

Synthesiology

視覚障害者のための音による空間認知の訓練技術

生体分子の分離法でカーボンナノチューブを分離

セラミックカラーデータベースの構築

業務用ビデオゲーム表示技術の変遷

大陸棚画定調査への挑戦

シンセシオロジー編集委員会

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

- 注1 「悪夢の時代」は吉川弘之と歴史学者ヨセフ・ハトバニーが命名。「死の谷」は米国連邦議会 下院科学委員会副委員長であったバーノン・エーラーズが命名。ハーバード大学名誉教授のルイス・ブランスコムはこのギャップのことを「ダーウィンの海」と呼んだ。
- 注2 本格研究： 研究テーマを未来社会像に至るシナリオの中で位置づけて、そのシナリオから派生する具体的な課題に幅広く研究者が参画できる体制を確立し、第2種基礎研究^(注4)を軸に、第1種基礎研究^(注3)から製品化研究^(注5)を連続的・同時並行的に進める研究を「本格研究 (Full Research)」と呼ぶ。本格研究 http://www.aist.go.jp/aist_j/information/honkaku/index.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6巻第2号(2013.5) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
視覚障害者のための音による空間認知の訓練技術 — リハビリテーション現場での実用化に向けて — ・ ・ ・ 関 喜一	66 – 74
生体分子の分離法でカーボンナノチューブを分離 — 大量・安価な金属型・半導体型 CNT の生産を目指して — ・ ・ ・ 田中 丈士、片浦 弘道	75 – 83
セラミックカラーデータベースの構築 — 30 数万点の釉薬テストピースのデータベース化と活用 — ・ ・ ・ 杉山 豊彦	84 – 92
業務用ビデオゲーム表示技術の変遷 — テレビ受像機への描画からリアルタイムグラフィクスへ — ・ ・ ・ 三部 幸治	93 – 102
大陸棚画定調査への挑戦 — 国の権益領域拡大と地球科学の貢献 — ・ ・ ・ 西村 昭、湯浅 真人、岸本 清行、飯笹 幸吉	103 – 117
論説	
英国における大学評価の新たな枠組み：Research Excellence Framework — 最近の日本の研究評価の状況との比較 — ・ ・ ・ 大谷 竜、加茂 真理子、小林 直人	118 – 125
報告	
研究・技術計画学会第 27 回年次学術大会での講演 構成学 (シンセシオロジー) の論文分析による技術の社会導入に向けた方法論	126 – 128
編集委員会より	
編集方針	129 – 130
投稿規定	131 – 132
編集後記	139
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Training technology of auditory orientation for people with visual impairments — Toward practical use in rehabilitation facilities — - - - Y. SEKI	66
Separation of carbon nanotubes (CNTs) by the separation method for biomolecules — Towards large-scale, low-cost separation of metallic and semiconducting CNTs — - - - T. TANAKA and H. KATAURA	75
Construction of a ceramic color database — Database of more than 300,000 glaze test pieces and its application to industrial research — - - - T. SUGIYAMA	84
Brief history of arcade video game display technologies — From CRT display technologies to real time graphics — - - - Y. SAMBE	93
A scientific challenge to the delineation of Japan's continental shelf — Contribution to validating the Japan's rights over marine areas based on earth science — - - - A. NISHIMURA, M. YUASA, K. KISIMOTO and K. IIZASA	103
Article (Abstract)	
An introduction to the Research Excellence Framework: A new research evaluation framework for universities in the UK — Comparison with the status of research evaluation in Japan — - - - R. OHTANI, M. KAMO and N. KOBAYASHI	118
Messages from the editorial board	133 – 134
Editorial policy	135 – 136
Instructions for authors	137 – 138

視覚障害者のための音による空間認知の訓練技術

— リハビリテーション現場での実用化に向けて —

関 喜一

視覚障害者が歩行するためには、音を手がかりに周囲の様子を把握する技能を習得する訓練が必要である。そのために著者は、“安全な仮想空間の中で訓練を実現する技術を開発してリハビリテーションの現場に導入する”ことを目指し、訓練システムの開発を行った。この訓練システムの実現のために、①音による空間認知のメカニズム、②メカニズムを再現する3次元音響技術、③3次元音響演算用ハード/ソフトウェア、④頭部位置方向計測技術、⑤訓練カリキュラム等の基盤研究および要素技術の開発を行った。構築した訓練システムの有効性を検証した結果、このシステムがこれまでの実環境訓練よりも有効であることを確認した。2010年9月より、訓練システム簡易版が視覚障害関係者に配布され、指導員養成課程等で活用されている。

キーワード: 視覚障害、聴覚空間認知、リハビリテーション、3次元音響、測位技術

Training technology of auditory orientation for people with visual impairments

– Toward practical use in rehabilitation facilities –

Yoshikazu SEKI

People with visual impairments require training to perceive their surroundings from ambient sounds. The author developed a system, introduced to rehabilitation facilities, that allows training to be conducted in a safe virtual environment. To realize this system, the author carried out fundamental research on the mechanism of auditory orientation; developed basic technologies to simulate 3-D sound; and designed hardware and software to calculate 3-D sound, as well as head position and direction. A training curriculum was also developed. The effectiveness of the training system was evaluated, and certified as being more effective than the existing real-environmental training system. However, some problems with calculating head position and direction must be addressed before this system can be completely introduced to rehabilitation facilities. While we are currently working to resolve this problem, the training system in its present state is being distributed as a simplified version to the people concerned since September, 2010, and is being actively used.

Keywords: Visual impairment, auditory orientation, rehabilitation, 3-D sound, position and direction measurement

1 これまでの訓練

傷病等により失明した視覚障害者にとって、光ではなく音によって周囲の状況を認知する技能（この技能を以後“聴覚空間認知 (auditory orientation)”と呼ぶ）を獲得することは歩行・生活能力を獲得する上で不可欠である。視覚障害者に必要な聴覚空間認知には、自動車のように音を発している物体を知覚する“音源定位 (sound localization)”のみならず、壁や柱のように音を発していない物体を反射音等により知覚する“障害物知覚^{用語1} (obstacle perception)”と呼ばれる技能も含まれる。

現在、視覚障害教育・リハビリテーションの現場における聴覚空間認知の訓練の現状は、現実の生活環境・歩行環境において実際に被訓練者が歩行し、ひたすら周囲の音情報を聞き取って周囲の状況を認知する聴取経験を積

み重ねていくことに依存している^[1]。しかし、訓練を開始したばかりの“初心者”の視覚障害者には、実際に自動車が往来する実環境での訓練は危険を伴う場合があり、またさまざまな音響が混在する実環境から、聴覚空間認知に必要な音の手がかりを選択的に聴取することが困難を極める場合がある。訓練の安全性を向上させ、また訓練の効率化、さらには社会復帰までの期間短縮化を図るためには、実環境でやみくもに聴取経験を蓄積する訓練を行うだけでなく、安全かつ体系的な聴覚空間認知訓練を行うことが効果的である。

このようなことを踏まえ、国内外には聴覚空間認知訓練を体系的に行う訓練システムの開発の試みが数例存在した^[2]。それらの訓練システムは主に音響技術を駆使したバーチャリアリティにより訓練用の音環境を仮想的に再現す

産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第6
Human Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan E-mail: yoshikazu-seki@aist.go.jp

Original manuscript received March 28, 2012, Revisions received September 11, 2012, Accepted December 4, 2012

るものであった。しかし、それらの訓練システムは音源定位の訓練のみが考慮されているだけで、障害物知覚の訓練は考慮されておらず、実用に供した研究成果はない。

一方、著者らは1998年から2002年までの期間に、障害物知覚の基礎訓練のみを想定した訓練方法を開発して実用化した^[3]。この訓練方法は、障害物知覚の手がかりが初心者に分かりにくく学習しづらいという問題を解決するため、その手がかりに音響技術を使用して人工的に分かりやすく再現し、初心者への学習の支援を行うものであった。しかしこれは逆に音源定位の訓練を想定していなかった。結果として、聴覚空間認知訓練を行う訓練システムは存在していないのが現状である。

このような背景から、著者は、音源定位と障害物知覚を統合した聴覚空間認知訓練システムの開発とその実用化を目的とした研究に着手した。この論文では、聴覚空間認知訓練システム開発のための一連の研究について述べる。

2 訓練システム開発に必要な構成学的シナリオ

前章で述べたとおり、安全かつ体系的な聴覚空間認知訓練を行う方法は存在せず、現状では訓練生は実環境で聴取経験を蓄積する訓練を行うしかない。安全な訓練のためには、安全な仮想環境で学習できることが理想である。また体系的な訓練のためには、教材の難易度を自由に設定できなければならない。そのためには聴覚空間認知訓練で学習すべき音の要因を仮想的に再現するバーチャルリアリティ技術を使うことが一番現実的である。しかしこの訓練方法を実現するには、聴覚空間認知の音響学的メカニズムの知識が必要であり、またバーチャルリアリティ技術の実現のためには3次元的に音を再生する技術や訓練生の頭の動きを計測する技術が必要となる。

この訓練システムの開発のためには、前述のような異分野の研究要素を構成学的に融合したシナリオが必要である。著者はまず目的実現のために、聴覚空間認知のメカニズムを解明し、このメカニズムに基づき人工的に設計された訓練環境を安全な仮想空間の中で再現して訓練を行う方法を開発し、最終的に低コスト化等の検討を行って視覚障害リハビリテーションおよび教育の現場に導入するというシナリオを考えた。

このシナリオを構成する要素技術は以下のとおりである。

- ① 視覚障害者の歩行における聴覚空間認知のメカニズムの知識（音響心理学）
- ② 上記メカニズムを人工的に再現する3次元音響技術（音響技術）
- ③ 3次元音響の演算をリアルタイムで行うハード/ソフトウ

エア（信号処理技術）

④ 3次元音響技術による仮想現実に必要な頭部位置方向計測技術（センサー技術）

⑤ 実現した訓練システムを用いた訓練カリキュラム（リハビリテーション学）

訓練システムの原理は図1のとおりである。視覚障害者の訓練を実施する指導員は、最初に訓練内容について訓練カリキュラムを考案し、その中で使用する訓練環境を設計する。例えば、“自動車が道路の上を通過する音を聞いてこの道路が敷設されている位置と方向を認識する技能を訓練生に習得させる”というカリキュラムを実施する場合は、“道路の上を自動車が走行している環境”を訓練環境として設計する。

次に、指導員によって設計された訓練環境を、訓練システムは3次元音響技術およびハード/ソフトウェアによって立体音響的に再現して訓練生に提示する。提示の際、メカニズムに相当する音情報は、初心者にも聞き取りやすく理解しやすいように強調して提示する。これにより訓練生は、実際に自分が訓練環境の中にいるかのような感覚で、周囲の音情報を実環境よりも明確に聴取でき、聴覚空間認知のメカニズムを分かりやすく学習できる。

さらに頭部位置方向計測技術によって、実環境で訓練生が頭部を回転したり移動した場合、その位置方向変化を検出して3次元音響システムに伝え、これに合わせて音像位置を変化させる。これにより、あたかも訓練環境中で自分の頭部が同様の動きをしたかのような音の変化を体験することができる。

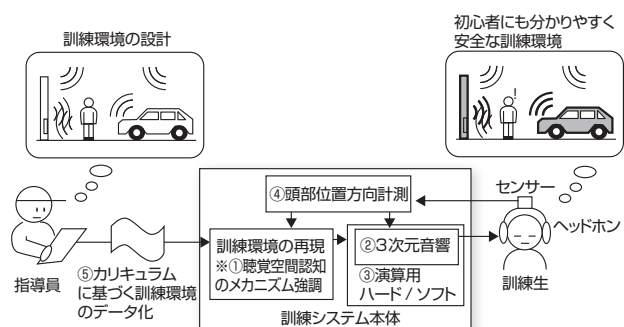


図1 聴覚空間認知訓練システムの概念図

指導員は、最初に訓練カリキュラムを考案し、その中で使用する訓練環境を設計する。次に、訓練システムは訓練環境を3次元音響技術によって立体音響的に再現して訓練生に提示する。メカニズムに相当する音情報は強調して提示する。さらに頭部位置方向計測技術によって、実環境で訓練生が頭部を回転したり移動した場合、これに合わせて音像位置を変化させる。これにより、あたかも訓練環境中で自分の頭部が同様の動きをしたかのような音の変化を体験することができる。

3 訓練システム開発のための課題解決

3.1 試作訓練システム開発

視覚障害者の歩行における聴覚空間認知のメカニズムについて解明し、得られた知見に基づき、試作訓練システムを開発した^[8] (図2)。この研究開発は、厚生労働科研究費の補助を受け、国立障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科と共同で行った。

3.1.1 障害物知覚に基づく訓練方法の開発

著者は、1990年代から2000年代前半にかけて、“聴覚空間認知”の中でもメカニズムが不明だった“障害物知覚”について、音響心理学的な被験者実験によりメカニズム解明のための研究に従事した^{[3]-[7]}。研究を遂行する過程で、障害物知覚のメカニズムが不明であるがゆえに、リハビリテーションや教育の現場が経験的訓練方法に依存せざるを得ない実態が明らかとなり、解明したメカニズムに基づいた訓練方法の必要性を知ることになった。著者の研究結果より、障害物知覚の“手がかり”となる音響現象が、物体からの反射音と直接音による音像^{[4][5]}や音色^[6]の変化、および遮音や回折による音の減衰^[7]であることが分かった。また、これらの“手がかり”を音響技術で再現すると、障害物知覚の習得者に(実際には物体が存在しないのに)あたかもそこに物体が存在するような感覚を生じさせることができた^[3]。図3に障害物知覚訓練の検証の例を示す。この検証例は、壁が存在する場合の環境音の直接音と反射音を、それぞれ被験者の後方と前方からスピーカで提示することによって作り出された仮想的な壁を被験者に接近させた場合の、被験者の身体動揺である。障害物知覚獲得者において、壁の接近に同期して不随意的回避動作が確認できることから、スピーカーを使った直接音と反射音

の再現によって、障害物知覚の要因を再現できることが確認できる。この成果は、この訓練システムにおいて障害物知覚の訓練を実現する基礎となった。この訓練システムでは、初心者に分かりやすいように、障害物知覚の要因を強調することができるようにした。例えば、反射音は完全反射(反射による音圧レベルの低下がない)、障害物による遮音は完全遮音、直接音は障害物反射面に垂直に入射、および直接音と反射音以外の雑音は存在しない等である。

3.1.2 3次元音響提示技術

3次元音響技術については、ヒトの聴覚が音を3次元的にとらえるメカニズムを応用して、ヘッドホン聴取で音を自由に3次元的に再生する技術^[9]を導入した。この技術は、ヒトの頭部・耳介・外耳道の音響伝達特性である“頭部伝達関数(head-related transfer function; HRTF)”を原音信号に畳込積分することにより、音像を3次元の任意の位置に定位させる技術である。この技術により、通常のステレオヘッドホンを通して、人工的に作成した音環境を聴取者に3次元的に提示することができる。ただしこの技術には、頭部伝達関数の個人差によって、聴取者ごとに3次元の音像再生位置の正確さに差が生ずるという欠点がある。したがってこの技術は、個人ごとの校正を行わない限り正確に音空間を再現することには使用できない。今回のシナリオの訓練システムでは、“初心者”に聴覚空間認知の基礎を分かりやすく教える教材という位置づけで使用することとし、厳密な訓練には使用しないものとした。

ハード/ソフトウェアについては、上記の3次元音響を実現する上で頭部伝達関数と原音信号をリアルタイムで畳込積分できる高速の演算が必要となるため、2000年代前半では専用のデジタル信号処理用集積回路(以下 DSP)

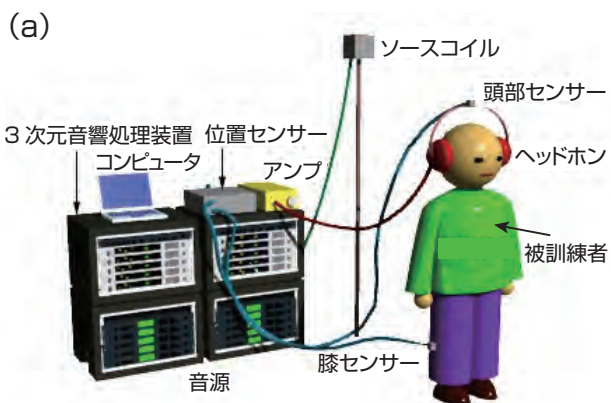


図2 試作訓練システム

(a) 全体の構成

(b) 画面上に表示された訓練環境

画面左部分の仮想環境表示部には、被訓練者(円の中心位置)、音源(自動車、トラック、店舗等)、壁、道路、ランドマークの配置が表示される。画面中央部分の条件操作パネルは、仮想環境の条件設定(騒音の有無等)や、仮想環境の表示方法(拡大縮小等)の操作を行う。画面右部分の再生操作パネルは、仮想環境のファイル操作や、仮想環境の再生・停止等の操作を行う。

を用いた音響エフェクタを用いることが一般的であった。試作訓練システムでも、専用 DSP を実装した市販の 3 次元音響エフェクタ (Roland 社 RSS-10) を 10 台並列で作動させて、10 音源分の 3 次元音響を実現した。

3.1.3 位置・方向検出技術

頭部位置方向計測技術として、試作訓練システム開発では、市販の磁気位置方向センサー (Polhemus 社 3SPACE Fastrak) を導入した。この磁気位置方向センサーは、ソースコイルから磁場を発生させ、位置方向検出対象物にセンサーコイルを設置すると、センサーコイルが磁場を検出してその位置と方向を高精度で計測することができる。価格は 100 万円を超えるが、位置 1 mm、方向 1 deg の精度で計測が可能であり、研究用として使用される。位置方向検出範囲は、ソースコイルからの磁場が届く約 1 m 以内の範囲に限られているため、訓練生は実際に実環境で歩行することはできなかった。そのため、訓練環境内で移動するためには、実際に歩行するのではなく、その場で“足踏み”することで歩行の代用とした。足踏み検出のために、訓練生の頭部に加えて、膝にもセンサーコイルを装着した。膝センサーが膝の上下の動きを検出すると訓練生が足踏みをしているものと判断し、上下動の速さや大きさに応じて歩行速度も変化するものとした。

3.1.4 訓練カリキュラム

訓練カリキュラムについては、訓練環境の構成要素として、(1) 音源、(2) 壁、(3) 道、および (4) 目印 (ランドマーク) の 4 つの要素を配置する方法を考案した。(1) “音源” は、点音源であり、自動車や店等訓練環境中で音を発する物体を表現するための要素である。これにより“音源”は、音源定位の訓練に使用することができる。またその他に、訓練環境内の東西南北に相当する 4 方向から環境音を発

することができるものとし、訓練環境が本物の屋外の実環境のように音に包まれた印象を作り出すことができるものとした。(2) “壁” は、それ自身は音を発しないが、前述の音源から発せられた音を反射および遮音するものとした。これにより“壁”は、障害物知覚の訓練に使用することができる。(3) “道” と (4) “目印” は、音響的な機能を持たない要素であるが、指導員が訓練環境を設計する際に“町並み”をイメージする手助けとなるように要素として加えた。以上 4 つの要素を用いて、国立障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科の指導員に、歩行訓練で習得すべき代表的な訓練環境の作成を依頼した。試作訓練システムには、指導員が訓練環境を自由に編集することができる編集用インタフェースを実装し、指導員はこれを使用して訓練環境を編集した。

3.2 訓練システムの有効性

訓練システムの有効性を検証するため、試作訓練システムが完成した 2005 年に、国立障害者リハビリテーションセンターにおいて検証実験を行った^[10]。

被験者は、リハビリテーションをまだ受けていない初心者 of 視覚障害者を模擬するため、あえて視覚障害者を被験者として使用せず、聴覚空間認知について何の経験もない晴眼者 30 名に目隠しをして実験に参加させた。被験者は 10 名ずつ 3 群に分けた。最所の群には何も訓練を施さず (第 1 群)、2 番目の群には訓練システムによる訓練を実施し (第 2 群)、3 番目の群には訓練システムで実施した訓練環境を実環境で再現してこれまでのように実環境中で訓練を行った (第 3 群)。訓練は、熟練した歩行訓練士が担当し、1 日 40 分の訓練を連続 5 日間行った。訓練効果の評価項目は、客観評価として (a) 歩行時の偏軌^{脚註 2} (まっすぐ歩いているつもりが曲がって歩いてしまう現象) の軽減効果、

(b) 歩行時におけるストレス (視覚がない状態で歩行することによる心理的負担) の軽減効果の二つを計測した。また被験者の主観評価として、(c) 技能評定^{脚註 3} (歩行の技能に関する 50 項目の自己採点) (d) 不安評定^{脚註 3} (歩行時の不安に関する 50 項目の自己採点) の二つを実施した。(d) は国立障害者リハビリテーションセンターで考案された、歩行に関する技能と、歩行時に感じる不安についての 50 項目の質問用紙を用いて評価した。

その結果、(b) (c) (d) については、試作訓練システムによる訓練を実施した群 (第 2 群) の訓練効果は、これまでの実環境での訓練効果 (第 3 群) と統計的に有意な差

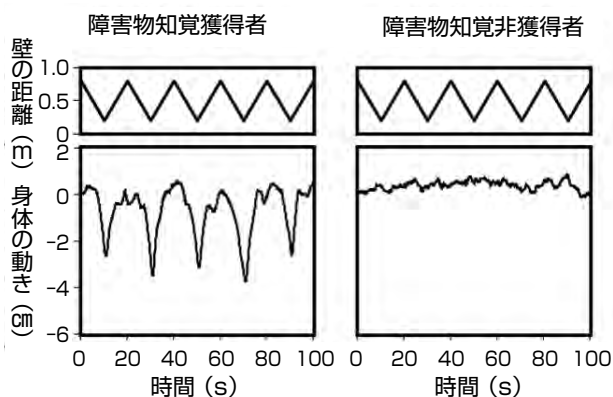


図 3 障害物知覚訓練の検証の例

反射音によって作り出された仮想的な壁を被験者に接近させた場合の、被験者の身体動揺 (左: 障害物知覚獲得者、右: 非獲得者)。左右の上図は壁の動きを表す。障害物知覚獲得者では、壁の接近に同期して不随意的な回避動作が確認できる。

がなく、また訓練をしていない群(第1群)より有意に高かった(図4(b)(c)(d))。このことは、安全な仮想空間内で訓練環境を構築して訓練を行った場合の訓練効果が、危険を伴う実環境中での訓練効果と遜色がないことを意味している。またさらに(a)については、訓練システムを使用した群の訓練効果が、他の2群より有意に高いことが示され、音を手がかりにする歩行訓練においては仮想環境訓練のほうがこれまでの実環境訓練より有効であることも示された(図4(a))。これらの検証実験の結果は、著者の訓練システムの有効性を支持するものであった。

なおこの訓練システムは2010年に国内特許登録済である^[11]。

3.3 訓練システムの実用化を阻む問題点(死の谷)

試作訓練システムを開発し、その有効性を証明したが、シナリオの最後にある“視覚障害者リハビリテーションの現場への導入”のためにはいくつかの課題が残されていた。

最初の課題は価格である。3次元音響を再現するための専用DSPを実装したエフェクタは当時1台約30万円と高価なもので、試作訓練システムではこれを10音源分の10台使用していたため、これだけで約300万円となってしまっ

た。さらに頭部位置方向計測のために使用した磁気センサーも100万円を超えており、その他に原音を録音するレコーダや制御用コンピュータ等を合わせると、約500万円の価格となってしまった。視覚障害者リハビリテーション等“福祉”の現場は、“医療”の現場とは異なり、高価なシステムを導入する経済力を持っていない。現場導入のためにはコストダウンが必須の課題であった。

また、システム本体も大型で持ち運びすることはできない。視覚障害者のリハビリテーションには、訓練生が訓練施設で訓練を受ける“通所・入所型訓練”の他に、指導員が訓練生の自宅に訪問して訓練を実施する“訪問型訓練”も盛んに行われている。本体が持ち運びできなければ、訪問型訓練に対応できない。小型化も急務であった。

さらに、前述の通り試作訓練システムで使用している磁気位置方向センサーは、計測範囲が約1mしかなく実際に歩行することができないため、その場で足踏みを行って歩行の代用とする不自然な方式を採用している。この場合、訓練生は、歩行することによって生じるはずの加速度フィードバックを体感できないことになる。計測範囲の制限をなくすることにより、実際に訓練生が歩行動作を行えるよ

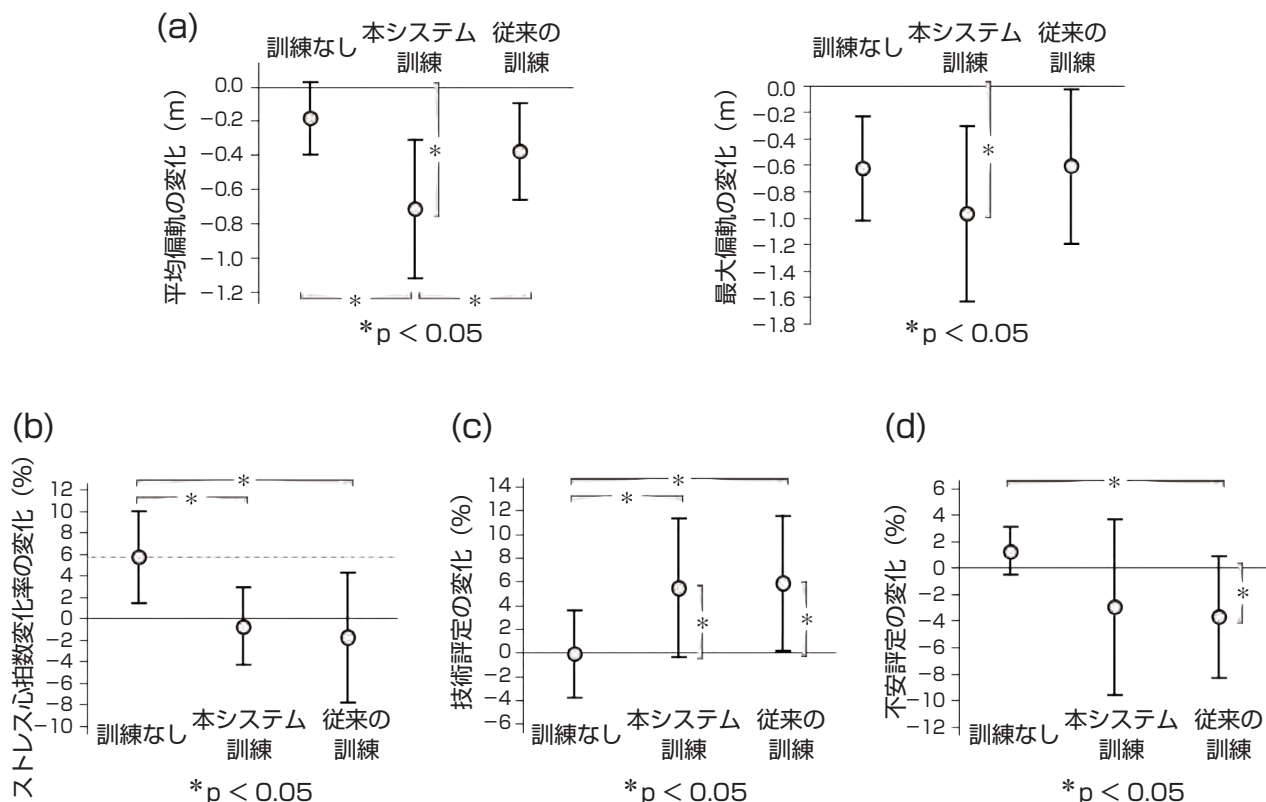


図4 訓練システムの評価実験結果 (Seki et al., 2011^[10])

- (a) 訓練による歩行時の偏軌(左:平均値、右:最大値)の変化。縦軸の値が負の値で小さいほど、訓練による偏軌軽減効果が高いことを示す。
- (b) 訓練による歩行時のストレスの変化。縦軸の値が負の値で小さいほど、訓練によるストレス軽減効果が高いことを示す。
- (c) 訓練による技能評定の変化。縦軸の値が正の値で大きいほど、訓練による技能向上効果が高いことを示す。
- (d) 訓練による不安評定の変化。縦軸の値が負の値で小さいほど、訓練による不安軽減効果が高いことを示す。

うにすることが望ましい。

以上のことから、これらの“死の谷”を超え、実用化するための新たな取り組みを行うこととした。

3.4 訓練システムの実用化へ向け再検討

シナリオ中のいくつかの要素について、再検討を行い、実用訓練システムの開発を2006年より開始した。この研究開発は、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究および財団法人大川情報通信基金研究助成の補助を受け、東北大学電気通信研究所、東北福祉大学等いくつかの研究機関と共同で行った。

ハード/ソフトウェアについて、試作訓練システムを開発した2000年代前半は専用DSPを使うのが主流であったが、その後、コンピュータ技術の進化に伴い、汎用のパーソナルコンピュータ（以下PC）の中央処理装置（以下CPU）でも頭部伝達関数の畳積演算がリアルタイムで行えるようになった^[12]。汎用PCは視覚障害者の情報アクセシビリティを確保するツールとしてすでに視覚障害者リハビリテーションの現場にも普及していたため、もし汎用PCを演算装置として利用できれば、現場は新たな機器を購入する必要がない。また、ノートPCを使用すればシステム本体が小型化できるため、持運びの問題も解決する。実用訓練システムでは、東北大学電気通信研究所の研究グループが開発した汎用PCによる3次元音響ソフトウェア SiFASo (Simulative environment for 3-D Acoustic Software)^[13]を導入することとした。SiFASoによる再現可能な音源数はCPUの処理速度に依存するが、Pentium IV 2 GHzクラスの性能があれば8音を同時に再生可能であり、現在主流となっているCore 2 Duo 2 GHzクラスのCPUではそれ以上の複数音源の再生が期待でき、試作訓練システムと同等の性能を確保できる。

頭部位置方向計測技術については、高価・高精度・狭計測範囲の磁気センサーの代わりに、量産品として一般に市販されているGPSやMEMSジャイロ・加速度センサー

等の技術を実用訓練システムに導入することとした。これらは数千円～数万円と低価格であり、現場の経済的負担を軽減できる。また計測範囲に制限がないので、試作訓練システムのように“足踏み”で代用する必要はなく、実環境内で訓練生が実際に歩くことが可能となる。これにより、例えば盲学校のグラウンド等のように広くて構造物のない敷地を用いて、その中で訓練生を実際に歩かせながら安全な訓練を実施でき、訓練生は、歩行することによって生じる加速度フィードバックを体感しながら訓練を受けることができる。しかし、量産されている低価格・広計測範囲のセンサー類は、一般に精度が悪く、ノイズや大きな誤差を含んでいる。訓練システムに導入するためには、精度を向上させる技術を新たに導入する必要がある。現在、ノイズ誤差除去の可能性について検討している^[14]。その結果、カルマンフィルター等のアルゴリズムがノイズ誤差除去に有効であることが分かってきており、低価格・広計測範囲のセンサー類をこのシステムに使用できる可能性が見えてきた。

4 訓練システム簡易版

上記の再検討に基づき、実用訓練システムの開発を実施した(図5)。

実用訓練システムは、ノートPC、ヘッドホン（とサウンドアダプタ）、および位置方向センサーで構成されている。このシステム本体は小型軽量（大きさはノートパソコンとヘッドホンを合わせたサイズ。重さはおよそ3 kg前後）であるため、訓練生はこれを装着した状態で実際に歩くことが可能である。

現在、頭部位置方向計測技術のセンサーの精度向上の課題を未解決のままの実用訓練システム簡易版が使用可能な状態となっている。簡易版はGPSやジャイロ・加速度センサーの代わりに、PCのマウスを用いてPCの画面に表示される訓練環境内の“訓練生”を操作することにより、訓練環境内を移動することが可能としたシステムで

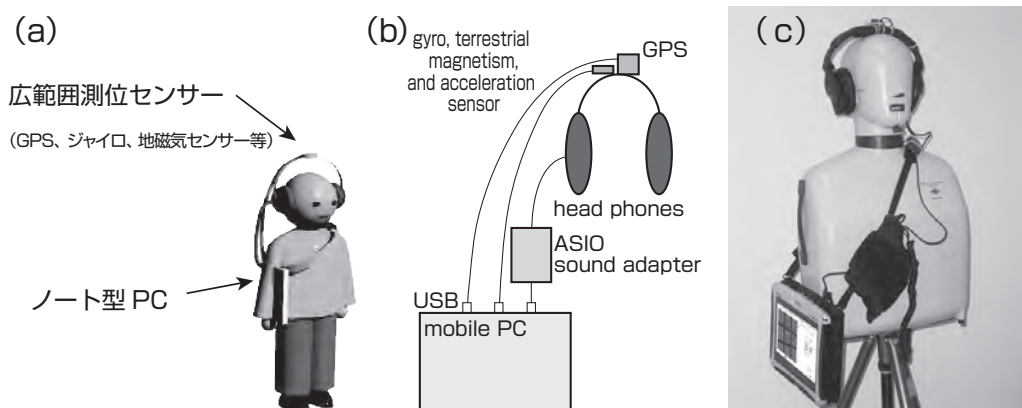


図5 実用訓練システム
(a) 全体の構成
(b) 各構成要素のブロック図
(c) 装着した状態の写真

ある（図6）。実環境で訓練生が実際に歩くことはできない点においては試作訓練システムの問題点と同じく未解決のままであるが、低価格化および小型化は実現しており、リハビリテーション現場での導入は容易である。表に、試作訓練システム、実用訓練システムおよびその簡易版の比較表を示す。2010年9月より視覚障害関係者を対象として国内外に簡易版のソフトウェア（産総研知的財産管理番号 H22PRO1182）を無償配布中であり、次の改良のためのフィードバックを求めている。このソフトウェアは、中核となる3次元音響技術の他に、頭部位置方向計測、訓練環境の読込・再生、および訓練士用ユーザーインターフェースの制御のためのソフトウェア等によって構成される。また国立障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科では、2010年より指導員養成課程において教育用に導入している。指導員養成課程における訓練システムの導入により、教室に居ながらにしてさまざまな歩行環境を疑似体験できるため、指導が効率よく行えるようになった。

5 まとめと今後の展開

この論文では、聴覚空間認知訓練システムの開発とその実用化を目的とした研究について述べた。

この訓練システムの開発のためには、①音による空間認知のメカニズム、②メカニズムを再現する3次元音響技術、③3次元音響演算用ハード/ソフトウェア、④頭部位置方向計測技術、⑤訓練カリキュラムという異分野の研究要素を構成学的に融合することが必要であった。このため、聴覚空間認知のメカニズムを解明し、このメカニズムに基づき人工的に設計された訓練環境を安全な仮想空間の中で再現して訓練を行う方法を開発し、最終的に低コスト化等の検討を行って視覚障害者リハビリテーションおよび教育の現場に導入するというシナリオを想定し研究開発を行った。

1990年代より人間の障害物知覚に関するメカニズムの解明に取り組み、2003年より3次元音響技術、これを再現

表 試作訓練システム、実用訓練システムおよびその簡易版の比較

	試作訓練システム	実用訓練システム	実用訓練システム簡易版
価格（PC除く）	500万円	数万円	同左
寸法	大型 (H0.6 m×W0.6 m× D0.6 mのラック4台分)	小型 (ノートPC+ ヘッドホン)	同左
可搬性	据置式	携帯可能	
頭部位置 方向計測	高精度 (方向 1 deg、 距離 1 mm) 狭範囲 (半径約 1 mの領域内) 高価格 (百万円以上)	低精度 (方向 10 deg、 距離数十 cm～数 m) 広範囲 (無制限) 低価格 (数千円～数万円)	マウスで 代用

するためのハード/ソフトウェア、訓練生の頭部の動きを計る頭部位置方向計測技術および訓練の手順を示す訓練カリキュラムの導入を検討し、2005年に試作訓練システムを開発した。評価実験により、訓練システムの妥当性を確認したものの、実用化のためには超えなければならない課題があった。3次元音響を再現するためのハード/ソフトウェアおよび頭部位置方向計測技術を再検討した結果、実用訓練システムを構築することができた。現在、早期の実用場面での実証を目指し、広範囲測位技術をマウスで代替して仮想環境内の頭部位置方向を指定できる機能を実装した簡易版のソフトウェアを2010年より視覚障害関係者に配布し、また指導員養成課程で実践している。

今後、頭部位置方向計測技術の課題を解決して改良版のリリースを目指す。低コスト性と測位性能のバランスを検討した結果、量産されている家庭用ゲーム機のコントローラを頭部位置方向計測センサーに流用することが最もコストと性能のバランスの面で有利であるため、このセンサーの誤差を軽減するアルゴリズムを実装して、改良版をリリースする予定である。また、訓練システムの普及を軌道に乗せる活動も行う。産総研 Web サイトを通して訓練システムソフトウェアの無償配布を実施し、視覚障害関連学術団体を通じて訓練システム配布の周知を行う。また指導員養成課程においては訓練システムを使用した訓練方法の指導を行う予定である。同時に、新たに訓練成果の評価システムの開発にも着手する予定である。

謝辞

この研究を遂行するにあたり、国立障害者リハビリテー

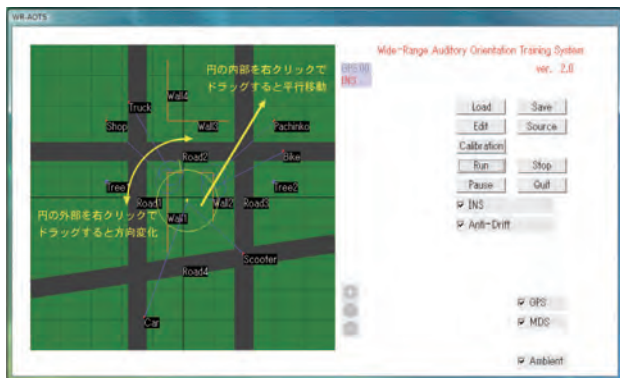


図6 実用訓練システム簡易版のユーザーインターフェース
頭部位置方向センサーの代わりにPCマウスで訓練環境内を移動可能。

ションセンター学院視覚障害学科、東北大学電気通信研究所、東北福祉大学、および2011年度産総研イノベーションスクール生の三浦貴大氏の協力を得た。またこの研究の一部は、厚生労働科研費（2003～2005年度）、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究（2007～2012（予定）年度）、および財団法人大川情報通信基金研究助成（2008年度）の助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

用語の説明

用語1：障害物知覚：壁や柱のように音を発していない物体を、物体からの反射音や物体による遮音等、音の変化を手がかりに聴覚で知覚する能力。視覚障害者の重要な環境認知能力の一つである。

用語2：偏軌：視覚障害者の歩行において、本来の歩行経路からはずれて歩行する現象。ベアリング(veering)ともいう。

用語3：(歩行時の) 技能評定・不安評定：国立障害者リハビリテーションセンターで考案された50項目によるアンケート調査による評価。技能評定の質問項目の例としては、「大体曲がらずに歩行することができる」「壁や建物を伝い歩くことができる」「車と平行に歩くことができる」等である。不安評定の質問項目の例としては、「走行中の車との接触(が不安である)」「未知の場所での歩行(が不安である)」「看板との接触(が不安である)」等である。

参考文献

- [1] 芝田裕一編著: 視覚障害者の社会適応訓練, 日本ライトハウス, 大阪 (1990).
- [2] 関喜一: 視覚障害者のためのVR技術, バイオメカニズム学会誌, 25 (2), 71-74 (2001).
- [3] 関喜一: 聴覚による障害物知覚とその訓練, 日本音響学会誌, 60 (6), 325-329 (2004).
- [4] 関喜一, 伊福部達, 田中良広: 盲人の障害物知覚と反射音定位の関係, 日本音響学会誌, 50 (4), 289-295 (1994).
- [5] Y. Seki: On a cause of detection sensitivity difference depending on direction of object in obstacle sense, *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, 5 (4), 403-405 (1997).
- [6] Y. Seki and K. Ito: Coloration perception depending on sound direction, *IEEE Trans Speech Audi. P.*, 11 (6), 817-825 (2003).
- [7] 関喜一, 伊福部達, 田中良広: 盲人の障害物知覚における障害物の遮音効果の影響, 日本音響学会誌, 50 (5), 382-385 (1994).
- [8] 関喜一, 佐藤哲司: 3Dサウンドを用いた視覚障害者用聴覚空間認知訓練システム(第2報), 第31回感覚代行シンポジウム予稿集, 1-4 (2005).
- [9] J. Blauert: *Spatial Hearing*, MIT Press, Cambridge (1997).
- [10] Y. Seki and T. Sato: A training system of orientation and mobility for blind people using acoustic virtual reality, *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 19 (1), 95-104 (2011).
- [11] 関喜一, 佐藤哲司: 視覚障害者のための歩行訓練環境生成システム, 日本国特許, 登録番号4534014 (2010).
- [12] 矢入聡, 岩谷幸雄, 鈴木陽一: 頭部運動感応型ソフトウェア聴覚ディスプレイの開発～DSPを用いない高臨場感音空間合成システム～, 日本工業出版 画像ラボ, 18 (2), 35-39 (2007).

