

Synthesiology

電力不足発生リスク回避のための節電率設定方法への一提言

ダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証研究開発

沖縄海域の海洋地質調査

基礎研究および応用・開発研究における標準化活動に係る
投入資源の計量方法および差異について

シンセシオロジー編集委員会

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

Synthesiology 第6巻第3号(2013.8) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

i

研究論文

- 電力不足発生リスク回避のための節電率設定方法への一提言 — 電力供給量逼迫環境下での電力不足発生確率評価システム — ・ ・ ・有蘭 育生、竹本 康彦 140 – 151
- ダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証研究開発 — 究極のパワーデバイスを目指して — ・ ・ ・鹿田 真一、梅沢 仁 152 – 161
- 沖縄海域の海洋地質調査 — 海底鉱物資源開発に利用できる国土の基盤情報の整備 — ・ ・ ・荒井 晃作、下田 玄、池原 研 162 – 169
- 基礎研究および応用・開発研究における標準化活動に係る投入資源の計量方法および差異について — 大学・TLO 等と電気機械産業の事例 — ・ ・ ・田村 傑 170 – 179

論説

- 技術開発におけるポートフォリオ構成と社会実装 — GERAS の開発と普及に向けての新たな展開 — ・ ・ ・駒井 武 180 – 186

編集委員会より

- 編集方針 187 – 188
- 投稿規定 189 – 190
- 編集後記 197

Contents in English

Research papers (Abstracts)

- A proposal for setting electric power saving rate to avoid risk of electric power shortage occurrence** 140
— Probability evaluation system of electric power shortage occurrence under tight electric power supply —
- - - I. ARIZONO and Y. TAKEMOTO
- Development of diamond-based power devices** — Verification of its superiority as the ultimate power device — 152
- - - S. SHIKATA and H. UMEZAWA
- Marine geological mapping project in the Okinawa area** — Geoinformation for the development of submarine mineral resources — 162
- - - K. ARAI, G. SHIMODA and K. IKEHARA
- Measurement of input resources for standardization activities in basic research and applied and development research, and the difference of the measuring results between the research types** — Case studies of universities and technology licensing organizations, and the electric machinery industry — 170
- - - S. TAMURA

Article (Abstract)

- Portfolio structuring and social implementation in the development of complex technology** — Case study of the development of GERAS and its evolution — 180
- - - T. KOMAI

Messages from the editorial board

191 – 192

Editorial policy

193 – 194

Instructions for authors

195 – 196

電力不足発生リスク回避のための節電率設定方法への一提言

— 電力供給量逼迫環境下での電力不足発生確率評価システム —

有蘭 育生^{1*}、竹本 康彦²

現状において、再生可能エネルギーの利用を含めた電力供給量の確保および節電対策に関するシステム策定は緊急を要する。ただし、天候等の影響により、電力需要量や再生可能エネルギーによる電力供給量は変動する。また、火力発電システム等による電力供給量も設備故障等の要因からやはり確定値とはいえない。よって、電力の需要・供給量に関する不確定な予測のもとで電力不足を回避するための計画策定が必要である。この研究では、電力需給バランスのもとでリスク回避を目的とした電力不足発生確率評価システムを提案し、現状の電力不足リスクの水準を維持しつつ、電力不足を回避するための節電率の一設定方法について提案する。

キーワード: 電力需給バランス、電力不足発生確率評価システム、Chebychev の確率不等式、Bennett の確率不等式、Hoeffding の確率不等式

A proposal for setting electric power saving rate to avoid risk of electric power shortage occurrence

– Probability evaluation system of electric power shortage occurrence under tight electric power supply –

Ikuo ARIZONO^{1*} and Yasuhiko TAKEMOTO²

Japan has to urgently build a new system for securing electric power supply including renewable energy and for saving electric power. The electricity demand and the electricity supply based on renewable energy are influenced by the weather. Thermal power generation may also be affected by equipment failure. Therefore, plotting of a plan is required to avoid electric power shortage under inaccurate prediction for supply and demand of electricity. In this article, we propose a probability evaluation system to avoid electricity shortage. We also propose a method for setting the electricity saving rate to avoid electricity shortage while maintaining the present level of electricity shortage occurrence risk.

Keywords: Electric power demand-and-supply balance, electric power shortage probability evaluation system, Chebychev probability inequality, Bennett probability inequality, Hoeffding probability inequality

1 はじめに

原子力発電所の新規建設および点検停止中の原子力発電所の再稼働などに関する見通しが不鮮明である現状を勘案すれば、既存遊休発電システムや再生可能エネルギーの利用を含めた電力供給量の確保および節電対策に関する計画法やシステム策定は緊急を要する^{[1][2]}。2011年夏季からの、特に東京電力エリアおよび関西電力エリアにおける「でんき予報」は、翌日あるいは当日の電力消費ピーク時における電力供給量と予想最大電力需要量との比率に応じた電力需給バランス情報の提供に関するその一つの実践例といえる。「でんき予報」では、ピーク時電力供給量と予想最大電力需要量は、電力会社に蓄積されたデー

タ、および過去の経験に基づき与えられているものと想われる。

2011年秋の関西電力のホームページには、節電意識の啓蒙のために、気温に対するピーク電力需要量の回帰モデルが掲載されていた。ここでは、気温と2010年度と2011年度の夏の最大電力需要量の関係が図示されていた。その図からは、明らかに2011年度と2010年度の電力消費行動の変化がみてとれた。また、回帰モデルにおいて与えられる平均的な電力需要量のまわりに実際の電力需要量はばらつく様子もみることができた。このことから、電力需給システムにおいて、例えば天候と電力需要量の関係に関しては、過去の情報蓄積により、電力需要量の子

1 岡山大学大学院 自然科学研究科 〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1, 2 県立広島大学 経営情報学部 〒734-8558 広島市南区宇品東1-1-71

1. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama 700-8530, Japan
* E-mail: arizono@et6500.mech.okayama-u.ac.jp, 2. Faculty of Management and Information Systems, Prefectural University of Hiroshima 1-1-71 Ujina-higashi, Minami-ku, Hiroshima 734-8558, Japan

Original manuscript received June 15, 2012, Revisions received February 20, 2013, Accepted February 26, 2013

測分布に比較的多くの知見が存在すると思われる。しかし、電力供給力の現状に対する電力消費行動の変化を踏まえれば、例えば電力需要量の分布形を正確に把握できるかという点、必ずしもその限りではないことを示している。

ところで、震災後の研究報告として、東日本大震災による電力不足が日本経済に与える影響に関する考察が公表されている³⁾。これによると、昨夏の供給電力逼迫状況における一時的な節電は生産や雇用にはさほど影響を及ぼさなかったと述べられている。また、節電の長期化により雇用が悪化するものの、自発的な節電よりも、強制的な電力供給削減の方が生産と雇用を大きく減少させることが明らかになったと述べられている。このことは、適切な節電目標を提示することの必要性を示唆している。

ところで、関西電力エリアでは、2011年夏、一律15%の節電要請が関西電力により発表された。この節電要請率は、おそらく、前述のような過去のデータの蓄積ならびに電力消費者の電力消費行動の変化の予測のもとに決定されたものと思われる。ただし、その関西電力に対し、当時の橋下大阪府知事が節電要請率15%の根拠を示すよう要求したところ、関西電力は、明確な回答を行わず、沈黙し、うやむやのまま、結局節電要請率15%が名目上残ったまま、2011年の夏をなんとか乗り切ってきた。これに対し、関西電力による必要節電率15%の根拠が必ずしも説明可能な科学的根拠にのっとるものでなかった可能性と、あるいは意図的な情報操作としての15%という数値であった可能性さえもいわれた。このことは、関西電力のみならず、東京電力をはじめとする電力各社の情報公開の不十分さをうかがい知るものといえる。もちろん、現在のような状況において、社会的に大きな混乱を引き起こさないように各個人が行動することは大切である。ただし、各個人あるいは各種団体がとるべき行動の指針として、何らかの納得がいく情報の提供があってこそのことである。

一方、脱炭素エネルギーの一つの帰結として、再生可能エネルギーに基づく発電システムが取り上げられ、再生可能エネルギー特別措置法のもとに再生可能エネルギーに基づく発電量の買取価格が決定された。ただし、再生可能エネルギーとは、端的にいって自然界に存在するエネルギーのことであり、それゆえ、例えば太陽光発電の場合、発電量は天候に左右され、風力発電の場合は、風量等の気象条件に依存するなど、自然界に存在するエネルギーを電力エネルギーに変換するにあたり、その発電量、すなわち電力供給量には不確定要素が多く存在する。また逆に、例えばエアコンの利用等に代表される電力需要量もまた天候等の気象条件に大きく影響されることはいうまでもない。このため、電力需要量に関しても不確定要素が存在

する。また、火力発電等に代表される既存の発電システムによる電力供給量も設備故障等の要件を勘案すれば、微妙といえどもその変動を考慮する必要がある。また、既存設備の経年疲労を考慮すれば、今後より厳格な点検計画が施行されるようになり、この結果が電力供給量に変動を与えるものと予測される。よって、我が国の置かれた現状に照らして、これら電力の需要-供給量に関する不確定要素を含む予測量のもとで、電力不足の発生を回避するための発電設備の拡充や省電力に向けての計画策定の必要性はいうまでもない。さらに、電力エネルギーの需給バランスを予測し、場合によれば、この予測に基づき、適正に節電の呼びかけを行う等の措置を図るためのシステム作りは急務である。

そこで、この研究では上記の状況を勘案し、現在の電力需給バランスが逼迫した環境において、電力需要量および電力供給量に確率的変動をとる場合の電力不足発生確率を評価することを考える。ただし、電力各社には、おそらく、過去の電力需要量等に関する膨大なデータの蓄積があるとと思われるが、上記のように電力消費行動に変化が見られる現在、蓄積された膨大なデータによっても、翌日あるいは当日の電力消費ピーク時における予想最大電力需要量の確率分布を正確に把握することは容易ではない。また、将来的に期待される再生可能エネルギーに基づく電力供給量はエネルギー変換効率を含め、まだ安定した状態とはいえない。

よってこの研究では、電力供給量ならびに電力需要量の分布が精確には与えられておらず、それらの予測値としての平均と分散といった限定された情報しか利用できない状況を想定することを基本とする。このような条件のもとで、この研究では電力需給バランスが逼迫した環境において、電力不足の発生予測を安全に評価することを目的とした電力不足発生確率評価システムの構築をまず試みる。

ここに、このような電力供給量ならびに電力需要量に関しては、東京電力や関西電力の電力予報のホームページや既述の関西電力ホームページにおける回帰モデルからもうかがい知られるように、少なくとも電力会社には、翌日気温に対する電力供給量や電力需要量の平均や分散を予測するに足る一定量のデータの蓄積があるものと考えられる。現にその一端として、でんき予報はこれらの平均値的な情報に基づいていることはいうまでもなからう。よって、この研究ではこのような背景から、翌日気温、天候の予測に基づき、翌日電力供給量ならびにピーク電力需要量の平均や分散は利用できるが、電力消費行動の意識変化や再生可能エネルギーに基づく発電等の状況変化により、それらの分布形を規定するに至らない状況にあるという立場

に立った上で、翌日ピーク電力消費時間帯における電力供給バランス評価用のシステム構築を目的とする。

さらに、提案する電力不足発生確率評価システムの実際の応用として、これによる評価値をベースに、現状における電力不足リスクの水準を維持しつつ、電力不足を回避するための節電率の一設定方法ならびにその説明責任への寄与について提案する。

2 問題の記述

この研究では、これまでの火力発電等による既存設備による発電量に、再生可能エネルギーを源とする発電量を加えて、全発電量が与えられる場合を想定する。ここで、再生可能エネルギーを源とする発電量の全発電量に占める割合は現状において3%程度であり、2020年の達成目標は10%である。

既述の通り、火力発電等に代表される既存の発電システムによる電力供給量も設備故障や点検保守等の要件を勘案すれば、変動を考慮するのが適当であろう。また、再生可能エネルギーによる発電量は天候・気候条件に左右され、現状において必ずしも安定した電力供給をもたらすとは限らない。よって、天候・気候条件による発電量の分布に関するデータの蓄積もこれからであるため、再生可能エネルギーによる電力供給量の分布形は未知であるとするのが現状において妥当である。

同様に、既述のように、現状を勘案した消費者の自発的節電行動により、現在の電力消費行動はこれまでの電力消費行動から確実に変化しており、これより、やはり電力需要量の分布形も未知とする。ただし、例えば翌日の気象条件の予報に基づき、翌日の電力需要量ならびに電力供給量に関する予測値として、おのおのの平均と分散といった情報が利用できるものとする。この研究では、電力需要量や電力供給量に関するこのような限定的な情報に基づき、電力需給バランスにおける電力不足発生確率の安全的な評価を目的とした電力不足発生確率評価システムの構築を試みる。

いずれにせよ、この研究では電力需給量に関する確率の変動をとともなう変数として

- 既存発電システムにおける発電量： e_0
(平均 μ_0 、分散 σ_0^2 、分布形未知)
- 再生可能エネルギー源による発電量： e_1
(平均 μ_1 、分散 σ_1^2 、分布形未知)
- 電力需要量： e_2
(平均 μ_2 、分散 σ_2^2 、分布形未知)

を想定する。ただし、 e_0 、 e_1 および e_2 には独立性を仮定する。この研究の目的は、現状のように電力需給バランスが

逼迫した状況において、電力供給量や需要量の変動に関する平均や分散といった限定的な情報しか利用できない条件のもとでの電力不足発生確率を評価するためのシステムの構築を第一義とする。

上記想定のもとで、 $e_0 + e_1 \geq e_2$ のとき、電力供給量は電力需要量を満足すると定義する。この定義は、電力需給バランスに関する安全余裕 (safety allowance) を s とすると、 $e_0 + e_1 \geq e_2 + s$ 、あるいは安全係数を k_s とするのであれば、 $e_0 + e_1 \geq (1 + k_s) e_2$ 等と修正されることになるが、簡単のためにここでは、 $e_0 + e_1 \geq e_2$ のとき、電力供給量は電力需要量を満足すると定義する。

この定義のもとで、確率 $\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\}$ 、すなわち電力不足が発生する確率を安全サイドに評価するシステムを構築する。ここでいう「安全サイド」とは、実際の電力不足発生確率が、構築するシステムにおいて評価される電力不足発生確率を確実に下回ることを保証することを意味する。すなわち、想定されるシナリオのもとでの最悪の状況における電力不足発生確率を評価するためのシステム構築をこの研究での目的とする。

3 確率不等式による方法の提案

分布形に関する情報を必要とせず、確率変数の平均や分散等の限定された情報に基づき、確率変数の和に関する上側確率の上界を評価する手段として確率不等式が存在する。確率不等式の決定問題への応用に関しては、最近、製品需要量の分布形が未知である状況において、許容欠品率を保証する発注点の決定法に関する竹本らの研究^[4]やトレンド効果を考慮した安全在庫に関する新里・郭の研究^[5]等がみられる。そこでこの研究では、電力需給バランスが逼迫した現況において、電力不足発生確率 $\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\}$ を安全サイドに評価する緊急避難的システムを確率不等式に基づき提案する。確率不等式には、片側 Chebychev の確率不等式^[6]、Bennett の確率不等式^[7]さらに Hoeffding の確率不等式^[8]など、各種のものが存在する。以下では、これら3種類の確率不等式に基づく評価システムを提案する。

3.1 Chebychevの確率不等式による方法

D を平均 ν 、分散 δ^2 の分布形未知の確率変数とし、 D が平均から正の方向に、ある偏差 $k\delta$ 以上大きな値として観測される確率を評価することを考える。このとき、片側 Chebychev の確率不等式^[6]に基づき

$$\Pr\{D > \nu + k\delta\} \leq \frac{1}{1+k^2}$$

の関係を得る。これを利用するとき、 $e_2 - (e_0 + e_1) > 0$ の確率の上界を評価するために、 $D > \nu + k\delta$ の関係を $e_2 - (e_0 +$

$e_1 > 0$ の関係と等価とすることにより

$$v = \mu_2 - (\mu_0 + \mu_1) \quad (1)$$

$$\delta^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (2)$$

$$k = \frac{(\mu_0 + \mu_1) - \mu_2}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (3)$$

を得る。ここに、計画発電量は想定される電力需要量より当然大きくあるべきなので、 $k > 0$ は自明である。このとき、電力需要量 e_2 が電力供給量 $e_0 + e_1$ を上回り、電力不足が発生する確率の上界は、片側Chebychevの確率不等式により

$$\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\} \leq \frac{\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2}{(\mu_0 + \mu_1 - \mu_2)^2 + \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4)$$

として評価される。

3.2 Bennettの確率不等式に基づく方法

同様の問題に対して、Bennettの確率不等式^[7]を利用することを考える。このとき、各確率変数 e_0, e_1, e_2 の平均と分散に加え、評価すべき確率が $\Pr\{e_2 - (e_0 + e_1) > 0\}$ であることから、確率変数 e_0 と e_1 の変動に関してはそれぞれの最小値が、また e_2 の変動の最大値が考慮される。このとき

$$B = \max\{(\mu_0 - a_0), (\mu_1 - a_1), (b_2 - \mu_2)\} \quad (5)$$

とする。ここに、 B の設定に関しては、既述のように e_0, e_1 の下限值と e_2 の上限値を必要とする。これら a_0, a_1, b_2 は、本質的には、過去の実績データ^[9]に基づく電力需要量の最大値として、また最も控えめに見積もられる発電量としてそれぞれ与えられるものである。ただし、このような実績値が正確な値として利用できない場合も存在する。このような場合においては、確率変数の平均と分散に基づき、例えば、3シグマ法あるいは2シグマ法にのっとり、 $a_0 = \mu_0 - 3\sigma_0, a_1 = \mu_1 - 3\sigma_1$ および $b_2 = \mu_2 + 3\sigma_2$ 、あるいは $a_0 = \mu_0 - 2\sigma_0, a_1 = \mu_1 - 2\sigma_1$ および $b_2 = \mu_2 + 2\sigma_2$ とすることが考えられる。

このとき、Chebychevの確率不等式による場合と同様に、Bennettの確率不等式を用いて、電力不足発生確率の上界は

$$\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\} \leq \exp\left\{-\left(\frac{\delta}{B}\right)^2 h\left(\frac{kB}{\delta}\right)\right\} \quad (6)$$

と与えられる。ただし、ここでも δ, k は式(2)、(3)の通りであり、また

$$h(u) = (1+u)\ln(1+u) - u$$

と定義される。

3.3 Hoeffdingの確率不等式に基づく方法

Hoeffdingの確率不等式^[8]を利用することを考える。ここで

も、Bennettの確率不等式の場合と同じく、確率変数 e_0, e_1 の変動の最小値 a_0, a_1 と e_2 の変動の最大値 b_2 が各確率変数 e_0, e_1, e_2 の平均と分散とともに利用される。

以上の所与条件によって、Hoeffdingの確率不等式に基づき電力不足発生確率を評価する場合に、電力不足が発生する確率の上界は

$$\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\} \leq \left(1 + \frac{kB}{\delta}\right)^{\left(\frac{\delta^2 + k\delta}{B + \frac{\delta^2}{3B}}\right)} \left(1 - \frac{k\delta}{3B}\right)^{\left(\frac{3B - k\delta}{B + \frac{\delta^2}{3B}}\right)} \quad (7)$$

として評価される。ただし、ここでも δ, k および B はそれぞれ式(2)、(3)および(5)の通りである。ちなみに、式(7)の右辺にみられる数値“3”は考察するシステムにおける確率変数の数を意味する。すなわち e_0, e_1 と e_2 の3つの確率変数に基づき、電力不足確率を評価することに対応している。

4 確率変数の上限値あるいは下限値の設定

Chebychevの確率不等式、Bennettの確率不等式およびHoeffdingの確率不等式を用いて所期の電力不足発生確率を評価する場合、確率変数の平均と分散を必要とする点はいずれの確率不等式においても共通である。一方、Chebychevの確率不等式に関しては確率変数の平均と分散の情報のみに基づき定義されるに対して、Bennettの確率不等式およびHoeffdingの確率不等式では確率変数の範囲に関する情報を利用する形式となっている。

ただしこの研究では、既述のように現状での電力供給量および電力需要量について、平均と分散という限定的な情報しか利用できない状況を取り扱う。これより、ここでは発電量 e_0, e_1 および電力需要量 e_2 に関して、それぞれの平均と分散の情報のみに基づくものとする。この際、Bennettの確率不等式およびHoeffdingの確率不等式においては、2シグマ法あるいは3シグマ法にのっとり、 e_0, e_1 の下限值 a_0, a_1 および e_2 の上限值 b_2 をそれぞれ与えることが考えられる。

ここに、定義域として変動の上下限値をもつ確率分布に関して最も不確実性が大きい分布は一様分布である。区間 $[\alpha, \beta]$ を定義域とする一様分布の平均は $(\alpha + \beta)/2$ であり、分散は $(\beta - \alpha)^2/12$ で与えられる。このとき、一様分布の定義域は平均 $\pm \sqrt{3}$ ×標準偏差で与えられる。すなわち、定義域として変動の上下限値をもつ確率変数として e_0, e_1, e_2 を捉える場合、その範囲を平均 ± 2 ×標準偏差で想定しておけば十分であると考えられる。これを勘案して、各確率変数の平均と分散の情報だけが所与である条件のもとでのこの研究では、 e_0, e_1 の下限值 a_0, a_1 および e_2 の上限值 b_2 をそれぞれ $\mu_i - 2\sigma_i, i=0,1$ および $\mu_2 + 2\sigma_2$ の

2シグマ法によって与えるものとする。

5 電力不足発生確率と電力供給の関係

ここでは、電力供給量の変化に対する電力不足発生確率の変動を既述の Chebychev の確率不等式、Bennett の確率不等式および Hoeffding の確率不等式のもとで評価した結果を示す。以上の3つの確率不等式は個別の成り立ちをもつものの、いずれの場合も想定する確率変数の分布形には依存せず、ここでの電力不足発生確率の上界値を与えるものである。

ここに、再生可能エネルギーに基づく発電量が占める総電力供給量における割合の変化による電力不足確率への影響について検討する。これを目的として、予想されるピーク電力需要量に関する特性を固定し、また総電力供給量に関して、 $E[e_0+e_1]=\mu_0+\mu_1$ を一定に保ったまま、総発電量に占める μ_1 の割合が変化する状況について解析する。具体的に、予測されるピーク電力需要量 e_2 に関して、 $E[e_2]=\mu_2=94.0$ 、 $V[e_2]=\sigma_2^2=(0.015 \times \mu_2)^2$ とする。ここに、 e_2 の分散は、既述の関西電力ホームページにおける電力需要量に関する回帰モデルにおける変動幅がおおむね $\pm 3\%$ 程度と読めることに依拠した。またこれにあわせて、 e_2 の平均は既存設備での発電量の平均に対し、 3% 程度の安全余裕を見込んだ設定とした。さらに、 $E[e_0+e_1]=\mu_0+\mu_1=100$ として、 μ_1 を 0.5 から 10 (μ_0 を 99.5 から 90) に変化させる。このとき、 μ_0 と μ_1 の値に応じて $V[e_0]=\sigma_0^2=(0.01 \times \mu_0)^2$ 、 $V[e_1]=\sigma_1^2=(0.30 \times \mu_1)^2$ と変化するものとした。ここに、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0, 3.0)$ の組み合わせは、再生可能エネルギー由来の発電量が現状の約 3% である状態に対応させ、 $(\mu_0, \mu_1) = (90.0, 10.0)$ は、総期待発電量を一定としたまま、この比率を 2020 年度目標の 10% にあわせたものである。また、各確率変数の分散は平均の値に基づくスケール変換した値として与えた。

既述の3つの確率不等式を用いて評価した結果を図1に示す。同時に、提案する確率不等式を用いた評価システムによる電力不足発生確率が安全サイドに評価されることを例証する目的で、発電量 e_0 、 e_1 およびピーク電力需要量 e_2 の分布として、それぞれ上記の平均や分散をもつ対数正規分布を与えたもとで評価される電力不足発生確率をシミュレーションにより求めた。具体的には、それぞれの平均と分散をもつ対数正規分布に従う乱数の組み (e_0, e_1, e_2) を 100 万組発生し、 $e_2 - (e_0 + e_1) > 0$ となる回数をカウントすることにより、その性能を検証・評価した。図1には、このシミュレーションによる結果を併記しておいた。ただし、図1における横軸は、 $E[e_0+e_1]=\mu_0+\mu_1=100$ の条件のもとで μ_1 を変化させた場合の総発電量の平均

$E[e_0+e_1]=\mu_0+\mu_1=100$ に占める再生可能エネルギーによる発電量の平均 $E[e_1]=\mu_1$ の割合をパーセント表示したものである。また縦軸は、再生可能エネルギーによる発電量 μ_1 の割合に対する電力不足発生確率をパーセント表示したものである。

図1の結果のように、シミュレーションによる電力不足発生確率は、提案するいずれの確率不等式を用いた電力不足発生確率評価システムにより評価される電力不足発生確率をも下回り、提案する電力不足発生確率評価システムによって、意図した通りに電力不足発生確率を安全サイドに評価することができることを示している。このような結果は、個々の確率変数 e_0 、 e_1 および e_2 の分布として、ベータ分布や正規分布等、他の分布形を想定した場合も同様であり、各確率不等式で評価される電力不足発生確率は、所期の通りに安全側に評価されているといえる。参考までに、平均と分散を図1での設定通りそれぞれ一定のまま、図1での対数正規分布に加えて、個々の確率変数 e_0 、 e_1 および e_2 の分布をすべてベータ分布、正規分布、一様分布として与えた場合の結果を図2にまとめた。ただし、ベータ分布は基本形として $0 \sim 1$ を定義域として有する。これに対して、平均と分散が指定される値に一致するよう線形変換を施した。このとき、ベータ分布がパラメータの設定により分布形状を大きく変えることを考慮し、密度のピークが中心の左側にある場合と中心の右側にある場合をシミュレーションでは利用した。具体的には、密度のピークが中心の左側にある場合に関しては e_0 、 e_1 および e_2 の値をすべてパラメータが 2.5 と 5.0 のベータ分布に基づき生成した。一方、密度のピークが中心の右側にある場合に関しては、これらをパラメータが 7.5 と 5.0 のベータ分布に基づき生成した。図2中においてこれらについては、それぞれ「 $B(2.5, 5.0)$ 」および「 $B(7.5, 5.0)$ 」として表記しておいた。

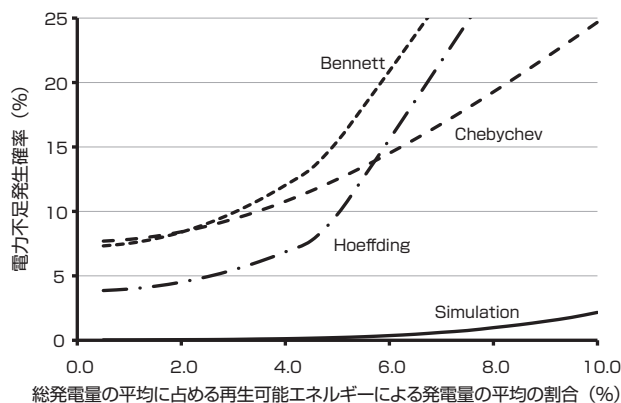


図1 (μ_0, μ_1) の変化による電力不足発生確率の挙動

当然ながら、想定する個々の確率変数 e_0 、 e_1 および e_2 の分布の相異は電力不足発生確率の違いをもたらす。ただし、図1の結果との比較から、図2でのいずれの想定のもとで評価される電力不足発生確率が、この研究で提案する確率不等式に基づき評価される電力不足発生確率を確実に下回っていることが確認される。すなわち、この研究で提案する確率不等式に基づく評価システムは、意図するように意志決定に際して、電力不足発生確率を安全サイドに評価するものであることが確認される。

またこの論文では3つの確率不等式を用いたが、これらはそれぞれの確率不等式の導出過程により性質が異なり、結果として e_0 、 e_1 および e_2 の設定により電力不足発生確率の上界の値の大小関係が入れ替わることがわかる。ただし、これら評価される確率は、いずれも確率の上界を与えていることから、それぞれの確率不等式での評価値のうち最小の値を採用すればよいことになる。すなわち、図1の範囲においては、再生可能エネルギーによる電力供給量の値に応じて、HoeffdingあるいはChebychevの確率不等式による評価値が採用されることになる。

ちなみに、図1においてBennettおよびHoeffdingの確率不等式による評価値が滑らかな変化を与えないことがわかる。BennettおよびHoeffdingの確率不等式では、式(5)のように考慮すべき確率変数の平均値からの変動幅の最大値が考慮される。また、この研究では各確率変数の変域を平均値 $\pm 2 \times$ 標準偏差で与えるものとしている。ここに、上記設定のように (μ_0, μ_1) が変化する場合、 $\mu_1 > 4.7$ においては、 $B=2 \times (0.30\mu_1)$ として B が μ_1 に対応して与えられる。一方、 $\mu_1 \leq 4.7$ においては $B=2 \times (0.015\mu_0)=2.820$ と一定値となる。このため、BennettおよびHoeffdingの確率不等式での電力不足発生確率の変化の挙動が図1のような様相を示す。

また、確率不等式を用いた電力不足発生確率の値がシミュレーションによる値に比べてかなり大きめに評価され

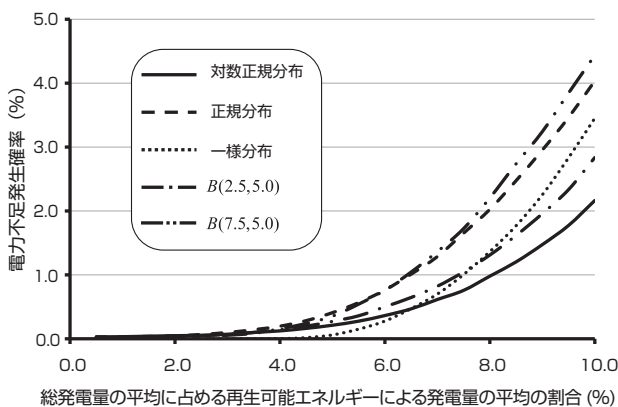


図2 仮想分布形によるシミュレーション結果の比較

ることに一定の留意が必要である。すなわち、確率不等式による電力不足発生確率の値は最も悲観的に見た場合における値であり、この数値をもっていたずらに不安感を煽るべきものではない。また参考として、図1での結果において、再生可能エネルギーが3%である現状での電力不足発生確率のシミュレーション値は0.0717%で、再生可能エネルギーが10%である2020年度ベースでの電力不足発生確率のシミュレーション値は2.180%であることを申し添えておく。このことから、例えば現状での既存発電システムによる電力供給量を単純に再生可能エネルギーでの電力供給量に置換していく場合には、再生可能エネルギーへの計画的移行で少なくとも電力不足リスクが30倍近くになることが読み取れる。

