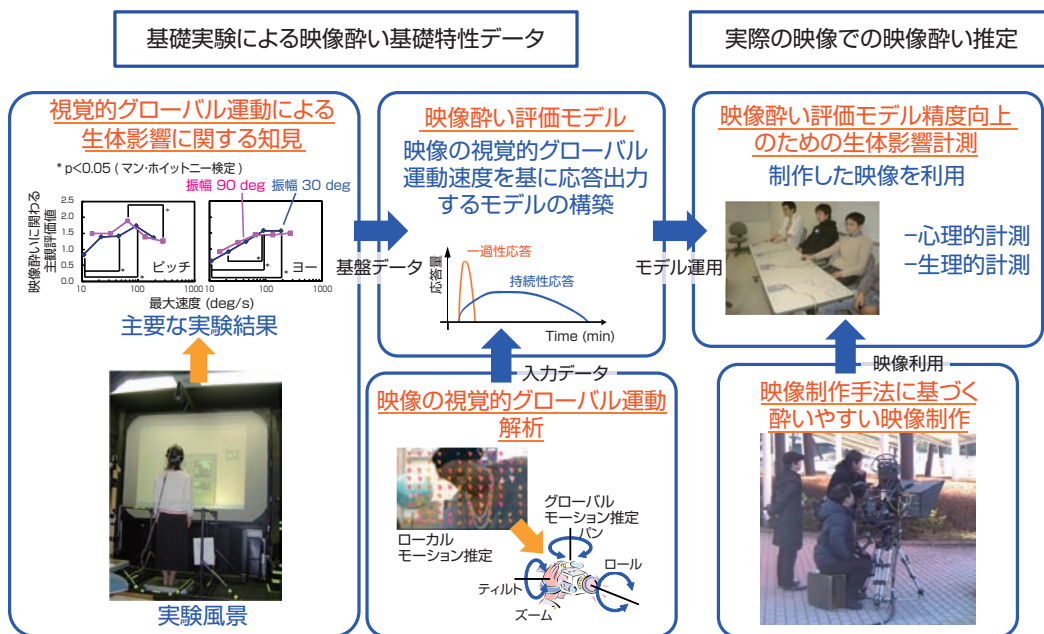


図4 映像酔い評価システムにおける要素技術の関係

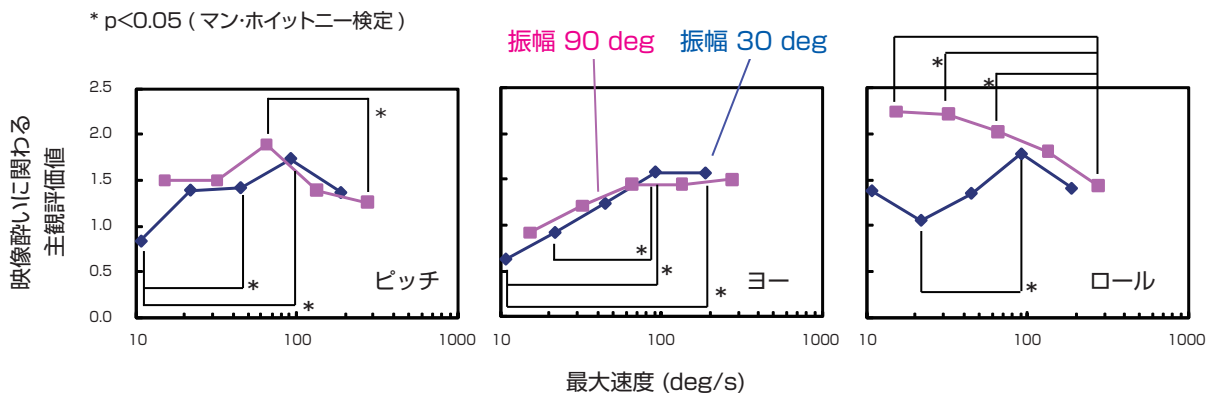


図5 視覚的グローバル運動による映像酔いへの効果



の大きさは映像中の視覚的グローバル運動の時間周波数成分ではなく、主として速度成分によって支配される<sup>[10]</sup>ことが明らかになった。したがって、映像に含まれる視覚的グローバル運動の速度が、図5の縦軸に示される生体影響レベルが一定以上となる帯域に含まれる場合に、生体影響が生じると考えることができる<sup>[11]</sup>。

映像酔い実験において留意すべき点は、映像酔いに対する慣れへの影響であり、これをできるだけ少なくするために、実験参加者は実験参加後に最低2週間をあけて次の実験に参加するという手続きをとる必要があった。図5の組み合わせ条件は最小限に抑えたものであるが、40名以上の実験参加者と2週間の間隔を開けるという手続きによって、この結果を得るのに半年以上を要している。

## 4.2 映像の視覚的グローバル運動解析

評価の対象とする映像に含まれる視覚的グローバル運動の種類と速度の時間的推移が明確になれば、前節で述べた知見に基づいて、どの程度の映像酔いが生じるかについての評価が可能になる。したがって、映像酔い評価システムでは、まず対象とする映像の視覚的グローバル運動を解析し、映像中に含まれる運動の成分およびその速度を抽出し、その速度の時間推移を求めることが必要である。これを実現する技術として、映像圧縮に関する研究での技術を応用したものが存在する<sup>[12]</sup>。そこで、この技術を映像酔い評価システムの構成要素として選択するとともに、研究開発段階においてこの技術を専門とする関係者やこれを実現する企業の本システム開発への参画を得た。

視覚的グローバル運動解析技術は、その過程に2段階がある。第1段階では、映像領域を例えば縦と横で16×16に分割し、各領域が次の映像フレームでどこに移動したかをパタンマッチングにより探索する。そしてこの移動量と方向を各領域の動きベクトル（ローカル・モーション・ベクトル、またはLMV）として算出する。第2段階では、各領域のLMVの成分をクラスタ解析し、パン、チルト、ロール、ズームなどカメラの基本運動に対応するグローバル・モーション・ベクトルを算出する。これが本システムでの視覚的グローバル運動に対応する。

この視覚的グローバル運動解析技術について検討すべきことは、解析時間と解析精度のトレードオフの問題である。本システム構築の初期段階では、各技術要素の精度向上を図るために、運動解析精度の高い手法を組み込むことでシステム全体としての精度の向上を図ったため、映像1フレームあたり15秒程度の解析時間を要した。しかし、実用面を考えると、少なくとも映像再生時間と同程度の速度で解析が行われることが望ましい。そこで、開発の後期では解析時間の縮小を図るために

LMV算出の手法を改善し、同時に解析精度について実用上問題が無いことを確認することで、視覚的グローバル運動解析技術の実用性を実現した。この解析技術は、以上のような過程で協力を得た(株)日立コンサルティングによって実現することができた。

## 4.3 映像酔い評価モデル

映像酔い評価システムでは、その核となる部分において、入力を映像中の視覚的グローバル運動の種類と速度の時間的推移とし、出力を発生し得る映像酔いの程度についての時間推移としている<sup>[13]</sup>。この入出力の間には、映像酔いの基礎特性に基づく推定が必要であることから、これを実現する映像酔い評価モデルを構築した。この映像酔い評価モデルは、以下の二つの観点から重要である。

- (1) 本システムが、映像酔いの程度の時間的推移を推定するのに対し、4.1で述べた生体影響に関する知見には時間的要因が含まれていない。したがって、これを含めたモデルを構築するためには映像の提示時間による影響を検討する必要がある。
- (2) 本システムは、複雑な視覚的グローバル運動を含む一般の映像での映像酔いの推定を目的としているが、4.1で述べた生体影響に関する知見は単純な視覚的グローバル運動のみを用いている。この基礎的知見に基づいて一般の映像の映像酔いの程度を推定可能であるか、検証する必要がある。

そこで、まず(1)の観点から、映像中の視覚的グローバル運動の速度が、映像酔いを生じる可能性のある速度帯域に含まれる際の、映像酔いに関わる不快度の推移を検討した。その結果、その速度帯域に該当する視覚的グローバル運動の存在によって、短時間のうちに不快度が上昇する一過性の反応と、そうした視覚的グローバル運動の消失後もしばらく不快度が低下しない持続性の反応とが存在することが明らかとなった<sup>[13]</sup>。そこで、映像酔い評価モデルでは、これら二つの要因を組み込むことで、視覚的グローバル運動の種類ごとに、それが一定時間だけ該当する速度帯域に含まれるたびに一過性の反応と持続性の反応を出力する。

次に、(2)の観点から、映像酔い評価モデルの精度向上を図るため、4.4節に述べる映像酔いを生じやすい映像を用意し、映像酔い評価モデルによって映像酔いの程度の時間変化に関する評価値を求めるとともに、4.5に述べる手続きにより同一の映像を用いた映像視聴によって生体影響を計測し、両者を比較する。この結果に基づいて映像酔い評価モデルの各パラメータの調整を図った。

## 4.4 映像制作手法に基づく酔いやさしい映像制作

映像酔い評価モデルの精度向上に利用する映像酔いの

要素を含んだ映像については、映像制作の専門家である映画プロデューサーの協力を得て、制作を依頼した。このような映像制作には、複雑な視覚運動を含んだ単純なコンテンツのCG映像や、研究者自らが撮影した実写映像などを用いることも可能であるが、これらを用いた場合には必ずしも映像制作の専門家に受け入れられないことがある。例えば、映像酔いを生じる基本的な要因が含まれている映像であったとしても、専門家の手にかからない映像には専門家が制作する映像効果や手法が必ずしも盛り込まれないために、映像制作者に対する説得力を低下させる要因となり得る。このあたりは、論理的に説明することが必ずしも容易ではなく、また技術的議論の枠を超えた話ではあるが、映像産業界関係者に映像の生体安全性についての理解と協力を求める上では重要な点である。

制作する映像の条件として、映像酔いを生じる基本的な要因が含まれていることに加えて、実際に評価対象として想定され得る実写映像であることを条件とした。前者の観点では、映像酔いの基礎特性に関する知見にもとづいて、カメラの基本運動であるパン、チルト、ロール、ズームの運動速度の影響を検討するために、これらを映像中に含めることを試みた。ただし、後者の観点から実写映像としており、その撮影現場ではカメラの動きの速度を計測しにくいいため、映画プロデューサーとの協議により、以下の手順を用いた。まず、カメラの基本運動それぞれに対して、5段階の速度を設定する。具体的には、パン、チルト、ロールの場合、微速 7.5 deg/s、低速 15 deg/s、中速 30 deg/s、高速 60 deg/s、超高速 80 deg/s とし、ズームの場合、フレーム間の拡大率（および縮小率）として、微速 1.15 (0.86)、低速 1.30 (0.77)、中速 1.50 (0.67)、高速 1.75 (0.57)、超高速 2.00 (0.50) とした。次に、特殊撮影 (SFX) により、これらの速度を一定にして、始めの 8 秒間に一方向に運動し、次の 8 秒間に逆方向に運動する、往復で 16 秒間の基本映像を制作する。4 種類の基本運動についてそれぞれ 5 段階の速度であるため、20 種類の映像となる。最終的に実写映像には、この 20 種類の基本映像で表現されたそれぞれの速度に対応するシーンが含まれるように、シーンごとに撮影に用いたカメラの動きをそれぞれの基本映像のカメラの動きと対応させた。

こうした映像で重要な点は、実験の際に実験参加者に飽きさせず映像を視聴してもらうことであり、そのために今回の映像制作では最低限のストーリー性が加えられた。ただし、このストーリー性が情緒的な影響を与えることで生体計測に影響することがないように、必要最小限にとどめる必要があった。そのためにも映画プロデューサーの協力が不可欠であった。

#### 4.5 映像酔い評価モデル精度向上のための生体影響計測

映像酔いに関する生体影響計測では、一般に、主観評価を中心とする心理的計測と、自律神経系への影響を調べる生理的計測とがある。既存の研究においては、いずれか一方の計測を主体とする事が多く、両者の関係を映像酔いの時間推移に対して検証するという事は、これまであまり行われていない。しかし、主観評価は評価に対する性癖の個人差の問題が残るため、客観的なデータの裏付けができる限り求められる。一方、生理的計測はその値に変化によって何が示されているかを検討するために、主観評価との突き合わせが必要になる。したがって、映像酔いの計測データの信頼性を向上させるためには、両者の計測が不可欠である。

映像酔い評価システムの開発にあたっては、心理的計測と生理的計測を同時に実施し、両者の時間推移の関係にまで踏み込んで検証を行った。生理的計測については、その計測法開発に経験豊富な東北大学、新潟大学、福島大学の協力を得て、映像視聴中の主観評価の時間推移と生理指標との関連を検証した<sup>[14][17]</sup>。なお、これを実施するために、上述の大学と産総研とで実験プロトコルを共通化し、計測データを共有化することで、効率よく多数の実験参加者のデータを収集することができた。こうした生体影響計測により、血圧-心拍数間の最大相互相関関数である  $\rho_{\max}$  が、主観評価の時間推移とともに 1 分程度の時間的ずれをもって変化すること、また心電図と指尖光電脈波の計測による複数の生理指標により、主観評価値の時間推移の推定が可能であることが、東北大学や福島大学により明らかにされた<sup>[14][17]</sup>。

映像酔い評価モデルでは、4.3 節に述べたとおり、視覚的グローバル運動が一定時間だけ該当する速度帯域に含まれるたびに、一過性の反応と持続性の反応を出力する仕様とした。このモデルの出力については、4.4 節で述べた映像を複数利用して実施した生体影響計測の時系列データから推定したインパルス応答関数に近似させることで、その精度向上を図った。その際に、生体影響計測の時系列データとして、1 分ごとに計測した主観評価を用いたが、上述のとおり複数の生理指標によって主観評価値の時間推移の推定が可能であることから、この映像酔い評価モデルは生理学的計測指標によっても裏付けられていると言える。

### 5 技術要素の連携と評価

#### 5.1 技術要素の連携による特徴

前章の技術要素の組み合わせにより、映像酔い評価システムの構築を行った (図 6)。本評価システムはソフトウエ

アであり、構築作業は福島大学が中心となって行った。こうした技術要素を連携させることで、本システムは以下のような特徴をもつ。

第1に、個別の技術要素を統合し、連携させることで初めてその精度向上を図ることができる構成となっている。そのため、映像酔いの一次要因である視覚的グローバル運動による影響とは独立に、二次要因として欠くことのできない視聴環境条件の影響を盛り込むことが可能である。視聴環境条件として、映像の表示サイズや視距離、輝度レベルや周囲の明るさなどが上げられる。実際に、これらの条件を操作して、同一の映像を用いて生体影響計測を実施し、その結果に基づいて本システムの出力を修正することで視聴環境条件の影響に対応できるように試みられている。

第2に、映像酔いのきっかけとなり得る映像の視覚的グローバル運動をリスト化し、それらの動きが含まれない場合の映像酔いの程度を評価することが可能となった。本システム内部の映像酔い評価モデルでは、映像中の視覚的グローバル運動が一定時間特定の世界帯域に含まれるたびに一定の応答（一過性の反応と持続性の反応）を出力する。そのため、特定の視覚的グローバル運動が存在しないと仮定することにより、これに対応するモデルからの出力を遮断することで、この影響を確認することができる。この機能により、映像制作者は影響の大きいと思われるシーンを編集しながら、映像酔い軽減の効果を確認することができる。

## 5.2 本システムの評価

本システムの利便性の向上を目標として、3章に述べた研究開発委員会において、関係者の協力の下、試用アンケー

トを実施した。アンケート対象者は映像産業界の関係者12名であり、そのアンケート結果によれば、解析速度や表示内容について概ね良好であった。ただし、表示される用語などが専門的でわかりにくいとするもの、表示の内容がわかりにくいなどのコメントも寄せられたため、できるだけ平易な言葉を用い、必要に応じてマニュアルに用語集を添付したり、表示内容を改善したりするなどが行われた。

## 6 今後の展開

映像酔い評価システムは、現時点ではプロトタイプ段階であり、さらに精度向上と試用アンケートの蓄積により利便性を向上させる予定である。また、映像酔いの程度に関する評価は生体影響計測の平均値レベルに合わせている。これまでに、実写映像による本システムの検討には200名以上の実験参加者のデータを蓄積してきたが、さらに大規模なデータを蓄積することで、一定の不快症状を示す人の割合などを推定したり、一定の割合の人々が体験し得る不快症状のレベルなどを推定したりすることを図っていく。

冒頭でも触れた映像の生体安全性に関する国際規格化が進められており、2010年中に映像酔いガイドラインのISO規格化提案を検討している。提案前にも本システムを映像産業界関係者に配布して映像酔いの問題に対する理解を求めるとともに、規格化審議においても、提案する規格化内容の妥当性を示すために本システムを活用する予定である。

さらに、本システムを発展させ、立体映像に対する生体安全性を評価する立体映像評価システムへの展開を進める予定である。立体映像では、立体特有の視覚疲労が存在

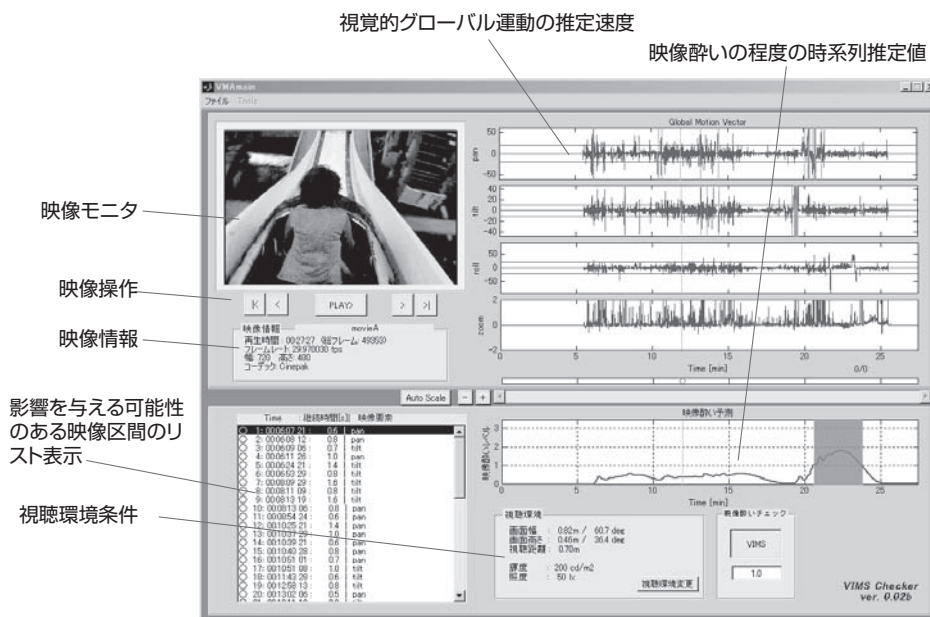


図6 映像酔い評価システムの操作画面

する一方、臨場感の向上により、さらに映像酔いに対する十分な対策をとる必要がある。

立体映像については、2009年のハリウッド立体映画の大ヒット、2010年の立体テレビの発売などにより、本格的な立体映像市場が形成されつつある。こうした状況において、2010年4月に、3Dコンソーシアム、(社)電子情報技術産業協会、産総研が連携して、立体映像ガイドラインや、その基盤となる文献抄録集の公開を行った。その結果、短期間のうちに幅広いマスメディアを通じて立体映像の生体安全性に関する社会的な認識が広まった<sup>[18]</sup>。これは、映像酔い評価システムの研究開発およびそれに至る長期の過程において培われた人的ネットワークが有効に機能したこと、またこれを基盤として、その研究開発過程を立体映像に対して容易に展開・適用することができたこと、さらにこれら一連の連携・協力による活動が、政府機関や関係各団体による理解につながり、立体映像の生体安全性に対する活動に道筋ができたことによるものである。

立体映像は、これまでにもおよそ10年周期で盛衰を繰り返していると言われてきたが、十分な市場に発展しなかった主な理由は、立体映像による不快症状を軽減するための対策が不十分であったためであるとも考えられる。今後、さらに大学など外部研究機関や業界関係者らとの密接な連携の下に、本システムを発展させた信頼性の高い立体映像評価システムを共同で研究開発することで、立体映像の生体影響に対する理解をさらに広め、また同時に、立体映像の評価を行えるようにすることで、立体映像の生体安全性に関する課題の解決に寄与していきたい。

## 謝辞

本発表の一部は、(財)JKAの機械工業振興事業補助金の交付を受けて行った(財)機械システム振興協会の委託による事業であり、2007年度「映像酔いガイドライン検証システムの実用化に関するフィージビリティスタディ」として実施しています。

また、映像酔い評価システムの開発にあたり、共同研究などでご尽力いただいた当該委託事業研究開発委員会関係者に感謝します。

## 参考文献

- [1] International standard organization: IWA3:2005 Image safety - Reducing the incidence of undesirable biomedical effects caused by visual image sequences (2005).
- [2] J.T. Reason and J.J. Brand: *Motion sickness*, Academic Press (1975).
- [3] H. Ujike, K. Ukai and K. Nihei: Survey on motion sickness-like symptoms provoked by viewing a video

movie during junior high school class, *Displays* 29, 81-89 (2008).

- [4] U.S. Navy: OPNAVINST 3710.7T. (2004).
- [5] 氏家弘裕: 人にやさしい映像の視聴環境づくりをめざす, *産総研Today*, 6(3), 28-29 (2006).
- [6] 氏家弘裕: 第3編7章映像の生体安全性 in *FPDガイドブック -2009年版-*, JEITA, 東京(2009).
- [7] (財)機械システム振興協会:(社)電子情報技術産業協会「映像酔いガイドライン検証システムの実用化に関するフィージビリティスタディ」報告書 (2008).
- [8] 氏家弘裕, 鶴飼一彦, 斎田真也: 映像酔いに対する運動パターンと映像コンテンツの影響, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 9, 377-386 (2004).
- [9] H. Ujike, T. Yokoi and S. Saida: Effects of virtual body motion on visually-induced motion sickness, *Proc. IEEE EMBS 2004*, 2399-2401 (2004).
- [10] H. Ujike, R. Kozawa, T. Yokoi and S. Saida: Effects of rotational components of yaw, roll and pitch on visually-induced motion sickness, *Proc. HCII 2005*, 2353-2356 (2005).
- [11] H. Ujike: Effects of global motion included in video movie provoking an incident on visually induced motion sickness, *Lecture Notes in Computer Science*, 4563, 392-396 (2007).
- [12] 泰泉寺久美, 渡辺裕, 石橋聡, 小林直樹: スタティックスプライト生成のためのグローバルモーション算出法と符号化への適用, *電子情報通信学会技術研究報告*, PRMU, パターン認識・メディア理解, 98 (206), 47-53 (1998).
- [13] H. Ujike: Estimation of visually induced motion sickness from velocity component of moving image, *Lecture Notes in Computer Science*, 5622, 136-142 (2009).
- [14] N. Sugita, M. Yoshizawa, A. Tanaka, M. Abe, S. Chiba, T. Yambe and S. Nitta: Relationship between physiological indices and a subjective score in evaluating visually induced motion sickness, *Lecture Notes in Computer Science*, 5622, 114-119 (2009).
- [15] 外山寛, 木竜徹, 岩城護, 飯島淳彦: 自律神経系指標の時間推移からみた映像酔いの評価, *電子情報通信学会技術研究報告*, 109 (406), 85-89 (2010).
- [16] 飯島淳彦, 鶴飼一彦, 木竜徹, 長谷川 功, 板東武彦: 映像の動き成分が脳血流に与える影響, *生体・生理工学シンポジウム論文集*, 21 (2009).
- [17] A. Tanaka, N. Sugita, M. Yoshizawa, M. Abe and T. Yambe: Interpolation of the subjective score of visually-induced motion sickness by using physiological parameters, *Proc. IEEE EMBS 2008*, 4595-4596 (2008).
- [18] 朝日新聞社: 「目に優しい3D」指針, *朝日新聞関東版*2010年4月10日朝刊1面 (2010).

## 執筆略歴

氏家 弘裕 (うじけ ひろやす)

1991年、東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。1995年、工業技術院生命工学工業技術研究所入所。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マルチモダリティ研究グループ、グループ長。視覚の心理物理学を基盤として、運動立体視、奥行き知覚の基礎的研究に関わるとともに、これらを発展させて、映像の生体安全性に関する研究開発に携わり、快適な映像環境の普及に貢献するよう努めている。映像酔い評価システムは、そうした活動の中で、大学関係者、業界関係者との連携の下に、共同開発を推進した。また、ISO/TC 159(人間工学)/SC 4(人間とシステムのインタラクション)/WG 12(映



像の生体安全性)の議長を務めるなど、映像の生体安全性に関する国際標準化活動にも従事している。

## 査読者との議論

### 議論1 全体構成

コメント (中島 秀之:はこだて未来大学)

全体としては著者のとった研究シナリオが良く分かるように書かれています。研究内容が書かれている第4章が核心ですから、読者としては早くここに到達したい気がします。第2章は、研究シナリオが映像プロバイダーの理解を得られることを強く意識して構築したことを説明することがポイントだと思いますので、そこを明確に、かつ簡潔に記述していただくと読み易くなります。

回答 (氏家 弘裕)

ご指摘ありがとうございます。この研究の成果は最終的なユーザーである映像プロバイダーの方々に使ってもらわなければ意味がないので、そのことを強調したいあまりに、第2章ではやや冗長な内容になってしまいました。なるべく簡潔になるように、修正いたしました。

### 議論2 研究シナリオの全体像

コメント (赤松 幹之:産総研ヒューマンライフテクノロジー研究部門)

映像酔い評価システムをどのように社会で使ってもらおうと考えたのかという目標の設定が2.2節に述べられており、シンセシオロジーの論文としてのポイントが明確です。この目標設定が読者に分かり易くなるように、開発したシステムの位置付けを図示したら良いと思います。

また、研究開発の成果の評価に関して、評価システムを実際に使って改善につなげた例が既にあるのでしたら記載してください。また、システムを使いたいといった声から制作現場からきているかなど、ユーザーサイドからの評価についても記載してください。

回答 (氏家 弘裕)

2.2節の文意に沿って、図1を加えました。成果についてですが、これまでに評価システムを紹介する場などで、ぜひ利用したいという声を多くいただいていますので、その点を2.2節の最終段落に加えました。なお、実際に評価システムを使って改善につなげた例は今後現れてくるものと思います。

### 議論3 酔いの要因

質問 (赤松 幹之)

表1に示されている各要因について、それぞれの要因がどのような条件の時に酔いが発生するのか(周波数やサイズなど)教えてください。また、グローバル運動と比べた時、その影響はどの程度なのでしょう。

回答 (氏家 弘裕)

表1の各要因が酔いを生じやすい条件についてですが、視覚的グローバル運動に対する他の要因の影響の程度については、以下の点から、これについてお答えするのは必ずしも容易ではありません。

1. 視覚的グローバル運動は、その存在によって酔いが誘引されるきっかけ要因(一次要因)であるのに対し、基本的にはその他の要因は、生じている酔いを増幅/減衰させる二次要因であり、酔

いに対する影響の質が異なるために比較が困難です。

2. 二次要因に属するものどうしについても、例えば、画面の明るさ(単位:cd/m<sup>2</sup>)と視野の大きさ(単位:deg<sup>2</sup>)というように、基本的に要因のパラメータ単位が異なるために比較が困難です。

そこで、これまでに我々が得た知見や報告されている内容を基に、主要な要因についてその影響の概略を記述いたします。なお、映像酔いは、個人差が大きいので、以下の記述は、典型的な観察者を想定した場合のものとしてご理解下さい。

**視覚的グローバル運動:**3種の軸に対する回転では、ロールによる影響が比較的大きいことがわかっています。ただし、一方への回転では、いずれの回転も30~70 deg/sの速度で影響が大きく、往復する振動では、時間周波数や振幅に多少依存するものの、3種の回転ごとに影響の大きい速度帯域が異なります。

**両眼立体視:**映像を立体表示させて奥行き情報を加えることで、酔いへの影響がやや大きくなる傾向が示されています。

**画面の輝度:**画面の輝度が低下すると、酔いの程度が減少する傾向が示されています。

**画面の空間周波数成分:**比較的単純な縦縞パターンを用いた回転ドラムの実験では、特定の空間周波数の縞パターンで酔い症状が大きいことが報告されています。

**画面の色度成分:**回転ドラムの実験で、輝度がほぼ同一の下で、色パターンの方が酔い症状が大きいことが報告されています。

**環境照度:**周囲が明るい方が、酔いの程度が減少することが示されています。

**視距離・提示サイズ:**画面の見かけの大きさが大きくなるほど酔いの程度が大きくなることが示されています。ただし、ある程度以下の大きさ(例えば、20×15 deg以下)になると酔いが生じにくく、またある程度以上の大きさ(例えば、140×90 deg以上)では、酔いの程度がそれ以上増加することがなくなるとの報告があります。

**運動酔い感受性:**運動酔い(あるいは乗り物酔い)しやすいほど、映像酔いしやすいことが示されています。

**性別・年齢:**運動酔いでは、男性に比べて女性の方が、また、10代前半で比較的酔いやすいことが報告されており、映像酔いでも同様の傾向が示されています。

### 議論4 最近話題の3D映像との関連

質問 (赤松 幹之)

本論文の投稿後に、3D映画や3Dテレビがマスコミに多く取り上げられましたが、これに際して、筆者が力を入れていて活動が活発なコンソーシアムが有効に機能して、映像の安全性についての重要性が社会に認知させることに成功したと思います。この研究成果が生きて3Dへの展開が容易にできたこと、また人的ネットワークが機能したこと、さらに行政の支援などによって社会的な認知が得られてきたことなどを記載したらいかがでしょうか。

回答 (氏家 弘裕)

ご示唆ありがとうございます。3Dコンソーシアム、(社)電子情報技術産業協会、産総研による共同のプレスリリース(2010年4月19日)後、3者に対して多くの問い合わせがあり、さまざまなメディアを通じて、立体映像の生体安全性に対する認識の広まりが見えたことは、ご指摘のとおり本評価システムの開発やそれに至る過程での多くの人々とのさまざまな連携活動による成果であると言えます。そのことを6章後半に追記いたしました。

# 戦略的システムデザインによる最適化設計法の提案

## — 排熱の再利用によるデータセンターと農業のCO<sub>2</sub>排出量の削減 —

福田 次郎<sup>1\*</sup>、日比谷 孟俊<sup>2</sup>

データセンターはICT (Information and Communication Technology) の重要なインフラであるが、地球環境問題の観点から電力消費の削減およびCO<sub>2</sub>排出量の削減が重要な課題となっている。しかし、データセンター単独の効率化だけでは大幅なCO<sub>2</sub>の削減は難しい。そこで、異なるステークホルダー間における「物理システム」と「価値システム」の二層の概念空間と、その中で最適化をはかる「戦略的システムデザイン」の思考を提案し、事例としてデータセンターの排熱をハウス栽培農家で再利用するシステムについて物理面および価値面の両方から考察した。こうした戦略的システムデザイン思考による複合システムの設計は単独のシステムと比較して、CO<sub>2</sub>排出量削減に効果があり、価値的にも優れたシステムとなることを明らかにした。

キーワード：データセンター、地球環境、システムデザイン、排熱再利用、農業

## An optimum design method utilizing a strategic system design concept

### – Reduction of CO<sub>2</sub> emission at a data center by reusing emitted heat for agriculture –

Jiro Fukuda<sup>1\*</sup> and Taketoshi Hibiya<sup>2</sup>

Data centers are important infrastructure of information and communication technology (ICT). Reducing electric-power consumption and the CO<sub>2</sub> emissions at the centers are urgent issues from the viewpoint of global environmental concerns. Improvement of efficiency within a single data center, however, cannot assure significant reduction of CO<sub>2</sub> emissions. Hence we propose the concept of “strategic system design”, which optimizes system design by combining different stake-holders not only from the viewpoint of the “physical system” but also from that of the “value system”. As an example, a system in which greenhouse cultivation farms reuse emitted heat at data centers was considered from both the physical side and the value side. The complex system designed by such a strategic system design idea was found to be effective in reducing CO<sub>2</sub> emissions compared with a single isolated system, and was clarified to be an excellent value system.

Keywords : Datacenter, global environment, system design, emitted heat, greenhouse business

### 1 はじめに

ICT (Information and communication technology) は経済活動の無駄を省き、輸送の効率化もしくは代替を実現し、エネルギーの有効利用や節減によるCO<sub>2</sub>排出量削減に大きな貢献をしている。しかし、ICTの普及により、オフィスや家庭での電力消費は逆に増えており、結果として、日本全体のCO<sub>2</sub>排出量を増加させる要因の一つとなっている。このまま増加が続くと、2025年にはICTによる電力消費が2006年現在の5.2倍、すなわち、国内総発電量の25%を占めるようになると<sup>注1</sup>予想されており、ICT分野における消費電力の削減は重要な課題となっている。

特に、大量のサーバーを保有するデータセンターは、多大な電力を消費し、なおかつ消費量が年々増加しており、地球温暖化防止の観点から、そのエネルギー消費およびCO<sub>2</sub>排出量の削減が大きな課題となっている。このため、

日本のデータセンター事業者各社は、より効率の良いサーバー、空調設備、電源設備の導入などの努力をしているが、データセンター単独でのエネルギー利用の効率化は限界に近づいており、より本質的な視点からのデザインアプローチが期待されている。

そこで、新たなデザインアプローチとして、複数の事業者のシステムを組み合わせる「戦略的システムデザイン」を提案する。戦略的システムデザインの例として、データセンター事業者の低温排熱をハウス栽培で再利用する複合システムがエネルギーの有効利用に効果的であることを示し、かつ経済的にも有益であることを述べる。

### 2 データセンター単独での効率化の限界

一般的な、データセンターのエネルギーフローおよびエネルギー消費構成を図1および表1に示す。モデルとして、

1 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 / 株式会社三菱総合研究所 〒100-8141 千代田区大手町 2-3-6、2 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 〒223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1

1. Graduate School of System Design and Management, Keio University / Mitsubishi Research institute, Inc. 2-3-6 Otemachi, Chiyoda-ku 100-8141, Japan \* E-mail: mr-fukuda@mri.co.jp, 2. Graduate School of System Design and Management, Keio University 4-1-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8256, Japan

最大収容数 1,000 ラック (実稼働率 85%)、1 ラックあたりの最大供給電力 6 kW (平均 4.2 kW/rack) のデータセンターを想定する。データセンター全体の消費電力のシミュレーションを行い、公表された電気事業者の排出係数<sup>注2</sup>をかけると CO<sub>2</sub> の排出量は表 2 のようになる。

データセンターにおける空調機器の電力消費を考慮し、エネルギー効率向上に資する有効な手段の一つとして、寒冷地にデータセンターを建設して、空調効率を向上させることが挙げられる。例えば、データセンターが集中している東京と札幌とを比較すると、年間 5 ~ 10 °C 程度の気温差があり<sup>注3</sup>、札幌などの寒冷地にデータセンターを設けることにより、空調機器の消費電力を約 8 % 削減することが可能と予想できる (表 2)。逆に温暖な那覇では、8 % 程度、空調機器の消費電力が増加する。しかし、データセンター全体の消費電力から見ると空調機器の消費電力は 3 割程度であるため、東京と札幌を比べても、およそ 2 % 前後の削減効果しか期待できない (表 2)。

さらに空調効率向上の方策として、ラックをパネルで囲ってサーバーの排出熱と空調機器の冷気を混合させない「キャッピング」という空調方式がある (図 2)<sup>注4</sup>。これにより、空調機器の消費電力を約 20 % 削減することができるが、データセンター全体の消費電力から見ると、約 5 % 程度の削減効果に留まるとみられる (表 2)。

このように、データセンター単独でのエネルギー消費の効率化には限界があり、大幅な CO<sub>2</sub> 削減を図るには、より画期的な技術革新か、新たなデザインアプローチによる効率化が必要である。

### 3 戦略的システムデザインの提案

#### 3.1 物理システムと価値システム

そこで、単独のシステムによる最適化の概念の枠を越えて、「戦略的システムデザイン」の発想による新たなデザインアプローチを提案する。

戦略的システムデザインの概念について図 3 に示す。従来のシステムデザインでは、単一のシステムについて、主に物理的性能の観点から評価と最適化がなされてきた。しかし、システムにはその保有者であるステークホルダーがあ

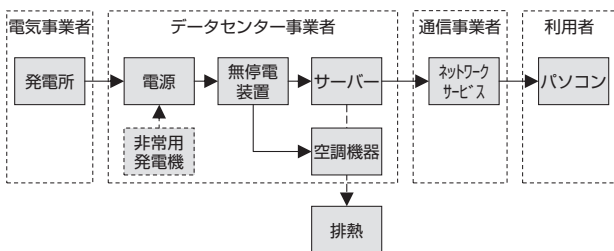


図1 データセンターのエネルギーフロー

表1 データセンターのエネルギー消費構成

|            |      |
|------------|------|
| サーバーの消費電力  | 58 % |
| 空調機器の消費電力  | 27 % |
| 電源設備、無停電電源 | 13 % |
| 照明、その他     | 2 %  |

表2 データセンターの立地とCO<sub>2</sub>の排出量

|   | 東京                | 札幌                | 那覇                | 東京<br>7月<br>キャッピング | 札幌<br>7月<br>キャッピング |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 空調機器消費電力 (MWh/年)  | 15,599<br>100.0 % | 14,393<br>92.3 %  | 16,810<br>107.8 % | 12,479<br>80.0 %   | 11,514<br>73.8 %   |
| データセンター全体の消費電力 (MWh/年)  | 57,817<br>100.0 % | 56,611<br>97.9 %  | 59,029<br>102.1 % | 54,697<br>94.6 %   | 53,733<br>92.9 %   |
| PUE <sup>※1</sup>   | 1.72              | 1.69              | 1.76              | 1.63               | 1.60               |
| 電力コスト (百万円/年)   | 694<br>100.0 %    | 679<br>97.8 %     | 708<br>102.0 %    | 656<br>94.5 %      | 644<br>92.8 %      |
| CO <sub>2</sub> の排出係数 <sup>※2</sup> (kg-CO <sub>2</sub> /kWh) | 0.339             | 0.479             | 0.934             | 0.339              | 0.479              |
| CO <sub>2</sub> の排出量 (t/年)                                    | 19,600<br>100.0 % | 27,117<br>138.4 % | 55,133<br>281.3 % | 18,542<br>94.6 %   | 25,738<br>131.3 %  |

※1 PUE：電力使用効率 PUE=データセンター全体の消費電力/サーバーの消費電力  
 ※2 環境省資料による平成18年度数値 (那覇は平成19年度数値)  
 点線下段は東京を100%とした場合の比較

り、システムの評価はそのステークホルダーにとっての価値で決まる。価値はステークホルダーの心理的な価値観に依存し、貨幣尺度に必ずしも限定されないが、貨幣尺度を用いることで定量化と一般化が可能となる。

したがってシステムは、物理的空間に存在する物理システムと、ステークホルダーの心理的空間に存在する価値システムとの二つの空間に存在していると言える。

データセンターの場合、建物、電源、空調機器、ラックなどで構成される「物理システム」と、それらが生み出す売上という事業者にとっての「価値システム」からなる。

このとき、物理システムの最適化と、価値システムの最適化とは必ずしも一致しない。データセンターの場合、物理システムの最適化とは消費電力を最小にすることであるが、価値システムの最適化とはコストを最小にして利益を最大化することである。消費電力の最小化と、コストの最小化は同じ傾向にあるが、必ずしも一致しない場合がある。例えば、高効率な設備導入は消費電力を削減するが、それが高額だと設備費用の増加によりコストは増大する。価値が減少すると、たとえ高効率であっても事業者は設備