- [13] 大内誠, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, 棟方哲弥: 汎用聴覚ディスプレイ用ソフトウェアエンジンの開発と音空間知覚訓練システムへの応用, 日本音響学会誌, 62 (3), 224-232 (2006).
- [14] 三浦貴大, 関喜一, 岩谷幸雄, 大内誠: 広範囲電子的測位による3次元音響を用いた視覚障害者の聴覚空間認知訓練の可能性(第5報)-利用可能なセンサに関する調査-, 第37回感覚代行シンポジウム予稿集, 89-92 (2011).

執筆者略歴

関喜一(せきよしかず)

1994年北海道大学大学院工学研究科生体工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。同年工業技術院生命工学工業技術研究所入所。現在産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門主任研究員。視覚障害者の聴覚による空間認知のメカニズムの解明、およびその習得訓練技術の開発に従事。また、国立障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科非常勤講師として、研究成果に基づき視覚障害者生活訓練専門職員の養成に従事。



査読者との議論

議論1 全体構成

コメント(多屋 秀人: 産業技術総合研究所広報部)

著者が長年研究を展開してきた聴覚による空間認知のメカニズムに関する知見をベースに、3次元音響提示技術、信号処理技術、センサー技術および訓練カリキュラムの要素技術から聴覚空間認知訓練システムを構成した研究で、本誌に適した内容構成になっている。

コメント(久保 泰: 産業技術総合研究所評価部)

取り扱っている内容は本格研究として優れており、またSynthesiologyの趣旨に沿った論文と判断する。

議論2 障害物知覚

質問(多屋 秀人)

障害物知覚の基礎訓練方法開発において解決した課題に言及し、その成果が今回の訓練システムの中でどのように活用されたかについて紹介してください。

また、視覚障害者を対象とした「障害物知覚」訓練等の検証結果について言及してはどうでしょうか？

回答(関喜一)

“障害物知覚の基礎訓練方法開発において解決した課題”については、すでにこの論文に“これらの「手がかり」を音響技術で再現すると、障害物知覚の習得者に(実際には物体が存在しないのに)あたかもそこに物体が存在するような感覚を生じさせる”と説明しています。また、“その成果が今回の訓練システムの中でどのように活用されたか”については、すでにこの論文に“障害物知覚の要因を強調することができるようにした。例えば、反射音は完全反射(反射による音圧レベルの低下がない)とした。”と説明しています。

“視覚障害者を対象とした「障害物知覚」訓練等の検証結果”については、実際に音による壁を提示した場合の視覚障害者の回避動作を記録したデータを図3として追加しました。

議論3 検証実験

質問(久保 泰)

「3.2 訓練システムの有効性」の検証実験は、このシステムの有効性を示す非常に重要な部分であり、実データを示す方がよいのではないのでしょうか。

また、訓練の回数にも依存するところがあるように思われますの

で、回数を明記する必要があるのではないのでしょうか。

回答（関 喜一）

ご指摘のとおりです。実験データを文献 10 から引用して、図 4 (a) ~ (d) として掲載しました。また、以下のとおり訓練の回数に関する情報を 3.2 第 2 段落に追加しました。

追加質問（久保 泰）

図 4 が加わることにより、開発したシステムの評価について、より客観性が加わりました。一方、(a) ~ (d) の縦軸ラベルの意味について、専門外からは難解です。各説明文で、上あるいは下方向の数値がどのような傾向を示唆するものか、補助的な記述をすることは可能でしょうか。

回答（関 喜一）

図の説明の、図 4 (a) ~ (d) で、値の正負や大小の意味について説明を追加しました。

質問（多屋 秀人）

検証実験では、視覚障害者を被験者とせず、晴眼者を被験者とされています。

- ・晴眼者を被験者としたことで、検証の限界はあるのでしょうか？
- ・視覚障害者を対象とした有効性の確認は行っているのでしょうか？

回答（関 喜一）

晴眼者を被験者としたことで、検証の限界は無いと考えています（というよりむしろ厳しい評価が行われたと言えます）。もしこのシステム

が、視覚障害者としての生活術を習得した視覚障害者が使用することを想定したシステムなら、目隠しをした晴眼者を被験者とした評価では不十分です。しかしこのシステムは、まだ何も習得していない“初心者”の視覚障害者の訓練のために使用するシステムですので、むしろ何らかの経験のある視覚障害者を被験者とした評価結果では逆に不十分となります。

なお、このシステムの使用対象である“本物の初心者の視覚障害者”を対象とした有効性の確認はまだ行っていません。“本物の初心者”（つまり失明して間もない）視覚障害者”を被験者として、開発途上のシステムの検証実験を行うことは倫理的に難しいです。

以上のことは、参考文献 [10] で説明済みです。

議論4 今後の課題

質問（多屋 秀人）

「今後の普及」のために行うべき課題として、技術開発、普及活動の両面があると思います。それぞれの面について述べてください。特に、普及のため活動策は？

回答（関 喜一）

技術開発の課題については、低コスト性と測位性能のバランスを検討した結果について追記しました。また、普及活動については、産総研 Web サイトを通して訓練システムソフトウェアの無償配布、および視覚障害関連学術団体を通じて訓練システム配布の周知を行います。また指導員養成課程においては訓練システムを使用した訓練方法の指導を行う予定です。実際に、今回の訓練システムの 10 年ほど前に開発した“障害物知覚訓練音響 CD”という訓練教材は、この方法で 300 件以上普及させました。

生体分子の分離法でカーボンナノチューブを分離

— 大量・安価な金属型・半導体型CNTの生産を目指して —

田中 丈士*、片浦 弘道

カーボンナノチューブ (CNT) には金属型と半導体型が存在し、その優れた電氣的性質を応用するには、2者を分離する必要がある。産業応用に向けては、大量・安価な分離法が求められる。我々は、生体分子の分離法を応用することにより、CNTの新規分離法を開発することに成功した。アガロースゲルを用いた電気泳動に始まり、最終的にはカラムを用いて大量・安価な分離を達成し、試料提供も開始した。直列カラムへのCNTの過剰投入による単一構造半導体型CNTの分離法も開発した。また、本論文では研究を効果的に進めるための、特許出願、成果発表、予算申請のタイミングの要点についても論じた。

キーワード: カーボンナノチューブ、金属型・半導体型、分離、ゲル、生体分子

Separation of carbon nanotubes (CNTs) by the separation method for biomolecules

– Towards large-scale, low-cost separation of metallic and semiconducting CNTs –

Takeshi TANAKA* and Hiromichi KATAURA

There are two types of carbon nanotubes (CNTs): metallic and semiconducting. To exploit their superior electric properties, mixtures of these two types of CNTs should be separated. For industrial applications, a large-scale, low-cost separation method is required. We successfully developed novel separation methods for CNTs by applying separation methods for biomolecules. We first applied agarose gel electrophoresis, and finally achieved large-scale, low-cost separation by the column method. Using this method, we provided separated CNT samples. A separation method for single structure semiconducting CNTs was also developed by overloading CNTs into tandemly arranged multi-columns. The point of timing of patent application, publication of research results, and budget application to carry out this research effectively is also presented in this paper.

Keywords: Carbon nanotubes, metallic/semiconducting, separation, gel, biomolecules

1 はじめに

1.1 背景: CNTのエレクトロニクス応用への期待と課題

カーボンナノチューブ (carbon nanotube, CNT) は炭素原子が六角形に繋がったシートを筒状に丸めて閉じた構造をもち、直径が数ナノメートルから数十ナノメートル (nm: mm の 100 万分の 1) で、長さはマイクロメートルを超える非常に細くて長い物質である (図 1)。1991 年に、当時の NEC 基礎研究所の飯島 (現: 産業技術総合研究所ナノチューブ応用研究センター長) によって、CNT が同軸で何層にも重なった「多層 CNT」が電子顕微鏡観察により見いだされた^[1]。その後、1993 年には、一層からなる CNT 「単層 CNT」が見いだされた^{[2][3]}。CNT の研究は、その分子構造が比較的単純なこともあり、理論計算の研究も精力的に行われてきた。その計算から、CNT は炭素原子のみからなる物質でありながら、非常に優れた特性、例えば、アルミニウムより軽く低密度でありながら、銅の 10 倍

以上の強度、銅よりも高い電気伝導性を有する他、高熱伝導性、高熱安定性、高化学安定性等といった、多様な特性を示すことが予想された。また、炭素原子の配列 (構造) によって、金属的・半導体的な振る舞いをすることも理論計算により予測された^[4]。上述のように、CNT は極めて

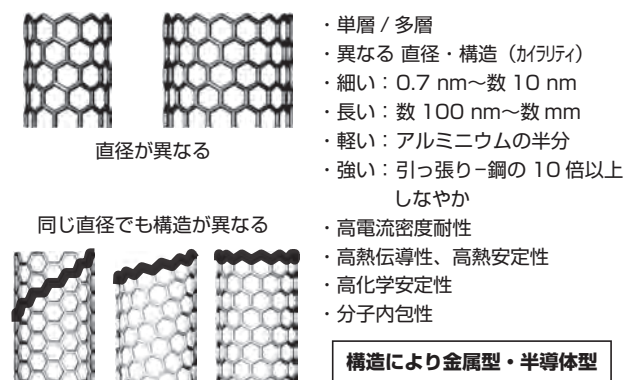


図 1 CNT の構造と特徴

産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 〒305-8562 つくば市東 1-1-1 中央第 4
Nanosystem Research Institute, AIST Tsukuba Central 4, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8562, Japan * E-mail: tanaka-t@aist.go.jp

Original manuscript received September 3, 2012, Revisions received October 31, 2012, Accepted November 22, 2012

優れた可能性を秘めたナノ材料であることから、これまでの材料では成し得なかった新たな応用への期待が高まっている。特に、エレクトロニクス応用に目を向けると、金属型 CNT は、薄膜にすると、既存の透明導電膜のように希少金属を必要とせず、高い機械的強度によって折り曲げることも可能な透明導電膜に利用できる。半導体型の CNT は高速動作するトランジスタを塗布型で簡単に作製することが可能で、この場合もまた、透明でフレキシブルなものを作ることができる。しかし、CNT のエレクトロニクス応用を実現する上での障害がある。それは、既存の一般的な CNT の合成方法では、金属型 CNT のみ、あるいは半導体型 CNT のみを選択的に合成できず、金属型と半導体型の混合物（通常、金属型：半導体型 = 1 : 2 の割合）としてしか得られないことである。そこで、金属型と半導体型の CNT の分離の研究が重要になってくる。

1.2 目標：大量・安価な分離CNTの供給

金属型 CNT と半導体型 CNT は、ともに炭素原子のみからなるシートが丸まった様に疎水的な表面をもつ物質で、見かけ上は大きな差異が認められずに区別が非常に困難である。また、合成後の CNT は非常に強固な束を形成しており、各 CNT を 1 本 1 本バラバラにして分散することが困難であることも、分離研究を大きく阻害していた。理論研究により金属型と半導体型の CNT が予想^[4]されてから 10 年以上の年月を経て、少しずつ金属型・半導体型 CNT の抽出や分離等の研究が報告されるようになってきた^{[5][10]}。例えば、選択的酸化^[5]、誘電泳動^[6]、アミンを用いた抽出^[7]、ポリマーを用いた抽出^[8]、DNA 分散とクロマトグラフィー分離^[9]、密度勾配超遠心分離法^[10]等である。これらは、(1) 金属型 CNT か半導体型 CNT の片方を選択的に壊すことによって、他方を得る「選択的破壊」、(2) 金属型あるいは半導体型 CNT の片方を選択的に取り出す「選択的抽出」、(3) 金属型 CNT と半導体型 CNT を分離し、両方の CNT を回収する「分離」、に大きく分けることができる。これらの中で、2006 年に Hersam らの報告した密度勾配超遠心分離を用いた手法^[10]は、純度の高い金属型と半導体型の CNT を得ることができる画期的な方法であった。しかし、超遠心分離機は非常に高価で、大量処理には向いておらず、分離時間も長い（12 時間）等、改善すべき点もあった。特に、分離した金属型および半導体型 CNT を産業利用するにあたっては、安価で大量に分離された CNT が求められる。大量生産することにより低コスト化を図ることも可能であるが、まず大量に処理できる必要がある。少量の試料で実施できる研究もあるが、大量になれば研究自体を進めることができないうものもある。そこで、分離した金属型および半導体型 CNT を

大量に安価に供給できる手法の開発を目的とし、CNT の分離の研究を行うこととした。

2 目的を実現するためのシナリオ

2.1 生体分子分離法をCNTへ適用（異分野融合）

上述の密度勾配超遠心分離法は、元々生命科学の分野で多用されている手法であり、DNA の抽出等に利用されている。また、DNA を用いて CNT を分散したものをカラムクロマトグラフィーにかけることで、金属型と半導体型の CNT を分離する手法^[9]でも比較的優れた成果が得られていた。このように、ナノ材料である CNT の分離では、生体分子の分離法あるいは生体分子自体を用いた分離で良い結果が得られていた。著者の田中は、元々、生化学を専門としており、DNA やタンパク質等といった生体分子の分離精製に精通していた。現在の産業技術総合研究所に入所した際に、異分野融合（バイオテクノロジーとナノテクノロジー）の研究を進めるポジションに就いたため、入所後、新たな研究課題を模索していた。その中で、CNT はさまざまな太さ・長さ・異なる電気特性をもつ混合物であり、その分離が非常に重要な課題であることを、片浦から知ったことをきっかけに、CNT の分離の研究を共同で行うこととなった。固体分光学や材料科学を専門とする物理系のバックグラウンドをもつ片浦と、生物系の田中が協力することで、異分野融合の研究が開始されたのである。分野が異なると、使う言葉や常識が大きく異なり、意思の疎通を上手くはかれないこともあるが、互いに全く異なる視点をもち、その結果、想像もしなかったアイデアが出ることもあり、それが研究を良い方向へ推し進める原動力となった。異分野の研究者の共同研究が始点となり、以降、金属型と半導体型 CNT の分離法として、アガロースゲル電気泳動^[11]、ゲルを用いるが電場を用いない分離（例：凍結-解凍-圧搾法ほか）^[12]、カラム法^[13]の順に研究は進み、さらに、マルチカラムを用いた単一構造半導体型 CNT の分離^[14]にまで発展した（図 2）。これらはいずれも第 1 種基礎研究に分類されるが、低コスト・大量分離に適したカラム法で、実際に大量の CNT を分離する第 2 種基礎研究も進め、現在では、分離した金属型および半導体型 CNT の試料提供を行うまでになっている。以降、分離法開発の詳細について、順に説明する。

2.2 ゲルを用いた独自の分離法の発見（ゲル電気泳動）

ゲルを用いた CNT の分離の研究を開始する以前は、生体分子であるタンパク質の持つ分子認識能を利用した CNT の分離を試みていた。ただ、この方法は結果が出るまで時間が掛かる上、なかなか良い成果のあがらない日々が続いていた。そのような中、密度勾配超遠心分離を用い

た金属型と半導体型 CNT の分離が報告された^[10]。金属型と半導体型の CNT が僅かな密度差で分離できるのであれば、電荷の差でより簡単に分離できるに違いないとの考えから、それまで行っていたタンパク質を用いた分離の研究は中断して、ゲル電気泳動による分離の研究を開始した。生物系の実験では、DNA の分離にアガロースゲル電気泳動、タンパク質の分離にアクリルアミドゲル電気泳動が多用されるが、CNT の太さ・長さが DNA と似通っているため、アガロースゲル電気泳動を CNT の分離に適用した。ちなみにアガロースゲル電気泳動は、生物系の大学では学生実験でも行われる非常に簡単で、ありふれた分離手法である。ただし CNT の分離には、通常のサブマリン型のゲル電気泳動（5～10 mm 厚のゲルを泳動用緩衝液中に沈め、ゲルに開けた小さな穴に 10～20 μl のサンプルを注入し分離する手法）ではなく、DNA の分離では一般的ではないガラス管中のアガロースゲルを用いた電気泳動法を適用した。この方法では、サブマリン型のゲル電気泳動の 10 倍以上のサンプルを供することができるため、僅かな差異も検出しやすくなる。そして、歯磨き粉やシャンプーにも用いられている一般的な界面活性剤であるドデシル硫酸ナトリウム (Sodium Dodecyl Sulfate, SDS) を分散剤に用いて CNT の分散液を調製し、ガラス管を用いたアガロースゲル電気泳動に供すると、金属型と半導体型の CNT を分離できることを見いだした (図 3a)^[11]。泳動先端と後端に金属型 CNT と半導体型 CNT がそれぞれ分離された。この方法は、非常に安価な設備で、1 時間程度で分離できる優れた手法である。ただ、収率があまり高くなく、中央部分に 8 割程度の CNT が分離されず残存するという問題点があった。

元々、アガロースゲル電気泳動は DNA を長さの違いで分離する手法であり、上述のゲル電気泳動法では、CNT の長さ分布が金属型・半導体型分離に悪影響を与えていると考えられた。この問題点を解決するために異なる分離条件を組み合わせて電気泳動を行う 2 次元電気泳動を適用した。2 次元電気泳動は、細胞や組織の全タンパク質を一

挙に分離するプロテオーム解析で用いられる手法である。1 回目の等電点の違いで分離したゲルを、2 回目の分子量の違いで分離する電気泳動の試料とし、1 回目の泳動方向と直角の方向に 2 回目の泳動を行うことで、一度のゲル電気泳動では分離できなかったタンパク質も分離することができる。CNT の分離では、まず、コール酸ナトリウムを分散剤に用いたアガロースゲル電気泳動で長さ分離を行い、その後、ゲル中で界面活性剤を SDS に置換してから 2 回目の電気泳動（金属型・半導体型分離）を行った。すると、半導体型 CNT は始めのゲルから移動せずに金属型 CNT のみが移動して分離するという、奇妙な現象が起きた。ゲル中で SDS に置換するのではなく、始めから CNT の SDS 分散液と溶かしたアガロースゲルを混合・ゲル化させた「CNT 含有ゲル」を電気泳動の試料に用いても、同じ現象が再現することを確認した (図 3b)。試料に CNT 分散液を用いた場合に比べ、「CNT 含有ゲル」を用いた電気泳動では、収率がほぼ 100 % と劇的に改善する他、分離純度も改善し、分離時間も 30 分以内に短縮され、非常に効率の良い分離法である。これは、ゲル電気泳動で金属型と半導体型の CNT を効率よく分離した初めての報告である^[11]。以上の分離は、特定のゲルと界面活性剤の組み合わせ、つまりアガロースと SDS を用いた時にのみ認められる特異な現象であり、以下、2.3、2.4 に示す分離法においても、非常に重要な組み合わせである。

2.3 より簡便、大量、安価な分離法への改良（電場を用いない分離）

CNT 含有ゲルを用いた電気泳動では、半導体型 CNT は全く移動せず金属型 CNT のみが泳動されるという非常に奇妙な現象が起きた。金属型と半導体型という電気的性質の異なる CNT なので、電場が重要な役割を果たしてい

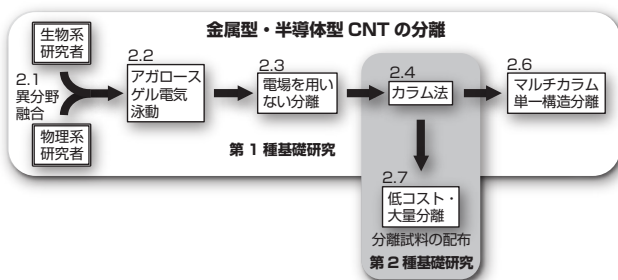


図2 大量・安価な金属型・半導体型 CNT の分離法開発のシナリオ

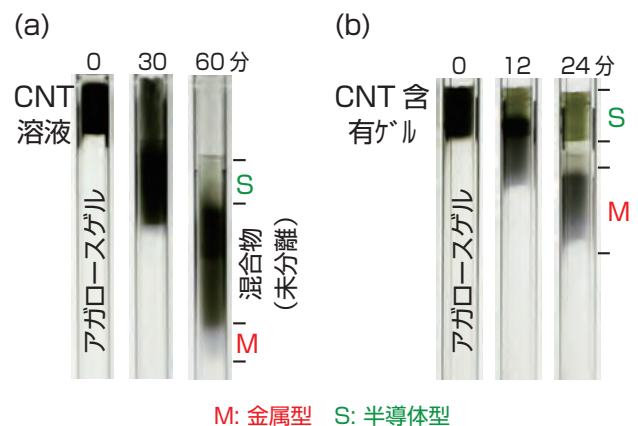


図3 アガロースゲル電気泳動による金属型・半導体型 CNT の分離 (a: 溶液試料、b: ゲル試料) CNT は分離前の混合物の状態では黒色をしているが、金属型と半導体型で光の吸収波長が異なるため、分離されるとそれぞれ異なる色を呈する。

る可能性も考えられた。そこで電場の必要性を調べるために、電場を用いずに分離が起こるかどうかを調べた。結論として電場は必要ないことが判明した。例えば、CNT 含有ゲルを単に SDS 水溶液に浸漬しておくだけで、金属型 CNT がゲルから溶出し、ゲルに残る半導体型 CNT と分離できた。また、CNT 含有ゲルをそのまま遠心分離にかけて、金属型 CNT を含む溶液を絞り出して分離することもできた。分離された半導体型 CNT で作製したトランジスタを解析した結果、電気特性からも分離を確認できた^[15]。

ところで、アガロースゲル電気泳動で分離した DNA をゲルから回収する方法に、凍結-解凍-圧搾法というものがある^[16]。この手法は、非常に簡便であるが DNA の回収率があまり高くなく、生物の実験現場では陳腐な手法となっている。しかし、全く異なる物理分野の研究者の視点から見ると、「手で搾るだけ」の分離は想像もしない高いインパクトがあるということで、この凍結-解凍-圧搾法を CNT の金属型・半導体型分離に適用した。凍結解凍後の CNT 含有ゲルを手で搾ると、金属型 CNT を含む溶液がゲルから絞り出され、半導体型 CNT を含むゲルの残渣と簡単に分離できた（図 4）。家庭用の冷凍庫さえあればできる、非常に簡便な金属型・半導体型 CNT の分離法である。この結果を前面に出してまとめた「電場を用いない簡便な分離法」の論文は、有名国際誌に掲載された^[12]。これも、ある分野ではありふれた手法であるが、他分野からの視点があるインパクトの大きさを見いだしたという、異分野融合の成果の良い例といえる。

また、CNT の SDS 分散液とアガロースゲルのビーズを混合すると、半導体型 CNT はゲルに選択的に取り込まれ、溶液中に残る金属型 CNT と分離することができた（バッチ分離法）。このことは単純であるが、分離原理を考察する上で非常に重要なことを示している。それは、半導体

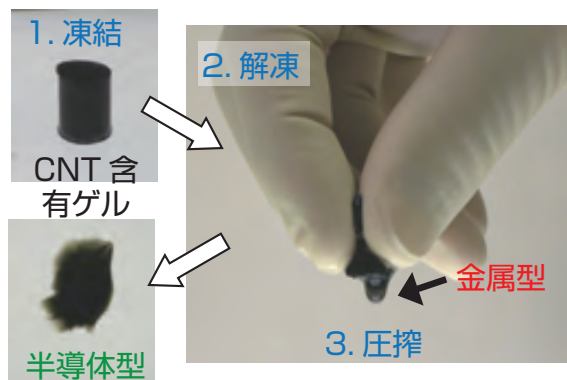


図 4 CNT 含有ゲルの凍結-解凍-圧搾による金属型・半導体型 CNT の分離

型 CNT がゲルへ選択的に吸着するということである。当初、CNT と DNA のサイズの類似性からアガロースゲルを選択したが、アガロースゲルのもつ網目構造の大きさにはあまり意味はなく、SDS を用いた際の選択的な吸着作用が最も重要なのである。この偶然に見つかった、アガロースゲルと SDS という組み合わせによって、金属型・半導体型 CNT の分離が達成されている。ゲル電気泳動では試料を CNT 含有ゲルにすることで分離効率が大きく改善したが、分離のために CNT 含有ゲルが必須である訳ではない。CNT 含有ゲル調製時にアガロースは溶解しており、CNT と相互作用できる領域が大幅に増加する結果、分離が改善されたと考えている。CNT 分散液を用いるバッチ分離法でも、ゲルビーズのサイズを小さくして表面積を大きくすると、分離時間は短縮し、結合容量も大幅に増加して、分離が大幅に改善する。

2.4 カラム分離法

アガロースゲルを用いた金属型・半導体型 CNT 分離の最終形は、カラム分離である（図 5）。これは、先述の CNT 分散液とゲルビーズを混合して行うバッチ分離が可能であれば、カラムを用いて連続的に分離することが可能であるという考えから行った。ここで用いるカラム分離用のアガロースゲルビーズは、元々、生体分子のタンパク質の分離を目的に作られたビーズであり、ここでも田中のバックグラウンドである生化学研究の経験が生かされた。アガロースゲルビーズを充填したカラムに CNT の SDS 分散液を注入すると、半導体型 CNT はゲルに吸着されるが、金属型 CNT は未吸着画分として回収される。ゲルに吸着した半導体型 CNT は、異なる種類の界面活性剤を含む溶出液を流すと溶液状態で回収される。分離純度も改善する他、半導体型 CNT からのゲルの除去も必要なくなり、使用したゲルを繰り返し利用することも可能となる。また、クロマ

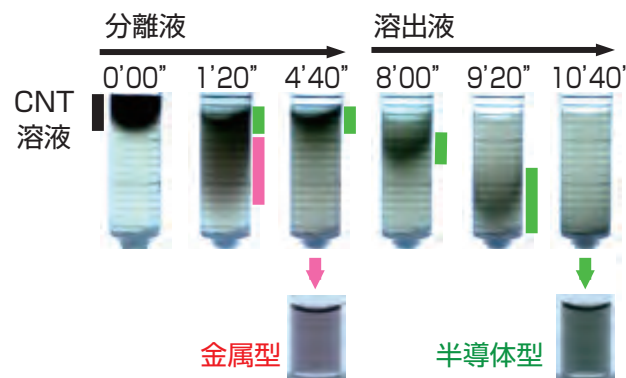


図 5 アガロースゲルビーズを用いたカラムによる金属型・半導体型 CNT の分離

CNT の直径が異なると金属型（あるいは半導体型）CNT でも吸収波長帯が変化するため、図 3、4 の CNT とは色が異なる。

トグラフィーの手法は、大型化や自動化に適しており、金属型・半導体型 CNT の低コスト・大量生産に最も適した手法である^[13]。

2.5 研究推進戦略（知財、成果発表のタイミング、研究資金の獲得）

ここまで、研究の展開について述べてきたが、ここで少し話を変えて、知財・成果発表・研究資金の獲得の進め方について論じる（図6）。簡便で効率の良いゲル電気泳動による金属型・半導体型 CNT の分離法を発見し、インパクトのあるこの成果を研究者としては早く発表したいという気持ちはあったが、すぐに成果発表というわけにはいかなかった。ゲル電気泳動による分離手法はあまりに簡便で、高価な装置も必要としないため、公表してしまうと、後発の研究者に先を越されることを危惧したからである。そこで、ゲル電気泳動による分離の発見からしばらくは、外部発表は行わずに水面下で研究を継続した。ゲル電気泳動分離に関するまとまった実験データが得られた時点で、まず特許出願を行い、一方で、電場を用いない分離が可能であることを確認した。研究を加速するためには、研究資金を得る必要があるが、元々生物分野での研究経験のみで CNT の研究業績もない者の予算申請が採択されるのはなかなか難しい。図6には示していないが、実際、ゲル電気泳動の分離の発見直後に予算申請を行ったが、不採択に終わっている。そこで、特許公開までにはまだ半年以上あったが、ゲル電気泳動の成果を学会発表するのに合わせ、プレス発表を行い広く成果を周知した。プレス発表の反応は上々で、一般紙を含む複数の新聞記事にも取り上げられ

た他、多くの企業からも相談を受けた。実は、このプレス発表のタイミングは、その少し前に申請した外部予算の審査の時期と合致するように設定したものであり、そのおかげもあってか、若手としては比較的大型の予算で採択された。重要なことは、この時点ではプレス発表、学会発表、予算申請書のいずれにも、実験の鍵となる条件は公開しなかったことである。2008年初頭の当該予算申請は、すでに電場を用いない分離法の最終形であるカラム分離による大量・低コスト分離を研究課題としていた。同年の夏から秋にかけては、ポスター賞受賞や電場を用いない分離の最初の学会発表も行い、広く成果の周知を行った結果、資金提供型の共同研究契約の締結と、分離原理解明に向けた新たな外部予算の獲得にも成功し、研究の進捗をさらに加速することができた。ゲル電気泳動の詳細を記載した最初の論文^[11]は、特許出願から1年半後の特許公開と同時期となった。このあたりの進め方は、すでに知財やプレス発表等の経験が豊富な片浦のアドバイスが非常に参考になった。

2.6 単一構造半導体型CNTの分離

これまで、金属型と半導体型の CNT の分離について述べてきたが、半導体型の CNT といっても、厳密に分類するとさまざまな構造のものがあり、個々の構造によってバンドギャップという電気的な性質が異なるものの混合物である。半導体的な性質を利用した CNT の応用では、完全に均質なバンドギャップを要求するものもあることから、単一構造の半導体型 CNT の分離も重要な課題であった。アガロースゲルを用いたカラム分離で、半導体型 CNT の溶

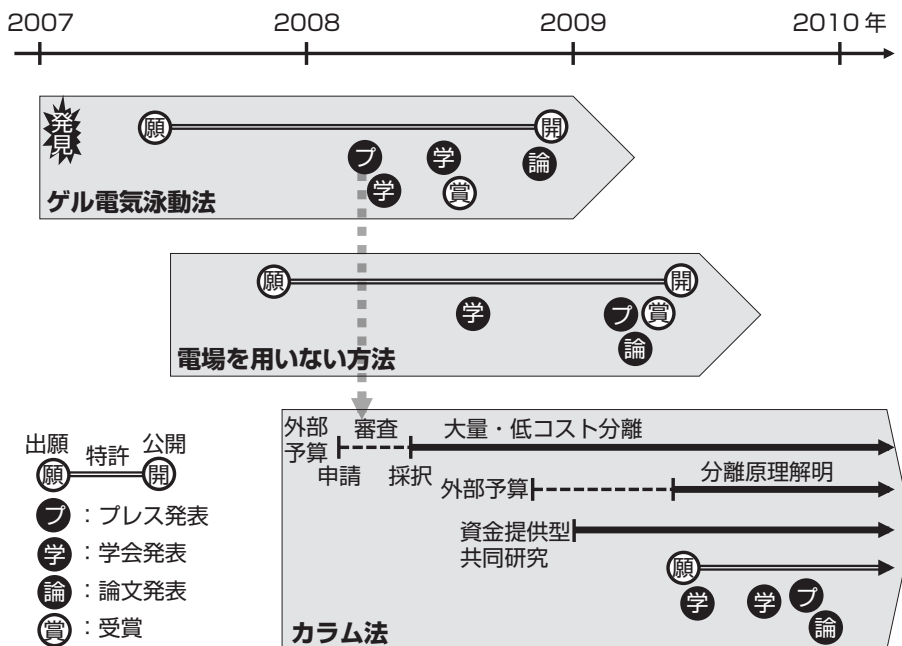


図6 ゲルを用いた金属型・半導体型 CNT 分離の発見から研究を効率的に進めるための知財戦略、成果発表のタイミングと予算獲得

出条件を段階的に変化させることで、異なる種類の半導体型 CNT を大まかに分離することには成功していた^{[17][18]}。しかし、分離精度に限界があり、さらに精度の高い分離法が求められていた。ZhengらはDNAで分散したCNTをクロマトグラフィーで分ける手法を進展させ、特定の配列を持つDNAを用いることで、単一構造の半導体型CNTを分離することに成功した^[19]。それまでに、12種類もの単一構造のCNTを高純度で分離した例はなく、極めて画期的な報告であった。ただ、高価な合成DNAが必要で、また、CNTの混合物から1種類のCNTを抽出する方法であるため、効率もあまり高いものではなく、改善の余地は残っていた。そのような中、アガロースと同様に多糖からなるセファクリルという市販のゲル（このゲルも本来、生体分子の分離用に開発されたものである）を用いたカラム分離で単一構造のCNTを分離できることを見いだした^[14]。ゲルに対するCNT分散液の添加量を検討する中で、大量の試料をカラムに投入した時に、限られた種類のCNTのみがゲルに吸着し、分離されたのである。通常、カラム分離で純度を向上させるには、添加する試料の量を減らしたり、カラムを長くしたりするが、ここでは全く逆の発想で、大過剰の試料を少量のゲルに添加することによってCNTの構造分離の高純度化を達成した。大量のCNT分散液をカラムに投入すると、異なる種類のCNT間で競争的な吸着が起こる結果、最も吸着力の強い種類のCNTのみがゲルに吸着するのである。直列に配置した複数のカラムを用いれば、一度に複数の吸着力の異なる半導体型CNTを分離できた（図7）。重要な点は、この手法は高価な試薬を必要とせず、CNTの混合物から何種類もの構造の異なるCNTを得ることが可能であり、カラム法なので、大量・低コストの分離に適しているということである。図7に示したように、最終的に鮮やかな色の異なる13種類の単一構造半導体型CNTを分離することに成功した^[14]。

2.7 金属型・半導体型分離のスケールアップ

ここまでの研究は、新現象の発見や新たな分離法の開発といった、基礎的な知見を得ることが目的の第1種基礎研究であった。ここでは、大量・安価な分離した金属型および半導体型CNTの供給の実現を目指した、製品化研究の1段階前の第2種基礎研究にあたる、分離のスケールアップと低コスト化の研究を進めた。すでに密度勾配超遠心分離法で分離された金属型と半導体型のCNTが市販されているが、ゲルカラム分離法によって処理量を10倍、100倍に増やすことを目的とした。試薬を安価なものに代替し、新たなゲルを開発することで、分離材料コストを大幅に下げることが成功した。分離のスケールアップも行い、現在では、図5の数千倍の容量のカラムを大型のクロマトグラ

フィー装置に接続して分離を行っている。分離のスケールアップだけでなく、分離に用いるCNT分散液の大量調製に関する研究も進めた。分離は何の問題もなくスケールアップとハイスループット化を実現し、日産1gの金属型および半導体型CNTを分離できる系を確立した。分離CNTは、技術研究組合単層CNT融合新材料研究開発機構から、サンプル試料として配布を開始した。これにより、「分離した金属型および半導体型CNTを世に出す」という当初の目標を達成することができた。

3 今後の課題・展開

3.1 大量・長尺・低欠陥CNT分散法

カラム分離では、すでに日産1gの処理量を実現しており、分離自体はスケールアップさえすれば、日産100gの分離でも可能な状況にある。今や問題は「分離」ではなく、「CNT分散液」の調製がスループットのボトルネックとなっている。また、分散処理によってCNTの欠陥導入や切断が生じ、CNTの持つ優れた特性が損なわれるという大きな問題もある。いかにCNTに欠陥を入れずに、切らず（長尺）に、かつ大量に分散液を調製するか、その方法を確

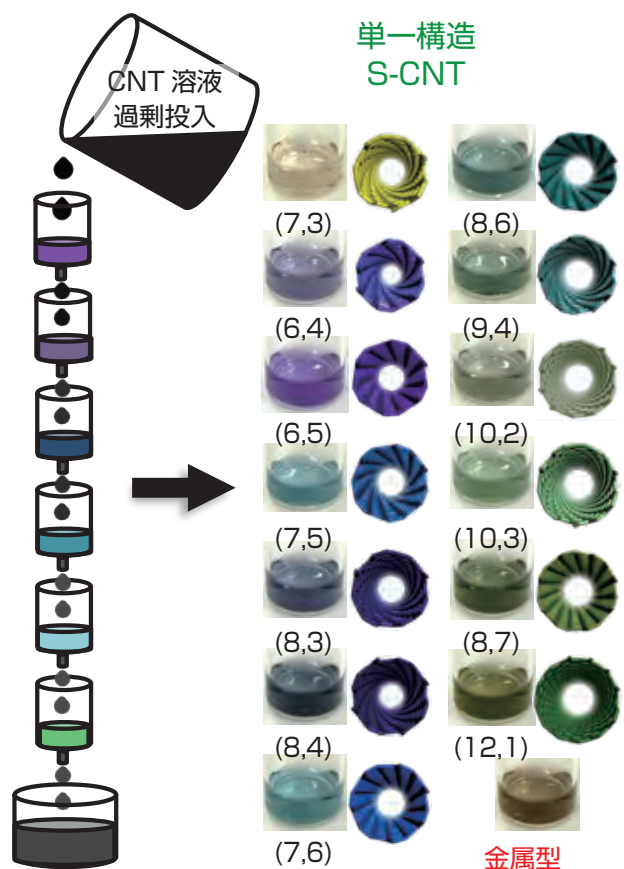


図7 マルチカラム法による単一構造半導体型CNTの分離模式図（左）と分散液（右）
 図中の(n,m)の数字はCNTの構造を表す指数。単一構造の半導体型CNTにまで分離されると鮮やかな色を呈する。

立することは非常に重要な課題であり、その問題解決に向けた研究を現在進めている。

3.2 CNTの特性を引き出したデバイスの開発

この研究を開始した当初の「分離CNTを世に出す」という目標は、技術研究組合からの試料提供という形で達成することができた。現状ですでに、日産1gという処理量も達成しており、日産10g、100gといった目標も実現可能な範疇に入ってきている。これにより、CNTの基礎・応用研究の両面から貢献できるようになってきたものの、有望な用途を生み出すことができなければ、大量のCNTを分離しても何の役にも立たないことになる。他にない材料を準備できれば、おのずと応用用途が出てくるという安易なものではなく、既存の物より優れた特性を示すことができなければ、なかなか次のステップに進むことは難しい。現在は、「分離CNTを世に出す」だけではなく、分離CNTの優れた特性を引き出したデバイスの開発という新たな目標も設定し、研究を推進している。

3.3 分離原理の解明

ゲルを用いた金属型CNTと半導体型CNTの分離は、ゲルにアガロースあるいはセファクリルを、分散剤にSDSを用いたときに、半導体型CNTが選択的にゲルに吸着することにより生じる。アクリルアミドゲルの他、アガロースと同様に多糖であるデンプンやゲランガムのゲルを用いても、分離は確認できなかった^{[11][12]}。特定のゲルと分散剤の組み合わせの時に、金属型CNT・半導体型CNT・ゲル・SDSの四者の相互作用の微妙なバランスによって、選択的な吸着が生じるものと考えている。最近、SDS以外にも分離に用いることのできる界面活性剤を大規模スクリーニングから見だし、その共通する構造から、適度な分散性を持つ界面活性剤が分離に使用できると示唆された^[20]。つまり、分散性の高い界面活性剤（コール酸やデオキシコール酸等）は金属型・半導体型の区別なく両方のCNTを安定に分散して分離を生じないが、SDSのような適度な分散性を持つ（あまり分散性の高くない）界面活性剤では、金属型CNTと半導体型CNTの微妙な違いを区別し、半導体型CNTのゲルへの選択的吸着を生じさせ、分離に至るというものである。しかし、金属型CNTと半導体型CNTの、どのような違いによって分離がなされているのかという、根本的な分離原理は未解明であり、今後の課題である。

3.4 安全性

ナノ材料は近年新たに合成されたものが多く、その歴史も浅いことから、安全性の評価が充分でないものも多い。昨今の情勢から、新材料の使用を開始する前に、まずその安全性を確保しておくことが求められており、ナノ材料の代表ともいえるCNTも例外ではない。現在、多くの研究

機関によりその安全性に関わるデータの取得が試みられているが、完全な理解には時間を要する。用途開発と安全性評価の研究は共に進めていく必要がある。

4 まとめ

アガロースゲルを用いた安価で大量生産が可能な金属型および半導体型CNTの分離法を開発することに成功した。また、セファクリルゲルを用いた単一構造半導体型CNTの大量分離法も開発した。金属型と半導体型CNTの大量分離を実際に行い、試料提供を開始した。これらの分離法はいずれも産総研オリジナルの手法であり、異分野の研究者による共同研究の結果生み出されたものである。研究を効果的に遂行するためには、予算獲得と知財戦略、成果発表のタイミングを総合的に判断して進めることが重要である。CNTの産業応用実現には、用途開発が欠かせない。大量安価な分離した金属型および半導体型CNTにより、用途開発を加速し、CNTの産業応用実現に貢献していきたい。

謝辞

ここで紹介した研究の一部は、NEDO産業技術研究助成事業、JSPS科研費、JST CREST、NEDO低炭素社会を実現する革新的CNT複合材料開発プロジェクトの資金援助により得られた成果である。

参考文献

- [1] S. Iijima: Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 354, 56-58 (1991).
- [2] S. Iijima and T. Ichihashi: Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter, *Nature*, 363, 603-605 (1993).
- [3] D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez and R. Beyers: Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls, *Nature*, 363, 605-607 (1993).
- [4] R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus: Electronic structure of chiral graphene tubules, *Appl. Phys. Lett.*, 60, 2204-2206 (1992).
- [5] Y. Miyata, Y. Maniwa and H. Kataura: Selective oxidation of semiconducting single-wall carbon nanotubes by hydrogen peroxide, *J. Phys. Chem. B*, 110, 25-29 (2006).
- [6] R. Krupke, F. Hennrich, H. von Lohneysen and M. M. Kappes: Separation of metallic from semiconducting single-walled carbon nanotubes, *Science*, 301, 344-347 (2003).
- [7] Y. Maeda, S. Kimura, M. Kanda, Y. Hirashima, T. Hasegawa, T. Wakahara, Y.F. Lian, T. Nakahodo, T. Tsuchiya, T. Akasaka, J. Lu, X.W. Zhang, Z.X. Gao, Y.P. Yu, S. Nagase, S. Kazaoui, N. Minami, T. Shimizu, H. Tokumoto and R. Saito: Large-scale separation of metallic and semiconducting single-walled carbon nanotubes, *J. Am. Chem. Soc.*, 127, 10287-10290 (2005).
- [8] A. Nish, J.Y. Hwang, J. Doig and R. J. Nicholas: Highly selective dispersion of single-walled carbon nanotubes using aromatic polymers, *Nat. Nanotechnol.*, 2, 640-646 (2007).

