

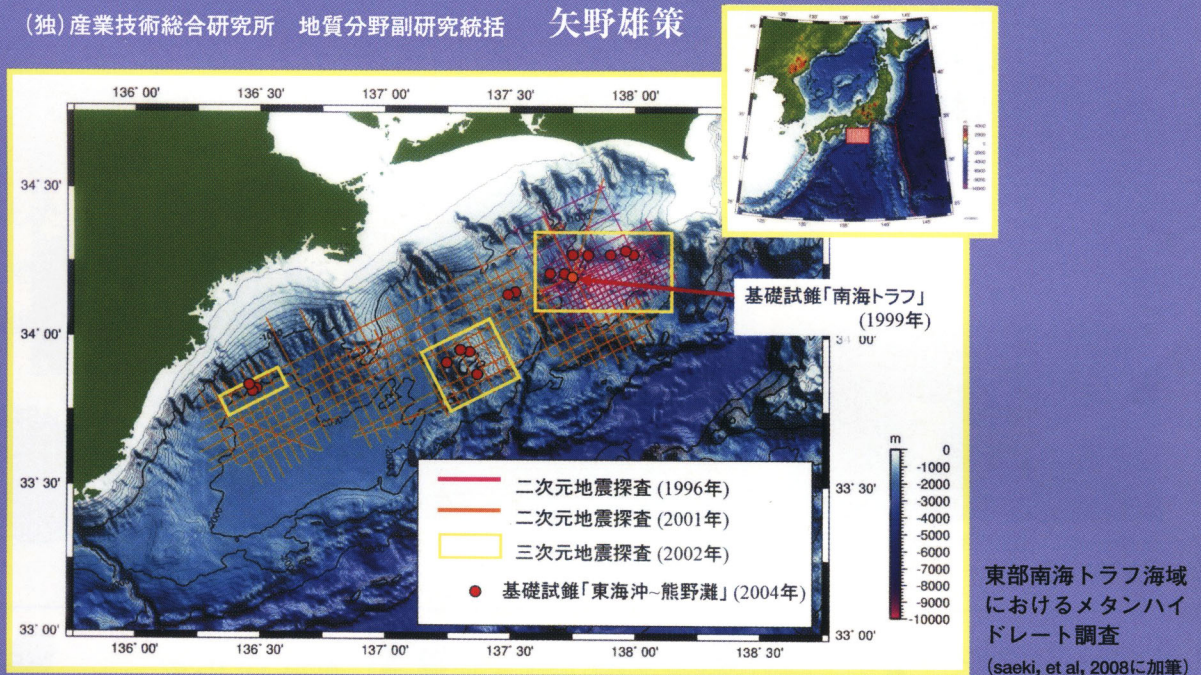
地質調査

'12 第2号
(通巻132号)

編集 / 一般社団法人全国地質調査業協会連合会

巻頭言 資源・総論—巻頭言に替えて

(独)産業技術総合研究所 地質分野副研究統括 矢野雄策



小特集 資源

メタンハイドレート 佐伯龍男

地熱資源 阪口圭一・安川香澄

レアメタルとレアアース 高木哲一

海底熱水鉱床 —開発に向けた取組と課題— 岡本信行

海洋の基盤情報である海底地形データの整備 加藤幸弘

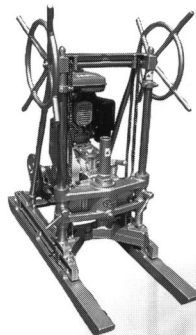
教養読本 1 海底下生命圏と炭化水素資源

—地球内部の持続的物質循環システムの理解と利活用— 稲垣史生

教養読本 2 地中熱利用と地質情報 笹田政克

地質関連研究所・部門紹介 地質調査情報センター 渡部芳夫

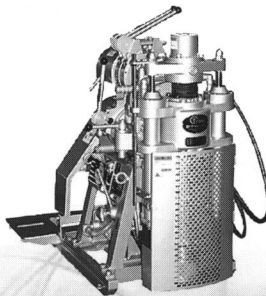
YHP-1



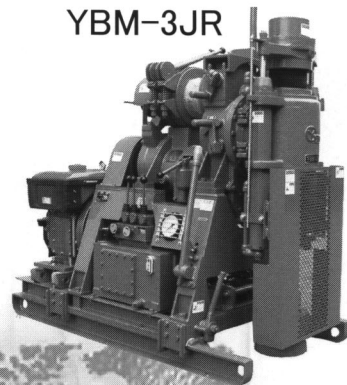
(ニッケル鉱調査 フィリピン)



YBM-05DA-2



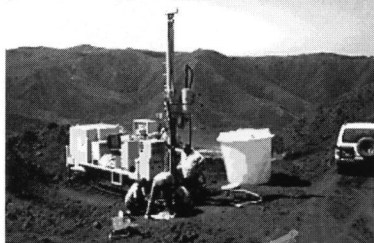
YBM-3JR



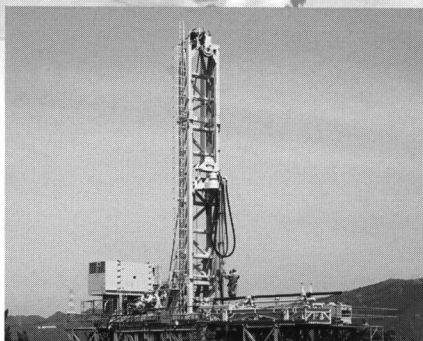
資源探査、環境調査、土木建設の基礎調査 世界で活躍するYBMのボーリングマシンとツールズ

大口径ボーリングマシンから、超軽量ボーリングマシンまで、
幅広いニーズを満たす製品を取り揃えております。

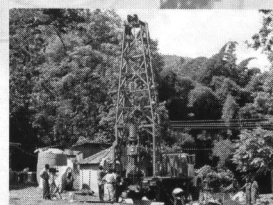
(ニッケル鉱山調査 ニューカレドニア)



ワイヤーライン工法用削孔機
TYW-50



地熱開発用コンパクトリグ
HC-2000R



(鉱物資源調査
マラウイ)

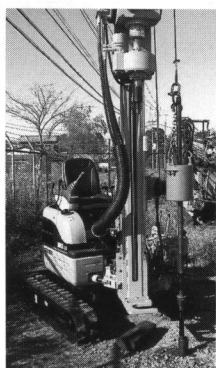
トラックマウントドリリングリグ
YSD-500BV



ワイヤーライン
工法調査機

YWL-200

スピンドル回転数
2速切換の為、
低速回転でのロ元
ケーシング掘削も
可能。



標準貫入試験作業風景

バイブドリル
ECO-1VⅢ

土壌・地下水汚染調査 など

バイブ機能を活
かして回転せずに
土中に貫入可能。



ポータブル
表層土壌調査機
ハンディECO
表層土壌汚染調査 など

YBM 株式会社 ワイビーエム

本 社 / 〒847-0031 佐賀県唐津市原1534 TEL (0955) 77-1121

<http://www.ybm.jp/>

東京支社 〒104-0032 東京都中央区八丁堀3丁目22-11八重洲第三長岡ビル2F TEL (03) 6280-4789
東京支店 〒342-0005 埼玉県吉川市川藤 3 0 6 2 TEL (048) 982-7558
大阪支店 〒578-0964 大阪府東大阪市新庄西 5 - 4 TEL (06) 4309-2921

東北営業所 〒981-3133 宮城県仙台市泉区泉中央3丁目27-3日泉ビル202号室 TEL (022) 343-1210
名古屋営業所 〒468-0043 愛知県名古屋市中区天白区菅田1丁目1208 TEL (052) 804-4841
広島営業所 〒732-0802 広島県広島市南区大州1丁目1-25第一ふじビル1F TEL (082) 285-3824
インドネシア事務所 Room No. 343 3F. PPHUL, JL. HR. Rasuna Said Kav. C-22 Jakarta Selatan 12940 TEL (+62) 21-52921131

巻頭言	資源・総論—巻頭言に替えて (独)産業技術総合研究所 地質分野副研究統括	矢野 雄策	1
小特集	資源		
	メタンハイドレート	佐伯 龍男	6
	地熱資源	阪口 圭一・安川 香澄	12
	レアメタルとレアアース	高木 哲一	18
	海底熱水鉱床—開発に向けた取組と課題—	岡本 信行	24
	海洋の基盤情報である海底地形データの整備 —海洋の利用開発に向けて—	加藤 幸弘	30
教養読本 1	海底下生命圏と炭化水素資源 —地球内部の持続的物質循環システムの理解と利活用—	稲垣 史生	35
教養読本 2	地中熱利用と地質情報	笹田 政克	43
地質関連研究所・部門紹介	地質調査情報センター	渡部 芳夫	47
私の経験した現場	単孔を利用した鉛直・水平透水試験	乾 一幸	51
大地の恵み	鹿児島市内の温泉と西郷隆盛が湯治した温泉	満尾 裕一	55
各地に残すべき地形・地質	平成20年岩手・宮城内陸地震で出現した 崩壊地形とカルデラ内湖底堆積物の大断面 (宮城県栗原市)	橋本 修一	57
各地の博物館巡り	「端浪市化石博物館」 岐阜県端浪市	小野 慶太	59
会告	全地連「平成23年度第49回定時総会」の開催について		61
	平成23年度地質調査事業量は659億円 (全地連受注動向調査)		63
	平成24年度「地質調査技士資格検定試験」 「応用地形判読士検定試験」 願書受付終了		65
	全地連「技術フォーラム2012」新潟		65
	平成24年度「土壌汚染調査技術管理者試験」対応 事前講習会開催のご案内		66

