

Synthesiology

SiC半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略

単結晶ダイヤモンド・ウェハの開発

日本全土の元素分布の調査とその活用

いかにしてカーナビゲーションシステムは実用化されたか

鑄造技術と粉末冶金技術の融合による新材料開発

シンセシオロジー編集委員会

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかせたままでは^(注1)、その成果の社会還元を実現することは難しい。そのため、社会の側から研究成果を汲み上げてもらうという受動的な態度ではなく、研究成果の可能性や限界を良く理解した研究者自身が研究側から積極的にこのギャップを埋める研究活動(すなわち本格研究^(注2))を行うべきであると考えます。

もちろん、これまでも研究者によって基礎研究の成果を社会に活かすための活動が行なわれてきた。しかし、そのプロセスはノウハウとして個々の研究者の中に残るだけで、系統立てて記録して論じられることがなかった。そのために、このような活動は社会における知として蓄積されずにきた。これまでの学術雑誌は、科学的発見といった基礎研究(すなわち第1種基礎研究^(注3))の成果としての事実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/research/honkaku/about.html
- 注3 第1種基礎研究： 未知現象を観察、実験、理論計算により分析して、普遍的な法則や定理を構築するための研究をいう。
- 注4 第2種基礎研究： 複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究をいう。また、その一般性のある方法論を導き出す研究も含む。
- 注5 製品化研究： 第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。

Synthesiology 第3巻第4号(2010.11) 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
SiC半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略 — 新規半導体デバイス開発における産総研の役割 — ・・・荒井 和雄	259–271
単結晶ダイヤモンド・ウェハの開発 — マイクロ波プラズマ CVD 法による大型化とウェハ化技術 — ・・・茶谷原 昭義、李野 由明、坪内 信輝、山田 英明	272–280
日本全土の元素分布の調査とその活用 — 陸と海を統合した地球化学図の作成 — ・・・今井 登	281–291
いかにしてカーナビゲーションシステムは実用化されたか — 開発マネージメントと事業化について — ・・・池田 博榮、小林 祥延、平野 和夫	292–300
鑄造技術と粉末冶金技術の融合による新材料開発 — 金属間化合物を活用した高機能硬質材料 — ・・・小林 慶三、尾崎 公洋、松本 章宏、中山 博行	301–308
対談	
臨床医学研究とシンセシオロジー ・・・樋口 輝彦、小野 晃	309–314
編集委員会より	
編集方針	315–316
投稿規定	317–318
3巻総目次(2010)	325–326
編集後記	327
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
R&D of SiC semiconductor power devices and strategy towards their practical utilization — The role of AIST in developing new semiconductor devices — --- K. Arai	259
Development of single-crystalline diamond wafers — Enlargement of crystal size by microwave plasma CVD and wafer fabrication technology — --- A. Chayahara, Y. Mokuno, N. Tsubouchi and H. Yamada	272
Investigation of the distribution of elements of the whole of Japan and their applications — Geochemical map of land and sea of Japan — --- N. Imai	281
How car navigation systems have been put into practical use — Development management and commercialization process — --- H. Ikeda, Y. Kobayashi and K. Hirano	292
New material development by the integration of cast technology and powder metallurgy technology — A high-performance hard material which used intermetallic compound for binder phase — --- K. Kobayashi, K. Ozaki, A. Matsumoto and H. Nakayama	301
Messages from the editorial board	319–320
Editorial policy	321–322
Instructions for authors	323–324

SiC 半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略

— 新規半導体デバイス開発における産総研の役割 —

荒井 和雄

SiC半導体のパワーデバイスの実現は、その省エネルギー効果により大きな期待が持たれている。SiCのような新規半導体のデバイスとしての実用化には、乗り越えなくてはならないいくつかの技術上の壁がある。産総研が関与した国家プロジェクトを中心として、15年を越える実用化に向けての研究開発活動を、産総研内の組織の変遷に対応させて、1) 研究目標、2) 個別課題の設定と解決のための戦略およびその成果、3) 戦略の妥当性の評価に分けて記述し、最後に今後の課題について述べる。

キーワード: シリコンカーバイド、ワイドギャップ半導体、ウェハ技術、パワー半導体デバイス、パワーエレクトロニクス

R&D of SiC semiconductor power devices and strategy towards their practical utilization

– The role of AIST in developing new semiconductor devices –

Kazuo Arai

The realization of SiC semiconductor power devices has been highly expected to contribute to energy saving, however, it requires overcoming various technological barriers. AIST has been contributing to this objective for more than 15 years mainly through participation in national projects. Corresponding to the changes of organization of the institute, in this paper, R&D activities for the past years are described in three parts, i.e., 1) the R&D targets, 2) the major issues and strategies for overcoming them and the main results, 3) the evaluation of the validity of the strategies, and lastly, future issues are suggested.

Keywords: Silicon carbide, wide-gap semiconductor, wafer technology, power semiconductor device, power electronics

1 はじめに

1990年代産総研の前身である旧工業技術院傘下の15研究所では、材料研究者は全体の半数を越していたと思う。息の長い材料研究において、どのような形でその存在意義を社会に示して行くかは周期的な議論的であった。1980年代後半米国は不況下で、基礎研究者が自分の研究のセールスに日本に来る状況にあったが、当時の日本の国立研究所は、より先鋭的な基礎研究に注力すべきであるとの流れ、いわゆる「基礎シフト」にあった。材料研究では、往々にして自分の専門を武器に流行りものの材料を渡り歩く研究スタイルが見られたが、電子技術総合研究所（以降、電総研という）では「使われてこそ材料」を標榜して、意識改革を進めていた。シリコンLSIの最先端技術開発から取り残されつつあった電総研にあって、材料分野としてはパイオニア的研究開発が始まっており、低損失・高周波動作と高温・高放射線耐性が期待できる炭化珪素（SiC）をはじめとするワイドギャップ半導体（窒化ガリウム（GaN）、ダイヤモンド）を将来のデバイス産業化の夢を持

てる材料群として取り組むべきと結論した（図1）。

本稿では、SiC半導体のパワーデバイス開発とその実用化に向けてのこれまでの活動を、産総研内の組織の変遷に対応させて、1) 研究目標、2) 個別課題の設定と解決のための戦略およびその成果、3) 戦略の妥当性の評価に分けて記述し、最後に今後の課題について述べたい^{註1}（表1）。

2 各時期における研究開発の目標

2.1 研究開発の全体としての位置づけ

最近我が国で、資源と環境の制約のもとでの2100年のエネルギーのあり方が議論され、それに向かつての技術開発の方向付けがされた¹⁾。そこでは再生可能エネルギーの大量導入と原子力エネルギーを基軸とし、効率・利便性・経済性にすぐれた電気エネルギーの利用による省エネルギーの徹底により、持続的発展が初めて可能となると推測されている。パワーエレクトロニクスが、電気エネルギー有効利用のキーとなる共通基盤技術として重要であることは言うまでもない。パワーエレクトロニクスのキー技術は

産業技術総合研究所 イノベーション推進本部イノベーション推進企画部 〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2
Planning Division, Research and Innovation Promotion Headquarters, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan
E-mail: arai-kazuo@aist.go.jp

Original manuscript received March 6, 2009, Revisions received March 15, 2010, Accepted March 29, 2010

表1 活動の流れ

組織	電総研 材料科学部 (1993~2001.3)	産総研パワーエレクトロニクス研究センター (2001.4~2008.3)	産総研エネルギーエレクトロニクス 半導体ラボ (2008.4~)
主たる活動	・調査研究(1994~1995年度)及び 先導研究 (ハードエレクトロニクス) (1996~1997年度)	・「超低損失電力素子基盤技術開発」 (1998~2002年度) ・省エネルギー提案公募2課題 (2003~2005年度) ・産総研委託3課題 (モジュール、電源、システム) (各2002、2004、2003~2006年度) ・「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」 (2006~2008年度)	・産業変革研究イニシアティブ (SiC素子試作ライン)(2008~2011) ・次世代パワーエレクトロニクス 基盤技術開発(2009~2012年度)
目標	・目標の明確化 →パワーデバイス	・トータルソリューション戦略 (ウエハーデバイス-機器並行開発)	・実証・基盤・先行研究 並行展開
主たる成果	・NEDOプロジェクト 立ち上げ	・国内におけるSiC基盤技術の構築 ・SiCパワーデバイス・機器の可能性の明確化 (ウエハ品質、デバイス低損失&信頼性、機器高パワー密度) ・ウエハベンチャー(LLP)の設立	・機器応用実証への展開(産業界との共研)
特記事項		・GaNデバイスの並行開発 ・産業界からのシニア人材の参画 ・デバイス作製ラインの構築	・国際交流・連携

パワーデバイスであり、現在のシリコン半導体のパワーデバイスでは、デバイス構造の工夫により性能の向上が図られてはいるものの、シリコンの物性値から予測される理論限界に近付いている。パワーデバイスの重要な性能指標は低損失であることで、そのためには低オン抵抗(通電時の抵抗が低いこと)と高スイッチング速度が求められている。シリコンに比べバンドギャップが約3倍大きなSiCワイドギャップ半導体では絶縁破壊電界がシリコンに比べ約1桁大きいために、オン抵抗の理論限界値は2桁以上小さい。シリコンでは、スイッチング速度が遅いもののオン抵抗を下げられるパワーデバイス(IGBT)が開発されているが、その適用範囲は限られる。広い使用耐電圧域で低オン抵抗と高速スイッチングの実現が可能なSiCパワーデバイス(MOS-FETや接合FET)は、シリコンパワーデバイスのこの制約を軽減する。低オン抵抗と高速スイッチングによりデバイス動作時の電力損失が抑えられ、放熱機構(放熱フィンやファン)の小型化や簡略化とともに、高周波化

による受動部品の小型化によりインバータ等のパワーエレクトロニクス機器の大幅なコスト削減が期待でき、省エネに寄与する。電力変換器(以降、変換器という)の高パワー密度化(すなわち小型化)は変換器を社会に導入するに当たっての重要な指標であり、ロードマップの示すところである(図2)。加えるに、SiCパワーデバイスの持つ高耐電圧性、高温動作や高破壊耐性は、パワーエレクトロニクス機器の新しい応用分野を開くものと期待できる。徹底した省エネルギーを支える「ユビキタスパワーエレクトロニクスの実現」のためには、SiC素子の実用化が極めて重要な役割を果たすものと考えられる。

2.2 電総研時代(1993年~2000年)の目標

材料研究は物質科学としての探究に止まらず、広義のデバイス化によって原理的優位性を明確にし、実用化を目指すべきである。SiC、GaNおよびダイヤモンドの電子デバイスとしての可能性を精査し、研究対象と目標の絞り込みを図った。そして「ワイドバンドギャップ半導体の中で、

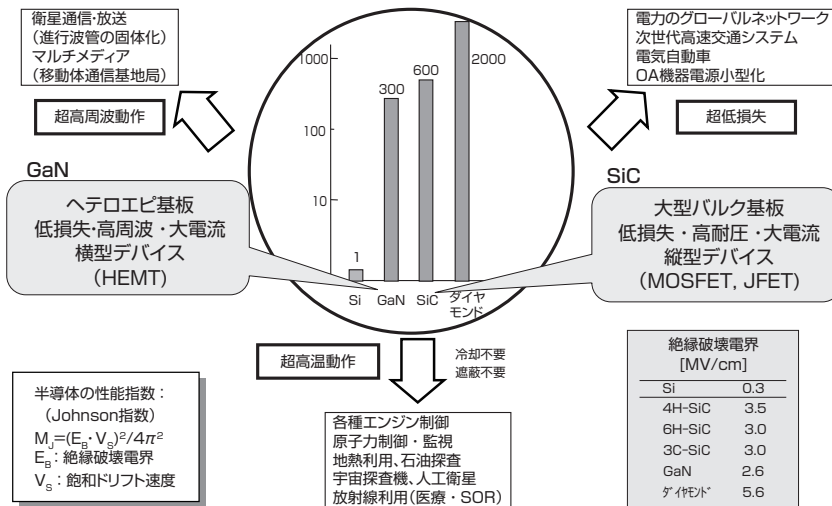


図1 ハードエレクトロニクス(ワイドギャップ半導体の世界)
ワイドバンドギャップ半導体では、絶縁破壊電界が大きく飽和移動速度も大きい。そのため半導体の性能指数がシリコン半導体デバイスに比べ、桁で大きくなる。SiCパワーデバイスの通電損失はSiの1/200になると推測される。

SiC が現行のシリコンに対してパワーデバイス応用において原理的優位性を持つとともに、その実用化においてほかのワイドバンドギャップ半導体に比べ先駆性を持つことを示す」ことが目標であった。

2.3 産総研時代 (2001年～2007年) の目標

(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究プロジェクト「超低損失電力素子技術開発」(1998年度～2002年度) において集中研究方式の役割を果たしている途中で、電総研から産総研への組織再編が行われた。プロジェクトのもとで進められていた「次世代パワー半導体実用化調査委員会」におけるパワーエレクトロニクス応用サイドの研究開発者との議論を通じて、「パワーデバイスがパワーエレクトロニクスのキーであるとしても、その実用化の実現のためには、変換器、システム応用開発との連携開発が不可欠である」との認識を得た。それに基づいて産総研内に、材料からデバイス開発、そして変換器、システム応用を含む一貫した研究開発を行う「パワーエレクトロニクス研究センター」(PERC) を設立することを提案し、採択された。そしてこの研究センターの目標として、「SiC パワーデバイスの高性能化を図るとともに、そのシステム応用への見通しを立てることによって、ユビキタスパワーエレクトロニクス (パワーエレクトロニクスにおける言うならば革新) への貢献を明確にすること」を掲げた。

2.4 産総研時代 (2008年～) の目標

パワーエレクトロニクス研究センターの活動実績が認められ、「研究開発集団として一体で活動し、次の展開を図るべきである」との評価が産総研内で下され、2008年に後継の研究組織として「エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ」(ESERL) が設立された。次なる目標を「ウェ

ハ・材料技術、デバイス技術、システム化技術の一貫した総合的取り組みを継承し、SiC パワーデバイスの実用・普及化を加速することによってパワーエレクトロニクスの革新を目指す」とした。

3 各時期における課題設定と解決のための戦略およびその成果

3.1 電総研時代の戦略と成果

–国内のSiCパワーデバイス開発基盤の構築–

電総研では、SiC 結晶の低温多形である 3C-SiC (立方晶) をシリコンウェハ上にヘテロエピタキシャル成長させて、ダイオードやトランジスタを試作し、デバイス特性を実証する先駆的研究開発があった^[2]。1980年代の国支援のSiC デバイス研究開発のプロジェクトは、「次世代産業基盤技術研究開発制度」のもとに、「超格子素子」プロジェクトや「3次元回路素子」プロジェクトと一緒にスタートしたが、耐環境 (耐熱・放射線) 強化素子 (GaAs デバイスが中心) を主たる目標としたのでは産業としての魅力が乏しく、細々とプロジェクト研究を続けている状態にあった。1990年代初頭は、30 mm 径の SiC 単結晶 (六方晶) が米国から市販され、SiC のパワーデバイスへの期待が起りつつあった時期である。

3.1.1 SiCのパワーデバイス化への絞り込みとプロジェクトの集中研究方式

米国では、SiC やダイヤモンドは米国防総省高等研究計画局 (DARPA) の支援のもとに軍事応用の電子デバイスとしての研究開発が活発化していた。これに対し、日本では産業応用への展開を目的としたワイドギャップ半導体研究開発の位置づけを明確にする必要があった。1994年(社) 日本電子工業振興協会のもとでニーズ分野とシーズ技術の調査を開始し、SiC、GaN、ダイヤモンドの一連のワイドギャップ半導体は、高パワー・高周波・耐過酷環境という極めて厳しい (ハード) スペックに耐えるデバイスを可能とする半導体材料である「ハードエレクトロニクス」という新しいエレクトロニクス分野を拓くものであるとの主張を行った^[3]

(図1)。その後、1996年より2年間のNEDOの先導研究 (NEDO 先導研究「ハードエレクトロニクス」(1996～1997年度)) を経て、2インチのウェハの市販が始まっていたSiCを中心に、最も産業的インパクトの大きな低損失のパワーデバイスの基盤技術を開発することに目的を絞り込むことによって、1998年から5年間のNEDOプロジェクト「超低損失電力素子技術開発」を立ち上げることができた(NEDOプロジェクト「超低損失電力素子技術開発」(1998～2002年度) (財) 新機能素子研究開発協会、「NEDOプロジェクト超低損失電力素子技術開発」)。「現在は米国

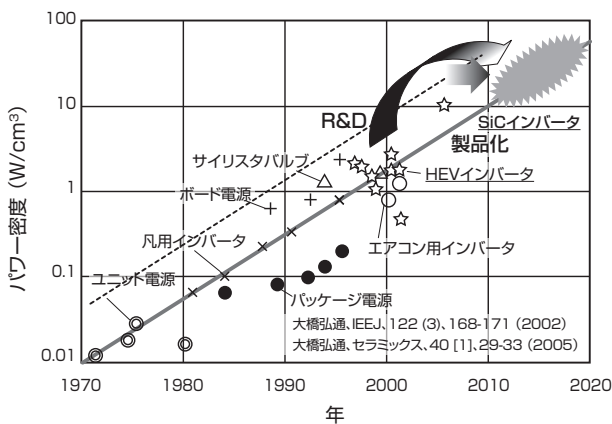


図2 パワー密度からみた電力変換器のロードマップ
この30年で2桁向上していることがわかる。変換器の効率の向上は飽和の傾向にあるが、パワー密度の向上は変換器の低コスト化につながり、普及の重要なポイントとなる。製品化の10年前倒しで実用化の実証が必要 (R&D ライン)。

では軍事目的の研究開発でも、将来、産業として花開く可能性のある基盤研究は通産省（現経済産業省）が支援すべきである」との主張だけでなく、SiC 半導体を用いた新デバイス産業が興り、SiC パワーデバイスの導入によって大きな省エネ効果が期待できることを提示したことがプロジェクト化の力になった（図3）。

「超低損失電力素子基盤技術開発」プロジェクトにおいては、基礎研究が中心であった国内で、パワーデバイス開発の基盤となるウェハ技術とデバイス・プロセス技術を早急に構築する必要があった。そこで、すでに実用レベルの素子開発が行われていたショットキーダイオードは主要な対象

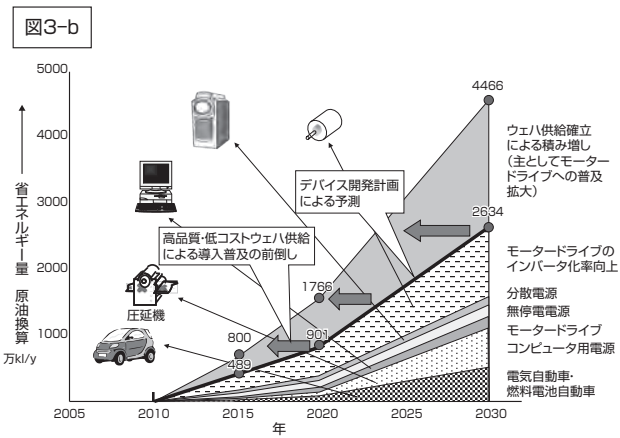
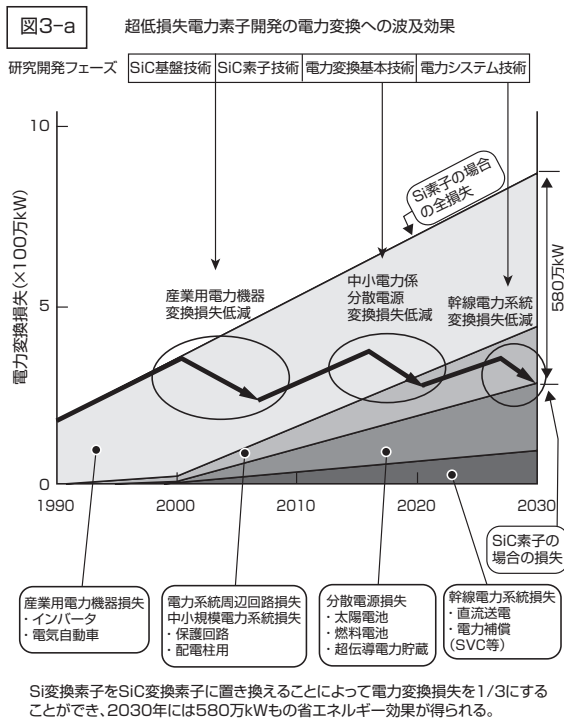


図3 SiCデバイスが導入された時の日本における省エネルギー効果
オリジナルの図面は工業技術（1997.8 石井格）に掲載（図3-a）。幾度かの改定の後、「省エネルギー技術戦略」（図3-b）に採用されている。

とせず、パワーエレクトロニクスに革新をもたらすスイッチングデバイスの基盤技術の開発に的を絞った。FET デバイスを作製できるまでの力のあるデバイスメーカー3社（株）日立製作所、三菱電機（株）、新日本無線（株）が異なるタイプのFET（MOSFET、JFET、MESFET）の試作開発を目指すとともに、産総研に産官学が結集して材料・プロセス・デバイスの一貫した基盤研究開発を一体的に行うプロジェクト（参加研究者が一か所に集まる集中研究方式で、新機能素子研究開発協会との共同研究開発）として進めた（図4）。重要な要素技術ごとに産学官の混成グループを形成し、Si 半導体とは異なる要素技術を必要とするSiC 半導体の技術開発を進めた。このプロジェクトは、1994年より6年間の京都大学松波弘之教授（現プラザ京都館長）をリーダーとして関西で進められたNEDO重要地域技術開発（重要地域技術研究開発「エネルギー使用合理化燃焼等制御システム技術開発」（1994年度～1999年度）、NEDO）とともに、SiC パワーデバイス研究開発の国内における基盤を構築することに貢献することができた。2000年5月には国際ワークショップを開催し、日本における国家的SiC研究開発を国際的にもアナウンスした^{注2}。これは、研究者人口の少ないこの分野において国際協力を進める上で有効であった。次項でこのプロジェクトにおける特徴ある開発アプローチと成果を示す。

3.1.2 「超低損失電力素子技術開発」プロジェクトの成果

当時 SiC ウェハの供給は、米国クリー社の独占状態にあった。デバイス製造企業がデバイスの製品化に安心して投資するには、安定してウェハ供給ができるセカンドソースを必要とする。独占状態では、ウェハ供給の安全性に懸念があるだけでなく、ウェハ価格と品質の向上が一社に握られてしまい、デバイスのコスト低減や性能向上に直結するウェハへのデバイスからの要求が通りにくいからである。

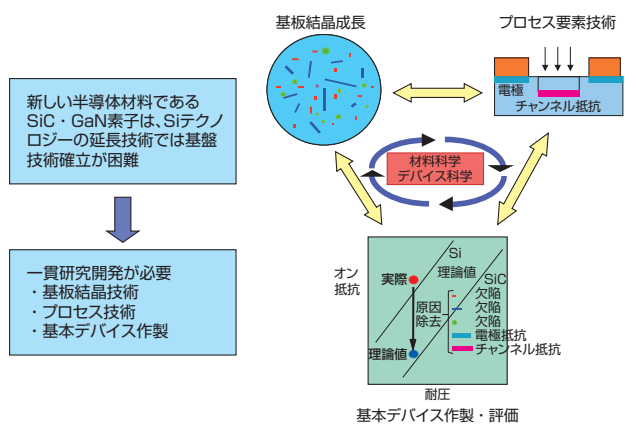


図4 NEDOプロジェクト「超低損失電力素子基盤技術開発」の開発コンセプト

プロジェクトでは、SiC 単結晶成長を開始していた電総研と2企業（昭和電気（株）、（株）デンソー、後期においては新日本製鉄（株）の参加）が集中研究方式でグループを結成し、研究開発を開始した。研究開発のアプローチとしては、結晶成長プロセスのエクス線トポグラフィその場観察手法とシミュレーションによる炉内可視化を主として採用した（図5）^{註3}。デバイス作製ではウェハにマイクロオーダーの貫通した螺旋状欠陥（マイクロパイプ）があると致命的になるので、プロジェクトの目標としては、マイクロパイプがない2インチの基板の作製と、外径4インチの結晶成長とを掲げた。重要な技術的貢献は、それまでノウハウとして公表されてこなかった結晶成長技術を学会等において科学的に提示したことである。開発された技術はプロジェクト終了後、結晶作製を希望する国内の企業数社に技術移転した。

高耐圧・高パワー縦型パワーデバイスでは、基板結晶としてはできるだけ高濃度に不純物（通常窒素ドーパでN型化）を入れて低抵抗化している。したがって、所望のデバイス特性を実現するためには、膜厚と不純物濃度を精密に制御してそのSiCの単結晶上に薄膜を形成するホモエピタキシャル単結晶薄膜成長技術は非常に重要である。京都大学の松波弘之教授のグループによりオフ角を導入することによって比較的低温（～1600℃）で良質な成長ができるステップ制御エピタキシーが開発されていた。プロジェクトでは、定評のある海外のエピ装置を導入し、成長条件のチューニングによりデバイス作製グループに必要なエピ膜を供給した。一方においては、新規高速エピ装置の開発を行った。（これは後年、3インチ基板で約100μm/h以上の成長速度を実証した）。プロジェクト終了間際であったが、これまでのデバイス作製結晶面であるシリコン面に加えて、その反対側の面であるカーボン面で不純物を制御できるエピ薄膜成長技術を見だし、MOSFETのチャネル移動度が

シリコン面に比べて桁が違うほど大きいことを示し、カーボン面デバイスの基本的なデバイス特許を取得した（図6）。現在、まだカーボン面デバイスプロセスには解決すべき問題が残されているが、実用化にとって重要な技術に育ってきている。

SiCは熱酸化によってSiO₂絶縁膜が形成できることが利点であるが、酸化によって得られるMOSFETのチャネル移動度がバルクに比べ極めて低い（通常の熱酸化ではバルクの移動度より2桁小さい）。シリコンプロセスで威力を発揮している不純物の熱拡散はSiCプロセスでは利用できず、高温イオン注入とその後の高温活性化プロセスが必要となる。デバイスに必要な低抵抗のコンタクト形成技術の開発も急がれた。またデバイス設計に必要なデバイスパラメーターが不確かだったり、揃っていない。集中研究方式では、これらの問題について系統的に取り組みデバイス・プロセスの基盤技術の構築に貢献した。必要な物性・プロセス評価については、大学や外部機関の協力を仰いだ。これらの結果は、分散研究方式におけるシリコンを上回る試作SiCパワーデバイスの性能実証とともに、デバイス技術開発という点で遅れていた我が国のこの分野における基盤構築に貢献した。

このプロジェクトのもう一つの重要な特長は、実用化調査研究をシステム応用の研究開発に重心を置く別の協会（（財）エンジニアリング振興協会）のもとに行ったことであった（「NEDOプロジェクト超低損失電力素子技術開発：次世代パワー半導体デバイス実用化調査」（1998～2002年度）（財）エンジニアリング振興協会）。この活動により基盤研究分野と応用分野との交流が進み、パワーデバイスを産業応用に展開する上でSiCがシリコンに対して原理的に優位であることを見通すことができた。

これらのすべての成果を広く一般に普及させるために単行本としてまとめた^[4]。

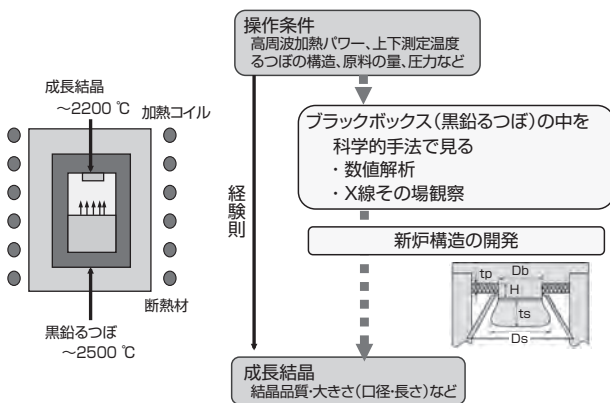


図5 SiC 単結晶成長技術開発のアプローチ
炉内構造等は学会でも発表されることがほとんどなかった。

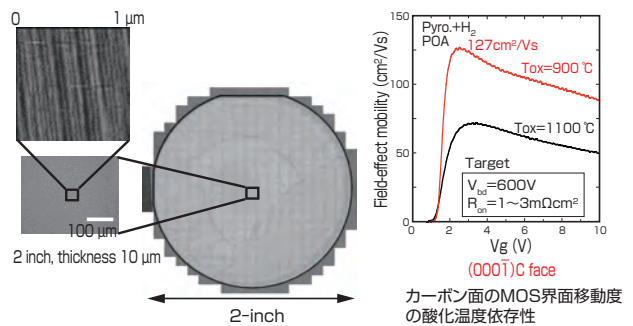


図6 カーボン面デバイス技術の開発
カーボン面（C面）へのエピ成長技術の開発とその面上で作製されたMOSのチャネル移動度（エピ表面のモルフォロジー。水跡様のシミは画像のアーティファクト）。

3.2 産総研時代（2001年～2007年）の戦略と成果 — ウェハからシステムまでトータルソリューションの提案 —

NEDO プロジェクトを2年残す段階で、2001年工業技術院研究所から産総研への組織再編が行われた。ここでは、特定のミッションを持つユニットとしての研究センターが設計された。研究開発フェーズとしてはSiC パワーデバイスの展開が見え始めた時であった。新規デバイスがパワーエレクトロニクスとして実用化するかどうかはデバイスの性能だけでなく、往々にしてトレードオフ関係にある各種要素技術をいかに最適に統合していくかが重要であると明確に認識していた（図7）。またこの時期、国内産業界におけるパワーエレクトロニクス研究開発は、システム側のインフラへの投資抑制にともない困難な状況にあった。新規パワー半導体デバイスの実用化をめざした研究開発には、長期的研究開発を担う公的機関の役割が重要であると考えた。そうした考えのもとに、一研究ユニットの中で材料からデバイス・プロセス開発、そして変換器、システム応用への展開をすべて含んだ一貫した基盤研究開発（トータルソリューション）を行い、「革新的パワーデバイスによるパワエレの革新」を実現することを掲げ、5グループからなる「パワーエレクトロニクス研究センター」（PERC）が設立された。

研究センターの前半期は「超低損失電力素子」プロジェクトの目標達成に注力したが、それも含めて「革新的パワーデバイスによるパワエレの革新」という目標に向けて本格的に活動を開始した。常勤専従職員14人で、回路・実装チームは常勤職員ゼロ、実装チーム、システム応用チームは産総研内の他研究ユニットからの併任研究者でのスタートであった。発足時には選択と集中の観点から、この統合的

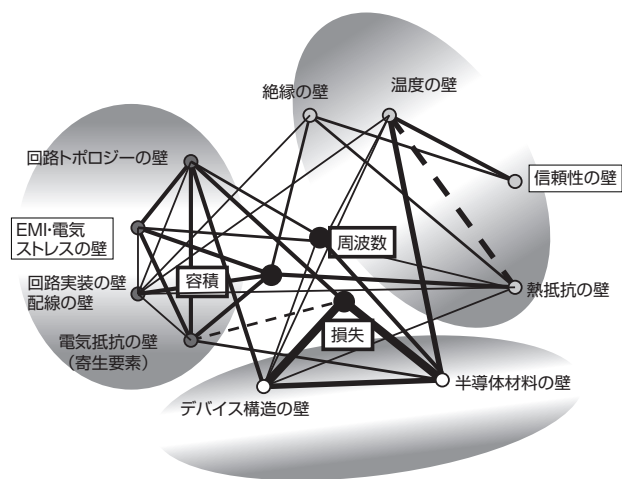


図7 パワーモジュール技術の諸問題
いろいろな要素課題は複雑に関係しており、統合的に解決していかなければならない（次世代パワー半導体デバイス調査委員会 大村一郎氏（株）東芝）作成。

アプローチへの批判もあったが、産総研の「第2種基礎研究を軸にした本格研究」推進と軌を一にしていることで次第に認知され、職員数も2007年には18人に増員し、併任研究者5人と常駐メンバーを合わせると陣容は80人を超すまでになった。

「超低損失電力素子」プロジェクトが終了した後、その成果をもとに、より実用化への貢献を意図したNEDO提案公募型省エネルギー先導研究開発の2課題（2003年度～2005年度）（「超低損失デバイスとMOS信頼性と変換器の高パワー密度化の基盤研究」と「先進的ダイオード開発」）（企業との共同提案）を中心に研究開発を進めた。それらの成果により、三菱電機（株）の変換器実証を柱とするNEDOプロジェクト「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術」（略称「インバータ」プロジェクト）（2005年度～2007年度）へと展開することができた。ここではパワーデバイスの実用化を保证する大容量化、高信頼化（MOS酸化膜）、変換器の高パワー密度化の可能性を明確化する研究開発を企業との集中研究方式で進めた。

3.2.1 ウェハ課題への貢献

プロジェクトで開発した技術は学会等で公表するとともに、積極的に産業界に移転した。日本で開発された結晶欠陥低減成長法（RAF法）をも踏まえて、欠陥の低減と大口径化の開発を進めるとともに、ウェハの実用化に不可欠な切断・研磨技術の開発とその技術移転も行った（図8）。エピについては、C面ではオフなし面でも成長が可能であり、かつC面上に形成したMOS界面の移動度が高いという発見を基に、エピ技術の実用化を促進するために、（財）電力中央研究所／昭和電工（株）／産総研が共同研究体

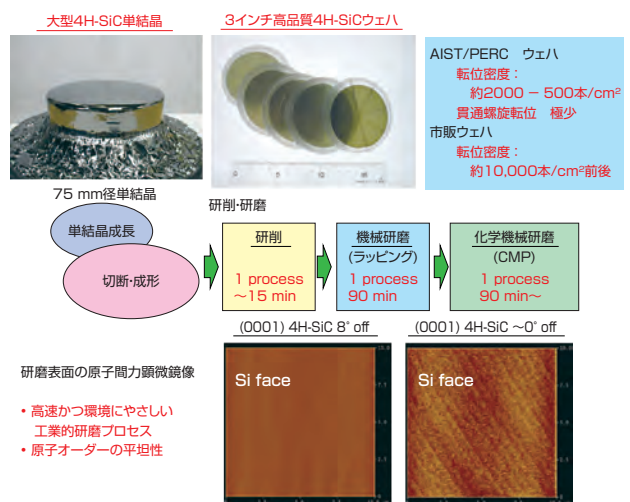


図8 SiC 単結晶ウェハ作製技術
ウェハの高品質化、低コスト化はSiC パワーデバイス実用化の最重要課題である。低コスト化には、単結晶切断・研磨等の周辺技術の開発も重要である。

制を構築した。その研究サポートのもとに共同でエシキャットジャパンというベンチャー（有限責任事業組合「LLP」）をつくり、研究開発の律速になっているエピウェハ供給体制を構築し、「インバータ」プロジェクトでの活用と育成を図った。この活動は2007年には昭和電工(株)に引き継いだ。

3.2.2 パワーデバイスの原理的実証から変換器への展開

スイッチング素子については接合FET (JFET) の開発が先行して進められ、数アンペアクラスのデバイスが市販されたが、ノーマリーオンデバイス（ゲート電圧ゼロでは通電状態にあるデバイス）であることもあって普及には至っていない。MOSFETはMOSチャネル移動度が上がらないことと、酸化膜の信頼性が不透明であるため市販には至っていない。産総研では、カーボン面の高チャネル移動度を活用

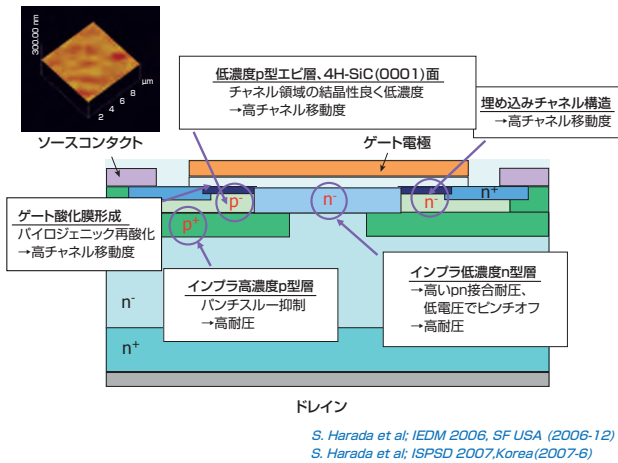


図9 カーボン面上に作製されたIEMOSFET (Implantation and Epitaxial MOSFET) のデバイス構造とその効用エピ成長技術とイオン注入技術を駆使してチャネル形成面を平坦化し (AFM像表示)、MOSチャネル移動度の向上をはかった。