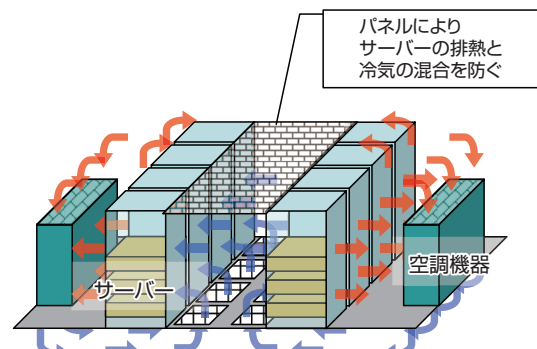


図2 キャッピングによる空調機器の効率化の一例

を導入することはない。

このように、物理的にいかに優れたシステムであっても、価値空間における優れたシステムでなければ実現は困難である。システムの実現のためには、価値を生み出すシステムすなわち価値システムについても設計しなければならない。

### 3.2 他のステークホルダーによるシステムとスーパーシステム

さらに、実際のシステムは、物理システムおよび価値システムの両面において、他のステークホルダーが所有するシステムと相互に影響を受けている（図4）。

また、より多数の物理的存在やステークホルダーで構成される「スーパーシステム」の中に組み込まれている。スーパーシステムとは、例えば、地球環境や、社会システムなど、システムの存在・機能・価値に影響を与えるより大きな物理システム・価値システムである。スーパーシステムは、個々のシステムに対しさまざまな影響を与え、要求を行う。システムは他のシステムおよびスーパーシステムに対して変化し、最適化が求められる。

データセンターの場合、地球環境の温暖化防止を目的とした社会システムの規制や世論・環境税の賦課により、排出するCO<sub>2</sub>を最小にすることが求められている。

こうした要求に対し、従来のシステムデザインでは、システムを所有する単一のステークホルダーの範囲内で最適化してきた。単一のステークホルダーの価値が最大になるようシステムを設計し、他のステークホルダーの価値や、資源の配分は考慮されていない場合が多かった。

例えば、データセンターの場合、サーバーを冷却する空調機器の効率化など、データセンター内だけの機器の効率化によってCO<sub>2</sub>の排出を削減しようとしていた。

しかし、データセンター単独の設備改善だけではCO<sub>2</sub>の排出をこれ以上大幅に削減することは物理的に難しい。さらに、価値空間においても、多額の設備投資が利益を圧迫し、環境税などが課せられる中で、単一の事業者が価値

（収益）を高めていくのは困難である。

環境問題など、スーパーシステムが要求する、より大きな課題に対しては、単一のステークホルダーの範囲内でシステムの最適化をはかることには限界がある。

### 3.3 戦略的システムデザインによる最適化設計

一方で、こうしたスーパーシステムからの要求課題は、他のステークホルダーにも要求されている。そこで、個々のステークホルダーの枠を越え、そのシステムを組み合わせることでスーパーシステムからの要求の最適化をはかり、かつ双方のステークホルダーの価値をも高めようとするのが「戦略的システムデザイン」による最適化設計である。

各ステークホルダーの物理システムは共通の物理空間に存在している。このため、共通の物理法則により等しく影響を受け、物質的交換等によりそれらを取りまとめて一つのシステムとして、最適化をはかることができる。それが、「総合物理システムデザイン」（Total Physical System Design）である（図3）。データセンターを例に挙げると、データセンターの排熱を再利用して、農業ハウスにおける暖房に利用することが考えられる。

しかし、物理システムの最適化の結果は、各システムのステークホルダーにとって、必ずしも最適な価値とは限らない。例えば、データセンターの排熱利用は、農業にとってはコスト削減となるが、データセンター事業者にとっては追加設備のコスト増になる。排熱再利用システムの実現のためには、データセンター事業者と農家という異なるステークホルダー間において、価値が向上するような価値システムの設計を行う必要がある。それが、「総合価値システムデザイン」（Total Value System Design）である（図3）。

例えば、栽培農家が利用したデータセンターの排熱の費用（調整金）をデータセンター事業者を支払う契約システムなど、価値を調整する仕組みが必要になる。

「戦略的システムデザイン」とは、「異なるステークホルダーのシステム間」において、「総合物理システム」と「総合価

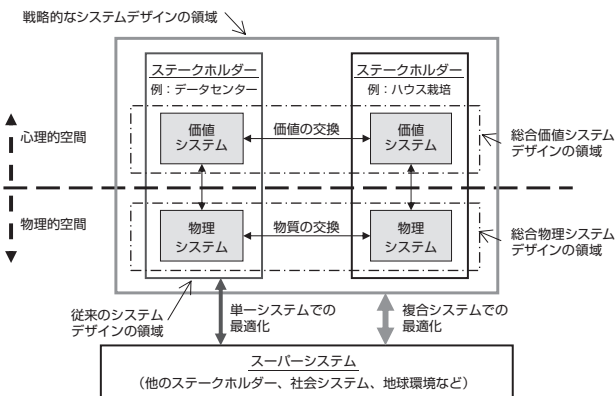


図3 戦略的システムデザインの概念

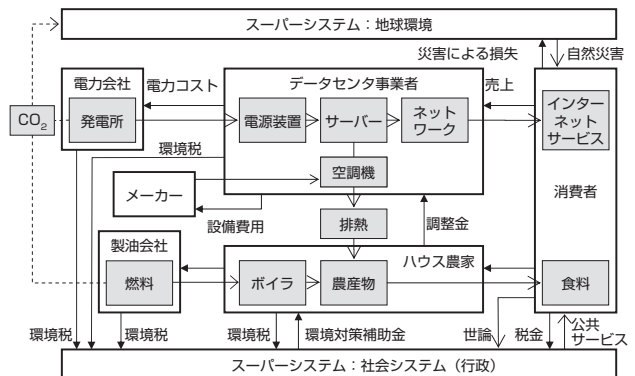


図4 データセンターを取り巻く他のステークホルダーのシステムとスーパーシステム



値システム] についてデザインを行い最適化することと定義できる。

#### 4 戦略的システムデザインによる複合データセンターの提案

##### 4.1 戦略的システムデザインによる複合データセンターの総合物理システムデザイン

戦略的システムデザインのコンセプトに基づき、CO<sub>2</sub>の排出削減という社会要求に対する最適化をはかるため、データセンターと農業を組み合わせた複合データセンターについてデザインし、その効果を定量的に検討する。

まず、物理面からみたデータセンターを考察する。図1のデータセンターのエネルギーフローを見ると、そのほとんどは熱としてデータセンターの外に排出されている。ちなみに、最終的にCPUが計算のために消費している電力は、全体のエネルギーの1%未満にすぎない。

そこで、このデータセンターの排熱を再利用する事業/システムを組み合わせることで、より効率的なシステムを提案できる(図5)。排熱を再利用する事業としては、オフィス、住居、病院などの冷暖房や温給水、浴場や温水プール、工場などでの温水利用、農業におけるハウス栽培の暖房などが想定される。このうち、ハウス栽培の暖房は、要求される温度が比較的低温、また熱需要の時間変化も比較的安定しており、低温の熱源であるデータセンターの排熱が温風として直接利用しやすいなど、データセンターの排熱の活用先として有望な分野と考えられる。一方、農業事業者にとっても、冬期のハウス栽培におけるコストの多くを暖房のための燃料費が占めており、大きなメリットが得られると考えられる(図6)。

そこで、電力事業者としてCO<sub>2</sub>排出係数が最も小さい東京電力の供給域で、比較的寒冷である宇都宮地域においてデータセンターの排熱を利用したハウス暖房を想定し、燃料費の削減効果とCO<sub>2</sub>の排出削減効果について概算を行った。

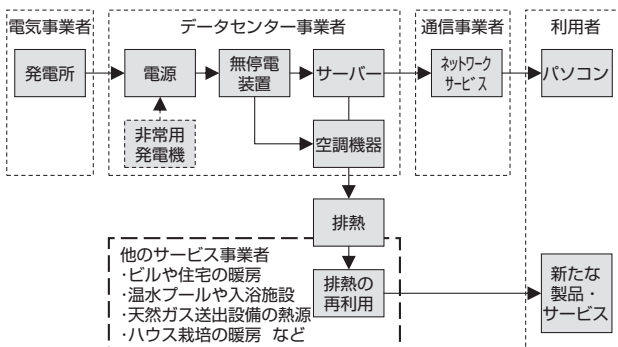


図5 複合データセンターのエネルギーフロー

表3 複合データセンターによるCO<sub>2</sub>の削減量

|                                 |                   |         |
|---------------------------------|-------------------|---------|
| データセンター全体の排熱量(宇都宮)              | MJ/日              | 566,308 |
| ハウス面積                           | m <sup>2</sup>    | 88,100  |
| 暖房用燃料削減量(灯油)                    | kL/年              | 1,709   |
| 暖房用燃料費削減金額                      | 千円                | 189,734 |
| 暖房用燃料削減によるCO <sub>2</sub> 削減量   | t-CO <sub>2</sub> | 4,256   |
| データセンターのCO <sub>2</sub> 排出量     | t-CO <sub>2</sub> | 19,464  |
| データセンターからみたCO <sub>2</sub> 削減率  | %                 | -21.9%  |
| データセンター+ハウスのCO <sub>2</sub> 削減率 | %                 | -17.9%  |

モデルとして同じく、最大収容数1000ラック(実稼働率85%)、1ラックあたりの最大供給電力6kW(平均4.2kW/rack)のデータセンターを想定した。データセンターからの空調機排熱をハウス内の暖房に使用すると想定し、10月1日~5月31日までの冬期に15℃以上に暖房するのに必要な熱量を計算した。試算の結果、データセンターの1日あたりの発熱量は566,300MJ/日に達し、灯油12.6kL/日の燃焼に相当する。これは、暖房効率による減少を考慮しても、厳冬期に88,100m<sup>2</sup>のハウスを暖房することができる熱量である(表3)<sup>注5</sup>。

これにより、ハウス暖房に必要な燃料費を年間約1億9千万円削減することができ、年間4,256tのCO<sub>2</sub>の削減効果がある。これは、データセンターが排出するCO<sub>2</sub>の21.9%に相当し、データセンターおよびハウス栽培両方を合わせた全体で17.9%のCO<sub>2</sub>削減効果がある(表3)。このように、データセンターとハウスの複合化で、CO<sub>2</sub>の排出は大幅に削減できると期待できる。

##### 4.2 戦略的システムデザインによる複合データセンターの総合価値システムデザイン

データセンター事業者と農家という二つのステークホルダーにおいて、双方の価値(利害)が受け入れられるシステムでなければ、物理的なシステムを実現して、効率化を実現することができない。そこで、データセンターとハウスが複合したシステムの価値設計について検討を試みる。

###### 4.2.1 データセンターが単独で環境対策に投資する場合の条件

データセンター事業者の利益をP<sub>0</sub>、サービスの売上をS、エネルギーコストをECとする。これに対し、エネルギー消

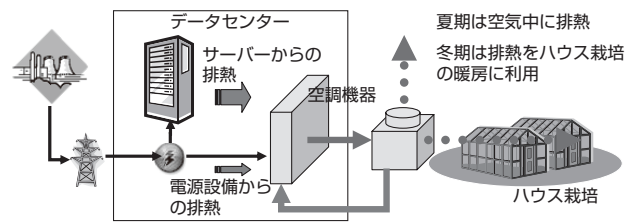


図6 農業でのデータセンター排熱の利用イメージ

費によるCO<sub>2</sub>排出量を抑制しようとする社会システムにより、環境税TCが導入されるとする。事業者は、利益減を最小にするため、効率的な空調機器の導入など環境対策投資ICを行い、エネルギーコストおよび環境税の削減をはかる。このとき環境対策投資ICを行う条件は、エネルギーコストの削減金額 $\Delta EC_2$ と環境税の削減金額 $\Delta TC_2$ の合計が投資ICを上回る以下の時である（図7）。

$$P_2 \geq P_1 \quad \Delta EC_2 + \Delta TC_2 \geq IC \quad (1)$$

さらに、コスト削減金額 $\Delta EC_2 + \Delta TC_2$ が環境対策投資ICおよび環境税TCの合計を上回る時、対策後の利益 $P_2$ は環境税課税前の利益 $P_0$ を上回り、事業者は、より積極的に環境対策投資を行うことになる（図7）。

$$P_2 \geq P_0 \quad \Delta EC_2 + \Delta TC_2 \geq TC + IC \quad (2)$$

しかし、実際には、技術的な限界から、データセンター事業者単独の範囲で、(1) および (2) の条件を満たすことはとても困難である。

#### 4.2.2 複数事業者全体における二つの条件

つぎに、データセンター事業者Xが、その排出する熱エネルギーを回収して、これを再利用するハウス栽培事業者Yを想定した場合の価値設計を行う。

この場合、両事業者のコスト削減金額の合計 $\Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y}$ が環境対策投資の合計 $IC_x + IC_y$ の投資を上回る場合、環境対策投資を行い設備の改善を行うことになる。

$$\Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y} \geq IC_x + IC_y \quad (3)$$

X、Yは異なる事業者であり、Xから排出された熱をYが再利用して大幅なコスト削減メリットを得ており、そのメリットをX、Yで再配分するための金額の補正ADを行う

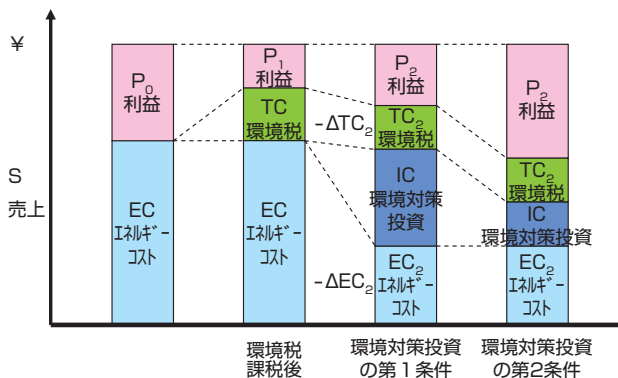


図7 単独データセンターでの収益イメージ

必要がある。ここでは、ハウス栽培農家がデータセンター事業者に対し、利用した排熱に対する費用として調整金ADをデータセンター事業者に支払うモデルを考える。

$$\begin{aligned} \Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + AD &\geq IC_x \\ \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y} - AD &\geq IC_y \end{aligned} \quad (4)$$

(4) の条件が満たされる場合、X、Yそれぞれの事業者は、外部対策コストの付加による利益の減少を投資： $IC_x$ 、 $IC_y$ によって小さくすることができ、両事業者が手を組んで対策を講ずることが可能になる（図8）。

さらに、下記の(5)の条件の場合、両事業者のコスト削減金額の合計 $\Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y}$ は環境税および環境対策投資の合計 $TC_x + TC_y + IC_x + IC_y$ を上回り、両事業者は環境税の課税以前よりも利益を拡大することができる（図8）。

$$\begin{aligned} \Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + AD &\geq TC_x + IC_x \\ \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y} - AD &\geq TC_y + IC_y \end{aligned} \quad (5)$$

データセンターの排熱エネルギーを利用したハウス栽培という複合システムを実現するためには、(4) もしくは (5) の条件を満たした設備コスト $IC_x$ 、 $IC_y$ の設備、および調整金ADを導入しなければならない。

#### 4.2.3 環境税を導入した場合の複合データセンターの価値評価

排出量を抑制しようとする社会システムにより、実際に環境税が導入された場合を想定し、環境省が2005年10月に想定した環境税率2,400円/t-CO<sub>2</sub>（電気0.25円/kWh、灯油0.82円/L）<sup>注6</sup>をモデルに、単独のデータセンターと、データセンターの排熱をハウス栽培で再利用する複合データセンターの試算をした。東京における、1,000ラック、6kW/rackの単独のデータセンターを想定した場合、現状の年間消費電力量は57,817MWhであり、

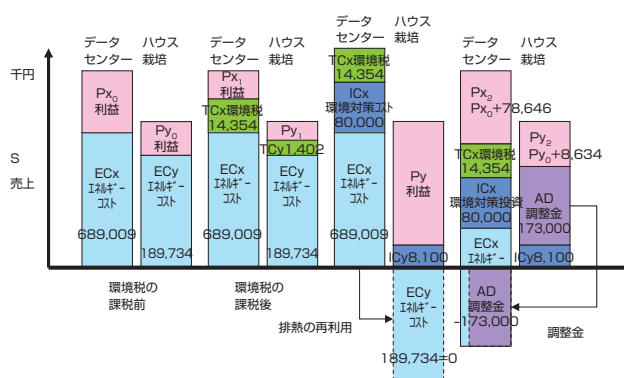


図8 複合データセンターでの収益イメージ

年間の電力コスト  $EC=693,807$  千円のほか、年間の環境税  $TC=14,454$  千円が新たにコストとなる。

最も効果的な、キャッピングによる対策を行った場合、年間消費電力量は  $54,697$  MWh となり、年間  $37,437$  千円の電力コスト削減 ( $\Delta EC_2$ )、環境税で年間  $780$  千円の削減 ( $\Delta TC_2$ ) が得られる (表 4)。しかし、 $CO_2$  の削減のための設備投資金額 IC の許容上限は年間  $38,217$  千円未満でなければならない。1 ラックあたりの投資金額は  $224$  千円 (償却期間 5 年) 以下となり、キャッピングに必要な一般的費用と比較すると、かなり困難な数字である。仮に 1 ラックあたり  $200$  千円でキャッピングが実現したとしても、データセンター全体のコスト削減金額は年間  $4,217$  千円に過ぎない。また、課税以前よりも利益を拡大できる (2) の条件を達成することは、ほぼ不可能とみられる。

次に、複合データセンターとして、同じ  $1,000$  ラック、 $6$  kW/rack のデータセンターを宇都宮に設け、その排熱を利用する  $88,100$   $m^2$  のハウスを想定する。

データセンターの年間消費電力量は  $57,417$  MWh となり、年間の電力コスト  $EC_x=689,006$  千円、年間の環境税  $TC_x=14,354$  千円がデータセンター事業者の負担となる。一方、排熱の再利用で、ハウス暖房の年間燃料消費量  $1,709$  kL および、年間燃料コスト  $EC_y=241,390$  千円が 0 となり、年間  $4,256$  t の  $CO_2$  排出と環境税  $TC_y=1,402$  千円が削減可能である。この削減効果に見合う年間の設備投資金額  $IC_x+IC_y$  の上限は  $191,135$  千円 (1 ラックあたり  $1,124$  千円) 未満であり、データセンター単独の場合と比較してコスト的に約 5 倍の余裕がある。年間の設備投資を  $88,100$  千円 (1 ラックあたり  $1,032$  千円) と仮定すると、環境税課税前と比較して、データセンター事業者は年間  $78,646$  千円、ハウス栽培農家は年間  $8,634$  千円の利益増となる。このように、複合データセンターでは、環境面でも高い  $CO_2$  削減効果を得つつ、事業者にとっても収益効果の高いシステムを設計できることが分かった。

## 5 まとめ

戦略的システムデザインは、異なるステークホルダーのシステムを物理空間および心理空間 (価値) のそれぞれにおいて統合的にデザインすることである。

その例として、 $CO_2$  の削減を目的としたデータセンターの設計を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 従来のデザインアプローチによるデータセンター単独の効率化設計では、物理的な  $CO_2$  の排出削減効果は限定的であり、価値面でも環境改善のために投資可能な上限金額が小さく、設備投資が困難である。また、環境税の課税前と同等の利益確保はほぼ不可能である。

表 4 環境対策投資と収益改善効果

|                        |           | iDC<br>キャッピング | iDC+<br>ハウス栽培 |
|------------------------|-----------|---------------|---------------|
| データセンターの立地             |           | 東京            | 宇都宮           |
| データセンターのエネルギーコスト       | 千円/年      | 656,370       | 689,009       |
| データセンターの環境税            | 千円/年      | 13,674        | 14,354        |
| ハウス栽培のエネルギーコスト (排熱利用前) | 千円/年      | -             | 189,734       |
| ハウス栽培の環境税 (排熱利用前)      | 千円/年      | -             | 1,402         |
| 設備投資によるエネルギーコスト削減      | 千円/年      | 37,437        | 189,734       |
| 設備投資による環境税の削減          | 千円/年      | 780           | 1,402         |
| $CO_2$ の削減量            | t- $CO_2$ | 1,058         | 4,256         |
| $CO_2$ の削減効果           | %         | -5.4 %        | -17.9 %       |
| 許容可能な設備投資の上限額          | 千円/年      | 38,217        | 191,135       |
| 1 ラックあたり               | 千円/rack   | 224           | 1,124         |
| 利益増となる設備投資の上限額         | 千円/年      | 23,763        | 175,379       |
| 1 ラックあたり               | 千円/rack   | 140           | 1,032         |
| モデルケースでの試算             |           |               |               |
| データセンターの設備投資金額         | 千円/年      | 34,000        | 80,000        |
| ハウス栽培農家の設備投資金額         | 千円/年      | -             | 8,100         |
| 環境税課税後のデータセンターコスト削減    | 千円/年      | 4,217         | 93,000        |
| 環境税課税後のハウス栽培コスト削減      | 千円/年      | -             | 10,036        |
| 課税前との利益増減 (データセンター)    | 千円/年      | -10,237       | 78,646        |
| 課税前との利益増減 (ハウス栽培)      | 千円/年      | -             | 8,634         |
| データセンターとハウス栽培との調整金額    | 千円        | -             | 173,000       |

(2) 総合物理システムデザイン (Total Physical System Design) の考えを採用し、ハウス栽培においてデータセンターの排熱を利用する複合システムの場合には、全体の  $CO_2$  排出削減効果が  $17.9$  % となり、より大きな環境改善効果ができる可能性を示した。

(3) さらに、総合価値システムデザイン (Total Value System Design) による価値システムとして、ハウス栽培農家からデータセンター事業者に対し排熱利用の調整金を支払う契約システムを導入することで、環境税の課税後も十分な金額の設備投資を確保することができ、双方とも環境税の課税以前よりも利益を拡大し価値を高めることができる可能性を示した。

(4) データセンターを例に、単独のステークホルダーを対象とした従来の戦術的なシステムデザインに対し、複数のステークホルダーを対象とする戦略的システムデザインによって、物理的性能および費用対効果においてより効率的なシステムをデザインできる可能性を示した。

こうした、物理システムと価値の全体バランスを取りつつ、双方のステークホルダーを満足させて全体の最適化をはかるといふ戦略的システムデザインの基本的な考え方は、データセンターと農業の関係に限らず、工場や発電所の排熱を再利用する地域冷暖房の検討にも適用できる。また、例えば各家庭に駐車した電気自動車の電池を、社会全体の電力網の蓄電池として利用するスマートグリッドのような、今後の社会におけるさまざまな異なる目的を有するステークホルダー間での新しい複合システムの実現の検討に適用できるものと考えられる。

今後は、データセンターと農業という二つのステークホル

ダーのシステムだけでなく、さらに太陽光発電を加えた三つ以上のステークホルダーによる複合システムなど、より複雑なシステムでの戦略的システムデザインによる最適化について検討していきたい。

## 謝辞

この研究は、慶應義塾大学グローバル COE プログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」の一環として実施された。排熱の利用に関してディスカッションを頂戴した慶應義塾大学大学院佐藤春樹教授に謝意を表す。

## 脚注

- 注1) 国内総発電量の25%：IT機器によるエネルギー消費量の見直し、IT政策ロードマップ、31P、2008.6.11（高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）  
 注2) 電気事業者の排出係数：平成18年度の電気事業者別排出係数の公表について、2008.9.27（環境省）  
 注3) 東京と札幌比較の気温差：気象統計情報、2008（気象庁）  
 注4) キャッピング：ラック空調システム、特許公開、2009-257730、2009.11.5（株式会社NTTファシリティーズ）  
 注5) ハウスの暖房熱量：温室暖房燃料消費試算ツール（試用版Ver.0.90）、2008.2.25（独）農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所 高収益施設野菜研究チーム）  
 注6) 環境税率：環境税の具体案、2005.10.25（環境省）

## 執筆者略歴

福田 次郎（ふくだ じろう）

三菱総合研究所戦略コンサルティング室主任研究員。早稲田大学理工学研究科機械工学修士課程修了。慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科博士課程在籍。1989年、三菱総合研究所入所後、課税制度、技術開発計画、交通システム、医療情報システムなど、政府官公庁を対象とした社会システムのコンサルティングを行う。近年では、インターネットビジネスおよびインターネット・データセンターのコンサルティングを行い、日本データセンター協会の活動を支援している。本論文における、戦略的システムデザインの考え方を提唱し、シミュレーションによる試算を行った。



日比谷 孟俊（ひびや たけとし）

NEC基礎研究所首席研究員、東京工業大学客員教授、首都大学東京教授を経て、現在、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授。工学博士。エレクトロニクス材料の開発、結晶成長、高温融体の熱物性測定、ロケットや航空機を利用した無重力下での材料プロセス研究に従事。本論文では、データセンターとハウス栽培との複合化を、システムデザイン・マネジメント学の観点から考察を行った。



## 査読者との議論

### 議論1 システムの階層性

質問（内藤 耕：産業技術総合研究所サービス工学研究センター）

単一システム、スーパーシステム、社会システム、ステークホルダーといった用語が使われていますが、それぞれのシステムがどのように

関係しているのか説明をお願いします。

回答（福田 次郎）

システムが個人レベル、組織レベル、社会レベル、地球レベルといったさまざまな大きさを持ち、階層的な重層構造を持ち、相互に影響しあっています。本論文ではまず単一のシステムの外に、さまざまなステークホルダーの存在を指摘することを意図しています。ステークホルダーの規模や属性およびその構造が、システムに与える影響およびその環境下での最適解については、より深く追求すべきテーマとして、今後の研究としています。本論文では、最も単純な組み合わせである二つのステークホルダーおよび外部環境としての環境税賦課の環境下での最適化について述べることにします。

### 議論2 データセンターの事例

質問（矢部 彰：産業技術総合研究所）

戦略的システムデザインという概念を提唱し、物理システムと価値システムという観点で複数システムの組み合わせを議論している点は、大変独創的な観点であり、例えば、焼酎製造工程での焼酎絞りかすの肥料応用と廃棄物処理の両立など、バイオマス利用と廃棄物処理の組み合わせなどのこの概念に相当する多くの事例が思い浮かびますが、この概念をデータセンターの排熱の再利用に適用することは現実的でないと判断されます。なぜならば、低温排熱の有効利用は、発電所排熱の有効利用の問題として長年議論してきており、多くの物理システムと価値システムの組み合わせを想定した議論を行ってきましたが、未だに経済性の成り立つ応用例を提案する段階に至っていないからです。とても独創的な有用な概念を提唱されているので、できることならば、実現している応用例の分析という観点で、この考え方を提唱されるのがより説得力を持つと思われませんが、どのようにお考えでしょうか。

回答（福田 次郎）

近年のデータセンターでは、外気を直接取り込んでサーバーを冷却し、排気として熱を建物外に排出する外気冷房を、ヒートポンプによる冷却と併用する事例が出ております。こうした方法で、データセンターの排熱から温室栽培に必要な温度を確保することは可能と考えられます。既に、物理システムとして、国内のデータセンターで、排熱による温室の栽培成功の事例も出てきています（IDC フロンティア：プレスリリース IDC フロンティアのアジアン・フロンティア 実証実験で外気空調の効果を確認 空調消費電力削減効果は最大4割弱、廃熱の農業活用の有効性も確認、2010.3.29）。また、夏場の排熱についてはすべて未利用の前提で試算を行っていますが、冬場のエネルギーの再利用だけでも経済的に十分な価値があるという結果になりました。これは、今後導入が予想される環境税を考慮に入れたことも、排熱利用の価値を高める結果となった要因の一つと考えられます。

本論文では、物理システムと価値システムの二層の捉え方以外に、データセンター事業者と農家という異なるステークホルダーも含めた戦略的視点に立つことで、単一のステークホルダーでは最適化できないものが、物理的にも価値的（経済的）にも成立することを目的としており、そうした観点から、従来の単一の工場事業主内のエネルギーの再利用事例ではなく、データセンターを対象に取り上げました。

コメント（内藤 耕）

データセンターを事例に、システムの相互関係から最適化するモデルを提案していますが、今回の論文ではデータセンターの排熱利用が一つの事例であることを明確にし、この論文で提案している内容の汎用性を強調することが望ましいと思います。

回答（福田 次郎）

「戦略的システムデザイン」の基本的な見方は、ご指摘のような排熱の再利用だけでなく、スマートグリッドのように、異なる目的を有するステークホルダー間でのエネルギー・マネジメント一般に適用できるモデルに拡大できると考え、そのように修正します。

# 複雑システムの信頼性を向上させる開発手法

## — アーキテクチャ設計手法とモデル検査の融合 —

加藤 淳\*、浦郷 正隆、狼 嘉彰

本稿では、システムの仕様を、システムを構成する要素間による協調動作が整合している構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解する開発手法を示す。本開発手法は、システム開発において既に有効性が認められているシステムエンジニアリング標準におけるアーキテクチャ設計手法およびモデル検査を、ブリッジ技術で融合して構築される。産業用ロボットの開発に対して本開発手法を適用した結果を示す。適用結果から、産業界の複雑システムに対して本開発手法が有効であることを示す。

キーワード: 開発手法、システムエンジニアリング、アーキテクチャ設計手法、モデル検査、ブリッジ技術、複雑システム、信頼性

## A methodology for improving reliability of complex systems

### – Synthesis of architectural design method and model checking –

Atsushi Katoh\*, Masataka Urago and Yoshiaki Ohkami

This paper describes a methodology for decomposing a system specification into component specifications and interface specifications whose cooperative behavior is consistent with each component. The methodology is constructed by a bridge method of combining architectural design method in systems engineering standards and model checking, which have already been confirmed to be effective in developing systems. As a trial, the methodology was applied to develop an industrial robot system. The result demonstrates that the proposed methodology is effective for complex industrial systems.

Keywords: Developing methodology, systems engineering, architectural design method, model checking, bridge method, complex systems, reliability

### 1 はじめに

定義された目的を実現するために、相互に作用する要素を組み合わせた集合体をシステム<sup>用語1</sup>という<sup>[1]</sup>。科学技術の進歩により、電子機器システム<sup>用語2</sup>、情報システム<sup>用語3</sup>などの技術システム(以降、システムという)は、社会に深く浸透している。一方で、求められる機能の高度化、目的の異なる複数のシステムが結びつき新たなシステムを形成する system of systems<sup>用語4</sup>の登場により、システムはますます複雑になっている。近年、システムの複雑化により、システムの不具合が多発している。放射線照射装置の事故<sup>[2]</sup>、アリアン5の爆発事故<sup>[3]</sup>、航空管制システムの障害<sup>[4]</sup>など、複雑システムの不具合が社会に大きな影響を与えている。複雑システムの信頼性を向上させることは、安心・安全な社会を実現する上で重要な課題である。

複雑システムではシステムの構成要素が連携しながら結びついている。例えば、5章で述べる不定形剛体運搬ロボットシステムの場合、測定サブシステムの測定結果を基に

統合制御サブシステムが周辺状況を判断し、ロボットサブシステムが動作することなどである。これを本稿では構成要素の協調動作<sup>用語5</sup>と呼ぶ。より詳しくは、システムの機能を実現するために、システムの構成要素における処理がインタフェースを介し、他の構成要素の処理と連携することである。複雑システムにおいては、システム仕様に対して構成要素による協調動作が正しく行われる(整合<sup>用語6</sup>する)ことが重要である。しかし、その複雑性のために、構成要素による協調動作の仕様に誤りが混入し、協調動作が正しく行われない(不整合である)場合がある。通常、システムの構成要素による協調動作は、システム開発の終盤に実施される構成要素の実プロダクトを組み合わせたシステム試験において確認される。システム試験において協調動作の不整合を検出した場合、システム開発の上流工程に立ち戻り、構成要素による協調動作を再設計する必要がある。その際、協調動作の不整合に関する改修に多くのコストを要する。また、開発終盤における協調動作の設計変更

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 〒223-8526 横浜市港北区日吉4-1-1  
Graduate School of System Design and Management, Keio University 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8526, Japan  
\* E-mail: katoh.atsushi@z7.keio.jp

により、システムの信頼性が低下する可能性がある。システムの構成要素による協調動作に対しては、システム開発の上流における確実な設計および確認が必要であるものの、これらを実現する開発手法は提案されていない。理由の一つ目は、システムにおける信頼性という観点において、システムの構成要素による協調動作が着目されることがなかったためである。理由の二つ目は、システム開発の上流において、システムの品質を作りこむこと自体が比較的新しい概念であるためである。そこで、私達は、システムの仕様を構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解し、それらの協調動作が整合していることをシステム設計段階において確認する開発手法を研究している<sup>[5][6]</sup>。協調動作が整合している仕様を基にして構成要素の開発を進めることで、複雑システムにおける信頼性の向上が期待できる。本開発手法は、システムエンジニアリング<sup>[1]用語7</sup>におけるアーキテクチャ設計手法<sup>用語8</sup>およびモデル検査<sup>[7]用語9</sup>を融合することで構築される。

システムエンジニアリングとは、与えられた費用、期間内で、必要な品質を満たすシステムを実現する技術体系である。システムエンジニアリングは主に軍事、航空・宇宙分野において研究が始まり、システム開発の Best Practice を蓄積・反映しながら発展してきた。システムエンジニアリング・プロセスは、技術分野に依存しないノウハウ・ルールとして標準化されている<sup>[8]-[10]</sup>。システムエンジニアリング・プロセスの一部に、アーキテクチャ設計手法が規定されている。アーキテクチャ設計とは、システムの構成要素に対し、システムに要求される機能・性能を配分し、構成要素の仕様および構成要素間のインタフェースを明確化する技術である。標準に規定されるプロセスに従い、アーキテクチャ設計を実施することで、複雑システムを円滑かつ確実に構成要素に分解することができる。本稿では、標準化されたアーキテクチャ設計手法を単にアーキテクチャ設計手法と呼ぶことにする。

モデル検査とは、システムの状態遷移を表すモデルに対し、モデルが実現しうるすべての状態遷移において与えられた性質が成り立つか否かを計算機により網羅的に検証する技術である。モデル検査は形式手法<sup>[11]用語10</sup>の一つに位置付けられる。モデル検査は検証技術として確立され、近年、ソフトウェア開発において普及が進んでいる。また、機能安全規格である IEC61508<sup>[12]用語11</sup>において、開発における形式手法の適用が推奨されたことにより、システムの高信頼化を実現する技術としても注目されている。構成要素間の協調動作に関する仕様に対してモデル検査を適用し、協調動作が満たすべき性質が成り立つかどうかをしらみつぶしに確認する。それにより、複雑な状態で発生

する協調動作の不整合を検出することができる。

アーキテクチャ設計手法は、システム工学に基づく、システム設計領域における Best Practice を結集した体系的知識である。モデル検査は、数理論理学および計算機科学に基づいた、システム検証領域における信頼性の向上に貢献する研究成果である。この研究では、複雑システムの高信頼化を目指し、アーキテクチャ設計手法とモデル検査を融合し、それぞれの特徴を活かした開発手法を創造する。私達の研究活動は、社会・経済のニーズへ対応するために異なる分野の知識を幅広く選択し、それらを融合する第2種基礎研究に値する。

本稿では、システムの仕様を協調動作が整合している構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解する開発手法を述べ、また、本開発手法の研究プロセスについても述べる。構成は次のとおりである。2章は研究目標および研究シナリオ、3章はアーキテクチャ設計手法およびモデル検査について述べる。4章はアーキテクチャ設計手法およびモデル検査の融合に関するプロセスを述べ、5章では産業事例への適用結果を述べる。6章で本開発手法の有効性および課題を考察し、7章において本稿のまとめと今後の展望を述べる。

## 2 研究目標および研究シナリオ

この研究の目標は、システムの仕様を協調動作が整合している構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解する、特定の技術システムに特化しない開発手法の確立である。図1に研究シナリオを示す。研究目標を達成するための研究シナリオとして、システム開発に関する技術領域から、既に有効性が認められている技術を選択する。理由は、システム開発において有効性が認められている技術を活用することで、高品質な開発手法を効率良く確立することができるためである。そして、選択した技術について、それぞれの特徴を活かして融合することで、開発手法を確立する。理由は、各領域の技術を融合することで新規技術が生まれ、新たな研究領域の創出が期待でき

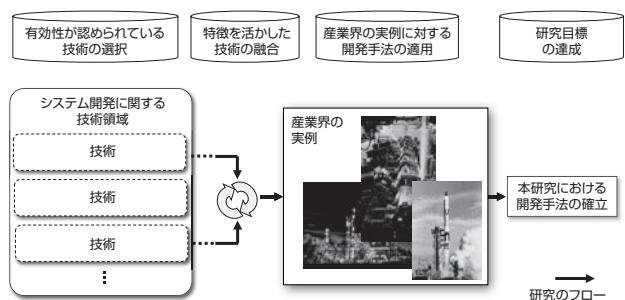


図1 研究シナリオ

るためである。また、産業界の実例に対してこの研究での開発手法を適用することで、開発手法としての有効性を確認する。適用対象として産業界の実例を選択した理由は二つある。理由の一つ目は、本開発手法が産業界において実用可能であることを確認するためには、サンプル的なケースではなく、安全性などの考慮が必要な、機能的に複雑な実例を適用対象とする必要があるためである。理由の二つ目は、産業界の実例に対する開発手法の有効性を社会に発信することにより研究活動と、研究成果の社会貢献との間のギャップ、いわゆる死の谷を越えられる可能性があるためである。

### 3 技術の選択

この研究における開発手法を確立するにあたり、本開発手法が満たすべき機能を次の二つに分解する。

- a. システム仕様を構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解する機能
- b. 構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様における協調動作が整合していることを検証する機能

システム開発技術の中から、機能 a. を満たすシステム設計技術を選択する。一般にシステム設計とは、ユーザーの要求を分析してシステム仕様にまとめること、さらにシステム仕様に基づいてシステムを構成する要素の機能および実現方法そして構成要素間の関係を仕様化する作業を指す。アーキテクチャ設計手法以外の代表的なシステム設計技術として、構造化分析・設計手法<sup>[13] 用語<sup>12</sup></sup>がある。構造化分析・設計手法とは、実現すべきシステムのデータの流れに着目し、システムを構成要素に分解する設計手法である。構造化分析・設計手法は、要求変更や技術の進歩に影響を受けやすい機能や処理ではなく、システム環境の変化に対して安定している業務情報などのデータに着目しシステム設計を行う。それにより、保守性および拡張性を有するシステムを構築することができる。しかし、構造化分析・設計手法は情報システムを念頭において開発された手法であることから、制御の流れや処理タイミングに関する設計を考慮していない<sup>[14]</sup>。したがって、組込みシステムなど情報システム以外のシステム設計には不向きな側面を持っている。一方、アーキテクチャ設計手法は、例えば前述のデータに着目するといった特定のシステム設計を行う場合、その設計に特化した手順や作業が規定されていないため、特定の設計手法に比べ労力を要する。しかし、アーキテクチャ設計手法は、システムの機能および実現方法を明確にするプロセスが規定されている、特定の技術システムに依

存しない汎用的な設計手法である。したがって、この研究の目標としている特定の技術システムに特化しない開発手法を実現するという点を踏まえ、機能 a. を満たすシステム設計技術として、アーキテクチャ設計手法を選択する。また、アーキテクチャ設計手法が規定される代表的なシステムエンジニアリング標準として、ISO 15288<sup>[9] 用語<sup>13</sup></sup>、ANSI/EIA 632<sup>[10] 用語<sup>14</sup></sup>、IEEE 1220<sup>[11] 用語<sup>15</sup></sup>が挙げられる。ISO 15288 は、システムの概念検討から利用および廃棄というシステムライフサイクルプロセスの全般を適用範囲としているものの、アーキテクチャ設計における作業および手順が詳細には規定されていない。ANSI/EIA 632 は、システムの概念検討から利用移行というシステムライフサイクルプロセスの広範を適用範囲としているものの、アーキテクチャ設計における作業および手順が詳細には規定されていない。一方、IEEE 1220 は、適用範囲がシステムの要求分析・定義から試験に限定されているものの、アーキテクチャ設計における作業および手順が詳細に規定されている。したがって、本開発手法として IEEE 1220 に規定されるアーキテクチャ設計手法を選択する。

