

Synthesiology

人工物工学研究の新しい展開

日常的に利用可能な疲労計測システムの開発

メタンハイドレート開発に係る地層特性評価技術の開発

4次元放射線治療システムに関する国際標準化

塗布熱分解法による超電導膜の合成

シンセシオロジー編集委員会

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標と社会的価値、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスを記述した論文誌です。本号論文の価値が一目で判るように、編集委員会が作成したシンセシオロジー論文としてのポイントを示します。

シンセシオロジー編集委員会

人工物工学研究の新しい展開

—個のモデリング・社会技術化へ—

太田（東大人工物工学研究センター）らは、人工物工学を確立するための研究の方法論を述べている。特に、人工物と個・社会・環境の持続的な調和関係を目指すために、人工物の存在によって価値観が変動する個のモデリングと、目的が不明確な問題に対する関係者間の協働による目的確定と解探索を組み入れた人工物創成の社会技術化から方法論を展開している点が興味深い。その具体例として、実験経済学的手法を用いた個のモデリング、および製品サービスシステムのモデル化が示されている。

日常的に利用可能な疲労計測システムの開発

—フリッカー疲労検査をPCやスマートフォンを使って生活環境で実現—

岩木（産総研）らは、これまで専用装置を用いて学術的用途のみに用いられてきた視覚的な「ちらつき（フリッカー）」の知覚閾値の計測による疲労の評価技術（フリッカー検査）を、スマートフォンやパソコンなどの一般向け電子機器で日常的に利用可能にする技術を開発した。フリッカー検査では点滅周波数を用いているが、点滅のコントラストによっても実現できることを示し、一般電子機器による疲労モニタリングシステムのための要素技術とその統合シナリオを述べている。

メタンハイドレート開発に係る地層特性評価技術の開発

—現場への適用を目指して—

メタンハイドレートを新たな天然ガス資源として利用するためには、採掘に伴う周辺地層への影響を的確に予測することが、経済性だけでなく社会的受容性の観点からも求められる。天満（産総研）による本論文では、「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」の中で進められた、長期的に安全な生産を行うための地層変形シミュレータの開発、それを基にした坑井の健全性評価および広域の地層変形評価技術の体系が俯瞰できる。

4次元放射線治療システムに関する国際標準化

—照射効果の向上と安全性の確保—

放射線治療においては患者の呼吸等に伴い動いてしまう腫瘍に対して、健康な組織の被曝を抑えつつ腫瘍の位置に必要な量の治療放射線を的確に照射する必要がある。平田（北大院）らは、患部の3次元的位置の時間変化を考慮した4次元放射線治療システムに対して、安全性の技術的要件に関する規格を作成した。日本の装置メーカー、医師、医療技術者、研究者、関係省庁など幅広いステークホルダーが合意形成して推進した国際標準化の戦略と成果を述べている。

塗布熱分解法による超電導膜の合成

—限流器等への研究展開—

酸化物高温超電導体は送電線材への応用だけでなく、薄膜化することで様々なデバイスや機器への応用が期待できる。真部（産総研）らは、塗布熱分解法という原料溶液を基板に「塗って焼く」だけという金属酸化物の成膜技術を独自に開発してきた。本論文では酸化物高温超電導体の電力機器応用として事故電流抑制装置（限流器）の開発を目指した。塗布熱分解法を実用化に展開するために採用された要素技術の選択や統合の研究シナリオが詳細に述べられている。

Synthesiology 第7巻第4号(2014.11) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
人工物工学研究の新しい展開 — 個のモデリング・社会技術化へ — ・・・太田 順、西野 成昭、原 辰徳、藤田 豊久	211-219
日常的に利用可能な疲労計測システムの開発 — フリッカー疲労検査をPCやスマートフォンを使って生活環境で実現 — ・・・岩木 直、原田 暢善	220-227
メタンハイドレート開発に係る地層特性評価技術の開発 — 現場への適用を目指して — ・・・天満 則夫	228-237
4次元放射線治療システムに関する国際標準化 — 照射効果の向上と安全性の確保 — ・・・平田 雄一、宮本 直樹、清水 森人、吉田 光宏、平本 和夫、 市川 芳明、金子 周史、篠川 毅、平岡 真寛、白土 博樹	238-246
塗布熱分解法による超電導膜の合成 — 限流器等への研究展開 — ・・・真部 高明、相馬 貢、山口 巖、松井 浩明、土屋 哲男、熊谷 俊弥	247-257
編集委員会より	
「Synthesiology - 構成学」発刊の趣旨	258
編集方針	259-260
投稿規定	261-262
第7巻総目次(2014)	269-270
編集後記	271
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
New research trends in artifactology — Modeling of individuals and socialization technology — --- J. OTA, N. NISHINO, T. HARA and T. FUJITA	211
Mental fatigue measurement as application software on consumer devices — Introducing reliable fatigue index to daily life — --- S. IWAKI and N. HARADA	220
Development of evaluation technologies for sedimentary characteristics — Applicability of the technologies to the assessment of methane hydrate sediments — --- N. TENMA	228
International standardization of four dimensional radiotherapy system — Enhancement of effects of irradiation and assurance of safety — --- Y. HIRATA, N. MIYAMOTO, M. SHIMIZU, M. YOSHIDA, K. HIRAMOTO, Y. ICHIKAWA, S. KANEKO, T. SASAGAWA, M. HIRAOKA and H. SHIRATO	238
Preparation of superconducting films by metal organic deposition — Research and development towards a fault current limiter and other electric devices — --- T. MANABE, M. SOHMA, I. YAMAGUCHI, H. MATSUI, T. TSUCHIYA and T. KUMAGAI	247
Messages from the editorial board	263-264
Editorial policy	265-266
Instructions for authors	267-268

人工物工学研究の新しい展開

— 個のモデリング・社会技術化へ —

太田 順^{1*}、西野 成昭^{1,2}、原 辰徳¹、藤田 豊久^{1,2}

東京大学人工物工学研究センターは、人工物工学に関する諸問題を解決するために設立され、現在第Ⅲ期に入っている。問題解決シナリオとして、まず、問題解決を問題設定の側面から扱う共創的なアプローチを採用する。データ分析法や計算科学、シミュレーションを基盤とし、実験経済学、実験心理学的手法を組み入れたモデル化を指向する。個の認識過程、認識に基づく個の活動、さらには個の価値形成という3つの側面に注目したモデル化を行う。この提案は、マルチステークホルダーの存在による社会技術的な側面と、個のモデリングという人間的な側面の両者を包含しており、製品サービスシステムのモデル化等の新しい問題設定がなされている。

キーワード:人工物、モデル化、個人、社会技術、共創

New research trends in artifactology

– Modeling of individuals and socialization technology –

Jun OTA^{1*}, Nariaki NISHINO^{1,2}, Tatsunori HARA¹ and Toyohisa FUJITA^{1,2}

The aim of Research into Artifacts, Center for Engineering (RACE), the University of Tokyo is to solve problems related to artifactology. The center has entered the third stage. A new approach in the problem-solving process has been proposed in this paper. The scenario for problem solving starts by establishing a problem using the concept of co-creation. Next, models related to artifacts are constructed by integrating the methods used in experimental economics and techniques of experimental psychology into computational science, data analysis, and simulation technology. Modeling of individuals is realized by focusing on three processes: recognition of individuals, activities of individuals based on recognized results, and value construction of individuals. This proposal of RACE includes the socio-technical viewpoint of multi-stakeholders and the human-centered viewpoint of modeling of individuals. Several new research topics are presented, including novel modeling methodology for product service systems (PSS).

Keywords: Artifacts, modelling, individuals, social technology, co-creation

1 はじめに—人工物工学が目指すもの—

人工物工学という学問を対象として扱う、東京大学人工物工学研究センターが1992年に設立された。このセンターの設置目的は、「人工物工学に関する教育研究を行う」ことである。人工物工学という用語は、元東京大学総長吉川弘之の「人工物工学の提唱」^[1]において議論されている。そこでは、まず、我々が直面している環境、貧富、安全、健康等の多くの困難な問題、すなわち「現代の邪悪なるもの」に共通するのは、人類の安全と豊かさを求めてきた行為の結果、全く予期せず生じた点にある、と述べている。そして、既存の学問体系は領域性と視点の限定によって構築されたものであり、これらの問題の解決のために適用できないのはおろか、これらの問題を生ぜしめた原因となっ

ている、と主張している。そして、その解決のためには、人間が創出するものすべてを対象とし、領域を否定し、どの視点も取り入れられる新たな学問、すなわち従来型の演繹を基盤とする学問ではなく、仮説・法則や行為を導出するためのアブダクションを基盤とした学問として「人工物工学」という学問体系を説明している。

この論文では、まず人工物工学を、周辺学問領域との関係において概観する。そして人工物工学研究センターが提唱する今後の人工物工学における新しい課題、方向性、ならびに研究の方法論を提案する。そして、構築した新しい方向性、方法論に沿ってセンターメンバー間で抽出した人工物工学に関する具体的課題について述べる。

1 東京大学人工物工学研究センター 〒277-8568 柏市柏の葉5-1-5、2 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 文京区本郷7-3-1
1. Research into Artifacts, Center for Engineering (RACE), the University of Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa 277-8568, Japan
* E-mail: ota@race.u-tokyo.ac.jp, 2. School of Engineering, the University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku 113-8656, Japan

Original manuscript received December 2, 2013, Revisions received May 12, 2014, Accepted July 4, 2014

2 人工物工学と他の学問領域との関係、人工物工学の新たな課題

2.1 人工物工学の位置付け

本節では、人工物工学に関連する学問領域を概観する。

Simon は「システムの科学」^[2]において、自然を対象としその解明を試みる自然科学との対比において、人間が作った人工物に関する学問体系構築の試みを行っている。そこでは、人工物を扱う学問体系のカリキュラムを、デザインの評価、代替案の探索、限定合理性等社会をデザインするための拡張、という観点から論じている。市川は、後向け因果性を前提としない科学を人工科学と定義しており^[3]、その成果が、美しさと有用さにより人間により評価されると述べている。ギボンズらは現代社会における知識生産のモードの変化を探求している^[4]。そこでは、各々の学問領域の中で内的論理によって生み出される従来型の知識をモード1と呼び(一般的な科学はモード1に対応する)、より社会に開かれたトランスディシプリナリな領域の中で生み出される知識をモード2と呼んでいる。その上でモード1とモード2の関係について論じている。また「総合工学」という学問分野は「旧来の工学には見られなかった工学における横型分野であり、あらゆる工学体系や知識を総動員して設計・製造される人工物に関する分野である」^[5]と定義されている。その重要性のため、日本学術会議では第20期(2005年)から総合工学委員会がスタートしている。このように人工物工学的な問題意識は、多くの研究者間に共有されており、対象に依存しない横型の学問体系の重要性が認識され続けていることが分かる。

対象に依存しない学問領域の中で人工物工学に関連が深いものとして、「問題解決」が存在する。Smithは広義の問題解決を、問題の同定・定義・構造化等から構成される問題設定と、診断・代替案の生成等から構成される狭義の問題解決の二つに分けて考えている^[6]。多くの場合、後者は適切なモデル化と最適化法等により適合解を得ることが多い。前者はいくつかの方法が提案されている^[7]が、まとめてソフトシステムアプローチ^[8]と呼ばれることが多い。代表的な手法がソフトシステム方法論(Soft Systems Methodology: SSM)^[9]である。ここでは、accommodationと呼ばれる複数の問題当事者が他を受け入れる状況を目指して、7つのステージからなるモデルが提唱されているものの、定性的な議論が多い。総合的な問題解決のためには、両者のアプローチの融合が不可欠であり、さまざまな試みがなされている(例えば文献[10])が、現在確固たる方法論が確立できていない。

上記の背景を踏まえ、人工物工学研究センターが取り組んでいる人工物工学の位置付けを俯瞰したい。日本学術

会議「新しい学術体系委員会」が2003年に取りまとめた対外報告書では、人工物工学と関連の深い設計科学について以下の議論がなされている^{[11][12]}。

「あるべきものの探求」を目的とする知の営みには広い意味での「設計科学」という呼び名がふさわしい。設計科学は目的や価値を正面から取り込んだ新しい科学でなければならない。設計は人間のためのものであるから、設計科学の対象は人工物システムである。新しい学術の体系は、「文」と「理」に共通する「秩序原理」という新しい概念を通して構築される。「物質界」「生物界」「人間界」の3つの階層がそれぞれ「物理学」「生命科学」「人文・社会科学」に対応する。設計科学はそれぞれのドメインに限定された対象を持つわけではなく、上記3つのドメインのどれにもかかわる「人工物システム」を対象とする。設計は不変の法則と可変のプログラムを組み合わせることによって目的を達成し、価値を実現する極めて人間的な行為であり、設計科学はそのための合理的な基盤を与える「人工物システム科学」でもある。

すなわち、人工物工学とは、普遍的な意味の人工物システムを新しく作り出す(設計する)ための学問体系であり、前述した問題解決とは異なり人工物を生み出すことに重点を置いていると言って良い。

2.2 人工物工学研究が踏み出してきた領域と新しい課題

人工物工学を扱う人工物工学研究センターがどのような研究を遂げてきたかを以下に述べる。同センターは、当初、設計科学、製造科学、知能科学の3部門の体制でI期(1992年～2002年3月)がスタートした。そこでは、人工物工学の課題分析とその一般化(研究アジェンダの設定)を行い、新たな機能を実現する仮説と発見の論理構築の基礎を築き、人工物工学教育に関するミッションとして脱物質化、脱領域化が抽出された。これらは既存のさまざまな分野を、機能性と普遍性の観点から統一的にとらえ直すことによって、より発展性のある新たな学術分野を構築する理念でもある。ただI期では課題抽出が主な成果であり、現代の邪悪に対処する方法論を構築できたとは言えなかった。そこで、I期の成果の現実問題への適用(創出行為の研究)を目的としてII期(2002年4月～2013年3月)がスタートした。ミッションを実現する上で攻究すべき4つの分野を提案し、それぞれを部門とした。まず、人工物工学における問題や知識表現法としてデジタル価値工学を提唱した。次に脱物質化の方法論として、大量生産・消費ではなくリサイクルやメンテナンスを扱うライフサイクル工学、物質の製造ではなく機能の提供という観点から人工物を論

じるサービス工学、そして個人間の合意形成やそれに伴う社会の構築を扱い、脱領域的な観点から上記のライフサイクル工学とサービス工学を結びつける共創工学を位置づけた^{[13][14]}。また、人工物工学にとって重要な概念である価値を扱った価値創成イニシアティブ(住友商事) 寄付研究部門を2005年12月から2010年3月まで継続した。Ⅱ期の成果として、ライフサイクル工学研究部門では、これまで行われてきたライフサイクル工学をモニタリング、メンテナンスまで拡張した学問体系を確立した。サービス工学研究部門では物質的機能のみにとらわれないサービスの設計論とその産業展開を、デジタル価値工学研究部門では知の新たな表現と価値の創出を、そして共創工学研究部門では異分野や多様な行動主体の共創による問題解決の方法論を求めるとともに、3つの研究部門を統合する基盤を築いてきた。寄付研究部門では人間の価値観について扱い、そのモデル化を行った。

Ⅱ期の成果を全体としてとらえると、例えば資源制約や廃棄を考慮した人工物の設計や大規模複雑シミュレーション基盤の技術等、物質界に重心を置いた設計科学を対象とした研究成果を多く出してきたと言える。しかしながら構築した人工物をどのように「多様で変動する人」や「多様で変動する社会」に浸透させるかという観点からの議論はまだまだ不十分であり、課題が残されている状態であった。

3 人工物工学の新しい方向性

3.1 新しい方向性の提案

現在、人工物工学研究センターではⅢ期(2013年4月～)がスタートしている。Ⅱ期での成果、限界を踏まえ、Ⅲ期では学問対象を人文・社会科学にまで発展させ、より包括的な人工物システム科学の学問体系の構築を目指す必要があると考えた。そのために、これまでの4部門間の融合を深め、メンバー間の相互作用を促進するという観点ならびに、人工物と人と社会というテーマをインテンシブに扱うため、2部門に再構成した。図1に人工物工学に対する人工物工学研究センターの取り組みの推移を示す。この図は、文献[15]をベースに議論、作成したものである。すなわち、よりミクロな観点から、多様で変動する人への人工物の浸透や相互作用を扱う Human-Artifactology 研究部門(人工物と人との相互作用研究部門)と、よりマクロな観点から、多様で変動する社会への人工物の浸透、相互作用を扱う Socio-Artifactology 研究部門(社会の中の人工物工学研究部門) からなる体制とした。

人工物と人との相互作用研究部門では、さまざまな社会の問題の解決を目指す中で、人と人工物のかかわりについて研究を行う。第Ⅱ期で得られた価値のモデルとサービス工学研究で得られた知見をベースとして、人に関する重要課題である個のモデリング、すなわち人工物の存在により価値観が変動する、ダイナミクスまでも考慮した多様な個のモデリングを目指す。製品サービスシステム設計や人間機械協調システム設計等の具体的な問題を扱う中で、普遍的観点からの人工物と人のかかわり方を明らかにしていく。

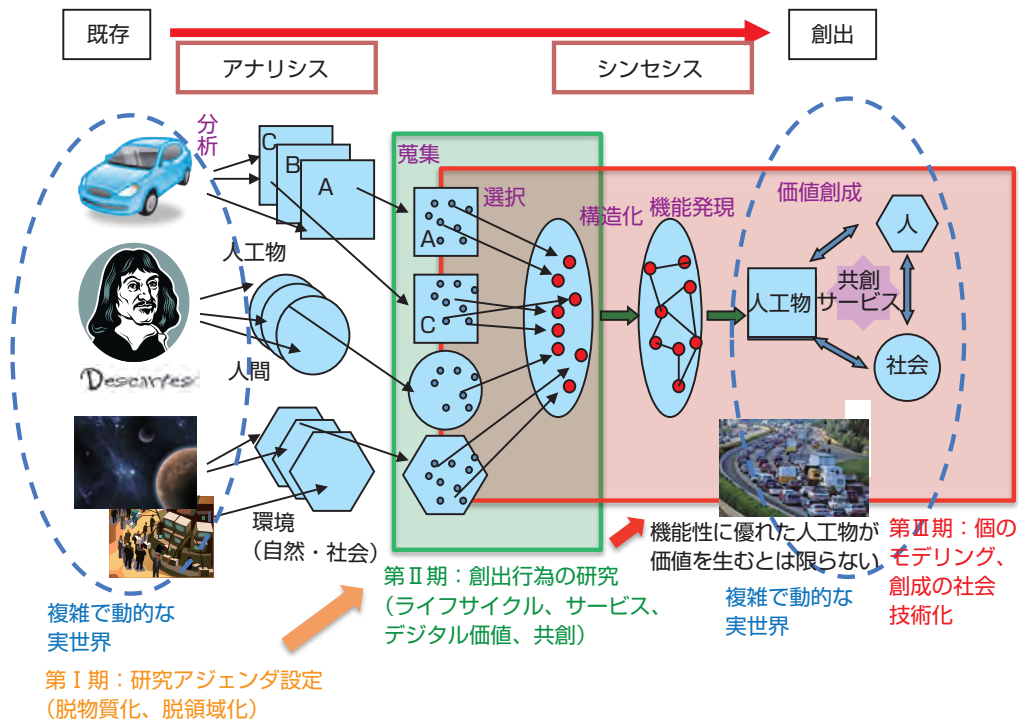


図1 人工物工学に対する東京大学人工物工学研究センターの取り組みの推移

社会の中の人工物工学研究部門は、さまざまな社会の問題の解決を目指す中で、社会と人工物のかかわりについて研究を行う。第Ⅱ期で得られたライフサイクルシステム概念、共創の概念をベースとして、社会に適用する人工物創成の社会技術化を目指して、目的が不明確な問題に対する関係者間の協働による目的確定と解探索とを組み入れた、人工物システムの共創的設計方法論の提案を目指す^[16]。ここで、社会技術とは「自然科学と人文・社会科学の複数領域の知見を統合して新しい社会システムを構築していくための技術」^[17]を意味する。分野として多様性を有する総合工学に属する諸問題－例えば複合領域最適設計、地球環境問題を扱う共創技術戦略－を扱う中で、社会と人工物のかかわりに関する共通構造を明らかにしていく。上記二部門の連携により、センター全体の目標を「動的に変動する個のモデリングに基づく人工物創成の社会技術化」と設定し、人工物と個・社会・環境の持続的調和関係の持続的な構築を目指す。

3.2 研究の具体的方法論

前節で、今後は、個のモデリング、人工物創成の社会技術化という観点からアプローチすることを述べた。ここでは、その具体的な方法論について述べる。

まず「個のモデリング」について議論する。この問題については、Ⅱ期でも扱ったが個々の相違のモデル化までの成果が主であり、その個の変容具合＝ダイナミクスについてはほとんど扱っていなかった。実社会の問題においては、行為主体が徐々に変容するのが通常なので、この問題は非常に重要である。問題解決のための議論を階層性から始める。モデル化を、対象の複雑さに着目して、人と人工物に対して行う。それぞれをモデルとして記述するとおおまかに図2のようになる。身体部位、部品等の要素があつて、人や人工物が構成され、それらが集まって集団となり、最終的に社会を構成する、という意味である。個々の四角は二つ以上の階層から構成されていると考えられる。それ

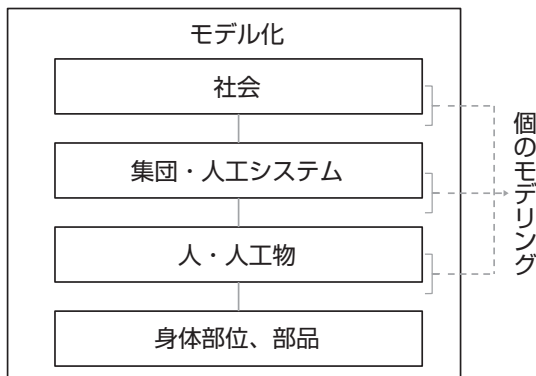
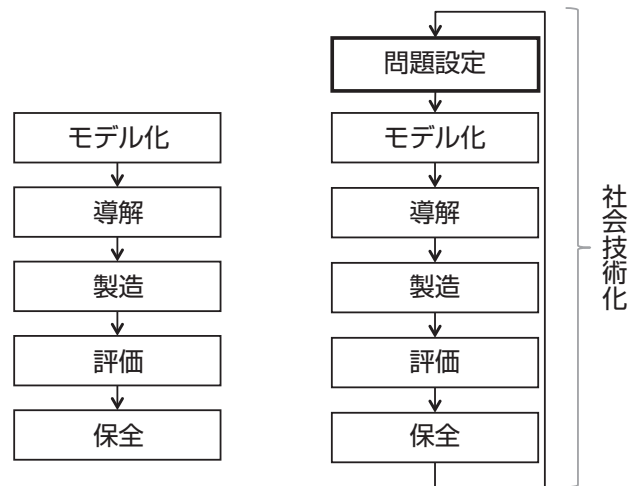


図2 モデル化の全体像と個のモデリング

ぞれの階層でのモデル化は多く行われているが、異なる階層をつなぐモデル化は一般的に非常に困難である。その理由としては、各々のモデルの表現形式が異なるということが挙げられる。また、ある階層のモデルがhomogeneous(均質)の場合に、それに隣接する階層がheterogeneous(不均質)となるという特徴を有しているという議論がある^[18]。階層構造のモデル化についてはすでにいくつかの手法が提案されている^[19]ものの、一般的な知見という観点からは改善の余地が残されている。ここでは、単純化のため、ある四角における個はその最下部で表現されると考え、それらが、直下の四角の最上位部における均質要素(おのおの内部状態を有し、その状態量は異なる値をとり得る)間の相互作用という形式でモデル化する。この際、要素の内部状態や相互作用の相違が個の多様性となり、そのダイナミクスが個のダイナミクスとなる。

社会技術についてはすでに多くの研究がなされている(例えば文献[20])が、ここでは問題解決の側面から「社会技術化」という言葉をとらえる。その過程にはさまざまなものが存在するが、通常は、図2で述べた問題のモデル化を行い、導解、製造、評価、保全という段階を踏んで物事が進む(図3(a))。ここで製造とは得られた解を実社会に導入するという意味であり、実体を作ることに限定せず広くとらえている。人工物創成も一つの問題解決過程であり、同様のプロセスを踏むが、ここでは「社会技術化」を目指すということを、それらの前段、すなわち問題設定から考えるというようにとらえる(図3(b))。これは、前述のSmithの広い意味での問題解決に対応する。良く知られていることであるが、人工物を作り出す際には、利害関係等が必ずしも一致しない複数の当事者がいる環境すなわ



(a) 狭義の問題解決を重視した設計過程 (b) 社会技術化を含んだ設計過程

図3 社会技術化を含んだ人工物設計過程

ちマルチステークホルダー環境を想定する必要がある、この構造の問題の定式化ならびに体系化が人工物創成の社会技術化に役立つものと考えている。この問題解決は、上田らが提唱してきたクラスⅢ問題と深い関係がある。上田によれば、人工物システムの設計の問題は大きく3つのクラスに分けられる^{[21][23]}。このうち、クラスⅢ問題とは「不完全目的情報問題であり、環境ばかりでなく、目的に関する情報も観測者には予測できず、問題を完全に記述できない^[7]問題と述べられている。これと前段の議論を踏まえて、我々が再解釈すると、目的や仕様が曖昧な問題を、設計者や受給者が協力して目的と仕様を同時に決定し、問題解決するものである、となる。この問題は非常に取り扱いがやっかいであり、Ⅱ期においてはあまり正面から扱わなかった問題であったが、Ⅲ期ではいくつかの実際の社会の問題を解決する上で、この問題ならび解法の体系化を目指すものである。

これらの問題を含んだシステムの解決シナリオについて述べたい。

(1) まずは、データ分析技術やシミュレーション、計算科学をモデル化の基盤として利用する。当センターのメンバーの多くはこれらの分野の専門家である。ここではそれらに加えて、比較的少数の行動主体から構成されるエージェントの行動原理ならびに相互作用を経済的側面または心理的側面から実験的に導出する実験経済学、実験心理学的手法を組み入れることを考える。

(2) その上で、個のモデリングをする。ここでは個をエージェントとしてとらえ、個の認識過程、認識に基づく個の活動、その活動を生成する基盤となる個の価値形成という3つの側面からのモデル化を行う。上述の相互作用は、各側面に対応するステップで表現され、マルチステークホルダー同士の相互作用、調停が表現できることになる。このようなモデルを階層ごとにつなぎ、社会、人、人工物のモデル化を目指す。

(3) (2) で形成されたモデル化に基づき、問題解決を遂

行する。図4は上述の問題解決のシナリオの全体像を示したものである。図中左部の手法群を用いて動的に変動する個のモデル化を行う。それらは右側に記述されている問題解決プロセス全体に貢献するが、主にモデル化のフェーズで利用される。

ここまででフレームワークの議論ができた。人工物工学の学問体系化という観点からは、さまざまな領域の、個々のアプリケーションを上記のフレームワークに当てはめて記述し、その普遍性を議論する必要がある。問題設定については社会技術学、モデル化については機能学、導解については構成学、製造は製造学、評価は評価学、そして保全は保全学という脱領域型学問体系化を目指す。これは、吉川が提唱する設計型工学カリキュラム^[24]の枠組みに沿ったものである。

4 研究事例と残された課題

本章では、具体的な研究事例と残された課題を述べる。

4.1 メンバー間の協力による共同研究テーマ設定－製品サービスシステムのモデル化を例として

製品サービスシステムとは、「製品を売るだけでなく、製品とサービスの組み合わせによってユーザーのニーズを満たすもの」である。ここでは、人工物工学研究センターで開発した世界初のサービスCADであるサービスエクスプローラーに、実験経済学的手法に基づいた方法論を組み入れることで、サービスを設計するサービス設計者、運用するサービス実務者、享受するサービス受給者の相互作用のモデルを構築する。ここではまず実験経済学的手法に基づく方法論の一般的な考え方を説明し、製品サービスシステムへの応用について述べた後で、それを当該テーマに適用する方法論について述べる。

4.1.1 実験経済学的手法の製品サービスシステムへの適用

実験経済学では、統制された社会経済システムを図5のような実験室環境に構築し、実際の人間を被験者として、

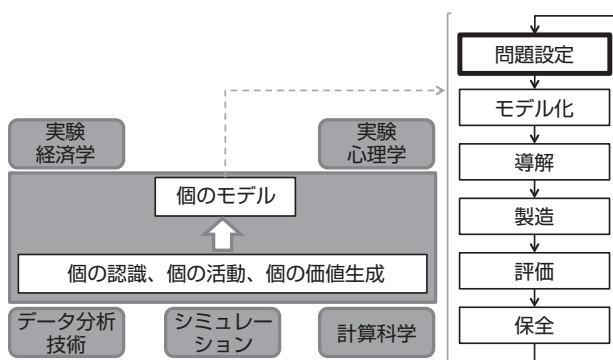


図4 問題解決のためのシナリオ



図5 実際の経済実験室

そこでの振る舞いを観察・分析するものである。特に、価値誘発理論^[25]に基づき、実験中で得られた得点に応じて報酬（主として国内通貨を用いる）を与えることにより、被験者の選好を統制している点に特徴がある。すなわち、実験者が定める効用関数を被験者に誘発するという一方で、効用さえも統制した仮想的な社会システム内での振る舞いを観察し、各主体効用の変化や全体の社会的余剰を見ることで、価値として明示的に取り扱うことが可能となる。この方法によって、2章で述べた「個の価値生成」過程のモデル化が可能となる。被験者実験の手法自体はこれまでの実験経済学の枠組みと同じであるが、実際の人間の行動として得られた結果から、個の行動主体（エージェント）レベルから価値生成過程のモデルへ展開するところに新しさがある。このためには、実験を行うためのフレームワーク、そこでの行動様式、相互作用等を事前に熟慮し、慎重に計画する必要がある。この点についてはサービスエクスプローラーとの融合によって、初めて遂行可能になる。エージェント単体の時には合理性に基づき活動をするのでモデル化しやすいが、マルチエージェント系の場合には、各エージェントの価値の相互依存関係により、各エージェントがどう行動するかは本質的に難しい問題である。ナッシュ均衡等の静的な均衡状態に関する議論はこれまでも非常に多くの研究がなされているが、それを取り巻く複雑なダイナミクスを含むと、その詳細については十分に分かっているとは言えない。特に価値の生成という観点からは、ほとんど良く分かっていない。実験経済学を基軸とする手法は、その部分のモデル化に貢献することができる。

以上のような方法を用いることで、設計された製品サー

ビスシステムが実験室の仮想社会においてどのように機能するかを、実社会に適用する前に経済実験という方法で検証することができる。機能性にすぐれた製品サービスシステムであったとしても、ビジネス環境あるいは消費者の利用局面において、十分な価値を見いだせないことが経済実験によって明らかになれば、製品サービスシステムの構造について再設計するか、あるいは、高い価値を生み出すような社会システムの構造、すなわち制度（メカニズム）としての構造を変化させる必要があることがわかる。このように、新しい人工物設計論への展開が可能となる。

4.1.2 製品サービスシステムのモデル化

製品サービスシステムの設計とは、製品という主たる人工物単体の設計ではなく、製品およびサービスの双方による機能創出とその伝達方法を設計することである。それが故に、人や社会との相互作用までも同時に考慮した総合的なシステム設計が必然的に求められる。そこでは、競合商品や他の消費者等、社会に存在するさまざまな相互作用によって変化する、限定合理的な受給者の購買、利用、および参加行動のメカニズムを包含した個のモデリングが肝要であり、これらに基づいた製品サービスシステムの逐次作成・修正が有効と思われる。

スマートハウスを例にした本共同テーマの構想を図6に示す。スマートハウスは、住宅、電化製品、設備機器という物理的な人工物を中心に構成されるが、エネルギーの需給により表出する利用を介して、生活者のニーズに応じたさまざまなサービス提供の可能性が考えられる事例である。

