

Synthesiology

産総研人工知能技術コンソーシアムにおける
トランスディシプリナリー型のオープンイノベーション

沿岸域における深層地下水の研究とその社会的な役割

圧子圧入 (IF) 法によるセラミックスの破壊じん性試験法

明治・大正時代のイノベーション：その独創技術と産業応用

シンセシオロジー編集委員会

Synthesiology 論文のポイント

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標、具体的なシナリオや研究手順、特に実用化のために要素技術を構成・統合するプロセスを記述した論文誌です。本号に掲載した論文の価値が一目で判るように、編集委員会が作成したシンセシオロジー論文としてのポイントを示します。

シンセシオロジー編集委員会

論文：産総研人工知能技術コンソーシアムにおけるトランスディシプリナリー型のオープンイノベーション —人と相互理解できる人工知能技術によるSociety5.0実現へのシナリオ— 本村 陽一

Society5.0実現のためのAI技術社会実装を目的として、実社会のビッグデータから諸現象をIA予測させる計算モデルを構築するという課題が提示され、そのプロセスとして社会サービスのリスクやコスト予測し、提供されるものの価値を高めるためのモデル化とシステム化が開始されました。そのプロセスとして産総研人工知能技術コンソーシアムを設立し、具体的な社会実験や実証事業を行っておられます。分野横断的に社会プロセスのデータを集約し、AI技術で取り扱うという本コンソーシアム活動の将来性には、少なからぬ期待が込められています。

論文：沿岸域における深層地下水の研究とその社会的な役割 丸井 敦尚ほか

社会課題となっている各種インフラ整備事業への貢献を目的として、我が国の水資源環境の基盤情報として整備してきた地下水の賦存状態について、概念モデルから地質環境モデルに高精度化するプロセスを提示しています。従来の地球科学図では、時間的にはある瞬間の国土の状態を図示するものでしたが、この研究では将来的な地下水状況の変化についてかなり長期間の予測を行うことで、工学的設計から安全の評価までに至る目指したものです。

論文：圧子圧入（IF）法によるセラミックスの破壊じん性試験法 —信頼性向上と国際標準化への取り組み— 宮崎 広行ほか

産業素材として非常に重要なセラミックの材料試験について、従来手法では試験精度や試験結果の計算式が不統一であった点を改善することを目的としています。試験のコストや簡易さを勘案しつつ、試験試料の測定精度を高める事を主眼に圧子圧入法という手法を採用し、読み取り誤差の改善に成功しました。このプロセスによって、標準的な計算式を提案でき、最終的には2019年にISO国際標準として発行されるに至っています。

論説：明治・大正時代のイノベーション：その独創技術と産業応用 —旧工業技術院の研究（無線通信とアンモニア合成）を例として— 小林 直人ほか

産総研の前身の旧工業技術院研究所群の明治から大正にかけての貢献について、特に東京工業試験所のアンモニア合成技術と電気試験所の無線電信技術について、その後の日本の産業育成へ大きなブレークスルーとなった点が紹介されています。先人各位による総合的な研究開発機関としての役割が明確に現れていると思われました。

Synthesiology 第13巻第1号(2021.1) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
産総研人工知能技術コンソーシアムにおけるトランスディシプリナリー型のオープンイノベーション —人と相互理解できる人工知能技術による Society5.0 実現へのシナリオ— ・・・本村 陽一	1 - 16
沿岸域における深層地下水の研究とその社会的な役割 ・・・丸井 敦尚、町田 功、井川 怜欧	17 - 28
圧子圧入 (IF) 法によるセラミックスの破壊じん性試験法 —信頼性向上と国際標準化への取り組み— ・・・宮崎 広行、安田 公一、吉澤 友一	29 - 44
論説	
明治・大正時代のイノベーション：その独創技術と産業応用 —旧工業技術院の研究（無線通信とアンモニア合成）を例として— ・・・小林直人、亀山哲也	45 - 60
編集委員会より	
編集方針	61 - 62
投稿規定	63 - 64
編集後記	69
「Synthesiology」の趣旨	
Research papers (Only abstracts in English)	
Interdisciplinary open innovation through activities in AIST Artificial Intelligence Technology Consortium —The scenario towards Society 5.0 by artificial intelligence (AI) technologies that enable mutual understanding between AI and humans— - - - MOTOMURA Y.	1
Study of deep groundwater on the coastal area and its social role - - - MARUI A., MACHIDA I. and IKAWA R.	17
Test method for fracture toughness of monolithic ceramics by indentation fracture (IF) method —Improvement of reliability and international standardization activity— - - - MIYAZAKI H., YASUDA K. and YOSHIZAWA Y.	29
Commentary (Only abstract in English)	
Innovation in Meiji and Taisho eras: Original Works and Industrial Application —R&D of Wireless Communication and Ammonia Synthesis in old AIST— - - - KOBAYASHI N. and KAMEYAMA T.	45
Editorial policy	65 - 66
Instructions for authors	67 - 68
Aim of <i>Synthesiology</i>	

産総研人工知能技術コンソーシアムにおける トランスディシプリナリー型のオープンイノベーション — 人と相互理解できる人工知能技術による Society5.0実現へのシナリオ —

本村 陽一

Society5.0の実現のために、人工知能技術（AI技術）の社会実装を進める上での課題がある。計算モデルが現象を十分に近似するためには、適用する利用方法（ユースケース）にAI技術を埋め込んだ上でデータ収集と計算モデル化、価値創出と向上を同時、持続的に行う必要がある。そこでステークホルダーの評価を計算モデルに反映するために人と相互理解できるAI技術を用いて、ステークホルダー間の相互理解に基づく共創的ユースケース開発、トランスディシプリナリー型のオープンイノベーションを実行することでデータ知識循環型サービス・システムを構築し、価値創出と向上を実現する。このシナリオを実現するため産総研人工知能技術コンソーシアム（AITeC）の仮説、実装、検証について述べる。

キーワード: オープンイノベーション、共創、ユースケース開発、確率モデリング、人工知能、Society5.0

Interdisciplinary open innovation through activities in AIST Artificial Intelligence Technology Consortium

—The scenario towards Society 5.0 by artificial intelligence (AI) technologies that enable mutual understanding between AI and humans—

MOTOMURA Yoichi

Realizing Society5.0 requires overcoming problems in promoting social implementation of artificial intelligence (AI) technology. To effectively model phenomena, it is necessary to continually collect data, construct computational models, create value, and improvement while embedding AI technology in real-world applications. AI technology that realizes mutual understanding with humans is needed to create value and improve mutual understanding with stakeholders. Implementation and verification of the AIST Artificial Intelligence Technology Consortium (AITeC) is described to realize this scenario.

Keywords: Open innovation, co-creation, use case development, probabilistic modeling, Artificial Intelligence, Society5.0

1 はじめに

我が国が目指すべき未来社会の姿として第5期科学技術基本計画^[1]において提唱された、「サイバーとフィジカルを高度に融合し、IoT (Internet of Things)、ロボット、人工知能 (AI)、ビッグデータ等の新たな技術をあらゆる産業や社会生活に取り入れてイノベーションを創出し、一人一人のニーズに合わせる形で社会的課題を解決する新たな社会」が Society5.0 である。ここではインターネットや実社会で集められたビッグデータと、そのビッグデータの活用技術としての機械学習に基づく AI 技術が主要な役割を果たす。IoT デバイスや次世代通信技術によってさらに実社会

の多様な活動が常時観測、収集されることで時間・空間解像度の高い実社会ビッグデータが今後集積されることが予想される (図 1)。従来のインターネットや携帯電話サービスでは利用者が操作しないとデータは取れないのに対し、IoT デバイスやセンサーを通じて人間が操作しなくても大量データが高速に集められるようになる。この時、データの中には状況依存性が高い、「今だけ」「ここだけ」「その人にだけ」といった固有の情報が埋め込まれる。またサービス・システムの利用頻度の向上や性能向上にしたがってその時間空間解像度が高いものになる。この従来のインターネット上のビッグデータとは性質が異なる時間空間解像度

産業技術総合研究所 人工知能研究センター 〒135-0064 東京都江東区青海 2-4-7
Artificial Intelligence Research Center, AIST 2-4-7 Aomi, Koto-ku, Tokyo 135-0064, Japan E-mail: y.motomura@aist.go.jp

Original manuscript received August 15, 2019, Revisions received March 10, 2020, Accepted May 27, 2020

が高い実社会のビッグデータから実社会の現象を計算モデル化し、価値を生むための計算を行う技術が Society5.0 の実現シナリオのためには重要となる。

この実社会ビッグデータから機械学習、AI 技術によって現象を予測、近似できる計算モデルが構築できると、サイバー空間の中でその現象を、フィジカル空間の実社会よりも高速に計算可能、シミュレーション可能になる。いわばこれが Society5.0 の要諦であると言える。AI 技術が社会実装され、様々な場面で実際に利用されることになれば、社会の中にある不確実性のもとでも、AI 技術を使って予測することでリスクやコストを低減し、ベネフィットを向上させることが期待されている^[1]。このリスク、コストの低減、ベネフィットの向上をもたらすことをこの論文では価値創出とする。

価値創出は次のようなシナリオで実現することが考えられる。社会のサイバーフィジカルシステム化、つまり社会の中の多くのサービスがシステム化され、リアルな実空間の活動がデジタル化され、ネット空間と融合する社会・生活の変革（イノベーション）が加速する。

そのためには、サービスに関する工学やモデル化の研究^{[2]~[6]}やその発展としての応用システム化が重要である。またこの時、AI 技術によってサービスを実行する応用システムであるサービス・システム^[用語1]とデータ収集の基盤が一

体となり社会実装され、多数の利用者がサービスを利用する度に実社会ビッグデータが加速的に増大すれば、機械学習による計算モデル化、その計算モデルを用いたサービス・システムの性能向上、価値向上が可能になる。そのためには、利用者にとっての価値の増大が不可欠であるため、具体的な社会実験、実証事業に早期に着手し、改善ループを持続すること、さらなる価値の飛躍的向上のために利用者や関連するステークホルダーの評価を計算モデル、サービス・システムに反映することが重要である。

そこで、この論文では、Society5.0 を目的とした AI 技術の社会実装への取り組みとして、産総研人工知能技術コンソーシアム (AIST Artificial Intelligence Technology Consortium, AITeC)^[7] の仮説、実装、検証について述べる。これは、シンセシオロジー論文の第三の課題である社会導入に向けた構成^[8]として位置付けられるものである。AITeC は産総研コンソーシアムの制度に基づき、産総研人工知能研究センターと同時に 2015 年 5 月 1 日に設立された。その後、5 年間の期間の活動を通じ、ニーズ、データとシーズをマッチングしてビッグデータの成長スパイラルを回す AI 技術の社会実装の場を創出し、参加機関が集まり、具体的な課題に対する実証実験が多数行われた（図 2）。以降では AI 技術の社会実装シナリオと課題、AITeC の仮説と実装、それにより明らかになった定性的検証、今後の展望について述べる。

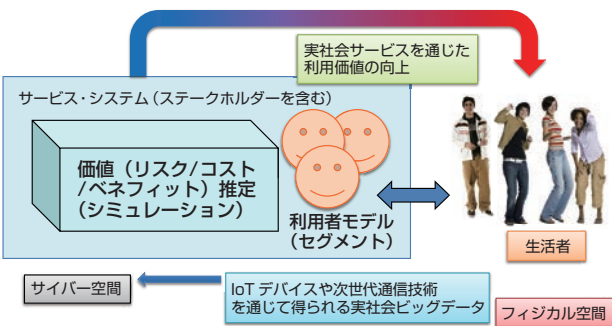


図1 社会のサイバーフィジカルシステム化

2 AI技術の社会実装のシナリオ

2.1 社会実装の課題

まず、Society5.0 実現を目的とした構成型研究におけるシナリオ^[10]の開発に向けた課題を整理する。AI 技術の中核である機械学習はデータから計算モデルを学習するものであるが、実社会においてはその背後にある現象は常に変動しているため、計算モデルが現象に追従

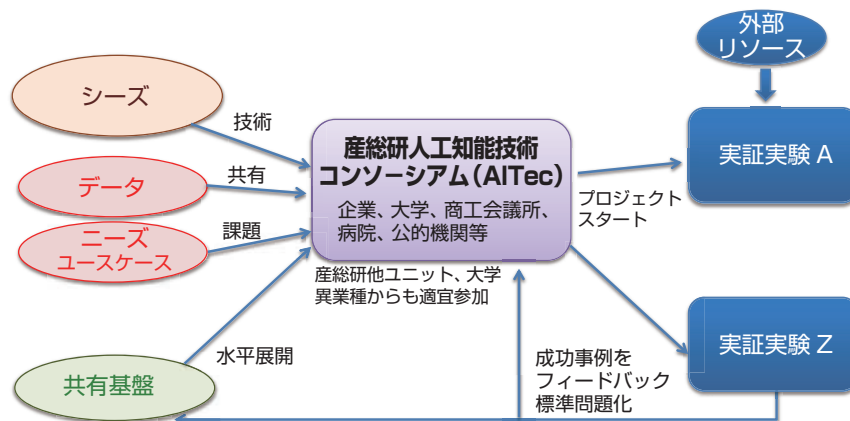


図2 産総研人工知能技術コンソーシアム

するためには、適用する利用方法（ユースケース）に埋め込んだうえで持続的にデータ収集と計算モデル化を行う必要がある。またそのためには、多くの利用者の高頻度かつ持続的な利用を動機付ける価値創出が必要となる。価値を高めるためには利用者や関係者となる多様なステークホルダーの評価や解釈をモデルに反映することが有効である。そのためには、利用者や関係するステークホルダーが協働できる異分野を越えた連携であるトランスディシプリナリー^{用語3}型で取り組むこと、そこで共創的なユースケース開発を行うことが考えられる。さらに人の知識や評価を反映するために、人と相互理解できるAI技術¹⁹を適用する。これにより学習した結果としての現象モデルが人にとって理解できるものであることが、各ステークホルダー間のインタラクションや相互理解を促進し、新たな価値に気づく共創的なプロセスを生じるためには重要な特性となる。ここでは人の知識と実社会ビッグデータを融合させてこれを循環させるサービス・システムをデータ知識循環型サービス・システムと呼ぶことにする。

データがなければ機械学習による性能向上が進まない。また実社会の現象は常に変動し、変動に応じたデータ更新が必要であるため、新たなデータを持続的に集めることが重要になる。そこで、AI技術をサービス・システムとして早期に社会実装することにより、そのサービス・システムを通じて新たなデータを持続的に集める方策が必要となる。そのために、具体的なユースケースのもと、利用価値のあるサービスの提供とデータ収集を同時に行い、その集まった実社会ビッグデータで機械学習を実行し、その結果構築される計算モデルを活用して利用者やステークホルダーの価値が向上（ベネフィットが高まり、リスク、コストが低減）することを確認する。この取り組みにより、ニーズのあるユースケースが開発され、サービスの利用者とデータ量が増大し、機械学習によりサービス・システムの性能が向上することで、さらに価値創出が進む（図3）。

以上の考察から、分野を越えたステークホルダー間の共

創を持続、発展させるためのトランスディシプリナリー型オープンイノベーションを促進する「場」として、データや現象モデル、方法論、ユースケース、事例に関する共通基盤を構築し、コミュニティ運営を行う主体として、AITeCが構想された。

2.2 ステークホルダーの共創

AI技術を社会実装し、現実問題に適応するためのフレーム設定や現場における暗黙的知識の抽出、目的変数と説明変数を設定したデータ収集とモデル化、目的変数の予測からどのように価値を出すのかというサービス・システムの設計において、現場のステークホルダーの主体的な関与が必要である。現場の利用者が問題解決の対象となる現象について初期仮説を持っている場合には、目的変数に対して、何が影響を与えるのかという説明変数との間の関係を説明できる事前知識は現場の利用者自身が持っていることが多い。機械学習の専門家が、この利用者が持つ事前知識、すなわち目的変数と説明変数やそれらの間の関係を観測可能な定量的な変数に対応付けることができると、相互の間で共通の現象モデルとして理解ができ、適切な計算モデルが選択できる。また、これを初期仮説として目的変数と説明変数を実際の現象から観測して、起こり得る場合を網羅したデータから学習すればその結果の計算モデルはさらに望ましいものになる。この機械学習の専門家と現場の利用者がそれぞれの分野を超えて連携するトランスディシプリナリー型の体制による共創的活動がAI技術を現場に導入するために重要なアプローチとなる。逆に、事前知識がないままにただ現場のデータを収集しても、適切な目的変数がない場合や、目的変数に大きな影響を与える説明変数が観測されていない場合、起こり得る場合が網羅されていない場合には、統計データとしては目的変数に関する隠れた交絡因子が多く、ランダム性が高く、起こり得る場合が欠損したものとなるので、当然その学習結果の計算モデルは信頼性の低いものになってしまう。

データから計算モデルを構築する機械学習において、

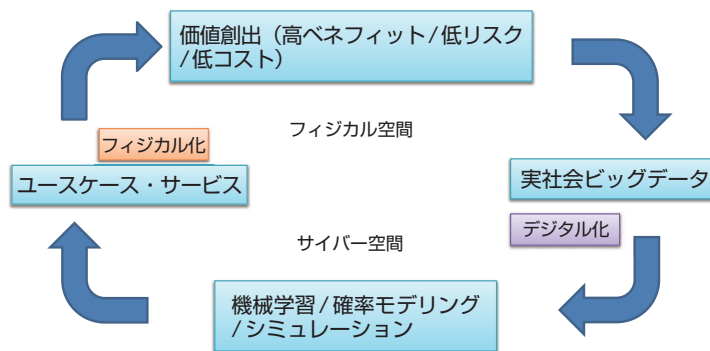


図3 実社会データ、機械学習、サービス、価値創出の成長スパイラル

データそのものの中には含まれていない背景情報（データの取得範囲、データの意味を表す属性、データの生成過程に関する制約条件等）を機械学習におけるフレームと考えると、この暗黙的なフレームがわからないというこの問題は、人工知能分野で良く知られる「フレーム問題」^[15]が機械学習において顕在化したものとして考えることができる。AI技術の社会実装を進めるためには、このフレームを実社会に適合するよう、明示的に扱うために、人からの知識やフレームに関するデータも収集することが必要になる。生活中的フレームやヒトの主観的な暗黙知等を収集するために、人の心理や行動から情報を引き出し、データと知識を融合して確率モデルを構築する方法^[16]や人と相互理解できるAI技術^[9]が活用できる。

2.3 社会のデジタルトランスフォーメーション

実社会ビッグデータからの確率モデリングは、社会のデジタルトランスフォーメーション^{用語2}を進めるものである。時間や空間の解像度が高い実社会のビッグデータは複数の異なる解像度における変数間の関係をモデル化することによって、ミクロな情報とマクロな情報を一貫性を持って整合できる。一方、従来の統計（集計表や平均、分散等の統計量）では、国の年単位の指標のようなマクロな情報、それより細かい県レベルの空間単位や月ごとの時間単位のようなメゾスコピックな情報、さらにミクロな市町村で日々扱うような時間・空間単位の情報はこれまで各階層で独立に計算されることが多く、必ずしも全階層を通じて一貫性を持つとは限らず、近年その統計の精度や信頼性を保証することは大きな社会課題でもある。従来のマクロ統計の情報が単なる集計値で、個々のミクロな現象には戻れないのと違って、確率モデリング技術によって、解像度の高い実社会ビッグデータから個々の現象を積算し、それが上の階層表現でのマクロレベルの数値になる一連のプロセスがサイバー空間の計算過程として実行できると、確率モデル上の逆の推論によって、マクロレベルの現象から立ち返ってミクロレベルの表現にたどりつけるようになる。つまり、実現したいマクロレベルの目的変数に対して、どのようなミクロレベルの状態であればよいか、という推論が実行可能になる。このようなシミュレーションを繰り返し、リスクやコストを低減し、ベネフィットが大きくなるようなミクロレベルの状態をサイバー空間で計算してから、フィジカル空間でそれを実現する。これが実社会がデジタル化される、デジタルトランスフォーメーションの意義である。こうした確率モデリング技術を活用したデータ知識循環型サービス・システムを開発することは、実社会現象のデータや実社会現象を近似した計算モデルを集積、共有するための共通基盤^[14]の構築にもつながる。

3 人と相互理解できるAI技術としての確率モデリング

ここでは Society5.0 の実現シナリオにおいて必要となる、人と相互理解できる AI 技術としての確率モデリングについて述べる。

社会現象を計算機上で再現するためには不確実性を考慮したモデルが必須になる。人の生活やサービス現場での現象を説明するモデル化においては記述量・計算量の点から、扱う対象自体を完全に記述することは困難であるので、計算対象としての現象を確率的・統計的なものとして扱うことにする。例えば、目的変数として人の行動を考える。行動を計測できれば、その回数を定量化し、その行動が生起する確率を考え、さらにその行動が起こる条件として典型的な（相互情報量が高い）状況を見つけると、条件付確率 $P(\text{行動} | \text{状況})$ という形で不確実性を含めて表せる。さらに個人の行動に限定しない一般化をはかり、よく似た人ごとにとる行動が異なる場合、これを条件部に加えて $P(\text{行動} | \text{状況}, \text{人のタイプ})$ とする。この人のタイプは利用者の「異質性」とも呼ばれる。この条件付確率の条件部に入る変数を加えていくことで、来店行動やある商品を買う購買行動の確率を精度良く予測できれば、あるタイプの顧客がお店に来る人数やその顧客が買う商品、サービスを利用する可能性を推定できるので、適切な人員配置や商品、サービスの準備をすることで人員不足や品切れを防ぐことができる。つまりサービスの最適化が図れる。こうしたデータに基づくモデル化、最適化を日常業務の中で自動的に行い、その日の状況や顧客のデータを持続的に集め、確率モデルも新たなデータによって更新することができれば、予測精度をさらに高めていくことができる。これを実現するために条件付確率のモデルをデータから自動的に構築するためにベイジアンネットワーク技術^[11]やその拡張としての確率モデリング技術を適用する^{[12][13]}。ベイジアンネットワークの変数間の関係はグラフ構造として表わされるため、人が理解し、編集もできる。これによって問題領域についてのフレーム、ステークホルダーの知識等を組み込み、データと融合してモデルを構築することもできる。

利用者の異質性については、行動の類似性によってセグメント化することを考える。購買行動であれば、会員カード等の顧客 ID と製品 ID が記録された ID-POS データに対して確率的潜在意味解析 (PLSA) を活用して利用者の異質性を潜在セグメントとして抽出し、さらにそのセグメントがどのような変数と関係があるかをベイジアンネットワークによりモデル化する^[13]。このように PLSA とベイジアンネットワークを組み合わせることで、ID-POS データや共通ポイントカードの使用履歴データ等のサービス現場で大量に集積されているビッグデータから顧客の異質性を表し購買行

動や嗜好性、アンケート回答の推定を行うことができる確率モデル、利用者モデルが構築できる。この利用者モデルの上で確率推論を実行することで、利用者の選択行動等を推定することができる。そこで利用者が選択する可能性の高いコンテンツを推定し、その候補を提示することで情報推薦が実行できる。とくに新たに追加されたコンテンツにも対応できるようにコンテンツ属性を変数として用い、さらに利用者属性や状況を表す変数もベイジアンネットワークのノードとしてモデルに組み込むことで、状況や利用者の傾向に応じた推薦が可能になる。これは目的変数として選択行動の背後にある価値観の推定を行うモデルとして考えることができる。利用者モデルを使って、顧客それぞれに対して対応を個別に最適化すること^{[11][12]}や、ある時間やエリア、ある商品に対して主たる利用者を推定して利用者の集団の特性を推定することでサービスを最適化する方法^{[4][13]}等が実現されはじめている。前者は会員カードやスマートホン等と連携したレコメンド（情報推薦）やナビゲーション、後者は利用者セグメントごとの施策やサービスの最適化という形で実行されることになる（図4）。

以上の利用者モデルによる価値創出は利用者が商品や情報を選択するという社会的な現象を、選択行動が生起する確率を目的変数として確率モデル化し、その確率が高くなるよう最適化を行うユースケースになっていた。さらにこれを発展させて、ある問題に対するステークホルダーの価値創出となるようなリスク、コスト、ベネフィットを目的変数として設定して、実社会現象をモデル化、最適化を考えることができる。実社会で価値向上の対象となる現象（リスク、コスト、ベネフィット）を計算モデルが十分近似できるためには、実社会の現象が生じる背景（フレーム）やプロセスといった利用者側の知識も反映して適切な計算モデルを構築する必要がある。そのため機械学習の専門家と現

場の利用者間のコミュニケーションを促進し、適切な実社会現象の計算モデル化を行うことが必要になる。双方の共通理解を促進できる方法は、問題解決の対象となる現象や価値を明確にして目的変数を特定し、その目的変数に影響を与えている主要な要素を説明変数としてその関係を構造として計算モデル化することである。さらに持続的に実社会現象から生成されるデータから学習し、さらに「対象とする現象の計算モデル化」により定量的なシミュレーションを可能にするためには、単に現象を予測する認識モデルというだけでなく、新たな現象を生成できるような生成モデルにする必要がある。そのために、対象となる実社会の現象から生成されたデータから確率モデルを構築し、さらにその確率モデルに対して検討したい様々な状況を設定して目的となる変数について確率推論を実行し、AI 応用システムであるサービス・システムに適用することで実社会現象を生成する。

確率モデリング技術によって、実社会ビッグデータから、目的変数として表した現象を、変数間の関係として人がその現象を理解できるとともに、新たな実社会現象に対するシミュレーションも実行できる。すると、その現象を人が理解しながらシミュレーションすることで、AI 応用システムの援用しながら現場のステークホルダーが協調して実社会の問題解決を行うことも可能になる。これがデジタルトランスフォーメーションや Society5.0 のための要素技術となり、この方法論を活用した多数のサービス・システムや実証プロジェクトを、具体的なユースケースにおいて実現することが次で述べる AITeC の役割である。

4 産総研人工知能技術コンソーシアム(AITeC)

現場のステークホルダーやサービス・システムに関わるステークホルダー間のインタラクションを促進し、共創的な

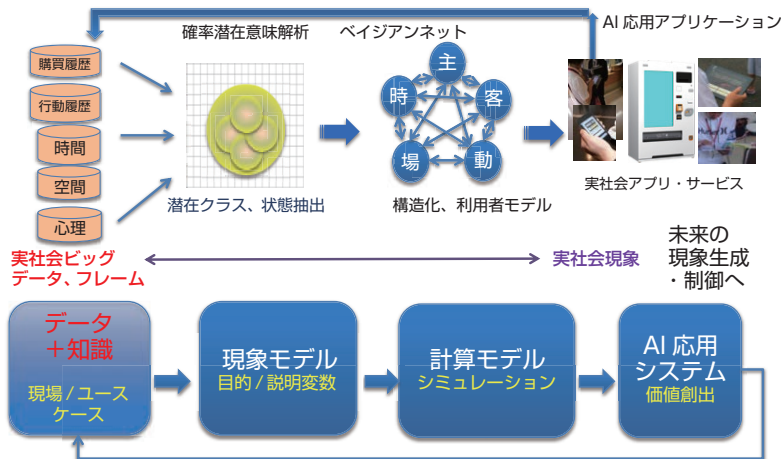


図4 確率モデリング (PLSA とベイジアンネットワーク) による AI 応用システム

ユースケースの開発と、サービス・システムによる問題解決に介在させる仕組みや方法を明らかにすることがAI技術の社会実装のためには重要な課題となる。そこでAI技術を社会実装するためのシナリオを実現するためにi) 多様なステークホルダーを集めたトランスディシプリナリー型のオープンイノベーションの取り組み、ii) 共創的なユースケース開発、iii) データ知識循環型サービス・システムの開発、の構成要件を持つような場として、AITeCが構想されることになった。このAITeC構成シナリオを図5に示す。

AITeCは2015年5月1日、国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能技術研究センターと同時に設置された。AI技術の社会実装、異業種の共創的価値創出による成功事例を持続的に生む仕組みづくりを目指し活動し、これまでに参画機関数約250法人を越え、会員の課題や強みを共有し、ベストマッチングを模索していく場（ワーキンググループ（WG））の形成、AI技術とビッグデータ活用の手法・技術・仕組みに関する研究会実施、最新動向の共有、デザイン・シンキングの実践や小規模プロジェクト立案やコンテスト、実証実験の実施等を行っている。2015年度当初は14機関で活動を開始し、2016年度23機関、2017年度は86機関、2018年度152機関、2019年度は212機関とその参加機関は増加し続け、地域支部も2019年度現在、関西支部、東海支部、九州支部、神戸支部が設置され、さらに長崎や広島、岡山、長野、岩手等でも地域支部の設立を念頭にした準備も開始されている。AITeCの活動により膨大なAI技術の活用や社会実装に関するノウハウが集積され、大規模の異業種連携プロジェクトや公的研究開発プロジェクトへの展開も始まっている。コンソーシアムの活動成果として、プロジェクトの活動やそこで開発されたサービス・システム、効果評価等は公開シンポジウムや大型展示会等を通じて外部にも発信し、社会への普及を促進している。また2019年からは優れたプロジェクトの評価基

準の確立、プロジェクト相互連携促進を目的として優秀なプロジェクトを評価し、表彰することを開始している。

AITeCに設置されているWG（図6）は2019年の時点では18あり、参加メンバは希望するWGにいくつ参加しても構わないという運用、またWGのリーダーは同時に運営委員として毎月1回行われる運営委員会での相互交流によって、相互のWGやプロジェクトのハブの人材となり、全体として緊密な連携がはかられている。

AITeCのWG、プロジェクトのうち、主なものについて以下で紹介する。

・ものづくりWG：ものづくりに関わる現象全般に関するデジタルトランスフォーメーションを進め、故障、不良といったリスクや時間コスト、得られるベネフィット等を目的変数とした計算モデルを構築し、目的変数に対する推定や最適化により改善をはかるAI技術の活用について検討、議論、試行を進めている。とくに再現可能な価値創出の方法論を定着させるために、デザインシンキングのトレーニング、AI技術を活用するためのビジネスモデルキャンパス（必要事項を網羅的に整理できるフレームワーク）や共通フォーマットの作成等を行い、横断的に比較しやすい形での価値創出につながる事例創出、共有を進めている。製造業分野では情報や知識の守秘性が高く、事例やデータを共有することが当初難しかったところ、このフレームワークによる抽象化や、参加メンバ固有の競争領域における事例ではなく、協調領域のテーマを新たに選定し、これを練習問題として進める等の工夫をしている。具体的なプロジェクトとしては、ハードディスクのエラーデータ分析、工場内のIoT導入推進の事例等がある。

・社会課題解決WG：自治体とのコミュニティ支援、健康イベントにおけるAI技術活用、地域コミュニティのコミュニケーション支援、犯罪予防へのAI技術応用、ユニバーサルトイレのGISデータ活用、科学イベントにおけるAI技

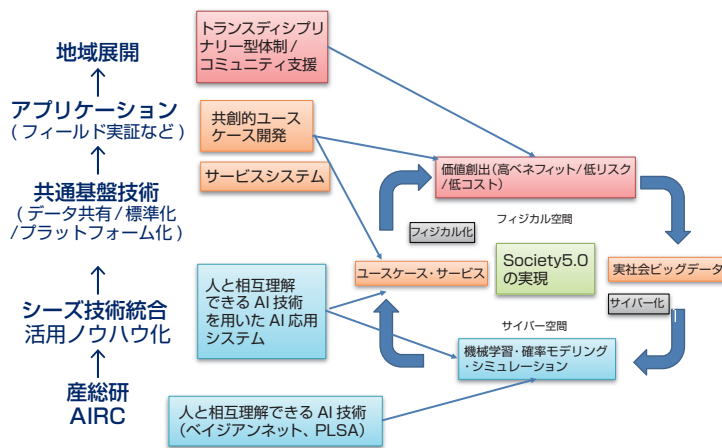


図5 AITeC 構成のシナリオ

術、ビッグデータ活用等の協調領域プロジェクトを進めている。

- ・観光 WG：国内の観光に関する AI、IoT、ビッグデータの活用シナリオの作成、観光関連調査データの収集、マーケティング施策の提案、ヘルスツーリズム開発・評価、具体的な地域への展開等を進めている。

- ・データプラットフォーム WG：マイクロアグリゲーションによるプライバシー保護技術を活用した異なるビッグデータの相互連携（データフュージョン）、共通プラットフォームの構築を目指し、健康情報の活用事例の創出、地域展開等を進めている。

- ・AI ツール WG：3章で述べた確率モデリング技術を Java 言語により実装したプログラムである PLASMA（図 7）や、その他の AI 技術に関する利用方法や事例の検討、セミナー開催、他の WG への協力等を行っている。顧客や商品の ID を付与した購買履歴データである ID-POS（ID 付き Point of Sales）データと AI 技術を活用した応用事例が多数あり、それに基づくサービス・システムの実装やユースケースの共有も進めている。

- ・データマイニング WG：企業におけるデータ活用の促

進、ビジネス課題を解決するための情報や事例共有を進め、データ分析スキルの向上、課題解決能力の向上を目指して、ビッグデータの共有と手法選択のノウハウ共有、具体的なデータマイニングツールのトレーニング等を行っている。

- ・深層学習 WG：産総研 ABCI の技術解説、協調領域でのユースケース検討、建設系への画像認識応用、特許管理費用予測プロジェクト等を進めている。

- ・AI リビングラボ WG：AI 技術や IoT 技術を活用して生活環境、サービス現場でのビッグデータ収集・活用インフラ、対話型デジタルサイネージや、AI 自動販売機、小型ロボットや情報端末によるレコメンドやナビゲーション技術のユースケース開発等を行っている。具体的なプロジェクトとしては、対話型デジタルサイネージを用いた神戸における手土産レコメンドサービス、大阪梅田における AI 自動販売機の導入、大学と連携したアプリ開発、大規模展示会における来場者のデータ収集等を進め、産総研が開発したシーズも含む AI 技術を活用したアプリケーション、サービスの実証を行っている（図 8）。

以上の他に、健康・医療データ利活用により生活者の安全、安心、豊かな生活を支援する仕組みづくりを目指

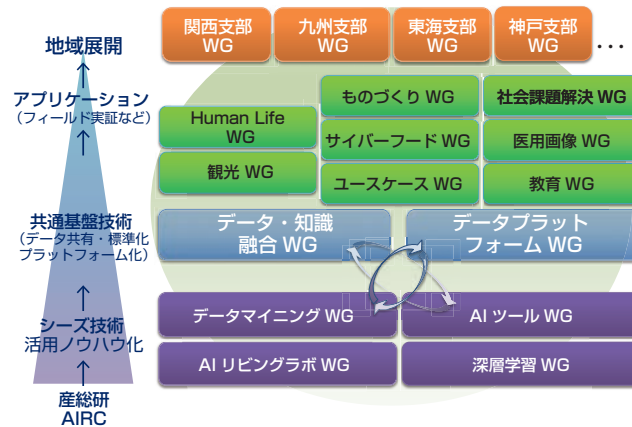


図 6 人工知能技術コンソーシアムとワーキンググループ (WG)

PLASMA: Probabilistic Latent Semantic Structure Modeling API

「確率的潜在意味構造モデリング」のための Java 言語による API セット

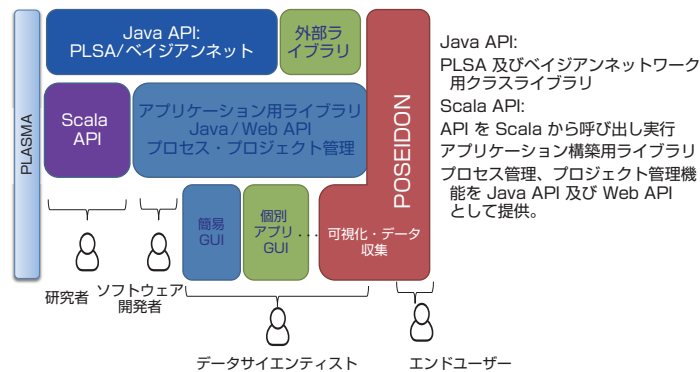


図 7 確率モデリング技術のソフトウェア PLASMA

す Human-Life WG、医療用の画像データの共有、活用の仕組みづくりを行う医用画像 WG、AI 技術の導入先ユースケースの策定、AI 技術導入プロセスの設計と方法論の一般化を行うユースケース WG、AI 技術を活用して食品流通の生産性向上、需給マッチング最適化を目指すサイバーフード WG、教育分野のビッグデータを活用する教育 WG、ビッグデータに現場の知識やフレームを融合させた社会現象のモデリング、シミュレーションを行うデータ・知識融合 WG 等がある。

5 産総研人工知能技術コンソーシアム(AITeC)の検証

AITeCは、Society5.0の実現に向けた以下の課題に対応するために構想され実装された。

- i) トランスディシプリナリー型オープンイノベーション
- ii) 共創的ユースケース開発
- iii) データ知識循環型のサービス・システムの構築

ここでは、AITeCがその狙い通りに機能したかどうかの定性的検証を試みる。

5.1 トランスディシプリナリー型オープンイノベーション

先に述べたように、AI 技術の社会実装のためには、トランスディシプリナリー型の体制が重要である。産総研コンソーシアムでは、参加企業が毎年会費を納入した自己財源を年度予算とし、会則で独自に定める方針に従って組織設計と運営を柔軟に行うことができた。さらに独自の人事、運営委員の選定、WG リーダー、プロジェクトリーダーの任命、地域支部の設置を行うことによって、従来の組織の枠を越えた異分野の会員が共創するトランスディシプリナリー型の体制を実現することができた。また実証実験を共同で実施することで、従来の組織に閉じたデータ管理の枠を越えたデータ共有、クラウドシステムによるコミュニケーションの活性化と経験の共有をはかることもできた。これによ

り産総研における共同研究契約の場合には特定の予算で獲得したデータや資産を外部組織や他のメンバと共有することが難しいところ、コンソーシアムの自己財源で取得したデータやデバイスを後からコンソーシアムに参画したメンバにも共有することができた。さらにそれを共有基盤として活用し、多様なステークホルダー間のインタラクションによって新たなプロジェクトを地域支部等へ水平展開することもできた。

また、こうしたプロジェクトの実施結果や報告書、サービス・システム構築のためのソフトウェアも共有することで、コンソーシアム内のプロジェクトの推進や水平展開のために、類似プロジェクトを効率良く高速に着手、実施でき、ノウハウの波及、メンバ間のインタラクションも促進できた。具体的には、次のような効果が示されている。

- ・ものづくり WG で作成したフレームワーク、AI 版ビジネスモデルキャンパスを他の WG や地域支部でも共有し、新規プロジェクトの立ち上げ、推進が加速した。

