

# Synthesiology

地球化学標準物質の開発と利用

都市域の3次元地質地盤図

極小微動アレイによる浅部構造探査システム

高温高压岩石変形実験技術の開発

特集：地質の調査

シンセシオロジー編集委員会

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標と社会的価値、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスを記述した論文誌です。本号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

### 地球化学標準物質の開発と利用

#### —地質試料元素分析の信頼性向上のために— 岡井 貴司

50年にわたって50種類以上の信頼性の高い地球化学標準物質を発行してきた経緯と研究シナリオがまとめられている。研究開発および標準物質の利用ニーズの変化、さらに分析機器の進展に伴う標準物質の変遷と世界の動向を見据えて、常にシナリオの見直しと新たな研究計画の立案を行ってきた。地質調査所および産総研地質調査総合センターの強みを活かし、標準物質の開発および研究の両面において世界をリードしてきた歴史を読み取ることができる。

### 都市域の3次元地質地盤図

#### —都市平野部の新たな地質情報整備— 中澤 努ほか

地震防災・減災のため、地質情報をハザードマップ作成や都市計画に反映させることを目的として、3次元地質地盤図に関する研究成果をまとめたものである。人口が密集する都市域の3次元地質地盤図の提示とモデリングの開発は精緻なレベルに達しており、今後の進展が大いに見込まれる。さらに自治体が保有するデータも含めて複数の要素技術を統合し、社会に有用で使いやすい枠組みの構築を目指しており、社会への貢献を一段と進める挑戦的なテーマである。

### 極小微動アレイによる浅部構造探査システム

#### —大量データの蓄積と利活用に向けて— 長 郁夫ほか

地震による強震動や液状化の被害が想定される浅部地盤を対象として、地下S波速度構造を精度よく探査できる極小微動アレイの技術開発を紹介している。著者の一人が長年にわたって研究開発し実用化した微動アレイ探査法をコア技術として、理論的な検討と新規技術によって相互補完と強化を行い、かつ地盤の揺れやすさを知るといふ社会ニーズへの的確な対応を統合した研究開発の事例であり、一般ユーザへの波及効果が大きいことは注目に値する。

### 高温高压岩石変形実験技術の開発

#### —千年スケールで進行する地質現象の加速化と検証— 増田 幸治

地下深部で起こった過去の地質現象を実験室において再現し、千年スケールで進行する岩石の変形・破壊現象を加速化して、検証する実験技術と手法を開発することにより、精度の高い地震発生予測モデルの構築という社会ニーズに応えようとしている。実験設備は、一般の圧力試験機に高压・高温技術を独自に導入、統合して開発したものである。基礎研究としての位置づけと目標を明確にして研究シナリオを適切に立てることが研究の進展につながった好例である。

# Synthesiology 第9巻第2号 特集:地質の調査(2016.5) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
地球化学標準物質の開発と利用 — 地質試料元素分析の信頼性向上のために — ・・・岡井 貴司	60-72
都市域の3次元地質地盤図 — 都市平野部の新たな地質情報整備 — ・・・中澤 努、野々垣 進、宮地 良典	73-85
極小微動アレイによる浅部構造探査システム — 大量データの蓄積と利活用に向けて — ・・・長 郁夫、先名 重樹	86-96
高温高压岩石変形実験技術の開発 — 千年スケールで進行する地質現象の加速化と検証 — ・・・増田 幸治	97-107
編集委員会より	
編集方針	108-109
投稿規定	110-111
編集後記	116
Special Issue of Geological Surveys	
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
<b>Development and utilization of geochemical reference materials</b> — Reliability improvement in the analysis of geological materials — --- T. OKAI	60
<b>Three-dimensional urban geological map</b> — New style of geoinformation in an urban area — --- T. NAKAZAWA, S. NONOGAKI and Y. MIYACHI	73
<b>Constructing a system to explore shallow velocity structures using a miniature microtremor array</b> — Accumulating and utilizing large microtremor datasets — --- I. CHO and S. SENNA	86
<b>Development of rock deformation techniques under high-pressure and high-temperature conditions</b> — Evaluation of long-term geological processes by a compressed timescale process model — --- K. MASUDA	97
Editorial policy	112-113
Instructions for authors	114-115

# 地球化学標準物質の開発と利用

## — 地質試料元素分析の信頼性向上のために —

岡井 貴司

地質調査総合センターでは、旧工業技術院地質調査所時代から約50年にわたり、約50種類の標準物質を発行しており、これらは地質試料の化学分析の信頼性を高める標準物質として世界中で使われている。岩石、鉱石・鉱物、土壌、底質等の地質試料は多様な元素を高濃度で含んでいるため、正確な化学分析を行うためには、主要成分の含有量が類似し、目的元素の濃度があらかじめ定められた地球化学標準物質を用いる必要がある。この論文では、世界および日本における地球化学標準物質開発のシナリオと、その後の発展および変化を述べ、試料の選択から、粉碎過程を経て、標準値の決定およびデータの公開に至る研究プロセスを述べる。

キーワード：標準物質、地球化学、化学分析、地質試料、試料粉碎

## Development and utilization of geochemical reference materials

### – Reliability improvement in the analysis of geological materials –

Takashi OKAI

The Geological Survey of Japan has issued about 50 reference materials over the past 50 years. They have been used all over the world to improve the reliability in chemical analysis of geological materials. Geological samples of rocks, ores, minerals, soils, sediments, etc. generally contain various elements at high concentration levels. For accurate chemical analysis, it is necessary to use geochemical reference materials that contain major components at similar levels to the samples to be analyzed and predetermined concentrations of target elements. In this paper, scenarios to develop geochemical reference materials for Japan and the rest of the world are described. Methods for selecting and grinding sample materials, the determination of reference values, and data sharing are also reported.

Keywords : Reference materials, geochemistry, chemical analysis, geological materials, sample grinding

### 1 地球化学標準物質とは

産総研地質調査総合センター (Geological Survey of Japan, GSJ) が行っている「地質の調査」において、元素の化学分析は、地質の特徴・成り立ち等を調べるために必要不可欠な技術の一つである。例えば、鉱物資源の利用では、鉱床の探査や成因解明、資源としての利用可能性の評価には化学分析が不可欠であるし、実際に採掘した鉱石の取引でも正確な化学分析が求められる。また、環境問題を考えても、特定の元素に汚染されているかどうか、その元素がどうやって移動してきたかの評価には化学分析が必要である。地質の調査で対象となる、岩石、鉱石・鉱物、土壌、底質等の地質試料は、多様な元素を高濃度で含んでおり、例えば岩石試料において主成分と呼ばれる比較的含有量の多い元素は、ケイ素、アルミニウム、鉄等

10 元素に及ぶ。化学分析に際しては、こうした含有量の多い成分同士が互いに影響し合うため、特定の元素を正確に化学分析するためには、他の元素からの影響を正しく見極めなくてはならない。このため、正確な化学分析には、主成分の含有量が類似し (含有量の多い元素からの影響が同程度で)、目的とする元素の濃度が決められた標準物質を用いることが有効である。こうした地質試料の正確な化学分析のための標準物質を「地球化学標準物質」と呼んでおり、地質試料の化学分析方法の開発や日常の分析の精度管理、機器分析での物差しとなる検量線の作製等、地質試料の化学分析にはなくてはならない標準物質として世界中で広く利用されている。

一般に、地質試料を化学分析する際には、塊状等の試料をさまざまな粉碎機を用いて粉末にしたものを用いる。

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7  
Research Institute of Geology and Geoinformation, GSJ, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: t-okai@aist.go.jp

Original manuscript received August 26, 2015, Revisions received October 6, 2015, Accepted October 16, 2015

天然の岩石はさまざまな鉱物等の集合体であるため、試料の代表性の観点から、一定量(試料の状態により数百g~数kg程度)の試料を粉碎・均質化した粉末の一部を採取して化学分析する。地球化学標準物質も基本的に源岩石を粉碎し、粉末状にした試料をビン等に詰めて提供される(図1)。

地球化学標準物質開発の歴史は、1949年に米国地質調査所(U.S. Geological Survey, USGS)からG-1(花崗岩)、W-1(輝緑岩)が発行されたことに始まる。日本では、旧工業技術院地質調査所(GSJ)において、1964年に開発のための研究が開始され、1967年に最初の標準物質であるJG-1(花崗閃緑岩)が発行された。以降、地質調査所から産総研地質調査総合センター地質情報研究部門に引き継がれ、現在まで約50年にわたり、約50種類の試料を作製してきた(表1)。このGSJ地球化学標準物質は世界中に1万個以上が配布され、化学分析の信頼性を高める標準物質として世界的に大きな貢献をしている。

## 2 開発の背景・経緯

### 2.1 1940年代の技術的背景と開発経緯

地質試料の化学分析は、旧来、湿式法と呼ばれる、化学的に各元素(成分)を分離し、重量法や容量法、比色法等により定量する方法で行われてきた。この方法は、適切に分析された際の正確さは非常に高いが、元素を分離・定量するために複雑な操作を必要とすることから、操作に熟練を要し、非常に時間がかかった。そのような状況の中、1940年代後半に、直流アークを用いた分光分析(発光分析)によるケイ酸塩岩石中主成分の分析方法が開発され、いわゆる機器分析が幕を開ける。機器分析の開発により、従来、長い時間と熟練技術を要した湿式法と比べ、格段に効率的に化学分析を行えるようになることが期待された。しかし、機器分析は、基本的に光りの強さや吸収といっ



図1 GSJ発行の地球化学標準物質  
左からJA-1a、JB-2a、JB-3a、JZn-1、JCu-1(各100g入り)。試料の粉末をビンに詰めて配布している。

表1 GSJ発行の地球化学標準物質

<b>火成岩</b>		<b>堆積岩</b>	
JA-1	安山岩(1982)	JLs-1	石灰岩(1987)
JA-1a	安山岩(2002)	JCp-1	サンゴ(1999)
JA-2	安山岩(1985)	JCt-1	シャコガイ(2002)
JA-2a	安山岩(2013)	JDp-1	ドロマイト(1987)
JA-3	安山岩(1986)	JSI-1	スレート(1988)
JB-1	玄武岩(1968)	JSI-2	スレート(1989)
JB-1a	玄武岩(1984)	JCh-1	チャート(1989)
JB-1b	玄武岩(1996)		
JB-2	玄武岩(1982)	<b>堆積物</b>	
JB-2a	玄武岩(2004)	JLk-1	湖底堆積物(1987)
JB-3	玄武岩(1983)	JSD-1	河川堆積物(1988)
JB-3a	玄武岩(2003)	JSD-2	河川堆積物(1989)
JF-1	長石(1985)	JSD-3	河川堆積物(1989)
JF-2	長石(1986)	JSD-4	河川堆積物(2005)
JG-1	花崗閃緑岩(1967)	JSD-5	河川堆積物(2006)
JG-1a	花崗閃緑岩(1984)	JMS-1	海底堆積物(1999)
JG-2	花崗岩(1985)	JMS-2	海底堆積物(2000)
JG-2a	花崗岩(2015)	JMS-3	海底堆積物(2007)
JG-3	花崗閃緑岩(1986)		
JGb-1	はんれい岩(1983)	<b>コールフライアッシュ・土壌</b>	
JGb-2	はんれい岩(1991)	JCFA-1	コールフライアッシュ(1995)
JH-1	角閃石岩(1992)	JSO-1	土壌(1997)
JP-1	ダナイト(1984)	JSO-3	土壌(2009)
JP-2	ダナイト(2011)		
JR-1	流紋岩(1982)	<b>鉱石・鉱物</b>	
JR-2	流紋岩(1983)	JMn-1	マンガンジュール(1994)
JR-3	流紋岩(1990)	JZn-1	亜鉛鉱石(2000)
JSy-1	閃長岩(1993)	JZn-2	亜鉛鉱石(2008)
		JCu-1	銅鉱石(2001)

た、物理量による比較分析であり、基準となる物差しが必要である。また、地質試料のように複雑な元素組成を持つ試料では、元素の存在状態や、他の元素からの干渉と言った影響も大きく受けるという問題を抱えていた。こうした問題を解決するためには、物差しとなる基準を、試料と同様の組成を持つ天然の岩石で作製することが有効との考えから、マサチューセッツ工科大学(MIT)のFairbairnを中心に火成岩岩石の標準物質を作製することが計画され、1949年にUSGSから二酸化ケイ素含有量の多い酸性岩の代表としてG-1(花崗岩、Granite)、二酸化ケイ素含有量の少ない塩基性岩の代表としてW-1(輝緑岩、Diabase)の二つの試料が発行された<sup>[1]</sup>。

### 2.2 世界初の共同分析と評価

この二つの試料は、世界の主な地質調査機関(GS)や大学等の研究機関に配布されて、含有量の基準となる標準値設定のための共同分析が行われたが、共通の試料を用いた地質試料の世界的な共同分析が初めて実施されたという意味でも重要な試みであった。共同分析結果は、1951年にFairbairn他により報告されたが<sup>[2]</sup>、非常に衝撃的な結果であった。この共同分析に参加したのは、各国選りすぐりの、一流の技術を持つ分析者達であったにもかかわらず、結果が予想以上に一致しなかったのである。G-1およびW-1の二酸化ケイ素の分析結果を図2に示したが、報告値間の差が大きすぎて、機器分析のための標準値の設

定が行えない結果となった。この原因は、分析方法の違いによるところが大きく、分析方法の改善という新たな課題を生み出した。その後、世界中で改善のための検討が行われ、当初望んでいた標準値(推奨値)が報告されたのは、1960年代前半であった<sup>[3]-[5]</sup>。同じ試料を用いた主成分分析方法の改善と合わせて、微量成分分析方法の開発も盛んに行われるようになった。微量成分の分析に際しては主成分による影響を大きく受けるが、共同分析で主成分の値が正確に定まっているため、世界中で微量成分分析の検討を行うのにつけての試料となったためである。さらに、標準値の設定には多くの報告された分析値を取りまとめる(compilation)必要があるが、地質試料に係わるこうした統計的な検討も行われており、地質試料の化学分析に非常に大きな貢献を果たした。

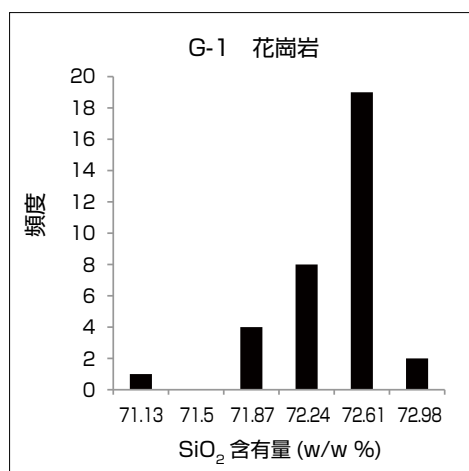
### 2.3 世界的な標準物質開発の始まり

最初の二つの試料について、こうしたさまざまな検討・研究開発が行われた結果、当初は単に機器分析の標準と考えていた試料に、分析方法・技術の開発・評価(精度、正確さ、練達度)という利用価値が生まれ、標準物質の必要性・有用性が広く認識されるようになった。最初の分析値が一致しなかったというつまづきが、かえって、標準物質の利用価値を広めるという逆の結果につながった。しかし、十数年にわたり世界中で使用された結果、当然のことながら、最初の二つの試料は使い果たされてしまう。それを見越して、1960年代にUSGSでG-1の替わりのG-2(花崗岩)を初めとする6種類の試料が新たに作製されるとともに、多くの国で標準物質開発の気運が高まり、作製が開始されていった。主な国(機関名)を列挙すると、米国(National Bureau of Standards, NBS)、英国(Bureau of Analyzed Samples, BAS)、フランス(Centre

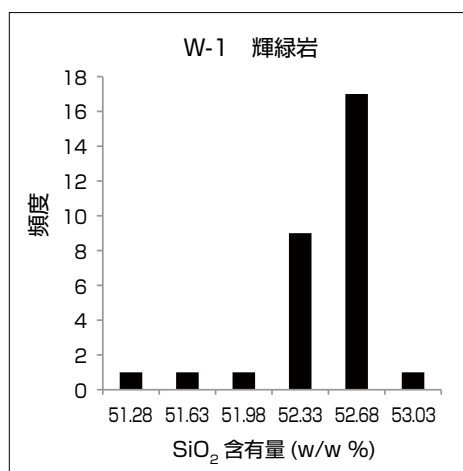
表2 1967年当時の世界の地球化学標準物質  
主要機関から発行されている試料について、安藤(1967)<sup>[1]</sup>より抜粋して作成。

国名	機関名	試料名
米国	USGS	安山岩、玄武岩、輝緑岩、ダナイト、花崗岩、花崗閃緑岩、霞石閃長岩、カンラン岩(調製中)
	NBS	玄武岩、ボーキサイト、耐火物煉瓦、セメント(5種)、鉄鉱石(2種)、石灰岩、マンガン鉱石、マグネサイト、葉長石、リン鉱石、珪砂、錳鉱石、リシヤ輝石、亜鉛鉱石
イギリス	BAS	耐火物煉瓦(2種)、鉄鉱石、マンガン鉱石、スラグ(3種)
フランス	CRPG	玄武岩、黒雲母、花崗岩(3種)
東ドイツ	ZGI	玄武岩、粘土質頁岩、花崗岩、石灰岩
カナダ	CAAS	閃長岩、硫化鉱石
日本	GSJ	花崗閃緑岩、玄武岩(調製中)

de Recherches Petrographique et Geochimiques, CRPG)、カナダ(Nonmetallic Standards Committee Canadian Association for Applied Spectroscopy, CAAS)、東ドイツ(Zentrales Geologisches Institut, ZGI)、そして日本(GSJ)である(機関名は当時の名称のまま)。標準物質開発を行った各国に共通していたことは、全て、自国産出の地質試料を使って作製していたということである。安藤(1967)<sup>[1]</sup>に掲載されている地球化学関連の標準物質一覧を基に、上記の国(機関)が当時発行していた標準物質のリストを表2にまとめたが、どういった種類の地質試料を標準物質にしているかということから、国・機関による意図が見て取れる。USGSは国土の基本となる火成岩が主体だが、NBSは鉱工業の原料・製品となる物質が主体である。GSJはUSGSと同様の火成岩からスタートしている。



分析数 34  
 平均値 72.24  
 標準偏差 0.37



分析数 30  
 平均値 52.33  
 標準偏差 0.35

図2 1951年に報告されたG-1およびW-1試料中の二酸化ケイ素含有量のヒストグラム  
 Fairbairn 他(1951)<sup>[2]</sup>より作成。  
 平均値より大きい値のところにピークがあり、ばらついている。

### 3 GSJでの開発シナリオ

#### 3.1 開始時の基本構想

##### 3.1.1 日本で作る意義とその背景

日本で地球化学標準物質を開発する最も重要な意義は「世界的な研究レベルで自国産出の岩石の化学組成を明らかにできる」ということであった<sup>16)</sup>。検討を開始した1960年代当時、機器分析はまだ一般的ではなく、湿式法が主体で、化学分析データを得るのに時間がかかり、1個の分析値が非常に貴重な時代であった。そうした状況にもかかわらず、最初の試料であるG-1、W-1は世界中で分析されて多くのデータが集まり、世界的な研究レベルで値がつけられた。また、この時期、地球化学標準物質の数はまだ少なく、発行と同時に世界中で分析され研究が行われていた。つまり、この時期に、日本の岩石を使って標準物質を発行すれば、世界レベルの分析値が多く得られることが期待できたためである。現在の標準物質開発の考え方からすると違和感を覚えるかもしれないが、初期においては、試料を作り、値をつけることそのものの研究開発要素が大きく、目的として成り立っていた。また、国土を構成する岩石（種類・化学組成）は国によって異なり、岩石種毎の必要性・優先度が異なるため、日本での研究開発に必要なものを優先的に作るには国内で作製するのが望ましいこと、外国から輸入するのに比べ入手がはるかに容易になり、日本国内での利用が促進され分析技術の底上げができることにも意義があった。

##### 3.1.2 基本理念

最初に考える問題は、どのような岩石種について標準物質を作るべきかということである。この岩石種選択には作製機関の意図が強く反映される。前項の意義に照らし、まず作製すべきは「日本を代表する岩石」ということを基

本理念として決定した。この選択には、実用上も大きな意味があった。日本を代表する岩石であるから、地質学的な研究資料（岩石学的記載・地質年代・化学分析例）が豊富で、多くの研究・分析が行われている。このため研究に使われる機会が多いことから、作製した標準物質の利用頻度が高く、良い分析値が集まりやすくなり、標準物質の利用が普及するといった効果が期待できた。

##### 3.1.3 要素技術の検討とGSJの強み

実際に標準物質を作製するに当って必要な要素技術は、大きく分けて、試料の選択、粉碎方法、標準値決定方式の3点である（第4章に詳述）。これらの要素技術と標準物質の開発に際して、GSJで作製する強みを合わせて図3に示した。試料の選択に際し最も重要なのはニーズの把握であるが、これは標準物質を最も必要としている地球化学の研究者自身が作製しており、また、周りにはあらゆる種類の地質試料について、各々の分野で日本を代表する研究者がいたことから、日本を代表する岩石という観点も含め、最良の選択ができる環境が整っていた。選択した試料の確保についても、GSJは国を代表する地質調査機関であり、日本国内であればあらゆる種類の試料が入手可能であったし、日本を代表する岩石というレベルの試料であれば、一定の規模以上の岩体が存在するため、必要な試料量の確保も問題なかった。また、当時GSJの化学分析技術は世界的に高い評価を受けており、試料を作製して配布する際に付与する初期分析値（GSJで分析した値）への信頼性が高く、試料の利用拡大に大きく貢献できると思われた。

#### 3.2 標準物質の評価と発展（展開）

##### 3.2.1 日本初の地球化学標準物質

前項で述べた基本理念とGSJの強みの下、1964年に

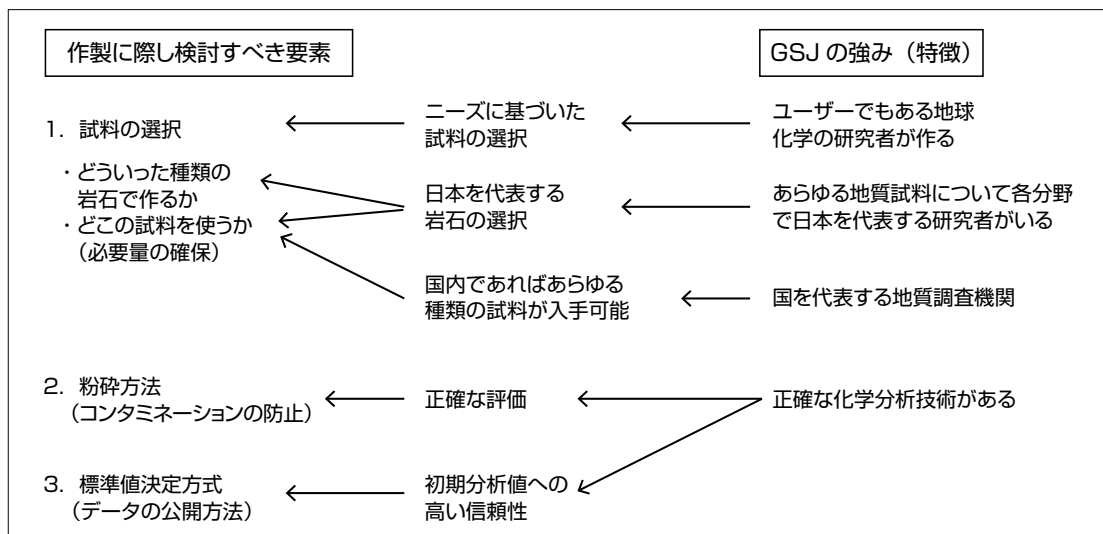


図3 地球化学標準物質にかかる要素技術とGSJの強み

日本での地球化学標準物質の開発が開始され(研究テーマ「地球化学的標準試料の研究」、1967年にJG-1(花崗閃緑岩、群馬県沢入)、1968年にJB-1(玄武岩、長崎県佐世保)の二つを最初の標準物質として作製した。この2種類の試料の最大の特徴は、徹底してコンタミネーションを避けて作られた点にある。地球化学標準物質は、基本的に塊状の岩石を粉碎して粉末にするため、粉碎器からの一定のコンタミネーションは避けられない。詳細は第4章に記載したが、1960年代当時一般的に使われていたスチール製の粉碎器からの鉄等の混入は、ある程度仕方がないものとされており、実際の化学分析を行う立場からすれば、混入が均質で、試料の分解に影響がないのであれば、標準物質としての利用に何ら支障はなかった。しかし、日本を代表する岩石の化学組成を明らかにするという観点からは、可能な限りコンタミネーションを防ぎたいとの考えから、粉碎する岩石と同じ岩石で作った臼と杵でつぶすという“ともずり”(ともすり)の方法で粉碎された。これは非常に手間がかかる方法であったが、十分な手間をかけたおかげで、「日本の標準物質は非常に丁寧に作られており、元の岩石の組成をそのままに反映している」と、世界の機関から標準物質として最も重要な「信用」を得ることができた。その結果、通常の化学分析値のみならず、元素の同位体比、年代値、さらに岩片を用いて弾性波速度や破壊強度といった物性常数<sup>[7]</sup>も報告された。当時、化学分析用標準物質について物性常数まで報告された例はなく、世界的にも高評価を受けた。こうして世界的に使われたことで1980年代前半には、両試料とも在庫がなくなり配布停止になってしまい、1984年に同じ源岩を用いて再調製したJG-1aおよびJB-1aを新たに作製している。地質試料の標準物質は同じ源岩を用いても、元素含有量が完全に同一の試料を作製することは不可能なので、再調製試料にはa、b、c…の順でアルファベットを追加して区別している。

### 3.2.2 高評価によるプロジェクト化

最初の2種類の標準物質の成功は、地球化学標準物質開発の環境に大きな変化をもたらした。1964年の開発当時の研究テーマは、最も基本的な経常研究の一部として行われており、予算規模もごく小さいものであったが、高評価を受けたことで、1981年にGSJ内の特別研究「岩石標準試料の作製に関する研究」としてプロジェクト化された。プロジェクト化されたことで作製のペースが加速され、1982年に3つめの標準物質であるJA-1(安山岩、箱根山)を作製して以降、年に2~3種類程度のペースで新たな標準物質を作製していき、1990年頃までに、最初の火成岩シリーズ17種類(内2種類は上記の再調製試料)、次い

で堆積岩シリーズ9種類を作製し、当初の目的であった「日本を代表する岩石」をほぼ網羅できた。この成果は、地質学の観点からも「GSJの標準物質は日本の代表的な岩石を網羅しており、さらにその組成は日本列島の化学組成と同一である」と、高く評価された。1996年10月に発行された「新版地学事典」の付図付表に「地質調査所岩石標準試料の主化学組成」として、火成岩シリーズ15種類(配布停止になっていた最初の2種類を除く)および堆積岩シリーズ9種類の主成分の推奨値(標準値)が掲載される<sup>[8]</sup>等、GSJで標準物質を作る意義が広く認められた。また、この成功には前述したGSJの高い分析技術も大きく貢献した。当時、標準物質は、発行機関であるGSJの初期分析値を付与して配布し、その後、分析データを集めて標準値を設定するという方式だったため、標準値が定まるまでには一定の期間が必要であったが、GSJの初期分析値への信頼性が高かったため、一般の分析所では、初期分析値が標準値として利用されていた。

この1990年頃までに、地球化学標準物質は広く普及し、当初の研究機関での使用のみならず、一般の分析所でも日常的に使われるようになり、多くの岩石種に対して標準物質が発行された。1977年にAbbeyがまとめた地質関連の標準物質のリスト<sup>[9]</sup>では、16発行機関の75種類であったものが、1992年にPottsがまとめたリスト<sup>[10]</sup>では、35機関の493種類に増大しており、GSJでもプロジェクトの新たな展開が検討された。

## 3.3 標準物質および機器分析の普及にともなう変化

### 3.3.1 ニーズの変化

標準物質が開発された初期においては、その使用者は大学や研究機関が主体で、標準物質を単に利用するのではなく、標準物質の値付けに参加して、少しでも正確で、精度の高い標準値を付与できるように、開発機関と一体になって標準物質を作り上げていった。しかし、標準物質の開発が広く行われるようになり、一般の分析所や、化学分析を専門としない研究者の利用が増えてくると、値付けに参加するのではなく、値がつけられた試料を文字通り標準物質として利用するという使用者が主体となり、研究目的での分析方法の開発といった目的は不変だが、分析の精度管理や検量線の作製といった、本来の標準物質としての使い方が主になっていった。これは、標準物質開発が初期段階を脱して成熟するにつれて発生した自然な流れであり、試料の選択や標準値決定方法、配布方式の変化へとつながっていった。

### 3.3.2 分析方法の進歩

地質試料の化学分析に使われてきた分析方法の変化を図4に示した。初期の機器分析は、装置が大がかりで高



価でもあり、分析精度もまだ不十分であったため、湿式分析での定量分析が難しい微量元素の分析を除き、主流は湿式分析であった。しかし、分析機器はその後急速に進化し、1970年代頃から蛍光X線分析法や原子吸光分析法により一気に機器分析が普及していき、1980年代の高周波誘導結合プラズマ(ICP)を使った発光分光分析および質量分析により、大部分の化学分析が機器分析で行われるようになった。JIS等の公定法でも、正確さの高い湿式分析の方法も残ってはいるが、主体は機器分析へとシフトしている。こうした汎用機器分析の普及には標準物質の開発・普及が大きく関わっている。例えば、蛍光X線分析法では、いくつかの地球化学標準物質を組み合わせることで、定量分析のための検量線を作製しており、地球化学標準物質なしには正確な定量分析は行えない。原子吸光法やICP法でも、マトリックスや共存成分からの影響を評価し、分析精度を管理するには地球化学標準物質を使うことが必須であり、機器の開発・進歩と、標準物質の開発・普及が一体となって発展してきた。

#### 4 標準物質開発のための要素技術

##### 4.1 試料の選択

##### 4.1.1 初期の試料選択 (日本を代表する岩石)

基本理念に基づき、日本を代表する岩石ということで、日本列島を構成する主体である火成岩(ケイ酸塩岩石)についてまず作製することとし、最初の2種類の標準物質としては、二酸化ケイ素含有量の多い花崗岩質の岩石 JG-1 (JはJapan、Gは花崗岩 Granite) および、苦鉄質(鉄やマグネシウム含有量が多い) で比較的二酸化ケイ素含有量が少ない玄武岩質岩石 JB-1 (Bは玄武岩 Basalt) を選択し

た。次に、どこの地域から試料を採取するかという検討になり、地質学的な研究資料が豊富で、多くの研究が行われているという観点から、JG-1としては、群馬県入りの花崗閃緑岩、JB-1としては長崎県佐世保のアルカリ玄武岩が選ばれた。実際の試料採取に際しては、岩石の地表に露出している表面は、風化や汚染といった影響を受けているため、採石場や石切場から、これまで表面が大気中に露出していなかった新鮮な試料を採取した(図5)。標準物質の作製には通常200kg程度の試料採取が必要で、特に、最初の2種類については、その後の研究用も含め400kg程度の源岩を採取しているが、こうした場所であれば、比較的容易に確保できた。