本構想ではまず、サービスエクスプローラーを用いて、人工物を中心に据えた受給者のモデル化と製品サービスシ

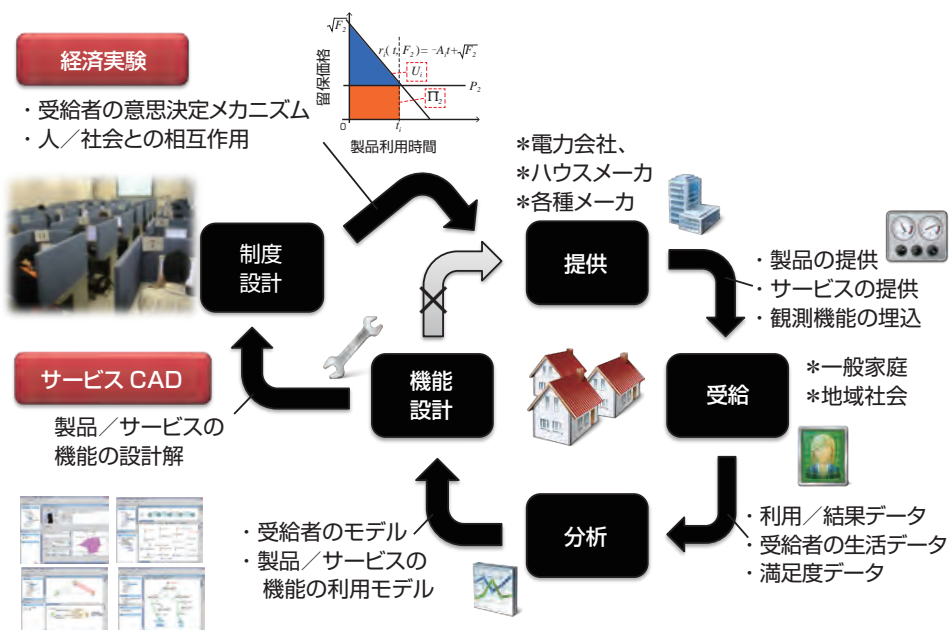


図6 スマートハウスを例にした製品サービスシステム構想

システムの機能設計を行う（図6左下）。その後、前項で述べた経済実験による受給者の意思決定の観察技術を用いて、認識・行動・価値に関する個のモデルを精緻化するとともに、製品サービスシステムを修正・精緻化していく（図6左上）。これは、機能設計にとどまらず、人と社会との相互作用を考慮した制度（メカニズム）設計を実験室にて行うことを意味する。その後は、実際のサービス提供を通じて得られるさまざまなデータをフィードバックとして用いて、より詳細に分析する（図6右下）。この図6の項目を図4の項目と厳密に対応させることは困難であるが、おおまかには以下ようになる。「分析」が問題設定とモデル化に、「機能設計」と「制度設計」が導解に、「提供」が製造に、「受給」が評価と保全に、それぞれ対応する。すなわち、「分析」においてその直前の受給の結果を踏まえて問題設定（社会技術化に相当）しつつ、個のモデリングを行うことを意味する。上記のうち、図6左下についてはⅡ期の成果の利用が可能である。図6左上、図6右下がⅢ期で新たに扱うテーマである。

4.2 関連テーマと残された課題

その他にも以下に示すような共通のテーマ設定を行い、この解決の中で、人工物工学研究センターの目的の達成を目指している。

- CO2 排出、省エネルギーの推進、燃料の安定供給等を考慮した新しいエネルギー政策
- 新しい人材教育システム-産業志向型の社会移行スキルトレーニング
- 震災時の市民の帰宅行動を考慮した水需要予測と応急給水体制のあり方
- 看護学生が多様な患者に対して適切な看護処置を適用できるようにするための看護技術自習支援システム

おのおののテーマは、この論文の最初で述べた環境、貧富（教育は貧富の問題を解決する有効な手段である）、安全、健康という「現代の邪悪なるもの」の典型的なものであり、個のモデリングという人間的な側面と、マルチステークホルダーの存在による人工物創成の社会技術的な側面との両者を包含した典型的な問題と言える。これらの問題の解決はⅢ期の大きな成果となることが期待できる。

残された課題として、最も重要なものは、ある問題に対する解決策を提案できたとして、それをどのようにして他の課題に適用するかという横展開の問題である。換言すれば、脱領域的な知見をどのように蓄積するかという問題である。現状では、各々の問題を解く中で、その解法プロセスを俯瞰的に眺め、できるだけ普遍的な形で記述する、データベース化することが、上記の問題解決の第一歩であると考えている。

5 おわりに

本稿は、始めに人工物工学研究の現状と将来構想について述べた。次いで、個のモデリング、人工物創成の社会技術化という観点からアプローチすることで、人工物と個・社会・環境の持続的調和関係の構築を目指すという方針について説明した。実験経済学的手法を組み入れた個のモデリング手法を適用するシナリオについて述べ、製品サービスシステムのモデル化をテーマ例として抽出した。

我が国の限られた人的・物的リソースを戦略的に活用する観点から研究・教育においても選択と集中が求められている。研究者自らが社会連携も含めた実社会における行動・働きかけを積極的に起こすとともに、その中で得られた知見・情報を組織内に場として素早く循環させていく仕組みの促進が肝要である。この際考慮すべき重要なこととして、アウトカム創出の観点からの評価を取り入れた、研究組織や研究者に対する新しい評価体系の導入が不可欠になる。今後は、研究成果の新しい評価の形式について考える必要がある。

謝辞

この論文を執筆する上で、さまざまな観点から影響を与えていただいた、東京大学人工物工学研究センターの元メンバー、現メンバー、その他関係者の方々に心より謝意を表す。木村文彦東京大学名誉教授（現法政大学）ならびに東京大学人工物工学研究センター外部評価委員の先生方に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 吉川弘之: 人工物工学の提唱
<http://www.race.u-tokyo.ac.jp/open/documents/Yoshikawa.pdf>, Accessed 2013 July 26.
- [2] ハーバート A サイモン著, 稲葉元吉, 吉原英樹訳: システムの科学第3版, パーソナルメディア (1999).
- [3] 市川惇信: 人工科学と技術, 計測と制御, 42 (3), 162-171 (2003).
- [4] マイケル ギボンズ著, 小林信一監訳: 現代社会と知の創造-モード論とは何か, 丸善 (1997).
- [5] 日本学会会議: 総合工学分野の展望, (2010).
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-h-3-7.pdf>, Accessed 2013 March 15.
- [6] G. F. Smith: Defining managerial problems: a framework for prescriptive theorizing, *Management Science*, 35 (8), 963-981 (1989).
- [7] 常田稔: 経営管理問題の設定・定式化, 早稲田社会科学研究, 46, 69-95 (1993).
- [8] 木嶋恭一: ソフトシステムアプローチ, 社会・経済システム, 23, 51-65 (2002).
- [9] P. Checkland and J. Scholes: *Soft Systems Methodology in Action*, John Wiley & Sons Ltd., (1990) [妹尾 堅一郎訳, ソフト・システムズ方法論, 有斐閣 (1994)].
- [10] マイケル・C. ジャクソン, 小林憲正, 高橋真吾, 根来龍之, 吉田武稔: ホリスティック・クリエイティブ・マネジメント-21世

紀COEプログラム:エージェントベース社会システム科学の創出 (木嶋恭一, 中條尚子 編著), 丸善 (2007).

- [11] 日本学術会議: 新しい学術の体系---社会のための学術と文理の融合---, (2003).
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/18pdf/1829.pdf>, Accessed 2013 July 26.
- [12] 日本学術会議: 新しい学術の体系, (2003).
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-18-t995-60-2.pdf>, Accessed 2013 July 26.
- [13] 馬場靖憲: 人工物工学研究は何ができなかったか: 次期への期待, (2002).
<http://www.zzz.rcast.u-tokyo.ac.jp/PDF/soukatsu.pdf>, Accessed 2013 Feb 18.
- [14] 福原知宏, 竹中毅, 森下壮一郎, 鈴木正昭, 西野成昭, 藤井信忠, 武田英明: 人工物工学における価値創成研究: 映画を題材として, *The 22nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 3B3-10, 1-4 (2008).
- [15] K. Ueda, T. Takenaka and K. Fujita: Toward value co-creation in manufacturing and servicing, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1 (1), 53-58 (2008).
- [16] N. Nishino: Co-creative Value Manufacturing: a methodology for treating interaction and value amongst artefacts and humans in society, *Nanotechnology Perceptions*, 9 (1), 6-15 (2013).
- [17] 社会技術の研究開発の進め方に関する研究会: 社会技術の研究開発の進め方について, (2000).
<http://www.ristex.jp/aboutus/pdf/his02.pdf>, Accessed 2014 April 26.
- [18] 伊藤正美: 自律分散システムはいかにして構成されるか, *計測と制御*, 29 (10), 877-881 (1990).
- [19] 阪口秀, 草野完也, 末次大輔編: *階層構造の科学*, 東京大学出版会 (2008).
- [20] 吉川弘之: インタビュー「科学と社会技術の未来」, *社会技術研究論文集*, 1, i-viii (2003).
- [21] 上田完次: *人工物環境の生命論パラダイム, 技術知の射程*, 吉川弘之監修, 田浦俊春, 小山照夫, 伊藤公俊編, 東京大学出版会, 129-149 (1997).
- [22] 上田完次他: *創発的シンセシスの方法論, 未来開拓プロジェクト成果報告書* (2001).
- [23] K. Ueda, A. Markus, L. Monostori, H.J.J. Kals and T. Arai: Emergent synthesis methodologies for manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50 (2), 535-551 (2001).
- [24] 日本工学アカデミー-EAJ NEWS: 第174回談話サロン「設計型工学のキャリアム」, (2012).
<http://www.eaj.or.jp/eajnews/news147/01.html>, Accessed 2013 July 26.
- [25] V.L. Smith: Experimental economics—induced value theory, *American Economic Review*, 66 (2), 274-279 (1976).

執筆者略歴

太田 順 (おおた じゅん)

1989年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。91年東京大学工学部助手。94年同講師。96年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授。2009年6月東京大学人工物工学研究センター教授。この間96-97年Stanford University Center for Design Research 客員研究員、マルチエージェントロボット、大規模生産/搬送システム設計と支援、移動知、人の解析と人へのサービスの研究に従事。この論文の総括、全体構成、具体的内容の構成に貢献した。



西野 成昭 (にし の なりあき)

1999年神戸大学工学部卒業。2001年同大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。2004年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年より東京大学人工物工学研究センター研究員。同センター助手、助教を経て、2009年11月より同大学大学院工学系研究科准教授。実験経済学やマルチエージェントの手法をもとに社会システムに関する研究に従事。人工知能学会、情報処理学会、日本経営工学会、サービス学会、システム制御情報学会、日本LCA学会、ESA、CIRP、INFORMS等の会員。この論文の、社会技術に関する方法論、具体的テーマの説明に貢献した。



原 辰徳 (はら たつり)

2004年東京大学工学部システム創成学科卒業。2009年同大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同専攻助教を経て、2013年3月より東京大学人工物工学研究センター准教授。サービス工学、製品サービスシステム、観光サービス等の研究に従事。2009年東京大学学生表彰工学系研究科長賞(博士)を受賞。精密工学会、日本機械学会、情報処理学会、サービス学会、観光情報学会、各会員。CIRP Research Affiliate。この論文の、個のモデリングに関する方法論、具体的テーマの説明に貢献した。



藤田 豊久 (ふじた とよひさ)

1995年秋田大学教授。2003年より東京大学教授。2012年からは東京大学人工物工学研究センター長、環境資源工学会会長(2005~2009年)。専門は資源処理工学、環境浄化、機能性流体。受賞約20件、特許約60件、発表論文等約300件。この論文の全体的な概念構成ならび方向性に関する議論の主導に寄与した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(持丸 正明:産業技術総合研究所サービス工学研究センター)
 人工物工学の体系を確立し、展開していく方向性と方法論について、その中核である東京大学人工物工学研究センターでの議論を中心に研究フレームワークを提案し、さらに、そのフレームワークに基づく研究活動事例を示した論文であると理解しました。人工物工学と Synthesiology は同根であり、人工物工学の目的とするところは、Synthesiology 誌のスコープと合致しています。それゆえ、この論文で提案されている研究フレームワークの議論は、本誌の読者にとっても有益なものだと考えています。

しかし、現在の章立てでは、「人工物工学の新課題とそれに対応する研究フレームワーク」の論文ではなく「東京大学人工物工学研究センターの第3期の紹介」であるかのように感じられます。「人工物工学の研究体系」を形成することが、この論文の向かうべき最終目標ですので、それに対する論理展開にしたらいかがでしょう。

回答(太田 順:東京大学)

貴重なコメントありがとうございます。東京大学人工物工学研究センターより人工物工学の進展と言う観点から記述すべきというのは、そのとおりだと思いました。おっしゃるとおりの構成に変更しました。

議論2 II期とIII期との関係について

質問（赤松 幹之：産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門）

III期において設置した Socio-Artifactology と Human-Artifactology と二つの部門についての説明がありますが、いずれも「II期での活動をベースに」と書かれているだけで、II期とIII期との関係が明確に書かれていません。マルチステークホルダーの問題や不完全情報での解探索の問題がライフサイクル工学と共創工学ではなぜ扱えなかったのか、それともライフサイクル工学と共創工学を進める中でこの問題が大きく浮上して来たのか、など取り組みが必要であると判断した仮説形成のプロセスを書いていただきたいと思います。

回答（太田 順）

II期では、物理学ベースの設計科学を対象とした研究成果を多く出してきました。III期では学問対象を人文・社会科学にまで発展させ人間社会までも含んだものを対象と考えています。そのような背景の元、社会技術化の問題を、上田完次先生が提唱したクラスⅢの問題と関連付けて議論しています。これはII期においてはあまり正面から扱わなかった問題でしたが、III期ではいくつかの実際の社会の問題を解決するというミッションであり非常に重要であるため、この問題ならび解決法の体系化を目指すものです。II期の成果とIII期の成果の関係が不明瞭であったため、各々の記述を、より違いが明確になるように書き換えました。例えばII期の寄付研究部門の成果を人間の価値観とする等、記述の変更をしました。またII期の成果のサマリーに具体的な内容（資源制約や廃棄を考慮した人工物の設計や大規模複雑シミュレーション基盤の技術）を書き加えました。

個のモデリングについては、II期でも扱いましたが個々の相違のモデル化までの成果が主であり、その個の変容具合＝ダイナミクスについてはほとんど扱っていなかったためそれをIII期で扱うことを考えています。そのような内容をこの論文に書き加えました。

議論3 個のモデリングについて

コメント（赤松 幹之）

個のモデリングについての記述がありますが、これだけですと個のモデリングが何なのか読み取ることはできませんでした。また、実験経済学的アプローチが事例として挙げられており、これは個のモデリングを行うための実験方法として採用したものと推察しますが、個のモデリングをするために必要な要件が何であって、それを満たすようにどのような機能を実験システムで実現できるようにしたのか、などの仮説構成が書かれていると、センターのミッションを達成するための具体的なアプローチとして、その意義を読者が理解できると思います。

コメント（持丸 正明）

「個のモデリング」は、第III期の研究アプローチにおける重要な用語です。ただ、査読者には、この「個のモデリング」を明快に理解す

ることができませんでした。

回答（太田 順）

個のモデリングに関して、まず階層構造についての記述を変更しました。単純化のため、ある四角における個はその最下部で表現されると考え、それらが、直下の四角の最上位部における均質要素（おのおの内部状態を有し、その状態量は異なる値をとり得る）間の相互作用という形式でモデル化しました。この際、要素の内部状態や相互作用の相違が個の多様性となり、そのダイナミクスが個のダイナミクスとなります。その上で、個をエージェントとして捉え、個の認識過程、認識に基づく個の活動、その活動を生成する基盤となる個の価値形成という3つの側面からのモデル化を行う、と考えました。上述の相互作用は、主に個の認識過程、個の活動というステップで表現され、マルチステークホルダー同士の相互作用、調停が表現できることとなります。そのような記述を加えました。これが個のモデリングです。

実験経済学的アプローチについては、エージェント単体の時には合理性に基づき活動をするのでモデル化しやすいですが、マルチエージェント系の場合には、各エージェントの価値の相対関係により、各エージェントがどう活動するかがよくわかっていません。実験経済学的手法は、その部分のモデル構築に貢献するものです。実験経済学によって、実験者が定める効用関数を被験者に誘発するということであり、効用さえも統制した仮想的な社会システム内での振る舞いを観察し、各主体効用の変化や全体の社会的余剰を見ることで、価値として明示的に取り扱うことが可能となります。この方法によって、2章で述べた「個の価値生成」過程のモデル化が可能となると考えます。そのような記述をこの論文に加えました。

議論4 社会技術化について

コメント（赤松 幹之）

III期での取り組みが実験経済学的研究の説明が中心になっているために、社会技術化に関する研究のアプローチが具体的に主張されていないように思われます。これから行われる研究ですので、フレームワーク通りに奇麗に整理はできないとは思いますが、読者に主張を理解してもらうためには、論文全体の論理構成がある程度整合されていることが望まれます。

回答（太田 順）

おっしゃるとおり、社会技術化に関する議論が少なかったため、それに関する記述を加えました。マルチステークホルダー環境自体が社会技術化との関わりが強いと考えられます。図4と図6の対応関係を記述しました。「分析」が問題設定とモデル化に、「機能設計」と「制度設計」が導解に、「提供」が製造に、「受給」が評価と保全に、それぞれ対応します。「分析」においてその直前の受給の結果を踏まえて問題設定（社会技術化に相当）しつつ、個のモデリングを行うことを意味します。

日常的に利用可能な疲労計測システムの開発

— フリッカー疲労検査をPCやスマートフォンを使って生活環境で実現 —

岩木 直^{1*}、原田 暢善²

日々の精神的疲労状態のモニタリングは、交通安全や健康管理のための非常に重要な要素である。これまでに疲労状態を評価するさまざまな指標が開発され、人間工学や産業衛生等の研究分野における研究ツールとして用いられてきた。我々は、研究のために用いられてきた精神的疲労のロバストな計測技術を、日常生活における実用的精神的疲労モニタリングのために低コストで提供することを目的とした技術開発を行った。

キーワード: 精神的疲労、ちらつき知覚閾値、フリッカー検査、日常疲労計測、交通安全

Mental fatigue measurement as application software on consumer devices

– Introducing reliable fatigue index to daily life –

Sunao IWAKI^{1*} and Nobuyoshi HARADA²

Monitoring mental fatigue is critical for traffic safety and health care. Various indexes of mental fatigue have been developed and used in the fields of ergonomics and industrial hygiene. One such index is the flicker-perception frequency threshold: the frequency at which the perception of flickering lights disappears for human observers. This index has a long history as a reliable indicator of mental fatigue in the laboratory setting. We have developed low-cost technologies for measuring mental fatigue objectively with widely available consumer devices such as personal computers and smartphones.

Keywords: Mental fatigue, flicker perception threshold, personal mobile device, traffic safety

1 研究の目的と関連する技術の背景

日常生活での精神的疲労の蓄積は、過労による健康状態の悪化を招く健康管理上の問題であるだけでなく、覚醒度の低下に起因する交通事故に直結したり、作業効率の低下の原因となるなど、重大な社会的・経済的問題でもある。特に、過労による居眠りや注意の低下が、トラック等の事業用車両における重大交通事故の主な要因の一つであることが指摘されており^[1]、経済的負担を強いることなく日常的に疲労状態を評価できる技術の実現が求められている。我々は、身の回りにあふれる情報機器を用いて、日常生活中に低コストで簡易に、精神的な疲労度合いを客観的かつ定量的にモニターできる技術を、スピーディーに開発することを目標とした。

一方、これまでに精神的疲労状態の定量的な評価のために、さまざまな指標が開発され、主に研究目的に用いられてきた。それらのうち主なものは下記のように整理できる。

A. 主観的指標

- 自覚的指標：
疲労自覚症状（質問紙やアンケート）^[2]

B. 客観的指標

- 行動学的指標：
対象とする作業に関する作業量や作業中の誤り頻度^[3]
対象とする作業とは無関係の動作や姿勢の変化^[4]
- 生理学的指標：
呼吸、脈拍、発汗^[5]、脳波^[6]など
- 知覚・認知指標
視覚刺激の「ちらつき」知覚閾値^[7]
触覚の空間弁別閾値^[8]
- 生化学的指標：
唾液、尿、血液中の代謝産物、遺伝子発現等^{[9][11]}
これらの客観的な指標に基づく疲労の測定は、いずれも検査者の監督下でそれぞれ専用の機器を用いて計測とデータあるいは試料の解析が行われ、データの解釈も研

1 産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6、2 フリッカーヘルスマネジメント(株) 関西研究所 〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31 産総研関西センター内

1. Human Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan * E-mail: s.iwaki@aist.go.jp, 2. Flicker Health Management Corp. AIST Kansai, 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda, Osaka 563-8577, Japan

Original manuscript received January 14, 2014, Revisions received June 20, 2014, Accepted August 5, 2014

究活動の一環として行われてきたため、一般の利用者が日常生活中に気軽に使用することは不可能であった。例えば、(i) 行動学的指標の計測のためには、特定の作業に特化した作業量（パフォーマンス）評価課題の実施や、カメラ等による第三者視点での被験者動作の撮影と高度な画像処理が必要、(ii) 呼吸・脈拍等の生理信号を用いるためには、これらの信号を携帯情報端末等で取り扱えるデジタルデータにするためのトランスデューサが必要、(iii) 生化学的指標を用いるためには、生体資料の採取と分析のための専用機器が必要であり、一般利用者の日常生活空間での利用に向けたシステムの実現は難しい。これに対して、知覚・認知指標については、視覚・聴覚・体性感覚等の感覚器に対する刺激の呈示と利用者からの反応の収集さえ可能であれば、我々が日常的にアクセス可能なデバイスを用いて実現できる可能性がある。

2 日常的に利用可能な簡易疲労計測システム実現のためのシナリオ

我々は、視覚的に呈示される刺激の「ちらつき」知覚の変化に基づく疲労の定量的評価を、スマートフォン、パソコン、カーナビゲーションシステム等の一般向け電子機器で利用可能にする技術の開発を行うこととした。

高速に明滅する光刺激の点滅周波数を徐々に減少させると、「ちらつき」が知覚できるようになる周波数（臨界融合周波数、critical fusion frequencyあるいはcritical flicker frequency (CFF)）が存在する（図1）。CFFは疲労の蓄積によって低下することが1941年に報告されて以来^[7]、疲労度の定量的検査指標として広く知られている。CFFは、(i) 活動の継続（すなわち疲労の蓄積）とともに連続的に変化し、(ii) 試行毎の計測値の変動が小さく安定的な計測が可能である等の性質を有することから、労働衛生学・労働生理学や交通心理学の分野では重要な研究ツールとして用いられてきた（フリッカー検査）^{[12][13]}。フリッカー検査は、疲労にともなう大脳皮質を含む中枢神経系の興奮性あるいは緊張度や覚醒度の変動にともなって変化すちらつき知覚閾値を計測していると考えられている。フリッカー値には個人差があるため、計測する本人の健常時のフリッカー値を測定しておき、「計測時のフリッカー値が健常時と比べてどのように変化しているか」に基づいてそのときの疲労状態を判定するのが妥当である。例えば、健常時よりも5%程度フリッカー値が低下していれば要注意とし、10%以上下がっているときは、休憩をとった方がよいといった具合である。これまでのフリッカー検査に関する研究結果によると、フリッカー値が10%以上低下した場合、単純計算課題の成績悪化等、認知・行動学的なパフォー

マンスが著しく低下することが知られている^[14]。

このフリッカー検査をパーソナルコンピューターやスマートフォン等を用いて行う場合の技術的課題として、「いかにして一般向け電子機器のディスプレイを用いてちらつき知覚閾値を計測するか」という点がある。従来のフリッカー検査では、LED等を用いて視覚刺激の点滅周波数を0.1 Hz単位で徐々に変化させ、被験者が点滅光のちらつきを主観的に知覚した閾値を検出していた。一方、携帯電話やパソコンのディスプレイは、垂直同期周波数（リフレッシュレート）が一定の値に固定されているため（典型的な携帯電話ディスプレイでは15あるいは30 Hz；パソコンでは60 Hz程度）、従来のフリッカー検査に必要な0.1 Hz単位での点滅周波数変化を実現できない。このため、点滅する視覚刺激の周波数変化に依存しないちらつき閾値の評価方法を開発する必要がある。

また、従来のフリッカー検査では、点滅周波数を一定の間隔で徐々にかつ連続的に変化させ、被験者は点滅光のちらつきを主観的に知覚したと感じた時点でボタンを押して回答する極限法（method of limits）を用いて、ちらつき知覚に周波数閾値を決定する方法がとられていた。この方法では、繰り返しフリッカー検査を受けることによる慣れの誤差や期待誤差、さらには計測結果に対する被験者の恣意性の影響を排除することが難しい。この問題点は、ラボ内での利用のように、データ取得に際して検査者と被験者が対面し、正確なデータ計測に対する被験者のモチベーションを保つことができる従来の利用法では重大な問題点ではなかった。しかし、日常生活中に検査者なしで自律的にちらつき知覚閾値を計測することを目的とする場合、計測結果に対する被験者の恣意的な操作等のバイアスを回避することは、特に重要な検討課題となる。

我々は、従来ラボ内で用いられてきた信頼性の高い疲労計測方法を日常生活環境で簡便に利用可能にする際に生じるこれらの問題点を解決する技術開発を行い、それらを統合したプロトタイプシステムを構築して、実環境における有用性を検証するための研究を行った。

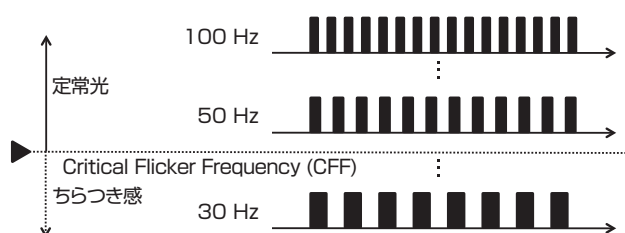


図1 臨界融合周波数（Critical Flicker Frequency (CFF)）

3 日常的に利用可能な簡易疲労計測システム実現のために必要な要素技術

上述のように、これまでラボ内で研究目的に利用されてきた「ちらつき」知覚閾値計測による精神的疲労の定量評価技術を日常生活環境で実現するには、まず技術的な課題である、

- (a) 従来専用装置でのみ計測可能であった「ちらつき」知覚閾値の計測を、汎用ディスプレイ装置でも実施できるようにする要素技術の開発

が必須であると同時に、疲労計測技術の利用形態が変化(ラボ内での研究目的の利用→日常環境での利用)するため、新たに発生する問題への対策が課題となる。特に、

- (b) 利用者が自律的に検査を進めることができるようにするためのしくみ、すなわち、これまで検査者の監督下で被験者の主観的な報告に頼っていた「ちらつき」知覚閾値の計測を、利用者単独でも客観的に行えるようにするための要素技術の開発

が必要である。

3.1 汎用ディスプレイを用いたちらつき知覚閾値計測のための技術—CCFS: Contrast- Controlled Flicker Stimuli—

まず我々は、ちらつき知覚における点滅周波数と、点滅する光刺激のON/OFF間の輝度の差(以下、コントラスト)の間の等価性^{[15][16]}に着目して、汎用ディスプレイ機器におけるCFF計測を可能にする技術を開発した。

点滅光の点滅周波数と、点滅時のON/OFF間コントラストに対して、ちらつきが知覚できる閾値(Flicker Perception Threshold: FPT)は、一般に図2の模式図に示すような関係がある^([15][16]をもとに編集)。被験者がちらつき

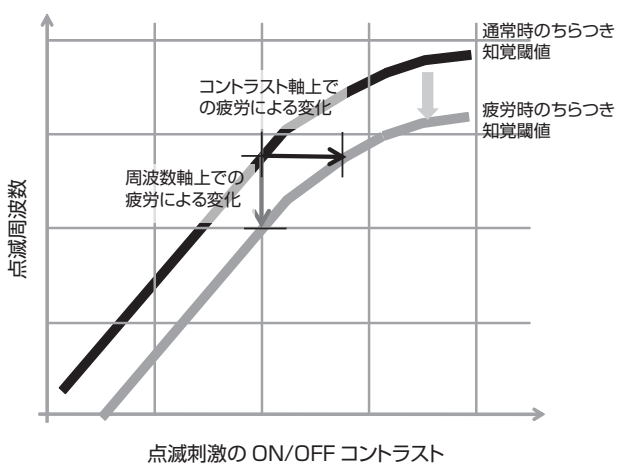


図2 ちらつき知覚における点滅周波数とON/OFFコントラストとの関係

を感じるフリッカー値は、周波数と明るさに影響を受け、健常時に黒線のような計測値となるとすると、疲労時はグレー線で示すように変化する。すなわち、同じコントラストの下では周波数の低下にともなってちらつきが知覚しやすくなり、同じ点滅周波数の下ではコントラストの増加に伴ってちらつきが知覚しやすくなる。これまでのフリッカー検査で計測されてきたのは、同一のコントラストの下で点滅周波数を変化させたときの、被験者がちらつきを知覚した周波数(CFF)のみである。これに対して、疲労にともなうちらつき知覚の変化は、同一の点滅周波数の下でのコントラスト閾値を用いても特徴づけることができる。この性質を利用することで、表示周波数が固定された画像呈示装置であっても、疲労によるちらつき知覚の変化を計測することが可能である。

我々は、従来のフリッカー検査のように点滅周波数を変化させるのではなく、明滅する視覚刺激の高輝度(ON)時と低輝度(OFF)時のコントラストを変化させることで、従来のフリッカー検査と同等の精度をもつ疲労計測が可能な方式(コントラスト変化によるフリッカー刺激: Contrast-Controlled Flicker Stimuli (CCFS))^[17]を考案した。図3は、14時30分から翌日の8時30分まで、パソコンを用いた資料作成等の作業を行っている間の精神的疲労の蓄積の様子を、(i)我々が開発したコントラスト変化によるフリッカー刺激(CCFS)を実装したディスプレイの垂直同期周波数30Hzの携帯電話、および(ii)CCFSを実装したディスプレイの垂直同期周波数60Hzのパソコン、および(iii)従来のフリッカー検査専用機を用いて計測した結果を示している(12名の被験者の平均値。エラーバーは標準偏差)。いずれの方法でも、終夜の精神的負荷により

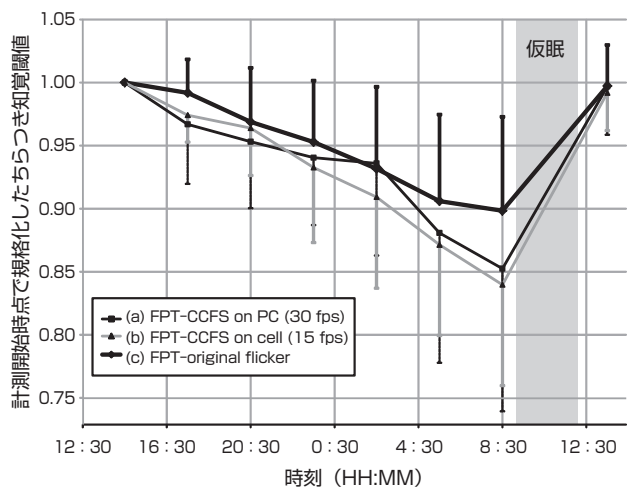


図3 終夜疲労負荷下での疲労計測結果^[17]
携帯電話(細グレー線)・パソコン(細黒線)に実装したコントラスト変化フリッカー刺激(CCFS)アプリケーションと、従来のフリッカー検査専用機(太線)。

疲労が蓄積していく様子と、仮眠により疲労が回復する様子が、従来のフリッカー検査と同様に適切に計測されている。また、CCFS方式フリッカー検査で得られる結果は、従来の専用機による検査結果と高い相関を持つことも明らかになった（図4）。

これらの結果は、(i) CCFSを実装したディスプレイの垂直同期周波数 30 Hzの携帯電話（細グレー線）、および(ii) CCFSを実装したディスプレイの垂直同期周波数 60 Hzのパソコン（細黒線）を用いた計測により、(iii) 従来のフリッカー検査専用機を用いた計測結果（太黒線）と同様に、終夜の精神的作業負荷による疲労蓄積の経時的変化の評価が可能であることを示している。