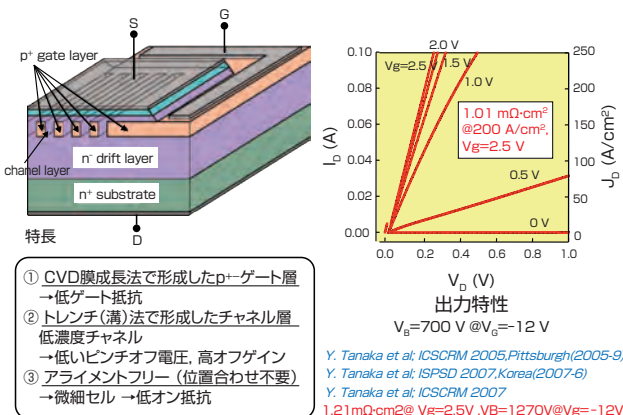


図10 埋め込みゲート型のSITの構造と静特性ノーマリーオン（ゲート電圧をかけないとオフにならないこと）であるが、極めて通電損失が小さい。このデバイスもエピ成長技術が重要な役割を果たしている。

してMOSFETのエピプロセスの活用とデバイス構造を工夫したIEMOSを開発し、世界最高レベルの低損失デバイスの原理的実証に成功した。また、JFETではエピ技術を活用した埋め込みゲート構造(SIT)により、さらなる性能の向上には基板抵抗の低減が課題になるほどの低オン抵抗の原理的実証に成功した(図9、図10、図11)。デバイス・プロセス技術は知的財産化するとともに、適宜、産業界へ技術移転を行った。

IEMOSについては、「インバータ」プロジェクトにおいてアンペア級の超低損失デバイスを試作・提供し、プロジェクト終了時に50 W/cm³の高パワー密度の変換器を実現する条件を明確化することができた。また、研究センターの技術開発成果のマイルストーンを示すために、産総研内にもつくり技術を促進するために設けられた「ハイテクものづくり」研究制度を2006年に活用した。そこでは結晶基板、エピ膜、IEMOSとショットキーバリアダイオードデバイス、チョッパー回路を、研究センター内の三つの研究チームの共同で作製し、発電モーターの制御を実現してトータルソリューションの実証を行った(図12)。JFET(SIT)およびPINダイオードについては、酸化膜の信頼性への懸念がなく、変換器への応用に必要なデバイスの供給が可能な歩留まりまで作製技術が進んだため、2007年頃から企業とのシステム応用の共同研究が開始され、2008年から成果が出始めている。

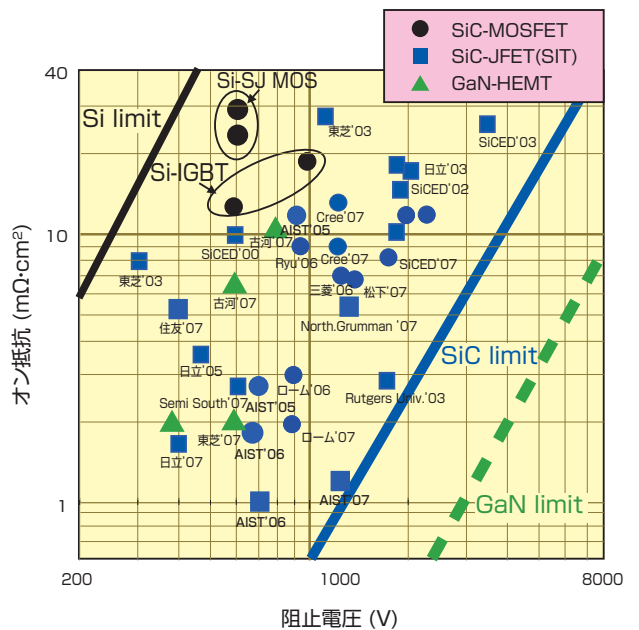


図11 アンペア級スイッチのオン抵抗と阻止電圧のトレンド産総研は世界のトップクラスの成果を出している。最近のIGBTやSJ-MOSのSiデバイスの動向や世界のSiCパワーデバイスの動向については、オーム2009.11号「次のステップに進むパワーエレクトロニクスの技術革新・応用」(荒井和雄)参照。

3.2.3 素子の大容量化・高信頼化とウェハ品質

実用化を目指したパワーデバイスの実証には、数十 A から 100 A クラスのチップを必要とする。2005 年の段階で、ショットキーバリアダイオードにおいては大容量化の報告が始まっていたが、スイッチング素子では開発が遅れていた。この事実は、ウェハ品質（結晶欠陥等）が重要な要因と考えられた。省エネルギー先導研究の成果を踏まえ、「インバータ」プロジェクトでは、100 A 級の大容量チップを実現するウェハ品質を明らかにすることを目標とした。現状では単結晶基板は約 1 万 /cm² の結晶欠陥（転位）を持っていたため、素子の大容量化と MOS の信頼性について、これまで真向から取り組まれていなかった結晶欠陥との相関を明確にする課題に取り組んだ。産総研において高いポテンシャルを持つ放射光を用いた結晶欠陥評価手法を軸として活用した。結論から言えば、ある種の結晶欠陥の低減は望ましいが、デバイスを作製する結晶基板上に形成されるエピタキシャル薄膜の成長技術（エピ成長時に発生する表面欠陥の極小化、結晶欠陥種の変換法等）の高度化と、デバイスプロセス（チャンネル移動度と信頼性の両立するゲート酸化膜形成法、高温イオン注入と活性化プロセス等）の工夫により、現状の結晶品質でもデバイス応用展開へのステップを切れるとの結論を得た。

3.2.4 変換器設計手法の構築と高パワー密度化への適用

パワーエレクトロニクス機器は使われる動作条件、環境がさまざま、これまでの開発では試行錯誤的手法でその最適化が図られることが多い。求められるデバイスの性能も用途によって重点が異なる。特に SiC パワーデバイスでは、大容量・高耐圧の条件で高速スイッチングさせるため、デバイスの性能を最大限に活用するためのデバイス・回路 - 受動部品 - 変換器構成の統合的設計手法が重要になる

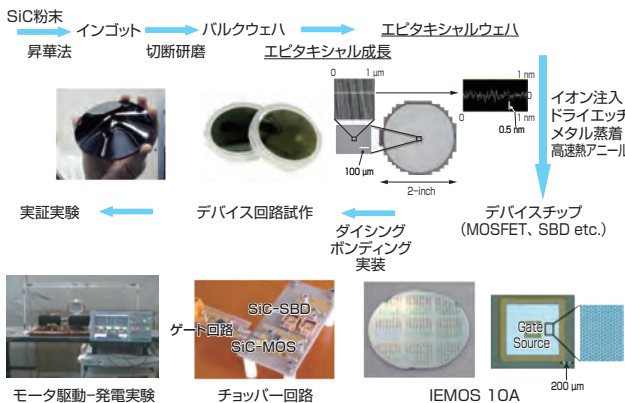


図 12 「ハイテクものづくり」プロジェクト（本文参照）における全 PERC 技術（ウェハ - デバイス - 変換器）によるトータルソリューションのデモンストレーション

（図 13）。例えば高周波化が進むとそれまで考慮しなくてもよかった浮遊容量や浮遊リアクタンスの影響が顕在化するるので、その評価と低減が必要である。産総研では先行的にデバイスシミュレーション、フィルター性能、制御手法等からなる回路統合設計方法を開発し、「インバータ」プロジェクトにおいて「変換器損失統合設計シミュレータ」として展開した。開発した低損失 SiC-MOSFET の試作評価と合わせて、50 W/cm³ の高パワー密度を実現する条件を明らかにした。

3.3 産総研時代（2008年～）の戦略と成果

-実用化のボトルネック解消へ向けて-

2008 年以降産総研では、ウェハ、デバイス、変換器において原理実証を終えたものはそれぞれ下流での実証研究へと進めているが、この流れは SiC 実用化にとって重要なアプローチである。この時期産総研は、さらに研究開発の螺旋を一段上がったところで必要な、より高度な目標を持つ基盤研究、さらにこの分野の発展に貢献する先行研究を合わせて進めることを目標に掲げた。

「インバータ」プロジェクトにおける企業による 14 kVA インバータの損失の 70 % 低減の実証と、集中研究方式による現状の結晶品質でのデバイス応用への展開可能性を踏まえて、2008 年度からは、グリーン IT プロジェクトの枠組みのなかで「次世代パワーエレクトロニクス基盤研究開発」（2008 ~ 2011 年度）がスタートした。そこでは、（株）日立製作所および三菱電機（株）による応用を明確に定めたパワーエレクトロニクス機器の実証開発と、産総研が三度目の集中研究方式で高パワー密度を目標にした基盤技術開発（超低損失デバイス開発と高パワー密度変換器のプロトタイプ実証）を進めている。

ウェハ技術の開発では、2007 年末に国産の 4 インチウェ

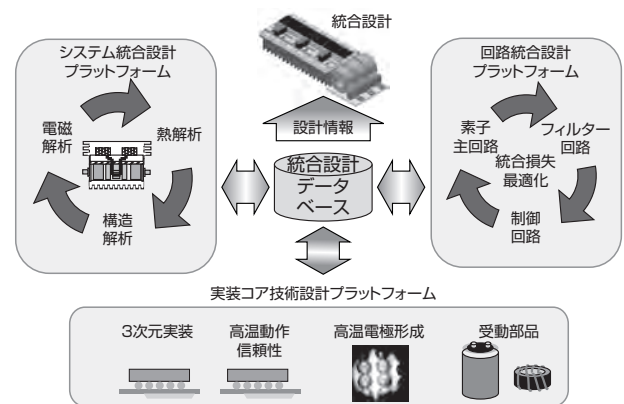


図 13 電力変換器の統合設計の概念図
素子 - フィルター（磁性体） - 制御の統合損失をシミュレーションして、回路設計において損失の最適化を図れる。受動部品のデータベースと構造要因を統合して、変換器統合損失設計シミュレーションが可能となる。

ハの開発がなされ、実用化への加速となった。昇華法結晶ではデバイスのコスト低減に向けての口径の拡大（6 インチ以上）や切断・研磨等の加工技術を含む生産性等コストにかかわる課題等が残っている。デバイス構造の形成にとってエピ技術が重要な役割をもっており、高品質エピ技術の汎用化も重要である。また、さらなる結晶品質の向上のための昇華法に代わる新成長技術の可能性の追求も必要であり、それらを視野に入れた活動を開始している。

SiC パワーエレクトロニクスはウェハ、デバイス開発において進捗がみられ、現在実用化への機運も高まってきていると言える。しかし、ウェハ業界にとっては需要予測が不透明で大規模な投資がしにくく、デバイス業界にとっては、ウェハの品質とコストを踏まえた市場予測の不透明性ゆえに、本格的な生産の決断がしにくい。また、デバイスのシステム応用をめざす企業にとっては、デバイスの入手が困難な状態にあり、いわば三^{すく}棘^{もみ}的な状態が続いてきた。この関係が相互に正のフィードバックになるような支援が重要である。高額なエピ成長装置が産業化のネックになっているウェハ業界に対する技術支援がエシキャットジャパン（LLP）の設立であった。

産総研においては、これまでイノベーションを生み出す産学官大型連携プロジェクト「産業変革研究イニシヤティブ」をいくつかの課題について行ってきた。2008 年度末より産業変革研究イニシヤティブ「SiC デバイス量産試作およびシステム応用実証」が 3 年間を目標に開始された。ここでは、デバイス企業（富士電機ホールディングス（株））等との連携により、デバイスチップの実用レベルでの生産技術を確立し、システムでの変換器応用を目指す企業や大学等に早期にデバイスチップを供給し、応用分野の可能性を明らかにしていくことを目指している。

4 戦略の評価

4.1 電総研時代

4.1.1 開発目標のSiCパワーデバイスへの絞り込み

調査研究や政策企画担当者との意見交換によって、「ハードエレクトロニクス」の目標をウェハ開発が先行する SiC 半導体に絞り込んでパワーデバイスを目的としたことにより、新産業創出と省エネルギーへの貢献というビジョンが明確になった。長期に亘る調査研究により、国家プロジェクトへの体制づくりができた。産業界の状況に柔軟に対応し、デバイス開発を目指す分散研究方式（3 社）と基盤技術の構築を目指す集中研究方式の体制は有効に機能し、その後のこの分野の発展において役立った。

4.1.2 研究開発立ち上げのためのスペースと人材の確保

電総研では、材料・物性研究者を中心に所内からの参

加者とポストクの集団としてスタートした。集中研究方式では、企業からの参加者の果たす役割は企業の施設の活用とともに大きかった。ポストクとして採用した材料・物性研究者がデバイスプロセスまで担当できるように成長を促し、簡単なデバイス試作を行うまでになった。ミーティングを密に行う等運営にも留意し、全体のポテンシャルをあげることに努めた。施設の導入に必要なスペースの確保も極めて厳しい状態にあった。より適切なスペースがあれば移動する等したが、移動にともなう現場の負担が大きく、デバイス開発におけるインフラの重要性をあらためて痛感した。プロジェクト当初、集中方式の研究開発は結晶成長やエピタキシャル成長で十分ではないかとの意見もあったが「デバイスまで仕上げてみて初めて材料の本質に迫れる」として、デバイス試作へ向けての努力をしたことは、長い目でみれば研究開発の継続にとってよい判断であったと考えている。

4.2 産総研時代（2001年～2007年）

4.2.1 研究センター化とトータルソリューションの提案

自由経済の波が日本社会を変える前までの電力や通信といった社会インフラ型研究開発は、電力会社や電電公社（現日本電信電話（株））等が主導し、その潤沢な研究資金によって民間企業が積極的に協力して進められてきた。そうした恵まれた技術開発のもとでは、過剰なスペックとも言える高い技術成果は国内での需要に応えることで十分であった。しかし、自由競争による経営環境の厳しさが増すなかで、限られた国内需要予測と研究開発費の削減により、企業サイドの開発意欲が急激に低下し、こうしたインフラ研究開発分野の縮小・企業間統合等が進められ、インフラ研究開発のみならずパワーエレクトロニクス全体として、研究開発環境が急激に弱体化していた。世界的にはシーメンス、ABB、GE 等世界的企業は、開発途上国を視野にこの分野の開発を強力に進めていた。こうした産業界の状況にあって、パワーエレクトロニクスにおいて中心的役割を果たす公的研究機関の存在意義は大きいと考えていた。

材料研究からスタートした産総研では、ウェハ開発やデバイスプロセスの開発は比較的順調に進められたが、変換器において使用できる実デバイスの開発や変換器の実装については経験を持つ人材がほとんどおらず、産業界からベテラン研究者を招聘することによって初めて可能となった。これら招聘研究員の存在は、産総研内のエネルギー技術研究部門、エレクトロニクス研究部門や計測標準研究部門からの協力とともにトータルソリューションの実行には極めて重要な役割を果たした。「ハイテクものづくり」研究制度による一貫した基盤研究開発の実証はトータルソリューションの象徴的な成果であった。経済産業省の産総研委

託費による産総研内のほかの研究ユニットとの先進的な共同研究は、施設の充実とさらなる展開に大きな役割を果たした（「超低損失電力モジュール技術開発」（2002～2006年度）、「オンCPU 高速・大容量電源技術開発」（2004～2006年度）、「電力平準化システム運用・制御技術開発」（2003～2006年度））。また、取得した特許を統合する「IP インテグレーション」研究制度によって先取り研究もできたことは、超高耐電圧デバイスの開発等、これからの研究開発を進める上で潜在的な力となった。

SiC のパワーデバイス開発を軸に、これからの省エネルギーの重要な共通基盤技術であるパワーエレクトロニクスの国内における中核的研究センターを産総研につくるべきだとの考えへの見通しは2008年までには得られなかった。その大きな理由は、構築した研究開発試作ラインでは想定される応用分野に対して実デバイスの供給が十分に行われる程度にデバイス試作のレベルが上がっていなかったためである。その実現のためにはデバイスファンドリーの構築と、デバイスの性能に対して要求仕様を明示できるシステム応用の研究開発者の参画・連携が不可欠と考えている。2008年以降になって、産業変革研究イニシアティブのように前者の可能性は見えている。後者の実現も期待したい。

4.2.2 省エネルギー提案公募課題でのデバイス技術の向上

最初の5年の基盤開発プロジェクトの後、経済産業省のプロジェクト担当部署は実用化を急ぎ、プロジェクトでの基盤研究の継続を認めなかった。その時期に「省エネルギー技術戦略」^{注4}において、将来技術として取り上げてもらうとともに、姿を見せ始めたSiCパワーデバイスに対し、官からは省エネへの期待を、ユーザー企業からは応用分野を語ってもらうシンポジウムを開きSiC実用化への気運を高めた^{注5}。そのかいもあり、3年間のNEDO省エネルギー提案公募型課題5件を産官連携で行うことができた。この3年間では、企業においては数Aクラスのデバイスを実証することができ、産総研においてはMOSFETが超低損失であることの原理的実証が行えた。また、企業と共同して、いち早く変換器での性能実証に結び付けられる高性能ショットキーバリアダイオードや、PINダイオードの開発ができた。これらの成果がNEDO「インバータ」プロジェクトへの展開に繋がった。

4.2.3 エシキャットジャパン (LLP) の設立

デバイス作製には、不純物濃度を制御した高品質のエピ膜を形成することが不可欠であるが、エピウェハの供給は米国クリー社の独占状態にあった。2005年度にエピ成長に経験と実力のある昭和電工(株)と(財)電力中央研究所、産総研の共同研究支援を前提に3者でLLP「エシキャッ

トジャパン」を立ち上げた。産総研が開発したカーボン面・微小オフ角面エピウェハの実用化を技術課題とした。前出「インバータ」プロジェクトは、直接的にはウェハ開発を含んでいないが、国内ウェハメーカーを中心にウェハ調達とデバイス性能とウェハ品質の相関についての情報交換による開発支援を行った。期待に応え、国内でも高品質の4インチ基板の供給が開始され、プロジェクトにおいては、最終局面でショットキーバリアダイオードの4インチ試作でエピウェハ品質が実用レベルにあることを実証した。こうした活動を通じて国内におけるエピウェハサプライチェーンの形成に貢献した。

4.2.4 GaNの研究開発との共存

2001年以降の活動において、SiCかGaNかの選択を迫られたことがよくあったが、両者の得失を常に比較しながら、パワーエレクトロニクスの革新を思い描くことは、意義のあることと主張してきた。これまでの2回のSiCのNEDOプロジェクトにおいても、SiCとの比較をするために小さな課題としてGaNデバイス課題を含めてきた。現時点では、SiCがkV級の大容量デバイスに適し、GaNは移動度の大きな利点から、横型パワー素子としてkV以下の比較的耐圧領域の高速スイッチング素子として有望と判断している。産総研におけるGaN研究は、携帯電話の基地局の低消費電力化を直近の応用とするGaN高周波デバイスの実用化のプロジェクトにおいて、共同研究の集中研究方式として材料研究の側面からプロジェクトを支えた「窒化物半導体低消費電力型高周波デバイス開発」（2002年度～2006年度）、NEDO）。また、GaNデバイスは産総研としてはやや遅れてデバイスフェーズに展開し、NEDOの省エネルギー提案公募の課題においてACアダプター用の低損失デバイスの開発で可能性を明らかにした。GaNは低コストウェハが期待できるSiウェハ上のGaNヘテロ基板の高品質化が実用化の大きなカギと思われる。2008年以降は、継続してGaNデバイスの先進的な応用開拓をめざした研究が進められている。

4.2.5 デバイスプロセスラインの構築

材料研究からスタートし、デバイス、変換器、システム化と戦線を拡大したために、人材、施設・設備とも常に不足で、その充実をはかることが必須であった。クリーンルーム施設(リソグラフィー等の重要機器を含む)については、初期においては産総研内のエレクトロニクス研究部門に全面的に依存した。変換器での実証を狙った実デバイス・回路・モジュール開発を進めるための研究開発資金の確保は、産総研の1研究ユニットとしては限界に近いものがあった。2回に亘るNEDOプロジェクトにおける集中研究の役割とNEDOの提案公募課題への積極的な応募採択、

経済産業省からのより基盤的研究開発を促進する産総研委託費、研究所の大型設備導入補助、ナノテクノロジー研究棟の新規建設等、タイミングのよい研究所の理解と支援により、2 インチデバイス試作ラインを構築することができた。それによって産業界との研究開発の場としての2 インチラインの充実が図られ、ノウハウの共有、知的財産の移転により企業との連携が図られた。加えるに、このラインにより先に述べた超低損失 SIT、PIN ダイオードが歩留まりよく作製できるようになり、企業との共同研究により、それぞれ直流配電系の遮断機（NTT ファシリテーズ等）や大容量変換器の開発（東芝三菱電機産業システム（株）：TMEIC 等）が進められている。

4.2.6 人材の育成、国際交流・連携

人材の育成という点では、産総研の研究センターの7年におよぶ経験により、確実にそれぞれ技術の下流を意識したり、踏み込んだりできる研究者が育ってきた。産業界への人材の供給も行ってきた。学会への貢献としては、（社）応用物理学会の研究会の活動、2 回の SiC 主要国際会議（ICSCRM）への貢献が上げられる^{注6}。国際的連携としては、パワーエレクトロニクスニューウエーブワークショップ（PENW）^{注7}の活動がある。国際学会等での交流において、パワーエレクトロニクスは重要ではあるが、社会の下支え的存在で社会的認知度が低いとの共通認識が議論された。同じ思いを有する米国（CPES）、EU のパワーエレクトロニクスセンター（ECPE）と産総研の3 者で情報交換をするとともに、パワーエレクトロニクスの共通ロードマップを作成するためにPENW を開催した。この活動により国際的連携の足場を作ったといえる。米国が2009年にオバマ政権になってからは、環境・エネルギーを重要な課題として取り上げており、この分野の研究開発の強化が進められている。CPESの後継として、全米科学財団（NSF）の支援のもと再生可能エネルギーを大幅に取り込んだ次世代マイクログリッドの構築を目標とするセンターが設立された¹⁵。グリッドの標準化等における世界的な競合・連携がこれからさらに重要な課題になる。我が国として国際的視野に立った遅れない取り組みが必要であると考え。

4.3 産総研の産業変革イニシャティブ活動

SiC のショットキーバリアダイオードについては市販が開始されている。スイッチングに際してのリカバリー電流が小さい利点から、Si-IGBT デバイスと組み合わせた還流ダイオードとして SiC ショットキーバリアダイオードを導入するだけで、30～40%の損失低減が図れることから、ダイオードへの応用は確実なものといえる。SiC デバイスの市場規模の広がりが見えてきて、三竦みの膠着状態から各分野において正のフィードバック状態へと展開していくことが期待

できる時代に入った。産総研における産業変革研究イニシャティブの研究課題は、デバイスチップの供給がないために遅れがちな変換器応用の関連知財を国内で確保するうえでも時宜を得た決断と考える。アプリケーションによってデバイスに対する主要な要求仕様が異なる（図14）。

また、変換器メリットからシステムメリットを考察するだけでなく、システム変更や新しいシステムをも構想することが重要であると考えられるが、それには多くの応用開発分野との交流・意見交換にとどまらず、現物の SiC デバイスを使った効果を企業関係者が実感したり、あるいは不足な点を指摘するような具体的な共同作業の場が肝要である。言うならば、基本ソフトウェアのソースコードを開示してその後の展開をユーザーから広く求めたリナックス方式的な開発が必要な時であり、この活動はまさに新規半導体デバイスの実用化を目指した本格研究における大きなステップといえる。今後のさらなる省エネルギーシステム開発を進める上での重要なインフラの構築事業と位置付けられる。こうした大型研究開発課題を迅速に実行するうえで、予算、施設、共同研究契約等について統合した指揮を可能とする職責（産総研の名称：産業技術アーキテクト）の果たした役割は大きい。デバイスはシステムからの要求仕様を受けて進化する。デバイスとシステム応用を継ぐ人材が極めて重要な役割を果たすフェーズになりつつある。産総研としての総合的取り組みに期待したい。

5 今後の課題

2009年9月に発足した日本の新政権は、「2020年までに1990年比25%の温暖化ガス削減」を世界に呼びかけている。つくば地区においては、欧州のIMECや米国のAlbanyにおける産学連携共同研究体を参考に、ナノテクノロジー拠点形成の計画が進められており、パワーエレ

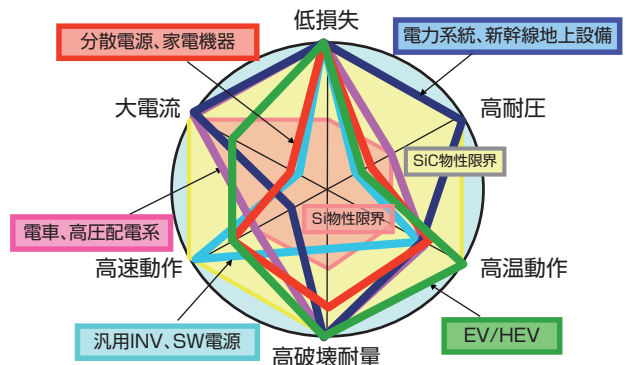


図14 アプリケーションと要求デバイス性能の概念図
デバイス性能のあるものはトレードオフ関係にある（例えば低損失－高破壊耐量－高速動作）。アプリケーションによるデバイス性能の最適化（チューニング）が重要である。

クトロニクスもその1課題となっている。また、SiCのさらなる基盤技術の充実と可能性を明らかにする課題が、我が国の「最先端研究開発支援プロジェクト」30課題の一つに採択された。新規半導体の実用化の研究開発は、「ウェア→デバイス→システム応用」といったように逐次的に展開するものではない。例えばデバイスの開発の進展により、さらなるウェアの口径拡大、品質の向上が求められるといったように螺旋的にそれぞれの研究開発が進む。実用化を揺るぎないものにするための先取りした基盤研究開発が、産学官で融合的に進められることを期待している。エネルギーインフラ変革を支えるキーテクノロジーとしてのパワーエレクトロニクスの将来を見据えた総合的研究開発が必要である。

謝辞

SiC材料・デバイス研究開発のパイオニアであり、一貫してこの活動を支援してくださっている吉田貞史埼玉大学教授（現産総研招聘研究員）による本稿に対する適切な助言に感謝します。

注1) 本構成は、査読者からの本誌の目的に照らした構成の在り方の要請に従いました。活動母体の存続時期とプロジェクト期間等は必ずしも一致していません。

注2) 1st International Workshop on Ultra-Low-Loss Power Device Technology (UPD2000), May31-June2, 2000, Nara, Japan (新機能素子研究開発協会主催)。

注3) シミュレーションについては、グルノーブルにあるフランス国立科学研究センター (CNRS) のマデル教授のグループに協力いただいた。

注4) 「省エネルギー技術戦略」2002年6月12日資源エネルギー庁省エネルギー技術対策課：パワーエレクトロニクス応用装置における省エネルギーの重要性が取り上げられた。現在の改訂版においては、パワエレにおける省エネルギーデバイス技術としてSiCが認知されている。

注5) 特別シンポジウム「省エネルギー技術開発の新しい息吹～パワーエレクトロニクスの新展開」(2002年11月25日) 東京、全共連ビル、産総研技術情報部門主催。

注6) 応用物理学会「SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会」、国際会議 Int.Conf.Silicon Carbide and Related Materials ICSCRM01 (つくば)、ICSCRM07 (大津)。

注7) 第1回パワーエレクトロニクスニューウエーブ (PENW) 国際ワークショップ (2005年4月11日) 東京、発明会館、産総研主催、新機能素子協会協賛。第2回 (2006.6.15) PERC主催、新機能素子協会協賛、第3回 (2008.1) つくば産総研。

ECPE: European Center for Power Electronics (ドイツ) シーメンスを中心とした産学官連合 (2003年設立)

CPES: Center for Power Electronics System (米国) バージニア工科大学を中心に5大学80以上の企業からなるNSF支援のエンジニアリングセンターの一つ (1998年設立)

参考文献

- [1] (財)エネルギー総合工学研究所: 超長期エネルギー技術ロードマップ報告書
http://www.iae.or.jp/research/result/cho06.html
- [2] 吉田貞史他: 特集-耐放射線半導体基礎技術-, 電子技術総合研究所彙報, 58 (2) (1994).

- [3] 「ハードエレクトロニクス調査研究報告I」(社)日本電子工業振興協会(平成7年3月)及び「ハードエレクトロニクス調査研究報告II」(社)日本電子工業振興協会 (平成8年3月).
- [4] 荒井和雄, 吉田貞史編: SiC素子の基礎と応用, オーム社 (2003).
- [5] FREEDM Systems Center
http://www.freedm.ncsu.edu/

執筆者略歴

荒井 和雄 (あらい かずお)

1966年3月東京大学工学部物理工学科卒業。1969年4月通商産業省電気試験所入所。1993年1月～2001年3月まで電子技術総合研究所材料科学部長。1998年10月～2003年3月「超低損失電力素子研究開発」プロジェクトリーダーを務める。2001年4月から2008年3月(独)産業技術総合研究所パワーエレクトロニクス研究センターの研究センター長として超低損失電力素子の材料、プロセス開発から、素子のシステム応用を目指したモジュール化の研究開発に従事。2006年7月から2009年3月までNEDO「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」プロジェクトリーダー。現在、産業技術総合研究所イノベーション推進本部招聘研究員。工学博士。



査読者との議論

議論1 全体構成

コメント (大和田野 芳郎: 産業技術総合研究所環境・エネルギー分野)

初稿は時の経過を追って、社会状況、考え方、研究実施の経緯と成果等が混在して書かれています。このため、解説としては興味深いのですが、論文としての論理展開が理解しにくい状態です。

「構成学」としてある程度一般化して今後の議論に供するためには、例えば、以下のような構成に組み直して記述してはいかがでしょうか。

1) 研究目標、2) 個別課題の設定、3) 課題解決のための戦略、4) 実施と成果、5) 戦略の評価、6) 今後の課題と戦略

コメント (立石 裕: 新エネルギー・産業技術総合開発機構)

初稿は全体として記述形式が、過去20年間のSiCデバイス開発の年代記/解説のようになっており、シンセシオロジーの研究論文に合うように構成と論理展開の見直しをしてください。

回答 (荒井 和雄)

少々記述が重複しますが、意見を取り入れて改訂しました。

議論2 研究戦略の明確化

コメント (大和田野 芳郎)

初稿の「パワーエレクトロニクスのイノベーション」は重要な内容を含んでおり、むしろ冒頭で議論されるべきと思われます。その際、シリコン代替を狙うのか、現状でも充分機能しているとされる機械的な遮断機・リレーの代替を狙うのか、その場合の利点は何か等の論点を整理してください。

回答 (荒井 和雄)

深く議論するだけの力量はありませんが、可能性の提示と開発ポイントを示しました。コストがシリコン並みで信頼性が確立すれば、今の>~kVクラスのパワーデバイスはSiCになることは間違いないと思います。

議論3 パワーエレクトロニクスとSiCを選択する理由

コメント（大和田野 芳郎）

エネルギーを電力として利用できる割合（電力化率）の増大は重要であることは事実ですが、それがパワーエレクトロニクスの普及拡大には直結していないことを認識すべきでしょう。パワーエレクトロニクスでなければならない、しかも SiC でなければならない用途とその拡大を提示してください。

回答（荒井 和雄）

まさに直結していないことが現在の問題で、それはパワーエレクトロニクスのコストと信頼性に問題と疑念があるからだと思います。その払拭こそがイノベーションで、SiC デバイスにはそのポテンシャルはありますが、解決すべき課題がまだあり、それを外的条件を踏まえてどうやって乗り越えるかが実用化の戦略だと思います。

議論4 SiCを選んだ理由

コメント（立石 裕）

出発点として、ワイドギャップ半導体の中でなぜ SiC を中心的課題として選んだのか、簡単な説明があった方がいいのではないのでしょうか。研究担当者には自明なことかもしれませんが、非専門家にとっては素朴な疑問です。

回答（荒井 和雄）

3.1.1 項の冒頭部に記述しました。まさに SiC の選択が出发点であったと思います。

議論5 研究戦略の変遷

コメント（立石 裕）

最初から一貫した長期的戦略が必ずしもあったわけではなく、研究の進展に伴い、「材料→使える材料→デバイス→システム」の関係をいらいらで、スペックや戦略自体が進化していったのではないのでしょうか。

回答（荒井 和雄）

これは 2001 年時点での重要なポイントで、3.2 節の冒頭部で記述

しました。

議論6 「トータルソリューション」と「パワエレの革新」の内容

コメント（大和田野 芳郎）

「トータルソリューション」という言葉の元々の意味は、ある大きな課題を解決するためにさまざまな方策を総合して対処する、という意味だと思います。「一貫研究」とは必ずしも意味が同じではないと思います。解決すべき課題を明示して「パワエレの革新」という用語の意味を明確にしてください。

回答（荒井 和雄）

- 1) 「トータルソリューション」は、ある大きな課題を解決するためにさまざまな方策を総合して対処する、という意味で用いています。新規半導体を実用化にまで持ち込むために解決すべき大きな課題は、「三疎み状態の解消」であると思います。それには「ウェハ→デバイス→応用開発」のリニアモデルの研究開発ではうまくいかなく、これら三方向（方策）から総合して対処する必要があると考えています。
- 2) 「（低損失+高周波化）→低コスト変換器→ユビキタスパワエレ機器」という展開を「パワエレの革新」と考えています。

議論7 「一貫研究」の内容

コメント（大和田野 芳郎）

「一貫研究」においても、時間の経過に伴う重点のシフト、有限なリソースの分散、テーマ間の壁等の課題があったと思いますが、どう対処したかという記述があると大変参考になると思います。

回答（荒井 和雄）

本研究はほとんどゼロからの立ち上げでしたので、必要なものからガムシャラに立ち上げていったので常に飢餓状態であったと思います。デバイスが自前でできなければその先の展望が開けないので、大きな金額を必要とするデバイスプロセスの機器・施設に資金を投入しました。この辺の事情を追記しました。

単結晶ダイヤモンド・ウェハの開発

— マイクロ波プラズマCVD法による大型化とウェハ化技術 —

茶谷原 昭義*, 杵野 由明、坪内 信輝、山田 英明

ダイヤモンドは超高压安定相であることから大型結晶の合成が困難であり、応用は工具など硬度を利用した用途に限られていたが、大きさとコストの課題をクリアできれば、その用途は計り知れない。特に究極の半導体と称され、半導体開発ロードマップ上では、炭化ケイ素SiCや窒化ガリウムGaNの次に位置している。高温動作が可能であり、物質中最高の熱伝導率が活かせるパワーデバイスが実現すれば、例えば、車載用インバータを冷却フリー化でき、低電力損失と冷却システムの軽量化の両面から省エネに貢献できる。本稿では、大型化が可能な気相合成による単結晶ダイヤモンド合成と難加工材であるダイヤモンドをウェハ形状にする技術開発について述べる。

キーワード: 単結晶ダイヤモンド、マイクロ波プラズマ CVD、結晶成長

Development of single-crystalline diamond wafers

– Enlargement of crystal size by microwave plasma CVD and wafer fabrication technology –

Akiyoshi Chayahara*, Yoshiaki Mokuno, Nobuteru Tsubouchi and Hideaki Yamada

Industrial application of diamond has been limited to the use of its hardness, e.g., in machining tools, because large size crystals of diamond are difficult to synthesize and very expensive. If these problems are solved, it can be used for various purposes. Diamond is called ‘an ultimate semiconductor’ and is located after SiC or GaN in the semiconductor roadmap. If power electronic devices with diamond are realized which utilize its operability under high temperature and the highest thermal conductivity among all materials, the inverters for automobiles can be operated without cooling devices, which lead to energy saving through the reduction of power loss as well as the reduction of weight of the cooling system. The purpose of this paper is to report the process of enlarging the size of single-crystalline diamond using vapor phase epitaxy and the fabrication of diamond wafers.

