

# Synthesiology

適応学習型汎用認識システム: ARGUS

ヒューマノイドロボットのコンテンツ技術化に向けて

水素センサーの研究開発

超高精細映像送受信を支える光通信ネットワークの実証実験

論文補遺: PAN系炭素繊維のイノベーションモデル

シンセシオロジー編集委員会

## 「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかせたままでは<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4巻第2号(2011.5) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
<b>研究論文</b>	
適応学習型汎用認識システム: ARGUS — その理論的構成と応用 — ···大津 展之	70-79
ヒューマノイドロボットのコンテンツ技術化に向けて — クリエイターによる多様な表現の創出が可能な 二足歩行ヒューマノイドロボットの実現— ···中岡 慎一郎、三浦 郁奈子、森澤 光晴、金広 文男、金子 健二、梶田 秀司、横井 一仁	80-91
水素センサーの研究開発 — 水素安全技術から国際規格まで— ···申 ウソク、西堀 麻衣子、松原 一郎	92-99
超高精細映像送受信を支える光通信ネットワークの実証実験 — ダイナミック光パス・ネットワーク映像配信 実験 — ···来見田 淳也、並木 周	100-110
論文補遺: PAN 系炭素繊維のイノベーションモデル — 励振モデル: 研究者の活動とマネージメントの相乗効果— ···中村 治、大花 継頼、田澤 真人、横田 慎二、篠田 渉、中村 修、伊藤 順司	111-114
<b>座談会</b>	
シンセシオロジー 3 周年記念座談会	115-120
<b>編集委員会より</b>	
編集方針	121-122
投稿規定	123-124
編集後記	131
<b>Contents in English</b>	
<b>Research papers (Abstracts)</b>	
ARGUS: Adaptive Recognition for General Use System — Its theoretical construction and applications — --- N. OTSU	70
Toward the use of humanoid robots as assemblies of content technologies — Realization of a biped humanoid robot allowing content creators to produce various expressions — --- S. NAKAOKA, K. MIURA, M. MORISAWA, F. KANEHIRO, K. KANEKO, S. KAJITA and K. YOKOI	80
Thermoelectric hydrogen gas sensor — Technology to secure safety in hydrogen usage and international standardization of hydrogen gas sensor — --- W. SHIN, M. NISHIBORI and I. MATSUBARA	92
Demonstration of optical communication network for ultra high-definition image transmission — Proof-of- concept experiment of image distribution over the dynamic optical path network — --- J. KURUMIDA and S. NAMIKI	100
Paper supplement: Study on the PAN carbon-fiber-innovation for modeling a successful R&D management — An excited-oscillation management model — --- O. NAKAMURA, T. OHANA, M. TAZAWA, S. YOKOTA, W. SHINODA, O. NAKAMURA and J. ITOH	111
Messages from the editorial board	125-126
Editorial policy	127-128
Instructions for authors	129-130

# 適応学習型汎用認識システム：ARGUS

## — その理論的構成と応用 —

大津 展之

近年、映像の監視や目視検査等、さまざまな分野で視覚システムのニーズが高まっている。特に、簡便で高速な実用的な視覚システムの実現が望まれている。この論文では、その目標に向けて筆者がこれまで行ってきた理論研究とその応用について概説する。まずこれまでのアプローチの問題点を指摘し、基礎としてのパターン認識の基本的な枠組、特に特徴抽出理論について言及する。次にその実践として提案した高次局所自己相関と多変量解析手法の2段階の特徴抽出からなる適応学習型汎用認識方式と、その応用事例を示す。実験結果は本方式の柔軟で効果的な性能を示している。

**キーワード：**視覚システム、パターン認識、特徴抽出、適応学習

## ARGUS: Adaptive Recognition for General Use System

### – Its theoretical construction and applications –

Nobuyuki OTSU

In recent years, the need for computer vision systems is increasing in various fields, such as security monitoring and visual inspection. It is crucial to realize simple and high-speed vision systems especially for practical usage. This paper addresses the author's theoretical research and its applications developed thus far in working toward this goal. First, the problems of the conventional approach are pointed out, and the general framework of pattern recognition, in particular the feature extraction theory, is explained as the theoretical foundation of the present research. Then a scheme of adaptive vision system with learning capability is presented, which comprises two stages of feature extraction, namely, Higher-order Local Auto-Correlation and multivariate data analysis. Several applications are demonstrated, showing the flexible and effective performance of the proposed scheme.

**Keywords :** Vision system, pattern recognition, feature extraction, adaptive learning

### 1 はじめに

近年、視覚システム（コンピュータービジョン）への期待が大き。防犯分野での監視カメラ、生産分野での製品の外観検査、医療分野でのCT画像解析や組織検査、スポーツ分野での動作解析や評価、さらにはインターネットでの画像検索、ロボットの視覚等、多岐の分野にわたっている。その背景には、CCDカメラや各種センサー技術の発達、さらにはコンピューターや可視化技術の発達により、さまざまな画像の収集と処理が容易になっていることが挙げられる。

これらのニーズに呼応して、画像認識の研究が国際的にも盛んに行われているが、いまだ自動化や実用化は難しく、個別のアドホックな手法や専用の高価なシステムとなっていて、実際の場面ではいまだ人の能力に頼っているのが現状である。できればPCベースでの簡便で安価な、しかも高速で汎用性の高い柔軟な視覚システムの実現と普及が

強く望まれている。

この論文では、この目標に向けて筆者がこれまで行ってきたパターン認識の理論<sup>[1]</sup>、特に特徴抽出理論<sup>[2]</sup>と、それに基づく実践的なシステム構成方式として提案した適応学習型汎用認識システム<sup>[3][4]</sup>、およびそのさまざまな応用展開について論ずるとともに<sup>[5][6]</sup>、認識（一般に情報）システムの構成法においては特に理論的アプローチが有効かつ重要であることを示す。

### 2 従来方式とパターン認識

まず、パターン認識としての画像計測や画像認識の問題を考えてみよう。図1-a)は、大小2種類の粒子(円)があって、それぞれの個数を数え上げる画像計測(計数)の課題である。通常考える方式は、次のような逐次方式であろう。まず画面をスキャンして個々の粒子を切り出し、個別に円で近似してその半径を測り、半径の大小によって粒子

の大小を判定して数え上げる。しかし、これでは、明らかに計算時間は対象の個数に比例して増大してしまう。

一方、図1-b)は、それぞれの対象（動物）が何であるかを答える画像認識の問題である。通常、これら四つの対象を識別する（部分的な）特徴は何かと考えるであろう。それぞれのモデルに照らして、耳や尾、体型等を、部分画像として（あるいは数量化して）照合し、最終判断を行う。しかし、全体の認識が部分の認識に帰着されていて、部分の認識を誤れば全体の認識を誤る。

従来方式のほとんどは、このように、まず画像から個々の対象を切り出し、あらかじめ用意したモデルに照らして認識を行う「逐次手順型」の方式である。しかし、一般にパターンはさまざまな変形を伴うので、モデルもそれに応じてさまざまに複雑なものを用意しなければならない。また、逐次手順では各段での処理の誤差が累積するため全体として脆弱となり、計算量も多く、実用に足る認識性能を得ることは難しい。画像レベルでアドホックに論理的な手順として考えがちな所に問題がある。ある意味で、ノイマン型計算機のプログラミングのパラダイムに支配されたアプローチである。

これに対するアンチテーゼとして、1980年後半からニューラルネットによる「並列学習型」の方式が提唱され<sup>[7]</sup>、その理論的性質の研究と共に、特にパターン認識や制御へのさまざまな応用が試みられてきた。しかし、素子の非線形や値域限定 [0,1] の制約から、一般には情報表現や特徴抽出の問題が曖昧となる嫌いがあり、さらにはモデルの恣意性や学習の速度と収束の問題等もあるため、近年はカーネル法<sup>[8]</sup>等の非線形多変量解析へと流れが変わってきている。

視覚システム、一般に認識システムの新たな方式を考察するためには、その基礎となるパターン認識の一般的な枠組、特に情報表現と特徴抽出について、理論的枠組から再考する必要がある。

### 2.1 パターン認識の一般的な枠組

パターン認識では、一般に時空局在的な関数  $f$  で表される信号としてのパターンから、認識に有効な何らかの特徴

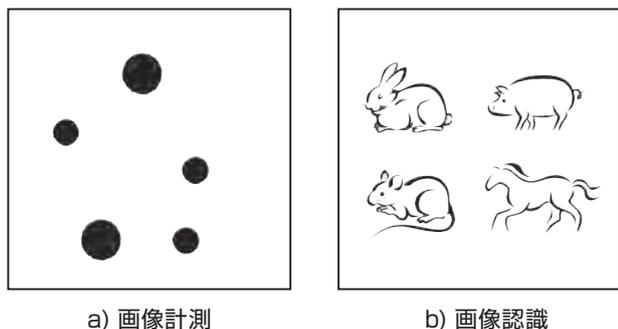


図1 視覚認識課題の例<sup>[6]</sup>

値（一般に関数の関数としての汎関数  $x_i = \phi_i[f]$ ）を複数抽出して（したがってベクトル  $x$  で表現して）認識を行う。通常、これは図2に示すように、「特徴抽出」と「認識」の2段階処理の枠組として考えられている。認識には識別と類別とがある。識別は、入力パターンが既知の概念のいずれかを判定することであり、学習段階で答えが与えられる意味で教師有り学習と呼ばれる。類別は、教師無し学習と呼ばれ、入力パターンを幾つかの類（概念）に別けて区別することである。識別に関してはすでに多くの手法が提案されていて、誤識別率最小の識別方式は、事後確率  $P(C_j|x)$  が最大となる概念  $C_j$  に決定するベイズ決定方式であることがすでに理論的に知られている。したがって、その意味では、前段の特徴抽出が認識システムの性能を左右する要件として重要であるが、これまで認識課題に応じたさまざまなアドホック、あるいは heuristic な手法が提案されてきた。

### 2.2 特徴抽出理論

筆者は、これら特徴抽出の理論的な研究を行ってきた<sup>[2]</sup>。特徴抽出の一般的な枠組としては、幾何学的な側面としての「不変特徴抽出」と統計的な側面としての「判別特徴抽出」があり、この順序でこれら2段階からなる特徴抽出が原理的に重要である。したがって、この理論から帰結されるパターン認識の一般的な枠組は、図3のようになる。

#### 2.2.1 不変特徴抽出（幾何学的側面）

パターンとしての観測像  $f$  は、対象と認識主体との相対的な位置関係や運動により、平行移動、大小伸縮、回転

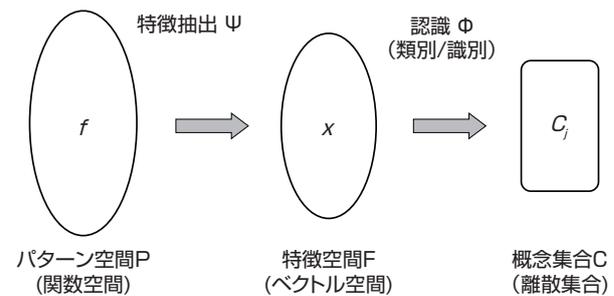


図2 パターン認識の一般的な枠組（通常）

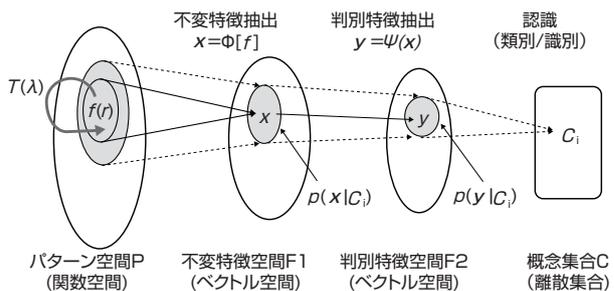


図3 パターン認識の一般的な枠組（詳細）

等さまざまな連続な幾何学的変換（一般には射影変換）を受けているが、認識結果はそれらによらず不変である。不変特徴抽出理論では、パターン関数  $f$  に作用するそれらの概念対応を変えない幾何学的な変換（不変変換と呼ぶ）を作用素  $T(\lambda)$  で表し、その下で不変な特徴値、したがって不変汎関数  $x = \Phi[f]$  を追求する。

$$\Phi[T(\lambda)f] - \Phi[f] = 0 \quad (1)$$

Lie 群論に基づく作用素解析から、必要十分条件として導かれる偏微分方程式の基本解として、与えられた不変変換に対する不変特徴が求まる<sup>[11][2]</sup>。これにより、パターンは、無関係な情報を捨象して認識に本質的な特徴として、理想的には、不変特徴ベクトル空間の1点  $x$  として統一的に捉えられる。

### 2.2.2 判別特徴抽出（統計的側面）

しかし、実際のパターンはさまざまな変形やノイズを含み、概念のクラス  $C_j$  毎に確率的な分布  $p(x|C_j)$  に従い分布する。次段の判別特徴抽出理論では、不変特徴ベクトル  $x$  から次元を縮小した新特徴ベクトル  $y$  への写像  $y = \Psi(x)$  を考え、概念クラスの判別等、 $y$  に関する評価基準を最適化する最適写像を求める。線形写像の場合は、いわゆる多変量解析（例えば判別分析）となり、ある種の非線形写像の場合がニューラルネットやカーネル法である。

究極の最適非線形判別写像は、実は、変分法を用いて次式で陽に求められる<sup>[11][2]</sup>。

$$y = \Psi_N(x) = \sum_{j=1}^K P(C_j|x) c_j \quad (2)$$

この結果は、パターン判別がベイズ事後確率  $P(C_j|x)$  と密接に関係し、パターン認識の背後のベイズ推定の本質的な枠組を示唆している。ここに  $c_j$  は写像先  $Y$  での各概念を代表表現するベクトルであり、判別分析の場合、元の空間  $X$  での概念クラス間の推移確率行列の固有ベクトルとして求まる。得られる最適判別空間の次元は本質的にクラス数から決まり、 $K-1$  次元となることが分る。

実際の応用においては、これらの理論的な枠組を踏まえ

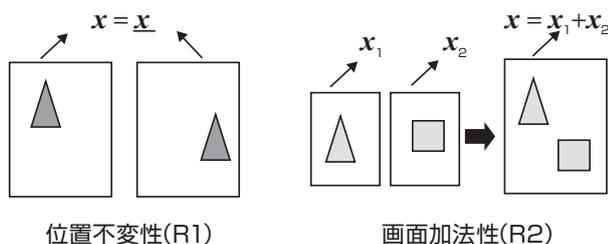


図4 位置不変性と画面加法性<sup>[6]</sup>

て、実用ニーズに照らした適切な簡略化が必要である。

### 3 アプローチと構成法への条件

柔軟な視覚システムへのアプローチと構成法を考えるにあたり、まず、視覚システムに要請される基本的な条件として、次の3点を挙げた（図4）。

R1: 位置不変性、R2: 画面加法性、R3: 適応学習性。

認識 / 計測対象が画像枠のどこにあっても、その認識 / 計測の結果は変わらない。したがって、最初の条件 R1 は、パターンから抽出される特徴  $x$  は対象の位置によらない（平行移動不変である）ことを要請している。不変変換としては、ほかにも大小スケールや回転等も考えられるが、平行移動が最も基本的であるので、これを要請条件とした。

次の条件 R2 は、画面全体に対する特徴が個々の対象の局所特徴の和になることを要請している。これは、R1 からの帰結でもあるが、特徴表現が認識（特に計数）にとって都合の良い表現（線形）となり、後の処理が簡単で高速になるための要請条件である。

最後の条件 R3 は、従来法のように特徴抽出がヒューリスティックな手順として与えられ、認識課題が変わると再度構成法も変わるというのではなく、例からの学習によって課題に適した新特徴  $y$  が初期特徴  $x$  から最適に自動構成（合成）され、課題の変化にも構造を変えることなく適応的に最適化される汎用的な方式であることを要請している。

さらに、これらの要請条件を満たすべく構成される特徴抽出法としては、もちろん計算量が少なく実時間処理が可能であることが望ましい。

### 4 適応学習型汎用認識システム

これらの基本要請条件を満たし、前記のパターン認識、特に特徴抽出理論の枠組を最も簡単な形で実践する「適応学習型汎用画像認識システム」<sup>注1</sup>を考案した<sup>[3][4]</sup>。本システムは、特徴抽出の理論的な枠組にしたがって2段階の特徴抽出からなっている（図5）。

#### 4.1 不変特徴抽出 (HLAC/CHLAC)

初段の初期特徴すなわち幾何学的側面としての不変特徴抽出としては、最も基本的な平行移動（位置）不変な特徴を考えた。認識は基本的に時空間でのパターン  $f(r)$  の位置  $r$  によらないからである。

位置不変な特徴として、音声等時系列解析分野では古くから自己相関関数  $r(\tau) = \int f(t)f(t+\tau)dt$  が知られている。これは波形パターンの位置によらない相対的な関係を抽出している。これを高次へ拡張した  $N$  次自己相関関数

$$x(a_1, \dots, a_N) = \int f(r)f(r+a_1) \cdots f(r+a_N) dr \quad (3)$$

が数学的に知られていて、その2次（一般に偶数次）の高次自己相関は位置不変の完全系となる等、パターン認識応用への幾つかの興味ある性質が論じられている<sup>[9]</sup>。画像の場合は、 $f(r)$ は参照点（画素：pixel） $r$ での濃淡値、 $a_i$ は参照点 $r$ 周りの相対的な変位である。しかし、 $N$ 個の変位の組み合わせによって得られる特徴値の数は指数関数的に膨大となり、それらの計算はほとんど不可能となる。したがって実際の応用には、ある限られた次数、また変位の組み合わせを用いることになる。

実際、一般に実世界のパターンは時空局在化していて、局所的な相対的關係が本質的である。また、この局所限定は、画面加法性（R2）を満たすことにもなる。したがって、

(3) 式の高次自己相関関数を局所変位に限定した高次（ $N$ 次）局所自己相関（HLAC: Higher-order Local Auto-Correlation）特徴を、R1とR2を満たす非線形特徴として考案して採用した<sup>[3][4]</sup>。

HLAC: 実際の2D画像（静止画像） $f(x, y)$ に対しては、次数を2次まで、局所近傍を $3 \times 3$ とすると、位置不変性を考慮して同値でない独立な積和の取り方に関する局所マスクのパターンは25通り（図6）となる。全画面（もしくは部分領域） $XY$ に関して、図6で表される各局所マスクでス

キャンして黒点に対応した画素値の積和を求め、HLAC特徴ベクトル $x$ が得られる。その次元は、濃淡画像の場合には35次元（例えば、No.1のマスクに対しては、 $f, f^2, f^3$ が区別される）、2値（0/1、白/黒）画像の場合には、縮退して25次元となる（例えば、No.1のマスクに対しては、 $f = f^2 = f^3$ と冪等となる）<sup>注2</sup>。

CHLAC: 動画（3D） $f(x, y, t)$ の場合は、2次元の静止画が時間軸に沿って並んだ3次元（立体） $XYT$ の数値データであることから、HLACを時間軸を含めて自然に拡張したCHLAC（Cubic HLAC）特徴を抽出する<sup>[11]</sup>。CHLACの局所 $3 \times 3 \times 3$ マスクの一例を図7に示す。独立な局所マスクのパターンは251通りとなる。HLACと同様に、立体枠 $XYT$ にわたりそれらのマスクで積和を求め、CHLAC特徴ベクトル $x(t)$ が得られる。その次元は濃淡動画の場合は279次元、2値動画の場合は251次元となる。

積分特徴としてのHLAC（CHLAC）による特徴抽出方式は、要請条件のR1（位置不変性）とR2（画面加法性）を満たす基本的で汎用的な「対象の形（と動き）」の特徴抽出方式となっている。これらによって、認識対象は常に統一的に不変特徴空間における1点（ベクトル） $x$ として捉えられ表現される。

#### 4.2 判別特徴抽出 (MDA)

次段の適応学習的な（R3を満たす）統計的判別特徴抽出としては、線形写像としての多種多様な多変量データ解析（MDA）手法を適用する（図8）。これは、HLACもしくはCHLAC特徴ベクトル $x$ の要素の重み付き線形和として、与えられた認識課題に最適な新特徴 $y$ を適応的に求めることであるが（R3：適応学習性）（図5）、線形写像であることから要請条件のR2（画面加法性）を確保している。

同様な方式としてニューラルネットがあるが、非線形ゆえにR2を保存しない。また、最適化に逐次解法を要し、計算時間も掛かる。これに対してMDAは、例からの学習によってタスクに最適な重みが解析的に陽な形で容易に求められる利点がある<sup>注3</sup>。

#### 4.3 認識システムARGUSの特長

これら2段の特徴抽出からなる本方式は、対象の切り出しや位置合わせが不要であり、対象に関する知識やモデ

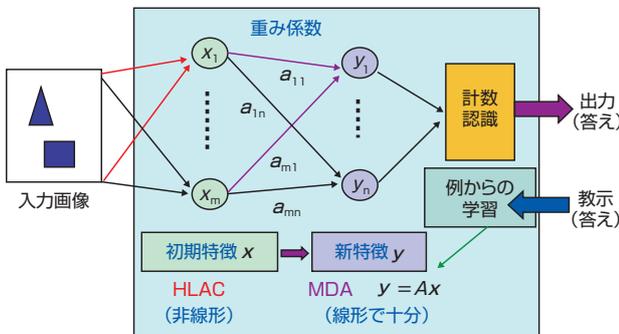


図5 適応学習型汎用認識システム（ARGUS）

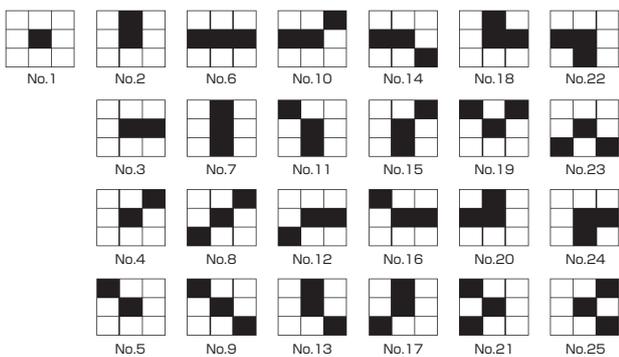


図6 2次までの局所 $3 \times 3$ マスク<sup>[3][4]</sup>

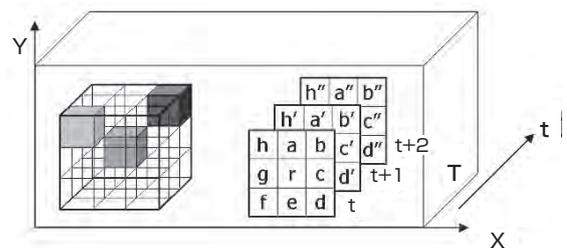


図7 CHLACマスクの例（ $hr'b''$ ）<sup>[5][11]</sup>

ルを一切必要としない点で新しくユニークであり、静止画像や動画のさまざまな認識や計測・計数に応用できる汎用性をもっている。また、基本的に積和演算のみのため、CHLACでも通常のPCで非常に高速な処理（2 msec/frame）が可能である。

## 5 応用事例

### 5.1 複数対象の同時認識（計数）

静止画像の認識として、複数対象を同時認識して計数する課題への応用例を示す（図9）。HLAC特徴の持つ位置不変性と加法性から、因子分析（FA）を用いることで容易に実現することができる。図9の左図の各パターンを一度システムに提示すると、システムはテスト画像（右図）に対して瞬時にそれぞれの個数 $y_i$ を $y = (F^T F)^{-1} F^T x$ として回答する。加法性により、右図全体の特徴ベクトル $x$ は、各パターンの特徴（因子）ベクトル $f_i$ の個数を係数とする線形和 $x = \sum_{i=1}^6 y_i f_i = [f_1, \dots, f_6] y = Fy$ に分解できるからである。

### 5.2 位相的特徴の認識（計数）

次に、形によらない認識の例として位相的特徴の計数結果を図10に示す。重回帰分析（MRA）を用いた例からの

学習により、システムは正しく対象の個数（a）あるいは穴の数（b）を答えている<sup>[4]</sup>。興味深いことに、システムは例から位相幾何学の基礎となるオイラー数（点数-線数+面数）を学習し<sup>注4</sup>、認識に用いていた。

### 5.3 顔認識と表情認識

2値画像に限らず、HLACは濃淡画像に対してもそのまま適用可能である。この応用として顔認識を行った<sup>[12][13]</sup>。多解像度を表す画像ピラミッドの各層からのHLAC特徴を判別分析（DA）で統合することにより、簡単な識別法MDD<sup>注5</sup>でも、119人に対して99%強の高認識率を達成した<sup>[13]</sup>。さらに、困難とされる表情認識を行い、9名の7表情（JAFFE Dataset<sup>[14]</sup>、図11）に対して、HLAC特徴の場所重みも考慮した判別分析とMDDを用いて、80%強の高い認識率が得られた<sup>[15]</sup>。

### 5.4 動作と人の認識

HLAC特徴を動画の場合に自然に拡張したCHLAC特徴を用いて、動画からの対象と動きの認識が可能となる。5人の4動作（左/右方向への歩き/走り）の動画をフレーム差分後2値化し、CHLAC特徴を抽出し、動作と人それぞれに判別分析を適用した結果を図12に示す<sup>[11]</sup>。それぞれの類（概念）が良く塊り分離されていて、CHLAC

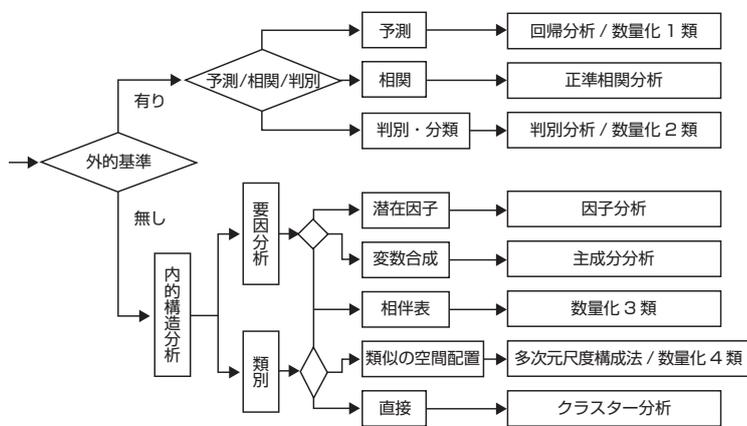
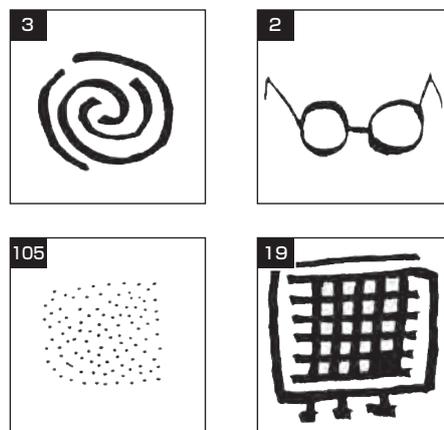


図8 多変量データ解析手法（目的別）

外的基準の有/無は教師有/無に対応する。数量化手法は質的データ（Yes/No, 1/0）の場合の手法である。



a) 対象の個数      b) 穴の数

図10 位相的特徴の認識（計数）<sup>[5][6]</sup>

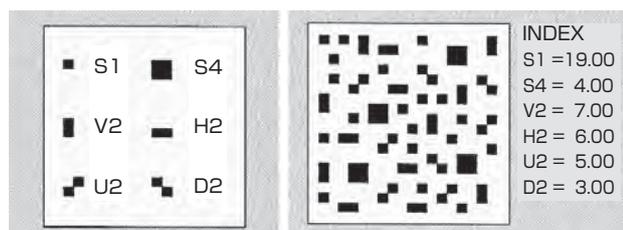


図9 複数対象の同時認識（計数）<sup>[5][6]</sup>



図11 JAFFE 表情データの一部（3名）<sup>[14]</sup>

特徴の有効性を示している。簡単な識別法 MDD でも、ほぼ 100 % の認識が得られた。

### 5.5 Gait認識

近年、遠方からの監視カメラによる個人同定（テロリスト等）のキーとして、gait（歩様）が注目されている。CHLAC + 判別分析 +  $k$ -NN 識別を、米国 NIST が取り纏めている 71 人の gait から個人を認識する Gait Challenge Dataset（図 13）に適用した結果、これまでの上位 5 位までの手法を大幅に上回る世界最高性能を達成した<sup>[16]</sup>（図 14）。

### 5.6 異常検出

CHLAC は、画像中に複数の対象がある場合、それぞれの対象の特徴の和が全体の特徴となる加法性をもつので、通常（正常）動作の特徴ベクトルは、特徴空間（251 次元）のある線形部分空間（通常動作部分空間） $S_N$  に分布することになる。したがって、常時学習（教師無し）で主成分分析（PCA）により  $S_N$  を求めておけば、異常行動は、あらかじめ定義する必要なく、 $S_N$  からの逸脱（距離 / 角度）として直ちに高速かつ高精度に検出・認識される<sup>[17]</sup>（図 15）。

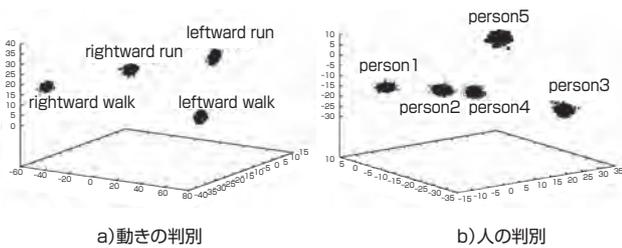


図 12 得られた判別特徴空間<sup>[11]</sup>



図 13 gait 動画とそのフレーム差分

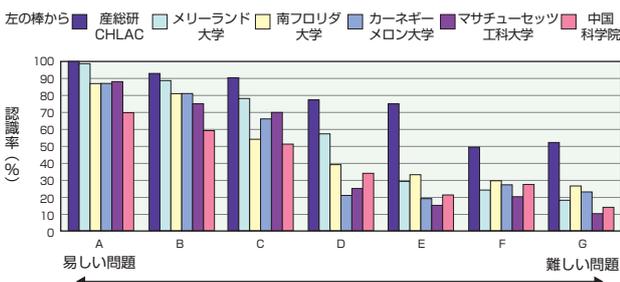


図 14 gait 認識の比較実験<sup>[5][16]</sup>

加法性から複数人の場合でも異常検出力は同じである（図 16）。

この異常検出方式は、すでにエレベーター内の監視カメラ<sup>注6</sup>に実用化されている。

通常例を CHLAC 特徴空間での統計的分布として学習し、そこからの逸脱（通常ではない）として異常を検知する本方式は、対象のモデルや知識を一切必要としない。したがって、監視カメラや車載カメラ等、映像からの異常検出のみならず、他のさまざまな異常検出に広く応用できる。例えば、静止画像の場合には HLAC 特徴空間を用いて、製造分野での半導体基板等の各種外観検査に応用できる（図 17）。

また、HLAC を用いた異常検出は医療分野での各種組織検査、特に癌の病理診断に同様に応用できる。癌は細胞の異常である。癌の病理診断は病理医が臓器組織の構造や細胞の変化の程度を顕微鏡で見て行うが、豊富な経験と知識が必要となる。しかし、経験豊かな病理医は不足しており、病理医の負担は増大している。したがって、そうしたスクリーニング検査の自動化による負担の軽減や、