- [9] M. Zheng, A. Jagota, E. D. Semke, B. A. Diner, R. S. McLean, S. R. Lustig, R. E. Richardson and N. G. Tassi: DNA-assisted dispersion and separation of carbon nanotubes, *Nat. Mater.*, 2, 338-342 (2003).
- [10] M. S. Arnold, A. A. Green, J. F. Hulvat, S. I. Stupp and M. C. Hersam: Sorting carbon nanotubes by electronic structure using density differentiation, *Nat. Nanotechnol.*, 1, 60-65 (2006).
- [11] T. Tanaka, H. Jin, Y. Miyata and H. Kataura: High-yield separation of metallic and semiconducting single-wall carbon nanotubes by agarose gel electrophoresis, *Appl. Phys. Express*, 1, 114001-114003 (2008).
- [12] T. Tanaka, H. Jin, Y. Miyata, S. Fujii, H. Suga, Y. Naitoh, T. Minari, T. Miyadera, K. Tsukagoshi and H. Kataura: Simple and scalable gel-based separation of metallic and semiconducting carbon nanotubes, *Nano Lett.*, 9, 1497-1500 (2009).
- [13] T. Tanaka, Y. Urabe, D. Nishide and H. Kataura: Continuous separation of metallic and semiconducting carbon nanotubes using agarose gel, *Appl. Phys. Express*, 2, 125002-125004 (2009).
- [14] H. Liu, D. Nishide, T. Tanaka and H. Kataura: Large-scale single-chirality separation of single-wall carbon nanotubes by simple gel chromatography, *Nature Commun.*, 2, 309, (2011).
- [15] S. Fujii, T. Tanaka, Y. Miyata, H. Suga, Y. Naitoh, T. Minari, T. Miyadera, K. Tsukagoshi and H. Kataura: Performance enhancement of thin-film transistors by using high-purity semiconducting single-wall carbon nanotubes, *Appl. Phys. Express*, 2, 071601-071603 (2009).
- [16] D. Tautz and M. Renz: An optimized freeze-squeeze method for recovering long DNA from agarose gels, *Anal. Biochem.*, 132, 14-19 (1983).
- [17] H. Liu, Y. Feng, T. Tanaka, Y. Urabe and H. Kataura: Diameter-selective metal/semiconductor separation of single-wall carbon nanotubes by agarose gel, *J. Phys. Chem. C*, 114, 9270-9276 (2010).
- [18] T. Tanaka, Y. Urabe, D. Nishide, H. Liu, S. Asano, S. Nishiyama and H. Kataura: Metal/semiconductor separation of single-wall carbon nanotubes by selective adsorption and desorption for agarose gel, *Phys. Status Solidi B*, 247, 2867-2870 (2010).
- [19] X. Tu, S. Manohar, A. Jagota and M. Zheng: DNA sequence motifs for structure-specific recognition and separation of carbon nanotubes, *Nature*, 460, 250-253 (2009).
- [20] T. Tanaka, Y. Urabe, D. Nishide and H. Kataura: Discovery of surfactants for metal/semiconductor separation of single-wall carbon nanotubes via high-throughput screening, *J. Am. Chem. Soc.*, 133, 17610-17613 (2011).

執筆者略歴

田中 丈士 (たなか たけし)

2002年3月京都大学大学院工学研究科合成・生物化学専攻博士課程修了、工学博士。日本学術振興会特別研究員を経て、2005年1月産業技術総合研究所入所。2010年1月より同ナノテクノロジー研究部門主任研究員、2011年11月よりナノシステム研究部門ナノ炭素材料研究グループ長。専門：生化学、微生物学、カーボンナノチューブの分離と応用。この論文では、主にゲルを用いた金属型・半導体型CNTの分離と本文の執筆を担当。



片浦 弘道 (かたうら ひろみち)

1987年3月筑波大学大学院工学研究科博士課程修了、博士(工学)。同年4月東京都立大学理学部助手。2004年4月産業技術総合研究所入所。2005年1月より同ナノテクノロジー研究部門自己組織エレクトロニクス研究グループ長、2011年10月よりナノシステム研究部門上席研究員。専門：固体分光学、材料科学。研究課題：カーボンナノチューブの合成、精製、分離、応用。この論文では、主にゲルを用いた単一構造半導体型CNTの分離とCNTの電気特性評価を担当。



査読者との議論

議論1 異分野融合の思考過程

質問(清水 敏美:産業技術総合研究所ナノテクノロジー・材料・製造分野、三石 安:産業技術総合研究所つくばセンター)

全く異分野の研究者がそのコミュニティでは非常識な(気づかないことが多い)試行を行った結果、セレンディピティ的に画期的な発見に出会うことがあります。当該研究を成功裡に導いた大きな要因は、生化学の領域で普通に使用されているDNA等の生体分子の分離・精製手法を、ナノ炭素材料であるカーボンナノチューブに適用した異分野融合の思考過程だと思います。そこで、今回の論文のシナリオ構成では、解決すべき課題に対して既存のさまざまな要素技術をどう評価し、どれを選択してどう組み立てたかという思考過程を十分に整理して記述してもらいたいと思います。

回答(田中 丈士)

電気泳動を選択した理由は、密度勾配遠心分離でわずかな密度の違いで分離ができるのであれば、電荷の差でより簡単に分離できると考えたからです。DNAとCNTのサイズが同程度であることから、DNAの分離に多用されるアガロース電気泳動を選択しましたが、結果はゲルの網目サイズは重要ではなく、偶然選択したアガロースとSDSの組み合わせが分離に重要であることを見いだしました。つまり、当初考えていた見通しと異なるが、優れた結果が得られたということになります。ご指摘いただいたように、どのような思考過程で研究方針を組み立てたかについてより詳細に記述するよう努めました。

議論2 要素技術

質問(清水 敏美)

要素技術の統合に関連して、後半のアガロース電気泳動法→カラム法→マルチカラム法といった研究の進め方はライフ分野ではそれほど特別なステップアップとは思いません。しかし、試料としてカーボンナノチューブを用いた場合、DNAでは考えられない特有の困難な点があったと推察します。もし事例があれば、ぜひ追記をお願いします。場合によっては、新たな要素技術になるかも知れません。その結果、後半の要素技術統合に関しても単なる生化学的研究手法に留まらないことを読者にアピールできると思います。

回答(田中 丈士)

ゲルを用いた金属型・半導体型CNTの分離の研究におけるブレイクスルーには、アガロースゲルとSDSの組み合わせの発見、CNT含有ゲルによる収率改善、試料の過剰投入による構造分離の発見、等があげられます。

議論3 ゲル材料の横展開

質問(清水 敏美)

生体分子の分離においては、アガロースゲルの他にポリアクリルアミドゲルも多用されています。ゲル材料の最適化の中で、ゲル材料を横展開する試みはなかったのでしょうか。

回答（田中 丈士）

アガロースゲルの特徴は、網目構造が非常に大きいことです。この大きな網目構造によって、生体分子の中でも巨大分子である DNA のゲル電気泳動による分離が可能となります。CNT のサイズは太さ・長さともに DNA と似通っているため、CNT の分離にもアガロースゲルを用いました。一方、タンパク質の分離に多用されるアクリルアミドゲルの網目は比較的小さく、CNT のように非常に大きなものはゲルのネットワークを通り抜けにくくなります。実際、アクリルアミドゲルを用いた電気泳動も行いましたが、分離は起きませんでした。しかし、このように当初はアガロースゲルの網目の大きさに注目しましたが、実際には網目の大きさは分離の本質ではなく、特定のゲルと分散剤の組み合わせを用いた時の半導体型 CNT とゲルの特異的相互作用が重要であることが判明しました。実際、カラム分離では、アガロース濃度が高く網目構造が密なゲルビーズを用いても、CNT はゲルビーズの表面に吸着することで分離されます。ただし、このような高濃度ゲルでは、吸着部分が表面に限られるため、ゲルへの吸着量は少なくなります。

議論4 分離メカニズム

質問（清水 敏美）

思いがけない結果が再現性よく出ることは何らかの科学的根拠があるはずですが、分離のメカニズムに関して科学的な記述も加味していただければ論文の価値が高まるものと思います。

回答（田中 丈士）

分離メカニズムに関しては、より詳細な記述を 2.3、3.3 に追加しました。ただ、現象としては、特定のゲルと分散剤の組み合わせの際

に生じる、ゲルと半導体型 CNT の選択的吸着によるものと分かっていますが、その分離を生じさせる根本的な原理については未解明であり、今後の重要な課題であると認識しています。

議論5 スケールアップ

質問（清水 敏美）

カーボンナノチューブの日産量が多層から単層の種類によって大きく異なりますが、数百グラムからトンオーダーになっている現在、分離・精製工程においても例えば、キログラム以上のオーダーを求められると思います。その意味で、現状のさらに 1000 倍以上のスケールアップは可能でしょうか。それとも、金属型および半導体型の精製カーボンナノチューブは 1 グラムオーダーで産業ニーズを満足するのでしょうか。スケールアップに関する産業および社会ニーズを記述してください。

回答（田中 丈士）

3.1 項に記述しました様に、カラム分離自体のスケールアップには限界はなく、現状の 1000 倍以上の分離も可能と考えています。分散液の調製がスルーブットのボトルネックとなっていますが、その向上を目指した研究も進めています。ただ、3.2 項に記述したように、用途開発が進まなければ大量に分離しても使い道がないということになりかねません。用途によって使用量は変わってくるため、今のところ、どれだけのスルーブットが必要となるかは明らかではありませんが、これまでよりも大量・安価な分離した金属型および半導体型 CNT は用途開発を加速することは間違いないものと考えています。関連する記述を「4 まとめ」の項に追加しました。

セラミックカラーデータベースの構築

— 30数万点の釉薬テストピースのデータベース化と活用 —

杉山 豊彦

産総研に30数万点の釉薬テストピースが保管されている。これらは、陶磁器試験所、名古屋工業技術試験所の80年以上の陶磁器研究において作成されたものである。テストピースは実験結果と実験過程が見える形で残されたものであり、釉薬および陶磁器の研究の基礎データとして貴重である。産業界等にこれらのデータを提供して、研究開発や製品化研究の省力化や加速化を実現する目的で、釉薬テストピースの情報のデータベース構築を行った。釉名称、焼成温度、焼成雰囲気、発色、化学組成、原料調合、外観性状等のデータ項目と外観画像を伴ったデータベース構成とした。データベースは、新規の研究開発等に利用されて有効性が確認された。

キーワード: 釉薬、陶磁器、発色、データベース、テストピース

Construction of a ceramic color database

– Database of more than 300,000 glaze test pieces and its application to industrial research –

Toyohiko SUGIYAMA

AIST has more than 300,000 glaze test pieces, from over 80 years of ceramic studies by the Imperial Ceramic Experimental Institute and the Government Industrial Research Institute of Nagoya. These pieces are the physical evidence of the processes and the results of glaze test experiments. As such, they provide valuable information for glaze and ceramic research. A ceramic color database has been constructed to make this fundamentally important information widely accessible in support of R&D in the ceramics industry. The database includes: glaze name, firing temperature, firing atmosphere, coloring, chemical composition, recipe, physical state, and other information, as well as images of the glaze pieces. The database has been used in recent ceramics research, and its effectiveness has been verified.

Keywords: Glaze, ceramics, color, database, test piece

1 緒言

30 数万点の釉薬テストピースが産総研に保管されている。それらは、80 年以上の陶磁器研究活動において作成されたものであり、各々の実験目的や研究フェーズは多様であるが、個々のテストピースに着目すれば、実験結果が見える形で残された基礎データである。これを体系的に整理して、産業界および学術界に提供し、新たな研究開発に役立てることを目的としてデータベースの構築を行った。

データベースの構築が進み、具体的な活用が始まるに伴って、それに対応した改良を進めた。データベースが対象とする釉薬テストピースは実験結果の現物であり、単純な数値データとは異なる。テストピースからどのような情報を取り出して、どのように整理を行うかは、利用者と利用者による活用を予見することが必要であって、それは将来にわたってこの分野の研究がいかなる方向性をもつか、あるいは方向性をもつべきかに関わる。

基礎研究成果から実用化に進む通常の場合と異なり、本データベースに想定される主な利用形態では、実用化研究等を遂行する研究者が、その目的に合致する基礎データを膨大な情報の中から探索する。それは直接的な単一の情報である場合もあれば、情報群であったり、傍証データであったり、研究の足掛かりとなるヒントのような情報の場合もあると考えられる。そのような活用に対応するためには、元データの有する価値と特質を把握し、体系化することが重要と思われる。この論文では、セラミックカラーデータベース構築とその活用について述べ、データベース化により実現される新たな展開について考察する。

2 データベースの構築

2.1 データベースの目的

釉薬テストピースは、陶磁器試験所以来の研究過程で蓄積された。1919 年に京都に設立された国立陶磁器試験所

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
Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST 2266-98 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan E-mail: sugiyama.toyohiko@aist.go.jp

Original manuscript received September 3, 2012, Revisions received November 12, 2012, Accepted November 21, 2012

では、「最新科学の応用基礎的科学研究に依る」研究開発を「常に実地と相連結して行う」ことを主眼として、試作を重要視した業界を牽引する多くの研究が実施された¹⁾。陶磁器試験所の業務を引き継いだ名古屋工業技術試験所においても、新規顔料開発や釉薬の先端研究が数多く実施されて、釉薬テストピースが作成された。それらの研究は世界的に著名なものも多く含まれ、現在からみても水準の高い研究開発である。テストピースは研究過程と結果が見える形で残されているという観点から学術的にも科学的にも貴重な資料である。テストピースは一般に公開されて、陶磁器・釉薬の研究者や製造企業に利用されていたが、その価値の高さに着目し、データベース化によりさらに活用を促進することが計画された。テストピースは産業に対し以下のような点で直接的に有効と考えられた。

- (1) 釉薬の開発・製造において、釉薬テストピースを作成して調合を改良していく作業が繰り返し行われる。既存の膨大な釉薬テストピースの情報を利用すれば、開発実験に要する日数を短縮できる。
- (2) 陶磁器やセラミックス製品の釉薬・ガラス素材を何らかの条件をもって探索する場合に利用できる。
- (3) 着色元素、ガラス組成、焼成条件等と発色の関係等の技術情報を提供する。

陶磁器以外への汎用性も考慮してデータベースは「セラミックカラーデータベース」と名付けられて、膨大な資料の体系的整理が1997年に開始された。

2.2 データベースの設計思想

データベースの第一の目的は、陶磁器や釉薬のメーカーに基盤情報を提供することである。それはこれまでテストピースが利用されてきた形態を踏襲し、利便性を増して活

用を促進することである。図1にセラミックカラーデータベース構築のシナリオを示す。

テストピースの平均的寸法は30×45×5 mmである。一連の試験のピースごとに台紙に貼った状態で保管され、台紙に焼成温度、調割合等情報が記載されている(図2)。テストピースの作成時には整理して残すことを意識せず情報が不十分な場合も多い。記載情報もテストピースごとに異なる。データベースの目的からは、すべてのテストピースについて、すべての情報を網羅することが望ましい。しかし、作業量と効率の面から、入力数とデータの絞り込みを行った。テストピースは30数万点、約1万枚の台紙が存在する。1枚の台紙から5点前後のテストピースを選択して入力することとし、5万件のデータ容量を前提としてデータベースの設計を開始した。このデータ件数によればテストピース全体の情報をおよそ活用できると考えた。

データ項目の構成は、釉薬情報として一般的で重要な情報を基本とし、陶磁器の研究者・技術者が利用することを想定しながら、内容および検索機能を設計した。利用状況を把握するために、検索等に関して利用記録を残すようにした。また、画像を伴ったデータベースとした。データ項目の構成や検索機能等の設計の詳細は次節で述べるが、雑多な情報を含む膨大な量の試験片を整理するにあたって次の2点を考慮し、それが設計全体の考え方の基盤となっている。

データベースの対象とする元データは、釉薬テストピースという実験結果のサンプルであり、そこからは多様な情報を取り出すことができる。いかなる情報を、どのような形式で抽出しデータベース化するかは、元データの特質と、将来の利用を考慮して判断する必要がある。データベース

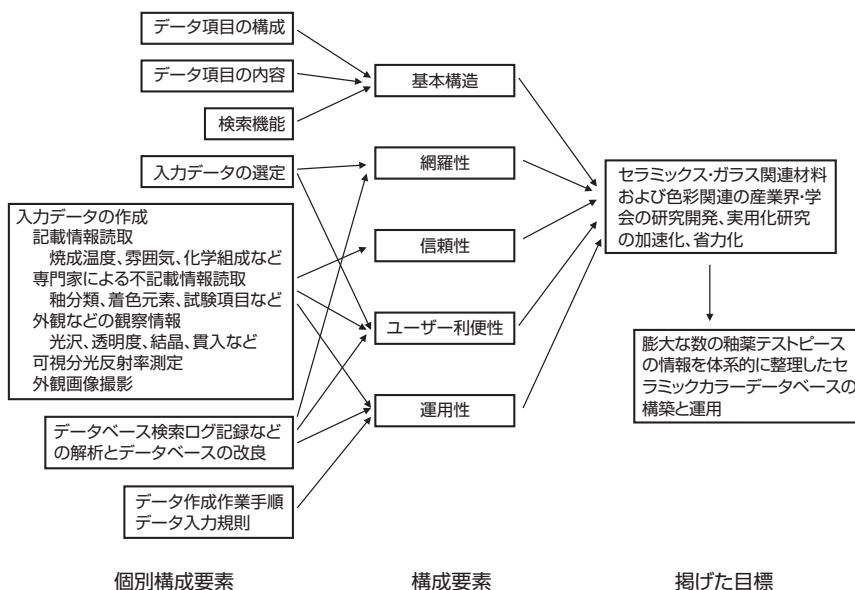


図1 セラミックカラーデータベースの構築のためのシナリオ

のデータ項目や構成を設計するにあたって、陶磁器および釉薬の現在と将来の研究開発の方向性を勘案して指針を立てるように努めた。例えば、釉薬調合では、原料の種類が重要視される。天然原料という特徴のために、主成分の化学組成を一致させても、原料によって微量元素や鉱物組成（結晶種類や結晶度等）によって結果が異なるためである。現時点での産業への実用を考えれば、原料名に基づいた整理が有益と思われる。しかし、データベースではあえて化学組成を重視し、含有元素等の項目を充実させた。天然原料は時代とともに変遷し将来にわたって安定性が保証されないこと、また、データベースが将来より汎用的に異分野からも利用されることを考慮したためである。

もう一つ重視した観点は、テストピースの情報の価値であった。釉薬焼成は熔融途中の非平衡状態で反応を止めることも影響して、実験条件の要因がとても多い。例えば、出発原料はその化学組成のみならず鉱物組成、粒径、混合状態等が影響し、焼成においても温度の不均一性や冷却過程が大きな影響を及ぼす。再現が困難な釉が芸術的な貴重品として存在するゆえんでもある。釉薬の実験では通常これらのすべての要因を制御することはなく、幾つかの着目する要因を制御して比較実験を行う。一方、保管されている釉薬テストピースには主要な実験データの一部の記載が省かれている等のために、テストピース個々に注目すると、情報が不足したり、実験再現性に問題があるものも含まれる。これに対し、1枚あるいは関連する複数枚の台紙上の一連の釉薬テストピースから得られる情報は、その実験が目的とした結果情報を示して有効性が高い。しかし、データベース上での検索を実施するためには、データの単位は個々のテストピースとすることが必要であるので、

表 1 元データベースと公開版データベース

	元データベース	公開版データベース
入力対象	全テストピース	典型的テストピース
入力データ	詳細	簡便
操作・利用者	利用者+担当者	一般利用者
提供環境	特定場所	インターネット上
利用目的	専門性	汎用性
特徴	テストピースが基盤	テストピースから独立
入力件数目標	50,000 件	10,000 件
入力済件数 (*)	約 33,000 件	3,826 件

(*) 2012年11月現在、元データベースは入力作業途中のデータを含む。

個々のテストピースを基本的なデータ単位としつつ一連のひとまとまりのテストピース情報も同列に扱うことができる設計とした。

データベース構築開始と同時に、このデータベースをインターネット上に公開することとなった（研究情報公開データベース）。このため、研究所内に構築するデータベースとインターネット上に公開するデータベースの二つのデータベースを構築することとした。両者の特徴を表1に示す。インターネット上に公開されるデータベースは多様な利用者が想定される。釉薬に関する専門知識を有しない、あるいはコンピューター操作に不慣れな利用者も考慮に入れて操作の容易性を重視した。そのため、元のデータベースからさらに典型的なテストピースのみを選ぶことにより検索結果が短時間で得られるようにした。また、当時のインターネット通信速度や記憶容量の制約もあってデータ項目も簡略化し、操作が容易になるように設計した。一方、テストピースに併設されている元データベースと異なり、インターネット公開のデータベースでは、元テストピースを容易に参照すること

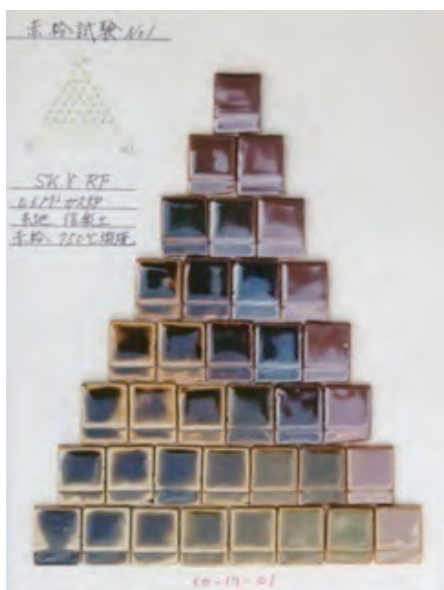
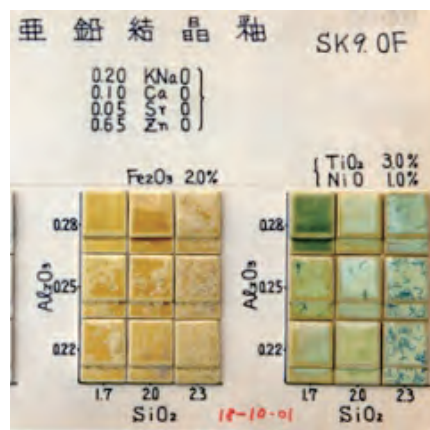


図 2 釉薬テストピースの例



ができない。このためインターネット公開のデータベースでは、検索抽出したテストピースと関連するテストピースを整理番号から探索する方法等を重要視した。

2.3 データベースの各項目の設計とデータ入力

2.3.1 データ項目の全体構成

データベースには以下のようなデータ項目を設定した。“*1”は候補リストから選択する形式でデータはコード番号で保存される。“*2”は数値データ、“*3”は文字データである。

(1) 台紙に記入されている情報

原料調合 *3、化学組成 *2、焼成温度 *2、焼成条件 *1、素地 *1、製作年月日 *2、製作者 *3、実験目的 *3

(2) テストピースから専門家が読み取る情報

光沢性 *1、透明性 *1、色 *2、外観 *3、釉薬分類 (釉名称) *1、表面状態 *1、結晶 *3、貫入 *3、着色元素 *1、構成元素 *3、素地種類 *1、特徴 *3

(3) 機器測定等により得る情報

(可視分光反射率)、表色系による色の数値 *2、外観画像

図3に元データベースの画面例を示す。釉薬テストピースに残されている記載情報は、形式および内容が統一されていないため、さまざまな情報をデータベースに入力できるように、コメント形式のデータ項目を多く設定した。インターネット上に公開しているデータベースもデータ項目の基本構成はおおよそ同様である。

2.3.2 記載情報を読み取るデータ項目

テストピースごとに台紙にはさまざまな情報が記載されている。そのうち、釉薬の調合(化学組成あるいは原料配合)と焼成温度は、ほとんどのテストピースに共通して記載がある。しかし、そのような基本情報についても、記載方法

は統一されていないので、整理が必要であった。

釉薬の主成分の化学組成はゼーゲル式の形式を採用した。ゼーゲル式はモル比を用いる組成式であり、また、その係数から釉薬の融点、熱膨張係数等の物性がおおよそ予測できる。検索において酸化ナトリウムの含有量が20モル%以下というような検索が可能となる。このような利点が、今後の釉薬研究や開発において必要であると考えた。

着色剤や乳濁剤等の添加元素は、周期律表の一覧から選択するようにした。また、釉薬に含まれる全元素をリストアップする項目も設けた。釉薬調合が原料配合で記載されているテストピースについては、化学式のデータは欠落することになるが、その場合にも含有元素を入力担当者が判断して記入した。これにより、元素の存否に基づく検索が可能である。

原料配合、いわゆる「釉薬調合」は重要データであるが、原料の種類が多く、また同名の原料でも年代によって化学・鉱物組成が異なる場合もあるため、数値化せず文字データのコメント形式で入力する方法を採用した。この方法では多様な原料種類を入力可能であるが、原料や調合割合数値による検索整理機能に劣るため、今後の課題である。

焼成条件は焼成最高温度を数値、焼成雰囲気は酸化・還元から選択入力とした。釉薬テストピースによっては、最高温度保持時間、昇温、冷却スケジュール等の焼成条件が記載されている場合もある。釉薬では最高温度のみで結果が決定されるものと、結晶析出等冷却条件が重要なものがある。しかし、これらの条件は見落とされて記載されない場合が多い。その欠点を補うために、焼成炉に関するデータ項目を設けた。焼成炉の種類、容量によって、大凡の昇

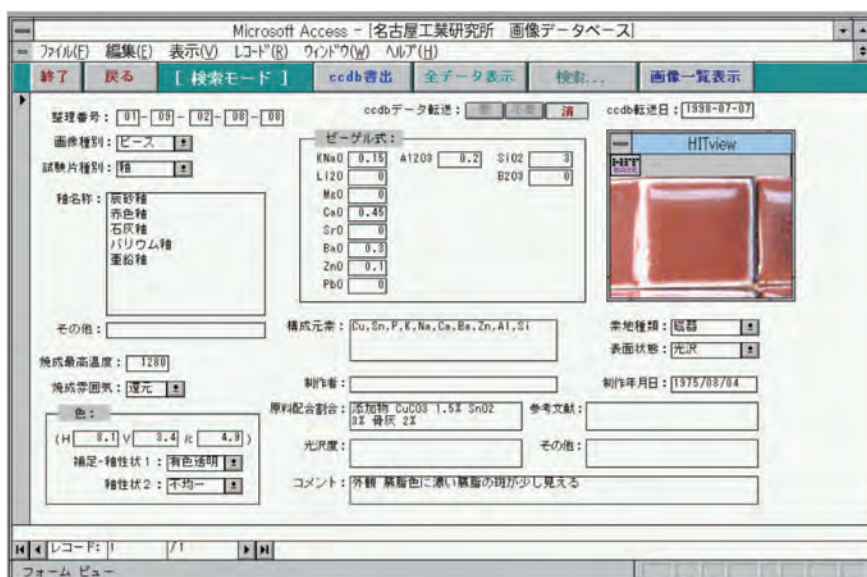


図3 データベースの画面の一例

温冷却速度が推測できるためである。焼成温度がゼーゲルコーン等の火度で記載されているテストピースが多い。最高温度のみでなく熱履歴全体を評価する火度の値は重要であるが、測定状態等の詳細までは記録にないため、その精度等を勘案して、単純な温度換算数値をデータとした。

2.3.3 テストピースから専門家が読取る情報・機器測定によるデータ項目

釉の名称は最も基本的な情報である。黄瀬戸、織部等の伝統名、石灰釉等の成分による名称、柚子肌や貫入、乳白等の外観による名称に分けて、名称一覧を作成した。伝統名は特殊な名称は採用せず、しかしおよそすべての釉薬が分類できるように、候補語を作成した。一つの釉が複数の名称に該当することは一般的であるので、釉名称は候補一覧の中から6件まで選択できるようにした。釉名称の分類法や判別について明確な規定等はないので、入力にあたって複数名の専門家が必要に応じて協議を行い、一般的な慣用に合致するように努めている。また、6件以内で選択した釉名称は、入力担当者がその重要性の順を決めてデータベースに登録する。

釉名称には失敗テストピースの問題がある。例えば黄瀬戸釉の実験のテストピースであるが、それ自体は「黄瀬戸」と呼べないような場合である。単純に黄瀬戸釉を探す場合には、このようなデータが検索に掛かれば不都合であるが、研究開発の参考には有効である。データベースではテストピースの実験目的に関する項を新設し、黄瀬戸の実験結果であることを記述するように設計した。釉名称は検索において最も頻繁に使用される項目である。それはインターネット上に公開したデータベースの検索ログ記録からも明らかとなっている。釉名称は、このように基本的で単純、重要な項目でありながら、その中に複雑さを含んでおり、本データベースの特質の一端を示すものである。

釉の外観の色は重要なデータのの一つである。釉薬テストピースの表面の直径5～10 mmの円形部分の半球面積分光反射率を光学機器（日立製C2000S、ミノルタ製CM2002）により測定し、分光反射率からC光源下での色を計算して、マンセル表色系の数値で表した^[2]。マンセル系を用いたのは、色相・明度・彩度という数値化が利用者にとって直感的な検索に最適と思われたためである。釉の外観色における問題の一つは、釉の色の不均一性である。2色の斑紋模様の場合、分光反射率は測定面積内の平均値であるので、元の色を正しく反映しない。しかし、明瞭な斑点の模様、漸近的に色が変化する模様、ごく小さい面積での変化等多様な場合があり、面積平均値が意味を有する場合もある。データベースでは、すべてのテストピースについて分光測定と色の算出を行ってデータを表示し、

同時に、外観色の均一性について別項目を設けた。色に関するもう一つの問題は透明性である。釉の透明性が高い場合は、外観色は釉の下の素地の影響を受ける。透明釉では外観色は無意味である。半透明釉の場合は、外観色が有意であるが、下地の影響を受けている。これについても、釉の透明性に関する別項目を設定した。これらの項目を併用することにより色に関する情報の提供と検索が可能と考えられる。マンセル系により表した3数値を用いると色の範囲を指定して検索が可能である。また、「色相に関わらず彩度の高い釉」といった検索も可能となった。これはデータベース化による利点の一つである。

データ項目の中のコメント欄には、陶磁器の専門家がテストピースの特徴や気付いたことを書き込んでいる。また、釉の特徴の把握に際しては、随時、光学顕微鏡による観察を行っている。データベースにおいて外観画像は提供するが、テストピースの現物を見ることはできない。釉薬の研究者等の複数の専門家が、あるテストピースを見たときの感想は類似することが多い。データ作成担当の専門家が作成するコメントは現物を見ることの代替の働きを有すると考えている。このため、データ作成においてコメントは重要性の高いものと位置付けている。

テストピースの外観写真は、その釉薬の特徴が最も表されるように照明、焦点、明るさを調整して撮影を行うこととした。当初、撮影画像から色の情報を得ることを検討した。その方法により斑な模様でも、各部の色を測定したり、色の分布について解析することが可能と考えたためである。しかし、色相等を正確に再現した画像を得たところ、画像は暗く感じられ、詳細な模様が判別し難く、釉の特徴を画像で示すことができなかった。日常、肉眼で我々が得る釉の印象を画像で示すには、撮影露出を変えた複数枚の画像が必要ではないかと思われる。データベースに表示する外観画像は、陶磁器の専門家が見て、そのテストピースの感覚的な色や模様等の特徴を最も良く現す条件で撮影し、厳密な明度や色相とは異なることを許容することとした。

2.3.4 データの入力作業

データベース中に多種類の釉薬がそろったことを考慮しながらデータ入力を進めている。テストピースの選定では、陶磁器製品に使用する上で一般的に釉薬として良好と思われるものを最優先に選んでいる。しかし、データベースを研究開発に利用する際には、一般的な観点からは失敗作のテストピースが重要となる可能性があり、一定の考慮をしている。

各データ項目の情報を読み取り、コンピューター入力、色測定、写真撮影等の一連の作業を行っている。このとき

に、誤記や写真取り違い等が発生すると、データ量が増えるほど、その発見と修正に膨大な作業が必要となる。このため各作業段階で、複数の担当者がデータ等の再確認を行う作業手順を試行錯誤しつつ確立した。

記載情報は、専門用語やその略記、固有名称等が含まれ、読取には高度の専門知識を必要とする。また、元の記載情報に誤りがある場合はその判定や訂正も重要である。この観点からも、複数の担当者による重複確認を実施するようにしている。

データ入力作業にあたっては、検討と判断が必要な事例が多く発生する。例えば焼成雰囲気において、磁器製造上の「還元焼成」とは、一般に800～900℃までは酸化焼成した後に還元雰囲気にして最高温度から冷却まで還元状態を保つ。テストピースによっては実験のために特殊な雰囲気変化を行ったものがある。そのような場合の焼成雰囲気のデータ項目入力は、陶磁器関係者が利用する場合を想定して、「酸化」あるいは「還元」を適宜選択した。このようなささいではあるが具体的に直面する多くの問題では、データベースの意義、価値といった基幹に立っての判断をするようにした。

元データベースの入力目標は5万件、インターネット公開版は1万件を目標としている(表1)。元データベースのデータ入力は1997年に開始し、最近の年間入力件数は約2,000件、入力済件数は、入力作業途中のデータが多数存在するがそれを含めて2012年11月時点で約33,000件である。また、公開版データベースのデータ数は2012年11月時点で3,826件となっている。

3 データベースの活用と成果

3.1 インターネットによる利用

データベース構築により、テストピース検索は容易となり、また、インターネット上に提供されたため、多くの一般利用が実現した。利用状況を知る一つの手段は、アクセス件数と、データベースに組み込んだ検索利用ログ記録である。アクセス件数は月平均6,000件、多い場合で月1万件程度である。しかし、インターネット利用に関しては具体的な活用実態を把握することはできない。活用的一端を知る機会には、利用者からの反響や意見、問い合わせ等が直接あるいはメール等で寄せられる場合である。

研究機関、企業の研究開発者から、釉薬の研究開発を始めるときには必ず利用し役立っているとの評価を頂いている。これは、目的とする具体的な釉薬があり、それを実現していく場合である。釉薬製造企業における釉薬開発では、釉薬テストピースを作成して調合を改良していく作業が行われる。焼成と冷却には最低でも1日、通常数日を要す

る。焼成結果を観察して調合を改良することを繰り返すので、時間と労力を要する。既存の膨大な釉薬テストピースを利用すれば、開発実験に要する日数を省略できる。特に、厳密な色合わせと物性が同時に要求される製品では、調査探索に数ヶ月を要することもあり、データベース利用の有効性が高い。

想定されるもう一つの活用形態として、具体的な探索条件はなくて釉薬を探す場合がある。このような場合にも、「明るい鮮やかな色」「1250℃で焼く」等の大凡の条件はあり、データベース化によって、このような検索も可能となった。また、このような活用では利用者が来所してテストピースを直接閲覧することも多く、利用が把握されている。

利用者からの反響や利用状況は、データベースの改良にもフィードバックされている。色の検索の簡便化の要望があった。色が釉薬検索の重要情報であることから、色の数値表示とそれを用いた検索に不慣れな利用者向けに、釉名称の項に色の名称を追加することによって、色に基づいた簡便な検索を可能として要望に応えた。

