

Synthesiology

座談会

科学・技術・イノベーション時代の新しい研究方法
— *Synthesiology* 発刊5周年記念座談会 —

研究論文

高効率 SOFCシステムによる分散型発電の実現に向けて

地下水観測による地震予知研究

高齢者でも読める文字サイズはどのように決定できるか

光ファイバ広帯域振動検出システムの開発

シンセシオロジー編集委員会

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

Synthesiology 第6巻第1号(2013.2) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
座談会	
Synthesiology 発刊5周年記念座談会	1-11
科学・技術・イノベーション時代の新しい研究方法 — 基礎的研究における構成的アプローチについて —	
研究論文	
高効率 SOFC システムによる分散型発電の実現に向けて — SOFC システム早期導入に向けた性能評価手法の開発と規格標準化 —	12-23
・ ・ ・ 田中 洋平、門馬 昭彦、根岸 明、加藤 健、高野 清南、野崎 健、嘉藤 徹	
地下水観測による地震予知研究 — 地下水位変化から地殻変動を推定することによる地震予測 —	24-33
・ ・ ・ 小泉 尚嗣	
高齢者でも読める文字サイズはどのように決定できるか — 文字表示のアクセシブルデザイン技術とその標準化 —	34-44
・ ・ ・ 佐川 賢、倉片 憲治	
光ファイバ広帯域振動検出システムの開発 — FBG センサを用いたひずみ・AE 同時計測技術 —	45-54
・ ・ ・ 津田 浩、佐藤 英一、中島 富男、佐藤 明良	
編集委員会より	
編集方針	55-56
投稿規定	57-58
編集後記	65
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Progress towards realizing distributed power generation with highly efficient SOFC systems — Development and standardization of performance evaluation methods targeting early market-entry of SOFC systems —	12
--- Y. TANAKA, A. MOMMA, A. NEGISHI, K. KATO, K. TAKANO, K. NOZAKI and T. KATO	
Earthquake prediction research based on observation of groundwater — Earthquake forecasting based on crustal deformation estimated from groundwater level change —	24
--- N. KOIZUMI	
Estimation of legible font size for elderly people — Accessible design of characters in signs and displays and its standardization —	34
--- K. SAGAWA and K. KURAKATA	
Development of fiber optic broadband vibration-detection system — Simultaneous measurement of both strain and acoustic emission using a fiber Bragg grating sensor —	45
--- H. TSUDA, E. SATO, T. NAKAJIMA and A. SATO	
Messages from the editorial board	59-60
Editorial policy	61-62
Instructions for authors	63-64

Synthesiology 発刊 5 周年記念座談会

科学・技術・イノベーション時代の新しい研究方法

— 基礎的研究における構成的アプローチについて —

製品化あるいは事業化のための研究開発はその目標達成のために必要な要素技術を統合していくアプローチがとられるのに対し、基礎研究は知的好奇心を原動力として進められることが多い。一方、公的資金による研究開発では民間企業としては実施できないような基礎的・基盤的研究を行うことが期待されるとともに、公共の益になる成果を出して社会にイノベーションを起こすことが期待されています。発刊 5 周年を機に関係する有識者の方々にお集まりいただき、こういった期待を持たれている基礎的・基盤的研究をどのように進めるべきか、そして Synthesiology が取り組んできた構成的アプローチの意義やその可能性、さらに今後の科学・技術・イノベーション推進の方向性を議論いただきました。

シンセシオロジー編集委員会



座談会出席者 (五十音順)

有本 建男	科学技術振興機構 社会技術研究開発センター長
安西 祐一郎	日本学術振興会 理事長
桑原 洋	元総合科学技術会議議員
柘植 綾夫	日本工学会 会長
中村 道治	科学技術振興機構 理事長
古川 一夫	新エネルギー・産業技術総合開発機構 理事長
吉川 弘之	科学技術振興機構 研究開発戦略センター長 (産総研最高顧問、Synthesiology 誌編集委員)

司会進行: Synthesiology 編集委員会 (赤松 幹之編集幹事)

赤松 研究開発の成果をいかに社会で使われる形にしていくかという科学技術的知の統合を記述する論文として『Synthesiology』を 2008 年に発刊し、本号で 5 周年を迎えました。まず最初に、吉川先生に Synthesiology が生まれた経緯を振り返っていただけますか。

吉川 工学系の学会等では「シンセシスは論文になるか」という議論が古くから行われていました。「新しい機械ができただけでは論文にならない」という話や、「分析だけでは工学はあり得ない」という意識はあったものの、シンセシスとは一体何かということがわからなかった。ところが、2001 年に私が産総研へ行ってみて、標語的に言えばシンセシスを行っている 3,000 人の研究者集団に巡り合って非常に驚いたのですが、そこでは従来からあるような論文にはなりにくい仕事をしていました。そこで、シンセシスで論文が書けないと苦労している研究者が投稿できる雑誌を作って、これを学会誌として認めてもらおうという、ある意味、現実的

な目標を立てました。つまり、“もの”はできても“もの”を作る方法論は残っておらず、シンセシスは歴史的に人類の継承ができていなかった。それをいわゆる分析型の学会誌のように、のちの人々に残せるようにしようというチャレンジだったわけです。学会誌の名前は、赤松さんが Synthesis (統合・構成) と logy (学) をつなげた Synthesiology を提案してくれました。今は Synthesiology という名前も徐々に認知されてきつつありますが、シンセシスが人類にとっての科学や技術においてどのように寄与し、発展していくのかということはまだ結論が出ておらず、Synthesiology の使命は非常に重要だと考えています。

赤松 “第 1 種基礎研究”の世界と“製品化研究”の世界をつなぐためになすべきことは何かという課題なのですが、こういった基礎的研究による人類的課題達成とイノベーションの促進のためには公的な研究開発資金の投入が重要な役割を果たしています。ファンディング

エージェンシーや企業のご経験のある方々においでいただいていますので、これまでの方法論だけでいいのか、そこに構成的アプローチを導入することが有効なのかについてご議論いただきたいと思えます。

研究開発プロジェクトの計画や事前評価において、構成学的な考え方が役立つのかということについていかがでしょうか。

構成的アプローチは有用か

柘植 シンセシスが学術論文となるかという議論の前に、イノベーションとは社会的な価値や経済的な価値に結びつくものであり、構成学を“実用”と捉えてお話しします。1995年から2010年までのGDPを見ると、世界が2倍伸びているのに対して日本は横ばい、明らかに世界の持続的発展に取り残されている。これにはいろいろな原因があると思うのですが、国を挙げた科学技術投資がイノベーションに結びついていない。では、どのようなイノベーションをおこそうとしているのか。これは20世紀のキャッチアップ型ではなく、とんでもなく難しいフロントランナー型のイノベーションをおこそうとしているわけですし、個別先端科学技術創造能力と、それをインテグレーションして社会経済的な価値にしていく統合化能力、その両方の能力と人材が不可欠であり、構成学のいわゆる社会的な活用としては「統合化能力」とその「人材」と私はとらえています。

産業はイノベーションと人材育成を、国研は研究開発、人材育成・教育を、そして大学は教育と基礎研究を担っているのですが、それぞれの参加者が担う価値創造とそれらのフローやインターフェースを明確化しコミットメントすることが必要です。これが欠けているために、科学技術がイノベーションまでいかないというメカニズムに陥っているのではないかと。そこに構成的アプローチの役割の重要性があると考えています。

赤松 具体的にインターフェースをどのようにイメー



柘植 綾夫氏

ジされていますか。

柘植 研究を担う参加者とコーディネーターの2つあると思いますが、今、国がリサーチ・アドミニストレータという職種を育てようとしています。コーディネーターやリサーチ・アドミニストレータは論文を書けないかもしれないけれども、社会的・経済的な価値に対する貢献はあります。そういう職種も社会的に評価すべきです。

桑原 私も「構成的アプローチが有用である」と申し上げたいと思いますが、二つに分けて考えたい。一つは、研究開発のプロジェクトがシステム開発であれば単独の技術で成り立つわけではなく、「複数の技術をどういう順番でどう組み合わせ、誰がどうやって制御して最終の形にまで持ち込むか」ということですから、必然的に目的、プロセスを明確化し、管理して最終的なところへ中間評価を含めて持っていかうという中で構成的に考えることは必須です。企業でも未熟なところがありますが、これがちゃんとできているものは成功の確率が非常に高い。もう一つは、研究開発プロジェクトが個別の科学技術開発であれば、目指す目的がおぼろげであっても、研究の位置付け、推進方法、必要となる人材の明確化のために構成的アプローチの有用性は高い。この2つの分野での構成的アプローチは、たぶん一つになっていくのではなからうか。検討の過程でお互いを含めて全体を俯瞰することが、漏れがなく正しい方向に行くのではないかと期待を持っています。

敢えて付け加えると、私は基礎研究を自由発想に基づく基礎研究とイノベーションを実現するための基礎研究の二つに分けたい。前者についてはあまり強いシナリオは危険だと思いますが、後者については目的や構成方法、中間評価での選択、必要となる他の技術の予測術、最後にこれをどうやってイノベーションを担う人たちに渡していくのかという明確なシナリオを作ってやるべきだと思うのです。

赤松 NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の研究はイノベーションを意識して目的を設定し、それに必要な開発をする性質が強いのではないのでしょうか。

古川 私は Synthesiology について勉強して本当に素晴らしいと思ったのですが、なぜこういうことをあまり意識しないで来られたのか顧みますと、この40年のほ

とんどが海外を追いかけるといふフェーズでしたので、その場合には絶対にシンセシスよりアナリシスなのです。追いついて、追い越そうとしたときにシンセシスということが極めて重要になる。目標、目的をいかに作り上げるかということが重要だと再確認すると同時に、こういう言葉が逆に基礎研究の皆さま方から出てきていたというのがちょっとショックでしたね。基礎研究、応用研究はJSPS（独立行政法人日本学術振興会）やJST（独立行政法人科学技術振興機構）にやっていただき、その果実を産業として大きくしていくことがNEDOに与えられた課題だと思っております、その意味からもSynthesiologyというコンセプトはNEDOにとっても極めて重要ですし、私どもシステム側からこういうことを考えなければいけないということを改めて感じた次第です。

研究論文の最後の1行と目標をつなぐツール

中村 JSTは自由な知的好奇心に基づく基礎研究をされる大学の研究者と産業界の中間から少し大学寄りに位置していますが、死の谷を克服して社会的・経済的価値に結びつけるということで、“バーチャル・ネットワーク型研究所”を標榜しております。期間を決めて世界あるいは日本で最も優れた研究者を集めて一つの研究所をバーチャルに作っていくという意味ですが、国の言葉で言うところの「戦略目標に合った」基礎研究をすることと、そこから出てくる成果を産業へ一貫してつなげ、運営する。企業につなげると新たな課題が発生しますので、それをまた目的志向の基礎研究に戻すことをスパイラルアップ的に回しています。戦略目標は、CRDS（独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター）の戦略プロポーザルという形で科学技術イノベーションの方向性や取り組む課題を検討し、それをもとに文部科学省で決めるわけですが、この出発点を間違えると5年後、10年後に大きな影響を及ぼします。

戦略目標を研究領域に落とすところからJSTの事業



中村 道治氏

が実際にスタートするのですが、「うまくいくとこういう社会的・経済的価値に結びつく」というより、世界の動きを見ながら、あるいは「これが大事だ」と先生方や学会が言っているからやっているという感じもあり、まさにシナリオ作りをしなければいけない。基礎研究は非常に不確かな、しかもかなり先の話になりますが、みんなで努力してスタートラインのシナリオあるいはビジョンを持って、それを実際に進めていきながら改善していこうとしています。シナリオを作るあるいは研究プロジェクトを立ち上げ設計する方法論として、構成学（Synthesiology）がもっと我々が使えるツールになれば、あるいは共通のツールとしてもう少し広く使えるようになれば非常にありがたいです。

赤松 JSTのグラントリクエストに「提案者はシナリオを書く」というレベルにまで落とそうということでしょうか。

中村 今はそうなっていないです。「将来こういうことが解明できて、人類の健康に役立ちます」と必ず最後に1行書いてあるのですが、それは実際の研究とはほど遠く、最後の1行だけが社会の言葉で書いてある。そこをつなぐ努力が我々は今できていない。基礎研究といえども、そこをいつも考えながらやったほうがいいと思うのですが、現状はそのツールがないということです。

ファンディングとイノベーション

赤松 研究開発プロジェクトの中間評価や事後評価の段階に話題を移したいと思います。有本さんは多くのプロジェクトをマネジメントされておられます。

有本 ファンディングのプログラム、プログラムの下で走る研究課題であるプロジェクトのそれぞれが、日本全体のイノベーション・エコシステムの中でどの位置にあるのか。次に、イノベーションの長い時間軸の中で社会や市場のどこに向かっているのか、今どこにあるのか、そのポジションをPD（プログラム・ディレクター）、PO（プログラム・オフィサー）がスタートの段階からステージに応じて共有しているかということ、甚だ心もとないところがあります。ただ、ブルースカイ型とミッションオリエンティッドな研究とでは評価やマネジメントの仕方が明らかに違うわけですが、ブルースカイ型でマネジメント側が介入的にやるとおかしくなるし拒否もされますが、ミッションを帯び出したらしっかりマネジメントすべきと考えています。私がRISTEX（独立行政法人

科学技術振興機構社会技術研究開発センター)を引き受けたとき、設立当初の目標と異なって論文生産のファンディングになっていたの、これは実験だと思って、社会実装への重点シフトを常に考えながら領域総括(PO)を選ぶ、公募条件の工夫等を進めて来ました。社会実装を意識的に掲げ継続していくと、申請する側も研究体制づくりや成果の社会実験の仕方あるいは研究組織をどう構成するかを旧来型でなく考えます。まさしく構成学の一つであると思えます。

赤松 あるところまで介入すると、そこで行われている研究開発がプロセスの中で適切だったかどうかを評価しなければいけません、プロジェクトはいったん始まるとなかなかそこはいじれない世界になっていませんか。

有本 おっしゃるとおりですが、RISTEXではPI(研究主宰者)や研究体制を何件かプロジェクトの途中で変えています。プロジェクトごとの個々の研究成果、評価だけではなく、一層上のプロジェクトが集まったプログラムのレベルで、マネジメントの方法等について構成的・俯瞰的な分析をし、RISTEX全体の運営改善に反映させる。こうした相互作用が非常に大事だと思っています。

赤松 JSPSはどちらかというと基礎的なファンディングをしておられますね。

安西 目的志向の研究以外に、知的探求から出発したアプローチがいろいろなところに芽を出していて、それを拾うことがイノベーションに大きな役割を果たしていると思えます。あるところを選択してテーマを決めても、それ以外の畑に芽が出ているかもしれない。フィールドは無限にあり、科学技術の可能性は広い。その広いところの芽を常時育てることが、特に日本のような「追

いつけ追い越せ」の時代を過ぎて、自分でオリジナリティを持ってイノベーションを進めていかなければいけない国にとっては極めて大切で、今までの話につなげれば、JSPSは無限の畑で芽をはぐくむ、それも自分から芽が育っていくように施肥するファンディングの機関だと考えるべきではないか。それは往々にしてマーケットから遠いため地味なのですが、科学技術のテーマの広さや、これからのイノベーションが全く新しいところから芽が出るかもしれないという、シンセシスのおもしろさにはそういう面がありますし、そういうシンセシスから出てくるイノベーションを支えるためには、私は広い畑を地道に耕し、芽を出させる仕組みが安定的・強力に必要なだと思っています。

もう一つ申し上げます、「シンセシス」と言うとイノベーションのプロジェクトマネジメントに近い話に聞こえますが、私はイノベーションは人から生まれる面が強いと思います。開発者、技術者、研究者が信念を持って、可能性を伸ばしながら新しい芽を生み出す、それがなぜ、どのようにしてできるのかを解明するのが「シンセシスの科学」の方向だと思えます。

赤松 これが芽になっているのか、蕾になっているのかという判断はどのように考えたらいいでしょうか。

安西 評価はファンディングの目的に依存すべきだと思うのです。例えば、JSPSが扱っている奨励研究や若手研究者向けの少額のファンディングで、厳密に2年間で結果が出たかどうかを評価することには私は賛成ではなく、長期的にその人が研究者として育っていくかどうかを評価しないといけないと思いますが、反対に多額のもの厳しく評価しないといけない。

ただ、これは政府のR&D資金の評価の問題と言えらるかもしれませんが、どちらかというと申請時点の評価が厳しくて、研究成果の評価については目線が次の予算を取るほうに移っているのではないかと。しかし、そこが曖昧だと、芽を出す研究と目的を持った研究が同じように評価されてしまう。基礎研究については縦断的に見ながら長期的な評価を行い、目的志向の研究については研究期間が終わった時に、産業界や違うセクターから見てもきちんと成果が出ているかどうかを評価するという、メリハリをつけることが必要だと思えます。

中村 JSTも分野やフェーズによって違うマネジメントをしないといけないと考えています。特にフェーズについては、初めに多めの研究テーマを設定して、2年目



安西 祐一郎氏

くらいに大体見えてきますので、そこで3分の1くらい落とすことをJSTも始めています。その時の落とす理由は、「研究としては立派なものが出ているけれども目的に合わない」とはっきり申し上げた上でプロジェクトを組み直しています。

赤松 ステージゲートで「目的に合わない」と先生方におっしゃったとき、どのような反応がありますか。

中村 これは、大変な反応をいただいています（笑）。先生方はいろいろところで研究できる能力のある方ばかりですので問題はないのですが、学生やポストドクがかなり入ってきてくれていますので、1年くらいソフトランディングして止めるとか、その辺は少し苦労し、工夫しながらやっています。ただ、我々はある目的に対しての基礎研究をしているので、そこは今まで以上に明確にするべきではないかという議論をJST内では随分やっています。

赤松 もう少し目的が厳しいというか、もっとスペシフィックになっているNEDOはいかがでしょう。

古川 NEDOは経済産業省の独立行政法人ですので、経済産業省の政策に基づいた定性的な方向性はありますが、それをいかに定量的な目的・目標に刷り込んでいくかということが重要だと思っております。我々も幅広い範囲や金額の案件をいろいろやってまいりましたが、今はかなり絞り込んで、グリーン・イノベーションやライフ・イノベーション等、大きな方向でのナショナルプロジェクトにフォーカスしています。そして、中間評価、事後評価、追跡評価を行っていますが、当初の目標立案の曖昧さが出てきてしまうこともあり、この評価は重要だと痛感しています。

構成学的なアプローチという視点でお話ししますと、Synthesiologyの「構成学で求める論文の4つの要素」



古川 一夫 氏

で書かれている「開発研究目標と社会的な価値」「研究成果の社会への導入のシナリオ」「要素技術の選択と統合」「研究結果の評価と将来展望」は非常に重要で、もちろんNEDOとしても評価軸を持っていますけれども、こういうアプローチが最初の基礎研究から行われて、そこが我々に引き継がれてくれば、悪夢の時代、死の谷、ダーウィンの海を渡っていけるのではないかと。

いずれにしても、アカウントビリティやマネジメントの問題における中間評価、最終評価については、従来の流れに乗ってやっていくということではなく、その目標に対してきちんと到達・達成できているか、また次の方向性が正しいのかということをかなり厳しくやっているところです。

Synthesiologyの社会的使命

吉川 基本的な研究プロジェクトの在り方の話だろうと思います。その中で特にキュリオシティドリブンでない研究の難しさが次第に浮き彫りになってくるのですが、キュリオシティドリブンにはシナリオを作るという意思はないわけです。ニュートンの『自然哲学の数学的諸原理』ではいわゆる3法則の仮説が書いてあって、それに対して500ページの分析があって、この仮説が正しかったということを証明している。ところが、Synthesiologyは「なぜニュートンは3法則を導いたか」という論文なのです。ある種の仮説を立てるのは一種のシナリオだと思うけれども、一般の分析研究はなぜこういう仮説を立てたかについては一切問わず、おもしろいことが自然に起こって、こうではないかという仮説を出して、それを実証すると大論文になる。目的のある研究はその目的に合ったシナリオを作らなければいけないので、Synthesiologyはそこを評価しようと目的の内容が詳しく書かれている。しかし、こんなことは他の論文にはなく、中村さんがおっしゃったように最後の1行に書かれている。その最後の1行をとことん突き詰め、最後の1行を実現するにはあなたの方法でいいのかということまで問う。目的研究とは本来そうあるべきなのではなかろうか、という問題提起がこの論文にはあるのです。

柘植 吉川先生の課題に対して直接の答えではないのですが、Synthesiologyの発想が学術としても価値があるのではないかとということと今日の話題であります科学・技術・イノベーション時代を重ねますと、もう一つSynthesiologyの社会的な使命があるのではないかと。Synthesiologyが生まれたきっかけは、まさにこれが知りたいという意味のキュリオシティドリブンの基礎研究

と、そこから始まる社会が求めているものに対して役に立つかもしれないという仮説のもとでの一種のキュリオシティドリブンと言えるかもしれないと私は思っています。独自シーズを活かした目的基礎研究や分野融合による新たな社会価値創成研究としての Synthesiology の役目があると思います。一方、社会から見ると、それだけでは社会的価値にまで結びつかないので、市場価値・社会的価値にまで持っていく全体のプロセスをアーキテクチャーとして設計し、それを実行するエンジン役として引っ張ってくれる Synthesiology、この2つの課題に取り組まないといけないのではないのでしょうか。

吉川 Synthesiology ではイノベーションをする人に渡せるところまでやろうと言っているので、具体的なイノベーションの担い手や、それが社会に対してどういうインパクトがあるかということについて十分検討しなければ論文になりません。ややラジカルに言えば、出発点はキュリオシティなのです。「天体はなぜ動いているのか」と「明日の地球が滅びてしまうのではないか」、これはどちらもキュリオシティです。天体については説明できれば「良かった」となる。地球がどうなるかについては「大変だ」ということになって、すぐ行動に移り、それが具体的なイノベーションにまでつながっていく。キュリオシティによってその後続く人間の行動が非常に違うわけです。「それではどうしようか」につながる研究という意味では、問題を明らかにしただけでは完結しない。応用研究も、応用の対象を研究者が発見することで始まるのであるから、人間の根源的なキュリオシティから出てくるものばかりなのではないかということを行っているのです。

赤松 キュリオシティドリブンとシナリオ型の仮説、同じような仮説検証だけれども思考の仕方が違うのではないかという問いかけに対していかがでしょうか。

安西 抽象的な言い方になりますが、「ここでこういうことをやるとこういうことが起こるのではないか」という因果関係ですね。実際やってみて起こった、あるいは起こらなかったというのは、とにかくやってみようというトライアル&エラーのアプローチで、それに対して、結果がわかって良かった、反対にこうなると困るというのは、ある意味、因果関係の表裏と見ることができ、これを両側からやっているのだと思えば、両方がシンセシスに関与していることになる。

桑原 吉川先生に質問があるのですが、Synthesiology そのものが論文の中で単独の価値を持つべきものか、あるいは論文のわかりやすさ、起源も含めて明確にするために Synthesiology 的に書くべきであると言われておられるのか。

吉川 これはチャレンジングな話なのですが、前者です。人間の知恵は断片的な科学研究が積み重なって巨大な科学知識になったわけですが、ものづくりは決して巨大な知識になっていない。ものづくりが消えてしまったら社会的にもものづくりがなくなってしまう。科学は消えなくてもシンセシスは消える、人類はものづくりを通して行われた貴重な思考を記録することができず、大損失をしているのではないか。その結果の一つが、作ってはいけないものを事前に認識できず環境を壊している結果を招いているのだから、「ものを作るとこうなるぞ」という基礎的な知識を人間は身につけなければいけないのではないかというのが私の基本動機なのです。

桑原 その時に Synthesiology はどう役立っているのでしょうか。

吉川 “もの”を作る基本原理を次々に明らかにしていくということです。ある材料を作る、システムを作る、社会構造を作るということは、みんな「作る」です。それらを積み重ねていくと、次に何か新しい「作る」をしたとき、過去の経験が生かされて、こういうことをやったら地球にとって良いとか悪いということを知ることがわかってくる。今は新しく作ってみて、「ああ、駄目だった」ということを依然として繰り返しているのです。

桑原 目的を持ってプロジェクトマネジメント的な完成まで持っていく「ものの考え方」もいろいろあると思うのですが、それ自身が論文対象になるということですか。

吉川 “もの”を作った人は、1つ論文を書いていいと思うのです。職人が「技能を盗む」と言うけれども、ああいう方法しかないと言われていたわけでしょう。その人がどうやって作ったかという記録が残っていないから、次に作る人が作り方について学べない。

桑原 平たく言うと、あらゆる研究はシンセシスを記述すべきであるか？

吉川 “もの”を作った人が、どこでうまくいき、どこがまずかったかを記述すればするほど蓄積され、人類は賢くなっていくだろう。今は結果として“もの”しか残っていませんが、“もの”を作った過程も客観的に記述しようという提案が Synthesiology です。

桑原 それは非常に貴重な、残せる事実ですね。

有本 小林直人さんを中心に Synthesiology の論文 70 編くらい蓄積されたものをアウフヘーベン型、ブレークスルー型、戦略的選択型の 3 つに分けて構造化されましたが、あれは非常に勉強になります。ファンディングのマネジメントの仕方や、どうやってシナリオを設計し具体化していくかという思考の枠組みを作るときに役立ついいものだと思います。今後もぜひ続けていただきたい。

中村 世の中に価値を生み出すという意味では、すべて構成的なアプローチをとってきていると思うのです。例えば、企業の研究報告の中には隘路となった主要事項が書かれているのではないかと思います。そういうものはなかなか外には出てこない。これらが蓄積されて、そこから何を学べるかというふうになってくるとすごく役立つのではないかと思います。

吉川 ちゃんと書いて公開してくれると人類として効率がいいですね。

柘植 経済的に社内の財産だからということはあるでしょうけれども、今の学術界の評価関数ではそれをまともにも評価されないというメカニズムがあることも一つの原因ではないでしょうか。そういう意味で、この Synthesiology を始められた意義は非常に大きいです。

イノベーションをおこせる人材

赤松 人材育成が重要になってくると思うのですが、いかがでしょうか。

柘植 構成的アプローチの役割を担う人材の育成の少し上位の課題として、科学技術創造立国や将来を担う科学技術人材の育成において一番大きな問題は、どんな人材を育てるのか、あるいは自分はどんな人材になりたいのか、育てるほうも育てられるほうも見えていない。教えるほうも、あるいは育つ学生あるいは子どもたちも「どんな人間が社会を支えているか」ということをもっ

と早い段階から各教育レベルで見えるようにしていくことが大切です。そうすると、自分はこんなふうになりたいというイメージを持って勉強できるのではないのでしょうか。

科学技術で日本が生きていくなら、少なくとも 4 つのタイプの人材カテゴリーが必須だと思います。まず、最先端科学技術を担う type-D (Differentiator) ですが、これには 2 つあって、純粋のキュリオシティドリブンからなるケースと社会的な目的があるケースです。2 つ目は、持っていなければ必ず負けてしまう技術を生み出す type-E (Enabler Technologies)、3 つ目は幅広い基礎技術と基盤技術・技能を有する type-B (Base)、そして 4 つ目が type-D、E、B を統合し、社会経済的な価値を生み出す type- Σ です。タイプ Σ 型統合能力人材をいかに育てるかという視点が今の科学技術政策や教育政策の中で私は欠けていると思っているのですが、そこを“見える化”し、教育と研究とイノベーション政策と一緒に育てていく。D 型、E 型、B 型で一芸に秀でた人がひょっとしたら Σ 型に育っていくのではないかと思います。

赤松 同感です。私の周りの研究者を見ていると、D 型、E 型、B 型の中でシンセシスに対する感覚のいい人が中にいて、何かの機会にその能力が拡大していくことがあるという印象があります。

桑原 シンセシスはそれ単独で主張があるべき分野であることと、構成的アプローチはそれとは全く別のものだけれども、シンセシスを記述していく上では極めて有益な連結ができる一つ的手段というふうに全体を整理してほしいと思います。

全体の中の一部であるイノベーションについてですが、イノベーションをおこそうと思ったら構成的なアプローチをとらなければいけない、これは明々白々です。ただ、「イノベーションとは何か」という定義が曖昧に



桑原 洋氏

なっている気がします。辞書や客観的に言われていることから考えると「従来の壁を破って、全く新しいものに到達すること」であり、従来のものの改造や改良ではなく、「イノベーション」という言葉そのものが社会への出口を非常に意識していると理解すべきです。「従来の壁を破って」となると、創造的人間や有能な人が必要です。そういう人たちの教育と、イノベーションに積極的に参画してくれる人の教育を分けて考えるべきでしょう。前者に対して私はあまり経験を持っていませんが、メーカーは「これだ」と思う人にいろいろと経験させ、失敗もさせ、それで育て上げていくという選択と実践のプロセスです。もっといい教育法があつてしかるべきだと思ふけれども、まだ思いつきません。もう一つの積極的にイノベーションに参画する人には、イノベーションはどういうものかを正確に教えてほしい。私の理解では、研究成果だけでできるものではなく、これを担う母体である国や企業が必要な投資を積極的に行い、投資のリターンの確実性をより大きくするように計画し、社会の受容性を考え、実現できるようにする。それには規制緩和や政府のインセンティブな策も必要でしょう。また、参画する人は部分的に参画していくわけですから、イノベーションをよくわかっている人たちが全力を挙げて協力して初めてできる。この人たちの育成は具体的にできると思いますので、教育として一つの形を作れるといい。

余談になりますが、日本でイノベーションをおこそうと今言っていますが、何個おこすのかということの設定ができていないのではないかと。産業を含めた国レベルで考えると、経済の解決のために大きなものを考えないといけない。選択が絶対必要ですし、国としてそういうことを考え、設定するメカニズムが必要ですね。

赤松 大学でのイノベーション人材育成を考えたとき、どのようなアプローチがありますか。

安西 イノベティブなプロジェクトマネージャーを育てていかないと日本の将来はないと考え、慶應義塾大学では理工学部システムデザイン工学科を立ち上げ、独立大学院としてシステムデザイン・マネジメント研究科を作りました。研究科のほうでもドクターが出始めたところですが、半分以上が実務経験のある学生です。今申し上げたように、イノベティブなプロジェクトマネージャーを養成するために、システムデザイン能力、システムマネジメント能力、システム思考能力、コミュニケーション能力の育成が目的になっています。イノ

ベーションをおこすようなマインドにさせる学習の場を作るということが肝心です。新しいことを発想し、チームで仕事ができ、チームのリーダーになれる、そういう人材養成を念頭に置いて詳細なデザインを描き、プロジェクトを通して学べる実践的なカリキュラムを作っています。文理融合のチームを作り、企業でイノベーションをおこした教授たちがダイレクトに教える。日本の現状を考えると議論だけしては間に合わないの、人材育成の実践をしています。

赤松 研究科くらいになるとマネジメントの訓練をすることは可能だと思うのですが、もっと早くからそういう感覚を身につけられないかというお話がありました。

安西 高等学校の学力中間層の勉強時間がこの15年で半分に減り、大学生については1週間の勉強時間が5時間以下が70%近くを占めている。それは学生が悪いのではなくて教育方法が悪い。一斉授業で、教壇から教員が一方的に話をし、期末試験では覚えたことを書けば大体単位が取れるという育ち方をしてくる、大学院に行って、ポストドクになって、あるいは企業に行きなり「クリエイティブになれ」「イノベティブになれ」と言われて、できるわけがない。高校までに、合理的な思考の基本を身につけなければいけない。もちろん基礎学力も必要だということで、その二本立てで進めるという議論が中央教育審議会の高大接続特別部会で始まっています。これは非常に大事なことで、日本全体が「言われたことはできるが、新しいことに勇気を持って挑戦しない」とよく言われますが、そこを解決していこうというものです。これこそ小さい時からやらなければいけない教育という空気は盛り上がってきています。これができるかどうかは日本の将来にかかわる。

有本 大学の修士課程やドクター、ポストドクと話していると、自分のやっていることが大きな学問体系の中



有本 建男 氏

で、あるいは社会の中でどこにあるのか、関係はどうかということが十分認識できていないのではないかと不安を感じることがしばしばあります。一方、ある大学の経営協議会の場で、学生から「先生は一方的に講義するだけでこの授業はどのような位置付けなのか教えてくれない」と言われて、若い人たちも問題意識や危機感を持っていることがわかって感激したことがあります。

今、社会技術センターでキーワードにしようと思っているのは「踏み出す研究者」「踏み出すマネージャー」、分野・組織を超えてつなぐ人材。対語的には「こもる研究者」「こもるマネージャー」。しかし危険なのは「踏み荒らす研究者」「踏み荒らすマネージャー」もいる(笑)。最終的にはアナリシスとシンセシスということで、アナリシスは学問の伝統であり大事なことはもちろんですが、シンセシスあるいはデザインやシステムも大事なのです。去年、「世界化学年」の特集で、ネチャー誌が「化学は今後どのような方向にいくのか」という特集をして、「化学はアナリシスもあるけれど、歴史的にシンセシスが重要で来たはずではないか。これが今から21世紀の化学が他の分野をリードしていく思考の枠組みや方法論になるのではないかとまとめていましたが、シンセシスの重要性はいろんな分野で認識されてきていると思います。

もう一つ、大きなイノベーションをおこそうとすると、理工系だけではなく社会科学系の知識や人材も動員しないとイケない。経済学では「ポリシーデザインにはあまり関与したくない」と言う人たちも多勢いますが、私はそこが一番大事なところだと思うのです。科研費だけに任せるのではなく、ミッションオリエンティッドのファンドを作って、社会科学者たちもある社会的課題に対して問題解決に知恵を出してもらい構造を作らないと、今のままではさまざまな危機の中で社会科学はバラバラで、社会に役に立っているのかという批判が大きくなることを危惧しています。

古川 日本としてのイノベーションの方向かなと思うのは「水素社会実現」です。水素社会はどうあるべきかを考えると、規制問題や安全性の問題等のトップダウン的なところから、最終的には蓄電池や燃料電池をどうするかまでポイントになってきます。燃料電池も SPring-8 (大型放射光施設) や J-PARC (大強度陽子加速器施設) を使って基礎的なところからアナリシスをやっているのですが、現実問題として電池の振る舞いはよくわかっていない。一番上の社会的なシンセシスから電池自身の分子・原子レベルのアナリシスまで、これができることが