3.2 検査者なしで自律的にちらつき閾値計測を行うための技術

従来のフリッカー検査では、点滅周波数を一定の間隔で徐々にかつ連続的に変化させ、被験者は点滅光のちらつきを主観的に知覚したと感じた時点でボタン押しにより回答する極限法（method of limits）が採用されており、計測

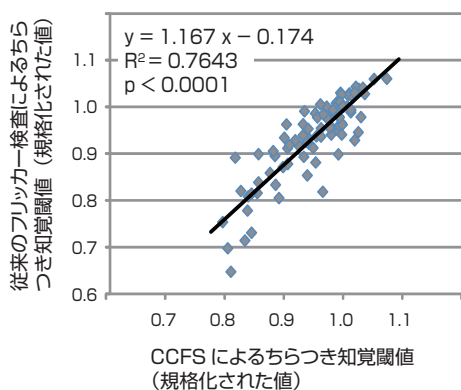


図4 コントラスト変化フリッカー刺激（CCFS）と従来の周波数変化フリッカー刺激で計測したフリッカー知覚閾値の相関^[17]

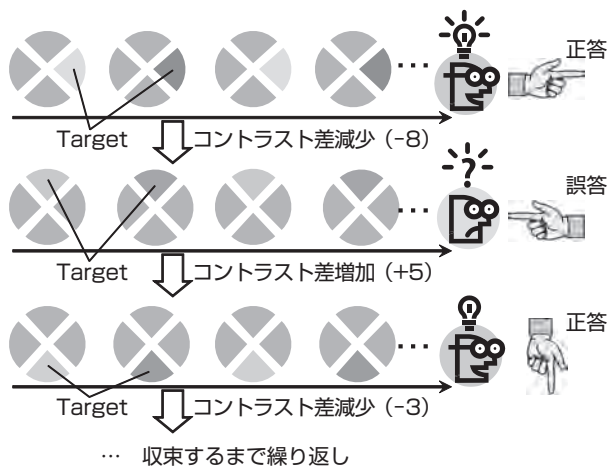


図5 強制選択・上下法によるちらつき知覚閾値の決定方法の模式図

結果に対する被験者の恣意性など様々なバイアスの影響を排除することが難しい。この問題点は、データ取得に際して検査者と被験者が対面して検査を行う従来の利用法では重大な問題点ではなかったが、日常生活中に検査者なしで自律的にちらつき知覚閾値を計測することを目的とする場合、解決すべき特に重要な課題となる。

これに対して我々は、検査結果に対する被験者の恣意性を排除するとともに、刺激の変化速度や変化方向を被験者の応答により適応的に調整することのできる、強制選択・上下法（Forced-choice up/down method: FCUD法）^[17]を導入し、検査者なしでも適切にちらつき知覚閾値（FPT）を計測できる検査アルゴリズム（FCUD-FPT）を採用することにした。具体的には、図5の模式図に示すように、呈示される複数の刺激の中から、ちらついて見える一つのターゲット刺激を強制的に選択させ、正答すれば次試行ではより難易度の高い（よりON/OFF間コントラストが低い、すなわち、ちらつきが見えにくい）ターゲット刺激を呈示、誤答であれば次試行でより難易度の低い（よりON/OFF間コントラストの高い、すなわち、ちらつきが見えやすい）ターゲット刺激を呈示する。これを、ON/OFF間コントラストが収束するまで繰り返すことによりちらつき知覚閾値を決定する。

この方法を用いることにより、被験者の応答にかかわらず一定間隔で刺激を変化させる極限法とは異なり、ちらつき知覚閾値付近で高密度な計測を行うことで計測結果の精度を向上させることができるとともに、ちらつきが知覚できる可能性が低い領域ではコントラスト変化を大きくする（図6）ことにより検査の短時間化に寄与する。

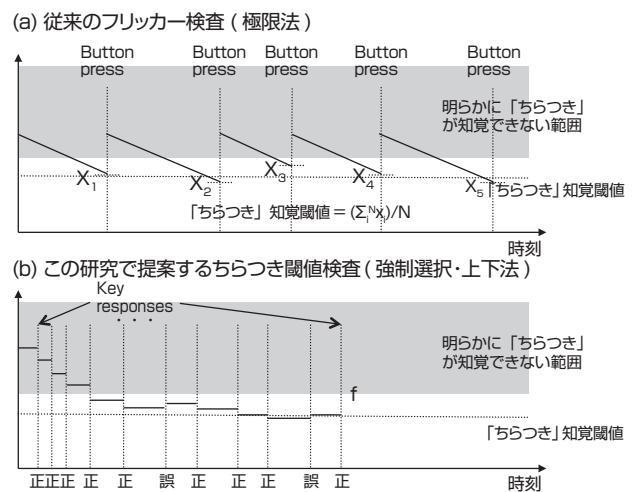


図6 従来方法と提案方法における、ちらつき知覚閾値の決定方法の違い

4 日常疲労計測のための技術の統合

我々は、3.1 節および 3.2 節に記述した二つの要素技術の日常疲労計測における有効性を実証するために、オンラインでデータを管理するためのデータベースを組み合わせたプロトタイプシステムを作成した (図 7)。すなわち、

- (i) CCFS (3.1 節) を用いて、スマートフォンあるいは PC での「ちらつき」を正確に制御する視覚刺激の発生を可能にし、
- (ii) FCUD-FPT (3.2 節) を用いて、「ちらつき」知覚閾値決定における被験者の恣意性を排除して、検査者と対面していなくても適切な疲労計測の遂行を可能にした。さらに
- (iii) ネットワーク上に構築した日常疲労計測データベースを立ち上げ、スマートフォンあるいは PC のネットワーク機能を用いて、端末側にインストールした疲労計測アプリケーション・ソフトウェアから計測データを随時登録・参照できるシステム (図 7) を作成した。

このプロトタイプシステムの一部である端末側機能は、Windows PC 向けのソフトウェアと、Android™ および iOS™ 向けのアプリとして実現されており、実環境でのデータ取得に用いられている。

実際に顧客として想定される運輸会社での始業・終業点呼とともに疲労計測を行う運用試験と聞き取り調査を実施したところ、検査にかかる時間を 1 分未満に短縮することが運用上非常に重要な要素であることが明らかになった。このため、上記の要素技術 FCUD-FPT の収束パラメータの見直しを行うことでこの目標を達成した。本手法をパソコンに実装したプロトタイプシステムでは、従来のフリッカー検査と比較して、計測に要する時間を 40 秒程度に短縮することができた (図 8)。



図 7 日常生活環境に利用可能な精神的疲労計測・管理システムのプロトタイプ

5 実現したアウトカムの効果と新たな研究課題

上記の研究開発で我々は、従来ラボ内に設置された専用装置を使って研究用途に用いられてきた、疲労にともなう「ちらつき」知覚の変化に基づく精神的疲労の客観的評価を、日常生活中に簡便に実施することを可能にし、プロトタイプシステムを用いた検証実験で、従来のフリッカー検査との互換性を確認した。現在、このプロトタイプシステムの実環境での有用性を確認するための運用試験を、中規模の運送会社の営業所 2 か所（首都圏と中国地方）と、大手建設会社の研究開発部門で実施中である。また、上記の技術は産総研技術移転ベンチャー企業フリッカーヘルスマネジメント (FHM) (株)^[18]にて事業化され、これまでに情報家電メーカー、自動車メーカー、大学研究室等で主に研究開発のために使われ始めている。現在のところ、従来のフリッカー検査で調べられてきた、連続的な疲労負荷状況における疲労状態の推移を、専用の計測装置を準備することなく低コストで評価する用途に用いられている。FHM では、「ちらつき」知覚閾値計測を用いた日常環境での疲労評価技術の一般への普及を図るため、機能と操作を簡略化したスマートフォン向けアプリを無償で配布している^{[19][20]}。

元来フリッカー検査は研究機関における学術目的の疲労計測方法としての長い歴史をもち、数時間～数十時間程度の時間スパンにおける疲労状態の推移を評価するために利用されてきた。我々が開発した技術は、研究用途では多くの実績をもつ疲労計測方法を、ありふれた機器を用いて簡易かつ低コストで実施することを可能にする。これにより、従来からのラボで行われてきたような短期間の疲労状態の変化を、日常生活中にいつでも簡単にモニターすることが可能になるだけでなく、疲労度合いの日々の変化を長期間

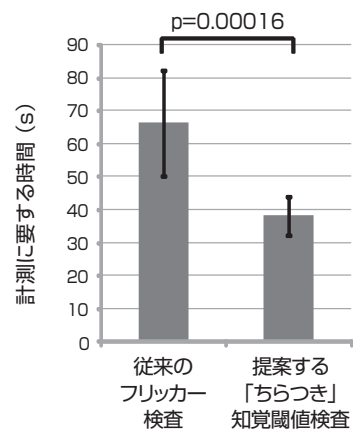


図 8 従来のフリッカー検査で用いられる極限法による「ちらつき」知覚閾値計測方法と、われわれが提案する FC-UD 法による「ちらつき」知覚閾値計測における、検査に要する時間の比較。^[17]

にわたって継続的に計測することができるようになるとともに、大規模な被験者群に対する疲労計測試験も現実的になる。このような疲労の簡易かつ定量的な評価技術は前例がない。日々継続的に計測する疲労計測データからどのような情報が抽出できるのか不明な点が多いが、精神的疲労状態の時間的推移をもとにした個人レベルにおける健康管理・疾病のスクリーニング、学習・生活環境の改善から、企業における業務の効率化やリソース配分の最適化等に至る、社会のさまざまな場面で有用性をもつ可能性がある。我々は、まず、実生活環境中で長期間継続的に疲労計測を行うことの意義を明らかにするためのデータ取得を始めている。図9に、民間企業研究開発部門に勤務する技術者が、夏季休暇期間を含む5週間毎日およそ同時刻に、我々が開発したAndroidスマートフォン向けアプリを用いて「ちらつき」知覚閾値を継続的に計測した例を示す。未だ予備的な段階であるが、日々の計測値の推移が出勤・休日パターンと関連していることを示唆する結果が得られつつある。

6 まとめと今後の展開

我々は、従来研究室内で学術的な用途に用いられてきた、「ちらつき」知覚閾値の計測に基づく精神的疲労のロバスタな評価技術(フリッカー検査)を、日常生活における実用的な精神的疲労モニタリングのために低コストで提供することを目的とした技術開発を行った。この結果、スマートフォンやパソコン等の日常生活環境に遍在する情報処理デバイスにソフトウェアをインストールするだけで、フリッカー検査の実施を可能にするプロトタイプシステムの開発に成功した。

残された技術的課題として、「ちらつき」知覚閾値の周囲の光環境や視距離への依存性が挙げられる。計測に用いるデバイスに内蔵されたカメラ機能を用いて、周囲光環境条件や視距離に基づく計測結果の補正を行うなど、基本的

なアイデアは提出されているが(特許第4406705号)、実データに基づく検証には至っていない。現状では、利用者によってできるだけ常に同じ条件で計測を行うよう教示しているが、より広範な普及に向けて、周囲環境の変化に対してもロバスタな疲労計測の実現が必要である。

計測される「ちらつき」知覚閾値は利用者の年齢、視力、用いる情報呈示機器のディスプレイ性能に大きな影響を受ける。実験室内で行う被験者実験では、実験開始時あるいは疲労負荷前の計測値を基準(基準値)に被験者ごとのばらつきを規格化することができるが、日常生活での計測では基準値が正確に得られない場合が想定される。我々は、日常生活での利用中に得られる計測データから基準値を設定するアルゴリズムの開発を進めている。

また、精神的疲労状態の多面的な理解と、疲労関連疾患のスクリーニング等への応用に向けて、血液や唾液等のサンプルから得られる各種バイオマーカーの変化等の生化学的指標と、「ちらつき」知覚閾値の変化に基づく計測結果との間の関連を明らかにする必要がある。我々は、産総研健康工学研究部門と共同で、終夜勤務中の被験者のフリッカー検査と同時に血液と唾液を採取し、両者の間の相関関係を検証する実験を行い、血液中の酸化ストレスマーカーとフリッカー検査結果との間に有意な相関があることを示す結果^[21]を得ている。引き続き、さまざまな環境における各種疲労マーカーや疾病マーカーとの関連を明らかにするためのデータの取得を行う。

日常生活場面で長期的に疲労の定量評価が可能な技術はこれまで実現されていなかったため、数か月・数年単位の日常疲労評価データの推移から、どのような情報が抽出できるのか明らかでない。本疲労計測技術と時系列データ処理技術等を組み合わせた健康維持・管理システムや、勤労者の疲労度合いの適切な管理を通じた業務効率化のしくみ等への応用に向けた検討は残された課題である

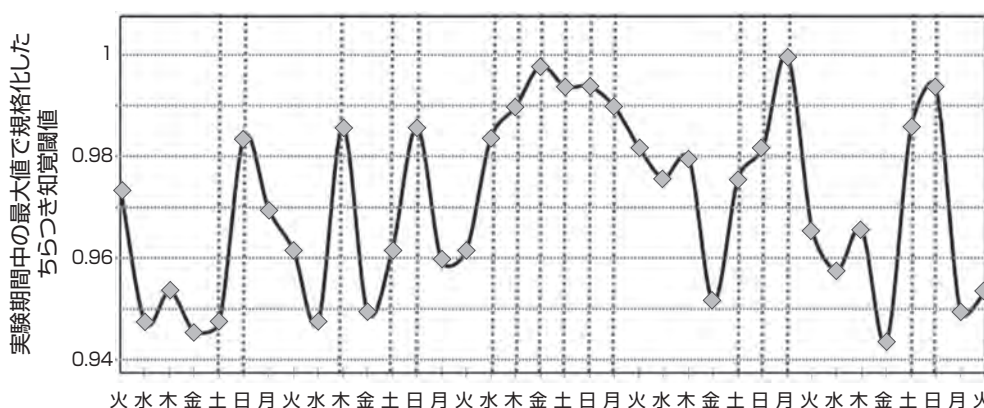


図9 オフィスワーカー(民間企業研究開発部門勤務)に対する5週間の継続的な計測によって得られた、ちらつき知覚閾値の推移と出勤・休日パターンとの関係を示す予備実験データ。破線は休日を示している。

もに、この技術の適用範囲を拡大する上でも重要であるため、産総研を中心に産総研技術移転ベンチャー企業をはじめとする産業界との密接な連携のもと、広範な環境におけるデータの継続的な取得と解析技術の開発を進める。

謝辞

この研究の一部は、(財)三井住友海上福祉財団研究助成(2011年度)および(財)スズキ財団科学技術研究助成(2011～2012年度)の助成と産総研ベンチャー開発センタースタートアップ開発戦略タスクフォース(2008～2009年度)の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] 自動車運送事業に係る交通事故要因分析報告書(平成19年度), 国土交通省自動車交通局自動車運送事業に係る交通事故要因分析検討会(2008).
- [2] 城憲秀: 新版「自覚症しらべ」の提案と改訂作業経過, *労働の科学*, 57(5), 299-304(2002).
- [3] M. Kuroda, T. Ishizaki, T. Maruyama, Y. Takatsuka and T. Kuboki: Effect of dried-bonito broth on mental fatigue and mental task performance in subjects with a high fatigue score, *Physiol. Behav.*, 92(5), 957-962(2007).
- [4] K. Saito: Measurement of fatigue in industries, *Indust. Health*, 37, 134-142(1999).
- [5] L. R. Hartley, P. K. Arnold, G. Smythe and J. Hansen: Indicators of fatigue in truck drivers, *Appl. Ergonomics*, 25(3), 143-156,(1994).
- [6] Y. Kaseda, C. Jiang, K. Kurokawa, Y. Mimori and S. Nakamura: Objective evaluation of fatigue by event-related potentials, *J. Neurol. Sci.*, 158(1), 96-100(1998).
- [7] E. Simonson and N. Enzer: Measurement of fusion frequency of flicker as a test of fatigue of the central nervous system, *J. Indust. Hyg. Toxicol.*, 23, 83-89(1941).
- [8] R.W. Porter: New test for finger-tip sensation, *Br. Med. J.*, 2(5519), 927-928(1966).
- [9] S. Kitano, Y. Yoshida, K. Kawano, N. Hibi and E. Niki: Oxidative status of human low density lipoprotein isolated by anion-exchange high-performance liquid chromatography - Assessment by total hydroxyoctadecadienoic acid, 7-hydroxycholesterol, and 8-iso- prostaglandin F (2alpha), *Analytica Chimica Acta*, 585(1), 86-93(2007).
- [10] M. Maes, I. Mihaylova, M. Kubera, M. Uytterhoeven, N. Vrydags and E. Bosmans: Coenzyme Q10 deficiency in myalgic encephalomyelitis/chronic fatigue syndrome (ME/CFS) is related to fatigue, autonomic and neurocognitive symptoms and is another risk factor explaining the early mortality in ME/CFS due to cardiovascular disorder, *Neuro Endocrinol. Lett.*, 30(4), 470-476(2009).
- [11] K. Miwa and M. Fujita: Fluctuation of serum vitamin E (alpha-tocopherol) concentrations during exacerbation and remission phases in patients with chronic fatigue syndrome, *Heart and Vessels*, 25(4), 319-323(2010).
- [12] W. Karwowski (ed.): *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, 2nd Edition, CRC Press, (2006).
- [13] 橋本邦衛: Flicker値の生理学的意味と測定上の諸問題: Flicker Testの理論と実際, *産業医学*, 5(9), 563-578(1963).
- [14] 橋本邦衛: 精神疲労の検査, *人間工学*, 17(3), 107-113(1981).

- [15] S. Hecht and C.D. Verrijp: The influence of intensity, color and retinal location on the fusion frequency of intermittent illumination, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 19(5), 522-535(1933).
- [16] S. Hecht and C.D. Verrijp: Intermittent stimulation by light: IV. A theoretical interpretation of the quantitative data of flicker, *J. General Physiol.*, 17(2), 269-282(1933).
- [17] S. Iwaki and N. Harada: Mental fatigue measurement based on the changes in flicker perception threshold using consumer mobile devices, *Adv. Biomed. Eng.*, 2, 137-142(2013).
- [18] <http://www.fhm.co.jp/>
- [19] <https://play.google.com/store/apps/details?id=fhm.lite.application>
- [20] <https://itunes.apple.com/jp/app/fhm-lite/id630387485?mt=8>
- [21] M. Shichiri, N. Harada, N. Ishida, L.K. Komaba, S. Iwaki, Y. Hagihara, E. Niki and Y. Yoshida: Oxidative stress is involved in fatigue induced by overnight deskwork as assessed by increase in plasma tocopherylhydroquinone and hydroxycholesterol, *Biol. Psychol.*, 94(3), 527-533(2013).

執筆者略歴

岩木 直 (いわき すなお)

1998年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年、電子技術総合研究所入所。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認知行動システム研究グループ長。2013年より筑波大学大学院人間総合科学研究科連携大学院教授。脳活動の非侵襲かつ高精度な解析技術の開発とその主観的な知覚・認知の客観的評価に向けた応用、および日常生活における生理・心理指標計測技術の研究開発に従事。この論文では、日常的に利用可能な簡易疲労計測システム実現のための恣意性のないちらつき知覚閾値の計測アルゴリズム開発、計測の高速化技術の開発と論文執筆を担当した。



原田 暢善 (はらだ のぶよし)

1996年、北海道大学大学院環境科学研究科博士課程修了。博士(環境科学)。JST特別研究員(生命工学工業技術研究所)、CREST研究員、NEDO研究員を経て、2004年より産業技術総合研究所特別研究員。2010年、産総研技術移転ベンチャー企業フリッカーヘルスマネジメント(株)代表取締役。1/fゆらぎを用いた、環境中の情報要因の生体(脳機能)に対する影響の研究と、この研究成果の知財化と技術普及のための事業化に従事。この論文では、日常的に利用可能な簡易疲労計測システムの検証実験と、事業化に向けた実装および実労働環境における実測データの取得を担当した。



査読者との議論

全体について (赤松 幹之: 産業技術総合研究所)

これまで実験的な疲労計測に用いられてきたフリッカー疲労検査を、日常生活の中でユーザー自身が使えるようにするための技術開発とその実用化について述べられており、研究で使われていたものを社会に広く使われる技術開発シナリオになっていてシンセシオロジーの論文にふさわしいものになっています。

議論1 技術的ブレイクスルーポイントについて

コメント (赤松 幹之)

周波数ではなく、コントラストを用いるという技術的なブレイクス

ルーポイントの一つが書かれていますが、もう少し明確にこの点を主張されるとこの技術の特徴が明確になると思います。「これに対して、上述の性質を利用することで、表示周波数が固定された装置であっても、コントラストを変化させることで疲労によるちらつきの知覚の変化を計測することが可能である。」といった文を入れることで、これがブレイクスルーのポイントであることが強調されると思います。

回答（岩木 直）

いただいたコメントをもとに、3.1 節第 2 段落の最後に、ちらつき知覚のコントラスト閾値を用いることによるブレイクスルーのポイントを簡潔に説明する 2 文を加えました。

議論2 これまでの疲労の測定について

コメント（坂上 勝彦：産業技術総合研究所環境安全本部）

第 1 章第 3 段落には、客観的な指標に基づく疲労の測定が一般の利用者が日常生活中に気軽に使用することは不可能であることが記述されていますが、この論文の主題である知覚・認知指標について触れられていません。次章以降で詳述されるとは言え、この段落でも他の客観的指標と同じ扱いとして触れておくべきと考えます。簡潔な要点のみでよいと思いますので、加筆をお願いします。

回答（岩木 直）

ご指摘の通りですので、第 1 章に知覚・認知指標についても記述を加えました。

議論3 本方法を用いたフリッカー疲労検査の指標について

質問（赤松 幹之）

図 9 の縦軸が他の図と異なっています。周波数によるフリッカー疲労検査においては疲労の指標値は確立されていますが、コントラストを用いた場合の指標として、何を使うのが定まっていらないのでしょうか。

回答（岩木 直）

図 9 に示す日常生活中における継続利用予備実験データでは、さまざまなパラメータがコントロールされた実験室内での実験と異なり、「基準値」（個人差の大きなデータを規格化するための基点となるデータ。通常、疲労負荷前の計測値を標準値とする）を明示的に設定する方法が確立されていません。今回は実験期間中に計測された最も大きい値を「基準値」とすることとし、他の図と同じようになるようグラフの縦軸を修正しました。

また、日常生活中に継続的に計測された疲労データからの「基準値」設定方法は、実用化に向けた非常に重要なポイントだと思われ、現在産総研技術移転ベンチャー企業とともに取り組んでいる研究開発対象でもあります。これに関して、第 6 章第 3 段落を追加しました。

メタンハイドレート開発に係る地層特性評価技術の開発

— 現場への適用を目指して —

天満 則夫

メタンハイドレート (MH) は次世代のエネルギー資源として期待されており、有効なガス生産手法として減圧法が提案されている。この減圧法を適用した場合にはMH層の圧密やMH分解に伴う変形が予想されており、変形の影響範囲の把握や変形に伴う坑井等の海底設備への影響を評価することが長期的に安全な生産技術を開発する上で必要である。そこで、地層の変形挙動や坑井の健全性評価を進めるために地層変形シミュレータ (COTHMA) の開発を中心とした地層特性評価技術の開発を進めた。現在、地層特性評価技術として「地層変形シミュレータの開発」、「坑井の健全性評価」と「広域の地層変形評価」の3課題の研究開発を進めており、この論文ではその実用化に向けた技術の体系化に関して論じる。

キーワード: メタンハイドレート (MH)、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21)、地層変形シミュレータ COTHMA、ジオメカニクス

Development of evaluation technologies for sedimentary characteristics

– Applicability of the technologies to the assessment of methane hydrate sediments –

Norio TENMA

Methane hydrate (MH) is considered to be part of a new generation of energy resources. Depressurization has been proposed as a method of extracting methane gas from MH in marine sediments. During depressurization, sediment deformation may occur because of MH dissociation and increased effective stress. It is therefore important to develop long-term, safe methods for protecting equipment used on the sea floor against the impact of deformation. We have developed the “COTHMA” geo-mechanical simulator to predict sediment deformation during methane gas production from MH. We have also performed laboratory experiments (push-out tests) of well integrity to determine model parameters. Deformation and stress in the vicinity of a production well were evaluated to assess the integrity of the well. Our technologies for evaluating sedimentary characteristics consist of the development of the geo-mechanical simulator and the evaluation of well integrity and wide-area deformation. Based on this research, we are now preparing technologies for practical application.

Keywords: Methane Hydrate (MH), MH21 Research Consortium, COTHMA, Geo-mechanics

1 はじめに

メタンハイドレート (以下、MH) はメタン分子が高圧・低温下の条件で、水分子の籠の中に取り込まれた固体の結晶である。この高圧・低温下の条件になる環境として陸域では永久凍土地帯、海域では大陸縁辺部の堆積層 (例えば、水深 1000 m 以下の海底面より 200 ~ 300 m) 等があり、このような条件下で固体として存在している。圧力を下げたり (減圧)、温度を上げたりすると、メタンガスと水に分解することから新たな天然ガス資源として期待されている。これまでの調査・研究によって日本の近海にも多く存在することが分かっている。この MH 資源開発のために 2001 年度に「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21)」が組織され、研究開発が進められている^[1]。

産総研メタンハイドレート研究センターは、この MH21

の中で生産手法の開発を担当し、有効な生産手法として減圧法を提案している^[2]。減圧法とは、地層中の原位置において水をくみ上げ圧力を下げることで MH をメタンガスと水に分解させて、メタンガスを採取する方法であるが、この減圧法を適用した場合には、図 1 に示すように MH 層の分解に伴う変形や圧密が予想されている。例えば、MH 層からのガス生産に伴い地層が変形すると生産井と地層との間に局所的な変形がおこり流路形成やガス漏洩といった生産障害を引き起こす可能性が考えられる。また、地層変形によって、坑井等の構造物の安定性に影響を与え、長期的に安全な生産を継続することが困難になることも考えられる。そのような観点から、安全かつ長期的に MH 層からのガス生産を行うためには、地層の変形挙動を予測できる数値シミュレータ等の評価技術を開発する必要がある。

産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究センター 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西
Methane Hydrate Research Center, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan E-mail: tenma-n@aist.go.jp

Original manuscript received January 14, 2014, Revisions received August 25, 2014, Accepted August 28, 2014

しかしながら「分解過程でMH層の力学特性がどのように変化していくのか?」とか「MHが力学的にどのような役割をしているか?」といった数値シミュレータで扱うべき基本的な特性が、プロジェクト開始時には分かっていたので、地層変形や圧密を評価することができなかった。そこで、これらを評価し、安全かつ長期的にガス生産を行うための技術として「地層特性評価技術」の開発を進めている。この技術は、図2に示すように後述するMH層からのガス生産技術の開発課題の1テーマであり、メタンハイドレート研究センターは本課題の管理主体として研究開発を行っている。著者は、メタンハイドレート研究センター副研究センター長（生産モデル開発チーム長を兼務）として、この地層特性評価技術の開発に取り組んでいる。生産モデル開発チームは、研究員3名にテクニカルスタッフ等を含め計14名で構成されており、地層特性評価技術の技術開発に取り組んでいる。著者はチームの全体調整や研究の体系化等を行っている。この論文では、生産モデル開発チームとして取り組んでいる課題等を中心にこれまでに進めて

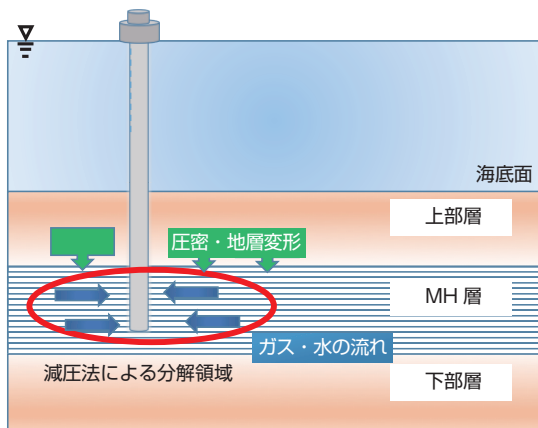


図1 MH層の力学挙動
MH層への減圧法適用によって、MHが分解して、圧密・地層変形が生じると予想されている。

きた地層特性評価技術の進捗等について論じたいと思う。

2 メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) の取り組み

MH21では、2001年度～2008年度までの期間をフェーズ1とし、東部南海トラフ海域のMH層のメタンガス原始資源量の算定や、減圧法による陸上産出試験の成功等、多くの成果を挙げてきた。そして、2009年4月より、「我が国周辺海域での海洋産出試験の実施等の研究開発を通して、MH層のメタンガスがエネルギー資源となり得る可能性をより高い信頼性で評価するとともに、MH層の商業的開発のための技術の整備に必要となる技術課題の抽出を行う」ことを目的にフェーズ2が2015年度までの予定で開始された。フェーズ2では、東大の増田昌敬准教授をプロジェクトリーダーとして、フィールド開発技術グループ、生産手法開発グループ、資源量評価グループ、推進グループ等がMH21内につくられ研究開発を進めている。2013年3月には、東部南海トラフの第二渥美海丘エリアにおいて、世界で最初の第1回海洋産出試験が実施された。この試験は、①減圧法によりハイドレートからガスを生産できることの実証とガスの生産性の確認、②減圧法を海底下の比較的浅い深度に適用するための技術の確立等を目的に実施され、減圧法によって6日間で約120,000 m³のガスが生産された。また、貯留層評価等のための貴重なさまざまなデータが取得された。第1回海洋産出試験で得られたデータを基に、MH層内のさまざまな現象に関して各研究グループ・チームが連携をとりながら詳細な検討をしているところである。

また、世界的にみると、米国、韓国、中国、インド等の世界各国で研究が進んでいる。例えば、韓国では対馬海盆におけるガスハイドレート掘削調査、米国ではメキシコ

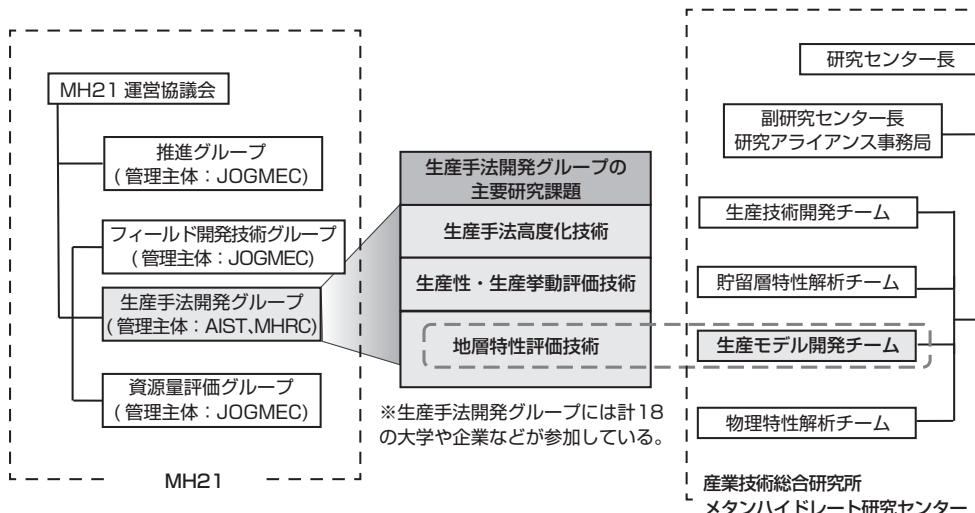


図2 生産手法開発グループと生産モデル開発チームの関係と研究課題
メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) にて、メタンハイドレート研究センター (MHRC) が生産手法開発グループの管理主体として研究開発を行っている。生産モデル開発チームは MHRC 内の研究チームとして地層特性評価技術の開発を進めている。

