

Synthesiology

我が国における5万分の1地質図幅整備

食洗機対応伝統工芸品「ナノコンポジット玉虫塗」

Additive manufacturing of ceramic components

放射性廃棄物処分の安全規制と地球科学

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：我が国における5万分の1地質図幅整備

－地質図整備における全体シナリオと個別シナリオ－ 宮崎 一博

1882年に地質調査所が設立されて以来、一貫して日本の地質図を整備することで国土の基盤情報として資源開発、インフラ整備、産業立地、減災など社会、経済を下支えして大きな便益を生み出してきた経緯を概観している。一方、後半では精度と信頼性が高い地質図を作成するため、要素技術としての野外調査や分析等の室内研究について述べ、それらをどのように統合していくかのシナリオについて具体的事例を用いて説明しており興味深い。

論文：食洗機対応伝統工芸品「ナノコンポジット玉虫塗」

－見る漆器から使われる漆器へ－ 蛭名 武雄ほか

伝統工芸と先端科学・工学とを融合させることで従来製品の弱点や壁を突破して社会に新しい価値を提供した貴重な事例である。具体的には漆器「玉虫塗」のユニークな外観を保ちながら、漆器共通の弱点である耐擦過性を著しく向上させる目的で有機粘土をナノコンポジット化した保護膜を開発し、食洗器にも対応できる漆器として新規用途を開拓した経緯と結果を纏めたものである。東北工芸製作所と産業技術総合研究所との深い連携・協創は他の分野にも示唆を与える成功例である。

報告：Additive manufacturing of ceramic components

－Towards innovation of ceramic industry－ Tatsuki OHJI

セラミックス分野は近年、新興国の技術力向上に伴って世界シェアが低下している。本報告は、イノベーションに繋がることが期待できる、従来技術では困難であった肉厚が不均一で複雑な形状のセラミックス製品を作製する技術としてAdditive Manufacturing (AM) に着目した。産学官が連携して取り組む国の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の中で、要素技術の選択と統合により課題解決した研究開発の方法論と得られた試作品の特徴などを詳述している。

論説：放射性廃棄物処分の安全規制と地球科学

－処分場の立地基準への研究成果の橋渡し－ 伊藤 一誠

原子力発電によって生じる放射性廃棄物を安全に埋設処分し管理していくためには、原子力規制委員会などが担当する安全規制基準や審査ガイド等の整備が必要である。その際、放射性物質の半減期を考慮して数十万年にわたる火山活動、断層活動、隆起・侵食現象、地下の熱水挙動など地質学・地球科学上の総合的な知見が不可欠である。この論説では産業技術総合研究所が行ってきた地質研究の成果を中深度処分（深度 100 m、低レベル放射性廃棄物対象）に活用した例を述べるとともに、より厳しい規制基準が必要な高レベル放射性廃棄物（使用済み核燃料など）の地層処分（深度 300 m 以上）を検討する際に求められる地質学上の研究課題を抽出している。また、得られた知見を円滑に橋渡しするため、関係機関間のコミュニケーションのあり方も提言している。

Synthesiology 第11巻第2号(2018.6) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
我が国における5万分の1地質図幅整備 — 地質図整備における全体シナリオと個別シナリオ — ・・・宮崎 一博	55-68
食洗機対応伝統工芸品「ナノコンポジット玉虫塗」 — 見る漆器から使われる漆器へ — ・・・蛭名 武雄、佐浦 みどり、松川 泰勝	69-80
報告	
Additive manufacturing of ceramic components — Towards innovation of ceramic industry — ・・・Tatsuki OHJI	81-93
論説	
放射性廃棄物処分の安全規制と地球科学 — 処分場の立地基準への研究成果の橋渡し — ・・・伊藤 一誠	94-105
編集委員会より	
編集方針	106-107
投稿規定	108-109
編集後記	114
「Synthesiology」の趣旨	
Research papers (Abstracts in English)	
1:50,000 quadrangle geological mapping project in Japan — Overall and individual scenarios of mapping project— - - - K. MIYAZAKI	55
Traditional craftwork that can be washed with a dishwasher, “nanocomposite tamamushi-nuri” —Expansion from exhibits to daily necessities— - - - T. EBINA, M. SAURA and Y. MATSUKAWA	69
Report	
Additive manufacturing of ceramic components —Towards innovation of ceramic industry— - - - T. OHJI	81-93
Article (Abstract in English)	
Earth science in safety regulations of radioactive waste disposal —Translation of scientific research to site selection criteria— - - - K. ITO	94
Editorial policy	110-111
Instructions for authors	112-113
Aim of <i>Synthesiology</i>	

我が国における 5 万分の 1 地質図幅整備

— 地質図整備における全体シナリオと個別シナリオ —

宮崎 一博

明治15年(1882年)の設立以降、地質調査所は日本国内の地質図幅の整備を行ってきた。現在、この業務は産総研地質調査総合センターに引き継がれている。この論文では地質調査総合センター(地質調査所)における地質図幅整備の歴史を振り返り、全体計画の変遷を概観する。全体計画は図幅整備の全体シナリオと見ることができる。さらに、地質図幅作成の実例を紹介し、地質図幅の作成における個別シナリオについて述べる。個別シナリオに従い研究要素は統合され、地質図が作成される。個別シナリオは地域地質に強く依存する。5万分の1地質図幅は地質調査総合センターで整備する最も基本的な地質図である。全体シナリオと個別シナリオの視点から5万分の1地質図幅整備を論じた。

キーワード: 5 万分の 1 地質図幅、20 万分の 1 地質図幅、7 万 5 千分の 1 地質図幅

1:50,000 quadrangle geological mapping project in Japan

—Overall and individual scenarios of mapping project—

Kazuhiro MIYAZAKI

The Geological Survey of Japan started a geological mapping project in Japan in 1882. This paper summarizes the historical transition of the strategy of the geological mapping project, which coincides with the transition of the overall scenarios of the mapping project in Japan. Each geological map has an individual scenario on which integration of research elements is conducted. Each individual scenario depends on local geology. 1:50,000 quadrangle geological map is the most basic one developed in the Geological Survey of Japan, and I discuss the mapping project in terms of the overall and individual scenarios.

Keywords: 1:50,000 quadrangle geological map, 1:200,000 quadrangle geological map, 75,000 quadrangle geological map

1 はじめに

地質図は地表付近に分布する地層・岩体を岩質・形成条件・形成年代等によって区分し地図上に表したものである。地質図には我々が生活を営む大地についての情報が記されている。我々が住む日本列島は地球上で最も活動的な場である沈み込み帯に位置している。日本列島およびそのもととなったユーラシア大陸の東縁は、5億年以上の間、沈み込み帯に位置し続けてきた。現在も、断層活動、火山活動、地すべり、浸食、隆起、地下水流動、土砂の堆積等我々に対して直接あるいは間接的脅威となり得る地質現象が進行している。地震や噴火および地すべりのような短い時間スケールで起こる現象や造山運動のような数千万年から数億年前の時間スケールで起きる現象の記録が我々の足下の地層および岩体に刻まれている。また、我々が直接見ることができない地殻深部ないしマントルで起きた現象を記

録している岩体が現在の地表に数 10 km 以上のスケールで大規模に露出しているところもある。結果として、我々の足下には多種多様な地層や岩石が分布する。これら地層および岩石の特質を知ることは、これらを利用あるいは立地基盤として、産業を発展させていく上で欠かせない。事実、明治から戦後復興期にかけて、戦時中の一時期を除き国内鉱物資源開発のために地質図が作成されていた。昭和の高度経済成長期から現在にかけては、国土開発や保全、自然災害の軽減のための基盤情報として地質図が作成されている。

この論文では最初に社会における地質図の役割を述べ、地質調査総合センターおよびその前身である地質調査所における地質図幅^{用語1}整備の歴史を概観し、地質図幅整備の全体計画の変遷をたどる。さらに、地質調査総合センターが現在出版する主要地質図幅である 5 万分の 1 地

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8561 つくば市東 1-1-1 中央第 7
Research Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8561, Japan E-mail: kazu-miyazaki@aist.go.jp

Original manuscript received January 25, 2018, Revisions received March 26, 2018, Accepted March 28, 2018

質図幅作成過程について述べる。地質図幅整備の全体計画と5万分の1地質図幅の作成過程は、地質図幅整備における全体シナリオと個別シナリオと言い換えても良い。この論文の前半で、明治以降の地質図幅整備の全体計画の変遷から全体シナリオについて言及し、さらに後半では、5万分の1地質図幅作成の個別シナリオを紹介する。最後に今後の5万分の1地質図幅整備における全体シナリオと個別シナリオの役割に言及したい。

2 社会における地質図幅の役割

地質図幅は、社会においてさまざまな場面で利用されている。大型土木工事における基礎的資料として利用される場合、地質図幅に記載されている地質情報から、工事・建設地等の選定のための地質概要を把握することによって、事業者の調査期間の短縮と経費の節減に効果を上げている。事業者ないし請負業者が作成する土木工事に特化した詳細な地層・岩体の区分に5万分の1地質図幅の凡例が標準として使用されている^[1]。国内陸上での大規模な資源開発は現在では珍しくなったが、新規に5万分の1地質図幅が出版された地域では、その詳細な地質図を基に石油天然ガスの探鉱の価値がありと判断され、数億から数十億円規模の地表踏査と物理探鉱が実施につながった例もある^[1]。5万分の1地質図幅のような信頼性の高い地質図は、資源探査の基礎データとして現在の日本国内においても重要であることを表している。さらに、5万分の1地質図幅や20万分の1地質図幅を基に作られる20万分の1日本シームレス地質図は、日本全国の深層崩壊推定頻度マップにおいて気象条件、隆起量とともに崩壊のしやすさ

を決めるデータとして使用されている^[1]。

地質図幅は多くの国において、国が公共財として整備している。公共財である地質図幅が、前述したようにある地域のインフラ整備あるいは産業施設の立地計画作成のための基礎資料、資源開発および減災のための基礎資料として利用されたとしてもその価値が明示的に示されることはほとんどない。しかし、国家地質図作成法を1992年に制定した米国では、2005年の地質図作成プログラムの予算規模が6,400万ドルに達し、予算処置の裏付けとして地質図の社会的価値の見積もりが行われた^[2]。この見積もりでは、二つの事例が取り上げられている。廃棄物処分場の立地と輸送幹線道路の建設である。どちらの場合も、古い地質図と新たに作成された地質図とでは、どちらがよりリスクを低減できるかを経済学的手法を用いて評価している。評価に用いられた地質図は1963年に作成された50万分の1バージニア州地質図と米国地質調査所(USGS)が1992年に作成した10万分の1バージニア州ラウダン郡地質図である(図1)。廃棄物処分場建設の場合、該当地域の透水率を地質から推定し、透水率から立地が制限される場所を決定した(図2)。地質図から求められるある地域の透水率はある統計分布に従う不確実性を持っている。高品質ある場所の地質の認定がより正確でより細分化されている場合、高品質とここでは定義する)で高精度(岩相境界や断層の位置精度が高い)な地質図を使用した方が透水率の不確実性を減少させることができる。立地場所の制限には断層から距離も加味される。このようにして決定した立地制限場所の資産価値と汚染発生確率から、立地制限を行ったことで回避された予測損失額を推定している。一方、輸

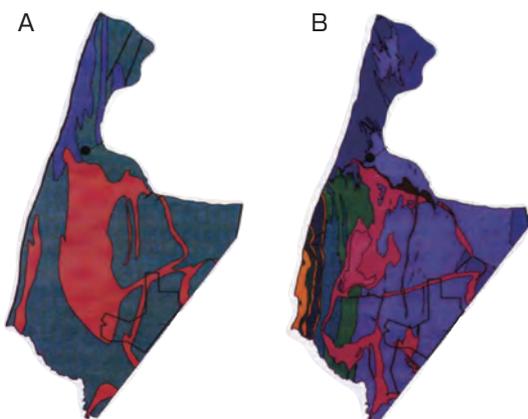


図1 バージニア州ラウダン郡東部の地質図
A. 1963年バージニア州地質図(バージニア州鉱物資源部)の一部。緑=堆積岩(砂岩と頁岩は未区分)。淡紅色=火成岩(輝緑岩と斑れい岩は未区分)。青=礫岩(粗粒堆積岩)。B. 1992年USGSバージニア州ラウダン郡地質図(予備版、Open-file Report)の一部。緑色系と青色系=堆積岩(砂岩、シルト岩、礫岩)、淡紅色系と橙色=(輝緑岩と玄武岩)、濃紺色=石灰岩礫岩。(文献[2]序論の第3図)。Aに比べBは岩相がより細分化されている。

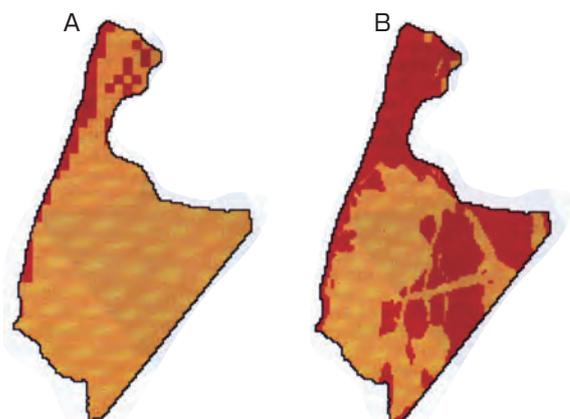


図2 A. 1963年のバージニア州地質図ならびにB. 1992年USGSバージニア州ラウダン郡地質図に基づいた廃棄物処分場立地に不適切なセルの分布。
黄=立地が制限されない。赤=立地が制限される。(文献[2]序論の第4図)。

送幹線道路建設の事例では、該当地域の地質から剪断強度を推定し、斜面崩壊の防止対策が必要な場所と不要な場所を決定した(図3)。道路建設では、防止対策が必要な場所を避けることで、道路建設による斜面崩壊の起きる確率と防止対策費から回避できる予測防止対策費を推定している。どちらも場合も、地質図から推定する透水率および剪断強度の値には不確実性が伴う。前述したように、該当地域に存在する地質図が高品質・高精度であれば、不確実性は小さくすることができる。したがって、新しい地質図と古い地質図を用いたときの回避できる予測損失額と予測防止対策費の差から新しい地質図を作成する費用を差し引いた便益を算出している。その額は上記2例に関して112万ドルから350万ドルと予測された。当然のことながら、廃棄物処分場立地や輸送幹線道路建設以外に地質図が利用されれば便益はさらに増大することになる。ここで重要なことは、高品質・高精度の地質図が社会的に大きな便益を生み出すということである。以下では、我が国における地質図幅整備の歴史と5万分の1地質図幅整備計画、さらに高品質・高精度の5万分の1地質図幅作成の過程を見ていくことにする。

3 地質図幅整備の全体シナリオ

3.1 20万分の1地質詳図

日本における地質図の作成は明治時代に始まる。内務省地理局地質課ができたのが明治11年(1878)年で、西南戦争の翌年である。明治12年(1879)年には、内務卿伊藤博文宛に、国として地質調査が農業・鉱業および冶金学・土木建築学にいかにより有益で、各種地下資源の開発にいかにより必要であるかという意見書が出されている^[3]。諸外国の地質調査所の設立を見てみても、英国地質調査所が1835年、米国地質調査所が1879年であり、国際的に見ても基

盤情報としての地質図の重要性が認識されていた。日本における地質調査所の設立は明治15年(1882年)である。地質調査所では国内の地質図の整備が開始された。地質調査所および現在の地質調査総合センターで作成する地質図には大きく分けて2種類のもので存在する。一つは野外地質調査と室内研究を行い作成する地質図で、その代表が現在の5万分の1地質図幅である。もう一つは、主として既存資料の編纂によって作成する地質図であり、現在地質調査総合センターで発行している20万分の1地質図幅がその代表である(図4)。編纂によって作成する地質図は、当然ながらオリジナルな地質調査で作成する地質図がある程度出版されてから、整備されることになる(図4)。

以下では明治から昭和初期にかけてのオリジナルな地質調査で作成された地質図の変遷を見ていく。地質調査所の設立の意見書に書かれているように、地質調査およびその結果作成される地質図は、近代国家として日本が発展するための基盤情報として重要であるとの認識があった。このとき、日本で地質調査を実施する場合の具体的計画として、明治12年(1879年)に20万分の1地質図幅(現在出版している20万分の1地質図幅との混同を避けるため、以下では20万分の1地質詳図と呼ぶことにする)98図幅を約12年で作成する計画が提案されている^[4]。20万分の1地質詳図調査に際しては、予察を縮尺40万分の1地質図、詳細を縮尺20万分の1地質図と説明書、これに縮尺10万分の1の土性図とその説明書を合わせて作成する計画だった^[4]。予察図は5図幅が計画され、北海道は除外されている。明治19年(1886年)の東北部が最初に出版され、明治27年(1894年)に西部および南西部が刊行され5図幅が出版されるが、最初に刊行された東北部は他に比較して位置精度が劣っていたので、明治28年(1895年)より再調査が始められ明治34年(1901年)に第2版が出版されている^[4]。以上の図幅は40万分の1予察地質図と呼ばれている(図4)。

20万分の1地質詳図は、オリジナルな地質調査を行い作成された。編纂を主として作成されている現在の20万分の1地質図幅と位置付けが異なることに注意されたい。シリーズ最初の20万分の1地質詳図「伊豆」が出版されたのが明治17年(1884年)であり、シリーズの最後の図幅である「敦賀」が98枚目の図幅として大正8年(1919)年に完成している。明治12年(1879年)の立案から完成まで40年を要したことになる。当初計画では12年であったので、当初計画よりかなりの時間を要したことになる。とはいえ、このときの20万分の1地質詳図は、現在我々が作成している5万分の1地質図幅12枚分の面積であり、これを1図幅当たり4か月(約120日)の調査で完成させて

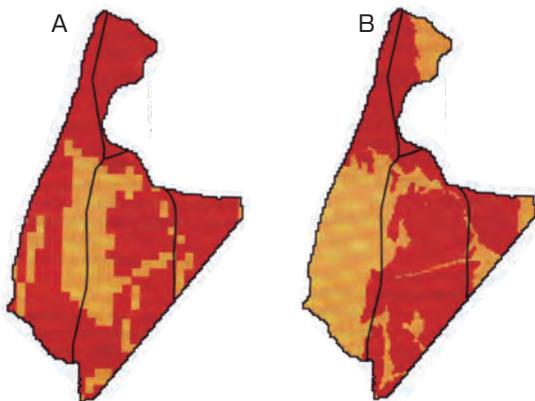


図3 輸送幹線道路建設により誘発される斜面崩壊を防止する対策を必要とするセルの分布

A. 1963年のバージニア州地質図を用いた場合。B. 1992年USGSバージニア州ラウデン郡地質図を用いた場合。黄=防止対策不要。赤=防止対策必要。黒線=輸送幹線道路計画ルート。(文献[2]序論の第5図)。

いる^[4]。20万分の1地質詳図はオリジナルな地質調査によりはじめて日本全国を完備した図幅となった。明治から大正にかけての先人たちの地質調査には、多くの困難が伴っていたと想像される。これにより、日本列島の野外調査による地質図の第一段階が完了したと考えて良いであろう。

3.2 7万5千分の1地質図幅

20万分の1地質詳図の全国完備は偉業であるが、明治40年（1907年）に当時の地質調査所長らが世界各国の地質調査事業を調べた結果、さらに大縮尺の地質図の整備が必要と認識された。大正3年（1914年）には7万5千分の1地質図幅の計画立案がなされた。7万5千分の1地質図幅は、現在の5万分の1地質図幅3枚分の面積に相当する。これを所要日数4か月（約120日）の野外調査で作成する計画が立てられていた^[4]。5万分の1地質図幅1枚当たり、1か月強の日数である。当初計画では、日本国内を324図幅に分け、年間8図幅を調査し、40年間で完成するという意欲的な計画だった^[4]。実際に、7万5千分の1地質図幅の作成が開始されるのは大正6年（1917年）からである。計画通りだと、1957年頃には全国完備が達成されていたことになる。昭和初期までは政府の緊縮財政下であっても地質図幅調査には重点が置かれていた^[3]。しかし、臨戦態勢下の昭和18年（1943年）について地質図幅調査が中止される^[3]。地質調査所創立以来初めてのことである。地質調査所の基幹業務であった7万5千分の1地質図幅の調査が戦後再開されたのは、昭和21年（1946年）からである^[3]。しかし、昭和33年（1958年）出版の「鬼

首」が最後の7万5千分の1地質図幅となる。全国完備を目標として計画された7万5千分の1地質図幅は結果的に83図幅を作成して中断してしまう。戦後荒廃した国土の保全並びに産業振興の面から図幅事業の推進が強く要望されており、社会の発展のためにはその基礎となる地質図の作成が重要であることが認識された^[4]のだが、戦後、国土の地質図を整備する役割は後述する5万分の1地質図幅に引き継がれることになる。

3.3 地質調査所時代の5万分の1地質図幅

前述の7万5千分の1地質図幅整備は、昭和24年（1949年）から現在まで作成が続く5万分の1地質図幅の整備に切り替わる。その理由は、基図となる国土地理院の地形図の縮尺が5万分の1であること、地形図との比較を考えたときの利用者の利便性と調査時の位置精度を考えての判断である^[3]。この変更により、全国完備の目標はどのようなのであろうか。縮尺を大きくしたことで完備に必要な図幅の枚数は単純計算で3倍に膨れあがる。1枚の作成にかかる時間が同じだと仮定すると、40年計画が120年計画になる。加えて、より詳細な地層・岩体区分が要求されることから、室内研究の増加分も含めるとこの数倍の期間が必要であろう。即ち、7万5千分の1地質図幅から5万分の1地質図幅の整備へ切り替えたことは、縮尺の変更以上に図幅整備の全体シナリオ、直接的には全国完備、がほぼ100年未満では不可能になったことを意味する。それではどのような全体シナリオで5万分の1地質図幅の作成はこれまで行われてきたのだろうか。

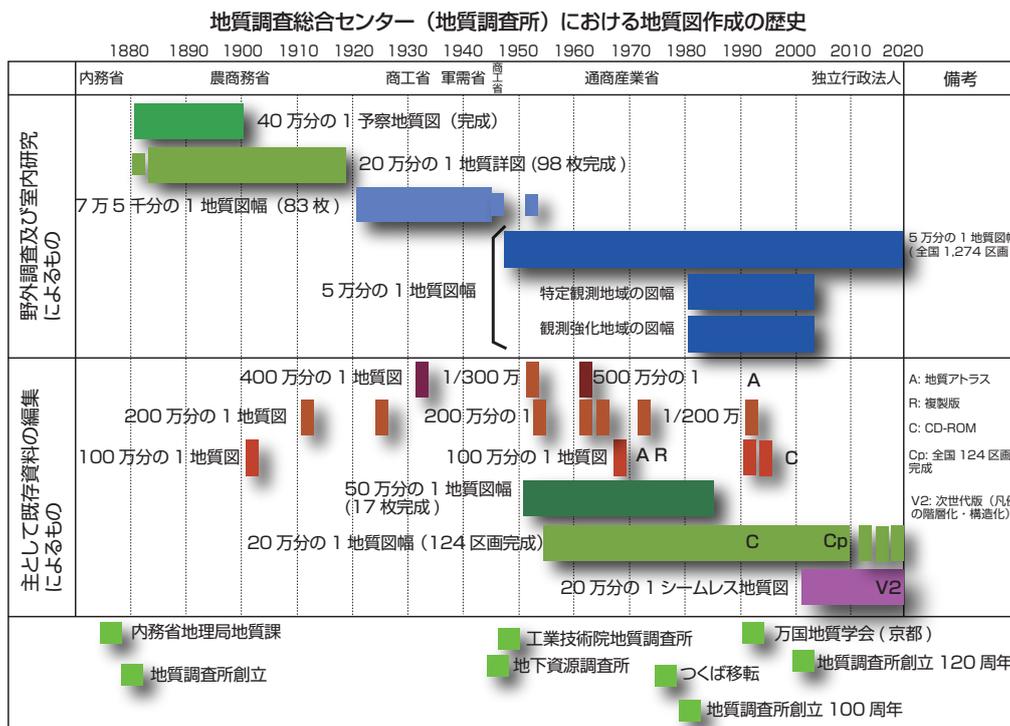


図4 地質調査総合センター（地質調査所）における地質図の歴史

5万分の1地質図幅は現在までに757.5区画（平成29年度時点）が出版されているが、年間を通じた出版数には大きな変動がある（図5）。5万分の1地質図幅の整備がスタートした初期は、主に北海道での図幅調査が活発化した。これはエネルギー資源（特に石炭）確保のために、北海道の図幅調査を所外の研究機関（道立地下資源調査所他）とも協力して集中的に行ったことが大きい^[5]。即ち、戦後復興期に、地質調査所、北海道地下資源調査所、北海道開発庁による北海道の図幅作成が行われる。北海道開発庁委託の5万分の1地質図幅調査が昭和26年（1951年）に開始されている。地質調査所でも、昭和29年（1954年）に図幅事業を特別研究として重視し多くの図幅調査が開始された。即ち、この時期の5万分の1地質図幅は北海道地域での集中的な整備を目指していたと考えて良い。集中的な北海道地域の地質図幅の整備は昭和38年（1963年）頃まで続いたが、その後、図幅整備は経常研究で継続することになり、出版される図幅数も極端に減少する。この減少期は、図幅以外に多くの特別研究が立ち上がった時期と重なる^[4]。即ち、特別研究の増加とこれへの研究者の参加が地質図幅調査の減少となり、経常研究費の相対的な減少にも拍車をかけた^[4]。

しばらくの間、出版数の低迷期が続き、次に、地質図幅の出版枚数が増加するのは昭和54年（1979年）に地質調査所所内特研として始まる特定地質図幅の整備からである（図5）。特定地質図幅整備計画は、全国8か所の「地震予知のための特定観測地域」内の5万分の1地質図幅を早急に整備するというプロジェクトであった。8地域とは、1) 北海道東部、2) 秋田県西部・山形県西北部、3) 宮城県東部・福島県東部、4) 新潟県南西部・長野県北部、5) 長野県西部・岐阜県東部、6) 名古屋・京都・神戸地区、7)

島根県東部、8) 伊予灘および日向灘周辺である（図6参照）。即ち、ここに特定地域に限定してはいるが、地質図幅をある一定期間内に集中して整備するという全体シナリオが再び復活したことになる。この時期の5万分の1地質図幅では1枚の作成に約250日の野外調査を行っていた。8地域内には5万分の1地質図幅が265図幅あり、うち132図幅が昭和54年（1979年）当時未整備であった。特定地質図幅整備計画は、第1次計画（昭和54年～59年）で42図幅、第2次計画（昭和60年～平成1年）で35図幅、第3次計画（平成2年～平成6年）で34図幅が作成された。3次計画までの16年間で111図幅が整備されており、8地域の5万分の1地質図幅整備率は9割を超える。計画自体は第4次計画（平成6年～平成12年）、第5次計画（平成11年～平成17年）が計画されたが、平成13年に産総研地質調査総合センターに計画が引き継がれてからは、特定図幅計画とそれ以外の経常図幅計画の切り分けは明確ではなくなっていく。特定地質図幅の範囲を眺めてみると、この地域の5万分の1地質図幅の整備率が非常に高いことがわかる（図6）。特定地質図幅整備計画は、トップダウン的地質図幅整備の全体シナリオであった。整備する図幅はトップダウンで決められ、1図幅当たりの野外調査期間も1-3年と限られていた。この計画は研究者個人には不評であったが、結果的には計画通り地質図幅が整備された。

3.4 産総研になって以降の5万分の1地質図幅

産総研になってからは、特定地質図幅のような明示的に特定地域の集中的整備を目指す5万分の1地質図幅整備の全体シナリオは存在しない。5万分の1地質図幅の重要地域はあるものの、現状は1970年代に見るような経常的な地質図幅整備に近い状態になりつつある。ただし、

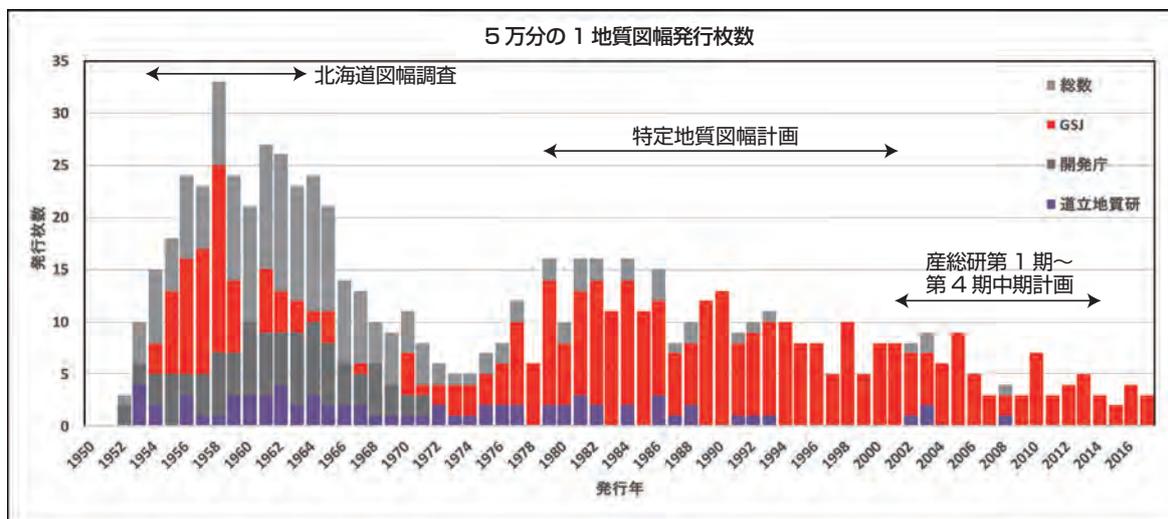


図5 5万分の1地質図幅作成枚数の変遷

GSJ:地質調査総合センター（地質調査所）、開発庁:北海道開発庁、道立地質研:北海道立総合研究機構地質研究所（北海道立地下資源研究所）。

産総研になってからの地質図幅整備の全体シナリオがなかったかというそうではない。国の知的基盤整備計画や産総研第1-2期中期計画（2001-2009年）の全体シナリオでは、昭和29年（1954年）に開始された20万分の1地質図幅の全国完備が間近であったこともあり、これが図幅整備全体を駆動するシナリオになっていた。2010年には56年の歳月をかけた20万分の1地質図幅の全国完備が達成された⁶⁾。産総研第1-2期（2001-2009年）の間、20万分の1地質図幅は改訂版も含めて34枚が出版されている。戦前に完備された20万分の1地質詳図と違い、20万分の1地質図幅には戦後日本における地質学的理解の進展が盛り込まれている（図7）。さらに、産総研第3期（2010-2014年）では、20万分の1地質図幅124区画全てにおいて日本列島の地質を最新の情報に更新するとともに、全国統一凡例の階層化と構造化を実施したシームレス地質図（次世代シームレス地質図）を完成させた。試験公開を経て、次世代シームレス地質図の本格公開が始まったのは2017年度からである。これにより、シームレス地質図による地質情報のオープンデータ化、20万分の1地質図幅による地質図の全国完備、5万分の1地質図幅は日本列島を代表する地質が分布する地域の標準を確立という役割別に地質図を体系的に整備していく枠組みが完成できた（図8）。今後の地質図幅の全体シナリオを考える場合、全ての地質図の基礎となる5万分の1地質図幅整備計画が重要になる。これを議論する前に、個別の5万分の1地質図幅作成のシナリオを概観する。これは個別シ

