

Synthesiology

シンセシオロジーの未来

超電導が拓く夢の世界を目指して

QRコードの開発と普及

単結晶固体電解質を利用した
小型全固体リチウム二次電池の開発

土壌・地下水汚染問題の解決に挑む

シンセシオロジー編集委員会

Synthesiology 論文のポイント

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

シンセシオロジー編集委員会

論文：超電導が拓く夢の世界を目指して

－希土類系超電導線材開発の現状と将来展望－ 和泉 輝郎

夢の技術として期待されている高温超電導体を用いた線材開発の現状と実用化へのハードルが述べられている。現状に至るまでに多様な要素技術の統合が行われたシナリオの記述も興味深いですが、今後の実用化に向けた重要なポイントとして挙げられている「ユーザーの本気度」を、いかにして獲得するかは他の多くの新材料実用化に共通する点ではないだろうか。

論文：QRコードの開発と普及

－読み取りを追究したコード開発とオープン戦略による市場形成－ 原 昌宏

2次元バーコードとして広く普及しているQRコードの開発のシナリオだけでなく、普及の戦略が述べられている。優れた技術は特許による独占ということをまず考えるが、この場合には特許権利のオープン化が普及につながった興味深い例である。どんなに優れた技術でも普及・ブランド化のための戦略が無ければ市場形成に至らないことを強く印象づける論文である。

論文：単結晶固体電解質を利用した小型全固体リチウム二次電池の開発

－酸化物系全固体リチウム二次電池の実現を目指して－ 片岡 邦光ほか

リチウム二次電池はスマホや自動車をはじめ利用が拡大しているが、さらに高容量化、高電圧化、長寿命化が可能な、次世代型の全固体リチウム二次電池が注目されている。本論文では、IoT、ウェアラブル、医療用などの用途が期待される酸化物を電解質として用いた全固体リチウム二次電池実現のための課題解決に向けたシナリオが提示されている。

論説：土壌・地下水汚染問題の解決に挑む

－学際融合研究－ 張 銘

豊洲新市場の土壌汚染問題で見られたように、土壌・地下水汚染は多様化・複雑化してきており、単に汚染の浄化・対策技術を深化させるだけでは解決しない問題である。この論説では、問題の解決には、汚染の調査・評価技術やリスク評価・管理技術もあわせて進展させていくとともに、環境・経済及び社会的側面を統合的に考慮することが必要であることを述べている。

Synthesiology 第12巻第1号(2019.2) 目次

論文のポイント	i
寄稿	
シンセシオロジーの未来	・・・吉川 弘之 1-5
研究論文	
超電導が拓く夢の世界を目指して — 希土類系超電導線材開発の現状と将来展望 —	・・・和泉 輝郎 6-18
QR コードの開発と普及 — 読み取りを追究したコード開発とオープン戦略による市場形成 —	・・・原 昌宏 19-27
単結晶固体電解質を利用した小型全固体リチウム二次電池の開発 — 酸化物系全固体リチウム二次電池の実現を目指して —	・・・片岡 邦光、赤尾 忠義、永田 裕、永井 秀明、秋本 順二、明渡 純 28-38
論説	
土壌・地下水汚染問題の解決に挑む — 学際融合研究 —	・・・張 銘 39-47
編集委員会より	
編集方針	48-49
投稿規定	50-51
編集後記	56
「Synthesiology」の趣旨	
Research papers (Abstracts in English)	
Towards an ideal world with superconductivity —Current status and prospects for rare-earth barium copper oxide superconducting tapes—	6 --- T. IZUMI
Development and popularization of QR code —Code development pursuing reading performance and market forming by open strategy—	19 --- M. HARA
Development of a compact all-solid-state lithium secondary battery using single-crystal electrolyte —Towards realizing oxide-type all-solid-state lithium secondary batteries—	28 ----- K. KATAOKA, T. AKAO, H. NAGATA, H. NAGAI, J. AKIMOTO and J. AKEDO
Commentary (Abstract in English)	
Challenges of solving the problem of soil and groundwater contamination —An interdisciplinary approach—	39 --- M. ZHANG
Editorial policy	52-53
Instructions for authors	54-55
Aim of <i>Synthesiology</i>	

シンセシオロジーの未来

吉川 弘之

シンセシオロジー誌が発刊 10 周年を迎えた。この 10 年の間に多くの構成型研究の成果の論文が同誌に発表された。またシンセシオロジーとは何か、構成型研究の構造はどのようなものか、その論文が社会にとって有用な知識になるための条件は何かなどに関する本質的な研究や提案も論文^{[1][2]}として発表され、それは構成型研究を論文として書く者にとって貴重な指針を与えている。構成は有用なものを生み出して社会に恩恵をもたらす人にとって重要な知的行為であるばかりでなく、その結果が社会、そして地球上の自然に大きな影響を与える行為であることがますます顕著になり、しかもその影響が社会や自然に問題を起こす可能性も指摘されて構成的行為に関する問題意識も高まる中で、構成型研究という類のない研究が長い歴史を持つ科学研究と同様に、科学者間でまた社会で認知されることを願って発刊された本誌が 10 周年を迎えたこの時期に、改めてその意義を考えてみたい。

1 科学論文

私がある工学系学会の編集委員に初めてなったころ、次のようなことが言われていた。それは「ものを作っただけでは論文にならない」ということである。事実そのような論文は、これを理由にリジェクトされていた。そして、それはなぜかが議論されいろいろ言われる中で共通した見解は、作るという思索は「科学的でない」ということだったように思う。この考えは、論文として発表される研究はすべて科学的手法に従うべきであるということであったといえるであろう。実際に、人類の発明である機械、電子機器、材料等、世界に大きな影響を与えた数々の人工物は、科学の知識を使いししたが公式に認知された科学的手法によって作り出されたとは言えないし、事実、論文として世の中に示されたことはなく、人工物としてあるいは部分的には特許として世の中に現れる。例えば蒸気機関は論文として現れたのではなく実機として現れ、そして実際に使われた。科学は公的に認められた手法に依拠して研究が行われることによって、その成果が公的知識として認められるから論文として受け入れられる。しかし、知識の使用には公的に認知された方法があるとは言えないために、使用して得られた結果は科学研究の結果のように、公的知識としては認めら

れず、したがって論文としては受理できないというのが理由である。

科学的研究とはごく簡単に言えば、理解できない現象を前にして、背後にあるその現象を駆動している広く成立する原理を発見することと言える。発見した原理は、新しいものであるとき科学的法則になり得るものとして登録される。科学的知識とは法則の集合であり、科学全体としては法則の集合に体系を与えることが目的である。人類は長い歴史をかけて、この方法を発見したといえるであろう。理解できない現象をできるだけ仔細に観察し、観察結果を起こしている背後に何か一般的な原理が存在すると仮定し、その仮定によってその現象の説明を試みる。説明ができた時その原理が仮説と呼ばれ、法則の予備軍に採用される。仮説は他の現象によって覆されない限り仮説であり続けるが、法則群の体系の中に矛盾なく組み入れられるとそれが法則と呼ばれ、公的な存在となる。そして法則を使用した思索が正しいと認められる。

2 シンセシオロジーの先見性

一方、人類の行動に含まれる新しい機械装置を作る、新しい行動様式を採用する、制度を新設するなど、これらをここではまとめて「人工物を作る」と呼んでおくと、それらはいずれも人にとって意味のある現象を作り出すことである。この意味が人工物の機能と呼ばれるものである。この意味のある現象は、一般的には多様な要素的現象の合成である。選ばれる要素的現象は科学的な法則に依拠するものばかりでなく、経験的知識はもちろんのこと、着想、洞察、感性的直観、ある場合には社会的動機等によって集められ科学的には説明不可能なものも自由に採用される。このことは熱力学の法則が知られる前に蒸気機関が作られた例を考えれば自明であるが、現代でも情報系の導入による経済活動が効率化という人工的システムを支える諸現象の科学的法則を全部知っているわけではない。

このように我々が欲しいと思う機能を作り出すことはそれに必要な現象を選択し合成することであるが、使う現象の背後にある法則を知らなくても現象を知っていれば選択してよいし、また現象群を組み合わせる方法についての知識は体系化されていない。このように、人工物を作る過程を

駆動する方法を一般的なものとして記述できないというのが、機械を作っても論文が書けないということの理由である。

人類は多くの人工物を作る方法を厳密には知らない、あるいは科学のように判明な説明ができないということが、「人工物を上手に作るができない」理由であると著者は考える。今おびただしい人工物を作っているのに、それを上手でないということには理由がある。それは同じ意図のもとで、無数の異なったものを作ってしまう、作ったものの正当性の評価ができないということであり、結果的に評価を社会に任せるのであるが、人工物の氾濫が環境破壊を起こす例を見るまでもなく、上手であるとは言えないからである。

しかもただ下手だといっていればよい状態は過去のものとなった。人工物を作ることは人類に意図通りの恩恵を与えてきたから、これは人類繁栄の根拠である。しかし一方で人類にとっての共通の問題、その代表的なものは地球温暖化であるが、それ以外にも緊急に対応しなければならない問題を多く作り出した。それは意図しない機能を作ってしまう副作用と言えるもので、多くは地球の限界 (planetary boundary, J. Rockstrom^[3]) と呼ばれるレジリエンスの視点での地球の包容力の限界を示す項目に含まれるが、資源枯渇、自然災害の増加等の世界的なもの、貧困、格差、飢餓、病気、短命等、そして対立や紛争等の地域的なものがある。これらの原因を見ると、これらはみな人間の行為の中にその根拠がある。科学的知識を応用する現代の競争的産業は地球上で不均一な技術レベルの分布を作り、格差を生んだ。貧困はその中で生まれる。人口増の下で行われた無制限に拡大する競争は、大気、海洋、生態系に影響し、結果として地球環境劣化を引き起こした。このことについて、現在人類は問題を認識し、温暖化については何十年とかかったものの、その対応についての世界的合意に到達している。また新しく提案された国連のSDGsは、地球温暖化のようにその背後の原理を合意して世界が行動するというものではなく、身近な問題現象を指摘してその解消を地域ごとに努めるという方法を採用している。

温暖化の場合は、生じてしまった不都合な現象を除去するために、二酸化炭素の排出量を抑制するという方針である。一方SDGsの場合は、未解決の問題を持つ地域に、同様な問題を持つ他の地域が解決した経験を生かして問題の解消に努めるという方針である。このように基本的には行動の抑制か、既知の知識の移動による解決を目指している。しかしこのような人工物を作ることが原因となって生じる現在の地球的問題を解決する方法として、既存の方法の抑制と地域的移動しかないのであろうか。

3 シンセシオロジーの哲学

近年になって大学教育を中心に、デザイン志向が話題になっている。このことはデザインの能力を高めるという社会の需要にこたえるというのが根拠であるが、そこには重要な意味があると著者は考える。デザインとは、我々工学者の間で考える開発や設計の範囲を超えて、上述した広い意味での「人工物を作る」行為を覆う概念であり、社会における多くの行動、例えば法律・政策の立案、経営の企画、芸術制作の構想、大学のポリシー、病気の治療、そして個人の人生設計も含めて、社会における諸行動の計画が含まれる。これが科学における分析的行為と対置される、構成的行為である。そして、これらの行為が「上手になる」ことが社会的目標として認知されたことを意味している。

このようにデザイン志向とは、構成的行為を暗黙に認めるのではなく人にとって重要なものであることを明示的に認めたいうえで対象化し、それについて考えることを要請している。とすれば、我々のシンセシオロジーは現在高まるデザインへの関心についてすでに10年の歴史を持ち、そこには貴重なデザインにかかわる多くの知見がすでに蓄積されているということができる。

シンセシオロジーに掲載された論文とはどのようなものか、著者はそれを発刊の数年後に調べたことがあるが、まずその紹介をする。

科学論文では、科学では対象が選択され、それによる現象が観測され、観測結果の分析によって既存法則によって説明されるか新しい法則が仮説として提案され、研究結果の応用に言及するという形をとっている。例えば生命科学では、生体の構成要素の働きが明らかになるという流れの中で、ある要素の生体現象における役割を解明し、その知識による病気の治療法を提案することになる。

科学論文では最後に言及する「知識の応用」が、シンセシオロジーでは社会によって求められているものとして最初に書かれる。まず社会がなぜそれを求めているかが述べられる。そしてそれを解決する科学的、技術的知識を探索し、不足の知識は新規の研究プロジェクトを立てて求める。あるいは自由に社会に出て隠れている知識を発掘する。これらのことを背景として、一つの仮説としてのシナリオが描かれるが、その記述が論理的であることと、意味の整合性が求められる。

このシナリオは仮説であり、社会の課題の提起と解決に関するもので、その仮説の実現が得られた結果が論文として記述されるが、仮説は独特な研究開発を誘発し、研究で得られた結果の有用性の確認をするが、書かれた論文には仮説の独創性と解決法の独創性が含まれる。

投稿された論文の構造は独特なものであり、その内容は

多岐にわたるが、研究の視点には共通性がある。その視点を簡単にカテゴリーとしてまとめると、新しい機能、それに伴うリスク、機能実現のための人工物(広義)のデザイン、デザインに基づく製造、固有の計測、そしてそれを社会に適用するための社会技術があり、各視点には独自の項目がある。論文によってその内容は多様であるが、調査の結果得られたカテゴリーをテンプレートとして各研究の視点をその項目とともに描き、その研究が該当する項目を指示することによって論文の意図の特徴を理解できる。例えば第1巻1号に掲載された不凍タンパクの論文^[4]は図1のように書かれる。

この図1の視点とは、研究で実現すべきものであり、この研究では食材の質を落とさずに保存や輸送等のために必要な優れた冷凍法の開発という目標を、基礎研究で発見された科学的知識を使用して実現するというものであるが、そのために必要な視点がテンプレート上に示されている。このように表示すると、他の異なる目標を持つ研究との関係が可視化される。言い換えれば、構成的研究とは相互に関係のないものだと思われていたことが、実はそうでなく共通の独自の構造と必要知識を持っていることが理解される。科学の手法がそれを守った研究であることで信頼され論文として発表が可能になるという社会的規則があ

るのに構成的研究にはそれがいないために論文誌がないという点は、このような例で改善される可能性が期待される。このことは本誌の小野、赤松、小林らの論文^{[1][2]}によって詳細に論じられている。

ここでの視点が実現すべき項目であるというのは、2節に述べた広義のデザインにおける要求機能を意味している。それがテンプレートのような形式化が可能であることは、さらに進んで「すべての視点を網羅した要求の規則」を作り、目標機能の実現とともに前述の副作用を回避できる、前記の上手な構成的行為を期待してよいと思われる。これはシンセシオロジーの哲学であるといえる。

このことが可能になれば、副作用の除去は事後的な行動の抑制や知識の異動に変わり、行動のデザインそのものの中に埋め込むことができるはずである。これはこれから取り掛かるSDGsの計画では特に考慮すべきことである。そこでは多様な知識、技術が、新しい地域に適用されようとしているが、地域の特殊性の考慮なしに適用すれば、危険な副作用が生じることは予見されることであり、デザインの段階で副作用のリスクを排除することが必要条件である。

4 一般デザイン学

ここで改めて、「ものを作っただけでは論文にならない」という科学の論理に依拠する論文の思想について考える。科学では公的な研究の方法が研究者の間で共有され、それに従ったことが論文になる条件であり、これが論文に書かれていることが正当性を持つことの根拠であった。それに対し、構成は方法が論理的であるとは認められていない要素である経験、直観、洞察、感性を含むから、結果の正当性は認められないというものである。

このことは少し説明を必要とする。科学研究はある現象を対象として雑音を排除した実験と、そのできるだけ精度の高い観測とに依拠して演繹的な論理に従う考察により結論を導出することになっている。観測の精度は必ず誤差を含むから、帰納的論理も併用される。ここまでの論文になるのであるが、さらに進んでその論文では実験が行われていない現象にまでその結果の適用範囲を広げて、法則であることを主張するときは仮説を提案することになるが、その時の思索は直観や洞察によるしかないといわれる。そこでは論理的には演繹や帰納は有効でなく仮説形成(abduction)である。この仮説形成は、間違いうる、すなわち可謬的である。このように科学研究で最も重大な仮説の提案は論理的には可謬的な仮説形成であり、この場合の科学者の思索は直観や洞察が主役である。

それでは構成的研究は科学とどこが違うのかと問うべき

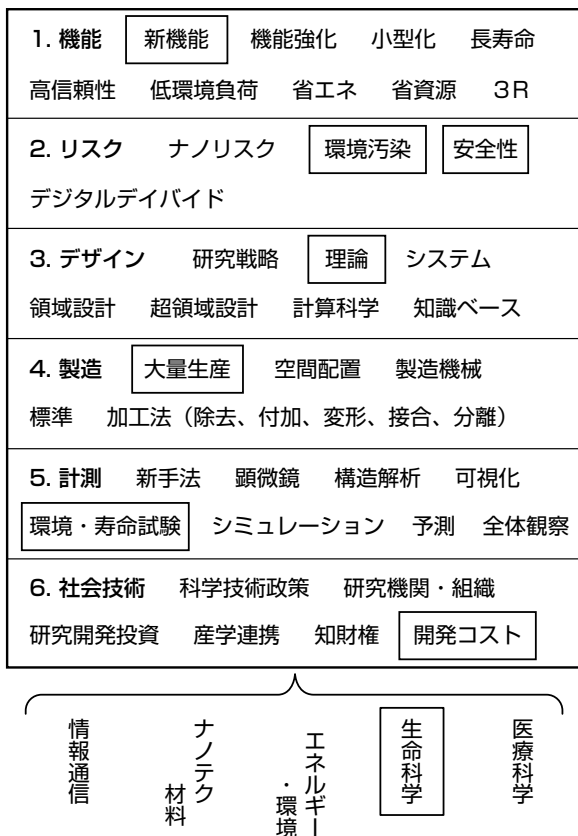


図1 構成的研究の視点

であろう。その答えは、「同じである」というものである。それでは論文にならないという主張が間違っているかと言えばそうではない。実は、科学研究で仮説形成によって提案される法則は、思索の過程でどの部分が仮説形成なのか明示的に示されている。そしてその仮説は、自分を含め、他の研究者の研究によって反論が出ない限り仮説は否定されない。そして多くの検証と、関連する法則との関係が整合的であることが崩れないことによって、次第に法則として認知される。もちろん新しい視点によって法則も書き換えられることはあり、それが科学の進歩である。

このような事情が科学にあるとして、同じような構成的研究が論文にならないといわれるのはなぜか。それは同じ仮説が、科学のように厳密な実験や観測によって確認されないことにある。科学の場合は限定された実験の範囲内でのみ確認されれば、それは暫定的に正しい仮説とされ、それが他の実験で覆されない限り仮説として生き延びる。しかし、人工物を作るという構成的行為の場合は、厳密な実験もいくらでも精度を高められる観測も不可能である。我々は習慣的に作られた人工物の正当性の第一条件として目的とする機能の実現を満たさなければならないと考えるが、この機能は、使用の場の浮動性、観測の不確実性のみならず、目的とする機能の解釈の曖昧性等により、正当性を決定的に言うことができない。その上に、科学における新しい事象への適用に対応する「予期せぬ機能」の出現の確認は非常に難しい。

現実には人工物の正当性の評価は、使用者のいる社会にゆだねられることになる。そして拒否されることなく使用が続くとき、正当であったと結論される。もちろん時代が変わり、評価の基準が変われば拒否されるが、それは科学において新しい理論が古いものを拒否するのと同じであるといつてよいであろう。

このことから、構成的研究が論文として受け入れられるようになるための戦略が生まれる。それは、目標としての機能の表現、その機能を実現するための要素化の過程、要素機能の実現のために用いる現象群、そしてこの現象群の合成など、目標の実現過程を明示し、どこに仮説形成が用いられたかも明らかにする。そしてその過程のいずれに対しても批判の可能性を保証する形式で表現するという戦略である。そしてこの批判を受けることのできる形式を持つ表現が、同じ専門の研究者を含め社会からのすべての反論に耐えた時、その構成結果が科学における仮説の地位を与えられるということである。ところで科学研究では説明できないといわれる現象を既存の法則で説明するものが多く、この場合は演繹論理が主役である。新法則の提案の時に仮説形成が問題となるが、構成的研究ではすべて

仮説形成の論理を使わなければならないので、科学論文よりも知的作業は格段に多くなる。

使用の場で受容か拒否かが判断されるときでも、その判断のために人工物を作る過程の論理構造などが明示的に表現されているとき、社会の判断が容易になることが期待される。科学的知識の使用では、例えばエネルギー問題で石油の燃焼が二酸化炭素を排出するという古くから知られた科学的知識を、目的機能のエネルギー抽出と関係がなくても明示しておくことにより、気候変動を研究する科学者に対して情報をより早く提供できたはずである。また最近の人間行動の情報技術による代替は、生産現場では効率を実験によって確認できるであろうが、家庭に情報技術を入れて生活環境をよくするという発想は直観であろう。その場合は特に、人間にとって外部情報が結合することの人間に与える影響は科学的に説明できていないということを明示し、その影響に対する評価が未確定であることを社会に示しておくことが必要となる。このような視点による明示は、シンセシオロジーの論文ではシナリオのほか、機能の予測によるリスクの推定などが書かれており、上記の観点からの問題について他にない考察がすでに行われていて貴重な論文である。

ここでの結論は、シンセシオロジーの執筆においてこの観点からの意識を明確にしていくことが大切であるということであるが、実はこの問題は構成とは何かを論じる一般デザイン学で扱われる課題であって、科学とは違う一般デザイン学の研究と、構成的研究の論文の形式を定めてゆくことが協調的に行われることが期待される。

参考文献

- [1] 小林直人, 赤松幹之, 岡路正博, 富樫茂子, 原田晃, 湯元昇: Synthesiology論文における構成方法の分析-研究の成果を社会につなげるための構成的方法論をめざして, *Synthesiology*, 5 (1), 36-52 (2012).
- [2] 小野晃, 赤松幹之, 小林直人: 構成型研究におけるシナリオ-シンセシオロジー誌掲載論文による検証の試み-, *Synthesiology*, 9 (1), 26-38 (2016).
- [3] J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin III, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen and J. A. Foley: A safe operating space for humanity, *Nature*, 461, 472-475 (2009).
- [4] 西宮佳志, 三重安弘, 平野悠, 近藤英昌, 三浦愛, 津田栄: 不凍蛋白質の大量精製と新たな応用開拓-実用化を指向する蛋白質研究-, *Synthesiology*, 1 (1), 7-14 (2008).

執筆者略歴

吉川 弘之（よしかわ ひろゆき）

東京大学工学部にて、設計学、製造学、保全学を研究。設計学では設計過程を位相幾何学で記述する「一般設計学」を開拓し、知的CADの基礎を築く。製造学では製造業の共通基礎学問の存在を指摘して「国際知的製造プログラム（IMS）」を提唱し、10年にわたり主導。保全学では保全の一般構造を定義し、「保全ロボット（MOOTY）」を試作。2001年より産業技術総合研究所。理事長として研究経営10カ条に基づき、持続性産業への重心移動のための本格研究を実施する研究所の輪郭を産総研に確立した。1956年東京大学工学部卒、東京大学教授、東京大学総長、放送大学学長、日本学会議会議長、日本学術振興会会長、国際製造科学アカデミー（CIRP）会長、国際科学会議（ICSU）会長。現在、産業技術総合研究所最高顧問、科学技術振興機構研究開発戦略センター特任フェロー。



超電導が拓く夢の世界を目指して

— 希土類系超電導線材開発の現状と将来展望 —

和泉 輝郎

1986年に発見され、フィバーを巻き起こした高温超電導は今どんな状況に置かれているのか。この論文では、液体窒素中でも超電導を示す希土類系超電導体 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, RE:希土類元素) を用いた線材開発の開発経緯と現状、そして将来展望について解説する。同線材の開発の歴史として、重要な3つの課題を選択し、その解決の過程を紹介した。これらの成果により、数百A/cm幅 (77 K, 自己磁場) の臨界電流特性を持つ数百mを超す長さの線材が販売されるに至り、最近では各種の機器に対応した特殊性能 (磁場中特性等) についても大きな進歩を遂げている。さらに、これらの線材を用いた機器開発が始まっており、早期の実用化が期待される場所である。

キーワード: 超電導、 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超電導体、臨界電流密度、人工ピン止め点、交流損失

Towards an ideal world with superconductivity

—Current status and prospects for rare-earth barium copper oxide superconducting tapes—

Teruo IZUMI

We review the history, current status, and prospects of research on rare-earth barium copper oxide ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) coated conductors. Three major issues were addressed to achieve critical current performance for long-coated conductors of several hundred meters. Special functional performances, e.g., in-field critical current, were greatly improved. Applications of coated conductors were also initiated. We expect applications to appear in the near future.

Keywords: Superconductivity, rare-earth barium copper oxide ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) coated conductors, critical current density, artificial pinning centers, AC loss

1 はじめに

1911年オランダのオネス卿によって水銀で発見された超電導現象は、液体ヘリウムの液化研究の過程で見出された^[1]。この超電導とは、電気抵抗がゼロであることから、損失がなく電気エネルギーを送ることができる夢の材料として期待されている。

超電導には、臨界温度 (T_c : 超電導を示す上限の温度)、臨界電流密度 (J_c : 超電導状態を維持できる単位断面積当たりの電流の限界値)、臨界磁場 (H_c : 超電導状態を維持できる磁場の限界値) の3つの臨界条件が存在する。この中で、 T_c および H_c は物性値であり、材料により決定される値である。また、超電導体には、第一種、第二種の二つの超電導体が存在する。第一種超電導体は H_c に到達すると、一気に超電導状態が壊れるのに対し、第二種超電導体では、二つの H_c を有し、下部臨界磁場 (H_{c1}) を超えた磁場で一部の磁束が超電導体内部に侵入するこ

とで比較的高い上部臨界磁場 (H_{c2}) まで超電導状態を維持できる。そこで、実用上は、第二種超電導体で高い T_c および H_{c2} を持つ材料を選択し、高い J_c を実現するための材料開発が進められてきた。結果的に、NbTi および Nb₃Sn 等が MRI (Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴画像) やリニアモーターカー等に用いられている。しかし、 T_c は 20 K 以下であることから、いずれの応用も液体ヘリウム (沸点 4.2 K) の中で使用する形態を取らざるを得ない。液体ヘリウムは、天然ガスの副産物として得られるもので、日本ではほとんどが輸入で得られている。しかし、天然ガスからシェールガスにエネルギー源が移行する中、価格が高騰し、非常に高価であることに加えて、供給が不安定になってきているという問題が起きている。更には、極低温であることで、比熱が非常に小さいことも問題となっている。不測の熱擾乱等により発生、流入した熱により温度が容易に上昇することになり、温度が T_c を超えて超電

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東

Research Institute for Energy Conservation, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan E-mail: teruo.izumi@aist.go.jp

Original manuscript received June 16, 2018, Revisions received August 27, 2018, Accepted August 29, 2018

導状態が急激に壊れるクエンチと呼ばれる現象を引き起こすことがもう一つの課題として挙げられている。いずれも、極低温が起因の課題であり、高い温度で超電導を発する材料の発見が長い間望まれていた。

そんな中、1986年、独のベドノルツ博士とミュラー博士により高い T_c を有する新たな材料系の超電導体 (高温超電導体) が発見された^[2]。上述の超電導体はいずれも金属材料であったが、彼らが見出したのは $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ という酸化物であった。もっとも、彼らは超電導体の探索が目的ではなく誘電体の開発の過程で、本材料を見出したのである。この材料は、ゼロ抵抗になる温度が 10 K 程度であり、金属系材料に比べてそれ程高いものではなかったため、当初は、あまり大きなニュースにはならなかった。しかし、東大の田中教授 (当時) は、抵抗が落ち始める温度が 30 K を超えているところに注目し、この材料系の周辺の組成を有する材料を調査することで、従来理論 (BCS 理論) が予言した T_c の限界を超える新しい超電導体を発見したのである^[3]。その後、次々と新たな超電導体が見出され、中には、 T_c が液体窒素の沸点 (77 K) を超える超電導体が現れ^[4-6]、これまでの応用の限界を超えて大規模で広い応用への展開が期待された。これらの超電導体の中でも $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO, RE: Y 等の希土類元素) ($T_c \sim 95$ K) や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (BSCCO) ($T_c \sim 110$ K) は、高 T_c で毒性を有した元素を含まないことから工業材料として開発の対象とされた。

これらの超電導体を工業材料として利用するには、機器を形成可能な形態である線材等に加工しなければならない。ここで課題となるのが、対象となる超電導体が酸化物である点である。従来の金属材料は、いわゆる、線引き加工技術を適用することにより容易に長尺で均一な線材を作製することが可能であるが、酸化物は延性が乏しく、同様の手法が適用できない。そこで、REBCO に先行して BSCCO において線材化の開発が進められた。BSCCO 材料は比較的結晶粒間の滑り特性に優れることから、従来の線引き加工技術を応用することにより線材形態を実現している。原料粉末を銀パイプに充填し、圧延と熱処理、集合化を繰り返す銀シース法と呼ばれる手法で、いち早く高特性を有する長尺線材の作製に成功している^{[7][8]}。一方で、同線材は比較的高温 (~ 77 K) での磁場中 J_c 特性や機械的特性に課題を有していた。これらの課題の解消を期待して、本質的な特性として高温磁場中での J_c 特性に優れている REBCO 線材の開発が始められた。具体的には、2000 年前後からはほぼ同時期に日米の国プロが立ち上がり、本格的な開発が行われた。

REBCO 線材の開発は、大別して 3 つの課題を解決する

ことにより進められた。第一課題としては、線材形態の中で REBCO が有する高い J_c 特性を実現するために必要な 2 軸配向組織 (単結晶のようにすべての結晶軸が一様に配向した組織) の形成技術の開発であった。第二課題では、高 I_c (臨界電流: 超電導状態を維持できる電流の限界値、 $J_c \times$ 断面積) 特性を有する長尺薄膜を形成する技術による、本格的な長尺線材を目指した開発が行われた。高 I_c 化には、高 J_c 特性を維持した厚膜化の技術が必要である。ここでは、 $I_c \times L$ 積を指標として、いかに高い I_c 特性を長尺線材で実現するか技術開発が行われた。 $I_c \times L$ 積は、長尺線材の必要要素である超電導特性 (I_c) と長さ (L) を同時に示す指標であるだけでなく、コイル化した時の起磁力 (アンペアターン) に相当する。その後、第二課題に対する成果を受けて、長尺線材を用いた機器開発が始まり、線材に対する要求は、各機器に対応した特殊な特性、機能へと移っていった。第三課題として現在では、磁場中 I_c 特性や低損失線材等の特殊性能向上技術開発に取り組んでいる。図 1 には、これらの開発課題を含めた実用化実現までの概念を、表 1 には、各課題における要素技術項目をまとめた。