6 電力不足発生確率と節電率の関係

現状のような電力供給量を増加することが難しく、需給バランスが逼迫する状況において、電力不足の発生を避けるためには、予想される電力需給バランスに基づき、必要に応じて節電要請を行う必要がある。しかしながら根拠のない強引な節電要請は経済活動を圧迫し、社会システムのバランスそのものを揺るがす可能性もある^[3]。このことから、節電率と電力不足発生確率に関する何らかの科学的根拠のもとで、節電要請率が決定されるということが説明責任として求められる。この際、総電力供給量の期待値(平均)と電力需要量の見積もり(平均)だけによる節電要請率ではなく、これらの平均に加えて、ばらつき(分散)をも考慮した結果としての節電要請率である方がより説得力があることはいうまでもない。そこで以下では、要請される節電率の根拠に関する説明責任に対して、提案する確率不等式を用いた評価システムの果たす役割について例証する。

以下では発電量 (e_0, e_1) に関して、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0, 3.0)$ および $V[e_0]=\sigma_0^2 = (0.01 \times \mu_0)^2$ 、 $V[e_1]=\sigma_1^2 = (0.30 \times \mu_1)^2$ の状況に対して、既存発電システムによる発電量が15%減少した状況、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0 \times 0.85, 3.0)$ を想定した上で、要請すべき節電率を導くことを考える。このとき、図1からわかるように、確率不等式を用いた電力不足発生確率は大きく安全サイドに評価される。これより、節電要請率の決定にあたって、確率不等式を用いて評価される電力不足発生確率に対して、実際に要求される水準の数値を設定する方法はこの研究では必ずしも適切とは考えない。

この研究では、図1における現状の $(\mu_0, \mu_1) = (97.0, 3.0)$ である状態が電力需給バランスに関して電力不足発生確率が安定的な状態あるいはそれに近い状態であると解釈する。これより、確率不等式の適用に関し、既存発電シス

テムによる発電量が 15 % 減少した状況における電力不足発生確率が、既存発電システムの発電量が減少する以前の状態での電力不足発生確率と同等あるいはそれを上回らないことを保証する節電率を適切な節電率と考える。ここに、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0, 3.0)$ のもとで、確率不等式により評価される電力不足発生確率の上界値は Hoeffding の確率不等式により、5.462 % と与えられる。

ここに、節電率 γ のもとで電力使用量 e_2 が非節電時の比率 $(1 - \gamma)$ での使用状況を想定することになる。このとき、節電率 γ のもとで電力使用量 e_2 の平均と分散はそれぞれ $((1 - \gamma) \mu_0, (1 - \gamma)^2 \sigma_0^2)$ で与えられることになり、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0 \times 0.85, 3.0)$ と発電量が減少した状況において、節電率の変化にともなう電力不足発生確率を γ に対応して評価する。以下ではこのことに勘案し、電力不足発生確率を $\Pr\{e_0 + e_1 < e_2 \mid \gamma\}$ と表記する。

このような設定のもとで、提案評価システムにおいて評価される電力不足発生確率の上界値に関する結果を図 3 に示す。ただし、ここに、3 つの確率不等式により評価される電力不足発生確率の上界値に関して、既述のことから、それらの最小の値を採用すればよいことになる。すなわち、図 3 の例では $\gamma = 13.63$ (%) を境に Chebychev の確率不等式による評価から Hoeffding の確率不等式による評価に移行する。これを抽出したのが図 4 である。

この結果、Hoeffding の確率不等式に基づき評価される節電率 γ の変化に対する電力不足発生確率の上界値が 5.462 % となる節電率として、 $\gamma = 14.66$ (%) が与えられる。一方、既存発電システムによる発電量が 15 % 減少した状況は平均的に総発電量の 14.55 % が喪失した状況である。すなわち、発電量が減少する以前の水準での電力不足発生確率の上界値を保証するためには総期待発電量の減少分 14.55 % を若干ながら上回る 14.66 % の節電率を必要とすることがわかる。ここで、減少分 14.55 % の値に

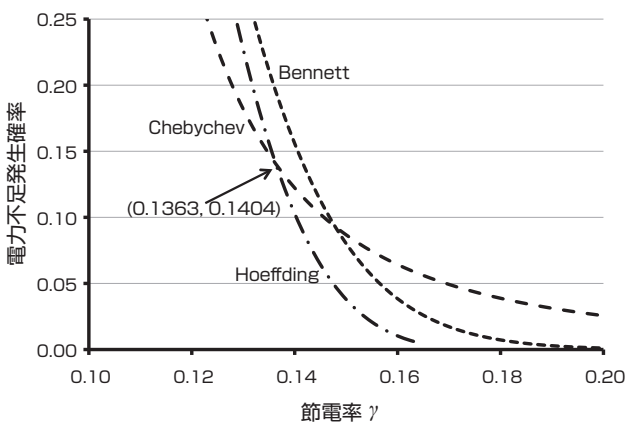


図3 各種確率不等式による節電率 γ に対する電力不足発生確率

対し、同水準の 5.462 % の電力不足発生確率の上界値の水準を維持するために 14.66 % の節電を要するという解析結果は、必要以上に過度の節電が必要ではないという結果を示している。このことから、提案する確率不等式による評価値に基づく節電要請率の信頼性が担保されると考える。ただし、わずかとはいえ喪失分よりも大きな節電率が得られたことは、単なる平均値的な評価に基づき、喪失分の節電を行うだけでは必ずしも十分とはいえないということを示していると解釈される。これは、発電量および電力需要量の変動要素として、おのおのの分散の情報を考慮したことによる効果であり、提案する電力不足発生確率の上界値の水準を維持するという基準での節電要請率の適切な安全志向の性質を表すものと解釈する。

同様の結果は、既存発電システムによる発電量の他の喪失割合のもとでも観測された。以上のことから、この研究で考察した確率不等式に基づく電力不足発生確率の評価法のもとで策定される節電要請率が現実的な要請に 대응するものであり、また平均値的な評価に基づき策定される節電要請率に比べて適切な安全志向の性質を有することがわかった。加えて、平均の情報に加えて、発電量や電力需要量に関する分散の情報をも考慮していることは、これにより導かれる節電要請率に関する信頼度の向上ならびに説明責任の遂行に寄与するものと考えられる。

7 おわりに

この研究では電力供給量と電力需要量のバランスが逼迫した状況にあり、電力供給源として再生可能エネルギーに期待が寄せられつつある現状、および再生エネルギーによる発電を含む電力供給システムにおける不確実性と電力需要量に関する不確実性が存在する現状に鑑み、このような状況において電力不足が発生する確率を評価するためのシステムについて考察した。具体的には、上記のよう

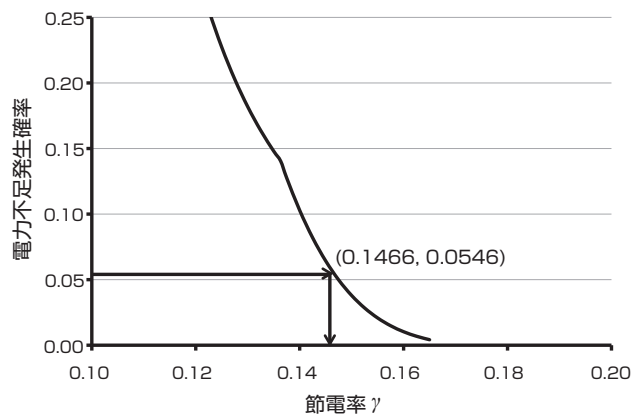


図4 提案評価システムにおける評価例

な不確実性を内包する状況であることを勘案し、最悪のシナリオでの電力不足発生確率を評価する目的で確率不等式に基づく評価システムを提案した。さらに、提案システムを用いて、状況に応じて適切な節電要請を行う場合の説明責任を果たすための方法について考察した。

ただし、本提案システムによる評価結果による施策策定、すなわちこの場合の直接的な施策としては節電要請率の決定、また付随的な施策としての再生可能エネルギーに基づく発電システムの計画策定等においては、確率不等式の性格を十分周知し、情報公開の上で行われるべきであることに留意しなければならない。もとをたどれば、電力供給量 e_0 および e_1 や電力需要量 e_2 に関する平均や分散の予測値に関する情報に関しても十分な情報公開を必要とするところである。これに関しては、既存の電力各社および政府関係筋に、より一層の情報開示を望むものである。逆にいえば、提案評価システムの使用を前提に、これに供すべき情報に関して、一層の情報開示を電力各社ならびに政府関係筋に要請することができる。

ちなみに、現状関西電力では、地域住民の数々の疑問に答えるべく、情報公開の努力を行っている^[10]。ここに、電力需要量ならびに電力供給量が、この研究で想定するように日々変動し、またこれらの予測値に基づき節電要請が考慮されていることがわかる。ただし、これより平均特性にあたる予測電力需要量ならびに予測電力供給量に関する情報は得られるものの、これらの予測誤差等、バラツキ（分散）に関する情報は得られない。ただし、これらの分散に関する情報も平均値と同様、意志決定における重要な情報である。これより、上記のように一層の情報公開を望むものである。

また、この研究では、既存の確率不等式を援用しているに過ぎず、必ずしも技術的な新しい開発を行っているわけではない。同様の立場は、上記の平均や分散、あるいは上下限值に関するものもいえる。ここに、例えば電力需要量の予測精度の向上は節電要請率の策定に直接大きな影響を与える。このことを勘案すれば、例えば電力各社に蓄積された過去の実績データを1次データとして、これに基づき、より精度のよい平均や分散の情報導出を可能とする予測法・推定法の開発は重要な問題である。また、確率不等式は最悪値としての評価値を与えるものであるため、ややもすれば過剰な評価値をもたらす可能性は否めない。すなわち、確率に関する不等関係をよりタイトに与える、より性能のよい確率不等式を考案することができれば、より効率的な施策の策定が可能となる。

ここで、この研究で採用した確率不等式について幾分かの説明を加える。この研究において評価される確率は、

本来発生させるべきでない電力不足の発生確率であるため、比較的小さな値として評価されるべきものである。したがって、ここで確率不等式に求める性能としては、与えられる条件制約のもとで保証されるべき確率の上界をいかに小さく与えるかということである。ただし、確率不等式にて評価される確率の上界は、所与とされる情報の量に影響を受けることは当然である。したがって、確率不等式の性能の評価は、与えるべき情報の量とこれによる評価値の両面を考慮すべきであり、一意に最も優位な確率不等式を示すことは必ずしも容易ではないことに留意されたい。

ここに Markov の確率不等式^[11]は、確率論に関する各種の教本で示される基本的な確率不等式であるが、確率変数の平均値のみの情報を所与条件として、より少ない情報で上側確率の上界の評価が可能である反面、評価値そのものは直接的な利用において実用上有益なものとはいいがたい。同じく、基本的な確率不等式として知られる Chebychev の確率不等式^[6]は、確率不等式の平均と分散を利用し、上側確率の上界の評価が可能である。よって、この研究では電力需要に関してその予測において平均と分散が想定される場合を考えていることから、まずこれを検討の一つとした。また、変数の平均と分散に加えて、範囲の情報を利用する Bennett の確率不等式^[7]さらに Hoeffding の確率不等式^[8]をこの研究では採用している。

これらの採用に関しては、変数の範囲について、既述の通り平均と分散を利用して代替的に与えるこの研究での工夫を含め、現実に観測可能であることも関係している。なお、Bennett の確率不等式に関する考察は Hoeffding の成果^[8]の基礎となっている。また、Hoeffding の確率不等式は、同じ所与条件のもとで評価される確率の上界について、現存する確率不等式の中で極めて有用であることがいくつかの文献^{[12][13]}で言及されている。また、Hoeffding^[8]では、変数の上限と下限の情報だけに基づいて上側確率の上界を与える不等式も別途提案されている。ただし、この研究でのように変数の平均と分散の情報を所与とする状況においては、この Hoeffding によって別途規定された確率不等式による確率の上界は、この研究において採用した Hoeffding の確率不等式によるそれと比べて、より大きな値を与えるため、ここではこれを採用しないものとした。

他に著名な確率不等式として Chernoff の確率不等式が存在する。Chernoff の確率不等式は、Bennett や Hoeffding の確率不等式と同様に、確率変数の和の分布の上側確率の上界評価を与える。ただし、確率変数の確率分布に関する情報を利用することによって、確率変数の和の分布の詳細な上側確率の解析を可能とする^[14]

[15]。このため、この研究で考察する状況において、このChernoffの確率不等式を採用することは適当ではない。

確率不等式については所与となる情報の設定や上側確率の上界等の評価値、また確率不等式の要諦となるアイデアに各種の提案があるものの、確率不等式を利用して電力不足発生確率の上界を評価することを目的とするこの研究での提案システムは、以上の考察から現状でひとまずの完成形を得ているものと考えられる。ただし、既存の確率不等式を同一の条件のもとでその性能の向上を与えることも考えられる。さらに、既存の確率不等式に工夫を加え、これを採用することで、この研究での目的に対して、より有用な結果を得ることも考えられる。より厳格な確率の上界を与えるとの意味において性能のよい確率不等式を考察することは、より正確で効率的な意志決定を行うために意味のある課題である。その意味で、著者らにおいても、これらの課題に関しては現時点も継続的に考察を重ねているところである。

以上を要約するとこの研究の成果ならびに課題は下記のように表すことができる。

1. この研究では、確率不等式を主たる要素技術として、不確実性を内包する電力需給量に関する情報に基づき最悪のシナリオでの電力不足発生確率を評価するための評価システムを提案した。
2. 提案したシステム運用に必要な入力情報に関して、入力情報に関する元データ（過去の実績データ）の開示が必ずしも十分ではないという現状の問題点を考察し、またこの元データが開示された場合にこれを有効に活用するための推定法に関する考察が必要となることを予想した。
3. 確率不等式に基づく提案システムを用いて、より効率的・効果的な意志決定を行うために確率不等式自体の性能向上が課題であることを明示した。

上記のことごとから、著者らは、本提案システムを中心に、あるいはたたき台として、より一層このような社会的要請に応えるために、より多くの研究者により補完されることを願っている。例えば、データ分析の分野でも多くの気鋭の若手研究者が存在する。電力会社が情報を開示すれば、これらの知見が結集することにより、より精度のよい平均や分散、および最大値と最小値等の推定法が提案される可能性がある。この際、本提案システムはその基礎となるべき要件を少なくとも備えているものと考えられる。この研究は、そのような意図のもとに、確率不等式に基づく評価システムを提案するものである。

参考文献

- [1] 朝日新聞: 東電、火力発電所再稼働へ、2011年3月18日朝刊
- [2] 朝日新聞: 原発ゼロ 試練の冬、2011年12月18日朝刊
- [3] 山本周吾: 東日本大震災による電力不足と日本経済 - 符号制約VARによる節電と電力供給削減の生産・雇用への影響 -, 神戸大学経済学研究科 Discussion Paper, 1119, 1-13 (2011).
- [4] 竹本康彦, 岩本史恵, 有菌育生: 限定された需要情報のもとで許容欠品率を保証する発注点の決定法に関する一考察, 日本経営工学会論文誌, 62 (1), 21-24 (2011).
- [5] 新里 隆, 郭 偉宏: レンド効果を考慮した安全在庫管理の大偏差統計的解析, 日本経営工学会論文誌, 62 (4), 164-173 (2011).
- [6] J.R. Birge and F.V. Louveaux: *Introduction to Stochastic Programming*, Springer (1997).
- [7] G. Bennett: Probability inequalities for the sum of independent random variables, *J. Am. Stat. Assoc.*, 57 (297), 33-45 (1962).
- [8] W. Hoeffding: Probability inequalities for sums of bounded random variables, *J. Am. Stat. Assoc.*, 58 (301), 13-30 (1963).
- [9] 関西電力: 電力需給のお知らせ, <http://www.kepco.co.jp/setsuden/graph/index.html>, 2012年6月12日閲覧
- [10] 関西電力: 供給量が毎日変わる理由, http://www.kepco.co.jp/setsuden/graph/pop/pop_pdf/forecast.pdf, 2012年11月15日閲覧
- [11] 海津 聰 訳: *不等式の工学への応用*, 森北出版 (2004).
- [12] M. Talagrand: The missing factor in Hoeffding's inequalities, *Ann. Inst. H. Poincaré-PR*, 31 (4), 689-702 (1995).
- [13] V. Bentkus: On Hoeffding's inequalities, *Ann. Probab.*, 32 (2), 1650-1673 (2004).
- [14] C. H. Papadimitriou.: *Computational complexity*, Addison-Wesley, Massachusetts (1994).
- [15] M. Mitzenmacher and E. Upfal: *Probability and Computing, Randomized Algorithms and Probabilistic Analysis*, Cambridge University Press (2005).

執筆者略歴

有菌 育生(ありぞの いくお)

1985年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程中退。同年より、大阪府立大学工学部助手、1990年同講師、1994年同助教授、2000年大学院部局化にともない、大阪府立大学大学院工学研究科准教授を経て、2011年より、岡山大学大学院自然科学研究科教授。この論文では、全体構想、シナリオ構築およびシステム構築を担当。



竹本 康彦(たけもと やすひこ)

2004年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年より、兵庫県立大学経営学部助手、2007年より県立広島大学経営情報学部准教授。この論文では、システム構築、数学的検証および数値検証を担当。



査読者との議論

議論1 この論文の意義

コメント（立石 裕：産業技術総合研究所つくばセンター、石井 格：国立科学博物館）

東日本大震災の影響で原子力発電所の運転がおよそ停止したことから、電力供給の制約が厳しくなり、大規模なブラックアウトが現実のリスクとして考えられる状況になっていますが、電力に関する情報は供給・需要の両面において、電力会社のコントロール下にあり、過去データに基づく回帰モデル以外に、社会全体としてリスク管理のための客観的なツールが見当たらない状態にあります。こうした背景を考慮すると、不確実性のある電力供給量ならびに電力需要量に関する限定的な情報を用いて、確率不等式により電力供給不足の発生確率を評価し、それに基づき節電率の客観的な説明を試みる、というこの論文のシナリオは一応説得力があると思います。社会的価値の創造を目的とするシンセシオロジーとしては、やや異質な内容ではありますが、価値創造につながる一つの合理的な方法論を提示しているという点においてシンセシオロジーの論文としての意義は十分であると思います。しかし、このような評価システムは、社会的に受容され、現実の意思決定過程において具体的な役割を果たさないと、単なる机上検討に終わってしまい、それではシンセシオロジーの趣旨からは不完全と言わざるを得ません。この論文の内容を実際の電力システムに適用する上では、今後検討すべき課題がいくつか考えられます。例えば、入手できる情報の制約から、供給量の変動、需要量の変動とも、実際に想定される確率分布曲線ではなく、平均値と分散を用いた評価を行っています。この簡略化は結論にどの程度の誤差を与えるのでしょうか？また、供給側の変動には保守による計画停止等の人為的因子も含まれ、気象条件に左右されるところの大きい自然エネルギーの変動と同一に扱ってよいのでしょうか？こうした将来の課題も含めて、シンセシオロジーへ投稿された狙いをご説明いただけたらよいと思います。

回答（有蘭 育生）

この研究は、昨今の電力需給事情に勘案し、著者が専門とする経営工学、オペレーションズ・リサーチ、応用統計学の見知から何らかの貢献を果たすべきとの観点から考察したものです。その意味で、ご指摘のように、提案する評価システムが社会的に容認されるためには、当該システムでの意志決定過程ならびにその解釈において、一定の説得力を必要とします。それに対し、提案評価システムを用いての意志決定が社会的に容認されるよう論旨を整理しました。

また、この研究に関し、「社会的価値の創造を目的とするシンセシオロジーとしては、やや異質な内容ではありますが、価値創造につながる一つの合理的な方法論を提示しているという点においてシンセシオロジーの論文としての意義は十分であると思います。」としてご理解を賜りましたことにお礼申し上げます。その上で、「シンセシオロジーへの投稿意図」について述べさせていただきます。

まずシンセシオロジーへの投稿を考えた第1の理由としては、「社会の側から研究成果を汲み上げてもらうという受動的な態度ではなく、研究成果の可能性や限界を良く理解した研究者自身が研究側から積極的にこのギャップを埋める研究活動（すなわち本格研究^{注2}）を行うべきである」と考える。」というこの学術ジャーナルの発刊の趣旨にあります。この研究は極めて今日的課題を取り上げており、震災および原子力発電所の事故以後の新しい価値観のもとでのシステム構築にあたり、発刊の趣旨でいう「基礎研究の成果を自然淘汰にまかせる」のではなく、むしろ議論の発端としての提案を行うことが必要であるとの認識がシンセシオロジーの発刊趣旨に沿うものであると考えたからに他なりません。「これまでの学術雑誌は、科学的発見といった基礎研究の成果としての事実的知識を集積してきた。これに対して、研究成果を社会に活かすために行うべきことを知として蓄積する、すなわち当為的知識を集積することを目的として、ここに新しい学術ジャーナルを発刊する。自然についての知の獲得というこれまでの科学に加えて、科学的知見や技術を統合して社会に有益

なものを構成するための学問を確立することが、持続的発展可能な社会に科学技術が積極的に寄与するための車の両輪となろう。」および「この「Synthesiology」と名付けたジャーナルにおいては、成果を社会に活かそうとする研究活動を基礎研究（すなわち第2種基礎研究^{注4}）として捉え直し、その目標の設定と社会的価値を含めて、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスが記述された論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に活かす研究が実践できるのかを読者に伝え、共に議論するためのジャーナルである。」という趣旨に賛同し、またこの研究がその趣旨に相応しいものと考え、投稿に至りました。

その意味でいえば、ご指摘とおり、この論文の内容を実際の電力システムに適用する上では、今後検討すべき課題がいくつか考えられます。この研究論文では、確率不等式を用いた方法論を提案するとともに、この方法論を活用するための現状の課題を明らかにし、さらに提案した方法を端緒として、さらに研究者の知をくわえることが必要であることを主張しています。このこともまた、「共に議論するためのジャーナル」という発刊趣旨に共感するとともに、この研究が相応しいものと考えています。すなわち、シンセシオロジー誌の目的である「従来の学術ジャーナルにおいては、科学的な知見や技術的な成果を事実（すなわち事実的知識）として記載したものが学術論文であったが、このジャーナルにおいては研究開発の成果を社会に活かすために何を行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。」にこそ、この研究を当ジャーナルに投稿した意図が集約されています。

なお、この研究に関する将来の課題として、提案システムに供されるべきデータの入手をはじめ、確率不等式の性能向上等いくつかのものが存在します。これらに関しては、論文中の「7.おわりに」において要約しています。

議論2 モデルの展開

コメント（立石 裕）

論文の導入部分では、再生可能エネルギーの役割への期待と電力需要予測における問題点が指摘され、これを考慮した予測モデルの定式化が試みられています。しかし、議論の筋道を追ってみると、問題解決において、再生可能エネルギーの存在は本質的な要素ではなく、電力供給不足の根源は、供給量とおよそ同等の大きさをもつ需要量の決定論的な予測が困難であり、確率論的な予測しかできないという不確実性があるように読み取れます。であるとすれば、第一近似としては、まず、再生可能エネルギーを無視して、需要量と既存発電量のバランスだけで評価を行い、著者の提唱するモデルの妥当性を検証した方が論理的にはすっきりすると思います。次のステップとして、再生可能エネルギーを考慮すると、どのような効果が想定されるのか、また再生可能エネルギーの供給量がどの程度になればこの影響が顕著になるのか、という議論の流れの方がよいと思います。また、分散の感度分析が述べられていますが、その前にまず、再生可能エネルギー量自体の感度分析が必要だと思えます。

回答（有蘭 育生）

この研究の初期投稿原稿作成時に、ちょうど再生可能エネルギーによる電力買取の制度化等が議論されていました。これにより固定買取価格制度も本格的にスタートし、場合によれば再生可能エネルギー由来の電力が原子力発電を含む既存の発電システムを代替していくことも考えられます。この研究は、そういう事態を積極的に考慮しようとの意識のもとに考察を進めてきました。ただ、ご意見ももっともですので、本改訂稿においては、現時点の状況からスタートし、2020年度目標に至る状況として、再生可能エネルギーによる電力供給量を扱うものとし、また旧稿での感度分析に関しましては、ご意見いただいた「再生可能エネルギー量自体の感度分析」に主旨を改め、改訂稿での図1のように再生可能エネルギーの占める割合の変化に関するものとして考慮しました。

議論3 評価結果の解釈と運用

質問（立石 裕）

提案システムのアウトプットである電力不足発生確率を、どのように解釈して運用するのかについての考え方が提示されていないので、現実社会においてどのような使い方をすべきなのかがはっきりしません。4章の最後で、結果の使い方には注意しなければならないという趣旨のリマークがあり、著者としての判断は差し控えて、そこには踏み込まないというスタンスのように見えますが、やはり、どのような使い方が考えられるのかという著者の主張がないと、読者としては評価のしようがないと思います。提案されているモデルの論理的妥当性は疑いようがないと思いますが、問題はそこにあるのではなく、まさしく、そこからどのような意思決定につながる結論を導くか、ということにあると思います。例えば、具体的には発生確率が何%以内であれば、問題ないと考えるのでしょうか？

回答（有蘭 育生）

この点が、いただいたご教示の内容として最も重要であり、かつ旧稿において曖昧な部分であったと反省しました。たしかに確率不等式による電力不足発生確率は最悪時のものとして解釈することができますが、この確率に関して容認される水準をどのように与えるのかについては旧稿では明言を敢えて避けていました。そこで本改訂稿におきましては、現状の水準を維持するという観点からこれを与えるものとなりました。これにより、提案評価システムに基づく意志決定の意味合いを明瞭化したと考えています。

議論4 分布の定義

コメント（立石 裕）

発電量や需要量の「分布」という表現が用いられていますが、「何に対する分布」なのかが明記されていないので、現実の議論に落とすときに、具体的にどのようなデータを使えばよいのかが見えません。

回答（有蘭 育生）

本稿で記述のように、一昨年度の関西電力のホームページに日中最高気温と電力需要量の関係に関する回帰モデルが若干の現実データと共に掲載されていました。すなわち、同じ日中最高気温に対して、電力需要量は一定ではなく、ばらつきます。回帰モデルはこのバラツキを確率的変動として捉え、このバラツキをもつデータの平均的特徴を捉えようとするモデルです。同様に、再生可能エネルギー由来の電力供給量は天候等の影響を受けざるを得ず、同じ日中最高気温の条件でも変動します。また、既存発電システムによる発電量も必ずしも全システムが設計発電量を常に保証するとは限らず、設備保全の問題等で若干の変動を考慮しておくべきだと考えました。この研究では、上記回帰モデルの適用から勘案されるように、これら電力需要量、各発電量のバラツキを確率的変動と捉えています。実際には、翌日の気候条件等に基づき、例えば翌日の最大電力需要量の予測値と予測誤差を平均と分散に対応させるものとしています。

ただし、現実にはこのような電力需要量や発電量に関する平均や分散といった情報は電力各社には過去のデータとして蓄積されているものの、これらのデータが正式に公開されているとはいえません。そのため、提案評価システムに関する本稿での数値検証においては、擬似的に策定した値のもので計算結果を提示しています。本来は、この部分に現実の蓄積データ等を1次データとして供給し、必要な平均や分散を算定することが考えられます。またこの際、本改訂稿では論旨の明確化のため削除した旧稿での「日本道路交通情報センターの渋滞予測」法を援用することができるかもしれません。あるいは、電力会社等から供給される蓄積データに基づきこれら提案評価システムに供されるべき平均や分散の情報を得るための斬新な方法が開発されるかもしれません。ただし、それらは電力会社等に蓄積されているであろうデータの公開を前提とします。この研究の目的の一つは、提案評価システムを現実に機能させるためには、電力会社等の蓄積情報が必要であることを示し、逆説的ではありますが、こ

れをもって電力会社等に一層の情報公開を促す契機としたいということにあります。現状関西電力では、地域住民の数々の疑問に答えるべく、情報公開の努力を行ってはいます。（http://www.kepeco.co.jp/setsuden/graph/pop/pop_pdf/forecast.pdf）

この資料から、電力需要量ならびに電力供給量（発電量）が、この研究で想定するように日々変動し、またこれらの予測値に基づき節電要請が考慮されていることがわかります。ただし、平均特性にあたる予測電力需要量ならびに予測電力供給量に関する情報は得られませんが、これらの予測誤差等、バラツキ（分散）に関する情報は得られません。さらにこの資料から、本稿でいう既存発電設備による電力供給量にも変動要因が存在することがわかります。このため、改訂稿におきましては、旧稿では確定値としていた既存発電設備による電力供給量（発電量）をも変動する確率変数として扱うように改めました。

議論5 確立不等式の特徴と選択

質問（立石 裕）

3つの確率不等式が使われていますが、説明なしに出てくるので、意味合いが理解できません。それぞれに特徴があって、得意不得意、利用上の注意点等があると思いますが、今回の目的に使用するにあたって必要な範囲で簡単な説明があった方がよいと思います。それから、この3つで、使えそうな不等式は尽くされているのでしょうか？

回答（有蘭 育生）

この研究で採用した3つの確率不等式の採用理由を追記しました。4章の最初の段落に示すように、Bennettの確率不等式およびHoeffdingの確率不等式の定義においてChebychevの確率不等式では必要な確率変数の変域についての情報を必要とします。今回は条件を合わせるためにこの変域情報を2シグマ法に基づき与えています。このように各確率不等式の出自の違いもあり、確率不等式の性能に関して確実に得意不得意を明記することは容易ではありません。ただし、Hoeffdingの確率不等式は、これが提案された論文が、Talagrand（“The Missing Factor in Hoeffding’s Inequalities”, *Annales de l’Institut. H. Poincaré Probab. Statistiques*, Vol. 31, No. 4, pp. 689-702 (1995)）やBentkus（“On Hoeffding’s Inequalities”, *The Annals of Probability*, Vol. 32, No. 2, pp. 1650-1673 (2004)）により、“celebrated paper”等と呼ばれるように特に性能に優れた確率不等式として認識されています。この事実ならびにこの論文に追記した3つの確率不等式の採用理由から、ここでの提案においてこの3つの確率不等式の併用で十分であると考えています。ただし、現在別途研究として、Hoeffdingの確率不等式の性能向上ならびにより高性能な確率不等式の開発にも着手しているところです。

議論6 シミュレーションにおける異なる分布の影響

コメント（立石 裕）

5.のシミュレーションで、対数正規分布を用いた計算例が示され、他の分布たとえば、ベータ分布や正規分布を用いても同様、と記されていますが、実際にどの程度差があるのかわからないか示していただいた方が説得力があると思います。