また、システム開発技術の中から、機能 b. を満たすシステム検証技術を選択する。一般にシステム検証とは、開発するシステムがシステムの仕様を満たすか否かを確認する作業を指す。モデル検査以外の代表的なシステム検証技術として、テスト手法<sup>用語<sup>16</sup></sup>およびシミュレーション手法<sup>[15] 用語<sup>17</sup></sup>がある。テスト手法とは、テストケースに対する実プロダクトの動作を確認する検証手法である。実プロダクトに関する実際の動作を確認することができるものの、起こりうるすべてのケースをもれなく抽出し、それらすべてのケースにおける動作を確認することは困難である。シミュレーション手法とは、検証対象およびその周辺環境を計算機上にモデルとして模擬し、テストケースに対する検証対象モデルの動作を確認する検証手法である。実プロダクトおよび周辺環境が存在しない開発早期の段階で、検証対象の動作を確認することができるものの、テスト手法と同様に、起こりうるすべてのケースをもれなく抽出し、それらすべてのケースにおける動作を確認することは困難である。一方、モデル検査は、検証対象の状態遷移しか確認することができないものの、状態遷移については満たすべき性質が成り立つかどうかを網羅的に検証することができる。システムの状態遷移にデッドロック<sup>用語<sup>18</sup></sup>などが存在する場合、システムの運用時に致命的な事象を引き起こす可能性がある。したがって、本開発手法として、モデル検査を選択する。

次に、IEEE 1220 に規定されるアーキテクチャ設計手法およびモデル検査を詳述する。

### 3.1 IEEE 1220におけるアーキテクチャ設計手法

図2に、アーキテクチャ設計のプロセスを示す。アーキテクチャ設計は、機能設計<sup>用語19</sup>と物理設計<sup>用語20</sup>で構成される。機能設計とは、システム仕様として定義される機能を分割・詳細化し、分割・詳細化した機能に対しシステム仕様として定義される性能を配分する作業である。物理設計とは、システムの構成要素を具体化し、機能設計において分割・詳細化した機能・性能を構成要素に配分する作業である。アーキテクチャ設計のアウトプットは、構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様である。

図3に、IEEE 1220 で定められる機能設計のプロセスを示す。機能設計のプロセスは、IEEE 1220 第6章3

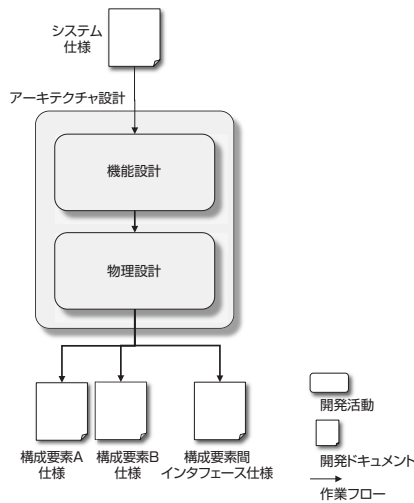


図2 アーキテクチャ設計のプロセス

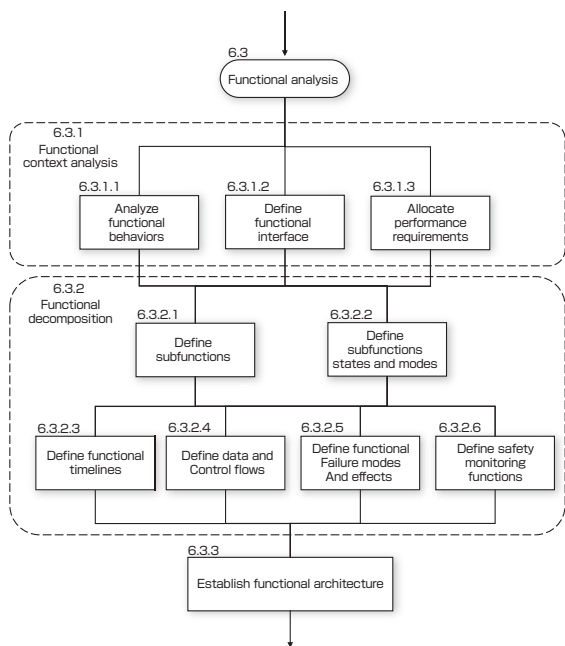


図3 IEEE 1220 における機能設計のプロセス<sup>[11]</sup>

節 Functional analysis<sup>用語21</sup>で定義されている。図4に、IEEE 1220 で定められる物理設計のプロセスを示す。物理設計のプロセスは、IEEE 1220 第6章5節 Synthesis<sup>用語22</sup>で定義されている。図3および図4の番号に従い、作業を実施することによって、円滑かつ確実に複雑システムを構成要素に分解することができる。IEEE 1220 におけるアーキテクチャ設計手法はさまざまな産業ドメインにおいて適用され、成果を上げている。そのため、一定の有効性が保証される<sup>[16]</sup>。

### 3.2 モデル検査

図5にモデル検査のプロセスを示す。モデル検査のプロセスは、モデルの作成、検査式の作成、モデル検査の実施、検査結果の分析という四つの作業に大別される。まず、適

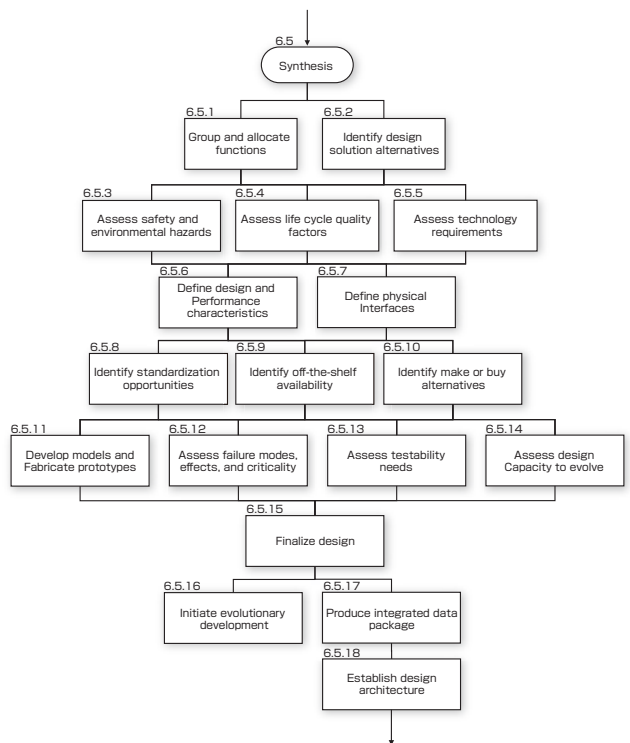


図4 IEEE 1220 における物理設計のプロセス<sup>[11]</sup>

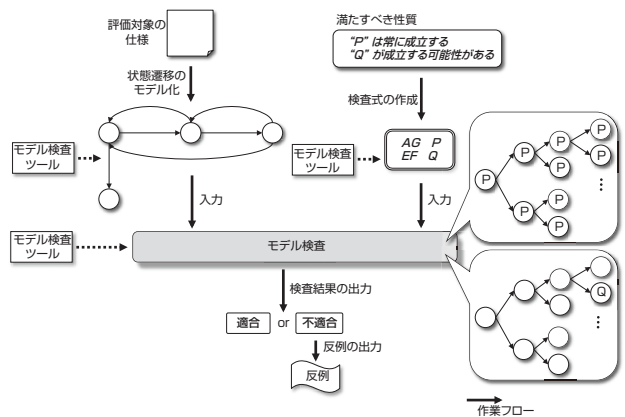


図5 モデル検査のプロセス



用するモデル検査ツールの表現形式に従い、検査対象となるシステムの仕様などを基に、検査対象の状態遷移をモデル化する。次に、検査対象が満たすべき性質を検討する。適用するモデル検査ツールの表現形式に従い、性質を表す検査式を作成する。そして、計算機上のモデル検査ツールに対して、モデルと検査式を入力し、モデル検査を実施する。モデル検査では、モデルが実現しうるすべての状態遷移において、検査式で表現する性質をモデルが満足するかどうかを網羅的に検証する。最後に、モデル検査の出力結果を基に、検査式で表現する性質とモデルとの適合結果を分析する。モデルに対して検査式が適合する場合、それはモデルの基になった仕様が性質を満足することを意味する。モデルに対して検査式が適合しない場合、反例として性質が成り立たない条件に至るまでのモデルの状態遷移が出力される。反例を分析し、モデルに誤りがない場合、モデルの基になった検査対象の仕様に誤りがあることを意味する。

モデル検査を適用することにより、次に示す二つの効果が期待できる。一つ目は、反例を用いることで、仕様の誤りを検出する際の工数を削減できる可能性がある。テスト手法やシミュレーション手法を適用し、確認内容が不適合となった場合、不適合に結びつく原因を複数仮定し、原因を分析する必要がある。その際に原因特定までに大きな労力を要することがある。モデル検査を適用する場合、自動で出力される反例を用いて不適合の発生過程を遡ることが

できる。それにより、不適合を引き起こす原因を効率よく特定することが可能である。二つ目は、モデル検査を実施する場合、モデル化という仕様の形式化を通して、検査対象である仕様の誤りを検出できる可能性がある。

#### 4 技術の融合

アーキテクチャ設計手法とモデル検査について、それぞれの技術の特徴を活かしながら融合し、この研究における開発手法を構築する。本章では、この研究の開発手法における作業フローを詳述することで、アーキテクチャ設計手法とモデル検査を融合するプロセスを示す。

##### 4.1 提案する開発手法

図6に、アーキテクチャ設計手法とモデル検査を融合したこの研究で提案する開発手法を示す。本開発手法は、アーキテクチャ設計、モデル検査、それら二つを繋ぐブリッジ技術<sup>用語23</sup>で構成される。

まず、本開発手法のインプットとして、システム仕様を入力する。システム仕様を基に、IEEE 1220に従い、機能設計および物理設計を含むアーキテクチャ設計を実施する。アーキテクチャ設計を実施することで、システム仕様を構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解する（図6の左上における破線の仕様）。また、アーキテクチャ設計の過程において、IEEE 1220で規定されるトレーサビリティマトリクス<sup>用語24</sup>を作成する。図7にトレーサビリティマトリクスを示す。システムの仕様および構成要素の仕様には、仕様の一つ一つに項番が付与される。トレーサビリティマトリクスには、システム仕様とそれをブレイクダウンした構成要素仕様との対応関係がまとめられる。

次に、構成要素の仕様、構成要素間のインタフェース仕様、トレーサビリティマトリクス、システム仕様に対し、こ

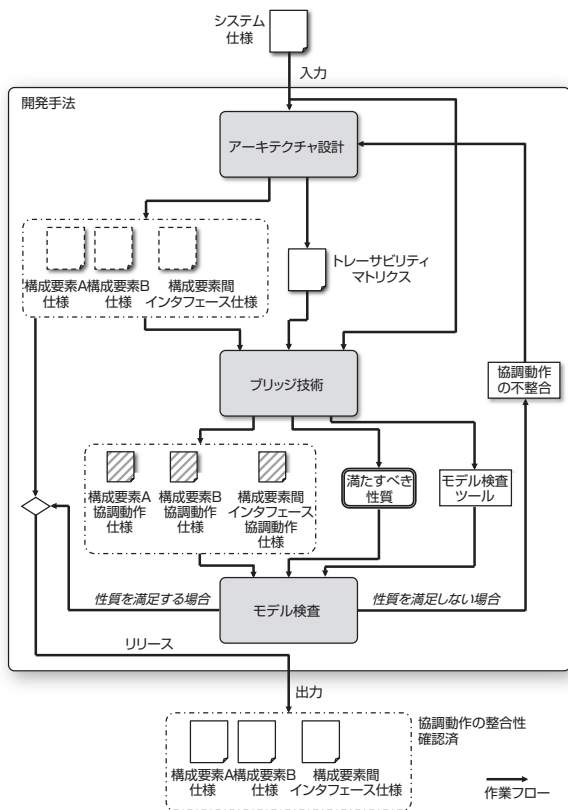


図6 この研究における開発手法

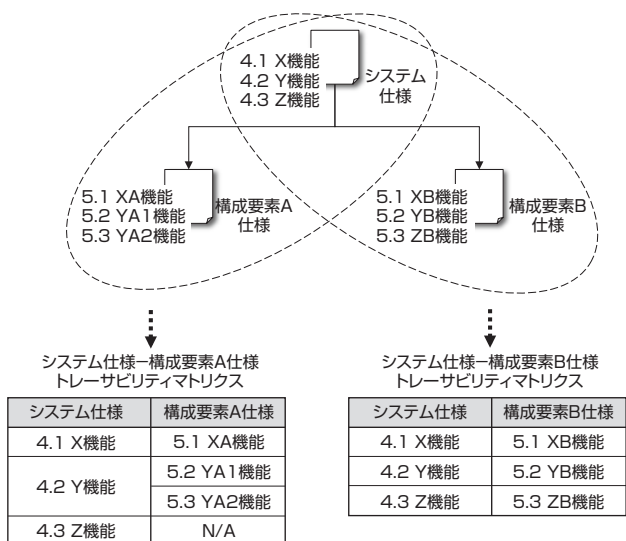


図7 トレーサビリティマトリクス

の研究で開発するブリッジ技術を適用する。ブリッジ技術を適用することで、協調動作に関連する構成要素の仕様および協調動作に関連する構成要素間のインタフェース仕様を抽出する（図6の左下における縞模様仕様）。協調動作が満たすべき性質を導出する。また、開発手法において適用するモデル検査ツールを選定する。ブリッジ技術のアウトプットはモデル検査を実施する上で必要なインプットとなる。

そして、適用するモデル検査ツールの表現形式に従い、協調動作に関連する構成要素の仕様および協調動作に関連する構成要素間のインタフェース仕様をモデル化する。また、適用するモデル検査ツールの表現形式に従い、協調動作が満たすべき性質からモデル検査の検査式を作成する。適用するモデル検査ツールに対し、作成したモデルおよび検査式を入力し、モデル検査を実施する。モデル検査の結果、モデル検査ツールから反例が出力される場合、反例を分析し協調動作の不整合内容をアーキテクチャ設計にフィードバックする。フィードバックした協調動作の不整合内容を基に、再度、作業フローにしたがってアーキテクチャ設計を実施する。モデル検査の結果、モデル検査ツールから反例が出力されない場合、協調動作が整合している構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様をリリースし、本開発手法のアウトプットとして出力する。

#### 4.2 ブリッジ技術

この研究における開発手法では、システム設計の段階で構成要素による協調動作に対しシステム検証を行う。その

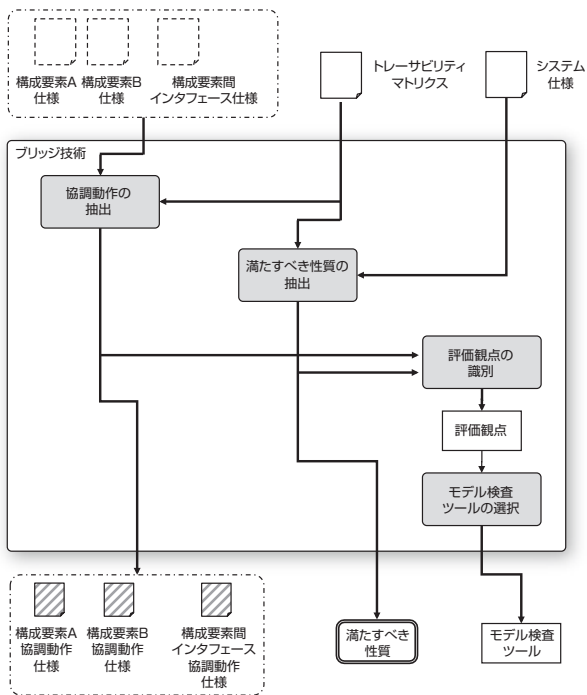


図8 アーキテクチャ設計とモデル検査のブリッジ技術

ためには、協調動作に着目し、アーキテクチャ設計のアウトプットおよびモデル検査のインプットをシームレスに繋ぐ必要がある。そこで、構成要素の仕様、構成要素間のインタフェース仕様、トレーサビリティマトリクス、システム仕様を基に、協調動作に関連する構成要素の仕様、協調動作に関連する構成要素間のインタフェース仕様、協調動作が満たすべき性質、適用するモデル検査ツールを導出する技術を開発している。この技術は、アーキテクチャ設計手法とモデル検査の橋渡しをすることからブリッジ技術と呼ぶ。ブリッジ技術は、協調動作に着目し IEEE 1220 といったシステムエンジニアリング標準とモデル検査を融合する具体的な方法を明確にしたところに新規性がある。図8に、アーキテクチャ設計とモデル検査のブリッジ技術を示す。図8は、図6の中央部分にあるブリッジ技術の詳細に相当する。ブリッジ技術のインプットは、構成要素の仕様、構成要素間のインタフェース仕様、トレーサビリティマトリクス、システム仕様である。

まず、協調動作に関連する構成要素の仕様および協調動作に関連する構成要素間のインタフェース仕様を抽出する。図9に、協調動作に関連する構成要素の仕様および協調動作に関連する構成要素間のインタフェース仕様を示す。協調動作に関連する構成要素の仕様を抽出する際、トレーサビリティマトリクスを用いる。トレーサビリティマトリクスにおいて、システムの仕様が複数の構成要素における仕様に対応付けられる場合、これら構成要素は協調動作することで、システムの機能を実現することになる。図7の場合、構成要素A仕様 5.1 XA 機能および構成要素B仕様 5.1 XB 機能は、システム仕様 4.1 X 機能を実現するために協調動作する。図9では、構成要素A仕様および構成要素B仕様における縞模様部分に相当する。協調動作に関連する構成要素間のインタフェース仕様については、協調動作に関連する構成要素の仕様内に存在するインタフェース情報を基に、構成要素間のインタフェース仕様から抽出する。図9では、中央のメッセージ部分に相当する。

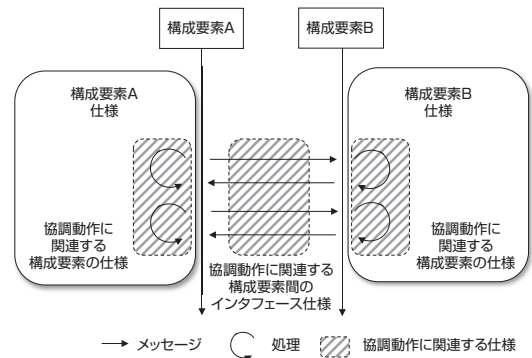


図9 協調動作に関連する仕様

次に、トレーサビリティマトリクスを基に、システム仕様から、構成要素における協調動作が満たすべき性質を抽出する。その理由は、トレーサビリティマトリクスを用いて抽出した構成要素における協調動作は、協調動作することにより実現するシステムの仕様を満足する必要があるためである。図7の場合、構成要素 A 仕様 5.1 XA 機能および構成要素 B 仕様 5.1 XB 機能における協調動作は、システム仕様 4.1 X 機能の性質を満たす必要がある。

そして、抽出した協調動作に関する仕様および協調動作が満たすべき性質を基に、協調動作として評価すべき観点を設定する。協調動作に関する評価観点は、以下に大別することができる。

- ①構成要素間におけるメッセージおよびメッセージに関する処理に抜けや齟齬が無いこと
- ②構成要素間におけるメッセージおよびメッセージに関する処理のタイミングが正しいこと

識別した評価観点に応じて、適用するモデル検査ツールを選定する。モデル検査ツールの代表的な種類として、有限オートマトン<sup>[17]用語25</sup> および有限オートマトンを拡張した時間オートマトン<sup>[18]用語26</sup> がある。評価観点①を評価する場合、有限オートマトンに対応するモデル検査ツールを選定する。有限オートマトンの代表的なモデル検査ツールとして SPIN<sup>[19]用語27</sup> がある。評価観点②のようにタイミングなどの時間的な制約を評価する場合、時間オートマトンに対応するモデル検査ツールを選定する。時間オートマトンは有限オートマトンを拡張したオートマトンである。時間オートマトンに対応するモデル検査ツールは評価観点①についても評価することができる。時間オートマトンの代表的なモデル検査ツールとして UPPAAL<sup>[20]用語28</sup> がある。また、それぞれの構成要素は並行して動作する。したがって、並行システムをモデル化することが可能なモデル検査ツールを選定する必要がある。前述した SPIN および UPPAAL は並行システムをモデル化することができる。

## 5 産業事例への適用

近年、産業用ロボット<sup>[21]用語29</sup> は、機能の高度化が進んでいる。また、産業用ロボットの多くは、対象とする作業の性格上、機械的出力が大きく、運用者に対する安全性を考慮する必要がある。産業用ロボットはこの研究における開発手法の適用に適するシステムの一つである。本稿執筆現在、私達は産業用ロボットメーカーと共同で、不定形な剛体を運搬する産業用ロボットシステムを開発している。この研究における産業事例として不定形剛体運搬ロボットシ

ステムを選定し、本開発手法を適用する。

以下に、不定形剛体運搬ロボットシステムを説明し、本開発手法を適用した結果を述べる。

### 5.1 不定形剛体運搬ロボットシステム

不定形剛体運搬ロボットシステムとは、形状・寸法が一定ではない重量のある剛体の把持、運搬、据置を行う産業用ロボットシステムである。不定形剛体運搬ロボットシステムに関する開発要求の特徴は、不定形剛体の把持および据置作業に対し、次に示す強い自律性が求められる点である。不定形剛体を把持する領域は限定されているものの、剛体の形状・寸法、剛体を把持する位置、剛体の姿勢は不定である。システムは、剛体を把持するにあたり、剛体の形状・寸法、位置、姿勢を正確に判断する必要がある。また、不定形剛体を据え置く領域は限定されているものの、その領域の中で剛体を据え置く位置は不定である。システムは、剛体を据え置くにあたり、剛体が存在しない位置、もしくは剛体が敷き詰められた領域において、最も標高が低い位置を正確に判断する必要がある。

不定形剛体運搬ロボットシステムを開発するにあたり、まず、開発要求を基にシステムの要求分析を実施した。システムの要求分析を実施することでシステム仕様を確定した。確定したシステム仕様を入力として本開発手法を適用した。

### 5.2 この研究における開発手法の適用

本節では、4章で述べたアーキテクチャ設計、ブリッジ技術、モデル検査の技術ごとに、この研究における開発手法の具体的な適用内容を述べる。

#### 5.2.1 アーキテクチャ設計

不定形剛体運搬ロボットシステムのシステム仕様を入力として、アーキテクチャ設計を実施した。アーキテクチャ設計の結果、不定形剛体運搬ロボットシステムの仕様を測定サブシステム、ロボットサブシステム、統合制御サブシステムの仕様およびサブシステム<sup>用語30</sup> 間のインタフェース仕様に分解した。図10に不定形剛体運搬ロボットシステムのアーキテクチャ設計結果を示す。アーキテクチャ設計の際、COTS (Commercial Off The Shelf)<sup>用語31</sup> 製品および既存の技術を最大限に活用できるように、あらかじめサブシステムを構成するコンポーネント<sup>用語32</sup> を想定し、各サブシステムを設計した。

測定サブシステムは、3次元形状を測定するレーザスキャナおよびレーザスキャナ上下動機構、それら二つを制御する測定制御計算機で構成される。測定サブシステムは、剛体を把持する際の剛体の形状・寸法、位置、姿勢を測定する。また、剛体を据え置く際の据置領域の凹凸状況を測定する。

ロボットサブシステムは、ロボットアームおよびロボットハンド、それらを制御するコントローラで構成される。また、運用者がロボットアームに関する動作のプログラミングや、ロボットアームの緊急停止を行う際に用いるティーチペンダント<sup>用語 33</sup>を有する。ロボットサブシステムは不定形剛体の把持、運搬、据置を行う。

統合制御サブシステムは、測定サブシステムおよびロボットサブシステムを制御する統合制御計算機、運用者が作業の指示やシステムのステータス確認を行う際に使用するコンソール<sup>用語 34</sup>で構成される。統合制御サブシステムは、測定サブシステムからの計測結果を基に、ロボットサブシステムを制御する。

また、アーキテクチャ設計を実施する際、測定サブシステム、ロボットサブシステム、統合制御サブシステムに関するトレーサビリティマトリクスを作成した。

### 5.2.2 ブリッジ技術

不定形剛体運搬ロボットシステムにおける各サブシステム仕様、サブシステム間のインタフェース仕様、トレーサビリティマトリクス、システム仕様に対し、ブリッジ技術を適用した。ここでは測定サブシステムおよび統合制御サブシステムを取り上げ、ブリッジ技術の具体的な適用内容を述べる。

まず、トレーサビリティマトリクスを基に、各サブシステム仕様およびサブシステム間インタフェース仕様から協調動作に関連する仕様を抽出した。協調動作に関連する仕様の具体的な抽出方法は4.2節に示す方法に従う。測定サブシステム仕様においては仕様39項目から6項目、統合制御サブシステム仕様においては仕様78項目から6項目を抽出した。また、測定サブシステムおよび統合制御サブシステム間のインタフェース仕様においては仕様26項目から22項目を抽出した。

次に、トレーサビリティマトリクスおよび不定形剛体運搬ロボットシステムのシステム仕様を基に、サブシステムの協

表1 測定サブシステムおよび統合制御サブシステムの協調動作が満たすべき性質(23項目のうちの2項目)

| No. | 性質  |
|-----|---|
| 1-5 | 統合制御サブシステムは、測定サブシステムに対する剛体測定要求に対し、測定サブシステムから剛体測定結果もしくは剛体測定失敗の応答を受信すること。 |
| 3-3 | 測定サブシステムは、統合制御サブシステムによる測定停止要求の送信後100 ms以内に測定処理を停止すること。                  |

調動作が満たすべき性質を抽出した。協調動作が満たすべき性質の具体的な抽出方法は4.2節に示す方法に従う。測定サブシステムおよび統合制御サブシステムにおいては、協調動作が満たすべき性質として23項目を抽出した。表1に抽出した23項目の性質の中から2項目を示す。

そして、抽出した協調動作に関する仕様および協調動作が満たすべき性質を基に、協調動作として評価すべき観点を設定した。測定サブシステムおよび統合制御サブシステムの協調動作においては、メッセージおよび処理の抜けや齟齬が懸念された。100 ms以内などの時間制約やメッセージおよび処理のタイミングに関する仕様が存在した。したがって、4.2節で示す①および②の二つを評価観点として設定した。

また、識別した評価観点を基に、適用するモデル検査ツールを選定した。測定サブシステムおよび統合制御サブシステムの協調動作については、時間的な制約やメッセージおよび処理のタイミングを評価する必要がある。また、測定サブシステムおよび統合制御サブシステムは並行して動作するため、並行システムのモデル化が可能なモデル検査ツールを選定する必要がある。したがって、本適用においては、これらの条件を満足するモデル検査ツールとしてUPPAALを選定した。

### 5.2.3 モデル検査

前項と同様に、本項においても、測定サブシステムおよび統合制御サブシステムを取り上げ、モデル検査の具体的な適用内容を述べる。

まず、モデル検査ツールの表現形式に従い、ブリッジ技術において抽出した協調動作に関連する仕様をモデル化した。図11から図13に、UPPAALを用いて測定サブシステムおよび統合制御サブシステムの協調動作に関連する仕様をモデル化した結果を示す。作成したモデルは、協調動作に関連する仕様において、測定サブシステムに対応するモデル(図11)、統合制御サブシステムに対応するモデル(図12)、測定サブシステムおよび統合制御サブシステムのインタフェースに対応するモデル(図13)の3モデルで構成される。

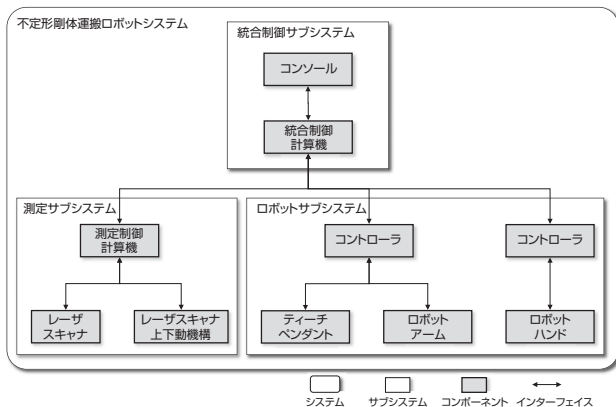


図10 不定形剛体運搬ロボットシステムのアーキテクチャ設計結果



確認された各仕様を基に開発が進められている。

## 6 考察

本章では、この研究における開発手法の有効性を示す。

また、本開発手法の課題を述べる。

### 6.1 開発手法の有効性

この研究における開発手法について、5章で示した産業事例への適用結果を基に有効性を示す。有効性を示すにあたり、適用事例におけるQCD（Quality：開発対象の品質、Cost：開発コスト、Delivery：開発期間）<sup>用語35</sup>に着目する。

まず、開発対象の品質という観点から、本開発手法を考察する。今回、不定形剛体運搬ロボットシステムという機能的に複雑な産業事例に対し、この研究における開発手法を適用した。その結果、アーキテクチャ設計に対して、測定サブシステムおよび統合制御サブシステムにおける協調動作の不整合をフィードバックし、1回の反復で協調動作が整合している測定サブシステム仕様、統合制御サブシステムを作成することができた。特に、表3に示す協調動作の不整合については、満たすべき性質が成り立つかどうかをしらみつぶしに確認するモデル検査ならではの、人手では検出することが困難な不具合といえる。そのような不具合を開発の初期段階で検出できたことは、本開発手法の有効性の現れである。

表4 産業事例に対する本開発手法適用時の工数

| 作業        | 工数(人時間) |
|-----------|---------|
| アーキテクチャ設計 | 189     |
| ブリッジ技術    | 5*      |
| モデル検査     | 12*     |

※測定サブシステムおよび統合制御サブシステムにおける実績値

次に、開発コストおよび開発期間という観点から、本開発手法を考察する。表4に産業事例に対して本開発手法を適用した際の工数を示す。ブリッジ技術およびモデル検査については、5章で述べた測定サブシステムおよび統合制御サブシステムにおける実績値を示す。アーキテクチャ設計については、189人時間の工数を要した。システム開発において、アーキテクチャ設計を含むシステムエンジニアリング手法を適用する効果については、多くの先行研究が存在する<sup>[22]-[25]</sup>。これらの先行研究において、システムエンジニアリング手法を適切に適用することで、システム開発における開発コストおよび開発期間の短縮が可能であることが示されている。本稿においては、今回の産業事例に対し、アーキテクチャ設計手法を適用したことによる開発コストおよび開発期間に関する短縮の程度を示すことはできない。しかし、アーキテクチャ設計において、確実な成果が得られたことを考慮した場合、システム開発における開発コストおよび開発期間を短縮できた可能性が高い。ブリッジ技術

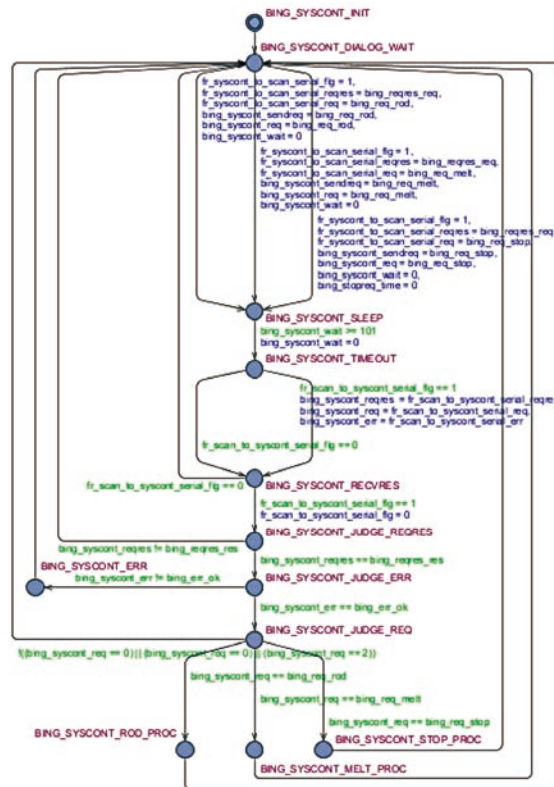


図12 統合制御サブシステムにおける協調動作モデル

およびモデル検査については、表4に示すとおり、測定サブシステムおよび統合制御サブシステムにおいて、それぞれ5人時間および12人時間の工数を要した。ここで、ブリッジ技術を介し、モデル検査を実施することで検出した協調動作の不整合について考察する。サブシステム間における協調動作の不整合について、通常、それらを検出することが可能な開発フェーズは、システム開発の終盤に実施されるサブシステム同士を組み合わせたシステム試験である。システム試験においてサブシステム間における協調動作の不整合を検出した場合、その改修に多くの改修コストおよび改修期間を要する。文献<sup>[26]</sup>の中でBoehmは、要求仕様が確定した段階で要求の誤りを検出し修正する際のコストを1とした場合、試験において検出された場合には小規模システムで2、大規模システムで20ものコストを要すると分析している。表3に示す協調動作の不整合は、要求仕様を確定する段階において、モデル検査を適用しない限り見逃される可能性が高い不具合といえる。システム開発全体で考えた場合、ブリッジ技術およびモデル検査に要する工数は費用対効果の高い工数であると考えられる。

## 6.2 開発手法の適用性

この研究における開発手法は、特定の技術システムに特化したものではなく、技術システム全般の開発に適用することが可能な手法である。それは、システムを設計する際にシステム仕様を基にシステムを構成する要素を見出して構成要素を正しく協調動作させることでシステムの機能を実現することは、技術システム全般において共通的な概念であるためである。また、本開発手法は、適用対象システムにおける協調動作に関する固有の問題に対処することが可能な手法である。その理由は、協調動作の特徴に応じて評価観点およびモデル検査ツールを選択するブリッジ技術を有するためである。

ただし、本開発手法の適用には注意すべき点がある。本開発手法では、構成要素の協調動作が整合していることを確認するために、モデル検査を採用している。モデル検査は、モデルが実現しうるすべての状態遷移において、与

えられた性質が成り立つか否かを計算機により網羅的に検証する技術である。モデル検査におけるモデルの状態数が多い場合、状態の組み合わせが膨大になることでモデル検査が終了しない状態爆発という現象が生じることがある。つまり、アーキテクチャ設計の結果、構成要素の協調動作が極端に複雑になると、モデル検査による協調動作の検証が終了しない可能性がある。その場合、構成要素による協調動作が極端に複雑にならないように、再度、アーキテクチャ設計を実施する方策や協調動作に関する仕様のモデルの状態数を減らす方策などが必要になる。

## 6.3 課題

この研究における開発手法について、産業事例に対する有効性を確認することができた。しかし、本開発手法には今後解決すべきいくつかの課題がある。

課題の一つ目は本開発手法におけるブリッジ技術の課題である。ブリッジ技術においては協調動作が満たすべき性質を抽出する。一般に、モデル検査の対象が満たすべき性質には活性 (liveness) および安全性 (safety) が存在する<sup>[27]</sup>。活性は“検査対象がいつかは良い状態に到達する”という性質である。安全性は“検査対象が決して悪い状態に到達しない”という性質である。検査対象の活性に関する性質については、検査対象が実現すべき仕様そのものである場合が多い。そのため、検査対象の活性は検査対象の仕様もしくは検査対象仕様の基となった仕様から抽出することができる。しかし、検査対象の安全性に関する性質について、その多くは検査対象仕様および検査対象仕様の基になった仕様中に規定されることはない。したがって、検査対象における安全性の抽出については、本開発手法を適用するエンジニアの経験およびスキルに依存する可能性が高い。特に、安全性に関する協調動作が満たすべき性質の抽出については、協調動作の複雑性のため、適用するエンジニアに依存する傾向が強い可能性がある。

課題の二つ目は本開発手法におけるモデル検査の課題である。モデル検査においては、構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様から抽出した協調動作に関

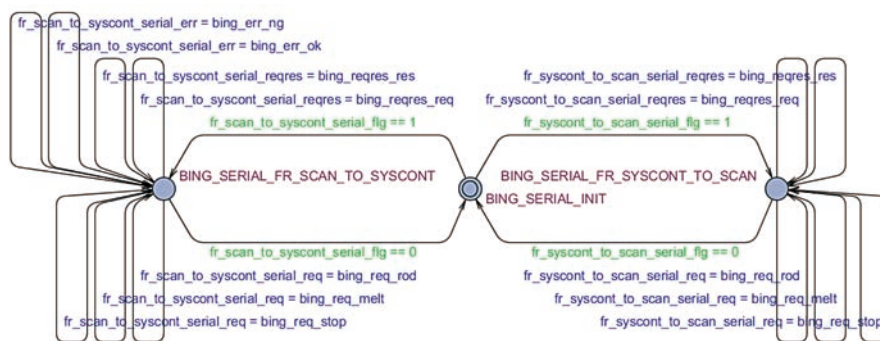


図 13 測定サブシステムおよび統合制御サブシステム間インタフェース仕様における協調動作モデル

する仕様を基にモデルを作成する。構成要素の仕様およびインタフェース仕様は自然言語で記述される場合が多い。そのため、抽出した仕様を手でモデル化する場合が多く、モデルに誤りが混入しやすい。本課題はモデル検査全般における課題でもある。

課題の三つ目も本開発手法におけるモデル検査の課題である。モデル検査においては、モデル検査ツールの表現形式に従い、協調動作が満たすべき性質を基に検査式を作成する。モデル検査における検査式は、時相論理<sup>用語36</sup>と呼ばれる時相演算子<sup>用語37</sup>（G：常に、F：いずれ）およびパス限量子<sup>用語38</sup>（A：すべてのパスで、E：あるパスで）、論理演算子<sup>用語39</sup>（OR、AND、NOT）を組み合わせて表現される。しかし、時相論理を扱うには専門的な知識が必要であることから、協調動作が満たすべき性質を基に検査式を作成するハードルは高い。本課題についてもモデル検査全般における課題である。

## 7 まとめと今後の展望

本稿では、システムの仕様を、システムを構成する要素間による協調動作が整合している構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解する開発手法を示した。アーキテクチャ設計手法およびモデル検査を融合するブリッジ技術を見出し、ブリッジ技術の実現例を示した。また、産業用ロボットに対する本開発手法の適用結果を示した。適用結果から、産業界の複雑システムに対し本開発手法が有効であることを示した。本開発手法については、筆者らが所属する慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科<sup>[28]</sup>（以降、慶應SDM研究科という）をとおして、産業界に広めることを検討している。慶應SDM研究科は文理を問わずさまざまなフィールドの社会人が多く学ぶ研究科である。慶應SDM研究科には、航空・宇宙、情報システム、ロボット、電子機器などの製品開発の第一線で活躍するエンジニアが在籍している。慶應SDM研究科において、それらのエンジニアに対して本開発手法を展開することで、本開発手法を広めて産業界にて貢献することができる。ただし、本開発手法には改善の余地もある。今後、本稿で挙げた課題のうち、課題1の解決に取り組む。そして、さらに品質の高い開発手法の実現を目指す。

### 用語説明

- 用語1: システム：定義された目的を実現するために、相互に作用する要素を組み合わせた集合体。
- 用語2: 電子機器システム：取り扱う情報をデジタル処理する複数のプロセッサが搭載されたシステム（例：携帯電話など）。