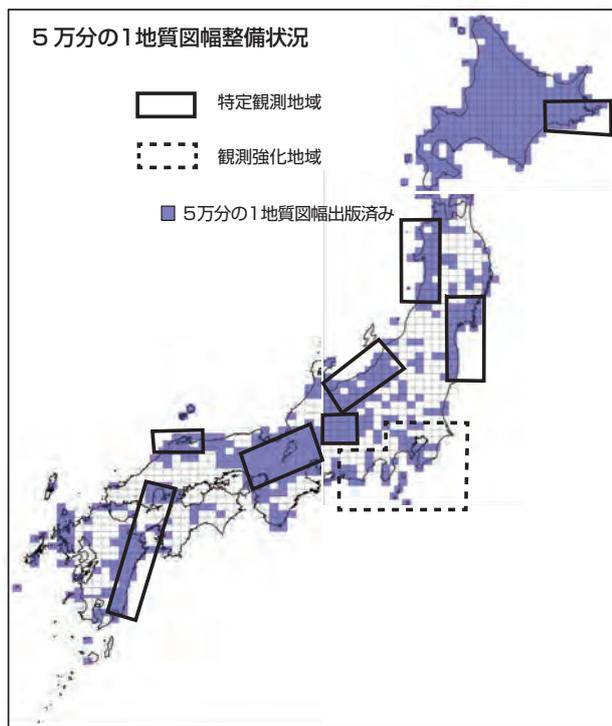


図6 5万分の1地質図幅整備状況（2013年時点）

ナリオとして位置づけられ、地質図幅の品質を保つことに関係している。また、個別の地質図幅研究から生み出される新たな知見は研究論文として公表され研究者個々の知的探求心から図幅整備を駆動している（図8）。

4 5万分の1地質図幅作成の個別シナリオと要素

4.1 個別シナリオのアウトライン

前章までで、明治以降の地質図幅整備の歴史と全体シナリオの変遷を見てきた。それでは、個々の5万分の1地質図幅を作成するための要素とは何か、また、その要素は地質図幅を作成するためのシナリオの中でどのように統合されていくのかを以下で見ていく。

5万分の1地質図幅を作成するための要素は、大きく野外地質調査と室内実験の二つに分けることができる（図9）。野外地質調査では、露頭観察、ルート調査、ルート柱状図・断面図作成を行い、地質構造を推定する。このような地味な作業を複数のルートで行っていく。推定した地質構造は逐次新たな地質調査の結果を反映して書き直される。多くの場合、対象とする地層や岩体の形成後の地殻変動による断層運動、褶曲作用等により地質構造が複雑化しているため、初期に行った少数のルート調査で推定し

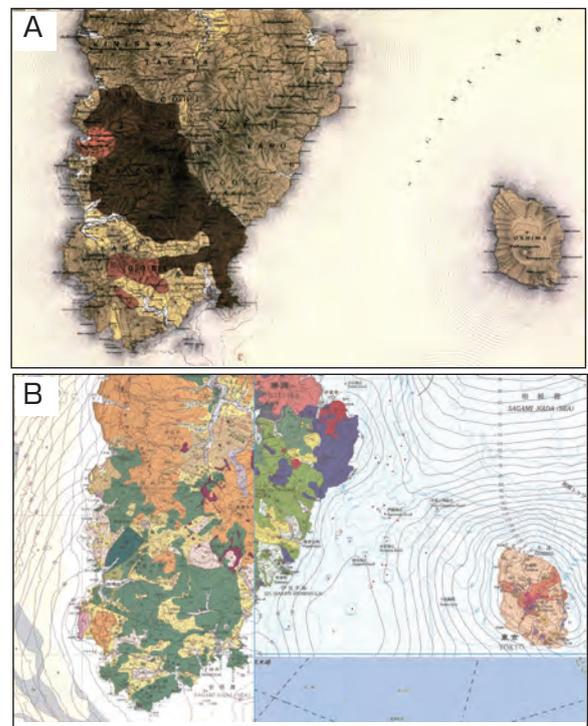


図7 20万分の1地質詳図と20万分の1地質図幅の比較

A. 1884年発行の20万分の1地質詳図「伊豆」。B. 2010年発行の20万分の1地質図幅「静岡及び御前崎（第2版）」と2015年発行の20万分の1地質図「横須賀（第2版）」を地質図Navi上でモザイク表示したもの。現行の20万分の地質図幅では、20万分の1地質詳図「伊豆」発行以降の約120年間の地質学的知見の蓄積により地層・岩体区分がより詳細にかつ正確になっている。

た地質構造モデルは覆される場合が多い。野外調査では絶えず地質構造に関する仮説を立て、野外調査でこれを検証し、修正していく作業を繰り返し行う（図9の①および図10）。この作業は地質図作成の作業の中で最も時間がかかる。野外調査による繰り返し検証を行うことで、調査を行っていない沢や尾根筋でも岩相境界や断層の位置を推定できる高い精度の地質図を作成することができる（図10）。地質図幅内に分布する地層および岩体の分類区分の正確さを保つためには野外調査で採取した試料を用いた室内研究も重要になる。野外における肉眼観察だけで得られない地層・岩体の形成環境や形成場、およびこれらが形成された時代が室内研究により明らかになるからである。室内研究の結果は野外調査にフィードバックされさらに精度の高い地質図の作成を可能にしている。

4.2 5万分の1地質図幅作成の要素（変成岩地域の地質図幅の場合）

5万分の1地質図幅作成の要素とその統合を見ていく上で、一般論を展開することは困難な場合が多い。その理由は、対象となる地質によって室内研究の手法が大きく異なるためである。以下では、東海地方豊橋周辺の5万分の1地質図幅「御油」^[7]（図11）を例に、もう少し詳細に見ていく。これらの図幅で著者は変成岩を担当した。変成岩および変成岩地域の室内研究では、岩石学、構造岩石学的研究および放射性元素を用いた年代学的研究が主になる。一方、堆積岩地域の室内研究では微化石層序学的研究および堆積学的研究が主となる。必要とされる分析・解析技術も大きく異なっている。

日本列島に広域に分布する変成岩は大きく分けて2種類

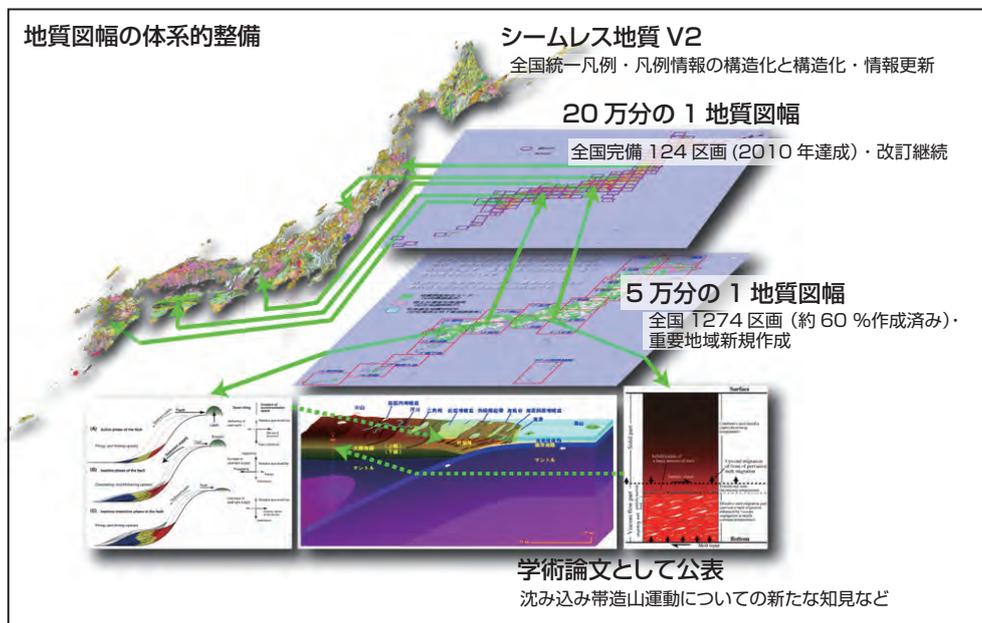


図8 産総研地質調査総合センターにおける地質図幅の体系的整備

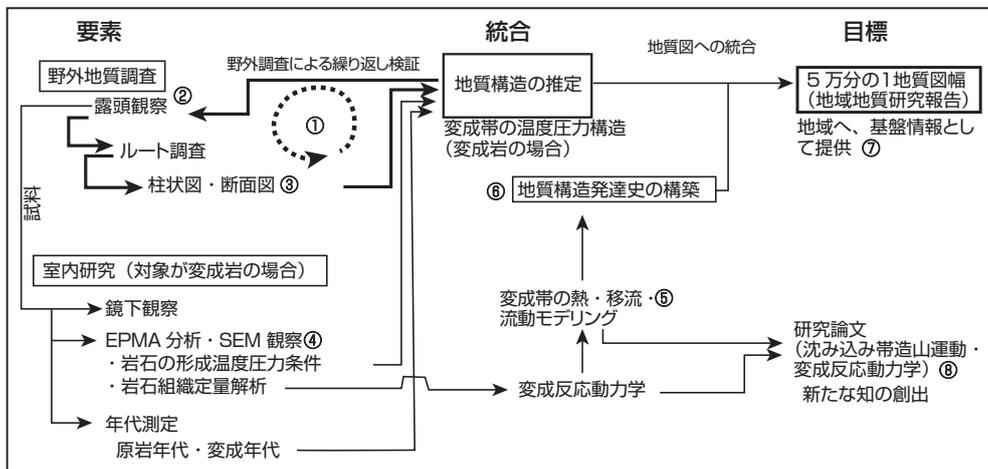


図9 5万分の1地質図幅作成の要素とシナリオ

ある。一つは海洋プレートが大陸プレートに沈み込む沈み込み帯近傍で形成される高压型変成岩である。このタイプの変成岩の中には地下100 km、圧力2 GPa以上で形成されたのち地表付近まで再度上昇してきたものがある。もう一つは、火山弧の深部で形成される高温型変成岩である。このタイプの変成岩は地下20 kmから30 km深さで、温度が800℃以上に達するものが存在する。岩石の部分溶融が起きる条件である。豊橋周辺では、これら両方のタイプの変成岩が中央構造線を介して接している。以下では、5万分の1地質図幅「御油」^[7]を例に、高温型変成岩

である領家変成岩の地質図作成について述べる。領家変成岩は西南日本中軸部を東西に約1000 km連続する変成岩であり、太平洋ベルト地帯の地下はほぼ領家変成岩およびこれに密接に伴う領家花崗岩から構成されている。

変成岩の特徴は、そのもととなる原岩があることである。原岩には堆積岩、火成岩、変成岩のいずれもがなり得る。「御油」地域に分布する変成岩を調査するとき、原岩とそれが受けた変成作用による岩相の変化を注意深く記載する必要がある（図9の②および図12）。領家変成岩の原岩はジュラ紀の付加体であることが多く、この地域でも層状

① 野外調査による推定地質構造の繰り返し検証

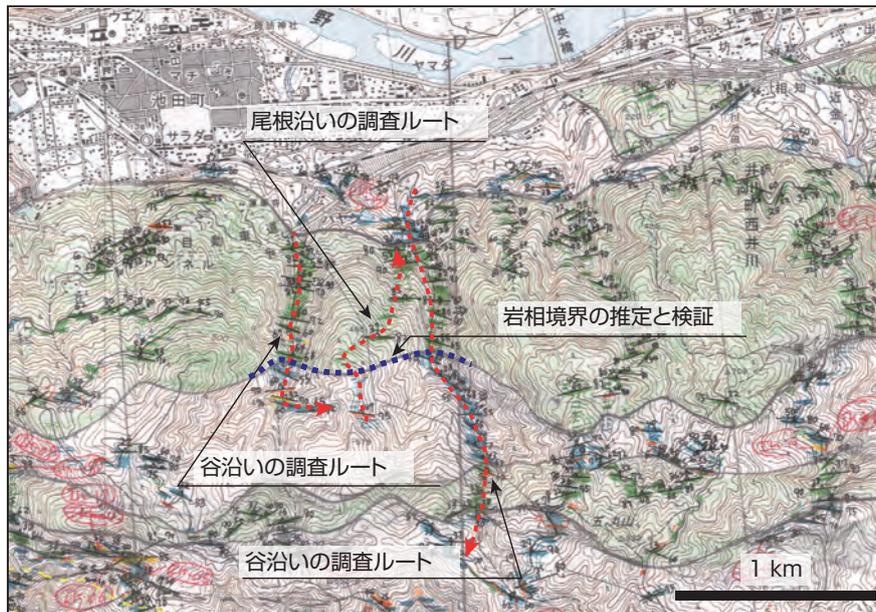


図10 野外調査による地質構造の繰り返し検証
見出しの番号は図9中の番号に対応。図は現在作成中の5万分の1地質図幅のある地域のルートマップの一部。ルートマップでは、観察された岩相の種類ごとに異なる色で塗色している。図中には卓越する片理の走向傾斜も書き込まれている。赤い文字は岩石試料採集地点を示す。

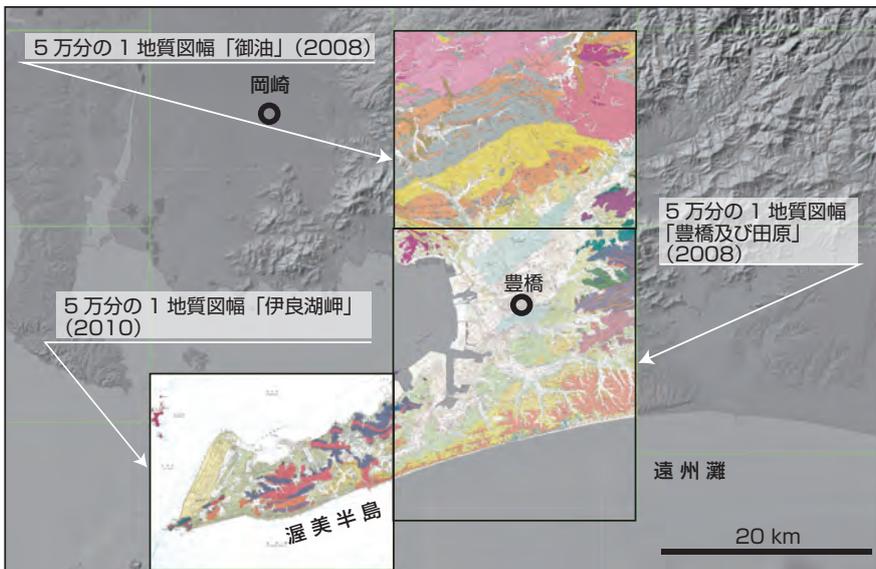


図11 豊橋地域の5万分の1地質図幅^{[7][11][12]}

チャート・珪質頁岩・泥岩が整合に積み重なる露頭が図幅の北半分で確認できる（図12）。一方、図幅の南半分では岩相が異なる。南側ではミグマタイトと呼ばれるマグマが固結した岩石と変成岩が数cmから数mスケールで混在する岩石が出現する。変成岩の部分は詳細に観察すると泥岩が部分溶融した溶け残りと考えても矛盾しない岩石であることがわかる。層状チャートも出現するが、よく観察するとチャートを構成する石英粒子は北部のものに比べ著しく粗粒である。このような岩相の違いがなぜ起こったのか。その合理的な説明はできるのか。など、露頭観察だけでは結論が出ない場合がある。変成岩の研究ではこのような場合、試料を持ち帰りさらに調べる。

変成岩地域の野外調査では、原岩の種類別に岩相を分け、これに露頭で採取した試料（薄片）を偏光顕微鏡観察で識別して、鉱物共生関係による変成時の温度圧力条件を反映した変成分帯図を作成する。これらを調査ルートごとにまとめた統合柱状図にして全体の地質構造と温度構造の推定を行う（図9の③および図13）。

変成岩の室内研究では、大局的な温度圧力構造の推定に加え、定量的な温度圧力推定も行う。そのためには採取

した変成岩試料中の鉱物の化学組成分析が必要である（図9の④と図14）。温度圧力条件推定は共存する2種以上の鉱物間での元素分配から見積もる。1960年代以降、さまざまな鉱物間の元素分配係数を用いた温度圧力計が考案されている。現在では構成鉱物の組成と岩石の化学組成から、変成岩が形成された温度圧力における鉱物および流体の量比および組成を、自由エネルギー最小化の条件を満たすように計算するプログラムが存在する。鉱物間の熱力学的平衡状態を利用した変成岩形成条件推定方法の開発はほぼやり尽くされた感がある。一方で、変成岩の熱力学的解析手法は造山帯形成モデルの定量化に大きく貢献したことも確かである。

4.3 個別要素の地質図への統合

「御油」図幅では、野外調査で得られた結果と室内研究で得られた結果を統合するとおもしろいことがわかった。室内研究で行った地質温度圧力計を用いた見積もりで、圧力値を深さに換算した値と野外調査から作成した地質柱状図の片理に垂直な方向の距離がほぼ一致した。即ち、片理に垂直な方向が変成岩ができた当時の重力の方向をほぼ表していると考えて矛盾のない結果が得られた。「御

② 露頭観察

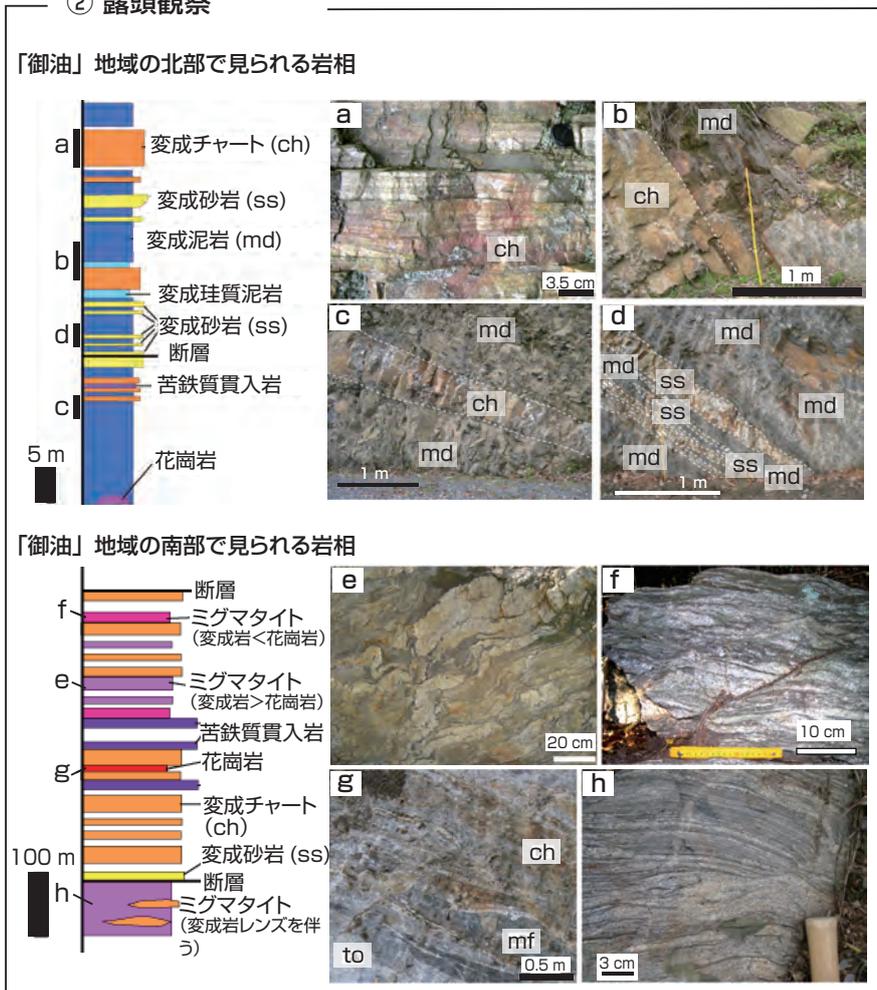


図12 野外調査における露頭観察の例（「御油」図幅）^[7]

見出しの番号は図9中の番号に対応。
 a-d「御油」地域の北部で黒雲母帯で見られる岩相。a 変成チャート (ch) の露頭；b 露頭左から変成チャート間に変成珪質頁岩を挟み、右側は変成泥岩 (md)；c 変成泥岩 (md) に挟まる変成チャート (ch)；d 変成泥岩 (md) 中にレンズ状に挟まる変成砂岩 (ss)。
 e-h「御油」地域南部のざくろ石薑青石帯で見られる岩相。e 変成岩的部分（メソゾーム）が多いミグマタイト；f 花崗岩的部分が多いミグマタイト；g 変成チャート (ch) の片理に平行に貫入する片麻状トータル岩 (to) (= 広義の花崗岩類) と苦鉄質貫入岩 (mf)；h 変成砂岩を原岩とするミグマタイト。

③ 地質柱状図の作成

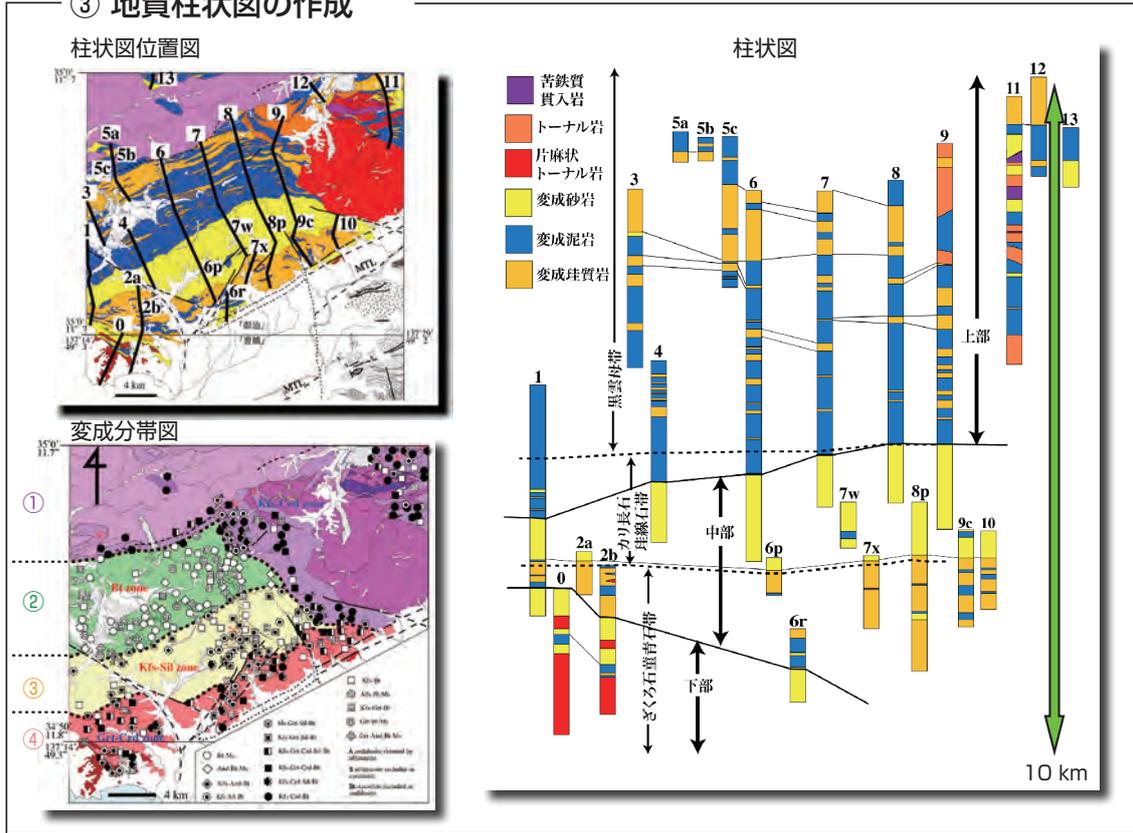


図13 野外調査により作成した地質柱状図の例（「御油」図幅）[7]

見出しの番号は図9中の番号に対応。左上は柱状図の位置図。番号は右柱状図の番号に対応する。左下は変成泥岩の鉱物組み合わせによって行った変成分帯結果。鉱物組み合わせごとに記号で示している。詳細は文献[7]と[8]を参照。左下の図の① Kfs-Crd zone はカリ長石重晶石帯、② Bt zone は黒雲母帯、③ Kfs-Sil zone はカリ長石珪線石帯、④ Grt-Crd zone はざくろ石重晶石帯を示す。変成時の温度圧力は黒雲母帯からカリ長石珪線石帯を経て、ざくろ石重晶石帯へ向い上昇する。カリ長石重晶石帯は変成帯にあとから貫入した花崗岩体の周囲に発達した接触変成作用の領域。変成分帯の結果は右側の柱状図にも示した。

④ 変成鉱物の EPMA 分析と変成岩の形成温度圧力条件

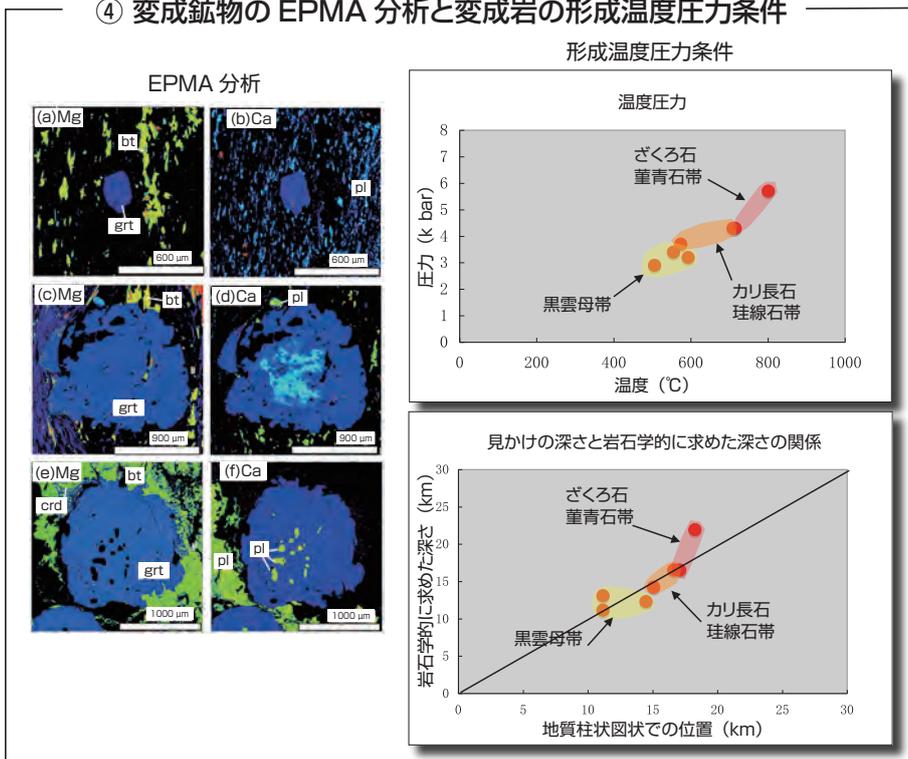


図14 室内研究における変成鉱物のEPMA分析と変成岩の形成温度圧力条件を推定した例（「御油」図幅）
見出しの番号は図9中の番号に対応。左側のaとbは黒雲母帯のざくろ石 (grt)、黒雲母 (bt)、斜長石 (pl) のMgとCaのEPMAによるX線強度マップ、c,dはカリ長石珪線石帯のざくろ石 (grt)、黒雲母 (bt)、斜長石 (pl) のMgとCaのEPMAによるX線強度マップ、e,fはざくろ石重晶石帯のざくろ石 (grt)、重晶石 (crd)、斜長石 (pl) のMgとCaのEPMAによるX線強度マップ。

油」図幅内には、白亜紀当時の深度20 kmから10 kmの地殻断面が露出しているのである。同時に、当時の地殻は深度10 kmで500℃から深度20 kmで800℃と非常に高温であったこともわかった。このような高温の地殻は、恐らく火山弧の下であろうと予測を立て、メルトが輸送する潜熱で高温地殻が形成されうことを熱・移流モデルで明らかにした（図9の⑤と図15）。このような熱・移流モデルは、この地域の見かけ下部に広く分布するミグマタイトの産状も説明でき、領家変成岩の地質構造発達史（図9の⑥）を包括的に構築することに成功した。このように野外調査および室内研究を統合して地質図と地質構造発達史を構築していき、最終的に地質図は5万分の1地質図幅「御油」^[7]（図9の⑦と図16）として出版する。学術的に新規な知見は研究論文^[8]として公表する（図9の⑧と図16）。以上が5万分の1地質図幅作成のシナリオである。

5 5万分の1地質図幅整備の今後

地質調査所における地質図整備の歴史を振り返り、地質図幅整備の全体シナリオの変遷を見てきた。明治から戦前までは、オリジナルな地質調査による地質図幅の全国完備が目的であり、20万分の1地質図幅の完備、7万5千分の1地質図幅の整備が進められた。後者は第二次世界大戦と戦後の5万分の1地質図幅への切り替えもあり、完備が達成されなかった。戦後、図幅利用者の利便性や精度の要求から、オリジナルな調査に基づく地質図作成は5万分の1地質図幅に引き継がれる。ただし、5万分の1地質図幅は1274区画が全国に存在し、これを100年未満の年月で完備することは現実的に不可能となった。昭和30年代から続く、5万分の1地質図幅整備の歴史を振り返る

と、初期には北海道に地域を限定することで、集中的な整備が行われている。1980年代以降は特定地質図幅の時代も、複数の地域ではあるが地域を限定した集中的整備が行われた。特記すべきは、地域を限定し、その地域の地質図幅を集中的に作成することの社会的使命を明確にすることで、結果的に地質図幅の整備が進んだことである。産総研になってから以降は、20万分の1地質図幅の全国完備と利便性を考慮した20万分の1シームレス地質図とその次世代版の作成が整備計画の中心的な役割を果たしてきた。これらは一定の成果を上げている。即ち、シームレス地質図の利用者の著しい増加である。次世代20万分の1シームレス地質図^[9]では、凡例の階層化と構造化を行ったことから、今後の地質図のオープンデータ化への対応も可能になった。しかし、我々がオリジナルに調査を行い作成する5万分の1地質図幅の作成枚数は少ない状態が近年続いている（図5）。地質図幅の体系整備の枠組みは一通り整ったことから、5万分の1地質図幅整備の全体シナリオを再度構築すべき時期に来ている。即ち、20万詳細図の当初完備計画が12年（実際には40年を要している）、7万5千分の1全国完備が40年（実際には未達成）、特定地質図幅が約20年の長期計画として策定されあるいは実行されたことを考えると、20年程度の長期を見据えた全体シナリオを立てることが適切と考えられる。さらに、地質図幅の品質を担保するために、5万分の1地質図幅作成の個別シナリオが重要になる。個別シナリオは対象となる地域に大きく依存する。全体シナリオと対象地域全ての個別シナリオを調和させることは困難なこともかもしれない。しかし、地質図幅整備は今後の社会の持続可能な発展のためには必要不可欠な基盤情報であることに変わりなく、実際

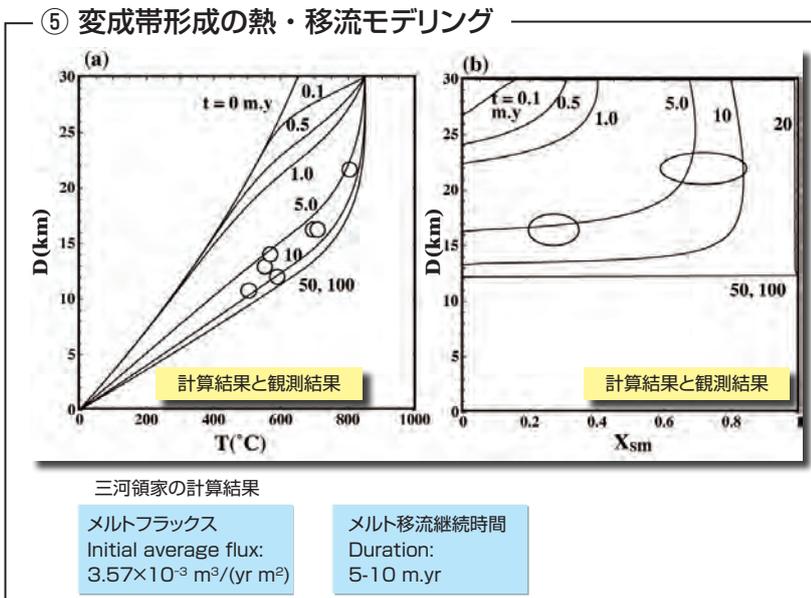


図15 室内研究における変成帯（三河高原領家変成岩）形成の熱・移流モデリング^[8]の例見出しの番号は図9中の番号に対応。詳細は文献[8]を参照。

に5万分の1地質図幅の全国的完備の要望は強い^[10]。全国完備は無理にしても、地域を限定して優先的に整備を行うなど、5万分の1地質図幅整備の全体シナリオの構築を行うべき時期に来ているのではないだろうか。

用語の説明

用語1：地質図幅：東西南北を緯度経度で区切られた矩形の範囲の地質図を地質図幅と呼ぶ。産総研地質調査総合センターでは、5万分の1地質図幅、20万分の1地質図幅等を出版している。

参考文献

[1] 経済産業省 産業技術環境局知的基盤課：知的基盤の活用事例集, (2012).
 [2] 小笠原正継, 大井健太 (編): 地質図の社会的価値—米国地質調査所サーキュラー 111 (日本語翻訳版) および米国における地質図の経済学的評価の動向—, 産総研地質調査総合センター速報, 37, 66 (2006).
 [3] 地質調査所百年史編集委員会 (編): 地質調査所百年史, 地質調査所 (1982).
 [4] 河合正虎: 地質図幅事業の歴史と現状, 地質ニュース, 220, 2-37 (1972).
 [5] 加藤碩一: 戦後(昭和30年代前期) 地質調査所史補遺, GSJ 地質ニュース, 6, 12, 390-395 (2017).
 [6] 山田直利, 宮崎一博, 栗本史雄, 加藤碩一: 20万分の1地質図幅全国完備までの道, 地学雑誌, 121 (3), N29-N41 (2012).
 [7] 宮崎一博, 西岡芳晴, 中島礼, 尾崎正紀: 御油地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 97 (2008).