- ・イベント空間での行動ナビゲーションのアプリケーションをリビングラボ WG や社会課題解決 WG で試行し、産総研でシーズ開発を集約し、開発したソフトウェアを企業に技術移転、それらをソフトウェアモジュールとして組み合わせることで、多くの新規プロジェクトやサービス・システム構築を加速できた。

- ・産総研が開発したソフトウェアモジュールを統合し、来場者の行動を観測し、AI による対話的なインタフェースも備えた AI タッチラリーと名付けたシステムや AI 自動販売機のアプリケーションとして実証実験を行い、ユースケースの改善、運用ノウハウを蓄積した。新たなユースケース開発と運営ノウハウを相互に進化させながらこれを他の WG や地域支部に展開し、後述するように大規模商業施設やお台場の日本科学未来館などに早期に展開できた。

第四次産業構造革命^{用語4}を見据えて、シーズ技術の活用のみならず、それらの共通基盤化、各応用事例のサービス・システム化、推進体制の仕組み化を同時に進め、さらに課題がある地域にデータ知識循環型サービス・システムとして展開し、社会実装をはかる持続的な活動へとつなげる再現性の高い仕組みとして確立できたと評価できる。地域支部と各 WG、各プロジェクトを有機的に連携できるようにハブとなる会員がそれらに同時参加し、主体的な活動を生むことができるように運営委員の選定や新規プロジェクトメンバの選定を注意して実施した運営上の方法の効果も大きいものであった。過去の情報を蓄積した独自のクラウドシステムへアクセスできることで、過去に行われたプロジェクトや報告会の資料を活用し、多様な企業文化や背景の異なるメンバ間の意識共有や、関心を共通にすることで、人材の少な

AI 技術によるアプリケーション、サービスの実証
(売り場やイベント空間での行動データ観測/分析/推論/推薦)



図 8 AI 技術によるサービス・システムの実装と実証

い各地域でのプロジェクト展開なども確実に実現できた点は、後述するティール型^{用語5}の組織運営^[17]を支援できるAI技術のあり方に示唆を与えたと言える。

従来とは異なる不確実性の高いプロジェクトを進める方法論としてアジャイル型開発^{用語6}やリーン・スタートアップ^{用語7}と呼ばれるものがある。これは不確実性が高く先を見越すことが難しい行動計画について、失敗することを前提にリスク管理をしながら経験することで組織学習する方法である。AIは一度使っただけではすぐに性能や結果が出せない。AIを使い何をするか、そのための仕組みの構築やデータ収集、計算モデル改善の試行錯誤が必要といえる。各社がそれぞれ同じような失敗をするのは非常に効率が悪い。失敗事例や経験、ノウハウを共有する方が圧倒的に有利になる。AITeCでは、同じ関心のある企業がWGを作り、経験を積むための実証プロジェクトをコンソーシアムの予算で行うことで、実証プロジェクトを通じて問題点やノウハウが共有できる。これらの知見を蓄積し、成功事例を自社に持ち帰ったり、他のプロジェクトへ水平展開するという運営をしている。AITeCでは、各参加組織のプロジェクトとしては推進することが躊躇われる不確実性の高い行動計画であっても、自己財源による経験の共有を一義的な目的とした運用によって失敗事例を活かし、その後のプロジェクトの成功に貢献することを支援できた。

5.2 共創的ユースケース開発

AI技術は、多くの利用者を獲得し、大量のデータを集積できた時に機械学習により効果を大きく上げることができる。そのため、多くの利用者を獲得できる価値ある利用方法（ユースケース）を設計する検討が大変重要である。そのためアルゴリズムや学習の理論だけでなく、価値あるユースケースを考える場やユースケース開発の方法論が必要である。この時、技術側やサービスの提供者側だけでなく、利用者側の立場からユースケースを検討することで、利用者メリットになるようなAIの活用方法を考え、利用者にとっての価値（リスク、コスト、ベネフィット）が事前に把握できる。そこで、異業種の多様な参加者の幅広い観点からAI導入シナリオを整理するために、多様なステークホルダーの間で、提供者と利用者の双方のインタラクションを通じて検討を行う。それにより潜在的なリスクが事前に明らかになり、想定外の価値や潜在的なニーズについても速やかに気づくことができる。例えば、店舗サービスの場合では、サービスの利用者や現場の提供者、さらに提供側だが管理・経営側など、対象となる実社会現象に関連するステークホルダーは多岐に渡る。組織間を跨ぐ大規模なサービスの場合はさらにその関係は複雑なものになる。このような多様なステークホルダーのそれぞれの立場からサービス・シ

ステムを構築、管理するように多くの実証プロジェクトを展開し、そこでの経験値を高め、ニーズ抽出やリスク回避、コスト低減が進むことで成果が出やすくなっている。

このように具体的なユースケースのもとでAI技術の社会実装を進め、社会のサイバーフィジカル化を実際に進めることで、従来の物理的な生産性の限界を事前の予測や最適な制御により改善することや、不確実な現象をサイバー上であらかじめ計算することで、新しい最適な組み合わせを探ることやリスクとベネフィットを最適化して決定をすることができるようになる。学習した確率モデルを活用した予測やシミュレーションを行うことで、例えば利用者の傾向を理解して適切なアクションを選択でき、利用者にとっての価値を向上するサービス改善を行うことができる。このように具体的なユースケースに基づいて目的変数と説明変数を設定し、質の高い実社会ビッグデータを収集し、利用者へのサービス提供を通じてさらに確率モデルの学習を進めて、現場を支援するAI応用システムを稼働させる。この循環を回すことで実社会ビッグデータの収集を加速、実社会現象をシミュレーションできる確率モデルを構築し、さらにその確率モデルを使って人が新たな気づきを得ることで、マネジメントの支援や新たなユースケース開発によって価値創出（ベネフィット創出、コスト削減、リスク低減）を持続的に発展させることができる（図9）。

学習した計算モデルが人間にとって理解が難しいディープラーニングの様なブラックボックス型のAI技術の場合、人が協調作業を行うことが難しいため、全自動で無人化を志向する応用事例が多い。一方、「人間と相互理解できる次世代人工知能技術研究開発」^[9]における確率モデリング技術の場合には、現象を目的変数と説明変数の間の関係として構造化した計算モデルが得られるため、その結果は人が理解しやすいものになり、人が気づくことで、サービス・システムやマネジメントに人が介入し協調作業を行うユー

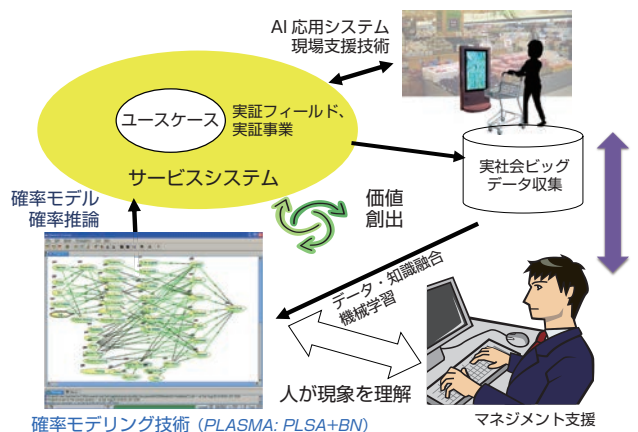


図9 人と相互理解できる次世代人工知能

スペースを開発することができる。つまり、AI 技術による自動実行ができる上に、人がよりよく意思決定できるようになるため、人と AI の協働動作が期待できる。この特性が持続的に働くと、実社会ビッグデータからの機械学習により AI が性能向上しながら、さらに人がその学習結果を利用することによるサービス・システムを通じた経験の可視化、説明可能な知識化、それを通じた適切な現象の再現性が向上する。その結果、現場やマネジメント層、さらに他分野の各ステークホルダーの学習や相互理解も進むことから、AI と人の共進化が期待できる。こうした好循環が人と相互理解できる AI の社会実装を早期に進める大きなメリットである。AITeC の活動により多くのユースケース開発と人材育成が同時に進み、サービス分野（図 10）や製造業分野（図 11）などでの事例が蓄積されている。

AI 技術の研究開発を効果的に進めるためには、AI 技術の研究と産業応用としてのユースケース開発を同時並行して進める戦略が重要になる。そのため、研究所の中に産業応用を進めるステークホルダーを巻き込み、研究と同

時に実際の現場で様々なユースケースを開発し、実際に利用する経験を積み重ねることのできる体制の形成と運営が必要で、AITeC の共創的ユースケース開発が有効に機能している。産総研の研究者が自身のシーズ研究のために、AITeC の WG に参加してユースケースを異業種のメンバと共同して開発した事例も生まれた。こうして開発された新しいユースケースが蓄積され、この蓄積を効率よく管理することで、AI 技術による効果の高いユースケースの特徴が明らかになり、適用先の性質とのマッチングに応じたユースケースの分類も進む。AITeC ではユースケースを管理するためのフレームワーク、管理システムを独自のクラウドシステムとして構築し、トランスディシプリナリー型オープンイノベーションによる共創的ユースケース開発と、その成果の波及を促進する仕組みとして機能していたと言える。

5.3 データ知識循環型のサービス・システム構築

近年のインターネットを活用したサービス・システムの発展は目指しく、その基本は利用者を ID により同定し、Web のクリック履歴やネット上の購買履歴などのデータを

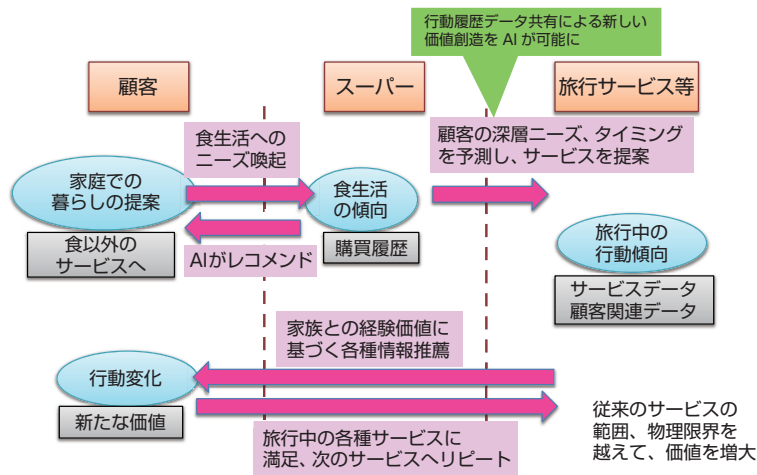


図 10 サービスでのユースケース（例）

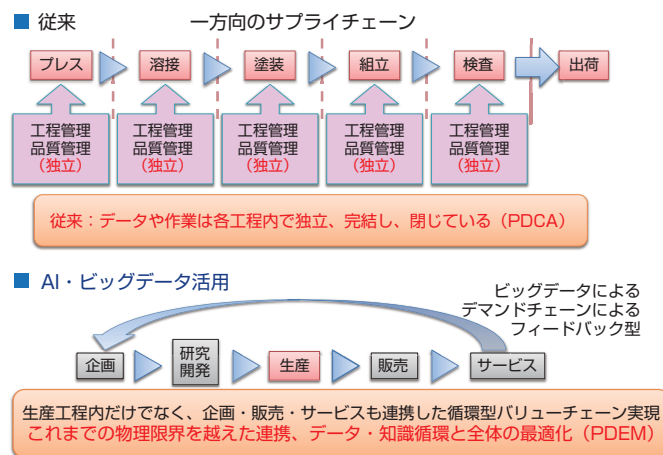


図 11 製造業でのユースケース（例）

集約し、その情報に基づいて、需要予測の精度向上を実現し、サービスや物流の最適化を図るものである。物流コストや欠品・機会損失などのリスクを低減し、顧客ベネフィットと生産性を向上できることが多くの事例により示されている。これは従来の産業の多くが提供側から利用者側へ製品を流通させて対価を得る、一方向的なプッシュ型のシステム（サプライチェーン）であったのに対して、インターネットを通じた利用者側から提供側へは、対価だけでなく、顧客情報や行動履歴などのフィードバック情報が得られるバリューチェーンであることが本質的な変化であった。書店やアパレルといったインターネット化が進む分野の急速な変化を見れば明らかであるように、提供側だけではなく、利用者側の情報も積極的に扱うことのできる循環型バリューチェーンが、今後の競争優位性の鍵となることは間違いない。今後さらに広い分野でキャッシュレスやシェアリングサービスの普及が進むにつれて、この利用者側の情報が提供側に容易に循環できるようになり、利用者側の情報を活用した予測により不確実性にも十分対応できるサービス・システムへと変化していくことが期待できる。サイバーフィジカル化する社会においては、デマンド側からのフィードバック情報を通じて、利用者側のニーズや状況を理解し、潜在ニーズを発掘したり、健康や環境といった社会課題の解決にも寄与できる可能性が生まれる。これまでの順方向の製品を市場に提供する意味でのサプライチェーンだけでなく、製品の利用現場や流通過程で起こる現象を実社会ビッグデータとして収集し、そこから価値（ベネフィット、リスクやコスト）がどのように生成されているのか、ということの説明できる計算モデル、重要な対象を目的変数とした説明変数との関係を構造とした確率モデルを構築・推論した結果を知識として活用するアプローチが実現できる。これまでサプライチェーン一辺倒だった産業構造に利用者側からのフィードバックシステムであるデマンドチェーンを付加し、循環型のバリューチェーンにすることができれば、経済活動を通じて得られる実社会ビッグデータによってデータ

と知識を循環し、リスクやコストを低減し、ベネフィットを向上させることのできる高付加価値で生産性の高い進化したサービス・システムや産業構造へと大きく変えることが可能になる（図 12）。

次にデータ知識循環型のサービス・システムの構築が可能であることを AITeC の活動から検証する。電子マネーが普及しキャッシュレス時代となると、これまでの現金では情報としては購買の総額、集計値でしか把握できなかったところが、利用者側の ID と、決済時刻、決済した場所などが履歴として記録されるものとなる。AITeC では、この利用者の ID として、会員カードや来場者のリストバンドとして RF-ID タグを配布し、決済時だけでなくサービス利用中の行動履歴や、健康サービスの利用ログ、測定結果を収集し、確率モデルを構築する実証実験を、お台場でのサイエンスアゴラという科学イベント^{[18][21]}や、ビッグサイトでの大規模展示イベント、有楽町での商業施設でのイベント^[22]、大阪工業大学との連携によるイベント^[23]、千葉大学との連携による健康イベントなどの複数の実証実験で実施した。この成果は AI タッチラリーと名付けられたシステムと運用方法論として一般化され、展示ブース約 100 箇所、来場者約数千人への対応、リアルタイムでの分析結果を多数の現場スタッフへスマホにより可視化できることなどを確認し、コンソーシアム内の複数のプロジェクトで共有できるパッケージとして確立した^[21]。プライバシーの保護については、利用者の ID を確率モデリング技術によってセグメント化し、セグメントごとに集計したマイクロ集計データ（マイクロアグリゲーションデータ）として、個人の元のデータには戻せない状態にすることで、安心して共有できる。データプラットフォーム WG では、このセグメント単位でデータを連結、突合することで、これまでは難しかった金融データ、保険データなど他業種のデータとも統合する実験を行い、新たなビジネスモデルの創出、起業にもつながった^{[24][25]}。

構築した確率モデルを使った確率推論によって、来場者セグメントの再来場確率や来場者数の変化や、これらの目

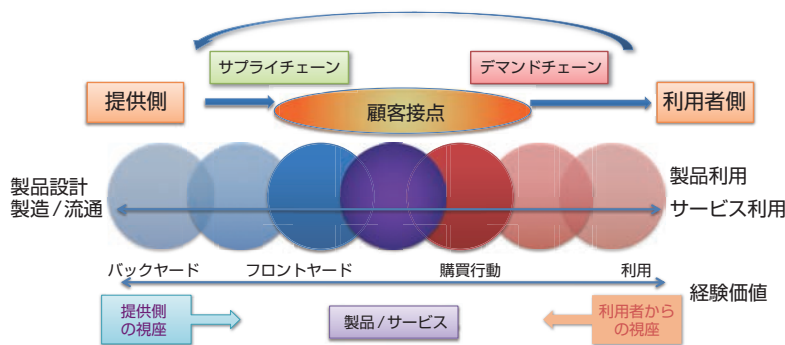


図 12 循環型バリューチェーン（サプライチェーンとデマンドチェーン）

的変数を変化させるための条件が予測できるので、その来場者セグメントにあった施策を適切に実施することで、来場者の満足度を高め機会損失や無駄なコストを減少できる。今後、データ知識循環型のサービス・システムで収集できた実社会ビッグデータを十分活用し、広範な応用を可能にするためには、企業内の限定的な活用にとどまらず、データや構築した確率モデルを共有できるプラットフォームを構築し、複数の企業や自治体、経済団体など多機関と連携し、実社会の問題解決を通じて事例と方法論を集積することが求められている。そのために AITeC での事例を広く共有し、大きな効果を上げるための共創的活動と、持続的に運用できるプラットフォームを地域に展開し、人材育成とも合わせて社会実装を進めていくこと、そのために観光 WG を地域支部に発展させることなどを計画している。これにより、AI 技術だけでなく、それを受容し、活用できる地域や社会との相互進化がさらに進むことが期待される。

6 考察：人工知能技術導入加速のスパイラルアップ

AITeC の 5 年間の運営を通じて獲得された AI 技術の社会実装を進めて、AI 技術と社会の相互進化への期待が明らかになった。これは、社会的期待として議論されている「情報循環の中でのピースミールに進化論的な変化」^[26]と言えるものに相違ない。

製造業や品質管理の文脈でこうした循環型の進め方としてデミングが創始したとされる PDCA サイクルがよく知られている^[27]。PDCA のような循環型の管理方法であっても、新規のサービスや AI 技術を導入した新たなユースケースの場合には、想定通りに効果が上がらない場合がある。コンソーシアムのプロジェクトでは、行動計画の立案 (Plan) では、技術シーズとメンバが揃い受益者となるフィールドがみつければ、たとえ収益性が不明確であっても自己財源の範囲内で実行 (Do) にうつすことができる。また、Check、Action の代わりに、実行した結果を、多様なステークホルダーの幅広い視座から探索的に評価 (Evaluation) し、その結果、その実行計画はもともとどんな意味を持っていたのかに立ち返り、その価値や背景にまで立ち返って、根本からプロジェクトの位置付けも見直す。ステークホルダーは、事前に特定できない場合や、プロジェクトの進行にしたがい新たなステークホルダーの参入が必要となる場合もある。動的、自立的な組織構成はティール型組織^[17]として不確実性が高まる現在、新しい組織モデルとして注目されているものに近い。オープンイノベーション、価値デザインに関する問題意識から生まれた WG の議論においても自立性の高さ、意思決定の速度が重要視されている^[28]。

目的を共有するが、スキルセットや所属組織が異なるトランスディシプリナリー型のチームは従来型の固い組織モデルよりも意思決定の速度、自立性が高く、実社会ビッグデータやシミュレーション技術により状況の変化や意思決定支援が受けられる場合にはそのパフォーマンスの向上が大きく期待できる。また、実行した結果もデータからの計算モデル化による可視化、シミュレーションにより深く掘り下げて振り返ることができるようになる。この振り返りは、各ステークホルダーが共有できることで、全体としてのメタ認知やリフレクションを支援するものである。当初の目論見を初期のモデルとすれば、それに基づくプランと実行を経た結果を元に、そのモデル自体を関与する複数のステークホルダーが評価し、実社会ビッグデータからの確率モデリングにより再構築するリモデリングを促進することができる。この繰り返しプロセスを Plan, Do, Evaluation, Modeling のステップによる PDEM スパイラルと名付け、AI 技術の社会実装を加速するための方法論として確立することを目指している (図 13)。この持続的、漸進的なプロセスを用いて、実社会ビッグデータと計算モデルを活用したシミュレーションを実行する技術、新たなステークホルダーを巻き込みながら価値創出のための新たな指標を探索する取り組みを進化させ、再現性を高める仕組みや支援技術を開発することも今後の重要な課題である。

7 展望：コミュニティ・人材育成の観点

今後、デジタル化が進んだ事業者同士がつながって、組織のモジュール化が進むと予想される。そして社会や産業のサイバーフィジカル化が進むと、フィジカル空間における従来のサービスが IT 化され、ソフトウェアとしてネットワーク化されるモジュールの組み合わせによって価値が出せる時代になる。多数のモジュールの掛け算ができるようになると、そこで初めて生産性が向上する。そのためには、各モジュールの互換性が高いことが必要である。早い時期に異業種コミュニティをつくって、お互いのリソースを交換し、互換性が高くなるような戦略を立てれば、産業構造変革の実現性が高まる。このように産業がモジュールし、相互に接続するネットワーク化は経産省から Connected Industries というコンセプトとして示されている^[29]。AITeC はこれをいち早く実現することを意識して、異なるスキルを持った異業種のメンバによる共同プロジェクトの形成を促した。

コンソーシアムの活動を約 5 年実施した結果、参加メンバの中から、WG リーダー、プロジェクトリーダーとなる人材が継続的に現れている。当初から問題意識を持ってコンソーシアムに加入し、コンソーシアム内の他の WG のメンバとして活動に参加する過程で、共通の問題意識と異なる

スキルを持つメンバが数名集まるとプロジェクトが形成される。プロジェクトとして成立すると数ヶ月～半年の期間、勉強会、ワークショップ、調査、試行を一定期間行う。このようにプロジェクト活動が持続的に行えるようになり、メンバの数が10名以上になると、新たなWGとして独立する。各プロジェクトやWGの活動を知り、類似事例を調査することで、地域支部においても新たなプロジェクトを速やかに立ち上げることが可能になった。地域支部は既存のWGリーダーをゲストとして招聘し、新たな地域支部内の活動、プロジェクトの支援も行っている。またこうした交流を加速するために、年に2、3回、WGとプロジェクトをコンソーシアム会員全体に紹介する定例報告会を開催し、新たなメンバの参加も促している。またWGやプロジェクト毎にSNSの利用や、会議室の利用、外部展示会への参加などを事務局が支援している。

新たなプロジェクトやWGの創出、拡大が企業間や地域支部との人的交流により自発的に行われることで、関心と動機、スキルを持ったメンバが協調、共創できる機会、経験が生まれ、自社の競争領域ではない協調領域での連携事例が増加した。また参加メンバの多くから産総研の研究者と日常的に交流し、AI技術に習熟する機会を増やし、プロジェクトリーダー経験や社外人材と協業を経験できるメリットは大きいとの評価も得ている。

さらに、こうした経験を共有したメンバ同士が、コンソーシアム内の活動で実績と相互の信頼を育み、自社の案件においても協調することとなり、従来考えられなかった体制で競争領域においても協業する事例も現れている。それと同時に産総研技術の社会実装事例も増加している。具体的には、ビールの推薦を行うAI応用アプリケーションを複

数企業が共同で開発、東京と神奈川の2店舗のレストランで行った実証実験、学生との連携事例である大阪工業大学梅田キャンパスでのAI自動販売機アプリや、お台場で毎年行われるサイエンスアゴラ、東京ビッグサイトや都内商業施設で実施したAIタッチラリーやAIデジタルサイネージによる実証実験などがある^{[18][23]}。これは、産総研技術そのものだけでなく、技術を活用したユースケースやサービスの開発事例や技術導入事例、プロジェクトの外部への可視化が可能になることの効果が大きい。実際、これらの実証実験を体験した別の企業から新たな実証実験の依頼などが増加した。従来の産総研内の連携では、研究者や開発者同士の横のつながりはあるが、社会実装のためにはそれに加え、技術の提供側と利用者側を結びつける縦のつながりが重要である。とくに機械学習分野ではデータが生成される場所とアルゴリズムが開発される場所の間の距離が物理的、人的に遠いため、この間をつなぐことのできる人的ネットワークをどのように構築するかが重要なポイントであり、この点で共創的なユースケース開発や、多機関連携での実証実験による事例の外部への可視化は有効に機能した。

技術の社会実装やユースケースの開発は、科学におけるユニバーサルな真理の探求とは異なり正解が一つとは限らないため、多様な価値観の並列的探索が重要になる。研究者が陥りがちな個々の手法、技術やその背後のディシプリンの優劣の比較のみに時間を費やすのではなく、ステークホルダーそれぞれの技術と課題にとって適切なユースケース、つまり再現性が高く、有効性のある事例を生み出すことが自然と優先される。失敗も想定した試行を経て、再現性と成功確率を高めるために、実証実験は異なるフィール

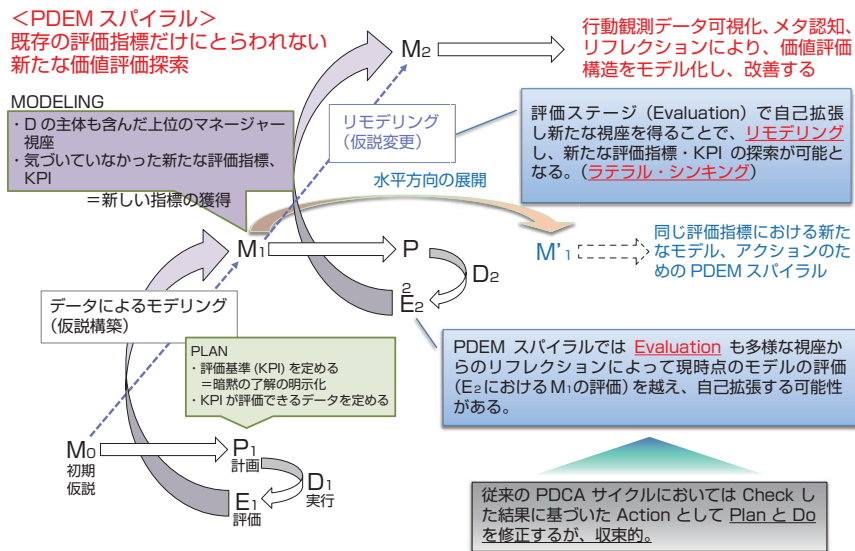


図13 PDEM スパイラル

ド、異なるメンバでも繰り返し行われる。そのためにクラウドを活用して、個々の実証実験で得られた情報、知見の共有が促進される。この共有のクラウドにより各 WG 間、地域支部との交流も促進されるため、コンソーシアムの拡大にも大きく寄与している。こうした活動によって、社会・産業のサイバーフィジカル化を進めるための人材育成、スキル向上、共有できる情報基盤整備、事例の蓄積が進んでいる。今後は成功事例の生成プロセスのマニュアル化、情報基盤整備のビジネス化、課題解決手法、コミュニティ育成手法の標準化にも取り組み、異なる企業間、産業間の連携にも展開していくことが重要であると考えている。

8 おわりに

産総研コンソーシアムという制度のもとで、実践的なコミュニティづくり、継続的な実証実験の生成、成長のスパイラルを試行する取り組みとして、AITeC を仮説として設定し、実装、定性的に検証した。インターネットが1998年以降から一般家庭でも使われ始め社会インフラとして定着、その約10年後にはそのインターネットのインフラの上にさらにスマートフォンやそのサービスが統合され、今や生活には不可欠の情報サービスとして定着した。今後、さらに社会のサイバーフィジカルシステム化、Society5.0の実現を進めるためには、情報技術そのものだけでなく、それを進める産業人材の育成、基盤整備、異業種間の連携と、研究コミュニティと実践、課題解決のためのコミュニティの確立、発展が必要である。こうした異分野の交流、トランスディシプリナリー型の共創活動を定着させるために、これまでにない経験を開始、展開するための場づくり、参加者の共通のマインドセットの醸成をAITeCでは実現できた。従来の学会や、産業・事業共同体などの集合体に見られない特色として、提供側と利用者側の連鎖がプロジェクト内、プロジェクト間、異なるWG間、異なる地域間にも波及してきている。技術の社会実装とそれを拡大するためには、従来の特定のコミュニティの壁を乗り越えるトランスディシプリナリー型の活動を可能にする場づくりと、実証実験の可視化、プロジェクトを再現可能にする仕組み化、基盤整備が有効であることが示された。

新しい枠組みへの発展、新規技術が適合するユースケースの開発を進めるためには、初期段階ではリスク、コストが高いかもしれないが、新たな可能性を経験するための実証実験を継続的に行える仕組みが重要である。労働人口減少が進む日本が今のままではいられないことは明らかであり、社会や産業の不確実性は今よりも高くなる。今までの経験が通用しないという前提で、我々はどのように意思決定すべきなのか、を考えてAI技術の応用先を考えるこ

とが必要である。AI技術の社会実装が進むと、そこから新たなデータの集積が加速するため、これまでよりも格段に高い精度、頻度でのデータ収集が可能になる。そこで、本来的には将来何を実現するかという長期的目的を設定し、その本来の目的のためのAI技術が必要となる品質の高いデータを取ることを考えて、初期のAI技術を導入するフィールドや利用方法（ユースケース）を考える戦略が重要である。そのために、まず初期利用者を獲得し、初期に実装したAI技術により新しいデータを早く集める。すぐに使えるAI技術を具体的なユースケースのもとでサービス・システムとして構築し、早期に社会実装すること、そのための分野融合型共創的エコシステム形成が有効であった。また、従来のビジネスモデルや産業構造にとどまらず、その枠を越えたAI技術活用の社会実験の事例集積、新たな活動と経験を通じたコミュニティと人材育成、技術評価が行える環境を用意することも重要であった。さらに、それを全国各地、幅広い産業分野に定着できるような共創の場、情報基盤を新たな共有サービス・システムとして構築することを全国に展開できれば、これからのサイバーフィジカル社会、Society5.0に向けて我が国の産業競争力、生活基盤強化を加速できることが期待される。

用語の説明

- 用語1: サービス・システム: 「提供者と受給者が価値を共創するサービス」を実行するシステム。ここではサービス学、サービス工学のシステムズアプローチが対象とする系の中に人やITシステムも含めた全体のシステム。(参考: http://ja.serviceology.org/events/doc/20121226_foundation_arail.pdf)
- 用語2: デジタルトランスフォーメーション: ITが浸透し、人々の生活が良い方向に変化すること(エリック・ストルターマン2004)。データとデジタル技術を活用して、製品やサービス、ビジネスモデルを変革し、競争上の優位性を確立すること。(参考「デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン(DX推進ガイドライン)」)
- 用語3: トランスディシプリナリー: Transdisciplinary, 分野を超えて複数の専門家やステークホルダーが連携すること。
- 用語4: 第4次産業構造革命: IoT、ビッグデータ、AIをコアとした技術革新による産業構造革命(参考: https://www5.cao.go.jp/keizai3/2016/0117nk/n16_2_1.html)
- 用語5: ティール型組織(進化型組織): 組織経営の進化形態のうち進化がもっとも進んだ生命体としての特徴を持つもので、相互の信頼関係に基づき、目的実現に向けて自立的に行動できることを特徴とする。
- 用語6: アジャイル型開発: 素早く、俊敏に、短い開発期間(イテレーション)を反復する開発手法で、リスクを最小化し、不確実性に適切に対応できるとされている。
- 用語7: リーン・スタートアップ: 起業の方法論の一種で、新規サービス・製品を最小コストで試作し、アーリーアダプター(初期採用者)に提供して反応を計測し、その結果からサービス・製品を改良、変更して顧客に受け入れられるものにしていくことで成功する確率を高めるもの。

（エリック・リース『リーン・スタートアップ』伊藤穰一訳、日経BP、2012年）

参考文献

- [1] 内閣府：第5期科学技術基本計画，(2016).
- [2] 吉川弘之：サービス工学序説—サービスを理論的に扱うための枠組み—, *Synthesiology*, 1 (2), 111-122 (2008).
- [3] 本村陽一, 西田佳史, 持丸 正明, 赤松 幹之, 内藤 耕, 橋田 浩一：サービスイノベーションのための大規模データの観測・モデリング・サービス設計・適用のループ, *人工知能学会誌*, 23 (6), 736-742 (2008).
- [4] 本村陽一, 竹中毅, 石垣司：サービス工学の技術—ビッグデータの活用と実践—, 東京電機大学出版局, (2012).
- [5] 産業技術総合研究所：社会の中で社会のための サービス工学—モノ・コト・ヒトのための研究最前戦, カナリア書房, (2014).
- [6] 中島秀之, 平田圭二：サービス実践における価値共創のモデル, *サービソロジー*, 1 (2), 26-31 (2014).
- [7] 人工知能技術コンソーシアム: <http://www.ai-tech-c.jp>, 閲覧日2020-2-4.
- [8] 小林直人, 赤松幹之, 内藤耕, 藤田茂, 小野晃: 学術誌「Synthesiology (シンセシオロジー)」のこれまでとこれから—イノベーション創出のための構成型研究をめざして, *情報管理*, 55 (10), 722-734 (2013).
- [9] 本村陽一：次世代人工知能技術, *情報処理*, 57 (5), 466-469 (2016).
- [10] 小野晃, 赤松幹之, 小林直人：構成型研究におけるシナリオ：その役割と表現—シンセシオロジー誌掲載論文による検証の試み, *シンセシオロジー*, 9 (1), 26-38 (2016).
- [11] 本村陽一, 岩崎弘利：ベイジアンネットワーク技術—ユーザ・顧客のモデル化と不確実性推論, 東京電機大学出版局, (2006).
- [12] 本村陽一：大規模データからの日常生活行動予測モデリング—実サービスを通じたベイジアンネットワークの学習と推論, *シンセシオロジー*, 2 (1), 1-11 (2009).
- [13] 本村陽一：ビッグデータを活用する確率モデリング技術—社会実装の取り組みと課題, *統計数理*, 66 (2), 213-224 (2018).
- [14] 本村陽一：異質性を活かす—サービス学の共通基盤を目指して, *サービソロジー*, 1 (3), 20-23 (2014).
- [15] 中島秀之：フレーム問題, *人工知能学事典*, 共立出版, (2017).
- [16] Y. Motomura and T. Kanade: Probabilistic human modeling based on personal construct theory, *J. Robotics and Mechatronics*, 17 (6), 689-696 (2005).
- [17] フレデリック ラリー：ティール組織—マネジメントの常識を覆す次世代型組織の出現, 英治出版, (2018).
- [18] 高岡昂太, 本村陽一：持続可能なデータ収集を可能にさせるサービスプラットフォームの構築, 第32回人工知能学会全国大会予稿集, 103-OS-15b-01 (2018).
- [19] K. Takaoka, K. Yamazaki, E. Sakurai, K. Yamashita and Y. Motomura: Development of an integrated AI platform and an ecosystem for daily life, business and social problems, *Int'l Conf. Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2018), Advances in Intelligent Systems and Computing*, 787, 300-309 (2018).
- [20] 大和田智之, 山下和也, 大前智嵩, 本村陽一：イベント参加者の属性情報および行動履歴データの分析と活用, 第32回人工知能学会全国大会論文集, 2K4-NFC-3b-01 (2018).
- [21] 山下 和也, 對間 悠一, 大和田 智之, 大塚 芳高, 竹田 会里, 櫻井 瑛一, 高岡 昂太, 澤谷 真澄, 齊藤 裕一郎, 中庭 伊織, 石田 和宏, 長谷 篤拓, 長谷川 裕久, 豊田 俊文, 潤間 励子, 本村 陽一：イベント空間のモデリングによるイベント来場者と企画者の満足最大化, 行動計量学会全国大会抄録集 (suppl), 196-199 (2019).
- [22] 古田真理, 山下和也, 碓井舞, 内藤まゆこ, 本村 陽一: 実社会ビックデータと確率モデルを用いた施設内サービス空間でのイベント来場者の行動・感情分析, 人工知能学会第35回社会におけるAI研究会, (2019).
- [23] 豊田俊文, 高岡昂太: AI自動販売機Reco!の概要と, デジタルシティアプリ開発の構想 AI搭載サイネージ型自販機Recoの実社会でのユースケースについて, 行動計量学会全国大会抄録集 (suppl), 204-205 (2019).
- [24] 博報堂: <https://www.hakuhodo.co.jp/news/info/47033/>, 閲覧日2018-5-25.
- [25] 博報堂DYホールディング, <https://www.hakuhodody-holdings.co.jp/news/corporate/2019/10/2338.html>, 閲覧日2019-10-10.
- [26] 科学技術振興機構: 「21世紀の科学・社会を支える新たな教養のあり方を考える」, CRDS-FY2016-XR-02 (2016).
- [27] 石川馨: *品質管理入門*, 第3版, 日科技連, (1989).
- [28] 内閣府知的財産戦略推進事務局: ワタシから始めるオープンイノベーション, 価値共創タスクフォース報告書 (価値デザイン社会実現に資する実質的なオープンイノベーションの実施に関するタスクフォース), (2019).
- [29] 経済産業省: Connected Industries, https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/connected_industries/index.html, 閲覧日2020-2-4.