前述したとおり、この最初の2種類の試料が高い評価を受け、プロジェクト化されて以降は、火成岩シリーズ、堆積岩シリーズの順で日本の代表的な岩石種について作製したが、特に主要な花崗岩(G)、玄武岩(B)、安山岩(A、Andesite)については表1にあるとおり各々3種類の試料を作製している。これは、各岩石種でもその中はさまざまな特徴によりさらに細分化されているため、地質学的に全体のバランスをみて主要な区分から作製したためである。玄武岩を例にとると、日本に産出する玄武岩は、鉍物組成や化学組成から、ナトリウム、カリウムに富み、鉄が乏しいアルカリ玄武岩、カルシウム、鉄に富み、ナトリウム、カリウムが乏しいソレライト玄武岩、前2者の中間でアルミニウムが多いハイアルミナ玄武岩の大きく3つに区分されるため、各々の区分から、JB-1 長崎県佐世保、JB-2 伊豆大島、JB-3 富士山を作製した。

##### 4.1.2 機器分析・環境分析に対応した試料選択

1980年代で火成岩シリーズ、堆積岩シリーズが完了する

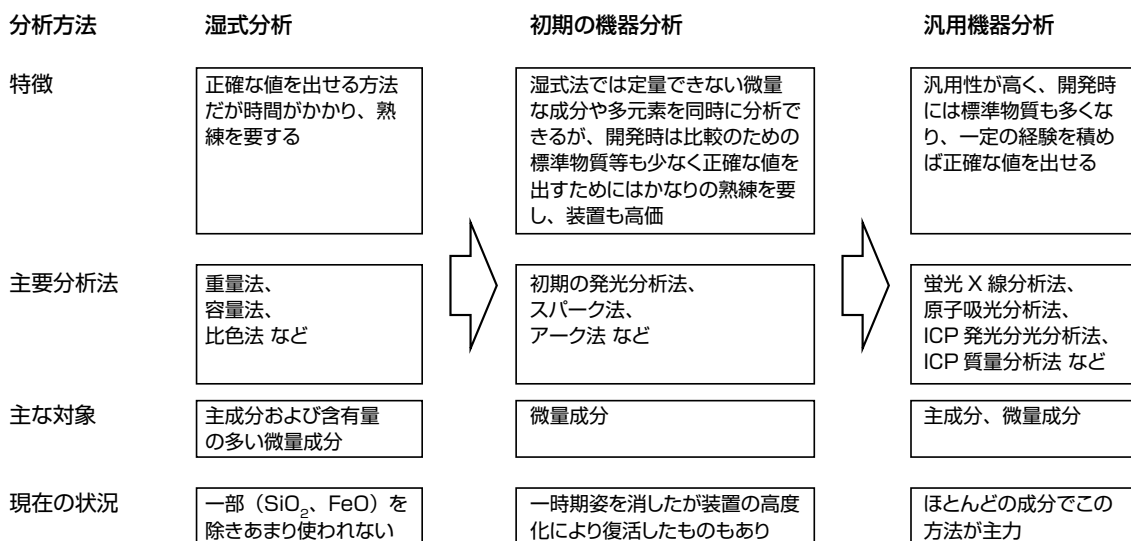


図4 地質試料の主な化学分析方法と変遷  
基本的に左から右に分析方法の時系列の変遷を示す。

と、地質学的な区分により行っていた試料の選択から、分析化学的な要求による試料の選択へと変化していった。具体的には、原子吸光法やICP発光分光分析法といった機器分析で検量線を作製するために適当な濃度の試料が求められるようになったため、これまでに作製した試料を各成分の濃度順に並べてみて、抜けている部分を補うような試料の選択を行い、機器分析シリーズとして作製した。特徴的な例はアルミニウム、ナトリウム、カリウムが多いJSy-1 (閃長石) で、日本国内に適当な試料がなかったため、カナダから源岩を購入して作製している。

また、この頃になると、地球環境研究が盛んになり、土壌や堆積物といった環境試料の分析ニーズが非常に高まっていた。地球化学標準物質を作っている研究室でも元素の濃度マップである「地球化学図」プロジェクトが同時に進行し、地球化学図作成に用いる河川堆積物、海底堆積物の標準物質が求められたため、環境分析シリーズの作製を開始した。特徴的な例としてはJCp-1 (サンゴ) がある。現在から数百年前程度の海水中の環境情報の復元のために、サンゴ試料中のさまざまな元素が、多くの研究室で分析されていたが、分析結果の信頼性に問題があった。そのため、関連プロジェクトからの依頼で、分析精度の向上 (環境の復元精度の向上) および研究室間の分析結果の比較 (信頼性の確保) のために世界で初めて一般化学分析用サンゴ標準物質を作製し、世界中で利用された<sup>[11]</sup>。

## 4.2 試料の粉碎

### 4.2.1 コンタミネーションのない粉碎方法の検討

試料の粉碎で、最も考えなくてはならないことは粉碎に用いる機器からのコンタミネーションである。粉碎の検討過程の詳細は安藤 (1984)<sup>[6]</sup> にまとめられているので概略のみ記すと、GSJでの開発当時、最も問題になったのは、スチール製の粉碎器からのコンタミネーションで、全工程をスチール製で行った場合、鉄の他、鉄材料に含まれるマンガン、ニッケル等の微量成分が入ってくるとされており、GSJで、けい石を用いて行った粉碎実験でも、鉄の混入は避けられなかった。ただ、100 kg単位の試料を粉碎することを考えるとスチール製粉碎器の使用は非常に効率的で、USGSがG-1を作製する際も、鉄の混入は仕方がないとしてスチール製ジョークラッシャーを用いて粉碎している。また、日本と同時期に開発を開始した、当時の南アフリカ共和国冶金学研究所 (National Institute for Metallurgy, NIM) はスチール製ジョークラッシャーにより混入した鉄を、磁石 (マグネチックセパレーター) で取り除いてコンタミネーションさせないようにしているが、この方法は混入した鉄と同時に、磁鉄鉱等の試料に元々含まれている磁性鉱物をも取り除いてしまう欠点があった。前述したように、USGSの方法も、NIMの方法も、元素の化学分析の標準とすることだけを考えれば、実際には大きな問題にはならないが、GSJでの開発の基本理念に照らすと、コンタミネーションや、特定の物質が除かれる方法は、試料の元々の特性を変えてしまう恐れがあった。可能な限り元の試料の特性を残した標準物質にしたいという観点から、コンタミネーション等の影響を受けない方法を模索した結果、砕く試料と同じ材質の粉碎

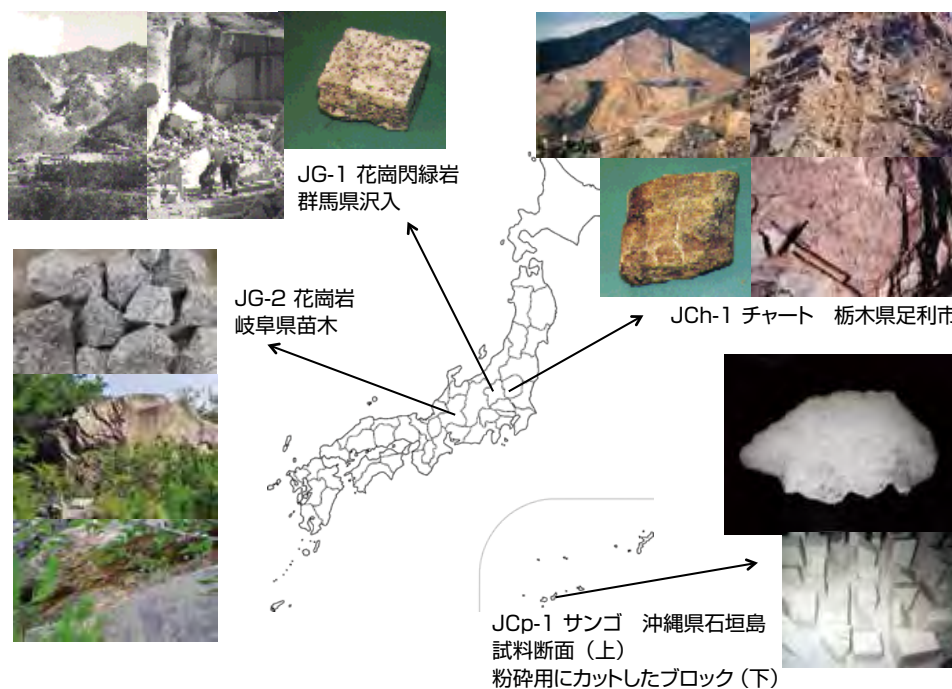


図5 採取した源岩試料および採取地の例

器で砕くという“ともずり”の方法で粉碎した。粉碎過程の概略を図6に示したが、JG-1は花崗岩、JB-1は玄武岩で臼と杵を作製して粗粉碎し、陶器製のポットミルで粉碎混合した。この方法は、人力で臼と杵を使って粉碎するため、コンタミネーションはないものの、多大な労力と時間がかかる。しかし、当時、世界的にもここまで粉碎に気を配って作製された標準物質はなく、徹底して行ったことで、前述したとおり、高い評価を得ることができ、その後の標準物質の発展に大きく貢献した。

#### 4.2.2 粉碎方法の効率化

1980年代に入り標準物質の作製がプロジェクト化され、毎年標準物質を作製するようになると最初の標準物質のような労力をかけるのは難しくなり、粉碎の効率化を検討する必要が生じた。3番目の標準物質であるJA-1（安山岩、箱根山）では、粗粉碎はJB-1と同様に同じ岩石で臼と杵を作って行ったが、微粉碎にはアルミナ内張のボールミルを用いている<sup>[6]</sup>。ポットミルに比べ大量の試料を処理することができ、内張に使われているアルミナは岩石試料には多く含まれているため、コンタミネーションの影響を受けにくい利点があった。また、ここでも一工夫加えて、粉碎に用いるボールに、同じ岩石のこぶし大～鶏卵大の塊をボールとして用い（源岩ボール）、“ともずり”により粉碎して、少しでもコンタミネーションを減らす努力をしている。その後は、臼と杵はさすがに非効率なため、基本的に、スチール製ジョークラッシャー（刃はマンガン鋼）により粗粉碎するようになった。この頃になると、装置の改良や試料中に

表3 JB-1 試料および再調製試料の主要成分含有量

	JB-1 (1968)	JB-1a (1984)	JB-1b (1996)
	推奨値	推奨値	初期分析値
(w/w %)			
SiO <sub>2</sub>	52.37	52.41	51.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.53	14.45	14.38
T-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.99	9.05	9.02
MnO	0.153	0.148	0.147
(μg/g)			
Co	38.2	38.6	40.3
Cr	425	392	439
Cu	55.1	56.7	55.5
Ni	133	139	148

T: total, JB-1&JB-1a:Imai他(1995)<sup>[12]</sup>, JB-1b: Terashima他(1998)<sup>[13]</sup>

鉄やマンガンは一定量含まれていることもあってか、ジョークラッシャーからの混入はほとんど問題にならなくなっており、現在は、図6に示したように、スチール製ジョークラッシャーで粗粉碎後、アルミナ内張ボールミルでアルミナないし源岩ボールで粉碎している。JG-1、JB-1 試料がなくなってきた頃に、最初の作製時に採取していた残りの試料を使って再調製した試料 JG-1a、JB-1a も現在の方法で作製した。JB-1 は再々調製試料の JB-1b も作製しているため、例として、JB-1、1a、1b の3種の主要成分の分析値を比較したが（表3）、粉碎器からの影響は見取れない。

#### 4.3 標準値決定方法およびデータの公開

##### 4.3.1 無償配布時の標準値決定とデータの公開

作製した試料は、まずGSJで分析し、この初期分析値

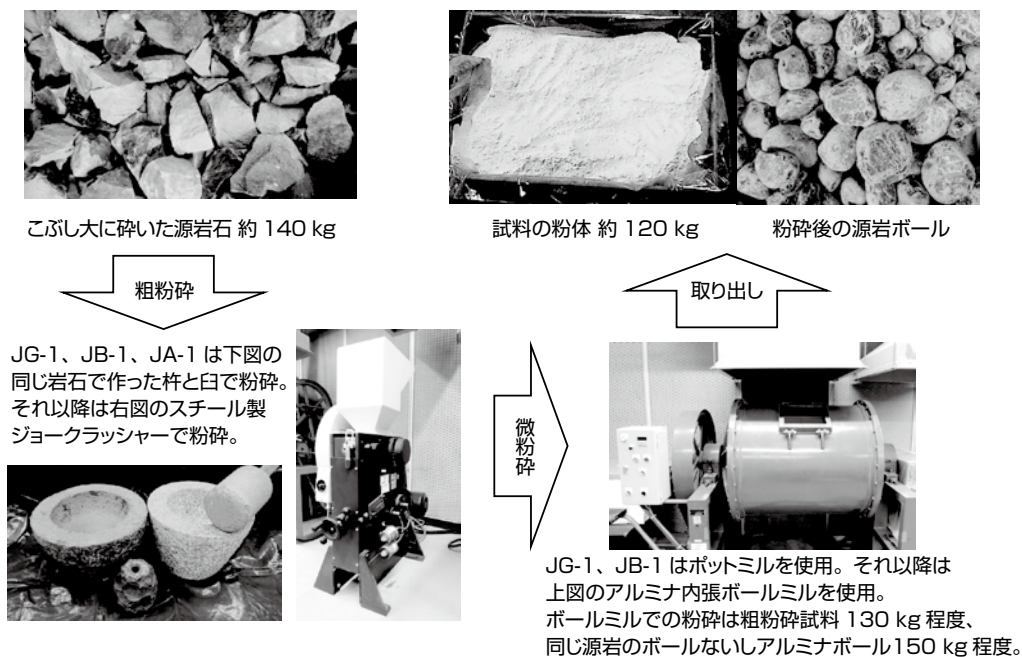


図6 試料の粉碎過程概略図  
試料等の量は100 g 入り1,000 本を作る際の目安

をつけて世界中に配布し、分析データを収集した。基本的には試料を作製した旨学会誌等に公告し<sup>[14][15]</sup>、配布希望者を募り、試料を分析したデータの送付を条件として、無償で配布した。標準物質の配布方式は大きく分けて二つの方式がある。一つはGSJでも採用した、原則無償で配布する代わりに分析値の報告を義務化し、収集した分析値から標準値を決定する方式。もう一つは、試料にあらかじめしっかりと標準値をつけた上で販売する方式である。現在は、後者が主流であるが、当時後者を取っていたのはNBS(現NIST)およびBAS等で、多くは前者の方式であった。標準物質という名称の本来の定義で言えば後者のみが該当し、前者はいわば研究用の共通分析試料とも言うべき位置付けであるが、USGSのG-1、W-1の経験から、分析方法の変化(進化)により、値が変化する可能性があること、また、地質試料ではほぼ全ての元素が分析(研究)対象となるが、多くの元素について初めから確かな値をつけることは非常に困難で、進化する分析方法に応じて多様な元素の分析値を収集するには前者が有効だったからである。

報告された分析結果を取りまとめて、1971年に最初の報告を学会誌に行ったが<sup>[16]</sup>、この時点での報告された全分析値(JG-1 24個、JB-1 17個、分析方法および分析者名含む)と全体の平均値、標準偏差、平均値から $\pm 2\sigma$ を超える範囲の値を除いた平均値が公開されている。その後、ある程度分析値が集まった段階で、報告された分析値を統計計算して得た標準値を学会誌に報告しているが、分析値の数が多くなると全てを掲載することはできなくなり、分析方法毎の平均値や分析値の範囲といった記載にとどまっている。一口に「標準値」と表現したが、実際にはその値の呼び方も変化がある。初期は“Consensus Mean (Value)”としており、その後は、ある程度の数の分析値があり信頼性が高いものは“Recommended Value”(推奨値)、分析値の数が少なく信頼性が低いものは、初めは“preferable data”その後“Reference Value”(参考値)として公表した。また、試料配布後に分析値を集めて標準値を設定するという方式の性格上、標準値は変動する可能性がある。表4に、JG-1試料の主成分値の変遷を示したが、主成分についてはほとんど変動していない。

#### 4.3.2 配布方式の変更と認証標準物質化

地球化学標準物質が広く使われるようになると、無償だが分析値の報告は義務、というのは一般の利用者にとっては使い難く、報告義務のない“売ってほしい”という要望が増えてくる。また、ISOによる世界的な標準化の流れが、1990年代後半になると地球化学標準物質にも及んできて、正確さが実証された方法で値付けされた認証値

表4 JG-1試料主成分標準値の変遷

設定年	1971年	1974年	1988年	1994年
標準値の呼び方	consensus mean	consensus mean	consensus value	recommended value
(w/w %)				
SiO <sub>2</sub>	72.24	72.28	72.30	72.30
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.27	0.26	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.21	14.23	14.20	14.20
T-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.21	2.17	2.14	2.18
MnO	0.06	0.061	0.063	0.063
MgO	0.73	0.73	0.74	0.74
CaO	2.18	2.17	2.18	2.20
Na <sub>2</sub> O	3.39	3.38	3.39	3.38
K <sub>2</sub> O	3.96	3.96	3.97	3.98
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.098	0.097	0.099

1971年：Ando 他 (1971)<sup>[16]</sup>、1974年：Ando 他 (1974)<sup>[17]</sup>、1988年：Ando 他 (1989)<sup>[18]</sup>、1994年：Imai 他 (1995)<sup>[12]</sup>

(Certified Value)を付与して配布する認証標準物質化ということが、検討課題となってきた。こうした状況の中で、2001年4月にそれまでの国立研究機関から、独立行政法人への改革がなされ、それにともない標準物質は原則販売することとされた。また、GSJはこれまでの実績から地球化学標準物質の主要発行(生産)機関として世界に認知されていたことから、一定の社会的責任を負っていたため、GSJ標準物質の販売に際しては、ISOの規定に従い、認証標準物質とすることが望ましいとの考えに至り、認証値をつけて販売するという、これまでとは全く逆の方式に舵を切った。標準物質生産者としてのISO認定は2007年に独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)認定センター(IAJapan)のASNITEプログラムで取得した<sup>[19]</sup>。現在、新規に作製する標準物質は全て、認証標準物質としており(図7)、認証地球化学標準物質の開発で2010年文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)を受賞した。

#### 4.3.3 データベースによる公開

報告された分析値は、初期は全データを学会誌等で公開したが、分析値が増えるにしたがって誌上で全てを公開するのは難しくなっていた。そのような状況下で、インターネット環境が整ってきた頃に、旧工業技術院で研究成果をデータベースとして広く公開するプログラム(RIO-DB)が開始されることになった。地球化学標準物質の分析データは、統計処理することもあり、試料、成分(元素)、分析値、分析方法、分析者、文献(報告日)といった情報が全てセットで電子化されており、比較的容易にデータベース化できるとの認識から、RIO-DBとして最初に整備されるコンテンツの一つとしてあげられた。GSJとしても、できるだけ多くの分析値を公開する方法を模索している中、データベース方式であれば全データを公開でき、広く利用してもらえるため、うってつけの方式であった。こうして整備さ

れた「岩石標準試料データベース」は非常に好評で、標準物質の利便性を高め、普及にも大きく貢献するとともに、RIO-DBの発展にも貢献した。現在は、地質調査総合センターの地質情報データベース (Gbank) の「地球化学標準物質データベース」(図8)として公開されているが、報告された全データを公開しているのは、世界でもGSJだけである。

## 5 地球化学標準物質の総括と未来

### 5.1 GSJ地球化学標準物質の総括

これまでのGSJでの地球化学標準物質の開発について総括すると、開発当初に意義として掲げた「世界的な研究レベルで自国産出の岩石の化学組成を明らかにできる」という点については、火成岩シリーズ、堆積岩シリーズの整備およびその評価から、十分に達成できたものとする。また、標準物質の開発にともない背負うことになった、世界的な標準物質生産者としての社会的責任や時代が必要とする標準物質の供給、標準物質の利用普及・ユーザーサービス、といった時代・環境にともなう変化についても、各々、ISOに対応した認証標準物質化や機器分析・環境分析等で使いやすい試料の供給、Webページ(データベース)によるユーザーサポート、といった形で応えることができおり、完全ではない部分はもちろんあるが、十分な役割を果たせたと考える。開発当初から、GSJ地球化学標準物質は世界中で利用されてきたが、現在の販売先も約半数は国

外で、日本を代表する発行機関として世界中で使われる標準物質を開発できたことは誇りである。また、繰り返したことであるが、標準物質は時代とともに変化してきた。今後も、さまざまな変化に柔軟に対応していくことが成功につながると考える。

### 5.2 これからの地球化学標準物質

では、今後、地球化学標準物質はどう変わっていくのか。標準物質の利用そのものは現在よりも拡大し、その重要性がより増していくことは想像に難くないが、取り巻く環境の変化を予測してみる。まず、試料については、やはり環境試料の分析が増大し需要が高まる。次に、分析技術者について考えると、旧来からの湿式法を行える技術者は激減し、機器分析のオペレーター的な技術者が大多数になる。そして、分析方法については、あらゆる分析が自動分析・流れ分析化し、前処理をしていない生の試料を、装置にセットしてボタンを押すと、さまざまな処理を装置が自動で行い、分析結果のみが出力されてくるという方向に進むとともに、試料の中の元素の存在形態分析も増加すると思われる。

結果として、環境分析、形態分析に対応した標準物質の開発が求められることになるが、こうした試料の標準物質開発の最大の問題点として、試料の安定性がある。この論文では、標準物質について重要な要因の一つである安定性については触れてこなかったが、その理由は岩石試料の場合、基本的に安定で、ほぼ永続的に使用可能だからである。

#### 認証書記載内容

- 生産者(発行者)
- 試料名
- 主な使用目的
- 認証値・参考値
- 分析方法(測定方法)
- 試料前処理方法(分解方法)
- 認証値の決定方法
- 試料調製方法(作製方法)
- 使用上・保管上の注意
- 均質性の確認
- 協力機関
- 発行年月日・発行責任者
- 連絡・問い合わせ先 など



独立行政法人 産業技術総合研究所  
地質調査総合センター 地質情報研究部門  
地球化学標準物質認証書  
認証標準物質  
GSJ CRM JB-2a 玄武岩(伊豆大島三原山)  
GSJ certified geochemical reference material JB-2a Basalt (Oshima volcano)



本標準物質は、玄武岩やそれに類似したマトリックスを持つ試料中の主・微量成分濃度の定量において、分析の精度管理及び分析方法や分析装置の妥当性の確認に用いることができる

成分	認証値(%)	分析方法(下記参照)
SiO <sub>2</sub>	53.22 ± 0.21	1
TiO <sub>2</sub>	1.18 ± 0.02	2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.67 ± 0.08	2
全Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.18 ± 0.07	2, 3, 4
FeO	9.83 ± 0.12	4
MnO	0.214 ± 0.004	2, 3
MgO	4.58 ± 0.04	2, 3
CaO	9.79 ± 0.05	2, 3
Na <sub>2</sub> O	2.03 ± 0.02	2, 3
K <sub>2</sub> O	0.41 ± 0.01	2, 3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.095 ± 0.005	2, 5

参考値  
認証成分以外のいくつかの成分について分析値の一部を参考値として以下に示す。

成分	参考分析値 (mg/kg)	分析方法 (下記参照)	成分	参考分析値 (mg/kg)	分析方法 (下記参照)	成分	参考分析値 (mg/kg)	分析方法 (下記参照)
Ba	219, 225	2, 2	Li	7.9, 7.84	3, 2	V	574, 575	2, 2
Co	40, 38.4	2, 2	Ni	14.5, 16.5	2, 2	Y	25.4	2
Cr	28, 27.7	2, 2	Pb	7.2	6	Zn	109, 107	2, 2
Cu	234, 269	2, 2	Sr	178, 179	2, 2	Zr	81.8	2

その他の成分の分析値についても同様に「産総研地球化学標準試料ホームページ」上で公開するので参照されたい  
<http://www.aist.go.jp/RIODB/geo/stand/welcomej.html>

分析方法  
1) 重量法と吸光度法, ICP発光分光法, 原子吸光度法のいずれかの併用  
2) ICP発光分光分析法  
3) フレーム原子吸光分析法  
4) ニオブとモリブデンの測定法  
5) 吸光度法  
6) 蛍光法

図7 認証書の一例

記載項目一覧とJB-2a:伊豆大島玄武岩の認証書の一部。

JG-1、JB-1 試料は現在でも、40 年以上前に分析されたデータを使って標準物質として使用できる。しかし、環境分析、形態分析に対応した試料では、標準物質を開発しても、使用できる期間が極めて短いものもある。例えば汚染土壌試料（一定の有機物、水分を含む）中の 6 価クロムの分析ということで考えると、粉碎してビン詰めして一定期間が経過すると、6 価クロムは、ほとんどが 3 価クロムに変化してしまい、6 価クロム分析用の標準物質を作製できたとしても、使用できる期間は極めて短いものになる。また、環境分析で今後要求される標準物質のマトリックスは多様で、対象成分も多岐にわたることが予想され、前述したような自動分析で、より正確な分析を行うためには、これまで以上に多様なマトリックスに対応した標準物質を、可能な限り短期間で開発する必要がある。現在の GSJ で行っている標準物質開発は、天然の試料を粉碎して作製するため、開発の検討開始から供給まで、最低でも数年という時間が必要であり、こうした短サイクル、短期間での供給は不可能であるため、今後は、工業的に、必要なマトリックスと成分を合成した標準物質の開発が求められる。こうなると GSJ のみで対応することは難しく、また、こうした技術開発は地球化学のみならず、標準物質全体にとって非常に重要であるため、計量標準総合センター (NMIJ) を中心に産総研の各領域の知識と技術を結集して対応すべき課題であると考えられる。

### 5.3 GSJ 地球化学標準物質の将来構想

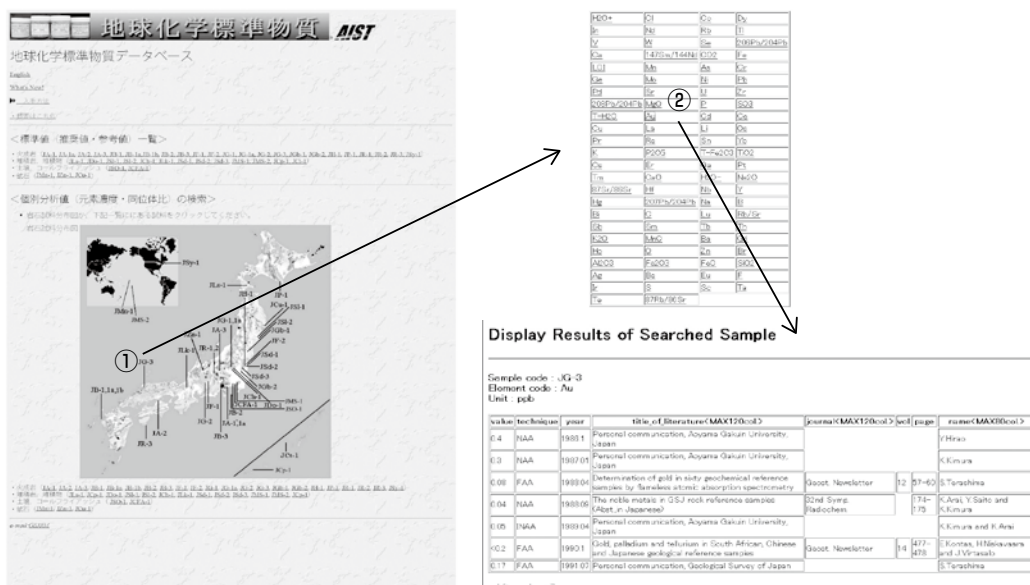
現在、作製している形の地球化学標準物質の重要性は将来も変わることはない。前述したとおり、ほぼ永続的に

使用できるため、40 年以上前の分析結果と現在の分析結果の相互評価が可能であり、ベースとなる標準物質として供給を維持していく必要がある。現在は、初期のシリーズで作製した試料がなくなりつつあり、再調製試料を中心に、一定数の標準物質供給を維持すべく整備を行っている。また、最近の研究開発現場では、レーザーヤイオンプローブを用いた局所分析により、岩石を構成する個々の微小鉱物や、鉱物間の境界での元素分析が試みられており、そうした局所分析に対応できる、岩石を溶融してガラス化した標準物質（ガラス化により、均質にした試料）が求められている。現在、岩石を溶融してガラス化した標準物質が供給できているのは USGS のみであり、USGS との協力も含め検討が必要と考えている。

最後に、標準物質の開発で、いかなる状況でも絶対に必要なことは、正確な値（標準値）を付与できる分析技術を持することである。今後、さまざまな標準物質が作られていくと思われるが、正確な値の付与が必要ということ是不変である。前述したように熟練した技術者が減少し、機器分析のオペレーターの技術者が増加する中で、国を代表する研究開発機関として、GSJ に限らず産総研にとって最も重要なことである。

### 謝辞

この論文執筆に際し、地質情報研究部門今井登博士には貴重な資料を提供していただくとともに、多くのご助言を賜った。今井博士を初め、地球化学標準物質に携わってこられた先輩方に敬意と感謝を表します。



## 参考文献

- [1] 安藤 厚: 地球化学的標準試料について, *地質ニュース*, 158, 23-27 (1967).
- [2] H. W. Fairbairn and others: A cooperative investigation of precision and accuracy in chemical, spectrochemical, and modal analysis of silicate rocks, *U. S. Geological Survey Bulletin*, 980, 71 (1951).
- [3] R.E. Stevens and others: Second report on a cooperative investigation of the composition of two silicate rocks, *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1113, 126 (1960).
- [4] M. Fleischer and R.E. Stevens: Summary of new data on rock samples G-1 and W-1, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 26-5, 525-543 (1962).
- [5] C.O. Ingamells and N.H. Suhr: Chemical and spectrochemical analysis of standard silicate samples, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27-8, 897-910 (1963).
- [6] 安藤 厚: 標準岩石試料の調製, *ぶんせき*, 116, 597-602 (1984).
- [7] 飯塚 進, 井波和夫: 地球化学的標準試料JG-1およびJB-1の物理的性質, *地質調査所月報*, 27, 155-165 (1976).
- [8] 地学団体研究会編: *新版地学事典 付図付表*, 71, (株)平凡社, 東京 (1996).
- [9] S. Abbey: Studies in "standard samples" for use in the general analysis of silicate rocks and minerals, *Geological Survey of Canada Paper*, 77-34 (1977).
- [10] P.J. Potts, A.G. Tindle and P.C. Webb: *Geochemical reference material compositions*, Whittles Publishing, London (1992).
- [11] T.Okai, A.Suzuki, H.Kawahata, S.Terashima and N.Imai: Preparation of new GSJ geochemical reference material Coral JCp-1, *Geostandards Newsletter*, 26, 95-99 (2002).
- [12] N. Imai, S. Terashima, S. Itoh and A. Ando: 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, "Igneous rock series", *Geostandards Newsletter*, 19, 135-213 (1995).
- [13] S. Terashima, M. Taniguchi, M. Mikoshiba and N. Imai: Preparation of two new GSJ geochemical reference materials: basalt JB-1b and coal fly ash JCFA-1, *Geostandards Newsletter*, 22, 113-117 (1998).
- [14] A. Ando: A new silicate rock standard, JG-1 issued from the Geological Survey of Japan, *Geochemical Journal*, 1, 155 (1967).
- [15] H. Kurasawa: A new silicate rock standard, JB-1 issued from the Geological Survey of Japan, *Geochemical Journal*, 2, 185 (1968).
- [16] A. Ando, H. Kurasawa, T. Ohmori and E. Takeda: 1971 compilation of data on rock standards JG-1 and JB-1 issued from the Geological Survey of Japan, *Geochemical Journal*, 5, 151-164 (1971).
- [17] A. Ando, H. Kurasawa, T. Ohmori and E. Takeda: 1974 compilation of data on the GSJ geochemical reference samples JG-1 granodiorite and JB-1 basalt, *Geochemical Journal*, 8, 175-192 (1974).
- [18] A. Ando, H. Kamioka, S. Terashima and S. Itoh: 1988 values for GSJ rock reference samples, "Igneous rock series", *Geochemical Journal*, 23, 143-148 (1989).
- [19] 岡井貴司: 認証地球化学標準物質について, *地質ニュース*, 663, 61-63 (2009).