[8] K. Miyazaki: Development of migmatites and the role of viscous segregation in high-T metamorphic complexes: Example from the Ryoke Metamorphic Complex, Mikawa Plateau, Central Japan, *Lithos*, 116, 287-299 (2010).
 [9] 20万分の1日本シームレス地質図編集委員会: 20万分の1日本シームレス地質図 V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/v2.html>, 閲覧日2018-01-25.
 [10] 地質調査総合センター: 地質・地盤情報に関する調査 地質調査企業アンケート結果 平成26年度, 産総研地質調査総合センター, (2015).
 [11] 中島礼, 堀常東, 宮崎一博, 西岡芳晴: 豊橋及び田原地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 113 (2008).
 [12] 中島礼, 堀常東, 宮崎一博, 西岡芳晴: 伊良湖岬地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 69 (2010).

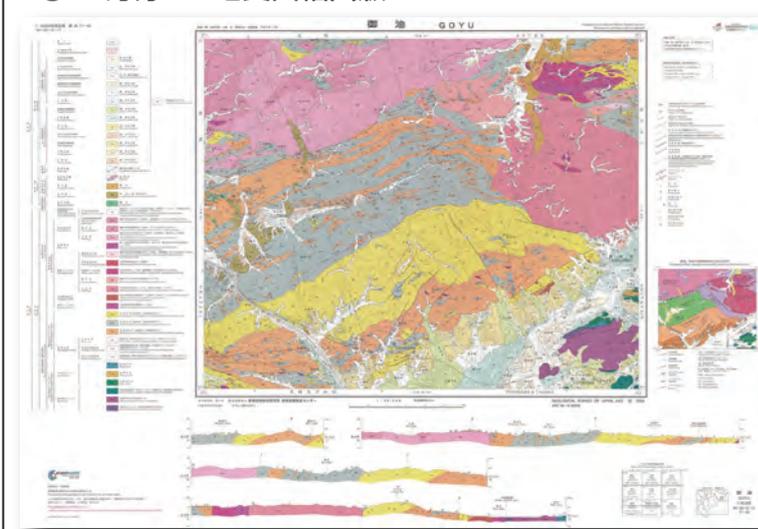
執筆者略歴

宮崎 一博 (みやざき かずひろ)

1987年九州大学大学院理学研究科地質学専攻修士課程修了。同年通商産業省工業技術院地質調査所入所。沈み込み帯及び火山弧深部における変成作用進行と変成帯形成を研究テーマとして、変成岩地域の地質図幅作成に携る。1994年九州大学理学博士。2005年より研究グループ長。2007年から5年間、5万分の1地質図幅、20万分の1地質図幅、及びシームレス地質図の作成を行う陸域地質図プロジェクトのリーダーを務める。2007年より地質情報研究部門副研究部門長。2012年よりIUGS (国際地質科学連合) CGI (地質情報管理普及委員会) 評議員。専門は岩石学。

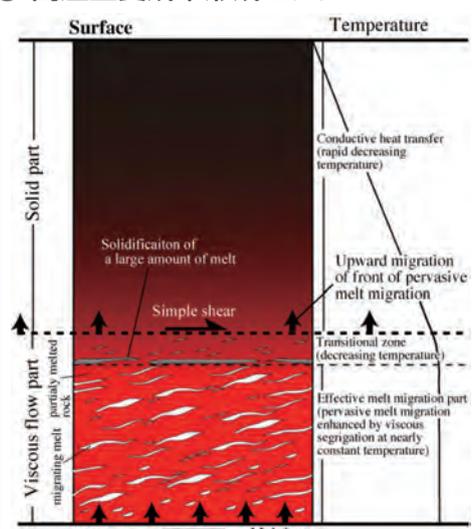


⑦ 5万分の1地質図幅出版



5万分の1地質図幅「御油」(宮崎ほか, 2008)

⑧ 高温型変成帯形成モデル



Miyazaki (2010)

図16 野外調査と室内研究を統合した成果物の例
 左：5万分の1地質図幅「御油」^[7]、右：高温型変成帯の形成モデル^[8]。

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）

地質調査総合センター（地質調査所）創立135年の歴史を振り返り地質図整備のシナリオを記述することは意義深い。この論文は、国土の基本情報として経済発展に必要な地質図の整備のために地質調査所が設立された経緯を述べ、時代の要請によって縮尺が20万分の1、7万5千分の1、5万分の1とより精密な地質が作成され、社会的に活用されてきたシナリオを総括している。高品質・高精度の地質図が、インフラ整備あるいは産業施設の立地計画作成、資源開発および減災のための基礎資料として社会的に大きな便益を生み出してきた。

また、野外調査では地質構造に関する仮説を立て、野外調査でこれを検証し、修正していく作業を絶えず繰り返すことにより地質図の精度をさらに高める。地質図作成で得た学術的に新規な知見は研究論文として公表される。例えば、5万分の1地質図幅「御油」において、白亜紀当時の地殻は深度10 kmで500℃から深度20 kmで800℃と非常に高温であること、このような高温の地殻は、火山弧の下で、メルトが輸送する潜熱で高温地殻が形成されうることを熱・移流モデル研究で明らかにし研究論文として公表された。このように野外調査と研究を統合して地質図と地質構造発達史を構築する。

これらの地質図の整備は国土の基本情報として重要であり、シンセシオロジー論文として適切であると考えられる。

コメント（松井 俊浩：情報セキュリティ大学院大学）

日本の地質図が整備されてきた歴史を概観し、いくつかの地域を例に取り上げて精密な地質図を作る方法が述べられている。著者らの地質図整備の継続的なご尽力には頭が下がる。シンセシオロジーの論文としては、これらの知的財産整備が、いかに日本の安全とイノベーションに貢献してきたかにも興味がある。イノベーションは、新しい思いつきとして語られることが多いが、著者らの成し遂げられた知識の継続的な蓄積こそが、「変化」のバックボーンとして働いたのではないかと予感がある。

議論2 地質図幅整備の目的について

コメント（牧野 雅彦）

全体シナリオで産総研の中期計画について記述されていますが、その前提である国の知的基盤整備計画の記述がありません。また、シームレス地質図の縮尺は20万分の1であることが記述されておらず5万分の1と誤解を与えるかもしれません。

各時代の地質図イメージの比較があると歴史の変遷や内容の発展充実が分かりやすくなると思います。

回答（宮崎 一博）

産総研になってからの地質図幅の整備と国の知的基盤整備計画との関連を加筆しました。シームレス地質図の縮尺についての記述を加筆しました。また、社会からの要請として地質図幅の全国完備があり、実際に7万5千分の1の整備計画までは全国完備が目標としてあったことを記述しました。この論文の主題である5万分の1地質図幅に関しては社会的な要望として全国完備があるものの現実的にはこれが難しいことを述べました。戦後始まった5万分の1地質図幅整備では、北海道地域や地震の特定観測地域等特定の地域を集中的に整備していたと言えます。この論文にコメントのあった20万分の1地質図と現行の20万分の1地質図幅の比較を加えました。前者は1884年発行の地質図で、後者は2010年代に発行されています。この間の地質図の内容の発展的充実を示していると思います。

コメント（松井 俊浩）

日本の地質図作成の歴史を俯瞰している記事として読み応えがあります。しかし、やや淡々と書かれており、地質図は何のために作られ、

どんなイノベーションを誘発してきたのかというシンセシオロジーらしい記述が足りません。資源開発や国土安全に簡単に言及されていますが、「いかに必要であるかという意見書」として参照されるだけでは価値がよくわかりません。現在、インターネットや、カーナビ、スマートフォンの発達で、地表の地図は、たいへんイノベーション価値を生んでいます。地質図は、そのようなイノベーションを開拓する力を秘めているのでしょうか？これは、論文のサブタイトルにある地質図整備のシナリオのゴールが何なのかという質問でもあります。ゴールは、具体的な、一つのイノベーションである必要はありません。というか、知的基盤整備とは、決してそのような狭量なものではないはずで、地質図が、いかに産業と社会の豊かな「基盤」になるかをご説明下さい。

回答（宮崎 一博）

地質図利用の具体的な例として、地質図の利活用事例を引用して使われ方を加筆しました。難しいですが、地質図を使ったイノベーションは可能性だと思います。関連して、新たに「2 社会における地質図の役割」を加筆しました。その中で高品質・高精度の地質図を整備し、これが利用されることで社会全体に対する便益を生むことを記述しました、この例のように、高品質・高精度の地質図を整備することで、社会全体に便益を生むようなイノベーションを行うことは可能だと考えます。

議論3 地質図の解説について

コメント（松井 俊浩）

野外地質調査と室内研究を元にする地質図と、既存史料の編纂から作成する地質図の2種類の地質図が解説されています（独自の調査によって作成する地質図とは前者のことでしょうか？対応が不明確です）。もしこの対比が重要なのであれば、2種類の図の実例を示し、その差異を解説して下さい。

回答（宮崎 一博）

5万分の1地質図幅では、東西約24 km×南北約19 kmの範囲の地質が詳細に区分されており、地下約500 mまでの地質断面図も描かれています。さらに、70ページから100ページの研究報告書がセットになり出版されます。研究報告書には地層・岩体の詳細な記載情報が掲載されています。この論文にも書きましたが、5万分の1地質図幅は1図幅当たり、約250日の野外調査を行い、室内実験等も含めて原稿完成まで3-5年の研究を行います。一方、20万分の1地質図幅は、既存の5万分の1地質図幅、および学術誌等で公表された地質図を編集して作成します。これに若干の野外調査を行い原稿を完成します。20万分の1地質図幅は5万分の1地質図幅16枚分の面積を1枚でカバーし、その地域の地質の概要を知るのに適しています。

質問・コメント（松井 俊浩）

地質図作成は、どのような調査、観測法、推定法によって行われ、何に主要なコストが要するのでしょうか？同時に、地質図の利用と作成の両面から、地質図の縮尺の持つ意味、特にタイトルにある「5万分の1」の意味を解説して下さい。精度の評価はどのように行うのでしょうか。衛星写真等でグローバルマップが収集できる地表の地図と、ボーリングを行う3次元地質図作成法の対比もあるとよいでしょう。また、明治～昭和の日本国土版図の変化にも言及が必要かも知れません（縮尺の大きな地質図とは、細密なのでしょうか、粗略なのでしょうか、紛れないように記述下さい）。4.2に地質図作成の方法が書かれていますが、ここで得られた知見は、どのような産業的・社会的価値を創造する可能性がありますか？

回答（宮崎 一博）

5万分の1地質図幅作成では、野外調査に最も時間がかかります。縮尺の持つ意味については「2 社会における地質図の役割」のどこ

ろで述べました。位置精度や地層岩体区分の正確さは、地質図の作成年度が新しいほど、また大縮尺であればあるほど高くなり、これを利用するときに得られる社会的便益も大きくなります。どの縮尺で作るかには作成にかかるコストと時間の問題ですが、5万分の1地質図幅が業界からは要望されています。断層や岩相境界の精度の表示はJISに従い地質図に表示しています。3次元地質図は地層がほぼ水平に堆積している平野部の地質を理解する上で重要です。これは現在地質地盤図の作成として別途首都圏を中心にプロジェクトが進行中です。大縮尺とは精密なものを、小縮尺とは粗いものを指します。図4をみても分かるように時代と共に小縮尺な地質図から大縮尺な地質図に変遷しています。

質問（松井 俊浩）

全国をカバーする「一様な」地質図を整備することが重要な戦略にされていることがわかりますが、それはなぜなのでしょう？全体を

完成させるとどのような価値が生じるのでしょうか？最初の地質図の目的の設定によっては重要な地域とそうでない地域があるように思われます。「3.4 産総研になって以降の5万分の1地質図幅」では、産総研になってから特定地区の地質図完備の計画がなくなると書かれています。それ以前は、北海道の石炭資源探査用以外にあったのでしょうか？

回答（宮崎 一博）

「2 社会における地質図幅の役割」を新たに加筆し、高品質・高精度の地質図が存在することが社会的便益を生むことを述べました。図4の歴史の変遷をみれば、20万分の1地質図の完備、7万5千分の1地質図幅、そして現在の5万分の1地質図幅と高品質・高精度化が行われています。戦後復興期は北海道地域、1979年以降産総研になるまでは、全国8地域の地震観測の特定観測地域の整備を集中的に行うシナリオが存在しました。

食洗機対応伝統工芸品「ナノコンポジット玉虫塗」

— 見る漆器から使われる漆器へ —

蛭名 武雄^{1*}、佐浦 みどり²、松川 泰勝²

漆器表面上に樹脂と粘土が混合した保護層を付与することによって、高耐久性漆器を開発した。保護層の成分は、溶媒への分散性、膜の透明性、硬度の観点から選択した。食洗機で繰り返し洗っても、保護層の色、つや、表面平坦性がいずれもほとんど劣化しないことが確認された。ペーストの粘度、スプレー吹き出し圧、塗工回数を最適化し、製品への保護層付与方法を確立した。さらに、意匠性、生産性を検討し、ユーザー評価も加味し、上記の優れた特性をアピールする製品を生み出した。

キーワード: 漆器、玉虫塗、粘土、ナノコンポジット、ハードコート

Traditional craftwork that can be washed with a dishwasher, “nanocomposite tamamushi-nuri”

—Expansion from exhibits to daily necessities—

Takeo EBINA^{1*}, Midori SAURA² and Yasukatsu MATSUKAWA²

We developed highly durable lacquerware by applying a protective layer in which resin and clay were mixed on the surface of the lacquerware. The components of the protective layer were selected from the viewpoints of dispersibility in a solvent, transparency of the layer, and hardness of the layer. It was confirmed that even after repeated washing with a dishwasher, the color, gloss, and surface flatness of the protective layer resisted deterioration. We optimized the paste viscosity, spray blowing pressure, and number of coatings to establish a method of giving a protective layer to products. In addition, we examined designs and productivity, considered user ratings, and created a product that exhibited the above-mentioned superior characteristics.

Keywords: Lacquer ware, tamamushi-nuri, clay, nanocomposite, hard coat

1 はじめに

1.1 研究の目標

伝統的工芸品である玉虫塗の耐久性を向上させるため、玉虫塗上に粘土を含む保護層を付与し、耐擦過性・耐紫外線性・耐食洗器性に優れた漆器およびその製造方法を開発する。さらに、塗工方法の検討を行い、上記の優れた特性をアピールする製品を制作する。

1.2 研究目標と社会とのつながり

漆器製作技術は古来より、日本の高いレベルのものづくりを代表とするものであり、海外からも常に高い評価を受けている。また、一般的に木工と植物由来樹脂の塗工で、加熱も必要ないことから、低環境負荷製造技術である。しかし、漆器は専ら器や食器、鑑賞用に制作され、広い温度範囲で耐久性を必要とする食洗器対応は想定されてお

らず、これらの用途に必要な耐擦過性、耐紫外線性、耐久性を具備していない。そのため、コーティング等により耐久性を向上させるなどの試みが行われてきた^[1]。この研究において、粘土を含む透明保護層を付与することにより、これらの特性を向上させ、工芸品のさらなる高付加価値化を図る。

玉虫塗は宮城県指定伝統的工芸品である^[2]。この研究は玉虫塗と産総研のシーズである粘土膜の両者をマッチングした次世代漆器製品の開発を目指すものであり、日本の伝統的な工芸品の技術を引き継ぐとともに、被災地域の企業を通じたイノベーションの創出を具現化するものである。また、この研究は、化学ものづくりの分野で、高機能性材料・部材として、伝統的工芸品の高機能化を達成し、従来利用できなかった分野・製品への展開が図られるものである。

1. 産業技術総合研究所 化学プロセス研究部門 〒983-8551 仙台市宮城野区苦竹4-2-1, 2. 有限会社東北工芸製作所 〒980-0011 仙台市青葉区上杉3-3-44

1. Research Institute for Chemical Process Technology, AIST 4-2-1 Nigatake, Miyagino-ku, Sendai 983-8551, Japan * E-mail: takeo-ebina@aist.go.jp, 2. Tohoku Kogei Co., Ltd. 3-3-44 Kamisugi, Aoba-ku, Sendai 980-0011, Japan

Original manuscript received March 5, 2018, Revisions received April 27, 2018, Accepted May 1, 2018

2 高耐久性漆器開発のシナリオ

玉虫塗は、下塗り、中塗り層の上に、銀粉撒きを施した半透明層を付与し、さらに染料を含む半透明上塗り層を付与した構造を有する(図1)^[3]。下塗り、中塗り、上塗り層は、用途によって、本漆、カシュー塗料、あるいはウレタン塗料を用いる。入射光が、染料を含む上塗り層を透過し、銀粉で散乱し、再び上塗り層を透過することで、染料の種類により、赤、緑、青、黒味を帯びた反射光に基づく特徴的な深みのある外観を呈する。しかし、漆器は表面硬度が低く、鉛筆硬度試験でF程度である^[1](一般的なハードコート塗工層は3H以上)。

一方、産総研では、粘土等の無機材料と有機材料をナノレベルで混合した材料技術を有している^{[4]-[6]}。この研究ではこの技術を表面保護層として適用して、耐久性に優れた伝統工芸品へと展開する。提案する新規玉虫塗の構成を図1に示す。

目的性能を具備するためには、微細構造として次のような構成が考えられる(図2)。膜中において粘土が微細粒子として均一分散することで高透明なコーティング膜とすることが可能である^[7]。ナノコンポジットハードコート剤において、粒子径が1 μm以下の時に耐摩耗性が向上することが報告されている^[8]。また、不安定な分子を粘土結晶に固定することで安定化させる効果がある^[9]ことから、紫外線吸収剤が粘土に付加した形にすることで、紫外線吸収剤の安

定性を向上させ、高い耐紫外線性を実現できると想定した。

東北工芸製作所は従来刷毛塗で漆器を製作していたが、昭和30年頃から伝統的漆器としては先駆けてスプレーで行うようになった。現在、グラス、花瓶、皿等形状の異なる製品に対してスプレー塗工による生産を行っている。特に複雑形状の製品に全面に均一塗工することは高い技術が要求され、東北工芸製作所の長い経験に基づいた塗工技術が本開発に生かされた。本開発は、産業技術総合研究所のラボ内検討と、東北工芸製作所のサンプル塗工を繰り返し、最終的には玉虫塗としての総合的な美観や塗工条件とのバランスから材料組成が決定され成し遂げられたものである。

3 高耐久性漆器の開発

3.1 保護層の設計

玉虫塗の保護層として、まず有機、無機、有機無機コンポジットの三種を想定することができ、それぞれ候補材料を選定し初期評価することにした。有機材の候補として、アクリル樹脂等いくつかの樹脂を用いた場合には、ペーストの長期安定性は優れているものの、目標とする鉛筆硬度3Hの表面硬度を実現することはできなかった。次に無機材であるシリカコーティングを検討したところ、こちらでは室温のプロセスのみで表面硬度3Hを確保した。しかし、ペーストの安定性が悪いという難点があった。そのため、ペー

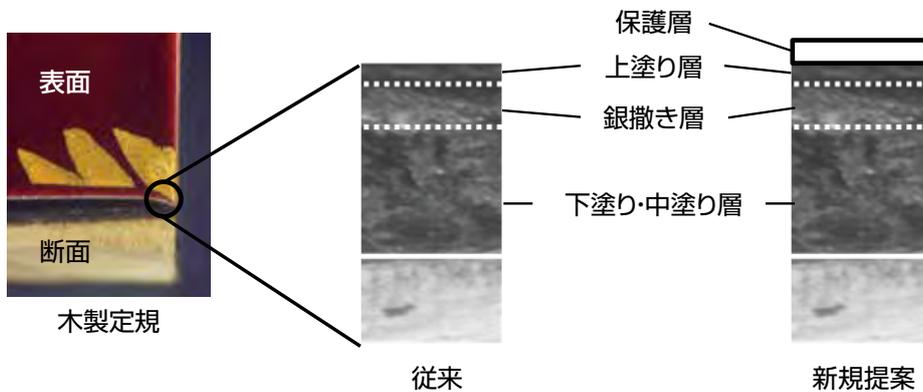


図1 従来の玉虫塗の構成と新規に提案する玉虫塗の構成

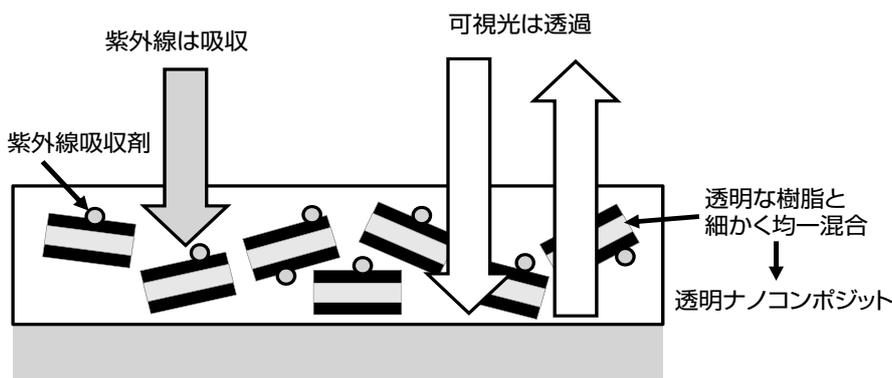


図2 保護膜の想定される内部構造と光学特性

表1 用いた有機化粘土と有機化剤

粘土 (製品名)	有機化剤	
	成分名	炭素数
SPN	塩化ポリオキシプロピレンメチルジエチルアンモニウム	75
STN	メチルトリオクチルアンモニウム	8
SAN	ジメチルジステアリルアンモニウム	18
SAN316	ジメチルジステアリルアンモニウム	18

ストが安定である有機、表面硬度が高い無機の両者のよい面を併せ持つ保護層を有機無機コンポジット材料によって実現する取り組みを実施することにした。有機無機コンポジット材料は、通常耐水性を向上させるために高温処理を行う。しかし、玉虫塗は基材に耐熱性がない場合があることと、玉虫塗自体に耐熱性がないことから、加熱プロセスを適用することができないという問題があった。そこで、加熱することなく硬度を上げられる紫外線硬化樹脂を用い、さらに粘土を添加することで室温プロセスのみで高硬度を得ることを目指した。高耐久性漆器開発における特性要因図を図3に示す。ポリマー粘土コンポジット材料において、紫外線硬化樹脂が用いられた例があるが、粘土添加量を5 wt%に増やすことによって透明性が低減した^[10]。そのため、溶媒・粘土・樹脂の選択を慎重に行い、最適の組み合わせを見つけなければ、高い透明性が得られないことが分かった。玉虫塗表面に密着し、剥がれること

表2 有機溶媒中の有機化粘土粒子径平均値とガラス塗布サンプルのヘーズ値

粘土	平均値 [nm]	標準偏差 [nm]	ヘーズ値 [%]
ガラス板	—	—	0.41
SPN	8.8×10^2	9.2×10^2	21.3
STN	1.1×10^3	6.4×10^2	68.6
SAN	1.9×10^4	2.9×10^4	42.3
SAN316	1.9×10^4	3.4×10^4	23.4

(粒子径はヒストグラム解析結果、ガラス板の厚みは1 mm)

のない塗膜を形成するため、溶媒・粘土・樹脂を選択し、それらの混合比を最適化するとともに、混合方法を検討した。

3.2 ナノコンポジット保護膜成分の選択

粘土を樹脂に均一分散させるために、粘土層間のナトリウムイオンを有機カチオンに交換する有機化を行うことがある^[11]。このとき用いる有機カチオンの種類によって樹脂への分散性が変わるため、有機カチオンの選択が重要である。ここでは異なる有機カチオンを用いた4種類の有機化粘土を検討対象とした(表1)。まず4種の有機化粘土を、当初想定された有機溶媒であるトルエンに分散させ、その分散性を評価することにした。トルエン分散液の固液比は0.1 wt%とした。大塚電子株式会社製ファイバー光学動的散乱光度計FDLS-2000を用い、粒子径分布を測定した。その結果を表2に示す。ヒストグラム解析でSPN、STNの平均値が小さく、SAN、SAN316が大きいという結

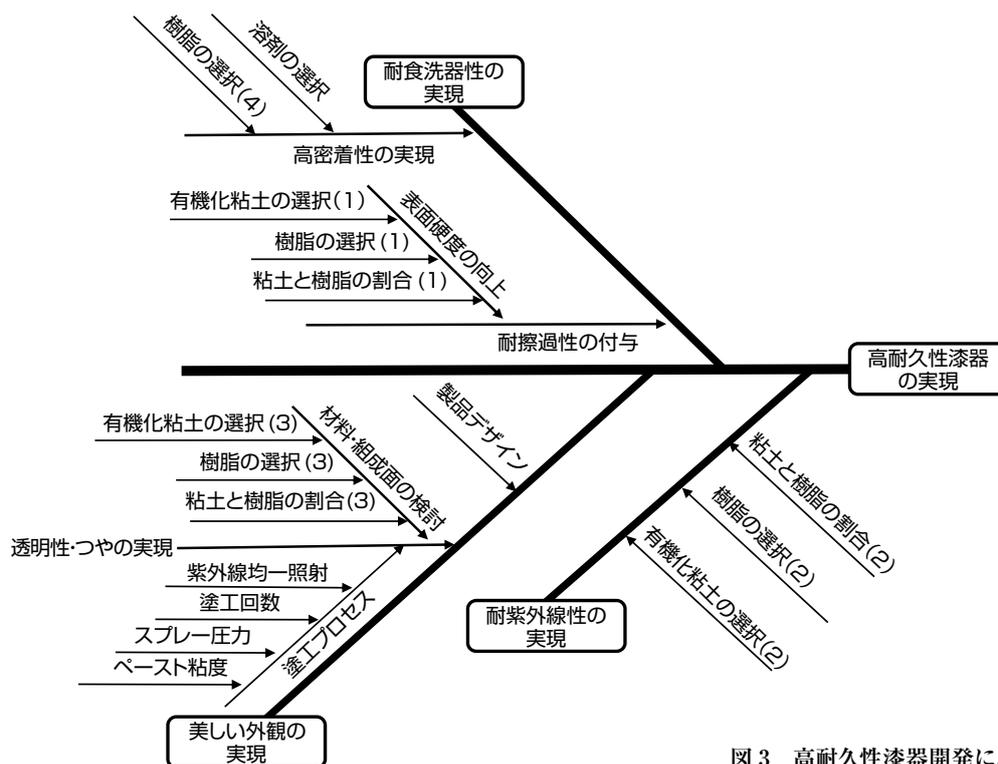


図3 高耐久性漆器開発における特性要因図

果になった。

次に、4種類の合成粘土のトルエン分散液(5 wt%) 約 0.3 gを厚さ約 1 mm のガラス板の上に約 3 × 3 cm の大きさに伸ばして室温乾燥した。この乾燥したガラス板のヘーズ(曇り度) 値をヘーズメーター(日本電色製 NDH5000) で測定した。ヘーズ値は小さい順に、SPN、SAN316、SAN、STN の順になった。ヘーズ値が小さいということは光が散乱せずクリアな外観であることを示しており、好ましい。

以上の結果から、有機化剤の炭素数の一番多い SPN は分散液中でも細かく分散し、ガラス上塗工膜についても低ヘーズとなることが分かったので、粘土として SPN を採用することにした。

紫外線硬化樹脂については、鉛筆硬度がカタログ値で今回の目標値である 3 H 以上である日本合成化学工業株式会社製 UV-7605B、UV-7640B、UV-1700B の 3 種類を候補として上げた。これらは、ウレタンアクリレート樹脂であり、UV-7605B、UV-7640B、UV-1700B の分子量 / オリゴマー官能基数はそれぞれ 1100/6、1500/6-7、2000/10 である。これらを用いた保護層の付与方法を図 4 に示す。これは、紫外線硬化樹脂、トルエン、粘土、そして光重合開始剤を所定の割合で混合し、均一なペーストになったものをパーコーターにてスライドガラス上、あるいは玉虫塗上に塗工し、紫外線硬化装置による重合を行うものである。

使用する溶媒は、選択された SPN に適しているトルエンを用いた。ここで、樹脂とトルエンの重量比率を 30 : 70 に統一した。粘土は、ペーストの増粘効果を有するため、粘

土を過剰に添加すると粘性が上がりすぎて塗工できなくなる。そのためペーストへの粘土の添加量と液の粘性について調査を行った。具体的には、UV-7605B に有機化粘土の添加量を変えて、ペーストの粘性を調べるものであり、行った操作は下記の通りである。まず、トルエン 70 g に樹脂 30 g を分散させた。次に、SPN をスクリー管瓶に計り入れ、粘土が分散するまで振盪した。以上の方法でペーストを作製したところ、混合できたのは SPN 添加量 25 g までで、SPN が 30 g 以上になると液が動かなくなった(図 5)。UV-7605B は 3 種類の樹脂の中で最も分子量が小さいため、粘性は低いと考えられる。そのため、振盪可能な有機化粘土の添加割合は、樹脂 30 g、トルエン 70 g、に対して 25 g までであることが分かった。ここでは、取り扱い性の観点から、SPN 添加量は 21 g としてペースト試作することとした。

スライドガラス上保護膜の紫外可視吸収スペクトルを図 6 に示す。保護膜は可視光領域に吸収がないことが分かった。また、紫外線吸収剤の吸収は、樹脂と粘土が共存する場合に、より強く、長波長側にシフトすることが確認された。これは、紫外線吸収剤の濃度が高い場合に観察される現象であり、粘土表面に紫外線吸収剤が濃縮されて吸着していることが示唆された。また、吸収が長波長側にシフトすることにより、保護膜の紫外線遮蔽効果が上がり、漆器の耐紫外線性の向上が期待される。

スライドガラス上の保護膜硬化実験において、溶媒がトルエンの場合も、東北工芸製作所が使用するシンナー(トルエン、キシレン等混合溶媒) を用いた場合も、いずれも紫外線で硬化ができることを確認した(厚み約 10 μm)。東北工芸製作所では、乾燥に漆風呂^[12] が用いられることから、加熱乾燥を行わずに乾燥可能か確認をした。漆風呂は、木製の棚であり特に温度制御をしているものではない。漆製品は漆風呂に置かれることで少しずつ乾燥・硬化する。産総研の実験において通常 60 °C、3 分かけていた