Keywords: Single-crystalline diamond, microwave plasma CVD, crystal growth

1 はじめに

これまで単結晶ダイヤモンドは高温高压法によって工業的に製造されてきた。主に Ib 型と呼ばれる窒素を含有した黄色い結晶が工具向けに量産されている。高純度で低欠陥の単結晶も合成可能であり、放射光の分光結晶などとして使用される完全に近い単結晶が作製できる^[1]。しかし、高温高压法による単結晶の大型化は 1 cm 程度が限界とされ、大型加圧設備を必要とするため大幅に大型化することは困難である。これに対し多結晶ダイヤモンド合成やホモエピタキシャル成膜に用いられている化学気相合成 (CVD) 法は、高温高压法に比べると大きさの制約は少ない。そのため近年、大型化および低コスト化のため CVD 法による単結晶合成が盛んに研究開発されている。私達の開発目的は、次世代パワーデバイス用基板としての利用であり、現状のデバイス試作ラインに必要な 2 インチウェハの実現を目

指している。また超高压合成により作製が可能な最大 1 cm 程度の単結晶基板は Ib 型で 100 ~ 200 万円程度と高価である。CVD 法で製造することにより 1 桁以上の低価格化が期待される。

CVD 法が最近までダイヤモンド薄膜の合成に使用され、バルク結晶の合成に使用されなかった理由は、成長速度が遅いことと、異常粒子が発生して単結晶成長を長時間維持できなかったからである。したがって、これらの課題を解決することが単結晶 CVD ダイヤモンド合成の研究課題となっている。

本稿では、ダイヤモンドの気相成長について説明した後、単結晶 CVD ダイヤモンド合成、特にホモエピタキシャル成長において、上述のような課題を解決するための高プラズマ密度化、窒素添加効果などについて述べる。さらに超硬質材料であるダイヤモンドをウェハ状に加工する手段の開発に言及する。

産業技術総合研究所 ダイヤモンド研究ラボ 〒563-8577 池田市緑丘 1-8-31

Diamond Research Laboratory, AIST 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda 563-8577, Japan * E-mail: chayahara-akiyoshi@aist.go.jp

Original manuscript received May 6, 2010, Revisions received June 14, 2010, Accepted June 14, 2010

2 気相法によるダイヤモンド合成の発展

化学気相合成 (Chemical Vapor Deposition : CVD) 法は、大気圧以下の圧力で原料ガス (ダイヤモンド合成の場合、メタンなどの炭化水素ガスと水素) を熱またはプラズマによって分解し、生じた成長種が基材表面で化学反応してダイヤモンドの薄膜を成長させる方法である^{[2]-[13]}。

1950年代に報告されている熱分解に基づくダイヤモンドのCVD合成は、極端に成長速度が遅く、グラファイト成分の混入の問題があり非実用的な方法だった。1960年代の終わりには、原子状水素の存在によってグラファイト成分が選択的にエッチングされることが分かっていたが、CVDダイヤモンド研究が急激に立ち上がったのは1982年から1983年に無機材質研究所 (現：物質・材料研究機構) が原子状水素の生成方法とそれを利用した毎時 μ m オーダーの成長速度でダイヤモンド合成が可能であることを報告してからである^{[14][15]}。これらの方法は、熱フィラメントCVD法およびマイクロ波プラズマCVD法と呼ばれる。2200℃程度に加熱したタンゲステンフィラメントまたはマイクロ波プラズマによって、水素で希釈したメタンガスを分解し、減圧下で800℃程度の基板にダイヤモンド粒子を成長させる方法である。その後、さまざまなCVD法が開発されたが、現在でもこの二つの方法はCVDダイヤモンド製造や研究開発に広く利用されていることから見ても、画期的な方法であったことがわかる。

一般に、CVD法では減圧下にて炭化水素などの原料ガスを分解し、非ダイヤモンド基板に核発生させ、多結晶ダイヤモンド薄膜を堆積させることができる。このような多結晶薄膜はコーティング工具をはじめ多くの用途では優れた特性を発揮する。原子状水素の生成と原料ガスの分解は種々の方法によって行うことができ、この分解 (活性化) の方法によって熱CVDとプラズマCVDに大別される。熱CVDプロセスでは原料ガスの分解は熱活性によって達成されるのに対して、プラズマCVDでは電子-分子間反応によって起こる。熱CVDには、熱フィラメント法や酸素-アセチレン-トーチのような燃焼炎法が含まれる。プラズマCVD法には、マイクロ波プラズマ、DCプラズマ、DCプラズマジェット、RFプラズマなどがある。

熱フィラメントCVD法は、比較的 low コストで大型装置を製作できることから大面積に成膜が可能となり、工具の多結晶ダイヤモンドコーティング法としてすでに実用化されている。しかし、高温に加熱されたフィラメント材料 (タンゲステン、タンタル、レニウムなど) が不純物として膜中に混入することと、成長速度が遅いことなどが問題として挙げられる。

マイクロ波プラズマCVD法は、無電極放電を利用するため不純物の混入が少なく、半導体グレードの成膜が可能である。これまで成長速度が遅かったが、後述のように高

速化が進み^[16]、最近ではCVDによるバルク単結晶合成のほとんどの報告でマイクロ波プラズマCVDが用いられている。

CVDダイヤモンド合成法に共通する特徴は、高濃度の水素ガスである。最近までグラファイト成分が少ないダイヤモンドを得るためには、99%以上の水素濃度が必要とされた。高濃度の水素は、多量の原子状水素を生み、これがダイヤモンドCVDプロセスにおいて重要な役割をすると一般に信じられている。ダイヤモンドの合成は気相からラジカルが成長表面へ付着し、また、離脱すること、つまり表面反応プロセスによって起こると述べられている。ダイヤモンド結晶が成長する場合、最初にダイヤモンドの核発生が起こるが、その後、ダイヤモンド成長表面がグラファイト相へ変態するのを阻止する必要がある。このためには高濃度の水素原子が、ダイヤモンド成長表面上に存在するすべてのダングリングボンド (非結合手) と結合する必要がある。水素中でダイヤモンド構造が比較的安定であることは、加熱実験で確かめられている。超高真空中では約900℃でダイヤモンド表面はグラファイト化するが、水素中の加熱では2200℃までダイヤモンド構造が保たれる^[17]。ちなみに酸素中では約585℃で酸化による質量減が始まり^[18]、ダイヤモンドの酸化は表面のグラファイト化を伴って進行する。ダイヤモンドの成長は次のように説明される。成長表面を覆っている結合水素が、気相の水素原子と反応し水素分子が形成される過程で、成長表面から水素が引き抜かれた跡に孔 (ダングリングボンド) ができる。次に、原料ガスが分解して生成したメチルラジカル CH_3 (この反応にも水素原子が関与する) が、この孔に結合することによって成長すると考えられている。さらに、原子状水素はダイヤモンドと同時に堆積しようとするグラファイト相を選択的にエッチングする。これはCVD多結晶ダイヤモンド合成における結晶粒界中のグラファイト成分の低減には有効である。この目的のためさらに原料ガスに酸素を添加することが一般に行われている。酸素によるエッチングでは水素ほどグラファイトとダイヤモンドの選択比が高くないが、低温でも有効にエッチングを行えるので、酸素添加はダイヤモンド成長条件の低温化に有効である。また、原料ガスにおける炭素-水素-酸素の組成比についてダイヤモンドの成長可能な組成比領域を示したバウハマン図^[19]はよく知られている。

ダイヤモンド結晶成長技術では、バイアス促進核生成 (Bias Enhanced Nucleation : BEN)^[20] と呼ばれるダイヤモンド核の形成技術が重要である。BENによる核形成は異種基板上でのヘテロエピタキシャル成長や多結晶ダイヤモンド、ナノダイヤモンド薄膜を成長させる場合の核形成方法として用いられている。BENによる核形成を利用しない

で多結晶ダイヤモンドを成長させようとする場合、成長に先立って外部でダイヤモンド砥粒を用いて有機溶剤中で超音波処理または機械的研磨によって基板を前処理する。「種付け」処理と呼ばれ、基板の上に微細なダイヤモンド粒子が埋め込まれ、これが種結晶となって成長すると考えられている。これに代わる方法が BEN である。基板は炭化水素濃度が比較的高い条件のプラズマ中で負にバイアスを印加される。この方法により高密度のダイヤモンド核が形成される。形成した核の上にダイヤモンドを成長させるために、BEN プロセスに続いて、バイアスを印加しない通常の条件で成長が行われる。BEN プロセス中に形成した安定な部分のみが生き残り成長を続ける。

種付け処理後に成長した薄膜は、成長面内では結晶方位がランダムに向いた多結晶となるが、BEN では、種結晶の結晶方位が基板と整合する場合があります、その上に成長したダイヤモンド薄膜も配向する。これにより単結晶イリジウム Ir、白金 Pt、SiC 上へのヘテロエピタキシャル成長が可能となる。Si や SiC ウェハなど大口径基板が入手できる現在、ヘテロエピタキシャル成長を利用した大型単結晶基板の製品化が試みられているが、結晶性の改善が課題である。

私達は、熱フィラメント法より合成面積は小さいが成長速度が比較的速く、長時間合成が可能なマイクロ波プラズマ CVD 法を使い、結晶性に優れるホモエピタキシャル成長を用いた大型ダイヤモンド結晶作製を目指した。

3 マイクロ波プラズマCVD法によるダイヤモンド単結晶の合成

図1に示すような一般的な ASTeX 型マイクロ波プラズマ CVD 装置 (2.45 GHz、5 kW、セキテクトロン製) を用いてダイヤモンド単結晶の高速合成を行った。マイクロ波プラズマ CVD 装置に関しては、文献^[21]を参照願いたい。高速に成長させるためには高密度なプラズマ生成が有効だ

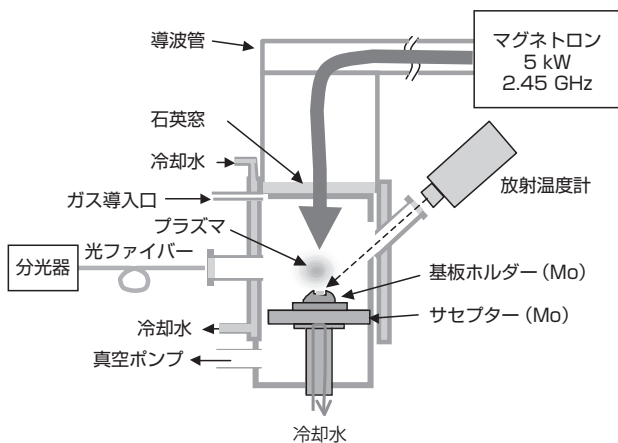


図1 ASTeX 型マイクロ波プラズマ CVD 装置

と考え、基板の上にプラズマを集中させるよう Mo 製の基板ホルダーの形状が工夫されている^{[22][25]}。

種結晶基板として、高温高压合成ダイヤモンド Ib 型100面を用いた。原料ガスとしてメタンおよび水素を用い、それぞれの流量 60, 500 sccm、圧力 21 kPa、基板温度 1100 ~ 1200 °C 程度の成長条件とした。基板はプラズマによって昇温している。プラズマからの発光は光ファイバーを用いて分光器に導かれモニターされている。

合成した成長層は、精密 X 線回折によるロッキングカーブ法、ラマン散乱分光法などにより評価した。合成された単結晶ダイヤモンドの結晶品質を端的に表す (400) 面ロッキングカーブ半値幅は、これまでの最小のもので 7.6 秒であり、これは高品質な高温高压合成 Ib の値に匹敵する。

3.1 成長速度

既に述べたように CVD 法が近年まで主に多結晶ダイヤモンド薄膜の合成に使用され、バルク結晶の合成に使用されなかった理由の一つは、成長速度が遅いからである。例えば、Si インゴットの引上げ法で液相成長 1 ~ 2 mm/分、昇華法による SiC の 0.2 ~ 1 mm/時に比較して、ダイヤモンドの成長速度数 $\mu\text{m}/\text{時}$ はバルク結晶法としてとても遅い。

プラズマ CVD 法におけるダイヤモンドの成長速度を増大させるためには、原料ガス圧力を高くし、さらに高電力を投入してプラズマを高密度化して成長表面へ供給される活性種を増やすことが必要である。

また窒素添加による成長速度の増加効果が、既に多数の報告がなされている^{[22][26]}。窒素流量に対する成長速度依存性を図2に示す。図中には成長に用いた2種類の基板ホルダーが示されている。どちらの基板ホルダーを用いた場合も窒素流量の増加とともに成長速度が増加している。従来のマイクロ波 CVD 法での成長速度が 10 $\mu\text{m}/\text{時}$ 以下だったのに対し、プラズマの高密度化と窒素添加の双方の効果により、50 ~ 100 $\mu\text{m}/\text{時}$ に到達した。それぞれの

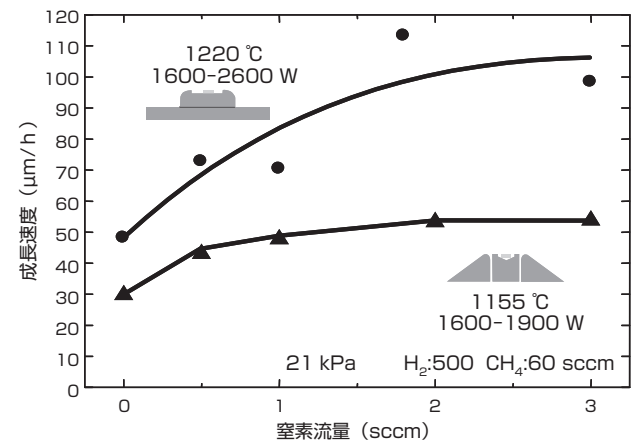


図2 成長速度の窒素流量依存性

基板ホルダーについて成長温度が異なっているが、この範囲の温度差による成長速度の変化は少ないことが実験から分かっている。図2は窒素添加効果とともに、基板ホルダーの形状により成長速度が大きく変化することを示している。基板ホルダーの形状によってマイクロ波電界が集中する度合いが変化し、集中したほうが基板周辺のプラズマ密度が高くなり高速化する。

3.2 異常成長粒子発生の抑制

エピタキシャル成長基板の結晶面方位として{100}面がよく用いられる。この理由は、他の面方位と比較して双晶が発生しにくいことや、製造上、{111}面の研磨が困難なことが理由として挙げられる。この{100}面上にエピタキシャル成長する場合、成長条件が適切でないと異常核と呼ばれる異常成長粒子が発生する。この異常核は多くの場合、{100}面上に発生した{111}配向の粒子を中心にしたピラミッド形状をとる。この起源としては種結晶中の転位、研磨傷、エッチピット、成長中のゆらぎなどが挙げられている。このような異常核の発生および拡大を抑制する方法として以下に述べる α パラメータ制御、オフ基板を用いるステップフロー成長および窒素添加が有効である。

1) α パラメータ制御

ダイヤモンド結晶成長においてファセット（結晶自形面）として現われるのは、ほとんど{111}面と{100}面である。それらの面に垂直な方向の成長速度を V_{100} 、 V_{111} とすると、 α パラメータは

$$\alpha = \sqrt{3} V_{100} / V_{111}$$

で定義される^{[27][28]}。 V_{100} 、 V_{111} は圧力、メタン濃度、温度などの成長条件に対する依存性が異なるため、 α は成長条件によって変化する。多結晶合成の場合、この α の変化は配向性の制御に利用される。つまり、特定の配向性を持たない核から成長をはじめても成長が進み、膜厚が増大するにしたがって成長表面付近の結晶配向性は α によって決まった向きに配向する。また、結晶粒の形状も α によって決定される。 $\alpha=3$ 程度の場合、多結晶成長では<100>配向となり、単結晶成長面として多用される{100}面上での成長では異常核発生の抑制に有効である。この場合、たとえ異常核の起点が存在してその上に{111}配向粒子が成長しようとしても、その周りの{100}の成長速度が速いために埋め込まれてしまい、大きな異常粒子に成長することができない。ただし、この条件では基板上の転位や成長中に発生した欠陥は成長方向に引継がれ、貫通転位などとして残る。また装置ごとに α は異なるので、まず成長条件を変化させて α マッピングを行い、所定の α が得られる条件を探索することがよく行われる。

2) オフ基板上のステップフロー

{100}面から数度以内で傾いた面で研磨されたいわゆるオフ基板上で成長を行うと、ステップフロー成長することが知られている。このときテラス上で異常核が成長するより早くステップがこの箇所を通過すると異常核が成長できず、平坦な成長が期待される。半導体グレードの成膜を行う場合に有効な手段である^[29]。

大型結晶成長の場合は、オフ基板を種結晶として用いて成長を開始しても、最初は薄膜成長と同様に基板全面でステップ成長が起こるが、基板の端からオフが解消されて、最終的には成長表面全面がほとんど{100}面となってしまう^[30]。当然、そうなった後の異常核抑制効果は期待できない。

3) 窒素添加効果

{100}面上でのエピタキシャル成長時、原料ガスに微量の窒素ガスを添加すると異常核の発生を抑制できる。極微量添加時は、窒素添加によって α が増大する。添加量が増加してくると、もはや{111}面は正常に成長することができず多結晶になってしまう。いずれにしても{111}面の成長を阻害することになり、結果として異常核の抑制につながる。高速成長を長時間継続して大型単結晶を合成する場合に用いられている手段である。しかし、窒素を添加すると深いドナー準位とキャリアトラップが導入されて絶縁体となる。また、窒素に伴う欠陥により可視光領域に吸収が現われる。窒素添加による{111}面成長の抑制効果は、{111}面上に窒素原子が3配位で強力に結合し、窒素で覆われた{111}面上には炭素原子が結合できないことが関係していると思われる^{[22][26]}。

図3に各窒素流量における成長表面の微分干渉顕微鏡像を示す。窒素を添加しない場合、ピラミッド型の突起（成長丘）が見られ、{100}面上にCVD法で合成されたダイヤモンドの典型的な表面形態である。この成長丘は大きな構造欠陥として結晶中に残り、長時間エピタキシャル成長による厚膜化を阻害する要因となっている。これに対し窒素を添加すると成長丘は全く見られず、代わりにマクロなステップバンチングによる表面荒れが観察されるようになる。さらに窒素を添加するとステップが直線状でなくなり乱れてくる。このように窒素を添加すると表面は荒れるが、成長丘が皆無となるので長時間成長による厚膜化・バルク化が可能となる。従来は異常核が発生してCVD法による単結晶成長自体が困難だったが、極微量窒素添加の効果により異常成長粒子発生が抑制できた結果、CVD法によるバルク単結晶成長が可能となった。

3.3 大型化

約1 cm角の基板上に長時間合成された試料の写真を図4に示す。窒素添加による{100}成長では、この写真の

ように結晶口径が拡大しない。大口徑化するため図5のように成長した結晶の側面（これも{100}面）を研磨し、その面を上面にして次の成長を行うことを繰り返している。図6に得られた結晶の一例を示す。

類似の側面成長法は、SiC 単結晶成長におけるRAF成長法とよばれる欠陥低減法に見られる^[31]。パワー半導体としての本格的な実用化に近い炭化ケイ素 SiC の単結晶成長には昇華法が用いられ、従来のSiC昇華法ではc軸(0001)に沿って成長するが、RAF法では、a面と呼ばれる{11 $\bar{2}$ 0}および{1 $\bar{1}$ 00}面による転位構造変化を利用して転位欠陥が低減される。a面方向に成長を繰り返すことからRepeated a-Face (RAF) 成長法と呼ばれる。c面方向に成長したインゴットから、①{1 $\bar{1}$ 00}面結晶を切り出し、その面に成長させる。次に、②{11 $\bar{2}$ 0}面結晶を切り出し、その面に成長させる。①、②を複数回繰り返した後、インゴットからc面の種結晶を切り出し、c面成長を行う。従来のc面成長したインゴットには多くの転位が存在するが、a面成長することで種結晶の転位は少なくなる。転位の大部分は種結晶面に平行に存在し、a面成長時には結晶面に平行に存在する欠陥は継承されないことが原因とされる。

SiC 単結晶におけるRAF成長法開発の動機は、おそらくマイクロパイプに代表される結晶欠陥の低減だったと思

われる。これに対してCVDダイヤモンドでの{100}面繰返し成長法は、まず口径拡大が第一の目的だった。極微量窒素添加の成長条件下では、<100>方向にのみ成長するので成長に伴う結晶口径の拡大が期待できなかったからである。SiCとダイヤモンドでは、ウェハの口径や品質に格段の差があり、SiCが20年以上先行しているが、およそ同時期に側面繰返し成長が提案されたことは興味深い。

3.4 ウェハ化

ダイヤモンドは物質中で最高の硬度を有することからその加工が容易ではない。そのため半導体素子製造に必要とされるウェハ形状への加工がとても困難となる。工業用ダイヤモンドの加工にはレーザー切断が用いられているが、切り代によるロスや加工時間が問題となる。また、精密研磨技術もさらに平坦化や低欠陥化が要求される。ウェハ化手法として、「ダイレクトウェハ化技術」やモザイク法が開発されている。

ダイレクトウェハ化技術^[32]では、成長に先立ち種となる単結晶ダイヤモンドにあらかじめイオン注入して、表面直下に欠陥層を導入しておく。気相成長後、欠陥層はグラファイト構造となり、電気化学的エッチングなどによって除去することができる。種結晶および成長層はダイヤモンド構造をもち化学的にとても安定なので化学的にはエッチングされ

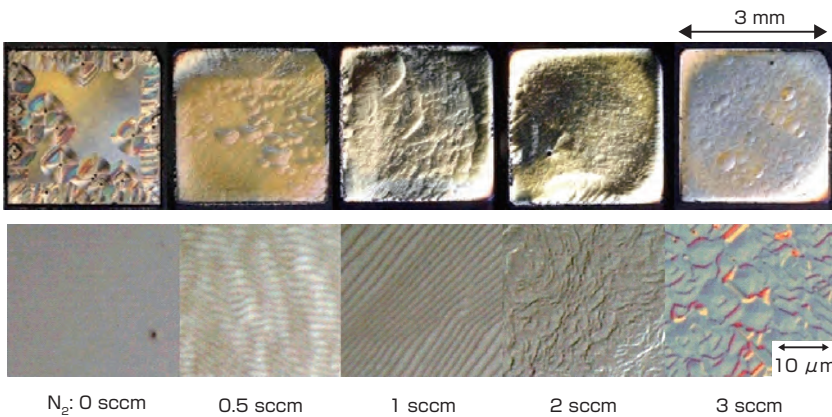


図3 微分干渉顕微鏡で観察した表面形態の窒素流量依存性
上段：マクロ形態（低倍率）、下段：ミクロ形態（高倍率）

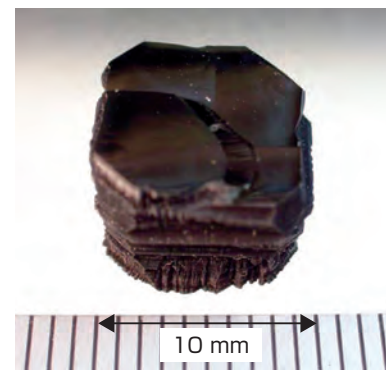


図4 CVD単結晶ダイヤモンド。重さ：2 g (10カラット)

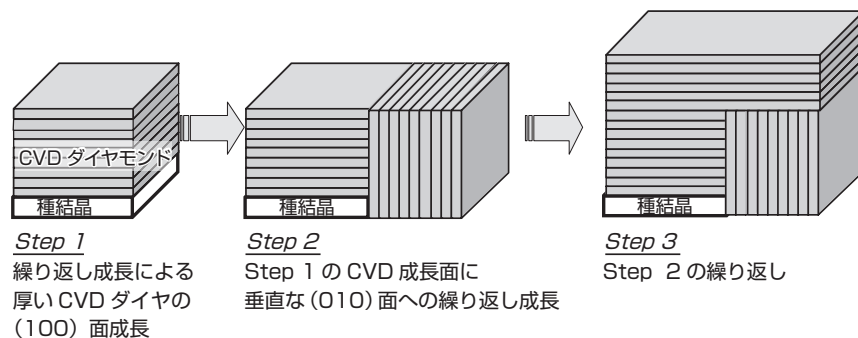


図5 側面成長の繰返しによる結晶の大型化

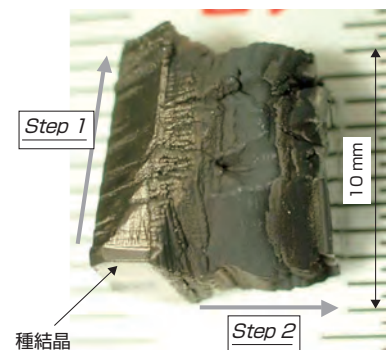


図6 側面成長した例

ない。それで種結晶と成長層が分離し、板状ダイヤモンドとなる(図7,8)。種結晶のごく一部は分離時に無くなるが、この厚さはイオン注入深さの1 μm程度とわずかである。このことから、通常の種結晶を何度も繰り返して利用することができると共に、切り離れた結晶を種結晶として使用していくことも可能である。

このような分離手法はこれまでいくつかの研究機関で研究されてきた^{[33][46]}が、いずれも小さい形状に限られ、エッチングの時間が長いという問題があった。文献で確認できる最大形状でも3~4 mm角程度で、従来技術の壁があった。筆者らは、エッチング方法の検討を進めた結果、これを飛躍的に大面積化し、かつ高速化する方法を見出した。原理的に形状のスケールアップや大量処理に問題がないので、将来のダイヤモンドウェハ製造技術として有望と考えられる。

モザイク法^{[47][54]}は、数ミリ角の小型単結晶ダイヤモンド板を密着して敷詰め、この上にCVD成長させて結合させる手法である。結合部は素子として利用できないが、全体をウェハ形状とし半導体プロセスに流す意図で開発されている。これまでの接合部では異常粒子が発生していたが、ダイレクトウェハ化技術を用いて同一の種結晶から作製した複数の結晶片を結合させると接合部の異常粒子を激減できることが見い出された^[55]。結晶片の面方位などが自動的に揃うためと考えている。私達はこの方法を用いて1インチ相当のモザイクウェハを作製して、さらにモザイクウェハを種結晶としてダイレクトウェハ化技術を適用することによりその量産方法にも目処をつけた。モザイク法は容易に大型化が可能であり、早急な大型化の要求に対応できる手段である。

3.5 スマートカットとダイレクトウェハ化

高速かつ低消費電力でデバイスを動作させることが可能なSOI (Silicon on Insulator) ウェハの製造方法の一つとして、水素イオン注入を利用した切断手法が利用されている^[56]。水素脆化現象を利用したこの切断法は、「スマートカット」または「イオンカット」と呼ばれ、シリコンなどの

半導体単結晶ウェハの表面をサブミクロン~ミクロンオーダーの厚み(イオン注入深さに対応する)で剥がす加工技術である。スマートカットによるSOIウェハ作製の基本プロセスは以下のように説明される。①シリコンウェハ表面に熱酸化によりSiO₂絶縁層を形成する。②水素イオン注入を行う。③親水化処理を施し、ほかのシリコンウェハと重ね合わせて室温で接合する。④400~600℃で熱処理を行い、水素イオン注入したウェハ表面から数ミクロン厚さで剥離させる。水素が集まって空隙ができることによる。⑤接合界面を1000℃以上で熱処理を行う。⑥剥離したウェハ表面を研磨する。以上のプロセスは貼り合わせ法と呼ばれる。また、イオン注入を利用したSOIウェハには、ほかにSIMOX (Separation by implanted oxygen) ウェハがあるが、こちらはシリコンウェハに酸素イオンを注入した後、高温で熱処理することにより、注入された酸素とウェハのシリコンから埋め込み酸化膜を形成する方法であり、剥離は行わない。

私達は、シリコンウェハへの高温炭素イオン注入を用いた埋め込みSiC層形成^{[57][58]}の経験から、上述のイオン注入応用技術の知識があり、難加工材であるダイヤモンドをウェハ化する手段としてイオン注入の利用を検討した。SOIのような薄膜は必ずしも必要でなく、厚さ0.3 mm以上のウェハを製造するためには、イオン注入後、エピタキシャル成長する必要がある。スマートカットでは、成長温度1150℃程度での熱処理によって成長中に剥離する可能性がある。それを避けるためダイレクトウェハ化では、注入層が黒鉛に変態する注入量を用いており、成長後のエッチングによって黒鉛層を除去することで成長層を分離している。なお、黒鉛層のエッチングに関しては、Marchywkaらの先駆的な研究がある^[59]。

4 おわりに

高温高圧法で入手できる最大サイズ1 cm角を越えて、単結晶で12 mm、モザイク結晶で25 mmサイズまでプラ

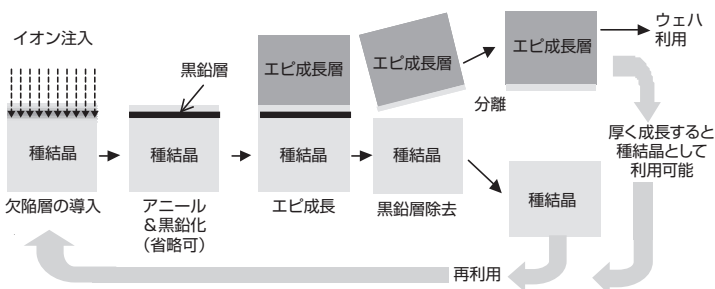


図7 ダイレクトウェハ化技術

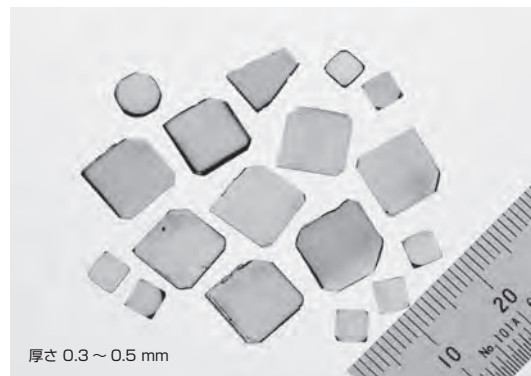


図8 ダイレクトウェハ化技術を用いて作製した単結晶ダイヤモンド板

ズマ CVD 法を用いて合成可能であることを実証した。また、ダイレクトウェハ化技術は、多結晶を用いて 2 インチサイズまで可能であることを示した。今後 1~2 年以内に 2 インチモザイク結晶の試作を予定している。ウェハとしての実用性の検証はまさに進行中であるが、少なくとも超高压基板に替えて利用可能なことは既に示されている^[60]。さらに高品質化するためには、転位密度の低減が必要で、エビ成長の前処理などが重要だと認識している。光学用途向けに、可視域に窒素に関連した吸収があり問題となる場合、窒素添加なしで成長すると透明にできるが、現状では 10 μm /時以下の成長速度となる。工具向けの CVD 多結晶ダイヤモンドコーティングが広く実用化されているように、CVD プロセス自体のコストが特別高額になることはなく、今後 CVD ダイヤモンドの量産化が行われれば、数ミリ単結晶は入手し易く、1 cm 以上も利用可能となる。目安として高温高压合成の場合、Ib 型 1 cm 角の単結晶ダイヤモンド板の価格が 100 ~ 200 万円だとすると、CVD の場合は一桁下がる。これは量産化の規模や企業戦略によって左右され、また整形など合成以外の費用も考慮する必要はある。ダイヤモンドの場合、半導体以外の需要が既に存在しているため、現段階の製造技術でもコストに優れる CVD 合成品へ移行すると予想される。本稿で紹介した単結晶ダイヤモンド製造技術に基づいた産総研ベンチャー^[61]が設立され、サンプル提供を行っている。ダイヤモンド半導体製造が実現すれば大きな需要が見込め、その結果、さらに入手しやすくなる単結晶ダイヤモンドを利用した新たな用途が期待される。

参考文献

- [1] 角谷 均, 戸田直大, 佐藤周一: 高品質大型ダイヤモンド単結晶の開発, *SEIテクニカルレビュー* 166, 7-12 (2005).
- [2] 犬塚直夫, 澤邊厚仁: *ダイヤモンド薄膜*, 産業図書 (1987).
- [3] N. Fujimori: *Materials Science and Technology*, edited by R.W. Cahn *et al.*, p.344, VCH Verlagsgesellschaft mbH (1996).
- [4] P.K. Bachmann and W.V. Enckevort: Diamond deposition technologies, *Diamond Related Mater.*, 1, 1021-1034 (1992).
- [5] S.T. Lee *et al.*: CVD diamond films: Nucleation and growth, *Mater. Sci. Eng.*, R25, 123-154 (1999).
- [6] 八田章光ほか: プラズマCVD 法による高品質ダイヤモンドの合成, *プラズマ・核融合学会誌*, 76 (9), 833-841 (2000).
- [7] K.E. Spear: Diamond - ceramic coating of the future, *J. Am. Ceram. Soc.*, 72 (2), 171-191 (1989).
- [8] T. Teraji: Chemical vapor deposition of homoepitaxial diamond films, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 203 (13), 3324-3357 (2006).
- [9] B.V. Spitsyn *et al.*: Origin, state of the art and some prospects of the diamond CVD, *Brazilian J. Phys.*, 30 (3), 471-481 (2000).
- [10] L.K. Bigelow and M.P. D' Evelyn: Role of surface and interface science in chemical vapor deposition diamond technology, *Surf. Sci.*, 500, 986-1004 (2002).
- [11] S. Matsumoto: Development of diamond synthesis techniques at low pressures, *Thin Solid Films*, 368, 231-236 (2000).
- [12] H. Kawarada: Hydrogen-terminated diamond surfaces and interfaces, *Surf. Sci. Rep.*, 26 (7), 205-259 (1996).
- [13] K. Kobashi: *Diamond films*, Elsevier (2005).
- [14] S. Matsumoto, Y. Sato, M. Kamo and N. Setaka: Growth of diamond particles from methane-hydrogen gas, *J. Mater. Sci.*, 17, 3106-3112 (1982).
- [15] M. Kamo, Y. Sato, S. Matsumoto and N. Setaka: Diamond synthesis from gas phase in microwave plasma, *J. Cryst. Growth*, 62, 642-644 (1983).
- [16] C-S. Yan *et al.*: Ultrahard diamond single crystals from chemical vapor deposition, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 201, R25-R27 (2004).
- [17] S. Kumar *et al.*: Survival of diamond at 2200 °C in hydrogen, *Diamond Related Mater.*, 5, 1246-1248 (1996).
- [18] J.D. Hunn *et al.*: Fabrication of single-crystal diamond microcomponents, *Appl. Phys. Lett.*, 65(24), 3072-3074 (1994).
- [19] P.K. Bachmann *et al.*: Towards a general concept of diamond chemical vapour deposition, *Diamond Related Mater.*, 1, 1-12 (1991).
- [20] S. Yugo *et al.*: Generation of diamond nuclei by electric field in plasma chemical vapor deposition, *Appl. Phys. Lett.*, 58, 1036-1038 (1991).
- [21] 八田章光: *マイクロ波プラズマの技術*, 電気学会・マイクロ波プラズマ調査専門委員会編, オーム社 (2003).
- [22] A. Chayahara *et al.*: The effect of nitrogen addition during high-rate homoepitaxial growth of diamond by microwave plasma CVD, *Diamond Related Mater.*, 13, 1954-1958 (2004).
- [23] Y. Mokuno *et al.*: Synthesizing single-crystal diamond by repetition of high rate homoepitaxial growth by microwave plasma CVD, *Diamond Related Mater.*, 14, 1743-1746 (2005).
- [24] H. Yamada *et al.*: Modeling and numerical analyses of microwave plasmas for optimizations of a reactor design and its operating conditions, *Diamond Related Mater.*, 14, 1776-1779 (2005).
- [25] Y. Mokuno *et al.*: High rate homoepitaxial growth of diamond by microwave plasma CVD with nitrogen addition, *Diamond Related Mater.*, 15, 455-459 (2006).
- [26] S. Dunst *et al.*: Growth rate enhancement by nitrogen in diamond chemical vapor deposition—a catalytic effect, *Appl. Phys. Lett.*, 94, 224101 (2009).
- [27] C. Wild *et al.*: Oriented CVD diamond films: twin formation, structure and morphology, *Diamond Related Mater.*, 3, 373-381 (1994).
- [28] F. Silva *et al.*: 3D crystal growth model for understanding the role of plasma pre-treatment on CVD diamond crystal shape, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 203 (12), 3049-3055 (2006).
- [29] N. Tokuda *et al.*: Hillock-free heavily boron-doped homoepitaxial diamond films on misoriented (001) substrates, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46 (4A), 1469-1470 (2007).
- [30] T. Bauer *et al.*: High growth rate homoepitaxial diamond deposition on off-axis substrates, *Diamond Related Mater.*, 14, 266-271 (2005).
- [31] D. Nakamura *et al.*: Ultrahigh-quality silicon carbide single crystals, *Nature*, 430, 1009-1012 (2004).
- [32] Y. Mokuno, A. Chayahara and H. Yamada: Synthesis of large single crystal diamond plates by high rate homoepitaxial growth using microwave plasma CVD and lift-off process, *Diamond Related Mater.*, 17, 415-418 (2008).