3.2 技術相談等を伴う利用

データベースの利用の状況を知る機会として、データベース利用者からの技術相談がある。希望する釉の色や性状を指定して、その調合や製造方法を知りたいという多数の相談件数がある。具体例として、見本サンプルと同一の釉を作成したいという企業からの相談があった。数ヶ月間、試作を繰り返したが、同一の釉が作れないということであった。データベースを利用して、類似のテストピースを半日間探したところ、全く同一の性状のテストピースとその調合、焼成条件の情報が得られた。また別の相談例では、特定の元素を含まず失透する組成を探したいというガラス関連材料の要望があり、データベースにより目的とする製造条件が見いだされた。この事例でも、他の方法では見いだすことが困難であった課題が、データベースにより解決された。

3.3 共同研究・研究開発における利用

データベースの有益性は、新規研究開発ではより明瞭に認識された。瓦や半磁器に使われる中火度釉のホウ素および他の有害元素の使用量を低減する研究では、これらの元素含有量を減らして1150℃以下で溶融する釉薬の開発が課題であった。多くの釉薬組成を試験して最適な釉薬を探索する実験とともにデータベースによる探索を行った。焼成温度として1150℃以下、溶融状態の替りに光沢釉を条件として検索を行った。データベースの検索結果と実験研究の結果は、およそ同一の組成範囲を示した。

リサイクル磁器に適合する釉薬の開発では、焼成温度と釉名称、化学組成等から、釉薬候補を探索し、それに基

づいて研究を進めた。これにより、リサイクル磁器の低い焼成温度に対応できる結晶釉をはじめ、熱膨張係数等を適合させた多種類の釉薬が開発され、リサイクル磁器の実用化に貢献した。

陶磁器以外の分野からの利用も行われた。印刷や外装等の分野からの利用が検討され、共同研究等に発展して色や外観の基礎研究に利用された。また、建材の日射反射率に関連する研究では、色や分光反射率のデータが活用された。このようにデータベース化とその公開により、これまで想定されなかった応用が実現している。

3.4 他機関等との連携

データベース構築当初から、他のデータベースとの連携の可能性が検討された。陶磁器分野では、化学組成と熱膨張率、焼結温度等の関係を得る物性予測システムが研究されていた。また、陶磁器デザイン分野では、コンピューター上でデザイン開発支援を行い、CAD や立体造形による試作品作成のシステムが研究されている。これらの他のシステムとのリンクを想定して複数の他機関とのデータの共有利用等が検討された。技術的には容易であり一部の試行試験を行ったが、他機関では一般公開に対する制限の問題等が発生し、その後進展していない。

一方、外国の公的機関との連携において進展が見られ、本データベースに準拠してデータ項目およびデータ形式を共通化した釉薬データベースが相手国側において構築される等の成果が得られている。今後、データの相互利用やシステムの連携等の発展が期待される。

4 今後の課題と将来の展開

釉薬テストピースの情報の利用者数と利用頻度はインターネット上への公開より飛躍的に増加した。また、これまでには不可能であった検索機能が提供されて有用性も増した。それに伴って、新たな展開の可能性や課題が明らかとなってきている。そのうちの3点について考察する。

第一に、陶磁器分野以外あるいは従来型とは異なる利用の有効性が確認された。今後も各種セラミックスやガラス関連素材等への利用、色の研究への利用等の発展が予想される。そのような観点からのデータ項目のさらなる充実が今後の課題となっている。

新設データ項目の候補として、光沢度と分光反射率データがある。JIS の測定法に準拠してテストピースの光沢度を測定することは比較的簡便に実施できる^[3]。また、色の測定においてすでに可視分光反射率を測定しており、数値データとして提供可能である。この他に、テストピースから得ることができる情報には、表面粗さ、結晶、赤外線反射、光学特性(屈折率等)、撥水性、貫入状態、相状態(斑模様)

等)等が考えられる。研究開発において光沢性を溶融状態の指針として用いた例と同様に、表面の艶消し状態は、析出結晶の種類や大きさを、貫入は熱膨張率や硬度を反映しており、そのような観点からのデータ活用の可能性がある。また、データベースに入力するテストピースの選択、コメントやデータの作成は、基本設計の考え方に基づいて進められているが、陶磁器以外の利用を考慮に入れば、その基準の拡張再設計が課題となる。

第二に、テストピースの情報の活用に関して次のような展開が考えられる。一連のテストピース群から得られる情報の重要性に配慮してデータベースを設計したが、それでも基本設計は個々のテストピースに基づいている。釉薬テストピースは、それぞれ何らかの実験目的に基づいて作成されたものである。例えば、化学組成を系統的に少しずつ変化させて釉薬の溶融状態を調べる、基礎釉に添加する着色元素の種類と割合を変えて発色を検討する、焼成条件を変えて釉の状態を見るといった実験である。テストピースの有する本来第一の情報は、この実験目的に対する結果の情報である。実験目的を記入するデータ項目により若干の対応は実施したが、テストピース群から得られる情報の整理と活用は未達成の大きな課題である。テストピースと研究報告等との対応付けの調査を一部実施した。それは、個々のテストピースに関する情報の増強にも役立つものである。研究報告との完全な対応が見られ、実験の詳細が把握されるテストピースは僅かであった。しかし、台紙の一連の情報を専門家が鑑定すれば、実験の概要は判定可能である。実験において着目された条件要素、例えば、化学組成、焼成温度、添加剤等に基づいて分類整理し、情報を提供する方法等が考えられる。これは現在のデータベース構成の範囲では対応できないので、新たな副データベースの構築による必要がある。小規模な試験データベースの構築から研究を進めることが課題である。

第三に膨大なデータ量を活かした展開が考えられる。データベース構築により、テストピースの高度な検索が実現されたが、膨大なデータ量はさらに新しい質の発展の可能性を含んでいると思われる。例えば、データベースでは、検索条件に最も合致する単独のテストピースを見いだして利用することを主に想定している。しかし、膨大な数のデータを有するので、要件に完全に一致するデータがない場合にも、多くのデータから疫学的に情報を抽出することの可能性が期待される。有害元素の含有量を減らしながら低温で溶融する釉薬の研究開発、リサイクル磁器用の低温焼成結晶釉の開発では、これらの要件に関連する多数の釉薬を検索抽出し、それらの釉薬の情報を参照して研究開発の参考とした。検索条件は数値データでは上限下限を設定

して幅のある検索が可能であるが、さらに曖昧な検索条件の採用も考えられる。また、検索結果として得られた多数のデータ群から共通する情報や傾向を抽出するような機能も有効と考えられる。職人氣質の陶磁器業界の中で、釉薬はさらに職人技が特徴とされる分野である。新規の釉薬の開発は、色や光沢等の外観と同時に、熱膨張率、熔融状態等の相反する諸条件を同時に満足させる必要があり、熟練した職人の経験と勘に頼ると言われてきた。近年、熟練者の減少と技術の継承が業界の課題となっている。本データベースは膨大なデータにより、職人の「経験」の部分の代替となることを期待して構築したものであり、その目的は達成されたと思われる。データベースの改良により「勘」の部分に踏み込むことの実現性は明らかではないが、将来の一つの課題と考えられる。

5 まとめ

釉薬テストピースのデータを整理してセラミックカラーデータベースを構築した。30 数万点の釉薬テストピースは 80 年以上の陶磁器研究において作成された。データベースの有効性は、元となるテストピースの研究水準と、それをデータベース化する作業の質に左右されると考えられる。データベースの構築作業は、すでに 10 数年間継続して行われている。本データベースはこれらの恵まれた環境により実現されたものであり、産業界からの利用、新規の研究開発への活用等多くの利用実績によりその有効性が実証された。インターネット上にデータベースが公開されることにより、利用は拡大した。陶磁器釉薬以外の材料開発や基礎研究への利用の有効性も確認された。それらの利用状況等に基づいて、データベースの改良を実施しているが、さらにデータベースの基本構想に立ち返っての展開も今後の課題である。

謝辞

この論文は著者単独名による著述であるが、セラミックカラーデータベース構築自体は組織的に行われた。データベースの構築は名工試セラミックス応用部と企画官室の協力の下に開始され、公開版データベースの作成には、産総研国際標準推進部、情報環境基盤部 (TACC) 等の担当者の指導を頂いた。データベースの改良は 10 数年の間にデータ入力を担当した陶磁器分野の専門家でもある非常勤職員の方々と議論しながら行った。

また、データベース構築が可能となったのは、30 数万点の釉薬テストピースが作成され、整理されて保管されていたことによる。釉薬関係の当所職員の諸先輩に敬意を表する。

参考文献

- [1] 平野耕輔: 日本陶業の現状及び其将来に対する所感並に試験所の経営方針に就て, *大日本窯業協会雑誌*, 39 (457), 8-18 (1931).
- [2] JIS Z8721
- [3] JIS Z8741

執筆者略歴

杉山 豊彦 (すぎやま とよひこ)

1984 年名古屋大学大学院理学研究科地球科学専攻修士課程修了。同年名古屋工業技術試験所 (現産業技術総合研究所) 入所。遠赤外線放射セラミックス、陶磁器および釉薬の研究等に従事。現在、サステナブルマテリアル研究部門セラミックス応用部材研究グループ長。この研究では、セラミックカラーデータベースの設計、データ入力等、構築全般を担当し、データベースを活用した技術相談、共同研究等を遂行した。



査読者との議論

議論 1 論文の全体構成

質問 (立石 裕: 産業技術総合研究所つくばセンター)

中部センターに残されている釉薬テストピースをもとに構築されたセラミックカラーデータベースの構成と活用例がまとめられています。インパクトがもうひとつ感じられません。その大きな理由の一つは、データベースの立ち上げのところがあまりにもあっさり片付けられているからではないかと思えます。テストピースという物理的実体からデータベースという仮想的資料への転換を図る時に、どのような内容にするべきかという最初の設計が極めて重要であり、いろいろな議論があったはずですが、そこがほとんど記述されていないため、どちらかという通常の技術論文になってしまっています。シンセシオロジーの特徴である「社会的価値の創造」をもっと明確に主張するために、以下のような論文構成にしたほうがよいと思しますので、ご検討ください。

2.1と2.2の間に、「データベースの設計」に関する節を設け、合わせて、

図1のシナリオをここで説明する。ポイントは

- ・そもそも、なぜデータベース化の話が出てきたのか?
- ・具体的な目的はなにか?
- ・その目的を達成するためには、どのような構造にするべきか?
- ・どのような形で一般に公開すべきか?

質問 (五十嵐 一男: 国立高等専門学校機構)

それぞれの章は興味深く読めるものの、全体としてこの論文は何が言いたいのが分りにくくなっています。それは論文の全体構成にあるように思います。この論文のデータベースの構築といった課題では、どのような設計思想の基で構築を進めたかが重要ですが、それらにかかわる文章が各章に分散されているのに加え、その主要と考えられる部分が 4. の「今後の課題と将来の展開」の中と最後に置かれています。例えば、背景・目的と結論は別にして、以下のような章立てとして最初に持って来てはいいかでしょうか。検討ください。

1. データベースの設計思想
2. それを実現するためのシナリオ
3. 構築に必要な項目と工夫
4. データベースの活用
5. 抽出された課題と今後の展開

回答 (杉山 豊彦)

論文の構成をどのようにすべきか悩みつつ書きました。査読コメン

トを参考に、データベースの設計に関する節 2.2 を作り、シナリオの説明を記述しました。また、2.1 の釉薬テストピースの説明は、前後の節に振り分けました

議論2 詳細DBと公開DBの関係

質問 (立石 裕)

2.2 では元データベースの内容が説明されていますが、元DBと公開版DBとの二重構造になった理由がはっきりと説明されないままに、2.3 以降で公開版の説明に移行してしまっているの、読んでいて混乱が生じます。また、例として挙げられている図3の各項目と対応付けながら、本文で説明したほうが読みやすいと思います。

回答 (杉山 豊彦)

二つのデータベースについて未整理な内容でしたので、新 2.2 節に説明を加えました。図3と2.3の説明は主に元DBについての記述ですが、公開DBもほとんど同様な構成なので、記述は両データベースに共通です。2.3.1に説明を加えました。2.3は項を作って整理しました。図3のデータ項目の配置とは異なる順になり、対応付けが十分ではありませんが、項はシナリオの図に書いたデータ項目の分け方に準じています。

議論3 データベースの活用例の説明ぶり

質問 (立石 裕)

3. のデータベースの活用の記述が羅列的で雑然としています。適宜項目立てして整理したほうがよいと思います。また利用者からの具体的なコメント例とそのフィードバックを入れたほうがよいでしょう。また、「技術以外の諸般の事情」とは具体的にはどのようなことなのか、支障のない範囲で明記できないでしょうか？ また、「この欄の利用率や有効性は未検証であるが、データ作成では重要性の高いものと位置づけている」と記載されていますが、未検証であるにもかかわらず重要と考える理由を示してください。

質問 (五十嵐 一男)

3. の「データベースの活用」においても、幾つかの事例が同じ重みで羅列されているばかりでなく、途中で結論めいた文章も入ってきているので何を主張したいのかわかりにくくなっています。小項目を立てるなり、優先度をつける等組み立て方の整理を望みます。

回答 (杉山 豊彦)

項を作りました。また、内容の一部は他の章へ移して整理しました。全体の章構成の修正に伴って、文章の一部を設計思想のほうへ移しました。また、小項目を作りました。「技術以外の事情」の具体例としては、先方の公設研究機関に対し、地元の業界から意見が入り、公設機関の作製したソフトやデータに関して、一般公開への制限(他産地の同業者への公開制限)がかかってしまったことが主な障害となりました。

未検証という記述に関しては、2.3.2の該当か所に理由を記しました。「...未検証...」と書いたのは、コメント欄については、利用者のログ記録等が残らないためでした。この記述は文章の修正に伴い削除しました。

議論4 外国のデータベースとの連携

質問 (五十嵐 一男)

3. の最後のパラグラフにおいて、「他のデータベースとの連携は技術的には容易であるが、諸般の事情で実現していない。一方、外国の公的機関においては、データ項目およびデータ形式を統一した同様なデータベースが構築される等、データの相互利用やシステムの連携において進展が見られる、」と記述されていますが、これは、本データベースの利用形態を凌駕した使い勝手のいいデータベースシステムが海外で開発されたということでしょうか。もしそうであるとするならば、著者らによってそれができなかった諸般の事情についても触れる必要があると思います。また、このようなシステムがあるというのであ

れば、参考として引用しておくことも必要です。

回答 (杉山 豊彦)

外国の公的機関(具体的にはタイのMTEC(タイ国立金属・材料技術研究センター)です)は、産総研の本データベースとデータ項目、形式を一致させて、釉薬データベースを作りました。相互に研究者が行き来して、研究協力をしました。「連携において進展」と書いたのは、本データベースとの連携のつもりでした。文章を修正しました。

議論5 テストピースの研究水準の妥当性

質問 (五十嵐 一男)

まとめに記載されているように、「データベースの有効性の高低は、元となるテストピースの研究水準とそれをデータベース化する作業の質による」となっています。まさしくそのとおりだと思いますが、80年間にわたり続けてこられたテストピース作製の研究水準はどのように担保されたと判断された上でデータベース化に踏み出されたのでしょうか。

回答 (杉山 豊彦)

データベース化を始める以前にも、企業の研究担当者等がテストピースを利用し、その有効性が認識されていました。また、産総研(名工試)の研究者自身も、研究に活用し有益性を確認していました。特に、研究開始初期の実験の方向性を探る段階で、過去の実験データの参照が役立ち、広範なデータは多くの場合に的確な情報を提供してくれました。

また、鉄系釉薬の研究等世界的に著名な研究開発に関連するテストピースもあり、国内外からも注目されていました。

一方、すべてのテストピースの研究水準が保証されているわけではないという問題点もあります。作製当時の研究担当者が判断した一定水準以上のテストピースのみ残されていると思われませんが、データ作成入力作業においても選別の判断を行っています。

議論6 収録データ数と今後の見通し

質問 (立石 裕)

2.2のはじめの部分で「5万件のデータ容量を前提としてデータベースの設計を開始した。」と記載され、また3ページ目に「(インターネット公開版では)元のデータベースからさらに典型的なテストピースのみを選ぶことにより検索結果が短時間で得られるようにした。」と記載されていますが、論文では、元データベースおよび公開データベースで、それぞれ、具体的にどの程度の数のデータが収録されているのか、まったく記載されていません。例えば、表1に数字を追加してはいかがでしょうか？

また、最終的な目標収録数があるとすれば、それを記載するとともに、いつごろ作業が完了するのか、見通しを述べていただければと思います。

回答 (杉山 豊彦)

表1に目標件数と現時点のデータ登録件数を記載しました。また、この論文の2.3.4の終わりに、データ件数に関する記述を加えました。

データ入力開始から約15年が経過しました。元データベースの登録データ件数は作業途中のデータを含めて約3万3千件、作業が完全に完了したものは2万数千件程度です。5万件を一つの目標としています。データベース開始当初は、年千件に満たない入力速度でした。入力システムや作業手順の改良を続けて、入力作業効率率は飛躍的に向上しました。一方、データの正誤の再確認作業を厳重化して、作業量が倍になりました。現在の入力ペースは年2千件程度です。このペースで今後作業が継続すると5万件の目標達成まで約10年を要します。複数の公設研究機関でも釉薬データベースが構築されていますが、このような長期間の事業が実施されている例はなく、本データベースの大きな長所となっています。

論文中には目標達成時期の見通しは記載しませんでした。今後の作業状況、担当者の人数等の外因によって変動するためです。

業務用ビデオゲーム表示技術の変遷

— テレビ受像機への描画からリアルタイムグラフィクスへ —

三部 幸治

1970年代に本格化した業務用ビデオゲームは、さまざまな画像表示手法が投入され独自の進化をしてきた。「TTLロジック」による手法に始まり、「ビットマップ表示方式」によるスペースインベーダーの大ヒットを経て、業務用ゲーム独自の「スプライト表示技術」は市場を広げ、DSP等の高速演算機能を組み込んだ「リアルタイムポリゴン表示」等、他産業より数年早く新技術を投入活用してきた。そして、これら業務用ゲームの技術は、家庭用ゲーム、携帯電話コンテンツ、通信カラオケ等多くの産業に繋がっている。この論文では、これら業務用ビデオゲームの中心となる画像表示手法の進化とその背景を述べる。

キーワード: ビデオゲーム、アーケードゲーム、ゲームセンター、スプライト表示、リアルタイムポリゴン表示、業務用ゲーム

Brief history of arcade video game display technologies

– From CRT display technologies to real time graphics –

Yukiharu SAMBE

Arcade video games, whose market expanded in 1970s, evolved in its own way by the adoption of various display technologies. TTL logic was applied at the beginning, bitmapped display was applied for the huge hit “Space Invaders,” “sprite display technology” originally developed in arcade game field enlarged the market, and very fast numerical operations such as DSP were incorporated into “real time polygon display.” As described above, arcade video games introduced, developed, and utilized new display technologies a few years earlier than other industries. These arcade game technologies led to the development of many other new entertainment systems, such as home console games, mobile phone contents, and even network (downloadable) karaoke. This paper describes the evolution of arcade game display hardware technologies and its background.

Keywords: Video game hardware, arcade game, sprite display, real-time polygon display

1 はじめに

世界のゲーム産業市場規模は約5兆円である^{[1][2]}。日本はその20%を占め、家庭用ゲームと業務用ゲーム（ゲームセンターゲーム、アーケードゲームとも呼ばれる）市場がおよそ同じ規模で2分している。業務用ゲーム市場がこれほど大きいのは日本だけで、新技術の投入等がその市場を支えている。業務用ゲーム機器は遊技者に「非日常の体験」を提供する一方、ビジネスであるこの産業では、優れたハードウェアやプログラミングによるゲームであっても、2週間ほどの（試作品の）インカムテスト期間に十分な収益が得られなければ開発作業は中断される。このインカムテストを生き延びる割合は20%ほどで、さらにヒット製品につながるのはその中の数%である。これら厳しい環境で生き延びたゲームコンセプトとそのハードウェアは、技術的にも商業的にも優れたものが多い。著者は1970年代から30年以上に渡り業務用ゲーム等エンターテインメント機器の研究開発とそのマネジメントに従事してきた。この論文では、あま

り表に出ることがない中で独自の発展をしてきた業務用ビデオゲーム表示技術の変遷とその背景について述べる。（なおゲームにおいてはそのコンセプトが重要であることは明らかであるが、これらは別稿に譲りこの論文では論じない。）

2 ビデオゲーム表示方式の発展

2.1 ビデオゲーム黎明期

最初のビデオゲームは米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）のウィリアム・ヒギンボーサムによって1958年に考案されたとされるが^[3]、その商業的成功は70年代初期に米国でノーラン・ブッシュネルが設立したAtari社による業務用ゲーム「PONG」である。その後日本の業務用ゲーム技術者はこれらにヒントを得て、独自にビデオゲームを研究開発し、その後1978年にスペースインベーダー（1978年（株）タイトー:開発者 西角友宏氏）が大ヒットしている。これ以降も米国との激しい競争の中、業務用ビデオゲームの表示技術は電子技術の進歩と相まっておよそ7、8年ご

(株)タイトー AM事業本部 技術顧問 〒243-0498 海老名市下今泉 3-11-1
TAITO Corporation AM Div. Senior technology advisor 3-11-1 Shimoimaizumi, Ebina-city 243-0498, Japan E-mail: sambe_yukiharu@taito.co.jp

とに独自の進化発展をしてきた。以後、順次その進化の様子を述べる。

2.2 ビデオゲーム前夜：1960年代メカトロ時代

ビデオゲームが登場する前の60年代、図1のように今日のゲームセンターに見られるゲーム機がすでに存在しており、そのプレイフィールドも今日のビデオゲームとおよそ同等である。CPUや高速なロジック部品がなかったこの時代、メカ機構、モーター、電球、そして電磁リレーによるシーケンサーが使われ、この例（スカイファイターII：タイトー1971年：開発者：西角友宏氏）では①背景に流れる雲の表示、②敵飛行機の表示、③敵の爆発表示、④弾痕表示、⑤ヒット検出、の主には5つのメカトロユニットでゲー



図1 メカトロゲーム機

ム機が構成されている。一時市場を席卷したこの種のメカトロゲーム機も、電磁リレーの接点不具合や機器の摩耗による保守作業が不可欠で、市場では保守作業の軽減と同時に複雑で早い動きを実現する技術が求められ、ブラウン管（テレビ受像機）を使ったインタラクティブなゲーム開発に技術者の目が向いてゆく。

2.3 ビデオゲーム表示の基本

70年代に始まるビデオゲームであるが、その表示技術の基本は今も同じで、ブラウン管上に電子ビームを順次左右上下に振ってラスタースを描き、その上に画素を載せることで画像を表示する（図2.1）。図2.2は表示のための基本信号作成を、図2.3はビデオゲーム表示における表示期間とブランキング（帰線消去）期間の考え方を示す図である。この例では、水平走査線1本を63マイクロ秒（その中のブランキング時間は10マイクロ秒）で、同じく垂直方向は16.6ミリ秒（その中のブランキング時間は1.3ミリ秒）で描いておりNTSC方式のテレビ表示周期に近い。一方、図2.4はこの後述べるスプライト表示方式におけるもので、水平ブランキング期間を増やすことで、当時非力であったメモリー性能を最大限引き出す工夫をしている。（なお、このような比率であっても水平方向の表示幅は短くなるものの、通常のテレビ受像機はその違いを吸収し、画面表示やテレビの同期動作に支障はない。）

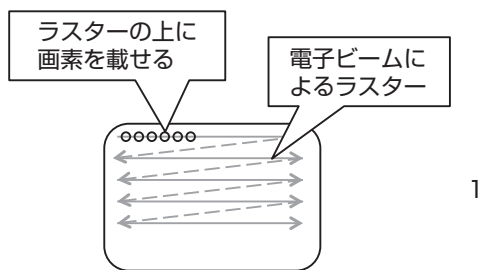


図2.1 ラスタ表示

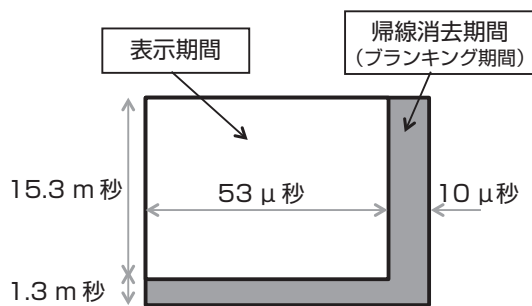


図2.3 表示期間とブランキング

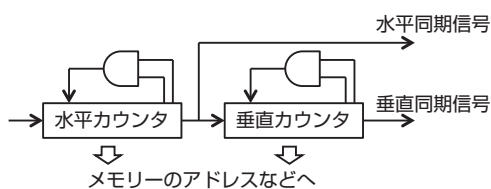


図2.2 ビデオ表示カウンタ

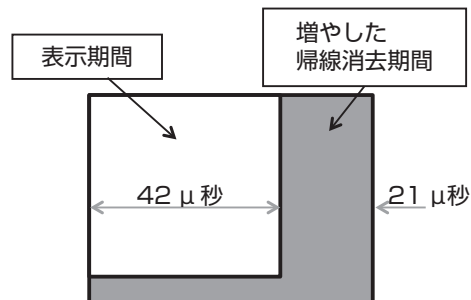


図2.4 スプライト方式の表示期間とブランキング期間

図2 ビデオ信号の基本

2.4 TTLロジックによる方式：1970年代前半

1972年に発表された米国 Atari 社の「PONG」は国内に導入されちょっとしたブームとなった。それを受け、国内の業務用ゲーム技術者は参考とする資料もほとんどない中、「PONG」のロジック回路にヒントを得て、半年後には異なる発想の独自技術でビデオゲームを開発している。電子回路の中心は TTL ロジックによるもので、この時期 TTL は高速化と低価格化が進んで業務用ビデオゲームの発展を側面から支えている。図3は当時のレーシングカーゲーム（スピードレース：1974年タイトー）の機能ブロックで、「デジタルカウンタのプリセット機能」等を活用して目的とするブラウン管の表示位置に絵を描いている。ゲームに必須のヒット検出（この場合は自車と敵車・道路緑石）は、表示された絵同士の画素の重なりを検出してハードウェアの動作を切り変える等、この時期 CPU はまだ搭載されておらず、制御の中心は TTL ロジックである。

【TTL ビデオゲームの限界】

この時代、ハードウェア（TTL ロジック回路）そのものがゲームコンセプトを実現しており、ゲームコンセプトを理解するハードウェア技術者は少数で、ここに人的な限界があった。また、初期には TTL200 個ほどでビデオゲームは商品化されたが、表示物体が多い複雑なゲームの要望が増えるにつれ、必要な TTL の数も増えハードウェアコストも間もなく限界に達する。

2.5 CPUビットマップグラフィックの時代：1970年代後期

70年代中期になって、米国企業が CPU を使ったビデオゲームを投入した（Gunfight：1975年 Midway）。国内では商業的な大成功には至らなかったが、CPU を使うことでゲーム制作の柔軟性を高め、初めてゲームコンセプトとハードウェアの分離が可能となった。一方この時期、これら CPU ハードウェアゲームに学んだ国内の業務用ゲーム技術者は、およそすべての開発ツール類を手作りしながら CPU 搭載ビデオゲームを開発している。大成功を納めたスペースインベーダーもすべて手作りのツールで開発されている。

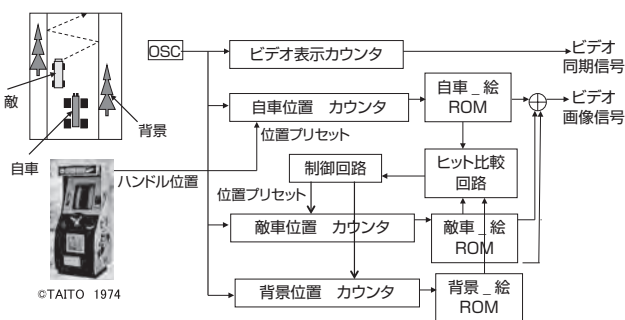


図3 TTLによるビデオゲーム回路ブロック

ところで、当時の一般的な画像表示方式はミニコンピューターの操作卓等として普及していた「キャラクタディスプレイ方式」である。この手法は少ないメモリーで構成でき、回路構成もシンプルでコストも低いが、限られた位置に限られた文字図柄を表示するもので表示制限が多い。（ランプゲームやマージャン等、この手法で市場投入されたゲームも少なくない）しかし、画面を自由に動き回るゲームの実現を目指した当時の業務用ゲーム技術者は、まだ高価であったメモリーを多く必要とするビットマップグラフィック方式をその開発の中心に据えている。図4はスペースインベーダーの機能ブロックで、画像表示用メモリーを時分割で CPU と表示ブロックで共有するビットマップグラフィック方式である。それまでの TTL ロジックのゲーム機に比べるとはるかに柔軟性に富んだビデオゲーム表示技術である。

【ゲーム開発ツール類の誕生】

この時代の国内ゲーム開発者は、ハードウェア、ソフトウェア、グラフィック作成を自ら行うマルチ技術者で、作業効率向上のためにさまざまなツールを自ら開発活用している。初期には紙とエンピツと人の手でデジタル化していたグラフィック作成作業を、専用のグラフィック作成ツールを作り上げ、絵柄形状の修正や色の変更そしてアニメーションの確認も行えるツールに仕上げ活用している。また、多くのサブルーチンプログラムが協調しながら並行して動作するゲームソフトにおいて、これらを統合して動かすために初期のリアルタイム OS も自ら作成して組み込んでいる。さらに、プログラム開発ツールも自製のデバッガーを活用しており、これらは基本的なデバッグ機能に加え、ハードウェアと協調してプログラムごとの CPU 占有時間をリアルタイムに測定表示する機能等当時としては先進的な機能も組み込まれている。

【CPU ビットマップグラフィックの限界】

上記インベーダーゲームで使われた「ビットマップグラフィック方式」は、表示物を動かすには新たな表示位置に物体を描き、同時にいままで描いていた部分を消去する処

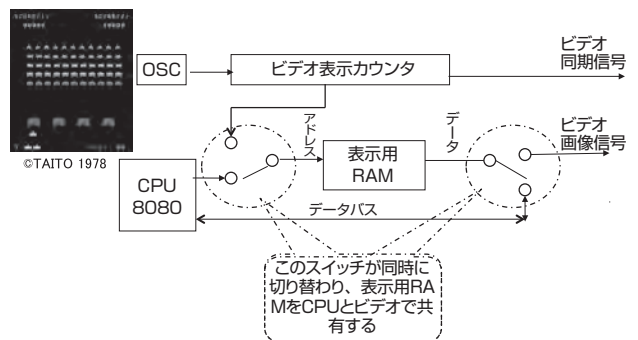


図4 ビットマップグラフィックによるビデオゲーム回路

理をすべてCPUプログラムが行う。その結果、動きの激しいゲームではすぐに処理の限界に達する。例えばインベーダーのハードウェアではリアルタイムに塗りつぶしを行う画面の面積は全画面の1/4ほどで、動きの激しいゲームには向いていない。解決策としてより高速なCPUを搭載し、描画速度を高めたビットマップグラフィック方式等が市場投入されたが（QIX：1981年タイトル、ハレーズコメント：1986年タイトル）短い期間で限界に達した。

2.6 スプライトの時代：1980年代

1978年、表示物の位置座標と絵柄の番号をCPUが書き込むだけで所望の絵柄をハードウェアが表示する業務用ゲーム独自の「スプライト表示方式」^[4]が米国Atari社で考案された。図5はこの方式によるビデオゲームシステムの機能ブロックである。当時高価であった高速なメモリーを用いて「ラインバッファメモリー」を構成したこの方式は、ハードウェア処理とソフトウェア処理がバランスよく分離されている。国内ではナムコ社の「ギャラクシアン：1979年」に初めて使われた。この方式では当時の高速メモリー素子（アクセス速度70nsほど）と周辺を構成するTTLの速度はラインバッファ回路を実現するのにギリギリの速度仕様であることが多く、回路設計者のセンスが問われる部分でもある（ギリギリの速度仕様は市場でのトラブルの遠因^[5]にもなった）。そしてできるだけ多くの画素をテレビの水平ブランキング期間内にラインバッファに書き込むために、そのブランキング期間を標準テレビ信号（NTSC）の倍に広げ設計に余裕をもたせる等の工夫が行われている。これら工夫の結果、55匹のインベーダーをゆっくり動かすのが限界であったビットマップ方式に比べ、10倍以上の数の表示物を高速に自由に動き回る画面が実現できている。80年代のおよそ10年間、ビデオゲームはこの手法を基本として、多くのビデオゲームコンセプトが試されている。そして今日に至るほとんどのビデオゲームジャンルが開拓され、この表示方式は初期の家庭用ゲームの表示方式にもなっている。

【役割の分化】

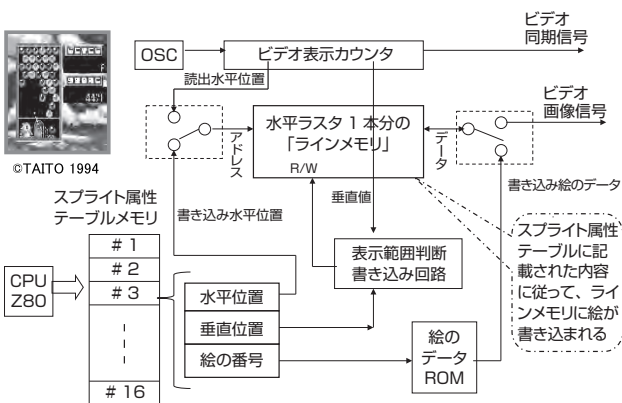


図5 スプライト表示回路によるビデオゲーム回路

一方この時期、プログラマー、ハードウェア技術者、ゲームコンセプター、グラフィッカー、そしてその取りまとめ役を行うプロデューサー（多くは中間管理職）等役割が徐々に専門分化され、特にプロデューサーは直接外部の競争にさらされながら次の時代のゲームコンセプトの実現と、プログラマー、ハードウェア技術者、ゲームコンセプターの融合を図り、次の技術開発に繋ぐ重要な役割を担うようになっていく。

【市場の拡大とスプライト表示の限界】

スペースインベーダーの大ヒットで急拡大した市場では、上記スプライト方式のゲームが多数開発される中、さらなる新しい表現とより複雑なビデオゲームが強く要望されるようになった。一方、スプライト方式では例えば表示物を拡大・縮小・回転させるためには、あらかじめ多くの絵柄を準備する必要があり、グラフィック作業とその絵柄を格納するメモリーも爆発的に増加し、表示品質も十分ではない中、コストだけが上がりつつあった。

2.7 DSPポリゴンの時代（1990年代前半）

（株）タイトーでは1986年にメカトロ手法による飛行機の着陸操縦を体感するフライトシミュレーターゲームを試作し市場テストの結果が好評であった。一方、このメカトロによる手法は判りやすいが、耐久性とコストに課題がある。これを受け、上記スプライト表示技術を大幅に拡張した同ビデオゲームの製品化を試みたが、昼間の離着陸に伴う風景や滑走路の拡大縮小回転表示に多くの技術的困難があり、まずはスプライト技術を拡張して夜間誘導灯を表示するフライトシミュレーターゲームを開発投入することとした。誘導灯であれば、点在するその並びを回転、拡大、縮小することで済み、比較的少ない数値演算とスプライト技術だけで実現ができるためである。そして市場投入の結果、さいわいこの機種も好評を得ている。一方この間、並行して昼間の離着陸表示を可能とする表示技術の開発検討を行い、ポリゴン表示ハードウェアの構想に行きついている。

図6に、当時のポリゴン表示ブロック図を示す。ここではポリゴンの頂点座標を計算するためにDSPを用いている。詳細な説明は割愛するが、図の「ポリゴン表示ブロック」は、ポリゴン表示メモリーの上にXおよびY分周器で設定された傾きの直線をXおよびYカウンタのカウンタアップにしたがって描き、この直線3本からなる三角形ポリゴンを描画する^[6]ブロックである。ここにおけるポリゴン表示メモリーはテレビ表示に必要なメモリーの10倍ほどの広さを持ち、描こうとするポリゴンが画面からはみ出す位置にあってもポリゴンを描き切る回路構成としている。テレビ画面表示の際には、その表示部分だけを切り出して、順次テ

レビ画面のラスターに三角形ポリゴン画素を表示する仕組みである。ポリゴンの塗りつぶしはラスター描画の際に上記三角形のポリゴン直線とラスター位置が最初に交わった位置から横方向に次の線分と交わるまで塗りつぶしを続ける仕組みである。図6のスクリーン画像は、国内で最初にポリゴン表示を実装したフライトシミュレーターゲーム（トップランディング：1988年タイトル）である。

[DSP ポリゴン表示の限界]

上記フライトシミュレーターゲームは、上空から見た比較的単調な地上平面と少数の高層建築物をポリゴン表示するものであったが、例えば電車運転ゲーム（電車でGO！：1997年タイトル）では、これとは比較にならない数のポリゴンが必要になる。初期のポリゴンゲームではDSPを複数搭載してこれらに対処しポリゴン処理能力を増やしたハードウェアを投入したが、すぐに限界に突き当たった。また、それぞれのポリゴンに単色を付加して表示した画像は、一種塗り絵のように不自然で、照射される光線の向きや反射等微妙な色の変化等を表現する表示ハードウェアに自ずと開発目標が向かった。

2.8 GPUレンダリングの時代：2000年代

立体的な画像は、図7に示す3つのステップで作られる。最初に箱庭的空間である「ワールド座標」に多数のポリゴンで構成されたすべての物体（人物、建物、背景等）を拡大・縮小・回転等を行って所望の場所に配置する。その後視点方向から2次元平面に切り取る「クリッピング」処理等を行い、「レンダリング処理」で光線の向き等を加味した色の付加等を行い表示する。このほとんどの過程で膨大な量のリアルタイム数値演算が必要で、初期には多数の

DSPを用い、専用のグラフィックLSIをタイトー、セガ、ナムコ等の業務用ゲーム製造企業が自ら設計開発したが徐々にその設計作業が膨大になり2000年以降はパソコンにその需要を広げた専門のGPU(Graphic Processor Unit)メーカーと協業している。現在は米国のNVIDIA社、カナダのATI(その後AMDに統合)がGPUの2大メーカーである。図8に現在のポリゴン表示LSI(GPU)の内部構成例を示す^[7]。積和演算を得意とするプロセッサが多数配置され(この図ではSP)、その上で、ある種のマイクロプログラム(スレッドと呼んでいる)が実行される。それらは、ある時には頂点計算、ある時にはクリッピング処理、ある時にはテクスチャの貼り付け等多様な役割を担う。メインCPUは、ある定まったデータの並び(マイクロソフトのDirectXやシリコングラフィックスのOpenGL等でデータ規格化されている)をGPUに与えることで、GPUはこれらスレッドを切り替えながら所望の処理を行い、結果をビデオメモリーに書き出すことを行う。ある意味、この部分はブラックボックスとして処理が行われていることになる。最新のものでは千個を超えるSPプロセッサが搭載され、同GPUは一部のスーパーコンピュータでも活用されている。

3 新技術投入のプロセス

業務用ゲーム産業においては他産業よりも数年早く新技術が商品化されることが多い。著者は、その背景として次の3つがあると感じている。①業務用ゲームでの企画・試作・市場テストのプロセスが短時間で回っていること。②比較的高額な新技術の投入が可能であること。③技術横断的な人材が活動していること。