小特集テーマ 「地学教育の今と将来」

自然災害とともに生きるための地学教育

市民レベルの地学の普及 (教育) の取り組み

現場地質技術者養成としてのマイスター (or 師弟) 制度

高等学校における地学教育の役割と現状

地学系学部における野外踏査 (実習) のありかた

建設系学部における地学教育

教養読本 地学系のJABEE制度

やさしい知識 ジオパークにおける地学教育活動

資源・総論—巻頭言に替えて

【Key Word】

資源・エネルギー，地下資源，資源論，地質調査，展望

やの ゆうさく
矢野 雄策*

現在の世界において、国民の生活あるいは国の経済は、その国だけの状況で決まるものではなく、国際社会の中でその国が置かれた位置や状況、他国との様々な関わりの中で決まり、また変化してゆく要素が非常に大きい。国民の生活を支えるものは国の経済力であるが、その源は国民の働く活力であり、現代社会で、その活力を大きく支えるものは石油を中心とする「エネルギー資源」であることは間違いない。それほど大事である「資源」であるが、日本において資源の将来についての危機感は今までは驚くほど希薄であった。これは現在に生きる世代は、比較的安価に輸入できる石油資源に慣らされてきたからであろう。もちろん現在世代も年配者は1973年の「第一次石油ショック」、1979年の第二次石油ショックを通じて、エネルギー資源の重要性を再認識する大きな機会があり、また国家の政策も、そのような危機のたびに新エネルギーを開発する政策を講じてきたが、新しいエネルギー資源を見つけることや大きく発展させることは簡単なことではなく、我が国ではこの30年をかけてもまだ成功していないし、今後も楽観的な見通しがあることではない。

一方で、世界の経済は新たな超巨大経済国の中国をはじめとしますます膨張しようとしている。経済が膨張するということは、人口が増加し、産業力が強化されてゆくということであり、それはますます「資源」を使用する社会になるということである。そして、世界規模で見ると、このエネルギー資源の使用が地球規模の資源問題と環境問題を顕在化させている。「有限な地球」の問題を顕在化させるまでに、人類社会は膨張しすぎてしまったと言える。「有限な資源の問題」は、安価

な石油を世界規模で豊富に使える時代の限界が見えてきたということであり、「有限な環境の問題」は、地球の大気の中の温暖化ガスを、化石燃料の燃焼によって増やしつつあるということである。

我が国においては、昨年の中東大震災と原発事故が、社会の関心をふたたびエネルギー問題に向けることとなった。そして、原発事故の影響による夏の電力制限の頃、メディアを通じて「再生可能エネルギー」への期待とその実現性に関する議論が盛んに行われた。原子力の前途に急速に暗雲がたちこめた中で、では石油や天然ガスあるいは石炭といった化石燃料を増やせば良いのではないかというスタンスは、我が国としては取りがたい。それは地球温暖化問題の対応において、京都議定書の履行を推進する立場を取っていたためでもある。我々が利用可能な一次エネルギーは、化石燃料以外には、原子力か、あるいはそれ以外のエネルギーか、ということになり、それ以外のエネルギーはいわゆる新エネルギーあるいは再生可能エネルギーと総称される多種多様なものから構成されている。それは太陽光発電、風力発電、バイオマス発電、地熱発電、といったものである。水力発電は従来の伝統的な一次エネルギーとして扱われ、もちろん再生可能エネルギーではあるが新エネルギーとしては扱われないことが多い。

将来に向けたエネルギーの議論においては、大筋ではもちろん省エネルギーや電力節減の努力によってエネルギー消費を減らしながらも、効率化や技術の高度化によって生活のクオリティや産業力は保持したい、という未来に向かった指向があることは大方共通している。しかし、それでは何年後に必要な総エネルギー量はどれだけか、その中で化石燃料はどれくらい使用してゆくことが地

* (独) 産業技術総合研究所 地質分野副研究統括 (前地圏資源環境研究部門長)

球環境の観点から許容されるのか、また原子力発電はどうするのか、あるいは考える方向性にむかってどの程度のスピードで転換して行くことが良いのか、ということになると、議論百出となって定まらないということが現実である。しかし、昨年の危機の中で行われた、厳しい現実とむきあった議論の中では、実現可能性の低い「夢のエネルギー」の可能性にけるような議論はあまりなかった。そういう意味では、一般の関心をひきつけたエネルギーの議論は、何が一番現実的な解決なのかを模索するという議論であったと思われる。しかし、何が本当に現実的で、何が非現実的か、あるいは夢物語であるのかの主張は、議論する者の持つ具体的な知識に応じて異なっている。専門家の話しは、一般の方よりもその現実性をかなりイメージした話しをするが、再生可能エネルギーのように、まだその技術領域そのものが充分に開拓されていない場合、実際にはその専門家の語る現実性も、当たっているとは必ずしも言えないことが多いかもしれない。専門家自身は、特に自己の技術領域においては希望的観測に基づいて語ることが多い。一方であまり知らない領域の話しは、識者が語ることを信じてしまいがちになる。しかし、将来のエネルギー資源を議論する場合、全てについて専門的な知識を持つ者はまず居ないので、それぞれの知識を持ち寄って議論せざるを得ない。そうすると、議論は専門的な話しと素人的な理解に基づく希望論や悲観論が混じり合うことになって真に妥当な結論が何かは見えにくいことになる。それがこのエネルギー資源論の難しいところであるが、それでもこの議論は人類の将来のために本質的に重要であり、そのために各分野は真に適切な議論材料を持ち寄ることがたいへん重要である。

今回、この「地質と調査」誌で資源問題を取り上げていただき、小特集として発刊されることは、我が国の地質分野、地質関係者が、資源問題において適切な議論素材を一般の方々にお伝えしていく上でたいへん役立つものであり、企画発刊される全国地質調査業協会連合会に感謝申し上げます。上記したまえがきは「エネルギー資源」に特に着目した記述であったが、地質分野は地下資源の探査の専門性を持っており、地下のエネルギー資源のみにとどまらず、地下鉱物資源あるいは地下生命資源についても社会的な議論の素材を提供することが期待されている。鉱物資源は産業の素材を供給するものであり、エネルギー資源と同様

に、それをいかに確保してゆくかが我が国の今後の発展を制するたいへん重要なものである。

さて、本小特集で専門家によって執筆いただいたテーマは「メタンハイドレート」、「地熱資源」、「レアメタルとレアアース」、「海底熱水鉱床」及び「排他的経済水域・大陸棚の資源探査」であり、さらに教養読本として「地下生命圏」及び「地中熱利用と地質情報」を執筆いただいている（これらのテーマ名は企画段階のものであり、各最終稿での正確なテーマ名とは異なる可能性がある）。いずれも、将来の資源を考える議論の上で、今般大きなトピックスとなっている項目であり、同じ地質分野の中でもこれらの知識を共有しておくことは意義深いことである。もちろん地下エネルギー資源の領域においては石油、天然ガス、石炭などの在来型化石燃料資源は社会的に大きな存在であるし、鉱物資源の領域においては、ベースメタル等がメジャーな存在であり、それらの探査、研究とその共通理解は極めて重要であるが、それらを全てカバーすることはこの小特集の意図するところではないことをご理解いただければ幸いである。

この総論の筆者（私）は、独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）の地質分野に所属している。産総研は、経済産業省所管の独法であり、大きく6分野（「環境・エネルギー」、「ライフサイエンス」、「情報通信・エレクトロニクス」、「ナノテクノロジー・材料・製造」、「計測・計量標準」、「地質」）、の科学技術研究を行う総合研究所である。常勤研究者は約2,500名であり、我が国では最大級の公的研究機関である。この中で、地質分野の常勤研究者は約240名の規模である。「地質の調査」は「鉱工業の科学技術」、「計量の標準」と並び、産総研が実施する業務の大きな柱とされている。産総研の創立は平成13年であるが、それまでの通商産業省工業技術院に所属していた15の研究所等が産総研として統一されたものであり、その中に明治15年に創設された地質調査所も含まれている。産総研に移行した際に、地質調査所というネーミングは廃止されたが、産総研では「地質調査総合センター（Geological Survey of Japan、略称はGSJ）」という対外的ネーミングを用いている。英文は地質調査所時代と同一であり、これは諸外国の地質調査機関の呼称を意識し、またGSJの存在アピールの国際的な継続性を意識したものである。地質調査総合センター、すなわち産

総研の地質分野は、現在、地質情報研究部門、地圏資源環境研究部門、活断層・地震研究センター、地質調査情報センター、地質標本館という5つの組織から構成されている。本年3月まで、筆者は地下の資源と環境の研究を行っている地圏資源環境研究部門に所属していたが、同部門は産総研創設当時、当時の地質調査所メンバーに加え、資源環境技術総合研究所のメンバーも一部加わって構成された研究部門であり、そのネーミングから類推されるように、同部門、すなわち産総研地質分野の一部は産総研の環境・エネルギー分野にも深く関連を持っている。

本小特集のうち、「地熱資源」及び「レアメタルとレアアース」は産総研地質分野の研究者による執筆であり、「メタンハイドレート」、「海底熱水鉱床」、「大陸棚調査」、及び教養読本の「地下生命圏」及び「地中熱利用」は他に所属の執筆者によるものであるが、産総研地質分野はこれらの研究テーマについても研究を実施している。以下では、それぞれの資源についての概略と産総研の取り組み状況、さらにその将来展望を少しご紹介しておきたい。地熱資源とレアメタル・レアアースについては、小特集に阪口及び高木の解説があるので詳細はそちらをご覧ください。こととしたいが、いずれも現在、社会的に大きな注目を集めている資源であることは間違いない。