- [33] N.R. Parikh *et al.*: Single-crystal diamond plate liftoff achieved by ion implantation and subsequent annealing, *Appl. Phys. Lett.*, 61 (26), 3124-3126 (1992).
- [34] Y. Tzeng *et al.*: Free-standing single-crystalline chemically vapor deposited diamond films, *Appl. Phys. Lett.*, 63 (16), 2216-2218 (1993).
- [35] M. Marchywka *et al.*: Low energy ion implantation and electrochemical separation of diamond films, *Appl. Phys. Lett.*, 63 (25), 3521-3523 (1993).
- [36] T.P. Humphreys *et al.*: Surface preparation of single crystal C(001) substrates for homoepitaxial diamond growth, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 339, 51-56 (1994).
- [37] J.D. Hunn *et al.*: Fabrication of single-crystal diamond microcomponents, *Appl. Phys. Lett.*, 65 (24), 3072-3074 (1994).
- [38] J.D. Hunn *et al.*: The separation of thin single crystal films from bulk diamond by MeV implantation, *Nucl. Instr. and Meth.*, B 99, 602-605 (1995).
- [39] J.B. Posthill *et al.*: Method of fabricating a free-standing diamond single crystal using growth from the vapor phase, *J. Appl. Phys.*, 79 (5), 2722-2727 (1996).
- [40] R. Samlenski *et al.*: Liftoff-technique of single-crystal diamond plates: Study of the lattice damage of the implanted substrates and the crystalline quality of the homoepitaxial films by ion channelling, *Diamond Related Mater.*, 6, 149-152 (1997).
- [41] R. Locher *et al.*: Lift-off technique of homoepitaxial CVD diamond films by deep implantation and selective etching, *Diamond Related Mater.*, 6, 654-657 (1997).
- [42] R. Ramesham *et al.*: Synthetic single-crystal, homoepitaxially grown, CVD diamond capacitor, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 8, 69-72 (1997).
- [43] D.B. Rebuli *et al.*: Oxygen surface studies in ultra-thin diamond using a resonance reaction and transmission channelled Rutherford forward scattering, *Nucl. Instr. and Meth.*, B158, 701-705 (1999).
- [44] P.F. Lai *et al.*: Recovery of diamond after irradiation at high energy and annealing, *Diamond Related Mater.*, 10, 82-86 (2001).
- [45] P. Olivero *et al.*: Ion-beam-assisted lift-off technique for three-dimensional micromachining of freestanding single-crystal diamond, *Adv. Mater.*, 17, 2427-2430 (2005).
- [46] J.O. Stoner Jr. and S.A. Miller: Isotopic ^{13}C target foils 0.4–2.2 mg/cm² by pyrolysis of methane, with alternative methods of production, *Nucl. Instr. and Meth.*, A561, 24-37 (2006).
- [47] M.W. Geis *et al.*: Large-area mosaic diamond films approaching single-crystal quality, *Appl. Phys. Lett.*, 58 (22), 2485-2487 (1991).
- [48] M.W. Geis *et al.*: Mosaic diamond substrates approaching single-crystal quality using cube-shaped diamond seeds, *Diamond Related Mater.*, 4, 76-82(1994).
- [49] G. Janssen and L.J. Giling: "Mosaic" growth of diamond, *Diamond Related Mater.*, 4, 1025-1031 (1995).
- [50] T.J. Kistenmacher *et al.*: Assessing polar and azimuthal correlations for an oriented mosaic of (001) diamond crystallites on (001) silicon, *Diamond Related Mater.*, 4, 1289-1295 (1995).
- [51] J.B. Posthill *et al.*: Demonstration of a method to fabricate a large-area diamond single crystal, *Thin Solid Films*, 271, 39-49 (1995).
- [52] J.J. Schermer *et al.*: Mosaic growth of diamond: A study of homoepitaxial flame deposition and etching of {001}-oriented diamond layers, *J. Crystal Growth*, 165, 387-401 (1996).
- [53] C. F.-Dufour and A. Gicquel: Study for fabricating large area diamond single-crystal layers, *Thin Solid Films*, 308-309, 178-185 (1997).
- [54] C. F.-Dufour, A. Gicquel and R. Chiron: Growth of large-crystal diamond layers: analysis of the junctions between adjacent diamonds, *Diamond Related Mater.*, 7, 986-998 (1998).
- [55] H. Yamada, A. Chayahara, Y. Mokuno *et al.*: Fabrication of 1 inch mosaic crystal diamond wafers, *Appl. Phys. Express*, 3, 051301 (2010).
- [56] A. Plossl and G. Krauter: Wafer direct bonding: tailoring adhesion between brittle materials, *Mater. Sci. Eng.*, R25, 1-88 (1999).
- [57] A. Chayahara *et al.*: High-dose implantation of MeV carbon ion into silicon, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31, 139-140 (1992).
- [58] A. Chayahara *et al.*: Formation of crystalline SiC buried layer by high-dose implantaion of MeV carbon ions at high temperature, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32, L1286-L1288 (1993).
- [59] M. Marchywka *et al.*: Low energy ion implantation and electrochemical separation of diamond film, *Appl. Phys. Lett.*, 63, 3521-3523(1993).
- [60] H. Umezawa *et al.*: Characterization of Schottky barrier diodes on a 0.5-inch single-crystalline CVD diamond wafer, *Diamond Related Mater.*, 19, 208-212 (2010).
- [61] <http://www.d-edp.jp/>

執筆略歴

茶谷原 昭義 (ちややはら あきよし)

1988年広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了。工学博士。同年通商産業省工業技術院大阪工業技術試験所入所。イオンビーム応用技術の研究に従事。2001年から独立行政法人産業技術総合研究所純度制御材料開発研究ラボ。2003年ダイヤモンド研究センター主任研究員。2006年同センター単結晶基板開発チーム長。2010年からダイヤモンド研究ラボ副ラボ長。本論文では、統括および窒素添加効果などを担当した。



空野 由明 (もくの よしあき)

1990年東北大学大学院工学研究科博士前期2年の課程修了。同年、通商産業省工業技術院大阪工業技術試験所入所。光情報処理技術、イオンビーム応用技術の研究に従事。1996年博士(工学)(東北大学)。2001年独立行政法人産業技術総合研究所純度制御材料開発研究ラボ主任研究員。2003年より同ダイヤモンド研究センター単結晶基板開発チーム主任研究員を経て、2009年より経済産業省に出向中。本論文では、繰返し成長法、ダイレクトウェハ化を行った。



坪内 信輝 (つぼうち のぶてる)

1994年大阪大学大学院理学研究科博士前期課程物理学専攻修了。同年工業技術院大阪工業技術研究所入所。産業技術総合研究所純度制御材料開発研究ラボ、ダイヤモンド研究センターを経て、2010年よりダイヤモンド研究ラボ主任研究員。博士(工学)。本論文では、結晶評価を担当した。



山田 英明（やまだ ひであき）

2002年新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。博士（理学）。同年京都大学大学院エネルギー科学研究科産学連携研究員。2004年産業技術総合研究所ダイヤモンド研究センター産総研特別研究員。2006年同センター研究員。これまでに、核融合プラズマやプロセスプラズマの理論・シミュレーション研究および、単結晶ダイヤモンドの合成技術開発に携わってきた。本論文では、プラズマCVDのシミュレーションおよびモザイク結晶の作製に従事。



法で作製された現状のウェハは、品質的にはどのレベルにあると理解してよいでしょうか。もし、さらなる品質の向上が必要であるとすればキー技術にはどのようなことが望まれるでしょうか。

回答（茶谷原 昭義）

マイクロ波プラズマCVD法を用いて単結晶ダイヤモンドを合成する場合、我々は極微量窒素の添加を行っており、これにより異常核と呼ばれるマクロな欠陥を抑制しています。X線ロックインゲカーブの半値幅から超高压合成Ib型と同程度の結晶性が得られています。半導体用途では、従来Ib型の基板を使用して行われてきたデバイス開発研究用の代替としては問題ないレベルです。さらに研究を発展させるためには、転位密度の低減が必要で、エビ成長の前処理などが重要だと認識しております。現状の電解エッチングを用いたダイレクトウェハ化技術の欠点は、導電性基板の分離ができないことです。したがって、これを可能にする技術が切望されます。光学用途では、可視域に窒素に関連した吸収があるので問題です。窒素添加なしで成長すると透明にできますが、現状では10 μm/時以下の成長速度となります。または、窒素添加ダイヤモンドを超高压処理すると無色化できます。いずれにしても、コストが問題となってきます。

査読者との議論

議論1 開発目標、既往技術の比較などの明確化

コメント（五十嵐 一男：国立高等専門学校機構、一条 久夫：つくば研究支援センター）

本論文では、単結晶ダイヤモンド・ウェハの応用先について必ずしも明示されていませんが、例えば、パワーデバイス用基板に用いることをターゲットとしたものであれば、副題にあるように大型化に向けた目標とするサイズ、それに対して現在はこのレベルにあるのか、また、ダイレクトウェハ化技術の優位性と大型化への適用性などを付加することで、シナリオ性の高い論文になると考えます。

また、高速成長、低欠陥/結晶性、大型化という課題に応える技術開発が行われていますが、これらに対する既往技術・他技術との数値的比較をされると（どれ位高速になったかなど）、本研究の成果が理解し易くなるのではないのでしょうか。

回答（茶谷原 昭義）

開発目的は、次世代パワーデバイス用基板としての利用です。デバイス試作ラインに必要な2インチウェハの実現を目指しています。現状では、超高压合成により最大1 cm程度の単結晶基板が作製可能ですが、Ib型と呼ばれるもので、100～200万円程度と高価です。サイズと価格が利用を困難にしています。ダイレクトウェハ化技術は、多結晶では直径2インチ基板に適用できたので、少なくとも目標のサイズまでは可能と思われ、また1桁以上の低価格化が期待されます。

既往技術・他技術との数値的比較につきましては、結晶性を除いて、本文のそれぞれの対応箇所に比較が容易なように数値を含む文章を付加しました。

議論2 ウェハの品質

質問（五十嵐 一男）

単結晶ダイヤモンド・ウェハを何に適用するかによりますが、用途毎に品質（透明性、不純物濃度、結晶性・欠陥濃度など）が保証されなければならないと考えます。マイクロ波プラズマCVD

議論3 ウェハ化技術における選択・統合

コメント（一条 久夫）

マイクロ波プラズマCVD法を採用した理由が記述されていますので、ウェハ化に関しても、種々の技術の選択・統合について簡単に記されるとSynthesiology論文としての重要性が明確になるように思います。

回答（茶谷原 昭義）

ウェハ化において、新規に切断技術の革新がない限り、レーザー切断と「ダイレクトウェハ化」以外に選択の余地はありません。レーザー切断の場合、ダイヤモンドを1 cm切り進むためには幅1 mm程度が切り代として消滅します。高速化したといっても現状の成長速度50 μm/時ではコスト上問題となり、さらに1インチ以上を切断するとなると切り代は許されなくなります。したがって、現時点では「ダイレクトウェハ化」が現実的な製造方法として最も適していると考えています。このような課題があることを加工分野の方々にご承知いただき、適応できそうな切断技術の提案をしていただくと幸いです。

モザイクウェハについては、繰返し成長法による単結晶の大型化は引き続き実施する計画ですが、現状では大型化をさらに加速する良案がありません。これに対してモザイク法は横方向に結合させますので、大面積成長が可能なCVD法とマッチングした方法であり、早急な大型化が可能です。また、結晶片について低欠陥化されれば、それを「コピー」して結合すれば原理的にモザイクウェハも即座に高品質化できる利点があるため、モザイク化を直近の重点課題として取組みます。

日本全土の元素分布の調査とその活用

— 陸と海を統合した地球化学図の作成 —

今井 登

日本全土における海と陸の元素分布を調査し、日本の地球化学図を初めて作成した。これにより日本列島の海と陸のバックグラウンド値が明らかになり、陸から海への元素の連続的な流れを知ることができるようになった。地球化学図作成に用いた試料は、陸では河川堆積物3,024個、海では海底堆積物4,905個で、分析した元素はヒ素、水銀、カドミウムなどの有害元素を含む53元素である。この研究では、特定の地域で確立した方法を適用し、現実的な実施可能性を考慮した発想の転換により一挙に全国カバーへの展開を実現し、陸域から海域、さらに土壌へと対象を拡大している。地球化学図は、人間・産業活動による土壌や海底堆積物の汚染の評価にも使用される。また、結果は出版やweb公開により、社会的なインパクトを与えている。本稿では、日本の地球化学図を作成するために採った研究シナリオを述べ、次に試料採取から試料処理、化学分析・元素濃度測定、地図作成、データ公開に至る一連の研究プロセスを述べる。

キーワード: 地球化学図、元素分布、有害元素、土壌汚染、環境汚染

Investigation of the distribution of elements of the whole of Japan and their applications

– Geochemical map of land and sea of Japan –

Noboru Imai

A geochemical map of the whole of Japan has been drawn for the first time by surveying the distribution of elements in land and sea throughout Japan. This map revealed the natural background of the elements distribution and allows us to know the continuous flow of elements from land to sea. The samples used in this work are 3024 riverbed sediments and 4905 seabed sediments and 53 elements including toxic elements of As, Hg, Cd, etc. have been analyzed. In this research, a new survey method has been established for a certain district at first and then it has been applied to the whole of Japan with modification taking realistic operability into consideration, and the object has been extended from land, sea to soil. The geochemical map is also used for evaluating the pollution of soils and marine sediments resulting from human and industrial activities. The results have been made public through publication and website and have had various social impacts. In this paper, the research scenario adopted to compose the geochemical map of Japan is first described, then a series of research processes are described starting from material sampling and treatment chemical analysis, measurement of element concentration, composition of geochemical map to data release.

Keywords: Geochemical map, distribution of elements, toxic elements, environmental pollution

1 はじめに

私達の周りには、どのような元素がどのくらいの濃度で存在しているのだろうか。こんな基本的なことがこれまでなかなか分からなかった。これを視覚的に一目で分かるようにしたのが地球化学図である。たとえば今問題になっている土壌汚染や海洋汚染を議論する上で、ヒ素や水銀、カドミウム等の有害元素の分布が分かれば大きな手がかりとなる。ここでは地球化学図とは何か、著者らが日本の地球化学図をどのように計画して作成したかを述べ、さらにそれがどのように活用されているかを述べる。

2 地球化学図の目的と背景

2.1 地球化学図とは

地球化学図とは、地表(地殻の表層)における元素の濃

度分布図のことである。図1に元素の濃度分布がどのような要因で決まっているかを示した。最も重要なのは、その地域にどのような岩石や堆積物が分布しているかであり、これが自然のバックグラウンドである。その上に、人為的な影響である工業や農業等の産業活動や人々が活動する都市からの排出物が付加され、全体の元素濃度分布はこれらの合計となる。すなわち、汚染を考える場合には自然のバックグラウンドとの比較で考える必要がある。

2.2 地球化学図作成の目的

地球化学図作成の目的は大きく分けて二つ考えられる(図1)。一つ目は、日本の国土の地球化学基本情報を提供することである。地表における元素の分布と移動に関する情報は、岩石の成因や日本列島の成り立ち等地球科学のあらゆる議論の基盤となるデータである。どこにどのよ

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 つくば中央第7

Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: noboru.imai@aist.go.jp

Original manuscript received May 13, 2010, Revisions received September 4, 2010, Accepted September 8, 2010

うな元素が分布して、その地域や全体の平均値はどのくらいの濃度か等は地球科学の研究を行う上で基礎となる。例えば、日本列島がどのような元素からできているかという最も基本的なデータとしての平均化学組成や、地表のウラン、トリウム等の濃度分布から求められる自然放射線量等の推定がある。学術上の応用として、岐阜県神岡にあるニュートリノ測定のための液体シンチレーション測定装置（KamLAND）に対する自然バックグラウンド推定のために地球化学図が使用されている例がある。ここでは地球化学図で示された地表のウランとトリウムの濃度分布から自然バックグラウンドを推定している^[1]。

二つ目は環境問題で、産業廃棄物や工場廃液等による土壤汚染や海洋汚染を明らかにするための手がかりを与えることである。これらの汚染を評価するためには、有害元素の分布と汚染評価の基準となる自然バックグラウンド値を求めることが重要であるが、これまでは特定地域で限られた元素の調査が実施されたのみで、日本全域を対象にした詳細かつ総合的な調査はなされていなかった。この研究では、日本全土の海と陸における微量有害元素（ヒ素、ベリリウム、カドミウム、水銀、モリブデン、アンチモン等）をはじめとする 53 元素の分布とバックグラウンド値を明らかにし、元素分布の起源や環境中における元素の動きを解明するために地球化学図を作成した^{[2][3]}。これにより全国的な元素の分布が明らかになり、その起源と循環メカニズムを解明する研究や、環境中における人為汚染の評価、汚染の拡散防止や浄化対策立案に必要な基礎データを提供することができる。

3 地球化学図作成の流れ

図 2 に著者らが採った地球化学図作成のスキームを示し

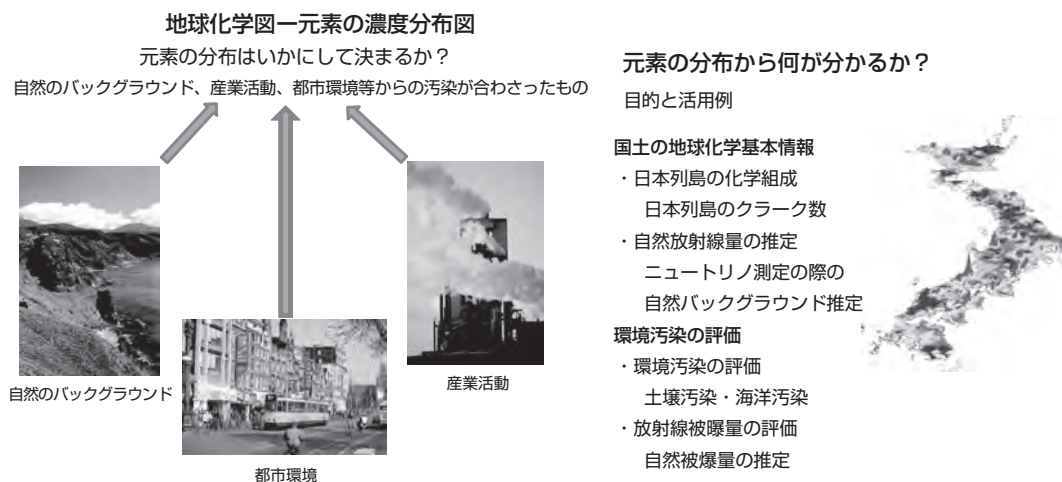


図 1 地球化学図における元素分布の要因と活用例

自然のバックグラウンド、産業活動、都市環境からの汚染の合計が元素分布となる。活用例としては国土の基本情報としての利用と環境汚染の評価がある。

た。地球化学図を作成するために試料採取、試料処理、化学分析・元素濃度測定、地理情報システムを用いた作図の 4 段階を踏んだ。まず、研究室で地形図や地質図、土壤図等をもとに試料採取点を定めた。その地点をもとに実際に現地です料採取を行った。試料は全国各地から採取した河川堆積物、海底堆積物、土壤等の試料である。試料は実験室に持ち帰って乾燥し、ふるい分け、磁性鉱物の分離、粉碎等の試料処理を行った。次に試料を酸で溶かし、元素濃度を ICP 分析や原子吸光分析等で測定した。このようにして求めた全国各地での元素濃度から地理情報システムを用いて地球化学図を作図した。

図には同時に地球化学図で用いる河川堆積物、海底堆積物について試料採取、採取した試料、試料処理、地球化学図を示した。河川堆積物については、試料採取は河川に行きスコップ等で採取するだけと比較的簡単であったが、試料処理では乾燥後のふるい分けや磁性鉱物を分離する作業が必要であった。一方、海底堆積物の採取には船が必要で、船上から採泥器を降ろして海底から試料を挟み込むようにして試料採取を行った。採取した試料は乾燥と粉碎を行った。分析と作図はすべての試料で基本的に同じように行った。

4 地球化学図作成における研究の展開

このような地球化学図を作成することは、地表での重金属の局所的な異常濃集帯を発見してその周辺に存在する鉱床を探査する目的で古くから行われていた。しかし、先進国では未発見の鉱床がほとんどなくなり、現在は別の観点、すなわち環境問題から地球化学図が見直されている。地球化学図を用いれば、有害元素がどのように分布しているかが分かるからである。このような観点で初めて全国的

な地球化学図を作成したのがイギリスの Imperial College の Webb らのグループであった^[4]。かれらはイギリス全土(約 151,000 km²) から約 50,000 個の試料を採取して全国をカバーする地球化学図を作成し地球化学アトラスと名付けた。現在では、ヨーロッパ全土に拡張されて地球化学図が作成されている^[5]。国内外の地球化学図については文献を参照されたい^{[6]~[9]}。

4.1 産総研の研究シナリオ

図3に日本全土の地球化学図の作成と公開のためのシナリオを示した。地球化学図を作成するうえでの構成要素としては、図に示したように元素分布、元素存在度、地殻表層、元素の種類、試料の種類と採取密度、陸域・海域、採取試料の代表性、試料の処理、試料の分析、公開の媒体、作図とデータの標準化、調査・分析体制、方法の標準化が考えられる。これらは地球化学図作成のための基本的な構成要素であるが、さらに地球化学図を支えるキーとなる五つの基本要素である基本特性、網羅性、信頼性、ユーザー利便性、運用性として統合することができる。これらの一つ一つが土台となって最終目標である「海と陸を統合した日本全土の地球化学図の作成と公開」が達成されることが考えられる。

産総研でのこれまでの地球化学図の作成の経緯を図4に示す。鉱床を目的とした地球化学探査は産総研でも以前から行っていたが、広域の地球化学図を系統的に作成したのは北関東地域が初めてであった。計画した目的は全国をカバーするための第一段階としての手法と方法論の構築であった。その後、重点地域として仙台・山形と日本海沿岸(北陸から秋田沖)の地球化学図を作成し、いくつかの経緯を経て全国展開を行い陸域の全国地球化学図を完成した。

次に陸域部分の延長としての海域の全国地球化学図を作成し、海陸の全国地球化学図が完成した。現在はさらなる展開として土壌の全国地球化学図を作成中である。

4.1.1 北関東の地球化学図の作成(最初の方法論の構築と展開への模索)

上記のように旧工業技術院地質調査所では1991年に水戸市からいわき市にいたる北関東地域で地球化学図を作成した^{[10][11]}。プロジェクトの最初の立ち上げの動機は、イギリス全土の地球化学図が発表され大きなインパクトを与えていたことである。イギリス全土が色づけされて元素の分布が一目で分かるというその分かり易さと強烈な印象は特筆されるもので、しかもその手法は鉱床探査を目的とした地球化学探査という、地質調査所の地球化学グループがこれまで行っていた手法そのものであった。北関東地域の地球化学図の作成は、当時の地球化学関連の複数のグループが協力して新たな国土の基本図に取り組むという点では初めての大型プロジェクトとして提案され、大きな期待を集めて開始された。

北関東の地球化学図では約 4,000 km² から河川堆積物の試料を約 3,850 個採取したが(試料の採取密度は約 1 km × 1 km に 1 個)、プロジェクトを始めるに当たって、この膨大な数の試料採取をいかに行うかが問題となった。結局、7-8 人の研究者と 20 人以上の補助者(学生)がチームを作り、5 年間にわたり夏休みの最初の 2 週間で試料採取を行うこととなった。このときはできるだけ試料処理を現地で完了することとし、川の水を用いて細粒の砂を現地でふるいをとおしてろ過し分離した。化学分析に当たっては、当時ようやく普及しはじめた ICP 発光分析法と、多元素を同時に分析できる中性子放射化分析法を自動化することに

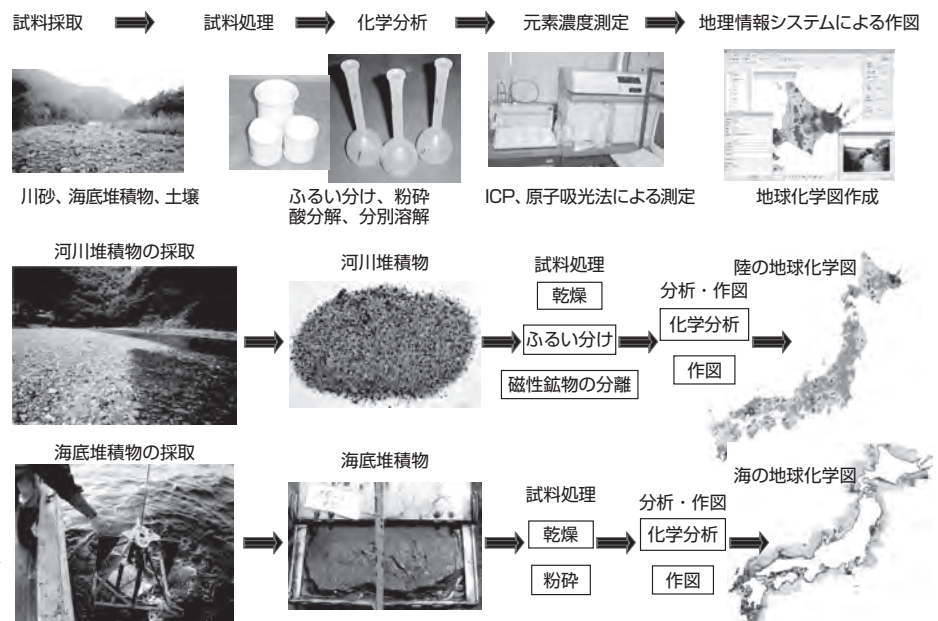


図2 地球化学図作成のスキーム
試料採取から地理情報システム(GIS)による地球化学図の作図までと、地球化学図で用いた河川堆積物、海底堆積物と試料処理、化学分析、地球化学図。

より行った。分析した元素はコバルト、クロム、銅、ニッケル、リン、鉛、ウラン、亜鉛等の26元素であった。この研究は広域的な地球化学図を日本で初めて本格的に作成した点で重要な意義があったが、試料採取から分析まで膨大な作業を伴い、役割分担や仕事内容を適切に検討することが重要であった。地球化学図については常にこのような点が問題となる傾向があるので注意が必要である。

4.1.2 全国の地球化学図へ（発想の転換による展開）

この後、研究の範囲を拡張して全国の地球化学図を作成しようとしたが、当時はそのままの形で全国に展開することを想定していたため、日本列島の広さが約38万km²に対して試料数は1kmメッシュとして38万個にもなり、実現には膨大な手間と費用がかかることが予想され、プロジェ

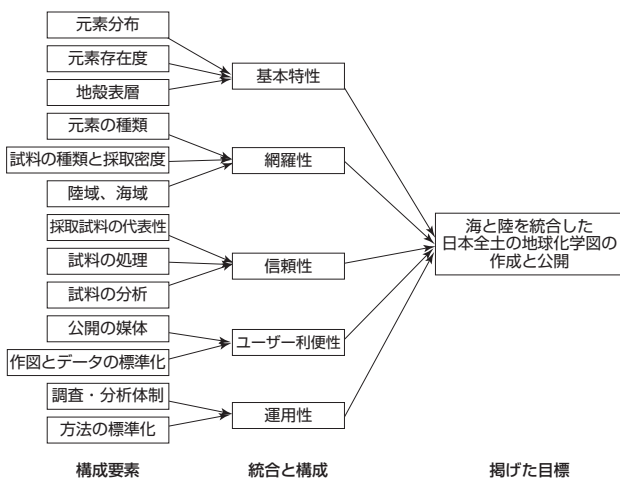


図3 日本全土の地球化学図の作成と公開のためのシナリオ
各構成要素と地球化学図を支えるキーとなる基本要素および最終目標。

クトを提案してもまじめに耳を傾けてくれる人はいなかった。この間、独自にごく狭い地域であるが仙台市^[12]および山形市周辺地域^[13]で地球化学図を作成する仕事を継続していた。また、海域としては能登半島から秋田沖にかけての沿岸海域地球化学図^[14]も作成した。

大きな転機は雑談の中からであった。ある時、地球化学図の全国展開は本当に無理なのかという話題になり、費用と人員から夢物語であるとあきらめていた自分に対して、発想を逆転させてみたらどうか、実現するためには現実的な観点から費用と人員にどのような条件が必要であるか考えてみたらどうかと提案があった。当時は1kmメッシュという試料採取密度にとらわれていたため、それよりメッシュが粗くなると意味がないと考えていたが、この点にこだわらなければ費用、人員、実施期間に目処が見えてくることがわかった。一般的なプロジェクトの期間として5年を設定し、10kmメッシュにすることで試料数を約3,000個に抑えることができる。これなら十分に実現可能である。すなわち第一段階として試料採取密度は粗くてもまず全国をカバーし、必要があればその後で特定の地域を別途試料採取密度を上げて地球化学図を作成すれば両方の要求を満たすことができるのではないかと考えた。こうして外部に予算要求しプロジェクトを開始したのが1999年であり、日本で初めて全国の地球化学図が完成したのは2004年のことであった^[2]。これにより10kmという粗いメッシュであっても日本列島のいくつかの特徴的な元素分布を初めて明らかにすることができ、当初の試料採取密度が粗すぎでは何も分からないのではないかと懸念は払拭された。全国

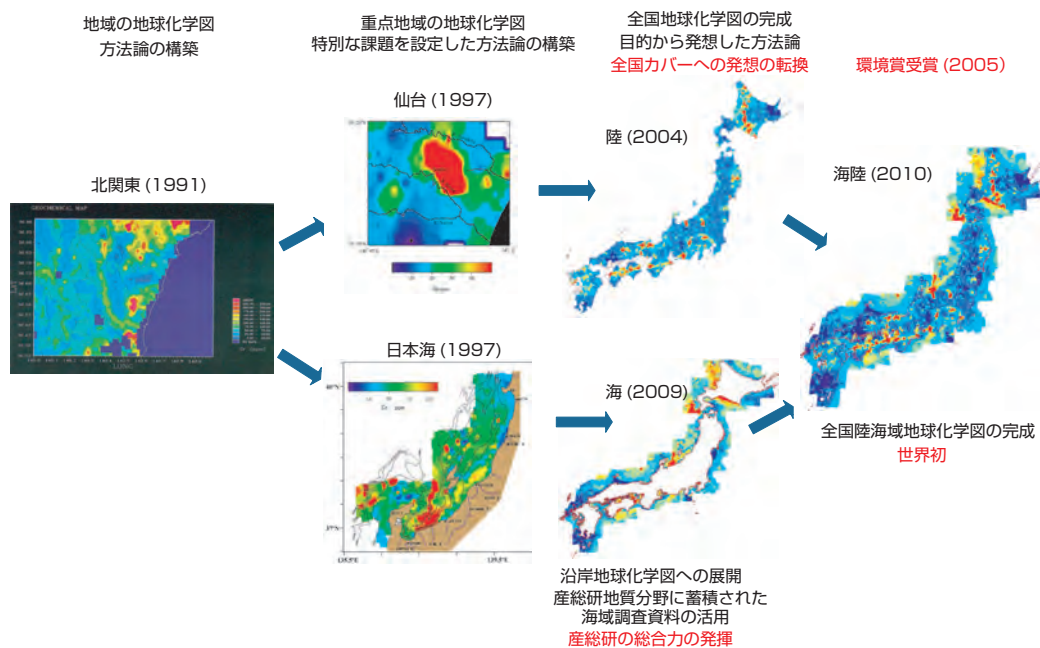


図4 地球化学図作成における研究の展開
産総研がこれまでに作成してきた北関東の地球化学図(1991)から日本の地球化学図(2004)、海と陸の地球化学図(2010)まで。

地球化学図は視覚的な分かり易さからさいわいにも社会から大きな反響があり、さまざまな方面で利用されると共に2005年に「環境賞」を受賞することができた^[15]。

4.1.3 沿岸海域の地球化学図（次の段階への進展）

その後の展開として、どのように研究を進展させるかについていくつかのアイデアがあったが、一つは陸の延長として、元素分布が海にどのように伸びているかという課題があった。海の地球化学図に関しては以前に北陸～秋田沖の海域で作成した経験があり、また地質調査所の長年の沿岸海域調査の研究ですでにかなりの海域で海底堆積物試料が採取済みであり、試料が保管されていたことが契機となった。地質に関する総合研究機関として、これらの過去の研究蓄積を最大限に利用することで全国の沿岸海域で比較的容易に地球化学図が作成可能であると思われた。日本全国についてその時点で入手できていなかったいくつかの海域（面積で全体の約3割）で新たに試料採取を行うことで、全国の沿岸海域の海底堆積物をそろえることができた。新旧あわせた試料総数は4,905個にのぼり、これを用いることにより2010年に「海と陸の地球化学図」を完成することができた^[3]。海と陸の両方を統合した全国地球化学図の作成は例がなく世界初であった。これにより、陸と海の元素分布がつながり、陸から海へ元素が移動していく過程を理解することが可能となった。その後現在は、さらなる研究の展開として外部予算を獲得し、全国から約3,000個の土壌試料を採取して全国の土壌地球化学図を作成中である。

5 地球化学図を作成するための要素技術（目的達成のための要素技術の開発）

地球化学図を作成するための要素技術としては試料採取、化学分析、作図がある。目的を達成するために、実際に開発した手法の留意点について、従来法とどのような違いに着目して地球化学図を作成していったかについて以下に述べる。実際の詳細な手順は過去の文献を参照されたい^{[2][3]}。重要なのは膨大な数の試料に対する取り扱いの自動化と、すべての試料を単一の手法で処理する標準化であると考えた。これまではさまざまな地域で異なった手法により地球化学図が作成されたため、それらをすぐに比較することは困難であったが、標準化した手法を採用することにより全国のデータを均質かつ統一的に解析できるようになった。

5.1 試料採取

5.1.1 北関東の地球化学図における試料採取^[11]

広域の地球化学図を作成する上で最も重要なのは、膨大な数の試料をどのようにして採取するかである。この研

究で使用した河川堆積物を採取するにあたって初期の頃に用いた方法は、試料採取後の処理の時間をいかに少なくするかであった。このため、できるだけ現地で必要な作業を終わらせてしまうように努力した。前述したように具体的には、研究者一人と補助者（学生）2～3人が1チームとなり、1/2.5万か1/5万地形図を見ながら車で試料採取点に移動する。1 km メッシュで試料採取を行うためにはかなり小さな川や沢まで移動する必要があり、車で入れない場合は歩くしかない。試料採取点は支流の付け根（その流域の一番下流の部分）で行うのが原則で、あらかじめ研究室で採取地点を定めておき、そこにいかに早く到着するかが重要である。

現地に着いた後は、川砂の中から80メッシュ（約0.17 mm）より細かい河川堆積物の成分をふるい分けの必要がある。できるだけ細粒の川砂を80メッシュのふるいに入れて、川の水をかけながらふるいを通った砂や泥をろ紙で濾し分けて80メッシュ以下の成分を分離する。しかし、試料によってはろ紙が目詰まりを起こしてろ過にとっても長い時間がかかったり、細粒の砂がなかなかなくて探すのに手間取ったりした。必要量がとれないと何度もろ過してますます時間がかかる。結局、1日に採取できるのは数個程度であることが多かった。試料は宿に戻って広げて乾かすと一晩でかなり乾燥した。こうして2週間の出張で一人60～100個程度、全体で600～800個の試料を採取することができた。

5.1.2 全国の地球化学図の試料採取^[2]

全国の地球化学図を作成するに当たって考えたことは、北関東で問題になった膨大な作業に対する人的負担をいかに減らすかであった。すべてを外注してしまえば手間は減るが費用も莫大になり、研究プロジェクトとして現実的ではない。費用を抑えるにはできるだけ自前のマンパワーで行うしかないが、それには最も手間のかかる試料採取、採取現場では試料処理作業は一切行わず、採取作業のみにとどめたことが重要であった。そうすれば仮に外注したときも費用も安く済むからである。したがって、北関東の時のような現地でのふるい分けと乾燥は行わず、できるだけ細粒の砂を探して約2 kgと比較的多量の試料をスコップや採泥器で採取してくるだけにとどめた。また、試料採取地点はできるだけ大きな河川と大きな道路を選び、川と道路が交差する到達しやすい地点に設定した。しかし、試料採取密度が粗いので試料採取点の間の移動距離が長く時間がかかり、特に山間部では谷が深く地図上では容易に試料採取できるように見えても、実際の川は断崖絶壁のはるか下方で、川に下りる道を探すのに長時間を費やしたり（この場合でも釣り人等のために川に下りる小さな道が意外とあったりす

る)、場合によっては不可能な場合もあった。結局、試料総数 3,024 個のうち約半数は自前で採取し、それ以外は外注して採取することとした。この場合は実験室で乾燥とふるい分けの作業が別途必要であるが、多数の試料を並行して一挙に行うことで比較的効率よく行うことができた。

5.1.3 海底堆積物の採取^[3]