湾の地震探査調査等の資源量に係る調査が行われているが^[3]、海洋産出試験の実施には至っていない。

さて、メタンハイドレート研究センターは生産手法開発グループの管理主体として、減圧法を始めとするさまざまな生産手法に関して研究開発を進めている^[4]。フェーズ1では、減圧法、加熱法等の各種生産手法の検討を行い、エネルギー効率で有効な手法として減圧法を提案することとなった。フェーズ2では、この減圧法を適用し、さらにメタンガスを大量・安定的に生産する複合生産手法（併用法）の開発、生産シミュレータ（MH21-HYDRES）の機能強化と産出試験との検証、メタンガス生産における広域の地層変形等の評価を実施している。具体的には、「生産手法高度化技術」として、高い生産性と回収率を確保するための生産手法の開発を行うとともに、長期にわたり安定な生産を行うため、出砂、スキン形成、細粒砂蓄積、圧密による浸透性低下、MH再生成による流動障害等の生産障害因子の定量的解析と数式モデルの開発、生産障害対策技術、抑制技術の開発を行っている。また、貯留層の不連続性や不均質性をパラメータとして導入した貯留層モデルの開発と室内試験等との検証を通じて、生産シミュレータの精度を高め、実践的なシミュレータの開発を進める「生産性・生産挙動評価技術」の研究を行っている。さらにMH層からのメタンガス生産に伴う地層変形・圧密挙動について長期的な安全性を保証するための「地層特性評価技術」の研究を行っている。

3 地層特性評価技術について

MH層からのガス生産に伴い地層変形が予測されていることから、長期間にわたって開発対象域での安全・安心な生産を保証する技術の開発が、社会的受容性からも重要になっている。特に、図3に示すように開発対象域では、MH層内での変形挙動の他に、断層等の不連続性や地層の不均質性が海底面沈下や地層変形等に与える影響を評価することも必要である。また、開発初期から廃坑後に至るまでの期間における地層の変形と強度の変遷についても解析し、開発前との比較によって開発の長期的な影響を評価することも必要になっている。さらに、減圧法適用時に坑井壁面に大きな応力差が生じることから、この生産条件が坑井壁に与える応力を解析し、生産期間中における坑井の健全性について評価を行うことも重要である。これらの問題を解決するために、生産手法開発グループでは「地層特性評価技術」として①地層変形シミュレータの開発、②坑井の健全性評価および③広域の地層変形評価の課題を設定して、MH21の枠組みを活用して民間企業や大学等と連携しながら研究開発を進めている。

具体的には、①地層変形シミュレータの開発では、後述するCOTHMAの開発等を進めている。また、シミュレータでMH層の変形や圧密挙動を取り扱えることが可能になるように、MH層のさまざまな力学パラメータの取得も行っている。

②坑井の健全性評価では、地層変形シミュレータを基に減圧法適用時の坑井周辺の地層変形や応力分布等を解析・評価している。また、健全性評価に必要な坑井に係る物性値の取得も実施している。

さらに、③広域の地層変形評価では、断層等の不連続性や地層の不均質性が海底面沈下や地層変形等に与える影響を解析する手法を調査・検討することや、シミュレータによる感度解析の実施を行っている。また、開発初期から廃坑後に至るまでの期間における地層の変形と強度の変遷について解析し、開発前との比較によって開発の長期的な影響を評価することになっている。これらの課題は図4に示すようにお互いに関連しており、後述する「坑井の健全性評価」や「広域の地層変形評価」の知見を合わせた「地層変形シミュレータ」を開発し、最終的にはMH開発の策定に必要なさまざまな情報を提供できるようにすることを目標としている。

このうち、メタンハイドレート研究センター生産モデル開発チームでは、MH21の枠組みの中で、①地層変形シミュレータの開発として、コア試験等を通して力学パラメータの取得を行いながら、地層変形シミュレータの高度化を図るとともに、MH開発に特有な大水深未固結堆積層の力学特性の総合的な評価を行っている。また、②減圧法適用に伴う坑井および坑井周辺の応力分布等を評価し坑井の安定性等の評価を行っている。

以下では、地層特性評価技術の開発として現在、生産モデル開発チームが取り組んでいる開発中の地層変形シミュレータの概要や計算例、坑井の健全性評価の一環とし



図3 MH開発における地層特性評価技術の開発
長期的に安全・安心な生産手法が確立するためには、地層特性に係るさまざまな課題を解決していく必要がある。

て実施している接触面特性に関する研究やMH21の枠組みの中で民間企業や大学等と連携して取り組んでいる広域の地層変形評価の進捗等について詳細に示したいと思う。

3.1 地層変形シミュレータの開発

地層変形に関する数値解析は土木や建築分野等で開発や利用が進められている。通常では現場のコアを用いて室内実験等を行い、地層がどの程度の圧力で変形するかを示す変形係数等のパラメータを取得し、これらのパラメータを用いて有限要素法（FEM）等で、地層内の応力分布や変形量等を計算している^[5]。しかし、MH層からのガス生産では、減圧法によって、元々固体として地層内にあるMHが分解して水とメタンガスになるため、これまで固体として寄与していたMHがなくなることになり、地層内の応力分布が変化する。さらに、分解に伴い発生した気体と液体が地層内を流動することになる。また、MHは分解の際は吸熱反応であるため、地層内での熱のやりとりも発生することになる。そのため、一般的な地層変形と異なり、MHを含む地層の変形係数や強度等の力学パラメータ、地層内の気液の流れやMH分解・生成に伴う温度変化等を取り扱えるようなシミュレータ開発を進めないとMH開発に係る地層の変形挙動を解析することができなかった。そこで、地層変形に関する解析や数値シミュレータの作成経験を有する西日本技術開発株式会社と共同で、地層変形用の数値シミュレータに対して、浸透流解析、熱伝導解析、MH分解・生成に関する機能を順次追加してMHを含む地層に関する数値シミュレータ開発を進めてきた^{[6][7]}。後述するMHの力学パラメータ等のシミュレータ上の取り扱いや数値シミュレータの基本設計は生産モデル開発チームが

中心に実施し、現在は、応力、浸透流、熱伝導、MH分解・生成等を連成したFEMになっている。シミュレータは、COTHMA (Coupled thermo-hydro-mechanical analysis with dissociation and formation of methane hydrate in deformation of multiphase porous media) と略称している。近年は、COTHMAと同様な機能を有する変形シミュレータがいくつか提案されているが^{[8][9]}、後述するように、COTHMAはMHを含むコア試料の力学試験結果を基にして開発を進めているため、MHを含む地層の変形挙動を最も精度よく表現できるシミュレータになっている。以下に開発・改良中のCOTHMAの特徴的な機能を示す。

- ①気液固3相を連成解析。
- ②減圧、加熱およびこれらを併用した生産手法に対応。
- ③MHの分解・再生成を考慮。
- ④水の生成・融解を考慮。

これまでは室内実験結果の再現を行い、シミュレータの検証を進めてきた^{[10][11]}。さらに、本シミュレータを用いて、フィールドスケールでのさまざまな感度解析も実施している^[12]。図5は、フィールドスケールでのシミュレータの検証として実施した予察的な検討結果の一例を示す^[13]。モデルは坑井を中心軸とした二次元円筒座標系の軸対称モデルで、坑井の右半分の領域を要素分割している。また、モデルではMH層とその上下に泥層を設けている。また、MH層であるがフィールドを参考に砂泥互層の簡便なモデルを仮定している。具体的には砂泥互層の厚みを1 m毎に交互に設定している。さらにMH層に達している坑井の区間で減圧する条件で計算を行っている。減圧開始の1日後、10日後および100日後の水圧、MH飽和度、変形量

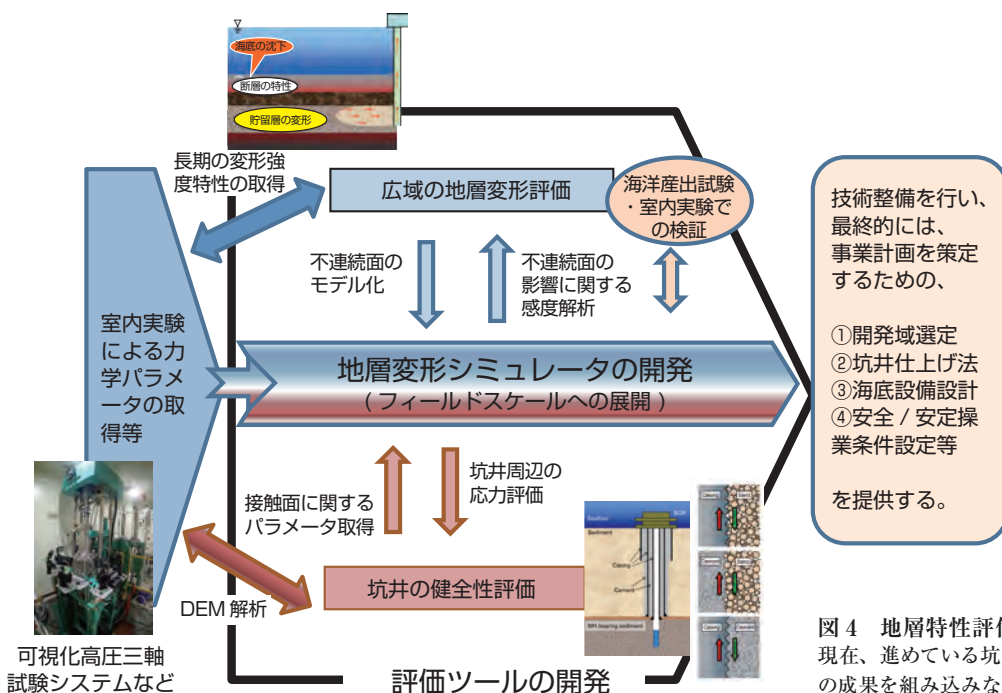
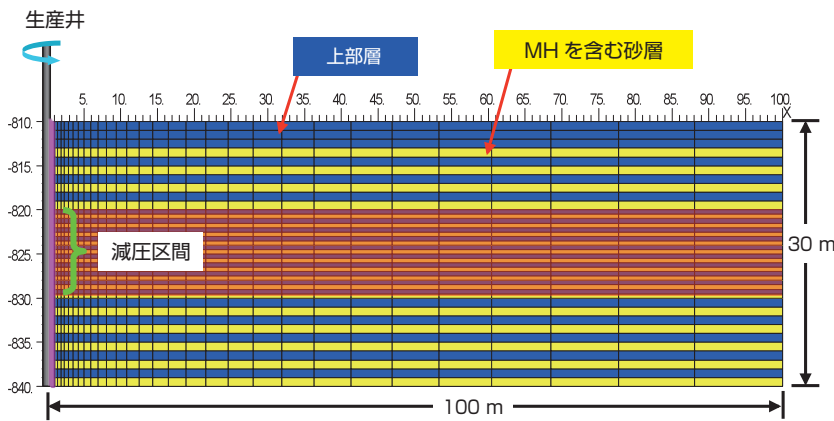


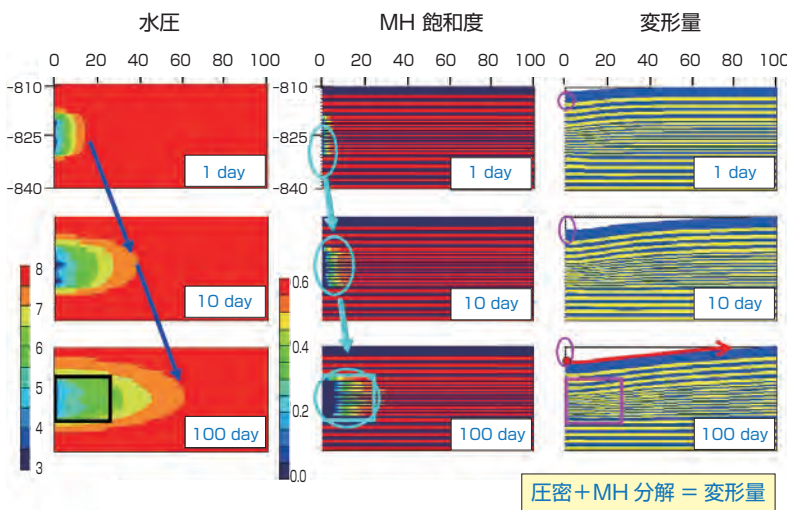
図4 地層特性評価ツールの開発
現在、進めている坑井の健全性や広域の変形評価等の成果を組み込みながら、ツール開発を進めていく。

のコンター図を示す。水圧変化から分かるように減圧開始後、減圧区間を中心に水圧の低下域が広がっている。減圧法によって低圧域が広がっていき、その領域に対応するようにMHを含む砂層にMH分解域が広がっており、砂層にはMH分解と圧密による変形の影響が表れている。このMH分解域が広がるに従い砂泥互層全体の変形も進んでいる。特に変形は圧密とMH分解に伴う影響が混在しており、分解域以上に広域に影響が出ている。ただし、計算では沈下は徐々に緩やかになっていき、坑井近傍での沈下はある程度まで進行した後にほぼ安定した結果となった。MH分解の影響も含まれているために、変形量は地層の圧密変形以上に大きくなったと考えられるが、MHが分解しても砂層内の骨格構造がある程度保たれるために変形が徐々に緩やかになっていったと推察される。現在は、これまで実施してきた感度解析結果の知見や、第1回海洋産出試験地の情報を基にした数値モデルを構築し、試験結果の検証を通してMH生産時の地層変形挙動などに関する解析・評価を進めている。

また、MHを含む地層の変形係数や強度（応力のピーク値）等の力学パラメータは、これまでに計測されたことがなく、またMHを含むコア試料の入手は困難であったので、力学パラメータを取得するためにMH専用の試験装置開発や試料を準備する必要がある。そこで、MH21の枠組みを活用して大学や民間企業等と連携しながらMHを含む模擬試料の作製方法を検討し、凍結した砂試料にガスを浸透させ所定の圧力と温度条件下で融解しながら作製する方法を確立した。また、従来の土質力学等で用いられていた三軸力学試験装置で模擬試料を扱えるように改造・開発することに成功し、MHを対象とした室内での力学試験が可能になった。さらに、MH21の研究開発の一環として2004年1月下旬から5月中旬にかけて「東海沖～熊野灘」にて基礎試錐が実施され、天然のMHコア試料を取得することに成功した。この天然のMHコアや、模擬試料を用いた力学試験の実施によって、MHを含むコアの変形係数や強度等の値が得られるようになり、MH飽和率（空隙内に占めるMHの体積比率）が大きいほど、変形係数



(a) 予察的な検討に用いたフィールドスケールのモデル概要図



(b) 計算結果のコンター図（水圧、MH飽和度、変形量）

図5 フィールドスケールでの感度解析結果の一例

フィールドスケールでの簡易モデルを用いて、減圧法適用時の地層変形に関して検討したコンター図である。MH層の分解や圧密による変形の影響が示されている。

※変形に関しては、変化を分かりやすくするために計算結果を30倍して表示。

や強度が大きくなる等の特性が明らかになった^{[14]~[18]}。これらの結果を基に実験式を導出し、地層変形シミュレータに組み込み、変形挙動の解析を可能にしている。

最近では、2012年夏に海上産出試験実施場所にて圧力コア（MHの分解を避けるために高い圧力を保持した状態のコア）の取得にも成功している。これらのコアは産総研北海道センターにて管理・保管されており、MH層に係るコアの詳細なデータ解析が進められている。さらに、MHを含むコアのより正確な力学パラメータを取得するために、高圧力を保持した状態で力学試験が実施できる「可視化高圧三軸試験システム」（写真1）を導入し、試験を実施している^[19]。本装置の特徴は、高い圧力を保持したまま採取された天然コアの圧力を減ずることなく装置に搬送し、ゴムスリーブを介して有効拘束圧を負荷し、圧縮試験ができることである。また、高圧下での三軸圧縮試験を可視化できるようにアクリルで試料セル部を作製してある。この結果、力学試験の過程でコアの局所的な変形を把握することも可能となり、地層に応力が付加された時のせん断面の肉眼観測、局所変形やひずみの定量化等が可能になる。本装置を用いることで地層変形シミュレータに用いる力学パラメータの精度向上に資することになる。

3.2 坑井の健全性評価

開発中の地層変形シミュレータを用いて坑井の健全性評価を進めている。例えば、減圧度（坑底部の圧力を原位置の圧力からどこまで減圧するか）の違いによって坑井周辺の応力分布が異なることなどが明らかになってきているが^[20]、さらなる解析精度の向上を進めるために、現場に即した坑井モデルの設定が必要になっている。特に、坑井はケーシング、セメントおよび地層の複合材料の組み合わせとなっていることから、各材料同士の接触面強度を把握することが重要である。しかし、MH層のような大水深・大深度の

条件下における坑井の接触面に関する研究報告はあまり多くない。そこで、これらのパラメータを取得し、現場に即した坑井モデルを構築するための貫入試験を行っている。写真2は、ケーシング-セメント間の接触面強度を取得するために準備した試料で、セメントで作製した中空の試料内に鋼棒が入り、この鋼棒を押し抜く貫入試験を行うことで材料間の接触面強度のデータ取得を行っている。これまでに、ケーシング-地層間、ケーシング-セメント間、セメント-地層間の接触面強度に関する実験を行い、例えば、ケーシング-セメント間の接触面強度に関して、有効拘束圧等をパラメータとした実験式の導出を行っている^{[21]~[22]}。今後、これらの実験式を用いた感度解析を進め、MH開発に適した坑井仕上げ法等を提案する計画である。

また、接触面では粒子破碎などによる局所的な変形も生じるが、貫入試験ではこの局所的な影響まで詳細に把握することは実験条件の設定や実験時間等の点から困難である。そこで、数値解析による評価として、個別要素法（Distinct Element Method; DEM）を用いた検討も行っている。DEMは多数の粒子の運動を追跡していく手法なので、実験では計測困難なマイクロな力学量を定量的に評価できる。接触面における「粗さ」が強度にも関係することが分かっているので、坑井表面スケールの凹凸や砂粒子の凹凸等さまざまなスケールの粗さをDEMで系統的に整理することを試みている。DEMによってさまざまな力学的条件下での接触面の特性を系統的に把握し、さらに貫入試験結果の再現等の検証から得られた知見によって、接触部の力学挙動の解明やモデリングを進めたいと考えている^[23]。

3.3 広域の地層変形評価

MH実用化に向けた開発では、図3に示すように開発対象地域周辺の断層等の不連続面がある場合に、

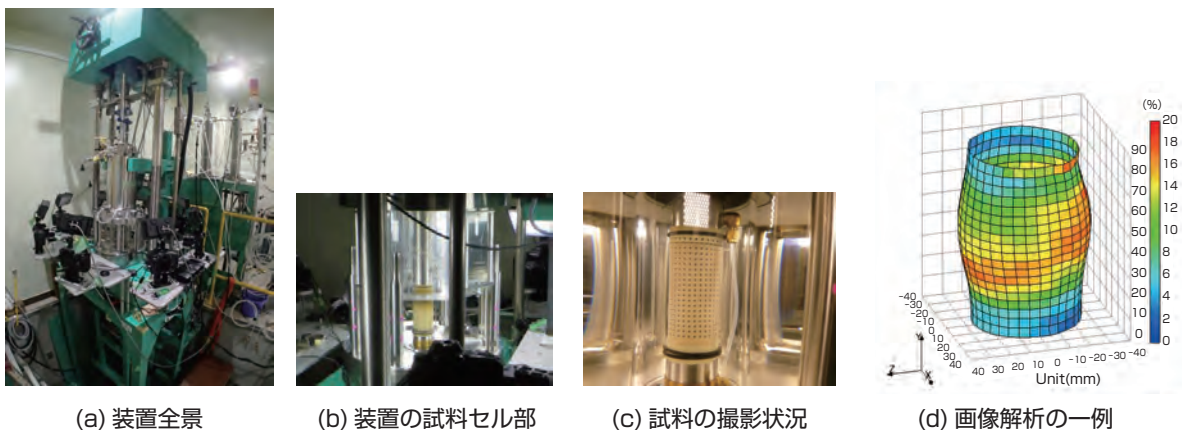


写真1 可視化高圧三軸試験システム

(a) 装置全景、(b) 装置の試料セル部、(c) 試料の撮影状況、(d) 画像解析の一例。装置全景からわかるように試料セル部にて画像を複数方面から取得でき、その画像データを用いて、試料表面の変化を把握することができる^[19]。

断層が水みちとなり減圧を継続できなくなる等、長期的な生産が継続できなくなることも考えられる。そこで、不連続面の影響評価を検討している。また、資源開発では減圧法を適用するために生産前、生産中、生産後に圧密等の変形挙動が大きく変わる可能性がある。その観点から長期的な地層特性についても検討することとした。広域の地層変形評価では、大きくこの2つの研究を実施している。まず、開発地域の選定手法を確立することを目的に、東部南海トラフの海底地盤を参考に数値モデルを作成し、その数値モデル上に仮想的に断層を設定して断層等の不連続性や地層の不均質性の影響について検討している。具体的には、断層のない数値モデルを基に減圧法を適用した場合の地層変形挙動と、断層を設定した場合の変形挙動に関して比較・検討することで断層等の不連続面が変形挙動に与える影響を把握し、開発域を選定する際にどのような地層条件が開発域として最適であるかの条件把握のための感度解析を行っている。これまでに考慮してきた感度解析のパラメータとしては坑井・断層間の距離、断層の傾斜角や正断層および逆断層の場合等がある^[24]。これまでの感度解析の結果では、減圧法の適用による地層変形挙動が断層を境に変わることが確認されている。今後、各パラメータの地層変形の影響を整理し、開発に適した場所を選定する際の考え方を確立する予定である。

また、開発初期から廃坑後に至るまでの期間における地層の変形と強度の変遷について解析し、開発前との比較によって開発の長期的な影響の評価を行っている。具体的には、MH層およびその周辺地層の現地基礎試錐により得ら

れた粒度構成等のデータを基に作製したMH模擬試料を対象に生産前後の状態を想定した条件下での三軸試験を実施している。減圧法適用時（生産中）や減圧終了後の水圧の回復（生産後）では、地層内の流体圧が変動するため、模擬試料内の空隙流体圧を変化させる試験を行い生産前後の変形強度特性の把握を行っている^[25]。今後は、試験結果から得られた変形強度に関するモデル開発を進め、これらのモデルを地層変形シミュレータに組み込むことで、長期の地層変形解析ができるように開発を進める予定である。

4 今後の研究開発について

2013年4月26日に閣議決定された「海洋基本計画」においてMH開発は、「日本周辺海域に相当量の賦存が期待されるMHを将来のエネルギー資源として利用可能とするため、海洋産出試験の結果等を踏まえ、平成30年度を目途に、商業化の実現に向けた技術の整備を行う。その際、平成30年代後半に、民間企業が主導する商業化のためのプロジェクトが開始されるよう、国際情勢をにらみつつ、技術開発を進める」との記載がある。この「海洋基本計画」に従い、現在「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」の見直しが進められており、長期的に安定な生産技術の開発を進めることが示されている。今後も地層特性評価技術の開発を着実に進めていくことが必要になっている。

現在は2013年3月に実施された第1回海洋産出試験地で得られたコア解析の結果等を用いて三次元モデルを構築・更新し、海洋産出試験結果の検証を通してMH生産時の地層変形挙動などに関する解析・評価を進めており、

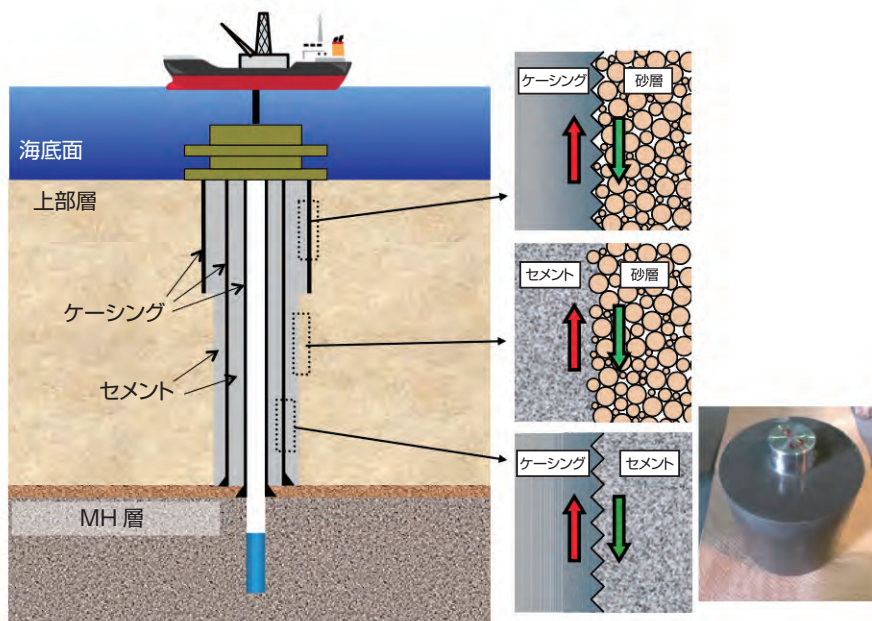


写真2 ケーシング・セメント間の接触面強度計測用試料（図面を一部修正）^[21]

坑井はケーシング、セメントおよび地層の複合材料の組み合わせなので、各材料の組み合わせに関する試料を準備して室内実験を行った。

これらの検証を通して地層変形シミュレータの改良を進めていく予定である。また、北海道センターには、MH層を対象とした世界最大の室内実験装置 High-pressure Giant Unit for Methane Hydrate Analysis (略称: HiGUMA) がある^[26]。この実験装置は、減圧法を適用した場合にコアスケールの室内実験では把握できなかったMH層の分解挙動やガスの生産挙動等を評価するための装置である。この装置を用いて、減圧法適用時の坑井近傍での変形挙動に関する計測も検討中である。減圧法を適用した際の変形挙動を計測し、実験の検証を通して地層変形シミュレータの精度向上を図りたいと考えている。

この地層変形シミュレータに、3.2 や 3.3 にて述べたような坑井周辺の評価や広域での地層変形評価等で確立される開発選定手法等の機能を組み合わせたシミュレータ開発を進め、最終的にはMH層からのガス生産を行うための開発地域選定、坑井仕上げ方法、海底設備設計等の評価に資するツールの開発を進めていきたいと考えている。

5 おわりに

この論文では、「地層特性評価技術」として①地層変形シミュレータの開発、②坑井の健全性評価および③広域の地層変形評価の概要、成果や今後の開発方針等について論じてきた。

MH資源開発の実用化に向けて、今後、長期的に安定な生産技術を提案することは重要であり、力学特性の評価技術の視点は、その基盤技術になるものと考えられる。これまでの研究を通して、研究対象とすべき天然MHコアの入手や、模擬試料の作製方法の確立や天然MHコアを用いた試験結果との比較等を経て、MHを含む地層の力学特性の把握やMHの力学挙動を扱える数値シミュレータの開発が進んできたのは大きな成果と考えている。

また、第1回海洋産出試験に関する結果検証は、MH21の枠組みを基にした産学官の連携によって進められ、これらの研究活動の実施がMH開発に関わる人材の育成にもつながっている。さらに、この研究を通してさまざまな実験装置の開発が進んでいる。さらなるMHを含む地層の力学特性の把握を進め、数値シミュレータの精度向上等を進め「地層特性評価技術」の現場への技術展開を進めていきたいと思う。

謝辞

この研究は、経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業・生産手法に関する研究開発」の一環として実施した。この論文を作成するにあたり、米田純研究員、片桐淳研究員、宮崎晋行研究員(兼務)をはじめとする生産モデル開

発チームのメンバーやMH21関係各位に対し、謝意を表する。

参考文献

- [1] MH21研究コンソーシアム, <http://www.mh21japan.gr.jp/>
- [2] M. Kurihara, A. Sato, H. Ouchi, H. Narita, Y. Masuda, T. Saeki and T. Fujii: Prediction of gas productivity from Eastern Nankai Trough methane-hydrate reservoirs, *SPE Journal*, 125481-PA, (2009).
- [3] U.S. DOE: *Fire in the Ice, Methane Hydrate Newsletter*, 13 (2), (2013).
- [4] J. Nagao: Development of methane hydrate production method – A large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests –, *Synthesiology*, 5 (2), 89-97 (2012).
- [5] 深田敦宏, 中野正文, 川村佳則, 松田隆: LNG地下タンク周辺盛土の地震時沈下予測解析, *土木学会第57回年次学術講演会*, 1087-1088 (2002).
- [6] 青木一男, 緒方雄二, 榊井明, 森二郎, 方火浪: メタンハイドレート生産に伴う地盤変動について, *資源・素材 2003 (A/B)*, 235-236 (2003).
- [7] 青木一男, 緒方雄二, 榊井明, 森二郎, 方火浪: メタンハイドレート開発時における地盤変動解析について, *資源・素材 2006(福岡)*, (2006).
- [8] M.Y.A. Ng, A. Klar and K. Soga: Coupled soil deformation-flow-thermal analysis of methane production in layered methane hydrate soils, *Proc. 2008 Offshore Technol. Conf., OTC19364*, (2008).
- [9] S. Kimoto, F. Oka and T. Fushita: A chemo-thermo-mechanically coupled analysis of ground deformation induced by gas hydrate dissociation, *Int. J. of Mechanical Sciences*, 52 (2), 365-376 (2010).
- [10] 坂本靖英, 覺本真代, 宮崎晋行, 天満則夫, 駒井武, 青木一男, 山口勉: 減圧法によるメタンハイドレート分解時の圧密ならびにガス産出挙動に関する室内実験のシミュレーション-メタンハイドレート貯留層の浸透率評価に関する研究(第7報), *Journal of MMIJ*, 126 (12), 631-639 (2010).
- [11] 宮崎晋行, 坂本靖英, 覺本真代, 天満則夫, 青木一男, 山口勉: 細粒分を含む模擬メタンハイドレート含有砂質堆積物の三軸圧縮特性とメタンハイドレート分解時の力学挙動, *Journal of MMIJ*, 127 (9), 565-576 (2011).
- [12] 米田純, 宮崎晋行, 天満則夫, 兵動正幸: 減圧法を適用したメタンハイドレート堆積層の長期的変形予測, *第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM)*, JSRM-64, (2012).
- [13] M. Kakumoto, J. Yoneda, K. Miyazaki, N. Tenma, A. Masui, K. Aoki, H. Karasawa and R. Itoi: Preliminary study on well integrity during gas production from methane hydrate sediments, *Proc. Int. Symp. Earth and Technol. 2011*, CD-ROM, (2011).
- [14] A. Masui, H. Haneda, Y. Ogata and K. Aoki: Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments, *Proc. 15th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, 364-369 (2005).
- [15] A. Masui, K. Miyazaki, H. Haneda, Y. Ogata, and K. Aoki: Mechanical characteristics of natural and artificial gas hydrate bearing sediments, *Proc. 6th Int. Conf on Gas Hydrates*, CD-ROM, (2008).
- [16] K. Miyazaki, A. Masui, K. Aoki, Y. Sakamoto, T. Yamaguchi and S. Okubo: Strain-rate dependence of triaxial compressive strength of artificial methane-hydrate-bearing sediment, *Int. J Offshore and Polar Eng.*, 20, 256-264 (2010).
- [17] K. Miyazaki, A. Masui, Y. Sakamoto, K. Aoki, N. Tenma and T. Yamaguchi: Triaxial compressive properties of

- artificial methane-hydrate-bearing sediment, *J. Geophys. Res.*, 116 (B6), 102 (2011).
- [18] K. Miyazaki, Y. Endo, N. Tenma and T. Yamaguchi: A nonlinear viscoelastic constitutive equation for artificial methane hydrate-bearing sand under triaxial compression, *Proc. 8th Int. Conf. on Gas Hydrates*, CD-ROM, (2014).
- [19] J. Yoneda, A. Masui, N. Tenma and J. Nagao: Triaxial testing system for pressure core analysis using image processing technique, *Rev. Sci. Instrum.* 84, 114503 (2013).
- [20] 天満則夫, 宮崎晋行, 米田純, 覺本真代, 青木一男, 森二郎, 瀧口晃, 方火浪: メタンハイドレート生産時における坑井の健全性に関する研究, 第3回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 55-56 (2011).
- [21] 覺本真代, 米田純, 宮崎晋行, 天満則夫, 青木一男, 糸井龍一: 坑井の健全性に係るケーシングセメント間の接触面強度に関する基礎的研究, *Journal of MMIJ*, 129 (4), 116-123 (2013).
- [22] 米田純, 覺本真代, 宮崎晋行, 片桐淳, 天満則夫, 青木一男: 高拘束圧下の砂中ケーシング周面摩擦力に及ぼす表面粗さの影響, *Journal of MMIJ*, 129 (6), 278-283 (2013).
- [23] 片桐淳, 米田純, 天満則夫: メタンハイドレート開発における坑井と土の境界面を模擬した個別要素法解析, 第4回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 207-208 (2012).
- [24] 荻迫栄治, 西尾伸也, 傳田篤: メタンハイドレート生産時の地層変形に関するケーススタディー, 第4回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 136-140 (2012).
- [25] 横山奈津子, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 加藤晃: 南海トラフの深海底地盤を模擬したメタンハイドレート固結砂の三軸圧縮せん断特性, 第4回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 145-149 (2012).
- [26] 今野義浩, 神裕介, 長尾二郎: 大型室内試験装置によるメタンハイドレート増進回収法の検証, 第5回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 54-55 (2013).