日本の強みだと思います。水素社会に関してはいろいろなご意見がありますが、2015年に500万円程度のFCV (燃料電池車) を販売するとコミットされている自動車会社もあり、社会の仕組みから部品レベルまで社会全体がそういう方向に行くことがイノベティブな動きになるのではないかと思います。

桑原 今のお話は大変重要で、国として水素社会を構築するように最大の努力を傾けていこうということであれば、研究の重点化は自ずとできます。国としての大きなプロジェクトは多くないし、あってもできない。そのくらいは国で候補を挙げるべきですし、日本の研究開発だけで駄目なら海外の成果も使う等、日本が世界に先んじて着手するという気概がないとイノベーションはおきません。ただ、それを決めると予算はみんなそっちに行ってしまうと考える人が大勢いるのですが、明確に「他を排除するものではない。大型のものはこれを進めよう」とすれば、安西先生が言われた「フィールドは無限にある」ことも含めていけるだろう。無作為は何も生まれないと思います。

Synthesiology は産業の出番

赤松 研究の進め方、組織の作り方、人材育成について皆さまからご意見を伺いましたが、吉川先生から総括をお願いできますか。

吉川 最近は、Synthesiology に外部の大学や企業の人、国外等から投稿もあり、非常にいい方向だと思っています。その根幹である Synthesiology のコンセプトが何かという厳しいご質問を桑原さんから受けたわけですが、最後はわかっていただけなので安心しました(笑)。簡単に言えば、科学の進歩がアナリシスを主体にしてきたけれども、人間の行動のほとんどはシンセシスであった。行動した結果や自然物についての議論はあったが、行動そのものに追ろうとしたとき、シンセシ



吉川 弘之氏

スという非常に学問的な新しいフィールドが出てきた。実は産業のほとんどがシンセシスなのだということで、シンセシスの重要性は非常に大きいし、それを担っていくためにこの雑誌の存在はよろしいというご理解をいただいたのではないかと思います。

「人間の行動とは何か」ということで「イノベーションだ」という話があったのですが、担う母体や社会の受容性、その結果、母体が潤うのか、それを作るエコシステムとは何かといったことも含めたものをイノベーション推進者として理解しなければいけないというご指摘がありました。これは非常に大事なことで、個々の行為がすべてシンセシスなのです。そういった意味で Synthesiology の単位とは、製品を1個作ったということよりはイノベーションがおきやすいエコシステムをどう作るのか、それは先ほどの政策論になるわけですが、そこまで将来広がっていかねばいけない。この雑誌が広げるかどうかは別として、そういった問題を内包する大きな問題提起だという気がするわけです。そうすると、シンセシスをどのように研究させるかというファンディングや研究成果の評価が非常に大きくなるわけで、JSPS、JST、NEDO、RISTEX はそれぞれ違う立場ですが、ファンディングにおけるシンセティックな能力についての評価も大事なのではなからうか。急に現実的な話になるのですが、Synthesiology にたくさん投稿している人にはたくさん研究費を出していただきたいと、こういうふうに思うわけです（笑）。

そして、「人を育てる」というお話がありました。イノベーションは人の頭の中にあるのですが、次世代につなげていくところが欠落している。もし、人類が環境問題で滅びるようなことがあると、分析的には大きな蓄積をしたが、“もの”を作ったり自然を改変する知恵は世代を通じた継承が非常に貧弱だったために、時代を通じて人類は利口になってこなかったこととなります。そのプロセスを伝えることと人を育てることは深い関係があるわけで、教育は考え直さなければいけない多



赤松 幹之氏

くの問題をはらんでいる。どういう人間を育てるかが Synthesiology あるいはシンセシスを考えたときの一つの切り口というご指摘は重要だと思います。

また、日本のイノベーションとしての水素社会実現というお話が古川さんからありました。小さなイノベーションはもちろん必要ですし、同時に国としてのイノベーションが少なくとも1つ2つ欲しい。日本が大成功した高度成長時代は、マーケットも製品のサプライヤーも、ヨーロッパの2.5億人とアメリカの2億人、日本は1億人くらいでしたから5.5億人強の中で1億人が頑張って「勝った」と喜んでいた。今、世界の人口は80億人に近くになり、それが産業での供給者となり、マーケットになりつつある。5億の相手が、80億に、10倍以上になった。このような競争の質的変化が起こる中で「小さな」日本の優位性とは何か。それはたくさんある。多数の優秀な基礎研究者の存在、そして基礎研究によるナノテクや材料技術等、また高度成長時代に生み出した技術の根幹そのもの、それは生産技術や工作機械、基本的な設計方法論かもしれないが、そういったもので商売をしようと思えばマーケットは何倍にも増えている。実は大チャンスが来ているわけで、Synthesiology 的な知恵を働かせればいい。これがおそらく古川さんや桑原さんの言われる「国として何をするかという話の背後の分析をもっときちんとやるべき」ということですし、私たち CRDS も研究プログラムを作る上で、どちらに研究方向を向ければいいのかというときの大きな条件として考えようと言っています。そして、リーダーが必要だと。私はリーダーは産業ではないかと思うのです。Synthesiology は、言い換えれば産業の出番ではなからうかと申し上げたいと思います。

赤松 Synthesiology 発刊5周年にふさわしく、これからの研究方法について示唆に富むお話を多くいただきました。ありがとうございました。

この座談会は、2012年10月3日に東京都千代田区にある(独)科学技術振興機構(JST)東京本部別館において行われました。

略歴(五十音順)

有本 建男(ありもと たてお)

1974年京都大学大学院理学研究科修士課程修了、科学技術庁入庁。内閣府大臣官房審議官(科学技術政策担当)などを経て、2004年文部科学省科学技術・学術政策局長。2006年から、社会技術研究開発センター長、研究開発戦略センター副センター長、2012年から政策研究大学院大学教授、(兼)科学技術振興機構社会技術研究開発センター長、研究開発戦略センター副センター長。

日本の科学技術政策の策定に実務者として参画。近年は、「社会のための科学」の実践を目標に、新しい課題解決型研究ファンディング制度の開発に努力。著書・論文に、「グリーン・ニューデールーオバマ大統領の科学技術政策と日本」(共著、丸善プラネット、2009)、「科学技術庁政策史—その成立と発展」(共著、科学新聞社、2009)、「Science and Technology Policy」(by T. Arimoto, in *Have Japanese Firms Changed*, Palgrave Macmillan, 2011)、「Rebuilding Public Trust in Science for Policy Making」(by T. Arimoto and Y. Sato, *Science*, vol.337, pp1176-1177, 2012) など。

安西 祐一郎 (あんざい ゆういちろう)

1946年東京生まれ。1974年慶應義塾大学大学院博士課程修了。カーネギーメロン大学客員助教授、北海道大学文学部助教授、慶應義塾大学理工学部教授を経て、93年～2001年同理工学部長、01～09年慶應義塾長。現在、独立行政法人日本学術振興会理事長、慶應義塾学事顧問。文部科学省中央教育審議会大学分科会長、学びのイノベーション推進協議会座長、公益社団法人全国大学体育連合会長等を務める。日本私立大学連盟会長、環太平洋大学協会会長、情報処理学会会長、日本認知科学会会長等を歴任。著書『心と脳』(岩波新書)、『「デジタル脳」が日本を救う』(講談社)、『教育が日本をひらく』(慶應義塾大学出版会)、『認識と学習』(岩波書店)、『問題解決の心理学』(中央新書)ほか多数。専攻は認知科学、情報科学。

桑原 洋 (くわはら ひろし)

1960年東京大学工学部電気工学科卒業。日立製作所大みか工場長、電機システム事業本部長、常務、専務、副社長、副会長を歴任。元内閣府総合科学技術会議議員。日立マクセル、日立電線、日立国際電気各社会長を経て、日立製作所特別顧問。この間、COCON(産業競争力懇談会)実行委員長、JISTEC(科学技術国際交流センター)会長、横幹技術協議会会長、衛星測位利用推進センター理事長、海外水循環システム協議会理事長、日本工学会副会長などを歴任。現日立マクセル名誉相談役、日立製作所名誉顧問。

柘植 綾夫 (つげ あやお)

1943年東京生まれ。1967年東京大学工学部卒、1973年同博士課程修了、工学博士。1987年Harvard Business School AMP101

修了。1969年三菱重工業(株)入社、原子力発電の研究開発に従事。原子力研究推進室長、高砂研究所長を経て同社取締役技術本部長、代表取締役・常務取締役技術本部長。2005年1月内閣府総合科学技術会議常勤議員、2007年1月三菱重工業(株)特別顧問、2007年12月芝浦工業大学学長。日本学術会議会員、日本工学会副会長、2011年4月日本工学会会長、科学技術国際交流センター会長。

中村 道治 (なかむら みちはる)

1967年3月東京大学大学院理学系研究科修士課程(物理)修了、理学博士 学位論文名「分布帰還形半導体レーザーの研究」、1967年4月(株)日立製作所入社、中央研究所勤務、1990年8月同社日立研究所副所長、1992年8月同社中央研究所所長、2001年4月同社理事、研究開発本部長、2004年4月同社執行役員副社長、2007年4月同社フェロー、2008年6月同社取締役、2011年10月独立行政法人科学技術振興機構理事長(現任)、2011年10月文部科学省科学技術・学術審議会委員(現任)。

古川 一夫 (ふるかわ かずお)

1971年株式会社日立製作所入社、2006年6月取締役代表執行役員執行役社長、2009年4月取締役代表執行役員執行役員副社長、2009年6月特別顧問、2011年10月より独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構理事長。また、2007年5月～2009年5月社団法人日本経済団体連合会副会長、2011年5月より一般社団法人情報処理学会会長を務める。

吉川 弘之 (よしかわ ひろゆき)

1933年生まれ。東京大学教授、同総長、放送大学長、産業技術総合研究所理事長を経て、現在、科学技術振興機構研究開発戦略センター長。その間、日本学術会議会長、日本学術振興会会長、国際科学技術会議(ICSU)会長、国際生産加工アカデミー(CIRP)会長などを務める。工学博士。一般設計学、構成の一般理論を研究。それに基づく設計教育、国際産学協同研究(IMS)を実施。主な著書に「本格研究」(東京大学出版会、2009)、「科学者の新しい役割」(岩波書店、2002)、「テクノグローブ」(工業調査会、1996)、「テクノロジーと教育のゆくえ」(岩波書店、2001)、「ロボットと人間」(日本放送出版協会、1985)などがある。

高効率 SOFC システムによる分散型発電の実現に向けて

— SOFCシステム早期導入に向けた性能評価手法の開発と規格標準化 —

田中 洋平*、門馬 昭彦、根岸 明、加藤 健、高野 清南、野崎 健、嘉藤 徹

高効率分散型発電システムとして期待される固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の早期導入と公正な商取引を実現するには、性能評価手法の確立とその試験方法の規格標準化が重要である。この研究では、SOFCシステムの基本構成パーツのSOFC単セル、スタックおよびシステムの発電効率の評価手法について、市販の測定器、計量標準にトレーサブルな高精度流量計・標準物質、触媒技術等を組み合わせて、計量標準から製品までつながるSOFCの高精度性能評価手法・試験装置等を開発するとともに、SOFC開発企業等と連携して開発した装置の性能と実用性を評価した。さらに、発電効率試験方法のJIS規格化を中心に、性能試験方法の規格標準化への取り組みを報告する。

キーワード：固体酸化物形燃料電池、SOFC、高効率分散型発電、性能評価手法、規格標準化

Progress towards realizing distributed power generation with highly efficient SOFC systems

– Development and standardization of performance evaluation methods
targeting early market-entry of SOFC systems –

Yohei TANAKA*, Akihiko MOMMA, Akira NEGISHI, Ken KATO, Kiyonami TAKANO, Ken NOZAKI and Tohru KATO

For solid oxide fuel cells (SOFC) that are expected to be highly-efficient distributed power generation systems, establishing performance evaluation methods and their standardization are important for early market entry and fair trade. For this purpose, we have developed high-precision performance evaluation methods and test apparatuses to measure power generation performance of SOFC cells, stacks, and systems. These methods were achieved by combination of elemental technologies and tools, such as commercial measuring instruments, precise flowmeters and reference materials that are traceable to national standards, and catalysis technology. The performance and usefulness of the test apparatuses developed in cooperation with SOFC manufacturers and others were evaluated. Our activities, mainly on JIS standardization of power generation efficiency test methods, are also presented.

Keywords : Solid Oxide Fuel Cell, SOFC, highly efficient distributed power generation, performance evaluation methods, standardization

1 はじめに

3.11 東日本大震災以来、電力を中心にエネルギーの安定供給が議論され、沿岸部の大規模集中型発電システムへの過度の依存からの脱却が重要な課題になっている。その一環として、小型分散発電システムを需要地に近い場所に設置してエネルギーを高度に利用するスマートコミュニティが注目されつつある^{[1][2]}。スマートコミュニティの中核として、太陽電池等の再生可能エネルギーによる発電システムが考えられているが、夜間および天候条件等で必要な電力が供給できない場合が多い。このため、電力貯蔵システムが適用されつつあるが^[3]、燃料を高効率に利用する分散型発電システムも有効な手段と考えられる。

高効率発電システムについては、最近、50万kW級の天然ガス利用コンバインドサイクルシステムで発電端効率

60%が達成され、大都市付近の大規模電力需要地に近い湾岸部への導入が開始された^[4]。一方、内陸部の中小都市では沿岸の火力発電所等からの送電距離が長く、送電ロスが無視できない。このような立地点においては、数千kW～数万kW程度の高効率発電システムの方が効率的である。燃料電池は燃料の化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換できるので、高効率分散型発電システムとして期待されてきた。特に2000年代より、80℃付近で作動する固体高分子形燃料電池 (PEFC) と700-1,000℃で作動する固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の研究開発が盛んに行われてきた。図1に示すように、1-10,000kWの発電規模では、SOFC単独およびSOFCとガスタービンとのコンバインドシステム以外に50%以上の発電効率を達成できるものはなく、究極的にはSOFCでは70%の発

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第2
Energy Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: tanaka-yo@aist.go.jp

Original manuscript received February 1, 2012, Revisions received June 21, 2012, Accepted July 24, 2012

電効率が期待できる^[5]。

後述するように、SOFC システムは、発電部として最小構成単位の単セルを複数積層したスタック、および流量制御器等の補機類で構成されている。したがって、SOFC の研究開発では、単セル、スタック、システムの性能をそれぞれ精度よく評価し、性能を向上していくことが重要である。国内では、一般財団法人新エネルギー財団の「固体酸化物形燃料電池実証研究」で家庭用 700 W システムでも 45 % の発電効率が実証され^[6]、2011 年 10 月より JX 日鉱日石エネルギー (株) から都市ガスや液化石油ガスを利用する電気出力 700 W のコージェネレーションシステム (コージェネ機) が世界に先駆け販売開始された。また、最近では 5 kW から 250 kW の業務用発電システムの開発が始まり、さらにガスタービンとスチームタービンを組み合わせたトリプルコンバインドシステム (目標：容量～800 MW、発電効率 60 % 以上) の開発が計画されている^[5]。また、国外では家庭用 2 kW システムが実用化し、発電効率 60 % が達成されている。なお、SOFC および火力発電所の発電効率は、燃料の低位発熱量 (LHV) 基準 (水の蒸発潜熱を含まない) で記述されることが多く、上記効率についても LHV 基準で示した。以降、高位発熱量基準 (HHV) で効率を記述する場合、その都度注釈を記す。都市ガス・天然ガスの場合、LHV 基準の効率は HHV 基準に比べ 11 % 高くなる。

我々は、民間の SOFC システムの研究開発を支援して早期実用化を促進し、さらに SOFC が商用化された際の公正な取引を行う上で重要な性能試験方法の規格標準化を行うために、経済産業省や新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から支援を受け、2001 年頃より SOFC の最小構成単位である単セル、スタック、および最終製品

であるシステムを対象とした高精度性能評価手法を研究開発してきた。特に、近年、IEC、ISO 規格等では、測定信頼性を表す尺度として、これまでの誤差・確度等に代わって不確かさを用いることが推奨されていることから^[7]、我々は国家計量標準へトレーサブルな性能測定手法を開発することを念頭に置き、産業技術総合研究所 (産総研) 計測標準研究部門、関連民間企業等と連携しつつ研究開発を進めてきた。なお、不確かさは、真の値は分からないという前提の下、観測値の平均値 (測定値) と各種ばらつきにより母平均の存在する範囲を通常 95 % の信頼の水準で推定するものであり^[8]、不確かさの詳細については参考文献 [7] を参照されたい。

この論文では、SOFC システムの研究開発で重要な SOFC 単セルおよびスタックの性能評価手法の研究開発と SOFC システムの発電効率測定手法の研究開発・規格標準化について報告する。

2 SOFC 早期実用化に向けた研究目標と研究展開

2.1 SOFC システム概要と研究目標

最終的な製品である SOFC システムは、概略図を図 2 に示すように、主に流量制御器、蒸発器 (水蒸気発生器)、改質器、SOFC スタック、インバータ等により構成される。外部からシステムに供給される物質は、燃料極 (アノード) 用都市ガス等の原燃料、原燃料改質用の酸化剤 (水、空気)、および空気極 (カソード) 用空気である。原燃料は改質器で、水素、一酸化炭素、メタン、水蒸気、二酸化炭素に改質され、アノードガスとしてスタック内の各セルのアノードへ分配される。アノードでは、水素、一酸化炭素がカソード側から電解質をとおり移動してきた酸化物イオン (O^{2-}) と反応し、水蒸気、二酸化炭素が生成すると同時

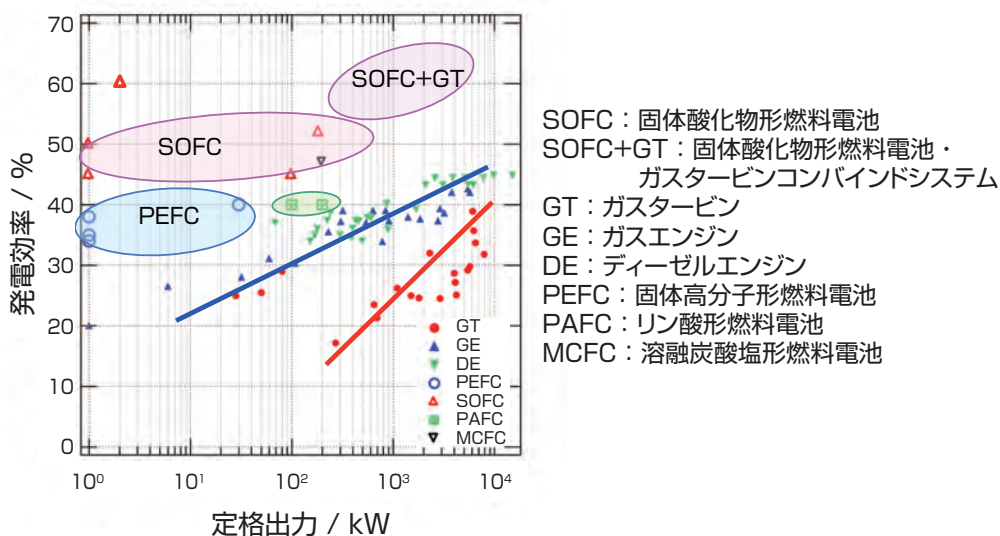


図 1 各種小型発電システムの定格出力と発電効率

に、電子が外部回路へ移動することにより直流出力（電力）が得られる。一般的には、直流出力をインバータ等のパワーコンディショナーで交流出力に変換し、SOFC システム内部でその一部が消費され（5-10 % 程度）、残りが正味の交流出力となる。

したがって、SOFC システムの研究開発は、一般的に、単セル材料・構造の開発→スタックの開発→改質器等システム構成部品的设计・開発の順に行われる。スタックを開発するには、図3に示すように、単セル性能を把握した上で、スタック内の温度分布、燃料分配の不均一性等による各セル性能のばらつきを評価し、最適な設計を行うことが重要である。また、システム開発ではスタック性能に加えて、熱設計、改質器性能等が重要で、システムの性能指標として発電効率が最も重要である。我々は、単セル、スタック、システムそれぞれの性能評価技術を開発することで民間のSOFC システムの研究開発を支援して早期実用化を加速することだけではなく、SOFC が商用化された際の公正な商取引を行ううえで重要となる性能試験方法の規格標準化を行うことも、公的機関である産総研の役割と考えた。

SOFC 単セル・スタックの発電性能は、SOFC 自体の特性だけではなく、ガス流量・組成、温度、燃料利用率（供給した燃料に対し、発電に利用された燃料の割合）等試験条件によって大きく左右される。しかし、これまでガス流量・組成精度等を規定した性能評価手法は確立されて

いなかった。また、アノードガス中には毒性の強い一酸化炭素が 10 % 前後含まれ、一般的な試験では純一酸化炭素や純水素等をそれぞれ供給して混合したガスが使用されるため、純一酸化炭素の取り扱いには厳重な安全対策が必要で、試験設備が複雑になりコスト増となる問題があった。

一方、発電効率の測定手法については、NEDO プロジェクトのコージェネ機発電効率目標値 40 %（定格時、送電端、HHV 基準）に対して^[9]、±1 % 以下の不確かさ（相対不確かさ±2.5 %）で測定するのが妥当と考えられる。しかし、開発の先行したリン酸形燃料電池、固体高分子形燃料電池では、性能評価方法において測定精度を規定する規格は当時は存在せず、既存のコージェネレーションユニットの規格（JIS B8122）の型式試験における測定器精度として電力計±1.5 %、燃料ガス用流量計±3 %が規定されているのみであり^[10]、発電効率の不確かさは±5 % 程度と推定され、不十分であった。また、10 kW 以上の SOFC システムは測定環境が整った実験室に移動させることが難しく、発電効率は民間等の SOFC 設置サイトで測定するのが最良であることから、可搬型の効率測定手法が重要になると考えた。

性能試験方法の規格標準化については、当初、1-200 kW 級 SOFC システムの開発がセル製造企業とシステム開発企業の間で進められ、実用化が迫っていたため、まず

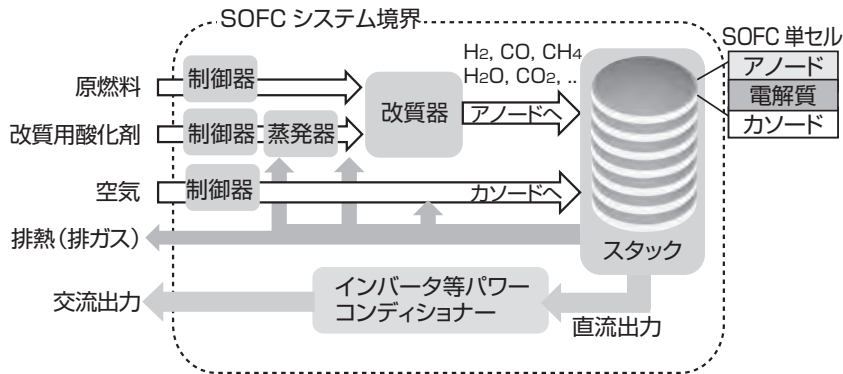


図2 一般的な SOFC システムの構成（制御器：流量制御器）

	単セル	スタック	システム
主な性能指標	電圧-電流特性	スタック電圧-電流特性	交流出力、発電効率
性能規定要因	<ul style="list-style-type: none"> 内部抵抗、過電圧 ガス流量・組成 燃料・空気利用率 温度 	<ul style="list-style-type: none"> セル品質の均一性 燃料分配のばらつき 温度分布 インターコネクト特性 	<ul style="list-style-type: none"> 熱設計（温度制御） 流量制御精度 改質器性能 インバータ性能

図3 性能指標・性能規定要因の包含関係

はシステム試験方法の規格標準化が最優先事項と判断した。なお、最近では、単セルおよびスタックを販売する企業が国内外で出てきており、今後商取引が活発になることから、それらの性能測定方法の規格標準化が重要になっている。我々は現在、単セル・スタック試験方法の IEC および JIS 規格提案を行っており、この取り組みについては別報にて報告した^[1]。

そこで、この研究では、単セル・スタックの発電性能評価手法については、SOFC システムの運転条件を簡便に模擬でき、試験者がより安全に、かつ電圧等の性能を相対不確かさ $\pm 1\%$ で測定するための「発電性能測定評価手法」および、スタック性能のばらつきおよびその要因を評価できる「スタック性能評価手法」の開発を目標とした。発電効率測定に関しては、測定システムに由来する発電効率の相対不確かさの目標値を SOFC 設置サイトでは $\pm 1.0\%$ とし、高精度に都市ガスや LNG 等原燃料の流量・組成を測定する技術を中心に技術開発を行うとともに、発電効率試験方法の規格標準化を行った。

2.2 研究目標を実現するための研究展開

この研究開発では、測定値の不確かさを低減するため、繰り返し性・直線性がよい市販の熱式質量流量計、ガス組成分析計 (ガスクロマトグラフ)、電圧計、電流計等各種測定器を、国家計量標準へのトレーサビリティを確保しつつ、高精度に校正する手法を念頭に置き、研究開発を展開した。

図 4 に、この研究開発で取り入れた各種要素技術とその統合を簡易的に示す。流量測定の例では、連携した産総研計測標準研究部門・流量計測科が都市ガス・水素流量の標準器と実用標準器の開発を行いつつ、当グループは流量校正方法と効率測定用高精度流量測定手法および装

置の開発を担当した。ガス組成分析では、標準ガスメーカーの協力のもと、不確かさが低減できる質量比混合法による標準ガスを利用する分析方法を採用し、高精度ガス組成分析システムを精密分析機器メーカーと開発した。また、図 4 に示すように、発電性能評価手法の研究開発では既存の触媒技術と上記高精度流量測定等を組み合わせた新規な手法を開発し、民間の実用サイズの SOFC セル・スタックを試験可能な装置を燃料電池用機器メーカーと共同で開発した。さらに、スタック性能評価手法の研究開発では、基礎的な電気化学的評価手法の交流インピーダンス法を応用して、電気化学測定器メーカーとともにスタックの性能のばらつきを同時に測定できる装置を試作した。

このように、この研究では、市販の測定器、計量標準にトレーサブルな高精度流量計・標準物質、触媒技術等を適宜組み合わせ、高精度で新規な SOFC 性能測定手法および装置等を開発するとともに、SOFC 開発企業等と連携して開発した装置の性能と実用性を評価した。

3 性能評価と測定手法

3.1 SOFCセル・スタック性能評価手法の開発

3.1.1 発電性能評価手法の開発

SOFC の単セル電圧は、アノードガス中およびカソードガス中の酸素分圧と温度から決まる起電力からオーミック抵抗による抵抗過電圧、電極反応過程による活性化過電圧、電極近傍の物質拡散速度による濃度過電圧を差し引いたものである。アノードガス (H_2 - H_2O - CO - CO_2 - CH_4 等) 中の酸素分圧はアノードガス組成と圧力、燃料利用率等に依存するので、セル・スタックの性能試験ではこれらを規定することが重要である。また、上記過電圧項は SOFC 自体



図 4 この研究開発で取り入れた主要素技術とアウトカムイメージ

の材料・構造に依存し、それらを低減することが SOFC の性能向上につながる。

SOFC システムでは都市ガス、液化石油ガス等多様な原燃料を利用でき、図 2 に示すように、それらを改質してアノードに供給する。つまり、原燃料種、改質条件により、アノードガスの組成は広く変化する。一般的な発電性能試験時の問題として、1. 加湿水素による簡易試験では SOFC システムの実運転条件と試験条件が大きく異なる、2. 改質ガスを模擬して供給する場合、毒性の強い純一酸化炭素を取り扱う必要があり危険で、小流量の水蒸気を安定に発生させることは難しく、セル電圧の変動が大きくなることが挙げられる。なお、SOFC システム (製品) では、アノードガスがそのまま漏えいすることはなく、アノード排ガス中の一酸化炭素等未利用燃料成分は、カソード排ガス中の酸素で燃焼されるので、一酸化炭素の危険性は極めて低い。

そこで、この研究では、これらの問題点を解決し、SOFC 開発者等がより安全に、簡便に、かつ信頼性をもって発電性能を試験できる模擬改質ガス供給方法を中心に、試験方法の研究開発を行った。開発した改質ガス供給方法を図 5 に示す。水蒸気発生は、過剰水素を供給のもと、市販の白金触媒を充填した触媒燃焼器にて水素と酸素を 200 °C 以上で反応させることにより行った。小流量の水蒸気でも安定に発生でき、H₂-H₂O 混合ガスを調製できる。また、純一酸化炭素の取り扱いを避けるために、市販のニッケルあるいはルテニウム触媒 (メタン化用) を用いて、逆シフト反応 (H₂ + CO₂ → H₂O + CO) を利用してアノ

ードの直前で二酸化炭素から一酸化炭素をその場発生させると同時に、メタン化反応 (4H₂ + CO₂ → CH₄ + 2H₂O) を併発させ、メタンも同時に発生できる平衡反応器を開発した。この手法の特徴をまとめると、水素、酸素、二酸化炭素を原料とし、触媒燃焼器と平衡反応器を用いて、改質反応の平衡時と同じ組成・流量の模擬改質ガスを発生させ、アノードに供給できる。また、万一、試験中に一酸化炭素が漏えいした場合でも、二酸化炭素の供給を止めることにより、一酸化炭素の発生を止めることができ、試験時の安全対策を講じることができる。

次に、開発したアノードガス供給方法のノウハウを技術移転し、図 5 に示すように、英和 (株) と共同で SOFC 発電性能試験装置を開発した (特願 2008-045311)。100 W 級 SOFC 試験の場合、コンパクトな触媒燃焼器 (10 mL) および平衡反応器 (20 mL) を実現した。模擬改質ガスの原料流量は熱式の質量流量計 (MFC) で制御しており、高精度流量計 (不確かさ ± 0.2 %) ^[12] を用いた流量校正により、不確かさ ± 0.5-1.0 % を達成した。この装置の性能を確認したところ、模擬改質ガスの組成精度は平衡値に対し ± 0.5-1.0 mol% (図 5)、ガス組成の安定性 ± 0.04 mol% が得られ、高精度な発電性能試験方法が実現できた ^[13]。また、民間の実用 SOFC を試験したところ、原燃料の流量比を変えることにより、想定する原燃料や改質条件を容易にかつ迅速に変更することができ、セル電圧は 30 s 程度で安定して大幅に試験時間を短縮できるとともに、セル電圧の変動を ± 0.1 % 以下に抑制できることが

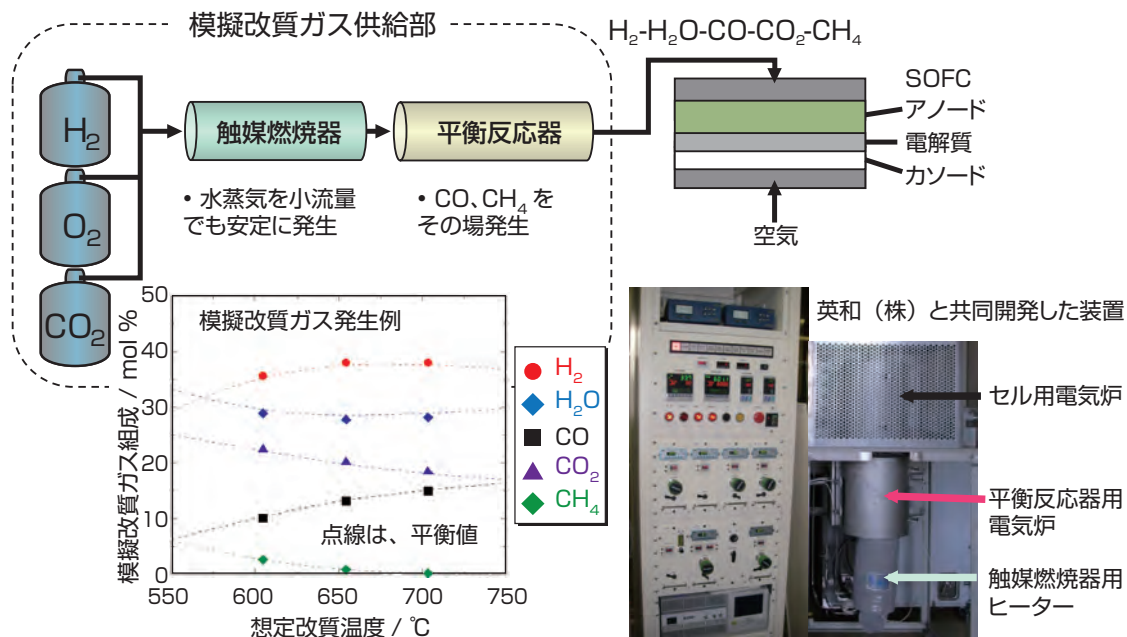


図 5 開発した SOFC 発電性能評価手法と試験装置

分かった。

以上をまとめると、開発した SOFC 発電性能評価手法および試験装置は、小流量でも安定にかつ精度よく模擬改質ガスをアノードに供給でき、かつ、毒性の強い純一酸化炭素の使用を避けることができるので、これまでよりも簡便、安全で、かつ高精度な SOFC 発電性能試験が行えるようになった。最近、複数の SOFC 開発企業がこの装置を購入しているのが、今後とも装置メーカーへ技術協力をを行い、製品化に向けた SOFC 研究開発に役立ててもらえるように貢献していきたい。さらに、この研究で得られた知見を活かしつつ、単セルやスタックの性能試験方法の素案を作成し、現在、JIS 規格化および IEC 規格化を同時に進めている^[11]。

3.1.2 スタック性能評価手法の開発

SOFC システムでは単セルを複数積層したスタック (図 6) の性能が重要であり、スタック内の各セル性能のばらつきを抑えることによりシステム制御が容易になる。また、通常、セルは直列接続されているので、セルが一つでも故障あるいは激しい劣化をすると、スタックの運転ができなくなる。以上の理由から、SOFC システムの研究開発では、スタック内の各セルの性能を個別に評価することが望まれている。図 6 に示すように、各セル性能のばらつき要因とし

ては、セル・周辺部材の個体差、燃料分配の不均一性、スタック内の温度分布、および部分的な性能劣化が挙げられる。しかし、このような SOFC スタックの性能を評価する手法は確立されていなかった。