執筆者略歴

本村 陽一 (もとむら よういち)

1993年 通商産業省工業技術院電子技術総合研究所情報科学部情報数理研究室研究員。2001年 独立行政法人産業技術総合研究所情報処理研究部門主任研究員。2003年 同研究所デジタルヒューマン研究センター主任研究員。2008年同研究所サービス工学研究センター大規模データモデリング研究チーム長。2011年 同研究所サービス工学研究センター副研究センター長。2015年4月 国立研究開発法人産業技術総合研究所情報技術研究部門副部門長。2015年5月 同研究所人工知能研究センター副研究センター長。2016年より同研究所人工知能研究センター首席研究員兼確率モデリング研究チーム長。東京工業大学特定教授、神戸大学客員教授、統計数理研究所客員教授、産総研人工知能技術コンソーシアム会長も兼務。



査読者との議論

議論1 論文全体

コメント (持丸 正明: 産業技術総合研究所)

新しい知識を含んだ内容ですが、基盤技術と活動を紹介する解説記事的な構成になっていて、論文の中核となる「Research Question」が何で、それをどう検証したかが読者に分かりにくい。査読者は、この論文の中核は「サービス(ニーズ)→データ→AI技術(シーズ)」からなるサイクルであると理解しました。だとすれば、この論文の Research Question は「このサイクルを実現する方策として、新しいスタイルのコンソーシアム活動は有効であったか」というものだと思います。そして、その仮説検証の過程から「PDEM スパイラル」という新しい枠組みが見いだされたかと考察するのが良いでしょう (PDEM スパイラルという枠組みで考えることの有効性は、この論文では検証し切れていないので、考察で論ずるにとどめる)。そのような論理構成で、論文全体の構成を組み替えてみてください。

回答 (本村 陽一)

論理構成についてのご助言、誠にありがとうございます。研

究の起点、すなわち、達成されるべき社会像を Society5.0 であるとし、第5期科学技術基本計画を引用して「社会のサイバーフィジカルシステム化」が有効であることを冒頭で論じました。その上で、「社会のサイバーフィジカルシステム化」を実現する方策としてのコンソーシアム活動が有効であるという仮説、AITeCの実装、活動結果に基づく検証という構造を明確化いたしました。

議論2 タイトル

コメント(持丸 正明)

論文のタイトル「人と相互理解できる AI 技術によるデータ知識循環型社会の実現へのシナリオ～産総研人工知能技術コンソーシアムにおけるトランスディシプリナリー型のオープンイノベーション～」が、本当に論旨にあったものなのか、再考ください。査読者は、副題の方が論旨に近く、たとえば「データ知識循環型社会実現に向けたトランスディシプリナリー型オープンイノベーションの有効性 ～産総研人工知能技術コンソーシアムの活動～」のようなものではないかと思えます。

回答(本村 陽一)

ご指摘の点を踏まえて、主題と副題を入れ替え、また先行研究との接続性を高めることを目的として、「産総研人工知能技術コンソーシアムにおけるトランスディシプリナリー型のオープンイノベーション～人と相互理解できる人工知能技術による Society5.0 実現へのシナリオ～」と変更しました。

議論3 用語

コメント(持丸 正明)

この論文において利用者、提供者などのステークホルダーは極めて重要です。本文中には登場しない「マネージャー」が図(PDEMの図)中に登場したり、利用者に近い生活者や顧客という用語が登場したりします。まずは、論理構成に必要なステークホルダーを整理し、それらを明瞭に使い分けるようにしてください。

回答(本村 陽一)

ステークホルダーを、人工知能技術が利用される状況でのものと、オープンイノベーションの場におけるもの、に分けて記述するように整理と用語の統一を行いました。

コメント(持丸 正明)

タイトルにも含まれる「トランスディシプリナリー型」は、この論文の後半で何度か出て参りますが、具体的にどの分野(discipline)を横断する(trans-)のか、よく分かりません。学術分野を意味するのであれば、知識循環型社会の実装において、どのような分野横断型の取り組みが必要と考えるのか(仮説)と、コンソーシアム活動では実際にどのような分野横断型の取り組みが行われ、それが成功の要因となったのか(検証)を、もっとしっかり記載すべきです。この部分は、この論文の中核的な箇所であると理解しています。

回答(本村 陽一)

トランスディシプリナリー型でチームを構成する必要性を目的共有するステークホルダーの自律的な取り組み(ティール組織)として位置づけ、AITeCにおける仮説、実装、検証と、考察のそれぞれの中で議論する形にいたしました。

コメント(小林 直人:早稲田大学)

この論文で使用している AI という言葉ですが、AI=ディープラーニング(機械学習)という理解でいいでしょうか。また AITeC が狙う次「世代人工知能」はディープラーニングを超えて、確率的推論能力を備えた新たな AI と考えていいのでしょうか。

また、「『人間と相互理解できる次世代人工知能技術研究開発』で開発された確率モデリング技術の場合には、学習した結果はヒトが理解しやすいものになる」と書かれてありますが、それは何故でしょうか?例えば、目的変数と説明変数を予め決めておくので、その枠を超えた結論が出る可能性は低いので、ヒトが理解しやすいものになる、と考えていいのでしょうか?

回答(本村 陽一)

AI という語の使用に一貫性がなかったこと、説明不足の点、ご指摘の通りと思います。人工知能技術のうちデータから学習する機械学習、その中の計算モデル、その一つとしての確率モデルといった整理を行い、人と相互理解できる人工知能技術の必要性と意義、参考文献なども記載しました。「人が(現象を)理解しやすい」「人と相互理解できる」という意味につきまして、現象と目的変数、説明変数、フレームによる関係整理を行い加筆しました。

議論4 具体的事例の紹介

コメント(小林 直人)

この論文では、AITeCの活動例として多数のWGの活発な活動が説明されていて分かりやすいですが、そのうちの1~2件が良いので、図8「AI技術によるアプリケーション、サービスの実証」に示されたような事例の実際の効果(数値を含む)や、産総研技術の社会実装事例の実際の効果を示すと、大変説得力があると考えられるので、是非それを期待します。

回答(本村 陽一)

ご指摘の点を踏まえて、事例と参考文献を5章と8章に追加しました。

議論5 人間の主体的関わり方

コメント(小林 直人)

この論文は、AIによる「デジタルトランスフォーメーション」に実現に向けた技術的課題の克服方法とその実証を示した貴重なものです。一方、今後、循環型バリューチェーンの中でデータ供給側にいる人間の主体的な関わり方に、何か良いアイデアはないでしょうか。行動することにより或いは情報を発信することにより、常に個人のデータが捕捉されていることは、社会生活上或いは政治上もあまり好ましいことではないと思われまます。プライバシー保護と言っても、現在ではあくまでもデータ取得側の意向に依存するように思います。今後の技術的な進歩により、データ供給側の主体性が保証されるような仕組みが可能であるのか、ご意見をお聞かせください。

回答(本村 陽一)

データ供給側に立つ、「利用者」の役割がとても重要になると思います。現在はデータ提供に同意をしないことで、利用者自身がプライバシー保護を優先することが可能です。しかし、そのような消極的な態度では、便益を得る機会が失われるため、利用者自身がプライバシーの保護と便益のトレードオフを選択すること、そのために同意の表明方法が重要になるかと思えます。我々が行う実証実験では、この同意の取得をできるだけ紙面によるものではなく、電子的に取得するようにしています。これは、今後、同意履歴のデータベースを利用者自身で変更、編集できることを目指し、利用者、すなわちデータ供給側が主体的に自身のデータ利用をコントロールできることを指向するものです。医療分野でもパーソナルヘルスレコードとして、利用者が常時利用するサービスであれば、電子的に同意の再取得や変更が容易になるため、今後、こうした利用者主体の進展が進むと予想しています。

沿岸域における深層地下水の研究とその社会的な役割

丸井敦尚*、町田功、井川怜欧

これまで、産総研では社会的な要請にこたえる形で、地下水研究を進めてきた。かつては、地下水資源の開発（工業用水の確保等）や環境保護のためであったが、現在では、エネルギー利用（地中熱利用等）や地下空間の活用（二酸化炭素の地中貯留や放射性廃棄物の地層処分等）にも地下水研究が貢献している。この論文では、地質調査所以来これまでにやってきた地下水研究を紹介するとともに、現在解決すべき課題とその取り組みについて報告する。

キーワード: 沿岸域、深層地下水、概念モデル、地質環境モデル、社会的役割

Study of deep groundwater on the coastal area and its social role

MARUI Atsunao*, MACHIDA Isao and IKAWA Reo

Geological Survey of Japan (GSJ) has carried out groundwater studies responding to social demands. Groundwater studies had been conducted for the development of resources and the protection of the environment in the past. These days, in addition, they are contributing to thermal energy use and practical use of the deep groundwater environment for high-level radioactive waste (HLW) and carbon dioxide capture and storage (CCS) projects. In this paper, we present the history of groundwater research at GSJ, current issues, and our approach to groundwater use.

Keywords: Coastal area, Deep groundwater, Conceptual model, Site descriptive model, Social role

1 はじめに

我が国初の水文地質図は、“日本水理地質概観図”として当時の地質調査所が1957年に出版している。以来、全国の主要な地下水盆において、地下水の分布深度や地下水量、温度勾配等が示された水理地質図を41葉出版している。2001年に産業技術総合研究所に移行してからは、地下水の滞留時間や水質等の追加情報を盛り込んで、水文環境図と名称を変更し、最新版の大阪平野に至るまで、7地域の水文環境図が出版されている。これに加えて、地下水のデータベース“いどじびき”を公開しつつ（現在は非公開）、基盤情報の充実をはかり、国際協力も実施してきた。これまでの研究においては、地下水学の課題である、地下水流動経路の特定と滞留時間の推定・確認が大きなテーマであり、各地の地下水盆を対象に、地下水流動経路や滞留時間を解明してきた。

地下水は、地球上の「水の大循環」の一部として存在しており、山から海に向かって流動している。陸域の地下水流動は、地質構造に大きく左右されると考えられている。し

かし、地下水流動の末端に当たる沿岸部の地下水は（特に深層の地下水は）、複雑な賦存状態を呈している。これは、①沿岸堆積平野の地質が、深海性の堆積物の上位に浅海性の堆積物、沖積層を持つものが一般的であり、かつては塩水で満たされていたこと、②氷期を経して大きな海水準変動の影響を受けたため、塩水層と淡水層が重なっていることが多いことが原因である。すなわち、流動性の高い淡水地下水帯の下位に、現海水が侵入した塩水帯や非流動性の淡水地下水帯、化石塩水帯等が層状に賦存している^[1]の一般的である。このように沿岸部と内陸部の地下水流動や賦存状態を理解したうえでの地下水の水理構造把握は、地下水資源の開発にとって最も重要な知見の1つである。

また、沿岸域は大規模な人間活動域であり、地下水資源の開発にとどまらず、環境保護や地下空間活用（地層処分や地中貯留）のためにも重要な地域である。これまでの地下水研究やデータベースの整備状況に鑑みれば、陸域の地下水についてはほぼ把握できる状況にあるが、沿岸陸域や海底下の地下水については、陸域に比べて特に深層地下

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 〒305-8567 つくば市東1-1-1
Geological Survey of Japan, AIST 1-1-1, Higashi, Tsukuba 305-8567 Japan * E-mail: marui.01@aist.go.jp

Original manuscript received August 22, 2019, Revisions received April 17, 2020, Accepted April 30, 2020

水データの密度や精度が劣り、まだまだ研究や基盤データが充実しているとは言えない状況である。とりわけ、地層処分や地中貯留といった社会的に大きな問題については、沿岸海底下が大きな候補となるだけに、さらに科学的な根拠を持って安全性を担保するためにも地下水の賦存状態を解く研究を急がなくてはならない。さらに、各種インフラ整備に関連する大規模事業や対策においては、ステークホルダーのコンセンサスを得るために、地質環境モデル (Site Descriptive Model) を使った工学設計からの性能評価、安全評価へと続くので (詳細は4章で説明)、この地下水研究では、概念モデル (Conceptual Model) を地質環境モデルに発展させるよう高精度化させることが最重要課題と考える。この研究においては、これまでの地下水研究史を振り返りつつ、沿岸域研究の課題を整理し、概念モデル (以下CM) から地質環境モデル (SDM) への発展ならびに高精度化を目的とする。

2 地下水の流動と賦存状態、海底湧出地下水

2.1 水の大循環と地下水の特性

一般的に、表層から降水がしみ込んで、地下に滞留する水が形成されるが、その下位には遠くの高山等所から流動してくる地下水が通過する。これらの地下水は、通常完全に混合することは少なく、塊状になって地形に沿って流下している。これらを、自由地下水 (不圧地下水) や被圧地下水と称し、水源 (地下水資源) として利用される。さらに、その下位には、流動性の低い停滞した地下水があり、一般的には第三紀層等、より緻密な地層内に存在することが多い。地球上の水循環の観点からそれぞれの水の状態について滞留時間や水質をまとめると図1のようになる。また、ごく深部には、温泉水や化石水等さまざまな特性を持つ地下水が存在している。これら地下水の種類と特性を表1にまとめる。

さらに、著者 (丸井) は日本列島の帯水層の状態を把握するため、日本列島の堆積層 (第四紀層と新第三紀層) の分布を調査した^[11]。列島内で掘削された17,000本以上の深井戸資料等からその堆積層の状況を見える化したものを使って、日本列島の地下水量を推定すると、新第三紀層、第四紀層と層厚は大きく異なるものの、ともにほぼ同量の地下水を保持しており、両層あわせて13兆トン存在していることが推定できた (図2^[12])。また列島全域にもたらされる総降水は、年平均約6,000億トンと推定されることから、列島全体の平均的な地下水滞留時間は200年以下と考えられる。通常我々が利用する第四紀層内の地下水滞留時間よりも格段に大きいことが明らかになった。

*年間約6000億トンの降水が列島にもたらされるが、そ

表1 丸井 (2012) による地下水の種類と特性

アンダーラインを付した用語はこの論文と関係の深い用語である。

用語	定義	出典
浅層地下水	地表に最も近接した地層または帯水層内に賦存する不圧地下水 (自由地下水)	H. Bouwer (1978) ^[3]
不圧地下水 (自由地下水)	帯水層内の水分 (地下水体) が大気圧以上に加圧されていない地下水	山本 (1986) ^[4] 一部改
被圧地下水	帯水層内の水分 (地下水体) が大気圧以上に加圧されている地下水	山本 (1986) ^[4] 一部改
深層地下水	不圧地下水の下位に存在する (第2帯水層以深の) 被圧帯水層内の地下水	Marui (2009) ^[5]
深部地下水	通常 (農業用水や雑用水) の利用範囲を超える深度の地下水	Marui (2009) ^[5]
化石水	地下水流動に関与していない地下水	高村・丸井 (2006) ^[6]
かん水	海水の塩分濃度を超過する塩化した地下水。かつては海水の5倍以上の塩分濃度を持つ地下水と山本 (1986) が定義していた。	高村・丸井 (2006) ^[6]
化石海水 (古海水)	化石水であり、かつ塩分濃度が海水と同程度以上の地下水	丸井・林 (2001) ^[7]
地層水	地層が形成されたときに取り込まれた水分が間隙中に残ったもの	高村・丸井 (2006) ^[6]
処女水	マグマ中の水分が上昇して帯水層に移動し、地下水となったもの	山本 (1986) ^[4]
鉱水	普通の水とは物理的、化学的性質を異にする天然の特殊な地下水。日本では温泉水の定義に満たない深部地質や鉱山起源の地下水	権根 (1980) ^[8] の記述を簡略化
硬水	WHO では、アメリカ硬度換算法で120mg/L以上の水を硬水と定義している。	WHO ^[9]
温泉水	温泉法により、水温が摂氏25℃以上か、あるいは19種類の特定成分を含む地中から湧出する温水、鉱水及び水蒸気その他のガス (炭化水素を主成分とする天然ガスを除く) と定義される	温泉法 (1948) ^[10]

のうち約半分は蒸発散し、約1/3が地表水として海洋に放出される。残った1/6程が地下水として涵養されるが、このうち200億トン以上が人間生活や工業・農業で利用されている。したがって、概ね800億トンの地下水が毎年涵養されるため、単純に計算すると163年分の降雨涵養に相当する地下水が日本列島に溜まっていることになる。一方で、海水準が大きく変動すると地下水の流動範囲 (深

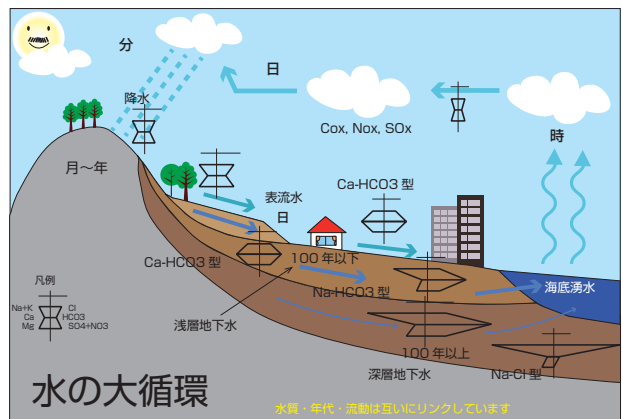


図1 水の大循環^[2]

地球上の水の大循環は、海洋から始まり大気圏、地圏へと移る。地表に到達した降水は、地表水や地下水となり、いずれは海洋へ戻る。これまで、さまざまな概念図が公開されているが、水循環の時間スケールや水質と地下水流動の関連等を示したものとしては類のない概念図である。

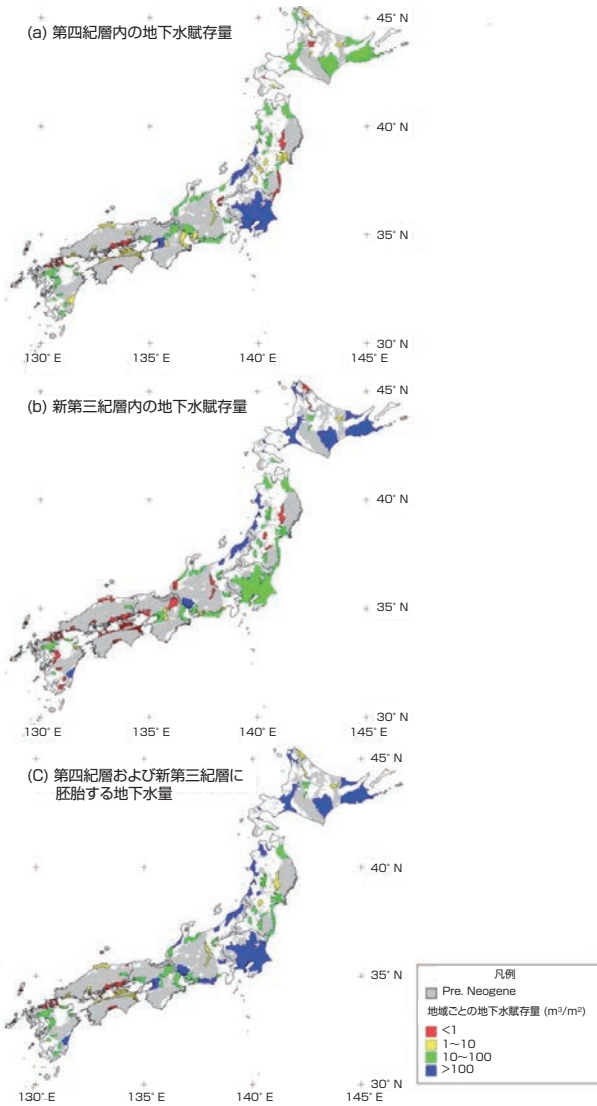


図2 地質年代ごとの帯水層中の地下水賦存量^[12]

度)が大きく変化する。これは、海水準が下がった場合、より深部までの地下水が流動して海域に流出するためであり、経済活動が集中する沿岸域ほどその影響は大きい。海水準変動の履歴(図3)を見て分かるように、約12万年周期で水期が終了すると一気に100 m以上海水準が高くなるため、流動していた淡水地下水は、その上位に侵入してきた海水によって覆われ、海底に淡水地下水が封じ込められるというのが定説であった^[14]。海底下に淡水の地下水が存在する場合、この淡水地下水は未利用資源として活用される可能性が高く、しかも陸域の地下水流動を阻害しないことから、塩水化等の地下水障害を引き起こす可能性が少ない。また、淡水地下水は約12万年の周期で流動と停滞を繰り返すものの、さらに下位の地下水は更新世中期以降の周期的な水期・間水期を繰り返して滞留していることから、少なくとも70万年以上停滞していると推定されるため、廃棄物処分等には好適の不動地下水領域と考えられる。このような、地下水の賦存状態が沿岸域深部において正確に把握されれば、現在の課題を解決する大きな知識となりうる。しかし、今世紀になるまで、人資の不足等から、これを検証する研究はなかなか行われてこなかった。

海底下の淡水地下水は、ほぼ陸水起源であるが、海底下深部には、処女水等陸域起源でない地下水が存在する可能性もあり、地中貯留や地層処分においては大きな課題となっている。また、海水準変動等による地下水流動の下限変動のため、その賦存状態が複雑化していることにもある。

2.2 海底湧出地下水研究

海底下の地下水特性を把握するためには、海底地形を探索し、地下水の湧出口の位置を特定し、その流出量を推定すること、流出水の水質等から滞留時間を把握すること、淡水地下水と塩水地下水の領域を把握すること等が

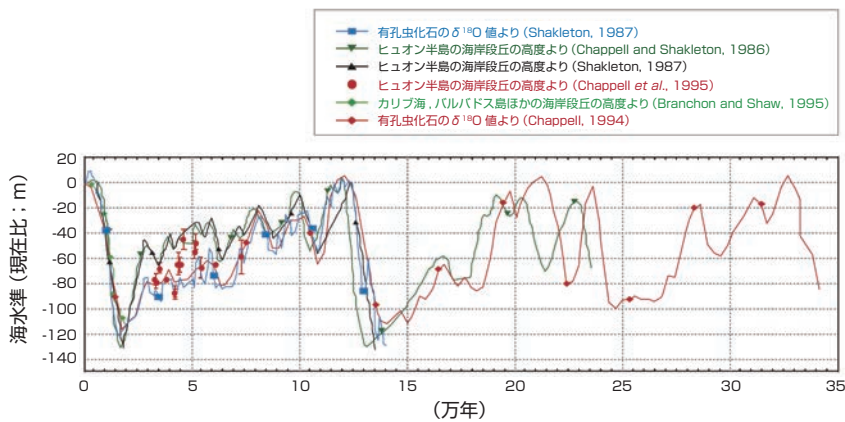


図3 過去35万年間の海水準変動^[13]

海水準は約12万年の周期で100 m以上変動している。約6000年前の縄文時代をピークに、現在は下降期に入っている。海水準が低下すると地下水の流動域はより深部にまで達するため、全体的な地下水流動はより活発になる。したがって、将来的には海底に湧き出す地下水の領域がより拡大あるいは移動すると考えられる

重要である。このため、列島の各地では、水収支法を使った地下水流出量の推定や流出する地下水を採取して分析する等の研究が行われてきた。

我々産総研での沿岸域地下水研究は、90年代から開始され、海底下に湧き出す陸域起源の地下水をとらえ、分析し、海底湧出地下水の年代測定結果やその水質から地下水の流動経路を解明した^{[15][16]}。また、利尻島や九十九里海岸等では海底堆積物から湧出する地下水の状態を可視化している^[7]。近年の成果としては、我が国に関する地質および地下水関連の文献を収集し、その総数が80万件を超えた^[17]。この文献集積結果はデータベース化され、調査の地域や手法等で検索できるシステムである(前述の“いどじびき”より)。これを使って、我が国の沿岸域における海底湧出地下水調査の結果を確認すると、海底湧出地下水に係る文献は260件ほどあり、その分布は下の図4になる。さらに、伊藤・丸井^[18]によれば、日本列島のほとんどすべての地域で流域にもたらされた降水量の方が、河川によって流出する流量と人々が利用する地下水量の和よりも大きく、日本列島の全域で海底に地下水が湧出

する可能性がある」と指摘している。海底の場合、調査が難しいことから、これまでになかなか実態が解明できていなかったが、陸域からの地下水流動を的確に把握する(再確認する)うえで、さらに未利用資源を開発するうえでも重要な調査対象であることは間違いない。

3 概念モデル (CM) の構築

3.1 沿岸域研究地 (北海道幌延町) の選定

海底に地下水を供給する沿岸部地下水の流動形態や賦存状態、水収支等を解明するための課題の一つに、沿岸での陸域から海洋への地下水流動の出口の把握がある。この可視化の一例として実施された、北海道北部の幌延町浜里モデルフィールドの成果を示す。北海道北部には広大なサロベツ湿原が広がり、堆積層による海岸平野が存在する(図5)。堆積層の厚さは6000 mに達すると推定されており^[19]、地下水も深部にまで賦存していると考えられる。福沢他^[20]によれば、表層の沖積層の下位には、更新世の更別層が存在し、その下位には、鮮新世の勇知層、声間層、さらには中新世の稚内層と続くことが報告されて

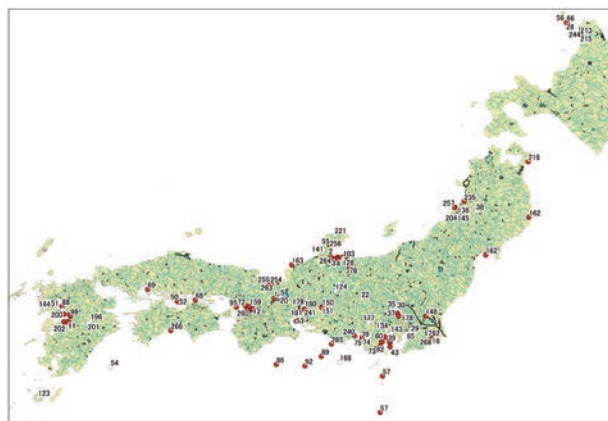


図4 既存文献で公表された海底湧出地下水の位置 (文献リストは http://www.groundwater.jp/colum_paper/maruis2019_01.pdf)

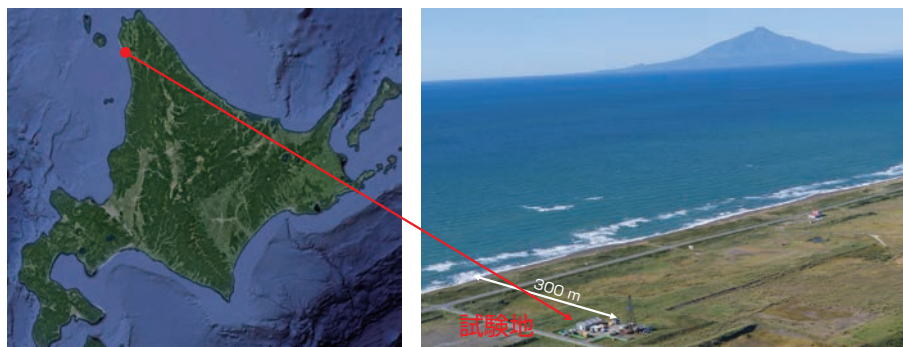


図5 幌延町沿岸域の試験地
試験地は利尻島を望むサロベツ湿原の沿岸域に位置している。
(地図は Google マップを使用。右下の写真は JAEA 提供による)

いる。この平野は我が国の典型的な遠浅海底地形を呈する堆積平野といえ、水期には陸域が広がり、現在の海域においても広範囲に地下水が流動していたことがうかがえる。また、この地下水流動域は水期の終了とともに上昇した海水で覆われており、当該地の海底地下水の賦存状態を把握することは、列島全体の沿岸域海底地下水の状態を理解する上で重要である。一般にフィールドを理解するためには、先ず地質構造に関する概念モデルを作る必要があり、この研究では、公開されている既存資料だけを使って3次元地質概念モデルを構築した。地質や地下水の概念がとらえられることで、適切なグリッドサイズや計算ステップの時間間隔が理解しやすくなるので、この概念モデルを数値化し、地下水流動シミュレーションを実施する。その際の初期条件として帯水層は塩水で満たし、天水による塩水の洗い流しと海水準変動を考慮とした初期的なシミュレーションを実施した。これを繰り返すことによりシミュレーション結果の最適条件を見出して、地下水の水利構造を提示することになる。

既存資料によれば、陸域の堆積層は海域に向かって傾斜しており、海岸部には海岸線に平行する断層かまたは大きな傾斜があると推定されていた。また、当該地には海上保安庁の海底地形データや物理探査データ、試掘データがあった。さらに産総研の海底地質データを考慮して、当該試験地のCMを構築した。これを図6に示す。この地質構造ならびに水利構造を考慮したCMは、その後につづく試験によって順次検証される。次節には、CMの高精度化のために実施した調査解析について概説する。なお、詳細については、越谷他^[21]、横田他^[22]、産総研^[23]、Ueda *et al.*^[24]、Ikawa *et al.*^[25]を参照されたい。

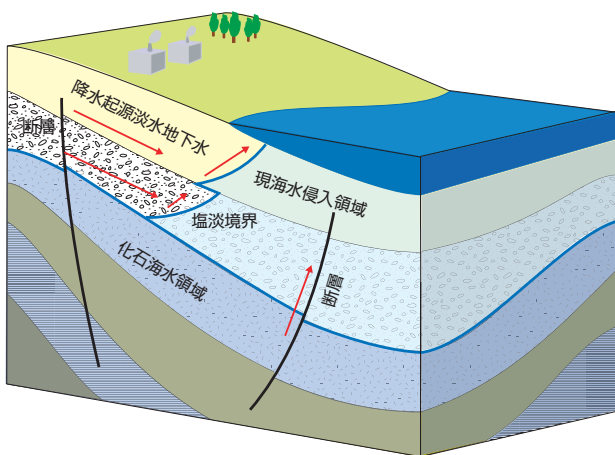


図6 幌延沿岸域の地下水流動概念モデル (CM)、対象となる深度は2000 m程度までを想定している。このモデルを基に、地質や地下水の水質・年代を確認するため、沿岸部での物理探査やボーリング掘削調査を計画した。

3.2 CM構築のための研究方法と結果

・物理探査による地質概要の調査

当該地では、地質の構造を理解するために2種類の物理探査試験を実施した。先ずは弾性波探査により地質の構造を解析し、その後電磁法探査によって塩水と淡水の存在域を確認した。その結果を図7に示す。弾性波探査では、地質の境界面がとらえられることから、地質の構造を見える化したモデルが構築できる。一方、電磁法探査とは地質の比抵抗値を明らかにすることから、この研究地においては、後述するボーリングデータと見比べることにより、塩水と淡水の賦存状態を確認することができた。

先に実施された弾性波探査によれば、当該地域の堆積層は、多少の上下があるものの、内陸から海域にわたりほぼ同様の層厚で水平に堆積しており、単調な構造を示していることが判明した。既存の文献記録^{[26][27]}とも一致した。また、事前の文献調査では、浅海域での断層の存在が懸念されていたが、これは確認されなかった。さらに、このような地質状況では、陸域にもたらされた降水が(特に)固結度の低い更別層内を流動して海域に流出していると考えられた。

続けて実施された電磁探査では、陸域から海域にかけての比抵抗値が測定され、海水と淡水の存在域を可視化することができた(図7)。これによれば、陸域にもたらされた降水は、内陸部の標高が比較的高い勇知層の露出部分では深部まで浸透することなく流出し、更別層の堆積域においてはじめて地下に浸透していることが判明した。さらに、降水浸透域は、ほぼ更別層に沿って存在し、海底下にまで舌状に伸張していることもわかった。この舌状に伸張した淡水領域の上には海水が浸み込んだとみられる塩水域が薄く存在していることも特徴的である。この舌状淡水域の下位には塩水域が存在していると推定された。

・ボーリング掘削による地質の確認と地下水調査

当該研究地では、海岸線から約300 mの地点(小学校跡地)で深度1200 mのボーリング掘削調査を実施している。オールコアボーリングと呼ばれる手法で、地表から末端部までのすべての地質試料を採取し、地質分析を実施した。また、このコア(地質試料)から地下水を採取し、さらには掘削後の井戸ケーシングに孔隙を作り、周囲の地下水を採取して分析している。図8、図9には採取した試料の分析結果を示す。

EC(電気伝導度)とは地下水中の溶存イオンの総量に依存する値であり、当該研究地においては、塩水と淡水を区別する指標として役立つ。ちなみに、海水のECは

45000 μ S/cm 程度であり、降水のそれは 10 μ S/cm 以下であることが多く、コントラストがはっきりしている。当該研究地における EC 値のプロファイル変化は概ね深度に依存しており、大きく 3 つの区間で特徴的な変化を示している。30 ~ 80 m 区間で減少し、80 ~ 300 m 区間で一定の値となり、300 m 以深で再び増加する。上層の区間で、間隙水の EC 値は 30 m 付近をピークとして減少する。この地域における同様の傾向は幌延地圏環境研究所^{[28][29]}においても報告されている。幌延地圏環境研究所^[29]によりサロベツ原野の沖積層中の深度 30 m 付近には、透水性の低い堆積物の存在が確認されている。したがって、30 m 付近における高い EC 値は堆積物中に取り残されている海成成分の溶出が原因と考えられる。次の区間 (80 m ~ 300 m) では、EC 値は相対的に最も小さな値を示し、値もほとんど変化しない。300 m 以深では EC 値は深度とともに増加傾向を示すが、その傾向は深度によって異なる。深度 500 m まで深度に伴う EC 値の増加は緩やかで、500 m 付近で EC 値の急激な低下が見られる。500 m 以深では EC 値は再び深度と共に増加し、その増加傾向はより顕著である。800 m 以深では、深度に伴う EC 値の増加はな

くなり、EC の低下が見られる深度もある。当該地域の地下水は、このような層構造を呈していることが確認できた。

注目すべきは、地下水中の水素同位体比である。一般に海洋で蒸発した水蒸気中の酸素や水素には質量数がわずかに重い、同位体の関係にある原子が混入している。気団が運ばれ、陸域に達するとこの重いものから先に降水として降下するため、内陸や山奥では通称“軽い雨”が観測される。地下水の流動を考えると、上流側から流動してくる“軽い雨”の地下水体の上位に沿岸部(その場)にもたらされた“重い雨”が重なって地下水体を作ることから、地下水は層状になって流れていると考えるのが一般的である。深度 100 m 程度までの流動域の地下水では、この同位体比が減少し軽くなっていく傾向が確認され、流動性の高い地下水が存在していると考えられるが、その下位では、現降水よりも軽いものの再度重い地下水が観測され、地下水の特性が異なることを示している。例えば Rozanski^[30] が指摘するように、温度効果によって低温期(水期)の降雨の同位体組成は軽くなることから、この流動域下部の地下水は水期にもたらされた降雨によって形成されている可能性がある。さらに、深度 800 m 以深の地下水は電気伝導度

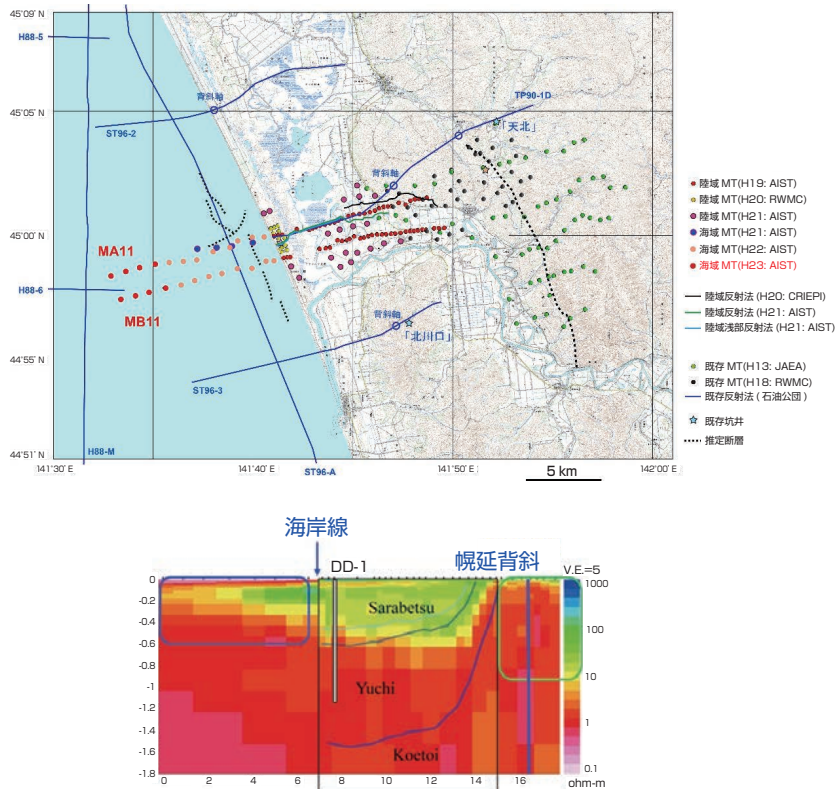


図7 上：幌延町沿岸域における物理探査側線の配置図。下：幌延町沿岸域における物理探査の結果判明した深度約 1.8 km までの地質の構造と地下水の賦存状態。中央部 DD-1 は調査ボーリングの位置 (深度 1200 m)、図中、赤色は塩水、黄緑色は淡水の存在域を示している。緑色で囲われた陸域の部分は降水が深部まで浸透せずに下流側に流動していることがわかる。また、青枠の部分では陸域から淡水地下水が海底下に伸張していることもわかった。さらにこの舌状の淡水地下水帯は水期に形成された地下水流動の名残であると考えられている。

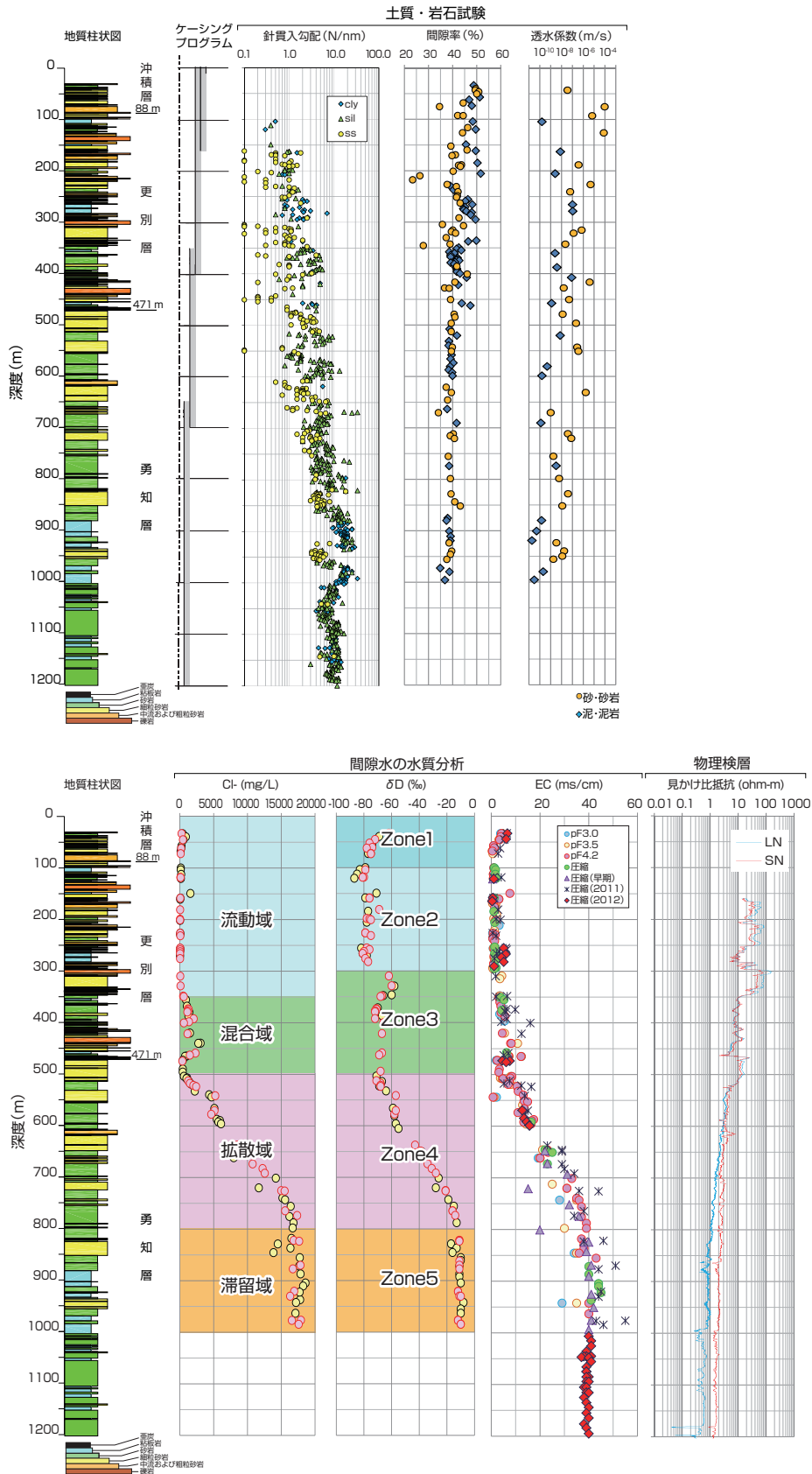


図8 1200 m 孔で採取した試料の分析結果。間隙率や透水係数はばらつくものの深度方向に低下する(上段)、ECや水素の同位体比は深度によって大きく変化している(下段)。この結果、地表付近の流動性地下水の下には、混合域、拡散域、停滞域と続いて賦存していることが確認できた。また、拡散域よりも下位においては有意にECが増加しており、浅層部の流動性淡水地下水と深部の滞留性地下水のコントラストが明らかとなった。