執筆者略歴

天満 則夫 (てんま のりお)

1990年工業技術院資源環境技術総合研究所入所、地熱貯留層の数値モデリングや抽熱特性に関する評価を専門分野とし、数値シミュレータの開発に従事。2009年度より産総研メタンハイドレート研究センターに異動し、これまでの専門を基にMH層開発に係る地層変形シミュレータ開発に携わり、地層特性評価技術の開発を目指している。



査読者との議論

議論1 全体的な評価

コメント(立石 裕:産業技術総合研究所中部センター、矢野 雄策:産業技術総合研究所)

この論文は、産総研メタンハイドレート研究センターで実施している研究開発の中の、「地層特性評価技術」について開発技術体系を俯瞰できる論文として仕上がっている。メタンハイドレート資源開発の国家プロジェクトの運営主体であるMH21の中で、同センターが果たしている役割を含めて、コア技術である地層変形シミュレータの開発と、これを基にした坑井の健全性評価および広域の地層変形評価が的確にまとめられており、シンセシオロジーの論文として適切であると判断します。

議論2 MH開発の世界的な位置付け

質問(矢野 雄策)

この論文では我が国のMH開発に係る技術開発について論じてい

ますが、新たな技術を開発しているという意味では世界に類のないものにチャレンジしていると思われれます。読者は、世界の中でのこの技術開発の位置付けも知りたいと感じると思います。背景として、世界ではMH資源はどのような国のどのような領域に分布しており、各国の技術開発の状況はどのようになっているのでしょうか。そして我が国のMHに関する技術開発はどのような位置付けにあるのでしょうか。また我が国ではMH21が開発までのロードマップを描いて進んでいるものと思いますが、世界では何らかの国際研究連携があるのでしょうか。また世界的なロードマップはあるのでしょうか。

回答(天満 則夫)

MH開発ですが、アメリカ、ロシア、カナダ、中国、インドなど各国で新たな資源として注目されており調査が進んでいますが、現在世界的には資源量を調べる調査が主になっており実際の生産技術の研究はほとんど進んでいません。そこで、世界的な位置付けに関して、「また、世界的にみると、米国、韓国、中国、インドなどの世界各国で研究が進んでいる。例えば、韓国では対馬海盆におけるガスハイドレート掘削調査、米国ではメキシコ湾の地震探査調査などの資源量に係る調査が行われているが、海洋産出試験の実施には至っていない。」との記載を追加しました。

議論3 既存の資源開発研究との関係

質問(矢野 雄策)

MHも坑井を用いて生産をする点では、在来型の石油や天然ガスと同様であり、石油・天然ガス開発の高度な技術体系の上にMH特有の技術体系を付加しようとしているものと思います。全く白地からの技術体系の構築と異なり、既存の大きな技術体系に新たな技術体系を付加しようとする場合には、それを効率的・効果的に進める考え方ができるように思います。地層特性評価技術の開発についても、石油や天然ガスにおいて、参考となるような先行研究があり、それを改良することによって効果的に研究が進むということはあるのでしょうか。それを実際に行っているのでしょうか。

回答(天満 則夫)

減圧法適用時の地盤沈下等の地層変形は、長期安定生産を検討する上で重要と考えられます。このような沈下の課題に関しては、例えば、水溶性天然ガス開発のような分野でこれまで検討されています。MH開発でも同様なことが生じると予想し、同様なアプローチとしてMH層を含む地層の力学特性の把握や、数値シミュレーションによる評価ができるような研究開発を進めてきた経緯があります。例えば、MHの力学特性を把握する際には、地層内に新たにMHが加わったと捉え、土質力学で行われる試験方法を参考に研究を進めました。具体的には、MH試料が圧力と温度の制御に関係するため、この制御をしながら力学試験ができる方法を検討し、この論文の「3.1地層変形シミュレータの開発」に記載したように、凍結した砂試料にガスを浸透させてMH模擬試料を作れるようにしています。この方法が確立されるまでは具体的に物性値を求める方法はなく大きな成果であったと思います。ただし、開発対象が海底数百mの未固結の地層ということや、減圧法を適用する場合の大きな減圧度(第1回海洋産出試験の場合には、約7MPaの減圧を行っています)など、これまでの研究では扱っていない条件になっていることも分かっており、このような違いを意識して研究を進めている状況です。

議論4 海洋産出試験との関係

質問(立石 裕)

2013年3月の海洋産出試験に関して、この研究は事前にどのような貢献をしたのでしょうか?それともシミュレータが未完成で具体的な予測には至らなかったのでしょうか?また、すでに1年近く経過しているため、結果とその解釈についてなんらかのリマークをすることはできないのでしょうか?成果管理の要請があって出せないとすればやむをえませんが、フェーズ2が予定ではあと2年というタイミング

を考えると、論文としては、ちょっと竜頭蛇尾の印象があります。

回答（天満 則夫）

解析結果については、第1回海洋産出試験の坑井設計やモニタリング井の設置等を検討する際の基礎データとして活用されました。ただ、第1回海洋産出試験のデータについては、色々と検証を進めており、この論文にも記載していますが、現在もデータの検証のための室内実験や数値モデルの構築・解析を実施中です。そのため、現状についての報告とさせていただきます。

議論5 シミュレータ開発の意義

コメント（立石 裕）

シミュレータの開発が研究の柱であることは分かるのですが、シミュレータの役割や意義が明示的に説明されていないので、意地悪

い言い方をすれば、シミュレータの開発が自己目的化しているような印象を受けます。論文の初めの方で、なぜシミュレータの開発が必要なのかを説明したほうがよいと思います。担当者にとっては自明のことかもしれませんが、一般読者にとっては必ずしも明確ではありません。

回答（天満 則夫）

地層変形シミュレータの開発の意義を明確にするために、「1. はじめに」にての「・・・その様な観点から、安全かつ長期的にMH層からのガス生産を行うためには、・・・」以降に「地層の変形挙動を予測できる数値シミュレータなどの評価技術を開発する必要がある。」と追記するとともに、関連して「数値シミュレータで扱うべき基本的な物性が、プロジェクト開始時には分かっていなかったため、地層変形や圧密を評価することができなかった。」と追記しました。

4次元放射線治療システムに関する国際標準化

— 照射効果の向上と安全性の確保 —

平田 雄一^{1*}、宮本 直樹¹、清水 森人²、吉田 光宏³、平本 和夫⁴、
市川 芳明⁵、金子 周史⁶、篠川 毅⁷、平岡 真寛⁸、白土 博樹¹

がんの放射線治療においては患者の呼吸等にもなって放射線の照射中に患部の位置が変化する可能性がある。放射線の患部への照射効果を向上させるとともに、周辺の正常部位へのダメージを最小化するために、患部の3次元的位置の時間的な変化を考慮した4次元放射線治療が最近日本で開発され治療効果を上げている。この時間軸を付加した4次元放射線治療を実現するシステムの安全性に関する技術的要件を盛り込んだ規格を日本から国際電気標準会議 (IEC) に提案した。理由は、IECの国際標準は、各国の規制当局によって引用されると、強制力を有するようになるため、IECにおける国際標準化活動は、4次元放射線治療システムの確固とした安全性担保のために非常に効果的であるためである。この論文は、今後さらに需要が増す4次元放射線治療システムに関する国際標準化の戦略について分析した内容をまとめたものである。戦略の要は、4次元放射線治療システムの安全性に関する技術的要件の国際標準化に焦点を絞り、臨床的視点を盛り込む形で、幅広い分野の専門家の意見を結集して国際的な合意形成を図ることである。今後4次元放射線治療を一層普及させるために、このような戦略にもとづいて、4次元放射線治療システムを構成する個別装置に関する既存規格の改訂に加えて、4次元放射線治療システム全体についてシステムとしての安全性評価を行ったうえで、新しい規格の作成を推進する。

キーワード: 4次元放射線治療、動体追跡放射線治療、動体追尾放射線治療、国際標準化、IEC

International standardization of four dimensional radiotherapy system

– Enhancement of effects of irradiation and assurance of safety –

Yuichi HIRATA^{1*}, Naoki MIYAMOTO¹, Morihito SHIMIZU², Mitsuhiro YOSHIDA³, Kazuo HIRAMOTO⁴,
Yoshiaki ICHIKAWA⁵, Shuji KANEKO⁶, Tsuyoshi SASAGAWA⁷, Masahiro HIRAOKA⁸ and Hiroki SHIRATO¹

In radiation therapy for cancer, there are possibilities of changing of positions of the affected area during irradiation due to respiration of a patient. In order to enhance effects of irradiation for the affected area and minimize damages to the surrounding normal tissues, four dimensional radiotherapy (4DRT), which can take into account time variation of the three-dimensional position of the affected area, has been recently developed, and has been achieving significant therapeutic effect. We have proposed the International Electrotechnical Commission (IEC) standards including technical requirements of the safety aspects of the systems which realize this 4DRT, taking into account the time variation. The reason for the proposal is that international standardization will be very effective to ensure safety of 4DRT, and international standards of IEC will have compelling force if regulatory agencies refer to them. The purpose of this paper is to summarize the analysis of the strategy in a precedent endeavor toward international standardization of the 4DRT systems, for which demands are increasing. The main point of the strategy is forming an international consensus by bringing together the opinions of specialists from various fields from a clinical point of view, focusing on the international standardization of the technical requirements of the safety aspects of the 4DRT. Based on such a strategy, we will promote developing new standards by evaluating the overall safety of the 4DRT systems for further expanding use, in addition to updating existing standards of particular equipment which constitute the 4DRT systems.

Keywords: Four dimensional radiotherapy, real-time tumor-tracking radiotherapy, dynamic tracking, international standardization, IEC

1 北海道大学大学院医学研究科 〒060-8638 札幌市北区北15条西7丁目、2 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2、3 三菱重工業株式会社 〒733-8553 広島市西区観音新町4-6-22、4 株式会社日立製作所 〒319-1221 日立市大みか町7-2-1、5 株式会社日立製作所 〒100-8220 千代田区丸の内1-6-1、6 京都大学医学部附属病院 〒606-8507 京都市左京区聖護院川原町54、7 株式会社島津製作所 〒604-8511 京都市中京区西ノ京桑原町1、8 京都大学大学院医学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田近衛町

1. Hokkaido University Graduate School of Medicine North-15 West-7, Kita-ku, Sapporo 060-8638, Japan * E-mail: hirata-yuichi@med.hokudai.ac.jp, 2. National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan, 3. MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. 4-6-22 Kan-on-shin-machi, Nishi-ku, Hiroshima 733-8553, Japan, 4. Hitachi, Ltd. 7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi 319-1221, Japan, 5. Hitachi, Ltd. Marunouchi Center Building, 1-6-1 Marunouchi, Chiyoda-ku 100-8220, Japan, 6. Kyoto University Hospital 54 Kawaharacho, Shogoin, Sakyo-ku, Kyoto 606-8507, Japan, 7. SHIMADZU CORPORATION 1 Nishinokyo-Kuwabaracho, Nakagyo-ku, Kyoto 604-8511, 8. Kyoto University Graduate School of Medicine Yoshida-Konoe-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

Original manuscript received January 31, 2014, Revisions received June 20, 2014, Accepted June 23, 2014

1 はじめに

1.1 放射線治療の重要性

厚生労働省の2010年の人口動態統計の年間推計によれば^[1]、がんは日本人の死因の第1位であり、患者全体の約25%が放射線治療を受けている。放射線治療は放射線に対するがん細胞と正常細胞の放射線感受性の差を利用し、治療放射線の照射量を制御することで正常細胞を傷つけずがん細胞のみを死滅させる治療法である。放射線治療には手術の必要がなく、患部の形態と機能を温存することができるという特徴があり、治療時間も短いため、高齢者の治療に適している。また、原理的に患者のあらゆる部位のがんを治療できるというメリットを有している。

図1に日本放射線腫瘍学会(JASTRO)が2010年に行った構造調査結果^[2]と国立がん研究センターがん対策情報センターの地域がん登録全国推計値^[3]をもとに作成した我が国のがん罹患患者数と放射線治療適用患者数の推移を示す。1990年代に入ってから、医療用の小型リニアック装置からの高エネルギーX線を用いた放射線治療が普及したことで適用数が増加し、将来的にも適用数が増加していくと見込まれている。がんによる死亡率の増加は高齢化が進む多くの国に見られる傾向であり、放射線治療の需要は国際的にますます高まっている。

1.2 4次元放射線治療

主な放射線治療では、X線、電子線、陽子線、炭素線が治療用放射線として用いられている。いずれの放射線治療においても、大きな課題は呼吸等に伴い動いてしまう腫瘍に対して、健康な組織の被曝を抑えつつ、腫瘍の位置に必要な量の治療放射線を照射することである。この課題を解決する方法として、それまでの空間的精度に加え、時間

的精度を向上させた4次元放射線治療の研究開発が2000年ころから始まった^[4]。

その後、4次元放射線治療は世界的な拡がりを見せ、「放射線治療における撮像、計画および照射の際に、生体組織の時間的な変化を明確に取り込んだ治療」と定義された^[5]。すなわち、4次元放射線治療とは、これまでの放射線治療でも考慮されてきた腫瘍の位置という三次元の情報に加えて、放射線の照射タイミングに対する腫瘍の位置の時間変化を考慮することで、正常組織の被曝を抑え、腫瘍への線量集中特性を向上させることを実現した高精度な放射線治療である。近年、4次元放射線治療は、患者の呼吸等により位置が時間変化する腫瘍に対して、急速にその適用が広がってきている。

4次元放射線治療のうち北海道大学が中心となって研究開発を行っているのが動体追跡(Gating)放射線治療^[4]である。動体追跡放射線治療では、以下で説明するように、治療放射線の照射位置を固定し、ターゲットが動いてきたタイミングに合わせて治療放射線を照射する。このとき治療放射線を照射するタイミングの精度が重要になる。図2に動体追跡放射線治療の概念図と、北海道大学の治療装置、金マーカを示す。この手法では、患者の体内の腫瘍位置の近傍に金マーカを埋め込み、これを呼吸等によって移動する腫瘍の目印としてX線画像誘導装置(X-IGRT EQUIPMENT)により腫瘍位置を追跡する。実際の治療時には、狙った待ち伏せ領域に金マーカが入ったタイミングで、X線・陽子線等の外部ビーム装置が治療放射線を腫瘍に向けて照射する。この手法を用いない場合、腫瘍が移動する場合には移動範囲全体に照射領域を広げる必要があったため、周囲の正常組織にも腫瘍位置と同程度の照射を行う必要があったが、この手法により、治療放射線の照射領域を狭めることが可能となった。

一方、4次元放射線治療のうち治療放射線を照射する位置の精度を重視したものが、動体追尾(Tracking)放射線治療^[8]である。図3に示されているように、動体追尾放射線治療では、マーカ等を利用してX線画像誘導装置により腫瘍の位置を追跡し、腫瘍に治療放射線が連続的に照射されるように治療放射線の照射位置が制御される。京都大学では三菱重工業が開発した超小型線形加速器によるX線外部ビーム装置を用いて、動体追尾放射線治療の研究開発を行っている。このX線外部ビーム装置の特徴は超小型線形加速器を回転ガントリの中に取り付けマルチリーフコリメータ(MLC)と共にジンバル機構と呼ばれる首振り機構に搭載することで、ビームの照射方向を自由に変更できることである^[8]。京都大学ではこの機能を利用し、治療中、常に患者の体内の腫瘍位置を追いかけ精度よく治

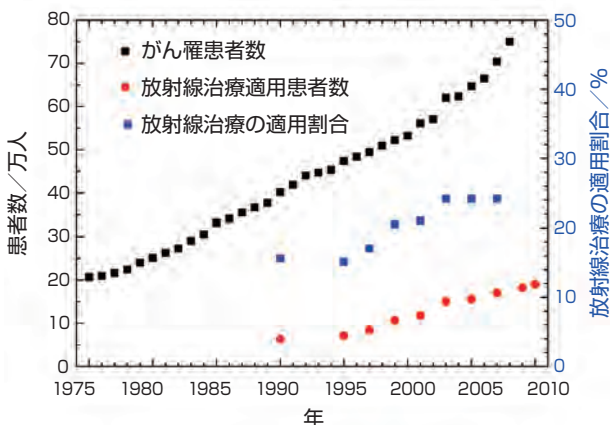


図1 1年間でがんと新たに診断された患者数(がん罹患患者数)とその中で放射線治療が適用された患者数(放射線治療適用患者数)の推移

リニアック治療装置の普及により、放射線治療が適用された患者数はこの20年間にほぼ3倍になっており、今後も増加を続けると見込まれる^{[2][3]}。

療ビームを照射させることで、動体追尾放射線治療を実現している。

4次元放射線治療は、従来の放射線治療に比べて効果的な放射線治療を可能とするが、腫瘍の動きの自由度に対応するために必要なパラメータ（腫瘍に治療放射線を照射するタイミング、腫瘍の位置変化パターン、腫瘍の位置変化を予測するための予測モデル等）が増えるため、4次元放射線治療を安全に行うためには、各患者の腫瘍の動きに対応するパラメータを個別に管理する必要がある。また、X線画像誘導装置や陽子線・X線等の外部ビーム装置等が適切に連動して放射線治療が行われる必要がある。

このように、4次元放射線治療の実現のためには、これまであまり考慮されてこなかった新たな安全性に関する要件が必要とされる。4次元放射線治療システムの研究開発において、最も重視されるべき要素は、安全性の担保であり、安全な4次元放射線治療が国際的に広く行われるためには、一刻も早く4次元放射線治療の安全基準が国際標準化される必要がある。また、4次元放射線治療の安全

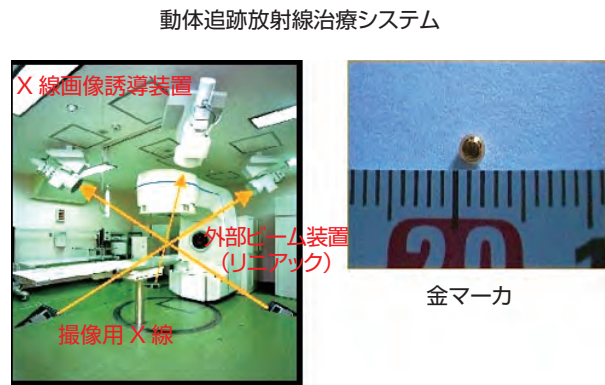
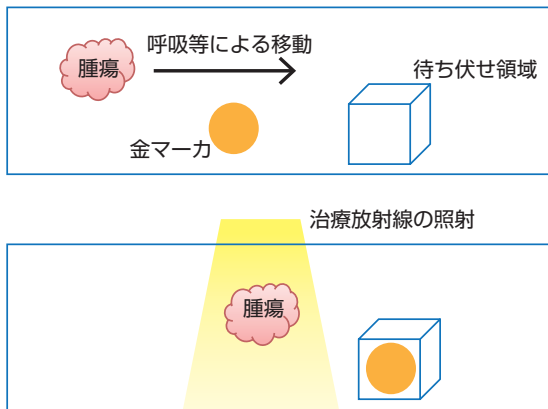
基準が国際標準化されることにより、4次元放射線治療の研究開発における安全性担保のための試行錯誤の無駄も削減されることが期待される。

特に、国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission：IEC）で国際標準化された任意規格は、いったん各国の規制当局によって引用等されると、強制法規化され、強制力を有するようになる。このため、4次元放射線治療システムの安全基準をIECにおいて国際標準化することは、4次元放射線治療システムの確固とした安全性担保のために非常に効果的である。

1.3 国際標準化の舞台

国際標準には、公的な機関によって策定されるデジュール標準、企業集団により作成されるフォーラム標準、市場競争により構築されるデファクト標準がある（知的財産推進計画 2011）。

デジュール標準の策定を行う代表的な機関は、国際標準化機構（International Organization for Standardization:ISO）、国際電気標準会議（International



出典：http://rad.med.hokudai.ac.jp/rad_research/motion_tracking/

図2 動体追尾放射線治療の概念図（左）と動体追尾放射線治療システムおよび金マーカの写真（右）。右図の写真は北海道大学病院 HP より引用した¹⁷⁾。

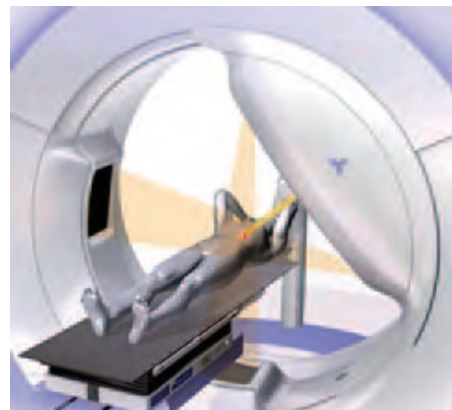
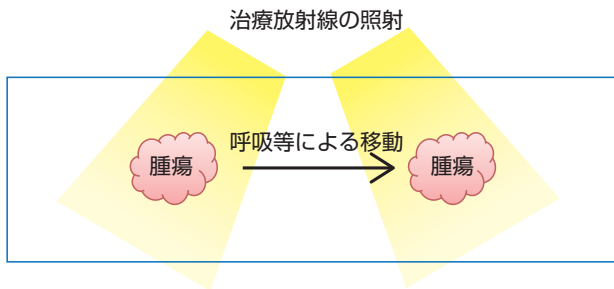


図3 動体追尾放射線治療の概念図（左）と三菱重工業のVero4DRTを用いた動体追尾照射のイメージ図（右）。イメージ図は三菱重工業 HP より引用した¹⁹⁾。

Electrotechnical Commission : IEC)、国際電気通信連合 (International Telecommunication Union : ITU) である。放射線治療装置は、IEC で取り扱われる電気技術分野に含まれ、IEC では、最近4次元放射線治療を実現するために必要となる重要な構成要素である X 線画像誘導装置に関する規格化が進展している。

IEC には分野別に技術委員会 (Technical Committee: TC) が設けられており、放射線治療装置の国際規格については、医用電気機器を扱う TC62 において議論される。TC62 は、SC62A (医用電気機器に関する共通事項)、SC62B (医用画像装置)、SC62C (放射線治療装置、核医学及び放射線量計)、SC62D (医用電子機器の個別要求事項) の四つの分科委員会 (Sub Committee: SC) を下部組織として有している。4次元放射線治療に関する国際標準化については、放射線治療装置を取り扱う SC62C で審議されることになる。

図4に示されているように、国内では、社団法人電子情報技術産業協会 (JEITA) が IEC の TC62、SC62A、SC62D に関して IEC 国内委員会として委託を受けて、審議している。また、社団法人日本画像医療システム工業会 (JIRA) ¹⁰⁾ が IEC の SC62B、SC62C に関して IEC 国内委員会として委託を受けて、審議している。

2 この論文の目的

この論文の目的は、IEC における4次元放射線治療の国際標準化の事例を分析し、安全性が高められた4次元放射線治療システムを今後国際的に普及させるために、国際標準化をどのように進めるべきかについての方向性を示すことである。

3 4次元放射線治療の国際標準化戦略

4次元放射線治療システムを核に、デジュール標準の代表的機関である IEC において国際標準化を目指すこととした。

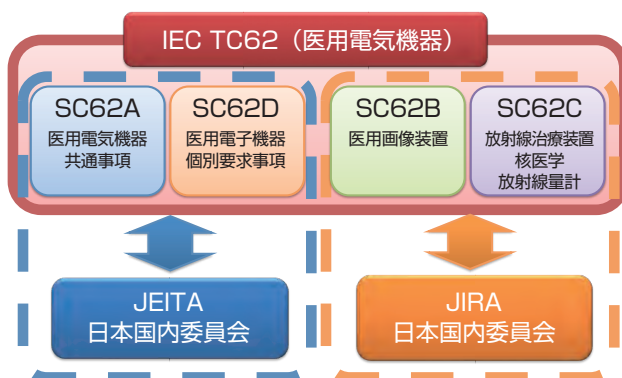


図4 4次元放射線治療に関する国際標準化の舞台を示す図。

国際標準化の一般的な問題点^[11]や放射線治療装置分野における国際標準化の問題点^[12]を解決し、4次元放射線治療の国際標準化を円滑に進めるために、以下のような戦略を取った。

3.1 幅広い領域からの国際標準規格案検討メンバーの選定

国際標準規格案を検討するメンバーには、4次元放射線治療システムの製造に関係している企業に加えて、大学・研究機関から4次元放射線治療の臨床に携わっている医師・医学物理士等が参加することで、幅広い領域から4次元放射線治療について議論出来る国内体制を整えた。

3.2 国際的合意を得やすくするための工夫

個別装置について規定している IEC の放射線治療関連の既存の規格群に対し、複数の個別装置を組み合わせたシステムを形成して実現する4次元放射線治療システムの規格についての提案を行うことにより、個別装置規格では解決できない問題点を明確化しそこに議論を集中させ、かつ国際標準規格を策定する組織間で合意を比較的得やすい「安全」に関する技術の国際標準化を目指すこととした。また、その安全性の検証に利用可能で汎用的なファントム (放射線治療システムの性能評価のために用いられる治療放射線の吸収または散乱について人体の組織と同様な性質を示す模型) を開発し、ファントムの活用による具体的かつ客観的なデータに基づいて安全規格を策定するという方針を取った。

3.3 ユーザー主導の国際標準化

システム規格案には、4次元放射線治療システムのユーザーにより、臨床上重要な項目を列挙した。そして、主に企業出身者で構成される IEC TC62/SC62C WG1 エキスパートに対し、臨床的見地からシステム規格の重要性を主張した。

4 国際標準化の取り組み

3章の戦略に基づき、我々は、以下のように、4次元放射線治療の国際標準化を展開した。

4.1 基本コンセプトの明確化

4次元放射線治療の国際標準化を目指すに当たり、第1に国際標準化の基本コンセプトの明確化が重要と考え JIRA の国内委員会等で検討した。4次元放射線治療は、治療放射線を動く腫瘍に直接照射し、腫瘍の周りを取り囲む正常組織のダメージを最小限にすることで、患者の肉体的な負担を軽減するものであり、安全な4次元放射線治療を実行するためには、4次元放射線治療システムを構成する各種装置群が、治療中にリアルタイムで、適切に強く連携して統合的に機能しなければならない。従来の既存の国

際標準の組合せだけでは、4次元放射線治療システムの実現に必須な各種装置群の適切かつ密なる関係を、保証することはできない。そこで、4次元放射線治療システムの装置群を適切に強く関係させるための独自の新しい安全規格を提案することに決定した。しかし、このような基本コンセプトは、4次元放射線治療に関する国際標準化活動の開始当初より定まっていたわけではなく、IEC 国際会議において議論を積み重ねる過程で、4次元放射線治療に関する国際標準化案と従来からIECで策定されていた装置規格との差異を明確化するために、このような基本コンセプトが練り上げられていった。

4.2 4次元放射線治療の対象と必要精度

4次元放射線治療は、呼吸性移動を伴う腫瘍の放射線治療において、腫瘍に対する線量を損なうことなく、腫瘍周辺の正常組織への線量を低減させる技術である。臨床的見地より日本で策定された呼吸性移動対策ガイドライン^{[13][14]}によれば、呼吸性移動対策とは、呼吸による移動長が10 mmを超える腫瘍を対象とし、呼吸性移動を補償するために必要な照射範囲の拡大を3次元の各方向において5 mm以下に抑えるために行う対策として定義されている。この呼吸性移動対策の定義から、4次元放射線治療についても、対象とする腫瘍の移動長についての定量的基準(10 mmより大きい)と、従来の放射線治療と比較した照射範囲の拡大低減の定量的基準(5 mm以下)を得ることができた。

具体的には、図5に示されているように、呼吸等により移動する腫瘍を治療対象とする場合に、4次元放射線治療の照射野は、従来の放射線治療の照射野と比較して、5 mm以上照射野を狭くできる。

4.3 4次元放射線治療・安全規格の項目検討

4.2の精度を達成するために必要な項目を整理した結

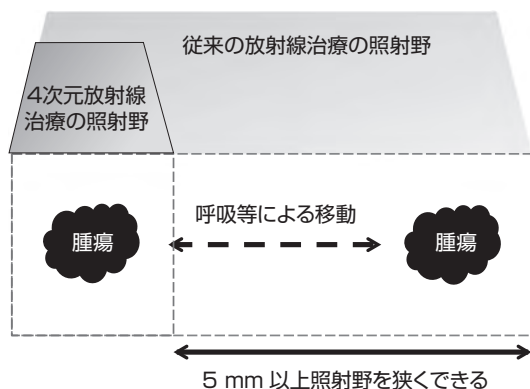


図5 4次元放射線治療の照射野と従来の放射線治療の照射野との比較

表1 遅延時間によって生じる最大の位置ずれ
2 cmの移動距離を周期3秒のsin波形で運動する腫瘍を考えた場合の遅延時間に起因する腫瘍位置と照射位置のずれを計算した値。250 msec程度の遅延時間によって、腫瘍位置と実際の照射位置の間には5 mmの位置ずれが生じることが分かる。

遅延時間 [msec]	遅延時間に起因する最大の位置ずれ [mm]
50	1.0
100	2.1
150	3.1
200	4.2
250	5.2

果、既存のIEC規格に規定されていない4次元放射線治療特有の重要キーワードを「遅延時間 (Latency)」、「予測モデル (Prediction Model)」、「ベースラインシフト (Base Line Shift)」、「動体ファントム (Dynamic Phantom) (図6)」、および「4次元CT (4DCT)」に絞りこんだ。

「遅延時間」とは、今腫瘍がどこにあるかを認識してから、実際に人体に治療放射線が照射されるまでの時間のことを指している。遅延時間が長くなってしまうと、治療放射線を照射したところに腫瘍がいなくなっていることが起こってしまう(表1)ため、信頼性の高い「予測モデル」を用いて腫瘍位置の予測が行われる。

遅延時間については、X線画像誘導装置と外部ビーム装置とを含むシステム全体で規定しないと治療放射線の照射精度を担保することができない。例えば、平均速度 V で移動する腫瘍に対して4次元放射線治療を行う場合の位置ずれ D について考える。システム全体の遅延時間 T は、X線画像誘導装置等の腫瘍位置を計測する機器が位置を把握してから、治療ビーム照射装置に照射指示信号を送る

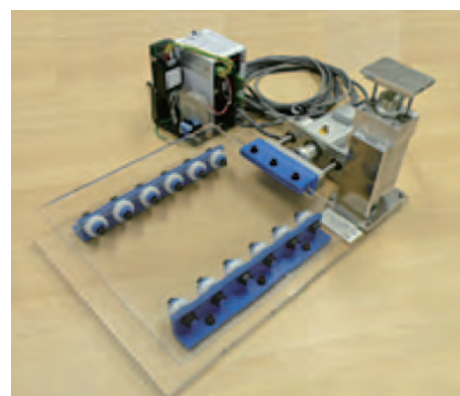


図6 動体ファントムの写真
4次元放射線治療では動体ファントムで、X線画像誘導装置の幾何学的ずれなどを評価する。

のにかかる時間 (T_1) と、治療ビーム照射装置が照射指示信号を受け取ってから治療用放射線を発する、もしくはビーム方向等の変更にかかる時間 (T_2)、及び通信等の時間 (T_3) の和となり、最終的な位置ずれ D は画像誘導装置の位置認識のずれ D_0 が加わって、

$$D = V (T_1 + T_2 + T_3) + D_0 \quad (1)$$

と表される。すなわち、4次元放射線治療システムの照射精度にあたる D は、個々の装置の遅延時間、通信時間および X 線画像誘導装置の位置ずれ等の複数の要因に依存することになる。このため、4次元放射線治療システム全体としての安全性を担保するには、個々の装置毎の国際規格 (T_1 , T_2 , T_3 , D_0) だけではなく、それらの上位に位置するシステムの国際規格 (T , D) が必要となる。