この論文では、上述の各課題において、表 1 に示す要素技術の中で鍵となる技術を選択し、課題解決するために実施した研究開発を概説する。なお、ここでは著者が以前に所属していた国際超電導産業技術研究センター (International Superconductivity Technology Center: ISTEC)、および現在所属する産業技術総合研究所 (AIST) が主体的に携わった開発成果を中心に紹介する。ISTEC は、上述の高温超電導体の発見 (1986 年) を受けて 1988 年に設立され、高温超電導体に関わる研究開発および学会の開催等による普及啓発を目的とした財団法人である。ISTEC では、所属の研究員に加え、民間企業からの出向研究員、更には海外から外国人研究員により産学官共同の研究所として組織され、2016 年に解散するまでの約 30 年の間、経済産業省、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 等から多くの国家プロジェクトを受託し、多くの民間企業、大学、国研等と共に研究共同体を形成し、世界の高温超電導関連技術の開発をリードしてきた。図 1 に示した戦略も ISTEC が中心となり構築し、世界において共有されるようになったものである。

代表的な国家プロジェクトとしては、時系列的に「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト (第 I 期)」、「同 (第 II 期)」、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」、「イットリウム系超電導電力機器技術開発 (共通基盤技術開発)」等があり、経済産業省、NEDO、および AMED

表1 各課題に対応する主要要素技術群

課題	要素技術	ブレークスルー技術
高 Jc 基盤技術開発 (第一課題)	<ul style="list-style-type: none"> 配向基板 / 中間層形成技術 イオンビームアシスト蒸着法 配向金属基板 超電導層 / 金属基板反応抑制技術 超電導層内不純物抑制技術 (単相化技術) 金属基板平坦化技術 (欠陥抑制技術) 電気的、化学的安定化技術 	<ul style="list-style-type: none"> 大面積成膜 自己配向化技術 高速配向材料
高性能 長尺線材開発 (第二課題)	<ul style="list-style-type: none"> 高 Ic 特性長尺超電導層形成技術 パルスレーザー蒸着 (PLD) 法 有機酸塩堆積 (MOD) 法 有機酸塩気相蒸着 (MOCVD) 法 特性均一化技術 (組成、膜厚、欠陥抑制等) 機械的高強度技術開発 低コスト技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> マルチブルームマルチターン 基板温度制御 反応機構解析 仕込み組成制御 ガス流制御
機器対応 特殊性能向上 技術開発 (第三課題)	<ul style="list-style-type: none"> 人工ピン止め点制御技術 (磁場中高 Jc 化技術) 高精度スクライビング技術 (細幅加工、ダメージレス、高速等) 高エンジニアリング臨界電流密度化 (金属基板薄肉化) 等方性線材 (低アスペクト比、丸線、等方 Jc(B) 化) 超電導 (低抵抗) 接続技術 	<ul style="list-style-type: none"> 微細人工ピン材料 UTO-CMOD 法 エキシマレーザー加工技術

(国立研究開発法人日本医療研究開発機構) 等からの受託事業であった。前半は線材開発が中心であり、後半に向かって機器開発のウエイトが大きくなっていった。いずれも ISTEK が中心となり企業、大学、国研等と研究共同体を形成し開発に当たってきた。現在も、AIST において、「高温超電導実用化促進技術開発」に参画し、線材の高度化の技術開発を続けている。

2 第一課題 (高 Jc 基盤技術開発)

REBCO は、ポテンシャルとして Jc 特性に優れているものの、結晶粒の配向性 (結晶方位の揃い方) に大きく依

存することが知られている。したがって、線材形態の中でいかに 2 軸配向を実現するかが、最初の大きな課題であり、これを実現するためにさまざまなアプローチが試みられた。当初は、BSCCO で成果を挙げた銀シース法による線材化が行われた。同法によって、線材の形態を実現することができたが、結晶粒の配向として 2 軸配向を得ることが困難であることに加え、クラックが発生するなどの理由で液体窒素中 (77 K) の自己磁場 (直線状に配置した線材に電流を流すことにより発生する磁場) 下において 10^3 A/cm² 程度の Jc 特性を得るのが精一杯であった^[9]。実用上は、少なくとも 10^5 A/cm² (77 K, 自己磁場) の Jc 特性

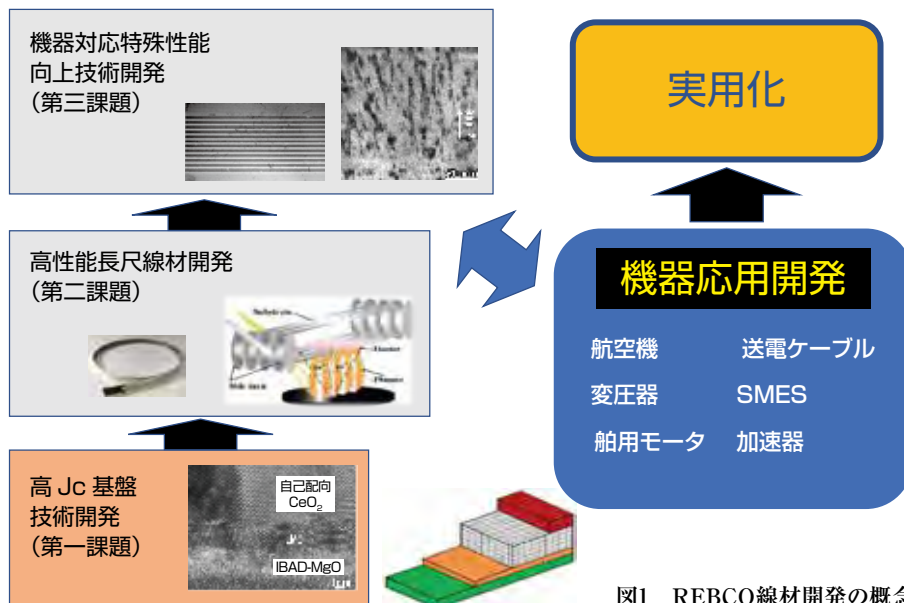


図1 REBCO線材開発の概念

が必要と考えられていることから大幅な改善が必要であった。その後、幾つかの2軸配向を実現可能な手法が開発され、一気に特性改善に繋がった。いずれも、金属基板上に複数の中間層を配した積層構造の形態(図2)の中で、特殊な処理を施した金属基板もしくは特殊な成膜法による中間層により2軸配向性を付与する方法である。本誌では、世界中でもっとも多く採用され、日本においても主流になっているイオンビームアシスト蒸着法 (Ion Beam Assisted Deposition法: IBAD法)^{[10][11]}を紹介する。基本は、ターゲットと呼ばれる対象物質のバルク体にイオンビームを照射することにより成膜蒸着子を金属基板に向かって叩き出し、基板上に堆積させることで成膜する手法である。IBAD法は、この成膜中に、金属基板に向かってもう一つのイオンビームを所定の角度で照射する手法である(図3)。角度は、材料により異なり、当初のZrO₂系の材料では法線方向から55°、最近用いられているMgOでは45°で、面内配向が得られる。この角度は、いずれも基板上の2軸配向組織に対し、材料の最密充填面に沿った角度で、配向化機構としては、イオンチャネリング機構(基板に向けたイオンビームで形成されるフレームにより通過できる方位を有した格子を限定して蒸着することで配向組織を形成する機構)

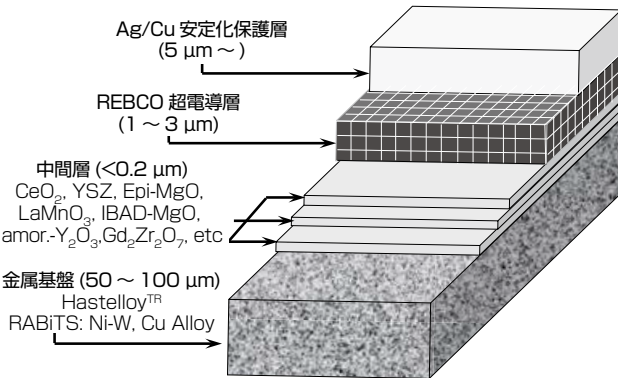


図2 REBCO線材構造の模式図

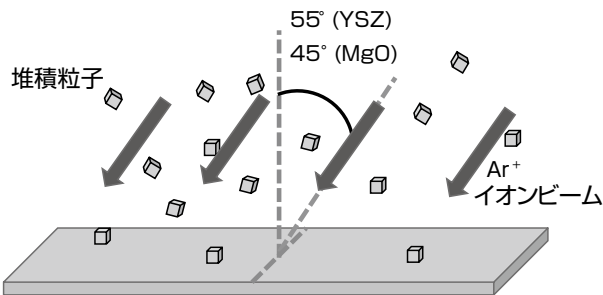


図3 IBAD法の概念図

やボンバリング機構(基板に向けたイオンビームにより特定の方位以外の結晶を弾き出すことで配向組織を形成する機構)が提案されている^[11]。本法は、配向性を有しない基板上においても、高度に2軸配向を実現する有効な手法であり、金属基板上におけるREBCO超電導線材で初めて77 K、自己磁場中での J_c 特性が1 MA/cm²を超えることになった。一方、成膜蒸着子を選択する手法であることから成膜速度が遅いことで線材の製造速度が遅い(当初:<1 m/h)ことが大きな課題であった。この課題に対し、ISTECにおいては、まず、以下に示す二つの手法により解決を図ってきた。

一つは、蒸着面積を拡大し、成膜ターン数を増やすことで移動速度を向上させる手法である。これは、国プロの中で装置の開発を行うことで実施した。二つ目は、配向度を向上させる新たな現象の発見である。IBAD法によりある程度の2軸配向性を与えた後に、アシストビームを用いない通常の物理蒸着法によりCeO₂を成膜すると急激に配向速度が向上する「自己配向化」という現象である^[12]。他の材料でも自己配向化は見られるが、下地にIBAD層が存在することは必要条件であり、その配向化機構についても最近明らかにされつつある^[13]。

加えて、米国において、IBAD法において高速化にMgOが適していることが見出された^[14]。ISTECは、日本でもいち早く、この成果を取り込み、上述の2手法と合わせることで、従来IBAD法で、面内配向度($\Delta\phi$)を10°以下にするのに3時間程度かかっていたものが、数分で $\Delta\phi \sim 5^\circ$ の面内配向度を得ることができるようになり(図4)、製造速度としても50 m/hを超え、律速プロセスではなくなった。また、配向度の向上により、 J_c 値も向上し、数 MA/cm²(77 K、自己磁場)を超えるようになり、1 μmの膜厚で数百 A/cm幅の臨界電流(I_c)を得ることができ

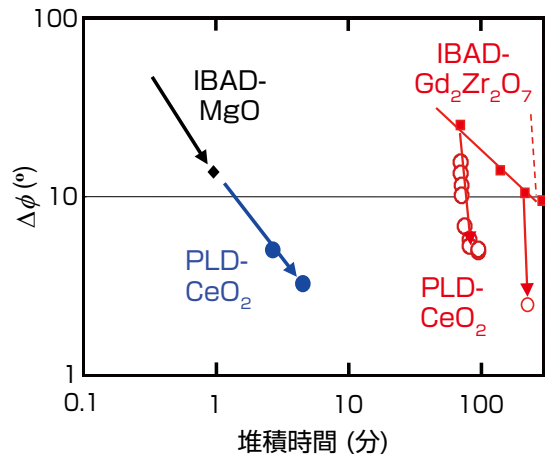


図4 IBAD層上における自己配向現象

るようになり、線材としての魅力を証明するステージに到達した。

3 第二課題 (高性能長尺線材開発)

上述の通り、第一課題の解決により、REBCO 線材において高 J_c を実現するために必要な2軸配向組織を実現した。本項では、この配向基板の上に形成する超電導層の成膜技術の開発に関して紹介する。

超電導層の形成技術としては、気相法と液相法に大別される。気相法としては、パルスレーザー蒸着 (Pulsed Laser Deposition: PLD) や有機酸塩気相蒸着法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD) 等があり、化学液相法では、有機酸塩堆積 (Metal Organic Deposition: MOD) 法が代表的な手法である。ISTEC (AIST) では、PLD 法とトリフルオロ酢酸塩 (TFA) を原料とした MOD 法を選択して開発を進めてきた。以下には、両法の特徴と主な成果を紹介する。

PLD 法は、ターゲット材に対して、エキシマレーザを照射し、励起させた蒸着子を基板材上に堆積させる方法で、真空中で成膜することから不純物が混入しにくく、高品質な膜を形成しやすい手法である。また、エキシマレーザのエネルギー密度が高いことからターゲットから膜への転写性が高く、複雑な組成を厳密に制御しなければならない材料には有効であり、今回対象としている RE 系超電導材料には適した手法と言える。実際、線材開発の初期から、比較的高品質な膜を形成することに成功しており、中間層の2軸配向性の向上に従って順調に J_c 特性が改善されてきた。一方で、装置が高価であることから、線材のコストが高くなる課題がある。この課題を解決するためには、特性向上とともに歩留まり向上、製造速度向上が必要とされてきた。このような、背景の下、ISTEC において開発されたのがリール式成膜法におけるマルチプルーム・マルチターン法である。プルームとは、レーザで励起された蒸着子の塊で、ターゲットから炎の様に立ち上がっている。高速成膜を実現するために、大型レーザ (例えば 200 W) を導入し、大パワーで大量の励起蒸着子を基板に供給する。この場合、一つのプルームでは、過飽和度が大きくなりすぎて、配向中間層上でのエピタキシャル成長が維持できなくなり、2軸配向を有した超電導膜を実現できなくなる。そこで、パルス状のレーザ照射位置を分散させ、複数のプルームに分割し、それぞれのプルームによる供給量を制限するマルチプルーム法を開発した (図5)^[15]。これにより、過飽和度を制御することに成功し、配向膜で高 J_c を維持したまま高速化することに成功した。一方で、マルチターン法は、高速化と高収率化の方策である。上述のプルームは、ター

ゲットから広がりながら基板に向かって飛んでいく。この際のプルームの広がり、基板の幅 (~10 mm) よりも大きく、この中で基板を移動して成膜する場合、基板以外の領域の原料を無駄にしていることになる。そこで、テープをずらしながらターンさせるマルチターンシステムを導入した。これにより、広い領域の原料を回収し、同じ膜厚を成膜するための移動速度を得ることができた。

さらに、高 I_c 化にも課題があった。PLD 法は上述の通り、高 J_c に適した手法である。確かに、膜厚が薄い領域では高い J_c を得ることが可能であるが、膜厚が増加するに従って J_c が低下することが一般的で、高 I_c 化の障害となっていた。この課題に対し、我々は、原因として膜厚増加に伴って表面の平坦性の低下により輻射率が増加し、結果として表面温度が低下することであると推察した。我々の PLD 装置では、テープの背面から加熱しており、この入熱量と超電導膜表面からの放熱量とのバランスで膜の温度が決められる。したがって、膜表面の輻射率が増加することで放熱量が増加し、表面温度が低下すると考えた。対策として、膜厚増加に応じて基板制御温度を上昇させるパターンで制御した温度環境の下、成膜することで厚膜時においても高い J_c を維持することに成功した^[16]。これらの高速化、高特性化の結果として比較的早い段階で、500 m 長で 300 A/cm 幅の線材作製に成功した (図6)^{[17][18]}。

MOD 法は、原料溶液を塗布し、電気炉で焼成する工程により超電導膜を形成するプロセスで、高価な真空チャンバーや熱源が不要であることから低コストなプロセスとして知られている。ところが、一般的な MOD 法は、熱分解により反応が決定されることから膜内での温度に差異がない場合、エピタキシャル成長が困難な手法であり、今回の対象である REBCO 超電導膜には不向きな手法であった。ところが、原料に TFA を用い、中間生成物として BaF₂ を經由することでエピタキシャル成長が可能となり大きな進展を見せた^[19]。本系における超電導層の形成には式 (1)

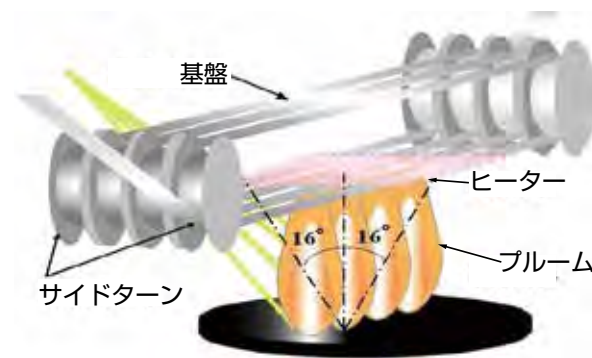
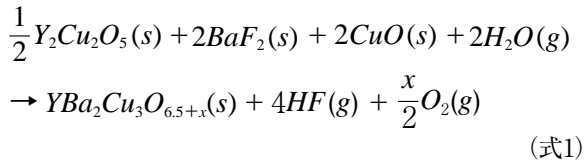


図5 マルチプルーム・マルチターンPLD法の概念図

に示す通り、BaF₂ に水を供給し BaF₂ と反応させることが必要になる。



その際、反応生成物として HF ガスが発生する (図7)。このコンバージョン反応がエピタキシャル成長を可能としているのである。我々は、まず、反応機構の解析を行い、HF ガスの排出速度(V_g) や水蒸気分圧(P_{H_2O})、全圧力(P_t)等により成長速度が決定されることを見出した^[20]。

$$R \propto \frac{\sqrt{V_g} \sqrt{P_{H_2O}}}{P_t} \quad (式2)$$

また、本法においても I_c 向上は重要な課題であり、そのための技術開発も精力的に進められた。代表的な手法としては、出発組成の制御による高特性化である。MOD 法では、当初、エピタキシャル成長する際に、完全な反応を実現するのは困難で、中間生成物 (Y₂Cu₂O₅、BaF₂、CuO 等) が超電導層内に取り込まれることが多かった。その場合、

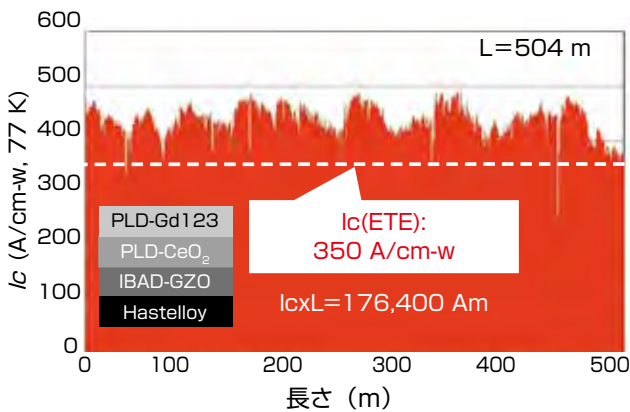


図6 IBAD-PLD線材における長尺線材^[18]

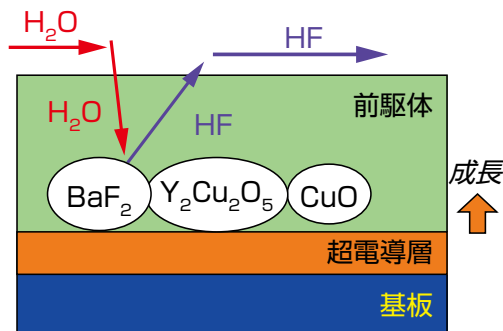


図7 TFA-MOD法における反応を示す概念図

Y₂Cu₂O₅ や CuO は、球状になり電流阻害因子とはなり難いのに対し、Ba 化合物は粒界に存在しやすく、劣化しやすい性質を持つことから特性低下の原因となると考えられた。そこで、我々は、出発組成を Ba 不足に変更することにより安定して高特性を実現することに成功した^[21]。また、MOD 法においては、前駆体である仮焼膜の下部より反応が進むため表面の性状が大きく変わらないことから、PLD 膜で見られた厚さによる温度変化がなく、比較的膜厚に対する J_c の低下が発生し難い系であった。これにより、厚膜化による高 I_c 化を実現することができた^[22]。

長尺化に関しては、大きく二つのプロセスによる開発が進められた。一つは、リール (Reel-to-Reel: RTR) 式という手法で、電気炉内にリールから供給された前駆体膜付テープが移動しつつ熱処理を行うものである。本手法は、一旦定常状態を作り出せば安定して反応制御が可能であり、長尺特性の安定化に適した手法である一方、製造速度に課題がある。もう一つは、バッチ (Batch) 式である。これは、ドラムに前駆体膜を巻き付け大型炉内で一括して熱処理する手法であり、製造速度に優れる一方、成長環境 (温度、ガス流等) の場所依存性を小さくすることが課題となっていた。いずれの手法も上述の基礎検討に基づいて、温度パターンやガス流の制御の適正化を図り、図8に示す高特性長尺線材の作製に成功している^{[18][23]}。

いずれも、ISTEC と線材メーカーが共同で開発にあたり、長尺線材を実現してきた。PLD 法に関しては、主に (株) フジクラと、TFA-MOD 法に関しては昭和電線ケーブルシステム (株) との共同研究で、NEDO プロジェクトの中で目覚ましい成果を上げた。一方、同時期に米国においても線材開発の大規模な国家プロジェクトが実施され、結果的に世界の RE 系超電導線材の開発は、日米が牽引することに

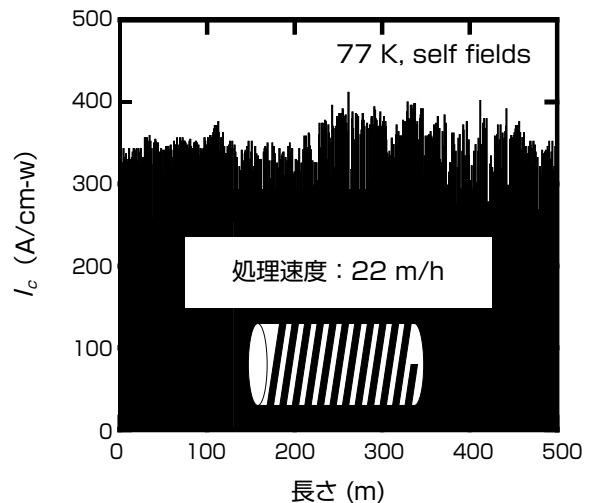


図8 IBAD-MOD線材における長尺線材^[18]

なった。ここでは、特性と長さを同時に示す $I_c \times L$ 積を指標に開発が行われた。図9には、 $I_c \times L$ 積の推移を示す^[24]。日米の大規模な国家プロジェクトが始められた2000年頃を境に急激に進展を遂げている。また、その担い手は、日米の研究者であったことが見て取れる。日米競争においては、国際会議等を通じたアカデミックな競争はもとより、年度開始時期のずれに伴う相互の予算獲得にも大きな影響を与えた。結果的には、大きな相乗効果を生み出し、劇的な進展を見せた。その後、韓国の SuNAM 社やロシア出資の SuperOX 社等が猛追しており、いずれも数百 m で数百 A の I_c を持つ線材を販売するまでに至っている。

4 第三課題 (機器対応特殊性能向上技術)

前項までの開発において一定の性能を持つ線材が百 m 以上の長さで製造可能になったことを受けて、機器の試作、開発が開始された。対象となる機器としては、送電ケーブル、変圧器、SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage: 超伝導磁気エネルギー貯蔵装置)、限流器等の電力応用機器、MRI や重粒子線加速器、NMR (Nuclear Magnetic Resonance: 核磁気共鳴) 等の医療応用機器、発電機、モータ等の移動機器応用等、さまざまな分野にわたっている。

これらの応用において、其々の運転環境の違いから線材に求められる仕様は必ずしも一様ではない。前項までの開発では、特性としては自己磁場中での I_c が指標となっていたが、付加的な必要機能として上述の機器対応機能があ

る。例えば、磁場を用いた応用である、モータ、発電機、MRI、加速器等においては、磁場中での高い I_c が必要であると共に多くの場合、磁場に伴って発生する機械的応力に耐えうる特性も求められる。また、ケーブル、変圧器等の交流を用いた応用においては、交流損失の低減が課題となる。交流損失とは、超電導体に対し交流を印加した際に移動する鎖交磁束によって生じる損失であり、 J_c と磁束の移動距離 (線材幅) に依存する。この特性は、モータの電機子コイルにおいても同様であり、さらに起源としては MRI 用コイルの遮蔽電流の影響を抑制するための方策としても同様である。以下には、磁場中での I_c (J_c) 特性向上技術と低損失線材の開発に関して解説する。

磁場中の J_c 特性の向上には、人工ピン止め点の導入が有効であることは知られている。量子化された磁束を捕捉することからコヒーレント長と同じオーダーの細かい非超電導層の分散が求められる。具体的には、REBCO 系材料においては、nm オーダーの人工ピンの分散が必要となる。REBCO 薄膜線材に対しては、主に気相法のプロセスで人工ピン導入技術の開発が始められた。Y₂BaCu₃ 相^[25]、BaZrO₃^{[26][27]}、Y₂O₃^[28] 等、さまざまな材料が対象となったが、ナノサイズに微細でかつ、REBCO の c 軸に配向したロッド状の人工ピン (ナノロッド) が導入可能な BaMO₃ (M=Zr, Ce 等) で大きな成果を挙げた。元来、REBCO 材料は、その構造を反映して、特性にも大きな異方性を有する。 J_c 特性の印可磁場角度依存性では、外部磁場が超電導結晶方位の a 軸あるいは b 軸に平行に印可された環

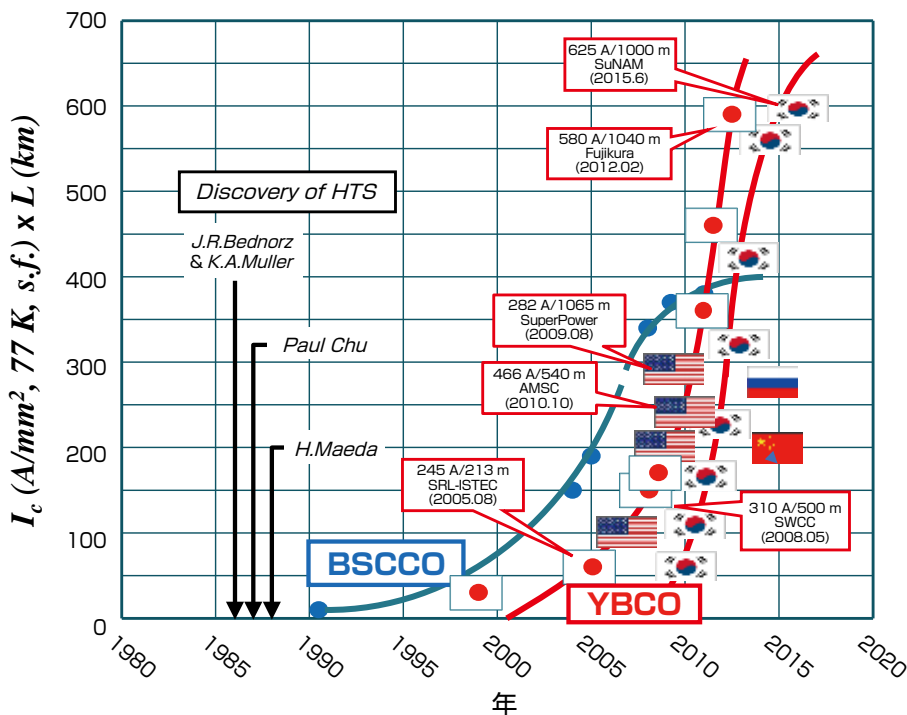


図9 IBAD法の概念図^[24]

境での J_c 特性である $J_c(B//ab)$ 値に対し、外部磁場が超電導結晶方位の c 軸に平行に印可された環境での J_c 特性である $J_c(B//c)$ 値が著しく低い挙動を示す。したがって、上述のナノロッドの導入により、本質的に J_c 特性が低い $J_c(B//c)$ が改善される効果が得られた。^{[25][26]}この分野では、高い結晶性を維持しながら、いかに細かい非超電導層を分散させるか、その組織制御技術が開発課題であった。この課題に対し、我々は最近、より効果的な人工ピン材料として、BaHfO₃を見出した^[29]。その際、超電導層としてもEuBCOとの組み合わせで厚膜領域まで $J_c(B)$ 特性を維持した線材の形成が可能となり、大きな磁場中 I_c 特性を実現することができた(図10)^{[30][31]}。上記の組み合わせでは、部分溶融成長することから、高い結晶性を実現すると共に、BaHfO₃の長さや分散状況が厚さに依存しない特徴が確認されており、これが厚膜超電導層においても高い $J_c(B)$ 特性を維持している原因であると考えられている。この組み合わせで、長尺化の検討も行われており、図11には、

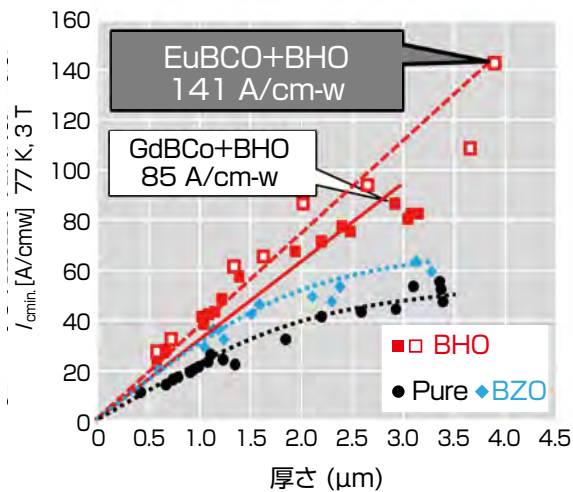


図10 PLD膜における磁場中 I_c 特性の膜厚依存性に対する人工ピン止め点材料の影響^[31]

EuBCO+BHOの厚膜(3.5 μm)条件で、ほぼ短尺試料と同様の特性を得ている。さらに、(株)フジクラでは、上記の組み合わせを採用して製造レベルの線材で高い特性を報告している。