や塩化物イオン濃度とともに現海水のそれに匹敵していることも観測された。この化石塩水の部分については、海水をトラップしている可能性が高いと考える。これにより、当該地域の地下水は、上層より上位流動層(現降水によって構成された地下水)、下位流動層(主に氷期の降水が起源であると考えられる地下水)、混合層、拡散層、滞留層であって、しかも層状態を呈していると考えられる。

これまで、地下水の流動は地質条件によって支配され、地質境界が水理的境界とされてきた。しかしこの研究では、沖積層・更別層・勇知層と3つの地層内に同位体比傾向が異なる5つの区間が存在していることが確認できた。

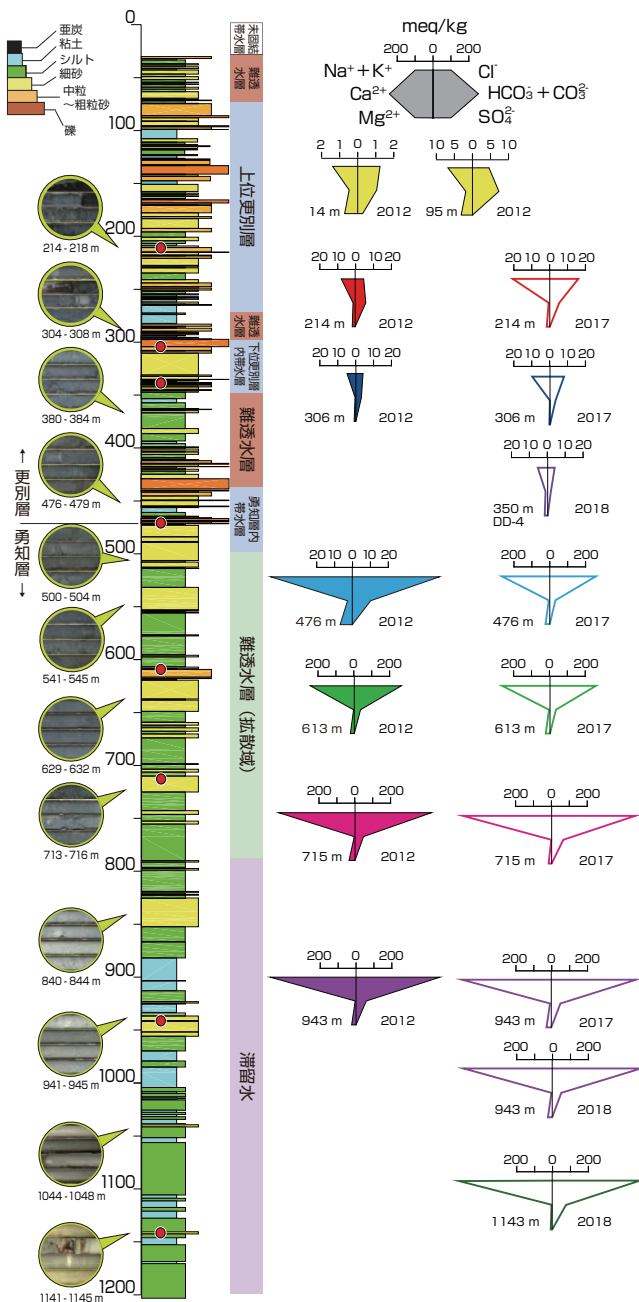


図9 深度ごとの地下水の特性 (シュティフダイヤグラム^{[17])})

浜里における地質境界の深度は、沖積層と更別層の境界が86 m、ならびに更別層と勇知層の境界が470 mである。

次に針貫入試験結果から物性値における境界面を推定したところ、地表~470 m区間では、シルト層で深度に伴う固結度の上昇が見られるものの砂層では確認されなかった。470~850 m区間では、砂層・シルト層ともに深度に伴う固結度の上昇が見られた。850 m以深では、泥層が卓越し、砂層の固結度には大きな変化は見られないがシルト層や泥層では高い固結度が維持された。したがって、固結度による境界面は深度300・470・850 mとなった。深度470 m境界面は更別層と勇知層の地質境界面と一致することから勇知層では更別層より砂層・シルト層ともに固くなるのがわかった。

これらの地質に対して、深度300 mまでは流動性の高い地下水であり、とりわけ下部は同位体比から見て、氷期の降水と考えられる。一方で、深度800 m以深では超長期的に安定した塩水が存在しており、地層水や化石水ともいえるものである。これら二つをエンドメンバーとして、この間には上位に混合域、下位に拡散域があることが確認できた。一方で、このような水質や同位体比の鉛直プロファイルは、新潟県沿岸部の大深度ボーリングの結果からは見られるものの、福島県や千葉県の大深度ボーリングからは得られていない^[31]。今後、このようなプロファイルの地域性や一般性を慎重に議論していく必要がある。

さらに、産総研他^[17]では、各地で採取した沿岸域深層地下水と幌延で採取した各深度の地下水体の年代測定も実施している。これによれば、浅層付近の地下水年代は³H(トリチウム)や¹⁴C(炭素14)で測定することができ、かつその起源を現在の降水か氷期の降水かに区別することができる。また、Cl(塩素)やI(ヨウ素)を使って、化石海水の判別も可能になってきており、数千万年に及ぶ年代測定もできる可能性が示されている。地下水年代の測定技術に関しては、現在各手法の測定範囲等を含めて議論が尽きない状態であり、今後の進展を待たなければならないが^[17]、いくつかの仮定をおくことにより、当該研究地の深層地下水年代が100万年を超えることが把握できた。

3.3 沿岸域深部地下水のCMの提示

幌延町沿岸域において、物理探査やボーリング掘削、地下水の水質・同位体分析等を実施した結果、初めに想定していたCM(図6)を覆す概念モデルが導き出された(図10)。当該地の地下水は、内陸にもたらされた後に、海底下まで流動し、海底下に淡水の張り出し(リッジ)を形成する。また、この地下水は地表付近から深部にかけて流動性の高いものから滞留性の高いものまで層をなして分布していることも観測された。さらに、流動域の地下水のうち、

深部に存在する地下水は氷期にもたらされた可能性が高いことも把握できた。氷期に海水準が低下すると地下水流動はより活発になり、処分事業等では、深部にまで流動が及ぶことが懸念されているが、今回の手法をとることで、氷期・間氷期を通して地下水流動の及ぶ範囲が変化することを明らかにした意義は大きい。

これまでの地下水研究においては、現状を把握することが主流であったが、地層処分研究のように数万年から10万年レベルでの環境変化を予測しながら安全性を評価する研究においては、固体地質と流体である地下水のそれぞれのモデルをカップリングさせなければならない。深部の利活用を検討する際には、地上からの調査で概念モデルを構築し、さらに斜坑掘削等による現地での詳細な調査を実施して地質環境モデルの精度を高め、工学設計の要素（または基礎）の一つとしていく必要がある。すなわち、地下水学をふまえた地質環境の精緻なモデル化は、気候変動や社会構造の変化等に代表される流動的な要素を真っ先に取り込めるものであり、その重要性は今後ますます明らかになると考える。

この研究において、CMを作成するために、公的な機関の発行した既存データ（産総研発行の地質図（陸域および海域）、国土地理院発行の地形図、海上保安庁発行の海域地形図、JOGMECデータ（資料請求が必要であり、データがない地域も存在する）が利用・検討されている。それは誰でも利用可能なデータを使って、同じ土俵で議論できることを前提にしているためである。これらにより地域のCMが作成できれば、詳細な調査として、弾性波探査による地質構造の把握、電磁探査による比抵抗値の推定がお

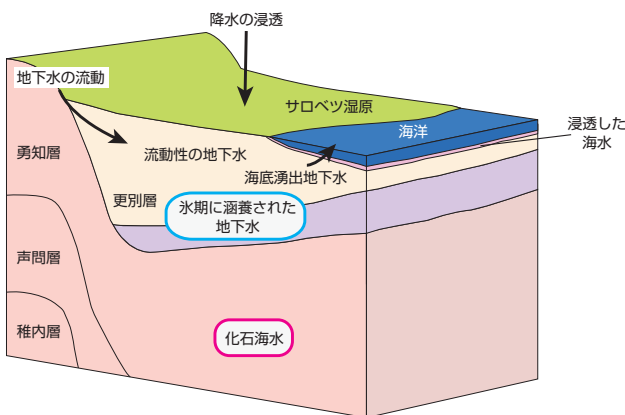


図10 幌延沿岸域における地下水流動と賦存状態のモデル。これは、Edmunds^[32]のモデルと共通する部分が多く、氷期から現在までの地下水が層をなして存在しており、図7の概念モデルとは大きく異なる事となった。現在の地層処分事業計画においては、概要調査の地域が選定されれば、幌延沿岸研究のように、先ず地上からの調査でCMを構築し、その後続く斜坑掘削に伴う調査で、SDMへ高度化する予定になっている。

こなわれ、さらに要所と考えられる地点でのボーリング調査等によりCMを高度化してSDMとすることができる。とりわけ、ボーリング調査では地質試料の分析と地下水試料の分析から、工学設計に受け渡すデータとして、時間軸を考慮すべきデータとそうでないデータの区分が必要であった。この手法は対象とする調査により時間軸を設定することができるため、今後の地下水研究の道しるべとなる。必要とする要素は場所や研究の目的によって異なるが、調査フローに大きな違いはない。

4 沿岸域深層地下水研究の社会的役割

大規模な工事や対策において、地域住民を含めたステークホルダーのコンセンサスを得るためには、

- ①概念モデル (Conceptual Model, CM)の策定
- ②地質環境モデル (Site Descriptive Model, SDM)の構築
- ③工学設計 (Detail Design)
- ④性能評価 (Performance Evaluation)
- ⑤安全評価 (Safety Evaluation)

というプロセスが必要であり、最終的な安全評価のわかりやすい成果物として市民はリスクマップを見ることができ。CMから高精度なSDMを構築することは、社会的な大規模事業の基礎をなすと考えている。著者（丸井）は、これまでに福島第一原発の汚染水処理問題や地層処分研究に関する国の技術ワーキンググループ討議（日本列島の科学的特性マップ）、中央新幹線敷設工事等において、CMからSDMへと発展させる議論を重ねてきた。実際に、福島第一原発の対策工事においては、原発建設時の資料からCMを作り、その後400本以上の観測井を掘削して敷地内の詳細な地下水流動モデルを構築している。これらの成果を踏まえて、凍土壁の性能評価や安全評価がおこなわれた。また、中央新幹線のルート選定や地域住民への安全性説明や工程説明においては、当初の概念的なCMに詳細な調査データ（ボーリングによる地質データや地下水の水質・年代測定データ等）を加味して不確実性を低減する取り組みが必要条件の一つとなっている。

現在の産総研の地下水研究グループは、地質調査所時代に工業用水課と呼ばれ、工業用水の開発調査に携わってきた歴史がある。日本経済が高度に成長した時期には工業用水を使いすぎて、地盤沈下や塩水化等の地下水障害が発生し、社会問題となったことから、地下水に関わる環境問題にも積極的に取り組むようになり、人口や経済が集中する沿岸部の地下水問題についても研究を重ねてきている。近年では前述のような環境問題への取り組みが大半を占めている。

今後、我が国の人口は減少する傾向にあるが、沿岸域

での社会活動は山間部に比べて衰えづらいつと考える。また、地球環境保護のための新たな取り組みも始まりつつあることから、沿岸域の環境を保護しつつ利活用することを考えなければならない時期に来ている。また、地下水に係る既存の法律も深度 300 から 400 m までであったが、当面 2000 m 程度までを意識して法整備をする必要があると考える。したがって、基礎研究においても、今後は地下深部を対象としなければならず、対象範囲が大きくなれば、取り扱う時間スケールも大きくならざるを得ない。また一方、日本列島は地質が複雑であり、同時に地下水の賦存状態も複雑であると容易に予想できる。近年の地下水研究は他分野の研究の基礎としてデータベースをそろえることやデータが充実した領域の解析研究が中心であったが、前述を考慮した未知の領域に挑む総合的な地下水研究が求められる。

著者（丸井）は、90 年代より利尻島における海底湧出地下水研究、九十九里海岸における海底湧出地下水と塩淡水境界面の形状・位置に関する研究、茨城県東海村における塩淡水境界面の形状と地下水流動に係る研究等を通して、沿岸部の地下水研究を実施してきた。近年では、北海道・幌延における深部地下水まで含めた沿岸部の地下水環境研究や駿河湾における富士山からの大規模地下水流動と海底湧出地下水に関する研究を行っている。これら沿岸部での研究は、活発に流動する淡水地下水と長期的に停滞している深部の塩化地下水の対比や境界の特性を追求したものである。地層処分研究においては、長年にわたる沿岸部の地下水研究を通じて、沿岸部の地球科学的特性を高精度に把握することで、天然バリアの機能評価の面から事業に貢献している。他の研究においても、地質環境モデル (SDM) の作成から検証を実施し、工学技術への情報提供を行うシステムを構築中であり、これまでの個別要素の研究課題では成しえなかった効率化や適正化を重視してより実践的な橋渡し研究が実施できるようにと考えている。

また、地盤沈下対策や土砂災害対策、未利用資源（海底湧出地下水）の利活用等にもこの研究で述べた手法は貢献できると思われる。時代に即して教育システムも変化しており、市民のコンセンサスを得なければ公的な事業はもちろん民間レベルの対策工等も進められなくなっている。コストパフォーマンスにつながる性能評価をしたうえでの安全評価を実施する重要性を皆が認識していると言えよう。その意味でも地下水学をふまえた地質環境の精緻なモデル化は気候変動や社会構造の変化等に代表される流動的な要素を真っ先に取り込めるものであり、その重要性は今後ますます明らかになると考える。

5 おわりに

一般に地下水は山から海へ向かって流れているが、人口が最も集中する沿岸域の地下水は、豊富であり重要であるにもかかわらず、その淡水の賦存状態は塩水との平衡の上に成り立っており、さらに海水準変動の履歴を反映しているため、脆弱でかつ科学的な知見に基づいた理解も進んでいない。今後の適正かつ効率的な利活用を進めるためには、その根本を理解する必要がある。まずは地下水の流動を把握し、その上で海水準変動等の外的要因を加味してモデリングすることが必要とされている。この研究はその手法の高度化を提示したものであり、現在、我が国の国民が直面している課題を解決するために必要不可欠な手法であると考えられる。今後は各地でのデータをさらに集積するとともに、そのデータが示す意味について理解の促進を高める情報発信が必要である。その意味でも産総研が保有し蓄積しているデータや研究手法のノウハウを事業者や社会に還元することで、公益に資すると考える。

一般市民が通常目にするのは、リスクマップであり、途中の過程や科学的根拠は常に求められるものの、実質的に説明がわかり辛くなることが多いため、メディアによっては省かれてしまうことが多い。しかし、我々基礎研究を行う者としてはこの状況を追認するのではなく、根気よく、丁寧に説明する必要がある。その意味で、基礎となる地質環境のモデリング、そしてこの研究で言う、CM の高度化は、今後欠くことができない現象理解のための基礎的なステップ（研究手法）となる。そのためにも、モデル内の地質等固定されたものや地下水のように流動しているもの、特に短期的に見れば変化のない地下水の賦存状態や長期的に見ると海水準変動などの影響を受けて変化する場合等、時間軸や対象を的確にふまえてモデルを構築したり計算ステップを適切に設定する等の必要がある。外的要因を明確に分離することやモデル内要素の連携を確実にすることが重要である。

謝辞

この論文では、資源エネルギー庁受託研究「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発」に係る一連の事業成果を活用しています、記して感謝を表します。

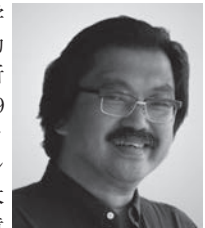
参考文献

- [1] 丸井敦尚: 水循環における深層地下水の役割, *日本水文科学会誌*, 42 (2), 61–68 (2012).
- [2] 丸井敦尚: 水循環基本計画ならびに地下水保全のためのデータ整備状況, *地下水学会誌*, 58 (3), 289–299 (2016).
- [3] H. Bouwer: *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, 480 (1978).
- [4] 山本莊毅: *地下水学用語辞典*, 古今書院, 40–91 (1986).
- [5] A. Marui: Keynote speech, Groundwater Assessment and Control in the CCOP Resion, 2009 Groundwater project on CCOP and GSJ., Bangkok, Thailand, (2009).
- [6] 高村弘毅, 丸井敦尚: 地下鹹水の定義と事例, *日本海水学会誌*, 60 (2), 86–90 (2006).
- [7] 丸井敦尚, 林武司: 塩淡水界面の三次元的形状把握に関する研究, *資源と素材*, 117 (10), 816–821 (2001).
- [8] 梶根勇: *自然地理学講座 3水文学*, 大明堂, 282 (1980).
- [9] WHO: Hardness in Drinking-water Background document for development of WHO Guideline for Drinking-water Quality, 1 (2011).
- [10] 温泉法 (1948): https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=323AC0000000125, 閲覧日2020-01-20.
- [11] 越谷賢, 丸井敦尚: 日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル (第一版), *地質調査総合センター研究資料集*, 564 (2012).
- [12] 越谷賢, 丸井敦尚, 伊藤成輝, 吉澤拓也: 日本列島における3次元水文地質モデルの構築と地下水賦存量の試算, *日本地下水学会誌*, 53 (4), 357–37 (2011).
- [13] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊1, II-170 (1999).
- [14] N. J. Lusczynski and W. V. Swarzenski: Salt-water encroachment in southern Nassau and southeastern Queens Counties, Long Island, N. Y., USGS Water Supply Pap., 1613 (F), 76, pl. 2&3 (1966).
- [15] 丸井敦尚, 今村杉夫, 林武司: 浅海部の海底湧出地下水と塩淡水境界形状の関係に基づく地下水流動研究, *月刊地球*, 23 (12), 867–873 (2001).
- [16] A. Marui: Groundwater conditions along seawater/freshwater interface on a volcanic island and a depositional area in Japan, *Geological Quarterly*, 47 (4), 381–388 (2003).
- [17] 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 沿岸部処分システム高度化開発成果報告書, 288 (2019).
- [18] 伊藤成輝, 丸井敦尚: 日本列島における海底地下水湧出量の分布, *日本水文科学会誌*, 40 (1), 1–18 (2010).
- [19] 山本裕彦: オホーツク海および天北日本海側海域の地質構造と堆積盆について, *石油技術協会誌*, 44 (5), 260–267 (1979).
- [20] 福沢仁之, 保柳康一, 秋山雅彦: 北海道中央部の新第三系の層序と古環境, *地質学論集*, 37, 1–10 (1992).
- [21] 越谷賢, 丸井敦尚, 五十嵐八枝子, 秋葉文雄, 吉澤明, 岡孝雄, 萩原育夫: 北海道幌延町の沿岸域における大深度ボーリングの岩相・微化石・テフラ, *地質調査研究報告*, 63 (9/10), 233–267 (2012).
- [22] 横田俊之, 稲崎富士, 溝端茂治, 内田敏弘, 上田匠: 幌延沿岸陸域における反射法地震探査, *物理探査*, 65 (3), 161–172 (2012).
- [23] 産業技術総合研究所: 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発成果報告書, 産業技術総合研究所, 1–275 (2013).
- [24] T. Ueda, Y. Mitsuhata, T. Uchida, A. Marui and K. Ohsawa: A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, *Journal of Applied Geophysics*, 100, 23–31 (2014).
- [25] R. Ikawa, I. Machida, M. Koshigai, S. Nishizaki and A. Marui: Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, *Hydrogeology Journal*, 22, 987–1002 (2014).
- [26] 石油公団: 平成2年度国内石油・天然ガス基礎調査 陸上基礎物理探査「天北地域」調査報告書 (1991).
- [27] 産業技術総合研究所: サロベツ断層帯の活動性および活動履歴調査, 「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書, no.H17-1, 25 (2006).
- [28] 幌延地圏環境研究所: 平成18年度 地圏環境研究事業研究成果報告書, 1–166 (2006).
- [29] 幌延地圏環境研究所: 平成18年度 地圏環境研究事業研究成果報告書, 1–209 (2007).
- [30] K. Rozanski: Deuterium and oxygen-18 in European groundwaters—links to atmospheric circulation in the past, *Chemical Geology*, 52, 349–363 (1985).
- [31] 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 沿岸部処分システム高度化開発成果報告書, 1–393 (2018).
- [32] W. M. Edmunds: Palaeowaters in European coastal aquifers—the goals and main conclusions of the PALAEAUX project, in W. M. Edmunds, C. J. Milne (eds): *Palaeowaters in coastal Europe: evolution of groundwater since the late Pleistocene*, Geological Society, London, 189, 1–16 (2001).

執筆者略歴

丸井 敦尚 (まるい あつなお)

1987年に筑波大学大学院修士と同時に理学博士の学位取得、その後立正大学地理学科助手を経て1989年(平成元年)に地質調査所に入所。21世紀になり産総研に移行し、2019年(平成31年)に定年を迎える。この間、カリフォルニア大学サンタバーバラ校や独キール大学、韓国ソウル大学、建国大学、国内の大学等で教鞭をとり、ボリビア国市民栄誉勲章等を受ける。平成の時代とともに沿岸域地下水研究に従事してきた。



町田 功 (まちだ いさお)

1999年、千葉大学自然科学研究科博士過程修了。博士(理学)。2000年、千葉大学環境リモートセンシング研究センター研究員、2003年、千葉大学工学部(科学技術振興事業団研究員)、2004年、神奈川県温泉地学研究所(日本学術振興会研究員)を経て、2006年、産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門入所。2011–2012年ドイツベルリン工科大学客員研究員、2018年より地圏資源環境研究部門地下水研究グループ長。2003年日本地下水学会研究奨励賞、2008年 International Association of Hydrologists, Best lecture award。2015、2017年、法政大学非常勤講師。2016年、日本水文科学会企画・広報委員長。この論文では第3章の一部を担当。



井川 怜欧 (いかわ れお)

2003年秋田大学工学部地球資源学専攻卒業。2008年熊本大学自然科学研究科環境共生科学専攻修了。博士(理学)。同年、特別研究員として産業技術総合研究所に入所し、2010年より常勤職員として採用。入所より約10年間にわたり、地層処分研究に従事。水文科学会、日本地下水学会、国際水文地質



学会（IAH）会員。この論文では第3章の一部を担当。

査読者との議論

議論1 全体について

コメント（渡部 芳夫：産業技術総合研究所）

この論文が取り扱っている対象や現象は社会的に重要なものであり、内外で実施されてきた多様な研究成果を取り纏める意義も大きいものです。これまでの研究成果をとりまとめ、新たな技術的研究成果を加えたこの論文は、社会へのインパクトを踏まえた課題の全体象と達成度などを提示しており、シンセシオロジー誌として掲載に値するものと判断されます。

コメント（景山 晃：産業技術総合研究所）

この論文では基礎研究としての沿岸域での深層地下水の研究の意義を具体的事例に基づいて専門外の読者にも分かりやすく論じています。これらの研究成果や研究方法は地層処分など社会的課題への解決策の策定、社会インフラ整備の際に考慮すべき事項、環境影響に配慮した未利用資源の活用策など重要な判断を行う際に大きく貢献できるものと考えられます。

議論2 この研究が貢献する地下利用事業について

コメント（渡部 芳夫）

シンセシオロジー誌としては、課題や研究目的と社会との関係が合理的に記述される必要があります。社会的課題解決の要素は具体的には「海底下の未利用な地下水資源の把握」（分布と量）と、「海底下の地層利用に必須の地下水性状の把握」（流動と組成）の二つになります。これらを合わせて表現する概念はないのでしょうか。

回答（丸井 敦尚）

ご指摘の二つの要素について分かりやすい表現・構成にしました。具体的には、社会の要請事項や科学的な課題の整理と実際の調査・研究の進展について整理し直して記述しました。

コメント（景山 晃）

もし可能であれば、沿岸域深層地下水研究という基礎研究が果たす社会的役割・貢献に関して、もう少し具体的なケースを示すことはできませんか。原稿では福島第一原発での汚染水処理、地層処分研究、中央新幹線敷設工事を挙げていますが、それぞれ2～3行で内容の概要を記述することはできませんか。

回答（丸井 敦尚）

コメントをありがとうございます。四章に追記しました。蛇足かもしれませんが、当該研究グループでは、一連の研究として、後輩山地の標高が低く堆積岩地域であるため、地下水流動が遅い北海道のサロベツ平野沿岸域と地下水流動が活発な駿河湾沿岸域での対照的な研究を実施しており、沿岸部における地下水流動や水理学的構造の一般性を見出すことを心がけました。

議論3 モデル化の普遍性について

コメント（渡部 芳夫）

第一章で水の大循環における沿岸域の水収支を説明した上で、特定の地域で地下水流動のモデル化に進む際の手順を示しています。これが、大規模事業等に特有なものではなく、地下水資源の把握にとっては普遍的な手段である事をもう少し説明されるべきではないでしょうか。

回答（丸井 敦尚）

水循環の理解が地下水資源の把握にとって重要であることを第一章下から2番目のパラグラフの最後に付け加えました。また、モデル化の用語につきましては、その後の議論に出てくる関連した重要なものだけに絞りました。

コメント（景山 晃）

第概念モデル、地域詳細モデル、工学設計、性能評価、安全評価は一章の後半の段落と四章とに出てきます。一章の部分で四章の

表現を用いて定義を示し、四章では例えば「一章に述べた概念モデルから安全評価に至るプロセスが必要であり、最終的な安全評価の・・・」のような記述とする方が読者には親切です。

回答（丸井 敦尚）

ご指摘の通り、第一章で詳しく書きすぎると読者の思考を止めてしまうので、四章に詳細を追記しました。

コメント（渡部 芳夫）

概念モデル（CM）、地域詳細モデル（SDM）の二つは、それぞれ検証すべき重要なモデルではないでしょうか。これらの付図の説明が、本文の記述に対応した精密さで、両者に必須とも言うべき「天水の流動経路」「古海水の存否」「塩淡水境界」が明瞭にされていると理解が進みます。なお、概念モデルを実証した結果の地域詳細モデルについて、地域詳細モデルの評価と概念モデルの妥当性についての論述は必要ないでしょうか。

回答（丸井 敦尚）

貴重なコメントをありがとうございます。CMにつきましては、その後の調査の礎となるもので、覆ること、高精度化されることを前提としていますので、検証の要はありません。一方SDMについては、その後の工学設計を確定させるものですから、検証の必要があります。地層処分研究において、現段階ではこの検証を斜坑掘削時に行う予定にしていますので、現段階で検証することができません。これらの点に留意して検証の方法などを記述しなおし、図10も加筆しました。

議論4 水の大循環について

コメント（景山 晃）

第二章での水の大循環の記述は、この論文を理解するための導入部と考えられ、図1にある水の大循環は言い換えれば水の物質収支であり、降水量＝蒸散量＋河川等の表流水＋地下への浸透水かと思えます。また、地下水賦存量＝地下への浸透水量から地下水揚水量と沿岸域海底での湧水量を差し引いたものと理解します。

物質収支の観点から沿岸域海底湧水量＝海底湧出地下水を精度よく算出することの重要性をもう少し丁寧に論述しては如何でしょうか。

回答（丸井 敦尚）

まず、降水量の1/6（すなわち約1000億トン）が地下に浸透しますが、このうち200億トンが使われますので、約800億トンが毎年地下水に涵養されます。列島全体の地下水量は約13兆トンですから、163年分の降水涵養量が溜まっていると言うことになります。すなわち、163年でいっぱいになり、その後あふれ出るとてもいいかもしれません。この論説ではこの計算の手順を含めて、より詳細に書き直しました。

圧子圧入 (IF) 法によるセラミックスの破壊じん性試験法

— 信頼性向上と国際標準化への取り組み —

宮崎 広行^{1*}、安田 公一²、吉澤 友一¹

圧子圧入法 (IF法) は試験片寸法・形状の制約が少なく、試験手法が簡便なことからセラミックスの破壊じん性試験法として、産業界で欠かせない存在である。しかし、従来手法では測定精度に劣ることや、算出式が多数存在し、どの式を使うべきかの統一的な見解がなく、国際的な取引に支障をきたしていた。そこで我々は顕微鏡の測定倍率を高くしてき裂長さの読み取り誤差を低減し、測定値の信頼性を改善する手法を開発した。また、この手法を使って最適な算出式を選定した。さらに国内外18試験機関の協力を得てラウンドロビン試験を行い、開発した手法の再現性を確認した。これらのバックデータに支えられて国際規格を発行することができた。

キーワード: 圧子圧入法、破壊じん性、セラミックス、国際標準化

Test method for fracture toughness of monolithic ceramics by indentation fracture (IF) method

—Improvement of reliability and international standardization activity—

MIYAZAKI Hiroyuki^{1*}, YASUDA Kouichi² and YOSHIZAWA Yu-ichi¹

The indentation fracture (IF) method is necessary for evaluation of fracture toughness of ceramics due to its simple test procedure and low sample size limitations. However, the conventional method is inferior in measurement accuracy, has many calculation formulas, and there is no unified view as to which formula should be used, which hinders international transactions. We developed a technique to improve the reliability of the measured values by increasing the magnification of the microscope to reduce the crack length reading error. Using this technique, we were able to select the optimal calculation formula. The round robin tests were conducted with the cooperation of 18 domestic and overseas testing institutions, and the reproducibility of the developed method was verified. Backed by these back data, we were able to publish the international standard.

Keywords: Indentation fracture (IF) method, fracture toughness, ceramics, international standardization

1 はじめに

既存の構造用セラミックス製品には、回路基板で使われるセラミックス放熱基板やセラミックベアリングボール、切削工具、セラミックターボチャージャー等多種多様な形状、寸法のものが数多く存在する。これらセラミックス製品の多くは部品としてシステムに組み込まれており、セラミックス製品の信頼性がシステムの信頼性を左右することから、セラミックス製品の機械特性はシステムの設計に必須である。セラミックスの主要な機械特性には、強度や弾性率の他破壊じん性がある。破壊じん性は表面や内部にき裂を有する材料の破壊に対する抵抗力を示す指標であり、セラミックス材料においては表1に示すような値を示す。部分

安定化ジルコニアは、強度、じん性ともに優れることから、高い応力や衝撃による破損の恐れが少なく、刃物や工具、歯科用インプラントに使用される。窒化ケイ素は、部分安定化ジルコニアに比べて室温での強度・じん性にかなわないものの、高温での特性に優れることから、高温高応力下での信頼性が必要とされるターボチャージャーやディーゼルエンジンのグロープラグ、切削工具等に使われている。これに対し、アルミナや炭化ケイ素等は、その高い耐摩耗性や化学的安定性を活かした用途に向いているが、破壊じん性が比較的小さいために高い応力が掛かる環境ではあまり利用されない。このように破壊じん性の大小によりセラミックスの機械的信頼性が評価される。実際に JIS R 1669

1 産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味ヶヶ洞 2266-98、2 東京工業大学 物質理工学院 〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-S7-14

1. Multi-Material Research Institute, AIST 2266-98 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan *E-mail: h-miyazaki@aist.go.jp, 2 Tokyo Institute of Technology 2-12-1-S7-14 Ookayama, Meguro-ku 152-8552, Japan

Original manuscript received December 6, 2019, Revisions received April 21, 2020, Accepted April 28, 2020

表1 代表的なセラミックスの破壊じん性値

材料	破壊じん性値 (MPa・m ^{1/2})
部分安定化ジルコニア	6～8
窒化ケイ素	5～7
アルミナ	3～4
炭化ケイ素	2～5
ガラス	0.5～1

「転がり軸受球用窒化けい素材の基本特性及び等級分類」においては、破壊じん性をもとに製品グレードのクラス分けが行われており、破壊じん性の測定値の誤差が2～3割もあるようでは、製品のクラス分けに意味がなくなり、製品をその性能に合った適正価格で販売することが難しくなることが予想される。そこで、セラミックス製品の国際市場での公正な取引を進めるためには、破壊じん性の優劣を正しく定量的に評価するための国際規格が不可欠となる。

2 セラミックスにおける破壊じん性試験法の概要と課題

金属材料を中心に開発されてきた破壊じん性測定法においては、寸法の比較的大きな試験片に巨視的なき裂を導入し、平面ひずみ状態での破壊荷重または破壊応力から臨界応力拡大係数、 K_{IC} を次式により算出する。

$$K_{IC} = (P/BW^{3/2}) Y \quad (1)$$

ここで、 P は破壊荷重、 B は試験片厚さ、 W は試験片の幅、 Y はき裂形状因子である。この式は線形破壊力学に基づいて導かれたものであり、セラミックスの破壊じん性試験においても適用されている。金属を対象とした試験方法と異なる点としては、金属材料においては鋭いき裂を導入するのに、試験片に切欠き加工をしたのちにサイクル荷重を

負荷することにより、その切欠き先端からいわゆる疲労予き裂を比較的容易に発生、成長させることができるのに対し、セラミックスでは疲労予き裂を導入することが困難であるという点である。このためセラミックスにおける予き裂の導入方法としては、ポップイン (音を発して急激にき裂が進展するが、試験片の破断にまでは至らず、き裂進展が途中で停止する現象)、V字の切欠き、安定成長等による予き裂導入で破壊じん性を測定する手法が提案されている。代表的なセラミックスの破壊じん性試験法を図1に、その特徴を表2に示す。Single Edge Precracked Beam (SEPB) 法は、特殊な治具を使ってポップインにより試験片表面の中央部に直線的な予き裂を発生させ、その試験片に3点曲げ試験を行い、破断後の破面観察から測定したき裂長さ、曲げ試験で得られた破壊荷重から破壊じん性を算出する方法である。Single Edge V-Notched Beam (SEVNB) 法では、試験片表面の中央部に切断砥石で導入した切欠きの底部を、ダイヤモンド砥粒でV字の切欠きに研磨加工し、その試験片に3点曲げ試験を行い、破壊じん性を求める方法である。Chevron Notched Beam (CNB) 法では、試験片中央に切欠き加工により切り残された3角形部分 (リガメント) を形成し、その試験片に3点曲げ試験を行い、破壊じん性を求める方法である。これらの巨視的なき裂を導入する方法は、いずれも3×4×36 mmの棒状試験片に予き裂を導入後、3点曲げ試験による破壊荷重を測定し (1) 式を使って破壊じん性を求めるため理論的根拠が明確であるが、予き裂の導入をはじめとして試験の実施は容易とは言い難い。これに対し、圧子圧入法 (Indentation Fracture、以下 IF 法と呼ぶ) では、鏡面研磨した試験片表面にピッカース圧子を圧入し発生した圧痕の対角線長さ $2a$ とき裂長さ $2c$ を測定して、破壊じん性を決定する方法である。極小試験片 (例えば5×5×5 mm程度) であっ

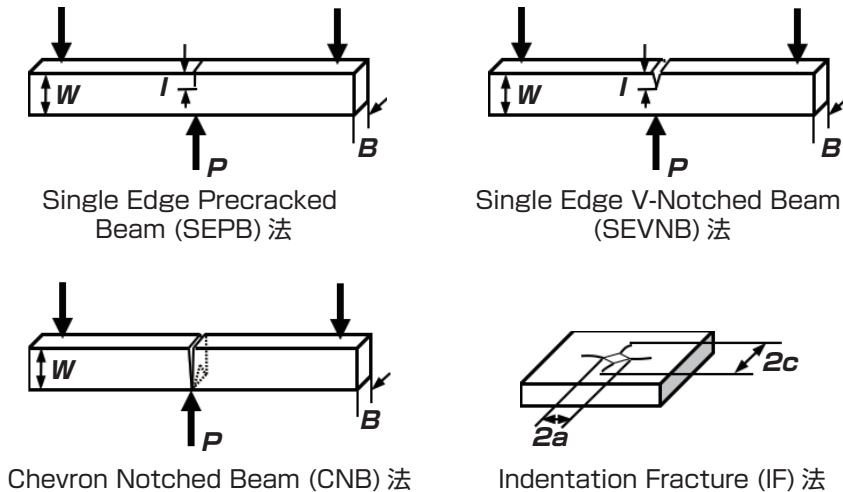


図1 セラミックスの代表的な破壊じん性試験法

表2 セラミックスの代表的な破壊じん性試験法の特徴値

測定方法	試験片サイズ (mm)	予き裂導入方法	特徴
SEPB 法	3×4×36 3×4×18	ビッカース圧痕 +ポップイン	長い貫通き裂が得られる
SEVNB 法	3×4×36	切欠き+ダイヤモンド砥粒によるV字研磨加工	先端の鋭いVノッチを用いる
CNB 法	3×4×36	3角リガメントによる安定成長	き裂長さの測定不要、破壊エネルギーも測定できる
IF 法	最小で5×5×5以上あれば可	鏡面にビッカース圧痕	小さい試験片でも測定可能 半経験的である

でも測定することが十分に可能であるうえに、ビッカース硬さ試験機があれば容易に測定できるというメリットがあるが、破壊じん性の算出式が半経験式に基づくものであり理論的背景が明確ではないという特徴を持つ。

一般にセラミックスの微細構造は製造プロセス条件に敏感であることから、同じ出発原料から同一作製条件で焼成しても、体積や形状に依存して微細構造が変化し、その結果として機械特性が異なるものとなってしまうことが多い。例えば、直径数 mm のベアリングボールの機械特性は、同一原料、同一条件で焼成された数センチ角のバルク体の機械特性と同じになる保証はない。このために、セラミックス製品の機械特性は製品自体を使って評価することが望ましい。しかし、セラミックスの破壊じん性や破壊強度の試験法の国内・国際規格においては、3×4×18～36 mm の棒状試験片が規定されているため、このサイズの試験片を切り出すことのできない小型セラミックスの評価は困難な状況であり、このような微小セラミックス製品にも適用可能な試験方法として IF 法は欠かせない。さらに、測定の容易さや装置導入コストが比較的安価等の優位性も加わり、IF 法は産業界等で広く一般的に使われている。

