

Synthesiology

活断層からの地震発生予測

2タイプのリード・ユーザーによる先端技術の
家庭への導入モデルの提案

スピントロニクス技術による不揮発エレクトロニクスの創成

ガス中微量水分測定の高信頼性の飛躍的向上

乾電池駆動可搬型高エネルギーX線発生装置の開発

シンセシオロジー編集委員会

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかされたままでは^(注1)、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/research/honkaku/about.html
- 注3 第1種基礎研究： 未知現象を観察、実験、理論計算により分析して、普遍的な法則や定理を構築するための研究をいう。
- 注4 第2種基礎研究： 複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究をいう。また、その一般性のある方法論を導き出す研究も含む。
- 注5 製品化研究： 第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。

Synthesiology 第2巻第3号(2009.9) 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
活断層からの地震発生予測 — 活動セグメント固有カスケード地震モデルによる活断層の活動確率予測 — ・・・吉岡 敏和	194–200
2タイプのリード・ユーザーによる先端技術の家庭への導入モデルの提案 — IH技術に対する調理システムの開発と普及 — ・・・久保 友香、馬場 靖憲	201–210
スピントロニクス技術による不揮発エレクトロニクスの創成 — 究極のグリーンIT機器の実現に向けて — ・・・湯浅 新治、久保田 均、福島 章雄、薬師寺 啓、長浜 太郎、鈴木 義茂、安藤 功兒	211–222
ガス中微量水分測定の信頼性の飛躍的向上 — 計量トレーサビリティの確立と計測器の性能評価 — ・・・阿部 恒	223–236
乾電池駆動可搬型高エネルギーX線発生装置の開発 — X線非破壊検査におけるイノベーションを目指して — ・・・鈴木 良一	237–243
報告	
学問と技術の統合 — 横幹連合・統数研・産総研合同ワークショップ —	244–252
編集委員会より	
編集方針	253–254
投稿規定	255–256
編集後記	263
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Evaluation of earthquake occurrence from active faults — Evaluation of rupture probabilities of active faults using the Cascade Earthquake Model based on behavioral segmentation — --- T. Yoshioka	194
Two types of lead users in a model for the transfer of technology into households — The development and diffusion of induction heating cookery — --- Y. Kubo and Y. Baba	201
Creating non-volatile electronics by spintronics technology — Toward developing ultimate green IT devices — --- S. Yuasa, H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama and K. Ando	211
A marked improvement in the reliability of the measurement of trace moisture in gases — Establishment of metrological traceability and a performance evaluation of trace moisture analyzers — --- H. Abe	223
Development of battery-operated portable high-energy X-ray sources — Innovation in X-ray non-destructive-evaluation — --- R. Suzuki	237
Messages from the editorial board	257–258
Editorial policy	259–260
Instructions for authors	261–262

活断層からの地震発生予測

— 活動セグメント固有カスケード地震モデルによる活断層の活動確率予測 —

吉岡 敏和

活断層の過去の活動から将来の地震発生を予測するため、活断層を固有の活動繰り返しを持つ活動セグメントという単位に区分し、それぞれの活動セグメントがあるときは単独で活動し、あるときは隣接する活動セグメントが連動するという「カスケード地震モデル」を採用した。これにより、野外での調査結果に矛盾することなく、統一的な基準により活断層の将来の活動確率を評価することが可能となった。その成果を「全国主要活断層活動確率地図」として公表した。

キーワード：活断層、地震、予測、活動確率、活動セグメント

Evaluation of earthquake occurrence from active faults

– Evaluation of rupture probabilities of active faults using the Cascade Earthquake Model based on behavioral segmentation –

Toshikazu Yoshioka

In order to assess the probability of the occurrence of future large earthquakes based upon the past activities of active faults, we divided active faults into behavioral segments, and adopted the cascade earthquake model, that is, a model that considers that an earthquake is sometimes caused by a single segment and sometimes caused by multiple segments. Using this model, we can evaluate the rupture probability of active faults by a uniform standard without any inconsistencies with field data. The result was published as the *Rupture Probability Map of Major Active Faults in Japan*.

Keywords: Active fault, earthquake, assessment, rupture probability, behavioral segment

1 研究の目的と背景

我が国は地震の多発国であり、毎年のように大きな被害がもたらされている。特に活断層の活動による地震は、内陸部の地下浅い場所で発生するため、被害がより甚大になるという特徴がある。したがって、活断層から発生する地震を少しでもより適確に予測できるようにすることが、効果的な地震防災を行うという観点から非常に重要なことである。近年、全国的規模で活断層の調査研究が推進され、多くのデータが得られているが、それらに基づく将来予測についてはまだ十分なものとは言えない。しかしながら、十分に確からしい情報でなくても、現時点において可能な限り合理的かつ統一的な考え方に基づいた情報を社会に発信することは、一研究者としてまた地質の調査をミッションの一つとしている研究機関として非常に重要なことと考え、本研究を実施した。

活断層とは、過去から繰り返し活動し、今後も活動して大地震を発生させる可能性のある断層のことである。その活動の繰り返し間隔は、通常千年から数万年と非常に長

い。1回の地震の際に断層がずれ動く量は数メートル程度であるが、数万年、数十万年と繰り返し同じ方向にずれ動くことにより、数十メートル、数百メートルのずれが累積し、その結果、そのずれが上下方向であれば隆起する側は山地となり、沈降する側は盆地や平野となる。また横ずれ（水平方向のずれ）であれば、谷や尾根が大きく屈曲する。このような地形学的観点からの活断層の研究は、1960年代から70年代前半にかけて急速に進展した。その背景には、日本列島が太平洋のプレートに押されて圧縮されているというプレートテクトニクスの考え方が普及したことがあげられる。すなわち、活断層の活動によって、日本列島の山地や盆地の地形が発達してきたというわけである。このように、活断層研究は、「なぜ山は高いのか？」という地形学、地質学の究極のテーマの一つを解明しようという研究としてスタートしたのであり、これが第1種基礎研究と位置づけられるということができよう。

その一方で、活断層の活動により大地震が発生するという観点から、活断層の過去の活動時期と活動頻度から将

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 中央第7
Active Fault and Earthquake Research Center, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: yoshioka-t@aist.go.jp

Original manuscript received March 5, 2009, Revisions received July 6, 2009, Accepted July 7, 2009

来の地震発生を予測しようという研究が、1970年代後半から始まった。手法としては、活断層をまたいで溝（トレンチ）を掘削し、活断層による地層のずれと地層の年代から過去の断層活動時期を明らかにしようとするものである（図1）。この方法はトレンチ調査法と名付けられ、1980年代に入り各地で行われるようになる。トレンチ調査法の普及により、活断層の過去の活動（過去の大地震）についてのさまざまなデータが蓄積し、それらはやがて「古地震学」（Paleoseismology）という学問として集約される。これは、従来の地震学が現在の地震観測を中心としたものであったのに対し、地質学的な過去からの活動の繰り返しを解明することによって、将来の大地震発生時期の予測ができるという期待によるものである。つまり、活断層の研究が社会への活用、すなわち第2種基礎研究へと進化したことを示している。

活断層の重要性が広く一般に印象づけられたのは、1995年の阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）であった。この地震が活断層の活動によるということがマスコミ等を通じて広まり、社会での「活断層」の認知度が急上昇することになった。それと同時に、この地震を契機にして政府に地震調査研究推進本部が設置され、全国的な規模で活断層調査が推進されるとともに、活断層の長期評価（確率予測）が開始された。これは、全国の主要断層帯（当時は98断層帯）のそれぞれについて、今後30年、50年、100年間に発生する地震の規模とその発生確率を評価し、各断層帯毎にその数値を公表するという世界的に見ても例のない画期的なものである。これにより、活断層研究の成果を製品化する一つの道が示されたと言える。



図1 活断層のトレンチ調査の例（福井県大野市の濃尾断層帯温見断層）
この活断層は1891年の濃尾地震で活動したことが知られている。地表の段差が1891年にずれたもの。下の地層（より古い地層）ほど大きく上下に食い違っていることから、断層のずれが繰り返し累積していることが読み取れる。

2 活断層と地震規模の関係

将来の地震を予測する際には、地震の場所および発生時期の予測とともに、その規模の予測が重要である。地震の規模は、その地震の際に活動する活断層の長さおよびずれの量に比例する。また1回のずれの量は活断層の長さに比例すると言われている。したがって、将来発生する地震の規模の予測については、その地震に関連すると考えられる活断層の長さを見積もる必要がある。

活断層の長さと言っても、日本列島には非常に多くの活断層が、網の目のように分布しており、どこからどこまでを一つの活断層とするか、判断しにくいケースがしばしば起こりうる。さらに、これまでの調査研究から、ある活断層のある地点では、過去からほぼ同じような間隔で、ほぼ同じ規模のずれを繰り返していることが、地質学的、地形学的な証拠として多くの場所で報告されている。ところが、歴史的な地震の記録や詳細な地質調査により、ある地域で繰り返される地震の際に活動する活断層の範囲は、地震ごとに異なることがあり、必ずしも同一範囲で活動しているわけではないことがわかってきた。

たとえば、1891年の濃尾地震（マグニチュード8.0）では、岐阜県と福井県にまたがる濃尾断層系が活動し、断層帯中部の根尾村（現本巣市）水鳥（みどり）では、高さ約6mの断層のずれが現れたことで知られている。この断層帯は、断層の分布形状からは、温見（ぬくみ）断層、根尾谷断層、梅原断層と、その他の小規模な活断層で構成される（図2）。1891年の地震の際には、これらのうち温見断層の西半分、根尾谷断層、それと梅原断層が同時に活動し、地表にずれが生じたことが記録に残されている^[1]。ところが、この断層の過去の活動を調査すると、温見断層と根尾谷断層、さらに梅原断層では、過去の活動時期が

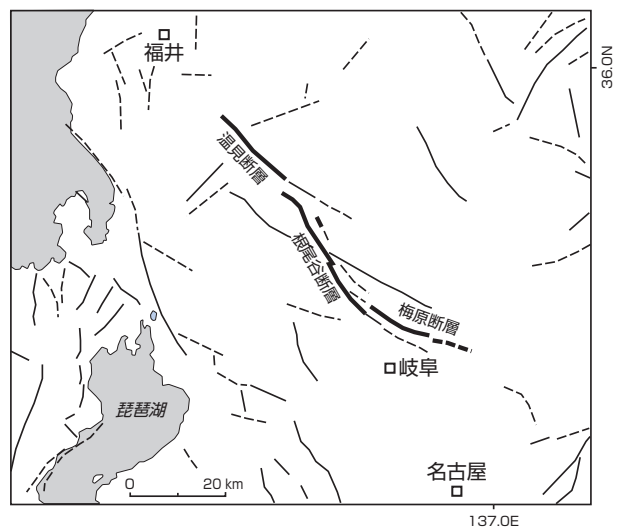


図2 濃尾断層帯とその周辺の活断層の分布
太線が1891年濃尾地震の際に活動した断層。破線は推定断層。

異なることが判明してきた^{[2][3]}。つまり、過去のある時期においては、温見断層と根尾谷断層、根尾谷断層と梅原断層は同時に動かなかったことがわかってきたのである。

ここで一つの問題が生じる。地震のたびに断層が破壊する範囲（すなわち断層の長さ）が異なるのであれば、断層の長さとずれの量は比例するので、ある地点でのずれの量は毎回大きく異なるということになる。さらに、断層の平均的なずれの速度（平均変位速度）は長期間にわたりほぼ一定と考えられるので、仮に毎回のずれの量が大きく異なるのであれば、それに伴い断層の活動間隔（地震の発生間隔）も毎回異ならなければならない。ところが、先に述べたように地形学的、地質学的な研究からは、ある地点に限れば過去の毎回のずれの量は大きくは変化しないという結果が得られている。また、もし仮に毎回の地震のたびに断層のずれの量と活動間隔が異なるとすると、最初に述べた活断層の活動の周期性の本質そのものが覆されることになり、将来の地震発生予測が困難となってしまう。

このことを矛盾なく合理的に説明するモデルとして、著者らはカスケード地震モデルに着目した。このモデルは、長さ数百キロメートル以上という長大な活断層での地震発生モデルとして、米国カリフォルニア州の活断層で採用されたものである^[4]。連続する長大な活断層を固有のずれ量と活動間隔を持つ複数の活動セグメント^[5]に分割し、それらのセグメントが固有の繰り返しを保ちながら、あるときは隣接するセグメントと連動し、活動するというモデルである。

カスケード地震モデルの最大の特長は、大規模な断層活動を活動セグメントの連動と捉えることで、断層活動の範囲値に関係なく、活動セグメントの長さを固定できることである。そうすることにより、断層長と地震時の変位量、地震規模の比例関係を保ったままで、ある地点での地震時変位量を一定にすることができ、ある地点での断層活動の繰り返しをきわめて単純に説明できる。したがって、現時点では地形学的、地質学的な研究結果を適用して予測を実現するための最も現実的なモデルとして、カスケード地震モデルを採用することにした。

カスケード地震モデルの模式的な図を図3に示す。従来、活断層は地理的な分布形状から特に基準もないままに「〇〇断層」という名称が与えられ、区分されてきた。た

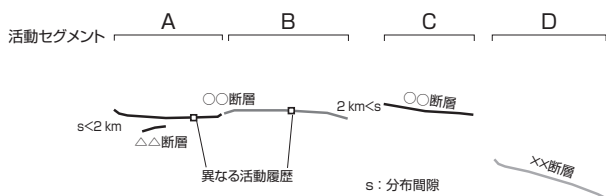


図3 活動セグメント区分模式図

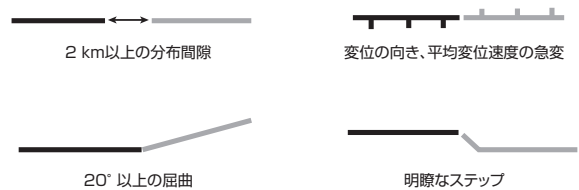
だし、この名称が与えられた範囲が必ずしも次回の地震を発生させるとは限らないため、断層の長さから地震規模を推定することもできない。そこで、これらの活断層を従来の断層名にとらわれることなく、過去の活動履歴や分布形状などの一定の基準で、地震を発生させる「単位」としての活動セグメントに区分（ここではA～Dに4区分）する。そして、それらが単独で、あるいは隣接するものが連動することにより地震を発生させると考えることにより、個別の断層（活動セグメント）の長さとその連動性から地震の規模を予測することができるということである。

このモデルを日本の小規模で複雑な活断層に適用するため、まず過去に活動した記録のある地震断層のデータを整理し、活動セグメント区分の基準と地震規模との関係についての試案をとりまとめた^[6]。そして近畿地方を例に、活動セグメント毎の将来の地震発生確率を試算し、公表した^[7]。この試算結果はあくまで一つの研究結果に過ぎないが、あるモデルに基づく論理的推論によって得られた評価結果として意味づけられるものである。

3 全国主要活断層活動確率地図の出版

この研究をさらに発展させ、地震災害リスクの軽減のために実際に社会に活用するためには、全国的な規模でのこ

1) ほぼ一線に並ぶ2つの断層間に以下のような不連続が見られる場合



2) 並走する断層間に、走向と直交する方向に2 km以上の間隔がある場合



3) 2地点で異なる活動履歴が得られた場合



4) 断層の長さがある地点の単位変位量の2万倍を超えた場合

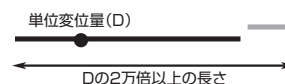


図4 全国主要活断層活動確率地図で採用した活動セグメントの区分基準

のモデルの適用が必要不可欠であった。そこで、著者が中心となって「全国主要活断層活動確率地図」^[8]の作成作業を開始することになった。

まず、活動セグメントの区分の基準を図4のようにまとめ、これにしたがって全国の活断層分布図を基に活動セグメントの区分作業を行った。また、全国の活断層をカバーするとなると、当然のことながら、多くの調査がなされデータの充足度の高い活断層と、ほとんど具体的なデータが得られていない活断層が混在することになる。この地図では、このような場合にも全国統一的な値を得ることを重視し、全くデータが得られていない場合でも、原則として「不明」とはせず、暫定値、経験値などを使って何らかの評価値を求めるとの方針で、全国をカバーすることを優先させて作業を進めることで、本格研究における「製品化」を目指した。

評価の対象とした活断層は、全国の長さ20 km以上の活断層で、区分した活動セグメントの数は547にのぼる。このうち、長さ10 km以上で一定以上の活動度を持つ295の活動セグメントについて、既存データ等に基づいて平均変位速度や1回の地震時のずれの量、過去の活動時期などのパラメータを推定し、将来の活動確率を計算した。そして、この活動確率の値によって色分けした活動セグメント

位置を日本地図上に図示した(図5)。

この「全国主要活断層活動確率地図」は2005年9月に産総研地質調査総合センターより、無事出版に至った。この地図により、全国に分布する活断層について、地域によるデータの粗密に起因する信頼度の差はあるものの、全国統一的な基準による比較が可能となった。全国統一的な基準での比較が可能になったことにより、たとえば損保業界や広域インフラ関係におけるリスク評価などへの活用が進展してきており、個々の活動セグメントの評価基準を明示したことで、たとえば異なる基準での評価が必要なユーザーにも対応可能とした。

この評価は、当然のことながら、一研究機関が一つの研究成果として作成したもので、製品としては一つのプロトタイプである。したがって、委員会の合議によって判断された一つの公式見解である政府の地震調査研究推進本部の長期評価とは、明らかに性格を異にするものである。結果として示された数値についても大きく異なっている場合もあり、一部には社会の混乱を懸念する声も聞かれた。また、暫定値や経験則を用いて推定した数値に基づく結果であることから、個々のデータを重視する研究者(特に地形・地質分野の研究者)からは、データが不十分な活断層まで無理に評価すべきでないという意見も多く聞かれた。

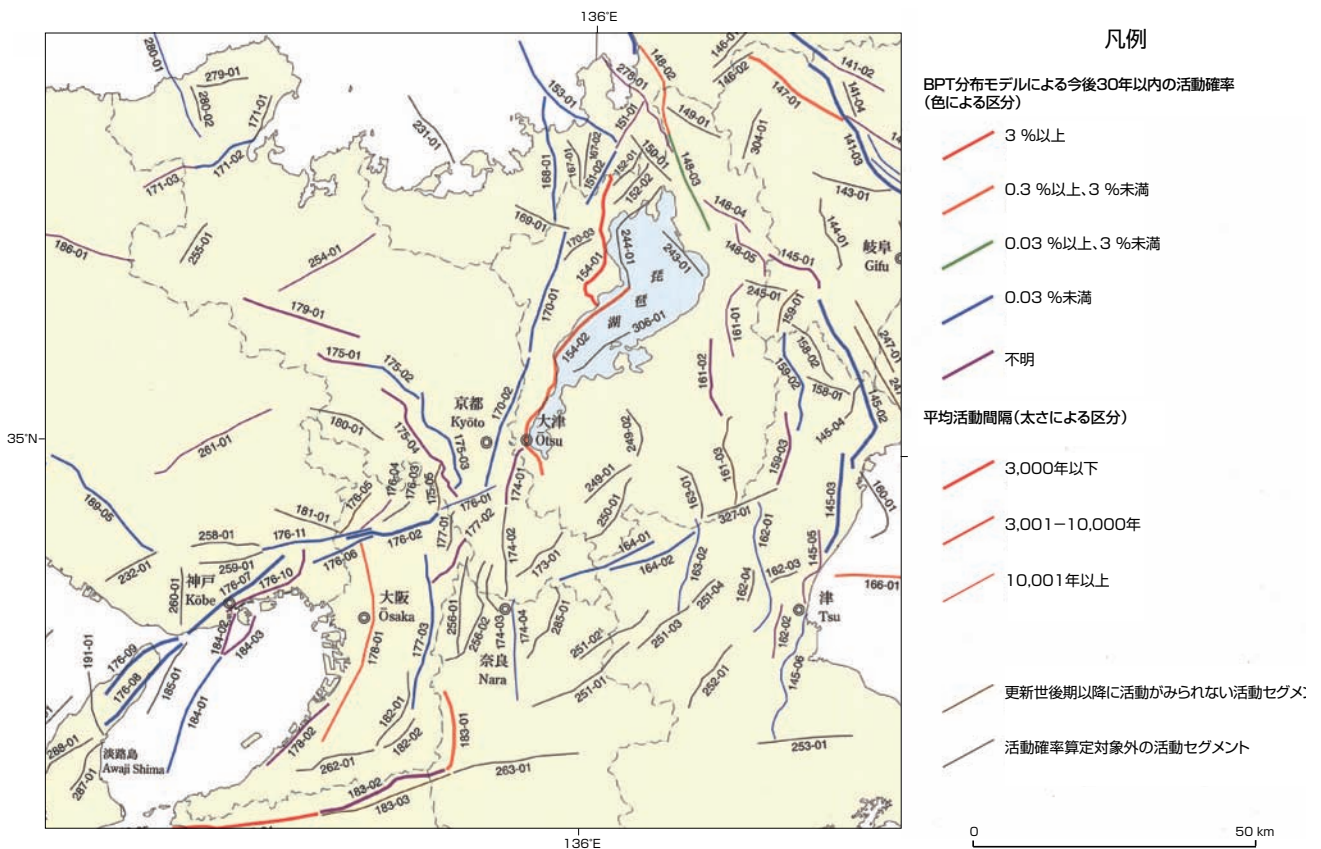


図5 全国主要活断層活動確率地図^[8](近畿地方の拡大図部分)
数字は活動セグメント番号を示す。

しかしながら、実際の地震発生の評価の困難さを考えると、多様な評価結果が存在するのは当然のことで、その一つの評価結果として数字を出したということに意味があると考えて公開した。

結果として、この「全国主要活断層活動確率地図」は損保業界などからは一定の評価を得るとともに、評価結果のデータを基礎データとして使用したいという問い合わせが相次いだことから、社会へのインパクトは示されてきていると言えよう。

4 予測の限界と今後の課題

このように「全国主要活断層活動確率地図」は統一したモデルに基づく全国評価という面で画期的なものであったが、なお活動セグメント間の連動性の評価については困難で、将来発生する地震の規模を直接予測するには至っていない。これについては研究を継続中であるが、二つの活動セグメントが過去の地震で同時に活動したか、ある時間差をおいて活動したかを判別するのは、地質学的な調査による時間分解能をはるかに越えており、この手法の限界と言わざるを得ない。そこで、この問題を解決するために、最近発生した地震の歴史記録を収集するとともに、研究センターの他のメンバーによって、動的破壊の数値シミュレーションにより、断層の分布形状と破壊の伝播との関係を探る研究が進められているところである⁹⁾。

また、近年のいくつかの被害を伴った地震を見ると、2004年の新潟県中越地震（マグニチュード6.8）のように、活断層沿いで発生したにもかかわらず活断層に大きなずれが生じなかった例があるほか、2008年岩手・宮城内陸地震のように、明瞭な活断層が確認されていなかった場所でもマグニチュード7.2という規模の地震が発生したりしている。これらの地震については、これまでの評価手法では予測不可能と言わざるを得ない。

さらに、各地で活断層の詳細な調査が進められた結果、いくつかの地点で活断層の過去の活動間隔が必ずしも一定ではないことを示すデータも得られつつある。これについては、調査データの不備であったり、調査地点の特殊性による例外である可能性も残されているが、活断層の活動の周期性についての根本に立ち返ってモデルを見直すことも今後必要である。

一方、2008年岩手・宮城内陸地震のようないくつかの例外的な事例に引きずられて、むやみにモデルを複雑にした結果、そのモデルによる評価に耐えるだけのデータが得られていない断層についての評価ができなくなるようでは、本末転倒のように思える。自然現象には例外が付きものであり、何が例外かという見定めが非常に重要であると思わ

れる。地震発生の長期的予測の検証には、数千年、数万年という時間が必要であり、検証が事実上不可能な中で、いかに単純で汎用性のある妥当なモデルを構築するかが今後の課題でもある。

5 むすび

以上のように、活断層から発生する地震の予測については、この10年あまりの間に画期的な進歩を遂げた。しかしながら、なお社会が必要としているものとのギャップは非常に大きいと感じることがしばしばである。たとえば、ある予測と異なる地震が発生した際に、「この地震は特殊で例外的なものでした」と言っても、社会には通用しない。その意味で本研究の達成度はまだまだ低いといわざるを得ないと考えている。また別の問題として、日本社会にはいわゆる「お墨付き」を求める傾向が根強く、それが行政に対する責任転嫁につながり、その結果、行政は確実なことしか公表しないという傾向にあるように思える。

今後、活断層の活動予測をできるだけ正確に、かつ、網羅的に社会に提示し、地震に対する備えとして活用してもらえぬ知的基盤を整備することが、筆者の社会的責務であると考えている。十分な正確さで、完全に網羅的な情報を提示することがいきなり実現できるわけではないが、全国規模での調査結果の出版はその第一歩として意義のあるものだと考えている。この研究手段が有効であったかどうかについては、今後、この研究成果に対して社会がどう動いたかによって、評価されていくと考える。

謝辞

本研究は、産業技術総合研究所の前身の一つである地質調査所での工業技術院特別研究「活断層等による地震発生ポテンシャル評価の研究」（平成6年度-11年度）やそれ以前の研究から継続的に実施されてきたものである。その間に多くの研究者による調査研究や議論が繰り返され、本研究が進展したことは言うまでもない。本研究は共同研究者の栗田泰夫氏をはじめとする多くの方々の共同作業による成果であることをここに明記し、深く感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] 松田時彦：1891年濃尾地震の地震断層，*地震研究所研究速報*，13，85-126（1974）。
- [2] 栗田泰夫，荻谷愛彦，奥村晃史：古地震調査にもとづく1891年濃尾地震断層系のセグメント区分，平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書，*地質調査所速報*，EQ/99/3，115-130（1999）。
- [3] 吉岡敏和，栗田泰夫，下川浩一，石本裕己，吉村実義，松浦一樹：トレンチ調査に基づく1891年濃尾地震断層系・温見断層の活動履歴，*地震*(2)，55，301-309（2002）。
- [4] Working Group on California Earthquake Probabilities:

Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 85, 379-439 (1995).

- [5] J. P. McCalpin: Application of paleoseismic data to seismic hazard assessment and neotectonic research, McCalpin ed. *Paleoseismology*, Academic Press, 439-493 (1996).
- [6] 栗田泰夫:日本の地震断層におけるセグメント構造とカスケード地震モデル(試案),平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書,地質調査所速報, EQ/99/3, 275-284 (1999).
- [7] 地質調査所活断層研究グループ:近畿三角地帯における活断層調査-主要活断層の活動履歴と地震危険度-,*第四紀研究*, 39, 289-301 (2000).
- [8] 吉岡敏和, 栗田泰夫, 下川浩一, 杉山雄一, 伏島祐一郎: 全国主要活断層活動確率地図, 産総研地質調査総合センター (2005).
- [9] Y. Kase and S. M. Day: Spontaneous rupture processes on a bending fault, *Geophysical Research Letters*, 33, L10302 (2006).

指摘するように説明不十分な点や *Synthesiology* としての観点から追加すべき点があります。また、当初論文に記述されていた活断層、断層、起震断層など言葉の定義を記述してください。

回答 (吉岡 敏和)

本文冒頭に、地震防災における本研究の意義に関する記述を加えました。また、末尾に以下のように、筆者としての考え方を記述しました。

「活断層の活動予測をできるだけ正確に、かつ、網羅的に社会に提示し、地震に対する備えとして活用してもらえる知的基盤を整備することが、筆者の社会的責務であると考えている。十分な正確さで、完全に網羅的な情報を提示することがいきなり実現できるわけではないが、全国規模での調査結果の出版はその第一歩として意義のあるものだと考えている。この研究手段が有効であったかどうかについては、今後、この研究成果に対して社会がどう動いたかによって、評価されていくと考える。」

また、「活断層」という用語は一般的にも使用される用語のため、定義は人や場面によって異なることもありますので、定義を明確にして追加しました。当初記述されていた起震断層等の表現は用語の混乱をさけるために削除しました。

執筆者略歴

吉岡 敏和 (よしおか としかず)

1986年東京都立大学大学院理学研究科地質学専攻修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院地質調査所入所。1995年博士(理学)(神戸大学)取得。2001年独立行政法人産業技術総合研究所活断層研究センター主任研究員、2002年から活断層情報研究チーム長、2004年からは活断層調査研究チーム長となる。自ら活断層の地形・地質学的調査の現場に立つとともに、その調査結果から将来の地震発生を予測する研究に一貫して取り組んでいる。2005年には「全国主要活断層活動確率地図」を筆頭著者として執筆・出版した。



議論2 研究手段の選択とその有効性検証

質問・コメント (持丸 正明)

研究手段の選択とその有効性検証を、できるだけ科学的に記述してください。この論文で構成学的に重要なポイントは2点あると思います。第一は、カスケード地震モデルの適用、第二は全国規模での調査と出版です。たとえば、最初のカスケード地震モデルですが、なぜ、このモデルを適用しようと思ったのか、他の選択肢はなかったのか、というあたりが構成論的に重要なポイントです。当然、そのカスケード地震モデルを適用したことの検証も重要です。

同様に、全国調査と出版という手段を選択した理由、ほかに方法はなかったか、近畿圏を全国に広げたことで社会的にどのような効果を期待し、その結果はどうだったか、また、学術的な副産物はあったのか、委員会を構成しコンセンサスをとることよりも一研究所としてのデータにこだわったのはなぜか、そのような手段はどういう「いいこと」をもたらしたか、などなど。そして、はじめに掲げた目標(夢)がどこまで達成できたのか、どういう限界があり、それにどう立ち向かっていくのか、をまとめて頂ければよいと思います。

査読者との議論

議論1 本格研究としての位置付けと「構成学」を意識した記述について

質問・コメント (持丸 正明:産総研デジタルヒューマン研究センター)

本格研究としての位置付けが「1 研究の目的と背景」に明瞭に記載されています。地形学・地質学としての活断層研究が第1種基礎研究であり、それに続いて地震予知としての活断層研究が第2種基礎研究。そこに「カスケード地震モデル」を適用して活断層を活動セグメントに分けたことが、一つのブレイクスルーとなり、近畿地方を例に検証したというあたりまでが第2種基礎研究と考えられそうです。そして、全国規模で調査を実施しそれを出版・公表することで社会につなげたことが製品化研究と位置付けられるということと理解しました。

ただし、*Synthesiology* という学術誌としては、「どういう社会を実現したいか」という研究者としての夢を掲げ、それを具現化するために、基礎研究を実用につなげた手段を「どうして選んだのか」、また選ばれた手段は目標を達成するに「有効であったか」を、是非とも科学的に記述していただきたいと思います。たくさんの本格研究事例を集めることで「構成学」をつくっていくのが *Synthesiology* 誌の狙いです。それにはただ集めるだけでなく、個々の論文が「構成学」を意識して書かれている必要があります。

質問・コメント (富樫 茂子:産総研評価部)

活断層の地質学的研究に基づき、第2種基礎研究として地震活動確率予測を実施し、地震災害の軽減に資する成果を公表して社会に貢献することにより、本格研究を実践しており、*Synthesiology* 掲載論文として推薦できます。ただし、内容については以下の議論2に

質問・コメント (富樫 茂子)

カスケード地震モデルについて、原理を簡潔に記載し、カスケード地震モデルを選択した理由や、数値シミュレーションへの展開の実際、他のモデルとの関係を具体的に記述してください。

予測の限界に関しては、現状では、他のモデルによる予測の精度が、社会の要請に追いついてきていないのは事実ですが、長期的にみれば、地震のメカニズムにまで迫った研究は、予測精度を高めるためには必須です。これらのモデルとの関係を客観的に述べてください。

一方、地震災害の軽減による社会への貢献に関する課題としては、著者が行ってきた「全国主要活断層活動確率地図」の発行のように、予測信頼性の低い場合も含めて単純で汎用性のあるモデルによる結果を提起していくことは今後も非常に有効な考え方だと思います。その有効性検証として、社会での反響をより明示的に示すべきです。

回答 (吉岡 敏和)

カスケード地震モデルでは、複数の活動セグメントの連動性について固有の規則性は問いません。全くランダムに連動することもあり得ます。ただ、連動には何らかの要因があると考え、数値シミュレーション等で検討しています。説明を追記しました。

動的破壊の数値シミュレーションについては、活断層・地震研究センターとして、さまざまな断層形状を想定した動的破壊シミュレーションにより複数の断層破壊の連動性を検討しています。ただし、本論

は断層活動繰り返しモデルとしてのカスケード地震モデルの採用に重点を置きましたので、動的破壊シミュレーションについては、あえて文献を引用するにとどめました。

カスケード地震モデルは断層活動の繰り返しモデルの一つであり、震源の破壊過程を示したモデルではありません。したがって、動的破壊の数値シミュレーションによる断層の分布形状と破壊の伝播モデル、地震発生過程の物理モデル、活断層周辺の応力状態の観測解析や地質構造把握によるモデル等と対峙するものではなく、当然共

存も可能です。なお、予測精度を高めるための研究については、別途進めるべきであることを本文に追記しました。

社会での反響として、以下のように本文の記述を追記しました。「この「全国主要活断層活動確率地図」は損保業界などからは一定の評価を得るとともに、評価結果のデータを基礎データとして使用したいという問い合わせが相次いだことから、社会へのインパクトは示されてきていると考えています」。

2タイプのリード・ユーザーによる先端技術の 家庭への導入モデルの提案

— IH技術に対する調理システムの開発と普及 —

久保 友香*、馬場 靖憲

本研究は、induction heating (IH) 技術の家庭への普及に関する実証分析により、企業と独立した多様なリード・ユーザーが先端技術を家庭へ普及・導入に貢献するモデルを提案する。大企業がIHを開発しても、家庭が導入するときは、調理道具またレシピ等、付随する調理システムが必要になる。活躍するのは異なった2タイプのリード・ユーザーである。技術に通じ技術の機能性を追求する論理的リード・ユーザーは機能性の観点から調理システムを開発する。一方、技術内容には関心が薄い感性的リード・ユーザーは製品価値に対する社会トレンドの影響に対して卓越した直観力を持っており、調理システムを魅力的にすることによって製品の普及に貢献する。今後、例えばロボットなどのように普及に成功していない先端技術を家庭へ導入するためには、既存技術にはない新しい価値を提示する必要があり、そのためには、産業また大学・公的研究機関が組織から独立した多様なリード・ユーザーと柔軟に連携し、製品を魅力的にすることによって普及を推進する必要がある。

キーワード：先端技術、リード・ユーザー、技術普及、社会価値、IH調理

Two types of lead users in a model for the transfer of technology into households

– The development and diffusion of induction heating cookery –

Yuka Kubo* and Yasunori Baba

In this paper, we propose a multi lead users model for the transfer of technology into households through an empirical analysis of the development and diffusion of induction heating (IH) cookery. Even if big firms successfully develop a technology such as IH, a new cooking paradigm based upon a special cooking device or special recipes is necessary when introducing a new technology to households. We postulate that two types of lead users play crucial roles in the task: reasoning-based lead users with technological expertise contribute to the development of functionality; sensitivity-based lead users having little expertise contribute to diffusion by making product socially trendy and authentically attractive. When introducing advanced technologies such as robots that have not been successfully diffused into households, forming flexible networks between the multi lead users and other stakeholders becomes highly indispensable.