## 執筆者略歴

岡井 貴司 (おかい たかし)

1984年東京理科大学理学部化学科卒。同年工業技術院地質調査所入所、技術部化学課に配属。現在、地質情報研究部門地球化学研究グループ、博士(環境学、名古屋大学環境学研究科)。分析化学、地球化学を専門とし、地質試料の化学分析法の研究、炭酸塩の地球化学の研究等を行ってきた。現在は、地球化学標準物質の作製・値付け・品質管理を担当。認証地球化学標準物質の開発で2010年文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)を受賞。



## 査読者との議論

## 議論1 全体について

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

地球化学標準物質に関しては日本の国立研究所(地質調査所)が約50年にわたって研究開発に取り組んできた。この論文では、地質試料の信頼性の高い化学分析を支援することを目的とした地球化学標準物質の開発と提供のシナリオが明快に描出されている。50年間の研究開発の中で標準物質の利用ニーズの変化に応じてシナリオが柔軟に見直され、新たな研究計画に反映されていることは興味深い。日本独自のアイデアを含む地球化学標準物質が現在世界で広く使われていることも注目される。

この論文は他分野の読者からも読みやすい記述と構成になっており、多くの人々の参考になることが期待される。シンセシオロジー誌の論文として優れたものと評価する。

コメント (栗本 史雄: 産業技術総合研究所)

工業技術院地質調査所および産総研地質調査総合センターは50年にわたり、50種類以上の信頼性の高い標準物質を発行している。この論文では、地球化学標準物質に関する世界の動向や標準物質の開発に係るGSJの取り組みについて、研究の意義、プロセス、成果が詳細にまとめられている。また、分析機器の進展に伴う標準物質の変遷と今後の展望についても記述されている。このようにこの論文は地球化学標準物質のこの半世紀の進展を総括し、未来の展開を提示しており、シンセシオロジーに掲載するにふさわしいと判断する。

## 議論2 湿式法の重要性

質問 (小野 晃)

この論文の記述から、次のように理解してよろしいでしょうか。「機器分析法は分析に手間と熟練を要さないという利点はあるが、分析結果は相対値しか得られない。そこで機器の校正のために元素濃度の絶対値が付与されている標準物質が必要になる。一方湿式法は手間と熟練を要するが、分析結果は元素濃度の絶対値が得られるという利点がある。このため標準物質の元素濃度標準値はもっぱら湿式法によって決められている。」

上記の理解が正しければ、標準物質提供機関は分析値(絶対値)の信頼性を確保するために、絶対値が得られる湿式法の技術開発も合わせて行う必要があるのではないかと考えますがいかがでしょうか。また産総研では現在でも湿式法に関して何らかの努力がなされていますか。

回答 (岡井 貴司)

地球化学標準物質を開発した初期は、ご指摘のとおり、もっぱら湿式法により値付けを行っていたのですが、現在は、図4に示したとおり、二酸化ケイ素(SiO<sub>2</sub>)およびII価鉄(FeO)は湿式法(SiO<sub>2</sub>は重量法、FeOは滴定法)により値付けを行っており、それ以外の主要成分は、主に原子吸光法やICP発光分光分析法といった汎用

機器分析により値付けを行っています。これは、装置の進歩や、干渉等の他元素からの影響評価について研究が進み、これらの機器分析による定量分析の精度が向上し、JIS等の公定法での採用が進んだことおよび、産総研計量標準総合センター(NMIJ)の尽力により各元素の標準物質が整備され、トレーサビリティの取れる認証標準物質により検量線作製のための標準液を作製できるようになったためです。また、値付けは共同分析で行っていますが、湿式法で十分な精度を出すためには熟練が必要で、そうした分析ができることが少なくなってきたという側面もあります。

現在では、地球化学標準物質のための新たな湿式法の開発は行っておりませんが、地質試料の湿式法による化学分析法は古くから行われ、さまざまな改善がされてきたこともあり、成熟した方法となっています。湿式法では分析方法の手順に表現しにくい、ノウハウ的なものによる差が出てきますが、産総研にはそうしたノウハウの蓄積が多くありますので、湿式法で正確な分析ができる技術を維持するというところに腐心しております。具体的には後進に十分に引き継ぐとともに、前述したとおり湿式法で分析できることが少なくなってきた現状に鑑み、外部に対しても情報発信して、技術を残していくことが重要と考えております。

### 議論3 精度に関して分析方法と対象物質が競い合う関係

コメント(小野 晃)

2.2節の、地球化学標準物質の開発当初、共通の試料を世界各国の主要な機関で共同分析したところ予想よりも大きなデータのばらつきが出て、結果的にそれが分析方法の高精度化を促したとの記述は面白いと思えました。このことに関して査読者は次のような一般的な命題が成り立つと考えますが、著者の見解はいかがでしょうか。

分析という行為は、分析する手法と分析する対象物の二つからなります。複数の分析方法である対象物を分析して結果がばらついたとき、ばらつきの原因は二つあると考えられます。一つは分析方法間に存在するばらつきで、測定の再現性も含まれます。もう一つは分析対象物自体のばらつきで、試料の不均質性や特性の経時的な変化により生じます。二つのばらつきは絡み合って観測されるので一般に分離できませんが、もし一方のばらつきが他方のそれよりも圧倒的に小さいと推定される場合には、ばらつきの大きい方が明確に特定され、それを改良する明確な動機が生まれます。

2.2節で述べられているのは、分析結果のばらつきの原因が対象物質のばらつきではなく、むしろ分析方法のばらつきであるとの結論が明快に得られ、そこから新たな研究がスタートした事例と思います。

一方対象物質のばらつきを評価するには、それよりもずっと安定な分析方法が存在しなければなりません。機器分析は分解能や安定性に関しては湿式よりも優れている場合が多いのではないかと思います。このように分析方法と分析対象物質は精度という観点から互いに競い合う関係にあり、一方が進歩すれば他方がそれに追随しさらに追い越すという形で、両者がともに進歩していく関係にあるのではないかと考えます。今回の事例はその一つと考えられ興味深く思いました。

また共同分析の結果がどう出るかわからない段階で、結果がばらつくことを恐れずに(さらにいえば、自分のデータだけが皆から外れることを恐れずに)共同分析に参加する人たちの勇気と決断も賞賛に値すると思います。現代につながる普遍的価値だと思います。

回答(岡井 貴司)

ばらつきという点で考えると、改めて当時の技術レベルの高さを感じました。共同分析では、コメントいただいた分析手法と対象物質のばらつきを評価する際に、分析者の技術のばらつきが少ないことが重要になると思います。一つの分析方法で複数の分析者が分析した際に、技術に差がある(ないし全体の技術レベルが低い)場合、その分析方法が持つ基本的なばらつきを超えて、結果がばらつきます。そうすると、複数の分析方法の比較を行う際に、分析方法間によるばらつき以上に、個々の分析方法内でのばらつきが大きくなり、分析方法による違いが隠されてわからなくなることがあります。今回、図2に例示した二酸化ケイ素では、分析方法の違いというよりは、重量法での少しの手順の差でした。この少しの手順の差が、分析方法の違いとして結果に表れるためには、各分析者が非常に高い精度で分析していないと難しいことですので、当時の、共同分析参加機関が非常に高い分析技術を持っていたというのを改めて感じた次第です。

また、分析方法と対象物質が競い合うということは、私も強く感じました。議論2の回答で、現在は主に機器分析により値付けを行っていると言いましたが、まさに、機器分析と標準物質の開発がお互いに影響し合って、競い合うように進歩してきたことによると思います。

共同分析への参加は、真剣勝負の場ですが、熟練した分析者としてのプライドもあったのではと思っています(自分のデータだけが外れるのでは?というのは本当に大きなプレッシャーですから)。こうした分析者としてのプライドを持てるレベルにまで、後進を育成することも大事な事と考えております。

### 議論4 要素技術とGSJの強み

コメント(栗本 史雄)

要素技術とGSJの強みを記述した3.1.3項とそれらの関係を示した図3は重要です。内容はそのとおりですが、図3において両者の関係や効果を関連付けて表現できると、両者の関係がより明解になり、この論文と併せて要素技術とGSJの強みを明示できると考えます。

回答(岡井 貴司)

ご指摘のとおり、要素技術とGSJの強みが単に羅列になっておりましたので、3.1.3項の記述内容に合わせる形で、GSJの強みが要素技術の検討に与えた影響を両者の間に入れて、関係を矢印でつないでみました。これにより要素技術とGSJの強みの相互関係とこの論文との整合をとりました。

### 議論5 GSJ地球化学標準物質

コメント(栗本 史雄)

5.3節「GSJ地球化学標準物質の将来構想」はたいへん興味深い内容です。今回の論文は、長年の地球化学標準物質の進展を総括し、今後の展開を提示する貴重なものなので、これを踏まえてGSJの基本方針や将来構想にも言及できると良かったと思いますが、今後、この論文を契機にGSJ内での議論が進むことを期待します。

回答(岡井 貴司)

現時点であくまで著者が抱いている考えですので、将来構想としましたが、今後の議論に役立てたいと考えます。



# 都市域の3次元地質地盤図

## — 都市平野部の新たな地質情報整備 —

中澤 努\*、野々垣 進、宮地 良典

都市域の地質地盤情報のニーズは高いが、地形が平坦な都市平野部では従来の紙ベースの地質図では地下の地質情報の表現に限度がある。信頼性を確保しながら地下地質をわかりやすく表現し、さらにはデータの2次利用を容易にする方策を検討した結果、インターネットを通して利用する3次元地質地盤図を構築するに至った。3次元地質モデルは、信頼のおけるボーリングデータを基準にし、高度なモデリング技術を駆使して構築する。地質災害リスク評価等に資する都市域の新たな地質情報整備として展開するために、現在、千葉県北部をモデル地域に設定してプロトタイプ作成を試みている。

**キーワード:** 地質情報、3次元地質モデル、ボーリングデータ、地下地質、地質図

## Three-dimensional urban geological map

– New style of geoinformation in an urban area –

Tsutomu NAKAZAWA\*, Susumu NONOGAKI and Yoshinori MIYACHI

Although geoinformation pertaining to urban areas is very important, paper-based geological maps do not adequately describe the subsurface geological conditions of urbanized plains. A three-dimensional geological map, available via the Internet, is expected to provide intelligible, highly reliable, and easily utilizable geoinformation for urban areas. In this case, a three-dimensional geological model needs to be constructed on the basis of reliable borehole data using an advanced modeling tool. We are now developing a prototype of a three-dimensional geological map of the northern part of Chiba Prefecture as a new form of urban geoinformation which contributes to estimating the risk of geological disasters.

**Keywords:** Geoinformation, three-dimensional geological model, borehole data, subsurface geology, geological map

### 1 はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では深刻な津波被害のほか、千葉県をはじめとする一部の沿岸域や河川沿いでは地盤の液状化が発生し社会問題となった<sup>[1]</sup>。また、この地震では、地震規模の割に揺れによる家屋の倒壊被害は多くはなかったが、東北・関東地方で屋根瓦が落ちる被害は極めて多く、つくば・土浦地域における研究によれば、その被害分布は特徴的であった<sup>[2]</sup>。このような地震被害の分布およびその程度は、地震そのものの震源位置、大きさ、卓越周波数等の地震波の特徴もさることながら、それぞれの地域の地質・地盤に影響される部分も大きい。このような認識はマスコミを通じて一般市民まである程度浸透し、一般市民の地質・地盤への関心は以前にも増して高まっているといえる。また、土木・建築工事の際には地質調査が必須であるが、その地域の地質・地盤がどのようなもので

あるか事前に情報を得ることができれば、地質調査計画の立案・積算が容易になり、ひいては実際の施工までをスムーズに行うことができるようになる。しかし、都市平野部の地下の地質状況を知る手段は現状では十分とはいえない。

このような状況を踏まえ、経済産業省の知的基盤の第2期整備計画（平成25年）では、重点化項目としてボーリングデータの一元化による都市平野部の地質情報整備に取り組むとした。これに先立つ知的基盤整備特別委員会では「ユーザーの視点に立った、わかりやすく使いやすい、新たな知的基盤の利用のあり方」が検討され、知的基盤整備計画では2次利用<sup>[3]</sup>を念頭においた地質情報整備を進めることが掲げられた。産総研はこれに基づき、産総研が独自に実施したボーリング調査のデータを基準とし、自治体等が公開する公共工事等のボーリングデータを用いて地層の広域な対比を行い、コンピュータ処理により地層の

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7  
Research Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan \* E-mail: t-nakazawa@aist.go.jp

Original manuscript received August 31, 2015, Revisions received October 22, 2015, Accepted October 26, 2015

3次元分布形態を解析する研究を都市平野部で実施している。また、そのようにして作成した3次元地質モデルを誰しもがウェブを用いて容易に閲覧・利用できる方法を検討するとともに、3次元解析に使用した元データであるボーリングデータを併せて閲覧・利用できるシステムの構築を検討している。この論文ではこのような都市平野部の地質情報整備の取り組みについて紹介する。

## 2 現状認識

近年、地質情報が重要だと認識から、公共の土木建築工事で実施したボーリング調査のデータがデータベース化されウェブ上で公開されるようになってきた。東京都<sup>[3]</sup>や千葉県<sup>[4]</sup>はかなり早い時期からボーリングデータを公開し、国土交通省でも国の事業のボーリングデータを公開するようになった<sup>[5]</sup>。またそれらを一括して閲覧できるポータルサイトも防災科学技術研究所により構築された<sup>[6]</sup>。さらに最近の政府の電子行政オープンデータ戦略に伴い、他の自治体でもボーリングデータを公開していく気運が高まっているといえる。しかし、これまでに整備されてきたこれらのボーリングデータベースは、ボーリングデータが格納されているのみであり（それだけでも我々には十分有り難いが）、それらを基に地層の対比や地層の分布形態、地質構造等、きちんとした地質学的な解釈をわかりやすく示したケースはない。

ボーリングデータはあくまで地点データであり、空間的に分布する地層の一端を示しているにすぎない。多数のボーリングデータを基に地層の分布形態（空間分布）を示すことで初めて都市平野部の地質が理解されるであろうが、そのような地質の解釈は高度な専門性を有する者でないと難しく、また地層の対比の根拠となる基準データの整備も必要となる。産総研が出版する5万分の1地質図幅はまさに地質の専門家の調査研究結果に基づく地層の対比や地層の分布形態、地質構造等を示したものであるが、都市平野部の地質図幅の場合、地形が平坦であるため、地下の地質情報を平面図で表現することには限度があった。そのため山地・丘陵部の地質図幅よりも地質断面図を多く作成し掲載するなどの対応してきたが（図1）<sup>[7]-[9]</sup>、従来の紙ベースの出版の場合、これにも限度があった。また、解釈の基礎データであるボーリングデータの掲載は紙面の関係上あるいは公開許可の関係上から主要なものに限られており、これも十分とはいえない。信頼性の高い地下の地質構造の解釈をわかりやすく提示するとともに、その解釈の基となるボーリングデータも閲覧・利用可能にすることが、研究の再現性の確保、そしてデータの2次利用促進の意味でも必要といえる。

最近ではコンピュータ処理技術が進み、また各種情報のインターネットを通じた配信も容易になり、一般市民のインターネット利用環境も日々拡充しつつある。ウェブでの配信を前提とするならば、都市平野部の地下地質構造の表現に自由度が高まり、必要に応じて3次元表示することも可能と考えられる。時代に即した形態での地質情報の整備が求められているといえるであろう。

## 3 3次元地質地盤図整備のシナリオと要素技術

上述の現状認識を考慮し、我々は、わかりやすく、使いやすく、そしてなによりも信頼性の高い都市域の地質情報整備として、ウェブでの配信を前提とした「3次元地質地盤図」の検討を始めた（図2）。地質の研究に携わる我々が独自に実施したボーリング調査のデータを基準とし、自治体等が公開する公共工事等のボーリングデータを用いて地層の広域な対比を行い、コンピュータ処理により地層の3次元分布形態を解析する。また、そのようにして作成した3次元地質モデルをだれしもがウェブを用いて容易に閲覧できる方法を検討するとともに、3次元解析に使用した元

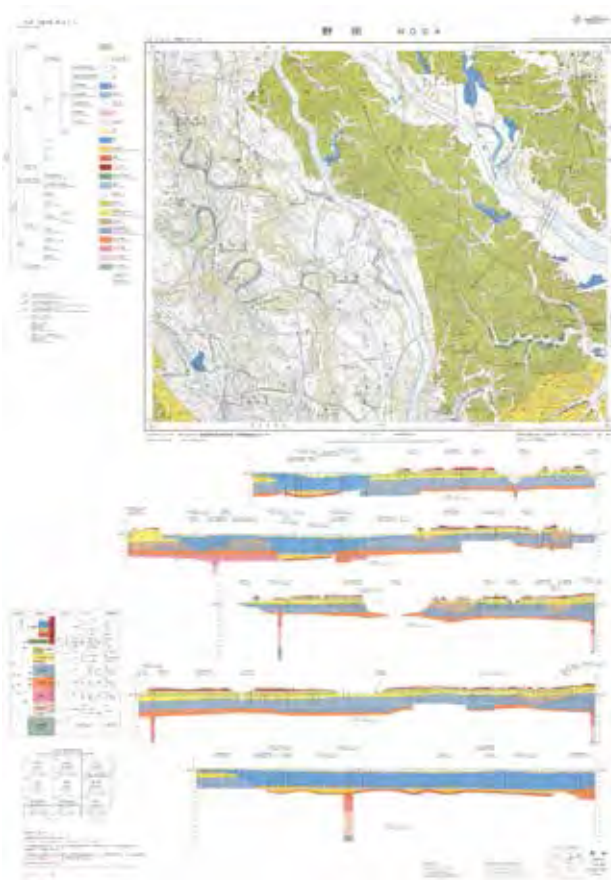


図1 従来のスタイルの都市平野部の地質情報5万分の1地質図幅「野田」。都市平野部は地形が平坦なため、平面図で表現できる地質情報は少ない。この地質図幅では地質断面図を多く掲載しているものの、紙での出版のためこれも限度がある。

データであるボーリングデータも併せて閲覧・利用できるシステムを構築する。これにより、わかりやすく、使いやすく、信頼性の高い地質情報整備が可能と考えた。このような都市平野部の地質情報整備のシナリオ（図3）は、主に次の6つの要素技術によって構成される。すなわち、自治体等の公共工事のボーリングデータの利用、基準ボーリング調査、地層の対比、地形分類、3次元モデリング技術、データ管理・表示技術である。我々のグループでは、地質情報のユーザビリティと信頼性を考慮し、これら6つの要素技術の統合を進めている。以下にそれぞれの要素技術について解説する。

なお、この論文で使用する「地質」と「地盤」はほぼ同一の意味として使用されることも多いが、一般的には同じ地層を扱いながらも「地質」は理学的、「地盤」は工学的な扱いをする場合に使用する傾向がある。今回紹介する都市平野部の地質情報整備は、従来のような地質学的解析だけでなく、標準貫入試験や弾性波速度等、工学分野でよく利用されるデータも扱うことから、両者を並記して「(3次元)地質地盤図」と呼んでいる。

### 3.1 自治体等が所有する公共工事等のボーリングデータの利用

自治体は管轄する地域内の土木建築工事等の公共工事の際して地質調査を実施する。その地質調査の主たる手法はボーリング調査である。実施するボーリング調査は通常、各自治体が地質調査業務共通仕様書等により定めた標準貫入試験を主体とするボーリング調査であり（表1）、その結果はJACIC様式のボーリング柱状図<sup>[10]</sup>で記載される。標準貫入試験を実施する場合、採取できる試料が未攪乱のオールコア試料ではないこと、そして多くの場合、記載

表1 基準ボーリングデータと公共工事のボーリングデータの比較

	基準ボーリングデータ	公共工事のボーリングデータ
目的	学術研究 リファレンスデータ整備	土木・建築工事の基礎調査
項目	地質学データ+工学データ 堆積相 年代値 火山灰層 化石 粒度 速度検層などの物性データ など	工学データ 岩石・土質区分 観察記事 標準貫入試験データ 孔内水位 など
掘削深度	40~120 m 程度	10~60 m 程度
特徴	調査地点数は多くないが、 地層の対比のリファレンス となる高精度な情報	標準貫入試験データが中心で、 地層の記載は簡素であるが、 過去の膨大なデータの蓄積がある

者が地質の技術者ではなく、土木の技術者あるいは現場のボーリングオペレータであることから、地層の記載は簡素である。なお、土木建築工事のボーリング調査は、基本的に構造物の支持基盤となる地層の深度が確認された時点で掘削を終了する。その深度は地質状況によってまちまちであるが、10 m から数十 m であることが多い。そのためほとんどの工事のボーリングデータは深度数十 m 程度までである。

近年、土木・建築工事の大量のボーリングデータは、前述のように国・自治体等により蓄積され、電子データとしてデータベース整備されるようになってきた。現在、デファクトスタンダードになっている電子データ形式は、国土交通省が定める電子納品のボーリング交換用データ形式<sup>[11]</sup>、いわゆるJACIC様式XMLである。これは前述の標準貫入試験データを含むJACIC様式ボーリング柱状図フォーマット

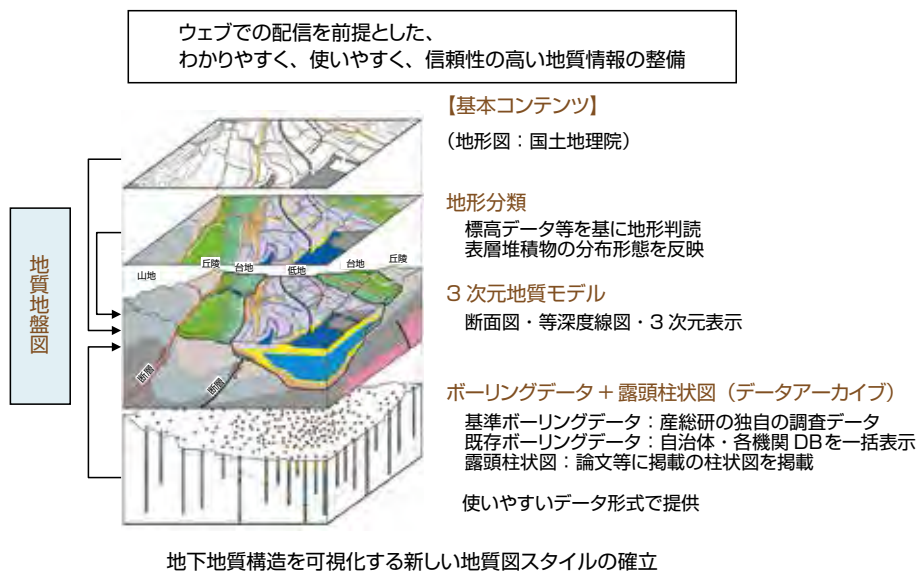


図2 都市域の3次元地質地盤図の概要

トをXML形式にしたものである。都道府県および主要都市の自治体に地質調査業務の報告書として電子納品されるボーリングデータもこの形式であるため、このファイル形式に統一したデータベースであれば、電子納品されるボーリングデータをそのままデータベースに順次格納できるというメリットがある。そのため最近はこのJACIC様式XML形式のボーリングデータを格納したデータベースが整備されることも多くなったが、現状では、さまざまなデータ形式のデータベースが存在する。2次利用を容易にするためには、他形式のデータはJACIC様式XML形式に変換してデータベース化することが望ましい。いずれにせよボーリングデータの整備と我々が実施する地質構造解析へのボーリングデータの利用については、自治体の地質情報整備に対する理解と協力が必要である。また、自治体のボーリングデータの管理および標準形式への変換等については、必要に応じて産総研から技術支援できるようにすることが重要であろう。

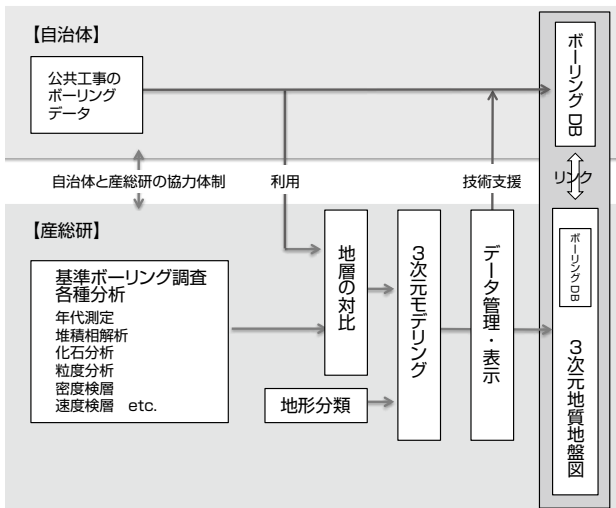


図3 都市域の3次元地質地盤図作成のシナリオ

### 3.2 基準ボーリング調査

公共工事のボーリングデータは自治体によっては過去の蓄積により膨大な量が集積され、地質情報整備において大きなメリットとなるが、一方でこのようなデータは前述のように工学データ（標準貫入試験データ）の提示が主たる目的であるため、広域の地層の対比の根拠となる火山灰層や年代値データ等は通常含まれない（表1）。また地層の記載は至って簡素であり、通常我々地質の専門家が記載する堆積構造や化石の産状、詳細な粒度変化等は記載されていない。そのようなボーリングデータは、工事の施工対象となるごく狭い敷地内の地層の対比であれば問題ないであろうが、都道府県レベルの範囲に及ぶ広域の地層の対比・追跡は困難であることが多い。これは地層の広域対比が、土木建築工事のボーリングデータ形式が持つ本来の使用用途を超えた作業であるから仕方ないことである。

このようなボーリングデータであるが、模式的に地層が分布すると思われる箇所で産総研が独自にボーリング調査を行い、その調査を基に地層を的確に区分し、それぞれの地層の特徴を的確に提示できれば、それが基準データとなり、近傍の土木建築工事ボーリングデータでの地層の対比が容易になる。このようなリファレンスデータ（図4）を我々は「基準ボーリングデータ」と呼んでいる。

通常の土木建築工事のボーリング調査では標準貫入試験を実施することからコア試料は採取しないかあるいは採取しても一部分だけのことが多いが、それでは垂直方向の地層の連続的な変化を把握することは難しい。基準ボーリング調査では、掘削する全深度の地層を直径10cm弱の円筒状のコア試料としてくり抜いて採取する、いわゆるオールコアボーリングを実施している。調査深度については、前述のように土木建築工事のボーリングデータは数十m程度までのことが多いが、基準ボーリング調査ではそれらを

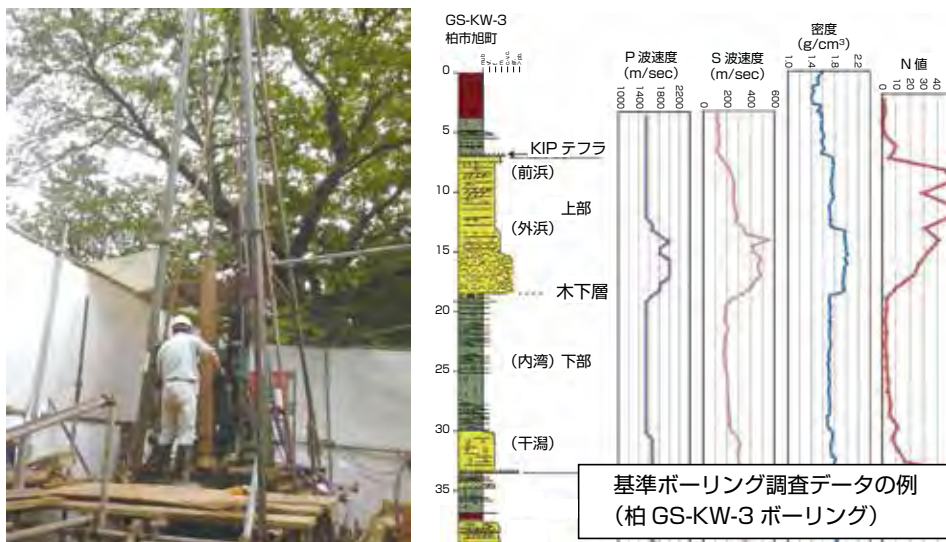


図4 ボーリング調査と基準ボーリングデータ  
独自のボーリング調査により、既存ボーリングデータの対比指標となる基準ボーリングデータを整備する。

完全にカバーする意味で、それらよりやや深い深度 100 m 程度までを対象としている。

採取した円筒状のコア試料は縦方向に半割にし、堆積構造、化石の産状、火山灰層等の記載を行うとともに、コア試料から粒度分析、年代測定、含まれる化石から環境解析等を行う（表 1）。また、掘削した孔を利用して孔内検層を実施する。各地層の地震波伝播速度（P 波および S 波）を測定する PS 検層やガンマ線を用いて地層の密度を計測する密度検層を実施する（表 1）。このような調査を基に、層序学的用語<sup>2</sup>・堆積学的用語<sup>3</sup>に地層を適切に区分し、それぞれの地層の特徴、年代等を地層の対比基準として提示する。このような地層の研究に基づく信頼性の高い基準データ整備は、同じく都市域の地質地盤情報整備を担う他の機関で実施した例は極めて少なく、地質の専門家の集団である産総研地質調査総合センターでこそできる取り組みである。

### 3.3 地層の対比

基準ボーリングデータを整備した後は、そのデータを軸として既存ボーリングデータへの地層の対比作業を行う。これにより地層の広がり把握する。前述のように既存ボーリングデータは膨大な数が蓄積され、それが大きなメリットであるが、基準ボーリングデータと比べると記載が簡素で、さらに記載の個人差も大きい。地層の対比作業においては、既存ボーリングデータに記載されている層相、含有化石、標準貫入試験データ等を、基準ボーリングデータと比較しながら一つずつ確認して地層の特徴を理解し、地層の境界面を追跡していく。基準ボーリングデータと既存ボーリングデータは、言わばハブとサテライトの関係にあり、両データを適切に利用していくことで、提供する地質地盤情報の信頼性を高めることができる。