一方、低コストプロセスとして期待の大きいTFA-MOD法においても上述の気相法と同様に人工ピンの導入プロセスの開発を行ってきた。代表的な材料としては、気相法と同様にBaZrO₃が有効であることが確認されている^[32]。ただし、その形態は、気相法のナノロッドとは全く異なり、球状(ナノ粒子)を呈している。これは、膜の成長機構に起因するものである。PLD法等の気相法では、蒸着子がターゲットから成長界面に供給され、ほぼ同じ界面上で超電導層と人工ピン止め点が成長するシステムであるのに対し、TFA-MOD法では、塗布膜を低温で焼成した仮焼膜が中間層上に存在し、この中で超電導層が生成する前に、人工ピン材料が核生成、成長することから中間層との方位関係を有していない。その後、中間層上から超電導層がエピタキシャル成長する際に前方に分散しているナノ粒子人工ピンが取り込まれながら成長している。したがって、ランダムで方位関係を持たないナノ粒子が、配向した超電導層内に分散する形態を取るようになる(図12)。この形態の違いを反映し、磁場の印加方位に対して等方的な向上効果を示す。しかし、微細化することが困難であり、気相法の J_c

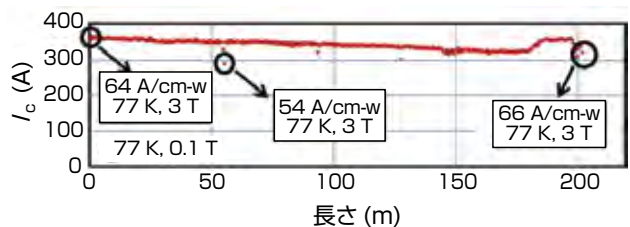


図11 人工ピン止め点を導入したPLD長尺線材^[31]

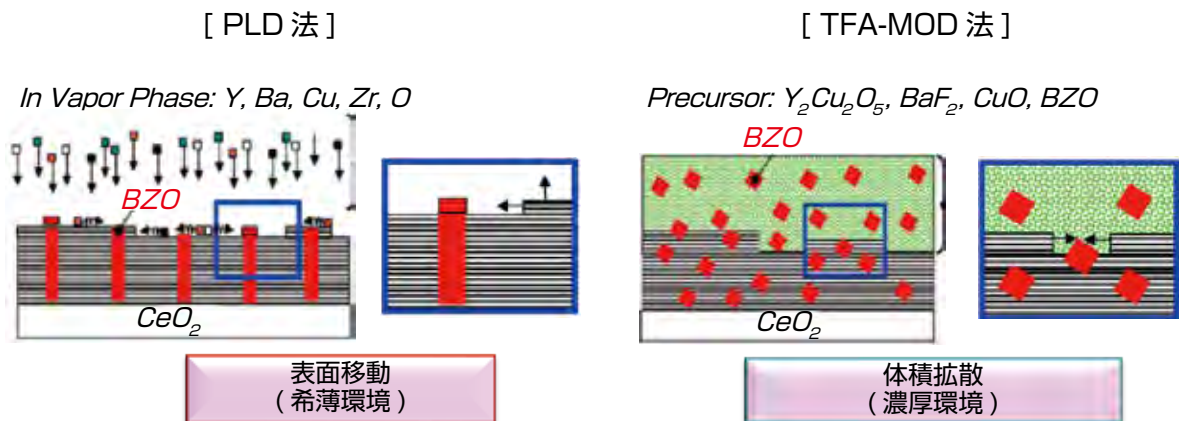


図12 PLD法及びTFA-MOD法における人工ピン止め点入り膜の異なる成長機構

(B) に比べて低い値となっていた。これに対し、我々は、まず、熱処理条件の適正化による微細化技術の開発を行った^[33]。この方法では、中間熱処理と呼ばれる仮焼と本焼の中間温度で一定時間熱処理をすることで、事前に必要な相変態を完了させ、人工ピン止め点をより低温で核生成・成長させる効果があると考えられている。この効果として、成長が抑制され、小さな人工ピン止め点を実現している。さらに、最近では、塗布膜厚を極薄化 (150 → 30 nm) することで、劇的に微細化することに成功した^{[34][35]}。この方法は、Ultra-Thin Once Coating (UTOC) MOD 法と呼ばれ、MOD 法の磁場中特性を大きく改善する。さらに、人工ピン材料を BaZrO₃ から BaHfO₃ に変更し、添加量を増加 (10 → 25 mol%) させることで、気相法による線材の磁場中 J_c 特性を超える 4 MA/cm² (65 K, 3 T) を実現した^[36]。

交流損失低減技術に関しては、原理的に、フィラメント化することで損失低減が可能であることが分かっていた。金属系超電導では極細線化した線材を束ねて撚ることによる低損失化が図られているが、積層構造を持つテープ線材では極細線化後のハンドリングが容易ではなく、異なる技術の開発が必要であった。この課題に対し、まずは、積層構造の中で基板を切り離すことなく、超電導層を細線化するスクライビング技術の開発を行った。世界的にも幾つかの異なる手法が提案されているが、我々は、線材の表面に樹脂系のテープを貼付し、溝を作るところのみを熱レーザーで細く融かし、その後、化学的にエッチングする手法を開発した^[37]。この手法により、長尺のスクライビング加工が可能になり、100 m 級の分割加工処理を実現した (図 13)^{[31][38]}。ところが、この手法においては、溝幅が不均一であると共に、オーバーエッチ部が存在するとそこから剥離が発生してしまう課題を有していた。そこで、液体を使用することなく、エキシマレーザーを用いて微細加工するスクライビング技術の開発を行った^[39]。この手法では、溝幅が

一定であるだけでなくより細い幅 (100 → 30 μm) での加工が可能となった。加えて、重要なことは、このスクライビング線材は、線材レベルでの交流損失低減は可能でも、応用に供する巻き線コイル形状ではその効果が失われてしまう。これに対し、特殊な巻き線技術によってこの損失低減効果を、コイル形状でも実現することに成功し、変圧器や全超電導モータの電機子に適用し、その原理検証を実施するまでに至っている^{[40][41]}。

5 今後の展開

上記の通り、REBCO 超電導線材は、当初、その製作性の難易度の高さから高特性で長尺の線材を実現することが困難であったが、高度に配向した中間層組織の実現や超電導層形成技術の開発、人工ピン止め点導入、更には細線加工技術の開発等により飛躍的な進歩を遂げている。これを受けて、送電ケーブル、変圧器、限流器、SMES、船用モータ、MRI、加速器等の開発が始められている。いずれも、超電導線材による機器を製作し、所定の性能を確認する等の成果は上げているものの残念ながら、これまで実用化に至った機器はないのが現状である。

その主な理由として、以下の3点が考えられる。まず、線材コストの高さである。作製方法が複雑でコスト高になりやすい REBCO 線材においては、特性向上によって使用線材量を減らせることによるコスト低減が期待できるが、エネルギー回収・保護の観点から1本の線材に流せる電流量には限界がある。一般的に、運転電流としては700～800 A/cm 幅が限界で、負荷率を考えると臨界電流としては1300～1500 A/cm 幅が上限となる。したがって、各機器の運転温度、運転磁場の環境下でこの臨界電流まで到達してなければ、運転電流を向上させることで実質的な低コストが図られる。現状では、50 K 以下で外部磁場が1～2 T の条件下ではすでに上記特性を満たしているが、期待される高温 (例えば液体窒素温度: 65～77 K) で中

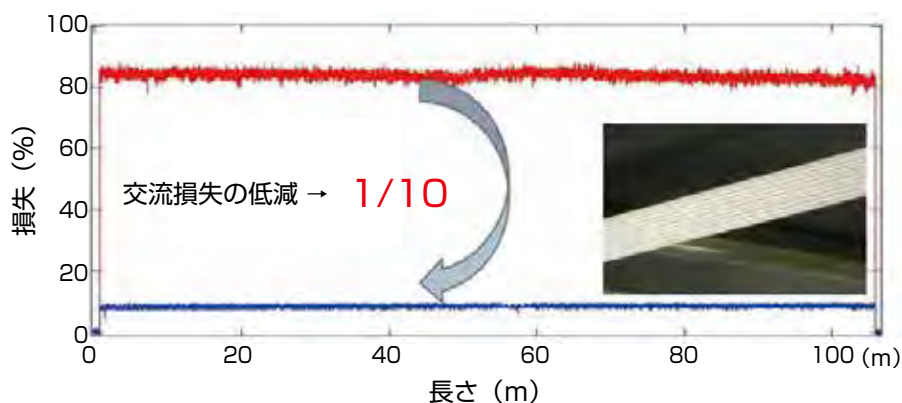


図13 スクライビング技術による100 m級線材の低交流損失化^[31]

高磁場 (3 T 以上) では、依然として開発が必要である。

もう一つのコスト高の原因は、歩留まりの低さである。根本的に歩留まりを向上させるには、均一性の向上が必要であるが、km オーダーの線材において細幅線材でか所も特性低下部を持たずに作製することは容易ではない。そこで、リペア技術等のリカバリーが可能で、安定性を向上させる技術が望まれるところである。

超電導機器が実用化に至っていない二つ目の理由は、既存技術に対する圧倒的な優位性を確保できていないことである。すでに、機能が検証できている機器は多いものの、それが絶対的でなければ、ユーザーは実績のある既存技術を選択する。したがって、例えば、超電導機器でなければ実現できないこと、もしくは、その機器部位だけでは大きな優位性は見いだせないが、超電導機器の導入により建築物が大幅に小さくて済み、その費用メリットが圧倒的であるなどの明らかな優位性が、少なくとも初期の技術導入時には必要であると考えられる。

三つ目の重要な要素は、エンドユーザーの本気度である。もちろん、これは二つ目の理由との連動で、圧倒的な優位性があった上で、ユーザーが現状もしくは近未来に必要な技術で、自らが参画して開発する本気度が必要である。この論文で対象としている、REBCO 超電導線材は、多くの利点による大きな魅力を持っているが、同時に幾つかの難点も抱えている。代表的な項目としては、テープ線材に起因した製作性の低さである。丸線に比べて加工性が劣ることから複雑な形状のコイル化等の加工に難点があることは事実である。一つの方策として、丸線化する技術も試みられているものの均一性の確保と連動して容易ではない。したがって、ある制約の下での機器開発を行う中で、単なる金属線材の置き換えではなく、超電導線材ならではの構造、運転方法等を検討する必要があると考えられる。

世界中で多くの技術者により開発が進められているが、現状では、容易に進まない中、著者はこれを打破する可能性のある応用として電気推進航空機への応用展開に期待している。航空機業界では、CO₂ 削減要求に応えるためにジェットエンジンによる推進から、電気推進への移行が求められている。しかし、常電導 (鉄と銅) で電動化を進めると、特に中大型機では、著しく重くなることから、航空機として不利であることが分かっている。そこで期待されているのが超電導技術を用いた電気推進システムである。全超電導発電機やモータ、ケーブル等をすべて超電導化し、軽量・高出力推進システムを構築するアイデアである。航空機全体が高価であることから、線材のコスト比が小さくなり、線材コストが大きな問題にならない可能性がある。優位性としても超電導化以外に大型航空機は難しいとされ

ていることからユーザーの意思が伴えば、有力な候補となり得ると期待される場所である。

いずれにしても、現状を俯瞰すると高温超電導技術は、新技術が通る「死の谷」を迎えていると考えられる。この状況を打破するためには、上記の課題解決による最初の実用化実績を達成し、実用上での有効性を世に示すことが本当の意味で超電導技術の広い展開に重要であると考えられる。

謝辞

この論文で解説した成果の一部は、経済産業省、NEDO、AMED からの支援を受けて実施したものです。

参考文献

- [1] H. K. Onnes: The superconductivity of mercury, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 122, 124 (1911).
- [2] J. G. Bednorz and K. A. Müller: Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system, *Z. Phys. B*, 64, 189–193 (1986).
- [3] H. Takagi, S. Uchida, H. Obara, K. Kishio, K. Kitazawa, K. Fueki and S. Tanaka: Magnetic susceptibility of high- T_c superconducting oxides (La, A)₂CuO₄ (A=Ba, Sr), *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26 (4), L434–L436 (1987).
- [4] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang and C. W. Chu: Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure, *Phys. Rev. Lett.*, 58 (9), 908–910 (1987).
- [5] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano: A new high- T_c oxide superconductor without a rare earth element, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27, L209–L210 (1988).
- [6] L. Gao, Z. J. Huang, R. L. Meng, P. H. Hor, J. Bechtold, Y. Y. Sun, C. W. Chu, Z. Z. Sheng and A. M. Hermann: Bulk superconductivity in $Tl_2CaBa_2Cu_2O_{8+\delta}$ up to 120 K, *Nature*, 332, 623–624 (1988).
- [7] S. Kobayashi, T. Kaneko, M. Umeyama, K. Hayashi and K. Sato: Transport critical current density of Bi-2223 tape, TEION KOGAKU (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan), 32 (9), 415–421 (1997).
- [8] S. Kobayashi, T. Kaneko, N. Ayai, K. Hayashi, H. Takei and R. Hata: Development of Bi-2223 superconducting wires, *Physica C*, 357–360, 1115–1118 (2001).
- [9] M. Nagata, K. Ohmatsu, H. Mukai, T. Hikata, Y. Hosoda, N. Shibuta, K. Sato, H. Hitotsuyanagi and M. Kawashima: Development of high T_c superconducting wire by powder method, *Advances in Superconductivity*, 377–380 (1989).
- [10] Y. Iijima, N. Tanabe, Y. Ikemoto and O. Kohno: Biaxially aligned YBa₂Cu₃O_{7-x} thin film tapes, *Phys. C*, 185–189, 1959–1960 (1991).
- [11] Y. Iijima, K. Kakimoto, K. Takeda and T. Saitoh: Long length IBAD process of fluorite type for Y-123 coated conductors, *Proc. Int. Workshop on Superconductivity*, Honolulu, HI, 47 (2001).
- [12] T. Muroga, H. Iwai, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saito, T. Kato, Y. Sugawara and T. Hirayama: Pulsed laser deposition method-CeO₂ buffer layer for YBCO coated conductor, *Physica C*, 392–396, 796–800 (2003).
- [13] T. Taneda, M. Yoshizumi, T. Takahashi, R. Kuriki, T. Shinozaki, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saitoh, R.

- Yoshida, T. Kato, T. Hirayama and T. Kiss: Mechanism of self-epitaxy in buffer layer for coated conductors, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23, 6601005 (2013).
- [14] C. P. Wang, K. B. Do, M. R. Beasley, T. H. Geballe and R. H. Hammond: Deposition of in-plane textured MgO on amorphous Si_3N_4 substrates by ion-beam-assisted deposition and comparisons with ion-beam-assisted deposited yttria-stabilized-zirconia, *Appl. Phys. Lett.*, 71, 2955–2957 (1997).
- [15] A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, S. Miyata, R. Kuriki, K. Takahashi and Y. Shiohara: Development of long GdBCO coated conductor using the IBAD/MPMT-PLD method, *Supercond. Sci. Technol.*, 19 (12), 1229–1232 (2006).
- [16] A. Ibi, H. Iwai, K. Takahashi, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe, Y. Yamada and Y. Shiohara: Investigations of thick YBCO coated conductor with high critical current using IBAD-PLD method, *Physica C*, 426–431, 910–914 (2005).
- [17] K. Kakimoto, M. Igarashi, S. Hanyu, Y. Sutoh, T. Takemoto, T. Hayashida, Y. Hanada, N. Nakamura, R. Kikutake, H. Kutami, Y. Iijima and T. Saitoh: Long RE123 coated conductors with high critical current over 500 A/cm by IBAD/PLD technique, *Physica C*, 471 (21–22), 929–931 (2011).
- [18] T. Izumi and Y. Shiohara: R&D of coated conductors for applications in Japan, *Physica C*, 470 (20), 967–970 (2010).
- [19] A. Gupta, R. Jagannathan, E. I. Cooper, E. A. Giess, J. I. Landman and B. W. Hussey: Superconducting oxide films with high transition temperature prepared from metal trifluoroacetate precursors, *Appl. Phys. Lett.*, 52 (24), 2077–2079 (1988).
- [20] T. Honjo, Y. Nakamura, R. Teranishi, Y. Tokunaga, H. Fuji, J. Shibata, S. Asada, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saitoh, A. Kaneko and K. Murata: Fabrication and growth mechanism of YBCO coated conductors by TFA-MOD process, *Physica C*, 392–396, 873–881 (2003).
- [21] T. Izumi, M. Yoshizumi, J. Matsuda, K. Nakaoka, Y. Kitoh, Y. Sutoh, T. Nakanishi, A. Nakai, K. Suzuki, Y. Yamada, A. Yajima, T. Saitoh and Y. Shiohara: Progress in development of advanced TFA-MOD process for coated conductors, *Physica C*, 463–465, 510–514 (2007).
- [22] T. Izumi, M. Yoshizumi, M. Miura, K. Nakaoka, Y. Ichikawa, Y. Sutoh, S. Miyata, H. Fukushima, Y. Yamada and Y. Shiohara: Present status and strategy of reel-to-reel TFA-MOD process for coated conductors, *Physica C*, 469 (15–20), 1322–1325 (2009).
- [23] T. Izumi, M. Yoshizumi, M. Miura, K. Nakaoka, Y. Sutoh, Y. Ichikawa, S. Miyata, A. Ibi, H. Fukushima, T. Itoh, T. Takahashi, Y. Aoki, T. Koizumi, A. Kaneko, T. Hasegawa, Y. Yamada and Y. Shiohara: Development of TFA-MOD process for coated conductors in Japan, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 19 (3), 3119–3122 (2009).
- [24] T. Izumi and N. Yanagi: Status and prospects on development of yttrium-based high-temperature superconducting coated conductor, *J. Plasma Fusion Res.*, 93 (5), 222–229 (2017).
- [25] T. Haugan, P. N. Barnes, R. Wheeler, F. Meisenkothen and M. Sumpston: Addition of nanoparticle dispersions to enhance flux pinning of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconductor, *Nature*, 430 (7002), 867–870 (2004).
- [26] J. L. Macmanus Driscoll, S. R. Foltyn, Q. X. Jia, H. Wang, A. Serquis, L. Civale, B. Maiorov, M. E. Hawley, M. P. Maley and D. E. Peterson: Strongly enhanced current densities in superconducting coated conductors of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ + BaZrO_3 , *Nat. Mater.*, 3 (7), 439–443 (2004).
- [27] Y. Yamada, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Kato, T. Hirayama and Y. Shiohara: Epitaxial nanostructure and defects effective for pinning in $\text{Y}(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ coated conductors, *Appl. Phys. Lett.*, 87 (13), 132502 (2005).
- [28] D. M. Feldmann, T. G. Holesinger, B. Maiorov, H. Zhou, S. R. Foltyn, J. Y. Coulter and I. Apodoca: 1000 A cm^{-1} in a 2 μm thick $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ film with BaZrO_3 and Y_2O_3 additions, *Supercond. Sci. Technol.*, 23 (11), 115016 (2010).
- [29] H. Tobita, K. Notoh, K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, T. Kato, T. Hirayama, M. Yoshizumi, T. Izumi and Y. Shiohara: Fabrication of BaHfO_3 doped $\text{Gd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors with the high I_c of 85 A/cm-w under 3 T at liquid nitrogen temperature (77 K), *Supercond. Sci. Technol.*, 25 (6), 062002 (2012).
- [30] A. Ibi, T. Yoshida, T. Izumi, Y. Shiohara, D. Yokoe, T. Kato and T. Hirayama: Development of long coated conductors with high in-field I_c Performance by PLD method at high production rate, *Phys. Procedia*, 81, 97–100 (2016).
- [31] T. Izumi: Achievements in M-PACC project and future prospects on R&D of coated conductors in Japan, *Physics Procedia*, 58, 6–9 (2014).
- [32] M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama and Y. Shiohara: Rare earth substitution effects and magnetic field dependence of critical current in $\text{Y}_{1-x}\text{RE}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ coated conductors with nanoparticles (RE=Sm, Gd), *Appl. Phys. Express*, 2 (2), 023002 (2009).
- [33] K. Nakaoka, K. Kimura, T. Kato, R. Yoshida, Y. Usui, M. Nakamura, T. Izumi and Y. Shiohara: Enhancement of J_c properties in magnetic fields of BaZrO_3 doped $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ coated conductors by a newly modified TFA-MOD process, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26 (3), 8000304 (2016).
- [34] T. Izumi, K. Nakaoka, R. Yoshida, K. Kimura, T. Kato, M. Miura and Y. Shiohara: Refining process of BaZrO_3 particles in coated conductors by TFA-MOD method, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 27 (4), 6601604 (2017).
- [35] K. Nakaoka, R. Yoshida, K. Kimura, T. Kato, Y. Usui, T. Izumi and Y. Shiohara: Another approach for controlling size and distribution of nanoparticles in coated conductors fabricated by the TFA-MOD method, *Supercond. Sci. Technol.*, 30 (5), 055008 (2017).
- [36] M. Miura, B. Maiorov, M. Sato, M. Kanai, T. Kato, T. Kato, T. Izumi, S. Awaji, P. Mele, M. Kiuchi and T. Matsushita: Tuning nanoparticle size for enhanced functionality in perovskite thin films deposited by metal organic deposition, *NPG Asia Materials*, 9, e447 (2017).
- [37] T. Machi, K. Nakao, T. Kato, T. Hirayama and K. Tanabe: Reliable fabrication process for long-length multi-filamentary coated conductors by a laser scribing method for reduction of AC loss, *Supercond. Sci. Technol.*, 26 (10), 105016 (2013).
- [38] H. Okamoto, H. Hayashi, M. Iwakuma, A. Tomioka, T. Saito, Y. Goshō, K. Tanabe and Y. Shiohara: Over-current characteristics of model coil using Y-based multi-filament wire for superconducting power transformers, *Physica C*, 471 (21–22), 1379–1380 (2011).
- [39] K. Katayama, T. Machi, T. Nakamura, Y. Takagi, K. Nakaoka, M. Yoshizumi, T. Izumi and Y. Shiohara: Development of low AC loss TFA-MOD coated conductors, *Physics Procedia*, 58, 142–145 (2014).
- [40] M. Iwakuma, K. Sakaki, A. Tomioka, T. Miyayama, M. Konno, H. Hayashi, H. Okamoto, Y. Goshō, T. Eguchi, S. Yoshida, Y. Suzuki, H. Hirai, Y. Iijima, T. Saitoh, T. Izumi and Y. Shiohara: Development of a 3 ϕ -66/6.9 kV-2 MVA REBCO superconducting transformer, *IEEE Transactions*

- on *Applied Superconductivity*, 25, 5500206 (2015).
 [41] S. Fukuda, K. Yun, M. Iwakuma, S. Miura, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M. Konno and T. Izumi: Design study of 2-MW fully superconducting synchronous motors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28 (4), 5207806 (2018).

執筆者略歴

和泉 輝郎 (いずみ てるお)

1987年3月東北大学工学部卒。博士(工学)。住友金属工業株式会社入社し、1989～1993年に公益財団法人国際超電導産業技術研究センターに出向。1998年同センターに入所、同センター解散に伴い、2016年産総研に入所。一貫して、磁性材料、酸化物超電導材料、シリコン単結晶などの材料開発に従事。1998年からは、RE系超電導線材のプロセス及びその応用に関する開発に従事し、多くの国家プロジェクトに関与。プロジェクトリーダーも歴任。この論文では、この経験に基づいてRE系超電導線材に関する開発を紹介した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(金山 敏彦:産業技術総合研究所)

1986年の酸化物高温超電導体の発見以来、この材料を用いた線材の開発と実用化は、大きな期待を集めながら、いまだ実現していない夢の技術である。この論文は、著者自身の開発成果を中心に、材料や合成法の選択、長尺線材の実用的な作製技術、特性向上技術等、一連の開発の課題と経緯を紹介している。この過程で、企業も関わる国家プロジェクト研究が有効であったことも述べている。新物質の発見を実用製品につなげるには、多様な要素技術を統合せねばならず、多数の研究者の多年に亘る継続的な開発が必要であることの、好例として意義が高い。

コメント(池上 敬一:産業技術総合研究所)

この論文では、線材としてほぼ実用化がなされ、今後部材として機器に組み込まれていくことが期待される希土類系超電導線材の開発について、その契機から現状に至るまでが丁寧に分かりやすく述べられており、史観を持った技術的解説として読み応えのあるものとなっている。

議論2 研究開発シナリオについて

コメント1(池上 敬一)

シンセシオロジー誌で重要視している「シナリオ」は、ある主体によって設定されるものであるのに対し、この論文では客観性を重視するあまり、シナリオを設定しそれに沿って開発を推し進めた主体の存在感が希薄になっているように感じられます。シンセシオロジー誌掲載論文としてこの論文が分析の対象とすべきは、超電導線材ではなく、その開発事例であるので、その事例の主体をより明確にすべく加筆が行われるべきであると考えます。

シナリオとして図1が提示されていますが、この論文を読むと、三つの課題に対してそれぞれシナリオを持って研究開発が遂行されてきたことが分かります。一方、シンセシオロジー誌では、「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。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。」とされています。したがって、図1に加えて、各課題に対して、どのような要素技術(群)を選択しそれらをどのように構成・統合して研究目

標を実現していったかを端的に示す、いわば「詳細シナリオの図」があると分かりやすいと思います。

コメント2(金山 敏彦)

この論文は、酸化物超電導線材の開発経緯の一般的な解説としては、ポイントを押さえた内容となっています。しかし、本誌が主眼とする、著者あるいは著者が所属する組織が、主体的にどのような選択をして、開発成果に至ったのかが、明確ではありません。

この明確化のために、要素技術の一覧表を追加してはいかがでしょうか。図1の3課題のそれぞれに対応して、どのような要素技術の候補があり、その中から著者および著者の所属組織が選択したのは、どれであったかが一瞥できれば、この論文の意義は、より明確になると考えます。

回答(和泉 輝郎)

表1に各課題に対する要素技術群をまとめました。

コメント3(金山 敏彦)

表1の追加で、全体構成に対する見通しが良くなりました。しかし、多くの要素技術が、目標とする技術課題の列挙に留まっています。例えば「ブレイクスルー技術」等のタイトルの第3列を設け、できれば第2列の要素技術と対応づけて、この論文で記述されている、各々の要素技術課題に対して開発のポイントとなった解決手段を記載すれば、この論文の流れが一覧できると考えます。

回答(和泉 輝郎)

上記のご指摘に従い、表を修正いたしました。

議論3 研究開発の主体について

コメント1(池上 敬一)

シナリオとして図1が提示されていますが、これは誰が設定したシナリオなのでしょう。希土類系超電導線材の開発に関わる世界の研究者コミュニティで共有されていたもののように思えますし、著者自身が所属するISTEC(～AIST)の研究グループの戦略であるようにも思えます。論文の冒頭で、分析対象とする開発事例の主体を明確にすべきと考えます。

回答(和泉 輝郎)

図1のシナリオは、ISTEC(AIST)の戦略であるといってもよろしいかと思しますので文中に記載しました。

開発事例の主体に関しましては、「1 はじめに」の後半で明記いたしました。

コメント2(金山 敏彦)

この論文の記述を、開発の世界的トレンドであった箇所と、著者および著者の所属組織が推進した部分を書き分ける工夫をしてください。

回答(和泉 輝郎)

ISTEC(AIST)が実施した内容は、それを明確化すべく、文頭に「ISTECは、」や「我々は、」との表記を加えました。

議論4 研究開発組織および国家プロジェクトについて

コメント1(池上 敬一)

この論文が分析を加えている事例では、ISTECという組織が極めて重要な役割を演じていたことが伺えます。ISTECという組織の成り立ち、ミッション、国家戦略における位置づけ、組織におけるリーダーシップのあり方、どのような研究者がどのようにして集められたか、彼らがどのように融合・連携・分担して研究開発にあたったか、概説していただけると良いと思います。

コメント2（金山 敏彦）

この論文では、国家プロジェクト研究が有効であったことが紹介されていますが、その組織体制や内容には、触れられていません。ISTEC および NEDO プロジェクトについて、簡単な解説を加えてください。

回答（和泉 輝郎）

ISTEC に関する記載を、「1 はじめに」の後半に加えました。

議論5 国際的な競争について

コメント（池上 敬一）

海外、特に米国のチームとの間で熾烈な開発競争がなされたと思いますが、それがシナリオの設定や遂行にどのような影響を与えたか興味を持たれます。加筆いただけないでしょうか。

回答（和泉 輝郎）

ご指摘の日米の開発競争の影響については、「3 第二課題」の末部に記載しました。

議論6 研究開発課題とその要求値について

コメント1（金山 敏彦）

「今後の展開」で述べられている、実用化への課題、特に、電流値の要求値と現状での達成値の関係が明確ではありません。この点を加筆いただくと共に、上記 1) の表に、残された実用化への課題と、できればその解決手段の候補を加えていただくと、この論文の位置づけが明確になります。

回答（和泉 輝郎）

「今後の展開」に書き加えました。

コメント2（池上 敬一）

「2 第一課題」で、「 10^3 A/cm² (77 K, 自己磁場) 程度の J_c 特性を得るのが精いっぱい」とありますが、実用化にはどの程度の J_c 特性が求められるものなのか、あるいは、他の材料系による線材ではどの程度の J_c 特性が実現されていたのかといった、比較の対象が提示されていないと、この数字の意味が読者には分からないと思います。

回答（和泉 輝郎）

上記に対する説明を加えました。

QR コードの開発と普及

— 読み取りを追究したコード開発とオープン戦略による市場形成 —

原 昌宏

高度化する情報化時代を迎えるにあたり、これまで情報入力手段として普及していたバーコードでは限界にきていた。そこで、バーコードに変わる次世代のコードとしてQRコードを開発した。コードの開発では、画像認識技術を活用して読み取り性能を追究した。また、社会変化に伴う新しい市場ニーズに対応する為にQRコードを進化させてきた。普及については、QRコードをオープンにし、多くの企業に協力してもらい市場形成した。その結果、最初は業務効率と利便性を向上する用途で利用されていたが、今では人と情報を繋ぐコミュニケーションツールとしても使われ、世界中の人が利用するまでに普及した。

キーワード: 2次元コード、バーコード、画像認識技術、誤り訂正符号、オープン・クローズ戦略

Development and popularization of QR code

—Code development pursuing reading performance and market forming by open strategy—

Masahiro HARA

Due to advances in information technology, we predict the widespread decline of barcodes as an information tool. Instead, we developed QR codes, to replace barcodes, using image recognition techniques. We have made innovations to QR codes to meet market needs. To popularize QR codes, we made QR codes available to the public and have formed a market in cooperation with many companies. As a result, QR codes have been used to improve work efficiency and convenience. QR codes are currently available as a communication tool for people all over the world.