海の地球化学図の作成についても試料採取が最大の問題であった。海底堆積物の採取は船を使用するため陸上の試料採取と違って個人で行うことは困難である。特に、水深数百 m を超えるような試料採取は、大型の専用船でないと事実上不可能であり多大な費用もかかる。この研究では、過去に地質調査所が日本周辺海域の調査で 2,000 トン級以上の専用海洋調査船を用いて約 3,000 m の水深まで採取した海底堆積物試料をそのまま使用することができたのは経費の節減にとって大きかった。これとは別にこの研究で、試料のなかった海域で新たに採取した場所の水深はせいぜい 100 m ~ 200 m 以下であり、個別の研究予算ではこの程度が限度である。しかし、水深 200 m 以下の海域は意外と広く、特に大陸棚の発達した西日本では広い海域を問題なくカバーすることができた。試料採取と試料処理は基本的には陸域と同じ方法によった。海底堆積物試料は、調査船から降ろしたグラブ採泥器(スミスマッキンタイヤー型採泥器)を用いて採取した。試料総数は 4,905 個である。試料を採取して引き上げた様子を図 2 に示した。

5.2 化学分析

この研究では大量の試料を分析する必要があるため、試料処理と分析の方法はできるだけ標準化すると共に自動化するように努力した。分析法は北関東の地球化学図では ICP 発光分析法と放射化分析法を用いて 26 元素を、全国の地球化学図では ICP 質量分析法と原子吸光法を用いて 53 元素を測定した。いずれもオートサンプラーや自動測定システムを最大限に活用した。試料処理を簡単化するために、河川堆積物は 80 メッシュ以下の成分を粉碎することなくそのまま分析した。ほとんどの場合は粉碎したときと分析値は同じであった。また、河川堆積物については磁石を用いて砂鉄等の磁性鉱物を除いて分析した。河川の中では水の分別作用により重鉱物等が濃集する場合があります、特に砂鉄の多い地域では砂鉄マップのようになって不自然な地球化学図になってしまうことを避けるためである。分解法は硝酸・過塩素酸・フッ化水素酸の混合酸による分解と、0.1 N の塩酸抽出による分析を併用した。

5.3 作図法

地理的に離散的な地点から採取した試料から、連続的な地球化学図を作成するにはデータの無い部分を補完する

必要がある。河川堆積物についてはデータをそのまま補完するのではなく、各試料採取点ごとに流域解析を行って上流となる流域を定めて、その地域を同一濃度とする方法をとった。計算を簡単にするため、このように流域で表した濃度データにメッシュをかけて、各メッシュに流域の元素濃度を割り当て、そのメッシュデータに対して補完を行って作図した。海底堆積物に関しては、海水や海流による試料の移動も考えられるが、取り扱いが複雑になるのでここでは考慮せず、そのまま濃度データを補完して地球化学図を作成した。

6 全国の地球化学図とその解釈(自然と人間活動における元素挙動の理解)

この研究では海と陸の地球化学図を 53 元素について作成したが、元素毎に自然界や人間活動による挙動が異なり、それぞれの状況に応じた解釈が必要となる。ここでは特徴的なクロム、水銀を例に挙げて述べることにする。ほかの元素およびそれぞれの地域での元素分布の特徴の詳細については個別の論文を参照されたい^{[16]-[20]}。

6.1 クロムの地球化学図

図 5-1 にクロムの地球化学図を示した。この図でまず目につくのは四国と北海道に 2 本の赤い線(高濃度地域)が見られることである。すなわち四国・近畿を東西に横断して東海・関東に至る中央構造線や、北海道の中央部を南北に縦断する構造線に沿って 200 ppm 以上の顕著な高濃度地域が見られる。これは、この地域に分布するクロムやニッケルを多量に含有する緑色岩類や、その周辺の超塩基性岩に起因すると考えられる。海域でも赤色の濃度の高い部分が北陸沖や北海道南部沿岸海域に見られる。もっとも顕著なのは北陸地方のフォッサマグナの北端である糸魚川市姫川周辺で、陸域のクロムの高濃度域が海域の延長方向に伸びている。これは陸の姫川流域のクロムの高濃度域と海の高濃度域が連続するもので、姫川からクロムを高濃度に含有する蛇紋岩の碎屑物が海域の富山深海長谷に沿って流れ出ていることを示している。図にはこの地域の海底地形も示したが、姫川沖に海底の谷があり、碎屑物が姫川からこの谷に沿って海に流れ出ている様子が分かる。

6.2 水銀の地球化学図

図 5-2 に水銀の地球化学図を示した。陸上では北海道のイトムカや紀伊半島の大和鉱山等の大規模な水銀鉱床の存在する地域で顕著な高濃度を示すほか、大都市周辺でも濃度が高い場合が多い。海については、東京湾、伊勢湾、大阪湾等で濃度が高く、人口密集地からの人為的影響が考えられる。図には九州、北陸、近畿地方の水銀

の地球化学図を示した。九州西部の八代海や新潟沖で高濃度域が見られる。これらの高濃度域には過去の水銀汚染の影響が残留している可能性がある。また、佐渡北部周辺海域の水銀の高濃度は、過去の佐渡金山の採掘に伴う影響が可能性として考えられる。近畿地方の伊勢湾、大阪湾の水銀の高濃度は都市からの人為的な影響のほか、紀伊半島における大規模な水銀鉱床である大和水銀鉱床の影響も関与しているものと考えられる。

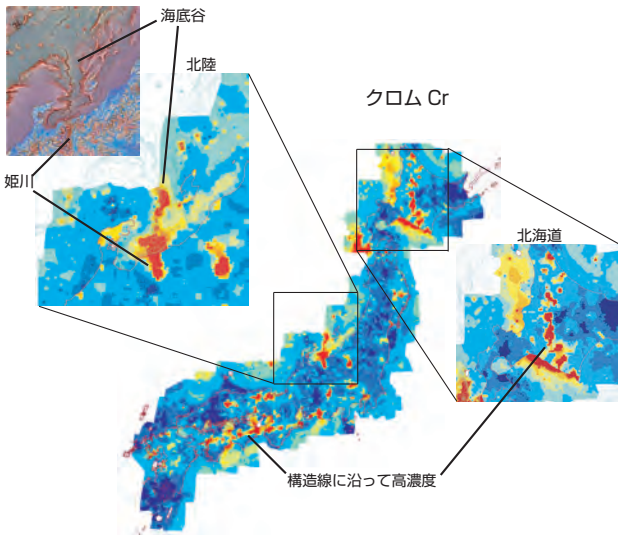


図 5-1 クロム Cr の全国地球化学図と北陸および北海道の地球化学図の拡大図
中央構造線と北海道の構造線に沿ってクロム濃度の高い赤い帯が見える。フォッサマグナ北端の姫川では陸から海への高濃度域の連続性が認められる。

7 データの公開 (公共財としての社会への情報提供)

これまでに蓄積された地球化学図の全データを、ウェブ上で容易に参照できる形で公表するためネットワーク上にホームページを作成した。図 6 に地球化学図のホームページを示した。ここでは全国の陸と海の地球化学図が参照できるほか、地域ごとに拡大した地球化学図、および全 3,024 個の河川堆積物および 4,905 個の海底堆積物のそれぞれの元素濃度等の詳細情報がネットワーク上で簡単に参

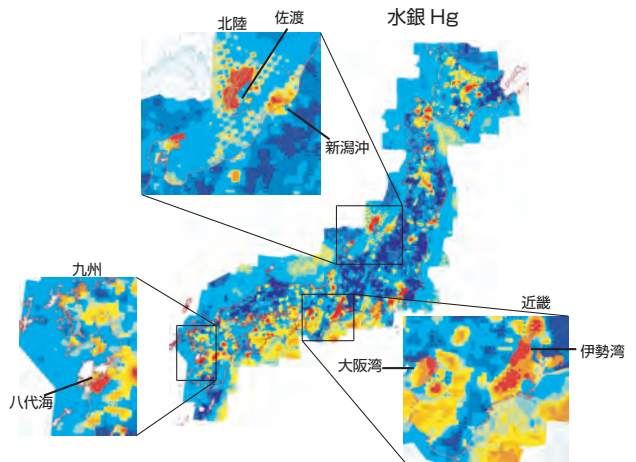


図 5-2 水銀 Hg の全国地球化学図と九州、北陸、近畿地方の地球化学図
八代海、新潟沖は過去の汚染の影響が、佐渡では鉱山の影響が、伊勢湾、大阪湾では鉱床と都市活動の影響が高濃度の可能性として考えられる。

図 5 地球化学図の解釈による自然と人間活動における元素挙動の理解



図 6 地球化学図の情報公開
地球化学図のホームページ (<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/geochemmap/index.htm>) と河川堆積物、海底堆積物の詳細情報。河川堆積物および海底堆積物の採取地と試料の写真と緯度経度、元素濃度等が参照できる。

照できる。また、河川堆積物はすべての試料で採取地と試料の写真を、海底堆積物試料は一部の試料で採取時の試料の写真を見ることができる。特に、河川堆積物はクリックすると大きく拡大して見ることができ、その地域に分布する大まかな岩石の種類や堆積物を推定することができる。また、このほかホームページ上から全試料の元素濃度、緯度経度、全国・地方地球化学図データ（画像 /GIS シェープファイル）および関連情報をダウンロードすることができる。

8 地球化学図の活用（国土の基本情報の多様な活用）

地球化学図は日本の海と陸の地殻表層の元素分布を表し、そのデータは国土の地球化学基本情報として重要である。また、河川堆積物は全国津々浦々からまんべんなく採取され、個々の河川堆積物はそれぞれの地域の流域を代表しているため、すべての試料の平均値は日本全体の平均化学組成とも考えられる。日本に分布する代表的な岩石166試料の分布割合とその組成から計算して求めた日本の平均化学組成（日本列島のクラーク数）^[21] が求められているが、これを理論値とすると、地球化学図における3,024個の河川堆積物の平均値は実際に測定した実測値とも言える。実際に両者はよく一致することが分かっている。

また、放射能レベルの評価にも利用することができる。自然放射線量は、空からの宇宙線と周囲の岩石や堆積物からの自然放射線の合計で決まるが、後者は岩石や堆積物中のカリウム、ウラン、トリウム濃度が大きく関与する。すなわち、これらの元素の濃度を地球化学図から求めて自然放射線量の概略値を算出することができ、例えばカリウム、ウラン、トリウムを多く含有する花崗岩が広く分布する西日本は自然放射線量が大きいことがわかっている。また、各地の原子力施設からの放射能の汚染レベルについても、これらのバックグラウンドと比較することにより評価できると考えられる。

一方、社会的な利用としては、地球化学図は最近問題になっている土壤汚染について各地における基盤的なデータとして利用されている。自治体の関連施設や会社・工場の所有地における元素濃度を簡単に知ることができ、詳細な汚染調査の事前調査として有効である。2.1節で述べたように、土壤汚染を考えるときに環境基準と共に自然のバックグラウンドレベルとの比較が重要である。もともと周辺にある鉱床や温泉等で自然のバックグラウンドレベルが高い地域があり、工場等による人為的な汚染と区別する必要がある。地球化学図は基本的には自然のバックグラウンドを表すので、これと比較することにより周辺の環境汚染を評価することができる。このようなデータは国・自治体における汚染の拡散防止や浄化対策立案の基盤資料として利用

することができ、産業立地や工場周辺のリスク評価に利用することにより、立地評価費の軽減や土壤汚染対策経費節減に役立つと考えられる。

以上のように地球化学図のデータは、基本的にすべて一般に公開されているため、利用する側の工夫によってさまざまな利用法があると考えられ、こちらでは考えつかないような利用法が時に提案される。例えば科学警察研究所の捜査における土壤試料の全国のデータベースとして、産地推定に使用する可能性について現在共同研究を行っているところである。いろいろな応用の可能性についても、今後大いに地球化学図のデータが利用されることを望みたい。

現在私達は全国から約3,000個の土壤試料を採取して土壤地球化学図を作成している。この中で地殻における元素の分布と移動・拡散過程の解明に関する研究成果を応用して、有害元素についての全国規模での陸域～河川域～海域を一体化した環境汚染評価システムを開発する予定である。今後、さまざまなデータを統合化して有害元素による汚染に関する考察を行っていきたいと考えている。

参考文献

- [1] S.Enomoto, E.Ohtani, K.Inoue and A.Suzuki: Neutrino geophysics with KamLAND and future prospects, *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 147-159 (2007).
- [2] 今井 登, 寺島 滋, 太田充恒, 御子柴(氏家)真澄, 岡井貴司, 立花好子, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井 豊, 上岡 晃, 谷口政碩: *日本の地球化学図*, 210, 地質調査総合センター (2004).
- [3] 今井 登, 寺島 滋, 太田充恒, 御子柴(氏家)真澄, 岡井貴司, 立花好子, 池原 研, 片山 肇, 野田 篤, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井 豊, 上岡 晃: *海と陸の地球化学図*, 207, 地質調査総合センター (2010).
- [4] J.S.Webb, I.Thornton, M.Thompson, R.J.Howarth and P.L.Lowenstein: The Wolfson geochemical atlas of England and Wales, *Imperial College of Science and Technology*, 69 (1978).
- [5] R. Salminen, W. De Vos and T. Tarvainen: *Geochemical Atlas of Europe*, Part 1 and 2, EuroGeoSurveys (<http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas/>) (2005,2006).
- [6] K.Yamamoto, T.Tanaka, M.Minami, K.Mimura, Y.Asahara, H.Yoshida, S.Yogo, M.Takeuchi and M. Inayoshi: Geochemical mapping in Aichi prefecture, Japan: Its significance as a useful dataset for geological mapping, *Applied Geochemistry*, 22, 306-319 (2007).
- [7] 青木かおり, 新藤智子, 楠野葉瑠香, 福岡孝昭: 河床堆積物の化学分析に基づく地球化学図作成の今後の展望－地球化学図作成のための準備と分析方法を中心に－, *地球環境研究*, 11, 227-238 (2009).
- [8] 菅 和哉, 黒沢邦彦: 北海道中央部における土壌元素の地球化学図, *北海道立地下資源調査所調査研究報告*, 26, 39 (1996).
- [9] T.Seki, K.Yamaguchi, Y.Noumi, M.Asada, T.Matsuda and J.Takada: Geochemical characteristics of sediments from the Takahasi river at Okayama prefecture. *KURRI Progress Report*, 1999, 111 (2000) (岡山県の地球化学図 <http://www.big.ous.ac.jp/~seki/kagakuzu/a.htm>).
- [10] 伊藤司郎, 柴田 賢, 田中 剛, 宇都浩三, 安藤 厚, 寺島 滋,

今井 登, 金井 豊, 坂本 亨: 地球化学図による元素のバックグラウンドと人為汚染の評価技術に関する研究, 昭和60年度国立機関公害防止等試験研究成果報告書, 82-1~82-17, 環境庁 (1985).

- [11] 伊藤司郎, 上岡 晃, 田中 剛, 富樫茂子, 今井 登, 金井 豊, 寺島 滋, 宇都浩三, 岡井貴司, 氏家真澄, 柴田 賢, 神谷雅晴, 佐藤興平, 坂本 亨, 安藤 厚: 地球化学アトラス-北関東-, 35, 地質調査所 (1991).
- [12] 今井 登, 岡井貴司, 遠藤秀典, 田口雄作, 石井武政, 上岡 晃: 仙台市周辺の地球化学図と環境評価, 地質ニュース, 513, 26-30 (1997).
- [13] 今井 登, 岡井貴司, 遠藤秀典, 石井武政, 田口雄作, 上岡 晃: 山形市周辺地域の地球化学図, 環境地質アトラス, 37-40, 地質調査所 (2000).
- [14] 今井 登, 寺島 滋, 片山 肇, 中島 健, 池原 研, 谷口政碩: 日本海東部沿岸域海底表層堆積物中の重金属等の地球化学的挙動, 地質調査所月報, 48, 511-529 (1997).
- [15] 今井 登, 寺島 滋, 太田充恒, 御子柴真澄, 立花好子: 環境賞, 環境評価の基盤となる地球化学図の作成, 日立環境財団 (2005).
- [16] M.Ujiiie-Mikoshiha, N.Imai, S.Terashima, Y.Tachibana and T.Okai: Geochemical mapping in northern Honshu, Japan, *Applied Geochemistry*, 21-3, 492-514 (2006).
- [17] A.Ohta, N.Imai, S.Terashima, Y.Tachibana, K.Ikehara and T.Nakajima: Geochemical mapping in Hokuriku, Japan: Influence of surface geology, mineral occurrences and mass movement from terrestrial to marine environments, *Applied Geochemistry*, 19, 1453-1469 (2004).
- [18] A.Ohta, N.Imai, S.Terashima and Y.Tachibana: Application of multielement statistical analysis for regional geochemical mapping in Central Japan, *Applied Geochemistry*, 20, 1017-1037 (2005).
- [19] A.Ohta, N.Imai, S.Terashima and Y.Tachibana: Influence of surface geology and mineral deposit to spatial distributions of elemental concentrations in stream sediments in Hokkaido, Japan, *J. Geochemical Exploration*, 86, 86-103 (2005).
- [20] 寺島 滋, 今井 登, 立花好子, 岡井貴司, 御子柴(氏家)真澄, 太田充恒, 久保田蘭: 関東地域の土壌, 河川堆積物, 東京湾堆積物の化学組成とバックグラウンド評価, 地質調査研究報告, 58, 69-91 (2007).
- [21] S.Togashi, N.Imai, Y.Okuyama-Kusunose, T.Tanaka, T.Okai, T.Koma and Y.Murata: Younger upper crustal chemical composition of the orogenic Japan Arc, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 1, 1049, doi:10.1029/2000GC000083 (2000).

執筆者略歴

今井 登 (いまい のぼる)

1980年東京大学理学系研究科化学専門課程博士課程修了。1981年地質調査所技術部化学課入所、現在産総研地質情報研究部門地球化学研究グループ。地球化学、分析化学が専門。岩石の分析、ESR年代測定、地球化学図、産総研岩石標準試料の発行を行ってきた。現在は、地球化学図を全国の陸域、海域、土壌について作成するプロジェクトを進めている。地球化学図で2005年環境賞、認証標準物質で2010年文部科学大臣表彰科学技術賞（開発部門）を受賞。



査読者との議論

議論1 全般的なコメント

コメント (富樫 茂子: 産業技術総合研究所評価部)

本論文は、国土の基本的な地質情報の一つとして、日本全国をカバーする陸域と沿岸域の地球化学図を完成するまでの方法論という点で意義のある論文です。地域情報から作成を開始した地球化学図を、発想を転換することで外部予算を獲得して全国一気に展開が可能とし、さらに多様に利用されることにより環境賞を受賞している点が特筆でき、シンセシオロジー論文としての確度です。

なお、読者に、まず地球化学図とは何で、どのように使われるかをわかりやすい図で示したほうが良いと思います。いくつかの具体例のキーワードを後章の活用の部分からも加えて記載してください。さらに、地球化学図作成の経緯についてもシンセシオロジーとしてより一般化した方法論の記述が望まれます。

当初の原稿は「解説」的でしたが、上記の一次コメント等に対応し、研究の進め方や社会貢献の方法論の一般化を意識した再構成により改善されました。

回答 (今井 登)

ご指摘にしたがい、論旨の展開を明確にするために文章の構成を修正しました。「2.1 地球化学図とは」で地球化学図の説明を行い、「3 地球化学図作成の流れ」で地球化学図作成のスキームについて述べ、全体としての構成を整えました。

議論2 研究シナリオの類似性

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

この研究の目標は海と陸とを統合した日本全土の地球化学図の作成であり、その成果がオリジナルな優れたものであると同時に、統合的、構成的な手法を含んだ第2種基礎研究および製品化研究の方法論としても優れたものと思います。

地球化学図を作成することは、大規模なデータベースを作ることと等価ではないかと考えます。査読者は物性データベースの構築に携わった経験がありますが、シナリオの設定部分がよく似ているように思いました。

データベースの構成要素は、データの基本特性、データの網羅性と信頼性、ユーザーがデータベースを使うときの利便性、データベースを構築したり利用に供したりするときの運用性等等です。データベースに関するこれらの特性は、地球化学図にも共通すると思うのですがいかがでしょうか。もし共通する部分があるならば、類似したシナリオの図を地球化学図でも描いていただくと、読者にとって分かりやすいと思います。

回答 (今井 登)

たいへん丁寧に原稿を見ていただき有り難うございました。また、具体的なシナリオの図を提案していただき有り難うございます。図は全体を見通すうえでたいへん分かりやすく、良くできていると思われますのでこれをもとにいくつかの用語を修正して全体シナリオの図3としてみました。専門外の方の視点は参考になるものが多くたいへん勉強になりました。有り難うございました。

議論3 研究の初期段階での動機

質問 (小野 晃)

この論文では、日本における地球化学図の研究の源流は、1991年の北関東地域のものにまで遡るとしています。今回、日本全土の地球化学図が出版されるまでに約20年を要していますが、北関東の地球化学図で方法論を構築できたことが今日の成功につながる大きな要因だったと思います。

その意味では、北関東の地球化学図の作成を決断したことが、たいへん重要なポイントだったように思います。当時、その決断

した動機はどのようなものだったのでしょうか。先行するイギリスの地球化学図の研究から刺激を受けて始めたのでしょうか。あるいは独自の学術的な興味から始めたのでしょうか。

回答（今井 登）

ご指摘のように北関東の地球化学図を最初にアイデアを出して立ち上げたことがたいへん重要なポイントであったと思います。当時の地球化学図プロジェクトの立ち上げの目的はいくつかあったと思います。1991年3月に北関東地域の地球化学図が完成いたしました。そのプロジェクトが5年計画で1985年4月1日が開始です。予算（公害特研）が通ったのがその前年ですから、準備は1984年頃からは行っていたこととなります。当時の私はまだ新人であり、立ち上げの経緯のすべてを知っているわけではありませんが、次のようなことであったと思います。

立ち上げの動機の第一は、ご指摘のようにイギリス全土の地球化学図が発表され大きなインパクトを与えていたことです。イギリス全土が色付けされて元素の分布が一目で分かるというその分かり易さと強烈な印象は特筆されることです。しかもその手法が鉱床探査を目的とした地球化学探査という、地質調査所の地球化学グループがこれまで行っていた手法そのものであったことで、私達にもすぐにでもできるように思われました。

当時の地球化学図作成に係わったグループは高いポテンシャルを持って地球化学の基礎研究や化学分析を行っていましたが、地質調査所の「地質図作り」といった主要プロジェクトとはある意味遠いところで仕事をしておりました。地球化学図は、そのような地球化学関連の複数のグループがまとまって新たな国土の基本図作りを一緒に行うことのできる一つの大型プロジェクトとして考え出されたもので、地球化学関連グループが初めて行うプロジェクトとして大きな期待を集めました。もちろん広域的な元素の分布と移動過程を知るという独自の学術的な興味もありましたが、当時の大型分析設備である放射化分析装置やICP発光分析装置等の導入による地球化学研究の促進も大きな目的でした。曲折もありましたが、だれもが認めるようになったのは全国図が完成して高い評価を得てからだだと思います。

議論4 野外調査と室内実験の方法論の類似性

コメント（小野 晃）

データの量が増大するという点からみますと、十分密なメッシュで試料を採取すること、広域をカバーすることは競合する要素で、どちらを優先するか、あるいはそれらをどう調和させるかは難しい問題だったと思います。この研究では粗い調査点でも広域であれば科学的に意味のあるデータが取得できるという仮説を最初に設定したことが重要な点であったように思います（それは後から見事に検証されることになりました）。

野外調査ではありませんが、実験室内での研究、たとえば物性研究では試料の温度を変えて物性を測定する場合には、まず粗い温度間隔で必要とする温度の全範囲をカバーして全体の傾向をいち早く把握し、その後さらに興味ある範囲を選んでより細かい温度間隔で測定していくという手法をとります。分野は違っても、まず全体像を把握し、それから詳細な部分に進んでいくという手法が共に有効であることは共通の手法であるように思います。野外調査は室内実験のように測定を容易に繰り返せるものではないので、そのような手法がより重要と思えました。

回答（今井 登）

ご指摘のように全体像を把握し、それから詳細な部分に進んでいくという手法がたいへん重要であると思います。その点になぜもっと早く気がつかなかったかについては、当時は外国を含めた類似研究がほとんど1 km メッシュかその程度であったことからメッシュを大きく広げて全国をカバーするという発想はありませんでした。山あり谷ありの野外の多様性のある地形と地質を前に

すると、10 km 四方に1点というのはとてつもなく少なく、本当に意味のあるデータが得られるのか疑問のように思えました。結果としてうまくいって良かったと思います。

全国をカバーするためには、各県の自治体や大学に呼びかけてそれぞれの地域で地球化学図を作ってもらってつなぎ合わせるといのが当時の考えでした。しかし、なかなかうまくいかず、最初のプロジェクトの提案者が異動した大学と、関心を持ったいくつかの大学がそれぞれの地域で現在も地球化学図の作成を行っています。

議論5 採取試料の代表性

質問（小野 晃）

この研究では川の支流の付け根部分の堆積物が、その流域の地殻表層を代表しているという前提をとっているように思います。たいへんうまい方法と思いましたが、そのような河川堆積物がその流域を十分に代表していることはどのようにして確認されているのでしょうか。また、これだけでなく何かほかの条件が必要か等、元素の分析結果の領域代表性に関してお考えがあれば教えてください。

また論文中で現在進行中の研究として土壌の元素分布にも言及していますが、地殻表層と土壌とはどのように定義が違うのでしょうか。川の支流の付け根部分の堆積物には土壌も混入しているのではないかと素人的には想像しますが、土壌の混入は無視するほどで、地殻表層を表していると言えるのでしょうか。

なお本論文の主題ではありませんが、土壌の元素分布を調査するときに、どのような場所から土壌の試料を採取すれば、ある領域の土壌の元素を代表していると言えるのでしょうか。

回答（今井 登）

付け根にある河川堆積物がその流域を代表していることはモデル的にいくつかの地域で確認いたしました。以下に仙台市周辺の亜鉛とリンの濃度を例にとって示します。図 a で 39 番の試料は図の上部の広瀬川の流域の付け根にあり、広瀬川全体の代表点と考えられます。図 b の散布図で見ると、流域にある各点の平均値と 39 番の濃度は亜鉛とリンのいずれに対してもおよそ平均値にあることが分かります。したがって、この場合には広瀬川流域全体は 39 番の試料でよく代表されていることが分かります。

代表性を高めるために注意していることは、現場の試料採取で、より平均化されていると考えられるなるべく細粒の試料を採取すること、工場排水等人為的な影響の可能性のある地点を避けること、重鉱物（砂鉄等）の濃集等に注意して、そのような試料を避けるように注意すること等です。

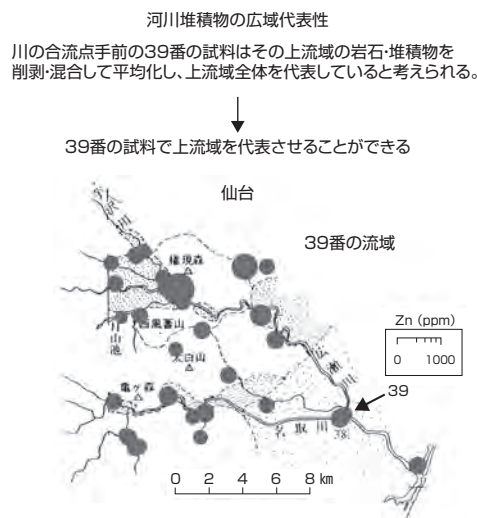


図 a 仙台市周辺の亜鉛とリンの濃度モデル例

地殻表層と土壌の定義の違いですが、地殻の厚さは陸地と海域で異なり数 km から数十 km です。「地殻表層」とは曖昧ですが 1 km 以内の数十～数百 m ではないかと思えます。これに対して土壌は表層の有機層から A 層、B 層、C 層と続きますが数 cm ～数十 cm（数 m）の単位です。河川堆積物に占める土壌の混入割合については場所により異なり、また川に削り込むのは表層の割合が高いことが考えられますが、上記の層の厚さの差が目安になり、割合はそれほど大きくないと思えます。しかし結局のところ、土壌も基本的には周辺の岩石が風化してできたものであり、外部からの混入やさまざまな人為的な影響はあっても基盤の岩石・堆積物と化学組成は大きく異なることが多いと思えます。

土壌試料の採取点の選び方ですが、設定した試料数と採取すべき面積から試料密度が求まります。この研究では約 10 km メッシュです。したがって 10 km × 10 km から 1 個の試料を採取することが基本ですが、全国図を作成するこの研究では試料採取密度が粗いため代表する採取点は慎重に選びました。すなわち、地質図と

土壌図を見比べながら可能な限り各地質区分・土壌区分を代表すると思われる地点を選ぶようにしました。結果として河川堆積物と土壌を用いた地球化学図は比較的よく一致する結果が得られました。しかし、採取密度がより高い場合は、土壌は基盤の目のようにメッシュ状に採取するのが基本だと思います。

議論6 採取試料の保存と再調査

質問（小野 晃）

海底堆積物の調査では、過去に産総研が採取し、保存していた試料を活用して分析に供したと書かれています。研究の継続性、総合性、相互利用性を遺憾なく発揮した点で組織の優れた機能と体制を示したものと思えます。

今回の研究では陸域と海域で新たに採取した試料も同様に、たとえば将来より詳細な分析が必要になった時等のために、地質標本館等に保管しておくという理解でよろしいでしょうか。

回答（今井 登）

全国の海底堆積物の採取につきましては、地球化学図の研究グループ内に沿岸海域プロジェクトの海底堆積物採取の責任者と研究者も加わりました。したがって、過去に採取した海底堆積物試料の資産を十分に生かせたと共に、欠けていた海域の試料を今回採取できたことで全国セットとして揃えることができ、沿岸海域プロジェクトの方にも少なからぬ貢献ができたことと自負しています。

地球化学図プロジェクトで採取した河川堆積物 3,000 個、海底堆積物 5,000 個、土壌 3,000 個は保存庫に分類・保存されています。これだけの数の化学組成既知の試料が全国セットとして利用できる形で保管されているのはたいへん貴重な財産です。科学警察研究所の全国土壌データベース作りや、名古屋大学のストロンチウム同位体比全国マップ作り等、実際にこれまでも外部の方に利用されてきました。地質調査関連試料は原則として地質標本館に登録して保管することになっており、ご指摘のように地球化学図の試料も地質標本館に登録して保存いたします。

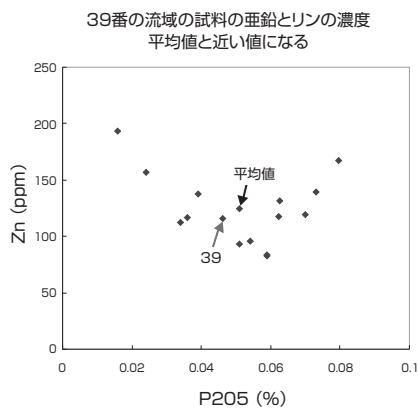


図 b 散布図

いかにしてカーナビゲーションシステムは実用化されたか

— 開発マネジメントと事業化について —

池田 博榮^{1*}、小林 祥延²、平野 和夫³

日本が実用化の先鞭をつけた車のカーナビゲーションシステムは、今や全世界に広がりたいへん有用なものとなり、日本だけでも約5000億円/年を超える事業規模となっていると思われる。しかし、これを実現するためには、当時にはなかった全国のデジタル地図作成のための仕組みづくりと作成、交通情報を車に流す仕組みや米国によるGPS整備とその利用等環境整備が必要であり、これに多くの労力を割いた。またマップマッチング等位置検出技術、ジャイロセンサー、ディスプレイ、メモリー、マイコン等ナビに必要なソフトウェア、ハードウェア開発が必要であった。今ではカーナビゲーションシステムは車載情報通信システムとして発展拡大している。まだ世の中に同システムに必要な要件が整備されていなかったところから始めた開発と事業化について、開発マネジメントの観点から述べる。

キーワード:カーナビゲーションシステム、地図データベース、マップマッチング、ジャイロセンサ、ルートガイダンス、VICS、GPS

How car navigation systems have been put into practical use

– Development management and commercialization process –

Hirosaka Ikeda^{1*}, Yoshinobu Kobayashi² and Kazuo Hirano³

Japanese manufacturers have played key roles in developing practical vehicle navigation systems (hereinafter “NAVS”). The NAVS have spread throughout the world and have become extremely useful. The market size in Japan alone is considered to exceed 5 hundred billion yen a year. This system could not have been achieved without the development of a scheme to create a nationwide digital road map, subsequent map creation, methodology to provide traffic information to vehicles, GPS development and its utilization in the United States. Much effort has been directed toward laying down infrastructure comprising these factors. Furthermore, it has been also necessary to develop the required software and hardware for the NAVS including location detection techniques such as map-matching, gyro sensors, displays, memory and microprocessors. The NAVS are presently evolving as onboard information communication systems. This report describes their development and commercialization, which started even before the requisites for the NAVS developed fully, from a development management perspective.