- 用語3: 情報システム：企業活動においてデータ処理を行う複数の計算機がネットワークで接続されたシステム（例：業務システムなど）。
- 用語4: system of systems：目的の異なる複数のシステムが結びついた複合システム。
- 用語5: 協調動作：システムの構成要素における処理がインタフェースを介し、他構成要素の処理と連携すること。
- 用語6: 協調動作の整合：システム仕様に対し構成要素による協調動作が正しく行われること。
- 用語7: システムエンジニアリング：与えられた費用、期間内で、必要な品質を満たすシステムを実現する技術体系。技術分野に依存しないノウハウ・ルールとして標準化されている。
- 用語8: アーキテクチャ設計手法：システムの構成要素に対し、システムに要求される機能・性能を配分し、構成要素の仕様および構成要素間のインタフェースを明確化する設計技術。
- 用語9: モデル検査：システムの状態遷移を表すモデルに対し、モデルが実現しうるすべての状態遷移において、与えられた性質が成り立つか否かを、計算機により網羅的に確認する検証技術。
- 用語10: 形式手法：数理論理学に基づく言語を用いて仕様を表現し、仕様が正しいことを保証する開発および検証技術。
- 用語11: IEC 61508：プロセス産業、機械製造業、交通輸送、医療機器などの機能安全を電気／電子／プログラム可能な電子系をもって構成する場合の遵守事項を定めた国際規格。
- 用語12: 構造化分析・設計手法：実現すべきシステムのデータの流りに着目し、システムを構成要素に分解する設計技術。
- 用語13: ISO 15288：システムエンジニアリング標準のひとつ。システム概念検討から利用および廃棄という、システムライフサイクルプロセスの全般を適用範囲とし、各プロセスにおける作業および手順が規定されている。
- 用語14: ANSI/EIA 632：システムエンジニアリング標準のひとつ。システム概念検討から利用移行というシステムライフサイクルプロセスの広範を適用範囲とし、各プロセスにおける作業および手順が規定されている。
- 用語15: IEEE 1220：システムエンジニアリング標準のひとつ。システムの要求分析・定義から試験というシステムライフサイクルプロセスを適用範囲とし、各プロセスにおける作業および手順が規定されている。
- 用語16: テスト手法：実プロダクトを用いて、テストケースに対する実プロダクトの動作を確認する検証技術。
- 用語17: シミュレーション手法：検証対象およびその周辺環境を計算機上にモデルとして模擬し、テストケースに対する検証対象モデルの動作を確認する検証技術。



用語 18: デッドロック：二つ以上の処理単位が互いの処理終了を待ち、結果としてどの処理も先に進めなくなってしまう状態。

用語 19: 機能設計：システム仕様として定義される機能を分割・詳細化し、分割・詳細化した機能に対し、システム仕様として定義される性能を配分する作業。

用語 20: 物理設計：システムの構成要素を具体化し、機能設計において分割・詳細化した機能・性能を、構成要素に配分する作業。

用語 21: Functional analysis：IEEE 1220 第 6 章 3 節に規定される機能設計に該当するプロセス。

用語 22: Synthesis：IEEE 1220 第 6 章 5 節に規定される物理設計に該当するプロセス。

用語 23: ブリッジ技術：本論文で明らかにした、アーキテクチャ設計とモデル検査の間をシームレスに繋ぐ技術。

用語 24: トレーサビリティマトリクス：上位仕様と下位仕様の対応関係をまとめた表。

用語 25: 有限オートマトン：有限個の状態、遷移、動作の組み合わせからなる振る舞いのモデル。

用語 26: 時間オートマトン：有限オートマトンに時間変数を導入した振る舞いのモデル。遷移条件として時間経過をモデル化することができる。

用語 27: SPIN：有限オートマトンベースのモデル検査ツール。PROMELA (Process Meta Language) という C 言語に似た言語を用いて、システムの状態遷移をモデル化する。次よりダウンロードが可能。<<http://spinroot.com/>>

用語 28: UPPAAL: 時間オートマトンに対応したモデル検査ツール。GUI (Graphical User Interface) を用いて、直感的に、システムの状態遷移をモデル化することができる。次よりダウンロードが可能。<<http://www.uppaal.com/>>

用語 29: 産業用ロボット：自動制御によるマニピュレーション機能または移動機能を持ち、各種の作業をプログラムによって実行できる、産業に使用可能な機械。

用語 30: サブシステム：システムの一部であるものの、それ自体が局所的な一つのシステムとしての構造を持つもの。

用語 31: COTS：Commercial Off The Shelf の略。ソフトウェア製品やハードウェア製品などの既製品。

用語 32: コンポーネント：サブシステムを構成する要素または部品。

用語 33: ティーチペンダント：産業用ロボットに対する動作のプログラミングや産業用ロボットの緊急停止に用いる装置。

用語 34: コンソール：システムを操作する際に利用する入出力装置。キーボードなどの入力装置、ディスプレイなどの表示装置で構成される。

用語 35: QCD: Quality (開発対象の品質)、Cost (開発コスト)、Delivery (開発期間) の略。

用語 36: 時相論理：時間との関連で問題を理解し表現するための規則と表記法の体系。時相演算子、パス限量子、論理演算子を組み合わせ、“常に P が成立する”、“いずれ Q が成立する”などの性質を表現することができる。

用語 37: 時相演算子：時相論理における“G: 常に”や、“F: いずれ”などを表現する演算子。

用語 38: パス限量子: 時相論理における“A: すべてのパスで”や、“E: あるパス”を表現する演算子。

用語 39: 論理演算子：論理演算を表す記号。“NOT: 否定”、“AND: 論理積”、“OR: 論理和”がある。

## 参考文献

- [1] International council on systems engineering (INCOSE): *INCOSE Systems Engineering Handbook version 3.1*, 1.5 of 6, INCOSE, USA (2007).
- [2] N. G. Leveson: *SAFWARE: System Safety and Computers*, 515-553, Addison-Wesley Professional, USA (1995).
- [3] 清水久二: アリアン5の爆発事故とソフトウェア安全性に関する国際規格, *安全工学会安全工学誌*, 41 (1), 39-42 (2002).
- [4] 国土交通省: FDPシステムの障害の原因調整の結果, 国土交通省(オンライン), 入手先 <[http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/12/120312\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/12/120312_.html)>(参照2009-09-22).
- [5] 加藤淳, 神武直彦, 春山真一郎, 狼嘉彰: モデル検査を用いて組込みシステムにおけるソフトウェアとハードウェアの協調動作に関する要求仕様の不整合を検出する手法, *IPSI Symposium Series*, 2009, 65-70 (2009).
- [6] 加藤淳, 狼嘉彰: FPGAとソフトウェアにおける協調動作の整合性に関する評価手法の提案, *情報処理学会第163回ソフトウェア工学研究会研究報告*, 2009 (31), 105-112 (2009).
- [7] E. M. Clarke, O. Grumberg and D. E. Long: Model checking and abstraction, *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 16 (5), 1512-1542 (1994).
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): *IEEE standard for system and software engineering - System life cycle processes*, IEEE 15288-2008 (2008).
- [9] American National Standard Institute (ANSI)/ Electronic Industries Alliance (EIA): *ANSI/EIA Standard for Process for Engineering a System*, ANSI/EIA 632-1999 (1999).
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): *IEEE standard for application and management of the systems engineering process*, IEEE 1220-2005 (2005).
- [11] E. M. Clarke and J. M. Wing: Formal methods: State of the art and future directions, *ACM Computing Surveys*, 28 (4), 626-643 (1996).
- [12] International Electrotechnical Commission (IEC): *IEC standard for functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*, IEC 61508-SER Ed. 1.0 (2005).
- [13] T. DeMarco: *Structured Analysis and System Specification*, Yourdon Press, USA (1978).
- [14] 有澤誠, 齊藤鉄也: *モデルシミュレーション技法*, 16-17, 共立出版 (1997).
- [15] V. K. Rompaey, D. Verkest, I. Bolsens and D. H. Man: CoWare - A design environment for heterogeneous hardware/software systems, *Proceedings of the European Design Automation Conference*, 252-257 (1996).

- [16] T. Doran: IEEE 1220: For practical systems engineering, *IEEE Magazines Computer*, 39 (5), 92-94 (2006).
- [17] M. Sipser: Course Technology Ptr(SD), *Introduction to the Theory of Computation*, 29-90, The Netherlands (1996).
- [18] R. Alur and D. L. Dill: A theory of timed automata, *Theoretical Computer Science*, 126 (2), 183-235 (1994).
- [19] G. J. Holzmann: The model checker SPIN, *IEEE Transaction on Software Engineering*, 23 (5), 279-295 (1997).
- [20] K. G. Larsen, P. Pettersson and W. Yi: UPPAAL in a nutshell, *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 1 (1-2), 134-152 (1997).
- [21] 日本工業標準調査会: 産業用マニピュレーティングロボット用語, JIS B 0134 (2008).
- [22] J. P. Elm: A study of systems engineering effectiveness - Initial results, *Proceedings of the Systems Conference 2008 2nd Annual IEEE*, 1-7 (2008).
- [23] B. Boehm, R. Valerdi and E. Honour: The ROI of systems engineering: Some quantitative results for software-intensive systems, *Systems Engineering*, 11 (3), 221-234 (2008).
- [24] E. C. Honour: Understanding the value of systems engineering, *Proceedings of the INCOSE International Symposium*, 1-16 (2004).
- [25] A. K. Kludze: The impact of systems engineering on complex systems, *Proceedings of Conference on Systems Engineering Research* (2004).
- [26] B. W. Boehm: *Software engineering economics*, 38-40, Prentice-Hall, USA (1981).
- [27] B. Alpern and F. B. Schneider: Defining liveness, *Information Processing Letters*, 21, 181-185 (1985).
- [28] 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科: 研究科ホームページ, 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科(オンライン), 入手先<<http://www.sdm.keio.ac.jp/>>(参照2010-04-18).

## 執筆者略歴

加藤 淳 (かとう あつし)

2000年熊本大学大学院自然科学研究科電気システム専攻修了。同年より、電機メーカーにおいて、ユビキタス環境における小型ネットワークデバイスの研究・開発業務などに従事。2006年より、宇宙開発領域において宇宙機ソフトウェアの独立評価業務に従事。また、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科において、システムエンジニアリングに関する研究に取り組む。2009年情報処理学会研究賞受賞。情報処理学会会員。本論文では、研究計画、技術の選択・融合、産業事例への適用、考察に関する部分を担当した。



浦郷 正隆 (うらごう まさたか)

1998年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年より、東京工業大学で助手を務める。2008年より、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科准教授となる。システムズエンジニアリングおよび工学問題のコンピュータモデリング、数値計算に関する研究に取り組む。日本機械学会会員。INCOSE会員。本論文では、技術の選択・融合に関する部分を担当した。



狼 嘉彰 (おおかみ よしあき)

1968年東京工業大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了。工学博士。NASA国際フェロー、東京工業大学教授、慶應義塾大学教授、宇宙開発事業団技術研究本部研究総監を経て、2008年より慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科委員長を務める。複雑システムのダイナミクス・制御および戦略的システムエンジニアリングに関する研究に取り組む。日本機械学会フェロー。INCOSEフェロー。日本航空宇宙学会会員。IEEE会員。AIAA会員。本論文では、研究戦略の立案および研究統括を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 課題の新規性と成果

質問 (上田 次次: 産業技術総合研究所)

2章で、各領域の技術を融合する理由として、融合により新規技術が生まれて新たな研究領域の創出が期待されるためとされていますが、この研究でどのような結果が得られたのでしょうか。

コメント (赤松 幹之: 産総研ヒューマンライフテクノロジー研究部門)

本論文の内容に新規性がうたわれていますが、専門外の読者にとっては新規であるかにはわかりません。これまでもシステムの信頼性を向上させるような手法が提案されているのではないかと推察されますが、この研究が行なわれる前の状況を少し解説していただくことで、新規性が浮き彫りになると思われます。また、同様に、このような必要な技術がなぜこれまで着手されていなかったのか、なぜそれが困難であったかなどを説明していただくと良いと思います。

回答 (加藤 淳)

システムの構成要素による協調動作に着目し、この研究の背景などをご説明させていただきます。通常、システムの構成要素による協調動作は、システム開発の終盤に実施されるシステム試験では確認されますが、ここで協調動作の不整合が検出されるとシステム開発の上流工程に立ち戻る必要があり、改修に多くのコストを要します。また、開発終盤における設計変更は、システムの信頼性を低下させる可能性があります。したがって、システムの構成要素による協調動作は、システム開発の上流における確実な設計および確認が必要です。しかし、これらを実現する開発手法は提案されていませんでした。それは、システムにおける信頼性の観点から、システムの構成要素による協調動作が着目されることがなかったことと、システム開発の上流ではシステムの品質を作り込むと自体が比較的新しい概念だったことに起因します。本論文の1章では、これらを加筆いたします。

また、この研究を行った結果、次に示す四つの成果が得られたと考えます。一つ目は、システム仕様を協調動作が整合している構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解する本開発手法を確立したことです。二つ目は、アーキテクチャ設計手法とモデル検査を融合するためにはブリッジ技術が必要であることを明らかにし、協調動作に着目した場合のブリッジ技術の実現例を挙げたことです。三つ目は、主にソフトウェア開発に適用されるモデル検査をシステム開発に適用したことにより、モデル検査の適用領域および研究領域を拡大したことです。四つ目は、ロボット産業界に対しこの研究における開発手法を提案したことです。

### 議論2 協調動作

コメント (上田 次次)

「構成要素の協調動作」の表現が多数用いられていますが、一般読者にとってはその意味を理解することが困難と思われます。また、「協調動作の整合、不整合」も自明のように記述されています。協調動作の定義ないし意味を明確に示して、わかりやすい記述にしてください。

コメント（赤松 幹之）

協調動作に関する評価の観点の設定方法、協調動作が満たすべき性質の抽出方法、安全性の考慮の方法などが書かれていませんので、例えばロボット技術者がこれを使えるかどうか分からないと思います。ロボット関係者がこれを使ってみようと思う手掛かりとなるような説明があることが望まれます。

回答（加藤 淳）

本論文では構成要素の協調動作を " システムの構成要素における処理がインタフェースを介し、他構成要素の処理と連携すること " と定義いたします。協調動作の整合を " システム仕様に対し構成要素による協調動作が正しく行われていること " と定義いたします。また、協調動作の不整合を " 協調動作の整合の定義を満足しないこと " と定義いたします。本論文の1章では、これらを加筆いたします。

協調動作に関する評価観点については、協調動作に関連する仕様および協調動作が満たすべき性質を基に設定します。適用事例における測定サブシステムおよび統合制御サブシステムについては、協調動作に関連する仕様からメッセージおよび処理の抜けが懸念されました。また、協調動作に関連する仕様および協調動作が満たすべき性質の中に、100 ms 以内などの時間的な制約やメッセージおよび処理のタイミングに関する仕様が存在しました。したがって、4.2 節で示す二つを評価観点として設定しました。5 章 2 節 2 項では、これらを加筆いたします。

協調動作が満たすべき性質は、システム仕様とそれをブレイクダウンした構成要素仕様との対応関係がまとめられるトレーサビリティマトリクスを用いて抽出します。

また、協調動作における安全性の確認については、この研究の課題です。安全性とはシステムが決して悪い状態に到達しない性質を指します。" システムとして悪い状態 " をもれなく識別することが困難であるため、協調動作における安全性の確認に漏れが生じる可能性は否定できません。本開発手法に対し Fault Tree Analysis (FTA) などのような安全性解析手法を組み合わせることで、本課題の解決策を検討する予定です。

### 議論3 技術の選択

質問（上田 完次）

「IEEE 1220 に従い・・・」のような表現が多数見かけられます。この研究で開発されている手法との関係はどのようなのでしょうか。また、なぜ IEEE 1220 を採用したのか、根拠も明確ではありません。

コメント（赤松 幹之）

システム設計技術にアーキテクチャ設計以外に何があるのか、同様にアーキテクチャ設計として IEEE 1220 以外に採用しなかった技術についても記載してください。さらに、数あるアーキテクチャ設計手法の中から IEEE 1220 を選択したシナリオを明確にするために、他の手法にはどのような欠点があるのかに記載されていると、理解しやすいと思います。

モデル検査とは、システムの遷移状態を表すモデルに対して網羅的に検証する技術と1章に記載されていますが、ここで用いられたモデル検査手法はこの研究で独自開発されたものか、既に開発されていたものを適用したのかが分かるように記述をお願いします。

モデル検査ツールとして有限オートマトンベースの検査ツールを選定したとあり、そのメリットが書かれていますが、それ以外のツールとして何があつて、それらの欠点は何であるかも書いてください。同様に UPPAAL の選定についても、もし他の候補があつたのであれば、その点も記載してください。

回答（加藤 淳）

この研究では既に有効性が認められている技術を選択し、高品質な開発手法を効率よく確立する研究方針を採用しています。本開発手法を構築するにあたり、有効性が認められ標準化されているアーキテ

クチャ設計手法を適用しています。アーキテクチャ設計手法以外の代表的なシステム設計技術として、構造化分析・設計手法があります。アーキテクチャ設計手法はデータやサービスなど特定の技術要素を中心とするシステム設計には不向きであるものの、特定の技術システムには依存しない汎用的な設計手法です。したがって、この研究ではシステム設計技術としてアーキテクチャ設計手法を選択しました。また、アーキテクチャ設計手法が規定される代表的なシステムエンジニアリング標準として、ISO 15288、ANSI/EIA 632、IEEE 1220 がありますが、IEEE 1220 は各プロセスにおける作業および手順が詳細に規定されていることから IEEE 1220 を採用しました。本論文の3章では、これらの比較について記載いたします。

モデル検査は検証技術として既に確立されている技術です。1980年代初頭より研究が開始され、近年、ソフトウェア開発では普及が進んでいます。モデル検査は " モデルを用いた検査 " なのですが、検証技術の固有名詞になっています。本論文の1章ではこれらを加筆いたします。モデル検査以外の代表的なシステム検証技術としてテスト手法およびシミュレーション手法がありますが、モデル検査は状態遷移については満たすべき性質が成り立つかどうかを網羅的に検証することができます。したがって、この研究ではシステム検証技術としてモデル検査を採用しました。本論文の3章ではこれらの比較について記載いたします。

また、形式手法の中には定理証明という検証技術があります。定理証明とはシステムの仕様や設計を意味論が数学的に定義された言語で記述し、厳密な証明を与える手法です。定理証明はシステムに対する厳密な検証を可能としますが、人間と対話的に証明を進める部分があり多くの労力を要します。定理証明について、現状、筆者らは産業界では適用され有効性が認められているとはいえない検証技術と考えます。したがって、この研究における検証技術の候補からは除外しました。

モデル検査の種類には代表的なものとして、有限オートマトンおよび有限オートマトンを拡張した時間オートマトンがあります。適用するモデル検査およびツールは、評価対象の特徴に応じて選定する必要があります。外部からのイベントをトリガとして状態が遷移するような一般的な状態遷移を評価する場合には、有限オートマトンに対応したモデル検査ツールを選定します。代表的なモデル検査ツールとして SPIN があります。時間制約を含む状態遷移を評価する場合には、時間オートマトンに対応したモデル検査ツールを選定します。代表的なモデル検査ツールとして UPPAAL があります。有限オートマトンに対応したモデル検査で確認できる対象は、時間オートマトンに対応したモデル検査ツールを用いても確認することができます。しかし、その逆は成り立ちません。本論文の4章では、これらを加筆いたします。また、今回の適用事例では、協調動作として時間的な制約を評価する必要がありました。また、時間オートマトンに対応したモデル検査ツールについて、産業界の実例に対して適用可能な品質を有するのは、現状は UPPAAL のみと筆者らは判断しました。

### 議論4 成果の産業応用

コメント（上田 完次）

この研究の実例の成果が、実際の産業応用にどのように使われたのか、あるいは、使われる見通しがあるのか、その際の適用限界などについて言及されると、第2種基礎研究として意義が高まると思います。

コメント（赤松 幹之）

この研究の重要なことは、この手法が産業界などで実際にシステムを開発している人達に使われることだと思います。その意味で、この成果を活用できる対象はどういったシステムなのか、この手法の適用範囲についての説明が望まれます。また、この手法を広めていくための方策などについてもお考えのことがあれば記載してください。

回答（加藤 淳）

この研究における開発手法は、特定の技術システムに特化しない、

技術システム全般の開発に適用することが可能な手法であると考えます。システムを設計する際、システム仕様を基にシステムを構成する要素を見出し、構成要素を正しく協調動作させることで機能を実現しますが、これは技術システム全般では共通的な概念であるためです。また、本開発手法は、適用対象システムにおける協調動作に関する固有の問題に対処することが可能な手法です。本開発手法は適用対象システムにおける協調動作の特徴に対し、評価観点およびモデル検査ツールを選択するブリッジ技術を有しているためです。

現在、筆者らは産業用ロボットメーカーと共同で、産業用ロボットに関する新製品の企画・開発を行っています。本論文の5章における産業事例がそれにあたります。本論文執筆現在、この研究における開発手法を適用し、協調動作が整合していることが確認された仕様を基に、産業用ロボットの開発が進んでいます。産業用ロボットにおける実際の製品開発に本開発手法を適用し、産業用ロボットの高性能化に貢献した実績から、この研究が第2種基礎研究に値すると考えています。本論文の5章にこれらを加筆いたします。

ただし、本開発手法の適用には注意すべき点があります。本開発手法では、構成要素の協調動作が整合していることを確認するために、モデル検査を採用しています。モデル検査におけるモデルの状態数が多い場合、状態の組み合わせが膨大になることでモデル検査が終了しない状態爆発という現象が生じることがあります。つまり、アーキテクチャ設計の結果、構成要素の協調動作が極端に複雑になると、モデル検査による協調動作の検証が終了しない可能性があります。その場合、アーキテクチャ設計の際に構成要素による協調動作が極端に複雑にならないように再度アーキテクチャ設計を実施する方策や、協調動作に関する仕様のモデルの状態数を減らす方策などが必要になります。6章に「開発手法の適用性」という節を設け、これらを加筆いたします。

本開発手法については、筆者らが所属する慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科をとおして、産業界に広めることを検討しています。本論文の7章では、これらを加筆いたします。

## 議論5 選択した技術のメリット/デメリット

質問（赤松 幹之）

3章では技術の選択を記述していただきましたが、機能 a を実現する手法として、アーキテクチャ設計手法と構造化分析・設計手法とを挙げ、アーキテクチャ設計手法は、データやサービスなど特定の技術要素を中心とするシステム設計には向かないが、汎用的な設計技術であることから、アーキテクチャ設計手法を選択したとあります。要素技術の選択は研究のゴールに依存して行なわれることから、そのゴールを明記して、それとメリット/デメリットを比較検討した結果としてアーキテクチャ設計手法を選択したという記述ができますでしょうか。

この研究のゴールは汎用性のある手法を構築することにあるからとも推察できますが、汎用性をゴールとすると実際の個別問題には適用しにくくなるという一般的な問題はありますか。それを解決するのがブリッジ技術かとも推察しますが、もしそうでしたら、（議論3とも関係しますが）その点を明記してください。

回答（加藤 淳）

この研究の目標（研究のゴール）を明確にいたします。この研究の目標はシステムの仕様を構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様に分解し、それらの協調動作が整合していることを確認する、特定の技術システムに特化しない開発手法の確立です。本

内容について2章に加筆いたします。本論文3章の機能 a を持つシステム設計技術として、構造化分析・設計手法およびアーキテクチャ設計手法が挙げられます。構造化分析・設計手法はシステム環境の変化に対して安定している業務情報などのデータに着目しシステム設計を行います。それにより保守性および拡張性を有するシステムを構築することができます。しかし、情報システムを念頭におき開発された手法につき、情報システム以外のシステム設計には不向きな側面を持っています。一方、アーキテクチャ設計手法はその設計に特化した手順や作業が規定されていないため、専用の設計手法に比べ労力を要します。しかし、アーキテクチャ設計手法は特定の技術システムに依存しない汎用的な設計手法です。したがって、この研究の目標における特定の技術システムに特化しない開発手法である点を踏まえ、機能 a を持つシステム設計技術としてアーキテクチャ設計手法を選択しています。本論文の3章では、システム設計技術の中からアーキテクチャ設計手法を選択したプロセス、構造化分析・設計手法およびアーキテクチャ設計手法のメリット、デメリットを修正いたします。

開発手法について、ご指摘のとおり一般には特定の技術システムに特化しないことで個別の問題に適用しにくくなる問題はあると考えます。本開発手法ではブリッジ技術により、適用対象システムにおける協調動作の特徴に応じて評価観点およびモデル検査ツールを選択しています。それにより、協調動作に関する適用対象システム固有の問題に対応しています。これらについて、本論文6章2節に加筆いたします。

## 議論6 ブリッジ技術

コメント（赤松 幹之）

ブリッジ技術が必要であることを明らかにしたことがこの研究の成果の一つであると述べていますが、なぜブリッジ技術が必要になったのか、またブリッジ技術が満たすべき要件は何であると判断したのか、なぜブリッジ技術と名付けたかなど、ブリッジ技術の研究シナリオについても記載をお願いします。

アーキテクチャ設計手法とモデル検査法がそれぞれ独立した考え方に基づいて開発されてきたために、モデル検査法を適用するためにはアーキテクチャ設計手法からの出力では不十分であったものと推察しますが、そもそもコンセプトが異なるものをつなげるためには、互いを変換する技術が必要になるのは当然ともいえます。したがって、それが単なる変換技術なのか、それとも、例えば、協調動作を検証するという視点が一つのポイントとなって開発した技術なのかなど、オリジナリティを明確にするために、こういった点についても言及してください。

回答（加藤 淳）

この研究では、システム設計の段階で構成要素による協調動作に対してシステム検証を行います。そのためには協調動作に着目し、アーキテクチャ設計のアウトプットおよびモデル検査のインプットをシームレスに繋ぐ必要があります。そこで協調動作に関連する構成要素の仕様および構成要素間のインタフェース仕様、協調動作が満たすべき性質、適用するモデル検査ツールを導出する技術を開発しました。この技術はアーキテクチャ設計手法とモデル検査の橋渡しをすることからブリッジ技術と呼びます。ブリッジ技術は協調動作に着目し IEEE 1220 といったシステムエンジニアリング標準とモデル検査を融合する具体的な方法を明確にしたところに新規性があると考えます。これらについて、本論文4章2節に加筆いたします。

# ものづくり産業の国際競争を支援する電気標準

## — キャパシタンス標準の実現と計量トレーサビリティ体系の確立 —

中村 安宏\*、堂前 篤志

キャパシター（コンデンサー）は電子部品の中でも最も基本的な素子の一つであり、各種電気機器に多数用いられている。電気機器などの産業界において、最近、キャパシターの品質の国際規格への適合要求が強くなっている。特に国家標準への計量トレーサビリティは必須の事項として要望されている。産業界の要望に応えるため、産総研において世界トップクラスのキャパシタンス標準を開発し、それを迅速に供給するための技術開発を行った。具体的には従来法に代わって新たに量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準を開発し、また校正事業者の認定を支援して標準供給体制の確立を行った。さらに供給の迅速化、低コスト化のために遠隔校正システムを開発した。

キーワード：キャパシタンス、コンデンサー、電気標準、トレーサビリティ、遠隔校正

### National electrical standards supporting international competition of Japanese manufacturing industries

– Realization of a new capacitance standard and its traceability system –

Yasuhiro Nakamura\* and Atsushi Domae

A capacitor or a condenser is one of the most basic electrical devices and is used in various electrical equipments. Recently the electrical equipment industry has been requesting the quality of capacitors to be compatible with international standards; among other things, it is strongly demanded that the traceability of a capacitance standard should be consistent with the national standards. To respond to this need from the industry, we have developed a new national standard of capacitance based on the quantized Hall resistance and also established its traceability system in cooperation with the accredited calibration businesses. A remote calibration system of capacitance has also been developed to disseminate the standard quickly and to reduce calibration costs.

Keywords: Capacitance, condenser, electrical standard, traceability, remote calibration

#### 1 はじめに

積層セラミックコンデンサー、チップインダクター、EMI フィルター、薄膜抵抗素子などの電子部品・電子モジュールの製造産業は我が国の主要産業の一つであり、例えばコンデンサーだけでも、その市場規模は8000億円～1兆円と推定されている。また、最近の薄型テレビ、携帯電話、パソコンなどに代表されるデジタル家電の高機能化・多機能化や自動車の電子化などによって、コンデンサーの需要が増大しており、さらに、次世代エネルギーデバイスとしての蓄電池キャパシター（大容量コンデンサー）への期待から、環境・エネルギー分野においても今後の需要の拡大が見込まれている<sup>[1]</sup>。現在、コンデンサーにおいて、我が国の電子部品産業が占める世界シェアはおおよそ7割と推定されているが、最近、アジア大手電機メーカーによるシェア拡大が急速に進んでいると言われている。

これら電子部品メーカーの主要顧客、すなわち電子部品

の主な供給先は、自動車産業、電気機器産業あるいは通信機器産業のいわゆる大手ものづくり産業である。これらの産業界から、最近、安心・安全と省エネの観点から、電子部品・電子モジュールに対する信頼性のさらなる向上が要求されており、またそれと同時に、ISO/TSI6949（自動車産業向けの品質マネジメントシステムの国際規格）、ISO/IEC17025（試験所および校正機関の能力に関する国際規格）などの国際規格への適合が強く要望されるようになってきている。特に、国家標準への計量トレーサビリティ確保が必須の事項として要求され、そのため国内電子部品メーカーでは、これら顧客の要望に応えるため、製造ラインの検査装置に対する計量トレーサビリティの確保と国際整合化への対応が喫緊の課題となっているのが現状である。

国内産業界のこのような課題に対応するため、産業技術総合研究所では国家標準として電圧や抵抗などの各種電気量の標準を開発し、これを国際比較などによって国際整

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園1-1-1 中央第3  
National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan \* E-mail: y.nakamura@aist.go.jp

Original manuscript received January 28, 2010, Revisions received July 12, 2010, Accepted July 14, 2010

合性の確保された標準として確立し、さらに国内校正事業者をとおして、国内産業の生産現場の隅々にまで、計量標準を広く供給・浸透させる体制作りを急いでいる。キャパシタンスやインダクタンス、交流抵抗といったインピーダンスの各量は、数ある電気量の中でも最も基本的な物理量であるが、電子機器の高機能化、自動車の電子化や性能向上に伴って、ここ数十年の間に、特にコンデンサーについて、より高精度な標準を望む声が大きくなってきた。そこで、コンデンサーの標準、すなわちキャパシタンス標準について、それまでの標準設定・実現方法をゼロから見直し、新たなキャパシタンス標準の確立と計量トレーサビリティ体系の構築を目指して研究開発を行った。

キャパシタンス標準をはじめ、産総研が開発・確立した世界トップレベルの各種電気標準を国内の電子部品メーカーに迅速に供給することによって、電子部品の一つ一つに計量トレーサビリティの保証を与え、これをとおして、国内電子部品産業はもとより、電子部品の供給先である電機・通信・自動車産業などの我が国基幹産業のグローバル競争や技術開発競争を知的基盤の面から強力にサポートし、国際競争力強化に貢献することを目指している。

## 2 シナリオ

### 2.1 国家標準の開発目標の設定

「新たに開発するキャパシタンスの国家標準はどの程度の不確かさ（精度）を目指すべきか」、また、「校正対象としてはどのような二次標準器を想定すべきか」など、新たな国家標準の開発に当たっては、まず、開発の目標を設定する必要がある。開発の当時、国家標準（一次標準器）から値付けする二次標準器には空気キャパシターあるいはマイカキャパシターと呼ばれる標準キャパシターが主に用いられていた。これは温度係数が小さいかまたは小型で扱いやすいことが理由で、企業の標準室で一般に広く使用されていたものであるが、期待できる不確かさは1 ppm(1  $\mu\text{F}/\text{F}$ ) レベルであった。より高精度なキャパシタンス標準を要望する電子部品メーカーあるいはキャパシタンスの計測器メーカーは、空気キャパシターに比べさらに高精度・高安定である熔融石英型キャパシターを所有し、このタイプのキャパシターに対して標準の供給を求めている。熔融石英型キャパシターであれば、0.1 ppm レベルの不確かさが期待できる。そこで、校正対象として熔融石英型キャパシターを想定し、それを校正するための国家標準（キャパシタンス標準）を開発することにした。

開発したキャパシタンス標準は他国の国立標準研究所（NMI: National Metrology Institute）における同種の標準と比較され、標準の同等性が確認されることによ

て、国際整合性が確保できる。世界トップレベルのキャパシタンス標準を実現する主要国のNMI、具体的にはNIST（米）・PTB（独）・NMIA（豪）・LNE（仏）においてそれぞれ実現されているキャパシタンス標準の不確かさを調査した結果、いずれも標準不確かさ0.1 ppm以下で標準を確立していることが分かった<sup>[2][5]</sup>。校正対象（二次標準器）として、高精度・高安定な熔融石英型キャパシターを想定する意味においても、また国内産業のグローバル競争を支援する意味からも、世界トップレベルの標準の実現は必須であると判断した。そこで、開発目標として「標準不確かさ0.1 ppm以下の国家標準の確立」を設定した。

### 2.2 産業現場までの標準供給シナリオ

メーカーの生産現場までキャパシタンス標準を供給し、計量トレーサビリティ体系を構築するには、民間の校正事業者の役割が必須だと考える。現在、世界の多くのNMIでは産業界の求める標準を数多く開発・整備し、広い範囲にわたって校正サービスを提供している。（例えば、電気標準を例にみても、NIST、PTBは共に約330種類、香港SCLは約200種類の校正サービスを提供している<sup>[6]</sup>。）しかし、産総研においても同様に産業界ニーズに見合うすべての範囲の標準を整備し供給することが最善の策かといえ、必ずしもそうではないと思われる。我が国には、他国と比べて能力の高い校正事業者や精密機器製造事業者が数多く存在する。計量トレーサビリティ体系の構築において、これらの国内事業者の協力を得て、その校正実施能力を最大限に活用することができれば、産業現場の隅々まで迅速かつ安定な標準供給が実現でき、またそれと同時に、産総研の業務のスリム化やリソースの効率的運用が可能になると思われる。そこで、キャパシタンス標準の供給においては、図1のような標準供給体制を想定した。

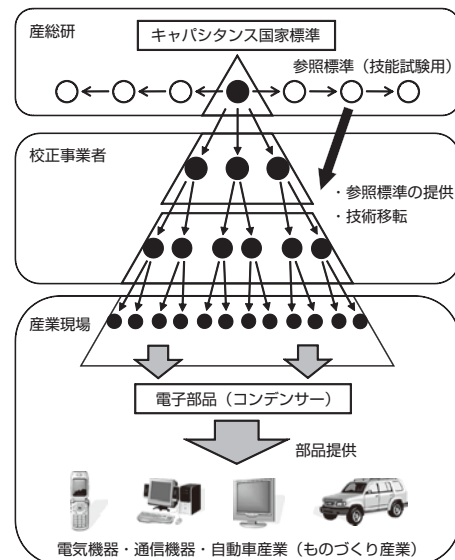


図1 キャパシタンス標準の供給体制シナリオ

すなわち、産総研は、基本範囲で国家標準を開発・確立し、国内の校正事業者に供給し、校正事業者において、基本範囲の標準をもとにして校正範囲の拡張を行って産業現場へ供給する体制である。この場合、産総研の役割は上位の校正事業者に、高精度でかつ限定した基本範囲の標準を定期的に供給するだけに限られ、校正業務のスリム化が図れる。また、供給する標準の範囲を限定することで、産総研におけるリソースの選択・集中が可能となり、これによって校正装置の高精度化と効率化を図ることができる。さらに、標準の供給形態はすべて「計量法に基づく校正事業者登録制度（JCSS：Japan Calibration Service System）」を基本として考える。このことにより、図1に示すように標準供給の階層化が実現でき、産総研における高精度かつ基本範囲の国家標準が各階層の校正事業者によって範囲拡張され、生産現場の隅々にまで確実に提供される。具体的には、産総研において、10 pF、100 pF、1000 pF のキャパシタンス標準を開発・整備し、これを上位の校正事業者に供給する。上位の校正事業者において、例えば、10 pF を基準に 1 μF への拡張などの校正範囲の拡張が行われ、下位の校正事業者へ供給される。下位の事業者からさらに生産現場へ校正範囲の拡張を伴ってキャパシタンス標準が供給される。この体制を構築することで、メーカーの生産現場まで必要な範囲のキャパシタンス標準が、必要な時に国家標準に連鎖して供給される。つまり、生産現場の計測器あるいはコンデンサーの国家標準への計量トレーサビリティ体系が効率的に確立できる。

この標準供給体制を構築するにあたっては、各階層の校正事業者、特に最上位の校正事業者の役割が極めて重要である。したがって、産総研は国家標準を開発・供給するだけでなく、それと同時に校正事業者の技術力の向上に対する支援も必要になる。また、その技術を評価・審査するための標準（技能試験用参照標準）も別途必要になる。これは、校正事業者が、例えば国家標準から供給された 10 pF を基準にして 1 μF、10 μF へと拡張する際に、その拡張した結果が正しいか否かを確認することが必要になるためである。そこで、図1に示すように、産総研においてもある程度キャパシタンス標準の範囲を拡張し（つまり、10 pF、100 pF、1000 pF を基準に 1 μF、10 μF への拡張を行い）、これを校正事業者の技術力確認のための参照標準に使用することとした。また、これら開発すべきすべての標準を計画的に整備するために、表1に示すような年度展開で標準整備計画を策定し、これに基づいて計画的に資源配分を行って、標準の開発・実現を行うこととした。さらに、この供給体制の実現には国内校正事業者の理解と協力が不可欠である。そこで、標準にかかる国内委員会

表1 キャパシタンス標準整備計画

| 供給容量    | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 10 pF   |      | ○    |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 100 pF  | ○    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1000 pF |      | ○    |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0.01 μF |      |      |      | ○    |      |      |      |      |      |      |
| 0.1 μF  |      |      |      | ○    |      |      |      |      |      |      |
| 1 μF    |      |      |      | ○    |      |      |      |      |      |      |
| 10 μF   |      |      |      |      |      | ○    |      |      |      |      |
| 100 μF  |      |      |      |      |      |      |      |      | ○    |      |
| 1000 μF |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ○    |

や研究成果発表会などにおいて、産業界との意見交換を積極的に行うことにより合意形成に努めることとした。

### 3 キャパシタンス標準の開発

#### 3.1 方法の選択

キャパシタンス標準を実現する方法には世界的に二つの方法が認められている。一つは、クロスキャパシターと呼ばれる特殊な形状のキャパシター（コンデンサー）を用いる方法である。図2に示すように、互いに平行に配置された4本の電極棒において、対向する2組の電極間のキャパシタンス（クロスキャパシタンス）の単位長さあたりの値を  $C_{12}$ 、 $C_{34}$  とすると、 $C_{12}$ 、 $C_{34}$  の平均値が次式によって表わされることが、A. M. Thompson と D. G. Lampard によって導かれている<sup>[7]</sup>。

$$(C_{12} + C_{34}) / 2 = (\epsilon_0 \ln 2) / \pi \quad (1)$$

同式から分かるように、単位長さあたりのクロスキャパシタンスの平均値は電極間の誘電率  $\epsilon_0$  のみに依存する。クロスキャパシター全体を真空中におけば、単位長さあたりのクロスキャパシタンスは 1.953549043... pF となり、これは電極の形状には依存しない。つまり、電極棒の長さを正確に決めることができれば、クロスキャパシターによって長さ標準からキャパシタンスを決定することができる。ただし、式(1)が成り立つ条件として、4本の電極棒が無限に長いことが前提となっている。すなわち、無限に長い電極棒に

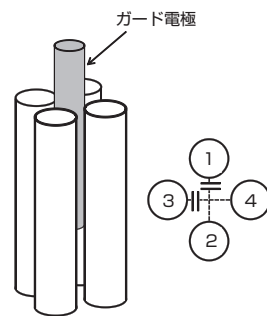


図2 クロスキャパシター

おける単位長さ当たりのキャパシタンスが式 (1) となる。したがって、実際にクロスキャパシターを実現する場合には、図 2 に示すように、四つの電極間に別のガード電極を挿入する必要がある。ガード電極が挿入されている部分はキャパシタンスがゼロとなる。この状態でガード電極を移動させると、その移動分だけキャパシタンスが増減する。つまり、ガード電極の移動距離分のクロスキャパシタンスを求めれば、それは式 (1) に従うことになる。この手法を用いて、多くの NMI がキャパシタンス標準を確立している<sup>[2][5]</sup>。しかし、実際にクロスキャパシターを製作するには電極棒の機械加工の精度が極めて重要になる。表面の粗さや電極棒の平行度がクロスキャパシタンスの不確かさに直接影響することになる。また、クロスキャパシターによるキャパシタンス測定には熟練技術を要し、これを用いて 0.1 ppm 以下の標準を実現するのは容易ではない。クロスキャパシターの先進国である NMIA (豪)、NIST (米)、PTB (独)、LNE (仏) においては、これを用いて 0.1 ppm 以下の標準を実現しているものの、他の NMI においては 0.1 ppm を超える不確かさとなっているのが実状である。また、産総研 (旧電子技術総合研究所) においても、かつてクロスキャパシターを製作・実現した実績はあるが、不確かさ 0.1 ppm 以下は達成されていない<sup>[8]</sup>。