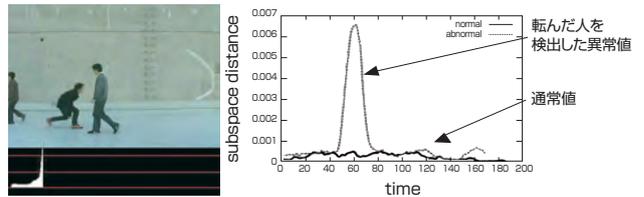


図 15 異常検出の例（ここでは「転ぶ」が異常）

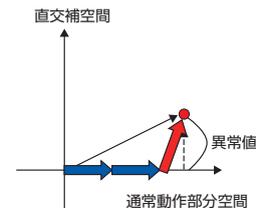


図 16 通常動作部分空間からの逸脱

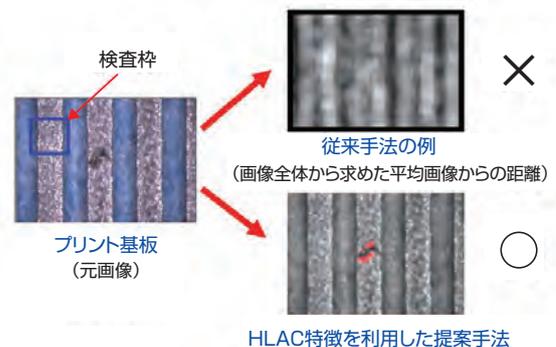


図 17 基板検査への応用例

ダブルチェックによる見落とし防止等、病理医を支援するシステム開発のニーズは大きい。実際の胃癌のリンパ節転移に対してこの方法を適用したところ、病理医の所見に近い解析結果を得ることができた<sup>[18]</sup>（図18）。現在、癌病理診断支援システムの構築を目指し、大学病院や癌センターと共同研究を行っている。

### 5.7 時系列データ解析

画像に限らず、一般にセンシングデータは  $N$  次元 (Ch.) の時系列データ  $\{s_i(t)\}_{i=1}^N, t = 1, \dots, M$  で表される。これらを  $N \times M$  の 2次元配列 (画像) とみなして HLAC 特徴を抽出することもできるが、一般に次元 (Ch.) の添え字  $i$  の順序は随意である。そこで、例えば任意の 3 個の組み合わせをとると、 $K = {}_N C_3$  個の 2次元配列 ( $3 \times M$ ) が得られ、それぞれから  $3 \times 3$  で HLAC 特徴をとると  $K \times$  HLAC の次元の特徴ベクトルが得られる。これを多変量解析 (PCA, DA) することで、時系列データの解析 (異常検出や判別) ができる。この方法は心電図の異常検出<sup>[19]</sup> や多自由度のロボット多指ハンドの動きの解析<sup>[20]</sup> に応用されている。

また、時系列データ間の非対称な相互関係 (相関) として捉えられる因果関係は多くの分野で重要であり、線形自己回帰モデルを用いた解析指標として Granger Causality<sup>[21]</sup> が提案されているが、これを多項式回帰モデル (したがって高次局所自己相関特徴が関係する) へ拡張した<sup>[22]</sup>。さらに因果関係の有無を示す重み関数  $w(t)$  (Causality Marker) を導入し、因果関係の存在箇所を自動的に抽出する方式を提案した<sup>[23]</sup>。

### 5.8 対応関係の学習

対応関係の学習は、一般的な幅広い応用に繋がる。パターン (静止画あるいは動画等) に対する人の判断や評価 (外的規準) の表現、例えばキーワードや印象 (感性) 語の質的表現  $y^{\text{質}}$  や評点  $y$  と、パターンの特徴ベクトル表現 (HLAC/CHLAC)  $x$  との対応関係を学習的に近似 (正準相関分析 CCA や重回帰分析 MRA) することにより、印

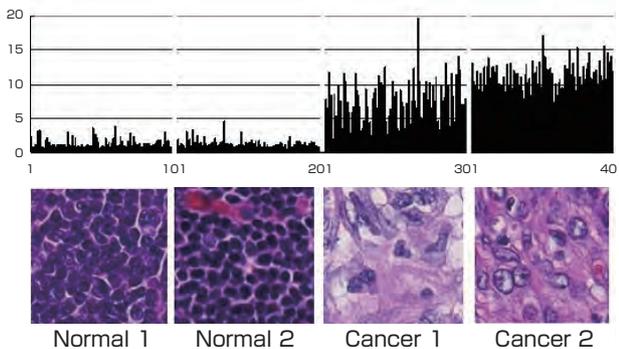


図18 癌検出への応用例 (上図は各標本の異常値)

象検索や双方向検索、さらに自動評価 (予測) が可能となる。図19に家紋の印象検索 (CCA)<sup>[24]</sup> と運動の自動評価 (MRA)<sup>[25]</sup> への応用を示す。

前者はさらに一般画像の検索 (annotation) に応用され<sup>[26]</sup>、後者はスポーツ映像の自動インデキシング<sup>[27]</sup> や、さらには超音波画像からの牛肉の肉質等級 (BMS) 判定にも応用されている<sup>[28]</sup>。

## 6 理論的アプローチの有効性

以上、パターン認識における特徴抽出理論に基づき、基本要請条件を満たすべく構成された適応学習型汎用認識システム (ARGUS) とその応用、特に視覚システムとしての種々の実用について概説した。

物理や化学の科学的アプローチ (現象解明) と異なり、工学応用、とりわけ情報技術においては、機能実現に向けての構成法は自由度が高く、とかくアドホックで恣意的なものとなりがちであるが、応用ニーズの基本要請条件を押さえて理論的な視点から新規性のある本格的な解決を図ることが重要である。

本方式は、理論的な視点からパターン認識の基本的枠組を踏まえて、幾何学的不変特徴抽出としての高次局所自己相関 (HLAC/CHLAC) と統計的判別特徴抽出としての多変量解析手法の 2 段階からなり、後者によって課題に応じた例からの学習が可能となっている。対象に関するモデルや事前知識を一切必要とせず、対象パターンの形状とその動きを判別特徴空間の点として区別する。対象の切り出しも不要であり、計算量も一定の積和主体と少ないため、動画像に対しても通常の PC で実時間処理を遙かに超える高速処理が可能である。本方式の特長は次のとおりである。

- 非モデルベースな方式 → 高い汎用性
- 基本的な初期特徴 (HLAC/CHLAC) → 広範囲のデータ形式に適用可能
- 統計的な学習 (MDA) → 課題適応性と精度向上
- 並列積和演算 → 高速で大量データ処理が可能



図19 対応関係の学習<sup>[24][25]</sup>

ほぼ想定どおり、種々の応用をとおしてこれまでの方式を上回る性能が得られている。これは、理論に裏付けされた方式、特に高次局所自己相関特徴の優位性とその本質性によるところが大と思われる。通常の自己相関が2点関係に留まるのに対し、3点関係へと高次化することにより、例えば静止画では輪郭の局所直線方向から曲率（凹凸）、動画像では速度から加速度へと、得られる特徴が詳細となっている。そして、これらの基本的で本質的な初期特徴が、個別の恣意的な逐次手順や論理判断（例えば閾値処理や条件分岐等）を用いず、多変量解析手法を用いて並列・総合的にタスクに有効な新特徴へと統合されていて、情報のロスが少なく頑健な方式となっている。

HLAC/CHLACは、時空間に局在する「パターン」の局所的形状パターンの統計量（相関や頻度）という基本的で汎用的な特徴である。その意味で、近年のHOGやSIFT特徴に代表される「モデル照合ベースから局所特徴の統計量へ」といった潮流の先鞭をなすものである。また、画像に限らず、音声や各種センサー情報等の多チャンネル時系列データ、さらには一般の3-wayデータへも広く応用可能である。今後の展開としては量的データから質的（カテゴリカル）データへの拡張が挙げられ、すでに手法<sup>[29]</sup>の開発を行っている。

今後、ニーズの高い知的防犯カメラ等、セキュリティ分野における自動（無人）映像監視を始め、各種外観検査、画像のannotationと検索、ロボットの視覚、スポーツやリハビリ分野での動作解析や評価等、広くコンピュータービジョンへの応用が期待される。現在、医療応用として大病院や癌センターとの共同研究で、顕微鏡画像からの癌の自動検査システムへの応用を進めている。さらに、産総研認定ベンチャー（融合技術研究所）を中心に、半導体基板検査や各種外観検査への実用化や、地域コンソーシアムプロジェクトでの米の品質検査や乳牛の発情・分娩予知等、農業畜産分野への応用を展開している。

本方式の実用化においては、その他の細やかな事柄、例えば前処理やパラメータ（相関幅）の調整が必要であり、それらのノウハウの蓄積や自動化が今後の課題である。

## 謝辞

この研究は、併任先の東京大学知能機械情報専攻での卒論・修論指導のもと、大いに進展した。関係学生諸君に記して感謝する。特に小林匠氏（現：情報技術研究部門）には、その後の共同研究においても大いに貢献していただいた。ここに感謝したい。また、初期のHLACの実験で栗田多喜夫氏（現：広島大学）、近年の応用展開でポストドクの方々や坂上グループと樋口グループに貢献していただいた。

た。関係諸氏に感謝する。

**注1)** 当初、ギリシャ神話の百の目をもつ巨人にあやかって、ARGUS (Adaptive Recognition for General Use System) と呼ぶ予定であった。近年、本方式の略称にHLAC/CHLACが用いられる向きもあるが、それは初段の特徴抽出法を指すので適切ではない。したがって、今後はシステム/方式全体をARGUSと呼ぶことにする。

**注2)** 2値画像のHLACは、パーセプトロン<sup>[10]</sup>における $N+1$ 位ベクトル、それによる図形のスペクトルと密接に関係している。ここでは、黒点(1)と白点(0)の組み合わせが考えられていて、我々の黒点のみを考える立場は一見不十分に見えるが、実は十分である。例えば $\blacksquare \square$ は、 $f_0 = f(\mathbf{r}) = 1$  かつ  $f_1 = f(\mathbf{r} + \mathbf{a}_1) = 1$  として、論理的に  $f_0 \cdot f_1 = f_0 \cdot (1 - f_1) = f_0 - f_0 \cdot f_1$  となり、マスク(No.1とNo.3)による特徴値の線形和の範囲で表される。

**注3)** この方式は、ニューラルネットの逆伝搬学習法<sup>[7]</sup>より以前に提案されている<sup>[2][3]</sup>。

**注4)** HLAC特徴は丁度それら位相幾何的要素の個数を数えあげていて、次段の重回帰でそれらの係数が学習的に決定されている。

**注5)** Minimum Distance Decision: 未知入力の特徴ベクトルからの各クラスの重心への距離を測り、最短のクラスへ識別する方式。

**注6)** ヘリオスウォッチャー (KK 日立ビルシステム)  
[http://www.hbs.co.jp/lineup/elevator/hw\\_outline.html](http://www.hbs.co.jp/lineup/elevator/hw_outline.html)

**注7)** 各該当語の有/無を1/0で表したベクトル。

## 参考文献

- [1] 大津展之, 栗田多喜夫, 関田巖: パターン認識-理論と応用, 行動計量学シリーズ12, 朝倉書店, 東京 (1996).
- [2] 大津展之: パターン認識における特徴抽出に関する数値的研究, 電総研究報告, 818, 210 (1981).
- [3] 大津展之, 島田俊之, 森俊二: N次自己相関マスクによる図形の特徴抽出, 電子通信学会技術報告, PRL-78 (31) (1978).
- [4] N. Otsu and T. Kurita: A new scheme for practical flexible and intelligent vision systems, *Proc. IAPR Workshop on Computer Vision (MVA1988)*, 431-435 (1988).
- [5] N. Otsu: Towards flexible and intelligent vision systems - from thresholding to CHLAC, *Proc. IAPR Conf. on Machine Vision Applications, Invited talk*, 430-439 (2005).
- [6] N. Otsu: CHLAC approach to flexible and intelligent vision systems, *Proc. ECSIS and IEEE Symposium on Bio-inspired Learning and Intelligent Systems for Security (BLISS2008), Invited talk*, 23-33 (2008).
- [7] D. Rumelhart, G. Hinton and R. Williams: Learning representations by back-propagating errors, *Nature*, 323 (9), 533-536 (1986).
- [8] J. Shawe-Taylor and N. Cristianini: *Kernel methods for pattern analysis*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (2004).
- [9] J. McLaughlin and J. Raviv:  $N$  th-Order Autocorrelations in Pattern Recognition, *Information and Control*, 12, 121-142 (1968).
- [10] M. Minsky and S. Papert: *Perceptrons*, The MIT Press (1969).
- [11] T. Kobayashi and N. Otsu: Action and simultaneous multiple-person identification using cubic higher order local auto-correlation, *Proc. 17th Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR)*, 741-744 (2004).
- [12] T. Kurita and N. Otsu: Face recognition method using

- higher order local autocorrelation and multivariate analysis, *Proc. 11th ICPR*, 213-216 (1992).
- [13] F. Goudail, E. Lange, T. Iwamoto, K. Kyuma and N. Otsu: Face recognition system using local autocorrelations and multi-scale integration, *IEEE Trans. PAMI*, 18, 1024-1028 (1996).
- [14] M. Lyons and S. Akamatsu: Coding facial expressions with gabor wavelets, *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition (FG1998)*, 200-205 (1998).
- [15] Y. Shinohara and N. Otsu: Facial expression recognition using Fisher weight maps, *Proc. 6th IEEE Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition (FG2004)*, 499-504 (2004).
- [16] T. Kobayashi and N. Otsu: A three-way auto-correlation based approach to human identification by gait, *6th IEEE Int. Workshop on Visual Surveillance*, 185-192 (2006).
- [17] T. Nanri and N. Otsu: Unsupervised abnormality detection in video surveillance, *Proc. IAPR Conf. on Machine Vision Applications*, 574-577 (2005).
- [18] 岩田健司他: 高次局所自己相関特徴法によるがん病理画像診断支援システム, *ViEW2009*, A-6H (I-15) (2009).
- [19] 荒木英人, 村川正宏, 小林匠, 樋口哲也, 久保田一, 大津展之: 高次局所自己相関特徴による多チャンネル時系列データからの異常検知, *電気学会論文誌C*, 129 (7), 1305-1310 (2009).
- [20] R. Fukano, Y. Kuniyoshi, T. Otani, T. Kobayashi and N. Otsu: Acquisition of unknown object property for manipulation by a compliant multi-fingered hand, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 17 (6), 645-654 (2005).
- [21] C. W. J. Granger: Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods, *Econometrica*, 37, 424 (1969).
- [22] K. Ishiguro, N. Otsu, M. Lungarella and Y. Kuniyoshi: Comparison of nonlinear Granger causality extensions for low-dimensional systems, *Physical Review E*, 77 (issue 3), 036217 (1-9) (2008).
- [23] K. Ishiguro, N. Otsu, M. Lungarella and Y. Kuniyoshi: Detecting direction of causal interactions between dynamically coupled signals, *Physical Review E*, 77 (issue 2), 026216 (1-6) (2008).
- [24] 小林匠, 森崎巧一, 大津展之: 印象情報の付与による類似画像検索性能の評価, *電子情報通信学会論文誌*, J91-D (4), 1025-1032 (2008).
- [25] 森下雄介, 小林匠, 森崎巧一, 大津展之: 時間重みと外的規準を用いた動作評価手法, *電子情報通信学会技術研究報告*, PRMU-107 (539), 371-376 (2008).
- [26] H. Nakayama, T. Harada, Y. Kuniyoshi and N. Otsu: High-performance image annotation and retrieval for weakly labeled images, *Proc. Pacific-Rim Conf. on Multimedia*, 601-610 (2008).
- [27] F. Yoshikawa, T. Kobayashi, K. Watanabe and N. Otsu: Start and end point detection of weightlifting motion using CHLAC and MRA, *Proc. 1st Int. Workshop on Bio-inspired Human-Machine Interfaces and Healthcare Applications*, 44-50 (2010).
- [28] T. Kobayashi, K. Watanabe, T. Higuchi, T. Miyajima and N. Otsu: Recognition of dynamic texture patterns using CHLAC features and linear regression, *International Journal of Database Theory and Application*, 2 (4), 13-26 (2009).
- [29] T. Kobayashi and N. Otsu: Image feature extraction using gradient local auto-correlations, *Proc. European Conf. on Computer Vision (ECCV)*, 346-358 (2008).

## 執筆者略歴

大津 展之 (おおつ のぶゆき)

1971年3月東京大学大学院工学系研究科計数工学数理コース専攻修士課程修了。同年4月電子技術総合研究所入所。パターン認識の理論と応用、特に特徴抽出理論とその実践としての画像認識の研究に従事。工学博士。1985年4月数理情報研究室長を経て、1990年4月首席研究官、1991年4月知能情報部長に就任。実世界情報処理(RWC)プロジェクト(1992-2001)の策定と特に実世界知能の研究推進に従事。2001年から産業技術総合研究所フェロー、現在に至る。1992年4月から2010年3月まで筑波大学連携大学院教授併任。2001年4月から2007年3月まで東京大学大学院情報理工学系研究科教授兼務。



## 査読者との議論

### 議論1 理論と応用と産業界への展開

質問 (赤松 幹之: 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)

ARGUSはしっかりとした理論に裏打ちされた手法であることから幅広く応用できた技術であると理解しています。こういった理論をベースにした研究のシンセシオロジーの論文として、理論ベースの研究のポイントや難しさ等を書いていただけませんか。また、種々の応用をしてみて、およそ理論どおりだったのか、理論どおりいなくて苦労したことはなかったのか等も記載していただけませんか。もし、前者のとおりだったのでしたら、なぜこの理論はうまくいったのか等を書いていただくと読者の大いなる参考になると思います。

回答 (大津 展之)

可能な範囲で対応いたしました。

### 議論2 要素技術の選択

質問 (上田 完次: 産業技術総合研究所)

この論文は、理論をベースとした技術の実問題への適用という第2種基礎研究であり、これまでにシンセシオロジーには掲載されていなかったタイプの研究の論文です。理論をベースとした構成的研究における要素技術の選択についてお伺いします。

実用化目標を達成するための構成要素をどのようにして選択したのでしょうか。既状態から演繹的に導かれる構成要素だけなのか、仮説的な構成要素があるのか等の説明をお願いします。

質問 (赤松 幹之)

3.1節において、R1からR3の要請条件を満たすシステムとして適応学習型汎用画像認識システムを開発したとあり、位置不変性を満たす特徴量を抽出する技術として、HLACとCHLACを採用したと述べられています。これを採用したプロセスにおいて、他にも候補となった技術があると思いますので、それらの技術と比較してHLACが優れていると判断した論拠を書いていただけませんか。

また、ここにおいてHLACを採用した理由として書かれているのは、パターンは局在していて局所的な相対関係が本質的であるという点です。局所の特徴だけを見ることが位置不変との関係等、専門外の読者にすぐに理解してもらえるかは分からないので、少し追記していただければと思います。

回答 (大津 展之)

認識システムでは対象パターンからの特徴抽出が性能を決める重要な構成要素となり、これまでアドホック (いわば仮説的、試

行錯誤的に種々選択されていたのに対して、理論的な基礎から幾何学的不変特徴抽出と統計的判別特徴抽出の2段階構成の枠組みを与え、実用化目標を達成するための基本要請3条件を満たすそれらの具体的な構成要素として、高次局所自己相関と多変量解析を採択しました。その意味では、理論から演繹的に導かれた構成要素ともいえますし、理論と条件を満たす仮説的しかし本質的な構成要素ともいえます。

基本要請条件（特にR1とR2）を同時に満たす特徴、しかもモデルベースではない汎用的な特徴としては、実は他にはあまり考えられません。

ご指摘のように、局所の特徴だけを見ているので位置不変となるわけではありません。むしろ、「相対的」な関係を自己相関として抽出するので位置不変となるわけです。

紙面の都合とも合わせて可能な範囲で説明を補足致しました。

### 議論3 視覚システムの要件

質問（赤松 幹之）

視覚システムに要請される基本的な条件として、「R1：位置不変性、R2：画面加法性、R3：適応学習性を掲げた」とありますが、これらを掲げた論拠が明記されていませんので、これらの技術開発を選択したシナリオを書いていただけませんかでしょうか。幾何学的不変性についても、例えば大きさに対する不変性、傾きに対する不変性、特徴間の位置関係の不変性等、他にも考えられると思います。また、不変特徴抽出において、幾何学的な変換に不変な特徴値が得られる汎関数を追求するとありますが、これは視覚システムを対象としていることから幾何学的な不変性が本質的に重要な性質になると理解してよろしいでしょうか。

また、画面加法性については、重なりがある場合には加法性が満たされないことになるとと思いますが、主に処理時間の観点からの選択でしょうか。

回答（大津 展之）

ここでの位置不変性とは、平行移動不変性のことです。「カメラと対象物の距離があまり変化しない」という意味ではなく、むしろカメラの向きの変化により対象物が画面枠内での平行移動として幾何学的な変換を受けて位置が変わりますが、そのような基本的な平行移動変換に不変な特徴が認識に本質的ということ。もちろんご指摘のように、他にもそのような不変変換としては大小（スケール）変換や回転等も考えられますが、平行移動（位置）不変性が最も基本的ということ。少し加筆して誤解のないようにいたしました。幾何学的変換に不変な特徴（汎関数）を追求する不変特徴抽出理論は、視覚に限定されるものではなく音声信号等も含めて、パターン一般にいえる普遍な理論です。

画面加法性は、重なりがある場合には、ご指摘のように厳密には成り立ちませんが、その場合も含めて、あえて要請しておくことが重要との主張です。これは、ご指摘のように、処理時間の観点からでもあります。特徴表現が認識（特に計数）にとって都合の良い表現（線形）となり、後の処理が簡単になるための要請条件です。少し説明を補足いたしました。

### 議論4 適応学習の意味

質問（上田 完次）

“適応学習”という言葉の用法はいくつかありますが、この論文での意味を明確にしていただけないでしょうか。

回答（大津 展之）

そもそも、パターン認識では事前に必要な情報は完備されていません。有限個の例が学習サンプルとして与えられるのみで、そ

れに基づき未知サンプル（出来れば無限個）の認識を行います。ご指摘のように、確かに“適応学習”は用語的に多義性があります。まずパターン認識として、認識対象を限定しても、パターンの変動に対する適応ということがあります。これは特徴抽出と学習プロセスに関わるものです。また、この論文でいう適応学習は、さらにメタに、認識課題に対する適応学習という意味でも使っています。モデルベースの学習ですと課題（タスク）が代わるとモデルの入れ替えが必要なのに対して、この方式ではモデルを一切必要とせず構成要素もそのまま、後段の統計的な特徴抽出である多変量解析手法において、例からの学習によって最適に（重みが）構成され課題に適応します。このあたりは、少し分かり易く加筆いたしました。

### 議論5 パターン認識の正答率

質問（上田 完次）

正答率が100パーセントにならないのはなぜでしょうか。あるいは、どのような場合に100パーセントとなりうるのでしょうか。これまでの研究、他の研究者に比べて優れた結果が得られたということは十分に評価した上で、シンセシオロジー論文としての議論を深めるための質問です。

回答（大津 展之）

実世界のパターン、例えば音声の「a/i」や画像の「犬/猫」は、多様な変形やノイズを持ち、そこからの特徴（観測）値、例えば周波数や色は一般には確率統計的に分布して、概念は判別的としても裾野は限りなく接近して重複もします。したがって、学習サンプルに対しても正答率100パーセントにならないのが普通です。もちろん、有効な特徴を数多く抽出して統合すればするほど漸近的に100パーセントに近づきますが、コストの点で有限個の特徴抽出に押さえるのが現実的です。費用対効果の問題です。

もちろん、簡単な識別問題では100パーセントの正当率になりうる場合があります。例えば100円玉と10円玉の識別では、それらの特徴値（例えば直径や重さ）は、およそ確定的で異なるので、自動販売機が実用化されているわけです（たまたま誤認識もあるようですが）。この論文では、より困難で高度な認識問題への汎用的なアプローチの方式を示しています。

### 議論6 応用事例

質問（赤松 幹之）

第4章に応用事例が9例述べられていますが、これによって汎用システムであることを主張していると理解します。しかし、これらの例において、共通に使われているのはHLACとCHLACであり、多変量データ解析による判別特徴抽出には、因子分析、重回帰分析、判別分析、kNN識別、主成分分析、ARモデル、正準相関分析等、異なる手法が使われています。それぞれの課題に対してどの手法を使うのが最適なのか等、一部には説明がありますが、タスクに応じた手法の使い分けの基本的な考え方は理論について整理された記述があることを期待します。これによって、読者が持っている課題を解決するためには、どの手法を適用すれば良いかといった読者の理解が進むと思います。

回答（大津 展之）

ご指摘のように、HLAC/CHLAC特徴を基本初期特徴（不変特徴）として、タスクに応じたそれらの最適統合手法（線形重み和）として種々の多変量解析を用いています。多変量解析に不案内な読者の理解のためには、ご指摘のような配慮も必要と思われるので、紙面の都合から割愛しておりました対応表をつけることにしました。

# ヒューマノイドロボットのコンテンツ技術化に向けて

## — クリエイターによる多様な表現の創出が可能な 二足歩行ヒューマノイドロボットの実現 —

中岡 慎一郎\*、三浦 郁奈子、森澤 光晴、金広 文男、金子 健二、梶田 秀司、横井 一仁

ヒューマノイドロボットは人間と同様に多様な振る舞いを表現する能力を秘めていることが大きな特徴であり、これをコンテンツ技術として利用することが期待できる。この利用法を実用的にするための技術的課題をロボットハードウェア、動作表現支援、音声表現支援、統合インタフェースの観点から考察し、それらの課題を解決する技術の開発と統合を行った。その結果人間にとっても近い外観を有する二足歩行ヒューマノイドロボットHRP-4Cと、その動作をCGキャラクターと同様に振り付け可能な統合ソフトウェアChoreonoidを実現した。また、これらを用いたコンテンツ制作実験により、ヒューマノイドロボットのコンテンツ技術としての可能性を検証した。

キーワード：二足歩行ヒューマノイドロボット、コンテンツ技術、エンターテインメント、サイバネティックヒューマン HRP-4C、動作作成、キーポーズ、Choreonoid、VOCALOID

## Toward the use of humanoid robots as assemblies of content technologies

### — Realization of a biped humanoid robot allowing content creators to produce various expressions —

Shin'ichiro NAKAOKA\*, Kanako MIURA, Mitsuharu MORISAWA,  
Fumio KANEHIRO, Kenji KANEKO, Shuuji KAJITA and Kazuhito YOKOI

A significant feature of humanoid robots is their potential to make various expressions as humans do, and this feature will allow the use of humanoid robots as assemblies of content technologies. Technical issues required for the practical use of humanoid robots are discussed in terms of robot hardware, motion expression generation, vocal expression generation and integrated GUI (Graphical User Interface), and the development of technologies to solve the issues and their integration have been carried out. As a result, we have produced HRP-4C, a life-size biped humanoid robot with realistic human-like appearance, and Choreonoid, an integrated software interface that allows us to choreograph motions with robots as done with CG characters. Experiments on creating contents with these technologies verified the potential of humanoid robots as assemblies of content technologies.

**Keywords** : Biped humanoid robots, content technology, entertainment, cybernetic human HRP-4C, motion creation, key pose, Choreonoid, VOCALOID

### 1 コンテンツ技術としてのヒューマノイドロボット

ヒューマノイドロボット（人間型ロボット）は、人間を模して作られた人工物が人間のように動くことのおもしろさや、様々なことを人間と同様に行ってくれることへの期待、フィクションの中で活躍してきたイメージ等から、ロボットの中でも特に多くの人々の興味を惹きつける魅力をもっている。この魅力を原動力として、実際に多くのヒューマノイドが開発されてきた。特に1996年にホンダが等身大で安定な二足歩行が可能なヒューマノイドであるP2<sup>[1]</sup>を発表して以来、ヒューマノイドの開発が活発になり、それらの一般向けのメディア・イベント等における露出も増えてきた。その結果、ヒューマノイドの実用化に対する期待も高まりつつある。

人々が実用化を期待するロボットの応用として、ロボット

に人間の生活を支援する様々な作業を行ってもらうことがあり、ヒューマノイドについてもこの期待に応えるための研究が進められている<sup>[2][3]</sup>。人間の生活環境の中で自由に移動し、人間も使う様々な道具や機器をそのまま使うことを目標とすると、人間と同様の身体を持つことが合理的であると考えられるのである。ただし、人々がロボットに期待する移動や作業の能力と現在のロボットの技術水準との乖離は非常に大きく、この方向での実用化のめどはついていないのが現状である。

一方で、人々に見せたり聞かせたりすることを目的としてロボットに何らかの振る舞いを行わせることも、ヒューマノイドの実用化に向けた応用として大きな可能性を秘めている。具体的にどのような振る舞いをどのように利用するかと

産業技術総合研究所 知能システム研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2  
Intelligent Systems Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan \* E-mail: s.nakaoka@aist.go.jp

Original manuscript received November 8, 2010, Revisions received February 21, 2011, Accepted March 7, 2011

ということについては様々なことが考えられるが、技術的な観点で見ると、それらの多くは「コンテンツ技術」という枠組みでとらえることが可能である。ここで「コンテンツ」とは、それに向き合う観衆・視聴者・消費者に何らかの価値をもたらすひとまとまりの情報や体験を意味している。そして、ヒューマノイドをコンテンツのキャストとして活用できるとすれば、それはコンテンツの表現や運用を支援する「コンテンツ技術」であると言えるのである。

ヒューマノイドはこのようなコンテンツ技術としての魅力を潜在的に備えている。そもそも、冒頭で述べた「人々の興味を惹く魅力」は、コンテンツとしての価値に直結するものである。また、ロボットというものはコンピュータで制御される機械であり、様々な情報技術と融合させたり、特殊な身体機能を実装することも含めて、コンテンツの作成・表現・運用において生身の人間ではできないことも可能となる。そして、人々が求めるコンテンツの多くは人間を対象とするものであるため、ヒューマノイドは他の形態のロボットと比べて、より一般的なジャンルのコンテンツに対応可能であると考えられる。

以上の特徴は、コンピュータグラフィックス (CG) のキャラクターアニメーションと重なる部分もある。実際、CG キャラクターは様々なかたちで活用され、コンテンツ技術として欠かせない存在となりつつある。その上で、ロボットは実世界における実体をもつという点が CG キャラクターとは大きく異なる。これにより、CG キャラクターでは実現不可能なリアリティや臨場感、物理的インタラクション等の表現が可能となってくる。

私達は、そのようなコンテンツ技術としての利用こそが、ヒューマノイドの特性を最大限に活かすことが可能な価値ある応用として、まず実用化を目指すべきであると考えている。これにより、CG やコンピュータミュージック、ゲーム機等のデジタルコンテンツ技術が成りてきたように、新たな価値をもつコンテンツを創出し、それらコンテンツと関連技術にかかわる産業を活性化していくことが期待できるのである。また、この応用によってヒューマノイドが広く利用されるようになれば、ヒューマノイドへの継続的な投資も期待でき、先に述べた生活支援等の他の応用の発展にもつながっていくと思われる。

## 2 研究の目的と課題

ヒューマノイドを用いたコンテンツと言えるものは、これまで全く存在していなかったというわけではない。すなわち、最先端のヒューマノイドの技術デモンストレーションは、ヒューマノイドの特定の振る舞いを観衆が見て驚いたり喜んだりするという点で、これに相当すると言えるのである。た

だし、それらは基本的に、ロボットの開発者が手掛けてきたものであり、内容的にもロボットの技術に焦点をおくものであった。また、これによって十分な収益を得るだけの価値や広がりを実現できているわけではなかった。

これに対して、本来コンテンツの作り手となるべきなのは、コンテンツ創作の専門家である「クリエイター」と総称される人々である。そして、様々な分野のクリエイターが自ら手掛けるコンテンツにヒューマノイドを取り込み、そこでロボット技術という範疇にとどまらない内容を表現できるようになることが、私達の目指す「ヒューマノイドのコンテンツ技術化」である。これが達成されなければヒューマノイドが広く利用されることは無いであろうことは、既存のコンテンツ技術の状況からも明らかである。しかし、十分な表現能力とそれを利用可能とする手段があるかという点で、従来のヒューマノイドとその周辺技術はクリエイターにとって現実的ではなかったのである。

本研究の目的は、この状況を改善するにあたって基盤となる要素技術の開発と統合を行い、その検証を行いながらヒューマノイドをコンテンツ技術として産業化する道筋をつけることにある。この取り組みの概要を図1に示す。