そこで、我々は、単セルの電気化学的性能評価手法としてよく用いられる交流インピーダンス法を応用して、直列スタック中のセル性能のばらつき要因を同時にかつ、各要因を区別して測定できる評価手法を開発し、図 6 (b) に示すように、47セルのインピーダンスを同時に測定できるマルチインピーダンス測定装置を試作した^[14]。この装置では、直流電流に交流電流 (周波数を数十 kHz から 0.01 Hz 程度まで変化) を重畳させ、各セルの電圧応答波形をフーリエ変換することにより、電極反応等の時定数に応じたマルチインピーダンススペクトルが得られる。さらに、試作装置を用いて、共同研究先の関西電力 (株) と三菱マテリアル (株) が開発中の 1 kW スタック (46 セル直列接続) の試験を行った。マルチインピーダンス測定結果の一例 (セル #41-46) を図 6 (c) に Cole-Cole プロットとして示す。x 軸はインピーダンスの実部であり、#46 のスペクトルのように、SOFC の場合、A: オーム抵抗、B: 活性化過電圧に相当する抵抗、C: 燃料消費に伴うガス濃度変化に相当する抵抗の 3 つに分けられる。例えば、セル #41、42 では

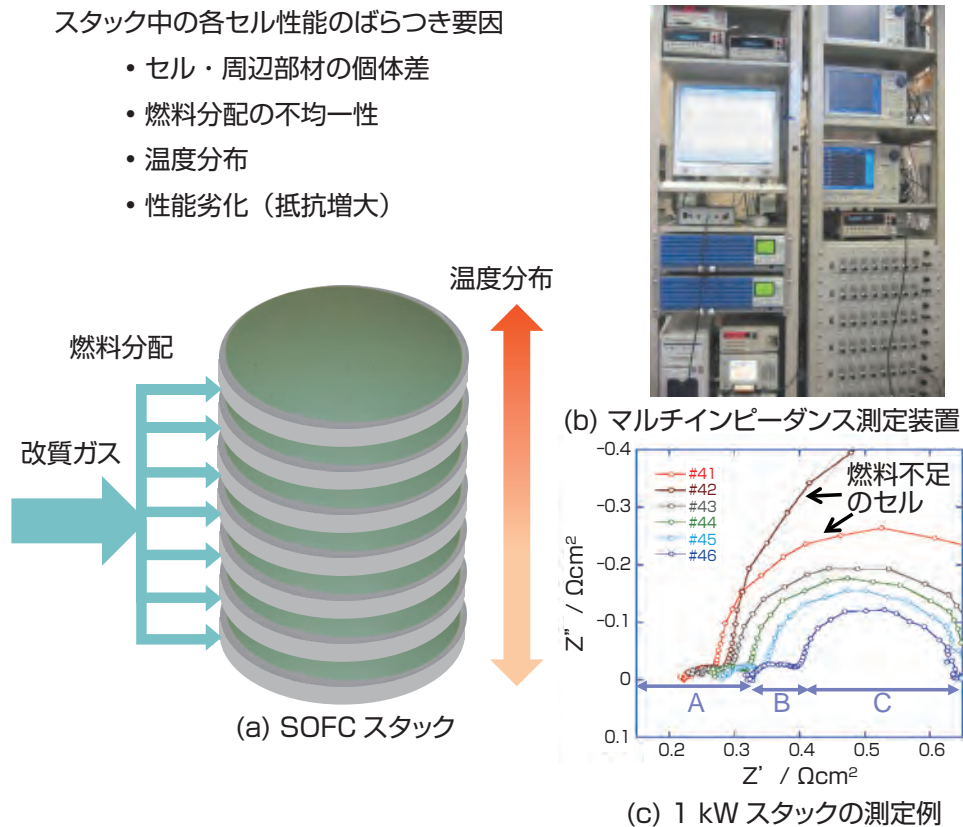


図 6 スタック性能評価手法の開発と民間 1 kW スタックの測定例

C が他のセルに比べ大きく、燃料供給不足により実質の燃料利用率が増加していると診断できる。このような測定結果を SOFC の研究開発にフィードバックすることにより、研究開発を加速させることができる。

以上をまとめると、スタック内の各セル性能のばらつきと各種抵抗成分を分離して測定できるスタック性能評価手法を開発し、民間企業の 1 kW スタックを実測することにより燃料分配の不均一性等の情報を多角的に評価でき、SOFC の研究開発に役立つことが分かった。この成果は、連携企業の 10 kW コージェネ機開発に活かされた。さらに、この手法は、耐久性試験にも応用できると考えている。

3.2 SOFCシステムの発電効率測定手法の開発と規格標準化

3.2.1 高精度発電効率測定手法の開発

NEDO プロジェクト「システム効率計測評価技術の研究」では、産総研計測標準研究部門・流量計測科と共同で、SOFC システムの発電効率の高精度測定手法を中心に研究開発を行った。流量計測科は都市ガス流量用標準器や実用標準器の開発を行った。当グループは可搬型の発電効率測定手法を開発し、同 NEDO プロジェクトで関西電力（株）と三菱マテリアル（株）が開発した 10 kW コージェネ機の発電効率を設置サイトで測定し、不確かさ解析を行った。セクション 2.1 で述べたように、発電効率は高位発熱量 (HHV) 基準を採用した。

SOFC システムの発電効率 η_e は、式 (1) で示すように、SOFC システムに供給される都市ガス等原燃料の発熱量 H と流量 f および正味の交流出力 (電力) P から定義される。

$$\eta_e = \frac{P}{H \times f} \quad (1)$$

よって、発電効率の測定では、これらのパラメータをそれぞれ、目標不確かさに応じた方法で測定することが重要になる。不確かさには、各種測定器の不確かさだけではなく、試験中の測定対象に起因する変動（例：都市ガス組成、出力）も含まれるので、測定システムに由来する発電効率の目標値を相対不確かさ $\pm 1.0\%$ とし、 H, f, P に平等に割り当てると、それぞれを $\pm 0.6\%$ の相対不確かさで測定することが要求される。

そこで、この研究開発では、発熱量、流量、出力の測定器の相対不確かさの目標値をそれぞれ $\pm 0.6\%$ とし、不確かさを低減するために、計量標準にトレーサブルな測定器の校正方法を含む高精度な測定手法を検討した。以下、各測定手法についてまとめる。

3.2.1.1 発熱量測定手法の開発

都市ガス等気体燃料の発熱量は、JIS K 2301 および ISO 6974, 6976 (ISO は天然ガスのみ対象) で規定されているように、ガスクロマトグラフによりガス組成を測定し、計算によって求める方法が主流となっている。この研究では、不確かさの計算方法が規定されている ISO の方法を基に、SOFC 設置サイトでガスを可搬型ガスサンプリング（特願 2008-045311）に採取し、研究室に輸送上記 JIS あるいは ISO 規格準拠のガスクロマトグラフで測定する手法、および可搬性に優れ、数分程度での高速分析が可能なマイクロガスクロマトグラフで測定する手法を開発した（図 7）。なお、ISO 6976 では、発熱量の計算に用いる

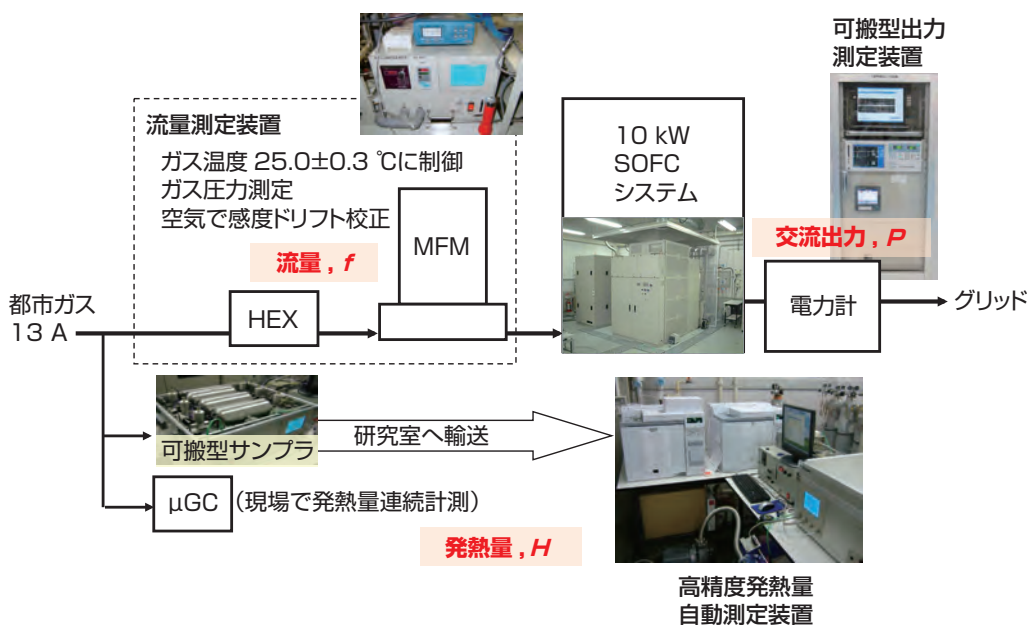


図 7 可搬型高精度発電効率測定システムの概要
HEX：熱交換器、MFM：メタン用熱式質量流量計、μGC：マイクロガスクロマトグラフ

各都市ガス成分の発熱量の不確かさ $\pm 0.1\%$ 程度を議論しているものの、不確かさ計算に取り入れていないので、この研究ではその不確かさも取り入れた。

燃料ガスの組成を高精度に分析するには、ガスクロマトグラフ校正用の標準ガス(ガス成分の濃度が既知)の不確かさが重要である。国内で市販されている不確かさ付きの都市ガス用標準ガスを調べたところ、主成分のメタン濃度については、例えば $88.47 \pm 0.89\%$ ($k = 2$)のように、相対不確かさ $\pm 1.0\%$ であり、この研究には不十分であることが判明した。そこで、住友精化(株)の協力のもと、質量比混合により都市ガス中の各成分を47 Lガスボンベに充填し、各充填質量を国家質量標準にトレーサブルな大型天秤を用いて3回ずつ繰り返し測定し、標準ガスを調製した。得られた充填質量、天秤の不確かさ等から、ISO 6142の方法に従い、標準ガス中の各成分のモル分率およびその不確かさを計算した。その結果、メタンの場合、 88.002 ± 0.016 、相対不確かさ $\pm 0.02\%$ ($k = 2$)となり、標準ガス組成の不確かさを既存標準ガスの1/50に低減できた。次に、このような高精度標準ガスを複数用いて、ガスクロマトグラフの校正(検量線の作成)を行った。

さらに、サンプルを測定前後に3種類の標準ガスを繰り返し分析でき、別途開発した可搬型のガスサンプラ中の都市ガスサンプルを自動で分析し、ガスサンプリング時の都市ガス流量、ガス圧力、温度等と共に分析データを出力できる高精度発熱量自動測定装置(図7)を紀本電子工業(株)と共同開発した。以上の結果から、都市ガスの発熱量を不確かさ $\pm 0.12\%$ で測定できるシステムを構築することができた。

3.2.1.2 都市ガス流量測定手法の開発

SOFCシステムに供給される都市ガス等原燃料の流量を測定するには、図7に示すように、SOFCシステムの上流に効率測定用流量計(測定装置)を設置する必要がある。家庭用ガスメーターの検定には計量法で指定された湿式体積流量計が基準器として用いられているが^[15]、日本では都市ガスの流量標準がなく、トレーサビリティが十分確保できていないことが問題であったので、計測標準研究部門流量計測科は、この研究開発で都市ガス流量の標準器と実用標準器を開発した。また、上記のようなオイルや水ミストが発生する流量計は、後段のSOFCに影響を与える可能性があるため、効率測定用には向いていない。一方、SOFCシステムの試作機等では、メンテナンスが容易で、繰り返し性に優れた熱式の質量流量制御器(MFC)がよく用いられている。そこで、この研究では、市販のメタン用熱式質量流量計(MFM)を利用した都市ガス流量測定および流量校正システムを構築した。

市販のMFMやMFCのメタン流量を高精度質量流量計で校正したところ、8%の器差を示すものもあり、目標の相対不確かさ $\pm 0.6\%$ の高精度流量測定を実現するには、使用ガスによる流量校正が必須であり、校正に用いる都市ガス等燃料流量の不確かさを低減することが重要であることが判明した。また、ガス組成の影響が少ない体積流量計に対して、MFMは気体の種類によって感度が変わるので、ガスの種類(組成)による補正が必要である。さらに、精密な流量測定にあたっては、質量流量計といえども、圧力・温度の影響を考慮する必要がある。そこで、図7に示すように、MFMの温度依存性を低減するため、熱交換器等によりガス温度を $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ の変動で調整でき、各種データを記録できる可搬型の流量測定装置を開発した。また、SOFCシステムの耐久性試験に備え、試験対象に影響を与えず、一定期間ごと(例えば1か月ごと)にMFMを校正し感度ドリフトを空気でも評価できるように、同装置には都市ガスのバイパスラインおよび小型空気コンプレッサーと層流式高精度流量計(米国DHI製molbloc)を搭載した。なお、MFMで測定された質量流量(g/min)を標準状態($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 101.325 kPa)の理想気体の体積で換算した流量(l min^{-1} 、 $\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)をそれぞれ、 Nl min^{-1} 、 $\text{Nm}^3\text{ s}^{-1}$ で表す。

MFMの流量校正には、都市ガス主成分のメタン(濃度約89%)、エタン(6%)、プロパン(3%)、イソブタン(2%)用のMFCをそれぞれ用意し、各流量を質量流量で校正し、各流量を調整後スタティックミキサーで混合し、熱交換器で温調した模擬都市ガスを発生する都市ガス流量校正器を試作した。この校正器を用いて、MFMの校正やMFMのガス組成依存性・温度依存性・圧力依存性等のMFM特性試験を実施した。この校正器では、20 kWのSOFCに相当する 70 Nl min^{-1} までの都市ガス流量を校正できる。詳細については、別報^[16]を参照されたい。また、使用したメタン用MFMの都市ガス組成補正係数(CF_{mix})は、重回帰分析により、式(2)で示す多項式で計算できることを確認した^[16]。計算値の不確かさは $\pm 0.15\%$ であった。

$$1/CF_{\text{mix}} = \sum x_i / CF_i \quad (2)$$

ここで、 x_i は成分*i*のモル分率、 CF_i は熱式質量流量計におけるメタンに対するガス成分*i*の相対感度である。さらに、MFMの繰り返し性、直線性、温度依存性、圧力依存性、経時的な感度ドリフトについては、カタログスペックと同程度であることを確認し、これらに起因する不確かさの解析にはカタログスペックを使用してもよいと判断した。

以上をまとめると、20 kW級SOFCシステムまで対応できる高精度可搬型都市ガス流量測定装置、流量標準にトレーサブルな流量校正方法および校正器を開発し、校正

表1 10 kW コジェネ機の発電効率初期特性試験時の測定値と不確かさ

パラメータと発電効率	平均値	相対不確かさ ^{a)} ($k = 2$)	(JIS 規定例 ^{b)})
都市ガス発熱量、 H^c (MJ Nm ⁻³)	44.69	±0.12 %	なし
都市ガス流量、 f (10 ⁻⁴ Nm ³ s ⁻¹)	5.507	±0.58 %	±3.0 %
交流出力、 P (kW)	10.14	±0.46 %	±1.5 %
発電効率、 η_e (%)	41.2	±0.74 %	なし

- a) 測定器の不確かさと測定値の変動を含む
- b) JIS-B8122 (2001) コジェネユニットの性能試験方法 (型式試験) の測定器精度¹⁹⁾
- c) 高位発熱量 (HHV) 基準

用流量の相対不確かさ± 0.44 % を達成するとともに、熱式質量流量計感度のガス組成依存性の予測式等都市ガス流量測定時の不確かさを解析するための MFM 特性を明らかにした。計測標準研究部門が開発した都市ガス流量標準器、実用標準器にトレーサブルな高精度流量計あるいは最近市販が開始された校正事業者認定制度 (JCSS) に基づく流量計を校正に用いることにより、トレーサビリティを確保した原燃料流量測定が可能になった。

3.2.1.3 出力測定手法の開発

10 kW 級 SOFC の出力測定には、精度± 0.1 % 級の電力計が市販されている。また、電力および電力量計測については JCSS に基づく高い精度の校正が確立されており、日本電気検定所では不確かさ± 0.04 % の一般校正 (JCSS 校正の最高測定能力は± 0.02 %) を利用できる。よって、出力測定の相対不確かさの目標± 0.6 % は達成可能である。

ただし、SOFC システムの交流出力は、スタックから出力される直流電力をインバータで商用周波数の交流に変換したものであり、一般的に商用周波数の基本波の他に、各種高調波やインバータのキャリア波等を含む。そこで、この研究では、基本波の有効電力のみを出力 P と定義した。高調波成分を含む交流電力の国家標準はなく、通常の商用電力量計では等級誤差の範囲内の高調波成分を含む交流しか対象にない。このため、出力評価において、電力測定への基本波以外の高調波成分等の影響が重大な不確かさ因子となる場合も想定され、高調波成分等の評価が不可欠である。

以上の理由で、必要な場合には直流電力も測定可能で、商用交流電力を高精度で測定でき、高調波等の解析も可能な市販の精密電力解析器 (YOKOGAWA WT3000) をベースに、図 7 に示すようなコンパクトな可搬型出力測定装置を開発した。測定項目は、有効電力の他に、出力条件の電圧、電流、力率、高調波やインバータキャリア波である。また、不確かさ解析のために、測定時の環境温度や測定器温度を測定できるようにした。

3.2.1.4 民間企業が開発した10 kW機の発電効率測定

3.2.1.1 ~ 3 で開発した可搬型高精度効率測定装置を用いて (図 7)、関西電力 (株) と三菱マテリアル (株) が NEDO プロジェクトで開発した 10 kW 級コジェネ機 (交流出力:60 Hz、三相三線 200 V、最大電流 38 A、力率 0.99) の発電効率の初期特性試験、および 3000 h にわたる耐久性試験において発電効率を同機設置サイトで測定した。10 kW 機と可搬型出力測定装置の接続は、不確かさを低減させるために、スターゼロポイントアダプターによる模擬中性点を利用する三相四線三電力計測定方式を採用した¹⁶⁾。

図 8 に初期特性試験時の都市ガス流量と出力を示す。この 10 kW 機は、燃料利用率 (原燃料の内、電池反応に利用される割合) を一定に制御しているため、都市ガス流量は比較的安定しており、変動は± 0.14 % であった。一方、交流出力は SOFC システム内部で消費される補機動力等の変動により、± 0.45 % 変動した。都市ガスの発熱量の変動については、10 kW 機設置サイトでマイクロログスケロマトグラフにより分析するとともに、可搬型サンプラで試験前後の都市ガスをサンプリングし、産総研で発熱量の変動を分析した。その結果、初期特性試験時の発熱量の変動

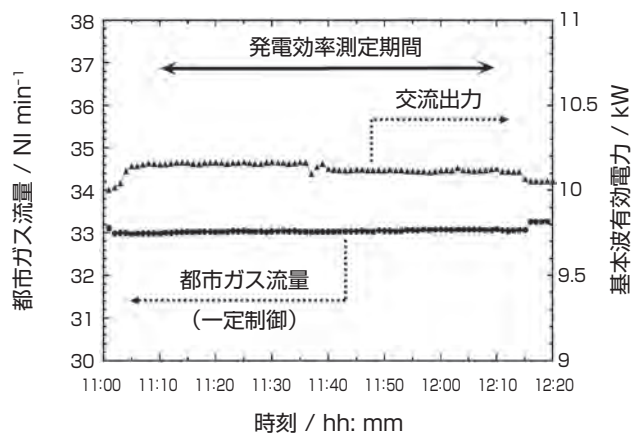


図 8 10 kW コジェネ機の発電効率初期特性試験時の都市ガス流量と交流出力

幅は $\pm 0.02\%$ で十分小さいことが判明した。都市ガスの高位発熱量 (HHV) と流量、出力 (60 Hz 有効電力) の平均値を測定値とし、表 1 に示すように、それぞれ 44.69 MJ Nm^{-3} 、 $5.507 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3 \text{ s}^{-1}$ 、 10.14 kW であり、式 (1) より高位発熱量ベースの発電効率 41.2% (HHV) が得られた。上記各パラメータの変動幅、効率測定時の都市ガス温度・圧力等測定条件が与える不確かさ、および 3.2.1.1 ~ 3 で示した測定装置由来の不確かさを合成したところ、表 1 に示すように、発熱量、流量、出力、発電効率の相対不確かさは、それぞれ、 $\pm 0.12\%$ 、 $\pm 0.58\%$ 、 $\pm 0.46\%$ 、 $\pm 0.74\%$ となった。したがって、発電効率は $41.2 \pm 0.3\%$ (HHV) と推定でき、NEDO プロジェクトの目標不確かさ $\pm 1.0\%$ を達成するとともに、この 10 kW 機が NEDO の開発目標発電効率 40% (HHV) 以上をクリアしたことを証明することができた。

以上をまとめると、この研究では国家計量標準へトレーサブルな可搬型の高精度効率測定手法および装置を開発し、発電効率を SOFC 設置サイトでも相対不確かさ $\pm 1.0\%$ 以下で測定できることを明らかにした。よって、将来的に発電効率が $50 \sim 70\%$ に向上した場合でも、効率を不確かさ $\pm 0.5 \sim \pm 0.7\%$ で測定することが可能になった。また、この手法は、SOFC だけではなく、その他の燃料電池システムあるいはエネルギーシステムの発電効率測定にも応用できると考えられる。

3.2.2 発電効率測定試験方法の規格標準化

燃料電池システムの発電効率試験方法は、国際規格として IEC 62282-3-2 が発行されているものの、国内では SOFC の発電効率試験方法の JIS 規格は確立されていなかった。また、SOFC が実用化・普及開始される段階では少なくとも商用電力並み (出力測定の不確かさ $\pm 0.1\%$ 級) の測定精度をもつ試験方法が必要である。そこで、この研究では、3.2.1 項で開発した高精度発電効率測定手法の知見を活かしつつ、SOFC 設置サイトへの機器輸送等が測定器に与える影響を調査し、SOFC システムの最も重要な性能指標の発電効率を有意に比較できるような不確かさで試験できる発電効率試験法の JIS 素案を作成し、(社) 日本電機工業会のご協力のもと、セル・スタック製造企業、システム開発企業、中立研究機関等から構成される審議委員会で検討を行った。

委員会の審議結果を反映しつつ、既存の JIS 規格、校正制度等を調査し、SOFC システムに対し、国家計量標準へのトレーサビリティを確保しつつ、発電効率を $\pm 1\%$ よりも小さな不確かさで測定する JIS 標準仕様書 (TS) 原案を 2008 年に作成した。原案は日本工業標準調査会 (JISC) で審議された後、2010 年に JIS TS C0054「メタンを主成

分とする気体燃料を用いる固体酸化物形燃料電池システムの発電効率試験方法」が発行され、2011 年 10 月からの家庭用 SOFC システムの販売開始に間に合わせる事ができた。

4 まとめと今後の展望

SOFC システムの早期実用化を支援するとともに、SOFC が商用化された際の公正な取引に重要な性能試験方法の規格標準化を行うために、国家計量標準へのトレーサビリティを確保しつつ、市販の測定器、触媒技術等を統合し、SOFC 単セルからシステム (最終製品) までの新規な SOFC 性能評価手法を開発した。SOFC システムの研究開発で重要な SOFC 単セル・スタックの性能評価手法については、簡便、安全で、かつ高精度な発電性能評価手法を開発し、民間企業と試験装置を開発するとともに、スタック内の各セル性能のばらつき要因を同時に測定できる手法・装置を開発して、民間の SOFC システムの研究開発に貢献してきた。また、SOFC システムの発電効率測定については、可搬型で SOFC 設置サイトでも高精度に効率を測定できる手法および装置を開発し、民間企業が開発した 10 kW 機の発電効率を実測したところ、 $41.2 \pm 0.3\%$ (HHV) という値を得、NEDO プロジェクトの目標値 (発電効率 40% 以上かつ不確かさ $\pm 1.0\%$) を達成していることを証明した。なお、将来的に発電効率が向上した場合でもこの手法を十分使用できる。さらに JIS (TS) の原案を作成し、SOFC システムの販売開始に先駆け JIS (TS) 発行が実現できた。

今後は、SOFC 単セル・スタック性能試験方法の JIS 規格化、IEC 規格化を急ぐとともに、この研究で開発した手法を活かして、SOFC システムの発電効率のさらなる向上、新燃料 (ジメチルエーテル等) ・バイオマス・石炭を利用できる SOFC システムの研究開発、自動車等の補助電源として期待されている可搬用 SOFC の研究開発に貢献し、高効率分散型 SOFC 発電システムの普及および適用性の拡大に努めていきたい。さらに、SOFC の製品化で重要になる耐久性試験方法の規格標準化も進めていきたい。

謝辞

本研究開発および性能試験方法の規格標準化は、経済産業省、NEDO から支援を受け実施しましたので、関係各位に感謝申し上げます。また、研究開発にあたり、関西電力 (株)、三菱マテリアル (株)、住友精化 (株)、紀本電子工業 (株)、英和 (株)、産総研計測標準研究部門流量計測科をはじめ、連携していただいた皆さまにお礼を申し上げます。試験方法の規格標準化では、(社) 日本電機

工業会、SOFC セル製造企業、SOFC システム開発企業、
中立研究機関等の方々からのご協力をいただきました。

参考文献

- [1] スマートコミュニティ・アライアンス(JSCA), スマートコミュニティ・アライアンス規約, <https://www.smart-japan.org>, JSCA, 東京 (2011).
- [2] W.W. Clark II and L. Eisenberg: Agile sustainable communities: On-site renewable energy generation, *Utilities Policy*, 16 (4), 262-274 (2008).
- [3] 電気化学会エネルギー会議電力貯蔵技術研究会(編): 大規模電力貯蔵用蓄電池, 8-25. 日刊工業新聞社, 東京 (2011).
- [4] 川上 潔, 河合 潤, 永井雅明: 1500 °C級ガスタービンコンバインドプラントの設計と試運転実績-東京電力(株)川崎火力発電所第1号系列の建設-, *三菱重工技報*, 46 (2), 30-33 (2009).
- [5] 小林由則, 安藤喜昌, 加幡達雄, 西浦雅則, 富田和男, 眞竹徳久: 究極の高効率火力発電-SOFC(固体酸化物形燃料電池)トリプルコンバインドサイクルシステム, *三菱重工技報*, 48 (3), 16-21 (2011).
- [6] 奥田 誠: 平成22年度固体酸化物形燃料電池実証研究成果報告会, 33-62, 新エネルギー財団, 東京 (2011).
- [7] 飯塚幸三 監修: 計測における不確かさの表現のガイド-統一される信頼性表現の国際ルール-, 日本規格協会, 東京 (1996).
- [8] 奥 雅司: 標準化教育プログラム [個別技術分野編-電気電子分野] 第15章計測の信頼性と測定の不確かさ, http://www.jsa.or.jp/stdz/edu/pdf/b4/4_15.pdf, 19.
- [9] 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): 「固体酸化物形燃料電池システム技術開発」基本計画, <http://www.nedo.go.jp/content/100085124.pdf>, 東京 (2004).
- [10] 日本規格協会: コージェネレーションユニットの性能試験方法JIS B8122: 2001, 1-41, 日本規格協会, 東京 (2001).
- [11] 門馬昭彦, 高野清南, 田中洋平, 嘉藤 徹: 固体酸化物形燃料電池(SOFC)単セル/スタックの発電性能試験方法の規格化における不確かさ評価, *Synthesiology*, 5 (4) (2012).
- [12] Bios International Corporation: model ML-800-10, <http://www.biosint.com/Products/biosmetlabseries.php>, Butler NJ (2012).
- [13] Y. Tanaka, A. Momma, K. Sato and T. Kato: Fuel flexibility of anode-supported planar solid oxide fuel cell evaluated with developed simulated-reformate-gas generator, *J. Fuel Cell Sci. Technol.*, 8, 061012, 1-6 (2011).
- [14] A. Momma, K. Takano, Y. Kaga, K. Nozaki, A. Negishi, K. Kato, T. Kato, T. Inagaki, H. Yoshida, K. Hosoi, M. Shibata, M. Yamada, T. Akbay, J. Akikusa and N. Chitose: Simultaneous impedance measurement of 46 cells in 1 kW SOFC stack: Evaluation of the fuel flow rate distribution among the cells, *Proc. SOFC9*, 1, 554-563 (2005).
- [15] 社団法人 日本計量機器工業連合会: 流量計の実用ナビ, 40-41および174-183, 社団法人 日本計量機器工業連合会, 東京 (2005).
- [16] Y. Tanaka, A. Momma, K. Kato, A. Negishi, K. Takano, K. Nozaki and T. Kato: Development of electrical efficiency measurement techniques for 10 kW-class SOFC system: Part I. Measurement of electrical efficiency, *Energy Conversion Manage.*, 50 (3), 458-466 (2009).

執筆者略歴

田中 洋平 (たなか ようへい)

2005 年京都大学大学院工学研究科物質エネルギー化学専攻博士課程修了。同年、産業技術総合研究所入所。現在、エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ研究員。専門は、触媒化学、燃料電池性能評価、エネルギー工学。この論文では、発電性能評価手法および高精度都市ガス流量・発熱量測定手法の研究開発と効率測定法の統括、発電効率測定試験法の規格標準化、論文の全体調整を担当。



門馬 昭彦 (もんま あきひこ)

1985 年東京工業大学金属工学科博士課程修了。SRI インターナショナル客員研究員を経て、1989 年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ主任研究員。専門は、電気化学計測・評価。この論文では、各種規格標準化、スタック性能評価手法の研究開発、および 10 kW 級出力測定手法の開発を担当。



根岸 明 (ねぎし あきら)

1968 年、通商産業省工業技術院電気試験所入所。1972 年東京理科大学理学部Ⅱ部化学科卒業。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループテクニカルスタッフ。専門は、電気化学、電池技術。燃料電池や新型電池等の電気化学的エネルギー変換貯蔵技術の研究開発等に従事。この論文では、高精度都市発熱量測定手法の研究開発を担当。



加藤 健 (かとう けん)

1969 年通商産業省工業技術院電気試験所入所。1973 年電機大学工学部Ⅱ部電子工学科卒業。元産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ主任研究員。専門は、電子工学。この論文では、高精度都市ガス流量測定手法の研究開発を担当。



高野 清南 (たかの きよなみ)

1966 年徳島大学工学部電気工学科卒業後、通商産業省工業技術院電気試験所入所。MHD 発電に関する研究開発、システム解析、発電特性の解析、発電実験等に従事。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループに産学官制度で来所。岩谷直治記念賞、ムーンライト計画推進功労者表彰、小平記念賞等を受賞。1989 年東京工業大学工学博士取得。その後、リチウム二次電池のシミュレーション技術の研究を経て、2001 年より固体酸化物燃料電池の発電特性評価に関する研究に従事。この論文では、スタック性能評価手法の研究開発と 10 kW 級出力測定手法の開発を担当。



野崎 健 (のざき けん)

1968 年 3 月東京大学大学院工業化学専攻修士課程修了。1968 年 4 月通商産業省工業技術院電気試験所入所。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループテクニカル

スタッフ。燃料電池や新型電池等の電気化学的エネルギー変換貯蔵技術の研究開発および地球環境技術の研究開発等に従事。この論文では、高精度都市ガス発熱量・流量測定手法の研究開発と発電効率測定試験法の JIS (TS) 規格の原案作成を担当。



嘉藤 徹 (かとう とおる)

1991 年東北大学大学院修士、工学博士。1992 年通産省工業技術院電子技術総合研究所入所。固体酸化物形燃料電池および高温水蒸気電解技術の研究に従事。産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループを経て現在は、経済産業省産業技術環境局研究開発課産業技術総括調査官。この論文では、研究開発全体の統括および発電効率測定試験法の JIS (TS) 規格の原案作成・とりまとめを担当。



くと、全体の流れがとてもわかりやすくなると思います。燃料電池の性能評価とは具体的に何を測定すれば相互評価ができるようになるのか、試験方法としてどのようなものが考えられるか、それぞれのメリット・デメリットは何か、セル・スタック・システム各レベルにおける評価手法の違いは何か、等々を整理していただけるとよいかと思います。

回答 (田中 洋平)

1 章および 2.1 節に単セル、スタック、システム性能評価の重要性を述べるとともに、新たに図 3 を作成し、各レベルの包含関係を示しつつ、性能指標と性能規定要因を整理したものを追加し、論文の前半で各レベルの評価項目 (性能指標) の説明と関連性の記述を追加しました。

議論3 技術開発の階層性

コメント (立石 裕)

議論 2 と関連しますが、3 章における個別の技術開発項目の関連性があまり記述されていないので、まったく独立な技術開発のように見えてしまいます。

3.1.1 単セルの性能評価手法の開発

3.1.2 スタックの性能評価手法の開発

3.2 システムの性能評価手法の開発と標準化

これらの項目の関連性と技術開発の流れの説明が必要かと思えます。例えば、単セルの評価手法は、スタックやシステムの評価手法にどう生かされているのでしょうか？

回答 (田中 洋平)

貴重なコメントありがとうございます。議論 2 の回答で一部お答えしましたように、単セルからシステムまでの性能評価・研究開発の流れと各レベルにおける性能指標および評価技術について、1 章で簡易的に記述し、2.1 節で説明するようにしました。

単セル性能がスタックあるいはシステムにどう活かされるかにつきましては、SOFC システムの発電部は、最小構成単位の単セルを複数積層したスタックであり、スタックの開発には単セルの性能を把握した上で、温度分布、流量分配の不均一性等による各セル性能のばらつきを評価し、最適な設計を行うことが重要です。さらに、システムでは、スタック性能に加えて、熱設計、流量制御精度等の補機類の設計が重要になりますが、特にスタック性能が発電効率等のシステム性能に直結いたします。

議論4 標準化の流れ

質問 (立石 裕)

システムの性能評価の標準化が先行し、セル・スタックの性能評価の標準化が後追いになっている理由は何でしょうか？ 常識的には、要素から標準化が始まり、システムの標準化は最後にくるような気がしますが。

回答 (田中 洋平)

ご指摘のとおり、通常ですと単セル・スタック→システムの順で開発も標準化も進んでいくと考えられますが、当初、1-200 kW 級 SOFC システムの開発がセル製造企業とシステム開発企業の間で進められ、実用化が迫っていたため、まずはシステム試験方法の規格標準化が最優先事項と判断いたしました。なお、最近、単セルおよびスタックを販売する企業が国内外で出てきており、今後国内外で商取引が活発になることならびに国際間連携による SOFC 開発が活発化することが予想されていますので、単セル・スタックの性能測定方法の規格標準化が重要となっています。我々は現在、単セル・スタック試験方法の IEC および JIS 規格提案を行っており、この取り組みについては *Synthesiology* 5 巻 4 号で報告しました (参考文献 [11])。

この点に関しては、2.1 節内に加筆しました。

査読者との議論

議論1 記述のわかりやすさ

コメント (立石 裕: 産業技術総合研究所つくばセンター)

全体に分量が多いので、記述の簡潔化が必要です。特に「1 はじめに」の部分はお題目的な内容が多いので、専門外の読者にとって必要最低限な記述にした方がよいと思います。温暖化対策と分散電源の必要性、SOFC がなぜそれに対応できるのか、開発状況、著者らの研究開発の意義とポイント (特に評価手法の現状と重要性)、を簡潔に述べてください。また、文末の「不確かさ」に関する記述は、どの程度の読者が正しく理解できるか疑問です。参考文献を追加した方が親切かと思えます。

コメント (長谷川 裕夫: 産業技術総合研究所つくばセンター)

Synthesiology は他分野の読者にもストレスなく読めるよう、筆者には分かり易い記述を心がけていただいています。その意味で、「不確かさ」について参考文献を上げていますが、簡単な解説をこの論文に書き込んだ上で、詳細は参考文献とした方がよりわかりやすくなると思います。「不確かさ」という何となく意味が分かったような気がしてしまう日本語のため、なおさらそうした注意が必要かと思えます。

回答 (田中 洋平)

導入の部分に関しては簡潔な記述を心がけ、これまでの SOFC の細かい開発経緯を削除し、現状のシステム開発の状況と今後の開発計画等を紹介し、高効率発電システムとしての SOFC システムの特長に触れるとともに、当グループの取り組みである高精度性能評価技術の重要性を記述しました。また、SOFC の位置付けとしては、温暖化対策としても有効だと考えますが、沿岸部の大規模集中型発電システムとは対照的に、特に内陸部の高効率分散型発電システムとし今後の電力・熱の安定供給を担っていくこと (エネルギーの高度利用) がより重要な役割だと考えており、関連する部分はほとんど修正していません。不確かさについては、ご指摘のとおり、簡単な説明を追加するとともに、参考文献 [7] を参照していただきたい旨を加筆しました。

議論2 性能評価の体系

コメント (立石 裕)

性能評価手法の開発に関して、セル・スタック・システムのそれぞれのレベルにおいて、具体的にどのような要素を評価すればよいのが統一的に述べられていないため、非専門家から見ると、個々の技術開発の目的がわかりにくくなっています。16 ページの 3.1.1 の二つ目のパラグラフの中の「一般的な発電性能試験時・・・大きくことが挙げられる。」という部分を最初にもう少し詳しく説明していた

地下水観測による地震予知研究

— 地下水位変化から地殻変動を推定することによる地震予知 —

小泉 尚嗣

我々は、長期の地下水観測・解析に多孔質弾性論と前兆すべりモデルを組み合わせた第2種基礎研究の結果として「前兆的地下水位変化検出システム」を構築し、国の東海地震予知事業に貢献している。この「前兆的地下水位変化検出システム」を東南海・南海地震予知にも適用するために、四国から紀伊半島地域にも地下水等総合観測網を拡大し観測を続けている。また、このシステムを用いて東南アジアの地震防災にも貢献するため、台湾で2002年から国際共同研究も行っている。2011年東北太平洋沖地震では、地震の規模を過小に予測したことが震災の要因の一つになった。しかし、この規模を過小評価してしまったことについて科学的に吟味した上で、さらに地震予知研究を進めるべきと考える。

キーワード：地下水、地震予知、地殻変動、前兆すべり、東海地震

Earthquake prediction research based on observation of groundwater

– Earthquake forecasting based on crustal deformation estimated from groundwater level change –

Naoji KOIZUMI

We constructed a system for detecting preseismic changes in groundwater levels that uses a combination of long-term observation and analysis of groundwater, a poro-elastic theory, and the pre-slip model. This system is now in operation and is contributing to the national project for prediction of the Tokai earthquake. To apply this system to Tonankai and Nankai earthquakes, we constructed an integrated groundwater observation network in and around Shikoku and the Kii Peninsula (Japan). This network is now being used to observe and study groundwater and crustal deformation. Since 2002, we have also been carrying out international cooperative hydrological research for earthquake prediction in Taiwan to help minimize the damage caused by earthquakes in Southeast Asia. We underestimated the magnitude of the 2011 Tohoku earthquake, which was one of the factors that brought about the severe damage in and around the Tohoku area. Therefore, we should examine scientifically the reasons for underestimation, and advance earthquake prediction research.