「ベースラインシフト」とは、患者の呼吸の状態が、予測モデルによる予測を超えた変化をすることを指す。したがって、ベースラインシフトを無視すると、予測モデルによる予測を超えた動きをする腫瘍に対して、予測モデルにしたがって治療放射線を照射することとなり、腫瘍以外の正常細胞に治療放射線を照射してしまうことが起こる。したがって、ベースラインシフトが起こった場合には、確実に治療放射線を停止することができる仕組みが 4 次元放射線治療システムに必要とされる。

「動体ファントム」とは、上記の「遅延時間」、「予測モデル」、および「ベースラインシフト」について、4次元放射線治療システムを構成する装置の性能を検証するための体内の腫瘍の動きを模倣したモデルを指している。

最後に、「4次元 CT」とは、例えば呼吸 5 回分の X 線 CT 像を取って、体表面に置いたマーカを用いて、動く CT 像を再合成するものである。4次元 CT により、腫瘍の動きの情報が得られ、その情報を参考にして 4 次元放射線治療の治療計画を練ることができるので、4次元放射線治療システムにおいて、4次元 CT の精度が問題となる場合がある。

上記は、4次元放射線治療システムを臨床に用いる場合に、最低限考慮すべきであると認識されてきた項目であり、IEC 規格でも規定されるべき項目である。

4.4 既存規格への新概念導入

上記のキーワードはいずれも 4 次元放射線治療の安全性の担保にとって非常に重要な役割を果たしており、これらを元に標準化すべき規格項目を定めて、2011 年 9 月にドイツで開催された IEC TC62/SC62C WG1 において、4次元放射線治療に関する安全性規格に関する新規格についての提案説明を行った。

しかし、この時点では、4次元放射線治療システムに関する規格策定を行うという基本コンセプト (4.1 節参照) の明確化ができていなかったため、4次元放射線治療の安全性の担保のために、全く新しい規格を策定することに対する IEC TC62/SC62C WG1 の合意が得られなかった。そこで、まずは、IEC TC62/SC62C WG1 で議論されていた X 線画像誘導装置に関する既存の規格 (IEC 60601-2-68) に、4次元放射線治療に関する規定を追加するという合意がなされ、遅延時間とベースラインシフトについて以下のような成果を得た。

4.4.1 遅延時間

遅延時間については、X 線画像誘導装置の遅延時間 (腫瘍の位置情報を含む画像の取得開始から、外部ビーム装置への信号出力にかかる時間 (T_1)) に関する規定が IEC 60601-2-68 に盛り込まれた。これは X 線画像誘導装置の遅延時間の安全上の重要性が認められたからである。

4.4.2 ベースラインシフト

4次元放射線治療中に頻繁に起こることが想定されているベースラインシフトについては、ベースラインシフトが起こったとしても、治療 X 線の照射を中断して装置の設定を修正しなおして、安全かつ円滑に治療を継続可能とする規定が、4次元放射線治療に必要な不可欠であるとの合意が得られ、X 線画像誘導装置の規格 (IEC 60601-2-68) に追加されることとなった。

4.4.3 既存規格との対応

さらに、IEC TC62/SC62C WG1 において議論を進めることにより、既存規格 (IEC 60601-2-68) との対応について以下のような成果を得た。

4次元放射線治療は、IEC 60601-2-68 で定義されていたオフライン X-IGRT (OFF LINE X-IGRT)、オンライン X-IGRT (ON LINE X-IGRT)、リアルタイム X-IGRT (REAL TIME X-IGRT) と関係することが分かった。そこで、この関係を整理し、4次元のオフライン X-IGRT、オンライン X-IGRT、リアルタイム X-IGRT の例を、新たに付属書類 (annex) として、IEC 60601-2-68 に盛り込むことができた。

4.4.4 X線外部ビーム装置規格の改訂

遅延時間の概念は、4次元放射線治療を実現するための他の構成要素である X 線外部ビーム装置においても重要であり、上記の遅延時間に関する成果は、X 線外部ビーム装置の安全規格 (IEC 60601-2-1) の改訂の開始のきっかけをつくった。X 線外部ビーム装置に関する規格 (IEC 60601-2-1) の更新 (62C/574/RR) においても、4次元放射線治療の技術である腫瘍の動きに対処するための制御 (Motion management) に関する項目の記載が確実な情勢である。この項目には、4次元放射線治療の代表的方

である動体追跡照射(Gating)、動体追尾照射(Tracking)、遅延時間等が列挙されることとなった。特に、遅延時間については、IEC TC62/SC62C WG1において当初から日本に規格案の作成を要請されることとなった。X線外部ビーム装置に関する規格(IEC 60601-2-1)は、放射線治療装置メーカーにとって装置の安全性を担保するための最も基本的かつ最も重要な規格であるので、この規格の更新に日本のIECエキスパートが最初から携わることが可能となったのは非常に価値あることである。

4.4.5 遅延時間とベースラインシフト以外の項目

4.3節で議論した5項目のうち遅延時間とベースラインシフト以外の3項目(予測モデル、動体ファントム、4次元CT)については新規性が高いため、日本がIECで提案する新業務項目(New Work Item Proposal: NP)で本格的に規定することとした。

5 今後の方向性

今後、治療機器の安全性の標準化という形で国際貢献を行っていくためには、以下で説明するような方向で、国際標準化活動を進める必要がある。

世界的にみると、放射線治療システムに特化した専門の大企業が単独で、放射線治療機器の国際標準化に積極的に取り組んでいる例もある。これらの活動に加えて、著者らが行ってきたように4次元放射線治療システムの開発と製造を行っているメーカーと、省庁、公的研究機関、大学、学会等が協力して、産学官連携で国際標準化活動を活発なものとしていくことも不可欠である。

さらに、4.1節で説明した基本コンセプトにもとづいて、システムの観点からの国際標準化の取り組みが必要である。

4次元放射線治療システムは、主に腫瘍の状態をみるX線画像誘導装置、腫瘍を直接治療する外部ビーム装置、治療台、これらを適切に作動させる治療計画装置等の構成要素からなる複雑なシステムである。一方、上記の4次元放射線治療システムの構成要素を互に関連付ける形で国際標準化の検討やデファクト化が進んでいるので、個々の構成要素について全く新たな規格を個々に策定するのは非現実的である。結果として、それぞれの装置を統合あるいは連結する部分での責任の所在が不明確になっており、患者の安全性に関して不安が残っている。この点を看過すると過剰照射や過少照射等の医療事故につながりかねない。

従来、IEC TC62/SC62Cでは、個々の装置に関する規格策定が主眼となっており、システム規格の策定は行われていなかった。この点を補うため、IEC TC62/SC62Cへ「動体的への複雑な実時間制御放射線治療システムの安全及び性能」についての全く新しいシステム規格策定を提案す

る新業務項目(NP)である62C/580/NPが日本から提出され、国際投票により承認された。このNPにおいて、4.3節で議論した5項目について4次元放射線治療システム全体の安全性を担保するという観点で本格的に規定することが求められる。

また、IEC TC62/SC62Cの新しいスコープ案には、システムが明示的に取り入れられる情勢にあり、IECにおいて、放射線治療システムに関するシステム規格の策定ができる可能性がある。もちろん、このような全く新しいシステム規格の策定を進める上で、個々の企業に不利にならないための工夫は必要であるが、企業の大小にとらわれず、システム全体として腫瘍の動きに対応した放射線治療の安全性を担保するための新システム規格の策定を進めていく方針である。

今後、IECにおいて、図7に示されているように、個別装置規格とシステム規格の両方において、4次元放射線治療に関する国際標準化が展開されることが期待される。

謝辞

この研究は、経済産業省・国際標準共同研究開発事業の支援を受けた。この研究を推進するにあたり、北海道大学大学院医学研究科の直江健二特任准教授、小塚隆特任准教授、社団法人日本画像医療システム工業会(JIRA)らの多大のご協力を得たことを記す。

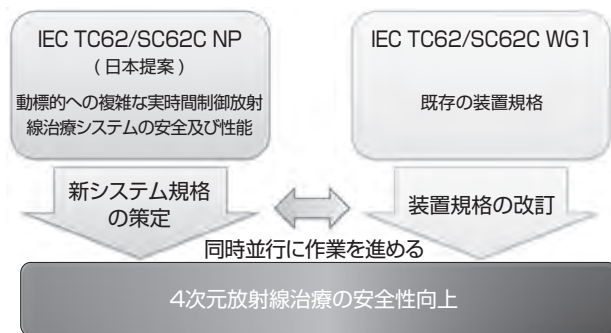


図7 4次元放射線治療に関する国際標準化の今後の方向性

参考文献

- [1] <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei10/>
- [2] 放射線腫瘍学データセンター, 「2010年構造調査結果(第1報)」, URL: <http://www.jastro.or.jp/aboutus/datacenter.php>
- [3] A. Matsuda, T. Matsuda, A. Shibata, K. Katanoda, T. Sobue, H. Nishimoto and The Japan Cancer Surveillance Research Group: Cancer incidence and incidence rates in Japan in 2007: a study of 21 population-based cancer registries for the Monitoring of Cancer Incidence in Japan (MCIJ) Project, *Jpn. J. of Clin. Oncol.*, 43 (3), 328-336 (2013).
- [4] H. Shirato, S. Shimizu, K. Kitamura, T. Nishioka, K. Kagei, S. Hashimoto, H. Aoyama, T. Kunieda, N. Shinohara, H. Dosaka-Akita and K. Miyasaka: Four-dimensional treatment planning and fluoroscopic real-time tumor

tracking radiotherapy for moving tumor, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 48 (2), 435-442 (2000).

- [5] P. J. Keall, A. D. Todor, S. S. Vadani, C. L. Barthelemy, J. V. Siebers, V. R. Kini and R. Mohan: On the use of EPID-based implanted marker tracking for 4D radiotherapy, *Med. Phys.*, 31 (12), 3492-3499 (2004).
- [6] 山中誓次, 篠川毅:放射線治療装置用動体追跡システム SyncTraXの開発, *島津評論*, 70 (1・2), 41-48 (2013).
- [7] http://rad.med.hokudai.ac.jp/rad_research/motion_tracking/
- [8] Y. Kamino, K. Takayama, M. Kokubo, Y. Narita, E. Hirai, N. Kawawda, T. Mizowaki, Y. Nagata, T. Nishidai and M. Hiraoka: Development of a four-dimensional image-guided radiotherapy system with a gimbaled X-ray head, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 66 (1), 271-278 (2006).
- [9] http://www.mhi.co.jp/products/detail/vero_advanced_radiotherapy.html
- [10] (社)日本画像医療システム工業会 標準化部会: 画像医療システムの安全規格の動向, *日本放射線技術学会雑誌*, 66 (10), 1397-1401 (2010).
- [11] 市川芳明: 国際標準化活動とグローバル環境戦略, *日立評論*, 93 (05-06), 12-16 (2011).
- [12] 平成23年度第2回IEC/TC62国内委員会, 於電子情報技術産業協会, 2011年11月1日.
- [13] 日本医学物理学会, 日本高精度放射線外部照射研究会, 日本放射線技術学会, 日本放射線腫瘍学会: 呼吸性移動対策を伴う放射線治療に関するガイドライン (2012年6月2日).
- [14] Y. Matsuo, H. Onishi, K. Nakagawa, M. Nakamura, T. Arijii, Y. Kumazaki, M. Shimbo, N. Tohyama, T. Nishio, M. Okumura, H. Shirato and M. Hiraoka: Guidelines for respiratory motion management in radiation therapy, *J. Radiat. Res.*, 54 (3), 561-568 (2013).

執筆者略歴

平田 雄一（ひらた ゆういち）

2001年北海道大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了。博士（理学）。東京大学医科学研究所、理化学研究所、米国立衛生研究所（NIH）、産業技術総合研究所、谷・阿部特許事務所を経て、2011年8月北海道大学大学院医学研究科特任助教、現在に至る。4次元放射線治療の国際標準化活動において、活動の全体調整、62C/580/NPの規格案の作成、規格案立案のための委員会の開催、標準化戦略の立案、海外メンバーへの説得活動に本質的な寄与をした。



宮本 直樹（みやもと なおき）

2006年北海道大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻博士課程修了。博士（工学）。北海道大学大学院工学研究科博士研究員を経て、2008年4月より北海道大学大学院医学研究科特任助教、現在に至る。4次元放射線治療の国際標準化のための動体ファントムの研究開発と62C/580/NPの動体ファントムに関する規格案の作成に本質的な寄与をした。



清水 森人（しみず もりひと）

2011年京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻博士課程修了。博士（工学）。2011年4月産業技術総合研究所計測標準研究部門研究員、現在に至る。4次元放射線治療の国際標準化活動において、X線外部ビーム装置に関する規格（IEC 60601-2-1）の改訂日本提案の作成に本質的な寄与をした。



吉田 光宏（よしだ みつひろ）

1990年京都大学理学部物理第一教室プラズマ物理学を卒業。同年三菱重工（株）基盤技術研究所（現先進研）に入社。1996年同広島研究所、2004年同広島製作所と異動し、産業用加速器開発等に関与。2006年NEDOバイオ医療部に出向後、2008年三菱重工（株）広島製作所真空装置技術課長を経て、2010年から放射線治療機に携わる。4次元放射線治療の国際標準化活動において、X線画像誘導装置の規格（IEC 60601-2-68）案の作成、X線外部ビーム装置に関する規格（IEC 60601-2-1）の改訂日本提案の作成、62C/580/NPの規格案の作成、標準化戦略の立案、海外メンバーへの説得活動に本質的な寄与をした。



平本 和夫（ひらもと かずお）

1978年京都大学大学院修士課程電気工学専攻修了、1986年工学博士（京都大学）。1978年日立製作所エネルギー研究所入所。原子炉炉心や粒子線治療用加速器等の研究開発を経て、2012年より研究開発グループ技師長。4次元放射線治療の国際標準化活動において、X線画像誘導装置の規格（IEC 60601-2-68）案の作成、X線外部ビーム装置に関する規格（IEC 60601-2-1）の改訂日本提案の作成、62C/580/NPの規格案の作成、標準化戦略の立案、海外メンバーへの説得活動に本質的な寄与をした。



市川 芳明（いちかわ よしあき）

1979年東京大学工学部機械工学科卒業、1987年工学博士（東京大学）。1979年日立製作所エネルギー研究所入所。1988年カーネギーメロン大学 Visiting Scientist、日立製作所環境ソリューションセンター長、同社地球環境戦略室を経て現在、知的財産本部国際標準化推進室主管技師長。4次元放射線治療の国際標準化活動において、X線画像誘導装置の規格（IEC 60601-2-68）案の作成、X線外部ビーム装置に関する規格（IEC 60601-2-1）の改訂日本提案の作成、62C/580/NPの規格案の作成、標準化戦略の立案、海外メンバーへの説得活動に本質的な寄与をした。



金子 周史（かねこ しゅうじ）

1994年東京工業大学制御工学科卒。同年三菱重工業（株）入社、2004年より放射線治療装置のシステム開発及びマーケティングを担当。2011年より京都大学医学部附属病院特定拠点講師、現在に至る。4次元放射線治療のうち動体追尾放射線治療の研究開発および4次元放射線治療の国際標準化活動において、X線画像誘導装置の規格（IEC 60601-2-68）案の作成、X線外部ビーム装置に関する規格（IEC 60601-2-1）の改訂日本提案の作成、62C/580/NPの動体追尾放射線治療に関する規格案の作成、標準化戦略の立案、海外メンバーへの説得活動に本質的な寄与をした。



篠川 毅（ささかわ つよし）

1990年早稲田大学理工学部数学科卒。同年（株）島津製作所入社、現在に至る。4次元放射線治療の国際標準化活動において、X線画像誘導装置の規格（IEC 60601-2-68）案の作成、X線外部ビーム装置に関する規格（IEC 60601-2-1）の改訂日本提案の作成、



62C/580/NPの動体追跡放射線治療に関する規格案の作成、標準化戦略の立案、海外メンバーへの説得活動に本質的な寄与をした。

平岡 真寛（ひらおか まさひろ）

1977年京都大学医学部卒。同放射線医学教室、スタンフォード大学等を経て、1995年京都大学医学研究科放射線医学講座教授。京都大学ナノメディシン融合教育ユニット長、京大病院がんセンター長を務めた後、現在、京都大学産学連携本部副本部長を務める。4次元放射線治療のうち動体追跡放射線治療の研究開発および4次元放射線治療の国際標準化活動において、X線画像誘導装置の規格（IEC 60601-2-68）案の作成、X線外部ビーム装置に関する規格（IEC 60601-2-1）の改訂日本提案の作成、62C/580/NPの動体追跡放射線治療に関する規格案の作成、標準化戦略の立案、海外メンバーへの説得活動に本質的な寄与をした。



白土 博樹（しらと ひろき）

1981年北海道大学医学部卒。同大病院放射線科、プリティッシュ・コロンビア大学、マンチェスター大学・クリステー病院、帯広厚生病院放射線科医長等を経て、2006年北海道大学大学院医学研究科放射線医学分野教授。北海道大学総長企画・経営室役員補佐を務めた後、現在、北海道大学大学院評議員、同北海道大学大学院医学研究科副研究科長を務める。4次元放射線治療のうち動体追跡放射線治療の研究開発および4次元放射線治療の国際標準化活動において、X線画像誘導装置の規格（IEC 60601-2-68）案の作成、X線外部ビーム装置に関する規格（IEC 60601-2-1）の改訂日本提案の作成、62C/580/NPの動体追跡放射線治療に関する規格案の作成、標準化戦略の立案、海外メンバーへの説得活動に本質的な寄与をした。



査読者との議論

議論1 全体評価

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

この論文では日本の学術界と産業界が主導してきた4次元放射線治療に関する国際規格を作成するための戦略と成果が明確に描かれています。具体的に国際電気標準会議（IEC）へ規格原案を提出しそれがIECの既存規格の改訂や今後の新規提案につながっていく過程が記述され、また日本国内での原案作成体制にも言及があり、今後国際標準化に携わろうとする読者にとって有益なものです。シンセシオロジー誌の研究論文として優れたものと思います。

議論2 国際標準化の意義

質問（赤松 幹之：産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門）

1.2節においてこの研究の動機が述べられており、この論文の社会的価値を主張するところになります。安全性の担保が重要なことは論を俟たないのですが、その手段として安全基準の国際標準化の必要性があると述べています。一般に考えると国際標準化をしなくても安全性の担保をする方策はありそうに思うので、なぜ国際標準化をすることが安全性の担保になるのか説明してください。

回答（平田 雄一）

具体的には、IECで国際標準化された任意規格がいったん各国の規制当局によって引用等されると強制法規化され強制力を有するようになるので、4次元放射線治療システムの安全基準をIECにおいて

国際標準化することは、4次元放射線治療システムの確固とした安全性担保のために非常に効果的です。

議論3 幅広いステークホルダー間の合意

コメント（小野 晃）

標準化の過程では関係する幅広いステークホルダーの間で合意を得ていくことがポイントになります。ISOやIECでの規格作成では参加国がそれぞれの国内に必ずしも幅広いステークホルダーを持っていないケースがあり、合意の範囲が狭いため成立しても広く使われない規格も散見されます。

これに対してこの論文で述べられている4次元放射線治療装置の標準化においては日本国内の幅広いステークホルダーが関与したことに特徴があります。3.3節の「ユーザー主導の国際標準化」と5章「今後の方向性」で述べられている主張は適確です。放射線治療装置の製造者だけでなく、医師、医療技術者等の装置利用者や、中立的立場にある研究者が幅広く関与したことが、説得力があり中立性に優れた規格の作成につながったと思います。世界的に広く使われる規格となることが期待されます。

回答（平田 雄一）

日本国内の幅広いステークホルダーに参加いただいて、4次元放射線治療装置国際標準化戦略WGをつくり、装置メーカー、医師、医学物理士、研究者、関係省庁など色々な分野の方々の意見に基づいて規格案の策定を行ったことが指摘いただいたこの論文で述べられている4次元放射線治療の標準化の特徴につながったと考えております。

議論4 本規格は製品規格か試験規格か？

質問（小野 晃）

今後日本が提案していこうとする規格の対象範囲（いわゆる規格のスコープ）に関して質問します。4.2節で言及されており、また5章「今後の方向性」でも述べられていますが、著者らが想定する規格の対象範囲は下記の(1)と(2)のいずれでしょうか、あるいは両方含むのでしょうか。

(1) 製品規格

4次元放射線治療装置に求められる性能や機能を規定しようとしているのでしょうか。すなわち4次元放射線治療装置の「製品規格」を作ろうとしているのでしょうか。

(2) 試験評価規格

4次元放射線治療装置に関して試験評価すべき必須項目とその方法を規定しようとしているのでしょうか。すなわち4次元放射線治療装置の「試験評価規格」を作ろうとしているのでしょうか。

なお私見ですが、仮に(2)のように試験評価規格を想定しているとしても、安全性に十分配慮した治療装置と必ずしもそうでないものとの差別化は明確にできるものと思われまます。この規格に適合しているかどうかを調べることで安全性が高い治療装置をユーザーが明確に認識できますので、この規格は世界のユーザーにとって有益であると同時に、しっかりと安全性を高めている治療装置は高い評価を受けることができるものと期待できます。

回答（平田 雄一）

今後具体化していく規格の対象範囲は、上記の(1)と(2)の両方を含むものとなると思います。上記の(1)については、すでに市場に存在する4次元放射線治療システムに基づいて、必要とされる性能や機能が規定されると思います。また、上記の(2)については、例えば、標準動体ファントムを用いた4次元放射線治療システムの試験評価方法が規定されると思います。

塗布熱分解法による超電導膜の合成

— 限流器等への研究展開 —

真部 高明*、相馬 貢、山口 巖、松井 浩明、土屋 哲男、熊谷 俊弥

酸化物超電導体を薄膜や長尺テープ状に加工できれば電力分野やマイクロ波デバイス等への応用が図れるが、これら超電導体は脆く難加工性であるため、まず超電導薄膜製造技術の確立が重要である。この論文では、事故電流抑制に有望な限流器応用を目的として、塗布熱分解法 (MOD) により高品質な大面積超電導膜の合成技術を開発した際に、製品ニーズに対応する目標を達成するために採用したシナリオや要素技術等を紹介する。塗布熱分解法は、原料溶液を基板に塗って焼成するだけという低コストで簡便な金属酸化物の成膜技術である。

キーワード: 塗布熱分解法、超電導体、薄膜、限流器、マイクロ波デバイス、線材

Preparation of superconducting films by metal organic deposition

– Research and development towards a fault current limiter and other electric devices –

Takaaki MANABE*, Mitsugu SOHMA, Iwao YAMAGUCHI, Hiroaki MATSUI,
Tetsuo TSUCHIYA and Toshiya KUMAGAI

For the application of oxide superconductors to power-electric and microwave devices, it is necessary to form oxide superconductors into films and tapes. Since oxide superconductors are fragile and processing resistant, establishing a thin film processing technology for oxide superconductors is important. In this article, we describe our approach to developing such technology with an example that involves the processing of high quality large-size superconducting thin films by metal organic deposition (MOD) for the realization of a fault current limiter. MOD is a simple and low-cost processing technology for metal oxide thin films, which are prepared by dipping a substrate in a coating solution and firing the substrate.

Keywords: Metal organic deposition, superconductor, thin films, fault current limiter, microwave devices, coated conductor

1 研究の背景

1.1 酸化物高温超電導体と限流器への応用

1986年に発見された酸化物高温超電導体は、その後ペロブスカイト類縁化合物 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (以下 YBCO という) の発見で臨界温度 (電気抵抗ゼロの超電導状態となる温度: T_c) が 90 K に向上したため、高価な液体ヘリウム (沸点 4 K) にかわって安価な液体窒素 (沸点 77 K) を冷却剤として使えることから実用への期待が高まった。例えば、これを送電線に加工すると送電途中での電気抵抗によるロスを無くすことができ、冷却に必要なエネルギーを考慮しても銅線と比べて送電損失が約半分まで済むと試算された^[1]。

送電線材だけではなく、超電導体を薄膜 (フィルム) 状に加工することでさまざまな応用機器・デバイスが実現す

る。その一つに SN 転移抵抗型 (薄膜抵抗型) 限流器がある。2章で述べるように、限流器とは送電線や配電線に対する落雷や倒木等の事故によって発生する大きな過電流を瞬時に抑制し、事故電流の遮断を容易にする新しいタイプの電力機器である (図 1)^{[1][2]}。薄膜抵抗型限流器 (図 2) は、信頼性が高く高電圧・大電流化が可能のため、低コスト超電導膜を用いることによって分散電源多量連系に向けた開発が期待されている。

1.2 塗布熱分解法

著者らは高温超電導体の発見以前から塗布熱分解法 (MOD: Metal organic deposition) によるセラミックス薄膜作製プロセスの開発を行ってきた。塗布熱分解法は構成元素を含む金属有機化合物を有機溶媒に溶解し、この溶液を基板に塗布した後に加熱処理することで有機成分を

産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第 5
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan * E-mail: manabe.t@aist.go.jp

Original manuscript received June 6, 2014, Revisions received July 25, 2014, Accepted August 11, 2014

燃焼除去して金属酸化物膜を形成する方法（“塗って・焼いて” 作る方法）である（図3）^{[3][4]}。

塗布熱分解法は「塗って焼く」だけという単純な工程から成り、高真空や高電圧を発生させる大規模な装置を使わないため、①膜の化学組成を正確にコントロールしやすい、②プロセス温度が比較的低温である、③さまざまな形状の大面积基板上や長尺テープ等にも応用できる、④完全燃焼時に排出されるのは水蒸気と二酸化炭素であり、トリフル

オロ酢酸塩を原料とした塗布熱分解法（TFA-MOD）^[5] のようにフッ化水素等の有害物質を排出しないので環境負荷が低い、という特長をもつ。

この論文では、電源多様化技術開発委託費「交流超電導電力機器基板技術研究開発」^[1] 等において、限流器応用を目的として、塗布熱分解法により高品質な大面积超電導膜の合成技術を開発した際に、製品ニーズに対応する目標を達成するために採用したアプローチや手法等を紹介する。

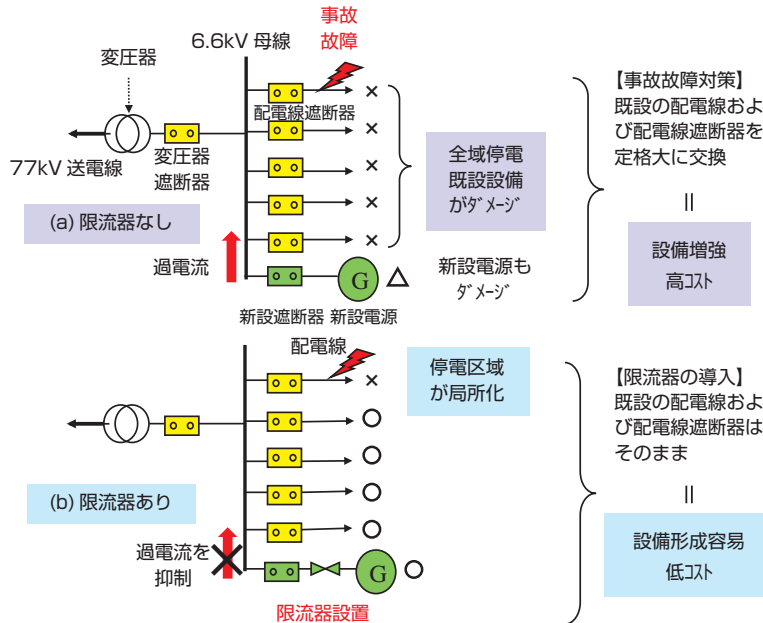


図1 分散電源導入における限流器の適用例

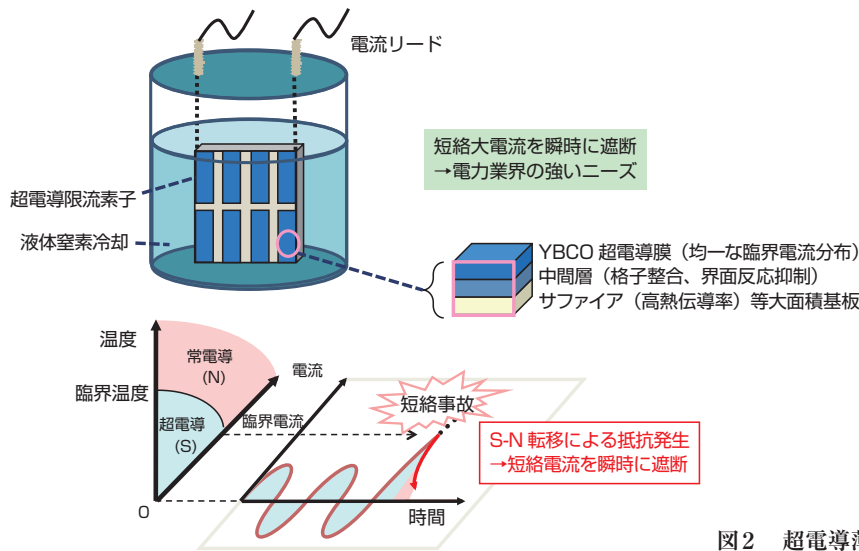


図2 超電導薄膜限流器（SN 転移型）

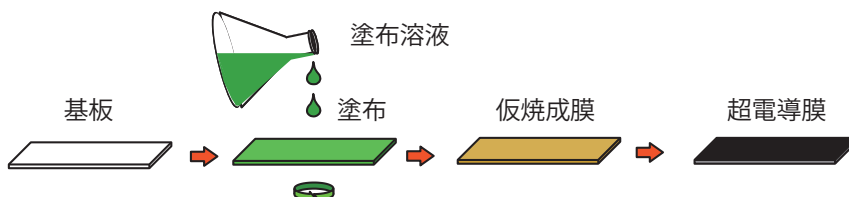


図3 塗布熱分解法（MOD）

2 事故電流抑制装置（限流器）の必要性和薄膜抵抗型限流器における超電導薄膜の要求仕様

超電導薄膜の応用先の一つとして薄膜抵抗型限流器があることを前章で述べた。電力自由化や逼迫時の対応のため、自家用電源の余剰電力等の分散電源を電力会社の配電線に接続して運用する系統連系が進められている。分散電源が連系されるとたとえば図1(a)に示すような短絡事故の際、電力系統に瞬間的に大きな過電流（事故電流・故障電流）が流れ、全域停電や分散電源発電機のダメージ、電力機器が破損といった事故等が起りやすくなる。このような事故故障を防ぐには既設の配電線および配電線遮断器を定格大のものに交換するなど高コストの設備増強が必要となる。これに対し、図1(b)に示すように限流器を導入すれば既設の配電線遮断器および配電線がそのまま使えて設備形成が容易であるため、その実現が望まれている^[1]。ここで限流器（限流遮断装置）とは過電流が回路中に流れることを抑制し、事故電流からエネルギーネットワーク（配電系・基幹系）等のシステムを守る機器である。

現在、薄膜抵抗型や整流器型等の受動（自律動作）型限流器、および半導体スイッチ型やアーク駆動型等の能動型限流器の開発が進められている。薄膜抵抗型限流器（図2）は受動型限流器の一種であり、超電導薄膜に過大な電流が流れると超電導薄膜が超電導（Super）状態から常電導（Normal）状態へと瞬時に転移して大きな抵抗が発生する（SN転移、クエンチともいう）現象を利用して事故電流を抑制する^[6]。この方式は可動部分がないため、能動型限流器と比較して信頼性が高い。超電導膜の直並列化によって高電圧・大電流化が可能であるため、低コスト超電導膜を用いることによって分散電源多量連系に向けた開発が期待されている。