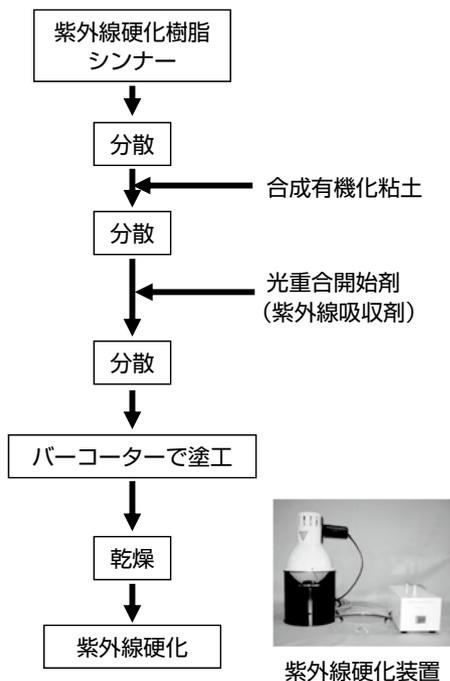


図 4 保護膜付与手順

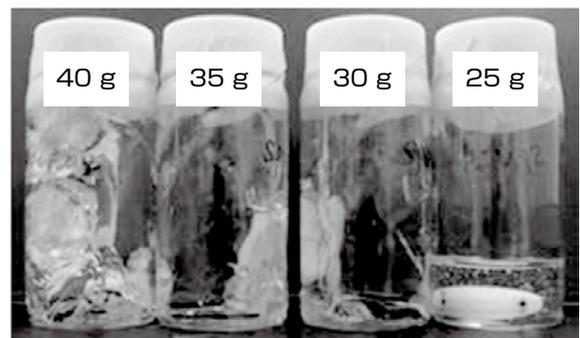


図 5 有機化粘土の添加量と液の状況
図中の数値は、樹脂 30 g に対して添加した SPN の量である。
第 58 回粘土科学討論会講演要旨集、A6、2014 年より転載。

乾燥プロセスは室温、1時間で代用できることが分かった。この知見により、スプレーコーティングを行うクリーン環境の外にある乾燥炉に持って行くことなく、クリーン環境中にある漆風呂に置くことで乾燥ができ、ゴミの付着等を避けることが可能になった。

3.3 評価方法と結果

3.3.1 透明性の評価

樹脂 30 g、トルエン 70 g に SPN 0 g から 40 g、開始剤 6 g の構成で、バーコーターによりスライドガラスに保護膜を付与し、透明性の評価を行った。なお、SPN を含まないものについては、ハジキが発生し、サンプルを作製することができなかった。ガラス上に塗工した膜の全光線透過率とヘーズを測定した(図7、8)。図7より粘土添加量によらず、膜の全光線透過率は目標値である 90 % を超え、十分な透明度を有していることが分かった。また、図8よ

りヘーズについては、0.6 以上 1.8 以下であり、特に粘土添加量が 20 - 30 g の間で最低値を取ることが分かった^[13]。本結果より、粘土添加量 5 g から 40 g の範囲で、十分に高い全光線透過率が得られることが示された。

3.3.2 表面硬度の評価

上記ペーストをバーコーター塗工したサンプルをガラス上の保護膜に対して、鉛筆硬度試験(JIS K 5600)によって耐擦過性を評価した。その結果、UV1700B は目標レベルである 3 H には到達しなかった。一方、UV7640B あるいは UV7605B は 3 H 以上の硬度が実現することが分かった^[13]。樹脂はオリゴマー官能基が多い方が硬度が高くなると考えられるが、粘土樹脂混合系では最適な、分子量およびオリゴマー官能基量があるものと考えられる。開始剤の量は、十分な硬度が実現する 6 g とした。樹脂については、UV7640B の粘度が UV7605B の粘度よりもずいぶん高く、

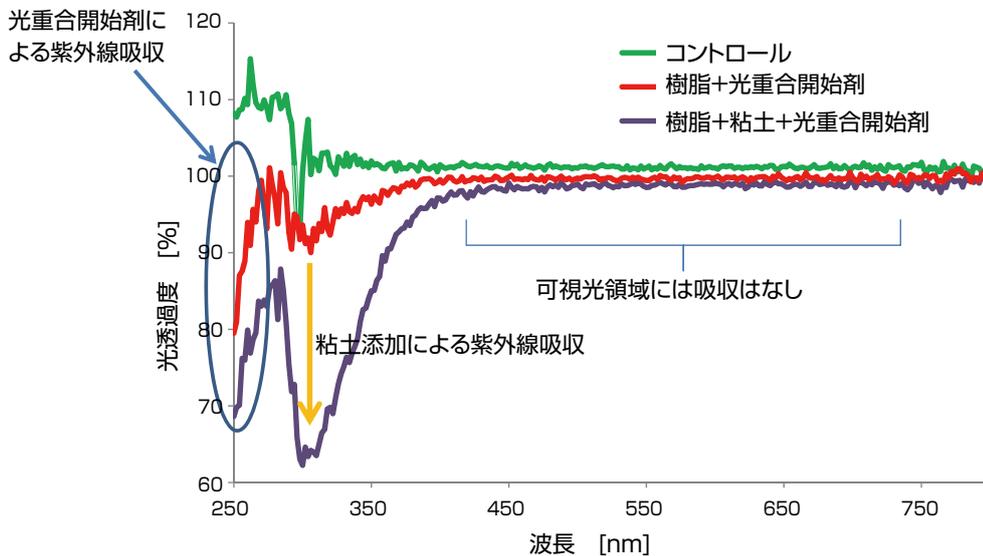


図6 保護膜の紫外可視吸収スペクトル

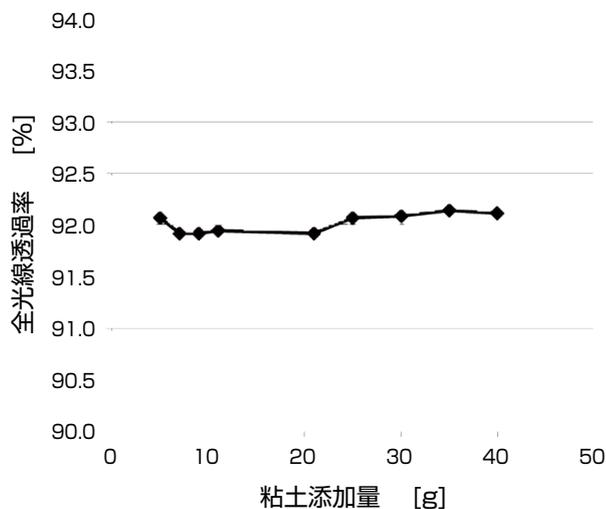


図7 粘土添加量と全光線透過率の関係
第58回粘土科学討論会講演要旨集、A6、2014年より転載。

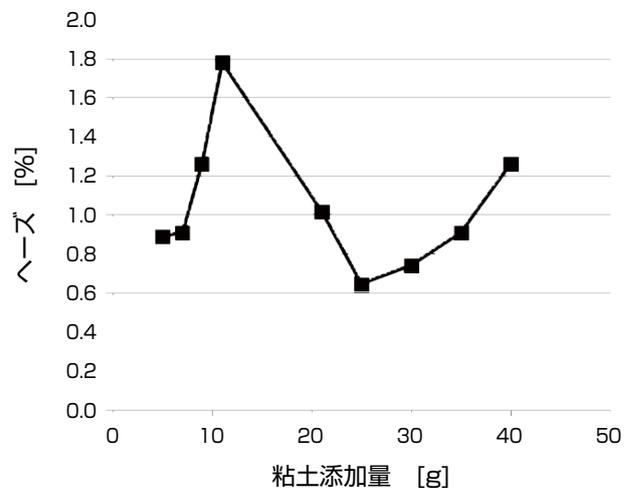


図8 粘土添加量とヘーズの関係
第58回粘土科学討論会講演要旨集、A6、2014年より転載。

スプレー塗工時に、より多くの溶媒で薄めなければならないという問題点があるため、UV7605Bを採用することにした。

バーコーターによる製膜時には問題がなかったものの、スプレー塗工の際に、粘性を低下させる目的で溶媒を添加したところ、つやが十分に得られなかった。これは、ペーストの高い粘性に対し、レベリング性が低く表面に凸凹が生じたためと考えられた。粘土添加量を低減させることによって粘性を下げる事が可能であり、粘土添加量を、7 g、3 g、1.5 g 等に変えた検討を行い、21 g の場合よりもレベリング性が改善していることを確認した。

以上のように、ヘーズ値、分散性から有機粘土を選定し、有機粘土添加量と粘性の関係をチェックし、可視光吸収特性・透明性、スプレー塗工性・レベリング性などを評価し、以降の塗膜性能評価では粘土添加量 3 g（樹脂 30 g に対して）として評価検討を進めた。

樹脂 30 g に対して、SPN を 3 g とした場合に、表面硬度を鉛筆硬度として評価した結果を図 9 に示す。サンプルはいずれも、スライドガラスに黒玉虫層（ウレタン樹脂）を付与したものに保護層をスプレー塗工したものである。鉛筆硬度は 4 H から 5 H であり、目標値である 3 H 以上の十分な表面硬度を示した（図 9 右）。一方、保護膜なしの黒玉虫表面は鉛筆硬度 F と判定された（図 9 左）。以上のように、保護層付与により十分な耐擦過性の向上が認められた。玉虫塗の塗料は、多くの場合カシューあるいはウレタンを使用している。ウレタンは黒色で評価済であることから、カシュー樹脂（赤色）をスライドガラスに塗工したサンプルに対する試験を実施した。カシュー樹脂の鉛筆硬度は HB と判定され、ウレタンの鉛筆硬度 F に比べいくぶん柔らかいことが分かった。また、図 9 と同様の保護層を付与した場合には、表面硬度は 3 H に向上することが

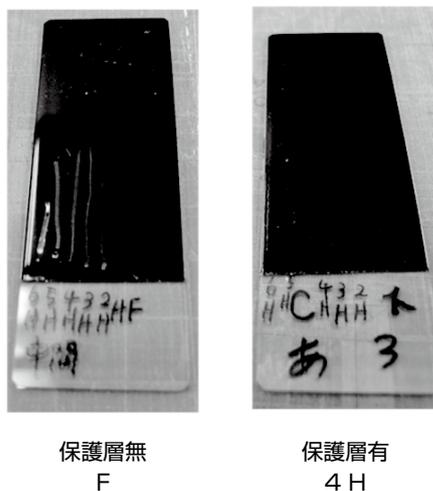


図 9 黒玉虫層の鉛筆硬度試験結果

確認された。

以上のように、ウレタン表面・カシュー表面ともに保護層は柔らかい表面の硬度を上げる効果があることが分かった。

3.3.3 耐食洗器性の評価

耐食洗器性の評価としてはこれまで決まった方法がなかった。そこで、食洗器による一般的な洗浄を一定回数繰り返し、その前後で評価試験を実施し、その変化が十分小さいことを目標とすることとした。評価項目は、色、つや、そして表面平坦性とした。

まず産業技術総合研究所内に評価用食洗機（Panasonic 製 NP-TR6）を設置した。洗浄は通常コースで実施し、除菌ミスト、洗い、すすぎのプロセスが行われ、時間短縮のため乾燥は行わなかった。洗いのお湯の温度は約 70 °C とした。1 サイクルの洗浄時間は約 30 分である。使用した洗剤はライオン製 CHARMY クリスタクリアジェルである。ガラス上に黒玉虫等を付与し、その上に、樹脂 30 g、トルエン 70 g に SPN 3 g、開始剤 6 g の構成で保護層をスプレー塗工したサンプル（玉虫塗が薄いもの、中くらいの厚み、厚いものそれぞれ 1 枚ずつ）で、20 回、60 回、100 回食洗機にかけたところでそれぞれサンプルを取り出し、色差計によって初期の色からの変化を測定した（図 10）。色差 ΔE^*ab は小さければ小さいほど、色の違いが小さいことを示す。保護膜がない場合、100 回洗浄後の色差は平均 0.97 であり、保護膜がある場合 0.76 であった。0.97 は AA 級許容差^[14]に区分され、「色の隣接比較で、わずかに色差が感じられるレベル」であり、一方 0.76 は AAA 級許容差に区分され、「目視判定の再現性からみて、厳格な許容色差の規格を設定できる限界」である。100 回洗浄後も色差が A 級許容差「色の離間比較では、ほとんど気づかれない色差レベル」に相当する 1.6 以上となるケースはなかった。この結果より、保護層は、食洗機で繰り返し洗浄しても変色しないことが分かった。

美観評価の一環として、「つや」に相当する測定値「G

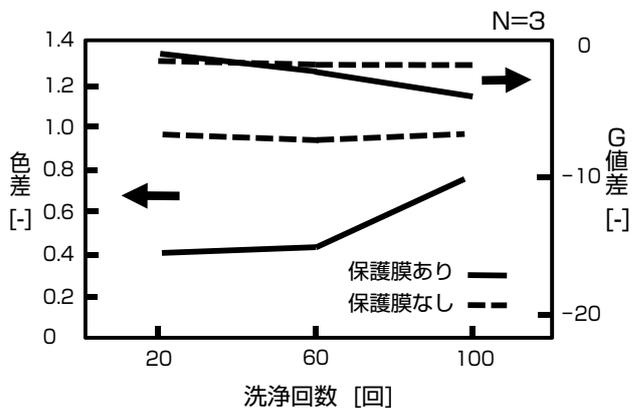


図 10 食洗機試験前後の色差および G 値差

値」を評価した。G 値は、正反射光を含む全反射光 SCI (Specular Component Include) の値から正反射光を含まない反射光 SCE (Specular Component Exclude) の値を除算して計算される^[15]。この値が大きければ大きいほど、つやがあることを示す。G 値の測定はコニカミノルタ製分光測色計 CM-2600d で測定した。入射角は 8 度である。黒玉虫上に保護層を付与したサンプルの測定値は 98 から 99 の間であった。G 値としては 100 前後あれば光沢プラスチック相当と言えることから、光沢のある表面であることが分かった。食洗器試験前後で、G 値の変化を測定した。食洗機にかける前よりどのサンプルも G 値が少し下がる傾向があった。その差は保護膜無の場合には、2 であり、保護膜有の場合には 4 である (図 10)。保護膜有の方がやや大きな値となっているが、外観としてはほとんど変化が分からない程度の変化であった。

次に、レーザー顕微鏡 (キーエンス製 KEYENCE VIOLET LASER COLOR 3D PROFILE MICROSCOPE VK-9500) で表面粗さ Ra 値を測定した。洗浄回数と表面粗さの関係を図 11 に示す。洗浄前のコーティング層の表面粗さ ΔRa は 0.07 から 0.08 μm であり洗浄後は 0.09 から

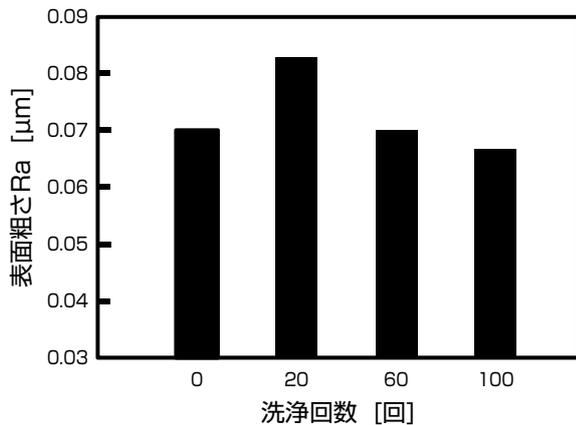


図 11 洗浄回数と表面粗さの関係

0.06 μm の間で、洗浄による表面粗さの増加は確認できなかった。以上のように保護層付与により、色、つや、表面平坦性のいずれについてもほとんど劣化しないことが確認された。

3.3.4 耐紫外線性の評価

紫外線照射はセン特殊光源株式会社製ハンディキュアラブ HLR100T-2 を用い (強度 12,000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、波長 365 nm)、光源とサンプルの距離を約 10 cm とし、照射を 1 から 5 時間行い、サンプルの色変化を色差計で評価した。なお、この条件で照度計により測定した照度とつくばにおける年平均値^[16]から、1 時間の照射は室内における 2.6 年分の照射量と計算された。

保護膜なし、SPN あり保護膜あり、SPN なし保護膜ありの 3 種類の玉虫塗ハガキをサンプルとし、同時に紫外線を照射して一晩放置後、色変化を測定した。色変化は全て保護膜なし > 保護膜 SPN なし > 保護膜 SPN ありの順に大きくなり、粘土添加の効果が確認された (図 12)。また、青 > 緑 > 赤の順に色変化が大きかった。

青についてはハガキに加え、ガラスを基板とした評価を実施した。保護膜なし、保護膜 SPN なし、保護膜 SPN 有の 3 種類のサンプルに同時に紫外線をあてて色差を測定した。その結果、1 時間照射後の保護膜なし、保護膜 SPN なし、保護膜 SPN 有サンプルの ΔE^*ab はそれぞれ、3.6、0.7、0.5 となり、SPN あり保護膜サンプルの色変化が最も小さく、粘土添加の効果が確認できた。

3.3.5 密着性の評価

樹脂 30 g、トルエン 70 g に SPN 3 g あるいは 0 g、開始剤 6 g の構成で、バーコーターおよびスプレーにより付与した保護膜について、テープ剥離試験 (JIS K5600) を実施したところ、保護膜の剥離は観察されなかった。また、同様のサンプルに対して、碁盤目テープ試験 (JIS K5600) を実施したところ、剥離は観察されず、目標であ

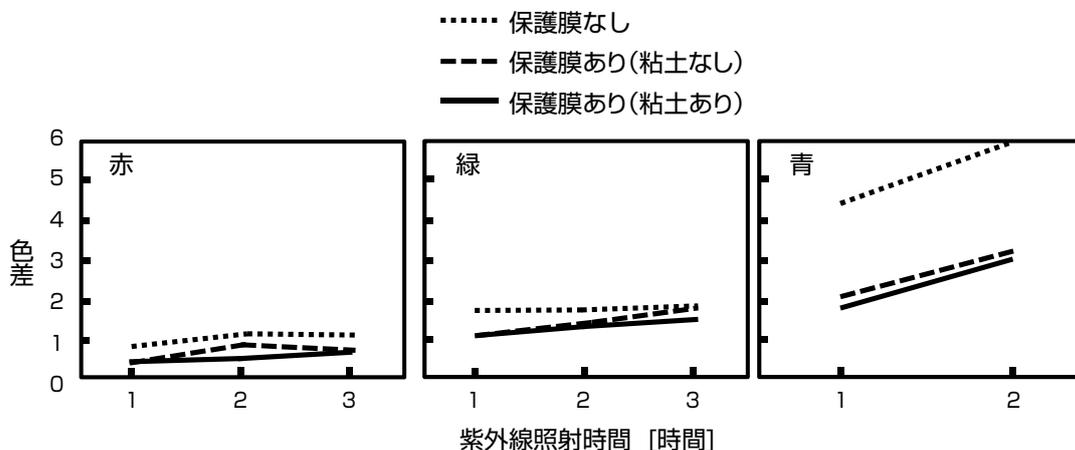


図 12 ハガキサンプルに対する紫外線照射時間と色差

る試験エリア 25 か所のいずれも剥離がない分類 0 と判定され、十分な密着性が確認された。さらに木質成形板、アルミの表面に対して同じ保護層を付与したサンプルについて、分類 0 と判定され、十分な密着性が確認された。

3.4 塗工方法の確立

上記の検討はすべて、平板試料での評価である。しかし、実際の製品は立体であり、三次元表面に保護層を付与することが要求された。そのため、バーコーターではなく、スプレーを用いて塗工を行うこととした。ペースト液の粘性特性により、均一でかつ十分な厚みの保護層を付与できるかどうか重要である。そのため、東北工芸製作所の工房にて開発ペーストをスプレーコーティングし、漆器表面に透明で、均一な高意匠性コーティングできるような最適条件を見出すこととした。具体的には、溶剤添加によるペーストの粘度、スプレー吹き出し圧力、塗工回数の最適化等を行い、高い品質のコーティング層の塗工方法を検討することとした。

3.4.1 均一性の高い吹き出し条件

玉虫塗では、被塗物の形状により、最適なペースト粘度がある。具体的には、側面が多い製品と水平面が多い製品では後者は粘性が低く、同じ平面でも面積が広いほどに粘性を低くしている。今回開発ペーストでは、ウレタンシンナー（カシユ株式会社製ストロンシンナー）を追加溶剤として、その分量で粘性を調整できることを確認した。通常商品としての短冊しおり、タンブラー、オールドグラス、ワインカップ（2 形状）、プロトタイプとしておちょこ、片口、小判皿、角鉢、プレートという、10 種類の被塗物に塗布するための最適なペースト粘度を確認した。以上の知見から、製品形状毎の適切な追加溶剤量が分かった。

スプレー塗装を用いている玉虫塗では、吹き付け速度をエア圧によって調整している。通常の玉虫塗の塗工における最適な圧力は 0.2-0.4 MPa 前後である、この圧力で開発ペーストを塗工すると、ゆず肌（表面に凹凸）ができてしまい、玉虫塗ならではのつやが消えてしまった。検討

の結果、本ペーストにおける最適な圧力は 0.15 MPa であることが分かった。

3.4.2 塗工回数

この研究では、玉虫塗の仕上げに、保護層を追加したため保護層の高い透明度が必須である。塗工回数の追加により、輝きとつやが消えない保護層の透明度を確保できることを確認した。具体的には、SPN の含有量を細やかに調整し、保護膜なし（= 通常の玉虫塗商品）と見比べ、美観を損なわない配合を発見した。保護層塗工後の紫外線照射のプロセスは、表面にゴミが付かないよう細心の注意を払って行われた。紫外線照射には、上面からだけでなく、側面等からも十分な強さの紫外線が当たるように専用のボックスを製作し、このボックスを上塗りの吹き付け室内に設置し、紫外線乾燥の一連の工程が完了するようにした。光を反射するアルミ板を活用、回転させることなども取り入れることでオリジナルの装置を作成した。

3.4.3 形状の違いによる再現性

前述の通り、玉虫塗では製品の形状により、塗料の粘度コントロールを行っている。今回製作した 1 種類の試作品においては、玉虫塗部分について東北工芸製作所の通常商品と同等の美観を確保することができた。また、素材についても通常の塗り加工を行った上で、木製、樹脂（アクリル、ABS）、ガラスといった玉虫塗で使われている素材から、今後の活用を検討している磁器まで、商品同等の玉虫塗の外観の再現を行うことができた。

3.5 製品仕様の確立

3.5.1 試作品の製作と評価試験および展示会調査

樹脂 30 g に対して粘土添加量を 1.5 g から 7.0 g まで変えた 4 種類のペーストでスプレー塗工したおちょこについて G 値測定とモニター評価アンケートを行った。

紫外線硬化樹脂に対する粘土の割合を変えて工房でスプレー塗工したおちょこ 4 種類と通常の玉虫塗りのおちょこ（保護膜なし）の 5 種類を展示会において、来場者にアンケートを行った（図 13）。保護膜なしに外観が一番近いサ

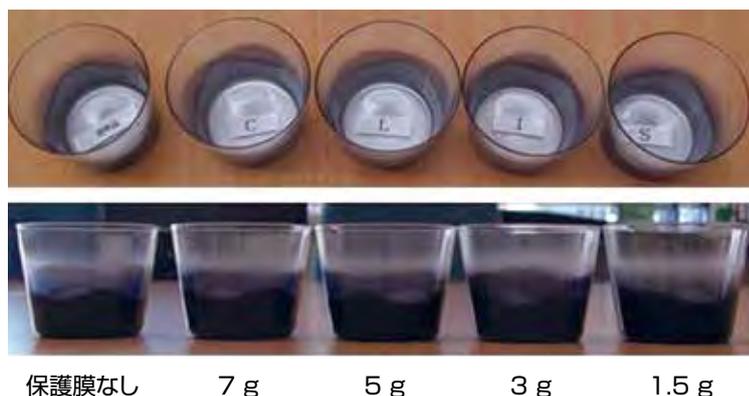


図 13 ユーザー評価用おちょこサンプルの外観
図中の数字は樹脂 30 g に対する粘土の添加重量。

ンプルを選んでもらう形式である。アンケートは91名に実施した。似ていると回答されたおちょこについては、最も粘土添加量の少ない1.5 gの回答が最も多く、全体の6割以上に達した。図14より、ガラス平板試料を用いて評価した結果粘土混合量が少ないほどG値が大きくなる傾向があった（図14）。アンケートの結果は、図14の粘土添加量とG値の関係と整合している。

3.5.2 飲食店におけるモニター調査

次のステップとして、開発ペーストを用いて、おちょこに加えて、片口、タンブラー、オールド、磁器の皿、磁器の小鉢、合計6種類について、本試作を行った。そのいくつかについて、飲食店A、B、Cでのユーザー評価を実施した。懐石料理店Aにおいては、製品の説明をしながら、地元の日本酒の容器として用いた。十分使用に耐え、観光客や地元の料理を楽しみたい方へのPRになるという意見ももらった。レストランBは、フレンチで、フランス料理やワインに明るいソムリエの居るレストランであり、実際にソムリエがオーナーの店舗であった。ワインカップを使用した、耐久性に問題はないものの、ワインの色が見えない等の指摘を受けて、ワインの色が見えるような形状のグラス

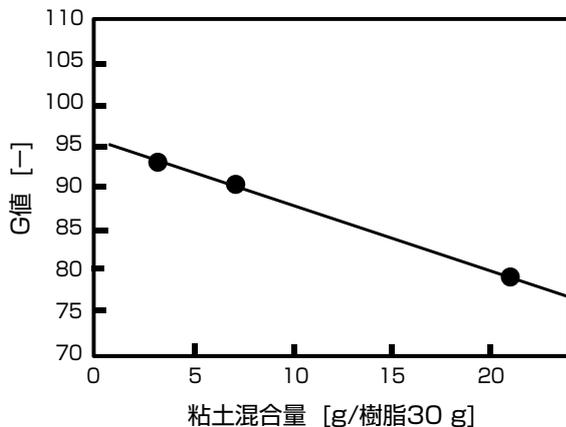


図14 粘土混合量とG値の関係



図15 レストランにおけるユーザー評価の様子

を検討した。レストランCは、イタリアンであり、ショープレートやワインカップを使用してもらった（図15）。保護膜ありとなしの両方のショープレートを使用し、食洗器で洗った結果、保護膜ありのプレートの傷が少ないことが確認された。

ユーザー評価では、全般にデザイン性、使い勝手がよいので、商品化したら購入希望という意見をもらうなど、好評であった。

3.5.3 製品化

製品化する際には一定数のロットをこなす必要があり、最初はさまざまな商品展開を検討したが、製品を絞ることにした。実際に使用したレストランやさまざまな分野の方に意見を聞いたところ、ワインカップが海外のお土産品としても使える、飲み物も幅広く使えるだろうということから2015年4月にワインカップ2色を製品化した（図16）。ワインカップは2016年5月に仙台で開催されたG7財務相・中央銀行総裁会議のお土産として採用された。

製品化するに至り、第6回ものづくり日本大賞の経済産業大臣賞受賞をはじめ、ものづくり白書に掲載、みやぎ優れMONOに選定など仙台市、宮城県、経済産業省、復興庁等から支援されるようになった。NHK「イッピン」の番組放映では、このドキュメンタリーの内容が共感を呼び4回再放送される等全国でも知られるようになった。NHKワールド「サイエンスビュー」では世界各国で放映された。以後、さまざまな新聞雑誌の取材があり、事例紹介として取り上げられ続けており、2018年2月の段階でワインカップは注文から納品まで3ヵ月待ちの状態である。

4 まとめと将来展開

保護層に関しては、その外観、耐擦過性、耐紫外線性等について、目標を達成した。これを製品に付与するプロセスも確立し、製品を上市した。今後は、玉虫塗自体の耐久性を高めたいと考えている。また、今回開発した保護層



図16 製品化したワインカップ
直径約6 cm、高さ約15 cm。

は幅広く表面の柔らかいプラスチック製品等へ応用することが期待されることから、漆器以外の用途にも紹介を行っていく。

Appendix. 伝統工芸と先端技術の連携・協奏

高耐久性漆器開発の取り組みは、「工芸試作品展示室」の展示品をある職員が見たことがきっかけで開始された^[2]。「工芸試作品展示室」は東北工業大学の庄子晃子名誉教授の指導の下2004年から2011年まで産業技術総合研究所東北センターC棟1階に設置された。東北センターの前身である工芸指導所は東北の産業振興を目的として設立されており、この工芸指導所および産業工芸試験所の東北支所の工芸試作品が保存・展示されていた。一方、東北センターは天然スメクタイトの鉱山の多い東北に立地していることもあり、スメクタイトメーカーと協力して合成スメクタイトの工業化に成功^[17]しており、今回使用した粘土原料は合成スメクタイトの有機化製品である。さらに粘土を用いた膜は、合成スメクタイトの「膜になりやすい」という特徴を生かした材料である。玉虫塗も粘土膜もコーティングであることから、東北センターの技術シーズを、漆器の用途拡大に広がる応用へとマージできないか、という発想に至ったことが、本連携に繋がった。

材料開発と、工芸製作という、一般的には連携が難しい間で、お互いのフィールドに踏み込んで密接な協力と連携のもとで、検討結果に対するフィードバックがかけられ、改良が進み、産学官連携が有効に発揮できたと考えている。これは東北工芸製作所の伝統を守りつつも新しいものを取り込んでいこうとする姿勢が表れたものである。

粘土原料供給企業等との連携により、ベスト供給から漆器製品の生産に至る製品供給の流れを作ることができ、統合開発^[18]の好例と言える。

高耐久性漆器の開発は東日本大震災後の科学技術振興機構の復興促進プログラムの中で行われ、科学技術振興機構コーディネーターによる事業化への後押し、東北センター、東北工芸製作所のメンバーとの産学官連携のプロジェクトとしても評価されるようになった。

2017年12月に東北工芸製作所は経済産業省より未来地域牽引企業に選定され、高耐久性漆器およびナノコンポジットの官民連携によるブランド化を進める形ができた。今後さらに、異業種の分野への参入や新たな価値を創出する商品へ繋げていきたい。近代工芸発祥の地「仙台」ならではの歴史と産学官連携の先駆けとして生まれた「玉虫塗」の技法を継承するためにも、今後も産学官連携を続けたい。

謝辞

本成果の一部はJST復興促進プログラムA-STEPシリーズ顕在化タイプ「粘土を含む保護層を付与した高耐久性漆器の開発」、JST A-STEPハイリスク挑戦タイプ(復興促進型)「無機有機ナノコンポジット高耐久表面処理技術の開発」と宮城伝統工芸『玉虫塗』への展開、および仙台市ものづくり中小企業製品開発補助金「無機有機ナノコンポジット高耐久表面処理技術を宮城県指定伝統的工芸品『玉虫塗』への展開」による成果である。庄子晃子先生(東北工業大学)、磯江準一氏(科学技術振興機構)、栗永規行氏、佐藤幸輝氏、遠藤光弘氏(仙台市産業局)、始澤達司氏(株式会社仙台山来)、佐浦康洋氏、木村真介氏(有限会社東北工芸製作所)、岩田伸一氏、田中理枝氏(産業技術総合研究所、当時)、鈴木麻実氏、外門恵美子氏、南條弘博士、石井亮博士、林拓道博士、相澤崇史博士、和久井喜人博士、中村考志博士、阿部真之氏(以上産業技術総合研究所)をはじめ開発に関わった多くの方々に謝意を表したい。

参考文献

- [1] 梶井紀孝, 江頭俊郎, 藤島夕代: 漆塗膜へのコーティング技術による耐候性向上の研究, *石川県工業試験場平成25年度研究報告*, 25-28 (2013).
- [2] 庄子晃子: 仙台・宮城デザイン史, *日本・地域・デザイン史II* (芸術工学会地域デザイン史特設委員会編), 美学出版, 東京, 235 (2016).
- [3] 佐浦みどり: ナノコンポジットコーティングによる高耐久性漆器～使える工芸の実現, *プラスチック*, 68 (2), 58-61 (2017).
- [4] 蛭名武雄: 柔軟な自立耐熱性フィルムクレーストClaiSt, *FC Report*, 23 (3), 109-112 (2005).
- [5] 蛭名武雄: 新規耐熱フィルム「クレーストClaiSt」の開発, *未発表材料*, 6 (5), 22-25 (2006).
- [6] T. Ebina: Development of clay-based films, *Chem. Rec.*, DOI:10.1002/tcr.201700085 (2018).
- [7] Y. Imai, A. Terahara, Y. Hakuta, K. Matsui, H. Hayashi and N. Ueno: Synthesis and characterization of high refractive index nanoparticle/poly(arylene ether ketone) nanocomposites, *Polymer Journal*, 42, 179-184 (2010).
- [8] 篠原宣康: ナノコンポジット・ハードコート材の開発, *有機・無機ナノ複合材料の新局面*, NTS, 東京, 122-130 (2004).
- [9] K. Kawasaki, K. Sakakibara, F. Mizukami and T. Ebina: Development and evaluation of novel radical-trapping sheets composed mainly of clay, *Clay Science*, 13, 217-224 (2008).
- [10] E. Pavlacky, N. Ravindran and D.C. Webster: Novel in situ synthesis in the preparation of ultraviolet-curable nanocomposite barrier coatings, *J. Appl. Polym. Sci.*, 125 (5), 3836-3848 (2012).
- [11] M. Alexandre and P. Dubois: Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials, *Mat. Sci. Eng. R.*, 28 (1-2), 1-63 (2000).
- [12] 塗装技術便覧編集委員会; *塗装技術便覧*, 日刊工業新聞, 東京, 191 (1956).
- [13] 蛭名武雄, 外門恵美子, 林拓道, 石井亮, 和久井喜人, 中村考志, 松川泰勝, 佐浦みどり: 有機化粘土/ポリマーコンポジットコーティングの伝統的漆器保護層としての検討, *第58回日本粘土学会講演要旨集*, 40-41 (2014).