Keywords: Advanced technology, lead user, technology diffusion, social value, induction heating cookery

1 はじめに

現在、induction heating (IH) 調理器を導入して、家庭調理の熱源をガス燃料から電気に転換する家庭が増えている。IH機器の開発は、1970年代の前半よりクッキングヒーターを中心に大手家電メーカーによって開始され、90年代初期に実用化された。商品化された製品は、コンロ内のコイルに電流を流しコンロに載せた調理器具を電磁誘導によって発熱させて食材を加熱する構造となっている。当初、IHの価格は35万円と家庭に普及する水準でなかったが、90年代後半に入って価格が20万円を切った。IHを利用する世帯は2008年段階で1割を超えている。

IHイノベーションの導入を分析する際には、IH機器そのものだけではその便益を享受することができないことが重要な観点である。調理をするためには、IHに対応する調理道具を準備し、調理技能を習得してレシピを開発するなど、調理全体のシステム(調理システムと呼ぶ)を整える必要がある。IHに関しては大企業による機器開発が先行したが、90年代前半においてはIH対応の道具等は未整備であり、家庭への普及が本格化する段階で調理システムの構成要素の開発が始まった。現在ではIH調理システムについて様々な提案がなされ、新しいシステムが持つべき要素をかねそろえて支配的になるデザイン(ドミナント・デ

東京大学 先端科学技術研究センター 〒153-8904 目黒区駒場 4-6-1

The University of Tokyo, Research Center for Advanced Science and Technology 4-6-1 Komaba, Meguro-ku 153-8904, Japan

* kubo@media.k.rcast.u-tokyo.ac.jp

Original manuscript received May 30, 2009, Revisions received July 24, 2009, Accepted July 24, 2009

ザイン^[1]を模索する動きが続いている。

従来、先端技術は主として大企業によって開発され、市場メカニズムを経由して家庭に普及した。しかし、先端技術が導入される際には、解決すべき難しい問題が発生することが多い。熱源が開発されても、上述したように道具、技能、レシピなどの補完的要素が必要になる^[2]。その際、製造業がIHを開発するのに加えて、様々な立場からIHの開発や普及に強い関心をもつユーザー（リード・ユーザー^[3]）達が補完的技術を開発し、技術の家庭への普及を推進する。本論文はこの事実に着目し、IHという先端技術を家庭に導入するプロセスで、多様なリード・ユーザーがそれぞれどのような役割を果たして先端技術の導入を促進したのかを調査分析する。具体的には、第一に、調理システムを構成する要素のそれぞれがどのような経路によって家庭に伝達され、IH調理システムとして普及されたかについて、調理法の変化をメディア情報の時系列分析によって明らかにする。第二に、IHの普及を契機として登場した調理法として、フライパンを固定し「両手でシリコン樹脂製スパチュラを持って炒める」調理法に着目し、それが誰によってどのように開発されどのように普及したか事例分析する。以上の分析に基づき、家庭に先端技術が導入されるとき多様なリード・ユーザーの果たす役割に注目したモデルを本論文では提案する。さらに、先端技術を家庭に導入する際に、社会的観点からその技術的可能性を最大限に引き出すためには何が必要になるかを考察する。

2 既存研究

人間は生活に必要な機能を実現するために、歴史的に様々な人工物を開発してきた。社会は生み出された人工物を評価して、性能と価格が優れた人工物を選択する。加えて、一部のリード・ユーザーは既存の人工物に対して積極的に対応し、それぞれの観点から修正を加え、再設計した人工物を社会に提案する^[3]。人工物の進化とそのメカニズムに関しては、工学また経済学・経営学から一連の研究が存在する^{[4][8]}。以下に、どのような経緯で「フォークの歯が4本になった」のかを明らかにしたペトロウスキ^[6]、また、なぜ、タイプライターの「キーボード配列が左上からQWERTYとなった」のかを分析したデビッド^[9]を紹介する。

まず、フォークの場合、現在の形状では使い難いという意味の失敗から既存製品が改良される。人間は食べ物を切り裂いて口に入れるとき、先史時代は手と歯で行っていたが、ナイフを発明すると最初はナイフを1本使用し、後に2本使用するようになる。1本は食べ物を押えて口に運ぶためにあり、もう1本は食べ物を切るためにあり、食

べ物を押さえて口に運ぶ方のナイフは、スプーン、2本歯のフォーク、3本歯のフォーク、現在の4本歯のフォークへと、先行する物の使用時の欠点を改良しながら進化する。何を欠点とみなすかは人によって、状況によって異なり完璧なものとは存在しないが、複数の人間がともに食事をする際のマナーや、行儀作法の本との相互作用によって社会への普及が決まる。このプロセスが繰り返されることによって、フォークの形状は連続的に進化した。ユーザーがフォークの進化について重要な役割を果たしている。

キーボードの場合、その文字配列の決定に関しては、開発を主導する製造メーカーに加え、タイピングするユーザー、またタイピング教育を行う専門学校の意向が影響した。1860年代後半に初めて実用化したタイプライターのキーボード配列は、左からABCDとアルファベット順に配列されていたが、その後製造メーカーごとに様々な配列を採用するようになる。異なる配列が混在する時期から、タイピングの速さを競うユーザー間の競争が起こり、速度を競うコンテストや、速記法を教えるタイピング専門学校が出現する。そこではキーボードを見ずに配列を記憶して打つタッチタイピングが基本となり、一度覚えた配列が変化することには誰もが否定的であったため、最終的には最も多くの人々が慣れてきた現在の配列が残ることになった。すなわちコンテストや専門学校のようなユーザーコミュニティの利益を反映して文字配列は選択され、その決定に関しては、市場メカニズムを越えた外部効果が働いている^[1]。

3 本調査の枠組み

本論文が分析対象とするIH調理システムは、熱源であるIHだけでなく、IHを用いて調理をするための多様な補完的要素によって構成される。本研究では、このIH調理システムが、誰によってどのように開発され普及したかを明らかにするために次のような調査を実施した。

第一に、IH調理法に関するメディア情報（書籍、料理雑誌、ファッション雑誌、テレビCM）を収集してデータベースを構築し、時系列変化を分析した^[2]。具体的には、2002年から08年にかけてIHを用いた新しい調理法がどのようにメディアにおいて発信されたか、対象をフライパンによる炒め物に限定し、IH調理の写真（書籍267件、料理雑誌57件、ファッション雑誌52件、雑誌広告64件）と、IH調理を含むテレビCM（31件）に関する時系列分析を行った^[3]。本研究のメディア調査に関する情報を付録Aに記す。

第二に、IHの導入を契機として現れた調理法に対して、それが誰によってどのように発案され、どのような理由から普及するに至ったかについてヒアリング調査を行った。具

体的には、調理法の開発と普及に貢献した関係者をメディア情報から抽出し、その関係者を対象に、2008年5月から11月にかけてヒアリング調査を実施した。本研究のヒアリングに関する情報を付録Bに記す。

4 メディアで発信されたIHを利用した調理法の時系列分析

メディアを通じて発信されたIHを利用した調理の中で、図1の写真が示すような両手でシリコン樹脂製スパチュラを持って炒める調理法が2004年に初めて紹介される。この調理法の新規性は以下のとおりである。第一に、従来から加熱調理に用いられてきた玉杓子、木べら、菜ばし、フライ返しなどではなく、シリコン樹脂製スパチュラを使用することである。シリコン樹脂製スパチュラ（以下、スパチュラ）とは古くからあるゴムべらの素材をシリコン樹脂にした「へら」であり、日本においては1999年に輸入販売が開始された。しかし、同時期にはスパチュラの日本での認知は極めて低いものであった。ゴムべらは加熱調理に使用できず菓子作りに使用されたが、スパチュラはシリコン樹脂を使用しているために300℃程度までの耐熱性があり加熱調理に十分耐え得る。しかも、IH調理では鍋底が高温になるために炒め物は鍋底で調理され、その際、鍋底に張り付いた食材をこそぎ取るためにスパチュラが活躍する機会がある。第二に、新しい調理の仕方として、食材を扱うための道具を両手で操作する方法が現れた。ガスを用いた炒め物では、最も高温になるフライパンの鍋肌に食材をあてるために鍋をあおっていた。それに対しIHでは、高温になるのは鍋底なので鍋をあおる必要はなく、道具2本で食材を持ち上げながらかき混ぜる方法が用いられる。IH調理では、鍋類は熱源から離すと加熱できないため、鍋類を固定しており、鍋類に手を添えることは少ない。

図2に示すように、前述の2004年における新しい調理



図1 両手にスパチュラを持つ調理法

法の紹介はファッション誌で行われ、後述するIH調理を研究する料理研究家Wが紹介した。書籍と料理雑誌においては、2006年に初めてスパチュラを用いた調理法が紹介され、後者においては増加傾向がみられる。全体としては、スパチュラ2本の調理法の成立過程にある木べら2本、スパチュラ1本の調理法を含めても新しい調理法の占める割合は3割程度であって優勢とはいえないが、社会的に認識される水準にある。対照的に、メーカーによる雑誌広告においては、IHに不適切であるという認識の強い調理に対して正しい技術的な情報を提供する意図が強く、新しい調理法が紹介されることは全くなかった^{注4)}。このように、新しい調理法は、IHクッキングヒーターを供給する企業からよりも、料理研究家を中心とするリード・ユーザーから情報発信されるファッション誌が主導して、IHの潜在的利用者に向けて広く発信されている。テレビCMでは、東京電力によるオール電化の販売促進のテレビCMシリーズが2004年10月に開始され、その1編で2006年1月より放映されたCMに木べら2本でかき混ぜるシーンがあった。

5 両手にシリコン樹脂製スパチュラを持って炒める調理法の開発と普及

調理法の開発に関しての聞き取り調査の結果を以下にまとめる。第一に、両手にスパチュラを持つ調理法の開発に関して、電気事業者が重要な役割を果たす。東京電力は、1999年に銀座TEPCO館の料理教室で有名料理人による調理デモを開始した。そこでは、プロの料理人がその高い専門能力を駆使して新熱源に対応した調理をすることの期待から、IHレシピの作成のために調理内容の測定・記録を行った。有名中華料理店のシェフYがチャーハンを作った際に両手に木べらを持って炒めたのを、調理デモに立ちあった料理教室コーディネーターNが観察し、IHでは鍋を持ち上げると熱が発生しないので「あおれない」という中華料理に関する批判に対し、この炒め方をこれまでと異なる新しい「IH調理法」と位置づけた。2006年1月に放映された東京電力のCMでは、IH料理教室で少年が炒飯作りに挑戦し、木べら2本でかき混ぜるシーンがあった。

第二に、IH調理を本格的に研究する料理研究家も大きな役割を果たした。料理研究家Wは2000年に自身の料理教室をリフォームして熱源をIHにし、研究対象をIH調理とした。前述のNとは頻繁に情報交換を行い、チャーハンがIHでどのように作るかというテーマについて、木べら2本でかき混ぜる調理法をNより知った。すぐにWは木べら2本の調理法では木べらにチャーハンの米がくっつく問題点に気づき、その改良のための実験から、スパチュラを両手に持つ調理法が最適であることを発見した^{注5)}。当時、

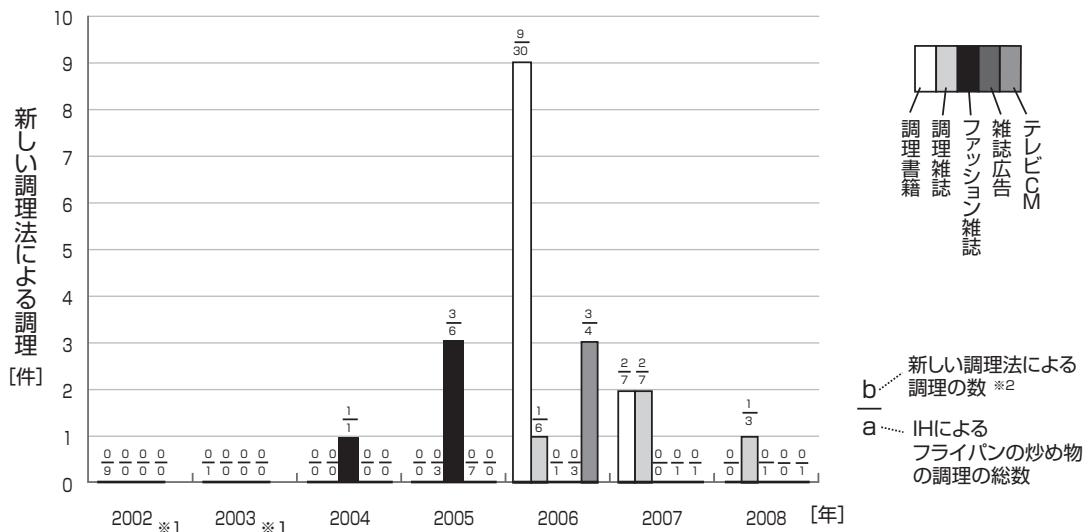
加熱調理に化学素材製のスパチュラ（へら）を用いるという調理法はなかったが、Wは、取引のあった輸入業者Kからサンプル提供されたシリコン樹脂製スパチュラに耐熱性があることを確認していたため、木べらやフライ返しに替わる調理道具としてスパチュラを試すことができた^{注6)}。しかしWは既成のスパチュラに満足せず、IH調理に最適な構造を持つスパチュラの研究を続け、成果として台所用品の製造を手がける貝印と共同で開発した製品は、2008年に商品発表され、2009年4月に一般向けに販売する。

第三に、IH技術、また、調理法に専門知識を持たないビジネス参入者も重要な役割を果たしている。「電気を通じて新しいライフスタイルを提案する」というコンセプトのスイッチ・ザ・デザイン・プロジェクトを推進する東京電力は、銀座TEPCO館にIH対応のセレクトショップの開設を企画し、一般の主婦の意見も採り入れて店舗を選択した結果、フライングソーサー社が2005年10月にそこで活動を開始した^{注7)}。同社は、主婦であったSに店長を担当させ、既存品だけでなくオリジナル調理道具も開発しており、Sの友人の料理メディアのスタイリストCが新しいアイデアの提案を担当した。フライングソーサー社は既に2004年にシリコン樹脂製スパチュラの開発に取り組んでおり、既に他店でも販売していた赤・黄・青に、黒・紺・緑・茶色を加えた7色のラインアップを立ち上げた。

次に、スパチュラを使った調理法の社会への普及プロセスを見てみる。第一に、開発者Wの経緯からみれば、当初は調理法の一般への公開は意図されていなかったことがわかる。スパチュラを両手に持つ調理法が一般に紹介されたのは、前述したように2004年のファッション誌の調理記事におけるIHでの炒め物の記事であった。2006年にW

が出版したIH向け料理本での炒め物のページでは、各手にスパチュラと木べらを持つ調理法が紹介されている。スパチュラ2本が最適ではあるが、スパチュラを2本持たない読者でも対応できるように配慮して、1本は木べらに変えて紹介した^{注8)}。前述のWが開発したIH調理向けのスパチュラが、初めてメディアを通じて発表されるのは2008年12月である。

第二に、フライングソーサー社は、発売当初から積極的にシリコン樹脂製スパチュラをメディアを通じて紹介した。本研究での時系列分析の対象としたような調理記事ではなく、IH調理とは関係のないファッション誌の雑貨の記事において多く採り上げられており、7色のラインアップに注目が集まり「男性が調理をするときにも使いやすい色」、「居心地のよい台所にするために、キッチンの内装に合わせられる色」などと紹介された。同社は、東京電力との連携に合わせてIH対応の自社製中華鍋を開発したが、そこでスパチュラをセットで見せる販売促進を行った。当時、スパチュラはIH調理を意識した商品ではなかったため、IH対応の調理道具とスパチュラが組み合わせられたのは半ば偶然である。同社がIH調理とシリコン樹脂製スパチュラの補完性を思いついたのは、当時放送中であった木べら2本による東京電力のCMシーンを確認したことによる。銀座の店舗の店頭を飾る中華鍋には、赤いスパチュラが1本乗せられ、店舗紹介の小冊子では中華鍋に両手に紺色と茶色のスパチュラを持ってかきまぜている写真が掲載されている。また東京電力のWebコマーシャルでは著名なシェフが同社の中華鍋と赤いスパチュラを用いてチャーハンを作っている^{注9)}。



※1 テレビCMについては2002～03年は調査対象外。

※2 新しい調理方には、スパチュラ2本の調理法他、その成立過程にある木べら2本、スパチュラ1本の調理法も含む。

図2 メディアによって発信されるIH調理に用いられる新しい調理法の変遷

6 IH技術に付随する調理システムの開発と普及モデルの提案

IHに付随する調理システムの展開は、図3に示すように開発と普及の2段階に分かれる。まず、1999年から2000年にかけて両手に木べらを持つ調理法がなかば自然発生し、木べらが使用されるプロセスで新しい調理道具としてのシリコン樹脂製スパチュラの使用が始まった。第2段階は2004年以降であり、IHの普及につれて新しい調理システムがメディアを通じて情報発信されている。調理システムの開発と普及に貢献した個人と組織をみると、開発に関しては、IHの普及を推進する電気事業者を筆頭に、直観的に両手に木べらを持って調理を行ったプロの料理人Y、それをIHに適応した調理法と位置づけた料理教室コーディネーターN、木べらをスパチュラに代替した料理研究家Wが主要な役割を果たしている。一方、普及に関しては、東京電力のオール電化の販売促進プロジェクトを中心に、IH調理の啓蒙にあたる料理研究家、また、ライティングソーサーに代表される小売りショップの販売促進活動が、さまざまなメディアを経由して家庭へと発信されている。

新しい調理システムの開発と普及を考察するために、表1に、開発と普及の主体となる個人・組織について、その活動内容、生成・移転された知識、また、活動の成果を既存研究と比較して示す。フォークの進化が長期に渡る累積的なプロセスであったのに対して、IH調理システムの変化は先端的な科学技術による非連続的進化であるが、フォークの事例同様に、ユーザーとしての家庭が進化において一定の役割を果たしていた。また、キーボードの事例との関連でいえば、調理システムを構成する調理道具やレシピは

表1 先行する人工物の進化と比較したIHイノベーションのメカニズム

	ペトロスキモデル [Petrosky 1992]	デービッドモデル [David, 1985]	IH技術に付随する調理システム
例	フォークの歯が4本になったこと	キーボード配列 QWERTY	両手にシリコン樹脂製スパチュラを持って炒める調理法
開発の主体	リード・ユーザー	メーカー	論理的リード・ユーザー
普及の主体	ユーザー	ユーザーコミュニティ	感性的リード・ユーザー
開発の駆動力	既製品における失敗の改良	より高い性能の実現	IHの機能を活用した新しい調理の開発
普及の駆動力	マナーの形成 (社会との協調)	タイピング能力によるユーザー間競争	社会トレンドとの適合性
普及を促進するメディア環境	礼儀作法の本、養蚕	タイピング・コンテスト、タイピング専門学校	雑誌、セレクトショップ (電気事業者施設内)、TV コマーシャル、WEB
普及した人工物の性能	以前より確実に良い	必ずしも高くない	新しい社会価値の提供

企業以外でも開発可能であり、キーボード配列の事例同様に、市場メカニズムに加えて一部のユーザーの趣向などの外部効果が影響を与えた。

以上の検討に基づき、本研究が対象とする調理法の開発・普及の特徴を述べてみよう。第一に、IHイノベーションを補完する調理法の開発と普及を行ったのは、IHの技術開発を担当した大手家電メーカーではない。家電メーカーからの宣伝広告は、IHに対して懐疑的な消費者を対象にIHの短所が解決できることを示す内容であり、IHの可能性を活かした新しい調理法に関する提案は見られない。開発と普及に貢献した一連の個人は、電気事業者にもメーカーにも直接の形で所属しない自立したリード・ユーザーであり、彼らは一般ユーザーのように既存の調理法を単純に受け入れることには満足せず、既存の調理道具、調理法対

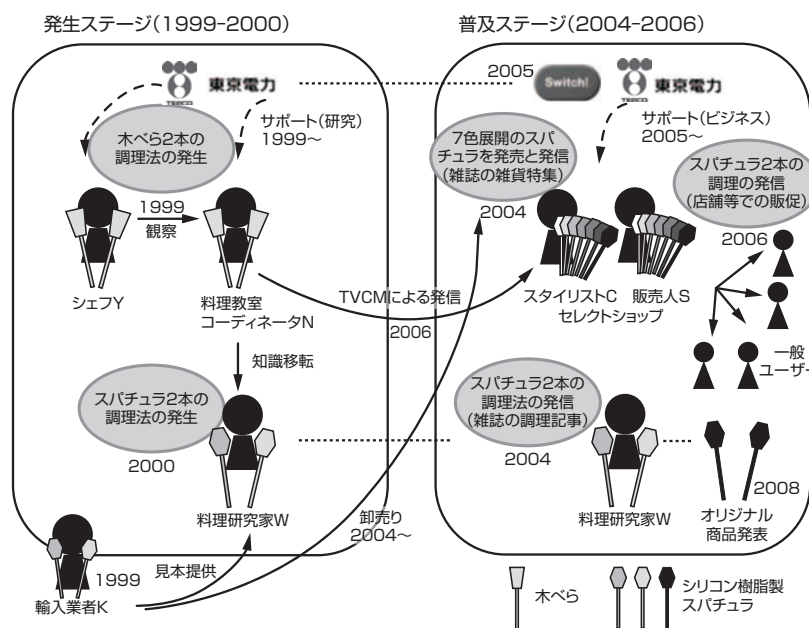


図3 両手にシリコン樹脂製スパチュラを持って炒める調理法の開発と普及

して進んで提案をする。彼らは、電気事業者の支援を受け、その提案を書籍、雑誌等のメディアを通じて家庭へと発信し、積極的に調理法の開発と普及に乗り出している。

次に、2種類のリード・ユーザーに対してそのインセンティブを考察する。まず、調理法の開発を担当するリード・ユーザーにおいては、IHの機能に対する論理的な好奇心と合理的な調理の探求がインセンティブとして働いている。彼らは、IHはユーザーが入力する電力の値と出力としての鍋内の温度変化に再現性があることや鍋内の温度を一定に保てることに着目し、その性能を調理に活かすための実験の過程で、IHでは鍋底が高温になることを活かした新しい調理法を発見した。開発者はIHという技術の中身にも好奇心を持ち、「調理の科学化」という観点からIHにアプローチしており、そのインセンティブには営利目的を越えた知的社会インフラの形成という側面がある^{注10)}。開発された新しい調理法は、ファッション誌の調理記事によって率先的に発信したが、調理法を発見してから4年後のことである。

一方、普及を牽引したリード・ユーザーのインセンティブをみると、紹介したセレクトショップの発想には、社会トレンドに対する感性的な直観力が認められる。彼らが直観的に開発した7色展開のスパチュラは、「男性でも使いやすい色」、「自分の家の台所に色に合わせられる色」とファッション誌の調理とは関係のない雑貨特集で評価を受ける。このようなリード・ユーザーは、電気事業者や家電メーカーと組織的には独立している。しかし、その調理法がメディアを通じて一般家庭へと発信される2004年から2006年という期間が、電気事業者によるIH普及促進の時期と重なっていることは偶然ではない。事実、典型的な普及主体であるセレクトショップは、販売促進という目的において、オール電化を推進する電気事業者と利害を共有する。このような背景によって新しい調理法は、銀座という繁華街のショーウィンドーを通じて、またWebコンテンツを通じて強力に一般家庭へ発信された。

以上の分析から、多様なリード・ユーザーによる先端技術の家庭への導入について、図4に示すモデルを本研究では提案する。大手家電メーカーによって開発されたIHを家庭に導入する際には、IHに付随する調理法の存在が大

きな役割を果たす。IHの技術的可能性を引き出す調理法を開発するのは、技術と調理に対する専門知識を持つ料理研究家Wのような「論理的リード・ユーザー」であり、調理のためにIHの機能性を最大限に引き出すことを目的とする。一方、新しい調理法の普及に貢献するのは、製品に関連する社会トレンドに対して卓越した直観力を持つセレクトショップのSやCのような「感性的リード・ユーザー」である。メーカーによる先端技術にIHの機能性を追求した調理システムが組み合わされることのみでは、かならずしも一般家庭へ商品訴求力は生まれず、家庭への普及をもたらさない。一方、技術内容に対する理解に欠ける感性的リード・ユーザーの提案する調理システムには、社会トレンドを捉えた魅力が生まれ、メディアによる発信を通じて調理システムの家庭への導入を促進する。このように、柔軟に連携する多様なリード・ユーザーがIHイノベーションの進展に貢献してきた。

7 考察

先端技術を家庭に導入するためには、技術内容を理解しない一般ユーザーに対して、適切な製品利用を可能にする必要がある。本研究が示したように、企業が開発したIHクッキングヒーターだけでは、ユーザーは上手く炒め物ができない。そこで、論理的リード・ユーザーによって新しい調理法が開発され、IHの機能を活かした調理のための補完要素が準備されて初めて一般ユーザーはIHを家庭で利用する。さらに、ユーザーは「スパチュラの色展開」など社会トレンドに沿った調理システムの一要因に引き寄せられ、それまで調理に強い関心を持っていなかった人々にまで、IHが普及していく可能性を本研究は示唆する。ユーザーが先端技術の持つ潜在力を意識することなくIHが普及していく現実を、どう評価すれば良いであろうか。

まず、先端技術を家庭に普及することは容易ではない。家庭用ロボットのケースが示唆するように、先端技術が画期的な機能を実現するとしても、優れた機能性のみでは製品の家庭への導入は保証されない。将来性がある製品を家庭に導入するためには、技術を家庭で利用するための一連の補完システムの整備が必要になる。本論文で検討してきたように、IHをどのように家庭で使用するか、IH調理システムに対する安全性、また環境性（エネルギー効率）からの評価が必要なように、先端技術を「使うための」システムについて検討すべき課題も極めて多様である。Apple社の商品開発等に注目するデザイン・インスパイアード・イノベーション・モデルが、使い手に喜びを与えるデザインが製品の成功を導くと主張するように¹⁰⁾、製品に対する利用者の視点も無視できない要素である。技術を家庭で利用するため

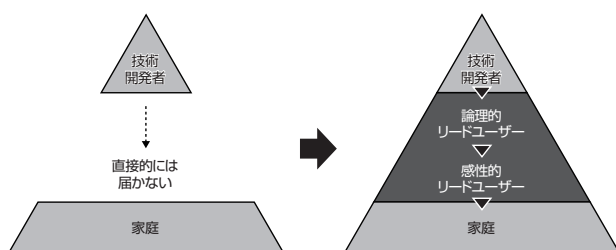


図4 多様なリード・ユーザーによる先端技術の家庭への導入モデル

の補完システムは、その時代の社会トレンドのもと、家庭のユーザーが受ける技術の便益を最大化するように設計されなければならない。

先端技術そのものを開発するのは大企業を中心とするメーカーである。しかし、技術の専門家だけで先端技術を「使うための」システムのデザインを担当するのには限界がある。吉川らが指摘するように、技術の専門家が熱力学や表面科学や流動学などの目玉焼きに関与する知識を総動員しても、おいしい目玉焼きができるとは限らない^[11]。本研究が対象としたIH調理システムの事例においては、企業とは独立した「料理の科学化」を志向する調理の専門家が調理のノウハウを先端技術と融合させ、自宅の台所を実験室とすることによってIHを「使うための」調理システムが創出されている。この事実は、技術の専門家とともに料理研究家という調理の実践家がいれば、両者が協力しておいしい目玉焼きを作るためのレシピができることを示唆する。また、調理の専門家が企業とは独立した存在であることの重要性も示唆される。IHの他にも圧力鍋や無水鍋などは、調理の専門家による情報提供が多く行われたことによって一般家庭で活用されるようになった。すなわち、企業が開発する先端技術を家庭で活用するためには、技術を「使う」ことを専門とする多様なリード・ユーザーの自律的参画が必要になる。

現在、科学技術と産業をつなぐ産学連携の重要性は深く認識されている。しかし、本研究の分析からは、ロボットなどの先端技術の家庭への導入について、技術を「使う」ためには産学に加えて多様なリード・ユーザーによって構成される社会ネットワークの構築が必要であることがわかる。本研究で提案するモデルは、産業を中心とした社会の生産活動に、家庭の生活者がその実践的知識を活用して柔軟に参加する可能性を示しており、どのように社会的イノベーションを促進するかという観点から新しい研究課題になることが期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、調理知識の伝授から貴重な資料の提供まで多方面で支援していただいた株式会社トワ・スールの料理研究家脇 雅世氏、加藤修司氏、多くの方々へのヒアリングのきっかけを提供していただいたフライングソーサーの清水三樹氏、清水智寿子氏、メディア情報の収集に協力していただいた東京電力株式会社の北 勝氏、森尻謙一氏、水谷知裕氏、IH開発に関する情報を提供していただいたパナソニック株式会社の萩野芳生氏、スパチュラに関する情報を提供していただいた河西広美氏、その他ヒアリングにご協力くださった方々に対し感謝の意を表しま

す。また、本研究に貴重なご助言をいただきました青山学院女子短期大学元学長の阿部幸子氏、査読の労をとられた赤松幹之、内藤 耕の両氏に対して感謝の意を表します。

注1) キーボードの文字配列の決定には、大規模メーカーのトラストによる特許障壁の形成における新規参入の阻止という企業戦略が決定的な役割を果たしたという有力な反論が最近提出されている^[12]。

注2) メディア情報は次のように決定した。書籍については、国立国会図書館書誌データベースにおいてタイトルに「IH」含む書籍を抽出した中から、IHクッキングヒーターを用いた調理を掲載する書籍を目視によって抽出した。雑誌については、『雑誌・新聞総カタログ2008』の「料理・栄養」部門と「女性誌」部門において、対象年齢が30歳以上の中で発行部数が5位以内の雑誌を抽出し、IHクッキングヒーターに情報発信の最も多い2005年と2006年について、IHクッキングヒーターを用いた調理記事を掲載する雑誌を目視によって抽出した。テレビCMについては、東京電力と関西電力のオール電化のCMを抽出した。

注3) 写真が複数でも、目的の料理が同じであれば1つのデータとみなし、1つの写真・テレビCMであっても、目的の料理が異なれば異なるデータとみなす。また、雑誌は広告と本編に分け、料理雑誌の広告とファッション雑誌の広告は性質が類似するため、合わせて「広告」と分類する。

注4) 広告が発信するIH調理は、書籍や雑誌と異なり、グリルを利用した調理が取り上げられることが多い。IHをグリル対応に利用できないため当初は「IHクッキングヒーターでは魚が焼けない」など否定的意見が多くあった。IHクッキングヒーターに含まれるグリルはIHではなく電熱線を熱源に採用している。広告では、新しい調理道具を用いた調理が一度も紹介されていないため、グラフでの表示は0になっている。

注5) Wは自身のキッチンで木べら2本でかきまぜる調理法について実験を行い、2本のへらの間に米粒が挟まりつぶれてくっつく欠点に気づいた。その欠点の改善のために、木べらに替えてフライ返し2本を用いることを試すが、フライ返しは通常、先端のラインが持ち手に対して直角ではなく、両手に持つと2本の先端のラインが一致せず交差してしまうため、食材を持ち上げることができない。そこで、フライ返しに替えてシリコン樹脂製のスパチュラを使用すると、問題なくかきまぜ作業ができることを発見した。

注6) 真空技術のエンジニアだった経験からシリコン樹脂の高い機能を知っていた輸入業者Kによって、日本で初めてスパチュラの輸入販売が開始された。同社においては、最初の3~4年、製品は全く売れなかったが、2004年頃より製品需要が盛り上がり、同年の売り上げは前年の2.7倍と急増した。

注7) セレクトショップとは、製造メーカーを限定せず、販売員が選定した商品を販売する商店である。フライングソーサーは業務用調理機器の卸し業を営んでいたが、2001年3月30日から一般家庭向けの業務を開始し、それまで主婦であったSが店長になる。

注8) 開発者である同氏は、IHでのフライパン調理に最適なスパチュラの形状を追及し、研究結果をもとに株式会社貝印と協働で設計・開発したスパチュラが、2008年12月に発表された。

注9) 2006年10月公開の東京電力のWebコンテンツの中には、著名な中華料理シェフの陳建一氏がフライングソーサーのオリジナルスパチュラを両手に持ってチャーハンをかき混ぜる姿が含まれる。(http://www.tepco-switch.com/others/ad/index-j.html)

注10) IHでは、コンロ内のコイルに電流を流すと鍋そのものが発熱し、中の食材に熱を与えるようになっている。ここで、鍋の金属の抵抗値のばらつきを無視すれば、入力する電力と出力としての鍋の発熱量は、常に一定の関係式を持つ。さらに食材の質のばらつきを無視すれば、入力する電力と食材の変性も、一定の関係を持つ。ガスの場合は、鍋内の温度を決定する要因は複雑であった^{[13][15]}。

参考文献

- [1] W. J. Abernathy and K. Clark: Innovation: Mapping the winds of creative destruction, *Research Policy*, 14, 3-22 (1985).
- [2] D. J. Teece: Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy, *Research Policy*, 15 (6), 285-305 (1986).
- [3] C. Herstatt and E. V. Hippel: From experience: Developing new product concepts via the lead user method: A case study in a "low tech" field, *Journal of Product Innovation Management*, 1992 (9), 213-221 (1992).
- [4] W. J. Abernathy: The productivity dilemma: Roadblock to innovation in the automobile industry, *Johns Hopkins University Press*, Baltimore and London (1978).
- [5] 今道友信：エコエティカー生圏倫理学入門一，講談社，東京（1990）。
- [6] I. H. Petroski: *The Evolution of Useful Things*, Alfred a Knopf, New York (1992).
- [7] 吉川弘之：テクノグローブ「技術化した地球」と「製造業の未来」，44-46，工業調査会，東京（1993）。
- [8] 馬場靖憲：デジタル価値創造，NTT出版，東京（1998）。
- [9] P. A. David: Clio and the economics of QWERTY, *The American Economic Review*, 75 (2), 332 (1985).
- [10] M. U. James: *Design-inspired Innovation*, World Scientific Pub Co Inc. (1996).
- [11] 吉川弘之，内藤耕：「産業科学技術」の哲学，東京大学出版会，東京（2005）。
- [12] 安岡孝一，安岡素子：キーボード配列QWERTYの謎，NTT出版，東京（2008）。
- [13] 中山由美子：IHクッキングヒーターについて，*日本調理科学会*, 39 (2), 171-175 (2006)。
- [14] 杉山久仁子：家庭用こんろの消費熱量に関する研究-IHクッキングヒーターとガスこんろの比較-，*横浜国立大学教育人間科学部紀要IV自然科学*, 9, 31-42 (2007)。
- [15] 杉山久仁子他：調理用熱源について ガスこんろとIHヒーターの比較(教材研究)，*日本調理科学会*, 40(2), 109-112 (2007)。

執筆者略歴

久保 友香（くほ ゆか）

2000年慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2002年東京大学新領域創成科学研究科環境学専攻修了、2006年東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻修了、博士（環境学）。2007年より東京大学先端科学技術研究センター特任助教。現在、家庭が利用する先端技術のイノベーションについて研究を行う。本論文では、ヒアリング調査、メディア調査とそれらの分析、モデル提案を担当した。



馬場 靖憲（ばば やすのり）

1977年東京大学経済学部卒業。1986年、サセックス大学博士課程修了Ph.D. SPRUフェロー、科学技術政策研究所主任研究官などを経て、1993年4月より東京大学人工物工学研究センター助教授、1997年同教授。2001年7月以降、同先端科学技術研究センター教授。2007年4月より同大学院工学系研究科先端学際工学専攻を兼務。本論文では、モデル提案、全体総括を担当した。



付録A

調査した書籍を書誌名、著者、出版社、発行日の順に下記に記す。

生活実用シリーズ 便利機能をフル活用！ IHクッキングヒーター・クッキング、NHK出版、NHK出版、2002.12.20。

生活実用シリーズ IHクッキングヒーターでつくるわが家のごちそうレシピ、NHK出版、NHK出版、2003.11.20。

IHレシピ集 家庭でできる神戸中華料理屋さんの味、兵庫県中華料理業生活衛生同業組合・兵庫栄養調理製菓専門学校・関西電力株式会社 神戸支店、旭屋出版、2006.3.21。

IHクッキングマスターレシピ、脇 雅世、講談社、2006.3.31。

いつでも、誰でも、おいしく作れる！IHクッキングヒーター満点レシピ、高城順子、扶桑社、2006.9.10。

IHクッキング 基本のレシピ、脇 雅世、講談社、2007.12.1。

調査した雑誌を書誌名、出版社、発行時期の順に下記に記す。

おかずのクッキング（料理雑誌）、テレビ朝日出版、2000年1・2月号～2008年10・11月号。

ミセス（ミセス）、文化出版、2000年1月号～2008年12月号。

調査したテレビCMを広告主、商品名、放映時期の順に下記に記す。

東京電力株式会社、オール電化、2005年-2008年。

関西電力株式会社、オール電化、2005年-2008年。

付録B

ヒアリング先を氏名、所属、面談日の順に以下に記す。

荻野芳生、パナソニック株式会社 ホームアプライアンス社オール電化事業推進部、2008年10月22日。

近藤弘志、パナソニック株式会社 ホームアプライアンス社IHクッキングヒータービジネスユニット営業企画グループグループマネージャー、2008年11月13日。

弘田泉生、パナソニック株式会社 ホームアプライアンス社IHクッキングヒータービジネスユニット技術グループグループマネージャー、2008年11月13日。

北 勝、東京電力株式会社 販売営業本部営業部コミュニケーショングループマネージャー、2008年5月9日。

森尻謙一、東京電力株式会社 販売営業本部営業部生活エネルギーセンターデザインセンター所長、2008年5月11日。

水谷知裕、東京電力株式会社 販売営業本部営業部生活エネルギーセンターデザインセンター、2008年7月15日。

関川伸子、有限会社エヌエヌエスファーム IHクッキングコーディネーター、2008年7月15日。

脇 雅世、株式会社トワ・スール 料理研究家、2008年6月27日。

加藤修司、株式会社トワ・スール 代表取締役、2008年7月9日。

河西広実、有限会社河西、2008年7月12日。

清水三樹、東興株式会社/フライングソーサー 代表取締役、2008年5月1日。

清水智寿子、東興株式会社/フライングソーサー 取締役店長、
2008年5月19日。

千葉美枝子、フード・スタイリスト/フライングソーサー、2008年7
月14日。

査読者との議論

議論1 議論の根拠となるエビデンスについて

質問・コメント（赤松 幹之：産総研人間福祉医学研究部門）

先端技術が家庭に導入されるためには、技術を使うための補完システムが必要であり、そこには、ある立場の女性（原稿段階での記述）が有効に働く、という論点は技術の社会導入における1つの重要なポイントと考えられ、シンセシオロジーのスコープに合致しています。しかし、論文全体としての論旨がやや不明確であり、エビデンスも充分ではないように思います。

質問・コメント（内藤 耕：産総研サービス工学研究センター）

特に「4 IHを利用・・・時系列分析」において、まず具体的な普及曲線を販売量データから作成し、そこに重要なイベントがどのように関係しているのかが分かる図の作成をお願いします。

回答（久保 友香）

エビデンスの不十分性については自覚があり、IHを利用した調理の実態や、シリコン樹脂製スパチュラの売上量のデータを収集するため、電気機器メーカーや調理道具メーカーの協力を得る努力をしましたが、達成できませんでした。また、セレクトショップの販売量のデータも非公開放した。そのため、メディアで伝達する情報から、一般家庭のユーザーの利用状況の分析を行いました。雑誌の種類は非常に多様で、網羅的な分析に限界があることを残念に思いながら、可能な限り適切な抽出を試みました。