薄膜抵抗型限流器用の超電導膜に求められている性能は以下のようである。

- ①臨界電流（超電導状態で流せる電流）が大きいこと
→臨界電流密度（ J_c ：以下では77 Kで1 cm²あたり流せる臨界電流をいう）が高く、幅が広いこと
- ②常電導状態に転移したときに高抵抗となり、高電圧を発生させること
→薄膜で電流方向に長いこと

このように、超電導膜の幅と長さはそれぞれ電流と電圧に関係し、また使用する超電導膜の枚数が多くなると直並列化の工程数や接続抵抗による損失が増大するため、高 J_c で大面積の超電導膜が必要である。電源多様化技術開発委託費「交流超電導電力機器基板技術研究開発」における開発目標は以下であった^[7]。

- ・高い臨界電流密度（ $J_c > 100$ 万A/cm²）

- ・大面積（10 cm×30 cm）

ここで超電導膜の J_c 値は、薄膜の微細組織に強く依存しており、高 J_c を達成するためにはYBCOの粒子配向が3次元的に揃った単結晶的膜であることが必要である。そのため、YBCOと格子整合性のよい（格子定数の差が小さい）単結晶を基板とし、その上にYBCOをエピタキシャル成長させ、単結晶的な超電導薄膜を作製する必要がある。後述するように限流器用の超電導膜の基板には耐熱衝撃性および熱伝導率の観点からサファイア（アルミナ単結晶）基板が有望視されており、市販サファイアの最大サイズがこの10 cm×30 cmであった。なおサファイアはYBCOとの格子不整合性が大きく（ミスマッチ：約10%）高温でYBCOと反応するため、両者の間に適切な中間層を形成することが必要である。また臨界電流を大きくするために超電導膜は厚いことが望ましいが、YBCOの熱膨張率（ $13 \times 10^{-6}/K$ ）はサファイアの熱膨張率（ $5 \sim 7 \times 10^{-6}/K$ ）の約2倍であり^{[8][9]}、YBCO膜厚が約300 nm（臨界膜厚）を越えると成膜温度（700-800℃）から冷却の際に熱応力によってマイクロクラックが生じてしまうため、サファイア上で得られる膜厚は300 nm以下となる。

3 塗布熱分解法と従来の大面積成膜技術との比較および目標実現のためのシナリオ

2章から明らかなように、薄膜抵抗型限流器の開発には高 J_c で大面積の超電導膜の合成技術の確立が必要である。一方で著者らは、YBCOの発見直後から塗布熱分解法を用いたYBCO薄膜作製プロセスの研究に取り組んできた。本章ではまず、塗布熱分解法と従来の大面積成膜技術との比較を行った後に、限流器応用を目的とした大面積超電導膜を塗布熱分解法により合成する際に、2章で抽出された製品ニーズから要求される目標を達成するための研究開発のシナリオを説明する。

3.1 塗布熱分解法と他の大面積成膜技術との比較^{[3][4]}

図3に示す塗布熱分解法と従来の金属酸化物の大面積成膜技術とを比較すると以下ようになる。

1) 従来技術の内容

- ①気相法（蒸着法、PLD法、スパッタ法、化学蒸着法）：成分原子（分子）を気体状態までバラバラにして基板に堆積させる方法であり、緻密で良質のエピタキシャル膜を作製しやすい。
- ②液相法（スラリーコート法、ゾル・ゲル法）：目的物質の粉体を溶媒に分散させたスラリーや金属アルコキッドを重縮合させたゾルを基板に塗布・乾燥後焼成しセラミックス膜を得る方法。

2) 従来技術の問題点

①気相法は気相発生工程と基板上への堆積工程の制御を同時に行う必要があるため組成の制御や大面積化が困難な上、高真空や高電圧等の発生のため高価な設備や大電力を必要とし、高コスト、高エネルギー負荷になりやすい。

②液相法は粉体やゾルを乾燥させたゲルが焼結するため多結晶的な無配向膜となり性能が低い。

すなわち気相法は高 J_c のエピタキシャル膜が得られるが、高コストで大面積では不均一になりやすい。従来、気相法で作製されたYBCO膜の最大サイズは、共蒸着法で20 cm径（中心に非蒸着部あり）^[10]および10 cm×20 cm（一方向基板移動）^[11]；PLD法で7 cm×20 cm^[12]；スパッタ法で7 cm径^[13]であった。一方液相法では、低コストで均一な大面積膜は得られるが、多結晶的な無配向膜で J_c は低いという問題がある。

3.2 目標達成のためのシナリオ

そこでこの研究では2章で抽出された製品ニーズから要求される目標を達成するために次の二段階に分けたシナリオで研究開発を進めることとした。

I. YBCO薄膜作製の実証と高 J_c 達成

II. 高 J_c の大面積YBCO膜の成膜

ここで塗布熱分解法による超電導膜合成の研究を時系列的に述べると、当初はIだけが開発の目標であった。YBCO超電導体発見の直後から溶液法による超電導成膜技術においても国際的に熾烈な開発競争が行われたが、著者らは他の研究機関に先んじてYBCO膜のゼロ抵抗を実証し、特許を出願することができた。一方、YBCO超電導体発見の直後から薄膜応用ではジョセフソン素子等が、厚膜応用では超電導線材、コイル、マグネット等への展開が語られていたが、いずれの応用においてもまずは高 J_c （ > 100 万 A/cm²）を実現することが求められていた。この時点における研究シナリオを図示すると、図4となる。

焼成温度が高いとYBCO膜は基板との界面で化学反応を起こすため、界面反応を抑制するために低温プロセスを開発し、さらにこの低温化によって使えるようになった格子整合基板を用いてYBCO膜の配向性向上を試みたところ、溶液法であるにもかかわらず予想外にエピタキシャル

膜ができ、高 J_c が得られた。この概略については次章で述べる。

このようにIのシナリオでエピタキシャルYBCO膜が作製できることが明らかになってきた頃に、電力の自由化や分散電源の多量連系の話がもちあがり、分散電源多量連系の際に電力機器の耐力仕様増強を低コストで行う上で超電導薄膜限流器が有望視されたため、Iで得られた「エピタキシャルYBCO成膜および高 J_c 化」をコア技術としてIIのシナリオが設定された。しかしながら一挙に高 J_c の大面積YBCO膜を作製するには多くの困難が予想されたため、以下のII-1、II-2の目標達成のための研究開発を同時進行させ、最終的に2章で抽出された製品ニーズから要求される目標II-3を達成するというようにした。

II-1 格子整合基板上へのYBCO成膜の大面積化

II-2 サファイア（格子不整合）基板上への中間層/超電導膜多層成膜

II-3 超電導体/中間層/サファイア積層大面積膜作製

このシナリオを図5に示し、5章で概略を述べる。また表1に超電導膜作製シナリオI、IIにおける目標達成のための要素技術とその概要を示し、各目標達成に主要な役割を果たした要素技術を枠で囲んだ。

4 YBCO薄膜作製の実証と高 J_c 達成

本章では図4に示すシナリオIにより高 J_c 化を達成するまでの概略を述べる。

4.1 溶液調製と酸素中熱処理によるYBCO成膜の実証

表1に示すように、目標I-1の達成には塗布溶液の原料・溶媒探索、熱処理条件探索および低反応性基板の選択が主な開発要素であった。

一般に、電気陰性度の異なる金属の有機化合物は溶解度が異なることが多く、多成分系では均一溶液を調製することは困難である。この研究では出発原料として特徴ある構造の（側鎖を有したり配位子として作用したりする）有機化合物を採用するとともに溶媒の種類（炭化水素、アルコール、酸、ケトン、アルデヒド、エステル、窒素化合物）および鎖長を変えて溶媒探索試験を行った結果、Y、Ba、Cu

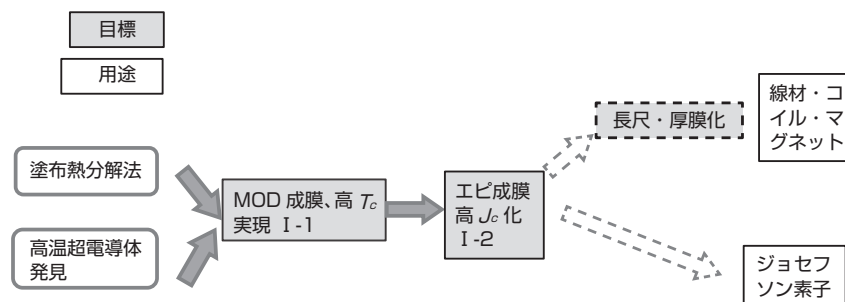


図4 塗布熱分解法による高 J_c 超電導膜作製のシナリオI

表1 超電導膜作製シナリオI、IIにおける目標達成のための要素技術

目標	基板・種類・サイズ	中間層	溶液	塗布	仮焼成	本焼成	用途
I-1: MOD成膜、高 T_c 実現	低反応性基板選択・YSZ・12 mmΦ、25x25 mm ²	—	原料・溶媒探索	ディップ	熱分解	酸素中熱処理条件探索	
I-2: 高 J_c 化	格子整合単結晶・STO・5x10 mm ²	—	溶液チューニング	スピコート	熱分解	低酸素低温 T_c 化開発	(ジョセフソン素子)
II-1: 先行的な大面積積化	大面積格子整合単結晶・STO、LAO・2 cmΦ、5 cmΦ		溶液チューニング	スピコート	熱分解	低酸素低温 T_c 化(赤外線急加熱)	
II-2: 多層 T_c の検討	格子不整合単結晶・GFAI ² ・2x2 cm ²	CeO ₂ 蒸着	溶液チューニング	スピコート	熱分解	低酸素低温 T_c 化(管状炉)	
II-3: 大面積積層化	大面積格子不整合単結晶・GFAI ² ・1x12 cm ² 、3x21 cm ² 、10x30 cm ²	大面積CeO ₂ 蒸着	溶液チューニング	大面積スピコート	熱分解	低酸素低温 T_c 化(大面積管状炉)	限流器
II-4: 低 R_s 化、パターンング	低誘電率基板・LAO,LSAT・GFAI ² 着・2x2 cm ² 、5 cmΦ	[CeO ₂ 蒸着]	溶液チューニング	スピコート	光照射・熱分解(光MOD)	低酸素低温 T_c 化	マイクロ波フィルタ
II-5: 長尺・厚膜化、高 J_c 化	配向性金属・Ni-W等・1 cm幅	CeO ₂ 蒸着	厚塗り溶液、ピン止めの導入	ディップ他	光照射・熱分解(光MOD)?	低酸素低温 T_c 化	線材

を高濃度かつ均一に溶解した塗布溶液を作製することができた。この溶液を基板上に塗布して大気中 500 °C で熱分解させ、Y₂O₃-BaCO₃-CuO からなる仮焼成膜を形成したのち、焼結体と同様の酸素中 950 °C での本焼成・固相反応により YBCO 成膜実証に成功し^{[14][15]}、溶液および製法の基本特許を取得した。しかしながら焼成温度が高いため、ペロブスカイト構造をもつチタン酸ストロンチウム(SrTiO₃、ミスマッチ：約 1 %) 等の格子整合単結晶基板は仮焼成膜中の BaCO₃ と反応したため YBCO 膜が得られなかった。そこで反応性の低いイットリア安定化ジルコニア焼結体を基板とすることによって初めて $T_c=90$ K が得られたが膜は多結晶的であり、液体窒素温度 (77 K) における J_c は低かった (~ 1000 A/cm²)^[16]。

4.2 低温プロセス開発と高 J_c の達成

目標 I-2 の達成には低酸素圧を利用した低温プロセスの開発が最も重要であった。

酸化物高温超電導体は酸素が欠損すると超電導性が失われるため従来は酸素中での焼成がなされていた。著者らは岸尾らの研究にヒントを得て^[17]、YBCO のような遷移金属を含む機能性酸化物は、原子価制御が重要であり、酸素分圧 (pO_2) と温度 (T) を制御して熱処理する必要があると考えた。そこで塗布溶液を熱分解 (= 仮焼成) して得られた粉末について pO_2 を変化させた熱分析を行い、生成物を X 線回折した結果、低酸素圧を用いることにより YBCO の生成温度が 100 °C 以上低下することが明らかとなった^[18]。

最高温度が 700 °C 台での熱処理であれば YBCO と SrTiO₃ 等の格子整合単結晶基板との反応は十分抑制され

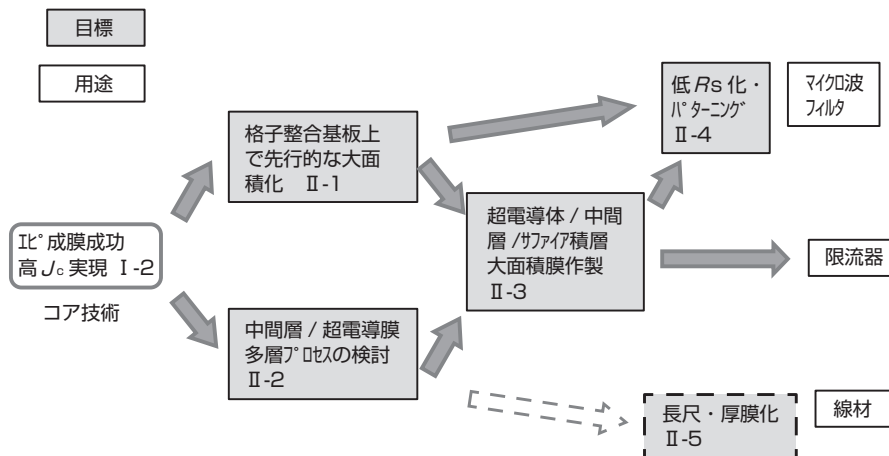


図5 限流器用の大面積超電導膜作製のシナリオII

るため、SrTiO₃ 基板上へのYBCO 成膜を行った。この際、製品膜厚の均一性と再現性を向上させるため、スピンドーターを導入して溶液を塗布し^[19]、大気中 500 °C で仮焼成した。

次に仮焼成膜を本焼成する際の酸素分圧および昇温速度を最適化することによって熱処理最高温度を従来比約 200 °C 低温化すること（低温プロセスの開発）に成功した。この様子を酸素分圧 (p_{O_2}) の対数と温度の逆数 ($1/T$) とを両軸として YBCO および酸化銅 (Cu₂O-CuO) の安定領域を示したエリンガム図上で模式的に表わすと図 6 のようになる（配向性については次章で述べる）^[20]。ここで従来の酸素中熱処理が経路 I -1、低温プロセスが経路 I -2 に相当する。経路 I -2 では低酸素圧を用いるため、本焼成時に酸素がより少ない非超電導体の YBa₂Cu₃O₆ が生成するが、本焼成後に酸素 1 atm に切り替え、冷却時に酸素を結晶内に取り込ませることで、超電導体である YBa₂Cu₃O₇ に転換することができる。さらに当時としては驚くべきことに経路 I -2 で作製された YBCO 膜は、溶液から出発したにもかかわらず基板に対してエピタキシャル成長しており、77 K における J_c として気相法 YBCO 膜に匹敵する 100 万 A (=1MA) /cm² 以上が得られ目標 I -2 を達成した^{[21][22]}。

5 高 J_c の大面積 YBCO 膜の成膜

本章ではシナリオ I -2 の「エピ成膜成功、高 J_c 実現」をコア技術として、図 5 に示すシナリオ II により高 J_c 大面積膜を実現するまでの概略を述べる。

4 章で SrTiO₃ 基板上に作製された YBCO 膜は 5 mm × 10 mm といった小サイズであった。基板と膜との反応性や格子不整合のため、限流器用として望ましい大面積サファイア（単結晶アルミナ）基板上への成膜を一挙に達成することは困難であったが、一方で早く大面積 YBCO 膜の性能を試したいという強い要望があったので、図 5 のように II -1 格子整合基板上で先行的に YBCO 膜の大面積化を示しつつ II -2 サファイア上への中間層の作製と YBCO 成膜のチューニングを同時進行させ、その後 II -3 超電導体 / 中間層 / サファイア積層膜の大面積化を図ることにした。

5.1 格子整合基板上への成膜の大面積化

目標 II -1 の達成には低温プロセスで最適昇温速度の選択が主要な課題であった。

格子整合基板の面積を大きくしていくと同じ熱処理条件でも小さい基板のときと比べて J_c が低くなりやすかった。初めはこの原因がわからなかったが、図 6 のエリンガム図を参考にとすると、気相法の場合と同様に、YBCO や CuO の熱分解温度付近で高 J_c の c 軸配向（超電導電流の流れやすい配向）になりやすい領域と、それより酸素分圧が高

い領域や低温側で低 J_c の a 軸配向（超電導電流の流れにくい配向）になりやすい領域があることがわかった^{[23][24]}。このことを利用して気相法では c 軸配向領域で成膜して c 軸配向膜を得ている^[25]。これに対して塗布熱分解法では、一旦堆積した仮焼成膜を本焼成するため、昇温速度が小さい通常の電気炉中の熱処理では a 軸配向領域を通過する際に、基板の面積が大きくなると局所的に a 軸粒子の結晶成長が進んでしまい、 a 軸配向が混在するようになると考察された。

そこで急加熱が可能な赤外線加熱式熱処理炉を導入して、昇温速度および均一加熱条件を調べた結果、 a 軸配向の生じやすい低温域を急加熱によって速やかに通過させることによって、 a 軸配向成長が抑制され c 軸配向膜が得られるようになった。直径 5 cm の格子整合 LaAlO₃(LAO、ミスマッチ：約 2 %) 基板に作製した厚さ 700 nm の YBCO 膜は、非常に緻密で平滑であり、誘導法で測定した J_c も非常に高かった (>2 MA/cm²)^{[26][27]}。また急加熱であっても YBCO と LAO は格子整合であり、熱膨張率も近い (YBCO:13 × 10⁻⁶/K、LAO:12.6 × 10⁻⁶/K^[9]) ため、クラックは生じなかった。このように格子整合 LAO 基板の上では高 J_c の YBCO 厚膜を得ることができる。しかしながら LAO 基板は作製される最大サイズが約 5 cm 径であり、大面積化に対応できない。また耐熱衝撃性および熱伝導率が低く、クエンチ時の発熱を液体窒素で冷却した際に熱応力で基板が破損しやすいため、限流器応用には不適と考えられる。

5.2 サファイア（格子不整合）基板上への中間層成膜

限流器応用超電導膜用の基板材料としては、熱伝導率や耐熱衝撃性が高く、大面積化が可能なサファイア（単結

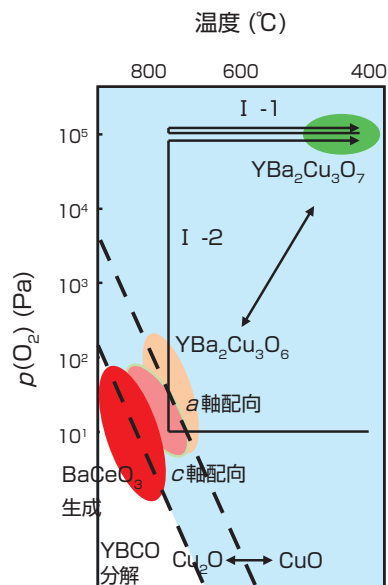


図6 エリンガム図における YBCO 膜の配向および反応

晶アルミナ) が最適である。しかし、サファイアは YBCO と化学反応を起こすうえ、結晶構造が異なり、格子不整合性が大きい (ミスマッチ: 約 10 %) ため、直接 YBCO をエピタキシャル成長させるのは困難である。そこで気相法^{[10][13]}と同様にして、中間層 (バッファ層) として CeO_2 (ミスマッチ: 約 1 %) を用い、格子不整合性を緩和するとともに化学反応を抑制することを試みた。

サファイア基板上に成膜条件 (温度、成膜速度、酸素圧、プラズマ化条件) を変化させて真空蒸着法にて CeO_2 中間層を形成したところ、RF (ラジオ波) アンテナにより酸素をプラズマ化し、蒸着温度を高くすることで、 CeO_2 の配向を望ましい (100) 配向にすることができ、ナノメートルレベルで平坦な表面を有する CeO_2 中間層が得られることがわかった^{[28][29]}。

中間層成膜と並行して中間層上への塗布熱分解法による YBCO 成膜とのチューニングを図った。熱処理条件は、格子整合基板のときとおよそ同じであるが、中間層に CeO_2 を用いると、YBCO との反応による BaCeO_3 生成が問題となってくる。すなわち BaCeO_3 が生成すると膜中の Ba の量が少なくなるため金属組成比が 1:2:3 からずれるだけでなく、YBCO の結晶性も低下して超電導特性が著しく劣化してしまう。そこで CeO_2 中間層を用いた場合の YBCO 膜の生成条件を調べた結果、図 6 のように高温あるいは酸素分圧が低いと BaCeO_3 が生成しやすいことがわかった。また CeO_2 中間層上への YBCO 成膜条件を最適化するうちに、 CeO_2 は YBCO との格子ミスマッチは小さいが、結晶構造が YBCO と異なる蛍石型構造であるため CeO_2 上での YBCO 結晶成長速度は比較的小さくなり、格子整合基板のような赤外線加熱炉を用いた急加熱は必要なく、管状炉加熱で十分であることが明らかとなった。中間層成膜法と熱処理方法のチューニングの結果、 CeO_2 中間層を 40 nm とし、最高熱処理温度約 750 °C で高 J_c の YBCO 成膜に成功した (目標 II -2 の達成)^{[30][31]}。

5.3 超電導体/中間層/サファイア積層膜の面積化

ついで中間層成膜およびその上への超電導多層成膜の面積化を図った。ここで問題となったのは両者の成膜時における膜厚および熱処理温度・雰囲気の一貫性である。

まず中間層成膜ではこれらの一貫性を向上させるために蒸着源を 2 機とするとともに、ヒーターおよびシールドを工夫して蒸着温度の低下を防ぎ、RF (ラジオ波) アンテナにより酸素をプラズマ活性化した。RF のパワーを上げ、蒸着温度を高く保つことで、面積にわたって均一なナノメートルレベルで平坦な表面を有する面積 CeO_2 膜が得られた^{[28][29]}。

一方面積 YBCO 成膜では、大型基板に対応するスピー

ンコーターを導入し、塗布膜厚が均一となるように粘度や蒸発速度をチューニングした溶液を塗布した。つぎに仮焼成工程では大型のマッフル炉あるいは管状炉を用いて昇温速度および雰囲気制御することで全面均一な仮焼成膜を作製した。さらに 5.2 の結果より、本焼成工程では赤外線加熱炉を用いた急加熱は必要ないことが明らかとなったため、温度均一性の高い大型管状炉を用いて精密な温度・雰囲気制御を行うことで 10 cm × 30 cm というような大面積サファイア基板上に高特性の YBCO 膜を作製することに成功した (図 7)。すなわち、誘導法による平均 $J_c = 2.6 \text{ MA/cm}^2$ であり、測定点の大部分で平均 J_c の $\pm 20\%$ 以内という均一性が得られ、プロジェクトの目標値を達成した (II -3)^{[31][33]}。

6 その後の展開

塗布熱分解法 (MOD) による大面積超電導膜の合成技術の開発について前章まで述べてきた。本章ではその後

(1) 外部機関 (企業、大学、電中研) との共同研究および産総研内研究 (エネルギー技術研究部門と共同) で、この研究で開発した超電導膜を提供して限流素子を作製し、その直並列化によりプロトタイプ限流器を試作して限流試験を行った結果、および (2) マイクロ波デバイスおよび線材への応用を目指した取り組みについて述べる。詳しくは引用論文を参考にいただきたい。

6.1 限流器の試作試験

素子用の超電導膜はスループット・均一性が高い 3 cm × 21 cm の CeO_2 /サファイア基板上へ成膜し、その上にクエンチ後の発生電圧を高くできる高抵抗の金銀合金の分流層を設ける構造^[34]とした。

①共同研究: モックアップ装置 (図 8)

2並列素子を 6直列接続した 6.6 kV 級単相限流器ユニットで 11.3 kA のピーク電流が 4.5 kA に限流された。この結果に基づいて 6.6 kV 級三相限流器の概念設計を行った^[35]。

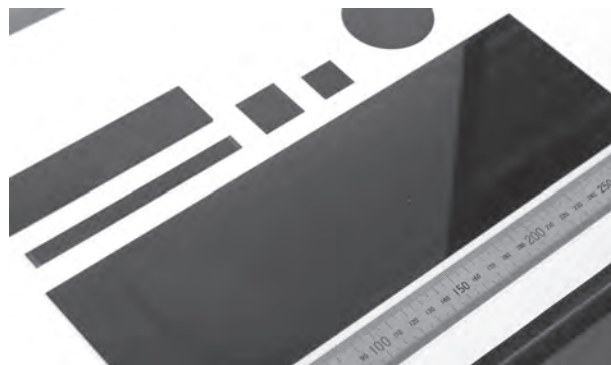


図 7 各種形状の基板上に作製された大面積 YBCO 膜

②産総研内研究：

産総研が開発した無誘導分流抵抗を用いた500 V/200 A単相限流器ユニットで3.5 kAのピーク電流が770 Aに
限流された^[36]。

また、分散電源用限流器に用いる大面積超電導膜のコス
トも試算され、実用化目標コストを将来的に下回ることが
示されている^[37]。

これらの成果をもとに、大面積超電導膜の作製プロセス
の企業への技術移転を進めている。

6.2 マイクロ波デバイスおよび線材への応用

①移動体通信基地局用マイクロ波フィルター

高温超電導体はマイクロ波領域において金属よりも表面
抵抗が低いため、超電導膜を加工したフィルターを移動体
通信基地局システムに組み込むことにより、通信品質向上
により、通話エリアの拡大や電磁波の影響の低減が図られ
る^{[38][39]}。ここで超電導成膜に求められる目標（Ⅱ-4）は、
大面積（5 cm 径）低誘電率基板への両面成膜、低い表面
抵抗およびパターンニングである。著者らはこの分野への応
用に関して以下のような成果を得た。

- a. 2 cm×2 cm LaAlO₃ 基板上へのマイクロ波フィルターの
作製とフィルター特性の実証^[40]
- b. 5 cm 径 LaAlO₃ 基板上への YBCO 成膜と低表面抵抗の
達成^[41]
- c. 5 cm 径 CeO₂/サファイア基板への YBCO 両面成膜と低表
面抵抗の達成^[42]
- d. 塗布光照射法による YBCO 成膜と同時パターンニングの可
能性^[43]

②線材応用

YBCO 超電導線材の製造は化学気相法（CVD）や、
トリフルオロ酢酸塩を原料とした塗布熱分解法（TFA-
MOD）によりこれまでに長尺化や厚膜化がなされてきた。
一方、この研究で紹介した塗布熱分解法は、原料に有害

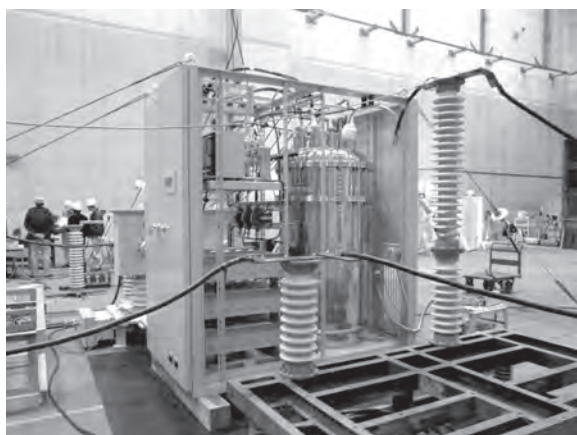


図8 6.6 kV 級単相試作限流器

なフッ素を含まないことからフッ素フリー（FF-）MOD とも
よばれ、低コストで低環境負荷な線材作製方法となること
が期待される。著者らは長尺化が可能な配向金属基板上
への高臨界電流（ I_c ）膜（すなわち高 J_c かつ厚膜）の開発
を目標（Ⅱ-5）として研究を遂行し、現在までに以下の成
果が得られている。

- a. 厚塗り溶液の開発：1回の塗布焼成で0.8 μmを達成^[44]
- b. 本焼成繰り返しで厚膜：4 μmのエピタキシャル膜を作製
- c. ピン止めの導入による高 I_c （>200 A/cm）達成：FF-
MOD膜として最高^[45]

7 まとめ

この論文では限流器応用を目的として、塗布熱分解法
により高品質な大面積超電導膜の合成技術を開発した際
に、製品ニーズに対応する目標を達成するために採用した
以下の二つのシナリオと要素技術を紹介した。

- I. YBCO 薄膜作製の実証と高 J_c 達成
- II. 高 J_c の大面積 YBCO 膜の成膜

すなわち I では溶液化学に基づいた均一溶液の調製と固
体物理化学に基礎をおく低酸素を用いた低温プロセスの開
発が主要であり、溶液から出発したにもかかわらず基板に
対してエピタキシャル成長した高 J_c 膜が得られた。

一方 II では、Ⅱ-1 格子整合基板上で先行的に YBCO 膜
の大面積化を示しつつ、Ⅱ-2 格子不整合のサファイア上へ
の中間層の作製と YBCO 成膜のチューニングを同時進行
させ、その後Ⅱ-3 超電導体 / 中間層 / サファイア積層膜
の大面積化を図るというアプローチをとった。このアプ
ローチを開発計画にしたがって遂行するうえで、グループ内
に気相成膜を専門とする研究者と液相成膜を専門とする研
究者がいて両者の連携・フィードバックがうまくいったこと、
および適切な時期に大型基板に対応した作製装置および
評価装置を導入できたことが大きな役割を果たした。

これらのアプローチはマイクロ波デバイスおよび線材へ
の応用へも活かされている。

謝辞

限流試験写真をご提供いただいた古河電気工業株式会
社パワー&システム研究所ならびに超電導実用限流器の研
究開発共同研究委員会の皆さまに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「交
流超電導電力機器基盤技術研究開発」事業原簿，I-2-I-6
(2005).
<http://www.nedo.go.jp/content/100091370.pdf>
- [2] 大熊武，岩田良浩：超電導限流器，電気学会誌，117 (4)，