私達はこの取り組みにおいて、まず以下の技術的な課題を解決することを目標とした。

### ロボットハードウェア

従来にない表現能力をもつハードウェアとして、全身に渡って人間に近い外観を有する等身大の二足歩行ヒューマノイドを開発する。

### 動作表現支援技術

多様な動作の表現を作成する手段として、CG キャラクターのキーフレームアニメーションと同様の操作による二足歩行ヒューマノイドの全身動作の振り付けを可能とする。

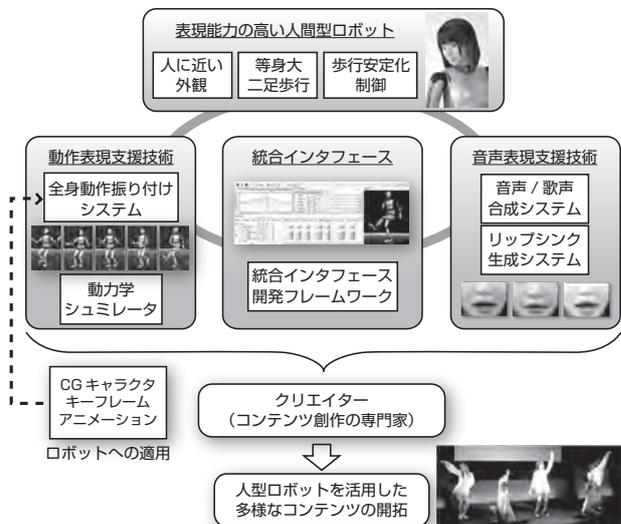


図1 研究の概要

## 音声表現支援技術

音声合成技術と連携し、口元の動きも伴う発話や歌唱の多様な表現を容易に作成可能とする。

## 統合インタフェース

以上の技術と既存の情報技術・コンテンツ技術を統合的に扱うことが可能なソフトウェアインタフェースを開発する。

これらを解決するためには、図1に示すような様々な要素技術の開発、選択、および統合を総合的に行うことが必要となる。

また、これらの技術的課題を乗り越えた上で、それらを用いて一般のクリエイターが創作した表現が、これまでにない新しいコンテンツとして認識されるかどうかを検証することも、本研究の重要な課題である。私達が構築する技術基盤とクリエイターのアイデアやスキルが組み合わさることにより、ヒューマノイドを活用した多様なコンテンツが開拓されていくというのが、私達の期待するシナリオである。

以下では、各技術的課題について、その設定に至った背景と解決に向けて実際に開発や統合を行った技術の内容を解説し、その後技術の検証に向けた取り組みと今後の展望について述べる。

## 3 ロボットハードウェア

### 3.1 ロボットの形態・外観における課題

従来のヒューマノイドの多くは、「人間型」を名乗りながらも、その形態や外観は一目見てロボットと分かるものがほとんどであった。それらは「ロボットらしい形態や外観」を意図的に表現するコンテンツにおいては有用なものであるが、そのようなコンテンツは人々が接するコンテンツ全体の一部のジャンルであると言える。これに対して、人間に十分近い形態と外観をもち、人間と同様の表現能力をもつロボットが加われば、多くのジャンルのコンテンツにおいてロボット利用の可能性が高まると考えられる。

以上を考慮して、ロボットハードウェアについては、以下の要件を満たすことを課題として設定した。

- (1) 等身大で自立二足歩行を安定に行えること
- (2) 全身にわたって人間に近い外観を有すること

要件(1)を満たすためには高度な技術が必要であり、ヒューマノイド全体の中ではこれを満たさないものも多い。その例として、スタンドや車輪で支持されるものや、体外の装置とケーブル等で繋がれているもの、小型のもの等が挙げられる。しかし、それらのロボットは全身動作やスケール感において人間と同様の表現能力をもつとは言えないものであるが、近年の研究の成果により、要件(1)を満たすロボットも多くのロボット開発機関によって開発されてきた<sup>[11][4][9]</sup>。しかし、それらのロボットの外観はいずれも「ロ

ボットらしい」ものであり、要件(2)を満たすものではなかった。その例として、私達の研究グループが開発にかかわってきた従来の二足歩行ヒューマノイドの外観を図2に示す。リアルな頭部を搭載した二足歩行ヒューマノイドである“Albert HUBO”<sup>[12]</sup>も開発されているが、これも頭部以外は従来と同様の外観であった。逆に、要件(2)のみに着目すれば、一見して人間と見間違ふほど人間に近い外観をもつロボットも開発されている<sup>[13][14]</sup>ものの、それらのロボットは基本的に上半身のみが動くものであり、要件(1)を満たしていない。したがって、両技術の一つのロボットへ統合することができれば、この課題が達成されたことになる。

要件(1)を満たすロボットがロボットらしい外観をもつ理由は、意図的にそのようにデザインしたというだけでなく、胴体や四肢、関節の大きさや形状に関する機構上の制約によるところも大きい。また、要件(2)を満たす従来のロボットでは、人間に近い外観に見合う多数の関節を高速に動作させるため、その駆動装置はロボット体外に置かれていた。両要件を同時に満たすために、人間と同様のスリムな身体に自立二足歩行が可能な機構を組み込み、その上に人間に近い外観を統合していくことは、技術的にも難しい課題なのである。

なお、ディズニーランドの“Audio-Animatronics”と呼ばれるものをはじめとする機械仕掛けの人形は、ある意味コンテンツ技術として実用化されたヒューマノイドと言えるかもしれない。しかしそれらは要件(1)を満たさないばかりでなく、特定の場所に設置され特定の動作を行うよう限定されたものであり、そこから切り離して利用できるだけの汎用性や魅力を備えたものではない。したがって、これは私達が目指す「コンテンツ技術」とは異なるものである。

### 3.2 サイバネティックヒューマンHRP-4Cの開発

私達はこの課題の解決に取り組み、その結果として、図3に示す「サイバネティックヒューマン<sup>注1</sup>HRP-4C」<sup>[15][16]</sup>

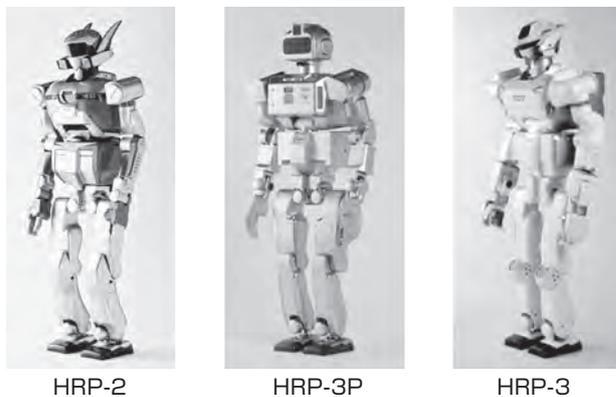


図2 従来の二足歩行人間型ロボット  
左から、HRP-2<sup>[6]</sup>、HRP-3P<sup>[10]</sup>、HRP-3<sup>[11]</sup>。

の開発に成功した。図3からも分かるように、HRP-4Cは全身に渡って人間に近い外観を実現した等身大(身長158cm)のヒューマノイドである。さらに、HRP-4Cは動作に必要な機構をすべて体内に備えており、二足歩行を行うための機構も備えた自立型のロボットである。その身体のサイズや形状は日本人青年女性の平均体型に近いものとしており、従来の二足歩行ヒューマノイドと比較して格段にスリムな体型を実現している。総重量は47 kg<sup>注2</sup>となっている。

関節は頭部に8、首に3、各腕に6、各手に2、腰に3、各脚に7の自由度を備えており、総自由度は44となっている。頭部の8自由度により、表情の変化、視線の移動、発声に伴う口元の動き等も表現可能である。また、腰部位の3自由度により、しなやかな胴体の動きも可能になる。これらにより、動きの面でも従来以上に人間に近い表現能力を秘めていると言える。

先に述べたように、このようなハードウェアを実現することは技術的にも難しい課題であった。HRP-4Cの開発にあたっては、HRP-2<sup>[6]</sup>やHRP-3<sup>[11]</sup>の開発で培ってきた設計技術の上に、小型分散モータードライバを組み合わせた分散制御システムや、新規開発の足首関節駆動機構等を導入し、可搬重量を軽減した設計によってアクチュエータやバッテリーの小型軽量化も図った。これらを結集した総合的な取り組みの結果として機構や電装システムの小型軽量化を達成し、課題を解決することができた。

### 3.3 歩行安定化制御システムの改良

HRP-4Cは足に関しても人間に近い形体を実現するため、図4に示すように、従来の二足歩行ロボットと比べてその足裏は小さく、足首中心もより踵方向に近づけた設計となっている。二足歩行ロボットでは、足裏の圧力中心の位置(ZMP)が足裏のエッジにくると、そのエッジ回りに転倒してしまう<sup>[17]</sup>。このため、足裏と床との間の圧力中心点(ZMP)を精度よく足裏の内部に制御することが、転倒

を避けるために必要となるが、足裏の面積が小さいほどこの制御は難しくなる。これについては、二足歩行の不整地対応能力を高める基礎研究として私達が取り組んできた、線形倒立振子トラッキング制御に基づく新しい歩行安定化制御システム<sup>[18]</sup>を導入することによって、十分な安定性を確保することに成功した。

## 4 動作表現支援技術

### 4.1 動きの振り付けにおける課題

ロボットの形態や外観に加えて、その身体の動きも当然のことながらコンテンツにおいて重要な表現要素となる。これに関してコンテンツ技術としてまず基本となる機能は、コンテンツ制作者が定めた一連の動きをロボットが行うことであろう。

問題は、その動きをいかなる手段でロボットに振り付けるかにある。本研究が対象とする等身大の二足歩行ロボットにおいては、動作の振り付けの手段として、特定の動作を生成するプログラムを個別に開発したり、あらかじめ用意された基本動作に対応するコマンドを記述するといった手段がこれまで一般的であった。しかし、それらは専門技術を要する非直感的な作業である上、結果も単調な動きに陥りがちである。これに代わるものとして、多様な動きを思いどおりに振り付けるための分かりやすく効率的な手段の提供が望まれるのである。

ここで再度着目したいのが、CGキャラクターアニメーションの技術である。人間を模した身体モデルに望みの動きを振り付けるという点では、ヒューマノイドもCGキャラクターもやるべきことは同じである。そして、CGキャラクターアニメーションは、長年にわたって多くの映像コンテンツにおいて利用されてきた実用的な技術である。したがって、CGキャラクターと同様の感覚でヒューマノイドの振り付けをできるようにすることは、ヒューマノイドのコンテンツ技術としての実用性を現実的なものにするための課題として妥当である。



図3 サイバネティックヒューマン HRP-4C  
愛称は「未夢(ミーム)」

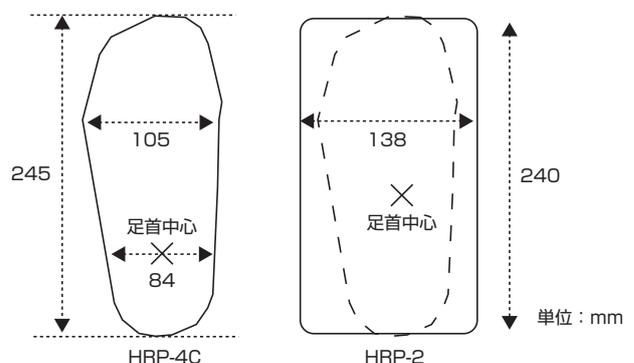


図4 HRP-4CとHRP-2の左足裏の大きさと足首中心位置  
比較のため、右図のHRP-2の足裏においてはHRP-4Cの足裏も点線を重ねてある。

CGアニメーションにおいて最も基本となる手法は、「キーフレームアニメーション」と呼ばれる手法である。ここで「フレーム」とはアニメーションにおいて秒間数十コマで切り替わっていく時系列の各画像を意味している。この手法では、キーフレームとして選んだいくつかのフレームにおけるキャラクターの姿勢（キーポーズ）を与えると、残りのフレームに対してキーポーズ間を補間した姿勢が自動で生成され、その結果がキャラクターの動きとなる。これにより、無駄な作業は省きつつも、キャラクターに対して直接詳細な動きを振り付けていくことが可能であり、動きの素になる姿勢を与えていくという操作も直感的で分かり易い。

この手法のロボットへの適用を目指したソフトウェアシステムは以前より開発されてきたものの、それらはいずれも「二足歩行型」のロボットに対しては不完全なものであった。

そもそも多くのシステムでは、キーポーズから動きを生成する処理において、実世界におけるロボットと床との間の物理的な挙動を考慮していない。その場合、自脚でバランスをとって支持することに関して物理的に無理のある動きとなってしまう、それをロボットで実行しようとすると容易に転倒に至ってしまうのである。ここがロボットとCGキャラクターで大きく異なる点である。そのようなシステムでも、ロボットが小型軽量で相対的な足裏サイズも大きい場合は、転倒せずにバランスを維持できる領域も広がるため、キーポーズの調整次第では転倒しない動きになることもある。このことにより、それらのシステムは主にホビーロボットの分野で限定的に用いられてきたが、私達の目的に対しては全く現実的ではない。

ロボットと床との間の物理的な挙動を考慮した唯一のシステムとして、“SDR Motion Creating System”<sup>[19]</sup>があり、このシステムを用いて身長58cmの小型二足歩行ヒューマノイドQRIO<sup>[20]</sup>の全身を使った様々な動作が実現されていた。ただし、このシステムにおいてキーポーズから動きを作れるのは上半身のみであり、下半身についてはシステムの提供する特定のコマンドとそのパラメータによって動きを設定するようになっている。この場合、下半身の動きはコマンドで表現できるものに限定されてしまうし、全身の動きを作成する作業はより複雑になってしまう。逆に、そのようにしなければ安定な動作を作れなかったところに、この問題の難しさがある。

以上のように、等身大二足歩行ヒューマノイドの全身動作をキーフレームアニメーションと同様に作成可能なシステムはこれまで存在しなかった。私達はそのようなシステムこそがヒューマノイドの動作表現のための基盤となる技術であると考え、キーフレームアニメーション技術と二足歩行ロボット技術の統合によりこれを実現することを課題として設

定した。

## 4.2 全身動作振り付けシステムの開発

私達は、上で述べた課題を解決する技術として、二足歩行ヒューマノイドのための全身動作振り付けシステムの開発に成功した<sup>[21]</sup>。このシステムのインタフェースとそれを用いて作成した動作の例を図5に示す。

本システムのインタフェースは、上半身と下半身を分けることなく全身に対して統一されたものとなっている。ユーザーは図5の中段に示すようなキーポーズをロボットのCGモデルに設定していけばよく、その結果は自脚でバランスをとって支持することに関して安定な動作となる。後は自己干渉や関節角速度のリミット超過が無ければ（それらが発生した際の修正はユーザーに委ねる仕様としている）、ロボット実機で転倒せずに実行することが可能である。

これを実現するため、私達はこれまでにないインタフェース設計を考案した。その大きな特徴は、各キーポーズにおける腰の水平位置を、ロボットがバランスをとれるようにシステムが決定するところにある。この決定はユーザーがキーポーズの入力や修正を行う度に瞬時に行われ、その結果はキーポーズにおける腰位置の補正というかたちでその場でユーザーに提示される。そして、キーポーズ間の補間もバランスのとれた動きとなるよう行われる。これは逆に言えば、初めからバランスのとれた動きしか振り付けできないということである。これを実現しながらも、ユーザーの行う操作自体は通常のキーフレームアニメーションと同様なため、まさにCGキャラクターと同様の感覚で、ロボットに振り付けを行っていくことが可能となるのである。なお、床に対するロボットの体重のかけ方を、足裏と床との間の圧力

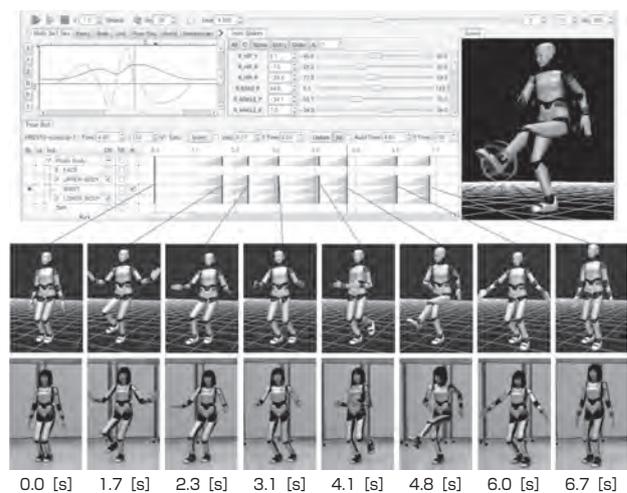


図5 全身動作振り付けシステムの動作編集画面と作成した動作（キーポーズ）の例

この例では8パターンのキーポーズを与えることにより、ポーズをとりながら一歩踏み出してキックする約7秒の動作を作成することができている。

中心点（ZMP）としてキーポーズに対して明示的に指定することで、バランスのとれる範囲内で腰の水平動作を望みに近づけることも可能である。

このような設計は自明ではなく、この考案に至ったことは課題の克服にあたって重要な成果である。さらに、この設計を実装することも難しい課題であった。ユーザーにシンプルなインタフェースを提供するその裏で、システムは足裏接地状態の検出、目標 ZMP 遷移、補間空間遷移、補助キーポーズの追加、目標 ZMP に適合する重心軌道の計算といった多くの複雑な処理を統合的に行う必要があり、さらにそれが高速に動作する必要があるからである。

このような実装上の課題を克服するにあたっては、私達が中心となって開発してきたロボット用動力学シミュレータ“OpenHRP3”<sup>[22]</sup>の技術も大いに活用することができた。シミュレータにおいて実装されているロボティクスに関する各種計算処理は、実行速度や精度の面で実用的なシミュレーションに耐えるよう開発が進められてきたものであり、本システムの実装においても有用なものであった。また、OpenHRP3のために私達が開発した動力学シミュレーション手法<sup>[23]</sup>は、二足歩行ロボットの床上での挙動を精度よく検証できるものである。これを本システムにも組み込むことにより、実装の妥当性をシステム上で直接検証できるようになり、開発の効率を高めることができた。

本システムは HRP-4C に対しても有効であることを確認できている。作成された全身動作は、3.3 節で述べた歩行安定化制御システム<sup>[18]</sup>と組み合わせることにより、図 5 の例のように実際に HRP-4C の実機でも安定に実行可能である。HRP-4C のように足裏の小さい等身大ヒューマノイドでこのような複雑な動作を思いどおりに構築できることは、画期的な成果である。また、図 6 に示すような顔の表情変化も作成可能である<sup>[24]</sup>。本システムでは、頭部に対する操作結果をリアルタイムで実機に反映させることも可能としており、これを用いることで、CG による完全な再現が難しい実機の微妙な表情の変化も、効率的に作り込むことが可能となっている。このように、本システムによって HRP-4C の動きの表現能力を引き出すことが可能となるのである。

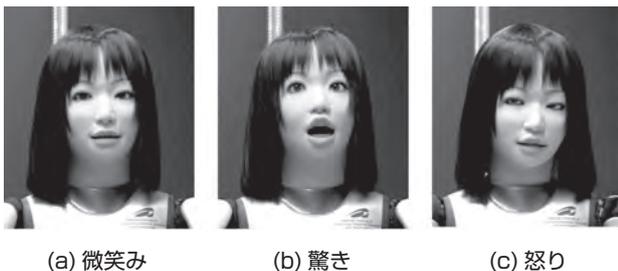


図 6 表情の作成例

#### 4.3 モーションキャプチャを用いる手法

CG キャラクタアニメーションにおいては、実際に人が行った動作をモーションキャプチャを用いて取り込む方式も広く用いられている。そして、キャプチャした人の全身動作を二足歩行ヒューマノイドの全身動作に適用する手法が中岡ら<sup>[25]</sup>によって開発されており、これを用いて HRP-2<sup>[6]</sup>による会津磐梯山踊りも実現されている。

この手法と本研究で開発した手法とを比較すると、人の動作を再現することに関しては、当然ながら前者が適している。ただし、中岡らの手法の制約やロボットの動作能力の限界により、現状では人の動作を再現仕切れないことも多いことには注意が必要である。一方で、ロボットならではの動きを表現したり、ロボットの動作能力の限界内で質の高い動きを作りこむことに関しては、初めからロボットに対して直接振り付けを行っていく後者の手法が適している。さらに、前者は専用の機材やスタジオに加えて望みの動作を行うスキルをもつ演者も必要とするが、後者はそれらを必要とせず一般的な PC 上で利用可能なため、より手軽に利用可能となっている。

以上の特徴を考慮すると、ヒューマノイドを用いた新たなコンテンツの創造とその利用の拡大という目的に対しては本研究の手法がより基本となるものであり、今回の成果によりこれを初めて実現したことには大きな意味がある。一方で、モーションキャプチャを用いる手法も有用なものであり、両者を統合的に使えるようにすることが今後の課題である。

#### 5 音声表現支援技術

ロボットの発する音声もコンテンツにおいて重要な表現要素となる。発声の形態については、人間の声帯を模した発声機構の研究もされているが<sup>[26]</sup>、これは肺に相当する部分も有する大きな機構となっており、現状では HRP-4C のようなヒューマノイドに搭載できるものではない。したがって、発声の形態としては適当な音声ソースをスピーカーから出力するのが妥当である。この場合、ロボットが発声しているように見せるためには、音声ソースに合わせてロボットの口元が動くこと（リップシンク）が必要である。また、音声ソースを得る手法としては、人間の声を取り込む手法と音声合成技術を用いる手法が考えられる。両者の特徴の差異は、4.3 節で述べた動きの作成に関する二つの手法の差異と同様であり、その意味では、音声合成を用いる方が私達の目的に対してより基本となる手法だと言える。

以上の考察から、音声表現に関しては、音声合成技術と連携し口元の動きも伴う多様な話し方や歌唱の表現を容易に作成可能とすることが課題となる。

この課題に対して、私達はヤマハ株式会社と共同で、同社の歌声合成技術“VOCALOID”<sup>[27]</sup>をHRP-4Cの音声表現に用いるシステムを開発した<sup>[28]</sup>。VOCALOIDは歌声の合成用に開発され、人間の歌唱に近い音声を実現可能な音声合成技術である。さらに、この技術をイントネーションの豊かな自然な話し方の生成に応用した“VOCALOID-flex”技術も利用可能となっており、多様な音声表現が可能である。このシステムはVOCALOIDの音声データからロボットのリップシンクを自動で生成する機能を実現しており、これを用いることでロボットの自然な発話や歌唱の振る舞いを容易に作成可能となっている。

## 6 統合インタフェース

4.2節で述べた全身動作振り付けシステムの実装にあたっては、キーポーズ処理の本質的な部分に加えて、各種データの管理、3Dモデルの表示や操作、キーポーズの時系列表示、動力学シミュレーションをはじめとする多様な機能を連携可能なかたちで実装することが必要である。また、ロボットの総合的な表現を作成しそれをロボット実機で提示するためには、振り付けシステムと音声表現支援技術、およびロボットハードウェアも連携させ、それをユーザーにとって分かりやすく使いやすいかたちで提供しなければならない。さらに、既存のものや今後開発されるものも含めて、ロボットの表現において有用な情報技術・メディア技術も連携して利用可能とできれば、コンテンツ技術としての有用性をさらに高めていけると思われる。4.3節で述べたモーションキャプチャ利用技術もそのような技術の例として挙げられる。

私達は以上を実現するため、統合インタフェース開発のためのソフトウェアフレームワークである“Choreonoidフレームワーク”を開発した。そしてこの上に本研究で開発・選定した技術のインタフェースを実装し、これを統合ソフトウェア“Choreonoid”<sup>注3</sup>とした。

ChoreonoidフレームワークはC++言語を基盤としており、CやC++で記述されたプログラムとの相性がよく、高速な処理が必要なアルゴリズムやインタフェースも実現しやすい。また、Model-View-Controllerと呼ばれるアーキテクチャとシグナル機構に基づいて設計されており、オブジェクト同士の独立性を高めることで保守性や拡張性を確保しつつも、オブジェクト間の複雑な連携を行うことが可能な設計としている<sup>[29]</sup>。これにより、プラグインとして新たな機能の追加ができるようになっており、プラグインが既存の機能や他のプラグインの機能と連携することも容易である。このような特徴により、Choreonoidは今後コンテンツ技術という枠組みも超えて、ロボット用ソフトウェアの上位層を開

発する環境として広く活用されていくことも期待できる。

## 7 コンテンツ制作実験

本研究においては、実際にChoreonoidとHRP-4Cを用いてコンテンツを制作し、技術の検証と改良、およびプロモーションを進めることが必要である。この際、本研究の目的を考えると、私達ではなく外部のクリエイターに主体となってコンテンツを制作してもらうことが重要である。これにより、実用性の検証や新たなコンテンツの開拓において大きな効果を期待できる。

これを実現するため、東京大学IRT研究機構特任研究員の石川勝氏と共同で、ダンスクリエイター/ダンサーとして著名なSAM氏にHRP-4Cを用いたエンタテインメントコンテンツを制作してもらう取り組みを行った。これはデジタルコンテンツEXPO (DC-EXPO)<sup>注4</sup>2009、DC-EXPO2010の支援を受けて行い、結果を同イベントにて発表してきた。以下ではChoreonoidの開発後に行われたDC-EXPO2010の取り組みについて紹介する。

DC-EXPO2010では、本論文で述べた技術を総合的かつ本格的に検証するため、図7に示すようなHRP-4Cが歌って踊るコンテンツの開発に挑戦した。このコンテンツは、HRP-4CがSAM氏の振り付けによるダンスを踊りながら、日本の音楽グループ“Every Little Thing”の曲である「出逢った頃のように」を歌う約3分のデモとなっている。

ダンスの動作はSAM氏の振り付けをもとにすべてChoreonoidを用いて制作した。振り付けにおいては事前にロボットの動作能力をSAM氏に伝え、その能力の範囲内で魅力あるコンテンツとなるよう振り付けを行ってもらった。実現したダンスの動作は図8に示すように全身を活用した様々なポーズ・動作を盛り込んだものとなっており、ロボットのダンスとしては表現の豊かさの点でこれまでに無いものである。演出面でも、ダンスのイメージにあったウィッグと衣装をHRP-4Cに装着し、ステージのライティングも趣向を凝らしたものとした。さらに、SAM氏の振り付けはバックダンサーとのコンビネーションを含めてデザインされており、人間のバックダンサー4人との共演による迫力あ



図7 HRP-4Cが歌って踊るデモ

るパフォーマンスを実現した。

歌唱についてはヤマハ株式会社に協力を要請し、VOCALOIDによる音声データとリップシンクデータの提供を受けた。使用したVOCALOID音源はクリプトン・フューチャー・メディア株式会社によるCV-4Cβである。音声データの作成にあたっては、中野・後藤によるVocaListener<sup>[30]</sup>の技術を用いて<sup>註5</sup>、原曲の歌手である持田香織氏の歌い方(エイベックス・トラックより提供された持田香織氏によるボーカルパートの音声トラック)をお手本としたチューニングが行われ、人間に近い表情豊かな歌声を実現した。リップシンクデータについては、5章で述べたVOCALOID連携機能を用いることで、音声データからの自動生成を行い、効率的に作成することができた。

このダンスデモは2010年10月16日の発表後ネットを中心として非常に大きな反響を呼んだ。反響の大きさを示す例として、ステージの観衆によって動画投稿サイトYouTubeに投稿されたデモの動画が、デモ発表後10日間で、延べ200万回以上の再生数と1500件以上のコメントを獲得したことが挙げられる。動画のひとつはその後YouTube日本語版の年間再生回数トップ6を獲得した。また、そのようなネット上の反響の直後に、海外も含む各方面から、このデモの公演依頼やHRP-4Cへの共演依頼が多数寄せられた。これは、本研究で構築した技術を用いてクリエイターが創作した表現が、これまでにない新しいコンテンツとして認識されたことを示しており、私達のシナリオの有効性を実証するものである。

なお、今回Choreonoid上でのキーボード入力作業は筆者のひとりが行ったが、入力に要した時間は実質80時間



図8 ダンス中で実現した多様な動作・ポーズの例

程度であった。3分の動作に対しては少なくない時間がかかってしまったが、これは担当者がCGキャラクターアニメーション作成の経験を持っていなかったことも大きい。本来キーボード入力作業も含めてプロのクリエイターによる検証が必要なのは言うまでもなく、今後はプロのCGクリエイターに直接Choreonoidを操作してコンテンツを作成してもらい取り組みも進めていきたいと考えている。

## 8 今後の展望

HRP-4Cは2009年3月の発表以来、その利用に関する依頼や提案を各方面から受け、2009年3月に開催されたファッションショー「第8回東京発日本ファッションウィーク」の「SHINMAI Creator's Project」においてオープニングスピーチを務めたり、同年7月に開催された「ユミカツラパリグランドコレクションイン大阪」においてウェディングドレスのモデルを務めたり、同年9月に開催された「CEATEC JAPAN 2009」の「ヤマハ株式会社ブース」において「初音ミク」をはじめとするVOCALOIDのキャラクターに扮して歌唱を披露するといった活動も行ってきた<sup>[31][29]</sup>。

ここで注目したいのは、このようなHRP-4Cに関する一般からの依頼は、実際に何をやらせるかについて私達ロボットの開発者に委ねるものに止まらず、ロボットにさせたいことを依頼者が自ら積極的に提案するものが多くを占めていたということである。これは従来私達が使用してきたHRP-2をはじめとするロボットでは無かったことであり、この意味でも3.1節で述べたロボットの形態と外観に関する戦略が成功したと言えよう。

そして、本研究で開発した動作表現支援技術や音声表現支援技術により、DC-EXPO2010のダンスのようにヒューマノイドの表現能力を総合的に活用したコンテンツも作成可能となり、HRP-4Cの利用に関する様々な提案に応じていくことが可能となった。これをさらに実証していくため、7章で述べたような取り組みを今後もさまざまなクリエイターと共同で進めていくべきだと考えている。

そのような取り組みを進めながら、技術的な面でもまだやるべきことは多く残っている。まず二足歩行にかかわる部分としては、現状の振り付けシステムでは滑りやジャンプを含むような動作や膝を伸ばしたより人らしい歩行等を作成することができないが、これらはコンテンツの幅と質を向上させる上で必要なものである。それぞれの動作を単体で実現した例<sup>[32][34]</sup>はあるものの、これらを組み合わせた動作を自由に作成することは依然として難しい課題として残されている。

より自然な動作を表出するための自律性の向上も課題である。例えば目線の動きが自然となるよう自動化したり、あ

る姿勢を維持する際にも完全に静止するのではなく、微妙なゆらぎを自動生成すること等が考えられる。

そして、ロボット技術全体にかかわる部分でも、まだ改善が必要である。コンテンツによってはロボットが周囲の環境に適応的に動作しなければならないので、環境認識やそれに基づく動作計画、あるいは人間とのインタラクションにかかわる研究成果を活かすことができる。また、小道具を扱うコンテンツにおいては、マニピュレーション能力も必要になってくる。

以上のようなロボットの各種技術は段階的にコンテンツへ取り入れながら発展させていけばよい。したがって、ヒューマノイドを用いたコンテンツを開拓していく取り組みは、ロボットの技術を総合的に発展させそれを産業に展開していく場としても有効である。その結果ロボットの能力が高まっていけば、生活支援も含めて、コンテンツ技術という枠を超えたヒューマノイドの実用化も視野に入ってくると期待できる。

以上を踏まえながら、今後もコンテンツ技術としてのヒューマノイドの発展に向けた研究開発を進めていく予定である。

## 謝辞

HRP-4Cの開発は、産総研産学連携プロジェクト「産総研産業変革研究イニシアティブ」の「ユーザー指向ロボットオープンアーキテクチャ(UCROA)の開発」の一環として実施された。また、Choreonoidの開発はNEDO「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」の支援を受けて開発した「動作パターン設計ツール」をベースとした。

UCROAプロジェクトの遂行にあたっては、産総研知能システム研究部門長の比留川博久氏、元産総研理事の伊藤順司氏の多大なる支援を受けた。産総研の藤原清司氏、原田研介氏、阪口健氏、有隅仁氏、喜多伸之氏、原功氏、辻徳生氏、元産総研のNeo Ee Sian氏には本研究に関して貴重な意見をいただいた。DC-EXPO2010におけるコンテンツ制作は、東京大学IRT研究機構特任研究員の石川勝氏、ダンスクリエイターのSAM氏、ヤマハ株式会社の大島治氏・剣持秀紀氏・橋誠氏をはじめとする多くの方々の協力により実現したものである。

**注1)** 人間に近い外観・形態を持ち、人間に極めて近い歩行や動作ができ、音声認識等を用いて人間とインタラクションができるヒューマノイドロボットを意味する造語である。

**注2)** 本論文執筆時点の最新の仕様である。他の記述についても同様とする。

**注3)** Choreonoidという名称は“Choreograph”と“Humanoid”の組み合わせによるものであり、このソフトウェアの核となる振り付け機能をイメージしたものである。

**注4)** デジタルコンテンツEXPO (DC-EXPO) は、経済産業省と財団法人デジタルコンテンツ協会が主催する国際イベントで、2008年より毎年10月に日本科学未来館、東京国際交流館にて開催されてきた。

**注5)** 正確には、産総研からこの技術のライセンスを受けてヤマハ株式会社が開発した「Netほかりす」サービスが使用された。

## 参考文献

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: The development of Honda humanoid robot, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium*, 1321-1326 (1998).
- [2] E. S. Neo, T. Sakaguchi, K. Yokoi, Y. Kawai and K. Maruyama: A behavior level operation system for humanoid robots, *Proceedings of the 6th IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots, Genoa, Italy*, 327-332 (2006).
- [3] K. Okada, M. Kojima, S. Tokutsu, Y. Mori, T. Maki and M. Inaba: Integrating recognition and action through task-relevant knowledge for daily assistive humanoids, *Advanced Robotics*, 23 (4), 459-480 (2009).
- [4] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujimura: The intelligent ASIMO: System overview and integration, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Switzerland*, 2478-2483 (2002).
- [5] S. Kagami, K. Nishiwaki, J. Kuffner, Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue: Online 3D vision, motion planning and bipedal locomotion control coupling system of humanoid robot: H7, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Switzerland*, 2557-2562 (2002).
- [6] 五十榎隆勝, 赤地一彦, 平田勝, 金子健二, 梶田秀司, 比留川博久: ヒューマノイドロボットHRP-2の開発, *日本ロボット学会誌*, 22 (8), 1004-1012 (2004).
- [7] I.-W. Park, J.-Y. Kim, J. Lee and J.-H. Oh: Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST humanoid robot -3: HUBO), *Proceedings of the 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Tsukuba, Japan*, 321-326 (2005).
- [8] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. Ok Lim and A. Takanishi: Development of a humanoid robot WABIAN-2, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, USA*, 76-81 (2006).
- [9] 高木宗谷: トヨタパートナーロボット, *日本ロボット学会誌*, 24 (2), 208-210 (2006).
- [10] K. Akachi, K. Kaneko, N. Kanehira, S. Ota, G. Miyamori, M. Hirata, S. Kajita and F. Kanehiro: Development of humanoid robot HRP-3P, *Proceedings of the 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Tsukuba, Japan*, 50-55 (2005).
- [11] 金子健二, 原田研介, 金広文男, 木村勉, 宮森剛, 赤地一彦: ヒューマノイドロボットHRP-3の開発, *日本ロボット学会誌*, 26 (6), 658-666 (2008).
- [12] J.-H. Oh, D. Hanson, W.-S. Kim, I. Y. Han, J.-Y. Kim and I.-W. Park: Design of android type humanoid robot Albert HUBO, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China*, 1428-1433 (2006).
- [13] H. Ishiguro: Android science: conscious and subconscious recognition, *Connection Science*, 18 (4), 319-332 (2006).