- [14] 日本電色工業株式会社：色の許容差の事例, http://www.nippondenshoku.co.jp/web/japanese/colorstory/08_allowance_by_color.htm, 閲覧日2018-03-05.
- [15] 蓮沼宏：光沢とその測定, *金属表面技術*, 8 (5), 155-160 (1957).
- [16] 気象庁：日積算UV-B量の月平均値の数値データ表, http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/uvb_monthave_tsu.html, 閲覧日2018-03-05.
- [17] 鳥居一雄：機能性粘土素材の工業応用史, *機能性粘土素材の最新動向* (小川誠監修), シーエムシー出版, 東京, 151-189 (2010).
- [18] 蛭名武雄：粘土膜の開発-出会いの側面から見た本格研究シナリオ-, *Synthesiology*, 1 (4), 267-275 (2008).

執筆者略歴

蛭名 武雄 (えびな たけお)

1993年東北大学大学院工学研究科博士課程を修了し、通商産業省工業技術院東北工業技術試験所に入所、2度カリフォルニア大学サンタバーバラ校で在外研究し粘土を含む機能性材料の研究を行う。現在、産総研化学プロセス研究部門首席研究員。2004年以降粘土を主成分とする膜材料の開発に従事する。原料粘土の合成から応用製品の大量生産方法まで幅広く研究する。粘土膜の用途としては合成粘土を用いた透明フィルムとそれを用いた電子デバイス等がある。この論文では、保護層の材料開発と評価を担当した。



佐浦 みどり (さうら みどり)

1991年東北学院大学法学部を卒業し、民間銀行に入社、その後、1996年に東北工芸製作所に入社。現在、東北工芸製作所の常務取締役。営業、販売、商品企画を担当する。この論文では、塗料の特性についての情報交換、ユーザー評価および製品化を担当した。



松川 泰勝 (まつかわ やすかつ)

1981年東北高等学校を卒業し、同年に東北工芸製作所に入社。現在、東北工芸製作所の工場長。商品の生産と管理を担当する。この論文では、スプレーによる塗工手法および製品への保護層付与方法を確立した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント (内藤 茂樹、景山 晃：産業技術総合研究所)

この論文は昭和3年に世界恐慌以降の産業活性化のために設立された「商工省 (現在の経済産業省) 工芸指導所」が発明した深みのある外観を呈する漆器「玉虫塗」の技術、玉虫塗を仙台を代表する工芸品に育てた東北工芸製作所、合成スメクタイトの工業化を成功させ、用途開発を進めていた産総研東北センターの協働により完成させた新しい技術について述べています。玉虫塗の優れた外観を保ちながら、漆器の弱点である耐擦過性を著しく向上させた技術開発の経緯と得られた結果を纏めています。

伝統工芸の分野と先端科学・工学の分野とが連携して、従来製品の弱点や壁を突破して社会に新たな価値を提供する形の協創はまだ少ないと考えられるなかで実施された貴重な事例で、他の分野についても大きな示唆を与えることから、*シンセシオロジー*誌に相応しい論文です。

議論2 要素技術の全体像について

質問 (景山 晃)

今回の技術には (1) 製品性能を表す指標 (透明性、表面硬度、耐擦過性、耐紫外線性、耐食洗器性、密着性等)、(2) 保護膜用材料設計の際の変数 (有機粘土、紫外線硬化樹脂、溶媒、粘土成分の組成と分散粒径等)、(3) 塗工条件設定上の課題 (塗工時の粘度、被塗装物の形状に応じたペースト希釈技術、ゆず肌防止、室温硬化性等) に対する全体最適化技術が重要ですが、これらの全体像が分かる図表がないので、読者は理解しにくいと思います。そこで、特性要因図、例えば魚骨 (fishbone) 図または表形式を活用して全体像を示すことはできませんか。

回答 (蛭名 武雄)

ご指摘のように製品性能を表す指標が多く、またこれらも連関を持っているために、特性要因図を魚骨図の形で示すことにいたしました。これを図3として追加いたしました。

コメント (景山 晃)

図3を作成したことにより要素技術の全体像が分かりやすくなりました。今回の技術開発の大きな特徴である「美しい外観」を維持するためには、材料・組成面と塗工プロセスの両面からの検討が必要と考えられますので、これを意識した特性要因図を示すと東北工芸製作所の寄与部分が一層理解しやすくなると思います。

回答 (蛭名 武雄)

ご指摘ありがとうございます。確かに図をご指摘の通り直すことによって、東北工芸製作所の寄与部分を理解しやすくなります。そこで、「美しい外観」の枠内に2段表示で「透明性・つやの実現」を加え、これらを解決するには材料・組成面の検討と塗工プロセスの検討の2大区分を示し、その次のレイヤーに現在記載してある各要因を示しました。

議論3 研究開発の結果を示すデータの補強について

コメント (内藤 茂樹)

耐擦過性評価で UV 硬化性樹脂を鉛筆硬度で絞込み、粘性により UV7605B を選定した箇所において、UV 硬化性樹脂の化学構造の概要と科学的な理解を記載しておく方がよいと思います。

回答 (蛭名 武雄)

ご指摘の点、その通りだと思います。そのため、単に現象論だけでなく、科学的な記述を加えました。具体的には、検討した UV 硬化性樹脂はウレタンアクリレート樹脂であり、UV-7605B、UV-7640B、UV-1700B の分子量 / オリゴマー官能基数はそれぞれ 1100/6、1500/6-7、2000/10 である旨を記載し、樹脂の化学的特性を示しました。また、UV-7605B は 3 種類の樹脂の中で最も分子量が小さいため、粘性は低いこと、および、樹脂のオリゴマー官能基数が多い方が硬度が高くなると考えられるが、粘土樹脂混合系では最適な分子量およびオリゴマー官能基量があるものと考えられるとの記載を加えました。

コメント (景山 晃)

材料技術の最適化に関しては文章での論述に加えて、もう少しデータを図または表で示し、判断根拠を明確にした方がよいと考えます。また、有機化粘土の有機化剤として SPN、STN、SAN、SAN316 を評価していますが、これらは化学構造が異なる 4 級アンモニウム塩

で処理されていると考えますので化学構造の概要を示すことはできないでしょうか。

回答(蛭名 武雄)

ご指摘の通りですので、図5、図7、図8、図14を加え、データに基づく判断を行ったことを示すようにしました。また、四種類の有機化粘土は、それぞれ異なる4級アンモニウム塩で処理された粘土になっていますので、有機化剤と有機化剤の炭素数を表1として追加いたしました。

議論4 産業技術総合研究所と東北工芸製作所との役割分担について

コメント(景山 晃)

東北工芸製作所が参画していなければできていなかった部分があると思いますので、そこをもう少し明確にできませんか。一つは玉虫塗(漆器)の美しさ、色彩の深み、光沢感等いわゆるアートの領域であろうと思います。二つ目はいわゆる職人の技の領域です。いずれも定量化が難しいと思いますが、玉虫塗としての総合的な美感や塗工条件とのバランスから材料組成を決めるなどの判断はなかったのでしょうか。そのような状況があったのであれば幾つかの事例を記述する方が異なる強みを持つ組織間の深い連携を示せると思います。

回答(佐浦 みどり、蛭名 武雄)

ご指摘の通り、今回の開発は産総研の材料開発の強みと、東北工芸製作所のデザイン力・職人技の組み合わせでのみ実現したことを強

くアピールする文章が欠けていました。そこで、下記の文章を「2 高耐久性漆器開発のシナリオ」に加えしました。

「東北工芸製作所は従来刷毛塗で漆器を製作していたが、昭和30年頃から伝統的漆器としては先駆けてスプレーで行うようになった。現在、グラス、花瓶、皿等形状の異なる製品に対してスプレー塗工による生産を行っている。特に複雑形状の製品に全面に均一塗工することは高い技術が要求され、東北工芸製作所の長い経験に基づいた塗工技術が本開発に生かされた。本開発は、産総研のラボ内検討と、東北工芸製作所のサンプル塗工を繰り返し、最終的には玉虫塗としての総合的な美観や塗工条件とのバランスから材料組成が決定され成し遂げられたものである。」

議論5 伝統工芸と先端技術の連携・協奏の章について

コメント(内藤 茂樹)

この視点を記載することはこの論文の特異性を示すためのよい試みと思いますが、論文全体の中ではやや違和感がありますので、この部分は外に出し“Appendix(捕遺、参考)”として適切な位置に載せては如何ですか。また、理解されやすい文章への修正をお願いします。

回答(蛭名 武雄)

アドバイスの通り論文本体とは切り離し、Appendixとして、謝辞、引用文献の前に記載することとしました。また、理解しにくい記述を修正しました。

Additive manufacturing of ceramic components

—Towards innovation of ceramic industry—

Tatsuki OHJI

Aiming for innovative ceramic manufacturing technologies which enable creative and novel products, a national R&D project “High-Value Added Ceramic Products Manufacturing Technologies (HCMT)” has been initiated since 2014 as part of the Council for Science, Technology and Innovation (CSTI), Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), “Innovative design/manufacturing technologies” program in Japan. The project deals with two key technologies: additive manufacturing (AM) for realizing complex-shaped ceramic products and reducing their lead-times, and hybrid coating on 3D bodies for enhancing their functionality and durability. Following an overview of this project and a brief description on the general status of AM technologies, this article focuses on the R&D strategies and the latest achievements on AM of ceramics in this project. Among a variety of AM approaches, we employ two AM technologies for making ceramic green bodies; powder layer manufacturing (powder bed fusion or indirect selective laser sintering) and slurry layer manufacturing (vat photo-polymerization or stereolithography), because of their dimensional accuracy, shape-flexibility, density-adjustability, *etc.* The former is a dry forming process, and is suitable for large/porous components, while the latter is a wet one, being good for small/dense parts. In addition, intensive research efforts are being devoted to ceramic laser sintering (direct selective laser sintering) which enables concurrent forming and sintering (saving post-sintering-process). This paper describes several 3D prototype models produced for various application targets using the developed AM technologies, which are never attainable with conventional methods. The current issues and future perspective for AM of ceramics will be addressed and discussed as well.

Keywords: Additive manufacturing, ceramics, components, powder, slurry, powder bed fusion, stereolithography, laser sintering, ceramic industry

1 Introduction

Because of their unique and excellent material properties, ceramics are often used as key parts in many advanced products and systems in a variety of fields including manufacturing, energy, environments, IT, electronics, optics, bio-technologies, and transportation. It is also noteworthy that Japanese ceramic industries have maintained the world’s highest-level manufacturing technologies, which have brought about almost a half of the global market share of ceramic-related products, thanks to their incessant efforts for technological innovation.

Ceramic manufacturing process has been composed of several miscellaneous steps including powder preparation, mold making, granulation, forming, dewaxing, sintering, machining, finishing, *etc.* (Fig. 1, top). In addition, some of the steps such as granulation, dewaxing and sintering require a great deal of thermal energy, indicating higher ratios of labor and energy expenditures to the total production cost in comparison with those of other materials. As a result,

production from countries of lower labor and energy costs has been gradually increasing in recent years, along with their progress of manufacturing technologies. To maintain and consolidate the technological superiority and international competitiveness of Japan’s ceramic industry, it is now crucially required to develop innovative manufacturing technologies which enable us to produce creative and novel products of high value. For this purpose, a national R&D project “High-Value Added Ceramic Products Manufacturing Technologies (HCMT)” has been initiated since 2014 in the CSTI, SIP, “Innovative design/manufacturing technologies” program of the government of Japan.^{[1]-[3]} The HCMT project intends to integrate the above-stated miscellaneous steps of manufacturing process into the two key technologies, “additive manufacturing (AM)” and “hybrid coating (HC)” (Fig. 1, middle), which bring about many advantages in terms of production process as well as product performance. AM realizes complex-shaping of ceramic products and reduces their lead-times as will be described later, while HC provides better surface modification of products and enhances their functionality and durability,^[4] strengthening the international

Fellow, AIST 2266-98 Anagahora, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan E-mail: t-ohji@aist.go.jp

Original manuscript received July 20, 2017, Revisions received January 30, 2018, Accepted February 3, 2018

competitiveness of Japan’s ceramic industry. This article will first briefly outline the HCMT project and describe the general status of the current AM technologies; then it will focus on the R&D strategies and the latest achievements on AM of ceramics in this project.

2 Overview of HCMT project

The HCMT project deals with R&D on “product manufacturing (PM)” as well as AM and HC. Figure 2 shows the R&D items in each of AM, HC, and PM. In AM, powder-

layer manufacturing (PLM) and slurry-layer manufacturing (SLM) technologies are being developed for actualizing mold-free production of green (or formed) bodies of complex-shaped components, in addition to ceramic laser sintering (CLS) which realizes concurrent forming and sintering. HC focuses on hybrid aerosol deposition (HAD) and fine-particle thermal spraying (FTS) for highly adhesive coating onto 3D shaped substrates (including polymer and metal), enhancing functions and durability of products. Based on these two developed platforms, we try to establish manufacturing technologies for a variety of target products of high value in

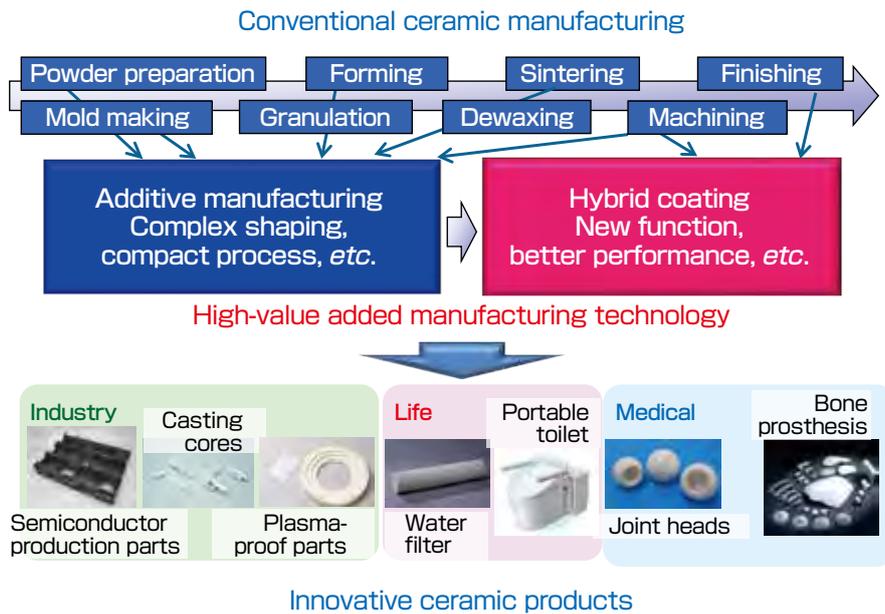


Fig. 1 Conventional ceramic manufacturing process and high-value added manufacturing technology to be developed

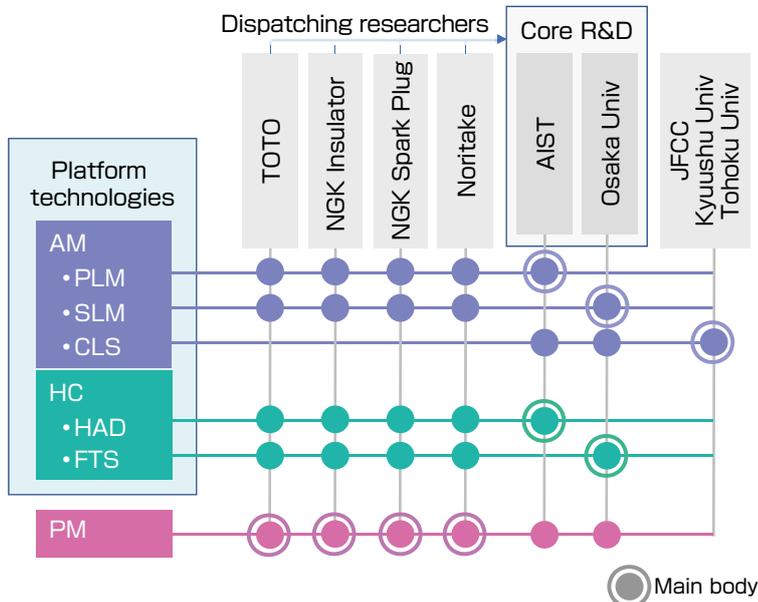


Fig. 2 R&D items and participating organizations of HCMT project

AM: Additive Manufacturing, PLM: Powder-Layer Manufacturing, SLM: Slurry-Layer Manufacturing, CLS: Ceramic Laser Sintering, HC: Hybrid Coating, HAD: Hybrid Aerosol Deposition, FTS: Fine-particle Thermal Spraying, PM: Product Manufacturing

PM. Examples are semiconductor production parts, plasma-resistant parts and ceramic cores of gas-turbine blades in the industrial field; water-purifying filters and portable toilets in areas related to everyday life; bone prostheses and ceramic heads for hip joints in the medical field (Fig. 1, bottom).

Figure 2 also shows the participating organizations of the HCMT project.^[1] The core R&D sites are placed at the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and Osaka University for intensive R&D using common research facilities and equipment. TOTO Ltd., NGK Insulators, Ltd., NGK Spark Plug Co., Ltd. and Noritake Co., Limited dispatch their researchers to core R&D sites for developing platform technologies in collaboration as well as product manufacturing for their own targets. These four companies are known as the “Morimura” Group which has established the foundation of modern ceramic industries of Japan since the beginning of the 20th century. In addition, Japan Fine Ceramics Center (JFCC), Kyushu University and Tohoku University are in charge of R&D on CLS.

3 R&D strategies for AM of ceramics

AM (additive manufacturing), also known as 3D printing, is a process by which a three-dimensional body is built through point, line or planar deposition of material typically using a print head, a nozzle, or another appropriate equipment. Objects are produced by not subtracting but adding material, based on computer-aided design (CAD) files or 3D model data, without using machining tools or forming dies and molds. The advantages include the following: (1) Realizing complex-shaped or integral-structured bodies which are never attainable by conventional molding approaches (this enables us to make totally new design of products enhancing their performance and durability), (2) Saving production time and cost due to a moldless process (this is particularly true for large variety-small amount production such as for new product prototypes and artificial bones and teeth), and (3) Saving raw materials since only a necessary amount is consumed while substantial amount of machining loss is generated in subtractive manufacturing, (4) Actualizing unique material structures including compositionally or functionally gradient layer textures. There are a variety of AM methods, which are classified into seven categories according to ASTM F2792-12a, “Standard Terminology for

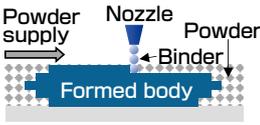
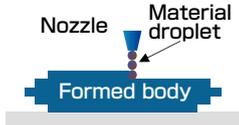
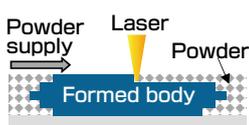
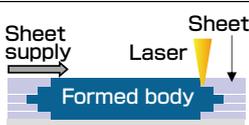
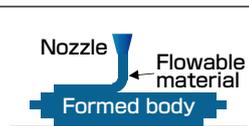
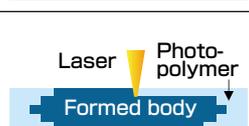
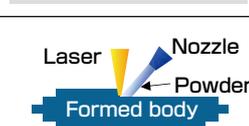
Additive Manufacturing Technologies.” Table 1 shows this classification with illustrations.

AM has been well developed in the field of polymers and already has been widely used for fabricating 3D products of this sort of material to such an extent that household 3D printers for resin have been commercially available for some time.^[5] Some key metal parts have also been successfully produced by AM;^{[6]-[8]} for example, GE Aviation has introduced the additive-manufactured metal fuel nozzles in combustion systems of aircraft engines that could not be made conventionally.^[8] The benefits include “25 % lighter weight than its predecessor part,” “the number of parts of the nozzle reduced from 18 to 1,” and “5 times higher durability due to more intricate cooling pathways and support ligaments.”

Regarding AM of ceramics however, though some complex-shaped 3D bodies have been prepared with relatively high precision using vat photo-polymerization (stereolithography), *etc.*,^{[9]-[18]} their product size has been generally limited, typically to a few centimeters or less, and the status is far from manufacturing technologies to be used in industries. Hence, comprehensive R&D efforts on manufacturing processes including powder preparation, lamination, and post-process suitable for ceramics are crucially required to grow AM of ceramics to the level of industrial application, and this has triggered the HCMT project.^{[1]-[3]}

When applying AM methods, which have been used in the fields of polymers and metal, to ceramics, because of the difficulty in directly obtaining sintered bodies due to their intrinsic nature such as high refractoriness and less-sinterability, it is general to produce green or formed bodies instead, which are to be sintered in a conventional furnace afterwards. For example, in powder bed fusion, laser heat melts polymer binder which is mixed with ceramic powder to form green bodies. The HCMT project employs PLM and SLM for forming green bodies as stated above; the former is categorized into powder bed fusion (also called “indirect selective laser sintering”) of the ASTM F2792-12a classification (Table 1), and the latter into vat photo-polymerization thereof. This is because these two approaches are known to be superior to the others in terms of homogeneous microstructure, good properties of

Table 1. Classification of additive manufacturing technologies, according to ASTM F2792-12a

Method	Outline
Binder jetting (Aka, 3D printing)	Liquid binder through a nozzle is selectively deposited to join powder materials. 
Material jetting	Droplets of build material through a nozzle are selectively deposited. 
Powder bed fusion (Selective laser sintering, PLM)	Heat, typically of laser, selectively fuses area of a powder bed. 
Sheet lamination (Laminated object manufacturing)	Sheets of material are bonded and selectively cut by laser. 
Material extrusion (Fused deposition modeling)	Flowable material is selectively dispensed through a nozzle or orifice. 
Vat photo-polymerization (Stereolithography, SLM)	Liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light, typically of laser. 
Directed energy deposition	Focused heat, typically of laser, selectively fuses materials as being deposited. 

the produced materials, wide shape flexibility, and high dimensional accuracy of the obtained products. In addition, material density (or porosity) can be adjusted over a wide range by combining these two approaches. Typical forming procedure of PLM is shown in Fig. 3. It consists of the following: (1) Mixing ceramic powder and polymer binder and putting them in the supply part, (2) Supplying the mixed powder to the forming stage and smoothing them using a squeegee (Fig. 3) or a roller to make a thin layer (typically ~0.1 mm), (3) Melting the binder of the desired part by scanning laser heat and bonding the ceramic powder, (4) Lowering the forming part by the formed layer thickness, (5) Repeating the above process of (2) to (4) for a 3D green body of a desired shape, and (6) Dewaxing and post sintering the obtained green body in a conventional furnace. PLM is a dry forming process itself and does not need a drying process of a wet body which often leads to undesired distortion and

deformation of a green body. This, therefore, is advantageous particularly in making large-scaled products. On the other hand, the lack of fluidity of powder results in low density of green and sintered bodies, indicating that PLM is suitable for producing porous bodies. For example, a previous study on similar AM approaches for alumina showed that the green and sintered densities are around 30 % and 40 %, respectively.^[19] It has been reported that the sintered density was substantially improved to 80 % or more when additional treatments of warm isostatic press and slurry infiltration on the green bodies were done; however, it is essentially important to increase the densities without such treatments in view of industrial application. For this purpose, in the HCMT project, we adjust and optimize the whole process from powder preparation (binder selection, powder mixture, powder fluidity evaluation, etc.) and lamination (powder supply, laser irradiation, etc.) to post-process (dewaxing,

sintering, *etc.*), resulting in the sintered density of 84 %, without the additional treatments, in a simple-shaped alumina plate (50 x 50 x 5 mm) for specific mixed powder and experiment conditions.^[20]

Figure 4 shows SLM's procedure, which includes the following: (1) Mixing fine ceramic powder and liquid photopolymer and putting them into the slurry supply, (2) Supplying the mixed slurry from the slurry supply on the substrate and smoothing them using a knife edge for forming a thin layer (typically several 10 μm), (3) Curing the photopolymer by laser light for the desired part, (4) Lowering the substrate by the formed layer thickness, followed by the same remaining processes as PLM (5, 6). SLM is a wet approach and therefore has characteristics totally opposite to PLM; due to the high fluidity, it is advantageous for producing dense parts of complex-shapes with high precision. It has been reported that careful selection of raw powder in SLM of alumina resulted in a high sintered density of 99 % with a bending strength of ~800 MPa.^[14] On the other hand, undesired deformations and distortions often are generated during the drying process, which leads to unsuitability for making large-sized products. Therefore, the HCMT project is aimed at avoiding such deformations and distortions by optimizing the processing conditions and modifying the forming apparatus. It is also critically important to disperse

the fine ceramic particles densely into the slurry, for example by using ceramic powder having bi-modal size distribution, with sufficient degassing for reducing sintering-shrinkage as well as obtaining dense bodies.

As stated above, it is extremely difficult to obtain sintered bodies by directly laser-sintering ceramic powder in AM. For example, Qian, *et al.*^[21] investigated direct-laser-sintering of alumina, and revealed three detrimental phenomena in the sintered body including glassy parts due to overheating/rapid cooling, unsintered parts due to heat lack, and cracks due to thermal stress. If it is realized successfully, however, it will bring enormous benefits of savings in the post sintering process which needs substantial cost and time. The HCMT project, therefore, also deals with direct laser sintering of oxide and non-oxide ceramics (CLS); the approach includes full-packing ceramic powder in a layer, optimizing laser irradiation conditions for critical temperature control, *etc.*

4 Platform technologies in PLM

For optimizing AM procedures of ceramics, there are a number of technical items that should be carefully examined and properly selected. This chapter discusses what sorts of technical items there are, how they are connected and correlated to each other and what should be considered and

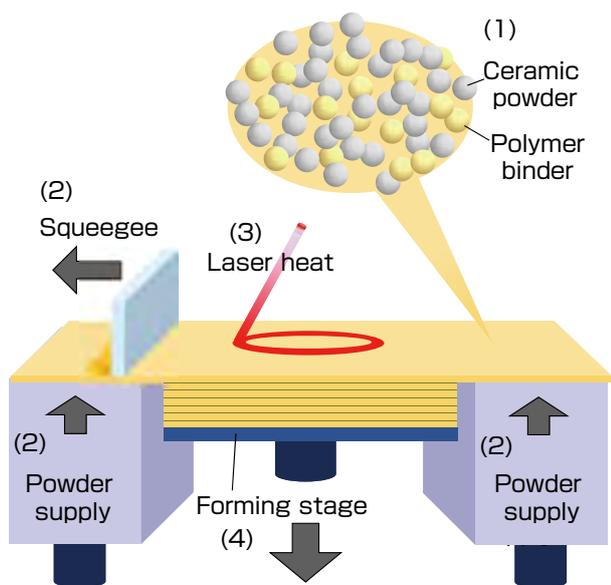


Fig. 3 Typical forming procedure of powder-layer manufacturing (PLM). The number in parenthesis corresponds to that of the description in the text.

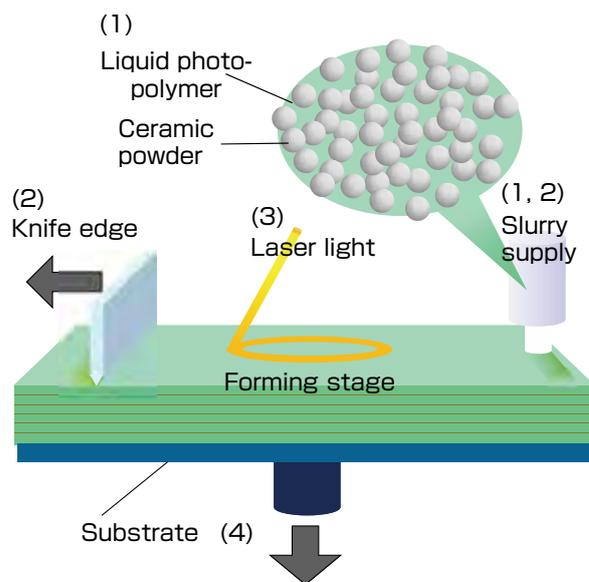
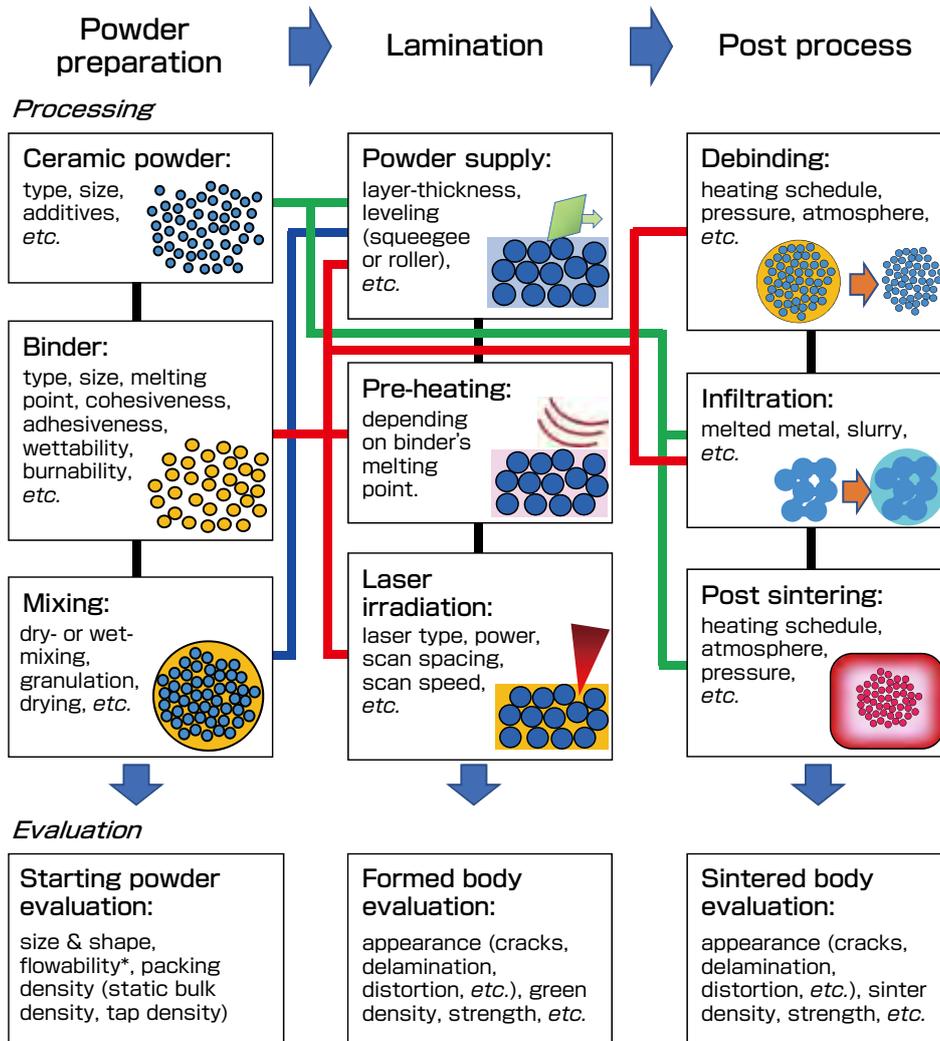


Fig. 4 Typical forming procedure of slurry-layer manufacturing (SLM). The number in parenthesis corresponds to that of the description in the text.

selected in each of the technical items in order to obtain sound products through an AM approach, taking an example of PLM.^[22] The total procedure of PLM can be roughly divided into three processes, including powder preparation, lamination (or PLM itself), and post process. Figure 5 shows technical processing items as well as evaluation items in each of these three processes.