回答（竹本 康彦）

参考として、図1での対数正規分布にくわえて、個々の確率変数 e_0 、 e_1 および e_2 の分布をすべてベータ分布、正規分布、一様分布として与えた場合の結果を図2にまとめておきました。ただし、ベータ分布は基本形として0～1を定義域とします。これに対しては、平均と分散が指定される値に一致するよう線形変換を施しました。このとき、ベータ分布がパラメータの設定により分布形状を大きく変えることを考慮し、密度のピークが中心の左側にある場合と中心の右側にある場合をシミュレーションでは利用しました。図1の結果との比較から、図2でのいずれの想定のもとで評価される電力不足発生確率が、この研究で提案する確率不等式に基づき評価される電力不足発

生確率を確実に下回っていることが確認されます。なお、以上のことについては、この論文の図2の説明に対していまま少し記述しています。

議論7 節電率の解釈

コメント（立石 裕）

6. の記述がちょっと分かりにくいのですが、ここの結論は、例えば発電量が15%減少した場合、電力不足発生確率を等価にするという条件を課せば、節電率は14.66%で十分であり、15%を超えるような設定は不要である、という理解でよろしいでしょうか？であるとすれば、もっと広範な計算結果を示していただいた方がよいと思います。例えば、発電量の低下率と節電率の関係を、再生可能エネルギーによる発電割合をパラメータとして数ケースについて示していただければ、読者が本手法の有用性を評価する上で役に立つのではないかと思います。

回答（有蘭 育生）

ご質問にある15%減は総発電量の平均 $\mu_0 + \mu_1=100$ の15%減ではなく、ここでは例えば原子力発電所の停止により、既存発電設備における発電量が減少した状況を想定しています。これにより、6章での数値例においては、「一方、既存発電システムによる発電量が15%減少した状況は平均的に総発電量の14.55%が喪失した状況である。」となります。このとき、総発電量の平均 $\mu_0 + \mu_1=100$ に対する喪失電力量比率14.55%に対して節電率が14.66%必要となると

の結果を与えています。すなわち、ご質問にある「発電量が15%減少した場合、電力不足発生確率を等価にするという条件を課せば、節電率は14.66%で十分であり、15%を超えるような設定は不要である。」という理解は誤解です。この論文「すなわち、発電量が減少する以前の水準での電力不足発生確率の上界値を保証するためには総期待発電量の減少分14.55%を若干ながら上回る14.66%の節電率を必要とすることがわかる。」から、むしろ総発電量から平均的に喪失される14.55%に対し、これを上回る14.66%の節電が必要になるというのが解析結果となっています。つまり、単純に平均的に喪失電力量を節電するのでは十分とはいえないという解析結果が与えられます。これは、平均的な評価ではなく、平均と分散を加味した評価の必要性を意味しています。この論文にも述べているように、主として各電力会社の蓄積データの開示が十分でない現状から、この研究では解析結果に関して、特に重きをおいているわけではありません。ただ、ここでのように平均と分散に基づく必要節電率の解析結果を示すことで、平均的な評価に基づく節電要請率の決定法が十分といえないことを示し、より妥当な節電要請率の決定法として提案システムを寄与させることを目的としています。また、提案システムを有効利用するためには、電力各社および政府関係の一層の情報開示が必要不可欠です。この事実をもって、電力各社および政府関係に一層の情報開示を求めるといことがこの研究の価値であるとも考えています。

ダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証研究開発

— 究極のパワーデバイスを目指して —

鹿田 真一*、梅沢 仁

省エネルギーのカギとなるパワー半導体分野で、群を抜いた材料特性から、SiCを上回る低損失電力変換デバイス用材料として期待されているダイヤモンドの、デバイス応用に向けた先導研究を行った。高い絶縁破壊電界の実証、ドリフト層エピ成長改善によるキラー欠陥撲滅、高温動作を可能にする超耐熱ショットキー電極開発、電界緩和構造^{用語1}や高電流素子の実現等の一連の開発である。その結果、250℃で30万時間以上動作可能な耐熱ショットキーバリアダイオードを開発し、高速スイッチング特性を確認し、ダイヤモンドのパワーデバイス用材料としての可能性を実証することができた。冷却フリーという新しいコンセプトの低損失デバイス実現に向けた、大型ウェハと大電力デバイスの研究が急がれる。

キーワード: ダイヤモンド、パワーデバイス、耐熱、低損失、ショットキーダイオード

Development of diamond-based power devices

– Verification of its superiority as the ultimate power device –

Shinichi SHIKATA* and Hitoshi UMEZAWA

Diamond is expected to be an excellent material exceeding SiC for producing low power loss electronic devices because of its superior material characteristics. We have developed series of elemental technologies including killer-defect free epitaxial growth, refractory Schottky contact, Schottky barrier height control associated with low leakage current and termination structure. As a result, we have developed a refractory Schottky barrier diode with fast switching capability, which can operate for over 300,000 hours at 250℃. R&D of large scale wafers and large power devices are required to realize low-loss devices with a new concept of “cooling free.”

Keywords: Diamond, power switching device, refractory, low loss, Schottky diode

1 研究の目的とアウトカム

ダイヤモンドは、熱伝導率、絶縁破壊電界等物質中で最高の性能を多数有し、“超物質”とも言える材料である。多くの応用が検討されているが、ワイドギャップ半導体材料としてもよく知られている。パワー半導体デバイスにおいても、SiCを上回る低損失電力変換デバイスとして期待されている^{[1]-[4]}。これに関連する材料パラメータを図1に示す。熱伝導率はSiより一桁高く、通常用いるヒートスプレッド材料のAlN、Cu、Al等をはるかに凌駕し、デバイスの熱設計を抜本的に変えることが容易に類推できる。絶縁破壊電界も他の材料に比べ一桁高く、薄膜での高耐圧確保が可能である。ホールの移動度も高く、高速動作、高出力動作に優位である。さらに200～250℃の自己発熱温度でキャリア増により高温で出力低下がないことにより、冷却ユニットのない新しいコンセプトの革新的デバイスモジュールの実現が考えられる。図2にショットキーダイオードのオ

ン抵抗と耐電圧の関連を、室温と250℃の二つで示した。SiCの特性は室温での最適構造に温度上昇によるドリフト層^{用語2}抵抗の上昇効果をあてはめた^[5]。ダイヤモンドでは温度上昇によるキャリア増が、散乱による移動度低下を補

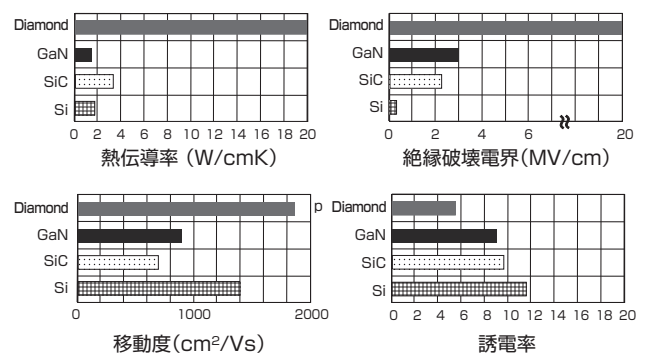


図1 パワーデバイスに影響する諸材料パラメータの比較 (移動度は、ダイヤモンドのみp型の記載)

産業技術総合研究所 ダイヤモンド研究ラボ 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2
 Diamond Research Laboratory, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: s-shikata@aist.go.jp
 (現所属: ユビキタスエネルギー研究部門 〒563-8577 池田市緑丘 1-8-31; current affiliation: Research Institute for Ubiquitous Energy Devices, AIST 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda 563-8577, Japan)

Original manuscript received August 28, 2012, Revisions received January 16, 2013, Accepted February 7, 2013

償し、200℃くらいまでは電流が上昇して低オン抵抗となり、その後250℃くらいまで一定となる。したがって、ダイヤモンドの場合、自己発熱で高温になったデバイスを“わざわざ冷却”しなければ低損失、かつ高電流、高耐圧、超小型が実現可能である^[6]。応用としては、電気自動車、電車、船舶等の輸送機器、産業用機器、送受配電等が考えられる。SiCと比較しても234万トン/年（2040年）、493万トン/年（2050年）のCO₂削減効果が期待でき、経済産業省Cool Earth革新技術計画^[23]の中でもパワーエレクトロニクスを支える究極のデバイスの一つとして挙げられている。

ダイヤモンドは炭素のみで構成され、埋蔵量、原料調達といった資源問題がないという大きなメリットがある。メタン、CO₂等安全なガスによる合成が可能であること、また高温まで極めて安定であり、燃えても有害物質を出さず、ナノサイズでも安全である等、安心感の高い材料でもある。

我々は、ダイヤモンドの基盤技術と、種々応用研究を進める中、2005年2月に世界に先駆けてパワーデバイス応用を目的としたウェハとデバイスの研究に着手した。ウェハについては、本誌の3巻4号に開発の過程の一部（あたかもコピーするように単結晶を製造するダイレクトウェハ化技術と12mm角結晶の実現）について報告がなされており^[7]、その後モザイク結晶の実現^[8]により、最近では20×40mm²のサイズ実現に至っている^[9]。この論文ではそれに対応したデバイス側の研究として、ショットキーバリアダイオード(SBD)を例題デバイスとして、ダイヤモンドの優位性を実証するためのフェーズ1の研究開発を実施したことについて報告する。

2 研究シナリオ

ダイヤモンドを次世代パワー半導体デバイスとして実現

させるには、もちろん段階に応じた各々の課題があるが、フェーズ1（優位性実証）の課題としては、他の材料を超える、下記の実証が挙げられる。

- 1) 高耐圧（他材料を超える物性の実証）
- 2) 高電流（密度）動作（高出力を高温で同時実現することの実証）
- 3) 高温動作（新概念を可能にする特性の実証）
- 4) 高速動作実証

このうち1)と3)は、比較的容易にプロセスが可能な擬似(図の説明との整合上)縦型デバイスで実証でき、2)4)は実用を可能にする縦型構造^{用語3}デバイスが必要である。

以上をシンセシオロジーにおける構成学的見地から、図3に構成としてまとめてみた。これらは構成方法の基本型とされたアウフヘーベン型にブレイクスルーを併せたような型であり^[10]、要素技術の積み重ねと、それを可能にするブレイクスルーが必要、というようにまとめることができる。なお図3に記載の擬似縦型と縦型デバイス構造に関して、図4に図示補足した。さて、この構成図中でも、デバイス動作層の低欠陥エピタキシャル成長（フェーズ1ではキラ欠陥撲滅）、高温動作のための耐熱性ショットキー形成については、ハードルの高い課題と考えられた。図5に示すように、ダイヤモンドのエピタキシャル膜には異常成長した欠陥が存在する。この例では成長丘（ヒロック）上に欠陥が穴状に見え、デバイス動作に致命的ないわゆる「キラ欠陥」となる。これは実際ダイオードを作成して特性評価すると、通常のダイオード特性に、オーミックの貫通電流が重畳したような特性が得られることから判断できた。デバイスの歩留と面積の関係を調べることで、図6に示したようにこの欠陥はデバイス歩留に直接影響することが定量的に明らかになった。このエピ膜の例では欠陥密度は10⁵個/cm²にもなることが分かる。

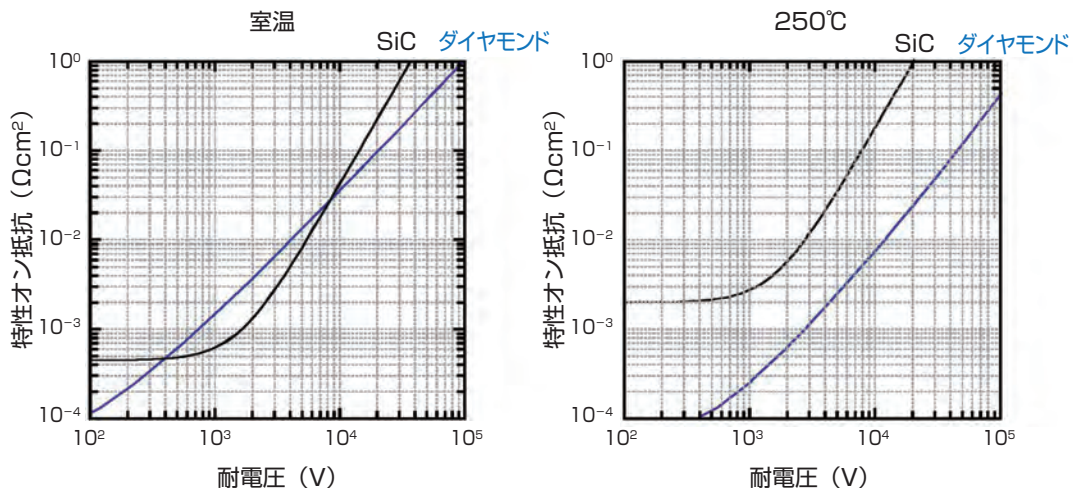


図2 室温と250℃におけるオン抵抗と耐電圧の関係性の比較

3 要素技術の開発例

この論文では、デバイスの要素技術課題に関して、ブレークスルーとなった項目について概説する。

1) キラー欠陥撲滅

まずは、デバイスの活性層となるドリフト層の低欠陥エピタキシャル膜成長についてであるが、通常の半導体材料のエピ成長では、ステップフロー成長により、低欠陥を目指すのが常道になっていることは、周知の事実である。ダイヤモンドは結合エネルギーがSiCの3倍強もあり任意研磨が難しく、結晶表面に再現性のあるステップを作るのは困難であり、実験もままならないという状況であった。このためまず最初に、ダイヤモンド結晶を任意方向に、かつ平坦面を得てステップを形成する研磨技術開発を行った。これまでの研磨技術では全く対応不可能なことが明白になった時点で、我々は徹底的にさかのぼることを決め、研磨装置の設計・製作から実施することにした。下記の2点が開発したポイントである。

- ① 研磨ヘッドにX線ラウエ用ゴニオメーターを搭載し、X線回折でオフ角・オフ方向を計測し、そのまま任意方向に研磨可能なようにした。
- ② 高剛性アームに加重調整用のおもりを設置し、研磨盤は低振動構造に設計した。

研磨機と共に研磨板、研磨プロセスの開発により、さまざまなオフ角・オフ方向の基板を、しかも超平坦加工（算術平均粗さ $Ra < 1 \text{ nm}$ ）してステップ形成することが実現できた。これを元に、エピ層成長の検討を行った。エピ層は通常用いられる2.45 GHzのマイクロ波CVDにより、 CH_4 と H_2 系ガスに、Bドーパントガスとしてトリメチルボロンを用いて行った。詳細は省略するが、低密度プラズマによるマイクロ波CVD成長では、オフ角・オフ方向を変えても異常粒子欠陥は減少せず、うまくステップフローしないことと、プラズマ密度によって多少の差が存在することが分かった。そこでプラズマの高パワー導入可能なCVD装置に設備改造を行った。マイクロ波を0.75 kWから4 kWに高パワー化し、オフ方向の依存性を検討した。

この結果、方位が $\langle 110 \rangle$ と $\langle 100 \rangle$ の間では巨大な成長丘（ヒロック）が発生しやすかった。 $\langle 110 \rangle$ 方位と $\langle 100 \rangle$ 方位では、この成長丘がなく、かつ異常粒子もなく、極めて平坦な表面が、2度以上であればオフ角にあまり依存せず、得られることが分かった^[4]。特に $\langle 110 \rangle$ 方位については、表面の炭素原子がダイヤモンド列を作るためステップフロー成長しやすくなることは容易に推定できる。エピ成長でできる欠陥とのオフ角依存性を図7に示す。プラズマ密度を変えた場合の状

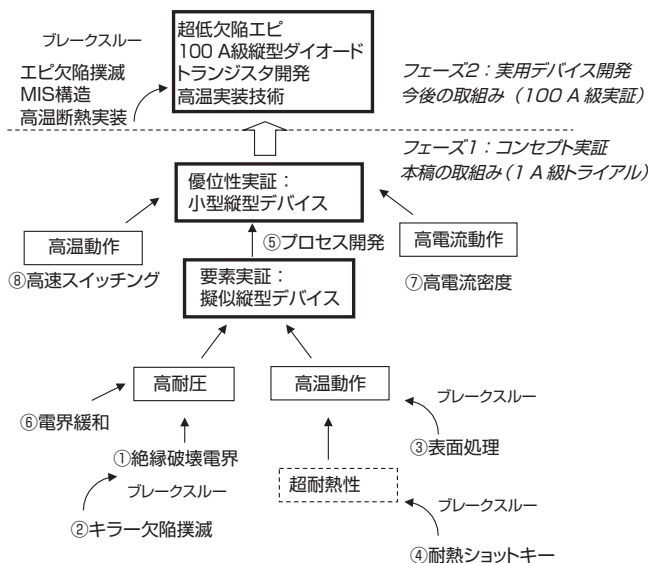
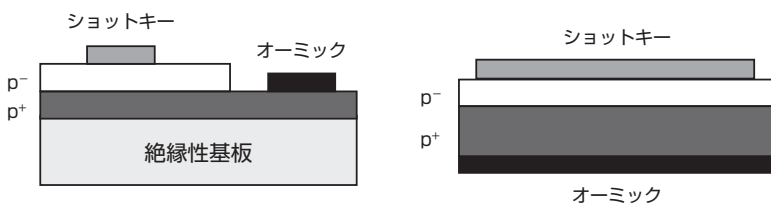
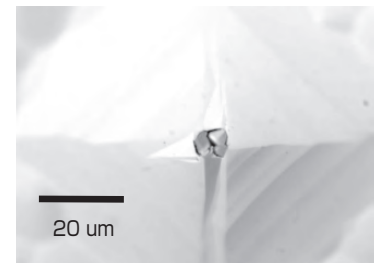


図3 ダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証開発における構成学的ツリー図（記載の数字は実施の順）



(a) 初期実験に用いた擬似縦型構造
図4 デバイス構造図



(キラー欠陥)

図5 ダイヤモンドのエピ層に存在するキラー欠陥

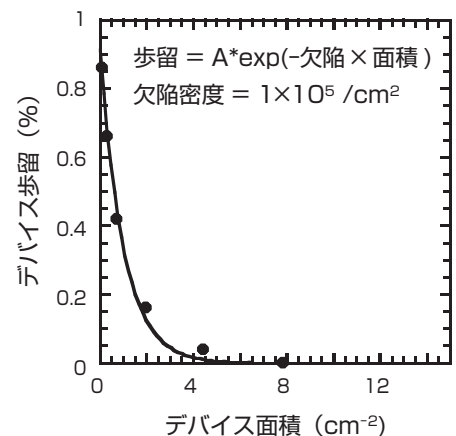


図6 デバイスの欠陥と歩留の関係

況も併せて記す。以上によりキラ欠陥が 10^5 cm^{-2} あったものを、およそゼロにすることに成功した^[11]。このエピ膜の表面を AFM で測定した平坦性 Ra は 1.1 nm であり、原子レベルで平坦な膜であった。ホール効果測定でダイヤモンド中のホールの移動度を測定したところ $1540 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と高く、高品質膜であることが分かった。またエピ成長の速度は、これまでの低プラズマ密度（750 W）の $0.2 \text{ }\mu\text{m/hr}$ 以下に比べて、今回の（4 kW）時は 5 倍以上で、 $0.8 \sim 3 \text{ }\mu\text{m/hr}$ と高速であった。パワーデバイスにおいては、耐圧を確保するために、動作層となる厚いドリフト層エピを必要とするため、概ね $10 \text{ }\mu\text{m/hr}$ 以上のエピ成長が求められるが、ダイヤモンドの場合は絶縁破壊電界が高く、Si より一桁小さい厚みで済むことから、今回得られたエピ成長速度は、十分に実用に耐える速度と考えられる。

以上述べたように、ウェハを平坦研磨して任意の結晶オフ角・オフ方向にする技術を確認し、ナノステップ制御可能にし、キラ欠陥のないエピ成長を可能にした。デバイスや結晶エピ成長の研究に先立ち、基礎から応用までを一貫して行う本格研究を目指す中で本腰を入れて研磨技術まで遡って一貫した技術として開発できた。

2) 高温動作を可能にするショットキー界面形成

ダイヤモンドのショットキー界面に関して、2005 年当時逆方向リークのマカニズムすら分かっていなかったため、まず基礎研究から開始した。このような段階での検討はプロセスの簡便性を考え、図 3 に記載した擬似縦型構造^[10]3 をもちいて検討した^[12]。ダイヤモンドのショットキーダイオード（SBD）を作成し、逆方向リーク電流の温度依存性解析を実施した。温度上昇と共にリーク電流は上昇し、例えば $23 \text{ }^\circ\text{C}$ においては $10 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ （@ $2 \text{ MV}/\text{cm}$ ）で、 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ においては $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ へと上昇する。これらの値は、同

電界における SiC SBD のリーク電流に対して数桁程度低い電流密度レベルとなっている。このリーク電流を、一般的に Si SBD や GaAs SBD の逆方向リーク電流解析に用いられる電界誘起バリア低下モデルを用いて解析することは難しい。これに対して大電界印加によるトンネル過程を考慮して、TFE モデル^[13]4 を用いることにより、およそ電流電圧特性の傾向は説明可能となることが分かった^{[13][14]}。アバランシェブレイクダウン^[15]5 による電流増幅での動作限界以前に熱電界放出電流によってデバイス動作限界が起るため、バリア高さを高くする必要があることが分かった。もちろんバリア高が高いと動作電圧が高くなるが、今回の高温動作を想定すると問題はない。そこで、ショットキー界面に表面処理を施して、フェルミ準位をピン止め（ピンング）するような局在準位を導入する手法に挑戦した。ダイヤモンド表面のドライ処理を検討する中で、UV/O₃ 処理^[15]により安定に局在準位を導入し、バリア高を高く保つことを見いだした。また $3.1 \text{ MV}/\text{cm}$ に達する耐電界を観測することができた。この局在準位の同定にはいまだ至っていないが、工学的に先行して用いることとした。実際この手法でショットキーダイオードを作成し、SiC^[16]と比較すると、高温でも 3 桁ほど低い逆方向リーク電流と、良好な順方向特性（高温で低くなりすぎない VF（順方向電圧）とキャリア増から来る低オン抵抗）を観測することができた^[17]（図 8）。

3) 耐熱金属

次に述べるのは、耐熱ショットキー電極探索に関するブレイクスルーである。当時すでに耐熱オーミック接合は開発されていて、TiPtAu や TiMoAu 等の TiAu 系で極めて高い耐熱性を有することが知られていた^[18]。難関はショットキー接合であった。耐熱性もさることながら、ショットキー特性、低抵抗、密着性、プロセスの容易さ（ウェハプロセス、ワイヤボンド）等の同時実現ということで、ハードルが高

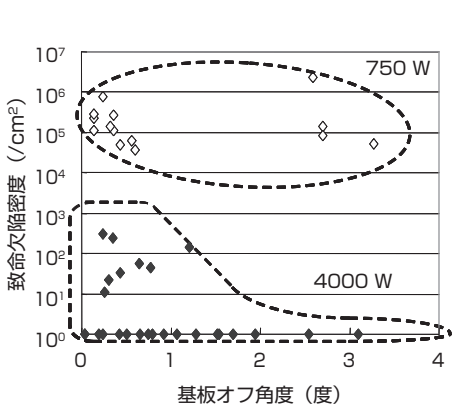
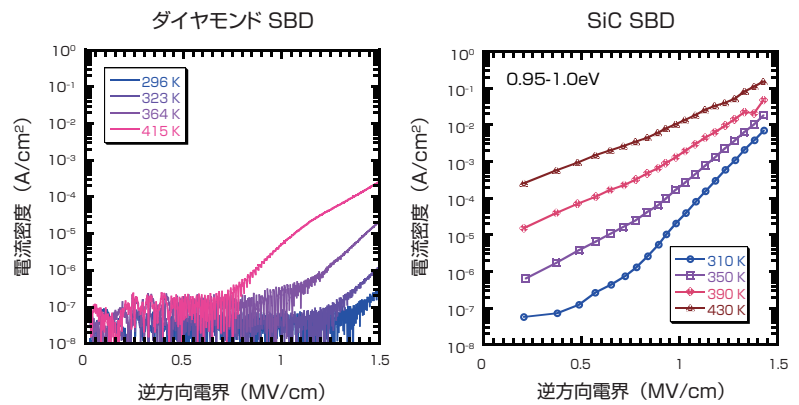


図 7 キラ欠陥と基板オフ角及びプラズマ密度の依存性



(a)ダイヤモンド
(表面処理して高バリア高のデバイス)

(b)SiCの例
(文献 [16]T.Hatakeyama らより引用)

図 8 ショットキー接合の逆方向リーク電流

く、実現性も不確かな研究であった。高温でダイヤモンドと反応しカーバイドを形成する材料とカーバイド非形成の両面から検討したが、最有力な安定カーバイドであるWCは抵抗率が高く、またさほど十分な耐熱性が得られるということではなく^[19]、カーバイド非形成の高融点金属探索に軸足を移した。数多くの金属の検討を行い、その中でMoが諸項目に優れることがわかり、有力候補として開発を進めた。ところが多くのデバイスを用いて高温保存における劣化を検討する中、無欠陥エピ層領域に成膜したショットキー接合では良好特性を示すのに、有欠陥エピ層領域では、逆方向リーク電流がアニール時間と共に増大することが判明した。この様子を図9に示す。エピ層の欠陥部分はsp³結合状態でなくなっており、 γ MoC_{1-x}の形でカーバイド形成する。エピ欠陥部分では、高温保存時間とともに逆方向リーク電流が増加するので、実用に用いることはできないことが分かった。こうした紆余曲折の中、若手ポストドク研究員から、以前の研究で用いていたRuを検討してみたいという提案があり、他部署のスパッタリング装置を借用して検討を行った。結果として、この金属の適用によって、耐熱性からプロセス容易さまで見事に上記5項目全ての特性を同時満足することを見つけ出した。加速劣化試験では欠陥有無に関わらず、図10に示すように400℃で1500時間行っても、変化しないことが分かった^[20]。表面グラファイト化による劣化の活性化エネルギーを1eVと仮定した場合、250℃30万時間以上の超耐熱性を有することが見積もられた。以上のように耐熱ショットキー金属探索は、元の計画的な研究開発からは遠いものではあった。しかし早期段階で高温劣化試験を実施することで、先に問題をつぶすことができ、開発が進んでから大問題発生とならずに済んだ。またRu提案のように「遊び心」でうまく進むことがあ

るのも、研究開発の事実であり、またよく耳にすることでもある。研究開発を進める上では、自由度を確保するのは大変重要なことと思われ、敢えて記載した。

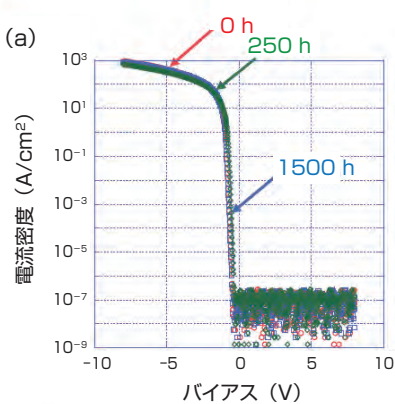
4 実証できた技術構成

以上パワーデバイスを目指したダイヤモンドの研究過程の中から、ブレイクスルーとなった開発について記述した。ダイヤモンドの優位性の実証として、図3の位置付けで、擬似縦型構造を用いて諸特性の実証を行い、プロセス・デバイス・実装技術等の開発後、縦型構造を用いた動作特性を検討し、トータルで下記のダイヤモンドの優位性を実証できた。紙面の都合で詳細は省略するが、内容としては下記のような項目に分類することができる。

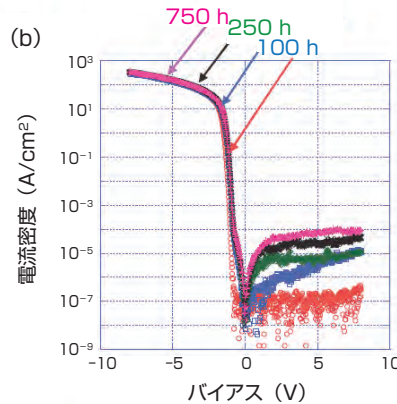
- ① 絶縁破壊電界：ショットキー接合でSiCを凌駕する3.5 MV/cmを実証^[21]
- ② ドリフト層エピ成長改善によるキラ欠陥撲滅（本稿紹介）
- ③ 表面処理技術と高φ_Bによる低リーク電流実現（本稿紹介）
- ④ 超耐熱ショットキー接合実現（本稿紹介）
- ⑤ 縦型デバイスプロセス開発^[22]
- ⑥ 電界緩和構造開発^{[23]-[25]}
- ⑦ 高温高電流密度の実証（擬似縦型の小サイズデバイスで5 KA/cm²@250℃）^[26]

また、上記以外に追加的実験として、動作時のデバイスの温度マッピングにより、ダイヤモンドはホットスポットができないことを観察するなど、ダイヤモンドならではの特性観察も実施している^[27]。

以上により、250℃高温動作かつ高電流密度を同時に達成可能なダイヤモンドダイオードを開発し、高温で低損失、高耐圧と合わせて、冷却フリーのパワーデバイスの可能性を示した。これは自己発熱でせつかく高温になっているデバイ

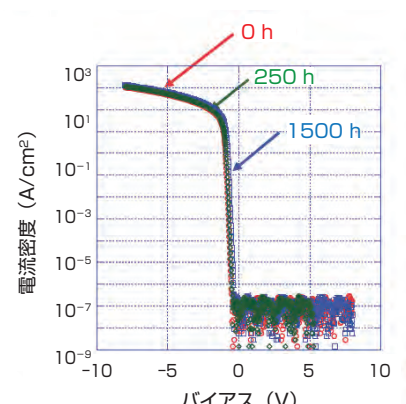


(a) エピ欠陥のない部分
400℃1500時間で、特性変化なし



(b) エピ欠陥のある部分
逆方向リーク電流増加

図9 Moショットキー接合の高温保存時の特性
(文献[20] K.Ikedaらより引用)



(a) 400℃1500時間保存

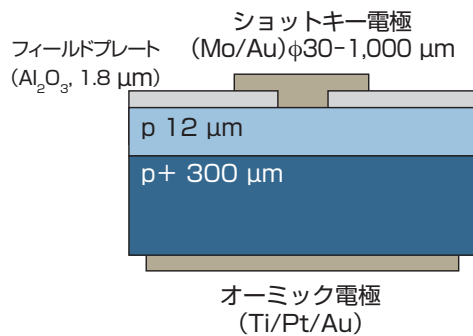
図10 Ruショットキー接合の高温保存時の特性
(文献[20] K.Ikedaらより引用)

スを、大きな冷却モジュールでわざわざエネルギーを費やして冷却せずとも、そのまま活かそうという発想である。

電界緩和構造として Al_2O_3 絶縁膜をフィールドプレートに採用した、縦型構造ダイオードを試作した。図 11 (a) に示すように Al_2O_3 をショットキー電極周囲に設置した構造である。初めてアンペア級のデバイスを試作できた結果を同図 (b) に示す^[28]。