本論は実証分析からIHが家庭に導入されるときにIH独自の調理法が貢献しており、調理法を普及させたのは感性的リードユーザーですが、発見したのは論理的リードユーザーであることを明らかにしました。論理的リードユーザーが新しい調理法を発見できたのは、論理的リードユーザーが、ユーザーでありながら、技術の中身にまで好奇心を持っていることに起因するので、このことを表すように修正しました。

議論2 感性的リードユーザーについて

質問・コメント（赤松 幹之）

料理研究家が論理的リードユーザーで、セレクトショップが感性的リードユーザーとしています。料理研究家については論旨が明確ですが、セレクトショップについては論旨が不明瞭です。電気事業者と独立であるとしていますが、TEPCO館のセレクトショップなので、独立とは言えないように思います。また、社会ニーズ対応の活動としていますが、「男性が調理に参加」や「好きな調理器具に囲まれる生活」は一般でいう社会ニーズではないと思います。また、「IHとスパチュラは半ば偶然である」とありますが、ということは東京電力のCMに重要な役割があったこととなります。この点からすると、電気事業者がコアとして機能したとも言えないでしょうか？

回答（久保 友香）

コメントをいただきましたとおり、感性的リードユーザーの行動が、社会ニーズ対応であることは本分析から明らかになっていません。感性的リードユーザーの直観的アイデアから発生した商品が、トレンドを伝えるファッション誌の雑誌記事で多く取り上げられていることから、結果的に社会トレンドに合致していることは明らかと言えます。社会トレンドという言葉を用いて、記述を変更しました。

感性的リードユーザーであるセレクトショップは、東京電力の支援によって銀座TEPCO館に店舗を構えますが、商品開発や商品選択などにおいて東京電力の協力は関係ありません。東京電力のC

Mの影響も、両手に調理道具を持つ炒め物調理である点は同じですが、木べらを利用しており、木べらをスパチュラに変えることは当然の発想でないことは重要だと考えます。

しかし、東京電力が、感性的リードユーザーに支援したことは偶然ではないと考えられます。銀座TEPCO館にセレクトショップを設置する過程で、一般の主婦の意見などを取り入れており、企業から発想できないアイデアを得ることを目的に構築した連携で、東京電力はある程度意図していたと考えられます。主婦の意見を取り入れていることを、加筆しました。

議論3 女性の貢献について

質問・コメント（赤松 幹之）

「女性の貢献」が本論文の重要なポイントとしていますが、「論理的リードユーザー」「感性的リードユーザー」という枠組みでは、女性であることは必須の観点ではないと思われます。もちろん、2つのリードユーザーはいずれも女性でしたが、これは対象が女性が使うことの多い調理器具だったためであると考えられます。

質問・コメント（内藤 耕）

女性を中心とする社会ニーズに直感を持つ感性的リードユーザーの役割の重要性を考察しています。これは重要な指摘だと思いますが、「自立した個人としての女性」「家庭で料理を担当する女性」という記述はありますが、本論文のデータや分析ではその「女性」の役割の重要性が明確ではないと考えます。

回答（久保 友香）

技術の普及に、論理的リードユーザーと感性的リードユーザーがそれぞれの立場で貢献したのは、一般的なユーザーが技術の中身を理解しないことが理由の一つであります。技術の中身を理解しないユーザーが多いのは、女性をユーザーとする技術に多く見られると考え、女性のリードユーザーの貢献を指摘しました。しかし、IHが家庭に導入されることに貢献した論理的リードユーザーと感性的リードユーザーの役割は、IHでないケースでは男性が担うことがあると考えられます。「女性」に限定する記述を省き、このモデルが、他のさまざまな技術のケースにも当てはまることを探究したいと思います。

議論4 他の製品例について

質問・コメント（赤松 幹之）

他の製品例との比較・考察があると読者の参考になると思います。例えば、調理器具という観点からでは、圧力鍋は一例になるかもしれません。

回答（久保 友香）

ユーザーに、技能やレシピ、道具がなくとも利用できる電子レンジや炊飯器などに対し、IHは製品がそこにあるだけではユーザーは便益を得られません。同様に、ユーザーに技能やレシピ、道具などの補完システムを必要とする製品については、本論が示すように普及において多様なリードユーザーが貢献すると考えられます。たとえば、圧力鍋や無水鍋は、メーカーによって開発されたのは過去ですが、現在でも、機能を引き出す調理法やレシピについて、料理研究家からの情報発信がさかんに行われています。近年、油を減らした料理への注目と相俟って利用者が増えているのは、リードユーザーの貢献によるものと考えられ、考察において、圧力鍋と無水鍋の例を加えるとともに、さらなる事例の調査は今後課題としていきたいと思えます。

議論5 イノベーションの観点について

質問・コメント（内藤 耕）

「IHイノベーション」について、IH技術の完成に加え、それをイノベーションと位置づけるには、IHがどのような社会的価値を形成したのかを記述してください。新しい調理法の登場がIHの普及に大きく

影響したことは、IHが単なるガスからの技術的代替ではなく、何らかの新たな価値をユーザーに影響を与えたものと想像されます。

回答（久保 友香）

本研究が分析対象とした新しいIH調理システムの発生と普及は、論理的リードユーザーが「使う」ことによって発見した「これまでできなかった調理ができる」価値を社会に普及することを目指したもので

した。しかし、感性的リードユーザーの直観的発想が普及に貢献した事実から、それまで調理に興味がなかったかもしれない、例えばデザインなどに興味を持つ人々にも、調理をするきっかけを提供するような価値も形成されていたことが、結果的に明らかになりました。また、IH調理システムが形成する社会的価値は、それだけではなく安全性、環境性などの側面もあり多様です。これらを含めて、7章に加筆しました。

スピントロニクス技術による不揮発エレクトロニクスの創成

— 究極のグリーン IT 機器の実現に向けて —

湯浅 新治*、久保田 均、福島 章雄、薬師寺 啓、長浜 太郎、鈴木 義茂、安藤 功兒

不揮発エレクトロニクスによる究極のグリーンIT機器の実現を目指して、スピントロニクスの本格研究を行った。不揮発エレクトロニクスの中核となる大容量・高速・高信頼性の不揮発性メモリを実現するために、酸化マグネシウム (MgO) を用いた高性能の磁気抵抗素子とその量産技術を開発した。この技術を用いた超高密度ハードディスク (HDD) 磁気ヘッドはすでに製品化され、現在究極の不揮発性メモリ「スピンRAM」の研究開発が精力的に進められている。

キーワード: スピントロニクス、磁気抵抗効果、ハードディスク (HDD)、MRAM、スピン RAM、不揮発エレクトロニクス、グリーン IT

Creating non-volatile electronics by spintronics technology

– Toward developing ultimate green IT devices –

Shinji Yuasa*, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima,
Kay Yakushiji, Taro Nagahama and Koji Ando

We have been promoting *Full Research* to develop ultimate green IT devices based on non-volatile electronics. A core technology of non-volatile electronics is a non-volatile memory possessing features such as large capacity, high-speed operation, and high endurance. To develop such an ultimate non-volatile memory, we developed a novel high-performance magnetic tunnel junction device based on magnesium oxide (MgO) and the underlying mass-manufacturing technology. This technology has already been commercialized for the production of the magnetic heads of ultra-high density hard disk drives (HDD). Now we are also performing intensive R&D activities for developing the ultimate non-volatile memory called Spin-RAM.

Keywords: Spintronics, magnetoresistance, hard disk drive (HDD), MRAM, Spin-RAM, non-volatile electronics, green IT

1 はじめに

1.1 不揮発エレクトロニクスの必要性

シリコン LSI テクノロジーを中核とした現在のエレクトロニクスは、基本的に“揮発性”（電源を切ると記憶が消失してしまう性質のこと）である。これは、コンピュータや情報家電などの機器で用いられている汎用メモリの DRAM¹ や高速メモリの SRAM²、さらに CPU 内の論理演算回路などの電子デバイスが全て揮発性であるからである (図 1)。一般に電子機器は、入力“待ち時間”が非常に長い。例えば、パソコンで文書などの作成を行っている場合、キー入力から次のキー入力までの大半の時間、パソコンは次の入力を待っているだけで何の仕事もしていない。しかし、このような“待機中”でも電子機器の電源は入っており、電力を消費している。これは、電子機器が揮発性であり、瞬時に電源を切れないことに起因している。もし仮に、コンピュ

タや情報家電を構成する電子デバイスを全て“不揮発性”（電源を切っても記憶が保持される性質のこと）にできれば、必要に応じて瞬時に電源のオン/オフができる“クイック・オン”や、「電源オフの状態を基本状態にして、演算をする瞬間だけ電源をオンにする」という“ノーマリー・オフ”の基本設計が実現できる (図 1)。特に“ノーマリー・オフ”の概念は、電源オンを基本とした現在のエレクトロニクスとは対極にある新しい概念であり、電力をほとんど消費しない究極のグリーン IT になるはずである。

このような夢のノーマリー・オフ電子機器を実現するためには、(i) コンピュータのメインメモリ (DRAM と SRAM) の不揮発化、(ii) 論理演算回路の不揮発化、という不揮発エレクトロニクス技術の開発が必要となる。産総研では、ノーマリー・オフを目指した研究開発の第一段階として、(i) の「大容量・高速・高信頼性を兼ね備えた不揮発性メモリ」

産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2

Nanoelectronics Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: yuasa-s@aist.go.jp

Original manuscript received May 11, 2009, Revisions received June 30, 2009, Accepted July 1, 2009

を実現するための研究開発を遂行している。ここで、「高信頼性」とは主に「書き換え耐性」のことである。コンピュータのメインメモリとして用いられる DRAM や SRAM に代わるものには、「 10^{15} 回書き換えても壊れない、事実上無限回書き換えが可能」という優れた書き換え耐性が要求される。ちなみに、現在外部ストレージとして用いられているフラッシュメモリの書き換え耐性は $10^4 \sim 10^6$ 回しかないため、とてもメインメモリとして使えない。また、既に製品化されている不揮発性メモリの代表格である強誘電メモリ (FeRAM) の書き換え耐性は 10^8 回程度であるため、やはりコンピュータのメインメモリとして用いるには難がある。現在開発中の不揮発性メモリである相変化メモリ (PRAM あるいは PCRAM と呼ばれる) も、書き換え回数に制限がある。これに対して、スピントロニクス技術 (後述) を用いれば、無限回書き換えが可能な不揮発性メモリの開発が可能となる。

ところで図 1 に示すように、不揮発性・大容量の外部ストレージとして、ハードディスク駆動装置 (HDD) が現在の主流である。今後、小容量や高付加価値の用途ではフラッシュメモリを用いた SSD^{用語3} が HDD に代わっていくと予想されるが、使用台数が多い大容量・低価格の用途では今後もしかばらくは HDD が外部ストレージの主役を担うと予想されている。しかし、HDD はその消費電力の大きさが問題視されている。HDD を低消費電力化するには、とにもかくにも記録媒体ディスクのサイズ (直径) を小さくすることが重要であり、そのためには HDD のさらなる高記録密度化が鍵となる。現在の主流は大容量の 3.5 インチ HDD (ディスク直径が 3.5 インチという意味) であるが、3.5 インチ HDD は消費電力が非常に大きい (典型的な数値として、1 台あたり 5 ワット前後)。一方、2.5 インチ HDD の

消費電力は 3.5 インチ HDD の 5 分の 1 程度と小さい。HDD を高記録密度化することによって現在主流の 3.5 インチ HDD を 2.5 インチ HDD に置き換えることができれば、HDD 全体で大幅な消費電力の低減が可能となる。産総研では、HDD の高記録密度化を目指した研究開発も行っている。

1.2 不揮発エレクトロニクスを実現するスピントロニクス技術

「スピントロニクス」とは、電子の持つ電氣的性質 (電荷) と磁氣的性質 (電子スピン) の両方を活用して新しい機能を創出する新しい分野である (図 2)。電子の電荷のみを利用したシリコン・エレクトロニクスは IT 技術の基盤であるが、不揮発記憶を苦手としている。一方、電子スピンのみを利用した磁気工学は不揮発記憶を得意としているが、論理演算や低消費電力性は不得意分野である。これらの従来技術に対して、スピントロニクス技術を用いれば、不揮発性と高信頼性、低消費電力、論理演算などの特徴を同時に実現できる可能性がある。大容量・高速・高信頼性を兼ね備えた不揮発メモリは、究極のノーマリー・オフを目指した不揮発エレクトロニクスの中核となる。

スピントロニクス分野では、電荷とスピンの相互作用を活用するために何らかの量子力学的な現象 (量子効果) を利用する。その中でも最も重要な効果が「磁気抵抗効果」である。磁気抵抗効果 (Magnetoresistance を略して MR 効果とも呼ばれる) とは、固体物質や固体素子に磁界を印加することにより電気抵抗が変化する現象であり、その電気抵抗の相対的な変化率を「磁気抵抗比」あるいは「MR 比」という。磁気抵抗効果を利用すれば磁界信号を電気信号に変換できるため、ハードディスク (HDD) の磁気センサ素子 (再生磁気ヘッド) などに利用できる。さらに、

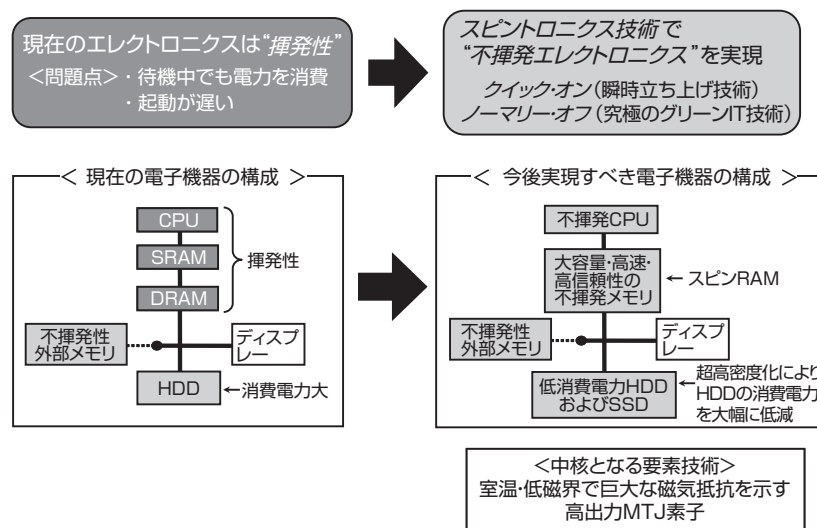


図1 現在のエレクトロニクスと将来実現すべき不揮発エレクトロニクス

強磁性体が持つ磁気ヒステリシス (履歴) 特性を活用すれば、磁気記録と同様の不揮発記憶が可能となる。

磁気抵抗効果のデバイス応用において、室温かつ低磁界 (数ミリ T (テスラ) 以下) における MR 比が応用上の性能指数となる。これは、通常の電子回路の中で生成できる磁界がせいぜい数ミリ T と小さいためである。室温・低磁界の MR 比が大きければ大きいほど、より高性能なデバイスの開発が可能となる。この応用上重要な室温・低磁界の MR 比は、かつてはわずか 1~2% しかなかったため、応用上有用とは考えられなかった。ところが、1988 年に A. Fert らと P. Grünberg らは磁性金属多層膜の巨大磁気抵抗効果 (GMR 効果) を発見し、室温・低磁界において従来よりも 1 桁大きな 10% 前後の MR 比を実現した。この発見により、A. Fert と P. Grünberg は 2007 年にノーベル物理学賞を授与されている。GMR 効果は、発見後約 10

年で HDD の再生磁気ヘッド (GMR ヘッド) として実用化され、その後の HDD の急速な大容量化をもたらした (図 3)。また、GMR 効果の発見が契機となって磁気抵抗効果の研究開発が世界規模で精力的に行われ、室温における TMR 効果 (後述) の実現にもつながった (図 3)。GMR 効果については本稿では割愛するので、詳しくは 2007 年ノーベル物理学賞の公式資料^[1]を参照されたい。TMR 効果については、次節以降で詳しく述べる。

1.3 室温 TMR 効果の実現とその応用

厚さ数 nm 以下の絶縁体層 (トンネル障壁) を 2 枚の強磁性金属層 (強磁性電極) で挟んだ素子を、「磁気トンネル接合素子 (Magnetic Tunnel Junction (MTJ) 素子)」と呼ぶ (図 4)。絶縁体は通常は電流を通さないが、絶縁体の厚さが数 nm 以下の極薄になると量子力学的な効果によって微小な電流が流れる。この現象は「トンネル効果」と呼ばれ、この効果によって生ずる電流と電気抵抗を、それぞれ「トンネル電流」、「トンネル抵抗」という。電極層が強磁性体の場合、平行磁化状態 (P 状態: 図 4 (a)) ではトンネル抵抗が小さくなり、より大きな電流が流れる。一方、反平行磁化状態 (AP 状態: 図 4 (b)) ではトンネル抵抗が大きくなり、トンネル電流は減少する。この現象を、「トンネル磁気抵抗効果」 (英語の Tunnel Magneto Resistance の頭文字を取って TMR 効果) という。MTJ 素子に磁界を印加すれば P 状態と AP 状態の間をスイッチできるため (図 4 (d))、磁気抵抗が生じる。また、強磁性体は磁気ヒステリシス特性を持つため、零磁界において P 状態と AP 状態の 2 値安定状態を持つことができ、

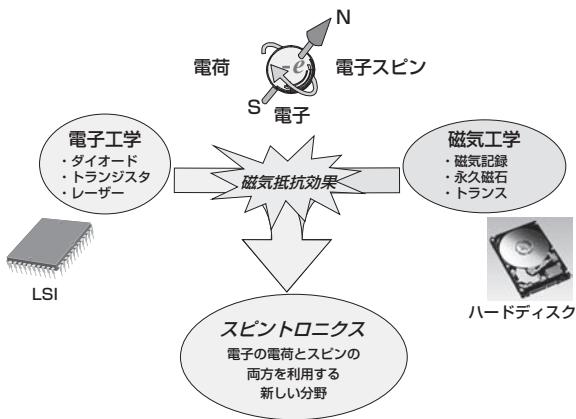


図 2 スピントロニクスと磁気抵抗効果

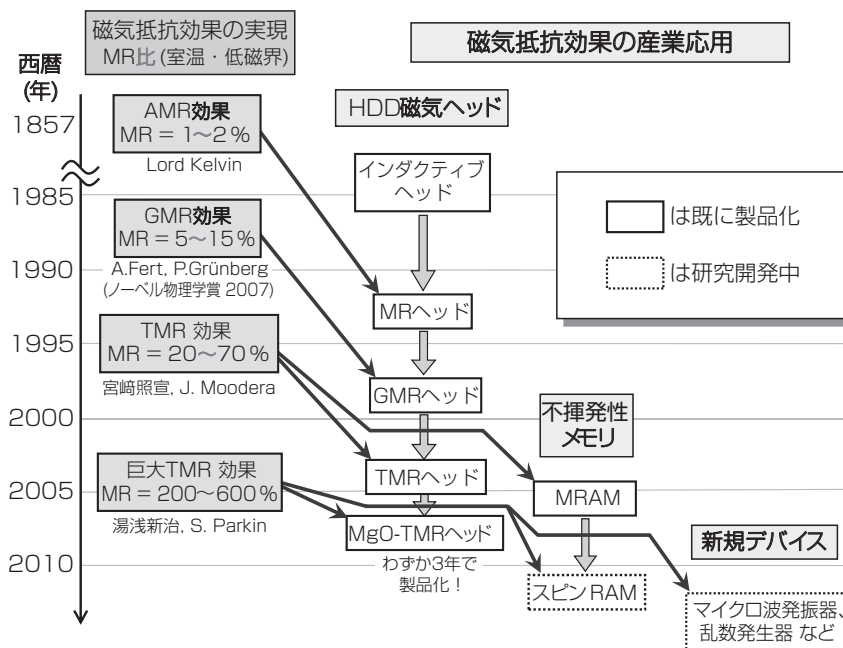


図 3 磁気抵抗効果とその産業応用の歴史と展望

MTJ素子は1ビットの情報を“不揮発”に記憶することができる。

低温でTMR効果が発現することは1970年代から知られていたが、室温で磁気抵抗が得られなかったため、その後10数年の間あまり注目されることはなかった。しかし、1988年に上述のGMR効果が発見され、これを用いた磁気センサー(HDD磁気ヘッドなど)の研究開発が盛んになるにつれて、TMR効果にも再び注目が集まるようになった。1995年に宮崎ら^[2]とムデーラ(J. Moodera)ら^[3]は、トンネル障壁にアモルファス(原子の配列がランダムな物質)の酸化アルミニウム(AI-O)、強磁性電極に多結晶のFeやCoなどの遷移金属強磁性体を用いたMTJ素子を作製し、室温・低磁界で20%近いMR比を実現した(図3)。これが室温MR比の最高値(当時)であったため、TMR効果が一躍脚光を浴びることとなった。その後、AI-Oトンネル障壁の作製法や電極材料の最適化が精力的に研究され、現在までに室温で70%を超えるTMR効果が実現されている。

室温TMR効果は、実現から約10年後の2004年にHDD再生磁気ヘッド(TMRヘッド)として実用化され(図5)、このTMRヘッドと垂直磁気記録媒体の組み合わせによって、記録密度が100 Gbit/inch²の高密度HDDが実現された。さらに、2006年にはMTJ素子を用いた比較的小容量(4 Mbit ~ 16 Mbit程度)の不揮発性メモリMRAM(図6)が製品化され、高信頼性(無限回書き換

え可能)を有する唯一の不揮発性メモリとして注目されている。ここで、MRAMが無限回書き換え可能な理由は、スピンの向き反転(つまり書き込み)には材料劣化のメカニズムが全くないためである。また、MRAMの動作速度はDRAMよりも速く、現在CPU内で用いられている高速メモリSRAMに近い動作速度も実現可能である。しかし、アモルファスAI-Oトンネル障壁を用いた従来型MTJ素子の性能(室温MR比)の改善はほぼ飽和していたため、これがHDDやMRAMのさらなる高性能化に向けて深刻な問題となっていた。例えば、アモルファスAI-OやTi-O障壁を用いたMTJ素子では、200 Gbit/inch²より高い記録密度のHDDやGbit級の大容量MRAMを開発することは困難であった(図4)。この限界を超えて、より高集積・高速・低消費電力の次世代デバイスを開発するためには、より高いMR比の実現が不可欠であった。

このように行き詰まりを見せていたアモルファスのトンネル障壁とは別に、結晶性のトンネル障壁を用いた単結晶MTJ素子に関する第一原理の理論計算が2001年前後に発表され、1000%を超える巨大なMR比が理論的に予測された。2004年に産総研において、結晶性の酸化マグネシウム(MgO)をトンネル障壁に用いたMTJ素子で巨大な室温TMR効果が世界で初めて実験的に実現され、TMR効果の応用研究が大きく進展することとなった。本稿では次章以降、結晶MgOトンネル障壁を用いた超高性能MTJ素子の研究開発における第1種基礎研究、第2

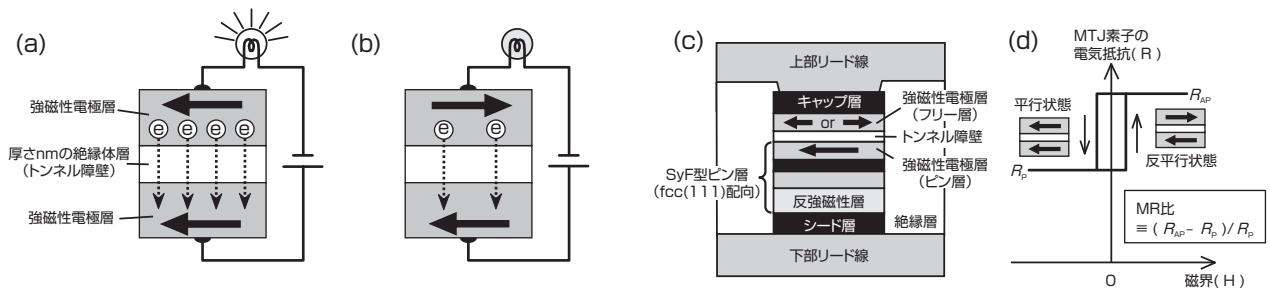


図4 磁気トンネル接合(MTJ)素子のトンネル磁気抵抗(TMR)効果

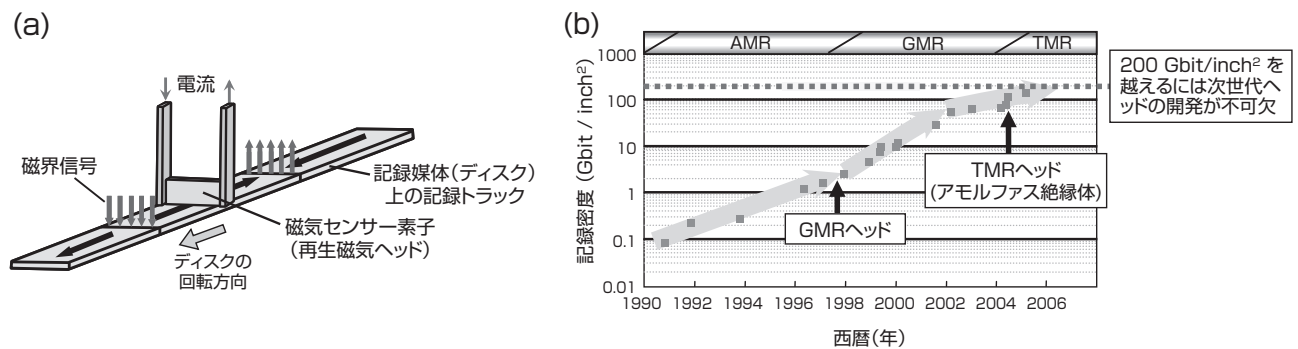


図5 (a) ハードディスク(HDD)の再生磁気ヘッドの仕組み。(b) HDDの記録密度と再生磁気ヘッドの変遷

種基礎研究、製品化の順で紹介し、本格研究^[4]をいかに遂行したかについて解説する。

産総研エレクトロニクス研究部門スピントロニクスグループでは、産総研第2期について次の2つのアウトカムを掲げて研究開発を行った。

- (1) 超高密度HDDのための次世代磁気ヘッドの実用化
HDDの超高密度化・小型化による消費電力の低減を実現するために、200 Gbit/inch²を超える超高密度HDD用の次世代磁気ヘッドの実用化を目指す。
- (2) 究極の不揮発メモリ（スピンRAM）の基本技術の開発
不揮発エレクトロニクスの中核技術となる大容量・高速・高信頼性を兼ね備えた究極の不揮発性メモリ“スピンRAM”の基本技術を開発する。

これら2つのアウトカムを創出するために、(i) 画期的な高性能MTJ素子の開発と(ii) その量産技術の開発の2つが研究開発目標となる。

2 要素技術の開発

2.1 酸化マグネシウム (MgO) トンネル障壁のTMR効果の理論

本節では、TMR効果の物理理論について説明する。体心立方晶 (bcc) Fe の (001) 結晶面と酸化マグネシウム (MgO) の (001) 結晶面は結晶格子の整合性が良いため、高品質な Fe (001) /MgO (001) /Fe (001) 構造の全単結晶 MTJ 薄膜が実験的に作製可能である。Fe や Co を主成分とする合金の bcc (001) 電極層と MgO (001) トンネル障壁の組み合わせでも、同様に高品質の単結晶 MTJ 薄膜の作製が可能である。2001 年に Butler ら^[5]と

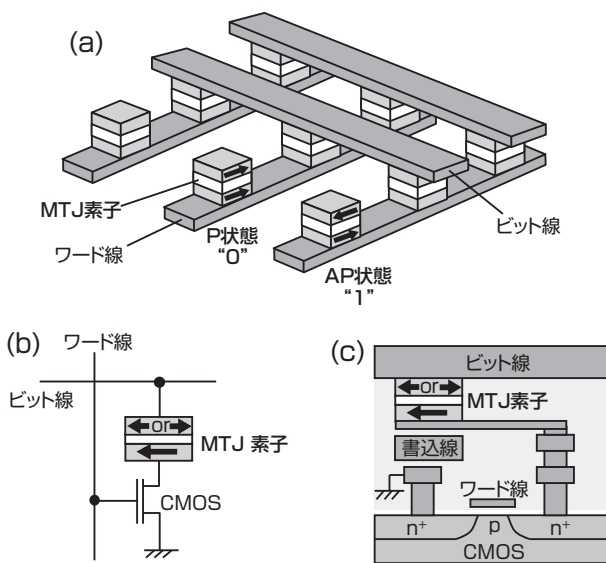


図6 不揮発性メモリ MRAM の (a) 概略図、(b) 回路図、(c) 断面図

Mathon ら^[6]は、Fe (001) /MgO (001) /Fe (001) 構造の単結晶 MTJ 素子に関する第一原理の理論計算を行い、1000 % を超える巨大な MR 比が理論的に期待できることを示した。この巨大 TMR 効果の物理機構は、以下に述べるように従来のアモルファス Al-O トンネル障壁の場合とは異なるものである。

従来のアモルファス Al-O トンネル障壁および結晶 MgO (001) トンネル障壁中の電子のトンネル過程の違いを図7に模式的に示す。強磁性電極中には種々の波動関数の対称性を持った伝導電子の状態（ブロッホ状態という）が存在する。アモルファス Al-O トンネル障壁の場合、障壁中では原子配列の対称性が崩れているため、電極中の種々のブロッホ状態が混ざり合ってトンネル伝導してしまう（図7 (a)）。電極中の各ブロッホ状態は、その軌道対称性に依存して正や負の MR 比を生じる。アモルファス Al-O 障壁では、これらのブロッホ状態が混ざり合って全てトンネル伝導してしまうため、各ブロッホ状態の MR 比の平均値（つまり MTJ 素子の MR 比）は大きな値にはならず、室温で 70 % を大きく超える MR 比は得られない。

一方、トンネル障壁を結晶性の MgO (001) にすると、全く違った特性が理論的に予想される。図7 (b) は、単結晶 MTJ 素子のトンネル過程を模式的に示したものである。トンネル電子は自由電子と仮定されることが多いが、実際の絶縁体トンネル障壁のバンドギャップ中に存在する電子の浸み出し状態（エヴァネッセント状態という）は特有の軌道対称性と特有のバンド分散を持っており、自由電子とは性質が大きく異なる。MgO (001) バンドギャップ内には、 Δ_1 (*spd* 混成の高対称状態)、 Δ_5 (*pd* 混成状態)、 Δ_2 (*d* 電子的な低対称状態) という3種類のエヴァネッセント状態が存在する。これらの状態のトンネル障壁中での状態密度の減衰率は各状態の軌道対称性に大きく依存し、 Δ_1 エヴァネッセント状態は、トンネル障壁中での状態密度の減衰が最も緩やかである（つまり減衰距離が長い）。したがって、この Δ_1 状態を介してトンネル電流が支配的に流れる

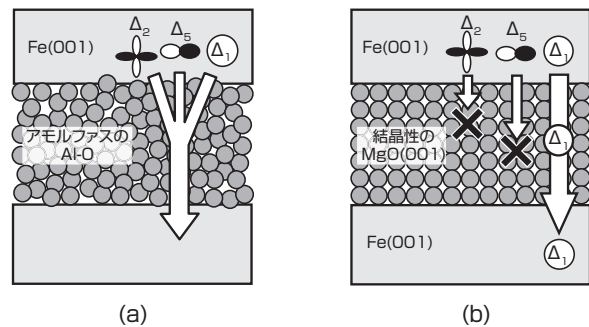


図7 電子のトンネル伝導の模式図。(a) アモルファス Al-O トンネル障壁の場合、(b) 結晶 MgO (001) トンネル障壁の場合

ことになる(図7(b))。理想的なトンネル過程では、Fe(001)電極中の Δ_1 ブロッホ状態のみがMgO中の Δ_1 エヴァネッセント状態と結合することができるため、支配的なトンネル経路はFe- $\Delta_1 \leftrightarrow$ MgO- $\Delta_1 \leftrightarrow$ Fe- Δ_1 となる。ここで注目すべきは、Fe(001)電極中の Δ_1 ブロッホ状態が非常に大きな正のMR比を生み出すことができる特殊な電子状態であるという点である。したがって、図7(b)のように Δ_1 対称性を持った電子だけが選択的にMgOトンネル障壁を透過することにより、1000%を超えるような巨大なMR比が理論的に期待される。なお、このような巨大なMR比の出現が理論的に期待されるのはbcc Fe(001)電極に限ったことではなく、FeやCoをベースにしたbcc構造の強磁性金属・合金の多くで、同様の巨大なMR比が理論的に予想される。

2.2 MgOトンネル障壁の巨大TMR効果の実現

2001年に出された結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果の理論予測と前後して、実際に単結晶Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)構造のMTJ素子を作製する試みが欧州の公的研究機関を中心に行われたが、不成功であった。従来のアモルファスAl-Oトンネル障壁を超える室温MR比は実現されなかったため、結晶MgOトンネル障壁に対する期待が失われていくとともに、巨大TMR効果の理論予測に対して懐疑的な見解も出されるようになった。このような状況下でも産総研では結晶MgOトンネル障壁の実験研究を続け、2004年に分子線エピタキシー(MBE)法を用いて高品質の単結晶Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)-MTJ素子の作製に成功した(図8)^{[7][8]}。この単結晶MgO-MTJ素子を用いて、2004年初頭にアモルファスAl-O障壁を超える室温MR比を世界で初めて実現した(図9の①)^[7]。この論文で、高い再現性や優れた電圧特性などの実用性も同時に実証されたため、結晶MgOトンネル障壁が大きく脚光を浴びる歴史的な転換点となった。産総研ではその後、結晶MgOトンネル障壁をさらに高品質化することにより、2004年の後半には室温で180%というさらに巨大なMR比を実現した(図9の②)^[8]。一方、この産総研の成果とほぼ同時期にIBMのParkinら

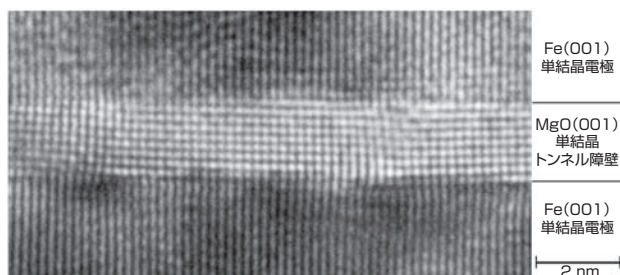


図8 単結晶Fe/MgO/Fe-MTJ素子の断面の電子顕微鏡写真^[8]

は(001)結晶面が優先配向した多結晶(配向性多結晶)MgO(001)トンネル障壁を用いてMTJ素子をスパッタ法により作製し、室温で220%のMR比を実現した(図9の③)^[9]。微視的に見れば配向性多結晶MTJ素子は単結晶MTJ素子と基本的に同じ構造であるため、同じ機構で巨大TMR効果が発現しているものと考えられる。このような結晶MgOトンネル障壁の非常に大きなTMR効果は、従来のTMR効果とは区別して「巨大TMR効果」(giant TMR effect)とも呼ばれている(著者らが命名)。なお、図9の①、②、③の成果(文献^[7-9])は2007年ノーベル物理学賞の公式文書^[1]の中でも紹介されており、歴史的な論文として世界的に認知されている。

また産総研では、高品質の単結晶MgOトンネル障壁を用いて種々の第1種基礎研究を行い、巨大TMR効果以外にも、MgO障壁の厚さに対するTMR効果の振動現象^{[8][10]}や、トンネル電子が媒介する層間換結合^[11]、複雑なスピン依存トンネルスペクトル^[12]など、アモルファスAl-Oトンネル障壁では観測されたことのない新現象の観測に成功している。これらの現象の物理機構の理解が進めば、トンネル効果の物理のさらなる発展につながると期待される。

2.3 結晶MgO-MTJ素子の量産技術の開発

上述のように、産総研では2004年に巨大TMR効果の実現という画期的な第1種基礎研究の成果をあげたが、この時点ではまだ結晶MgO-MTJ素子の産業応用に対して懐疑的な見方が産業界では支配的だった。その主な理由は、産総研が開発した単結晶MgO-MTJ素子およびIBMが開発した配向性多結晶MgO-MTJ素子は、どちらもデバイス応用には適さない素子構造であったためである。HDD磁気ヘッドやMRAMへの応用では、「SyF型ピン層」と呼ばれる下部構造(図4(c))が必須となる(詳細は割愛)。