地熱資源は我が国では既に約45年の地熱発電の歴史がある資源であるが、ここ10数年、新規の発電所運転開始がなかったこともあり、一般の認識はあまり高くなかった。しかし昨年エネルギー論議の中でマスコミにも注目され、阪口ほか産総研の地圏資源環境研究部門の地熱資源研究グループのメンバーは研究実施とともに、マスコミを通じて一般の方々への情報伝達にも大忙しとなっている。現在の同地熱資源研究グループは研究員5名という小所帯であるが、30年近く前は当時の地質調査所の地殻熱部（当時筆者もここに属していた）は20数名の規模であり、また当時の資源環境技術総合研究所で高温岩体を研究していたメンバーと合わせると30数名の規模であったことを考えると、最近の地熱研究規模の小ささが表れている。30年前には当時のサンシャイン計画の中で大きな国のプロジェクト研究として、NEDOと連携して資源量評価、資源探査技術開発を幅広く行っていた。国のプロジェクトは平成14年度をもって終了し、その後は産総研では独自の小規

模な予算で、全国の地熱データの整備と地熱ポテンシャルの精度向上を図ってきた。そのような中で平成22年度から久々に国からの委託費による研究、すなわち環境省の地球温暖化対策事業の一環である温泉との共生を計る地熱研究が開始された。地熱資源研究グループに加え、産総研地質分野の関連研究者と、共同研究機関の連携によりこのような新たな動きに対応して研究を進めている。

現在、我が国における地熱発電所は18カ所約54万キロワットの設備容量を持っているが、先に述べたように、最近は新規の開発が停滞している。その間に世界では開発が進み、日本の地熱開発規模はインドネシア、ニュージーランド、アイスランドなどに抜かれ、世界では8番目となっている。しかし、地熱資源量で見れば、100以上の火山を持つ日本はインドネシア、米国に次いで世界第3位の地熱資源大国であり、その全国ポテンシャルは2000万キロワット相当であると推定されている。この資源ポテンシャルを今後どこまで活用していけるかがポイントであるが、その資源量の8割以上が、開発行為が規制されている自然公園の特別な地域に存在するということに開発の難しさがある。現在、環境省では規制緩和の方向で検討を進めているが、地域の景観や自然を守るといっても環境保護、再生可能エネルギーの開発を進めて地球温暖化を防止するというのも環境保護であり、この2つの環境保護をどのようなバランスで行うかということは確かに難しい問題である。また、地熱開発は温泉に影響するのではないかと温泉事業者からの心配も強くあり、これもまた地域開発のバランスの問題として、地域ごとに理解を深めてゆくことを進めない限り、地熱開発はなかなか進まないことになる。しかし、日本全体としては再生可能エネルギーとしての地熱に期待するところは大きくなっており、また具体的な開発の進行している地点もあり、さらに経済産業省も地熱開発調査を再び推進する政策に転換しているので、今後は発電量が増加する方向に進むと考えられる。

地中熱は地熱と関連して扱われることが多い。しかし地熱は多くの場合、地熱発電を意味して用いられ、深度1000m程度あるいはさらに深いボーリングによって熱水もしくは蒸気を採取して発電に用いる技術を示すのに対し、地中熱は一般には100mより浅いボーリングで地下の恒温性を利用し、ヒートポンプを用いて冷暖房の効率を向

上させる技術であり、内容はかなりの違いがある。一方で、地下の熱と水の流れを研究するという意味では共通するところも大きく、地熱と地中熱、さらに地下水のジャンルへと研究者のつながりがある。産総研では昨年の震災からの東北の復興にむけて、福島県郡山市に再生可能エネルギーの研究拠点を構築することを決定し、現在その準備を進めている。そこでは、太陽光発電やエネルギーマネジメントの研究と並んで地熱と地中熱の研究を実施する予定であり、地中熱については、実際に研究拠点の建物の冷暖房に地中熱を利用してその効率向上の実験を行う予定である。産総研地質分野では地下の温度状態、熱伝導率を中心とする地層の物性に着目した地下構造、地下水の状態をボーリングデータなどを利用して把握し、その分布をモデリングすることによって、どのような範囲でどのように地中熱を利用すれば最も効率よい地中熱利用が可能かを研究しており、地中熱ヒートポンプシステムの効率化と合わせて進めることによって、今後の地中熱開発の促進に貢献できればと考えている。地中熱システムは我が国においてはまだその普及は1000件のオーダーであるが、米国では既に100万件のオーダーで普及しており、中国、スウェーデン、ドイツも急速に普及が進んでいる。産総研における研究は、我が国における地中熱利用の拡大の端緒を探る研究でもあり、高効率化と低コスト化がやはり技術開発の鍵である。地中熱の利用普及が拡大すれば掘削コスト等の低廉化が相乗して進むということを期待したい。

レアメタルは、近年その資源供給問題が良く新聞紙上を賑わしているホットな 이슈であるが、一般の方々にはその内容が充分浸透しているとは考えられない。鉄や銅などのベースメタルでは無いが、最近の話題であるので情報産業などの先端産業に必要なメタルであることらしいことは理解されていると思う。レアメタルだけで31 鉱種あるので、とても全鉱種は覚えきれないが、チタン、ニッケル、タングステンなどは良く知られた鉱種だと思う。レアアースとなると、さらに一般の方々にはわからなくなるが、レアアースはレアメタル31 鉱種の中の1 鉱種であり、しかし、元素の種類としては17 元素がその1 鉱種に所属している。これらの元素はなかなか専門的な名称のものが並んでおり、ジスプロシウムをご存知の方はこの分野に関心の高い方と思われる。

レアメタル、またその一部であるレアアースは、

広くは鉱物資源の範疇であり、鉱物資源の研究は、産総研地質分野が取り組む柱たる研究である。そもそも、多くの世界の地質調査研究機関は鉱物資源の調査を目的として創設されてきた歴史的経緯があり、我が国地質調査所も創設以来、資源調査、特に鉱物資源調査は主要な所管業務であった。しかし、上記産総研における地熱資源研究の規模の変化に類似するが、鉱物資源についても、かつては数10名以上の規模で取り組んでいたが、現在の産総研地圏資源環境研究部門の鉱物資源研究グループは常勤研究者5名という状況であり、関連部署や他部門における鉱物資源研究者を加えても常勤としては10名に満たない規模である。しかし昨今のレアメタル研究に関する社会的要請はたいへん大きなものがあり、不足する研究者を若手のポストドク研究者雇用で補っている実情がある。このような研究人材量という意味では厳しい状況のもと、国及び民間からの要請により、中国の寡占するレアアース資源の供給に頼る現状を打破するために、石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)、世界の資源国と連携して、国際的なレアメタル・レアアース調査を展開し、また分析技術の確立にむけて研究を進めている。産総研が調査している国は、南アフリカ、モンゴル、カナダ、東南アジア各国など世界にまたがっており、我が国でレアメタル、レアアースを必要としている民間産業も必死になってこの資源を確保しようという姿勢がある。米国等との連携も始まっており、まずは世界各国の資源の頒存状況を明らかにして我が国としての資源確保戦略を立ててゆくことが重要と考えられる。

メタンハイドレートについては、経済産業省、JOGMEC が我が国周辺海域でのメタンハイドレート資源の開発を目指して海洋産出試験の実験段階に取り組む中で、産総研では、環境・エネルギー分野のメタンハイドレート研究センターが生産手法開発の研究に取り組んでいる。地質分野においては地圏資源環境研究部門が、特に堆積学、有機地球化学、熱学研究の分野でメタンハイドレートの資源量評価と成因研究を実施している。最近では同位体測定などの地化学的手法と、微生物学的手法を駆使し、地下微生物の活動を総合的に解析・評価してメタンの生成がどのように起きているかの解明を進めている。

メタンの成因において地下微生物に話しが及んだが、これを研究している産総研地圏資源環境研

究部門の地圏微生物研究グループは、産総研地質分野の中で比較的最近創設された研究グループであり、地下調査の一手法として微生物を研究対象としていることで新規性のある研究グループである。これまで、地質分野では、地質学のほかは地球物理学的、地球化学的な手法が主に用いられる技術手法であったが、近年のライフサイエンスの発達により、DNA解析も含め、微生物を分析する手法が飛躍的な発展を遂げてきたことが、地下調査の分野においても新たな領域を切り開く要因になっている。地下には生命圏が広がっており、そのバイオマスすなわち存在する生物の量は、地上と海中に存在するバイオマスに匹敵あるいははるかにそれを超える、しかもその存在深度は数1000 mに及ぶということが明らかになってきている。資源との関連で言えば、石油、天然ガスや石炭などの燃料資源は元々生物起源であるし、そのような資源の生成に微生物が関与していることはメタンにおける例のように相当重要な研究課題である。また、存在する地下資源の解明に地圏微生物研究を応用するだけでなく、地圏微生物の働きを利用して、地下資源の増産を図ろうという研究も構想されているくらいである。本小特集でも「地下生命圏」をとりあげていただいているが、資源の分野においてもたいへん興味深い話題である。

本小特集では「海底熱水鉱床」と「大陸棚の資源」についても解説を寄せていただいている。いずれも海洋、海域の調査に関係している。また先に述べたメタンハイドレートも我が国周辺の海域海底下に存在するものである。我が国は国土の面積は約38万km²（世界第62位）の国であるが、領海と排他的経済水域を合わせた広さは約447万km²（世界第6位）であり、世界有数の海洋国である。海洋における産業活動は主として漁業であるが、海の下に広がる大地の中には資源の可能性が広がっている。世界に目をむければ北海油田や、流出事故を起こしてしまったがメキシコ湾に広がる油田が想起される。また、日本と中国の間の東シナ海にも油田が広がっていることも知られている。1982年に国連で採択され1994年に発効した海洋法条約において、沿岸国は200海里までの海底下を大陸棚とし、さらに海底の地形と地質が一定の条件を満たせば200海里の外側に大陸棚