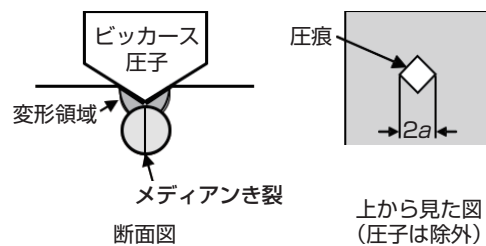
しかし、IF 法には測定値の再現性が低い、破壊じん性の算出式が複数あるといった大きな問題点がある。そこで、国内外の多くのユーザーから現有の光学顕微鏡やビッカース硬度計等の装置で破壊じん性の評価が可能である IF 法を再検討してほしいという要望があり、これを受けて、我々は従来から指摘されてきたき裂長さの読み取り誤差を低減させ、測定値の信頼性を改善させるために、IF 法の測定方法の問題点の探索と具体的な改善手法の検討に取り組んだ。また、破壊じん性算出式の選定にあたっては、信頼性の高い SEPB 法による結果との相関の完全性を重視した。さらに、国内外の試験機関によるラウンドロビン試験を経て、我々が見出した IF 法の改善手法の再現性を確認し、多くのユーザーを対象とする国際規格を発行する

に至った。以下の章では、各項目についてより詳細に述べていくこととする。

3 従来のIF法による破壊じん性試験法の概要と問題点

図2にビッカース圧子の押し込みによるき裂の生成の様子を示す。ビッカース圧子の圧入により圧痕とその直下に変形領域が形成され、押し込み荷重がある臨界値に達すると、圧子の直下にほぼ円形のメディアンき裂が生成する。このき裂は材料内部に発生するものであり試験片の表面には達していない。また、このき裂は互いに直交する2組のき裂からなる。ビッカース圧子を引き上げながら除荷していくと、このメディアンき裂は表面に向かって進展し、表面き裂にまで成長し、いわゆるメディアン・ラディアルき裂を形成する。図3に炭化ケイ素上のビッカース圧痕の金属顕微

(a) 圧子圧入時の様子



(b) 除荷後の様子

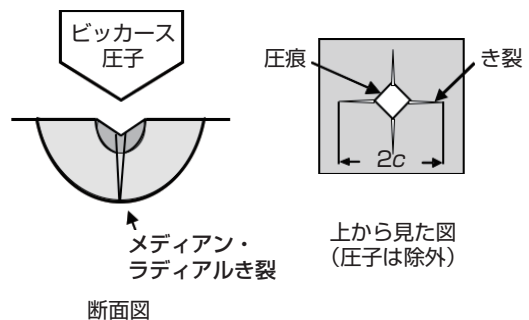


図2 ビッカース圧子圧入によるき裂の生成

表3 代表的なIF法の破壊じん性算出式の定数

提案者	n	A	発表年
Lawn-Fuller	0	0.0726	1975
Tanaka	0.25	0.035	1984
Niihara-Morena-Hasselmann	0.4	0.0309	1982
Anstis-Chantikul-Lawn-Marshall	0.5	0.016	1981
Lawn-Evans-Marshall	0.5	0.0175	1980
Miyoshi-Sagawa-Sasa	0.5	0.018	1985
Shetty-Rosenfield-Duckworth	0.5	0.023	1985

鏡写真を示す。ここで、除荷後にき裂が成長する駆動力は、圧子下で圧縮変形された領域が、除荷後にその周囲にもたらず残留引張応力場にあると考えられている。巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入する破壊じん性測定法では応力場が理論的に解析されているのに対し、IF法における残留応力場は複雑であり、現段階では厳密な理論的取り扱いが困難である。このため破壊じん性の算出式としては、式の導出に使われた弾塑性解析法の相違から数多くの式が提案されており、メディアン・ラディアルき裂に対して、そのほとんどは、一般的には以下のように表現される。

$$K_{\text{LIFR}} = A(E/HV)^n (F/c^{1.5}) \quad (2)$$

ここで、 K_{LIFR} はIF法による破壊じん性で、 E はヤング率、 HV は圧痕寸法から求まるビッカース硬さ、 F は押し込み試験力、 c はき裂長さの半分、 n は指数、 A は定数である。定数 A は巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入する破壊じん性測定法で求めた破壊じん性値と一致するように実験的に決定される場合が多い。代表的な破壊じん性算出式の n と A を表3に示す。IF法は測定の簡便さと試験片寸法の制約がほとんどないことから、1970年代後半から開発されて以来、セラミックス業界で広く一般に使われており、特に $3 \times 4 \times 18 \sim 36$ mm の棒状試験片を取り出せない小型セラミックス製品の破壊じん性評価に欠かせないものとなっている。しかし、国際的に算出式が統一されておらず、各自がそれぞれ異なる算出式により評価を行うケースが散見された。同じ測定データを用いても、算出式が異なると異なる破壊じん性を与えることになることから、2つの異なるセラミックス製品の比較に際し、それぞれ異なる算出式で計算された破壊じん性を比較しても、製品の優劣を比較することができないという問題が生じた。このために業界からは統一した算出式の導入による国際標準化が長らく要望されてきた。

さらに、セラミックスの破壊じん性試験の海外専門家から

IF法は不適切な試験方法とみなされていることもあって^{[1][2]}、これまで国際規格化されることはなかった。その主な理由は以下の2つである。

- (1) 測定精度に劣り、異なる試験機関間の測定値の再現性が乏しい^{[2][3]}。
- (2) 定数 A と n が少しずつ異なる算出式が20以上提案されているが、どの算出式においても、巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入する破壊じん性測定手法で測定した破壊じん性値とIF法の破壊じん性値との相関性が不完全である^[4] ことから、どの式が最適であるかが決まっていない。

興味深いことに、IF法の批判者たちは問題点を指摘し、その原因がIF法の理論が根本的に誤っているせいであると主張するばかりで、なぜ測定値の再現性に劣るのか、なぜ巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入する破壊じん性測定法での破壊じん性値との相関性が劣るのかといったことについて、十分な調査を行ってこなかった。

4 研究開発のシナリオ

IF法の国際標準化にあたっては、上記の海外専門家から指摘された①測定値の再現性が低いことと、②破壊じん性算出式が複数あるといった問題点を解決しなければならないのは明らかである。そこで、まずは図4に示すように①破壊じん性の再現性が低い原因について検討を行うこととした。その結果、き裂長さの読み取り誤差が破壊じん性のばらつきの主因であることがわかったことから、次に、測定の容易さ、コスト等を勘案しつつ、き裂長さの高精度測定法の開発を行った。開発した手法については、国内外のラウンドロビン試験により、再現性が改善されたかを検証することとした。

一方、②算出式が複数あるという問題に対しては、異なる研究者がそれぞれの算出式を導出する際に使ったデータの測定方法を調査し、使われた測定方法があまり信頼性の高いものではないことを見出した。精度に劣るデータが多く

の算出式を生む原因の一つであり、また、そのようなデータをもとに IF 法自体が批判されていることから、高精度のデータを取り直して議論する必要があると考えられた。そこで、開発した高精度測定法による破壊じん性と、SEPB 法

による破壊じん性との相関性を検討することとした。また、そのデータを使って最適な破壊じん性算出式の選定を行うこととした。このように、これまで問題とされてきた懸念事項を解決し、高精度測定法と破壊じん性算出式の選定を通して、国際標準化へ取り組んだ。

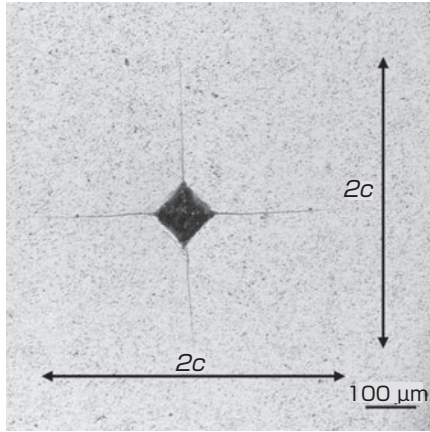


図3 炭化ケイ素に導入されたビッカース圧痕とき裂の金属顕微鏡写真 (圧入荷重:196 N、対物レンズ10倍、従来の一般的な測定方法を示す。)

5 IF法の問題点の克服

5.1 従来手法による試験機関間の測定値のばらつきの原因

IF 法の再現性の検証を目的として、日本セラミックス協会の「バルクセラミックスの信頼性革新に関する研究会」の協力のもと、国内の主要なセラミックスメーカー4社と、6大学、2公的研究機関の計12試験機関による国内ラウンドロビン試験を実施した。まず初めに、これまで一般的に行われてきた対物レンズと接眼レンズをそれぞれ10倍としてき裂全部を一つの視野に収めて、この視野の中で圧痕とき裂長さを読み取る (図3) という従来の手法について検討した。図5の黒丸は、図3の炭化ケイ素試料を供試材

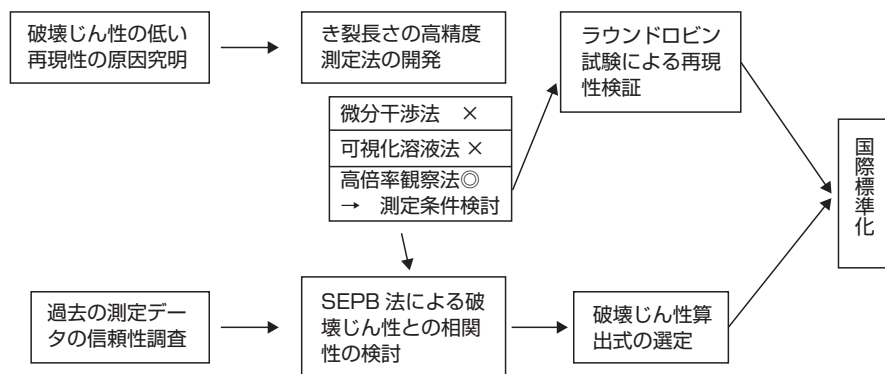


図4 圧子圧入 (IF) 法によるセラミックスの破壊じん性試験法の国際標準化のためのシナリオ

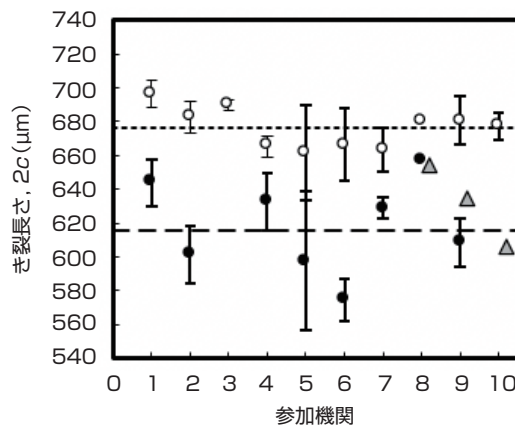


図5 炭化ケイ素を供試材とした IF 法の国内ラウンドロビン試験でのき裂長さの測定結果^[5]。●は10倍の対物レンズ (従来法) での測定値を示し、▲は10倍の対物レンズと CCD カメラで撮影した画像をソフトウェアで約400倍に拡大して測定した値を示す。○は対物レンズを40～50倍として測定顕微鏡 (新提案法) (No. 1～4)、または、硬度計のステージ移動 (新提案法) (No. 5～10) により測定した値を示す。エラーバーは標準偏差を示す。N=5～8。

表4 従来のIF法による破壊じん性測定の不確かさ評価

記号	要因	標準不確かさ (%)	感度係数	標準不確かさ (%)
$u(a)$	圧こん寸法測定の不確かさ	0.582	0.8	0.466
$u_s(a)$	標準器の校正の不確かさ	0.263		
$u_r(a)$	寸法測定繰返しの不確かさ	0.519		
$u(c)$	き裂長さの測定の不確かさ	0.965	-1.5	1.448
$u_s(c)$	標準器の校正の不確かさ	0.067		
$u_r(c)$	寸法測定繰返しの不確かさ	0.963		
$u(f)$	試験力測定の不確かさ	0.108	0.6	0.065
$u(E)$	ヤング率測定の不確かさ	0.214	0.4	0.086
合成標準不確かさ (%)				1.52
拡張不確かさ (%) ($k=2$)				3.04

とした国内ラウンドロビン試験結果を示している^[5]。き裂長さ $2c$ は、約 580 ~ 660 μm と大きくばらつき、この結果、Niihara の式^[6] で算出した破壊じん性は約 3.4 ~ 4.4 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ と試験機関の間で大きく異なるものとなった (図 6 の黒四角)^[5]。ここで、研究機関 1 における破壊じん性の測定の不確かさの要因を表 4 に示した。破壊じん性の算出式には Niihara の式を使って、(2) 式でのピッカース硬度 HV に、 $HV=1.854F/4a^2$ を代入した次式を不確かさの計算に用いた。

$$K_{\text{IFR}} = 0.042E^{0.4}F^{0.6}a^{0.8}c^{-1.5} \quad (3)$$

表 4 より、破壊じん性測定の不確かさの大部分がき裂長さの測定の不確かさに起因していることがわかる。またこ

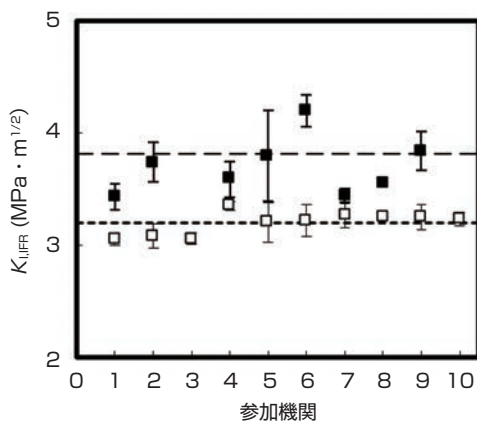


図 6 炭化ケイ素を供試材とした IF 法の国内ラウンドロビン試験での破壊じん性の測定結果^[5]。■は 10 倍の対物レンズ (従来法) での測定値を示し、□は対物レンズを 40 ~ 50 倍として測定顕微鏡 (新規提案法) (No. 1 ~ 4)、または、硬度計のステージ移動 (新提案法) (No. 5 ~ 10) により測定した値を示す。エラーバーは標準偏差を示す。N=5 ~ 8。

れとは別に、試験片を回収し圧痕とき裂の寸法を後述する高倍率観察法を用いて我々が測定したところ、約 700 μm とほぼ一定の値が得られ、き裂長さ自体のばらつきは小さいことや、各機関で読み取ったき裂長さが我々の値よりも 40 ~ 120 μm ほど短いことがわかった。これにより、従来の破壊じん性測定値のばらつきは、き裂長さ自体のばらつきが原因ではなく、き裂長さの読み取り誤差が測定者ごとに大きく異なることに起因することが明らかとなった。

5.2 き裂長さの高精度測定法の開発

き裂長さの読み取り時に誤差が生じることは、図 3 から見てわかるように、き裂先端を特定するのが難しいことに由来する。そこで、き裂長さを正確に測定するためにはき裂先端の視認性を向上する必要があり、その手法には①き裂先端のコントラストを高める、②き裂先端の解像度を上げる、の 2 通りがあげられる。そこでまず、コントラストを高める方法として、き裂にインク等の顔料を浸透させる手法の検討を行ったところ、アルミナ等白色のセラミックスには有効であるが、炭化ケイ素等の黒色のセラミックスには使えないことがわかった。また、水分による低速き裂成長を防ぐために水分を含まないインクを選択しなければならないという問題があった。これに対し、我々は圧こん導入後の試料表面に透明塗料を薄く塗布し乾燥させることで、き裂先端を着色する方法を見出した。これは、き裂に透明塗料が浸透すると、乾燥後のき裂周囲の透明膜の厚みが僅かに減少し、光の干渉色が変わることを利用したものである。この方法により炭化ケイ素のき裂長さの読み取り誤差を低減できることがわかった^[7]。しかし、この方法では透明塗料の塗布量をコントロールし一定の膜厚を得ることが難しいことや、他のセラミックスでの検討が行われておらず、まだ発展段階にある手法と言える。この他に、微分干

渉法による観察により、き裂長さの読み取り誤差を低減できることが、後述する高倍率観察法との比較によりわかった。しかし、微分干渉機能の付いた光学顕微鏡は高価であるうえに、オペレーターにも知識が要求されることから、広く一般のユーザーを対象とした方法とは言えない。次にき裂先端の解像度を上げる方法の最たる例として、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使って倍率1万倍でき裂先端の位置を同定する方法を検討した。この場合、従来法のようにき裂長さを1つの視野の中で測定することはできないので、代わりに上のき裂先端を画面中央に合わせて試料テーブルの位置を記録し、その後、テーブルを移動して反対のき裂先端を画面中央に合わせて試料テーブルの位置を再度記録し、テーブルの移動量からき裂長さを求めた (図7)。この手法によりき裂の位置を $1 \mu\text{m}$ の精度で特定することができたが、SEM 観察用試料の準備に手間がかかることや、操作に時間がかかるという問題があった。一般的に破壊じん性の測定自体、測定の繰返しのみならず、 $1 \mu\text{m}$ の高精度で測定する必要性がないうえに、IF 法は操作の簡便さが魅力とされており、製造現場においても誰もが簡単に測定できることが必要と考えられる。さらに現有

の光学顕微鏡や硬さ計等の装置を使った測定を多くのユーザーが要望していることを考慮すると、微分干渉法による測定や SEM による測定は、多くのユーザーを対象とした IF 法の標準化には向いていないと言える。

それならば、き裂先端の解像度を改善する簡単な方法として、光学顕微鏡の観察倍率を大きくすれば良いと思われるだろう。しかし、単に観察倍率を上げるだけでは必ずしも解像度を改善できるとは限らない。例えば、対物レンズを10倍として CCD カメラで撮影した画像をソフトウェア上で約600倍程度に拡大した観察例を図8左に示す。全体としてぼやけており、き裂先端がどこかがわかりにくい。実際にこの方法でき裂長さを測定しても、図5の△で示すようにき裂長さは、従来法で測定した値とあまり違わなかった。これに対して、50倍の対物レンズと CCD カメラで撮影した画像を同じ倍率に拡大した写真を図8右に示す。分解能が著しく向上しき裂先端まではっきりと観察できることがわかる^[5]。この違いは光学顕微鏡の2点分解能から説明できる。光学顕微鏡の2点分解能 δ は、 $\delta = 0.61 \lambda / NA$ で与えられる。ここで λ は光の波長、 NA は対物レンズの開口数である。開口数は一般的に倍率の高いものほど大き

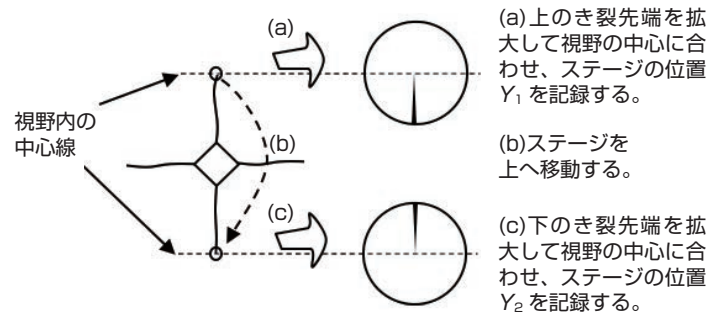


図7 き裂両端を高倍率で観察し、ステージ移動量からき裂長さを測定する方法。き裂長さは $Y_2 - Y_1$ から求められる。

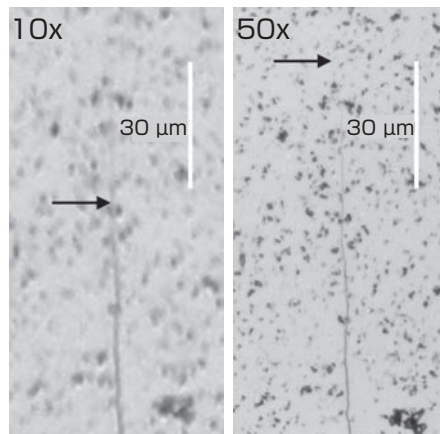


図8 炭化ケイ素上のき裂先端を10倍(従来の倍率)、又は、50倍(新提案の倍率)の対物レンズで観察した金属顕微鏡写真。図中の矢印は認識できるき裂先端の位置を示す。

い。ここで一例として2点分解能を計算すると、我々の有する10倍と50倍の対物レンズの開口数はそれぞれ0.2と0.55であり、光の波長が600 nmの場合、10倍の対物レンズの分解能は1.83 μm 、50倍の対物レンズの分解能は0.67 μm となった。つまり、低倍の対物レンズを使って撮影した画像をソフトウェアで拡大する手法では、分解能の悪い画像を単に拡大するだけで解像度の改善にはつながらないので、開口数の大きな高倍率の対物レンズを使い、分解能を改善することが必要であることがわかった。この他、顕微鏡の照明方法にも注意が必要である。白色のセラミックス等透光性が多少ある場合、側射照明を使うと、表面下のき裂を誤って観察してしまう可能性があることがわかった。これを防ぐために同軸落射による照明が望ましいと言える。

き裂長さ測定への高倍率観察法の効果を確認するために、測定顕微鏡に50倍の対物レンズと10倍の接眼レンズを装着し、同軸落射照明でき裂先端の位置を同定し、図7に示した試料ステージを移動する方法でき裂長さの測定を行ったところ、研究機関1のき裂長さの測定の標準不確かさは0.558%となり、従来法の約60%まで減少させることができた。この結果、破壊じん性の合成標準不確かさは0.94%となり、SEPB法による標準不確かさが1.06%であったことと比べると、SEPB法と遜色ない精度で測定ができていたことがわかった。この高倍率観察法は、手持ちのビッカース硬度計に40~50倍の対物レンズを装着でき、ステージが縦横にマイクロメーターで移動可能であるならば採用できるし、もしくは、ビッカース硬度計のすぐわきに測定顕微鏡を置き、圧痕導入後に測定顕微鏡で圧痕とき裂長さを測定するというやり方も可能であり、広く産業界でも利用できる手法であることから、IF法の標準的な手法として望ましい。そこで、この新たな測定法の有効性を検証することを目的として、国内ラウンドロビン試験を再度実施した。図5の白丸は対物レンズを40~50倍にして測定顕微鏡、または、硬度計のステージ移動によりき裂長さを測定する新提案法で得られたき裂長さの国内ラウンドロビン試験結果を示す。き裂長さのばらつきは約660~700 μm と、従来手法で得られたばらつきの約半分となり、同時に各参加機関内でのばらつきも小さくなっている。この結果、各参加機関の破壊じん性の値も図6の白四角に示すように3.2 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ でほぼ一定となっている。他の代表的な構造用セラミックスである窒化ケイ素やアルミナを使って国内ラウンドロビン試験を実施し、この新提案法によれば破壊じん性値の良好な再現性を得ることができることを明らかにした^{[8][9]}。このように、き裂先端の位置の決定を高倍率の対物レンズを使って行い、き裂長さをステージ

の移動により測定することで、それぞれを正確に行うことが可能となり、再現性の改善が可能であることがわかった。

5.3 SEPB法による破壊じん性値との相関性

5.3.1 過去の測定データの信頼性推移

幾つかのセラミックスを使った時のIF法による破壊じん性値と、IF法以外の測定法による破壊じん性値との相関性が、どの算出式を使っても劣ることが海外の一部専門家にIF法が批判されてきた主な理由である。しかし、これまで述べてきたように従来のIF法で測定された測定値は精度に劣るものであるから、果たしてそのような信頼性に劣るデータを基にして、IF法の有効性を議論することが妥当であるかは疑問が残る。そこで、過去の文献における測定データの信頼性を再調査することにした。

まず、過去の文献を評価する基準として、1) IF法におけるき裂長さ測定精度、2) 比較となるIF法以外の破壊じん性測定法の精度、3) 測定対象となるセラミックス試料の妥当性があげられる。1) に関して言えば、前述したように従来手法による測定では精度が不十分であり、高倍率観察とステージ移動を組み合わせた手法、または、微分干渉法等の特別なテクニックで測定されたものでなければ、信頼性あるデータとみなすことはできない。一方、巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入する破壊じん性測定法に関しては、IF法の開発が行われていた1980年代では十分に確立されたものではなく、さまざまな測定法が使われていた。しかし、その後の研究によりSEPB法やSEVNB法、CNB法等が信頼性の高い測定法として認識され国際標準化されたのに対し、それ以外の一部の方法は測定精度の低いものであることが判明し、今ではほとんど使われていない^[10]。したがって、過去の文献において使われている破壊じん性測定法によっては、データの信頼性が不十分であることもあり得る。最後の3) 測定試料の妥当性については、IF法の測定原理から考察する必要がある。前述したようにIF法の測定原理として、圧子下で圧縮変形された領域から発生する残留応力場が、き裂の進展の駆動力と考えられている。ここでもし、圧縮変形された領域が高密度化してしまうと残留応力自体が減少するので、IF法での破壊じん性が見積りに狂いが生じてしまう。近年の研究によりガラスが高圧縮応力下において緻密化することが知られ、IF法の測定に適さないことが明らかとなった^[11]。しかし、IF法の開発当時はこの現象がほとんど知られておらず、ガラスやガラスセラミックスを測定対象に含めた研究も行われてきた。

これらの判定基準を基にIF法に関する主要な23文献の実験データを精査した^[12]。その中でも引用が多い主要な論文について、上記の判定基準にしたがって測定精度

表5 主要なIF法の文献における破壊じん性の測定精度とガラス試料の有無 (文献[12]より抜粋)

発表年	著者	IF法の測定精度	比較とする破壊じん性測定法の測定精度	ガラス試料の有無
1976	Evans & Wilshaw	×	○	有
1976	Evans & Charles	×	×	無
1980	Lawn-Evans-Marshall	×	×	有
1981	Anstis-Chantikul-Lawn-Marshall	○	×、○	有
1982	Niihara-Morena-Hasselman	×	×、○	無
1989	Ponton & Rawlings	×	×	有
2007	Quinn & Bradt	○	○	無

と測定試料に関して表5にまとめた。IF法による測定に関してみると、高い精度を確認できるのは、Anstisら^[13]と、Quinn & Bradt^[2]の報告しか見当たらない。比較とする破壊じん性の測定に信頼性が高い手法だけを使っているのは、Evans & WilshawとQuinn & Bradtの2件のみである。一方、測定試料として不適切なガラス試料を使っていないのは、Evans & CharlesとNiihara-Morena-Hasselman、Quinn & Bradtだけである。これより、上記の3つの条件を同時にクリアできるのは実のところ、Quinn & Bradtしかないことになる。しかし、彼らの測定試料は窒化ケイ素のみであり、引き合いに使った他の研究者の炭化ケイ素のデータの測定精度が不確かであるので、相関性を議論することは適切でない。ここで、IF法の批判者たちが、IF法とIF法以外の測定法での破壊じん性値の相関が悪いという根拠として引用するPonton & Rawlingsのデータ^[4]の信頼性を見てみると、IF法の測定値の信頼性に欠けるのみならず、不適切な破壊じん性測定法が使われており、さらには、ガラス試料も使われている。この測定データを使ってIF法の有効性を議論することは適切と言えず、したがって、海外の専門家が批判するIF法とIF法以外の測定法との破壊じん性値の相関性が劣るとする主張には確固としたデータの裏付けがないことが明らかとなった。しかしこのことは同時に、巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入する測定法とIF法との破壊じん性値の相関性があるかどうかはわからないということであり、IF法の有効性を議論するためには、これら3条件を満たす正しい測定により、相関性を実際に調べる必要が生じた。

5.3.2 各種セラミックスでの測定

表3に示した破壊じん性算出式の中でも、世界的にもっともよく使われていると思われるAnstis^[13]、Niihara^[6]、Miyoshi^[14]の3式を使って、IF法による破壊じん性とSEPB法での破壊じん性との相関性を調べた^[15]。幾つか

の構造用セラミックスを供試材とし、我々が開発した高倍率観察法によるIF法での測定値と、SEPB法による破壊じん性値との相関性を図9～図11に示す。どの図においても、IF法による破壊じん性はSEPB法による破壊じん性にほぼ比例している。図9はAnstisの式を使ってIF法の破壊じん性を算出したグラフである。ほとんどのセラミックスにおいてIF法の値はSEPB法の値の7～8割程度しかなく、これらの破壊じん性の拡張不確かさ($k=2$)はIF法とSEPB法ともに約0.1～0.2MPaであり、統計的に見ても明らかな有意差があった。一方、Miyoshiの式を使った場合、図10に示すように、ホットプレス法により作製した微粒からなるアルミナ(図中の△)と微粒の窒化ケイ素(図中の○●)のIF法の値が、SEPBの値とかなり近い値を示したが、統計的に有意差が認められた。一方、固相焼結炭化ケイ素以外のサンプルのIF法の値はSEPBの値よりも約1～2割ほど小さくなった。これに対し、Niiharaの式の場合、IF法の破壊じん性が増大してすべてのデータ点がグラフの上側に移動した(図11)。この結果、窒化ア

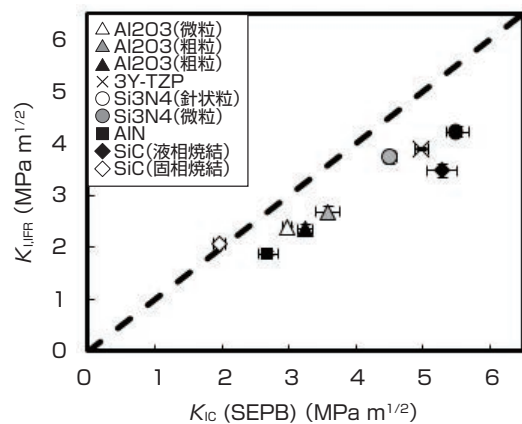


図9 主要な構造用セラミックスにおけるSEPB法による破壊じん性 K_{IC} と、Anstisの式により算出したIF法の破壊じん性 K_{LIFR} との相関性。き裂の長さは新提案法で測定した。エラーバーは標準偏差を示す。N=3～8。

ルミ (■) と 液相焼結の炭化ケイ素 (◆) では、IF 法と SEPB 法との間に統計的に有意差が認められなかった。一方、粗粒のアルミナ (▲) では、IF 法の値と SEPB 法の値は比較的近い値となったが有意差が認められ、他のアルミナや窒化ケイ素、3Y-TZP においては IF 法の値が 1~3 割ほど大きくなった。このように材料ごとに見ていくと、必ずしも、IF 法による破壊じん性が SEPB 法の破壊じん性に近い値を与えるとは言いきれない場合もあるが、全体の傾向としては、IF 法と SEPB 法での測定値の間に正の相関性が認められ、IF 法の妥当性が確認できた。

これまで海外専門家からは IF 法の測定精度が劣ることや、巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入する測定法での破壊じん性値との相関に劣ることが問題視されてきたが、我々の取り組みにより、IF 法の測定精度が改善され、

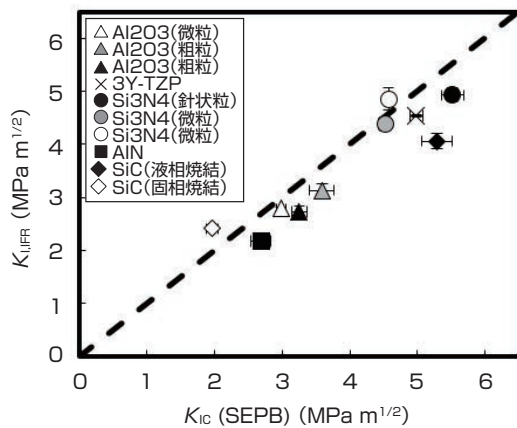


図 10 主要な構造用セラミックスにおける SEPB 法による破壊じん性 K_{IC} と、Miyoshi の式により算出した IF 法の破壊じん性 $K_{I,IFR}$ との相関性^[15]。き裂の長さは新提案法で測定した。エラーバーは標準偏差を示す。N=3~8。参考文献 [15] から許可を得て再掲。

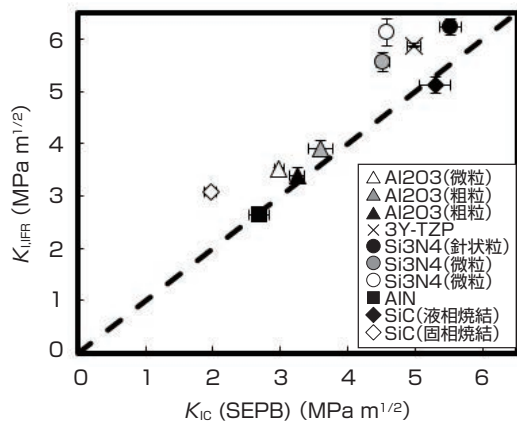


図 11 主要な構造用セラミックスにおける SEPB 法による破壊じん性 K_{IC} と、Nihara の式により算出した IF 法の破壊じん性 $K_{I,IFR}$ との相関性^[15]。き裂の長さは新提案法で測定した。エラーバーは標準偏差を示す。N=3~8。参考文献 [15] から許可を得て再掲。

SEPB 法での破壊じん性との相関も悪くないことが明らかとなった。これにより、高倍率観察法による IF 法を使った破壊じん性試験法を国際標準化することが妥当であると考えられた。

6 国際規格化に向けた取り組み

6.1 セラミックス材料の破壊じん性に関する測定法や国際標準化等に関する歴史的経緯

1920 年代から 1950 年代にかけて、Griffith、Irwin、Weibull 等により線形弾性脆性固体の破壊現象に関する古典論が構築され、セラミックスの破壊現象を理解するための破壊エネルギーや破壊じん性という概念が与えられた。1960 年代になると、破壊じん性の測定のために DCB (Double Cantilever Beam) 法や CNB 法をはじめとする金属材料での破壊じん性試験法が使われはじめ、1970 年代になるとセラミックスの破壊じん性がより広範囲に検討されるようになった。しかし、多くの測定法において鋭いき裂の導入が難しいという問題があった。これに対して、1970 年代後半には IF 法の開発が行われ、その測定の簡便さから 1980 年代に多くの研究が行われ数多くの算出式が提案された。さらに 1980 年代後半には Nose らにより予き裂の導入が比較的容易である SEPB 法が開発された^[16]。

日本においては、SEPB 法による測定値との比較により、多くの IF 法の算出式の中から Miyoshi の式が選定されて、SEPB 法と IF 法が 1990 年に JIS R1607「ファインセラミックスの破壊じん性試験方法」として制定された。しかし、海外においては、同時期に最適な IF 法の式を選出する調査が Ponton ら^[4]により行われたが、いずれの式も不十分であるとみなされた。VAMAS プロジェクト^[3]においても国際規格化が検討されたこともあったが、再現性や SEPB 法との相関性等に問題があるとされて規格化は見送られた。また、ASTM 等他の規格にも採用されることはなかった。

比較的大きな試験片に巨視的き裂を導入する各種破壊じん性測定法に関しても、再現性や異なる測定法間での整合性等の検討が行われた結果、一部の測定法は不適切であることが明らかとなり、SEVNB 法や、SCF (Surface Crack in Flexure) 法が開発された。これらの各種破壊じん性測定法の見直しを踏まえて、1999 年に ASTM C1421 において、SEPB 法、SCF 法、CNB 法の 3 種がセラミックスの破壊じん性試験法として規格化された。これに引き続き、ISO が 2003 年から 2005 年にかけてこの 3 試験法の国際規格をそれぞれ発行し、2008 年には SEVNB 法の国際規格が発行された。

これらの試験法はすべて静的かつ線形域での破壊を対象としたものである。これは、セラミックスが室温では塑

性変形をせず非線形的な破壊挙動を示さないことによる。一方、1400 °C の高温においては、窒化ケイ素が非線形的な破壊挙動を示すことから、金属材料を対象に開発された弾塑性破壊じん性 JIC 試験が 1990 年代初頭に行われた例があるが^[17]、高温構造材料としてのセラミックスの研究開発が下火になるにともない、高温での非線形破壊じん性試験はほとんど行われていないのが現状である。動的破壊じん性に関しては、ホプキンソン棒法による衝撃試験による測定^[18]や、落重型衝撃試験装置を使った測定^[19]が 1980 年代後半に行われた例があるが、現在では動的破壊じん性に関する報告を目にするのはあまりない。このように 2008 年に SEVNB 法が国際規格として発行されて以来、新たな破壊じん性試験法の国際規格化の動きは見られず、工業的に広く使われている IF 法の国際規格化は取り残されたままであった。

6.2 算出式の選定

国際標準化にあたりまず問題となったのは、算出式を統一すべきかどうかということであった。各国や各組織でこれまで頻繁に使われてきた算出式が異なり、各国、各組織としてはこれまで使ってきた式をそのまま継続して使いたいという要望がある。例えば、日本では Miyoshi の式が JIS R 1607「ファインセラミックスの破壊じん性試験方法」に採用されており、一方、ヨーロッパでは Anstis の式が比較的好く使われてきた。また、アメリカでは Niihara の式も多用されてきた。このため、算出式を 1 つに絞らず、代表的な式を併記するという考えも考えられた。しかし、もし仮に複数の式を併記した場合、式によって得られる値が異なることから、規格のユーザーにとっては、異なる式で計算された破壊じん性を比較しても意味をなさず、セラミック製品の優劣を判断することが難しくなってしまう。国際規格を作成する目的は、セラミックスの機械特性を直接比較して、製品の優劣を判断することであるから、複数の式を併記することは国際規格化の目的を大いに損ねてしまう。このため国際規格においては IF 法の算出式を一つに統一することとなった。

では、どの式を使うべきかという問題になる。基本的には、SEPB 法等の標準的な手法で測定した破壊じん性値と比較的よく一致する算出式が望ましいのは言うまでもない。5.3.2 で述べたように Anstis の式で破壊じん性を求めた場合、ほぼすべてのセラミックスで SEPB 法による破壊じん性値よりも小さな値となることから、適当ではないだろう。Miyoshi の式の場合、微粒のアルミナや微粒の窒化ケイ素で IF 法の計算値が SEPB 法の値に近い値となったが有意差があり、他のセラミックスでは全体的に小さな値を与えた。これに対し、Niihara の式の場合、窒化アル

ミ、液相焼結炭化ケイ素で有意差が認められなかったものの、全体的に大きめの値を与えていたことから、Miyoshi と Niihara のどちらの式も甲乙つけ難い。しかし、国際的な認知度を比較すると、Miyoshi の式は、日本の論文誌に日本語の論文で発表されたものであることから、海外では一部の専門家を除きほとんど知られていないのに対し、Niihara の式の海外での知名度は高い。また、転がり軸受球用窒化ケイ素材に関する ISO 26602 において、すでに Niihara の式が採用され、Niihara の式が破壊じん性の算出式として国際的に認識されつつある。以上のことから、Niihara の式を採用することとした。