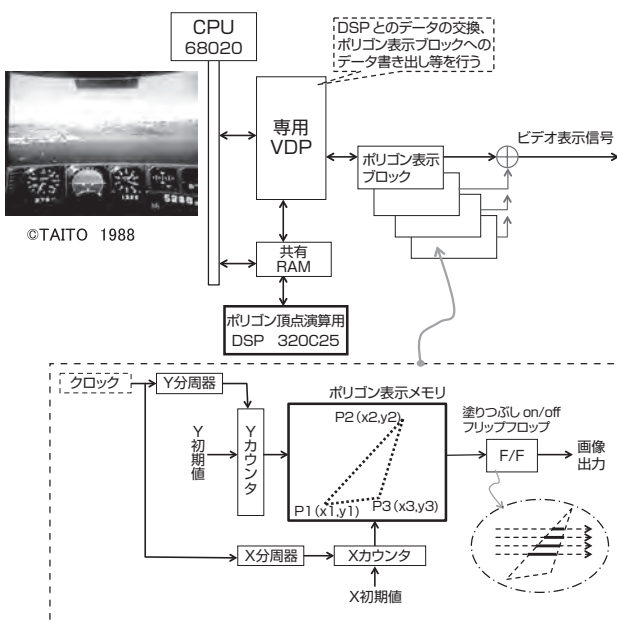


図6 DSP・ポリゴン表示ビデオゲーム回路

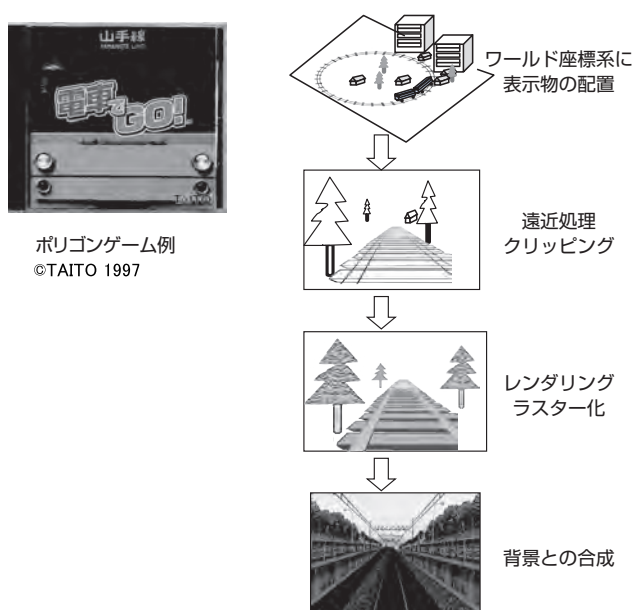


図7 立体表示の処理ステップ

3.1 短時間のテストプロセス

業務用ゲーム産業では試験的な製品であっても、完成度60%ほどの試作品をゲームセンターに試験設置することで消費者の反応を素早く知ることができる。先の表示技術例以外にも独特のビデオ表示技術が数多く試されており、例えば、CRTの電子ビームで直接描くことで多数の表示物体の拡大・縮小・回転を可能にしたベクタースキャン表示方式^{[8][9]}や、スプライト表示の絵柄をハードウェアで拡大縮小を可能にする方式^[10]、動画像を取めたLDディスクとゲーム表示を組み合わせた方式^[11]等、多くの独自表示方式が試されている。そして消費者はそのゲームメーカーやブランドとは関係なく硬貨（例えば100円）を投入してゲーム機を試し、気に入らなければ二度と戻ってこない。明快な市場テストである。いわば、市場をテスト環境として、さまざまな新技術を試しているのである。一方、類似産業である家庭用ゲームソフト産業では商業的な成功をその販売本数で判断するが、そのためにはゲームソフトの完成後、ゲームCD等を製造し、流通に乗せた後に初めて消費者の本当の需要実態を知る等、プロセスは短くない。

どの産業にも試作品等の市場テストの仕組みはあるが、業務用ゲーム産業におけるそのプロセスは的確で短い。

3.2 新技術の投入コスト

70年代の一般的な業務用ビデオゲーム機の取引価格は50万円～100万円で、そのコストの半分は電子部品で占められていた。CPUとメモリーがまだ高価（5万円ほど）であった当時、業務用ゲームが率先してこれらを採用できた理由はこの比較的高いゲーム機の取引価格にある。図9は、新しい技術をそれぞれの市場で活用するのに必要なコストイメージを描いたもので、左端は研究室等の、「斬新ではあるが信頼性や実装コストにはまだ課題を抱える技術」の

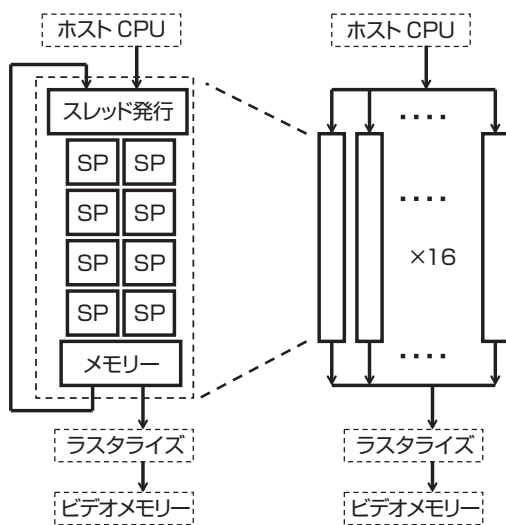


図8 GPUの内部構成
(NVIDIA GeForce8800 技術資料より筆者作成)

エリアである。右端のエリアはコンシューマー向け技術で、「一般消費者に渡るまでの時間はかかるが、信頼性や実装コストは十分に練られたものである」ことが多い。中央のエリアは、比較的高コストな新技術や考案が活用されるエリアで、業務用ゲーム市場はここにある。例えば、マイクロコンピュータと呼ばれたCPUが産業界で本格活用される数年前に業務用ゲーム市場ではこれらを本格活用し関連産業に刺激を与えている。また、ポリゴン演算処理において、当初は高価で扱いにくいDSPをいち早く業務用ゲームでは取り入れ積極活用された。周知のように、これらDSPは現在では劇的に価格を下げ携帯電話にその主要部品として複数搭載されている。

3.3 技術横断的な人材

先に述べたように、初期の業務用ゲーム産業では開発者が自らハードウェアの設計、ソフトウェアの開発、グラフィックや効果音の作成、そしてその開発ツールも自作する技術横断的な人材が産業を牽引した。この流れは現在も健在で、役割が専門分化された最近の業務用ゲーム開発においてもプロデューサーは複数技術の専門家であることが多い（なお、専門分化とは主に①ゲームコンセプト、②電子回路ハードウェア、③プログラミング、④グラフィック、⑤サウンド、⑥ネットワーク、⑦メカ機構、⑧プロデューサーである）。

業態の異なる通信カラオケが、タイトー、セガ等業務用ゲーム企業に始まり^[12]、さらに携帯電話の着メロビジネス等に繋がった背景もここにある。

ところで、ビデオゲームの遊技者は、そのゲームプレイに慣れてくると、さらに次の「新しい体験」を求める。それらに応えるべくプロデューサーは新しいゲームコンセプトと表現技術を追い続け、それらが次の技術開発の目標となっている。スプライト技術が生まれた背景、ポリゴン技術を必要とした背景等はその顕著な例である。一方、「遊技者

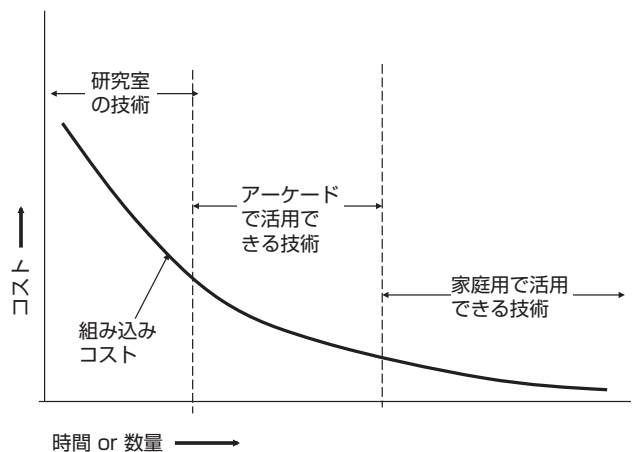


図9 技術導入のコスト

が求める新しい体験」は、外からは見えにくい潜在的なものであるため、作ってみて、試してみても初めて判ることがほとんどで、多くのゲーム機が試作され市場テストが行われる理由がここにある。

4 表示技術の年表と背景

図 10 に、以上のまとめとして、業務用ビデオゲーム表示技術の進化とその背景年表を示す。

ビデオゲーム表示技術の基本は、「CPU に負担をかけずに、ハードウェアでいかに多様な表示を実現するか」にある。そのためにはビデオメモリーの効率的・効果的な読み書きの回路設計が重要であり、CPU ビットマップ方式ではブラウン管表示の間隙を縫って CPU がビデオメモリーのアクセス権を取り合う回路設計技術に、スプライトでは CPU を介さずに高速メモリーに直接画素を書き込むロジックに、DSP ポリゴンではこれらに加え DSP 演算結果を反映したポリゴンを直接メモリーに書き込むロジックに回路技術が生きている。そして、それぞれの時代に入手し得るメモリーや TTL 等の電子素子の多くはおよそその限界速度で動く設計が必要で、わずかな見落としが後に問題となることを多くの設計技術者が経験している^[5]。

また、これら技術の進化を促した背景要因は次のように集約される。

【TTL → CPU ビットマップ】 ①ハードウェア設計能力とゲーム開発センスの両方をもつ人材が不足し、ハードとソフトの分離が必要となり、②ゲーム開発ではゲームの質を高めるためにその微修正や手直しが必須であり、これらを容易にするために CPU 導入が重要で、③動く表示物のため

には、それぞれ独立した表示用回路（主にはカウンタとの組み合わせロジック回路）が必要で、表示物の数が増えると、そのまま回路規模が大きくなり、コスト増大への対処が必要になった。

【CPU ビットマップ→スプライト】 見栄えのする画面表示のために①高速に、②多くの動き回る表示物を、③ CPU に負担をかけずに表示する手法としてハードウェアロジックがその多くを担う手法としてスプライト方式が考案された。

【スプライト→ DSP ポリゴン】 三次元的な物体を表示するために考案された。当時すでに大型計算機や専用計算機で「ポリゴン技術」が用いられていたが、これらは業務用ゲーム機器に採用できるコストをはるかに超えるもので、ゲーム機に採用するために①徹底した簡素化、②数値演算素子としての DSP の採用、③高速描画のための専用 LSI の設計を行っている。一方、当時ポリゴンに代わる手法として、先に述べた「ベクタースキャン表示」があり、米国では多くのゲームが作成されている^{[8][9]}。しかし線画が主体で表示物体が幾何学的であるこの手法は、彩色ができないこともあって次第に使われなくなった。

【DSP ポリゴン→ GPU レンダリング】 ポリゴン表示ではその頂点データ等を演算処理するが、①従前 (DSP ポリゴン) の 100 倍近い数のポリゴン表示、②光線を意識した自然なレンダリング彩色等、が要望され DSP を複数並べるだけでは演算処理が間に合わなくなった。当時 10 数個の DSP を並べる手法も検討されたが、メモリー間のデータ転送速度が不足し、自社開発ではコストと開発期間も膨大となることが明らかとなり、GPU 専門メーカーとの協業を始めた。

一方、協業により業務用ゲームメーカーは独自の表示技

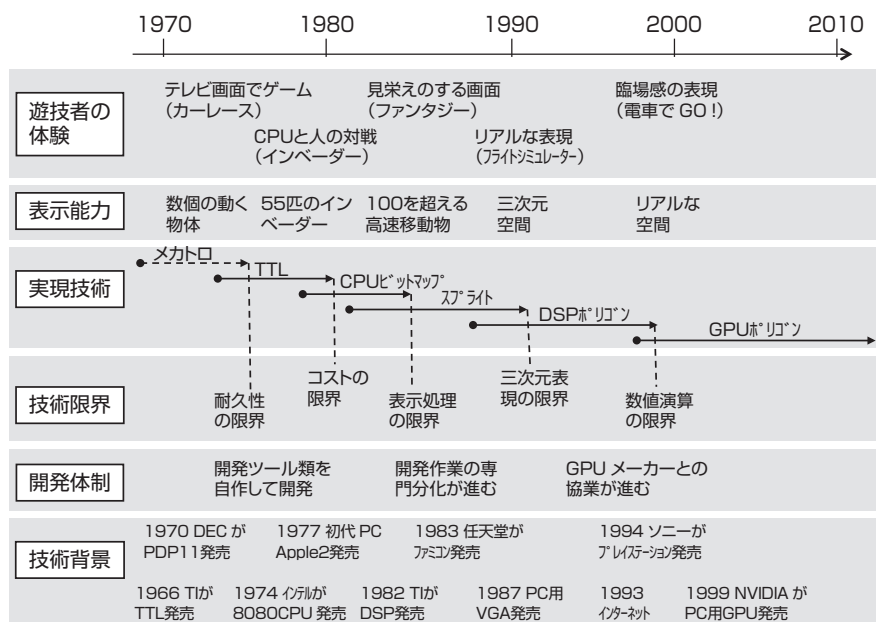


図 10 表示技術年表と背景

術を投入する機会が減り、結果として同じような表現のゲームが多数を占めることになり、今後のさらなる斬新な技術革新に注目が集まっている。

5 おわりに

（株）タイトーは、2004年から先に述べたGPUメーカーのグラフィックハードウェアを搭載した「業務用ビデオゲームハードウェア：Type-X」を外部のゲームソフト企業に提供している（図11）。高性能パソコンに似た構成で、開発環境は一般のPC環境をそのまま活用することができる。タイトーを含め20社以上のゲームメーカーがゲームソフトを作り、すでに70以上のゲームタイトルが市場に投入されている。そしてタイトー等これまでの業務用ビデオゲーム企業は、そのハードウェア性能を引き出すためのソフトライブラリ等に開発の中心が移っている。

すでに述べた様に、業務用ゲームはビジネスと密着しており、日の目を見ずに葬り去られるゲームが無数にある。一方、実績の少ない技術であっても積極的に取り入れ、他産業に比べて数年早く新技術として活用され、他の産業にも少なからず影響を与えている。

ゲームセンターが社会の片隅で煙たがられた時代等を経て、多くのエンジニアやクリエイターそしてゲームセンター運営の方々の努力により、今日では社会的認知が得られ、現在のゲームセンター来場者の半数は女性である。日本の強みとしてアニメ等と一緒に論じられるゲーム産業が今後も発展し、さらに新たなエンターテインメントが生まれることを確信している。

謝辞

メカトロゲーム、TTLビデオゲームそしてスペースインベーダーと、国内ビデオゲーム黎明期の基礎をおよそ一人で作られた西角友宏氏からは、この時代の多くを教えていただき、ここに改めて感謝いたします。また、この論文作成にあたり、産総研の赤松幹之様と持丸正明様には、査読者としてシンセシオロジーの主旨のもと繰り返し多くのご指導をいただきました。併せてお礼申し上げます。ありがとうございました。



図11 ビデオゲームハードTYPE-X（タイトー）

参考文献

- [1] 経済産業省: ゲーム産業戦略(2006).
- [2] 日本アミューズメント産業協会: アミューズメント産業界の実態調査報告書 平成22年度(2011).
- [3] 赤木真澄: それは「ポン」から始まった, アミューズメント通信社(2006).
- [4] Method for generating a plurality of moving objects on a video display screen: US Patent 4116444 Sept.26, 1978 (スプライト表示に関するUS特許広報).
- [5] MIDWAY'S Galaxian Trouble shooting logic board part2: 1980 Midway FORM 00214-8008
- [6] 図形ぬりつぶし方法とその装置: 公開特許公報 昭55-10656(1980).
- [7] NVIDIA GeForce 8800 GPU Architecture Overview, November 2006
- [8] Vector generator: US Patent 4027148 May 31, 1977 (ベクター・スキャンによる表示方法).
- [9] 三部幸治: RX62Nでよみがえる! ベクタ・スキャン・ゲームの製作, インターフェース, 38(5), 129-139, CQ出版(2012).
- [10] 標体の画像表示装置: 公開特許公報 昭59-040687(1984).
- [11] 対話式ビデオディスクシステム: 公開特許公報 昭59-500076(1984).
- [12] 三部幸治: 商品企画技術者の役割, 技術士現場の視点, 日刊工業新聞, 2007年4月4日版(2007).
- [13] 三部幸治: 携帯電話を使ったコンテンツビジネスの展望, 赤門マネジメント・レビュー, 1(8), 607-624(2002). <http://www.gbrj.jp/journal/amr/AMR1-8.html>
- [14] 三部幸治: アミューズメントに於けるデジタル処理の進化, 九州大学学術情報リポジトリ(2008). <http://jairo.nii.ac.jp/0001/00010100/en>

執筆者略歴

三部 幸治(さんべ ゆきはる)

1974年東京電機大学工学部電子工学科卒、1979年(株)タイトー入社、2000年CTO常務取締役、現在技術顧問。技術士(電気・電子)。長年業務用ゲーム機器等のシステム設計とマネジメントに従事。1992年世界で最初の通信カラオケを考案し事業化した。



査読者との議論

議論1 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)

この論文は、アーケードゲーム機を中心に画像表示技術の変遷を軸として、ゲーム進化、ソフトウェア開発体制の変化、周辺技術への波及等を俯瞰し、そこから将来のアーケード技術について展望する論文であると理解しました。技術がどのように構成されてきたか、ということ画像表示技術の中核として俯瞰し展望していくという発想は、構成学として有益な内容を含んでいると考えます。

コメント(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)

アーケード版のビデオゲームの技術の変遷を記述した論文であり、技術の進展とともに技術導入についても言及されており、技術の社会導入の一つの例として大変興味深い内容になっています。技術史的な論文になってしまわないように、この技術的変遷の中で、なぜ新しい技術に変化したのか(目標の設定)、それを実現するための技術の選択の論拠、またそれぞれを実現するために解決してきた技術的課

題は何であったのか（開発シナリオとプロセス）についての記述をしていただきたいと思います。

回答（三部 幸治）

ご指摘、ありがとうございます。修正論文にそれらを追加記載させていただきます。補足しますと

目標の設定

ビデオゲームの遊技者は、そのゲームプレイに慣れてくると、さらに次の「新しい体験」を求め、ゲームプロデューサーはそれらに応えるべく新しいゲームコンセプトと表現技術を追い続け、それらが次の目標となります。スプライト技術が生まれた背景、ポリゴン技術を必要とした背景等がその顕著な例です。一方、遊技者が求める「新しい体験」は潜在的なものであるため、作ってみて試してみ始めて判ることがほとんどで、多くのゲーム機が試作され市場テストが行われる理由がここにあります。

開発シナリオとプロセス

ビデオゲームの技術は、突き詰めると「CPUに負担をかけずに、ハードウェアでいかに多様な表示を実現するか」ということとなります。そのためにはビデオメモリの効率的・効果的な読み書きが重要で、初期のビットマップ方式ではCRTディスプレイの間隙を縫ってCPUがビデオメモリのアクセス権を取り合う回路設計技術に、スプライトではCPUを介さずに高速メモリに直接画素を書き込むロジックに、ポリゴンではこれらに加えDSP演算結果を反映したポリゴンを直接メモリに書き込むロジックに試行錯誤した回路技術が生きています。

議論2 開発技術の他製品への展開

質問（赤松 幹之）

図に書かれている技術とコストは重要なポイントですので、具体例をもって論じることができると読者に有益だと思います。すなわち、書かれている具体的な技術について、アーケードゲーム技術として導入しようとしたとき、それが研究室レベルの技術としてどこまで出来上がっていて、それをゲーム技術とするためにその技術をどのように改良していったのか、またアーケードゲーム技術として発展することで家庭用技術としてどのように使えるものになったのか等、アーケード技術としての時期に、それぞれの技術がどのように変化して、家庭用技術として使えるようになったのかを、個別の技術ごとに記載できませんでしょうか。

回答（三部 幸治）

修正論文にCPUとDSPについて簡単に記載させていただきます。補足しますと

- ・CPUがまだ高価で産業用にもあまり普及していなかった1970年代に、業務用ゲームでは率先して使い始めています。NECが技術者向けCPU学習用キットとして発売したTK80（1976年）が10万円ほどの価格でした。この時期すでに一部のアーケードビデオゲームにはCPUが搭載されていました。CPUが家庭用機器に組み込まれたのはそれから10年以上経過してからとなります。
- ・DSPは、ご存じのように1980年前半NEC等が音声圧縮等のデジタル信号処理用として各種研究や一部専門家向けに投入しています。その後米国TI社がDSPの出荷を始め、業務用ゲーム機ではフライトシミュレーターゲーム（1988年）に最新のTI製DSP（TMS320C25）を組み込んでいます。この時期の取引価格は1万円を超え、当時の半導体価格としては高価なものの一つでしたが、現在ではさまざまな機器に内蔵されています。
- ・フライトシミュレーターゲームの制作において、パイロット養成に活用されているフライトシミュレーターの技術を検討しました。しかし映像表示部分だけでも桁違いのコスト（数千万円～数億円）であり、そのままの導入はできないことを再確認しています。結果、簡素化したポリゴン表示機能（1988年）を独自に検討設計して活用しています。家庭用ゲーム機にポリゴンが採用されたのは7年後の1995

年です。

- ・コピープロテクト手法：この論文には記載しませんでした。インベーダーゲームの後、ゲーム機のコピー業者が世界中で暗躍しました（1980年代前半）。このコピー対策として、当時研究されていた「ナップサック暗号（1978年）」にヒントを得た手法を活用しています。具体的には「外部から読み取りができないプログラム内蔵型ワンチップマイコン」を米国企業と一緒に開発し、このマイコンとメインCPUの間で暗号通信を行うことで「コピー防止」を実現しています（1983年：フロントライン ほか：タイトー）。現在「USBドングル」として不正コピーを防止する仕組みと同じです。

議論3 技術の社会的な目的

質問・コメント（持丸 正明）

Synthesiology 誌の目的の一つは「社会にある変革をもたらすという目標を定めたとき、それに向かってどのように技術を選択し構成していくか、その結果がどのようになったか」ということを論文として蓄積していくことにあります。アーケードゲームの社会的目標はなんですか？例えば、「新しいユーザー体験」と「効率的な開発、機器運用」として定義してみてもどうでしょうか？この論文では、メカトロ、ビデオ、TTL、CPU、ポリゴン数値演算、GPUレンダリングというかたちで技術の変遷が展開されています。それぞれの時代において、これらの技術の投入によって実現したいと考えていた「新しいユーザー体験」と「効率的な開発、機器運用」があると思います。

すなわち、画像表示技術の変遷を記載するに際して、その時代に求められた「新しいユーザー体験」と「効率的な開発、機器運用」を、その時代の目標として掲げ、その目標に向けて、中核となる画像表示技術としてどのようなものが選択されたか（選択された理由はなんであるか）、さらに周辺技術としてCPUやメモリー、表示デバイス、ソフトウェア開発手法等がどのように変化し組み合わせられたか、という視点で「目標に向けた技術の選択と統合」のかたちで技術史を俯瞰していただくと構成学として意義のある論文になるかと思えます。

回答（三部 幸治）

- ・アーケードゲームの社会的目標は、遊技者に非日常の体験をしていただくことにあり、生活に潤いを提供することにあります。遊技者は継続して次の「非日常の体験」を求め、それらに応えるために新しいゲームコンセプトを提案し、新しい表示技術等を開発するのがゲーム企業といえます。その結果、1970年には考えられなかったような表現が可能となり、大きな産業となっています。
- ・目標に向けた技術の選択と統合について、修正追加させていただきます。特にスプライトからポリゴンに移る過程について記載させていただきます。よろしくお願いいたします。

議論4 自領域での技術開発と他領域からの技術の導入

コメント（持丸 正明）

「新しいユーザー体験」と「効率的な開発、機器運用」という社会ニーズに駆動されて、新たな画像表示技術が選択され統合されてきたと考えたとき、(1) 他の分野の技術的進展に伴って開発された技術が転用された（TTL?）、(2) アーケードゲームが牽引役となって技術が開発された（スプライト? GPU?）の2通りがあるのではないのでしょうか。構成される要素技術の萌芽が自らの領域であったとしても、その技術が他で進展した場合、自らの領域の技術にこだわることなく他の領域で進展した技術を取り込んで構成していくという枠組みが示されています。このような技術の構成の仕方が、「新しいユーザー体験」や「効率的な開発、機器運用」という目標に対してどのように効果的であったのか、まで含めて記述していただくと、構成学として意義のある論文になるかと思えます。

回答（三部 幸治）

- 修正論文に一部追加記載させていただきます。補足しますと
- ・TTLはご存じのように汎用計算機等への活用を目的として開発され

たもので、簡便にデジタル処理ができるこれらの機能はビデオゲームでは不可欠のものと当初から認識されていました。

- ・初期のポリゴン表示に使ったDSPは1970年代後半、音声圧縮等のデジタル信号処理用として投入されたもので、その数値計算能力の高さに注目したゲーム産業がいち早くポリゴンの数値計算に活用しました。
- ・GPUに関して、複雑化するポリゴン表示用に10数個のDSPを活用する案もありましたが、開発も製品もコストが見合わず、外部GPUメーカーと協業を始めました。その結果ゲーム開発環境はそのGPU企業から調達でき（自社で整備する必要がなくなり）開発コストの低減ができ、PCの進化に伴って進化したGPUを使うことで、よりリアルな立体表現が可能となっています。一方、多くの業務用ゲームメーカーがこれら同じものを採用したため、その表現が似たものになっており、今後の方向を考える上で重要な検討項目の一つともなっています。

議論5 今後のアーケード技術の展望

コメント（持丸 正明）

「次のアーケード技術」を展望するにあたり、やはり、「新しいユーザー体験」や「効率的な開発、機器運用」について、どのような目標が設定されるか、という視点で整理していただくと、論文全体の主旨が一貫して分かりやすいかと思います。

「新しいユーザー体験」については、すでに飽和したものもあるのではないのでしょうか？あるいは、特定のユーザーとともに「新しいユーザー体験」を極めてしまったために、それについてこれなくなったユーザーがでてくるといった状況があると思います。査読者からみると立体表示や半球スクリーン表示等は、さらなる画像表示の高度化としての「新しいユーザー体験」を極めていく方向性であり、「メカトロ回帰」は、高速移動や高画質表示だけではなく別の身体能力を使ったインタフェースによる「新しいユーザー体験」軸の提案に繋がっているのではないかと思います。家庭用ゲーム機でいえば、前者がSCEで後者がWiiのような位置付けです。このあたりをもう少し掘り下げて、今後の技術を展望していただけると面白いと思います。

回答（三部 幸治）

- ・ご指摘のように「新しいユーザー体験については、すでに飽和したもの」が多くあります。インベーダーゲームに見られるシューティングゲームはおそらく百を超える種類の同様なゲームが市場に出回り、このジャンルは一部を除いて飽和してしまいました。そして一部の愛好家がさらに難しいゲームを求めた結果、一般ユーザーが離れてしまったジャンルでもあります。
- ・「新しいユーザー体験」として初稿では半球スクリーンやメカトロ回帰を取り上げました。ご指摘のように、これらは画像表示の高度化とインタフェースによる新しい体験の提供ということですが、論文の軸である「ビデオゲームの進化」から少々離れてしまい、また不明瞭な

事柄もあって修正版では削除させていただきました。

議論6 開発に関わった人数の変遷

質問（赤松 幹之）

それぞれの世代での開発に関わった人数が変わってくることも興味深い点です。どう技術を扱ったためにこれだけの人数が必要となったのかが記載できませんでしょうか。

回答（三部 幸治）

開発に関わった人数については、一概に言えないこともありこの論文では省略させていただきましたが、最も増えた人員はグラフィック担当です。初期にはシンプルな絵柄を動かすことで済んでいたものが、直近では3Dモデリングやその動き（モーション）を作成する等、開発人数が増えました。プログラマーも増えていますが、開発ツール（OS環境や開発言語等）の進歩があり、グラフィックほどの増加はありません。電子回路ハードウェア人員は自社でLSIを設計していたポリゴン時代が最も多くなっており、続くレンダリングの時代ではNVIDIA社等のGPUに方針を変えることでハード人員は減少しています。

議論7 ビデオゲーム業界への参入の背景

質問（赤松 幹之）

タイトーは最初はジュークボックスの会社でしたが、ビデオゲームに着手するきっかけは何だったのでしょうか？

また、スペースインベーダーゲーム機を喫茶店に置くというのは、新しいビジネスモデルだったと思いますが、その経緯はどういったものだったか書いていただくことはできませんでしょうか。

回答（三部 幸治）

ジュークボックスの件：ご指摘のように、タイトーは1960年代ジュークボックスを輸入してレンタルするビジネスをしていました。当時このジュークボックスの横に同じく輸入したピンボール等が置いてあり、ここに独自開発したメカトロゲームを置くことに始まり、その後のビデオゲームに繋がりました。

喫茶店に置かれた経緯：1970年頃の喫茶店のテーブルの上には、ピーナツバンダーと云われる「硬貨を投入して、少量のピーナツを販売する小型の自動販売機」が置いてありました。その後ピーナツ販売が下火になるに従い、同じ喫茶店のその場でお客さまに硬貨を使っただくサービスとして、ゲーム提供を思いついたそうです。実は、インベーダーが発売される以前に喫茶店テーブル型テレビゲームは市場投入されており、インベーダーで爆発的に広がった結果、インベーダーと喫茶店が印象として強く結びついたものと思われます。

技術もビジネスも少しずつ形を変えて成長するものであることをあらためて感じます。

大陸棚画定調査への挑戦

— 国の権益領域拡大と地球科学の貢献 —

西村 昭^{1*}、湯浅 真人¹、岸本 清行¹、飯笹 幸吉²

大陸棚画定調査は政府一体として取り組まれた事業である。その目的は国連海洋法条約に定められた「大陸棚」について、科学的根拠を含む延伸大陸棚の限界に関する情報の取りまとめを行い、国連へ提出することであった。産総研の海洋地質に関わる研究者は、海域調査の実施、採取岩石試料の分析・解析・解釈、ならびに国連への申請書作成のための作業部会への参加を通じて、海洋地質学の専門家集団としての総合力を発揮することにより大陸棚画定調査に貢献した。関係省庁各機関が協力してとりまとめられた日本の延伸大陸棚に関する情報は、2008年11月12日、日本政府が国連の「大陸棚の限界に関する委員会」に申請書として提出した。そして、同委員会より、申請の審査の結果としての「勧告」を2012年4月26日に日本政府は受領した。本報告では、「大陸棚」および日本の「大陸棚」に関する簡単な解説とともに、科学的な情報が基礎となってわが国の海域における権益の及ぶ範囲の増大に貢献できるという稀有な機会に、産総研の研究者が組織の一員として、また研究者として参加したことの経緯とその成果を示し、さらに、このような事業を実施するうえでの問題点について議論した。

キーワード: 大陸棚、国連海洋法条約、海洋地質学、海底地形、大陸棚画定調査

A scientific challenge to the delineation of Japan's continental shelf

– Contribution to validating the Japan's rights over marine areas based on earth science –

Akira NISHIMURA^{1*}, Makoto YUASA¹, Kiyoyuki KISIMOTO¹ and Kokichi IIZASA²

The national project of the delineation of the extended continental shelf was conducted by ministries of the government of Japan as one. The intention of the project was to summarize the information containing scientific basis on the limits of the extended continental shelf and to submit the application to the United Nations. The researchers of AIST in the field of marine geology carried out the marine survey, analyzed the collected rock samples and interpreted the results, and attended the working group for the preparation of the submission. In this way, AIST contributed to the delineation of Japan's continental shelf by utilizing all the required resources as a professional marine geologist group. The information on Japan's extended continental shelf made up through the cooperation of concerned government ministries and agencies became the basis of the application which was finalized and submitted to the "Commission on the Limits of the Continental Shelf" of the United Nations by the government of Japan on November 12, 2008. And the government of Japan has received "the recommendation" as the result of the review by the commission on April 26, 2012. In this manuscript, the authors first explain the "continental shelf" and the "continental shelf of Japan". Then, they describe the background and the results of the participation of AIST researchers in the working group, which was really a rare opportunity in the sense that the utilization of scientific information contributed to the expansion of the legal rights over marine areas of Japan. Finally, they discuss the issues encountered in the operation of such a project.

Keywords: Continental shelf, United Nations Convention of the Law of the Sea, marine geology, submarine topography, Japan's Program for Delineation of the Outer Limits of Continental Shelf

1 はじめに

大陸棚画定調査は、「海洋に関する国際連合条約」(United Nations Convention of the Law of the Sea^[1]; 以下、海洋法条約と呼ぶ)に定められた「海底及びその下の天然資源開発に沿岸国が権利を有する大陸棚」を200海里を超えて確保するため、日本政府が一体となって行った海域調査とそれらの結果を国連への申請文書としてまとめていく一連の事業を呼ぶ。国連への申請の提出期限は、

申請する沿岸国の海洋法条約批准時期等に関連して定められており、日本の提出期限は多くの国と同様に、2009年5月12日であった。それまでに申請書を提出することが、大陸棚画定調査の第一の関門であった。もちろん、その申請が審査に耐え、法的に定められた制約の中で最大の範囲を日本の大陸棚として確保することが最終的な目標であった。作業の結果として、日本政府は2008年11月12日に日本の延伸大陸棚の申請を提出し、その申請が審査さ

1 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7、2 東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒277-8561 柏市柏の葉 5-1-5

1. Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan * E-mail: akira-nishimura@aist.go.jp, 2. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa 277-8561, Japan

Original manuscript received October 18, 2012, Revisions received December 5, 2012, Accepted December 5, 2012

れた結果として2012年4月26日に勧告を受領した。

本報告においては、最初に「大陸棚とはどのようなものか」「大陸棚画定調査とは何をしたのか」「結果はどのようなものか」ということを示す。そして、産業技術総合研究所（以下、産総研）の研究者がその中でどのような役割を果たしたかを中心に、日本の大陸棚画定調査の実施と国連への科学的根拠に基づいた申請書作成に貢献するという目的にいかに取り組み、目標に近づこうとしたかを記述した。さらに、その過程での大陸棚の延伸申請に関する問題点、作業を進める際の困難性とそれの克服のプロセスも示した。

2 大陸棚と大陸棚画定調査とは何か

大陸棚の画定は、国の海底資源の開発権の範囲拡大ということであり、端的に表現すれば国の領域拡大と同義語である。しかし、海洋は一方で人類共通の財産として管理・利用・保護されるものであり、単なる沿岸国の財産として勝手な利用は許されるべきものではない。大陸棚の画定は、海洋法条約により法的に位置づけられた国の管轄権の範囲を決定することにより、海洋の開発の権利の秩序ある行使・管理がなされる体制を作ることである。それを武力等による国家間の争いでなく、科学的根拠に基づいて行うということで、科学に携わる者が貢献できる稀有な機会となっている。

海洋法条約に定められた大陸棚を最大限に確保するという日本の政策に、科学的根拠を整備し協力することは、科学が国際的な枠組の中で掲げた政策に役立つことを社会に示すこととなる。また、日本の申請において、日本の高い技術力と科学を国際的に示す機会でもある。そして、大陸棚の画定のために行われた調査・研究は、日本の大陸棚の候補域やその隣接域の地球科学的データを飛躍的に増大させ、その理解を大きく進める学術的な貢献の機会ともなった。大陸棚の範囲の拡大は、本来の大陸棚の定義のとおり、天然資源の開発対象域の拡大をもたらすことにより、将来の社会・国民へ還元されるものである。

本章では、この報告でいう「大陸棚」や「大陸棚画定」とはどのようなものかを記述する。

2.1 海洋法条約における大陸棚の定義

大陸棚は、沿岸国が海域に持つ権益の範囲を示す海洋法条約に定義された用語であり、一般にもよく知られた「領海」や「排他的経済水域」等と並ぶ言葉である。「海域における海底及びその下の資源開発に権益を有する範囲」を呼ぶ用語であり、「排他的海底・海底下資源開発域」とでも呼べば分かり易いかもしれない。一方、大陸棚という言葉は、「大陸や島嶼の周りにある平坦、緩やかな傾斜を持つ一般に200 m以浅の地形」として、地学（地形学・地質

学）の分野や一般社会で使用される用語であり、その用語の概念を一般の人が持っているために、逆に、海洋法条約における「大陸棚」が理解しにくいものとなっている。

海洋法条約の大陸棚の概念は歴史的な議論により構築されてきた。第2次世界大戦終了直後の1945年9月に、米国大統領トルーマンが「合衆国の沿岸に接続する大陸棚の地下および海底の天然資源を合衆国に属するもの」として、米国の大陸棚の資源の権利を主張した。それに引き続き、他の沿岸国も海底の資源開発の権利を主張し始めた。1958年の第1次海洋法会議で「大陸棚に関する条約」が採択され、大陸棚を「200 mまたは天然資源の開発可能な水深まで」とし、「海底とその地下の天然資源の探査・開発についての主権的権利を持つ」とした^[2]。その当時の関心を持たれていた資源は海底油田で、それらの開発可能な水深もおよそ地形的な大陸棚に限られていた。その後、技術の進歩により「開発可能な水深」は地形的な大陸棚を越えて深くなり、海底の天然資源も深海底のマンガン団塊まで拡大していった。そして、1982年に海域のすべての問題についての体制を定めた海洋法条約において、「海底と海底下の天然資源の探査・開発についての主権的権利を持つ」範囲を示す用語として「大陸棚」が継続使用されることとなって今日に至っている。

先にも述べたように、大陸棚画定調査で用いられる「大陸棚」は地学的な意味での大陸棚とは異なる概念として、海洋法条約第76条に規定されている。その大陸棚の定義は、「沿岸国の大陸棚とは、当該沿岸国の領海を越える海面下の区域の海底及びその下であって、その領土の自然延長をたどって大陸棚縁辺部の外縁に至るまでのもの又は、大陸棚縁辺部の外縁が領海の幅を測定するための基線から200海里の距離まで延びていない場合には、当該沿岸国の領海を越える海面下の区域の海底及びその下であって当該基線から200海里の距離までのものをいう。」（第1項）となっている。200海里を超える大陸棚は、次に述べる海洋法条約76条の第4項から第6項に定められた方法により決定し（第2項）、その限界線は経緯度を定めた点を結ぶ60海里を超えない直線で引くこと（第7項）になっている。

大陸棚の限界は、限界を伸ばすことが可能な以下の二つのいずれかにより設定する^[3]（図1）。

- ・ある点の堆積岩の厚さが大陸斜面脚部からの距離の1%以上の点
 - ・大陸斜面脚部から60海里を超えない点
- （大陸斜面の脚部とは、大陸斜面の基部における勾配の最大変化点である）

上記の規定に従い引いた限界では、大陸棚の延伸が無限に広がる可能性があるため、次のいずれかの制限を超え

てはならないとされている。

- ・領海基線から350海里を超えてはならない
- ・2500 m等深線から100海里を超えてはならない（ただし、大陸縁辺部の自然の構成要素でない海底海嶺ではこれは適用されず350海里を超えることはできない）

これらの規定により、大陸棚の外側限界は決定される。

大陸棚を規定する「領土の自然延長をたどって大陸縁辺部の外縁」とその限界を規定する「自然の構成要素であるか」を決定するためにも、地形・地質等の地球科学的なデータが根拠となる。

領海は領海基線から12海里、排他的経済水域は同じく200海里というように、領土に関連して基準として定められた領海基線からの位置関係（距離）のみで決まるものであるのに対し、200海里を超えて設定される大陸棚（延伸大陸棚；Extended Continental Shelf）は、地形・地質条件によって決まるものであること、さらに沿岸国がその根拠と範囲を記述した申請書を提出し、その審査を経て出された勧告により決まるものであるという特徴がある。大陸棚と認められれば200海里の排他的経済水域（海底の上部水域並びに海底及びその下の天然資源の探査、開発、保存及び管理のための主権的権利を有する；海洋法条約第56条）の外側に、「沿岸国は、海底及び海底を探索し及び天然資源の開発等の主権的権利を持つ」（海洋法条約第77条）ことが可能になる。