ボーリングデータの対比作業は、地層の観察に慣れ、地層の特徴を的確に把握することができる研究者・技術者が行う必要がある。実際の対比作業は、産総研が開発したボーリングデータ解析ツール<sup>12)</sup>を用いてコンピュータの画面上にボーリング柱状図を並べ、手作業で実施している。この解析ツールは、対比した地層境界のそれぞれのボーリング地点での位置情報（緯度・経度・標高）をリストとして出力できるようになっている。この位置情報リストを 3 次元モデリングの基礎データとして利用している。

### 3.4 地形分類

地形は堆積物の形成プロセスおよびその分布を反映したものである。そのため表層部（最上部）の地層については、点データであるボーリングや露頭のデータのみで分布形態を判断するよりも、ボーリングデータ等で地層の特徴を把握したうえで、地形からその地層の分布を把握するほうが、

より正確な分布形態を知ることができる。地形は、国土地理院から提供されている地形図、数値標高モデル（Digital Elevation Model: DEM）、空中写真等を使用して、標高分布およびその形状を基に判読し分類する。また、旧版地形図や昔の空中写真を現在のものと比較することで、埋立地の分布や台地・丘陵部の造成地の切り盛りを知ることができる。例えば旧版地形図は明治期に作成された迅速測図<sup>13)</sup>が、また空中写真は戦後すぐに米軍が撮影したもの<sup>14)</sup>が公開されており、地形分類の際によく使用される。地形判読結果は地形分類図として地図上に彩色により図示する。

### 3.5 3次元モデリング技術

3次元地質モデルは、地下の地質情報と地表の地形情報とを統合することにより作成する。地下については、前述のように多数のボーリングデータ間の地層の対比を行い、各地点の地層境界の標高情報から地層境界面を推定することにより地下の 3 次元モデル（3次元地下地質モデル）を構築する。地表については、地形図、数値標高モデル、空中写真等を基に地形分類図を作成する。最終的に、3次元地下地質モデルと地形分類のそれぞれが持つカテゴリーを統合することにより、3次元地質地盤図のベースとなる 3次元地質モデルを得る（図 5）。

地質構造の 3次元モデリング技術には、大きく分けて二つの手法がある。一つは、地質図幅作成と同様、地質の専門家が野外調査の結果を基に、手作業を主体としてモデルを構築する方法である。もう一つは、人間が関与する処理をできる限り省き、コンピュータ処理を主体としてモデルを構築する手法である。手作業主体の手法では、専門家の持つ知識や経験を反映しやすく、複雑な地質構造も表現しやすい。その反面、同じ調査結果を用いる場合でも作成者によって全く異なる 3次元モデルとなることがある、モデルの修正時には一からモデルを再構築する必要があるなどの難点がある。一方、コンピュータ処理主体の手法では、処理アルゴリズムで対応している地質構造しか表現できないものの、同じ調査結果からは誰でも常に同じ 3次元モデルを得られるうえ、データの追加等の際にも即座に 3次元モデルを修正・再構築できる。一つのモデリング手法を共通基盤として、地質の専門家が新たに取得した調査データを持ち寄り、3次元モデルを随時修正・再構築すれば、専門家間の認識の共有を促すことにもなるだろう。3次元モデルによる地質情報の普及や 2次利用を考えた場合、単に地質構造をわかりやすく見せるだけでなく、モデルの再現性や更新性を確保できることが望ましい。そこで、この研究では、コンピュータ処理を主体とする手法を用いた 3次元モデリングを行う。

コンピュータ処理により 3次元モデリングを行う場合、3

次元モデルは、地質構造の論理モデル<sup>[15]</sup>と地層境界面の形状とを用いて、仮想的に構築する。地層境界面の形状は、標高値を等間格子状に並べたデータセットである数値標高モデルにより表現する。地下深部を主な対象とする資源開発分野等の3次元モデリングでは、調査コストの問題から、対象とする地質構造の規模に比べて基礎データの量が乏しく、目的の地層が存在する可能性が少しでも高い場所を特定することが重要となるため、確率論的手法を用いて地層境界面のDEMを作成することが多い。一方、都市平野部における地下浅部3次元モデリングでは、既存ボーリングデータを詳細に解析することにより、地層境界に関する大量の標高情報が得られるため、これらを満たす面の形状をいかに精度良く求めるかが重要となる。そこで、地層境界面のDEM作成に、最適化原理とスプライン<sup>[16]</sup>に基づく曲面推定法を用いる<sup>[16]</sup>。この手法は、与えられたデータを満足する曲面の中で、最も滑らかなものを求めるという手法である。利用可能なデータは、地層境界の標高情報および地質学特有の走向・傾斜情報である。標高情報はボーリングデータの解析結果等から、走向・傾斜情報は地表踏査等から得る。標高情報については、地層境界面を観察できた地点の標高値そのものだけでなく、「面はここよりも下位または上位を通る」といった面の上限または下限を示す情報も利用できる。このような特徴は、ボーリングデータの掘削深度が目的の地層境界に達していない場合や、ボーリングコアの一部が欠如して地層境界の位置を明確に指定できない場合などに役立つ。本手法では、面

の滑らかさと推定精度を調節しながらDEMを作成する。DEMは機械判読に適したASCII形式で保存することにより、地層境界面を利用する各種解析へ2次利用することも容易である。

### 3.6 データ管理・表示技術

3次元地質モデルを広く一般に利用してもらうには、誰もが簡単に3次元地質モデルを閲覧できる環境を整備することが望ましい。そこで、主にマウス操作だけにより3次元地質モデルを閲覧できるウェブシステムを開発する(図6)。3次元地質モデルの信頼性確保という観点から、3次元地質モデルの構築に利用したボーリングデータも閲覧・検索できるようにする。システムは、今後も柔軟にその改良を行えるように、フリーオープンソースソフトウェアにより構成されているので、一般的なウェブブラウザを通して利用できる利点もある。3次元地質モデルは、紙媒体の地質図幅に馴染みのある研究者や技術者はもちろん、一般の利用者も利用しやすいように、平面図・断面図・立体図という3つの形式で提供する。平面図の表示では、昨今インターネットを通じた地図サービス等で普及しているタイル化画像を用いた高速地図表示技術を利用し、ズームイン/ズームアウトおよび移動をマウス操作で行えるように利便性を図る。断面図の表示では、利用者が平面図上でマウスクリックした任意の2点間における鉛直地質断面図を表示できるようにする。立体図の表示では、3次元地質モデルデータのファイルサイズの都合上、全域モデルのウェブ配信が難しいため、全域を格子状に分割した小領域ごとのモデルを

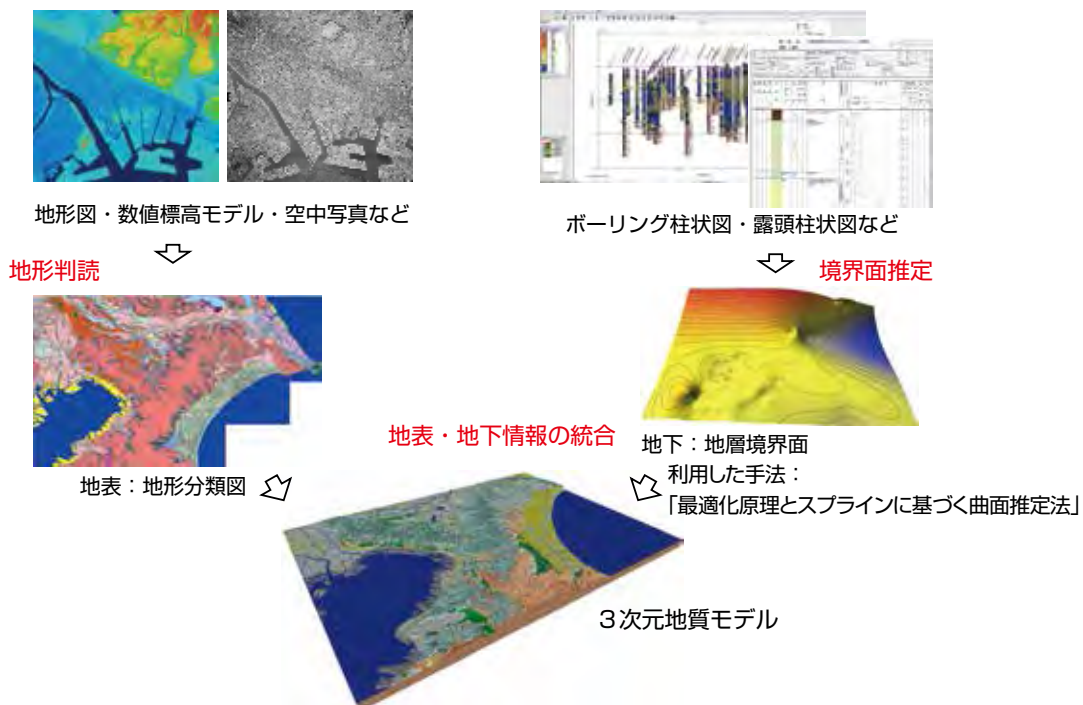


図5 3次元モデリングの手順

表示し、回転表示等もできるようにする。ボーリングデータについては、データ点をクリックすることでオリジナルデータである JACIC 様式の XML および PDF へのリンクを含めたメタ情報を閲覧できるようにする。メタ情報についてはデータベース化を行い、閲覧システムにマウス操作で検索範囲を指定する機能を持たせることで、閲覧システムからボーリングデータのメタ情報検索を行えるようにする。

自治体等が所有する公共工事のボーリングデータや、産総研が整備する基準ボーリングデータは、3次元モデリングの核をなす重要な基礎データであり、3次元モデルの信頼性確保のためにも必須の情報である。そこで、自治体担当者等が容易に JACIC 様式 XML 形式のボーリングデータのデータベース管理ができるシステムの開発も行っている（図7）<sup>[17]</sup>。データベースには汎用性の高い RDBMS<sup>用語5</sup>

である PostgreSQL<sup>用語6</sup> を用い、本システムは無償で公開する予定である。このようなシステムの利用により都市平野部の地質地盤の基本情報であるボーリングデータがより多くの自治体で適切に管理されることが期待される。

#### 4 3次元地質地盤図の想定される利活用

現在、我々のグループでは、前章で述べた6つの要素技術を統合させ、3次元地質地盤図の作成を試行している。このような3次元地質地盤図の想定される利活用としては、地震ハザードマップ作成、都市インフラ整備・産業立地計画立案、不動産売買等が挙げられる。

地震ハザードマップ作成には、地下の地震波伝播速度データ（S波速度データ）と浅層の地質モデルが必要とされる<sup>[18]</sup>。しかし、S波速度データを含む既存ボーリングデー

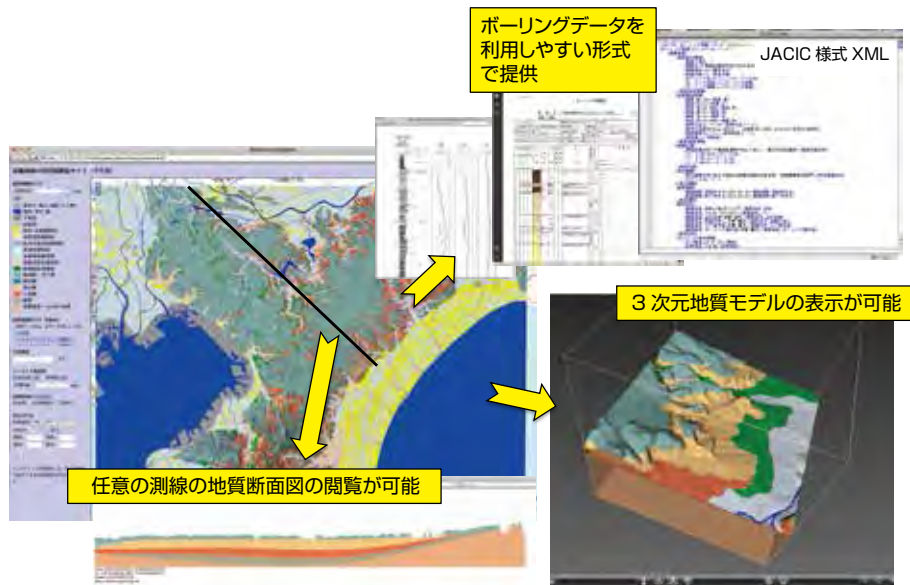
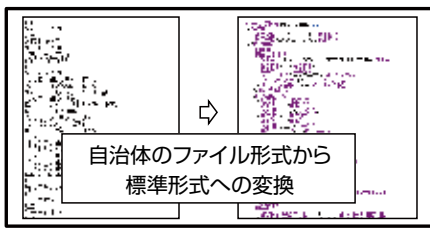


図6 3次元地質モデルやボーリングデータを閲覧するウェブシステム

#### 形式変換プログラム



#### ボーリングデータ管理システム



図7 ボーリングデータの変換プログラムと管理システム

タは極めて少ない。我々が実施する基準ボーリング調査ではS波速度を測定するため、地震動シミュレーションの基準データとして利用が可能である。また我々が基準ボーリングデータを軸に作成する3次元地質モデルも、地震ハザードマップ作成の際の浅層地盤モデルデータとして利用されることが期待される（図8）。さらには、常時微動観測<sup>[19]</sup>によりそれぞれの地盤の振動特性、例えば固有の卓越周波数を把握することで、より正確に地盤を考慮した地震ハザードマップの作成が可能となる。そのため我々のグループでは、地質モデルの構築とともに、常時微動測定を実施し、地質状況に応じた地盤振動特性の類型化を実施することを検討している。

都市インフラ整備や産業立地計画立案に際しては、軟弱地盤の有無や構造物の支持基盤となる地層がどの深度に分布するかを事前に情報収集することが極めて重要である。これを事前に知ることであれば地質調査計画の立案および積算が容易になる。地質調査業界では、想定した地質状況と異なる地質であった場合に生じる調査工期遅延、設計変更、事業費増大といった、いわゆる地質リスクを低減する取り組みが行われている<sup>[20]</sup>。その対応策の一つとして、既存の地質地盤情報の積極的な活用が挙げられる<sup>[21]</sup>。都市平野部の既存のボーリングデータおよびそれから適切に解釈された3次元地質モデルは、利用しやすい形式で公開されることにより、このような地質リスクマネジ

メントに貢献するものと考えられる（図8）。

2011年東北地方太平洋沖地震以降、一般市民の都市平野部の地質地盤への関心は極めて高いものとなった。不動産取引においては現在のところ地質地盤情報の提供は慣習化していないが、東京湾岸域の深刻な液状化被害を受けて、不動産取引の際にも地質地盤情報を積極的に活用すべきとの提案もある<sup>[22]</sup>。地質地盤情報が公開されることにより不動産の評価額の変化を危惧する声もあるだろうが、市民の地盤リスクに対する意識を高め、さらには災害に強い街づくりを推進するためには、地質地盤情報が重要な公共財であるという社会の共通認識を培う必要があるように思える。日本学術会議は、地質地盤情報の共有化に向けた提言<sup>[23]</sup>において、地震災害リスクの軽減のためには、地下の地質・地盤に関する情報を国民の共有財産と認識し、国土の基本情報として有効活用することが不可欠としている。他方、一般市民にとって住宅立地の地盤は今では関心の的であるが、地質の専門知識を持たない多くの市民にとってボーリングデータや地質図を解釈するのは難しいであろう。これは不動産業界関係者も同様である。このようなニーズに対して最近では既存の地質地盤情報を利用したコンサルティングビジネスも生まれつつある。このようなビジネスにおいても地質地盤情報が利用しやすい形式で整備されることが望まれている。我々が試行する3次元地質地盤図はこのような要望にも対応するものといえよう（図8）。

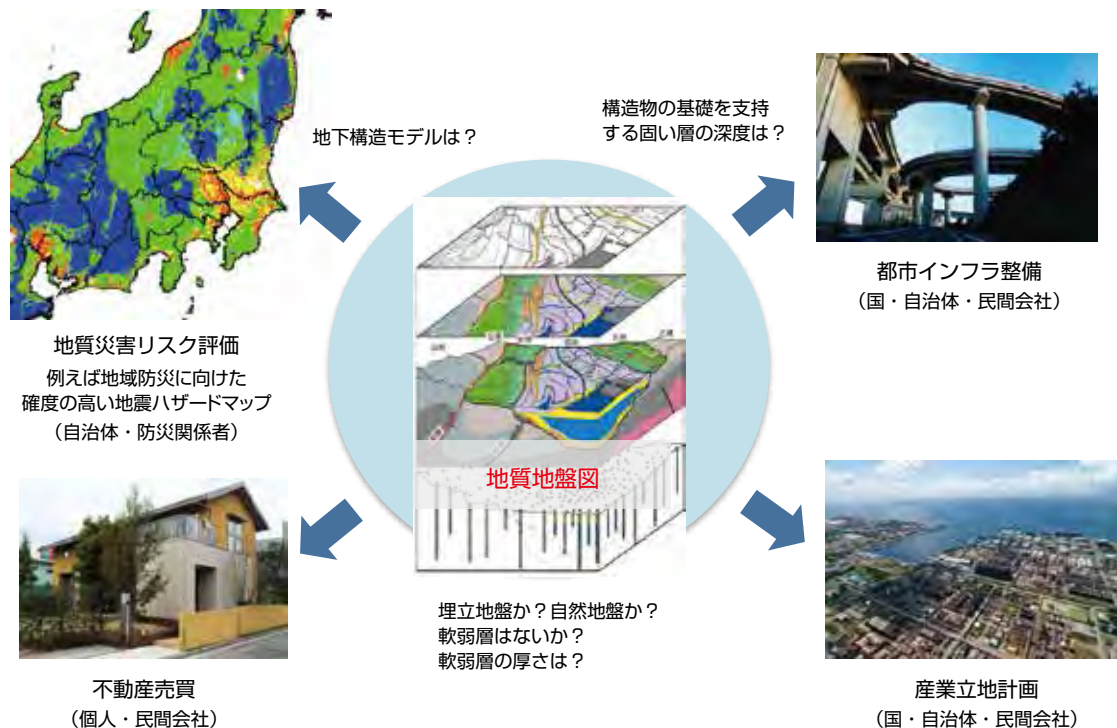


図8 3次元地質地盤図の想定される利活用



## 5 モデル地域での試行

第3章で述べたシナリオにより都市平野部の地質地盤情報整備は可能であると判断したが、初めての試みでもあることから、まずはモデル地域を設定して試行することとした。現在、千葉県北部をモデル地域に設定し、3次元地質地盤図を試作している。本地域を選定した大きな理由は、関東平野を構成する地層が模式的に分布すること、そして千葉県が以前より地質地盤情報整備に積極的に取り組んでいる自治体であることが挙げられる。

### 5.1 モデル地域の地質学的トピック

モデル地域には、関東平野を構成する代表的な地層である更新統、沖積層、そして湾岸低地には埋立層が分布する。

更新統は台地を構成する地層であるとともに、平野を形成する主要な地層である。平野の更新統は地下で大きな盆状の地質構造を呈することが多い。盆状構造は平野の形成史を反映した構造であり、このような構造を明らかにすることは平野の形成史を解き明かすだけでなく、地下水流動の高精度解析にも大きく貢献する。千葉県北部の地下には既存ボーリングデータの解析により盆状の地質構造が推定されているが、層序学的な研究がほとんど行われておらず正確な盆状構造はわかっていなかった。最近の我々のグループの層序研究により、船橋周辺を中心とした盆状構造の詳細が明らかになりつつある<sup>[24]</sup>。モデル地域で平野の地下の盆状地質構造を3次元解析するノウハウを蓄積することが重要である。

現在の低地の地下には、沖積層と呼ばれる、2万年前以降に形成された若い時代の地層が分布する。沖積層は昔の谷を埋めるように分布することが多く、軟らかい泥層を主体とすることから軟弱地盤として知られるが、最近、関東平野には台地の下にも沖積層によく似た軟弱な泥層が分

布することがわかってきた<sup>[25]</sup>。このような軟弱泥層が台地の下に分布することはあまり知られておらず、都市地盤の盲点といえる。モデル地域の千葉県北部にはこのような谷埋め堆積物が柏から成田にかけて東西に分布することが知られているが（図9）、層相がどのように変化し、層相の変化がどのように物性に反映され、それが地震動の差にどのように表れるかが興味深いところである。

千葉県北部の東京湾岸地域には埋立層が海岸線に沿って広く分布している。また埋立層の下には沖積層がいくつかの筋の谷埋め状をなして分布することが知られている。この地域の埋立層は2011年東北地方太平洋沖地震の際に深刻な液状化を起こし、一部で都市インフラが麻痺して社会問題となった。一般的に液状化を起こしやすい地層は、地下水で飽和された“ゆる詰め”の砂層とされ、このような砂層は特に沿岸部や河川沿いの埋立層に多くみられる。東京湾岸地域の埋め立てはサンドポンプ工法によって実施されている<sup>[26]</sup>。サンドポンプ工法は沖合からポンプで深掘した土砂により埋め立てる工法で、埋め立てによりできた地層は砂泥互層からなり、一見、自然の地層に酷似しているが、コア試料にみられる堆積構造や化石の産状等の詳細な観察により区分できる<sup>[27]</sup>。またサンドポンプ工法の場合、ポンプの吐き出し口の位置により埋立層の砂や泥の分布に偏りが現れ、砂が卓越する部分で液状化が発生しやすいとされる<sup>[28]</sup>。今回の我々が実施した一連のボーリング調査によって、サンドポンプ工法による埋立層の同定基準を確立するとともに、ボーリングデータや過去の空中写真の判読等により、埋立層中の砂および泥の偏在パターンを明らかにすることが可能になる。さらには、埋立層の下位には軟らかい沖積層が不規則に分布しているが、その沖積層の厚さの変化が上位の埋立層の液状化にどの程度影響するのかも興味深いところである。

### 5.2 自治体との協力関係

現在、ボーリングデータの管理手法の検討および解析については千葉県環境研究センターと協力関係を築きながら試行している。千葉県環境研究センターは地層汚染や液状化に関する研究で実績のある研究機関であるが、1991年から千葉県内の公共工事のボーリングデータの収集を行い、ウェブで公開する取り組みを実施しており、ボーリングデータベース整備においても先駆的な機関である。研究センターが運営する「地質環境インフォメーションバンク」では現在、千葉県内の約2万地点のボーリングデータが公開されている。このデータベースに格納されているデータは独自形式であるため、我々が現在標準形式であるJACIC様式XMLへの変換を試みているところである（図7）。研究センターの担当者とともに、将来的にはJACIC様式XML

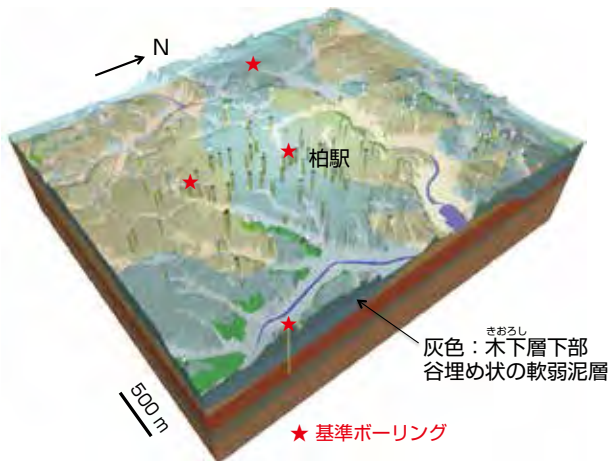


図9 千葉県柏市付近の地下の谷埋め堆積物の3次元地質モデル

形式で格納するデータベースへの転換を検討している。なお、前述のボーリングデータ管理システムの仕様については、研究センターと議論しながら決定した。当初、ウェブを使用するシステムを検討していたが、担当者との打合せの結果、セキュリティの関係から、スタンドアローンのコンピュータで動作する仕様に大幅に改めた。このようなニーズは自治体との意見交換により初めて知ることができたのであり、自治体の事情を十分把握することが極めて重要であることを改めて知る良い機会となった。また、研究センターは地質地盤調査の豊富な経験から、公共工事等の既存ボーリングデータの収集のみならず、実際のボーリングコア試料の検討に基づく基準ボーリングデータ整備が土壌汚染の拡散や液状化予測等地盤環境・災害対策に極めて重要であるという考えを強く持っている。この点で、我々との共通の認識のもと本課題に取り組んでいる。

### 5.3 3次元地質地盤図のプロトタイプ作成

これまでに千葉県北部の浅部地下の3次元地質モデル作成アルゴリズムの確立のため、関東平野を構成する更新統の模式地である千葉県木更津地域で実践研究を行った。まず既出版の5万分の1地質図幅「木更津」に記載される地層の層序を基に3次元地質モデルを作成するためのアルゴリズムを作成し、地質図幅の作成に利用したものと同様の柱状図データを用いて3次元地質モデルを構築した。そして、作成した3次元地質モデルを、手作業の描画である既出版の地質図幅と数值的、視覚的に比較した。その結果、論理的手法により作成した今回の3次元地質モデルは、層序学的に問題がないことはもちろんのこと、従来の手作業の描画と比較して、人為的誤差がなく、データに忠実かつ精密に地質境界を描画できることを確認し、その実用性を示した<sup>[29]</sup>。今回、関東平野を構成する地層の模式地である木更津地域において構築したこのアルゴリズムは、関東平野で広く適用可能であると考えられる。

このアルゴリズムを使用して、これまでに14地点で実施した基準ボーリングデータおよび355地点の露頭柱状図、地形分類図を基に暫定的に3次元地質モデルを作成した。そして前述の閲覧システムにより平面図、任意の断面図、3次元モデル、ボーリングデータが閲覧できる3次元地質地盤図のプロトタイプを作成した(図6)<sup>[30]</sup>。最終的に基準ボーリングデータを20地点以上に増やし、既存ボーリングデータを約2万本利用し地質モデルの高精度化を図ることで、これまでの地質図幅の基本スケール(5万分の1)を上回る、2万5千分の1スケールで使用できる地質地盤図を目指している。このような地質地盤図の整備によって、より精度の高い地質災害リスク評価等が可能になると期待される。

## 6 おわりに

現在モデル地域で試行している3次元地質地盤図については、今後、基準ボーリングデータを追加拡充するとともに、既存ボーリングデータへの地層の対比を進め、3次元地質モデルの高精度化を行う。また断面図や3次元モデルをより快適な動作で使いやすく改善したうえで、2017年度を目途に公開する予定である。この成果を都市域の新しい地質情報整備のスタイルとして提示し、これをきっかけに他地域の自治体にも協力を得て各都市への展開を図りたいと考えている。また自治体が独自に地質地盤図を作成することもできるようにガイドラインを作成し、必要に応じて技術支援もできるようにすることを検討している。このような、わかりやすく、使いやすく、そしてなによりも信頼性の高い地質地盤情報整備を都市平野部において推進することにより、行政、民間企業、そして一般市民の地質地盤情報の利活用が一層促進されるものと期待する。

## 謝辞

この研究課題については、立ち上げ当初より、経済産業省知的基盤課(現 知的基盤整備推進室)、産総研地質分野研究企画室(現 地質調査総合センター研究企画室)、地質調査情報センター(現 地質情報基盤センター)、ならびに地質情報研究部門幹部およびこの研究課題に参画する地質情報研究部門の小松原純子氏、納谷友規氏、長 郁夫氏、坂田健太郎氏、そして共同研究を実施する千葉県環境研究センター地質環境研究室の皆様、研究の方向性についてさまざまな議論をしていただきながら進めてきた。以上の方々に深く感謝いたします。

## 用語の説明

- 用語1: 2次利用: 総務省の「地盤情報の公開・2次利用促進のためのガイド」(平成25年6月)によれば、地盤情報の2次利用は「行政機関等から提供される地盤情報(ボーリングデータ等)を活用して、より使いやすい情報に加工したり別の情報を付加して利用または提供したりすること」とし、一次利用は「地盤情報を保有する行政機関等が主に内部での業務利用を目的として利用すること」と定義している。なお、政府の電子行政オープンデータ政策では「政府、独立行政法人、地方公共団体等が保有する公共データを、機械判読に適したデータ形式で、営利目的も含めた2次利用が可能なルールで公開する」としている。
- 用語2: 層序学: 地層の重なる順序を、化石、測定年代、地層の特性等から明らかにする学問分野。
- 用語3: 堆積学: 堆積層が形成されるプロセスやメカニズムを堆積物の性質から明らかにする学問分野。

用語4：スプライン：対象領域を複数の区間に分割し、各区間ごとに多項式を定めた区分的多項式関数。複雑な形状の曲線や曲面のあてはめに優れる。

用語5：RDBMS (Relational DataBase Management System)：リレーショナルデータベースを管理するためのソフトウェアの総称。RDBMSでは、データをテーブル（表）形式で管理しながら、データの比較、結合、抽出等の操作を行う。

用語6：PostgreSQL：費用、ライセンス、2次配布等、さまざまな面でフリーで利用できるオープンソースのRDBMS。データベース操作にはSQLが用いられる。

## 参考文献

- [1] 若松加寿江, 先名重樹: 東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)による液状化と過去の液状化履歴, *地質と調査*, 2013 (4), 通巻138号, 6-11 (2013).
- [2] 岡田真介, 小松原 琢, 中澤 努, 中村洋介, 坂田健太郎, 納谷友規: Google Earth を用いたつくば市および土浦市周辺における2011年東北地方太平洋沖地震による瓦屋根被害の分布調査, *地震 第2輯*, 64 (4), 257-264 (2012).
- [3] 東京都土木技術支援・人材育成センター: 東京の地盤(GIS版), <http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyouhou/geo-web/00-index.html>, 閲覧日2015-08-27.
- [4] 千葉県地質環境インフォメーションバンク: ちば情報マップ(地質柱状図), <https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/chishitsu.html>, 閲覧日2015-08-26.
- [5] 国土交通省: 国土地盤情報検索サイト(KuniJiban), <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>, 閲覧日2015-08-27.
- [6] 防災科学技術研究所: ジオステーション(Geo-Station), <http://www.geo-stn.bosai.go.jp/jps/index.html>, 閲覧日2015-08-27.
- [7] 中澤 努, 遠藤秀典: 大宮地域の地質, 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, (2002).
- [8] 中澤 努, 田辺 晋: 野田地域の地質, 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, (2011).
- [9] 納谷友規, 安原正也: 鴻巣地域の地質, 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, (2014).
- [10] (財)日本建築情報総合センター: ボーリング柱状図作成要領(案)解説書 (1999).
- [11] 国土交通省: 地質・土質調査成果電子納品要領(案)付属資料(2008), <http://www.cals-ed.go.jp/mg/wp-content/uploads/boring62.pdf>, 閲覧日2015-10-02.
- [12] 木村克己: ボーリングデータ処理システムの公開 国土基盤情報としてのボーリングデータの利活用を目指して, *産総研 TODAY*, 11 (1), 19 (2011).
- [13] 農業環境技術研究所: 歴史的農業環境閲覧システム, <http://habs.dc.affrc.go.jp>, 閲覧日2015-10-02.
- [14] 国土地理院: 地図・空中写真閲覧サービス, <http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>, 閲覧日2015-10-02.
- [15] 塩野清治, 升本真二, 坂本正徳: 地層の3次元分布の特性と地質図作成アルゴリズム-地質構造の論理モデル-, *情報地質*, 9 (3), 121-134 (1998).
- [16] S. Nonogaki, S. Masumoto and K. Shiono: Gridding of geological surfaces based on equality-inequality constraints from elevation data and trend data, *International Journal of Geoinformatics*, 8 (4), 49-60 (2012).
- [17] 野々垣 進, 中澤 努: JACIC様式ボーリング柱状図管理システムの開発, *地質調査総合センター速報*, 68, 53-59 (2015).
- [18] 内閣府(防災担当): 地震防災マップ作成技術資料, <http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/050513siryuu.pdf> (2005).