- [14] 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒浩, 萩田紀博: 遠隔存在感メディアとしてのアンドロイド・ロボットの可能性, *情報処理学会論文誌*, 48 (12), 3279-3738 (2007).
- [15] 金子健二, 金広文男, 森澤光晴, 三浦郁奈子, 中岡慎一郎, 原田研介, 梶田秀司: サイバネティックヒューマンHRP-4Cの開発-プロジェクト概要からシステム設計まで-, *日本ロボット学会誌*, 28 (7), 79-90 (2010).
- [16] 金子健二, 金広文男, 森澤光晴, 三浦郁奈子, 中岡慎一郎, 梶田秀司, 横井一仁: エンターテインメント応用に向けたサイバネティックヒューマンHRP-4Cの改良, *第28回日本ロボット学会学術講演会*, 1A3-4 (2010).
- [17] 梶田秀司(編): ヒューマノイドロボット, オーム社(2005).
- [18] S. Kajita, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro and K. Yokoi: Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking, *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan* (2010).
- [19] Y. Kuroki, B. Blank, T. Mikami, P. Mayeux, A. Miyamoto, R. Playter, K. Nagasaka, M. Raibert, M. Nagano and J. Yamaguchi: Motion creating system for a small biped entertainment robot, *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada*, 1394-1399 (2003).
- [20] Y. Kuroki, M. Fujita, T. Ishida, K. Nagasaka and J. Yamaguchi: A small biped entertainment robot exploring attractive applications, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan*, 471-476 (2003).
- [21] S. Nakaoka, S. Kajita and K. Yokoi: Intuitive and flexible user interface for creating whole body motions of biped humanoid robots, *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan*, 1675-1682 (2010).
- [22] 中岡慎一郎, 山野辺夏樹, 比留川博久, 山根克, 川角祐一郎: 分散コンポーネント型ロボットシミュレータOpenHRP3, *日本ロボット学会誌*, 26, 5, 399-406 (2008).
- [23] S. Nakaoka, S. Hattori, F. Kanehiro, S. Kajita and H. Hirukawa: Constraintbased dynamics simulator for humanoid robots with shock absorbing mechanisms, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA*, 3641-3647 (2007).
- [24] S. Nakaoka, F. Kanehiro, K. Miura, M. Morisawa, K. Fujiwara, K. Kaneko, S. Kajita and H. Hirukawa: Creating facial motions of Cybernetic Human HRP-4C, *Proceedings of the 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Paris, France* (2009).
- [25] 中岡慎一郎, 中澤篤志, 金広文男, 金子健二, 森澤光晴, 比留川博久, 池内克史: 脚タスクモデルを用いた2足歩行ヒューマノイドロボットによる人の舞踊動作の再現, *日本ロボット学会誌*, 24, 3, 112-123 (2006).
- [26] K. Fukui, Y. Ishikawa, K. Ohno, N. Sakakibara, M. Honda and A. Takanishi: Three dimensional tongue with liquid sealing mechanism for improving resonance on an anthropomorphic talking robot, *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Kobe, Japan*, 5456-5462 (2009).
- [27] 剣持秀紀, 大下隼人: 音声合成システムVOCALOID-現状と課題, *情報処理学会研究報告*, 2008-MUS-74-9, 12, 51-58 (2008).
- [28] 橋誠, 中岡慎一郎, 剣持秀紀: 歌うロボット-VOCALOIDとサイバネティックヒューマンHRP-4Cのコラボレーション-, *情報処理学会研究報告*, 2010-MUS-84, 14 (2010).
- [29] 中岡慎一郎, 比留川博久: OpenRT Platform/動作パターン設計ツール, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECS2009, 福岡*, 2A2-C12 (2009).
- [30] 中野倫靖, 後藤真孝: VocaListener: ユーザ歌唱を真似る歌声合成パラメータを自動推定するシステムの提案, *情報処理学会研究報告*, 2008-MUS-75, 50, 49-56 (2008).
- [31] K. Miura, S. Nakaoka, S. Kajita, K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa and K. Yokoi: Trials of cybernetic humanoid HRP-4C toward humanoid business, *Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, Seoul, Korea*, WA01 (2010).
- [32] 三浦郁奈子, 中岡慎一郎, 金広文男, 原田研介, 金子健二, 横井一仁, 梶田秀司: 足裏の滑りを利用した2足歩行ロボットの方向転換-滑り現象のモデル化と回転角の予測-, *日本ロボット学会誌*, 28, 10, 84-94 (2010).
- [33] 但馬 竜介, 菅 敬介: 1脚ロボットによる跳躍動作の実現, *第24回日本ロボット学会学術講演会*, 岡山, 2F16 (2006).
- [34] Y. Ogura, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, T. Okubo, S. Momoki, H. ok Lim and A. Takanishi: Human-like walking with knee stretched, heelcontact and toe-off motion by a humanoid robot, *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China*, 3976-3981 (2006).

#### 執筆者略歴

中岡 慎一郎 (なかおか しんいちろう)

2001年東京工業大学理学部情報科学科卒業。2006年東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程修了。博士(情報理工学)。2006年4月より産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。2008年度日本ロボット学会論文賞、IROS2010 Best Paper Finalist 受賞。ヒューマノイドロボットによる動き提示、ロボットソフトウェアプラットフォームの研究に従事。本研究では、主として動作表現支援技術、音声表現支援技術、統合インタフェースの開発と、コンテンツ制作実験を担当した。



三浦 郁奈子 (みうら かなこ)

2004年東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年フランス Université Louis Pasteur 博士課程修了。博士(情報科学) / le grade de docteur: Electronique, Electrotechnique, Automatique。同年東北大学研究支援者。2005年より株式会社 NTT ドコモ総合研究所研究員。2007年より産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。人間の動作解析、ヒューマノイドロボット動作計画等の研究に従事。本研究では、主として HRP-4C の開発を担当した。



森澤 光晴 (もりさわ みつはる)

2004年慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年4月より産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。2009年4月より1年間、仏国 LAAS-CNRS 客員研究員。パラレルメカニズム、モーションコントロール、ヒューマノイドロボット等の研究に従事。本研究では、主として HRP-4C の開発を担当した。



金広 文男（かねひろ ふみお）

1999年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士（工学）。1998年より日本学術振興会特別研究員。2000年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年より組織改変に伴い産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。2007年10月主任研究員。2007年4月より仏国LAAS-CNRS客員研究員。ヒューマノイドロボットのシステム構成法、全身行動制御に興味がある。本研究では、主としてHRP-4Cの開発を担当した。



金子 健二（かねこ けんじ）

1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年工業技術院機械技術研究所に入所。1995年9月より半年間米国カーネギーメロン大学客員研究員、1999年9月より1年間仏国CNRSパリオロボット研究所客員研究員。2001年より組織改変に伴い産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員、現在にいたる。博士（工学）。モーションコントロール、マイクロマシン、遠隔制御、ヒューマノイドロボット等の研究に従事。2009年IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots Best Paper Award (Oral Category) 受賞。本研究では、主としてHRP-4Cの開発を担当した。



梶田 秀司（かじた しゅうじ）

1985年東京工業大学大学院修士課程修了（制御工学専攻）。同年工業技術院機械技術研究所に入所。1996年2月より1年間米国カリフォルニア工科大学客員研究員。1996年東京工業大学より学位取得。工学博士。2001年より組織改変に伴い産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員、現在に至る。二足歩行ロボット等の動的制御技術の研究に従事。1996年度計測自動制御学会論文賞、2005年度日本ロボット学会論文賞受賞。本研究では、主としてHRP-4Cと歩行安定化制御システムの開発を担当した。



横井 一仁（よこい かずひと）

1986年東京工業大学大学院機械物理工学専攻修了。同年工業技術院機械技術研究所に入所。2001年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。2004年同所同部門研究グループ長、2009年同所同部門副研究部門長、現在に至る。1995年～1996年スタンフォード大学客員研究員、2003年～2008年AIST-CNRS Joint Robotics Laboratory Co-director、2005年より筑波大学大学院システム情報工学研究科教授（連携大学院）兼任。人間型ロボット等の自律性の向上に関する研究に従事。1993年日本機械学会賞研究奨励賞、1993年計測自動制御学会論文賞、2003、2004年IEEEICRA Best Video Award、2005年日本ロボット学会論文賞、2006年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞、2008年日本機械学会賞（論文）他受賞。博士（工学）。本研究では、主としてコンテンツ制作実験を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 構成学としての全体構成

コメント（持丸 正明：産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター）

#### 【構成学としての論文構成】

構成学としては、等身大のリアルなヒューマノイド（ハードウェアとしてのプラットフォーム）、運動表現支援技術（全身動作生成+動力学シミュレータ）、歌唱表現支援技術（音声合成技術+リップシンク技術）の三つの要素技術を統合し、それによって産み出された表現が、これまでにない新しいメディアコンテンツとして認識されるかどうかを検証した、という枠組みになると理解しました。構成学の論文として、この位置付けを明瞭化して、それに沿って章立てを考える方が良いと思います。

コメント（小林 直人：早稲田大学研究戦略センター）

#### 【構成学としての全体像が掴める図】

要素技術として、「サイバネティックヒューマン“HRP-4C”の完成」、「全身動作作成ソフトウェア“Choreonoid”の生成」、「顔動作生成機能の実現」「動力学シミュレータの開発と活用」等が極めて重要なものであり、これらを統合することにより、最終目標を達成できたと認識しました。ここで各要素技術を一つのブロックとして表現し、要素技術ブロック同士の関係やそれらをどう組み合わせ構成して最終目標に近づけたかを一つの図で表現すると読者の理解が高まると思われれます。「構成学」としての学の観点からも非常に重要です。

#### 【統合における技術的困難性の記述】

またその際、統合に向けて乗り越えるべき大きな困難があったとしたらそれが何であったかを記述されるとよいと思います。

#### 【統合から要素技術へのフィードバック】

さらに統合に向けて、個々の要素技術の修正や改善までフィードバックをする必要があったかと思いますが、もしそのような分かりやすいフィードバックの例があると、読者の参考になりますので例示をしていただけるとよいと思います。

回答（中岡 慎一郎）

#### 【構成学としての論文構成】

コメントを参考にして、記述を改めました。章の構成については、まず2章で本研究の目的と課題となる四つの技術領域について簡潔にまとめた上で、課題の詳細とそれに対する取り組みは四つの技術領域ごとに章をまとめて記述する構成としました。その上で、【構成学としての全体像が掴める図】として、本研究の概要を表す図1を追加しました。

#### 【統合における技術的困難性の記述】

「ロボットハードウェア」「動作表現支援技術」「音声表現支援技術」「統合インタフェース」を構成要素とする大きな枠組みでは、それらの必要な要素を検討して総合的に作り上げるところに困難性がありました。一方で、ロボットハードウェアと動作表現支援技術のそれぞれの枠組みでは、「人に近い外観」と「二足歩行」を「統合」することの困難や、「CGのキーフレームアニメーション」と「二足歩行ロボットの安定な動作の作成」を統合することの困難がありました。これらの困難性の記述をそれぞれの章に含めました。

#### 【統合から要素技術へのフィードバック】

確かにそのような事例がありました。特に、歩行安定化制御システムに改良が必要になったので、3.3節にて詳しく述べました。

### 議論2 ヒューマノイドのコンテンツ産業

質問（小林 直人）

コンテンツ・メディアとしてのヒューマノイドの産業化を目指しているとの記述があります。現時点では、この論文の例で示された「歌唱やダンス」、「ファッションショーの司会」、「モデル」等以外に、今後具体的にどのようなニーズが考えられ、全体としてどれくらいの市場規模の産業（ヒューマノイド・コンテンツ産業やヒューマノイド・アミュー

ズメント産業)が想定されるでしょうか。またその場合に、他にどのような技術、機会や工夫があるとその産業がさらに育っていきと考えられますか。

回答 (中岡 慎一郎)

HRP-4Cを用いた具体的なコンテンツとしては、論文で示した例以外にも、演劇や、成人式でのメッセージビデオ、見本市における製品紹介等を実際に行ってきました。また、2010年に開催されたアジア太平洋経済協力(APEC)首脳会議においては、日本の先端技術の展示会にてHRP-4Cが歓迎のあいさつを各国首脳に行いました。論文で示した例も含めて、このようにHRP-4Cのようなヒューマノイドが何かを「伝える」「提示する」「表現する」「演じる」といったことの応用範囲は広く、具体的なニーズをコンテンツの内容で考えていくことにはきりがありません。この部分はクリエイターの仕事となってくるので、今後、多様な分野のクリエイターの方々と広く議論していきたいと考えています。

産業に関しては、まずは既存のコンテンツ産業やアミューズメント産業の枠組みの中でロボットが使われるようになるというイメージで考えています。そのような期待は、経産省の技術戦略マップ2010においても「アイドルロボット」として記述されており、影響を与える範囲として、音楽、映画、ドラマ、遊園地、観光の各産業が取り上げられています。これらのライブ・エンターテインメントの市場は1兆円(2007年)です。この中でロボット自体(ロボットのハードウェア・ソフトウェア・運用サービス等)の市場規模として、まずは国内で数十億円程度を達成することが目標となるかと思っています。その後、「8.今後の展望」に述べた技術発展によってロボットの応用範囲を広げること、この産業をさらに育てていければと思います。また、産業を育てる機会や工夫という点では、やはりクリエイターとの連携が重要になると思います。

### 議論3 日本文化としての特性

質問 (小林 直人)

このようなヒューマノイドに対して感じるある種の親近感、日本特有の文化に根ざしていると考えられないでしょうか。もし文化が異なった場合は、人間が感じる印象も異なると考えられますが、国際学会での評判や反応はいかがでしょうか。

回答 (中岡 慎一郎)

国際学会での研究者から直接得られる評判や反応は、国籍を問わず好意的なものが中心でした。これは、技術を中心に評価していることや、もともとロボット研究者はロボットが好きなお客からくるものだと思います。したがって、国によってどのように印象が変わっているかについて、学会の反応からはよく分かりません。一方、動画投稿サイト等のネット上で寄せられたコメントは、好意的な意見ばかりではありませんでした。その中で気づいたこととして、海外の人が書いたと思われる英語のコメントの中には「いずれ人を襲う」「戦争に使われる」といった趣旨のコメントも多かったのですが、日本語で書かれたコメントの中にはそのようなものはほとんどなく、この点では文化の違いのようなものを感じました。いずれにせよ、非常に多数のコメント

が寄せられているので、それらの統計をとれば印象の違いに関する正確な傾向が分かるかもしれません。

### 議論4 ヒューマノイドの技術的進化とコンテンツの魅力限界

質問 (小林 直人)

現在はヒューマノイドが人間のように動いてコンテンツを作っていることが大きな興味を惹いていると思います。今後、技術がより高度になると、人間ができないこともできるようになると思います。コンピュータがチェスで初めて人間に勝ったときには興味を惹きましたが、その先は興味がなくなってしまったように、ヒューマノイドによるコンテンツにも人間の興味を失わせる限界があるような気がします。もしそうだとすると、その限界はどのようなもので、いつごろ到来すると考えられるでしょうか。あるいはそうならないためにはどのような工夫がいるのでしょうか。

回答 (中岡 慎一郎)

ヒューマノイドロボットを用いたコンテンツが人の興味を惹く要素として、「ロボット自体への興味」と、「コンテンツの内容への興味」があるかと思っています。前者については、人間と変わらないところまで進化し、さらにロボットが人間を超えて進化していくことに関して、人々の興味はつきないかと思っています。また、後者については、興味深い内容を実現するためにロボットの特徴や機能が表現や運用の面で役に立てばよいのだと思います。これについても、ロボットが進化していくことで人間にできないようなことができるようになれば、それだけコンテンツの表現や運用の幅が広がり、より一層興味を惹くコンテンツ内容に繋がると考えています。

### 議論5 ヒューマノイド研究開発の戦略

質問 (小林 直人)

ヒューマノイド研究開発の戦略や方針の一つとして、本研究のようなコンテンツ・メディアとしてのヒューマノイド利用を先行させ、その利用に駆動されるかたちでヒューマノイドの運動能力や堅牢性・安全性等の基本性能を向上させ、これらの基本性能の向上をヒューマノイドによる生活支援を含む他の応用に繋げる方策であると理解しました。その戦略は妥当だと思います。一方で、人間の機能を支援する場合は必ずしもヒューマノイドである必要はないと考える意見は、依然根強いと思われる。人間自身の心理的側面も考慮して、ヒューマノイドが必要だという意見があればお聞かせ下さい。

回答 (中岡 慎一郎)

人間の生活を支援するためにロボットにできる作業を増やしていけば、「1.コンテンツ技術としての人間型ロボット」の第2段落で述べた理由により、ロボットの物理的な形態は必然的に人間に近づくのではないかと考えています。また、人間に近い形態は人間を心理的側面から支援することに対しても有効であると考えられます。結局、ロボットにどこまで求めるかという問題であり、生活支援における高い要求に答えていくためには、多くの要素技術の発展に加えて、「ヒューマノイドという形態」も必要となると考えています。

# 水素センサーの研究開発

## — 水素安全技術から国際規格まで —

申 ウソク\*、西堀 麻衣子、松原 一郎

水素ステーションでの水素漏れ検知に向けて開発した熱電式水素センサーは、優れた水素選択性と、0.5 ppmから5 %までの広範囲の水素濃度検知性能という特徴を示した。1年間のフィールドテストにおいてこれまでの技術を超える高感度と信頼性を実証し、その技術を実用化することで社会へ還元した。触媒燃焼と熱電変換技術を組み合わせた新しい原理、それを最大限活用するための微細加工技術、ガス燃焼に欠かせない高性能のセラミックス触媒部材、これら三つの構成要素を社会的なニーズという境界条件に合わせて、各要素の特長を最大に引き出すことができた。さらに、開発中に検討したセンサー性能評価技術を国際標準の提案へ発展させた。

キーワード：水素センサー、ガス検知、水素ステーション、フィールドテスト、熱電変換、燃焼触媒

### Thermoelectric hydrogen gas sensor

- Technology to secure safety in hydrogen usage and international standardization of hydrogen gas sensor -

Woosuck SHIN\*, Maiko NISHIBORI and Ichirou MATSUBARA

A thermoelectric hydrogen gas sensor developed for leak detection in hydrogen stations has shown good hydrogen selectivity and wide hydrogen detection concentration ranging from 0.5 ppm to 5 %. We have demonstrated high sensitivity and reliability of the sensor exceeding conventional technology through a field test of one year. We could optimize the following three constituent technology elements to meet the social needs, i.e. new principle integrating catalytic combustion and thermoelectric conversion technology, micro-fabrication technology to realize the principle and high performance ceramic catalyst for gas combustion. In addition, the sensor performance evaluation technology established during the development has been proposed for ISO standardization.

**Keywords:** Hydrogen sensor, hydrogen station, field test, thermoelectric, catalyst combustor

#### 1 はじめに

私達がガスセンサーの研究開発を始めたのはわずか10年ほど前であり、その頃からこの論文で紹介する新しい原理の水素センサーの開発がスタートした。旧工業技術院から産業技術総合研究所への変革を迎える中で、私達は材料研究者として将来どのような研究を推進していくべきかを探っていた。すでに民間企業の研究レベルがとて高く、ハードウェアである分析設備やプロセス装置も大手メーカーが一步先を進んでいるうえ、大学との差別化をどのように図るかに対する一つの答えとして、機能性材料の物性およびプロセスの研究から、それらを利用したセンサー素子の製造へと進化を試みた。

水素燃料電池を筆頭にブームが起きた水素関連技術に着目し、水素の安全利用に最も重要となる漏れ検知用センサー技術を確認することを目標として、今までにない原理のセンサー開発を始めた。可燃性ガスセンサーの動作原理

である触媒を用いたガスの接触燃焼と、当時研究を行っていた熱電変換材料からなる“知識の融合”である。ガスの燃焼による発熱で生じる素子内部の局所的な温度変化を熱電材料で電圧に変換する新しい原理をもって、それまでに数多くの開発が行われてきた水素センサーの分野に飛び込んだ。

水素センサーに限らず、ガスセンサーにはさまざまな性能が要求される。まず挙げられるものとして、検出濃度範囲、検出限界濃度、ガス選択性等の検知性能がある。学会や学術論文における報告のほとんどが、これらの検知性能に基づいた議論を展開する材料研究やデバイス研究に関するものである。しかし、実際の社会で用いるためのセンサーには、検知性能の他に信頼性や経済性が求められる。特に、信頼性は実際のシステムにセンサーを適用する際に最も厳しく問われる課題である。

私達が開発したセンサーは、これらの課題に対して解決

産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒463-8560 名古屋守山区下志段味ヶ洞 2266-98  
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST 2266-98 Anagahora, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan  
\* E-mail: w.shin@aist.go.jp

Original manuscript received February 1, 2011, Revisions received April 26, 2011, Accepted April 27, 2011

策を出し続けることにより、水素漏れ検知応用において最も優れた性能を示す結果となった。これを実用するにあたっての社会受容性の観点から、私達は水素検知器に関する国際規格の提案を同時に進めた。

## 2 水素センサーに求められる社会的ニーズ (性能)

クリーンな反面、爆発の危険を併せ持つ水素を安全に利用するためには、安全担保技術が不可欠である。水素ステーションを代表とする高水準の安全管理が求められる水素関連施設では、水素漏れ濃度の変化を随時モニタリングする水素センサーが要求される。水素を大量に貯蔵し、さらには別の機器等に移し替える水素ステーションの安全管理は、今までの社会にはない新しい技術への挑戦であり、以下に述べるこれまでの技術の弱点を見直す契機となった。

市販されている水素センサーの多くは、接触燃焼式あるいは半導体式の動作原理のものである。これらの原理のセンサーでは、狭い濃度範囲のガスしか検知できなだけでなく、いずれの技術も水素を選択的に検知するには至っていない。

半導体式センサーは超高感度の検知性能が達成できる動作原理であるため学術的な研究が多く行われており、ガスセンサーに関する論文の大部分を占めている。半導体式センサーの感度を向上させるための材料開発を行うと、高感度が達成される一方でさまざまな環境ノイズにも応答し易くなる問題が生じる。さらに、センサー信号がドリフトする問題のために精度（表示値のばらつき）<sup>[1]</sup>が悪くなり、信頼性に欠けるものとなる。

接触燃焼式センサーは寿命および安定性に優れているため広く利用されている。このセンサーの場合、触媒燃焼によるわずかな素子温度の上昇（＝白金コイルヒーターの抵抗変化）を検知信号とする。触媒燃焼はシンプルな化学反応であるため、多少の環境ノイズが存在しても誤った信号出力は少ないが、信頼性と感度を両立させるのは難しい。接触燃焼式センサーではセンサーの抵抗変化分を検出信号としており低濃度での感度が著しく低下するため、実用的には1000 ppm から数%の検知濃度範囲で利用される<sup>[2]</sup>。

図1に水素ステーションで必要とされるマルチレベルの安全システムのコンセプトを示す。広い濃度範囲を安定性よく検知できるシステムが構築できれば、設備全体のシャットダウンを回避し、水素濃度に合わせた高効率の運用ができる。さらに、ステーション等では、通常でも他の可燃性ガスや被毒性ガスが空气中に存在していることから、水素選択性や対被毒性も要求される。

実際の水素ステーションでは、高濃度では接触燃焼式

を、低濃度では半導体式を、それぞれ得意とする濃度領域に合わせて運用するところも多数存在する。小さな“水素漏れ”でも短時間で検知することを考慮すると、半導体式センサーを使えば良いと考えがちであるが、実際の現場では、低濃度での安定性の問題から半導体式センサーは参考用としてのみ利用し、接触燃焼式センサーを警報機として利用しているところもある。

## 3 ガスセンサー開発での構成学的要素

### 3.1 三つの性能に対する三つの技術要素：センサー素子作製

私達は触媒燃焼と熱電変換技術を組み合わせた全く新しい原理の水素ガスセンサーを提案した。このセンサーはこれまでの接触燃焼式センサーと同様に触媒上で生じるガスの燃焼発熱を用いるが、素子全体の温度変化を抵抗変化としてとらえるのではなく、素子内部の局所的な温度差の変化を熱電変換原理で電圧信号に直接変換するものである。私達はこれを熱電式センサーと名付けた。図2に、ガスセンサーに求められる基本的な三つの検知性能である3S、ガス選択性 (selectivity) 高感度 (sensitivity) 安定性 (stability) と、この研究での技術要素との相関を示す。

- ①新しい原理、“知識の融合”：熱電変換原理は、これまでの技術で実現できなかったガス選択性および検知範囲を可能にした最も重要な技術要素であり、開発当初からセンサー素子開発の土台となった<sup>[3]</sup>。
- ②微細加工技術：低濃度ガスによる微小な熱量でさえ信号として利用するために、シリコンの異方性エッチングを代表とする微細加工技術を用いて、マイクロカロリーメーターとなるセンサー素子を作製した。
- ③触媒技術：マイクロデバイス上の熱電パターンの特定位置にガス燃焼に欠かせない高性能のセラミックス触媒部

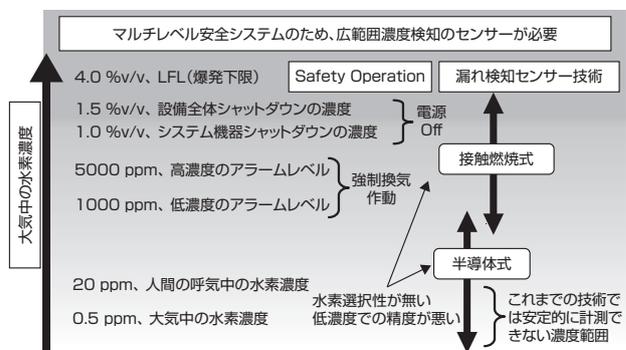


図1 水素濃度に対応するマルチレベルの安全システムの概要  
水素は拡散が早く低濃度レベルから警報すべきであるが、これまでの技術は低濃度レベルでの安定性が悪く、水素選択性がない。

材を載せる技術を開発し、上記①の原理のセンサーをマイクロセンサーとして完成させた。

これらの技術要素①、②、③の統合により試作したセンサーは、優れた水素選択性と、0.5 ppm から 5 % までの広範囲の水素濃度検知性能を示し、1 年間のフィールドテストにおいてこれまでの技術と同じ安定性を実現することができた<sup>[4]</sup>。センサーの高感度の特性は、選択性あるいは安定性とトレードオフとなるのが一般的であるが、熱電式センサーでは両立させることに成功した。接触燃焼式センサーの検知下限が 500 ppm 程度であることを考えると、熱電式センサーの検知性能は革新的である。

センサーの安定性については、応答性能の劣化を引き起こす要因を科学的なアプローチで明らかにし、触媒の組成および膜厚を制御する等の改良研究によって向上させることができた<sup>[5]</sup>。しかし、開発した新しい原理のセンサーが、それだけで実用化に向けた信頼性が確保できているとは言い難い。そこで、開発したセンサーの信頼性を実証するために、東京有明水素ステーションに実際に熱電式センサーを 1 年間設置し、アラームレベル 100 ppm でも十分な応答を示すことを実証するフィールドテストを実施した<sup>[6]</sup>。

### 3.2 もう一つの構成的要素：センサー（製品）評価技術

それぞれの技術要素をまとめていくと、センサー素子という構成された形が作られる。その“出来栄”を分析・評価する技術要素は、最終的な製品の構成要素に含まれないように見えるが、実は不可欠な要素である。開発された“製品”を使うユーザーにとっては、製品の特性がどのように表現されているかによって、さまざまな判断を下す指

標となるためである。この研究では、図 3 に示した次の三つの評価方法が活用された。

- ・ガス応答中の素子表面温度変化を IR カメラでその場観察する試験方法
- ・万人が同一の方法で応答速度を評価できる試験方法 (ISO CD26142 付録)
- ・量産技術としてガス応答性能を評価するシステム

前述のとおり、熱電式ガスセンサーは熱電変換デバイスおよびそれに載せるセラミックス触媒の二つの構成要素からなる。

1 番目の試験方法はセンサーとして構成するために融合した異なる二つの要素を切り分けて評価することで、各構成要素の間の有機的なバランスを明確に把握するために活用した。