高速動作特性については、大阪大学大学院工学研究科の舟木教授と共同研究を行い、ダイヤモンドダイオードのスイッチング特性を、Si MOSFET を用いて駆動回路を構成し、ダブルパルス法を用いてダイヤモンドショットキーダイオードの回復特性を計測した。このスイッチング特性を図 12 に掲載する^{[29][30]}。これは図 3 の構成学的ツリーの⑧として記載の内容である。

⑧の高速スイッチングについては、初試作の小型縦型ダイオードで、0.01 μsec の高速スイッチングと 40 A/cm^2 の小さな逆回復電流（低損失）を $225 \text{ }^\circ\text{C}$ の高速動作において確認し、さらに 1 A 級のデバイスで $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 動作も達成している^{[28][31]}。

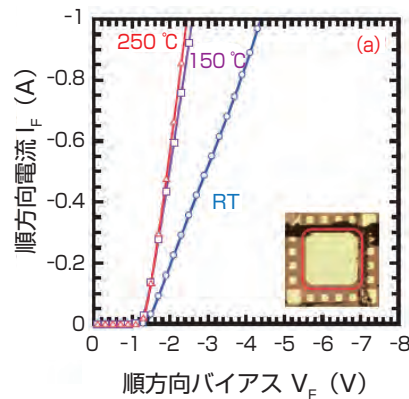


(a) フィールドプレートを電界緩和層とした縦型デバイス構造模式図

ダイヤモンドダイオードが高温で高速、低損失で動作することを、小型縦型デバイスとは言え、実際に用いる構造で実証したことで、この研究のフェーズ 1（優位性実証）ステージをクリアしたといえよう。

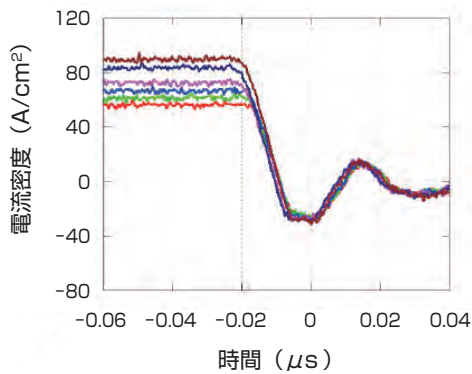
5 将来展開とロードマップ

まずは一にも二にも、低欠陥のエピ膜成長が課題である。キラ欠陥は撲滅できたものの、デバイスサイズを大きくすると著しくリーク電流が増大することが分かっており^{[32]-[34]}、欠陥を減らすことが最重要課題である。現在、欠陥の種類別、デバイス特性への影響、その低減等への取り組みを開始したところである。こういった観点での研究はこれまでダイヤモンドでは実施されておらず、一旦、基礎研究に戻る必要が出てくる。現状、X線トポグラフィをはじめとする解析より、主な欠陥種類として、刃状転位と混合転位の存在と、大まかな欠陥密度等が見えてきつつあり^{[35][36]}、デバイスへ各々どのような影響を及ぼすか詳細な検討が急がれる。実用縦型構造デバイスの実現と、実用可能な数

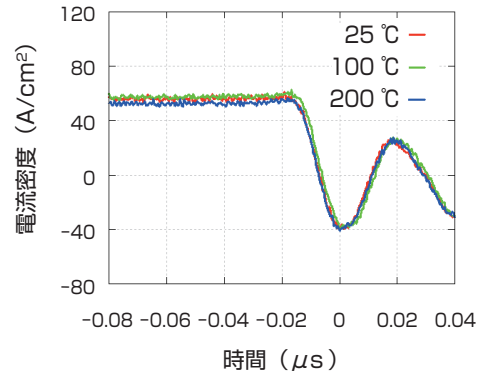


(b) ダイオードの順方向特性例

図 11 電界緩和構造を有するアンペア級ダイヤモンドショットキーダイオード（文献 [28] H.Umezawa ら より引用）



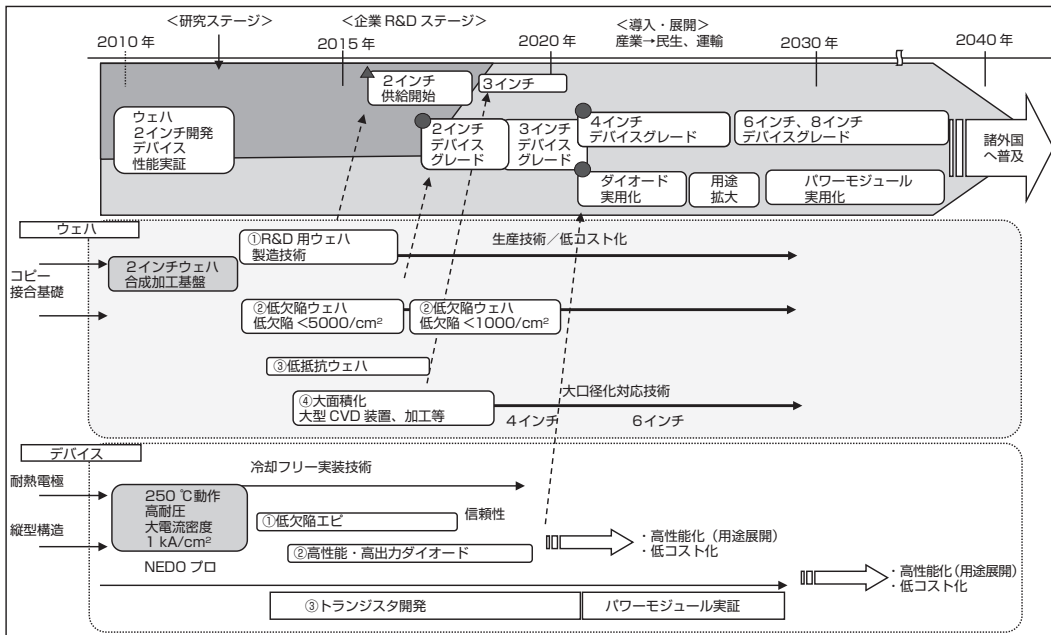
(a) 様々な電流レベルでの比較
（同一の高速回復特性を示す）



(b) 様々な温度での比較
（同一の回復特性を示す）

図 12 ダイヤモンドショットキーダイオードの回復特性（文献 [29] K.Kodama ら より引用）

表1 ダイアモンドパワーデバイス及びウェハロードマップ



A ~ 100 A のデバイス実証を目指す。

トランジスタについては、これまで横型デバイス構造で高速・高周波デバイスを目指した研究が盛んに行われてきた^{[37]-[39]}。ただ、パワーデバイスでは高耐圧、高出力可能な縦型デバイスが必須であり、過去の知見をベースに、この研究を急ぐ必要がある。さらにまたデバイスの実装等高温動作で冷却フリー動作を実現する技術も含めて、優位性を定量的に探る計画である。

経済産業省の技術戦略マップをベースに産学で調査する中で作成したウェハおよびデバイスのロードマップを表1に示す。ウェハについては企業と共同で、2インチウェハの試供体制を構築し、企業、大学等におけるデバイス研究促進に貢献する。併せて、低抵抗ウェハ、低欠陥ウェハ等実用ウェハの開発を行う。デバイスに関しては、今回のショットキーダイオードの実用化を目指した低欠陥エピ成長等の研究を行い、高出力・高性能ダイオードの実用化を促進する。

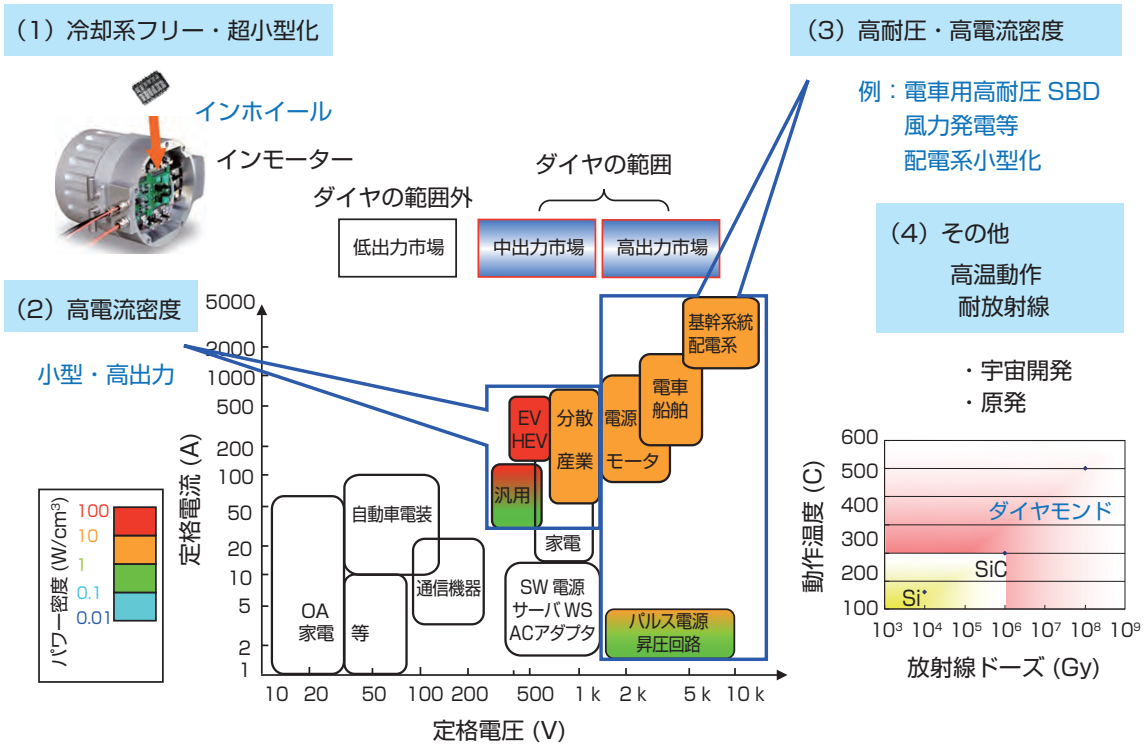


図13 ダイアモンドパワーデバイス応用展望の図

同時に多くの大学等と共に、MIS (MOS) 型や接合型のトランジスタの研究を進める。応用として、企業ヒアリング等により図 13 に示すような応用展望を念頭において開発する予定である。

長期間に及ぶ本格研究を開始したところであるが、資源、安全等で日本の国益に沿う 21 世紀の主材料、デバイスとなるよう、また早く温暖化問題の解決に役に立てるよう、開発を急ぎたいと考える。

謝辞

当時の研究員吉川博道氏（現トーマイダイヤ）、産総研特別研究員の池田和寛氏（現住友電工）、R. Kumaresan 氏（現神戸大学）、A. M. M. Omer 氏（現住友化学）、辰巳夏生氏（住友電工より出向）、研究員永瀬正範氏（現ナノシステム研究部門）および現在ダイヤモンド研究ラボ在籍の主任研究員渡邊幸志氏、研究員加藤有香子氏、ウェハ開発メンバー（副ラボ長茶谷原昭義氏、主任研究員空野由明氏、主任研究員坪内信輝氏、主任研究員山田英明氏）に深謝致します。またスイッチング特性で共同研究を実施している大阪大学舟木教授に深謝致します。

この研究の一部は、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）省エネルギー革新技术開発事業による助成のもとに行われた。

注) [http://www.enecho.meti.go.jp/policy/cool-earth_energy/cool-earth-hontai.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/policy/coolearth_energy/cool-earth-hontai.pdf)

用語の説明

用語1: 電界緩和構造: 耐圧を確保するためにデバイス構造を工夫して、電界集中を分散させて回避する。フィールドプレートや接合終端構造などがよく知られている。

用語2: ドリフト層: パワーデバイスとして動作する活性層を指す。

用語3: 縦型構造と疑似縦型構造: パワーデバイスは大電流を流すため、LSiや高周波デバイスで用いられる横型構造のデバイスではなく、縦型に電流経路を有する構造を用いて、面積全面を使って電流を流す。疑似縦型は、絶縁基板を用いた実験用デバイスで、活性層の部分のみ縦型で、電流取り出しは上面から行う。図3参照。

用語4: TFEモデル (Thermionic Field Emission Model): ショットキー接合障壁でのキャリア伝導のモデルとして3タイプある内の一つで、熱電子と電界放出の両効果が関連するモデル。

用語5: アバランシェブレイクダウン: 自由電子が電界で加速され、衝突電離を繰返し発生させ、雪崩 (アバランシェ) のように大電流が流れ破壊に至る現象。

参考文献

- [1] B.J. Baliga: Semiconductors for high-voltage, vertical channel field-effect transistors, *J. Appl. Phys.*, 53, 1759 (1982).
- [2] 大橋弘通: パワーデバイスの現状と将来展望, *FEDジャーナル*, 11 (2), 3-7 (2000).
- [3] W. Saito, I. Omura, T. Ogura and H. Ohashi: Theoretical limit estimation of lateral wide band-gap semiconductor power-switching device, *Solid-State Electron.*, 48, 1555-1562 (2004).
- [4] A.Q. Huang: New unipolar switching power device figures of merit, *IEEE Electron. Device Lett.*, 25 (5), 298-301 (2004).
- [5] 荒井和雄, 吉田貞史: 第5章 デバイス設計・評価, *SiC素子の基礎と応用*, オーム社 (2003).
- [6] H. Umezawa and S. Shikata: Diamond high-temperature power devices, *Int'l Symp. Power Semiconductor Devices*, 259-262 (2009).
- [7] 茶谷原昭義, 空野由明, 坪内信輝, 山田英明: 単結晶ダイヤモンド・ウェハの開発, *Synthesiology*, 3 (4), 272-280 (2010).
- [8] H. Yamada, A. Chayahara, Y. Mokuno, H. Umezawa, S. Shikata and N. Fujimori: Fabrication of 1 inch mosaic crystal diamond wafers, *Appl. Phys. Express*, 3, 051301 (2010).
- [9] 山田英明, 茶谷原昭義, 空野由明, 坪内信輝, 梅澤仁, 加藤有香子, 鹿田真一: インチサイズの単結晶ダイヤモンド接合ウェハの作製と大面積化に向けての取組み, *第25回ダイヤモンドシンポジウム*, 8 (2011).
- [10] 小林直人, 赤松幹之, 岡路正博, 富樫茂子, 原田晃, 湯元昇: *Synthesiology*論文における構成方法の分析, *Synthesiology*, 5 (1), 36-52 (2012).
- [11] N. Tatsumi, H. Umezawa and S. Shikata: Reduction of epitaxial defects in diamond for high power device, *Int'l Conf. SiC and Related Materials*, Th-P-33 (2007).
- [12] R. Kumaresan, H. Umezawa and S. Shikata: Parasitic resistance analysis of pseudoverlateral structure diamond Schottky barrier diode, *Phys. Status Solidi A*, 207 (8), 1997-2001 (2010).
- [13] H. Umezawa, T. Saito, N. Tokuda, M. Ogura, S.G. Li, H. Yoshikawa and S. Shikata: Leakage current analysis of diamond Schottky barrier diode, *Appl. Phys. Lett.*, 90 (7), 073506 (2007).
- [14] H. Umezawa, N. Tokuda, M. Ogura, S.G. Li and S. Shikata: Characterization of leakage current on diamond Schottky barrier diodes using thermionic-field emission modeling, *Diamond Relat. Mater.*, 15, 1949-1953 (2006).
- [15] H. Umezawa, N. Tatsumi, S. Shikata, K. Ikeda and R. Kumaresan: Increase in reverse operation limit by barrier height control of diamond Schottky barrier diode, *IEEE Electron. Device Lett.*, 30 (9), 960-962 (2009).
- [16] T. Hatakeyama, M. Kushibe, T. Watanabe, S. Imai and T. Shinohe: Optimum design of a SiC Schottky barrier diode considering reverse leakage current due to a tunneling process, *Mater. Sci. Forum*, 433-436, 831-834 (2003).
- [17] H. Umezawa, K. Ikeda, R. Kumaresan and S. Shikata: High temperature characteristics of diamond SBDs, *Mater. Sci. Forum*, 645-648, 1231-1234 (2010).
- [18] Y. Nishibayashi, N. Toda, H. Shiomi and S. Shikata: Thermally stable ohmic contact to boron doped diamond films, *4th Int'l Conf. New Diamond Science and Technology*, 717-720 (1994).
- [19] M. Liao, J. Alvarez and Y. Koide: Tungsten carbide Schottky contact to diamond toward thermally stable photodiode, *Diamond Relat. Mater.*, 14 (11-12), 2003-2006 (2005).
- [20] K. Ikeda, H. Umezawa, K. Ramanujam and S. Shikata: Thermally stable Schottky barrier diode by Ru/Diamond,

- Appl. Phys. Express*, 2, 011202 (2009).
- [21] 梅澤仁, 辰巳夏生, 山口博隆, 加藤智久, 池田和寛, R. Kumaresan, 鹿田真一: ダイヤモンドのエピ欠陥観察とショットキーダイオード特性相関, 第17回SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会, P-76, (2008).
- [22] R. Kumaresan, H. Umezawa, N. Tatsumi, K. Ikeda and S. Shikata: Device processing, fabrication and analysis of diamond pseudo-vertical Schottky barrier diodes with low leak current and high blocking voltage, *Diamond Relat. Mater.*, 18, 299-302 (2009).
- [23] K. Ikeda, H. Umezawa and S. Shikata: Edge termination techniques for p-type diamond Schottky barrier diodes, *Diamond Relat. Mater.*, 17 (4-5), 809-812 (2008).
- [24] K. Ikeda, H. Umezawa, N. Tatsumi, R. Kumaresan and S. Shikata: Fabrication of a field plate structure for diamond Schottky barrier diodes, *Diamond Relat. Mater.*, 18 (2-3), 292-295 (2009).
- [25] H. Umezawa, M. Nagase, Y. Kato and S. Shikata: High temperature application of diamond power device, *Diamond Relat. Mater.*, 24, 201-205 (2012).
- [26] S. Shikata, K. Ikeda, R. Kumaresan, H. Umezawa and N. Tatsumi: Recent progress of diamond device toward power application, *Mater. Sci. Forum*, 615-617, 999-1002 (2009).
- [27] H. Umezawa and S. Shikata: Characterization of temperature distribution of forward biased Schottky barrier diode on diamond wafer, *Eur. Conf. SiC and Related Materials*, TueP-15 (2010).
- [28] H. Umezawa, Y. Kato and S. Shikata: 1Ω On-resistance diamond vertical-Schottky barrier diode operated at 250 °C, *Appl. Phys. Express*, 6, 011302 (2013).
- [29] K. Kodama, T. Funaki, H. Umezawa and S. Shikata: Switching characteristics of a diamond Schottky barrier diode, *IEICE Electron. Express*, 7 (17), 1246-1251 (2010).
- [30] T. Funaki, K. Kodama, H. Umezawa and S. Shikata: Characterization of fast switching capability for diamond Schottky barrier diode, *Mater. Sci. Forum*, 679-680, 820-823 (2011).
- [31] T. Funaki, M. Hirano, H. Umezawa and S. Shikata: High temperature switching operation of a power diamond Schottky barrier diode, *IEICE Electron. Express*, 9 (24), 1835-1841 (2012).
- [32] H. Umezawa, K. Ikeda, R. Kumaresan, N. Tatsumi and S. Shikata: Device characteristics dependence on diamond SDBs area, *Mater. Sci. Forum*, 615-617, 1003-1006 (2009).
- [33] H. Umezawa, Y. Mokuno, H. Yamada, A. Chayahara and S. Shikata: Characterization of Schottky barrier diodes on a 0.5-inch single-crystalline CVD diamond wafer, *Diamond Relat. Mater.*, 19 (2-3), 208-212 (2010).
- [34] R. Kumaresan, H. Umezawa and S. Shikata: Vertical structure Schottky barrier diode fabrication using insulating diamond substrate, *Diamond Relat. Mater.*, 19 (10), 1324-1329 (2010).
- [35] H. Umezawa, Y. Kato, H. Watanabe, A.M.M. Omer, H. Yamaguchi and S. Shikata: Characterization of crystallographic defects in homoepitaxial diamond films by synchrotron X-ray topography and cathodoluminescence, *Diamond Relat. Mater.*, 20 (4), 523-526 (2011).
- [36] Y. Kato, H. Umezawa, H. Yamaguchi and S. Shikata: X-ray topography used to observe dislocations in epitaxially grown diamond film, *Jap. J. Appl. Phys.*, 51, 090103 (2012).
- [37] H. Taniuchi, H. Umezawa, T. Arima, M. Tachiki and H. Kawarada: High-frequency performance of diamond field-effect transistor, *IEEE Electron. Device Lett.*, 22 (8), 390-392 (2001).
- [38] K. Hiramata, H. Sato, Y. Harada, H. Yamamoto and M. Kasu:

Diamond field-effect transistors with 1.3 A/mm drain current density by Al_2O_3 passivation layer, *Jap. J. Appl. Phys.*, 51, 090112 (2012).

- [39] T. Iwasaki, Y. Hoshino, K. Tsuzuki, H. Kato, T. Makino, M. Ogura, D. Takeuchi, T. Matsumoto, H. Okushi, S. Yamasaki and M. Hatano: Diamond junction field-effect transistors with selectively grown n^+ -side gates, *Appl. Phys. Express*, 5, 091301 (2012).

執筆者略歴

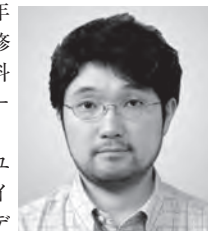
鹿田 真一 (しかた しんいち)

1978年京都大学工学部卒業、1980年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。企業を経て、2004年産業技術総合研究所入所。現在、ユビキタスエネルギー研究部門総括研究主幹。ワイドギャップ半導体デバイス、弾性波デバイス、ダイヤモンドの材料及びデバイス応用の研究開発に従事。大阪大学博士(工学)。兼千葉大学大学院工学研究科客員教授。IEEE Senior member、応用物理学会、電子情報通信学会各会員。2004年12月に本研究の基本長期計画を策定し、この論文では全体に渡って開発を主導した。



梅沢 仁 (うめざわ ひとし)

1998年早稲田大学理工学部卒業。2000年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。2002年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。早稲田大学理工学研究センター助手、同大生命医療工学研究所助手を経て、2005年産業技術総合研究所入所。現在、ユビキタスエネルギー研究部門主任研究員。ダイヤモンドの材料合成技術、評価技術、及びデバイス応用の研究開発に従事。早稲田大学博士(工学)。応用物理学会、IEEE会員。入所以降、メインの実務担当者として、この論文では研磨以外の研究全体を担当した。



査読者との議論

議論1 論文全体

質問・コメント(小林 直人:早稲田大学研究戦略センター)

この論文は、ダイヤモンドのパワー半導体デバイス化をめざした優位性の実証研究を総合的に行った結果を報告したものであり、著者らが長年にわたり積み重ねてきた個々の要素技術をベースにして実際に実証まで示した統合的成果として、構成学としても意義のある論文となっていると考えられます。特に、これからダイヤモンドのパワーデバイスの実用化ないし利用をめざしている読者に対して、より有効な指針や方向性を与えることができると考えられます。ただし、記述に分かりにくい点や不確実な点がありますので、丁寧な推敲が必要と考えられます。

質問・コメント(清水 敏美:産業技術総合研究所)

この研究は、物質中で最高の性能を多数有するダイヤモンド材料を用いて、次世代パワー半導体デバイスとしての優位性実証を確認した結果を示したものであります。ブレイクスルーを交えながら4つの構成要素を解決してきた本格研究に値する内容を記述しており、シンセシオロジーとしてふさわしい論文と考えます。論理構成に大きな問題はないのですが、表現記述に関して、一般読者により理解しやすい工夫が必要と思います。これらのポイントが補足されることによりさらに充実した論文になると思います。

議論2 研究シナリオや具体的応用

質問・コメント（小林 直人）

図3にダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証研究のシナリオ（構成学的ツリー図）が描かれています。まさに構成学としてのこの論文の眼目であり、とても重要であると思います。ただ、①絶縁破壊、②キラ欠陥撲滅・・・、と書かれている項目の番号の意味とそれらの関係が良く分かりません。第4章でその説明がありますが、時間の流れを示しているのか、研究にとりかかかった順序を示しているのかなどが不明ですので、この論文や図のキャプションでの説明が必要でしょう。

回答（鹿田 真一）

番号は結果としての、実施の順です。図に注釈入れました。おおむね2004年12月に基本計画を考えたときの筋書きに沿って進んでおり、平行して研究を進めているウェア開発とあわせて、表1に示したロードマップへ繋がってきております。今後の課題は、図3の左上に例示したような、実用化に向けたブレークスルーですが、多くの機関と協力して日本で成し遂げたいと考えます。

質問・コメント（小林 直人）

第1章にダイヤモンドパワーデバイスの応用について簡単に書かれていますが、この論文の成果の実用化に関する最も重要な部分なので、図（例えば、http://www.chubu.meti.go.jp/jisedai_jidoushiya/chiubu/pdf/sansoken/sansoken_8.pdf 内の図）なども使用して、より詳細に述べた方がよく、それが読者の理解を助けることになると思います。

回答（鹿田 真一）

紙面の都合で割愛していた図を入れました。具体的な応用機器名を入れています。IEAのENERGY OUTLOOKではCO₂削減に及ぼす役割の67%が省エネ技術であり、それに対応すべく早期実用化を、目指したいと考えています。この論文で例題デバイスとして取り組んだショットキーダイオードは、SiCの例を見ても、Si pnダイオードに比べてメリットが大きく、中出力機器から可能性があらうかと考えます。その他ダイヤモンドは、γ線、中性子線耐性に優れるので、小電流デバイスでも可能性が考えられます。

議論3 低損失パワーデバイス性能の比較とダイヤモンドデバイスの研究開発状況

質問・コメント（清水 敏美）

種々の物性値を、物質としてのダイヤモンド、SiC、GaN、Siと比較していますが、実際にデバイスにそれらの物質が実装された際のデバイスとしてのベンチマーク情報が知りたいところです。言い換えれば、将来のパワーデバイス応用に関して、ダイヤモンドはどの部分で特徴を発揮するのか、その根拠や理由は何なのかなどを記述してください。荒井和雄氏が執筆したSynthesiology論文「SiC半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略」（Vol. 3, No. 4, pp. 259-271）において、パワー半導体のアプリケーションと要求デバイス性能の関係を明確に示した概念図があります（pp. 269）。例えば、この図にダイヤモンドの性能を重ねるなど、理解が容易な図の作成が必要だと思います。

回答（鹿田 真一）

新たなイメージ図を作成しました。もう少し具体的に電流、電圧に即した応用を類型で示しました。実際にはこれに、冷却系フリーで、高温の軸をいれて、そのまま出力を落とさずに使うダイヤモンドのメリットが特徴とならうかと考えています。

質問・コメント（小林 直人）

この論文では、著者らが長年にわたり積み重ねてきた要素技術の

それぞれの内容と意義を詳細に述べていますが、国内外のこの間の研究開発状況についての記述がなく、この研究の位置付けにやや不透明な印象を与えています。例えばT.Iwasaki他、Applied Physics Express 5 (2012) 091301、など他の研究開発についても言及されることを期待します。また、本成果は特許としても活かされていると思いますので、特許情報の引用も入れた方がよいと思います。

回答（鹿田 真一）

トランジスタについて論文を引用して、展望を入れました。ご指摘の最近の論文はpn接合ベースのデバイス研究ですが、用途としては超高耐圧等が想定されます。ただnA級から100 A級に10桁以上の向上が必要です。ダイヤではn+が未だできておらず、さらなる材料の研究が望まれます。当面はSiCと同様に、低電圧駆動可能なユニポーラ系デバイスが先行すると考えられます。この論文ではすでに1 A級なので、欠陥を減らして、2桁の向上を目指します。特許については、ダイヤモンドに特有の特許ははじめ数件、登録になっています。

議論4 アドバンテージ実証に関して

質問・コメント（清水 敏美）

「1. 研究の目的とアウトカム」の最後に、「・・・アドバンテージ実証として、フェーズ1の研究開発を実施した・・・」とあります。例えば、創業研究には、基礎研究から始まって、動物を用いて実施する非臨床試験、人での薬物の有効性と安全性試験（フェーズ1、フェーズ2、フェーズ3）を実施する臨床試験があります。ここでは実証の対象において動物か人かという大きな研究フェーズの相違があります。デバイス研究においては、図3にあるコンセプト実証のフェーズ1研究と実用デバイスとしての実証のフェーズ2とを区別する大きな構成要素や技術要素は何でしょうか。それらは著者が考える個人的な差別化でしょうか、それとも一般的に受け入れられている差でしょうか。デバイス研究者では当たり前でも幅広い読者にとっては、フェーズ1とフェーズ2の位置付けが明確ではありません。

回答（鹿田 真一）

フェーズ1のコンセプト実証は、例えば1 A級で確認して原理的に可か否かという意味で、動物実験。フェーズ2の実用デバイス開発は、搭載可能な100 A級で実証という意味で、人での有用性確認に相当します。信頼性試験は、安全性試験ということでフェーズ3になります。この後、エンジニアリングサンプル、製品とフェーズが上がっていきます。呼び方は企業によって異なりますが、概念は一般的なものです。図3に補足入れました。

議論5 トランジスタの性能実証に関して

質問・コメント（清水 敏美）

ダイヤモンド半導体を用いたパワーデバイス実証を目指すためには、ダイオードのみでなくトランジスタ性能の実証も必要不可欠と考えます。つい最近、産総研の研究グループによって接合型電界トランジスタの動作実証に初めて成功した学術論文が発表されました。当Synthesiology論文ではダイヤモンド半導体を用いたトランジスタ動作に関する今後の見通しに関して全く言及されていません。究極のパワーデバイスを目指すのであればダイヤモンド材料を用いたトランジスタ開発の最新技術動向に関して何らかのコメントが必要だと思います。

回答（鹿田 真一）

昔から山のようにトライアル成果がありますが、残念ながら高周波狙いの横型デバイスのみで、縦型構造で将来の100 A級に繋がるプロトタイプという成果はありません。しかし、トランジスタについての記載がないのはご指摘のとおりなので、記載しました。これは多くの機関の参画によって、研究していかねばならない項目かと考えます。

沖縄海域の海洋地質調査

— 海底鉱物資源開発に利用できる国土の基盤情報の整備 —

荒井 晃作*、下田 玄、池原 研

沖縄海域の海洋地質調査は、国土の基盤情報整備の一環として2008年度から開始された。沖縄海域の九州から台湾に続く島嶼は琉球弧と呼ばれ、フィリピン海プレートの琉球海溝における沈み込みに伴って形成された島弧である。琉球弧の西側には沖縄トラフと呼ばれる背弧海盆が形成されており、活動的な海底火山や海底熱水活動が知られている。鉱床の胚胎場には地質構造の規制が存在すると考えられるので、海底鉱物資源が期待される場の海洋地質情報の整備は資源賦存場の絞り込みにとっても有効である。周囲を海洋に囲まれた日本にとって、海底鉱物資源の開発に向けて期待はますます大きくなる。国土の基盤情報の一つの利用方法として、地質現象に基づく海底鉱物資源の開発に向けた方法論を提示する。

キーワード：海洋地質、地質構造、沖縄トラフ、背弧海盆、鉱物資源

Marine geological mapping project in the Okinawa area

– Geoinformation for the development of submarine mineral resources –

Kohsaku ARAI*, Gen SHIMODA and Ken IKEHARA

AIST has been conducting marine geological surveys in the Okinawa area to construct geological maps since 2008. The chain of islands extending from Kyushu to Taiwan in the Okinawa area is called the Ryukyu Arc, and was formed with the subduction of the Philippine Sea Plate beneath the Eurasian Plate along the Ryukyu Trench. The Okinawa Trough is a back-arc basin formed behind the Ryukyu Arc. Active submarine volcanoes and hydrothermal phenomena are known to exist in the trough. Because large scale mineral deposits may exist in relation to the geological structures, collecting the marine geological information around the area where submarine mineral resources are expected is very effective for grasping the location of resource-rich zone. Being surrounded by sea, Japan is expected to increase marine utilization within the Exclusive Economic Zone (EEZ) in the future. Methods for developing submarine mineral resources based on the geological phenomena are presented as tools for exploiting fundamental geological information.