In the powder preparation, ceramic powder is mixed with polymer binder to be melted by laser heat as described above by some appropriate method. The mixed powder used in PLM should have sufficient flowability, which is generally obtainable with a spherical shape and size of ~50 μm. Therefore, when the powder size is below 10 μm which is typical for so called fine ceramics, granulation process including spray-drying is frequently used to produce

spherical granules of such a size. The mixed powder is evaluated in terms of flowability including angle of repose, compression ratio, Hausner ratio as well as their size and shape, *etc.* Angle of repose is the angle measured in degrees between the horizontal plane and the steepest slope at which loose powder remains in place without sliding. Compression and Hausner ratios are given by $(D_t - D_b)/D_t$ and D_t/D_b , respectively, where D_t is the tap density and D_b is the static bulk density. When the flowability increases, these three indices all decrease. Suitability of powder to lamination of PLM is also examined in a simple preliminary powder test, where a lump of powder placed in the forming stage is leveled by using a squeegee. If the powder is flowable enough and not so cohesive, the surface becomes smooth without dimples and cracks, which appear with powder cohesive and less flowable, as shown in Fig. 6 (a) and (b),



*Flowability: angle of repose, compression ratio, Hausnerratio, preliminary powder test for lamination, *etc.*

Fig. 5 Technical processing items and evaluation items in starting powder preparation, lamination, and post-process

respectively. The powder flowability is also important for making a sufficiently filled powder layer. Because the layer is formed only by smoothing the powder by a squeegee, *etc.* without pressure, the powder density of the layer is almost equivalent to the static bulk density of the powder. It should be noted that since the mixed powder contains polymer binder as well, the density of ceramic powder itself is further lowered. It is, therefore, essentially required to have a well filled powder layer to get high densities of the resulting green and sintered bodies, which also leads to reduction of undesired deformation/distortion. It has been known that proper combination of coarse and fine powders leads to closer packing; however, powder flowability is generally degraded when containing fine powder.

In the lamination, the first step is formation of the powder layer, whose thickness is to be determined from the mixed powder size; it is preferably 1.5 to 5 times larger than the powder's maximum size. The thicker the layer is, the higher the production rate; however, it results in larger steps of side surfaces. The thickness also should be determined so that laser-heat is sufficiently transferred to the bottom of the

layer. Insufficient heat transfer causes a large temperature distribution thickness-wise, frequently resulting in warping and inter-layer delamination of a green body. Next, pre-heating mixed-powder is made before lamination, depending on the binder's melting point. For example, when employing wax-based binder whose melting point is 80–120 °C, temperature difference is usually small thickness-wise and successful lamination is easily attainable without pre-heating. On the other hand, for nylon-based binder with melting point of 150–200 °C, higher laser power or slower laser scan is usually required to melt it, which leads to a large temperature difference thickness-wise and frequent appearance of warping as described above. An example of warping which was observed in a green body with nylon-based binder is shown in Fig. 7 (a). Pre-heating the mixed powder closely to the melting point is effective for avoiding such warping. Laser irradiation conditions including laser type, power, scan spacing, and scan speed should be carefully chosen depending on the types of the polymer binder and ceramic powder, *etc.* An issue often occurring during the lamination is sliding of a green body embedded in powder and formation of a gap, as shown in Fig. 7 (b). This sliding is

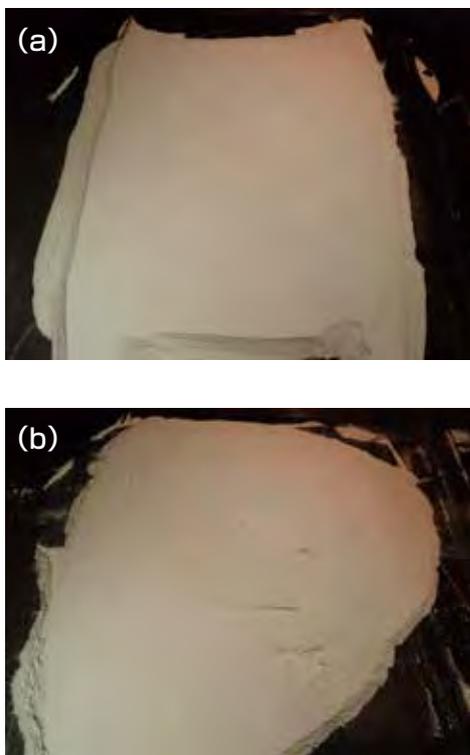


Fig. 6 Preliminary powder test for lamination, (a) Smooth surface with flowable powder, (b) Dimples and cracks with less flowable powder

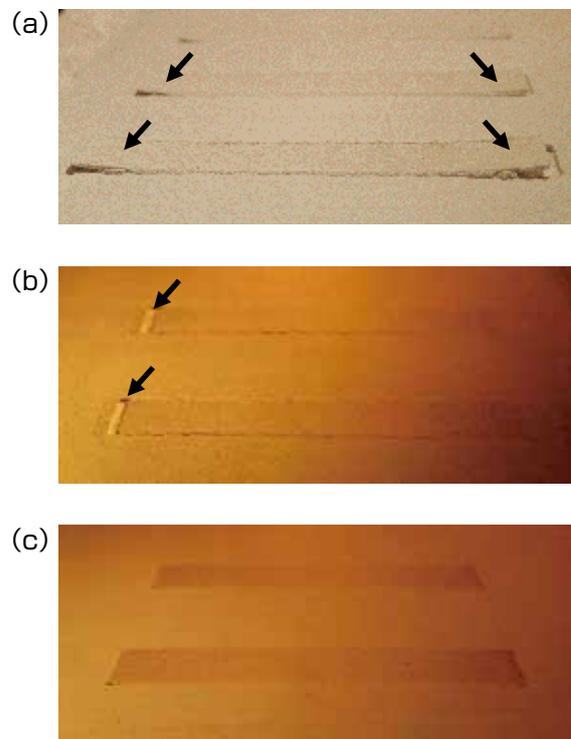


Fig. 7 (a) Warping observed in a green body with nylon-based binder, (b) Sliding of a green body and formation of a gap, (c) Successful formation of a green body embedded in powder. The body is rectangular-shaped with 7 mm width and 50 mm length.

made when the body is trailed by powder being re-coated on it and is more likely to occur typically in the following cases: (1) the binder is still heated and adhesive, (2) the squeegee moves too fast, or (3) the mixed powder is too flowable. Thus, it can be resolved by cooling the binder sufficiently, lowering the squeegee movement speed, or lowering the powder flowability. Figure 7 (c) shows an example of successful formation of a green body without the above issues (embedded in powder).

In the post process, first the binder is removed from the obtained green body by burning it out. The heating schedule, pressure, atmosphere, *etc.* for this process should be carefully selected so that undesired deformation and distortion would be minimized while the binder is melted and burnt out. Infiltration is often employed for densification. A typical example is siliconized silicon carbides (SiSiC), where melted Si is infiltrated through porous SiC-C green bodies produced by PLM, followed by reaction between Si and C for formation of secondary SiC and densification.^[23] Free carbon produced during burning the polymer binder can be used for this reaction. Slurry infiltration into green bodies also can increase green and sinter densities as already stated.^[19] In post-sintering, selection of conditions including heating schedule, pressure, atmosphere, *etc.* is crucial for obtaining sound sintered bodies, and knowledge and experiences so far on sintering of conventional green bodies are of great use for it. The green and sintered bodies are evaluated in terms of appearance (cracks, delamination, distortion, *etc.*), green/sinter densities, strength, and others.

As seen so far, many of the technical processing items are closely connected and correlated to each other; such close relations are expressed by solid lines in Fig. 5. It can be said that particularly powder preparation substantially affects many of the subsequent processes of lamination and post process. For example, the properties of the binder are critically important for the powder supply, pre-heating and laser irradiation of the lamination (melting point, cohesiveness, adhesiveness, wettability, *etc.*), while they are also crucial to the debinding and infiltration (where burnt binder is often used for reaction with infiltrated ones) of the post process (melting point, burnability, *etc.*). Thus, powder preparation is the most essential process in PLM, similarly to the cases of conventional ceramic processing. Sound

Table 2. Bulk density, Young's modulus, specific stiffness (Young's modulus/bulk density) and flexural strength of PLM-produced SiSiC and conventional one (molding approach).

	PLM	Conventional
Bulk density	3.0	3.0
Young's modulus (GPa)	340	340
Specific stiffness	113	113
Flexural strength (MPa)	290	320

products can be obtained only after all the technical items are properly selected and performed. It should be noted that the approach for examining and integrating the technical items into optimal AM technology described in this chapter is employed similarly in SLM and CLS.

5 Prototype models produced by AM

Taking advantage of the developed AM technologies, the HCMT project has manufactured several types of unique prototypes aimed at various target applications, some of which are described in this chapter. The first are stage models produced by PLM, which are anticipated as basic structures for ceramic exposure stages used in future semiconductor industries; some examples are shown in Fig. 8, in comparison with a conventional structure.^{[1][24]-[26]} A light and stiff exposure stage of large scale and complex shape is critically needed for next generation IC chip production where more accurate positioning and higher throughput will be strongly required. While the conventional rib structure produced by molding consists of simple walls (a), AM can make that having windows in the walls (b), and furthermore truss structures of light weight/high stiffness (c-e), which were not obtainable until now. The models of (b-e) are siliconized silicon carbides (SiSiC) which are obtained by Si infiltration into SiC-C green bodies followed by reaction-sintering, as described above. Their feature is high specific stiffness (Young's modulus/bulk density) and very little sintering-shrinkage, both of which are advantageous for application to large-sized exposure stage products. In order to fully recognize AM as industrial manufacturing technologies, it is crucially important for products produced by AM to have properties equivalent to those of conventional ones. Table 2 compares bulk density, Young's modulus, specific stiffness,

and flexural strength of PLM-produced SiSiC with those of the conventionally manufactured high-rigidity SiSiC.^[26] It should be noted that specific stiffness, which is the most important property for stage application, equals to that of the conventional ones. R&D should proceed for improving flexural strength to 320 MPa or higher.

One of the advantages of AM is its capability of producing complex-shaped parts directly from computer aided design files or data. Using computer simulation based on structural topology optimization techniques, it is now possible to optimize rib structures of stage models. Figure 9 shows an optimal rib structure obtained thereby in comparison with a conventional one, and a SiSiC exposure stage model (green body) produced by PLM based on that structure.^[22] The weight is reduced to half or less while maintaining the same vertical stiffness (the simulation neglects horizontal stiffness). The thinnest part of the model is approximately 3 mm in thickness.

Because of their chemical resistance, durability, and other properties, ceramic filters currently are used for various applications, one of which is in a water-purification device. The water paths of the filters are unidirectional straight channels, simply because they are produced by extrusion molding. Employing the AM techniques, however, enables us to make the channels more complicated, such as, for

example, spiral channels as shown in Fig. 10 (a).^{[1][26]} It will bring several potential benefits including increase of contact area between water flow and the channel, local control of water flow (flow velocity, laminar flow vs. turbulence, etc.) and others, which may lead to improving the performance and miniaturizing the device. Figure 10 (b) shows an alumina filter model produced by PLM, containing spiral channels of 3 mm diameter, which can be identified from the traces of the cut model.^{[1][22]} Similar filter models have been also manufactured by SLM, and the joining technologies for making a long-sized filter base are also under development.^[26]

Besides the above-stated ones, the HCMT project has manufactured several other types of prototype models, including artificial alumina knee joints whose internal surface has salient parts, which were difficult to make conventionally, to improve fixation into bones,^{[1][27]} bone prosthesis with uniform pore size and no closed pores which leads to sufficient infiltration of bone cells and dense bones,^{[1][27]} and ceramic cores for cooling systems of gas-turbine blades with remarkably shortened production time and wide flexibility of the structure design.^{[1][28]}

Notable progresses have been made in direct laser sintering of ceramics as well.^{[1][29][30]} A thin formed layer of alumina with high green density of 83 % has been successfully obtained by dewaxing and drying slurry layer containing

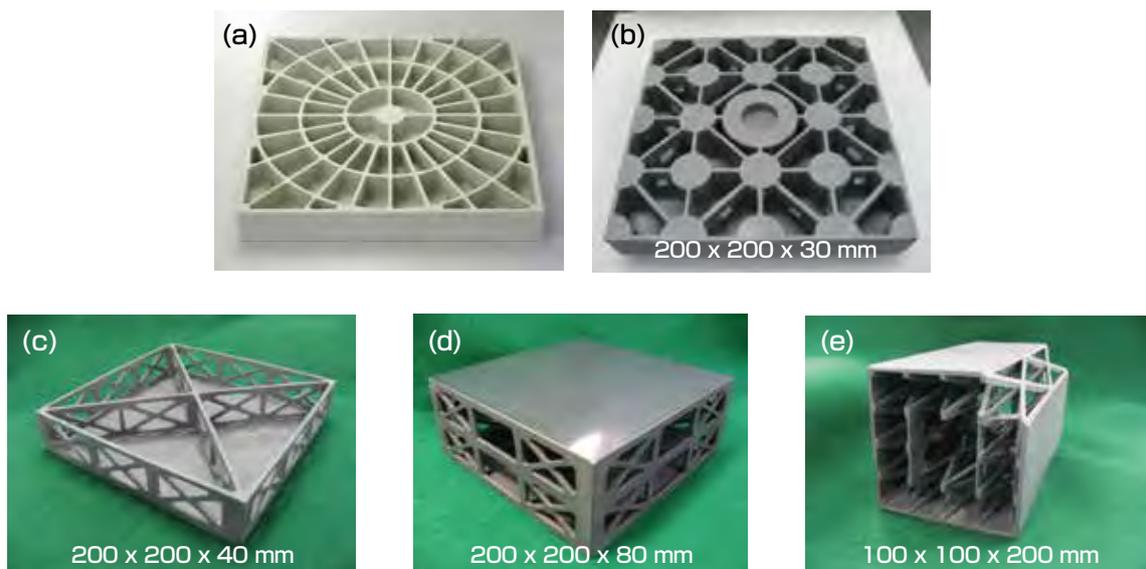


Fig. 8 SiSiC exposure stage models for IC chip production
 (a) Conventional rib structure produced by molding approach, (b) PLM-produced rib structure having windows in the walls, and (c), (d) & (e) PLM-Produced truss structure of light weight/high stiffness

optimal mixture of different sorts of alumina powder. Laser-irradiating this highly-packed green alumina layer has led to full densification without such glassy parts, unsintered ones, and cracks as reported previously.^[21] The laser absorption coefficient was adjusted by using a proper amount of material having a different coefficient from alumina.

6 Summary and future perspectives

This article describes the R&D strategies and the current achievements on AM of ceramics in the HCMT project, which has been initiated since 2014. The two AM technologies, PLM and SLM, which are advantageous in terms of dimensional accuracy, shape-flexibility, density-controllability, *etc.*, are being developed for producing ceramic green bodies. A variety of 3D prototype models for varied target products have been manufactured so far by using the developed AM technologies. Furthermore, intensive research efforts are being devoted to ceramic laser sintering. In order to ensure the developed technologies, 7 and 26 patents have been applied for on PLM and on the

HCMT project as a whole, respectively, as of March, 2018.

While AM of ceramics has numerous advantages as already stated, there are also several issues which should be taken into consideration when using it for industrial applications: (1) Profitable almost only for large variety-small amount products, (2) Facilities sometimes can be very expensive, requiring substantial initial costs, (3) Difficult to apply to ceramics, for which melting and solidification are not available in principle, (4) Currently usable only for producing green bodies, which are to be post-sintered in a conventional furnace, (5) Whether AM products give us the same properties as those of conventional ones is not certain, (6) Some restrictions apply to powder used, *e.g.*, the grains should be free flowing, requiring a preferably spherical shape and size of $\sim 50 \mu\text{m}$ when supplying them to the forming stage in some methods including binder jetting and powder bed fusion. In order to overcome these issues and establish AM as manufacturing technologies in ceramic industry, further R&D efforts are critically required in the future.

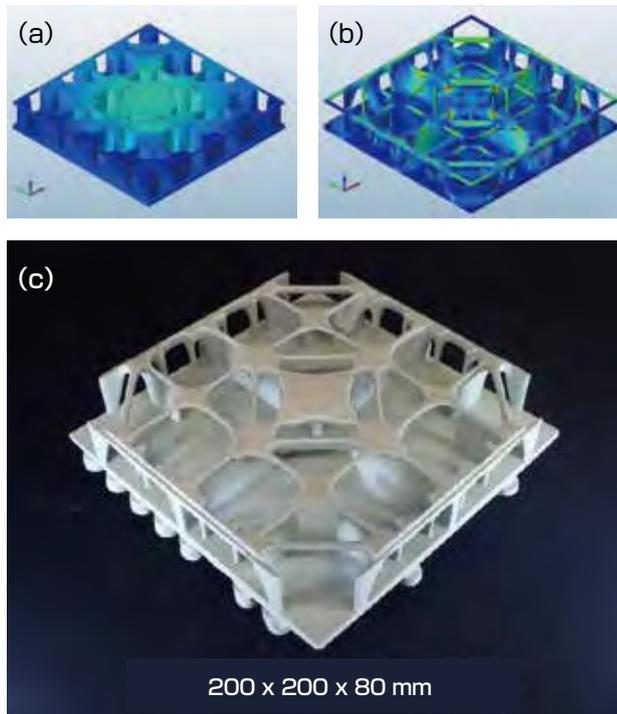


Fig. 9 (a) Conventional rib structure, (b) Optimal rib structure obtained by computer simulation based on structural topology analysis, and (c) an SiSiC exposure stage model (green body) produced by PLM based on the structure (b)

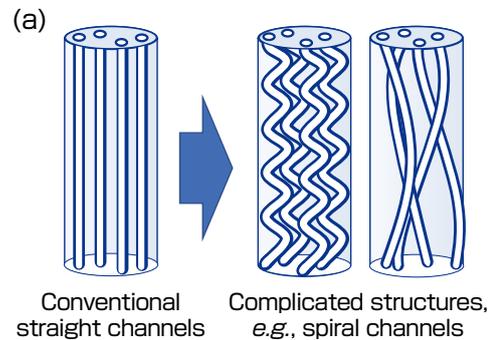


Fig.10 (a) Conventional water-purification ceramic filter has unidirectional straight channels, while the AM techniques enable more complicated channels, *e.g.*, spiral ones. (b) an alumina filter model produced by PLM, containing spiral channels of 3 mm diameter whose traces are observed in the cut model

Acknowledgement

This work was conducted as part of the “High-Value Added Ceramic Products Manufacturing Technologies” project supported by CSTI, SIP, “Innovative design/manufacturing technologies (managed by NEDO).”

The author, who serves as a leader of the AM group of this project, is most grateful to the participants for their courtesy of allowing him to describe their achievements in this article.

References

- [1] High-Value Added Ceramic Products Manufacturing Technologies, <http://www.hcmt.website>, accessed 2017-07-20.
- [2] K. Nonomura: Future of ceramics exploited by 3D printer, *Nikkei Monodukuri*, 742, 75–82 (2016) (in Japanese).
- [3] T. Ohji: Additive manufacturing of ceramics, *Bull. Ceram. Soc. Japan*, 52 (10), 683–686 (2017) (in Japanese).
- [4] J. Akedo and K. Shinoda: Overview: Hybrid coating technologies, *Bull. Ceram. Soc. Japan*, 52 (10), 687–691 (2017) (in Japanese).
- [5] S. Singh, S. Ramakrishna and R. Singh: Material issues in additive manufacturing: A review, *J. Manu. Proc.*, 25, 185–200 (2017).
- [6] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk and C. Emmelmann: Additive manufacturing of metals, *Acta Mater.*, 117, 371–392 (2016).
- [7] B. Jodoin, M. Brochu, J. Y. Hascoet and T. Palmer (eds.): Special focus on metal additive manufacturing, *J. Therm. Spray Tech.*, 26 (4), 581, 587–626 (2017).
- [8] GE Global Research: 3D Printing Creates New Parts for Aircraft Engines, <http://www.geglobalresearch.com/innovation/3d-printing-creates-new-parts-aircraft-engines>, accessed 2017-07-20.
- [9] N. Travitzky, A. Bonet, B. Dermeik, T. Fey, I. Filbert-Demut, L. Schlier, T. Schlordt and P. Greil: Additive manufacturing of ceramic-based materials, *Adv. Eng. Mater.*, 16 (6), 729–754 (2014).
- [10] A. Zocca, P. Colombo, C. M. Gomes and J. Gunster: Additive manufacturing of ceramics: issues, potentialities, and opportunities, *J. Am. Ceram. Soc.*, 98 (7), 1983–2001 (2015).
- [11] K. Monri and S. Maruo: Three-dimensional ceramic molding based on microstereolithography for the production of piezoelectric energy harvesters, *Sensors and Actuators A*, 200, 31–36 (2013).
- [12] S. Kiriwara: Stereolithography of ceramic components: fabrication of photonic crystals with diamond structures for terahertz wave modulation, *J. Ceram. Soc. Japan*, 123, 816–822 (2015).
- [13] S. Kiriwara: Free form fabrication of ceramics components by three-dimensional stereolithography, T. Ohji and M. Singh (eds.): *Engineered Ceramics: Current Status and Future Prospects*, 330–351, Wiley, Hoboken, NJ, USA (2016).
- [14] S. Kiriwara: Stereolithographic additive manufacturing of ceramic components with functionally modulated geometries, presented at 40th Int. Conf. Adv. Ceram. Compo., Jan. 24–29, 2016, Daytona Beach, FL, USA.
- [15] M. Schwentenwein and J. Homa: Additive manufacturing of dense alumina ceramics, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 12 (1), 1–7 (2015).
- [16] T. Chartier, C. Dupas, M. Lasgorceix, J. Brie, E. Champion, N. Delhote and C. Chaput: Additive manufacturing to produce complex 3d ceramic parts, *J. Ceram. Sci. Tech.*, 6 (2), 95–104 (2015).
- [17] G. V. Franks, C. Tallon, A. R. Studart, M. L. Sesso and S. Leo: Colloidal processing: enabling complex shaped ceramics with unique multiscale structures, *J. Am. Ceram. Soc.*, 100 (2), 458–490 (2017).
- [18] M. Ahlhelm, E. Schwarzer, U. Scheithauer, T. Moritz and A. Michaelis: Novel ceramic composites for personalized 3D structures, *J. Ceram. Sci. Tech.*, 8 (1), 91–99 (2017).
- [19] K. Shahzad, J. Deckers, J.-P. Kruth, and J. Vleugels: Additive manufacturing of alumina parts by indirect selective laser sintering and post processing, *J. Mater. Proc. Tech.*, 213 (9), 1484–1494 (2013).
- [20] M. Hotta, A. Shimamura, N. Kondo and T. Ohji: Powder preparation for indirect selective laser sintering of alumina-binder composite powder, presented at 40th Int. Conf. Adv. Ceram. Compo., Jan. 24–29, 2016, Daytona Beach, FL, USA.
- [21] B. Qian, L. Taimisto, A. Lehti, H. Piili, O. Nyrrhilä, A. Salminen and Z. Shen: Monitoring of temperature profiles and surface morphologies during laser sintering of alumina ceramics, *J. Asian Ceram. Soc.*, 2 (2), 123–131 (2014).
- [22] N. Kondo, M. Hotta, A. Shimamura and T. Ohji: Development of powder layer manufacturing technology for ceramics, *Bull. Ceram. Soc. Japan*, 52 (10), 700–702 (2017) (in Japanese).
- [23] M. Ahlhelm, H.-J. Richter and K. Haderk: Selective laser sintering as an additive manufacturing method for manufacturing ceramic components, *J. Ceram. Sci. Tech.*, 4 (1), 33–40 (2013).
- [24] M. Ando: Development of the ceramic parts by “3D-printing,” Ceramic Expo, April 25–27, 2017, Cleveland, OH, USA.
- [25] M. Ando, T. Ide and T. Tokizono: Development of ceramic parts for semiconductor manufacturing equipment using powder layer manufacturing, *Bull. Ceram. Soc. Japan*, 52 (10), 716–718 (2017) (in Japanese).
- [26] Y. Sato and Y. Fuji: Development of ceramic filters using slurry layer manufacturing and hybrid coating, *Bull. Ceram. Soc. Japan*, 52 (10), 710–712 (2017) (in Japanese).
- [27] M. Sato and J. Otsuka: Development of custom-made artificial bone using slurry layer manufacturing, *Bull. Ceram. Soc. Japan*, 52 (10), 713–715 (2017) (in Japanese).
- [28] A. Kawahara: Manufacture technology development of the ceramic core by the 3D printer, *Bull. Ceram. Soc. Japan*, 52 (10), 707–709 (2017) (in Japanese).
- [29] T. Kimura and S. Suehiro: Development of laser sintering process of oxide ceramics, *Proc. 29th Fall Meeting Ceram. Soc. Japan*, 3T05 (2016).
- [30] T. Kimura, H. Miura and T. Goto: Development of ceramic direct manufacturing technologies using laser, *Bull. Ceram. Soc. Japan*, 52 (10), 692–695 (2017) (in Japanese).

Author

Tatsuki OHJI

Joined AIST in 1983, and currently is Fellow thereof since 2017. BS and MS in mechanical engineering from Nagoya Institute of Technology and Ph. D. in inorganic materials engineering from Tokyo Institute of Technology. Has authored more than 350 peer-reviewed papers and 20 book chapters, and has edited more than 40 books and conference volumes. Research interests include mechanical/physical properties, microstructural control, and novel processing of ceramics and related materials. Fellow of American Association for the Advancement of Science (AAAS), American Ceramic Society and ASM International, and Academician of World Academy of Ceramics. Currently serves as Governor of Acta Materialia Inc., Vice President of the Ceramic Society of Japan, and Editor in Chief of *Ceramic International* and *Journal of the American Ceramic Society*.



Discussions with Reviewers

1 Overall

Comment (Toshimi Shimizu, AIST)

This “report” describes research centered on additive manufacturing (AM), of which the author serves as the leader, of the R&D project on high-value added ceramic products manufacturing technologies (HCMT) of the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP). It is a focused presentation of the technological platform of powder-layer manufacturing (PLM), an AM technology for making ceramic products that have uneven thickness or complex shapes that are difficult to process, and of prototypes made from the technology. It is a very effective presentation in understanding the processes that form PLM and the interconnection of the related technological elements. As a report that presents an example of development of technology that has practical value that is expected to lead to innovation, it is suitable for *Synthesiology*.

Comment (Akira Kageyama, AIST)

Of ceramic technology and industry in which Japan has excelled, this report summarizes the process by which the HCMT project was started as a national strategical project, and how it succeeded, against the decline of Japan’s world market share along with the improvement of technological level of developing countries. It presents the selection of elemental technologies and integration of each technology, focusing on AM as technology that forms ceramic products of complex shapes that were difficult to make with the conventional technology. It is also worth reading as a report on management of R&D in which collaboration and role assignment was necessary among the participating universities, AIST, and companies. Of the necessary technologies covering a wide range, PLM is selected, and it describes in detail, within the allowed range of disclosure, each of the elemental technologies such as the optimization of raw material powder, which is bound by confidentiality. R&D discussion is presented in an easy to understand manner, and it is well worth being printed in this journal.

2 Content, structure, research scenario (draft report)

Comment (Toshimi Shimizu)

The first draft that was submitted as a research paper and the

second draft that was submitted as a report did not satisfy the qualities that are required of *Synthesiology*. For a writing to be accepted, it needs to cover seven topics: 1. research objective, 2. research target and relationship to society, 3. scenario, 4. selection of elements, 5. relationship among elements and their integration, 6. evaluation of results and future perspectives, 7. originality. The first and second draft did not cover these. Specifically, 1) for 3. scenario, the scenario of hypothesis was not rationally described; 2) for 5. relationship among elements and their integration, the relationship among elements and integration were not rationally described using scientific words; 3) for 7. originality, much information that was already publicly known was presented and it lacked originality. Therefore, its content as it was unfortunately did not apply to a research paper or a report of *Synthesiology*, which need to focus on the research scenario and specific research processes. The draft covered the whole R&D of AM, and lacked depth in its description of the scenario and hypothesis, and the relationship and integration among elements.

The reviewer suggests focusing on PLM technology actively being promoted at AIST as a revision of the content of the report. How about using a diagram which would help the reader to understand and describing in detail each elemental technology related to PLM, how they are correlated, and the process by which they are integrated and optimized?

Answer (Tatsuki Ohji)

According to your advice, I revised the text, and in Chapter 4 “Platform technologies in PLM,” I have categorized and described in detail each elemental technology of the three processes of powder preparation, lamination, and post process, have presented the relation to other elemental technologies using a diagram (Fig. 5). Especially with strongly related elemental technologies, they were emphasized in the diagram, and the process by which they were integrated and optimized was described. Evaluation items for each process are also considered. Furthermore, in Chapter 5 “Prototype models produced by AM,” the subject was narrowed down to a ceramic stage model and a ceramic filter model attained by PLM, and other prototype models were simply described along with references.

Comment (Akira Kageyama)

The first draft was submitted as a research paper, and after a review, additions were made, and the manuscript was resubmitted as a report. In the second draft, the significance of the technologies and their positions are easier to understand as more detailed descriptions were added of the R&D that was bound by confidentiality. However, as a report, it needs to strongly state how technology is introduced to society and how it is to be useful, but this point is not expressed clearly. I suggest a revision on this line. If you rearrange and reorganize the structure, the way of expression, and figures and tables, the point of the report will become clear. For example, a report according to the editorial policy needs to present 1) the aim, 2) the process of development (the course to the goal), and 3) the outcome. Keeping this in mind, the report can be arranged to include 1) the global state of ceramic industry and the situation that Japan faces (situation analysis), 2) the issues that need to be solved in order to overcome the situation, and why the issues were chosen (problem analysis), 3) what was decided technically and in management in order to clear or solve the issues (decision analysis), and 4) the results of R&D and management executed in this project with the above-mentioned 1) to 3) in mind (output and/or outcome). The manuscript already includes these aspects, so why not revise the whole structure and try to make it simpler and clearer?

The manuscript is also rather long. In the second draft, as, taking PLM as an example, the relationship and integration of elemental technologies are described, couldn’t the section

concerning other R&D related to AM be reduced or deleted by stating that “similar integration of elemental technologies is attempted as PLM”? It is also useful to use references. I also suggest narrowing down examples presented in the Chapter 5 “Prototype models produced by AM.”

Answer (Tatsuki Ohji)

As you pointed out, I have revised the manuscript as follows: The global state of ceramic industry and the situation of Japan, and the significance of the HCMT project in order to break through the situation was described in Chapter 1 “Introduction”; R&D under this project and the managerial system was written in Chapter 2 “Overview of HCMT project”; the technical strategy of AM was summarized in Chapter 3 “R&D strategies for AM of ceramics” and Chapter 4 “Platform technologies in PLM”; and the outcomes up to now were presented in Chapter 5 “Prototype models produced by AM.”

As I have responded to the previous comment, I have focused on the prototype model of PLM in Chapter 5 “Prototype models produced by AM,” and have greatly reduced the descriptions of technologies other than PLM in Chapter 3 “R&D strategies for AM of ceramics,” and have added a sentence that you suggested to the end of Chapter 4 “Platform technologies in PLM.”