2 番目の試験方法は、特別な設備を用いることなくセンサー応答性能の評価が誰でも同じ方法で実施できることを考慮し、容積 30 リッターのチャンバー内に計測するガスを充填させただけの簡単なものである。この方法は、2010 年に発行された国際規格 (ISO) の中で応答速度評価方法として記載された。

3 番目の試験方法は量産技術としての評価法である。ガスセンサー素子の製造コストは一体どのくらいであろうか？ 小さな部品を一つ一つ覗いてみると、それほど費用がかかっているようには見えない。高付加価値のセンサー素子は商品となる前のテストにかかるコストが最も大きい。部材や部品に対する評価装置は市販されているが、センサーの

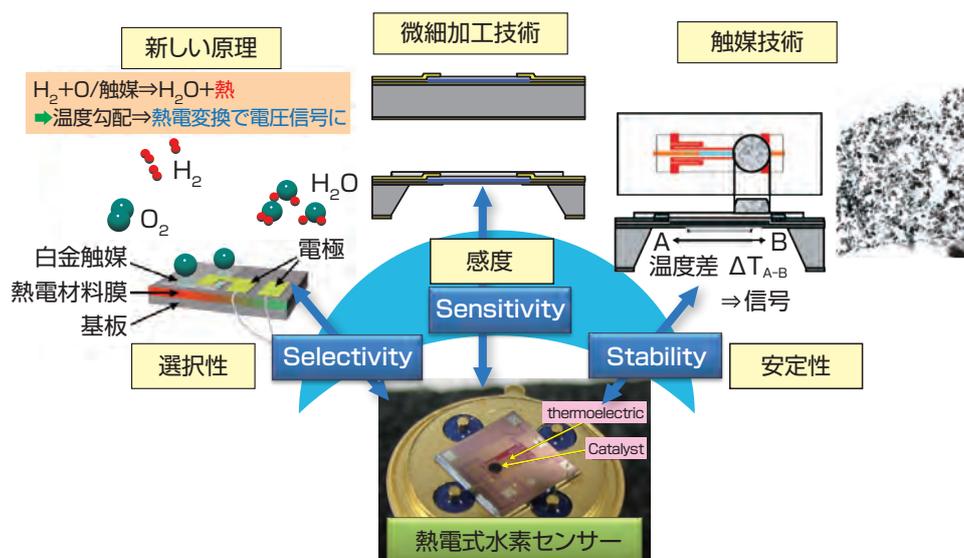


図2 水素センサーに求められる性能と技術要素の相関図  
センサーは高感度であるべきだが、選択性または安定性とのトレードオフとなる。熱電式センサーはセンサーデバイスの局所的な温度差を熱電変換する新しい原理により、高感度でありながら選択性と安定性を併せもつことができる。

ような“製品”に対する評価装置は市販されておらず、量産用の製品テスト装置は各メーカーにおいて最も重要な機密事項である。そこで私達は、研究開発を始めた頃から、素子の量産技術の最重要課題として高効率な評価システムの開発に取り組んだ。

### 3.3 構成的方法はまずシナリオを作ること

ここまで述べた技術要素の構成による統合は社会のニーズに対応するためにさまざまな技術課題の解決を目的とした研究開発の流れそのものである。図4に熱電式水素センサー開発のシナリオを時系列で示す。平成12年度から3年間の研究開発で得られたシーズは、触媒燃焼と熱電変換を融合させる“知識”の技術要素であった。そのアイデアは最初はとても脆いものであり、開発を開始してすぐに、優れた原理のセンサーであっても十分な性能を引き出すにはマイクロ化が不可欠であることが分かった。

2002年度は動作確認ができたばかりのセンサーをマイクロガスセンサーデバイスまで開発を広げる、5年間の壮大な“開発シナリオ”を描いていた節目の時期であった。2003～07年度が構成学的な研究の一つのサイクルであった。最初は構成要素がばらばらにあるが、これらを融合し構成することで必要な性能を実現させる成果を出し、最後は研究成果が収穫され次の研究がスタートする、という一つの循環が明確であった。この循環を以下の四つのステップに分け、ここでは主に【③構成する】に対して方法論を論じる。

- ①アイデア：新しい着想・発見する、またはニーズを発掘する
- ②知識の融合：それを具体化した実験等で定量化する
- ③構成：応用に必要な特性を定め（目標）、開発を進める

### ④仕上げ：研究成果をまとめ、次の研究に繋げる

それぞれ異なる特長の要素に対し、うまく構成するには長い時間がかかる。性能向上のための新しいアイデアを基にセンサー製造プロセスを行い、結果を確認し、次の方法を探ることで、各要素技術を担当するメンバーに新たな方向性を示す、いわゆるフィードバックには、数カ月から1年の時間が必要なこともある。これはオーケストラの練習に近いものがある。私達が熱電式センサー開発で実践した最も機動力の高い方法論は、以下の二つである。

- ・最初から実用化を目指したラボ設計（自動化プロセス設備とセンサー評価装置）
- ・開発シナリオ全体の共有と現場中心のディスカッション

たとえ知識の融合といえども、いかに迅速に実験による結果の確認を行えるかが重要である。そのためには、プロセスツールと分析ツールの両者を充実させる必要がある。この論文でラボ設計の詳細を述べるのは難しいが、この研究のマイクロセンサー素子製造に対して、クリーンルーム空間を最小限にし、半径5メートル以内におよそすべてのプロセス設備群を集約した極めて効率の高いラボ設備でプロセスを行ったことが、実用化まで開発を進めることができたポイントである。

全自動のプロセス設備の導入が良い結果をもたらした。通常、研究の初期段階では実験用設備を導入しがちであるが、私達は汎用的セミ量産装置を導入したことにより実用化を見据えた開発ができた。このような設備は高い知識

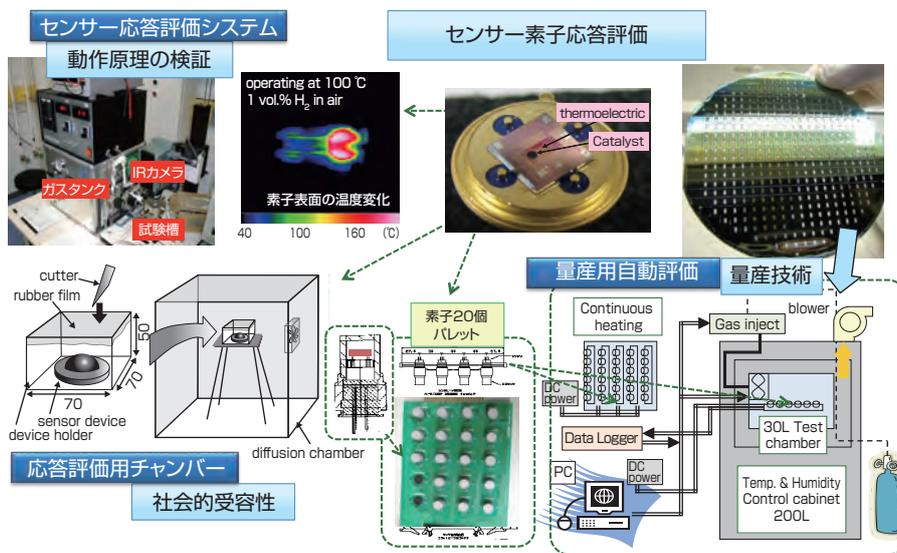


図3 三つのセンサー素子応答評価  
動作原理の確認、評価方法の社会的受容性、量産技術としての評価法としてそれぞれ意義をもつ。

をもつ専門のスタッフを必要とせず、メンテナンスも容易であるため、開発コストの大幅な削減に繋がった。

設備を稼働して結果を出すのは同じチームのメンバーである。メンバーの適材適所な配置、各自の専門に縛られない環境作り、担当する要素技術開発の奨励もまた構成に必要な要素である。それぞれのメンバーの要素技術を守りながら一つの目標に向かわせることは簡単ではないが、【シナリオの共有】ができればベクトルを揃えることができる。熱電式センサー開発では、メンバーが自分の担当技術をしっかり持ちながら他のメンバーの技術領域も理解することで、有機的な連携を実現した。

最近ソフトウェア開発でよく使われる概念としてアジャイル型がある。計画重視であるウォーターフォール型の開発ではスタッフ間のコミュニケーションがなかなか難しいとの反省から、現在は適応の開発であるアジャイル型の概念が多く用いられている。私達が行った研究は、メンバー間の意思疎通を強調した点からはアジャイル型に近いが、同じではない。アジャイル型の弱点はなかなか進捗しない議論に陥るリスクにある。私達の成果は全体のシナリオを開発スタート時に作り上げたために得られたものである。初期の頃にどういふものをどう作るかというイメージとシナリオはほとんど纏まっていた。

一例として、私達のプロジェクトでの設備導入案は3年後についても当初の計画のまま進められた。プロジェクトのリーダーは、一緒に汗をかくメンバーに対して、5年間のシナリオと5年後の見える成果の形を、初めから語り続けるべきである。これはオーケストラの指揮者に近いものがある。つまり、本質的な部分は、大きなビジョンと詳細な情

報の共有に尽きる。

## 4 どう構成すればいいのか

### 4.1 構成要素と構成条件

単なる組合せだけでは構成学にはならない。図5にそれぞれの要素を構成する考え方を示す。左側には自然現象と工学的な構成要素があり、それらの特長を定量化するツールとして観察・分析を関連付けた。ここでは各要素の特長を最大に引き出すことが重要であり、観察された各性能は学術的または工学的な価値をもつ。しかし、それらを構成し、新規に統合する際には、具体的で詳細な境界条件が不可欠である。その境界条件は社会的な価値観であるさまざまなニーズである。

例えば、触媒と熱電変換材料を構成する場合、触媒燃焼発電機への応用とガスセンサーへの応用とでは構成の条件が異なる。高カロリーのガス燃料を燃焼させることにより大きな電圧と電流を得る発電機の構成では、触媒が高温に達するため耐熱性の触媒材料を選択する構成が必要であり、導入した燃料を効率よく燃焼させるための複雑なガス流路とシステム全体の熱容量を十分に大きくするのが望ましく、電流を多く流せる熱電デバイスの設計が必要である。

一方、数 ppm から数%までのガス濃度に対して、高い信頼性で確実に、線形性よく検知信号を出力するセンサーの構成では、低濃度でも確実に燃焼発熱を発生させるために、希薄なガスでも確実に燃焼させることができる活性の高い触媒が必要であり、検知ガスが高速で拡散しやすいセンサー構造、高速応答のためのセンサー部材の熱容量の最小化、さらには微弱な温度変化を検知するために高い電

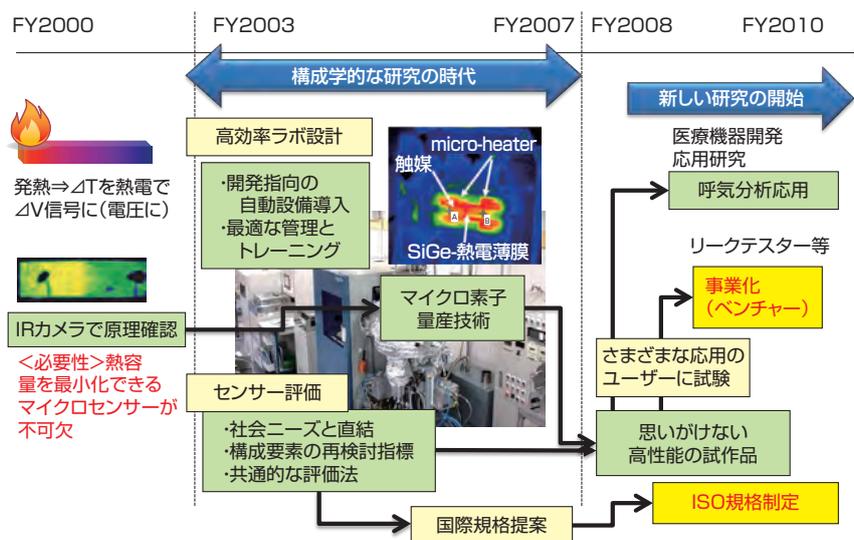


図4 熱電式水素センサー素子開発を進めるシナリオ  
2000年度からのNEDO産業技術助成事業で新しい動作原理のセンサーを具体化し、その後の水素基盤技術プロジェクトにより水素センサー開発を本格化した。

圧が発生できる熱電デバイスの設計が求められる。

私達の開発では、これらのガスセンサーの構成の条件を、図5の右に示す高感度、安定性、高速応答等のユーザーのニーズから要請される具体的な数値目標で定めることができた。実際にセンサー素子を試作し、さらにその性能を評価し、目標値に対する達成度を確認するプロセスの中で構成要素を選択し、その組み合わせと統合を行った。

構成条件から構成要素を選択する際には、過去の知識だけでは不十分で、実際に試作したデバイスでの評価結果が最も重要な指針となることを認識する場面が多い。私達の熱電式センサーの開発当初、触媒に関する論文報告等を過信して失敗するという経験を味わった。当時、白金薄膜の触媒をセンサーに載せていたが、過去の論文等から厚み数ナノメートルの薄膜が高い触媒活性を示すと認識していた。しかし、結果的には厚い膜の触媒が室温でも水素をよく燃焼した<sup>[7]</sup>。この教訓を活かす場合がその後にあった。

マイクロデバイスに集積化した触媒は、触媒分野での常識である数 wt%の貴金属担持量ではなく、20～40 wt%の貴金属担持量の触媒で高い検知能力を発揮することが分かった<sup>[8]</sup>。ガスセンサーの場合は通常の触媒の化学反応と違って、極めて薄い可燃性ガス濃度でも確実にガスを燃やす能力が要求される。そのガスセンサーという応用が構成要素を刺激し、結果として全く質の違うものを作ることができたのである。

#### 4.2 製品化へのシナリオ

開発予算、研究所の設備と人的資源を投入して実施した研究開発の結果、具体的な論文と特許の両者をいかに収束するかが次につながる重要課題である。さらに突き進み、得られた技術を実用化することが研究開発が完結する最終ゴールである。事業部を持つ組織ではないが、特許等の知的財産を事業会社等に技術移転することで研究開発を完結するのが産総研の本格研究だと考えられる。

私達の試作したセンサーデバイスの量産技術開発では、

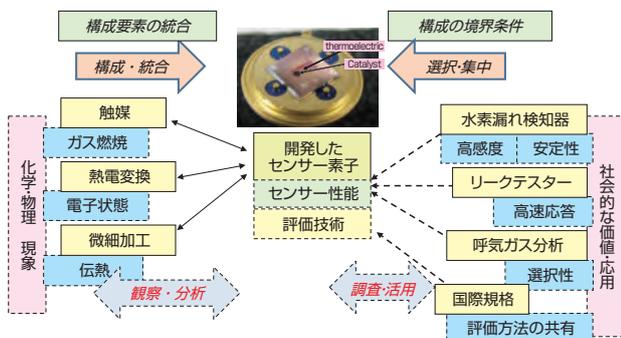


図5 センサー開発における構成学的な要素とそれを構成するための境界条件の相関図

幸いにも研究室での性能がそのまま量産化においても達成できた（前述した実用化思考の結果でもある）。半導体プロセスの関連設備を所有していない事業会社に対しても技術移転が可能となるように、私達は研究室での試作品製造だけでなく民間のファンドリ施設を利用した4インチおよび6インチのウェハプロセスを実施することで、量産化技術を実証した。また国内のファンドリサービスは営業実績が少なく、技術的な問題の他にも契約上の問題とサービスの検収の問題を含めて、当初は想定できなかった大変難しい実証プロセスであったが、実用化に十分な歩留まりも確認できたことで、実用化へ大きく前進できた。特に幸運だったのは、熱電式センサーは熱電パターンのゼーベック係数が最も重要なパラメータであり、この物性は比較的過程に依存しないことだった。そのため、センサーデバイス性能のバラつきを抑えた製造技術が確立できた。

#### 4.3 成果はシナリオを超える

思いがけないセンサー性能が開発当初は想像できなかった新しいニーズへの展開を進めることができる。開発された熱電式水素センサーの数 ppm レベルの水素漏れ検知能力は、水素漏れ検知器としてはオーバースペックである。しかし、それを活用し新産業分野を切り拓く挑戦的な研究開発事業を推進している。ヘリウムに代わって水素を用いる水素リークテスター用検知器がその一つである。真空装置のリーク検知、または製造品の気密性検査等にヘリウムガスを使っているが、ヘリウム供給への不安から、この代替ガスとして水素 5 % 窒素 95 % のガスを利用する検査機器が最近普及している。熱電式水素センサーもこの応用に活用できる性能を持っている。

また、人間生活を支える医療機器として、呼気中の水素ガスを計測するセンサーとしての応用展開を図っており<sup>[9]</sup>、これまでのガスクロと半導体式ガスセンサーを用いる 300 万円程度の高価なシステムに代わる小型センサーシステムの開発を進めている。このような新しい分野では ppm 以下の水素濃度検知が要求されており、さらに一桁高い高感度化の達成が望ましい。現在、産総研技術移転ベンチャーとしても試作品を商業化しており、今後も水素ステーション等の水素関連施設だけでなく具体的なさまざまな分野への応用が期待できる。

#### 5 研究成果を活かした国際規格策定

水素エネルギー利用技術の普及と深く関係する水素センサーの市場がどのようなものは、実用化にとって重要な問題である。現状は厳しく、水素ステーションでもほとんどこれまでのガスセンサーが採用されている状況であり、水素漏れ検知に特化した新しい技術がユーザーに受け入れられ

なければ、単なる技術開発で終わってしまう。そこで私達は、「標準化先取り研究」というキーワードで水素センサーの規格作りを始めた。これは、製品または技術開発とそれに関する規格化を並行して進める、当時の経済産業省の政策でもあった。

私達は、自ら開発した“水素選択性に優れた広い検知濃度範囲をもつ熱電式水素センサー”の性能を基に、2005年ISO/TC197 (Hydrogen technologies)へ新規提案(NWIP)を提出した。さらに、議長国としてWG13 (Hydrogen Detectors)を推進し、2010年6月に国際規格を発行することができた。これは、技術開発の成果を活かして国際規格を提案した一例であり、提案した規格内容の多くを満足する最も優れた検知技術が、私達の開発した熱電式水素センサーであった。しかし、当然のことながら草案をそのまま会議で通すことはできず、2005年に結論として得られた最終案は草案と大きく変わっていった。

規格では、以下に示すような、水素検知器に対する要求性能の項目を決めることから始まった。

- ・測定範囲および濃度校正、アラーム設定点
- ・安定性(短期および長期)
- ・応答・回復時間、選択性、被毒性
- ・温度、圧力、湿度等の動作環境(標準的なセンサーテスト環境)
- ・測定範囲以上の高濃度時の動作、電力変動、停電、過渡電圧

最も議論された重要な点は、図6に示すガス検知濃度の測定範囲に関する考え方である。すでに存在する可燃性ガスの国際規格(IEC)では、検知器の最高検知可能濃度のみを明記し、これを検知範囲として定義している。キャ

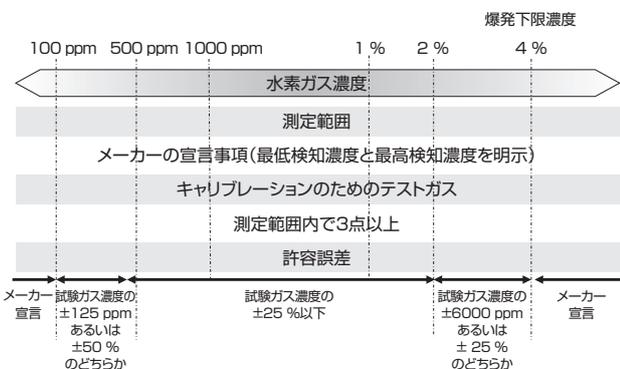


図6 測定範囲とキャリブレーション

検知範囲を規格で明記するのは困難を極める。最終案を決める際に使われた検知濃度範囲を500 ppmから2%までとした会議資料の日本語版。結局は、この案での最終合意に至らず、検知濃度範囲はメーカーの宣言によるものとした。

リブレーションの際の許容誤差の要求は、この範囲の5%あるいは指示値の10%のどちらか大きい方と規定しているため、低濃度での許容誤差が大きくなり、実質低濃度域の検知は想定していない。

私達は低濃度から高濃度で検知することの重要性を説明し、低濃度から高濃度まで十分な精度で水素漏れを検知するセンサーが使われるよう規格内容を提案した。これには高濃度のガスセンサー技術に優れた国内メーカーが歓迎する一方、低濃度での検知を不得意にするセンサー技術を採用している欧米諸国から猛烈に反対された。議論の結果、ISO規格では検知濃度の絶対値は規定しないものの、検知濃度範囲として必ず最低検出濃度と最高検出濃度を宣言することを求めることとし、低濃度側をどこまで信頼して検知できるかという点を明確にした。

## 6 まとめ

私達は、水素ステーション等で活用する水素漏れ検知器として、熱電デバイス上に触媒を集積化し、可燃性ガスによる微弱な燃焼熱を熱電変換して検知する動作原理のセンサーを提案し、さまざまな技術要素を統合し融合することで、全く新しい熱電式水素センサーを開発した。これまでの技術の場合、ガス選択性がなく低濃度が検知できなかったことに対して、優れた水素選択性をもち、水素濃度0.5 ppmの低濃度から5%の高濃度まで、優れた直線性の応答特性をもつ水素センサーを開発するに至った。また、技術開発の成果を活かし、水素センサーの国際規格(ISO)の策定を同時に進めた。

開発した熱電式水素センサーのさまざまな分野での実用化はもとより、私達が提案した国際規格が広く普及することで、国際協力の促進と水素エネルギーの利用推進に貢献できると期待している。

## 参考文献

- [1] ISO 5725-1:1994 (JIS Z 8402-1: 1999) Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions 測定方法及び測定結果の精確さ(真度及び精度).
- [2] 定置型可燃性ガス検知警報器, JIS-M 7626, 日本規格協会 (1994).
- [3] W. Shin, K. Imai, N. Izu and N. Murayama: Thermoelectric thick-Film hydrogen gas sensor operating at room temperature. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40, L1232-1234 (2001).
- [4] M. Nishibori, W. Shin, L. Houlet, N. Izu, T. Itoh, N. Murayama and I. Matsubara: New structural design of micro-thermoelectric sensor for wide range hydrogen detection. *J. Ceram. Soc. Japan*, 114, 853-856 (2006).
- [5] M. Nishibori, W. Shin, L. Houlet, K. Tajima, N. Izu, T. Itoh and I. Matsubara: Long-term stability of Pt/alumina catalyst combustors for micro-gas sensor

- application, *J. European Ceramic Society*, 28, 2183-2190 (2008).
- [6] M. Nishibori, W. Shin, K. Tajima, L. Houlet, N. Izu, T. Itoh and I. Matsubara: Robust hydrogen detection system with a thermoelectric hydrogen sensor for hydrogen station application, *Int. J. hydrogen energy*, 34, 2834-2841 (2009).
- [7] M. Matsumiya, W. Shin, N. Izu and N. Murayama: Nano structured thin-film Pt catalyst for thermoelectric hydrogen gas sensor, *Sens. Actuators, B*, 93, 309-315 (2003).
- [8] Y. Choi, K. Tajima, N. Sawaguchi, W. Shin, N. Izu, I. Matsubara and N. Murayama: Planar catalytic combustor application for gas sensing, *Applied Catalyst A* 287, 19-24 (2005).
- [9] M. Nishibori, W. Shin, N. Izu, T. Itoh and I. Matsubara: Sensing performance of thermoelectric hydrogen sensor for breath hydrogen analysis, *Sen. Actuators B*, 137, 524-528 (2009).

#### 執筆者略歴

申 ウソク (しん うそく)

1994年韓国科学技術院修士課程修了。1998年名古屋大学工学研究科博士課程後期応用化学専攻修了、同年工業技術院名古屋工業技術研究所入所。2001年産業技術総合研究所、2008年より名古屋工業大学大学院工学研究科未来材料創成工学専攻准教授(兼務)、2011年より先進製造プロセス研究部門研究グループ長。博士(工学)。産総研技術移転ベンチャーを立ち上げて産総研のセンサー技術の実用化に従事。専門は水素センサー、熱電変換材料、熱電物性計測技術およびマイクロデバイス加工技術の開発。この論文では、熱電式水素センサーデバイスおよび全体構想の取りまとめを行った。



西堀 麻衣子 (にしほり まいこ)

1998年愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程生物地球圏科学専攻修了、同年高輝度光科学研究センター放射光研究所入所。2006年産業技術総合研究所の産総研特別研究員、2007年同所先進製造プロセス研究部門研究員。博士(理学)。専門は機能性セラミック材料、ナノ構造を制御した触媒を活用し新規ガスセンサーを開発、放射光を用いた材料分析およびデバイスの動作条件下でのその場分析。この論文では、センサー製造プロセス、触媒材料の開発、センサーの応用に関する検討を行った。



松原 一郎 (まつばら いちろう)

1987年大阪大学理学研究科高分子学専攻博士前期課程修了、同年工業技術院大阪工業技術研究所入所。2001年産業技術総合研究所、2005年より先進製造プロセス研究部門研究グループ長、2011年よりナノテクノロジー・材料・製造分野研究企画室長。博士(理学)。専門はガスセンサー、機能性材料、ナノ材料。ISO/TC197/WG13(水素検知器)およびTC146/WG16(VOC検知器の試験方法)のコンビナー。この論文では、水素検知器の国際標準に関する検討を行った。



#### 査読者との議論

##### 議論1 社会ニーズの把握

質問(村山 宣光:産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門)

この論文では、研究を始めるにあたり、社会ニーズの把握が重要であることを指摘されていますが、社会ニーズの把握の方法論について、ご意見をお聞かせ下さい。

回答(申 ウソク)

研究を始めた頃は、国内外の技術委員会の報告書と技術ロードマップ(TRM)の情報を入手しまとめました。その結果を素早くチーム内で発表して質疑を重ねることで、社会ニーズに対する客観的な分析および評価を行いました。

##### 議論2 要素技術の選択

質問 (一條 久夫:(株)つくば研究支援センター)

要素技術の統合・融合を明確に記述するよう工夫されていると思いますが、“選択”はどのようになされたのでしょうか。

回答(申 ウソク)

社会ニーズという境界条件から要素技術を選択することは簡単ですが、それをより詳細に選び、さらに組み合わせるのが必要でした。その具体的プロセスは、実際、素子を試作し、それを評価しながら行いました。

##### 議論3 研究のオリジナリティー

質問(村山 宣光)

この研究のオリジナリティーの一つは、触媒燃焼と熱電変換との組み合わせだと思えます。このアイデアに至った経緯をお聞かせ下さい。

回答(申 ウソク)

この研究を始める前に開発していた熱電変換技術をガスセンサーに新規応用する文献調査を行いました。その中で、酸化物焼結体の電極として白金を使ったガスセンサーの論文(1985年)を見つけました。そのセンサーの要素部材と素子構造を進化させて開発したのがこの研究の水素センサーです。

##### 議論4 製品化研究

質問(村山 宣光)

この研究では、当初から量産化を見越した装置を導入し、それが製品化に大きく寄与したと指摘されています。ただし、すべての研究でこの方法論は適用できるのでしょうか。あるいは、この方法論の適用可能な研究とそうでない研究に分類できるとお考えでしょうか。

回答(申 ウソク)

研究開発の中には常に材料探索的な研究が必要です。この研究開発でも触媒材料の開発プロセスは通常の化学実験室レベルのもので進めました。【量産化を見越した装置を導入】は、実用化の壁になるプロセス変更を最小限にしたものです。原則、この方法論はほとんどの研究開発で適用可能であり、スピーディーな製品開発においてますます重要な方法論であると思えます。

##### 議論5 研究成果の広報活動

質問(村山 宣光)

当初水素ステーションの水素漏れセンサーの応用を想定していたのが、真空容器等のリークチェック用センサーや呼気センサーという想定外の応用に展開したことを紹介されています。このような、想定外の応用を開拓するためには、広報活動が効果的ではないかと推測しますが、実際にはどのようなアクションが効果的であったのでしょうか。

回答(申 ウソク)

産総研のプレス発表と研究試料提供が非常に効果的でした。そのおかげで新しいアプリケーション開発に繋げることができました。

# 超高精細映像送受信を支える光通信ネットワークの実証実験

## — ダイナミック光パス・ネットワーク映像配信実験 —

来見田 淳也\*、並木 周

現在の通信ネットワークを構成する装置群の消費電力、通信容量等の限界を超えるために、産業技術総合研究所 (AIST) は、情報通信関連企業5社と共同で、情報通信研究機構 (NICT)、NHK放送技術研究所の協力のもと、高精細大容量映像時代を支える新しい光通信ネットワークの実証実験を実施した。この実験は研究開発テストベッド等による光ファイバー線路を用いて東京の秋葉原・大手町・小金井の3点を結び、AISTが中心に開発する「ダイナミック光パス・ネットワーク」を実際の環境下で動作させる試みである。異種間ネットワーク接続としてNICTの光パケット・光パス統合ネットワークと協調すると共に、NHKの超高精細映像の配信も合わせて行っている。この論文では開発された要素技術を用いて行った実証実験について、その目的や狙いとともに、動作結果を得るまでの技術的構成と成果について述べる。

キーワード: ダイナミック光パス・ネットワーク、光パケット・光パス統合ネットワーク、JGN2plus、映像配信、スーパーハイビジョン (SHV)

## Demonstration of optical communication network for ultra high-definition image transmission

- Proof-of-concept experiment of image distribution over the dynamic optical path network -

Junya KURUMIDA\* and Shu NAMIKI

In order to overcome the limitatin of low-power-consumption and communication capacity of the equipment forming the present communication network, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) has carried out a demonstration of a new prototype optical path network to support the ultra high-definition large-capacity image contents era, in collaboration with five IT-related companies and with the support of National Institute of Information and Communications Technology(NICT) and Nippon Hoso Kyokai Science and Technology Research Laboratories (NHK/STRL) . The experiment was a trial to demonstrate the performance of the dynamic optical path network developed mainly by AIST under practical conditions, using a network testbed of field optical fiber links connecting Akihabara, Otemachi and Koganei offices in Tokyo. The demonstration included the cross-border-connection with the optical packet and circuit integrated network realized by NICT and transmission of ultra high-definition video signals developed by NHK. In this paper, we describe the objectives, targets, technology syntheses based on the elemental technologies for the demonstration, and outcomes.