Keywords: Marine geology, geological structures, Okinawa Trough, backarc basin, marine mineral resources

1 はじめに

日本周辺海域の地質情報の整備として実施してきた海洋地質調査は、20万分の1海洋地質図の作成のための調査が1974年度に工業技術院特別研究「日本周辺大陸棚海底地質総合研究」として本格的に開始され、2006年度に日本主要四島（本州・北海道・九州・四国）周辺について終了した。その後、国土の基盤情報の未整備海域である「沖縄」周辺海域の海洋地質調査を2008年度から開始した（以下、沖縄プロジェクトと呼ぶ）。沖縄プロジェクトではまず2008～2010年度の3年間に沖縄島周辺の調査を実施し、2011年度のGH11航海では北部沖縄トラフの調査を行った。産総研の調査航海は「GH08航海」のように示され、地質調査総合センターの英語名であるGeological Survey of Japanの頭文字Gと使用船舶である第2白嶺丸の頭文字H、ならびに実施年度（西

暦）で航海名を表している。2012年度からの4年間は鹿児島県沖永良部島、徳之島および奄美大島の周辺海域の調査を計画している。その後、南部沖縄トラフの広域調査を行った後に、南琉球の島嶼（宮古島、石垣島および与那国島）周辺の調査を実施する予定である^[1]。

沖縄海域の調査の計画を策定する時期と前後するように、日本の海洋開発・利用に関しても大きな変化があった。2007年に海洋基本法が制定され、2008年にはこれに基づいて海洋基本計画と海洋エネルギー・鉱物資源開発計画が策定された。海洋エネルギー・鉱物資源開発計画の中では、2018年までの海底熱水鉱床の商業化がうたわれている。また、世界金融危機（2007年）以降の資源価格の世界的な高騰等もあり、鉱物資源をめぐる情勢も大きく変化してきた。これらの背景により海底鉱物資源の開発の重要性が急激に増すことになった。今後、日本が有する広大な

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7

Geological Survey of Japan, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan * E-mail: ko-arai@aist.go.jp

Original manuscript received October 2, 2012, Revisions received January 31, 2013, Accepted February 15, 2013

排他的経済水域（EEZ）の管理・保全や開発に資する地質情報を整備することは、日本周辺の海洋の開発・利用という観点から重要である。

2012年4月には、国連に申請中の日本の大陸棚延伸が一部を除き認められ^[2]、広く報道された。新たに大陸棚に認められたのは、四国海盆海域、小笠原海台海域、南硫黄島海域および沖大東海嶺南方海域の一部で、その広さは約31万km²にも及ぶ(図1)。これらの広大な範囲には、海底鉱物資源の期待される海域が含まれる。鉱床の胚胎場には地質構造の規制が存在すると考えられるので、海底鉱物資源が期待される場の海洋地質情報の整備は資源賦存場の絞り込みに有効である。EEZを含めてこれらの海域の管理・保全や開発の計画のために地質情報の整備が必要となる。これらの調査を効果的に実施することによって、知的基盤整備を加速することは日本の国益につながる。

このような背景からこの論文においては、沖縄海域の国土の基盤情報整備の意義とその状況を報告する。沖縄プロジェクトの調査海域には活動的背弧海盆の沖縄トラフが含まれる。沖縄トラフには九州から延びるトカラ列島とそれに連続する海底火山での火山活動、および活動的な海底熱水活動もすでに知られている^{[3]-[5]}。近年期待の高まっている海底鉱物資源の開発に向けての産総研としての取り組み方について現状と課題を考える。

2 海洋地質図の調査と地質情報の整備の方法と利用

海洋地質図は、調査船を利用した海洋地質調査を基にして作成され、2012年9月末の段階で76枚の地質図が出版されている(図2)。日本の周辺海域の海洋地質図は8枚の1/100万の海洋地質図として出版済みである。また、より詳細な地質図として1/20万の海洋地質図シリーズが出版されている。1/20万海洋地質図シリーズは、表層堆積図および海底地質図に分けられ、海底地質図には重力・磁力異常図が付けられている。

産総研の海洋地質調査では、効率的に船を利用するために、主に夜間に航走観測を行い、昼間に停船して堆積物の採取を実施している(図3)。これらの調査では画一的なデータの取得を目指している。画一的なデータとは、系統的・網羅的にデータが取得され、かつデータの取得項目およびその手法に大きなばらつきがなく、地質学的解釈に十分な質が保たれているデータである。表層堆積図は海底表層から採取した堆積物を基に作られる図面で、グラブ採泥器や柱状採泥器等により試料を採取し、その粒度や堆積物の組成からその海域の堆積作用を示す地質図である。グラブ採泥器には、CTD(電気伝導度水温水深計)、濁度計、採水器および海底カメラが取り付けられており、同時に試料採取地点の海洋環境に関する情報を得ることができる。表層堆積図は堆積学、海洋学および地球化学等を総合的

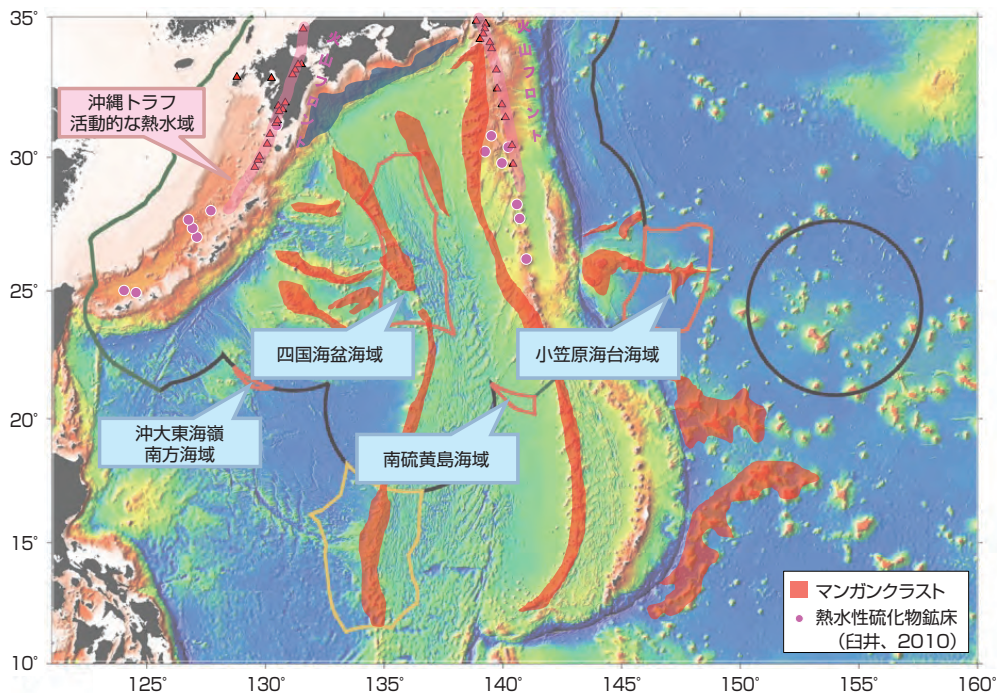


図1 大陸棚の拡大が認められた海域および主な活動的な熱水域

日本周辺の海底地形および排他的経済水域。黒線は公海、緑線は隣国との境界を示す。橙色は拡大が認められた海域を示し、黄色は審査先送りの海域(内閣官房総合海洋政策本部:平成24年版海洋の状況および海洋に関して講じた施策)。沖縄トラフは活動的な熱水域の存在が知られている海域である^[3]。

に解釈して作成される。一方の海底地質図は、反射法音波探査および重力・磁力等の物理探査データを基にした海底面下のイメージ図である。海底地質図は音波探査断面および採取した堆積物の年代値を基に作成され、地質構造や層序を示している。構造地質学、音響層序学、地球物理学、堆積層序学等を統合的に解釈して作成される。

これらの国土の基盤情報のデータ取得から利用までの流れをシナリオとして図4に示す。船上調査で取得されたさまざまなデータはデータベースや海洋地質図として公表され、重要な知的基盤情報となる。データや図面の利用の一例を図4では「地質災害リスク評価」および「海底資源評価」として示している。例えば、海底地質図は、海底活断層の

存在やその地質学的な活動時期が把握できるので、海岸沿いの建築物の地質災害リスクの評価のための資料として利用されている。また、この論文で重点をおいて論じた海底熱水鉱床のポテンシャル把握への利用のみならず、表層堆積物は砂や礫といった骨材資源になり得る堆積物の分布の把握に利用されている。

3 活動的な琉球弧・沖縄トラフ背弧海盆の地質と構造

沖縄プロジェクトでは海域の地質情報の整備を目指して、主に琉球弧の島嶼周辺海域の地質情報の取得を行っている。琉球弧の地質層序に関して、これまでの研究は、琉球弧全体から見ればわずかでしかない陸上踏査が主体であり、その構造発達史はまだ解明されていない点が多く残されている。沖縄プロジェクトによる海洋地質データの取得は新しい知見を提供できるだろう。

琉球弧は九州と台湾の間に位置する長さ約1,200 kmにもおよぶ島嶼であり、これは、フィリピン海プレートが琉球海溝に沿って沈み込むことによって形成された島弧-海溝系である。琉球海溝の最大水深は6,000 mを超え、およそ島弧と平行に北東-南西方向に配列している。琉球弧南部においてはその方向がおよそ東西方向の配列に変わる(図5)。琉球海溝の前弧斜面は、四国・本州沖合の南海トラフの沈み込み帯の前弧斜面と比べると前弧海盆がほとんど無いか規模が小さく、目立った外縁隆起帯が存在しない。これは、フィリピン海プレートの沈み込み様式の違いに起因する可能性がある。目立った外縁隆起帯が存在しないのは琉球海溝の中・北部の沖縄島沖より北側の琉球海溝の斜面で顕著である^[7]。琉球弧は地質学的な累帯構造の違いから、北琉球・中琉球・南琉球の3つに分けられる^[8]。この境界部は、北からトカラ海峡および慶良間海裂と呼ばれる水深1,000 mを超す北西-南東方向に延びるへこみによ

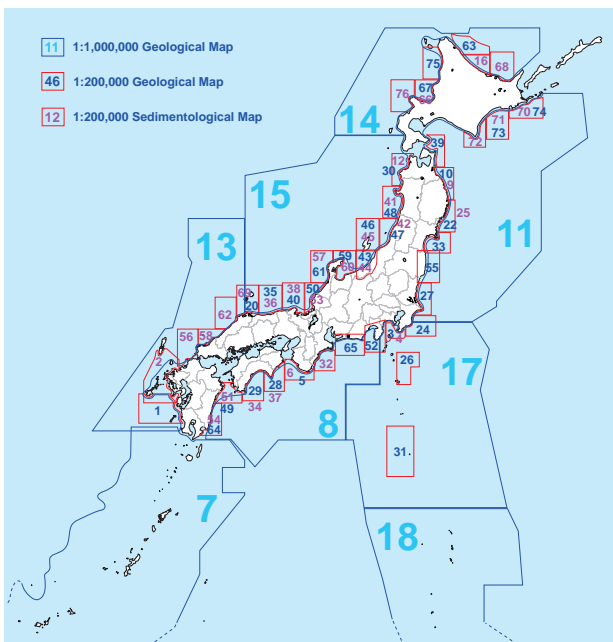


図2 日本周辺海域の海洋地質図の出版状況
青枠が100万分の1の海洋地質図、赤枠で示した四角が20万分の1の海洋地質図がすでに出版されている(産総研 URL: より引用)。

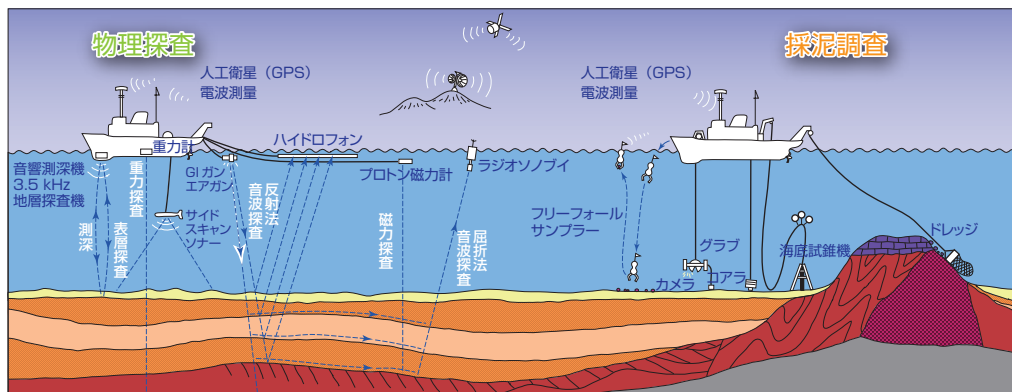


図3 海底の調べ方の模式図 ([6] より引用)
航走観測(物理探査)および停船観測(採泥調査)のイメージ図。1/20万分の海洋地質図の作成には、航走観測には測深、表層探査、重力探査、反射法音波探査および磁力探査を用いる。停船観測には、グラブ採泥器、コアラ、ドレッジが用いられる。

て特徴付けられる。これらの構造は島弧を横切る方向に発達する断層運動に伴って形成されている。GH08 航海でも、沖縄島東方のフィリピン海側にはいくつかの特徴的な島弧を横切る方向に発達する活動的な正断層を見つけている^[9]。これらの調査の結果、琉球弧およびその前弧斜面上部においては、多数の島弧を切る断層運動が陸に近い浅海域にも発達していることが明らかとなった。これらの断層の活動は津波を発生させる可能性もあるので、今後より詳細な断層の分布や活動度を明らかにする必要がある。沖縄県における歴史資料には、被害地震や津波の記録は少ないが、過去に八重山諸島や宮古諸島において甚大な被害をもたらしたとされる明和 8 年八重山地震津波 (1771 年) が知られている^[10]。沖縄プロジェクトとして琉球弧の島嶼周辺を画的に調査し、地質災害のリスクを評価することは減災に向けても極めて重要である。

琉球弧の北西側には沖縄トラフと呼ばれる背弧海盆が形成されている^[11]。活動的な背弧海盆である沖縄トラフも、琉球弧とおおよそ並行に続いており、長さ 1,000 km、幅 200 km で、北部から南部に向かって軸部の水深は徐々に深くなり、最大水深は南部で 2,000 m を超す。現在の沖縄トラフの形成開始時期に関しては、まだ議論が残るものの、南部沖縄トラフでは音響層序と陸上層序の対比から更新世以降とされている^[12]。沖縄トラフには九州から沖縄島北西沖へ続く火山フロントが存在し、海底火山が分布している^{[4][13]}。琉球弧ならびに背弧海盆を形成した新生代テクトニクスに関しては、多くの研究が行われているが^{[11][14]} 北部のデータが乏しく、いまだ全体像が把握できていない。したがって、GH11 航海では北部沖縄トラフのデータ取得を行った。沖縄トラフは大陸性の地殻が引きのばされるリフティングのステージにあると考えられるが、沖縄トラフ北部ではトラフ底

を埋める成層した堆積層が発達し、この堆積層を切る正断層群が多数認められた (図 6)。断層面の傾斜方向は軸の北西側では北西方向に、南東側では南東方向にブロック状に回転しており^[15]、その軸部において堆積層が最も薄くなる。このリフティングの軸は地形的な最深部とは必ずしも一致していない。また、リフティングの軸は沖縄トラフを横切る方向である北東-南西方向に連続するが、断層によって切られて雁行状に配列している^[16]。このような観察事実から、この海域の地質理解のためには地形的な最深部を見るだけではなく、海底面下の地質構造を調べることが重要であると言える。

4 海底鉱物資源の開発への展開

次に、海洋地質図の利用の一例として、海底鉱物資源の開発への活用を議論する。産総研は既述の通り、地質情報の整備の一環として海底の地質構造や表層堆積物の採取・分析のノウハウを長年に渡って培ってきた。鉱床の胚胎場には地質構造の規制が存在すると考えられる^[17]。したがって、海底鉱物資源が期待される場の海洋地質情報の整備は資源賦存場の絞り込みにとっても有効と期待される。特に、産総研の行う画的なグリッド状の海洋地質調査によって、これまで見落とされていた新たな海底鉱物資源の賦存可能性場の発見の可能性がある。

なお、海底鉱物資源評価においては、国の複数の機関がそれぞれの機関の有する技術や機器・機材の特徴を活かして取り組んでいる。海洋研究開発機構および大学関係機関らは海底鉱物資源の調査を実施し、特に「もの」の調

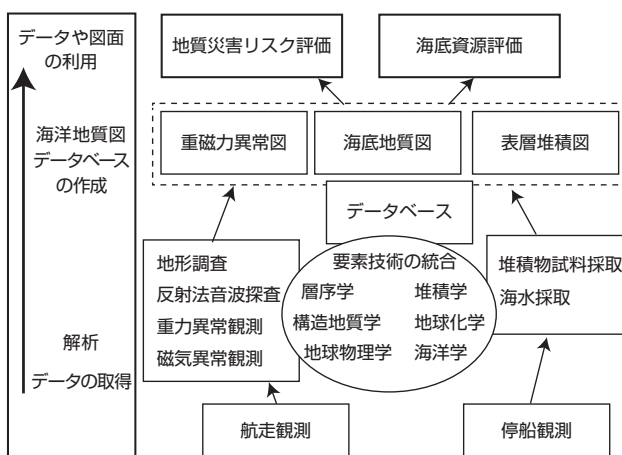


図 4 20 万分の 1 海洋地質図のデータ取得から海洋地質図の作成とデータや地質図利用のシナリオ

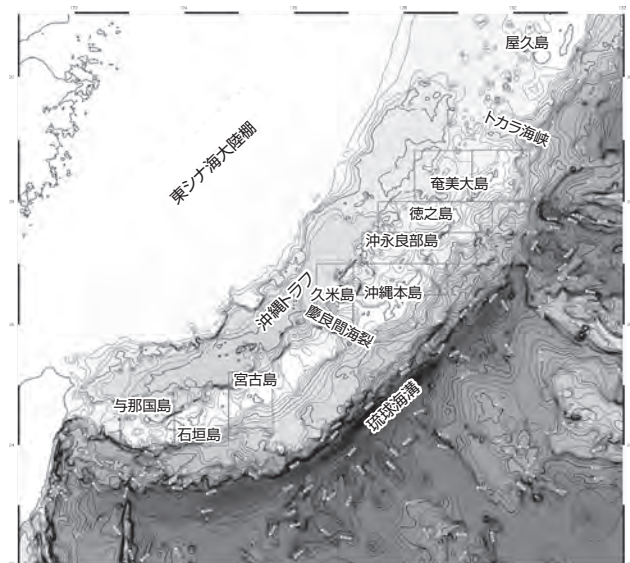


図 5 沖縄プロジェクトの調査範囲と海底地形 ([1] より引用) 四角は地質図を作成する予定のエリアを示す。沖縄プロジェクトでは島嶼周辺で 10 枚の 20 万分の 1 の地質図を作成する。

査を行い成因に関する研究等を行っている。例えば、IODP（統合国際深海掘削計画）では、沖縄トラフの伊平屋北熱水活動域で海底微生物研究をターゲットとした科学掘削が行われた^[18]。一方、石油天然ガス・鉱物資源開発機構は、特に資源開発の有望海域にターゲットをおいて海底着座式ボーリングマシン（BMS）等を使ってコア試料を採取し、資源量の評価を実施している。海底鉱物資源評価においては、「もの」を中心としたこれらの組織の研究と、広域の「場」を中心とした産総研の研究とは、互いに協力・連携しながら推進していく必要がある。

以下に、これまでの沖縄プロジェクトの調査例として、産総研の海洋地質調査を基にした海底鉱物資源の開発に向けた調査研究の展開と課題を述べる。

4.1 沖縄トラフにおけるポテンシャルサイト検討の視点

ここで、熱水活動が現在存在するか過去に存在した可能性のある場所を「ポテンシャルサイト」と呼ぶ。活動的な背弧海盆としての新しい地質現象が認められる沖縄トラフでは、トラフのリフティングの軸とそれを横切る方向の断層の接合点付近、および島弧-海溝系に支配される海底火山列の海底カルデラにおいて熱水活動の存在の可能性が指摘されている^[5]。これまで日本周辺海域では、火山フロントや背弧リフト帯の海底カルデラや構造的凹地で熱水鉱床の賦存が確認されて探査が行われてきた。その主な発見域は伊豆・小笠原弧および沖縄トラフ海域である（図1）。つまり、海底下の地質構造を理解し、断層系の分布を把握することや、海底火山やカルデラの分布を把握することは、沖縄トラフに存在する未知の熱水鉱床を探し出す可能性を導くものである。さらに、同じような地質学的なバックグラウンドをもつ海域においては、現在は非活動的な場所にも過去の活動による鉱床形成の可能性がある。沖縄プロジェクトの海洋地質調査で1/20万の地質図を作成する調査海域

（図5）はトラフには及んでいない。ポテンシャルサイトの検討には、調査海域を拡大して沖縄トラフの背弧海盆の地質情報を整備する必要がある。

4.2 新たなポテンシャルサイトの発見に向けた画一的なグリッドデータ取得の意義

海洋地質調査において、的確に地質構造を把握するために、海域における航走観測では、船を自由な方向に走らせてデータが取れる利点を活かし、一般的には地質構造つまり変形の方に直交するように測線を設定する。近年の1/20万海洋地質図の調査では、地質構造に直交する航走観測の測線間隔は約2マイルで設定し、マルチナロービーム測深機による海底地形、パラメトリックSBP（サブボトムプロファイラー）による表層探査、反射法音波探査、重力・磁力探査等の物理探査を同時に行っている。さらに、その測線に直交する方向に約4マイル間隔で測線を設定している。これにより、約5 km以上の長さをもつ断層や褶曲軸のような地質構造を把握可能である。また、堆積物の採取地点もこの直交する測線の交差点に設定されるため、グリッドを作るように試料採取が行われている。このような画一的なデータセットの取得と解析は、海域の全体像の把握に不可欠であるとともに、恣意的に観測を行うと見落とされてしまう情報を得ることができる。

4.3 ポテンシャルサイトにおける可能な調査研究の現状と課題

4.3.1 航走観測の調査と課題

反射法音波探査は海底地質構造を知るための基礎的な調査方法の一つである。沖縄トラフのリフティングの軸がそれと斜向する断層によって切られている接合部に海底熱水鉱床が存在している可能性があり、伊是名海穴はその一例とされている^[5]。反射法音波探査による背弧海盆全体の地下構造の把握はポテンシャルサイトの把握のためにまず実

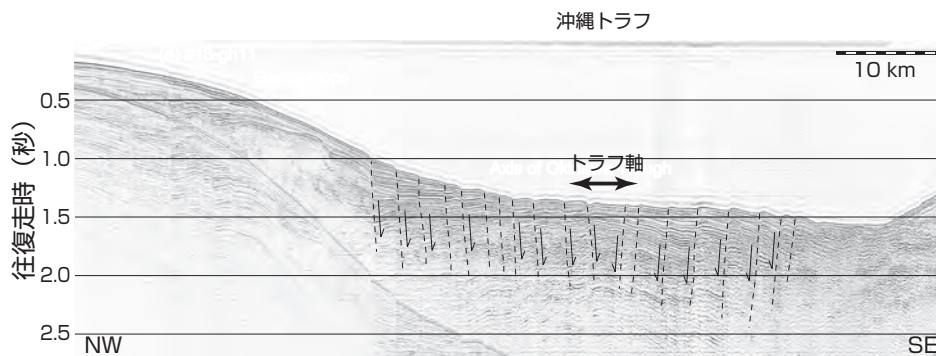


図6 GH11 航海で取得した音波探査断面 ([16] より引用)
 沖縄トラフに直交する音波探査断面。成層した地層の内部反射面が明瞭に認められる。これらの地層は正断層群（図の破線で示す）によって切られている。

施すべき手段と言える。同じくポテンシャルサイトになり得る海底カルデラについて特に重点をおき、GH09～12航海では沖縄トラフでいくつかの海底カルデラの地下構造断面の取得に成功した。反射法音波探査や岩石採取は海底カルデラの形成メカニズムを解明する上で重要である。航走観測で同時に行う重力・磁力探査等の物理探査においても、火山岩を伴う岩石が地下に存在していれば、異常として見いだすことができる。これらによって、カルデラ全体の広がりや、カルデラ形成の年代やメカニズムの解明につなげることが可能になってきた。

ただし、熱水鉱床の開発としては、鉱床自体が範囲数100 m程度の狭い範囲に堆積物あるいはカルデラ壁からの崖錘堆積物と混在して存在することから深度方向および水平方向の地層分解能は数 m程度が要求される。また、背弧海盆の熱水鉱床域の賦存域はカルデラ壁近傍の複雑な場所にあり、これまでの反射法音波探査のみから正確なイメージングが難しい。したがって、今後は高分解能の音源を使った新たな手法や、海底面直上を曳航する深海曳航式の音波探査、海底面直上の重力・磁力探査等、これまでとは異なるより精度の高い手法の導入が必要となる。

4.3.2 停船観測の調査と課題

停船観測による採泥作業では、グラブ採泥器を用いたグリッド状の表層堆積物の取得、柱状コア試料の取得、また、急峻な岩石の露出域ではドレッジによる採泥作業が行われてきた。これら画一的に採取された表層堆積物試料



図7 GH12航海で使用した「白嶺」に搭載されている遠隔操作無人探査機 (ROV) システム

このROVシステムはフェザーケーブルと呼ばれるケーブルでROV本体を海底で切り離すことができる。そのため、投入時にケーブルに浮力体を付けるなどの作業が不要で有り、短時間でのオペレーションができる。ROVにより、海底の様子をリアルタイムで観察でき、マニピュレーターを使って岩石の採取や海底での作業も可能である。

はこれまで熱水活動の把握のためには利用されてこなかったが、これらの堆積物試料を弱酸によりリーチングし、熱水活動により放出された硫化物を選択的に分解して分析することで、熱水活動の痕跡や活動域の絞り込みに貢献できる可能性がある。さらに、GH12航海では、2012年に就航した「白嶺」(石油天然ガス・金属鉱物資源機構所有)に搭載されている遠隔操作無人探査機 (ROV) を利用した調査を実施した(図7)。ROVは約2 kmの海底観察を2露頭(2本のルートでの探査)で行って、合計で3つの試料を採取した。作業は、投入揚収時間も合わせて約5時間であった。ROVの調査では、海底映像をリアルタイムで観察でき、必要なサンプルをその場で判断して採取できる。潜航調査による露頭観察が採泥作業と同様に短時間のオペレーションで可能になれば、ポテンシャルサイトがある程度絞り込んだ次のステップとしてROV調査が有効である。ただし、ROV調査を利用できる船舶は限られている。

5 まとめと今後の展望

この論文では、知的基盤整備の一環として実施する海洋地質調査の成果の活用の例として、沖縄プロジェクトに関する現状と、主として海底鉱物資源の開発への貢献の方法を論じた。

2008年度から開始した沖縄プロジェクトは島嶼周りの知的基盤整備の一環として地質情報の取得を目指している^[19]。これまでに、琉球弧で最も主要な島の一つである沖縄島周辺の調査をはじめの3年間で完了し、2012年度の調査では鹿児島県沖永良部島周辺の調査を実施した。沖縄プロジェクトでは海洋地質学的な見地から、海域活断層の把握や海底鉱物資源探査の基礎となるカルデラ構造の把握等の重要な成果をあげつつある。

今後、知的基盤整備として実施している沖縄プロジェクトの計画を、沖縄トラフに調査範囲を広げてデータの取得を目指すことで新しい鉱床の発見の可能性は大きく広がると言える。ただし、調査海域の拡大にはいくつかの課題がある。最も大きなものは、調査を実施する船舶の確保である。海洋地質調査には、設定した測線、設定した観測点で調査を行うための装備をもった船舶が必要となる。また、海底鉱物資源の開発へ向けて広域的な調査の実現を目指したときには、これまで述べてきた通り効率化と技術面での課題も残される。より大きな目で国益を考えれば、海底鉱物資源の開発は省庁、機関を超えて効果的効率的に行うことが必要であることは言うまでもない。産総研を含め、互いの技術やノウハウを活かす連携協力を構築し、効率的な研究体制を作る必要がある。

謝辞

産総研の日本周辺海域の知的基盤整備は、その前身である工業技術院地質調査所海洋地質部から継続的に行われてきた。多くの諸先輩や関係者の皆さまによる海洋調査の手法の開発や科学的な議論の積み重ねの賜である。また、調査船を用いた海洋調査ではその運航などに多くの方々のご協力を頂いた。特に、石油天然ガス・金属鉱物資源機構およびその前身の金属鉱業事業団所有の調査船舶が海洋地質調査における重要な役割を果たしてきた。かかわってこられた皆さまに、ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 荒井晃作, 西村 昭: 沖縄海域の調査に向けて-特集号のはじめに-, *地質ニュース*, 633, 10 (2007).
- [2] 西村 昭, 湯浅真人, 岸本清行, 飯笹幸吉: 大陸棚画定調査への挑戦-国の権益領域拡大と地球科学の貢献-, *Synthesiology*, 6 (2), 103-117 (2013).
- [3] 白井 朗: *海底鉱物資源-未利用レアメタルの探査と開発-*, オーム社 (2010).
- [4] 横瀬久芳, 佐藤創, 藤本悠太, Mirabueno, M.H.T., 小林哲夫, 秋元和實, 吉村浩, 森井康宏, 山脇信博, 石井輝秋, 本座栄一: トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動, *地学雑誌*, 119, 46-68 (2010).
- [5] 原口 悟, 児玉敬義: 沖縄トラフの海底熱水鉱床, *地質ニュース*, 634, 10-14 (2007).
- [6] 池原 研: 海底を調べる, 海から聞く地球のメッセージ, *産総研TODAY*, 5 (8), 4 (2005).
- [7] S. Kato: A geomorphological study on the classification and evolution of trenches around Japan, *Rep. Hydr. Res.*, 27, 1-57 (1991).
- [8] 小西健二: 琉球列島(南西諸島)の構造区分, *地質学雑誌*, 71, 437-457 (1965).
- [9] 荒井晃作, 井上卓彦, 辻野 匠, 村上文敏, 池原 研: 沖縄島東方沖の音波探査, 『*沖縄周辺海域の海洋地質学的研究*』平成20年度研究概要報告書-沖縄島東方海域-, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, 46, 29-39 (2009).
- [10] 渡辺偉夫: *日本被害津波総覧 第2版*, 東京大学出版会 (1998).
- [11] J. Letouzey and M. Kimura: The Okinawa Trough: Genesis of a back-arc basin developing along a continental margin, *Tectonophysics*, 125 (1-3), 209-230 (1986).
- [12] J.O. Park, H. Tokuyama, M. Shinohara, K. Suyehiro and A. Taira: Seismic record of tectonic evolution and backarc rifting in the southern Ryukyu island arc system, *Tectonophysics*, 294 (1), 21-42 (1998).
- [13] R. Shinjo: Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough-Ryukyu arc system, *Chem. Geol.*, 157 (1-2), 69-88 (1999).
- [14] J.C. Sibuet, B. Deffontaines, S.K. Hsu, N. Thureau, J.P. Le Formal, C.S. Liu and ACT party: Okinawa Trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution, *J. Geophys. Res.*, 103 (B12), 30245-30267 (1998).
- [15] C.S. Lee, G.G. Shor, L.D. Bibee, R.S. Lu and T.W.C. Hilde: Okinawa Trough: Origin of a back-arc basin, *Marine Geology*, 35 (1-3), 219-241 (1980).
- [16] 佐藤智之, 荒井晃作, 井上卓彦: GH11航海での反射法音波探査概要: 沖縄トラフ拡大軸と陸棚斜面勾配, 『*東シナ海沖*

『*沖縄トラフ海域の海洋地質学的研究*』平成23年度研究概要報告書-北部沖縄トラフ海域-, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, 58, 46-53 (2012).