Keywords: Two-dimensional code, barcode, image recognition techniques, error correction code, open and closed strategy

1 はじめに

QRコード^{用語1}は、高度化する情報化時代に必要な情報の多様化、大容量化と製造現場の部品レベルまで個品管理の要望を実現する高密度印字のニーズに対応する為に、1994年に開発したコードである。QRコードは、マトリックス型の2次元コードであり、囲碁で使用する碁盤の様に格子状に白・黒のセルを配置して情報を表現する。一方、これまで普及しているバーコードはバーの幅が太いか細いかで情報を表現する。バーコードは1次元的にしか情報が表現できないのに対し、QRコードは2次元的に情報を表現できるので大容量の情報を高密度で記録できることから、コンピュータやネットワークの進歩と共に次世代の情報化時代を担うコードとして普及してきた。また、QRコードを普及させる為に、いち早くパブリックドメイン（特許権利を行使せずに自由に使用できるコード）を宣言した。その効果も

あり、最近ではスマートフォンと連携した色々なサービスに使われ、一般社会、市民に活用され世界中で普及している。

QRコードが誕生してから24年目を迎えた今でも、日々新しい活用が生み出されており、QRコードはまだまだ普及し続けている。

2 開発の背景

デンソーは、約40年前にトヨタの「カンバン」にバーコードを入れ、物と情報の一元管理する生産システムを提案した。「カンバン」はトヨタ生産方式の基本思想であるジャストインタイムを実現する道具で、「カンバン」は部品と一緒に回る作業指示書の役割であった。生産量が多くなると売上に関する伝票処理が多くなり、その当時はコンピュータのデータ入力の手入力で行っていた為にミスが多くなった。そこで、「カンバン」にバーコードを入れ、それを読み

デンソーウェーブ AUTO-ID 事業部 〒470-2297 知多郡阿久比町大字草木字芳池1番
DENSO WAVE INCORPORATED AUTO-ID Bissiness Unit 1 Yoshiike, Kusaki, Agui-cho, Chita-gun 470-2297, Japan E-mail: masahiro.hara@denso-wave.co.jp

Original manuscript received October 9, 2018, Revisions received December 9, 2018, Accepted December 10, 2018

取るリーダーを開発してコンピュータへの自動入力を実現した。ここで、デンソーは情報の重要性を知り、今後はコンピュータの普及により情報化時代を迎えると確信し、コンピュータの情報入力装置を色々と開発した。その中 QR コードの開発を開始したのは 1992 年である。その当時、印刷媒体による情報システムへの正確、迅速、安価な入力手段として、バーコードが広く利用されていた¹¹⁾。しかし、バブル崩壊で製品を作れば売れる時代は終わり、大量生産から多品種少量生産へと変わっていった。

そこで生産現場ではきめ細かな生産管理をするようになり、扱う情報量は格段と多くなり、ある製造現場では管理用に 10 個ぐらいのバーコードを読ませていた。これでは、生産効率が非常に悪くなり、作業者の疲労にも繋がることから多くの苦情が出ていた。またバブル崩壊後は、製品の差別化として高品質を追求する企業が増え、部品レベルまで管理したいことから、IC 等の極小部品にも印字できるコードのニーズが高まっていた¹²⁾。一方、情報化時代を迎えるにあたり、当時の通商産業省が推進する企業間の電子データ取引 (EDI) 構想があった。そこで使う業界標準伝票に漢字の扱える大容量データに対応したコードの要求が出始めていた。さらに、森林破壊等の環境問題の観点から紙の使用量が削減できる高密度印字が可能なコードのニーズも高まっていた。今後の高度化する情報化時代では、さらに多くの情報が扱われ、これまで情報入力手段として普及していたバーコードでは限界の時期であると感じた。そこで、高度化する情報化時代に対応できる次世代のコードとして QR コードを開発した。

3 開発と普及のシナリオ

3.1 開発コンセプトと開発目標

どのような優れたコードを開発しても、社会に広く実用化されなければ企業としては成功と言えない。そこで、QR コードを世界中に普及させる目標を持ち、以下の開発コンセプトで QR コードを開発した。

- ① 高度化する情報化時代にも対応できるコードを提供し、時代の変化に応じて進化させる。
- ② 使用する者の視点に立った読み取りしやすい (読み取り性能に優れた) コードを開発する。
- ③ ユーザが自由に安心して使える環境を構築し、実用化を図る。

開発の背景でも述べたように、社会ニーズは、大容量のデータを高密度印字できるコードであるが、今後のコンピュータやネットワークの進歩が著しいことを考慮すると、10 年後の社会ニーズの予測は非常に困難である。そこで、予測できる範囲のニーズでコードを開発し、その後、変化

する社会ニーズに応じて QR コードを進化させていくことにした。また社会ニーズは、システムやアプリケーションを構築する人等からの一般的なニーズしか表面化しないことが多い。しかし、幅広く普及させるには、実際にそれを使う人が使いたくなる装置、サービスが提供できるかがポイントである。そこで、QR コードを使用する現場の視点に立ったコードを開発することにした。特に、開発する QR コードは読み取れなければ、使用者には全く生産性がなく、無駄な行為となってしまう。その為に、QR コードの読み取り性能が重要なポイントになると考えた。さらに、新しいコードを使ってもらうには、インフラが整備され、安心して使用できる環境を提供することも必須である。安心して提供できる環境とは、1 社独占で事業不振による事業撤回や他社の特許侵害で利用差止・ライセンス料請求等がなく、長期的に安定して QR コードが利用できることである。

QR コードを開発し、社会に広く実用化を図るシナリオとして、図 1 に示すように市場ニーズ、技術・製品開発、普及活動、市場活性化の 4 フェーズで構築した。

3.2 開発目標とシナリオ

ニーズ調査では、社会ニーズの調査よりもバーコードを読ませている現場の人からの要望等の意見が鍵になると考え、優先的に収集した。その結果、バーコードの読み取り性能と読み取り装置の操作性についての改善要望がほとんどであった。特に要望が多かった内容は、以下の通りである。

- ① 多くの情報 (複数のバーコード) を早く読み取れるようにして欲しい。
- ② 汚れ、破損したバーコードを読めるようにして欲しい。
- ③ 誤読 (誤った情報として読む) しないようにして欲しい。
- ④ バーコードは読み取り方向に制限があり、読み取り装置に当てやすくして欲しい。

読み取り性能と操作性の向上については、画像処理技術を使って読み取り装置で実現する方が一般的であるが、コードに工夫を加えて、読み取りしやすいコードを開発することとした。その理由は、画像処理技術を使えば処理時間が掛かるが、コードに特徴を出すことで他のコードと差別化が図れるからである。さらに処理能力が低い低価格な読み取り装置でも性能が出せる方が市場に受け入れやすく、QR コードを幅広く実用化させる上で重要と考えた。そこで、社会ニーズと現場の声から表 1 の開発目標を設定した。具体的な目標値は、バーコードを基準にして決定した。

開発フェーズでは、大容量のデータをあらゆる環境化でも高速かつ正確に読めるコード開発に重点を置いた。2 次元コードは大きく二つのタイプに分類される。一つは、複数のバーコードを縦に積み重ねた形態のスタック型バーコード

表1 QRコードの開発目標

項目	目標値	バーコード
情報量	英数字:4,000文字以上 漢字:1,600文字以上	約30文字
情報種類	英数字、漢字 バイナリデータ	漢字未対応
読み取り方向	制限なし	制限あり
読み取り速度	30ms(100桁)	約30ms(20桁)
復元能力	面積の30%復元可能	無し
誤読率	10 ⁻⁹ 以下	約10 ⁻⁶

であり、もう一つは、格子状に白黒を配置する形態のマトリックスコードである。スタック型バーコードは、読み取り原理が従来のバーコードと同様であり、比較的読み取り時間が早く、読み取り装置をバーコードと兼用しやすい利点があるが、バーコードと同様に高密度印字ができず大容量データを扱うのに適さず、さらに読み取り可能な方向も制限される。マトリックスコードは、格子の中心が白か黒かを判断して読み取る方式により、印刷精度が要らず高密度印字ができ大容量データを扱うのに適している利点があるが、構造がバーコードより複雑な為に読み取りに時間が掛かる^[3]。この二つの方式から、今後さらに高度化する情報化時代を考へて、大容量データ、高密度印字において発展性のあるマトリックスコードを採用した。当社では、約40年にわたりバーコード、OCR等の光学的情報読み取り装置の製品開発を行ってきた実績があり、そこで培った画像認識技術

を駆使して、読み取りしやすいマトリックスコードの開発に取り組んだ。

高速読み取りに関しては、マトリックスコードの読み取り時間の大半を撮像画像からコードを抽出する処理に費やしていた。そこで、コード抽出に適した特徴のあるシンボルをコードに配置して高速読み取りを可能にし、バーコードの5倍の情報量でバーコードと同等の約30msの読み取り時間を実現した。

コード汚れの読み取りに対しては、誤りを復元できる誤り訂正符号として訂正効率が高く、汚れなどのバースト誤りに適したリード・ソロモン符号を採用し、コードの30%が汚れ、破損しても読み取りができるようにした。また、リード・ソロモン符号は、符号の設計自由度が高く、付加した冗長データの一部を誤り検出として利用し、誤ったデータとして読む確率を10⁻⁹以下にした^[4]。

操作性に関しては、読み取り装置とコードのなす角度で発生する光学歪や曲面に印刷された歪んだコードでも安定して読めるように、歪を補正するシンボルをコードに配置した。

3.3 普及のシナリオ

どんなに良いコードを開発しても、インフラが整備され、誰もが自由に安心して使えなければ普及はしない。特にインフラ整備は当社だけでは困難であり、また普及に時間が掛かると他の2次元コードや新しい技術が浸透する可能性がある。そこで、普及フェーズでは多くの企業にQR市場への参入を促し、インフラ整備に協力してもらい、早期にQR市場を形成させることが鍵になると考えた。その為には、業界標準、国際規格の取得が必須となるが、非常に

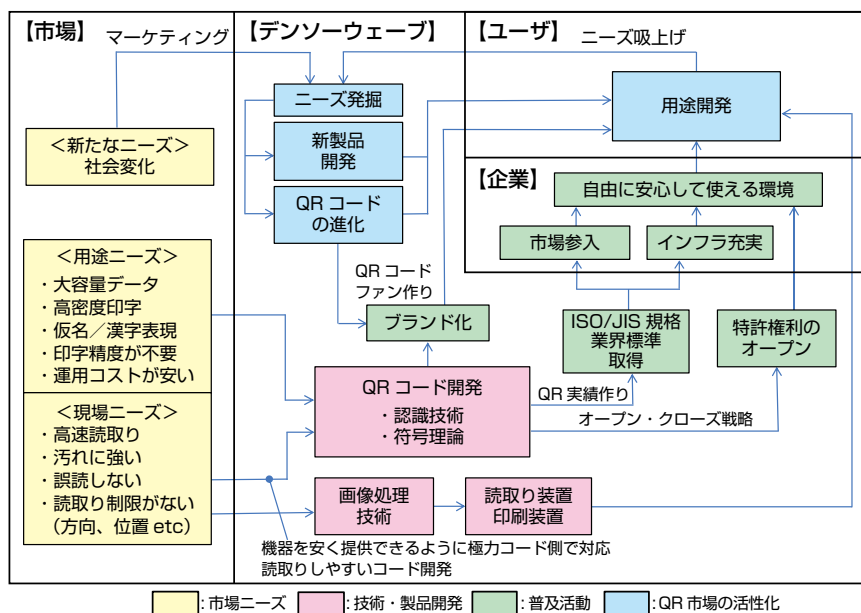


図1 QRコードの開発と普及のシナリオ

労力が掛かり、特に国際規格である ISO 規格を取得するには時間が掛かる。そこで、少しでも早く取得する為に、グローバルで連携している自動車、電機・電子、流通業界の活用実績を優先的に作り、業界標準を取得し、業界から ISO の規格化を要請してもらい、QR コード誕生から 6 年で ISO 規格を取得した。

誰もが自由に安心して使える環境作りでは、上記以外に QR コードの特許を以下のように活用した。QR コードの利用者には特許権利をオープンにし、QR コードの模倣品や不正用途に関しては特許権利を行使して、市場から排除する方針を採った。また、特許権利を取得したことで、他の特許侵害で訴えられない証明となり、ユーザが自由に安心して使える環境を提供した。

市場活性化フェーズでは、ユーザの価値を創造する用途開発が鍵になると考えた。幅広い用途開発ができればできるほど、QR 市場は拡大するので、当社の経験がない分野の用途開発はユーザの力を活用することにした。その為には、ユーザにとって QR コードが魅力のあるコードでなければならない。そこで、QR コードは高性能、高品質、安心といったイメージを構築し、ブランド化した。また、技術の進歩による社会変化に伴い新しい用途開発が行われ、そこで対応できない新たなニーズに対して QR コードを進化させてきた。これにより、QR コードの陳腐化を防ぎ、常に時代の先端を行くコードとして市場に提供してきたことでブランド力が向上し、QR コードは爆発的に普及した。

3.4 事業化のシナリオ

当社の QR 事業については、自社の強み／弱みを考慮したオープン・クローズ戦略で取り組む方針を採った。QR コードの市場形成を他社に協力してもらう為に、規格化・標準化をした上で QR コードをオープンにした。一方、事業収益は慣れ親しんだ読み取り装置・サービスを QR 市場に提供することにし、QR コード読み取り装置をクローズにした。読み取り装置の核となる画像認識技術は特許出願せず秘匿化し、それ以外の読み取り装置に関しては特許を取得してライセンス提供する方針を採った。そして、読み取り性能と自動車分野の物作り品質を武器に読み取り装置、ソリューションビジネスを事業収益の柱とした。

バーコード事業で培った画像認識技術、ノウハウと QR コードを開発したメーカーとしてのブランド力で競合他社と差別化を図り、事業成長を実現してきた。また、QR コードを進化させる技術とノウハウを活用してユーザの用途開発をサポートすることにより、いち早く市場ニーズを把握でき、競合他社より優位に立てることもできた^[5]。

4 QRコードの概要

QR コードの名前は、最大の特長である高速読み取りを表現する「Quick Response」に由来している。QR コードは、色々なアプリケーションで使いやすさを主眼において開発した。2次元コードの特長である大容量、高密度記録の他に、高速読み取りができ、汚れ・破損・歪のあるコードでも正確に読めるなど読み取り性能を最大限に追求したコードである。

4.1 QRコードの構造

QR コードは、図 2 に示すようにファインダパターン、アライメントパターン、タイミングパターンの読み取りを支援する機能パターンとデータ領域（灰色部分）で構成される。

4.1.1 ファインダパターン

QR コードの位置を検出する為のシンボルである。このファインダパターンは、検出しやすいように印刷物であり存在しない左右対称の固有パターン(黑白比率が 1:1:3:1:1)で構成されており、360°全方向でこの固有パターンが出現するように工夫されたシンボルである。このファインダパターンを 3 つのコーナーに配置することにより、コード周囲に文字や図形等の模様が印刷されていても、コードの位置、大きさ、傾きを即座に検出できる^{[6][7]}。

4.1.2 アライメントパターン

コードの歪みを補正する為のパターンである。特に非線形歪みを補正するのに発揮する。アライメントパターンの中心座標を求めて、コードの歪みを補正する。この為、アライメントパターンは中心に黒の孤立セルを配置し、中心座標を正確かつ検出しやすい構造にして、高精度な補正ができる。これにより歪んだコードでも正確に読み取ることができる^{[6][7]}。

4.1.3 タイミングパターン

各データセルの中心座標を正確に求めるのを支援するパターンである。ファインダパターン間の縦横の 2 か所に白、

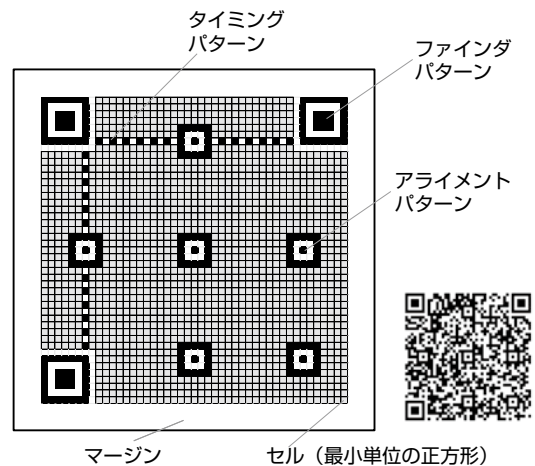



図 2 QR コードの構造

表2 QRコードの概略仕様

項目	仕様	
コードの大きさ	最少 21×21 セル～ 最大 177×177 セル（4 セル間隔） ☆セルサイズが 0.25 mm の場合 ・数字 40 桁 : 5.25 mm 角 ・数字 7089 桁 : 44.25 mm 角	
情報の種類及び情報量	数字	最大 7089 文字
	英数字	最大 4296 文字
	バイナリ	最大 2953 文字
	漢字*	最大 1817 文字
データ復元機能	コード面積の約 7%、15%、25%、30% が破損しても復元可能（4 段階で選択）	
連結機能	16 個まで連結可能（最大で約 46 K バイト格納可能） ☆6 連結の例 	

*QRコードは JIS 第 1、第 2 水準を 13 ビットに圧縮

黒のパターンが交互に配置されている。コードが局部的に歪んだり、印刷精度によるセルピッチずれが生じた場合でも、データセルの中心座標を補正し正確に読み取ることができる^{[6][7]}。

4.1.4 データ領域

QRコードのデータは、灰色部分のデータ領域に配置されている。データは、決められた規則に基づいて‘0’と‘1’の2値符号化され、‘0’は白セル、‘1’は黒セルに変換し、各セルに配置する。データ領域には、誤り訂正機能を実現するリード・ソロモン符号も配置されている^{[6][7]}。

4.2 QRコードの仕様

QRコードは、格納する情報量に応じてコードのサイズが大きくなり、21×21セルから最大177×177セルまで4セル間隔で用意されている。また、16個のQRコードを連結できる機能があり、最大約46Kバイトのデータが格納できる。表2にQRコードの概略仕様を示す。

5 QRコードの特長

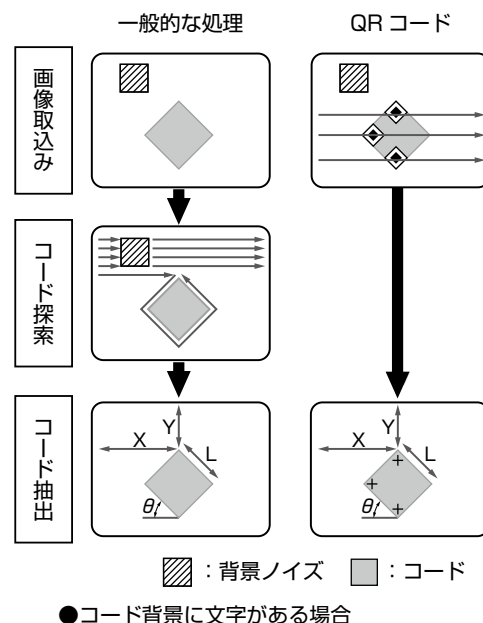
ここでは、QRコードの特に優れた高速読み取りと汚れ、破損に対しても正確に読める特長について紹介する。

5.1 全方向・高速読み取り

通常、2次元コードの読み取りは2次元イメージセンサを用いて行う。2次元イメージセンサによって取り込まれた画像データをいったんメモリ上に展開した上で、ソフトウェアで詳細に解析し、コードだけを抽出し、コードの位置・大

き・傾き等を検出し、各セルの中心座標を求めてデコードをする。一般的なマトリクスコードでは取り込み画像をソフトウェアで探索し、黒い部分を検出するとその外周検出を行いコードかを判断し、コードでない次の黒い部分の検出を行う為、読み取りに要する時間の大半をその処理で費やしている。特に、背景に文字等の模様等のノイズがある場合は、処理する情報量がバーコードの約800倍になり、非常に処理時間が掛かり、バーコードに比べ読み取りフィーリングが劣る。QRコードは、3コーナにコード位置を検出するファインダパターンを配置し360°全方向で高速読み取りを可能にしている。図3に一般的なマトリクスコードとQRコードの処理プロセスの比較を示す。

QRコードのファインダパターンは、図4のように360°の方向からでもファインダパターンの中心を通る走査線の黒白比が1:1.3:1となる。この固有の比率は、文字や図形を構成する白黒比率を調査した上で、極端に出現率が低いことを見つけ出した。この比率は2次元イメージセンサからラスタースキャンで画像を出力する時に検出できるので、文字や図形等がある画像の中から、メモリを探索しなくてもQRコードの位置が特定できる。また、3つのファインダパターンの位置関係から、コードの大きさ、傾きが分かり、コード外形が瞬時に検出できる^[8]。従って、ファインダパターンを検出することにより、取り込み画像の中からコードシンボ



code: A bit sequence of defined length of the data and encoding region. The region of the code matrix is subdivided into sub-codes. Extended Channel Interpretation (ECI): Data interpretation. An ECI may represent an arbitrary character set, a numeric set, a date-time pattern, a time zone, a currency, a language, a country, a postal code, a state/province, or a user-defined code. The error correction applied to the code and on the code matrix is described in the pattern. An electrical code matrix is used to describe the code. Pattern Refer:

図3 コードの位置、外形検出プロセス

ル境界線と周辺を探索する必要がなくなり、一般的なマトリックスコードの処理に比べて読み取り速度を約 50 倍速くできる^{[7][9]}。当時の機器組込に使われる汎用的な CPU (32 bit RISC CPU : 18 MIPS 相当) でも、バーコードの 5 倍の情報量をバーコードと同等の約 30 ms で読み取れる。またファインダパターンの検出はハードウェア化が容易に実現でき、ハードウェア化で画像の取り込みと同時に QR コードの外形が検出できるようになり、高速移動している QR コードをリアルタイム画像で読み取りが可能となる。

5.2 汚れ・破損に強い

QR コードは、誤り訂正符号であるリード・ソロモン符号を採用し、コード面積の 7%・15%・25%・30% が破損しても復元できる 4 つのレベルを設定した。オフィス等の綺麗な環境化では 7%、工場等の極悪な環境化では 30% と使用する環境やアプリケーションによって選べるようにしている^[6]。また、誤訂正率が総てのコードバリエーションで 10^{-9} 以下になるように設計した。その他にも、読み取り性能をよくする為に、白黒のセルが偏らずバランス良く配置されるように工夫している。この処理はマスク処理と呼び、図 5 の様に格納データを符号化してデータ領域に配置する時、データ領域のセルとあらかじめ用意されているマスクパターン（テンプレート）のセルとの間で EX-OR 演算（両方のセルが黒、又は白の場合は白、それ以外は黒）を行い、その結果、一番バランス良く白黒のセルが配置されたパターンを QR コードとして採用している^[10]。この白黒のセルをバランス良く配置することで、特に輝度むらのある粗悪な QR コードの読み取りに効果を発揮する。一般的な 2 値化処理は、画像の輝度値のヒストグラムを取り、谷部の輝度 T1 を閾値として T1 以上の輝度を白セル、T1 未満の輝度を黒セルとする。この場合、QR コードの左部分は白セルが多くなり、右部分は黒セルが多くなり、2 値化の閾値 T1 が悪いことが判る。そこで、閾値 T1 より輝度が低い所と高い所にそれぞれ谷 T2、T3 があり、白セル多い領域は閾値 T3、黒セルが多い領域は閾値 T2 とすると正確にセルの白黒判別ができ、粗悪な QR コードでも読み取ることができる。

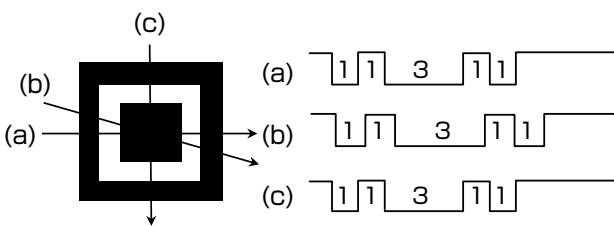


図 4 ファインダパターンの特長

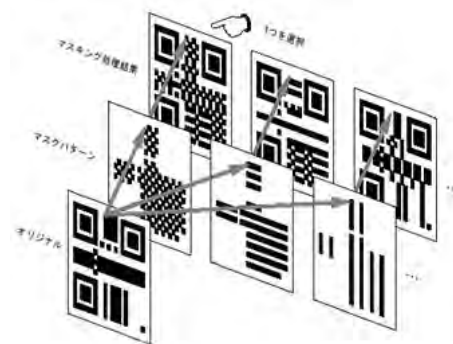
6 QRコードの進化

QR コードの誕生からこれまで、社会ニーズの変化を一早く捉え、ユーザ価値を創出することを重点に考えて、「小型化」「大容量化」「デザイン性」「セキュリティ性」という 4 つのカテゴリで新しい QR コードを開発し、進化させてきた。図 6 に QR コードの進化の歴史を示す。

QR コードの登場により、これまでバーコードで管理できなかった電子部品、医薬品、貴金属等の小物商品や極小部品の管理に利用の要求が年々高まっていた。そこで、QR コードの読み取り性能を継承し、品番とシリアル番号等が扱える英数字 20 文字程度のデータを 1 mm 角で印字できるマイクロ QR コードを 1998 年に開発した。さらに、医療分野や製造現場では曲率の高い試験管や円柱状の小型部品も管理との要望からデータ効率を向上させた長方形の形状をサポートした iQR コードを 2008 年に開発した。大容量化では、2000 年に入ると日本企業が中国等アジアに進出し、日本以外の漢字やハングル文字等アルファベット圏でないマルチバイト文字を効率良く扱う要望が高まっていた。そこで中国、台湾の漢字と韓国のハングル文字等アジアの言語に対応した QR コードを 2001 年に開発した。それに伴い、アジア各国の国家規格も取得した。

セキュリティ性では、2004 年頃から QR コード読み取り機能を搭載した携帯電話の普及で、誰でもが QR コードを読み取れるようになり、企業が使っていた管理用の QR コードがお客様に簡単に読み取られてしまうなどの課題も出てきた。この課題を解決する為に、2007 年に SQRC を開発

●マスク処理



●2 値化処理

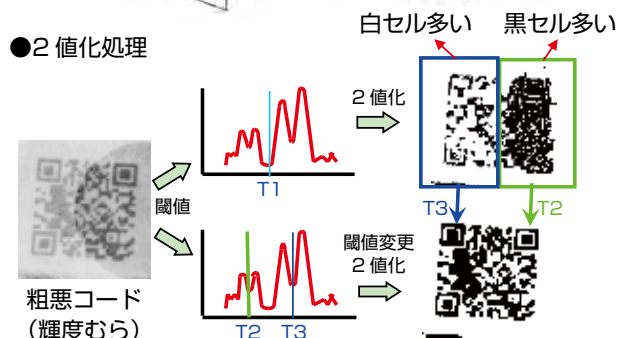


図 5 マスク処理の効果

した。SQRCの最大の特長は、公開情報領域と非公開情報領域の2層構造になっており、公開情報領域は携帯電話等の総ての読み取り装置で読み取れるが、非公開領域は情報が暗号化されており、SQRC専用の認識ソフトウェアが搭載され、暗号キーが一致した読み取り装置しか読み取れない。このSQRCの暗号機能により、データ改竄ができないことから、新たな用途としてチケットに使用のニーズが高まってきた。ただ、コピー機で簡単に複製できるので高額チケット等には使用できない。そこで、SQRCを印刷した後に、特殊な光を通すインクで隠蔽し、複製とデータ改竄できない複製防止QRコードを2011年に開発した。ブラックライト（紫外線）を照射すると蛍光色で光る技術は知られているが、複製防止QRコードは特殊波長の光を照射しても人間に見えなく、どこにSQRCがあるか分からないのでセキュリティ性が向上する。

デザイン性では、2005年以降から急激にソーシャルネットワークが普及し、企業や個人のアドレスをQRコード化する人が急増するようになった。その中で、自分だけのオリジナルなQRコードが欲しいとの要望が高まり、さらに企業側では、自社のサイトにアクセスさせる為に読ませたくなるユニークなQRコードの要望も高まっていた。そこで、デザイン性を最大限に追求したフレームQRを2014年に開発した。フレームQRは、コードの中央部に画像やロゴが入る専用キャンバスを設け、QRコードの読み取り性能を継承したコードである^[11]。デザイン性向上だけでなく、画像やイラストから、このコードはどのような情報のサイトに繋がっているか分かるので利便性も向上する。このように、社会ニーズに応えるQRコードの進化と共にQR市場は拡大した。

7 QRコードの広がり

図7にQRコードの広がり状況を示す。1990年代は、主に製造、物流分野で使われていたこともあり、QRコードは一般の人には見る機会はありませんでした。

2000年にISO規格に制定されると馬券、車検証や飛行機のチケットに使われ、2002年に携帯電話でQRコードが読めるようになるとWEBサイトのアクセスに使われ、新聞、雑誌、ポスターにQRコードが付くようになり、誰もがQRコードを目にするようになった^[12]。その頃から公共・行政・流通での活用が増え、QR市場は急激に拡大した。

さらに、2005年以降はソーシャルネットワークの普及により、人の情報を繋ぐコミュニケーションツールとしての活用が多くなり、ゲームや営業拡販ツール等の一般消費者向けの分野で市場が形成され、さらに、2010年頃から海外でもスマートフォンの普及で世界中の人々がQRコードを活用するようになり、QR市場は爆発的に拡大した。

8 おわりに

QRコードが普及すると、独占すれば良かったのと言う人がいる。実際、独占していたらどうなっていたか分からないが、ここまでは普及しなかったであろう。多くの企業がQR市場に参入し、それぞれの企業が競争することでより良い技術・製品やサービスが開発されたことがQRコードを爆発的に普及させた原動力になったと思う。当社も競合他社と競争する中で、技術開発を切磋琢磨しQRコードを進化させることができた。また、この開発した技術が他の分野にも活かされ、この点においてもQRコードをオープンにしたことは成功であった。

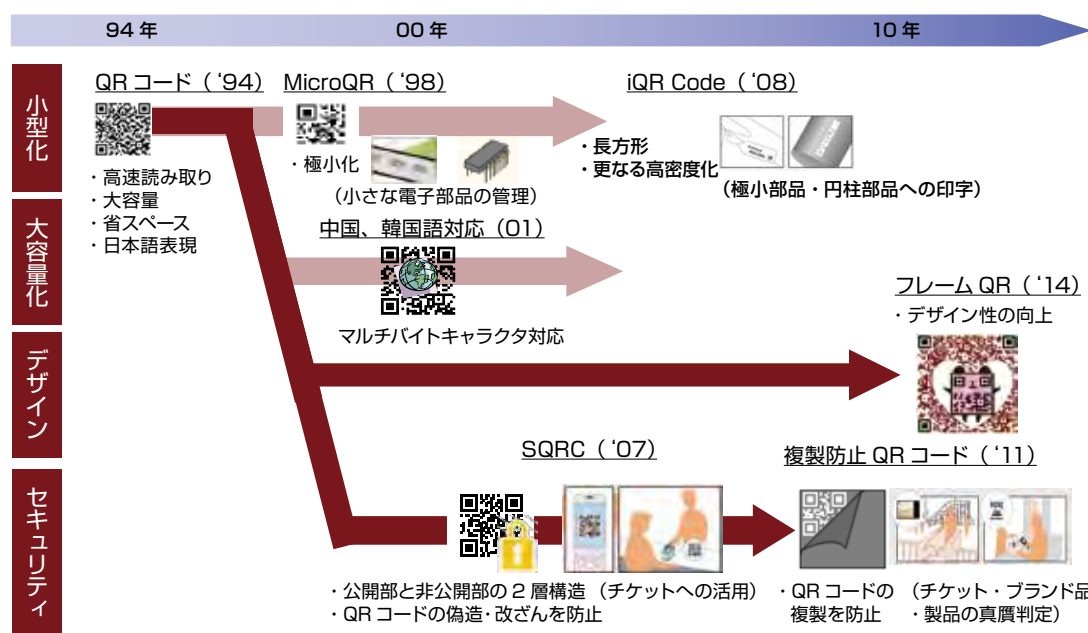


図6 QRコードの進化

用語の説明

用語1：QRコード：デンソーウェーブの商標登録。

参考文献

- [1] 流通システム開発センター：これでわかったバーコードの応用, 国際自動認識工業会.
- [2] 星野裕, 澤田善次郎, 野村政弘, 増澤洋一, 藤本義治: QRコード(2次元バーコードと品質管理への適応), 生産管理, 9 (1), 81-86 (2002).
- [3] <http://www.jaisa.jp/about/pdfs/20040219bcd.pdf>, 閲覧日 2018-10-09.
- [4] 長屋隆之, 山崎智彦, 原昌宏, 野尻忠雄: 高速読み取り対応2次元コード「QRコード」の開発, 第52回メディア情報処理学会全国大会講演論文集, 253-254 (1996).
- [5] 加藤浩一郎: 二次元バーコードのビジネスモデルと事業戦略～デンソーウェーブのQRコード～, 特許庁, <http://watanabelab.main.jp/wp-content/uploads/1ca0679d710dc1b130a20ac08e580b69.pdf>, 閲覧日2018-10-09.
- [6] 日本自動認識システム協会(編): これでわかった2次元シンボル, オーム社, (2004).
- [7] 自動車技術会: 自動車技術, 62 (1), (2008).
- [8] 岩井誠人, 佐波孝彦, 菊間信良, 原昌宏: 日本発・世界に広がる二次元コード: QRコード, 通信ソサイエティマガジン, 7 (2), 126-132 (2013).
- [9] 標準化研究会(編): QRコードのおはなし, 日本規格協会, (2002).
- [10] 2次元コードシンボル-QRコード-基本仕様 JIS X 0510, 日本規格協会, (2004).
- [11] QRコードとは?, デンソーウェーブ, <http://www.qrcode.com/about/>, 閲覧日2018-10-09.
- [12] スマートフォン経済の現在と将来, 平成29年度情報通信白書, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/n1100000.pdf>, 閲覧日2018-10-09.