**Keywords**: Optical path network, optical packet and circuit integrated network, JGN2plus, distribution of high-quality images, super high vision (SHV)

### 1 はじめに

インターネットを中心とした通信需要の増加を背景に光通信の低エネルギー化が緊急の課題になりつつある。すなわち、どのようにネットワークを構成すれば通信装置群の消費電力を抑えながら、超高精細映像のような大容量情報を自宅で好きな時に入手 / 視聴することができるのか、ということが私達の研究開発の最重点課題となっている。要求があればすばやく光ファイバーの通信路が切り換わって自宅と情報源とをつなぎ、あらゆるサービスが手元に現れる。そのような自宅と情報源が光ファイバーのみで接続される (光トランスパアレント) ネットワークは、エネルギーの増大を伴わずに通信帯域がその理論的限界まで自由に使える

ため理想的であり、超高精細映像伝送を活用する教育・福祉・医療等、それを基にした応用技術 / サービスはさまざまなものが考えられている。現代社会では通信技術を基盤としたさまざまなサービスが着実に大容量化しており、高速なデータ通信が不可欠となった。大容量データ通信を取り扱うことができるのは光ファイバー通信技術であり、それが昨今のインターネット、高度情報化社会を支えていることは疑いのない事実である。一方で、次章で述べるように、このような高度な通信サービスの持続的発展性に付随する大きな問題点がある。

私達は2010年8月に、産業技術総合研究所 (AIST) が中心となり情報通信企業5社と共同で新しく開発され

産業技術総合研究所 ネットワークフォトンクス研究センター 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2  
Network Photonics Research Center, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan \* E-mail: j.kurumida@aist.go.jp

Original manuscript received February 7, 2011, Revisions received March 31, 2011, Accepted April 6, 2011

た光通信向けの要素技術を組み合わせて、超高精細映像に代表される大容量情報を要求に応じて配信できるネットワークの実証実験を行った。これによって、現在のネットワークを構成する装置群の消費電力や通信容量等の限界を超える新しいネットワーク技術の一提案ができた。この論文では、個別要素技術を組み合わせてその動作結果を得るまでの技術的構成の検討過程について述べる。

## 2 光ネットワークに対する社会的要請

日本国内のインターネット上の通信トラフィックが年率3～4割の割合で増え続けていることはよく知られている。この傾向が仮に20年続くとするとトラフィックは現状の1,000倍程度になる。その場合にはもちろん電力効率もそれ相応の改善が望まれる。インターネットの国内利用者数は2009年末までの集計で9,400万人を上回り、人口普及率は78%となっている<sup>[1]</sup>。通信機器や情報端末の高性能化に伴いアプリケーションも充実し、インターネットに接続されたコンピュータ上（もちろん移動端末等も含む）の1クリックが大量のデータの送受信を生成するようになったことが根底にある。映像情報サービスもインターネットを通して提供されるようになっており、通信トラフィックの増加に対し電力効率を考慮してどのようにネットワークを構成していくかが大変重要な課題となった。中でも大容量データ通信を支えることのできる光ファイバー通信技術からなる光ネットワークをどのように構成するかが重要視されるようになった。これには社会的背景を中心とした次のような理由がある。これまでインターネット上の通信トラフィックの増加には通信装置を並列に増設したり、通信速度が高速な装置に入れ替えたりすることで対応してきた。しかし、高速電気信号処理を中心とした従来型の通信装置の増設は通信速度の増加に伴い消費電力も線形に増加することが問題となった（電力問題）。また、光加入者回線接続技術も進歩し、光ファイバーが自宅まで届けられるようになったものの、多様化する広帯域サービスを効率的に通信ノード（基地局）へ収容していくことが難しいという現状が認識されるようになった（通信容量とネットワーク構成問題）。これらを解決していくためには光の通信回線をどのように真の光ネットワークへと発展させ構成していくか、という点が重要になる。

産業技術総合研究所（AIST）のネットワークフォトンクス研究センターでは、ユーザーとユーザーとの間を光のパスで直接結ぶ「光パス・ネットワーク」と名付けた新しいネットワークを提案し、上記の問題を解決するべく研究開発を推進している。特に大容量情報のリクエストに対し柔軟に光ネットワークをスイッチし、光パスを動的に確保するもの

を「ダイナミック光パス・ネットワーク」と呼んでいる。具体的には映像送受信、シリコン光パス・スイッチや分散補償等の技術開発を行い、各装置および装置群の適切な管理制御を基にして広帯域サービスを実現できる光ネットワークへと構成していくものである。図1がその概念図である。光スイッチをネットワークで活用するためには、アプリケーションに応じて光スイッチを制御する仕組みが必要である。すなわち、高精細映像サーバーやディスプレイを相互に接続、またビデオ会議システムを取り扱い、それらが光パスやストレージの情報を基に適切に管理制御される仕組みである。さらにシリコン光パス・スイッチや波長資源管理技術も導入し、デバイスからアプリケーションまで個別に開発される技術を集約して実現する垂直連携が欠かせない。このような取り組みにより、高速データ通信が多数の電気信号処理を介することなく実現され、大容量情報を低電力で扱うネットワークを構成することが可能となる。この論文ではこれらを構成する要素技術をどのようにシステムとして組み上げ、実証実験を実施したかを中心に述べる。

ネットワークに顕在化している問題が段階的にも解決された暁には社会的・経済的にもとても大きな利点を生み出す。自動車やロボット（遠隔手術等も含む）への情報提供や、テレビ会議やリモートセンシング等、あらゆるサービスへの通信基盤となるからである。これら新しい通信基盤はアプリケーションを中心に新しい社会的価値観を生み出す。例えば3次元映像を共有しながらのテレビ会議は出張といった人間の移動を減らすであろうし、高精細で臨場感あふれる映像サービスは現地へ実際に向く必要性を減らすであろう。高速大容量通信基盤はテレプレゼンス（遠隔存在感）、テレレゼンス（遠隔臨場感、コミュニケーション）、テレマージョン（臨場感通信）のいずれもの現実化を支える基本技術となることができる。

## 3 実証実験のシナリオ

一般に通信ネットワークは電気やガス・水道と同様の社会基盤（インフラ）であると言うことができ、既設のネットワークがない場所を除いて新しい光ファイバーネットワーク

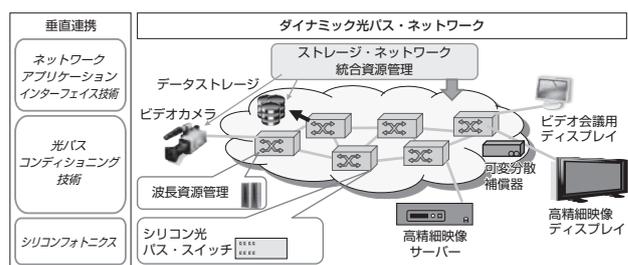


図1 ダイナミック光パス・ネットワークの概念図

を一から街中へ引き直すという形には通常ならない。したがって、既存の技術と新しい技術とを組み合わせながら段階的に新しいネットワークを実現していくことになる。将来を見据えて、超高精細映像をネットワークの中いかに組み入れていけばよいかを考える必要がある。そこで三つの観点から考える。A. 超高精細映像配信を実証実験に組み入れるために、研究開発段階にある超高精細映像配信技術（ビットレート < 43 Gb/s）と実際の通信サービスとして市場に立ち上がっている 1 Gb/s、10 Gb/s といった通信要素技術を共存させネットワークを構成することを考える。これには二つ理由がある。一つ目は超高精細映像配信技術を中心にさまざまな通信レートを同時にネットワークで取り扱うことができることを実際に示すためである。二つ目はそれらをネットワーク上で管理し、リクエストに応じたサービスを判断し、実際のネットワークを切り換えて配信できることを示すためである。次に、B. 実際に敷設された光ファイバーを使って構成することを考える。これにも二つ理由がある。敷設されている光ファイバーからくるあらゆる非線形応答を補償し、通信が成立することを確認することと、異なる要素で構成された別のネットワークとも相互に接続が確立することを確認するためである。さらに全体としてこれらに工夫を加え、C. 低消費電力で実現することが目的となる。

上記が実証実験へ向けたシナリオの骨格である。これを基にしてダイナミック光パス・ネットワークを実現していく。はたして前述の事柄を集約し、組み合わせることだけで近未来に思い描く高速大容量通信基盤を具現化できるのかどうか一つのポイントとなる。前述の視点はハードウェアに主に着目したものであり、それだけではやはり正しく構成されない。ハードウェアに合わせてソフトウェア・ファームウェアを設計開発する必要がある。図2にデモ実験の構成要素を示す。構成要素には実際に敷設された光ファイバーを活用すること、私達が開発した通信要素技術を活用すること、これらにリソース管理制御を加えること、という制約条件がある。さらにそれらにはソフトウェアとハードウェアの2面性があり、デモ実験をより効果的に行うためには、総合的な構成検討が必要となる。

要素技術については次章で詳しく述べるが、実際にデモ

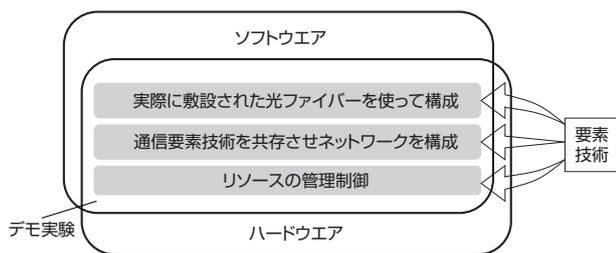


図2 デモ実験の構成

表1 実証実験構成要素

構成要素	技術名称	協働組織名	文献	注
資源管理	(a) 光パス・ネットワーク	NTT / AIST	[2][3]	
	(b) 光バケット・光パス統合ネットワーク	NICT	[4]	
通信線路	(c) 研究開発テストベッドネットワーク	JGN2plus (NICT)	[5]	
	(d) 商用光ファイバー回線(秋葉原-大手町)	—		
ノード装置	(e) PLC型光スイッチ	—		市販
および デバイス	(f) シリコンフォトニクス・スイッチ	AIST	[6]	
	(g) 電流注入型シリコン高速光スイッチ	富士通研究所	[7]	
	(h) 省電力型次世代ROADM	NEC	[8]	
	(i) 高速波長可変レーザー	トリマティス		
	(j) 光増幅器 (EDFA)	—		市販
	(k) パラメトリック任意光波長変換器	古河電工/AIST	[10]	
	(l) 高速自律制御型光可変分散補償器	古河電工/AIST	[11][13]	
	端末装置	(m) スーパーハイビジョン送受信装置	NHK	[14]
(n) コンテンツ集積サーバー		—		汎用
配信サーバー		—		汎用
コンテンツ	ディスプレイ (モニタ)	—		市販
	(o) スーパーハイビジョン映像	NHK		
	(p) ハイビジョン映像	AIST		

を遂行するにあたっては、余分なシナリオ検討等も行った。具体的にはデモでは使用しないが、それぞれの要素技術にネットワークの機能拡張性 (Extendability) を設け、最悪の事態を想定した予備 (Backup) を準備した。このような準備はデモ実験に限ったことではなく、実際の通信システムにおいても考慮される事柄である。実システムにおいても、問題の実態に合わせて再構成可能 (Reconfigurable) にしたり、代替機能 (Alternative) をもたせたりすることができる機能が実装されている。以上を考慮し、ビットレート混在、異種ネット相互接続、高精細映像をリクエストに応じてサービスすることを実際に示すシナリオを組んだ。

## 4 要素技術

光ネットワーク実証実験の構成要素は五つに分けて考えることができる。ネットワーク資源管理、情報が伝送される媒体としての通信線路、それらの端に配置されるノード装置およびデバイス、配信または受信先となる端末装置、線路や装置に流れる実際の情報 (コンテンツ) である。それらを具体的にまとめたものを表1に示す。この章では構成要素技術について表1に沿って述べるとともにそれらを選択した理由を明確にする。

### 4.1 資源管理

#### 4.1.1 光パス・ネットワーク (NTT/AIST)

AISTのネットワークフォトニクス研究センターでは、これまで光パス・ネットワークの研究開発を推進してきており、各種光スイッチによって通信路が切り替えられてもそれに影響を受けないよう通信路の分散量や光強度を最適化する技術を開発している<sup>[2]</sup>。このデモにおいては主にノードにPLC型光スイッチ<sup>用語1</sup> (表1(e))を用い、その間を

数十メートルの光ファイバパッチコードでつなぎ光パス・ネットワークを形成することとした。

光パス・ネットワークにおけるネットワークおよびストレージ資源管理は NTT と AIST 情報技術研究部門との協働により実現される。性能保証されたストレージの予約状況を管理する資源管理装置と光パスを管理するネットワーク資源管理装置を配置し、視聴者からの映像視聴要求に対して最適なサーバーの選択および光パスを提供する<sup>[3]</sup>。視聴者から予約が入り予約時刻になると光パスを開通させ視聴者へのコンテンツ配信を開始、1 Gb/s、10 Gb/s、43 Gb/s を含むマルチビットレート信号を扱うことができるように設計されている。光パスの予約状況を示すソフトウェアも開発され、ユーザーインターフェイスも同時に提供されることとなった。

#### 4.1.2 光パケット・光パス統合ネットワーク(情報通信研究機構(NICT))への相互接続

異種ネットワークの相互乗り入れを広範囲で行えることを実証するために、NICT の光パケット・光パス統合ネットワークと共同でデモを実施する運びとなった。この相互接続は NICT の協力を得て、制御信号の受け渡しを取り決め、コンテンツおよびサービス情報を接続ノードで交換することで実現する。光パケット・光パス統合ネットワークにより遅延やデータ損失のない高品質なサービスが提供される<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 通信線路

実際に敷設されている光ファイバ(フィールドファイバ)を使わずにネットワークを構成することも当然可能ではあるが、それでは実証実験の意図(シナリオ)から外れるので、フィールドファイバを使うことが必要であった。ところが長距離にわたり商用光ファイバを借りると、経済的にも負担が大きいため研究開発テストベッドネットワーク(JGN2plus)<sup>[5]</sup>を借用し実験系に組み入れることで、実際に近い形の通信距離を得るに至った。このようにして実際上起こり得る通信不安定要因、制限要因を含めて実験することが可能となった。このテストベッドの地理的要件や利便性を考慮すると JGN2plus の利用はデモ実験に適したものであった。その内容は次章の 5.1 節で実験会場と共に述べる。

#### 4.3 ノード装置およびデバイス

##### 4.3.1 シリコンフォトニクス・スイッチ(AIST)

低電力・集積化可能な光デバイスはネットワーク機器への搭載に向けた研究が注目を集めており、AIST ではシリコンフォトニクス技術によるクロスバスイッチ<sup>[用註2]</sup>の開発に着手している<sup>[6]</sup>。このスイッチを実際にネットワークノードに取り込み初めて映像データを流せるように構成した。いくつかの通信ノードのスイッチには一般に使用されている

PLC 型光スイッチを採用しているが、このシリコンフォトニクス・スイッチは低電力化、高集積多ポート化が実証できるため組み入れられた。

##### 4.3.2 電流注入型シリコン高速光スイッチ((株)富士通研究所)

(株)富士通研究所では将来のダイナミック光パス・ネットワークの実現にむけて、小型で電子回路との混載集積が可能なシリコンベース光スイッチの開発が進められている。ナノ細線リブ導波路横方向 p-i-n ダイオード構造を採用した、断面積が小さいと同時に光閉じ込め効率の高い高効率動作デバイスが実現されている。世界最小のスイッチング電力でスイッチング速度数 ns を実現しており<sup>[7]</sup>、このスイッチもまた実際のデモ実験用ネットワークノードに組み込んだ。

##### 4.3.3 省電力型次世代ROADM(日本電気(株)(NEC))

光ネットワークノードに組み込む再構成可能型光分岐挿入多重装置は ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexer) と呼ばれており、波長多重方式とパス管理の技術を組み合わせて超高速・大容量の光伝送ネットワークを効率よく運用するための装置である。現在、ROADM が採用されているネットワークのノード装置においては光パスの設定に自由度が十分でないという問題がある。ノードに収容されているトランスポンダ<sup>[用註3]</sup>を任意の波長、任意の方路に切り替えすることができる装置が重要になる。NEC ではトランスポンダアグリゲータ<sup>[用註4]</sup>を開発し光パス設定の自由度を向上させており、これは最終的にトランスポンダの利用効率を改善することとなる<sup>[8]</sup>。

##### 4.3.4 高速波長可変レーザー((株)トリマトイス)

今後の光ネットワークではダイナミックに光の波長を切り替えて運用していく必要があるため、波長切り替えの高速性が鍵となる。トリマトイスではミリ秒以下の波長切り替えが実現できる波長可変レーザーダイオード(T-LD)を基にした波長変換用光源装置の開発を行っている。これは単体の T-LD を高速かつ安定に波長可変させる技術であり、C バンド<sup>[用註5]</sup>を 5 GHz ステップで波長(周波数)可変可能な装置が実現されている。これを NEC の ROADM 装置の一部入力側へ搭載し、光の波長の切り替えを想定した構成とした。

##### 4.3.5 光増幅器

光増幅器(エルビウム添加光ファイバ増幅器:EDFA<sup>[用註6]</sup>)は光ファイバ通信線路の損失を補うために用いる必要がある、欠かすことができない。これをネットワークのどこに配置するかが要点になるが、距離に対応した光ファイバの損失情報より配置を決める。また、光パス・ネットワークでは波長がダイナミックに切り替えられるため、過渡応答に

追従できる EDFA<sup>[9]</sup> である必要があり、この技術が採用されているものを選択している。

#### 4.3.6 パラメトリック任意光波長変換器（古河電気工業（株）/AIST）

将来の光パス・ネットワークで光波長資源を有効活用するためには、波長変換技術は欠かすことのできない技術となっている。高非線形ファイバー（HNLF）を利用したコヒーレントな波長変換は変換後の光の位相の状態を保持することができるため、原理的にデータ変調フォーマットや変調速度に依存しない<sup>[10]</sup>。波長変換技術には高非線形ファイバー以外にも半導体光増幅器を利用したもの等が存在するが、高非線形ファイバーにおいては変調フォーマット無依存性が将来的に有用であるため採用された。デモでは C バンドから L バンド<sup>用語5</sup>への波長変換が組み込まれている。

#### 4.3.7 高速自律制御型光可変分散補償器（古河電気工業（株）/AIST）

古河電気工業（株）と AIST では、光パラメトリック可変分散補償（P-TDC）と呼ばれる、パラメトリック過程による波長変換と波長依存の分散媒質を組み合わせた可変分散補償方式を提案・実証している<sup>[11]</sup>。位相保持型波長変換の原理に低分散スロープを有する高非線形光ファイバー（HNLF）<sup>[12]</sup>の 4 光波混合（FWM）を用いることにより、これまでの可変分散補償技術では実現困難である 1 THz を超えるグリッドレスな広帯域動作を実現する。また、今後の光ネットワークにおいて光パスがダイナミックに切り替えられることを想定し、マイクロ秒オーダーの高速可変応答を実現している<sup>[13]</sup>。この技術をスーパーハイビジョン信号が流れる 43 Gb/s、105 km ラインのフィールドファイバーに適用し伝送実験を行うこととした。

### 4.4 端末装置

#### 4.4.1 スーパーハイビジョン送受信装置（NHK）

非圧縮スーパーハイビジョンを 24 Gb/s デュアルグリーン方式で 43 Gb/s 光信号より送受信できる装置が NHK を中心にして開発されており<sup>[14]</sup>、これを用い 105 km のフィールドファイバーを経由するようにネットワークを構成する。そのため 4.3.7 節で述べた高速自律制御型光可変分散補償技術を用い、長距離伝送を実現することとした。

#### 4.4.2 コンテンツ集積サーバー、配信サーバー、ディスプレイ

コンテンツ集積サーバーは文字どおり映像コンテンツを保存しているコンピュータであり、光パス・ネットワークのネットワーク・ストレージ資源管理装置からの命令（4.1.1 節）でこれらの集積 / 配信サーバーが作動する。ディスプレイはスーパーハイビジョン用モニターを除いて、一般に入手可能である機器で構成される。

### 4.5 コンテンツ

コンテンツにはスーパーハイビジョン映像（NHK）とハイビジョン映像を用意した。前者は 3,300 万画素 / フレームをもつ超高解像度映像を指しており、ハイビジョン映像を縦横 4 倍にした画素数相当をもつ映像である。NHK の協力により二つのスーパーハイビジョン映像が送出できるようにデモの実験系にセットされた。

ハイビジョン（HD）については一般の HD ビデオカメラを購入し自作コンテンツを準備した。映像は配信サーバーへセットされる。

## 5 実証実験

通信技術の実証実験は、基本的に切り替え技術を含めて情報を A 点から B 点へ届けることが可能なことを実際に示すことである。それには送信端・受信端が存在する会場、計画を基にした実験系の構築、それから実際に映像情報を送出 / 切替を行うといったことが実験のための重要要素となる。これらのことを考慮した結果、実証実験構成を図 3 のようにした。4 章で述べた要素技術が図中に取り込まれている。この章では前章の要素技術をどのように取り込み、実験を成立させたかを述べる。

図 3 では主に二つのネットワークが相互に接続されている構成がわかる。左側の青いエリアが NICT の光パス・パケット統合ネットワークであり、右側の緑のエリアが AIST の光パス・ネットワークとなっている。その中央部には NHK のスーパーハイビジョン送受信技術がセットされる。これは相互接続点を協議した結果のトポロジー<sup>用語7</sup>である。図中の青い接続線は光ファイバーを示している。また、相互のネットワークのスウィッチングのリクエスト方式はあらかじめ定めた。同図右の黒い鎖線部のネットワークはすべて秋葉原に置かれ、NICT の光パケット・光パス統合ネットワークへはその左端 NICT-EAST、NICT-WEST の装置を接点に大手町、小金井、大手町と経由する。これによりネットワークの制御環境が整い、映像配信実験（5.2 節）へ移行する。

### 5.1 実験会場と実験系の構築

実証実験はどこでも可能なように思えるが、利用可能な敷設光ファイバーを絞り込んでいくことを同時に行いながら会場を決めた。4.2 節で述べた研究開発テストベッドネットワーク（JGN2plus）を使う必要があるため、適切な端局を考える。JGN2plus の東端は東京都千代田区大手町にあり、それと産総研秋葉原事業所（東京都千代田区外神田）までを一般商用光ファイバーで接続することで、比較的容易にネットワークにできる結論に達した。産総研の主たる事業所、茨城県つくば市まで接続することも不可能ではな

かったが、この時、研究開発テストベッドネットワークのつくば市までの延伸がなかったこと、デモ実験とシンポジウムの併設が決定されていたので、利便性の高い産総研秋葉原事業所が選ばれた。大手町～秋葉原間は見通し1～2 kmであるが、利用した光ファイバーは9.8 kmの距離がある。これは利用できる敷設光ファイバーがビルの特定のフロアに上っていたり、そこから地下の共同坑に取り込まれたりしているためである。大手町～秋葉原間の光ファイバー線路が確保されたので、あとはJGN2plus 西端がNICT（小金井）に存在することからそのままNICTへ接続し、その範囲を実際のネットワークに仕立てた。この間の距離は約42.7 kmあり、往復で105 kmの距離を秋葉原から利用できる。したがって、実験会場はNICT（小金井）とAIST（秋葉原）の2カ所となった。この距離間隔は一つの都市間を繋いでいるネットワークのモデルとして適度なものとなった。大きな課題は、この実験で用いる最も高速な43 Gb/s 光変調信号による通信を成立させることであった。そのために私達が開発した高速自立制御型可変分散補償器によって105 kmの光ファイバーから受ける波長分散による波形劣化の影響を完全に補償することを計画した。ところが、光ファイバーの0.2 dB/km以上の伝送損失および光コネクタ・部品による損失が事前に明らかでなかったため、

受信器に合う光S/N比に入るかどうか不確定であった。そのためトポロジーを簡略化し、伝送の難易度を下げようようなバックアッププランを映像配信実験用に用意して臨んだ。

デモ実験の場所は産総研秋葉原事業所のフロアの一部に図4のように設定された。ハードウェアはおおよそ要素技術別に配置されている。図3との対応をとっているが、実際はこの図4が先に設計を完了している。限られたスペースにおいて装置の大きさや接続の利便性が優先していった結果、レイアウトが不都合のない形で定まった。図4のように実際のハードウェアが準備されたところで、機能ブロックごとにデバイス・装置を接続していく。実験系の構築においてはこの接続のプロセスが最も重要でミス接続や巨大な通信線路損失は許されない。スイッチのポートテーブルを用いて正確にかつ適正な信号レベルで行う。

### 5.2 映像配信実験

このデモ実験のハイライトの一つは、最も高速な光変調信号でかつ105 kmの伝送距離のある43 Gb/s バスの通信が成立するかであった。図3中の赤線で示した通信パスである。このパスをビットエラーレートテストで試験すると、光信号強度を上げてもエラー無し状態にならず、スーパーハイビジョン映像に乱れや瞬断が起こる懸念があった。し

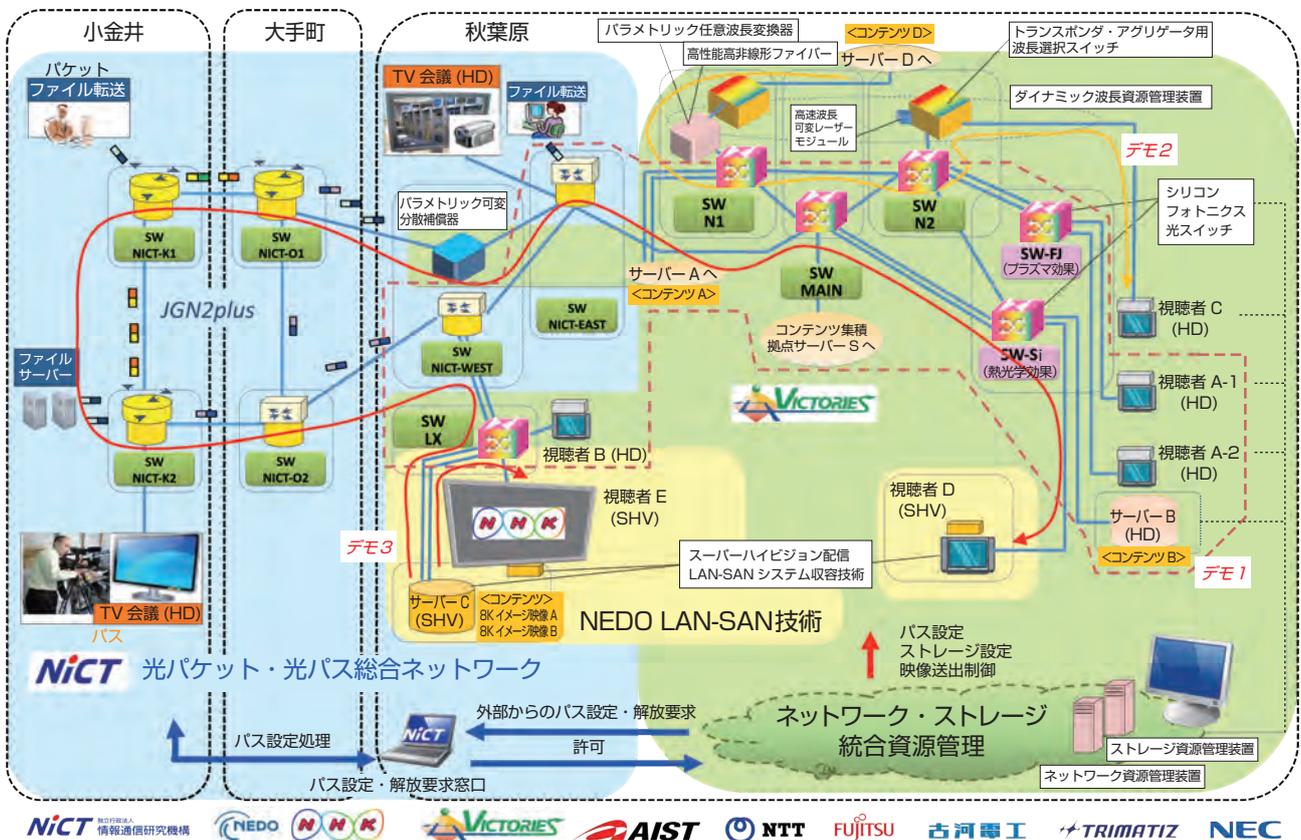


図3 光ネットワーク合同接続実験概要図

かし適切な光パワーで実際の受信装置に接続すると、その装置の信号誤り訂正機能により通信が成立した。信号誤り訂正機能は特別なものではないが、構築した伝送距離 105 km の 43 Gb/s パスが誤り訂正可能範囲内に入ることは実験によってのみしか確認できず、映像配信実験の一つの大きなポイントとなった。

長距離・高速の通信パスが確認された後は、公開デモ実験として見ていただくシーンをどのように作り込むかといったことがむしろ課題であった。この点はネットワーク・ストレージ資源管理技術を扱う NTT と入念に話し合われた。これをデモシナリオと呼んだが、大規模な実証実験ネットワークを組みながらすべての要素技術が実際に機能するようにデモシナリオを組まなければ、要素技術の存在の意味が薄れるからである。実行したデモシナリオはストレージ管理装置を含めた映像の予約とその制御、ノード装置の映像を含めたプロテクション動作、NICT 光パケット・光パス統合ネットワークとの協調、スーパーハイビジョンの予約配信である。

デモ実験は 2010 年 8 月 25 日に開催された第 3 回「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点」シンポジウムの中で実施された。表 2 が当日のデモシナリオの流れである。約 30 分間ですべての要素技術が連携し網羅されるように構成している。デモシナリオと図 3 とを合わせて見ると、デモ 1 によりネットワーク・ストレージ総合資源管理をベースに視聴者 A-1、A-2 からのコンテンツリクエストに対応し、コンテンツが保存されているサーバーと視聴者を結ぶ光パスとを最適化し HD 映像が送信されることが示された。デモ 2 では、ダイナミック波長資源管理装置を経由して視聴

表2 デモシナリオと要素技術

	デモシナリオ	要素技術
約30分	デモ1：ストレージ管理装置を含めた映像の予約とその制御	(a), (e), (j), (n), (p)
	デモ2：プロテクション(次世代ROADM技術)	(e), (h), (i), (l)
	NICTデモ：光パケット・光パス統合ネットワーク	(b), (c), (d)
	デモ3：予約によるスーパーハイビジョンの映像配信(NHK)および異種ネット間接続、シリコン光スイッチ、可変分散補償	(b), (c), (d), (e), (f), (g), (j), (k), (l), (m), (o)

者 C のリクエストであるサーバー D 中のコンテンツ D を配信する形式に加えて、トランスポンダ故障時のプロテクション動作も行われた。デモ 3 では、視聴者 B、D からのスーパーハイビジョン映像リクエストを想定して、長距離伝送とシリコンフォトニクス・スイッチを含めた光パスを設定し、高精細映像情報が異種ネットワークを問題なく通過することも確認された。図 5 に公開デモ実験の様子を示す。中央に見える 3 台の小モニターが左から視聴者 C、A-1、A-2 と対応する。3 台の小モニターの右の大画面がネットワーク・ストレージ総合資源管理画面である。

## 6 結果の評価と将来への展開

5.2 節のデモシナリオを使ってすべての要素技術が連携することが実験で確認された。そして 3 章で述べた三つのポイント、A. さまざまな通信レートを同時にネットワークで取り扱いそれらをネットワーク上で管理し、リクエストに応じたサービスの判断によって実際のネットワークを切り換えて配信できること、B. 実際に敷設された光ファイバーで生じる非線形応答を補償し、通信が成立することおよび異なる要素で構成された別のネットワークとも相互に接続が確立すること、C. 低消費電力で実現すること、が示された。

また、動作状態において特定のネットワークノードの消費電力計測を行い、結果を予測値と共にまとめたものが図 6 である。コアルータを使ってデモ実験で使用した機器と同等数のスイッチポートとノードを組み上げると仮定すると、光増幅器を含めて 13.4 kW 程度となることが予測される。デモ実験におけるサーバー等を除いた電力は Tb/s への拡張性を残して 1.5 kW であった。計測の電源回路から分別

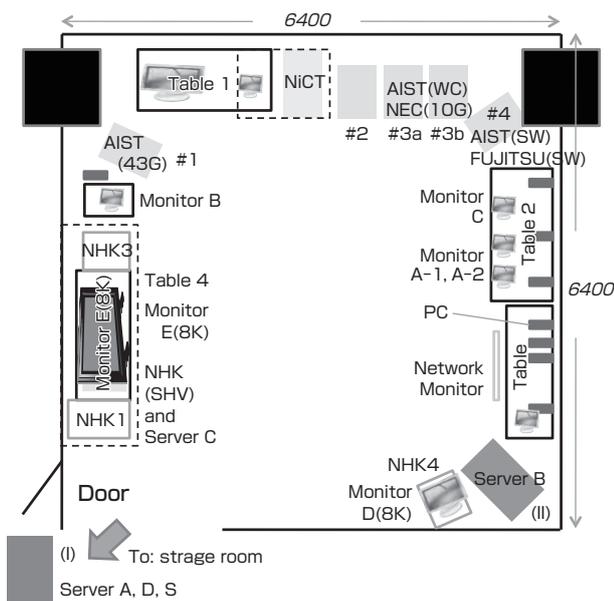


図4 秋葉原会場レイアウト



図5 公開デモ実験の様子

することのできないオフィス機器の電力が一部含まれたために装置群の定格を積み上げた値より若干大きな数値になったが、基本的に電力の値は大容量通信データを詰め込んでいけばいくほど省エネルギー効果が顕著に得られることがわかった。具体的にはシリコンフォトニクス光スイッチが実現されポート当たりの伝送レートが 100 Gb/s となれば現状と比べると 1,000 倍の電力効率が得られる見通しである。今後予測される高精細映像情報のような通信需要増に対しても、電力の伸びを抑えられる点で適度な低電力化が達成されたと考える。光パス・ネットワークにより通信ネットワークの低消費電力化に貢献可能である。