- [17] F.J. Sawkins: Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics, *Jour. Geol.*, 80 (4), 377-397 (1972).
- [18] Expedition 331 Scientists: Deep hot biosphere, *IODP Preliminary Report*, 331 (2010).
- [19] 荒井晃作, 池原 研: 沖縄島周辺の海洋地質調査 琉球列島および東シナ海の地質情報整備を目指して, *産総研 TODAY*, 11 (6), 27 (2011).

執筆者略歴

荒井 晃作 (あらい こうさく)

1994年金沢大学自然科学研究科物質科学専攻博士課程修了。1997年通商産業省工業技術院地質調査所入所。2001年独立行政法人産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門主任研究員、2004年独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研究部門主任研究員、2010年から同部門海洋地質研究グループ研究グループ長となる。入所以来海洋地質調査に従事し、遠州灘海底地質図等の海洋地質図を執筆出版した。沖縄プロジェクトの立ち上げから、調査実施を指揮している。この論文では、沖縄プロジェクトに関する現状をまとめ、海底鉱物資源の開発への貢献の方法を論じた。



下田 玄 (しもだ げん)

1996年京都大学大学院人間・環境研究科人間・環境学専攻修了(人間・環境学博士)。1997年京都フィッシュントラック株式会社入社。1998年京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設講師(研究機関研究員)。2001年独立行政法人産業技術総合研究所地球科学情報研究部門重点研究支援協力員。2005年独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研究部門研究員。2012年からは資源テクトニクス研究グループ長となる。専門は固体地球化学。この論文では、海底鉱物資源のポテンシャルサイトにおける可能な調査研究の現状と課題に関する提言をした。



池原 研 (いけはら けん)

1982年東京学芸大学教育学部卒業。同年通商産業省工業技術院地質調査所入所。2005年独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研究部門海洋地質研究グループ研究グループ長。海域地質図プロジェクトリーダー。2009年独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研究部門副研究部門長。入所以来日本周辺海域を中心とした海洋地質調査に従事。専門は堆積学。この論文では、海域地質図プロジェクトリーダーとして海底鉱物資源の開発に向けての産業技術総合研究所としての取り組み方について提言した。



査読者との議論

議論1 全般

コメント(富樫 茂子: 産業技術総合研究所)

産総研が旧地質調査所時代から継続して実施してきた、日本周辺海域の地質情報の整備としての海洋地質調査について、特に沖縄プロジェクトに関して現状と課題を明らかにしており、国の知的基盤整備の方法論として、シンセシオロジー論文としてふさわしい内容である。初稿においては、方法論としての展開は不十分な点があったが、

改善されている。

コメント（瀬戸 政宏：産業技術総合研究所）

沖縄海域での海洋地質調査の意義について、地球科学の視点、防災および資源ポテンシャル評価の視点から論じており、大変興味深い論文となっている。シンセシオロジー論文としても内容、構成ともに適切なものとなっている。また、沖縄海域の今後の調査の発展を期待したい。

回答（荒井 晃作）

沖縄周辺海域の調査によって、地球科学的な新しい知見が得られています。また、昨今の日本を取り巻く情勢をみても、国土の基盤情報整備は速やかに行う必要があると思います。産総研の調査として一定の質を保ちながら、能率を向上していきたいと思えます。

議論 2 国土の基盤情報のデータ取得から利用までの流れ

コメント（富樫 茂子）

「国土の基盤情報のデータ取得から利用までの流れ」や図4については、シンセシオロジー論文として丁寧に説明を加えていただきたい。

特に分野外の人には、取得されたデータが堆積図や地質図になる過程を丁寧に説明する必要があります。例えば、堆積学、構造地質学、地球物理学、地球化学、鉱床学、地震学等の最新知識を駆使して、その地域に特有な堆積作用や、地質構造、鉱床生成プロセス等の解釈が必要なことの説明を加えてください。このような多様な「要素技術」を、科学的なシナリオに基づいて「シンセシス」して、対象地域の地質現象を明らかにし、堆積図や地質図にまとめ上げていることを明確に示してください。また、図4にも、キーワードとなる上記の**学のうち主要と判断できるものを総合するプロセスを示してください。

また、「海底鉱物資源の開発への展開」については、何を目的として、その方法を選択し、その結果何が分かったか。今後何を分かることが必要で、そのためにどのような方法の選択が必要なのか、そのための課題は何かという流れが明確になるようにしてください。

回答（荒井 晃作）

国土の基盤情報としての海洋地質図の作成から利用までの流れをなるべく分かりやすく加筆いたしました。実際の調査航海では、多くの研究者が乗船して資・試料を収集します。取得したデータの解析・解釈には多様な知識が必要になります。また、取得した試料に関しても、産総研内部にとどまらず、大学等のそれぞれの専門分野の研究者に配分されて、たくさんの知見が得られます。海洋地質図のシリーズはこれらの集大成と言えます。

議論 3 「画一的な調査」について

コメント（富樫 茂子）

「画一的な調査」という表現が散見されますが、これはこの論文の重要なキーワードですので、丁寧に説明してください。

画一的の意味は、たとえば、「空間的に系統的網羅的にデータが取得され、かつデータの項目選定や取得の方法が標準化された方法で取得され、一定の質を確保されている」ということでしょうか。

回答（荒井 晃作）

第2章に加筆いたしました。

議論 4 海底下にある断層活動の調査法

コメント（瀬戸 政宏）

琉球弧およびその前弧斜面上部において島弧を横切る断層が発達していることを述べられた上で、今後の詳細な活動度の調査の重要性を指摘されています。海底下にある断層活動の調査、評価については、地上の活断層調査とは当然異なる手法があると思いますが、そういった技術、方法論は確立しているのでしょうか。また、確立しているとしたらどのような方法によるのでしょうか。

回答（荒井 晃作）

地球のプレート境界部の多くは海域にあります。つまり大きな地震リスクの原因になる断層の多くは海域に存在していると言えます。また、海域の断層の活動は津波を引き起こすこともあります。このような観点で、海域活断層の評価手法の研究は産総研でも続けています。まず、海域の活断層の分布やその形状は反射法音波探査を使って調べることができます。しかし、重要なのはその活動度や活動履歴を知ることです。海域の活断層を挟んでコアを取得して、両者の層厚変化からその活動履歴を研究している例があります。また、地震性堆積物（タービダイト）が、大きな地震に伴って形成されることがあり、柱状コア試料の分析により地震性堆積物の狭する頻度を研究することから大地震の活動履歴を明らかにできます。これらの調査は、それぞれの海域に適した手法を使うことが大事になり、調査事例を積み重ねていくことも必要です。

議論 5 鉱床の胚胎場への地質構造の規制

コメント（瀬戸 政宏）

「鉱床の胚胎場には地質構造の規制が存在する」として、地質構造の規制というのは一般的にどのような構造や事象を指して言うのでしょうか。

回答（荒井 晃作）

熱水活動の存在の可能性は、島弧火山および背弧海盆に集中しています。背弧海盆では、引張の応力場に関連する背弧リフト帯の形成により、地下のマグマ活動に伴う熱水活動が存在します。地下深部から続く断層等の存在している場所は可能性が高いと考えられます。

議論 6 沖縄海域の海洋地質調査の特徴と今後の展開

コメント（瀬戸 政宏）

2008年から始まった沖縄海域の海洋地質調査の今後の展開について、計画としてどのような地質図幅をどの時点までに整備していくという計画になっているのでしょうか。また、地質図幅の整備においてもそれを担当する研究者のオリジナリティが表現されるものと思いますが、この沖縄海域調査での結果はこれまでの海洋地質調査と特徴という点でどのような違いがでることを期待できるのでしょうか。

回答（荒井 晃作）

計画では、2019年度まで調査が続く予定です。地質図の作成に関しては、調査がすでに終了した沖縄島および久米島周辺の海域から始めています。順次出版を進めていきたいと思えます。これまでの海域との違いに関しては、地質構造の違いについては、その一部をこの論文に記載させて頂きました。主要四島の調査と違うおもしろい特徴として、大きな河川の流入はないことをあげさせて頂きます。河川で流入してくる陸源の碎屑物が少なく、一方でサンゴ礁が形成され高い生物生産量を有します。したがって、島の周辺では生物遺骸粒子が海底を埋めています。このことは、堆積物の供給および堆積作用等に影響を与えています。

基礎研究および応用・開発研究における標準化活動に係る 投入資源の計量方法および差異について

— 大学・TLO等と電気機械産業の事例 —

田村 傑

この研究は、基礎研究、応用・開発研究における、標準化活動を定量的に収集する手法を考察することを通じて、イノベーション・マネジメントの基盤の高度化を目的とする。具体的には、一般的な標準化活動の代替量として、組織のイノベーション活動に関係が大きいと考えられる知的財産活動における標準化活動に着目する。基礎研究機関として、大学・TLO等を取り上げて電気機械製造業、情報通信業を応用・開発研究機関として取り上げる。データの複数年度間にわたる収集の安定性の有無や、標準化活動の定義の妥当性について論じた上で、基礎研究と応用・開発研究における標準化活動の差異を述べる。基礎研究においては、応用・開発研究と同程度の知的財産活動に関する標準化活動の割合を示す可能性があるとの仮説等が導かれた。

キーワード：基礎研究、応用・開発研究、標準化活動、大学

Measurement of input resources for standardization activities in basic research and applied and development research, and the difference of the measuring results between the research types

– Case studies of universities and technology licensing organizations, and the electric machinery industry –

Suguru TAMURA

This study explores the methods for measuring standardization activities in basic research and applied and development research. Such methods are supposed to enable more sophisticated management of innovation in organizations. This paper focuses on standardization activities relating to intellectual property, because such activities are thought to be strongly linked to innovation. Universities and technology licensing organizations were chosen as examples of basic research institutions. Companies in the electric machinery industry and information and communication industry were selected as examples of the applied and development research institutions. First, the stability of data over multiple years and the validity of the definition of standardization activities are discussed. Then, the difference in measurement results between basic research, and applied and development research is described. A hypothesis is proposed that the ratio of standardization activities in basic research is as high as that in applied and development research.

Keywords : Basic research, applied research, development research, standardization activities, university

1 概要

この研究は、基礎研究や応用・開発研究における、標準化活動に関する定量的データの計量方法が適当であるか否かを明らかにし、その結果をイノベーション・マネジメントの高度化への基盤とすることを目的とする。加えて、今後の標準化政策の評価手法の構築のため、標準化活動への投入資源や活動成果の定量化を通じた、標準化活動の要素活動、各要素間の再構成を検討課題とする。これまでは、ISO等の統計で成果の定量化がある程度可能となる一方、投入資源の定量化は十分になされていなかった。

以上を踏まえて、この論文では標準化活動に関する定義等の調査分析への利用可能性（以下 有効性）、ならびに

複数年度にわたり計量されたデータがおおむね一定の範囲内に収まっているか否かの検証を行う（（注）複数年度にわたりデータが収集され、おおむね一定の範囲内に収まっている場合を「安定している」と記述する）。また、得られたデータに基づいて、基礎研究を実施する大学等と応用・開発研究を行う企業等における標準化活動の違いについて評価を加える。併せて基礎研究機関における標準化活動の管理のあり方について考察を加える。加えて、長期的なアウトカム目標として、イノベーション活動における標準化活動を定量的にマネジメントする社会的な基盤形成を設定し、この達成に必要な研究過程、ならびにこの研究段階での到達点について提示を行う。

経済産業研究所 〒100-8901 千代田区霞が関 1-3-1

Research Institute of Economy, Trade and Industry (RIETI) 1-3-1 Kasumigaseki Chiyoda-ku 100-8901, Japan Tel: 03-3501-1363, Fax: 03-3501-8577

Original manuscript received December 12, 2012, Revisions received February 18, 2013, Accepted February 18, 2013

標準化戦略の重要性が重視される近年の状況にあって、驚きではあるが、企業や組織中における標準化活動に係る定量的データの計量手法は、いまだ研究途上の課題である。文部科学統計要覧には、特許に関するデータは収録されているが、標準化活動のデータは記載されていない^[1]。公的に収集された標準化活動に関する定量データは、成果に関するものが中心でありISO、IECが提供しているデジュール規格の策定数や、事務局人員数等に限定されている^[2]。

こうした中で、2008年に日本の特許庁は、知的財産活動における標準化活動に関する調査項目を、2002年より日本国内の全産業を対象として実施している「知的財産活動調査」に追加した^{[3]-[6]}。標準化活動全体に比べて、知的財産活動に関する標準化活動は、標準と関係を持つ特許の存在がさまざまな分野で近年クローズアップされており、政策的にも重要性が増している変数である^[7]。また、範囲を知的財産活動に絞ることにより、ISO14000シリーズに係る認証活動に関する資源投入量といった、この論文が対象としている標準の企画等とは異なる活動が意図せず含まれる恐れを低くすることが期待できる。このことにより、得られたデータは、知的財産活動中における標準化活動に係る資源投入量の影響をより正確に表していると期待される。

日本の場合には、大学等の研究機関における研究費の約6割が基礎研究に充てられている。一方、企業における研究費の9割近くが、応用研究と開発研究に充てられている^[1]。この点を考慮して、基礎研究における標準化活動を評価する対象として「教育・TLO・公的研究機関・公務」に分類されるデータを活用する。このカテゴリーの中には、大学等の基礎研究機関が含まれている。応用・開発研究を評価する対象として、「電気機械製造業」および「情報通信業」に分類されるデータを利用する。これら標準化活動データに注目して、データの収集の妥当性、安定しているか否かについて検証を行い、今後の政策分析への利用の可能性について妥当性を検証する。加えて、両研究分野における、イノベーション活動に関する評価手法の高度化に資する標準化活動に係るデータ収集方法および利用方法について論ずる。さらに、研究目的別の標準化活動の差異とその要因について考察を行う。さらに、得られた結果に基づき、大学等の基礎研究機関における、標準化活動のマネジメントについて検討を加える。

2008-2011年の間の4年分の知的財産活動中における標準化活動に関するデータの比較を行ったところ、当該データは、継続性において、一定の信頼性があり、安定していることを示唆する結果が得られた。また、産業の比率と比較して、基礎研究を代表すると解される教育・TLO等にお

いては、知的財産活動者中における標準化活動者数が多いことが明らかとなった。加えて、政策面では、大学において、知的財産活動における標準活動の管理は十分に対応が行われていない点が課題として指摘された。

この論文は第2章において、先行研究調査について説明を行う。第3章で、仮説の説明と背景の記述を行う。第4章で、方法およびデータの説明、第5章においては結果、第6章では、実現のためのシナリオを含めた考察、第7章では今後の課題、第8章で結論を記述する。

2 先行研究

この研究領域における先行研究は数が少ないので、研究のフレームワークを理解する上で必要となる文献について紹介する。

2.1 標準化活動者数の収集方法および定義

2.1.1 収集方法関係

研究者数等の人員数の収集等については、OECDのフラスカティマニュアルの中でFTE (Full-Time Equivalent) 方式による収集が推奨されている^[8]。FTEは、人頭数に基づくカウント方法と対をなすものである。人頭数のカウント方式は、人間の実在の数に基づいて数える。一方でFTEは、労働時間の割合で、人数を数える方式であり、1日のうち、ある業務に半分だけ従事する場合には、0.5人とカウントされることになる。FTEはその性質から大学の教員のように教育と研究を兼任している場合に、投入労働量を把握するのに適した方式である。これは、人頭数の場合に起きる実質的な研究活動の過大評価を防ぐことが可能となるためである。特許庁の知的財産活動調査においては、従来から知的財産活動者数の収集にFTE方式を利用している。これを踏まえて、知的財産活動における標準化活動者数の収集にもFTE方式が適用されている。

2.1.2 定義関係

標準活動の定義については、技術に着目して“特定化”のキーワードを使って説明している場合がある^[9]。しかし、これは製品についての定義であり、標準化活動に関する定量データの収集のために利用することは目的とされていない。各国のイノベーション活動評価方法を規定するOECDフラスカティマニュアルにおいては、標準化活動の定義についての記述はなされていない。

しかし、企業内における標準化活動に関する定義に関する実証は、近年端緒が得られつつある。この論文で利用する特許庁が実施する知的財産活動調査において以下の定義が用いられている^{[3]-[6]}。

標準化活動者

標準化とは、ある技術分野において、技術仕様や試験評

価方法、用語や記号等の統一化、単純化等、複数者の取り決めにより規格（標準）を制定または改正する過程を意味している。

知的財産活動者

産業財産権の発掘から権利取得、権利の維持に関する業務に従事する者のみならず、知的財産活動の管理、評価、取引、実施許諾、係争に係る業務に従事する者、知的財産に関する企画、調査、教育、会計、庶務等、知的財産活動を支えるために必要な業務に従事している者。

知的財産活動者のうち標準化活動従事者

標準に係る特許の調査、必須特許の評価やライセンス交渉、標準化に向けた特許声明書の作成や提出、標準化に関する技術に対する特許侵害等への対応等、標準に関連した知的財産の管理に従事する者のみならず、知的財産担当者のうち、標準の企画提案、審議に係る業務に従事する者、教育、普及、会計、庶務等、標準化に関わる活動を支えるために必要な業務を兼務する者。

2.2 国際的に見た既存のデータとの比較

国際的に見て、標準化活動に関するデータの収集の試みはほとんど行われていない。その主要な理由の一つとして、関係する国際機関におけるデータ収集の取り組みの不在が挙げられる。国際標準の策定団体である ISO や IEC の年次報告書には、各国の政府部内等にある事務局の局員数や、策定された標準の数といったデータが存在するものの、各国の国内の標準化活動者数についてのデータは記載されていない^[12]。この背景として、ISO、IEC は国際標準規格書を文書の形で作成することを目的としており、各国の標準化活動の実態に係る統計データの収集は組織的な目的とされていない点が指摘されている。一方、国際知的所有権機構（WIPO）等の国際知的財産組織は、特許に関する経済的なデータの収集は行っているものの、標準化活動についての統計データを収集する機能を有していない。このように標準化活動に関するデータの収集を組織的に行っている機関が存在していないことが、国際的に比較可能なデータの不在といった現状につながっている。

さらに、標準化活動に係る資源投入量は、科学技術データとしてこれまで認知されていなかったことも理由の一つに挙げられる。科学技術活動の範囲をどのように捉えるかは、これまでも OECD や UNESCO において度々議論が行われてきているが、技術標準に関する活動は研究開発に「関連する活動」として位置づけられてきたことから、これまでのところ科学技術活動自体とはみなされず、科学技術に関係する活動として位置づけられているにすぎない。このため、現在でも公的な科学技術関連の統計データの対象になっていないとの背景がある^[10]。その結果、政策

変数として標準化活動を評価するために、どのような量を取り上げれば良いかの問いが未解決のままである

その他の実務的な理由として、収集の困難性を指摘できる。標準化活動は、独立した業務として確立していない場合が多く、主たる業務を別に行いながら、研究開発活動、知的財産活動等の業務の付帯業務として、実施している場合が多いと考えられる。このため、組織内での認識が行われにくいとの特徴が指摘できる。

2.3 基礎研究、応用・開発研究と標準化活動の関係

基礎的な研究領域を代表する大学等における標準化活動数について、実数データは前述のように国際的にも見られない。応用研究と開発研究を主に担っていると考えられる企業等における実数データも同様である。

2.4 標準化活動が技術革新に与える影響

米国電気機械製造業では標準策定団体における参加者数と、企業の取得した特許の数との間には有意な正の相関があるとの報告がなされており、標準策定団体における標準化活動が、企業の特許に代表される知的財産活動と因果関係を有していることが指摘される結果となっている^[9]。

3 仮説

この論文では、次の仮説の検証を行う。

3.1 仮説1a

組織内における標準化活動参画者数の収集方法は、いまだ国際的に確立したものがなく、模索が行われている段階である。まず、収集手法およびデータが実際に安定的に収集可能であるかの確認を行うことが、データの利用を行う前提として必要である。

仮説 1a. 標準化活動に関する人員数の収集データが回収率等の点で安定していること。

3.2 仮説1b

知的財産活動における標準化活動者数の収集にあたっては、これまでの標準に関する交渉関係の業務を念頭においた定義ではなく、広く組織内における標準化活動を念頭とした定義に基づき収集を行っている。この定義によるデータの収集が実際に可能であるかについて、先行研究では検証されていないことから、本仮説の検証を行う。

仮説 1b. 標準化活動従事者数のデータの収集の上で有効な定義であること。

図 1 に、仮説と、研究の構成との関係についての流れを示す。

4 方法

知的財産活動調査のデータを活用して、産業分野別の知的財産活動者数と、知的財産活動に関する標準化活動

者数について、2008年から2011年間の観察を行った。知的財産活動に占める標準化活動の割合について、研究分野間の比較を行った。

4.1 知的財産活動調査の概要

4.1.1 調査目的

調査目的は、「我が国の知的財産政策を企画立案するにあたっての基礎資料を整備するため、我が国の個人、法人、大学等研究機関の知的財産活動の実態を把握すること」とされている。平成14年度（2002年度）から本統計調査は実施されている。

4.1.2 対象年次

平成19年度（2007年度）以降が、標準化活動関係の調査対象年度となっている。

4.1.3 調査対象者

前年度に特許出願、実用新案登録出願、意匠登録出願、商標登録出願のいずれかが5件以上である企業等であり、具体的には、企業、企業の研究所、大学、公的研究機関が含まれている。知的財産活動調査は、2002年からデータの収集が始められている。統計法に基づく一般統計調査として実施されているために、通常のアンケート調査と異なり、回答者に忠実に回答することが求められており、企業内の標準化活動の把握について、より信頼性の高い結果が得られていると考えられる。

5 結果

5.1 知的財産活動者数、ならびに知的財産活動における標準化活動者数

本調査の各年の回収率を見ると、5割程度となっており、およそ過半数からの回答を得る結果となっている。また、回答した企業等のうち、知的財産活動に関する標準化活動についてデータが記入された割合は、およそ9割程度となっており、回答の有無による、サンプリングバイアスを受けているおそれは低いと考えられる。

知的財産担当者数についてのデータ収集は2002年か

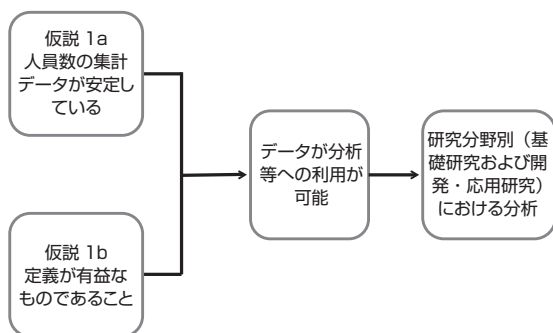


図1 仮説および研究の構成に関するフロー

表1 知的財産活動における標準化担当者数と母数になる知的担当者数

	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年
知的財産活動における標準化担当者数(人)(FTE)	未調査	未調査	未調査	未調査	未調査	未調査	2,296	2,298	2,336	1,826
母数となる知的財産担当者数(人)(FTE)	17,679 (参考値)	9,234 (参考値)	17,569 (参考値)	17,700	18,658	19,589	18,458	19,227	17,106	18,583
割合(%)	—	—	—	—	—	—	12.4%	12.0%	13.7%	9.9%

出典：特許庁知的財産活動調査の集計データ。2002年、2003年、2004年の知的財産担当者数は現在とは測定方法が異なるために、参考値。

ら調査が実施されている（表1）。数値は17,000人台から19,000人台で推移している。2003年については、収集方法の変更等の理由により、半分の9,000人程度になっており、この値は参考値としての扱いになっている。これに対して、標準化活動の代替指標として取り上げた、知的財産活動における標準化活動者数については、2008年から2011年の間においておよそ2,000人前後で推移している。おおむね、標準化活動の割合は、10%前後を示す結果となっている。2011年については、割合は9.9%になっており、過去4年間の取得されたデータの中では、この標準化活動の割合が一番低くなっている。

5.2 業種分野別のデータの経年比較

業種ごとの、数値の推移を示す（表2、図2）。一覧して、絶対数が多い分野は「電気機械製造業」と「教育・TLO・公的研究機関・公務」であることがわかる。ただ、この数は、母体となる企業の数および、関係者の数に影響を受けることが考えられるために、当該数の大小を単純に比較することはできない。しかし、それぞれの産業界ごとに、どの程度の活動が行われているかを概観する上で適当である。併せて、各年度のごとの数値のばらつきを見ることにより、収集手法の適切性、データの信頼性を見る判断に利用できる。

5.2.1 教育・TLO・公的研究機関・公務

このカテゴリーは、大学等の高等研究機関を対象として含んでいる。よって基礎研究の動向を把握するデータとして代替することが可能である。カテゴリーでみた場合には、電気機械製造業に次いで2番目に標準化活動に関与する人数が多い。2010年には402人で最大の値を示しており、2011年には、161人で最小の値を示している。知的財産活動における標準化活動が占める割合は、12.9%の2011年が一番低くなっている。その他の年においては、26%から27%の割合になっている。このデータの変動の理由としては、頭数人数そのものが減少している場合の他に、人頭が減った場合でなく業務の中における標準化活動の量が減った場合が考えられる。その他の要因として本データが、パネルデータではなく、毎年度ごとに、前年度の特許

表2 知的財産担当者数のうち標準化担当者数およびその割合（全体、業種別）

	標本数				知的財産担当者数				うち社内弁理士数			
	2011年	2010年	2009年	2008年	2011年	2010年	2009年	2008年	2011年	2010年	2009年	2008年
全体	3,030	4,805	3,663	3,231	18,538	17,106	19,227	18,457	1,352	1,055	1,202	998
教育・TLO・公的研究機関・公務	256	515	252	251	1,246	1,549	1,412	1,524	46	54	62	47
電気機械製造業	328	425	378	389	6,600	4,806	6,711	5,953	563	336	491	337
情報通信業	108	254	170	149	431	653	687	568	39	42	38	21
建設業	107	190	110	126	286	360	242	345	15	12	5	10
食品製造業	164	200	228	161	465	501	531	493	47	30	39	41
繊維・ハルフ・紙製造業	53	98	66	72	238	260	244	263	23	22	22	24
医薬品製造業	88	82	86	85	626	565	610	551	106	94	101	89
化学工業	211	261	227	227	1,743	1,844	1,912	1,725	128	132	125	109
石油石炭・プラスチック・ゴム・窯業	192	262	224	208	990	1,039	944	955	76	76	65	51
鉄鋼・非鉄金属製造業	75	79	82	84	667	603	697	633	52	50	41	33
金属製品製造業	109	190	149	133	271	335	320	329	4	10	6	7
機械製造業	215	266	219	294	905	872	1,156	865	58	40	59	39
輸送用機械製造業	137	166	139	145	1,581	1,207	1,272	1,468	71	46	47	53
業務用機械器具製造業	104	108	90	100	1,023	667	852	845	61	37	50	48
その他の製造業	209	291	236	229	699	804	703	1,133	33	35	25	66
卸売・小売等	323	594	528	296	329	380	389	314	10	15	4	6
その他の非製造業	226	446	317	281	337	512	385	472	15	18	15	18
個人・その他	125	378	162	91	147	149	161	19	6	6	7	-

	知的財産担当者数				うち標準化に携わる担当者数				(うち標準化に携わる担当者数)/(知的財産担当者数)			
	2011年	2010年	2009年	2008年	2011年	2010年	2009年	2008年	2011年	2010年	2009年	2008年
全体	18,538	17,106	19,227	18,457	1,826	2,336	2,298	2,296	9.9%	13.7%	12.0%	12.4%
教育・TLO・公的研究機関・公務	1,246	1,549	1,412	1,524	161	402	386	390	12.9%	26.0%	27.3%	25.6%
電気機械製造業	6,600	4,806	6,711	5,953	421	465	461	484	6.4%	9.7%	6.9%	8.1%
情報通信業	431	653	687	568	34	63	73	35	7.9%	9.6%	10.6%	6.2%
建設業	286	360	242	345	40	62	36	41	14.0%	17.2%	14.9%	11.9%
食品製造業	465	501	531	493	115	120	80	85	24.7%	24.0%	15.1%	17.2%
繊維・ハルフ・紙製造業	238	260	244	263	20	31	21	19	8.4%	11.9%	8.6%	7.2%
医薬品製造業	626	565	610	551	129	133	127	65	20.6%	23.5%	20.8%	11.8%
化学工業	1,743	1,844	1,912	1,725	98	161	204	180	5.6%	8.7%	10.7%	10.4%
石油石炭・プラスチック・ゴム・窯業	990	1,039	944	955	109	103	149	173	11.0%	9.9%	15.8%	18.1%
鉄鋼・非鉄金属製造業	667	603	697	633	44	37	35	26	6.6%	6.1%	5.0%	4.1%
金属製品製造業	271	335	320	329	63	66	73	84	23.2%	19.7%	22.8%	25.5%
機械製造業	905	872	1,156	865	159	220	153	192	17.6%	25.2%	13.2%	22.2%
輸送用機械製造業	1,581	1,207	1,272	1,468	113	106	123	164	7.1%	8.8%	9.7%	11.2%
業務用機械器具製造業	1,023	667	852	845	63	50	66	77	6.2%	7.5%	7.7%	9.1%
その他の製造業	699	804	703	1,133	122	154	143	148	17.5%	19.2%	20.3%	13.1%
卸売・小売等	329	380	389	314	82	88	85	66	24.9%	23.2%	21.9%	21.0%
その他の非製造業	337	512	385	472	32	54	55	63	9.5%	10.5%	14.3%	13.3%
個人・その他	147	149	161	19	21	23	28	6	14.3%	15.4%	17.4%	31.6%