執筆者略歴

原 昌宏 (はら まさひろ)

1980年3月法政大学工学部電子工学科卒業。1980年4月日本電装(現デンソー)入社。2012年1月デンソーウェーブに転籍し現在は主席技師、2018年1月愛知県幸田町のづくり研究センターの技術顧問兼任。これまでバーコード、OCR、QRコードの認識アルゴリズムと読取り装置の開発及びQRコードの開発に従事。これまでの主な受賞歴は、中日産業技術賞特別奨励賞(2000)、全国発明表彰発明賞(2002)、R&D 100 Awards(2002)、モバイルプロジェクトアワード最優秀賞(2004)、日本イノベータ大賞優秀賞(2007)、グッドデザイン賞 Best100(2012)、欧州発明家賞(2014)。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(赤松 幹之:産業技術総合研究所)

2次元バーコードであるQRコードの開発経緯とその普及戦略について述べた論文であり、情報量や回転への対応また対汚れ性など光学的コードの技術的なポイントが丁寧に記載されているとともに、開発開始時での社会情勢に基づいた目標設定やブランド化等の普及戦略、そして特許のオープン化という大胆な方針が広範な普及につながったことが書かれており、技術開発とその社会への普及のシナリオとして大いに参考になる。

コメント(松井 俊浩:情報セキュリティ大学院大学)

QRコードは、日本の企業が開発したパターンコードとして広く普及しており、コードを自由に使えることでも評価の高いシステムである。その開発の経緯をSynthesiologyに発表していただけたことは、独自技術を普及させていく方法として読者の参考になる。

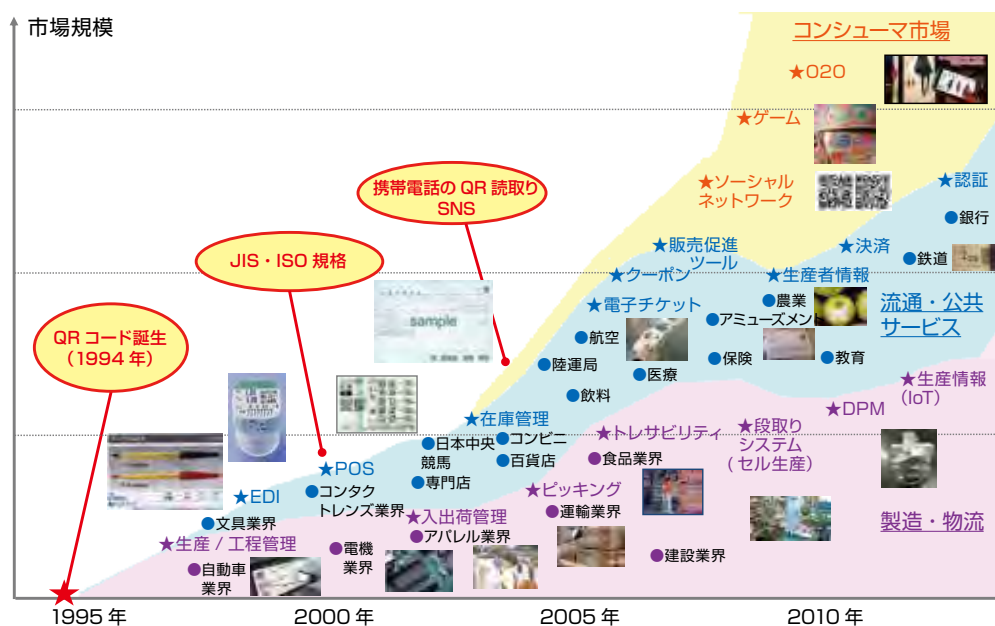


図7 QRコードの広がり

議論2 オープンクローズ戦略における知財について

質問（松井 俊浩：情報セキュリティ大学院大学）

オープンクローズ戦略を採用されているということですが、QR コードを登録商標にされたのでは利用が制限されることはないでしょうか。特許を獲得しながら、オープンにするというのが素晴らしい戦略ですが、どういう特許を取るべきかを検討されたのでしょうか。模倣品や不正使用には特許を使って排除するとは、具体的にはどのようにされたのでしょうか。クローズ部分に関することとなりますが、当時、専用の読み取り機を使わなくてもスマートフォン等で手軽に読み取りが可能になることを想定されていましたでしょうか。

回答（原 昌宏）

商標登録に関しましては、QR コードの普及の戦略の1として、QR コードは優れたコードというブランド化を図りました。QR コードが普及した時に、他の2次元コードがQR コードと名乗ってくる可能性があります。その2次元コードの性能が悪ければQR コードの評判が落ちる可能性もあるので、他の2次元コードがQR コードと名乗らせないためにも商標登録を取得しました。

特許に関しては、オープンにしたQR コードでは他の特許を侵害していないことを証明するために、QR コードで新しく開発した項目について特許を取得しました。また、当社の事業の柱である読み取り装置に関しての特許を優先的に権利化しました。

模倣品や不正用途を発見した場合は、当社の特許権利を侵害していると警告し、警告しても止めなければ権利行使することになっています。これまでに、模倣品で1件だけ警告したことがあります。

開発当時はスマートフォンでQR コードを読ませることは想定していませんでした。当社では、BtoBの用途は色々検討しましたが、デンソーの社風からしてBtoCはビジネス領域でないと考えていました。

議論3 ブランド化について

質問（赤松 幹之：産業技術総合研究所）

ブランド化も戦略の一つだったとのことですが、「高性能・高品質・安心といったイメージの構築」といったブランド化のための方策はどのようなものだったのでしょうか。

回答（原 昌宏）

QR コードをオープンにし、多くの企業に参入していただいたことにより、デンソーウェブ以外にも読み取り装置や印刷装置が製品化されます。もし、デンソーウェブ以外の製品性能が悪くとQR コードの優れた特長が発揮できません。そこで、運用に支障を与えない性能や品質が最低限に確保できるよう、読み取り、印字のノウハウ開示をしました。また、QR コードの良さを理解してもらうために、QR コードの特長を解説した「QR コード読本」というムックを作成して、ユーザに配布し、啓蒙活動を行いました。

議論4 標準化を通じた技術の普及について

質問（松井 俊浩）

普及のシナリオが興味深く語られています。初期段階で、まだ誰にも使われていない状態では、どのようなプロモーションを行うことで活用実績を蓄積できたのでしょうか。また、将来の可能性が見えない段階において、開発を続けることをどのようにして納得してもらったのでしょうか。普及のための標準化ですが、標準化を6年で達成した背景にはどのようなことがあったのでしょうか。用途開発等にユーザの力を借りるとは、具体的にどのような方法で行ったのでしょうか。

回答（原 昌宏）

最初に、色々な業界団体の集会でQR コードのプレゼン機会をもらい、そこで高速読み取りと汚れ破損しても正確に読み取りデモを実施

しました。その中で、興味を持っていただいた企業様に訪問してQR コードの詳細説明を実施して、採用に結び付けてきました。

開発当時は成功するか分からないために、2人という少人数で、開発費の掛からないコード開発からスタートさせてもらいました。そして、コードが完成して、ユーザにデモを実施して手ごたえがあれば読み取り装置を開発することで納得してもらいました。ですから、QR コードが完成してから2年後に読み取り装置を製品化させ事業をスタートさせました。

標準化については、グローバルで連携している自動車業界、電子電気業界、流通業界の実績を積極的作り、各業界からISO規格化の要請をしていただいたから早く規格化できました。

用途開発では、ユーザから現状の業務の課題や在りたい姿を聞き、それをQR コードで実現する方法を提案してきました

議論5 QRコードの特徴的技術について

質問（松井 俊浩）

4章では、QR コード技術の使いやすさ、容量、読み取り性能、信頼性が解説されています。中でもファインダパターンがQR コードの特徴でしょう。ファインダパターンが、印刷物の中では特殊であり、回転しても検出しやすい、1次元の直線的なスキャンで検出しやすいのだろうと推測しますが、回転不変性を追求するのなら、なぜ同心円にしなかったのでしょうか。

回答（原 昌宏）

ファインダパターンを同心円にしなかったのは、解像度の低いプリンターで印字するとどうしても円が大きくなります。正方形に比べて円の方が構成するドット数が多く必要になります。少しでも、小さな印刷領域で印字できることを考慮して正方形にしました。

議論6 競合技術との違いについて

質問（松井 俊浩）

海外でのQR コードの普及はどうでしょうか。医薬品の分野では、データマトリックス、データバーリミテッド等が標準化されていますが、QR コードとどのような違いがあるのでしょうか。

回答（原 昌宏）

海外でもQR コードは広く使用されています。データバーリミテッドはバーコードの仲間でも多くの情報が入りません。そのため、医薬品業界以外ではほとんど使われていません。データマトリックスは40桁までのデータの用途ではアメリカの産業界で使用されていますが、多くの情報を入れると読み取り性能が悪くなります。そのために多くの情報を扱う用途では、QR コードが広く採用されています。

議論7 QRコードの進化について

質問（赤松 幹之）

「社会ニーズに応じてQR コードを進化させる」とあります。進化の具体例としてiQRやSQRCやイラスト等挙げられていますが、このような多くの情報に対応ができるようになるための工夫はどのような点にあったのでしょうか。

回答（原 昌宏）

多くの情報を早く正確に読むために、コード認識技術を考慮した読みやすいコード構成（機能セルの配置）、データの配置に工夫しています。また、情報を効率よく圧縮して、少しでもコードの大きさが小さくなるよう工夫をしています。例えば、漢字第1水準、第2水準を13ビットで圧縮する他に、https://www. や業界で良く使われるキーワードを1バイトの予約語として扱えるようにしています。

単結晶固体電解質を利用した 小型全固体リチウム二次電池の開発

— 酸化物系全固体リチウム二次電池の実現を目指して —

片岡 邦光*、赤尾 忠義、永田 裕、永井 秀明、秋本 順二、明渡 純

全固体リチウム二次電池は、次世代二次電池の一つとして注目され、研究開発が盛んに行われている蓄電デバイスである。全固体リチウム二次電池の実現には、新しい部材であるリチウム固体電解質の開発が重要である。ここでは、我々が行っている、リチウム固体電解質単結晶とAD法を利用した全固体リチウム二次電池の開発について、論じる。

キーワード: 全固体リチウム二次電池、リチウム固体電解質、単結晶、AD法、FZ法

Development of a compact all-solid-state lithium secondary battery using single-crystal electrolyte

—Towards realizing oxide-type all-solid-state lithium secondary batteries—

Kunimitsu KATAOKA*, Tadayoshi AKAO, Hiroshi NAGATA, Hideaki NAGAI, Junji AKIMOTO and Jun AKEDO

All-solid-state lithium secondary batteries are attracting attention as a next-generation technology. To realize this technology, it is important to develop a new solid-state lithium-ion conductor. In this regard, we discuss the development of all-solid-state secondary lithium batteries using single-crystal solid electrolytes and the AD method.

Keywords: All-solid-state lithium battery, lithium-ion conductor, single-crystal, AD method, FZ method

1 はじめに

1.1 次世代リチウム二次電池の現状

高いエネルギー密度を有するリチウム二次電池は、スマートフォンなど多くの小型電子機器や自動車に使用されており、現代社会の生活とは切り離せない電源デバイスの一つである。最近、二次電池への要求スペックも他の電子デバイスとの兼ね合いから、高容量化、高電圧化、長寿命化、高エネルギー密度化など、現行の液系二次電池では解決できない問題にさしかかっている。ポストリチウム二次電池としては、移動体イオンにナトリウムやマグネシウムを利用した二次電池や対極に空気を用いるリチウム空気電池などさまざまな新規二次電池が研究開発されているが、最も有力な新規二次電池として全固体リチウム二次電池が注目され

ている^{[1]-[3]}。我が国では2013年のNEDOのロードマップによると、全固体電池は次世代電池を横断的にカバーする電池と位置づけられており、2030年の実用化を目指している^[4]。従来のリチウム二次電池では、大きく分けて正極、負極、電解液と正極と負極を隔てるセパレータの4つの部材で構成されている。一方で全固体リチウム二次電池では正極、負極、リチウム固体電解質の3つの部材で構成されており、リチウム固体電解質が電解液とセパレータの役割を果たす。図1に従来の液系リチウム二次電池と全固体リチウム二次電池の模式図を示す。全固体リチウム二次電池でも正極材料と負極材料は従来の液系リチウム二次電池の材料が利用できる可能性があるが、リチウム固体電解質は新規に開発しなければならない。このリチウム固体電解質

産業技術総合研究所 先進コーティング技術研究センター 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5
Advanced Coating Technology Research Center, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan * E-mail: kataoka-kunimitsu@aist.go.jp

Original manuscript received December 28, 2018, Revisions received January 23, 2019, Accepted January 24, 2019

表1 報告されているリチウム固体電解質の代表例

	化学組成	リチウムイオン 導電率 (S cm ⁻¹)	金属リチウム 負極の使用	高電位 正極の使用	電極との 界面形成	部材として の稠密性	安全性
酸化物系	Li ₇ La ₃ Zr ₂ O ₁₂	3.0 × 10 ⁻⁴	可能	可能	困難	困難	安全
	La _{0.57} Li _{0.29} TiO ₃	6.8 × 10 ⁻⁴	不可能	可能	困難	困難	安全
	Li _{1.3} Al _{0.3} Ti _{1.7} (PO ₄) ₃	7.0 × 10 ⁻⁴	不可能	可能	可能	可能	安全
	Li _{2.9} PO _{3.3} N _{0.46}	3.3 × 10 ⁻⁶	可能	可能	可能	可能	安全
	Li _{1.5} Al _{0.5} Ge _{1.5} (PO ₄) ₃	4.0 × 10 ⁻⁴	可能	可能	可能	可能	安全
硫化物系	Li ₁₀ GeP ₂ S ₁₂ *	1.2 × 10 ⁻²	不可能	可能	容易	容易	硫化水素 ガス発生
	Li ₇ P ₃ S ₁₁ *	1.0 × 10 ⁻²	不可能	可能	容易	容易	硫化水素 ガス発生
	参) 現行有機電解液	10 ⁻²	不可能	不可能	容易	-----	可燃性

を利用した全固体リチウム二次電池には、内部抵抗の低減や作動電圧、そして出力の増大が可能なバイポーラ型全固体リチウム二次電池は、高電圧化や高容量化、長寿命化、パッケージの簡素化、金属リチウム負極使用の可能性など多くの利点が期待されており、現在、世界各国の研究機関、企業で全固体リチウム二次電池の実現にむけて開発が行われている。なおこの論文において、リチウムイオンが移動する固体電解質をリチウム固体電解質として定義している。

1.2 全固体リチウム二次電池が抱える問題点と先進コーティング技術研究センターが目指す全固体リチウム二次電池

全固体リチウム二次電池は、リチウム固体電解質などの部材開発から全固体リチウム二次電池の電池設計に至るまで、さまざまな研究開発が精力的に行われている^[5]。表1に現状で開発が行われている主なリチウム固体電解質と

特徴をまとめる。硫化物系固体電解質はリチウムイオン導電率も高く可塑性材料であるため、電池作製では有利に働くが、安全性の観点では不利であり、使用されている多くの材料で水分と反応して有害である硫化水素ガスが発生することが知られている。身近なデバイスであるだけに、安全性の担保は重要であると考え、まだまだ課題はあるものの、より安全性の高い酸化物系固体電解質を利用した全固体リチウム二次電池の開発を先進コーティング技術研究センター（以下、当センター）では行っている。図2はリチウム二次電池の現状と将来の展望を俯瞰したときの当センターが目指す全固体リチウム電池のポジションである。酸化物系全固体リチウム二次電池は硫化物系全固体リチウム二次電池と比較して、大面積化などが必要である高容量化や高出力化は、まだまだ難しいものの、高安全性化、長寿命化、耐環境性に優れると考えられており、それらの特性を活かした、小型全固体リチウム二次電池により物のイ

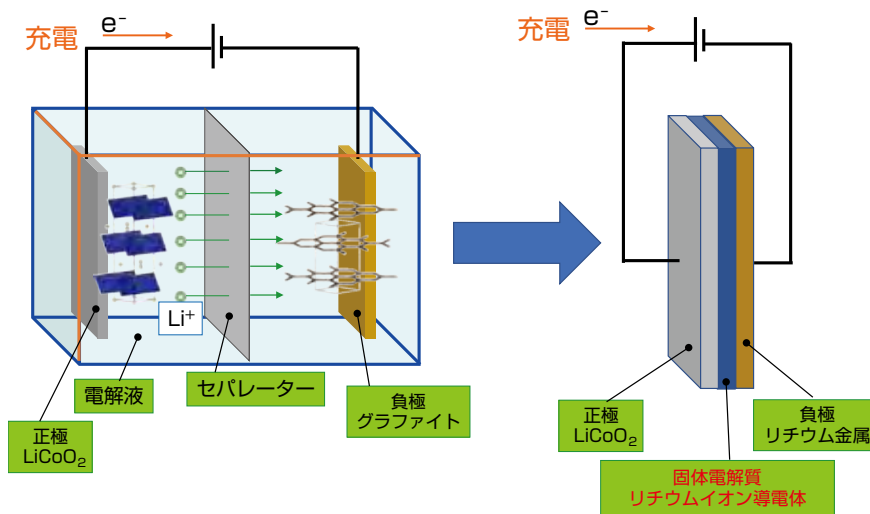


図1 現行のリチウム二次電池と全固体リチウム二次電池の構成比較

表 2 主な酸化物系全固体リチウム二次電池の作製方法と特徴

全固体電池の作製方法	電極層の膜厚	材料選択の自由度	作製温度
一体焼結法	バルク型電池	低い	1000 °C付近
ゾルゲル法	薄膜電池	低い	800 °C付近
PLD法	薄膜電池	高い	400 °C付近
AD法	バルク型電池	高い	25 °C付近

ンターネットとよばれる IoT や、ウェアラブルそして、医療等の用途を目指すべきであると考えている。

1.3 ガーネット型リチウム固体電解質の問題点と解決策

当センターは、全固体リチウム二次電池の研究を始める以前より従来のリチウム二次電池に用いる正極と負極の材料酸化物の開発を行ってきた。最近、全固体リチウム二次電池の研究開発に携わるようになり、酸化物系リチウム固体電解質の中でも、特にガーネット型リチウム固体電解質を中心に研究開発を行ってきた。ガーネット型リチウム固体電解質の研究は世界の多くの研究機関、企業で行われており、一般的に焼結法によりバルク体が作製されているが、ガーネット型リチウム固体電解質は高温で分解し、リチウムの揮発を伴うので、高温での緻密化が困難で、焼結体の焼結密度が向上しないという欠点があった。最近では、ガーネット型リチウム固体電解質の微細化による低温焼結やスパークプラズマシタリング法 (SPS 法) とよばれる放電プラズマ焼結法により焼結密度は年々向上している。しかし、焼結体である限り粒界が存在し、粒と粒の間をリチウムイオンが通る際の粒界抵抗が大きくバルク体本来の性能を引き出すことは難しい。したがって、バルク体本来のリチウムイオン導電性の性能を引き出すためには粒界のない一つの大きな粒、すなわち大型の固体電解質

単結晶を育成すれば可能となる。近年、ガーネット型リチウム固体電解質の焼結体を利用した酸化物系全固体リチウム二次電池では、リチウム金属の析出時に針状リチウム金属が固体電解質中をデンドライド成長することが問題となっている。文献で、デンドライド成長したリチウム金属は、全固体リチウム二次電池の内部で短絡を引き起こすことが報告されている^[6]。この問題の解決のためには、粒界のないバルク体であるリチウム固体電解質単結晶が必要であると考えた。

以上のようなガーネット型リチウム固体電解質の課題を克服するために、当センターは、長年培ってきた単結晶育成技術を応用することで、大型で粒界のないガーネット型リチウム固体電解質の開発に着手した。ガーネット型リチウム固体電解質の欠点を単結晶化によって克服することができれば、部材として、さらには酸化物系全固体リチウム二次電池開発のブレイクスルー技術となることが期待できる。これまでに、ガーネット型リチウム固体電解質をはじめとして、大型のリチウム固体電解質単結晶の育成例はなく、全固体リチウム二次電池の分野に限らず、固体内のリチウムイオンの動きを調べる固体アイオニクス学的な要素技術においてもリチウム固体電解質単結晶の育成は意味のある研究課題である。また、リチウム固体電解質の単結晶を使用すると、理想的な界面が形成できるため、これまで焼結体では解明できなかった界面構造を明らかにできる可能性もあると考えている。

1.4 固体-固体界面の形成の問題点と解決策

さらに酸化物系全固体リチウム二次電池を作製するにあたり、ガーネット型リチウム固体電解質単結晶と電極層をどのように接合するかの課題に取り組んだ。全固体リチウム二次電池の電極作製には一体焼結法や、ゾルゲル法による薄膜電池作製法、パルスレーザーデポジション法 (PLD 法) が報告されている。表 2 に主な酸化物系全固体リチウム二次電池の作製手法と特徴をまとめる。どの手法の場合でも、リチウム固体電解質と電極層の間で強固な界面を形成する必要がある。ガーネット型リチウム固体電解質では、高温での電極と固体電解質の相互拡散により電極と固体電解質の固体界面に反応生成物である異相が生成されるた

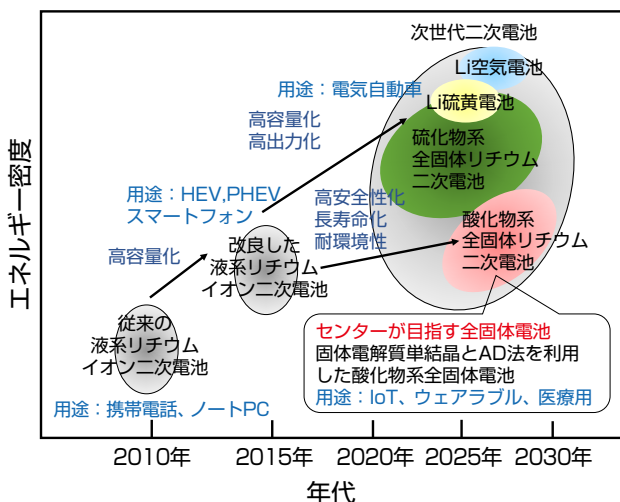


図 2 リチウム二次電池の現状と将来展望の俯瞰図

め、高温での一体焼結は難しい。そこで、当センターで長年行われてきた厚膜セラミックスコーティング技術として研究開発された、常温衝撃固化現象を利用したエアロゾルデポジション法 (AD 法) による電極層作製技術の開発に着目した。常温製膜プロセスである AD 法を用いる常温接合技術を利用して解決できると考えた。全固体リチウム二次電池の用途にもさまざまな事例が想定されるが、我々は電池容量が多いバルク型全固体リチウム二次電池の作製を目指している。そこで、バルク型全固体リチウム二次電池を作製するために、ガーネット型リチウム固体電解質単結晶と固体界面をリチウムが移動するために強固な界面を形成する技術であり、常温で強固な製膜が可能である AD 法を組み合わせることで、常温での全固体リチウム二次電池が作製できると着想した。

1.5 この論文における研究の目標

当センターで酸化物系全固体リチウム二次電池の研究開発を行っている過程で、全固体リチウム二次電池実現のための課題として、電池内部での短絡、固体同士の界面形成の二つの課題が大きいことを実感した。特に電池内部での短絡は、最近広く問題視されており、その解決策は他の方法では見出されていない。この論文では、全固体リチウム二次電池、およびリチウム固体電解質の研究開発の現状と、前述した酸化物系全固体リチウム二次電池の二つの課題解決のために、現在当センターで行っている、ガーネット型リチウム固体電解質の単結晶化技術と常温製膜技術である AD 法を利用した電極形成技術について述べる。

2 全固体リチウム二次電池とリチウム固体電解質

前項でも述べたが、全固体リチウム二次電池は、主な部材として、正極、負極、リチウム固体電解質の3つの部材で構成される。全固体リチウム二次電池ではリチウム固体電解質にアニオンが酸素で構成される酸化物系リチウム固体電解質を利用するものと、アニオンが硫黄で構成される硫化物系リチウム固体電解質を利用するものが広く研究されている。硫化物系リチウム固体電解質は可塑性に優れるため電極と界面形成が容易であること、現行の有機電解液を超える 10^{-2} S/cm オーダーの高いリチウムイオン導電率を有する固体電解質も報告される^{[7][8]}などの利点がある一方で、有害な硫化水素ガスが発生する危険性も有している。酸化物系リチウム固体電解質は安全性の面で優れるが、固体-固体界面の形成やリチウムイオン導電性に課題があった。現在の全固体リチウム二次電池の開発状況としては、硫化物系リチウム固体電解質を用いる硫化物系全固体リチウム二次電池の研究が先行して実用化に近づいており、酸化物系リチウム固体電解質は実用化には、まだ時間

がかかる段階である。しかし、当センターでは、酸化物系リチウム固体電解質のもつ優れた安全性に着目して酸化物系全固体リチウム二次電池の研究開発を行っている。酸化物系固体電解質では、ナシコン型構造を有する材料に代表されるポリアニオン型リチウム固体電解質^[9]、ペロブスカイト型リチウム固体電解質^[10]、ガーネット型リチウム固体電解質^{[4][11][19]}などがあるが、当センターでは、酸化物系リチウム固体電解質の中でも比較的高いリチウムイオン導電率 (10^{-4} S/cm) が報告されている。そして広い電位窓を有しているため、有機電解液では利用できなかった高電位正極活物質や負極活物質に金属リチウムが利用できるガーネット型リチウム固体電解質に注目して、2009年から継続して、酸化物系全固体リチウム二次電池の研究開発を行っている。

3 ガーネット型リチウム固体電解質

ガーネット型リチウム固体電解質は、名称の由来の通り、宝石として利用されるガーネットや、光学結晶として利用されるイットリウムアルミガリウムガーネット (通称 YAG) などと非常に類似した結晶構造を有している。本来のガーネットは、一般式 $C_3A_2B_3O_{12}$ で表され、C サイトは酸素と 12 面体配位、A サイトは酸素と 8 面体配位、B サイトは酸素と 4 面体配位をしている。一方、ガーネット型リチウム固体電解質では通常のガーネット構造では空隙となる酸素と 8 面体配位する箇所にはリチウムが存在する。図 3 にガーネット型リチウム固体電解質の結晶構造を示す。

例えば $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ の組成のガーネット型リチウム固体電解質であると、C サイトをランタンが占有し、A サイトをジルコニウムが占有し、B サイトと空隙をリチウムが占有する。