キャパシタンス標準を実現するもう一つの方法は、図 3 に示すように、量子化ホール抵抗を基準として、抵抗標準からキャパシタンス標準を決定する手法である。1990 年以降、直流抵抗の標準は量子化ホール抵抗を基準に決める

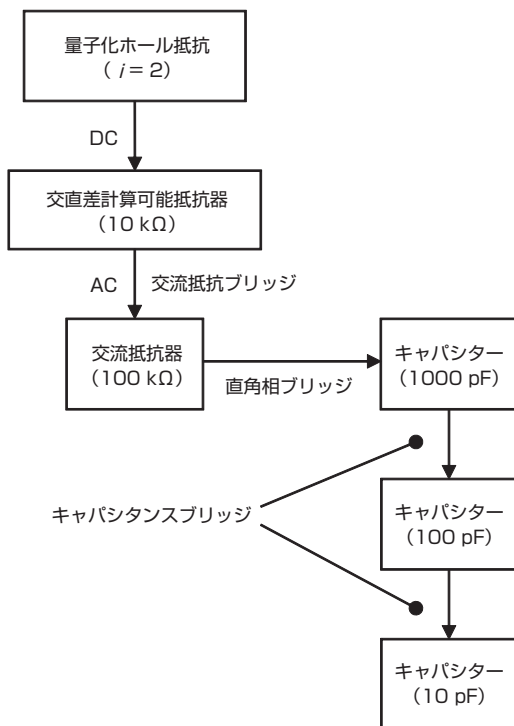


図 3 量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準

ことが世界的に合意されている。産総研 (旧電子技術総合研究所) においても、この合意 (正確には、第 77 回国際度量衡委員会勧告、1988 年) に基づき、量子化ホール抵抗標準を開発・整備し、量子化ホール抵抗に基づく抵抗標準の維持・供給を行ってきている<sup>[9]</sup>。標準の起点を量子効果に求めれば、いつ、誰が、どこで行っても同じ結果が得られる。特に量子ホール効果を示す式は式 (2) で与えられ、同式から明らかなように、量子化ホール抵抗  $R_H$  の決定に他の基準や標準は一切必要としない ( $h$  はプランク定数、 $e$  は電子の素電荷、 $i$  は量子化の次数を表す整数)。

$$R_H(i) = h/ie^2 \quad (2)$$

これは、クロスキャパシターにおいては電極棒をいかに精度よく作製しても、キャパシタンスの決定には必ず長さ標準が必要になることとは大きく異なる利点である。また、上述のように、量子化ホール抵抗は直流抵抗標準の起点であり、したがってキャパシタンスも同じく量子化ホール抵抗から導くことができれば、装置の共有化、効率化が可能となり、標準を開発した後の維持・管理の面でも有利である。そこで、キャパシタンス標準の実現方法として、量子化ホール抵抗を基準に導出する方法を採用することとした。

### 3.2 ニーズに対応した新たな手法の開発

量子化ホール抵抗からキャパシタンスを導くには、図 3 に示すように、各種ブリッジ回路と特殊な抵抗器が必要となる。具体的には、交流抵抗ブリッジ、直角相ブリッジ、キャパシタンスブリッジ、および交流-直流差が計算可能な特殊形状の抵抗器である。これら機器をそれぞれ高精度に開発し、それを用いて抵抗標準からキャパシタンスへ順次測定を行うことで、量子化ホール抵抗からキャパシタンスが導出できる。この一連の測定の中で、抵抗からキャパシタンスへの変換を行う直角相ブリッジはキャパシタンス標準の最終的な不確かさを決めるうえで特に重要である。図 4 に直角相ブリッジの回路構成を示す。同図から直角相ブリッジの平衡条件は、

$$\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 = 1 \quad (3)$$

となる。ここで、 $\omega$  は角周波数、 $C_1$ 、 $C_2$  はキャパシタンス、 $R_1$ 、 $R_2$  は抵抗である。この式から明らかなように、直角相ブリッジは、周波数依存型のブリッジである。つまり、直角相ブリッジにおいて、抵抗を基準にキャパシタンスを決める場合、平衡周波数は一意的に決定されることになる。(式 (3) から明らかなように、比較すべき抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  とキャパシタンス  $C_1$ 、 $C_2$  を固定値とした場合、平衡周波数  $\omega$  は当然一つ



しか存在しない。)このため量子化ホール抵抗から導かれるキャパシタンスは、ある特定の周波数での値に限られる。

(通常、 $C_1=C_2=1000$  pF、 $R_1=R_2=100$  k $\Omega$ とするため、平衡周波数は $\omega=10^4$  rad/s、すなわち約1.592 kHzとなる。)これはクロスキャパシターによるキャパシタンス標準とは異なる欠点である。(クロスキャパシタは原理的に周波数に依存しない。)

図1で示したように、開発するキャパシタンス標準の直接の供給先は高精度の校正サービスを行う上位校正事業者である。上位校正事業者の候補として想定される計測器メーカーや民間校正業者にキャパシタンス標準の校正周波数についてニーズ調査したところ、「1 kHzでの校正を希望」とのことであった。しかし、図4に示す回路を用いる限り、量子化ホール抵抗から導出されるキャパシタンスは周波数 1.592 kHz での値に限定される。1.592 kHz と 1 kHz の差、つまり 592 Hz の差は無視できるとの考えも一般的であったが、産業ニーズを満足させるには、標準供給の開始前に、校正対象である熔融石英型の標準キャパシ

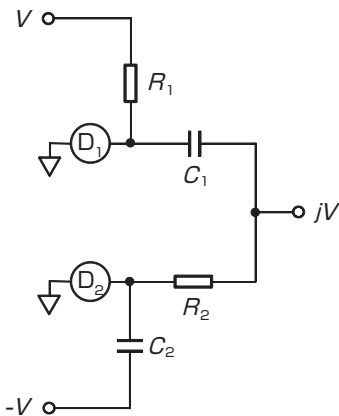


図4 直角相ブリッジ

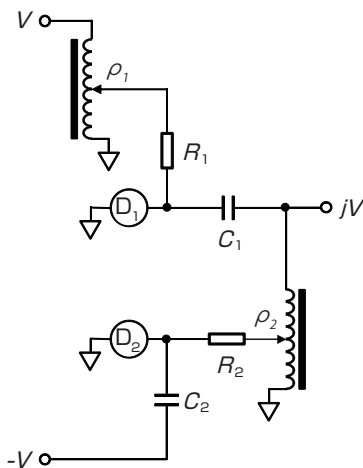


図5 周波数可変直角相ブリッジ

ターについて 1 kHz 付近の周波数特性を詳細に測定・評価する必要があると判断した。そこで、図4の回路に改良を加え、平衡周波数が可変となる新たな回路構成の直角相ブリッジを考案した。図5に周波数可変型直角相ブリッジの回路を示す。従来型回路(図4)に二つの誘導分圧器を加えると、ブリッジの平衡条件が式(4)で表わされることを見出した。

$$\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 = \rho_1 \rho_2 \quad (4)$$

ここで  $\rho_1 \rho_2$  は新たに加える二つの誘導分圧器の分圧比である。この分圧比  $\rho_1 \rho_2$  を任意にとることによって、原理上あらゆる周波数において直角相ブリッジが平衡することになる。実際には、 $\rho = n/8$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) を採用してブリッジを構築し、平衡周波数が  $1.25n/2\pi$  kHz となる周波数可変直角相ブリッジを実現した<sup>[10]</sup>。このブリッジを用いて熔融石英型標準キャパシターの周波数特性を測定したところ、図6に示すように、あるタイプのキャパシター (GR1408) においては、1 kHz 付近で周波数による容量変化が存在することが判明し、「熔融石英型キャパシターにおいて、1.592 kHz と 1 kHz の範囲では周波数依存性はない」との一般的考えを覆す新たな知見が得られた<sup>[11]</sup>。またそれと同時に、主な二次標準器として想定される AH11A 型標準キャパシターについては、周波数による容量変化は無視できることも確認できた<sup>[12]</sup>。以上のように、直角相ブリッジに周波数可変となる新たな回路構成を取り入れた「量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準」(図7)を開発した。開発したキャパシタンス標準の不確かさ評価を行ったところ、標準不確かさ 0.04 ppm と見積もられ、目標とする 0.1 ppm 以下を達成することができた。またこの結果は国際比較によっても確認され(図8)、他国の NMI の専門研究者による技術評価(ピアレビュー)を経て、国際同等性が十分にあること(CMC 登録<sup>[6]</sup>)が証明された。なお、

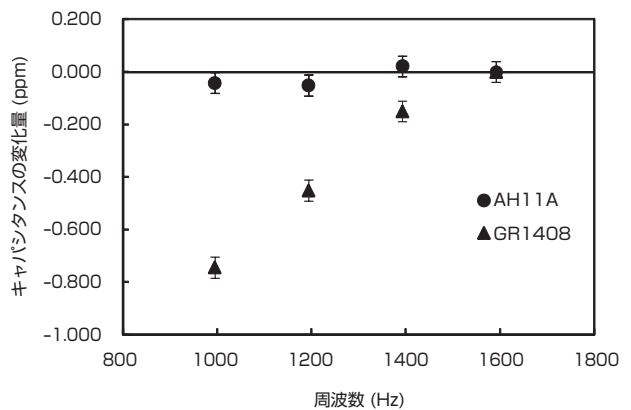


図6 熔融石英型標準キャパシターの周波数特性

現在、量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準を実現している機関は産総研以外にはNPL（英）、CMS（台）、BIPM（国際度量衡局）があるが、いずれも直角相ブリッジには従来型の回路を用いている。

#### 4 計量トレーサビリティ体系の確立

##### 4.1 技術審査のための参照標準の開発と技術移転

産総研で開発したキャパシタンス標準は、図1に示す標準供給体制に基づいて産業現場まで供給される。また、これによりキャパシタンスの計量トレーサビリティ体系が確立される。ただし、上述のように、産総研から供給される標準は10 pF、100 pF、1000 pFのみである。一方、産業界の生産現場では、少なくとも1 pFから100 μFまでの範囲のキャパシタンス標準が必要とされる。そこで、図1の各階層の校正事業者において、校正範囲の拡張が不可欠になる。校正事業者の候補としてはキャパシタンスの計

測器メーカーや電子部品メーカーの品質管理部署が想定されるが、これらの校正事業者が産総研から供給されたキャパシタンス標準を基準として自らで拡張方法を開発し、産業現場や顧客が必要とする範囲のキャパシタンス標準を実現し供給することになる。この際、校正事業者は、拡張方法の技術的妥当性などについて、JCSSに基づく技術審査を受けることになるが、この審査には、拡張結果が正しいか否かの判断をするための参照標準（値が既知の標準）が必要になる。例えば、産総研から供給された10 pFの値を基準として、校正事業者が自らで開発した手法を用いて、1 μFの校正を行う場合、校正結果が正しいか否かの判定には値が既知な1 μFの標準が必要となる。そこで、産総研において、10 pF、100 pF、1000 pFの標準（低容量標準）とは別に、新たに技術審査用の参照標準として0.01 μF、0.1 μF、1 μF、10 μFの標準（中容量標準）を開発し、JCSSの認定審査機関である（独）製品評価技術基盤機構（NITE）へ提供することとした。中容量標準の開発にあたっては、測定系をすべて同軸四端子対型ブリッジとする技術を採用した。これによって、容量の拡張、すなわち低インピーダンス化への対応を図った。同軸四端子対型とすることにより、測定ケーブルの影響を除去し、寄生インピーダンスの効果を軽減することができる。開発した中容量キャパシタンス拡張システムの外観を図9に示す。中容量拡張システムの不確かさは、0.01 μFにおいて標準不確かさ0.38 ppm、10 μFにおいて標準不確かさ2.0 ppmと見積もられ、技術審査用参照標準として十分な精度を持つ容量拡張システムが開発できた<sup>[13][14]</sup>。

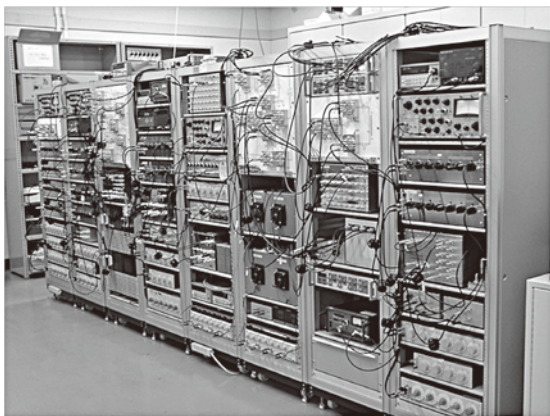


図7 量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準(国家標準)

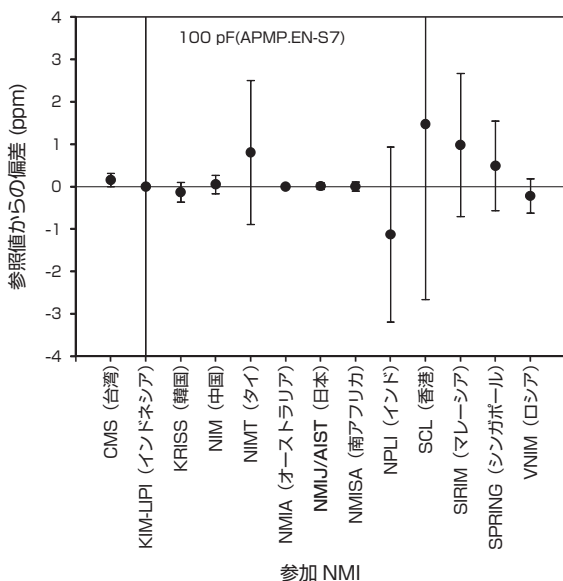


図8 キャパシタンス標準の国際比較結果

また、校正事業者による校正範囲の拡張を技術支援するため、産総研で開発した中容量拡張技術を校正事業者の一つである日本電気計器検定所に技術移転した<sup>[15]</sup>。（具体的には、産総研との共同研究により、同所において産総研と同型の中容量拡張システムを開発した。）その結果、同所において中容量拡張システムによる容量範囲の拡張が

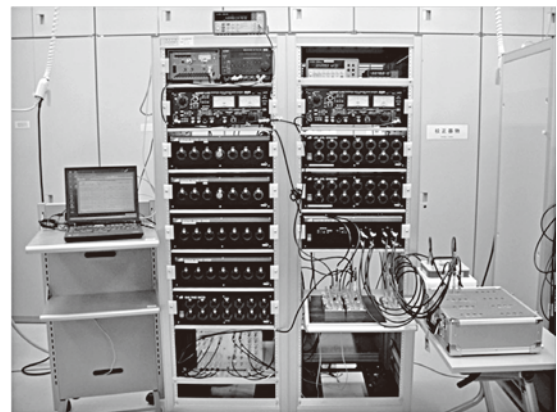


図9 中容量キャパシタンス拡張システム

実現され、NITE による審査を経て JCSS 校正事業者への登録が認定された。また、その他の校正事業者に関しても、範囲拡張にかかる不確かさ解析方法などについて積極的に技術的指導・助言を行い、現在までに、キャパシタンス標準において国内に 3 社の JCSS 登録事業者（最上位の校正事業者）が認定されている。（電気標準全般においては、現在、約 50 の JCSS 登録事業者が認定されており、そのうち上記 3 事業者を含む 9 事業者が最上位の校正事業者として認定されている。）

#### 4.2 標準供給状況の分析と新たな供給方法の開発

上述のように、キャパシタンス標準の計量トレーサビリティ体系の確立には、校正事業者の存在が不可欠である。産総研の国家標準を校正事業者を介して産業現場まで届けるシナリオを描いた。現状において、キャパシタンスの JCSS 校正事業者の認定は着実に進んでおり、当初のシナリオどおりの標準供給体制が実現されつつある。しかし、計量トレーサビリティの確保を真に必要なとしているのは産業の現場であり、産業現場のニーズを満足させて初めて目的が達成されたことになる。すなわち、産業現場における計量トレーサビリティ体系の状況について調査・分析が必要と考えた。そこで、産業界に対して標準供給体制にかかるニーズの調査を行ったところ、現状の供給体制では、生産現場の計測器の 1 台 1 台まで、計量トレーサビリティの保証を付与することは時間とコストの面で難しいとのことであった。すなわち、現状のように、校正すべき計測器を校正事業者に持ち運んで校正を受ける形態（持ち込み校正）では、校正に出している期間は計測器を使う製造ラインを停止せねばならず、24 時間稼働が普通の製造ラインでは不可能である。また、1 生産現場あたり数百～数千台の計測器をすべて校正に出そうとすれば、校正手数料が莫大になり現実的ではないとの調査結果が得られた。つまり、当初シナリオのままでは、産業現場までの計量トレーサビリティ体系の確立は難しいと判断した。

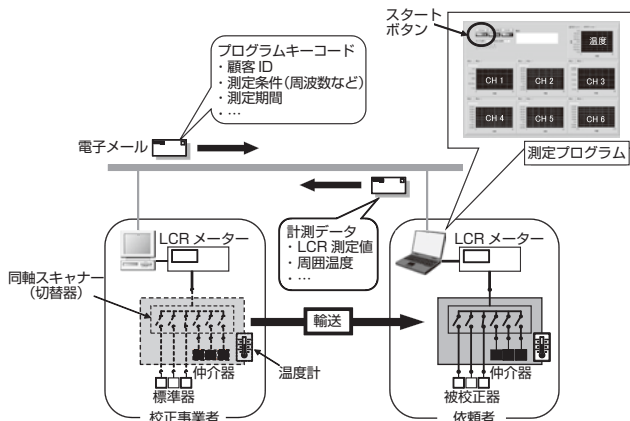


図 10 キャパシタンス標準の遠隔校正の概念図

そこで、校正時間を短縮し、校正コストが軽減できる新たな供給方法として、遠隔校正法の研究開発を行った<sup>[16]-[18]</sup>。図 10 に、キャパシタンス標準における遠隔校正の概念図を示す。これは仲介器を介在させて行う校正手法である。通常の校正においては、校正の依頼者は校正を受けたい被校正器を自らの負担と責任において、校正事業者へ送付あるいは持ち運び、校正を受ける。これに対し、図 10 の遠隔校正では、依頼者は校正事業者から送付される仲介器と測定装置を用いて、被校正器の校正のための測定を依頼者自身の手によって行う。具体的には、同図に示すように、まず校正事業者によって事前に校正された仲介器が依頼者に送られる。この際、同軸スキャナと呼ばれる切替器も同時に送付される。依頼者側ではこれに市販の LCR メーターとパソコン (PC) および被校正器を接続して校正システム (遠隔校正システム) を組立て、事前に PC にインストールされた測定プログラムを起動して測定を行なう。校正システムおよび測定プログラムは、開始から終了まで全自動で測定が実施できるように設計されており、依頼者側に測定のための特別なトレーニングやスキルを必要としない。依頼者側で行なわれた測定結果は電子メールで校正事業者に自動転送され、校正事業者側でデータの解析を行ったのち、校正結果を同じく電子メールで依頼者に返送する。以上のように、遠隔校正においては、依頼者は、自身の被校正器を外部へ持ち出すことなく校正を受けることができる。これによって、被校正器の輸送に係るコストが不要になり、また校正のために被校正器が使用できない期間も最低限に短縮することができる。遠隔校正の手法を標準供給体制に組み入れることによって、上位校正事業者から直接、生産現場への標準供給も可能になり、供給の迅速化と計量トレーサビリティ体系の合理化を図ることができる (図 11)。

開発した遠隔校正システムの外観を図 12 に示す。本システムの開発に当たっては、産業界への普及を考え、導入

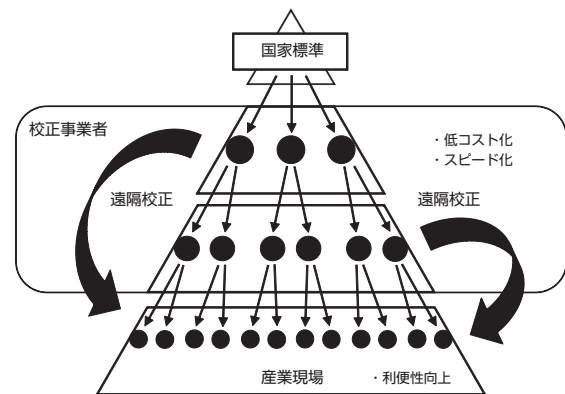


図 11 遠隔校正による供給の迅速化とトレーサビリティ体系の合理化

コストの低減を図る目的で、校正システムの一部にはあえて産業界で広く使用されている市販計測器を採用した。また、校正に対する専門知識の少ない依頼者（ユーザー）でも利用できるシステム作りを行い、特にデータの送受信、あるいは測定条件の設定において、ユーザーが介入できないようデータ保護・セキュリティ対策には細心の注意を払った。さらに、校正対象をキャパシタンス (C) だけでなく、インダクタンス (L) や交流抵抗 (R) も含めたインピーダンス標準全般 (LCR 標準) の遠隔校正が可能なシステムとした。図 13 に、本システムを用いた遠隔校正の実証実験結果を示す。従来の持ち込み校正と比較して遜色のない結果を得ることができた。この結果を踏まえてシステムの実用化について検討を行い、具体的に国内電子部品メーカーに対して、現在、遠隔校正システムの導入に関する相談を行っている。このメーカーの生産現場には LCR 部品の検査用メーターが数千台保有されており、遠隔校正によってこれらすべての計測器に計量トレーサビリティの保証を与えることが期待されている。また、同メーカー以外にも産業界への積極的な技術移転・実用化を図り、キャパシタンス標準の産業界への迅速な供給と計量トレーサビリティ体系の確立を推進したいと考えている。

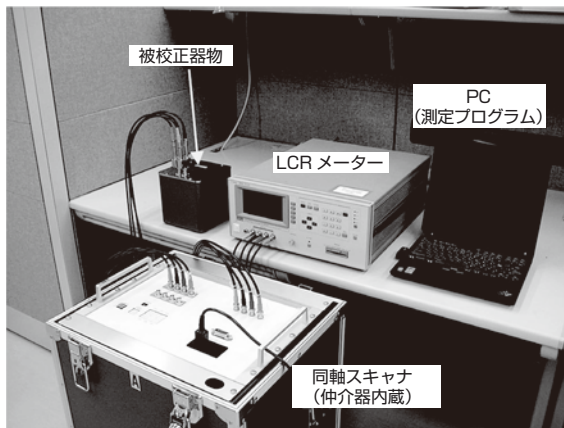


図 12 LCR 標準遠隔校正システム

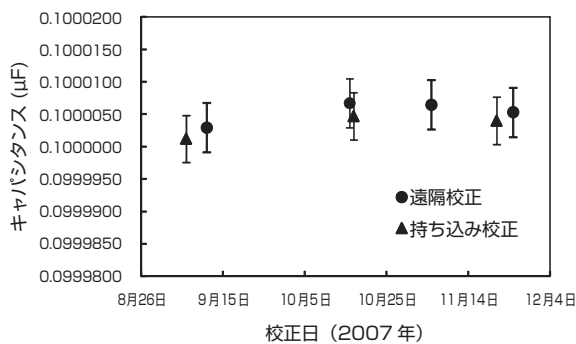


図 13 遠隔校正の実験結果 (持ち込み校正との比較)

## 5 今後の課題

国際統合化された世界トップレベルのキャパシタンス標準を開発し、校正事業者をととして産業界へ標準供給する体制を構築することで、計量トレーサビリティ体系を確立し、これによって国内産業の競争力強化を支援することを目的として、一連の研究開発を行った。現在までに JCSS 校正事業者が 3 社登録認定され、これらの事業者によって 1 pF ~ 100 μF の範囲の校正が実現されるようになり、標準供給体制の基本は確立できた。しかし、真の意味で計量トレーサビリティ体系の確立を達成するためには、産業界の現場が必要とする標準を迅速かつ低コストに供給できる体制作りが不可欠である。これに対する解決策の一つとして遠隔校正法を検討し、キャパシタンス標準を含むインピーダンス標準 (LCR 標準) 全般にわたっての遠隔校正システムを研究開発した。実証実験によって技術的には実用化の目的が立ったものの、実際に産業界へ普及させるには、システムの低価格化、遠隔校正手法の JCSS による認定など未解決の課題がいくつかある。しかし、産総研が確立した国家標準を産業界の隅々にまで届ける体制の構築こそが、今後注力すべき課題であると考えている。本稿で提案した遠隔校正法だけでなく、新たな供給手法の開発も視野に入れ、より効率的で合理的な計量トレーサビリティ体系の確立が今後の取り組むべき課題と考えている。

## 参考文献

- [1] (株)日本エコノミックセンター: '10 コンデンサ業界の実態と将来展望, (株)日本エコノミックセンター (2009).
- [2] H. Bachmair, T. Funck, R. Hanke and H. Lang: Realization and maintenance of the unit of capacitance with the PTB cross capacitor during the last ten years, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 44, 440-442 (1995).
- [3] G. Trapon, O. Thevenot, J. C. Lacueille and G. Geneves; Realization of the farad at BNM-LCIE, *CPEM '98 Conference Digest*, 448-449 (1998).
- [4] G. W. Small, B. W. Ricketts, P. C. Coogan, B. J. Pritchard and M. M. R. Sovierzoski: A new determination of the quantized Hall resistance in terms of the NML calculable cross capacitor, *Metrologia*, 34, 241-243 (1997).
- [5] A. Jeffery, R. E. Elmquist, L. H. Lee, J. Q. Shields and R. F. Dziuba: NIST comparison of the quantized hall resistance and the realization of the SI ohm through the calculable capacitor, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46, 264-267 (1997).
- [6] BIPM: *Calibration and Measurement Capabilities - CMCs (Appendix C)*, The BIPM key comparison database (<http://kcdb.bipm.org/AppendixC/default.asp>) (2009).
- [7] A. M. Thompson and D. G. Lampard: A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance, *Nature*, 177, 888 (1956).
- [8] K. Shida, T. Wada, H. Nishinaka, M. Kobayashi, G. Yonezaki, T. Igarashi and T. Nemoto: Determination

- of the quantized Hall resistance value by using a calculable capacitor at ETL, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-36, 214-217 (1987).
- [9] 遠藤忠: 新しい電気の量子標準—ジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準—, *応用物理*, 59, 712-724 (1990).
- [10] Y. Nakamura, A. Fukushima, Y. Sakamoto, T. Endo and G. W. Small: A multifrequency quadrature bridge for realization of the capacitance standard at ETL, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 48, 351-355 (1999).
- [11] Y. Nakamura, M. Nakanishi and T. Endo: Measurement of frequency dependence of standard capacitors based on the QHR in the range between 1 kHz and 1.592 kHz, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 50, 290-293 (2001).
- [12] 中村安宏: 溶融石英型標準キャパシタの周波数特性の測定, *AIST Today*, 3 (1), 17 (2003).
- [13] A. Domae, Y. Nakamura and Y. Ichikawa: Calibration of standard capacitors of 0.01  $\mu\text{F}$  - 1  $\mu\text{F}$  at NMIJ/AIST, *CPEM Conference Digest 2004*, 608-609 (2004).
- [14] 米永曉彦, 堂前篤志, 中村安宏: 四端子対インピーダンスブリッジを用いた標準キャパシタの校正法とその不確かさ, *産総研計量標準報告*, 6 (2), 101-117 (2007).
- [15] 坂上清一: 4端子対キャパシタンスブリッジの整備, *JEMIC計測サークルニュース*, 32 (3), 16-17 (2003).
- [16] Y. Nakamura, A. Yonenaga, N. Sakamoto and A. Shimoyama: Remote calibration of standard inductors, *IEEJ Trans. FM*, 126, 1183-1186 (2006).
- [17] 中村安宏: 低周波インピーダンスの遠隔校正について, *JEMIC計測サークルニュース*, 36 (1), 1-6 (2007).
- [18] S. Matsuzawa, T. Shimodaira, K. Hanaoka, A. Shimoyama, S. Sakagami, A. Domae, K. Kito and Y. Nakamura: Feasibility study on remote calibration of impedance standards for industrial use, *CPEM Conference Digest 2008*, 348-349 (2008).

## 執筆者略歴

中村 安宏（なかむら やすひろ）

1994年3月同志社大学大学院工学研究科博士課程（後期）修了、博士（工学）取得。1994年4月工業技術院電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）入所。2005年10月計測標準研究部門電磁気計測科電気標準第1研究室長、2007年4月同研究部門電磁気計測科長、2009年4月より同研究部門主幹研究員。キャパシタンス標準をはじめとする各種電気標準の研究開発と標準供給業務に従事。2002年市村学術賞（貢献賞）。本論文では、量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準の開発、LCR標準遠隔校正手法の開発、および全体構想の策定と取りまとめを担当した。



堂前 篤志（どうまえ あつし）

2000年3月豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学課程卒業。2000年4月工業技術院電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）入所。2001年4月より計測標準研究部門電磁気計測科研究員、2006年5月よりキャパシタンス標準および交流抵抗標準の校正責任者。キャパシタンス標準および交流抵抗標準の研究開発と標準供給業務に従事。本論文では、中容量キャパシタンス拡張システムの開発を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 全般的評価

コメント（工藤 勝久：産業技術総合研究所環境安全管理部）

産業界からのニーズに対応した研究開発目標を明示し、産業現場に至る標準供給のシナリオも明確です。世界の標準研究機関における開発状況を十分に把握した上で、これまで培ってきた研究ポテンシャルをベースとして、明確な研究ロードマップにしたがった研究開発を実施し、オリジナリティの高い世界トップレベルのキャパシタンス標準を確立しています。一方で、一次標準から産業現場への標準供給を実現するための効果的な標準供給手法を開発し、世界に誇れるキャパシタンス標準のトレーサビリティ体系の確立に大きく貢献しています。

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

キャパシタンスの国家標準の開発と、それを産業現場まで供給するための技術開発が、そのシナリオとともに俯瞰的に記述されており、優れた第2種基礎研究と製品化研究の論文になっています。最高精度を追求する国家標準の開発にとどまらず、産業現場に効率的、合理的に標準を供給するための遠隔校正のアイデアとその実現も優れた成果と考えます。

### 議論2 電気標準全般への言及

コメント（工藤 勝久）

本論文では、キャパシタンス標準に限定した内容になっています。ものづくり産業の国際競争を支援するのはキャパシタンス標準が特に重要であると主張している印象を持ちました。一般的には、コアとなる電気標準の一つという位置づけかとも思いますが、電圧、電流、抵抗標準などと比較した場合、産業界からのニーズとして差別化できるのでしょうか。そのあたりについて、「はじめに」に簡単に言及されれば、読者の理解の助けになると思います。

回答（中村 安宏）

本論文は筆者が主に担当したキャパシタンス標準に焦点を当てて、研究開発のシナリオと成果を記述しました。ご指摘のとおり、キャパシタンスはコアとなる電気標準の一つではありますが、電圧標準や抵抗標準といった他の電気量の標準も、ものづくり産業の国際競争支援には欠くことができません。ただ、電圧標準や抵抗標準にまで言及すると、内容が散漫になると考え、本論文では意識的にキャパシタンス標準だけに絞った内容としました。しかし、ご指摘どおり、「はじめに」では、他の電気量についても言及した方がよいと思われるので、加筆・修正いたしました。

### 議論3 現状の校正事業者の数

質問（工藤 勝久）

「2.2 産業現場までの標準供給のシナリオ」で、校正事業者の階層構造が図1に書かれています。後述で、JCSS校正事業者3社が記述されていますが、国内の校正事業者の階層がいくつあり、各層の校正事業者の数などの状況はよくわかりません。もう少し定量的な記述が可能でしょうか。

回答（中村 安宏）

電気標準において、現在は約50事業者がJCSS校正事業者として認定されています。このうち、図1に示しました最上位の校正事業者は、9事業者（キャパシタンスに限れば3事業者）で、その他は第2階層以下の事業者になります。これらの校正事業者数の現状を本文中に加筆いたしました。

### 議論4 外国の国立標準研究所の状況

質問（工藤 勝久）

「3.2 ニーズに対応した新たな手法の開発」で、量子ホール抵抗からキャパシタンスを導く手法は、おおいに誇れる成果だと思

ます。他の標準研究所でクロスキャパシタンス法と量子ホール抵抗から導出する手法を用いている研究所の割合などの状況、産総研が新規に開発した手法を導入している外国の標準機関があるかなど、可能であれば加筆をお願いします。

回答（中村 安宏）

クロスキャパシタを利用している国立標準研究所の中で、高精度にキャパシタンス標準を実現しているのは、本文中にも記載しました NMIA（豪）、NIST（米）、PTB（独）、LNE（仏）です。これ以外では NIM（中国）、VNIIM（露）がクロスキャパシタで標準を実現しています。また、量子化ホール抵抗からキャパシタンスを導出しているのは、産総研以外では、NPL（英）、CMS（台）、BIPM（国際度量衡局）があります。しかし、いずれも従来型の直角相ブリッジ回路でキャパシタンス標準が実現されており、周波数可変である当所のシステムは国際的に見て優位な立場にあります。

## 議論5 新たな標準供給手法

質問（工藤 勝久）

「5. 今後の課題」で、「- 新たな供給手法の開発も視野に入れ、-」とあります。計量標準共通の課題でもありますが、何か加筆できるアイデアをお持ちでしょうか。

回答（中村 安宏）

本論文で紹介した「遠隔校正法」以外に、その他の手段として産業現場に「長期間安定な標準器」を設置して、産業現場においていつでも手軽に機器の校正ができるシステムを実現することが考えられます。例えば、ジョセフソン電圧標準と薄膜サーマルコンバータ AC/DC 標準を組み合わせると、「長期間高安定な標準電圧電流発生装置」を実現できる可能性があります。このような「産業現場で直接校正可能な技術」を開発し、産業現場に技術移転することによって、校正の低コスト化と校正時間の短縮を図り、トレーサビリティ体系のさらなる合理化が実現できるのではないかと考えています。

# 遺伝子解析の精度向上と試薬の開発

## — ライフサイエンスに用いる化学試薬の製品化 —

小松 康雄\*、小島 直

遺伝子解析は、複数の要素技術が統合されて構築されている。多くの要素技術の中で、筆者らは化学試薬に着目し、その機能を高度化することで遺伝子解析技術全般の精度を向上させることを目指した。本稿では、遺伝子解析用試薬の開発に関する着想から製品化に至るまでの展開を述べた後、そのプロセスに関して考察する。

**キーワード:** 遺伝子、遺伝子解析、DNA、RNA、固定化、検出、標識、アミノ基

## Development of novel chemical reagents for reliable genetic analyses

### – Process from an original idea to marketing of a chemical product used for life science –

Yasuo Komatsu\* and Naoshi Kojima

High performance genetic analysis is an integration of various inter-correlated technologies. Of all the technologies, chemical reagents are indispensable for modifying DNA or RNA, yet the total performance of genetic analysis is sometimes limited by the insufficient capability of reagents. We have developed novel chemical reagents to increase accuracy and sensitivity in genetic analysis. We describe the development process from obtaining the original idea to marketing of the products and discuss important factors in the process.