6.3 用語の選定

SEPB 法等のき裂を導入した棒状試験片による標準的な破壊じん性の試験方法は、線形破壊力学で定義されたモード I の臨界応力拡大係数の評価として理論的根拠が明確である。これに対し、IF 法での測定は半経験式に基づくものであり理論的背景が明確ではないことから、海外においては、SEPB 法等の標準的破壊じん性測定法による破壊じん性 K_{IC} と、IF 法による測定値は厳密に区別すべきであるとされてきた^{[11][2]}。これを受けて、IF 法を使った転がり軸受球用窒化ケイ素の測定値は、ISO 26602 において IF 法による「破壊抵抗、 $K_{I,IFR}$ 」と定義され、海外において定着しつつある。また、5.3.2 で述べたように、ごく一部のセラミックスにおいて、IF 法による測定値と SEPB 法による測定値は統計的に有意差がないものの、他の多くのセラミックスでは有意差があることがわかった。これらのことから、ファインセラミックス全般を対象とした IF 法においても、「破壊抵抗、 $K_{I,IFR}$ 」という用語を国際規格において採用することとした。

6.4 国際ラウンドロビン試験による新提案法での再現性の検証

我々が新たに提案した IF 法の再現性については、国内でのラウンドロビン試験により良好な結果が得られたが、国際規格化においては国際的に再現性を検証する必要がある。また、試験手順が国外においても実施が容易であることを確認しなければならない。そこで、国内ラウンドロビン試験で使ったアルミナ、窒化ケイ素、炭化ケイ素の試料を海外の 6 試験機関に送付して、国際ラウンドロビン試験を行った^[20]。結果の一例として、窒化ケイ素のき裂長さや破壊じん性の測定結果を図 12 と図 13 に示す。き裂長さは各機関でほぼ一定となり、その結果得られた破壊じん性も極めてばらつきの少ない結果となった。このことから、国際的に IF 法の再現性が妥当であることが確認された。

6.5 ISO 専門委員会での活動

国際ラウンドロビンでの再現性の確認後に、ISO/TC206

「ファインセラミックス」委員会 2015 年韓国済州島総会において、今回開発した IF 法の破壊じん性試験法を将来提案として説明した。国内外の計 18 機関によるラウンドロビン試験での再現性や、IF 法と SEPB 法での破壊じん性値の相関性といった実験データを示すことで、従来の問題点が解決され国際規格として準備ができていないことを十分にアピールすることができた。翌年春に国際規格案を TC206 委員会に提案し、新業務項目として審議すべきかを問う投票に臨んだ。投票の結果、国際ラウンドロビン試験に参加したドイツからエキスパート 2 名の選出があり、この他にマレーシア、インドネシア、日本の計 4 か国からエキスパートが選出され新業務項目として審議がスタートした。この投票時において以下の技術的コメントが寄せられた。

- a) Niihara の式以外にも、Anstis の式等複数の式を併記すべきでないか。

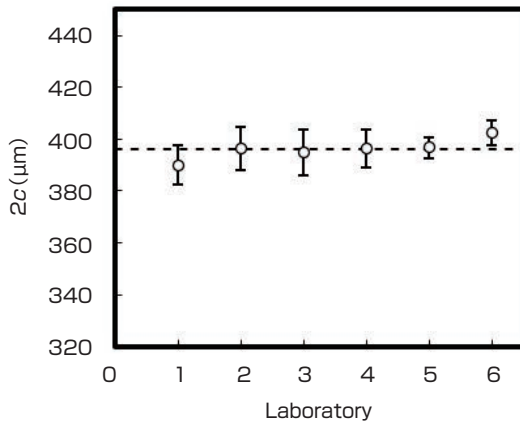


図 12 窒化ケイ素を供試材とした IF 法の国際ラウンドロビン試験でのき裂長さの測定結果^[20]。き裂の長さは新提案法で測定した。エラーバーは標準偏差を示す。N=6～11。参考文献 [20] から許可を得て再掲。

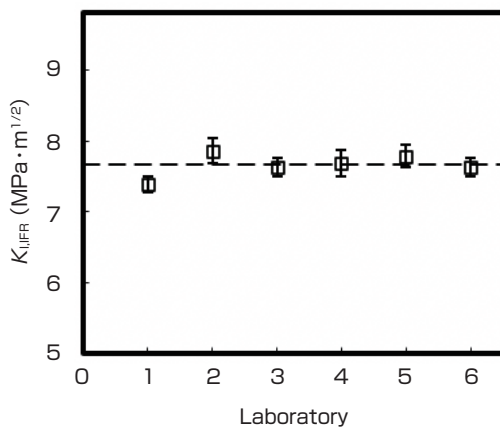


図 13 窒化ケイ素を供試材とした IF 法の国際ラウンドロビン試験での破壊じん性の測定結果^[20]。き裂の長さは新提案法で測定した。エラーバーは標準偏差を示す。N=6～11。参考文献 [20] から許可を得て再掲。

- b) どうして Niihara の式を選出したのか。その正当性を説明するべきである。

これに対し、6.2 で検討した内容をエキスパートに説明し、了承を得ることができた。その他、試料表面下に水平に広がるラテラルクラック (水平き裂) や、多孔質セラミックスに対する取扱いに関する注意を規格本文に追記する等の微修正を経て、ISO 21618 「室温での圧子圧入法によるモノリシックセラミックスの破壊抵抗試験法」が 2019 年 3 月に発行された。

7 まとめ

試験片の寸法・形状の制約が少なく、試験手法が簡便なことからセラミックスの破壊じん性測定に多用されてきた IF 法であるが、従来の測定手法では測定精度に劣ることや、算出式が多数存在することからこれまで国際規格化されることがなかった。これに対し我々は、き裂長さの読み取り誤差を低減し、測定値の信頼性を改善する手法を開発した。また、この手法を使って最適な算出式を選定することができた。そして、国内外の計 18 機関によるラウンドロビン試験での再現性といった十分なバックデータをもとに、国際規格を発行することができた。IF 法による破壊じん性値は、セラミックス部品の特性を示すカタログ値として記載され、その製品が構造用材料として使用に耐えるかの判断基準とされる他、JIS R 1669 においては窒化ケイ素製のベアリングボールの等級分類の指標にも使われている。構造用セラミックス製品の製造に携わる方々をはじめ、その製品のユーザーにとっても IF 法は欠かせないと思われることから、多くの方々にこの国際規格を使って正確な破壊じん性の測定に役立てていただきたいと願っている。

謝辞

ラウンドロビン試験による再現性改善に関する研究は、公益社団法人 日本セラミックス協会のバルクセラミックスの信頼性革新に関する研究会 (代表者：東京工業大学、安田公一) のご協力のもとに行われました。また、国内での標準化委員会の運営は、一般社団法人 日本ファインセラミックス協会の協力のもとに行われました。ここに記して、本研究会、および、ラウンドロビン試験参加機関、日本ファインセラミックス協会の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

[1] G. D. Quinn: Fracture toughness of ceramics by the Vickers indentation crack length method: A critical review, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 27, 45–62 (2006).

[2] G. D. Quinn and R. C. Bradt: On the Vickers indentation fracture toughness test, *J. Am. Ceram. Soc.*, 90 (3), 673–680 (2007).

[3] 淡路英夫, 山田達也, 奥田 博: セラミックスの破壊靱性ラウンドロビンテスト結果報告, *J. Ceram. Soc. Jap.*, 99 (1149), 417–422 (1991).

[4] C. B. Ponton and R. D. Rawlings: Vickers indentation fracture toughness test. Part 2. Application and critical evaluation of standardized indentation toughness equations, *Mater. Sci. Tech.*, 5 (10), 961–976 (1989).

[5] H. Miyazaki, Y. Yoshizawa and K. Yasuda: Round robin on indentation fracture resistance of silicon carbide ceramics by using a powerful optical microscope, *Ceram. Int.*, 39 (1), 611–617(2013).

[6] K. Niihara, R. Morena and D. P. H. Hasselman: Evaluation of K_{Ic} of brittle solids by the indentation method with low crack-to-indent ratios, *J. Mater. Sci. Lett.*, 1, 13–16 (1982).

[7] H. Miyazaki, Y. Yoshizawa: Novel measurement technique of crack length for indentation fracture (IF) method using high contrast image of crack tips through thin film coating, *J. Euro. Ceram. Soc.*, 35 (10), 2943–2948 (2015).

[8] H. Miyazaki, Y. Yoshizawa and K. Yasuda: Improved accuracy of the measurements of indentation fracture resistance for silicon nitride ceramics by the powerful optical microscopy, *Ceram. Int.*, 39 (8), 9499–9504 (2013).

[9] H. Miyazaki and Y. Yoshizawa: Refined measurements of indentation fracture resistance of alumina using powerful optical microscopy, *Ceram. Int.*, 40, 2777–2783 (2014).

[10] R. Morrell: Fracture toughness testing for advanced technical ceramics: Internationally agreed good practice, *Adv. Appl. Ceram.*, 105 (2), 88–98 (2006).

[11] S. Yoshida, J.-C. Sangleboeuf and T. Rouxel: Quantitative evaluation of indentation induced densification in glass, *J. Mater. Res.*, 20 (12), 3404–3412 (2005).

[12] H. Miyazaki and Y. Yoshizawa: A reinvestigation of the validity of the indentation fracture (IF) method as applied to ceramics, *J. Euro. Ceram. Soc.*, 37 (15), 4437–4441 (2007).

[13] G.R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn and D. B. Marshall: A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness. I. Direct crack measurements, *J. Am. Ceram. Soc.*, 64 (9), 533–538 (1981).

[14] 三好俊郎, 佐川暢俊, 佐々 正: 構造用セラミックスの破壊じん性評価に関する研究, *日本機械学会論文集 (A編)*, 51, 2489–2497 (1985).

[15] H. Miyazaki and Y. Yoshizawa: Correlation of the indentation fracture resistance measured using high-resolution optics and the fracture toughness obtained by the single edge-notched beam (SEPB) method for typical structural ceramics with various microstructures, *Ceram. Int.*, 42 (6), 7873–7876 (2016).

[16] T. Nose and T. Fujii: Evaluation of fracture toughness for ceramic materials by a single-edge-precracked-beam method, *J. Am. Ceram. Soc.*, 71 (5), 328–333 (1988).

[17] N. Miyahara, Y. Mutoh, K. Yamaishi and T. Oikawa: Fracture toughness and transition of fracture behavior of silicon nitride at elevated temperature, *J. Soc. Mt. Sci., Japan*, 41 (465), 892–898 (1992).

[18] 岸田敬三: セラミックスの動的強度, *生産と技術*, 46 (1), 62–64 (1994).

[19] T. Kishi, N. Takeda, B.-N. Kim and K. Suzuki: Dynamic

fracture toughness of ceramics, *J. Ceram. Soc., Japan*, 97 (1131), 1392–1397 (1989).

[20] H. Miyazaki and Y. Yoshizawa: International round-robin test on an improved indentation fracture (IF) method performed through high-magnification microscopy with a traveling stage, *Ceram. Int.*, 41 (10) Part A, 13271–13276 (2015).

執筆者略歴

宮崎 広行 (みやざき ひろゆき)

1991年東京工業大学大学院修士課程修了、博士(工学)。東京工業大学助手を経て、現在、産業技術総合研究所主任研究員。主に無機構造材料の機械特性試験法の開発や、パワーモジュール用メタライズ基板の耐熱疲労特性の評価を行い、工業標準化に関する研究にも従事。この研究では、高倍率測定法の開発、SEPB法での破壊じん性との相関性の調査、ISO規格化に取り組んだ。



安田 公一 (やすだ こういち)

1985年東京工業大学大学院総合理工学研究科修了、博士(工学)。1997年より東京工業大学物質理工学院准教授。専門はエンジニアリングセラミックスとその複合材料の破壊力学と信頼性解析。この研究では、ラウンドロビン試験のコーディネイト、国内の標準化専門委員会での意見の取りまとめ、ISO素案作成等に従事した。



吉澤 友一 (よしざわ ゆういち)

1985年東北大学大学院修士課程修了、博士(工学)。日本原子力研究所研究員、東京大学工学部助手、東北大学素材工学研究所助手を経て、現在、産業技術総合研究所マルチマテリアル研究部門長。酸化物セラミックスの組織制御と機械的特性の研究に従事。この研究では、セラミックス業界での破壊じん性試験法に対するニーズの把握、種々のセラミックスの破壊じん性試験法に関するアドバイスをを行った。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(清水 敏美: 産業技術総合研究所)

この論文は、脆性材料であるセラミックスの産業応用や実用化にとって非常に重要な機械的性質の一つである破壊じん性の試験方法に焦点をあてたものです。特に、産業界で広く採用されているにもかかわらず、これまで統一的な見解や算出式がなかった圧子圧入 (IF) 法を取り上げ、従来の測定値の信頼性を改善する手法を提供し、国際規格を発行するに至ったシナリオが述べられています。以上の点から、シンセシオロジー誌にふさわしい内容と考えます。

コメント(藤井 賢一: 産業技術総合研究所)

この論文は、セラミックスの破壊じん性試験法のなかでも特に圧子圧入 (IF) 法の信頼性について評価したものです。他の試験法との比較や従来のデータの再評価などを通じて IF 法の信頼性を改善する手法を提案し、この分野における国際標準化に貢献したという点で優れた内容の論文であると考えられます。

議論2 種々の破壊じん性試験法について

コメント (清水 敏美)

初稿をまず読み終えた率直な感想です。高精度なき裂長さ測定を目指すと言いつつ、何故、最先端の高精度・表面欠陥測定装置類とは異なる反射型光学顕微鏡の明視野観察に固執するのか、何故、比較的信頼性が劣る IF 法に固執するのか、正直、理解に苦しみました。しかし、幾度と読み返していくうちに、この論文が目指した意義や趣旨がやっと見えてきました。しかし、おそらく専門家ではない一般の読者は、著者が意図する重要な意義を理解できず、査読者が最初に抱いた誤った感想を持たれるのではないかと危惧します。なぜなら、導入部の数章において、その後続く議論のあらずのポイントが的確に記述されていないためだと考えます。言い換えれば、破壊じん性測定において、他の信頼性のある破壊じん性試験法の長所や短所を俯瞰しながら記述した後、IF 法の説明に移行すべきと考えます。導入部の記述は最後まで議論の根幹となりますので非常に重要と考えます。

回答 (宮崎 広行)

本文の第 2 章第 1 段落の後半において、セラミックスの代表的な破壊じん性試験法として SEPB 法、SEVNB 法、CNB 法、IF 法を個別に取り上げて説明を加えました。さらに、図 1 と表 2 を用いてそれら試験法の特徴を説明しました。次に、微小セラミックス製品にも適用可能な試験方法として、IF 法が欠かせないこと、さらに、測定の容易さや装置導入コストが比較的安価などの優位性も加わり、IF 法が産業界などで広く一般的に用いられていることを強調しました。しかし、IF 法には測定値の再現性が低い、破壊じん性の算出式が複数あるといった大きな問題点がありました。そのため、国内外の多くのユーザーから現有の光学顕微鏡やビッカース硬度計等の装置で破壊じん性の評価が可能である IF 法を再検討してほしいという要望がありました。これを受けて、著者らは従来から指摘されてきたき裂長さの読み取り誤差を低減させ、測定値の信頼性を改善させるために、IF 法の測定方法の問題点の探索と具体的な改善手法の検討に取り組みました。また、破壊じん性算出式の選定にあたっては、信頼性の高い SEPB 法による結果との相関の完全性を重視しました。その結果、国内外の試験機関によるラウンドロビン試験を経て、著者らが見出した IF 法の改善手法の再現性を確認し、多くのユーザーを対象とする国際規格を発行するに至ったわけです。

コメント (藤井 賢一)

材料試験の分野では非常に多くのじん性試験法があると考えられます。そこで、まずは第 1 章と第 2 章において、それら種々の破壊じん性試験法の全体概要を図や表などで説明し、その上で IF 法の特徴や概要を述べた方が、一般の読者にはわかりやすいと思います。

回答 (宮崎 広行)

第 2 章「セラミックスにおける破壊じん性試験法の概要と課題」の中で、第 1 段落前半において、金属材料とセラミックス材料において一般的な、巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入し、破壊応力から破壊じん性を計算する方法を説明しました。そして、金属材料と異なる点として巨視的なき裂を導入することが難しいことや、き裂を導入する方法がいくつかあることも説明しました。第 1 段落後半では、代表的なセラミックスの破壊じん性の測定法である SEPB 法、SEVNB 法、CNB 法について、図 1 と表 2 を用いて特徴や概要を記述しました。また、これに引き続き、IF 法の特徴として、①鏡面研磨した試験片表面にビッカース圧子を圧入し発生した圧痕の対角線長さとき裂長さを測定して、破壊じん性を決定する方法であること、②極小試験片 (例えば $5 \times 5 \times 5$ mm 程度) であっても測定することが十分に可能であるうえに、ビッカース硬さ試験機があれば容易に測定できるというメリットがあること、③破壊じん性の算出式が半経験式に基づくものであり理論的背景が明確ではない、という点に言及しました。

議論3 IF法の特徴と概要

コメント (清水 敏美)

IF 法が測定の準備や操作の簡便さ故に産業界など多くのユーザーがいることが述べられています。そのため著者らは、走査型電子顕微鏡の使用に関しては、それほどの精度が必要ないこと、準備や操作が大変であること、等の理由により多くのユーザーに不向きであると記述しています。さらに、微分干渉法の光学顕微鏡においても高価であり、理解に専門的知識が必要であるため不向きであると記述しています。測定法の選択において、一般のユーザー、広く産業界でも利用可能といった内容の必要条件は非常に曖昧です。高精度な測定手法を求めるとすれば、できるだけコスト、操作や準備の容易さ、等を求めながら最先端の測定法を求めたいと思いますが。

回答 (宮崎 広行)

この研究の出発点は、セラミックス業界からの「操作が簡便で広く普及している IF 法を国際規格化して欲しい」というものでした。精度が高く理論的にも正しい SEPB 法などの測定法は既にありましたが、それらの測定法はセラミックス業界の現場ではほとんど使われておらず、IF 法がもっぱら使用されているとのことでした。そのため、高精度な測定手法を求めるという要望はなく、簡便さという IF 法のメリットを最大限に生かしながら、如何に IF 法の測定精度を向上するかが著者らに課せられた課題でした。言い換えれば、研究の出発点において既に、測定法としては「多くのユーザーが現有の光学顕微鏡やビッカース硬度計などの装置で破壊じん性の評価が可能な IF 法」が基本的に選択されていました。

質問・コメント (藤井 賢一)

多くの破壊じん性試験法があるなかで、著者らが IF 法に着目し、その改良に取り組んだ理由について説明して下さい。標準サイズの試験片を切り出すことのできない小型や板状のセラミックスにも適用できるから、ということなのでしょうか。

回答 (宮崎 広行)

まずは、セラミックスの各種破壊じん性の試験法と IF 法の違いを記述しました。さらに、IF 法であれば、標準サイズの試験片を切り出すことのできない小型のセラミックスにも適用できるという点に注目し、その改良に取り組んだことがわかるように第 2 章に詳しい説明を加えました。

議論4 測定の「不確かさ」について

コメント (藤井 賢一)

従来、IF 法は測定精度に劣り、他の方法で測定した破壊じん性との相関性が悪いことを理由に、IF 法は不適切な試験方法であるとみなされていました。しかし、著者らはき裂長さの測定を高精度化する手法 (図 7) を開発し、高倍率の顕微鏡を使うことで、より信頼性の高い測定結果が得られるようにしました。高倍率の顕微鏡でサンプルを観測しながら、サンプルを載せたステージを移動させ、その移動量からき裂長さを測定することで、測定の偏りやばらつきを減らすことが可能となり、IF 法の精度向上に繋がったと考えます。そこで、測定の偏りやばらつきに関連して、図 5、図 6、図 12、図 13 に掲載されているエラーバーをどのようにして導いたのかについての説明が欲しいところです。

計測の分野では通常「不確かさ」という概念で標準偏差や系統効果を見積もり、それらの合成から標準不確かさ (包含係数 $k = 1$) や拡張不確かさ (包含係数 $k = 2$ など) として測定の不確かさを評価します。IF 法における破壊じん性値は式 (2) から導かれますが、その不確かさをどのようにして見積もったのか、すなわち、き裂長さ測定における標準偏差や偏り、その他のパラメータの不確かさや系統効果などについて、典型的な場合だけでも良いので、不確かさバジェット表などを活用しながら、定量的に説明して下さい。その上で、他の測定法による測定の不確かさも評価しながら、測定法の優劣を比較し、測定結果の違いが統計的に有意なのかどうかを議論してほしいかがでしょうか。

回答 (宮崎 広行)

図 5、図 6、図 12、図 13 のエラーバーが、標準偏差であることと、N 数を追記しました。また、図 9、図 10、図 11 においてもエラーバー

が標準偏差であることと、N 数を追記しました。従来の IF 法の破壊じん性測定の不確かさのバジェット表を表 4 に作成しました。表 4 によると、き裂長さの測定の標準不確かさは 0.965 % となり、破壊じん性測定の標準不確かさに及ぼす寄与は 1.448 % ありました。これに対し、圧こ寸法測定の不確かさによる寄与は 0.466 %、試験力測定の不確かさの寄与は、0.065 %、ヤング率測定の不確かさの寄与は 0.086 % であり、破壊じん性測定の合成標準不確かさの大半をき裂長さの測定の不確かさが占めていることがわかりました。この結果を 5.1 節の半ばで説明しました。また、新規提案法によるき裂長さ測定の不確かさは、0.558 % となり、従来手法の約 60 % まで減少させることができたことや、その結果として、破壊じん性測定の標準不確かさが、0.94 % となり、これは SEPB 法による破壊じん性の標準不確かさ 1.06 % とほとんど同じであり、SEPB 法と遜色ない精度で測定できていることがわかりました。このことを 5.2 節の第 3 段落で言及しました。

議論5 圧子圧入時の破壊抵抗の算出式

質問 (清水 敏美)

圧子圧入時の破壊抵抗の算出式 (2) ですが、IF 法自体が理論に基づかない半経験的な手法であるのに対し、どのように導出されたのですか。

回答 (宮崎 広行)

IF 法が開発されることになったきっかけは、き裂長さが経験的に破壊じん性に関係することを Palmqvist が見出したことです。その後、弾性 / 塑性応力場を考慮した次元解析などにより、き裂長さ、圧こ寸法、押し込み荷重と破壊じん性の関係を求める式が幾つか提案されました。ここでは、最も代表的な式である Lawn-Evans-Marshall (LEM) の式を例にとり説明します。このモデルの特徴は、圧子下に形成された圧縮変形域が圧子の除去後に膨張しようとする力が、変形域周辺に引張応力場を形成し、この応力場がき裂形成の駆動力となると考えます。

圧痕周りの塑性変形域の半径を b とすると、この領域に導入される塑性ひずみは、 δV を圧痕の体積、 V を塑性変形域の体積、圧こ寸法を $2a$ とすると、

$$\delta V/V \approx (a/b)^3 \cot \phi \quad (1)$$

ここで、 ϕ は圧子の頂角 (136°) の半分です。この塑性ひずみは静水圧縮応力 p_b

$$p_b \approx k(\delta V/V) \approx E(a/b)^3 \cot \phi \quad (2)$$

を塑性変形域内に発生させると考えます。ここで、 k は体積弾性率、 E はヤング率で、ここで体積弾性率からヤング率に直すときのポアソン比の効果は、あまり影響がないと考えて無視します。十分に発達したき裂 ($c \gg b$ 、 c は半円状き裂の半径) では、この圧縮応力は塑性域外側に発生したき裂面に対して引張の集中力 P_b

$$P_b = (\pi/2)b^2 p_b \quad (3)$$

を作用させると考えられます。

半径 c の半円状き裂に集中力が作用した時の応力拡大係数 K_R は次式で与えられることが理論的に知られています。

$$K_R \approx f(\theta) P_b / c^{1.5} \quad (4)$$

$f(\theta)$ は角度の関数で、自由表面の影響を考慮するために導入されたものです。一般的に $f(\theta)$ は 1 近くの値でとても緩慢に変化します。

(4) 式に (2) 式、(3) 式を代入すると、

$$K_R \approx f(\theta) (\pi/2) E (a/b) a^2 \cot \phi (1/c^{1.5}) \quad (5)$$

一方、硬さ H は押し込み荷重 P と

$$H = P / (2a^2)$$

という関係を持つので、(このモデルではビッカース硬さ H_V でなく、押し込み荷重を投影面積で割った H を用いているので係数が H_V の時と異なります)

$$K_R \approx P (1/c^{1.5}) f(\theta) (\pi/4) (E/H) (a/b) \cot \phi \quad (6)$$

さらに、Hill の“膨張空孔”問題の解を応用すると塑性域の大きさは次式で (E/H) と近似的に関連付けられます。

$$b/a \approx (E/H)^m (\cot \phi)^{1/3} \quad (7)$$

ここで、 $m \approx 1/2$ です。(7) 式を (6) 式に代入すると、

$$K_R \approx P (1/c^{1.5}) f(\theta) (\pi/4) (E/H)^{1/2} (\cot \phi)^{2/3} \quad (8)$$

さらに定数項を $a = f(\theta) (\pi/4) (\cot \phi)^{2/3}$ としてまとめると、次式が得られます。

$$K_R = a (E/H)^{1/2} (P/c^{1.5}) \quad (9)$$

平衡状態においては、応力拡大係数 K_R は、破壊じん性 K_{LIFR} と等しいと考えられるので、本文中の (2) 式と同じ以下の式が得られます。

$$K_{LIFR} = a (E/H)^{1/2} (P/c^{1.5}) \quad (10)$$

この LEM モデルでは、定数 a の理論的な導出はしておらず、巨視的なき裂を比較的大きな試験片に導入する破壊じん性試験法で得られた破壊じん性 K_{IC} と $P/c^{1.5}$ を比べることにより、経験的に定数 a は、0.0175 が適当であるとしています。これまで多くの研究者が異なるモデルを立てて破壊じん性の算出式を提案していますが、殆どにおいてこのように定数 a が最終的には経験的に求められていることから、半経験的な式となっています。

議論6 メディアン・ラディアルき裂について

コメント (藤井 賢一)

本文と重複してもよいので、読者に伝えるために、メディアン・ラディアルき裂とはどのようなものであるかを、わかりやすく回答にも記述して下さい。

回答 (宮崎 広行)

ビッカース圧子の押し込みによるき裂生成の様子を図 2 に示しました。まず、ビッカース圧子が圧入されると、圧痕とその直下に変形領域が形成され、押し込み荷重がある臨界値に達すると、圧子の直下にはほぼ円形のメディアンき裂が生成します。このき裂は材料内部に発生するものであり試験片の表面には達していません。このき裂は互いに直交する 2 組のき裂からなります。ビッカース圧子を引き上げながら除荷していくと、このメディアンき裂は表面に向かって進展し、表面き裂まで成長し、いわゆるメディアン・ラディアルき裂を形成します。この説明を第 3 章の第 1 段落に記載しました。

議論7 開口数や同軸落射照明の推奨数値

質問 (清水 敏美)

光学顕微鏡において 10 倍の対物レンズより開口数の大きい 40 ~ 50 倍の対物レンズを用いて課題が解決したとあります。しかし、同じ倍率であっても開口数が異なる対物レンズがあります。同軸落射照明や開口数は定量的に推奨数値を示す必要はないのでしょうか。これらの定量的な数値条件も測定誤差に影響を与えると考えますが。

回答 (宮崎 広行)

測定顕微鏡やビッカース硬度計の顕微鏡などの 4 種類の対物レンズを調べると、各装置に取り付けられる対物レンズは、各倍率で 1 種類しかなく、一つの倍率に対し異なる開口数の対物レンズを選択することはできないようでした。また、これらの対物レンズの開口数 NA は、例えば、10 倍の対物レンズでは、 $NA=0.2 \sim 0.3$ の間にあり、40 ~ 50 倍の対物レンズでは $NA=0.55 \sim 0.75$ となっており、同じ倍率のレンズであれば、装置によらず NA は似たような値となり、また、倍率の増加とともに増大していました。おそらく、明視野像観察で、ある程度の作動距離が必要とされる測定顕微鏡や硬さ計の場合には、倍率と開口数の間に最適な関係があるのではないかと思います。そこで、市販の装置を用いている限り、対物レンズの倍率が 40 ~ 50 倍であれば、 NA は 0.5 以上となり、十分な分解能が得られると予想できます。このようにレンズの開口数の推奨数値を示さずとも倍率を指定することで、必要とされる開口数が得られると思われるので、開口数の推奨値を示さず倍率のみの指定としました。同軸落射照明に関して、制御できるのは光量だと思われませんが、最適な光量は、測定対象物ごとに観察者にとって最も見やすくなるように調整するものであり、一概に一定の数値を決めるのは難しいと思われます。また、測定顕微鏡や硬さ試験機の顕微鏡では照射している光量が数値で表示されることはほとんどないので、推奨数値を示したと

しても実際に設定することは難しいと思います。

議論8 Niiharaの式の採用について

質問 (清水 敏美)

「6.2 算出式の選定」において、JIS R 1607 に採用された Miyoshi の式を採用せずに、Niihara の式を採用したのは国際的な知名度や認知度のためとあります。和文か欧文かによって科学的根拠の信頼性を判断することに少し疑問が残りますが、一方、苦渋の選択であったことも理解できます。ISO の新業務項目として審議すべきかを問う投票においても複数の式を併記すべきとの意見が挙げたとあります。6.2 で検討した内容を説明して了承を得たとありますが、何が一番大きな決め手となったのでしょうか。議論の経緯に関して、詳しい説明をお願いします。

回答 (宮崎 広行)

海外エキスパートへの回答において、①算出式を1つにしなれば、国際規格化する意味がないこと、②海外エキスパートが考えている Anstis や Shety の式で算出した破壊じん性は、SEPB 法による破壊じん性との相関性が悪いが、それに比べて Niihara の式による破壊じん性は、SEPB 法との相関性が優れること、③ Niihara の式が転がり軸受球用窒化ケイ素材に関する ISO 26602 において既に採用され Niihara の式が算出式として国際的に認知されつつあること、の3点を説明しました。コメントをした海外のエキスパートに直接確認したわけではないので、どれが一番の決め手となったかは推測の域を出ませんが、おそらく②の説明において、実測データをもとに、Niihara の式を用いた時に SEPB 法との相関性が良好になることを明らかにしたことが、決め手になったものと思います。

明治・大正時代のイノベーション：その独創技術と産業応用

— 旧工業技術院の研究（無線通信とアンモニア合成）を例として —

小林直人^{1*}、亀山哲也²

この論説では、我が国の明治・大正時代の産業勃興期における旧通商産業省工業技術院研究所の前身の研究所群の役割を概観し、組織的な技術導入と実証、独創技術の研究開発、産業育成・振興の面から、その成果を紹介する。その例として、(1) 電気試験所における無線電信、および(2) 東京工業試験所におけるアンモニア合成、の研究開発を取り上げた。

イギリスで18世紀末に起きた産業革命は紡績機、硫酸等の製造技術の革新にあった。19世紀中頃から20世紀初めにはドイツ、アメリカを中心に電信電話機、アンモニア合成等で技術革新が達成された。それに対して我が国の産業革命は19世紀末（明治中期）から20世紀初頭（大正初期）にかけて起こったとされるが、その間の技術導入に加えて電気試験所におけるTYK型無線電話の発明や、東京工業試験所における「東工試法」というアンモニア合成法における新触媒開発等の独創的技術が創出されている。

一方、産業振興の面では、初期無線研究において技術が海軍に移されて研究開発が行われ、その後それらの技術が企業に引き継がれ我が国初の無線通信機製造会社が成立したこと、「東工試法」によるアンモニア合成技術が企業における国産初の硫酸製造の成功に大きく貢献したことは大きな特徴である。

このように我が国においては極めて早い時期に、技術導入に加えて独自技術開発やその産業応用が行われていたことは注目値する。またこの論説では、これらの例をベースに、それ以降引続く我が国の国立試験研究所の産業上の役割についても言及する。

キーワード：無線通信、アンモニア合成、電気試験所、東京工業試験所、イノベーション

Innovation in Meiji and Taisho eras: Original Works and Industrial Application

—R&D of Wireless Communication and Ammonia Synthesis in old AIST—

KOBAYASHI Naoto^{1*} and KAMEYAMA Tetsuya²

This paper shows an overview of the role of the national research institutes, which later belonged to the old AIST (Agency of Industrial Science and Technology), MITI (Ministry of International Trade and Industry) during the rising period of industry in Japan in Meiji and Taisho eras, and demonstrates the results of systematic introduction and realization of technology, research and development (R&D) of original technology, and its industrial application.

We introduce (1) wireless communication in Electrotechnical Laboratory and (2) new catalyst for the ammonia synthesis in Governmental Chemical Industrial Research Institute, Tokyo.

The industrial revolution that took place in the late 18th century in UK was mainly due to innovations in manufacturing technology such as spinning machines and sulfuric acid. In the middle of the 19th and early 20th centuries, technological innovation was achieved in telegraph and telephones and in ammonia synthesis, mainly in Germany and the United States. In contrast, in the period of industrial revolution in Japan, which has occurred from the end of the 19th century (middle Meiji era) to the beginning of 20th century (early Taisho era), Japan has already created its own original technologies. The inventions of the TYK-type wireless telephone in Electrotechnical Laboratory and of a new catalyst in the ammonia synthesis by the “Tokoshi-method” are good examples.

For the industrial application and realization, the results of R&D of the initial wireless research were transferred to the Navy and then R&D was carried out by a private company. The ammonia synthesis technology by the “Tokoshi-method” has led the first domestically produced ammonium sulfate in a private company.

It is noteworthy that in Japan, in addition to the introduction of technology, effective original technology development and its industrial application were carried out in very early period. The role of national institute for industrial application is also discussed in this paper.