光パス・ネットワーク構築をスタートさせて初めて明らかになることが複数あった。ネットワーク接続の基本となる OSI モデル<sup>用語8</sup> からみると、レイヤ間連携が複雑になったということが第一にあげられる。これは物理層がスイッチで切り換わることに始まり、ブラウザのキャッシュがある程度の映像を貯めながら表示させるといったところまで、複雑に絡み合う。メディアコンバータ<sup>用語9</sup>を使用している回線ではそれ自身に対向するリンク連動機能が働いて資源管理装置からの命令と異なる動きとなる等、一つ一つの光パスの通信確立に時間を割いた。デモ実験においてはレイヤ間連携に関連する問題を一つ一つ解決し動作状態としたが、よりスムーズに光パス・ネットワークを構築しその特徴を最大限に発揮させるには接続標準化を含めたより具体的なデモ実験・相互接続のような機会が必要になると考えられる。このような知見はデバイスからアプリケーションまでの技術を持ち寄って実施する「垂直連携」がなければ得ることができなかった。

今後光パス・ネットワークにおいては、レイヤ間連携や送受信機の光の波長や性能の違いを補償していくことが必要になる。この点については、光パスコンディショニング技術として AIST ネットワークフォトニクス研究センターにて研究開発を進めている。

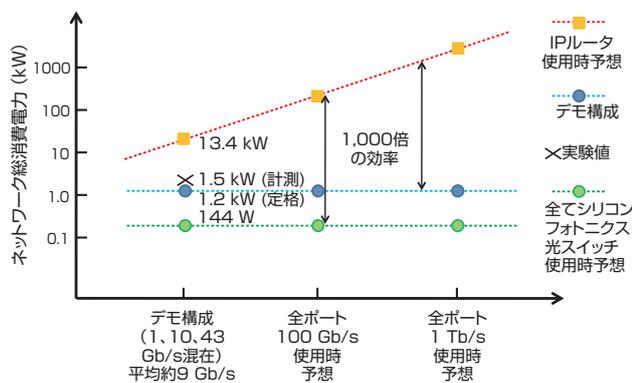


図6 デモ構成における通信容量と消費電力(含予想値)

## 7 おわりに—この実証実験の意義

産業技術総合研究所、情報通信関連企業 5 社、情報通信研究機構、NHK 放送技術研究所の共同で高精細大容量映像時代を支える新しい光通信ネットワークの実証実験を成功させた。各組織をまたがる垂直連携により、現在のネットワークを構成する装置群の消費電力、通信容量等の限界を超える新しいネットワークの可能性を示せたことは有意義であった。新しく開発された光通信向けの要素技術を取り込んで、新しい映像情報サービスの一面を現実のものにできたことは光通信技術進化の一つの重要なステップであったと信じたい。

## 謝辞

デモ実験を進めるにあたり NICT および NHK の両機関には多大なる貢献をいただいております、ここに感謝の意を表したい。各社協働企業の皆さま方のご尽力によりデモ実験が成功に導かれたことにお礼を申し上げます。デモ設置・立上に関して多大なる実働をいただいた、AIST 情報技術研究部門工藤知宏グループ長をはじめとする、各要素技術を担当した AIST 研究者各位に感謝する。最後に、AIST 一村信吾理事および石川浩センター長の指導・支援がなければこのデモ実験が実現しなかったことを付記したい。

## 用語説明

- 用語1: PLC (Planar Lightwave Circuit) 型光スイッチ: 平面光回路型の光スイッチ。PLCは石英系平面光導波路を指すことが多い。
- 用語2: クロスバススイッチ: 2入力、2出力の接続ポートを考えた時、バー状態とクロス状態の二つのスイッチングステートをもつスイッチを指す。デジタルスイッチングが普及する以前に電話交換機等で利用されていた電気スイッチ方式からきている。近年では装置内部のCPUやメモリ間でデータをやり取りする時に経路を動的に選択する内部スイッチ素子を指すことが多い。
- 用語3: トランスポンダ: クライアント信号を収容し基幹系伝送路に適したフレームフォーマット (OTN等) に変換し、任意の波長で通信を行う光送受信装置。
- 用語4: トランスポンダアグリゲータ: これまでROADMが抱えていた光経路設定における波長制約および方路制約を解消し、伝送路と光送受信装置 (トランスポンダ) の間における光経路の再構成自由度を提供する装置。波長選択性のある光導波路と光マトリクススイッチにより構成され、任意のトランスポンダが任意の波長で任意の光ファイバー伝送路と接続する光経路設定を可能にする。
- 用語5: Cバンド/Lバンド: 光通信で使用される光の波長帯。Cバンド (Conventional-band) は1530-1565 nmの波長帯、L

バンド (Long-band) は1565-1625 nmの波長帯である。

用語6: エルビウム添加光ファイバー増幅器：希土類元素エルビウムを添加したファイバーに特定波長の励起光を与えると、特定範囲の光信号が増幅される原理を用い、電気信号への変換を介さずに光信号をファイバー中で直接増幅する装置。

用語7: トポロジー：位置・接続的関係を示す用語で、一般的にコンピュータネットワークの接続形態を指す。スター型、リング型等のネットワークトポロジーが代表的である。

用語8: OSI (Open Systems Interconnection)：開放型システム間相互接続。通信プロトコルを機能ごとに7つの階層構造に分け規定・整理したもの。OSI参照モデルとして知られる。

用語9: メディアコンバータ：異なる伝送媒体間を接続し、相互に信号を変換する装置を指している。LANケーブル（銅線）を光ファイバーへ変換するものが代表的である。

## 参考文献

- [1] Ministry of Internal Affairs and Communications, 2010 White Paper on Information and Communications in Japan. (*White paper*), (2010).
- [2] S. Namiki, T. Kurosu, K. Tanizawa, J. Kurumida, T. Hasama, H. Ishikawa, T. Nakatogawa, M. Nakamura and K. Oyamada: Ultrahigh-definition video transmission and extremely green optical networks for future, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 17 (2), 446-457 (2011).
- [3] K. Yamada, Y. Tsukishima, K. Matsuda, M. Jinno, Y. Tanimura, T. Kudoh, A. Takefusa, R. Takano and T. Shimizu: Joint storage-network resource management for super high-definition video delivery service, *Optical Fiber Communication (OFC) 2011, Conference on, JWA1*, (2011).
- [4] H. Harai: Report of proof-of-concept experimental and live demonstration of optical packet & circuit integrated network over JGN2plus optical-fiber testbed, *IEICE technical report*, 110, 7-12 (2010).
- [5] NICT, Advanced Testbed Network for R&D, <http://www.jgn.nict.go.jp/>.
- [6] Y. Shoji, K. Kintaka, S. Suda, H. Kawashima, T. Hasama and H. Ishikawa: Low-crosstalk 2 x 2 thermo-optic switch with silicon wire waveguides, *Optics Express*, 18, 9071-9075 (2010).
- [7] S. Sekiguchi, T. Kurahashi, K. Kawaguchi and K. Morito: Current-injection-type silicon-based optical switch with silicon germanium waveguide, *IEEE Photonics Society 23rd Annual Meeting, WW3* (2010).
- [8] M. Sakauchi, I. Nishioka, S. Nakamura, T. Chu and Y. Urino: Demonstration of fast optical protection in ROADM system with one-chip color/direction-independent add/drop multiplexer employing silicon photonic circuit, *Optical Fiber Communication (OFC) 2009, Conference on, JThA51* (2009).
- [9] Y. Oikawa, Y. Horiuchi, Y. Tanaka, M. Shiga, N. Shiga, and H. Nagaeda: Super-fast AGC-EDFA for the burst-mode systems without gain excursion in 20-ns and 21-dB ramped input, *2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 1-3 (2008).
- [10] S. Petit, T. Kurosu, S. Namiki, M. Takahashi and T. Yagi: Truly arbitrary wavelength conversion by cascaded four-wave mixing in low dispersion slope sbs suppressed highly nonlinear fibers, *2010 IEEE Photonics Society Winter Topicals Meeting Series*, 115-116 (2010).
- [11] S. Namiki: Wide-band and -range tunable dispersion compensation through parametric wavelength conversion and dispersive optical fibers, *Journal of Lightwave Technology*, 26, 28-35 (2008).
- [12] M. Takahashi, R. Sugizaki, J. Hiroishi, M. Tadakuma, Y. Taniguchi, and T. Yagi: Low-loss and low-dispersion-slope highly nonlinear fibers, *Journal of Lightwave Technology*, 23, 3615-3624 (2005).
- [13] K. Tanizawa, J. Kurumida, H. Ishida, Y. Oikawa, N. Shiga, M. Takahashi, T. Yagi and S. Namiki: Microsecond switching of parametric tunable dispersion compensator, *Optics Letters*, 35, 3039-3041 (2010).
- [14] F. Sugino, T. Ikeda and K. Shogen: Wireless and fibre-optic live contribution link for uncompressed super hi-vision signals, *The Best of IET and IBC, IET Journals*, 2, 31-36 (2010).

## 執筆者略歴

来見田 淳也 (くるみだ じゅんや)

独立行政法人産業技術総合研究所ネットワークフォトニクスセンター光信号処理システム研究チーム、研究員。1998年大阪電気通信大学大学院工学研究科修士課程修了。2007年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。富士通株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所光技術研究部門、カリフォルニア大学デイビス校を経て2009年より現職。光ファイバー通信技術分野におけるデバイスから装置システムにわたる研究開発に従事。並木と議論しながら、デモ実験全体の統括を担当し方針管理を実施、この論文ではすべての章を執筆した。



並木 周 (なみき しゅう)

独立行政法人産業技術総合研究所ネットワークフォトニクスセンター光信号処理システム研究チーム、研究チーム長。1988年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年古河電気工業(株)入社。以来、半導体光デバイス、モード同期レーザー、光増幅器、非線形ファイバー光学、光伝送等の研究および製品開発に従事。1994-1997年米国MIT客員研究員。2005年より産総研。現在、同ネットワークフォトニクス研究センター研究チーム長。これまでに、200件以上の出版物を共著し、多くの国際会議プログラム委員や、IEC国際標準化委員を務める。2005年から電子情報通信学会英文誌B編集副委員長とOSA Optics Express誌のAssociate Editorを務め、現在、Optics ExpressのAdvisory Editor、電子情報通信学会通信ソサイエティ副編集長。理学博士。アメリカ光学会(OSA)フェロー。この論文では、デモ実験の方向性と組み合わせる要素技術の概要を検討した。



## 査読者との議論

### 議論1 論文の背景

コメント (小林直人：早稲田大学研究戦略センター)

この論文は、ダイナミック光パス・ネットワーク実現のための実証実験を行ったことが主なテーマですが、そもそもダイナミッ

光バス・ネットワークとは何なのか、それを行うことによってなぜ低消費電力の光通信が実現できるのか（なぜパケット通信では駄目なのかも含めて）、という説明が不足していると思われます。これらを記述して、専門外の読者の理解をも促すことを期待します。

回答（来見田 淳也）

重要な説明ポイントのご指摘ありがとうございます。光バス・ネットワークを明確にするために、第2章第2段落に次の文を加えました。「光バス・ネットワーク」と名付けた新しいネットワークを提案し、これらの問題を解決するべく研究開発を推進している。特に大容量情報のリクエストに対し柔軟に光ネットワークをスイッチし、光バスを動的に確保するネットワークを「ダイナミック光バス・ネットワーク」と呼んでいる。」また、第2章中に「このような取り組みにより、高速データ通信が多数の電気信号処理を介することなく実現され、大容量情報を低電力で扱うネットワークを構成することが可能となる。」を入れ、低消費電力光通信実現性の理由について触れました。

また、多くの読者の方々に明確になるよう、第1章に「一方で、このような高度な通信サービスの持続的発展性に付随する次章で述べるような大きな問題点がある。」という文を挿入し、問題点を次章で説明することを述べました。

コメント（立石 裕：新エネルギー・産業技術総合開発機構）

この論文のポイントは、大容量ネットワークの全光化による省電力化、異種光ネットワークのシームレスな相互接続技術、これらをベースにした超大容量コンテンツの配信実装、を一つのデモで実証した、ということだと理解しますが、どこにブレークスルーポイントがあるのか、それをどのように解決したのか読み取れません。まず、研究の背景と概要を、もっと整理してわかりやすく提示して下さい。産総研 HP の当該実験に関するプレスリリース<sup>\*</sup>の方がより明快です。そのあとで、研究開発としての視点から、重要なポイントを記述してください。現状では何をやったかは細かく書かれていますが、「なぜそれをやらなければならないのか」「実際に何が問題となり、それをどのように解決したのか」はあまり記述されていません。第三者に理解してもらおうというスタンスでご検討ください。

回答（来見田 淳也）

重要なお指摘ありがとうございます。まず概要に「現在の通信ネットワークを構成する装置群の消費電力、通信容量等の限界を超える新しい光ネットワークの実証のために、」という文章を加え、1. はじめにの文頭に「インターネットを中心とした通信需要の増加を背景に光通信の低エネルギー化が緊急の課題になりつつある。」という文を付加し、研究の背景と概要を明確にいたしました。

また、研究開発からの視点を充実させるべく、5.2 映像配信実験の節にこのデモ実験のハイライトの一つである、最も高速な光変調信号でかつ 105 km の伝送距離のある 43 Gb/s パスの通信を成立させる、という内容を追記するとともに、第3章で触れました、三つのシナリオの観点を A. B. C. とし、第6章と対応付けることで整理しました。

※[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2010/pr20100824\\_2/pr20100824\\_2.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2010/pr20100824_2/pr20100824_2.html)

## 議論2 実証実験システムとその意義

コメント（小林 直人）

要素技術はよく書かれていると思いますが、実証実験システム実現の部分とその成功によるこの研究の意義についての表現が弱く、せつかくの大きな仕事の意義が読者によく伝わらない可能性があります。そこで、

- (1) 第3章に示されたシナリオが、実際の実証実験でどう実現されたのか、を第3章に示された内容、「(1) Gb/s、10 Gb/s といった通信要素技術を共存させたネットワークを構成すること、(2) 実際に敷設された光ファイバーを使って構成すること、(3) さらに全体としてはこれらに工夫をし、低消費電力で実現すること」の結果として明瞭に示すのがよいと思います。
- (2) 要素技術を統合して一つのシステムに組み上げたことは極めて意義深いことなので、そこでの統合の困難さ、それを克服できた理由等をもう少し詳しく記述するとよいと思います。

コメント（立石 裕）

5.1 節で、中間の光ファイバーの距離が細かく記述されていますが、それが実験にとってどのような意味があるのか説明がないので、どのように理解すればよいのか分かりません。実用的にはこのくらいの距離で実装できれば十分ということを言いたいのでしょうか、それとも単に結果的にそうなってしまったのであって技術的には特段の意味がないのでしょうか？いずれにせよ具体的な数字を見ると、読者としてはその意味が気になります。

回答（来見田 淳也）

論文をよりよくできるポイントのご指摘ありがとうございます。

(1) 第3章で触れた、三つの視点を「そこで三つの観点から考える。」という前置きの文とともに、A. B. C. として明確にし、第6章と対応付けを行いました。

(2) 5.1 節に光ファイバー線路の具体的な距離を説明しましたので、距離に対する高速通信の難しさに関連するストーリーを次のように加えました。「この距離間隔は一つの都市間を繋いでいるネットワークのモデルとして適度なものとなった。大きな課題は、この実験で用いる最も高速な 43 Gb/s 光変調信号による通信を成立させることであった。そのために私達が開発した高速自立制御型可変分散補償器によって 105 km の光ファイバーから受ける波長分散による波形劣化の影響を完全に補償することを計画した。ところが、光ファイバーの 0.2 dB/km 以上の伝送損失および光コネクタ・部品による損失が事前に明らかでなかったため、受信器に合う光 S/N 比に入るかどうか不確定であった。そのためトポロジーを簡略化し、伝送の難易度を下げるようなバックアッププランを映像配信実験用に用意して臨んだ。」

また、上記に対応すべく、このデモ実験で克服できた重要なポイントを 5.2 節に次のように明記いたしました。「このデモ実験のハイライトの一つは、最も高速な光変調信号でかつ 105 km の伝送距離がある 43 Gb/s パスの通信が成立する点であった。図 3 中の赤線で示した通信パスである。このパスをビットエラーレートテストで試験すると、光信号強度を上げてもエラー無し状態にならず、スーパーハイビジョン映像に乱れや瞬断が起こる懸念があった。しかし適切な光パワーで実際の受信装置に接続すると、その装置の信号誤り訂正機能により通信が成立した。信号誤り訂正機能は特別なものではないが、構築した伝送距離 105 km の 43 Gb/s パスが誤り訂正可能範囲内に入ることは実験によってのみしか確認できず、映像配信実験の一つの大きなポイントとなった。」

## 議論3 垂直連携とその概念

コメント（小林 直人）

「垂直連携」はこの仕事の最も価値のある点の一つだと思いますので、図とともに簡単な説明を入れた方がよいと思います。

回答（来見田 淳也）

ご指摘ありがとうございます。図 1 を挿入してそれに対する説明を次のように加えました。「図 1 がその概念図である。光スイッチをネットワークで活用するためには、アプリケーションに応じて光スイッチを制御するしくみが必要である。すなわち、高精細映像サーバーやディスプレイを相互に接続、またビデオ会議シス

テムを取り扱い、それらが光バスやストレージの情報を基に適切に管理制御される仕組みである。さらにシリコン光バス・スイッチや波長資源管理技術も導入し、デバイスからアプリケーションまで個別に開発される技術を集約し実現する垂直連携が欠かせない。」

#### 議論4 結果の評価

コメント（立石 裕）

第6章ですが、シンセシオロジーとしては重要なポイントであるにもかかわらず、記述が不十分です。実験で発生した具体的な課題の意味とそれをどのように解決したのか、さらにはそれが今後の展開においてどのような意義を持つのか等々。現状では、「実験してみたらいろいろと想定していなかった問題が発生したが、すべてその場で解決でき問題はなかった。」という、読者にとっては何の情報もない、単なる結果報告になっています。

また、「消費電力 1.5 kW」の評価がありません。図6を見れば電気信号処理に比べて大幅に削減可能なことは理解できますが、「どこまで減らせば実用上問題ないのか」「それに対して今回の結果は十分なのか、それとも不十分なのか」等々の記述が必要でしょう。

回答（来見田 淳也）

5.2節の映像配信実験の最初に、実験で発生した具体的な問題とその解決のプロセスに関する文章を追加いたしました。このデモ実験において最も高速な光変調信号でかつ 105 km の伝送距離がある 43 Gb/s バスの通信が成立する過程を記しました。

また第2章のはじめに、通信トラフィックと電力について次のように詳しく触れました。「この傾向が仮に20年続くとするとトラフィックは現状の1,000倍程度になる。その場合にはもちろん電力効率もそれ相応の改善が望まれる。」これを軸にして、第6章で消費電力の評価を行うために次の文章を追加いたしました。

「コアルータを使ってデモ実験で使用した機器と同等数のスイッチポートとノードを組み上げると仮定すると、光増幅器を含めて 13.4 kW 程度となることが予測される。デモ実験におけるサーバ等を除いた電力は Tb/s への拡張性を残して 1.5 kW であった。」

「具体的にはシリコンフォトニクス光スイッチが実現されポート当たりの伝送レートが 100 Gb/s となれば現状と比べると 1,000 倍の電力効率が得られる見通しである。今後予測される高精細映像情報のような通信需要増に対しても、電力の伸びを抑えられる点で適度な低電力化が達成されたと考える。」

## 論文補遺:

## PAN 系炭素繊維のイノベーションモデル

## — 励振モデル；研究者の活動とマネージメントの相乗効果 —

中村 治<sup>1\*</sup>、大花 継頼<sup>2</sup>、田澤 真人<sup>3</sup>、横田 慎二<sup>4</sup>、篠田 渉<sup>5</sup>、中村 修<sup>6</sup>、伊藤 順司<sup>7</sup>

## Paper supplement:

Study on the PAN carbon-fiber-innovation for modeling  
a successful R&D management

– An excited-oscillation management model –

Osamu NAKAMURA<sup>1\*</sup>, Tsuguyori OHANA<sup>2</sup>, Masato TAZAWA<sup>3</sup>, Shinji YOKOTA<sup>4</sup>,  
Wataru SHINODA<sup>5</sup>, Osamu NAKAMURA<sup>6</sup> and Junji ITOH<sup>7</sup>

Synthesiology誌第2巻第2号159-169頁にて発表された論文「PAN系炭素繊維のイノベーションモデル」に関して、誤りや不正確な表現があり、著者の意図が必ずしも十分に伝わらず誤解を招く可能性もあったので、以下に正誤表、原論文を補遺するための追加参考文献および追加的な解説を記す。

## 【正誤表】

## 1. 160頁右2.1(2)

原文：炭素繊維の端緒は1956年に米国のレーヨンを原料として開発されたものである。

訂正：アメリカのW.F.アボットは1956年にレーヨンを原料として炭素繊維を開発し、最初の特許申請を行った<sup>[1][4]</sup>。

## 2. 162頁右2.4(1)

原文：東レ(株)が炭素繊維について本格的に生産を開始したのは1968年頃であり、

訂正：東レ(株)は1970年に事業化を決定し、進藤博士の特許ライセンスを受け、1971年に炭素繊維の生産・販売活動を開始した<sup>[15][16]</sup>。

この訂正に伴い、図1および図3をそれぞれ図1訂正および図3訂正に訂正する。

## 3. 163頁左2.5(1)

原文：・・・少なからずあったようで、大工試への感謝が「社史」などの形で表現されていることで一端を知ることができる。

訂正：・・・少なからずあったようで、それらが「社史」などの形で表現されていることで一端を知ることができる。

## 4. 165頁左3.3

原文：「公には内緒で」技術指導を受けに来ていた。

訂正：技術情報収集活動の一環として来ていた。

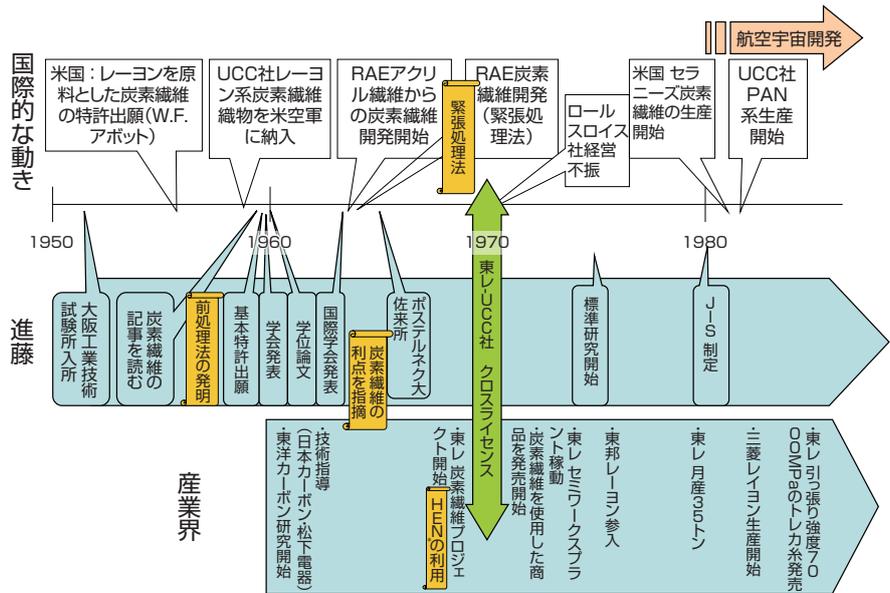
1 産業技術総合研究所 評価部 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2、2 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5、3 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区 下志段味穴ヶ洞 2266-98、4 産業技術総合研究所 イノベーション推進室 〒100-8921 千代田区霞ヶ関 1-3-1、5 産業技術総合研究所 計算科学研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2、6 長崎県科学技術振興局 〒850-8570 長崎市江戸町 2-13、7 産業技術総合研究所 理事 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

1. Evaluation Division, AIST Tsukuba Central 2, Umezono1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan \* E-mail : osamu-nakamura@aist.go.jp,

2. Advanced Manufacturing Research Institute, AIST Tsukuba Central 5, Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8565, Japan, 3. Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST Anagahora 2266-98, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan, 4. Research and Innovation Promotion Office, AIST Kasumigaseki 1-3-1, Chiyoda-ku 100-8921, Japan, 5. Research Institute for Computational Sciences, AIST Tsukuba Central 2, Umezono1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan, 6. Science and Technology Promotion Division Nagasaki Prefectural Government Edo-cho 2-13, Nagasaki 850-8570, Japan, 7. AIST Board of Trustees, AIST Tsukuba Central 2, Umezono1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan

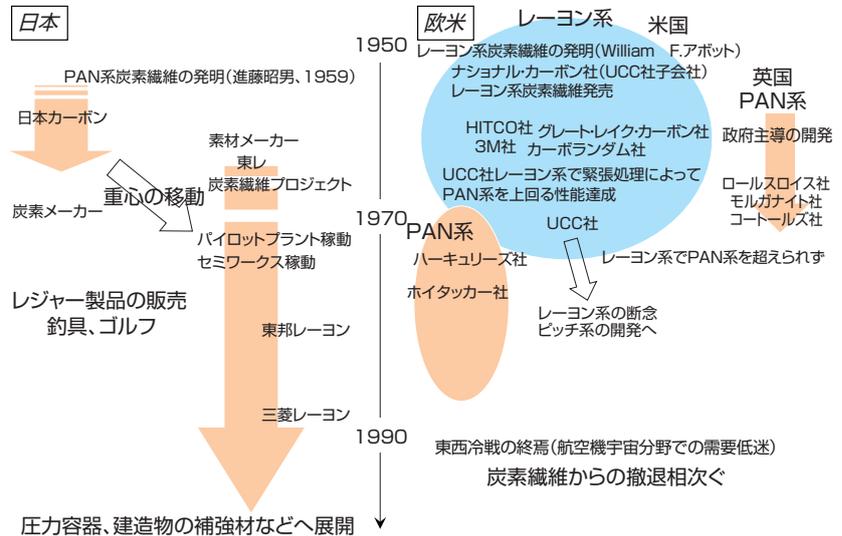
Received original manuscript February 2, 2011

図1訂正 炭素繊維開発の流れ



\* HEN：ヒドロキシエチルアクリロトリルの略、共重合体とすることで焼成時間の短縮と機械的特性の大幅な向上がもたらされた。

図3訂正 炭素繊維に係る国内外の産業界の取り組み



【追加参考文献および挿入場所】

[14] 高松亨: 技術と文明, 12 (1), 2, 日本産業技術誌会誌 (2000).  
 (160頁右2.1(2) 上記正誤表1)  
 [15] [http://www.fujimura-lab.mot.titech.ac.jp/class/CASE05-03TORAY\(1\).pdf](http://www.fujimura-lab.mot.titech.ac.jp/class/CASE05-03TORAY(1).pdf)  
 青島矢一, 河西壮夫 (一橋大学イノベーション研究センター), 経済産業省「技術経営人材育成プログラム導入促進事業」“東レ炭素繊維複合材料「トレカ」の技術開発” 3頁 (2005).  
 (162頁右2.4(1) 上記正誤表2)  
 [16] 東レ50年史, 199, 308 (1977).  
 (162頁右2.4(1) 上記正誤表2)  
 [17] 松井醇一: 講座: 炭素繊維の話その3 PAN系炭素繊維の誕生 - 進藤とワットたちの研究, 強化プラスチック

クス, 43 (8), 298 (1997).