Keywords: Groundwater, earthquake prediction, crustal deformation, pre-slip, Tokai earthquake

1 はじめに

地震予知研究は典型的な「第2種の基礎研究」である。地震現象そのものの基礎研究が、地震発生の推定にも役立つと考えられることから、地震予知（実用的な地震予知）に役立つとされる第1種の基礎研究に相当する研究成果は過去にも多数報告されてきたが、それらを統合して実際の地震予知につなげようとするのはとても困難である。地下水観測による地震予知研究も例外ではない。日本で、地下水観測による地震予知研究が本格的にスタートしたのは、1975年7月の文部省測地学審議会の建議：「第三次地震予知計画の一部見直しについて」からであり、当初は、大学では、東京大学、名古屋大学、京都大学が参加し、国立研究所では工業技術院地質調査所（現在の、産総研地質調査総合センター）が参加した。

しかし、長期の観測とそれに伴う経費が必要な割に

は学術論文としての成果が上がるのが少ないことがわかってくると、大学での研究は停滞気味になり、1990年代の後半になっても積極的な観測・研究を行っているのは地質調査所だけとなってしまった。これは、大学に比べて、国立研究所の方が息の長い研究が認められたということに加え、1978年に成立した大規模地震対策特別措置法（以降、大震法）に基づく国の東海地震予知事業において、地下水観測を地質調査所が担当したことから、地震予知のための地下水の観測と研究が地質調査所の社会的責任とみなされたことが大きい。このようにして、第2種基礎研究における「悪夢の時代」^[1]を地質調査所は耐え抜いたことになる。

2 過去の南海地震前後の顕著な地下水変化

東海～四国の沖合にある駿河トラフ～南海トラフで

産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 つくば中央第7
Active Fault and Earthquake Research Center, Geological Survey of Japan, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan
E-mail: koizumi-n@aist.go.jp

は、100-200年程度の間隔でM8（マグニチュード8）クラスの巨大地震が繰り返し発生してきた（図1、2）。歴史的には、南海トラフの東側と駿河トラフの両方を破壊している地震でも東海地震と呼ぶが、ここでは簡単に、駿河トラフで生じる地震を東海地震、南海トラフ沿いの熊野灘から遠州灘で起こる地震を東南海地震、南海トラフ沿いの潮岬から西側で起こる地震を南海地震とする（図1、2）。

四国～紀伊半島の沖で発生する巨大地震である南海地震は、古くから都のあった京都周辺で被害を生じたため古文書によく記録が残っており、世界で最も発生履歴がよくわかっている巨大地震の一つである。過去8回の南海地震のうち、愛媛県松山市の道後温泉（図1のN10付近）における水位や湧出量は4度、和歌山県本宮町湯峯温泉（図1のN5付近）における水位や湧出量は4～5度、地震発生に伴い大きく低下している（図2）。ただし、それが地震前から起こっていたことなのか地震後からなのかはよくわからない。また、1946年南海地震（M8.0）においては、紀伊半島～四国の太平洋岸の11カ所で生活用水として使っていた井戸水（不圧地下水（後述）と考えられる浅い地下水）が、地震の直前～10日前に涸れたとされており^[3]、推定で数十cm以上水位が低下したと考えられる（図3）。勝浦（図3）では、温泉の湧出量も地震の6時間前に低下した。地下水位や温泉湧出量が地震前に低下した地点は合計12カ所で、紀伊半島～四国の太平洋岸周辺に広範囲に存在する（図3）。ただし、海上保安庁水路局による調査地域は160カ所

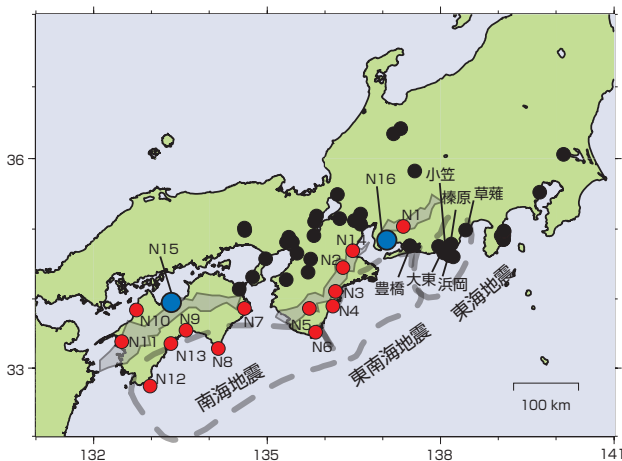


図1 東海・東南海・南海地震の想定震源域（破線）と産総研の地震予知研究のための地下水等観測網（●（黒）：2004年度以前に整備した観測点、●（赤）：2006年度以降に整備した新規観測点N1-N14、●（青）：現在整備を行っている観測点N15-N16）。四国～紀伊半島～愛知県内陸部の灰色の領域は、短期的ゆっくりすべりおよび深部低周波微動が定期的に発生していると考えられる地域。N5の観測点の近傍に湯峯温泉があり、N10の観測点の近傍に道後温泉がある。湯峯温泉と道後温泉については図2参照。

上で^[3]、出現率としてはごく低いことになる。このような地震前の地下水位の低下は、1854年の南海地震前にも四国や紀伊半島の太平洋岸で発生したことが知られている^[4]。

3 多孔質弾性論による地下水と地震との結びつけ

上述のように、地下水が地震前に変化することがあるのは日本では古くから知られていて、脇田（1978）^[5]が過去の例を表の形にまとめている。しかし、これらはいわば観測事実のみであり、地震と地下水を結びつける理論が薄弱だったために、組織的な研究が日本で始まったのは1975年からである^[6]。ダイラタンシー水拡散モデル^{[7][8]}（震源域に力が集中して割れ目が増加し、その割れ目に周囲から地下水が流れ込んで震源域の強度が下がり地震が発生するというモデル）が提案されて、地下水変化と地震の関係の理論的な裏付けができたことが、1975年から本格的な研究が始まったことの一因である。ダイラタンシー水拡散モデルが支持されなくなると^[9]、地下水観測はいったん理論的裏付けを失うが、その代わりに理論的根拠になったのが多孔質弾性論である。

物体にかかる力（応力）と変形（歪（ひずみ））の関係を記述したのが弾性論であり、地震と地殻変動（地面の変形）は弾性論によって理論的に結びつけることができる。地震を断層における食い違いとし、それによる変形が（地震に伴う）地殻変動であるとする事で地震と地殻変動は結びつけられるのである。GPSや歪計等で観測される地殻変動と地震との関係は一般に弾性論で説明され、弾性論における変数は応力と歪の二つであるからここに地下水の関与する余地はない。

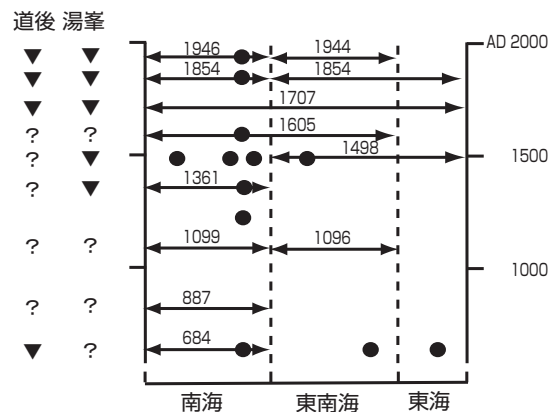


図2 東海・東南海・南海地震の発生履歴と道後温泉・湯峯温泉の湧水量や水位の低下 ▼は低下を表し、？は古文書に変化の有無の記載がないことを示す。●は液状化等の地震の痕跡。寒川（1992）^[4]に加筆。この結果を考慮して、湯峯温泉の近傍にN5の観測点を、道後温泉の近傍にN10の観測点を設けた。

他方、多孔質弾性論は、空隙のある弾性体を考え、その空隙が水で満たされている状況での、応力・歪・空隙中の水圧・空隙中の水の量（以降、単に含水量と称す）との相互関係を示す理論である^{[10][12]}。空隙中の水＝地下水、空隙中の水圧＝空隙圧＝地下水圧＝地下水位とみなせば、この理論を用いることで地下水と地殻変動を結びつけることができる。多孔質弾性論の立場から考えると、地下水と地殻変動は密接な関係があるので、地殻変動を正確に理解するためには地下水の観測が必須ということになり、この理論を用いることで、地殻変動を仲立ちにして地下水と地震とを理論的に結びつけることができる。実際には、地下深部の地震発生位置付近の含水量や空隙圧を把握するのは難しい。現状の我々の解析では、地震の断層モデルとそれによって生じると考えられる地殻変動については弾性論を用い、その地殻変動と地下水変化との関係については多孔質弾性論を用いる形をとっている。

地殻変動と地下水変化との関係で実際によく用いるのは、地震に伴う地殻変動は地下水の移動に比べて十分早いとして含水量の変化はないとしたときの、地殻の体積変化（体積歪変化： ε ）と地下水圧変化（ p ）との比例関係式

$$p = k\varepsilon \quad (1)$$

である。観測された地下水圧変化から体積歪変化を求めたりその逆を行うのである。ここで k は、地下水圧の体積歪変化に対する感度（以降、単に体積歪感度）とも呼ぶべきものである。

地下水圧変化を体積歪変化に換算するのに必要な感度 k は、月や太陽の引力による地面の変形（地球潮汐）で

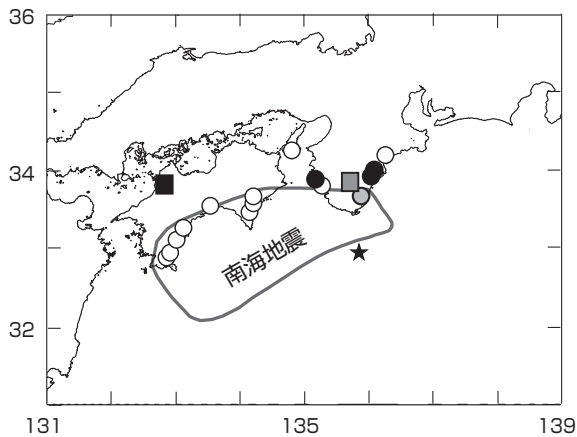


図3 1946年南海地震前の地下水位等の低下
○：浅い井戸水の水位が低下した11地点、●：浅い井戸水が濁った3地点、●（灰色）：温泉湧出量が低下した勝浦地点、★：1946年南海地震の震央、実線で囲まれた部分：南海地震の想定震源域、■：道後温泉、■（灰色）：湯峯温泉。

生じた体積歪の潮汐変化（日本では 10^{-7} 程度の大きさ）による p の変化によって一般に見積もっている。地下水は大きく不圧地下水（水を通さない地層や岩盤の上にある自由地下水面をもつ地下水、自由地下水面では気圧と水圧がつりあっている）と被圧地下水（水を通さない地層や岩盤に挟まれた地下水）に分けられるが、不圧地下水（一般に浅い地下水）では k はごく小さくて 10^{-7} 程度の体積歪変化に対する水位の潮汐変化は検出されない。他方、被圧地下水（一般に深い地下水や温泉水）では検出可能で、水位に対する k は、観測点によって異なるがおおむね $0.1 \sim 10$ ($\text{cm}/10^{-7}$)程度である^{[13][14]}。図4に三重県津市にあるN14観測点（図1）における2012年3月1日～15日の観測結果を示す。この観測点では、地下水位が地表より上にくるので、井戸を密閉して水圧として測定している。生の水圧データには、気圧や降雨による変化に加え、半日や1日を周期とする変化が見いだせるが、これが体積歪の潮汐変化による地下水圧変化である。気圧や降雨の地下水位（水圧）への影響を統計的に除去するプログラム^[15]を用いてそれぞれの成分を分離すると、両振幅で6 cm程度の潮汐成分が認められる。また、気圧・降雨の寄与や潮汐成分を除いた（補正

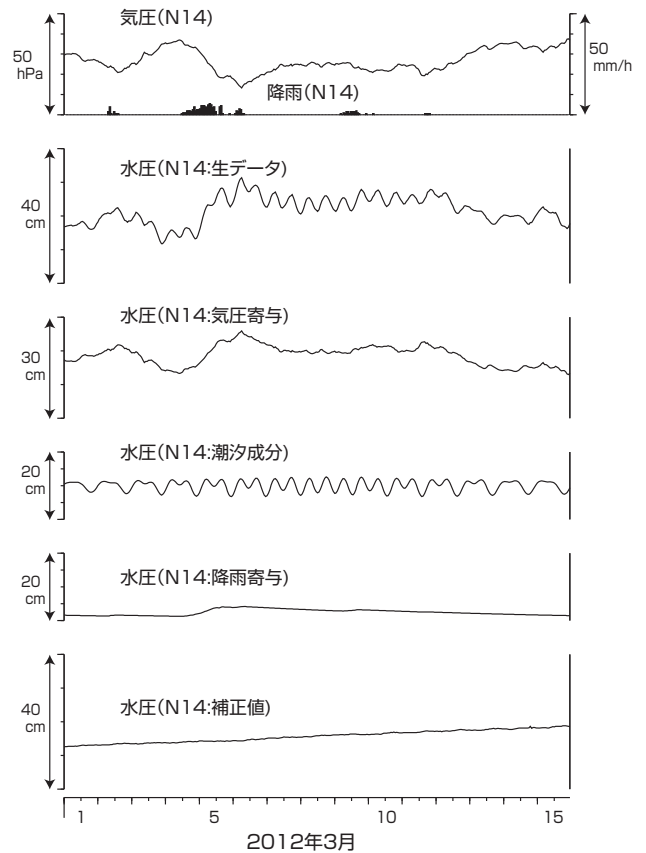


図4 N14観測点（図1）における水圧変化の観測例
水圧を水位の単位に換算して表示している。

された) 水圧には、この期間ではほとんど変化がないことがわかる。

4 東海・東南海・南海地震予測と産総研の地下水等観測

図2に示したように、駿河～南海トラフで最も近年に発生したM8クラスの巨大地震は、1944年東南海地震(M7.9)と1946年南海地震(M8.0)である。この二つの地震では、震源域が駿河トラフまで及んでいなかったため、駿河トラフでの巨大地震(東海地震)が切迫しているとされ、大震法が1978年に制定されて国による地震予知事業が始まった。

産総研は旧工業技術院地質調査所のこの事業を継承し、東海地方周辺に地下水観測点を設け、観測データを気象庁に提供し、東海地震の判定を行う地震防災対策強化地域判定会の説明者として国の地震予知事業を当初から分担してきた^{[16][17]}。我々は、東海地方での長年の地下水観測によって、通常時の観測点毎の地下水変化の特性をつかむとともに、図4に示したような気圧や降雨の地下水への影響を統計的に除去するプログラムを開発し^[15]、地下水観測のS/Nを向上させてきた。加えて、多孔質弾性論を用いることで、地下水の観測によって体積歪変化も推定してきた。その結果「体積歪観測」として考えたときの地下水観測のS/Nを定量的に評価できるようになっていった。観測された地下水位(水圧)・湧水量には、平常時において、気圧や降雨・潮汐の影響を除去しても、図4の補正值に示すように長期的な上昇や下降といった変化が残る。また、期間を24時間以内といった短期間に限っても数mm～数cm程度の水位変化が残る。このような変化は「ノイズ」と考えられる。そのノイズのレベルを越える変化があったときに異常な地下水変化として検出できることになる。このようなノイズは体積歪を直接観測した場合でも存在する。地下水観測のノイズレベルと体積歪観測のノイズレベルは、そのままでは単位が異なるので比較ができないが、上述の k を使うことで、地下水データを体積歪データに換算でき比較可能となる。図5は、地下水位のノイズレベルを体積歪に換算し、気象庁の体積歪計のノイズレベル(1999年時点)と比較したものである。地下水位も歪も長期的な変化におけるノイズの見積が困難なので、1時間、3時間、24時間といった短い時間の差(階差)の中でのノイズレベルを見積もっている。気象庁では、1999年の時点では歪計における雨量補正を行っていなかったため、降雨時と通常時(降雨のない時)を区別してノイズレベルを求めているのに対し、産総研は水位において降雨補正をしているのでその区別をしていない。産総研の

地下水観測点のノイズレベルは、気象庁の体積歪計のそれに比べて同程度～数倍程度である。水位計等の地下水観測機器の価格が、体積歪計のそれに比べて1/10～1/100であることを考慮すると、コストパフォーマンス的に優れていることがわかる。また、後述するように、歪計等の高価な地殻変動観測機器が整備されていない地域や国々においても、地下水位等の観測が行われている所が多いことも考慮すれば、地震予知のための手法として汎用性に優れているともいえる。

21世紀に入り、次の東南海・南海地震の切迫性が増すと^[20]、「東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」が2003年に施行され、同地震に対する観測施設の整備が求められた。同法は、国に四国・紀伊半島を中心とする東南海・南海地震防災対策推進地域において地震防災対策を求める一方で、観測網の整備と研究も求めている。このようななか、産総研は、東南海・南海地震予測のために、紀伊半島～四国周辺に地下水等観測施設を2006年度から新規に構築して2011年度末までに14点の整備を終え、現在は、さらに新規2点を整備中である(図1)。これについては4.3で述べる。

4.1 地下水観測による東海地震の前兆すべり検出

現時点で東海地震の最も有望な前兆現象は、地震直前に将来の地震発生域周辺で起こるゆっくりすべり(前兆すべりまたはプレスリップと呼ぶ)である。図6に、プレート境界で逆断層型のすべりがあったときの地盤の隆起・沈降や伸縮およびそれに伴う地下水位変化を模式的に示した。このようなすべりが地震直前にあって、それ

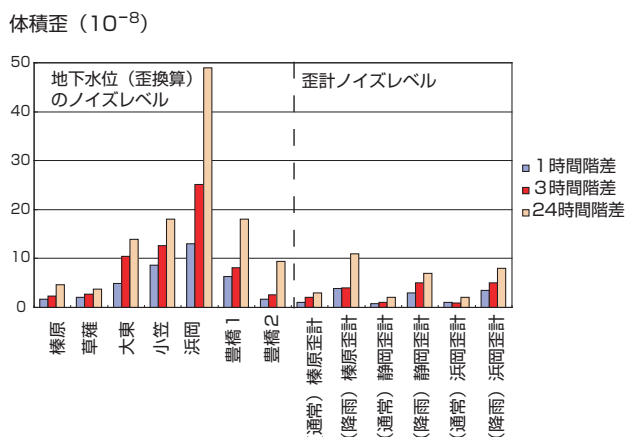


図5 東海地方における、産総研の主な地下水観測点のノイズレベル(左側7組のグラフ、観測点の位置については図1参照)と気象庁の体積歪計のノイズレベル^[18](右側6組)との比較(松本・北川(2005)^[19]の図を一部修正)。豊橋には観測井戸が二つあるので、それぞれ豊橋1・豊橋2としている。

に伴う地殻変動を事前に検出できれば地震予知ができることになる。

気象庁（2003）^[21]がこのような前兆すべりによる地殻変動検出による東海地震予知シナリオを発表したとき、地下水変化を体積歪変化として評価できるようになっていた我々はそれに対応して地下水観測による定量的な地震予知方法を作り上げた^[17]。この方法を使うことで、歪計・傾斜計・GPSといった地殻変動観測機器と同様にして地下水位変化を定量的に評価できるようになった。図7は、産総研の榛原観測点の直下でマグニチュード6.5の大きさに相当する前兆すべりが生じた時に想定される、気象庁観測点での体積歪変化と産総研観測点での地下水位変化を示したものである。上述のように、産総研の地下水観測点のノイズレベルは体積歪に換算して気象庁の体積歪観測点の同程度～数倍なので、それを反映して有意な変化の検出は気象庁の体積歪観測点と同程度か遅れる。他方、実際にこのような変化があった場合には、歪観測とは独立な観測である地下水位観測結果も前兆すべりで説明できることから、前兆すべりが発生しているという推定への信頼性が増すと考えられる。もちろん、前兆すべりの場所や大きさによって現れる水位変化は異なるので、我々は、東海地震の想定震源域周辺すべてで前兆すべりの大きさも変えて同様の計算を行って、観測値と比較できるようにしている^[17]。このような観測から解析にいたる手順一式を、我々は「前兆的地下水位変化検出システム」と呼んでいる。このシステムによって、地下水観測による前兆現象検出についての精度が増し、東海地震予知手法全体についての信頼性向上に貢献したと考えられる。

産総研の東海地域における地下水観測データは産総研を経由してリアルタイムで気象庁に送られていて、東海地震予知のために気象庁で24時間監視されている。すなわち、産総研による東海地域での安定な地下水観測そ

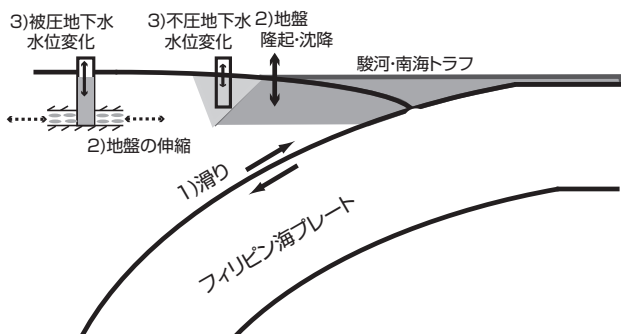


図6 プレート境界で逆断層型のすべりがあったときの地盤の隆起・沈降と伸縮およびそれによって地下水位変化が生じることを示す模式図

のものが社会的なアウトカムとなっている。

4.2 前兆すべりモデルに基づく過去の南海地震前の地下水変化の解釈

上述の前兆すべりモデルに基づいて2章で示した南海地震前の地下水低下を考えてみる。南海トラフのプレート境界で南海地震の前に逆断層型のゆっくりしたすべり（前兆すべり）があれば、四国や紀伊半島では広い範囲で地震前に地盤が隆起し体積歪が増加する。被圧地下水は体積歪が増加すると上述のように水位が下がり得る。不圧地下水は体積歪変化に対して鈍感だが、海岸付近の不圧地下水は海水と圧力平衡にあるので、地盤が隆起すると、相対的に低下した海水面に呼应して（陸地の表面から見て）水位が低下する（図6）。したがって、過去の南海地震前の地下水位や温泉湧水量の低下は、定性的ではあるが前兆すべりによって説明することができる。

他方、1946年南海地震における不圧地下水の地震前の変化については、京都大学防災研究所（2003）^[23]の前兆すべりモデル（1946年南海地震の断層の一部で、本震の10%程度のすべりが地震前に生じたとするモデル）で予測される隆起量が最大でも数cm程度なので、上述した数十cm以上という水位低下の振幅は説明できない。他方、同じモデルによる体積歪増加は大きく、被圧地下水の水位ならば数十cm以上の低下も可能である^[16]。しかし実際には、1カ所の勝浦の温泉を除いて、浅い地下水と考えられるものの水位が大きく低下してい

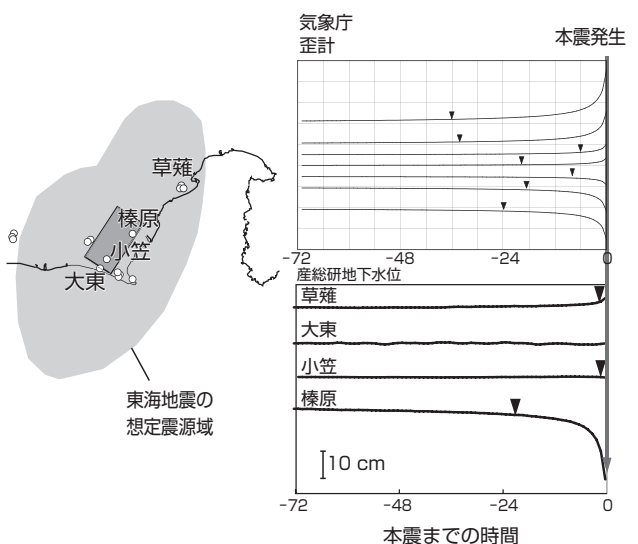


図7 前兆すべりに伴う地下水位変化のシミュレーション^[17] 左側の小さな○は産総研の地下水観測点の位置。灰色のナスビ状の形は東海地震の想定震源域を地表に投影したもの。左側の想定震源域の中の灰色の四角で示した矩形形状の断層でM6.5相当の前兆すべりが72時間かけて生じた時に気象庁の歪データや産総研の地下水位データにどのような変化が生じるかを計算したのが右の図。通常時のノイズレベルを越えたときに「有意な変化」として▼印を入れている。

る。したがって、図6のモデルで1946年南海地震前の地下水変化を説明するためには、前兆すべりによる微小な地殻変動があることに加えて、それによって不圧地下水が大きく変化する何らかの特殊なメカニズムが必要となる。被圧地下水が先に水位を低下させた後、不圧地下水から被圧地下水へ水が移動し、不圧地下水も水位が低下するというのはあり得る一つのメカニズムである。このような特殊なメカニズムの存在する場所が限られているために、1946年南海地震前の地下水位低下の出現率は低いのかかもしれない。

4.3 新たな観測システムの設計と整備

以上のことから、東海地震用に構築した「前兆の地下水位変化検出システム」を東南海・南海地震にも適用するため、過去の南海地震前の地下水位低下メカニズムを明らかにするために、産総研は、地下水等総合観測点を2006年度から2012年度までに、整備中のものも含めて四国～紀伊半島周辺に16点構築し(図1)、東海地域の観測網と統合して観測・解析を行っている^[22]。観測点の選定にあたっては、過去の南海地震前後に地下水が変化した場所や(図3)、東南海・南海地震の想定震源域に近い場所(図1)、および、後述する短期的ゆっくりすべりや深部低周波微動の発生位置を考慮して決めた(図1)。歴史的にみれば、東海地震は、東南海・南海地震と連動して発生するのが通例なので(図2)、この観測と解析は東海地震予知にも役立つ。

四国から紀伊半島に整備した新たな産総研の観測点では(図1のN1-N14)、地下水の観測に加えて歪や傾斜や地震の観測も行っている。近くに国土地理院のGPS観測点がない場合はGPSも測定している。過去の南海地震では、被圧地下水と考えられる深い地下水(温泉水)だけでなく、不圧地下水と考えられる浅い地下水も変化したとされており(図3)、上述のように鉛直方向の地下水の移動があり得ることから、深さの異なる3本の井戸を掘削して水位(水圧)・水温の観測を行っている(図8)。現在整備中のN15・N16観測点でも同様の観測を行う予定である。なお、観測データはリアルタイムで産総研に送られている。また、産総研を経由してリアルタイムで気象庁にもデータが送られている。

東海地震および東南海・南海地震の想定震源域の深部延長では、想定されている前兆すべりに酷似した短期的ゆっくりすべりが深部低周波微動^[24](プレート境界付近の深さ30-40km程度で発生し、通常地震より低周波の微弱な波を出し、始まりと終わりがはっきりしない地震)と共に年に数回発生することが知られており^[25]、その時空間分布を正確に把握することが東海・東南海・南

海地震の予測精度向上に必須である^[26]。短期的ゆっくりすべりが拡大して想定震源域にまで及べば、本震を誘発することが考えられる。さらに、震源域に応力が集中して本震の発生が近づくと、震源域の深部延長部分でも応力状態等が変化して短期的ゆっくりすべりの発生パターンが変わることがシミュレーションで推定されている^[27]。産総研は、防災科学技術研究所や気象庁と協力してこの短期的ゆっくりすべりや微動のモニタリングを行っていて、今までよくわかっていなかった紀伊半島での短期的ゆっくりすべりの時空間分布^{[28][29]}や微動の高感度検出^[30]等においてすでにいくつかの成果を出している。同時に、この短期的ゆっくりすべりによって地下水がどのように変化するかどうかも調査している。現状では、一部の観測点の被圧地下水について、短期的ゆっくりすべりに伴う地下水圧の変化は検出されているが^[31]、それは、歪変化等から想定される範囲内である。また、短期的ゆっくりすべりに伴う不圧地下水の水位変化は検出されておらず、過去の南海地震前の地下水位低下メカニズムを明らかにするには至っていない。

これらの観測データのグラフは、<http://www.gsj.jp/wellweb/>で公開しており、グラフは毎日更新している。

5 地下水観測による地震予知研究手法を海外にも適用する試みについて

地殻変動観測機器は一般に高価であり、地震リスクが高くても、地殻変動観測が不十分な地域や国々はたくさんある。例えば、東南アジアの国々もその一例である。しかし、そのような国々でも、地下水の観測は、地震予知以外の目的で一般に行われている。降雨の影響が少な

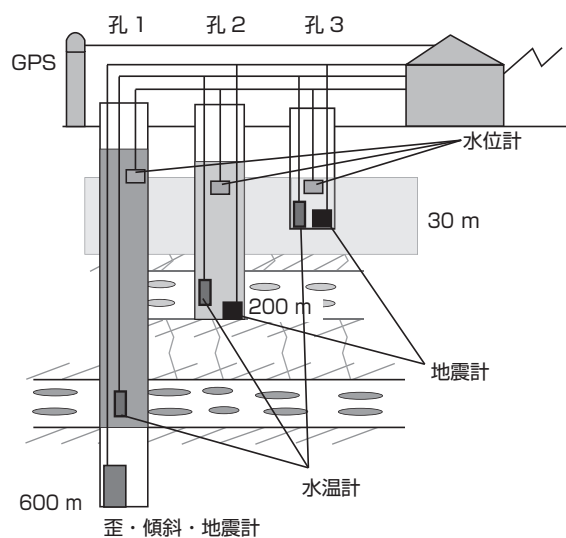


図8 N1-N16観測点(図1)における典型的な観測システム

い、揚水の影響が少ない、地下水位の体積歪感度が高いといった条件で観測井戸を選び出して地下水位観測網を作れば、短時間で「簡易」地殻変動（体積歪）観測網ができることになり、前兆的地下水位変化検出システムをその地域に適用することが可能になる。また、以前の地下水位データを体積歪感度を使って洗い直すことで、過去にさかのぼって地震前後の地殻変動を推定することも可能になる。以上のことから、その地域の地震災害軽減に低コストで貢献できると考えられる。このような考えに基づいて、我々は、台湾の成功大学と地下水観測による地震予知研究について2002年から共同研究「台湾における水文学的・地球化学的手法による地震予知研究」を行っている^[32]。この背景には、1999年に台湾西部で発生した集集地震（モーメントマグニチュード7.6）で大きな被害が生じた結果、将来の地震予知も視野に入れた地震・活断層研究が2001年から台湾で活発になったことがある。