出典：特許庁 2011年(平成23年),2010年(平成22年),2009年(平成21年),2008年(平成20年) 知的財産活動調査報告書のデータを加工

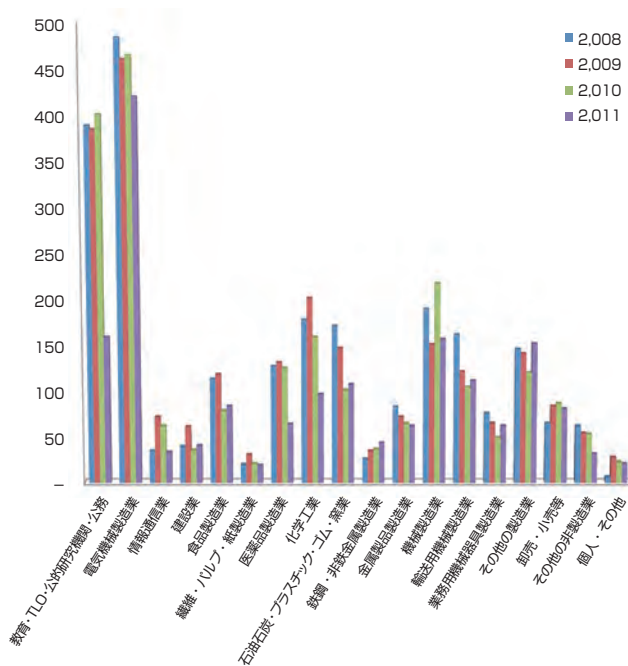


図2 産業分野毎の知的財産担当者数のうち標準化に携わる担当者的人数（2008-2011）

申請数が5件以上の企業等を対象に行っていることから、サンプルの入れ替えが要因の一つとして考察される。

5.2.2 電気機械製造業

2008年の484人が過去においては最大の値を示しており、2011年の421人が最小値を示している。一方で、知的財産活動に占める標準化活動者数の割合は、2011年に6.4%と一番低くなっている一方で、2010年が9.7%で割合が一番高くなっている。

5.2.3 情報通信業

2011年が34人と一番小さな値を示しており、2009年が73人と最大の値を示している。知的財産活動者数の中に占める割合についても、2008年の6.2%が最小であり、2009年が10.6%で最大の値を示している。

6 考察

6.1 仮説検証

以上の結果より、仮説1a、1bの評価を行った。仮説を検証するに際して、1.調査の回収率、2.回収データ中における当該数値の回答率、3.各年のデータの時系列で比較した場合の変動を見ることとする。現在のところ、標準化活

動者数については先行データとなる統計指標が国際的に存在しないために、国際的な比較結果から妥当性の検証ができないとの限界がある。このために、データの利用可能性に係る検討は、収集の安定性等から行う。

仮説 1a については、知的財産活動における標準化担当者の数が、各年度において、おおむね一定程度の範囲に収まっている結果が観察された。また、各年度の調査結果の回収率もおおむね 5 割程度であること、ならびに、回収された個表のうち、おおむね 9 割程度が当該項目について回答を行っていることから、当該データについては、安定して収集が行われており、二次的な分析への利用が可能であると判断された。仮説 1b については、仮説 1a の結果を踏まえて、標準化活動に関する規格策定の交渉のみならず、標準活動に関するバックオフィス業務、企画業務を定義に含む標準化活動の範囲を広く捉えたデータの収集が可能であることが示された。仮説 1a と仮説 1b の結果を併せて判断すると、収集されたデータが、サンプリングバイアスを受けている蓋然性は低いと判断でき、各種分析への応用が可能であると判断された（図 1）。

組織の内外にわたって考察した場合に、イノベーション活動に関連する標準化活動の範囲をどのように捉えるかはこれまで曖昧とされてきた。理由として国際的な規格策定においては、最終的な決定の場である会議への関与と、決定の際の投票権の行使が重要であると考えられるため、標準化活動とは、規格内容のドラフティングを行う所属組織外の標準化団体での活動を意味すると捉える背景があったことを挙げられる。そのため、標準化活動とは規格策定のための会議への出席者の数を示すとの概念が形成されるとともに、その反射的な意味として、会議出席等の渉外活動以外に標準化活動を調査集計することは難しいとの認識が形成されてきた。一方で、組織内における標準化活動は、渉外業務に加えて、技術標準の開発に伴う新たな製品の開発戦略等も想定される。比較考慮の対象となりえる特許活動に係る調査定義においても、従来から特許紛争やライセンスに関する交渉等の渉外業務に限らず、今回の拡張された標準化活動の定義のように幅広く包含されたものとなっている^{[3]-[6]}。

今回、研究の対象とした標準化活動は、組織内における知的財産活動に関連する標準化活動であるが、標準化活動についてのデータの大まかな動向を捉えることができると期待される。このため、得られた結果は、標準化活動に関する投入資源データを、科学技術データの中に位置づけるべきか否かの議論において有意な知見となることが期待される。また、渉外業務を含めた拡張された標準化活動のイノベーション活動に係る影響の評価につながる。

6.2 研究分野間比較

基礎的な研究活動において、知的財産活動の中での標準化活動が応用・開発研究と同程度の割合で行われている可能性があるとの仮説が形成された。基礎研究の分野として、「教育・TLO・公的研究機関・公務」を代表させ、応用・開発研究の分野として「電気機械製造業」等を代表させた。どちらにおいて、知的財産活動に占める標準化活動の程度が高いかについて比較を行うと、基礎的な研究領域において高いとの結果が示された。一方、総計においては、両分野とも平均値より高い、およそ同程度の数字が示された。

図 3 に、研究性格別の標準化活動に係る傾向を見るために、基礎研究：「教育・TLO・公的研究機関・公務」、および応用・開発研究：「電気機械製造業」「情報通信業」の 2008 年から 2011 年の 4 年間の、知的財産活動に関する標準化活動の平均割合の変動を示した。

基礎研究と応用・開発研究の対比で見ると、基礎研究の方が、平均的な割合は高い、おおむね 20 % 程度となっている。一方で、応用・開発研究は 10 % 前後で推移している結果が見て取れる。基礎研究の方が、応用・開発的な研究より割合が高い背景として、この割合は、知的財産活動者中における標準化活動について収集したものであることから、知的財産活動者数の変動による、割合の変化が挙げられる。応用・開発研究に該当する「電気機械製造業」を見ると、おおむね知的財産担当者数は 5,000 人程度となっている。一方で、基礎研究に該当する「教育・TLO・公的研究機関・公務」においては、1,500 人程度である（表 2）。このことが、基礎研究に該当する「教育・TLO・公的研究機関・公務」において、標準化活動の割合が高くなった理由の一つと考えられる。「電気機械製造業」において、「教育・TLO・公的研究機関・公務」より知的財産活動者数

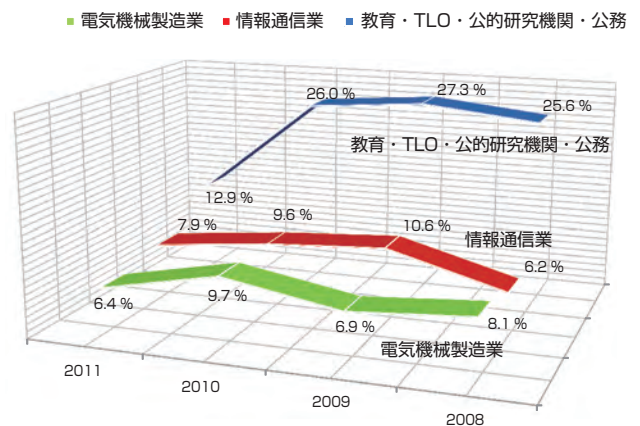


図 3 知的財産担当者数のうち標準化に携わる担当者数割合の経年変化

が多い理由としては、特許の出願数が、大学等の基礎研究機関に比べて多いことに起因して、出願関係業務に関係する業務が大きいことが考えられる。例えば日本の代表的な企業、NEC、富士通、日立においては、100人から300人規模の人員の知的財産部門を、設置しており、今回の結果と一致するものである^[11]。他に、基礎研究機関においては、研究者の知的財産活動や標準化活動への貢献が少ないため、知的財産部局に所属する者で知的財産活動者と標準化活動の両方を行うこととなり割合が高くなる場合等が理由に挙げられる。

日本国内においては、基礎研究を中心としている産業技術総合研究所（AIST）や情報通信研究機構（NICT）において、開発された技術を実用に供するために国際的な技術標準規格にするための活動が行われている。産業技術総合研究所においては、国際標準化策定に関する論文を積極的に公表している。また、大学の研究者による標準規格の開発活動も行われており、通信プロトコルに関する研究は、大学の理工系学部でも研究の取り組みがなされている。このような技術標準の策定に係る活動等が、このカテゴリーには含まれていると考察される。また、公務のカテゴリーについては、政府等の公的機関が、デジュール規格の策定の事務局機能を果たしている場合を含んでいるものと考えられる。以上の活動が、基礎的な研究領域における、標準活動の概要を表していると考えられる。

一方で、「電気機械製造業」や「情報通信業」は開発・応用研究を代表していると考えられる。製品の開発戦略や技術の市場化のためには、インタフェース部分の標準化をはかることが必須であることから、現在の電気機械製造業におけるプロダクト・イノベーションにおいては、技術標準の役割が重要であり応用・開発的な研究領域における実態は、これに関連する活動を含んでいるものと考えられる。

以上の結果は、基礎的な研究領域において、企業等で見られる応用・開発研究と同等程度に、知的財産活動に関係する標準化活動が行われている可能性があるとの仮説につながる。

6.3 基礎研究における標準化活動の問題点

大学は数多くの特許の申請を行っており、大学等における標準化活動をもたらす技術標準が、自ら保持している特許群に関係するか否かの確認が必要である。日本の特許公開件数上位の大学（東北大学、東京大学、東京工業大学、大阪大学）における、知的財産ポリシー中の技術標準の取り扱いを確認したところ、規定を設けている大学は存在していないことが判明した^{[12][15]}。このことは、日本の企業で行われているような、特許と標準に関する組織内で

表3 基礎研究と応用・開発研究における知的財産活動に関する標準化活動の差異

研究目的	割合	人数	標準化活動と特許管理活動の総括的管理の程度（内部ガイドラインの策定等）	備考：代表させた、産業カテゴリー等
基礎研究	高	平均より大	事例は、ほぼ見られない（知的財産ポリシーの中に記述はない）	教育・TLO・公的研究機関・公務
応用・開発研究	低	平均より大	進展している企業があり	電気機械製造業等

のクリアランス制度が、大学の知的財産関係部局において行われていないことを意味する。背景として大学等の基礎研究機関は、自ら生産設備を持つことがないため特許の実施を自身で行わない場合が多く、応用・開発研究を行っている企業とは異なり技術標準に含まれる特許技術の存在に留意する必要性が低い点を指摘できる。

研究目的の違いによる標準管理と特許管理の比較を表3に示す。情報通信産業等の民間企業においては、知的財産戦略を統一的に実施するために、知的財産組織の整備が行われており、特許管理と標準策定の間で連携を取る体制が構築されてきている。日立、富士通、NECにおいては、社内全体の標準戦略と標準化活動を統括する標準委員会の設置が行われている。応用・開発研究においては、特許と標準化活動を統括する取り組みが進んでいる^[11]。この論文の結果を踏まえると大学等の基礎研究機関においても、技術標準の策定による自身が持つ特許への影響を管理するため同様の取り組みが今後は必要となろう。

6.4 課題達成の目標：構成学の視点

構成学的視点から、研究の流れと導入に関するシナリオを図4に示す。長期的なアウトカム指標となる、イノベーション活動における標準化活動のマネジメント手法を確立するためには、基礎研究および応用・開発研究におけるデータの収集方法および利用方法の基盤の確立が必要となる。このためには企業や大学等におけるデータの収集可能性、応用・開発研究機関である企業の組織における標準化活動の影響の評価手法、基礎研究機関である大学等における標準化活動の影響の評価手法が必要となる。これらのうち、この研究において、企業や大学におけるデータの収集基盤の確立について一定の到達がなされた。一方、基礎研究と応用・開発研究の間に見られる実態の評価については、この論文では仮説の導入にとどまる結果となった。今後、研究の深化がさらに必要になると考えられる。

7 今後の研究課題

情報通信機器の技術の市場化（プロダクト・イノベーション）のためには、ネットワーク外部性を得るためのインタフェース標準等への対応が今日では必要不可欠である。特

許を中心とした知的財産活動に係る統計データについての収集方法および、評価方法は、OECD フラスカティマニュアル^[8]、オスロマニュアル^[16]等において記載されているが、標準化活動について記述はなされていない。このため、現状では国際的な比較を通じた妥当性の確認を行うことは困難である。各国におけるデータの収集により国際的なデータの比較が可能となれば、精度の向上につながる。今後、国際的な研究の進展が望まれる。

また、この論文で導かれた、基礎研究と応用・開発研究における知的財産活動における標準化活動の程度についての仮説の検証を行うためには、基礎研究領域における標準化活動の実態把握が望まれる。

8 結論

知的財産活動調査中における標準化活動に関するデータが安定的に収集可能であること、ならびに再現性を有することについて確認を行い、データの回収率等の検討結果から妥当性を支持する結論が得られた。2012年以降についても、データの安定的な収集が可能であること、また再現性を有することについて、引き続き検証が必要であると考えられるが、この論文における検討の結果から、おおむね1次データとしての信頼性は確認されたと考えられる。この結果は、組織内での標準化活動の可視化を通じたイノベーション・マネジメントの高度化に寄与することが期待できる。加えて、応用・開発研究と同等程度に、知的財産活動に関係する標準化活動が基礎研究機関で行われている可能性があるとの仮説が今回の集計データの分析からは

導かれた。少なくとも、精度は別として基礎研究における、標準化活動の存在は定量的データから確認がなされた。

政策的な含意としては、標準化活動が企業等に代表される応用・開発研究と同程度以上の割合で観察されたにもかかわらず、大学の知的財産管理においては、標準化活動の管理方針が十分に整備されておらず、標準化活動と特許活動が十分にすり合わされていない点が課題として指摘された。大学等においても、電気機械製造業の場合と同様に、標準と特許の一体的な管理が必要と考えられ、そのためには現在、特許情報の取りまとめを行っている大学の産学連携推進担当部局等において、標準化情報の伝達を行う等の役割が必要となると考えられる。併せて、大学等が内部規程としている知的財産ポリシーにおいて、標準化活動を考慮した規定が求められるであろう。

研究面での含意として、短期的には、技術標準活動に関与する人数を活用して基礎研究、応用・開発研究においてイノベーション活動の評価等の定量分析への利用可能性を示唆する結果となった。長期的には、この論文の結果から得られた知見を活用して、国際的に同様のデータの収集を図る体制の確立につながることを期待される。

標準化活動が知的財産活動に与えている質的变化を踏まえたイノベーション活動の評価方法の確立のためには、標準活動に関する定量データに係る計量方法のさらなる高度化が引き続き求められるであろう。さらに進展するネットワーク社会を想定した場合に、標準化活動はイノベーション活動評価の上で、今後ますます無視できなくなる要因になると考えられる。

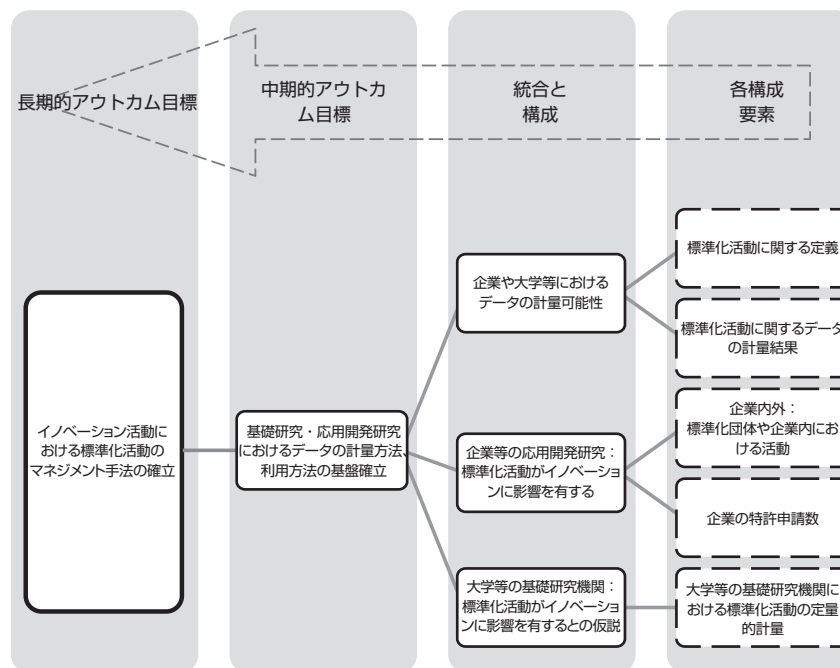


図4 イノベーション活動のマネジメント向上につなげるための標準化活動に関する手法の開発と導入の為のシナリオ

謝辞

この研究を行う機会をいただいた、経済産業研究所（RIETI）および早稲田大学、並びに職員の各員に感謝いたします。また、経済産業省基準認証ユニット長野氏、坂元氏および各位に感謝いたします。研究上の有益なアドバイスをいただいた、一橋大学イノベーションセンター 長岡教授に感謝いたします。

なお、この論文は著者の責任で記述されたものであり、記載内容および誤記等の責任は著者に帰されるべきものです。

参考文献

- [1] 文部科学省: 文部科学統計要覧 (2009).
- [2] International Organization for Standardization (ISO), *ISO Members 2006*, ISO, Geneva (2006).
- [3] 特許庁: 平成20年知的財産活動調査報告書, 特許庁 (2009).
- [4] 特許庁: 平成21年知的財産活動調査報告書, 特許庁 (2010).
- [5] 特許庁: 平成22年知的財産活動調査報告書, 特許庁 (2011).
- [6] 特許庁: 平成23年知的財産活動調査報告書, 特許庁 (2012).
- [7] 経済産業省: 三菱総合研究所, 先端技術分野における技術開発と標準化の関係・問題に関する調査 報告書, 経済産業省 (2009).
- [8] OECD: *Frascati Manual 2002: Proposed Standard Practice For Surveys on Research and Experimental Development*, OECD, Paris (2002).
- [9] N. Gandal, N. Gantman and D. Genesove: Intellectual property and standardisation committee participation in the US modem industry, *Standards and Public Policy* (S. Greenstein and V. Stango (eds.)), 208-230, Cambridge University Press (2007).
- [10] B. Godin: *Neglected scientific activities: The (non) measurement of related scientific activities*, Montreal (2001). <http://www.csiic.ca/pdf/godin_4.pdf> [accessed 26 Sept. 2012].
- [11] S. Tamura: Effects of integrating patents and standards on intellectual property management and corporate innovativeness in Japanese electric machine corporations, *Int. J. of Technology Management*, 59 (3/4), 180-202 (2012).
- [12] 東北大学: 国立大学法人東北大学知的財産ポリシー. Obtained through <<http://www.rpip.tohoku.ac.jp/files/chipo.pdf>> [accessed 11 Dec. 2012].
- [13] 東京大学: 東京大学知的財産ポリシー (2004). Obtained through <http://www.ducr.u-tokyo.ac.jp/jp/rules_and_forms/index.html#policy> [accessed 11/12/2012].
- [14] 東京工業大学: 東京工業大学知的財産ポリシー (2004). Obtained through <<http://www.sangaku.titech.ac.jp/policy/pdf/property.pdf>> [accessed 11 Dec. 2012].
- [15] 大阪大学: 大阪大学知的財産ポリシー (2010). Obtained through <<http://www.ipo.osaka-u.ac.jp/>> [accessed 11 Dec. 2012].
- [16] OECD: *Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data, 3rd Edition*, OECD, Paris (2005).

執筆者略歴

田村 傑(たむら すぐる)

通産省入省、産業技術環境局技術評価調査課、内閣府総合科学技術会議総括グループ等をへて2009年から2012年早稲田大学理工学研究院准教授、2012年より(独)経済産業研究所(RIETI)シニアフェロー。主要な業績に、*Journal of the American Ceramic Society* 他での出版がある。研究関心領域はイノベーションマネジメント、研究開発評価手法ほか。この論文では田村傑が全ての内容について記述を行った。



査読者との議論

議論1 標準化活動全般に対する計測ではなく、知財活動の中の標準化活動というフィルターを通した計測に限定されている点

コメント(松田 宏雄:産業技術総合研究所国際標準推進部)

研究目標に、「標準化活動を計測する手法を考察する」と掲げられているが、特許庁が行った「知的財産活動調査」に含まれる標準化活動調査の数字的揺らぎ(安定性?)を考察するだけで、仮説を妥当と結論付けている。この特許庁の調査結果は、この論文を構成する重要な「要素」であるから、その妥当性にもう少し突っ込んだ考察が必要ではないか。細かい点で言えば、この論文で対象とした基礎研究では、2011年度の標準化担当者割合が過去の年度に比べて半減している。これについて5.1節で言及はあるが、調査方法の揺らぎとしての考察がない。

回答(田村 傑)

2011年の変動の理由として、パネル調査でないための調査対象企業の入れ替えが要因として考えられることを記述しました。またデータの信頼については、調査データの回収割合が5割程度と高く、また回収された調査のうち、標準化部分への回答が9割以上の割合でなされている点をサンプリングのバイアスを排除して信頼して良い理由として追記しました。「5.結果」、「5.1 知的財産活動者数、ならびに知的財産活動における標準化活動者数」、「5.2 業種分野別のデータの経年比較」)

議論2 データの信頼性

コメント(田中 充:産業技術総合研究所)

「我が国の知財活動の統計を基礎データとしこれに立脚した評価指標であることからその信頼性に関する記述が不十分であること」について: この論文では公的なデータであることを根拠として網羅性があることに触れているだけのように見えます。このデータの信頼性に明るくない人にとっては、2008年~2011年の変化や、基礎研究と応用・開発研究の比較結果をどの程度信用して良いのか分かりません。必要に応じて加筆することを勧めます。

回答(田村 傑)

調査票の回答割合が5割程度であること、また回収した調査票のうちこの研究で用いた質問部分の回答割合が9割はあることから、回答に際してのバイアスを排除することができ、データの信頼性が高いと結論付けられることを記述しました。通常のアンケート調査では、場合によりますが、2割から3割も回答があればデータソースの信頼性が高いと判断されると考えます。また、結論については、基礎研究分野においても、知的財産活動に関する標準化活動が一定程度存在することを否定することはできないと考えられる点を追記いたしました。「5.結果」、「5.1 知的財産活動者数、ならびに知的財産活動における標準化担当者数」、「6.考察」、「6.1 仮説検証」、「6.2 研究分野間比較」、「8.結論」)

議論3 標準化の定義の重要性に関する記述

質問（田中 充）

「新たな標準化の定義が妥当であるとの仮説の検証方法が明確でないこと」について：この論文で、「標準化活動に関して、規格策定の交渉のみならず、標準活動に関するバックオフィス業務、企画業務を含む定義に基づくデータの収集が、有意義に働き、データを得ることが可能であることが示された」とされていますが、その理由があまり明確でないようです。むしろ、「標準化活動のアイテムをできるだけ広く取り上げることが、より正確な指標を与える」ことは自明、つまり定義として妥当なことは自明であるように思え、この点を簡単に触れれば良いように思います。それとも、やはり安定性が「データを得ることが可能な」理由というのがこの論文の論旨でしょうか？この点が分かりやすいように改訂することを勧めます。

回答（田村 傑）

すでに調査実施が行われている特許活動の定義に合わせたことを言及すると共に、これまでの標準化活動者の集計が交渉者の集計を中心としていた点に言及しました。併せて、そのような集計方法がもたらす、反射的な欠点についての記述を追加しました。さらに、拡張した定義において、標準化活動の集計はこれまで行われていなかったことから、データが収集できること自体が一つの意味をなす点を示しました。社会的な調査では、自然科学分野の計測機器を使った計量と異なり、アンケート調査を行っても、データの回答が得られない場合があります。（「6. 考察」、「6.1 仮説検証」、「6.2 研究分野間比較」）

議論4 基礎研究における標準化の傾向に対する仮説の検証

質問（田中 充）

「この評価指標を用いた基礎研究と応用・開発研究における標準化活動の比較がなされているが、その信頼性に関する疑問が明らかにされていないこと」について：この試論は、本評価指標の利用事例を示す意図の下に展開されたように記載されています。したがって、上記のもろもろの懸念に示されるように、評価指標の持つ信頼性や定義

の妥当性を加味した上でどの程度の強さで主張できる結論なのか読者は疑問視する可能性があります。評価指標の比較に基づく結論はあくまで必要条件であり十分条件ではないというのが妥当なところではないでしょうか？これに応えるメッセージを加筆することを勧めます。

回答（田村 傑）

基礎研究と応用開発研究においては、同程度の知財活動に関する標準化活動が行われている可能性があるかと改めました。また、結論ではなく仮説が導入されたとの位置付けとしました。（「6. 考察」、「6.2 研究分野間比較」、「8. 結論」）

質問（松田 宏雄）

アブストラクトにおいて、「基礎研究においての方が、応用・開発研究より標準化活動の占める割合が高いとの結論が得られた。」と記述されているが、査読者から見てこの結論は、読者をミスリードする大変危険なものと考えられる。この論文で使われた特許庁の調査は、知的財産活動を行っている者を母数として、その内数として標準化活動従事者をカウントしているにすぎない。2.4 節で標準化策定団体への参加と特許の数の正の相関を述べているように、応用・開発研究では、知財部門に所属しない標準化活動者がたくさんいると推定される。一方で大学等の基礎研究機関では、知財や標準化への研究者の貢献が少ないため、結果的に知財部門に所属する者が両分野をカバーしなければならないので、知財活動者に含まれる標準化活動者の割合が多くなったと考えられまいだろうか。

回答（田村 傑）

- ・結論の扱いを仮説の導入としました。また、応用・開発研究と同程度の標準化活動が行われている可能性があるとの記述に変更いたしました。（「6.2 研究分野間比較」）
- ・基礎分野における原因について、考察を追加しました。（「6.2 研究分野間比較」）

技術開発におけるポートフォリオ構成と社会実装

— GERASの開発と普及に向けての新たな展開 —

駒井 武

さまざまな技術体系や要素技術の融合を必要とする複雑な技術開発を対象に、構成学的手法を用いて要素のポートフォリオ分析を実施し、重点化すべき要素や脆弱な要素を明確にしてシステム設計および社会実装を可能にした。題材として、土壤汚染診断のための地圏環境リスク評価システムGERASを取り上げ、その研究構想から社会への普及に至るまでの構成学的なプロセスを解析するとともに、震災復興等の新たな視点からの技術開発の展開について論じた。

キーワード: 環境リスク、リスク評価、土壤汚染、構成学、ポートフォリオ

Portfolio structuring and social implementation in the development of complex technology

– Case study of the development of GERAS and its evolution –

Takeshi KOMAI

A portfolio analysis of composing elements using a synthesesiological method has been carried out for complex technology development, which involves fusion of various technology systems and elemental technologies. To assess the method's effectiveness, a case study was conducted on GERAS (Geo-environmental Risk Assessment System), a system for soil contamination diagnosis. The analysis spanned the entire development phase, from the generation of research ideas to the dissemination of results to society. The benefit of using this method was greater ease in system design and social implementation, through the analysis of critical components in the developmental process. I also discuss applying this method to novel areas, such as the development of technology for reconstruction after The Great East Japan Earthquake Disaster.