**Keywords:** Gene, genetic analysis, DNA, RNA, immobilization, detection, labeling, amino group

### 1 研究の目標

遺伝子はあらゆる生物、ウイルスにおいて共通の言語であり、それを読み解き、働きを理解することはそれらの本質を知る上で不可欠である。この遺伝子の解読、解析技術はこれまでの多くの研究の集積から構築されてきた。例えば、現在では個人の遺伝情報解読が短時間で完了する水準にまで達し<sup>[1]</sup>、遺伝子間あるいは遺伝子-タンパク質間などによって形成される、膨大かつ複雑なネットワークに関しても解析可能になっている<sup>[2]</sup>。このように高度に進化した遺伝子解析技術によって、遺伝子のかかわる情報は基礎研究のみでなく、医療、食品、治安などの社会生活の広範な領域に活用されるようになってきている。今後、バイオ分野のみならず、工学分野などの多くの領域の発展ともあいまって、遺伝子解析技術は一段と高機能化することが予想される。それと同時に、遺伝子情報は現在よりも私達にとってさらに身近になり、今以上に私達の社会生活は影響を受ける可能性が高い。そのため、遺伝子解析技術は高機能化と同時に高い精度を維持しなければならない。しかし、

遺伝子解析を構成する全ての技術の性能が高機能化を続ける解析システムに追い付いていないとは限らない。そこで我々は、遺伝子解析に用いられる化学試薬の性能に着目し、その機能を高度化することによって遺伝子解析全体の精度の向上を目指し研究を行った。

### 2 目標を実現するためのシナリオ

遺伝子解析法の多くは、革新的基盤技術を中心に、複数の既存技術が統合されてシステム全体が形成されていると考えることができる。ここで、既存の要素技術の一部は異なる遺伝子解析技術にも共通して用いられている場合も多い。これらの関係のイメージを図1に示した。例えば、標的遺伝子と結合する“合成DNA”や、遺伝子の高感度検出のために用いられる“標識試薬”は、複数の遺伝子解析法に共通に用いられる代表的な要素技術の一つである。

多くの研究は必然的に新しい中心技術の開発に費やされ、多くの研究予算が投入されている。しかし、中心となる技術に連動したことにより、従来技術にも新たな問題点

産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門 〒062-8517 札幌市豊平区月寒東2条17-2-1  
Bioproduction Research Institute, AIST 2-17-2-1 Tsukisamu-Higashi, Toyohira-ku, Sapporo 062-8517, Japan \* E-mail: komatsu-yasuo@aist.go.jp

Original manuscript received February 18, 2010, Revisions received April 6, 2010, Accepted April 6, 2010

が発生し、結果としてシステム全体の精度の低下につながっている場合もあると筆者は考えた。また、既存技術の中でも特に共通性の高い技術の性能を改善、改良することは、複数の遺伝子解析システムに対して高い波及効果をもたらすと考え、これら重複領域の技術に目を向けて問題点を再検証した。その結果、筆者は共通性の高い技術として上記の「合成 DNA」と「標識試薬」に着目し、それらの問題点を改善することによって、遺伝子解析全体の精度の向上に寄与するシナリオを考えた。

### 3 合成DNA用リンカーと標識試薬

1990年代から最近までの間に DNA チップ（マイクロアレイ）、あるいは次世代型高速シーケンサーなどの高度な遺伝子解析装置が相次いで開発され、現在においてもそれらの技術は日進月歩で向上している。これらの解析システムでは標的遺伝子に配列選択的に結合するプローブ DNA（オリゴヌクレオチド）を平板あるいは微粒子などの固相表面上に固定化している場合が多い。この固定化は DNA 側に導入された特殊な化学修飾リンカーと基板表面の反応性基との共有結合によって行われる（図 2a）。また、このような固定化に用いられるリンカーは蛍光物質や薬物などを DNA に結合させる際にも利用される（図 2b）。これらの現状から、「合成 DNA」の中でも「リンカー」が極めて重要な役割を担っていると判断した。同様に、サンプルより回収した遺伝子側を「標識」する試薬も、微量の遺伝子を検出する場合には、その反応性が感度に影響するだけではなく（図 2c）、核酸への高い反応性は核酸医薬の開発にも潜在的につながる可能性を有していると考えた。そこで、従来のリンカーと標識試薬の問題

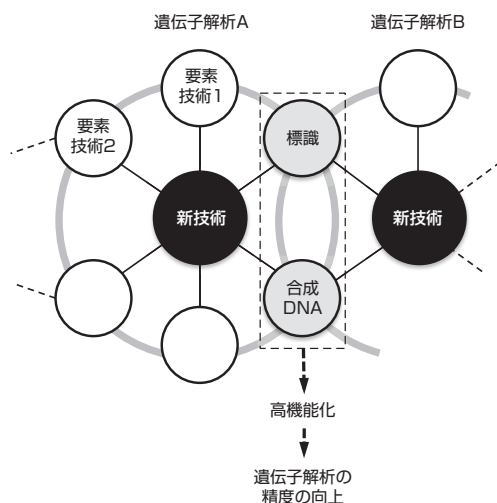


図1 遺伝子解析システムにおける技術構成  
合成 DNA (RNA)、標識技術などの従来からの技術は、複数の遺伝子解析システムに共通に用いられ、さらに医薬などにも関連する。

表1 各アミノリンカーの利点ならびに欠点

|    | 従来型  | 第一世代型  | 第二世代型  |
|----|--|--|--|
| 利点 | <ul style="list-style-type: none"> <li>安定性</li> <li>コスト</li> <li>実績</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>反応性(&gt;従来型)</li> <li>精製(≧従来型)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>反応性(&gt;従来型)</li> <li>精製(≧従来型)</li> </ul> |
| 欠点 | <ul style="list-style-type: none"> <li>精製</li> <li>反応性</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>安定性</li> <li>コスト</li> <li>実績</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>コスト</li> <li>実績</li> </ul>                |

点を調べ、より高い性能を持つ試薬開発を目指して研究を行った。初めにプローブ側のリンカー試薬の開発から製品化までを記述した後、標識試薬への展開に関して記述する。

## 4 開発と結果

### 4.1 アミノリンカーの開発

#### 4.1.1 開発の目標

プローブとなる DNA は、構成成分であるアデニン、グアニン、シトシン、チミンの4種類のモノマーが配列情報にしたがって順次化学的に連結して合成される。同様に、DNA の固相表面への固定化に必要なリンカーも一般的には DNA の末端に DNA 合成時に専用の“リンカー試薬”を連結して導入される。このリンカーには結合様式に応じて幾つかの種類があるが、中でも一級アミノ基を持つアミノリンカーは化学的にも安定で扱いやすいことから、DNA の化学修飾に最も頻繁に用いられている修飾基の一つである。

アミノ基を結合させた DNA (アミノ化 DNA) の合成は一般に専門の DNA 合成会社において行われるが、その際の一工程としてリンカーの導入に失敗した DNA を目的のアミノ化 DNA から分離しなければならない。しかし、アミノ基の有無は微妙な化学的相違であるために、それらの精製を短時間で行うことは困難であった。一方で、全遺伝子を対象にした網羅的な遺伝子解析の最近の需要から数百~数万種類のアミノ化 DNA を一度に用意する必要性が生まれてきたが、従来のリンカーがそのまま用いられており、合成会社もそれらの合成と精製には苦勞していることは容易に推測できた。また、最近になってアプタマーや siRNA などの核酸医薬の可能性が高まり、それらの生体内での持続性を高めるために、リンカーを介して機能性化合物を核酸に連結する必要性も生じてきた。この場合には、高い収率で連結生成物を得ることが重要であるため、精製の簡便化と同様にアミノ基側の反応性を向上させることも高いニーズがあると考えた（図 2b、表 1）。

そこで、近年の網羅的遺伝子解析と核酸医薬などに役立たせるため、アミノ化 DNA (または RNA) の高純度ハイスループット精製と、高い化学修飾効率を両立する、新たなアミノリンカーの開発を目指すこととした。



#### 4.1.2 第一世代型アミノリンカーの開発

従来型のアミノリンカーは直鎖の炭素リンカーの末端にアミノ基が結合したシンプルな構造であるが、我々はこの炭素のリンカー上に芳香族基を結合させた新規なアミノリンカーを初めに開発した（図3：第一世代型アミノリンカー）。導入した芳香族基と標的分子との間で疎水的相互作用が働き、アミノ基と標的分子との水溶液中における会合が促進され、反応効率が上がると考えた。また、芳香族基の存在によってアミノリンカーの有無に依存したDNA分子の疎水性の違いが大きくなるため、逆相カラムによる分離精製が容易になることも同時に期待した。

芳香族基とアミノ基間の距離（図3：L1、L2）を変えた幾種類かのアミノリンカー試薬を合成し、アミノ化DNAの化学的性質を調べたところ、第一世代型アミノリンカーでは、水溶液中におけるアミノ基への結合反応と、逆相カラムによるDNAの精製効率とも従来型に比較して非常に改善されることが示され（表1<sup>[9]</sup>）、我々は2004年に第一世代型アミノリンカーに関する特許を民間企業と共同で出願した。

#### 4.1.3 実用化を目指した研究

第一世代型の中で最も高い性能を示した“ssN-linker”を製品化用のアミノリンカーに選択し、ssN-linkerが結合したDNAを搭載した“高性能DNAチップ”の製品化を共同研究先企業と計画した。少数のDNAを用いた基礎データの収集は産総研において既に終了していたが、同リンカーをバイオ系のユーザーに実際に使用してもらうには、①リンカー試薬の合成、②アミノ化DNAの合成と精製、③アミノ化DNAを用いたDNAチップの作製と性能評価、の三つの大きな課題を解決しなければならなかった（図4a）。しかし、共同研究先の企業が上記③を実施するバイオ系企

業であったため、①、②の化学合成にかかわる事業を実施することが不可能であり、バイオ分野に用いる化学試薬を製品化する難しさを痛感することになった。そこで筆者はそれら合成事業を行う企業に新型リンカーの性能、利点を説明し、同リンカーを取り扱ってもらえるよう交渉した。その後、あるDNA合成企業がssN-linkerに関心を持っていたことで、同社にリンカー試薬とDNA合成技術の両方を供与することになった（図4b、c）。試薬単体の大量合成①の移転は容易に進んだものの、多数のDNA合成と精製②に関する技術移転には時間を要した。これは、産総研の実験室レベルでは、多くても数十本のアミノ化DNAの精製を手動で実施して精製することでプロトコルを確立していたのに対し、民間では数百～数万本のDNAの合成と精製を機械による全自動で行うことが必要で、これらに適するようにプロトコルを調整する必要が生じたためである。一方、合成関連の作業①、②と並行して、合成した複数本のssN-linker修飾DNAをスライドガラスに固定化したDNAチップを作製し、その性能を評価する作業も平行して進めていた（図4b、c）。上流①、②と下流③の両方でリンカーの性能を評価することは、極めて大変な作業であったが、同試薬を実際にバイオ分野のユーザーにいち早く使用してもらうようにするには上流から下流までのルートを確立し、従来技術よりも優れていることを示す必要があると考え、関係先企業と連携して作業を進めた。その結果、いずれの評価においても我々の開発した試薬が従来型よりも高性能であることが証明され、DNAチップの販売に加え、ssN-linker修飾DNAの製造、販売をDNA合成会社にライセンスするところまで話が進んだ。

#### 4.1.4 問題点の発覚と製品化の中止

試薬の製品化には、試薬自体と試薬が導入されたDNA

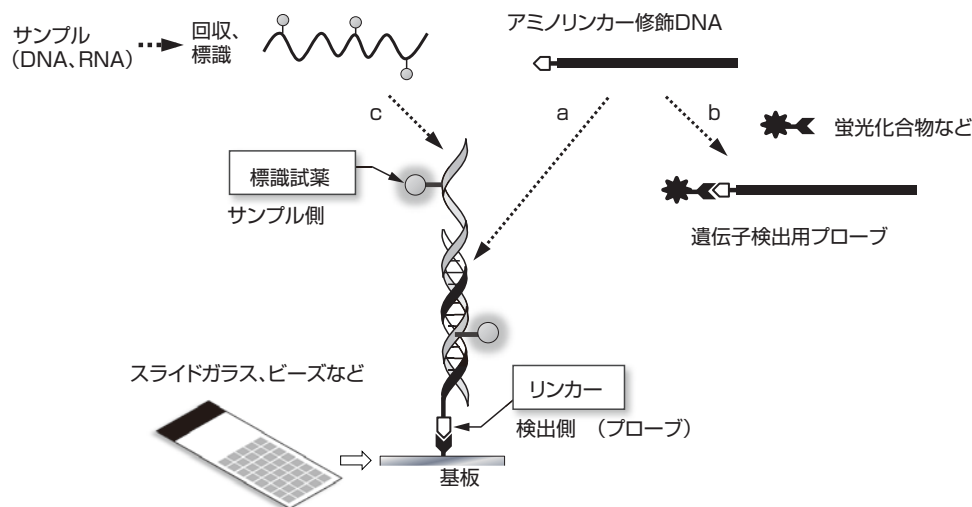


図2 アミノ化DNAと核酸標識

アミノ化DNAは、基板への固定化(a)、化学物質との結合(b)などに用いられる。相補的な配列を有するサンプル側は、標識試薬によって標識される(c)。

の安定性も重要な確認事項となる。この安定性試験には時間を要するため、民間への技術移転とほぼ同時期に産総研で着手していた。その結果、ssN-linkerは単体試薬では安定に存在したが、DNAに導入された状態で加熱したアルカリ条件という過酷な条件下においては、微量ではあるが一部が分解してアミノ基本来の性質が失われることが明らかになった<sup>[4]</sup>。通常の条件下では安定に存在するため、実質的に重大な問題ではなかったが、ユーザーの使用と保存は千差万別であるため、将来的に製品となった場合には問題になる可能性を完全に否定できなかった。そのため筆者は、ssN-linkerのライセンスの中止を決断し、それを受けてDNA合成ならびにDNAチップ作製側の関係者にも事情を説明し、一旦プロジェクトを中断していただくことになった。このssN-linkerの不安定性は、全くの想定外の結果であったわけだが、安定性試験など、製品化においてどこまで産総研側で行うべきか難しい問題でもある。しかし、新素材(ssN-linker)を発見した直後から民間を巻き込んだ応用(下流)研究を筆者は急いで進め過ぎたのかもしれない、この点は反省すべきポイントかもしれない。

#### 4.1.5 第二世代型アミノリンカーの開発

プロジェクトが中断したことは大きな問題であったと同時に挫折感を味わった。しかし、上述の製品化の検証中にssN-linkerの高い反応性の要因を調べる基礎研究も並行して進めていたことが結果的には功を奏し、しばらくして同linker中の部分構造が隣接するアミノ基の性質を変化させ、標的分子との結合効率を上げることができることを見出した<sup>[4]</sup>。その構造は第一世代型に関する特許には内包されない新しい発見であったことから、新たに特許を出願

し、この新しい構造は「第二世代型アミノリンカー」となった。第二世代型にはその共通構造から複数の化合物が属するが、種々検討した結果、高い安定性を備えた“ssH-linker”を次期リンカーに選択した(図3)。ssH-linkerはssN-linkerと異なって分子中に疎水性基は持たないが、アミノ基を保護する疎水性基を温和な条件下で極めて迅速に取り除くことが可能であった。そのため、逆相クロマトグラフィーによるハイスルーブット精製が容易であり、また、同リンカーの標的分子との結合効率も市販のリンカーを上回る性能を有することを確認した(表1、図5)。何よりも、ssH-linkerは化学的にssN-linkerよりも安定であることに加えて、試薬の合成コストも従来型とほぼ同程度に抑えられるという利点も有していた(表1)。

このような優位性から、ssH-linkerをDNA合成会社とDNAチップ作製会社に再提案し、中断していたプロジェクトの再開を願い出た。ssH-linkerでは試薬単価を大幅に抑えることが可能になったことで、合成会社側の受け入れは円滑に進んだが、それまでssN-linkerでDNAチップのデータを収集してきたDNAチップ関連会社には、許可いただくまでに時間を要した。その後、ssH-linkerの技術的な優位性はそれぞれの会社でも確認され、2006年に同リンカーの国内DNA受託合成に関するライセンス契約をDNA合成会社と締結した。また、2007年、2008年には、同リンカーをプローブに用いたDNAチップが相次いで製品化されることにもなった。

ssH-linkerは活性エステルなどに対する反応性が従来のリンカーよりも高く、DNA、RNAの高純度、ハイスルーブット精製も可能にする。加えて、試薬単価も低いことから、

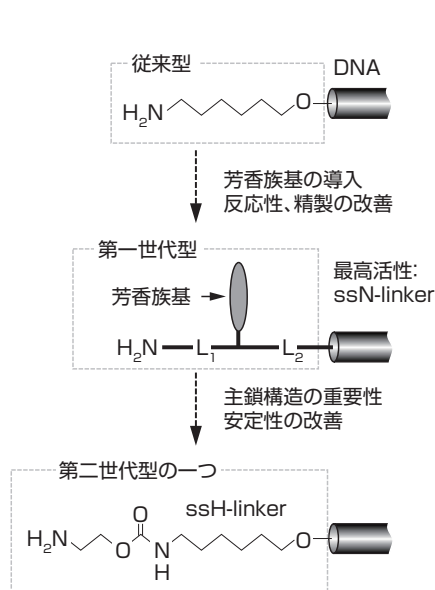


図3 DNAに結合したアミノリンカーの構造と開発の流れ

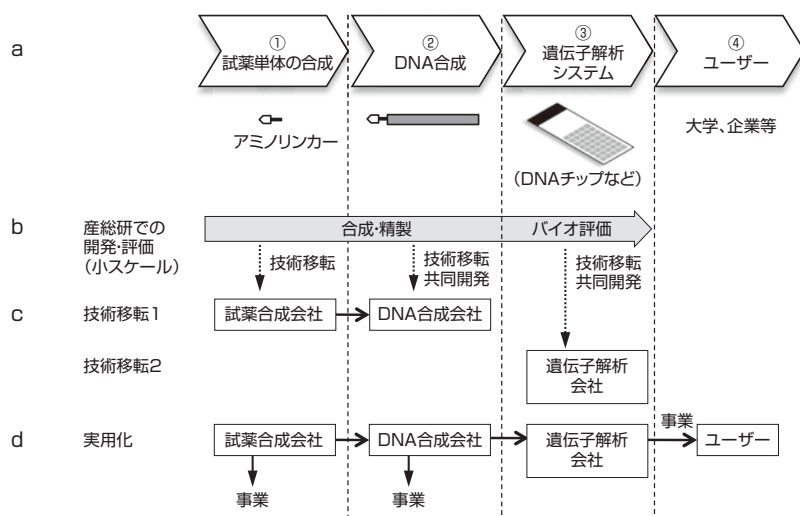


図4 リンカー試薬から解析システムへの活用までに行ったプロセス。産総研において基礎開発とモデル系の構築、評価を行い、性能の有効性を確認した(b)。その後、民間への技術移転(c)と、遺伝子解析会社におけるバイオ実験の評価を経て(c)、アミノ化試薬をバイオ研究に活用する製品ルートを構築した。試薬とその加工品で、それぞれの事業が行われる。

DNA 合成会社での評価は高く、同リンカーの試薬単体が国外化学薬品メーカーから全世界販売されることにつながった。それまで一社の DNA 合成会社にものみ ssH-linker の使用は限定されていたが、これにより複数の DNA 合成会社に対して同試薬が販売されるようになり、ssH-linker を DNA の受託合成に利用する企業の裾野が広がるようになった。ライセンス対象が安価な試薬単体に変更されることは、同時にロイヤリティーが減ることを意味していたが、開発した成果を国内外の多くの企業、研究機関で使用してもらうという以前からの目標を達成する方を我々は選択した。

#### 4.1.6 ライセンス後の開発

従来型のアミノリンカーは、これまでの長い期間に全世界で使用され、既存の遺伝子解析システムの多くに既に組み込まれている。そのため、性能が高いということのみで既存のリンカーの全てを、構造も異なる新しいリンカーに置き換えることは容易ではない。すなわち、ライセンスはできたものの、「物を売る、買ってもらう」ということがどれだけ難しいことであるかを改めて実感することになった。そこで、着実に我々のリンカーを広めるために、論文発表による科学的実証は勿論のこと、遺伝子解析以外の新しいニーズを提案する応用研究も行った。その結果、核酸を用いる医薬品の分野においても、同試薬が役立つ場面があることを示すことができた<sup>[5]</sup>。最近ではそうした新たな分野からもリンカーの需要が出てきている。ライセンスで終わりにするのではなく、新たな利点を見出すべく継続的に研究開発を行うことはニッチ分野の技術を育てる上で重要であることを実感した。

#### 4.2 標識試薬

筆者らは第一世代型のアミノリンカーの開発において、芳香族基に近接したアミノ基が標的分子と効率良く反応することを見出していた。この原理をいち早く他の課題にも発展させるため、次に標的側の核酸を標識する試薬の開発を

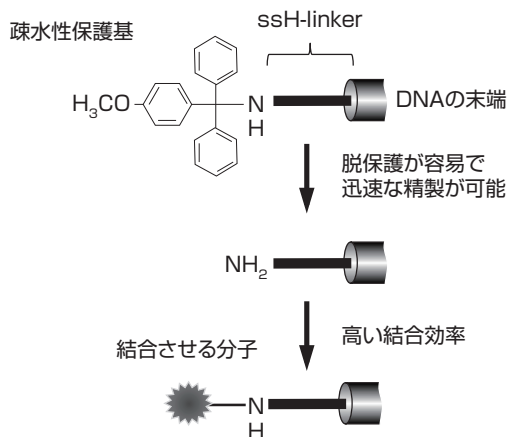


図5 ssH-linker の性質の概略  
疎水性保護基の脱保護速度と、アミノ基への反応が向上した。

計画した。アミノリンカーはプローブ側の修飾に用いる試薬であったことから、優れた標識試薬を開発することでプローブ側と標的側のそれぞれにかかわる試薬開発を行うことを目指した。

生体から回収した DNA や RNA を直接標識するには試薬が核酸と強固に結合する必要がある。酵素を利用して標識する手法もあるが<sup>[6]</sup>、その多くは核酸塩基の種類によって標識効率変動する場合が多い。そこで、自然現象によっても、人工的にも、DNA や RNA 中に発生する“アルデヒド基”に対して効率良く反応する試薬であればアミノリンカーと同様に汎用性を有すると考えた。しかし、アルデヒド基に反応する試薬として既に幾つか製品化されていたため、この開発においてもそれらを上回る性能を発揮することが必要条件となった。そこで核酸に対して高い反応性を持たせるために、アミノリンカーの開発で得たノウハウ（芳香族基の導入による核酸への親和性の改善）を活用し、アルデヒド基に反応する部位である試薬側のアミノオキシ基に隣接して芳香族基を連結した試薬を合成した（図6）。単に疎水性基を導入したのみでは試薬が水溶液に難溶であったことから、水溶性の向上と負電荷の核酸に対する高い親和性を発揮させる目的で、正電荷を有するグアニジノ基を標識試薬分子に導入した化合物を合成した。反応の結果、芳香族基とグアニジノ基を有する新しい標識試薬は、核酸中のアルデヒド基に対して市販の試薬よりも高い反応性を示すことが明らかになり、実際の DNA 中に生成したアルデヒド基も高感度に検出できることが明らかになった<sup>[7]</sup>。このように核酸への反応性が高くなることで、微量の遺伝子の標識も可能になり、高感度な遺伝子検出につながることを期待できると考えている。また、芳香族基とグアニジノ基を並列した基本構造が核酸に高い親和性

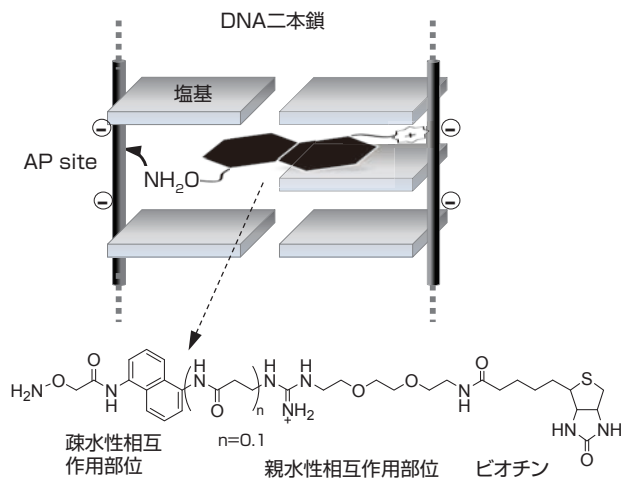


図6 標識試薬と反応の模式図

+と-は、正電荷のグアニジノ基と負電荷のリン酸ジエステル基をそれぞれ示す。AP site は塩基を持たない損傷 DNA の構造であり、アルデヒド基を有する。

を示すことは、その他の核酸認識分子の創成にも重要な知見を与えたと言える。本成果は2007年に特許出願し、2009年に論文、学会などで発表した。その結果、幾つかの研究機関から試料提供の要請を受け、現在、その活性が評価されている。この標識試薬に関しても将来的には社会で使用してもらえるものにしたと考えている。

## 5 考察

我々の進めた研究開発においては、「研究の展開」と「特許」が重要なポイントになったと考えるため、以下にそれらについて簡単に考察する。

### 5.1 研究の展開について

2003年の後半から研究を開始し、2007年までに一つの試薬の全世界販売に至ったのには、いくつかの要因を挙げることができる。試薬開発では既述のように有機化学からバイオ分野までの広範な領域に開発がおよぶだけでなく、その実用化には安定性試験、コスト問題などのさまざまな課題を解決しなければならない。そのため、予算、人員に限界のある我々が波及効果のある成果を残すには、汎用性のある技術開発が必要であると研究開始の段階で考えた。そこで、多くの解析に“共通”に用いられているリンカー開発をテーマに選択した。この領域は、多くの人に、もはや開発することはないと思われていた“流行ではない課題”であったが、そのようなことを気にせず、自ら考えてテーマを選んだことが独自性につながり、結果的に重要なポイントであったと思われる（要因1）。また、広範な研究を素早く実施するために産総研内における研究の分担を明確にし、さらに、企業側の技術者とも製品案の段階から綿

密に議論を交わした。こうした所内外の連携は迅速な実用化には極めて重要であった（要因2）。特に既存技術の改良の場合には開発の「スピード」が重要であると考え、開発の段階から常に実用化することを念頭に研究を進めた。これが最善とは言えないが、ライフサイエンスの進歩は極めて早く、スピード感を持って開発を進めたことはとても重要であったと考えている（要因3）。一方で、日々の研究では加速度が付いていくあまり、幾つかの研究環境システムとの摩擦から減速感を感じることも度々あった。そのため、可能な限り減速させない環境が望まれる。また、第二世代型試薬の開発が重要なポイントであったが、これは第一世代型リンカーの化学的性質を詳細に調べる基礎研究がなければ成しえなかった。そのため、根本を追及することは実用化においても極めて重要であると筆者は考えている（要因4）。これらの四つの要因は結果論からくるものであるが、何らかの形で社会に残せる成果を挙げるといふ熱意を持って開発に臨んだことが何よりも重要であったかもしれない。特に民間との共同研究は、実務的な作業とは別に、我々が社会とつながっているという意識と緊張感を持続させる役割も果たしていたと感じる。

これまでの研究では、一つの成果をライセンスした後に、得られた知見を異なる研究内容に展開する方法を筆者は選択してきている（図7）。しかし、ライセンスした成果を一層広げるには既に述べたように同じ研究をさらに進めることも必要になった。そのため、我々のとった戦略は、広い分野に最初の知見をいち早く展開できる反面、新たに開始した研究と、ライセンス技術の応用研究の両方を常勤職員2名で対応しなければならなくなり、予算的にも体力的にも大変厳しい消耗戦に突入することになった。つまり、ライセ

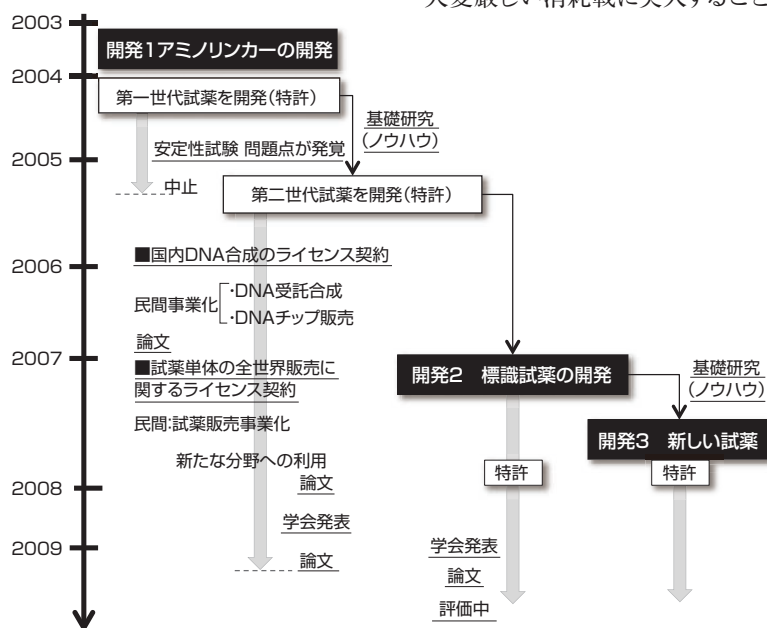


図7 研究開発の展開

ンスがゴールではないため、何らかの方策を考えない限り、それまでの研究と新開発の両方を実施しなければならない場面が今後も出てくることが予想される。

## 5.2 特許に関して

開発した試薬が社会で使用されるには現実には特許が必要になる。また、民間と共同研究する限り、特許に関しては当初から極めて重要に捉えていた。そのため、いずれの開発においても事前の特許調査や出願内容などに関しては可能な限りの注意を払った。その結果、アミノリンカーに関しては国内外で新規性が認められて極めて迅速に特許が成立し、結果的にライセンスにつながっている。また、標識試薬の特許はこれから審査を迎えるが、開発した試薬は新規性を有するとの調査報告も受けている。

一方で、特許には多くの費用が掛かる。そのため主要特許以外にも幾つか関連特許を出願したが、ライセンスしないと考えた特許に関しては、審査請求および外国出願には移行させずに取り下げ、自ら絞り込む姿勢をとってきた。予算がなければ特許は生まれませんが、多くの予算をかけても必ずしも製品は生まれず、特許すら成立しない場合も多々ある。研究開発と特許の取扱いは組織のポリシーの一面を反映するが、もし技術の実用化を目指すのであれば、良い特許が出せ、さらにその実施を支持する環境作りが重要であると考えられる。

## 6 将来への課題

これまでの2種類の試薬の開発は、既存試薬の性能の高度化という形態で研究を進め、当初の目標は達成することができた。しかし、既存技術は多くのシステム中に深く浸透している場合が多く、入れ替えには時間を要するという問題も浮き彫りになった。そのため、次の開発は極端にニーズにとらわれ過ぎず、全く新規なアイデアを提示する開発からのアプローチも試みたいと考え、既存試薬には無い性質を有した試薬を最近になって開発した(図7:開発3)。この試薬の詳細は未発表であるが、既に特許出願も終えている。この第3の試薬はこれまでにないユニークさを有しているが、ユーザーの明確なニーズを定義していないため、これまでの試薬開発とは異なり、最終的な製品像も現時点では描けてはいない。しかし今後、この第3の試薬に関しては我々が自らの力で新しいニーズを創り出すか、あるいは論文などを通じて世の中にこの技術を提案することで、多くの人々の発想による新たな活用も期待できる。

シーズとニーズの議論が多々あるが、これまでの開発経験からでは、筆者はどのようなアプローチが確実であるかは全く分からない。しかし、往々にして想定外のことが起こるため、ニーズ、シーズに固執し過ぎると行き詰り、結

果的に何もできずに終わる可能性も高い。成果の実用化にはニーズとシーズの両方が必須であり、さらに研究の過程でそれらを照らし合わせてバランスを保ち、修正することが必要ではないかと考える。また、単に成果をライセンスすることだけを目的にするのではなく、私達自身がベンチャー精神を持って開発に臨む姿勢や意識も、本当の実用化には必要であると考えている。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、ご助言、ご協力をいただきました、契約職員の方々、(株)DNAチップ研究所、日立ソフトウェアエンジニアリング、(株)シグマアルドリッチジャパン、東レ(株)、日本ガイシ(株)の関係者の皆様、ならびに旧ゲノムファクトリー研究部門の方々に感謝の意を表します。

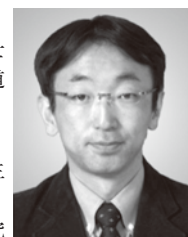
## 参考文献

- [1] J. Shendure and J. Hanlee: Next-generation DNA sequencing, *Nat. Biotechnol.*, 26, 1135-1145 (2008).
- [2] H. Sara, O. Kallioniemi and M. Nees: A decade of cancer gene profiling: from molecular portraits to molecular function, *Methods Mol. Biol.*, 576, 61-87 (2010).
- [3] N. Kojima, M. Sugino, A. Mikami, K. Nonaka, Y. Fujinawa, I. Muto, K. Matsubara, E. Ohtsuka and Y. Komatsu: Enhanced reactivity of amino-modified oligonucleotides by insertion of aromatic residue, *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, 16, 5118-5121 (2006).
- [4] Y. Komatsu, N. Kojima, M. Sugino, A. Mikami, K. Nonaka, Y. Fujinawa, T. Sugimoto, K. Sato, K. Matsubara and E. Ohtsuka: Novel amino linkers enabling efficient labeling and convenient purification of amino-modified oligonucleotides, *Bioorg. Med. Chem.*, 16, 941-949 (2008).
- [5] N. Kojima, T. Takebayashi, A. Mikami, E. Ohtsuka and Y. Komatsu: Efficient synthesis of oligonucleotide conjugates on solid-support using an (aminoethoxycarbonyl) aminoethyl group for 5'-terminal modification, *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, 19, 2144-2147 (2009).
- [6] K. Cole, V. Truong, D. Barone and G. McCall: Direct labeling of RNA with multiple biotins allows sensitive expression profiling of acute leukemia class predictor genes, *Nucleic Acids Res* 32, e86 (2004).
- [7] N. Kojima, T. Takebayashi, A. Mikami, E. Ohtsuka and Y. Komatsu: Construction of highly reactive probes for abasic site detection by introduction of an aromatic and a guanidine residue into an aminoxy group, *J. Am. Chem. Soc.*, 131, 13208-13209 (2009).

## 執筆者略歴

小松 康雄 (こまつ やすお)

1995年北海道大学大学院薬学研究科博士後期課程修了。博士(薬学)。1995年北海道大学大学院薬学研究科助手。2000年(株)DNAチップ研究所マネージャー。2003年(独)産業技術総合研究所生物機能工学研究部門主任研究員。2005年ゲノムファクトリー研究部門、2010年産業技術総合研究所生物プロセス研究



部門生体分子工学研究グループ研究グループ長。本論文では、テーマの立案、統括と、核酸の合成と活性評価を担当した。

小島 直（こじま なおし）

1998年北海道大学大学院薬学研究科博士後期課程修了。博士（薬学）。2001年工業技術院北海道工業技術研究所入所。同4月（独）産業技術総合研究所生物機能工学研究部門研究員。2010年産業技術総合研究所生物プロセス研究部門生体分子工学研究グループ主任研究員。本論文では、モノマーの化学合成を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 2 目標を実現するためのシナリオ

コメント（地神 芳文：産業技術総合研究所糖鎖医学研究センター）

この部分は、図1の説明がわかりにくいので、より具体的に遺伝子解析システムにおける「要素技術」とそれらの相互の関連、「標識」と「DNA合成」との関連などを説明すると良いのではないかと思います。また、図3に出てくる「従来技術」と「第1世代型（ssN-linker）」、「第2世代型（ssH-linker）」について、技術の特性・優劣などを表にして比較しながら、どこに着目して、「遺伝子解析全体の精度の向上に寄与するシナリオ」を想起したのか、また、その過程で、なぜ、「ニッチ分野におけるニーズを選択することになった」のかを説明すると、筆者の思考過程がよく理解できて、読者の参考になると思います。

回答（小松 康雄）

図の説明とシナリオの部分をもっと明確になるように書き換えました。また、各アミノリンカーの利点と欠点をまとめた簡単な表を作成しました。

### 議論2 3.1.4 問題点の発覚

コメント（地神 芳文）

この部分は、第2世代型アミノリンカーの開発の動機付けとなる重要な部分であり、より詳細な説明がほしいところです。特に、見出された問題点が、なぜ、ssN-linkerのライセンスの中止を決断し、一旦プロジェクトを中断することになったのかについて、より詳しい判断の根拠や状況の説明があると良いと思います。

また、後半部分「ロイヤリティーは減るが、開発した成果を国内外の多くの企業などで使用してもらうことを選択した」の背景にある筆者の考えや社会の状況などを追加すると、構成学的な意義がより明確になると思います。

回答（小松 康雄）

ssN-linkerは高い反応性を示すと同時に、化学的な不安定性を有していました。ssN-linkerの変質は限定された条件においてのみ確認されます。しかし、ユーザーがアミノ化DNAを保存する場面には、あらゆる状況が想定され、その保存中にリンカーが変質して機能が低下する可能性を完全には否定できませんでした。また、そのような危険性を内包する化合物を民間に供与することは、企業側にリスクを転嫁することに近い意味となります。そこで、プロジェクトはかなり進行していましたが、より良いリンカーの開発を早急に進めることを筆者は選択しました。ライセンス化の寸前でこのような決断を選択した背景には、ユーザーからのクレーム対応は非常に大変であり、将来的に大きな問題発生の可能性を残す、という漠然とした個人的考えからくるものが大きいと思います。

国外へのライセンスに関しては、研究開発を進めた当初から、国内のみでなく海外にライセンスすることも念頭に行っていました。全世界で使用してもらうことは、開発した技術がさらに進化する可能性もあると考えてこちらを選択しています。またロイヤリティーに関しても、私達、産総研が取得するという考えよりも、図4に示したように民間において複数の事業が行われるようになることが重要であると考えています。

## 議論3 3.2 標識試薬

コメント（地神 芳文）

この部分、特に開発した新規な標識試薬と従来の標識試薬との特性比較、これを基にした今後の展開について、より具体的にどの様な社会的インパクトが期待されるかについてコメントがあると読者の参考になると思います。

回答（小松 康雄）

開発した標識試薬の核酸に対する高い反応性は、微量サンプルの検出と作用させる試薬量の減少（バックグラウンド値の低下）につながると考えています。また、試薬の構造における特徴は、標識以外の核酸認識低分子の創成においても重要な知見を与えたと考えています。こうした重要性が分かるように本文を書き換えました。

## 議論4 4.1 研究の展開

コメント（一條 久夫：(株)つくば研究支援センター）

新たな標識試薬に辿りついたプロセスを簡単に記されると、研究開発過程で行われた研究要素の取捨選択が分かり易く、理解が深まるように思います。

回答（小松 康雄）

第二世代型試薬の開発がなければ実用化もなかったため、この開発が大きなポイントでした。

ご指摘いただいたとおり、考察部分にこのような開発の重要性を書き加えました。

コメント（地神 芳文）

「流行ではない開発」を選んだことが結果的には重要であったと思われる（要因1）は、なぜこれが重要なのかの説明がほしいし、また、「製品化のための広範な研究を実施するために所内外での連携（要因2）」は、連携の具体的な実態の説明がほしいと思います。

図7の開発3については、5.将来の課題で、この様なシーズ志向からの研究が、先のニーズ志向の研究とどう違うのか、研究手法の違いがどの様な研究成果や波及効果（社会的インパクト）の相違に結び付くと想定しているかを考察してほしいと思います。また、先のニーズ志向の研究からシーズ志向の研究に回帰しているように思われますが、研究者として、なぜこの回帰が必要なのか、この間の経験に基づく筆者の「思い」や「将来の夢」などを是非お聞きしたいと思います。

回答（小松 康雄）

流行のテーマを開始することは、必然的に追いかけた研究になる可能性が高く、人的余力も無い場合には追いつけず終了することもあると考えていました。一方、既に確立したと思われた技術にも、時代の変化に伴った新たなニーズの出現によって、これまではない問題点が発生している場合もあると考えると、確立したと考えられた技術に再度、目を向けて問題点を掘り起こしたことが本件に限っては良い結果につながったと考えています。今回の成果にかかわる他の要因に関する部分も具体的に書き換えました。図6にも関連性を示す文章を書き加えました。

ニーズとシーズに関しては、最初の二つの研究開発は、ニーズ志向の研究を進めてきました。しかし、ニーズのみにとらわれた場合には、本文中にも記載したように、既存の類似技術との競争（入れ替わり）が必要になります。既に浸透した既存技術を入れ替えることは、たとえ技術的に優れている場合であっても困難なこともあり、さらに時間を要します。そのため、全く類似品が存在しない技術を提供することで、最終的に実用化に向かうルートを今回は試みたいと考え、第3の試薬開発を開始しました。しかし、このようなアプローチもニーズとは異なる場所に着地する場合も多々あります。そのため、最適なアプローチは不明ですが、実用化には両者が必須で、さらに研究の過程でそれらのバランスをとって修正することが必要ではないかと個人的には考えています。

# 安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発

## — 無線センサーによる鶏健康モニタリングシステム —

伊藤 寿浩\*, 増田 誉, 塚本 健司

動物の健康状態をモニターする無線センサー端末と、動物集団の健康管理を行うアニマルウォッチセンサーネットを開発している。特に、パンデミック対策として、鳥インフルエンザ発生の早期発見システムへの応用に主眼をおいた小型・軽量・フレキシブル・メンテナンスフリーな無線センサー端末を実現することで、人への感染防止など、人類の健康と食の安全の確保に資することを目的としている。システム実現のため、特に、これまで培ってきたMEMS技術と、鶏の生体・行動特性やインフルエンザ症状などの解析にかかわる生命分野、無線技術などの情報分野の各技術との融合により、イベントドリブン型の超低消費電力端末や、超短電文化に対応したダイレクトコンバージョン方式の受信システムなどを開発している。

**キーワード:** 無線センサー端末、センサーネットワーク、デジタル MEMS、イベントドリブン、鳥インフルエンザ

### Development of a sensor system for animal watching to keep human health and food safety

– A health monitoring system for chickens by using wireless sensors –

Toshihiro Itoh\*, Takashi Masuda and Kenji Tsukamoto

We have been developing wireless sensor nodes for monitoring animal health and networks that care animal groups. “Animal Watch Sensors” - miniaturized, light, flexible and maintenance-free sensor nodes, will be utilized for the early detection of avian influenza outbreaks in poultry farms to defend human beings from an influenza pandemic. Key technologies to realize the sensor network system are ultra low power “event-driven” sensor nodes and a direct-conversion type receiver system for ultra short message communication. These technologies are developed by the integration of MEMS technology, life science and information technology.