Keywords : wireless communication, ammonia synthesis, Electrotechnical Laboratory, Governmental Chemical Industrial Research Institute, Tokyo, innovation

1 はじめに

1882年（明治15年）創立の地質調査所に始まる旧通商産業省工業技術院研究所群は、2001年（平成13年）

に独立行政法人・産業技術総合研究所（現在は国立研究開発法人）に統合されたが、国立試験研究所として我が国全体や地域の産業振興のために大きな役割を果たしてきた

1 早稲田大学 〒162-0041 東京都新宿区早稲田鶴巻町 513、2 産業技術総合研究所 〒463-0008 名古屋市守山区小幡北 2310
1. Waseda University 513 Tsurumaki-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0041, Japan *E-mail: naoto.kobayashi@waseda.jp, 2. AIST 2310 Obatakit, Moriyama-ku, Nagoya 463-0008, Japan

Original manuscript received February 28, 2020, Revisions received May 26, 2020, Accepted July 7, 2020

た。特に明治中期から大正期にかけての日本の産業勃興期には、その極めて早い時期に公的な機関として新産業の創出・育成や牽引の役割を果たしてきたと言えよう。

この論説ではそれらの研究所群全体の歩みを概観した後、著者らが在籍した電子技術総合研究所の前身である電気試験所と、物質工学工業技術研究所の前身の一つの東京工業試験所の成果について、明治～大正期の特徴的な研究成果とその意義を述べる。特に、組織的な技術導入と実証、独創技術の研究開発、産業育成・振興の面から、その成果を検証する。その一例として、(1) 電気試験所における無線電信の研究開発、および(2) 東京工業試験所におけるアンモニア合成の研究開発、を取り上げて概説する。

2 旧工業技術院研究所群の歩み

図1に旧通商産業省工業技術院に連なる各研究所の創立以来の変遷を示す^[1]。これらのうち、地質調査所(1882年(明治15年)設立)、電気試験所(1891年(明治24年)設立)、工業試験所(1900年(明治33年)設立、後に1918年(大正7年)に東京工業試験所と改称)、中央度量衡器検定所(1903年(明治36年)設立)は、それぞれ明治時代に設立されている。またこれらの研究所は、電気試験所が逓信省に設置された以外は農商務省に設置された。これらは当時我が国の近代化にとって必要な産業に関連した試験研究所群である。また、この時代は1880年代後半から1900年代初期にわたる我が国における産業革命の時期と軌を一にしていると言える^{[2][3]}。

大正期には絹業試験所(1918年(大正7年)設立、後に繊維高分子材料研究所)、臨時窒素研究所(1918年(大

正7年)設立、1928年(昭和3年)に東京工業試験所に吸収)、燃料研究所(1920年(大正9年)設立、後に公害資源研究所)が設立されるとともに、大阪市に大阪工業試験所が1918年(大正7年)に設立され、京都市陶磁器試験場が農商務省に移管されて陶磁器試験所が1919年(大正8年)に設立(後に名古屋工業技術試験所に統合)されたように、東京以外にも試験所が設けられるようになった。

さらに昭和期に入ると、仙台市に工芸指導所(1928年(昭和3年)設立、後の製品科学研究所)が、東京に機械試験所(1937年(昭和12年))が設立された。また1940年(昭和15年)に大蔵省に酒精研究所が設立され、その後商工省に移管された後、発酵研究所として独立した。

これらの研究所群は第2次世界大戦後には、商工省工業技術庁を経て通商産業省工業技術院に統合された。その後、さらに地域工業試験所(名古屋工業技術試験所(1952年(昭和27年)設立)、北海道工業開発試験所(1960年(昭和35年)設立)、九州工業技術試験所(1964年(昭和39年)設立)、四国工業技術試験所(1967年(昭和42年)設立)、中国工業技術試験所(1971年(昭和46年)設立)が設立された。これら15研究機関は2001年(平成13年)に、独立行政法人・産業技術総合研究所に統合された。

3 電気試験所の明治・大正期の概要と注目すべき成果

3.1 概要^{[4]-[9]}

1891年(明治24年)に逓信省電務局内に電気試験所が設立されたが^{注1)}、その所掌業務は、(1) 電気試験に関すること、(2) 電気事業監督に関すること、(3) 研究および試験に要する機械器具の修繕および新調に関すること、

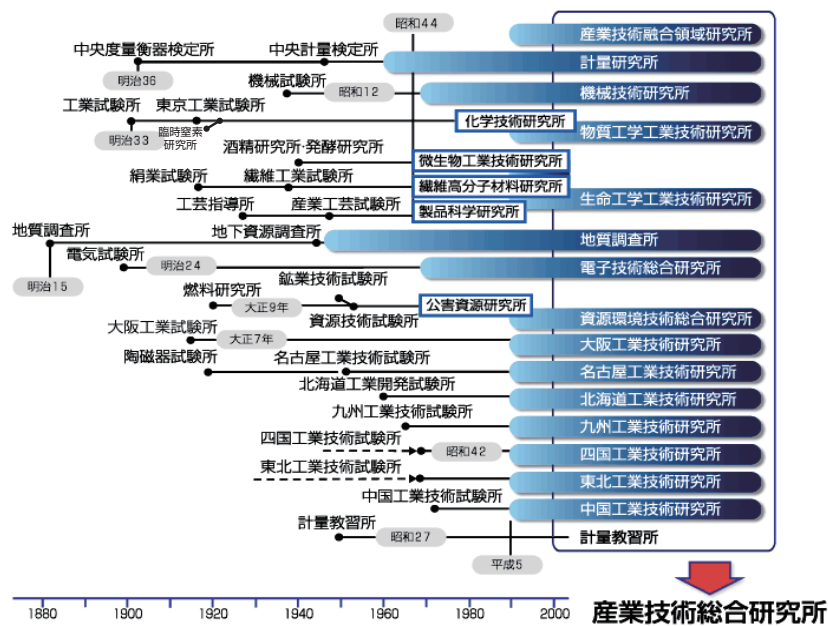


図1 旧通商産業省工業技術院に連なる各研究所の変遷^[1]

(4) 電報送受の正否および電報料収納の可否調査に関すること、であった^[4]。その後、電気・電力の学術的研究の意義が明確化され、行政監督、行政事務等は、これを所掌する別の行政機関に順次引き継がれ、電気試験所は電気に関する純粹の試験研究機関として、高度化する電気技術関連の研究に力を尽くすこととなった。

さらにその後、我が国の電気通信並びに電力事業は大きな発展を遂げ^{[2]-[4]}、我が国の産業革命の進行とともに、電気試験所はその主力を電信、電気、電力に関する研究業務に移し、幅広い産業振興に資する研究開発を行うこととなった。

図2に電気試験所のその後の組織の変遷を示すが、第2次世界大戦後には二つに分割され、電気・電子技術を研究する電気試験所は商工省工業技術庁から通商産業省工業技術院に管轄が移り、1970年（昭和45年）には電子技術総合研究所と名称を変えている。一方、電気通信の分野は逓信省および電気通信省管轄下から、その後日本電信電話公社（現NTT）の電気通信研究所となった。またその一部は郵政省電波研究所となり現在の国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）となっている。このように電気試験所は明治から第2次世界大戦終了後まで我が国の電気・電子・通信に関する研究開発の中心的役割を果たしていたことが分かる^[7]。

3.2 無線通信研究^{[4]-[15]}

3.2.1 我が国で初めての無線通信

電気試験所が1891年（明治24年）8月16日に設立された時、初代所長は少壮33歳の浅野應輔（1859年～1940年）であった。浅野は1881年に工部大学校電気科を卒業後、同年工部大学校教官（教授補）となり、その後東京電信学校教授兼幹事を経て電気試験所に奉職した（在任期間1891年～1914年）^[8]。

当時、我が国における電気事業として1869年（明治2年）

に東京～横浜間に電信が開通し、初の電報取り扱いは開始（日本の電信創業）されており、1890年（明治23年）には東京・横浜で電話開通（日本の電話創業）がされている。このように電気試験所が創設された時は、我が国において漸く電信・電話が実用期に入り逐次拡張されつつあった時であった^[3]。

浅野所長は在任中試験所内での研究を重視し、所内に電気試験所研究会を始める等所員に研究を広く奨励するとともに、国産技術の進歩確立を目指した^[8]。当時欧米諸国においては電信電話の進歩が著しく、彼は1894年から翌年にかけて電気事業調査のため欧米各国を視察したが、その際に我が国で最初に大西洋横断海底電信線敷設事業に参加した。彼の業績の中で際立つ一つが、この時の経験を活かして九州大隅～台湾間（約1400km）の海底電信線の工事設計・敷設を行い、1897年に竣工に成功したことである。またより大きな業績は同年、以下に述べる日本最初の無線電信実験の成功である。それに続いて1903年水銀検波器の発明、電気単位の制定、等多くの業績を残している。このように浅野は我が国が電気・電信の技術開発の初期にあつて優れた研究者でありまた卓越した指導者であった^[8]。

1895年にイタリアのグリエルモ・マルコーニ（1874年～1937年）は世界で初めて無線電信に成功したが、その報告を記した外国雑誌（ロンドン・エレクトリシアン）が1897年に電気試験所に届くと、浅野所長はその意義を重視し同年7月に早速電信係主任の松代松之助（1866年～1948年）に無線電信の調査および研究を命じた。これは当時欧米の諸大国が、いずれもその試験成績に疑問を抱いていた中での慧眼であった。

松代は実験用部品をすべて自作する等難問を独自に克服しながら研究を進めた。最初に取り上げた問題はコヒーラーの研究であったが、これは数ヶ月で解決することが出

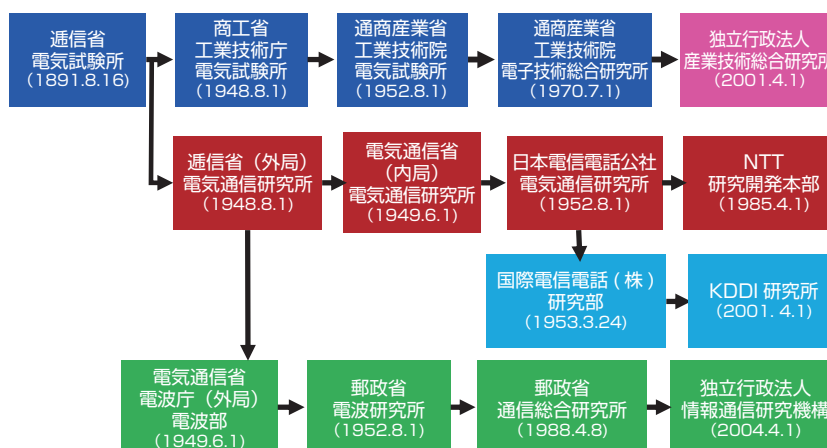


図2 電気試験所の組織の変遷^[7]

来た。コヒーラーとは金属粉末に高周波が到来すると電気抵抗が減って直流電流が流れる現象を利用した電磁波検出装置である。そしてマルコーニの無線電信成功のわずか2年後の1897年12月に、東京の月島海岸と金杉沖の船舶間約1.8 kmの距離の無線通信を成功させた^{[4][10]}（図5参照）。翌年5月には電気試験所構内に空中線を建設し、これによって十分通信ができるまでに進歩した。また同年月島と第五台場との間3.4 kmの実験に成功している^{[8][10]}。



図3 電気試験所初代所長 浅野應輔^[8]



図4 松代松之助^[9]

この技術は1898年に海軍の知る事となり、英国のマルコーニ会社への高額なロイヤリティー支払いを回避するための国産技術の確立を目的として、松代松之助ら数名が海軍における無線研究に関与することとなった。この受け継がれた技術により、34式無線電信機（1901年（明治34年）（明治34年に生まれたためこの名がある）、36式無線電信機（1903年（明治36年））等の实用無線機が生み出された。1903年には長崎～台湾間の長距離無線通信試験も実施された。

1904年には我が国の全軍艦に無線装置が装備され、翌1905年5月27日の日本海海戦の際、哨艦信濃丸が「敵艦見ゆ」を発信したことは有名である（図6参照）。なおこの海軍36式無線機は1904年に安中電機製作所（現アンリツ（株））が製作したものである^[12]。

なお、松代らが1899年に海軍の囑託となって電気試験所を去ってからは、無線通信研究は佐伯美津留に引き継がれ、送受信機の改良と通信距離の拡大が図られた^[11]。1908年には我が国最初の商用無線基地である銚子無線電信局が開局している。また佐伯は1907年に磁石鉄粉検波器を発明し、1913年には瞬滅火花式と言う通信省式無線電信方式を発明し、これは1913年に安中電機製作所によって製作された^[12]。

これらの浅野・松代・佐伯らによる無線電信実験の特徴は、(1)当初から全く自らの手で短期間に装置をくみ上げ基礎的実験を実施したこと、(2)僅かな期間で軍用に实用

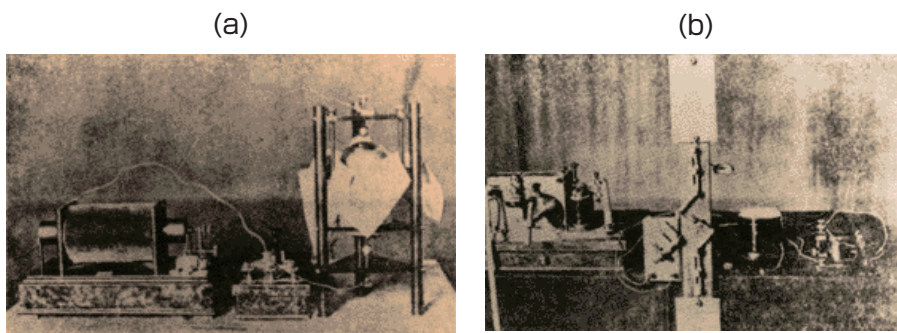


図5 松代松之助が使用した無線電信装置（(a)が送信機、(b)が受信機^[11]）

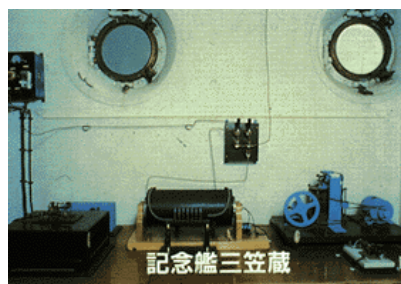


図6 我が国の初の無線電信機。電気試験所と当時の海軍が協力して開発し日本海海戦でも使用された^[9]。

化したこと、(3) その後商用化へ自主技術を継承・発展したこと、(4) 国際的発信力の確保、とされている^[10]。特に独自に短期間で技術開発を達成したことは、その後の自主技術開発の端緒を作ったもので、浅野所長の狙いにも大いに合致するものであった^[8]。松代は後年、「明治 22 年に世界に先駆けて後の搬送式通信法に相当する多重通信の提唱を電気学会誌で提唱したこと」や、「明治 25 年頃まではいわゆる模倣の時代であったが、それ以降は多少なりとも「オリジナリティー」を出すようになり、電気試験所がその主役を勤めた」と述べ、当時の研究上の独創性発揮の経緯を述べている^[4]。

3.2.2 世界初の無線電話

20 世紀初頭の無線通信においては減衰火花方式が通信方式の主流となっていたため、高周波電波の振幅に持続性を持たせることができず、無線電話は不可能とされていた。1906 年（明治 39 年）にベルリンの第 1 回国際無線電信会議に出席した浅野所長は、無線電話の研究の必要性を感じて電気試験所内で持続電波発生法の研究を命じた。

そこで鳥潟右一（1883 年～1923 年、第 3 代電気試験所所長（在任 1920 年～1923 年））は、横山英太郎、北村政治郎とともに火花発振法による「TYK 式無線電話器」（図 7、図 8）を発明した（1912 年）^{[10][13]}。

ここで使用された火花発振法は、鳥潟らが発明した独創的なもので、直流電圧で蓄電池を充電し 1 秒間に 2～5 万回の割合で放電させ持続波を発生する方式であった。図 7 には、1912 年 6 月登録の特許第 22347 号「振動放電間隙」の TYK 型無線の回路図を示す。例示として陽極に銅、陰極に磁鉄鉍を使用した振動放電間隙 Q で火花が発生され、M の自動調整起動装置で間隙距離を調整する方式となっている。鳥潟はそれ以前に「斑銅鉍と紅垂鉛鉍」を摘出し、それを使用した「鉍石検波器」および「タンタラム検波器」を発明している。TYK 式無線電話器ではこの両者の検波器が受信器として使用され実用に供された。

最初の通話試験は 1912 年（明治 45 年）5 月 23 日、木

挽町の電気試験所と芝の通信省官吏練習所との約 1.5 km の距離で行われた。また同年、東京湾内の海底敷設船沖縄丸～電気試験所、東京～横浜通信省経理局倉庫、横浜倉庫～第 3 飛鴻丸の間でも通信実験が行われた。鳥潟は 1912 年の TYK 式無線電話器の発明後、同年 6 月 3 日に交詢社で公開実験を行った際次のように述べている。「先づ持続電波の研究に歩を進めたるも未だ理想通りの電波を起すに至らざりしが、今より三四ヶ月前に至り或元素の或は或金属を電極として接近せしめて火花を起さしむるときは一定したる持続電波が起こることを発見し実験に実験を重ねたる結果漸く成功。僅かに十分の一馬力の電力にて二十海里余の距離に於て完全に通話し得る迄の成功に至り去月十五日特許の査定を得たり。（中略）余は一昨年の海外留学に於て又専門誌上に於て得たる見聞に依り無線電話が未だ世界孰れの国においても実用せられずと断言するに躊躇せず。（中略）此発明に依り将来無線電話が活用せらるるようになれば研究の局に当たつ吾々一同は無上の幸福を感じる次第であります。」^[14]

1913 年には、この電話機は神戸・大阪・門司の各港で公開中の船舶と通話試験をして、50 海里以上の通話に成功している。これは世界で無線電話を実用化した最初のものであった。この発明および実証は世界各国からも「異常な関心」を持って注目され、1914 年には英国のマルコーニ社で公開実験が行われた。それは、当時の無線技術のリーダーであったマルコーニ社においても実用に値する無線電話装置が実現されていなかったことを示している^[10]。

さらにこの技術は英国、米国、ドイツ、フランス等の外国特許を取得しただけでなく、鳥潟らは欧米各地で立会実験を行い、我が国技術の海外紹介に貢献するとともに世界各国から大きな注目を集めることとなった^[10]。さらに 1916 年（大正 5 年）には、三重県の鳥羽～神島～答志島間で

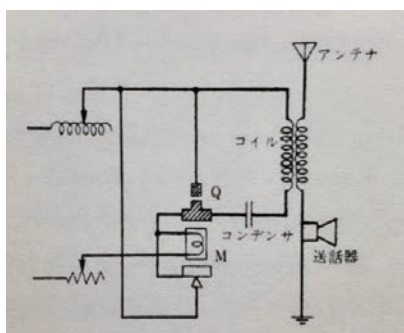


図 7 特許第 22347 号「振動放電間隙」の TYK 型無線の回路図（1912（明治 45）年 6 月登録）^[10]



図 8 TYK 型無線電話（郵政博物館）^[15]

我が国最初の無線電話が商用化されるが、これも安中電機製作所の製作によるTYK式無線電話器によるものであった^[12]。

なお、その後鳥潟らは電話線路に高周波を通ずる多重無線電話（無線式有線電話）の開発（1917年）、無線電話同時送受方式の世界初めての成功（1917年）、電力線搬送の実施（1918年）等、我が国の無線通信分野における多彩な成果をあげている。

また、その後真空管が有線電話において利用されるようになったが、鳥潟らはTYK放電間隙を適当な真空度を持つ希薄ガス中で動作させると動作が安定な整一振動電流が発生することを発見した。一方で、電気試験所では独自に真空管の研究開発を進め、その後1917年には真空管式同時送受無線電話の開発に成功している。

電気試験所時代、鳥潟の部下であった丸毛登は、鳥潟の業績を7つに要約している。すなわち（1）鉱石検波器の発明、（2）TYK無線電話、（3）有線無線電話接続、（4）搬送電話の発明、（5）電力線搬送電話の実用化、（6）真空管の研究、（7）放送無線電話への寄与、である^{[10][13]}。このように鳥潟はTYK無線電話の発明だけでなく、多彩な研究成果を挙げていることがわかる。

ただし鳥潟らの発明によるTYK無線電話は長期の隆盛になりえず、その後は真空管式無線電話に転換していくことになった。TYK無線電話の成功のために電気試験所における真空管研究への対応の遅れがあったとも考えられ、技術の流れを見る時機の困難さを物語っているとも言えよう^[10]。

以上、電気試験所における無線通信、無線電話の研究を紹介したが、この成果の背後には優れた時代感覚を持った浅野應輔と言うリーダーと、松代松之助、佐伯美津留、鳥潟右一ら優秀な研究者がいたことが、短期間での極めて高い研究成果に繋がっていると見えよう。松代の場合は、



図9 「無線と実験」第1巻第3号の表紙に使われた鳥潟右一の肖像^[13]。

外国での研究成果の検証その実用化が大きな業績であるが、鳥潟の場合は当初から独創的な研究成果を挙げている。当時の電気試験所の研究環境は必ずしも恵まれたものとは言えなかったと思われるが、その創設初期にこれらの優れた成果が上がったことは注目に値する。

4 東京工業試験所の明治・大正期の概要と注目すべき成果

4.1 概要^{[16]-[18]}

東京工業試験所（東工試）の前身である工業試験所は、1900年（明治33年）に我が国の化学工業の進歩発達を図ることを目的として設立された。当初は一般化学分析試験・鑑定（1部）、化学工業に関する試験・研究（2部）が所掌業務であったが、後に窯業に関する試験・研究（3部）、色染に関する試験・研究（4部）が追加された。20世紀になって電気化学工業が欧米諸国で飛躍的に発展したが、その当時我が国には豊富な電力があったため電気化学工業は我が国に最も適した工業と位置づけられ、東京工業試験所に第5部を増設してこの試験研究を所掌することになった。

その後、食糧増産の観点から窒素利用が産業上の大きな課題となったため次節に述べる臨時窒素研究所でアンモニア合成等の試験研究を進めた。その後、それを受け継ぎ第6部で高圧化学工業の業務を行うこととなった。このように東京工業試験所は当時の国内外における化学工業の激しい動きに対応して業務を拡大してきた。

図10に東京工業試験所の組織の変遷を示すが、戦後1979年（昭和54年）に化学技術研究所となり、1993年（平成5年）には当時の繊維高分子材料研究所、製品科学研究所とともに物質工学工業技術研究所となった。

4.2 臨時窒素研究所によるアンモニア高圧合成技術の開発

化学の分野でも20世紀の初頭から日本は欧米の技術を導入するとともに国産技術を開発し、先進諸国の仲間入りを果たし、欧米を追い抜く技術も数多く開発してきた。日本が現在の技術力を獲得した原点は20世紀の初頭、国立の臨時窒素研究所（後に東京工業試験所に吸収）が日本初の大型プロジェクト方式でアンモニア高圧合成技術を開発し、昭和肥料で工業化されたことにある。以下では臨時窒素研究所が開発したアンモニア高圧合成技術および昭和肥料による工業化を達成した技術革新の特徴を述べる。

4.2.1 臨時窒素研究所の設立^{[16]-[26]}

20世紀の初頭、ヨーロッパでは産業革命後の人口急増にともなう食糧増産のため、空中窒素固定法によるアンモニアの合成および硫酸の製造が最大の関心事であった。ドイツのフリッツ・ハーバー（1868年～1934年）等が、1913年

表1 臨時窒素研究所の大正8年度研究項目並びに担当職員^[24]

研究項目	技師	技手	嘱託
アンモニア合成に関する研究			
ハーバー法の研究	横山武一 黒田修三	徳岡松雄	
触媒剤の研究	柴田勝太郎		片山正夫
爆発に関する研究	阿野建虎		朽木網貞
特殊窒素化合物製造研究	北脇市太郎		
敵國特許発明実施に関する研究		春田能為	
硫酸合成に関する研究			
オストワルド法による硝酸製造の研究	森殿五郎	村山力蔵 長井 済	
原料及び装置材料に関する研究			
水素及び窒素製造方法に関する研究	内田嘉吉		
機械装置に関する研究	後藤 尚		加茂正雄 春山敏郎
合金に関する研究		佐藤貞造	本多光太郎 野附雄次郎
(注)大正9年3月31日現在の担当職員を表わす。			
(出所)「職員業務分担事項表：大正9年臨時窒素研究所経費増加概算書参考書類（大正8年6月調製）」並びに「人事二関スル書類綴」より作成。			

最初に高圧法アンモニア合成技術を開発し、この課題に応じた。アンモニアは肥料のみならず、爆薬、染料、医薬品の原料として極めて重要であった^[18]。

日本においても第1次世界大戦後に予想される国際的な経済競争に打ち勝つためには化学工業を振興させる必要があるとの観点から、国策としてのハーバー法によるアンモニア合成および、オストワルド法による硝酸合成技術の開発を目的として臨時窒素研究所が1918年（大正7年）に設立された^[18]。

最初は学術的小規模実験から始めて日本特有の方法を見出すことを目標に、工業所有権戦時法により専用が許される予定の敵国特許（ハーバー等の特許）の内容に関する研究を実施し、その後中規模実験に移り、アンモニアは月産0.5

t、硝酸は月産2tを製造し、成果の企業化を検討するとした。

4.2.2 研究の展開

1919年（大正8年）から本格的に基礎研究および小規模実験が開始された。ハーバー法の研究は横山武一、触媒の研究は柴田勝太郎が中心であった。高圧装置の研究は陸軍の後藤尚が担当した。高圧用化学機械の製造技術は民間では未発達であり、かつ国防にも関することから、当該プロジェクトでは民間からの参加は無かった。また、研究の推進に関する意見等を聞くため、東北帝大の片山正夫、本多光太郎、東京帝大の加茂正雄等の教授陣を招聘している。我が国初の大型プロジェクトは官学軍体制で実施された（表1参照）。

小規模実験ではハーバーの学術論文や特許を参考にし

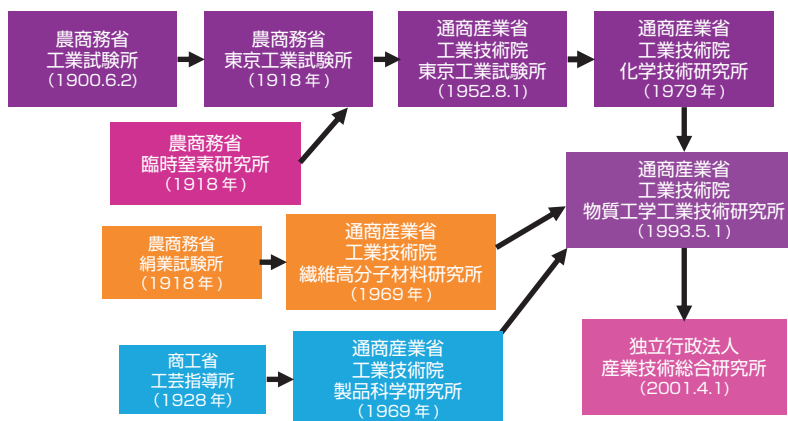


図10 東京工業試験所の組織の変遷

た。触媒は酸化鉄 (Fe_3O_4) に 2～6 % の酸化アルミニウムと 0.2～0.6 % の酸化カリウムを加えた 2 重促進触媒が優れていること、合成管は 200 気圧、500～600℃で水素脆性が発生しない構造 (図 11) になっているとの情報をベースに、実験室レベルの高圧合成管 (図 12) を試作した。上段の触媒充填室 (外径 13.5 cm、高さ 63 cm) と下段の熱交換室 (外径 10.5 cm、高さ 77.1 cm) を一体として連結したもので、いずれも市販の丸棒の鋼材の内部を削りだしたものである。1924 年頃には研究途上の純鉄触媒を用い、200 気圧、580℃で 1 日当たり 2 kg のアンモニアを連続して合成することが可能となった。

中規模実験では工業化用高圧合成装置の整備並びにアンモニア合成用工業触媒の開発が課題であった。当時、水

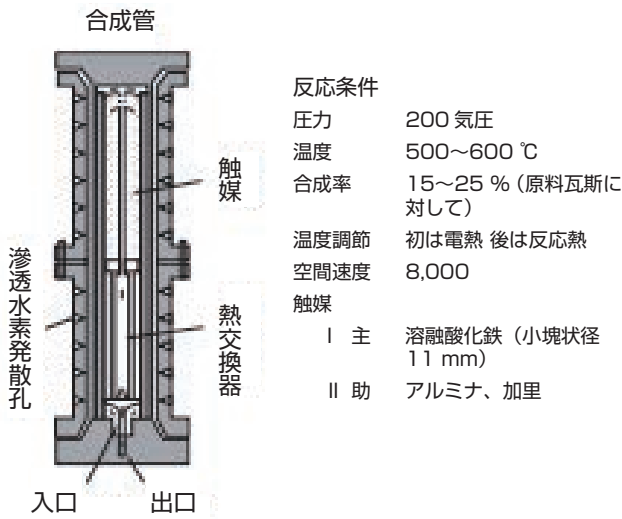


図 11 ハーバー法合成管の構造 (アンモニア 10 t/日)^[24]

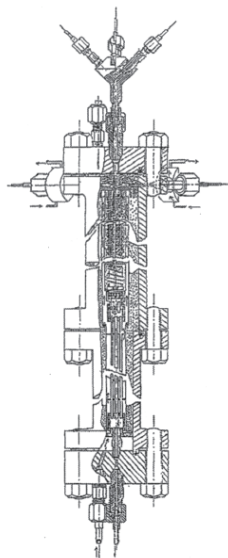


図 12 小規模試験用アンモニア合成管^[24]
(注) 上半：触媒充填室 (高さ 63 cm、外径 13.5 cm) 下半：熱交換室 (高さ 77.1 cm、外径 10.5 cm)

素、窒素等の原料製造装置、ガス圧縮機等を製造する技術は国内では育ってなく、横山等が中心となって外国から装置を導入した。

窒素製造装置は 1922 年 (大正 11 年) にドイツのリンデ社から輸入した。純度 99.5 % の窒素を 1 時間当たり 40 m³ 製造することができる (図 13)。合成アンモニアの価格に占める原料ガスの割合が約 6 割を占め、しかもその大部分を水素ガスが占めることから、水素をいかに廉価に製造するかが重要な課題であった。当時、余剰電力の利用、高純度の水素が得られる等の利点からアメリカのエレクトロラボ社の電解水素製造装置 (図 14) を輸入した。1 槽あたり 0.1 m³/時、100 槽全体では 11 m³/時の水素を製造した。

唯一の国産品は日本製鋼所のアンモニア合成管、および混合ガス貯蔵用の水素貯蔵器であった。合成管は長さ 3 m、2 m、1 m の各 1 本で、外径 38 cm、内径 24 cm の同一径で、材質はニッケル・クロム鋼製、300 気圧、500℃までの高温高圧下で使用することができた (図 15)。

ハーバーが 1924 年 (大正 13 年) に星一 (星薬品の社長) の招待でかつてハーバーの元で研究を行っていた田丸節郎



図 13 リンデ式空気液化分留器^[24]

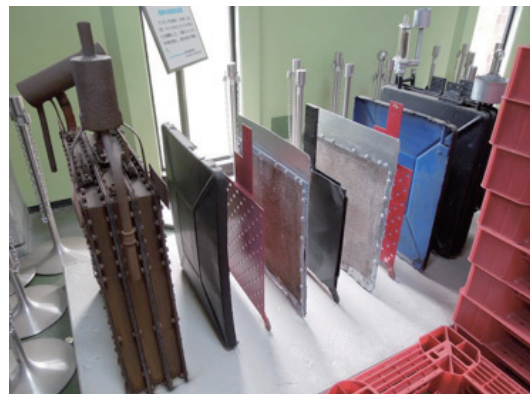


図 14 電解水素発生装置

(1879年～1944年)とともに東京工業試験所を訪れていたことは、研究者にとって大きな励みになったと思われる。中規模試験での最大の課題は安くて活性の高い触媒の開発であった。柴田らはほとんど廃物に等しい製鉄所のスケール(空气中で熱した鉄の表面にできる FeO 、 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 等の酸化物)を原料に、促進剤の種類、量、酸化鉄の酸化度の程度等製造の諸条件を異にする多数の触媒を作り、1925年には安くて強力で耐久性に優れたアンモニア合成用工業触媒の開発に成功した。柴田勝太郎および莊司信守の発明「アンモニア合成用接触剤の製造法、番号:79899」として1929年(昭和4年)に登録されている。この触媒の開発こそが、日本の化学工業史において「東工試法」アンモニア合成技術として高く評価される所以である。実際に使用された触媒は官営八幡製鉄所のスケール(Fe_3O_4)に Al_2O_3 (4～5%)、 K_2O (0～4%)を混ぜて熔融し、細かく砕いてふるいわけたもの(5～8mm)であった(図16)。

この触媒を中規模実験用アンモニア合成管(長さ3m、外径38cm、内径24cm)の触媒充填室に入れ、500℃、



図15 アンモニア合成管



図16 アンモニア合成触媒

200気圧、空間速度30,000/h(触媒1リットル当り1時間に通過した原料ガスの量を標準状態に換算したリットル数)の条件で13%のアンモニアを30kg/h合成することに成功した。1日約700kgのアンモニアを合成し、いわゆる「日産0.5t計画」を見事に達成した。

このような中、1925年に国会で「臨時窒素研究所に対し多額の研究費を支出しているが、肥料の生産には至っていない。外国技術を導入して肥料を生産し始めた国内企業への補助金として使った方がよいのでは」という厳しい意見があったが、政府委員は外国技術より優れた方法を開発しつつあり、その成功も近いということでその場を切り抜けた。

4.3 昭和肥料による東工試法アンモニア合成の企業化

昭和肥料(1928年(昭和3年)設立、1939年に日本電気工業と合併し昭和電工となる)は1929年、臨時窒素研究所(1928年に東京工業試験所に吸収)が開発した方法、つまり同所が東京工業試験所(東工試)に吸収されたことから「東工試法」と言われたアンモニア合成を企業化することを決定した。同年、東京工業試験所はアンモニア合成に関する研究業績並びに6件の特許の使用を無料で昭和肥料に許可した。その上、9月には企業化を円滑に実施するために横山武一と中村健次郎が同社に入社した。

「国産の技術でアンモニアができれば首をやる」という他社の批判の中にあって、昭和肥料は臨時窒素研究所の技術を使って日産120tのアンモニアの製造に着手した。高圧機械装置類のうち、外国製のものにはリンデ式窒素製造装置のみであり、その他の装置はいずれも日本製であった。臨時窒素研究所で使用された中規模実験用の輸入装置を参考にして民間で製造された。水素製造用の電解槽は日立製作所で製造された(図17)。日立の稼ぎ頭の製品であった。高圧ガス循環機は東京石川島造船所および神戸製鋼所から購入した。

臨時窒素研究所が開発したアンモニア合成触媒(合成磁鉄鉱92～95%、アルミナ4～5%、酸化カリウム～4



図17 水電解槽

表2 アンモニア合成方式の分類と国産化アンモニア合成方式の分類と国産化

	方式	圧力	温度	合成管 出口 NH ₃ 濃度 (%)	会社名		工場 所在地	生産 開始年月	硫安 (万t/年)
					設立時	現在			
低圧法	モンスニー・ウーデ法 (ドイツ)	90~ 150	400~ 500	8~12	矢作工業	東亜合成 化学	愛知県 名古屋	1933.12	4
中圧法	ハーバー・ボッシュ法 (ドイツ)	200~ 350	500	10~15	日本タール	三菱化学	福岡県 黒崎	1937.9	8
	NEC 法 (アメリカ)	200~ 350	500	10~15	住友肥料	住友化学	愛媛県 新居浜	1931.4	3
	東工試法 (日本)	200~ 300	500	10~15	昭和肥料	昭和電工	神奈川県 川崎	1931.3	15
	ファウザー法 (イタリア)	200~ 300	500	10~16	大日本人造 肥料	日産化学	富山県 速星	1928.3	3
高圧法	カザレー法 (イタリア)	600~ 800	500	20	日本窒素肥料	旭化成	宮城県 延岡	1923.10	1
	クロード法 (フランス)	900~ 1000	500~ 650	25	クロード窒素	三井化学	山口県 彦島	1924.10	1

%) 1900 kg を高さ 14 m、外径 1 m の合成炉に充填し、温度 500 °C、圧力 300 気圧、空間速度 20,000 ~ 30,000/h の条件で 10 % 濃度のアンモニアを合成し、1931 年には日産 120 t (1 基当り 20 t、6 基) のアンモニア製造に成功した。当時、各社が競って外国技術を導入し、外国技術の博覧会的様相を呈していた状況(表 2) にあって、昭和肥料が東工試法による国産技術でアンモニア合成を実現し、しかもその規模が最大(硫安年産 15 万 t)であったことは、日本の近代化学技術の外国からの自立を示すものとして極めて意義深いものであった。

外国技術の導入が主流であった 20 世紀初頭の日本にあって、臨時窒素研究所が開発した「東工試法」アンモニア合成の企業化は我が国の近代化学技術の外国からの離脱、および国産技術に対する自信を与えた。1940 年(昭和 15 年)には昭和肥料は世界第 1 位の硫安生産量を達成し、国内シェアも 20 % を占めていた。昭和 18 年までに東京工業試験所に納入された特許使用料は 58 万円とかなりの高額に達した。「東工試法」アンモニア合成技術は見事に企業化されたのである。

また、第 2 次世界大戦後の食糧増産に必要な大量の硫安肥料を緊急に生産するため、商工省の指導により、東京工業試験所の内田熙らが新たに開発した鉄-カーボニルを主原料とする高活性アンモニア合成触媒を昭和電工および東亜合成化学が使用することでその目的を達成した(図 18)。なお、図中の日新化学は現住友化学、三菱化成は現三菱化学、東洋高圧は現三井化学、また I.G. はドイツの BASF 等の連合企業体である。

臨時窒素研究所における主要な研究テーマであった硝酸合成技術については白金触媒を用いたアンモニアの酸化研究を行い、平均酸化率 93 % を達成し、日本窒素肥料を初め、陸軍省、昭和電工で工業化された。また、アンモニア

合成用水素製造技術に関連したメタノール合成技術の開発は柴田勝太郎が行い、Zn-Cr 触媒を用い、50 ~ 100 気圧でのメタノール合成に 1920 年に成功した。三井鉱山等が実施権を得て、合成工業でメタノールの生産を開始し、海外からの輸入を駆逐した。その後、東洋高圧が本格生産を行い、世界のトップ技術として海外にも輸出された。

臨時窒素研究所で活躍した研究者たちはその後、企業のトップ、大学の教授および学長、研究所のトップとして転出し、技術革新の基礎から应用到にわたり推進した(表 3)。

臨時窒素研究所・東京工業試験所は 20 世紀の初期以降、世界的にも優れた工業用触媒および高圧合成技術の開発を通じて産業化を推進することで日本の近代化学工業創出を主導してきたと言える。

5 考察

旧工業技術院に連なる試験研究所は、その設立時からその当時我が国が重要視する産業の創出・振興に資する検査検定、試験、行政監督・事務等を主たる業務としてい

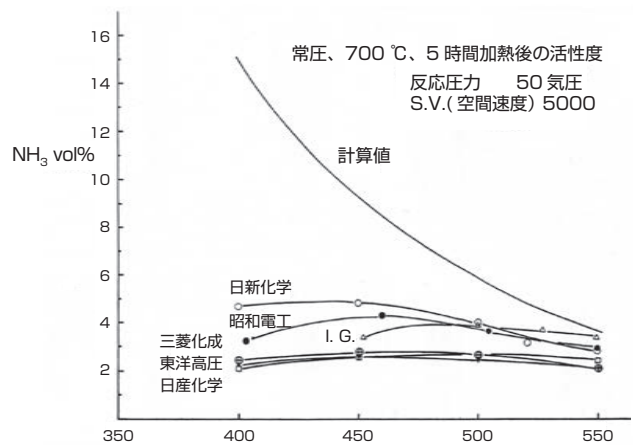


図 18 各社の触媒活性度^[21]

表3 臨時窒素研究所時代の主要職員の転出先¹²⁴⁾

役職名	氏名	廃所後
所長	小寺 房治郎	第三代東京工業試験所長
第一部長	○森 殿五郎	死亡
第二部長	○内田 嘉吉	東京瓦斯
第一・二部長	北脇 市太郎	第四代東京工業試験所長
主要研究題目あるいは担当		
アンモニア合成メタノール合成の触媒研究	柴田 勝太郎	合成工業常務・東庄社長
〃	荘司 信守	三菱化成常務
アンモニア合成の試験研究	横山 武一	昭和電工常務
〃	中村 健次郎	〃
アンモニア酸化による硝酸（白金触媒）	○森 殿五郎	前掲
〃	○村山 力蔵	旭化成取締役
〃（鉄・蒼鉛）	内田 俊一	東工大学長・相模中研所長
〃（コバルト）	佐々木 一雄	山形大教授
尿素の研究	徳岡 松雄	台北大・名古屋大教授
〃	○渡部 尚一	朝日石綿取締役
尿素ベンゾール合成	折戸 勇	信越化学取締役
アーク法硝酸	北脇 市太郎	前掲
〃	岡崎 直喜	満州軽金属理事
〃	山村 義次	日本カーバイド
水素製造	金城 紀典	満州軽金属
窒化物（セルベック法）	○黒田 修三	満州マグネシウム
〃	○香田 能為	探偵作家（甲賀三郎）
活性化窒素	堀 義路	北大教授
一酸化炭素転化触媒	木下 龍夫	探偵作家（大下宇陀児）
〃	吉村 倫之助	満鉄中研次長
石膏法硫酸	堀 省一朗	満州化学・東北大教授
硫酸結晶	高原 守喜	味の素重役
金属材料	山内 淑人	藤永田造船重役・京大教授
高圧機械	○武田 晴爾	内務省災害予防研所長
新ルブラン法	篠崎 平馬	山形大学長
メタノール合成	島 五郎	第七代東京工業試験所長
〃	鈴木 為吉	陸軍技師
〃	山本 明光	東洋高圧
硫酸硝酸の製法	高木 外次	保土ヶ谷書達重役・山形大教授

(注)○印の人は廃所前に転出、その他の人は東京工業試験所第六部に勤め、その後転出。
 (出所) 安達龍作「尿素肥料をひらく―柴田勝太郎の道」化学技術同友会 p.165(1969) 並びに「東京工業試験所五十年史」東京工業試験所 p.647 (1951) より作成。

たが、その一方で研究開発を行うことによって世界に伍する産業の興隆さらには世界をリードしうる新産業創出への貢献が望まれて来た。上記の事例は正にその後者に関連する極めて相応しい例であると言えよう。この章では明治～大正期の産業状況を概観したのち、早期に設立され現在までも連続と続く産業振興に関する国立研究所の役割について考察する。

5.1 明治～大正期の産業の状況^{[2][3][27][28]}

我が国の産業革命は、欧米における産業革命に遅れて19世紀末から20世紀初頭の明治中期から大正中期にかけて行われたが、単に当時の欧米からの先進技術の短期間の導入と実証およびその普及という側面のみではなく、すでに江戸時代におけるオランダ等からの科学知識の導入と普及、生糸等の問屋制家内工業の発展、佐賀藩や鹿児島藩等の諸藩における先進的な技術振興、道路や廻船による物資の流通制度の確立、藩校や寺子屋制度に見られる人材育成と識字率向上、さらには明治期になっての高等教育制度の整備と有能な人材輩出等、の科学技術や産業に関する多くの素地がそれらを大きく支えていたことは銘記されるべきである。

明治政府は初期には製糸業および紡績工業等の軽工業の振興に注力し、1872年(明治5年)には富岡製糸場が作られた。また政府は並行して通信、鉄道の整備にも力を注ぎ、すでに1869年(明治2年)には東京～横浜間に電