Keywords: Environmental risk, risk assessment, soil contamination, synthesesiology, portfolio structure

1 はじめに

シンセシオロジー Vol.1 No.4 (2008 年) に掲載した地圏環境リスク評価システム GERAS (Geo-environmental Risk Assessment System) に関する研究論文^[1]には、4 年余り経過した現在でもさまざまな反響が寄せられている。直接的には、GERAS を企業や自治体の環境対策に活用したいとの要望が強くあり、社会的な普及に大いに役に立っている。リスク評価の研究分野では引用されるケースも多い。しかし、より本質的な議論としては、GERAS 開発に至るプロセスや構成学的な考え方を定着させ、普及させるための方法論に関わる意見が数多くあった。また、一連のコメントの中では、このような複雑な技術開発を推進する上での最適なシナリオの選定や要素技術の融合のあり方等、建設的な提案や新たな視点も示されている。

環境技術のほとんどは多種多様な技術要素の集合体であり、膨大な情報を解析・処理して製品や社会システムとして実現するものである。技術要素の研究開発は数限りな

く存在するが、それらをつなぎ合わせるテクニックが不足している。最終的には、これらをインテグレートして社会経済学的な観点を視野に入れて社会に定着させることも必要である。2011 年 3 月の東日本大震災以降では、環境技術を早期に社会に普及させて震災復興支援に寄与するといった新たな展開も期待されている。

この論文では、このような背景の中で、GERAS をさらに発展させ、産業界に普及させていくための科学的、社会的な方策について論じる。特に、複雑な技術要素の組み合わせや融合が重要であることから、研究開発における全体シナリオの描き方、システムにおける脆弱性の改善、さらにはポートフォリオの構築と社会実装といった新たな視点で議論を進める。また、著者は現在大学の環境科学専攻に所属しており、主として学の立場から技術開発における産官学の役割と連携のあり方について基本的な考え方を述べてみたい。

東北大学大学院 環境科学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20
Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University 6-6-20 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan E-mail: komai@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

Original manuscript received May 10, 2013, Revisions received June 18, 2013, Accepted June 19, 2013

2 技術開発の現状と展開

GERAS の開発では、これまで約 10 年をかけてさまざまなタイプの解析モデルを作成して、実際の環境汚染問題に適用してきた。我が国では、すでに 1,500 を超える企業や機関で活用され、標準的なリスク管理ツールとして定着している。ユーザーからの意見として、環境リスクの評価に加えて経済リスクの評価も可能にしてほしい、土壤環境に係わる社会システムやできれば法制度にもリスク評価を組み込んでほしい、などの将来展開の要望が多い。このため、次のステップとして浄化対策のコストや費用対効果の定量化を目指した経済モデルの開発を進めている。また、土壤汚染対策の生活環境への影響や生態系への影響に関するサブモデルも開発しているところである。これらの新たな展開の中では、リスクベースの意思決定や環境経済的な検討も必要であることから、文理融合の方法論の導入が必須であると考えられる。そこで、社会系の人材活用を積極的に進めるため、産官学の取り組みがきわめて重要となる。特に、自治体の環境部署や公設研究機関との間で数多くの共同研究等を実施して、産総研内では対応が困難な社会経済的な問題に取り組んでいる。また、大学機関では社会系、環境系の人材が豊富であることから、リスク評価を専門とする学術分野の結集も重要である。大学との連携講座や共同研究、企業とのイノベーションスクール等の制度を活用して土壤汚染リスク評価の研究を実施したところ、これまでにはなかった複合的な成果が得られた。具体的には、大学との間で放射性物質のリスク管理や新規の数値統計手法に関する共同研究が進められている。また、GERAS の活用と普及に関するアンケート調査を通じて、真に必要とされる評価システムの機能や各種データのフィードバックの方法、評価結果の信頼性確保の方法等の多くの知

見（ノウハウ）が集積された。

3 開発のシナリオとポートフォリオ分析

3.1 ポートフォリオの構成

短期間で研究目標を達成して効率的に製品化し、さらには社会実装を実現するためには、研究開発のシナリオの設計や個別要素に関わるポートフォリオの構成を行うなどの工程管理が最も重要と考えられる。そもそも、単一の技術あるいは技術体系により製品化を実現できることはきわめて希であろう。複数の技術要素を組み合わせ、融合することにより目的を達成できるケースが圧倒的に多いのではと思う。そのシナリオの中で、技術開発に必須の要素技術は何か、いかなる技術の組み合わせが最適か、チーム内で不足している要素は何か、などのポートフォリオ分析を事前実施することが成功の鍵となる。

GERAS の開発において必要とされた技術要素（研究課題）のポートフォリオを描いてみると図 1 のようである。この図は、研究開発と社会（市場）の成熟度に関する定性的な関係を示したものである。双方が上向きのベクトルを示すことが技術開発の目標であるが、土壤調査、化学分析、環境修復、リスク評価、情報解析、物理探査等のさまざまな技術要素の向上に加えて適切な融合が重要である。例えば、土壤の汚染情報はいずれの要素にも深く係わるものの、「リスク」の観点からこれらをかか有机的に繋げるかが融合の成否を決めると言ってもよい。加えて、津波堆積物や放射性物質等の社会的な要請に対応する必要もあった。すなわち、図の凡例に表記した基礎研究や製品化研究のみならず、社会要請に基づくニーズ対応研究の組み合わせと統合化も重要なポイントとなる。実を言えば、開発の当初からこのような明確なイメージがあった訳ではなく、

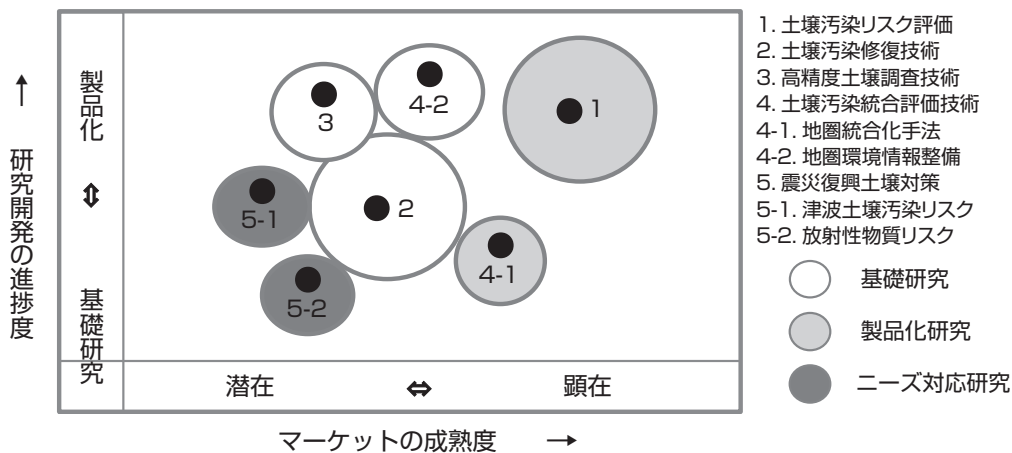


図 1 GERAS 開発におけるポートフォリオ分析
GERAS を構成するさまざまな技術要素について、研究開発の進捗度と土壤汚染対策マーケットの成熟度の観点から各要素の位置付けを図示。

一部の技術要素とその位置付けを明示した程度であった。しかし、開発の中途において、おそらく「死の谷」に至る段階で開発を加速させるための方法として思いついた次第である。ここで議論したように、ポートフォリオの構築は、達成目標を明確にして技術を融合・統合させるために重要な示唆を与えてくれる。核となる技術要素の高度化に加えて、新たに参画すべき技術や加速すべき技術の動態を明示することができる。

3.2 要素技術の脆弱性とその強化

研究開発において陥りがちな大きな間違いは、優位性の高い技術要素だけに重点的に取り組み、その周辺の技術に目を向けないことである。我が国の研究開発の欠点とも言えるかもしれないが、開発すべき技術体系の俯瞰的な分析が欠落するケースが多い。全体システムの特性をよく分析した上で、伸ばすべき技術開発の重点化に加えて、システム内で最も脆弱な技術要素を見極めることが重要である。一つの優れた技術が完成しても、関連する周辺技術やその連関性が保証されなければ、使えないシステムになってしまう可能性が高い。GERASの開発において、当初重点的に取り組んだ研究は土壌調査、土壌汚染修復および数理解析手法の開発であり、主に工学分野の研究者が担当した。その後、チーム内で脆弱と考えられた曝露評価やシステム開発を強化し、さらには物理探査や地球化学等の異分野の研究者も加わり、約10年をかけてGERASの完成にまでこぎつけた。すなわち、分野融合の研究展開と研究開発のリーダーシップが重要と考えられた。

もう一つの重要なポイントは、GERASにおいて必要不可欠なデータベースや解析パラメータの構築である。モデ

ル作成者と使用者による双方向のリスク評価を可能にするためには、現場の汚染データや地質・地下水の実測データの取得が欠かせない。産総研のみでこれらのデータをコンパイルすることは不可能に近いので、大学、自治体や民間企業との共同研究等を通じて現場の貴重なデータや地質情報を収集することができた。これらの産官学の連携では、産業技術連携推進会議の土壌汚染研究会（著者が会長を務めた）が果たす役割が大きかった。例えば、北海道地質研究所と共同で自然由来重金属の調査・分析を実施、東京都環境科学研究所と共同で有機化合物のリスク評価を実施、山形県環境科学研究センターと共同でVOC（揮発性有機化合物）による地下水汚染を解明、東北大学環境科学研究科と共同で地圏環境インフォマティックシステムを開発、などの特筆すべき成果を得ている。

3.3 技術開発の融合と一気通貫

それでは、GERASの開発段階において、いかなる手法により複数の要素を構成して要素間を融合させたのか、いくつかの構成案（図2）で示してみる。まず、既往の環境地質あるいは地質汚染のみの分野では、リスク評価の実用に供し得ないことは自明の理である。そのため、次の段階（Ⅱ）では地球化学や環境科学（生物学、生態学等）の分野を導入して、評価結果をより科学的に解釈できるように融合化をはかった。さらに、全体システムにおいて曝露解析や数値シミュレーションの手法開発がボトルネック（あるいは脆弱な要素）であることが判明したので、リスク科学の知見を取り入れて、曝露・リスクを統一の尺度として技術の融合化を試みた。幸運にもこれらの各要素は相性がとてもよく、段階（Ⅲ）では要素間を繋ぐ糊の機能として情

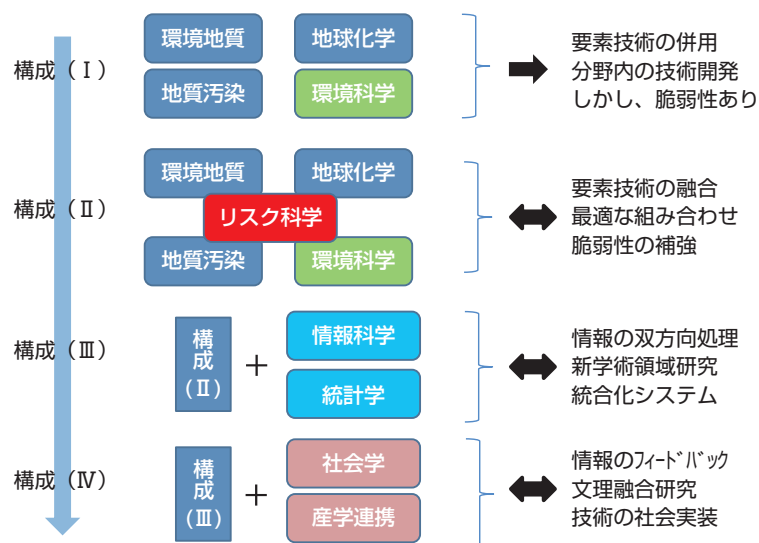


図2 GERAS開発における構成の変遷イメージ
GERASの開発に必要な研究分野とそれらの構成について、開発当初から中途、成熟した4段階における構成の特徴を示す。技術開発に加えて、社会実装の最終段階が重要である。

報科学や統計学を基礎とした情報処理の新手法も重要な役割を果たした。さらに、技術の社会実装のためには、社会学や後述の産学連携の取り組みが不可欠であった。すなわち、技術開発の構成段階に加えて、社会実装の最終段階（Ⅳ）を組み込むことが最も重要であった。いずれを欠いても、全体システムを構成することは不可能であり、最適なシステム設計をなし得なかったと考えている。リスク（事象の発生確率）といった尺度で要素間を一気に連結させたことが成功の一つであり、また副産物としては地質と医療（健康）を結びつける社会地質学（著者が学会会長を務める）の創生にも貢献した。

4 開発技術の普及と社会実装の実現

4.1 社会、産業との連携とフィードバック

開発したさまざまなタイプの GERAS を産業や社会に普及させるための仕掛けも重要な要素である。前述の土壤汚染研究会の対外活動をはじめとして、地質汚染や社会地質に関する学術活動、自治体における審議会や研究会等の委員会活動、民間企業を取り込んだ土壤調査や環境修復等の事業に積極的に取り組んだことは、GERAS をアピールするよい機会となった。最も力を入れた取り組みは、実際に使用しているユーザーからの評価データのフィードバックである。通常、GERAS のリスク評価は入力データに基づくフォワード解析であるが、逆に汚染状況の実データからのバックワード解析を同時に実行することが可能である。これらの双方向の操作を繰り返すことで、評価結果の信頼性が高まるだけでなく、システムの効率的な改善が可能となった。さらに、利害関係者

とのコミュニケーションにおいてもよい結果をもたらす。つまり、仮想的な環境下でリスク評価を行うのではなく、現実的な条件で実施することにより、リスク認知と評価結果の理解が得やすくなるといった社会的な利点がある。このため、ベイズ統計のスパースモデリング¹⁾を駆使して、リスクの事前分布と事後分布の最適化をはかるなどの新学術領域の研究を進めている。

4.2 技術の公的活用と標準化

技術を普及させるための仕掛けとして、政府や自治体等の公的機関を活用することも有効な手段である。GERAS-1,2 のバージョンは、2008 年に公開されて以来、200 を超える自治体や政府機関で活用されている。この知名度を生かして、土壤汚染対策を管轄する主要な官庁の関係者に機会ある毎にアピールしたところ、以下のような公的採用が実現した。経済産業省では、用地診断を目的とした認証制度であるサイトアセッサで使用可能なリスク評価手法として GERAS-1,2 が採用された。また、国土交通省では建設工事で発生する土壤や土砂のリスク評価ツールとして、GERAS-1,2 を改良した新バージョンが採用された。この他、環境省や東京都においても、リスク評価の方法論をもとにした GERAS の考え方が導入されている。最近、東京都環境局との共同研究を通じて、LCA を加味した GERAS の新バージョンの開発も進行中である。浄化対策のリスク評価では、環境負荷のみならず環境エネルギーの観点から、個々のライフサイクルに対して包括的な評価手法を確立することが重要である。そのため、図 3 に示すように周辺環境や生態系への影響、外部環境負荷（CO₂ 排出）等を含めたトータルとしての環境影響を総合評価し

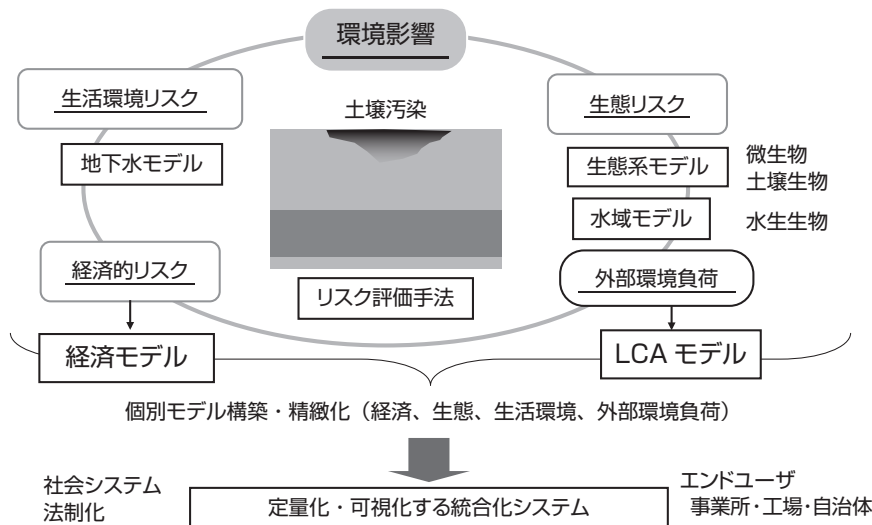


図3 GERAS 開発における統合化システムの構成
 土壤汚染リスクや環境負荷の評価に加えて、経済モデルをはじめ地下水モデル、生態系モデル、LCA モデル等の統合化システムを開発する。

ている。すなわち、これまでの土壤汚染リスクに加えて生活環境や生態系へのリスクを評価するため、具体的には地下水モデル、生態モデルおよび水域モデルの開発を進めている。

さらに、土壤汚染のリスク評価手法について国際標準化を目指す動きも始まっている。GERAS はアジア諸国だけでなく先進国でも広く使用されているため、国際標準機構 ISO に新たな枠組みを作って、GERAS 等で導入されている曝露・リスク評価の方法論を標準化あるいは規格化するというものである。また、国際標準を見据えた国内のリスク評価技術の標準化も重要であり、各省庁に働きかけて JIS 等の標準化に向けた横断的な取り組みを進める。今後、世界に向けて研究成果を発信して、アジア諸国を中心としたリスク評価技術の普及・拡大のための国際的な活動を推進する。

4.3 社会実装と震災復興への貢献

2011年3月の東日本大震災以降、研究開発のあり方が大きく問われている。研究によって得られた成果は、実用可能な製品やシステムとして社会に認知され、直面している課題に適用できるものでなければならない、とする社会実装の考え方である。GERAS の対象とする環境汚染は、これまで土壤汚染対策法で規定されている重金属や有機化合物が中心であったが、震災以降では津波堆積物や震災廃棄物、さらには放射性物質についても適用可能となるように研究開発を加速させた。多様化する環境汚染問題のリスク評価手法を確立して社会実装を可能にし、ひいては震災復興の一助となればとの思いからである。

東日本沿岸を襲った大津波により、大量の津波堆積物や震災廃棄物が発生している。一部の堆積物や廃棄物には、ヒ素や鉛等の有害化学物質が含まれるため、そのリスク管理が必要となっている。著者らは、2011年から約1年かけて津波堆積物の物理化学特性を調査し、GERAS を用いて環境リスク評価を実施した。その結果、宮城県から岩手県にかけての沿岸部でヒ素によるリスクが高い地域がみられ、地下水等のリスク管理を実施する必要があることが判明した^[2]。また、約95%の地域では重金属の環境リスクは小さく、震災復興の資材として堆積土砂が再利用可能であることもわかった。この研究成果は、社会実装の重要な研究として公益社団法人土木学会から論文賞(2013年度)を受けた。

セシウム137等の放射性物質による土壤汚染の問題も社会的にみて重要課題の一つである。現在、GERAS に放射性物質を組み込むための新規の研究を進めている段階であり、特に環境中での放射性セシウム等の挙動に関する知見を収集している。放射性物質の物理化学的特性は既

知であるので、現時点でも GERAS に導入することが可能であるが、リスク評価の確度を向上させるためには土壤粒子との係わりや存在形態による移動特性の解明が必要である。東日本地域の土壤特性に関するデータベースの構築、福島県内の土壤や水系、河川底質等のモニタリングを進め、GERAS の解析に必要なパラメータを整備しているところである。

5 まとめ

地圏環境リスク評価システム GERAS の開発では、研究開発の死の谷から脱出して成果を社会に普及させるまでの貴重な体験をした。この論文で述べたような新たな視点の下で GERAS の新バージョンが開発され、成果を社会に発信しているところである。研究チームの努力と幸運(偶然)にも恵まれて、順調に研究が進んでいるようにも見えるが、大震災の直後では復興の支援というさらなる重責もあって、2回目の死の谷の時期を迎えたようにも感じた。研究の途上ではあるが、津波堆積物や震災廃棄物、放射性物質にも対応可能な評価システムの完成にめどがたった。困難を克服して技術を社会に定着させるためには、システムを構成する要素技術の十分な理解と融合の能力が必要である。

最後に、研究リーダーたる者、以下のような覚悟が重要であると痛感している。

- ・アタッシュケース(引き出し)に持ち物をたくさん持とう。
- ・引き出しの中の物の組み合わせを最適なものにしよう。
- ・何が脆弱であるか(何が強い)かを明確にしよう。
- ・社会や産業に打って出て、大海原を航海しよう。
- ・最後は、強いリーダーシップを発揮しよう。

用語の説明

用語1: スパースモデリング (Sparse Modeling) は、ベイズ統計の理論 (Bayes' theorem) を用いた情報解析の手法の一つである。最近、地球科学の分野ではビッグデータからの主要情報の抽出や画像の修復等に活用されている。リスク評価の分野では、事後の発生確率から事前のリスクを推定する新規の数値手法として注目され、生態系等の複雑系でいくつかの適用事例がある。著者らは、表層土壌と津波堆積物の地球化学的判別にベイズ統計を適用する研究を進めている。

参考文献

- [1] 駒井武, 川辺能成, 原淳子, 坂本靖英, 杉田創: 土壤・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法—リスク管理の実践に向けた構成学的研究アプローチ-, *Synthesiology*, 1 (4), 276-286 (2008).
- [2] 川辺能成, 原淳子, 保高徹生, 坂本靖英, 張銘, 駒井武: 東日本大震災における津波堆積物中の重金属類とそのリスク, *土木学会論文集G(環境)*, 68 (3), 195-202 (2012).

執筆者略歴

駒井 武（こまい たけし）

産総研の地圏資源環境研究部門において、GERAS の立案から製作、普及に至るまでの研究マネジメントを担当し、GERAS の産業や社会への普及をはかった。2010 年 4 月より研究部門イノベーションコーディネータ、2012 年 4 月より地圏資源環境研究部門長。専門分野は環境工学、環境地質学であり、資源と環境の間にあるさまざまな課題の解決や環境技術の産業への普及に取り組んできた。この間、東京都環境審議会委員、千葉県公害審査会委員、茨城県環境審議会専門委員等を歴任し、研究成果の普及に努めている。2013 年 3 月に産総研を退職し、2013 年 4 月より東北大学大学院環境科学研究科教授として、地球システム・エネルギー学講座を担当している。

**査読者との議論****議論1 全体**

コメント（栗本 史雄：産業技術総合研究所評価部、田尾 博明：産業技術総合研究所環境管理技術研究部門）

この論説は、土壌・地下水汚染のリスク診断システム GERAS について、その研究構想から社会への普及に至るまでの構成学的なプロセスを示したもので、開発と社会提供に至ったプロセスを論じた研究論文（*Synthesiology*, 1 (4), 276-286 (2008).）に基づいて、さらなる技術開発と産業への普及のための科学的・社会的な対策、および産学官の役割と連携のあり方を論じている。特に、技術要素の組み合わせや融合のための全体シナリオやポートフォリオ、社会実装に焦点を当て、重点化すべき要素や脆弱な要素を明確にして、システム設計および社会実装に活かすことの重要性を浮き彫りにしている。このように構成学としてふさわしい内容を有していることから、シンセシオロジーへの掲載は適当と判断します。

議論2 ポートフォリオ分析

コメント（栗本 史雄）

この論文において、技術として、土壌調査、化学分析、環境修復、リスク評価、情報解析、物理探査を挙げますが、図1では「1. 土壌汚染リスク評価、2. 土壌汚染修復技術・・・」のように複数の技術を統合した技術・対策等を記載しています。技術要素（研究課題）や図1の凡例中の要素技術等、用語の整理を行い、この論文にも技術の融合・統合の説明をしてください。

回答（駒井 武）

図1の凡例とこの論文の用語を整理し、この論文に融合・統合の方法やプロセス構成等の詳細を加筆しました。図1に示すポートフォリオは、技術と社会の成熟度を指標とする一つの表現方法と考えています。凡例の3つのカテゴリーは、それぞれ基盤研究、製品化研究、ニーズ対応研究に修正し、全体イメージを理解しやすいように用語を整理しました。全体を通じて、解説的な内容から構成学の見方を示唆する論理的な考察となるよう修正・加筆しました。

議論3 GERAS開発の構成

コメント（栗本 史雄）

図2において、GERAS 開発における3段階の構成とその特徴は整理されていて、わかりやすいと思います。また、4章では産業界との連携や社会実装等の社会に向けた活動が記述されています。そこで図2において、産業界との連携や社会実装に至る流れを明示できると、より理解が進むと思います。図2の社会学、産学連携を構成IVとして次の段階に位置付けるのはいかがでしょうか。

回答（駒井 武）

社会への普及を目的とした構成は、これらの研究開発の次のステップ、あるいはループの最終段階にあるものと考えます。構成学のプロセスの中に、技術開発だけではなく、社会実装のためのプロセスを加えることはとても重要であると気づきました。そこで、図2の3つの段階の変遷を基礎として、段階4として社会学や産学官の連携といった社会活動を通じた新たなプロセスを設けることしました。全体を4つの段階として図2を修正し、わかりやすい表現としました。

議論4 ベイズ統計のスパースモデリング

コメント（田尾 博明）

リスク評価の際、「ベイズ統計のスパースモデリング」は重要な解析手法だと思いますので、用語説明として簡単に解説していただくと、理解の助けになるとと思います。

回答（駒井 武）

スパースモデリング（Sparse Modeling）は、ベイズ統計の理論（Bayes' theorem）を用いた情報解析の手法の一つです。最近、地球科学の分野ではビッグデータからの主要情報の抽出や画像の修復等に活用されています。リスク評価の分野では、事後の発生確率から事前のリスクを推定する新規の数値手法として注目され、生態系等の複雑系でいくつかの適用事例が報告されています。著者らは、津波堆積物の判別手法への適用にベイズ統計を活用する研究を進めています。用語説明を行いました。

議論5 技術の公的活用と標準化

コメント（田尾 博明）

4.2章「技術の公的活用と標準化」で、「最近、東京都環境局との共同研究を通じて、LCAを加味したGERASの新バージョンの開発も進行中である。」とありますが、LCAを構成要素として加えることの意義を記述していただくと、新たな発展の可能性が示されると思います。また、図2においてLCAは統計学と情報科学に部分的に含まれているのかも知れませんが、構成要素にLCAを加えられないでしょうか。

回答（駒井 武）

これまでのリスク評価では事象や事件の頻度や確率を時系列で解析することはあまり行われてきませんでした。しかし、土壌汚染対策では調査から浄化に至るさまざまなプロセスの環境負荷やエネルギーの収支を時間、空間的に解析することが必要です。そのため、対策事業のライフサイクルについて環境負荷のみならず、環境エネルギーの観点から包括的に評価する手法を開発しています。周辺環境や生態系への影響、地球環境（CO₂排出）等を含めたトータルとしての環境影響を総合的に評価することを目的としています。このような内容を説明するため、新たに図3を加えました。

コメント（田尾 博明）

4.2章「技術の公的活用と標準化」で、国際標準化の動きが書かれていますが、JIS化に関しても、何らかの対応を検討しているのであれば、記述をお願い致します。

回答（駒井 武）

国際的な枠組みではすでにISOにリスク評価モデルの提案をしているところです。国内では、各省庁において個別の法律体系の中でリスク評価の手法の導入が検討され、この論文に記載したように一部ではすでに公的な枠組みに採用されているものもあります。次のステップとして、国際標準を見据えた国内のリスク評価技術の標準化が考えられます。各省庁に働きかけて、JIS等の標準化に向けた横断的な取り組みが必要な時期になっていると思います。以上を加筆しました。

議論6 GEARS開発の統合化システム

コメント（栗本 史雄）

図2の学術・研究の要素の構成に対して、地圏環境を総合的に考察し、統合化を示す図3を追加したことは適切と思います。地圏環境の中に存在する環境リスクに対するリスク評価手法を行い、地下水モデル、水域モデル等の開発、さらにその先にある経済モデル・LCAモデルを統合して統合化していく道筋が示されています。図、キャプションおよびこの論文にある経済モデル、生態系モデル、LCAモデル等の用語の整合性を確認してください。

回答（駒井 武）

図3はこれまでの土壤汚染に加えて地下水モデル、水域モデル等を開発し、その先で個々のモデルに関する経済モデル・LCAモデルを開発、さらにそれらを統合した全体システムが個別モデルと連動してエンドユーザーに提供されるというシナリオを示したものです。文章中の説明と図のキャプションについて整合性がとれるように用語を整理、修正しました。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

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

1 投稿記事

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

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

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

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

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

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

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8568

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

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: S. ICHIMURA

Senior Executive Editor: M. SETO, N. YUMOTO

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

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

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

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

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

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

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

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

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

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

1 Types of contributions

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

will be reviewed by the Editorial Board prior to being approved for publication.

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

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

3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

are included.

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

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

3.3 Format

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

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

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

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

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

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

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

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

4 Submission

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

近年、研究開発成果に求められる要求が多様化している。一昔前であれば、「優れた性能の製品ならば売れる」と言う信念から、よりよい性能の製品等につながる成果を生み出すことが研究開発の主要な使命であったが、現在では製品やサービスに機能性だけでなく「より高い次元での価値」が求められていると言われる。一方で、2011年の東日本大震災以降、特に「研究成果の社会への具体的な適用(実装化)」についての要請が高まっており、研究成果の生み出す「社会における価値の実現方法」もより大きく問われている。

翻ってシンセシオロジー(構成学)では、研究開発の社会での目標や具体的価値を定め、その実現のシナリオを設定し、そのために必要な要素技術の選択と統合を行うことなどを論文執筆の要件としている。その際、最も重要なことのひとつが、「社会での目標や価値」をどのように設定するかということであろう。この課題について研究者がどのようにとらえてきたかを調べることは、大変興味深い。今号のシンセシオロジーでは、4編の論文と1編の論説が掲載されたが、この観点から少し考察した結果を以下に記す。

荒井氏らの論文「沖縄海域の海洋地質調査」は、地質現象に基づく海底鉱物資源の開発に向けた方法論を提示している。国土基盤情報整備という範疇にとどまらず、資源開発という「より高い価値」を生み出す方法論の構成プロセスが詳細に提示されていることは、特筆すべきことであろう。

鹿田氏らの論文「ダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証研究開発」は、パワー半導体の中でも最高性能をもち圧倒的な優位にたつダイヤモンド材料を実用にまで高める実証研究を行ってきたものである。ダイヤモンドの種々の優位性を組み合わせて、「低損

失電力変換」のためという「より高い環境的・エネルギー的価値」を実現することを目標としている点が注目される。

田村氏の論文「基礎研究および応用・開発研究における標準化活動に係る投入資源の計量方法および差異について」の論文も大変興味深い。ここでは、基礎的な研究領域においても、応用・開発研究と同等程度に、標準化活動が行われている可能性があるとの仮説が導かれ、標準化活動という研究成果の「より高い付加価値」を生み出す活動に焦点を当てている。

また、有蘭氏らの論文「電力不足発生リスク回避のための節電率設定方法への一提言」では、確率不等式を主たる要素技術として、電力不足を回避するための節電率の設定方法を提案している。電力不足が予想される中で、現状の電力需給バランスのもとでの電力不足のリスクをいかに回避するかという「困難な必須課題の解決」をめざすという観点から、興味深い論文と言えよう。

このように、いずれの論文も新たな価値創出に向けた研究の取り組みが見られ、それぞれの研究者の独自の洞察力が垣間見られることを指摘しておきたい。

最後に駒井氏の論説「技術開発におけるポートフォリオ構成と社会実装」を掲載したが、ここでは、複雑な技術開発を対象に、構成学的な手法を用いて要素のポートフォリオ分析を実施し、実際にGERASと言う地圏環境リスク評価システムによる解析を行った方法論や成果普及の状況を報告している。冒頭に述べた社会実装まで行った構成学の新たな応用例であり、是非一読をお勧めしたい。

(編集幹事 小林 直人)

Synthesiology 6巻3号 2013年8月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：一村 信吾

副委員長：瀬戸 政宏、湯元 昇

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

幹事(普及)：赤松 幹之、小林 直人、山崎 正和

幹事(出版)：多屋 秀人

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

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

松井 俊浩、三石 安、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

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

TEL: 029-862-6217 FAX: 029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

A proposal for setting electric power saving rate to avoid risk of electric power shortage occurrence

-Probability evaluation system of electric power shortage occurrence under tight electric power supply-

I.ARIZONO and Y.TAKEMOTO

Development of diamond-based power devices

-Verification of its superiority as the ultimate power device-

S.SHIKATA and H.UMEZAWA

Marine geological mapping project in the Okinawa area

-Geoinformation for the development of submarine mineral resources-

K.ARAI, G.SHIMODA and K.IKEHARA

Measurement of input resources for standardization activities in basic research and applied and development research, and the difference of the measuring results between the research types

-Case studies of universities and technology licensing organizations, and the electric machinery industry-

S.TAMURA

Article

Portfolio structuring and social implementation in the development of complex technology

-Case study of the development of GERAS and its evolution-

T.KOMAI

Editorial policy

Instructions for authors