Keywords: Car navigation system, map database, map-matching, gyro sensor, route guidance, VICS, GPS

1 はじめに

近年多くの自動車にカーナビゲーションシステム（以下、ナビと記す）が標準装備され、レンタカーやタクシーにも装着されるようになってきている。筆者は4年前にドイツに駐在したが、ナビを装着した乗用車を使ったお陰で、地理を知らないまま地図帳なしで、どこへでも運転することができた。当初ヨーロッパの研究者らが主張した進行方向を矢印で示すのみのターンバイターン方式ではなく、すべてのナビは日本式の地図ナビとなっていた。

ナビの始まりは中国の十八史略にある殷の黄帝が発明したといわれる指南車であった。その後時代を経て、本田技研工業（株）が1981年にガスレートジャイロを用いたナビを作ったが、透明シート地図を用い、自車位置を光で投射するものであった^[1]。その後地磁気を用いて走行方向を示

すものはあったが、ディスプレイ上の地図に自車位置を重ねて表示するものが1987年にトヨタクラウンに搭載され、これがナビの始まりであった。このナビは地磁気と車速センサーの出力を基に移動量を積算していくので、徐々に真の位置からずれていくものではあったが、これによりナビ搭載の気運は高まった。このときの地図は1/5万（1 cmが500 m）と粗いものを用いていた。そして、1989年に日産シーマにナビが搭載されたが、これは住友電気工業（株）（以降、住友電工という）によって開発されたものであり、地図中の道路の上に自車位置が精度良く表示されるという点において実用的なナビの最初と言うことができる。本稿では、住友電工におけるナビの研究開発のプロセスを振り返り、実用化のポイントと困難さについて述べる。

1 九州大学イノベーション人材養成センター 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 創造パビリオン 1F、2 (株) オートネットワーク技術研究所 〒510-8503 四日市市西末広町 1-14、3 住友電気工業 (株) 〒541-0041 大阪市中央区北浜 4-5-33 (住友ビル)

1. Innovation Training Program Center for R&D and Business Leaders of Kyushu University Sozo Pavilion 1F, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan * E-mail: ikeda@itp.kyusyu-u.ac.jp, 2. AutoNetworks Technologies, Ltd. 1-14 Nishi-Suehirocho, Yokkaichi 510-8503, Japan, 3. Sumitomo Electric Industries, Ltd. 4-5-33 Kitahama, Chuo-ku, Osaka 541-0041, Japan

2 ナビの基盤となった道路の情報化技術

ナビは地図上に自車位置を表示し、地図上の道路に沿って目的地に至る経路をドライバーに提示すると共に道路の渋滞状況を表示するシステムである。したがって、自動車に搭載する車載機器単独で成立するのではなく、道路インフラ側の情報化技術の開発も不可欠である。このインフラ側の開発がいち早く行われたのが我が国の特徴であった。

1966年に東京銀座にて信号機と車両感知器をオンラインでつなぎ、交通流の検出から信号機の制御をコンピューターで行う交通管制システム実証実験が行われ、有効性が確認されて実用化が始まったが^[2]、さらに急激に増大し始めた交通事故の防止と交通渋滞対策の必要性が課題となっていた。1973年に行われた通商産業省(当時)の自動車総合管制システム^[3](CACS)では交差点にコイルを埋設し、交差点を通る車に誘導無線を用い、渋滞を避けるための進路を車載機に表示する実験が行われた。実用化には、車載機とインフラとの両方の整備が必要で、ニワトリと卵の関係で実現しなかったが、交通情報で車を空いている道路に誘導することの有効性は実証された。

これとは別に、警察庁はパトカーの有効な運用の為に、センターでパトカーの位置を把握し誘導するパトカーロケーションシステム^[4](以下パトロケと記す。警察用語ではカーロケータ)開発を進めようとしていた。

こういった情勢のなか、道路インフラ技術に参画していた住友電工ではナビの開発の必要性を感じていた。そして、1983年当時住友電工で交通管制やCACSをリードしてきた油本暢勇氏(後の専務取締役)は米国で開発されたマップマッチング技術を知り、これを用いることでナビを実用化できると判断して、この方式での開発を決定し、着手した。

その後、路車間通信システムの技術は官民の連携によって進められ、1984年には路車間情報システム(RACS)がスタートし、1987年には新自動車交通情報通信システム(AMTICS)が発足した。このように道路交通情報の収集が進み、またナビの車載化が始まり、移動体を対象とした新たな道路交通情報システム導入の機運が高まった。その結果AMTICSやRACS会員を中心に新たな会員も加わり、VICSが1991年に発足し、さらにITS(Intelligent Transportation System)へと拡大することになった。

3 ナビゲーションシステムの開発

住友電工におけるナビ開発は車載ナビ開発とパトロケ開発からなり、それに必要な共通の技術や部品を開発した。本稿ではナビを中心に述べる。

3.1 現在位置検出技術

1) マップマッチング^[5]技術開発

ナビの基本技術は、いま自分がどこにいるかという位置検出の技術と、目的地までの経路を計算し、その経路に沿って案内する経路計算、経路案内技術である。

現在では、この基本技術の一つである位置検出は、GPS衛星を利用したシステムを使用することで比較的簡単にできるようになっている。私達のパトロケやナビ開発当初はまだGPS衛星が数個しかなく、実際にこれを用いて位置を計算できるのは1日のうちわずか1~2時間という未整備状態であり、まだ使えるものではなかった。

① マップマッチング方式の開発

スタートの位置がわかり、その位置からの走行距離と進行方向がわかれば、原理的には位置がわかることになる。この方法をデッドレコニングと呼ぶ。ただし、この方法はその走行距離および走行方向を検出するセンサーの精度がととも重要で、潜水艦や航空機に使用されていた高精度かつ高価なセンサーを自動車に使用するのは無理であった。この高価なセンサーを用いなくても、正しい位置検出ができる方法を、アメリカのETAK社が開発した。それがマップマッチング方式であった。この方式では、デッドレコニングで検出した自車の軌跡を、自動車は道路上を走るものとして、地図の道路と比較してその誤差を補正するものであるため、センサーによる誤差の累積を防ぎ、正しく位置の検出ができることになる。図1に説明図を示す。

青色はデッドレコニングによる軌跡である。走行距離や方向にわずかのずれを有するため、徐々に緑色の真の道路位置から離れていく。車が交差点を曲がる時に、マップマッチング方式では道路地図データから交差点の位置を参照し、現在位置を交差点位置に修正する。

赤色がマップマッチングにより修正された軌跡である。軌跡が道路上に補正されているため、ドライバーに違和感を与えないものである。開発チームはETAK社の技術を導入するかどうかを考えたが、日米の道路密度、道路形状

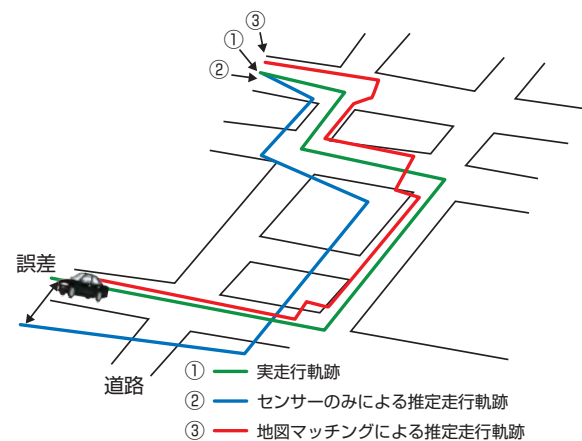


図1 マップマッチングの原理
(住友電気工業(株)提供)

の違い等、ロジックに影響を与える要因に隔たりが大きかったことや、将来の発展を考えて、自社開発することにした。

②センサー、ハードウェア、ソフトウェアの考え方

センサーとしては、移動量、旋回角のセンサーが必要である。自動車に用いるためには、潜水艦や航空機に比べ2～3桁安価で、精度はそこそこ、しかも車の使用年数十年くらいは調整が不要で壊れないというものが必要となる。

移動量と旋回角は車の両輪の回転数の平均とその差分でそれぞれ検出できる。住友電工はアンチロックブレーキ（以下ABSと記す）メーカーでもあったので、よく分かっていたABS用車輪速センサーを車メーカーにお願いし、それをセンサーとして使用することにした。また、旋回角のセンサーだけでは、絶対方位が分からないため、絶対方位の分かる地磁気センサーを併用した。ただし、車輪の回転数はスリップのために実際の移動距離と違ったり、地磁気センサーも直流駆動電車の近く等場所によって大きく狂うことがあるため、これらセンサーの誤りをマップマッチングでいかに正すかというソフトウェア開発がとても重要になる。そのソフトウェア検証のため、種々のコースで実車走行したり、実車走行のデータをもとにシミュレーションを行ったりした。ただ、これらの検証走行やシミュレーションの結果から、車輪の両輪差からの検出方法では旋回角の精度が不十分であることが分かり、後に示す光ファイバージャイロ⁶⁾を開発することになった。その他の部品についても、自動車用を使用する場合は、世の中一般に使用されており、十分信頼性の高い物かつ自動車の振動や高低温に十分耐えられる物を選ぶ必要があった。地図の表示や推奨経路の表示については、当初は（車に一部搭載されていた）6インチ程度のCRTを用い、また地図の記録媒体としてCD-ROMを使用した。これらの方式を用いたナビが1989

年セドリック、シーマに採用された（図2）。現在では、これらの表示装置や記録媒体は、液晶ディスプレイとDVDまたはハードディスクにとって代わられている。

1990年頃のナビには6インチCRTが使われたが、これまでオーディオやエアコンの操作パネルが位置していたところにナビが入り、オーディオやエアコンの操作機能もナビ機能に組み込まれた。

③実用化の考えかた

一般車では、ナビの車輪速センサーとしてその当時まだ搭載が少なかったABSシステム用のセンサーを用いたため、ナビを搭載できる車両はABSシステムの搭載車に限られることになった。地磁気センサーについては、車メーカーが製作時に車体を消磁すること、および一度旋回し磁石の方位を確認してセンサーの常数を記録させることを行い、その後は車輪速センサーの値とマップマッチングにより自動補正を行う方法にした。

マップマッチングによる位置検出方式は、基本的にスタート地点を設定する必要がある。また、走行中に実際の道路と地図が異なることがあり、位置を見失う場合がある。その時は改めて位置の分かった地点でスタート地点の登録が必要になる。これは、ユーザーが行うことになるため、できるだけその回数を減らし、また簡単に行えるようにしなければならなかった。

このためディスプレイでの表示内容は見易く、かつスタート位置の設定等は簡単な操作で扱える必要があった。したがって、自車位置検出や経路誘導・経路案内を行うためのソフトウェアのほか、ディスプレイに表示および操作するためのソフトウェアがとても重要となってきた。

また、このナビシステムでは表示用のほかマップマッチング用のデジタル地図が必要となったが、これも当時は世の中になく自ら作るようになった（後述）。

さらに、ナビ用ディスプレイは、ナビ以外に車の情報表示装置として重要な役割があり、それらが表示できるようにソフトウェアの開発は行われた。ナビの目標価格は5万円、10万円、20万円といった金額になるが、ディスプレイをカラーで大きなものにする限りは、コスト低減に限界がある。基本的にナビは高価な商品といえる。アフターマーケットに出ていた後付けタイプのディスプレイは安いが小さいために視認性が悪く、安全を確保することが必要なカーメーカー純正のシステムにはそぐわないものであり、採用することはできなかった。

2) 方位検出ジャイロの開発

①光ファイバージャイロ⁶⁾の開発

車の旋回角度をはかるセンサーとして、両輪の回転数差を求める方式は必ずしも精度は良くなく、当初のナビでは



図2 カーナビゲーションシステム
(1989年日産シーマのカタログより、日産自動車(株)提供)

そのためにマップマッチング処理の限界を超え、道に迷うことが度々あった。旋回角センサーの精度を上げることが必要と考え、当時住友電工で極限作業ロボット用として開発していた光ファイバージャイロ (サンプル価格は数百万円程度) を何とか安く作ってナビ用にできないかと考えた。幸い住友電工では光ファイバージャイロに必要な部品のほとんどを内製できたこともあって、それぞれの部品を量産で安く作ることや、ナビ用として精度を落としても問題ないところは低コスト化のため落とす等することで、コストを2ケタ下げることができ、車に搭載することが可能になった。光ファイバージャイロの採用により、位置を見失う頻度が200 kmに1回程度に低下するところまで性能を向上することができた。

②振動ジャイロ^[7]

1990年以降になってナビにGPSが使用できるようになると旋回角センサーには光ファイバージャイロ程の精度は必要でなく、もっと低コストのものが求められた。当時、カメラの手ぶれ防止用の振動ジャイロが世の中に出始め、これをナビに使用できないかを考えた。カメラ用の振動ジャイロは手の動きを検出することを目的としているため、長時間にわたる零点ドリフトについては考慮されていなかった。ナビ用の要求仕様を作り、センサーメーカーに開発を依頼した。その結果、ほぼ満足できるジャイロセンサーを(株)村田製作所が開発でき、振動ジャイロに切り替えることができた。もちろん、振動ジャイロ単体性能の向上によるだけでなく、ジャイロを扱うソフトウェアにおいても走行中の零点ドリフトの推定処理やジャイロ温度測定によるドリフト量の推定等のソフトウェア機能を追加した。このソフトウェア機能により光ファイバージャイロよりも小型・安価であるが零点オフセットが5倍大きな振動ジャイロであっても採用することが可能となった。

3.2 経路計算・経路案内技術の開発

位置が精度良く検出されると、その次には目的地までの最適経路を求め、走行中に右左折を案内する機能が求められた。経路計算のアルゴリズムは多くが大学の研究によ

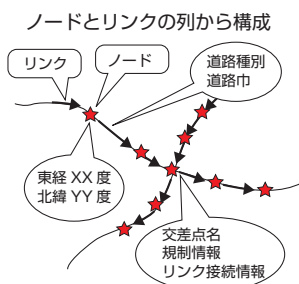


図3 道路形状データ (住友電気工業(株)提供)



図4 実道路のプロット例 (住友電気工業(株)提供)

て産み出されていたが、多くは膨大なメモリー、高速読み出しのできる地図データ記憶媒体を前提としていた。一方、ナビにおいては1倍速のCD-ROMとコスト的に厳しく切り詰めたメモリーを使って、東京-大阪500 kmの経路計算を速やかに行うことが求められた。住友電工ではこれまでの方式では30分かかった経路計算をソフトウェアの工夫により30秒にまで高速化し、製品化した。

3.3 デジタル地図の開発

①地図データベースの確保

マップマッチングには、デジタル化された地図データが必要であり、交差点をノード、交差点間をリンクと呼ぶ地図データ構成となる。表示目的だけで構成された地図データよりも、道路間の接続関係や一方通行規制等、はるかに緻密なデータからなる。

図3において、ノードは交差点や道路の折れ曲がっている点であり、座標や交差点名、つながっているリンクの情報が含まれている。リンクはノードを直線でつないだベクトルデータであり、道路属性や道幅等の情報を含む。

図4は実際の道路の例であり、高速道路への接続道路が多くのリンクから実際の曲線を模擬する形で構成されている。図5は表示地図であり、人が見やすい地図にするために、水系、建物形状、地名、施設名等の情報が含まれている。

当初、ナビ各社で独自にデータ整備を始めた。住友電工の場合は、電力会社、ガス会社、地方自治体発行2500分の1の都市計画図等の詳細地図データを元に、3大都市圏の整備を行った。地方自治体の許可が必要となるため、開発者が手分けし許可を求めに各地方自治体をまわった。

②財団法人日本デジタル道路地図協会^[8]

初期の大都市向け用途では独自開発で十分であった。しかしナビ普及の気運の高まりと共に膨大な工数と費用を必要とする地図データは民間企業が個々に行うべきことではないことが各社で認識されてきた。そこで、関係部門に働きかけた結果、当時の建設省を中心にデジタル地図を整備することとなり、(財)日本デジタル道路地図協会が設立



図5 地図データ表示例 (住友電気工業(株)提供)

された。設立のポイントは、仕様(標準化)と会員(ユーザー集め)であり、測量・編集領域では業界のために互いに協力する一方で、表示デザイン等の表示の仕方については競争領域にするとカーメーカーが決断したことによって大きく進んだ。建設省(当時)内では、道路局と国土地理院の両方の参画を得た。民間企業は、地図データの共通化による差別化の喪失があったが、コスト削減ができるため、基金・会費の供出やエンジニアの派遣を含めて参画をした。

地図データに求められる機能も、ナビの進化とともに変化してきた。現在位置を表示するだけの第1世代ではネットワークの正確さが、目的地への経路を表示する第2世代では、一方通行や右左折規制、中央分離帯の有無等の規制情報が、交通情報を表示する第3世代では、渋滞状況の管理単位との適合性が、それぞれ求められてきた。以後、現在に至るまで(財)日本デジタル道路地図協会のデータが日本のナビを支えている。この元地図に警察が管轄している右左折禁止等の交通規制データを加味して、経路誘導機能が実現された。

3.4 交通情報の受信

狭い国土と交通網を最大限に活用するために我が国の道路交通管制は世界で最も進んでいる。道路上に設置された数多くの車両感知センサー^[9]や画像感知器、交差点監視カメラ等で渋滞状況は把握されてきた。その渋滞情報を、郵政省(当時)の管轄するFM放送を使って、建設省が管轄する高速道路上では電波ビーコン^[10]で、警察庁が管轄する一般道路では光学式車両感知器^[11](光ビーコン)で、というように複数のメディアを介してナビに提供されている。関係者の努力でVICS^[12](Vehicle Information and Communication System)センターが構築され、VICSセンターに集約された情報は、各メディアセンターを介して、ナビへと送られた。この仕組みを通じてナビでは全国の渋滞状況も知ることができるようになった。電波ビーコンや、光ビーコンからのデータは媒体こそ異なるものの共通的なデータについては、そのフォーマットの統一が企業関係者の努力により成し遂げられた。

ビーコンの受信においてもデータ処理ソフトウェアが重要であった。ビーコンから送られる簡易図形のデータはその地点特有のものであり、ナビがどういう表示状況にあるとも即座に割り込み的に表示させる必要がある。表示縮尺切り替え中や経路再探索中等CPUやメモリー負荷の高いタイミングにビーコン受信を行うと内部処理がたいへんであった。

この交通情報の提供に当たっては、渋滞情報を収集している地図データ表現、VICSセンターでのデータ表現、ナビ車載器でのデータ表現の対応付けが必要であったが、関係者の努力により克服することができた。

図6において地図の上の緑の矢印は空いている道路、赤の矢印は混雑している道路を示す。ナビが普及し、VICSが1996年にでき、1973年にCACSにおいて描いた車載器とインフラの協調システムは、ようやく実現に至った。

3.5 その他コア部品開発

ナビは、マップマッチングを行うほか、目的地までの経路計算と経路誘導をリアルタイムでディスプレイの地図上に表示しなければならず、これまでの車載機器にない大きなメモリー量、ソフトウェア量と計算パワーが必要となった。まず表示用、マップマッチング用の地図を実用的な範囲で記憶するにも、開発当初の半導体メモリーでは全く容量が足りず、当時車にはほとんど使用されていないCD-ROMを使うことにした。このCD-ROMを採用するに当たり、特に車の振動に耐えられるよう住友電工の関連会社である東海ゴム工業(株)が開発したオイルダンパーをCDドライブメーカーに紹介した。

また1M byteにおよぶプログラムメモリーにROMを、地図演算用メモリーにはこれも車で使用実績のあまりないD-RAMを採用した。これらを採用するにあたり、車用の環境試験や信頼性に留意した。

米国が1988年頃から軍用目的で整備を始めたGPSは、民間用途にも精度を意図的に下げながらも提供されてきた。先述の種々のセンサーを車に装着しなくても受信機さえ備えれば現在位置が分かるということで、その取り付けの簡便さゆえに市販ナビを中心にGPSナビが1990年頃から登場してきた。当初は測位に必要な十分な数の人工衛星が上空を飛んでいないため、トンネルやビル陰等衛星が見えない状況では、役に立たない場面もあったが、1995年頃にはほぼ実用レベルになり、2001年に精度劣化が解除されると十分実用レベルへと達した。

3.6 カスタマーへの売り込み

1983年にナビの単独開発を始めて半年後には大阪周辺のデジタル地図を作り、ナビのテストが進み始め、カーメーカーへPRを開始した。結果的には日産自動車(株)が評



図6 渋滞表示有りの地図表示

価してくれ、車輪速センサー、地磁気センサー、1/2500 地図によるマップマッチングナビが、1989 年シーマ、セドリックに 1 千台 / 月の企画で量産が始まったが、位置精度にはまだ課題があった。1991 年セドリック、シーマにファイバージャイロを用いたものを出したが、その後日産自動車(株)は(株)日立製作所との合弁会社『(株)ザナヴィ・インフォマティクス』を設立し、自社開発体制とした。住友電工のナビは、その後トヨタ自動車(株)以外の顧客に採用されたが、カスタムメイド化に多大の設計工数を要し、事業的には大きな赤字となり問題となった。

一方、後付け市販ナビがオーディオメーカー中心に出始め、これが主流になり始めた。将来はナビは運転支援システムとして純正ナビが主流になると読んでいたが、市販で評価されることも生き残りに重要であると考え、社内の反対があったが、市販市場に打って出た。GPS からの検出座標を元に道路上以外や湖にも現在位置を表示してしまう GPS ナビが多い中、車載純正ナビで培った位置精度と経路算出の迅速さが好評を博した。

4 ナビ事業展開と撤退

4.1 開発費負担と事業利益確保

ナビ用のハード開発や、位置検出の改良、地図表示、経路計算、経路案内、さらに全国地図の作製や更新費用を負担しながら、事業利益確保の見通しがなければナビの事業は続けることはできない。これら費用を回収するためには、月 2 万台以上のナビの販売が必要であった。

その当時は純正ナビの車への搭載数は、当社が納入していないトヨタ自動車(株)が高かったほかは、各自動車メーカーとも数千台 / 月の規模で、多い時でも受注数量は 1 万台 / 月にもならなかった。

当時は、ナビの市場が爆発的に増え、採算を取ることができると考え、販売台数にすぐなると考えていたが、バブルが崩壊して思った程市場が伸びず、結局事業採算のとれない状態が続いた。多大の地図データやソフトウェア開発費をメーカーに負担してもらった仕組みを作れなかったのが、ナビビジネスモデルの敗因となった。

このため、何とか採算を改善することを考え、地図データベースの作成やナビ開発そのものについても他社との協業等を行った。

4.2 車載ナビソフトウェア開発問題

市販ナビ参入後も並行して複数のメーカーと純正ナビの開発も進めた。純正ナビでは、オーディオやエアコンの操作も同一画面で行う必要がある。車種が異なるとインパネデザインが変わり、インパネに配置できるスイッチの数が変わる。携帯電話で機種を変更すると操作感が大き

く変わるように、一つのスイッチの増減でソフトウェアは大きく変えなければならない。これら車種への横展開とともに、1995 年以降 VICS 受信やインターネット接続といった大きなソフトウェア新機能実現の縦展開を並行して行っていた。こういう時期にはソフトウェアを共通化して容易に機能拡張できることが、VICS 対応やインターネット接続機能等の新機能をいち早く世に出すためにも重要である。

先述の横展開と縦展開で、複数のメーカーのそれぞれの要望をかなえるには強力な開発陣容を必要とした。その結果ソフトウェア開発費が事業を圧迫するようになってきた。

しかるに、当時住友電工では市販のナビをより高性能にすべく、当社独自のナビ OS を開発していた。1995 年発売の市販ナビはこれゆえに性能速度において高く評価された。しかし一面では特化した OS やソフト体系になってしまっており、これをベースに各メーカーの車種への横展開、新機能実現の縦展開をするには、OS の改造をする必要がでてきた。インターネット接続等の機能においてもブラウザを独自新規開発せねばならない等、縦機能展開への障壁となり、ソフトウェア開発費用と工数が莫大となり、メーカーに機能実現見送りをお願いせねばならなかった。

このなか 1997 年に発売したナビでは、仕様の変更等でソフトウェア開発の工数として当初見積もり約 200 人月が完成時 1,000 人月を越える等費用が大幅に膨らんだことに加え、発売後ソフトウェアのバグが多発し、メンテ費用も大幅に増え、赤字幅を大幅に増やした。これがナビ市場撤退の大きな要因となった。

おりから各企業では“選択と集中”がキーワードとなり、住友電工は事業損益の点で大きな赤字を続け、改善の見通しが立たないナビ事業から撤退することを決断した。

5 まとめ

ナビ開発は単なるナビソフトウェア開発のみでは実現しなかったものであり、地図 DB、交通情報、通信方式、各種ハード等々、多くのインフラ構築や関連技術の開発が相まって実現したといえる。当時の建設省、郵政省、警察庁の関係者、トヨタ自動車(株)、本田技研工業(株)、日産自動車(株)等メーカー、(株)デンソー、三菱電機(株)、アルパイン(株)、パイオニア(株)等多くのナビメーカー、パナソニック(株)、(株)日立製作所等インフラ整備メーカー、地図メーカーの方々、小型振動ジャイロ、GPS、ディスプレイ等を開発された各部品メーカーとの協力関係があつてこそ、現在の普及が実現できたといえる。

図 7 にナビに採用された技術および部品と関連する社会システムを時代を追って図示したが、この図に示すようにナ

びは多くの技術、部品の組み合わせとこれらを有効に活用するソフトウェアによって完成されたものである。

地図データにおいては、各社独自の地図データから共有化に移行し、センサーにおいては振動ジャイロが登場し、GPSの整備により現在位置検出が容易になると共に高精度となった。表示においては液晶の低価格化により大画面化し、機能拡張においては、CPUの高機能化・メモリーの大容量化・CDROMからDVDやHDDへの進化、といった動きがあった。

また、ナビ普及をさらに促進したものと、並行して開発された社会システムの発展もある。日本のITS (Intelligent Transport System) はナビの普及から始まり、今や車に必須のものとなった。ETCシステムの整備がそれに続いた。

ナビは車における情報センターとなり、車載カメラ映像や種々の情報が映し出されるようになってきている。曲がるべき交差点前で自動減速する等、運転制御との統合も進んでいる。一方でPND (Portable Navigation Device) の普及も海外ではめざましい。今後も、高級機能の純正ナビ、手頃なPNDの二極に分化しつつ普及が進んでいくであろう。

6 謝辞

ナビの実用化は産官学にわたる多くの関係者が努力し、貢献したことによるものであり、それらの功を称えて感謝したい。また元住友電工油本暢男氏、三藤邦彦氏がナビ開発にかかわる多くの課題に貢献されたことを述べてみたい。さらに本稿を記すにあたり、三藤邦彦氏の協力をいただいたことに謝意を表したい。最後にナビ開発、製品化、車載化等を進めてきたが、事業としてはうまくいかず、撤退せざるを得なかった。この間多くの関係者に多大のご迷惑をお掛

けたことを、それに携わった責任者として衷心よりお詫び申し上げたい。

参考文献

- [1] ホンダ・エレクトロ・ジャイロケータ, 日本の自動車技術240選, <http://www.jsae.or.jp/autotech/data/14-2.html>
- [2] ITS -安全, 安心, 快適な交通社会の実現に向けて-, 松下テクニカルジャーナル, 51 (2), 84-89 (2005).
- [3] 大山尚武: 自動車総合管制技術(解説), 自動車技術, 33 (4), 243-248 (1979).
- [4] 警察庁編: カーロケータ, 昭和60年警察白書, 第1章第1節1(2)カ, <http://www.npa.go.jp/hakusyo/s60/s600101.html>
- [5] 田中二郎, 平野和夫, 小林祥延, 信田裕明, 川村静治: マップマッチングを用いたナビゲーションシステム, 住友電気, 136, 7-11 (1990).
- [6] 大岡明裕, 西浦洋三, 鷲見公一, 岡本賢司, 岩下隆樹, 川村静治, 吉川順一, 長谷川早人: カーナビゲーションシステム用光ファイバージャイロ, 住友電気, 140, 71-75 (1992).
- [7] 中村武: 圧電振動ジャイロスコープ, 電子情報通信学会誌, 76 (1), 39-41 (1993).
- [8] デジタル道路地図協会ホームページ: www.drm.jp
- [9] 福澤克寿: 車両感知器, 交通工学, 17 (7), 46 (1982).
- [10] 高田邦彦: 路車間情報システムの開発状況(解説), 自動車技術, 43 (2), 58-64 (1989).
- [11] 宇佐美勲: 高度交通管制システム, 国際交通安全学会誌, 26 (2), 21-28 (2001).
- [12] 宮田穰: 快適な自動車交通を目指して-VICSの挑戦-, 自動車技術, 47 (8), 11-17 (1993).

執筆者略歴

池田 博榮 (いけだ ひろさか)

1964年九州大学工学部応用化学科卒、1964年住友電気工業(株)入社、自動車用ワイヤーハーネス開発、カーエレクトロニクス、ナビを統括。1999年常務取締役、1995年(株)オートネットワーク技術研究所社長、2008年九州大学イノベーション人材養成センター特任教授、現在に至る。本論文ではナビ開発の背景、進め方、マネジメントを担当。



小林 祥延 (こばやし よしのぶ)

1967年大阪大学工学部電気工学科卒、1967年住友電気工業(株)入社、ハーネスエレクトロニクス、ナビ開発、1999年カーエレクトロニクス事業部長、2000年(株)オートネットワーク技術研究所エグゼクティブチーフエンジニア、現在嘱託。本論文では、主としてハード開発を担当。後にナビ事業の採算改善、リストラを進めた。



平野 和夫 (ひらの かずお)

1974年京都大学工学部数理工学科卒、1974年住友電気工業(株)入社、1981年ハーネスエレクトロニクス、ナビ開発、1996年カーエレクトロニクス事業部技術部長、自動車技術研究所次長、現在自動車事業本部統合企画部室長。本論文では主として、車載ナビソフトウェア開発、VICSの構築を担当。



ナビ	現在位置検出	経路案内	交通情報を加味した経路誘導	ITS
地図	表示用 位置検出用 (MM)	周辺案内充実 規制	波滯	
位置センサー	距離 車輪速 方位 地磁気	GPS	光ファイバジャイロ (光FJ) 振動ジャイロ (BJ)	
ハード	表示器 CRT 地図記録	液晶	VICS受信機	
	媒体 CD CPU 16 bit	全国3~5分割	DVD 32 bit	HDD
ソフト	構成 ナビ単独	高速化	汎用化 他の機能と一体化	携帯・パソコンとの融合
社会システム	CACS '73 RACS '84 AMTICS '87 交通管制システム '66	デジタル道路地図協会 '88	VICS '91	
住友製品	'89 ▲MM '91 ▲光FJ セドリック・シーマ	'92 ▲GPS・BJ・経路 ダイヤモンド	'93 ▲市販	'97 ▲VICS アコード

図7 カーナビゲーションシステム開発相関図

査読者との議論

議論1 論文全体

コメント（景山 晃：産業技術総合研究所イノベーション推進本部）

カーナビゲーションシステムとして、広範囲の要素技術をコンパクトにまとめた論文としてシンセシオロジーに相応しい内容になっていると思います。ある製品が世の中に出るために求められる技術群の領域の広さを示すと同時に、目的に沿ってどの技術を採用し、逆にどの技術を捨てたのか、また、その技術と他領域の技術とをどのように融合させたのかは、企業における研究開発マネジメントの事例として大変貴重な論文です。

また、限られた誌面の中で、研究開発マネジメントの重要な側面として、(財)日本デジタル道路地図協会の設立や企業間連携、官公庁との連携等の重要性に触れてあり、シンセシオロジーの典型的な論文だと思えます。

議論2 各要素技術の融合化の全体像

コメント（景山 晃）

本論文では要素技術として、(A) 位置検出技術、(B) 経路計算技術、(C) 経路案内技術が基本であることを述べています。マップマッチング技術を皮切りに、(A) を完成させるための候補技術、(B) を完成させるための複数の技術、(C) を完成させるための幾つかの技術を記述してあります。分野外の読者の理解を助けるという意味で、これらカーナビを実用に耐える技術として仕上げるための要素技術群を、図または一覧表で載せてはいかがでしょうか。実に多様な技術が不可欠であることが読者に一層よく伝わるように思います。

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

マップマッチング技術、位置同定技術、デジタル地図、経路計算技術等の大きな技術要素ごとに、時代によってほかの要素（GPS、CPU、ストレージデバイス）によって、どのように技術の選択が変化していったのかが図示できると、技術動向に合わせてダイナミックにシナリオが変化していったことが読者に直ちに理解してもらえと思えます。

回答（池田 博榮）

要素技術間の関係を、「5 まとめ」の章に図7として挿入しました。

議論3 多種のハードウェア技術を統合制御するソフトウェア技術開発の重要性

コメント（景山 晃）

センサー技術だけでなく、ソフトウェア技術が重要であることが述べられていますが、OSを含めたソフトウェアの研究開発の重要性をもう少し強調して記述された方がよいと思います。センサー技術とデジタル地図との融合や位置ずれの補正技術、電波または光ビーコンからのデータ処理技術等のソフトウェアも重要な役割を担っていると推察します。

回答（池田 博榮）

ご指摘のとおり、カーナビはソフトウェア技術が重要な車載装置であり、車載装置の中でも群を抜いて大きなソフトウェア量となっています。本論文では、3.1 振動ジャイロの節において、光ファイバージャイロよりも単体性能、とりわけドリフト値において相対的に劣る振動ジャイロを使うようにするためのソフトウェアの工夫を追記しました。また、ビーコン受信については、受信後の割り込み画面への切り替え等負荷が集中し、内部的に複雑な処理が求められたことを記載しました。

議論4 技術開発の展開

質問（景山 晃）

ソフトウェアの開発費用が膨大となり、住友電気工業（株）（以下、住友電工という）としては事業を撤退せざるを得なくなったと論述さ

れています。カーナビシステムの黎明期に業界を引っ張った住友電工の撤退は大変残念な出来事ですが、その後、カーナビやETCが大きな産業となったことに繋がった技術、またはマネジメント上のポイントを、技術あるいは産業領域という視点から簡潔に示していただくことは可能でしょうか。

回答（池田 博榮）

1) 大きな産業に繋がったポイント

① 技術的なポイントとしてはTVと同様にリピートが効く製品であり、一度使えばやめられないものであることが大きいと思います。TVも始めには「家庭にTVは不要」といった教育的視点、家庭環境悪化といったことから不要論がありましたが、今や家庭に何台もある時代になりました。

カーナビも初めの頃は車メーカーの電子技術部のほとんどの人は「車にナビは不要」と言い、「池田さん、この忙しい時に何をやっているのか、ナビ開発なんかやめろ」と言われたこともありましたが。その人は後でカーナビ開発の責任者になり、「池田さん、あれは誤りでした」と言われたことがありました。また当時、マーケティング調査ではカーナビ装着を望む人は少なかった。それに対し、車メーカーのある幹部はいわゆるマーケティング手法をまったく信用していなかったのが今でも印象的でした。「池田さん、世の中になく製品が欲しいかどうかをお客さんに聞くのは意味がない。お客さんは分かっているのだから」と言われました。同じことがタクシーや会社のプロの運転手も「ナビは不要、地図を見れば良い」と言っていました。ご存じのように今ではタクシー運転手にとっても不可欠のものとなっています。そういう意味でカーナビは運転の支援システムと言えます。そして今では、カーナビという言葉が「リクナビ・・・」等のように他分野でも使われるようになったことが、いかにカーナビが浸透したかをよく表していると思います。

② 車で1万円を超える部品は少なく、まして10万円を超えるものは少なかったのですが、カーナビによって高額な車載機器というものが成り立つことが分かりました。また部品のすそ野が広い機器であり、例えば車載用の液晶ディスプレイだけでも一つの市場となり得ています。

③ 車の組み込み系ソフトウェアとして最大のものであり、かつ品質信頼性でパソコン等ほかの分野よりはるかに高品質を要求されたため、ソフトウェアの品質向上が進みました。ハードウェアもそうですが自動車関連では品質要求は高く、お客さんに不具合がすぐわかるために、一般のIT企業では純正ナビに入れない「品質WALL」による差別化ができる分野となりました。「基本的にバグが許されない世界」ですが、逆にこのことが開発マネジメントとして住友電工が陥った穴でした。

2) ソフトウェアのブレイクスルー

ソフトウェアを構成するうえで、独自化による機能差別化と、共通化による拡張の容易性を考慮する必要があります。住友電工は当初からカーナビ性能において抜きん出ていたと自負しております。しかし、1995年以降はVICS対応、さらにはインターネット対応と大きな機能追加を行うべき時期が到来してきていました。その時期には共通化を目指すべきであったと考えます。しかし当時住友電工は機能差別化、高速化を図るべく独自OS開発へと進み、結果的に大きな機能追加を独自で行わねばならなくなりました。本文においても、これらのことを示すように改訂しました。

議論5 ETAK社のカーナビ技術の情報

質問（赤松 幹之）

マップマッチング技術を最初に世に出したETAK社のカーナビは1985年だったようですが、本論文では1983年に油本氏が同技術に注目したと記載されています。これはETAK社が製品化する前から論文等でマップマッチング技術について発表されていたから知ることが出来たのでしょうか。

回答（池田 博榮）

1983年に当時住友電工の油本氏がアメリカ出張したおり、この分野

の先駆者であった French さんからの情報を得て ETAK の試作カーナビに試乗したものです。当時は、地図は簡易なものでした。

議論6 カーナビ普及に関する海外との比較

質問（赤松 幹之）

本田技研工業（株）のジャイロケータ、トヨタ自動車（株）のエレクトロマルナビジョン、そして住友電工さんのシステム等と同時代に、米国 ETAK 社がカーナビを開発し市販しましたが、結果的には我が国でカーナビが普及しました。この違いは、どのような点にあるとお考えでしょうか。

さらに、産業界がなぜ積極的に動いたのか、また行政サイドでも積極的な動きがあったのはなぜなのか、どのようにお考えでしょうか。

回答（池田 博榮）

①カーナビ普及の違い

アメリカ国土は都市内は Street と Avenue からなる碁盤の目で整然としており、また都市間道路の出入口は番号化され、分かりやすく、カーナビの必要性が少ないこと。また、アメリカでは道路案内は地図より、簡条書き案内が多く、地図ナビはそれほど必要ではありませんでした。

一方ヨーロッパは、歴史の古い都市国家で道路は曲がりくねり非常に分かりづらく、日本も同様で、カーナビが普及しやすい国柄です。

日本は新し物好きといった国民性以外に、技術的にはカーナビに必要なジャイロセンサー、ディスプレイ、CDROM ドライブ、半導体、道路交通情報等々が進んでいたこともあります。

②動いた産業分野はシステム開発と地図については、自動車メーカー、カーエレクトロニクス、オーディオ、電機、地図メーカー等が動き、ジャイロセンサー、GPS、マイコンを始めとする半導体、CD、DVD、HDD、ディスプレイ等々については部品メーカーが動きました。さらにナビソフトウェアを組み込んだ新しい情報企業等々が新分野として多く参入し、普及を推し進めました。

③行政サイドに関しては、インフラを含めた新分野として注目したからであったと思います。

議論7 解説、レビュー論文との差異化

コメント（景山 晃）

この論文は読者から見て、カーナビ技術開発に関する解説（レビュー）、研究開発史という印象を与えます。そこで、候補技術群の中でなぜその技術を選定して研究開発を進めたのか、

結果としてその選定技術がどのような点でほかの候補技術より優れていたのかについて、半定量的な数値情報を加える等により、論述していただくとよいと思います。

回答（池田 博榮）

光ファイバージャイロについては、「光ファイバージャイロの採用により、マップマッチング処理の限界を超えることは 200 km に 1 回程度に低下するところまで性能を向上することができた。」との文を、振動ジャイロについては、「もちろん、振動ジャイロ単体性能の向上によるだけではなく、…。このソフトウェア機能により光ファイバージャイロよりも小型・安価であるが零点オフセットが 5 倍大きな振動ジャイロであっても採用することが可能となった。」の文を追加しました。

議論8 シンセシオロジー論文について

質問（赤松 幹之）

今回、カーナビの開発と事業化についての論文を執筆していただきましたが、著者として、これまでの論文や総説また技報等では記述されることはなかったことで、シンセシオロジー論文にすることで初めて記述できたこととしてどのようなものがあったのか記載いただけませんか。

回答（池田 博榮）

ここで書けたもの

- ①住友電工がカーナビ開発を進めた経緯。
- ②位置精度向上のために光ファイバージャイロを開発した経緯
- ③世の中になかったデジタル地図データベース作成経緯
- ④車メーカーとの関係
- ⑤後付けカーナビ開発
- ⑥事業採算と開発費の問題
- ⑦ソフトウェア不具合問題

書けなかったもの

- 省庁間の調整の問題
- 部品入手の苦労
- カスタマーへの売り込み
- 各種イベント対応（事業推進の観点からすると、積極的な参加は必ずしも得策ではなかった）。
- 住友電工社内の反対
- 競合メーカーとの関係
- アライアンス等々多くの話れないものあり。

鑄造技術と粉末冶金技術の融合による新材料開発

— 金属間化合物を活用した高機能硬質材料 —

小林 慶三*、尾崎 公洋、松本 章宏、中山 博行

セラミックス粒子を金属で結合した硬質材料は、わが国の高度加工技術を支える金型や工具の材料として利用されている。しかし、硬質材料は資源的に少ないレアメタルを大量に含むため、新しい材料開発が求められていた。そこで、Fe-Al金属間化合物を結合相とした硬質材料を開発した。この硬質材料は鑄造と粉末冶金の技術を組み合わせたプロセスで合成することにより高硬度で高強度とすることができた。本稿では開発した材料を工業的に利用するための第2種基礎研究への取り組み、さらに異なる専門分野の研究者の融合による効率的な研究開発の方法論について紹介する。

キーワード: 超硬合金、FeAl、メカニカルアロイング、パルス通電焼結、金型、切削工具

New material development by the integration of cast technology and powder metallurgy technology

— A high-performance hard material which used intermetallic compound for binder phase —

Keizo Kobayashi*, Kimihiro Ozaki, Akihiro Matsumoto and Hiroyuki Nakayama

Hard materials made of ceramics combined with metals are used for dies and cutting tools that support high precision processing technology in Japan. Hard materials, however, need a large amount of rare metals that are scarce as resources as component and hence developing new materials with less dependence on rare metals has been expected. We developed a new hard material with Fe-Al intermetallic compound as a binder. This material was synthesized by a process combining casting and powder metallurgy and exhibited high hardness and high strength simultaneously. This paper introduces an approach to “Type2 Basic Research” in order to apply the developed material to industrial use, and a method of efficient research and development through the collaboration of researchers of different specialized fields.