信回線が引かれ、1873年には東京～長崎間に、1874年には青森～東京間に電信線が開通している。

その後官営八幡製鐵所の操業が1901年(明治34年)に開始され、第1次世界大戦の前後から産業の重心が重化学工業へと変化していく。化学工業に関しては、19世紀末からの15年ほどが「近代的化学技術の体系的確立への準備期」に相応しく、製紙、精糖、石油工業が大規模化していく。その一方で、アルカリ工業、アルコール工業等は準備的状態であった^[27]。

当時の全産業に対する鉱業および製造業の産業構成比は、1885年(明治18年)で0.8%と10.7%、1900年(明治33年)で1.8%と15%、1920年(大正9年)で3.4%と20.6%である。この最後の時点で、第1次産業が30.2%、建設業(5.0%)も含めた第2次産業が29.2%となっており、さらに加えて第3次産業のうち運輸・通信業は6.5%を占めている。これらを加えると35.7%となり大正中期にはすでに第2次産業が第1次産業を凌駕していたと言える。また就業構造も1906年には第1次産業従事者および運輸・通信業を含めた第2次産業従事者の割合が、それぞれ61.8%、18.8%だったのが、1920年には54.0%、25.2%と着実に後者の割合が増加している。このように産業構成上も製造業が主要な産業になりつつあることがわかる^[27]。ただし1921～1925年の国勢調査の結果では、製造業と言っても従来の我が国の伝統的な在来産業と従業員

5人以上の近代産業の構成比は、ほぼ4:1であり、近代産業の規模はまだ大きいものではなかったことも忘れてはならない^[28]。

図19には明治・大正期(1871年～1925年)にわたる我が国と欧米主要先進国との(a)GDP(国内総生産)および(b)一人当たりGDPの推移を示す。この表はオランダのUniversity of Groningen、Maddison Project Database 2018のデータを基に著者らが構成したものであるが、GDPの値は2011年のドル換算値で示されている^{[29][30]}。明治初期1871年(明治4年)の日本のGDPに比べて、英国、ドイツ、米国のGDPはそれぞれ3.9倍、2.4倍、3.9倍であった。日清戦争後の1896年(明治29年)になっても、それぞれ3.5倍、3.5倍、6.4倍と差は縮まらなかったが、第1次世界大戦後の1919年(大正8年)では、それぞれ2.1倍、1.9倍、7.8倍となっている。米国との差はさらに大きくなっているものの世界大戦で疲弊した英独仏等の欧州各国との差が縮まっていることがわかる。なお、この間の米国のGDPの急激な成長は移民増大による急速な人口増加が大きな役割を果たしている。また我が国のGDPは、1871年を1とすると1896年で1.7倍、1919年で3.9倍と第1次世界大戦後に大きな伸びを示しており、さらに昭和に入ると(1927年)4.5倍とさらに増加する。

一方、1人あたりのGDPで見ると、1896年でドイツ、フ

ランス、イタリアは日本のそれと比べると3.0倍、2.7倍、1.4倍であったのが、1919年の時点ではそれぞれ1.5倍、1.6倍、1.0倍と減少し、欧州の疲弊と対照的に日本の産業力の向上が見て取れる。その一方で、米国が1人あたりのGDPでも欧州各国を大きく引き離しつつあることも特徴的である。

このように大正末期には我が国の産業の力は数字上では欧州先進国に近づいたように見られるが、前述のように必ずしも満足な近代的状況ではなかったようである。実際、フリッツ・ハーバーが1924年(大正13年)に我が国を訪れた際に大阪で行った講演「日本の印象について」の中で、彼は「日本の工業はいまだに紡績業が中心で鉄鋼生産が貧しい、また工場は近代的設備があるかと思うと、原始的、手工業的な部分が混在し、これらを合理化するためには、ドイツからの技術者の派遣を含め、中間技術者の教育育成を進めなければならない」と説いている^[31]。

しかしそのような状況の中で、今回取り上げた電気試験所および東京工業試験所の技術開発の例は、正に日本の産業が勃興し欧米各国に接近する近代化の過程においてその先導的役目を果たしたと言えよう。

5.2 国立試験研究所の産業上の役割

このような産業構造の急速な変化と経済成長時における国立試験研究所の役割は、それから引続く昭和期さらに

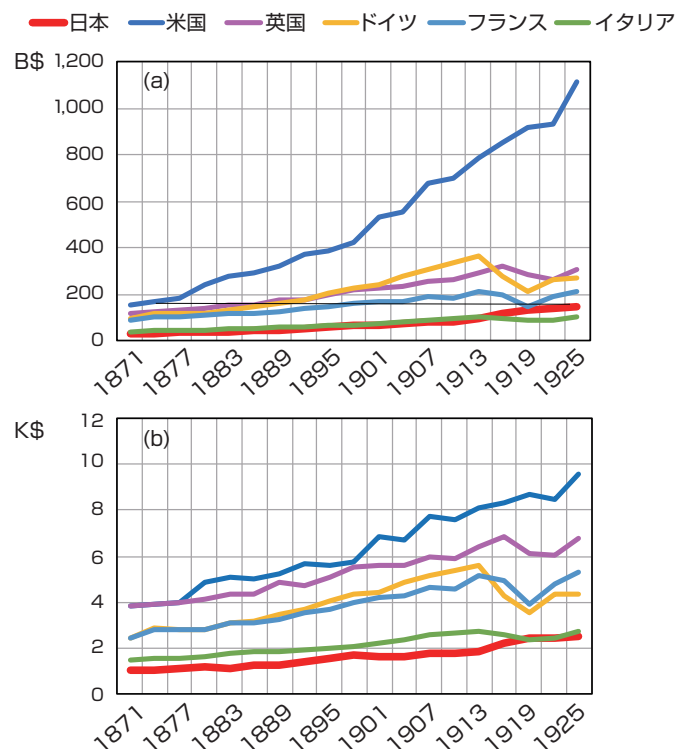


図19 明治・大正期の主要国の(a)GDP(単位10億ドル)、および(b)一人当たりGDP(単位千ドル)の推移。(文献[29]のデータから構成。GDPの値は2011年のドル換算値)

第2次世界大戦後の高度成長時においても基本的には大きな変化はなく、次の4点に集約できよう。そのうち優先度が最も高いのが(1)「国家的(社会的)課題の達成」である。上述の通り、この論説で対象とする明治から大正期にあって欧米の産業革命に比べてかなり遅れて近代化を図るために、早急なキャッチアップが国家的使命であった。上記の例では、日本の産業技術の黎明期にあって無線研究やアンモニア合成のように逸早く欧米の研究成果を取り入れた実証実験の実施やそれに基づく国産技術の開発がその例である。

その次が(2)「組織研究の実践」である。大学における研究とは異なって国立試験研究所では組織的な研究が求められ、これによって骨太で幅広い技術基盤の形成が期待される。上記の電気試験所においても東京工業試験所においても、それぞれ着実な組織研究およびそのマネジメントが行われた。臨時窒素研究所の設立はその最も適した例であり、またそこにおける大型の実験設備等の建設・利用等もこの範疇に入るといえることができる。

さらに次は、(3)独創的な研究成果を創出する「独創技術の開発」である。上記の例では、鳥潟らのTYK無線電話の研究において「直流電圧充電を用いた火花放電発生による持続波発生」が極めて独創的であり、「東工試法」アンモニア合成では柴田らによる新触媒開発が独創的成果の例である。

最後に、(4)「知識および技術移転の実施」がある。これには組織連携および人の交流が重要な役割を果たしている。初期無線研究において松代松之助はその後海軍の嘱託となり海軍の木村駿吉らとの連携による海軍での技術開発を行い我が国の海軍力の飛躍的發展をもたらすとともに、その技術はその後安中電機製作所に引き継がれ、同社は唯一の無線通信機製造会社となった。またTYK無線電話も同製作所により、1914年に世界最初の無線電話の実用化となる三重県鳥羽～神島～答志島間での船舶の監視に利用された。この事業は翌1916年通信省直轄事業としてサービス開始となった^[10]。

一方、「東工試法」によるアンモニア合成技術では、1929年に東京工業試験所の横山武一らが昭和肥料に移り、幾多の困難を乗り越えて同社川崎工場での国産初の硫酸製造の成功に大きく貢献した。この技術が実用化された後、同社においては順調に生産が進展し、1943年まで年間ほぼ17万t(シェア20%以上)の生産量を維持し、戦後も業務再開後1972年に合成硫酸生産が停止されるまで、毎年約20万t以上の生産が行われた^[26]。

また現代の産業技術開発の視点から上記の研究開発を見直すと大変参考になる。すなわち研究開発の目的とその

ための要素技術とそれを構成していくシナリオが明確であり、そのためのリーダーシップや体制整備がきちんと行われた例であると思われる。我が国初の無線研究および世界初のTYK無線電話においては、当時世界的にも早期の実現が求められていた無線による電信電話の整備という喫緊の目標があった。すでに19世紀末にドイツのハインリヒ・ヘルツ(1857年～1894年)がカールスルーエ工科大学で電磁波の発見をし、それを基にマルコーニが1895年に無線通信実験に成功した。これが要素となる科学と技術である。浅野がその価値を見抜いて松方に研究を命じ直ちに実験に成功したことは、すでに明治20年代には我が国の研究ポテンシャルが相当のレベルに達していたことを示している。その後、海軍での研究開発が進み軍用実用化され、また安中製作所という企業での発展に繋がった。

この研究開発の基本は技術の追試から始まっているが、これを契機にその後松方、佐伯らが独創的な研究を進めて我が国の無線研究の基礎を作ったと言えよう。ただし当時他にも東北大学(第二高等学校)から海軍に技術協力した木村駿吉のような俊才もいたことを忘れてはならない^[10]。

またYTK無線電話の場合は、要素技術そのものが鳥潟らによる独創的研究の成果である。これを基に多くの試験研究を繰り返し最終的には安中製作所による世界最初の無線電話の実用化に結びつけている。ここでも浅野のリーダーシップが発揮されているが、当時の電気試験所の少人数ながらも旺盛な研究開発の勢いとそのため優れた体制を見てとることができる。

他方、臨時窒素研究所におけるアンモニア合成の研究も、その目的は明確である。当時ドイツにおいて開発された空中窒素の固定法は、食糧増産に資するという産業的意義は明白であり、それをいかに我が国においても実用化するかが第1次世界大戦直後当時の大きな使命であった。ここでの貴重な判断は、すでに輸入技術に頼る企業が多い中で、「技術の国産化」を実現することであった。

その目的を実現するためのシナリオは必ずしも一筋縄ではなく、極めて大きな障害を幾つも乗り越えなければならなかったし、その技術の実現の後も昭和肥料によるアンモニア合成の企業化に至るまでの道筋も困難を極めた。独自の触媒開発と、昭和肥料での実際の実用化研究、それらの全体を支える研究開発体制が鍵であったと言えよう。ここではそれらを実用化に至るまで完成させる大掛かりなプロジェクト体制のための臨時研究所の構築による大規模研究の推進という、その後の我が国の組織研究の模範となるマネジメントが行われたことは極めて重要である。またその中でアンモニア合成用の新触媒開発という独創技術を生み

出したことも注目特筆すべきである（図 20）。

6 まとめ

この論説では、我が国の産業技術振興に影響を及ぼした例として特に電気試験所と東京工業試験所の研究成果とその普及例を紹介した。これらは我が国の産業技術の黎明期における極めて特徴的な成果であり、今まで連続と続く国立試験研究所の初期の役割を典型的に示した好例であろう。翻って現在では公的研究所の社会的ミッションは、社会的イノベーションの創出であろうが、その他の役割については大きな相違はないように思われる。今後引き続き他分野の例も含めて、より詳しい考察を行っていくことが重要であるが、今後の公的研究所の社会的ミッションの遂行に参考になれば幸いである。

一方で、IoT や AI の進歩のように社会の動きが極めて激しい中で、公的研究所の活動のあり方も鋭くそのあり方を問われている。さまざまな社会的課題があるにも関わらず、この論説で示したような明確な目標を設定しにくい中で、どのように研究開発を進めていくかが極めて重要である。そのためには、それぞれの目標の設定と、その実現のために考えられるシナリオを設定し、図 20 で示すサイクルを早く回していくことが求められる。そのためにも常に社会や産業界との対話・連携が必要であろう。

注 1) 電気試験所に先立って工部省内に電信用国産碍子試験のため碍子試験場（または試験所）が 1876 年（明治 9 年）に設けられたと記され¹⁵⁾¹⁹⁾、実際に東京都中央区銀座 8 丁目に「碍子試験所」の碑がある。しかし杉藤芳雄氏によれば公式に「碍子試験所」と呼ばれた独立した組織は実在しなかったようである。（工業技術院電子技術総合研究所「研究に関する研究」研究班報告書、1994 年）

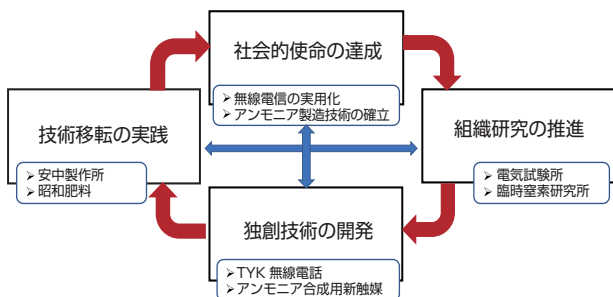


図 20 国立研究所の役割と本論文で示した例

参考文献

- [1] 産業技術総合研究所ウェブサイト: <http://www.aist.go.jp>, 閲覧日2019-12-01
- [2] 中岡哲郎: 日本近代技術の形成, 朝日新聞社, 8-21, 46-64, 460-480 (2006).
- [3] 石井寛治: 日本の産業革命, 講談社, 68-80, 153-158 (2012).
- [4] 電気試験所: 創立五十周年記念 電気試験所五十年史, 705-734 (1944).
- [5] 電気試験所: 創立六十周年記念 電気試験所最近の十年史, 1-3, 296-300 (1951).
- [6] 電気試験所: 創立七十周年記念 電気試験所最近の十年史, 1-3 (1961).
- [7] 電気技術に果たした国立研究所の役割調査専門委員会編: 電気技術に果たした国立研究所の役割, 電気学会技術報告, 926, 5-10, 30-32 (2003).
- [8] 工学博士浅野應輔先生伝記編纂会: 工学博士浅野應輔先生伝, 12-38, 58-65 (1944).
- [9] 電子技術総合研究所創立100周年記念事業実行委員会: 軌跡 電子技術総合研究所創立100周年記念写真集, 2-6 (1991).
- [10] 日本科学史学会編: 日本科学技術史体系 第19巻 (電気技術), 125-134, 181-204, 239-251 (1969).
- [11] 松代松之助: 現時ノ無線通信, 電友社, (1905).
- [12] アンリツ(株): アンリツ100年の歩み, (2001).
- [13] 鳥潟博士33回忌回想録刊行会: 鳥潟博士と無線研究60年の歩み: 33回忌回顧録, 1-7, 83-85, 96-126, 170-173 (1955).
- [14] 電友社: 電気之友, 306, 75-77 (1912).
- [15] 郵政博物館ウェブサイト: <http://www.postalmuseum.jp/column/collection/tykwireslesstelephone.html>, 閲覧日2019-12-01
- [16] 東京工業試験所編: 東京工業試験所五十年史, 220-228, 247-250 (1951).
- [17] 日本科学史学会編: 日本科学技術史体系 第21巻 (化学技術), 275-286 (1964).
- [18] 亀山哲也, 鎌谷親善: 臨時窒素研究所の10年, 化学工業資料, 13 (8), 1-63 (1979).
- [19] 亀山哲也, 鎌谷親善: 臨時窒素研究所-設立の背景, 化学史研究, 10, 15-26 (1979).
- [20] 亀山哲也: 工業所有権戦時法による専用免許と臨時窒素研究所, 特許研究, 6, 26-35 (1988).
- [21] 亀山哲也: 窒素工業技術懇話会と東京工業試験所, 化学工業技術懇話会, 65-85, (1990).
- [22] 亀山哲也: 日本最初の大型プロジェクトはいかにして遂行されたか, 科学と国家と宗教, 平凡社, 9, 252-276, (1995).
- [23] 江崎正直, 亀山哲也: アンモニア合成技術の歴史, 20世紀の日本の化学技術 (化学史学会編), ティー・アイ・シー社, 第1章, 6-47 (2004).
- [24] 亀山哲也: 日本の近代化学工業を創出した臨時窒素研究所, 近代日本の創造史, 6, 3-17 (2008).
- [25] 亀山哲也: 日本の近代化学工業創出の原点, 化学と工業, 66 (7), 547-549 (2013).
- [26] 昭和電工株式会社社史編集室: 昭和電工五十年史, 昭和電工, 37-46 (1977).
- [27] 経済企画庁 平成12年度年次経済報告, <https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je00/wp-je00-0020j.html>, 閲覧日2019-12-01
- [28] 中村隆英: 明治大正期の経済, 東京大学出版会, 177-196 (1985).
- [29] J. Bolt, R. Inklaar, H. de Jong and J. Luiten van Zanden: Rebasings 'Maddison': new income comparisons and the shape of long-run economic development, Maddison Project Working Paper 10, (2018). 閲覧日2019-12-01
- [30] University of Groningen, Maddison Project Database 2018; <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/>

releases/maddison-project-database-2018, 閲覧日2019-12-01

[31] 宮田親平: 愛国心を裏切られた天才 ノーベル賞科学者ハーバーの栄光と悲劇, 朝日文庫, 190-192, (2019).

執筆者略歴

小林 直人 (こばやし なおと)

1978年京都大学工学研究科博士課程修了、工学博士。同年通産省工業技術院電子技術総合研究所入所。1996年量子放射部放射線応用研究室長、1997年企画室長、1998年量子放射部長。この間、西ドイツ・カールスルーエ原子核研究センター（1982～83年）および米国コーネル大学（1988年）で量子ビーム・超伝導体材料・半導体材料に関する在外研究を行う。2001年産業技術総合研究所光技術研究部門長、2003年より同理事、評価部長兼務、2007年より同理事、環境安全管理部長・業務推進本部長等兼務。2009年4月より早稲田大学研究戦略センター教授、2018年所長。2020年4月より早稲田大学参与・名誉教授。専門は光デバイス工学、半導体材料工学、量子ビーム工学、研究戦略・評価、産業技術論など。この論説では、主として旧電気試験所の研究開発に関する事項と5章の考察について論述を進めた。



亀山 哲也 (かめやま てつや)

1975年、名古屋大学大学院工学研究科応用化学博士課程満了、博士（工学）。1975年、工業技術院東京工業試験所入所。水素エネルギー技術の研究（サンシャイン計画）に於いてセラミックス系水素分離膜を開発した。また、日本で最初の大型プロジェクト方式によりアンモニア合成技術の開発に成功した臨時窒素研究所の全貌を解明した。1982年、科学技術庁の長期在外研究員として米国MITに於ける超高温の発生および利用に関する研究を行った。1983年～、ハイブリッド型高周波熱プラズマ発生装置の開発および同装置を用いた貴金属代替超微粒子触媒を創製した（科学技術庁振興調整費）。1987年、化学技術研究所（元東京工業試験所）エネルギー化学部課長。1997年、名古屋工業技術研究所バイオセラミックス研究室長。高周波熱プラズマ法による生体適合性セラミックスを開発した（工技院競争特研）。2001年、産総研セラミックス研究部門長。企業からの資金提供による省エネ型セラミックス製造技術の開発を主導した。2005年、文科省の特定領域研究「日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化」における「日本の文化・伝統と技術革新」の研究を主導した。2012年、産総研名誉リサーチャー。名工大の連携大学院教授、名大の非常勤講師等を務めた。この論説では、主として旧東京工業試験所の研究開発に関する事項と5章の考察について論述を進めた。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント (沢井 実: 南山大学、佐藤 一彦: 産業技術総合研究所)

国立試験研究機関の活動の歴史的意義を検討するために、国立試験研究所の中でも最も長い歴史を有する電気試験所と東京工業試験所を取り上げ、両研究機関による開発プロジェクトの中の代表的成功事例である「TYK式無線電話機」と「東工試法」の産業技術史的、社会経済史的意義をバランスよく分析されています。

また国立試験研究機関の役割を、(1) 国家的 (社会的) 課題の達成、(2) 組織研究の実践、(3) 独創技術の開発、(4) 知識および技術移転の実施の4点に集約して、それらの観点から取り上げられた研

究開発プロジェクトを考察している点も評価できます。この4点は、技術開発から社会実装へ至るための、現代でも変わらない成功の鍵となります。公的研究機関の役割や、研究開発の進め方を再認識するうえで有益であり、シンセシオロジー論文としてふさわしい内容になっています。

議論2 当時の異なるセクター間の連携状況

コメント (沢井 実)

1934年時点での官立試験研究所（植民地を除く）の研究経費ランキングは、電気試験所（140万円、人員1090人）、東京工業試験所（58万円、90人）、鉄道大臣官房研究所（55万円、271人）、大阪工業試験所（46万円、70人）、内務省土木試験所（25万円、100人）の順であり、一方陸軍科学研究所（159万円、417人、35年数値、以下同様）、海軍技術研究所（554万円、827人）、東京帝国大学航空研究所（63万円、240人）等も大きな存在でした（沢井実『近代日本の研究開発体制』51、53頁）。

しかし同時代および戦時期の科学技術新体制に関する議論では、

(1) 軍・官・産・学の4セクター間の連携の悪さ、(2) 国際的にみれば研究開発投資の小規模性、(3) 官立試験研究機関の学術志向性・研究成果の応用面の弱さ、(4) 民間企業における研究所と工場現場の連絡の悪さ等が絶えず問題視されていました。そうした中であってこの論説で取り上げられた2事例は研究成果の卓越性だけでなく、応用面での拡がりにおいても特筆すべき事例であると思われます。

質問 (佐藤 一彦)

製造法を革新して社会実装するまでには、現代でも通常は長期間かかります。現代よりも研究資金や設備、情報等が少ないこの時代に、わずか数年で基礎研究から中規模生産を達成できた最大のポイントは何かですか？

回答 (小林 直人、亀山 哲也)

特に第2次世界大戦前の場合、国の技術開発における軍の支援は大きかったと思います。電気試験所の無線通信研究の例では松代松之助による実験成功を知った海軍がいち早く研究開発に着手することを決め、その要請を受けて松代らが海軍に赴いて研究に協力したのはその例です。その間の海軍からの多額の資金的援助が実用化に結びついたものだと思います。さらにそれに企業も参加した連携が行われたこと、きちんと企業に技術を渡して企業が自立できたことが大きな理由だと思います。ただこの件の場合、参考文献[10]の中の野島晋氏の指摘のように、「軍用にそのすべてを吸収されることなく、商用化への自主技術を継承・発展させたことが、非常に重要だった」と思います。またご指摘の「官立試験研究機関の学術志向性・研究成果の応用面の弱さ」という状況の中で、本件の電気試験所の浅野所長の率いたチームは、無線通信にしてもTYK型無線電話にしても大変稀有な例であったと思われます。

臨時窒素研究所におけるアンモニアおよび硝酸合成技術の開発は10年間の大型プロジェクト方式で実施しました。予算は潤沢で、当時の東京工業試験所全体の予算と同レベルでした。5チーム程度で、優秀なプロジェクトリーダーのもと、2名程度の研究者および同人数の実験助手がいました。さらに、囑託として東大とか東北大学の著名な先生を有給で採用していました。このような体制がミッションの達成を確実なものにしたと思われます。

議論3 継続的な研究の成果

コメント (沢井 実)

卓越した研究成果を上げることとそうした成果を継続的に生み出す組織を構築することとはリサーチ・マネジメントのうえで分けて考えられます。「TYK無線電話の成功のために電気試験所における真空管研究への対応の遅れがあったとも考えられ」との指摘があります。戦時期になると電波兵器開発が焦点の急となり、堀岡正家電気試験所所長は陸海軍の電波兵器開発責任者に対してさまざまな提言を行

いますが、電気試験所が真空管研究開発ネットワークのハブ的存在になったように思われません（沢井前掲書、「第8章 太平洋戦争期における『共同研究』の諸相」）。電気試験所における真空管研究の遅れを規定した要因として何があったのでしょうか。

回答（小林 直人）

参考文献 [7]、[10]、[13] によれば、当時の電気試験所では鳥潟らが早くから真空管に注目していたものの、1912年にTYK型無線電話が発明された数年後の1915年にはすでに米国では25Wの真空管300個を使用した長距離無線電話に成功している^[13]のに対して、電気試験所では後追いでやっと1917年に至って真空管利用の受発信装置の実験に成功しています。ただし1918年には真空管式に基づく世界初の電力線利用搬送無線電信電話に成功している等一定の成果を出しています。鳥潟の部下であった丸毛登は真空管に関する研究が遅れた理由として、(1) TYK型無線電話の改良（希薄ガス中放電研究等）に時間を費やしたため真空管研究の開始が遅れたこと、(2) 初期において所幹部が真空管研究に予算をあまりつけなかったこと、(3) 1923年の関東大震災のため、それまであった真空管研究の臨時予算がなくなり真空管研究が中止されたこと、等を挙げています。特に、(1) については鳥潟グループの責任でしょうが、(2) (3) については、優れたリーダーシップを発揮した浅野應輔所長が1914年にすでに退任していて、当時の所幹部が彼のように真空管研究の重要性に対する慧眼を持っていなかったことによるかも知れません。また鳥潟も1920年に所長となり自分自身の活動を無線研究から電力应用到に主力を移しています^[13]。これは当時電力の研究への傾斜の社会的流れがあったかと考えられます。さらに当時、真空管技術を東京電気（後の東芝）に提供し、製品を同社に作らせる等主力が企業に移ったこと^[7]、また真空管研究の背景にはしっかりした科学研究基盤が必要であったものの日本ではその面での脆弱性があったこと^[10]等も指摘されています。しかし、全体としては、やはり鳥潟を含めた当時の電気試験所幹部の研究戦略の方向性の問題であったと考えられます。

議論4 我が国の独自技術の開発

質問（赤松 幹之：産業技術総合研究所）

当時の研究開発を考える上で独自技術という観点は重要な観点ですが、独自技術の研究開発を推進した原動力はどこにあったのでしょうか。また、独自技術であることと技術移転が行われたこととに関連はありそうでしょうか。アンモニア合成のところに書かれている

ように、産業界の雰囲気は輸入技術推進派と独自技術推進派に分かれていたように思われます。富国強兵、殖産興業の思想の流れとの関連性も議論できるのではないのでしょうか。

回答（小林 直人、亀山 哲也）

電気試験所の初代所長の浅野應輔所長は国産技術ということに相当な重点を置いていたようです。その理由は外国企業に対して高額の特許料の支払い避けるためもありますが、それ以上に我が国の技術基盤を早く高めて常に外国の後塵を拝さなくても良いようにするという安全保障上からの強い決意があったと思います。松代松之助の場合は雑誌の記事内容だけで独自にコヒーラーを開発したようですし、鳥潟の無線電話についてはそもそも外国と初めから競争をしてそれに先んじたということがあります。無線通信は安中電機製作所（現在のアンリツ）が実用化しましたが、その創業者である安中常次郎は、東京帝国大学助手の時に無線電信の将来性に着目して会社を創設し（1900年（明治33年））、電気試験所・海軍とタッグを組んで36式無線電信機を開発し、この後TYK型電話の実用化も同社が行っており、創業5年目には売り上げが創業時の5倍の2万4000円（現在の価格で40億円以上）になっています。この例を見ると、有望な技術領域における創業ベンチャーが国からの技術導入と公的調達によって育って行ったというのが真相であったと考えられます。いずれにしても電気試験所の松代松之助、海軍の木村駿吉、安中電機製作所の安中常次郎の間の緊密な連携が新たな技術の実用化・産業化に結びついたものと言えらると思います。

アンモニア合成技術に関しては、食糧増産および軍事に関わる基幹技術であり、外国に依存しないことが必要であるとの農商務省の考えでありました。それを実現するために設立されたのが臨時窒素研究所です。第1次世界大戦後においては食糧増産という社会的課題に応えるため、表2にみられるように日本のほとんどの企業がドイツ、フランス、イタリアの企業のアンモニア合成技術を高い特許料を払って導入し、硫酸等の化学肥料を製造・販売していました。昭和肥料も当初は外国技術を導入して硫酸等を製造しようとしたのですが、すでに日本の他社の企業に先を越され、導入すべき外国の技術はない状況でした。一方、国産技術を開発した臨時窒素研究所も日本の企業が活用してくれなければ、その目的を果たすことはできなかったことから両者の思いが合致し、国に対して安い特許料を支払うことで、当時、最大の硫酸を製造することに成功したと言えます。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2017年 4月 1日

1 掲載記事の種類と概要

シンセシオロジーの記事には下記の種類がある。

・研究論文、報告、論説、座談会記事、読者フォーラム

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

①研究論文

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

②報告

イノベーションに繋がるような実用的価値のある技術の開発事例および新しい技術の実用化事例を記述した報告。記述の内容は、1) 目的、2) 開発の経緯（目的への道筋）、3) 成果、から成る。投稿された原稿は編集委員による内容の確認を行い、必要な修正点等があればそれを著者に伝え、著者はそれに基づいて最終原稿を作成する。

③論説

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

④座談会記事

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

⑤読者フォーラム

シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また本誌の主旨に合致した読者への有益な情報提供などを掲載した記事とする。1,200文字以内で自由書式とする。

編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

3.1.2 研究論文については、下記の研究論文の構成および書式にしたがうものとし、報告・論説については、構成・書式は研究論文に準拠するものとするが、サブタイトルおよび要約はなくても良い。

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

3.2.4 研究論文・報告・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・報告・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、和文の場合には9,000文字程度とし、英文の場合

合は刷上りで同程度(3,400ワード程度)とする。

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

3.2.10 研究論文における査読者との議論は査読者名を公開して行い、査読プロセスで行われた主な論点について3,000文字程度(2ページ以内)で編集委員会が編集して掲載する。報告または論説における編集委員との議論は、編集委員が必要と認める場合に編集委員名を公開して行い、主な論点について800文字程度(半ページ以内)で編集委員会が編集して掲載する。

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

3.3 書式

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

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

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

3.3.4 図については画像ファイル(掲載サイズで350 dpi以

上)を提出する。原則は白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

ウェブサイト：[番号] 著者名(更新年)：ウェブページの題名、ウェブサイトの名称(著者と同じ場合は省略可)、URL、閲覧日。

4 原稿の提出

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

〒305-8560

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第1
産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内

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 企画本部広報サービス室内
シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

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 April 1, 2017

1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

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

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

① Research papers

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

② Reports

A report describes a development example of technology which has practical value as well as an example of new technology which has been put to practical use. It contains 1) the aim, 2) the process of development (the course to the goal), and 3) the outcomes. The submitted manuscript is checked by the Editorial Board. The authors will be contacted if corrections or revisions are necessary, and the authors complete the final draft based on the Board members’ comments.

③ Commentaries

Commentaries describe the thoughts, statements, or trends and analyses on how to utilize or spread the results of R&D to society. Although the originality of the statements is not required, the commentaries should not be the same or similar to any articles published in the past. The submitted

manuscripts will be checked by the Editorial Board. The authors will be contacted if corrections or revisions are necessary, and the authors complete the final draft based on the Board members’ comments.

④ Roundtable talks

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

⑤ Readers’ forums

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

3.1.2 Research papers should comply with the structure and format stated below, and reports and commentaries should also comply with the same structure and format except subtitles and abstracts are unnecessary.

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

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

3.2 Structure

3.2.1 The manuscript should include a title (including

subtitle), abstract, the name(s) of author(s), institution/contact, main text, and keywords (about 5 words).

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

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

3.2.4 Research papers, reports, and commentaries shall have front covers and the category of the articles (research paper, report, or commentary) 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, 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 with the names of the reviewers disclosed. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as part of the article. Regarding the reports and the commentaries, discussion with the Editorial Board members will be opened at the Board's discretion. In this case, the Editorial Board will edit the discussion to about 800 Japanese characters (less than half a page) with the names of the Board members disclosed.

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

3.3 Format

3.3.1 The headings for chapters should be 1, 2, 3..., for subchapters, 1.1, 1.2, 1.3..., for sections, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, for subsections, 1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.1.1.3.

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

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

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

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

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

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

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

Website – [No.] Author(s) name (updating year): Title of web page, Name of website (may be omitted). If the name of the website is the same as that of the author(s), URL, Access date.

4 Submission

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

Synthesiology Editorial Board
c/o Public Relations Information Office, Planning Headquarters, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)
Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560
E-mail: synthesiology-ml@aist.go.jp

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

Proofreading by author(s) of articles after typesetting is complete will be done once. In principle, only correction of printing errors is 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 Public Relations Information Office, Planning Headquarters, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212
E-mail: synthesiology-ml@aist.go.jp

編集後記

本誌創刊13年目の第1号は、論文3編と論説1編から構成されています。論文はそれぞれの研究開発の成果だけでなく、そのプロセスに興味深いものがあり、想定されている課題解決に向けた成果の社会実装の道のりを追体験するに格好のモデルとなっていると思います。私が査読を担当した丸井氏らの論文は、社会課題となっている各種インフラ整備事業への貢献を目的として、我が国の水資源環境の基盤情報として整備してきた地下水の賦存状態について、概念モデルから地質環境モデルに高精度化するプロセスを提示しています。著者らが産総研で行っている地下水調査の成果は、「水文環境図」という名称の地球科学図として国内各地域で順次出版されていますが、これらは、時間的にはある瞬間の地下水の状態を図示するものです。地下水をはじめとする地質学的調査からは、非常に長い期間の地球の履歴が復元される事が多く、それは数百万年に至る地球環境の超長期的変化が地質に残されているからです。論文にあるとおり、地層中に残され

ている地下水の時代と生い立ちからは、地層自体の水理学的な性能も判断できるため、今後数十年～数千年にいたる将来に亘り、ここで地下水がどう流れるか、あるいは止まるかといった予測に繋がります。身近な社会的課題としては、福島原発敷地におけるトリチウム溶存地下水のコントロールに地下凍土壁を配置する手法や、山岳水源地のトンネル掘削による河川流量の将来変動予測手法などに関わりがあります。この研究では従来の国土の地球科学図調査の手法を発展させ、将来的な地下水状況の変化についてかなり長期間の予測を行う手続きを現実の地下地質で実証してみせたことで、産業廃棄物等の地下貯蔵や地下廃棄にあたり将来数十万年規模の安全性の評価にも適用できることを示しました。地下水学が単独で地下地質の将来予測を可能とするには至っていないと思っはいますが、最終的な工学的設計から安全の評価までに繋げる橋渡しが見えてきたと言えます。

(編集委員 渡部 芳夫)

シンセシオロジー編集委員会

委員長：金丸 正剛

副委員長：湯元 昇 (国立循環器病研究センター)、加藤 一実

幹事 (編集及び査読)：清水 敏美、牧野 雅彦

幹事 (普及)：赤松 幹之、小林 直人 (早稲田大学)

委員：綾 信博、池上 敬一、一村 信吾 (早稲田大学)、小賀坂 康志 (国立研究開発法人 科学技術振興機構)、小野 晃、後藤 雅式、内藤 茂樹、藤井 賢一、松井 俊浩 (情報セキュリティ大学院大学)、吉川 弘之 (国立研究開発法人 科学技術振興機構)、渡辺 芳夫

事務局：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 広報部広報サービス室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

〒 305-8560 つくば市梅園 1-1-1 中央第1 産業技術総合研究所広報部広報サービス室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

ホームページ：http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/synthesiology/index.html

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

関係府省庁連絡会議において、各府省庁が作成する公用文等において日本人の姓名をローマ字表記する際は、原則として「姓-名」の順で表記することとなったため、今号よりローマ字表記の順番を「姓-名」の順とすることとします。

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: KANEMARU S.

Senior Executive Editor: YUMOTO N. (National Cerebral and Cardiovascular Center), KATO K.

Executive Editors: SHIMIZU T., MAKINO M., AKAMATSU M., KOBAYASHI N. (Waseda University)

Editors: AYA N., IKEGAMI K., ICHIMURA S. (Waseda University), OGASAKA Y. (Japan Science and Technology Agency), ONO A., GOTOH M., NAITOU S., FUJII K., MATSUI T. (Institute of Information Security), YOSHIKAWA H. (Japan Science and Technology Agency), WATANABE Y.

Publishing Secretariat: Public Relations Information Office, Public Relations Department, AIST

c/o Public Relations Information Office, Public Relations Department, AIST

Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560, Japan

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

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

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

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

Starting from this issue, the order of the romanization of Japanese names is “first name, last name”.

「Synthesiology」の趣旨 — 研究成果を社会に活かす知の蓄積 —

科学的な発見や発明が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。そのため、研究者自身がこのギャップを埋める研究活動を行なうべきであると考え。これまでも研究者によってこのような活動が行なわれてきたが、そのプロセスは系統立てて記録して論じられることがなかった。

このジャーナル「Synthesiology - 構成学」では、研究成果を社会に活かすために行なうべきことを知として蓄積することを目的とする。そのため本誌では、研究の目標設定と社会的価値、それに至る具体的なシナリオや研究手順、要素技術の統合のプロセスを記述した論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に生きる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。

Aim of Synthesiology —Utilizing the fruits of research for social prosperity—

There is a wide gap between scientific achievement and its utilization by society. The history of modern science is replete with results that have taken life-times to reach fruition. This disparity has been called the *valley of death*, or the *nightmare stage*. Bridging this difference requires scientists and engineers who understand the potential value to society of their achievements. Despite many previous attempts, a systematic dissemination of the links between scientific achievement and social wealth has not yet been realized.

The unique aim of the journal *Synthesiology* is its focus on the utilization of knowledge for the creation of social wealth, as distinct from the accumulated facts on which that wealth is engendered. Each published paper identifies and integrates component technologies that create value to society. The methods employed and the steps taken toward implementation are also presented.

Synthesiology 第13巻第1号 2021年1月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所



Research papers

Interdisciplinary open innovation through activities in AIST Artificial Intelligence Technology Consortium
—*The scenario towards Society 5.0 by artificial intelligence (AI) technologies that enable mutual understanding between AI and humans*—

MOTOMURA Y.

Study of deep groundwater on the coastal area and its social role

MARUI A., MACHIDA I. and IKAWA R.

Test method for fracture toughness of monolithic ceramics by indentation fracture (IF) method

—*Improvement of reliability and international standardization activity*—

MIYAZAKI H., YASUDA K. and YOSHIZAWA Y.

Commentary

Innovation in Meiji and Taisho eras: Original Works and Industrial Application

—*R&D of Wireless Communication and Ammonia Synthesis in old AIST*—

KOBAYASHI N. and KAMEYAMA T.

Editorial policy

Instructions for authors

Aim of *Synthesiology*