- [19] 長 郁夫, 先名重樹: 極小微動アレイによる浅部構造探査システムの構築—大量データの蓄積と利活用に向けて—, *Synthesiology*, 9 (2), 86-96 (2016).
- [20] 地質リスク学会, 社団法人全国地質調査業協会連合会(編): *地質リスクマネジメント入門*, オーム社 (2010).
- [21] 岩松 暉: 地質リスクの軽減と地質地盤情報, *第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集*, 09, [http://committees.jsce.or.jp/seibu\\_s01/system/files/04vip-iwamatu.pdf](http://committees.jsce.or.jp/seibu_s01/system/files/04vip-iwamatu.pdf) (2008).
- [22] 本間 勝: 浦安市における液状化被害・復旧状況と不動産取引における地質情報の活用策, *GSI地質ニュース*, 2 (12), 357-360 (2013).
- [23] 日本学術会議: 提言 地質地盤情報の共有化に向けて—安全・安心な社会構築のための地質地盤情報に関する法整備—(2013), <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t168-1.pdf>, 閲覧日2015-10-02.
- [24] 納谷友規, 坂田健太郎, 中里裕臣, 小松原純子, 中澤 努: 千葉県北西部東京湾北縁地域における下総層群の層序, *日本地質学会第121年学術大会講演要旨*, 52 (2014).
- [25] 中澤 努, 中島 礼, 植木岳雪, 田辺 晋, 大嶋秀明, 堀内誠示: 大宮台地の地下に分布する更新統下総層群木下層のシーケンス層序学的研究, *地質学雑誌*, 112, 349-368 (2006).
- [26] 風岡 修: 利根川下流低地・東京湾岸埋立地, *アーバンポタ*, 40, 5-13 (2003).
- [27] 小松原純子, 中島 礼, 納谷友規: 千葉県船橋市の埋立地における沖積層の堆積相と堆積環境, *日本地質学会第121年学術大会講演要旨*, 53 (2014).
- [28] 風岡 修, 佐藤光男, 楠田 隆, 香村一夫, 風戸孝之, 香川 淳, 森崎正昭, 佐藤賢司, 古野邦雄, 酒井 豊, 加藤晶子, 楡井久: 局所的な表層地質の違いが液状化—流動化—to与える影響, *第10回環境地質学シンポジウム論文集*, 33-38 (2000).
- [29] 野々垣 進, 中澤 努: 論理的手法に基づく木更津地域の3次元地質モデリング, *情報地質*, 26, 3-13 (2015).
- [30] S. Nonogaki, T. Nakazawa and H. Nakazato: Development of browsing system for two- and three-dimensional geological data, *Proc. GIS-IDEAS 2014*, 236-241 (2015).

## 執筆者略歴

中澤 努 (なかざわ つとむ)

1993年千葉大学大学院理学研究科修士課程修了。石灰石鉱山勤務を経て、1996年通商産業省工業技術院地質調査所入所。2012年より産総研地質情報研究部門情報地質研究グループ長。博士(理学)。専門は層序学、堆積学、古生物学。古生代石炭紀から新生代第四紀まで幅広い時代の地層を取り扱うが、主たるテーマとして5万分の1地質図幅作成を通じて都市平野部の地質情報整備に従事し、関東平野の地層の研究を進めてきた。現在は3次元地質地盤図課題のリーダーとして研究を推し進める。この論文では地質調査関連の執筆と全体の総括を担当した。



野々垣 進 (ののがきすすむ)

2009年大阪市立大学大学院理学研究科後期博士課程修了。博士(理学)。産総研特別研究員を経て、2012年より産総研地質情報研究部門情報地質研究グループ研究員。専門は情報地質学。野外調査で得た地質情報から地層境界面の形状を求める手法の開発を主たるテーマとしながら、地質構造の3次元モデルの構築手法や可視化手法の開発にも携わっている。この論文では、主として3次元モデルの作成およびデータの管理・表示技術についての執筆を担当した。



宮地 良典（みやち よしのり）

1991年新潟大学大学院理学研究科修士課程修了。1992年通商産業省工業技術院地質調査所入所。2014年より産総研地質情報研究部門平野地質研究グループ長。2016年より産総研企画本部総合企画室総括企画主幹。専門は層序学、堆積学。新生代の地層の層序・地質構造発達史を主たるテーマとして、5万分の1地質図幅や沿岸域の地質・活断層調査を通じて大阪平野、新潟平野や関東平野の地層の研究を進めてきた。3次元地質地盤図課題ではサブリーダーを務めるとともに、沖積層・埋立層の調査・解析を担当した。この論文では沖積層・埋立層の調査と自治体との協力関係について執筆を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 全体について

コメント（景山 晃：産業技術総合研究所）

この論文は地震に対するハザードマップ作成や都市計画に反映させるという目標の下に、地質情報を、2次元だけでなく3次元の地質地盤図として提供する目的で進められた試行研究の成果をまとめたものである。自治体が保有するデータも含めて複数の要素技術を統合していった経緯を述べているが、当初から使いやすさを意識して研究を進めていることもあり、社会的有用性が高い。技術面では、直接観測が難しい3次元の地質状態を推定するモデリング技術を精緻に検討している点でも高く評価できる。これらのことからこの論文はシンセシオロジー誌に相応しいと判断する。

コメント（栗本 史雄：産業技術総合研究所）

この論文は、人口が密集する都市域の3次元地質地盤図を提示し、自治体との連携を図りつつ、ハザードマップ作成等に役立つ研究成果を紹介している。このような観点は、防災・減災が課題である都市域において意義深く、その成果は社会に高いインパクトを与えると期待される。また、モデリング技術の開発を進めて、高精度で使いやすいものを構築する姿勢は社会ニーズに合う。このようにこの論文は地質の調査を基盤として、地質地盤情報の整備とそのデジタル情報の取扱いと高度化、自治体との連携による社会への実装まで含んでおり、シンセシオロジーの趣旨に十分合うと判断する。

### 議論2 1次利用と2次利用

コメント（栗本 史雄）

1章「はじめに」に記述されている1次利用と2次利用は重要ですので、用語解説があると読者にとって理解しやすくなると思います。

回答（中澤 努）

「2次利用（および1次利用）」について脚注に解説を加えました。

### 議論3 シナリオ、要素技術の説明の組み立て方

コメント（景山 晃、栗本 史雄）

3章の冒頭および図3で目標達成のためのシナリオを論述していますが、図2と図3を一体化（図を一つにまとめるという意味ではありません）して説明した方が理解しやすいと思います。例えば、[案1]図2にある「地形・土地利用情報」や「地表の地質情報」も3次元モデリングに利用しているのであれば、図3にもその旨記載する。あるいは、[案2]図3は図2のボーリングデータ・露頭柱状図の部分について、データ・情報の統合の進め方を詳細に示した図であると説明する方法もあると思います。

また、3章の適切な位置にユーザビリティと信頼性を考慮しながら、6つの要素技術の統合を進めてきたことを述べ、続いてそ

れぞれの要素技術について解説するという構成の文章としては如何ですか。

回答（中澤 努）

図2の表層の情報、すなわち地形分類も重要な要素技術の一つですので、地形分類についても図3の要素技術に加えたいので、この論文にも項目を設けて解説しました。

また、3章の前書きに、6つの要素技術の統合を進めている旨を加筆し、併せて4章の冒頭にも、6つの要素技術を統合させ3次元地質地盤図の作成を試行している旨を書き加えました。

### 議論4 基準ボーリングデータと公共事業等のボーリングデータ

コメント（景山 晃）

3.2節でこの二者の違いを説明してあり、重要な部分だと思います。そこで、両者の差異を対比表として示してはどうでしょうか。目的と測定データを直接的に比較して示すことで、公共事業等のボーリングデータは有用であるもののそれだけでは十分ではないという研究全体のシナリオを一層理解しやすくなると思います。

査読者の理解では、基準ボーリング調査の結果と自治体が保有するボーリングデータを比較・対比・緻密化していくプロセスが3.3節の地層の対比であると理解します。そうであれば、基準ボーリング調査が「ハブ機能」、自治体のボーリングデータが「サテライト機能」を担っていることになるとは思います。如何ですか。

回答（中澤 努）

基準ボーリングデータと公共工事のボーリングデータの特徴を比較した表1を新たに作成しました。両データはご指摘のようにハブとサテライトの関係にあり、両者をうまく利用することで地質情報の信頼性を高めることができる旨の記述を加えました。

### 議論5 3次元モデリング技術について

質問・コメント（景山 晃、栗本 史雄）

3.3節の論述と図5の記載とで、できるだけ用語を統一した方がよいと思います。例えば、「3次元地質モデル」、「3次元地質地盤モデル」、「地形分類図」、「地形区分図」等の記述があります。

また、3.5節の第2段落で、手作業では担当した人によって全く異なる3次元モデルになる可能性があることと記述されています。ここにある種のガイドラインに沿って統一的なモデル、解釈にする活動は必要ありませんか。例えば、今回開発したコンピュータ利用モデリング方法を共通基盤として、そこに各専門家の知識・経験をメタデータとしてアドオンするシステムに順次移行していくという考え方は。

回答（中澤 努、野々垣 進）

用語については、記述を整理して地下地質のみの3次元モデルを「3次元地下地質モデル」、地表情報と統合したモデルを「3次元地質モデル」としました。また「地形分類図」「地形区分図」は「地形分類図」に統一しました。

ご指摘いただいたような統一的なモデル・解釈にする活動については、現時点では取り組んでいませんが、重要であると考えています。コンピュータ処理による3次元モデルは、専門家間における認識の共有にも有用である旨を、この論文に加筆しました。

### 議論6 第4章の論述について

質問（景山 晃）

(1) 野田や柏での基準ボーリングは何箇所で行ったのですか。一定レベルの信頼性を得るには基準ボーリングは何箇所必要ですか。また、自治体のボーリングデータの内容に依存すると思いますが、全体システムを構築するうえでどの程度の補完効果を期待できるのでしょうか。これらについてある程度の情報を記述すると、今後、日本各地に展開していく際の目処立て（費

用も含めて）ができるように思います。

(2) 不動産取引への利活用については、3次元地質地盤図が公表されると不動産の評価額が減少するので公表しないで欲しいという要望が出るのが予想されます。2014年8月の広島市安佐南区の土砂災害のケースでも事前のハザードマップの公表が抑制され、結果として惨事を拡大したように報じられています。このような事態に対して、利害関係者の理解を高めて社会（コミュニティ）のリスク対応度を高めるという視点から執筆者はどのようにお考えですか（もちろん執筆者や産総研がコミットできる訳ではありませんが）。

回答（中澤 努）

(1) モデル地域の千葉県北部では、基準ボーリング調査は最終的に20地点程度整備し、公共工事等の既存ボーリングデータを約2万本利用することで、従来の地質図幅の基本スケールである5万分の1を上回る、2万5千分の1スケールで使用できる地質図を目指しています。これにより目標は達成できると考えています。5.3節にその旨を加筆しました。なお、今回の基準ボーリング調査の地点のうちの半分以上は谷埋め状に不規則に分布する堆積物を主なターゲットとするものです。基準ボーリングデータは多いにこしたことはありませんが、地層が平坦に広く分布する地域ではこれよりも少ない密度の調査で地質構造を理解できますし、逆に複雑な地域ではさらに多くの調査が必要になると思います。つまり基準ボーリング調査の密度はその地域ごとの地質の特徴によって大きく変化すると考えます。

(2) ご指摘のように、不動産取引に地質地盤情報が付加されることにより不動産の評価額の変化を懸念する声もあると思います。評価額の変化には増・減の両方が考えられます。いずれにせよ、本来の地質地盤特性を理解して、安全安心な街づくりを進めることが社会として重要であり、地質地盤情報はそのような災害リスクに対応するための重要な公共財でもあるという認識を広く持ってもらうことが重要と考えています。その旨、関連する日本学術会議の提言の引用とともに、この論文に加筆しました。

#### 議論7 3次元地質地盤図の作成、今後の展開と波及効果

コメント（栗本 史雄）

図6を引用して3次元地質地盤図のプロトタイプの結果が記述されています。また、今後の研究展開により「都市域の新しい地質情報整備のスタイル」確立につながると理解しますので、今後の研究展開と波及効果を整理していただくと読者への理解が進むと思います。

回答（中澤 努）

3次元地質地盤図のプロトタイプは、地盤災害リスク評価の高精度化が期待されると考えられ、社会への波及効果が大きいと考えますので、その旨を加筆しました。また、今後の研究展開と期待される波及効果を明示するため、モデル地域の3次元地質地盤図構築と都市域での新しい地質情報整備にスタイルの確立を目指すことを6章にまとめました。

# 極小微動アレイによる浅部構造探査システム

— 大量データの蓄積と利活用に向けて —

長 郁夫<sup>1\*</sup>、先名 重樹<sup>2\*\*</sup>

著者らの目標は、地質・地盤に関連するさまざまな社会的ニーズに対応して、できる限り高密度・高分解能で定量的な地下S波速度構造の情報を提供することである。S波速度は地盤の揺れやすさや固さに直結する物性値なので、例えば、地震災害軽減のための地震ゾーニングの高精度化等に寄与できる。その一環として、半径0.6 mの極小アレイを用いて常時微動を15分間観測するだけで数mから数十mの深さのS波速度を探索する観測・解析システムを構築中である。開発のポイントは、アレイ観測・解析の徹底的な簡易化、客観化とそれによる自動化、品質管理である。構築中のシステムにより、今後取得されると期待される膨大な量の微動データに対応する。

キーワード：微動探査、アレイ観測、レーリー波、S波速度、地盤モデル、地震計

## Constructing a system to explore shallow velocity structures using a miniature microtremor array

– Accumulating and utilizing large microtremor datasets –

Ikuo CHO<sup>1\*</sup> and Shigeki SENNA<sup>2\*\*</sup>

Our final goal is to provide quantitative information on subsurface S-wave velocity structures in response to a variety of social needs regarding geological and soil matters. Since S-wave velocity is a physical property directly related to site amplification and ground stiffness, it is expected to contribute to, for example, improving accuracy of seismic zoning for the mitigation of earthquake disasters. Currently, we are constructing a system for observation and analysis of microtremors to explore S-wave velocities within the depth range from several to tens of meters on the basis of 15-minute observations with a miniature seismic array having a radius of 0.6 m. The simplicity and objectivity of our system affords automatization and quality control, with an expected capacity to acquire large amounts of microtremor data.

Keywords: Microtremor survey method, array observation, Rayleigh wave, S-wave velocity, soil-structure model, seismometer

### 1 はじめに

2011年の東日本大震災では壊滅的な津波被害が発生したが、強震動や液状化による被害も甚大であった。地質地盤の良否により、被害が異なる。地盤のS波<sup>用語1</sup>速度は、地震による揺れやすさを知るための重要な情報となり、防災にも役立てられる。S波速度を明らかにするための一つの方法として、常時微動と呼ばれる地面の微小な揺れをデータとして用いる方法がある。

微動アレイ探査法は、数十mから数kmのスケールで地表面に地震計を配置し、数時間にわたり常時微動を群列観測（微動アレイ観測と呼ばれる（図1(a)））することで地下数十mから数kmまでのS波速度構造を推定する方法である。これは、検層<sup>用語2</sup>のように地面を掘削する必要

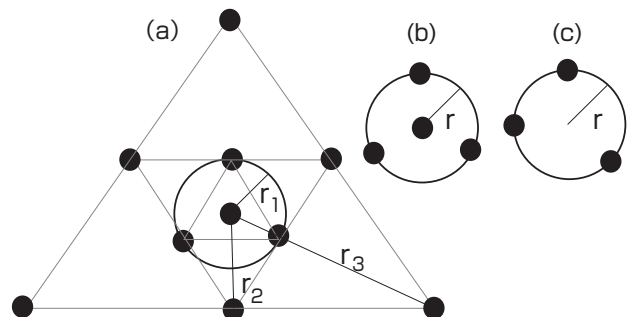


図1 微動アレイ

rはアレイ半径、黒丸は地震計。通常の微動アレイ探査法ではアレイ半径は数十mから数km程度（アレイ(a)）である。新システムでは基本的に0.6m（アレイ(b)）とし、補助的に5m程度（アレイ(c)）のものを用いる場合もある。

1 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7、2 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット 〒305-0006 つくば市天王台3-1

1. Research Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan \* E-mail: ikuo-chou@aist.go.jp. 2. Disaster Risk Research Unit, Department of Integrated Research on Disaster Prevention, NIED 3-1 Tennodai, Tsukuba 305-0006, Japan \*\* E-mail: senna@bosai.go.jp

Original manuscript received September 1, 2015, Revisions received November 30, 2015, Accepted December 2, 2015

のない非破壊探査である。また、いつでもどこでも存在する微動をデータとするので、人工振源<sup>用語3</sup>を用いる地震波探査法<sup>用語3</sup>と比べて低コストで都市域でも簡単に適用できるメリットがある。

著者らは、この微動アレイ探査法を浅部地盤に特化して観測・解析を徹底的に簡易化した探査システムを構築中である（以降、単に「新システム」と略す）。この新システムでは、円の中心に1台、円周上に均等に配置した3台（合計4台）の地震計で構成される半径0.6 mのアレイ（図1（b）、図2）を用いる。このアレイで15分間程度微動を観測することで深さ数 m から数十 m までの浅部地盤 S 波速度構造を推定する。観測者として地下構造探査の専門家ではない一般のユーザー（例えば大学の研究室や高校の地学クラブ等）を想定し、ワンタッチで使える観測機材を用いる。観測後は、得られた微動データは無線でサーバー計算機に転送され、自動解析される。ユーザーの手元には解析結果が配信され、サーバー側では、観測データおよび解析結果がデータベース化される。この一連の流れを包括的に提供することを目指している。なお、新システムで用いるアレイは通常の微動アレイ探査法で利用されるものよりも格段に小さいので、ここでは極小アレイと呼んでいる。

この新システムは、著者らの一人（先名）が構築した「i 微動」と呼ばれる既存システム<sup>[1]</sup>の高度化である。i 微動は、微動観測キット<sup>[2]</sup>による単点観測<sup>用語4</sup>の実施、サーバーへのデータ転送、微動の水平動と鉛直動のスペクトル比（H/V スペクトル<sup>用語4</sup>）の計算、それを用いた地震時の揺れ予測、結果配信までを含む一連の流れで構成される。なお、微動の H/V スペクトルは、地盤固有の振動特性を表すとされている。新システムは、i 微動の単点観測を極小アレイ



図2 半径 0.6 m の極小アレイ（図1（b））による観測風景

に置き換えることにより、地盤の振動特性だけでなく波の伝搬速度を高精度で解析できるようにしたものと位置付けられる。

著者らの目標は、地震防災をはじめとする地質・地盤に関連するさまざまな社会的ニーズに対応して、できる限り高密度・高分解能で定量的な地下 S 波速度構造の情報を提供することである。そのためには膨大な量の微動データを取得・解析・蓄積する必要があり、現在、新システムでその実現を試みているところである。単点観測ほどではないにしても、極小アレイの観測は非常に簡易なので、観測点位置を変えながら多数の観測を繰り返すことにより、S 波速度構造の空間変化を容易にイメージングできる。本章冒頭の通り、S 波速度は地盤の揺れやすさや固さに直結する物性値なので、地震災害軽減のための地震ゾーニング<sup>用語5</sup>の高精度化に寄与できる。つまり、現状では分解能の観点から微地形区分<sup>用語5</sup>等から推定せざるを得ない表層地盤の揺れやすさを、S 波速度構造や地盤振動特性の実データから評価できるようになるため、地震の揺れに関する予測精度が飛躍的に向上する。また、液状化等の地盤災害の評価や、建築・土木構造物の立地条件の検討にも寄与できる。このようにこの研究の成果には幅広い社会的な価値と波及効果が期待される。

以下ではまず通常の微動アレイ探査とこの研究の位置付けを説明する（2章）。次に、新システムの中核となる考え方を説明し（3章）、構成学的観点から開発のプロセスを述べる（4章）。なお、4.1 節、4.2 節はそれぞれ長、先名の分担である。最後に、今後の課題を述べる（5章）。

## 2 通常の微動アレイ探査法とこの研究の位置付け

微動は、風や波浪、産業活動等無数の振動源の影響で励起される、人体には感じない程度の小さな揺れであり、P 波や S 波（実体波）およびレーリー波やラブ波（表面波）<sup>用語1</sup>の重ね合わせである。実体波は減衰が大きいので振動源付近だけで卓越する。結果として、微動の波動場は一般に四方八方から到来する無数の表面波で構成される。弾性論に基づけば、このような微動の実体は容易に想定可能だが、観測データによる検証は 1950～1960 年代になってからである<sup>[3]–[5]</sup>。

微動の実体解明後は、微動上下動をアレイ観測し、レーリー波の伝搬速度（位相速度）を抽出してその分散特性（周波数によって伝搬速度が異なる特性）から地盤の S 波速度を推定する方法、すなわち、「微動アレイ探査法」を確立するための研究がなされるようになった<sup>[6]–[7]</sup>。

1990 年代後半には、微動探査法が実用化され、国内では国や自治体による地下構造調査の一環として深部地盤

構造を推定するために用いられるようになった<sup>[8][9]</sup>。深部地盤構造の推定とは、大づかみに言えば、関東平野や大阪平野等の場合では深さ数 km までに現れる地震基盤と呼ばれる S 波速度 3 km/s の基盤の深度を評価することであり、そのための作業はある程度マニュアル化されている<sup>[10]</sup><sup>[11]</sup>。具体的には、半径数十 m から 1000 m 程度にわたる大小スケールのアレイ（図 1 (a)）を展開し、自然の波浪や風を励起源とする微動を一晚（実質はアレイ半径に応じて 1～2 時間もしくは 3 時間以上）観測する（表 1）。得られた微動データから周期 0.1～10 秒のレーリー波位相速度を抽出し、その分散特性に基づいて、深さ数 km にも達するような地震基盤深度の情報を得る。

一つのアレイで解析可能な波長帯域はアレイサイズに依存し、概ねアレイ半径の 2 倍から数倍もしくは 10 数倍までの範囲と言われている<sup>[11]</sup>。探査の最大深度は解析可能な波の最大波長に依存するので、興味のある深度までカバーする広い波長帯域でデータを得るためには、アレイ半径の異なる複数のアレイで観測する必要がある。例えば、図 3 は図 1 (a) を複数回組み合わせた 6 種類の三角アレイ（半径 50 m と 100 m、250 m と 500 m、1000 m と 2000 m のアレイ；それぞれ青、緑、赤で示されている）で微動を観測して得られた位相速度の分散特性（分散曲線と呼ばれる）である。例えば、2 Hz の位相速度（青線）は半径 50 m のアレイ、0.2 Hz の位相速度（赤線）は半径 2 km のアレイで得られたものである。波長はそれぞれ 125 m、10 km に、深さスケールはそれぞれ数十 m、数 km に対応する。各アレイで得られる位相速度の分散曲線を統合して一本の分散曲線とし、観測地点の深さ数十 m から数 km までの地盤構造を表すデータとみなすことになる。

しかし、同図に示されるように、異なる半径で得られた

表 1 微動探査法の内容

項目	通常の微動探査法	新システム
微動アレイ形状・サイズ	4点アレイを組み合わせた星型のアレイ（図 1 (a)）を用いる。アレイ半径は数十 m から 1000 m～2000 m 程度。	基本は半径 0.6 m の 4 点アレイ（図 1 (b)）、オプションとして半径 5 m 程度の 3 点不規則アレイ（図 1 (c)）を用いる。
観測時間	数時間。長周期微動が卓越する夜間の観測が適している。	15 分間。短周期微動が卓越する日中の観測が適している。
解析可能な波長帯域	解析可能な最小波長はアレイ半径の 2 倍、最大波長は数倍～十数倍程度。	解析可能な最小波長はアレイ半径の 2 倍、最大波長は数十倍、条件が良ければ 100 倍を超える。
探査深度	数十 m～数 1000 m	数 m～数十 m

データはきれいに繋がらないことが多い。異なるサイズのアレイによる分散曲線が自然につながるかどうかはデータの信頼性の指標となる。アレイごとの解析結果のつながりがあまりに悪いようならば、再観測も検討される。つまり、複数サイズのアレイ観測を実施するのは、探査深度の範囲をカバーするためだけでなく、結果の信頼性を評価するという意味もある。

この問題について、もう少し言及する。微動アレイ解析では一般に微動の振動源がアレイから十分遠方にあることが前提とされる。しかし実際には、この前提が満たされることはほとんどない。市街地で数十 m 以上の微動アレイを展開するならば、地震計の周辺やアレイ内部に交通振動等の産業活動が含まれることは避けられないからである。その結果、それらは総体として想定外の記録成分すなわちノイズとなり、アレイごとの分散曲線にバイアスを与え、最終的な分散曲線のつながりの悪さに帰結する。これは、微動

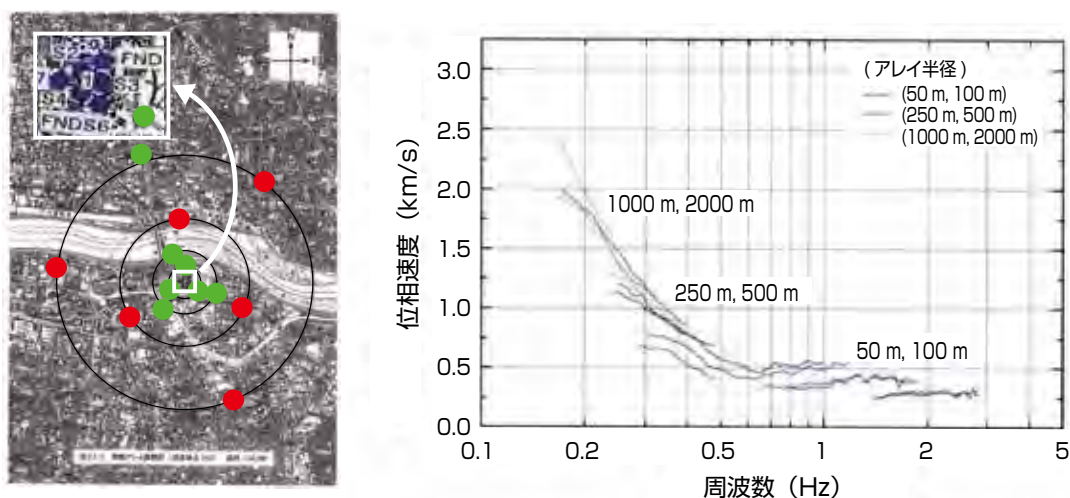


図 3 通常のアレイ探査法によるアレイ（左）とアレイごとに得られる分散曲線（右）の例（東京都による報告<sup>[12]</sup>に加筆修正）異なる半径で得られたデータは一般にきれいに繋がらないことが多い。



アレイ探査についてまわる、かなり本質的な問題である。それにも関わらず、長い間、この問題を解きほぐすための理論モデルが作られることなく、したがって定量的な検討がなされることもなく、再観測等の実務レベルでの対処に任されてきた。

このように、微動アレイ探査の枠組みは経験を基本とするところも多いという背景もあって、著者らの一人（長）は、2000年代以降微動アレイ探査に関する基礎理論の研究に取り組んだ。2000年代半ばには、微動アレイ探査の限界と可能性を把握するための理論構築も試みた<sup>[13]-[19]</sup>。浅部地盤に特化してアレイサイズの100倍以上の波長を扱う「極小アレイ」のアイデアはその時に生まれた。

一方、先名は、機動性の高い微動観測キット<sup>[2]</sup>を開発して通常の微動アレイ探査法で深部地盤をモデル化する傍ら、「i微動」という単点微動観測・解析システムを開発するなど（1章）、システムチックな大量微動観測の仕組みを整備した。両者は2011年頃から互いの研究を認識し、それぞれの分担をデータ処理の理論開発および観測システムの開発と位置付けて連携するようになった。つまり、その時点で極小アレイのアイデアは原型ができており、i微動はすでに稼働していたが、それらを融合させるための研究開発を実施し、新システム（極小微動アレイによる浅部構造（数mから数十m）探査システム）の完成を目指すようになった<sup>[20][21]</sup>（図4、図5、表1）。

これは、構成学的には、i微動という既存の統合システムの1構成要素を改善することで、浅部地盤構造の情報を精度良く、かつ簡便に得ようとするものである。i微動にはもともと観測地点周辺の地質モデルと地盤振動データからS波速度構造をモデル化するという内部処理が入っている。しかし、データの性質上S波速度の拘束が緩いため、探査システムというよりはむしろ地震時の揺れ（震度）を評

価するための途中プロセスとしての位置付けである。新システムでは、既存のi微動観測を基盤技術としつつ、地盤振動特性だけでなく地盤固有の波の伝搬速度が実データとして得られるようになるので、抜本的な精度向上が可能である。新システムが完成されれば、局所探査の精度で大量探査を実現する新たな探査デバイスとなる。今後定量的な評価が必要であるが、応用範囲は非常に幅広くなる。構成学的には、既存の統合システムの1構成要素を改善することがイノベーションとなり得る例として整理できるのではないだろうか。

### 3 一般ユーザーの利用を前提とする開発方針

著者らの一人（先名）は、i微動を含むこれまでの微動関連機材の開発において、一般ユーザー（微動解析の非専門家）が利用することを前提とし、観測から解析、結果の提示までの一連の流れを包括的に提供するアプローチをとってきた。以下、これの趣旨を説明する。

我々が対象とする浅部（数mから数十m）の地盤構造は、家屋の立地や町の防災等から一般市民にも関心が高いと考えられる。この程度の深さの地盤構造は局所的に変化するもので、隣家で起こった地盤災害が一軒離れていたために被災を免れたということも起こり得る。そのため、場合によっては数mピッチでデータをとる必要がある（例えば、4.3節）。

しかし、このような高分解能は、国や自治体の地震災害軽減プロジェクト等の広域調査では実現困難である。また、ピンポイントの調査は大多数の利益にはつながりにくい。そこで先名は、地方の大学等、地域に興味を持つ一般ユーザーが自分でデータを取得し、解析や結果の閲覧までできるような自給自足の道具を構築してはどうかと考えた。このような道具を利用したいと考える一般ユーザー