3 Technical terms and drawings (figures)

Comment (Toshimi Shimizu)

The readers of *Synthesiology* are not specialists of ceramic technology, but general engineers, researchers, and readers. For the engineers not related to the ceramic field, it would be difficult to understand the various and numerous technical terms that are used throughout this report. Since the report is written assuming that the technical terms are understood, understanding of the content by the general reader would not be deepened with such difficulty. Lack of unity of terms can also be seen.

The shortest course to explain technical terms is to use

drawings. Extreme examples are the processes of shaping the raw material, sintering, and the post process, which are nothing special for engineers of the field, need to be explained from the basics by using drawings to the general reader and engineers from other fields. Regarding classification of AM, and technological explanation of PLM and slurry layer manufacturing (SLM), how about organizing technologies with overviews and characteristics by using drawings?

Answer (Tatsuki Ohji)

As you pointed out, I have used drawings in Table 1 “Classification of AM,” and diagrams (Figs. 3, 4) of PLM and SLM of the revised (final) draft. In the diagrams on PLM and SLM, I have used numbers that correspond to explanations in the text. In the related diagram of elemental technologies (Fig. 5), I have also used simple illustrations. Concerning technical terms, they have been unified to the most general terms that are used in the materials field.

4 Intellectual properties (draft)

Comment (Akira Kageyama)

I imagine that there are many intellectual properties generated through this project. Couldn't you write about this in the last chapter, Chapter 6 “Summary and future perspectives”? For example, it can be a phrase like “so and so number of patents on PLM, and so and so number of patents on the HCMT project as a whole have been filed.” Intellectual property is one of the important outcomes of R&D, and is a yardstick to measure international competitiveness of technology.

Answer (Tatsuki Ohji)

As you indicated, I have added the following sentence to Chapter 6 “Summary and future perspectives”: “In order to ensure the developed technologies, 7 and 26 patents have been applied for on PLM and on the HCMT project as a whole, respectively, as of March, 2018.”

放射性廃棄物処分の安全規制と地球科学

— 処分場の立地基準への研究成果の橋渡し —

伊藤 一誠

放射性廃棄物処分事業の安全規制行政に対して、産総研は主に処分場立地の適性を評価するための調査・評価技術に関する研究を実施し、得られた知見を規制機関に受け渡すことによって技術的支援を行ってきた。規制機関では、高レベル放射性廃棄物処分に先立ち、低レベル放射性廃棄物の中で相対的に高い放射能レベルを持つ廃棄物の中深度処分における安全規制基準と審査ガイドの整備が行われている。ここでは、中深度処分の安全規制に対する産総研の研究成果の活用状況を紹介するとともに、今後整備される高レベル放射性廃棄物処分の規制に研究成果を活用するために、中深度処分と地層処分との安全確保における技術的課題の相違点、中深度処分の規制基準と資源エネルギー庁が公表した「科学的特性マップ」の地質特性分類における基準との比較等を行って、課題の抽出した事例を紹介する。

キーワード: 放射性廃棄物処分、安全規制、立地、許可基準規則、地質事象

Earth science in safety regulations of radioactive waste disposal

— Translation of scientific research to site selection criteria —

Kazumasa ITO

AIST has been supporting scientific aspects of the Nuclear Regulatory Authority (NRA), mainly in regard to the regulation of site selection for radioactive waste disposal. NRA is constructing regulation criteria and examination guides for the disposal of intermediate-level radioactive waste (ILW) at intermediate depth prior to the geological disposal of high-level radioactive wastes (HLW). This paper introduces some examples of utilizing AIST's R&D results for regulation of ILW disposal. This paper also presents examples of future tasks by analyzing the differences between the ILW and HLW disposal, and the differences between ILW regulation and criteria in the "Nationwide Map of Scientific Features for Geological Disposal" to categorize areas based on favorability for HLW disposal.

Keywords: Radioactive waste disposal, safety regulation, site selection, permission standards, geological event

1 はじめに

産総研は、2001年の産総研発足から当時の深部地質環境研究センターにおいて、高レベル放射性廃棄物の地下深部埋設処分（以下、地層処分と言う）の安全規制に対して、科学的知見の蓄積と規制機関への橋渡しを目的とした安全規制支援研究を開始した。地層処分の安全規制は、同2001年に設置された原子力安全・保安院の所掌施策であった。以降、規制機関の体制の変化等はあるものの、放射性廃棄物の処分に関する研究機関としての支援は活断層・火山研究部門において継続している。一方、地層処分事業を進めるために、資源エネルギー庁が主導している研究開発の一部は、地圏資源環境研究部門が実施している。

放射性廃棄物処分に関しては、2012年原子力規制委員会設置後、地層処分の規制基準策定よりも、今後廃炉が予定されている原子力発電所で生じる、長半減期核種に

よって汚染された炉内構造物の地下への埋設処分（以下、地層処分と区別し、中深度処分と言う）に対する安全規制が進められ、原子力規制委員会において許可基準規則、審査ガイド等の整備が行われている。

中深度処分は、地下への放射性廃棄物埋設という点では地層処分と共通している。したがって、産総研がこれまで実施してきた地層処分の安全規制支援研究の中で、火山、断層等、処分場の立地に関する成果が活用されることが期待されたが、結果として、断層活動に関する成果は直接活用されることはなかった。

一方、地層処分事業は、2000年の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（最終処分法）の成立とそれを受けた実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）の設立後、2002年から全国の市町村を対象とした立地調査の第一段階である文献調査地区の公募を

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7
Geological Survey of Japan Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba
305-8567, Japan E-mail: kazumasa-ito@aist.go.jp

Original manuscript received September 4, 2017, Revisions received May 6, 2018, Accepted May 7, 2018

行ってきたが、実際に文献調査に着手できていない状況である。そのため、政府は特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針を転換し、立地に関しては科学的有望地を提示し、調査への協力を自治体に申し入れるという方針を打ち出した（2015年5月22日閣議決定）。そして地層処分への地質学的適否の観点での要件・基準を提示し、既存の全国レベルで得られる地質データに基づいて2017年7月28日に全国を対象として、地層処分を行う際に考慮すべき特性の抽出と、日本全国におけるそれらの分布を俯瞰するための科学的特性マップを公開した。

今後、産総研地質調査総合センターの安全規制支援研究は、規制機関である原子力規制委員会・原子力規制庁に対して、地層処分の許可基準規則及び審査ガイドに活用できる研究成果を橋渡しする必要がある。そのため、この論文では中深度処分への研究成果の活用の総括に加え、科学的特性マップを参照しつつ、中深度処分と地層処分における安全規制の共通点と相違点を考察することで、今後の地層処分の安全規制における研究課題及び研究成果の規制機関への橋渡しを円滑に行うための成果の発信に関する提案を行いたい。

2 放射性廃棄物埋設処分の分類と規制の関与

2.1 放射性廃棄物の分類と処分方法

原子力発電によって生じる廃棄物の処分は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下、炉規法と言う）において、「政令で定める放射性物質についての放射能濃度が人の健康に重大な影響を及ぼすおそ

れがあるものとして当該放射性物質の種類ごとに政令で定める基準」によって第一種（高レベル）、第二種（中・低レベル）放射性廃棄物埋設に分類されている。

高レベル放射性廃棄物は、主に使用済核燃料を再処理し、ウラン、プルトニウムを分離して残った核種をガラスとともに固化したもの（ガラス固化体）であり、中・低レベル放射性廃棄物は、原子力発電所の炉内構造物や燃料被覆管、制御棒等の放射化金属及びコンクリート構造物、あるいは再処理施設やMOX燃料加工施設から発生する放射性廃棄物のように、比較的放射能濃度が高いものから、建物の換気、洗濯廃液、使用済みのペーパータオル、古い作業衣や手袋等の放射能濃度が低いものまでが含まれる。

放射性廃棄物の処分方法は、地表近傍にトレンチやピット等を掘削して廃棄物を保管する浅地中処分、トンネル等の地下利用深度よりも深い深度である100 m程度の深度に坑道を掘削して処分する中深度処分、より大深度である深度300 m以深に処分する地層処分に分類される。ここで、地層処分に該当する廃棄物は、高レベル放射性廃棄物及び中・低レベルの中で、MOX燃料加工施設等で生じる長半減期の超ウラン元素を含む廃棄物である。中深度処分は、原子力発電所の炉内構造物等、中・低レベル放射性廃棄物の中でも比較的放射能濃度が高いものが対象となる等、放射性物質の半減期や濃度に応じた処分方法が適用される。図1に、放射性廃棄物ごとの処分深度を模式的に示す¹⁾。

2.2 廃棄物埋設事業における規制の関与

放射性廃棄物の処分事業は、処分場の立地、設計及び

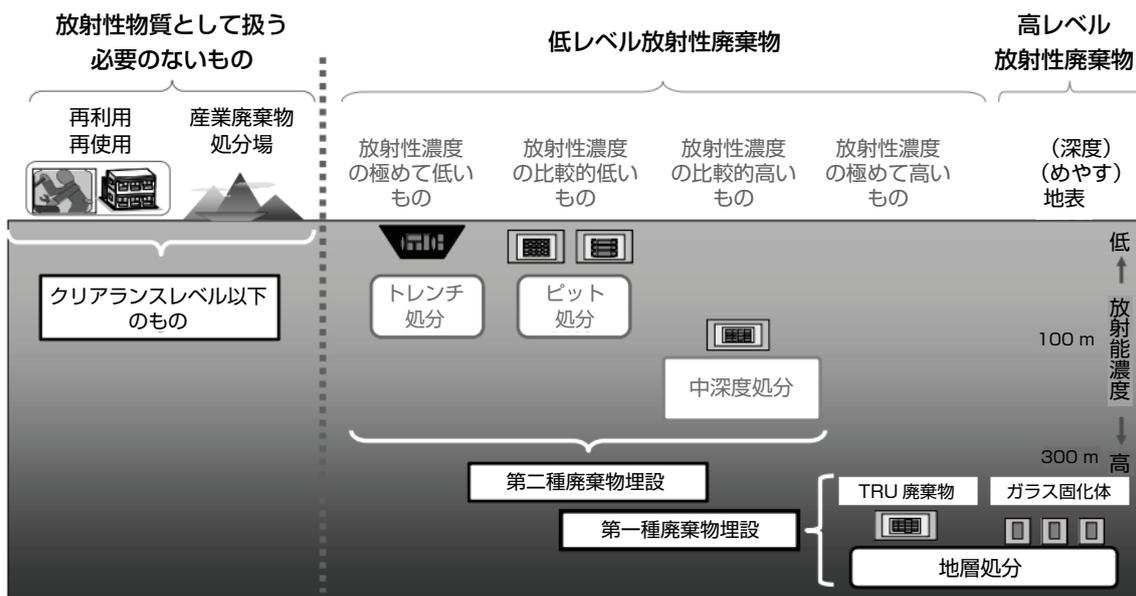


図1 放射性廃棄物の分類と処分概念
第一種、第二種は放射能レベルによって分類されている¹⁾。

将来的な被ばく線量を評価するための安全評価、地下埋設施設の建設、廃棄物の受入及び埋設、坑道の埋め戻し、保全、事業の廃止の段階によって構成される。図2に、原子力規制庁において検討されている中深度処分の各事業段階における規制の概要を示す^[2]。制度上、規制が直接関与する期間は、事業者の基本設計に対する事業許可の審査から開始され、埋設事業の終了である事業の廃止措置の終了確認によって終了する。この中深度処分の場合おおむね300～400年が想定され、廃止措置が終了した段階で、事業者は解散し規制期間が終了することが予定されている。

中深度処分の対象となる炉内構造物等の廃棄物及び地層処分における高レベル放射性廃棄物の放射能濃度の経時変化を図3に示す^[1]。両者とも規制期間終了時である数百年後には初期放射能濃度の1/1000程度に減衰する。しかし、放射能濃度が初期濃度の1/100万に減衰するの

に要する時間は、高レベル放射性廃棄物では1000万年程度、中深度処分対象の炉内構造物等の廃棄物においてもおおむね10万年程度を要する。したがって、中深度処分及び地層処分の規制基準においては、規制期間終了後も放射線障害(被ばく)が生じないことを保証するための規則が必要となる。それらの規則は、後述するような火山活動、断層活動等の影響による核種の漏洩を回避するための処分場の立地選定と、核種の閉じ込め機能と移行遅延機能を持つ処分容器や緩衝材等から構成される人工バリア、周辺岩盤に相当する天然バリアから構成される処分場の設計によって担保される必要がある。

原子力規制委員会・原子力規制庁は、中深度処分に関して、処分事業者が遵守しなければならない事項を項目ごとに示した許可基準規則、技術的要件を満足する内容の例を示す規則の解釈、審査官が事業者の調査・評価結果の妥当性を確認するために、技術的要件への適合性を確

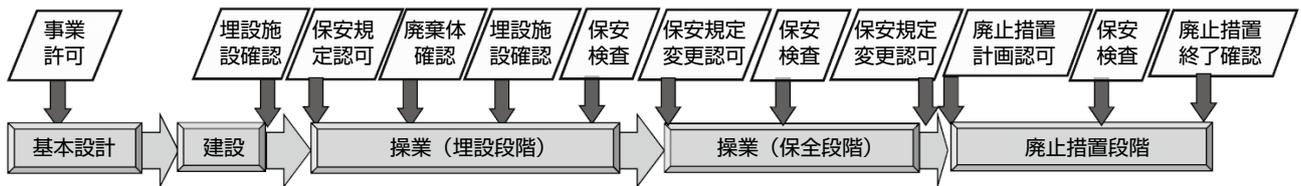


図2 放射性廃棄物処分事業における規制として講ずべき措置の例
廃止措置までの期間は300～400年程度を想定^[2]

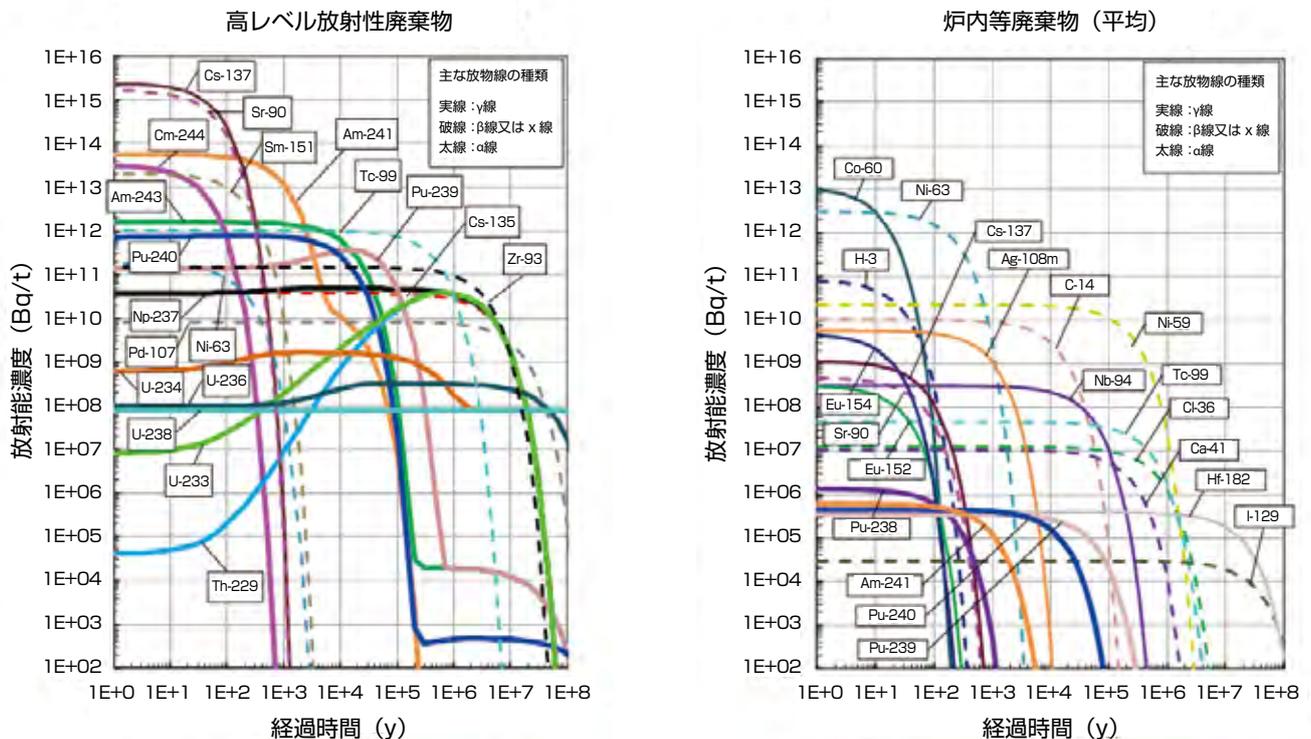


図3 原子力規制庁作成による放射性廃棄物の放射能濃度と時間の関係 ([1]より抜粋)

認するための具体的な調査・評価手法の例を示した審査ガイドの整備を行っている。例えば、許可基準規則骨子案では、処分場の立地に関しては、火山活動、断層活動、深度の確保、天然資源及びその他考慮すべき事象が規制の要求項目としてあげられ、一例として、火山活動に関しては「廃棄物埋設地は将来にわたって火山活動による地層の著しい変動が生ずるおそれのない区域に設置しなければならない」と規定されている。解釈では「将来」とは少なくとも10万年であること、「地層の著しい変動が生ずる恐れがない」とは、第四紀における活動履歴を評価することによって火道、岩脈等の記録が存在しないことが示されていることなどがある。今後少なくとも10万年間にわたって、火山活動が想定されないことを、事業者が証明すべきとされている^[3]。

また、審査ガイドにおいては、評価・調査の方法として、調査範囲として廃棄物埋設地及び施設から15 kmの範囲、調査方法としてデータベース等による文献調査、地形調査、地質調査を行うことに加え、将来にわたる火山活動の可能性が科学的根拠を持って否定できる例が示されている^[4]。

3 既往研究成果と中深度処分の安全規制

3.1 規制期間終了後に安全が確保されるべき期間の設定

前章に示したように、中深度処分によって埋設される廃棄物中の放射性物質の濃度は長期にわたり減衰しない一方、規制機関が定期的な評価等によって直接関与できる期間は、処分事業の廃止までの期間である300～400年程度である。また、日本においては、長期的には廃棄物は地下水に接触する可能性が高いため、溶出した核種は地下水流動によって長期間をかけ減衰しながら生物圏まで到達し、井戸の利用や農作物等さまざまな形で居住者が被ばくする。規制基準では、居住者の被ばく線量が長期にわたっても一定値以下となることが求められるが、その前提条件として、廃棄物埋設地への断層活動や火山活動の直撃による破壊、あるいは地盤の侵食による廃棄体の地表への急激な接近という地質事象が発生しない地域の選択が求められる。そのような地質事象が発生しないことを要求する期間として、許可基準規則骨子案では少なくとも10万年という期間を規定している。

この期間の設定に当たっては、埋設処分される廃棄物の放射能特性の変化と将来にわたる火山、断層活動の発生、あるいは隆起・侵食の傾向に関する予測可能性が担保される期間が重要となる。廃棄物の放射能特性は、図3に示したように約10万年で多くの核種が十分に減衰する。一方、地質事象の予測可能性としては、特に埋設深度の変

化に直接影響する侵食量の評価において、過去の海水準上昇時に百数十mという海面上昇が見られる場合、沿岸域では水平方向の側方侵食と堆積による地形変化が生じるため、次の海水準サイクルの海水準上昇時においてどのように侵食が広がるかを予測することは困難である^[5]が、海水準低下時の挙動は比較的予測可能であるため、想定される次の海水準上昇が開始するまでの時間である10万年という期間が設定された。

3.2 地質変動事象ごとの規制要求の概要

3.2.1 火山活動に関する規制要求

火山活動に関しては、今後10万年間におけるマグマの貫入、噴出による廃棄物埋設地の変形・破壊が生じないことを、埋設施設近傍約15 kmの範囲に第四紀（現在から約258万年前まで）に活動した火山が存在しないことを持つて確認することが要求されている^[3]。

産総研は、過去の火山活動の時空分布を分析することで、例えば東北日本における前弧域、背弧域の火山活動の特徴を示した^[5]。また、日本列島において、調査データと既往公表データをまとめた第四紀火山岩体及び貫入岩体のデータベース^[6]を公開した。中深度処分の審査ガイドにおいても、立地調査の文献調査段階において、これらの成果を活用した調査が行われていることを確認することが明記されている。

3.2.2 断層活動に関する規制要求

発電用原子炉の審査においては、将来活動する可能性のある断層の定義は、「後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できないものとする。」とされている^[7]。一方、中深度処分においては、3.1節で示したように、原則40年間の稼働期間が前提となる発電用原子炉と異なり、将来10万年間の安全を確保する必要がある。

過去の地震の例を見た場合、第四紀において明瞭な活動の記録が残されていない断層の活動によって生じた2003年宮城県北部地震のような例が存在し^[8]、最新の活動履歴のみから将来の活動可能性の評価を行うことは将来予測の点で不確実性が大きいと判断された。したがって、中深度処分の審査ガイドにおいては、発電用原子炉と異なり、文献調査あるいは現地調査において存在が確認された断層は、その活動履歴に関わらず将来活動する可能性があるものと考え、処分坑道の中で廃棄物を埋設する部分（廃棄物埋設地）を断層及び周辺の影響範囲の外に設置することを要求している。ただし、考慮すべき断層長さの下限として、1回の活動によるずれが生じた場合でも工学的対策で安全が確保できるという前提で、長さ5 km以上の断層を対象としている。

また、廃棄物埋設地が長さ5 km以上の断層の影響範

図に設置されていない場合、すなわち前段の基準に適合している場合においても、「廃棄物埋設地近傍に断層が存在する場合には、当該断層の形状、規模及び活動度を考慮し、廃棄物埋設地への影響を勘案した上で、当該断層の伸長の可能性を評価すること」とされているが、現状の審査ガイド骨子案においては具体的な評価方法が明示されていない。

産総研は、規制支援研究として主に低活動性断層の再活動可能性評価に関する研究として、花崗岩地域を対象とした断層ガウジ(断層粘土と破碎物からなる破碎帯)の鉱物・化学特性による評価^[9]、断層面の三次元的形状と断層面に作用する応力による力学的指標(Slip Tendency^{用語1})を用いて断層の動きやすさを評価する手法の開発^[10]を行ってきた。産総研は、この力学的指標を用いた評価手法を、東北、中部、近畿地方等の異なるテクトニックブロックに適用している^[11]。その結果、図4に例を示すように、東北地方においては第四紀における活動履歴が確認されている断層は、多くの場合 Slip Tendency によって有意に抽出することが可能であることが示された。しかし、中部日本や近畿地方においては、第四紀における活動履歴が認められ

ていない断層においても Slip Tendency が大小広く分布している結果となっている。その原因としては、断層の摩擦係数や断層面内の間隙水圧の影響、第四紀の活動履歴が存在するにも関わらず活動間隔が長いために、地形学・地質学的手法では正確に評価できていない可能性などが考えられるが、その上で、活動履歴が認められていない断層に関しても、現在の地殻応力状態によって将来活動する可能性があるものが存在すると結論づけられている。このような解析は、断層の三次元的形状等の調査結果に加え、微小地震等の観測結果によるその場に作用する地殻応力の解析結果があって初めて可能なものであり、両者を備え、融合できる産総研地質調査総合センターの代表的な研究成果と言える。

しかし、審査ガイドにおいて、廃棄物埋設地の設置を避けるべき断層に関しては、前述したように断層の活動履歴ではなく長さを要件としたことによって、その要件に産総研の成果が直接反映されるまでは至らなかった。これには、前述したような断層活動に関する保守的な判断に加え、力学的指標による評価の適用例がまだ十分でないことや、境界条件となる応力場や入力パラメータ等の設定に関して不確実性が残存していることが影響していると考えられる。

3.2.3 隆起・侵食

中深度処分や地層処分のような地下への放射性廃棄物の処分において、埋設深度の減少は、廃棄体の地表への露出に至らないまでも、トンネル等の地下空間利用あるいは井戸等のボーリング掘削といういわゆる人間侵入による被ばくの原因となり得る。そのため、中深度処分の許可基準規則骨子案では、人間侵入の防止という観点から、廃棄物埋設地の位置に関する基準に、将来的な侵食量に関する要求が設定されている。

許可基準規則骨子案においては、深度に関する要求として、現在のトンネル等による地下利用の実績から、将来少なくとも10万年間にわたり、廃棄物埋設地の深度として、70メートルが確保されることを要求している。したがって、調査・評価手法としては、将来10万年間における侵食量あるいは侵食の要因となり得る隆起量に関して、過去の外挿という観点から過去数十万年間における侵食量あるいは隆起量の標準的な調査・評価手法を示す必要がある。審査ガイドでは、過去の侵食によって生じる指標地形面の形成年代の評価、あるいは必要に応じた地球化学的調査を行うことが調査・評価手法として示されている。

産総研においては、海岸段丘等の指標地形面の編年を行う際にも適用可能な年代測定手法として、カリ長石を用いた光ルミネッセンス法^[12]による浅海堆積物の堆積年代の測定と、詳細な堆積相解析による海面指標の認定^[5]に基

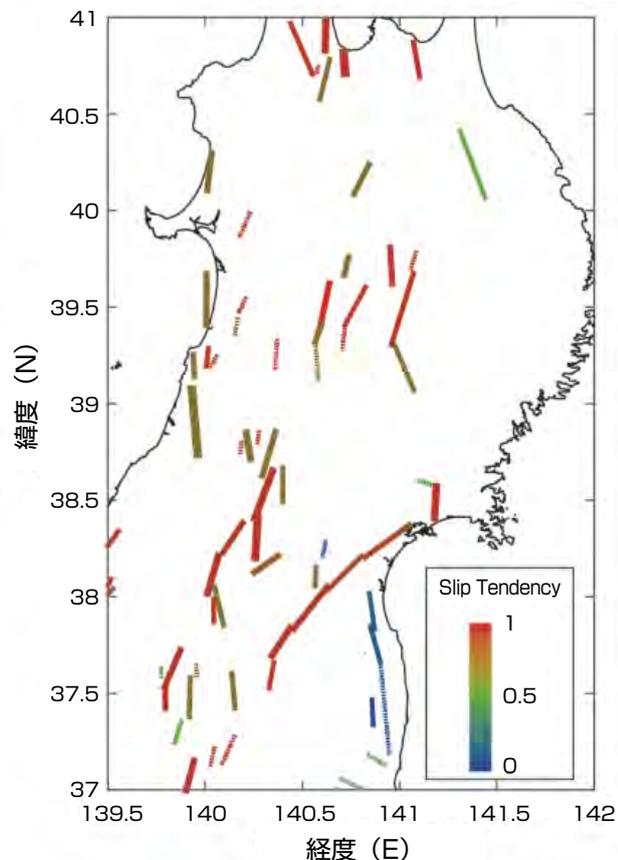


図4 東北地方の活断層に対する力学的指標による活動度評価結果、地域応力場は東北地方太平洋沖地震前の地震データから算出 ([10]を一部改変)

づく過去数十万年間の隆起速度評価の高精度化を進めている。一方、地域的な侵食速度を数十万年の時間スケールにおいて直接的に評価する手法として、地表近傍における岩石の宇宙線への暴露によって、岩石中に生成された核種の深度分布を用いて評価する手法の研究を行ってきた^[13]。

前者に関して、指標地形面の編年では、段丘構成物から年代が既知の広域テフラ^{用語2}を検出した上で、地形面が形成された海水準変動ステージを間接的に推定する方法が一般的であるが、複数回の海水準変動サイクルを経た古い地形面では、年代指標となるテフラが乏しい場合が多いという問題が存在した。産総研が進めている研究は、そのような地形面への適用においても、堆積物の堆積年代を直接評価することによって地形面の形成年代を評価する手法である。一般的な石英粒子を用いたルミネッセンス法は測定限界として約10万年前^[5]であり、将来少なくとも10万年以上の隆起・侵食の評価を行うためには十分な時間の評価が困難であった。一方、カリ長石粒子を用いたルミネッセンス法を適用することで、適用限界を数十万年前まで拡大することが可能となった。将来10万年の予測を過去の外挿から精度良く行うためには、少なくとも過去数十万年前までの地形面の編年と隆起速度を高精度で評価することが必要であり、これによって、将来10万年の予測の確度が向上するため、特にテフラによる編年が困難な地域においても、実際の処分場立地選定における手法の適切性の判断の科学的根拠となり得る成果が得られている。

後者に関して宇宙線核種は、海水準変動とは独立した評価手法であり、侵食速度を直接評価できる手法であること、明瞭な指標地形面が認められない場合においても適用可能な手法として、審査ガイド骨子案において、事業者から提出される申請の妥当性を確認する上での適用されるべき調査・評価手法の例として示されている。ただし、放射性廃棄物処分への適用に当たっては、個々の侵食量評価手法が適用可能な空間スケールの検討等、今後解決すべき課題が多い。また、現状の侵食量評価手法では評価が困難な、海水準変動に伴う沿岸部の側方侵食や河川侵食による将来10万年間における水平方向の侵食量の予測手法に関する知見の蓄積が必要となる。

3.2.4 その他地質事象等

審査ガイド骨子案においては、以上の地質事象の他に、大規模マスマーブメント^{用語3}、泥火山^{用語4}等の事象が、立地の排除要件となり得る事象として示されている。また、排除要件として扱わないが、立地地点の状況を勘案して影響評価を行う事象として、熱水活動・深部流体、気候変動・海水準変動があげられ、それ以外に熱 (T)、水理 (H)、力学 (M)、地球化学 (C) のいわゆる THMC 特性が個別

評価の対象として示されている。

それらの個別要因に対して、産総研は例えば大規模マスマーブメントデータベース^[14]、泥火山データベース^[15]を公開し、審査において用いられる知見の整理を行っている。熱水活動・深部流体に関しては、日本列島におけるスラブ起源水上昇地域をデータベース化するとともに、日本列島における深部流体の起源及び化学的特性の分類を行っている^[16]。今後は、単に現状における深部流体上昇の有無のみではなく、将来的な深部流体上昇の可能性、その際の想定される化学特性等の評価を行うための手法開発が必要である。また、処分深度が比較的浅いため、周辺地下水が酸化的環境となり、核種の地下水への溶解の促進や、ベントナイト等の人工バリアの核種隔離性能あるいは遅延性能の低下を引き起こす可能性への配慮が必要となる。

一方、THMC 特性に関して処分場の地下施設建設による人為的擾乱が発生する前の、いわゆるベースライン調査における物理探査やボーリング調査を用いた手法開発と技術的取りまとめを実施しており^[5]、特に水理特性に関しては、異常間隙水圧と地下水流動、物質移行への影響の評価手法に関する詳細な検討を行っている^[17]。それらの地下環境のベースライン評価と長期変動予測の中で、安全評価上特に問題となり得る水理、地球化学特性とそれらの長期変動予測に関する評価手法に関する研究を進め、今後整備及び改訂が進められる調査、モニタリングに関する審査ガイドに反映されるよう、成果の取りまとめを行っていく必要がある。

4 地層処分の規制への成果の反映法

4.1 中深度処分安全規制との共通点と相違点

地層処分に係る規制の考え方は、高レベル放射性廃棄物に含まれる長半減期核種の濃度が中深度処分と比較して数桁高いという特徴を有する。地層処分における具体的な要求深度や評価期間については中深度処分と異なると考えられるため、さらなる技術的な検討が必要である。しかし、例えば長期間にわたって公衆と生活環境を防護するための根幹的な対策として、事業者に離隔と閉じ込めといった設計上の対策を要求する考え方などは中深度処分と共通するものと考えられている^[1]。ここでは、地層処分と中深度処分の具体的な技術的課題の相違点を明らかにすることで、地層処分の安全規制の技術的要件と、そこへ研究成果を反映させるための課題を分析する。

資源エネルギー庁が公開した「科学的特性マップ」^[18]は、地層処分を行う場所を選ぶ際にどのような科学的特性を考慮する必要はあるのか、それらは日本全国にどのように分布しているかということを大まかに俯瞰するためにマップの