を延長することができることとされた。日本は2008年11月に大陸棚限界委員会に大陸棚の延長申請を行ったが、産総研は政府一体となった2003年以降の大陸棚画定調査体制の中で経済産業省が担当した基盤岩採取の海域調査やその試料の分析・解析を行うとともに、外務省・国土交通省（海上保安庁海洋情報部）・経済産業省（JOGMEC、産総研）・文部科学省（海洋研究開発機構）の関係職員と研究者により組織された申請文書作成のための作業部会に参加し、詳細な科学的根拠に基づいた申請文書作成に貢献した。

この原稿を書いている2012年4月27日、政府は日本の大陸棚を約31万平方km²拡大することが国連の大陸棚限界委員会に認められたと発表した、とのニュースが流れた。申請していたのは74万km²であり、九州パラオ海嶺南部海域は審査が先送りされたが、認められた面積は陸域国土の80%を超える広さであり、資源も含めた我が国の海洋権益の拡充において重要な結果が出たと考えられる。

以上、本小特集に寄せられたテーマに関して、筆者が知る概要や筆者の所属する産総研の取り組み状況、あるいは今後の展望などについて記述したが、各テーマについては、本小特集の中でそれぞれの専門家による論説に詳細が紹介されているので、ぜひお読みいただきたい。本稿を締めくくりに際して、今一度強調しておきたいのは、我が国の経済の維持安定のためには、資源・エネルギーの確保は基本的に重要な事項であり、地下資源というものはその中で重要な位置を占めているということである。地下資源を見つけること、その量や質を評価判定すること、その開発の方法を確立すること、開発においてはコストと環境への影響を十分に考慮することが求められる。地下探査の技術は資源の種類に応じて、共通する技術もあり、また新しい技術を要することもある。特に新しい資源については新しい技術が求められる。新しい技術の開発のためには、やはり技術開発のための人材の確保育成、国内各機関の連携や国際連携、学界、業界の取り組みといったものがたいへん重要である。この意味で、全国地質調査業協会連合会が資源について本小特集を企画されたことはたいへん意義深く、またその冒頭に拙文を書かせていただいたことに感謝したい。

メタンハイドレート

【Key Word】

ガスハイドレート、燃える氷、天然ガスハイドレート、海底擬似反射面（BSR）、メタンハイドレート開発計画、タービダイト砂層

佐伯 龍男*

1. 緒言

メタンハイドレートは、低温高圧という条件下でメタン分子と水分子から形成される物質である。メタンは、天然ガスの主成分であることから、メタンハイドレートそのものを利用するというより、その中に含まれるメタンを取り出すことによって、将来のエネルギー資源の一つとして期待されている。

非在来型のガス資源として注目されているシェールガスが、砂岩層よりも孔隙率や浸透率が低い条件下の貯留層に賦存するメタンガス等を対象としているのに対し、メタンガスが特定の温度圧力条件で水と結合して、メタンハイドレートという固体で存在しているという違いはあるが、いずれもメタンガスの存在形態の一つ、と捉えることができる。

日本列島の周辺海域には、広範囲にメタンハイドレートの分布が推定されており、資源が乏しいといわれる日本国としては、それらが有望な資源として利用できるかどうかに期待がかかるところであるが、まずは、現状を正しく理解していくことが大切である。

筆者が参加しているメタンハイドレートの資源開発の研究プロジェクトも、開始されて10年以上を経過し、メタンハイドレートの賦存状況に関する知見が蓄積されてきたが、資源開発自体が本来期間を要するものであり、その点では、端緒についたばかりという感がある。本稿では、これまでわかってきたことや、今後の展望を紹介することとしたい。

2. メタンハイドレート

メタンハイドレートは、図1のように、水分子が結合した籠状の構造の中にメタン分子がとりこまれる特殊な分子構造を有している。メタン分子以外にもエタンやブタン、あるいはCO₂などがとりこまれる場合もあり、総称してガスハイドレートとよばれる。

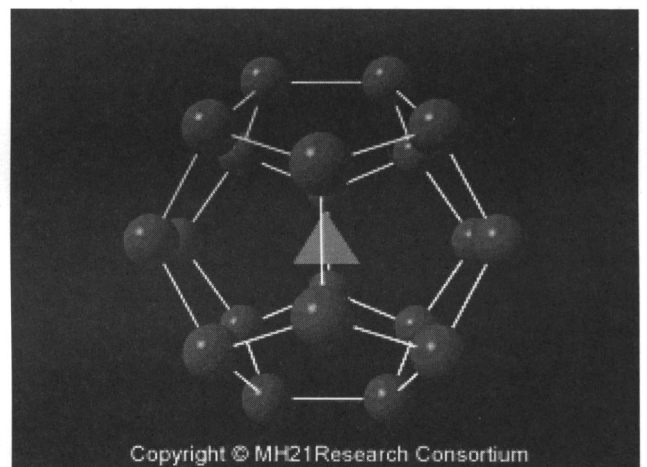


図1 メタンハイドレートの構造（提供：MH21）

写真1に、人工的に生成されたメタンハイドレートの一例を示しており、その他にも粒状のサンプルや、塊状のサンプルなどの形態で合成されることもあるが、見た目は氷のように見えるという点では共通している。また、図2に示すグラフ上の温度圧力曲線を境に、低温高圧側で安定的に存在するが、われわれが生活する環境では日常的に目にする物質ではない。

メタンハイドレートを常温常圧の条件下にもつてくると、メタンガスと水への分解が始まる。メタンは、可燃性のガスであるため、火を近づけると写真1のように燃えることから、「燃える氷」と呼ばれる。なお、大気中ですべてが瞬時に分解

* 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 メタンハイドレート開発課長

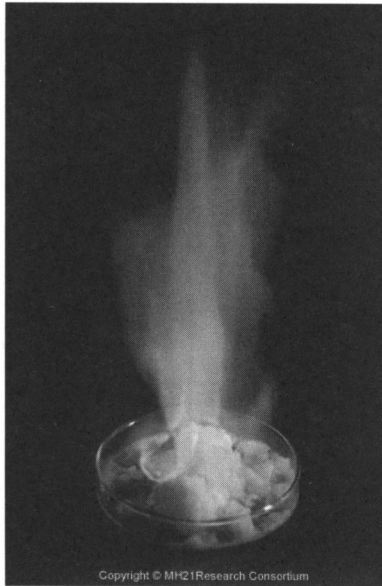


写真1 人工メタンハイドレート
の燃焼例（提供：MH21）

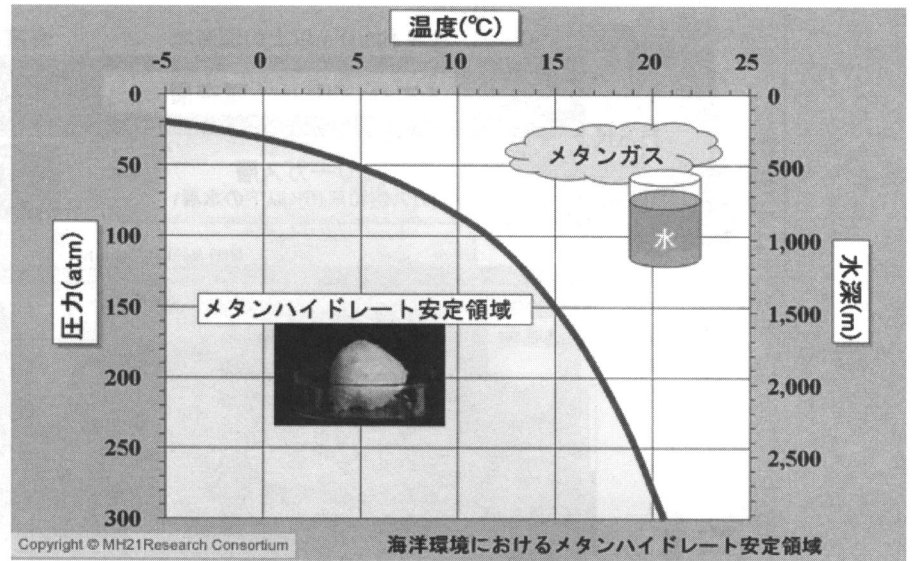


図2 メタンハイドレートの安定領域（提供：MH21）

するわけではなく、徐々に分解して発生したメタンガスが燃焼するため、あたかも氷がゆっくりと燃えつきていくように見え、温泉宿で夕餉などに使う固体燃料の燃え方に近い。

このような燃焼実験は、メタンハイドレートを印象づけるためには効果的なデモンストレーションであるが、筆者の見聞したテレビ番組の例では、人工的にメタンハイドレートを作る技術があるのであれば、わざわざ海底面下を掘って回収する必要もないじゃないか、と出演者がコメントしたことがあり、おもわず広報活動の難しさを実感したことがある。

人工のメタンハイドレートの用途としては、天然ガスから天然ガスハイドレート (NGH) を合成して、固体として運ぶという計画もあり、それは天然ガスを経済的かつ安定的に移送するための手段の一つとして検討されているものである。

資源開発の対象として期待されているのは、もともと海底面や地下に存在しているメタンハイドレートであり、それらが有効活用できないか、というのが基本的な考え方であり、メタンガスをわざわざメタンハイドレートに合成する必要などないことはいうまでもない。

3. 永久凍土と BSR

1930年代のシベリアにおいて、しばしばガスパイプラインの閉塞トラブルが起こり、その原因としてメタンハイドレートが認識されるようになった。シベリアという低温の環境に敷設されたパイプライン内をメタンガスが高圧で送られ、その際