- 222-226 (1997).
- [3] 水田 進, 熊谷俊弥, 真部高明: 塗布熱分解法による超伝導膜の合成, *日本化学会誌*, 1997 (1), 11-23 (1997).
- [4] 山口 巖, 真部高明, 熊谷俊弥, 水田 進: 塗布熱分解法によるエピタキシャル酸化物膜の作製, *日本応用磁気学会誌*, 24 (8), 1173-1180 (2000).
- [5] 荒木猛司, 山際勝也, 平林泉: トリフルオロ酢酸塩(TFA)を用いるMetalorganic deposition (MOD)法によるYBCO成膜とプロセス条件, *低温工学*, 35 (11), 516-522 (2000).
- [6] K. Ueda, K. Yasuda, K. Inoue, A. Kikuchi and K. Iwadate: R&D of HTS power cable and fault current limiter in Super-ACE project, *Physica C*, 392-396, 1171-1179 (2003).
- [7] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」 事業原簿, 基本計画-I (2005).
<http://www.nedo.go.jp/content/100091370.pdf>
- [8] G. Kästner, D. Hesse, M. Lorenz, R. Scholz, N.D. Zakharov and P. Kopperschmidt: Microcracks observed in epitaxial thin films of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ and $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 150 (1), 381-394 (1995).
- [9] 川崎雅司: 高温超伝導デバイス用薄膜技術, *低温工学*, 31 (11), 563-571 (1996).
- [10] H. Kinder, P. Berberich, W. Prusseit, S. Rieder-Zecha, R. Semerad and B. Utz: YBCO film deposition on very large areas up to $20 \times 20 \text{ cm}^2$, *Physica C*, 282-287 (1), 107-110 (1997).
- [11] C. Hoffmann, A. Lümckemann, U. Schmatz, M. Bauer, R. Metzger, P. Berberich and H. Kinder: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ deposition of large moving plates for continuous processing, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 13 (2), 2879-2881 (2003).
- [12] B. Schey, W. Biegel, M. Kuhn and B. Stritzker: Large area pulsed laser deposition of YBCO thin films, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 9 (2), 2359-2362 (1999).
- [13] J. Geerk, F. Ratzel, H. Rietschel, G. Linker, R. Heidinger and R. Schwab: Simultaneous double-sided deposition of HTS films on 3-inch wafers by ICM-sputtering, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 9 (2), 1543-1546 (1999).
- [14] T. Kumagai, H. Yokota, K. Kawaguchi, W. Kondo and S. Mizuta: Preparation of superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) thin films by the dipping-pyrolysis process using organic acid salts, *Chem. Lett.*, 1987 (8), 1645-1646 (1987).
- [15] 真部高明, 横田洋, 熊谷俊弥, 近藤和吉, 水田 進: 金属ラウリン酸塩の塗布熱分解による $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超伝導薄膜の合成, *日本セラミックス協会学術論文誌*, 98 (2), 220-224 (1990).
- [16] T. Kumagai, W. Kondo, H. Yokota, H. Minamiue and S. Mizuta: Preparation of superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films by the dipping-pyrolysis process using metal acetylacetonates, *Chem. Lett.*, 1988 (3), 551-552 (1988).
- [17] K. Kishio, J. Shimoyama, T. Hasegawa, K. Kitazawa and K. Fueki: Determination of oxygen nonstoichiometry in a high- T_c superconductor $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-\delta}$, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26 (7), L1228-L1230 (1987).
- [18] T. Kumagai, T. Manabe, W. Kondo, H. Minamiue and S. Mizuta: Effects of heat treatment conditions on the critical current densities of $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ films prepared by the dipping-pyrolysis process, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 29, L940-L942 (1990).
- [19] T. Manabe, W. Kondo, S. Mizuta and T. Kumagai: Preparation of high- J_c $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ films on $\text{SrTiO}_3(100)$ substrates by the dipping-pyrolysis process at 750°C , *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30 (9B), L1641-L1643 (1991).
- [20] T. Manabe, K. Arai, W. Kondo, S. Mizuta and T. Kumagai: Preparation of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ films on SrTiO_3 and MgO by the dipping-pyrolysis process under low- $p(\text{O}_2)$ heat treatment, *J. Mater. Res.*, 7 (9), 2337-2342 (1992).
- [21] T. Kumagai, T. Manabe, W. Kondo, S. Mizuta and K. Arai: Preparation of high J_c $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ -Ag composite films on $\text{SrTiO}_3(100)$ substrates by the dipping-pyrolysis process, *Appl. Phys. Lett.*, 61 (8), 988-990 (1992).
- [22] T. Kumagai, H. Yamasaki, K. Endo, T. Manabe, H. Niino, T. Tsunoda, W. Kondo and S. Mizuta: Critical current densities at 77K in $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ -Ag films prepared by dipping-pyrolysis process, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32 (11A), L1602-L1605 (1993).
- [23] T. Manabe, W. Kondo, S. Mizuta and T. Kumagai: Crystallization of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ films on $\text{SrTiO}_3(100)$ by postannealing of precursors prepared by dipping-pyrolysis process, *J. Mater. Res.*, 9 (4), 858-865 (1994).
- [24] T. Manabe, I. Yamaguchi, W. Kondo, S. Mizuta and T. Kumagai: Processing of superconducting films and tapes by dipping-pyrolysis process, in K. Yamafuji and T. Morishita (eds.), *Advances in Superconductivity VIII/2*, Springer, 589-594 (1994).
- [25] M. Mukaida and S. Miyazawa: Nature of preferred orientation of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ thin films, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32, 4521-4528 (1993).
- [26] T. Manabe, W. Kondo, I. Yamaguchi, M. Sohma, T. Tsuchiya, K. Tsukada, S. Mizuta and T. Kumagai: Critical current density and microwave surface resistance of 5-cm-diameter YBCO films on LaAlO_3 substrates prepared by MOD using an infrared image furnace, *Physica C*, 417, 98-102 (2005).
- [27] T. Manabe, M. Sohma, I. Yamaguchi, K. Tsukada, W. Kondo, K. Kamiya, T. Tsuchiya, S. Mizuta and T. Kumagai: Surface resistances of 5-cm-diameter YBCO films prepared by MOD for microwave applications, *Physica C*, 445-448, 823-827 (2006).
- [28] M. Sohma, I. Yamaguchi, K. Tsukada, W. Kondo, S. Mizuta, T. Manabe and T. Kumagai: Cerium oxide (CeO_2) buffer layers for preparation of high- J_c YBCO films on large-area sapphire substrates ($30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) by coating pyrolysis, *Physica C*, 412-414, 1326-1330 (2004).
- [29] M. Sohma, I. Yamaguchi, K. Tsukada, W. Kondo, K. Kamiya, S. Mizuta, T. Manabe and T. Kumagai: Preparation of CeO_2 buffer layers for large-area MOD-YBCO films ($10 \times 30 \text{ cm}^2$) with high- J_c , *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 15 (2), 2699-2702 (2005).
- [30] T. Manabe, M. Sohma, I. Yamaguchi, W. Kondo, K. Tsukada, S. Mizuta and T. Kumagai: 2-D large-size YBCO films on sapphire for FCL prepared by coating-pyrolysis process, *Physica C*, 392-396, 937-940 (2003).
- [31] T. Manabe, M. Sohma, I. Yamaguchi, W. Kondo, K. Tsukada, K. Kamiya, S. Mizuta and T. Kumagai: Distribution of inductive J_c in two-dimensional large-size YBCO films prepared by fluorine-free MOD on CeO_2 -buffered sapphire, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 15 (2), 2923-2926 (2005).
- [32] T. Manabe, M. Sohma, I. Yamaguchi, W. Kondo, K. Tsukada, S. Mizuta and T. Kumagai: Preparation of high- J_c large-size YBCO films ($30 \times 10 \text{ cm}^2$) by coating-pyrolysis process on CeO_2 -buffered sapphire, *Physica C*, 412-414, 896-899 (2004).
- [33] 長村光造, 松本要: 実用高温超伝導線材の開発現状と展望, *応用物理*, 73 (1), 3-13 (2004).
- [34] H. Yamasaki, M. Furuse and Y. Nakagawa: High-power-density fault-current limiting devices using superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ films and high-resistivity alloy shunt layers, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 4427-4429 (2004).
- [35] T. Nitta, T. Matsumura, J. Baba, M.D. Ainslie, S. Torii, H.

- Kado, T. Kumagai and M. Shibuya: Tests for conceptual design of 6.6 kV class superconducting fault current limiter with YBCO thin film elements, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19 (3), 1964-1967 (2009).
- [36] H. Yamasaki, K. Arai, K. Kaiho, Y. Nakagawa, M. Sohma, W. Kondo, I. Yamaguchi, H. Matsui, T. Kumagai, N. Natori and N. Higuchi: 500 V/200 A fault current limiter modules made of large-area MOD-YBa₂Cu₃O₇ thin films with high-resistivity Au-Ag alloy shunt layers, *Supercond. Sci. Tech.*, 22 (12), 125007 (2009).
- [37] 山崎 裕文, 新井 和昭, 古瀬 充穂, 中川 愛彦, 海保勝之, 熊谷 俊弥, 渋谷正豊, 仁田 旦三: 超電導薄膜限流器とテープ巻線型限流器の導体コスト比較, *低温工学*, 41 (9), 397-404 (2006).
- [38] 瀬恒謙太郎, 榎原晃: 高温超伝導体の移動体通信への応用—基地局用マイクロ波フィルター—, *応用物理*, 66 (4), 351-355 (1997).
- [39] 榎原伸義, 超伝導フィルターの小型化検討, *応用物理*, 72 (1), 21-26 (2003).
- [40] T. Kumagai, T. Manabe, I. Yamaguchi, S. Nakamura, W. Kondo, S. Mizuta, F. Imai, K. Murayama, A. Shimokobe and Y-M. Kang: Preparation of YBCO films by CP-process for HTS microwave filters, in T. Yamashita and K. Tanabe (eds.), *Advances in Superconductivity XII*, Springer, 927-929 (2000).
- [41] T. Kumagai, T. Manabe, W. Kondo, K. Murayama, T. Hashimoto, Y. Kobayashi, I. Yamaguchi, M. Sohma, T. Tsuchiya, K. Tsukada and S. Mizuta: Characterization of 50-mm-diameter Y123 films prepared by a coating-pyrolysis process using an infrared image furnace, *Physica C*, 378-381, 1236-1240 (2002).
- [42] M. Sohma, K. Kamiya, K. Tsukada, I. Yamaguchi, W. Kondo, S. Mizuta, T. Manabe and T. Kumagai, Fabrication of double-sided YBa₂Cu₃O₇ films on CeO₂-buffered sapphire substrates by MOD process, *IEICE Trans. Electron.*, E89-C (2), 182-185 (2006).
- [43] M. Sohma, T. Tsuchiya, K. Tsukada, I. Yamaguchi, T. Manabe, T. Kumagai, K. Koyanagi, T. Ebisawa and H. Ohtsu: Preparation of epitaxial YBCO films by a novel excimer-laser-assisted MOD, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 17 (2), 3612-3615 (2007).
- [44] I. Yamaguchi, W. Kondo, T. Hikata, K. Kamiya, H. Matsui, M. Sohma, K. Tsukada, Y. Nakagawa, T. Kumagai and T. Manabe: Preparation of Y123 thick films by fluorine-free MOD using a novel solution, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21 (3), 2775 -2778 (2011).
- [45] H. Matsui, H. Ogiso, H. Yamasaki, T. Kumagai, M. Sohma, I. Yamaguchi and T. Manabe: 4-fold enhancement in the critical current density of YBa₂Cu₃O₇ films by practical ion irradiation, *Appl. Phys. Lett.*, 101 (23), 232601 (2012).

執筆者略歴

真部 高明 (まなべ たかあき)

1988年東京大学工学部合成化学科卒業。同年工業技術院化学技術研究所入所、2009年産業技術総合研究所先進プロセス研究部門機能薄膜プロセス研究グループ長。2014年コンプライアンス推進本部総括企画主幹(先進製造プロセス研究部門兼務)。市村学術賞貢献賞、日本セラミックス協会進歩賞等受賞。世界最大級大面積超電導膜の合成と限流器への応用等に取り組み、この論文では主としてシナリオIIを担当した。



相馬 貢 (そうま みつぐ)

1989年北海道大学大学院工学研究科応用化学専攻修士課程修了。同年工業技術院化学技術研究所入所。1996年磁性薄膜研究により博士(工学)取得。2001年産業技術総合研究所物質プロセス研究部門主任研究員。2014年先進プロセス研究部門機能薄膜プロセス研究グループ長。この論文では超電導膜に適した高品質中間層の気相合成、塗布光照射法による高特性薄膜の超電導フィルター応用等に取り組んだ。



山口 巖 (やまぐち いわお)

1994年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年工業技術院物質工学工業技術研究所入所。同所無機材料部、産業技術総合研究所物質プロセス研究部門を経て、現在先進製造プロセス研究部門主任研究員。2009年京都大学大学院工学研究科博士(工学)取得。この論文では超電導体や各種酸化物のエピタキシャル薄膜の合成と評価、厚膜作製プロセスと超電導テープ線材への応用等に取り組んだ。



松井 浩明 (まつい ひろあき)

2006年東北大学理学研究科博士課程修了。同研究科助教を経て、2008年産業技術総合研究所入所。現在先進製造プロセス研究部門主任研究員。博士(理学)。この論文では塗布光照射法による高特性超電導膜合成、ナノ構造制御による高臨界電流密度発現機構の解明等に取り組んだ。



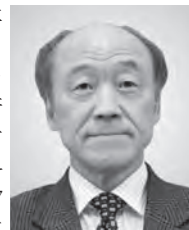
土屋 哲男 (つちや てつお)

1998年東京理科大学大学院理工学研究科博士課程修了。工業技術院物質工学工業技術研究所COE特別研究員を経て2000年産業技術総合研究所入所、2010年先進製造プロセス研究部門フレキシブル化学研究グループ長、工学博士。1999年光MODによる機能性薄膜の結晶成長を着想、以来、金属有機化合物の光分解による金属酸化物の低温多結晶成長、エピタキシャル成長、ナノ粒子光反応法によるフレキシブル薄膜法を開発。この論文では塗布光照射法による超電導体の作製プロセスの開発等に取り組んだ。



熊谷 俊弥 (くまがい としや)

1974年早稲田大学理工学部応用化学科卒業。1975年工業技術院東京工業試験所入所、2001年産業技術総合研究所研究グループ長を経て2009年先進製造プロセス研究部門副研究部門長、現在招聘研究員。博士(工学)。市村学術賞貢献賞等受賞。エネルギー関連材料を中心とした無機材料科学研究に従事。1987年世界で初めて本法によるY系超電導膜合成に成功し、合成・応用に関する研究開発を主導した。この論文では主としてシナリオIを担当した。



査読者との議論

議論1 全般

質問・コメント(赤穂 博司:未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合)

この論文は、酸化物高温超電導体の電力応用として、限流器を一つの大きなターゲットとして焦点を絞り、その開発に向けて、シナリオを構築するとともに要素技術の選択と組み合わせが示されており、シンセシオロジーの論文として価値があると思われます。

質問・コメント（小林 哲彦：産業技術総合研究所）

この論文は、限流器への応用に向けた大面積超電導膜の作成に関する論文であり、掲載を推薦します。

議論2 限流器の説明

質問・コメント（赤穂 博司）

この論文においては、酸化物高温超電導体の電力応用として、限流器の開発を目的としています。このため、はじめに分野外の読者にも限流器をイメージとして理解できるボンチ絵を示すことが重要と思われます。論文中では、限流器の構造や原理が図示され、また、2章においても文章では記述されていますが、電力システム全体の中で、限流器の役割と重要性を表すボンチ絵を示すことにより、より理解が進むように思われます。また、図8で示した試作限流器を含む装置写真との対応も、より明確になるかと思われます。

さらに、1章において、「多くの方式の限流器開発が進められている」との記述がありますが、他の方式についても少し具体的例を挙げていただくことにより、より明確になるかと思われます。

回答（熊谷 俊弥）

図1として電力系統中で限流器の役割を示すボンチ絵を追加し、図2の上部に図8で示した装置写真と対応がつくような「クライオスタット中で冷却された限流器」を示すボンチ絵を挿入しました。

2章において、受動型および能動型限流器を2、3例示しました。

議論3 シナリオIとシナリオIIの関連

質問・コメント（赤穂 博司）

限流器の開発に向けては、本来シナリオIとシナリオIIとは、連続的に関連すると理解していますが、図4と図5に分けて記述することにより、シナリオIとIIの関連性が不明確になっているように感じました。MOD成膜による高 T_c 化と高 J_c 化に成功し、それをコア技術として、大面積化や積層大面積化へと研究開発を進めていくことで限流器の開発を飛躍的に展開しているのがこの論文のシナリオと主旨かと思っています。さらに、低 R_s 化・パターンニングにより、マイクロデバイス応用へ発展し、また、将来的には、長尺・厚膜化により、線材応用に展開できるとのシナリオでしょうか。限流器開発を中心として、シナリオを提示し、マイクロデバイス応用や線材応用をその他の展開として記述するシナリオは如何でしょうか？

回答（熊谷 俊弥、真部 高明）

この論文全体のシナリオと主旨についてはご指摘のとおりです。しかしながら時系列的に述べますと、シナリオI設定の段階（高温超電導体の発見当時）では限流器という出口は明確になっておらず、各種電力機器応用は「夢」であり、その実現のために「高 J_c 化」を必須目標として研究開発を進めたのが実状です。その後高 J_c 化を達成し、限流器を含む各種デバイスが具体的ターゲットとして明確になった段階でそれぞれの製品ニーズに対応する目標とそれを達成するシナ

リオを設定して研究開発を進めました。この論文では限流器応用を中心としていますが、マイクロ波デバイスへの応用はある程度同時進行させてきた経緯があります。これらをふまえて、シナリオIとシナリオIIと分けて図示して記述しています。なお、図5でI-2の「エビ成膜成功、高 J_c 実現」がシナリオIIにおけるコア技術であることを明示しました。

議論4 塗布熱分解法の特長

質問・コメント（小林 哲彦）

塗布熱分解法の特長の一つとして、「④焼成時に排出されるのは水蒸気と二酸化炭素であるので環境負荷が低い」と記述されていますが、条件によればVOCや不完全燃焼ガスの発生もあるのではないのでしょうか？

回答（真部 高明）

ご指摘のように、不完全燃焼時にはVOC等のガスも発生します。また、この項目は気相法に対する塗布熱分解法の特長ではなく、トリフルオロ酢酸塩を原料とする塗布熱分解法（TFA-MOD）に対してこの論文で用いたフッ素フリー原料を用いた同法（FF-MOD）の特長を記述したものです。読者にもこれらがわかるように④を追記修正しました。

議論5 赤外線急加熱プロセス

質問・コメント（赤穂 博司）

技術的な質問です。5章に記述されていますように、 a 軸配向成長を抑制し、 c 軸配向膜を得るため、赤外線加熱式による急加熱プロセスを開発されていますが、基板と膜との熱膨張係数の差により、膜にクラックが生じないのでしょうか？ご教示いただければ幸いです。

回答（真部 高明）

LAO上の厚さ700 nmのYBCO膜は急加熱であってもクラックは生じませんでした。それは格子整合でかつ熱膨張率も近いためであることを記載しました。

なお、熱膨張率差が大きいサファイア上の膜は、成膜後の冷却時にマイクロクラックが入りやすく、YBCOの膜厚が300 nm以下と制限されることを2章に追記しています。

議論6 薄膜の大面積化と低温プロセス

質問・コメント（小林 哲彦）

薄膜の大面積化のため、「膜と基板との界面反応を減らし、配向性を向上させることによって J_c を上げるために低温プロセスを開発した」とありますが、専門外の読者には、「膜と基板との界面反応を減らし」の意味が分かりにくいと感じますので、補足説明が必要です。

回答（真部 高明）

ご指摘の点を含め、前原稿は記述が整理されていませんでしたので、焼成温度が高いとYBCO膜は基板との界面で化学反応を起こす→界面反応を抑制するために低温プロセスを開発→この低温化によって格子整合基板を用いることが可能に→格子整合基板を用いてYBCO膜の配向性向上を試みた」と記述を改めました。

「Synthesiology - 構成学」 発刊の趣旨

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

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかされたままでは、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。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日
 改正 2008年6月18日
 改正 2008年10月24日
 改正 2009年3月23日
 改正 2010年8月5日
 改正 2012年2月16日
 改正 2013年4月17日
 改正 2014年5月9日

1 掲載記事の種類と概要

シンセシオロジーの記事には下記の種類がある。

・研究論文、論説、座談会記事、読者フォーラム

このうち、研究論文、論説は、原則として、投稿された原稿から査読を経て掲載する。座談会記事は編集委員会の企画で記事を作成して掲載する。読者フォーラムは読者により寄稿されたものを編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。いずれの記事も、多様な研究分野・技術分野にまたがる読者が理解できるように書かれたものとする。記事の概要は下記の通り。

①研究論文

成果を社会に活かすことを目的とした研究開発の進め方とその基となる考え方（これをシナリオと呼ぶ）、その結果としての研究成果を、実際に遂行された研究開発に関する自らの経験や分析に基づき、論理立てて記述した論文。シナリオやその要素構成（選択・統合）についての著者の独自性を論文としての要件とするが、研究成果が既に社会に活かされていることは要件とはしない。投稿された原稿は複数名の査読者による査読を行い、査読者との議論を基に著者が最終原稿を作成する。なお、編集委員会の判断により査読者と著者とで直接面談（電話・メール等を含む）で意見交換を行う場合がある。

②論説

研究開発の成果を社会に活かすあるいは社会に広めるための、考えや主張あるいは動向・分析などを記述した記事。主張の独自性は要件としないが、既公表の記事と同一あるいは類似のものではないものとする。投稿された原稿は編集委員による内容の確認を行い、必要な修正点等があればそれを著者に伝え、著者はそれに基づいて最終原稿を作成する。

③座談会記事

編集委員会が企画した座談会あるいは対談等を記事にしたもの。座談会参加者の発言や討論を元に原稿を書き起したもので、必要に応じて、座談会後に発言を補足するための追記等を行うことがある。

④読者フォーラム

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本誌の主旨に合致した読者への有益な情報提供などを掲載した記事とする。1,200文字以内で自由書式とする。編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

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。

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(Wordファイル)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: T. KANAYAMA

Senior Executive Editor: M. SETO, N. YUMOTO

Executive Editors: C. KURIMOTO, T. SHIMIZU, M. TANAKA, S. TOGASHI, H. HATORI, M. AKAMATSU, F. UEDA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), A. OKADA (Sumitomo Chemical Company, Limited), N. KOBAYASHI (Waseda University), T. MAENO (Keio University), M. YAMAZAKI, M. TAKAHASHI

Editors: H. AKOH, S. ABE, S. ICHIMURA (Nagoya University), K. UEDA (Hyogo Prefectural Institute of Technology), A. ONO, A. KAGEYAMA, S. KANEMARU, T. KUBO, N. KOHTAKE (Keio University), K. SAKAUE, H. TAO, M. TAKESHITA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. TATEISHI, H. TAYA (J-Space Inc.), K. CHIBA, E. TSUKUDA, H. NAKASHIMA (Future University Hakodate), S. NIKI, Y. HASEGAWA, Y. BABA (The University of Tokyo), T. MATSUI, Y. MITSUISHI, N. MURAYAMA, M. MOCHIMARU, Y. YANO, A. YABE, H. YOSHIKAWA (Japan Science and Technology Agency)

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

Revised May 9, 2014

1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

- Research papers, commentaries, roundtable talks, and readers’ forums

Of these, the submitted manuscripts of research papers and commentaries undergo review processes before publication. The roundtable talks are organized, prepared, and published by the Editorial Board. The readers’ forums carry writings submitted by the readers, and the articles are published after the Editorial Board reviews and approves. All articles must be written so they can be readily understood by the readers from diverse research fields and technological backgrounds. The explanations of the article types are as follows.

① Research papers

A research paper rationally describes the concept and the design of R&D (this is called the scenario), whose objective is to utilize the research results in society, as well as the processes and the research results, based on the author’s experiences and analyses of the R&D that was actually conducted. Although the paper requires the author’s originality for its scenario and the selection and integration of elemental technologies, whether the research result has been (or is being) already implemented in society at that time is not a requirement for the submission. The submitted manuscript is reviewed by several reviewers, and the author completes the final draft based on the discussions with the reviewers. Views may be exchanged between the reviewers and authors through direct contact (including telephone conversations, e-mails, and others), if the Editorial Board considers such exchange necessary.

② Commentaries

Commentaries describe the thoughts, statements, or trends and analyses on how to utilize or spread the results of R&D to society. Although the originality of the statements is not required, the commentaries should not be the same or similar to any articles published in the past. The submitted manuscripts will be reviewed by the Editorial Board. The authors will be contacted if corrections or revisions are necessary, and the authors complete the final draft based on the Board members’

comments.

③ Roundtable talks

Roundtable talks are articles of the discussions or interviews that are organized by the Editorial Board. The manuscripts are written from the transcripts of statements and discussions of the roundtable participants. Supplementary comments may be added after the roundtable talks, if necessary.

④ Readers’ forums

The readers’ forums include the readers’ comments or thoughts on the articles published in *Synthesiology*, or articles containing information useful to the readers in line with the intent of the journal. The forum articles may be in free format, with 1,200 Japanese characters or less. The Editorial Board will decide whether the articles will be published.

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.

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 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 (Word 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

Synthesiology 第7巻総目次(2014)

第7巻第1号

研究論文

熱物性データの生産と利用の社会システム

- レーザーフラッシュ法による熱拡散率の計測技術・計量標準・標準化・データベース–
 …馬場 哲也、阿子島 めぐみ 1-15
- オープンイノベーションと先端機器共用施設
 –共用施設が実現する協創場とその戦略的活用方策– …秋永 広幸 16-26
- 次世代型下水汚泥焼却炉「過給式流動燃焼システム」の実用化
 –新規下水汚泥焼却炉の開発における産総研の役割– …鈴木 善三、村上 高広、北島 暁雄 27-35
- オンデマンド材料開発を目指した材料設計システム
 –開発現場から生まれた新規な材料設計手法– …稲田 禎一、松尾 徳朗 36-42
- 持続発展可能な大容量・低消費電力の通信ネットワーク実現に向けて
 –ダイナミック光パスネットワークのためのトポロジ検討– …石井 紀代、来見田 淳也、並木 周 43-56

第7巻第2号

研究論文

- 通信の大容量化に対応する「長さ」の国家標準
 –ファイバー型光周波数コムの開発– …稲場 肇、大苗 敦、洪 鋒雷 68-80
- ソーラー水素製造の研究開発
 –独創的な光触媒–電解ハイブリッドシステムの実現を目指して– …佐山 和弘、三石 雄悟 81-92
- モジュール化に基づく高機能暗号の設計
 –実社会への高機能暗号の導入における障壁の低減に向けて–
 …花岡 悟一郎、大畑 幸矢、松田 隆宏、縫田 光司、Nuttapong ATTRAPADUNG 93-104
- 糖鎖プロファイリング技術がもたらすパラダイムシフト
 –フロントル・アフィニティ・クロマトグラフィーからエバネッセント波励起蛍光検出法へ– …平林 淳 105-117
- ボールペン技術による家庭用高精細映像光伝送システム開発
 –安価で簡易な光接続を可能とするボールペン型光インターコネクットの提案–
 …当麻 哲哉、瀧塚 博志、鳥飼 俊敬、鈴木 等、小木 哲朗、小池 康博 118-128

第7巻第3号

研究論文

放射線による生体障害を軽減する高安定化細胞増殖因子の開発 -放射線防護剤の創薬に向けた基礎研究機関における研究開発-	・・・今村 亨	140-153
自己抗体解析のためのプロテインアレイ開発 -生体防御系を利用した総合的疾患診断に向けて-	・・・川上 和孝、五島 直樹	154-162
内部熱交換式蒸留塔 (HIDiC) の技術開発 -バイオエタノール蒸留のベンチプラントに至る実証研究-	・・・片岡 邦夫、野田 秀夫	163-178
漏えいに強いパスワード認証とその応用 -短いパスワードを許容しながら情報漏えい耐性を実現-	・・・古原 和邦、辛 星漢	179-189
低環境負荷表面処理技術の開発 -有機フッ素化合物および凹凸加工を用いない新規はつ液処理の実用化を目指して-	・・・穂積 篤、浦田 千尋	190-198

第7巻第4号

研究論文

人工物工学研究の新しい展開 -個のモデリング・社会技術化へ-	・・・太田 順、西野 成昭、原 辰徳、藤田 豊久	211-219
日常的に利用可能な疲労計測システムの開発 -フリッカー疲労検査をPCやスマートフォンを使って生活環境で実現-	・・・岩木 直、原田 暢善	220-227
メタンハイドレート開発に係る地層特性評価技術の開発 -現場への適用を目指して-	・・・天満 則夫	228-237
4次元放射線治療システムに関する国際標準化 -照射効果の向上と安全性の確保-	・・・平田 雄一、宮本 直樹、清水 森人、吉田 光宏、平本 和夫、 市川 芳明、金子 周史、篠川 毅、平岡 真寛、白土 博樹	238-246
塗布熱分解法による超電導膜の合成 -限流器等への研究展開-	・・・真部 高明、相馬 貢、山口 巖、松井 浩明、土屋 哲男、熊谷 俊弥	247-257

編集後記

5報の研究論文を掲載した第7巻第4号をお届けします。まずは、前号から始めた冒頭にある編集委員会がまとめた「論文のポイント」をご覧ください。筆者が編集後記を書き始めたその時、喜ばしいニュースが飛び込んできました。白色光源を可能にした青色発光ダイオードの発明と製品化に対して日本人3名がノーベル物理学賞を受賞する快挙です。窒化ガリウムの結晶化などの科学的知見が集積して種々の技術要素となり、それらが様々なステークホルダーの熱意と執念、意思決定を経て統合され、社会が認める価値となったものです。まさに本誌が求める構成型研究の大成果と言えます。

Synthesiology誌の大きな特徴は、そのような新たな社会価値を目標に定めて技術要素を多様なプロセスで統合していく過程がストーリー性をもって論じられることです。そのため、査読者は多様な判断基準の下、論文構成が社会価値を実現するためのシナリオとなっているかなど、社会に代わって判断する役割を演じており、その責任は非常に重大です。筆者が特に注目するのは、前号の編集幹事も少し触れましたが、論文の最後にある「査読者との議論」です。学術論文誌で査読者名やピアレビューにおけるコメントが公開されることは原則ありません。しかし、本誌ではあえて査読者名と議論のやり

とりを公開することで、場合によっては読者がそこで論理の本質を見いだすことができます。議論のやりとりは複数回行われるのが実態であり、最終的に査読者は著者の了解の下、論文に不可欠な質問、コメント、著者からの回答をできるだけ忠実にまとめます。

本号の人工物工学研究に関する論文では、査読者は論理展開における執筆者の視点の変更を進言し、日常的に利用可能な疲労計測システムに関する論文では、査読者自らが不明な点を遠慮無く指摘し、是正を求めています。メタンハイドレート開発および塗布熱分解法による超電導膜の合成に関する論文では、査読者は一般の読者に対して配慮した緒言の改訂、具体的には技術の国内外の背景や最新技術の分類に関する追記を促しています。4次元放射線治療システムに関する論文では、著者らの当初の訴求を超える論点を指摘し、著者らが共鳴するケースを見ることができます。こうして、透明性が高められた「査読者との議論」を先に読むことでも、本誌の醍醐味が味わえると信じます。「査読者との議論」の導入の経緯や意義については、論説と編集後記（第1巻第1号）、および座談会（第5巻第3号）において詳しく紹介されています。改めて、ご参照いただければ幸いです。

（編集幹事 清水 敏美）

Synthesiology 第7巻第4号 2014年11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：金山 敏彦

副委員長：瀬戸 政宏、湯元 昇

幹事（編集及び査読）：栗本 史雄、清水 敏美、田中 充、富樫 茂子、羽鳥 浩章

幹事（普及）：赤松 幹之、植田 文雄（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、岡田 明彦（住友化学株式会社）、
小林 直人（早稲田大学）、前野 隆司（慶應義塾大学）、山崎 正和

幹事（出版）：高橋 正春

委員：赤穂 博司、阿部 修治、一村 信吾（名古屋大学）、上田 完次（兵庫県立工業技術センター）、小野 晃、景山 晃、金丸 正剛、久保 泰、神武 直彦（慶應義塾大学）、坂上 勝彦、田尾 博明、竹下 満（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、立石 裕、多屋 秀人（株式会社 J-Space）、千葉 光一、佃 栄吉、中島 秀之（公立はこだて未来大学）、仁木 栄、長谷川 裕夫、馬場 靖憲（東京大学）、松井 俊浩、三石 安、村山 宣光、持丸 正明、矢野 雄策、矢部 彰、吉川 弘之（独立行政法人 科学技術振興機構）

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。



Research papers

New research trends in artifactology

—*Modeling of individuals and socialization technology*—

J.OTA, N.NISHINO, T.HARA and T.FUJITA

Mental fatigue measurement as application software on consumer devices

—*Introducing reliable fatigue index to daily life*—

S.IWAKI and N.HARADA

Development of evaluation technologies for sedimentary characteristics

—*Applicability of the technologies to the assessment of methane hydrate sediments*—

N.TENMA

International standardization of four dimensional radiotherapy system

—*Enhancement of effects of irradiation and assurance of safety*—

Y.HIRATA, N.MIYAMOTO, M.SHIMIZU, M.YOSHIDA, K.HIRAMOTO, Y.ICHIKAWA, S.KANEKO, T.SASAGAWA, M.HIRAOKA and H.SHIRATO

Preparation of superconducting films by metal organic deposition

—*Research and development towards a fault current limiter and other electric devices*—

T.MANABE, M.SOHMA, I.YAMAGUCHI, H.MATSUI, T.TSUCHIYA and T.KUMAGAI

Messages from the editorial board

Editorial policy

Instructions for authors