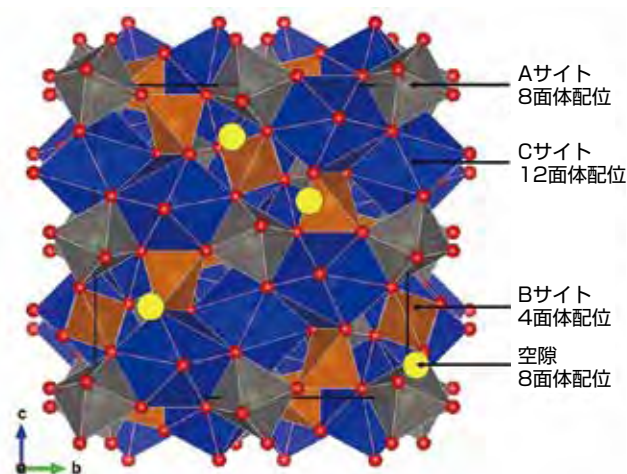


図 3 ガーネット型リチウム固体電解質の結晶構造

ガーネット型リチウム固体電解質では、さまざまな元素が置換することが知られており、C サイトにはカルシウム、ストロンチウム、バリウム、A サイトにはニオブ、タンタル、スズ、ハフニウムなど、B サイトにはアルミニウム、ガリウムが置換すると報告されている^{[11][15]}。置換元素によってリチウム量に変化して、結晶中でのリチウムの配列や占有率が変化することによりリチウムイオン導電率が変化する。ガーネット型固体電解質は 10^{-4} S/cm オーダーのリチウム導電率を有することが多数報告されており^{[8][18]}、酸化物系リチウム固体電解質の中でも、リチウムイオン導電性に優れている。一方で難焼結材料であるため、部材としての稠密化が難しく、粒界抵抗などの影響によりバルク体が本来有するリチウムイオン導電性を部材として発揮できないといった課題があった。最近では、通電焼結法やホットプレス法などにより、稠密性の高い部材も作成され、リチウムイオン導電率が 10^{-3} S/cm オーダーの報告もされている^{[20][22]}。部材としての稠密性が上がっているが、最近では新たに内部短絡の問題が報告されている^{[3][6][12][13][15]}。内部短絡の問題とは全固体リチウム二次電池の内部で金属リチウムが析出することで正極と負極間で短絡してしまうことである。もちろん、全固体リチウム二次電池では、従来のリチウム二次電池の様な発火はないが、短絡することで電池としての機能は果たせなくなる。全固体リチウム二次電池の内部短絡は、図4のイメージ図に示すように、リチウム固体電解質の粒界に沿って金属リチウムが成長すると考えられており、これまでさまざまな手法で部材を稠密化しても低電流で内部短絡を引き起こすことが報告されており、課題の解決には至っていなかった。そこで我々は部材として粒界のないリチウム固体電解質、すなわち単結晶を利用することで、この問題を解決できるのではないかと着想し、ガーネット型リチウム固体電解質の大型単結晶の開発に着手した。

4 リチウム固体電解質の単結晶育成と評価

4.1 FZ法によるガーネット型リチウム固体電解質の単結晶育成

これまでガーネット型リチウム固体電解質の単結晶は、高温焼成またはフラックス法により合成されており、どちらの手法でも最大で1 mm 程度の単結晶が報告されているだけであった^{[16][18]}。高温焼結法やフラックス法では、全固体リチウム二次電池に利用できるリチウム固体電解質は育成できないと考え、我々はフローティングゾーン法 (FZ法) による単結晶の育成を検討した。図5にFZ法溶融炉、図6にFZ法の概略を示す。FZ法は溶融帯を空中に浮遊させることから、この名前が付けられた。溶融帯は上下の原料棒によって表面張力で支持され、溶融帯を移動させることで単結晶が成長する。るつぼなどの容器を使用しないため、るつぼ材からの不純物の混入がなく、溶融帯が局所的であるため、育成条件を工夫することで、揮発性が高い材料でも単結晶の育成が可能となる。実際に過去の単結晶育成例を調べてみると、リチウムを含むリチウム二次電池の正極活物質である LiCoO_2 も FZ法で育成を行っている報告がある^{[23][24]}。今回扱うガーネット型リチウム固体電解質も、高温下でのリチウムの揮発が生じることや、ガーネット型リチウム固体電解質自体の反応性の高さから、るつぼ



図5 FZ 溶融炉の装置写真

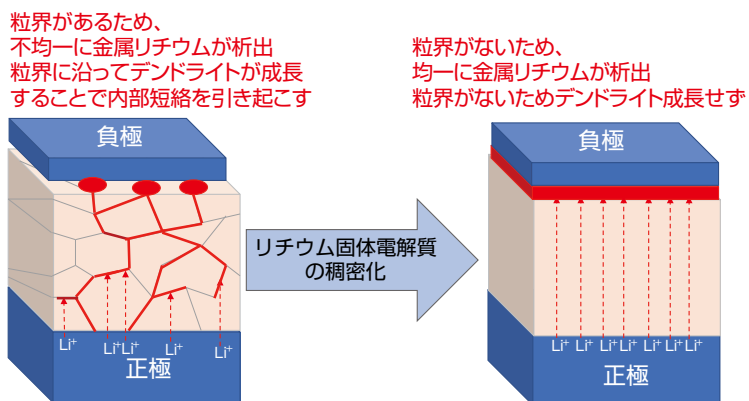


図4 全固体リチウム二次電池の内部短絡のイメージ図

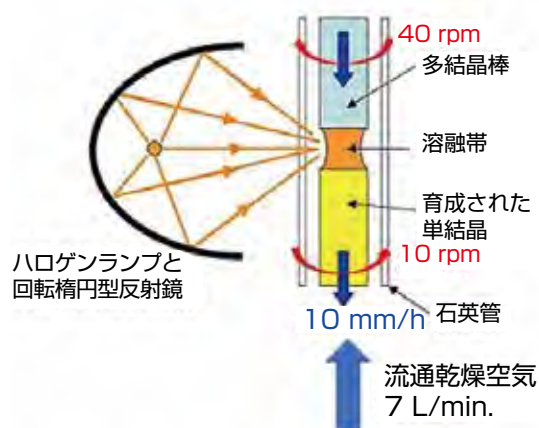


図6 ガーネット型リチウム固体電解質の育成条件図

を使用しないFZ法を用いて、育成方法を検討、工夫することで育成が可能であると判断した。またFZ法を利用するメリットとして、ガーネット型リチウム固体電解質単結晶の開発に成功した場合に、企業への技術移転や共同開発が見込める点を考慮した。FZ法で育成したさまざまな単結晶を販売しているベンチャー企業が存在することや、FZ法はいわゆる溶融法であるため、FZ法で単結晶が育成できれば、さらに工夫をすることで、企業が生産現場で用いる、工業的な大型単結晶育成手法が適応できる可能性があるため、単結晶育成・製造設備を有している企業と共同開発をする道も考えられた。実際に我々の公開特許でリジウムるつぽを使用したチョクラスキー法(CZ法)による単結晶の引き上げ例もある^[25]。

実際に、FZ法によるガーネット型リチウム固体電解質の単結晶育成の検討を始める就非常に苦労した。そもそも、ガーネット型リチウム固体電解質の単結晶が溶融法で育成可能かもわからない。加えて、一般的に溶融法による単結晶育成では、相図を見ながら検討することが多いが、ガーネット型リチウム固体電解質は、組成も複雑なこともあり相図も存在しないからである。そこで、研究開発では、さまざまな単結晶育成パラメータを変化させ、実際に育成させて凝固物を分析しながら、単結晶の育成を目指すという、トライアンドエラーで結晶育成の方法を探った。ガーネット型リチウム固体電解質の単結晶育成について検討を開始して4年がかりで、単結晶育成の条件を見いだした。育成条件で特徴的な部分は、原料を仕込むときにリチウム源となる炭酸リチウムを1.2倍程度過剰に添加すること、単結晶育成中は7 L/min程度の乾燥空気を流通させて揮発するリチウム由来のガスを取り除くこと、供給する多結晶試料を約40 rpmで回転させて気泡を外部に取り除くこと、単結晶育成の育成速度を10 mm/h程度にすることである。図6に今回の育成の条件を示す。特に育成速度の部分は興味深く、一般的なFZ法による単結晶育成では、育成速度が1~2 mm/h程度で行われるが、今回のガーネット型リチウム固体電解質では、一般的に用いられる育成速度では単結晶が得られず、その5~10倍程度速い速度で単結晶が得られた。我々は、この方法を用いて、世界で初めて溶融法を用いたさまざまな化学組成のガーネット型リチウム固体電解質の単結晶を育成して、特許出願やノウハウをまとめたうえで、学術論文を発表した^{[26][27]}。この論文では、文献[26]に記載したガーネット型リチウム固体電解質の中でも、ジルコニウムの一部をニオブで置換した、 $\text{Li}_{7-x}\text{La}_3\text{Zr}_{2-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ について評価した結果を記載する。実験方法や実験結果の詳細は、同文献を参考にさせていただきたい。

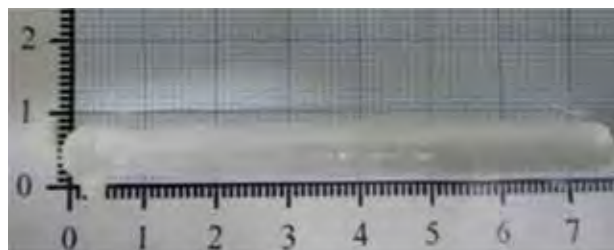
図7に今回育成したガーネット型リチウム固体電解質 $\text{Li}_{6.5}\text{La}_3\text{Zr}_{1.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{12}$ の単結晶ロッドと切断後、表面を研磨した単結晶板を示す。図7に示すように長さ8 cm程度、直径8 mm程度の大型単結晶が世界で初めて育成できた。

4.2 ガーネット型リチウム固体電解質の結晶学および電気化学的評価

初めに行った評価は、Nbの置換量によるリチウムイオン導電率特性の相関関係である。リチウムイオン導電率特性は高い方が電池動作に有利に働くため、最も重要な物性である。交流インピーダンス法により、Nb置換量とリチウムイオン導電率の相関関係を調べると、Nb置換量が0.5のときにリチウムイオン導電率が最大となり、その値は図8で示すように298 Kで 1.39×10^{-3} S/cmであった。この値は従来報告されてきた焼結体の試料よりも高く、粒界の影響がないためであると考えられる。X線回折測定および中性子回折測定の結果、図9に示すように、従来報告されているガーネット型リチウム固体電解質の結晶構造とはリチウムの配列が異なることを確認した。既報のガーネット型結晶構造は24dサイトにリチウムが占有しているのに対して、我々の結晶構造解析結果からリチウムは24dサイトが4つ分裂した96hサイトを占有していた。その結果、既報のガーネット型結晶構造よりもリチウム間距離が短くなり、リチウムイオン導電率の向上に繋がったと考えられる。

次に、ガーネット型リチウム固体電解質を単結晶化することによって問題解決ができたかを調べるために、金属リチウムのデンドライド成長による内部短絡試験を行った。短絡試験は金属リチウムを貼り付けた対称電池を用いて、

(a)



(b)

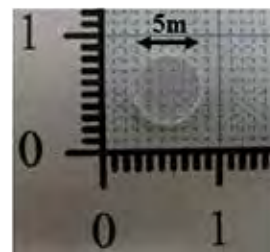


図7 (a) 育成したガーネット型リチウム固体電解質 $\text{Li}_{6.5}\text{La}_3\text{Zr}_{1.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{12}$ の単結晶、(b) 切断、研磨した単結晶板

定電流を流し金属リチウムの溶解と析出を繰り返すことで確認した。図10に内部短絡試験結果を示す。この結果から 0.5 mA/cm^2 の電流密度でも短絡せず作動することが確認された。また、内部短絡試験の結果から算出されたリチウムイオン導電率は $1.0 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ であり、交流インピーダンス法の測定結果 $1.39 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ と大きな差異は見られなかった。以上より単結晶を用いることで、ガーネット型リチウム固体電解質の課題であった内部短絡の問題は解決できたと考えている。

5 エアロゾルデポジション法による電極形成

もう一つの課題として、電極とガーネット型リチウム固体電解質単結晶における固体同士の界面形成がある。この課題には、電極形成にエアロゾルデポジション法 (AD法) を用いることで解決を試みた。AD法は、微粒子をガスと混合し減圧下でノズルから噴射することで、エアロゾルジェットとして基板に衝突させ、膜を形成する技術である。

この論文の著者の一人である明渡により発見された「常温衝撃固化現象」(粒子径 $1 \mu\text{m}$ 前後のセラミックスなどの微粒子材料に、高い圧力や機械的な衝撃力だけを加えることで、加熱することなく常温で高密度に固化できる現象) を用いて、緻密で密着強度が高いセラミックス膜が金属、ガラス、プラスチックなどさまざまな材質の基板に常温で形成できる。産総研がノウハウなど有する製膜プロセスである^[28]。この製膜プロセスは、すでに企業により実用化されている技術であり汎用性も高い。AD法の詳しい説明や、これまでの取り組みは過去に同誌に記載された文献[28]を参考にいただきたい。

今回、電極形成技術としてAD法を利用したのは、AD法に技術的なメリットがあり、すでに産業用に実用化されている技術であったからである。AD法の代表的な特徴として、加熱など温度を必要としない常温製膜プロセスで、塗工膜のようなバインダを必要としないこと、基板材料と膜の密着性が強いこと、複数の微粒子を同時に用いること

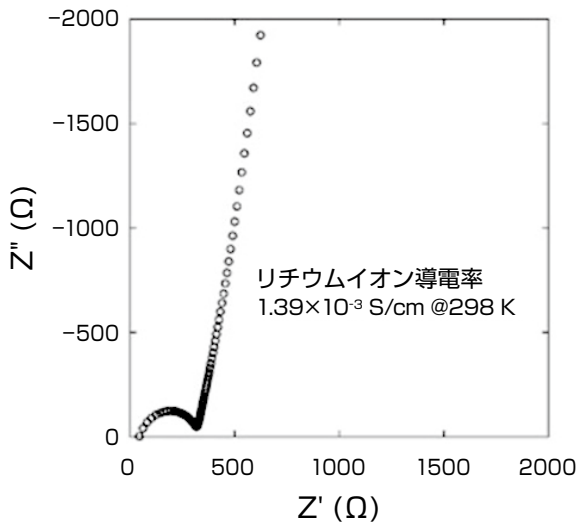


図8 交流インピーダンス測定によるガーネット型リチウム固体電解質の298 Kでのナイキストプロットとリチウムイオン導電率

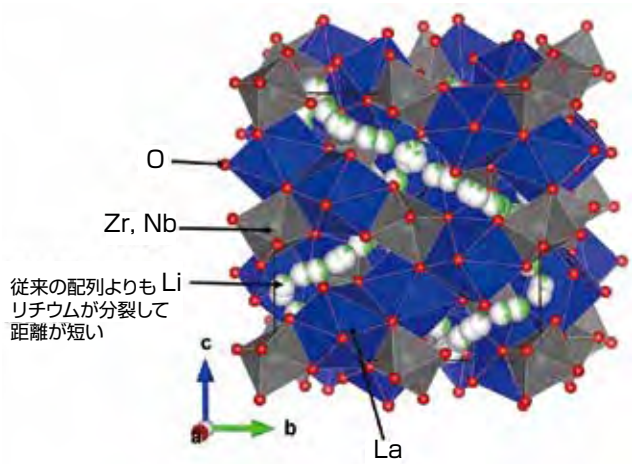


図9 育成したガーネット型リチウム固体電解質の結晶構造

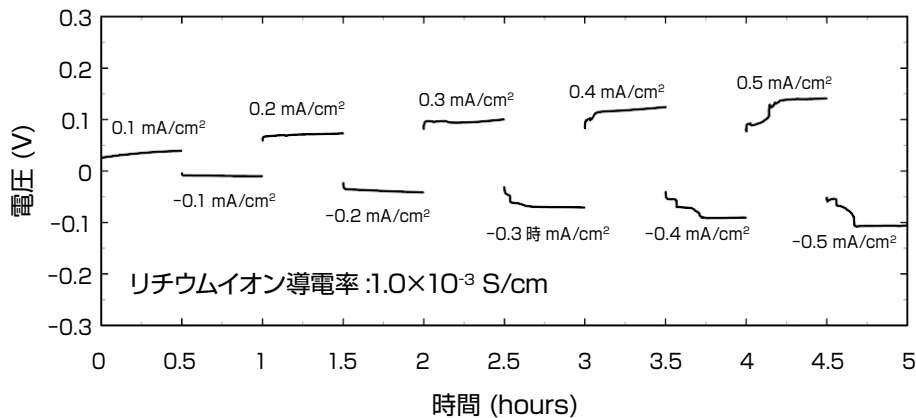


図10 内部短絡試験結果

で複合膜も可能であることなどが挙げられる。今回、ガーネット型リチウム固体電解質単結晶に電極を製膜するにあたり、特に、常温製膜プロセスであること、そして基板材料と膜の強い密着性があることが電極形成に適していると考えた。理由として、一つ目は、ガーネット型リチウム固体電解質は比較的反応性の高い材料であるため、加熱を必要とする製膜プロセスを用いると、基板であるガーネット型リチウム固体電解質と電極で反応して、別の物質が界面に生成され全固体リチウム二次電池として機能しなくなるためである。二つ目は、ガーネット型リチウム固体電解質と電極の界面は、リチウムイオンが移動するため、強い界面密着性が求められるからである。実際の製膜操作では、正極活物質として、現行のリチウム二次電池正極活物質である $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA) と乾燥空気を用いて、減圧チャンバー内に設置したガーネット型リチウム固体電解質単結晶にエアロゾルジェットを吹き付けることで製膜を行った。図 12 (a) に示すようにガーネット型リチウム固体電解質単結晶を基板として NCA 電極を AD 法により製膜した成形体を示す。

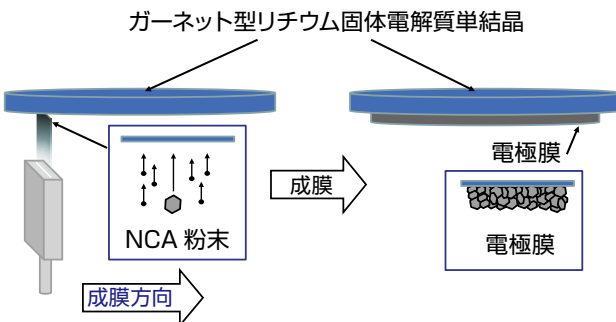


図 11 AD 法によるガーネット型リチウム固体電解質単結晶基板への NCA 電極製膜の概略図

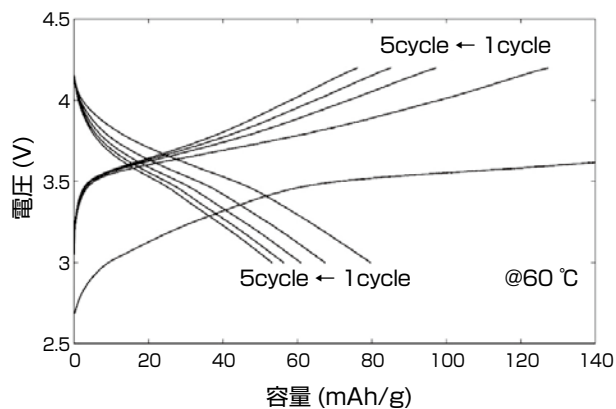


図 13 Li/ガーネット型リチウム固体電解質/NCA 全固体リチウム二次電池の 60 °C における充放電特性

6 全固体リチウム二次電池の評価

これまで記述してきた、ガーネット型リチウム固体電解質単結晶と AD 法を利用して、当センターオリジナルの酸化物系全固体リチウム二次電池の試作を行った。負極活物質には、ガーネット型リチウム固体電解質単結晶のメリットを生かすため、金属リチウムを圧着して用いた。図 12 (b) に今回開発した全固体リチウム二次電池の概略図を示す。評価試験は、電圧範囲 3.0 V-4.2 V、0.5 μA で 60 °C で 5 サイクル充放電した後、25 °C で 5 サイクル充放電を行った。図 13 に 60 °C における充放電試験結果、図 14 に 25 °C における充放電結果を示す。図 14 に示すように、NCA の理論容量には届かないが、室温環境下においても可逆的に充放電を行うことが確認された。すなわち、AD 法によるガーネット型リチウム固体電解質と正極電極膜の固体同士の界面形成は十分強固であることが確認できた。また、ガーネット型リチウム固体電解質単結晶は、従来のリチウム二次電池における電解液とセパレータの機能を有していることが明らかとなった。

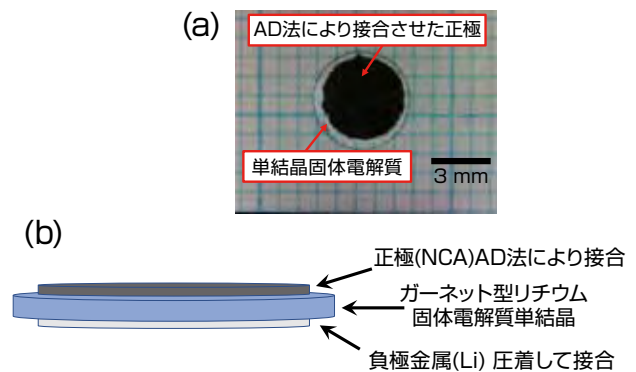


図 12 (a) ガーネット型リチウム固体電解質単結晶基板上に AD 法により製膜した NCA 電極膜、(b) 開発した全固体リチウム二次電池の概略図

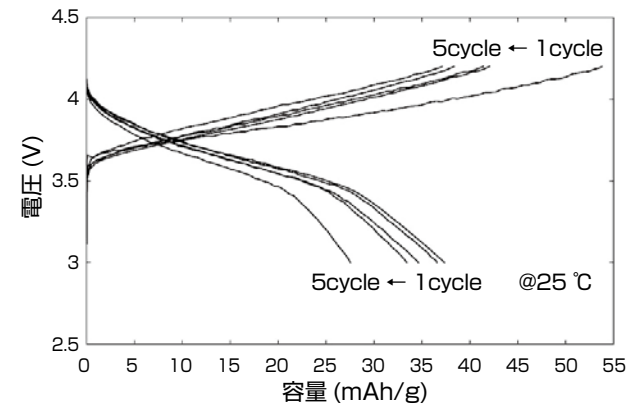


図 14 Li/ガーネット型リチウム固体電解質/NCA 全固体リチウム二次電池の 25 °C における充放電特性

7 今後の展望

次世代二次電池の有力な候補である酸化物系全固体リチウム二次電池には、まだ多くの課題があり、今回はリチウム固体電解質単結晶と AD 法を組み合わせることで課題の解決ができることを見いだした。

今回、世界で初めて育成に成功したガーネット型リチウム固体電解質単結晶は、学術的にも、産業的にも多くの研究機関、企業に関心を持っていただいている。学術的な側面では、これまでにガーネット型リチウム固体電解質を含め、リチウム固体電解質の大型バルク体単結晶がなかったため研究が進んでいなかった。現在、固体アイオニクスの研究者と、単結晶中のリチウムイオンの固体拡散などの研究を、そして基礎物性の測定などを多くの機関と共同研究を行っている。さらに、単結晶を用いると理想的な電極界面を作製できるため、固体電解質と電極との界面構造の研究も行っている。また産業的な側面では、ガーネット型リチウム固体電解質の単結晶について、高品質化、量産化、大型化を目指して、企業と単結晶育成について共同開発を行っている。

当センターでは、ガーネット型リチウム固体電解質の単結晶が溶融法で育成できるメカニズムの解明、リチウムイオン導電率向上のためにさらに元素置換による新しいガーネット型リチウム固体電解質の探索、電極活物質とリチウム固体電解質の複合電極膜の作成、電極膜の厚膜化などを行っている。さまざまな課題はあるが、まずは高品質な固体電解質単結晶が育成できることから、関連企業との連携により、2030 年ごろまでに小型全固体リチウム二次電池の実用化を目指している。

参考文献

- [1] J. B. Goodenough and Y. Kim: Challenges for rechargeable Li batteries, *Chemistry of materials*, 22, 587–603 (2010).
- [2] M. Armand and J.-M. Tarascon: Building better batteries, *Nature*, 451, 652–657 (2008).
- [3] J. Jürgen and W. G. Zeier: A solid future for battery development, *Nature Energy*, 1, 16141 (2016).
- [4] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 二次電池技術開発ロードマップ (2013), <https://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>, 閲覧日2019-02-06.
- [5] 経済産業省 特許庁: 平成25年度特許出願技術動向調査—次世代二次電池— (2014), https://www.jpo.go.jp/shiryoku/pdf/gidou-houkoku/25_jisedai_battery.pdf, 閲覧日2019-02-06.
- [6] F. Aguesse, W. Manalastas, L. Buannic, J. M. Lopez Del Amo, G. Singh, A. Llordés and J. Kilner: Investigating the dendritic growth during full cell cycling of garnet electrolyte in direct contact with Li metal, *Appl. Mater. Interfaces*, 9 (4), 3808–3816 (2017).
- [7] N. Kamaya, K. Homma, Y. Yamakawa, M. Hirayama, R. Kanno, M. Yonemura, T. Kamiyama, Y. Kato, S. Hama, K. Kawamoto and A. Mitsui: A lithium superionic conductor, *Nature materials*, 10 (9), 682–686 (2011).
- [8] Y. Kato, S. Hori, T. Saito, K. Suzuki, M. Hirayama, A. Mitsui, M. Yonemura, H. Iba and R. Kanno: High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors, *Nature Energy*, 1, 16030 (2016).
- [9] C. J. Leo, G. V. Subba Rao and B. V. R. Chowdari: Fast ion conduction in the Li-analogues of Nasicon, $\text{Li}_{1-x}(\text{Ta}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{Al}(\text{PO}_4)_3$, *J. Mater. Chem.*, 12, 1848–1853 (2002).
- [10] Y. Inaguma, C. Liqun, M. Itoh, T. Nakamura, T. Uchida, H. Ikuta and M. Wakihara: High ionic conductivity in lithium lanthanum titanate, *Solid State Communications*, 86 (10), 689–693 (1993).
- [11] S. Ohta, T. Kobayashi and T. Asaoka: High lithium ionic conductivity in the garnet-type oxide $\text{Li}_{7-x}\text{La}_3(\text{Zr}_{2-x}\text{Nb}_x)\text{O}_{12}(X=0-2)$, *J. Power Sources*, 196 (6), 3342–3345 (2011).
- [12] K. Ishiguro, Y. Nakata, M. Matsui, I. Uechi, Y. Takeda, O. Yamamoto and N. Imanishi: Stability of Nb-doped cubic $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ with lithium metal, *J. Electrochem. Soc.*, 160 (10), A1690–A1693 (2013).
- [13] H. Yamada, T. Ito and R. H. Basappa: Sintering mechanisms of high-performance garnet-type solid electrolyte densified by spark plasma sintering, *Electrochimica Acta*, 220, 648–656 (2016).
- [14] K. Hayamizu, Y. Matsuda, M. Matsui and N. Imanishi: Lithium diffusion measurements on a garnet-type solid conductor $\text{Li}_{6.6}\text{La}_3\text{Zr}_{1.6}\text{Ta}_{0.4}\text{O}_{12}$ by using a pulsed-gradient spin-echo NMR method, *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*, 70, 21–27 (2015).
- [15] C.-L. Tsai, V. Roddatis, C. V. Chandran, Q. Ma, S. Uhlenbruck, M. Bram, P. Heitjans and O. Guillon: $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ interface modification for Li dendrite prevention, *Appl. Mater. Interfaces*, 8 (16), 10617–10626 (2016).
- [16] R. Murugan, V. Thangadurai and W. Weppner: Fast lithium ion conduction in garnet-type $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 46 (41), 7778–7781 (2007).
- [17] J. Awaka, A. Takashima, K. Kataoka, N. Kijima, Y. Idemoto and J. Akimoto: Crystal structure of fast lithium-ion-conducting cubic $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$, *Chem. Lett.*, 40 (1), 60–62 (2011).
- [18] C. A. Geiger, E. Alekseev, B. Lazic, M. Fisch, T. Armbruster, R. Langner, M. Fechtelkord, N. Kim, T. Pettke and W. Weppner: Crystal chemistry and stability of “ $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ” garnet: a fast lithium-ion conductor, *Inorg. Chem.*, 50 (3), 1089–1097 (2011).
- [19] H. Hyooma and K. Hayashi: Crystal structures of $\text{La}_3\text{Li}_5\text{M}_2\text{O}_{12}$ (M=Nb, Ta), *Mat. Res. Bull.*, 23 (10), 1399–1407 (1988).
- [20] C. Bernuy-Lopez, W. Manalastas Jr., J. M. Lopez del Amo, A. Aguadero, F. Aguesse and J. A. Kilner: Atmosphere controlled processing of Ga-substituted garnets for high Li-ion conductivity ceramics, *Chemistry of Materials*, 26 (12), 3610–3617 (2014).
- [21] D. Rettenwander, G. Redhammer, F. Preishuber-Pflügl, L. Cheng, L. Miara, R. Wagner, A. Welzl, E. Suard, M. M. Doeff, M. Wilkening, J. Fleig and G. Amthauer: Structural and electrochemical consequences of Al and Ga cosubstitution in $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolytes, *Chemistry of Materials*, 28 (7), 2384–2392 (2016).
- [22] L. Buannic, B. Orayech, J.-M. López Del Amo J. Carrasco, N. A. Katcho, F. Aguesse, W. Manalastas, W. Zhang, J. Kilner and A. Llordés: Dual substitution strategy to enhance Li^+ ionic conductivity in $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolyte, *Chemistry of Materials*, 29 (4), 1769–1778 (2017).
- [23] L. Pinsard-Gaudart, V.-C. Ciomaga, O. Dragos, R. Guillot

and N. Dragoe: Growth and characterization of Li_xCoO_2 single crystals, *Journal of Crystal Growth*, 334 (1), 165–169 (2011).

- [24] S. Uthayakumar, M. S. Pandiyan, D. G. Porter, M. J. Gutmann, R. Fan and J. P. Goff: Crystal growth and neutron diffraction studies of Li_xCoO_2 bulk single crystals, *Journal of Crystal Growth*, 401, 169–172 (2014).
- [25] K. Kataoka and J. Akimoto: Lithium-containing garnet crystal body, method for producing same, and all-solid-state lithium ion secondary battery, WO2016017769A1 (2015).
- [26] K. Kataoka, H. Nagata and J. Akimoto: Lithium-ion conducting oxide single crystal as solid electrolyte for advanced lithium battery application, *Scientific Reports*, 8, article no. 9965 (2018).
- [27] K. Kataoka and J. Akimoto: High ionic conductor member of garnet-type oxide $\text{Li}_{6.5}\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{12}$, *ChemElectroChem*, 5, 2551–2557 (2018).
- [28] J. Akedo, A. Nakano, J. Park, S. Baba and K. Ashida: The aerosol deposition method, *Synthesiology English edition*, 1 (2), 121–130 (2008).