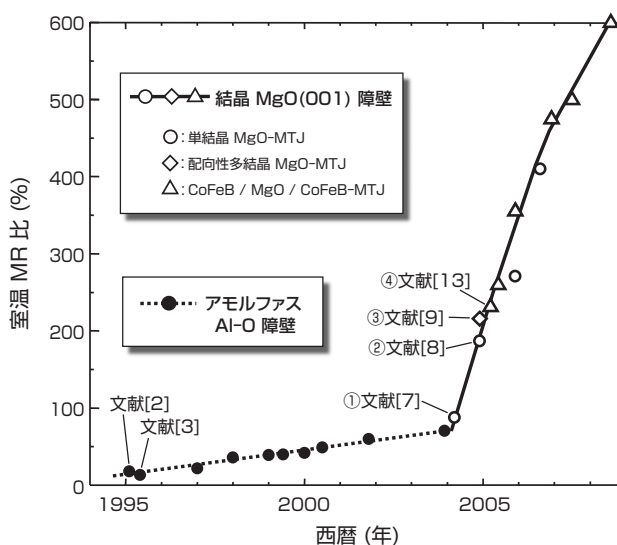


図9 室温MR比の改善の歴史

ここで、この“実用的な下部構造”の上に、MgO-MTJ 素子を作製できないという深刻な問題があった。その理由は、SyF 型ピン層が (111) 面配向した面心立方晶 (fcc) を基本構造としているためである。fcc (111) 構造は面内 3 回転対称の結晶構造を持つため、その上に結晶対称性が異なる MgO (001) 層 (面内 4 回転対称構造) を成長できない、という結晶成長上の根本的な問題があった。

産総研では当初、「面内 4 回転対称を持つ下部構造を新たに開発すればよい」と考え、デバイスメーカーに対して MgO-MTJ 素子技術の“売り込み”を行った。しかし、デバイスメーカーからの反応は、「下部構造の信頼性は、製品 (HDD や MRAM) の信頼性に直結する。これまで約 10 年の研究開発の末にようやく SyF 型ピン層という信頼性のある下部構造を開発したのだから、今さら新しい下部構造を開発することはできない (そんな余裕はない)」というものであった。確かに、製品化のためにはたくさんある要求を全て満たすことが必須となる。たとえ飛び抜けた性能を持つ新技術であっても、致命的な欠点の一つでもあると製品化にはたどり着けず、“死の谷”の中で文字どおり死ぬことになる。この点が本格研究を遂行する上での最難関であることは頭では分かっていたが、実際に経験してみても改めて実感させられた。この時点で“定石的な解決手段”は、

(i) 面内 4 回転対称構造の下部構造を力づくで新規開発する、(ii) 面内 3 回転対称の SyF 型ピン層の上に作製可能な新しいトンネル障壁を開発する、の 2 つであったが、どちらの場合も少なくとも 5 ~ 10 年の開発期間を要するであろう難題である。さらに、デバイスメーカーの要求は、「すぐに開発・生産ラインに導入できるレベルの完成された技術」というものであったため、そのようなソリューションを

産総研単独で開発することはほとんど不可能であった。このような状況下で、産総研は製造装置メーカーのキヤノンアネルバ (株) と共同研究を開始し、以下に述べる“画期的な解決策”を実現した。

製造装置メーカーという「製造装置を作っているだけ」と思われがちであるが、現在の製造装置メーカーは装置開発だけでなく、新材料や新デバイスの生産プロセス技術の開発という重責も担っている。本研究開発では、産総研の持つ優れた材料・デバイスの技術シーズと製造装置メーカーの持つ優れた製造プロセス技術・装置を統合することによって、上述の難題の解決を目指した (図 10)。特に、同社の生産用スパッタ装置は HDD 産業界における世界標準の製造装置であったため、同装置を用いて量産技術を開発できれば速やかにデバイスメーカーの生産ラインに技術移管することが可能となる。

キヤノンアネルバ (株) との共同研究で、下部の強磁性電極にアモルファス CoFeB 合金を用いると、その上に高品質の配向性多結晶 MgO (001) トンネル障壁層を室温で成長できることを発見した (図 11 (a))^[13]。この極めて特殊な結晶成長様式を用いた CoFeB/MgO/CoFeB 構造の MTJ 素子は、下部電極層がアモルファスであるために任意の地下層の上に作製することができ、しかも室温スパッタ成膜で作製できるために生産プロセス適合性と生産効率は理想的である。この CoFeB/MgO/CoFeB - MTJ 素子を 250°C 以上の温度で熱処理すると、図 11 のように界面からアモルファス CoFeB 層の結晶化が起り、MgO (001) 層との格子整合が良い bcc CoFeB (001) 構造に結晶化する^[14]。図 11 (b) の素子構造は、前述の単結晶 MgO-MTJ 素子や配向性多結晶 MgO-MTJ 素子と基本的に同じ構造であるた

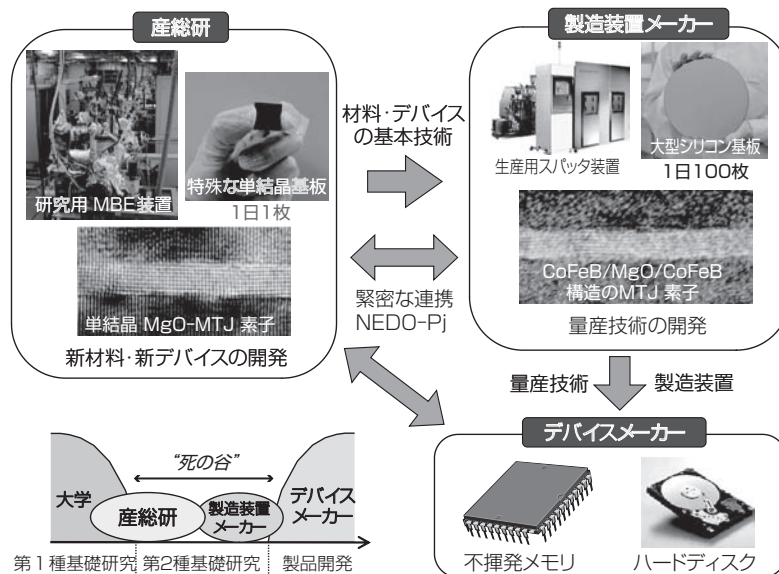


図 10 MgO-MTJ 素子に関する本格研究

め、同じ物理機構によって巨大 TMR 効果が発現する (図 9 の④)^[13]。この薄膜作製法は、「下地層から上に向かって順番に結晶成長させる」という結晶成長の常識を覆す独創的な手法である。

現在、この CoFeB/MgO/CoFeB 構造の MTJ 素子がスピントロニクス応用の主流技術となっており、これを用いた様々な研究開発が世界規模で精力的に進められている。その結果、現在までに室温で 600 % に達する巨大な MR 比が実現されている。ちなみに、キヤノンアネルバ (株) と共同研究を開始してから CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子の開発に成功するまでに要した期間は、わずか 1 年弱であった。このことは、結晶 MgO トンネル障壁の“素性の良さ”に依るところも大きい。産総研と製造装置メーカーの組み合わせが第 2 種基礎研究を遂行するのに非常に適していることも証明している。

3 アウトカムの創出

3.1 超高密度 HDD 用の MgO-TMR ヘッドの製品化

産総研とキヤノンアネルバ (株) が共同で開発した CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子と同社の製造装置は速やかに HDD メーカーの製品開発ラインに導入され、そこで製品開発に活用された (図 10)。そこで精力的な製品開発が行われた結果、HDD メーカー各社は 2007 年に MgO-MTJ 素子を用いた第二世代の TMR ヘッド (MgO-TMR ヘッド) の製品化に成功した。この MgO-TMR ヘッドが第一世代の TMR ヘッドに比べて格段に高性能であったため、最新の垂直記録媒体と組み合わせることで 250 Gbit/inch² (従来の 2 倍) を超える超高密度 HDD が実現された^[15]。さらに将来的に 1 Tbit/inch² の次々世代 HDD まで開発が可能となった。このような HDD の高記録密度化によって、現在主流の 3.5 インチ HDD を 2.5 インチ HDD で置き換えても、十分な大容量が得られるようになった。その結果、大容量 HDD の市場でも近い将来 2.5 インチ HDD が主流になると予想されている。1.1 節で述べたように、2.5 インチ HDD の消費電力は 3.5 インチ HDD の 5 分の 1 と小さいため、3.5 インチ HDD を 2.5 インチ HDD に置き換えることによって HDD 全体で大幅な消費電力の

低減が可能となる。また、HDD は DRAM や CPU と並ぶ巨大な市場を持つ産業である (市場規模は約 3 兆円/年)。磁気ヘッドは HDD の中で最も値段の高い部品であり、磁気ヘッド市場だけでも、約 6 千億円/年という巨大な市場規模を持つ。現在生産されているほぼ全ての HDD に MgO-TMR ヘッドが搭載されており、このことが本研究成果の社会的なインパクトの大きさを最もよく表している。

3.2 究極の不揮発メモリ“スピン RAM”の研究開発

不揮発エレクトロニクスの中核技術となる大容量・高速・高信頼性を兼ね備えた究極の不揮発性メモリ「スピン RAM」の実現を目指して、産総研は (株) 東芝などと共同で NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトを遂行している。ここで、スピン RAM とは、「スピントルク磁化反転」という新しい物理現象を書き込み技術に用いた MRAM のことであり、従来の磁界書き込み型 MRAM に比べて大容量化に適している。Gbit 級の大容量スピン MRAM を実現するには、MgO-MTJ 素子の巨大 TMR 効果による読み出し出力の増大のほかに、スピントルク磁化反転による低電力書き込み技術の実用化が不可欠となる。スピントルクとは、MTJ 素子に電流を流した際に伝導電子から磁性層の局在磁気モーメントにスピン角運動量が転移されることにより生ずるトルクのことであり、このスピントルクを用いることによって強磁性電極のスピン方向の反転 (つまり書き込み) が可能となる。スピントルク磁化反転は以前から GMR 素子や Al-O 障壁 MTJ 素子を用いて実現されていたが、磁化反転に必要な電流密度が非常に高かったため実用化は困難と考えられてきた。産総研では 2005 年に MgO-MTJ 素子におけるスピントルク磁化反転を世界に先駆けて実現した^{[16][17]}。さらに、産総研と大阪大学が共同で、スピントルクの定量的測定手法の開発^{[18][19]} や、スピントルクを用いた大出力マイクロ波発振の実証^[20] にも成功している。また最近では、ソニー (株) や東北大学など多数の機関の精力的な研究開発によってスピントルク磁化反転の低電流化が進められている。

現在、産総研は NEDO プロジェクトの支援のもと (株) 東芝らと共同で、新規開発の“垂直磁化電極”と結晶 MgO トンネル障壁を組み合わせた“垂直磁化 MgO-MTJ 素子”を用いて究極のスピン RAM の開発を進めている。現在進行中の産官学プロジェクトであり秘密事項も多いため、研究開発の詳細は割愛するが、すでに低電流かつ高速のスピントルク書き込みや優れたデータ保持特性などが実証されている。我々は、この垂直磁化 MgO-MTJ 素子を用いて究極の不揮発メモリの実現を目指し、長期的にはノーマリー・オフ電子機器による究極のグリーン IT 機器の

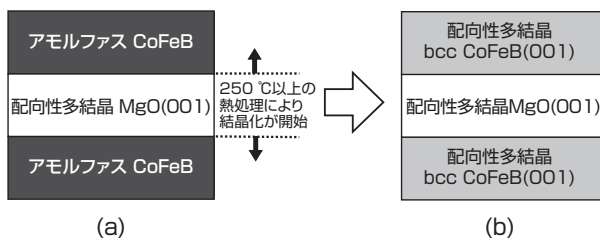


図 11 CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子の構造

実現を目指して研究開発を続けている。

4 おわりに

本章では、本格研究を完遂した自らの体験に基づいて感想を述べたい。産総研の掲げる本格研究のシナリオはあくまで概念論であり、実際にこれを遂行する具体的な方法は現場の個々の研究開発者が暗中模索しなければならない。概念論も重要ではあるが、差し迫った難題を数多く抱える研究開発の現場ではすぐに役に立つものではない。実際に基礎研究の成果を製品化に繋げようとする、技術的な課題だけでなく、社会ニーズとのマッチングの問題、さらに組織間の利害関係や人間関係などの複雑な要素が絡んでくる。特に組織間の利害関係が障壁となった場合、組織の上層部に任せていても膠着状態になるだけで何も進展しない。最後は現場の人間が組織に働きかけて問題の解決を図る必要があるため、現場の研究開発者間の信頼関係が重要となる。つまり、最後は“人対人”の問題である。

技術的な課題について言えば、基礎研究と製品開発の間にある“死の谷”は想像した以上に広く深く、産総研だけで死の谷を渡りきることはほとんど不可能と信じられた。特にエレクトロニクスのような成熟した産業では、製造装置メーカー、素材メーカー、デバイスメーカー、ファウンドリ、というような分業体制が進んでいるため、研究開発の各段階で適切な相手と連携することが必須となる。今回我々が行ったような産総研と製造装置メーカーがタッグを組むというやり方は、第2種基礎研究の一つのモデルケースと言える。製造装置メーカーの重要性はまだ一般には十分認識されていないため、今回のような成功事例を通じて産総研としても積極的に発信していくべきであると感じられた。

最後になるが、今回の研究開発において第1種基礎研究の成果から僅か3年という短期間で製品化に結びついた成功の要因を分析してみたい。成功の鍵を極論すれば、「技術シーズの筋の良さ」に尽きると言える。第1種基礎研究では何か飛び抜けた性能が一つあれば脚光を浴び、もてはやされる。しかし、製品開発においては、少なくとも10以上ある重要な項目の全てにおいて合格点を取らなければならない、致命的な欠点の一つでもあると製品化は不可能となる。たとえ著名な学術雑誌に論文が掲載されて脚光を浴びた“画期的な新技術”でも、その大半は何らかの致命的な欠点を持っており、ほとんどの場合、死の谷を越えることができない。ごく希に存在する本当に筋の良い技術シーズだけが死の谷を越えるポテンシャルを有しているが、この場合でも多くの協力者や賛同者が産業界から集まらなければ実用化は不可能である。ここで、いかにして有能な協力者や賛同者を集めるかが鍵となるが、技術シーズが本当に

筋の良いものであれば、適切なタイミングで適切な成果発信を行っていけば“自然に人は集まってくる”、というのが我々の感想である。筋の良い技術シーズは、有能な人間を引き寄せるものである。産業界には保守的な人間も多く、新技術に対して懐疑的な見解や批判が浴びせられることも多いが、新技術の筋の良さを見抜いて適切に評価できる開発者やマネージャーもまた必ず存在する。もし、技術シーズをいくら成果発信しても有力な協力者が集まらず産業界が全く動かないのであれば、それを産業界の保守性のせいにする前に、まず自分の技術シーズの筋が悪いのではないかと疑ってみた方がよい。

付記

本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) さきがけ、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ナノテク・先端部材実用化研究開発 (ナノテク・チャレンジプロジェクト)、ならびに NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトの支援により行われた。また本研究の一部は、キヤノンアネルバ (株)、および (株) 東芝との共同研究の一環で行われた。

用語説明

用語1: DRAM: コンピュータに用いられている大容量メモリ。キャパシタに電荷を蓄えることで情報を記憶する。電源を切ると、電荷が放電されるために記憶情報が消失する (揮発性メモリ)。

用語2: SRAM: CPU 中のキャッシュなどに用いられている揮発性メモリ。フリップ・フロップ回路の2値安定状態を用いて情報を記憶する。高速で高信頼性という利点を持ち、論理回路との整合性にも優れるが、高集積化に不向き、消費電力が大きいなどの欠点も持つ。

用語3: SSD: フラッシュメモリを記録媒体に用いた外部ストレージ。ハードディスク (HDD) と違い、機械的な駆動部分がないため、Solid State (固体) Drive の頭文字をとって SSD と呼ばれる。HDD に比べて消費電力が少なく、衝撃にも強いという利点を持つ。一方、容量当たりの単価は、現在のところ HDD に比べて1桁高い。

参考文献

- [1] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/phyadv07.pdf
- [2] T. Miyazaki and N. Tezuka: Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction, *J. Magn. Magn. Mater.*, 139, L231-L234 (1995).
- [3] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong and R. Meservey: Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 3273-3276 (1995).

- [4] 吉川 弘之: 第2種基礎研究の原著論文誌, *Synthesiology*, 1, 1-6 (2008).
- [5] W. H. Butler, X.-G. Zhang, T. C. Schulthess and J. M. Maclaren: Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches, *Phys. Rev. B*, 63, 054416-1-12 (2001).
- [6] J. Mathon and A. Umerski: Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction, *Phys. Rev. B*, 63, 220403R-1-4 (2001).
- [7] S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando and Y. Suzuki: High tunnel magnetoresistance at room temperature in fully epitaxial Fe/MgO/Fe tunnel junctions due to coherent spin-polarized tunneling, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, L588-L590 (2004).
- [8] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki and K. Ando: Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions, *Nature Mater.*, 3, 868-871 (2004).
- [9] S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant and S.-H. Yang: Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers, *Nature Mater.*, 3, 862-867 (2004).
- [10] R. Matsumoto, A. Fukushima, T. Nagahama, Y. Suzuki, K. Ando and S. Yuasa: Oscillation of giant tunneling magnetoresistance with respect to tunneling barrier thickness in fully epitaxial Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 252506-1-3 (2007).
- [11] T. Katayama, S. Yuasa, J. Velez, M. Y. Zhuravlev, S. S. Jaswal and E. Y. Tsymlar: Interlayer exchange coupling in Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 112503-1-3 (2006).
- [12] Y. Ando, T. Miyakoshi, M. Oogane, T. Miyazaki, H. Kubota, K. Ando and S. Yuasa: Spin-dependent tunneling spectroscopy in single-crystal Fe/MgO/Fe tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 87, 142502-1-3 (2005).
- [13] D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, M. Nagai, H. Maehara, S. Yamagata, N. Watanabe, S. Yuasa, Y. Suzuki and K. Ando: 230 % room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 86, 092502-1-3 (2005).
- [14] S. Yuasa and D. D. Djayaprawira: Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO(001) barrier, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40, R337-R354 (2007).
- [15] <http://www8.cao.go.jp/cstp/sangakukan/sangakukan2008/award.html>
- [16] H. Kubota, A. Fukushima, Y. Ootani, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and Y. Suzuki: Evaluation of spin-transfer switching in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, L1237-L1240 (2005).
- [17] H. Kubota, A. Fukushima, Y. Ootani, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and Y. Suzuki: Magnetization switching by spin-polarized current in low-resistance magnetic tunnel junction with MgO [001] barrier, *IEEE Trans. Magn.*, 41, 2633-2635 (2005).
- [18] A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and S. Yuasa: Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions, *Nature*, 438, 339-342 (2005).
- [19] H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama,

- S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and Y. Suzuki: Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions, *Nature Phys.*, 4, 37-41 (2008).
- [20] A. M. Deac, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, Y. Suzuki, S. Yuasa, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira and N. Watanabe: Bias-driven high-power microwave emission from MgO-based tunnel magnetoresistance devices, *Nature Phys.*, 4, 803-809, (2008).

執筆者略歴

湯浅 新治 (ゆあさ しんじ)

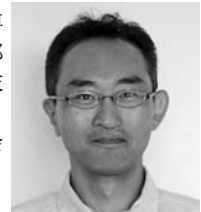
1996年3月慶応義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了、博士(理学)取得。1996年4月工業技術院電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)に入所。これまでトンネル磁気抵抗効果を中心としたスピントロニクスの基礎と応用の研究に従事。これまでの受賞歴は、内閣総理大臣賞(産学官連携功労者)



(2008)、朝日賞(2007)、日本IBM科学賞(2007)、東京テクノフォーラム21賞(2006)、産総研理事長賞(2006)、丸文学術賞(2006)、市村学術賞(2005)、文部科学大臣若手科学者賞(2005)、つくば奨励賞(2003)、他10件。本論文では、MTJ薄膜作製、磁気抵抗効果の測定、キャノンアネルバ(株)との連携およびNEDOナノテク・チャレンジプロジェクトの責任者、全体構想の取りまとめを担当した。

久保田 均 (くぼた ひとし)

1994年3月東北大学大学院工学研究科博士課程修了、工学博士取得。東北大学工学部助手、助教などを経て、2004年4月産業技術総合研究所に入所。これまでスピントロニクスの基礎と応用の研究に従事。日本磁気学会論文賞(2007)、原田研究奨励賞(1998)、日本応用磁気学会学術奨励賞(1997)を受賞。



本論文では、スパッタ法によるMTJ薄膜の作製、MTJ素子のナノ加工、スピントルク磁化反転およびスピントルクの測定を担当した。

福島 章雄 (ふくしま あきお)

1991年3月東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、理学博士取得。1993年4月工業技術院電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)に入所。これまでにスピントロニクスの応用研究に従事。応用物理学会論文賞(2007)を受賞。本論文では、MTJ素子のナノ加工技術の開発、スピントルク磁化反転およびスピン・ダイナミクスの測定技術の開発を担当した。



薬師寺 啓 (やくしじ けい)

2001年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了、工学博士取得。東北大学金属材料研究所 助手などを経て、2006年6月産業技術総合研究所に入所。これまでにスピントロニクスの応用研究に従事。トーマス科学技術振興財団研究奨励賞(2006)、原田研究奨励賞(2005)、応用物理学会講演奨励賞(2004)、日本応用磁気学会優秀講演賞



(2003)、他1件を受賞。本論文では、垂直磁化 MTJ 素子の開発、スピントルク磁化反転の研究、(株)東芝との共同研究開発を担当した。

長浜 太郎（ながはま たらう）

1999年3月京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。博士（理学）。日本学術振興会特別研究員などを経て、2002年3月産業技術総合研究所に入所。これまでにスピントロニクスの基礎研究に従事。応用物理学会論文賞（2005）、日本応用磁気学会論文賞（2002）を受賞。本論文では、MTJ 薄膜の作製と磁気抵抗効果の測定を担当した。



鈴木 義茂（すずき よししげ）

1984年3月筑波大学理工学研究科修士課程攻修了。1984年4月工業技術院電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）に入所。博士（工学）。エレクトロニクス部門スピントロニクス研究グループ長などを経て、2004年3月より大阪大学大学院基礎工学研究科 教授、産業技術総合研究所 客員研究員を兼務。これまでにスピントロニクスの基礎と応用の研究に従事。内閣総理大臣賞（産学官連携功労者）（2008）、応用物理学会論文賞（2005、2007）、他2件を受賞。本論文では、スピントルク磁化反転およびスピン・ダイナミクスの測定・評価手法の開発を担当した。



安藤 功児（あんどう こうじ）

1975年3月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。1975年4月電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）に入所。工学博士。1984年11月エレクトロニクス研究部門 副研究部門長。これまでに磁気光学効果と磁性半導体を中心としたスピントロニクスの基礎と応用の研究に従事。応用物理学会フェロー表彰（2008）、日本応用磁気学会業績賞（2007）、応用物理学会論文賞（2005）を受賞。本論文では、NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトおよび(株)東芝との共同研究の責任者、全体構想の取りまとめを担当した。



(iv) 破壊電圧が十分に高いこと、(v) 製品レベルでの信頼性、などいろいろな要求を満たす必要があります。我々のこれまでの経験や知見の蓄積に基づいて、どの材料系が最も有望であるかを多角的に考察した結果、「結晶 MgO 以外は難しい」という結論を実験を開始する前に導き出しました。ただし、「MgO なら問題ない」ということでは決してありませんでした。研究開発の開始前に危惧された最大の問題は「生産プロセス適合性」でしたが、この点はキャノンアネルバ（株）との共同研究で CoFeB/MgO/CoFeB が開発されたことにより解決されました。CoFeB/MgO/CoFeB 開発の成功要因は、キャノンアネルバ（株）の優秀なエンジニアの活躍によることも大きいですが、セレンディビティの要素も大きかったと思います。また、製品レベルでの信頼性は、研究開発の最終段階にならないと判断がつかない問題ですが、研究開発の初期段階から「MgO の信頼性は高い」という感触は持っていました。これは、論理的な考察に基づいた結論ではなく、研究現場の人間だけが感じ取れる直感です。

議論2 電力消費の低減

質問・コメント（小林 直人）

不揮発性メモリを開発することが究極のグリーン IT 機器の実現に繋がることの記述があります。確かに不揮発性メモリが実用化することによってメモリ動作に必要な電源電力の大幅な低減は実現されるでしょうが、一方で図1に書かれているような不揮発 CPU の実現がないと全体での電力消費の低減は望めないと思います。そこで質問です。①現状でスピン RAM の実現で達成される消費電力低減と、将来不揮発 CPU の実現によりさらに低減される消費電力の割合はどの程度になるのでしょうか。②将来の不揮発 CPU の実現には、スピン FET などの実現が不可欠かと思われます。その分野の研究開発の展望はいかがでしょうか。

回答（湯浅 新治）

① DRAM・SRAM を MRAM・スピン RAM で置き換えるだけでは、消費電力の低減はあまり期待できません。ご指摘のとおり、抜本的な低消費電力化のためには、メモリの不揮発化と CPU の不揮発化をセットで実現する必要があります。その第一段階として DRAM・SRAM の不揮発化がある訳ですが、これ自体のメリットとしては (i) 近い将来訪れる SRAM・DRAM のスケーリング限界の打開、(ii) システム LSI 中のメモリをスピン RAM だけで構成することによる高集積化と低価格化、などがあげられます。

② スピン FET のような不揮発記憶機能を持ったスイッチング素子を実現されれば理想的ですが、既にある記憶素子（MTJ 素子や強誘電メモリ素子など）と CMOS を組み合わせることで不揮発性論理回路の設計が可能という意見もあります。いずれにせよ、CPU の不揮発化によるノーマリー・オフの実現は、相当な時間と投資を要する壮大なプランですので、20 年スケールでの研究開発が必要と予想されます。

質問・コメント（大蒔 和仁：東洋大学総合情報学部）

特に「はじめに」において、ノーマリー・オフのコンピュータの基幹技術として TMR 技術が提案されています。今のコンピュータはキー入力で止まっているように見えますが、その間通信回線を覗いたり、表示装置の走査をしたり、たまには暗号化のアルゴリズムを計算していたり、と忙しく働いていて、必ずしも止まっているわけではないと思います。ノーマリー・オフのコンピュータについてアーキテクチャ上の若干の説明補強が必要と感じました。

回答（湯浅 新治）

私のデスクトップパソコンには液晶モニター、HDD2 台、DVD ドライブ、LAN ケーブル、USB メモリが接続されており、ウィンドウズ上ではワープロソフト、インターネット・ブラウザ、メールソフト、プレゼン資料作成ソフト、表計算ソフトが同時に起動していますが、それでも CPU 使用率をモニターすると通常 1~4 % 程度しか使われてお

査読者との議論

議論1 ブレークスルーの達成

質問・コメント（小林 直人：早稲田大学研究戦略センター）

本研究開発は、① MgO を用いた巨大 TMR 効果の実現と、② CoFeB/MgO/CoFeB という極めて大きな 2 重のブレークスルーを達成することによって、短期間に実際に売れる商品の開発というアウトカムまで結びついた稀有な例であると思います。そのそれぞれのブレークスルーがなぜ達成できたのかは本文で概ね理解できましたが、その材料やプロセスの選択課程（他の材料やプロセスを排除した理由なども含めて）を（必要であれば研究開発体制を含めて）説明していただけますか。また有効なセレンディビティなどもあったのであれば、是非記述をお願いします。

回答（湯浅 新治）

成功要素の半分は狙って達成したもの、残りの半分は幸運（セレンディビティ）によるもの、という認識です。理論的には MgO 以外にも有望な結晶性のトンネル障壁材料が幾つもあります。まず考えるべきことは、どの理論予測が正しいか（どの理論予測に賭けるべきか）、という問題です。さらに、実用化のためには、(i) 厚さを nm まで薄くしてもピンホールが空かないこと、(ii) 金属電極材料との界面で反応や原子拡散が起こらないこと、(iii) 低温成膜で結晶化すること、

らず、5%を越えることは希です。つまり、バックグラウンドで様々な処理をしても、大半の時間はCPUが待機状態ということです。揮発性を基本とした現在のエレクトロニクスでは、低負荷時にはCPUのクロックや電源電圧を下げることで消費電力の低減を計っていますが、この手法には必ずと限界があります。長期的には、ノーマリー・オフによる抜本的なグリーンIT技術の実現が必要と考えます。

議論3 スイッチングスピード

質問・コメント（大蒔 和仁）

門外漢が感じることは、磁気の動きを利用するときのスイッチングスピードの問題だと思います。TMR素子のように、磁気を使って省エネ、ノーマリー・オフコンピュータの実現は達成されるとして、そのスイッチングスピードは、現在のシリコン技術と比べて明る見通しがあるでしょうか。その言及が欲しいと思いました。

回答（湯浅 新治）

磁気のスイッチングスピードは本質的に高速であり、数ナノ秒より早いスイッチングスピードが実現できます。現在CPU内で用いられている高速メモリSRAMと同程度の動作速度を持つ不揮発メモリが実現可能です。ただし、現在のシリコン技術よりも画期的に速くなることはありません。つまり、現在技術と同程度の動作速度を維持しながら、不揮発性による画期的な低消費電力化を実現することが目標となります。動作速度について、1.3節に簡単な説明を加えました。

議論4 理論的背景

質問・コメント（小林 直人）

最初のブレイクスルーであるMgOを用いた巨大TMR効果の実現の契機は、ButlerやMathon等による第一原理計算があったからとの説明がありますが、彼等がMgOを取り上げた背景等について説明してもらえるとよいと思います。我が国では、理論的な寄与はあまりなかったのでしょうか。

回答（湯浅 新治）

ButlerやMathonらは最初から巨大TMR効果を予想していたわけではなく、厳密な第一原理計算が可能な典型例としてFe/MgO/Fe構造を最初にしたようです。従来のアモルファスAl-Oトンネル障壁では、アモルファスの無秩序構造のために第一原理計算が不可能でした。これに対してFe/MgO/Fe構造は格子整合の良い結晶であり、しかも実験的にも実現できる可能性があったため、Fe/MgO/Fe構造を選んだと聞いています。このような理由からFe/MgO/Feの理論計算が行われた結果、巨大TMR効果が理論的に予言されたことは、セレンディピティの一種と言えます。2001年当時、日本国内でこのような理論計算を行った研究者は、残念ながらいませんでした。計算技術自体は特に難しいものではなく、むしろ「当たり前すぎる理論計算」とも言われていたと記憶しています。しかし、これは「コ

ロンブスの卵」のようなものであり、当たり前すぎる計算を実際に行って、その結果を実験家に提示したことには、高く評価されるべきことだと思います。

議論5 技術シーズを見極める目

質問・コメント（小林 直人）

5章「おわりに」に、「技術シーズの筋の良さ」が極めて重要であると言う興味深い指摘があります。そこで質問です。①本研究開発は「技術シーズの筋」が極めてよかったということは非常によく分かりますが、それは「偶々（たまたま）うまく行った」からだと考えられないでしょうか。あるいは、最終ゴールまでたどり着いたものだけが、結果的に「技術シーズの筋が良かった」ということにはならないでしょうか。もしそうでないとすると、「技術シーズの筋の良さ」を予め見極める目、勘の良さやセンス（江崎玲於奈氏が言っているテイスト？）は、どのように養ったらよいでしょうか。②実際に技術シーズの筋がよいかどうかは、ある程度まで技術開発が進まないとわからないものだと思います。死の谷を乗り越えるためには、いくつものハードルを乗り越えなくてはいけません、そのそれぞれの段階で「技術シーズの筋の良さ」をどのように判断できるでしょうか。つまり技術開発を継続するか断念するかの「見極め」はどのように判断すればよいでしょうか。

回答（湯浅 新治）

ご質問の①と②について、まとめてお答えします。議論1のところでも簡単に述べましたが、実用化のために必要な多種多様な要求性能のうち、製品レベルでの信頼性や歩留まりなどの項目を満たせるかどうかは、本格研究の最終段階にならないと分かりません。したがって、本当に筋が良い技術かどうかは製品化にたどり着いてみないと分からない、と言うこともできます。しかし、逆に「かなり筋の悪い技術」については、研究開発の開始前、あるいは初期段階で判断できると思います。私自身は、たくさんある技術シーズの中で筋の悪い技術は早い段階でどんどん切り捨てるように心がけています。技術の筋の善し悪しを見抜くには、広い見地で多角的かつ論理的に事象を分析できるセンスが必要だと思います。これは、一つの事象を深く掘り下げる能力とは相反するものかもしれません。これら二つの能力の両方が本格研究の遂行には欠かせませんが、一人の研究者がその両方を持つことは難しいかもしれません。一つの事象を深く掘り下げる能力にたけた研究者の方が多数派で、広い見地で多角的に事象を分析できる研究者は少数派のように思われます。研究者が技術の筋のよしあしを判断するセンスに欠けている場合は、研究開発マネージャーがその部分を補完すべきと考えます。技術シーズの筋を判断するセンスをどのように養えばよいかは私にはよく分かりませんが、研究開発マネージャーになる人はそういうセンスを持って欲しい、というのが私からの希望です。

ガス中微量水分測定信頼性の飛躍的向上

— 計量トレーサビリティの確立と計測器の性能評価 —

阿部 恒

産総研で確立した微量水分の国家標準をもとにして、ガス中の微量水分測定の信頼性が近年になって飛躍的に向上した。その結果、従来の微量水分測定法の問題点が明らかになった。本稿では、微量水分測定の信頼性向上を目標に産総研が策定したシナリオ、世界的にも独自の方法による我が国の微量水分国家標準の開発、国家標準を産業現場につなぐ計量トレーサビリティ体系の整備、そして国家標準との比較測定によって明らかとなってきた市販計測器の課題を述べる。微量水分測定の信頼性の飛躍的向上により、産業現場で使われる高純度ガスの適確な評価が可能になった。

キーワード：微量水分、一次標準、湿度、トレーサビリティ、信頼性

A marked improvement in the reliability of the measurement of trace moisture in gases

– Establishment of metrological traceability and a performance evaluation of trace moisture analyzers –

Hisashi Abe

The reliability of the measurement of trace moisture in a gas was improved markedly owing to the establishment of a trace moisture standard at AIST. As a result, problems with conventional methods for measuring trace moisture in gases were revealed. This article presents the scenario which we adopted to improve the reliability of measurement of the trace moisture, the development of a national trace moisture standard, the provision of a metrological system traceable to a national standard for industrial measurements, and problems revealed of trace moisture analyzers available commercially through comparisons with the national standard. This improvement makes it possible to evaluate properly the quality of high purity gases used in industry.