約10年間の共同研究によって、1999年集集地震に伴う地下水変化のメカニズムに関する研究^{[33][34]}、地震に伴う地下水変化に関する研究を行うための16点からなる地下水観測網の構築、同観測網での地震時～地震後の地下水変化の分析^[35]等において成果をあげてきた。他方、既存の地下水観測井戸のデータを用いる場合は、人工的な揚水の影響を受けることが多くS/Nの評価については大きな課題である。前兆的地下水位変化検出システムの技術移転を台湾に行うことで、人材の養成も含めて台湾側の地震防災に貢献できる。また、台湾は日本以上に地震活動が活発であり、通常の地殻変動の大きさは年率にして日本の10倍以上に達するところもある。したがって、日本で観測するよりも短時間で、地震や地殻変動に対する地下水変化の観測例を蓄積することができるので、台湾において地震と地下水・地殻変動の観測・研究を行えば、より効率的に研究成果をあげることができる。今後とも、双方にメリットのあるこの共同研究を続け、将来的には東南アジアの地震災害軽減に貢献したい。

6 2011年東北地方太平洋沖地震後の地震予知研究に対する考え方

地震発生の場所・規模・時期をあらかじめ推定して震災軽減に役立てようという研究において、先人たちが「予測（あらかじめ推し測る）」という言葉ではなく、「予知（予め知る）」というより強い言葉を使ったのは（例えば、今村（1929）^[36]）、地震前の防災行動に直接つながる「精度の高い予測」を目指したからだろう。実際の所、地震予知研究に携わる研究者が、現在に至るまで終始一

貫行ってきたのは「地震予測」の研究であり、その精度を高める努力を続けてきたわけである^[37]。その成果の一つとして、日本およびその周辺域における地震の長期予測が行われるようになった^[38]。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震は、これまでその場所で地震学者が想定してきた規模をはるかに上回るマグニチュード9に達し、主に津波によって約2万人の死者・行方不明者を出して、我々の予測のレベルが予知と呼ぶには不十分なことを示した^[39]。ただし、データが少なく評価不能な三陸沖中部や福島県沖（想定地震規模M7.4、30年発生確率7%）を除く、三陸沖北部・宮城県沖・茨城県沖では、M7-7.5クラスと想定された規模の地震の30年発生確率は80%以上と高かったので^{[40][41]}、地震の長期予測における場所と時間予測についてはおおむね的中したとも考えられる。特に、宮城県沖では、2005年にM7.2の地震が発生していたのにも関わらず、GPS等の観測結果から、想定されている震源域周辺ではまだエネルギーが解放されていないとして、引き続き30年以内での発生確率99%という数値（地震調査研究推進本部の長期予測確率の最大値）を変更せず警戒を呼びかけていたのも事実である^[42]。このように、同地震前の予測に関しては、科学的にも防災的にも評価できる部分があり、「地震予知（予測）の研究は無駄」といった批判は的外れであろう。今後、2011年東北地方太平洋沖地震の事前の予測とその結果についての科学的な評価・検証を十分に行った上で、さらに地震予知研究を進めるべきと考える^[43]。

7 まとめ

長期の地下水観測と解析結果に多孔質弾性論と（気象庁が明確化した）東海地震予知モデルを組み合わせた第2種基礎研究の結果、「前兆的地下水位変化検出システム」を構築し、アウトカムとして東海地震予知事業に貢献している。「前兆的地下水位変化検出システム」を東南海・南海地震予測にも適用するために、四国から紀伊半島地域にも地下水等総合観測網を拡大し、観測と研究を続けている。また、同システムを用いて東南アジアの地震防災にも貢献するため、台湾で2002年から国際共同研究を行っている。台湾は日本より地震活動が高く、地殻変動も大きいので、日本で観測するよりも効率よく地震と地下水との関係がわかる可能性もあり同システムの改善への期待が持てる。2011年東北太平洋沖地震では、地震の規模を過小評価したことも一因となって大きな被害が出たが、場所や時期については、予測はある程度当たっていたとも考えられる。科学的な検証を行った上でさらに地震予知研究を進めるべきである。

参考文献

- [1] 吉川弘之, 内藤 耕: 第2種基礎研究-実用化につながる開発研究の新しい考え方-, 日経BP社 (2003).
- [2] 寒川 旭: 地震考古学, 中央公論社 (1992).
- [3] 海上保安庁水路局: 昭和21年南海大地震調査報告-地変及び被害編-, 水路要報増刊号, 201 (1948).
- [4] 重富國宏, 梅田康弘, 尾上謙介, 浅田照行, 細 善信, 近藤和男, 辰巳賢一: 資料, 証言にみる南海地震前の井水濁れ及び異常潮位, 京都大学防災研究所年報, 48-B, 191-195 (2005).
- [5] 脇田 宏: 地下水の水位, 化学組成変化, 浅田敏編「地震予知の方法」, 東京大学出版会, 146-166 (1978).
- [6] 小泉尚嗣: 地球化学的地震予知研究について, 自然災害科学, 16, 41-60 (1997).
- [7] A. Nur: Dilatancy, pore fluids, and premonitory variation of tp/ts travel times, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 62, 1217-1222 (1972).
- [8] C.H. Scholz, L.R. Sykes and Y.P. Aggarwal: Earthquake prediction: a physical basis, *Science*, 181, 803-810 (1973).
- [9] 茂木清夫: 日本の地震予知, サイエンス社 (1982).
- [10] M.A. Biot: General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, 12, 155-164 (1941).
- [11] E.A. Roeloffs: Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, *Adv. Geophys.*, 37, 135-195 (1996).
- [12] H.F. Wang: *Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology*, Princeton Univ. Press, Princeton (2000).
- [13] E.A. Roeloffs: Hydrologic precursors to earthquakes: a review, *Pure Appl. Geophys.*, 126, 177-209 (1988).
- [14] S. Itaba, N. Koizumi, T. Toyoshima, M. Kaneko, K. Sekiya, and K. Ozawa: Groundwater changes associated with the 2004 Niigata-Chuetsu and 2007 Chuetsu-oki earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, 1161-1168 (2008).
- [15] N. Matsumoto: Regression analysis for anomalous changes of groundwater level due to earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1193-1196 (1992).
- [16] 小泉尚嗣, 高橋 誠, 松本則夫, 佐藤 努, 大谷 竜, 北川有一: 水文学的手法による地震予知研究-地下水変化から地震前の地殻変動を検知する試み-, *地震2*, 58, 247-258 (2005).
- [17] N. Matsumoto, Y. Kitagawa and N. Koizumi: Groundwater-level anomalies associated with a hypothetical preslip prior to the anticipated Tokai earthquake: Detectability using the groundwater observation network of the Geological Survey of Japan, AIST, *Pure Appl. Geophys.*, 164, 2377-2396 (2007).
- [18] 小林昭夫, 松森敏幸: 埋め込み式体積歪計のノイズレベル調査及び異常監視処理, *駿震時報*, 62, 17-41 (1999).
- [19] 松本則夫, 北川有一: 想定東海地震震源域付近の観測井における地下水位の歪感度とノイズレベル, *測地学会誌*, 51, 131-145 (2005).
- [20] 地震調査研究推進本部: 南海トラフの地震の長期評価, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01sep_nankai/nankai.pdf (2001).
- [21] 気象庁: 東海地震に関する新しい情報発表について, <http://www.jma.go.jp/jma/press/0307/28a/20030728tokai.pdf> (2003).
- [22] 小泉尚嗣, 高橋 誠, 松本則夫, 佐藤 努, 大谷 竜, 北川有一, 板場智史, 梅田康弘, 武田直人: 地下水等総合観測による東海, 東南海, 南海地震予測, *地質ニュース*, 663, 29-34 (2009).
- [23] 京都大学防災研究所: 地下水変化に対する前駆的すべりの断層モデル, *地震予知連絡学会報*, 70, 402-403 (2003).
- [24] K. Obara: Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681 (2002).
- [25] K. Obara, H. Hirose, F. Yamamizu and K. Kasahara: Episodic slow slip events accompanied with non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23602, doi: 10.1029/2004GL020848 (2004).
- [26] 小原一成: スロー地震モニタリングは巨大地震予測に有効か?, *日本地震学会講演予稿集2011年度秋季大会*, 104 (2011).
- [27] T. Matsuzawa, H. Hirose, B. Shibasaki and K. Obara: Modeling short- and long-term slow slip events in the seismic cycles of large subduction earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 115, B12301, doi:10.1029/2010JB007566 (2010).
- [28] S. Itaba, N. Koizumi, N. Matsumoto and R. Ohtani: Continuous observation of groundwater and crustal deformation for forecasting Tonankai and Nankai earthquakes in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 167, 1105-1114 (2010).
- [29] S. Itaba and R. Ando: A slow slip event triggered by teleseismic surface waves, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21306, doi:10.1029/2011GL049593 (2011).
- [30] K. Imanishi, N. Takeda, Y. Kuwahara and N. Koizumi: Enhanced detection capability of non-volcanic tremor using a 3-level vertical seismic array network, VA-net, in southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L20305, doi:10.1029/2011GL049071 (2011).
- [31] 北川有一, 松本則夫, 小泉尚嗣: 津安濃観測点の地下水圧変化による三重県北部および中部での短期的SSEの検出, *日本地震学会講演予稿集2011年度秋季大会*, 148 (2011).
- [32] 小泉尚嗣, 松本則夫, 頼 文基: 台湾国立成功大学と産業技術総合研究所との共同研究「台湾における水文学的, 地球化学的手法による地震予知研究」について, *地質調査研究報告*, 62, 185-190 (2011).
- [33] WC. Lai, N. Koizumi, N. Matsumoto, Y. Kitagawa, CW. Lin, CL. Shieh and YP. Lee: Effects of seismic ground motion and geological setting on the coseismic groundwater level changes caused by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Earth Planets Space*, 56, 873-880 (2004).
- [34] N. Koizumi, WC. Lai, Y. Kitagawa and N. Matsumoto: Comments on "Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chichi earthquake, Taiwan" by Min Lee *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13603, doi:10.1029/2004GL019897 (2004).
- [35] WC. Lai, KC. Hsu, CL. Shieh, YP. Lee, KC. Chung, N. Koizumi and N. Matsumoto: Evaluation of the effects of ground shaking and static volumetric strain change on earthquake-related groundwater level changes in Taiwan, *Earth Planets Space*, 62, 391-400 (2010).
- [36] 今村明恒: 關東並に近畿地方に於ける地震活動の循環と大震前の諸現象とに就いて, *地震1*, 1, 4-16 (1929).
- [37] 日本地震学会地震予知検討委員会: *地震予知の科学*, 東大出版会 (2007).
- [38] 地震調査研究推進本部: 地震に関する評価, http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm (2011).
- [39] 松澤 暢: なぜ東北日本沈み帯でM9の地震が発生しえたのか?-われわれはどこで間違えたのか?, *科学*, 81, 1020-1026 (2011).
- [40] 地震調査研究推進本部: 宮城県沖地震の長期評価, <http://www.jishin.go.jp/main/chousa/00nov4/miyagi.htm> (2000)
- [41] 地震調査研究推進本部: 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価の一部改訂について, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09mar_sanriku/index.htm (2009).
- [42] 地震調査研究推進本部: 今までに公表した活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧, http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran_past/ichiran20110111.pdf (2011).
- [43] 小泉尚嗣: 2011年東北地方太平洋沖地震後における地震の予知・予測研究への批判について, *日本地震学会論文集「地震学の今を問う(東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会報告)」*, 58-61 (2012).

追記

本論文を執筆し、受理後、筆者も所属する公益社団法人日本地震学会（以降、単に地震学会と記す）が、2011年東北地方太平洋沖地震によって生じた様々な課題に対処するためとして行動計画 2012 (<http://www.zisin.jp/pdf/SSJplan2012.pdf>) を発表し、その中で「地震予知」と「地震予測」の用語の厳密化を図っている。従来、地震予知は「場所、大きさ、時間を特定して地震の発生を事前に予測すること」という広い意味でも使われてきたが、それが警報につながる狭義の地震予知と混同され、地震前の「警報」に対する社会の過剰な期待を生むことになり、その裏返しとして、2011年東北地方太平洋沖地震後に地震学者は大きな批判を浴びた。この反省から、地震学会は、「場所、大きさ、時間を特定して地震の発生を事前に予測すること」については地震予測と呼ぶことにし、警報につながる精度の高い地震予測のみ地震予知とよぶべきと用語を整理し、現状では地震予知は非常に困難であるとの認識を改めて示したのである。ただし、6章でも述べたように、地震予測の精度を上げれば（狭義の）地震予知につながるわけであるから、研究レベルで地震予知研究と地震予測研究を明瞭に区別するのは困難であると考えられる。「地震予知と地震予測の定義の厳密化」については、以前から地震学会内でも議論されていたことではあるので、本論文でも、警報にすぐにつながるもの（地震予知）とすぐにはつながらないもの（地震予測）ということを意識して使い分けてはいるが、明瞭に区別できているわけではない。

イタリアのラクイラでの地震（2009年4月6日発生、M6.3、死者300名以上）で、事前に「安全宣言」を出したということで、6名の科学者を含む7名が罪に問われている。地震予知の難しさを改めて示す出来事であるが、困難であっても取り組まなければならない研究課題というものはある。地震国日本において、地震予知は、まさにそのようなタイプの研究課題であると筆者は考えるものである。

執筆者略歴

小泉 尚嗣（こいずみ なおじ）

1988年京都大学大学院理学研究科博士後期課程地球物理学専攻単位取得退学。1989年京都大学防災研究所助手、同年博士（理学）（京都大学）取得。1996年通商産業省工業技術院地質調査所に異動。2001年独立行政法人産業技術総合研究所地球科学情報研究部門地震地下水研究グループ長、2009年活断層・地震研究センター地震地下水研究チーム長、2011年からは同センターの主幹研究員となる。学生時代から一貫して地下水観測による地震予知研究に取り組む。震災軽減のためには、研究成果の広報活動が最も重要とも思っている。



査読者との議論

議論1 全般的コメント

コメント（佃 栄吉：産業技術総合研究所、多屋 秀人：産業技術総合研究所広報部）

この研究論文は、長期にわたる地下水位の観測と解析技術の中核に、理論的基礎（多孔質弾性論）を背景に地殻変動に伴う地下水位と地震発生との関連に展開し、また、地下水位観測システムの構築、観測網の整備を通じて東海・東南海・南海地震予知に向けて一連のプロセスについて言及した優れた論文と判断しました。東海・東南海・南海地震については、その切迫性が高まる中、また、東日本大震災の経験もあり社会的関心もますます高まっています。地震予知情報が出されれば人的被害を効果的に軽減できることから、その研究の進展が強く期待されていると理解しています。一方、その結果が得られるまで長期的な観測の継続が必要であり、そのため公的研究機関が担うべきであることは自明であるものの、本格研究として困難な課題に挑戦されていると思います。

議論2 潮汐による体積歪

質問（多屋 秀人）

潮汐による「体積歪」についての質問です。日本では、「 10^{-7} 程度の大きさ」とのことですが、地球の緯度でおおよそ決まるものなのでしょうか？

回答（小泉 尚嗣）

潮汐による地盤の変形の最大振幅は、おおよそ緯度で決まります。

議論3 地下水位観測による地震予知

質問（多屋 秀人）

日本各地域で地震は発生しているが、それぞれ発生メカニズムが異なると思います。その中で、地下水位観測により地震予知が可能と想定される地震とはどのようなもののでしょうか？

回答（小泉 尚嗣）

現状では、プレート海溝型の地震であって、前兆滑りのシナリオが使えるもののみ地震予知の可能性があると思っています。今後、他のタイプの地震についても、信頼できるモデルに基づく地震前の定量的な地殻変動のシナリオが提示されれば対応は可能だと思います。

議論4 新たな超巨大地震の想定と観測体制

質問（佃 栄吉）

国はすでにマグニチュード9クラスの地震を想定して被害予測を行っています。これについて観測体制との関係でコメントしてください。これまでより大きな規模ですが、想定モデルに基づく観測に影響はありませんか？

回答（小泉 尚嗣）

南海トラフで発生する可能性があるとして新たに想定されたM9クラスの超巨大地震について、想定震源域が西（日向灘）へ広がった分については、今後は九州の観測点が必要になるかもしれません。沖合に広がった分については陸の観測では及ばないので、海洋研究開発機構や気象庁等が行う海底観測との連携が必要になるでしょう。また、想定モデルが大きく変わったので、観測データの解釈やそれに基づく予測について困難になることは事実です。

議論5 低頻度の巨大地震予知研究のための観測と国際共同研究

質問（佃 栄吉）

特定の地域の地震発生の間隔は短くても100年程度であり、研究者のライフタイムより優位に長い。このことが、地震研究においては仮説・検証による飛躍的な科学的進歩を阻害しているともいえます。これを克服する一つの方法として国際共同研究があると思います。台湾以外にも海外事例を集める努力があってもよいと思いますがどう

しょうか。地震発生プロセス（準備過程）について、最近の海外事例についてコメントをお願いします。

回答（小泉 尚嗣）

地震に関連した地下水変化に関する観測・研究については、台湾以外に米国地質調査所（USGS）とも連携を続けてきています。観測事例を増やすために、このような連携が今後さらに重要になることは事実で努力を続けたいと思います。

地震後の解析で、前兆滑りの可能性のある現象が観測された海外の事例としては、1960年チリ地震（M9.5）、1997年カムチャッカ地震（M7.8）、2001年ペルー地震（M8.4）の最大余震地震（M7.6）があります。日本では、1944年東南海地震（M7.9）、1946年南海地震（M8.0）に加えて、1964年新潟地震（M7.5）、1983年日本海中部地震（M7.7）があります。また、2011年東北地方太平洋沖地震についても、直前の地震活動の移動の様子や、海底津波計の観測結果から、前兆滑りが発生していた可能性が示唆されていますが、東海地震の前兆滑りで想定されているような滑りの加速はなかったようです。このような結果を受けて、今後、地震発生プロセスに関しては、今までのモデルの見直しや新たなモデルの提出があると考えられます。モデルの改善・創出と精密な観測データとは密接な関係があります。今後も、モデルに適切な拘束条件を与えるべく、精密な観測・解析を行う一方、国内外の地震発生プロセスの研究成果を注意深く収集していきます。

議論6 気象庁の体積歪計と地下水観測

コメント（佃 栄吉）

地下水の観測データの価値について、気象庁の体積歪計があれば必要ないとも読めます。地下水データの特徴と他のデータとの補完性についてもう少し詳しく述べてはいかがでしょうか。

回答（小泉 尚嗣）

この論文でも述べましたが、ノイズレベルから推定できる地下水観測の歪検出精度は、体積歪計のそれに比べて同程度～やや劣ると考えられますが、水位計等の地下水観測機器の価格が、体積歪計のそ

れに比べて1/10～1/100であることを考慮すると、コストパフォーマンス的に優れているといえます。また、歪計等の高価な地殻変動観測機器が整備されていない地域や国々においても、地下水位等の観測が行われている所が多いことも考慮すれば、地震予知のための手法として地下水観測は汎用性に優れているともいえます。さらに、歪観測と地下水位観測は独立なので、両方のデータが前兆滑りモデルのような一つの物理モデルで説明できる場合は、物理モデルそのものとその物理モデルが示す予測への信頼性が増すと考えられます。

議論7 地下水による地震予知研究の社会的リスク

コメント（佃 栄吉）

地下水の変動については、論文にあるとおり、観測が比較的容易であることや、生活に密接なものであるため、一般の宏観現象として、報告されることも多々あり、精度の悪い民間情報（多くは誤情報）が発信されて、社会が混乱する恐れもあります。その際に、長年にわたる科学的観測データが重要であり、社会的役割も大きいと思います。気象庁との連携等も必要と思います。想定される対応についてコメントをお願いします。

回答（小泉 尚嗣）

ご指摘のとおり、きちんと管理された精度のよい地下水観測データを示すことで、地震予知に関する誤った情報の流布を防止できると考えます。したがって、観測データのグラフを公開しています。地震と地下水に関する研究成果については、積極的なアウトリーチ活動（産総研の一般公開や出前講座等）を行っています。気象庁とは、観測データや解析結果を提供するだけでなく、地震に関する種々の情報・解析手法等について共有するようにしています。異常な地下水変化等について気象庁に問い合わせがあったときは、我々の方から適切な解釈の仕方について情報を提供することもあります。

また、民間に限らず、地震に関して発信される種々のデータやモデルに対して、自治体の防災担当職員が正しく解釈・判断できることが、社会的な混乱の予防に重要という観点から、観測点を置いている自治体の防災担当職員を主な対象として「地震・津波に関する自治体職員用研修プログラム」を実施しています。

高齢者でも読める文字サイズはどのように決定できるか

— 文字表示のアクセシブルデザイン技術とその標準化 —

佐川 賢*、倉片 憲治

高齢者・障害者の不便さを解決する技術として、アクセシブルデザイン研究の概念と進め方および成果の普及方法について、視覚の研究を例にとり説明した。福祉用具とは異なる視点をもつアクセシブルデザインの特徴を、問題解決の方法、デザインの対象、公共性の点についてそれぞれ言及し、公共性の点からアクセシブルデザインにおける標準化の役割について説明した。次に、これらの研究の特徴を、特に高齢者に読みやすい文字サイズを推定する視覚的技術を例にとり、その研究の流れに沿って技術的内容を述べた。年齢を考慮した最小可読文字サイズ推定方法を開発するため、まず、年齢や視距離によって変化する視力の基盤データの収集からスタートし、実際の日本語に出てくる文字の可読性に関するデータの収集を行い、そこから一般性のある可読文字サイズ推定式を導き、その実用性を確認した。この推定技術は、さらに国内外における標準的技術へと進展させた。特に国際標準確立に必要な国際比較テストを行い、この研究成果の有用性を確かめた。最後に、これらの一連の研究を基礎技術とその展開という二つのサイクルに分けて説明することによって、アクセシブルデザイン技術体系の開発における本格研究の位置付けを明確にした。

キーワード: アクセシブルデザイン、視力、加齢変化、最少可読文字サイズ、標準化

Estimation of legible font size for elderly people

– Accessible design of characters in signs and displays and its standardization –

Ken SAGAWA* and Kenji KURAKATA

Concept, methodology, and dissemination of outcomes for accessible design research are described in this paper, using vision research as an example. Characteristics of accessible design whose standpoint is different from that of assistive technology are explained in terms of methods for problem solving, objects of design, and public usefulness, and the role of standardization is emphasized from the point of public usefulness. As an example, the process of vision research for estimating minimum legible font size for elderly people is described. To develop a general estimation method for minimum legible font size, we collected fundamental data on visual acuity which changes with age and visual distance. Then, we compiled data on legibility of letters used in actual Japanese, derived a general estimating equation of legible font size, and confirmed the practical utility of the method. We have developed this method as a domestic and international standard. In addition, we have also applied this method to international comparative testing and have confirmed the validity of the results of this research. Finally, the entire process has been clarified by separating it into two procedural cycles: one for basic research, and the other for application, and the concept of “Full Research” has been addressed in the process.

Keywords: Accessible design, visual acuity, age-related change, minimum legible font size, standardization

1 はじめに

超高齢社会の急速な進展や障害者権利条約(国連)の採択^[1]により、高齢者および障害者に対する配慮が社会全般に浸透してきた。高齢者・障害者の課題は、政治、経済、社会の極めて多くの分野に及ぶ。ここで、人間工学や心理学等の技術的視点から見ると、彼らが日常の生活行動で感じる不便さ(見づらさ、動きづらさ、分かりづらさ等々)の解明は他の分野に比べて遅れており、この技術分野の発展と普及は、人間そのものに係る問題であるだけに、急務と言えよう。

高齢者や障害者が有する不便さは、人間工学に関する

ものだけでもとても広範な分野にわたる。内閣府や共用品推進機構による調査結果^[2]では、不便さに関わるさまざまな課題が指摘されている。これらは、(1) 身体サイズや動作に関する身体的課題、(2) 視覚や聴覚等の感覚的課題、(3) 注意や記憶等の認知的課題、に分類することができる。これらの各分野について、人間工学的概念とそれに基づく製品・環境等のデザイン手法によって、高齢者や障害者の抱えるさまざまな問題を解決していくことが望まれる^[3]。そのうちの聴覚と報知音の問題に関する技術的視点とその背景となる高齢者・障害者配慮設計指針については、本誌ですでに報告した^[4]。

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

Original manuscript received March 28, 2012, Revisions received July 9, 2012, Accepted July 10, 2012

この論文では高齢者の視覚的課題を取り上げ、その中でも年齢にともなう視力の衰え（加齢変化）と文字の読みにくさに焦点を当てて問題解決に向けて我々の取った考え方と方法論を述べる。文字の読みにくさは、日常生活における不便さ調査でも最も多く指摘されている課題の一つである。我々は、家電製品の説明書や注意書き、包装ラベル、製品タグ、案内パンフレット等々、安全や操作に関するさまざまな情報を主として文字から読み取る。高齢者やロービジョンと呼ばれる視覚障害者には、ここに多くの不便が存在する。これらの人々に対して、読みやすい文字を提供することは極めて重要であり、安全で快適な社会生活の基盤整備や向上に繋がるものと期待される。

この論文ではさらに、開発した文字設計手法やデータを広く社会に普及させるための手段として標準化をとりあげる。この研究において標準化は重要な位置付けにあり、その考え方と有用性、さらに標準化に必要な技術的視点や研究の特徴についても述べる。

2 問題解決への二つの手法

高齢者や障害者が有する問題にはさまざまな側面から取り組まねばならないが、人間工学的手法から見ると、その解決方法には以下の二つの考え方がある。

まず一つは、福祉用具からの考え方である。この考えでは加齢や障害によって衰えた機能、あるいは失われた機能を、特別な用具や機器を身体に装着・付加して補い、若年者や障害のない人と同様な機能を回復させるものである。すなわち、ここでは製品や環境、サービス等には何ら修正や変更を加えず、そのまま利用してもらうことになる。この手法は実際に“福祉用具”という研究領域で開発されているものであり、人間機能を人工的に向上させるというデザイン概念である。

これに対してもう一つの考え方では、製品や環境、サービス等を、衰えた機能や失われた機能のままでも利用できるように製品側のデザインを修正・変更する。すなわち、人間機能の衰えがあっても、特別な用具を用いずに利用できるようにする考え方である。この手法は“アクセシブルデザイン”という研究領域のもとに進められているものであり、この論文の基盤となるデザイン概念である。類似する概念に、ユニバーサルデザイン、バリアフリーデザイン、インクルーシブデザイン等がある。それぞれの間で具体的手法は異なるものの、福祉用具をあてがうのではなく、人間機能に合わせて製品等をデザインするという意味ではアクセシブルデザインと同じ概念である。

この二つのデザイン概念と解決方法を、文字の読みにくさという問題に適用してみよう。図1はその違いを示す概

念図である。

図の左側に示す福祉用具の考え方では、文字が読みにくい原因を人間の視力の低下と考え、この視力を技術的に向上させることを考える。具体的には、眼鏡や拡大鏡を開発することに該当する。適切な眼鏡や拡大鏡を開発することにより、例えば視力の衰えた高齢者でも、小さな薬瓶ラベルの文字を読むことができる。視力という人間機能を小さな文字に合わせる考え方である。この手法では、眼鏡は特定の個人に最もよく合うものとして開発され、他人には無用となる。すなわち、個人専用であり、想定された個人の身体に付加・装着することでその個人の問題を解決することが基本である。

一方、アクセシブルデザインの考え方では、文字の読みにくさの原因は文字サイズが小さすぎることにありと考える。したがって、文字を大きくする等、文字を適切にデザインする。ここではもちろん眼鏡等の使用は前提とせず、文字のデザインから問題を解決する。文字という製品側の要素を、低下した視力に合わせてという考え方である。製品側のデザインであるので個人対応ではなく、同じく視力の低下した多くの人々が読めるようにすることができる。ここでは、デザインをする前に、対象のグループや集団がどのような（低下した）機能・能力を有するグループか、その特性をあらかじめ把握しておくことが必要となる。この過程でグループの特徴抽出や標準化の重要性がクローズアップされてくる。

3 開発と普及のシナリオ

この論文では、視力の加齢変化を考慮した最小可読文

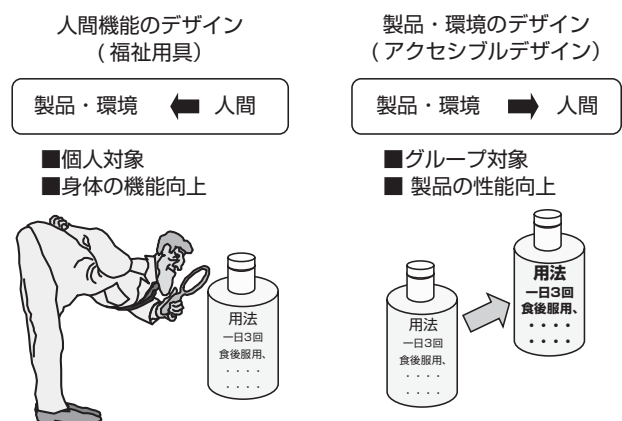


図1 アクセシブルデザインおよび福祉用具の基本概念と特徴
可読性の問題を例として解決の方法を示す。左側は福祉用具の概念を示すもので、眼鏡のように個人対象のデザイン手法。右側がアクセシブルデザインの概念で、大きな文字サイズによる製品のデザインをすることにより、問題の解決を図る。

字サイズの推定方法を例にとり、我々が行ったアクセシブルデザイン技術の開発と標準化とおした技術の普及を述べる。前章で述べたように、アクセシブルデザインの考え方に基づいて問題を解決する場合、対象は個人ではなく集団が対象となる。印刷や表示された文字は、一度デザインされると多くの人が見ることになり、デザインの程度によって読める対象やその数が異なることは言うまでもない。そこで、この研究では高齢者という年齢層の人々を対象とし、より多くの高齢者が読みやすい文字を提供するための技術を検討した。すなわち、最大限多くの人々を対象とするアクセシブルデザインの基本概念をこの研究の基礎に据えた。個人から見ると必ずしも最適とは言えないケースが生じる懸念もあるが、より多くの人々を対象とすることによる公共性の拡大を重視した。

ここで、不特定多数を対象とすることから、アクセシブルデザインでは集団の特徴を抽出し、最適化するという視点が重要となる。あるデザインにより最大数のユーザーを得ようとするには、その集団の特性の分布や特徴を必ず把握しなければならない。この考えは、標準化という考え方に相通じる。標準はより多くの利便性、効率性、効果を期待して作成され、開発された標準の普及の度合いはまさにその適切さに依存する。アクセシブルデザインの概念も全く同じであり、高齢者や障害者という多くのユーザーが抱える問題を、彼らの特性に基づく技術開発によって解決する。開発されたデザイン手法は標準化という手段によって効率的に普及が図られる。具体的には、例えばエレベーターの点字表示等はその位置や記載方法等を定め、この情報を多くの視覚障害者が共有して初めて意味をもつ。障害者ほど、この共通性や一貫性が効率的な普及を促す要因となる。こうした点が、アクセシブルデザインが標準を必要とし、その概念や利点を最大限に利用する理由となる。

具体的な技術開発のシナリオを図2に示す。技術要素を観察条件と文字のデザインの条件に分け、前者は3つの重要な要因(サイズ係数、輝度、年齢)に統合し、後者はフォントタイプと文字種の主要因に統合して、これらの要因を用いて可読データの収集を行った。この結果は最小可読文字サイズの推定法の技術に集約され、最終的に読みやすい文字設計の国内規格開発という目標に繋げる。すなわち、この段階が構成と統合のプロセスである。さらにこの研究の最終目標として国際規格開発を掲げ、必要となる海外のデータを収集した。そのデータを踏まえて、最終的に最小可読文字サイズ設計の国際標準という目標を設定した。

この研究はこうしたアクセシブルデザインの概念と標準

化の考えに基づいたシナリオと研究開発によって実施された。

4 最小可読文字サイズの推定

4.1 基盤データの収集

この研究における技術開発のポイントは、高齢者を含む、より多くの人々を対象として、文字の可読性と視力の関係における一般的特性を把握することにある。視力は、人間の目が空間的に見分けられる最小のすき間を視角 θ (単位は分)で表し、その逆数($1/\theta$)で定義される。視力1.0は視角1分が見分けられることを示す。この視力の良し悪しによって読める文字サイズが変化することは容易に理解できるが、この間の定量的関係は未知であった。特に、年齢によって変化の様相や、高齢者の特定の年代における視力変化等は十分知られていなかった。これらの関係を多くのデータ収集を踏まえて統計的に導くことがこの研究の一つの課題であり、これによって年齢に応じた適切な文字サイズの設計方法を開発することができる。さらに、さまざまに変化する実生活の環境に適用するためには、この関係性は主要な環境変動要因を踏まえて、より一般的な条件について確立されなければならない。

視覚の基本特性から見ると、人間の視力はさまざまな観察条件において変化することが知られている^[5]。この主たる要因として、(1)年齢、(2)視距離、(3)輝度レベル(文字背景の明るさ)の3つが挙げられ、これらの要因ごとに視力の変化を把握することが必要となる。前述した視力は距離に無関係に視角で定義されたが、目の調節能力は年齢とともに視距離に依存するので、年齢と視距離の

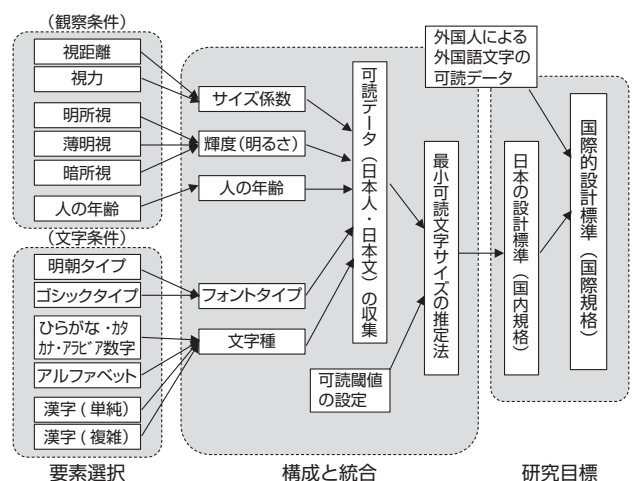


図2 この研究の技術開発のシナリオ
可読性の視覚的問題を要素選択から主要因(サイズ係数、輝度、人の年齢、フォントタイプ、文字種)に統合し、それらを用いて可読データの収集を行い、可読文字サイズ推定法を導く。その技術を、研究目標である文字設計法の国内規格や国際規格として確立する。国際規格開発のためには外国語文字の可読データも海外において収集する。