執筆者略歴

片岡 邦光 (かたおか くにみつ)

2004年東京理科大学工学部工業化学科卒業、2010年筑波大学数理物質科学研究科物性・分子工学専攻博士後期課程修了、2004年から2010年まで産総研技術研修生、2009年から2010年より日本学術振興会特別研究員、2011年産総研特別研究員、2012年より産総研任期付研究員、現在同研究所先進コーティング技術研究センターエネルギー応用材料研究チーム主任研究員、現在に至る。専門は結晶学。この論文では、前駆試料の焼結棒の作成、単結晶育成、結晶構造解析、電気化学測定を担当し、論文の執筆も担当した。



赤尾 忠義 (あかお ただよし)

1994年岡山大学工学部精密応用化学科卒業、1996年岡山大学大学院工学部精密応用化学専攻修了、1996年から2005年まで電池製造企業にてニカド電池・ポリマー電池開発等に従事、2005年から2014年までベンチャー企業にて高出力電池開発・電池製造工程改善・電池製造工程立上げ等に従事、2014年より技術コンサルタントとして独立、2017年より産総研招聘研究員、現在に至る。この論文では、AD法による電極成膜を担当した。



永田 裕 (ながた ひろし)

2004年岐阜大学大学院工学研究科応用精密化学専攻博士前期課程修了、2015年岐阜大学から論文博士制度により博士(工学)授与、2004年から2017年まで化学メーカーや自動車部品メーカー等にて材料開発に従事、2017年産総研特別研究員、2018年より産総研先進コーティング技術研究センターエネルギー応用材料研究チーム主任研究員、現在に至る。専門は二次電池。この論文では、対称セルの作製を担当した。



永井 秀明 (ながい ひであき)

1993年通商産業省工業技術院北海道開発工業試験所(現産業技術総合研究所)入所、1993年九州大学大学院博士(工学)取得、2015年より産総研先進コーティング技術研究センターエネルギー応用材料研究チーム主任研究員、現在に至る。専門は材料化学(セラミックス、半導体)、熱物性計測。この論文では、前駆試料の焼結棒の作成に関する部分について助言、担当をした。



秋本 順二 (あきもと じゅんじ)

1990年東京大学大学院理学系研究科博士課程鉱物学専攻修了、同年工業技術院化学技術研究所入所、2015年より産総研先進コーティング技術研究センターエネルギー応用材料研究チーム長、現在に至る。専門は電池材料酸化化合物。この論文では、単結晶育成、電気化学測定に関する全体のとりまとめ、監修を担当した。



明渡 純 (あけと じゅん)

1984年早大理工学部応用物理学科卒、1988～1991年同理工学部助手をへて、1991年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所、2001年産総研グループ長。2015年から先進コーティング技術研究センター長、工学博士。大学時代に光磁気記録、光センサーの研究で材料開発からデバイス開発まで幅広く関わり、バーコードリーダーを製造するベンチャー企業で商品開発も手がける。機械技術研究所入所後、1994年頃から現在の研究(AD法)を着想。2002年から5年間、NEDOナノテクノロジープログラム・プロジェクトリーダー。この論文ではAD法による電極成膜に関する全体のとりまとめ、監修を担当した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(小原 春彦:産業技術総合研究所)

全固体リチウム二次電池の実現に向けて、酸化物単結晶を用いた電解質、AD法を用いた電極形成という独自性の高い研究を紹介しており、シンセシオロジー論文としての価値は高いものと考えます。

コメント(牧野 雅彦)

リチウム二次電池への社会的な需要は今後も増々増大していくことと思います。著者らが目指す「IoT、ウェアラブル、医療用」への用途拡大にとって、この論文で開発された技術はその根幹をなすものと期待できます。この論文では、ガーネット型リチウム固体電解質の単結晶の育成について苦勞したことが詳細に記述されており、シンセシオロジー論文として適切であり、貴重な情報を含んでいると判断します。

議論2 酸化物系全固体リチウム二次電池への期待と研究開発課題

コメント(小原 春彦)

競合技術の硫化物系固体電解質については、安全性の問題を指摘するなど、分野外の読者からすると現在多くの企業、研究機関が開発に取り組んでいる硫化物系の全固体リチウム二次電池が危険である、という過度の懸念を抱かれる可能性があります。酸化物との比較の仕方など、論文の表現の配慮をすべきかと思われます。

回答（片岡 邦光）

硫化物系全固体電池を批判しているわけではなく、学会、論文等でも硫化物系固体電解質の水分と反応して硫化水素ガスが発生する問題は長年議論されており、もはや全固体リチウム二次電池の研究者、開発者の中では、なかば常識的な部分です。しかし、大面積化が可能であり、界面形成に優れる硫化物系全固体リチウム二次電池を先行して実用化する動きはあり、各研究機関、各企業で、材料としては水分反応で硫化水素ガス発生を防げないため、パッケージングなどを工夫することで研究開発を行っているのが現状です。一方で酸化物系全固体リチウム二次電池では、硫化物系のような安全性の関する問題がないのも、全固体リチウム二次電池の研究者、開発者なかではなかば常識的となっております。

コメント（小原 春彦）

一般的にFZ法は、るつぼが使えないような結晶成長に適用されていますので、大型単結晶育成には大きなギャップがあるように思われます。もし大型多結晶育成への手がかりが得られていれば、可能な範囲で記載されると説得力が増すものと思われます。

回答（片岡 邦光）

大型化に関しては我々が出願しているWO2016017769A1の公開特許では、イリジウムるつぼを使用することでチョクラスキー法（CZ法）によるガーネット型固体電解質の大型単結晶育成の証拠を提出しております。その事実を踏まえて、以下の文章を追記しました。

実際に我々の公開特許でイリジウムるつぼを使用したCZ法による単結晶の引き上げ例もある

コメント（小原 春彦）

「従来報告されているガーネット型リチウム固体電解質と結晶構造内でのリチウムの配列が異なる」と記載されています。なぜ、そのような結晶構造になったのか、物性（導電率など）にどのような影響を与えているのか、といった考察が加わると良いと思います。

回答（片岡 邦光）

なぜそのようにリチウム配列が変化したのかは、まだわかっておりません。回折データ量の多い単結晶を利用した中性子回折により本来あるべき結晶構造が確認できた可能性もあります。解釈の問題もありますが、本結果で得られた結晶構造は、従来ガーネット型結晶構造よりもリチウム間距離が短くなっており、その結果イオン導電率が向上したとも考えられます。

以上のことから、以下の文章を追記しました。

従来報告されているガーネット型結晶構造は24dサイトにリチウムが占有しているのに対して、我々の結晶構造解析結果からは24dサイトが4つ分裂した96hサイトを占有していた。その結果、従来報告されているガーネット型結晶構造よりもリチウム間距離が短くなり、リチウムイオン導電率の向上に繋がったと考えられる。

コメント（小原 春彦）

「単結晶を用いることで、ガーネット型リチウム固体電解質の課題であった内部短絡の問題は解決できた」と記載されています。粒界が無いので、デンドライトができないのは自明のように思われます。あるいは根本的に単結晶を使うことによりデンドライト成長を抑制できるメカニズムなどがありますでしょうか。

回答（片岡 邦光）

自明のように思われますが、これは自明ではなく現在でも議論されているテーマです。デンドライトの成長は粒界のあるなしに関係なく生じる現象であるとする報告もあります。しかしながら今回の我々の結果から、単結晶固体電解質ではデンドライトを抑制することができました。一つの要因に図4に示すように、単結晶の表面が平坦であるため均質にリチウム金属が析出するためであると考えられます。実際に表面が荒れた単結晶固体電解質ではデンドライトが成長して、単結晶固体電解質が割れるという現象も確認しております。

議論3 AD法を用いる常温接合技術への期待

コメント（小原 春彦）

AD法を用いる常温接合技術が、難しかった一体焼結の課題を解決する、と記載されていますが、界面抵抗や拡散の防止など、課題が解決しているかどうか客観的に判断できません。何か課題解決のエビデンスはありますか？

回答（片岡 邦光）

AD法は常温製膜技術であるため、加熱によるプロセスを必要としません。一体焼結法ですと、必ず焼結させるために加熱が必要であり、加熱を要すると、異種固体界面では相互的に熱拡散が生じるため、異相ができる可能性が高いです。一方で、AD法が常温で製膜できる技術であるということが、何よりのエビデンスになると思います。

議論4 「IoT、ウェアラブル、医療用」への用途拡大

コメント（牧野 雅彦）

「研究目標と社会のつながり」については技術的な記述に偏っており、図2「リチウム二次電池の現状と将来展望の俯瞰図」に見られる「高安全性化」「長寿化」「耐環境性」や「用途：IoT、ウェアラブル、医療用」についてこの論文で言及されてはいかがでしょうか？医療用の二次電池は社会からの期待が大きいと思います。

回答（片岡 邦光）

以下の文を追記しました。

硫化物系全固体リチウム二次電池は硫化物系全固体リチウム二次電池と比較して、大面積化などが必要である高容量化や高出力化は、まだまだ難しいものの、高安全性、長寿命化、耐環境性に優れると考えられており、使用用途としてはそれらの特性を活かした、小型全固体リチウム二次電池により物のインターネットとよばれるIoT用途や、ウェアラブル用途、医療用途を目指すべきであると考えている。

土壌・地下水汚染問題の解決に挑む

— 学際融合研究 —

張 銘

土壌・地下水汚染は人の健康や社会経済的活動に密接に関連し、大きな影響を与えるため合理的な対策措置が必要不可欠である。多様化・複雑化する土壌・地下水汚染問題を解決するためには、汚染物質の種類や存在形態等を調査・評価する技術、汚染を浄化・対策する技術、ならびにリスク評価・管理技術に係る要素技術の開発のみならず、環境・社会および経済的側面を統合的に考慮した実社会への橋渡しも極めて重要である。この論文では、土壌・地下水汚染問題に係る研究対象、要素技術および社会実装に向けたシナリオの構成を論説し、著者が携わってきた幾つかの研究トピックスを紹介するとともに、今後の展望を試みる。

キーワード：土壌・地下水汚染、浄化技術、環境規制、持続的発展

Challenges of solving the problem of soil and groundwater contamination

—An interdisciplinary approach—

Ming ZHANG

Feasible countermeasures are needed to address soil and groundwater contamination problems, because of its impact on human health and socioeconomic activities. Soil and groundwater contamination is a complex issue that requires an interdisciplinary effort involving research into contaminants, their practical removal, and social implementation. This paper discusses several areas of research that the author has been involved in this regard.

Keywords : Soil and groundwater contamination, remediation technologies, environmental regulation, sustainable development

1 はじめに

土壌・地下水汚染は、“古くて新しい環境問題”である。古くは「足尾鉍毒事件」、近年では福島第一原子力発電所事故による放射能汚染や豊洲新市場予定地の土壌汚染等が挙げられる。土壌・地下水汚染は各種産業活動の“負の遺産”とも言え、時代や産業構造等によって変わってきており、また規制のあり方に関しても、政策や文化の変遷に伴い、変化してきている。

わが国では、19世紀後半からの重工業の発達に伴って鉍山開発と精錬等の産業が盛んになり、鉍山排水による農地の汚染が深刻な社会問題となった。1880年代後半から渡良瀬川沿岸の農地が汚染された公害事件（通称足尾鉍毒事件）は、わが国の公害の原点となった。また、1968年富山県神通川流域で発生したイタイイタイ病をきっかけに、1970年に「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」が制定された。2016年12月に環境省水・大気環境局が

公表した報告によれば^[1]、平成27年度末時点で、法律で定められた基準値以上検出された地域面積は7,592 haにのぼり、その内対策事業等完了面積は割合にして92.7%であった。このように、農地の土壌汚染問題は発覚から50年以上にわたる対策を実施してもいまだに100%でないのが現状である。「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」に指定された汚染物質は3種類のみであり、カドミウムは人への健康被害、銅とヒ素は植物への生育障害防止という観点から規制されている。2014年12月に、日本のコメ中のカドミウムの基準値は、1.0 mg/kgからWHO基準と同じ0.4 mg/kgに改正された。基準が上がったので、今後一部の地域で問題が顕在化する懸念も残ると考えられる。

戦後、化学や製造業の発達に伴い、鉛や六価クロム等の重金属類や揮発性有機化合物（以下、VOC）による汚染等が顕在化した。2000年に土壌環境センターが公表し

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7
Research Institute for Geo-Resources and Environment, GSJ, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: m.zhang@aist.go.jp

Original manuscript received January 6, 2019, Revisions received January 22, 2019, Accepted January 24, 2019

た報告書によれば、汚染の恐れのある全産業事業所数は約 93 万カ所、調査費用は約 2 兆円、浄化費用は約 11 兆円が必要と推定された^[2]。わが国では、市街地の土壌汚染に係る法整備は、米国の汚染土壌浄化費用の信託基金（通称スーパーファンド法、1980 年に制定）より 20 年以上も遅く、2003 年に「土壌汚染対策法」（以下、土対法）が制定された。この法律により、汚染物質は第 1、第 2 および第 3 種特定有害物質に分類され、それぞれ VOC、重金属類^{用語 1}、および農薬類と PCB に対応する。土対法は数回の改正を経て、現時点で、第 1、第 2 および第 3 種特定有害物質はそれぞれ 12、9 および 5 物質（合計 26 物質）が指定されている。特定有害物質は、日本で使われている約 6 万 5 千種類の化学物質の極一部しかないことに留意されたい。また、現状のわが国の環境規制はリスクに基づくものではなく、一律の環境基準値によるものであることにも留意されたい。

土対法の施行をきっかけに、わが国における土壌汚染の調査と対策の事例が年々増加している。環境省水・大気環境局が公表した最新の報告によれば、近年法規制に基づく調査・対策が実施された件数だけで年間約 1200 件、企業等の自主対策も含めると数千件にのぼる^[3]。しかし、汚染サイト数は数十万カ所も潜在するのに対して、数千件はわずか 1% 程度であり、土壌・地下水汚染問題を解決するためには、長い道のりが必要であることが一目瞭然である。

この論文では、土壌・地下水汚染問題の多様性と複雑性を提示し、土壌・地下水汚染問題を合理的に解決するための要素技術および社会実装に向けたシナリオを構成・論説するとともに、著者が携わってきた幾つかの研究事例を紹介する。

2 土壌・地下水汚染の多様性と複雑性

「土対法」に指定された汚染物質は 3 種類で、26 物質のみであるが、実際に人の健康に影響を与える可能性のある汚染物質は他にも多数存在する。ヨーロッパでは、汚染物質を重金属類、芳香族炭化水素（以下、BTEX）、有機塩素化合物（以下、CHC）、多環芳香族炭化水素（以下、PAH）および鉱物油に分類されている^[4]。日本では、「油汚染対策ガイドライン」が発行されているものの、法律による規制はまだ実施されていない^[5]。また、BTEX や CHC および PAH にはそれぞれ多数の異性体が存在するが、土対法で指定された VOC は、BTEX そして CHC の一部のみである。

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災によって引き起こされた福島第一原子力発電所事故により、広範囲にわたる放射性物質汚染が発生した。この喫緊の問題を解決

するために、同年 8 月 30 日に「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」が公布され、2012 年 1 月 1 日より施行された。すなわち、放射性物質による汚染は、土対法の規制の範疇外である。

2016 年 6 月 1 日より改正「労働安全衛生法」が実施され、化学物質に係るリスクアセスメントの実施が義務化された。同改正では、一定の危険性・有害性が確認されている 640 の対象化学物質を製造、または取り扱う事業者に対して、業種や規模を問わず、リスクアセスメントを実施することが義務付けられた。また、水道法に基づく水質基準では、51 ある規制項目のほか、26 の水質管理目標設定項目と 47 の要検討項目（合計 124 項目）も指定されている。このように、土対法で規制されている化学物質の種類は限られた数しかない。これは、土壌汚染問題は非常に複雑であり、調査と対策は容易ではなく、現実的に厳しい規制が困難であることが伺える^[6]。現時点で、土対法に規制されていない物質が今後規制される可能性もあり、場合によっては、社会問題になる可能性もあり得る。実際に 2017 年 4 月よりクロロエチレンが土対法の規制物質として追加され、汚染のない土地が法律上では、汚染された土地に変わり、売却や再開発ができなくなったケースも発生した。

汚染物質の多様性に加え、土壌の多様性やその不均質性と異方性、有機物と粘土鉱物の強い吸着性等により、土壌汚染問題は非常に複雑になる。また、汚染物質によっては、自然界の物質循環によって汚染が連鎖的に発生する場合もある（図 1）。環境基本法では、土壌汚染を大気汚染、水質汚濁、騒音、振動、地盤の沈下および悪臭と並べて、「典型七公害」の一つとして位置付けられている。

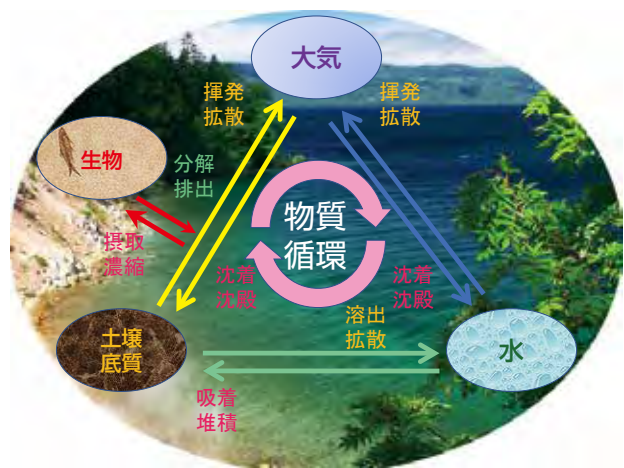


図1 物質循環による各種汚染の連鎖作用

これらの公害は単独で発生するのではなく、原因によっては同時に発生する可能性もある。例えば、異臭のある揮発性化学物質は悪臭のほか、大気汚染、降雨による水質の汚濁および浸透による土壌・地下水の汚染を同時引き起こす可能性もある。このように、土壌・地下水汚染問題を調査・対策するためには、多分野に跨る知識と技術の融合は必要不可欠である。

3 土壌・地下水汚染に係る研究の構成学的意義

土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法に関する構成学的意義は、駒井ら^[7]によって論じられているが、多様化・複雑化する土壌・地下水汚染問題を解決するためには、リスク評価技術と自主管理技術が必須であるものの、それだけではまだ不十分である。多様化・複雑化する土壌・地下水汚染問題を合理的・効率的に解決するためには、汚染物質の種類や存在形態を適切に調査・評価する技術や、低コスト・低環境負荷での浄化・対策技術、そしてリスク評価に基づくリスクコミュニケーション等の技術を体系的に開発する必要がある。さらに、科学・技術研究をエンジニアリング的な工法を介して、社会への橋渡しまで持っていく必要もある。実問題への適用においては、環境の側面だけでなく、経済および社会的側面も統合的に考慮する必要がある。汚染対策措置の選択に係る意思決定のプロセスにおいて、要素技術が意思決定の科学的根

拠の一部として取り込まれ、柔軟に統合される。これは、持続的発展を考慮した合理的土壌・地下水汚染対策措置と言ひ、サステナブル・レメディエーションとも称される^{[8]-[10]}。

図2に持続的発展を考慮した合理的な土壌・地下水の汚染対策措置のシナリオをまとめる。技術の社会実装においては、産・学・官連携のみならず、地域住民を含むステークホルダー全員の参加も重要であり、日本では発展すべき課題の一つでもある。豊洲新市場予定地の土壌汚染問題で社会的混乱を引き起こした原因の一つに、ステークホルダーの参加が欠けたことがある。

土壌・地下水汚染の調査・評価技術、浄化・対策技術およびリスク評価・管理技術にはそれぞれ複数のアプローチと研究課題がある。図2に示しているのは、その代表的なもののみである。これら技術の開発には多分野に跨る知識が必要不可欠であり、表1に各種技術開発の目的と主な専門分野を示す。このように、土壌・地下水汚染問題に係る研究はサイエンス、エンジニアリングおよび社会経済学に跨る学際融合研究である、単一分野の知識で解決できない複雑な社会問題である。

4 土壌・地下水汚染に係る戦略的技術開発

土壌・地下水汚染の調査と対策に係る各種技術開発は発展してきているものの、関連知見に対する誤解や実問題への適用に限界がある等の問題が存在する。現状の「土

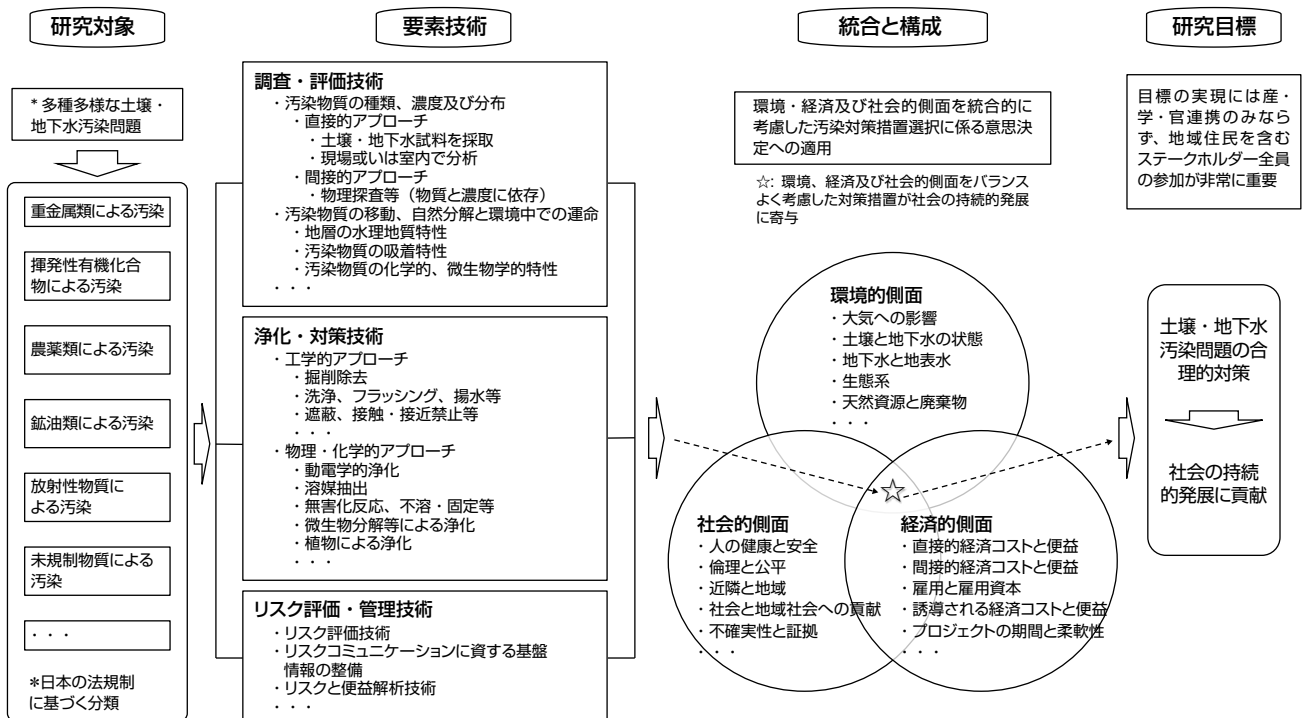


図2 持続的発展を考慮した合理的土壌・地下水汚染対策措置のシナリオ

表1 土壌・地下水汚染研究開発に係る主な専門分野

要素技術分類	目的と関連の専門分野
調査・評価技術	目的：問題の理解と実態把握
	・調査：化学・土壌化学・有機化学・微生物学・機器分析・物理探査... ・評価：水文地質学/水理地質学・数理学...
浄化・対策技術	目的：汚染による人への健康リスクをいかに低減させるか
	・浄化対策：化学工学・電気化学・地球化学・環境微生物学・環境工学... ・管理措置：土木工学・水理地質学・環境経済学・社会経済学...
リスク評価・管理技術	目的：科学的根拠に基づくリスクコミュニケーションの円滑な実施
	・リスク評価：土壌物理学・数理学・毒性学・生態学... ・リスクコミュニケーション：社会心理学・政治哲学・倫理学...

対法」に基づく調査と対策は強制力が強いものの、必ずしも科学的・合理的ではない。例えば、汚染の恐れのある区域に対して、平面方向で試料採取は一律 10 m、対策も 10 m の間隔の格子線で区画される 100 m² が基本単位となっている。実際に鉛等の重金属類で汚染された場合、土壌の吸着性により、10 m より狭い範囲に存在するケースが多いので、100 m² 単位で対策するのは非経済的である。また、現状の土対法では一律の環境基準値で行われているため、実際に人への健康リスクが大きくなって汚染と指定されるケースもあれば、指定調査機関¹¹⁾の分析で環境基準値以下であれば、汚染はないあるいは浄化完了となる。実際に、汚染物質や土質および現場の地質条件等にもよるものの、異なる指定調査機関が分析すれば、環境基準値以上になる可能性もある。これは、分析の対象や方法によって精度が変わること、そして、分析者の経験によるところもあるからである¹¹⁾。このような背景を踏まえ、著者が所属する地圏環境リスク研究グループは、企業や事業所等における自主調査と対策への支援や今後の規制のあり方の変化をも見据えた戦略的研究開発を実施している。ここで、著者が携わってきた幾つかの研究トピックスを紹介する。

4.1 調査・評価に関する技術開発

土壌は複雑なシステムを持つ媒体であり、汚染土壌の分析結果は採取場所や採取方法、前処理、分析方法および分析機器等に依存する¹²⁾。土対法に基づく分析は、「公定法」と言い、評価されるものは分析結果だけであり¹¹⁾¹³⁾、汚染物質の存在形態や浄化・対策技術の選択等に参考となるメカニズムの検討は行われない。例えば、重金属類に関しては、「含有量」と「溶出量」の両方の基準が設けられている。含有量試験は、0.1 mol/L 塩酸抽出法が採用されている。この試験法で“真”の“全含有量”の評価はできないが、専門家でも“全含有量”と誤解するケースがある。この誤解のもとで適切ではない対策方法を選択してしまうと、失敗につながる可能性もある。特に、自然由来の汚染

土壌の場合、一般的に公定法に基づく含有量は低く、溶出量が高い特徴がある。この種の汚染土壌を浄化しようとした場合、繰り返して洗浄しても環境基準値以下にならない可能性がある。これは、真の全含有量が公定法の分析値よりはるかに高いからである。

このような問題を解決するために、著者および共同研究者らは、汚染物質の存在形態に着目した評価法の開発を進めている。例えば、自然由来の汚染物質としてよく存在する鉛汚染土壌に対して、沈降分級と X 線回折分析を用いた鉛含有鉱物の存在状態の解明と簡易定量分析法を確立した¹⁴⁾。分級した各粒径毎の試料を Thermo 製の携帯型蛍光 X 線 (XRF) 分析計 (Niton XL 3t-900S-M) を用いて全岩化学分析を行った。各試料と標準試料 (金属シリコン) の重量比が 1:1 の混合試料を作成し、リガク製の粉末エックス線回折装置 (Smart Lab) を用いて、各鉱物相の同定およびそれらの簡易定量分析を行った。試料に含まれる鉱物相の定量分析は、標準試料の回折ピークの積分強度を 50 とし、未知試料の相対量を算出した。某サイトから採取してきた二つの試料の評価に適用したところ、一つの試料では、鉛濃度が粒子の大きさと正の相関があり、方鉛鉱の含有量とも良い相関が認められた。もう一つの試料では、鉛濃度が逆に粒子の大きさと負の相関があり、明ばん石の含有量と正の相関が認められた (図 3)¹⁴⁾。土壌汚染分野においては、分級洗浄という工法があり、よく利用されている浄化工法の一つである。この工法は、汚染物質が粘土物質を多く含み、比表面積の大きい微粒子に附着すると仮定して行われている。しかし、実際の汚染土壌については、この仮説が必ずしも成立しない。このように、汚染物質の粒子サイズと鉱物含有量との相関性は、汚染物質の濃度だけでなく、どのような浄化あるいは対策方法が適用できるかの判断材料としても利用可能である。

4.2 浄化・対策に関する技術開発

汚染の浄化・対策の技術として、工学的アプローチと物

理・化学的アプローチがあり、それぞれのアプローチにはさらに複数の工法が存在する(図2)。しかし、浄化の確実性等からこれまで報告された事例のほとんどは掘削除去等のコストが高い工法を採用してきた^[3]。豊洲新市場予定地の汚染対策には860億円が投じられたが、最終的には完全浄化できなかつたと報じられている。したがって、低コスト・低環境負荷での浄化・対策技術の開発は依然として優先順位の高い研究課題である。地圏環境リスク研究グループは、鉱物系材料^{[15]-[17]}や環境微生物^{[18]-[20]}を利活用した浄化技術の開発を精力的に推進している。前者はヒ素等の重金属類の吸着と不溶化、後者はVOCの分解に利用することが可能である。加筆すべきポイントとして、吸着は単なる汚染物質の濃度変化だけではなく、使用済吸着材の環境安定性^[15]や土壌の種類および土壌中に存在するケイ酸の影響^{[16][17]}も詳細に評価できることである。ここでは、酸性で有機成分に富む黒ぼく土、弱酸性の黄褐色森林土、中性でアロフェン(火山灰地帯に幅広く分布する結晶度の低い水和アルミニウムケイ酸塩でできた粘土)含有量の高い鹿沼土、アルカリ性でシリカ成分含有率の高い川砂および鉄成分含有率の高い山砂を、主要な土壌の種類として、体系的に評価した。また、微生物を利活用したVOCの分解については、単一の汚染物質ではなく、実際の汚染現場で発生する複合汚染を再現した条件下での分解実験を実施した^{[18][19]}。さらに、複合汚染の分解において、どの微生物がどの汚染物質の分解に寄与したかを安定同位体プロービング法で明らかにした^[20]。これら研究開発の全ては実用化を見据えた上で実施している。

図4にテトラクロロエチレン(PCE)、トリクロロエチレン(TCE)、シス-1,2-ジクロロエチレン(*cis*-DCE)、クロロエチレン(VC)、ベンゼン、トルエンおよびジクロロメタン(DCM)の7種を対象とした分解実験の結果を示す。この7種類の汚染物質を選択した理由として、国内で実