Keywords: Trace moisture, primary measurement standard, humidity, metrological traceability, reliability

1 はじめに

水は人類にとって欠かすことのできない大切な物質であるが、その一方で、高真空または高純度ガスを必要とする科学実験や製造プロセスなどでは、残留不純物としてよく問題にされる物質でもある。これは水が大気中に大量に存在し、多くの物質表面に対して高い吸着性を示すからである。すなわち、外部から浸入する可能性が常にある物質であり、一度内部へ入り込めば、すぐにどこかへ吸着する性質があるため、水は除去しづらい極めてやっかいな不純物と考えられている。したがって、いかなる科学実験や製造プロセスにおいても、要求される条件が、より高真空へ、より高純度へと進めば、いずれどこかで残留水分の影響を考慮する必要性が生じる。実際、半導体製造分野では、デバイスの急速な高集積化・微細化に伴って、製造過程で使用される材料ガスの高純度化が進み、近年、材料ガス中の残留水分の微量レベルでの制御が重要な課題となっ

ている。例えば、ウエハ表面の汚染防止用に使われる高純度窒素ガスの場合、物質質量分率（モル分率）で数 nmol/mol (ppb) 以下（大気圧下での霜点^{用語1}が-100℃以下に相当）の残留水分制御が必要とされている^[1]。また、窒化ガリウム（GaN）系の発光ダイオードでは、材料ガス中の1 μmol/mol (ppm) 以下のごく微量な残留水分（霜点が-75℃以下に相当）によって、発光効率の著しい低下が見られた報告がある^[2]。こういった微量レベルでの水分制御や残留水分の影響の正しい理解には、信頼性の高い水分測定が不可欠となる。

図1は我が国において、現在までに国家標準が確立されている湿度領域を示している。ガス中の水分量（湿度）を測定する計測器はそれぞれの領域ごとに様々な種類^[3]のものが販売されており、多くの製造現場等で使用されている。しかし、1 μmol/mol (ppm) 以下の微量水分領域になると、それらの計測器を同じ計測現場で使用しても、機器ごとに

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

Original manuscript received May 13, 2009, Revisions received June 25, 2009, Accepted July 6, 2009

指示が大きく異なることが多々ある。このような問題が生じた場合、通常は国家標準に基づいて計測器の校正を行うことで解決を図るが、微量水分領域においては、ガス中水分量の国家標準が最近まで無く、校正を行うこと自体が困難であった。それでも必要が生じた場合は、ユーザーや計測器メーカーがそれぞれ何かしらの方法を用いて計測器の校正を試みてきた。しかし、それでも依然として計測器の指示の不一致がよく見られており、微量水分領域での水分測定信頼性は決して高いものとは言えなかった。

この問題に対応するため、産業技術総合研究所(産総研)では微量水分の国家標準(微量水分標準)の確立を行った。ここでは国際単位系へのトレーサビリティが直接確保された一次標準^{用語2}と呼ばれる計量学的に最も質が高い標準を開発した。それから微量水分標準の供給(校正サービス)体系の整備を進めた(図2参照)。また、微量水分標準の開発過程において、キャビティリングダウンレーザー分光法(CRDS)と呼ばれる原理に基づく新しい微量水分計が優れた微量水分測定能力をもつことが分かってきた。このように、微量水分の国家標準が確立され、国際単位系へのトレーサビリティが確保された校正サービス体系が整い、高性能な計測器が市場で入手可能になったことから、近年、微量水分測定信頼性が飛躍的に向上した。その一方で、従来の微量水分計測法の問題点が少しずつ明らかになってきている。

本稿では、微量水分測定信頼性向上を目標として産総研が策定したシナリオ、それに沿った研究活動、研究成

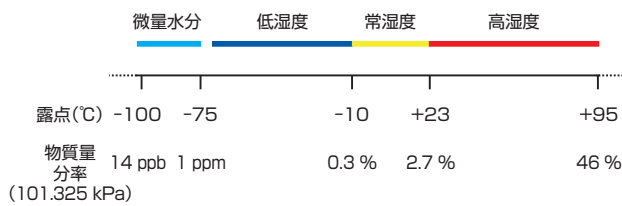


図1 ガス中水分(湿度)の標準供給の現状
霜点-75℃～-70℃の範囲は現在校正サービス準備中

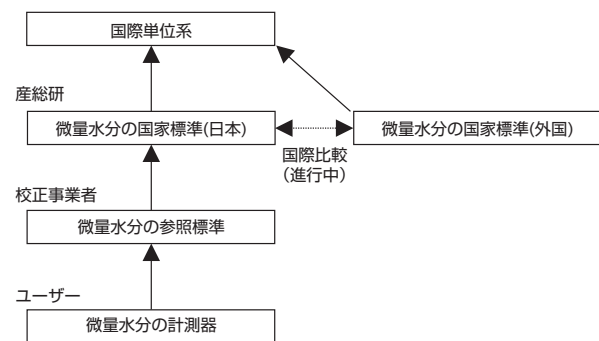


図2 微量水分測定のためのトレーサビリティ体系

果によって生じた微量水分測定信頼性に関する近年の状況変化について紹介する。

2 微量水分測定信頼性向上のためのシナリオと目標

産業現場等で微量水分測定が高い信頼性で行われるためには、①微量水分計の目盛りの基礎となる微量水分の国家標準の確立、②計測器の校正サービス体系の整備、③校正対象となる高性能な計測器が必要である。これらの関係を図3に示す。①～③を実現のため解決すべき各課題を、図中左から2列目に示してあり①～③と矢印で結んでいる。これらの課題は、国立標準研究機関、校正事業者、計測器メーカーによる解決が期待されるもので、それぞれが主に取り組むべき課題と考えられるものを矢印でつないでいる。①～③に注目すると、②については国際単位系へのトレーサビリティが確保された校正サービス体系の整備が重要であり、また③については国家標準に基づく実験での性能実証が極めて有効なため、この3つの中では①が最優先事項と考えた。さらに、①は国立標準研究機関が取り組むべき課題であったため、産総研は2001年にガス(窒素)中の微量水分標準の確立を目標とした研究に着手した。微量水分の発生下限の目標は大気圧下での霜点-100℃に相当する14 nmol/mol (ppb)とし、上限は現行の低湿度標準の供給範囲の下限を考慮して-75℃に相当する1 μmol/mol (ppm)とした。測定の不確かさは霜点-100℃付近で0.5℃に相当する、相対標準不確かさ11%とした。これは英国物理学研究所(NPL)が当時目標としていた霜点-95℃での標準不確かさ0.5℃^[4]をしのぐものとして設定した。②については、標準整備後のしばらくは産総研の国家標準器を使った依頼試験による校正サービスを個別ユーザーに対応し、それと並行して校正事業者を募ることとした。③については、国家標準確立後に、従来から使われていた計測器の評価を国家標準に基づいて行い、性能が高い機種を見出すことを当初考えた。以下このシナリオに沿って行った研究活動について述べる。

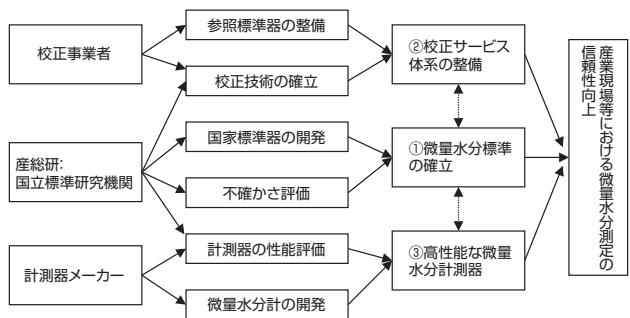


図3 微量水分測定信頼性向上のための要素技術と統合のシナリオ

3 微量水分の国家標準の確立

微量水分の国家標準は、標準値の分かった一定の水分を含むガスを発生させる装置（微量水分発生装置）と、その標準値の不確かさ評価を行うことで実現される。国家標準を確立するとき、一般に、自国の国家標準器を外国の国家標準器で校正してもらうことで最終的に国際単位系にトレーサブルにする場合があり、開発途上国はこの方法をとることが多い。一方多くの先進国では、一次標準と呼ばれる自ら国際単位系に直接トレーサブルな標準を開発する。技術力、経費、国内産業のレベル等を総合的に勘案してどちらにするかを定めるが、我が国の場合高度な半導体産業やプロセス産業を有することから、産総研としては自ら一次標準を開発することとした。

その上でさらに重要な決定は、微量水分発生装置の発生方式の選択を行うことであった。ここで産総研は、他国の標準研究機関とは異なる非常にユニークな選択を行った。その理由は、我々がユニークな方式の具体的構想をもっていたこと、ユニークな方式がうまくいけば世界最高精度を達成することも不可能ではないこと、また世界的に見て異なる複数の方式で国家標準を維持したほうが、1種類の方式で統一するよりも、標準の信頼性を高められることである。

3.1 発生方式の選択

微量水分の発生にはいくつかの方法があるが、産総研は拡散管法と呼ばれる方式を採用した。図4は、拡散管方式微量水分発生装置^[5]の概念図を示している。ステンレス等の金属を材料とした、水溜めと拡散管からなる拡散管セルを、温度・圧力が制御された発生槽内に入れる。セルの水溜め内部には水が入れてあり、中の温度に応じた圧力の水蒸気が発生している。水蒸気は拡散管の中を通り発生槽内へと移動する。これを流量制御された乾燥ガスと混合することで、微量水分を発生させる。ガス中の水の物質分率は、単位時間に蒸発した水分の質量測定（水分蒸

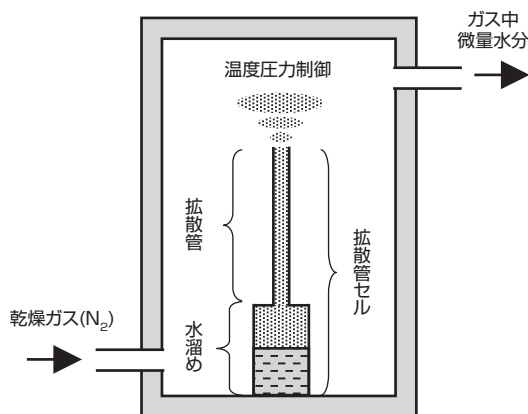


図4 拡散管方式微量水分発生装置の概念図

表1 拡散管法と霜点発生法の比較

発生方式	拡散管法	霜点発生法
飽和の実現と確認	必要なし	必要
蒸気圧式と水蒸気増加補正係数	必要なし	必要
微小な質量変化の測定	必要	必要なし
ゼロガス	必要	必要なし
一次標準としての実績	なし	あり

発速度の測定)と単位時間に流れた乾燥ガスの質量測定(質量流量の測定)から決定する。

一方、産総研以外の他国の標準研究機関の多くは、低湿度・微量水分発生装置の中核に霜点発生法と呼ばれる方式を採用している。図5に霜点発生装置の概念図を示す。温度一定の水の水蒸気で飽和している飽和槽内にガスを流し、水蒸気とガスとを混合することで湿潤ガスを発生させる。飽和が完全となり平衡状態が実現していれば、水の温度と等しい霜点の湿潤ガスが発生する。低温の水(-75℃以下)を使えば微量水分の発生も可能である。発生ガス中の水の物質分率は、水の温度測定と発生槽内の圧力測定、それに水の蒸気圧式と水蒸気増加補正係数^{用語3 [6][7]}を使って決定する。簡単な原理だが、湿度の発生法としては信頼性が高い方法である。

表1にこれら2つの方式の長所・短所の比較を示す。拡散管法の長所として、霜点発生法で必要とされる飽和の実現・確認が不要というのがある。霜点発生法では飽和槽での完全な飽和が前提となるが、低温領域へ行くほど、氷からの蒸発水分量が少なくなることや、蒸気圧が温度変化に敏感になることから、外乱の影響を受けやすくなり、平衡状態の実現が困難になる。さらに、飽和が実現されていたとしても、その確認を行うことは容易ではなく、そ

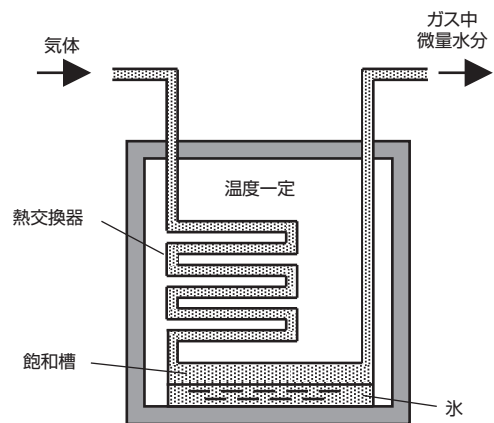


図5 霜点発生装置の概念図

の結果不確かさを大きく取らざるを得なくなる。拡散管法ではこれらの問題を回避できる。次に、発生ガス中の水の物質質量分率の決定に関しては、霜点発生法は水の蒸気圧式と水蒸気増加補正係数が必要になるが、拡散管法は水分蒸発速度と乾燥ガスの質量流量の測定だけから決定できるので、国際単位系へのトレーサビリティが明確でより直接的な方法と言える。水の蒸気圧式としてよく使われている Sonntag の式^{[7][8]}は-100℃までしか有効ではないため、霜点発生法では-100℃以下の領域は Sonntag の式を使う限り水の物質質量分率の決定ができない。さらに水蒸気増加補正係数については-35℃以下では実験の報告がなく、この温度以下の領域では信頼性が低いとの指摘がある^[9]。拡散管法では、蒸気圧式や水蒸気増加補正係数を必要としないので、これらは全く問題にならない。

一方、拡散管法の短所としては、水分蒸発速度測定の必要性が挙げられる。拡散管方式による 14 nmol/mol (ppb) の微量水分発生では、水分蒸発速度は約 14 μg/h (≈780 nmol/h) と極めて小さな値となるので (乾燥ガスを窒素とし、0℃・101.325 kPa 換算での流量 20 L/min の場合)、これをいかに不確かさを小さく測定できるかが鍵となる。他に、ゼロガスの問題がある。拡散管法では乾燥ガスの中に水分が残留していると、それが不確かさとなるため、これを限りなくゼロに近づけたゼロガスと呼ばれる乾燥ガスを準備する必要がある。さらに、拡散管法は今まで微量水分の一次標準として確立された実績がなかった。すなわち、標準確立に必要な知識・経験・技術の蓄積が乏しく、装置設計や不確かさ評価法の開発を、ほとんどゼロに近い状態から始める必要がある。

以上の拡散管法、霜点発生法それぞれの長所・短所を十分に踏まえた上で、既に述べたように、産総研は拡散管法を選択した。この理由として第一に、霜点発生法における飽和の実現・確認の問題を重要視したことが挙げられる。産総研 (当時：工業技術院 計量研究所) では 1999 年頃から微量水分標準の開発の検討を始めたが、この頃他国の研究機関では、既に霜点発生法を中核とした微量水分標準の開発が進められていた。しかし、霜点-100℃付近の微量水分発生で不確かさ評価の報告まで行われた研究例は、筆者の知る限りその当時まだ無く、その主な理由を-100℃付近での飽和の実現と確認の困難さにあると考えていた。第二に、今後の微量水分計測の方向性があった。国際半導体技術ロードマップ 2000 年度版^[10]では、要求される水分制御が当時既に霜点-100℃以下となっており、今後さらに低いレベルでの制御が必要になると報告されていた。この領域を霜点発生法で対応した場合、蒸気圧式や水分増加補正係数の信頼性が問題になると考えた。

第三に、磁気吊下天秤と呼ばれる新しい天秤の存在が挙げられる^[11]。磁気吊下天秤は 1990 年代の前半に機能性・利便性の高い製品が市販されるようになり、90 年代の半ばから後半にかけて、これを使った研究報告が多くなされるようになった。そして 2000 年頃にはその性能の高さが実証されてきていたので、拡散管法で問題となる水分蒸発速度測定は、磁気吊下天秤を導入することで解決できると考えていた。最後に、計量学 (メトロロジー) を専門とするものとして、拡散管法の国際単位系へのトレーサビリティの明確さが実に魅力的であったことも理由として挙げておく。

3.2 一次標準器の開発

拡散管方式微量水分発生装置で発生するガス中の微量水分の物質質量分率は次式で与えられる：

$$x_w = \frac{N + N_b + Fx_b}{N + N_b + F} \approx \frac{N}{F} + \frac{N_b}{F} + x_b \quad (1)$$

ここで、

x_w : 発生させたガス中微量水分の物質質量分率 [mol/mol]

N : 単位時間あたりに拡散管から蒸発発生する水分の物質質量 [mol/h]

N_b : 吸着・脱離により単位時間あたりに移動する水分の物質質量 [mol/h]

F : 単位時間あたりの乾燥ガスの流量 [mol/h]

x_b : 乾燥ガス (ゼロガス) 中に含まれている残留水分の物質質量分率 [mol/mol]

である。拡散管法による一次標準器の開発方針を (1) 式で簡単に説明すると次のようになる：(1) 式右辺の各物理量の測定方法を確立する。 $x_w \sim 14$ nmol/mol と $N \sim 780$ nmol/h において、 $x_w \gg x_b$ と $N \gg N_b$ の条件を満たすように装置を開発し、

$$x_w \approx \frac{N}{F} \quad (2)$$

と表せるようにする。 N と F を安定化させる (ばらつきを小さくさせる)。 N と F を不確かさを小さく測定する技術を開発し、(2) 式を使って標準値 x_w を決定できるようにする。

ただし、実際の開発はこの順序では行われていない。また、開発すべき技術項目は大小含めて多数あり、そのうちの 1 つの技術が高まると、他の技術の見直しが必要になるなど、開発は決して一方向に進んだものではなかった。

3.2.1 水分蒸発速度の測定

(2) 式の N は水分蒸発速度 [g/h] の測定を行い、水の

モル質量 (18.02 g/mol) で割ることによって求まる。水分蒸発速度の測定については、3.1 で述べたように、磁気吊下天秤を使うことを計画した。磁気吊下天秤は、図 6 に示されるように、発生槽内の拡散管セルを、磁力によって外部の電子天秤に吊り下げられる構造をしている。これにより、蒸発によるセルの質量減少速度 (水分蒸発速度) を、水蒸気発生を中断させることなく、連続的に測定することができる。産総研で導入した磁気吊下天秤は、微量水分発生槽の一部にもなるので接ガス面は電解研磨とし、12 g 程度の質量の拡散管セルの質量変化を 1 μg の分解能で測定でき、国際単位系へのトレーサビリティ確保のため外部分銅による校正も可能とするなど、微量水分標準の開発のための特別仕様としている。図 7 (a) は磁気吊下天秤を使った水分蒸発速度の測定例である。5.1 $\mu\text{g}/\text{h}$ の小さな水分蒸発速度でも十分測定が可能であることが分かる。図 7 (b) は、磁気吊下天秤を使わずに測定した例である。これは拡散管セルの質量測定の度に発生槽を大気開放し、発生槽内にあるセルを発生槽外の上方にある電子天秤にワイヤーで吊して測定した。拡散管セルは図 7 (a) の実験と同じものを使っている。実験の詳細については文献^[12]を参照されたい。この場合でも 6.6 $\mu\text{g}/\text{h}$ の水分蒸発速度が測定されているので、時間が掛かることを認めればこの方法でもいいように思えるかも知れない。実際、このように一度水分蒸発速度を決定しておき、その後はその値を使って、簡易な微量水分標準として拡散管法が利用される場合がある。しかし、理論値との比較から図 7 (b) の実験には問題があったことが分かった。拡散管法では理想的な拡散現象を考えた場合、水分蒸発速度は拡散管の内径、長さ、発生槽内の圧力、セル内の水の温度から計算によって求めることができる。計算方法の詳細は文献に譲るが^[6]、図 7 (b) の実験の場合、理論値が 4.1 $\mu\text{g}/\text{h}$ となり測定値との間にやや差がある。この差は圧力、温度などの不確かさを考慮しても説明できない。一方、磁気吊下天秤を用いた図 7 (a) の

実験では、理論値が 5.1 $\mu\text{g}/\text{h}$ となり測定値と一致する。これが偶然でないことを確認するため、拡散管の内径、発生槽圧力、発生槽温度を変えた実験を行ったが、磁気吊下天秤を使った測定では、理論値と測定値が不確かさの範囲内で一致することが分かった^[5]。この結果によって、10 $\mu\text{g}/\text{h}$ レベルの水分蒸発速度を信頼性高く測定するには、磁気吊下天秤の導入が極めて有効であることが実証された。この結果からもう一つ分かったことは、開発した発生装置の水分蒸発は拡散現象でよく説明できると言うことである。これはつまり、温度と圧力の制御だけで (2) 式の N の安定化が十分可能であることを意味する。これも実験によって確認され、精密な温度・圧力制御によって、相対標準不確かさ 0.6 % 以内での安定性が実現されている^[5]。 N の測定の技術開発が、 N の安定化の技術開発にもつながったことになる。

3.2.2 吸着・脱離水分、ゼロガス中の残留水分の測定

$x_w \sim 14 \text{ nmol/mol}$ (ppb)、 $N \sim 780 \text{ nmol/h}$ でも (1) 式の $x_w \gg x_b$ と $N \gg N_b$ の条件を満たす装置を開発するには、 N_b や x_b の測定が不可欠であり、それには高性能な微量水分計が必要となる。これについては当初、計量研究所で開発した真空紫外光微量水分計 (VUV)^[13] と 2000 年に導入していた大気圧イオン化質量分析計 (APIMS)^[3] の使用を考えていた。VUV は真空紫外光を水分子に吸収させ電子励起状態の OH ラジカルを生成させ、その蛍光を観測することで微量水分の検出を行う装置である。APIMS は試料ガスをコロナ放電によって大気圧下でイオン化させ、差動排気を用いてこれを質量分析計に導入し、ガス中の微量物質 (この場合は微量水分) を検出する装置である。VUV および APIMS も微量水分領域で十分な感度があるが、それ自体は目盛りをもっておらず、標準を使って検量線を作成する必要がある。これについては開発中の拡散管方式発生装置で発生させた微量水分を使い、標準添加法で作ることを考えていた。すなわち、(1) 式の N_b と x_b が一

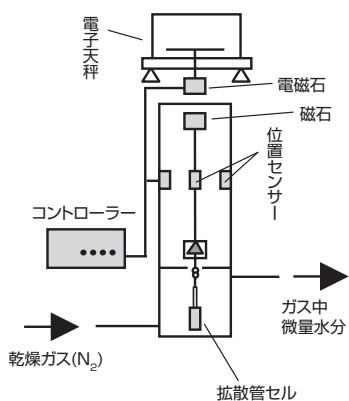


図 6 磁気吊下天秤による拡散管セルの質量減少測定概念図

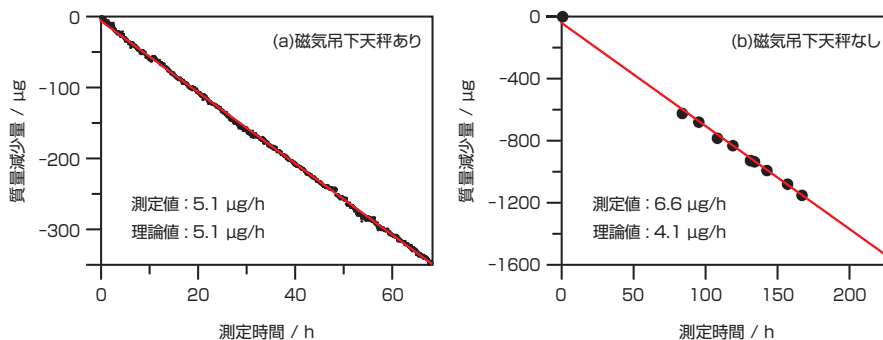


図 7 拡散管セルの質量減少の測定データ

定値をとると仮定し、 N と F の値を変えることで x_w を変化させ、これをVUVまたはAPIMSで測定して指示値を記録し、 N と F の値と指示値の変化量の関係から検量線を作成する方法である。しかし、微量水分領域では、拡散管セルの入れ替え(N を変えるため)後の乾燥パージ(残留水分除去)に長時間を要するため、一連の実験期間内のVUVやAPIMSのベースラインドリフト・感度ドリフトが信号強度に比べて無視できず、また、どの程度の乾燥パージ時間を設ければ入れ替え前の N_b の値と同じと見なせるのか、その後は本当に N_b を常に一定値と見なしてよいのかも不明のため、この方法では信頼性の高い検量線作成が難しいことが研究を進めていくうちに分かってきた。

微量水分領域では吸着・脱離水分とゼロガス中の残留水分による不確かさが全体の中で大きな割合を占めると予想していたので、 N_b と x_b の測定は装置開発をする上で特に重要な項目と考えていたが、これをVUVとAPIMSだけで行うのは問題ではないかと、研究を進めていくうちに次第に考えるようになった。

ちょうどその頃(2002年頃)、キャビティリングダウンレーザー分光法(CRDS)^{[14][17]}と呼ばれる原理に基づく新しい微量水分計が市販されるようになっていた。これは高反射率ミラーで構成された光学キャビティ内にレーザー光を閉じこめ、レーザー光を何度も往復させることで長い実効光路長を得て検出感度を高める方法で、特に近年になって飛躍的に高感度化された吸収分光法である。CRDS微量水分計は水の吸収断面積と測定データから直接 x_w を求めることができるので、検量線を作らなくとも微量水分測定が可能である。この特長はVUVまたはAPIMSに比べて有利であると考えられたため、すぐに装置の性能に関する情報収集と導入の検討を始め、2003年の早い時期に導入を行った。装置の製造元発行の校正証明書によると、米国標準技術研究所(NIST)へのトレーサビリティが確保された参照標準器との比較により、0 nmol/mol (ppb) ~ 1000

nmol/mol (ppb) の範囲で指示の正確性が確認されているとのことであった。こちらでも独自に指示の正確性の確認を行うため、産総研の微量水分発生装置で発生させた値の分かった微量水分(標準値)をCRDS微量水分計で測定し(指示値)、標準値と指示値の比較を行った^[5]。図8に標準値との指示値の差を相対値で示す。また、CRDS微量水分計の内部機能を使って水の吸収スペクトルを測定し、吸収線の解析からも x_w を求めた(解析値)。図9にスペクトルの測定例を示す。図9の吸収線は全て水の振動回転遷移で、解析には図中で最も強い吸収線($\nu_1+\nu_3$ バンドの $2_{02} \leftarrow 3_{03}$ 遷移)を用いた。CRDS微量水分計の指示値もこの吸収線のピーク強度から決定されている。これら独立に得られた3つの x_w は20 nmol/mol (ppb) ~ 600 nmol/mol (ppb) の範囲で11%以内の差で一致し、CRDS微量水分計が N_b や x_b の測定に十分使用できる装置であることが分かった。そして、この装置を使って研究を進めた結果、 $x_b < 0.15$ nmol/mol (ppb) と $N_b < 6$ nmol/hを達成する方法を見だし、 $x_w \gg x_b$ と $N \gg N_b$ の条件を満たす技術が確立された。この研究の過程でCRDS微量水分計が高性能な微量水分計であることも明らかになった。

3.2.3 乾燥ガスの流量測定

乾燥ガス(窒素)の流量 F は熱式質量流量計を用いて制御・測定されており、トレーサビリティの確保にはこの流量計を校正することを、そしてその校正には計量法に基づいて登録された校正事業者(JCSS)^[18]で校正サービスを受けることを当初考えていた。しかし、最も小さい不確かさで校正が可能なJCSS校正事業者に2004年後半に問い合わせたところ、熱式流量計については校正実績がまだ無く、すぐに校正を行うことは難しいとの回答を得た。また当時、熱式流量計の精度保証はフルスケールに対して1%程度が普通であり、設定流量が小さい領域では不確

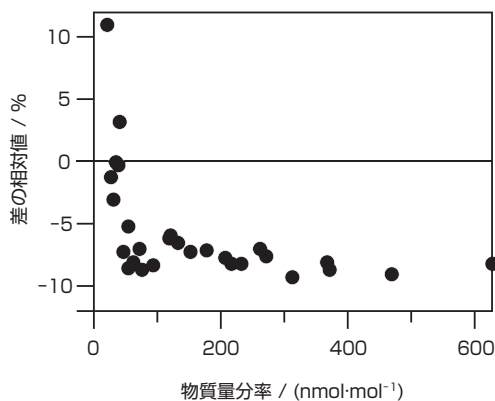


図8 標準値と指示値の差(相対値)
[(指示値-標準値)÷標準値]×100を示している。

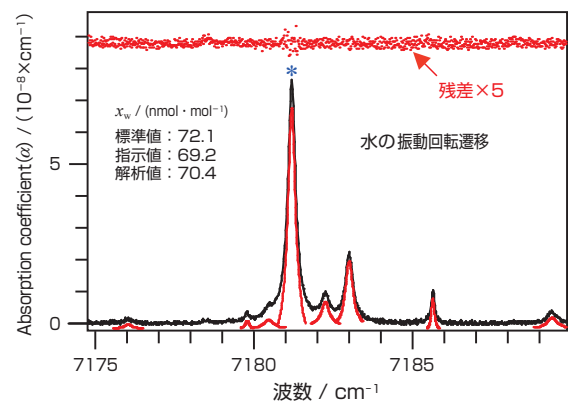


図9 水の近赤外吸収スペクトル
図中の吸収線は全て水の振動回転遷移に帰属される。水の物質分量率は図中で一番強い $\nu_1+\nu_3$ バンドの $2_{02} \leftarrow 3_{03}$ 遷移を使って決定している(アスタリスクで示した吸収線)。

かさが急激に増大する。そのため、本研究で必要とされる流量範囲を小さい不確かさで測定するには、複数台の流量計を準備し、その全てに対して校正を行う必要があった。さらに、図8で見られた標準値と指示値の差は、主に流量測定の不確かさからくるものと考えていた。以上の理由により、2005年の前半頃から、別原理のより信頼性の高い流量計の導入を考えるようになった。

気体小流量の測定で、最も信頼性の高い流量計は臨界ノズル（音速ノズル）式質量流量計^{[19][20]}と考えられる。市販用の臨界ノズル式流量計については、計量研究所と流量計製造業者の共同研究による開発が行われており^[21]、2000年頃から販売が開始されていたので、これを2005年に導入し、JCSSを利用して国際単位系へのトレーサビリティの確保も行った。気体の圧力・温度の測定データとノズル形状に関するデータを使って流量を独自に計算し、流量計の指示と比較することで動作原理の確認をした。この流量計を使った実験を行い、流量制御法に改良を加えることで、0.15%以内の標準不確かさで流量制御が可能であることが確認できた^[22]。図10はこの流量計導入後に行った標準値との微量水分計の指示値の比較実験の結果である。図8と同じように標準値と指示値の差を相対値で示している。図8で最大11%だったものが全て6%以内に収まっており、またその差もほぼ一定となっているのが分かる。この差については、CRDS微量水分計で使われている、水の吸収断面積の温度の影響も含めた不確かさで説明できることが分かっている^[22]。

3.3 不確かさの評価

x_w の標準不確かさ $u(x_w)$ は、(1)式右辺の物理量の間に関連がないとして、

$$u(x_w) = \sqrt{\left(\frac{u(N)}{F}\right)^2 + \left(\frac{u(N_b)}{F}\right)^2 + \left(\frac{Nu(F)}{F^2}\right)^2 + u^2(x_b)} \quad (3)$$

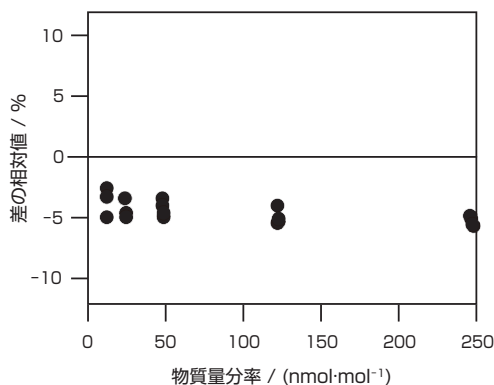


図10 臨界ノズル式流量計導入後の標準値と指示値の差（相対値）
 [(指示値-標準値) ÷ 標準値] × 100 を示している。

と表される。ただし、右辺の $u(A)$ は物理量 A の標準不確かさを表す。 $u(A)$ はさらに、

$$u^2(A) = c_1^2 u^2(a_1) + c_2^2 u^2(a_2) + \dots \quad (4)$$

の形で表される。ただし、 c_i は感度係数で $u(a_i)$ は物理量 a_i の標準不確かさを表す。 c_i は理論的な考察から決まる場合もあれば、実験的に決める場合もある。また、どのような物理量の不確かさを(4)式の $u(a_i)$ として考慮するかも重要である。小さなものは無視してよいが、無視できる大きさかどうかは時間をかけて調べてみるまで分からないことが多々ある。また無視できると思っていたものが、実はそうではなかったというケースもある。一例を挙げると、水分蒸発速度の測定を複数回行うと測定値にばらつきが見られるが、そのばらつきが発生槽の温度と発生槽内の圧力のばらつきでは説明できないことがあった。長期間のデータを集めたところ、室温の変化との間に相関が見られたので、エアコンを使って室温を意図的に大きく変化させる実験を行った。図11に室温と発生槽の温度を示す。室温を変化させても発生槽温度には変化がないように見えるが、この間に磁気吊下天秤で測定した水分蒸発速度は図12(a)に示されたように室温に依存して変化しているのが分かる。これが温度変化による磁気吊下天秤の指示への影響のせいではなく、確かに水分蒸発速度の変化によるものであることは、図12(b)に示されたCRDS微量水分計の測定データを見ると理解できる。すなわち、CRDS微量水分計の測定値も室温に依存して変化している(CRDS微量水分計の測定値の温度の影響は補正してある)。図12(a)と図12(b)の実験からそれぞれ求めた室温変化に対する蒸発水分量変化の感度係数はよく一致した。この現象は、発生槽に流れ込む窒素などを通じて外部から発生槽内へ熱流入が起き、それによってモニター用温度計がある場所の温度(設定値付近で制御されている)

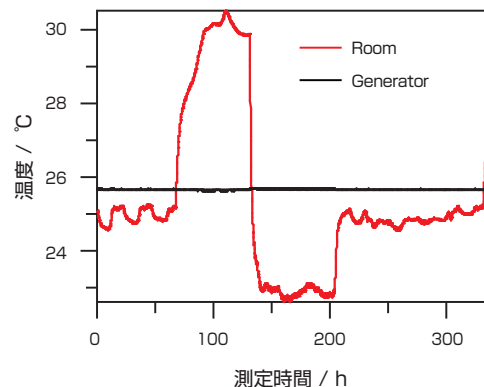


図11 室温変化に対する発生槽の温度変化

と拡散管セル内の水の温度(室温によって変化する)に差が生じて観測されたものと考えられる。これらの詳細については文献^[23]で議論しているのをご参照されたい。発生槽の温度がよく制御されているように見えたので、拡散管セル内の水の温度も同様に制御されていると思ひ込み、このような不確かさ成分があることに最初は気付かなかったが、以上の実験から、 $u(N)$ に含まれる $u(a_i)$ として室温変動があることが分かり、その感度係数も実験的に求められた。

(3) および(4)式にある他の物理量に関しても同様に実験・考察を行ってこの2つの式を完成させていく作業が不確かさ評価となる。その際、結果を整理し見やすくするために、不確かさの評価をまとめた表を普通作成する。この表が完成すれば、不確かさ評価は完了となる。詳細部分は省略するが、本研究で完成させた不確かさの評価を表2に示す。標準確立における不確かさ評価は、装置開発と同等かそれ以上に難しい作業である。

3.4 微量水分標準の確立のまとめ

3.2.1 ~ 3.2.3 で示した研究成果などから最終的に、12 nmol/mol (ppb) ~ 1200 nmol/mol (ppb)(大気圧下での霜点が約-100℃~-75℃に相当)の微量水分発生が可能な微量水分発生装置の開発に成功し、発生範囲に関する目標が達成できた。また不確かさに関しては、12 nmol/mol (ppb)における相対標準不確かさの目標値11%に対して、表2から分かるように3%程度で実現されているので、こちらも目標が達成できた。これらによって微量水分標準が目標どおり確立された。

本研究においては、測定装置の選択が極めて重要であった。磁気吊下天秤、CRDS微量水分計、臨界ノズル式流量計の導入がなければ、微量水分標準の確立は大変厳しかったと考えている。CRDS微量水分計と臨界ノズル式流量計は当初は導入を考慮していなかった装置だが、最初に使用した別の装置の問題点に比較的早い段階で気付くことができ、その後の早い時期に新装置の導入を行えたことが

表2 微量水分発生における不確かさの評価表

標準値	12.00	20.00	50.00	100.00	500.0	1200.0
不確かさ成分						
・水分蒸発速度	0.172	0.286	0.715	0.384	1.918	4.602
・吸着・脱離水分	0.014	0.024	0.059	0.021	0.104	0.249
・乾燥ガス流量	0.024	0.040	0.099	0.198	0.990	2.376
・ゼロガスの残留水分	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300
合成標準不確かさ	0.35	0.42	0.78	0.53	2.2	5.2
相対合成標準不確かさ [%]	2.9	2.1	1.6	0.53	0.44	0.43

* 単位は全て nmol/mol(相対合成標準不確かさを除く)

開発の成功につながったと考えている。また、本稿では記述を省略したが、装置導入前には製造業者と特別仕様に関する打合せを何度も行い、導入後も必要に応じて装置改造を行うなど、本研究に特化した測定装置作りに注力したことも成功の鍵だったと考えている。

4 校正サービス体系の整備

本研究で確立した微量水分標準に基づき、産総研は2007年5月より、12 nmol/mol (ppb) ~ 240 nmol/mol (ppb) (大気圧下での霜点が約-100℃~-85℃の範囲に相当)の範囲で計測器の校正サービスを開始した。2009年5月に校正範囲を拡大し、現在は12 nmol/mol (ppb) ~ 1200 nmol/mol (ppb) (霜点約-100℃~-75℃に相当)の範囲で校正サービスを行っている。また、(財)化学物質評価研究機構は、磁気吊下天秤無しの拡散管方式微量水分発生装置を整備し、CRDS微量水分計を仲介標準器として産総研へのトレーサビリティを確保する方法で、2009年7月より12 nmol/mol (ppb) ~ 1200 nmol/mol (ppb)の範囲で校正サービスを開始した。

5 高性能な微量水分計測器

微量水分標準と校正サービスの整備が行われても、高性能な微量水分計測器がなければ信頼性の高い測定を行うことができないため、それを見いだす作業が必要となる。ここでは微量水分標準に基づき市販の微量水分計の一部

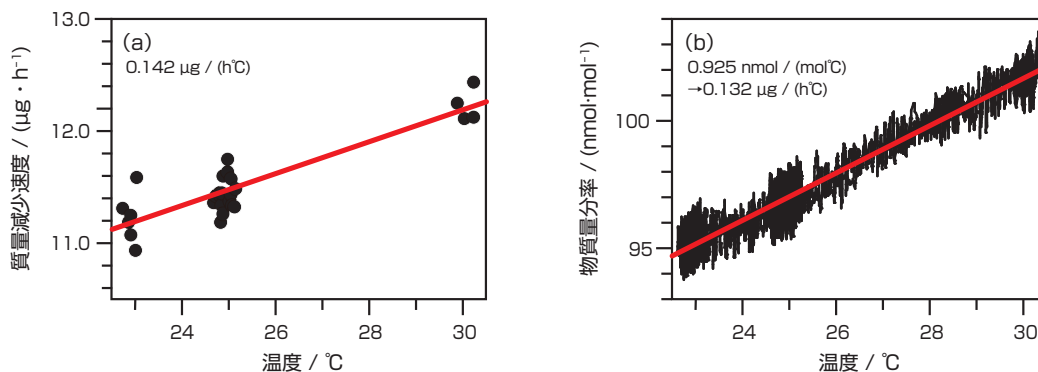


図12 水分蒸発速度の室温依存性
転載許可を得て文献 [23] から転載

に対して行った、予備的な性能試験について紹介する。

5.1 CRDS微量水分計の性能試験

3.2.2で述べたように、標準確立の過程でCRDS微量水分計が高性能であることが明らかになった。図13に発生装置で発生させた微量水分をCRDS微量水分計で測定した例を示す。応答性・安定性よく測定できているのが分かる。これは逆に、産総研の微量水分標準の応答性・安定性のよさの実証にもなっている。CRDS微量水分計は1 nmol/mol (ppb) 程度までの測定が可能で、12 nmol/mol (ppb) ~ 1400 nmol/mol (ppb) の範囲において優れた直線性を示すことも標準との比較で確認された。