要因は特に重要となる。それぞれの影響の概要はこれまでの先行研究で判明していたものの、これらの要因の相互関係は不明であり、文字判読に関する統合的研究が必要であった^[6]。

人間の視力は、心理物理学的手法によって詳細に計測することが可能である。この研究では、歪みのないフラットな高解像度ディスプレイに、ランドルト環と呼ばれる切れ目のある円環視標をさまざまな大きさに提示し、その切れ目が認識できるか否かをモニターである被験者に判断させる。大きな視標であれば100%の正確さで認識できる。逆に、小さいと認識は0%となるが、実際には偶然の確率があるので0%とはならず、この点は一般的な心理物理学的測定法にしたがって確率的に補正を加える。こうした知覚確率曲線と呼ばれるデータから、ある基準(ここでは80%正答率)を設定して閾値を求め、これをその観測者のその観察条件における視力とする。

観測者は10歳代から70歳代までの111名であった。その内訳は10歳代11名、20歳代28名、30歳代11名、40歳代10名、50歳代10名、60歳代22名、70歳代19名であり、20歳代と60～70歳代の年齢層を多くとっている。この研究では60歳代以上を高齢者、20歳代を若年者として扱うが、一般にはさまざまな定義がある。高齢者は医学的に特別な眼疾患のない人に限定している。これら若年者から高齢者までの被験者は、実験に際してあらかじめ遠点(5 m)において最高の視力が得られるように補正した眼鏡を用いた。いわゆる遠点補正眼鏡による矯正視力である。被験者自身が保有している眼鏡は適性が不明であり、データの信頼性を得るために、この遠点補正は視力の計測条件を整え、基盤的データを収集する上では極めて重要である。

視距離は0.3、0.5、1、2、5 mの5段階を設定した。

高齢者は近点の視力が落ちると言われているが、人間の目の近点は一般的におよそ30 cm付近となるので、この点を最小の視距離測定点とした。一方、レンズの特性はディオプター(1/m)で記述される。そこで遠点の代表として視距離5 mを採用し、遠方の調節能力の特性をこの点で捕えることとした。これらの視距離の範囲(0.3～5 m)と測定点(5点)の設定により、高齢者の目の調節能力の全容が把握できると考えた。

輝度レベルは、人間の目の広範な順応領域を踏まえ、明所視^{明語1}から薄明視^{明語2}の広い範囲をカバーした。具体的には、0.05 cd/m²から1000 cd/m²の間を対数でおおよそ均等になる間隔で9点を選択した。

図3は、これらの測定結果の平均的な特性をまとめたものである。図3(a)は視力に及ぼす視距離の影響を示したものであり、図3(b)は輝度の影響である。図3(a)に見られるように、視距離の影響は40歳代から顕著に現れ、近距離になると視力が急激に低下していく。すなわち、高齢者に近点で文字を見せる場合は、文字サイズを大きくしなければならない。一方、輝度の影響についてみると、どの年代でも輝度が低下するにつれて視力も低下する様子が見られる。輝度の変化に対して視力が変化する様相は、全体的な視力のレベルに差はあるもののどの年代も同じであり、ここでは年齢効果は見られない。

環境要因による視力の変化は把握することができたが、このデータは文字サイズと直接関連してはいない。そこで、視力を計測した場合と同じ条件のもとに、日本語の文章で用いられる文字(以下、日本語文字と言う)がどのくらいのサイズまで読めるかを同様な環境において行った。この時、視力と同様に80%正答率をもって可読とした。この結果により、視力と文字サイズを直接結びつけることができる。

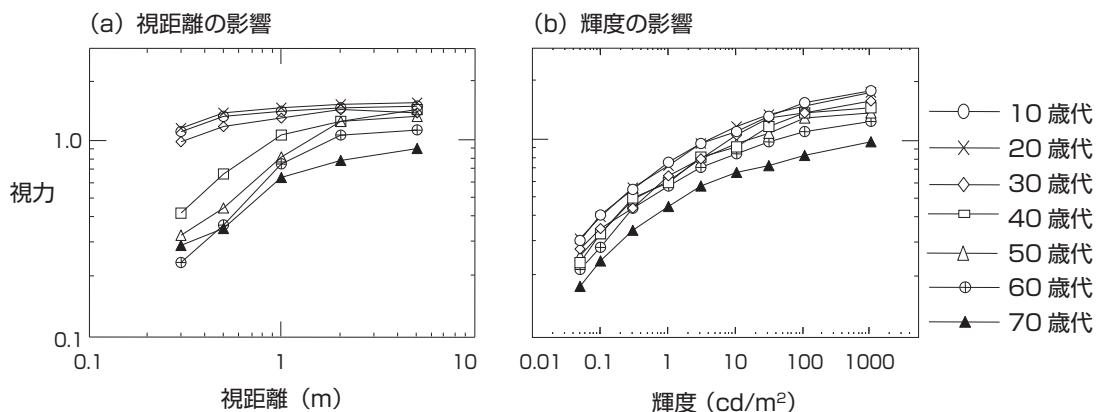


図3 視力に及ぼす視距離および輝度の影響

(a) 視距離の影響。輝度100 cd/m²に固定し、視距離を0.3～5 mの間で変化させたときの結果。(b) 輝度の影響。視距離5 mに固定し、輝度を0.05～1000 cd/m²の間で変化させたときの結果。(a)、(b)共に、10歳代から70歳代までの観測者計111名の年代別平均値。

図4は3種の文字(ひらがな/カタカナ/アラビア数字、漢字5～10画、漢字11～15画)の文字に対して、最小の可読サイズの平均値を示したものである。条件として、年齢2段階(20歳代、60～70歳代)、視距離2段階(0.5、2m)、輝度2段階(0.5、100 cd/m²)を組み合わせた計8条件を設定し、計測を行った。

若年者全48名の結果(平均値)では、最も条件の良い100 cd/m²、0.5 m 視距離、ひらがなに対する結果ではおよそ4ポイントのサイズの文字まで読めるが、高齢者では12ポイントとかなり大きくしなければならない。これは、先に示した視力の結果とも対応する。視距離が長くなると文字を大きくしなければならないのは幾何学的に当然であるが、暗くなると文字を大きくしなければならないことは、目の特性からくる要求である。

4.2 推定式

図4の結果は限定的な条件に対するものであるが、一般条件に幅広く適用するためには、この結果を他の年齢、視距離、輝度レベルに拡張しなければならない。図4の結果をさらに分析すると、新たに“サイズ係数”という変数を導入することによって、全体の結果がサイズ係数を用いた簡単な式で表されることが明らかとなった。サイズ係数とは、(1)式に示すように、視距離を視力で割った値である。

$$S = D / V \quad (1)$$

ここでSはサイズ係数、Dはメートルで表した視距離、Vは視力である。

サイズ係数の値は、該当する視距離における目の分解能(実寸)に対応する。視力の定義は目が分解できる最小の角度θで定義されており、この定義では視力は距離に依

存しない。しかし、高齢者は目の調節能力に限界があり、特に短い視距離(およそ1m以下)では距離によって視力が大きく異なる。図3(a)に示した視距離と視力のデータから高齢者の距離ごとの視力を知ることができるが、視力そのものは角度の情報のみとなるので、文字サイズと直接結びつかない。そこで、(1)式によるサイズ係数を導入することにより、視距離に対応した実寸の分解能を知ることができ、文字サイズと関連付けることができると考えた。すなわち、最小可読文字サイズは実寸の分解能であるサイズ係数に比例すると考えた。なお、分解能を角度で表記する場合と実寸で記述する場合の変換($\tan \theta = \theta$)については、角度θは十分小さな値であり、その誤差はここでは無視できる。

図5は、導入したサイズ係数に対して実験で得られた最小可読文字サイズを表したものである。この結果を見ると、やや近似の程度の悪いところが見られるものの、全体として最小可読文字サイズはサイズ係数の関数で表現できることが分かる。そこで、最も簡単な式として、サイズ係数と最小可読文字サイズの間、次の一次式を当てはめることにした。

$$P = aS + b \quad (2)$$

ここで、Pは最小可読文字サイズ(単位:ポイント)、aおよびbは明朝体やゴシック体等のフォントタイプや漢字、ひらがな等の文字種によって異なる係数である。aおよびbの値は、図4の近似直線から表1のとおりである。

式(2)は定数bをもつ一次式であるが、サイズ係数が可読文字サイズに比例するという考えを踏まえると式(2)は原点を通るb=0の式となるのが理想である。しかし、図5のデータを見ると実際はサイズ係数の大きな領域では

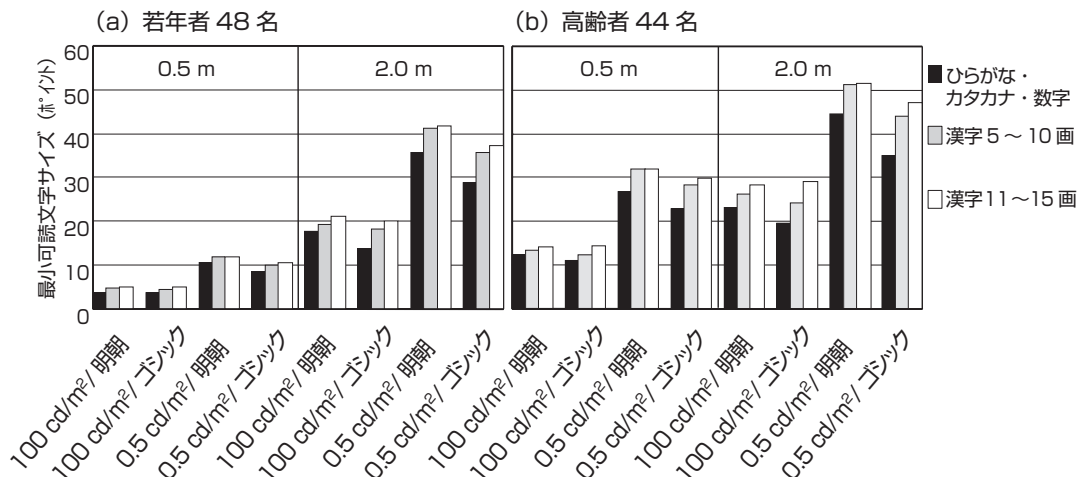


図4 日本語文字1文字を読む場合に必要のフォントサイズ

(a) 視距離0.5 mおよび2 m、輝度100 cd/m²および0.5 cd/m²の条件における日本語一文字(ひらがな・カタカナ・アラビア数字、漢字5～10画、漢字11～15画)を読む場合に必要の最小の文字サイズ。若年者48名の結果。(b) 同様の条件における高齢者44名の結果。

文字サイズがやや低くなる傾向にある。全体を適合させるには、原点を通る冪関数かまたは式(2)のように定数bをもつ一次式が良い。この研究では、最終的に標準化という応用面に結びつける必要があることから、高精度よりもむしろ一般的な使いやすさを重視し、冪関数よりも簡単な一次式を選択した。さらに、原点を通らない式(2)はあくまで目の調節可能範囲の距離(近点から無限遠)に適用するもので、視距離がゼロ近傍の限界点では、そもそも視力が定義できない。この領域は適用外である。したがって、視距離ゼロの点において式(2)は $P=b$ となり、あるサイズが読めるという矛盾した結果になるが、ここは適用外であり、必ずしも $P=0$ に収束する必要はないと考えた。

4.3 計算例

式(2)を適用して、最小可読文字サイズを求めてみる。例えば、70歳で視距離50 cm、100 cd/m²の明るさにおいて、ゴシック体、5～10画の漢字を読む場合を想定する。図3(a)より視距離50 cmでの70歳の視力(0.4)が分かり、視力からサイズ係数 S [距離(m) / 視力 = 0.5/0.4 = 1.25]が求められる。表1中の対応する値を読んで以下のように計算すると、最小可読文字サイズ P (ポイント)が推定できる。

$$P = 8.1 \times 1.25 + 3.4 = 13.5 \text{ (ポイント)}$$

同じ計算を明朝体で行うと14.8ポイントとなり、ゴシック体よりもサイズが大きくなる。すなわち、明朝体の方がゴシック体に比べて読みづらいことが分かる。また、明るさの条件が100 cd/m²より暗くなると図3(b)のとおり視力が落ちるためサイズ係数が大きくなり、最小可読文字サイズも大きくなる。

最小可読文字サイズは、文字の可読性判断の基盤とな

表1 日本語文字の最小可読文字サイズを求める計算式の係数

文字の種類		a	b
明朝体	ひらがな、カタカナ、アラビア数字	8.2	2.6
	漢字 5～10画	9.6	2.8
	漢字 11～15画	9.6	3.6
ゴシック体	ひらがな、カタカナ、アラビア数字	6.4	3.0
	漢字 5～10画	8.1	3.4
	漢字 11～15画	8.6	4.1

る尺度を提供するものである。年齢、視距離、輝度によって視力がさまざまに変化しても、それらの変数を統合して一つの尺度を導いたことの利便性は大きい。なお、最小可読文字サイズは確率80%で読める閾値付近のサイズであるので、このサイズではまだ“読みやすい”とは言えない。読みやすい文字サイズを求めるには、読みやすさ評価について研究を進め、新たに尺度を構成すると良い^[7]。

5 標準化による技術の普及

前述したように、アクセシブルデザインは個人対応ではなく、より多くの人を含む集団を対象とする。集団の特徴を踏まえて技術を標準化し、社会全体に普及させることが重要である。この研究の研究成果である最小可読文字サイズの推定方法も、標準化をとおして、より多くの人に対して読みやすい文字サイズを提供できると期待される。

5.1 JIS(日本工業規格)の制定

この研究の基盤となるデータはまず日本語文字に対して

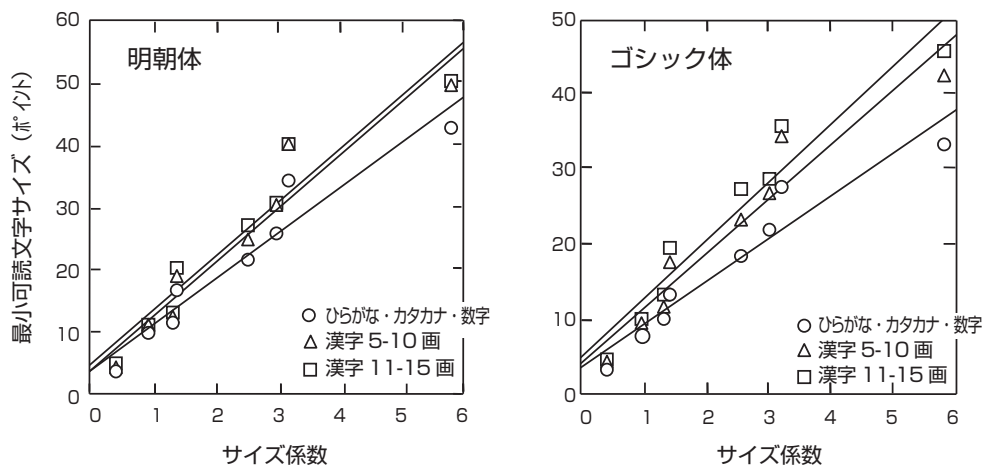


図5 サイズ係数と最小可読文字サイズの関係

(a) サイズ係数の関数として表した明朝体の3種の文字(ひらがな・カタカナ・アラビア数字、漢字5～10画、漢字11～15画)の最小可読文字サイズ。直線はそれぞれの文字種の結果に対する一次近似式。(b) 同じ測定条件で、ゴシック体の3種の文字に対する結果。

収集され、そのまま日本における標準化技術として確立された。一般に標準化にあたっては、適用範囲を明確にすることが重要である。最小可読文字サイズの推定技術に関しては、適用範囲として以下の項目を挙げた。

- (1) 日本語一文字の読みやすさを対象とする。
- (2) 最小の可読文字サイズを、年齢、視距離、輝度の3つの変数を考慮して表す。
- (3) 10歳代から70歳代のすべての年齢に適用できる。ただし、ロービジョン等の視覚障害者には適用しない。
- (4) 白地に黒文字等の高コントラストの文字を対象とする。

アクセシブルデザインの視点から見ると、この研究の技術は高齢者を含むおよそすべての年齢に適用できる。しかし、ロービジョンと呼ばれる視力の低下した人には適用できず、これについては別途検討が必要である。

現実の環境において文字を読む条件は複雑であるが、この研究ではそのうち主要な要因である年齢、視距離、輝度レベルを考慮している。もう一つの重要な要因であるコントラストについてはさらに検討が必要であるが、印刷文字等白地に黒の高コントラストの文字には、この研究の手法が適切に適用できる。例えば、電子式ディスプレイでは外光による写り込みによるコントラストの低下を生じることがあるので、この手法の適用には注意が必要である。

標準化において重要な他の視点は、眼鏡による視力の補正である。この実験では高齢者も若年者も遠点（5 m 視距離）で視力を補正して実験に参加したが、現実にはいわゆる老眼鏡では近点が見やすいように補正されている。この場合は、この研究によって推定した最小可読文字サイズよりも小さな文字も読むことができる。したがって、この研究成果は、老眼鏡や拡大鏡等を使わない最も見づらい条件における最小の文字サイズを推定したものである。

この研究の成果は、このような議論を経て、JIS S 0032「日本語文字の最小可読文字サイズ推定方法」として制定された¹⁸⁾。このJISの制定により、高齢者にも見やすい文字設計の尺度が確立されたと言える。すなわち、種々の環境要因（年齢、視距離、輝度）を考慮した、最小の可読文字サイズが決定できるようになった。このレベルを基準として、“最小可読”だけでなく、さらに上の段階として“読みやすい”レベルの文字サイズ等も決めることができる。

5.2 ISO（国際標準化機構）における標準化

この研究で開発した技術は、国内の標準としてだけでなく国際的にも普及させることができる。式(2)は目の基本特性を表すものであり、どの言語の文字においても成り立つと予想される。特に、数字やアルファベットは文字の構成が類似しており、目の特性が同じである限り、これらの

文字に対する判読性はどの国においても同じはずである。この点を確認するため、異なる言語や文字を有する外国語に対して、その可読性を比較検討した。

実験では、同じ台紙と印刷技術で作成した、高コントラストおよび高解像度の印刷による実験サンプルを韓国、中国、ドイツ、日本、タイ、米国のそれぞれの研究機関に配布し、その可読性を比較した。韓国はハングル文字、中国は漢字、タイはタイ文字、その他はアルファベットを用い、それぞれ明朝タイプとゴシックタイプを用いた。明朝タイプとゴシックタイプは serif font および sans-serif font としてどの文字にも共通で取り入れられている。一般的な違いは、文字を構成する線分の端にあるハネ飾りの有り、無しによって決まる。各国の被験者は、若年者および高齢者ともおよそ20名ずつである。国によって視力の分布や照明レベル等がやや異なるが、同じ実験環境で同時に測定した視力を用いれば、文字サイズの補正や式(2)の適用が可能である。

図6(a)、(b)は文字サイズに対する正答率データの一例で、(a)、(b)はそれぞれ明朝タイプ、ゴシックタイプの文字判読に対応する。照度等やや条件が異なり、また文字の種類も異なるので、例えば韓国やタイのデータはやや異なるが、各国の実験結果は全体的におよそ一致している。したがって、文字判読能力に関して基本的に大きな差はなく、式(2)による最小可読推定が妥当であると言える。

各国それぞれのデータと、式(2)の適用による推定フォントサイズと実測サイズを比較した結果が図6(c)である。式(2)の適用にあたっては、各国の実験条件における実測の視力と視距離が同時に計測されているので、サイズ係数が分かり、表1の係数から最小可読文字サイズが推定できる。ハングル文字、漢字、タイ文字に対しては表1の漢字11-15画の係数を、アルファベットに対してはひらがな等の係数を用いた。日本およびタイのデータがやや異なるものの、推定フォントサイズは全体的に実測値（80%判読率サイズ）とよく一致していることが分かる。ただし、まだ予測性は十分とは言えない。例えばハングルやタイ文字等では日本語文字とは字形が大きく異なるので、当然のことながら式(2)中の a および b の値も異なるはずである。これらの値を適切に定めれば、式(2)による推定はさらに改善できると思われる。

国際比較した実験結果に裏付けられた最小可読文字サイズの推定方式は、ISOにて国際標準化の審議が開始されている。国際的にはアルファベットが多く用いられているので、まずアルファベットや数字を対象として、式(2)の推定式および係数の値を確立するのが適切と思われる。さらに、漢字やアラビア数字、タイ文字や韓国（ハン

グル) 文字等についても、適切な定数を補足資料として提供することになる。ここにおいて、世界各国の文字を対象とする場合は、表1で漢字を2種に分けたように、文字の形態や構成等に関する視覚的複雑さによる類別技術も必要となる。これに関してはさらに研究を進める必要がある。

ISOにおけるアクセシブルデザインの標準化対象は文字だけではない。人間工学にかかわる広い分野、すなわち身体系、感覚系、認知系のそれぞれの分野について、産総研のヒューマンライフテクノロジー研究部門が中核となり、加齢や障害特性のデータに基づく製品・環境等のデザイン手法の開発と標準化を進めている。

アクセシブルデザインはISOにおいて新分野であり、既存の作業グループが存在しなかった。最も近い分野としてISO/TC159「人間工学」という技術委員会があり、そのTCの傘下にアクセシブルデザインの活動領域を作成した。図7はTC159の構成である。全体構成の中で塗りつぶしたワーキンググループ(WG)、すなわち、TC159直属のWG2、SC4傘下のWG10、SC5傘下のWG5、全体の調整をはかるAGAD、等はすべてアクセシブルデザインのために設立した作業グループである。こうした標準化の枠組みづくりも、研究成果普及のためには欠かせない活動

であった。アクセシブルデザインは理念が先行し、技術はまだ発展途上の部分も多い。この技術整備には人間特性データの収集等多くの時間と労力が必要であり、産業界のみでは難しい。特に高齢者や障害者の問題解決には具体的な人間工学の知識やデータの蓄積が必要である。アクセシブルデザイン研究は、基礎的な研究成果と標準化による普及活動が密接に連携をとって進められている。

6 まとめ：本格研究と標準化

図8はこの研究の全体の流れをまとめたものである。図の左下から時計回りに研究が進められ、いったん右下のゴールに至った後、再び新たな問題を解決するために次の研究サイクルに至る道筋が示されている。通常、新たなニーズや問題の把握から基礎データの収集および基礎技術の確立が第1サイクルで行われ、多くの場合、ここで学術論文としての公表が行われる。アクセシブルデザイン技術の場合もここまでは同じステップを踏むが、そのステージで終結すると社会への普及が難しい。なぜならば、対象者の限られた小規模な研究の結果では、高齢者や障害者を含む多くの人々に適用できるかどうか不明だからである。そこで、普及のための次の研究サイクルへと入る必要がある。

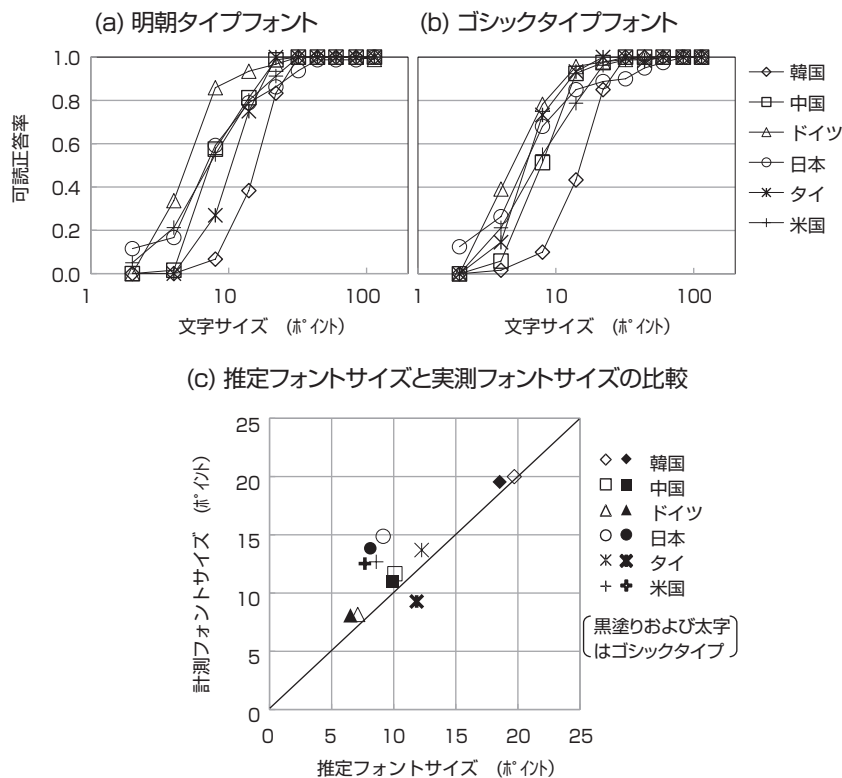


図6 韓国、中国、ドイツ、日本、タイ、米国の6カ国における最小可読文字サイズ
 韓国はハングル文字、中国は漢字、タイはタイ文字、その他はアルファベット小文字。それぞれ明朝タイプの文字とゴシックタイプの文字を使用。
 (a)、(b)は2～114ポイントの10種の文字サイズに対する1文字の判読率。データは各国の高齢者約20名の平均値。照度は300～500 lx。(c)は最小可読文字サイズ推定式による推定値と(a)、(b)から求めた実測値(80%正答率サイズ)との相関図。

第2のサイクルでは、前述したアクセシブルデザインの理念に基づき、高齢者や障害者の特性を把握するためのデータ収集が行われる。そのデータの分析や、実際の製品や環境への適用可能性の検討をとおして、技術の洗練化作業が行われる。最終的に確立された技術は国際標準として提案され、社会や産業界に送り出される。このようにして、第1サイクルにおける新しいニーズの把握から、新しいアクセシブルデザイン技術の開発と普及という全体のシナリオが完成することになる。なお、この技術では満たされない新しいニーズや問題が発生した場合には、再び

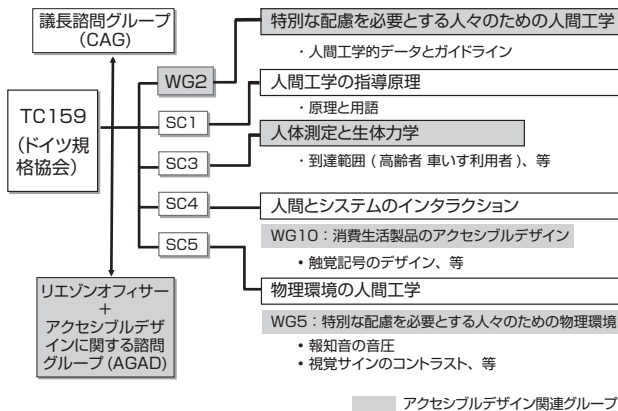


図7 TC159の構成図とアクセシブルデザインに関する作業グループ
灰色に塗りつぶした部分 (AGAD, WG2, SC4/WG10, SC5/WG5) は、アクセシブルデザインの国際規格を作成するために新たに設立した作業グループである。これらのコンピナーおよび幹事は産総研の研究者が担当している。

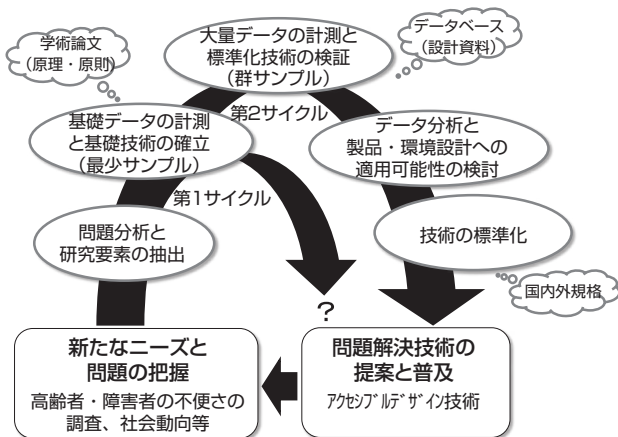


図8 この研究における問題点の把握から技術の標準化と普及までの流れ
ニーズ把握から基礎データの計測と基礎技術の確立までが第1研究サイクルであり、その成果は学術論文等を通して公表される。そのステージからさらに大量データの計測と標準化技術の検証を行うのが第2サイクルであり、その過程でデータベースや国内外の規格が作成され、公表される。

この第2のサイクルを経て、新しい技術の開発と標準の見直しが行われる。

この論文で紹介した最小可読文字サイズの研究はまだ国際標準化の作業が進行中であるが、国内標準化の経験を踏まえ、この研究サイクルを経ることによって、広く社会に普及し、活用されていくはずである。

用語の説明

用語1: 明所視: 少なくともおよそ10 lx以上の照度レベル、または2~3 cd/m²以上の輝度レベルの明るい状態に順応した視覚。主として網膜の錐体細胞が働いている状態。

用語2: 薄明視: 明所視と暗所視 (およそ10⁻² lxの照度レベル以下、または10⁻³ cd/m²以下) の中間の照度または輝度レベルの薄暗い状態に順応した視覚。網膜の錐体細胞と桿体細胞が働いている状態。

参考文献

- [1] 国際連合: Convention on the Rights of Persons with Disabilities, <http://www.un.org/disabilities/convention/conventionfull.shtml> (2006).
- [2] 共用品推進機構: 障害のある人、高齢者などの不便さ (2010).
- [3] 佐川 賢, 倉片憲治, 横井孝志: アクセシブルデザインと国際標準化, *横幹*, 5 (1), 24-29 (2011).
- [4] 倉片憲治, 佐川 賢: 高齢者に配慮したアクセシブルデザイン技術の開発と標準化-聴覚特性と生活環境音の計測に基づく製品設計手法の提供-, *Synesthesiology*, 1(1), 15-23 (2008).
- [5] L.A. Riggs: *Visual Acuity, Vision and Visual Perception*, 321-349, John Wiley & Sons, New York (1965).
- [6] K. Sagawa, H. Ujike and T. Sasaki: Legibility of Japanese characters and sentences as a function of age, *Proceedings of the IEA 2003*, 7, 496-499 (2003).
- [7] K. Sagawa and N. Itoh: Legible font size of a Japanese single character for older people, *Proceedings of the IEA 2006*, CD-ROM (2006).
- [8] 日本工業標準調査会: JIS S0032 高齢者障害者配慮設計指針-視覚表示物-日本語文字の最小可読文字サイズ推定方法 (2003).