**Keywords:** Wireless sensor nodes, sensor network, digital MEMS, event-driven, avian influenza

#### 1 はじめに

2009年の新型インフルエンザ(H1N1亜型)発生と世界流行(パンデミック)は記憶に新しいが、近年発生が危惧されてきたのは、これとは別のH5N1亜型の鳥インフルエンザウイルスがヒトインフルエンザウイルスとの再集合によって変異し、強い毒性を獲得した新型インフルエンザである。厚生労働省の推計では、仮にこのウイルスにより1918年に発生したスペインかぜのような重度のパンデミックが起こった場合には、我が国だけでも死者数は最大64万人にも達するとされている。すでにアジアを中心に世界中で、鳥インフルエンザ発生および人への感染が確認されているが、我が国でも、2004年1月に山口・京都で、2007年1～2月に宮崎・岡山でそれぞれ養鶏場においてH5N1亜型鳥インフルエンザの発生が確認され、現在も依然として人類の安全・安心に対する重大な脅威となっている。

このような鳥インフルエンザの脅威に対して、養鶏場における対策の基本は次の4点である。

- 1) 衛生管理と野鳥対策の強化によるウイルス侵入防止策の強化
- 2) サーベイランスによる農場監視の強化
- 3) 診断の迅速化
- 4) 発生農場の防疫措置によるウイルスの早期撲滅

動物衛生研究所などでは、3)に関わる研究、すなわち多様性がある鳥インフルエンザウイルスの遺伝子を幅広く検出できる遺伝子検査法の開発が進められてきた。一方、産総研を中心とする研究チームでは、2)に関わる農場の自動監視システムの開発を進めてきている。

この養鶏場での鳥インフルエンザ感染の対応については、ウイルスの毒性が極端に強いために感染から死亡までの期間が1～2日の場合には、明らかに死亡鶏が異常増

産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 〒305-8564 つくば市並木1-2-1 つくば東  
Research Center for Ubiquitous MEMS and Micro Engineering, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan \* E-mail: toshihiro-itoh@aist.go.jp

Original manuscript received March 29, 2010, Revisions received May 24, 2010, Accepted May 25, 2010

大するため、現在義務付けられている生産者による報告によって、時間的には侵入から比較的短期間で発生が検知される。しかし、後出図7で示すように毒性が強いということは伝播感染力も強く、目に見えて異常が確認されるような状況では相当な広範囲に感染が拡大している可能性が高いため、経営的な損失が拡大するだけでなく、生産従事者にも危険である。一方、毒性がそれほど強くない場合には、他の要因との間で見分けがつきにくく、死亡鶏数が報告義務を要しない範囲に収まっている場合には、必ずしも迅速な通報は望めない。さらに、我が国では、近年急速に養鶏場の大規模化が進んでおり、農家の深刻な高齢化・人手不足と相まって、従来ならば見つけられた健康異常のサインも見落としたりやすくなっている。つまり、鳥インフルエンザ発生の早期発見という公衆衛生や食の安全の確保からの必要性とともに、生産性の向上という観点からも、鶏集団の健康状態を高いレベルで把握できるような技術を導入することが望まれている。

このような背景のもと、本研究では、図1に示すような養鶏場の鶏の健康をモニタリングするネットワークシステムの開発を試みている。基本的には、数%以上、将来は全羽の鶏に無線センサー端末を装着して、その活動量や体温をモニタリングすることで、それぞれの健康状態を管理・監視しようとするものである。例えば、ある端末で体温異常が検出された場合には、体温変化パターンとあらかじめ集積された実験データとを照合して鳥インフルエンザなどの感染の疑いを自動的に判断したり、集団での異常パターンから個体の問題なのか、感染症なのか、環境制御の問題なのかを推定したりするなどして、必要に応じて生産者への警告、獣医への連絡あるいは行政への報告を自動的に

行うようなシステムである。

私達はこのような無線センサーネットワークシステムを実現するためには端末の小型化、低消費電力化、低コスト化が必須であり、それらのキーとなるのは、近年さまざまなセンシングデバイスあるいはマンマシンインターフェースデバイスの製造技術として成熟し、More than Moore（機能の多様化による電子デバイスの進化）の主役として期待されているMEMS（Micro Electro Mechanical Systems、微小電気機械システム）技術の活用とその他必要関連分野技術との融合だと考え研究を進めてきた。本稿では本研究プロジェクトで得られた感染実験データなども紹介しながら、MEMS技術を活用した超低消費電力（Ultra Low Power: ULP）小型無線センサー端末の開発コンセプトを中心に述べる。

## 2 アニマルウォッチセンサー端末

前述したように、本研究では、鳥インフルエンザ発生の早期発見システムへの応用が可能な鶏健康モニタリングシステムの開発を行っているが、開発している無線センサー端末は、鶏以外の畜産動物はもとより、将来的には野生動物や愛玩動物への適用も視野に入れて（図2）、「アニマルウォッチセンサー端末」と呼んでいる。動物といっても多種多様であるが、主に鶏のような比較的小さな畜産動物を想定したアニマルウォッチセンサー端末とヒト用の端末を比較すると表1のように整理することができる。重要なのは、開発しようとしている端末はヒト用として開発されてきた端末とは要求仕様が何から何まで全く異なるということであり、特に端末の低消費電力化にかかわる技術的なハードルがかなり高いということである。

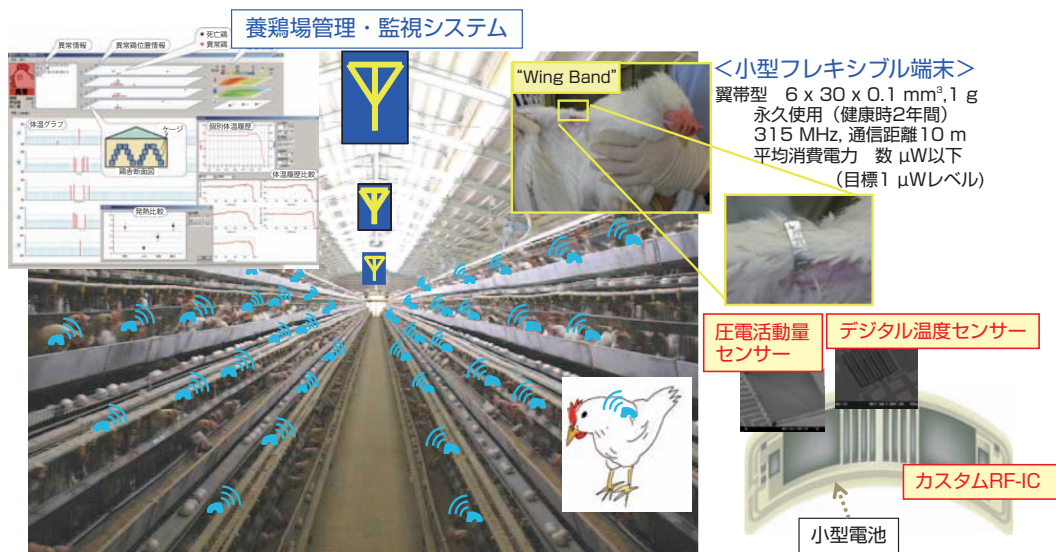


図1 鶏健康モニタリングシステムのイメージ



具体的に消費電力を検討してみると、採卵鶏の場合、550日程度で淘汰（廃鶏）されるので<sup>[1]</sup>、端末寿命としては2年程度確保する必要がある。仮に腕時計などに使われる酸化銀電池 SR721 という 0.5 g 程度の小型ボタン電池を使う場合、SR721 の公称電池容量は 25 mAh なので、2年間動作するためには、平均消費電流を 1.4  $\mu$ A 以下にしなければならない。無線センサー端末は、通常、センサー素子、センサーインターフェイス回路、マイクロコントローラー（MCU、マイコン）、無線通信用 IC および電源などで構成される。表 2 に示すように、低消費電力型のマイコンを用いた場合でも、マイコンと無線通信 IC のみの消費電流で 1  $\mu$ A 程度になるため、さらにセンサーや増幅器の待機および動作分、動作時のマイコンと無線送信による消費電流分などを考えれば、消費電流 1.4  $\mu$ A 以下というのは実現が容易ではないことがわかる。そこで、本研究では、マイコンなどの半導体素子のさらなる低消費電力化を図るといような方法ではなく、通信およびセンシングの低消費電力化を図ることにより、平均消費電力を従来の 1000 分の 1 の 1  $\mu$ W レベル（消費電流 0.65  $\mu$ A レベル）の端末を目指している。つまり、待機電力を極力減らしてセンシングや通信の効率化を図ること、端的にはセンシングや通信の頻度や量を必要最少限にしたり、アンテナの高効率化を図るといった方法により、低消費電力化を達成しようというのが本研究の戦略である。

上述した“センシングや通信の頻度や量を最小化する”ために最も重要なコンセプトと考えているのが、イベントドリブン（Event-driven）という考え方である。センシングや通信の頻度や量を単に減らすだけであれば、間欠動作をさせれば良い。例えば、鶏の健康管理を体温測定だけで行うのであれば、1分ごとに体温を計る必要はなく、30分に1回程度で十分であり、センシングや通信に要する電力を平均

表1 アニマルウォッチセンサー端末とヒト用健康モニタリング端末との比較

| 主な仕様     | 端末 | アニマルウォッチセンサー端末（主に鶏）      | ヒト用健康モニタリング端末                       |
|----------|----|--------------------------|-------------------------------------|
| 端末サイズ・重量 |    | 鶏の場合は、数 cm 角、重量は数 g 以下   | 腕時計サイズなどが典型、重量は数 10 g なら許容範囲        |
| 電源       |    | 充電不可、メンテナンスフリーが基本        | 携帯電話程度の充電頻度なら許容                     |
| 受信機・通信距離 |    | 最短でも 10 m 程度の通信性能が必要     | 受信機は携帯電話、通信距離は 1 m 以下               |
| センサーの種類  |    | 当面、体温センサー、活動量(加速度)センサー程度 | 体温センサー、活動量(加速度)センサー、脈波センサー、心電センサーなど |
| 端末価格     |    | 100 円（1 米ドル、ユーロ）程度       | 数千円～                                |

表2 無線センサー端末を構成するデバイスの典型的な消費電流値の例

|           | マイコン(MCU:MSP430)                | 無線通信 IC               |
|-----------|---------------------------------|-----------------------|
| 待機（スリープ）時 | 0.8 $\mu$ A <sup>[2]</sup>      | 0.2 $\mu$ A 程度        |
| 動作（無線送信）時 | 250 $\mu$ A/MIPS <sup>[2]</sup> | 650 $\mu$ A (1 mW) 程度 |

消費電流でいえば 0.1  $\mu$ A 程度にすることは難しくなく、待機消費電流と合わせて 1.4  $\mu$ A 以下にすることは十分可能である。しかし、ヒトの場合でも高熱の出る病とそうでないものがあり、私達はしばしば体温だけでなく、“疲れているようだ”、“元気がない”といった活動の低下も合わせて、医療機関にかかるかどうかを判断する。そこで、本研究のアニマルウォッチセンサー端末でも、ある種の活動量センサーの搭載は不可欠だと考えていた。実際、後出図 7 に示した山口株のように H5N1 の中でも毒性の強いものでは体温が上昇することなく死に至る場合があり、体温モニタリングだけでは早期発見ができないが、その場合でも活動量の低下から感染の推定を行うことが有効であることがわかっている<sup>[3]</sup>。活動量をセンシングする場合、30分に一回測定を行うといった方法では、その瞬間の活動状態しかわからず、その瞬間の値のみをもって活動的であるかないかを判断するのは難しい。したがって、本研究では、一定時間間隔でセンシングして送信するタイムドリブン型ではなく、例えばある閾値以上の活動が行われたら、センシングおよび通信を行うイベントドリブン型にすべきであると考えた。イベントドリブン型で難しいのは、適切なイベントの選定とその閾値設定であり、この閾値を鶏の感染実験データ分析から取得するとともに、それに適したセンサーを開発するというのが、本研究の重要なオリジナリティの一つである。

また、送信電力は電文量に比例するため、通信回数の低減とともに、送信電文の短文化も重要である。電文は、

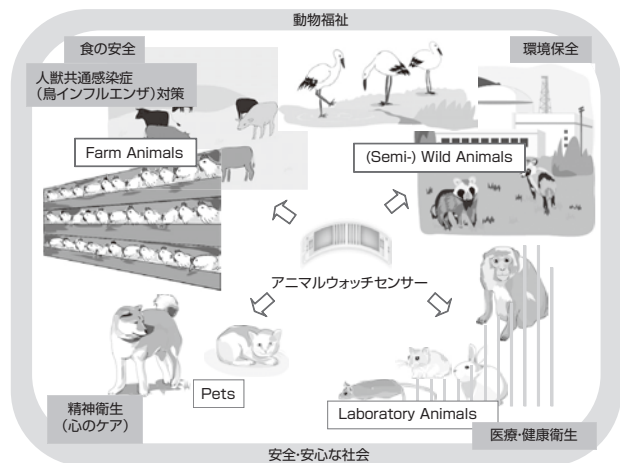


図2 アニマルウォッチセンサーの応用

データそのものの他に、クロック同期用序文やフレーム同期用通信定型文などのオーバーヘッド部や、ID（端末の個体識別符号）などが含まれているが、本研究では、新たな同時多チャンネル受信方式を採用することにより、オーバーヘッド部分を不要にするとともに、送信周波数やポーレート（変調速度）をIDとして利用して短電文化を図っている<sup>[4]</sup>。さらに受信間隔から活動量を算出するようにすれば<sup>[5]</sup>、理論的には、体温データとパリティビット（最も単純な1ビットの誤り検出符号）だけで構成される従来の1/3以下の最短電文を構成することが可能となる。

以上述べたように、養鶏場用の鶏健康モニタリングシステムを実現するためには、技術的には無線センサー端末の低消費電力化が最も重要であり、そのためには鶏の行動・病変を実験的に把握することによる適切なイベントとその閾値の設定、さらにはそれに合わせたデバイス・端末システムの開発を行う必要がある。表3はシステム実現に必要な主な要素技術をまとめたものである。本研究では、図3に示すような開発プロセスに沿って、無線センサー端末による感染動物実験・解析と、それらで得られたデータに基づくイベントドリブン方式に適した低消費電力MEMSセンサーおよび他の要素デバイス開発を行うとともに、プロトタイプ端末の試作と、それをベースに実験鶏舎用のモニタリングシステムを構築して、鶏舎応用における課題抽出を行ってきた。今後は開発を行ってきた要素デバイスを組み込んだ実用型端末の開発とそれを用いたモニタリングシステムの構築を行って、実験鶏舎におけるデモンストレーションへと進める予定である。

表3 鶏健康モニタリングシステムの主要要素技術

|                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| ULP 無線センサー端末               | デジタルバイメタル温度センサー        |
|                            | デジタル圧電加速度（活動量）センサー     |
|                            | カスタム RF-IC（イベントドリブン方式） |
|                            | 小型アンテナ（315 MHz）        |
|                            | フレキシブル端末実装技術           |
| ダイレクトコンバージョン（直接変換）方式受信システム |                        |
| 鶏舎モニタリングシステム               |                        |

### 3 端末の超低消費電力化戦略

小型（翼帯サイズ）・軽量（1 g 程度）・フレキシブル・メンテナンスフリー（寿命2年間）な無線センサー端末を実現するために、本研究では、MEMSスイッチを利用したデジタルセンサーを新たに考案した<sup>[6][7]</sup>。このデジタルMEMSセンサーはスイッチ型センサーのアレイで構成され、AD変換回路無しに直接デジタル信号を出力できるセンサーであり、スイッチ型であるためスリープ（時計停止）モードにある無線センサー端末の起動トリガーとしても利用できる。センサーを構成する個々のスイッチはMEMS技術を用いた微小機械スイッチであり、スイッチそのもののON/OFFには電力を要しないのが特徴である。以下、本研究で開発を進めているデジタルバイメタル温度センサーとデジタル圧電加速度センサーを例に具体的に説明する。

図4にデジタルバイメタル温度センサー<sup>[7]</sup>の模式図を示す。原理的にはとても単純であり、所定の温度以上で対向電極と接触するバイメタルカンチレバーのアレイで構成される。鶏の平熱は41℃程度なので、後出図7の横浜株に感染した場合のように、42.5℃以上に上昇すれば何らかの健康異常を来して発熱していると考えられる。そこで、例えば42.5℃以上で接点がONとなるようなバイメタルカンチレバーを用意しておき、体温上昇によって接点がONとなった時に、端末がスリープ状態から目覚めて接点がONになったことのみをセンシング情報として含む電文を送信するというのがイベントドリブンという考え方の基本である。タイマーを使った間欠動作モードの場合は、体温上昇というイベントの発生とは関係なく、検出タイミングは設定間隔で決定されるが、イベントドリブン型端末においては、体温の値の代わりに体温上昇時点を検知できるのが特徴である。イベントドリブンは、イベント時の1回送信というだけでなく、端末をスリープ状態から緊急タイムドリブン測定モードに変化させるというように使うこともできるし、またイベントに関しても個体差を考慮するとともに、粗い体温変化などがわかるように、各設定温度値に対応した複数のバイメタルカンチレバーを用意することもできる。例えばON温度が0.5℃といった一定間隔刻みになるように

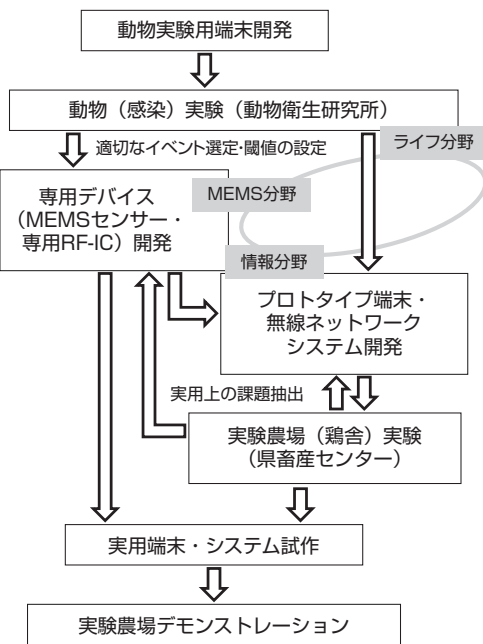


図3 開発プロセスの全体像（シナリオの概要）

サイズの異なるバイメタルカンチレバーを複数用意すれば、デジタル型の温度センサーとなる。“デジタル”の意味は、センサー出力が直接デジタル信号になっている、すなわち四つのスイッチが（ON, ON, OFF, OFF）であれば、そのまま1100というデジタル信号として検出されていることであり、加工することなく電文に乗せられるからである。このような機械式スイッチのON検出はわずかな消費電力で可能であり、センサーの待機電力は基本的には半導体スイッチのそれだけである。バイメタルスイッチはMEMS技術でなくても構成できるが、バイメタル温度センサーの小型化・低コスト化のためには、半導体微細加工技術を利用して多数の立体マイクロ構造をシリコンウェハ上に組立工程なしに一括して実現することができるMEMS技術の利用が不可欠である。

活動量センサーの場合も、ある値以上の加速度が入力されたらONになるといった機械式スイッチで構成することも可能であるが、私達が開発しているのは、図5に示すようなカンチレバー上に圧電薄膜を形成したタイプのセンサーである。ここでは技術の詳細<sup>[8][9]</sup>の説明は省くが、カンチレバーが運動すると圧電効果によって発電が行われ、この電力によってトランジスタのON/OFFを行うことが可能であり、原理的にはゼロ消費電力のデジタル加速度センサーが実現できる。バイメタル温度センサーと同様、感度の異なるカンチレバーを並べることもできるが、同じカンチレバーを並べて直列つなぎにしたり<sup>[6]</sup>、カンチレバーは一本にして、回路の工夫により所定の加速度閾値に対応したデジタル出力を取り出せるようにすることも可能である<sup>[10]</sup>。第5章で後述する実験用端末を用いた感染実験の結果から、

例えば感染による顕著な体温上昇が見られない山口株の場合でも、一定時間（例えば30分間）内にある閾値を超える加速度の発生回数（活動量）をカウントし、その回数を24時間前の回数と比較するといった方法により、体温低下よりも10時間程度前に健康異常が検出できることがわかっている<sup>[3]</sup>。発電型の圧電センサーを使えばこの活動量のカウントを低消費電力で行うことができる。このようなデバイスを小型・低コストで実現するためには、MEMS技術と圧電薄膜形成技術を組み合わせた圧電MEMS技術が必要である。

図6に示すように、超低消費電力端末を実現するためには、センサーそのものをイベントドリブ型に対応したデジタルMEMSセンサーにするとともに、マイコンや高周波無線通信集積回路（RF-IC）といった半導体素子もそれらに対応したものにカスタム（専用）化する必要がある。これまで述べてきたように、本研究で開発を行っているイベントドリブ型端末とは、「センサーからは直接デジタル信号が出力され、それによって端末がスリープ状態から起動してそのままそのデジタル信号を無線送信する」というものである。したがって端末には高級な演算処理は不要で、センサーインターフェイス機能と電文作成機能といった単純な処理機能を有するRF-ICがあれば十分である。逆に言えば、オーバースペックの汎用マイコンを搭載することを前提にすると、電力的にもコスト的にも鶏用の端末の実現は困難となる。このようなカスタムRF-ICの導入には、半導体素子技術として新たな技術開発が必要となるわけではないが、イベントドリブ型端末専用のRF-ICは世界でも例がなく、自ら設計開発を行う必要があるキーとなるデバイスの

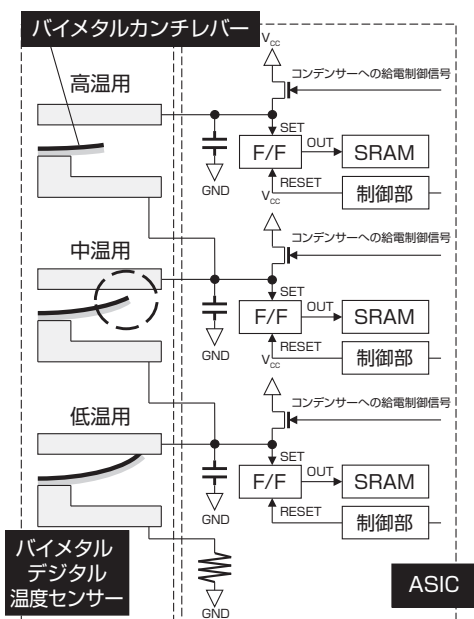


図4 デジタルバイメタル温度センサー

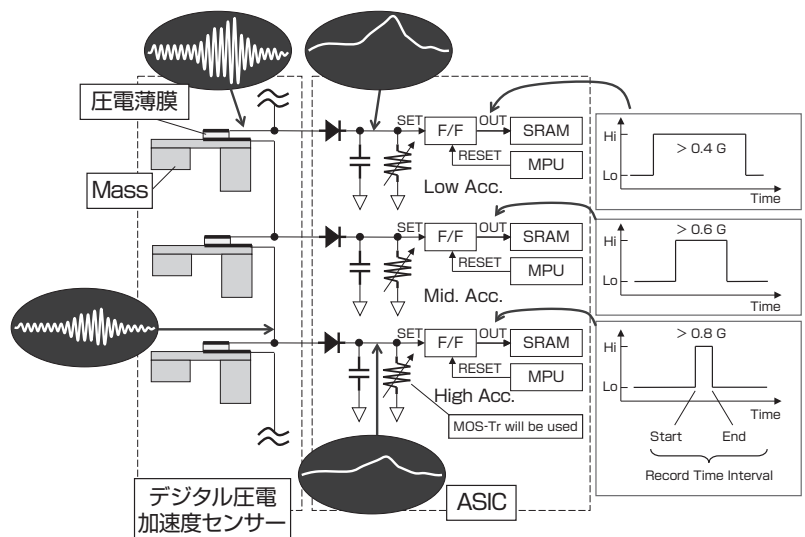


図5 デジタル圧電加速度センサー

一つである。もちろん、これら以外にも、基板のフレキシブル化やアンテナの小型化・フレキシブル化などが実用上重要であることは言うまでもない。

#### 4 アニマルウォッチセンサーのイメージ

本研究プロジェクト終了時（2011年度末）に実現を予定している無線センサー端末の様子は以下のとおりである。

端末本体サイズ・重量：基板（フレキシブル）サイズ6×30×0.1 mm<sup>3</sup>、重量（電池含む）1 g程度

装着方法：翼帯型

センサー：デジタルバイメタル温度センサー、デジタル圧電加速度（活動量）センサー

無線送信：周波数315 MHz帯（310～320 MHz）、変調方式GFSK、見通し通信距離10 m以上

待機時消費電力：0.5 μW以下

電源：酸化銀電池（1.55 V）

本研究の無線センサー端末は、データ送信のみで受信の方は行わない。受信待ち受け電力が大きく、サイズやコストなど所要スペックを満たせないというのが一番の理由であるが、そもそも端末が受信を行う必要もないと考えるからでもある。端末側で受信を行う必要があるのは、端末間で通信したり、受信不良の場合に再送信要求を受信したりするためなどだが、今回のシステムでは、データ送信頻度が30分～1時間に1回程度、送信電文は10 bit以下と短いものを想定していることなどから、端末数が一万を超える数になったとしても、送信信号が衝突する確率はほとんどないと考えるからである。しかし、イベントドリブン型システムでは、1回の送信データの重要度は高いため、通信には高い信頼性が要求される。本研究では、境界条件の厳しい端末側のシステムをできるだけ簡素にするため、逆に受信機側を高度化するというを基本コンセプトにしている。

このような考えのもと、本研究で受信方式として採用し、

開発を行っているのが、ダイレクトコンバージョン（直接変換）方式である。これはソフトウェア無線とも呼ばれるものの一種で、基本的には上記で示した周波数帯域310～320 MHzの周波数スペクトル自体を取り込んでメモリに保存し、それを解析することで電文の解釈を行おうというものである。私達はこのために同時多チャンネル受信機を試作して受信システムの開発を進めている。このようにすれば、周波数と送信データレートによる端末識別も可能であるし、先に述べたように、プリアンプなどのオーバーヘッド部がなくてもデータ受信が可能となる。また、各端末からの受信信号強度の比較を行うことで、1 m以下の精度での端末の位置同定、すなわち端末のID管理を行わなくても、健康異常を来した鶏の位置や病変の発生・拡大の様子を検出することも可能であると考えている。短電文化のもう一つのポイントが、受信頻度による活動量の推定である。例えば最も単純には、ある閾値を超える加速度が入力されるとONとなるようなスイッチを用意し、ONの回数が一定量に達すると1回電文送信を行うといったものである<sup>[11]</sup>。活動的であれば、送信間隔が短くなり、逆に活動が鈍い場合には送信間隔が長くなるため、受信時間間隔が活動状態を表すことになる。もちろんこの場合は1回の送信データそのものから活動状態に異常があるかどうかは分からないが、過去のデータと比較することにより、個体差も考慮した活動量のモニタリングが可能となる。このような方式によれば、電文中に活動量に関わるデータも入れる必要がなくなるため、究極的には信号送信時のデジタル温度センサーからの出力+パリティビットのみを送れば良いことになる。この受信システムの開発においては、同時多チャンネル受信機（プロトタイプ）試作と動作確認、電文解析基本ソフトウェアの有効性確認、端末位置同定アルゴリズムの開発などが終了しており、端末位置同定については理想環境においては1 m以下の精度が得られることが実験的に確かめられている。

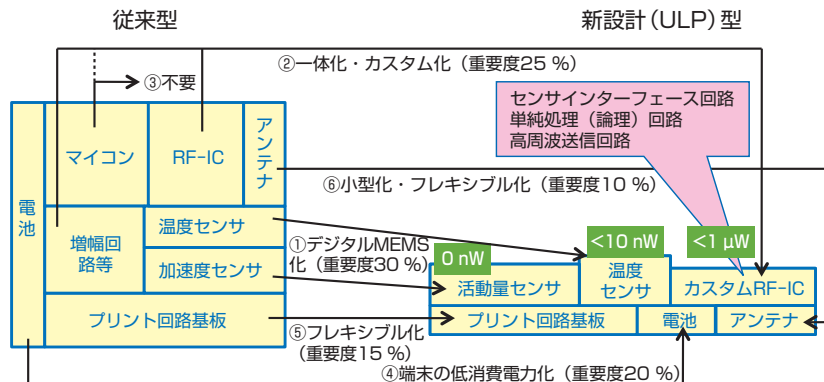


図6 超低消費電力 (ULP) 無線センサー端末と従来端末との比較

以上述べたように、本研究では、高性能受信システムの採用による端末の簡略化によって、端末の小型軽量化、低消費電力化（長寿命化）、低コスト化を図っている。

## 5 感染実験とプロトタイプシステム

既に述べたように、本研究の重要なポイントの一つは、センサー端末の最適化のために、まずは鶏（の病変）をよく調べるということである。本研究プロジェクト開始時点で、既に我が国の養鶏場などで発生していた鳥インフルエンザが人類にとって大変な脅威であることが認識されているが、鶏が H5N1 に感染したら体温がどのように変化するのかさえ調べられていなかった。もちろん、養鶏場の鶏が健康時にどのような生活サイクルを刻み、感染によってそれがどのように変化するのかというデータも定性的なものしか存在していなかった。デジタル MEMS センサーあるいはイベントドリブン型端末は、対象となるものの性質、本研究では鶏の生態がわかっただけではじめて実現できるものであり、研究チームでは感染実験などの動物実験を進めてきた。

動物衛生研究所が実施した感染実験では、図 7 に示す体温挙動の結果などから、「高病原性鳥インフルエンザウイルスに感染した鶏の発熱や死亡時間は株間で異なる」こと<sup>[12]</sup>や、「鳥インフルエンザウイルスの鶏伝播性はウイルス排泄量と相関している」こと<sup>[13]</sup>が、無線センサー端末の活用で初めて明らかとなった<sup>[14]</sup>。なお、実験に用いたプロトタイプ端末は、感染実験や鶏舎実験において鶏の装着負担

をできるだけ低減するため、外形 1 円玉サイズ、本体重量 3 g 以下（電池重量込み）であり、体温測定用の温度センサー、活動量モニタリング用加速度センサーを搭載するとともに、一定時間間隔（自由に設定可能）で体温・加速度データを取得・送信するタイムドリブン型の無線モジュールを搭載した。

上記の感染実験では、体温データだけでなく、加速度データも記録されているが、これらの知見・データをもとに、体温パターンと活動量のパターン双方を用いる感染判別プログラムを開発し、従来と比較し、感染の疑いが早期に自動的に発見（認識）できるようになった。さらに、デジタル温度センサーのプロープ本数やそれぞれの閾値などが設定でき、活動量センサーについても適切な加速度閾値の設定が可能となる。また、感染伝播速度のデータを用いて伝播シミュレーションプログラムを構築し、端末濃度と感染の疑いを発見する時間との関係を調べ、モニタリングプログラムの開発に活かしている<sup>[3]</sup>。なお、このシミュレーションによって、例えば、3 羽の異常により感染を疑う状況と判断するとした場合、5 % の鶏にセンサーを装着すれば、現状の行政で決められている見回り観察による報告時期よりも、山口株で 2 日間ほど早い検知が可能であることがわかっている。

またこのような無線センシングシステムを鶏舎に適用した場合の課題を抽出するため、上記で用いたプロトタイプ端末を翼章型にすることにより、鶏へ容易に装着できるようにす

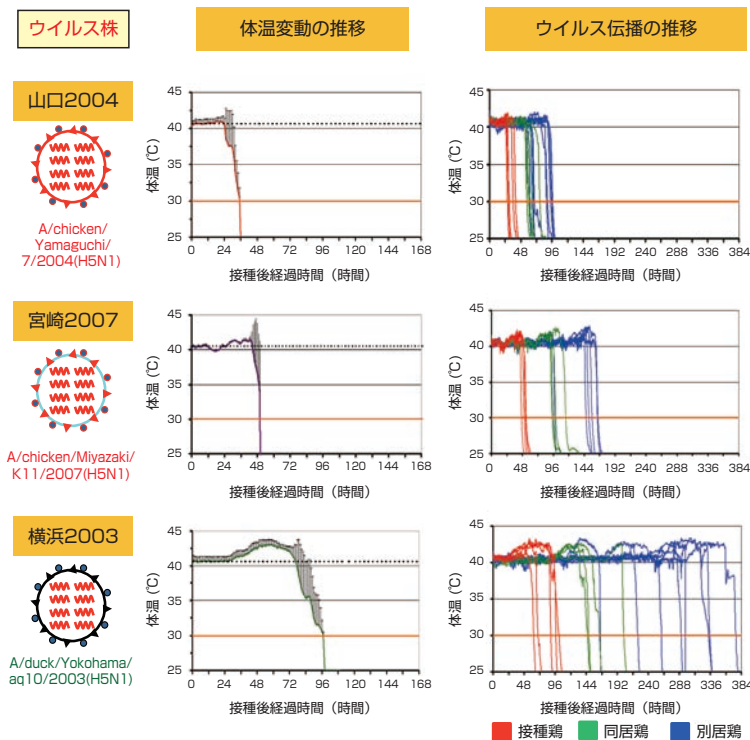


図 7 感染実験により得られたデータ例

るとともに、茨城県畜産センター実験鶏舎内に無線ネットワークシステムを構築して、夏季の暑熱ストレスをモニタリングできる養鶏場の健康管理システムについて検討している<sup>[14]</sup>。

## 6 研究の進捗と見通し

本研究は、2011年度末に実用レベルの鶏健康モニタリングシステムを完成させることを目標としているが、表3に上げた各要素技術の開発進捗度には多少の違いはあるものの、当初目標と比較した全体の到達度は現時点で60～70%である。要素デバイスの中でも、キーデバイスの一つとして開発を進めているデジタル圧電加速度センサーについては、試作デバイスを使ったプロトタイプ端末のデモンストレーションができるようになっており、デジタルバイメタル温度センサーについても、実装を含めたウェアレベルでの製造を考慮した新構造の開発が進んでおり<sup>[15]</sup>、2010年度にはこれらの量産化プロセスの検討を行う予定である。また、カスタムRF-ICについても2010年11月の完成を目指して設計試作が進められており、最終目標に近い形の端末は早ければ2010年度中に完成する見通しである。技術的課題としては

- ・受信システム用ソフトウェア開発
- ・デジタルMEMSセンサー用低コストウェアレベル実装技術開発

が挙げられる。特に、後者の実装技術については、デジタルMEMSセンサーデバイスの製造コストを大きく左右するものであり、デバイス本体の製造プロセスを含めた最適化を行う必要がある。

本研究の最終目標は、“実用レベル”のシステムを構築してデモンストレーションを行うことではなく、実用そのもの＝民間養鶏現場への導入であるが、そのためには技術開発だけでは解決しないさまざまな課題がある。低コスト着脱方法の開発といったものに加え、農場でそれをどう生産性向上に結び付けるかといった問題や、行政での監視体制システムをどう構築できるかなどの検討を進める必要がある。

本研究では、アプリケーションを一見特殊な鶏健康モニタリングシステムに絞って開発を進めることで、安価なものでも数千円は下らないアクティブ型（RFタグと違いリーダーを必要としないタイプ）の無線センサー端末を、ワンコインにまで低コスト化するとともに、絆創膏並みのサイズまで小型軽量化することを試みている。確かにこの端末は、バイタルサイン（生命情報）そのものを計ることはできないため、ヒトへの応用は限定的かもしれないが、体温や活動量（元気さ）のモニタリングは健康管理の基本であり、施設での見守りが必要な乳幼児や高齢者の健康モニタリング応用への適用性の検討を行っていききたいと考えている。

## 7 おわりに

本研究を実際に進めていく中で分かったことは、MEMSや実装技術分野の研究が、全体の課題解決に必要な技術群から見ればほんの一部にすぎないということであった。MEMSの研究とは基本的に製造プロセス技術の研究であり、例えば“非常に細くて深いまっすぐの穴をあける”研究であったが、今世紀に入ってこのような技術が成熟しつつある中、私達が直面しているのは、むしろ何を（何のためのどんな仕様のものを）つくるべきかという問題である。その答えの一つが超小型の無線センサー端末の中で使うデバイスだと考え、その流れの中で本研究を始めたが、鶏の健康モニタリング応用の場合に、本当にMEMSが必要かというのはこれまでも度々俎上に載せてきた。幸いなことに、今のところMEMS技術は必要不可欠な技術として位置付けてきているが、境界条件が変われば、（例えば豚や牛応用になれば）本当にMEMSが必要なのかどうかはそのつど議論しなければいけない。

当初、本研究はあくまで農場における鳥インフルエンザの早期摘発が主たる課題であったが、畜産研究者らといろいろ議論する中で、動物福祉という観点からもアニマルウォッチセンサーについて考えるようになった。畜産の大規模化に伴って、都市部では特に生産現場が生活圏から離れているためか、動物性食品を食すことに対する実感が薄れている。もちろん畜産動物は経済動物であるので、愛玩動物や野生動物と同様に考えることはできないが、高カロリーの食事を摂られ生産病罹患のリスクの高いメタボ状態の動物から、卵・牛乳・肉などを得ているということを理解した上で、今後もそれらを食していけるのかはもう一度考えてみる時にきているのかもしれない。欧米では家畜福祉という考え方が浸透しつつあり、2010年からは家畜福祉認証畜産物（Welfare Quality Products）が販売される予定であるが、その評価会議の中で技術的な問題点として挙げられているのがAnimal Based Measurement：動物側からの評価、すなわち「動物がどう感じているか」の評価手法であり、アニマルウォッチセンサーは動物とのインターフェイス技術として、畜産動物の福祉の確保という点からも重要性を増していくものと考えている。

本稿で紹介した無線センサーネットワークに関するコンセプトや技術の多くは、アプリケーションを鶏の健康モニタリング応用に特化して検討したことで生まれたものであるが、個々の技術は、農業応用や防災応用を含めた環境モニタリングなどの他のアプリケーションへ応用可能なものも少なくない。時にアプリケーションを絞り込んで研究を進めることは、分野の開拓や発明創出にとっても有効な方法となりうることを改めて実感できたことも大きな成果だと考えている。

## 謝辞

本稿で紹介した研究開発成果は、動物衛生研究所・塚本健司上席研究員、東京大学・増田誉特任講師、産総研・小林健研究員、張毅研究員、岡田浩尚研究員他で構成される研究チームが実施するJST CREST「安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発」で得られたものである。

## 参考文献

- [1] <http://www.toukei.maff.go.jp/digest/tikusan/tiku06/tiku06.html>
- [2] テキサスインスツルメンツMSP 430マイクロコントローラ <http://focus.tij.co.jp/jp/mcu/docs/mcugettingstarteddetail.jsp?sectionId=97&tabId=1511&familyId=342>
- [3] H. Okada, K. Suzuki, K. Tsukamoto, T. Itoh: Wireless sensor system for detection of avian influenza outbreak farms at an early stage, *Proc. IEEE Sensors 2009*, 1374-1377 (2009).
- [4] 伊藤寿浩, 増田誉, 中村公亮, 岡田浩尚: 低消費電力無線センサー端末およびセンサーネットワークシステム, 特願2009-232154.
- [5] 伊藤寿浩, 増田誉, 中村公亮, 岡田浩尚: 無線活動量センサー端末およびセンサーネットワークシステム, 特願2009-232153.
- [6] 小林健, 伊藤寿浩, 池原毅, 一木正聡, 前田龍太郎: 加速度センサー, 鳥インフルエンザ監視システム, 特願2008-151562.
- [7] 池原毅, 伊藤寿浩, 張毅, 一木正聡, 小林健, 前田龍太郎: 温度センサー, 生体の健康管理システム, 特願2008-151555.
- [8] T. Itoh, T. Kobayashi, H. Okada, T. Masuda and T. Suga: A digital output piezoelectric accelerometer for ultra-low power wireless sensor node, *Proc. IEEE Sensors 2008*, 542-545 (2008).
- [9] T. Kobayashi, H. Okada, T. Masuda and T. Itoh: A digital output piezoelectric accelerometer using patterned Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> thin films electrically connected in series, *22th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (Sorrento, Italy, Jan. 25-29, 2009).
- [10] 小林健, 伊藤寿浩, 増田誉, 岡田浩尚, 張毅, 前田龍太郎: 圧電加速度センサー, 特願2010-098993.
- [11] H. Okada, T. Kobayashi, T. Masuda and T. Itoh: Ultra-low power event-driven wireless sensor node using piezoelectric accelerometer for health monitoring, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 48 (7), 070222 (2009).
- [12] K. Suzuki, H. Okada, T. Itoh, T. Tada, M. Mase, K. Nakamura, M. Kubo and K. Tsukamoto: Association of increased pathogenicity of asian H5N1 highly pathogenic avian influenza viruses in chickens with highly efficient viral replication accompanied with early destruction of cytokine responses, *Journal of Virology* 83 (15), 7475-7486 (2009).
- [13] K. Suzuki, H. Okada, T. Itoh, T. Tada and K. Tsukamoto: Critical determinants of avian influenza viruses for transmissibility in chickens, Submitted to *Journal of General Virology*.
- [14] 2009.10.6産総研プレス発表「無線センサーによる鶏の健康モニタリングシステムを開発」.
- [15] 張毅, 岡田浩尚, 小林健, 伊藤寿浩, 前田龍太郎: MEMSの技術による温度センサー及びこれらの製造方法, 特願2009-067117.