5.2 他の市販計測器の性能試験

従来から使われていた鏡面冷却式露点計についても、一部の機種について同様の性能試験を行った。試験した鏡面冷却式露点計は2社の製品で、カタログ記載の測定範囲の下限は両製品とも霜点-100℃ (14 nmol/mol (ppb)) 以下となっている。結果を図14に示す。今回の試験では、A社の製品は指示の正確性と安定性に問題が見られ、B社の製品は応答性と正確性に問題が見られた。鏡面冷却式露点計は霜点を直接測定できるので、湿度の計測器としては最も信頼性が高い装置であるが、微量水分領域になると、いかに鏡面冷却式露点計といえども測定が容易ではないことが今回の結果から分かった。

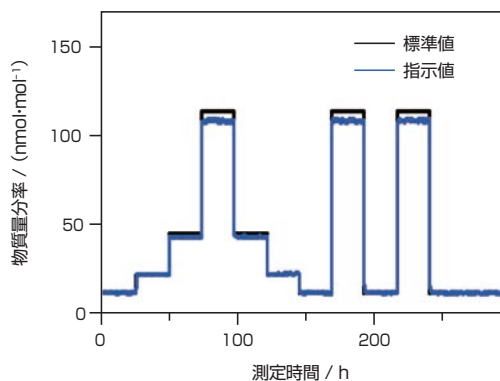
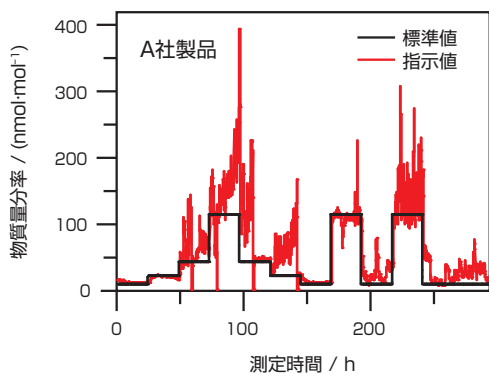


図13 微量水分標準とCRDS水分計の指示との比較



微量水分計として最も普及している従来型の酸化アルミ静電容量式センサーについても、一部の機種について性能試験を行った。試験したのは5社の製品で、カタログ記載の測定範囲の下限は全て霜点-100℃ (14 nmol/mol (ppb)) 以下となっている。センサーへ流すガス流量は0.6 L/min ~ 1.0 L/minとし、センサー部に吸着している不要な水分を除去するため、実験を始める前に12 nmol/mol (ppb) の微量水分を使って1ヶ月間以上のパージ(残留水分除去)を行った。パージ期間を長くしたのは、従来型酸化アルミ静電容量式センサーは乾燥を要する工程などで水分検出用の警報器としてよく使われており、通常センサー部は非常に乾燥した雰囲気内に長い期間置かれているので、それに近い状態で性能を調べるためである。試験は約12 nmol/mol (ppb) ~ 100 nmol/mol (ppb) (霜点約-100℃ ~ -90℃) の範囲で行った。5社のうちの1社の製品は測定レンジ以下とのエラーが表示されて測定できなかった。残りの4社の製品の結果を図15に示す。今回試験を行ったこれらのセンサーには、指示の応答性、正確性、感度に問題があることが分かった。同様の試験がBOC Edwards社とNPLの共同研究によっても行われており、そこでも300 nmol/mol (ppb) → 850 nmol/mol (ppb) の水分濃度変化に対して応答に8時間以上かかる機種があることが報告されていた^[24]。従来型の酸化アルミ静電容量式センサーは、酸化アルミニウム細孔内での水分の吸着平衡を利用するので、微量水分領域では平衡に達するまでに長い時間を要し、そのため応答が遅くなるものと推測される。したがって、微量水分領域での測定のためには、応答性を高める技術開発が必要と考えられる。

従来は微量水分標準がなく、また微量水分領域で水分濃度を素早く変更させることも難しかったので、微量水分計の性能、特に応答性については高い信頼性で試験する方法がなかったが、微量水分標準の整備と微量水分発生技術の発達から、近年それが技術的に可能になってきている。

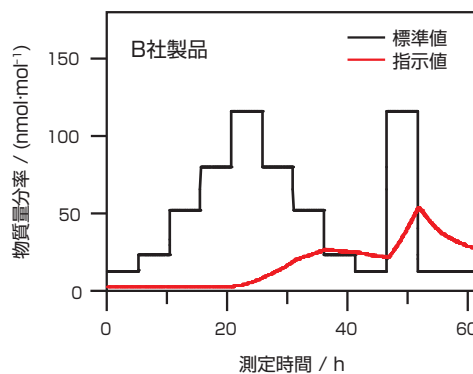


図14 微量水分標準と鏡面冷却式露点計の指示との比較

6 今後の展望

国家標準の確立、CRDS 微量水分計の登場、校正サービス体系の整備によって、国際単位系へのトレーサビリティが確保された微量水分計測が可能となった。5章の性能試験の結果を見ると、微量水分測定信頼性が近年になって飛躍的に向上したことが分かる。しかし、そのような測定を行うには現在のところ CRDS 微量水分計の入手が条件となるが、これはまだ高額な装置であるため誰もがこの条件を容易に満たせるとは言い難い。したがって、「信頼性の高い微量水分計測の普及」の観点からは、市販計測器にまだまだ課題が残されている。この問題の解決には低価格で高性能な微量水分計の登場を待つ必要があるが、これについては、吸着平衡を利用するタイプのセンサーについて、応答性を高める研究開発が計測器メーカーで進められており、一部は既に製品化されている。これらのセンサーの高性能化・低価格化が期待される。また、他の微量水分計の開発に関しては、微量水分計測に特化したフーリエ変換赤外分光計 (FTIR) が近年開発・販売されており、CRDS 以外の吸収分光法による微量水分計の登場も今後期待される。一方、従来から使われている微量水分計についても、今回試験した機種は全体のごく一部に過ぎず、まだ試験していない機種の中に高性能な微量水分計が存在する可能性は当然ある。新型装置にせよ従来型装置にせよ、装置の性能を実証するには、装置の性能試験（特に応答性、感度、ドリフトに関する）を、微量水分標準へのトレーサビリティが確保できる方法で行うことが肝要であると筆者は考えている。そして、その結果をユーザーにきちんと

示すことが、信頼性の高い微量水分計測の普及につながっていくと考えられる。

本稿で紹介した内容は全て窒素中の微量水分の計測に関するものだが、半導体製造分野では、窒素以外のガス中の微量水分計測に関する需要が近年急速に高まっている。これについては微量水分標準がまだないので、この問題への対応も今後考えていく必要がある。

日本以外の国でも、近年、微量水分標準の整備が進められているが、これらの標準は現在、各国ごとに個別に開発・管理されている状況にある。各国で維持している国家標準の同等性は国際比較という作業を通して確認されるが、微量水分標準に関しては最近ようやく予備的な国際比較が始まったところである。この国際比較には NMIJ（産総研・計量標準総合センター）、NPL（英国物理学研究所）、NIST（米国標準技術研究所）、PTB（独国物理工学研究所）の4つの標準研究機関が参加しており、現在も進行中である（2009年7月現在）。この結果については、また別途報告したい。国際比較は、産総研の微量水分標準の信頼性をさらに高め、それを他国にも認めてもらう上で極めて重要な作業であるため、今後もこのような活動に積極的に参加していく予定である。

謝辞

本研究における、装置開発または不確かさ評価に関してご指導・ご協力をいただいた北野寛湿度標準研究室長、高橋千晴博士（前温度湿度科長）、植木正明主任研究員、中尾晨一博士（前流量標準研究室長）、今江理人時間周波

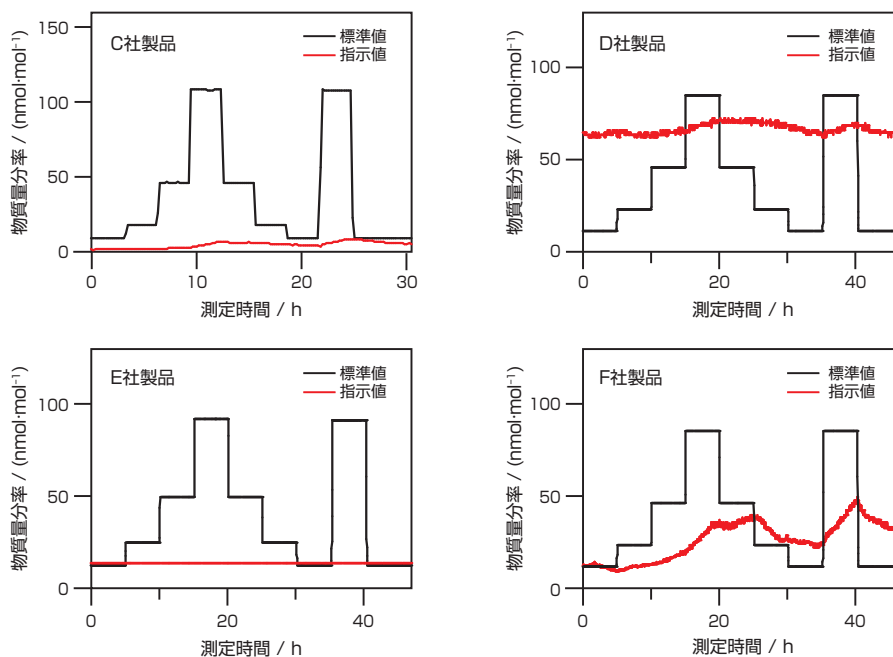


図 15 微量水分標準と従来型酸化アルミ静電容量式センサーの指示との比較

数科長、田中秀幸研究員、倉本直樹研究員、松本信洋研究員と、他の多くのNMIJ研究者に感謝します。装置製作・改造にご協力いただいたRubotherm社、Tiger Optics社、株式会社平井、東亜ディーケーケー株式会社、若葉設計事務所、株式会社堀場エステック、株式会社フジキンの関係者にお礼申し上げます。校正サービス体系の整備にご協力いただいた(財)化学物質評価研究機構の丸山正暁氏に感謝します。従来型微量水分計の性能の問題について意見交換して下さった多くの方々に感謝の意を表します。

用語説明

用語1:霜点: 湿潤気体を圧力一定の条件で冷却していき結露が起こる温度を露点という。露点は気体に含まれる水蒸気量が少ないほど低温となる。氷点以下で霜となって現れる場合は霜点(そうてん)とよぶ。

用語2:一次標準: 計量学的に最も高い質を持ち、国際単位系による不確かさの完全な表が与えられ、同一の量の他の標準の参照なしに実現される標準。

用語3:水蒸気増加補正係数: 乾燥空気が存在することによって生じる水蒸気圧の変化を補正する係数。乾燥空気が存在すると、乾燥空気による加圧、水への溶解、水蒸気分子との相互作用によって、水蒸気だけが存在する場合とは異なる水蒸気圧となる。

参考文献

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors 2007, <http://strj-jeita.elisasp.net/strj/ITRS07/Roadmap-2007.htm>
- [2] 小林芳彦, 万行大貴, 小野宏之, 池田拓也, 池永正, 松本 功, 杉原健一, 渋谷和信: 有機金属気相成長法によるGa_N系化合物半導体成長に対するNH₃ガス中の水分の影響, *大陽日酸技報*, 26, 1-6 (2007). <http://www.tn-sanso.co.jp/jp/rd/report26.html>
- [3] H. H. Funke, B. L. Grissom, C. E. McGrew and M. W. Raynor: Techniques for the measurement of trace moisture in high-purity electronic specialty gases, *Rev. Sci. Instrum.*, 74, 3909-3933 (2003).
- [4] M. Stevens and R. Benyon: Conceptual design of a low-range humidity standard generator, *Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture*, 1, 103-110 (1998).
- [5] H. Abe and H. Kitano: Development of humidity standard in trace-moisture region: Characteristics of humidity generation of diffusion tube humidity generator, *Sens. Actuators A*, 128, 202-208 (2006).
- [6] L. Greenspan: Functional equations for the enhancement factors for CO₂-free moist air, *J. Res. Nat. Bur. Stands.*, 80A(Phys. and Chem.), 41-44 (1976).
- [7] 日本工業規格: JIS Z 8806 湿度-測定方法, 日本規格協会 (2001).
- [8] D. Sonntag: Important new values of the physical constants of 1986, vapor pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae, *Z. Meteorol.*, 70, 340-344 (1990).
- [9] S. Boyes and S. Bell: Assessment of fundamental data

used in humidity metrology, *NPL Report*, CMAM 42 (1999).

- [10] International Technology Roadmap for Semiconductors 2000 Update, <http://www.itrs.net/Links/2000UpdateFinal/2kUdFinal.html>
- [11] Rubotherm, <http://www.rubotherm.de/>
- [12] H. Abe, H. Kitano and C. Takahashi: Design of the NMIJ diffusion tube humidity generator, *Papers from the 4th International Symposium on Humidity and Moisture*, 33-39 (2002).
- [13] H. Kitano, C. Takahashi and N. Ochi: Moisture measurement in air by vacuum ultraviolet light-excited fluorescence method, *Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture*, 1, 288-293 (1998).
- [14] A. O' Keefe and D. A. G. Deacon: Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, *Rev. Sci. Instrum.*, 59, 2544-2551 (1988).
- [15] G. Berden, R. Peeters and G. Meijer: Cavity ring-down spectroscopy: Experimental schemes and applications, *Int. Rev. Phys. Chem.*, 19, 565-607 (2000).
- [16] M. Mazurenka, A. J. Orr-Ewing, R. Peverall and G. A. D. Ritchie: *Annu. Rep. Prog. Chem.*, Sect. C, 101, 100-142 (2005).
- [17] 川崎昌博, 江波進一: キャビティリングダウン分光法による微量物質検出, *レーザー研究*, 34 (4), 289-294 (2006).
- [18] Japan Calibration Service System, <http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/>
- [19] S. Nakao, Y. Yokoi and M. Takamoto: Development of a calibration facility for small mass flow rates of gas and the uncertainty of a sonic venturi transfer standard, *Flow Meas. Instrum.*, 7, 77-83 (1996).
- [20] N. Bignell: Using small sonic nozzles as secondary flow standards, *Flow Meas. Instrum.*, 11, 329-337 (2000).
- [21] M. Hayakawa, Y. Ina, Y. Yokoi, M. Takamoto and S. Nakao: Development of a transfer standard with sonic venturi nozzles for small mass flow rates of gases, *Flow Meas. Instrum.*, 11, 279-283 (2000).
- [22] H. Abe and H. Kitano: Improvement of flow and pressure controls in diffusion-tube humidity generator: Performance evaluation trace-moisture generation using cavity ring-down spectroscopy: *Sens. Actuators A*, 136, 723-729 (2007).
- [23] H. Abe, H. Tanaka and H. Kitano: Uncertainty analysis of evaporation rate in magnetic suspension balance/diffusion-tube humidity generator, *Int. J. Thermophys.*, 29, 1555-1566 (2008).
- [24] S. A. Bell, T. Gardiner, R. M. Gee, M. Stevens, K. Waterfield and A. Woolley: An evaluation of performance of trace moisture measurement method, *Proceedings of 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, 1, 663-668 (2004).

執筆者略歴

阿部 恒 (あべ ひさし)

1996年金沢大学大学院自然科学研究科博士課程修了、博士(理学)。工業技術院産業技術融合領域研究所、資源環境技術総合研究所(ボスドク)を経て、2001年産総研入所。計測標準研究部門温度湿度科湿度標準研究室に所属し、微量水分標準の研究に従事。



査読者との議論

議論1 水の蒸気圧式の信頼性

質問・コメント (小野 晃:産総研)

外国の多くの標準研究所では、Sonntagの水の蒸気圧式を用いて微量水分の国家標準を作っています。そもそも Sonntagの式を導出するときには、国際単位系にトレーサブルな形で微量水分量の絶対測定を行っているはずですが、どのような方法で行っているのでしょうか。また Sonntagの式には不確かさが付いているのでしょうか。

拡散管法を用いた本研究では国際単位系にトレーサブルな形で微量水分量の絶対測定を行っています。この方法を用いて、Sonntagの式の妥当性を検証したり、新たな水の蒸気圧式を不確かさ付きで導出した可能性はありますか。

回答 (阿部 恒)

外国の多くの標準研究所では、霜点発生法に基づいて霜点が一定となるガスを発生させていますので、国際単位系へのトレーサビリティは温度となります。このガス中の水分量を物質質量分率などで表す時やガスの圧力を変化させて霜点を変える際の計算に Sonntagの水の蒸気圧式を使っています。

Sonntagの水の蒸気圧式は1990年の論文[8]で発表されましたが、これはそれ以前にあった Wexlerの水の蒸気圧式 (*J. Res. Nat. Bur. Stands* 1977, vol 81A, page 5-20)を、現在の国際温度目盛りである ITS-90に基づいて再計算したものです。Wexlerの式は1977年当時の国際実用温度目盛りである IPTS-68に基づいて計算されていました。これらの式はともに Clausius-Clapeyronの式を積分することで得られています。計算に必要となる気体定数や水蒸気の圧縮係数などは、科学技術データ委員会 (CODATA)の推奨値や過去の文献等で報告された値を使っています。計算の詳細については上記 Wexlerの論文をご参照下さい。

Sonntagの式の不確かさは、 $-100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲において、相対標準不確かさ0.5%未満と報告されています^[9]。実験データとの比較も行われています^[9]、微量水分領域(霜点が約 $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下)では一致が良くありません。

Sonntagの式の妥当性の検証については、現在進行中の国際比較を通じて、産総研の拡散管法による実験結果と NPL および NISTの霜点発生法に基づく実験結果を比較することで、ある程度は可能と考えています。これは上で述べたように、霜点発生法に基づく実験結果を比較のため物質質量分率に変換する際に Sonntagの式を使うからです。ここでいう程度と言ったのは、特に検証の必要性が高い微量水分領域では、国際比較における不確かさ(比較を行う2つの標準それぞれが持つ固有の不確かさと比較の際に生じる不確かさの合成)の方が Sonntagの式の不確かさより大きい場合、これだけでは検証が十分とは言えないからです。この国際比較においては、産総研の標準と NPL および NISTの標準との同等性が不確かさの範囲内で確認できなかった場合においてのみ、その原因の1つとして Sonntagの式の妥当性を疑う形になります。

拡散管法を利用した水の蒸気圧式の導出については、拡散管法で発生させたガスの霜点測定を行うことで可能となりますが、霜点測定の精度および拡散管法の現在の不確かさを考慮すると、残念ながら意義ある結果を得るのは難しいと考えられます。水の温度と蒸気圧の同時測定の実験など、他の方法による導出の方が今のところ可能性としては高いと思っています。

議論2 マトリックスガスが窒素以外の場合の校正

質問・コメント (小野 晃)

本研究ではマトリックスガスとして窒素を用いた拡散管法による微量水分標準を確立したと思いますが、マトリックスガスとしてその他の種類で重要なものには何かあるのでしょうか。またその他の種類のマトリックスガスに対してはそれぞれ拡散管法で微量水分標準を確立することが必要になるのでしょうか。1種類のマトリックスガス(例えば窒素)で標準ができれば、他の種類のマトリックスガスに対しては、相

対測定で簡便に標準が設定できるというにはできないでしょうか。

回答 (阿部 恒)

半導体製造分野では、微量水分標準が必要とされている窒素以外の重要なマトリックスガスとして、水素、アルゴン、ヘリウム、酸素、アンモニア等があります。これらのガス種についても拡散管法を利用してそれぞれ微量水分標準を確立して校正サービスを行うことは可能だと思います(ただしアンモニアなど水への溶解度が高いガスは工夫が必要)、開発コストやユーザーの利便性を考えますと、あまり現実的な方法とは思えません。それよりはご質問にもありました相対測定(変換係数)の手法の方が、実現の可能性が高いと考えています。これについては、次の質問の回答の後半をご参照下さい。

議論3 キャビティリングダウン分光法の種々のマトリックスガスへの活用

質問・コメント (小野 晃)

拡散管法とキャビティリングダウン分光法とでは測定の絶対値が良く一致しているように見えます。このことは、レーザー光の波長に対して水分子の吸収断面積の絶対値があらかじめ精度良く求まっているということでしょうか。

吸収断面積は温度依存性が大きいように述べられていますが、マトリックスガスの種類の違いによる変化はどのくらいと考えられますか。もしマトリックスガス依存性が小さいとすると、拡散管法でキャビティリングダウン分光装置を一度校正しておけば、それを他の種類のマトリックスガスにもそのまま使えるということになりませんか。

回答 (阿部 恒)

水分濃度決定のためモニターしている水の吸収線の強度については、今までに多くの研究報告がなされていますが、それらの値にはばらつきがあります。例えばある文献で報告された値と、比較のため同じ文献で引用されている別の報告による値とでは6%程度の差があります(*JQSRT* 2005, vol 94, page 51-107)。同様に別の文献では差が最大で20%以上あります(*JQSRT* 2002, vol 75, page 493-505)。したがって、あらかじめ精度よく決まっていたというよりは、標準値との一致が比較的良い値が今回使用した装置では選ばれていたとの印象をもっています。本研究で得られたような結果がフィードバックされていくことで、測定に用いる吸収断面積の不確かさが小さくなり、キャビティリングダウン分光装置を使った微量水分測定の信頼性がさらに高まっていくことを期待しています。

吸収断面積のマトリックスガス依存性は決して小さくはなく、例えば、窒素と酸素とではこの吸収線の場合約2倍も値が異なります。しかし、この関係は温度変化の小さい範囲では常にほぼ一定と見なせますので、これらの間の変換係数を測定温度付近で一度正確に決定しておけば、その後は装置の校正は窒素に対してだけ行い、酸素中の微量水分測定の場合はその変換係数を用いることで測定が可能となります。この方法を使えば、変換係数が小さな不確かさで得られるガスについては、そのガスをマトリックスとした微量水分標準がなくても、測定の信頼性を確保することができます。またユーザーにとっても校正の手間が省け、管理コストも低減できますので、この手法は窒素以外のガス中の微量水分測定に対する有効な方法と考えています。ただし、水の吸収線と同じ周波数領域にマトリックスガスの吸収線が存在する場合(NH_3 など)は、その影響を取り除き水分濃度に関する情報を引き出す解析技術がさらに必要となります。ガスの種類によっては、マトリックスガスの吸収が強すぎるなどの理由で、全く測定できない場合も考えられますので、この方法は全てのガス種について有効とは言えません。変換係数を決めるための実験上の困難さや不確かさなども考慮しながら、どのようなガス種について有効かを検討する必要があります。

議論4 国家計量標準と市販計測器

質問・コメント (小野 晃)

本研究の成果を使うことにより、すでに市販されている微量水分測定器の多くのものでスペックが満たされていないと言うことが明らかになっています。国家計量標準がしかるべく整備されていない場合、大きな社会的損失が起きうるといえる例と思いますが、このことから我々は何のような教訓を得ることができるでしょうか。

回答 (阿部 恒)

従来型の市販計測器の件につきましては、国家標準がまだ整備されていない状況で、計測器メーカー・販売業者が計測現場からのニーズに応えようと活動し、その状態が長年続いて生じた結果と理解しています。標準が整備されていない状況で起きた重大な事例として受け止める必要があり、標準が持つ社会的重要性や社会に与えるインパクトを改めて強く意識する必要があると感じました。他国の微量水分標準の整備状況や、拡散管法による標準実現に不可欠だった CRDS 微量水分計の販売開始時期を考えますと、2001 年以前に微量水分標準を確立することは技術的に困難だったと考えていますが、このような状況でも理想的には、標準整備がまだできない技術的な理由や、標準がない状態で微量水分測定を行った場合の測定結果の信頼性について、ユーザー、計測器メーカー・販売業者、標準研究機関の研究者の間である程度共通の認識が持てていれば良かったかと思われま。これは微量水分計測に限らず、似たような状況にある他の量の計測についてもあてはまる話です。どうすれば 3 者間で大きく異なる認識を持てるようになるか、特に難しいのはユーザーからの需要に対して、研究者側が技術的に否定的な考え(必ずしも常に正しいとは限りませんが)を持った場合と考えられます。そのような否定的な事柄について発表や議論する機会をどのようにして得れば良いのか? 通常の学会発表や学術論文での発表で、否定的な事柄を主題目として取り上げるのは容易ではありませんし、仮に行ったらしてもユーザーや計測器メーカー・販売業者にまでその情報が伝わる可能性は高くありません。技術的な問題点が明らかになっていけば、研究シナリオの 1 つとしてシンセシオロジーでの発表が今後は可能かも知れませんが、それと他に成功したシナリオがない限り、非常に難しいかと思われま。現在産総研計量標準総合センターで行っている計測クラブや研究室見学などの機会を通じて、ユーザーや計測器メーカー・販売業者と意見交換を行い、計測に関する理解を互いにより深め合っていくことが 1 つの解決法と考えられますが、それ以外には今のところ特に有効な方法を思いつきません。本件からどのような教訓が得られるのか、正直なところ、筆者もまだ十分整理できていない状況です。

ただし、微量水分測定が関係した過去の「社会的損失」については次のように考えています。微量水分標準が確立される以前は、微量水分計の測定能力を客観的に調べる方法がなく、そのことがはっきり分かったのも微量水分標準が確立された後のことです。そのような状況を考慮しますと、現在から過去の測定を振り返り、それらによって社会的損失が生じていたと言ってしまうのは、やや厳しい見方に思えます。過去の測定でも当時は特に大きな問題が(少なくとも表面上は)生じていなかったのですから、過去に社会的損失があったというよりは、むしろ産業現場等における微量水分制御にまだ改善の余地あることが最近になって分かったと前向きに捉えるべきではないでしょうか。

議論5 拡散管法の有機標準ガスへの適用可能性

質問・コメント (小野 晃)

本研究では拡散管法を水に適用して微量水分の標準を作ったわけですが、他の有機物質などに適用すれば、それらの物質の濃度値が付いた標準ガスを作ることができるようにも思います。その適用可能性をどのように考えますか。

回答 (阿部 恒)

拡散管法を一次標準法として開発に成功したのは産総研が最初になりますが、元々この方法は有機物質も含めた様々な物質の低濃

度標準ガスを作る手段として古くから利用されてきました (Crit. Rev. Anal. Chem. 2005, vol 35, page 31-55)。実験温度である程度の蒸気圧を持つ物質、マトリックスガスの溶解が問題にならない物質など多少の制限はありますが、基本的には水以外の物質に対しても適用可能です。特に、吸着性の高い物質や不安定で長期の保存が難しい物質の場合、標準ガスを高压容器に充填して供給する方法では、使用時における信頼性の確保が困難なため、拡散管法のように連続的に標準ガスを発生させる方法(動的方法)が有効と考えられます。拡散管法は簡易な標準ガス発生法として、国際規格 (ISO 6145-8) や日本工業規格 (JIS K 0225) でも規定されています。ただし、本研究で明らかにされたように、極めて小さな蒸発速度が必要となる微量な濃度領域においては、磁気吊下天秤を使わずに蒸発速度の測定を行った場合、この方法では信頼性の確保が難しいことに注意しておく必要があります。

議論6 不確かさの目標値の設定

質問・コメント (五十嵐 一男:産総研生産計測技術研究センター)

2 章において、霜点-100 °C 付近で相対標準不確かさの目標値を 11 % (霜点で 0.5 °C に相当) と定めたことと理由として、NPL の当時の目標が霜点-95 °C での標準不確かさが 0.5 °C であったことを参考にしたと述べられています。実際には、多くの不確かさの要因を潰していった結果として 3 % 程度に収める素晴らしい成果に結びついています。水蒸気発生方式も異なり、それに伴う種々のプロセスも異なるなかで 11 % に設定したことの妥当性について教えてください。

回答 (阿部 恒)

拡散管法の採用によって、不確かさが霜点発生法に比べて大きくなるようでは、この方法を選択した意味が失われますので、まずは霜点発生法での目標値を参考にしました。また、拡散管法ではゼロガス中の残留水分と吸着・脱離水分が大きな不確かさ要因になると予想していましたが、ゼロガス生成に使う水分除去装置(ガス精製機)の性能は高性能機種の場合、大体どのメーカーの製品カタログでも残留水分が 1 nmol/mol 以下になると記載されていました。吸着・脱離水分による不確かさもおよそこのレベルと仮定しますと、この 2 つを合成した不確かさは $1.4 \text{ nmol/mol} (\sqrt{1^2 + 1^2} \approx 1.4)$ になり、これは 14 nmol/mol では 10 % に相当します。これ以外の不確かさ成分も当然含まれることを考慮しますと、11 % はそれほど簡単に実現できる数値だとは当時は思っていませんでした。ちなみに、NPL は現在、霜点発生法による標準発生の下限を霜点-90 °C までとしており、霜点-90 °C における標準不確かさを 0.2 °C (約 3.7 %) と報告していますので、NPL が最初に設定した霜点-95 °C での標準不確かさの目標値 0.5 °C は、今となっては少々大き過ぎた感じがあります。

議論7 発生槽内と拡散管セル内の水の温度差の原因

質問・コメント (五十嵐 一男)

3.3 節に不確かさの評価がなされており、発生槽内の温度と拡散管セル内の水の温度との間に相違があったことに起因することが述べられています。温度差が生じる原因として流す窒素ガスの流量に対応した温度制御および拡散管セル材の SUS を用いていることの熱伝導度の低さなどにもあるように思います。もし、そのようなことも検討されたのであれば、より詳細な検討の証左にもなりますので記載いただければと思います。

回答 (阿部 恒)

温度差が生じた原因の推測について本文中に書き加えました。室温変動が測定結果に影響を及ぼす理由を検討することは、不確かさの評価の正しさ、すなわち不確かさの不確かさ(ここでは実験から決定した感度係数の不確かさを意味します)を考える上で重要な問題なのですが、これに関する実験、ご指摘にありました流量依存性を調べる実験などはまだ行っておりませんので、はっきりとした理由はまだ分かりません。しかし、感度係数の不確かさについては、文献 [23]

で行っている議論から、現在の実験条件ではそれほど大きくないと思っています。得られた感度係数が正しいとすると、室温変動による不確かさを他の成分の不確かさに比べて小さくすることは、今のところ難しい問題にはなりませんので、温度差が生じる原因については、現時点ではこれ以上の検証を行っておりません。

議論8 水の純度の影響

質問・コメント (五十嵐 一男)

微量水蒸気を発生させるに当たり、吸着・脱着水分、ゼロガス中の残留水分、ガス流量計の検討など多くの要因が分析をされていますが、基本となる水自体の純度には何も触れられていません。水蒸気圧に影響を与えない程度の純度が確保されていれば問題ないからでしょうか。

回答 (阿部 恒)

水の純度についてはよく質問を受けるのですが、紙面の都合もあり

本文では触れられなかったので、ここで説明します。本研究では超純水製造装置で高純度化された水を使用しています。ただし、水の純度自体が直接大きな問題になることはありません。これは水分蒸発速度を単位時間あたりの拡散管セルの質量変化として測定しているため、水の中に不純物が含まれていたとしても、拡散管セルの中に留まっている限りは問題にならないからです。水の中にガスが溶解している場合は水と一緒に蒸発するので不確かさ要因の1つとなりますが、上記の超純水製造装置の利用によりそのようなガスも取り除かれていると考えられ、その影響は無視できるレベルと考えています。また、測定は拡散管セルを高純度窒素雰囲気槽の発生槽に入れて十分長い時間 (通常 10 日間以上) が経過してから行いますので、もしガスが残っていた場合でも窒素で十分置換されていると考えられます。最後に水溶液中に溶解している窒素ですが、発生槽内圧力 150 kPa、温度 25 °C の状態で飽和しているとしても、物質質量分率で 0.002 % 以下ですので、これの影響も無視できると考えています。

乾電池駆動可搬型高エネルギーX線発生装置の開発

— X線非破壊検査におけるイノベーションを目指して —

鈴木 良一

電子加速器の小型化及び省エネルギー化、乾電池駆動超小型電子加速器という産総研の有する要素技術と、企業が開発したカーボンナノ構造体電子源の技術を統合することによって、単三乾電池1個で駆動し、100 keV以上の高エネルギー高出力X線を発生でき、高精細なX線透過像を得ることができる実用的な可搬型X線発生装置の開発に成功した。本稿では、これらの要素技術について述べるとともに、各要素技術がいかに成果に結びついたかについて考察する。

キーワード：X線、非破壊検査、乾電池駆動、電子加速器、省エネルギー

Development of battery-operated portable high-energy X-ray sources

– Innovation in X-ray non-destructive-evaluation –

Ryoichi Suzuki

We have developed a practical portable high-energy X-ray source, which can generate high energy X-rays with energies greater than 100 keV enabling the taking of high-definition X-ray transmission images using an R6(AA) battery as a power source. This result is a consequence of the integration of the compact and energy-saving electron accelerator technologies of AIST and the carbon nanostructure technologies of private companies. In this paper, we discuss these elemental technologies and how to integrate them.