在した某不法投棄サイト(廃棄物総量150万t以上、広さ27ha)の調査結果を利用できたからである。図中の(a)と(b)はそれぞれ異なった試験条件下での結果を示している。(AN)/AEは嫌気分解実験後の好気分解実験、(AN)/AE-〇〇/ANは嫌気分解実験、好気分解実験後にさらに嫌気分解実験を行ったことを意味する。また、O21とO5はそれぞれ酸化分解試験における試験瓶ヘッドスペース中の初期酸素濃度を示すものであり、それぞれ体積割合が21%と5%に対応する。DOは溶存酸素の濃度である。好氣的微生物による酸化分解(好気分解とも略称)と嫌氣的微生物による還元分解(嫌気分解とも略称)を柔軟に適用することにより、酸化条件では、ベンゼン、トルエンおよびDCMの分解が確認され、また還元条件では、PCE、TCE、*cis*-DCE、VCおよびDCMの分解が確認された。VCは無害なエチレンまでに分解され、クロロエチレン類の完全分解が確認できた。また、この研究により偏性嫌気性細菌として知られている*Dehalococcoides*は、好気環境に一定期間曝されても生存できクロロエチレン類の分解が可能であることが初めて実証された。今後の複合汚染浄化の設計において非常に有用な知見を得ることができた。

4.3 リスク評価・管理に関する技術開発

リスク評価と管理技術を社会へ適用・実装するためには、リスクコミュニケーションを介して実施する必要がある。リスクの度合いを分かりやすく示す、あるいは理解を得るためには、我々の身近にある自然環境中のバックグラウンドレベルの提示が極めて有効である。重金属類の汚染に係るリスクコミュニケーションや次世代の土地利用計画等に資するため、地圏環境リスク研究グループでは表層土壌における重金属類を含む各種元素の含有量、溶出量および地域の産業構造と住民の生活スタイルを考慮したりリスク評価マップを「表層土壌評価基本図」として整備して

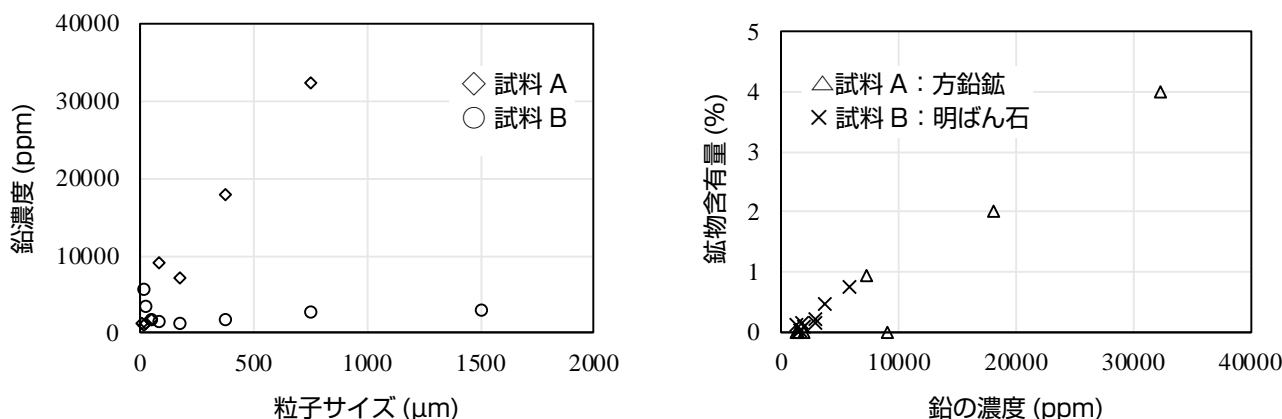


図3 自然由来汚染土壌試料における鉛濃度と粒径および鉱物含有量との関係

きている。これまでに、宮城県、富山県、鳥取県、茨城県および高知県地域の整備が完了し、Webで公表している (<https://unit.aist.go.jp/georesenv/georisk/japanese/>

home/home_map.html)。一例として、図5にGoogle Earth 上に表示した高知県のクロム全含有量、塩酸溶出量、水溶出量およびヒトの健康リスク評価図のイメージを

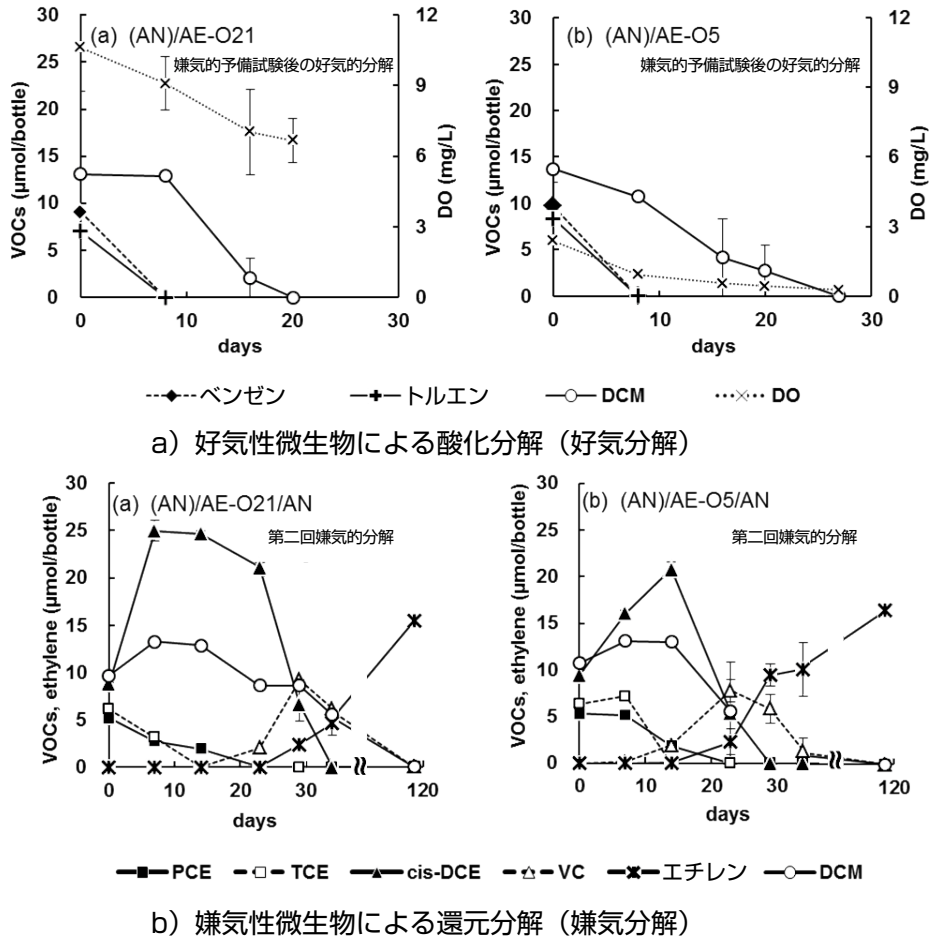


図4 環境微生物によるVOC複合汚染の完全分解例¹⁹⁾

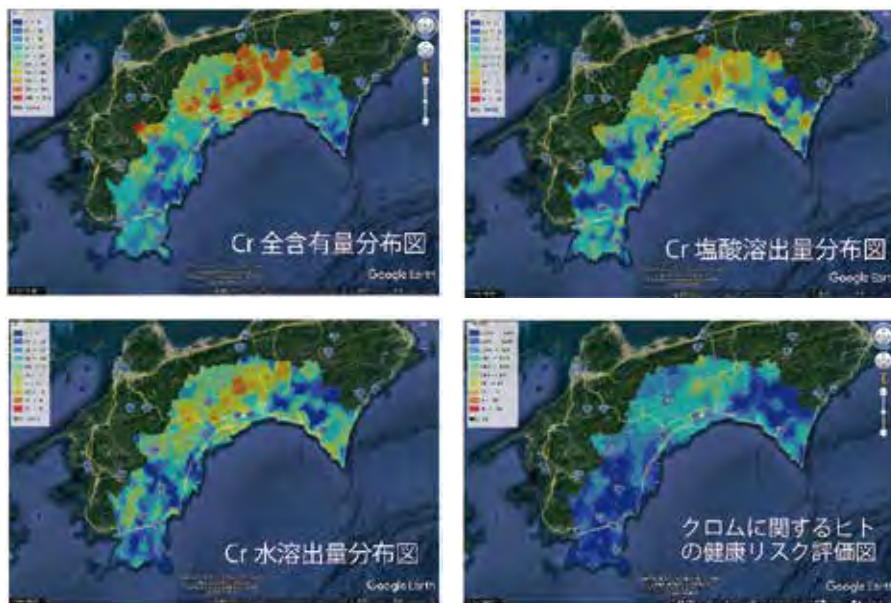


図5 高知県「表層土壌評価基本図」におけるクロムの評価

示す。全含有量が高くても、必ずしも溶出量は高くないこと、溶出量が環境基準を超過した地点でも、地域の産業構造および住民の生活スタイルを考慮したヒトの健康リスクは極めて低いことが明らかである。現在、四国地域の整備と公表に向けた調査と解析を進めており、将来的には全国版への展開を目指している。

4.4 サステナブル・レメディエーション支援ツールの開発

サステナブル・レメディエーションは浄化技術そのものではなく、土壌および地下水汚染対策において、環境面だけでなく社会および経済的側面も統合的に考慮し、最適な対策措置を選定する意思決定のプロセスである^[8]。サステナブル・レメディエーションは一律の環境基準に基づく浄化対策技術ではなく、米国環境保護庁 (US EPA) および米国試験材料協会 (ASTM)^[21] が提唱したグリーン・レメディエーションを発展させたものである。近年では、国際標準化機構 (ISO) よりサステナブル・レメディエーションに関する枠組みの基準も発行され^[10]、著者はエキスパートの1人として制定過程におけるレビュアーとして基準化に携わっていた。現時点では、サステナブル・レメディエーションに関する枠組みが提示されたものの、社会実装に向けたツールはまだ確立されていない。そこで、著者は所内外の研究者らと連携し、階層化意思決定手法に基づくツールの開発を進めることにした (図6)^[22]。

この手法は、問題の分析において、主観的判断とシステムアプローチを上手く融合した問題解決型意思決定手法の一つであり、ハイアラーキカル・デシジョン・プロセスとも称される^[23]。この手法を用いることにより、ステークホルダーにおける意思決定の過程において、異なる立場にいる利害関係者らの主観的な意見を相対的な点数で入力・集約し、

システムによる客観的・中立的な結果を出すことが可能となるため、合意形成が実現しやすく、意思決定も円滑に行われる。このツールの一般公開に向けた開発を進めている。

5 今後の課題と展望

土壌汚染問題は発展途上国においてその深刻さが増大しているものの、日本を含む先進国において、依然として直面しなければならない社会問題のひとつである。しかし、汚染物質の多様性に加え、土壌の多様性や地盤の不均質性および異方性等により土壌汚染問題は非常に複雑である。このため、土壌汚染問題を効率的・効果的に解決するためには、単一分野の知識や要素技術の開発だけでは不十分である。多分野融合による実用化可能な技術開発のほか、柔軟に統合・構成する必要もある。また、より効果的な規制・管理のあり方の検討も必要不可欠であると考えられる。

土壌汚染対策には莫大な費用を要するケースが多いため、環境面ではなく、経済的および社会的側面も考慮した対策・管理システムの構築が極めて重要である。また、リスク評価に基づく対策技術の適用や土地の用途等も考慮した対策技術の選定等、持続的な開発と発展が可能となるような土壌汚染対策と管理システムの確立も重要であると考えられる。このようなシステムの構築において各種要素技術の統合を図ることも可能である。

誌面と時間等の制限や著者の浅学非才等により記述の不十分な部分や、場合によっては誤解もあるかもしれないが、今後さらなる議論を深め、日本における土壌汚染問題だけでなく、環境問題に係る国際協力や連携に少しでも多めに貢献できれば幸いである。

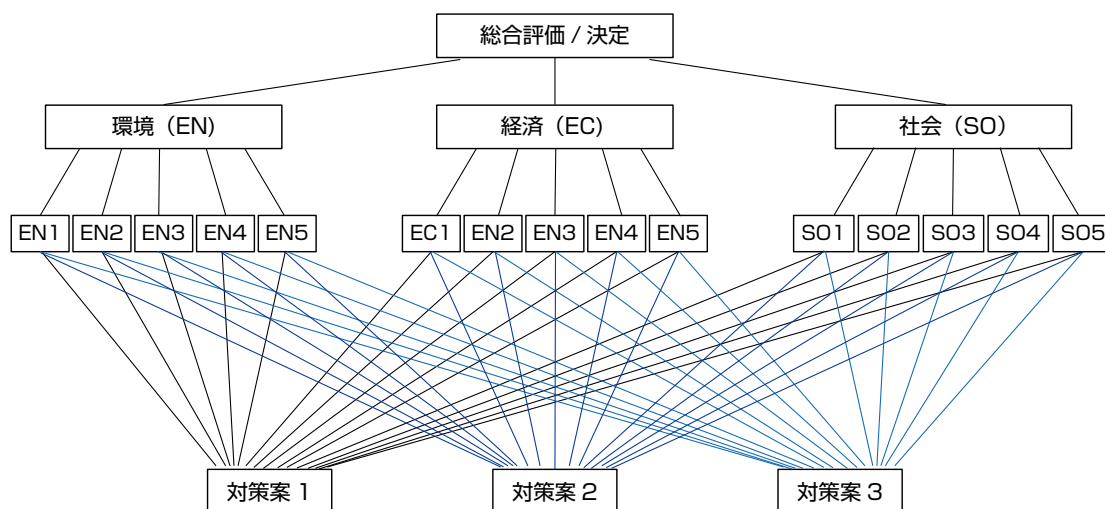


図6 サステナブル・レメディエーションに係る意思決定プロセスの階層例^[22]

用語の説明

用語1：重金属類：重金属とは比重の比較的大きい金属を指しており、一般的に比重が4～5以上のものである。法律および土壌汚染分野では、重金属のほか、鉛や水銀等の重金属と同じく人への健康被害をもたらすシアン化合物やふっ素およびその化合物、ほう素およびその化合物を含む。

用語2：指定調査機関：手続き根拠法に基づいて特定の調査等を行うに当たって、適切な調査等を行うことができる機関として法に基づき指定される。土壌汚染対策法（2002）第3条又は第4条に基づく調査を行う場合には、環境大臣の指定する者に調査をさせなければならない。この場合の環境大臣の指定する者を指定調査機関という。

参考文献

- [1] 環境省水・大気環境局：平成27年度農用地土壌汚染防止法の施行状況（2016）。
- [2] 土壌環境センター：我が国における土壌汚染対策費用の推定（2000）。
- [3] 環境省水・大気環境局：平成28年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果（2018）。
- [4] European Environment Agency (EEA): Main contaminants at industrial and commercial sites affecting soil in Europe as % of total, http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/main-contaminants-at-industrial-and-commercial-sites-affecting-soil-in-europe-as-of-total/csi15_fig02.eps/image_large, accessed 2019-01-03.
- [5] 中央環境審議会土壌農薬部会土壌汚染技術基準等専門委員会：油汚染対策ガイドライン—鉱油類を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方—（2006）。
- [6] 張 銘：土壌汚染対策と制度の今後、*環境管理対策と制度の今後講演要旨集*、エコケミストリー研究会、65-74（2017）。
- [7] 駒井武、川辺能成、原淳子、坂本靖、杉田創：土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法—リスク管理の実践に向けた構成学的研究アプローチ—、*Synthesiology*, 1 (4), 276 (30)–286 (40)（2008）。
- [8] 張 銘：サステナブル・レメディエーション、*地盤工学会誌*, 65 (1), 55-56（2017）。
- [9] US Sustainable Remediation Forum: Integrating sustainable principle, practice, and metrics into remediation projects, *Remediation*, 19 (3), 5-114（2009）。
- [10] International Standard Organization: Soil quality—Sustainable remediation, ISO 18504（2017）。
- [11] 張 銘：土壌汚染対策法（分析—有機）, *ぶんせき*, 519, 100-101（2018）。
- [12] 岡崎正規：土壌分析法総論, *ぶんせき*, 517 (1), 19-20（2018）。
- [13] 加藤雅彦：土壌汚染対策法（分析—重金属等）, *ぶんせき*, 518, 58-59（2018）。
- [14] 星野美保子、張 銘、鈴木正哉、月村勝宏、大田昌昭、秋田憲：自然由来汚染土壌における鉛の存在形態の解析、*第19回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集*（2013）。
- [15] 杉田創、小熊輝美、張 銘、原淳子、高橋伸也：Mg系及びCa系使用済ヒ素吸着材に関する環境安定性評価—土壌の影響—、*土木学会論文集G(環境)*, 72 (7), III_437-III_448

- (2016)。
- [16] 杉田創、小熊輝美、張 銘、原淳子、川辺能成：Mg系使用済ヒ素吸着材の環境安定性に及ぼすケイ酸の影響、*土木学会論文集G(環境)*, 73 (7), III_407-III_418（2017）。
- [17] 杉田創、小熊輝美、張 銘、原淳子、川辺能成：使用済Ca系ヒ素吸着材の環境安定性に及ぼすケイ酸の影響、*土木学会論文集G(環境)*, 74 (7), III_493-III_502（2018）。
- [18] M. Yoshikawa, M. Zhang and K. Toyota: Enhancement and biological characteristics related to aerobic biodegradation of toluene with co-existence of benzene, *Water Air Soil Pollut.*, 227 (9), 340（2016）。
- [19] M. Yoshikawa, M. Zhang and K. Toyota: Integrated anaerobic-aerobic biodegradation of multiple contaminants including chlorinated ethylenes, benzene, toluene, and dichloromethane, *Water Air Soil Pollut.*, 228 (1), 25（2017）。
- [20] M. Yoshikawa, M. Zhang, F. Kurisu and K. Toyota: Bacterial degraders of coexisting dichloromethane, benzene, and toluene, identified by stable-isotope probing, *Water Air Soil Pollut.*, 228 (11), 418（2017）。
- [21] ASTM: Standard Guide for Greener Cleanups, E2893-13, 1-30（2013）。
- [22] 張 銘、保高徹生、古川靖英、中島 誠：ハイアラーキカル・デシジョン・モデリング法に基づくサステナブル・レメディエーション意思決定ツールの検討、*第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集*, 811-814（2017）。
- [23] V. Rajput and A. C. Shukla: Decision-making using the analytic hierarchy process (AHP), *International Journal of Scientific Research*, 3 (6), 135-136（2014）。

執筆者略歴

張 銘（ちょう めい）

1996年3月九州大学大学院（工学）博士取得。1996年10月科学技術振興事業団科学技術特別研究員。1999年7月主任研究官として工業技術院地質調査所に入所。2001年4月産総研深部地質環境センター主任研究員。2011年4月同所地圏資源環境研究部門地圏環境リスク研究グループ長。2016年4月より東北大学大学院環境科学研究科連携講座教授を兼任。放射性廃棄物の地層処分や土壌・地下水汚染浄化技術等に係る研究開発に従事している。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（牧野 雅彦：産業技術総合研究所）

土壌・地下水汚染問題は人の健康や社会に深刻で大きな影響を与えるためその解決に向けた研究は重要である。著者はこの論説で研究目標、それと社会とのつながり、シナリオ、要素技術、要素技術間の統合について分かりやすく丁寧に記述している。また、対策の支援ツールとして「サステナブル・レメデーションに係る意思決定プロセス」の開発に取り組み、将来への展望が期待できる。以上、この論説はシンセシオロジーの査読基準を十分に満たしており掲載を推薦する。

コメント（内藤 茂樹：産業技術総合研究所）

この論説は、長期の技術・研究開発が必要になる土壌・地下水汚染問題の解決に向けたシナリオを述べています。SDGs「持続可能な開発目標」の17の目標の複数に貢献する、その挑戦的な課題は広範囲な研究対象・要素技術開発と環境・経済および社会的側面を統合し、汚染対策措置の意思決定が重要であることを述べており、

シンセシオロジーにふさわしい論説と考えます。

議論2 はじめについて

質問・コメント(内藤 茂樹)

「わが国では、18世紀後半の産業革命以降」というところが、鉱山開発は戦国時代から行われていたが、重工業の発達ということであれば、明治になってからであり、19世紀後半～20世紀初頭の官営八幡製鉄設立以降とするべきではないでしょうか。

回答(張 銘)

ご指摘頂いた通り、日本における鉱山開発の歴史はさらに古く、また、重工業の発達は19世紀後半からとなります。「足尾鉍毒事件」は日本最初の公害であり、わが国の公害の原点とも称されております。誤解を避けるために、文章を「19世紀後半からの重工業の発達に伴って」と修正させて頂きました。鉱山開発自身はそれ以前からも行われておりますが、盛んにではないと考えております。また、「足尾鉍毒事件」は「わが国の公害の原点」であることも追記いたしました。

議論3 土壌・地下水汚染に係る構成学的意義について

質問・コメント(内藤 茂樹)

「リスク評価に基づくリスクコミュニケーション等の技術」とはどのような技術なのでしょうか？

回答(張 銘)

リスク評価は不確実性があるものの、基本的に汚染物質の有害性と曝露量により、科学的に計算・評価できるものであり、リスクコミュニケーションは社会心理学的なアプローチとなります。リスクコミュニケーションにおいて、如何に科学的・客観的な知見を分かりやすく相手に伝え、リスクに対する理解あるいは受容、さらには合意形成までに持っていきけるかに係るコミュニケーション技術をこの論説では「リスク評価に基づくリスクコミュニケーション等の技術」と表現させて頂きました。

議論4 調査・評価に関する技術開発について

質問・コメント(内藤 茂樹)

「沈降分級とX線回折分析を用いた鉛含有鉍物の存在状態の解明と定量分析」について簡単に分析方法を記載された方が良いものと思われまます。「某サイトで採取された資料の評価で、一つの資料は粒子の大きさと正の相関、方鉛鉍の含有量と良い相関があり、もう一つの資料では鉛濃度が逆に粒子の大きさと負の相関があり、明礬石の含有量と正の相関が認められた。」と記載があるため、定量分析法として意味ある分析法かと読者は疑われるものと思います。結果だけではなく、結論の部分等もう少し言葉を足さないどのように理解すれば良いのか解らないものと思います。

回答(張 銘)

ご指摘を踏まえ、分析法の概要を追記いたしました。また、結果の持つ意味についても、追記させて頂きました。

議論5 浄化・対策に関する技術開発について

質問・コメント1(牧野 雅彦)

図4b「嫌気性微生物による還元分解」のグラフで、エチレンが日数の経過につれて増大しているのが気になります。この論説では分解が確認されたと記述されているので、本グラフの分かりやすい説明は可能でしょうか？ また、図中でそれぞれ(a)、(b)と分かれておりその説明もありません。

回答1(張 銘)

嫌気性微生物によるPCEの還元分解は逐次的脱塩素化反応とも称され、 $PCE \Rightarrow TCE \Rightarrow DCE \Rightarrow VC \Rightarrow ETH$ (ethylene) というルートで分解されます。ETHは毒性のあるPCEやTCE、DCEおよびVCと違って、無害であるため、ETHまでできた分解を完全分解と言います。この点をより分かりやすくするために、この論説に微修正を加えさせて頂きました。なお、分解微生物の種類によって、TCEが*cis*-DCEのほか、*trans*-DCEおよび1,1-DCEに分解される可能性もありますが、著者らの実験結果のみならず国内外ほとんどの報告事例でも、*cis*-DCE経路ルートで分解されています。

図中の(a)と(b)につきましては、それぞれ異なった試験条件(酸化分解試験の初期に設定したヘッドスペース酸素濃度)に対応しており、この点についてもこの論説に追記させて頂きました。なお、ヘッドスペースとは、密閉した試験瓶の中で、液体と固体の土壌粒子で充満していない空間を指します。かなり複雑で専門的な試験であるため、この論説では詳細な記載を控させて頂き、ご興味のある読者には、Open Accessの原著論文を参照して頂ければ幸いです。

質問・コメント2(内藤 茂樹)

著者の研究部分で引用[15]-[20]の論文のまとめが記載されているが、実用化を見据えてどのような工夫をしたとか、実際の汚染現場で複合汚染を再現した条件等を説明されてはどうか？ また図4が小さすぎて理解不能。掲載するのであれば、もう少し大きくすべきと考えます。

回答2(張 銘)

ご指摘を踏まえて、不溶化に関しては、考慮した土壌の種類を追記いたしました。また、VOCによる複合汚染については、なぜ、その条件に設定したかについてもその理由を追記いたしました。

図につきましては、文字が読めるように大きく調整いたしました。また、他の査読者から頂いたご意見と合わせて、試験条件等も追記いたしました。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2017年4月1日

1 掲載記事の種類と概要

シンセシオロジーの記事には下記の種類がある。

・研究論文、報告、論説、座談会記事、読者フォーラム

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

①研究論文

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

②報告

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

③論説

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

④座談会記事

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

⑤読者フォーラム

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

編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

3.2.4 研究論文・報告・論説の場合には表紙を付け、表紙には記事の種類（研究論文・報告・論説）を明記する。

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

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

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

3.2.8 本文は、和文の場合には9,000文字程度とし、英文の場

合は刷上りで同程度(3,400ワード程度)とする。

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

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

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

3.3 書式

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

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

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

3.3.4 図については画像ファイル(掲載サイズで350 dpi以

上)を提出する。原則は白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8560

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

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先:

産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内
シンセシオロジー編集委員会事務局

電話: 029-862-6217、ファックス: 029-862-6212

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

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“Synthesiology” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised April 1, 2017

1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

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

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

① Research papers

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

② Reports

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

③ Commentaries

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

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

④ Roundtable talks

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

⑤ Readers’ forums

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

3.2 Structure

3.2.1 The manuscript should include a title (including

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

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

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

3.2.4 Research papers, reports, and commentaries shall have front covers and the category of the articles (research paper, report, or commentary) shall be stated clearly on the cover sheets.

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

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

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

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

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

3.2.10 Discussion with reviewers regarding the research paper content shall be done openly, and the Editorial Board will edit the highlights of the review process to about 3,000 Japanese characters (1,200 English words) or a maximum of 2 pages with the names of the reviewers disclosed. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as part of the article. Regarding the reports and the commentaries, discussion with the Editorial Board members will be opened at the Board's discretion. In this case, the Editorial Board will edit the discussion to about 800 Japanese characters (less than half a page) with the names of the Board members disclosed.

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

3.3 Format

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4 Submission

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

シンセシオロジー誌が発刊10周年を迎えました。私は、創刊号の最初の論文として掲載された不凍タンパク質の大量調製の査読者となって以来、本誌に、論文著者や編集委員としても関わらせて頂いています。創刊当初は、論文著者だけでなく、査読者や編集委員も本誌の論文に要求されるシナリオをどう執筆して良いかわからず、手探りの状況でしたが、この間に執筆ガイダンスや特選論文集も出され、シナリオに関する多くの知見が蓄積してきたと思います。また、産総研の初代理事長として本誌の創刊を推進された吉川弘之氏の本号に掲載されている寄稿にあるように『シンセシオロジーは現在高まるデザインへの関心についてすでに10年の歴史を持ち、そこには貴重なデザインにかかわる多くの知見がすでに蓄積されている』と思います。とは言え、本号に掲載されている論文の「査読者との議論」を拝見すると、本誌の論文の作成過程では、まだまだ著者と査読者の共同作業という面が強く残っていると思います。

さて、本誌の10周年を記念して、昨年（2018年）10月25日に産総研つくばセンターで、『研究開発から製品そして社会への橋渡しのシナリオ—成功事例から学ぶ—』と題された

シンセシオロジー講演会が開催されました。本誌の編集幹事の産総研・赤松幹之氏が本誌の10年を簡単に総括された後、株式会社ニチレイ・技術戦略企画部・基盤研究グループ・主任研究員の石井寛崇氏による「食品、畜産、医療など様々な分野で応用が期待される不凍タンパク質の製品化のシナリオ」、株式会社デンソーウェーブ・AUTO-ID 事業部・主席技師の原昌宏氏による「QRコードの開発と普及のための戦略」と題された講演が行われました(図1)。原氏の講演内容は本号の論文となっていますが、どんなに優れた技術でも普及・ブランド化のための戦略が無ければ市場形成に至らないことを強く印象づけるものでした。石井氏の講演では、創刊号に製品化のベースとなる過程が掲載された不凍タンパク質が実際に製品化されるまでのシナリオを話されましたが、講演後には、創刊号の責任著者の津田栄氏(産総研)と談笑される場面も見られました(図2)。当日は産総研のテクノブリッジフェアの参加者を含み200名以上の参加があり、10周年を記念する良い講演会であったと思います。

(編集委員会副委員長 湯元 昇)



図1 株式会社デンソーウェーブ・原昌宏氏の講演風景



図2 株式会社ニチレイ・石井寛崇氏(左)と産総研・津田栄氏(右)

シンセシオロジー編集委員会

委員長：三木 幸信

副委員長：湯元 昇 (国立循環器病研究センター)、小原 春彦

幹事 (編集及び査読)：池上 敬一、金山 敏彦、清水 敏美、牧野 雅彦

幹事 (普及)：赤松 幹之、小林 直人 (早稲田大学)

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

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

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

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

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

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: Y. MIKI

Senior Executive Editor: N. YUMOTO (National Cerebral and Cardiovascular Center), H. OBARA

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

Editors: N. AYA, Y. ARIMOTO (RIKEN), S. ICHIMURA (Waseda University), Y. OGASAKA (Japan Science and Technology Agency),

A. ONO, A. KAGEYAMA, C. KURIMOTO, M. GOTOH, S. NAITOU, K. FUJII, T. MATSUI (Institute of Information Security), H.

YOSHIKAWA (Japan Science and Technology Agency)

Publishing Secretariat: Public Relations Information Office, Planning Headquarters, AIST

c/o Public Relations Information Office, Planning Headquarters, AIST

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

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

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

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

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

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

科学的な発見や発明が社会に役立つまでに長い時間がかかったり、忘れ去られ葬られたりしてしまうことを、悪夢の時代、死の谷、と呼び、研究活動とその社会寄与との間に大きなギャップがあることが認識されている。そのため、研究者自身がこのギャップを埋める研究活動を行なうべきであると考え。これまでも研究者によってこのような活動が行なわれてきたが、そのプロセスは系統立てて記録して論じられることがなかった。

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

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

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

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

Synthesiology 第12巻第1号 2019年2月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所



Research papers

Towards an ideal world with superconductivity

—*Current status and prospects for rare-earth barium copper oxide superconducting tapes*—

T. IZUMI

Development and popularization of QR code

—*Code development pursuing reading performance and market forming by open strategy*—

M. HARA

Development of a compact all-solid-state lithium secondary battery using single-crystal electrolyte

—*Towards realizing oxide-type all-solid-state lithium secondary batteries*—

K. KATAOKA, T. AKAO, H. NAGATA, H. NAGAI, J. AKIMOTO and J. AKEDO

Commentary

Challenges of solving the problem of soil and groundwater contamination

—*An interdisciplinary approach*—

M. ZHANG

Editorial policy

Instructions for authors

Aim of *Synthesiology*