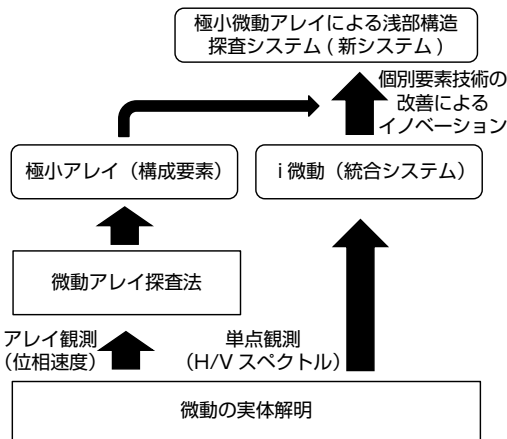


図4 構成学的観点に基づく微動研究の概念図

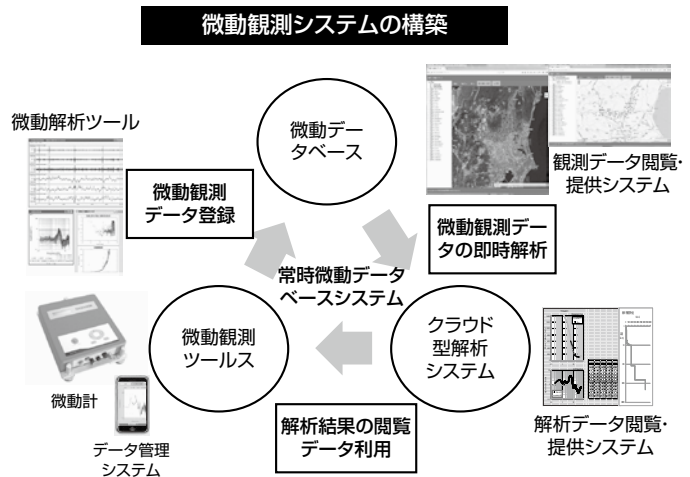


図5 微動システム構成概念図

は数の上で微動の専門家数よりもはるかに多いと推測される。各ユーザーが興味を持つ地域はそれぞれ限定的かもしれないが、幅広い層のユーザーが集まれば、広域的にデータが得られるであろう。得られたデータを中央に集約し、データベース化することを条件として、一般ユーザーに観測機材の貸与やレクチャーを行い、彼らのニーズを満たしてもらおう。このように必然的にデータが蓄積する構造ができれば、双方の利益となる。

このアプローチを実現するためには、一般ユーザーを対象とすべく操作や管理が簡単な観測機材を開発する必要がある。データ処理の自動化や客観的な品質管理をする必要もある。また、データの散逸を防ぎ、継続的に蓄積するために、データベース周りもセットで開発する必要がある。こうして、各要素をバランス良く開発し、機材やサービスを包括的に提供するという発想（図5）が生まれる。

上記の開発方針は新システムの場合にもそのまま適用され、極小アレイを利用することで*i*微動による観測の簡易性が失われないように注意を払っている（4.1.1、4.2.2項）。また、極小アレイとセットで開発した理論に基づく品質管理とそれによるデータ処理や視覚化までの全自動化（4.1.2項）、準リアルタイムでの結果の配信（4.2.3項）によって、全体的な使いやすさを維持している。ユーザーは、既存の*i*微動のような簡易さで、地震、地盤災害に直結する浅部S速度構造の2次元断面まで取得できる（4.3節）。

## 4 新システムの構成要素

### 4.1 理論開発

#### 4.1.1 極小アレイ解析（対策：長波長の解析限界の拡張）

既開発の*i*微動では、大量観測を目的として観測の簡易性が重視されている（3章）。このことはこの研究でも同様なので、単点観測の簡易性をなるべく減じずにアレイ観測を実施したい。そこで、路肩に停車させた乗用車の背後にアレイを設置することを一つの目標とし（図2）、半径0.6 mの4点アレイ（図1（b））を用いることとした。

従来の微動アレイ探査の基準（2章）に基づく限り、半径0.6 mの極小アレイで解析可能な波の波長は1.2 mから12 m程度となり、深さ数十 mまでの探査は困難なはずである。しかし、アレイが小さければ、アレイ内部に振動源を含まないようにできること（2章）、また工事現場等の明らかなノイズ源から離れたところに設置する等の対処も簡単なことから、長波長帯域の解析を阻むノイズの問題が軽減され、アレイサイズと比較して相対的に長い波長も取り扱えるようになると期待される。さらに、著者らが開発したさまざまな解析手法<sup>[14][17]</sup>を組み合わせれば、SN比<sup>用語6</sup>

を評価してノイズの影響を補正することが可能となり、アレイ半径の100倍以上の長波長を扱えるようになる可能性がある。また、スペクトル推定理論に基づけば、15分程度の観測時間で十分安定に解析できると推測される。

著者らはこのような理論スキームを整備した上で実機<sup>[2]</sup>を使って多数のサイトで実験を行い、その実用性を検証した。具体的には、現場到着から退去までに要する時間を約30分に抑え、ターゲットとする数十 mから場合によっては100 m以上の波長帯域における位相速度の分散特性が得られることを示した<sup>[20]</sup>。

#### 4.1.2 位相速度の読み取り（対策：解析限界の評価）

2章で述べたように、通常の微動アレイ探査法では、(i)ターゲットとする深さレンジに対応する波長帯域をカバーし、(ii)分散曲線の信頼性を担保する、という二つの観点から複数サイズのアレイを用いている。しかし、新システムでは観測の簡易性を重視し、なるべく半径0.6 mの極小アレイ（図1（b））だけの観測を基本としたい。極小アレイの場合は対象とする深さスケールを限定していることと長波長側の解析限界の拡張に成功している（4.1.1項）ことから、

(i)はクリアできる。したがって、いかにして(ii)を実現するかが問題となる。

この問題に対処するために、著者らは、SN比を評価して位相速度の解析限界を提示し、信頼性を評価するアプローチを考えた<sup>[20]</sup>。得られた解析結果の信頼性が高ければ極小アレイ1回の観測で終わらせれば良い。信頼性が低い場合は、サイズの大きい3点不規則アレイを追加的に実施することで対処することとする（次項）。

実データを用いてこのアイデアの現実性を検討したところ、理論通りの結果が得られることが分かった（技術的な詳細は参考文献[20]を参照）。これを説明するために、まず図6を見て頂きたい。同図は、半径0.6 mの極小アレイで得られた位相速度の分散曲線である。紫三角、水色クロスはそれぞれノイズの影響を補正した場合、補正しない場合の位相速度である。分散曲線は通常周波数が低くなるにつれて位相速度が速くなるが（正分散と呼ばれる）、これは地盤の深さとともにS波速度が大きくなることの反映である。同図の分散曲線も7.5 Hz以下で急激に位相速度が速くなっている。一方、7.5 Hz以上では周波数が高くなると位相速度が速くなる、いわゆる逆分散と呼ばれる傾向が見られる。これは地表近くに高速度の層があることの反映である。事実、同図の観測地点周辺では、深さ5 m程度にS波速度の非常に遅い粘土層が挟まれていて、地表付近のほうがS波速度が速いことが分かっている。

図6には、極小アレイでどの程度深くまでのデータを取れるかを示す参考指標として、波長25 m（赤線）、40 m（紫

線)、100 m (緑線) に対応する直線が描かれている。分散曲線とこれらの直線との交点は、各波長に対応する周波数および位相速度ということになる。3 Hz 以下において位相速度が減少して見える部分については除外するとして、ノイズを補正しない場合は波長 100 m 弱まで、補正した場合は波長 100 m を超えるところまで、このような交点が図上で確認でき、それらの波長と対応する位相速度が得られていることが分かる。ここでは、ノイズの影響を補正した結果の目視により(クロス)、波長 100 m を超える部分まで同定した。なお、波長 100 m はアレイ半径の 167 倍に対応する。この目視の妥当性は、半径 5 m 程度のアレイを別途実施することにより検証されている。

さて、ここまで図の見方を説明しつつ極小アレイのパフォーマンスについて述べたが、図 6 で示したいのは、位相速度の解析限界に基づく信頼性の評価である。同図において解析限界は黄点線で示されている。これは、微動記録をアレイを横切る表面波(シグナル)の成分とそれとは無相関なノイズの成分に分ける開発技術に基づいて厳密に決められた解析限界である。位相速度の推定値に比べて解析限界が十分に高速ならば、安心して位相速度の推定値を採用できると判断される。同図では、この解析限界を参考として、長波長側は波長 40 m を超える位相速度までが自動読み取りされている(黄四角)。つまり、このケースでは、極小アレイだけのデータをもとに客観的に解析結果の品質管理がなされ、少なくとも波長 40 m までは「使える」ことが自動判定された。当然ながら、この情報は専門家、非専門家に関わらず享受される。

このように、地盤の S 波速度の情報を有する新たなデータとしてレーリー波の位相速度が得られるようになったこと

が、極小アレイを用いた i 微動高度化の核心である。それをベースとして解析限界の評価を実施できるように理論開発をしたことで、客観的な品質管理とそれに基づく解析の自動化、そして一般ユーザー利用の道が拓かれた。

#### 4.1.3 3点不規則アレイ解析(対策:不規則アレイ形状の評価)

半径 0.6 m の極小アレイの解析結果が低品質だった場合、その対処としてさらに大きなサイズのアレイを実施してデータを補うこととする。ここでは、1 オーダー大きなアレイ(半径数 m)を考える。しかし、そのサイズのアレイは路肩に停車させた乗用車の背後には収まらない。また、従来は円周上に等間隔に地震計を設置する図 1 (b) のアレイが用いられてきているが、市街地では道路や建物の関係があるので、整然と配置できるとは期待できない。

その対策として、この補助的なアレイは半径 5 m 程度の 3 点不規則アレイ(図 1 (c)) とすることを考えた。従来の微動アレイ探査ではアレイを等間隔に配置することを前提としてデータ処理がされているので、このような 3 点不規則アレイの適用は困難である。しかし、著者らはすでに不等間隔な場合のデータ処理法を提案し、解析結果に及ぼす影響を理論的に評価している<sup>[13]</sup>。この研究では実機<sup>[2]</sup>を用いて、極小アレイと数 m サイズの 3 点不規則アレイを組み合わせた野外実験を繰り返し、新システムへの適用性を検討した。その結果、このアイデアの適用により目的にかなう補助データが得られること、観測時間や労力にそれほど多大な影響を与えず、十分実用的であることが示された<sup>[22]</sup>。

#### 4.1.4 地盤構造の推定(対策:簡易解析の採用)

最終的に欲しいのは地盤の S 波速度構造である。そのためには、近くの検層データや広域的な地質構造を初期モ

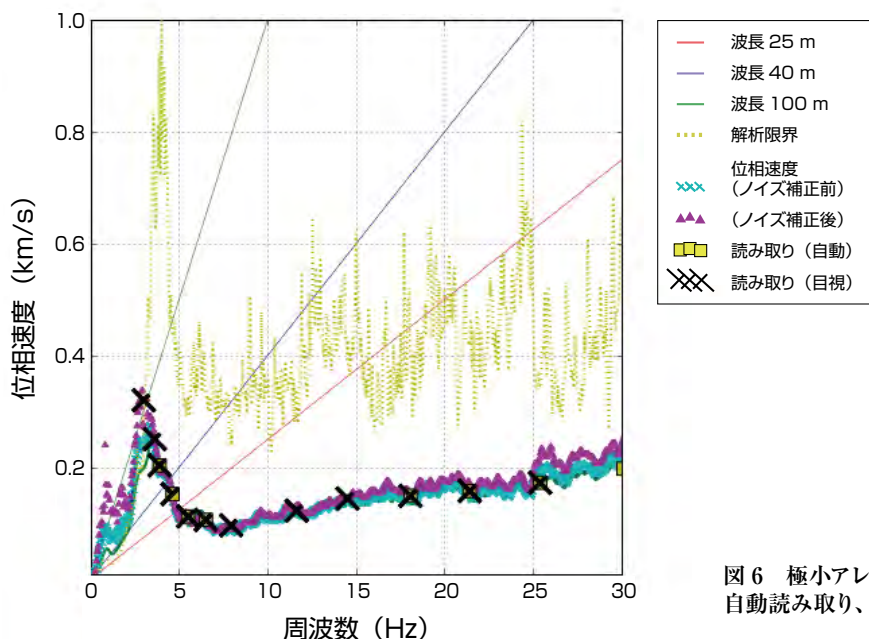


図 6 極小アレイによる位相速度(分散曲線)と自動読み取り、解析限界の評価

デルとして参照しつつ、アレイ観測で得られた位相速度に合わせてそれを修正する逐次的な逆解析が実施されることが多い。

しかし、初期モデルの作成には専門家の知見が必要となり、自動処理と解析結果の即時配信という要請と折り合わない。そこでここでは、周波数一位相速度で表される分散曲線を波長一位相速度の関係に変換し、適当なスケールングにより深さ—S波速度の関係とみなす簡易変換を採用することとした<sup>[22]</sup>。分散曲線から波長 40 m に対応する位相速度を深さ 30 m までの平均 S 波速度とみなす方法<sup>[23]</sup>も併用する。

この対処は古典的な予備解析の範疇に入るものであるが、今回の研究と実証によって需要と供給のバランスを考慮した上で、十分納得できる範囲の結果が得られると考えている（例えば、4.3 節）。ただし、現在、H/V スペクトルと分散曲線の同時インバージョン<sup>[24]</sup>等の可能性についても検討を進めている。

#### 4.1.5 データ解析の自動化（対策：パラメータの最適化）

一般ユーザーの利用という観点から、解析区間の選択<sup>[19]</sup>、位相速度の読み取り<sup>[25][26]</sup>（図 6）を含むすべての処理を自動化した。これは、読み取りにおける客観性の確保、時間短縮、ヒューマンエラー対策を兼ねている。後で目視により自動処理の結果を確認し、読み直しができる仕様とした。

地盤構造の推定では、観測地点ごとに解析結果を提示することになるが、それだけでは解釈がおぼつかないことが多い。多数の観測点の結果をつなぎ合わせて 2 次元的速度断面があれば、解釈の補助としてたいへん有効である。そこで、興味のある断面線を地図上で決定するだけで S 波速度断面を自動描画するツールも作成した（4.3 節）。

#### 4.1.6 生データ・解析結果の品質管理（対策：指標の作成）

データ欠損、GPS による時刻同期の失敗、劣悪な設置環境等のため生データに問題がある場合、準リアルタイム的にその事実を提示することで、その場で再観測をする等の判断が可能となる。解析結果の品質が低い場合（微動の強度が低い場合 SN 比が低くなりターゲット深度まで探査できない、あるいは信頼性が低い等）は 3 点不規則アレイの追加観測を実施するという判断が可能となる。解析結果の過剰解釈を防ぐためにも、品質管理を徹底する必要がある。品質管理のための指標は、波形の最大振幅やスペクトル密度、SN 比等の量を組み合わせて提示することになる。詳細は現在検討中である。

## 4.2 観測システムの開発

### 4.2.1 地震計の開発（対策：機動性、頑健性、安定性、簡易性の確保）

微動アレイ探査に用いる地震計は、応答特性の個体差が小さく、特に位相特性が揃っていなければならない。また、微動レベルの小さい地域で高品質のデータを得るために、自己ノイズが低いことが重要である。数 100 m サイズの微動アレイに用いる可能性を考えると、GPS による時刻同期と、低周波数帯域まで解析可能な広帯域地震計が必要となる。H/V スペクトルの単点観測に用いる可能性を考えると、上下方向だけでなく水平方向の地面の動きを感知するためのセンサーが必要となる。

機動性を確保するために、小型軽量で内容物が一つの筐体に収められていること、現場での配線やクランプ除去等の手作業が不要なこと、充電時間が短く、1 日の観測中電源が持続すること、電源オンから短時間で安定に記録を開始できることを条件とした。車両運搬の耐振動性、防滴性に加え、端子類の外部露出を最小限に抑えることも重要である。

これらの要件を満たすために、先名他<sup>[2]</sup>は高感度で広ダイナミックレンジ、低ノイズでバイアス温度安定性の高い地震計を開発した。同地震計の開発においては、特に記録計の振幅分解能や SN 比にも注意が払われた。この機材は極小アレイの適用にも耐える性能を有することが実証されている<sup>[20]</sup>。

### 4.2.2 データ転送システムの開発（対策：データ欠損の対処等）

微動アレイ観測を大量に実施し、その解析結果までを円滑に管理するためには、観測データの取得から解析、結果の評価に至るまでの工程が少なくかつ簡単であることが必要である。特に観測によるデータ取得と解析までの間には、解析のためのデータチェック・データフォーマット変換・写真整理等の整理作業に多くの時間が割かれる。しかし、現場で簡単にデータを吸い上げ、データベースに納めることが可能となれば、沢山の観測データを楽に管理できるため、前述の簡単な観測機器と合わせ大量の観測管理が可能となる。

これらの目的を達成するためには、現場でのデータ整理から解析等（位置情報・写真情報・観測データ・時刻歴情報・解析結果等のデータ登録）の一連の工程が簡単に行え、ヒューマンエラーが少なくなる仕組みが必要である。具体的には、複数の観測機材から簡単に安定的に標準化書式を介してデータを送受信・集約し、データベースシステムや解析ソフトでデータを共有利用できる仕組みの構築を課題とした。

これらを解決するため、個々の微動計が自動で位置判

断し、1台がマスター機（親機）、その他がスレーブ機（子機）として構成され、データをマスター機に集約する機能を付加した。また、冗長性のあるACTプロトコル<sup>用語7</sup>を採用し、PCやタブレット等の端末にマスター機からデータを欠損なく送受信できるようになっている<sup>127</sup>。

#### 4.2.3 解析結果の配信（対策：迅速性の確保）

データベースに登録されたデータは、自動的に品質管理・解析され、解析結果からS波速度構造（地盤モデル）をWEBGIS<sup>用語8</sup>等にて地図情報とともに配信・確認できる必要がある。また、観測者が現地にて品質管理・解析結果を確認するためには、リアルタイムに近い形でデータベースに送信したデータを解析し、結果を閲覧できるようにする必要がある。

これらを実現するために、スマートフォン用のアプリケーションや、高速に微動データを解析・品質管理する「クラウド解析システム」の構築を課題としている。スマートフォン用アプリケーションについては、i微動<sup>11</sup>の機能をそのまま用いて、リアルタイムでデータを受けて、波形やスペクトルのチェック、簡易的な微動のSN比管理等のデータの品質管理を行えるようにする。また、クラウド解析では、入力されたデータについて詳細解析およびデータの品質管理を行う<sup>120</sup>。本クラウドシステムを使えば、使わない場合に比べて5～10倍程度高速化する。既存のi微動であれば数分以内で結果を配信できることが分かっている<sup>127</sup>。新システム（極小アレイによる浅部構造探査システム）にはこの高速化が反映されることになる。

#### 4.2.4 データベース関連（対策：書式・フォーマットの定義）

微動の生データ・解析データを効率的に閲覧・活用可能とするためのデータベースの形式を検討した。具体的には、

微動観測データについてはXML<sup>用語9</sup>形式の書式を定義し、観測生データおよび解析結果データについては、汎用性の高い数種類のフォーマット形式で収めることとした。

#### 4.3 構成要素の統合

4.1節、4.1節の構成要素を順に並べれば、3章の開発方針を実現できる。その完成度は、開発の基本方針である一般ユーザーによる利用の便・不便および結果の信頼性から量られる。利用性と信頼性は互いにトレードオフする傾向があるので、ここでは一般ユーザーが容易に結果を得られるようになった時点で利用性の目標は達成されたとみなし、開発終了とする。その時点で検証用データとの照合等から新システムの信頼性を評価する。こうして「適用範囲」が付された一つの製品となる。

現在、その途上ではあるが、ある程度の手ごたえは得られている。例えば、図7を見て頂きたい。これは、液状化現象に関連して千葉県立浦安高校グラウンドの地下構造を評価したいという地学関連の研究者（微動探査の非専門家）に新システムを試験的に利用してもらい、結果として得られたS波速度断面である。本結果は佐藤他による学会発表<sup>129</sup>で用いられた。彼らは極小アレイ観測についての簡単なレクチャーに基づいて、高校の校庭に約120mおよび40mの2測線を描き、概ね5m間隔で極小アレイ観測を繰り返した。1地点につき約20分、全体で12時間要したようである。ただし、短いほうの測線だけならば観測時間は合計2時間に満たない。

データ転送システム（4.2.2項）および解析結果の配信（4.2.3項）が未完成なので、機材返却の際、彼らから観測データを受け取った上で、データ解析から描画までを完全自動処理した結果（120mの測線）が図7である。浦安高校グラウンドの最上部は厚さ3mの埋立層であり、測線

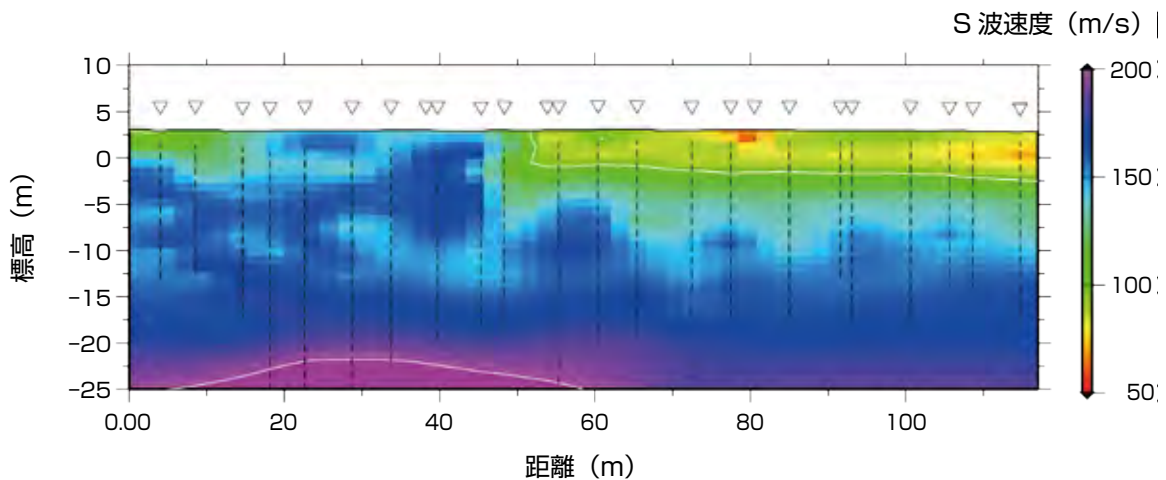


図7 浦安高校グラウンドで実施された極小アレイ探査によるS波速度断面  
断面図の右、左方向はそれぞれ南東、北西方向に対応する。断面の凡例はS波速度で単位は(m/s)。断面中の三角は個々の極小アレイ位置、点線は速度構造データが存在する深さの範囲を表す。白線は100(m/s)ごとの等速度線を表す。描画にはGeneric Mapping Tool<sup>128</sup>を用いた。

中央部付近を境に東西でそれぞれ砂層、シルト層からなることが、1965-1971年の埋立工事に関連する調査およびハンドオーガーパーリング<sup>用語2</sup>から分かっている<sup>[30]</sup>。同図の速度断面の深さ10 m程度までの部分には、横軸45 m付近を境に明瞭にこの相違が描き出されている。

## 5 将来に向けて

我々の目標は7割方完成していると考えている。未対応の構成要素（データ転送システム、解析結果配信）や、洗練可能な部分（地盤構造の推定手法等）について、今後詰める必要がある。

現在、関東地方平野部全域において1-2 kmメッシュで極小アレイによる観測が計画され、一部実施されつつある<sup>[31]</sup>。新システムの限界と可能性を見極め、今後の発展につなげるために、このデータを利用したいと考えている。

一方、著者らの一人（長）の所属する研究グループでは、高分解能地質地盤図を作成中である<sup>[32]</sup>。そこに新システムを適用し、微動データを用いたより定量的な評価を加味することを検討している。

## 用語の説明

用語1: S波: 地震波の一種。物質内部を伝搬する地震波は実体波と呼ばれる。伝搬方向と平行に振動する波はP波、垂直に振動する波はS波と呼ばれる。一方、物質の表面を伝わる地震波は表面波と呼ばれる。伝搬方向と垂直かつ水平方向に振動する波はラブ波、伝搬方向と平行かつ上下方向に振動する波はラーリー波と呼ばれる。ラブ波の伝搬により地盤の粒子は水平面内で直線的に振動するが、ラーリー波の場合は垂直面内で楕円軌道を描く。

用語2: 検層: ボーリング孔を使って地下の地質や地盤の状況を測定すること。ボーリングは、地面に円筒状の穴を穿つこと、またはその穴。ハンドオーガーパーリングは手回しドリルによるボーリングである。

用語3: 人工振源: 人工的に地震波を励起するために地表付近で実施する発破や打撃、起振機による振動。人工振源を用いて励起された地震波による探査を地震波探査と言う。

用語4: 単点観測: 地震計1台を用いる観測。H/Vスペクトルは、単点観測で得られる水平方向と上下方向の地動のスペクトル比である。一般に、H/Vスペクトルは主に表面波の特性で規定されると考えられている。例えば、第一近似としてH/Vスペクトルをラーリー波の楕円率と解釈すると、ラーリー波上下動の振幅が0になる周波数がH/Vスペクトルのピーク周波数ということになる。

用語5: 地震ゾーニング: 地盤条件等を考慮して地震動の強さや被害率の分布を地図上に表すこと。地盤条件として、微地形と呼ばれる5万分の1縮尺の地形図上には明瞭には

表現しにくいほどの小規模な起伏が参考とされている。

用語6: SN比: シグナルとノイズの強度の比。

用語7: ACTプロトコル: 首都圏地震観測網 (MeSO-net) のデータを、確実かつ安定的に伝送するために開発されたデータ伝送プロトコル。プロトコルとは、情報を相互に伝達できるように決められた約束事や手順のことである。

用語8: WEBGIS: インターネット上で機能する地理情報システム。

用語9: XML: インターネット上でのさまざまなデータの取り扱いに適した汎用的なデータ記述言語。

## 参考文献

- [1] 先名重樹, 東宏樹, 武留井優子, 藤原広行: 微動探査観測システム「微動」等の開発, *物理探査学会第124回学術講演会論文集*, 346-348 (2011).
- [2] 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, *第115回物理探査学会学術講演会論文集*, 227-229 (2006).
- [3] K. Aki: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 35, 415-457 (1957).
- [4] M. N. Toksöz and R. T. Lacoss: Microseisms: Mode structure and sources, *Science*, 159, 872-873 (1968).
- [5] R. A. Haubrich and K. McCamy: Microseisms: Coastal and pelagic sources, *Review of Geophysics*, 7, 539-571 (1969).
- [6] 岡田広, 坂尻直巳: やや長周期微動による地下構造の推定, *北海道大学地球物理学研究報告*, 42, 119-143 (1983).
- [7] 岡田広, 松島健, 森谷武男, 笹谷努: 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法, *物理探査*, 43, 402-417 (1990).
- [8] 千葉県: 平成10年度千葉県地下構造調査 (1999).
- [9] 横浜市: 平成10年度関東平野(横浜市区)の地下構造調査 (1999).
- [10] H. Okada: *The Microtremor Survey Method*, *Geophysical Monograph Series, 12*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (2003).
- [11] 物理探査学会標準化検討委員会: *物理探査適用の手引き: 土木物理探査マニュアル2008*, 111-126 (2008).
- [12] 東京都: 23区内微動アレイ探査委託(その1)に関する調査成果報告書 (2004).
- [13] I. Cho, T. Tada and Y. Shinozaki: A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, *Geophysics*, 69 (6), 1535-1551 (2004).
- [14] I. Cho, T. Tada and Y. Shinozaki: A generic formulation for microtremor exploration methods using three-component records from a circular array, *Geophys. J. Int.*, 165 (1), 236-258 (2006).
- [15] I. Cho, T. Tada and Y. Shinozaki: Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, *J. Geophys. Res.*, 111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235 (2006).
- [16] 長郁夫, 多田卓, 篠崎祐三: 極小アレイによる新しい微動探査法: 浅部地盤平均S波速度の簡便推定, *物理探査*, 61 (6), 457-468 (2008).
- [17] T. Tada, I. Cho and Y. Shinozaki: Beyond the SPAC method: Exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97 (6), 2080-2095, doi:10.1785/0120070058 (2007).
- [18] T. Tada, I. Cho and Y. Shinozaki: New circular-array microtremor techniques to infer Love-wave phase velocities, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99 (5), 2912-2926,

doi:10.1785/0120090014 (2009).

- [19] T. Tada, I. Cho and Y. Shinozaki: Analysis of Love-wave components of microtremors, *Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, 115-124 (2010).
- [20] I. Cho, S. Senna and H. Fujiwara: Miniature array analysis of microtremors, *Geophysics*, 78 (1), KS13-KS23, 10.1190/GEO2012-0248.1 (2013).
- [21] 先名重樹, 長郁夫, 藤原広行: 常時微動を用いた浅部構造探査の高度化について, *日本建築学会大会[近畿]梗概集 2014*, 355-356 (2014).
- [22] 長郁夫: SPAC法の一般化とCCA法の開発について, *地球惑星科学連合* (2014).
- [23] 紺野克明, 片岡俊一: レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案, *土木学会論文集*, No. 647/1-51, 415-423 (2000).
- [24] H. Arai and K. Tokimatsu: S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95 (5), 1766-1778, doi:10.1785/0120040243 (2005).
- [25] 長郁夫, 先名重樹, 藤原広行: 微動を用いた浅部構造探査法の高度化(その1): 自動読み取りアルゴリズムの開発, *地球惑星科学連合* (2014).
- [26] 先名重樹, 長郁夫, 藤原広行: 微動を用いた浅部構造探査の高度化(その2)-自動読み取りアルゴリズムの適用-, *地球惑星科学連合* (2014).
- [27] 先名重樹: 微動クラウドシステムの構築, *地球惑星科学連合* (2015).
- [28] P. Wessel and W. H. F. Smith: New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79 (47), 579 (1998).
- [29] 佐藤伸司, 東将士, 樋口茂生, 稲田晃, 伊藤彰秀, 岩本広志, 上加世田聡, 川崎健一, 楠恵子, 品田正一, 末永和幸, 渡邊拓美, 先名重樹, 藤原広行: 液状化地域の「微動」の解釈: 浦安地域におけるケーススタディ(2), *地球惑星科学連合* (2014).
- [30] 岩本広志, 東将士, 樋口茂生, 稲田晃, 伊藤彰秀, 上加世田聡, 川崎健一, 楠恵子, 佐藤伸司, 品田正一, 末永和幸, 渡邊拓美: 2011年東北地方太平洋沖地震による人工地盤の変状(その2)-沖合海底から浸濺された埋立シルト層の意味について-, *日本地質学会学術大会講演要旨* (2012).
- [31] 先名重樹, 松山尚典, 神薫, 若井淳, 前田宜浩, 藤原広行: 関東地域における微動観測に基づくS波速度構造の推定と地盤モデルの構築, *物理探査学会第133回学術講演会論文集* (2015).
- [32] 中澤努, 野々垣進, 宮地良典: 都市域の3次元地質地盤図-都市平野部の新たな地質情報整備-, *Synthesiology*, 9 (2), 73-85 (2016).