2.2 大陸棚画定のプロセス

大陸棚と認められるためには、沿岸国はその根拠を含めた大陸棚の限界情報をまとめて申請しなければならない

い。1999年5月13日に「大陸棚の限界に関する委員会（CLCS）」（以下、限界委員会と呼ぶ）は、申請の審査のための解説として、「大陸棚の限界に関する委員会の科学的・技術的ガイドライン」（Scientific and Technical Guidelines of the Commission on the Limits of the Continental Shelf；以下、ガイドライン）^[4]を作成した。ガイドラインは、限界委員会が申請に対し勧告を出すための申請検討の際の許容される科学的技術的証拠の範囲を明確化することを目的として作成されたが、申請する沿岸国にとっては申請書作成の指針として位置付けられる。さらに、「条約に含まれている科学的及び技術的ならびに法的な用語の解釈を明確化することも目的とする」として、重要な概念や用語について、いくつか例をあげて説明している。それでもなお、いくつかの重要な問題点について、海洋法条約における解釈は確定せず、ガイドライン策定後も何度も議論や解釈の表明が行われてきた^[5]。さらに、科学や技術の進展により、ガイドライン作成時に想定されていなかったデータや根拠に基づく議論も必要になってきている。ガイドラインには、ガイドラインがすべてを述べているものではなく、ケースバイケースで検討されるべき問題があることも明記されており、申請においては申請国が対象を解析して明確に記述することが重要であると考えられる。

申請期限は海洋法条約批准後10年間と定められているが、ガイドラインの制定以前に条約を批准していた国は、ガイドラインの示された時点から10年間が申請の期限となった。日本はガイドラインの制定以前の1996年に海洋法条約を批准したので、他の多数の国とともに2009年5

大陸棚の定義

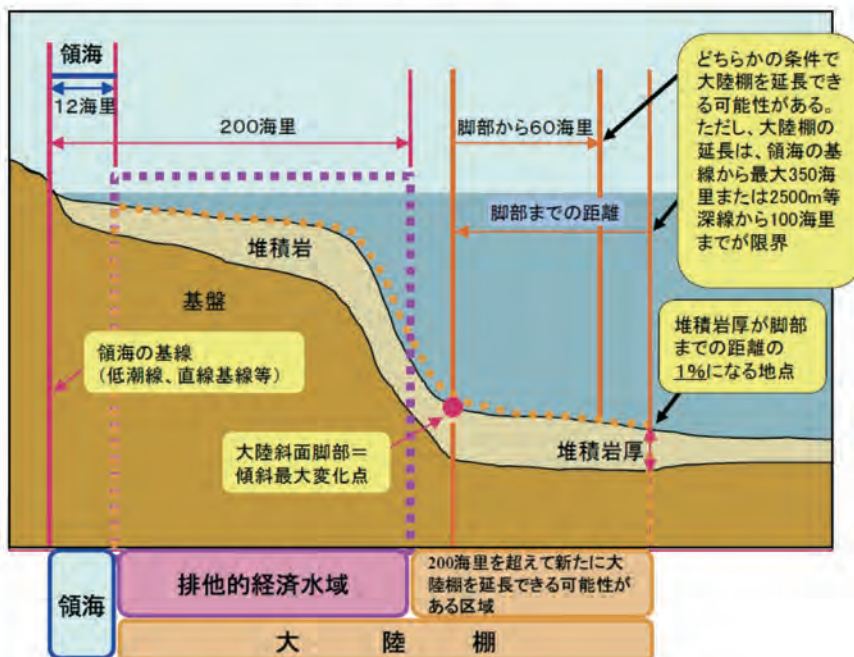


図1 国連海洋法条約の大陸棚の定義
 地学上の定義とは異なり、法的に規定されている大陸棚。
 出典：海上保安庁からの記者発表（2008.10.31）^[9]

月12日が申請提出期限となった。

3 日本の大陸棚画定調査の枠組み

日本では、大陸棚の規程を含む海洋法条約が採択された1982年の後、1983年より海上保安庁水路部（現：海洋情報部）が大陸棚調査を開始していた⁶⁾。国連への延伸大陸棚の申請を初めて行った2001年提出のロシアの申請に対し、大陸棚申請の審査を行った限界委員会による2002年6月の勧告は、その内容や科学的根拠に関して厳しいものであった。そこで、日本政府として大陸棚の申請の科学的根拠を確固たるものとし、大陸棚を確保するための方策が推進された。2003年には、地球科学・法律の専門家からなる大陸棚調査評価・助言会議が発足し、また、全体調整を行う大陸棚調査対策室が内閣官房の下に置かれた。そして、大陸棚調査の方針が作成され、日本政府の関係省庁各機関が一体となった調査が開始されることとなった。

産総研は、地球科学の総合的な調査研究を実施する研究所として、大陸棚画定調査に参加し、本事業への係わりを持つこととなった。産総研の参加は、本検討の対象海域で進めてきた産総研研究者の研究ポテンシャルの高さと長年にわたり培われた海洋調査技術や海域の岩石の年代・化学成分の最高レベルの分析技術、さらにそれらに基づいて大陸棚画定のとりまとめにおける研究者の総合的な取り組みへの期待によるものである。

大陸棚画定調査は、調査から申請書を作成提出するまでの一連の事業であり、日本での体制も調査実施から、とりまとめ作業を全体包括するものである。以下に、①全体

調整、②調査実施、③とりまとめに分けて記述する（図2）。

①全体調整

大陸棚画定調査の体制は、内閣総理大臣が本部長である総合海洋政策本部を頂点とする。その下に、調査や最終の申請書案の作成に責任を持つ関係各省庁の連絡・調整・協議を行うワーキンググループと国連提出情報案作成委員会等関係3委員会があり、それらの総合調整は、総合海洋政策本部事務局（2007年までは大陸棚調査対策室）が行う体制が作られた。さらに、専門家委員が構成する大陸棚評価・助言会議が専門・学術的な面から、これら委員会等に提言することとなっていた。

大陸棚画定調査は、政府一体となった調査として組織されたものではあったが、行政組織としては、その事務局・総合調整を行う大陸棚調査対策室（現在の総合海洋政策本部事務局）が新たに設置されたのみであった。

②調査実施

日本の大陸棚画定のための科学的根拠を確固たるものとして確立するために、日本周辺海域の複雑な地形と地質状況の把握を考慮して、三つの調査（精密海底地形調査、地殻構造探査、基盤岩採取）を実施することが設定された。調査対象域は大きくは、海上保安庁海洋情報部のそれまでの調査で絞り込まれており、三つの調査での具体的な調査測線や試料採取候補点の大枠は、その後、調査実施機関やとりまとめに参加する予定機関の研究者が非公式のワーキンググループにおいて議論し、その結果が、大陸棚調査評価・助言会議での意見を受けて、調査方針として決定された。

精密海底地形調査（担当機関：海上保安庁） 地形の連

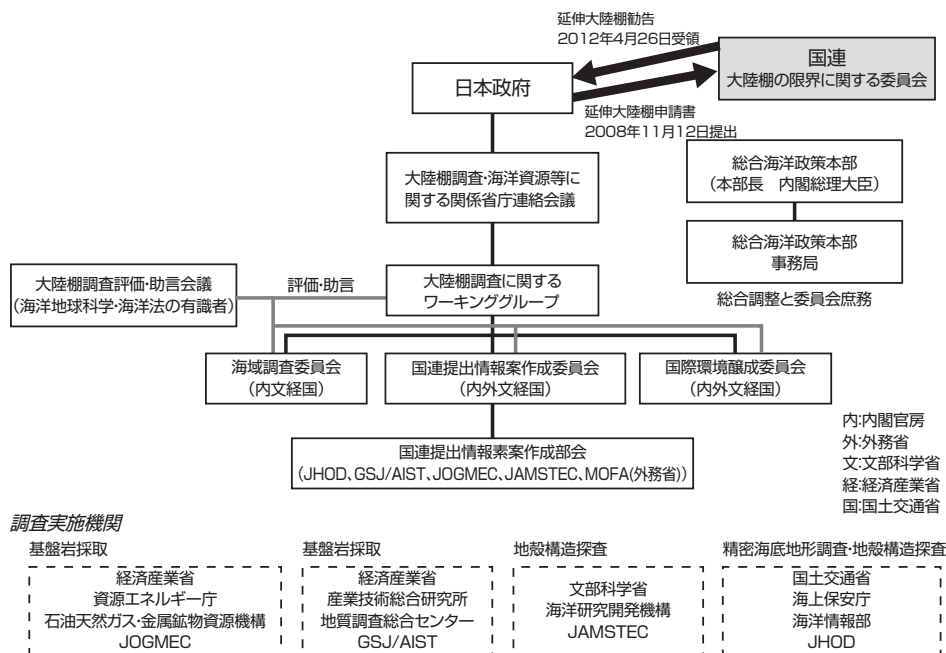


図2 大陸棚画定調査に関する国としての取り組み体制

続性、および大陸棚の外縁を決定する地形・測深データの把握を行う。調査対象海域をマルチナロービーム測深で全域カバーする。

地殻構造探査（担当機関：海上保安庁、および海洋研究開発機構） 地質の連続性を地殻構造から検討する。地殻構造を浅部から深部まで決定するために、マルチチャンネル反射法音波探査、および海底地震計による屈折法地震探査を同じ測線で行う。

基盤岩採取（担当機関：石油天然ガス・金属鉱物資源機構および産総研） 地質の連続性を地質体の構成岩石から検討する。地質体の現地性試料採取のために、可能な限り海底設置型ボーリングマシン（BMS）を用いた掘削を行う。地形や水深の条件によってはドレッジ（浚渫）で試料採取を行う。年代測定や微量元素・同位体分析やその解析・解釈は産総研が全域の試料について担当する。

複数機関が担当した地殻構造探査と基盤岩採取では、担当機関で対象海域を地域分けして実施する。

③とりまとめ

申請文書の作成に携わる作業部会として、関係各省庁の行政担当責任者の構成する国連提出情報案作成委員会の下に、国連提出情報案作成部会（以下、素案作成部会）が設置された。関係調査実施機関を中心としたメンバーにより構成され、外務省、海上保安庁、海洋研究開発機構、石油天然ガス・金属鉱物資源機構、および産総研が参加した。素案作成部会は、取りまとめと申請書案の作成を行うことが最終目標であったが、同時に進行している海域調査結果の解析の他、海域調査の調整検討の役割も担っていた。素案作成部会には調査実施機関からメンバーが参加しており、素案作成部会は調査の進行状況の把握は良くできた。

素案作成部会では、統一的な方針の議論、現状の把握、相互の作業の問題の解決やスケジュールの決定や確認等を行う全体会合、専門分野や個別海域の検討や課題解決のための少人数での作業会合が適宜開催された。多数の機関からの部会員が部会を構成しており、作業は、各担当者がその所属機関で行ったので、顔を合わせ、議論や調整を行う会合の意義は大きかった。素案作成部会の全体会合の開催は50回以上の多数にのぼり、作業会合もそれ以上の開催であった。

産総研からは、海洋地質・地球物理（地質構造・岩石・層序・資源・重力・磁力）の専門家9名が参加した。申請文書案作成に至るには、大陸棚が何であるかの学習からスタートしたが、産総研の部会メンバーは、それぞれの技術分野・学問分野の専門性に基づき、全海域の検討を行うとともに、データの解析と統合による大陸棚の限界決定の

ための個別海域におけるシナリオの検討を行った。申請文書のうち、調査データの取得、分析・解析に用いた技術に関すること、そして延伸大陸棚に係る根拠を記述した海域文書についての執筆を担当した。

4 産総研の大陸棚画定調査の実施と成果

総合的な地質調査研究を行う日本で最大の地球科学分野の研究機関である産総研地質分野は、大陸棚画定調査に参加するにあたり、産総研内に大陸棚プロジェクトチームを発足させ、「海域調査」、「岩石の分析・解析・解釈」、「申請書作成のとりまとめ」を担い、実施した。産総研はこれまで日本周辺海域の全域で海洋地質調査を実施し、海域の地球科学データおよび海域の地質調査のノウハウを蓄積してきた。また、産総研の地質分野は、ある地域の地球科学的全体像を地質・地球物理データから捉え、地質図に統合化する視点を持っていること、大陸棚画定関連海域の調査を実施してきたさまざまな専門研究者が多数いることから、総合的に貢献できる基盤があった。さらに、海域の岩石の年代測定^[7]や微量元素の分析・解析・解釈において、技術と研究のポテンシャルも極めて高く、海域の岩石の年代測定においては、海水との接触による風化・変質の評価を行い正確な生成年代を出すという国際的にも最高レベルの技術を有している。

産総研が大陸棚画定調査として実施した中で、「海域調査」と「岩石の分析・解析・解釈」について、4.2および4.3節で記述した。「とりまとめ」については、次章の申請書類作成に関連したところで、産総研の研究者が素案作成部会の活動として行った作業内容も含めて記述している。本来は「とりまとめ」も含め、これら三つの項目は独立したものではなく密接に関連しており、産総研として、また研究者がこれらの複数の項目を担当したことで、それぞれの項目をより深化できたことは特筆すべきことである。

4.1 産総研の海洋地質調査

産総研地質分野の前身である地質調査所は、1882年に設立されて以来、130年の歴史を持つ研究機関である。日本の陸域の地質については、その設立時から資源開発を中心として着実に調査研究を進め、日本の地質の解明と各種地質図の発行等を進めてきた。海域の地質に関しては、マンガン団塊等海域資源開発への期待が持たれた社会的背景と、沿岸海域や日本の湖沼での地層形成環境の基礎研究等の蓄積を基盤として、1974年に海洋地質部が設立され、本格的な海洋地質調査研究が開始された。また、設立年に就航した地質調査船白嶺丸を使用して、日本周辺海域の100万分の1海洋地質図の発行に象徴される海域地質の概要の把握、日本主要4島の周辺海域の地質・

地質構造・表層堆積物分布の詳細解明を行ってきた。今回の大陸棚画定調査に係わる海域については、「小笠原弧からマリアナ弧北部海域」の100万分の1地質図作成のための調査、「フィリピン海北西部」でのマンガン団塊等の資源と地質構造の調査、「伊豆・小笠原海域」を熱水鉱床の調査技術開発の試験調査海域として行った詳細調査を実施してきた。さらに、その蓄積のもとで、国際深海掘削計画や米国の大学等のこれら海域の調査への参加、東京大学海洋研究所の調査船共同利用研究や海洋科学技術センター（現：海洋研究開発機構）の公募研究への参加により研究を進めてきた。以上のような調査研究をとおして、大陸棚画定調査関連海域のうち、特に伊豆・小笠原弧とその周辺海域については、研究者のポテンシャルは極めて高いものである。

4.2 海域調査および基盤岩の採取

「基盤岩採取」は、海底岩石を可能な限り現場でのボーリング等により採取し、それぞれの地点の岩石の形成場や年代を明らかにして、海域の地形・地質構造の形成過程を明らかにするとともに、地質学的な連続性の検討を行うものである。政府の各省庁分担の中では経済産業省の担当となっており、実施機関は石油天然ガス・金属鉱物資源機構と産総研である。第2白嶺丸とその搭載機器である海底設置型ボーリングマシン(BMS)を強力なツールとして、二百数十点の試料採取候補地点で基盤岩を採取した。

産総研は、東日本沖の海域を担当し、2005年と2007年の2回にわたり、各30日の調査航海を実施した。この海域は他の大陸棚延伸可能性域に比べると詳細地形データも十分でなく、地形調査による試料採取候補点の選定も含めての調査となった。

実際の調査では、BMSまたはドレッジによる海底岩石の採取を試みた。調査海域の海流が強いことや水深が深くBMSでの試料採取ができない地点もあり、ドレッジの多用となった。その際には、素案作成部会での議論が進行する中での調査であり、大陸棚延伸の根拠として地形と

関連して必要な地質の連続性に直接的に結び付く試料採取地点の選定を行った。また、産総研がこれまでの地質調査をとおして培ってきたドレッジ試料と地形や音波探査記録との対応を関連付ける狭いポイントでの岩石試料採取を行う操船技術と、採取岩石が基盤を構成しているか否かの評価に留意して実施された。

八丈島沖の伊豆・小笠原海溝には、茂木海山と呼ばれる白亜紀に形成された海山が存在している。海溝の最深部の軸は茂木海山により連続せず、同海山の西側の斜面は伊豆・小笠原弧の大陸斜面と一体になっている。この海山の山体は、太平洋側の海底の沈み込みに伴う正断層による大きな変位構造で変形している。大陸棚画定調査として、この海山の山体の範囲を採取試料により決定することに成功した(図3)。

また、2005年の調査により行った地形調査等を基に、この調査海域の名称のなかった海山について名称を付けることの提案を行い、地形命名委員会において、堀田(ほった)海山・一明(かずあき)海山・任弘(たかひろ)海山の三つの新海山名が決定された^[8]。

4.3 基盤岩採取の試料の分析・解析・解釈

基盤岩採取の最大の意義は、海底を形成する地質の連続性および地質構造発達史上における個々の地質体(基盤岩試料)の密接な関連性の証明に資するという点にある。それは、地形の連続性の議論を支える地質学的な連続性の証明であり、また、連続する高まりの地形については、それが「海底海嶺」なのか「海底の高まり」であるのかの識別根拠となるからである。この識別は、二つの制限線の適用に係わるため、延伸大陸棚の広さに直接関係してくることとなる。

産総研では、伊豆-小笠原-マリアナ海域を中心にした海域で、大陸棚画定調査以前より、さまざまな機会に地質・地質構造の調査や岩石学的な研究がなされてきており、この海域のテクトニクス、およびマグマの起源・成因の歴史の変遷について議論してきている^[9]。それらの蓄積の上に、

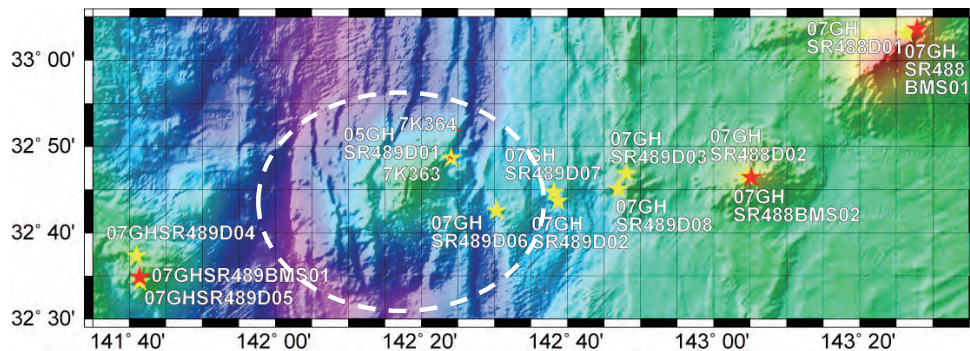


図3 東日本沖海域での基盤岩採取(石塚、原図)
八丈島沖の茂木海山(白破線で囲む)周辺での試料採取点(赤星:ボーリング、黄星:ドレッジ)

基盤岩採取で採取された岩石試料の微量元素・年代測定の高高度な技術を駆使して、極めて系統的に全域をカバーする「基盤岩データセット」を整備した。精密な年代とその地球化学的特性の把握は、この海域の地質体の形成のメカニズムとその時間的変遷について極めて多数の新たな事実を提起した。それらは、国連提出の申請文書に記述された他、科学論文として公表され、さらに今後の公表に向けて解析が進められている。

一例として、九州-パラオ海嶺の岩石試料の分析・解析による地質学的な連続性の証明がある。この海嶺は、その名のとおりに九州からパラオ諸島に達する海底の高まりの連続である。ここは全体として狭い帯状の高まりと認定でき、その上に個々の大小の海山が成長している。大陸棚画定調査が始まるまで、この海嶺の基盤をなす火山岩の年代と成因を示す化学組成のデータセットはほとんどなかった。海嶺を構成する海山から採取された基盤岩についての今回の主・微量成分の化学分析結果に、微量元素のスパイダーダイアグラムパターンや同位体組成によるマグマ起源・成因の決定法を適用し、これらがすべて島弧性の火山岩からなるという地質学的同一性を示すとともに、測定された火山岩の放射年代が、四国-パレスベラ海盆拡大直前

の2500～2900万年前に集中していることが明らかになった^[10](図4)。島弧の火山岩の性質と形成時期の同時性は、九州-パラオ海嶺が四国-パレスベラ海盆形成前の古伊豆-小笠原-マリアナ弧の一部を構成していた火山弧で、地形的にも地質学的にも連続した海底の高まりであることを明確に示した。

海域の火成岩を中心とした基盤岩のデータのみでなく、この海域における石油天然ガス・金属鉱物資源機構の基盤岩採取の調査により取得された海洋地質・地球物理データについても産総研で分析・解析を進め論文として公表されている^[例として、11,12]。

5 信頼性の高い申請書の作成と申請

申請文書案を作成するための素案作成部会は、当然のことながら大陸棚が何であり、大陸棚申請の提出書類に盛り込むべき内容について、何が必要であり、どのように取り組んでいくかを検討するところから始まった。そして、最終的には、日本の大陸棚関係海域の地質学的・地形学的特性の検討から、申請書案を作成した。ここでは、その作成の過程も含め、申請書の信頼性・説得性を高めるための課題やその克服への取り組みを記述する。

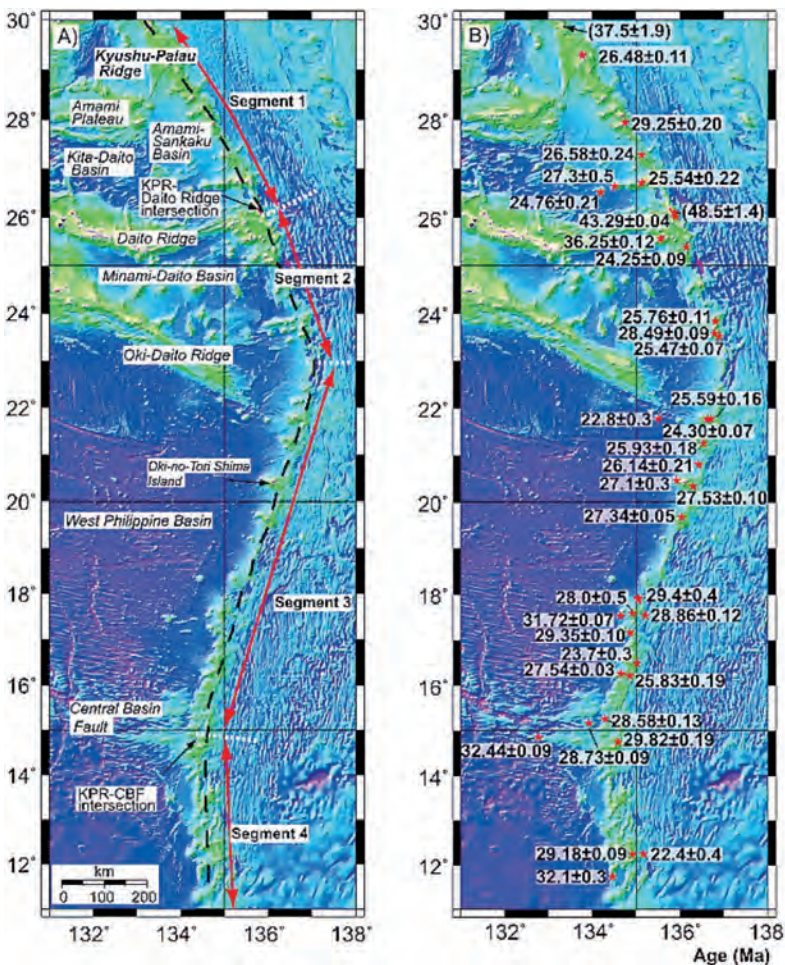


図4 九州-パラオ海嶺の火山活動年代
A) 地形名, B) 火山岩の⁴⁰Ar/³⁹Ar年代で数字はMa(百万年前)を示す。
出典: Geochem. Geophys. Geosyst., 12, Q05005, Fig. 2.^[10]

5.1 法的記述の理解

大陸棚の申請をするにあたり、その根拠となるのは、「海洋法条約」「ガイドライン」「大陸棚限界委員会（CLCS）の各文書」等である。日本語は国連での公用語ではない。海洋法条約に関しては、その日本語訳が出版されている^[13]。しかし、現実に海洋法条約76条を適用して、申請文書を考えるとき、日本語文章を基本にするのではなく、元の条文により考える必要がある。一方、ガイドラインについては、日本語訳として公認のものはない。申請書を作成する作業や申請文書の議論のため、また、検討結果をまとめて国内で説明する際には、ガイドラインの用語・文章について共通の認識を持つておく必要がある。素案作成部会では、海洋法条約・ガイドライン・手続き規則等について、議論や対訳を作る作業を行った。科学的用語を除くと、外務省やその関係部署の経験者が法律的な厳密さや慣例用法等の適用等を主導して、対訳を完成した。知識や経験を異にするものが、議論や取りまとめを共同にするための基礎として、必要で重要な一つのプロセスであったと思われる。

5.2 海洋法条約およびガイドラインにおける用語の問題

海洋法条約とそれに従い限界委員会が審査のために定めたガイドラインには、科学的用語が使用されている。科学的というのは、最初に「大陸棚」という用語が、地形・地質学や一般社会の通念と異なる法的意味を持つ用語であるといったのと同じように、科学の世界でも使用されるが、そのとおりの意味では使用されていないこともあり、十分吟味の必要な用語であるということである。これらについては、これまでも大陸棚の限界を決定するためにどのように区分あるいは定義されるべきかが、議論されてきた。素案作成部会では、それらの歴史的な議論を含めて理解し、日本への適用での注意点を検討した。海洋法条約に出てくるそれらの用語は下記のものがある。

- ・大陸縁辺部（continental margin）
- ・陸塊（land mass）
- ・棚（continental shelf）
- ・斜面（continental slope）
- ・コンチネンタル・ライズ（continental rise）
- ・大洋底（deep ocean floor）
- ・海洋海嶺（oceanic ridge）
- ・海底海嶺（submarine ridge）
- ・海底の高まり（submarine elevation）
- ・海台（plateau）
- ・海膨（rise）
- ・キャップ（cap）
- ・堆（bank）

- ・海脚（spur）

また、下記のフレーズは、延伸大陸棚の決定の基本となる法的意味を持つ海洋法条約独特の概念で、また、その適用には科学的な議論と証拠を必要とするものと考えられた。

- ・領土の自然延長（natural prolongation of the land territory）
- ・大陸縁辺部の自然の構成要素（natural components of the continental margin）

最終的には、用語の適用は可能な限りガイドラインに記述される一般的な概念を尊重し、日本の各海域の延伸大陸棚の特性を検討して適用し、日本の申請の中での用語と概念の使用に関する全体での矛盾がないように統一した。

5.3 申請文書の内容・形式への対応方針

申請文書の作成を他の国の申請や勧告内容を参考にして作業を進めたかったが、素案作成部会の作業開始当時には申請や勧告の詳細な内容は非公開であった。先に申請した各国の情報収集に努め、コンテンツの概要は知ることができたが、詳細は不明であった。2008年の秋からはそれまでの限界委員会での議論と勧告の内容も公開されるようになり、審査過程での委員会と申請国の間でのやり取りや勧告についての具体的なことを知ることができるようになっている^[14]。しかし、日本の申請の作成段階では公開情報として、限界委員会での議論等は知ることができなかった。

大陸棚延伸に係る国連への限界情報を申請書としてまとめるにあたり、その実際の文書をどのような構成で作成するのかについては、記述すべき内容がガイドラインに書かれている。文書の形式や提出部数については手続き規則に示されており、概要、主文書、科学的および技術的支持データの三つの部分からなる。その内、概要のみが「Executive Summary」として申請文書提出後、国連の限界委員会のHPに公開される。先に申請されたその概要の内容を解釈することで、大陸棚決定の考え方や申請の根拠についての解析も行って参考にした。申請書に書き込むべき大陸棚の限界情報とは、申請国による海洋法条約の条文の解釈、対象海域の地形地質の概要を述べ、最も重要な情報は領土から大陸縁辺部への地形および地質に基づいた連続性の根拠である。具体的には、大陸斜面の基部の情報とそれに基づいて決定される斜面脚部の位置、条約に則して描かれる大陸棚の範囲をガイドラインに従い記述することであるとの理解で作業を行った。

5.4 説得力のある表現の工夫

日本の大陸棚の申請書を作り上げる作業では、先にも述べたように大陸棚を規定する海洋法条約の条文の解釈から始め、日本の検討対象海域の地形地質の特性から、海洋法条約を適用して最大の大陸棚を示すことに中心が置かれ

ていた。そのために、最終結論である大陸斜面脚部の決定とそこに至る領土からの連続性の解釈や記述に検討を集中した。しかし、最終段階でのまとめの記述や提出後の説明においては、全域および各対象海域の地形・地質の形成の時間的変遷の理解を通して、地形・地質の連続性を実証的に説明することへと重点が変化した。そこで、基本として、現在の地形・地質がどのようになっており、それはどのようにして形成されてきたかという、いわゆる歴史のプロセスをわかりやすく説明することとした。そのために、各海域でのバックグラウンドとしての地形・地質の記述が重要であることを意識して、またそれらを図で示すことで、簡便に、かつ総合的に理解されるような工夫がなされた。

地形については、地形がもともと「形」であるため、言葉を尽くす前に図で示すことが理解への必須条件である。地形的連続性についてもどのように示すかの決定的な基準があるわけではなく、表現とそれによる理解が重要である。日本の大陸棚画定調査での精密地形調査は、長期にわたり、かつ最新のシービーム海底地形調査により対象とする海域のおよそ100%をカバーする測深データを集積してきた。そのデータにより、大陸棚の外側限界の決定で極めて重要な大陸斜面の脚部（その決定法はガイドライン）の決定についても、おそらく他国の申請には無い特徴的な手法が用いられることとなった。陸域の地形では、空中写真のステレオビューによる立体視での地形判読や、DEM（数値標高モデル）により作成された立体画像等が使用される。海域の地形は、海水が邪魔をしているため、その上空を航空機で飛んでも、船から眺めても、潜水艇で潜っても全体像を見ることはできない。しかし、大陸棚の調査のように精密で広域のデジタル水深データからは、地形の3Dイメージを作ることができる。地形はいわゆる地形図の他、コンター図や陰影図等、さまざまな表現法があるが、地形全体像の把握や小地形要素の形態や配列、それらと大地形との関係等、さまざまな地形に含まれる情報の理解には、立体像が優れている。産総研のメンバーは、地球物理データの可視化技術で蓄積した経験に基づき、地形の3次元表現やアナグリフ等立体可視化に高度な技術^[15]を駆使して、説明資料の作成に大いに貢献した（図5）。

5.5 日本の地質の特性に基づく大陸棚延伸議論

海洋法条約の大陸棚は、大西洋の大陸の周辺で見られる地形地質状況を基にして定義されたと想像される。「大陸縁辺部は、沿岸国の陸塊の海面下まで延びている部分からなるものとし、棚、斜面及びコンチネンタル・ライズの海底及びその下で構成される。」（海洋法条約第76条3）という記述は、そのことを示す。コンチネンタル・ライズは、大陸が分裂、分離した後の大陸の削剥、浸食によりもたら

された堆積物が斜面下部に堆積し形成された地形で、非活動的縁辺部の産物である。そして、海洋法条約における大陸縁辺部の決定の際の基準の点として大陸斜面の脚部が使用され、斜面の外側にコンチネンタル・ライズが存在する際には基準の点はコンチネンタル・ライズの上限となる。一方、活動的縁辺域である日本の大陸棚延伸の検討対象海域での地形的な高まりは、島弧とプレート内火山であり、それらはプレートの沈み込み域における付加・衝突作用や島弧火成活動、プレート内火成活動のプロセスにより形成された。縁辺域の成長に伴う堆積物、すなわち島弧火山やプレート内火山の活動に由来する火山性堆積物、および溶岩等の火山岩が、火山体成長の進行とともに斜面を形成したもので、これらの斜面はコンチネンタル・ライズではない。このような地形・地質形成プロセスの違いに留意して、日本の大陸棚の申請では、日本の地質の特性と海洋法条約上の定義や解釈との整合性、説明方法には注意を払って記述された。

伊豆・小笠原弧の西側斜面（内弧斜面）はこの島弧の活動的な火山列から四国海盆へと至る地形を形成している（図6）。この斜面地形が限界委員会でどのように判断されるかは、大陸棚の限界を決めるのに重要な大陸斜面の脚部の認定に関連して、大陸棚の範囲に大きな影響を及ぼす条件となる。伊豆・小笠原弧の成長過程を見ると、始新世における海洋プレートの海溝での沈み込みにより由来する火山活動から出発している。成長を続けた島弧はやがて島弧下に蓄積された熱源の増大により弧内リフトを発生させ、次の世代の島弧（現在の伊豆・小笠原弧）と背弧側の残留島

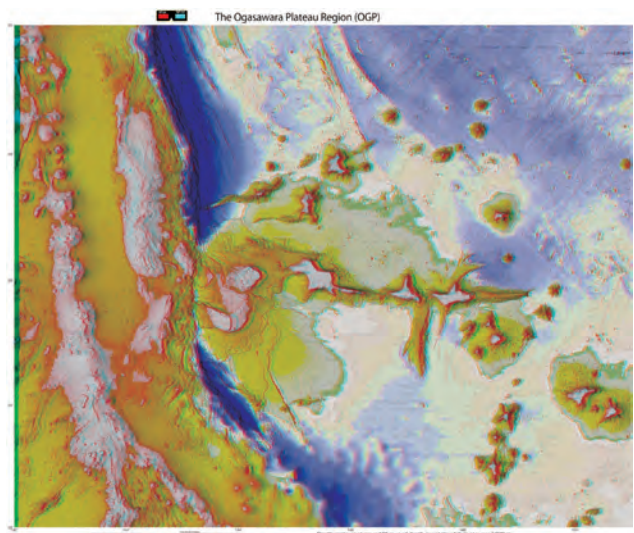


図5 「小笠原海台」周辺のアナグリフ立体視地形図
伊豆・小笠原海溝-マリアナ海溝の会合部を越えて、東から西に向かって小笠原海台が伊豆・小笠原弧に衝突付加しているダイナミックな様子がわかる（赤青メガネで見ると立体視できる）。
出典：産総研 TODAY, 9 (6), (2009)^[16]

弧（九州-パラオ海嶺）とに分裂する。両者の間に形成されたのが背弧海盆としての四国海盆である。四国海盆の両端では島弧、残留島弧とも分裂に伴うリフト壁が形成され、非活動的縁辺域の特徴を示す。そこで、非活動的縁辺域としての伊豆・小笠原弧の西側において、一連の島弧を形成する斜面として形成されたものであることを、その地質的データや形成史をとおして具体的に説明した。

伊豆・小笠原弧の背弧海嶺である西七島海嶺から西方の比較的平坦な内弧斜面域（図6下図）には、線状の磁気異常が存在するとされている。これが、四国海盆拡大に伴う海洋地殻の存在を直接示すものとすれば、伊豆・小笠原弧の内弧斜面が大洋底そのもの、あるいは、大洋底の上に形成された堆積体のコンチネンタル・ライズと同様のものとみなされ、その上限が大陸斜面基部であるとする認定がなされる可能性もある。しかし、この内弧斜面を構成する地質体が島弧起源の火山性岩体（堆積物および貫入岩体等）であること、それらが地質構造上、背弧海嶺の火山体から連続していることを示すことにより、地質学的には一連の斜面であり、伊豆・小笠原弧上の島嶼の棚から続く、大陸斜面の一部であることを示すことができる。同海域から採取された基盤岩類は、主・微量成分の化学分析の結果、明瞭な島弧火山岩の特徴を示し、放射年代測定の結果、四国海盆拡大停止後の、伊豆・小笠原弧の火山活動と時期を同じくし、かつ内弧斜面上で西から東（火山プロ

ント）に向かって新しい時代の活動になっていること、すなわち背弧火山活動から現世火山フロントの活動にいたる一連の島弧火山活動の幅広い拡がりを示していることが明らかとなった^[17]。つまり、分裂した片方の、現在の伊豆・小笠原弧はその後も活発な火山活動を伴っており、背弧側の斜面域に広く火山体の形成や大量の火山性堆積物による堆積体を形成してきた。島弧の背弧側は活動的縁辺域と非活動的縁辺域の二面性を持っているが、内弧斜面は島弧火山活動により島弧の成長とともに形成されたものであると結論された。これは、日本の地質の特性と大陸棚延伸議論の一例である。

6 今後の展望

6.1 大陸棚関連調査以降の地球科学的課題

大陸棚画定調査として実施された海域調査で、日本の南方海域について、極めて詳細で多様で多量の科学データが蓄積された。それらは、大陸棚限界情報として申請書に記述され、審査対応において活用された。すでに、学術誌に公表された成果もあるが、現在さらに公表のための解析作業や論文化が進められている。また、これらの調査をとおして、地形、地質、地殻構造のデータセットがもたらす相乗効果による大きな成果も生まれつつある。今後、進めるべき地球科学の研究課題として、産総研研究者に係わるものを簡単に記述した。

1. 伊豆・小笠原-マリアナ島弧、およびフィリピン海の構造発達史：大陸棚画定調査の新たなデータやその解釈を使用して、日本の南方海域の構造発達史を全球のプレート形成・運動の枠組みの中で構築することは、完成されていない。多様で多量の新たなデータとその解析から、新たな詳細なモデルを提起することは、日本の大陸棚画定調査の科学的なとりまとめとしてなされるべき大きな課題である。
2. 精密地形と地質データを総合した海域火山の形成史：大陸棚画定調査で、精密海底地形調査により、日本の南方海域は世界でもまれな極めて精緻な地形情報のある海域となった。この海域には、島弧火成活動やプレート内火成活動により形成された地形的な高まり、背弧の海底拡大により形成された海盆地等、火成活動による地形が主要な構成要素をなしている。それらに合わせ、基盤岩採取によるそれらの構成岩石の特性（成因）と形成年代のデータ等も組み合わせ、広域的な火成活動史と個々の火山山体の形成過程等を詳細に明らかにする研究への発展が期待できる。
3. 海底鉱物資源の生成場の地質構造・火成活動規制とポテンシャル評価：ここ2-3年の海外企業の日本周辺海域における海底熱水鉱床の開発の動きや世界市場でのレアメタル価格の高騰等から、海域の鉱物資源開発への動きは、日