## 執筆者略歴

伊藤 寿浩 (いとう としひろ)

1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年、東京大学先端科学技術研究センター助手、同講師、同助(准)教授を経て、2007年産業技術総合研究所入所。2010年より集積マイクロシステム研究センター副研究センター長。圧電MEMS、MEMSプローブカード、MEMS実装、無線センサー端末などの研究に従事。2006年より、JST CREST「安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発」研究代表者。2008年より、NEDO異分野融合型次世代デバイス製造技術開発(BEANS)プロジェクトMacro BEANSセンター長として、ウィービングMEMSなどの研究に従事。本論文では、主としてMEMSセンサーと無線センサー端末の開発を担当した。



増田 誉 (ますだ たかし)

2001年静岡大学大学院電子科学研究科電子工学専攻博士課程修了、2002年群馬県立群馬産業技術センター独立研究員を経て、2006年太陽誘電(株)R&Dセンター主任研究員と東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻特任講師を兼務し、現在に至る。過去には湿度センサー、シリコンピエゾ抵抗式圧力センサー、サファイア静電容量式圧力センサー、ボール式傾斜センサーなどの素子や信号処理に関する研究/開発に従事し、現在はJST CREST「安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発」の特に超低消費電力無線センサーにおけるイベントドリブン通信プロトコル開発や圧電振動発電システムの開発、超低消費電力カスタムLSIの開発、300MHz帯用小型アンテナ開発に従事。本論文では、主として超低消費電力化技術や無線ネットワークシステムの開発を担当した。



塚本 健司 (つかもと けんじ)

1982年東京大学大学院農学系研究科修士課程修了。同年、農水省家畜衛生試験場(現動物衛生研究所)採用。研究員、主任研究員、室長を経て、2007より上席研究員。2004年から鳥インフルエンザの野鳥疫学調査、遺伝子診断法の開発に従事。また、2006年よりJST CREST「安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発」に主たる共同研究者として参加し、鳥インフルエンザウイルスに感染した鶏の病態変化の解析と、鶏病原性の分子基盤の解析に取り組んでいる。本論文では、主として感染実験とプロトタイプシステムの開発を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 無線センサー端末の構成

コメント(清水 敏美:産業技術総合研究所研究コーディネータ)

無線端末をイベントドリブン型に対応させるために、新たに設計した端末のコンセプト項目とそれらの重要度(難易度でもよい)が不明確です。一つの案として、従来型の無線端末の構成と新たに設計開発したそれとの構成を図面で比較した上で、要素ごとに解決すべき課題を項目ごとに図示し、その中で重要度(あるいは難易度でもよい)を記述するとMEMSには慣れ親しんでいない技術者を含む一般読者にとって理解が深まると思います。

回答（伊藤 寿浩）

ご教示にしたがって、図6を修正いたしました。

## 議論2 技術用語

コメント（清水 敏美）

共同研究先として、動物衛生研究所とあります。査読者の知る限り、動物衛生研究所には多くの獣医がいると聞いており、獣医学的立場から鶏の感染予防あるいは感染防止に関して、どのような最近の研究動向があるのでしょうか。農林省の技術政策や施策の点からも、解説を加えていただければと思います。

回答（伊藤 寿浩）

「1.はじめに」の第2段落「・・・養鶏場における対策・・・」に関連の記述を加筆しました。

コメント（清水 敏美）

技術者を含む一般読者には、カタカナ表示による難解な技術用語が多くあります。例えば、タイムドリブン、プリアンプ、パリティビット、ダイレクトコンバージョン、カスタムRF-IC、バイタルサインなどは当該学会では一般的な用語であっても、一般読者にとっては意味が不明です。日本語訳が可能であれば和訳を、不可能であれば、説明など工夫が必要だと思います。

回答（伊藤 寿浩）

少なくともご指摘の語句に関しましては、初出部分にできるだけ括弧書きなどで和訳あるいは説明を入れました。

## 議論3 MEMS技術活用のメリット

質問（濱 純：産業技術総合研究所評価部）

加速度センサー、温度センサーともにスイッチ方式による超省電力化へのMEMSの活用は、動物用センサーのシンプル化に加えて、MEMS技術で一体製造できることによると記述されていますが、図3、4の各センサーの製造上のメリットを具体的に教えてください。

回答（伊藤 寿浩）

スイッチ方式のセンサーを実現するためには3次元的な機械構造が必要です。MEMS技術は、シリコンウェハ上に3次元マイクロ構造およびそれらを保護する実装構造を一括して製作することを得意とする技術であり、小型かつ低コストな3次元的な機械構造を含むデバイスを実現する唯一の技術といえます。具体的には、加速度センサーについては圧電薄膜が形成された振動子および封止構造の作成、温度センサーについてはバイメタル片持ち梁アレイ、接点構造および封止構造の作成にMEMS技術が必要不可欠です。

## 議論4 閾値の設定

質問（濱 純）

センサーシステムのハードやソフトができて、それと同等以上に重要なのが鳥の異常行動と判定する閾値の設定であると思われしますが、非日常的行動としての最終的な閾値の設定は、実際にはどのように決定されたのですか？公開できる範囲でその決定プロセスを説明下さい。

回答（伊藤 寿浩）

動物実験用の無線センサー端末を使って、動物衛生研究所で同時に数10羽の鶏を使った実験を複数回実施してきました。基本的には、ウイルスを接種した鶏（複数のウイルス株について実施）と未接種の鶏の体温データ・加速度データを比較分析することにより、検出体温の設定や加速度閾値の設定などを行っています。

## 議論5 低コスト化

質問（濱 純）

健康モニタリングシステムの低コスト化には、安価なセンサーシステムの技術開発のほかに、サンプリング数（装着数）を最小化するなどの工夫もなされていると思いますが、統計的なサンプリング総数（取り付け総数）については動物の特性によって違いがあるのでしょうか。

回答（伊藤 寿浩）

動物の特性によって相違があるかどうかはわかりませんが、動物衛生研究所の専門家の意見をうかがったところでは、養鶏場の鶏集団の健康を見るためのサンプリング数としては0.3～1%で十分ではないかとのことでした。また、実験データを利用して、センサー濃度と検出時間（最初に鶏が感染してから異常と判断して通報するまでの時間）との関係をシミュレーションした結果から、現在は5%程度が必要最小限の数だと考えています。

## 議論6 MEMS技術の実用化

質問（濱 純）

MEMSという技術ベースからの用途開拓の一つとして鳥の健康モニターという実際の製品化普及を狙っていますが、一方で、鳥の健康モニターというニーズの視点からの競合製品などの出現に対する競争力の検討が実用化普及には重要であることを「おわり」において示唆されていると思います。MEMS技術における優位性のある出口の見通しについて、より具体的に説明ください。また、健康行動モニタリング以外でどのような用途が有力と思われるか、現状での考えをお聞かせ下さい。

回答（伊藤 寿浩）

一般論では、MEMS技術は特に小型・低コストが求められるあらゆるセンサーの製造基盤技術だと思いますので、アンビエント社会<sup>注)</sup>のさまざまなセンサーインターフェースデバイスがMEMS技術で実現されていくはずで、鶏以外の動物の健康行動モニタリングまでは、同様のコンセプトのシステムが適用可能であろうことは予測できるものの、例えば施設環境モニタリングといった別の用途では、(MEMSが必要かどうか含めて)一から検討しなければいけないと考えています。しかし、端末の側をできるだけ“軽い”システムにしてより広範囲に多数ばら撒けるようにし、受信側のシステムを高度化するというコンセプトは、農業応用や防災応用を含めた環境モニタリングへの応用へは有効だろうと考えています。

注) アンビエント社会

「ユビキタス社会」は、人間が「いつでも、だれでも、どこでも」必要な情報を能動的に取りにいける世界に対して、「アンビエント社会」は、人を「取り巻く(= ambient)」情報環境が人の状況を賢くセンシングし、環境側から必要な情報を必要な時に提供する世界。



## インタビュー

# イノベーションを推進する根本的エンジニアリング

日本工学アカデミーには、社会のための工学という立場から、どのような科学技術政策が必要かを分析し、有効な政策提言を行なう政策委員会があります。その政策委員会のもとで、我が国が重視すべき科学技術のあり方に関する提言が行なわれました。この提言のためのタスクフォースの幹事の鈴木浩さんに本誌赤松幹之編集幹事がインタビューして、ここで提唱されている「根本的エンジニアリング」の考えをうかがい、シンセシオロジーとの関連について話し合いました。

シンセシオロジー編集委員会

鈴木 浩：ゼネラル・エレクトリック・インターナショナル・インク 技監

赤松 幹之：シンセシオロジー編集幹事 産業技術総合研究所

### 根本的エンジニアリングとはなにか

**赤松** 日本工学アカデミー政策委員会で「我が国が重視すべき科学技術のあり方に関する提言」として「根本的エンジニアリング」を提唱されておられます。提言を拝見しますと、「顕在化した課題に対する科学技術の適用にとどまらない、根源的なイノベーションを推し進める」とありますが、そもそも根本的エンジニアリングとはどのようなものでしょうか。

**鈴木** アメリカにおいては、クラウド・コンピューティング、スマートグリッド、iPodやiPadなどがイノベーションとして登場しています。一方、日本はエンジニアリングがとても得意である、製品をつくるのがとてもうまい、ものづくりが巧みであると言われているのですが、日本からはイノベーションがあまり起きてこない。その原因が何なのかということをもう一度見直してみようということが動機です。

エンジニアリングにはいろいろな定義がありますが、「与えられた制約条件のもとで最適な答えを出す」というふうに捉えられることが多い。本当にそれでいいのかと疑問を持つようになり、制約条件自身を無視し、幅を狭めな

いで、オープンに見ることからスタートしたら全く違う答えが出てくるのではないかと、それがイノベーションにつながるのではないかと考えました。イノベーションを研究する中で、アメリカやEUなどによる科学技術分野の捉え方としての「Converging Technology」を調べてみよう。もし、それが日本にうまくフィットするようであれば、日本型のConverging Technologyを考えたらどうかというのがタスクフォース発足のきっかけです。

### アメリカのConverging Technologyとは

**赤松** Converging Technologyの研究から始まり、それでは足りないので「根本的エンジニアリング」という概念を出したということですね。

Converging Technologyについては、2002年に「Converging Technologies for Improving Human Performance (人間の能力改善のためのCTs)」(NSF、米国商務省)が発表されていますが、その後、欧州などによってさまざまな定義がされています。

**鈴木** 研究に至るプロセスとしては、将来の課題を見つ



赤松 幹之 氏 (左) と鈴木 浩 氏 (右)

け、それに対してどういう科学技術が必要なのかというところが両方ともスタートポイントになっています。ただ、最終的な提言書を見ると、アメリカの場合には NBIC (nano-bio-info-cogno) の四つの分野がこれから中核になってくるが、これらが単一の分野だけで社会的な課題解決ができるということではなくて、それらをうまく融合することが必要になるだろうと言っています。“Converging”とは“収束させる”という意味ですが、もともと NBIC という四つの分野はそれぞれ独立して存在しているのですが、元のものが残っていて、それらをうまくコンバージするということです。

**赤松** 要するに、一緒になって新しい分野ができるということではない、ということですね？

**鈴木** 新しい分野ができてもいいけれども、元の分野も残していくということです。

convergence ではなくて、なぜ、converg “ing” かというと、アメリカ人はダイナミックに動いていくというイメージを出したかったのではないのでしょうか。ヨーロッパや韓国では、“Convergence technology” と言っているケースもあります。この辺は国の特徴が出ているのかなという気がします。

#### 日本のサッカーとかけて日本のイノベーションと解く

**赤松** アメリカの Converging Technology というのは、“能力拡大”が一つのキーワードになっていて、技術ユートピア的な、未来を拓いていこうというところがあります。それに対して、欧州は、もう少し世の中の問題を把握しようという感じを受けます。

ただ、NBIC について、具体的な課題や、何を解決したいかということが具体的には見えてこない気がするのです。タスクフォースにおいて、CT では何が足りないという議論になったのでしょうか。

**鈴木** 議論をしているとき、実はサッカーの日本代表チームのことがチラッと頭をよぎったのです。技術はとても素晴らしい、パス回しもうまい、ボールの支配率も国際試合で 60 % くらいある、サイドチェンジもパスがうまくとおる。ところが、ゴール前に行くと、みんな、シュートしない。ですから、当然、点は入らない。よくてせいぜい引き分け。日本のサッカーが私達の今置かれているイノベーションの状況にとっても近いのではないかと思ったのです。一方、得点できる、勝っている国は、個々の技術はもちろん優れているのですが、チームとしてうまい技術があまりあるわけではない。しかし、ゴール前のシュート力というか、ここで決めなければいけないというときの集中力がとても素晴らしい。

そういうふうと考えていくと、イノベーションが継続して起きているアメリカでは、アメリカ人はわりと見えない課題を見つけるのがうまいので、答えを出すほうに問題点を見つけてそこを一生懸命やっているのではないか。日本人はある制約条件のもとで課題を与えられると、それに対する答えの見つけ方はうまいけれども、制約や条件がなくて、「何かを考えなさい」といわれたときにはとても弱いのではないか、ということです。見えている課題の背景にあるのは何なのだろうか、本当の課題は何なのだろうか、潜在的な課題は何なのだろうかというふうに、見えていない課題までうまくアプローチして、そこから解決策を見つけていかないと、得点はとれない。

欠けているのは、見えない課題、潜在的な課題をうまく見つけてきて、それをいかに科学技術で解決できるかということらにつなげる、この辺がエンジニアリングとしての課題ではないかと思いついたわけです。

#### 日本のエンジニアとアメリカのエンジニアでは発想が違う

**赤松** 今、アメリカ人は課題を見つけることが得意であり、日本人は条件下での課題解決能力が優れているというお話がありました。GE にはアメリカのエンジニアと日本のエンジニアがおられると思うのですが、違いは感じられますか。

**鈴木** ものの発想の仕方の違いを感じます。日本の企業が何かビジネスをするとき、「うちはこのいうものを持っている。これをどうやってビジネスに結びつけようか」と考える。ところが、GE 流のやり方は、「GE としてこういうビジネスをやりたい」というのがまずあるわけです。そのときに、うちにあるものは何か、ないものは何か、それをどうするかということから、トップダウン的に物事がスタートします。日本の場合には、手に持っている技術をいかに新しい製品に結びつけていくかという、ボトムアップというか、それがとても強いです。

**赤松** ボトムアップ型のアプローチは、よく言えば「強みを生かす」ということになるのですが、このやり方は、高度経済成長期における多角化の教科書的なやり方でしたね。これが、必ずしも GE の場合はそうではないということですね。

**鈴木** ええ。私達は TAM (Total Available Market) という言い方をよく使います。例えば、GE は発電がとても強かったのですが、二、三十年前に送変電のネットワークビジネスをやめてしまった。ところが、世界では 80 兆円くらいの送変電のマーケットがあるので、送変電のビジネス

をもう一回やりましょうということになりました。GEに残っていた技術は、変圧器はあるけれども、遮断器や系統制御システムはない。では、ビジネスをするためにはどうしたらいいかということから考えるわけです。技術としてはほとんどないわけですから、ない部分をどうするか。自分たちで研究開発するのか、あるいはどこかを買収するのか、あるいはパートナーングをするのかというオプションになる。

日本の会社の場合は、変圧器の技術を持っていると、変圧器を中心にその周辺の製品をラインナップして電力でビジネスをしようと考える。このように全く違います。

**赤松** ポトムアップ型ではないですね。企業経営としてのやり方がそういうスタイルだということだと思うのですが、「会社としてはこういう方針がある。これをやりたい」といったときに、日本とアメリカでは現場のエンジニア自身もそういう発想の違いみたいなものはあるのでしょうか。

**鈴木** あると思います。原因はわかりませんが、教育もあるかもしれません。日本の小学校の算数は「 $5 + 7 = ?$ 」と聞く。ところが、アメリカでは「 $? + ? = 10$ 」というふうな前の2つの数字を埋めなさいという。5 + 7 だったら、答えは12しかないでしょう。そういうふうな問題の与えられ方をされていて、それに慣れてしまっている、というような気がします。

私が例としてよく挙げるのは、日本のエアコンです。これは、とても効率が高い。インバータを使ったり、ヒートポンプを使ったりして、とても緻密な技術を使っている。また、ハイブリッド自動車についても、ガソリンの内燃機関と電池のモーターがうまくコンバインしている。ああいうことができてしまうので、そこで解決しようとしてしまう。

**赤松** なるほど、日本の科学技術分野において、イノベーションのために欠けているものということで、根本的エンジニアリングが必要だということですね。



赤松 幹之 氏

**鈴木** 潜在的課題を見つけ、制約をはずして取り組むことを「根本的エンジニアリング」という名前にしました。他に候補として、ホロニックエンジニアリング、包括的エンジニアリング、生態学的エンジニアリング、トランスフォーマーエンジニアリング、あるいは日本型コンバージングテクノロジー等々あったのですが、既存のエンジニアリングのもう一つ上のレベル、形而上学的なメタのエンジニアリングとしてもう一度定義し直そうということで、最終的には「根本的エンジニアリング」にしよう。 “根本的”を英語にすると“radical”ですが、日本では“先鋭的”という意味になってしまうので、英語では“Meta engineering”という言い方をしています。

### 根本的エンジニアリングとは四つのプロセスをスパイラルに循環させること

**赤松** 根本的エンジニアリングでは課題を見つけるプロセスが大事だというお話がありました。

**鈴木** スタートポイントだということです。今、四つのプロセスと言っているのですが、潜在的な課題、埋もれている課題を見つけ、それに対して必要な科学技術を見つける。既存の科学技術で解決できなければ、分野や技術を融合する、そして、最終的に課題への取り組みをうまくインプリメントする。その中でまた新しい課題を見つける……というふうな、四つのプロセスがグルグル回るというイメージを大事にしていきたいと思っています。

**赤松** その「回る」ということなのですが、潜在的な課題を見出して、それに必要な技術を探して、統合して、実際に課題を解決する、そこで終わりになってもいいような気がするのですが、さらに新しい課題を見つけるというプロセスにもっていかなければいけないというふうな考えるのはなぜでしょうか。

**鈴木** イノベーションは継続しないと意味がないということが一つあります。グルグル回りながら、サイクリックに社会自身が良くなっていく、あるいはイノベーションが継続的に起きていくという、そういうところに結びつけたいということです。

**赤松** そういう意味では、フィードバック的な意味のサイクルというよりはスパイラル的な意味ですね。要するに、新しいものが導入されることによって、世の中が変わって、また別の潜在的な課題が出てくる。

一番難しいのは、潜在的な課題発見ということだと思います。

うのですが、何がキーポイントとなるのでしょうか。

**潜在的な課題発見のポイント**

**鈴木** 具体的な案はなかなか見つからないのですが、マーケティングで考えてみましょう。

ある営業マンがお客さんのところに行くと、お客さんが「ジュースを飲みたい」と言う。日本の会社ですと、高級なジューサーミキサーを買ってきて、フレッシュなフルーツを買って、ジュースをつくって持っていく。そうすると、お客さんは100%満足して、例えば10ドルで買ってくれる。しかし、原価は、ジューサーミキサーを買ったり、新鮮な果物を買っているので9ドルかかる。売上が10ドルで利益が1ドル。日本の会社だと、これでとても評価される。顧客満足度も100%です。

しかし、例えばGEが本当の課題に迫ろうとしたら、お客さんに「ジュースが欲しい」と言われると、「なぜジュースが欲しいのですか」と聞くわけです。お客さんが「喉が渴いているから」と答えると、水を持って売りにいく。そうすると、お客さんは喉の渇きは解決できます。あるお客さんは「コーラが欲しい」と言っているけれども、喉が渴いているのかもしれない。こうやって喉が渴いているお客さん10人に売れたとします。一杯を1ドルで売ったとして、売上は同じく10ドルです。しかし、水は原価が安いですから、例えば10杯の原価が5ドルだとすると利益は5ドルです。

このように、ビジネスのやり方が違いますが、日本では、「本当に何が必要なのか」というところを問うプロセスがどうも欠けているような気がするのです。私は、エンジニア自身もそういう意識を持って課題に対して取り組んでいく必要があるのではないかと考えているのです。日本人は、How

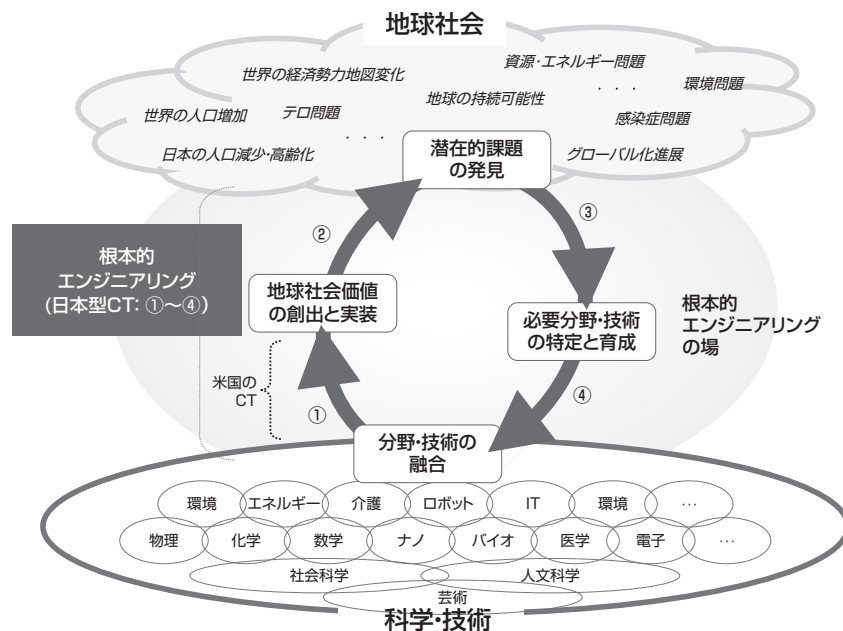
ばかりに目が行く。本屋でもハウツーものはよく売れています。けれど、その後ろにWhatがあって、本当に何が必要なのか、それがWhy、なぜ必要なのかというところまで探らないと、隠れている課題、潜在的な課題は出てこない。その辺は産総研がやっているシンセシオロジーにかなり近いのではないかと思います。

**赤松** ジューズの例でいくと、Whatは、いわばジュースが欲しいと言っているレベルであって、どういうジュースをつくるかがHow。けれども、Whyは、なぜジュースが欲しいのか、喉が渴いているからか、ということまでいくということですね。

従来のエンジニアリングのあり方はWhatを与えてHowをつくるということですが、そうではなくて、そのWhatがなぜきているかということまで立ち戻って、Whyを考えましょうと。

**鈴木** 私達のタスクフォースでも引き続き議論をしているのですが、それには二つ大きなポイントがあるだろうと考えています。一つは、やはり教育です。教育の中でこういったことが実現できるような人をどうやって育てたらいいのかということと、もう一つは根本的エンジニアリング自身を研究してみる。事例研究も含めて、学問的に捉えられないかということで、今、その二つの線で追求していこうと思っています。

教育では、アメリカではディベートが必ず授業の中であり、土俵を変えたり、見方を変えてみたり、視点を変えながら議論が進んでいく。日本では、授業であまりディベートは好まれないですね。



**赤松** いったん見方を切り換えて、何をなすべきかという議論をする。そういう訓練が日本では足りないのかなという気もします。

**鈴木** 先日、日本工学アカデミーとイギリスの王立工学アカデミーとで、町で人の写真を撮ってセキュリティ対策をするというシンポジウムがありました。日本からはテレビカメラでどうやってパターン認識をするかとか、どういう角度でカメラを置いたらいいかという議論が多いのですが、イギリスは、制度をどうするかと。個人の情報なので、それをどうやってプロテクトしながら国としてのセキュリティを生かしていくかという制度そのものにかかわる議論から入るのです。その辺がもの見方が少し違っているのかなという気がしました。

**赤松** 技術系の人間が制度のところまで口を出す習慣がない、というところがありますね。役割として、技術関係をやればいいのだと。

**鈴木** そう、おっしゃるとおりです。そこでいいのだと思ってしまうのです。その枠をうまく取り払えるような教育ができると面白いですね。

**赤松** 視点の切り換えみたいなものが大事だと思うのですが、エンジニアも同じところにずっといると視点がどうしても固定化しがちです。GEではいろいろな技術があると思うのですが、違う部署に行くということはあるのでしょうか。

**鈴木** GEでは、わりと人のモビリティが高くて、セールスをやっていた人がマーケティングに行くとか、私達は事業開発と言っているんですけども、アキュイジション（Acquisition）の担当になるとか、あるいはプロジェクトマネジメントをやるとか、いろいろな業種を経験して、その中で自分のエキスパートイズ（Expertise）を高めています。



鈴木 浩氏

18カ月あるポジションにいと、ほかに移る権利が発生するのです。

**赤松** 権利なのですか。この動くことを推進するようなインセンティブはあるのですか。

**鈴木** 人材募集をするサイトがあります。COS（キャリア機会システム）といって、どの国のどの身分の、どのような職種が人を求めているかが表示されています。容易に異動先情報が得られるようになっているのです。また、ポジションが変わるときに給料の仕組みが変わりますから、それは個人にとってとても大きなインセンティブです。能力のある人であれば、給料がそこで必ず上がりますので強い動機になります。もちろん、逆にポジションがなくなってしまうということもあります。

### シンセシオロジーと根本的エンジニアリングの接点

**赤松** 根本的エンジニアリングによるイノベーションの推進を考えると、潜在的な課題発見が重要であり、そのためには視点の切り換えも大切だということですが、事例研究以外にどんなことが考えられるでしょうか。

**鈴木** まだ具体的なアイデアはないのですが、イノベーションの成功事例を持ってくるといいのか、あるいは失敗した例をどこまで見つけられるかわかりませんが、なぜイノベーションに結びつかなかったのか。逆にいうと、日本はものづくりが得意で、いいものがいっぱいできているけれども、その限界は何かというところを調査できると面白いと思います。

What と How に戻るので、 “ものづくり” という “もの” と “つくり” の掛け算になっているでしょう。日本ではつくるほうばかり、How のほうに力を入れているのだけれども、本当は “もの” のほう、What が大事なのではないか。What と How があって、初めて “ものづくり” になっていると思うのです。

アメリカは、どういうものをつくるのかというところがとても強いので、つくり方が多少弱くてもそれはどこかにソーシングすればいい。たくさん作っているうちにいいものができるようになる。結局、掛け算すると大きなイノベーションにつながってきます。

**赤松** 企業の中で、エンジニアにアイデアがあっても、それが製品化するプロセスにのらなったり、マネージャークラスの意思決定が既存型の製品だけにしかゴーサインを出さないなど、これまでの発想と違うものを製品化すること

に対して、ある種の判断力が足りないのではないかという気もします。そういう意味で、技術経営と根本的エンジニアリングは関係があるのでしょうか。

**鈴木** かなり密接な関係があると思います。技術経営の経営とは、必ずしもビジネスの経営ではなくて、その技術をどのようにうまく使っていくかということでもあります。先ほど“ものづくり”は“*What*”と“*How*”の掛け算と言いましたが、“技術経営”も“技術”と“経営”の掛け算だと思っているのです。技術だけ良くて経営が良くなかったらだめだし、逆に経営が良くて技術がないとだめなので、その辺のバランスをうまく掛け算として積み上げていくことが必要です。そこに根本的エンジニアリングはかなり大きなウエートを占めるのではないかと思います。

**赤松** では、経営だけをやってきた人たちは根本的エンジニアリングをできるのでしょうか。シンセシオロジーでは、技術というか、研究の対象をよく知っているからこそ、初めて次の展開を考えられるのではないかとも思っています。これは研究者の能力として必要なことではないかと考えているのですが、根本的エンジニアリングは、そこはどうなのでしょう。

**鈴木** 私達は、むしろ技術のほうを中心に議論しているので、直接結びついているかどうかかわからないのですが、シンセシオロジーにレスターさんのインタビュー記事<sup>注)</sup>がありましたよね。レスターとピオーレが「イノベーション、失われた次元」という本で言っているのは、「これからのイノベーションは分析的ではなくて解釈的に起きる」ということです。私達も今までわが国ではそういう視点が欠けていたのではないかという気がして、その意味で、エンジニアリングも単に分析のためのエンジニアリングではなく、それを拡張して解釈に結びつけていくことが大切だと思っています。当然、エンジニアリングでエクスペルタイズをもっている人はそれが得意だと思いますので、今のところは分析のことしかやっていないけれども、そのバックグラウンドをもっとうまく生かして、解釈的なプロセスに入っていけば、根本的エンジニアリングとつながってくるのかなという気はします。解釈の中にはシンセシオロジー的な考え方も当然入ってきますから、その辺の分析と合成みたいなものがうまく同じバックグラウンドの中で広がりをもってくと面白いイノベーションにつながると思います。

**赤松** もう一つ、アメリカでは、かかわった人が本当にマーケットをつくらうということまですごく力を入れてやり

ますね。日本は、いい技術ができました、というところで終わってしまうことが多い。

これは想像なので間違っているかもしれないのですが、国からのファンディングを受けた時に、それが「技術開発につなげればいい」というふうに思っている企業の方が多いのではないのでしょうか。国は市場化するためにファンディングしているので、そこまで責任を持って、ファンディングを受けて欲しい、と思うことがあります。

**鈴木** おっしゃるとおり。技術開発だけに枠をはめている。日本が目指すべきは全体体系をとらえて必要性を重視することだと思います。

**赤松** シンセシオロジーの論文を見ていると、技術があるところまで必ず持っていこうという、研究者としての強い意思が不可欠な感じがします。

**鈴木** そうですね。そういう意味では、この根本的エンジニアリングはグローバルに提言できるかなと思っているのです。日本はつくるところがとても得意ですから、強みは強みとして、これまで蓄積した経験を最大限に活用し、弱いところをうまく強化して、潜在的課題の発見から、必要な科学技術の特定と育成、そして分野・技術の融合から社会価値の創出、また潜在的課題の発見というように、スパイラルに回るプロセスに持っていけるといいと思います。

**赤松** 最終的なゴールは何か、それに対してこの技術をどのように使うのかということに常に立ち戻って考える、それも“しつこく”考えるという力がイノベーションを起こすのに必要なのだと思います。根本的エンジニアリングとシンセシオロジーの接点が見えたような気がします。興味深いお話をありがとうございました。

本インタビューは2010年5月13日、港区赤坂にあるGE Energyにおいて行われました。

**注)**リチャード・レスター、小林直人: インタビュー シンセシオロジーへの期待, *Synthesiology*, 1 (2), 139-143 (2008).

#### 略歴

鈴木 浩 (すずき ひろし)

1946年12月25日、東京生まれ。1969年東京大学工学部電子工学科卒業。1974年東京大学大学院博士課程修了、三菱電機株式会社入社、中央研究所、電力系統技術部長、電力変電技術部長、電力システムエンジニアリングセンター長を経て、役員技監。2003年GEに転職、新規事業担当の技監。電気学会副会長、日本工学アカデミー理事、IEEEフェロー、技術経営日本支部長などを歴任。電気学会電気技術史技術委員会副委員長。専門分野はエネルギーシステム、技術経営。工学博士。

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

## 研究論文の記載内容について

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

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

## 対象とする研究開発について

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

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

## 査読について

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

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

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

## 参考文献について

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

## 掲載記事の種類について

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

## 執筆要件と査読基準

(2008.01)

|   | 項目            | 執筆要件   | 査読基準  |
|---|---------------|--|---|
| 1 | 研究目標          | 研究目標（「製品」、あるいは研究者の夢）を設定し、記述する。                                       | 研究目標が明確に記述されていること。                                    |
| 2 | 研究目標と社会とのつながり | 研究目標と社会との関係、すなわち社会的価値を記述する。  | 研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。                            |
| 3 | シナリオ          | 研究目標を実現するための道筋（シナリオ・仮説）を科学技術の言葉で記述する。                                | 道筋（シナリオ・仮説）が合理的に記述されていること。                            |
| 4 | 要素の選択         | 研究目標を実現するために選択した要素技術（群）を記述する。<br>また、それらの要素技術（群）を選択した理由を記述する。         | 要素技術（群）が明確に記述されていること。<br>要素技術（群）の選択の理由が合理的に記述されていること。 |
| 5 | 要素間の関係と統合     | 選択した要素が相互にどう関係しているか、またそれらの要素をどのように構成・統合して研究目標を実現していったかを科学技術の言葉で記述する。 | 要素間の関係と統合が科学技術の言葉で合理的に記述されていること。                      |
| 6 | 結果の評価と将来の展開   | 研究目標の達成の度合いを自己評価する。<br>本研究をベースとして将来の研究展開を示唆する。                       | 研究目標の達成の度合いと将来の研究展開が客観的、合理的に記述されていること。                |
| 7 | オリジナリティ       | 既刊の他研究論文と同じ内容の記述をしない。  | 既刊の他研究論文と同じ内容の記述がないこと。                                |



# 投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

改正 2009年3月23日

改正 2010年8月5日

## 1 投稿記事

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

## 2 投稿資格

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

## 3 原稿の書き方

### 3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

### 3.2 原稿の構成

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3 書式

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

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

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

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

は刷り上りで左右15 cm以下、白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

#### 4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

#### 5 著者校正

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

#### 6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

#### 7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

## MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

*Synthesiology* Editorial Board

Editor in Chief: A.Ono

Senior Executive Editor: N.Kobayashi, M.Seto

Executive Editors: M.Akamatsu, K.Naito, T.Ishii

Editors: S. Abe, K. Igarashi, H. Ichijo, K. Ueda, A. Etori, K. Ohmaki, Y. Owadano, M. Okaji

A. Kageyama, T. Kubo, T. Shimizu, Y. Jigami, 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 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](mailto: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 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](mailto: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 Publication Office, Public Relations  
Department, National Institute of Advanced  
Science and Technology(AIST)  
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212  
E-mail: [synthesiology@m.aist.go.jp](mailto:synthesiology@m.aist.go.jp)



# Synthesiology

## Workshop —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Hubに向けた技術統合の方法論

参加費無料  
事前申込不要

**会場** 産総研つくばセンター 中央第一  
共用講堂 大会議室

**日時** 2010/10/15 **金**  
<13:30~16:00>

産総研では10月14、15日に「産総研オープンラボ」を開催いたします。その中の講演会の一つとしてシンセシオロジーワークショップを企画いたしました。

イノベーションの推進には、多様な技術を統合する構成的研究を、組織を超えてオープンに推進していく必要があります。しかし、これまでの研究開発は分析的方法論で進められ、構成的研究の方法論ははっきりしません。また、構成的研究の成果も知識として継承されるに至っていません。

産総研では、産業界と密接に連携し、社会のニーズや製品の機能から技術を組み上げる構成的研究を積極的に推進しています。そして、そのような研究の成果を知識として蓄積するための学術雑誌「シンセシオロジー」も発行しています。本ワークショップでは、シンセシオロジー誌にこれまで掲載された学術論文を検討し、この構成的研究の類型化を試みるとともに、イノベーション推進の方法論について、構成的研究開発を自ら推し進め、多くの実績を挙げてきた産業界の研究者とともに議論します。

### 13:30 開会挨拶

産業技術総合研究所 副理事長  
シンセシオロジー編集委員長

小野 晃氏

### 13:35 問題提起

「イノベーション創出に向けた構成的研究の類型化」  
早稲田大学研究戦略センター 教授  
シンセシオロジー副編集委員長

小林 直人氏

### 14:00 総合討論

#### パネラー

GE エナジー・ジャパン株式会社 技監  
日本工学アカデミー政策委員会 TF 幹事

鈴木 浩氏

三菱プレジジョン株式会社 取締役社長  
元・三菱電機株式会社 役員理事 通信システム事業本部 副本部長

北山 忠善氏

元矢崎計器株式会社 常務取締役  
元トヨタ自動車株式会社 ボデー設計部室長

伊藤 肇氏

早稲田大学研究戦略センター 教授  
シンセシオロジー副編集委員長

小林 直人氏

#### 司会

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長  
シンセシオロジー編集担当幹事

赤松 幹之氏

### 16:00 閉会

お問い合わせ

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 広報部出版室内

TEL:029-862-6217 FAX:029-862-6212 Email:synthesiology@m.aist.go.jp http://www.aist.go.jp/synthesiology

## 編集後記

研究開発の「死の谷」や「悪夢の時代」を乗り越える方法論や、社会との接点で技術が社会に受け入れられていくプロセスを「社会技術」として確立する方法論を、人類共通の財産として見える形で体系化しようとする試み、また、世界に対して発信していこうという試みが「シンセシオロジー」の目指している目標です。特に、構成学（シンセシス）の観点で他の技術と融合・連携しながら、一つの技術として社会に受け入れられていくプロセスの記述を重要と考えています。

本号でも、「遺伝子解析の精度向上と試薬の開発-ライフサイエンスに用いる化学試薬の製品化-」で、「死の谷」を乗り越える方法論や「社会技術」としての確立のプロセスが、研究の展開についての考察として記述されており、死の谷を乗り越える方法論や社会技術として有効と思われる点がいくつか挙げられます。

まず、第一に、(1) DNAチップなどで医療応用が急速に進んでいる分野での技術ニーズとして、合成したDNAを基板上に結合させるリンカーと呼ばれる結合部分に機能を持たせることにより、リンカーを結合できなかったDNAを除去しやすくすると共に、DNAが目的とする標的分子と疎水的相互作用により結合しやすくすることが重要であることを見出した点です。合成DNAの純度を上げることと、標的分子の補足割合を増やすという技術ニーズを

的確に把握し、それを実現するアイデアを提言できた点が極めて有効なポイントです。

次に、(2) 大量に製造し、DNAチップとしての性能評価をすることで社会技術を確立するプロセスで、企業の方々の技術と共同研究を進めながら安定性を実現するための大きな改良を加え、従来の技術との差別化を実現して商品化まで到達した点が、極めて有効と考えられます。たくさんの苦労をしながらも死の谷を乗り越え、大量生産や安定性の確保、従来の技術との差別化などの社会技術として確立し、実用にまで結びつけた点は極めて高く評価されますし、多くの技術開発にとって参考になるものと思われます。

さらに、著者らは、技術ニーズにとらわれずに新たなアイデアも入れたいと述べていますが、リンカーに機能を付加することによりDNAチップの機能を拡大させることは重要な社会ニーズであり、新たなニーズを把握し、それに対するアイデアを提案できている状況が現在の状態ではないかと思われます。

シンセシオロジーに投稿された論文から、死の谷の越え方や社会技術としての確立のプロセスを自分なりに整理してみるの、研究開発と一緒に参加できたように思われ、とてもうれしい体験でした。

(編集委員 矢部 彰)

Synthesiology 3巻3号 2010年8月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

---

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、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）：石井 武政

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、地神 芳文、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 広報部出版室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒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出版室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



## Messages from the editorial board

### Research papers

Developing an evaluation system of visually induced motion sickness for safe usage of moving images

*-Fermentation of a social understanding to supply secure and comfortable images through integration of researches on human characteristics, image analysis technique and image production technique-*

H.Ujike

An optimum design method utilizing a strategic system design concept

*-Reduction of CO<sub>2</sub> emission at a data center by reusing emitted heat for agriculture-*

J.Fukuda and T.Hibiya

A methodology for improving reliability of complex systems

*-Synthesis of architectural design method and model checking-*

A.Katoh, M.Urago and Y.Ohkami

National electrical standards supporting international competition of Japanese manufacturing industries

*-Realization of a new capacitance standard and its traceability system-*

Y.Nakamura and A.Domae

Development of novel chemical reagents for reliable genetic analyses

*-Process from an original idea to marketing of a chemical product used for life science-*

Y.Komatsu and N.Kojima

Development of a sensor system for animal watching to keep human health and food safety

*-A health monitoring system for chickens by using wireless sensors-*

T.Itoh, T.Masuda and K.Tsukamoto

### Interview

Meta Engineering that promotes innovation

H.Suzuki and M.Akamatsu

### Editorial policy

### Instructions for authors