執筆者略歴

佐川 賢(さがわ けん)

東京工業大学大学院物理情報工学専攻修士課程卒業。工学博士。独立行政法人産業技術総合研究所を経て、現在、日本女子大学家政学部教授、独立行政法人産業技術総合研究所名誉リサーチチャー兼ヒューマンライフテクノロジー研究部門客員研究員。視覚工学、測光、測色、視環境評価に関する研究に従事。色彩環境の快適性評価、高齢者の視環境評価、アクセシブルデザイン技術等に関する開発研究、国内外の標準化活動等を行う。この論文では、主としてアクセシブルデザインの基本概念の構築、および文字可読性に関する実験を担当した。



倉片 憲治(くらかた けんじ)

1994年大阪大学大学院人間科学研究科博士課程修了、博士（人間科学）。現在、独立行政法人産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門アクセシブルデザイン研究グループ長。高齢者の聴覚特性および音を用いたユーザー・インタフェースの研究、聴覚・音響分野の国内および国際標準化活動に従事。この論文では、主としてアクセシブルデザインの基本概念の構築、および実験データの解析、さらに国際標準化を担当した。



査読者との議論

議論1 全体

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

要素技術が明確に選択され、それらを統合しつつ、最小可読文字サイズを推定し、最終的に標準を構成していった優れた第2種基礎研究だと思えます。

3章で標準化が技術の普及に役立ったことが強調されています。しかしそれだけでなく、標準化を目標に設定してそれを常に意識したことが、要素技術の選択から構成・統合のプロセスに至るこの研究全体を適切に律していったように思えます。この点について、実際に研究を行った著者の立場からコメントをいただければと思います。

回答（佐川 賢、倉片 憲治）

ご指摘のように、この研究は立案から完結の段階まで標準化を意識して、その視点のもとに進めてきました。実際、この研究は産総研の「標準基盤研究制度」により実施されました。このグラントに応募すること自体が標準化を意識することになり、ゴールとして標準またはそれに類するものの作成が要求されることになりました。

研究の立案段階ではゴールが想定されますが、標準化をとおして解決すべき社会ニーズがそのゴールとなります。この研究の場合には高齢者のための読みやすい文字設計というニーズがあり、公共性や産業界で解決することの困難さ（時間や労力、費用対効果等）を考慮して標準を最終目標に設定し、それを常に意識して進めました。

議論2 可読率の設定値

質問（小野 晃）

可読率を80%に設定して最小可読文字サイズの標準化を行っていますが、80%を採用した理由は何でしょうか。80%以外の他の選択肢はなかったのでしょうか。

回答（佐川 賢、倉片 憲治）

通常、心理学の知覚確率曲線で閾値は50%に設定されますが、この設定では半数の人が読めて半数の人が読めないということになり、現実的にはかなり読みづらい文字サイズとなります。そこで、もう少し確率を上げたレベルで閾値を設定しました。一案として標準偏差（ σ ）を採択しますと84.1%になりますが、特にどの%が良いという強い根拠はないので、区切りの良い数字として80%にしました。

なお、80%でも5回に1回は読めないことになり、読みづらいレベルですが、このレベルを基準にデザイナーが何倍かすることにより、共通の読みやすさの尺度化ができます。

その後の研究で、最小可読の文字サイズを1単位として、0.9以下は“非常に読みづらい”、0.9～1.2は“読みづらい”、1.2～1.7は“普通に読める”、1.7～2.2は“読みやすい”、2.2以上は“非常に読みやすい”という尺度を作成しています。次の研究発表や規格の改正では、この使い方も提案しようと考えております。

議論3 文字サイズとサイズ係数の関係式

コメント（赤松 幹之：産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門）

実寸での分解能とは、文字として識別できるために必要な最小のストローク間の幅の実寸値ですから、それは文字サイズと線形な関係があると言えます。このように考えると、あてはめるべき最も単純な線形式は $P = aS$ という原点を通る直線です。しかし、おそらくこの直線をあてはめるとサイズ係数が大きいところでは当てはめが悪くなります。一方、図5のデータを見ると、原点を通る冪関数だと当てはめが良くなると予測できます。精度を求めるとすれば冪関数が良いと分かっているながら、標準文書としてはy切片を含む一次式を用いたと想像します。

標準化のためには、あえて精度を落としてでも、誰でもが使えるものにするというのも、大事な考え方ですので、こういった考えが背景にあるのでしたら明記していただく方が読者に有益な情報になると思います。

回答（佐川 賢、倉片 憲治）

関数の当てはめの考え方や方法はいくつかありましたが、最終的には可能な限り簡便な式を採用しました。ご指摘のように、標準化における普及のあり方も重要な視点ととらえ、この結論に至りました。

細かく分析して場合ごとに分ければ、近似式をさらに精度良くあてはめられることは事実です。しかし、可読文字サイズデータのばらつきや原点を通る必要等を考え、精度のみを追求すると、現実とかけ離れた予測式となります。冪関数や一次関数（定数のあり、なし）等を検討しましたが、やはり結果として定数をもつ一次式が一番良いということになりました。標準化という応用面を常に意識しながら出した結論とご理解いただければ幸いです。

この考えを踏まえて、この論文を書き改めました。

議論4 文字のフォントタイプと視認性

質問（小野 晃）

この研究では文字のフォントとして明朝とゴシックを選んでいますが、どちらも正規の文字であり、デフォルメされたものではありません。一方高速道路の標識等に描かれている漢字は省略や簡略化等、相当デフォルメされています。デフォルメされた漢字の方が人間にとって視認性が良いということなのだと思いますが、そのこととこの研究の可読性とは何か関係があるのでしょうか。

回答（佐川 賢、倉片 憲治）

フォントタイプは現在数百種類もあり、読みやすさよりも審美性や目立ちやすさを狙ったものがたくさんあります。これらはSerif（明朝のように線分の端に“ハネ”のあるもの）とSans-Serif（ゴシックのように“ハネ”のないもの）に分類されます。SerifやSans-Serifにもさまざまな変形があります。この研究ではそれらの代表として、一般に利用頻度の高いMS明朝およびMSゴシックを用いました。

フォントの読みやすさは、空間周波数（縞の粗密）の成分とそれに対する目の感度特性で決まります。その意味で線の太さ等が大きく関係します。明朝は一般に細い線で高い空間周波数を含み、ゴシックは太い線で比較的低い空間周波数を含みます。その違いを明らかにする上では、代表的な明朝や代表的なゴシックで研究するのが有効と考えました。空間周波数成分と読みやすさの関係は一つの大きな基礎研究の領域であり、この研究ではあまり追及していませんが、その考え方や視点は踏まえて実験条件を整えました。

その結果、ゴシック（Sans-serif）が読みやすいということになりましたが、線の太さ等が読みやすさの主要な要因と考えられます。さらに、カタカナ、漢字[5-10画]、漢字[11-15画]となるにつれて最小可読文字サイズは大きくなりますので、読みづらくなることが示されています。一般に、デフォルメされると文字は単純な方へ変化しますので、標識等にはこの簡略文字が有効に使われていることと考えられます。

議論5 外国語文字と日本語文字の視認性

質問（赤松 幹之）

図6に示されている各国の文字にこの方法を適用した結果ですが、日本語が最も視認性が悪い結果になっています。元々は日本語データを使って作られた方法を適用したにもかかわらず、日本語の結果が最も悪いのは何か理由があるのでしょうか？

また、外国の文字に適用する場合の課題として、日本語から得られた係数を適用することが挙げられていますが、その他に、例えば文字のポイント数の定義（文字高さの定義）の違い等、他言語に適用するときの課題があるのでしたら、追記してください。

回答（佐川 賢、倉片 憲治）

日本語の結果が一番悪いこと自体に本質的な理由はありません。日本の結果は、最小可読文字サイズ推定式を導いた111名の実験とは別に、新たに行った（同条件、同サンプルの）国際比較のデータに適用したもので、式を導いたときと被験者や測定条件が異なります。ひらがなとアルファベットの違いかと思いましたが、ドイツ等では良く一致していますので、アルファベットに対する推定の問題ではないと思われる。

日本語文字から得られた係数の適用に関しては、今後の課題となります。それぞれの言語の文字について適切な係数を求めるのが理想ですが、現実的な方法として、文字の複雑さによってクラス分けし、各クラスの適切な係数を決めたいと思います。また、文字のポイント数の表し方は国際的に決められていますので、それを適用すること、その他の適用上の課題に関しては前述の複雑さのクラス分けが有効であること等を記述しておきたいと思えます。

議論6 標準化における規定事項

質問（小野 晃）

この研究の成果としてJIS S 0032「日本語文字の最小可読文字サイズ推定方法」が制定されましたが、この規格はどういう項目をNormative（準拠すべき規範的）なものにし、どういった項目をInformative（参考にとどめる情報提供的）なものにしたのか、またそう決めた背景にある考え方に関してもご教示ください。

回答（佐川 賢、倉片 憲治）

JIS S 0032は「手法」の標準化で、可読文字サイズそのものの値は標準化していません。すなわち、Normativeな事項は、最小可読文字サイズを求める方法〔式(2)と表(1)〕のみとなります。ここで求めた文字サイズをどのように活用するかは、この規格の使用者に任されています。Informativeな事項としては、附属書に最小可読文字サイズに基づく文章の読みやすさの評価方法等を盛り込んでおります。

議論7 技術の普及のための方策

質問（赤松 幹之）

アクセシブルデザインの普及のために標準文書化が良いというのは分かりましたが、標準文書化がなされても、デザインをする人たちにそれを使ってもらわないとアクセシブルデザインが広まりません。標準文書を広く使ってもらうための取り組みをしているのであれば、ご紹介していただけませんか？

回答（倉片 憲治、佐川 賢）

標準文書の普及が大事であることは、十分理解しております。当初、標準化すれば技術は普及するものと安易に考えていましたが、普及はそう簡単ではないことが良く分かってきました。

そこで、まずは「アクセシブルデザイン」というアイデアそのものを広く知ってもらうため、経済産業省や（財）共用品推進機構（アクセシブルデザインの推進母体）と連携して普及のためのパンフレットを作成したり、企業のデザイナーや技術者に向けたシンポジウムを定期

的に開催したりしてきました。

今後は、アクセシブルデザインを採用した製品であることを、カタログ等で消費者に対して分かりやすく表示する仕組みが必要ではないかと考えています。例えば、アクセシブルデザイン規格への適合性評価制度といった社会的な仕組みです。これによって、消費者が商品を選択しやすくなるのはもちろん、製造者側もアクセシブルデザインの効果を実感できるようになり、製品の普及に弾みがつくものと期待されます。

議論8 標準化の限界

質問（赤松 幹之）

アクセシブルデザインの普及に標準化というシナリオを採用したのがこの論文の主張ですが、標準化という手法の限界についてのお考えを聞かせてください。

回答（倉片 憲治、佐川 賢）

ご質問の範囲が広いので、いくつかの側面に焦点を当ててお答えします。

- 1) 分野については、先端的、革新的な研究で、Only one やNumber oneを狙う研究にはあまり向いていないと思われれます。ある程度成熟した技術で、もう1段階、応用面での展開（第2種基礎研究）が必要な領域が標準化に向いていると思います。一方、スピードを競う研究や新分野の開拓を狙う研究ではこれまでの標準化手続きでは限界があり、より戦略的な手法が必要と考えられます。
- 2) 技術を標準化することは、同時に多様性への対応に制限を設けることにつながりかねません。この論文で扱った文字の可読性も、ある年齢群の者について、限定された輝度と文字種の条件で読み取れる文字サイズを、いわば最大公約数的に推定したものです。個人の視覚特性をより詳しく求め、環境条件をより細かく特定すれば、その条件でその人が読める文字サイズをさらに精度良く推定することも技術的に可能です。このような精緻化や最適化よりも簡便化と一般化に力点を置いて技術の早期普及を優先させるのが、標準化研究の特長でもあり、限界でもあるかと思えます。
ただし、そのような簡便化と一般化を図る技術開発の裏には、この論文でも触れたように、膨大なデータの蓄積があります。一般的な条件だけでなく、個々の条件に応じてデザインの最適化を図りたいといったニーズに対しては、それらのデータも合わせて活用していただくのが効果的であると考えます。このような企業の技術者やデザイナーらのニーズに応えるために、著者らは産総研の研究情報公開データベース（RIO-DB）等とおして、標準化した技術の背景にあるデータを広く公開する取り組みを始めています。
- 3) 研究体制については、標準化を目指すための組織的な推進が必要と言えます。著者の一人（佐川）は国際照明委員会という国際組織で「光と照明」の分野の国際標準化に取り組んできましたが、当初は全くの一人であったため、研究の遂行、委員会活動、国際交流に限界を感じました。産総研になって、研究所内部に新たに工業標準部が組織され、標準基盤研究制度ができる等体制が整ってきました。それによって、標準化を目指した研究への賛同者も増えてグループでの研究もできるようになり、一気に進展しました。逆に、このような支援体制のないところで標準化研究を実施するには、かなりの困難があると思えます。
- 4) 3) に関連しますが、期間の短い研究プロジェクトで標準化まで実施するには限界があります。標準化には提案してから少なくとも3年はかかりますので（ISOの場合）、その前段の研究期間を含めると、理想的に進んでも全体で6~7年の時間がかかります。最近では3年程度のプロジェクトが主流になっていますので、それらをいくつかつないでいくことが要求されます。このつながりが途絶えてしまえば、標準化計画そのものが消えてしまいます。あまりに短期的なプロジェクトや新規のプロジェクトをつないでいく方法では、標準化研究は進められません。

光ファイバ広帯域振動検出システムの開発

— FBGセンサを用いたひずみ・AE同時計測技術 —

津田 浩*、佐藤 英一、中島 富男、佐藤 明良

打音検査や超音波検査のように振動を利用すると構造物の健全性を評価することができる。光ファイバセンサは電気センサの適用が困難であった極限環境下における構造物健全性評価を可能にすることが期待されている。近年、多機能、多重化可能、電磁波非干渉といった特長を有するファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG) による振動検出の研究が盛んに行われている。しかしこれまでのFBGセンサシステムは温度・ひずみ変動下で超音波を検出することが困難であった。我々はこの技術的障害を乗り越えるシステムを新たに開発した。この論文ではコンパクトで経済性に優れた数Hz~2 MHzの広帯域な振動検出が可能なFBGセンサシステムの開発過程を構成的アプローチに基づいて紹介する。

キーワード: 超音波、振動、アコースティック・エミッション、非破壊検査、光ファイバセンサ

Development of fiber optic broadband vibration-detection system

– Simultaneous measurement of both strain and acoustic emission using a fiber Bragg grating sensor –

Hiroshi TSUDA*, Eiichi SATO, Tomio NAKAJIMA and Akiyoshi SATO

Structural integrity can be examined using methods that evaluate response to vibration, such as hammering tests and ultrasonic inspections. Fiber optic sensors are expected to allow structural health monitoring in harsh environments where conventional electric sensors cannot be used. Recently, detection of vibration with a fiber Bragg grating (FBG) has been intensively investigated, because FBGs have many advantages such as multifunction abilities, multiplexing, and electromagnetic immunity. In using previously proposed systems incorporating FBGs, however, there was a technical difficulty in detecting ultrasound under varying temperatures and strain conditions. We developed a novel system that overcomes this technical barrier. Our system is also capable of detecting vibrations across a broad frequency band from several Hz to around 2 MHz. This paper presents how our compact and economical vibration-detection system with an FBG sensor was developed.

Keywords: Ultrasound, vibration, acoustic emission, non-destructive testing, fiber-optic sensor

1 はじめに

打音検査と超音波検査は構造物に振動を与え、その応答特性から構造物の欠陥の有無を評価する。一方、材料が微視破壊する時には、アコースティック・エミッション(AE)と呼ばれる表面エネルギーの解放に伴う弾性波放出があり、超音波域の振動が発生する。また、回転機械では、回転周波数と比較して回転軸のゆがみは低周波域に、ベアリング部の破損は高周波域に高い成分強度を有する異常振動を誘発することが知られている^[1]。このように構造物・機械の健全性評価において、振動測定はとても重要な役割を果たす。

これまでの振動測定では、電気センサであるひずみゲージや圧電センサが多用されてきた。周波数が数 kHz までの振動測定には、電線の電気抵抗のひずみ依存性を利用

するひずみゲージが用いられる。AE等の超音波振動になると、測定されるひずみが小さくなることから、ひずみゲージでは振動を検出できなくなり、圧電センサが用いられる。ただし圧電センサには共振周波数が存在するため、測定対象の周波数域に応じた共振周波数を有する圧電センサを選択する必要がある。つまり機械的振動から超音波振動までの広帯域にわたる振動を測定できる電気センサは皆無である。したがって広帯域の振動を測定可能なセンサおよびその計測システムの開発は、振動を利用した非破壊検査の利便性を大いに高めると期待される。

近年、電気センサの適用が困難な構造物が増えている。例えば、設計の自由度が高く高比剛性・比強度という特長から炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を航空機構造部材や風力発電用ブレードに適用するケースが増えてい

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2
Research Institute of Instrumentation Frontier, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: hiroshi-tsuda@aist.go.jp

Original manuscript received June 18, 2012, Revisions received August 30, 2012, Accepted September 10, 2012

る。CFRPは導電性材料であることから、電気センサを用いた場合はショート等電磁障害により正確に測定できない問題がある。また放射性廃棄物を処分するための深部地下貯蔵施設等で数十年単位の長期間にわたり施設の安全性を確保する必要がある場合、耐食性・耐久性の問題から電気センサによる健全性評価は難しい。

光ファイバセンサは、上記したような電気センサの問題を解決する構造体健全性評価用センサとして期待されている。中でも波長変調型光ファイバセンサであるファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG) は、ひずみセンサとしてすでに実用化され、近年は超音波センサとしての研究開発が盛んに行われている^[2]。このようなことからFBGは、ひずみゲージと圧電センサの両方の機能を備えたひずみと超音波・AEが同時計測可能なセンサとして最も期待されている。しかし、後述するようにFBGによるAE計測には大きな技術的障壁があり、AEセンサとして実用化されていないのが現状である。FBGと既存の振動検出センサであるひずみゲージおよび圧電センサの特徴を比較したものを表1に示す。

この論文では、宇宙構造物の健全性評価のための光ファイバセンサシステムの構築を目標とした宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の研究開発プログラムに携わる中で開発された、コンパクトなAE計測システムの開発経緯と、JAXA、民間企業、産業技術総合研究所 (AIST) が共同で構築したFBGセンサを用いたひずみ・AE同時計測システムを紹介する。

2 開発される光ファイバセンサシステムがもたらすインパクト

近年、航空機は、非破壊検査では検出できない微小な初期欠陥から運用中にき裂が進展することを前提に寿命を評価する損傷許容設計に基づいて製造されている。この設計思想に基づく構造体では、定期的な非破壊検査を行い、次の検査までに急速なき裂進展が見込まれる大きさの欠陥を修理することで構造体の信頼性を確保している。もし構造体中の欠陥の存在や進展を運用中にモニタリングすることができれば、格段にその信頼性を向上させることができる^[3]。このためスマート構造体と呼ばれる、欠陥の発生や進展のモニタリングに寄与するひずみ計測やAE計測機能を包含した構造体が、航空・宇宙分野を中心に注目されている。スマート構造体の実現には、耐久性に優れたシンプルなセンサ網から構成されるシステムの開発が望まれている。

これまでの電気センサでは、上述のようにひずみとAE計測用のセンサを個別にそろえる必要がありセンサごとに配

表1 振動測定に用いられるひずみゲージ、圧電センサ、FBGセンサの特徴

	ひずみゲージ	圧電センサ	FBGセンサ
応答周波数範囲	数kHzまで	数十kHz～数十MHz	数Hz～2MHz
ひずみ計測	○	×	○
超音波・AE計測	×	○(注1)	○(注2)
ひずみと超音波・AEの同時計測	×	×	○
耐食・耐久性	×	×	○(注3)
電磁障害	×	×	○
価格(円/個)	300～600	3,000～300,000	10,000～30,000

(注1) 測定対象の周波数域に応じた共振周波数を有する圧電センサを選択する必要がある。

(注2) 既存技術によるFBGのAE計測には大きな技術的障壁がある。

(注3) グレーティングが消失する400℃以上の高温、または放射線環境での利用には時間的制限がある。

線を必要とすることから、大型構造物の健全性評価には複雑で重量の大きなセンサ網になる懸念がある。一方、光ファイバセンサは、耐久性に優れ、軽量なことからスマート構造体用センサに適している。特に波長変調型センサであるFBGは、波長多重技術を利用して一本の光ファイバ上に複数のセンサポイントを設けることが可能なことから、極めてシンプルなセンサ網を構築できると考えられる。このような理由から、ひずみとAEの二つの計測機能を有するFBGセンサシステムは、スマート構造体の中核技術として期待されている^[4]。

3 FBGについて

3.1 FBGのセンサ機能

FBGは光ファイバの導光路であるコアの屈折率がファイバ軸方向に周期変化した構造をもつ。FBGは0.2～2nm程度の狭帯域光を選択的に反射する性質があり、この反射光の中心波長はブラッグ波長と呼ばれる^[5]。FBGが受けるひずみまたは温度変化に応じて、ブラッグ波長は比例変化する。ブラッグ波長1.55μmを有するFBGのブラッグ波長のひずみおよび温度感受性は、それぞれ1.2pm/μεおよび14pm/Kである。屈折率変調を与えている空孔欠陥が消失・拡散するような400℃以上の高温または放射線環境での利用には時間的制約があるが、それ以外の環境ではFBGは耐久性に優れた温度・ひずみセンサとして機能する。なお第1章に、FBGは優れた耐食性・耐久性から放射性廃棄物を処分するための深部地下貯蔵施設のモニタリングセンサとして期待されていると記したが、強力な放射線の照射はFBGを消失させる可能性があることを考慮しなければならない。

ブラッグ波長の計測に波長計等の光計測器を用いた場合、サンプリング速度はせいぜい数Hzであることから、

振動検出といった動的な計測はできない。動的なブラッグ波長計測法として光フィルタ、またはレーザを復調に利用する波長-光強度変換法がある^{[6][7]}。光フィルタ復調方式は、FBGの反射光を透過率が波長に依存する光フィルタに入射させ、FBGのブラッグ波長変化を光フィルタの透過光強度変化として検出する。一方、レーザ復調方式は、図1に示すようにFBGの反射スペクトルの勾配が急峻な波長域にレーザを入射させることで、わずかなブラッグ波長変化を大きな反射率変化つまりFBGからの反射光強度変化として検出する。

3.2 FBGによるAE計測の技術的課題

材料に熱的または力学的負荷が加わると、ひずみが発生し突発的な微視破壊が生じる。このときに発生するAEを計測するためには、温度やひずみ変動条件下で超音波振動を高感度に検出できるセンサシステムが必要である。AEがもたらすひずみ変化はせいぜい数 $\mu\epsilon$ 程度で、これに伴うFBGのブラッグ波長変化はせいぜい数pmである^[8]。このような微小で高速なブラッグ波長変化はレーザ復調方式を利用して高感度に検出できる。しかし、ひずみ約0.008%で温度約7Kの変化をFBGが受けると反射スペクトルは0.1nm波長シフトし、図1に示すようにレーザ波長はFBGの反射スペクトルから外れる、つまり動作域から外れる問題がある。また光フィルタ復調方式では、周期的な光学特性を有する光フィルタを利用することで動作域を広げることが可能だが、レーザ復調方式と比較すると検出感度が劣る。このようにFBGによる超音波・AE計測技術は未成熟な段階にあり、FBGのブラッグ波長が大きく変動するひずみ・温度変動条件下においても、超音波検出可能なAE計測システムの開発が望まれていた。

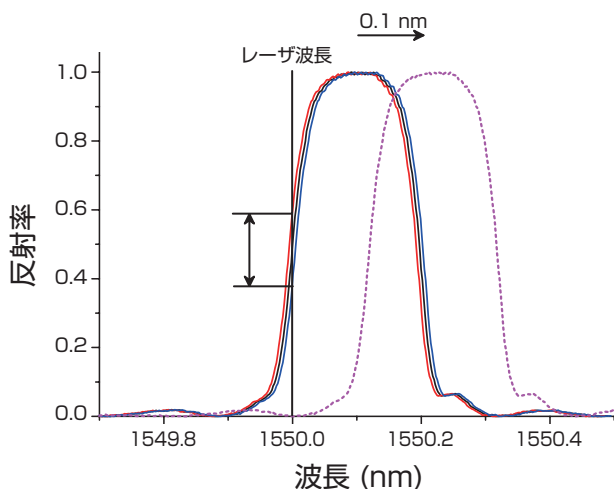


図1 レーザ復調方式の超音波検出原理
ひずみ約0.008%または温度約7Kの変化で、反射スペクトルは0.1nm波長シフト。

4 FBGを用いたAE計測システムの開発

我々は2008年秋から2011年春まで、JAXAの研究プロジェクトである宇宙オープンラボの課題名「大型構造物の構造ヘルスマニタリング技術の研究開発」に参画し、ロケット等の宇宙構造物に適用されるひずみとAEの同時多点計測可能なFBGセンサシステムの開発に係わった。このプロジェクトではAISTが計測技術の開発と提供、民間企業が計測システムの設計・製作および実験遂行、そしてJAXAが実証試験のための実験場の提供および研究統括を行う研究体制を取った。

プロジェクトが開始された2008年当時は、AE計測可能なシステムとしてAWG (Arrayed Waveguide Grating) またはFabry-Perot干渉フィルタといった、周期的な光学的特性を持つ光デバイスを復調用光フィルタに利用するシステムが提案されていた^{[9][10]}。しかしFBGを用いたAE計測は報告されておらず、FBGのAE計測能は未知であった。このような状況であったので、プロジェクト初年度はFBGのAE計測能の評価、および光フィルタ復調方式によるAE計測可能性の検討の2点に課題を絞り研究を行った。

4.1 レーザ復調方式によるAE計測

FBGによる超音波検出ではレーザ復調方式が最も感度が高いことから、レーザ復調方式により超音波の一種であるAEを検出し、これまでのAE計測に用いられてきた圧電センサとAE計測能を比較した。具体的にはロケット燃料タンクに用いられるCFRP圧力容器の耐圧試験中のAEをFBGと圧電センサで検出し、両センサのAE計測挙動を比較した。

これまでレーザ復調方式による超音波計測では、FBGは図2(a)に示すように被検体に貼り付けられたり、埋め込まれたりしていた。このようなFBGの反射スペクトルは、被検体が受けるひずみに応じて波長シフトする。このためひずみ変動条件下で連続的に発生するAEを計測するためには、反射スペクトルシフトをモニタリングしてレーザ波長を超音波検出可能な波長にフィードバック制御することが考

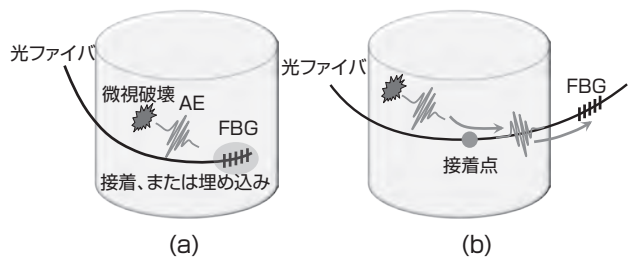


図2 FBGの被検体への取り付け方法
(a) 従来の取り付け法、(b) FBG反射スペクトルがひずみの影響を受けない取り付け法。

えられる。しかし、材料破壊時の不連続なひずみ変化にレーザー波長制御が追従できないことから連続的な AE 計測は困難である。

そこで図 2 (b) のように FBG を書き込んだ光ファイバの FBG 部以外の箇所を被検体に取り付ける工夫をした。この場合、被検体で発生した AE は被検体と光ファイバの接着点を介して光ファイバに入り、FBG に到達する。FBG は被検体に接していないことから、反射スペクトルは AE のみの影響を受けて波長シフトする。屋内であれば温度変化は小さいことから、実験室内で行われる破壊試験ではこの FBG センサの取り付け法により連続 AE 計測が可能になった。

CFRP 圧力容器の耐圧試験中に FBG センサと圧電センサから検出された累積 AE 事象数と圧力-時間関係を図 3 に示す。この耐圧試験では圧力 1MPa を越えてから両センサともに AE を検出し始めた。両センサが検出した AE は圧力の増加に伴い増加する、また圧力が一定に保たれた時間では AE 増加率が減少する類似した挙動を示している。このように FBG は圧電センサと同程度の AE 計測能を有することがわかった^[11]。

4.2 光フィルタ復調方式による AE 計測

ロケット等の宇宙構造物に搭載するシステムには寸法、重量、消費電力に大きな制約がある。JAXA が提示したロケット搭載用 AE 計測システムの仕様制限は、サイズ 200 × 300 × 150 mm³、重量 4 kg、消費電力 14 W 以下であった。前節に記したレーザー復調システムは、波長可変レーザーや光スペクトルアナライザといった重量や寸法ともに大きな計測器を必要とし、上記した仕様制限を満たすことはできない。光フィルタ復調方式を用いたシステムは、レーザー復調方式と比較して超音波検出感度は劣るが、システムを小型化できるメリットがある。そこで光フィルタ復調方式による AE 計測を試みた。周期的な光フィルタを復調器

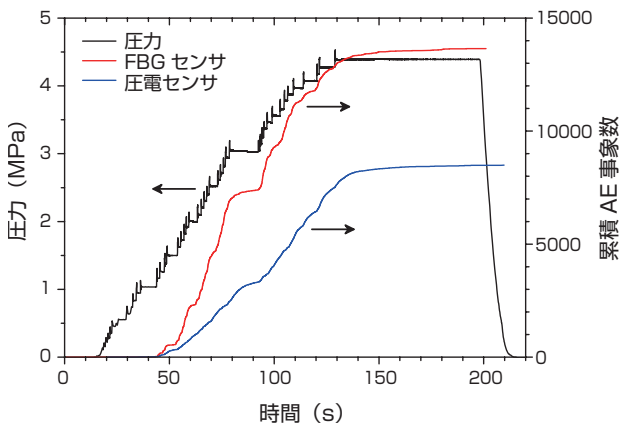


図 3 CFRP 圧力容器の耐圧試験における圧力、累積 AE 事象数-時間関係

に用いた場合、FBG の反射スペクトル幅と同程度の FSR (Free Spectral Range: 光学的特性の周期間隔) を有する光フィルタを用いることで超音波検出感度が最大になることがわかっている^[10]。AWG の FSR の選択肢は少なかったが、Fabry-Perot 干渉フィルタにはさまざまな FSR を有するフィルタが市販されていた。そこでプロジェクトでは、FBG センサの反射スペクトル幅と同程度の FSR を有する Fabry-Perot 干渉フィルタを用いてロケット搭載用システムを試作し、その AE 計測能を評価することにした。

前記したロケット搭載用の仕様制限を満足したシステムを作成することができ、同システムを CFRP の AE 計測に適用した。しかし、検出感度が低いことから、AE 信号とバックグラウンドノイズの識別が困難であった。光源に広帯域光を用いる光フィルタ復調方式では、FBG から反射される光強度はレーザー復調方式と比較して 1/10,000 程度と微弱である。このような微弱光を利用する光フィルタ復調方式では AE 検出感度の大幅な改善は難しいと考え、プロジェクト初年度が終了した時点では AE 計測システムの開発にめどが立っていなかった。

4.3 新しい計測原理に基づく AE 計測システムの開発

産総研では当時、FBG のグレーティング長が超音波検出感度に及ぼす影響を評価する実験を行っていた。この実験で用いたレーザー復調システムの実験セットアップを図 4 に示す。FBG はわずかな温度・ひずみ変化で反射スペクトルが波長シフトすることから、超音波検出に最適なレーザー波長が常に変化する。このため図 4 の光スイッチをポート 1 に設定して FBG の反射スペクトルを光スペクトルアナライザで測定した後に光スイッチをポート 2 に切り替え、レーザー波長を FBG の反射スペクトル勾配が大きな波長、通常は反射率 50 % の波長に制御した後超音波応答を検出していた。

レーザー復調方式は超音波検出感度が高いことから単発超音波に対しても良好な感度で応答を得られるはずだが、応答信号を平均化処理しなければ超音波を検出できなかった。つまり繰り返し超音波を発生させ、その応答信号を加算平均することで超音波を検出できるケース

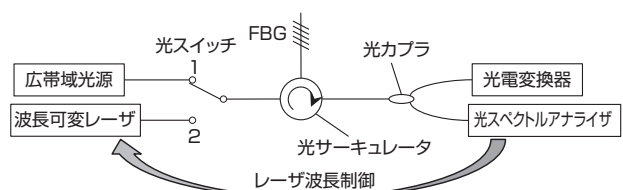


図 4 レーザー復調システムの実験セットアップ

があった。この検出感度低下の原因を探索したところ光スイッチをポート1にした状態、つまり広帯域光をFBGに入射した状態で超音波計測を行っていたことがわかった。操作ミスであったが、この結果から広帯域光をFBGに入射し、FBGからの反射光強度を平均化処理することで超音波応答を得ることができる。換言すれば広帯域光をFBGに入射したとき、光フィルタによる復調なしでも低感度であるが超音波振動を検出できることがわかった。FBGは超音波振動を受けたとき反射スペクトルが pm レベルで変動している。この波長変動が光強度変化として現れていることから、上述したシステムでは広帯域光源出力の波長依存性を利用して超音波を検出したと考えられる^[12]。光源の光出力の波長依存性を利用する考えはこれまで提案されてきたFBGを用いた超音波計測法にはない概念であった。この新しい復調法では復調用光フィルタが不要なことからシステムの大幅な軽量化・小型化が見込まれ、大きなブレークスルーにつながると期待した。

そこで光源の光出力の波長依存性を利用する超音波検出法の高感度化について考察した。上記した実験で用いた広帯域光源のスペクトル分布を図5(a)に示す。用いたFBGのブラッグ波長1,550 nm付近では波長に伴い出力が若干低下する傾向を示している。このブラッグ波長近傍での光スペクトル分布を模式的に表したのが図5(b)で、超音波振動により光出力が0.5～1の間で変化すると仮定する。FBGの反射光強度が10の場合、超音波振動に伴う出力変化は5～10になり強度5の変化が得られる。もしFBGの反射光強度を100に増加した場合、同じ振動に伴う出力強度変化は50になる。したがってFBGからの反射光強度を高めることで超音波検出感度は改善される。FBGからの反射光強度を高めるには、強力な光出力を持つ広帯域光源またはファイバ・リング・レーザの利用が考えられる。広帯域光を用いた場合、光源から出力されるごく一部の光を利用して超音波を検出することから極めて効率

の悪い計測システムである。そこでファイバ・リング・レーザを用いてシステムを組むことにした^[13]。

ここでファイバ・リング・レーザについて説明する。ファイバ・リング・レーザは図6のような構成をもつ。光アンプには微弱な広帯域光を放出する、また比較的高い成分強度を有する波長の光を増幅するという二つの機能がある。光アンプから放出された微弱な広帯域光は、FBGでブラッグ波長を中心とする微弱な狭帯域光として反射され、リング状ファイバを經由して光アンプに入射される。光アンプはブラッグ波長を中心とする狭帯域光を増幅し、増幅された光はFBGで再び反射されてリング状ファイバを循環する。このリング共振器と呼ばれるリング状ファイバにおいて、FBGからの反射光は繰り返し増幅されることで、FBGのブラッグ波長におけるレーザが作られる。例えばシステムのリング共振器長を10 mの光ファイバで構成した場合、FBGからの反射光がリング共振器の周回に要する時間は約33 ns、周波数に換算して30 MHzである。このためFBGがひずみ、温度変化を受けてブラッグ波長が変動しても、十分な応答速度でひずみ・温度に応じたブラッグ波長でレーザ発振する。リング共振器に光カプラを挿入し、レーザの一部を取り出し、光電変換器に入力してレーザ強度を測定する。光アンプが有する光利得に波長依存性がある場合、FBGのブラッグ波長変化をレーザ強度変化として検出することができる。

ファイバ・リング・レーザを用いてFBGのブラッグ波長でレーザ発振させ、波長計等の光計測器を用いてブラッグ波長を測定してFBGが受けるひずみを計測する技術はこれまでもあった。しかし、ファイバ・リング・レーザに組み込まれる光アンプの光利得の波長依存性を利用して、ブラッグ波長変化をレーザ強度変化に変換することでFBGが受ける振動を検出する技術は、この研究の独創的な発案である。

このシステムを利用した超音波検出の一例を紹介する。

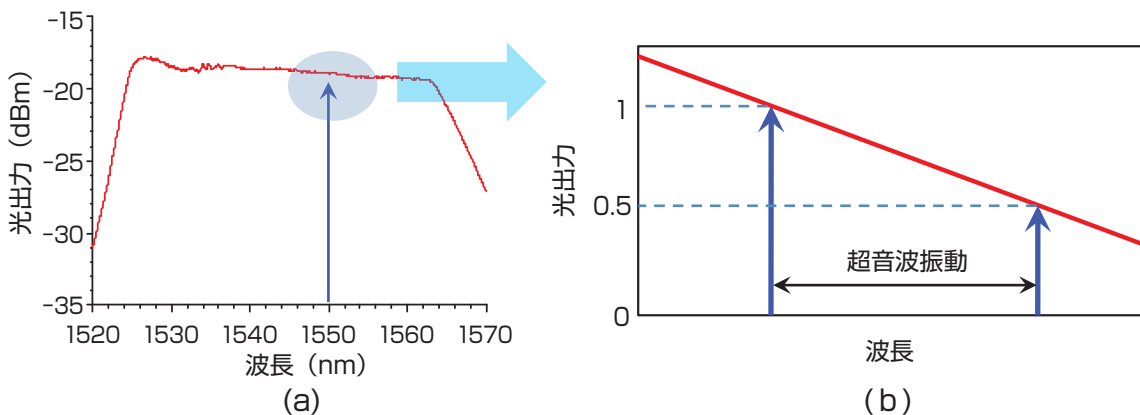


図5 (a) 用いた広帯域光源の出力光スペクトル分布、(b) 波長 1,550 nm 付近のスペクトル分布模式図

FBG を CFRP 平板に貼り付けて $\pm 0.06\%$ のひずみを与えたとき、図 7 に示すように反射スペクトルが波長シフトする。従来技術であるレーザ復調方式では、超音波検出時に反射スペクトルの波長シフトに応じてレーザ波長を制御する必要があるが、ファイバ・リング・レーザシステムではひずみに応じたブラッグ波長において自発的にレーザ発振する。このようなひずみの異なる状態においても何ら制御することなく図 8 に示すように 3 周期トーン・バースト波で励起した単発超音波を検出することができた^[4]。