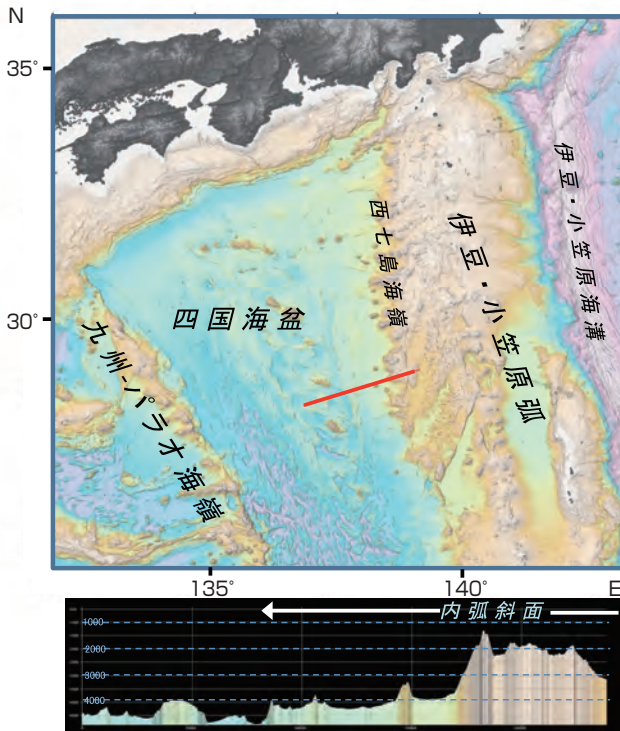


図6 伊豆・小笠原弧から九州-パラオ海嶺の地形
下図は上図の赤線の地形断面（縦横比を12倍に強調している）。

本でも活発になりつつある。日本の排他的経済水域等、大陸棚調査でその地質構造発達史や形成史が明らかになった海域に、既存の海底熱水鉱床が存在する。今後の海底熱水鉱床の開発には、それらの鉱床の存在する場所の構造的な位置付けとそれらを利用した新たな開発対象となる鉱床の発見への探査の指標を提起することが必要である。

さらに、調査や試料の分析・解析の過程での技術の向上、手法の有効性の確認、および技術ノウハウの蓄積も大きく、これらは上記の課題を進める際にも活用されていくべきものである。

6.2 日本の申請

日本政府は、2008年11月12日に国連の大陸棚限界委員会に申請書を提出して、受領された。その概要を示す「Executive Summary」は、限界委員会のHPにおいて公表された^[18]。その中には延伸大陸棚として申請した海域を示す地図と大陸棚の外側境界を規定する緯度・経度の座標、どの規程で設定した点かを示す表が示されている。大陸棚延伸の根拠を示した申請文書本体は大部の文書であるが、公表されない。他の国の文書も公開されていないので比較はできないが、マルチビーム測深データに基づく面的な地形情報、多数の岩石試料の分析、解析データの

地質解釈、海底地震計を使用した地殻構造探査データ等、科学的データの質の高さが、他の国と比較して最上級であることは確かである。

日本の延伸大陸棚の申請は7海域の総面積約74万km²の海域である^[19]（図7）。それらの中には、大陸棚として限界委員会が認めても、その後隣国との調整が必要な海域が含まれる。日本申請後にパラオが申請した延伸大陸棚は日本の九州-パラオ海嶺南部海域の延伸大陸棚の申請とおおよそ重複した範囲を含んでいる。また、南硫黄島海域、南鳥島海域、および小笠原海台海域は、アメリカの延伸大陸棚と重複する可能性がある。この両国は、重複可能性を認めて、日本の延伸大陸棚の申請が行われることを了解していることを申請前に日本に伝えている^[18]。

日本の申請は、13番目の申請として提出された。日本の申請の後、日本を含めて多くの国の申請期限であった2009年5月12日までに37の申請が提出された。審査は原則として提出順に進められ、限界委員会委員と小委員会委員の人数から同時に3件しか行われない。日本の申請の提出が2009年5月の締め切り直前の提出になっていたら、審査の開始もかなり遅れて審査開始がいつになるか予想もできない事態であったかと思われる。

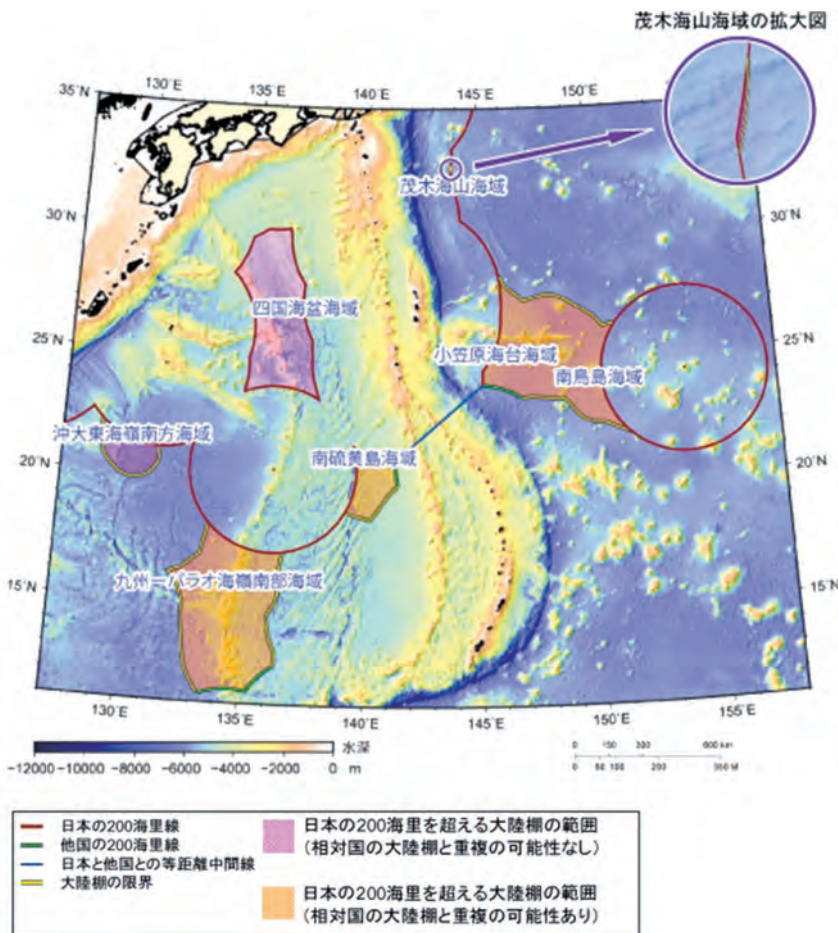


図7 日本の申請した延伸大陸棚

日本の申請した延伸大陸棚は7海域（九州-パラオ海嶺南部海域・南硫黄島海域・南鳥島海域・茂木海山海域・小笠原海台海域・沖大東海嶺南方海域・四国海盆海域）で、その総面積は約74万km²である。

出典：総合海洋政策本部：「大陸棚の限界に関する委員会」へ提出した我が国の大陸棚の限界について^[19]

6.3 審査と勧告

提出された大陸棚の申請は国連の大陸棚限界委員会において審査される。この委員会のメンバーは21名からなり、地質学、地球物理学、水路学の専門家が世界の地域的なバランスもとる形で、海洋法条約締結国会議での選挙によって選出されている。各国から出された申請に対して、限界委員会のメンバーから7名による小委員会が構成されて、詳細な検討が行われる。審査結果は最終的に勧告としてまとめられ、限界委員会で採択・決定されて公表される。

日本の申請についての審査は、2009年3月の限界委員会の第23会期全体会合での申請についての日本からの申請概要の発表からスタートした。日本の申請の審査を行う小委員会は、第24会期会合の2009年9月2日に設置され、この時点から本格的審査を開始した。小委員会は、第24会期から第28会期の2年半にわたり審議し、2011年8月の第28会期に勧告案を採択し本会合へ報告した。本会合では、第28会期に勧告案の審議を始め第29会期の2012年4月19日に勧告を採択した。そして、2012年4月26日に日本政府は勧告を受領した。

勧告は、申請した7海域のうち、この時点での勧告を行わないとして先送りとされた九州パラオ海嶺南部海域以外の6海域について行われ、隣国との調整の必要な海域等を含む総面積約31万km²の延伸大陸棚が認められた^[20]（図8）。この中には、前項で述べたようにアメリカの大

棚と重複する可能性のある範囲を含んでいる。勧告の概要は限界委員会のHPに公開されている^[21]。

産総研の部会メンバーは、2008年の申請書の提出後、限界委員会や同小委員会の日本の申請の審査に対応して、質問への回答や追加説明への対応のために、素案作成部会を母体に2009年1月に設置された大陸棚審査対応部会のメンバーとして活動した。その活動には、審査過程での質問への回答案作成や回答のプレゼンテーションの実施、ニューヨークの限界委員会開催時の日本代表団への参加等を含んでいた。

7 おわりに

日本は周りを海に囲まれ、世界で第6位の排他的経済水域を有している。さらに「勧告」に従い日本政府が大陸棚の外側限界を決定すれば延伸大陸棚が確保され、海底資源の開発対象域もさらに拡大する。2007年海洋基本法が制定され、2008年にはそれを政策に反映すべく海洋基本計画も決定された。さらに、2009年3月には「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」も決定され、海域の資源の開発へ向け調査の推進が図られている。日本の排他的経済水域や大陸棚については、基本的な情報が十分整備できていない現状なので、海域の地形・地質・資源賦存状況等の情報を整備し、それに基づいて海域の資源や空間の利用・開発の長期的なビジョンを持つことが最も重要である。

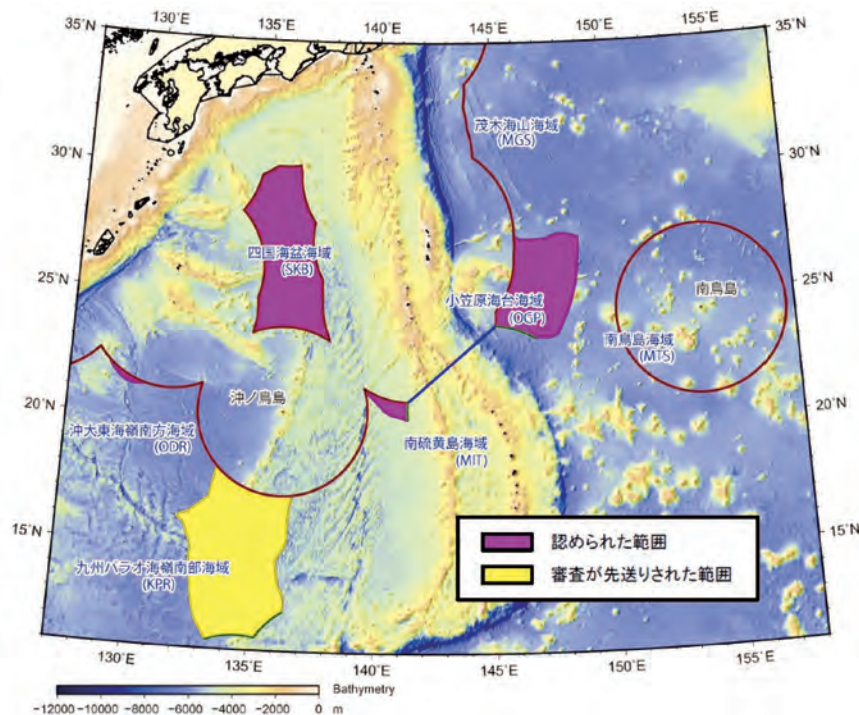


図8 日本の延伸大陸棚の勧告

出典：総合海洋政策本部：我が国大陸棚延長に関する大陸棚限界委員会の勧告について^[20]

本報告に関連した大陸棚プロジェクトに参加した産総研の地質分野のメンバーは世代・役割等それぞれで異なり、「勧告」が出た時点での大陸棚画定調査に関する達成感とその研究活動に関連した意味合いも異なっている。しかし、地球科学の研究に携わってきたものが、日本の国際的な権益確保に科学的成果の上で係われたことは、今後の研究活動の一つの原点にできると確信している。

謝辞

これらの事業を進めるにあたり、資源エネルギー庁鉱物資源課および内閣官房総合海洋政策本部事務局にさまざまなサポートをしていただいた。国連提出情報素案作成部会や大陸棚審査対応部会での活動や作業は、外務省の葉室和親氏、海上保安庁の加藤幸弘氏をはじめとする同部会のメンバーとの共同作業で行い、産総研の担当についてもいろいろ議論や援助をいただいた。

産総研においては、理事・地質分野研究統括（前研究コーディネータ）の佃 栄吉氏、歴代の地質情報研究部門長の富樫茂子氏、栗本史雄氏、牧野雅彦氏、地質分野副研究統括（前地圏資源環境研究部門長）の矢野雄策氏を始め多くの方々から援助をいただいた。

東京大学大学院工学研究科教授で限界委員会委員であった玉木賢策氏は、2011年4月ニューヨークの限界委員会開催中に体調を崩され、同地で帰らぬ人となった。同氏は、元地質調査所の所員であり、本報告著者すべてのものと旧知の仲で、調査航海や研究をともにした仲間であった。さらに、同氏は、「大陸棚」に関して、限界委員会委員として、また大陸棚評価・助言会議のメンバーとして日本の大陸棚画定について大きな貢献をされるとともに、我々の取り組みにもさまざまな場でご支援いただいた。我々の活動と日本の大陸棚画定調査が「勧告」として実を結んだことに関するこの報文を玉木賢策氏へのお礼をこめた報告としたい。

最後に、本著者の他、産総研の大陸棚プロジェクトのメンバーとして参加いただいた方々の氏名を記す。棚橋 学、石塚 治、石原丈実、上嶋正人、下田 玄、森尻理恵、斎藤英二、山崎哲生（2008年4月より大阪府立大学）、田中弓。また、石塚治氏には八丈島沖海域の原図の掲載を快諾いただいた。

以上の方々をはじめ、さまざまな形でご支援いただいた皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] United Nations Convention on the Law of the Sea
http://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf

- [2] 葉室和親: 第6章大陸棚, 島田征夫, 林司宣(編); 海洋法テキストブック, 66-78, 有信堂 (2005).
- [3] 海上保安庁: 大陸棚の限界の申請について, 海上保安庁からの記者発表 (2008.10.31).
http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/tairiku/20081031_css_conclusion.pdf
- [4] Scientific and Technical Guidelines of the Commission on the Limits of the Continental Shelf
http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/commission_documents.htm#Guidelines
- [5] M. H. Nordquist, J. N. Moore and T. H. Heidar (eds.): *Legal and scientific aspects of continental shelf limits*, Martinus Nijhoff Publishers, 467 (2004).
- [6] 春日 茂: 日本における大陸棚調査の現状と展望, *学術の動向*, 10 (2), 18-25 (2005).
- [7] 石塚 治: 極微量の岩石鉱物試料についての地質年代測定, *産総研 Today*, 6 (2), 38-39 (2006).
- [8] 飯笹幸吉, 岸本清行, 石原丈実, 上嶋正人: 東日本沖海域における地形概要、及び新海底地形名, *地質調査総合センター速報*, 40, 3-8 (2007).
- [9] 湯浅真人, 村上文敏: 小笠原弧の地形地質と孀婦岩構造線, *地学雑誌*, 94 (2), 115-134 (1985).
- [10] O. Ishizuka, R. N. Taylor, M. Yuasa and Y. Ohara: Making and breaking an island arc: A new perspective from the Oligocene Kyushu - Palau arc, Philippine Sea, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q05005, 40 (2011).
- [11] T. Ishihara and K. Koda: Variation of crustal thickness in the Philippine Sea deduced from three-dimensional gravity modeling, *Island Arc*, 16 (3), 322-337 (2007).
- [12] T. Nakazawa, A. Nishimura, Y. Iryu, T. Yamada, H. Shibasaki and S. Shiokawa: Rapid subsidence of the Kikai Seamount inferred from drowned Pleistocene coral limestone, Implication for subduction of the Amami Plateau, northern Philippine Sea, *Marine Geology*, 247 (1/2), 35-45 (2008).
- [13] 外務省経済局海洋課 監修: 英和対訳 国連海洋法条約[正約], 成山堂書店, 479 (1997).
- [14] Recommendations issued by the Commission on the Limits of the Continental Shelf.
 2008年時点 http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/commission_recommendations.htm
 2012年より http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/commission_submissions.htm
- [15] 岸本清行: 日本列島やその周辺海域の地形・地質を立体画像で体験する—最近の表現技術とデータの精度の向上—, *地質ニュース*, 594, 42-44 (2004).
- [16] 西村 昭, 湯浅真人, 岸本清行: 大陸棚の限界を決める 地質学が日本の海底権益の確保に貢献, *産総研TODAY*, 9 (6), 23 (2009).
- [17] O. Ishizuka, M. Yuasa, R. N. Taylor and I. Sakamoto: Two contrasting magmatic types coexist after the cessation of back-arc spreading, *Chemical Geology*, 266 (3-4), 274-296 (2009).
- [18] Japan's submission to the Commission on the Limits of the Continental Shelf (2008).
http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/jpn08/jpn_execsummary.pdf
- [19] 総合海洋政策本部: 「大陸棚の限界に関する委員会」へ提出した我が国の大陸棚の限界について (2009.3.24).
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/CS/area.pdf>
- [20] 総合海洋政策本部: 我が国大陸棚延長に関する大陸棚限界委員会の勧告について(2012.5.25), 総合海洋政策本部会合(第9回)議事配布資料
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/dai9/siryou4.pdf>
- [21] Summary of Recommendations (2012).
http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/jpn08/com_sumrec_jpn_fin.pdf

大陸棚問題の理解には下記の文献も助けになる。

- 加藤幸弘：大陸棚画定のための科学的調査，*地学雑誌*，115 (5)，647-651 (2006)。
 玉木賢策：国連海洋法と大陸棚限界画定問題，*学術の動向*，10 (2)，8-11 (2005)。
 玉木賢策：地球科学と国連海洋法条約大陸棚問題，*日本地球惑星科学連合ニュースレター*，4 (1)，1-3 (2008)。
 棚橋 学，西村 昭：日本の排他的経済水域などの海底資源をめぐって，*土木施工*，45 (8)，68-75 (2004)。

執筆者略歴

西村 昭（にしむら あきら）

1977年京都大学大学院理学研究科博士課程修了、1978年工業技術院地質調査所入所。1988年博士（理学）。2001年産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門副研究部門長、2005年から地質情報研究部門副研究部門長、2010年4月より招聘研究員。海洋地質学・層序学を専門として、マンガン団塊の地質学的成因研究や伊豆・小笠原海域の地質調査研究に従事。大陸棚調査では、素案作成部会の副部長・大陸棚審査対応部会のサブグループリーダー・産総研の大陸棚プロジェクトの代表者（2010年3月まで）を務めた。



湯浅 真人（ゆあさ まこと）

1972年北海道大学理学部卒業、1972年工業技術院地質調査所入所。1989年博士（理学）。2001年産業技術総合研究所地質調査情報部地質調査推進室長、2005年から地質情報研究部門総括研究員、主幹研究員、2010年4月より研究顧問。海洋地質学・岩石学を専門として、日本周辺海域の海底地質図作成および伊豆・小笠原海域の海底熱水活動の研究に従事。大陸棚調査では、素案作成部会・大陸棚審査対応部会の海域担当として伊豆・小笠原海域関連の申請書作成等を行った。



岸本 清行（きしもと きよゆき）

1982年京都大学大学院理学研究科博士課程修了、工業技術院地質調査所入所。2001年産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門海洋地球物理研究グループ、2004年地質情報研究部門地球変動史研究グループ主任研究員。地球物理学に基づき、海嶺系・島弧系の海底地形・地質の研究に従事。大陸棚調査では、素案作成部会・大陸棚審査対応部会の海域担当として申請文書作成を行うとともに、情報処理・画像処理の技術を駆使し、国連でのプレゼンテーション作成に貢献した。2010年4月より産総研の大陸棚プロジェクトの代表者。



飯笹 幸吉（いざさ こうきち）

1985年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士（工学）。1986年地質調査所入所。2004年産業技術総合研究所地質情報研究部門海底系地球科学研究グループリーダー、2009年9月より、東京大学大学院新領域創成科学研究科教授、産総研客員研究員。伊豆・小笠原海域の明神海丘で海底熱水鉱床を発見する等海底鉱物資源の調査研究に従事。大陸棚調査では、産総研の基盤岩採取の海域調査の総括・主席研究員を務め、また、素案作成部会・大陸棚審査対応部会では試料採取・分析等の技術担当としてとりまとめを行った。



査読者との議論

議論1 大陸棚画定調査における産総研地質分野の貢献

コメント（富樫 茂子：産業技術総合研究所）

この論文は、政府一体として取り組まれた事業である大陸棚画定調査において、産総研の「大陸棚プロジェクト」が実施した、「科学的根拠に基づき、国の大陸棚延伸の申請に貢献するプロセス」を示したものであり、科学者が成果を国連へのプレゼンにまで直接的に関与して、社会に還元している例として、シンセシオロジー論文としての確です。

具体的には、産総研が海洋地質に関する国の総合研究機関として分担した「海域調査」、「岩石の分析・解析・解釈」「とりまとめ」について、全体シナリオの中で産総研の研究の位置付けや、産総研の研究者が国の素案作成部会の活動として行った内容も含めて記述しています。

コメント（瀬戸 政宏：産業技術総合研究所）

この論文は、国としての重要な施策“大陸棚画定調査”に地質分野が総力を結集してかかわった結果について、これまでの技術ポテンシャル、科学的ポテンシャルに基づき貢献し、さらに新たな科学的な知見も明らかにした点を中心にとまとめたものであり、シンセシオロジーへの掲載論文として適当であると判断します。

議論2 構成学的視点による論文の再構成

コメント（富樫 茂子）

初稿は「解説」的であったが、研究の進め方や社会貢献の方法論を意識した再構成により大幅に改善されました。

コメント（瀬戸 政宏）

初稿では活動報告書のように読めましたが、修正によって構成についても変更され、さらに対象となった技術的なポイントも明確になり初稿から大きく改善されたかと判断します。

初稿における指摘は以下の通り。

コメント（富樫 茂子）

論文の構成が「解説」的であるので、シンセシオロジー論文として章立てと記述を再構成し、シナリオの提示、研究ポテンシャルおよび研究成果等について追加の記述をしていただきたい。また、研究の方法論を意識して、シナリオの中で産総研の研究を位置付けて、記述するようにしてください。

コメント（瀬戸 政宏）

この論文は全体を通してワーキンググループの活動報告書という内容になっているように思います。まず、本画定調査の中で産総研がこの事業に参画することとなったベースとなる技術ポテンシャル、科学的ポテンシャルが何であったのかを具体的に記述してください。岩石の年代測定や微量元素の分析・解析・解釈等が評価されたという記述がありますが、それぞれで技術的にはどのような内容で、その内容が今回の調査とどのように関係していたのかが分かりにくいと思います。

回答（西村 昭）

一次の査読で、根本的な問題や再構成のアドバイスをいただき、二次査読では詳細に読んでいただき、細部までチェックいただいたことを感謝いたします。ご指摘いただいた点は、ほとんど修正いたしました。

議論3 産総研に期待された役割や挑戦課題

コメント（瀬戸 政宏）

“1.はじめに”において、産総研に期待された役割や挑戦課題を整理していただくと分かりやすいと思います。

これまでの基礎研究の蓄積も含めた産総研の科学ポテンシャルに加えて、それらを統合し、かつ新たな課題も解決することによって、延伸範囲を高い信頼性で確定できたという流れで具体的に論述してください。また、この中で、画定調査で延伸範囲を決める上で必要となった新たな挑戦としての技術的な課題は何で、それを克服するための取り組みとしては具体的にどのようなものであったのかも記述していただくと「挑戦」の意味がでると思います。

また、「産総研の役割」で海洋地質部の設立等の組織的な変遷が書かれていますが、ここでは先にも記しました産総研の海洋地質調査に関するポテンシャルや科学的にどの領域で我が国トップあるいは世界的な水準であるのかを記述する方が産総研が本調査に参画した意義が明確になると思います。

回答（岸本 清行、西村 昭）

「はじめに」を簡略化して、その最後に、「日本の大陸棚画定調査の実施と科学的根拠に基づいた国連への申請書作成に貢献するという目的にいかに関わり、目標に近づこうとしたかを記述した。」というところで役割を書きました。さらに、4章の最初に産総研の大陸棚画定調査への参加の意味・役割を記述し、組織の変遷やこれまでの海域調査の実績を現在の産総研のポテンシャルへの道筋としての記述にしました。4.3 および 5.5 で、ご指摘の産総研の貢献による「延伸範囲を高い信頼性で確定」の実例を記述しました。

表題に使用した「挑戦」の意味（ニュアンス）も含めて、「挑戦としての技術的な課題」については次のとおりです。

ここで言う「挑戦」という言葉遣いは英語のチャレンジの直訳に近いものです。つまり、英語で表現すると、The task was a scientific challenge for all geo-scientists. と表現できるかもしれませんが、日本語に意識すれば、「延伸画定（領土拡大）」というこれまで扱ったことのない目標のために、科学技術的知見に基づいて科学者が直接寄与する役割を負った希有な機会であった」という意味だと思います。通常の科学技術論文が想定する「ある特定の先端技術や発見、機能」が果たした役割（挑戦）のことはニュアンスが違います。我々は一般の人に大陸棚の仕事を説明するとき、挑戦という言葉は使わず、「科学にとって希有な機会」という言い方をしています。大陸棚の仕事を通して、各国の地質調査所等の研究機関の人達や仕事内容を調べながら進めている中で、「It is a scientific challenge ~」という表現にぶつかったのだと思います。そのとき、英語ではこういう時にも challenge というのか、と納得したのです。

産総研の地球科学ポテンシャルのうちの特定のもの challenge されたのではなく（もちろんそれもありますが）、大陸棚画定に必要な地球科学ポテンシャルを国家的な威信をもって担保している機関として、海洋情報部や JAMSTEC や JOGMEC とともに産総研が challenge され、それに応えたのだと思います。これまでに大陸棚申請を提出した国は 60 カ国を超え、日本は 13 番目の申請国として審査が行われました。日本の申請はこれまで提出され、審査されたものに比べて圧倒的な質と量の地形、地球科学情報に基づくものであるといえます。科学技術大国のアメリカがまだ提出していませんが、おそらく、現在まで出されたとどの国の申請も量、質ともに遥かに及ばないものと言えます。しかし、日本の申請が圧倒的に優位であったかといえばそうではないと思います。世界の中で日本が位置する地形

的、地質的背景は海洋法条約的「延伸大陸棚」を証明・説得させるにはとても challenging なものだからです。そういう意味では、「挑戦」は二重の意味合いをもっています。

議論4 新たな知見や発見は何か

コメント（瀬戸 政宏）

今回の画定調査全体の中で、地質学、地球物理等における新たな知見や発見、発明はあったのでしょうか。全体に委員会や書類策定にかかわるご苦労は詳しく書かれていますが、技術的な部分の内容をもう少し盛り込んでいただくとよいと思います。例えば、基盤岩データセットを整備した中で、地質体の形成のメカニズムとその時間的変遷について極めて多数の事実を発見したということですが、本誌で紹介できる範囲でもう少し具体的な記述をご検討ください。

回答（西村 昭）

4.3 および 5.5 で記述しました。

議論5 “延伸大陸棚”や“限界情報”の意味

コメント（瀬戸 政宏）

“延伸大陸棚”というワードが出てきますが、こう書く定義が必要になります。“延伸される大陸棚”のような書きの方がよいと思います。また、大陸棚の延伸範囲の申請で必要となった“限界情報”とは主にどのような情報なのかを整理していただくと、課題と実際にやったことが分かり易くなると思います。

回答（西村 昭）

最初に“延伸大陸棚”が出てくるところ (2.1) で、「200 海里を超えて設定される大陸棚（延伸大陸棚；Extended Continental Shelf）」として、定義して述べました。また、5.3 の最後に、「申請書に書き込むべき大陸棚の限界情報」として簡単に記述しました。

議論6 技術的な課題の具体的な記述

コメント（瀬戸 政宏）

“海域調査”、“基盤岩採取の試料の分析・解析・解釈”の章は、技術的な課題に対してどのような取り組みや研究を実施したのかを具体的に論述してください。“海域調査”では試料を採取するポイントの設定も重要であったと思いますが、このポイント設定において産総研のこれまでの知見が生かされたということが具体的にあれば記述してください。

回答（西村 昭）

前者については、4.3 において、「微量元素のスパイダーダイアグラムパターンや同位体組成によるマグマ起源・成因の決定法を適用し、」と説明を加えました。

後者のご指摘には、4.2 において、「産総研がこれまでの地質調査を通して培ってきたドレッジ試料と地形や音波探査記録との対応を関連付ける狭いポイントでの岩石試料の採取を行う操船技術と、採取岩石が基盤を構成しているか否かの評価に留意して実施された。」と書き加えました。

英国における大学評価の新たな枠組み： Research Excellence Framework

— 最近の日本の研究評価の状況との比較 —

大谷 竜^{1*}、加茂 真理子²、小林 直人³

現在英国では、高等教育機関で実施されている研究の評価の新たな枠組みであるREF (Research Excellence Framework) の実施が準備されている。REFでは、高等教育機関で行われる卓越した研究が、その潜在的な効果を最大限に発揮できるよう、評価軸として、アウトプットの質、インパクト、研究環境の3つの要素が設定された。特に着目される点として、大学等での研究評価にも関わらず、社会的なインパクトも明示的に取り入れられていることである。また、アウトプットの質の評価においても、専門家パネルによるレビューとともに、論文被引用情報を中心とする計量書誌学的な定量的データを参考として用いることが提案されている。本稿では、REFにおける、アウトプットからインパクトまでの評価の考え方について紹介するとともに、わが国の研究評価や大学評価への示唆について考察する。

キーワード: REF、研究評価、卓越性、計量書誌学、インパクト、研究環境、アウトカム

An introduction to the Research Excellence Framework: A new research evaluation framework for universities in the UK

– Comparison with the status of research evaluation in Japan –

Ryu OHTANI^{1*}, Mariko KAMO² and Naoto KOBAYASHI³

This article introduces the Research Excellence Framework (REF), a new research evaluation framework developed by the Higher Education Funding Council for England (HEFCE) to evaluate the research activities of higher education institutes in the UK. To promote excellent research so that its potential effect can be maximized, REF has three criteria for evaluating institutes: output quality, impact, and research environment. Remarkably, although the purpose of REF is university evaluation, social impact is explicitly included within the evaluation framework. It is proposed that output quality be evaluated by conventional review with the aid of quantitative bibliometric indicators such as the number of paper citations. In this article, we will introduce REF, from output to impact, and will make suggestions about the evaluation of research and university in Japan.

Keywords: REF, research and technology evaluation, excellence, bibliometrics, impact, research environment, outcome

1 はじめに

産業技術総合研究所(産総研)では、「技術を社会へ」という理念の下、産業技術に関する第1種基礎研究、第2種基礎研究、および製品化研究を連続的にを行い、その成果を社会に送り届けることで、持続可能な社会の実現に貢献することを目的として研究を展開している。こうした基礎研究から社会への成果還元まで含めた幅広い研究活動の評価方法について大きな示唆を与えてくれる Research Excellence Framework (REF) と呼ばれる研究評価シ

テムが現在英国で構築されている。

イングランド高等教育基金協議会(HEFCE: Higher Education Funding Council for England)は、英国の大学等に対して常勤教員・職員給与、施設、図書館、情報システム等の研究インフラを支援するための基盤的資金の提供を行っている。これらの資金の用途は各大学の裁量にゆだねられているが、その配分に当たっては研究評価が大きな役割を果たしており、現在、HEFCEは大学等高等教育機関の統一的な研究評価の新たな枠組みであるREFを

1 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7、2 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、3 早稲田大学研究戦略センター 〒162-0041 新宿区早稲田鶴巻町 513 (120-1 号館)

1. Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan * E-mail: ohtani-ryu@aist.go.jp, 2. Evaluation Department, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan, 3. Center for Research Strategy, Waseda University 513 Wasedaturumaki-cho, Shinjuku-ku 162-0041, Japan

Original manuscript received December 3, 2012, Revisions received January 8, 2013, Accepted January 16, 2013

構築している¹¹⁾。これは、これまで約5年おきに行われてきた研究評価 Research Assessment Exercise (RAE) に置き換わる予定で (RAE については例えば [2] を参照)、2014 年からの評価に導入予定である。

REF の大きな特徴の一つは、高等教育機関における研究、すなわち相対的に基礎研究の比重が高い大学等での研究の評価であるにも関わらず、評価軸として、論文等といったアウトプットの質とともに、「インパクト」という指標を明示的に設けている点にある。評価における重み付けとして、アウトプットの質 65 % に対して、インパクトは 20 % と大きな比重が提案されており、この指標が重要視されていることが分かる。前述のように、基盤的な研究予算は評価に基づいて傾斜配分されているため、こうした評価方法の新たな導入が大学等で実施される研究に大きな影響をもつ。今回、インパクトという指標を明確に打ち出したことは、英国では大学に対しても、研究による波及効果を連続的・戦略的に社会にもたらすことが一層期待されていることを示唆している。

こうした英国の新しい評価の枠組みは、我が国における大学や産総研等の公的研究開発機関における、イノベーション実現のための研究をいかに評価するかという点に対して大きな示唆を与えるものと考えられる。特に、REF の評価の背後に想定している体系的な研究推進の考え方は、産総研で試みられているように、主に構成的手法を用いた第2種基礎研究を軸とする戦略的な研究展開 (本格研究) にも良く似ている。よって、REF が評価の対象とするインパクトがどのようなものか、対象となるインパクトの内容や性格、その評価の概念体系等を理解することは、産総研における本格研究の評価に対しても大きな示唆が得られるものと期待される。そこでこの論説では、2009 年の REF の第二次案¹²⁾ の概要を紹介しながら、我が国の研究評価や大学評価の在り方についても考察する。

2 研究評価の背景にある考え方—何のための評価か—

REF における評価方法の詳細に入るために、まず理解しなければならない重要な点は、どういった意図があって評価を行っているか、ということである。なぜなら、この意図に基づいて評価 (方法やどこに重点を置くのか、また評価パネル等) が設計されていくものだからである。言ってみれば評価全体のグランドデザインの基盤になるのが、この「何のための評価なのか」、といったことである。

一般に、大学には教育・研究・社会貢献という3つの役割があるが、REF で対象としているのは大学等、高等教育機関における研究活動の評価である。そして REF の考えの根幹にある考え方は、卓越した研究という概念であ

る。すなわち、高等教育セクターが学術分野の幅広い領域に亘って世界をリードする能力を維持することが、社会・経済の成長や国の安寧の下支えをするのに本質的な役割を果たすという考えが REF では明示されている。それは、単にあらゆる形態の研究の質を上げるだけにとどまらず、そうした知見を効果的に共有し、研究による成果の普及および応用を行い、高等教育機関とビジネスや他の研究成果の利用者 (ユーザー) との間で、研究者やアイデアの生産的なやりとりを行うことで、経済や社会にも大きなインパクトが与えられるはずだということ、そしてこれらのことは、卓越した研究を土台とすることで可能だ、という考えが REF の根底にある。

そのために HEFCE は、経済的な繁栄や国の安寧および知の拡大や普及に大きく貢献するような、精神的で国際的な研究セクターを発展させることを目的として活動すべきであるとされており、その際、研究評価はこの戦略的な目的を追求する上でとても重要な手段となるという明確な政策意図が謳われている。そこには単に外向けの説明責任を果たすといった、いわゆるパフォーマンスだけではない、国家としての明確な戦略がある。また、こうしたことを実現させるための、より良い研究基盤のマネージメントやそうした環境の持続可能性を支援しているかどうかについても、一定程度評価において見ることにしている。

このように、高等教育機関によって実施される卓越した研究がその潜在的なインパクトを最大限に発揮できるよう、REF には研究の評価軸として、アウトプットの質、インパクト、研究環境の3つが設定された。これらはパイロットスタディによって事前に詳細な調査が行われ、評価方法の妥当性等についての検討がなされている¹³⁾。以下、それぞれの要素のポイントについて見ていく。

3 アウトプットの質の評価

最初の評価軸である「アウトプットの質」では、評価単位である研究ユニット (大まかには学科相当) の中でもっとも質の高い研究のアウトプットを選び、評価する。その際、研究ユニットに属する構成員がどの程度卓越した研究成果を出せたかを、被評価側が同定するものとしている。今回の評価の新たな特徴の一つに、このアウトプットの質の評価に際して、計量書誌学的データの利用が掲げられていることである。これは REF 全体で、評価の作業の負担軽減や透明性向上のため、定量的データをできる限り使用することが推奨されていることから導入されたものの一つである。

当初、少なくとも理工学や医学分野においては、論文の被引用情報に基づいて、専門家レビューに完全に代替する

ことも検討されていたが、パイロットスタディによる検討の結果、計量書誌学的方法は十分熟成されていない、ということで見送られている。

その後の第二次案においては、論文の被引用情報は、専門家による評価パネルにおいて、参考情報として利用される形で落ち着いている。こうした被引用情報データは、評価する側があらかじめデータベースとして整備し、被評価側の求めに応じて、評価の前や評価資料の準備段階で情報が提供されることとなっている。これにより被評価側の負担を軽減させるとともに、統一的な情報を使用できるようにすることで、情報の齟齬をなくすことも考慮されている。また、このような統一的なデータベース等の情報基盤の整備も盛り込まれているのが REF の一つの特徴といえる。

アウトプットの質の評価において重要な点は、卓越した研究のみを評価する姿勢であるとされている。REF では、すべてのアウトプットをその質に関係なく評価するように設計されているわけではなく、質の高い重要な研究活動に従事していない研究者の成果を（たとえそれが実際に可能であったとしても）考慮することはしない。そして、質の高いアウトプットを有するスタッフを、評価を受ける高等教育機関自身に選定することを求めている。これは、実質的な研究の役割を担う者を同定できるのは評価される機関自身だけだということを認識させるためであるとしている。そしてこのことは、被評価機関の研究マネジメントの意識を涵養する上でも政策的な意味で重要なこととしている。

またアウトプットとして、伝統的な意味での論文のみではなく、一般の出版市場には流通していない、政府や学術機関で発行される書類、あるいは電子媒体の出版物や、被引用データが利用できそうにない標準的でない形式で公表された成果（これらは grey literature と呼ばれている）に関しても考慮に入れるべきだとしている。また、被引用情報の有用性が限定されているようなタイプの研究や応用研究の質の評価についても同様に評価するとしている。こうした研究には、研究のユーザーのために直接実施される仕事、あるいは研究のユーザーと協力して実施した仕事、また公共政策に情報を提供するような研究も含まれ、単にインパクト・ファクターの大小等といったものだけでは測らず、アウトプットの形態がどうであろうと、高い質を有するすべてのアウトプットに、最大限かつ均等に検討を行う姿勢が窺われる。こうしたアウトプットの質は、厳密性 (rigor)、独創性 (originality)、そして意義 (significance) という基準で評価される。

4 インパクトの評価

二番目の評価軸の「インパクト」では、研究ユニット内での活動を通じて、卓越した研究を土台にして、どの程度実証可能なインパクトを実現できたかが評価される。ここで使われる「インパクト」という言葉は、経済、社会、公共政策、文化、生活の質へのインパクトと言った意味でも使われている。一方、学界への知的影響を及ぼすインパクトの意味は含まれていない（これはアウトプットの質の評価に含まれる）。

ここで、REF で使われている「インパクト」という概念についてさらに説明を加えたい。というのは、この内容を正しく理解することは、評価を行う上での重要なポイントとなるからである。REF でのインパクトの評価では、ある評価期間内に、研究ユニットが社会・経済に明白なインパクトを与えるのに、どの程度卓越した研究から得られた優れた成果を元にしてしているのが問われる。そして当該研究ユニットがインパクトを育てるにあたって実際に関与しており、そのことが実証可能であることも求められている（図 1：説明文も参照）。すなわち、当該研究ユニットによる研究をベースとしていても、そこから生じたインパクトがもつばら当該研究ユニット外の他者（例えばベンチャー企業）によって開発あるいは引き出されたもので、当該ユニットがそうした他者による開発に関与したことを実証できないものについては、自らの功績として主張することは許されない。