(165頁左3.3 英国の炭素研究者は・・・PAN系炭素繊維の研究を開始している[17]-[19].)  
 [18] 進藤昭男: 特集: 日本イノベーション物語 - 軽く伸びにくい「PAN系炭素繊維」-, 化学, 65, (1), 22-25 (2010).  
 ([17]と同じ)  
 [19] D. Swinbanks: Graphitic carbon copies, *Nature*, 349, 97 (1991).  
 ([17]と同じ)  
 [20] 松井醇一: 講座: 炭素繊維の話その6炭素繊維の工業化 - 東レ社の場合 (1968年～1979年), 強化プラスチック, 44 (1), 31 (1998).  
 (165頁右3.3 実際の製品が世に出る)

## 【追加的解説】

この論文は、「概要」および「はじめに」に記述したとおり、公的機関の研究成果が社会に認知され、産業界へ移転されて産業変革につながっていった中で、イノベーション誘発の初期過程を、旧大阪工業技術試験所のマネジメントおよび研究者の内面的動機や行動を中心に、可能な限りの文献と当事者（この論文の謝辞に記載）へのインタビューに基づいて検証し、構造化を図ったものである。したがって、PAN系炭素繊維の開発の全過程に関する技術史ではない。

### 1 大工試における「戦略的」な研究推進についての解説

160頁右2.1(2)原文：戦略的に発表されたと容易に考えられる。

「戦略的に発表」と記述したのは、“発表された”という事実の裏には、行き当たりばったりではない戦略性があったと、当事者インタビュー等をもとに分析・推論しているものであり、発表という事実に関する著者の見解である。

研究そのものについては、「個人の興味、関心に基づいてテーマが設定される」と随所に明確に記述してある。これは、当時の上司（進藤研究者の場合、仙石）の研究指導の一部であり、「人によって研究テーマの選択や研究の進め方についての自由度は大きく異なっていた」ことに由来する。また、進藤：「炭素繊維の開発も新聞記事を見たことによる偶発的なものである」、ということもこの論文で明確に記述してある。このようにテーマ設定や新たな発見等はむしろ研究者個人の自律性や新聞報道等による偶発性に依存するものであり、「研究開発は戦略的・計画的になされる」との近年一般的に言われているMOT的論評とは明確に一線を画している。

この論文で取り上げたモデルにおける「戦略」とは、研究開発の初期段階における個人またはグループの自発的な行為を包含し、その行動や成果の普及を組織が阻害せず、逆に激励・発展させる諸施策（知財確保の奨励等）がなされることを言っている。つまり、研究という個人の自発的行動と組織の戦略性とは二律背反ではなく、両立しうるもの、さらに言えば両立させてこそイノベーションが加速されるということがこの論文の主張である。

研究成果をあげるためのマネジメントの背景の例として、161頁左2.2「大工試がインフラ整備、人心の鼓舞を図っていた。」との記述は、「大阪工業技術試験所50年史」[11]の記述を基に、関係者へのインタビューにより確認したものである。上記文献には、同所の研究発表

や特許出願数の急増、放射化学実験室の建設、技術相談所の開設、大仁（大阪）から池田への集中化構想等の事実が記されており、これを根拠としている。さらに、161頁左2.2「組織的な取り組みを企図していることがうかがえる」との記述は、昭和34年（1959年）度「大阪工業技術試験所年報」[9]の記述にあるとおり、「炭素材料研究」の中に「繊維状黒鉛の研究」が、組織（大工試）として設定されていることを根拠としている。

また、特許出願に関しても学会発表の前に申請するという原則は守られている。国研や大学で特許の重要性が認識され始めたのはいわゆる日本版バイドール法と呼ばれる「産業活力再生特別措置法（第30条）」が施行された1999年以降である。これによって、公的機関による知財実施が活発化され、知財の重要性が飛躍的に高まった。戦後間もない1950年代および60年代で“パテント・ファースト”の原則が実行されていることは特筆に値する。著者はそこに着目しており、それを組織的戦略と個人の自発性とは両立する一つの証左と分析するものである。

### 2 イノベーションへの迅速展開に向けた行動についての解説

163頁左2.5(1)

原文：企業研究者にとって日常の会話から得た技術情報を自分自身の思考展開で眼前にある課題解決または新規提案にこぎつけてある程度の成果が得られた場合、往々にして当該成果に繋がった種は大工試にあることを言わないで社内説明展開を行ったようだとして著者の一人は聞く。

この論文の表現においては、「大工試側から日常の会話を通して得た情報に基づいて企業研究者が独自努力をして得た成果」に限定された文脈になっていること、また、それを問題にしているものではなく、得た情報をヒントにセレンディピティー的発想があった場合にその成果の背景には大工試情報（貢献）があるということを必ずしも社内でも明示してくれていないのではないかと、という当時の大工試側の一般的な認識を述べている。何らかの原情報をもとにイノベーションに繋がる発想や研究展開があった場合、結論だけの報告ではなくその場の議論の展開において、発想に至った原情報や思考展開プロセスも併せて紹介したほうが意見交換の幅が広がり、上乘せの展開の可能性が期待できるからである。

### 3 イノベーションにおける「死の谷」の軽減についての解説

163頁右2.5(2)

原文：先発グループと第2グループ

これは著者が整理のため便宜的に分類したものであり、読者が理解しやすいようにしたものである。特に材料研究にありがちであるが、先行している材料より良いものを探したけれども結果的には見つからなかった、という新材料開発における裏を取る作業の必要性を述べている。（進藤博士ほか関係者へのインタビューで得られた情報に基づく。）

新しい材料が発見され、社会に認知・賞賛されるようになったあと、性能的にもコスト的にも、信頼性や耐久性においても、発表された材料が他材料に比べ競争力において真にベストなものかどうかを確かめる必要がある。もちろん、発表側でそのような調査は済ませているはずであるが、その材料の製造プロセスや用途適用等を考えると、さらなる検討が要求される。発想の異なる同業他社、異業種社等が商機を窺い研究に参入する。材料に対する規格が定まっていない場合、その可能性を求めてさらに多くの企業が関心を寄せる。こういう状況は、広い意味で「死の谷」の概念に含まれる。この論文においては、先発グループと第2グループという用語は、この段階を説明するために導入したものである。「製品」を定め、世に出しつつある企業を「先発グループ」、関心を持ち商機を別途見つけようとする企業を「第2グループ」とした。「第2グループ」は当該分野の層を厚くするために必要であるが、意図した結果がでなかったという実績が残ることも多々ある。これらのネガティブ情報は世に出ることなく死蔵の一途をたどる。一般に、一研究者、一企業のカバーできる範囲はいつの世でも限定された範囲に留まることは否めない。そこで、イノベーションの達成を目指して、困難性の高い注文と思われるが、たとえば国としてこの「死の谷」を効率よく越える仕組みづくりが期待される。

これに対する試み、または見直しとして、その効果は部分的であるが、164頁右3.2(2)に記載のとおり国立研究所として「研究の進展に応じて成果の社会への出し方（特許、論文、報告会等）と産業界へのコンタクトを考えていた。さらに、成果にはずみをつけるため、成長に併せて研究費の規模をコントロールする方法もうまく使っている」ということに著者らは注目した。大工試は、進藤研究室を誕生させ、新たな研究者を参画させたことも、その裏づけと言える。これは大工試内での組織的研究マネジメントであり、企業も含めた組織的な（システムティックな）研究を実施したということを記述しているわけではない。

昨今言うところのイノベーション・ハブに似せた「企業との日常的交流」（164頁右3.2(2)）も上記の目的に役

立つ可能性がある。当時の状況は、このようなことを意図していたかどうかははなはだ疑問ではあるが、現在の研究機関において企業研究者が自発的に国立研究所に入りし、ダイナミックな議論がより多く交わされるようなことがあれば「死の谷」を乗り越えるための時間が多少なりとも短縮されることが期待される。

#### 4 PAN系炭素繊維の開発者についての解説

165頁左3.3

原文；英国の炭素研究者は1963年の米国炭素会議における進藤博士の発表によってPAN繊維を炭素繊維原料にすることの有用性を認識してPAN系炭素繊維の研究を開始している。

以下の参考文献を追加し、この記述の根拠とする。

文献[17]に、「進藤の研究成果は1963年6月に開催された米国炭素会議で発表され、これが契機となって欧米におけるPAN系炭素繊維の研究が進められた」との記述があり、さらにその下部の文章には、「英国RAEがPAN系に着手した理由は、進藤の発表に触発されたとしか考えられない」の記述がある。

文献[18]の24頁左にも同様な記述がある。文献[19]においても次の記述がある。「W. Watt *et al.*, Nature 213, 690-691 (1967) and Nature 220, 835 (1968); referenced Shindo's earlier work, and PAN carbon fibres were first made by Shindo and . . .」

#### 5 最初の発明からイノベーションに至る年月についての解説

165頁右3.3

原文；実際の製品が世に出る10年以上前から技術移転が行われている。

ここでいう実際の製品が世に出た時期とは、文献[20]に「炭素繊維強化プラスチックを使った釣竿やブラックシャフト（著者注；実際の製品）は1972年頃から世に知られるようになった。」と記述されているように、1972年を想定している。一方、進藤らが日本カーボン（株）と松下電器産業（株）に対して行った「黒鉛繊維の製造方法」という名称の「技術指導」は1960年であり、時間関係は原文のとおりである。

この論文の趣旨は、最初の発明（1959）から、真に役に立つもの（製品）に到達するまでには、一研究者の努力だけでなく、多種・多大な研究と労力および長い年月が必要である、というイノベーションの困難さを表現するものであり、技術史の年表のような厳密さで10年を表現しているものでない。

# シンセシオロジー 3周年記念座談会

今年でシンセシオロジー創刊から3年が経ち、今回も著者による座談会を開催いたしました。執筆により得られたもの、またシンセシオロジーの特徴の一つでもある査読者との議論への感想もお聞きしております。

シンセシオロジー編集委員会



## 座談会出席者

吉川 弘之	編集委員、科学技術振興機構 研究開発戦略センター、産総研
赤松 幹之	編集幹事、産総研
駒井 武	地圏資源環境研究部門
諏訪 牧子	生命情報工学研究センター
木下 佳樹	組込みシステム技術連携研究体
渡利 広司	イノベーション推進本部 イノベーション推進企画部
中村 安宏	企画本部
脇田 浩二	地質調査情報センター

**赤松** 科学的発見という基礎研究の成果を発表する通常の学術論文誌とは異なり、シンセシオロジーでは「研究のシナリオを書いてください」とお願いしています。そういうこれまでとは異なる視点で論文を書く中で、あらためて気づいたことや得られたものがあるのではないかと思います、発刊3周年を記念して著者の皆さんと吉川最高顧問においでいただきました。

最初に、自著論文の概要と執筆時の感想をお話いただけますか。

### 自著論文で表現したかったこと

**駒井** 私の論文は「土壌・地下水汚染のリサイクル技術」という、環境・エネルギーと地質の二つの領域にまたがる研究です。大気や地表水のリスク評価に比べて土壌や地下水のリスク評価の方法論は世界でも確立していなかったもので、それらの汚染が人の健康に与えるリスク評価技術を開発したというものです。

実は、普通の論文とどこが違うのかというのを自分でもあまりわからないまま、時系列的に書き上げて、最終的にはそれを構成的に非常にスマートにまとめたつもりでいたのですが、小野副理事長と富樫評価役に査読いただいた結果が散々でして「これではわからない」(笑)。時系列、やめました。書きたかったのは「こういうメンバーがいて、こういう構成があれば製品化できる」、その1点だけです。これまでの論文誌は、そういうものを全部はぎ取って論理だけを書いていますので、一般読者がよくわからないと思うのです。学術論文もち

ろん重要ですが、こういう構成を中心としたスタイルもこれから重要になってくるのではないかと思います。

**諏訪** 私のテーマは「循環発展的なプロジェクト構造のバイオインフォマティクス戦略」という、2001年からのデータベース作りとそれを使った共同研究の話です。2001年にヒトゲノムが解読されるというエポックメイキングな事件があったのですが、そのゲノム配列の中から、ヒトの細胞膜内で、外から受けた刺激の情報を細胞内部に伝える創薬の重要な標的タンパク質の遺伝子、GPCRを網羅的に探し出し、その機能解析を行うための計算パイプラインを作りました。そしてその応用結果を機能解析総合データベース(SEVENS)として練り上げました。研究のはじめからデータベース公開といういわゆる製品化までは2年でしたが、この成果がその次の要素技術になって、そこから大きな共同研究が循環的に次々に広がって行ったという内容を書きました。バイオインフォマティクスという分野は、結果が出るまでが比較的短期間でして、しかも何を対象として選んでもいい分野なので、機動的に動くことができ、いろいろな共同研究者と次々に話を発展できたと思っています。

論文を書くに当たって一番困ったのは「研究シナリオを示す」というところです。私はこの研究の中で、自分でシナリオを描いた記憶は一切ない(笑)。描いたとすれば最初の1~2年で、そこから先は自然発展的に物事が進んできて、それにのっかってきたという感じなのです。ただ、結果的には

非常に最短コースを歩んでこられたと思っています。

通常の論文は、すべて終わった後で、一番きれいに見せるために最適化したものを書くわけです。駒井さんは「時系列をやめて構成し直した」とおっしゃられました。私の場合は時系列そのものが新たな発展を生んでいったので、その時系列が重要だと思っていました。それと、普通の論文に書けないことは失敗談と思うのです。「失敗しました」と言ったら、あと通らなくなる。この論文誌では、失敗したからこそ、次の展開につながるのだという議論ができるところが面白いと思いました。

あともう一つ、困ったことといえば、異分野の方にわかりやすく説明しなければいけないということでした。赤松さんに査読をいただいたのですが、「こんなのでは全くわからない」と（笑）。すべての分野の人にわかるような用語を使うこと、これは苦勞しました。

**木下** タイトルは「臨床情報学のための野外科学的方法—技術移転の方法論に向けて—」です。重厚なキーワードを並べましたが、昨年3月までの6年間、システム検証研究センターで活動してきた技術移転活動について記したものです。システム検証というのはソフトウェアシステムのバグ、つまり障害を見つけたり、修復したりする技術です。私どもは産総研に改組される以前の電総研ではプログラミングの意味論に関する理論研究をやってきたのですが、産総研になって、そういうアカデミックな研究をしているものが、どのようにして社会に貢献するために、やるべきことはシステム検証である、と考えました。しかし、意味論研究から産業でのシステム検証活動への貢献までを、ウォーターフォール式に順にたどっていたのでは日が暮れてしまう。そこで、アカデミックな研究と技術移転を並行して行っていく、という活動を試みました。大学の先生も、教育と研究の両方をやっておられて、研究内容がそのまま教育に結びついているわけではないけれども、そのおかげでうまくいっていることもたくさんある。私達も研究と技術移転・産学連携を並行してやってみようと考えました。“臨床”という言葉は、システム検証とお医者さんの診断の類推をして医学から借りてきた言葉です。また、“野外科学”は、文

化人類学者の川喜田二郎さんが提唱されていた言葉です。

「帰納法、演繹のほかにアブダクションが大事」ということで、本格研究を進める上でアブダクションのプロセスも大事なのではないかとこの論文に記しました。

**渡利** 「セラミックス製造の省エネプロセスの確立」という非常にシンプルなタイトルで論文を投稿させていただきました。企業で稼働しているセラミックスの製造プロセスを対象とした研究開発についてまとめたものです。研究のポイントはバインダー技術で、バインダーとセラミックス製造のエネルギー消費の関係性を理解し、新しいバインダー技術で製造の省エネ化を図りました。

論文を書くに当たって、民間企業との成果を果たして書いていいのかという、自分自身の戦いがありました。ただ、書き進んでいくうちに、どういうふうに分人たちが考えてシナリオを作ったのか、どういう要素技術によってどんなものを抽出してできたのかという、ストーリー性が非常に大事だということが分かり、どうにかまとまったという感じです。

そして、難しい研究課題や社会のニーズでも、課題と構成要素を明確化することによってほとんど解決できるのではないかと、ということがわかりました。企業との共同研究をして、こういうふうな形でシンセシオロジーにまとめられたというのは、私にとって非常に名誉だったと思っています。どうもありがとうございました。

**中村** 私の論文は「ものづくり産業の国際競争を支援する電気標準」です。例えば、「ものの寸法」は、物差しを作っている企業が責任を持ってその精度を保証するわけですが、その企業は定期的に、社内の標準器を校正機関に持ち込んで社内基準がずれていないかを確認します。その校正機関はもっと上位の機関に、自らの標準器を校正してもらおうということで、最終的には国の標準へ繋がっています。このようにいろいろな物理量には、それぞれに必ず「国の計量標準」があるのですが、現在、およそすべての計量標準は産総研が実現し、維持管理と産業界への供給を行っています。ですから、私たちの使命は、国家計量標準を実現し、産業界



木下 佳樹 氏



中村 安宏 氏

において計量の正しい値を保証し、これを通して我が国のものづくり産業の国際市場での展開を側面支援することです。コンデンサ(キャパシタ)は我が国の主要産業の一つですが、最近、大容量のコンデンサが蓄電池用として期待されています。また、キャパシタンス標準の精度に対する要求レベルも高くなっています。キャパシタンスの国家標準は昔からあったのですが、今のニーズに合ったキャパシタンス標準を新たに開発し、それを校正事業者を通して世の中に供給したことを書きました。

「シナリオを書け」と言われると、どうやってここまで来たのかを振り返らなければいけない訳ですが、そもそも国家標準は最高精度の標準になりますので、どこまでも高い精度が良いわけです。何となく世界のトップを目指すという感じでやってきたのですが、産業ニーズや、世界の他の国々の標準と見比べ、最短時間で、しかもリーズナブルなコストで実現できるスペックがどんなものかということが、論文を書いていて自分の中に整理できました。

もう一つは、供給した標準が産業の現場の方にうまく届いているのかということです。産業現場では時間とコストの問題がより厳しくなってくるので、「国家標準レベルの精度は産業現場では要らない、精度は多少悪くても、もっと簡便に、もっと安く、もっと早く供給して欲しい」という話が出てくる。そこで、シナリオをもう一度見直して、次に必要な研究開発をしたという、実際に追う形でストーリーを書きました。

**脇田** 「シームレスな 20 万分の 1 の日本地質図」というタイトルですが、シームレスとは継ぎ目がない状態を指します。産総研地質情報総合センターの前身である地質調査所では、明治の頃は富国強兵の、第二次世界大戦後は復興の鉱物資源探査開発のために地質図を作ってきました。その後、地質情報もその利用目的があいまいになってきたという面が若干あって、地質学も、例えば日本列島はどうしてできたのか、この岩石や鉱物はどうしてできたのだろうかというような、産総研で言えば第 1 種基礎研究に集中していく形になりました。私も入所以来、日本列島がどうしてできたかということを真剣に考えて、ひたすらそのことの結果として地質図を出して

いた時期が長くありました。その結果、日本中の地質図がそれぞれの研究者のアイデアでバラバラにできてしまった。そこで、産総研発足後、ユーザーの利便性を考えた地質図のあり方を考えて、最新情報を用いて統一規格で作直すこと、境界を最新の知見でデジタル化してつなげるようにしようと、シームレス地質図のプロジェクトを立ち上げました。地質図が完成して数年たった段階も利活用が進んでいますが、その基本理念と作るプロセス、波及効果と反響等について書いています。データベースをどうやって作ったかとか、社会にどうやって役立ったかというような論文はどこにも載せるところがないので、いいチャンスだったと思います。昔、実学だったものがピュアなサイエンスになって、また実学に戻りつつあるという時期に、こういう活動をして、それを論文で発表させていただいたということで大変ありがたく思っています。

### 論文執筆によって得られたもの

**赤松** 自分であらためて見直して、ストーリーなり、シナリオが実はあったのだということに気がつくということが共通に起きているのではないかと思います。それがどういうふうに次に生かされているだろうかということに私は関心があるのですが、いかがですか。

**中村** 標準の場合、開発し供給することに視点がいきがちなのですが、研究室の人には、「標準が供給された後、どう波及していくのか」というところまで最初にシナリオとして考える」ということを言えるようになりました。

**赤松** 実際に普及させるプロセスが研究者の間で今まであまり共有されていなかったということですね。地質にも同じような印象を私は持っているのですが、いかがですか。

**脇田** 第 3 期に向けて次世代シームレスというプロジェクトが立ち上りましたし、JIS や国際標準化との連携や GEO Grid のシステムの中での活用の広がりが出てきました。多くの若手研究者を含めて、情報技術分野と連携して地質情報をどのように利活用すべきかというユーザー志向が明確になっ



脇田 浩二氏



赤松 幹之氏

たという上で、波及効果は大きかったと思います。

**駒井** 最終的には国家で標準となる方法論を開発して、できれば法制度や社会システムの中に組み込んでほしいという思いがスタートラインです。社会にいかに普及させるか、省庁に働きかけて、お金をかけずに汚染問題を解決したい、これはリスクマネジメントの鉄則です。

ただ、今、ものすごく苦勞しています。製品化ができて、社会的システムも回っている。問題は、そこから先の「コストとリスク」の関係でちょっと停滞気味です。第3期は経済モデルをやるのですが、「死の谷」の2回目を迎えているような感じがします。

**木下** アカデミックな研究と技術移転を並行仕様とした結果、現場の研究員に非常に大きな負担がかかった場合もあります。技術移転だけ、あるいはアカデミックな研究だけではなくて、「両方必要だ」と主張したわけですが、個別の研究員に対して過度の負担がかかった場合もあるようです。

**赤松** 木下さんがやられた現場のことを解決するための社会学的な方法論に対して、あまり価値のないことではないかとサイエンティストが思っている可能性があるのですね。それは自然科学とは違う理論があって、学問の営みの一部だと理解できることによって、気持ちが良くなるというか、つらさがなくなるのではないかという気がするのです。

**木下** 社会学的、自然科学的の対照の他に、クオリタティブ（質的）な議論とクオンティタティブ（量的）な議論があると思うのです。量的な議論ができればそっちのほうが精密な議論ができるのでいいに決まっているわけです。しかし、どんな量を測ればいいのか明らかだとは限りません。そこをいかに決めて、その上に精密な量的議論を展開しても、砂上の楼閣というものです。計算機科学では、異なる価値の体系をいくつも相手にしなければなりませんので、量的な議論に入る前に、どんな量を問題にするべきかという議論をする必要のある場合が多いのです。そのような議論は必然的に

質的議論になります。質的な議論でもある程度精密なことは言える場合もありますので、そういったことをもうちょっと強調したいと思っています。

**駒井** 今、私も一番悩ましいところは「社会的なアプローチ」です。リスク評価技術は科学的なアプローチなのですが、一般の人にそのリスク評価の結果を受容していただけるかどうかです。自治体や企業と話しているのは社会的な受容性の部分なので、そういった分野にも産総研がこれから進出するのが私はいいいと思っています。社会系の人をどれくらい採用できるかという問題はありますが（笑）。

**吉川** 私も同じことを長年考えてきて、それで「設計学」というのを作るわけですが、これまで、「設計は学問ではない」と言われて、個別の設計者が作りっ放しだった。ですから、蓄積もないし、物理学のように日進月歩にならないわけですから、量的に表現できない、科学ではないと差別意識みたいなものを持って見られているわけです。それは広い意味でいうと、理学部が偉くて、工学部は偉くないという構造になっているわけですね。結局、私は「クオリタティブな問題を科学にする」方法を考えようとしたわけです。多くの問題が定性的にしかできないということは、その問題は科学の対象として大きな問題を抱えていて、それをやっている人は尊敬されるべきなのですね。

**木下** 私は、物理学ではないものの、理学部出身なのですけれど、私達の分野では定性的な議論をしようとするのはむしろ理学部の人に多くて、工学部の方は計算機のパフォーマンス等で定量的な議論をしがちです。定量的な議論が偉くて、差別されるのは理学部のほうだったりします（笑）。

**赤松** 諏訪さんの場合は、量的に1個でゴールが決まるのではなく、質的なものが入って循環的になっている。ある種のスパイラルを起こさないと次に行かないという気がしたのですが。



駒井 武氏



吉川 弘之氏

**諏訪** おっしゃるとおりです。質的なものは明確には説明できないのですが、確かに入っていて、その質のレベルが途中で変わっていきます。ある時点で学問的なニーズがあって、さらに世の中の時世の流れみたいなものがそこに混ざってくると、ある種のベクトルができます。そのベクトルに対してどうするかをそのつど考える。循環的に、もう1回基礎に戻る、ということが繰り返されるというイメージが強いです。

**赤松** 渡利さんは、ストーリー性が大事だと強調されておられましたね。

**渡利** 私は2年前からイノベーション推進室でいろいろなプロジェクトを担当していますが、構成学の考え方はプロジェクトの立ち上げや、テーマを理解するのに非常に勉強になりました。最近、もう一つの活動として、企業との共同研究を進めています。最近の傾向として、産総研職員と企業の人との間で、共同研究テーマの提案がうまくできないのです。なぜかという、お互いに持っている課題をもとに、それをうまくブレークダウンしていくような構成学を持たないからです。要素技術のどれを選択するのか、どれを基礎研究のターゲットとして進めれば花開くかを考えます。相手のニーズを把握し、十分にコミュニケーションを取りながらシナリオを作る等、一連の構成学の考え方は技術を社会に出すためには必要だと思います。今の産総研にとっては構成学をつくるという学問が一番大事なのかと感じました。

**木下** 企業の方と共同研究の相談をするとき、言葉が通じないというか、半年ほどたったら実は全然通じていなかったというような経験をもっています。

**渡利** ターゲットをどれだけ絞り込んだ議論ができるかという前準備の段階だと思うのですが、産総研内でも語彙が難しいですね。

**赤松** シンセシオロジーに他の分野の研究者がわかるように書くというのは、訓練になりますね。

**渡利** 普通は、他分野の研究論文を読んでもわけがわからないですが、シンセシオロジーを読むと流れがわかる。質問を先に読むと、皆さんがどういう問題意識をお持ちで、どこがポイントかわかる。科学の知識を持っていたら、すべての学問に対応できるというのがシンセシオロジーの論文のいいところだと思います。

#### 査読者との議論を通じて

**赤松** 査読者との議論が一つの特徴でもあるのですが、査読者との議論の質はどうお感じになりましたか。

**駒井** すごく勉強になりました。2回ほどやりとりして、シナリオを作ったら明解になったので非常にありがたい経験だったと思います。私のところは企業とのお付き合いがものすごくあるのですが、企業の人にはものづくりとか製品化に対して真剣です。産総研の研究開発は、製品化の最後のところまでいくシナリオを書いていない嫌いがあると思っています。シナリオを書くことで研究プロジェクトや最短での製品化提案ができるのではないかと思います。

**諏訪** 最初は、産総研の本格研究の枠組みの中で自分の研究をどう説明するかを書かなければいけないと思っていたのです。無理やりそれに合わせたら、ねじれがあって自分もつらかったのですが、「設計したものを自由に披露してほしい」と言われて、気が楽になって書けました。私自身、自分の研究を振り返ることが出来て勉強になりましたし、非常にいい論文にさせていただきました。ただ、このような議論は産総研の職員に対してだからできる話だと思うのです。今後、産総研外の人へも論文投稿依頼を広げていかれると思いますが、普通の論文は査読でそんなにやりとりはしませんので、それだけの時間的コストをかけてくださる産総研以外の方がいらっしゃるのか、ということは気になりますね。

**赤松** 吉川先生、皆さんのお話を聞かれていかがでしょうか。



渡利 広司 氏



諏訪 牧子 氏

**吉川** 駒井さんは、土壌・地下水汚染の新しいリスク評価技術のみならず科学技術政策論まで踏み込み、システム設計をやっておられる。渡利さんはセラミックス製造の省エネプロセスという大目的を実現するためにあらゆる分野の話が出てきます。これを私は「超領域の設計」と言っているのですが、一つ一つの研究が総合されて「構成」ができるのだろう。諏訪さんは、生命科学と情報通信、ICTの合体したバイオインフォマティクスの中で幅広い研究が統合されている。木下さんの臨床情報学は、ある意味では構成学的设计そのもの、構成の本質問題を議論している。中村さんは、グローバルイノベーションも含めて標準の重要性が高まってきた背景もあり、広い範囲の研究をされている。脇田さんのシームレスな日本地質図は、これまで、知識ベースは研究論文にならなかったのですが、その背後にある大きな問題を抽出したということ。

このように、シンセシオロジーで扱う科学には、多様な問題の背後に、ある種の抽象的ではあるが、普遍的な構造があるのではなからうかと思っているのです。第1種基礎研究の方法論とは違う、それに匹敵するような、これが第2種基礎研究だと言えるようなものが蓄積された論文群から抽出できるのではないか。それが私の楽しみです。

### シンセシオロジーへの期待

**赤松** 最後に、シンセシオロジーというジャーナルへの期待をお願いします。

**木下** 安全や信頼性を論じる時にはリスク評価が必ずあること、それからディペンダブルな信頼性の高いソフトウェアはこう作るべきである、という筋書きでやってきました。それ以上の抽象的なレベルで考えたことはなかったのですが、今、吉川先生がおっしゃった共通の構造が自分の目の前にあるような気がしてきました、この辺も追求してみたいと思いますし、そういう方向をシェアしてくれるような著者が現れるといいなと思っています。

**諏訪** サイエンスという以上、再現性がなくてはいけません。こういうやり方をしたら何%成功したとか、失敗したとか、結果と結びつけた上で研究の構造の分類をすると面白いと思います。それと、世の中の流れや外部の環境とのインタラクションを考えて、その年代における研究集団の成果と、その後の時系列変化に伴う再現性の変化を見られるといいですね。

**赤松** 社会状況の変化によって同じ方法で失敗するかもしれないということですね。失敗を書いてほしいという話もときどき聞くのですが、勇気が要りますね（笑）。

**脇田** 私達の分野で言えば、最近、「地質多様性」ということを提案しているわけですが、そういうものを融合した形で構成学として新しい学問を提案していく。それをやった結果、また新たな失敗例、成功例の論文を出していくという道もつくっていただければいいなと思います。

**中村** 標準は構成学においても共通インフラ的なところがあるのかなと思っていて、自分でも感心しているところですが、“標準”というキーワードで、他の分野との連携・融合が進められると思います。

**渡利** 最近、産総研の中で「分野融合が重要だ」と言っているのですが、社会の大きな問題はすべて融合化されています。せっかくの機会ですから、シンセシオロジーを書いた人に実学をやってもらいたいです。ブレークダウンしていくと、こんな研究要素があって、こういうプロジェクトができますよというふうに実学に落とすことが次の課題かなと思います。

**赤松** 書いて偉そうなことを言っているだけではなくて、やってみるということですね（笑）。

**駒井** 若手の研究者にこういった意識を持ってほしいです。連携講座で社会系の学生に講義をしているのですが、去年から構成学の話を取り入れたら、すごく興味を持っています。全体の俯瞰や、構成をしっかりとすることは社会科学としても、これから企業に行く人にとっても重要な部分ですので、若い人たちに普及することが大切だと思います。また、イノベーションスクールで今年モデレーターをしたのですが、ポストクラスの特にシステム科学やバイオ系の人が興味を持っています。

**吉川** 戦略プロジェクトは、明らかにシンセシオロジーの思想に基づいてつくっているのだと思うのですが、それをもう少し分析的にして、産総研の外にもアピールできるようになるといいと思います。第4期科学技術基本計画では、課題解決型イノベーションと言っているんだけど、その方法論がないのです。それを「ここにあり」ということをぜひ実証していただきたいと思いますね。

**赤松** 実践したことを基にして論文に書くだけではなくて、その論文を書く中で得られたことを活かして再び実践しながら実証していくことを目指していきたいと思っています。きょうはありがとうございました。

# 編集方針

シンセシオロジー編集委員会

## 本ジャーナルの目的

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

## 研究論文の記載内容について

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

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

## 対象とする研究開発について

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

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

## 査読について

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

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

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

## 参考文献について

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

## 掲載記事の種類について

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

## 執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

# 投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

改正 2009年3月23日

改正 2010年8月5日

## 1 投稿記事

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

## 2 投稿資格

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

## 3 原稿の書き方

### 3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

### 3.2 原稿の構成

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3 書式

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

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

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

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

は刷り上りで左右15 cm以下、白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

#### 4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

#### 5 著者校正

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

#### 6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

#### 7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

## MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

There has been a wide gap between science and society. The last three hundred years of the history of modern science indicates to us that many research results disappeared or took a long time to become useful to society. Due to the difficulties of bridging this gap, it has been recently called the valley of death or the nightmare stage <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, H.TAYA

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 Website and Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

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

E-mail: [synthesiology@m.aist.go.jp](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 Website and Publication Office, Public Relations Department, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

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

E-mail: [synthesiology@m.aist.go.jp](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 Website and Publication Office, Public Relations Department, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

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

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

## 編集後記

シンセシオロジー 4巻2号では、研究論文4編と補遺1編をお届けします。主題は、情報、ロボット、センサー、フォトニクス、材料と多彩な分野にわたりますが、どの論文も、専門が異なる他の分野の方や一般の読者からも十分理解できるように記述されています。読者から毎号いただくアンケートへの回答でも、他分野の研究がよくわかることがシンセシオロジー論文の特徴であるとの指摘をよく受けます。

今回は、いままでシンセシオロジーに研究論文を執筆したことのある著者6名に集まっていたいただき、産総研前理事長の吉川弘之先生と座談会を行いました。シンセシオロジーの研究論文は、これまでの学術誌とは異なった、新しい記述形式をとっていますので、執筆に当たって苦労した点や、工夫した点、有益だった点等、自由に語っていただきました。

シンセシオロジーの研究論文を執筆したことで、自分が行ってきた一連の研究に明確なシナリオがあり、改めてそれに気が付いて、自身の研究を再構成できたという発言が多くの著者からありました。シンセシオロジーの編集者として、シンセシオロ

ジーの特徴と意義を改めて確認した次第です。またプロジェクトを立案したり、評価したりするときにも、要素を明らかにし、それらを構成していくアプローチが役に立つという指摘にも同感します。

シンセシオロジーでは査読者と著者との間で丁寧に議論を行います。これも著者にとって良い刺激になっていることがうかがわれます。議論の内容を論文本文の後ろに掲載していますが、議論は読者に対して論点を浮き彫りにし、読者の理解を助けていることも指摘されました。

読者各位には引き続きシンセシオロジーをご愛読いただければありがたく、同時に、機会がありましたらこの新しい記述形式でご自身の研究を表現していただくことで、自分の研究のシナリオを改めて見つめ、さらに新たな視点を加えることも可能と思います。シンセシオロジーへの広い分野の方々からの積極的な投稿をお待ちしています。

(編集委員長 小野 晃)

Synthesiology 4巻2号 2011年5月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

---

### シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：阿部 修治、五十嵐 一男、一條 久夫、上田 完次、餌取 章男、大蒔 和仁、大和田野 芳郎、岡路 正博、景山 晃、久保 泰、清水 敏美、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 広報部広報制作室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

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

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



## Messages from the editorial board

### Research papers

ARGUS: Adaptive Recognition for General Use System

*-Its theoretical construction and applications-*

N.OTSU

Toward the use of humanoid robots as assemblies of content technologies

*-Realization of a biped humanoid robot allowing content creators to produce various expressions-*

S.NAKAOKA, K.MIURA, M.MORISAWA, F.KANEHIRO, K.KANEKO, S.KAJITA and K.YOKOI

Thermoelectric hydrogen gas sensor

*-Technology to secure safety in hydrogen usage and international standardization of hydrogen gas sensor-*

W.SHIN, M.NISHIBORI and I.MATSUBARA

Demonstration of optical communication network for ultra high-definition image transmission

*-Proof-of-concept experiment of image distribution over the dynamic optical path network-*

J.KURUMIDA and S.NAMIKI

Paper supplement: Study on the PAN carbon-fiber-innovation for modeling a successful R&D management

*-An excited-oscillation management model-*

O.NAKAMURA, T.OHANA, M.TAZAWA, S.YOKOTA, W.SHINODA, O.NAKAMURA and J.ITOH

### Round-table talks

Third anniversary of *Synthesiology*

### Editorial policy

### Instructions for authors