に、水が混入してメタンハイドレートが形成され、閉塞トラブルが発生したとされている (Hammerschmidt, 1934)。

その後、自然状態でも、メタンハイドレートを含む地層が存在しうることが認識されるようになった。地下は、温度的には高温、圧力としては高圧、と考えるのが一般的であるが、永久凍土層が厚く分布する地域や、大水深域の海底付近では、地下表層部は比較的低温状態が保たれることになるため、地下であっても、メタンハイドレートが安定的に存在しうる程度の低温高圧条件を満たすようになる。ただし、それらのエリアでも、深部になるほど、温度は上がるため、メタンハイドレートの安定領域は比較的浅層部に限定される。

永久凍土地域において、メタンハイドレートの存在が初めて検討されたのは、西シベリアに位置するメソハヤ・ガス田であり、1960年代に在来型のガス層よりも浅部にも、メタンハイドレートが存在しうることが理論的に検証されている (Makogon, 1997)。現在は、本当にメソハヤ・ガス田にハイドレートが存在したか、という点では懐疑的な見方もあるが自然状態でのメタンハイドレートの存在が認識されたという点では、歴史的な意義は大きかったといえる。

一方、大水深域の海底面下については、1970年代における米国フロリダ沖での海底擬似反射面 (BSR) の確認が、海域におけるメタンハイドレートの認識につながっている (Sholl et al., 1973)。BSR とは、図3のように、メタンハイドレートの安定領域の下限において、上位のメタンハイドレ

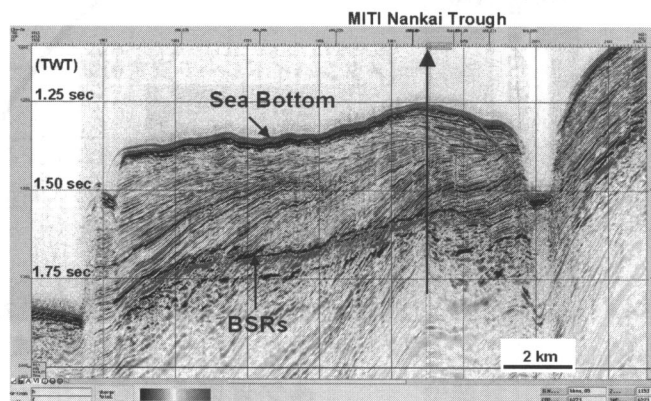
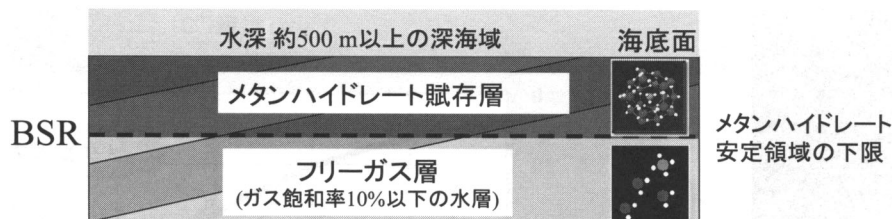


図3 (上) BSRが発生する理由 (下) BSRの例 (Tsuji, et al., 2004より引用)

ート層と下位のメタンと水に分離している流体を含む層とのインピーダンス・コントラストによって生じる、海底面とほぼ並行に分布する地震波の反射面を指す。この特徴的な反射波の成因の議論が、海域におけるメタンハイドレートの推定に至ったわけである。

ただし、永久凍土地域も大水深域も、科学的調査や資源探査の対象としては厳しい環境であったことから、使用できるデータには限界もあり、初期のメタンハイドレート認識には、偏った面も多かったと考えている。

例えば、地震探査断面上では、ハイドレート層内では、反射波が不明瞭となる特徴があるとされ、ブランキング現象と呼ばれたが、筆者らの日本周辺海域における研究では、それが一般的な現象と呼べるような具体的な事例は確認されていない。

また、BSRの下位の層では、メタンガスが存在することが予想されることから、フリーガス層と呼ばれることもあり、それらもあわせて資源開発の対象となりうる、という考え方もあるが、東部南海トラフ海域の調査では、BSR下位には飽和率の低いガスが存在するのみで、レベル的には、水層というべきものであるとの解釈をしている。

このようなメタンハイドレート認識にみられるいくつかの混乱は、現在も、まだ解消しきれていないとは言い難いのが現状である。

4. 日本周辺海域のメタンハイドレート

日本においては、メタンハイドレートが意識されるようになったのは、1980年代に南海トラフ海

域における反射法地震探査断面においてBSRが確認されたためである。その後も、科学掘削等でメタンハイドレートのサンプルが回収されるなどの報告もあり、1995年には、石油公団と民間会社数社による共同研究が始まり、日本周辺海域のBSR分布域の推定や、1999～2000年の国の基礎試錐「南海トラフ」におけるメタンハイドレートのコアサンプルの回収の成功につながった。

これらの先行研究を踏まえて2001年に発表されたのが、「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」である。JOGMECや産業技術総合研究所などによるメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)が組織され、フェーズ1の2001～2008年度には、東部南海トラフ海域をモデル海域とし、資源開発の可能性検討を念頭においたメタンハイドレートの探鉱と、海外陸上の永久凍土地域におけるメタンハイドレート産出試験が実施された。

このうち、東部南海トラフ海域では、2001～2002年に二次元および三次元の地震探査が、2004年には基礎試錐「東海～熊野灘」として16箇所32坑の試掘が実施され、この結果から、海底面下のメタンハイドレートについて、一気に理解が深まることとなった(図4)。

強調されるべき点は、BSRの上にメタンハイドレートが分布することは確認できたが、分布の形態や量は、地質状況その他によって、変化しているという点であった。メタンハイドレートの存在は、比抵抗値(電気的抵抗の大きさ)の高いことから認識できるが、BSR分布域のエリアでは

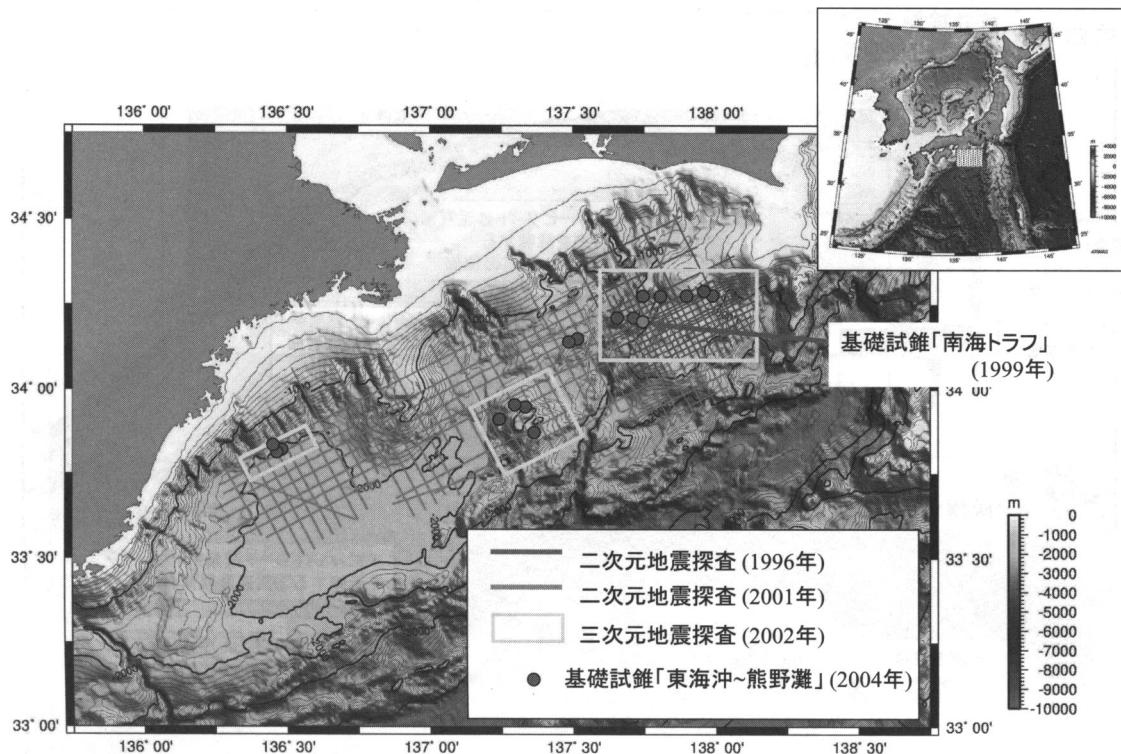


図4 東部南海トラフ海域におけるメタンハイドレート調査 (saeki, et al, 2008 に加筆)

BSR 上位のメタンハイドレート層の比抵抗値が BSR を境に下位層より高くなるものの、大半の場所や地層では、値としては $3 \Omega\text{m}$ 未満の比較的低めの値に止まるのに対し、一部エリアの特定の地層では、それらを顕著に上回る比抵抗値を示し、コアサンプルなどの他のデータからもメタンハイドレートが濃集していることが確認された。濃集箇所の共通点は、深海域における油田・ガス田の代表的な貯留層でもある、タービダイト砂層を貯留層としている点であり、試掘結果と地震探査データに基づき再検討した結果、すでに試掘して濃集箇所を確認したものも含めて、16 箇所の濃集箇所が調査海域に存在していること、それらに含まれるメタンハイドレートの総量が約 5000 億立方 m のガスに相当すると見込まれることが判明した (Fujii et al., 2008)。現在、MH21 では、このような濃集箇所をメタンハイドレート濃集帯と呼称しており、三次元地震探査データを解析して、濃集帯の存在を推定する手法も確立している (図 5)。