例えば、研究ユニットでの研究開発の結果、あるモノや知見が成果として得られ、それをとりまとめて出版したが、その後、当該研究ユニットはその成果を放っておいたとする。ここで、それをたまたま他者（例えば営利企業）が見つかり、それを使って（当該ユニットの預かり知らぬところで）結果的にその企業が莫大な利益を得たとしても、その営利企業が利益を得るために行われた種々の活動に、当該研究ユニットが関わっていなければ（あるいは関わっていたとしても、そのことが何らかの形で実証できなければ）、それは当該研究ユニットのインパクトとしては認められないとするのである。こうした場合、研究ユニットの功績として評価される対象となるのは、元となった、成果の「アウトプットの質」のみである。このように、REF で言うところの「インパクト」は、極めて限定される概念である。驚くべきことは、一般に日本の大学では主に基礎研究を推進することが期待されるが、REF ではインパクトも研究評価の対象として求められ、さらに評価される側が、インパクト生成に直接関与したことの实証が求められる点である。

なお、インパクトが達成されるまでには、相当の時間がかかる。評価対象期間に顕在化したインパクトはそれより以前の評価対象期間に生みだされた研究アウトプットの結果である場合が往々にしてあるが、その際でも評価対象期

間中のインパクトであれば評価対象になるとしている（インパクトの評価についての具体的な事例等については[5]にまとめられている）。

ところで、インパクトの評価は、研究ユニットという階層でなされる。これは、個々の研究者のインパクトを評価することは現実的には不可能であり、一方、機関全体（例えば大学）のインパクトを評価することは、REFの目的からするとあまりに粗雑になりすぎるとするのがその理由である。評価では、どういった行動の結果インパクトがあったとされたか、またインパクトがどのように形成されたかを特定することが被評価側に求められている。

インパクトの評価は一般に定量的なデータだけでは難しいとされることから、主に記述方式が採用されている。内容としては、ケーススタディとインパクトステートメントを記述する二つの方式で評価が行われ、その際、論理立てて筋書き性があり、かつそれを示す適切な指標が含まれることが条件とされている。REFではそうした指標の具体的な候補についても詳細なリストとともに掲げられており（表1にその主要項目を示す）、被評価側の準備の負担軽減に配慮がなされている。評価側は、以上の二つに対するエビデンスや提出された資料を用いて、どの程度インパクトが得られたのか、インパクトがどの程度重要かつ大化けする可能性があるかを見ることとされている。

こうした評価方法の採用が検討されている理由は、一般

表1 REFで提案されているインパクトのタイプの主要項目^[3]

- ①高度なスキルを持った人材の輩出
- ②新ビジネスの創出、既存の企業の実績向上、あるいは新製品や新プロセスの商業化
- ③グローバルなビジネスからの研究開発投資を引きつけること
- ④より詳細なデータに基づいた公共政策立案や、改善された公的サービス
- ⑤医療ケアまたは保健関係の改善
- ⑥環境持続性を含む持続可能な開発への進展
- ⑦社会における科学研究への関与の向上等社会的文化の強化
- ⑧社会福祉、社会における連帯や国家の安全保障の向上

（この表は、Research Excellence Framework^[3]のp41とp42から要点部分のみを抜粋して作成）

にインパクトの評価においては、時間的ずれ、帰属、裏づけといったことが大きな問題となるからである。

「時間的ずれ」とは、研究の実施とその研究のインパクトが明らかになるまでの間には、一般に長い時間的ずれが生じ得ることを指している。この問題に対処するには、個々の研究アウトプットのインパクトを特定しようとするよりも、むしろ、実施されている研究のインパクトを十分長期間にわたって考慮すること、また研究ユニット全体のインパクトを広く概観することによりある程度解決できる、とされている。

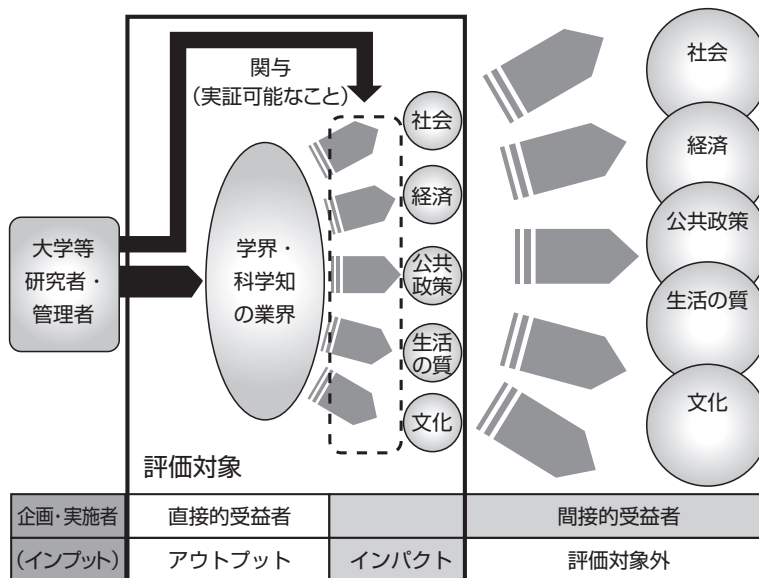


図1 REFにおけるアウトプットとインパクトの定義、および評価の対象範囲の概念図

大学等における研究者の研究活動により、いわゆる「学術的な知」が生産され、それが社会や経済等のさまざまなところに波及して行って「波及効果」をもたらす。この時、大学等の研究者は研究の「企画・実施者」であり、学術の知というアウトプットが生産される学界内の関係者が「直接的受益者」、さらにその波及効果を得るものが「間接的受益者」となるが、REFでは波及効果を二つに分け、研究者がその創出に関与しており、かつそれが実証可能な波及効果のみを「インパクト」と定義し（破線内の部分）、それ以外のものはインパクトとは呼ばない。REFで評価対象となるのは、卓越したアウトプット、およびそうしたアウトプットを土台にして創出された波及効果の内、研究者がその創出に関与して、かつそれが実証可能なもの（太線で囲った部分）に限定される（[9]を元に作成）。

「帰属」とは、研究がインパクトにつながるプロセスは直線的ではなく、インパクトに影響を及ぼす多数の仲介因子が存在している問題を指す。すなわち、研究者や機関の影響だけでなく、他の要因がインパクト形成に影響を及ぼすことがあることが認識されている。そのため、インパクトのどの部分が当該研究ユニットの研究活動に「帰属」されるのかを特定する必要がある。REFでは、卓越した研究の移転に対する、研究ユニットの研究駆動型の貢献を示すことがポイントとされている。その際、定量化可能な指標によって研究インパクトが「計測」され得る範囲には、限界があることも認識されている。これらのことによりREFでは、適切な指標に基づいた、論理立てて筋書き性のあるエビデンスを概説することが要求されることになったのである。

そして「裏づけ」とは、インパクトの検証や裏づけに伴う諸課題のことで、REFでは必要に応じて第三者による検証の機会も含まれている。また、被評価側によって提供されたエビデンスの信憑性についても、その判断のため、研究の利用者（ユーザー）を含むエキスパートパネルによって、精細に調べられることになっている。

5 研究環境の評価および総合配点

三番目の評価軸の「研究環境」の項目においては、研究ユニットの研究環境の質、およびそれが持続しているかの評価、高等教育研究拠点の活性化への貢献、さらにそれが機関や分野を超えてどの程度広く貢献できたかを評価する。これは研究ユニットがどのくらい研究のインフラを展開し、卓越した研究を連続的、効果的に普及応用できるよう貢献したか、その幅広いサポート活動を評価するものである。

前述した政策的な面での重要性に鑑み、「インパクト」には「研究環境」よりも高い重みづけられることが検討されている。インパクトは研究ユニットの卓越した研究を土台としていることが前提にされていることから、こうした配分により、卓越した研究をインパクトに結びつけられたものに対しては大きな比重がかけられ、評価結果全体に大きな影響を及ぼすようにする設計となっている。

6 評価の設計

研究評価にあたっては、あるひとまとまりの研究の単位であって、そこから実体的な成果が生まれるような階層で、卓越性が評価される。これはおおそ学科(department)に相当する。評価は、こうした大学といった機関内の一連の活動を単位として行われ、(分野等の)評価領域で説明するのに最も適した形で単位が決められる。これはこうした評価結果が、その後の研究予算の傾斜配分に直接反映

されること、REFが個々の研究者や機関全体を評価するものではないことに対応しているからだと考えられる。

提出資料としては、研究スタッフやそのアウトプット、そして研究によってもたらされるインパクト、研究環境に関するその他の定性的および定量的な情報の詳細な記述が求められている。それに対して評価基準やプロセスは、すべての評価領域(分野)や評価パネルで整合的なものになるよう設計される予定であるが、分野間の違いがあった場合は弾力的に対処するものとしている。これはファンディングを行う際の統一性を保つためや、被評価者側に対して不必要に複雑な手続きを避けるために有用であろう。

7 日本における「アウトカムの視点からの評価」や「大学評価」との関連性

産総研においては、2005年度からの研究ユニットを対象とした評価に、「アウトカムの視点からの評価」を取り入れた。これは研究成果が将来どのようなアウトカムとなって社会的な貢献を行うのか、その目標とともにそこに至るシナリオやロードマップを明らかにして、それをアウトプットともに評価対象とする評価手法である^{[6][7]}。当初このような方法で評価が可能かどうかとの声も聞かれたが、すでに7年以上の実績を経て現在は定着し、効果も表れているようである^[8]。この評価の特徴は、将来的なアウトカムの設定やそこに至る道筋や方法が妥当であるかどうかを、ピアや関係者(大学、産業界、ジャーナリスト、官界・独法関係者等)で構成される評価委員会で評価することである。アウトカムとインパクトはかなり近いものがあり、一部重なっているが、必ずしも同一のものではない。平澤^[9]によればアウトカムは研究開発においては「研究開発成果の本質的なし内容的側面」であり、政策・施策であればその目的に照らした本質的内容である。例えば施策目的が疾病予防の場合、「疾病患者数のトレンド」等がそれに該当するとしている。一方、インパクトは研究開発においては「研究開発者の手を離れた後の間接的成果による波及効果」であり、政策・施策においても「意図した結果以外の波及効果」と位置づけた。このようにアウトカムは「意図した結果」であり、インパクトを「意図した結果」以外の「波及効果」と定義した場合、産総研のように明確な目的を設定して行う研究開発を行う場合と、大学の基盤的基金による研究のようにいわば真理の探究で進めるべき研究では、その評価の対象がそれぞれアウトカム、インパクトと異なっているのはよく理解できる。

一方、我が国の大学評価(国立大学法人を対象)では、大学評価・学位授与機構が中期目標期間における教育研究の状況について評価を行ってきたが^[10]、英国のREFに

相当するものとしては、「学部・研究科等の現況分析」があり、これは REF のアウトプット評価に対応すると考えられる。このうち研究業績の分析結果として大学側が学術的意義に加えて社会、経済、文化的意義を記入する欄があり、そこには「客観的指標等の根拠を示しつつ」、研究業績の社会・経済、文化貢献の卓越性を述べることになっている。したがって、研究業績のインパクトを考慮していないわけではないが、明確なインパクト評価の取り入れには至っていないと言えよう。なお、最近では国立大学法人の第 2 期中期計画期間（平成 22 年度～27 年度）における評価方法の改訂の検討がなされているが^[11]、特に学術的意義と社会、経済、文化的意義のそれぞれに関する評価資料のバランスは各学部・研究科に任されており、その片方のみではなく両方の意義について、大学側から評価資料を提出してアピールすることが可能となるよう議論が進んでいる。

REF と我が国の大学評価を比較した際の最も大きな違いは評価の活用であると考えられる。REF の場合はその結果によって大学への予算額を変化させると言う明確な反映があるが、我が国の大学評価の場合は、評価の反映の明確さを欠いていることが大きな課題であると言えよう。

8 おわりに

以上、現在検討されている REF の概要を説明してきた。基礎研究をもっぱらとする大学に対して、英国では特に「インパクト」という概念を導入し、研究結果の社会への波及についても高い評価の比重を置いていることが大きな特徴である^[12]。特に、英国においては「研究に力を入れ、競争力を備える企業家精神にあふれた大学が、国家の安寧や繁栄に欠かせない存在であるとの認識」が広まっているために^[12]、大学の研究評価やその方法の改革に熱心に取り組んでいると思われる。また製造業が弱い英国においては、より一層大学の知をベースにした知的新産業の振興にも重点をおいているといえる。

こうした傾向は科学技術を使って、国力の増進や国際競争力の強化、持続可能な社会の構築等を目指す先進国では共通の傾向として見られており、今後、社会への貢献を目的とする産総研のような我が国の公的研究開発機関における研究の評価においても、このようなインパクト評価は一つの参考になるであろう。

一方、このようなインパクトの評価方法については議論もある^{[13][14]}。パイロットスタディの結果や意見の反映を経て、第 2 次案では重み付けが、インパクト 25 %、アウトプット 60 % だったものが、2011 年での最終案ではそれぞれ 20 %、65 % に変更されており^[15]、今後は実際にどのように運用されていくのか、その動向が注目される。

謝辞

産総研中国センターの中村修所長、および評価部の栗本史雄首席評価役には丁寧な査読を頂き、貴重なコメントを頂きました。また大学評価・学位授与機構の林隆之准教授からは、大学評価に関する貴重な情報を頂きました。この原稿は、2012 年 3 月 22 日に行われた産総研評価部による平成 23 年度第 2 回研究評価セミナーにおいて発表したものを元に論説化したものです。貴重な発表の機会を頂いた評価部の関係者には、ここに記して謝意を表します。

注 なお、英国の大学に対しては研究評議会（RC: Research Council UK）が別途研究資金を提供しているが（基盤的研究予算の約半分）、こちらは独自に個別のプロジェクトまたはプログラムごとに評価を行い、基金提供を行っている。また、そこでもインパクトは重要な評価軸ではあるが、これは達成されたインパクトではなく研究成果から将来予想されるインパクトを対象としている。

参考文献

- [1] <http://www.ref.ac.uk/>
- [2] 岩田末廣: RAE2008に向けて: UK における研究評価事業、*大学評価・学位研究*, 5, 独立行政法人大学評価・学位授与機構 (2007).
- [3] http://www.hefce.ac.uk/media/hefce1/pubs/hefce/2009/0938/09_38.pdf
- [4] <http://www.ref.ac.uk/background/>
- [5] <http://www.ref.ac.uk/background/pilot/>
- [6] 産業技術総合研究所研究評価検討委員会: *産総研の研究開発評価のあり方 (中間まとめ)* (2004). <http://unit.aist.go.jp/plan/research-evaluation/report/report.pdf>
- [7] O. Nakamura, O. Nakamura, M. Takagi Sawada, S. Kosaka, M. Koyanagi, I. Matsunaga, K. Mizuno and N. Kobayashi: Strategic evaluation of research and development in a Japan's public research institute, *New Directions for Evaluation*, 118, 25-36 (2008).
- [8] O. Nakamura, S. Ito, K. Matsuzaki, H. Adachi, T. Kado and S. Oka: Using roadmaps for evaluating strategic research and development: lessons from Japan's Institute for Advanced Industrial Science and Technology, *Research Evaluation*, 17, 265-271 (2008).
- [9] 平澤冷: 実績概念の枠組みとアウトカムの定義, *研究開発のアウトカム・インパクト評価体系*, 科学技術振興調整費成果報告書 (2006). <http://scfdb.tokyo.jst.go.jp/pdf/20051270/2005/200512702005r.pdf>
- [10] 大学評価・学位授与機構ウェブサイト: http://www.niad.ac.jp/n_hyouka/kokuritsu/index.html
- [11] 国立大学教育研究評価委員会資料: http://www.niad.ac.jp/n_kikou/shokaigi/hyouka/kokuritsu/_icsFiles/afieldfile/2012/06/21/no6_9_H240619siryout-3.pdf
- [12] ガレス・ロバーツ: イギリスにおける研究評価の改革, *新時代を切り拓く大学評価 日本とイギリス* (秦由美子: 編著), 233-251, 東信堂 (2005).
- [13] N. Gilbert: Plans for UK research assessment revealed, *Nature*, doi:10.1038/news.2009.933 (2009).
- [14] N. Gilbert: UK science will be judged on impact, *Nature*, doi:10.1038/468357a (2010).
- [15] <http://www.hefce.ac.uk/news/newsarchive/2011/name,62310,en.html>

執筆者略歴

大谷 竜 (おおたに りゅう)

1999年3月東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻博士課程修了。博士(理学)。同年4月通商産業省工業技術院地質調査所入所。2001年4月独立行政法人産業技術総合研究所地球科学情報研究部門研究員。2013年現在、同地質情報研究部門主任研究員。この間、2003年2月から2005年2月までスタンフォード大学客員研究員。これまで、主にGPSを使った精密計測手法による地震や地殻変動、大気圏変動に関する研究に携わってきた。この論文では、REFの第二次案の「総括」の章から「アウトプットの質の評価」の章までの翻訳を元に、第1章の一部、第2章から第6章、第8章の一部の執筆を担当した。



加茂 真理子 (かも まりこ)

2009年3月東北大学大学院理学研究科修士課程修了。同年4月独立行政法人産業技術総合研究所入所。評価部を経て、2011年4月より経済産業省産業技術環境局技術振興課。専門は研究評価論等。この論文の元となるREFの第二次案の「研究環境の評価」の章から「社会経済インパクトの評価」の章までの翻訳を担当した。



小林 直人 (こばやし なおと)

1973年京都大学理学部物理学科卒業、1978年京都大学工学研究科博士課程修了、同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。1997年より企画室長、量子放射部長を経て、2001年産業技術総合研究所光技術研究部門長、2003年同研究所理事、2009年4月より早稲田大学研究戦略センター教授。専門は光デバイス工学、半導体材料工学、量子ビーム工学、研究戦略・評価論等。この論文では、REFの第二次案の「総合的な評価の結果」の章から「責任負担」の章までの翻訳を元に、我が国におけるプログラム評価の現状についての考察・論述を行い、第1章の一部、第7章、第8章の一部の執筆を担当するとともに、全体の監修を行った。



査読者との議論

議論1 全体

コメント (中村 修:産総研中国センター、栗本 史雄:産総研評価部)

英国における新たな大学評価の枠組みを紹介して、日本の評価システムに示唆を与えることを主眼とした、社会的インパクトを生み出す研究推進に資する構造的な研究評価を考察するための時宜を得た論説でありますので、シンセシオロジーに掲載することにより、広く議論が展開されることを期待したいと思います。

議論2 日本の評価との対比

コメント (中村 修)

全体的構成は申し分ありません。多くの紙面を費やしてREFについて分かりやすく紹介されていますが、日本の評価システム(特に大学)の実際と比較した考察をさらに深められたらいかがでしょうか。具体的には、第7章に、日本の大学の評価の実態をもう少し詳しく表記して、今回紹介したREFの事例との違いをさらに浮き彫りにされることを提案します。

回答 (小林 直人)

ご指摘に沿って、以下のように付け加えました。

「なお、最近では国立大学法人の第2期中期計画期間(平成22年度~27年度)における評価方法の改訂の検討がなされているが^[11]、特に学術的意義と社会、経済、文化的意義のそれぞれに関する評価資料のバランスは各学部・研究科に任されており、その片方のみではなく両方の意義について、大学側から評価資料を提出してアピールすることが可能となるよう議論が進んでいる。

REFと我が国の大学評価を比較した際の最も大きな違いは評価の活用であると考えられる。REFの場合はその結果によって大学への予算額を変化させると言う明確な反映があるが、我が国の大学評価の場合は、評価の反映の明確さを欠いていることが大きな課題であると言える。」

なお、英国でなぜこのようにインパクトをREFの評価の中に積極的に導入するかと言う疑問があると思われませんが、これについては研究成果の社会的価値への貢献と言う社会や政府からの要請に関して、大学側が敏感に反応し、評価結果をより積極的に大学のために活用しようとする姿勢があると予測されます。

議論3 評価対象期間

コメント (栗本 史雄)

2014年に導入されるREFについて、評価対象期間(年限)が言及されていません。研究のアウトプットは、対象期間(複数年と思われる)の研究成果と思いますが、一方、社会に対するインパクトを与えた研究は対象期間より以前の研究成果になると考えられます。評価される側(この場合、学科に相当し、産総研の研究ユニット程度の規模を想定)が、現在の研究と過去の研究を繋ぐ研究要素を継続している場合は問題ないと思いますが、年月を経ていると研究とインパクトの実態把握やインパクトの検証に困難が生じる可能性があると考えられます。いかがでしょうか。

回答 (小林 直人)

ご指摘のように、REFの評価対象期間は複数年になります。アウトプットの場合は、前回の評価からその回の評価票提出時までがそれにあたる考えられます。一方、インパクトの場合、対象となるインパクトが発生した期間はアウトプットと同じ評価期間ですが、そのインパクトの元になる研究成果は、その期間に先立つことおおむね15年前以降に生みだされたものとされているようです。実際、2010年のインパクトのパイロット・スタディでは、インパクトの現れた期間は、2005年から2009年までで、その元となる研究成果は1993年以降に生みだされたもの、という規定がなされています。そのようにこの論文に加えしました。

なお、今回のパイロット・スタディを受けた関係者から直接間接に事情をお聞きしたところ、かなり古い時点の成果までさかのぼることは極めて大変であって、今後資料の整理・保管も重要事項となる、とのことでした。

参照URL

<http://www.ref.ac.uk/background/pilot/>

REF impact pilot: revised case study template and guidance July 2010

議論4 図の解説

コメント (中村 修)

第1図ですが、図の見方について詳細な解説が欲しいところです。REFの構造を図示した核心部分でありますので、分かりやすい説明をお願いしたいと思います。

回答 (大谷 竜)

以下のように、図のcaptionに詳細な説明を加えました。

「大学等における研究者の研究活動により、いわゆる「学術的な知」

が生産され、それが社会や経済等のさまざまなところに波及して行って「波及効果」をもたらす。この時、大学等の研究者は研究の「企画・実施者」であり、学術の知というアウトプットが生産される学界内の関係者が「直接的受益者」、さらにその波及効果を得るものが「間接的受益者」となるが、REFでは波及効果を二つに分け、研究者がその創出に関与しており、かつそれが実証可能な波及効果のみを「インパクト」と定義し（破線内の部分）、それ以外のはインパクトとは呼ばない。REFで評価対象となるのは、卓越したアウトプット、およびそうしたアウトプットを土台にして創出された波及効果の内、研究者がその創出に関与していて、かつそれが実証可能なもの（太線で

囲った部分）に限定される（[9]を元に作成）。」

議論5 インパクト評価指標の活用

コメント（中村 修）

インパクト評価の指標（表1）が引用されていますが、具体的で充実した内容であり、日本の評価の指標としても有用であると思いますので、大いに活用すべきことを記述してみたいかがでしょうか。

回答（大谷 竜）

そのようにこの論文に書き込みました。

研究・技術計画学会第 27 回年次学術大会での講演

構成学(シンセシオロジー)の論文分析による技術の社会導入に向けた方法論

2012 年 10 月に一橋大学で開催された研究・技術計画学会第 27 回年次学術大会において行われた講演と質疑応答の概要をご報告します。

シンセシオロジー編集委員会



出席者 小林 直人 早稲田大学 (シンセシオロジー副編集委員長)
赤松 幹之 産総研 (シンセシオロジー編集幹事)

小林 「研究者が社会に役立つ研究を、効果的かつ効率的に実施するための構成的な方法論の確立」を目指す論文誌である Synthesiology が 2008 年 1 月に創刊され、5 年弱たちました。この論文誌は「研究目標の社会的価値の記述」「シナリオの提示と要素の選択」「要素間の関係付けとそれらの構成・統合」を要件としています。論文に求められるオリジナリティは、設定したシナリオ、選択した要素、そしてその構成・統合の方法によって発揮することを期待しています。

これまでの論文のうち、環境・エネルギー、ライフサイエンス (バイオテクノロジー・ヒューマンライフ)、情報通信・エレクトロニクス、ナノテク・材料・製造、標準・計測、地質の 6 分野から 70 編を分析対象として、要素技術構成の基本型を抽出しました。それらは「アウフヘーベン型」「ブレークスルー型」「戦略的選択型」、そして「螺旋型 (スパイラル型)」構成方法です。

アウフヘーベンとはヘーゲルが提唱する止揚、つまり矛盾する要素が発展的に統一され高め合うことですが、それは技術でもあり得るのではないかと考えました。一例としてガラスモールド法とインプリント法の統合ですが、ガラスモールド法は従来から平坦ガラスへの応用は

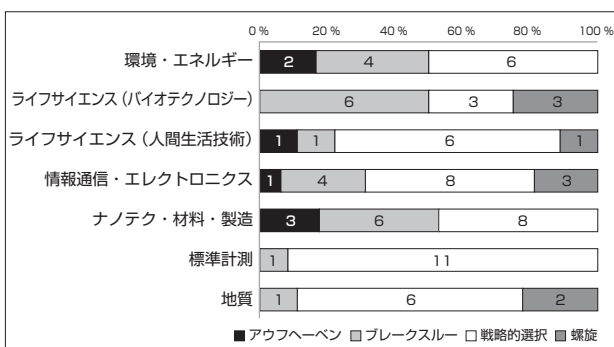
あったものの小さい構造には適しておらず、一方のインプリント法は型の構造を転写するため、高温では適さなかったのですが、これらを合わせて新しいガラスのナノレベルのプロセスを開発したものです。「ブレークスルー型」は重要な要素技術に周辺の要素技術を付加して統合技術に持っていくものです。例えば、「スピントロニクス技術による不揮発性エレクトロニクス」では、新材料・新デバイスの開発から量産技術の開発へという二重のブレークスルーを達成しています。「戦略的選択型」とは、幾つかの要素技術をあらかじめ戦略にのって選択し統合していくものです。「螺旋型」の例としてはライフサイエンス分野のバイオインフォマティクスをあげることができます。G タンパク質共役型受容体の遺伝子特徴の知見を大規模な計算機利用技術で開発して応用するパイプラインを作り、これを公開して実際に使うことで課題を抽出し、それをフィードバックしてまた製品化に持っていくものです。これは我々が当初想定していなかった新しい構成方法です。

6 つの分野では戦略的選択型が多く、70 編のうち 34 編を占めます。ブレークスルー型が 12 編、アウフヘーベン型は 7 編、そして螺旋型は 2 編、あとの 15 編は二

つ以上を結びつけたものです。これらの論文の考察から、技術の構成の基本型として、アウフヘーベン型、ブレークスルー型、戦略的選択型があることに加えて、その過程で社会との相互作用を繰り返しフィードバックする螺旋型という構成方法の重要性も確認することができました。また、技術の構成型は一様ではなく、種々の型の多段の組み合わせがなされることや、分野によって構成型に特徴があることも明らかになりました。

以上で、技術の社会への導入についてお話ししましたので、次に技術の社会での活用についてご紹介します。

分野ごとに4類型に分類した結果 (組合せ型を各類型に重複して計数)



赤松 どれほど素晴らしい技術や製品（プロセス）であっても、また社会ニーズに対応している、社会の中でそう簡単に使われるわけではなく、社会に導入されたからといって必ずしも社会の中で簡単に広がるわけでもありません。

Synthesiology の論文を対象にして、どのような方法で技術や製品が社会導入されたかについて、技術とニーズの関係の観点から分析しました。「社会でのニーズが明確化されている」場合と「社会のニーズが明確化されていない」場合の二つに大きく分けることができます。

まず、「ニーズが明確化されている」場合ですが、先



小林 直人氏

ほどのスピントロニクスで「新材料・新デバイスの開発から量産技術の開発」という説明がありましたが、社会が欲しがっていた高性能かつ高速な低消費電力のメモリの要素技術を開発しただけでなく、企業が活用できる製造技術にまで持っていったという例です。もう一つ、社会での使われ方が定まっているものとして計量標準のトレーサビリティ体系があります。社会でのニーズが明確な場合のポイントは、製品につながる技術であれば、要素技術および大量に製造できる工業製品にするための製造技術を併せて研究開発すること、性能を安定化させること、そしてもう一つ大事な観点としては既存の製造プロセスからの最小限の変更で対応が可能ということ。計量標準のケースでは、技術の供給システムに対応させ、使いやすい設計にしたことです。

次に、「社会のニーズが明確化されていない」場合ですが、一つのやり方として“製品の形にしてやってみせる”というのがあります。持ち運びできるコンパクトな長さ標準器の試作品を作る、あるいは全時間全焦点顕微鏡を試作してインパクトを与えたという例です。“試しに使ってもらおう”方法もあります。サンプル提供できる量の有機ナノチューブを製造する、またサイバーアシスト（状況依存の情報サービス）を実フィールドに近い展示会やイベントで使ってもらおう。技術を実際の形にしてみせることでインパクトを与え、汎用的な技術で製品化できることを示すことができます。多様な使い方が試されることで、技術の適用可能性の検討や技術課題の抽出もできます。

「ニーズは理解されているが、躊躇がある」場合もあります。こういうケースが多いと思うのですが、それには“相手の理解を待つ”か“懐に飛び込む”ことが行われていました。「紫外線防御化粧品と評価装置」は基本技術が完成し、ニーズは理解されたのですが、意思決定に時間がかかるので落ち着いて待ったという事例です。

「ディペンダブル情報システム」は、現場で必要な情報を見極め、説明するだけでなく、実際にやってみせて重要性や価値を共有することができたという事例です。

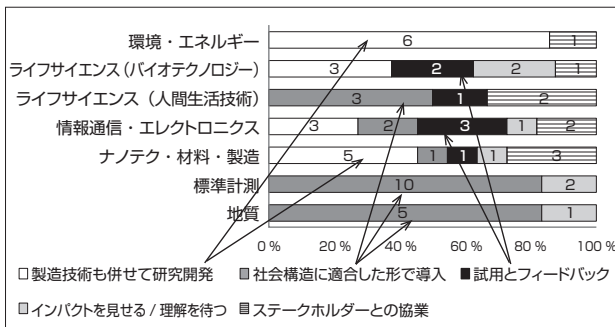
次の段階は、製品化ができて社会に定着させる場合です。「IH 調理器に対する調理システムの開発と普及」では感性的な先導的ユーザーである料理研究家が新しい使い方にチャレンジして、価値が付与されました。また、日本ではカーナビが普及していますが、カーナビメーカーだけでなく国やセンシングメーカー、地図会社等、多様な官民のステークホルダーの連携によって広まったものです。

研究分野ごとの社会導入の特性として、環境・エネル

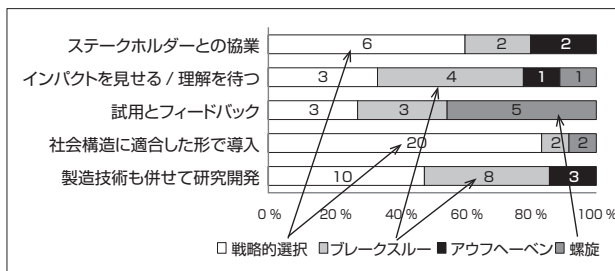
ギー分野においては製造技術を併せて開発することが多く行われていました。エネルギー問題は産業界で出すCO₂問題の比率が高く、トータルとしてのエネルギー問題の解決から製造技術開発が比率的に高くなったと考えられます。ナノテク・材料・製造も製造技術そのものが対象です。一方、社会構造に適合した形での導入が多いのはライフサイエンス（人間生活技術）や標準計測、地質です。試用とスパイラル型に関してはライフサイエンス（バイオテクノロジー）および情報通信・エレクトロニクスが多くなっています。

社会導入に向けた構成を連続して起こすことが研究成果の社会導入には重要です。その際、社会ニーズが明確になっている場合とそうでない場合、産業としての拡大を図る場合、それぞれ異なったアプローチが求められます。「社会導入からイノベーションの創出」を考えると、このような構成例の分析を積み重ね、そのダイナミズムを分析すること、さらにシナリオをどのように構築していくかの分析が必要です。

研究分野ごとの社会導入の特性



社会導入と技術的構成の関係



フロア 研究側の自己評価とその成果を使う産業界等の外部からの評価との齟齬があるのではないのでしょうか。それがイノベティブなものが出てこない原因ではないかと思うのですが。

赤松 シンセシオロジーで論文を書くことは、自分がどのように社会にフィードバックさせるかを考えてきたかを振り返ることであります。自分でどこまでシステムティックに考えていたかが明確に評価できるようになると、社会なり企業の側と話がしやすくなる面があると思います。

フロア 基礎研究は論文の引用でモニタリングができると思うのですが、社会への応用に関して、自動的にマーケティングできるようなモニタリングの方法があるのでしょうか。

赤松 従来の論文誌では、実際に社会で使われるかどうか分からないことから、そこを表現できる論文誌として Synthesiology があります。社会への導入には運・不運もありますが、その運・不運をコントロールするだけの努力なり、仕掛けをどれだけ作ってきたかということが大きなファクターになります。そこをアウトプットの数等の定量的な形で測るのは難しいです。ただ、プロセスをどのように評価するかは可能だと思います。社会への導入を考えて必要なプロセスをとったかで評価することが考えられます。

小林 我々としては事例を積み重ねていくことが大切だと思っています。特に企業の方々はこのところは得意だろうと思いますので、論文をたくさん出していただきたいと思っています。



赤松 幹之氏

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日
 改正 2008年6月18日
 改正 2008年10月24日
 改正 2009年3月23日
 改正 2010年8月5日
 改正 2012年2月16日
 改正 2013年4月17日

1 投稿記事

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

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

3.3.1 見出しは、大見出しである「章」が1、2、3、…、中見出しである「節」が1.1、1.2、1.3…、小見出しである「項」が1.1.1、1.1.2、1.1.3…、「目」が1.1.1.1、1.1.1.2、1.1.1.3…とする。

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

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

3.3.4 図については画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則は、白黒印刷とする。

3.3.5 写真については画像ファイル(掲載サイズで350 dpi以上)で提出する。原則は白黒印刷とする。

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2
産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先:

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

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

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board
(written in January, 2008)

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board
Published by National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: S. ICHIMURA

Senior Executive Editor: M. SETO, N. YUMOTO

Executive Editors: T. SHIMIZU, H. TATEISHI, M. TANAKA, S. TOGASHI, Y. HASEGAWA,
M. AKAMATSU, N. KOBAYASHI, M. YAMAZAKI, H. TAYA

Editors: H. AKOH, S. ABE, K. IGARASHI, K. UEDA, A. ETORI, K. OHMAKI, M. OKAJI, A. ONO,
A. KAGEYAMA, S. KANEMARU, T. KUBO, C. KURIMOTO, K. SAKAUE, H. TAO,
K. CHIBA, E. TSUKUDA, H. NAKASHIMA, S. NIKI, Y. BABA, Y. HINO, T. MATSUI,
Y. MITSUISHI, N. MURAYAMA, M. MOCHIMARU, A. YABE, H. YOSHIKAWA

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

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

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

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

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

URL: http://www.aist.go.jp/aist_e/research_results/publications/synthesiology_e

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

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

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, for subsections, 1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.1.1.3.

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

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

3.3.4 For figures, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be in black and white.

3.3.5 For photographs, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be in black and white.

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

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title of journal* (italic), Volume(Issue), Starting page-Ending page (Year of publication).

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

4 Submission

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

Synthesiology Editorial Board
c/o Website and Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Industrial Science and Technology(AIST)
Tsukuba Central 2 , 1-1-1 Umezono, Tsukuba
305-8568
E-mail: synthesiology-ml@aist.go.jp

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

Synthesiology 6 巻 2 号をお届けします。本号には、5 報の研究論文、1 報の論説、そして 1 件の報告を掲載しました。

研究論文は、ライフサイエンス分野の論文 1 報、ナノテクノロジー・材料・製造分野の論文 2 報、情報通信・エレクトロニクス分野の論文 1 報、そして地質分野の論文 1 報と、分野で眺めれば多岐にわたります。しかしいずれの論文も、技術の波及する社会的価値の追求という観点では共通しています。例えば、ライフサイエンス分野では視覚障害者の訓練技術、ナノテクノロジー・材料・製造分野は新素材の大量・安価な分離技術と、糊葉のデータベース化技術、情報通信・エレクトロニクス分野は業務用ビデオ表示技術、そして地質分野は大陸棚画定調査と、社会インパクトの大きな課題を取り上げています。インパクトの大きさを 2、3 の代表的な題材に関して数値を使って紹介すれば、日本の国土面積にも匹敵する 31 万平方キロの延伸大陸棚（地質分野）、80 年に及ぶ陶磁器研究活動で作成された 30 数万点の糊葉テストピース（ナノテクノロジー・材料・製造分野）、そして黎明期から 40 年にわたるビデオゲーム（情報通信・エレクトロニクス分野）となります。これらの題材を本誌の特色とする構成的なアプローチ法の適用で料理した論文は、いずれも読者の皆様に読み応えがあり、ご満足頂けるものと考えています。

ところで社会的価値の実現は、イノベーション創出を大目標に掲げるグローバル化の時代に合っては世界共通のターゲットで、それが大学という知の源泉を生み出すべき機関の評価指標としても使われ始めています。それを英国での新しい大学評価の枠組みとして紹介したのが論説で、今後日本にも波及する可能性を秘めています。関心を持つに十分な情報提供と位置づけられるでしょう。

最後に、新素材の大量・安価な分離技術（ナノテクノロジー・材料・製造分野）では、ライフサイエンス分野の人材が同分野では多用されている手法をナノテクノロジー・材料・製造分野の人材と「異分野融合」的に展開することで、新たな局面を切り開いた取り組みを紹介しています。このような選択する要素の構成・統合の方法をこれまでの Synthesiology 誌の論文をベースに解析する試みも並行して行っており、それを学会で紹介した時の質疑応答を今号で報告しています。このような解析には、様々なセクターから多岐にわたる研究開発の実施例に基づく構成・統合の方法論を投稿頂くことが不可欠で、その努力が今後の我が国のものづくり力を支えるとも言えます。読者の皆様の積極的なご投稿と引き続きのご支援をよろしくお願い申し上げます。

（編集委員長 一村 信吾）

Synthesiology 6 巻 2 号 2013 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：一村 信吾

副委員長：瀬戸 政宏、湯元 昇

幹事（編集及び査読）：清水 敏美、立石 裕、田中 充、富樫 茂子、長谷川 裕夫

幹事（普及）：赤松 幹之、小林 直人、山崎 正和

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：赤穂 博司、阿部 修治、五十嵐 一男、上田 完次、餌取 章男、大蒔 和仁、岡路 正博、小野 晃、景山 晃、金丸 正剛、

久保 泰、栗本 史雄、坂上 勝彦、田尾 博明、千葉 光一、佃 栄吉、中島 秀之、仁木 栄、馬場 靖憲、檜野 良穂、

松井 俊浩、三石 安、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

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

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Training technology of auditory orientation for people with visual impairments

-Toward practical use in rehabilitation facilities-

Y. SEKI

Separation of carbon nanotubes (CNTs) by the separation method for biomolecules

-Towards large-scale, low-cost separation of metallic and semiconducting CNTs-

T. TANAKA and H. KATAURA

Construction of a ceramic color database

-Database of more than 300,000 glaze test pieces and its application to industrial research-

T. SUGIYAMA

Brief history of arcade video game display technologies

-From CRT display technologies to real time graphics-

Y. SAMBE

A scientific challenge to the delineation of Japan's continental shelf

-Contribution to validating the Japan's rights over marine areas based on earth science-

A. NISHIMURA, M. YUASA, K. KISIMOTO and K. IZASA

Article

An introduction to the Research Excellence Framework: A new research evaluation framework for universities in the UK

-Comparison with the status of research evaluation in Japan-

R. OHTANI, M. KAMO and N. KOBAYASHI

Report

Research presentation at the 27th Annual Meeting of the Japan Society for Science Policy and Research Management (JSSPRM)

-Establishing methodology for introduction of technology to society through analysis of papers published in Synthesiology-

Editorial policy

Instructions for authors