Keywords: Cemented carbide, FeAl, mechanical alloying, pulsed current sintering, die, cutting tool

1 研究の背景

金型や工具として広く用いられている超硬合金は、硬質な炭化タンゲステンにコバルトで焼き固めた高強度で硬質な複合材料であり、我が国の自動車や情報家電等の先進産業を下支えする高精度加工技術には不可欠な材料となっている。超硬合金の歴史は古く、我が国の超硬工具出荷額は2007年度に3500億円を超える規模(超硬工具協会統計)にまで成長しているが、一方では全世界的な工業化の進展により、タンゲステンもコバルトも将来にわたる安定供給に不安がでてきている。特にコバルトは古くから価格変動の激しいレアメタルであり、環境的な側面からも新しい金属結合相の開発が望まれていた。そこで、高強度で高硬度を有する硬質な無機材料と金属からなる新しい複合材料の開発を目指して、産総研での材料開発がスタートした。

複合材料を構成する金属として、資源的に豊富で価格

が安定している鉄を使いたいという市場ニーズが潜在的にあった。しかし、鉄は炭化物(炭化タンゲステン等)と反応しやすい上、錆びるという実用上の大きな問題を有していた。そのため、これまで鉄を結合相とした超硬合金はほとんど実用化にいたっていない。

一方、超硬合金の新たな用途として、加工分野における高温下での使用が求められている。これは、例えば切削工具においては高速切削、無潤滑切削につながるものであり、金型では高温あるいは中温での成形加工を実現する技術となる。これらの技術は、成形時のエネルギー消費量を低減することにつながり、低CO₂社会の実現に向けた新しい技術となりうるものである。そのためには、超硬合金の結合相に耐熱性を付与することが不可欠である。

本稿では、産総研で見出した鉄アルミニウム金属間化合物を結合相とする新しい超硬合金^[1]を単なる機械的特性

産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴が洞 2266-98
Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST 2266-98 Anagahora, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan * E-mail: kobayashi-keizo@aist.go.jp

Original manuscript received July 30, 2010, Revisions received August 25, 2010, Accepted August 30, 2010

の評価にとどまらず、工業的な利用に必要な特性評価や周辺技術の適用性にまで広げて、異なる専門を有する多くの研究者による継続的なグループ研究によって開発してきた経緯について報告する。

2 研究の目的と目標

硬質な複合材料の耐熱性を、鉄を用いた金属材料によって改善するためには、1990年から経済産業省のプロジェクトとして大学、民間企業、国立研究所によって総合的に取り組まれてきた金属間化合物の利用が有効だと考えられる。金属間化合物は異なる金属元素で構成される規則相であり、セラミックスと金属の中間的な特性を有する材料として知られている。なかでもアルミニウムを含む“アルミナイド”と呼ばれる金属間化合物は強度の逆温度依存性を示すものがあり、中・高温域で利用できる金属材料として期待されている。産総研ではこれまでに民間企業との連携のもと、鑄造技術によるアルミナイド金属間化合物の合成技術について研究を行ってきており、チタンアルミナイド (TiAl や Ti_3Al 等) や鉄アルミナイド (FeAl や Fe_3Al 等) 等の金属間化合物の合成を行ってきた。アルミナイド金属間化合物は、比重差や融点差の大きな元素で構成されているため、通常の溶解方法や鑄造技術では偏析が大きく、新たに電磁浮揚溶解-鑄造というプロセス技術を開発した。しかし、溶解した金属を鑄造しただけでは、鉄アルミナイド金属間化合物の組織が粗大となり、十分な強度を付与することができなかった。また同じ頃、産総研ではマグネシウム合金の組織を微細化して成形する鑄造技術として、半溶解成形技術の開発に取り組んでいた。マグネシウム合金を半分溶けた状態で加圧成形することによって、チキソトロピー性を発現させたニアネット成形と組織微細化による高強度化を同時に実現するものである。さらに、アルミナイド金属間化合物の合成方法として粉末冶金技術にも着目し、メカニカルアロイング法を用いた微細組織のアルミナイド金属間化合物の合成技術^{[2][4]}についても検討していた。

一方、WC-Co系超硬合金は材料および製造プロセスに関する技術がほぼ完成されており、硬質粒子をさらに微細化した材料開発を中心に研究が行われていた。超硬合金は加工技術の高速化・高精度化とともにその需要が増加し、一層の低コスト化が求められていた。特に、価格変動の大きいコバルトや資源偏在性の高いタングステンについては、代替あるいは省使用化技術が必要とされていた。

そこで、私達は金属間化合物のさまざまな合成技術と超硬合金に関する基礎知識をベースとして、アルミナイド金属間化合物を結合相とした新たな硬質材料を開発するため、これらの技術を融合した新しいプロセス技術の開発に着

手した。すなわち、超硬合金の結合相としてCoの代わりにFeとAlを用い、焼結過程でAlのみ液化させ、その後FeAl金属間化合物相を合成するプロセスを開発した。この技術を用いることで、鉄アルミナイド金属間化合物を結合相として炭化タングステンや炭化チタン、硼化チタン等の硬質粒子と複合化した耐熱性を有する新しい硬質材料を提供できるものと考えた。また、開発する複合材料は超硬合金の用途の一部を代替できるように、硬度900 Hv以上、3点曲げ強度で2 GPaを超えることを目標とした。

3 目標の実現に向けた研究のシナリオ

この技術開発では、複合材料を構成する硬質粒子の間隙をどのような方法で鉄アルミナイド金属間化合物で充填して硬質粒子と金属間化合物の密着性をいかに高めるかが複合材料の機械的強度を左右することになる。これまでに、硬質粒子の多孔質成形体（プリフォーム）を作製して、溶解した鉄アルミナイド金属間化合物を加圧注入する方法や、溶解した鉄アルミナイド金属間化合物の中に硬質粒子の粉末を混合して攪拌する方法等が検討されているが、硬質粒子との密着性が低いために高い強度は得られていない。そこで、産総研では高融点である硬質粒子と、金属間化合物を構成する鉄粉末およびアルミニウム粉末を機械的な攪拌力によって強制的に混合するプロセス^[4]を考えた。金属粉末は高い展延性を有していることから、硬質粒子を被覆しながら混合できるものと期待した。

そこで、これまでの超硬合金の製造プロセスに近い方法を用いてWC-FeAl合金(WC-8.6mass%Fe-1.4mass%Al)を作製した。WC粉末、Fe粉末、Al粉末を目的の組成になるように配合してアトライタによる湿式混合を行い、1440℃で真空焼結を行った。これまでの超硬合金は結合相を溶解させながら焼結を行う液相焼結法であり、WC-FeAlの場合にも結合相と硬質粒子の密着性を改善するには高温での焼結が必要であった。得られた焼結体は大気中で800℃に加熱しても優れた耐酸化性を示し、焼結体を熱間等方加圧(HIP)処理すると抗折強度は最大で1.8 GPaを示した。ただ、得られた焼結体の強度には大きなばらつきがあり、安定した焼結体を作製し難いことがわかった。これは、融点の低いAlが真空焼結中に蒸発するため、結合相の組成や量が一定にならないことに起因している。また、蒸発したAlは真空焼結炉の黒鉛電極等へ付着することが懸念され、従来プロセスによるWC-FeAl超硬合金の作製は困難であろうと考えられた。

焼結時のAlの蒸発は、湿式での混合によりFeとAlが十分反応しなかったことが原因と考えられ、大きな混合力で合金を作製できる乾式混合方法であるメカニカルアロイ

ング（以下、MA と記す）を WC-FeAl に適用してみた。これまでに MA によるアルミナイド金属間化合物の合成では、アモルファス状の合金粉末が合成されることが知られており、Fe と Al の合金化が進行するまで長時間の処理を行った。大きなエネルギーで長時間の MA 処理を行うと、硬質粒子と結合相との密着性が強くなり、低温での焼結が期待される。実際に遊星型ボールミルを用いて長時間の MA を行い、焼結してみると 1200 °C でも緻密な焼結体^[5]を作製することができた。しかし、得られた焼結体の抗折強度は 0.8 GPa しかなく、強度の向上を狙って結合相量を増加させても金属相の扁平化が進行^[6]し、焼結体の強度改善にはつながらなかった。すなわち、これまでの超硬合金製造プロセスを発展させた研究開発では WC-FeAl 超硬合金を目的の特性まで高めることはできなかった。その結果、いわゆる“死の谷”に陥り、企業との共同研究も継続できず、実用化への道は閉ざされたかのように思われた。

そこで、これまでの超硬合金製造プロセスから離れ、当時研究グループでアモルファス粉末のバルク成形方法として開発してきたパルス通電焼結技術を WC-FeAl 超硬合金の焼結に応用することへ方向転換した。パルス通電焼結は通電で加熱を行いながら同時に加圧を行うことで短時間・低温で緻密な焼結体を作製する技術であり、固相焼結に適した焼結技術である。ただ、液相を伴う超硬合金の焼結では加圧により液相が分離するため、適さないプロセスと考えていた。しかし、MA において WC 粉末と Fe 粉末は十分に混合されているが、Al と Fe は反応していない状態で焼結を行うと、焼結過程で Fe が溶解する前に Fe と Al の反応で金属間化合物が生成することを見出した。この反応を利用すると、パルス通電焼結における低温（660 °C）で Al が溶解し、その後 FeAl 金属間化合物を合成しながら焼結が進行する。WC-FeAl 超硬合金中の Al 含有量は

わずかであるため、加圧を行っても生成した Al の液体は粉末の空隙部を浸潤する程度で分離する現象は認められなかった。また、パルス通電焼結を用いたことで粉末間のジュール加熱により焼結体の内部まで均等に加熱することができた。一般の粉末冶金プロセスの加圧成形時には有機系の潤滑剤が用いられるが、溶解した Al はこの潤滑剤の役割を果たすものと考えられる。Al が溶解した状態での加圧成形は、半溶融成形技術と全く同じメカニズムであり、Mg 合金の半溶融成形技術で得た知見を投入することで緻密な成形体を作製することに成功した。なお、Fe と Al の反応はわずかな発熱を伴う反応であり、金属間化合物の合成時には微量の体積変化が生じて気孔を生成するが、その後の加熱によって十分緻密化することができた。開発したプロセスは図 1 のように示される。このプロセスで得られた WC-FeAl 超硬合金焼結体は目標の抗折強度と硬度をほぼクリア^{[7][8]}し、ようやく新たな硬質材料としての目途を立てることができた。本合金の作製プロセスにおいては、乾式の新しい合金粉末合成プロセスとパルス通電焼結^{[9]-[11]}という新しい焼結技術を導入することで、実験室レベルではあるが、これまでの超硬合金の一部を置き換えることができる材料を試作できた。ただ、これまでの超硬合金においてご法度とされていた Al 添加はなかなか関連業界に受け入れられるものではなく、また特殊な焼結設備を必要とすることから、基盤技術の構築はできたものの実用化への研究展開に行き詰まりはじめていた。

基盤技術が開発できた経緯を分析してみると、超硬合金に関する基礎知識があったことは当然であるが、粉末冶金に関する知識、加圧焼結技術に関する知識、界面を制御するための微細領域を観察する技術等の知識を有する研究者が、産総研で組成特許を取得した材料に興味を持ち、それぞれのアプローチから材料特性を改善できたことが大きかったと思われる。その結果、これまでの超硬合金

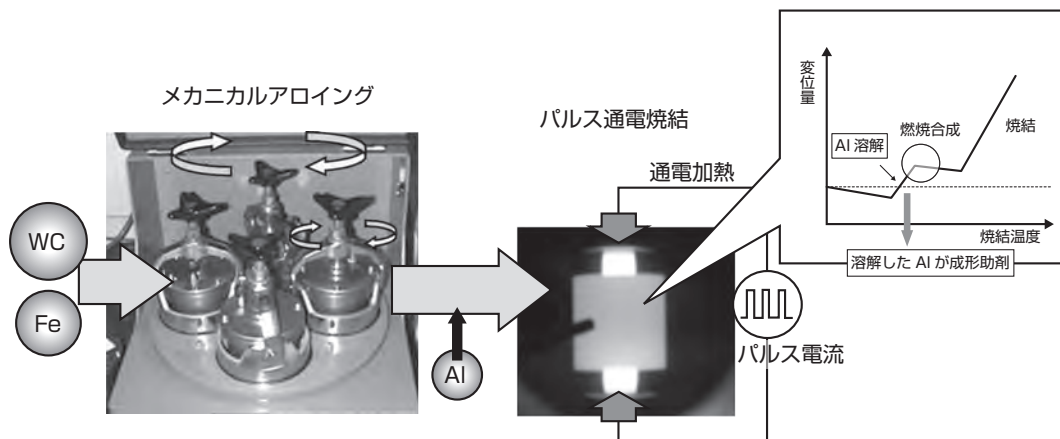


図 1 開発した WC-FeAl 超硬合金の作製プロセス

製造プロセスの呪縛から離れ、奇抜な発想に基づく新たなプロセス開発につながったものと考えられる。それぞれのアプローチで問題解決に取り組んだため、次に紹介する第2種基礎研究から実用化に向かうステージではそれぞれの研究者の個性が表れるユニークな技術に展開することができた。

4 第2種基礎研究から実用化研究へ

新しく開発した WC-FeAl 超硬合金を実用材料として普及するには、本材料を工業レベルで作製してもらえる企業を見つけることが重要である。ただ、新しい材料を新しいプロセスで作製して高い材料特性を示しても、なかなか本気で本材料に取り組んでももらえる企業は現れない。ただ、得られた情報については適宜関連する学会（粉体粉末冶金協会）等の場で報告してきたため、関連業界からは研究の初期段階から注目されていたようである。そこで、一気に本材料を実用化するため、本材料を実用化した際の製品イメージから企業が本当に必要とする実験データを収集することにした。私達はこれをまさしく第2種基礎研究と位置づけ、大学や企業ではリスクが高く実施しづらい内容と考え、実用化に向けたデータ収集を行った。そのために、産総研の“ハイテクものづくり”プロジェクトを活用し、WC-FeAl を金型として実用化するためのキーワードを精査した。すなわち、①実用的な大きさの金型を作製するための大型焼結体作製、② WC-FeAl 超硬合金の加工コストを判断するためにこれまでの加工技術による仕上げ加工、③高温での金型使用を想定した加熱-冷却による耐サーマルショック性、を実用化のための技術課題とした。なお、実験室の装置のみでは対応できない課題も含まれるため、大学や企業の協力を仰ぎながら研究を推進した。

大型焼結体の作製では、開発プロセスにおいて Al 液相

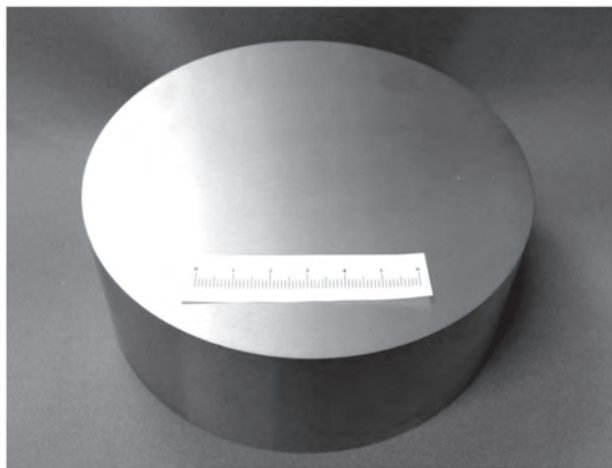


図2 WC-FeAl 超硬合金の大型焼結体の外観

を利用した加圧成形を行っているため、Al 液相が成形助剤として作用し、粉末の緻密化が比較的容易に行えることがわかった。産総研のパルス通電焼結装置より電源および加圧力の大きな焼結装置を利用することで基礎研究と同様の性能を有する大型焼結体が作製できた。試作した大型焼結体の外観を図2に示す。小型の金型として利用できる程度の大きさ（ ϕ 140 mm）を有している。また、硬質な超硬合金の仕上げ加工には放電加工やワイヤーカットが活用されている。これは、超硬合金が有する高い導電性を利用した加工技術である。開発した WC-FeAl 焼結体もこれまでの超硬合金と同様に高い導電性を有していることから、同じ加工条件にてワイヤーカットや放電加工を施すことができた。また、これまでの超硬合金のワイヤーカットでは加工面が少し反応して変色するが、WC-FeAl 超硬合金では FeAl の耐食性の良さを反映して反応が少ないことが確認された。実際に産総研にて焼結した WC-FeAl 超硬合金を加工メーカーに依頼して金型形状（歯車）へ加工したが、その外観は図3に示すように超硬合金製金型と同じ仕上げであった。加工に伴う作業時間もこれまでの超硬合金と同じ程度であることから、これまでの超硬合金と同程度のコストで本材料を加工できることが確認できた。このような金型を高温鍛造等で使用することができれば、被加工材を加熱して高温下にて小さな成形荷重で高速に加工することができ、加工に要するエネルギーの低減が期待できる。一般の高温鍛造等では、金型を水冷しながら使用することがあり、超硬合金を大気中で 900 °C に加熱した後、水中に急冷する実験を行ってみた。急冷した試料の外観を図4に示す。これまでの超硬合金では酸化の進行が大きく、大気中で加熱した試料の表面は酸化膜が生じて青く変色しており、急冷を行うと熱応力でクラックが発生した。一方、WC-FeAl 超硬合金は表面に薄い酸化膜が生じてやや赤褐色になるが、クラックは発生しなかった。このことから開発した WC-FeAl 超硬合金は大気中で加熱しても酸化しにくく、その後水冷してもクラックの発生が少ない材料で



図3 WC-FeAl 超硬合金製金型の外観

あり、高温用の金型材料として期待される。

さらに、WC-FeAl 超硬合金は砥石を使った研削加工においてもこれまでの超硬合金並みの加工速度で同等の加工精度が得られ、複雑形状を有するボールエンドミルの刃先部分を試作加工できた。得られたボールエンドミルの先端部は図5のようにこれまでの材料と同等の加工が実現できている。ただ、本ボールエンドミルは先端部のみ開発材料を使用しており、軸部のハイス材料とろう付けによって接合している。これは、開発したプロセスでは長尺焼結体がまだ作製できないためであり、今後の課題である。

これらの第2種基礎研究の成果は実用化への距離を大きく短縮し、本材料を実際に使用してみたいという企業が複数できた。いずれの企業も自社での材料製造を検討されており、新しいプロセス技術を導入しながら自社の技術と融合させることにより用途および事業化を検討してみたいという希望であった。そこで、切削工具および金型を出口として、材料メーカーや加工メーカーを巻き込んだ研究体制で実用化検討を行っている。

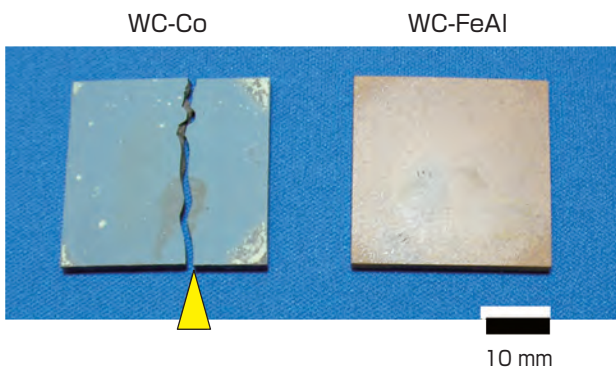


図4 大気中で900℃から水中へ冷却した超硬合金の外観
WC-Co（従来材）は割れているが、WC-FeAlは割れ無し。



図5 WC-FeAlで試作したボールエンドミルの外観

5 考察

開発した WC-FeAl 超硬合金は結合相に FeAl 金属間化合物を採用した新しい複合材料であり、これまでの WC-Co 超硬合金の問題点を解消できる可能性がある。例えば、これまでの超硬合金の結合相である Co は硬度がビッカース硬度で 130 Hv であり、炭化タングステンよりかなり軟らかい材料である。そのため、表面を研磨した際には結合相と硬質粒子の間にでこぼこが生じる。一方、FeAl 金属間化合物はビッカース硬度が 320 Hv であり、硬度差に起因するでこぼこは減少するものと考えられる。そこで、結合相の体積割合をそろえた WC-FeAl 超硬合金およびこれまでの WC-Co 超硬合金をダイヤモンド砥粒で研削し、表面にダイヤモンドライクカーボン (DLC) をスパッタでコーティングした。それぞれの試料における研削面の面粗さは観察場所による差が多少あるものの、WC-FeAl では Ra=4.3 nm であり、WC-Co では Ra=5.3 nm となっていた。WC-FeAl は結合相が硬いため、研削面が滑らかになったものと考えられる。それぞれの超硬母材の上に形成した DLC 膜の密着性をスクラッチ試験により測定してみると、WC-FeAl の方が 25% 程度剥離に必要な荷重が高くなった。DLC 膜と超硬合金母材との界面部分は図6のように、硬質粒子や結合相の上に均質な DLC 膜が密着していることが確認された。WC-FeAl と DLC 膜の界面を微視的に観察すると、界面部には薄い層が観察され、詳細に分析すると酸化アルミニウムの膜が形成されていた。WC-FeAl では表面に薄い

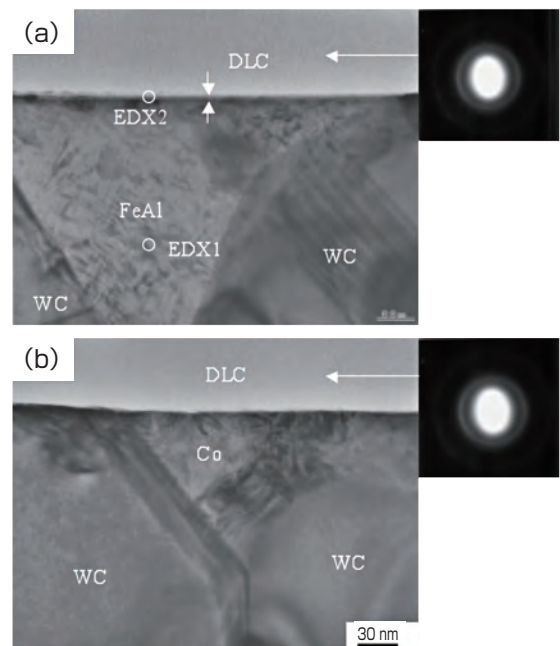


図6 DLC膜と超硬合金の界面部の微細組織観察
(a) DLC/WC-FeAl界面、(b) DLC/WC-Co界面
(a)のEDX2部分で酸化アルミが形成

酸化アルミニウムを含む層が形成され、高温での耐酸化性が改善されているものと考えられるが、室温付近で形成されたこの薄い層は DLC 膜との密着性を改善する効果のあることがわかった。超硬合金の表面に DLC 膜を形成すると、金型と成形材との離型性を改善することが期待される。実際に、マグネシウム薄膜や銅薄膜を DLC 膜をコーティングした WC-FeAl 超硬合金で打ち抜き加工してみると、加工時の成形荷重を低減できることが確認できた。

開発したプロセスで作製した WC-FeAl 超硬合金は、これまでの超硬合金で問題となってきた焼結時の WC 粒子の結晶成長がほとんど観察されない。また、脆化相として知られる W_3Fe_3C 等の複合炭化物相の形成も認められない。開発当初は低温焼結を実現したための結果と判断していたためあまり注目していなかったが、学術的な側面から Al の効果について検討する研究者もあらわれ、炭化物と Fe 系金属間化合物の相互作用についてさらに深い考察を行う必要がある。これまで実用化に注力してきたため、学術的考察が不足している側面もあり、大学との共同研究等を通してさらなる考察を行う予定である。

結合相を FeAl という硬質材料にすることで、同じ硬度を発現させる場合には炭化タングステン量を少なくすることができ、WC-FeAl 超硬合金の利用は省タングステン技術にもつながると考えられる。ただ、そのタングステン削減はわずかであり、さらにタングステン使用量を低減するためには、炭化タングステン以外の硬質材料との複合化を検討する必要がある。特に近年のタングステン価格の高騰を考えると、炭化タングステン以外の硬質材料との複合化について検討する必要がある。そこで、WC-FeAl の作製プロセスを活用して、チタン系の硬質粒子と FeAl の複合化を検討した。高い熱伝導性を有する硼化チタン粒子を Fe-Al 金属間化合物で結合した硬質材料の開発を試みた^{[12][13]}。

得られた TiB_2 -20mass% (Fe-Al) 焼結体は理論密度の 95% 以上となり、その硬度は Fe:Al の比率によって変化するが、1500 Hv 以上を示した。なお、 TiB_2 粒子は結合相に Fe 含有量が多いと焼結性が良好であるため、より Fe 含有量の多い (Fe-Al) 金属間化合物を用いた。また、硬質粒子に炭化チタン粒子と硼化チタン粒子、結合相に Fe-Al 金属間化合物を用いた TiC -30mass% TiB_2 -30mass% (Fe-Al) 硬質材料は、30 W/mK の熱伝導率を示し、これまでの超硬合金とサーメット (TiC-Ni 系合金) の間の値を示した。WC を FeAl 金属間化合物で結合した超硬合金でさまざまな付加機能が発現したように、 TiB_2 - (Fe-Al) あるいは TiC - TiB_2 - (Fe-Al) 硬質材料にも新たな用途がでてくるのではないかと期待している。実際、 TiB_2 - (Fe-Al) 硬質材料は超硬合金より軽量であり、耐摩耗性等をさらに評価することで新しい耐摩耗部材への応用が考えられ、今後の展開が楽しみである。

6 まとめ

産総研で材料自体を開発した耐酸化性に優れた硬質材料である WC-FeAl 超硬合金について、その開発経緯を詳細に紹介し、研究グループとして取り組んできた基礎研究から第 2 種基礎研究、応用研究へ向けた研究開発を紹介させていただいた。開発の経緯を模式的に示すと図 7 のようになり、長年にわたってさまざまな要素技術が融合された結果、現在の WC-FeAl が形成されたことがわかる。硬質材料の開発を開始した頃から超硬合金の一部を代替することを目指していたため、出口としては金型や工具になることは自明であった。さいわい本材料を発見した研究者が企業で超硬合金の開発に従事した経験を持つことから、実用化につながる目標設定を比較的容易に行うことができた。産総研が開発した独自の硬質材料をこれまでの超硬

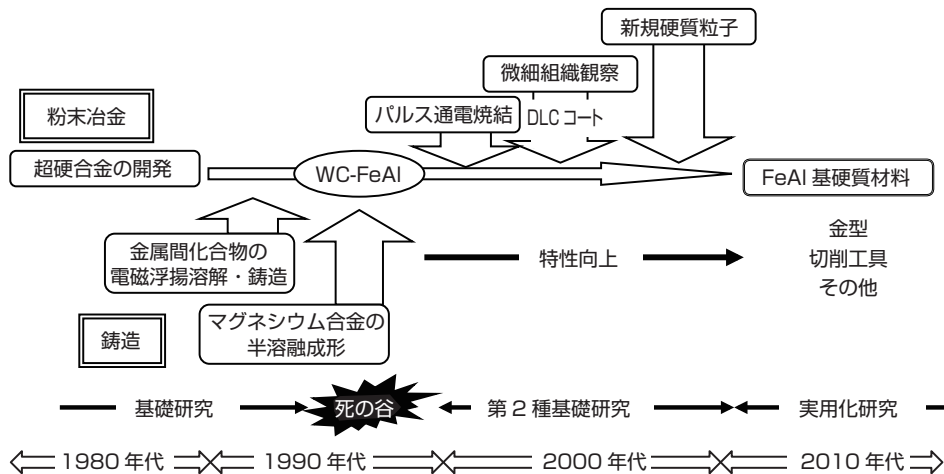


図 7 WC-FeAl 超硬合金の開発

合金製造プロセスを使って目標値を達成することは困難であったが、超硬合金とは直接関係のない研究者の新しいものの見方により、課題を着実に解決することができた。ただ、目標値の達成が即実用化につながるものではなく、長期にわたって継続的に硬質材料に関する学会にて情報を発信し続けることで、企業からのアドバイスをいただきながら実用化に近づく課題をさらに見出すことができた。これまでに本開発材料の実用化を目指したプロジェクトとして、経済産業省の地域コンソーシアムや戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン）のご支援をいただき、産学官の連携体制にて実用化、その先の事業化へ向けて研究開発を推進しているところである。今後も超硬合金においてはCoの価格高騰や人体への影響等が懸念されており、本開発材料の高度化により一層の利用分野拡大が期待される。ようやく大型部材や複雑形状の部材を供給できる体制が組みあがり、本材料にご興味をいただいた方々にサンプルを提供できるようになってきた。WC-FeAlを中心に新しい硬質材料が工業材料としてお役にたてるよう、継続して研究室一丸となった体制で邁進する予定である。

参考文献

- [1] 小林慶三, 三輪謙治, 阪口康司: 高硬度で耐酸化性に優れた超硬合金, 特許第2611177号
- [2] 小林慶三, 尾崎公洋: アルミナド金属間化合物の低温成形合成法, 特許第2818860号
- [3] K.Kobayashi and K.Ozaki: Synthesis of aluminide intermetallics in low temperature using mechanical alloying process, *Mater. Trans., JIM*, 37, 738-742 (1996).
- [4] 小林慶三, 坂崎一茂: Al液体を利用したFeAl金属間化合物の成形, *粉体および粉末冶金*, 42, 1247-1251 (1995).
- [5] 小林慶三, 三輪謙治, 福永稔, 町田正弘: Fe-Al合金を結合相にした超硬合金の作製, *粉体および粉末冶金*, 41, 14-17 (1994).
- [6] 福永稔, 町田正弘, 小林慶三, 尾崎公洋: FeAlを結合相とする超硬合金のパルス通電焼結による作製, *粉体および粉末冶金*, 47, 510-514 (2000).
- [7] 松本章宏, 小林慶三, 尾崎公洋, 西尾敏幸: メカニカルアロイングを利用したFeAl-WCの作製, *粉体および粉末冶金*, 48, 986-989 (2001).
- [8] A.Matsumoto, K.Kobayashi, T.Nishio, K.Ozaki and S.Tada: Fabrication of FeAl-WC by combustion synthesis and the mechanical properties., *Euro PM2004 Conference Proceedings*, 3, 641-645 (2004).
- [9] 小林慶三, 松本章宏, 尾崎公洋: 短時間メカニカルアロイングで合成したWC-20mass%Fe₃Al合金の機械的特性, *粉体および粉末冶金*, 49, 284-289 (2002).
- [10] 小林慶三, 松本章宏, 西尾敏幸, 安井幸栄: 素粉末をミリングした75vol%WC-FeAl混合粉末のパルス通電焼結における結合相の変化, *粉体および粉末冶金*, 54, 269-273 (2007).
- [11] 小林慶三, 尾崎公洋, 多田周二, 西尾敏幸, 安井幸栄: WC-FeAl超硬合金の機械的特性に及ぼすWC粒径, FeAl量の影響, *粉体および粉末冶金*, 55, 593-598 (2008).
- [12] 小林慶三, 松本章宏, 尾崎公洋, 西尾敏幸, 菊池光太郎: メカニカルアロイングによるTiB₂-20mass%Fe₃Alサーメットの合金の作製, *粉体および粉末冶金*, 53, 58-61 (2006).

- [13] 中山博行, 小林慶三, 尾崎公洋, 多田周二, 三上祐史: 通電焼結で作製したTiB₂添加TiC/Fe-Alサーメットの特性, *粉体および粉末冶金*, 56, 775-779 (2009).