また、数 Hz 程度の機械的振動を FBG に与えた際、ひずみゲージから計測された振動周期と一致するレーザ強度変化が現れた。詳細に調べた結果、このファイバ・リング・レーザシステムにより数 Hz ~ 2 MHz に渡る広帯域の振動測定が可能であることがわかった。ファイバ・リング・レーザシステムはシンプルな構成であることから小型化が容易で、前述したロケット搭載用 AE 計測システムの仕様制限を満たし、かつ十分な AE 計測能を有するシステムを図 9 に示すように作成することができた。

5 ひずみ・AE同時多点計測システムへの展開

我々が携わった研究プロジェクトの最終目標は、4つの FBG センサを用いて AE と最大 1% までのひずみを同時計測可能なシステムの開発であった。FBG を用いたひずみ

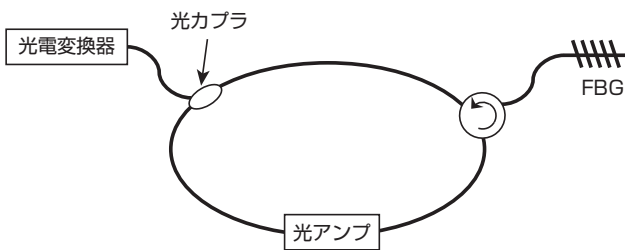


図 6 ファイバ・リング・レーザ

計測については、光フィルタを復調器に利用した波長-光強度変換法が確立されている^[6]。そこでプロジェクト最終年度に、前節に記したファイバ・リング・レーザシステムから得られる FBG 反射光を AE 計測用とひずみ計測用に分岐して取り出し、AE とひずみを同時多点計測できるシステムを作成した。

このシステム開発にあたって以下の技術的制約があった。

1. 一つの光アンプから構成されるファイバ・リング・レーザで複数波長のレーザを安定して発振させることは、現在の技術では困難である。

2. ひずみ計測では混信を避けるため、ひずみを受けた FBG のブラッグ波長が重ならないように各 FBG センサに利用する波長帯域を割り当てる必要がある。具体的には 1% のひずみを受けたとき FBG は 12 nm のブラッグ波長シフトが生じるので、それぞれの FBG に 12 nm 以上の重複しない波長帯域を割り当てる波長多重技術を利用する必要がある。

光通信分野では一本の光ファイバに波長の異なる信号を重畳させる波長多重技術が普及しており、経済的かつ

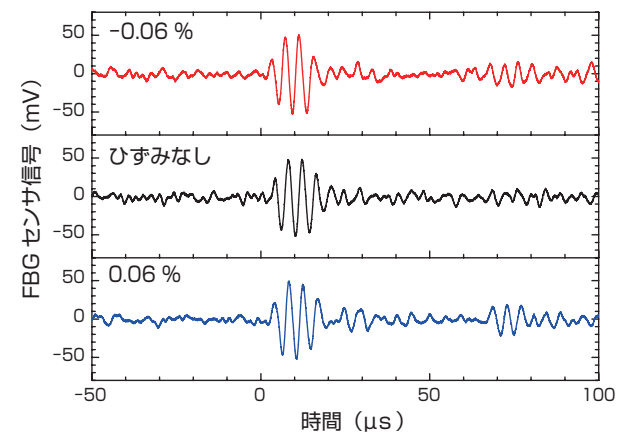


図 8 ファイバ・リング・レーザシステムを用いた超音波検出の一例

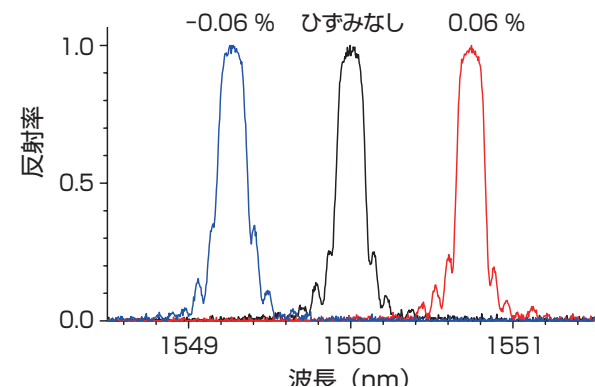


図 7 ファイバ・リング・レーザシステムを用いて超音波計測を行った時の FBG 反射スペクトル

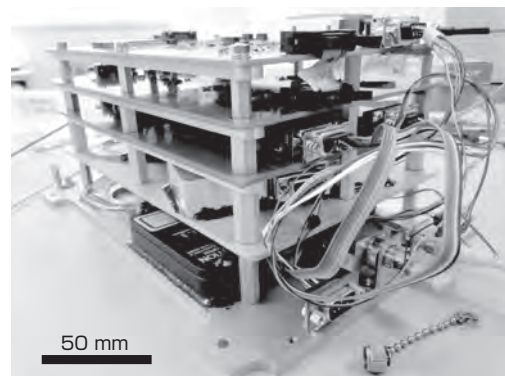


図 9 ファイバ・リング・レーザを利用したロケット構造物へ搭載可能な AE 検出システム

容易に光通信用波長多重コンポーネントを入手することができる。この研究では 20 nm ごとに各チャンネルの波長を分離する仕様の CWDM (Coarse Wavelength-Division Multiplexing) 技術を適用して、図 10 に示すシステムを組み立てた。

このシステムの動作原理は以下のとおりである。ブラッグ波長が 20 nm 分離された 4 つの FBG からの反射光は、光サーキュレータと光カプラを経由して、CWDM フィルタにより波長ごとに 4 つの光ファイバに分離される。各波長の反射光は、個々に光アンプで増幅された後に光カプラで一本の光ファイバに合流される。その後、FBG で反射されてリング共振器を循環することで繰り返し増幅を受け、

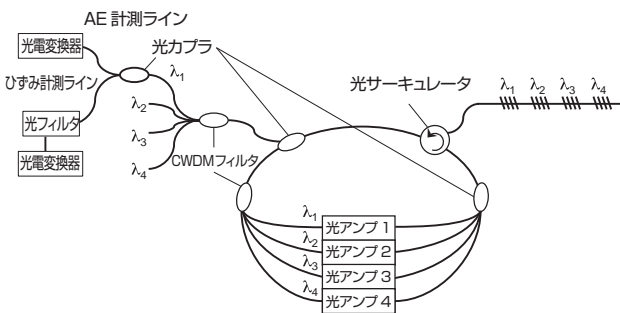


図 10 ひずみ・AE 同時多点検出システムのブロック図
単純化のため図中は波長 λ_1 の出力にのみ AE およびひずみ計測ラインを示したが、実際のシステムでは他波長出力にも同様の計測ラインを設けている。

各ブラッグ波長におけるレーザを得る。このファイバ・リング・レーザで発振された多波長レーザの一部は、光カプラで取り出され CWDM フィルタにより波長分離される。各 FBG からの反射光に対応する波長分離されたレーザは、さらに光カプラによりひずみ計測ラインと AE 計測ラインに分岐される。ひずみ計測用ラインはひずみ復調用の光フィルタに入射され、光フィルタの透過光および反射光強度から FBG が受けるひずみを評価することができる。また AE 計測ラインは光電変換器に接続され、バックグラウンドノイズを取り除くために設定したしきい値レベルを越えた信号が AE として検出される。AE 信号の収録は、圧電センサ用に市販されている AE 収録装置を流用することも可能である。なお、図 10 には一つの波長のみ AE 計測ラインとひずみ計測ラインを示したが、他波長についても同様の計測ラインを設けて 4ch のひずみ・AE 同時計測システムを作製した^[15]。

これまでにこのシステムを用いて液体水素雰囲気で回転する液体ロケットエンジンの振動計測や固体ロケットモータケースの AE 計測試験を行った。液体水素雰囲気での振動計測は、これまでの電気センサでは計測部にセンサを貼り付けることが困難であったため、振動ガイドである金属棒を介して測定部位から離れて振動を検出していた。FBG は液体水素雰囲気においても被検体に接着させて計測することが可能で、これまでの電気式センサでは検出できな

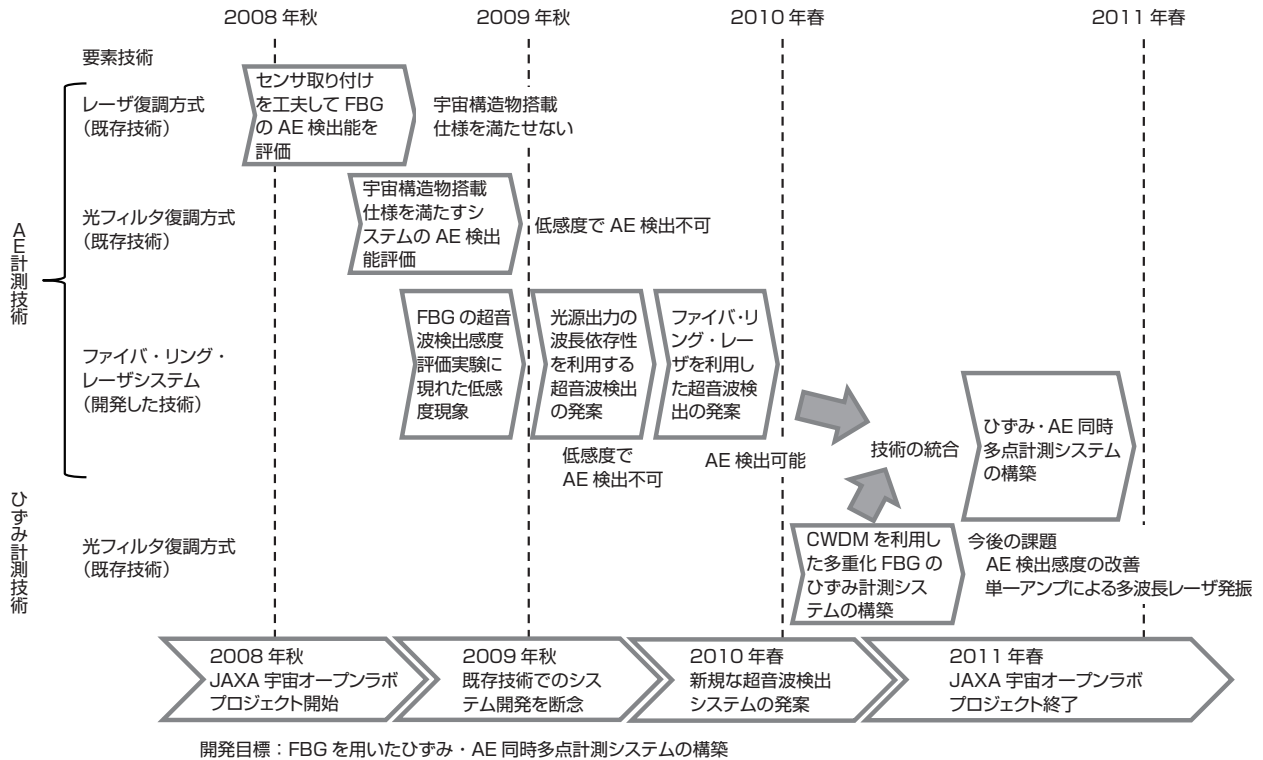


図 11 本研究開発の展開

表2 本研究開発で採用されたFBGを用いたAE計測技術の特徴

	レーザ復調方式	光フィルタ復調方式	開発した復調方式 (ファイバ・リング・レーザシステム)
AE計測能	○(図3を参照)	×(AEとバックグラウンドノイズの識別不可)	○(図8を参照)
ロケット搭載仕様への適用性	×	○	○
ひずみ同時計測への拡張性	×(注1)	○(注2)	○(注2)
システム価格(注3)	600万円程度	100万円程度	50万円程度

(注1) ひずみ計測用に広帯域光源を追加する必要がある。

(注2) 一つの光源でAEとひずみの同時計測が可能。

(注3) 1チャンネルAE計測システム構築時の費用で、ひずみ計測機能を含めない。

かった微小な振動成分を検出できた。また、これまではひずみゲージと圧電センサの二つを用いてひずみとAE計測を行ってきたが、このシステムを用いることで一つのFBGセンサでひずみとAEを同時に計測できた。

6 まとめ

波長変調型光ファイバセンサであるFBGを用いて、AEおよびひずみの同時多点計測が可能なシステムの開発を目的にこの研究は開始され、図11に示す展開を経た。研究開始当時はFBGをセンサとするAE計測技術が未熟で、その検出の可能性も実証されていない状況であった。そこでこの研究は、初めにFBGによるAE検出の可能性の実証と従来技術を利用した宇宙構造物搭載仕様を満たすシステムによるAE計測を試みた。FBGは優れたAE検出能を有したが、従来技術システムでは十分な検出感度が得られなかった。だが偶然にも実験中の操作ミスから新しいAE計測法を見いだすことができた。ここで新たに開発されたシステムは、ファイバ・リング・レーザに組み込んだ光アンプが有する光利得の波長依存性を利用して、FBGが受ける機械的振動から超音波振動までの広帯域振動をレーザ強度変化として検出することができる。この研究で採用されたAE計測に関するこれらの要素技術の特徴を表2にまとめた。この研究では最終的にファイバ・リング・レーザシステムに光フィルタ復調法によるひずみ計測技術を統合させて、ひずみ・AE同時多点計測システムを構築した。

これまで市販されてきたFBGを用いた構造物健全性評価用システムでは、サンプリング速度が最大でも1kHz程度で、周波数20kHzを超えるAEを検出することはできない。一方、このシステムは最大2MHzまでのAEを検出できることを確認している。さらにこのシステムはこれまでのFBG振動検出システムと比較してとても軽量、小型であり、かつ安価に作製できる特長がある。しかし、下記の技術課題が残っている。一つの光アンプか

ら構成されるファイバ・リング・レーザでは安定した多波長レーザ発振が実現できず、FBGセンサごとに一つの光アンプを要している。また圧電センサと比べてAE計測時のしきい値レベルが高いため、現状のシステムでは圧電センサよりもAE検出感度が低い。今後、これらの技術的な問題を改善しながら、開発されたシステムを宇宙構造物のみでなく一般産業機械等広い応用分野へ適用できるように研究を展開していきたいと考えている。

参考文献

- [1] 陳山 鵬: 回転機械の振動診断の最新技術と動向, 検査技術, 17 (3), 29-35 (2012).
- [2] G. Wild and S. Hinckley: Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art, *IEEE Sensors Journal*, 8, 1184-1193 (2008).
- [3] W.J. Staszewski, C. Boller and G.R. Tomlinson: *Health Monitoring of Aerospace Structures : Smart Sensor Technologies and Signal Processing*, 29-73, Wiley, West Sussex (2004).
- [4] M. Majumder, T.K. Gangopadhyay, A.K. Chakraborty, K. Dasgupta and D.K. Bhattacharya: Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications, *Sensors and Actuators A-Physical*, 147, 150-164 (2008).
- [5] A. Othonos: Fiber Bragg gratings, *Review of Scientific Instruments*, 68, 4309-4341 (1997).
- [6] M.A. Davis and A.D. Kersey: All-fiber Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength-division coupler, *Electronics Letters*, 30, 75-77 (1994).
- [7] N. Takahashi, K. Yoshimura, S. Takahashi and K. Imamura: Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating, *Ultrasonics*, 38, 581-585 (2000).
- [8] H. Tsuda, K. Kumakura and S. Ogihara: Ultrasonic sensitivity of strain-insensitive fiber Bragg grating sensors and evaluation of ultrasound-induced strain, *Sensors*, 10, 11248-11258 (2010).
- [9] S. Kojima, A. Hongo, S. Komatsuzaki and N. Takeda: High-speed optical wavelength interrogator using a PLC-type optical filter for fiber Bragg grating sensors, *Proc. SPIE*, 5384, 241-249 (2004).
- [10] J-R. Lee, H. Tsuda and Y. Akimune: Apodized fibre Bragg grating acousto-ultrasonic sensor under arbitrary strain using dual Fabry-Perot filters, *Journal of Optics A-Pure and Applied Optics*, 9, 95-100 (2007).
- [11] H. Tsuda, E. Sato, T. Nakajima, H. Nakamura, T. Arakawa, H. Shiono, M. Minato, H. Kurabayashi and A. Sato: Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions, *Optics Letters*, 34, 2942-2944 (2009).
- [12] H. Tsuda: A Bragg wavelength-insensitive fiber Bragg grating ultrasound sensing system that uses a broadband light and no optical filter, *Sensors*, 11, 6954-6966 (2011).
- [13] 津田 浩: FBG振動検出システム, 該システムを用いた装置および振動検出方法, 特開2011-196744.
- [14] H. Tsuda: Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser, *Optics Letters*, 35, 2349-2351 (2010).
- [15] 中島富男, 佐藤英一, 津田 浩, 佐藤明良, 川合伸明: 多重化したFBGセンサによるひずみとAE同時計測システムの開発(固体ロケットモータ複合材チャンバの構造ヘルスマモニタリングを目的として), *日本機械学会論文集(A編)*, 78, 728-741 (2012).

執筆者略歴

津田 浩（つだ ひろし）

1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年東京大学先端科学技術研究センター助手。1995年通商産業省工業技術院物質工学工業技術研究所入所。2001年独立行政法人産業技術総合研究所スマートストラクチャー研究センター、2005年から計測フロンティア研究部門、2010年から同研究部門構造体診断技術研究グループ長。光ファイバを利用した非破壊検査技術の開発に従事。この論文では計測技術の開発を担当した。



佐藤 英一（さとう えいいち）

1985年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了、同年宇宙科学研究所入所。2003年の宇宙航空研究開発機構統合を経て、現在、独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授。この論文では宇宙構造物検査への光ファイバセンサ技術の推進と研究全体の管理・運営を担当した。



中島 富男（なかじま とみお）

1987年筑波大学大学院にて工学修士取得。同年日産自動車株式会社入社。2000年株式会社IHIエアロスペース、2005年より株式会社IHI検査計測。現在、IHI検査計測研究開発センター課長。この論文では計測システムの工学系の設計・製作と実験計測を担当した。



佐藤 明良（さとう あきよし）

1977年青山学院大学理工学部化学科修了。日産自動車（株）宇宙航空事業部、（株）IHIエアロスペースで宇宙機器の非破壊信頼性評価技術を担当。2009年から（株）IHIエアロスペース技師長。この論文では計測システムの電気系の設計・製作と実験計測を担当した。



査読者との議論

議論1 全体評価

コメント1（一村 信吾：産業技術総合研究所）

この論文は、著者がこれまで進めてきたFBGセンサシステムの開発と宇宙構造物への応用展開可能性を記述したもので、主な成果はFBGを用いてひずみ・AE同時計測が実現できたことにあります。その中でも、FBGを用いてAEを計測する新しい技術を開発できたことに高い価値があると判断しました。ただし、シンセシオロジー誌の主眼である構成論的アプローチに関してより明確に記述いただく必要があると考えます。

コメント2（田中 充：産業技術総合研究所）

紆余曲折を経ていて、読み応えがあります。紆余曲折のダイアグラムを示すとわかりやすいのではないのでしょうか？

議論2 目標設定・章題の問題

コメント1（田中 充）

高感度化ではなく、「周波数領域での複合化あるいは多機能化」がポイントでしょうか？だとすると、高感度化関連の用語が頻繁に出てきており、誤解を招きやすいので、「はじめに」の記述も含めて、少し整理してはいかがでしょうか？

回答1（津田 浩）

この研究での最大の成果はFBGを用いた高感度でコンパクトなAE計測システムの開発です。AEとひずみの同時計測技術である周波数領域での複合化技術については、この研究で開発したAE計測技術に既存のひずみ計測技術を統合させたとご認識下さい。

コメント2（一村 信吾）

章題ですが

4 FBGを用いたAE計測システムの開発

4.1 レーザ復調方式によるAE計測

の方が理解しやすいように思います。いかがでしょうか？

回答2（津田 浩）

4章と4.1節のタイトルをご指摘のとおり修正しました。

またこの修正に伴い、4.2節のタイトル「光フィルタ復調方式によるAE計測の試み」を「光フィルタ復調方式によるAE計測」に修正しました。

議論3 用語の問題

コメント1（一村 信吾）

第2章で「損傷許容設計」と「スマート構造体」の用語が出てきますが、相互関係が明確ではありません。前者に基づく構造体と後者との関係に関して補足的な説明を足して下さい。

回答1（津田 浩）

第2章の第1パラグラフに損傷許容設計とスマート構造体に関する補足説明を追記しました。

論点4 個別要素の記述の問題

コメント1（一村 信吾）

既存の振動測定技術であるひずみゲージ、圧電センサ等の適用範囲と問題点はこの論文に記述されています。目的とするFBGセンサとこれらセンサの特徴、適用範囲等を比較する表を作成し付け加えると読者の理解がより深まります。ご検討下さい。

回答1（津田 浩）

ご指摘のとおり、第1章の第4パラグラフに各センサの特徴を表した表1を追加しました。

併せて理解を助けるための注記も加えました。

コメント2（一村 信吾）

3.1節はFBGの原理とセンサ機能という題名になっていますが、原理の説明はありません。また、文中に「放射線環境での利用には時間的制約があるがー」というか所がありますが、これは第1章の記述中にある「光ファイバセンサは上記した電気センサの問題を解決するー」という記述か所と矛盾した印象を与えます。整合性を考えて記述して下さい。

回答2（津田 浩）

ご指摘を受け第3.1節の題目を変更、および同節第1パラグラフの最後に整合性を図るための文章を追加しました。

コメント3（田中 充）

光フィルタ復調方式とレーザ復調方式が対比されていますが、その意味がよくわかりません。簡単に述べるか、または、この対比が本質

的ではないようでしたら、まとめて削除してはどうでしょうか？最終判断はお任せします。

回答3（津田 浩）

3.1 節第 2 パラグラフでは、光フィルタ復調方式がブラッグ波長の動的变化を計測する手法で、レーザ復調方式が超音波検出手法であると解釈される記述になっていました。ご指摘のとおり、よく意味のわからない文章になっていたと思います。そこで光フィルタ復調方式とレーザ復調方式の簡単な説明、および両方式がブラッグ波長の動的变化を計測する手法であることを明記する修正を行いました。

論点5 構成学上の問題

質問・コメント1（一村 信吾）

この新しい技術を見いだす（実現する）に至ったプロセス、研究アプローチ法を、4.3 節において構成的に書き直して記述いただくことができるでしょうか。つまり、偶然に気づいた「光源の光出力の波長依存性を利用する」方式が、どのような思考過程、検討過程を経て現実に利用できる技術として実現できるに至ったかを、構成的に書き下していただくことかと思えます。それが他の分野の研究者に対しても普遍性を持つ価値の高い研究アプローチ法になると思われますので、検討をお願いします。

回答1（津田 浩）

第 4.3 節の第 3 パラグラフを修正し、そこに図 5 (a)、(b) を説明のために追加しました。また第 6 章に図 11 を追加して、この研究の構成・展開をまとめました。

質問・コメント2（田中 充）

- ①リングレーザに至った経緯をもう少し書き込んではいかがでしょうか？
- ②図4では波長可変レーザを光源としておりますが、図10では複数の光アンプから構成されるリングレーザが光源になっているという理解でよいでしょうか？
- ③そして、周波数バンド割り当ての問題等は“今後の問題”という理解でよいでしょうか？であれば、図4と図10では、「現状の到達点」とこれからの構成学上戦略とに分けて描いてはどうでしょうか？

回答2（津田 浩）

- ①リングレーザ発案に至る紆余曲折のダイアグラムを第6章に図11として、また第4.3節の第3パラグラフにリングレーザに至る経緯を記した文章、ならびに解説のための図5 (a)、(b) を追加しました。
- ②そのとおりです。光アンプから放出される微弱な広帯域光を利用して、FBGのブラッグ波長における狭帯域光を繰り返し増幅することによりレーザを得ています。
- ③「周波数バンド割り当ての問題等」のご指摘ですが、開発者一同は

図10のシステムはFBGセンサごとにアンプを設けるのではなく、一つの光アンプを用いて実現したいと考えております。これまでのシステムと開発システムの課題を図11に記しました。

質問・コメント3（一村 信吾）

この論文は、表 1 の FBG センサを宇宙・航空分野で展開するため、表 1 で注記を加えた課題（特に注 2）を克服するための技術開発について記述することが主眼となります。FBG による AE 計測に関する技術課題は 3.2 に、新しいシステムは 4 に記述され、それらをまとめる形で図 11 が加えられていますが、今一つ課題と解決策の関係が明瞭でない印象があります。

については、「宇宙・航空分野における FBG を用いた各種 AE 計測法の特徴」に関する表を新たに加える等を検討して下さい。その際、既存技術の位置付けと開発技術の特徴をより明確にするための性能仕様の記述の仕方も含めてご検討下さい。

回答3（津田 浩）

ご指摘いただいたとおり、表 2 を 6 章「まとめ」に追加しました。

質問・コメント4（一村 信吾）

上記に示した表 2 等、この技術で開発した新しい復調方式の位置付けが明確になった上で、新たに加えていただいた図 11 を見てみますと、

・ファイバ・リング・レーザシステムによるAE計測性能の実現については位置付けを理解することが容易ですが、技術の統合を図った・CWDMを利用した――

に関しては、(表1でFBGによる歪み計測に関しては課題が無いことが記されているので) 何の課題の解決を目指したのか、容易に理解できません。

これらを踏まえて、表 1 に注を各加えるなり、または表 2、図 11 を再整理する等して、よりわかりやすい構成的な研究アプローチ法を記述していただけないか。

回答4（津田 浩）

宇宙オープンラボの当初の開発目的は FBG を用いた AE・ひずみ同時多点計測システムの開発です。AE 計測技術とひずみ計測技術を合体させて最終システムを構築したイメージがわかるように、表 1 に FBG はひずみと超音波・AE 同時計測が可能であることを示す欄を追加し、図 11 も各要素技術が AE 計測またはひずみ計測に対応するかを明記するように修正しました。ひずみ計測は既存技術を流用していますが、図 10 に示したように AE 計測システムと同じ光源を利用していることから、ひずみ計測機能を付与してもシステムをコンパクトに保つことができます。このような特徴を表 2 にも追加しました。またこの論文にも FBG による AE・ひずみの同時多点計測を明確にするように表現を一部修正しました。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

本ジャーナルは、個別要素的な技術や科学的知見をいかに統合して、研究開発の成果を社会で使われる形にしているか、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

1 投稿記事

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

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

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

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

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

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

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先:

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

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

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: S. ICHIMURA

Senior Executive Editor: N. KOBAYASHI, M. SETO

Executive Editors: M. AKAMATSU, M. TANAKA, H. TATEISHI, S. TOGASHI, Y. HASEGAWA, K. NAITO, H. TAYA

Editors: H. AKOH, S. ABE, K. IGARASHI, H. ICHIJO, K. UEDA, A. ETORI, K. OHMAKI, Y. OWADANO,

M. OKAJI, A. ONO, A. KAGEYAMA, T. KUBO, C. KURIMOTO, K. SAKAUE, T. SHIMIZU,

K. CHIBA, E. TSUKUDA, H. NAKASHIMA, K. NAKAMURA, Y. BABA, J. HAMA, K. HARADA,

Y. HINO, N. MATSUKI, K. MIZUNO, Y. MITSUISHI, N. MURAYAMA, M. MOCHIMARU,

A. YABE, H. YOSHIKAWA

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

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

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

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

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

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

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

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

1 Types of contributions

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

approved for publication.

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

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

3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2.10 Discussion with reviewers regarding the

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

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

3.3 Format

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

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

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

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

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

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

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

Book – [No.] Author(s): *Title of book* (italic),

Starting page-Ending page, Publisher, Place of Publication (Year of publication).

4 Submission

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

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

本号の座談会で語られていますように、今基礎研究における構成的アプローチが注目を集めています。

21世紀の人類が抱える課題は、例えば環境やエネルギー、最近の例でいえば原子力発電所の安全性のように複雑かつ複合的で、これまで科学研究が得意としてきた分析的なアプローチだけでは解決できないことが強く認識されています。また足元を見れば産業における研究開発活動のほとんどが構成的なアプローチで行われていることも事実です。基礎研究の成果をイノベーションに活かすために、分析的なアプローチと構成的なアプローチを同時に一貫して行う科学と技術の新しい研究方法が求められていると考えます。

本誌シンセシオロジー（構成学）は構成型研究を記述するオリジナルな論文誌で、発行して丸5年がたちました。創刊から昨年の3月まで本誌の編集委員長を務めましたので、改めて5年を振り返ってみたいと思います。

本誌にはこれまで約100件の研究論文が掲載されました。ここでは社会的価値につながる研究目標を達成するための著者独自のシナリオが記述されています。

構成型研究のシナリオの書き方は著者によってさまざまですが、研究で最も大切な部分であるにもかかわらず、これまでほとんど公開されてきませんでした。シンセシオロジーを発行して、構成型研究のシナリオが実は異なる専門分野の人にも理解可能で大いに役立つことが分かってきました。研究分野が極度に細分化され、分野相互のコミュニケーションが非常に難しくなった現代の科学技術の状況を考えますと、科学技術の研究者や技術者が自己のシナリオを公開し、専門分野にかかわらず相互に意思疎通・理解し、学ぶことができることは画期的であると言えます。

本号では5周年記念座談会の記事を冒頭に掲載しました。座談会には要職を勤められている方々にお集まりいただくことができ、研究開発と社会とをつなぐためには何をすべきかについて、大変中身の濃い議論をしていただきました。心より感謝申し上げます。

研究論文としては4編の論文を掲載しました。固体酸化物型燃料電池(SOFC)の実用化を促進させるとともに、市場に出回った時の商取引のために必要となる性能評価手法の開発と標準化についての田中論文、地下水の水位変化から地殻変動を予測する技術の開発とそれに基づく地下水水位変化検知システムの構築に関する小泉論文、明るさと文字までの距離に応じて高齢者でも読める文字サイズを決めるための研究と標準の構築についての佐川論文、光ファイバセンサを用いたびずみやアコースティックエミッションのセンサの開発とその宇宙構造物の振動検知への応用を述べた津田論文です。標準化に関わる2つの論文は、性能評価や商取引のための標準と高齢者向けの製品デザインを支援するための

本号の座談会の他にも、構成型研究の価値や進め方について各界の有識者からいろいろなご意見を伺ってきましたが、それらは本誌の論説や対談、座談会などで毎号お届けしてきました。また本誌の発刊以来読者からの反響も大きく、異なった分野の研究でもよく理解できるとか、企業の研究開発の進め方にも参考になるといったポジティブな意見をたくさんいただきました。著者からも、従来の学術論文では本質的な事柄であっても書けないことがたくさんあったが、この雑誌にはそれが書けるのがよいといった意見が出ています。

本誌の特徴の一つとして、査読者と著者との議論を論文の末尾に掲載したことがあります。査読意見には査読者の所属と実名が記載されています。構成型研究の論文形式がまだ十分に確立していないことから、当初論文の書き方を公開の場で議論し開発していくという趣旨で始めたものですが、思わぬ副次的効果がありました。実名が公表されることから査読者は極端に偏った意見を出せなくなり、むしろ責任を持った公平な査読意見が得られるという好結果を生みました。また査読者と著者との議論は、読者に対しても重要な情報を与えるもので、読者が論文内容を理解する上で非常に役に立つことが分かってきました。

科学技術の基礎研究と社会のイノベーションとを双方向で結ぶ太いきずなどとして、構成型研究と本誌シンセシオロジーがあります。多くの新しい試みを盛り込んだ本誌に対して今後さらに多くの読者からの支持を願い、また構成型研究を実際に行っている産業界や学界のさまざまな方からの論文投稿を歓迎します。

新しい科学技術の研究開発とイノベーションが日本から始まることを期待しています。

(編集委員 小野 晃)

標準で、両者は異なる性質の標準ですが、いずれも良い製品を市場に出すために何が必要かを考えた上で進めた研究開発です。また、地下水水位変化が地震予知に有効であると学術的には考えられ研究が行われていたものですが、それを実際に社会に役立たせるためには、必要な地点にこの地下水水位変化システムを設置するまで行わなければなりません。これらは社会を強く意識した研究のシナリオに基づいて進められたものです。光ファイバセンサによる振動検知では、ある種のミスがあったお陰でブレースルー技術ができたというセレンディピティがありましたが、その後も宇宙構造物に利用するという技術的制約を満たすために様々な課題を解決して研究開発が進められています。宇宙構造物という制約の強いものをゴールに設定することで、他にも適用可能な技術につながっていきます。実際の研究開発に要している時間は数年から20年以上と様々ですが、ゴールを見失わないことが大切であるとあらためて感じさせられました。

(編集幹事 赤松 幹之)

Synthesiology 6巻1号 2013年2月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：一村 信吾

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

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

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：赤穂 博司、阿部 修治、五十嵐 一男、一條 久夫、上田 完次、餌取 章男、大蒔 和仁、大和田野 芳郎、岡路 正博、
小野 晃、景山 晃、久保 泰、栗本 史雄、坂上 勝彦、清水 敏美、千葉 光一、佃 栄吉、中島 秀之、中村 和憲、馬場 靖
憲、濱 純、原田 晃、檜野 良穂、松木 則夫、水野 光一、三石 安、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

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

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Round-table talks

A new research methodology of science and technology at the age of innovation

-The fifth anniversary of Synthesiology-

Research papers

Progress towards realizing distributed power generation with highly efficient SOFC systems

-Development and standardization of performance evaluation methods targeting early market-entry of SOFC systems-

Y.TANAKA, A.MOMMA, A.NEGISHI, K.KATO, K.TAKANO, K.NOZAKI and T.KATO

Earthquake prediction research based on observation of groundwater

-Earthquake forecasting based on crustal deformation estimated from groundwater level change-

N.KOIZUMI

Estimation of legible font size for elderly people

-Accessible design of characters in signs and displays and its standardization-

K.SAGAWA and K.KURAKATA

Development of fiber optic broadband vibration-detection system

-Simultaneous measurement of both strain and acoustic emission using a fiber Bragg grating sensor-

H.TSUDA, E.SATO, T.NAKAJIMA and A.SATO

Editorial policy

Instructions for authors