一方、濃集帯以外の東部南海トラフ海域のメタンハイドレート層に含まれるメタンハイドレートの総量も、ほぼ同量と推定しているが、面積的には約 5 倍の分布範囲に拡散しており、単位面積あたりの量という点では、大きな差がある。

この他、日本周辺海域では、上越沖において、2004 年に基礎試錐「佐渡南西沖」の事前調査 (サ

イトサーベイ) がきっかけで、海底面表層型のメタンハイドレートの存在が確認されていることも特筆される。ただし、上越沖の海底面メタンハイドレートについては、本格的な掘削調査をせずとも、サンプル採取が可能なこともあって、学術調査や科学調査が主体となっている。もともと、上越沖は、日本における油田地帯と隣接していることから、メタンハイドレートの安定領域よりも深部の地層を対象に、在来型の石油・天然ガスの存在の可能性が検討されている海域である。ただし、もともと深部に存在していたメタンガスの一部が断層を通じて表層付近まで移動し、ハイドレート化している可能性も指摘されており、資源開発の観点からすれば、まずは、深部の天然ガスの探鉱に目を向けるほうが自然であろう。

濃集帯の発見によって明確になったことは、メタンハイドレートが存在するかどうかというよりも、どのような形でメタンハイドレートが存在するかどうか、が重要という点である。たとえば、石油・天然ガスが資源として価値を有するといっても、わずかに油分やガス成分を含む地層までが探鉱開発の対象になることはない。シェールガスのように、貯留層性状としては良好でなくても、技術の進展によって、資源対象となる例はあるが、歴史的には、その前に、従来型の天然ガス層の開発があつての話である。

そのような点を踏まえると、タービダイト砂層

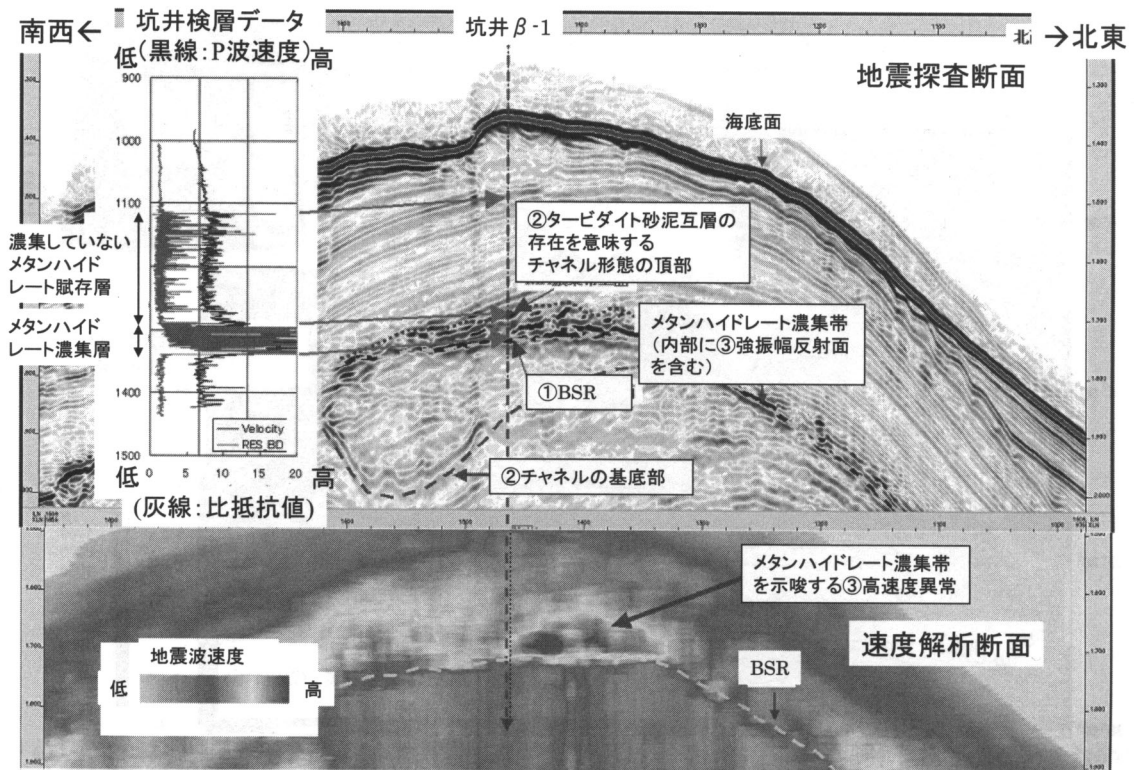


図5 東部南海トラフ海域におけるメタンハイドレート濃集帯の例 (Saeki et al., 2010 に加筆)

を貯留層として孔隙充填型で存在が確認されているメタンハイドレート濃集帯については、油田や天然ガス田に相当するものといえるのではないかと、という期待をもっているが、東部南海トラフ海域において大半を占めているような、濃集帯以外のメタンハイドレート賦存層については、資源開発対象とみなすことは難しいように思える。

海底面表層型のメタンハイドレートについては、今後、メタンハイドレートの生成過程や表層付近の地質学的研究などにきわめて興味深い知見を提供してくれるものと期待しているが、学問的価値に重視した研究調査に力点を置いていくという選択肢もある。

日本周辺では、広範囲の海域にBSRの分布が確認されているものの、すべてのエリアに資源開発対象となるメタンハイドレートがあるわけではない。

5. メタンハイドレートの産出試験

地下もしくは海底面下のメタンハイドレートを回収するという作業は、地下の圧力を保持したままコアサンプルを取得という方法で、前述した1999年度や2004年度の試掘において実績がある。ただし、これらは、地下の物性データを取得するために重要であったが、実際に資源開発を進めるためには、よりコストのかからない方法で、十分な量のメタンガスを安定的に回収する技術の

確立が必要である。

幸い、天然ガス開発の技術の多くがメタンハイドレートの開発にも利用できると期待しているが、通常の天然ガス開発と大きく異なる点は、いったんメタンハイドレートをガスに分解するというステップが必要になること、すなわち、地下で安定的に存在しているメタンハイドレートを強制的にメタンガスと水に分解し、メタンハイドレートの再生成が起こらないような状態にしなければならないことである。

メタンハイドレートを分解する手法として、温度を上昇させる方法と圧力を低下させる方法が挙げられる(図6)。「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」のフェーズ1において、カナダの永久凍土地域であるマリックにおいて、国際共同実験として、それら2種類の実験を実施した。

2002年には、坑井内に温水を循環し、その熱で地層温度を上昇させ、メタンハイドレートを分解する温水循環法を実施し、5日間で、約470立方mのメタンガスを生産した(第1回陸上産出試験、日加米独印が実施)。なお、この実験は、ガス生産という方法で、メタンハイドレートを地下から回収した世界初の実験である。

2007~2008年には、ポンプで水をくみ上げて坑井内の水頭を下げることによって、坑内や周辺地層の減圧を行い、メタンハイドレートを分解する減圧法が試みられた(第2回陸上産出試験、日本・

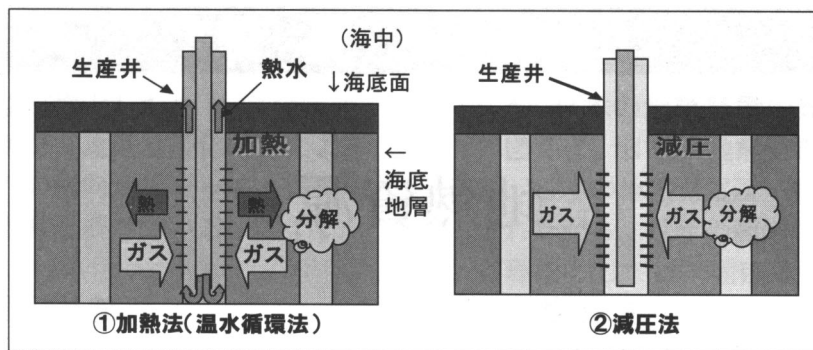


図6 加熱法（温水循環法）と減圧法（提供：MH21）

カナダによる共同実験)。この結果，5.5日間で約13000立方mという，温水循環法を上回る生産レートが得られ，減圧法が，現時点では，最も効率の良い生産手法として考えられる（山本ほか，2009）。

その後，米国がアラスカの永久凍土地域のメタンハイドレート層で，小規模の減圧実験を実施したことと，2011～2012年にCO₂置換実験が行われたこと以外は，これまでのところ海外での産出実験の報告例はないが，日本の第二渥美海丘（渥美半島と志摩半島の沖合）で，2012年度に海洋における初めての産出試験を実施する計画である。

この結果次第で，今後の展望が大きく開けてくる可能性もあるが，海洋における第1回の試験では，海洋における減圧法の有効性と，基本的な効果を検証するということが中心となっており，実用化のためには，まだまだ試験回数を重ねていく必要があると考えている。

また，長期的な生産挙動をあらかじめ把握しておくために，比較的インフラが整備されている陸上の利点を活かして，ふたたび永久凍土地域に戻り，長期陸上産出試験を実施することも計画している。

なお，前述したように，アラスカではCO₂置換実験も実施している。これは，ConocoPhillips社の協力要請に応える形で，JOGMECが日米共同実験として参加したものである。実験の主眼は，メタンハイドレート層にCO₂を圧入して，メタンハイドレートをCO₂ハイドレートに置換しようというものであり，主目的は，CO₂の地下圧入であるが，その際，置換されてメタンが発生するので，メタンハイドレートの生産手法の一つとみなすこともできる。ただし，その産出レートは減圧法を上回るとは考えられないが，減圧法を補完する手法の一つとして活用できる可能性もある。

6. 今後の展望

メタンハイドレートの資源開発のための研究は，まだ途上であり，海洋産出試験の実施等によって，技術的に可能であることが実証されれば，将来の実用化に，近づいていくものと期待している。