Keywords: X-ray, non-destructive evaluation, battery operated, electron accelerator, energy saving

1 はじめに

日本には、高度成長期に作られたコンクリート構造物などの社会インフラや工場プラントなどが多く、これらの老朽化が問題となってきている。これらを安心して使用するためには、検査機器をその場に持ち込み、ものを壊さずに劣化状況を検査する非破壊検査法が必要とされている。非破壊検査法には、超音波を使うもの、電磁波を使うもの、X線・放射線を使うものなど様々な方法がある。この中でも特にX線透過法は、人体のレントゲン検査と同様に検査対象物の内部の透過イメージを得ることができ、検査結果がわかりやすいことから、様々な分野で利用されている。

しかしながら、X線透過法でプラント配管の減肉検査などを行おうとすると、材質が鋼製の配管は高いエネルギーのX線が必要で、それに対応するX線源は大きく重く、狭い箇所の検査が難しいという問題があった。また、出力の大きなものはヒーター・フィラメントの余熱の時間が長く使いたい時にすぐ使えない、エネルギー消費が大きいという欠点もあり、利便性が悪いためにX線透過検査がな

れない場合も多い。これらの問題が解決できれば、検査機会が増え、事故や故障の確率を減らすことができると考えられる。

そこで、筆者らは、乾電池のようなどこにでもある電源で駆動できて持ち運びしやすく、100 keV以上の高エネルギー高出力X線を発生できる可搬型X線発生装置の開発を目標として設定し、開発を行ってきた。その結果、カーボンナノ構造体を電子源とした乾電池駆動高エネルギーX線発生装置の開発に成功した。このX線発生装置は、単三乾電池わずか1個でも100 keV以上のX線を発生し、条件によっては100枚以上の高精細X線透過像の撮影が可能であり、可搬型X線源として実用になる。これを利用すれば、交流電源や重いバッテリー無しに、その場にX線源を持ち込んでX線透過検査が可能になることから、新しい非破壊検査用X線源として期待される。

本稿では、開発した乾電池駆動高エネルギーX線発生装置について述べるとともに、従来から行ってきた研究がいかにこの成果に結びついたかについて考察する。

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: r-suzuki@aist.go.jp

Original manuscript received May 15, 2009, Revisions received July 14, 2009, Accepted July 16, 2009

2 乾電池駆動可搬型高エネルギーX線源

X線は、陰極から放出された電子ビームを加速し金属ターゲットに入射することによって発生させることができる。従来のX線管は、陰極からの電子放出はフィラメントあるいはヒーターによる熱電子放出現象を利用しており、陰極の温度が一定になるまで待たなければならない、ヒーターに電力を供給しなければならずX線を発生していない時でも電力を消費する、といった問題があった。特に、可搬型のX線源では、この問題によって利便性が損なわれていた。

筆者らが開発したカーボンナノ構造体を用いたX線源^[1]は、このヒーターやフィラメントが不要で、従来のX線源と同程度以上のX線を出力することができ、予熱やエネルギー消費の問題を解決できる。

開発したX線管に用いたカーボンナノ構造体は、共同研究先の企業が開発したもので、炭素で構成されるグラフェンシートが針葉樹状の形状をしていて、先端部はナノメートルサイズの中空構造で基板側に行くほど太くなっている構造のため、機械的に安定で先端部に電界が集中しやすく、室温で100 mA/cm²以上の高い電流密度の電子放出が可能である。

開発の当初は、このカーボンナノ構造体を電子源、モリブデンメッシュを引き出し電極、金属板をターゲットとしたX線管を試作したが、この構造では、メッシュ電極が高温になり、ガスを出して異常放電しやすいという問題があっ

た。カーボンナノ構造体は、放電によってそのナノ構造が損傷し、電子の放出特性が劣化するため、異常放電が多いことは致命的な欠点である。そこで、この欠点を克服するため、加速器開発に使われているシミュレーションコードを用いて、メッシュ電極を用いず、電子ビームがターゲットに効率的に集束するような構造のX線管を設計し、試作した。このX線管は、陰極の電子源に負の高電圧、陽極のターゲットに正の高電圧を印加する双極型のX線管である(図1)。

カーボンナノ構造体を用いたX線管の製作工程では、エージングと呼ばれる放出電流の安定化処理を行うが、この段階での異常放電は電子源にダメージを与えることから、放電を起さずに放出電流の安定化処理を行えるような処理条件を試行錯誤により探し出した。この結果、熱電子放出型のX線管にも引けをとらない高出力X線を発生できる冷陰極X線管が得られた。

このX線管は、ヒーター・フィラメントがないため、特に可搬型のX線検査の用途でその特徴を発揮できると考えられることから、図2の構成の乾電池駆動可搬型X線発生装置を完成させた。このX線発生装置は、単三乾電池1個を電源として蓄電回路に一時的に電力を蓄積し、X線発生可能な電力量が蓄積したら高電圧発生回路で高電圧を発生してX線管を駆動しX線を発生する。高電圧発生回路では±50 kV以上の電圧を発生し、100 keV以上のX線を発生できる。このX線管は、X線の発生時以外はエネルギー消費をほぼゼロにできるため、エネルギー効率が極めて高い。また、予熱が不要ですぐにX線を発生でき、可搬型のX線源として利便性が高い。さらに、電源を含めた全重量を5 kg以下にでき、持ち運びが容易である。

図3は、図2の蓄電回路から2 Jの電力量を高電圧発生回路に供給してX線管を駆動し撮影したテーブルタップの

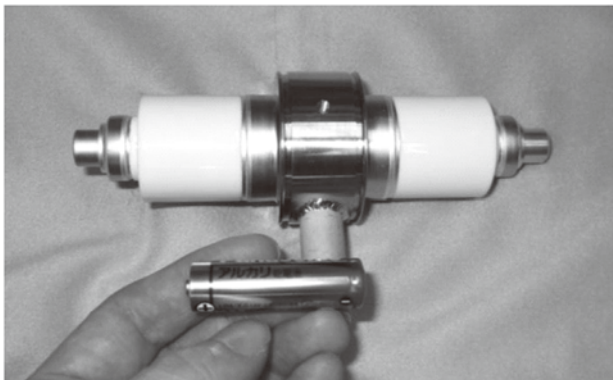


図1 カーボンナノ構造体電子源を用いたX線管。

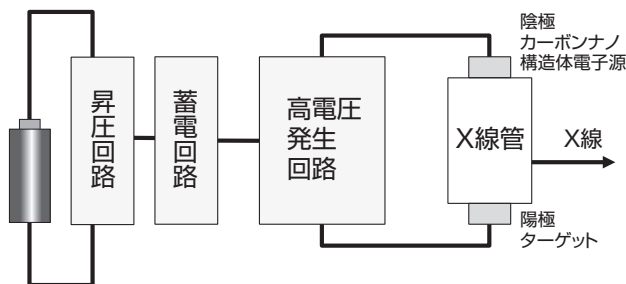


図2 乾電池駆動X線発生装置外略図。

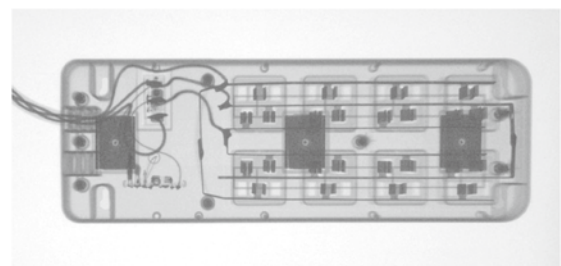


図3 (上) 被検体：テーブルタップ。(下) 乾電池駆動X線源により撮影したX線透過像。投入電力2 J。

X線透過像であり、コンセントの電極の開き具合などを認識できる。しかしながら、2 J程度では照射面積が広い場合細かい構造の部分でノイズが目立ち解像度が不十分である。

図4は、20 Jの電力量を高電圧発生回路に供給して撮影したX線透過像であり、ノートパソコン内のLSIチップなどが0.2 mm以下の解像度で撮影できる。また、直径10 cm程度のセラミック製碍子内の電極も鮮明に見える。したがって、20 J程度のエネルギーがあれば、様々な物の高精細X線透過像を撮ることができ実用的と言える。この20 Jの電力量を1ショットとしてX線透過像の撮影を行った場合、単三型ニッケル水素電池（容量：2000 mAh）1本を電源として100ショット以上（2本なら300ショット以上）の透過像撮影ができることを確認している。また、X線管の寿命は、1ショット50 Jの電力量で 10^6 ショットのX線発生を行っても劣化がみられず、可搬型のX線源としては問題無いことを確認している。

さらに、このX線管の最大放出電流は50 mA以上で、短時間に出力の高いX線を発生させることも可能である。これによって、1ミリ秒以下の短時間露光もできる。この高出力特性を利用すれば、通常のX線透過像撮影だけでなく、高出力X線が必要なコンピュータトモグラフィ（CT）撮影用のX線管としても使用できると考えられる。

X線源の技術をラジオにたとえるなら、従来のX線源は真空管式のラジオで、可搬するにしてもバッテリーを常に気にしなければならなかったが、カーボンナノ構造体を用いたX線源はトランジスタラジオに匹敵し、X線源の可搬性が飛躍的に高まる。これにより、現場でのX線非破壊検査・X線診断が容易になり、X線の検査法において新たなイノベーションが期待される。

3 成果実現までの経緯

筆者らは、これまで電子加速器の開発及び利用研究を行ってきており、2章で述べた新X線源の開発は、産総研

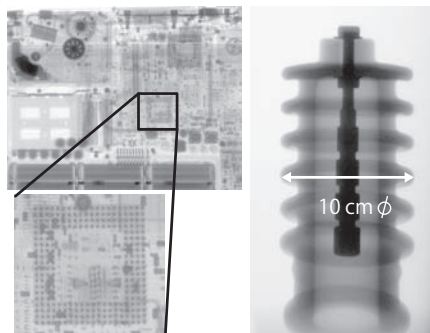


図4 投入電力20 JのX線透過像。
 (左) ノートPCのX線透過像。
 (右) テスト電極付アルミナ碍子のX線透過像。

が有する可搬型超小型加速器・X線源技術と、企業が開発したカーボンナノ構造体電子源の技術を統合することによって実現したものである。さらにこの超小型加速器・X線源の技術は、電子加速器の省エネルギー化、電子加速器の小型化などが技術のベースとなっている。以下に、新X線源開発の元となった各要素技術について述べる。

3.1 電子加速器施設の省エネルギー化

筆者らは、産総研の最大エネルギー400 MeVのSバンド電子リニアック（線形加速器）の管理・運転とそれを用いた研究を行ってきている。この加速器は、1979年に完成し、放射光電子蓄積リングTERAS、自由電子レーザー専用電子蓄積リングNIJI-IV、材料評価実験用高強度低速陽電子ビーム源などに使用されてきている^[2]。この加速器施設では、2005年度に老朽化した空調等の改修に合わせて施設全体の抜本的な省エネ化対策を実施した。

省エネ化対策前のこの施設の電子リニアック稼働時の電力は、瞬時600 kW以上、年間の電力使用量は約2.5 GWh以上であった。この電子リニアックの電子蓄積リングへの電子入射において真に必要なビーム電力を見積もってみると、 $320 \text{ (MeV)} \times 100 \text{ (mA)} \times 1 \text{ (}\mu\text{s)} \times 2 \text{ (pps)} = 64 \text{ (W)}$ と実際に加速器を稼働して消費している電力の0.01%しかない。また陽電子の実験の場合は、 $70 \text{ (MeV)} \times 100 \text{ (mA)} \times 1 \text{ (}\mu\text{s)} \times 100 \text{ (pps)} = 700 \text{ (W)}$ と実際の消費電力の数100分の1である。

この非常に低い効率にはいくつかの要因があるが、第一の要因として元来この電子リニアック及びそれに付随した施設の空調・冷温水系は様々な実験に対応するため数10 kWの大出力電子ビームの発生も可能なように設計され、それが蓄積リングへの入射のような低パルスレートモードや陽電子の実験のような低エネルギーモードに最適化されていないことがあげられる。

この問題の解決には、電子リニアック本体部だけでなく、空調や冷温水系も含めた抜本的な対策が必要である。そこで、長年蓄積した加速器技術と空調・冷温水・電源システムの最新技術を組み合わせた省エネ化対策を練った。この省エネ化対策を実施するにあたって、以下のような省エネ化の基本原則を設定した。

- 1) エネルギーを必要な量だけ使用する
- 2) エネルギーを必要な時間だけ使用する
- 3) エネルギーを必要な場所だけ使用する
- 4) 最新のエネルギー効率の高い技術を導入する

この基本原則に基づいて改修や新規導入する機器の仕様を決めるには、いつ、どこで、どれだけエネルギー（電力）が消費されているかを把握する必要がある。そこで、各部の消費電力を調査し、改修対策に割り当てられた予算の範

圏内でできる限りの対策を実施した³⁾。

その主な対策は、冷温水・空調システムの分散化と電子リニアックの大電力マイクロ波発生装置の更新である。冷温水・空調システムは、様々な実験条件下での消費電力を見積り、検討した結果、集中型よりも分散型のシステムの方が大幅な電力消費削減を期待できることがわかったことから、実験に応じて各部の空調・冷温水系を ON/OFF できる分散型のシステムを導入した。

S バンド電子リニアックは、電子加速のための大電力マイクロ波を発生するクライストロン装置として建設当時最新の 22 MW 出力のものを 8 台使用していた。現在はその 4 倍近い出力を出すことができる 80 MW クライストロンが開発されているため、3～4 台をこれ 1 台に置きかえた。従来のクライストロンの消費電力は、低パルスレートでは安定しないために蓄積リングに供する場合でもやむなく 50 pps 以上のパルスレートで使用せざるを得ず、このために 1 台あたり約 30 kW、3 台で約 100 kW の大きな消費電力であったが、新たに導入した 80 MW クライストロンは、蓄積リングの入射により適した 2 pps で運転でき、平均の消費電力は 10 kW 以下と削減できた。この部分に限ればエネルギー消費は改修によって 1/10 になった。これによって、冷温水や空調系の能力も削減でき、大幅な省エネ化が可能になった。

このほかにも上記原則に従い様々な対策を行い、図 5 のように施設全体として改修前に比べて約 60 % の大幅な電力使用量の削減を実現した。さらにこの対策によって、電子リニアックの稼働時間も増えており、研究を効率的に行うことができるようになった。

この対策に直接かわることによって得られた省エネ化のノウハウは、超小型電子加速器・新X線源の低電力量駆動回路開発につながった。

3.2 Cバンド小型電子加速器の開発

高強度低速陽電子ビームを用いた研究は、前述の S バン

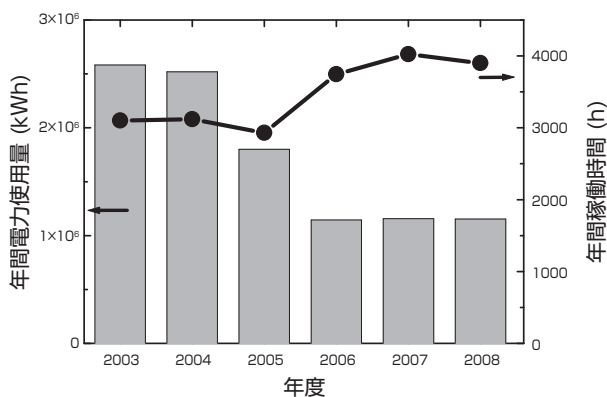


図 5 電子リニアック棟（産総研つくば中央 2-4 棟）年間電力使用量（棒グラフ）及び電子リニアック稼働時間（折れ線グラフ）。

ド電子リニアックを利用して実験を行ってきたが、この加速器は共用の加速器のために蓄積リングへの入射を行う場合に陽電子の実験を中断しなければならず、実験の時間が制限されていた。また、加速器が陽電子発生を前提として建設されたものではないため、陽電子の発生効率が悪いという問題もあった。これを解決するには専用の電子リニアックが必要で、限られた遮蔽スペース内に陽電子発生効率の良い電子リニアックを設置するには小型の電子リニアックが必要である。

さらに、陽電子ビームを用いた実験では、検出器が飽和しないようにするため、加速器のパルスレートが高い方が望ましい。そこで、陽電子発生用の電子加速器として、加速管へマイクロ波を供給してから電界が一定になるまでの時間（フィリングタイム）が短くパルスレートを高く取れる C バンド電子加速器を選定し、そのシステムのコンポーネント開発を行った（図 6）⁴⁾。この C バンド電子加速器は、共振器のサイズが小さくなることから、加速管の径や導波管のサイズも従来の S バンド電子リニアックに比べて小さく小型化できるという利点がある。

また、この加速器では、マイクロ波増幅管（クライストロン）に供給する高電圧パルスの発生回路において、高電圧大電流の半導体スイッチを用いた新しい回路の開発を行い、18 cm × 7 cm × 7 cm 程度の小型の半導体スイッチで C バンドクライストロンを駆動して約 2 MW の大電力マイクロ波を発生し、電子ビームを加速することに成功している。

これらの C バンド加速器の研究開発の過程で得られたマイクロ波の高周波化、高電圧半導体スイッチおよび高電圧パルス発生技術が新X線源を実現する上での技術的なベースになっている。

3.3 乾電池駆動超小型電子加速器

2000 年代に入り、原子力発電所の配管の蒸気漏れ事故や工場プラント配管の老朽化による事故が増える傾向が出てきて、これらの検査を現場で行いたいという社会的なニ

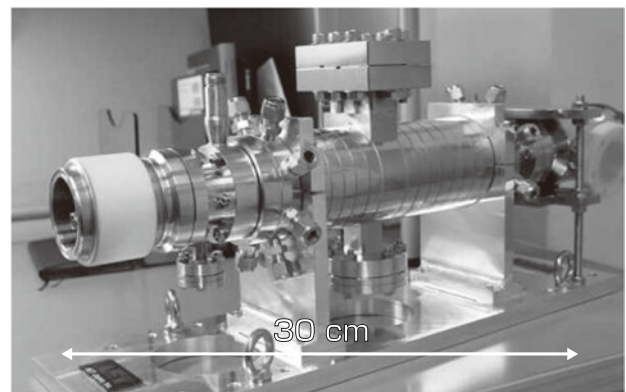


図 6 C バンド電子加速器初段部。

ズが強まってきた。特に保温材などの被覆材付配管は被覆材を剥がして検査するには非常に手間がかかり、被覆材を付けたままでの検査法が望まれていた。ちょうどその頃、筆者らは3.1節、3.2節で述べたように電子加速器の小型化・省エネ化の研究を行っていた。1章で述べたようにこの研究で得られた知見がこのニーズに応えられると考え、小型化・省エネ化を極限まで追求した電子加速器・X線源システムについての概念設計を行った。ここでは、効率的な高電圧パルス発生技術、マイクロ波発生技術、電子発生技術、制御系など従来の加速器の技術を1つ1つ原点に立ち返って設計した。その結果得られた詳細な見通しに基づいて、開発・試作を行い、超小型電子加速器を単三乾電池で駆動し高エネルギーX線を発生させることに成功した。

この超小型電子加速器の基本構成は大型の電子加速器と同じく電子銃、加速管、マイクロ波源、真空ポンプ、真空排気装置電源、パルス発生装置、制御システムなどで構成される。従来の加速器では加速管が多数あるので、加速管間の共振周波数を合わせるためそれぞれの温度制御に冷温水が必要だったが、この新たな加速器は加速管が1つで、乾電池で駆動する場合は熱負荷も少なく冷却の必要も無い。そこで、この加速器では、加速管の温度を制御して共振周波数を一定にする方式ではなく、周波数を変化させて共振周波数に合わせる方式として従来の加速器で大きな電力消費の原因だった冷温水系が無いシステムとしている。また、真空ポンプは高真空下では電力消費がほとんど無いイオンポンプを使用している。

この加速器では、マイクロ波源として前述のCバンドよりもさらに周波数の高い9.4 GHzのXバンドパルスマグネトロン管を用いている。このマグネトロン及び電子加速器の電子銃を駆動するために、電池電源を12 kV以上に昇圧して蓄電回路に電力エネルギーを蓄積し、半導体スイッチにより約100 kWの高電圧パルスを約1マイクロ秒の幅で発生し供給する。この高電圧パルスによってマグネトロン管で発生した9.4 GHzのマイクロ波を加速管に供給することにより、電子ビームを加速し、100 keV以上の高エネルギー電子ビームを発生する。この電子ビームを重金属ターゲットに入射することで、X線が発生する。

図7は、電子銃、加速管、真空ポンプ（イオンポンプ）、X線ターゲット（金薄膜）、X線射出窓で構成される加速管本体部の試作機の写真で、大きさはほぼ手のひらサイズ（うち加速管は約3 cm）、重量約1.5 kgである。この図中のフランジやバルブは試作段階でのみ必要なものであり、これらを除けばその重量は半分以下になる。この本体部とマイクロ波源や電源等のコンポーネントを小型のカメラ

ケースに収めて片手で容易に持ち運びできるようにしている。

この超小型加速器は、ピーク電力は100 kW オーダーであるが、その幅は1マイクロ秒であるため、パルスレートを低くすることによって平均消費電力を20 W以下にでき、単三乾電池10～12本でX線を発生できる。このX線源にX線イメージングシステムを組み合わせることにより、X線透過イメージングが可能である^{[5][6]}。このシステムを完成させるために、乾電池から高電圧大電力パルスを発生する技術を試行錯誤しながら作り上げた。これが、次に述べるカーボンナノ構造体の電子放出特性の試験やX線発生装置にも応用でき、短期間での開発に繋がった。

3.4 カーボンナノ構造体電子源のX線源への応用

前述の超小型電子加速器の電子源は、熱電子放出の原理を用いているためにX線を発生する瞬間以外の時間もヒーター電源を入れておかなければならず、単三乾電池10本程度では4時間程度しか持たない。そのため、乾電池は非常用電源の性格が強く、真にいつでもどこでも使えるX線源とは言えなかった。この熱電子放出電子源の問題は、高周波電子加速方式に限らず一般的な可搬型X線源でも同様である。

ヒーターやフィラメントを使わない高性能電子源があればこの問題を解決できるが、室温で電子放出を起こすカーボンナノチューブ（CNT）には、X線管のように強い電界をかけると構造が壊れすぐに劣化するという欠点があった^[7]。そこで、CNTよりも高電界下での安定性が高い冷陰極電子源を探し、ある企業が開発したカーボンナノ構造体（CNX）電子源に注目した。この電子源は、形が針葉樹状で基板側に行くほど太くなっている構造を持ち、先端部はCNTと同じナノメートル構造で先端部に電界が集中しやすくなっており、高電界下でもCNTより安定していると考えられることから、X線源として有望であると予想された。

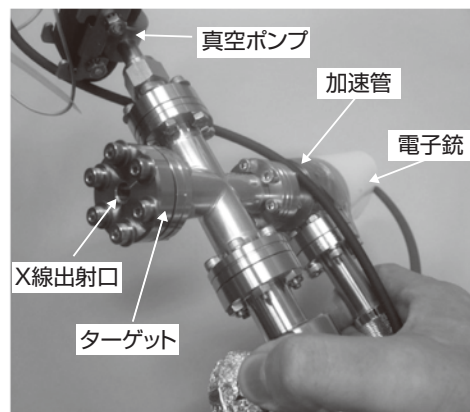


図7 Xバンド超小型電子加速器本体部。

そこで、CNX 電子源を用いた予備実験により動作を確認した上で2008年7月から製品開発に着手した。このCNX 電子源の他にカーボン系の冷陰極電子源なども市販されていたが、それを使わずにCNX 電子源を選択したのは、企業側が電子源の製造装置を当所に持ち込み、X線源の開発においていくらかでも試行錯誤ができる環境ができたからである。これによって、様々な条件の実験が可能になり、2章に示した新X線発生装置の最終的な実現に至った。

4 考察

ここでは、今回の乾電池駆動高エネルギーX線発生装置の開発を通じて得られた知見、考察を記す。

カーボンナノ構造体を用いた乾電池駆動高エネルギーX線発生装置の開発は、これまで述べてきたように、産総研で行ってきた電子加速器の省エネ化、小型化の研究とそれを応用した乾電池駆動超小型電子加速器の技術がベースとなって、それに企業の有するカーボンナノ構造体電子源の技術が統合することによって実現したものである。

電子加速器の小型化の研究では、元々大型の電子加速器を保有し利用していて、その問題点を解決したいという研究上のニーズが研究を開始した動機である。この動機に対して、省エネルギー化で小型化された加速器は非破壊検査・医療・滅菌など産業上も応用範囲が広いと考えられることから新たな開発課題として設定され、小型のCバンド加速器のためのコンポーネント開発に着手できたことがその後の加速器省エネ化や超小型電子加速器の開発につながっている。また、Cバンド小型電子加速器・Xバンド超小型電子加速器の開発では、従来のSバンド電子加速器や放射線検出技術などの技術・人材や放射線管理区域などの施設のリソースが大いに役立った。つまり、大型の電子加速器施設がなければ今回のような成果に至らなかったかもしれない。

加速器の省エネ化については、老朽化した空調・冷温水の改修という機会に巡り会えたことで、省エネ化を机上の空論とせず、様々な省エネ化対策を実施することができた。この対策の中には、通常の電子加速器システムでは採用しないような、試験的な対策も含まれており、それらの効果を把握することで電子加速器の省エネ化技術・ノウハウを蓄積できたことが大きい。

Xバンド超小型電子加速器の開発は、可搬型の高エネルギーX線源の社会的なニーズと産総研の電子加速器の小型化・省エネ化のシーズが結びついた。この加速器は、熱電子放出のためにヒーターがあり、真に実用的な可搬型X線源とは言えなかったが、この成果を外部に発表して我々の技術レベルを示すことができたことで、カーボンナノ構

造体電子源という新たな技術に巡り会うことができた。さらに、企業側もこの開発に熱意を持って取り組み、企業の電子源の製造装置を当所に持ち込み、集中的な研究の中で試行錯誤を繰り返すことにより、わずか半年という短期間で真に実用的なX線発生装置を開発できた。

このように、今回の成果は、個々の技術に加えて、研究施設、人、研究環境の変化、技術の蓄積、社会ニーズ、成果発表などの様々な要素が統合した成果と言える。ただし、それぞれの要素は、単なる寄せ集めでは新たな成果には結びつかない。たとえば、何の問題も無く電子リニアックが稼働していたなら、省エネ化・小型化できる手法やカーボンナノ構造体の電子源があっても積極的に採用しようとは思わず、その後の開発に繋がらなかったであろう。それぞれの要素技術が不完全なあるいは問題点を積極的に見つけるほうが、その問題を他の要素技術ととりいれながら1つ1つ解決していくことにより、他の要素技術との繋がりが強固になり、新たな成果に結びつくと考えられる。

5 まとめと今後の課題

本稿では、単三乾電池1個で動作し、高精細X線透過イメージを撮ることができるX線源の開発がどのような要素技術が結びついて実現したかについて論じた。開発したX線源は、X線源単体として従来のX線源を置きかえることができるだけでなく、予熱不要でどこにでも持っていくことができるという特徴があり、これまでに無い新たなX線非破壊検査への展開も期待される。その場合、X線源だけでなく、検出器や安全装置などトータルなシステムとして完成させる必要がある。また、大型の構造物の検査にも対応できるようにするため高周波加速方式によるエネルギー増強も必要である。

今後、これらの課題に取り組み、X線検査の分野に真のイノベーションを起こすよう研究を続けていきたい。

謝辞

本研究のカーボンナノ構造体を用いたX線源開発は、2008年度産業技術研究開発事業（中小企業支援型）においてダイライトジャパン株式会社及び株式会社ライフ技術研究所との共同研究により実施されたものである。Cバンド電子加速器開発の一部は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。本研究は産総研電子加速器グループの協力をいただいた。電子加速器の省エネ化改修では産総研研究環境整備部門及び監視盤室の協力をいただいた。カーボンナノ構造体の企業に関して産総研一村信吾理事よりご紹介いただいた。ここに関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090319/pr20090319.html
- [2] *TELL-TERAS Activity Report 1987-1990*, Electrotechnical Laboratory, Japan (1990).
- [3] R. Suzuki, K. Yamada, M. Koike, S. Ichimura, N. Sei, H. Toyokawa, H. Ogawa, M. Yasumoto, R. Kuroda, T. Ohdaira, A. Kinomura and N. Oshima: 50 % Reduction of energy consumption in AIST electron accelerator facility, *Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 242-244 (2006).
- [4] R. Suzuki: Generation of slow positron beam by an electron LINAC and its applications, *Proc. 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 82-86 (2005).
- [5] 鈴木良一：乾電池で動作する超小型電子加速器, *検査技術*, 13 (6), 5 (2008).
- [6] http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2007/pr20071022/pr20071022.html
- [7] 奥山文雄：カーボンナノチューブを電子源とするX線管, *日本放射線技術学会雑誌*, 58 (3), 309-313 (2002).

執筆者略歴

鈴木 良一 (すずき りょういち)

1987年筑波大学大学院工学研究科博士課程前期修了、1991年博士(工学)取得。1987年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所主任研究員。電子加速器技術と電子加速器を用いた高エネルギーX線発生・計測や高強度低速陽電子ビームを用いた材料評価技術の開発・応用に関する研究に従事。2004年電気科学技術奨励賞(オーム技術賞)、2005年市村学術賞(財)新技術開発財団。



査読者との議論

議論1 電子加速器小型化での独自の技術開発について

質問・コメント(一條 久夫:産総研評価部)

電子加速器の小型化の記述では、独自の技術開発であることが分かり難いように思います。著者自身の論文、特許などを引用しつつ、独自性ある研究結果が導かれたことを記される方が良いのではないのでしょうか。

回答(鈴木 良一)

電子加速器システムでは、加速周波数を上げれば小型化ができることは公知の事実であり、それ自体に独自性はありませんが、陽電子の発生用に小型電子加速器の開発を始めたのは我々が最初ですので、それを報告した学会発表の論文を引用しました。また、この成果は本論文の主題ではないため、研究の経緯の章に入れました。

議論2 乾電池駆動超小型電子加速器の概念設計での取り組みについて

質問・コメント(一條 久夫)

乾電池駆動超小型電子加速器の開発に関する記述に、概念設計と記されていますが、すでに経験した省エネ化を今回の概念設計に如何に活かしたのかを、技術的側面を中心に書き込まれてははいかがでしょうか。

回答(鈴木 良一)

詳しい内容は知財に登録しているため書くことはできませんが、概念設計において、どのような技術に取り組んだかについて文章を加えました。

議論3 非破壊検査への適用可能性や課題について

質問・コメント(一條 久夫)

原稿では最後のパラグラフで、著者自身の創意・工夫が記されると、独自性が明確になるように思います。また、ここで非破壊検査への適用可能性や課題についても記されては如何でしょうか。

回答(鈴木 良一)

図と文章の言葉を統一しました。超小型加速器の冷温水系が無いシステムについての説明を加えました。このパラグラフと次のパラグラフで、超小型加速器の課題とカーボンナノ構造体X線源開発にいかにか繋がったかについて書き込みました。

議論4 本研究の構成要素について

質問・コメント(田中 充:産総研研究コーディネータ)

省エネ化、小型化、電子源の導入が本研究の構成要素と考えられます。それらを支える広範な技術が加速器施設を用いた研究のバックグラウンドの上に培われていたところへ、省エネ化・小型化を図らねばならないとの強い要請への対応の実験がその実用化に拍車を掛けたこと、高性能の電子源に関する外部機関の重要な技術導入も同様に拍車を掛けるのに役だったことが、本格研究の構成学と思います。

回答(鈴木 良一)

そのとおりと考え、読みやすいように本論文の並び換えをしました。

議論5 カーボンナノ構造体のX線源用電子源としての有効性について

質問・コメント(一條 久夫)

原稿では、カーボンナノ構造体電子源・X線源について、X線源用の電子源として有望・とのみ記されていますが、数値も交え、どう有効なのかを記されると理解が深まるように思います。また、技術的課題を解決するために検討された種々の方法、カーボンナノ構造体電子源を組み入れることにより期待される効果などを勘案した上、この技術統合に至ったプロセスを簡単に記されると、要素技術の選択・統合が明確になるのではないのでしょうか。

回答(鈴木 良一)

田中査読委員の意見も踏まえ、このパラグラフが論文の主題ですので、これを章としてまとめ、これまでの経緯の前にもってきました。それに伴って、数値も交えて実験結果等を入れ、詳しく説明するようにしました。カーボンナノ構造体の技術の統合については、経緯のほうにも少し説明を加えました。

学問と技術の統合

－ 横幹連合・統数研・産総研合同ワークショップ －

狭い技術分野に限定した研究開発だけでは、社会や学問の現代的要請に応えられないとの認識が強まっています。2009年1月19日(月)産総研臨海副都心センターにて、産総研シンセシオロジー編集委員会、特定非営利活動法人横断型基幹科学技術研究団体連合(横幹連合)、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構統計数理研究所(統数研)の3機関が合同で、「学問と技術の統合」に関するワークショップを開催しました。構成的研究方法論の理解や促進のために、また各機関の研究上の理念共有のために、本ワークショップにおける6名の講演概要を紹介します。

【日時】 2009年1月19日(月) 13:00～18:10

【会場】 産総研臨海副都心センター本館第1会議室

【議事】 司会進行 鈴木久敏(横幹連合副会長)

「構成的研究方法論(シンセシオロジー)とは」(小野晃、産総研副理事長)
「個別適合メガネフレームの製造・販売支援技術」(持丸正明、産総研副研究センター長)
「知の統合とは」(木村英紀、横幹連合会長)
「知の統合の研究事例」(鈴木久敏、横幹連合監事)
「知識社会におけるモデリング」(北川源四郎、統計数理研究所長)
「モデリングの研究事例」(樋口知之、統計数理研究所副所長)

「構成的研究方法論(シンセシオロジー)とは」

産総研副理事長・シンセシオロジー編集委員長
小野 晃

産総研では *Synthesiology* と名付けた学術誌を2008年1月に創刊し、季刊でオリジナル版と英語翻訳版を発行しています。電子ジャーナルとしてインターネットで見ることができます。この学術誌は、産総研の掲げる研究方法論の“本格研究”のうち、特に“第2種基礎研究”に焦点を当てて論文化したものを掲載しています。

第2種基礎研究は従来“応用研究”と呼ばれてきましたが、世間の関心を集める基礎的な研究段階(第1種基礎研究)での発明や発見が長いリードタイムを経て現実の製品となる段階(製品化研究)までの研究開発上の“死の谷”に相当します。この死の谷の期間を基礎研究と位置づけ研究していこう、そしてそれはどういうものであるのかをオリジナルな論文として著してみようということになったのです。

研究の展開に関して、時間の経過に沿って基礎から応用を経て開発に至るリニアモデルをよく見かけます。しかし、本格研究の視点で捉え直してみると、応用研究に当たる第2種基礎研究はたくさんの第1種基礎研究の成果に依存し、立脚しています。また、開発に相当する製品化研究からのフィードバックもあります。つまり研究展開は一方向で

はなく逆方向も同時に存在するというモデルです。このモデルでは研究の担い手である組織やグループ、個人も左から右へ行ったり、右から左へ行ったり、あるいはぐるぐる回ったりします。

このぐるぐる回る中で得られた研究成果は既存の学術誌にはなかなか投稿しにくいですし、何より方法論さえありません。しかし、これまで応用研究と言われてきたもの、実際は基礎研究を個別の分野に単に適用したものではなく、応用研究同士が影響しあい、互いに共有すべき大切な事柄があるのではないかと考えられ、そういう意味で汎用性とか普遍性をもった基礎研究の1つであると位置付け、それを“第2種基礎研究”と名付けました。

さて、イノベーションの推進に対しては社会でも大変関心がありますが、大事なのは予算や体制といった政策と、もう1つ研究あるいは研究者自身に関する問題です。特に産総研のような公的研究機関の、恐らく大学もそうだと思いますが、公的研究の成果を社会にどう還元していくかということは重要です。国民とか産業界という成果の受益者自身がニーズを提示し、政府の各省から税金の一部が研究資金として公的研究機関や大学に流れ、研究者はそこで活動して第1種基礎研究の成果を学会に論文投稿します。論文がピアレビューという査読を通して学会に受け入れられれば学術論文として出ていきます。こういう社会還元のルー

トが職業人としての研究者の頭の中に定着しています。

ところが、実際には必ずしもこのルートだけではありません。学会を経由しないで国民や産業界に直接貢献する、あるいはいわゆる産学連携といった形もあります。例えば、企業との共同研究、スポンサーからの受託研究、これらは学会活動を経ずに報告書などが研究機関から直接ユーザーにいつているわけです。シンポジウム、セミナー、展示会というのがあります。このようなことについてこれまで研究者は、どうもこれは本来の研究ではない、あるいは研究の本道ではないと思ってきたのではないのでしょうか。やはり一流の学術誌に載らなければよい研究ではない、と思いつ込んできたように思います。

研究機関・大学と国民・産業界を直接結ぶ流れが第2種基礎研究の特徴です。ここには、要素技術ではなく統合した技術、かなりまとまった技術、リスク評価、計量標準や規格などさまざまな形のアウトプットがあります。これらも立派な研究であると位置付け、それを論文にし、研究者のオリジナリティを認め、プライオリティも認める手段として新しいジャーナルを作ったらどうかというところから始まりました。

現在我々の周りにある学術論文では科学における論理整合性、つまり事実を矛盾なく説明できることが求められています。それから新規性で、これも新たな事実や知見を創出することに価値があるというのが基本で、そのために、ピアレビューという専門家による査読制度が設けられました。学術雑誌ではプライオリティも重視されます。一方、有用性については必ずしも十分な検証を要求しませんでした。この制度はここ300年ほどの間大変うまく機能し、研究者はいち早く仕事をしよう、成果を出そうと一生懸命働き、今日に至っています。

しかし、この歴史ある制度はこれまでうまく回ってきた反面、その反作用とも言える“病理”も目立つようになってきました。論理整合性を過度に追求すると、事実を矛盾なく説明するためにどんどん狭い領域に入ってしまう。新規性を過度に重視すると、他の研究者との些細な違いを強調することに集中してしまう。それらの代償として、私たち研究者は有用性の検証努力を放棄してきたのではないかという気がします。ピアレビューについては、著者とピアレビューアーがあまりにも専門分野が近いものですから、その中で狭い問題しか査読の対象になっていません。我々がやってきた基礎研究の学術誌は、特定の学会の特定の分科会の人たちの間でしか興味をもたれなくなってしまい、国民や産業界からはひどく縁遠いものになってしまいました。

こういう中で、産総研では本格研究とか第2種基礎研究をやろうということになり、第2種基礎研究の方法論と

はどういうものかを考えました。そして本格研究を通してイノベーションを加速する、また、持続性のある社会を構築するために科学技術は何ができるのかという問いかけへの答えも出したいと考えてきました。

そもそも第2種基礎研究を記述する論文形式というのはこれまでありませんでした。自然とか人工物という研究の対象があり、それを主として分析(アナリシス)という手法でいろいろな結論を導き出すのは、今までの300年ぐらいの科学の歴史だと思います。これに対して第2種基礎研究というのは、研究目標が社会的な何らかの価値につながっているもので、その目標をどういうシナリオで実現していくのかをまず考え、必要な要素技術を選択・設定し、足りなければ自ら開発し、そしてそれらを統合あるいは構成しながら実現していくというものと考えます。この統合とか構成がsynthesisに相当しますので、それを新しい学術誌のタイトル *Synthesiology* に持ってきました。*Synthesiology* のポイントは、シナリオと統合・構成を書くことになります。

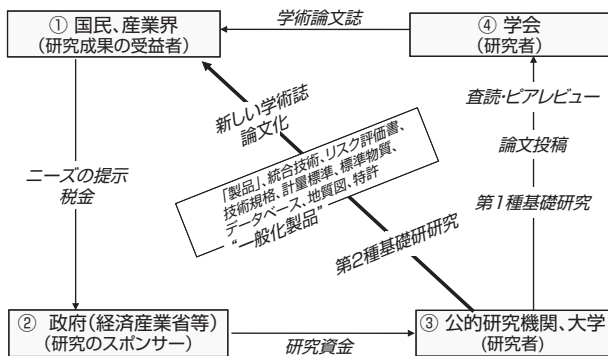
実は、シナリオは、今までの学術誌でもイントロダクションで書かれていました。イントロダクションでは、過去の研究の歴史を批判的に見て自分はどのような新しいアプローチをとったかを書くのですが、著者の見識がよく出ます。ただ、そこは査読の対象ではなく、どう書かれていようがさほど問われることなく済まされてきたと思います。*Synthesiology* ではそこをしっかりと書いてもらう、しかも、苦労話ではなく、合理的な科学技術の言葉でシナリオを書いてもらうことが大事です。シナリオをどう作ったかは研究者のオリジナリティでもあると思っています。同じ目標に対しても一人ひとりアプローチの仕方は異なりますので、要素技術をどう選択・統合したかにもオリジナリティがあるでしょう。*Synthesiology* 第1巻第1号に掲載された論文タイトルを見ていただきますと、「大量精製」とか、「標準化」、「低コスト製造」、「評価戦略」、「設計・販売支援技術」、「信頼性向上」など今までの論文とは一味違うことにお気づきいただけると思います。

Synthesiology に対してはいろいろな意見をいただいています。著者からは、「これまでの学術誌には書けないことが書けてよかった」と言われ、これは我々の狙いどおりでうれしく思っています。その一方で、なかなか書き方がわからないとも言われています。査読に関しては、分野が違って論文が理解できる、査読ができる、査読意見が出せるということが経験上わかってきました。工学、理学、薬学、農学と専門を分けることなく、あらゆる分野から読んで理解可能な形に書かれていることもわかりました。読者からは実名入りの査読者と著者との議論が新鮮だとか、アメリカの研究者から大変興味ある雑誌だとのメールをもらいま

した。産業界からもポジティブな意見をいただいています。

今後の *Synthesiology* の展開においては、論文を一層充実させ、産業界や大学の方々にも広めていきたいと考えています。他の学会、組織の皆さんとどのような関係を持ち、連携していくかは、今後の課題です。