表1 科学的特性マップと中深度処分規制基準における地質事象ごとの要件と基準の比較

前提条件及び評価項目	科学的特性マップにおける好ましくない範囲の要件 (地層処分の観点からの特性の分類)	中深度処分の許可基準規則・審査ガイド (原子力規制委員会)
目的及び利用する段階	事業者の公式な処分場立地の前段階において、国民理解を深めるための対話活動	事業者の事業許可申請に対する安全審査
基となるデータ	以下の条件を満たす文献データ 1) 品質が確立され(信頼性の観点) 2) 全国規模で体系的に整備されるなどにより地域間のデータが客観的に比較可能とし(地域間の公平性確保の観点) 3) 現時点で一般的に入手可能である(透明性・検証可能性の観点)	事業者が実際に立地調査を実施した後の調査データ及び文献データ
対象とする時間スケール	天然バリアの遅延特性が維持される期間として数万年以上、隆起・侵食では10万年	少なくとも10万年
火山・火成活動	・ 第四紀火山の中心から15 km ・ 第四紀の火山活動範囲が15 kmを超えるカルデラの範囲	・ 第四紀における火道、岩脈等の記録のある地域 ・ 第四紀火山活動の時空分布から、少なくとも今後10万年間にわたって火山活動が生じる可能性がある地域
断層活動	・ 活断層に、活動セグメント長あるいは起震断層長の1/100程度の幅を持たせた範囲	・ 地表面に投影した長さ5 kmの断層及び力学的影響が及ぶ範囲(当該断層からの距離が断層長さの最大1/100まで)
隆起・侵食	・ 将来10万年間で隆起と海水準低下による侵食量が300 mを超える地域(処分場の地表への接近の観点から)	・ 将来10万年間においても深度70 mを確保 ・ 海水準変動による側方侵食を考慮(トンネル等の地下利用深度の観点から)
地熱活動	・ 処分深度において緩衝材温度が100℃未満を確保できない地温勾配	・ 発電エネルギー資源として利用可能な地熱資源の存在する地域 ・ 熱特性に関しては排除要件としないが、立地地点の状況を勘案して影響を評価
火山性熱水活動・深部流体	・ 地下水の特性としてpH4.8未満あるいは炭酸化学種濃度0.5 mol/L以上を示す範囲	・ 排除要件としないが、立地地点の状況を勘案して影響を評価
未固結堆積物	・ 深度300 m以深まで更新世中期以降の地層が分布する範囲	・ 排除要件としないが、立地地点の状況を勘案して影響を評価
火砕流等	・ 完新世の火砕流堆積物・火山岩・火山岩屑の分布範囲	・ 地表施設に関しては、完新世の火砕流堆積物等の分布範囲 ・ 排除しないまでも、実際の地質環境調査において、処分システムの性能を評価する上で重要となる事項
鉱物資源等	・ 鉱業法で定められる鉱物のうち、全国規模で整備された文献データにおいて、技術的に採掘が可能な鉱量の大きな鉱物資源の存在が示されている範囲	・ 天然資源が有意に存在することが確認されていない区域に設置 ・ 天然資源とは、現在、すでに社会的に利用されている資源又は将来的にその利用が有望視されている資源

形で示したものである。その中で、例えば火山・火成活動、断層活動等の各項目に対し、好ましくない範囲の要件、基準を提示している^[18]。科学的特性マップは、処分事業者の公式な立地選定に先立つ議論として、既存の全国スケールで得られるデータから地質学的特性分布を俯瞰的に示したものである。一方、規制における基準は、事業者が処分場の立地のための地質学的調査を行い、処分場の位置を決定した後の審査を行う上での基準であるため、両者の目的が大きく異なる。そのため、両者の基準を直接比較し、個別要件ごとの相違点を単純に議論することは意味を持たないが、地層処分を行う際に考慮すべき要件と、中深度処分の安全規制上の地質学的条件を比較することで、今後、地層処分における規制基準の検討に必要な技術的課題の抽出を行う際の参考としては利用可能であろう。

ここでは、科学的特性マップにおける要件・基準と中深度処分の規制基準を表1において比較することで、今後整

備されるべき地層処分の規制基準の設定において必要とされる研究課題に関する議論のベースとする。ただし、繰り返しとなるが、両者は対象廃棄物が異なると同時に、科学的特性マップは立地選定の立場で示されたものであり、現状において全国レベルで入手可能なデータから判断されているのに対し、規制基準は調査等が終了して選定された破棄物埋設地の立地の適否を判断するためのものであるということから、要件・基準を利用する段階と中心となる視点の相違に注意が必要である。

対象とする時間スケールに関しては、科学的特性マップ整備の議論を取りまとめた報告書^[19]において、「処分場スケールの地質環境は、人工バリアの機能が所定の期間維持されるのに適した設置環境としての特性を有すること、天然バリアが放射性物質の溶解、移行を抑制するのに適した特性を有すること、さらには、それらの特性が数万年以上の長期間の時間スケールにおいて変遷する中で許容で

きる変動範囲内にとどまることが求められる」と示されており、最低限数万年間以上は天然バリアとなる岩盤の遅延特性に大きな変動がないことがあげられている。科学的特性マップでは、考慮すべき科学的特性とその分布を俯瞰的に見るという目的から、時間スケールに関する明確な議論の結果は示されていないものの、隆起・侵食において10万年間の隆起量300 mが基準となっていることから、対象とする時間スケールとしては10万年が念頭にあるものと考えられる。一方、中深度処分においては、3.1節に示したように、主に侵食による深度減少の予測可能性と放射能濃度の減衰の観点から、10万年間を対象としている。地層処分と中深度処分の廃棄物の特徴を考慮すると、後述するように地層処分においても、少なくとも中深度と同等あるいはそれ以上の時間スケールを対象とすべきであろう。

表1中の個別自然事象に着目すると、火山・火成活動及び鉱物資源に関しては、両者ではほぼ共通する基準が設けられている。一方、断層活動は、科学的特性マップでは「今まで繰り返し活動し、将来も活動する可能性が高く、変位の規模が大きい断層は回避する必要がある^[18]」という前提の下で、活断層とその影響範囲として破碎帯幅（両側で長さの1/100）を好ましくない範囲としているのに対し、中深度処分では長さ5 km以上の断層と、現地調査で想定される力学的影響範囲（最大限断層面からの片側の距離が長さの1/100）を回避する要件としている。対象とする断層に関する相違点は、科学的特性マップの基準は、現段階において全国スケールで得られる活断層のデータベースに基づくこと、一方中深度処分の基準は、実際に現地調査が実施され周辺地域までを含めた断層の三次元構造がある程度把握できた段階で、存在が確認された一定長さ以上の断層は、将来10万年間に活動する可能性があるという考え方に基づく。断層活動の影響範囲に関しては、科学的特性マップでは、地層処分の観点から好ましくない基準として、データベース上の断層長さから破碎帯の幅を想定しているのに対し、中深度処分では、破碎帯に加えて、周辺の損傷領域までを調査によって想定すること、その際に想定した最大幅として片側で断層長さの1/100とするという考え方をういたことで相違が生じている。

隆起・侵食に関しては、処分対象深度の相違によって基準となる侵食量の値が異なっている。科学的特性マップは、深度300 m以深に廃棄物を埋設する地層処分において、将来10万年間に隆起と海水準低下による侵食量が300 mを超える可能性が高い地域を、好ましくない範囲の基準としているのに対し、中深度では、3.2.3に示したように将来10万年間において一般的な地下利用の深度以上の深度を確保することを要求したものであり、基本的には

将来において処分場、廃棄物が地表へ接近しないことを要件としている点では共通である。

その他の項目として、地熱活動、熱水活動・深部流体、未固結堆積物及び火砕流等に関しては、科学的特性マップでは具体的な基準が提示されているが、中深度処分においては排除要件とせず、個別の地点の特性として影響評価を行う項目とされている。ただし、特に熱水活動・深部流体に関しては、処分深度における現状の水質や将来的な活動の評価手法や、安全評価を行う際の地球化学特性の設定方法という問題が残されている。

4.2 地層処分の安全規制において考慮すべき要件

規制機関において中深度処分の規制基準及びガイドが整備された後は、1章で示した事業の動向や社会的要請から、地層処分における規制基準等の整備が行われる可能性が高い。中深度処分と地層処分において考慮すべき地質事象は類似しているため、地層処分の規制基準が、中深度処分の基準を参考にして整備される場合においても、以下の項目に留意する必要があると考えられる。

4.2.1 対象とする時間スケール

高レベル放射性廃棄物は、中深度処分対象廃棄物と比較して放射能濃度の減衰には長期間を要するため、規制基準において対象とする時間スケールは少なくとも中深度処分と同等、あるいはより長期間に設定する必要があると思われる。一例として、スイスの規制機関である連邦原子力安全検査局(ENSI)は、「地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件(ENSI-G03)」において、少なくとも100万年までの間は防護基準が遵守されることの立証を求めている。日本列島においては、立地基準に関連する地球科学的事象の予測可能性についても地域的特性が存在するため、地域、事象ごとに一定の確度で予測可能な期間を明示するとともに、不確実性が増大する将来においても安全を評価するための方法論を提示する必要がある。100万年スケールの地質変動事象を検討する場合は、日本列島スケールの地質現象の根本的な駆動力であるプレート運動の継続性と将来変遷にまで検討範囲を広げる必要が生じる。この課題に対する産総研の既往の研究成果の例としては、日本列島周辺のプレート運動と地殻変動の変遷と将来予測に関する成果があげられる^[20]。ここでは、過去2,500万年のプレート運動と地殻変動の再現を行うことで、将来のプレート運動の予測可能性の評価を行い、プレート運動による地殻変動が今後数十年程度で転換する可能性を示す積極的証拠はなく、少なくとも今後10万年程度は現在の枠組みが継続するということが示されている。プレート運動とそれに伴う地殻変動は、規制基準においても考慮すべき自然事象の根本的な要因となるものであるた

め、今後は、そのような将来予測の前提条件下で、処分場に影響を及ぼす自然事象に関する予測可能期間や長期にわたる不確実性の幅を示すことが必要となる。

4.2.2 埋設深度の影響

中深度処分の想定処分深度が約 100 m であるのに対し、地層処分では、最終処分法において、「地下三百メートル以上の政令で定める深さの地層」に処分するものと規定されている。深度 100 m 程度における地下水流動は、多くの場合天水を起源とした水の循環であるのに対し、深度が増加した場合、堆積岩地域においては 3.2.4 項で述べたような異常間隙水圧が発生し、単純な天水の循環が及んでいない場合が多い。異常間隙水圧の成因によっては、地下水流動や核種の移行において従来の数値解析モデルが単純には適用できない場合が存在する。異常間隙水圧が観測された際のその成因の評価、その場合の地下水流動及び物質移行への影響に関しては、今後も知見の整備を進め、審査ガイド等に反映させる必要がある。

また、深度が増加することによって、熱や化学場が地下水流に与える影響が顕著に出ない場合であれば、地表と比較すると動水勾配が比較的小さく、透水係数も小さい傾向があるため、地下水の流速は遅くなる傾向にある^[19]。中深度処分においても、審査ガイドで地下水流動解析結果の検証と核種移行経路の設定において、水頭、水質、地下水年代等の情報及び解析的な検討を用いて説明することを要求している。地表から涵養された地下水が地層処分の対象深度に到達するには、中深度処分と比較して長時間を要することに加え、処分深度の地下水は、天水に加え海水や深部流体等の複数の起源を持つ水が混合している可能性があることから、複数の同位体を用いた地下水年代評価や、隆起・侵食や海水準変化による地下環境の変化の結果としての地下水年代と数値解析の結果を有機的に結合させる手法の構築が急務と言える。

5 安全規制機関への橋渡しに向けて

研究機関の研究成果を規制の許可基準規則やガイド等へ反映させることは、一義的には規制機関側の役割であろう。一方、処分場の立地に関する許可基準規則及び審査ガイドの整備を行うためには、地質学、地形学、地震学、火山学、第四紀学、水文学、地球化学等の幅広い分野の知見が必要となる。規制機関はそれらの分野の最新の研究成果を収集、整理した上で、許可基準規則や審査ガイドを策定しなければならない。そのために、日本における地球科学の主導的な研究機関である産総研地質調査総合センターは、規制機関のニーズを反映した形での成果の橋渡しによる科学的な面での支援を行う必要があり、それは

規制機関の将来的な専門性の向上にも有効である。ここでは、今後整備されるべき地層処分の規制に対して、研究機関として行うべき課題と、橋渡しの方法に関して考察してまとめとする。

規制における許可基準規則及び審査ガイドは、中深度処分を例とすると、審査・評価項目（審査及び安全評価の対象とする地質事象や地質環境）、審査基準（事象ごとに評価の対象とする期間、排除の基準）及び適合性を実証するために実施すべき調査・評価手法の例から構成される。ここでは中深度処分の許可基準規則、審査ガイドに追加すべき検討項目を抽出する。

審査・評価項目に関しては、4章で述べたように、地層処分と中深度処分との相違点から、地層処分特有の課題をより詳細に抽出し、中深度処分の規制基準において考慮すべき地質事象に関して、その評価手法を提示する必要がある。一例としては、科学的特性マップに示されている熱水活動・深部流体が該当する。立地における排除要件とするか否かの最終的な判断は規制機関が行うとしても、産総研は、将来 10 万年を超える長期間を対象とした具体的な基準が設定可能であるか、あるいは立地調査段階で具体的な調査・評価が可能であるかという課題に対して検討を進める必要がある。

審査基準に関しては、規制機関が評価期間の設定を行う上で、第一には 4.2.1 項に示したように地質事象の発生に対して評価可能な期間の理解が重要である。次に、それぞれの事象に関する評価可能期間における発生可能性の議論として、過去の活動の時空分布の評価によって、将来における事象を評価することとなる。産総研の研究成果の中で、例えば 3.2.1 項に示した火山活動に関するデータベース等、過去に発生した事象の時空分布を評価可能な例も存在する。しかし、長期予測を行う上では過去に発生した事象の単なる将来への外挿のみではなく、対象地域の構造発達史や事象の発生メカニズムを理解した評価を行う必要がある^[21]。そのために、産総研としては、4.2.1 項で示した日本列島スケールの地殻変動の将来予測を基とした上で、それぞれの自然事象を対象とした長期予測手法を提示する必要がある。その上で、規制機関は、評価すべき期間と最低限排除すべき基準（例えば、侵食の影響を考慮しても評価期間内に確保すべき深度等）、不確実性が增大する長期間における判断指標等を提示することとなる。

例えば、地層処分における断層活動の基準は、過去の履歴から将来 10 万年間の評価が可能な地域があると考えられている火山活動^[6]等と異なり、活動履歴や活動可能性評価ではなく中深度処分と同様に断層の長さのみを対象としたものになる可能性が高い。その際に、産総研が進め

ている力学的指標による断層活動性評価手法は、基準策定には直接活用することは困難となる。しかし、中深度処分の審査ガイドと同様に、廃棄物埋設地周辺の断層の活動による影響を評価するという基準を設ける場合には、周辺断層の活動性や伸長、複数の断層の連結の可能性の評価を行う必要がある。現状、産総研のみならず世界的に見てもそのような研究が行われた事例は少なく、今後、規制機関の支援を行う上で重要な課題となる。したがって、現状までの力学的手法による活動性評価を発展させ、断層活動性と断層の伸長の関連性の評価や、断層活動をもたらす応力場の変動に関する検討を行い、周辺断層の影響に関する基準や評価の方法論を審査ガイド等へ反映させるための成果を発信すべきである。

調査・評価手法に関しては、3章に例を示したように、現状の中深度処分でも産総研のいくつかの成果は審査ガイドに活用されている。中深度処分と比較して地層処分において特に重要となる課題は、より深部の流速が小さな場における地下水流動の評価である。特に、隆起・侵食、海水準変動、断層活動等の要因が、地下深部の水頭、水質や地下水年代の調査結果に与える影響を、今まで産総研で実施してきた水文学的調査研究結果から抽出・整理し、それぞれの水理地質構造に応じた調査、評価上の留意点を示すことで、立地調査や将来的な地下水モニタリング等の審査ガイドに反映させていく必要がある。

中深度処分が対象ではあるが、具体的な規制基準の検討が開始された以降、断層活動に関して提示された規制基準と産総研の研究課題設定の相違点を例としても、産総研の研究成果の規制機関への橋渡しは十分とは言えない。これは、規制機関の体制の変化によって、一時的に放射性廃棄物処分の規制上の優先度が不明確となったこと、そのために規制機関と産総研の間での情報交換が不十分となり、迅速な規制基準の整備への対応が困難となったことが主な原因であろう。例えば、中深度処分の位置の基準に関しては、規制機関における外部専門家との本格的な議論の開始から許可基準規則骨子案の公表までの期間はほぼ3か月程度と、比較的短期間で方向性が決まっているため、年度単位の研究プロジェクトの中では対応が困難である。産総研の研究成果の橋渡しのためには、研究成果を利用する規制機関との定期的なコミュニケーションによって、基準やガイドの整備のニーズに合致した科学的知見の受け渡しや新たな研究課題の提案という段階を踏む必要性を痛感している。また、そのような情報交換によって、規制機関に所属する地質学を専門としない技術者の人材育成にも寄与できるものと考えられる。

今後、規制機関との議論の土台として、産総研研究成果

も含めた現状の最新科学技術をまとめた技術資料の定期的発信や、調査データを可視化したデータベースの継続的整備のように、規制機関が利用しやすい形での発信を行っていききたい。また、個人的には、産総研の科学的研究成果を、規制基準等の整備や審査の判断に活用するための知見へと再構築する役割を果たし、規制機関の方針の転換に柔軟に対処した課題設定や提案を行うために尽力したいと考えている。

用語の説明

用語1: Slip Tendency: 断層周辺の応力状態と断層の走向・傾斜、間隙水圧から計算される断層面上の作用するせん断応力と法線応力の比で計算される指標^[22]。一般的に摩擦係数で規格化され、0~1の値で示される。Slip Tendencyの値が大きい程、現在の応力状態で活動しやすい断層という評価となる。

用語2: テフラ: 火山噴火の際に火口から放出され、空中を飛行して地表に堆積した火山砕屑物の総称。巨大噴火の際のテフラは供給源から数百~数千km以上隔たった地域においても独立した地層として認められるため、地形面の対比や編年に利用される^[23]。

用語3: マスマーブメント: 地すべりや山体崩壊等、斜面を構成する岩体が重力によって下方へ移動する現象で、斜面上での岩体に対するせん断力がせん断抵抗力を上回ったときに発生する。大規模なものは、移動土塊の体積数10 km³、移動距離数10 km、すべり面の深度数100 m に達することが知られている^[5]。

用語4: 泥火山: 泥火山は、異常に高い間隙水圧を持つ地下の泥が上位の地層を押し上げてドーム状に上昇し、地下水（温泉水）、（可燃性）ガス、時には石油とともに地表に噴出して、火山に類似した地形を生じたものである。泥火山による堆積（凸型）地形や陥没（凹型）地形は、最大で高さ数百m、直径数km に及ぶこともある^[5]。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会: 第27回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合参考資料27-2-2炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について(改訂案) (2017), http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/hairo_kisei/00000028.html, 閲覧日2007-11-06.
- [2] 原子力規制委員会: 第1回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合資料1-1第二種廃棄物埋設に係る規制制度の概要 (2015), http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/hairo_kisei/20150126.html, 閲覧日2017-08-16.
- [3] 原子力規制委員会: 第27回原子力規制委員会臨時会議 資料3 第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案 (2017), <http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/kisei/00000258.html>, 閲覧日2017-09-22.
- [4] 原子力規制委員会: 第27回原子力規制委員会臨時会議 資

- 料4 中深度処分における廃棄物埋設地の位置に係る審査ガイドの骨子案 (2017), <http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/kisei/00000258.html>, 閲覧日2017-09-22.
- [5] 深部地質環境研究コア編: 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性, *地質調査総合センター研究資料集*, 560, (2011).
- [6] 西来邦章, 伊藤順一, 上野龍之(編): 第四紀火山岩体・貫入岩体データベース, *地質調査総合センター速報*, 60, 地質調査総合センター (2012).
- [7] 原子力規制委員会: 敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド (2013), https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/kettei/02/kisei_naiki.html, 閲覧日2017-08-16.
- [8] N. Kato, H. Sato, T. Imaizumi, Y. Ikeda, S. Okada, K. Kagohara, K. Kawanaka and K. Kasahara: Seismic reflection profiling across the source fault of the 2003 Northern Miyagi earthquake (Mj 6.4), NE Japan: basin inversion of Miocene back-arc rift, *Earth Planets Space*, 56, 1369–1374 (2004).
- [9] 間中光雄, 福土圭介, 宮下由香里, 伊藤順一, 渡部芳夫, 小林健太, 亀井淳志: 2000年鳥取県西部地震の余震域と非余震域に分布する断層ガウジの比較, *地質学雑誌*, 118 (8), 459–475 (2012).
- [10] A. Miyakawa and M. Otsubo: Applicability of slip tendency for understanding long-term fault activity: A case study of active faults in northeastern Japan, *Journal of JSCE*, 3, 105–114 (2015).
- [11] A. Miyakawa and M. Otsubo: Evolution of crustal deformation in the northeast-central Japanese island arc: Insights from fault activity, *Island Arc*, 26 (2), e12179 (2017).
- [12] K. Ito, T. Tamura, T. Kudo and S. Tsukamoto: Optically stimulated luminescence dating of Late Pleistocene tephric loess intercalated with Towada tephra layers in northeastern Japan, *Quaternary International*, 456, 154–162 (2017).
- [13] 城谷和代: 地質環境の長期安定性評価手法開発にむけた宇宙線生成核種の利用, *地形*, 35 (2), 187–197 (2014).
- [14] 塚本齊: 日本の大規模マスマーブメントデータベース, *地質調査総合センター研究資料集*, 543, 地質調査総合センター (2011).
- [15] 高橋正明, 切田司, 大丸純, 風早康平: 日本及び周辺地域の泥火山データベース, *地質調査総合センター研究資料集*, 540, CD-ROM1枚, 地質調査総合センター (2011).
- [16] 風早康平, 高橋正明, 切田司, 内藤一樹, 渡部芳夫: 日本列島におけるスラブ起源水の上昇地域の分布図, *地質調査総合センター研究資料集*, 616, 地質調査総合センター (2015).
- [17] 竹田幹郎, 間中光雄, 平塚剛, 三好悟, 徳永朋祥, 伊藤一誠: 堆積岩地域における化学的浸透現象の地下水流動への影響, *地学雑誌*, 122 (1), 192–213 (2013).
- [18] 経済産業省資源エネルギー庁: 「科学的特性マップ」公表用サイト (2017), http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/, 閲覧日2017-08-16.
- [19] 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術WG: 地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分技術WGとりまとめ) (2017), <http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/20170417001.html>, 閲覧日2017-09-22.
- [20] 高橋雅紀: プレート運動からみた日本列島の地殻変動, 第23回地質調査総合センターシンポジウム「日本列島の長期的地質変動の予測に向けた取り組みと今後の課題-数十万年の過去を解明し, 将来を予測する技術・知見・モデル-」, *地質調査総合センター研究資料集*, 610, 14–15, 地質調査総合センター (2015).
- [21] 山元孝広: 地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の

安全性評価—事象のシナリオに基づく長期予測の方法論—, *Synthesiology*, 4 (4), 200–208 (2011).

- [22] A. Morris, D.A. Ferrill and D.B. Henderson: Slip-tendency analysis and fault reactivation, *Geology*, 24 (3), 275–278 (1996).
- [23] 地学団体研究会編: 新版地学事典, 平凡社 (1996).

執筆者略歴

伊藤 一誠 (いとう かずまさ)

1988年3月東京大学大学院工学系研究科資源開発工学専攻修士課程修了。応用地質株式会社入社。2001年博士(工学)取得。同年米国ロレンス・バークレー国立研究所を経て2005年10月産総研深部地質環境研究センター入所。現在、活断層・火山研究部門水文地質環境研究グループ長。2011年原子力安全基盤機構、2015-2017年原子力規制庁技術基盤グループ主任技術研究調査官。水理地質学が専門。放射性廃棄物処分の規制支援として、地下の水理環境の調査、評価に関する研究を担当している。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント (栗本 史雄: 産業技術総合研究所, 渡部 芳夫: 産業技術総合研究所)

この論文は、中深度処分の規制に関する産総研の研究成果の活用事例を述べ、今後の高レベル放射性廃棄物処分への利用を見据えた課題をまとめています。その内容は、研究開発の成果を社会に生かすための動向・分析を目標とする「論説」に適合しており、シンセシオロジーにふさわしいと判断します。また、2017年7月に公開された資源エネルギー庁「科学的特性マップ」との比較も行われており、意義があると考えます。

議論2 規制基準の扱いについて

コメント (渡部 芳夫)

国の安全規制で先行して整備が進んでいる「中深度処分」規制を概説し、「地層処分」についてこれと比較する際に、資源エネルギー庁が公表した「科学的特性マップ」での要件・基準は、規制そのものの議論においては「地層処分」で同一に扱う事ができない事を十分に読者に伝える事が肝要です。原子力の安全研究を行っている産総研としては、正確で丁寧な記述に努めて下さい。この論説のオリジナルな成果が読者にスムーズに誤解なく理解されるよう、記述の構造や語句・概念等の平易さに努めるなどの配慮が肝要です。

回答 (伊藤 一誠)

ここで比較している両者は、利用される目的や段階、考慮の基となるデータの量や質も大きく異なるものであり、単純には比較できないものであることを明確にするため、両者の目的と利用段階、基となるデータ比較に関する記載を追加するとともに、両者が単純には比較できないものであるが、課題抽出のためにあえて比較するという説明を追加しました。

議論3 産総研の研究成果

コメント (栗本 史雄)

中深度処分の規制に関する産総研の研究成果の活用事例を述べ、今後の高レベル放射性廃棄物処分への利用を見据えた課題を簡潔にまとめています。「3.2.2 活断層に関する規制要求」は産総研成果の活用に至らなかった事例を示しており、今後の研究にとって重要であり、この論文のポイントになると思います。力学的指標に

よる活動可能性評価等の適用事例の拡充、パラメータの合理的設定法の確立が必要と記述されていますが、これに関する具体的な研究の進捗、産総研としての貢献や立ち位置（強味）を強調していただきたいと思います。「3.2.3 隆起・浸食」についても同様です。

回答（伊藤 一誠）

断層活動に関しては、産総研で実施されている断層再活動性評価に関する最新の論文の引用を追加した上で、力学的指標としてのSlip Tendencyが廃棄物埋設地周辺に存在する断層の活動性評価における第一段階の評価手法として有効であることを追記しました。また、今後、具体的な調査・評価手法として認知されるために進めるべき研究課題を具体的に追記しました。隆起・侵食に関しても、産総研における研究の進捗に関しての追記を行うとともに、現在の許可基準規則や審査ガイドにおいて要求されているが、具体的な評価手法に関して十分に検討が行われてない水平方向の侵食に関する課題を追記しました。

議論4 研究の橋渡し

コメント（栗本 史雄）

「3.2.2 活断層に関する規制要求」および「3.2.3 隆起・浸食」に関する既存の研究成果の具体的な説明や産総研成果の学術レベル等への言及に基づいて、産総研の優位性や立場を強調し、その上で国の基準として審査ガイドへの提案に向けた方策・計画や今後の研究方針を述べていただきたいと思います。

回答（伊藤 一誠）

3章で産総研が現在進めている研究について、放射性廃棄物処分の観点からの優位性を追加しました。その上で、5章において、特に断層活動に関して、地層処分の基準にも引き継がれると思われる中深度処分の基準適合性の審査ガイドへの橋渡しに向けた研究方針に関する記述を追加しました。

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いるか、という科学的知の統合に関する論文を掲載することを目的とする。この論文の執筆者としては、科学技術系の研究者や技術者を想定しており、研究成果の社会導入を目指した研究プロセスと成果を、科学技術の言葉で記述したものを論文とする。従来の学術ジャーナルにおいては、科学的な知見や技術的な成果を事実（すなわち事実に知識）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。これをジャーナル上で蓄積することによって、研究開発を社会に活かすための方法論を確立し、そしてその一般原理を明らかにすることを目指す。さらに、このジャーナルの読者が自分たちの研究開発を社会に活かすための方法や指針を獲得することを期待する。

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 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)で編集委員会が編集して掲載する。

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

3.3 書式

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

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

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

3.3.4 図については画像ファイル(掲載サイズで350 dpi以

上)を提出する。原則は白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8560

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

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

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

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“Synthesiology” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised April 1, 2017

1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

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

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

① Research papers

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

② Reports

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

③ Commentaries

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

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

④ Roundtable talks

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

⑤ Readers’ forums

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

3.2 Structure

3.2.1 The manuscript should include a title (including

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 Format

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4 Submission

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

Synthesiology (構成学)誌は創刊から11年目に入っています。本誌は、研究の成果を社会で活用できる形にするために研究者自身がどのようなシナリオを描いて研究開発を進めたのかを記載する論文誌です。具体的には、課題解決のために複数の要素技術を統合していくこと、また、それぞれの要素技術を確立する際に複数の研究アプローチの中から何を選定したのかという研究開発のプロセスを記載するものです。本誌では研究論文、報告、論説の三つのジャンルを設けていますが、本号では研究論文2報、報告1報、論説1報となっていますので、それぞれ技術領域は異なっていますが、読み比べて頂ければと思います。

「我が国における5万分の1地質図幅整備」は国土の基盤情報となる地質図を日本全体で整備することを目的に1882年に地質調査所を設立して以降の調査・データ整備の状況を概観すると同時に、精度・信頼性が高い地質図を作成するための最新の研究方法論を述べ、対象地域の特性によって研究方法を変える必要があることを示しています。「食洗器対応伝統工芸品『ナノコンポジット玉虫塗』」は玉虫塗という漆器が持つ独特の美感を損なうことなく耐擦過性、耐久性を付与する目的で、最新の有機・無機ナノコンポジット材料を応用する技術開発に取り組んで組成とプロセス条件を最適化した際の異分野連携と協創の経緯を述べた成功例です。「Additive manufacturing of ceramic components」はセラミックス分野を取り巻く世界的状況を十分分析した上で、産学官が連携す

るプロジェクトを設立して研究開発に取り組み、複雑な形状や肉厚変化に対応できるadditive manufacturing技術を構築し量産化の目処を得ており、十分イノベーションに繋がる事例です。「放射性廃棄物処分の安全規制と地球科学」は原子力発電所の運転に伴って発生する中～高濃度放射性廃棄物を地下に埋設処分するに当たって、数十万年にわたって安全を確保するため地質学を含む地球科学がどのように貢献していくかについて、これまでの事例と今後の課題を提言した論説で、地震や火山の多い日本にとって非常に重要なポイントです。

最近、基礎研究を含む日本の研究開発の国際競争力が低下しつつあるという解析結果が各所から報告され、これを突破するための議論が活発になっています。ある提言によれば、科学研究を行う研究者、科学研究とサイエンス型産業創造のプロデューサー、科学から経済価値・社会価値を生み出すイノベーターという三つのタイプの科学者が必要とされており、特にプロデューサーとしての資質を持つ科学者・研究者が重要と述べています。Synthesiologyは研究の成果を社会に活かすために、課題解決の具体的なシナリオを作成して検証したり、要素技術を融合・統合するプロセスについての記述を要件としており、上記のプロデューサー機能を論ずる先駆けと位置付けることもできます。大学、研究機関、民間企業の読者の皆様との議論が進むことを期待しています。

(編集委員 景山 晃)

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 (名古屋大学)、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 (Nagoya 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11巻第2号 2018年6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

1:50,000 quadrangle geological mapping project in Japan

—Overall and individual scenarios of mapping project—

K. MIYAZAKI

Traditional craftwork that can be washed with a dishwasher, “nanocomposite tamamushi-nuri”

—Expansion from exhibits to daily necessities—

T. EBINA, M. SAURA and Y. MATSUKAWA

Report

Additive manufacturing of ceramic components

—Towards innovation of ceramic industry—

T. OHJI

Article

Earth science in safety regulations of radioactive waste disposal

—Translation of scientific research to site selection criteria—

K. ITO

Editorial policy

Instructions for authors

Aim of *Synthesiology*