ただし，研究開発の初期段階では常にいえるように，経済性の向上や安定的かつ効率的な技術の確立が，その先に必要である。

そのような点で課題は少なくないが，メタンハイドレートは，日本周辺に現実に存在する，という点が，研究開発の推進力となっており，かつ，世界的にも日本が研究を牽引している立場となっているので，その利点を活かして，着実な努力を積み重ねていきたい。

参考文献

- Hammerschmidt, E.G., Industrial and Engineering Chemistry, 26 (8), 851-855 (1934)
- Makogon, Y.F., Hydrates of Hydrocarbons. (PennWell Books), (1997)
- Scholl, D.W., and Creager, J.S., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 19, 897-913 (1973)
- Tsuji, Y., Ishida, H., Nakamizu, M., Matsumoto, R. and Shimizu, S., Resource Geology, 54 (1), 3-10 (2004)
- Saeki, T., Fujii, T., Inamori, T., Kobayashi, T., Hayashi, M., Nagakubo, S. and Takano, O., Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC19311 (2008)
- Fujii, T., Saeki, T., Kobayashi, T., Inamori, T., Hayashi, M., Takano, O., Takayama, T., Kawasaki, T., Nagakubo, S., Nakamizu, M. and Yokoi, K., Proceedings of 2008 Offshore Technology Conference, OTC19310 (2008)
- 山本晃司, 佐伯龍男, 石油技術協会誌, 74 (4), 270-279 (2009); Yamamoto, K., and Saeki, T., Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 74 (4), 270-279 (2009)

地熱資源

【Key Word】

地熱発電, 火山, 地熱資源図, バイナリー発電, 温泉発電

さか ぐち けい いち やす かわ か すみ
 阪 口 圭 一 * ・ 安 川 香 澄 **

1. はじめに

日本の電力供給が大幅に見直される中、地熱エネルギーは今後のエネルギー供給において大きな役割を果たすと考えられる。地熱発電は、きわめて高い稼働率、非常に低いCO₂排出量、純国産エネルギーという特徴を持つ。環太平洋火山帯に位置する日本は、世界有数の地熱資源保有国である。地熱エネルギーの利用法には、地熱発電のほか、熱をそのまま利用する直接利用があり、日本では温泉が直接利用の代表だが、海外では工業や農業などの産業面および地域暖房に広く利用されている。また地中熱利用は、地下の温度が一年中安定していることを利用して、高効率で冷暖房や給湯などを行うものであり、地熱地帯に限らずどこでも利用できる。

地中熱利用では冷熱も利用することから他に譲り、本文では主として地熱発電を対象とした高温の地熱資源について述べる。

2. 地熱発電の技術革新

地熱発電に必要な地下システムの3要素は、水(天水の浸透)、熱源(マグマ溜まりなど)、容器(地熱貯留層)である。この3要素の規模によって、ある地域で永続的に発電できる量が決まる。地熱発電では、地熱貯留層に生産井(1~3km深程度)を掘って高温の地熱流体(蒸気と熱水)を取り出し、発電に利用した後、還元井から地下に流体を戻す。地熱貯留層は、花崗岩などの緻密な岩石に亀裂が発達して透水性が高くなった部分であり、その上部は帽岩(粘土層など低透水性の地層)で覆われているため、高温高压状態が保たれている。

なお、地上の発電設備には、火力発電や原子力発電と同じ蒸気タービンを用いる。

従来、地熱発電は上記の3要素の揃った地域において、200℃以上の高温の地熱流体を取り出し、蒸気発電を行うものであった。しかし、低沸点の2次流体(ペントランなど)と熱交換を行って発電するバイナリー発電(有機ランキンサイクル方式)では、120℃程度の地熱流体でも発電できることから、地熱発電が可能な地域が世界的に拡大した。さらに、カリーナサイクル方式を用いた低温バイナリー発電では、100℃未満でも発電でき、国内でも高温源泉の熱を有効利用する「温泉発電」が期待されている。

また近年、世界的には Engineered Geothermal System (EGS) と呼ばれる手法により、地表から地下に水を圧入して岩盤を水圧破碎し、「水」と「容器」の双方を人工的に増強する技術開発が行われている。日本でも高温岩体技術として過去には開発が行われていた。ドイツのランダウでは、水圧破碎により地下の透水性を高めることで、2008年からバイナリー発電を開始しており、世界初のEGSによる発電の実用例として注目されている。一方、地下深部に行くほど高温になることから、オーストラリアでは、4~5km深度の坑井掘削に

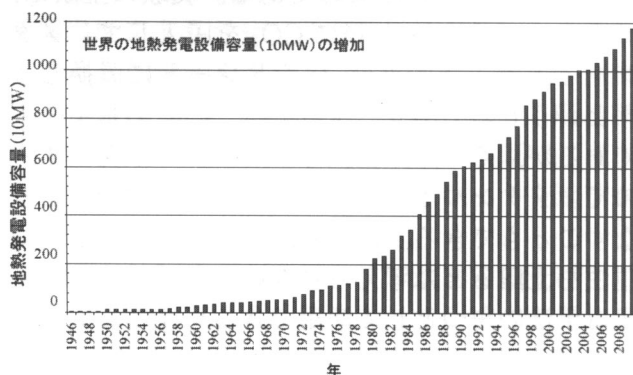


図1 世界の地熱発電量の推移 (Bertani, 2010)

* (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 地熱資源研究グループ長

** 同 地熱資源研究グループ主任研究員

よる EGS を試みている。このように、バイナリー発電と EGS という技術革新により、地熱発電に利用できる地熱資源量が増大した。

こういった技術革新と、地球温暖化問題による再生可能エネルギーへの指向が相まって、世界の地熱発電量は近年も上昇を続けている (図 1)。

3. 地熱資源量の国際比較

表 1 に、村岡ほか (2008) による各国の地熱資源量を示す。この表は、各国の地熱資源量比較のため、米国スミソニアン科学史博物館 (ホームページ) の火山カタログにある火山数データを元に、基盤深度 (約 3 km 程度) までに蓄えられている熱水資源量を推定し、電力に換算したものである。日本の活火山数 119 は、気象庁火山噴火予知連絡会 (2011) による認定数 110 と齟齬があるが、国際比較のための引用元による違いとして、ご理解いただきたい。

高温熱水資源量は、活火山数にほぼ比例し、表 1 によれば、日本は世界第 3 位の地熱資源保有国である。この表では 150℃ 以上を対象としているが、低温バイナリー発電を考慮して、より低温の資源もカウントすれば各国の資源量は表 1 より大きくなるであろう。しかしそれでも、資源量の桁数や各国順位などの大勢は変わらないと予想される。一方、より深部をもターゲットとした EGS が普及した場合は、究極的には面積の大きい国ほど地熱資源量が多いことになり、各国の資源量も国際順位も大幅に変わる可能性が高い。但し、EGS には課題も多く、海外での現行 EGS プロジェクトも、ある程度的高温が比較的浅部で得られる場所で行われている。従って少なくとも現段階では、日本が世界的な地熱資源保有国であること

国名	活火山数 (個)	地熱資源量 (MW)	2010 年の地熱発電量 (GWh)
米国	160	30,000	16,603
インドネシア	146	27,790	9,600
日本	119	23,470	3,064
フィリピン	47	6,000	10,311
メキシコ	39	6,000	7,047
アイスランド	33	5,800	4,597
ニュージーランド	20	3,650	4,055
イタリア	13	3,270	5,520

表 1 各国の基盤深度までに蓄えられている地熱資源量と発電量 (村岡ほか, 2008)

には変わらない。

4. 日本の地熱発電の現状と課題

図 2 に、日本の地熱発電量の推移を、また図 3 に、日本の地熱発電所一覧を示す。地熱資源に恵まれながら、近年の国内の地熱開発が進まなかった理由としては、国内地熱資源の 80% 以上が自然公園内にあり、開発が厳しく規制されていたことや、法制面での制約によりコスト回収が困難だったことが大きいようである。東日本大震災後の政策転換により、再び地熱開発が進むことが期待されており、地元の温泉事業者の理解と協力を得て、温泉資源と地熱資源の双方を有効に利用することが、今後の地熱開発の課題となると見られる。もちろん、技術革新と共に開発事例の蓄積による技術向上も重要である。

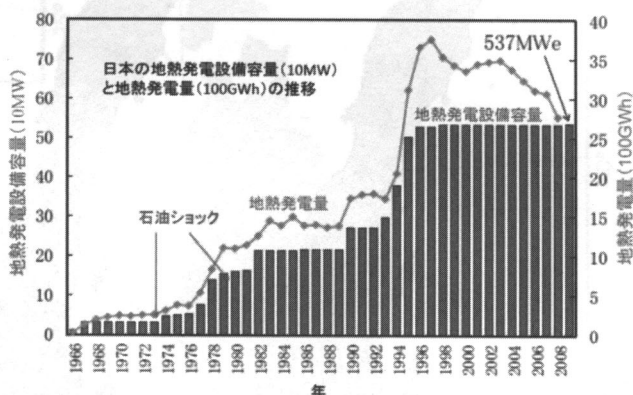


図 2 日本の地熱発電量の推移 (火力原子力発電技術協会, 2012 より作成)