研究成果の国民・産業界への還元プロセス



「個別適合メガネフレームの製造・販売支援技術」

産総研デジタルヒューマン研究センター副研究センター長
シンセシオロジー編集委員 持丸 正明

構成学の研究の論文化についてメガネフレームの設計・製造・販売を例にして述べたいと思います。このメガネフレームは個別適合を目指したのですが、要点は「あなただけ」を「だれにでも」です。



初めに産業化に伴って生活の質が向上すると我々の背が高くなることを指摘しておきます。明治以降、特に戦後、日本人の平均身長が伸びています。ただ全員の背が伸びたのではなく、実は今はいろいろな身長の人がいるという時代です。平均寿命の伸びも併せ考えると世代間での大きな身長差が生じている時代とも言えます。こうなると同じものを大量に作って大量に売ることができません。そこで私は「あなたの身体を測って合うものを作り提供しましょう」と考えました。そういうサイクルを回すと人の身体のデータが集まり蓄積できます。データが社会的に蓄積されると「あなただけ」から「だれにでも」に変えることができます。

私たちが目指すのはマスカスタマイゼーション (Mass Customization) で、多くの人の個別の注文に応じてものを作ることです。店と工場が一緒になっている、そんなスタイルです。メガネの例では、店で顔を測って、サイズに応じてメガネを選び、どのように似合うかをシミュレーションして、ファッション性とフィット性の両方を推奨できるものを

作ろうということになります。ただ、このシナリオの中にはいろいろな技術を含みますし、数多くの外部との共同研究が全部寄り集まっていますので、プロジェクト報告書としてまとめることができません。技術としては、まず測る、それをモデル化・統計処理し、ものを作って売る、その過程でデータを継続的に蓄積してデータバンク化する、そういうことです。それら全体の“構成”がシナリオになります。

かつて経済産業省の委託研究で開発した頭部形状計測システムは、短時間に精密に人の頭部を、しかもあごの下や耳の後ろなども測れます。12台のカメラを備えたとても大きな機械です。耳の後ろは、メガネのつるがかかるところでもとても重要です。測ったデータをモデル化しますが、データ自体は点群情報(座標値)にすぎません。メガネ設計に活かすには解剖学的な情報やメガネとの相対的位置関係の情報を加える必要があります、そうすることにより、コンピュータで設計可能な状態になります。具体的にはメガネ設計に重要な特徴点を利用し、全体で211点、366ポリゴンという多面体を構成します。どの人も366個のポリゴンで、何番目の点は必ずどこに対応するというのが全部一致していますからとても筋の良いデータになります。これで目鼻の距離を出したり、平均値や標準偏差を求めたりといった統計処理が可能になり、形状の個人差の分布図を表すこともできます。

実際に日本人男性56人の顔形状を計測し、第1軸に“頭部の奥行きと彫りの深さ”、第2軸に“顔の幅と眼窩の高さ”の情報を入れて2次元で分布図を作成してみると、これで80数%の個人差を表現できることがわかりました。情報を増やしていくと、5次元で90数%になります。つまり耳の位置と骨の位置はメガネ設計に重要で、2次元でも大きな特徴を捉えれば、相当な範囲の個人差をカバーできます。

このように統計処理したものに新たなサイズ分類を加え、メガネメーカーと共同してメガネフレームを作りました。その際、合理的な説明はできないのですが、メーカーにとって幾つ作れるのかはとても大事なので、製造と流通にかかるコストを勘案しつつ、顔形状の特徴で個人差を4つのグループに分けました。どのグループについても出荷量が同じくらいになるよう調整されています。

次に、作ったメガネフレームの適合性評価を行いました。圧迫力とかずれ量、そしてフィット感を伴う心理評価です。新しいフレームは顔形状にぴったり合っているのですが、圧迫力が小さくても、頭を振ってもずれたりしません。このことはメガネをかけたとき、古いフレームと新しいフレームとで受ける感じが劇的に違うことでわかります。しかし、驚いたことに総合的なフィット感になると予想したほどの違いが出

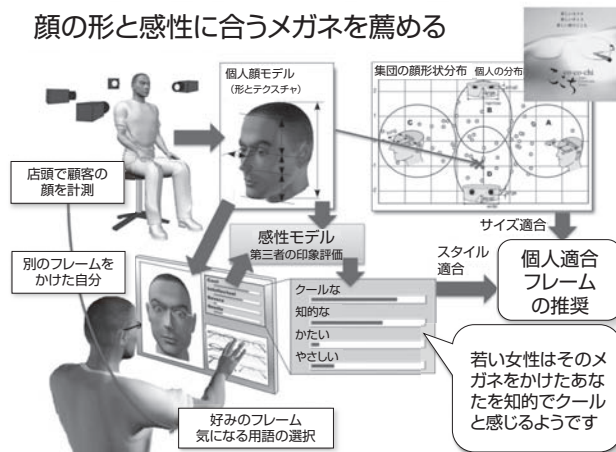
ません。日常生活で長い間メガネをかけてきた人は、新しいフレームの圧迫力の弱さが、逆に“もの足りなさ”を与えてフィット感を減じているようなのです。

新しいフレームを使ったメガネは実はもう商品化され売られています。売るときお客さんにどのメガネがいいか、どのように推奨するかを技術的な面から検討してみます。まず、メガネを必要としている人は一般的に視力が悪い人です。自分のメガネをはずしてしまうと、度のないガラスをつけたメガネフレームをいくらかけたところで、鏡に映る自分の姿をよく見ることはできません。そこでコンピュータグラフィックの自分の顔に別のメガネをかけて見てもらうこととなります。これ自体はそれほど難しくはありません。問題は、メガネをかけたときの“印象”です。しかも自分で感じる印象ではなく、第三者があなたを見たときの印象です。「そのメガネをかけると知的、クールに見えますよ」としゃべってくれるようにしたい。それは印象を得点化し、メガネをかけたときの物理量とともに数学的な感性モデルに落とし込むということです。

印象を表す言葉はたくさんありますが、類縁関係から整理して言葉のマップを作りました。それら言葉の中から「優しい－怖い」とか「明るい－暗い」、「おしゃれな－ダサイ」といった7対の言葉を選択し、メガネをかけた仮想顔にどう感じるか、ウェブ上でアンケート調査しました。するとメガネと仮想顔が持つ物理量と言葉の印象とはかなりの相関があります。メガネは「おしゃれな－ダサイ」や「若い－老けた」という印象に効いてきます。「優しい－怖い」や「明るい－暗い」はメガネよりも顔自体が支配的に影響するようです。

最終的にはいろいろなメガネを次々とつけかえて、印象を表す7対の言葉それぞれの相対的な印象度をディスプレイ上に示します。これはメガネ感性シミュレータと呼んでいます。ただし、このシミュレータは研究室用で、計測する部分まで含めると高額で場所を取ります。店頭には安く、小型で、簡単に操作できる、そういうものがが必要です。まだ店頭で稼働しているものはありません。顔形状のデータを収録した顔形状データベースから得た平均顔にお客さんの特徴を付加するとお客さんに“近い顔”を復元できます。それを基に個人に適合したメガネを勧められます。通常の商品より1.5倍くらいまでの価格なら購入してもよいという調査結果があり、個人が特定されなければ顔の形状データを利用してもらうことも構わないという人が6割ほどいます。これはかなり“前向き”な数字だと思いますし、消費者がモノづくりの環の中に入ることを意味しています。

顔の形と感性に合うメガネを薦める



「知の統合とは」

横断型基幹科学技術研究団体連合会長

理化学研究所理研BSI-トヨタ連携センター長 木村 英紀

今日は「知の統合」についてお話し

させていただこうと思います。初めに形式的に「知の統合」とは何かということ

を文章で示したものを紹介します。日本

学術会議では「異なる研究分野の間

に共通する概念、手法、構造を抽出す

ることによってそれぞれの分野の間での知の互換性を確立

し、それを通してより普遍的な知の体系を作り上げること

を「知の統合」としていますが、これで十分かどうか。「知

の統合」には少なくとも2種類あります。1つは「還元的な

知の統合」、もう1つは「生成的な知の統合」で、両者は

相互補完的なものです。

ハーバード大学のウィルソンが1998年に『Consilience』

という本を出しました。意味は「ともに跳躍すること」で

す。本の副題は「知の統合」となっていて、ヒューウェル

が1840年の著書『帰納的諸科学の哲学』で述べた「跳躍

には統合が必要である」との表現がウィルソンの考える「知

の統合」にぴったり一致するとしてConsilienceを本の題

名にしたようです。ヒューウェルの時代は近代科学が発展

し、進歩がこのまま続けば完璧な世界に到達するだろうと

人々は楽天的でした。その一方、ケトラーは1833年に『社会物理学』

を著し、理想主義や楽観主義ではだめで、文

と理の乖離が深まったと主張しました。

脳科学者でもあるウィルソンは学問の進歩で新しい啓蒙

主義の時代を築くべきで、そのためには自然科学(サイエ

ンス)をベースにした「還元的な知の統合」が必要だと説

きました。脳の研究者には、脳科学の進歩が全てを解き

明かすとする“唯脳主義者”とも呼べる人がいます。ウィル



ソンはその一人で、彼の思想は唯物的、物質的であり、それは精神や文化にも及ぶとしています。脳の働きも物質過程や物質科学の言葉で記述できると考えているわけです。

「還元的な知の統合」に対して私たちが提唱するのが「生成的な知の統合」です。生成的ということで、新しい知、新しい知的活動の場、新しい技術、新しい産業を作り出す。そこに知の統合の根拠と目的を求めようというわけです。では還元主義とか「還元的な知の統合」とはどこが違うのか。

日本学術会議の2004年の報告書『新しい学術の体系』では、物質科学、生命科学、人文・社会科学などは秩序原理が異なるのだから、全てを脳とか物質に還元できないと述べています。むしろそれぞれが境界条件となり、多層構造をなしている。この多層構造をもとにした知の統合を考えなければなりません。

さて、知の統合とは“言うは易く行うは難し”です。既に学術の各分野には膨大な知の集積があり、その上に新しい知が積み上げられていきます。それらを全部学び取るのは不可能です。異分野の言葉を理解することさえ難しい。例えば、脳科学でIPLは下頭頂野、免疫学でIL-1といえはインターロイキン-1を指します。この略称がわかっていないと論文は読めない。このような状態で知の統合は可能なのか、とても深刻な問題です。

しかし、各分野が集積した知には、その分野の専門家が意識できない限界があり、その限界は、知の集積のある段階で他の分野の視点から明らかになるのです。すなわち専門性というものです。このとき科学の共通の言葉、数学（論理）があれば、また専門家が隣にいて聞くことができれば、限界をお互いに了解し合うことができます。

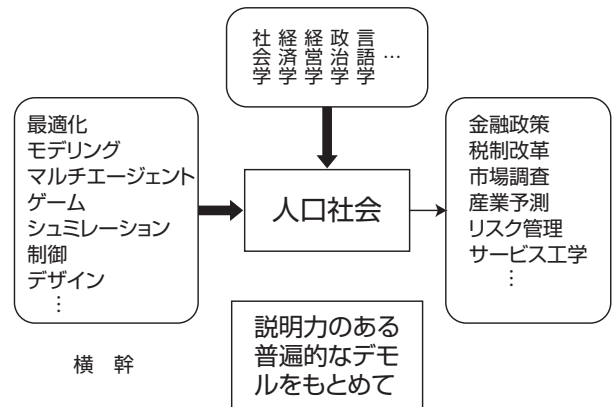
「存在の二分規定」ということがあります。質量と形相、物質と論理、「もの」と「こと」、構造と機能、ハードとソフトなどです。これらはある同じことがらを別の面から言っているわけですが、両者を結びつけるツールというべきものがあって、そのツールこそ「横断型基幹科学技術」であり、それにより知の統合も可能になるのではないかと考えています。

ではツールを借りてどのようにして知の統合を行うのか。伝統的な学問分野同士の間での結びつきは還元主義とおしの結びつきですから知の統合とは言いません。例えば、生物学と物理学から生物物理学が生まれましたが、この場合は物理学が生物学の一部を吸収して生まれました。このようなものではない、つまり生成的な組み合わせによって知の統合が起こり、大きな可能性を生むのだらうと思います。

サイバネティクスは巨大な知の統合の例です。伝統的な電気工学や人文分野の経済学、心理学に、新しい通信工

学、制御工学などが結びつき、その先に人工知能、ヒューマンインターフェース、行動科学、経済予測といったものが出てきました。電気工学と機械工学に制御工学が融合したメカトロニクスではロボット工学が生まれました。ライフサイエンスでは盛んに知の統合が起こっています。バイオインフォマティクスとか制御生物学です。計算論脳科学というものもあります。国土・都市、経営・経済においても知の統合は考えられます

人口社会という言葉があります。これは1つの「場」と呼べるもので、これを介して様々な学問が統合されて最適化、モデリングがスタンダードな技術のアプローチとなり、金融政策、税制改革、市場調査、リスク管理、サービス工学などにおける適切な新しい成果が得られるものと期待しています。これまでもいろいろなモデルがあって、例えば災害回避や交通シミュレーションで答えが導かれていますが、実際の政策にあまり使われることがなかったのは、目的のために、そのたびごとにモデルを作っていた、つまり、モデルに普遍性がなかったからです。人口社会では“エージェント”というものを公理的に定義し、そのエージェントの動きによっていろいろな現象が1つのモデルから出てくる。まさに文と理の融合が獲得できるのではないかと、それを横幹連合でやってみたいと思っています。



「知の統合の研究事例」

横断型基幹科学技術研究団体連合監事
筑波大学理事・副学長 鈴木 久敏

私は、学際とか融合、それらと横断との違いについて概念整理をし、次いで「知の統合」に関するインタビュー調査を踏まえた企業等の事例を報告します。最後に、まとめと提言をしたいと思っています。



まず、2つの基本的なディシプリンの周辺で、これまであ

まり重要視されていなかったようなところで、2つのディシプリンの知識をもって新しく何か研究が進められる領域が見つかってきたときに、そこを学際と言うのだろう。融合というのは、その学際領域が発展し自立して、1つの領域を作ってしまった状態を言うのだろう。そのように考えています。

では、横断（横断型基幹科学技術）とは何か。従来の縦型とも言える物理や機械や土木の分野に、統計や最適化や制御と言った異なる原理をもつ科学技術が横断を通すように使われる。するとそれは“領域フリー”の分野であり、横型分野とも横型学問とも呼べる、これが横断の1つ目の定義だろうと考えられます。吉川産総研理事長（当時）の唱える「領域無限定の科学」に相当するでしょう。

縦型と横型の接するところで新しい課題がずいぶんたくさん生まれていますが、この他にもあるのではないかと横幹連合の中で議論になりました。縦型の学問分野の知識を総合して何かを解決する、あるいは俯瞰してものを見る。融合をさらに広域化したような、マルチディシプリンの考え方は。これが横断の2つ目の定義です。さらに、縦型・横型それぞれの分野の知識や技術を融合・統合して、新しい社会的価値を生み出すとする学問を横断であると捉える第3の定義もあります。それを3つの軸で、第1軸に従来の縦型学問分野、第2軸に横型学問分野、第3軸に技術の社会化という軸で表すというのではないかと議論したのです。

ところで、最初は横型の学問という考えで集まったのが横幹連合でもあるのですが、横型の学問同士の融合もあるはずで、その原理は何か、それを社会的な価値へと高める、社会的なアウトプットを出すための技術があるだろうと考えるに至りました。そういうところこそ横断型基幹科学技術であると言うべきだとすると横型の学問というのは、横断型基幹科学技術の基礎科学であると認識されました。

知の統合の事例について、インタビュー調査をもとにして紹介します。1つは内閣府からの委託による「イノベーション戦略に係る知の融合調査」で、企業、大学、公的研究機関を含め、27の事例を調査しました。プロジェクトリーダーや経営幹部に、イノベーションがどうやって起こり、そこに知の融合・統合がどう関わったかということを探って報告書にまとめたものです。もう1つは横幹連合の中に作った「横断型人材育成推進」に関する調査研究会において、横断型人材がいた場合のイノベーションの成功例、横断型人材の能力や適性、企業内での横断型人材の育成などを約10の企業にインタビューをしてまとめている報告書です。

1例目はある電線メーカーにおける光ファイバーの開発事例で、ガラスをコアにした光ファイバーの製造に関するもの

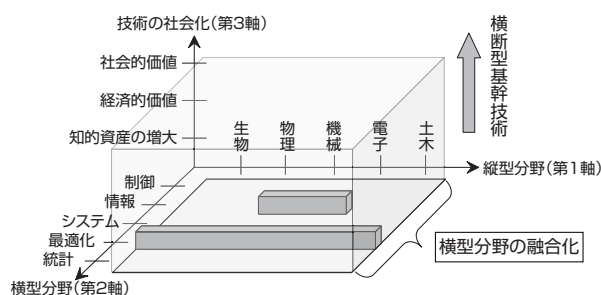
です。この開発で実際に役立ったのは実は樹脂系技術で、これにより長大かつ大量の光ファイバー製造が可能になりました。また、解析には自ら持っていたシミュレーション技術が活かされたようです。開発の中心人物の専門は電子工学で、業務上必要な技術としてガラスやセラミックスを独学で勉強したということで、このような人材がいてはじめて新しい技術が確立されたと言えます。また、製品ではなく商品、つまり“売れる”ものを作るという考え方が重要であって、要素技術、生産技術、商品開発技術のトータルでテーマを選定しています。マーケティングもポートフォリオ分析も研究ステージの管理も導入していますので、これらの知の総和が成功につながっています。

2例目はある電子機器メーカーでのデジタルカメラの開発事例です。従来の光学式カメラではできない新しい機能を付加するため、液晶モニターをつけたり、コンピュータにつなげるようにしています。デジタル化により小型化、低価格化もできました。このメーカーはもともと電卓やデジタル時計、電子辞書などを手がけていたのですが、画像には圧縮率の高いJPEGに着目し、また、技術者自身が市場に出かけてユーザーのニーズ調査をしたところ「撮った画像をその場ですぐ見たい」とのユーザーの意向がわかり、それならば液晶モニターをつけようという発想になったようです。コンピュータに画像を取り込める特徴を活かすため、商品としてのデジタルカメラをパソコン売り場で売り出したことも成功の一因と考えられます。異分野の知を導入することが必要なのだということがわかります。企業風土の点では、この会社にある「消費者の求める、消費者が喜ぶ製品を作る」という意識、異分野の技術者を含めて自由に討議できる雰囲気、技術者が商品の企画や開発にまで関わる体制が特徴として挙げられます。これにより横型の連携がとれ、複合型の技術を創出しやすくなり、成功につながったでしょう。

まとめてみますと、新たな課題の多くは縦と横の接点で起こっている、また、社会的な価値を創出することで課題

横断型基幹科学技術とは？

■ 縦型分野と横型分野の知識や技術を融合化・統合化して、社会的な価値を生み出す学問分野



を解決に導く、そして個別課題の解決に留まるのではなく、解決策の普遍化を目指すことが重要である、このように考えられます。ここまでいってはいじめて横断型科学技術と呼べるのではないのでしょうか。その技術は縦型分野の単なる融合ではなく、融合化や統合化を促進する技術であるべきです。同時に、イノベーションを引き起こすには、この技術を支援することが重要になります。

「知識社会におけるモデリング」

統計数理研究所長

北川 源四郎

「モデリングとは何か」という仮題をいただきましたが、近年モデルの概念や考え方が変わってきているということを中心にお話します。情報社会では、多くの情報を持った方が勝ちと言われましたが、次第に“だれでも、いつでも、どこでも”大量の情報にアクセスできるようなユビキタス社会の時代になりつつあります。実際にこのようなユビキタス社会が実現すれば、情報自体には相対的な価値はなくなるわけですから、いかにその情報を活用して、目的に即した情報や知識を獲得していくかが勝負になってきます。



社会制度に関していえば、既に第二次世界大戦直後から資本主義社会は変質してポスト資本主義社会に移行したといわれています。P. E. ドラッカーは、ポスト資本主義社会における資源は、資本でも土地でも労働でもなくて知識である、つまり、ポスト資本主義社会は知識社会になると本の中で述べています。そういう意味で、今後知識社会に移行していく中で、科学的な方法が果たす役割を考えていく必要があります。

そこで社会における科学者の果たす役割を考えてみると、かつて経験と勘に頼っていたことに科学的な方法を適用してきたところがあったのではないかと思います。かつて匠が担った製鉄も今日では科学的に管理されていますし、熟練した漁師に尋ねた明日の天気も今や数値計算を使って予報しています。また、マネージメント、マーケティング、ファイナンスやリスク管理など勘に頼る面が強かった分野でも、科学的な方法が適用されるようになってきています。科学的発見自体を科学的にやろうという発見科学もありますし、サービスを科学的・工学的に考えようというサービスサイエンスも提唱されています。

科学の対象や方法論を考えて見ると、19世紀ころまでは知識とは普遍的真理に関するものでした。ところが19世紀半ばにダーウィンの『進化論』が出現して、普遍的真理

だけでなく進化的世界が考えられようになりました。その影響を受けて19世紀末にK.ピアソンは現実世界のあらゆるものを科学の対象とすべきということを主張し、それを実現するための科学の文法を提唱しました。方法の学としての統計学はその結果発展しました。統計学は確率論的世界観に基づき、実験科学あるいはデータ主導型の方法論の基盤となりました。数学が機械論的世界観のもとで、理論科学・原理主導型であるのとは対照的です。いずれにしても、科学の言語と科学の文法を19世紀までに確立して、それが20世紀の科学・技術の研究を主導してきたと言えます。さらに21世紀になると、普遍的真理、進化的世界、システム世界だけではなく、サイバー世界や人工物が科学研究の重要な対象になりつつあります。その背景には20世紀半ば以降の情報通信技術の急速な発達があります。

サイバー世界や人工物を扱うとき、従来の理論科学と実験科学という2つの方法論では複雑な非線形系や多変量系の理解や予測が難しいので、これをシミュレーションの方法で解こうという計算科学が生まれ、既にかなり確立しています。計算科学は理論主導型でありながら、科学者の直感や経験によらず計算機に依存する方法論で第3の科学とも呼ばれています。するとデータ主導型で計算機に依存する方法論も当然考えられるわけです。これは科学の分野にも社会の中にも蓄積されつつある大規模、大量、異種のデータを活用する科学的な研究法で、データ中心科学あるいは第4の科学と呼ばれています。ただし、データ中心科学が計算機依存型の帰納的方法であるとはいっても、研究の対象自体が変化していますので、計算機を用いて全部力づくでやるというものではありません。

研究の対象がサイバー空間となると、実体としては捉えられないし、予測や意思決定に有用な情報を求めようとするならば、そのための知識は必ずしも普遍的真理である必要はありません。モデルで言えば、実体の表現ではなく、対象の持つ機能を表したものになると考えられます。人によって着目する機能が異なれば、モデル自体もモデルの役割も大きく変わります。今日の知識社会においては、私たちは目的に応じて知識を獲得し、あるいは知識を発展させていくわけですが、モデルはそのための道具であり、推論の根拠を示すものといえます。モデルもその役割も場合に応じて変わるわけで、理論、知識、データ、目的などすべての情報を統合してモデルを作っていく必要があります。問題はどうすればそれが実現できるのかです。

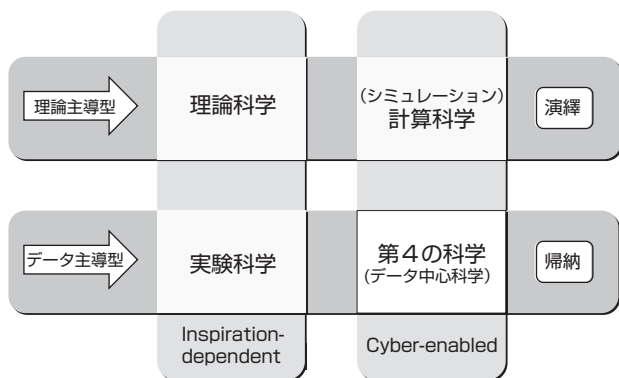
統計学の中では赤池先生が考案されたAICというモデル選択基準がとて有名です。モデルは近似であって、真のものは未知または存在しないという立場をとると、モデルは考えられた範囲でのベストなものを見つけることしかで

きません。したがって、知識やデータが増えるにつれてモデル自体を永続的に改良しなければならないこととなります。これはモデルによって知識が得られ蓄積されるとモデルが改良されること、つまり知識発展のスパイラルが構築されるということの意味します。

経済の季節調整という1つの歴史的例題を考えてみますと、ノンパラメトリックモデルでは n 個の観測値に対して、 $2n$ 個のパラメータがあって、従来の最小二乗法などでは意味のある解が得られません。赤池先生は観測値とパラメータの差の二乗の他に適当な重みをかけたペナルティ項を導入し、ベイズモデル的解釈で事前分布から事後分布を求める方法を提案しました。統計の分野では、実はいろいろな問題がベイズモデルで解けますし、時系列構造を持つ場合には状態空間モデルを使って解けるようになってきています。地下水観測井での地下水位データから地震の影響を抽出するという産総研との共同研究事例では、適度な物理的イメージのモデルとデータの情報の統合でいろいろなことがはっきりわかるようになりました。

これからのデータ中心科学としては大量のデータを使った予測と知識発見、リスク管理、人間も含めた実世界のシミュレーション、サービスサイエンスというところが重要になり、我々のグランドチャレンジになってくるだろうと思います。

第4の科学（データ中心科学）



「モデリングの研究事例」

統計数理研究所副所長
樋口 知之



いろいろな知識の統合の上で重要なのは知識発展のスパイラル構造を自然に達成する仕組みを持つことで、それによって絶え間ないイノベーションや価値の創造が起こるだろうと思います。まず、社会的な要請として個に特化し

た技術－個人化技術－の開発があります。それをいかに作っていくか。また、個人化技術とは一人ひとりに合わせるだけではなく、何らかの汎用性を持っていなければなりません。持丸さんの「あなただけ」を「だれにでも」ということです。これには統計的なモデル、ベイズモデルで対応できるのではないかと考えています。例えば、たくさんのデータが手元にある時にどんなモデルがいいか、どのモデルを選ぶべきかということから、いろいろな場面に対する柔軟性や汎用性を持ったモデル化に移っていく。この流れの1つにベイズモデルがあります。

ベイズモデルでは Y のデータを説明するパラメータ X に当該分野の“知識”という制約を加えます。知識はさまざまですが、ここでは統計モデルや確率モデルとして導入します。これはある意味で順問題ですから、 X を与えるとモデルを生成できますし、 Y も出てきます。この生成モデルを使って、ベイズの反転公式から事後分布を導けることが重要で、逆問題に解くことができるのです。さらに重要なのは元に戻って事前分布にすることができることです。これは非常に有用で、ベイズモデル自体が循環機能を持っていると言えます。スパイラル構造とかサイクルという言葉もありましたが、循環をどのようにして達成するのかをしっかりと捉えるのは知の統合の1つの策になるのではないかと考えます。

研究事例を少しご紹介します。1つ目はレストランのランチ売上予測です。日々10万円から30万円くらいの売上げになっています。これを Y というデータだとしていろいろな要因に分解します。例えば、週の何曜日だったか、天気はどうか、どういうイベントがあったかなど、現場の知識や当然取り込んだほうがいいと思われるものをどんどん取り込んでいきます。このときベイズモデルで統計モデルを扱っていますから、モデル自体の評価も行い、自然とスパイラル構造が達成できるようにします。

週効果のモデルでは祝日と日曜日は似ているのか、祝日の前日は金曜日か土曜日に似ているのか、そのようなことを単に数値で与えるのではなく、パラメータを用意しておきます。そのパラメータはイベントの開かれる場所ごとに違ったものにします。雨のパラメータも入れます。イベント効果として予想入場者数を入れると、売上げの予測能力は上がります。これらは1つ1つ個別化しているのですが、基本となるモデルには汎用性があります。

週効果、雨効果、イベント効果などを状態空間モデルに落として計算できます。逆問題を解くことになるのですが、知識を注入してベイズの定理を使って事後分布が出てくる、いろんなことに分解することができます。

長期的な効果という点では去年と今年は売上げがどれくらい違うか予測できますし、週のレベルでは曜日ごとの推

定もできます。近くにビジネス街があれば曜日によって、あるいは天気によって売上げが変わるだろうという店長の勘もパラメータの導入で数値的に出すことができます。普通、雨が降るとレストランの売上げは減りそうですが、レストランがビジネス街のビルに直結していると、雨の日にはわざわざ外に出ないでランチを食べたいという人がいますからかえって売上げが伸びる、そういう結果が得られます。ただし、予測能力が上がるといっても、外れる場合もありません。近くに有名人が来てお客の流れが変わったとか、試食コーナーや弁当販売のあるイベントが開かれてランチを食べに来る人がいなかったとか。

もう1つ売上げに関連するのはマーケティング関係のコーザルデータのうち、セールスやチラシなど自らの意思で行える意思決定情報です。店内に商品を大量陳列したかどうか、書籍なら平積みしたのか、チラシを配ったのか、いろいろあります。スーパーマーケットで出口近くに商品がいっぱい並べてあると何となく安いように思いつい買ってしまふ、そんな効果が明らかにあります。実際に店に行って調べなくても、過去のやり方や周りのデータを総合的にみて、自分が持っていない情報を推論し、そして戦略を立てる。逆に言えば、価格と売上げのデータから、店がどんな販売方法をとったかを統計的に推測できます。

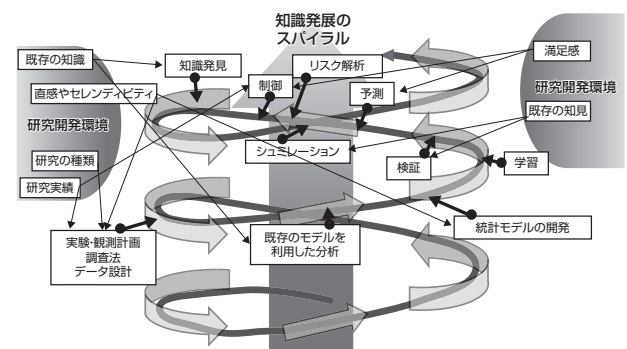
さて、天気予報や地球科学の分野でデータ同化という手法が使われています。データ同化とはシミュレーションとデータ解析をつなぐ技術で、ベイズモデルの枠組みでやれば自然な循環構造が達成できます。例えば、生命体データ同化というプロジェクトでは多様なタンパク質や発現のデータと生命のいろいろなレベルでのシミュレーションとをベ

イズモデルで統合します。さらに、それらを全部ベイズの統計モデルで書き下していますので、幾つものシミュレーションモデルが考えられる中で、どれが良さそうかを最尤法で評価・選択できます。他に、物理の分野で使われるシミュレーションで、境界条件がよくわからないが、だいたいこの辺かといったデータ自体の不確実性を推察することもデータ同化から行うことができます。

データ同化はベイズモデルに則っていますから循環構造があり、データ取得、パラメータ推定、モデルの作り直し、新しい実験計画の立案、仮説の提示、データの再取得と先へ進められます。とにかく循環が重要です。

知識の循環やモデルの改良についてお話してきましたが、最後に個別科学での人材養成がとても重要であることを指摘しておきます。専門が1つのT型、2つあるπ型、横向きのπ型と幾つかあります。雇用という観点からも人材養成は大事で、受益者・生活者の視点と目線を持ち、そして現場に興味ある人材ならば産業界にとっても魅力的ではないでしょうか。

絶え間ないイノベーションとデータ価値創造



編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

改正 2009年3月23日

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。

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不要とする。読者フォーラムへの原稿は、シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また読者への有益な情報提供などとし、1,200文字以内で自由書式とする。論説および読者フォーラムへの原稿については、編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

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

3.2.5 タイトルは和文で10～20文字（英文では5～10ワード）前後とし、広い読者層に理解可能なものとする。研究

論文には和文で15～25文字（英文では7～15ワード）前後のサブタイトルを付け、専門家の理解を助けるものとする。

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

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

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

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

3.3.4 図についてはそのまま印刷できる鮮明な原図、または画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則は刷り上りで左右15 cm以下、白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

4 原稿の提出

原稿の提出は段刷文書1部および電子媒体に原稿提出チェックシートを添付のうえ、下記宛に提出する。

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

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

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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: A.Ono

Senior Executive Editor: N.Kobayashi, M.Seto

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

Editors: K. Igarashi, H. Ichijo, K. Ueda, A. Etori, K. Ohmaki, Y. Owadano,

A. Kageyama, K. Kudo, T. Shimizu, H. Tateishi, M. Tanaka, E. Tsukuda,

S. Togashi, H. Nakashima, K. Nakamura, Y. Hasegawa, J. Hama, K. Harada,

P. Fons, K. Mizuno, N. Murayama, M. Mochimaru, A. Yabe, H. Yoshikawa

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

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

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

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

1 Types of contributions

Research papers or editorials and manuscripts to the “Readers’ Forum” should be submitted to the Editorial Board.

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 Format

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

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

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

3.3.4 For figures, clear originals that can be used for printing or image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be 15 cm x 15 cm or smaller, in black and white.

3.3.5 For photographs, clear prints (color accepted) or image files should be submitted. Image files should specify file types: tiff, jpeg, pdf, etc. explicitly (resolution 350 dpi or higher). In principle, the final print will be 7.2 cm x 7.2 cm or smaller, in black and white.

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

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

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

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

4 Submission

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

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

第2巻3号が発行されました。今回と次回の編集後記を私が担当します。

シンセシオロジーが目指す構成的研究は、産総研の研究開発理念の中核として、設立当初からその方法論確立を目指した議論を内部で行ってきました。学術雑誌の必要性は当初から指摘されていましたが、多くの研究者が議論するワークショップを約100回開催し、その結果として議論の裾野も拡大し、最終的に昨年発行することができました。発行準備に長い時間をかけ、またその後も多くの関係者の努力と協力で、刊行が比較的順調に進んでいることに、シンセシオロジーに携わっている一人としてまずは感謝の意を表しなければなりません。

ところで、今回の号も多様な研究分野の論文が掲載されています。活断層の活動確率予測、先端技術の家庭への普及、IT機器の開発、X線非破壊検査の装置開発、計測器の性能評価です。これまで、このような論文は異なる学術雑誌に異なる方法で投稿され、分野の異なる研究者や技術者にはなかなか理解されてきませんでした。しかし、既にシンセシオロジーのいくつかの論文に目を通された読者は、内容を理解できただけでなく、何らかのヒントを得たことに驚かれたと思います。つまり、技術分野を超え、構成的研究には共通の方法論が存在していることを、これらの論文は予感させてくれます。

今回の号に掲載された論文では、個々の要素技術を構成し、それを社会や生活・産業の現場へ適用していくとき、様々なステーク

ホルダーの役割の重要性が共通して指摘されています。具体的には、活断層研究での行政と市民の関係、家庭で利用される技術の普及における論理的リード・ユーザーと感性的リード・ユーザーの役割、IT機器開発における製造装置メーカーとの連携、X線非破壊検査装置開発では研究施設や人の統合、計測器の性能評価では国内外機関のネットワーク確立の重要性が指摘されています。このような技術や製品の社会普及の検討は、これまでの要素技術の開発を目指す分析的研究論文では取り扱われてきませんでした。

今後、多くの構成的研究結果がシンセシオロジーに投稿され、様々な成果が蓄積されていけば、社会から強く要請されている持続型社会構築に向けたイノベーションをより効率的に達成できると期待しています。そのような意味で、産総研のみならず、産業界や大学の研究者や技術者にシンセシオロジーへの投稿を期待しております。

最後になりますが、構成学の深化と裾野の拡大を目指し、12月4日に東北大学で横断型基幹科学技術研究団体連合（いわゆる横幹連合）と統計数理研究所とともにシンポジウム「シンセシオロジー（構成学）：知の統合を目指す学問体系」を開催します。関心がおありの方は是非参加をお願いします。また、3機関による議論は既に始めており、今回の号の最後にはその第1回目として開催した合同ワークショップ「学問と技術の統合」の概要を紹介しております。

（普及担当幹事 内藤 耕）

Synthesiology 2巻 3号 2009年9月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：石井 武政

委員：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、景山 晃、工藤 勝久、清水 敏美、立石 裕、田中 充、佃 栄吉、富樫 茂子、中島 秀之、中村 和憲、長谷川 裕夫、濱 純、原田 晃、Paul Fons、水野 光一、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2 産業技術総合研究所広報部出版室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Evaluation of earthquake occurrence from active faults

-Evaluation of rupture probabilities of active faults using the Cascade Earthquake Model based on behavioral segmentation-

T.Yoshioka

Two types of lead users in a model for the transfer of technology into households

-The development and diffusion of induction heating cookery-

Y.Kubo and Y.Baba

Creating non-volatile electronics by spintronics technology

-Toward developing ultimate green IT devices-

S.Yuasa, H.Kubota, A.Fukushima, K.Yakushiji, T.Nagahama and K.Ando

A marked improvement in the reliability of the measurement of trace moisture in gases

-Establishment of metrological traceability and a performance evaluation of trace moisture analyzers-

H.Abe

Development of battery-operated portable high-energy X-ray sources

-Innovation in X-ray non-destructive-avaluation-

R.Suzuki

Report

Unity of academic knowledge and technology

-A joint workshop of three organizations-

Editorial policy

Instructions for authors