#### 執筆者略歴

長 郁夫 (ちょう いくお)

1999年京都大学大学院地球惑星科学専攻理学研究科博士課程修了。同年北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター講師。2000年東京理科大学工学部第一部助手。2002年(財)地質地盤環境研究所主任研究員。2005年産総研に入所。2014年まで同所主任研究員として地震発生予測の業務研究を促進する一方、微動探査に関する研究を実施。2014年文部科学省地震調査官として活断層評価を担当。2015年産総研主任研究員として微動を軸とした地質情報の研究を進めている。同年防災科学技術研究所客員研究員。



先名 重樹 (せんな しげき)

1994年金沢大学大学院理学研究科地学課程修了。同年(株)ダイヤコンサルタント入社。2003年防災科学技術研究所研究員。2008年東京工業大学総合理工学研究科人間環境システム科博士課程修了。2014年まで同研究所研究員・客員研究員として文部科学省の地震調査研究推進本部の強震動予測地図作成業務を促進する一方、液状化調査や微動探査に関わる研究を実施。2014年防災科学技術研究所の主任研究員として、微動を軸とした地下構造モデルの構築や、システム・ツール開発、強震動予測の研究等を進めている。2013年度から産総研客員研究員。



#### 査読者との議論

##### 議論1 全体について

コメント(景山 晃:産業技術総合研究所, 栗本 史雄:産業技術総合研究所)

微動アレイ探査法は地下数十mから数kmまでのS波速度構造を推定し、地震による揺れやすさを知ることができるが、この論文では対象を浅部地盤に特化し、地震による強震動や液状化の被害が想定される都市部における高密度・高分解能で定量的な地下S波速度構造の解明を目標としている。著者らは、社会ニーズへの的確な対応、極小微動アレイ解析の理論開発と既存微動アレイ技術への適用、自動解析システムの開発、さらに一般ユーザーによる実地での試行について、一貫したシナリオに沿った研究の進捗と成果を適切に提示している。したがって、この論文はシンセシオロジーに相応しいと判断する。また、この論文は複数の要素技術からなるシステムにおいて、コア技術を新しい発想に基づいて進化させることによって、システムに革新的な機能を付加できることを示したもので、シンセシオロジーの論文として新しい構成法を提供したものと見える。

##### 議論2 要旨について

コメント(景山 晃, 栗本 史雄)

「この研究の成果がどのように社会に役立つか」を明示してほしいと思います。また、この研究の目標として「地下S波速度構造の情報を提供する」を示していますが、その波及効果にも言及すると、読者の理解が進むと思います。

回答(長 郁夫)

地下S波速度構造は「地盤の揺れやすさや固さ」に直結するので、それが高密度・高分解能で得られるようになることは「地震の揺れに関する予測精度の飛躍的向上」につながるということを冒頭に記述しました。

##### 議論3 論文の構成および構成学としての意義

コメント(景山 晃)

この論文の技術は、著者の一人が長年にわたって研究開発し実用化している微動アレイ探査法を基盤システムとし、浅い地盤の探査精度を高めることで地震時の防災・減災に貢献することに特化して理論的な検討を含めて新規技術を開発したものである。この新規技術によって基盤システムを相互補完・強化しようとする位置付けにあり、シンセシオロジー誌にとって新しい論文構成を提供するものである。この点を意識して論文全体の構成について再検討していただきたい。

回答(長 郁夫)

指摘の通り、我々は、従来の技術では打開できなかった問題が既存システムの一部改善によって一挙に可能となった例としてこの論文を執筆しました。この趣旨を明確にするため、2章の最終段落で、新システムにおいては地盤振動特性だけでなく地盤固有の波の伝搬速度を得ることにより、抜本的な精度向上が可能になったことを強調

し、既存の統合システムの1構成要素を改善することがイノベーションになりうると説明しました。また、3章の最終段落および4.1.2項の最終段落において、観測の簡易性、品質管理、データ処理や視覚化までの全自動化、準リアルタイムの配信等、技術開発のポイントを整理しました。

#### 議論4 S波速度構造観測のメリットについて

コメント（景山 晃）

S波の速度構造について論じてありますが、この技術によってどのような便益を社会に提供できると考えているのかについて、もう少し具体的に触れることはできませんか。例えば、「地震ゾーニングの高精度化」という説明がありますが、ユーザーがどのようなことを理解しやすくなり、判断の材料となりうるのかを説明できるとさらに理解が進むと思います。

回答（長 郁夫）

微地形区分を用いて推定せざるを得なかった表層地盤について、微動による物性値や地盤振動の実データを利用することにより、地震の揺れに関する予測精度を向上させられることを述べました。

#### 議論5 図4について

コメント（栗本 史雄）

図4にはこの研究の構成要素が網羅されていますので、この図を使ってこの論文のシナリオが示されると良いと考えます。

回答（長 郁夫）

「微動アレイ探査法」から「極小アレイ」に至る展開が重要なポイントであり、この過程はこの論文の構成学的な大きなポイントと判断していますので、この過程を中心にこの論文をまとめました。なお、この論文では、「極小微動アレイによる浅部構造探査システム」を「新システム」と呼んでいます。

#### 議論6 4.1.3項の3点不規則アレイについて

質問（景山 晃）

4.1.3項の第2段落で、「従来の微動アレイ探査ではこのような3点不規則アレイの適用は困難」とありますが、これは不等間隔な場合のデータ処理法が検討、開発されていなかったためですか。であるとする、従来の微動アレイ探査ではアレイを等間隔に配置することを大前提として、観測データの処理法を整備していたが、執筆者らは「素朴な疑問」に立ち返ってアレイ位置が不規則な場合のデータ処理法を新規に開発・評価し、十分に実用可能であることを立証したという位置付けになるとと思いますが、この理解でよいですか。

回答（長 郁夫）

その通りです。ご質問を参考に、該当箇所に「従来の微動アレイ探査ではアレイを等間隔に配置することを前提としてデータ処理がされている」ことを追記し、舌足らずなところを補いました。



# 高温高压岩石変形実験技術の開発

## — 千年スケールで進行する地質現象の加速化と検証 —

増田 幸治

地震災害に正しく備えるためには、地震発生予測に関する正確な情報を社会へ発信する必要がある。そこで地震予測精度を向上させるために、物理プロセスを考慮した地震発生モデルを構築する。地質の調査を基に過去に地下深部でおきたプロセスのモデル化を行い、実験室で再現することでそれを検証する。その際、自然界と実験室の間の、環境の違いと時間の違いという二つの点を解決するために、既存の技術と独自開発した技術を統合した岩石実験手法を開発した。千年スケールで進行する地質現象を加速化して検証する技術と手法を報告する。

**キーワード:** 地震発生予測、地質調査、岩石実験、高温高压、減災

## Development of rock deformation techniques under high-pressure and high-temperature conditions

### – Evaluation of long-term geological processes by a compressed timescale process model –

Koji MASUDA

The reliability of earthquake forecast information is important for disaster mitigation in our society. A physical model of the earthquake generation process was constructed to improve the reliability of earthquake forecast information. We proposed a model based on the information extracted from geological surveys. Our model was evaluated using experimental techniques in the laboratory. During the experimental study, we considered two disparities between laboratory and natural conditions, which were differences in environmental conditions and timescale. A new experimental rock deformation technique was developed that unifies previous and newly developed techniques. Long-term geological processes were evaluated by a process model operating over a compressed timescale.

**Keywords:** Earthquake, geological survey, rock mechanics, high-temperature and high-pressure, disaster mitigation

### 1 はじめに

災害に強い社会の構築に貢献したい。地震に関する研究の最終目標は、その科学的成果をもって、地震による災害の軽減につなげることであると言える。災害は防ぐことはできないが、正しく備えることはできる。正確で、かつ地質学的にも、物理学的にも信頼性の高い情報や予測を速やかに発信することで、それが社会にとって、災害に備えるための有用な基礎情報となる。予測は単なる仮説ではなく検証された成果に基づいて科学の言葉で発信されなければならない。地震の発生予測には、データとモデルに起因するあいまいさが伴うが<sup>[1]</sup>、我々は、より精度の高い地震発生予測モデルを構築することで、地震予測精度向上に貢献することを目指している。より精度の高い地震発生モデルを構築するためには、どのようなプロセスが起こっている

かということに関して地質学的にも物理学的にも信頼性のあるモデルを提案することが必要で、ここでは、そのモデルを検証するために開発した技術と手法を報告する。

地震研究を俯瞰したときには、地質の調査、地震波や地下水等の観測データによる研究、コンピューターを使用したシミュレーション研究、室内実験研究等さまざまな手法の研究がある。地質の調査・観測・室内実験・モデル化等、これら各種の地震研究は補完しあって地震の理解が進んできた<sup>[2][3]</sup>。活断層の過去の活動状況(活動履歴)や津波堆積物の調査によって過去の巨大地震の発生時期と規模を解明することで、今後の巨大地震の発生時期や規模を予測する研究<sup>[4][5]</sup>。最新の観測技術によって日本列島の地震発生状況や地殻変動(地面のわずかな動きや変化)を常時モニターし、いち早く異常を検出するための観測研

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7  
Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: koji.masuda@aist.go.jp

Original manuscript received January 29, 2016, Revisions received March 11, 2016, Accepted March 12, 2016

究等が産総研でも実施されている<sup>[6]</sup>。この研究の目標は、地震発生メカニズム、地下での岩石の挙動を明らかにすることであり、それを明らかにしないと地震発生の本質に迫ることができない。地震発生モデルやシナリオを明らかにすることで予測モデルを精緻化していこうというものである。図1に地震発生予測をするために必要な各段階の研究の流れをまとめ、高温高压岩石実験の役割と位置付けを示す<sup>[7][8]</sup>。この論文では、地震発生予測モデルを検証するための手段として、室内で行う岩石実験手法を用い、千年スケールで進行する地質現象を加速化して検証する技術と手法について報告する。

地震は地下で断層が動く現象である。地下で岩石が急激に破壊する際、破壊はある面に沿ってずれる形で進行するので、断層が急激に動くことになる。自然界で起きている現象は複雑であるが、そのプロセスのメカニズムを支配している要因は何かを見極めて、物理モデルを構築し、そのモデルを検証するのが岩石実験の重要な役割である。決して、自然界の断層運動をそのままミニチュア実験として、実験室で行うのではない。室内での岩石実験をデザインする際には自然界と実験室での違いを見極めることが重要である（図2）。例えば、大きさの違い、時間スケールの違い、構造の違いなどがあげられる。大きさの違いというのは、現象の起こる空間スケールの違いのことである。自然界で起きる広範囲の断層運動や変形・破壊現象と実験室内の岩石試料内部で起こるそれらとは全く同じことが再現されているのであろうか。岩石の破壊強度は試料の大きさ（サイズ）によって変わるという実験結果も報告されている。

地震発生予測

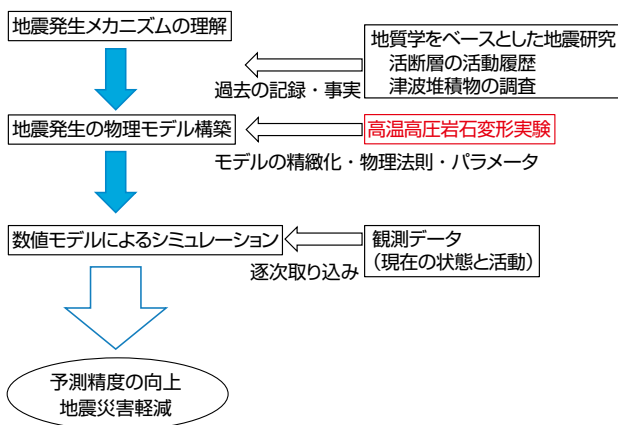


図1 地震発生予測研究と高温高压岩石変形実験の位置付け  
地震発生予測のためには、地震発生メカニズムを正しく理解し、地震発生の物理モデルを構築し、地震発生や発生に至る一連の過程を数値モデル化して計算機によるシミュレーションで再現する。高温高压岩石変形実験は、その際、構成方程式やそのパラメータを見出したり、物理モデルを検証したりすることで地震発生モデルの精緻化に貢献する。

断層運動についても、断層の大きさに依存する性質と依存しない性質があることが知られている。空間的サイズに依存しない性質は実験室でそのまま再現して調べることができるかもしれないが、サイズに依存する性質は、どのように依存するかを調べて、それを基に実験室の結果を自然界に外挿したり、自然界の現象を解釈したりしなければならない。地震発生をコンピューターでシミュレーションするために現在使われている摩擦法則は主に実験室の岩石実験から得られた摩擦法則が使われているが、接触面の大きさによって岩石摩擦の性質が異なることが最近明らかにされてきた<sup>[9]</sup>。

自然界と実験室での時間スケールの違いも重要である。自然界では通常時は非常にゆっくりとしたスピードで現象が進行している。大きな災害をもたらす大地震の発生間隔は数百年から千年程度であるが、これらの現象を全く同じ進行速度で再現することはできない。この論文ではプロセスの加速化を行った事例を報告する。また、自然界は様々な物質でできているわけではない、物質も構造も複雑になっている。断層運動において何が本質的な役割をはたしているか？ 例えば何種類かの物質（岩石）で成り立っている断層帯も、断層運動の際に全体の動きを支配しているのは何か？ どこか？ 体積の割合で一番多く含まれる物質の性質（物性）が全体を支配しているとは限らない。含まれる量としては少ないが、その部分が滑ったり動いたりすることによって全体の動きを支配しているような層があれば、断層運動の本質を調べるには、その層の物性を詳しく調べなければならない。室内における岩石実験は、単に自然界をそのままの形で模倣するのではなく、その本質的なメカニズムを抽出して検証することにその役割がある。

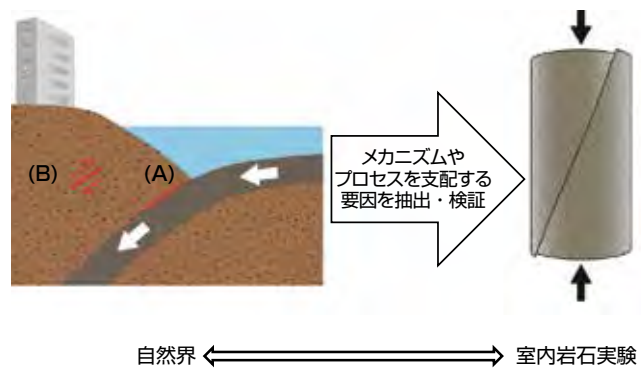


図2 自然界の断層帯と岩石実験  
（左）プレートの沈み込みに伴う海溝型地震と内陸型地震の発生域、（A）海溝型地震、（B）内陸型地震、断層のずれの方向を矢印で示した。内陸型地震のずれは、この他に正断層、横ずれ断層等他のセンスもある。（右）円柱形の岩石試料を用いた室内実験。岩石実験は自然界の断層運動をそのまま実験室に持ち込んで再現するものではなく、自然現象のプロセスやメカニズムを支配する要因を見極めて、物理モデルを構築し、それを検証するのが重要な役割である。

## 2 岩石実験技術に関する歴史

室内における岩石実験技術に関しては、1910年代に von Karman が静水圧下での変形試験装置を開発したが、Griggs が1930年代に初めて近代的な岩石変形実験のための実験機器の開発に成功した。それ以来、石油会社 (Shell) のヒューストン研究所の Handin, Heard といった研究者らによって米国で技術開発が進められてきた<sup>[10]</sup>。現在でも、シェールガス開発に関連して、石油関連会社においてあるいは石油会社からの資金を使ってさかんに岩石実験研究が進められている。国内では1960年代には産総研 (当時地質調査所) において、星野らが、米国で使われている岩石用変形実験装置を参考にして、独自に設計した何種類もの岩石変形実験装置を製作し、精力的に実験データを生産していた<sup>[11]</sup>。オーストラリア国立大の Paterson が1960年代から開発を進めたガス圧式の変形実験装置は、独自の会社を作ってそこから世界に向けて販売され、米国やヨーロッパ等で広く使われている<sup>[12]</sup>。著者も、1990年代の終わり頃、その装置を購入できないかと思い、オーストラリアまで調査に行き、Paterson に工場も見せてもらったことがある。高压ガスを使用する装置をそのまま輸入するのは、検査や認証等のハードルが高かったこともあって、当時は購入をあきらめた。そして、既存技術と独自開発した技術を統合して、独自の実験システムを製作した。

最近では、深部掘削のプロジェクトによって、実際に地下深部に存在する岩石や断層帯を貫く岩石試料が入手できるようになった。それらの試料の物性を実験室で測定することによって、例えば東北地方太平洋沖地震の際に起こった浅い領域での大規模な滑りに対する理解が進んできた<sup>[13]</sup>。現在の岩石実験分野の重要な課題は、多様性をもつ断層挙動についてより確からしい物理法則やその構成方程式のパラメータを見出して一般化し、シミュレーションによって地震を再現する研究と融合していくということにある。そのためには地震発生過程のより正しい理解がモデルの構築にとって不可欠である。この論文はそのような課題に対する取り組みとして開発した技術と手法を報告するものである。

## 3 地震現象再現のための課題

地震は地下で断層が動く現象である。そこで、地震発生モデル構築のためには、地震時に地下深部でどのような現象つまり断層運動が起きているかを明らかにする必要がある。我々は、地下深部で起きている断層運動を実験室内で再現して、断層が動き始める条件すなわち地震が発生する条件、断層に加わっている力と断層の動き等を検証するという手法で断層運動のプロセスを明らかにしようとしてい

る。その際、地下深部でのプロセスを実験室内で再現する場合の課題として、自然界と実験室の間の、環境の違いと時間の違いという二つの点を解決する技術が必要である。

地下深部は地表とは異なる温度・圧力条件にある。これを実験室内で再現するために、高压高温環境 (かつ水条件の制御の下) で実施できる岩石実験技術が必要である。これは、材料に力を加えて変形させる材料試験の手法において、被試験体となる材料部分を、密閉した高温高压圧力容器の内部に設置することで、すなわち材料科学分野の既存技術に試料部の環境を制御する圧力容器を追加することで実現できる。

自然界で進行する現象の時間スケールは長く、人間の時間スケールでは巨大地震発生等一つの事象の1サイクル分の観測事実が得られない。研究対象とする巨大地震の自然界でのプロセス進行はゆっくりで人の一生の長さより長い。例えば、海域で発生するマグニチュード8クラスの南海地震等の海溝型地震は、数百年間隔で発生し、東北地方太平洋沖地震のようなマグニチュード9クラスの巨大地震は約千年間隔で発生する。日本列島の内陸部で発生する活断層地震は千年以上の間隔である。つまり1回の現象のプロセスを観察しようとしたら数百年から千年かかるということの意味している。これについては、熱力学的考察を応用する<sup>[14]</sup>。地下深部で非常にゆっくりと進行しているプロセスは、次章で考察するように、ミクロな視点では、そのメカニズムは化学反応がその進行速度を規定していると考えられる。そこで、実験室内で観察や検証が可能のように、そのプロセスの進行をスピードアップさせる。そのためには、断層運動が実際に起きている地下環境より高温にして化学反応速度を加速させる高温技術が必要である。この部分は、独自に開発した。

## 4 目標実現に向けた研究シナリオと要素技術の連携・統合

図3にこの研究で用いた要素技術と研究全体の流れを示した。まず、観察事実を基に、作業仮説を構築する。既存の技術や独自開発した技術を統合した検証手法と技術で、作業仮説を検証する。本章において各要素技術を概説し、次章にその結果として得られた新たなコンセプトを例示する。

### 4.1 地表地質調査 (過去の事実の記録から作業仮説を構築する)

まず、検証すべきプロセスの推定と作業仮説の構築を行う。地下深部で起きている現象を推定するために、過去には地下深部にあったが、現在は地表に露出している地層を調査・観察する (図4)。地下の地層が長い年月をかけて上

昇する隆起という変動をする地域があり、そういう場所では過去の地下深部の状態を地表で観察することができる。地表に現れているのは過去に地下深部で起きた変形や破壊といったプロセスの結果である。岩石や鉱物等の物質やそれらの構造を詳細に観察・分析することで、過去に起きたプロセスを推定することができる。ただし、過去の記録は地質に残されているが、それは結果のスナップショットであるので、プロセスやその時間経過といった時間軸は地質の調査からは詳細に読み取ることはできない。そこで、このような結果となるにはどのようなプロセスが起きたのか、物理学的・地質学的根拠をもったモデルや作業仮説の構築が必要となる。そして地質記録から読み取ったプロセスやモデルを、再現して検証するという手順で研究を実施する。

大きな災害をもたらす大地震は千年単位で繰り返し起きているので、千年単位の長い時間での変化があって、それで千年後に大地震発生につながるような、非常に長い時間をかけて変化していくようなプロセスがあるに違いない。そのプロセスでは、断層の強度や、岩石の変形状態が、ゆっくり変化しているはずである。そこで、温度も圧力も高いところで、さらに地下深部であるので水も存在するという環境の下で、水と岩石の化学的な作用が関係しているのではないかと。断層運動というのは“滑り”というイメージであるが、摩擦の現象は、断層面の接触点でのミクロな破壊がその本質ではないか？ そのミクロな領域での破壊に、岩石と水との化学反応が影響しているのではないかと？ そういうプロセスが重要であるという作業仮説を考えた。摩擦現象は、断層面の接触部や固着部の突起先端部における岩石-水間の化学反応によるミクロな破壊が本質である、とい

うものである（図5）。岩石はその強度以上の力を加えると破壊が発生したり、岩石内部のクラック先端部の破壊が進行したりしていく。この理屈でいくと破壊強度に満たない力が加わった状態では破壊や状態の変化は起こらないし、クラックも進行しないことになる。しかし、実際には破壊強度以下の応力環境下でもクラックや破壊はゆっくり進行していくことが知られている。これは応力腐食といわれていて、物質や材料が、周りの環境に含まれる水等と反応して、その強度が低下していくというメカニズムで説明されている<sup>[15][16]</sup>。

#### 4.2 材料試験技術

地下深部では、岩石や断層に力（地殻応力）が加わって、ゆっくりとした変形や滑りが起きていると考えられる。したがって、地下深部でのプロセスを再現するためには、材料である岩石に力を加えて変形や滑りがどのように起きるかを測定する。これには材料試験で行われている手法と技術を用いる。図6に示したのはこの研究で使用した設備で、もともとは材料試験のためのものである。この試験機は1980年代に産総研（当時地質調査所）に導入されて、主に岩石の破壊靱性試験に使用されてきた。すでに役割を終えて休止状態にあったものを再利用した。基本的な機能は、材料（この場合は岩石試料）に上下方向から力を加えて変形・破壊させるというものである。図6の左に写っているのが試験機本体の制御装置で、試料に力を加えるピストンの上下方向の動きを制御する働きを担っている。ピストンの変位や材料に加わる荷重を測定しながら、それらの値が一定速度やあらかじめ設定した関数形（例えば正弦波）に沿って変化するように制御するサーボ制御を行う。これによって、ピストンの変位や材料に加わる荷重が、一様な



図3 要素技術の関係と研究全体の流れ

速度でゆっくり増加するように制御したり、正弦波のような繰り返し载荷したりすることが可能になっている。後にこの制御部はアナログ制御から、最新のデジタル制御方式に交換した。岩石試料に加わる力や岩石の変位・変形を測定するフレーム部分はこのように既存の材料試験機を利用した。

### 4.3 高压技術

単に岩石の材料試験を行うのではなく、地下深部と実験室の間の環境の違い、つまり地下では高温高压の環境であるので、高温かつ高压環境下での変形実験が可能のように、まず高压技術を導入して試験ができるようにした。

高温高压環境を実験室内に実現するにあたって、压力容器（密封容器）の中で高压環境を実現するため、固体もしくは流体を压力媒体として封入して使用する。ピストンを挿入して内部の体積を小さくしたり、外部からさらに压力媒体を注入したりすることで容器内の压力（封圧）を高くする。固体を压力媒体に使用すると、流体を使った場合に比べて高压力を実現できる。Talc、NaCl、パイロフィライト等の固体を封入し、ピストンで荷重を加えることでこれらの物質を压力媒体として用いる方法で、利点としては高い压力と温度条件を作り出すことができる。しかし、压力の値を正確に測定できないこと、压力を加えた状態で試料の変形を精度よく測定することができないことから、岩石の変形実験にはあまり向いていない。そこで、岩石の変形

実験では压力媒体としては流体（液体、気体）を使用する方法を採用することが多い。また、流体を使って高压でかつ高温状態を再現する際、压力媒体に使っている流体のうち液体については、特殊なシリコンオイルという物質を使っても到達可能な最高温度は500℃くらいである。次節で説明するようにこの研究ではそれよりさらに高温が必要なので、不活性気体（アルゴンガス）を压力媒体として使用した。気体（ガス）は、一様な压力（静水圧）を加えることができる理想的な压力媒体である。しかし、気体を扱う際はリーク（漏れ）については特に注意が必要である。また、気体は圧縮率大きい（压力の変化に対して体積の変化率が大きい）ので、高い压力を得るためには大容量の気体を送り込むことができるポンプシステムが必要になる。さらに、体積変化率が大いいために、その扱いには特別な注意が必要である。高压ガスの性質や扱いをよく理解し、

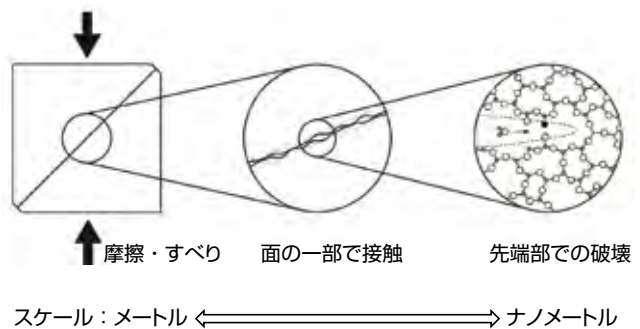


図5 摩擦と破壊の模式図

メートル～センチメートルの空間スケールで見ると、摩擦は面のずれで理解できる。しかし、ミリメートル以下の小さな空間スケールで見ると、摩擦面は完全な平面で接しているのではなく、その一部で接触している。接触している突起部ではミクロな破壊が起こっている。この接触部での破壊現象こそが摩擦現象の本質であるといえる。ナノスケールで見ると、接触部先端でのミクロな破壊は水が関係する化学反応によってゆっくり進展している。



図4 地表地質調査

過去に地下深部にあり現在地表に露出している地層（露頭）の調査。中央構造線（長野県）沿いの露頭。過去に地下深部で変形を受けた岩石を中央構造線より採取。過去に深部で起きた変形等のプロセスの結果を保存している岩石や地層を観察・分析することで過去に地下深部で起きていたプロセスを推定する。



図6 材料分野で用いられている材料試験機

被試験体に岩石を用いる。この研究ではこれを元に改造した。

法令に従った安全措置が求められる。

日本では高压ガスを圧力媒体として使用した実験装置の開発が外国に比べて遅れていたが、2000年頃、京都大学でガス圧式試験機が開発され、国内でもガス圧式試験機が製作できるようになった。我々は、京都大学で開発された技術を使用させてもらうことで、国内2号機を製作した<sup>[17]</sup>。実現できる最高圧力（封圧）は200 MPa（メガパスカル）である。このシステムは、図7に示すように、圧力容器内部の岩石試料に圧力（封圧）を加えるだけでなく、外部から試料内部へ直接流体（液体もしくは気体）を送り込むことができ、またそれらを流通させたり、圧力（間隙圧）を制御したりすることも可能である。この間隙流体圧は最高200 MPaまで制御できる。このような環境下で、最大直径20 mm、長さ40 mm程度の円柱形岩石試料の変形実験や摩擦実験が可能になった。

また、圧力容器内部で試料に加えられている荷重を正確に計測するために、内部荷重計を開発した<sup>[10][2][17]</sup>。試料に加わる荷重を測定するには、通常は圧力容器外部でピストンに加わる荷重を測定する方法で行われているが、ピストンと圧力容器の間のシール材であるOリングの摩擦が荷重測定に影響するので、試料に直接加わる荷重は圧力容器の内部で測定しなければならない。我々の装置は、外国のガス圧式試験機に比べ、軸荷重・封圧・間隙圧等の制御性能においてすぐれている。

高压ガスを圧力媒体に使用した高压容器の中に岩石試料を設置することで、地下10 kmくらいの環境が再現で

きるようになった（図8）。地下10 kmくらいでは、200～300 MPaという圧力で温度が300℃くらいである。しかし、地下と同じ圧力、環境を再現するだけでは、一つの事象の1サイクル分のプロセスを再現しようとすると千年くらい待たなければいけないことになってしまう。では、どのような技術開発をすればこの問題を解決できるか。

#### 4.4 高温技術

我々の作業仮説では、地下深部での長期的変動を支配する本質的なプロセスでは化学反応が重要な役割をはたしている。もし化学反応が影響するのであれば、その反応速度は、一般に式(1)で表されるように温度に関係する。

$$\text{Rate} = A \exp \left( - \frac{H}{RT} \right) \quad (1)$$

ここで、Aは定数、Hは活性化エネルギー、Rは気体定数、Tは絶対温度。したがって、温度を上げて反応速度を速くすれば実験室で観察できる速さにスピードアップできるはずなので、地下深部でゆっくり進行する現象を室内実験で検証することができる<sup>[14]</sup>。温度を上げることで試料が部分的にも溶けてしまったり、変形を支配するプロセスが変わってしまったりしては意味がないので、どの温度範囲までなら同じメカニズムを維持したまま温度を上げることが可能か、先に確認したうえで到達目標温度を設定した<sup>[18]</sup>。そうすると、高温高压で、実際の自然環境下よりもさらに高温環境を実現する技術が必要ということになるが、この部分は独自に開発した。ここでは、200 MPaま

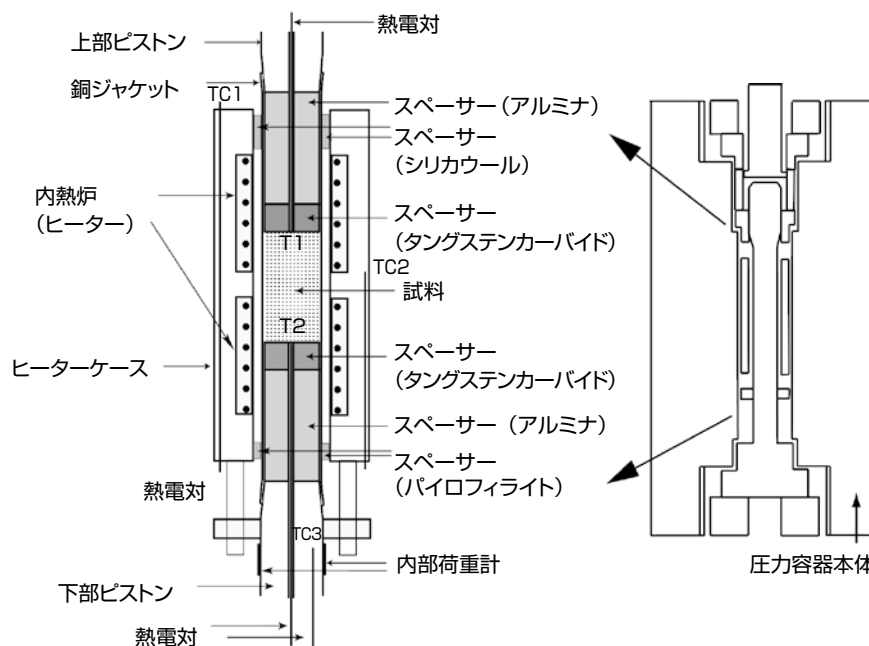


図7 圧力容器の模式図<sup>[19]</sup>

左：試料部。外部から試料内部に直接流体を送り込んでその圧力（間隙圧）を制御したり、流体を流通させたりすることができる。右：圧力容器の構造。

での高压環境下でさらに 800 °C くらいの高温にできる技術、具体的には压力容器の内部に設置するヒーターを作製した<sup>[19]</sup>。

压力容器内部にセットした試料に対する加熱機構としては、外熱式と内熱式がある。外熱式は压力容器全体を熱する方式で温度の上昇と下降に時間がかかることと、压力容器の材料そのものが十分な強度を保持できる以上の温度にはできないなどの制約がある。一方、内熱式は加熱機構（ヒーター）そのものを压力容器の内部にセットする方式で、外熱式の制約を上回る高温状態を压力容器内の試料部に実現できる。この原理自体は単純で、コイル状の構