執筆者略歴

小林 慶三 (こばやし けいぞう)

1986年3月大阪大学大学院工学研究科冶金工学専攻前期課程修了、(株)神戸製鋼所勤務を経て1989年工業技術院名古屋工業技術試験所入所。チタン合金の磁気浮揚溶解技術、マグネシウム合金の半溶融成形技術、メカニカルアロイングによる非平衡粉末合成技術などの研究に従事。2001年4月産業技術総合研究所基礎素材研究部門相制御プロセス研究グループ長、2004年4月よりサステナブルマテリアル研究部門相制御材料研究グループ長。1997年7月大阪大学より博士(工学)授与。本研究開発では、超硬合金の経験を活かしてWC-FeAl超硬合金を見出し、特許を取得するとともに、全体計画の立案と研究管理・運営を行った。



尾崎 公洋 (おざき きみひろ)

1994年3月大阪大学大学院工学研究科生産加工工学専攻博士課程修了、博士(工学)取得後、同年工業技術院名古屋工業技術研究所入所。メカニカルアロイングパルス通電焼結法によるマグネシウムアモルファス合金の開発、パルス通電焼結法の基礎現象解明などの研究に従事。本研究開発では、金型用途への研究展開を推進するとともに、通電焼結技術の開発に従事した。



松本 章宏 (まつもと あきひろ)

1992年3月名古屋大学大学院工学研究科金属工学および鉄鋼工学専攻博士課程後期課程修了。博士(工学)。同年4月工業技術院名古屋工業技術試験所に入所。構造用高融点金属間化合物の開発、チタン系非晶質・準結晶合金の合成とエネルギー利用に関する研究、環境融合型超硬合金の開発に従事。2007年サステナブルマテリアル研究部門融合部材構造制御研究グループ長。本研究開発では、切削工具用途への研究展開を推進するとともに、微視的組織観察をもとにDLCコーティング技術を開発した。



中山 博行 (なかやま ひろゆき)

2004年3月豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程機能材料工学専攻修了。博士(工学)。ワシントン大学、名古屋工業大学でのポストドクターを経て、2008年4月産業技術総合研究所に入所。本研究開発では、省タンゲステン技術としての研究展開を推進するため、種々の硬質粒子とFe-Al金属間化合物との混合および複合化技術を開発した。



査読者との議論

議論1 超硬合金の市場規模とコバルトフリーの効果

コメント (村山 宣光: 産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門)

研究の背景で、分野の異なる読者に超硬合金の経済的意味とコバルトフリーにする効果をより具体的に理解していただくため、

超硬合金の市場規模、日本シェア、コバルトフリーの経済効果を数値で表現されたらどうでしょうか。

回答 (小林 慶三)

超硬合金の国内生産量は2007年度の超硬工具協会の統計によりますと、3500億円を超えるまでに成長しております。ただ、その後リーマンショック等で減少しておりますが、2000億円を超える市場を維持しており、その後また増加傾向に転じております。超硬合金の国際的なシェアでは、サンドビック、ケナメタル、イスカルに続いて、我が国の三菱マテリアル(株)や住友電気工業(株)等がありますが、日本のシェアについては正確な数値を出すことができませんでした。また、コバルトフリーの効果につきましては、原料コストの低減(原料価格ではコバルト粉末に対して鉄粉末・アルミ粉末は1/4以下: 試薬による比較)とともに、環境的側面(発がん性等)や新たな高温用途への対応等数値化しにくい部分が多々あります。ご指摘にしたがい、数値等を明瞭に記載できる部分につきましては加筆・修正しました。なお、第2種基礎研究から応用研究に向けて開発を進めている鍛造用金型は150億円((財)素形材センター資料)程度の市場があります。

議論2 本研究のオリジナリティ

コメント (村山 宣光)

本研究の第1のオリジナリティは、超硬合金の結合相として、CoのかわりにFeとAlを使い、焼結途中では、Alを液体状態で結合相として機能させ、その後FeAlを合成させ、Fe、Alの欠点を回避するというアイデアだと思います。この着眼点を2.あるいは3.に記載されることにより、論文がより充実すると思います。

第2のオリジナリティは、実験結果では、Fe、Alともに液体状態にしてしまうと、Alの蒸発が激しくて、うまくいかなかったが、Alだけを液体状態にすると、それが結合剤として機能し、かつ、FeAlへの合成も進むという現象の発見だと思います。これは、思考実験によるシナリオ設計どおりの結果は得られなかったが、粘り強い研究によって道が開けた事例です。

3.の目標の実現に向けた研究のシナリオを、例えば、思考実験によるシナリオ設計と実験によるシナリオ変更に大きく分けて記載されると、材料研究のダイナミズムが読者に伝わると思います。

回答 (小林 慶三)

ご理解いただけましたように、本研究ではCoのかわりにFeとAlを用い、焼結途中でAlを溶解し、その後の加熱で目的の金属間化合物を合成するところに最大の特徴があります。この着眼点につきましては、2.に追加しました。また、WC-FeAlという合金をどのような経路で作製するかが今回の研究では重要であったと思います。これまでの超硬合金の概念に縛られて材料開発を行っていた間は、素材の特性については明らかにできたものの、安定した材料を作製することができませんでした。その後、発想を転換してプロセスから見直すことでさまざまな副次的な効果が見出され、結果として研究を飛躍的に伸ばすことができました。ご指摘いただいた点を加味して、3.目標の実現に向けた研究のシナリオを加筆・修正しました。ただ、思考実験というものをごまかす範囲を示すべき概念なのかが明確にできませんでしたので、思考実験という言葉はあえて使用しませんでした。

議論3 材料開発に要する時間

コメント (村山 宣光)

材料開発には長い年月がかかります。これも、材料開発の特徴

です。図7のWC-FeAl超硬合金の開発に時間軸を加え、本文中にも、この点を記載されたいかがでしょうか。

回答 (小林 慶三)

ご指摘のとおり、時間軸の記載は本材料の進化過程をご理解いただくうえで、とても有効なものだと思います。ただ、実際には、同時並行的に技術開発が進行しておりますので、時間軸を記述するのは難しいように思います。かなり雑駁になってしまいますが、図7に10年単位での時間軸を記載し、長期間の歳月が材料開発には必要であることを強調しました。

議論4 実用化に向けた要素技術の選択

コメント (一條 久夫: (株)つくば研究支援センター)

研究開発の必要性、素材合成、特性評価、融合研究をととした新超硬合金開発への一連のプロセスは詳述されています。第2種基礎研究では要素技術の選択と統合の過程が重要ですが、選択についても記されると理解が深まるのではないのでしょうか。

回答 (小林 慶三)

ご指摘にしたがい、要素技術の選択についても簡単に記述しました。金型材料を出口と考えた場合の本材料およびプロセスの課題については、関連する学会等での民間企業からのご意見を拜聴して、選定しました。

また、ハイテクものづくりでは、出口イメージとして中・高温用金型に絞り込み、これまで基礎的な物性(機械的特性、耐酸性、摩耗試験等)の評価を行ってきたWC-FeAl超硬合金に対して、産業的に利用できる金型を供給するための大型素材の試作、加工コストを評価するために従来の超硬合金加工方法の適用性、加熱と冷却を繰り返すことによる割れや酸化の評価を目的とした実験を行いました。これは、関連する学会(粉体粉末冶金協会)にて本材料に興味を示された企業からのヒアリング等を通じて設定したものです。本文の記述内容を加筆・修正し、背景がわかるようにしました。

議論5 パルス通電焼結の効果

質問 (村山 宣光)

パルス通電焼結の効果を教えてください。加圧下で、660℃の低温域での成形、燃焼合成反応とそれに続く焼結ということであれば、通常の加圧焼結でも目的の超硬合金は作製できるのでしょうか。

回答 (小林 慶三)

本プロセスにおける考え方(アルミの溶解による成形と燃焼合成反応、焼結)を使いますと、小型の成形体においてはホットプレス等の加熱と加圧を同時に行える焼結プロセスでも実現できると思います。ただ、大型の成形体では、ホットプレスのようなヒーターを用いた外熱式の加熱では、ヒーター近傍と成形体の中心付近では温度差が生じ、液相の生成タイミングやその後の燃焼合成反応のタイミングにずれが起こり、均質な焼結体を作製することが難しくなります。これは、私達が半溶融成形の際に身につけた知見であり、パルス通電焼結では成形体内部にも電気が流れて、粉末間でのジュール加熱が行えることから外熱式の加熱方式に比べて温度差の発生を抑えることができます。この結果、大型のWC-FeAl焼結体の作製におきましてもAl液相が成形助剤として均等に作用し、割れない焼結体を作製できたものと考えております。

対談

臨床医学研究とシンセシオロジー

医学研究の分野においては、基礎的研究の成果を治療というかたちで社会に活かす研究のことを臨床研究と呼んでいます。我が国におけるこの臨床研究の状況がどのようになっているのか、国立精神・神経医療研究センターの樋口理事長と本誌小野編集委員長が対談し、医学領域における臨床研究とシンセシオロジーとの共通の目標などについて話し合いました。

シンセシオロジー編集委員会

出席者 (独) 国立精神・神経医療研究センター 樋口 輝彦理事長・総長
Synthesiology 編集委員会 小野 晃編集委員長
司会 Synthesiology 編集委員会 赤松 幹之編集幹事

司会 科学的研究成果を社会に活かすためには、従来の分析的な純粋基礎研究だけでなく、それら要素的技術を構成・統合する方法論を見出す研究が重要であると考えています。医学研究にも基礎研究と臨床研究がありますが、この二つは本質的に学問として違うものなのか、そもそも臨床研究とはどのようなものかということからご説明いただけますか。

第2種基礎研究と臨床医学

樋口 患者さんを治療するために新たな治療法を開発したり、病気の原因を究明して新たな治療法につなげる、それが医学研究の本質的なものです。医学研究には、疾患そのものにダイレクトに関わり、それを解明しようとするアプローチと、人間の体や疾患を構成している要素的な基本・基礎を十分に解明し、その知識と技術をもって実際の人の病気にもう一度立ち向かっていくというアプローチがありますが、基礎医学は、あくまでも正常の細胞の果たす機能、正常の神経の働き方を研究し、臨床研究は基本的には病態や病気の組織を対象とするものです。

基礎医学は歴史的に古くから存在しています。病気の原因を知るために生理学ができたわけではなく、「人の体はどのようなふうにできているのか」「心臓はなぜ自発的にビートを繰り返しているのか」ということ自体に人間は大きな関心と興味を持っていたから、大昔から研究が始まっていたのだと思うのです。

一方、臨床医学は、基礎医学で得られた情報と知識によって、病的な状態は生理的な機能がどう変化して起こったのかを理解することに応用しようとするものです。人や疾患を直接対象とし、健常者と病気を持った人との間でその違いを明確にする、場合によっては、ある薬がほんとうに効くのか、プラセボ（偽薬効果：薬を飲むことの心理効果で、薬効がなくても自然治癒効果以上の効果が出ること）と差がないかを何百人、何千人を対象にして行う大規模臨床研究もあります。

司会 疾患モデルの動物を使う臨床研究もありますが、大規模な、最終的に人の治療に使うかどうかを研究する別のタイプの臨床研究もあるということですね。



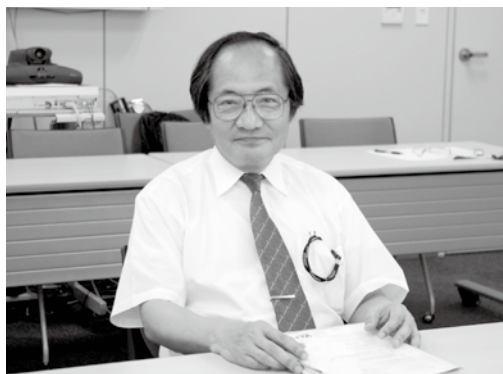
小野 晃氏 (左)、赤松 幹之氏 (中央)、樋口 輝彦氏 (右)

小野 今の基礎医学と臨床医学というお話は、我々の第1種基礎研究と第2種基礎研究に似ているような気がします。純粹基礎研究は夢があり、夢を達成した人はノーベル賞をもらえることもあるし、研究費もそこそこついてきます。しかし、その成果が現実の産業界で製品になり、社会に使われるようになるまでには時間的・技術的なギャップが非常に大きい。社会的価値を実現するためには、分析的手法だけでなく構成的・統合的手法が必要であると考えています。

樋口 第2種基礎研究が応用研究と呼ばれるものだとすると、臨床研究で動物モデルや病的細胞を使う研究はそこに位置付けられると思います。実際に人を対象として検証していく大規模臨床研究は「製品化研究」に近いですね。私は、世の中に出していくところの研究が足りないと考えています。例えば、抗がん剤一つとってみても、動物にがんをつくって、この薬を使ったらがんが消えたということが証明できたとしても、それが人のがんで果たして本当に効くのか、副作用は出ないのかということを経験してみないと薬にはなりません。

司会 人間を使って治療の効果があるかを確かめるという意味では、疾患指向型研究のカテゴリーになるのでしょうか。病気のメカニズム解明に近いのでしょうか。

樋口 メカニズム解明とはちょっと違うアプローチかもしれませんが。人を対象にしても、病態研究と治療研究があります。例えば、アルツハイマー病の病態を研究するためには、昔は死後の脳の組織を顕微鏡で見ることしかできませんでした。しかし、現在は、画像技術の進歩によって、生きている患者の脳画像を見ることができるようになり、それを用いてアルツハイマーの病態を研究することが可能になっています。これは人を対象にした病態研究ですが、まだ治療研究ではありません。治療研究になってくると、こ



樋口 輝彦氏

れはほとんど臨床研究の範疇です。

司会 病態研究までは、ある疾患という自然現象を対象にしたメカニズムを解明するわけですから、第1種基礎研究に近いのでしょうか。それを治療に変換するところが第2種基礎研究に変わるところなのではないでしょうか。

病態研究から治療への橋渡しをするTMC

小野 医学の世界では、一人の研究者は病態研究だけ、あるいは治療研究だけを行うのでしょうか。それとも病態研究から治療研究まで一貫してすることはあるのでしょうか。

樋口 両方あります。国立精神・神経センターの神経研究所の例で申し上げますと、筋ジストロフィーという疾患は遺伝する病気で、ようやくジストロフィンという遺伝子が見つかりました。それから十数年経って、どういう異常蛋白ができて筋肉が萎縮していくのかということが見えてきたのですが、同じ研究者が治療研究までつなげようとしていません。

司会 樋口先生から見せていただいた日本の臨床研究のデータをみて気になるのは、インパクトファクターの高い基礎医学研究4誌(2000～2005年)における日本の発表論文数は世界4位なのに、臨床医学研究3誌では8位で論文数も少ないですね。

樋口 基礎研究で素晴らしい論文が積み上がっていても、臨床のほうに応用編が一向に出てこない。最終的に人に役立つものとして出てこないとおかしいではないかという認識は強まっています。産総研さんと共通した認識がそこにはあるのだらうと思うのです。

当センターは、病院と二つの研究所から構成されていますが、かつて研究所はもっぱら基礎研究を中心に展開しており、日々の臨床を行っている病院との間にほとんど接点がありませんでした。しかし、独立行政法人化を機に、「基礎研究から応用研究を経て臨床研究」をやろうではないかという認識がこの5、6年の間にできあがり、その要としてトランスレーショナル・メディカルセンター(TMC)が平成21年にスタートしました。TMCでは、精神・神経・筋・発達障害分野の臨床研究についてトランスレーショナル・メディスン推進のため、研究と臨床を結びつけること、治験や臨床研究を推進することが重要とされています。

日本でなぜ大規模臨床研究が進まないのか

司会 先ほどの筋ジストロフィーのケースもそうですが、治療方法のアイデアとなるような基礎研究が多くあるのに、かたや、臨床に応用できるものが出てこない。大規模臨床研究も含めて、日本で臨床研究が進まないのはなぜでしょうか。

樋口 研究者は、「オリジナリティのあるクオリティの高い研究をクオリティの高いジャーナルに掲載する」ことが仕事として評価されます。大規模な臨床研究は、三、四十人が関わって、デザインも非常に用意周到に準備して、大勢の患者さんをリクルートして、そして初めて成り立つという世界ですから、研究者としてはものすごく生産性が悪い。一つの臨床研究を終わらせるのに、場合によっては5、6年かかります。しかも、そこですばらしい結果が得られたとしても、ファーストオーサーは1人です。他の三、四十人の人たちにとっては、割いたエネルギーに対する評価を考えれば自分一人でデザインして、動物を使って数カ月でいい研究をして、ファーストオーサーになってネイチャー、サイエンスに出したほうがずっと効率がいいし、評価も高い。こういう認識になるのは、ある意味では当然なのでしょうが、それがこの領域を遅らせてきた理由の一つです。アメリカでは、そこに研究費や人を投入し、しかもオーサーもかなりの数を並べて、この研究に関わったということで評価される。その辺の違いもあるのだらうと思うのですが、日本は決定的に遅れました。

司会 今の大規模臨床研究が進まない理由は、『Synthesiology』の発刊の趣旨とも非常に関係が深いように思いますが、小野編集委員長はどう思いますか。

小野 臨床研究が遅れた要因の一つに「研究者としての論文生産性」というお話がありましたが、産総研も第1種基礎研究と製品化研究の橋渡しとしての第2種基礎研究



小野 晃氏

の推進を柱にしようとしたとき、「研究者として評価してほしい。この領域でジャーナルがありません。どうするのですか」と言われました。そして、『Synthesiology』ができたのです。まだささやかなものですが、この雑誌に掲載される論文は、我々がいわゆる基礎科学と言ってきた論文とどこが違うのか、どこにオリジナリティがあるのかということ突き詰めて考えました。また査読者の名前を明らかにしています。一般の学術ジャーナルは、公平性を担保するために、査読者は匿名、著者の名前も査読者に対して匿名にする傾向ですが、我々はその逆を行ったのですね。どういう点が評価されたのか、あるいは評価されなかったのかということに関して完全にオープンにしてしまう。透明性を担保したのですが、実は公平性のほうにもいい影響がありまして、査読者は自分の名前が出るとなると、変な質問ができないし、偏ったコメントができなくなる(笑)。

司会 臨床研究が進まなかった理由は、ほかにもあるでしょうか。

樋口 国家として、そういうものに価値を置き、資金を投入し、そして人を育てるということをしてこなかったことです。

製薬会社も大規模臨床研究をしますが、それは最終的に薬になって大勢の患者さんが使ってくれる場合に限りません。患者数は少ないけれども重篤な疾患には国のサポートが必要です。最近スタートした「医師主導型治験」は製薬メーカーが直接関与せずに、パブリックな研究費を得て、医師が主体に行っています。

人を育てるということでは、教育のシステムは今でも十分とは言えません。臨床研究を行うためには生物統計や疫学統計の専門家が必要ですが、大学に講座がない。そのため、ほとんどの人は海外で勉強して、帰ってくると就職先として製薬会社に行きます。また、大型臨床研究をするには、どれくらいの統計値で有意差がつくのか、そのために症例がどれくらい必要かというデザインをしなければいけません。臨床疫学を専門とする大学の講座は5指に満たない。研究者としてのモチベーションという面も大きいけれども、臨床研究に対する環境が整っていなかったし、重要性を国も大学も研究所も共有できていなかった。その結果、日本はどんどん遅れていったわけです。

小野 ドラッグ・ラグという言葉をよく聞きます。

樋口 日本では臨床研究を行う体制が十分整っていないため、外国で使える薬が日本で使えないということです。

司会 アメリカで医学系の基礎研究がすごく盛んになり、その後にトランスレーショナル・リサーチということが言われ出したと思うのですが、それは遺伝子絡みの研究が起きたからでしょうか。

樋口 遺伝子解析で応用研究の可能性を持ったものが出てきたという、大きなブレイクスルーがありました。遺伝子の学問があそこまで行かなかつたら、バイオ系の研究にあまり大きな変化をもたらさなかつたかもしれません。

司会 要素還元的な解明がものをつくることにつながるレベルまで解明できるようになった、それがかたや物理学の素粒子という世界であり、医学の場合はそれが遺伝子だと思ふのです。メカニズムのエレメントとしてそこまで解明できたので、いろいろなアイデアが出てくるようになってきたということですね。

樋口 どうやったら臨床研究のほうへもっと迅速に流せるのか。トランスレーショナル・リサーチと声高に言われるようになった背景には、それが確かにあります。

しかし、精神疾患の多くや、糖尿病などの慢性疾患、生活習慣病的なものは、環境と遺伝子の両方が関与している領域ですから、もっと複雑系です。

臨床研究の推進を実現するために必要なこと

司会 基礎研究から臨床研究へ移っていく重要性は社会的には理解されているけれども、日本の場合、トランスレーションする部分の教育がないことや、研究者のマインドに課題があるということですね。では、同じ研究者が基礎研究から臨床研究に移る、あるいは基礎的な研究をしている医者が臨床研究に移るということについて抵抗はあるのでしょうか。

樋口 関心はあると思いますが、そこに携わろうとする



赤松 幹之 氏

と自分の本業はそっちのけでやらないといけません。特に、研究者が応用編のところに出ていくのは難しいですから、チームが必要です。研究者がクリニカル・トライアルのところまで自ら関与するということはおそらく難しいので、共通したマインドを持った研究者と実際の臨床家と、その間に介在する、治験でいえば我々が言うところのCRC (Clinical Research Coordinator) などを中心にチームをつくって動いていかないと難しいでしょうね。

小野 それは国研や独法研究所の役割になってくるのでしょうか。

樋口 そう思います。大規模な研究所と病院とを持っているナショナルセンターがそれに一番フィットするので、そういう中でチームを組んで、それぞれの役割を果たす人たちが共同して関与するというやり方が求められるでしょう。それはぜひやりたいと、ナショナルセンターは表明しています。大学は一つの研究室単位で動いているのでちょっと難しいかもしれません。

研究所でプロダクトをつくり、それを実際に臨床で検証するという、スタートからゴールまでを一貫してやれる機関はそんなに多くはないでしょうね。

小野 製薬会社が非常に大きな資本を持ってれば、研究から臨床までデザインできるし、大規模臨床研究が行えるということですね。

樋口 日本の製薬メーカーの研究所は研究能力が高いし、非常にアイデアのいいコンパウンドを自分たちでつくるのだけれども、それを国内で検証できない。全部海外に持って行き、逆輸入しているのが現状です。

司会 製薬メーカーから見て日本国内で治験をするためのバリアがあるのでしょうか。

樋口 日本の治験のシステムは時間とコストがかかるということでしょうか。例えば、新しい薬をアメリカへ持っていって半年でファーストステップが終わるのに日本では2年かかるとなると、アメリカでファーストステップを終わらせ、逆輸入することになります。市場も、日本の人口が1億何千万人、中国は13億人、インドも11億人の世界です。そういうことから、国内の開発を手控えて海外へという流れが出てきているのです。治験の空洞化は大きな問題です。

もう一つ、医療機関のキャパシティが非常に小さい。例えば、100例の症例の治験をやろうとすると、日本はたぶ

ん 30 施設くらい見つけておかないとできない。ところが、アメリカやヨーロッパでは、一つの施設で 10 例、15 例でできるのです。

司会 それは病院の規模の大きさの問題なのですか。

樋口 規模というよりも、その医療機関が臨床試験にどれだけ力を注ごうとしているかということです。今は CRC がかなり配置されて、雑用的なことを全部その人たちがやって、医師は評価するだけでよいというふうになったのですが、以前は医師が書類作り等々すべてやっていたので、臨床の時間に加えて、負担が大きく、協力するにも限界があったということがあります。

平成 20 年に日本学術会議から「日本における臨床治験の問題点と今後の対策」という提言が出されていますが、我が国の治験実施体制の不備、そこに関わる医師たちのインセンティブが非常に低いという問題が指摘されています。もっと悪いことは、海外での試験は、初めてということで、その結果は比較的クオリティの高い英文誌のジャーナルに出るのですが、日本ではドラッグ・ラグで遅れているため、三番煎じくらいの試験を国内でやることになってしまいうので、ほとんど名もないジャーナルに掲載するしかない。ただ、最近、やっとグローバルの中に日本が最初から参加して、少なくとも研究代表者は英文誌のオーサーの中に入るといふふうになりつつあります。

臨床研究の推進には研究者のインセンティブとサポートシステムが必要

司会 大学や研究所にいる医師たちにとって、臨床研究をするためのインセンティブはやはり論文でしょうか。

樋口 論文と研究費です。ただ、研究費に制約があって、非常に使い勝手が悪いということはありません。

小野 大変な問題がありそうですが、どういうふうに対処しようとお考えですか。

まずは、ご自身のセンターの中でトランスレーショナル・リサーチセンターを成功させるということが一番であろうと？

樋口 それがまず一番です。それから臨床に携わっている人たちが高いモチベーションを持てるようにする必要があります。臨床研究をするためには相当のエネルギーが必要になります。モチベーションを高めるためにいろいろな意味でのインセンティブと、コーディネーター的な存在を含むサポー

トシステムをつくる必要があるということです。TMC のコンセプトは、研究所の成果を臨床へという方向性を持ってつくられたものですが、逆の流れも必要です。つまり、医師がアイデアを持っていたり、こういう臨床研究をやりたいというときに、デザインも含めてサポートする体制です。

小野 トランスレーショナル・リサーチそのもののオリジナリティや研究としての面白さというのはどんなところにあるのでしょうか。

樋口 先ほどの筋ジストロフィーの研究は、うちの病院で第 1 号の臨床応用を行うことになります。病院もセンターでのオリジナルな仕事だからと協力的です。研究者にとってはものすごくやりがいがある、しかも、発見だけで終わらず、それを臨床応用に具体化するところまで関わられるので、モチベーションは高い。ただ、これがうまくいったので全国で数百例を対象にしてやりたいといったときに、果たしてどれくらいが協力してくれるか。そこは医師主導型の研究の成否にかかります。

小野 医師主導型の研究によって小規模から中規模のところまでは持っていく。そこから、あとは製薬会社に渡してもいい、ということになりますか。

樋口 そういうことです。

社会が受け入れ、支える研究へ

司会 臨床研究は、物事を社会で検証するプロセスなので、「社会全体で支える」という意識が必要だと思うのです。研究者個人としての価値基準だけで行動していると、だれも大規模な検証をする手伝いをしてくれなくなってしまいます。社会自体の意識変革が不可欠なのではないでしょうか。

小野 それとリスクに対する考え方ですね。日本のロボット研究は相当にいいレベルにあるのですが、最後の一線が安全性なのです。ロボットメーカーが製品化で二の足を踏んでいるのは、もしも事故が起きたとき、どのくらいの責任を負わなければいけないのか、それはすべて製造者の責任なのか、ということなのです。臨床治験とちょっと似たところがあるような気がしたのですが、リスクはその提供者のみが全面的に負わなければいけないのか、提供された側あるいは社会がある合意の上でリスクを分担していくと考えるのか。

そこがまだないものだから、ロボットが普及しないのです。ロボットの治験が進まないのです(笑)。

樋口 あ、そうなの(笑)。

小野 それで、我々はISOやJISの安全基準まではいっていないけれども、一応の安全基準をつくってみよう。できるだけ公的な立場で、可能な限りの安全性を考慮し、この安全性に関してはクリアしたことを示そう、それを「パイロット認証」と言っているのですが、社会的な合意のもとで顧客は使ってみてくださいということを今やろうとしているところなのです。

司会 筑波大学の次世代医療研究開発・教育統合センター(CREIL)の例なのですが、そこでトランスレーショナルリサーチをするときに、茨城県の開業医の先生たちのネットワークを利用して手伝ってもらっています。開業医の先生方にとって臨床研究のお手伝いをするということが先端技術に触れる喜びになっているようです。

ロボットも「リスクはあるかもしれないけれども、評価してくださいね」ということで、一般の方々に最先端技術に触れる喜びを得ていただき、それでうまく回っていくところがあるのではないかと思います。

小野 市民による社会貢献の一つですね。そういうことが医学のほうでも、我々のほうでも要るのかなという感じがします。

司会 今のは一般ユーザーとお医者さんのレベルですが、患者さんはまた違うメンタリティが有りますね。

樋口 患者さんも日本と世界を比べると、いろいろな仕組みの違いがあるから、それは無理もないということもあるのですが、まず保険制度が違います。日本は皆保険ですから、皆さん、等しく治療も受けられる。アメリカでは、オバマさんが変更しようとしていますけれども、基本的にはプライベートに高額な保険料を払って加入します。治療は費用がかからないので、そこに人がドッと集まる。

けれども、もっと本質的なところはボランティア精神でしょうか。欧米では、人の役に立ちたい、社会に貢献したいという、積極的なボランティア精神を強く感じます。日本は治療に参加してくださいということに対してのノリは悪いですね。

司会 リスクとベネフィットのうちのベネフィットは主張するが、リスクはとりたくないという傾向が日本人にはあるように感じますね。

小野 確かに、リスク・ベネフィットがうまく判断できないというのは至るところにあるような気がします。

医療について、国民皆保険は素晴らしい制度ですし、世界一長寿命も実現した。そういう成功体験があるものだから、このままでいけるんじゃないかと思っているのだけれども、そうは簡単にいかないよ、ということでしょうか。

樋口 臓器移植やODAなどの話にも共通していると思います。自分たちも応分の負担をしなければいけないということですね。

小野 日本は安心・安全のいい社会をいち早く実現したと思うのです。それは非常にハッピーであったけれども、理想の社会を実現したがゆえに次に進めない、次のエネルギーが出てこないという、今はそういう状況かもしれません。日本の良い点は良い点として、やはり変わらないといけません。

司会 地球環境自体が変わっていくことにはたと気づいたら、もうついていけなかった、ということが起きかねない。研究者だけがひた走ればいい時代もあったのですが、今は社会的な合意のもとに、社会と一緒に、社会を巻き込んで、考え、行動していくときですね。どうもありがとうございました。

本対談は、2010年7月2日、東京都千代田区にある産総研秋葉原事業所において行われました。

略歴

樋口 輝彦(ひぐち てるひこ)

1972年東京大学医学部卒業。東京大学医学部附属病院、埼玉医科大学、群馬大学医学部精神神経学教室、昭和大学藤が丘病院精神神経科教授を経て、1999年国立精神・神経センター国府台病院副院長、翌年院長、2004年国立精神・神経センター武蔵病院院長、2007年国立精神・神経センター総長、2010年4月独立行政法人国立精神・神経医療研究センター理事長・総長現在に至る。日本学術会議会員。他に、日本臨床精神神経薬理学会(副理事長)、日本産業精神保健学会(常任理事)、日本うつ病学会(理事)等の会員。専門は気分障害の薬理・生化学、臨床精神薬理、うつ病の臨床研究。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

項目	執筆要件	査読基準
1 研究目標	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

1 投稿記事

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

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

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

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

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

3.3.4 図についてはそのまま印刷できる鮮明な原図、または画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則

は刷り上りで左右15 cm以下、白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

4 原稿の提出

原稿の提出は紙媒体で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@m.aist.go.jp

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.Ono

Senior Executive Editor: N.Kobayashi, M.Seto

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

Editors: S. Abe, K. Igarashi, H. Ichijo, K. Ueda, A. Etori, K. Ohmaki, Y. Owadano, M. Okaji
A. Kageyama, T. Kubo, T. Shimizu, Y. Jigami, H. Tateishi, M. Tanaka, E. Tsukuda,
S. Togashi, H. Nakashima, K. Nakamura, Y. Hasegawa, J. Hama, K. Harada,
N. Matsuki, K. Mizuno, 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, Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan

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

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

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

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

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

1 Types of contributions

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

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

3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 Format

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

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

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

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

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

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

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title*

of journal (italic), Volume(Issue), Starting page-Ending page (Year of publication).

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

4 Submission

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

Synthesiology Editorial Board
c/o 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@m.aist.go.jp

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

Synthesiology Editorial Board
c/o 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@m.aist.go.jp

Synthesiology 3巻総目次(2010)

3巻1号

研究論文

1550℃に至る高温度の計測の信頼性向上

-熱電対のための温度の標準体系構築- ……新井 優、小倉 秀樹、井土 正也 1-15

マイクロチップを用いたバイオマーカー解析コア技術の開発

-POCTデバイスとしてのマイクロチップ基板の可能性を探る- ……片岡 正俊、八代 聖基、山村 昌平、田中 正人、大家 利彦 16-25

石油流量国家標準の確立とわが国の標準供給体制

-信頼性のある効率的なトレーサビリティ体系の構築への取り組み- ……嶋田 隆司、土井原 良次、寺尾 吉哉、高本 正樹 26-35

臨床情報学のための野外科学的方法

-技術移転の方法論に向けて- ……木下 佳樹、高井 利憲 36-46

製造現場における熟練技能の抽出に関する研究

-技能の可視化および代替に関する研究- ……松木 則夫 47-55

暗号モジュールの安全な実装を目指して

-サイドチャネル攻撃の標準評価環境の構築- ……佐藤 証、片下 敏宏、坂根 広史 56-65

論説

“社会のための科学”と研究開発評価

-プログラム評価の構造とSynthesiologyへの示唆- ……大谷 竜 66-76

座談会

シンセシオロジー創刊2周年を迎えて …… 77-82

3巻2号

研究論文

サービス工学としてのサイバーアシスト

-10年早すぎた?プロジェクト- ……中島 秀之、橋田 浩一 96-111

学問分野を超えた「システムデザイン・マネジメント学」の大学院教育の構築

-大規模・複雑システムの構築と運用をリードする人材の育成を目指して- ……神武 直彦、前野 隆司、西村 秀和、狼 嘉彰 112-126

紫外線防御化粧品と評価装置の製品化

-産総研の論理・戦略的方法と工業技術院の経験・試行錯誤的方法を組み合わせた地域連携型の製品化研究- ……高尾 泰正、山東 睦夫 127-136

コンパクトプロセスの構築

-高圧マイクロエンジニアリングと超臨界流体との融合- ……鈴木 明、川波 肇、川崎 慎一郎、畑田 清隆 137-146

正確性・コストパフォーマンスに優れた遺伝子定量技術の開発と実用化への取り組み

-蛍光消光現象を利用した遺伝子定量技術の開発- ……野田 尚宏 147-157

報告

シンセシオロジー(構成学): 知の統合を目指す学問体系 …… 158-168

3巻3号

研究論文

映像の安心な利用を可能にする映像酔い評価システムの開発 -人間特性研究/映像分析技術/映像制作技術の融合による安心・快適な映像を提供するための環境づくり-	・・・氏家 弘裕	180-189
戦略的システムデザインによる最適化設計法の提案 -排熱の再利用によるデータセンターと農業のCO ₂ 排出量の削減-	・・・福田 次郎、日比谷 孟俊	190-196
複雑システムの信頼性を向上させる開発手法 -アーキテクチャ設計手法とモデル検査の融合-	・・・加藤 淳、浦郷 正隆、狼 嘉彰	197-212
ものづくり産業の国際競争を支援する電気標準 -キャパシタンス標準の実現と計量トレーサビリティ体系の確立-	・・・中村 安宏、堂前 篤志	213-222
遺伝子解析の精度向上と試薬の開発 -ライフサイエンスに用いる化学試薬の製品化-	・・・小松 康雄、小島 直	223-230
安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発 -無線センサーによる鶏健康モニタリングシステム-	・・・伊藤 寿浩、増田 誉、塚本 健司	231-240
インタビュー イノベーションを推進する根本的エンジニアリング	・・・鈴木 浩、赤松 幹之	241-246

3巻4号

研究論文

SiC半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略 -新規半導体デバイス開発における産総研の役割-	・・・荒井 和雄	259-271
単結晶ダイヤモンド・ウェハの開発 -マイクロ波プラズマCVD法による大型化とウェハ化技術-	・・・茶谷原 昭義、空野 由明、坪内 信輝、山田 英明	272-280
日本全土の元素分布の調査とその活用 -陸と海を統合した地球化学図の作成-	・・・今井 登	281-291
いかにしてカーナビゲーションシステムは実用化されたか -開発マネジメントと事業化について-	・・・池田 博榮、小林 祥延、平野 和夫	292-300
鑄造技術と粉末冶金技術の融合による新材料開発 -金属間化合物を活用した高機能硬質材料-	・・・小林 慶三、尾崎 公洋、松本 章宏、中山 博行	301-308
対談 臨床医学研究とシンセシオロジー	・・・樋口 輝彦、小野 晃	309-314

編集後記

2008年1月にシンセシオロジーの1巻1号を創刊してからまもなく丸3年になります。これまで（本号まで）全部で12号を発刊し、70編以上の研究論文と10編以上の論説・討論記事を掲載しました。この間読者各位からはシンセシオロジー誌に高い関心と暖かい励ましをいただきましたことに、編集委員会一同厚く御礼申し上げます。

シンセシオロジーでは、これまでに産総研と大学の研究を中心に論文を掲載してきましたが、今回はじめて企業の開発に関する論文、「いかにしてカーナビゲーションシステムは実用化されたか」を掲載しました。日本で先駆的に開発され、日本の技術が世界の人々の安全と便益に大きく貢献したカーナビですが、その草創期における研究開発のシナリオとプロセスが明快に記述されています。

この論文では多分野に跨る多くの要素技術を統合して目標に向かって進んでいく過程がよく分かり、また企業での研究開発の意思決定にも触れることができ貴重です。企業の研究者や技術者だけでなく、公的研究機関や大学の研究者にも大いに読みごたえのある論文になっていますので、是非一読をお勧めしたいと思います。

「日本全土の元素分布の調査とその活用」は20年以上にわたって成し遂げられた地質学の研究の集大成です。日本全土をカバーする地球化学図を初めて世に出したわけですが、基本的な研究方法論を確立しつつ、多くの要素技術を統合して完成させた骨太

の構成的研究です。また「SiC半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略」は、現在実用化の一手手前まできている技術の過去15年におよぶ研究開発の中で、状況の変化に応じて研究戦略を進化させていった興味深い論文となっています。

医学研究において、臨床医学は基礎医学に比べると我が国が先進各国に対して著しく遅れをとっている分野と言われています。臨床医学の研究は疾病の診断と治療に直接関連するものですので、シンセシオロジーが扱う第2種基礎研究と相通じる点が多くあります。国立精神・神経医療研究センターの樋口理事長との対談では、この種の研究に対する我が国のあるべき姿勢が議論されています。

シンセシオロジーの創刊3周年を迎えるに当たって、これまでと同様各方面の研究者、技術者の皆様に高い関心を持っていただけますとありがたく思います。また本誌が新しい試みとして導入した「査読者と著者との議論」は読者に好評を博していることから、今後とも公開を続けていくつもりです。社会への出口を見据えて科学技術の研究開発に携わっておられる幅広い分野の研究者、技術者の方々が、本誌へ積極的に投稿されることをお待ちしております。

(編集委員長 小野 晃)

Synthesiology 3巻4号 2010年11月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：石井 武政

委員：阿部 修治、五十嵐 一男、一條 久夫、上田 完次、餌取 章男、大蒔 和仁、大和田野 芳郎、岡路 正博、景山 晃、久保 泰、清水 敏美、地神 芳文、立石 裕、田中 充、佃 栄吉、富樫 茂子、中島 秀之、中村 和憲、長谷川 裕夫、濱 純、原田 晃、松木 則夫、水野 光一、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

事務局：独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部広報制作室内 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@m.aist.go.jp ホームページ <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

R&D of SiC semiconductor power devices and strategy towards their practical utilization

-The role of AIST in developing new semiconductor devices-

K.Arai

Development of single-crystalline diamond wafers

-Enlargement of crystal size by microwave plasma CVD and wafer fabrication technology-

A.Chayahara, Y.Mokuno, N.Tsubouchi and H.Yamada

Investigation of the distribution of elements of the whole of Japan and their applications

-Geochemical map of land and sea of Japan-

N.Imai

How car navigation systems have been put into practical use

-Development management and commercialization process-

H.Ikeda, Y.Kobayashi and K.Hirano

New material development by the integration of cast technology and powder metallurgy technology

-A high-performance hard material which used intermetallic compound for binder phase-

K.Kobayashi, K.Ozaki, A.Matsumoto and H.Nakayama

Talk

Clinical research and synthesiology

T.Higuchi and A.Ono

Editorial policy

Instructions for authors