図8 材料試験機の試験片を取り付ける部分に設置する压力容器  
岩石試料は压力容器の中で圧力（封圧）を加えて地下にあるのと同じ環境下で試験を行う。

造をもったヒーターを作成すればよいのだが、技術的制約が多く開発に2年を要した。図9左の写真に示すように、ヒーター本体は二つの部分が独立した2ゾーン方式とし、上下のヒーターコイルに対して、それぞれ外部から電力を供給する。試料の温度分布を一様にするために、試料の加熱中は、試料の上端面と下端面の温度を測定する熱電対の出力をそれぞれ制御信号としたフィードバック機構によって上下それぞれのヒーターに供給する電力を制御した。外国の同様な装置では3ゾーン方式のものもあるが、このような2ゾーン式でも試料部の一様な温度分布が得られた<sup>[19]</sup>。

図7右は压力容器内部の模式図である。非常に狭い空間に試料やヒーターが内蔵・セットされている。压力容器内部の中心部にある岩石試料は非常に高温にしなければいけないが、压力容器自体は金属できていて、これを800 °Cにしたら塑性変形してしまうし、压力容器内部は圧力が高いので非常に危険な状態になる。限られた狭い空間内で中心部分だけは高温にし、容器内壁は高温になってはいけないという、さまざまな技術的制約があった。これは図9のヒーター本体とヒーターケースの間に詰める断熱材とその詰め方を工夫することで解決した。これらの開発は、担当していただいた民間企業と試行錯誤を繰り返して実現することができた。図10に今回独自製作したヒーターの性能試験の結果を示す。試料部の温度は高温（800 °C）かつ一様な温度分布を実現し、压力容器内壁部や内部荷重計等の測定機構部分は安全な温度範囲（300 °C以下）に保たれていることが確認できた。



図9 独自開発したヒーター（電気炉）  
高压下で実際の地下環境よりも高い温度を実現する。（左）ヒーター本体。セラミックスのチューブに電熱線をコイル状に巻き付けた。二つの部分からなる。（右）ヒーターの外観。

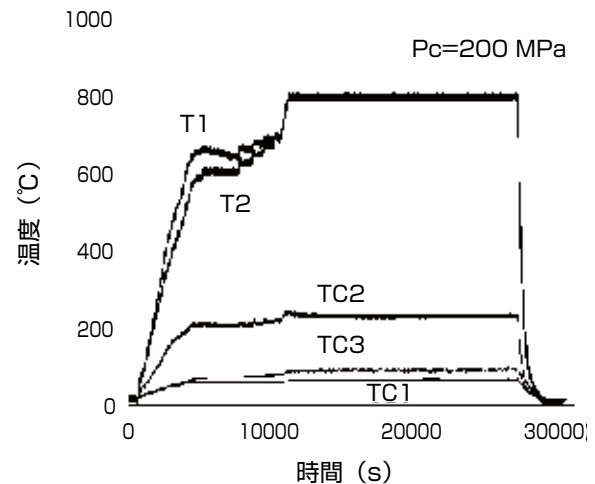


図10 開発したヒーターの性能テスト<sup>[19]</sup>  
内部の試料の温度は上下端とも一定に保たれている（T1、T2）。压力容器内壁（TC1、TC2）や内部荷重計のある部分（TC3）は300 °C以下に保たれている。

#### 4.5 高温高压岩石変形実験における技術の統合とプロセスの再現

このような既存および独自開発した技術を統合して、高温高压環境下で岩石の変形実験ができるようになった。これによって、地質の調査で考察したメカニズムや作業仮説を、高温高压岩石実験という手段を用いて検証することができるようになった（図3）。地下深部に存在する岩石を対象とする場合、一般的に多様な方向から多様な圧力がかかる非静水圧系を考える必要がある。しかし、その変形や破壊を考える際は、圧力下（静水圧下）で地殻応力はプレートの運動に伴う差応力のみを考えればよく、静水圧下での圧縮で代表される。本装置ではその状況を再現した。また、高温高压下で岩石の変形を精密に測定するためには、圧力媒体を気体（高压ガス）とする必要があった。実現できる最高圧力は200 MPaである。これは世界的にみても最高性能グループに該当するが、地下10 km程度までの再現にとどまっている。

#### 5 新たなコンセプトの提示

今回開発した技術と手法を用いた学術的成果についての例を示す<sup>[18]</sup>。地震分野では、自然界における断層の摩擦強度は、実験室内で測定されている岩石の摩擦強度に比べて弱いことが地質学的・地球物理学的観測より知られている。また、岩石の強度は、その変形の数値によって変化し、クリープ現象にみられるように、時間によっても変化する。これらは岩石の物性、特に破壊強度や摩擦強度が時間に依存することを示している。このような岩石物性の時間依存性を理解することは、地震発生メカニズムの解明にとって重要な課題となっている。

大地震の発生サイクルは数百年から千年という長期間であるので、断層強度の長期的変化の全容は地球物理学的手法によるモニタリングでは直接観測することはできないが、岩石の摩擦強度も長期的に変化していると考えられる。そこで、断層摩擦強度の長期的弱化メカニズムの本質は、断層面が真に接触している突起部先端での、ゆっくりとしたクラック進展によって引き起こされるマイクロな破壊であるというモデルで、摩擦強度の時間依存性も説明できると考え、それを実証する実験を行った。このモデルでは、断層強度の長期的弱化は水の存在下で進行する化学反応が支配していることを仮定している。したがって、このメカニズムが有効に働いているのなら、断層強度の長期的弱化に対する水の影響が実験室で観測されるはずである。そこで、断層運動が起きていると想定される実際の地下深部の環境より高温状態で断層の摩擦強度に対する水の影響を調べた。図11に示すように、円柱状に整形した岩石試

料の圧縮破壊実験を行った。岩石試料には福島県畑川破砕帯より採取したマイロナイト<sup>[19]</sup>という岩石を使用した。この岩石は地下深部で変形と破壊を受けたもので、円柱形試料の高さ軸方向が、岩石の面構造<sup>[20]</sup>と30度になるように整形した。これによって試料の軸方向に圧縮応力を加えることで、面構造に沿った方向に断層面が形成され、形成された断層面を滑らせ、摩擦強度を測定した。実験では、圧力一定の下で、水のないDRYな状態と、水のあるWETな状態の2種類の実験を行った。それぞれのシリーズについて、温度を室温、200℃、400℃、600℃とした。

その結果、水のない環境では摩擦強度は温度が高い状態でもほとんど変わらないのに対して、水の存在下では摩擦強度は温度の上昇によって低下することがわかった（図12）。圧力状態が同じなので、間隙水圧の上昇で強度低下を説明する有効圧の法則で知られているような、物理的メカニズムとは別の化学的効果によると考えられる強度低下を示すデータを得た。自然界でゆっくり進行する現象のプロセスが化学反応に依存していると仮定できる場合、温度を上げて化学反応を促進させることで、現象が進行するスピードを速めるということをサポートする結果となった。図13では、温度が高いほど長期的な現象を観察しているということに相当する。

今回明らかにした現象は、長期的時間スケールでみると

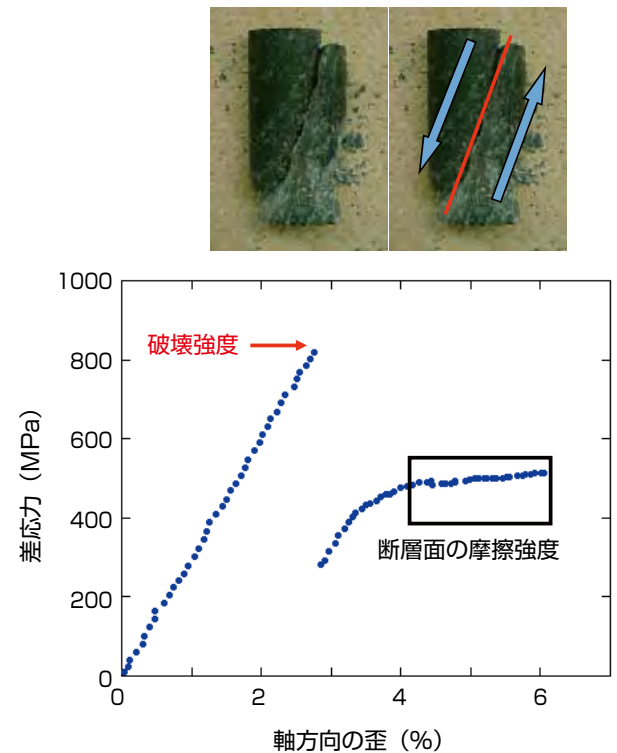


図11 実験の試料と応力-歪曲線<sup>[18]</sup>  
岩石の破壊強度と断層の摩擦強度を測定した。差応力が破壊強度に達すると岩石試料は破断面を形成する。破断面が滑る際に必要な差応力が摩擦強度に相当する。



断層強度が低下していくというメカニズムを示したことになる。断層強度が低下すれば、ある時にその場の応力以下になり、破壊（地震）発生のトリガとなることが予想される。このプロセスをモデル化することで地震発生のシミュレーションの精密化に貢献することができる。地震発生子測研究においては、地震発生メカニズムを正しく理解したうえで、地震発生の物理モデルを構築し、数値モデルによるシミュレーションにつなげる必要がある。今回の結果は通常の時間スケールでは直接観測できない現象で、かつ地震発生過程において重要なメカニズムが存在することを示した。それらを定量的に評価しモデルに組み込むことができれば、より精密化した地震発生モデルに近づくことができる。今後は、さらにこれらの現象を数値モデルに取り込むことができるような構成方程式を見出して、数式化し、必要なパラメータの値とそれらの温度・圧力等の環境依存性を明らかにしていくことが必要である。地震発生の予測精度が向上することで、より正確な情報を社会に発信することが可能になることが期待される。

## 6 今後の課題と展開

地震発生子測モデルを検証するための手段として、室内で行う岩石実験手法を用い、千年スケールで進行する地質現象を加速化して検証する技術と手法を開発した。そこでは、既存の個々の手法や技術を組み合わせ、さらに独自開発した技術を組み込んで、目的の技術開発や方法論を完成させた（図3）。このコア技術は、一部の大学へも提供した。

現時点では、データ取得段階であるが、すでに新しいコンセプトを検証し公表することができた。したがって、学問的にも一つのことが達成できたという段階である。

次の展開として、最終的な目標に向けて、得られたデータやモデルを、シミュレーションや計算科学に投入できるような形で提出することで、物理学的・地質学的な根拠をもった将来予測ができるようにしたい。より正確な将来予測ができるようなモデルを構築するという方向に展開していきたい。

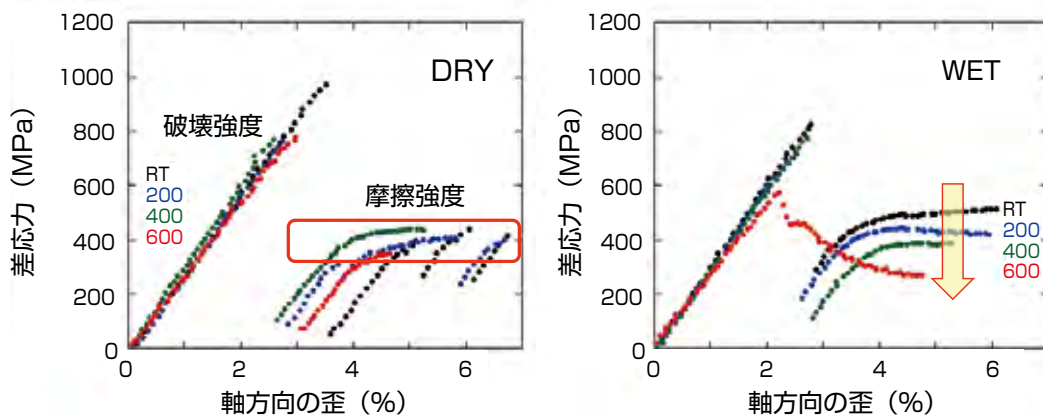


図12 測定結果<sup>[18]</sup>  
摩擦強度は、DRYでは温度によらずほぼ一定のレベルであるが（赤枠の部分）、WETでは温度が上がるに従ってそのレベルが下がっている（矢印で示した部分）。左：水のない環境下（DRY）での測定結果。右：水の存在する環境下（WET）での測定結果。

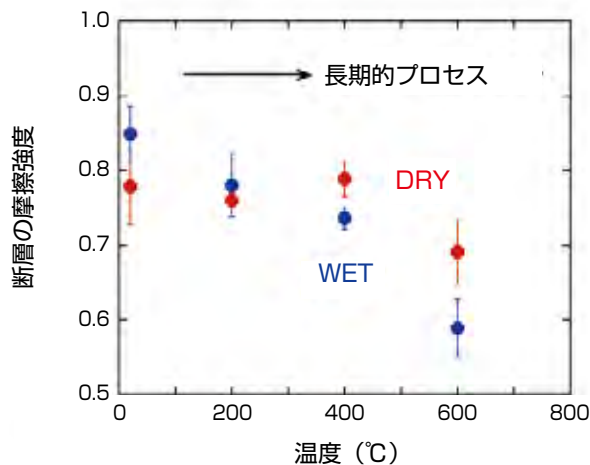


図13 岩石試料中の断層面の摩擦の温度依存性を測定した結果<sup>[18]</sup>  
実際の地下環境より高温状態で測定することにより、岩石中の断層面の接触部で起こっているプロセスを加速する。温度が高いほど、長時間で起こっているプロセスを観察していることに相当する。水の存在（WET）下では、摩擦強度の低下が起こっていることが示されている。

## 謝辞

この研究は多くの同僚の皆さんと実施したものである。藤本光一郎、新井崇史、高橋美紀、北村圭吾、溝口一生、重松紀生の各氏に感謝する。また、内熱炉の開発は井料兼一、小椋 昭（現：株式会社プレテック）の各氏と行った。

## 用語の説明

用語1：マイロナイト：断層深部の高温領域（延性せん断帯）で形成された強く変形した岩石。

用語2：面構造：岩石中に発達する面状要素。変形に起因したプロセスによって生じる構造などがある。

## 参考文献

- [1] 山岡耕春: 南海トラフ地震, 岩波新書 (2016).
- [2] 日本の地震学: 現状と21世紀への萌芽, 地震, 2 (61), 特集号 (2009).
- [3] C. Scholz: *The Mechanics of Earthquakes and Faulting (second edition)*, Cambridge Univ. Press (2002).
- [4] 吉岡敏和: 活断層からの地震発生予測, *Synthesiology*, 2 (3), 194-200 (2009).
- [5] 岡村行信: 西暦869年貞観津波の復元と東北地方太平洋沖地震の教訓, *Synthesiology*, 5 (4), 234-242 (2012).
- [6] 小泉高嗣: 地下水観測による地震予知研究, *Synthesiology*, 6 (1), 24-33 (2013).
- [7] 長谷川昭, 佐藤春夫, 西村太志: 地震学, 共立出版(2015).
- [8] 平田直: 首都直下地震, 岩波新書(2016).
- [9] F. Yamashita, E. Fukuyama, K. Mizoguchi, S. Takizawa, S. Xu and H. Kawakata: Scale dependence of rock friction at high work rate, *Nature*, 528, 254-257 (2015).
- [10] T. E. Tullis and J. Tullis: Experimental rock deformation techniques, Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies, The Paterson Volume, B. E. Hobbs and H. C. Heard eds, *Geophysical Monograph*, 36, American Geophysical Union, 297-324 (1986).
- [11] 星野一男: 高圧岩石変形実験機器について, *石油技術協会誌*, 44 (3), 161-165 (1979).
- [12] M. S. Paterson: A high-pressure, high-temperature apparatus for rock deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 7, 517-526 (1970).
- [13] K. Ujiie, H. Tanaka, T. Saito, A. Tsutsumi, J. Mori, J. Kameda, E. Brodsky, F. Chester, N. Eguchi, S. Toczko, Expedition 343 and 343T Scientists: Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments, *Science*, 342, 1211-1214 (2013).
- [14] M. S. Paterson: Rock deformation experimentation, The Brittle-Ductile Transition in Rocks, The Heard Volume, A. G. Duba, W. B. Durham, J. W. Handin and H. F. Wang, eds, *Geophysical Monograph*, 56, American Geophysical Union, 187-194 (1990).
- [15] S. W. Freiman: Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics, *J. Geophys. Res.*, 89, 4072-4076 (1984).
- [16] K. Masuda: Effects of water on rock strength in a brittle regime, *J. Struct. Geol.*, 23, 1635-1657 (2001).
- [17] K. Masuda, K. Fujimoto and T. Arai: A new gas-medium, high-pressure and high-temperature deformation apparatus at AIST, Japan, *Earth Planets Space*, 54, 1091-1094 (2002).
- [18] K. Masuda, T. Arai, K. Fujimoto, M. Takahashi and N. Shigematsu: Effect of water on weakening preceding

rupture of laboratory-scale faults: Implications for long-term weakening of crustal faults, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L01307, doi:10.1029/2011GL050493 (2012).

- [19] 増田幸治, 井料兼一, 小椋 昭: ガス圧式高温高压実験装置用内熱炉の開発, *構造地質*, 49, 73-76 (2006).

## 執筆者略歴

増田 幸治 (ますだ こうじ)

1987年名古屋大学大学院理学研究科博士課程（後期課程）地球科学専攻満了、1987年理学博士。1990年通商産業省工業技術院地質調査所入所。専門は地球内部物理学、地震学、岩石力学。地震発生機構における流体と物理化学過程の役割について、岩石力学実験を手法として研究してきた。2014年から活断層・火山研究部門副研究部門長。



## 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)

世界有数の変動帯に位置し地質災害が頻発する日本において、特に地震災害に強い社会の構築が求められており、そのための地震発生予測に関する研究は必須です。この論文は、過去に地下深部で起こった地質現象を実験室において再現し、地震発生予測モデルを岩石実験により検証するという挑戦的な課題に取り組んでいます。実験室と自然界の間に存在する環境や時間の相違を解決するために地質現象の検証と技術開発に取り組んだ過程は、明確なシナリオのもと高度な知見を統合したものであり、シンセシオロジーにふさわしいと判断します。

コメント (清水 敏美：産業技術総合研究所)

この研究は、一般の材料試験で使われる圧縮試験機に独自に高圧・高温技術を巧みに導入、統合することにより開発した、千年スケールで進行する岩石の変形・破壊現象を加速化して検証できる実験技術と手法について述べています。断層摩擦強度が長期的に弱化する現象に対して水の影響があるという仮説の妥当性を室内の実験で明らかにし、当該手法の有効性を示したことは大変興味深いものです。これにより、より精度の高い地震発生予測モデルの構築という社会的価値に貢献する事例が示されており、シンセシオロジーにふさわしい内容を含んでいると思います。

### 議論2 地震発生予測モデルの精緻化に関して

コメント (清水 敏美)

この研究の目標として、より精度の高い地震発生予測モデルの構築をあげています。確かに、高温高压下での加速試験を活用して岩石の挙動、物性変化を解析することが地震発生メカニズムモデルを検証するのに役立つことは理解できます。しかし、その研究成果によって一般の人々が地震災害に正しく備えるためにどうすればよいかの間接的、直接的アウトカムが少く思われます。一方では、活断層の活動履歴や津波堆積物の調査に基づいて今後の巨大地震の発生時期や規模を予測する研究、あるいは地殻変動等の常時モニタリングによっていち早く異常を検出する研究等はメディアが多く取り上げていることもあり、一般の方々にも理解しやすくなっています。そこで、「1 はじめに」の第二段落ですでに記述はありますが、地震研究、特に地震予測技術において現在、どのような研究（技術）要素があり、今回の高温高压岩石変形実験による予測モデルの精緻化が全体においてどの位置にあり、どのように貢献するかの役割分担的な構成図があれば読者の理解が進む気がします。

回答（増田 幸治）

図1を新たに作成し、地震発生予測研究に関する現状の認識について、既存の教科書等も参考にして流れをまとめ、さらにそれぞれの研究、特に岩石実験の位置付けに関して、私なりの考えをまとめました。

### 議論3 研究シナリオ

コメント（栗本 史雄）

作業仮説から要素技術の開発と統合、さらに新たなコンセプトの提示に至る研究シナリオが適切に整理された図があれば読者の理解が深まると思います。

回答（増田 幸治）

実際の岩石試料や実験装置の写真を組み合わせて、研究シナリオを図3としてまとめました。図1と併せて見ると、地震発生予測に関する研究全体が理解できるように工夫しました。

### 議論4 研究史と外国の技術動向

質問（清水 敏美）

岩石用の変形実験装置に関する歴史的経緯に関して記述がありますが、現在の各国の状況はいかがでしょう。同じ岩石試料を用いた場合、各国が開発した装置を用いた解析において各国の優位性等があれば教えてください。特に、最近話題になっている非在来型天然ガスとして知られるシェールガスは頁岩層から採取されるそうですが、石油系会社等の企業の岩石実験に関する取り組み、興味はどうでしょうか。関連して、岩石変形実験に関する国際的な連携や枠組み、さらには国際標準化への動きがあれば教えてください。

回答（増田 幸治）

各国が開発した装置について、基本的な性能や能力としては、個々の優位性を記述するようなそれぞれの特徴（違い）はあまりありません。国際的な連携に関して、特段の連携組織があるというような状況ではありません。地震や津波観測が全世界レベルで連携ができているというとは少し対照的です。

シェールガスに関連しては、この論文の歴史的経緯に書き加えましたが、黎明期にアメリカで岩石実験装置を開発・研究を發展させた人たちはShellの人たちです。現在でも石油会社関連で岩石実験がさかんに行われています。ただし、シェールガス開発やその興味の対象とする深度は、地震の研究として今回紹介した深度より浅く、技術的には地震研究として開発したものの方が、より高温高压領域を実現しています。

### 議論5 地震の発生メカニズムと岩石変形に関して

コメント（清水 敏美）

地震とは、地下の岩盤に力が加わり、それが岩石の破壊強度を上回った際に生じる破断現象であると聞いています。一方では地球の表面を覆っている厚さ数十 km の岩盤（プレート）間の歪み解消といったより大きなマクロスケールでも言われています。一般読者からすれば、岩石の破壊といったナノメータ～マイクロメータスケールから、プレート間の歪み解消といったマクロスケールまで地震原因が議論さ

れ、それらのスケールギャップに少し戸惑いを感じます。この研究では、地下深部で起こっている断層運動の再現やプロセス解明が目的ですので、空間スケールの理解では、例えば、図2と図5は1枚の図に組み入れ、キロメートル、メートル、マイクロメートル、ナノメートル等のスケールを各図に挿入し、摩擦、すべり、破壊等の技術用語、水分子、鉱物結晶等の説明句の挿入等によって理解できるような図面の工夫をお願いしたいと思います。

回答（増田 幸治）

図2は、そもそもなぜ岩石実験をやるのかという本質的な理由を示すのが目的でした。ここでは、単にスケール（ダウン）するのではなく、むしろ、空間スケールが問題ではなく、自然現象の本質を見極めてその要因を取り出して検証する、というのが岩石実験であるということを主張したかった図です。それがわかるように図やキャプションを工夫しました。一方、図5は、空間スケールを変化させて見ていくと、ミクロなメカニズムを検証することに行きつくということを説明した図です。空間スケールの議論を理解できるように図や説明を工夫しました。

### 議論6 新たなコンセプトの提示

コメント（栗本 史雄）

地震発生のシミュレーションの精密化への貢献や正確な情報の社会への発信について記述していますが、最新の研究動向と最先端の課題との関連に注目して、この研究の位置付けと貢献、今後の展開についてももう少し言及していただきたいと思います。

回答（増田 幸治）

今回、通常の時間スケールでは直接観測できない現象で、かつ地震発生過程において重要なメカニズムが存在することを示しました。今後はさらにこれらの現象を数値モデルに取り込み、必要なパラメータの値と温度・圧力等の環境依存性を明らかにしていくことが必要であることを、第5章に明記しました。

### 議論7 材料試験機に関して

質問（清水 敏美）

プラスチック、セラミック、金属、木材、コンクリート等の材料を対象とする材料試験では圧縮以外に引っ張り、曲げ、ねじり等の多様な力を負荷し、破壊現象が起こるまでの強さや弾性、硬さ等の機械的性質を測定します。これに対して、地下深部に存在する岩石を対象とする場合は、多様な方向から多様な圧力がかかる非静水圧系を考える必要があり、圧力のかけ方も多様な制御が必要と思います。そこで、高温高压環境下（水分調節も制御）以外で、一般の材料試験機との性能上の大きな相違点、測定の限界値等を教えてください。

回答（増田 幸治）

ご指摘に対するコメントを4.5節に追加しました。地下の応力状態は、基本的なものとして、圧力下（静水圧下）での圧縮で代表されます。また、今回の試験機の限界は高压ガスを使うこと（使わなければ、高压かつ高温を実現できず、さらに精密な変形の測定ができない）による、最高到達圧力値（200 MPa）であることを記述しました。

# 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（すなわち事実に基づく知識）として記載したものが学術論文であったが、このジャーナルにおいては研究開発の成果を社会に活かすために何を行なえば良いかについての知見（すなわち当為的知識）を記載したものを論文とする。これをジャーナルの上で蓄積することによって、研究開発を社会に活かすための方法論を確立し、そしてその一般原理を明らかにすることを目指す。さらに、このジャーナルの読者が自分たちの研究開発を社会に活かすための方法や指針を獲得することを期待する。

## 研究論文の記載内容について

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

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

## 対象とする研究開発について

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

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

## 査読について

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

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

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

## 参考文献について

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

## 掲載記事の種類について

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

## 執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

# 投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定	2007年12月26日
改正	2008年6月18日
改正	2008年10月24日
改正	2009年3月23日
改正	2010年8月5日
改正	2012年2月16日
改正	2013年4月17日
改正	2014年5月9日
改正	2014年11月17日
改正	2015年4月1日
改正	2015年10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、論説、座談会記事、読者フォーラム

このうち、研究論文、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。

### ③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元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。

### ④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、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 研究論文または論説の場合には表紙を付け、表紙には記事の種類（研究論文か論説）を明記する。

3.2.5 タイトルは和文で10～20文字（英文では5～10ワード）前後とし、広い読者層に理解可能なものとする。研究

論文には和文で15～25文字（英文では7～15ワード）前後のサブタイトルを付け、専門家の理解を助けるものとする。

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

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

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

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

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

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

### 3.3 書式

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

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

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

入する。

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

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

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 June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

Revised May 9, 2014

Revised November 17, 2014

Revised April 1, 2015

Revised October 1, 2015

## 1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

- Research papers, commentaries, roundtable talks, and readers' forums

Of these, the submitted manuscripts of research papers 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 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 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 reviewed 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 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.

### ④ 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 editorials 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 and editorials shall have front covers and the category of the articles (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheets.

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3 Format

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

3.3.2 The 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 a web page, Name of a website (The name of a website is possible to be omitted when it is the same as an author name), 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 are allowed in the proofreading stage.

### 6 Responsibility

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

### 7 Copyright

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

Inquiries:

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

## 編集後記

本号では「地質の調査」特集号として4編の論文をお届けします。「地質の調査」の対象は一言でいうと地下の地質情報です。日本列島は世界有数の変動帯に位置することから、地震、火山、地すべりなどの地質災害が多く発生します。また、国土開発、環境保全、インフラ整備などには地下の地質情報が必須になります。このように重要な情報ですが、地下は直接見ることが不可能であるため、安全で豊かな社会の構築のために国として地質情報の整備を行うことが必要です。

「地質の調査」は他の研究分野のように、産業振興や製品開発には直接結び付きませんが、上述の地質災害への対策、国土開発、環境保全、インフラ整備などの観点から、地質情報の整備や精度の良し悪しは社会の安全と持続的な発展に直結する重要な知見です。実学（実用的な、実行を目的とした学問）という用語があるように、地質学はもともと社会とのつながりが深い学問といえます。そのような観点から「地質の調査」に関する論文を集めました。

地球化学標準物質に関する論文では、標準物質の開発および研究に関して地質学の研究機関としての優位点が示されています。3次元地質地盤図に関する論文では、社会に対する地震防災・減災のための新提案が示されています。極小微動アレイに関する論文では、地盤の揺れやすさという社会ニーズに的確に応えています。この極小微動アレイを使った解析は前述の3次元地質地盤図の精度に依拠しますので、両論文の関連性にも注目していただきたいと思います。高温高压岩石変形実験技術に関する論文では、将来の地震予測のための研究シナリオがポイントで、地震・活断層・津波などの既報告論文と合わせてお読みいただくと地震発生予測研究に対する理解が一層進むと思います。

「地質の調査」では幅広い研究が展開されていますので、多様な切り口から特色ある論文を次の機会にも紹介したいと考えています。

（編集幹事 栗本 史雄）



## シンセシオロジー編集委員会

委員長：金山 敏彦

副委員長：湯元 昇、四元 弘毅

幹事（編集及び査読）：池上 敬一、栗本 史雄、清水 敏美、富樫 茂子、山田 由佳

幹事（普及）：赤松 幹之、小林 直人（早稲田大学）

幹事（出版）：高橋 正春

委員：安宅 龍明、綾 信博、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、後藤 雅式、竹下 満（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、多屋 秀人（株式会社 J-Space）、内藤 茂樹、藤井 賢一、松井 俊浩（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、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: T. KANAYAMA

Senior Executive Editor: N. YUMOTO, H. YOTSUMOTO

Executive Editors: K. IKEGAMI, C. KURIMOTO, T. SHIMIZU, S. TOGASHI, Y. YAMADA, M. AKAMATSU, N. KOBAYASHI (Waseda University), M. TAKAHASHI

Editors: T. ATAKA, N. AYA, S. ICHIMURA (Nagoya University), Y. OGASAKA (Japan Science and Technology Agency), A. ONO, A. KAGEYAMA, M. GOTOH, M. TAKESHITA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. TAYA (J-Space Inc.), S. NAITOU, K. FUJII, T. MATSUI (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 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9巻第2号 2016年5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

Development and utilization of geochemical reference materials

—*Reliability improvement in the analysis of geological materials*—

T.OKAI

Three-dimensional urban geological map

—*New style of geoinformation in an urban area*—

T.NAKAZAWA, S.NONOGAKI and Y.MIYACHI

Constructing a system to explore shallow velocity structures using a miniature microtremor array

—*Accumulating and utilizing large microtremor datasets*—

I.CHO and S.SENNA

Development of rock deformation techniques under high-pressure and high-temperature conditions

—*Evaluation of long-term geological processes by a compressed timescale process model*—

K.MASUDA

## Editorial policy

### Instructions for authors

### Aim of *Synthesiology*