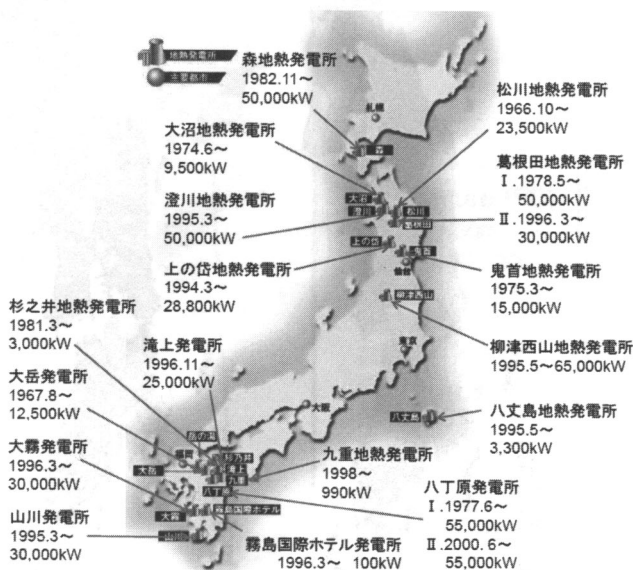


図 3 日本の地熱発電所一覧 (火力原子力発電技術協会, 2012 より作成)

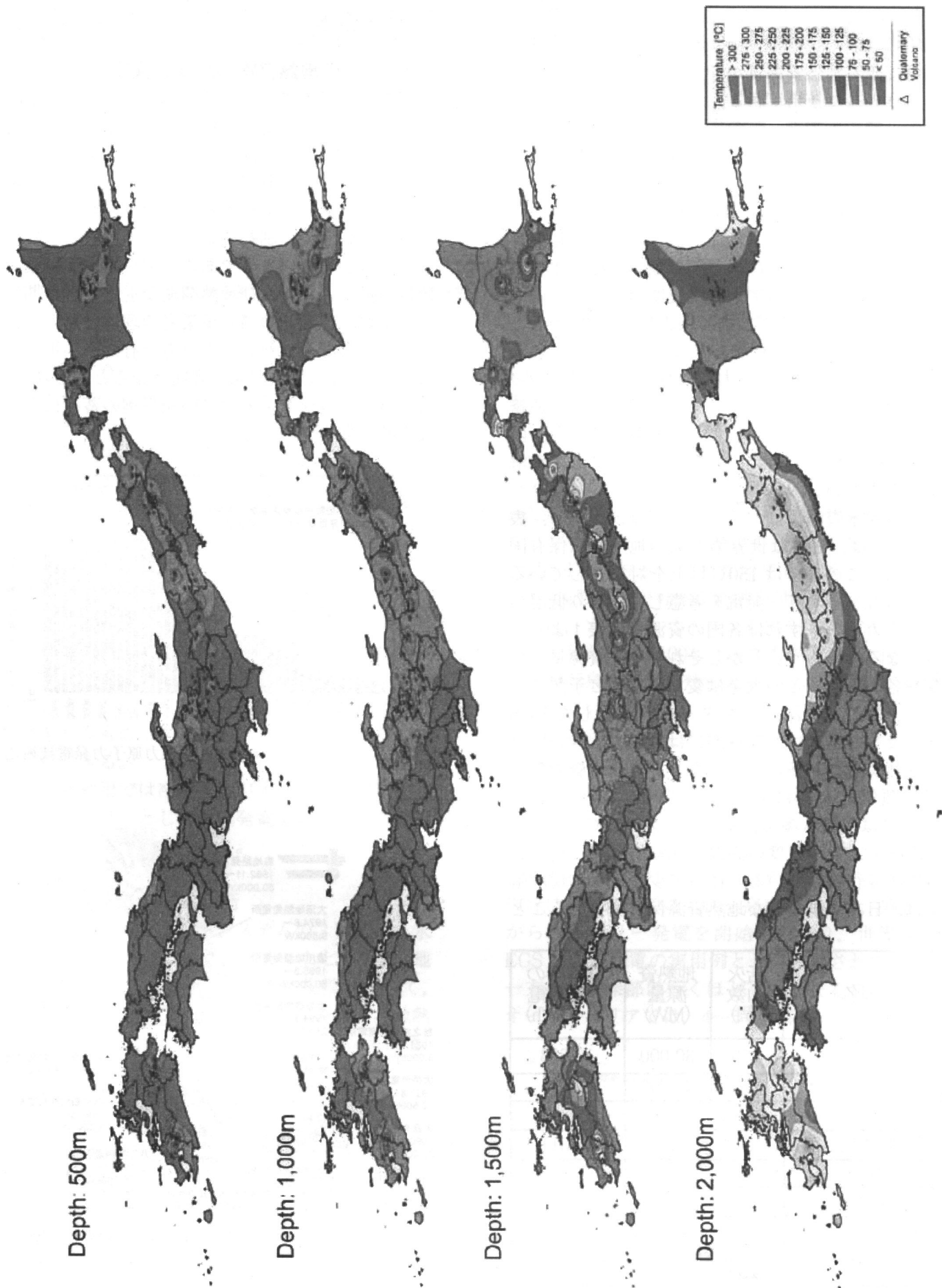


図4 坑井温度データによる深度 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m における温度コンター図 (GSJ, 2007)

5. 日本の地熱資源

技術の進歩により地熱発電に利用できる温度範囲が拡大し、将来的には天然の熱水系が無い場所でも地熱発電が可能となれば、地熱資源量の見直しが必要となる。その際に基本データとして用い

られるのが、地温分布データである。図4は、国の調査等で公開された坑井温度データを基に作成された、深度別の地温分布図である。

図4は、温度の実測値に基づく点が最大の長所だが、2000 m級の坑井データ点が非常に限られ

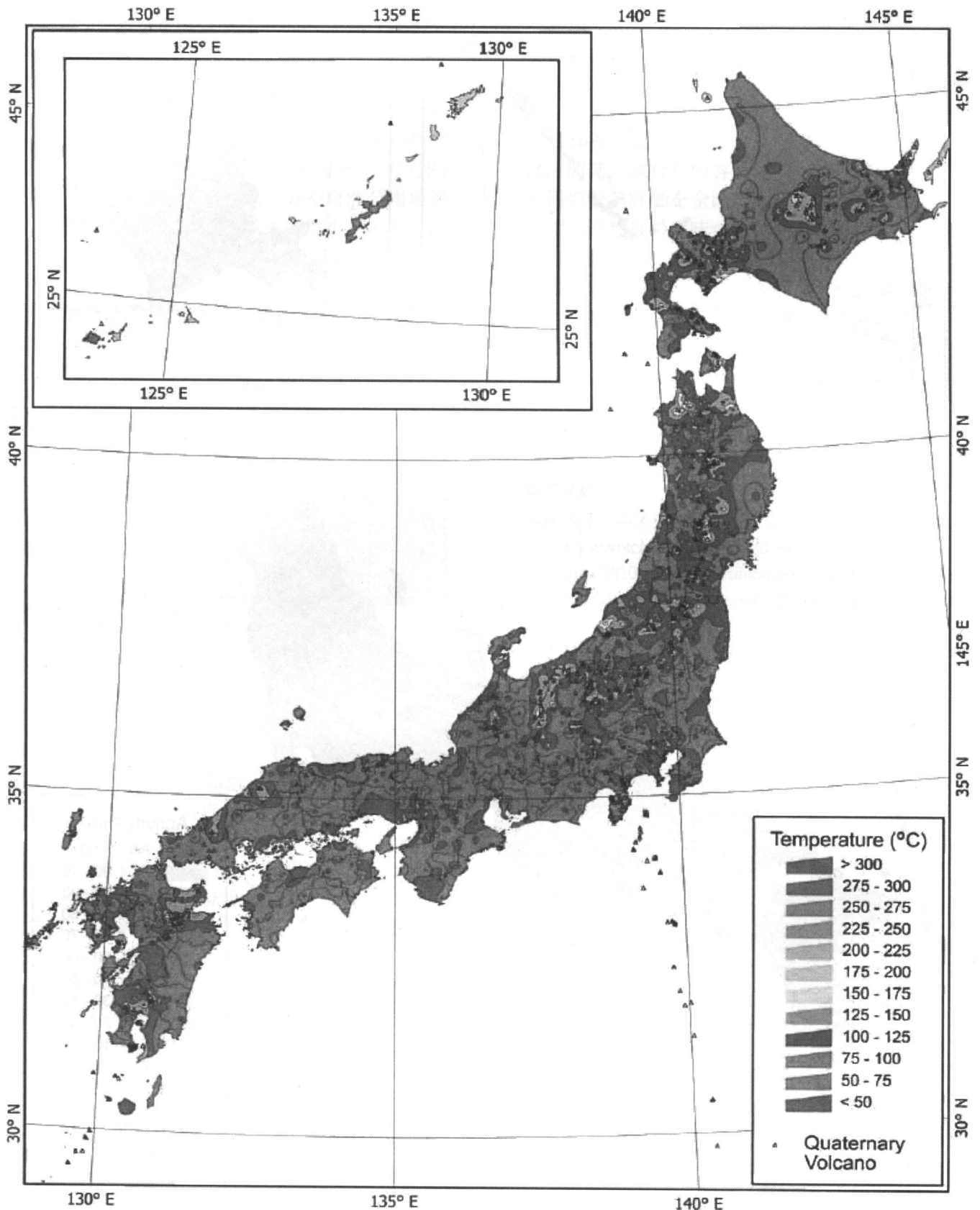


図5 石英伝導冷却温度計補完による深度1000 mにおける温度コンター図 (GSJ, 2007)

ているため、データが無い地点は周辺の数値に影響されるという問題がある。そのため、GSJ (2007) は、深井戸に比べてデータ点数が格段に多い温泉のデータを用いた、各種の科学的補完手法による地温コンター図を作成している。深度の判

っている温泉の熱水化学分析値データのうち、坑井地温データと相関の高いデータ種を抽出し、坑井地温データをそのデータ種で補完する方法である。図5は、全ての深度に対して比較的高い相関係数を示した、石英伝導冷却温度計による補完温

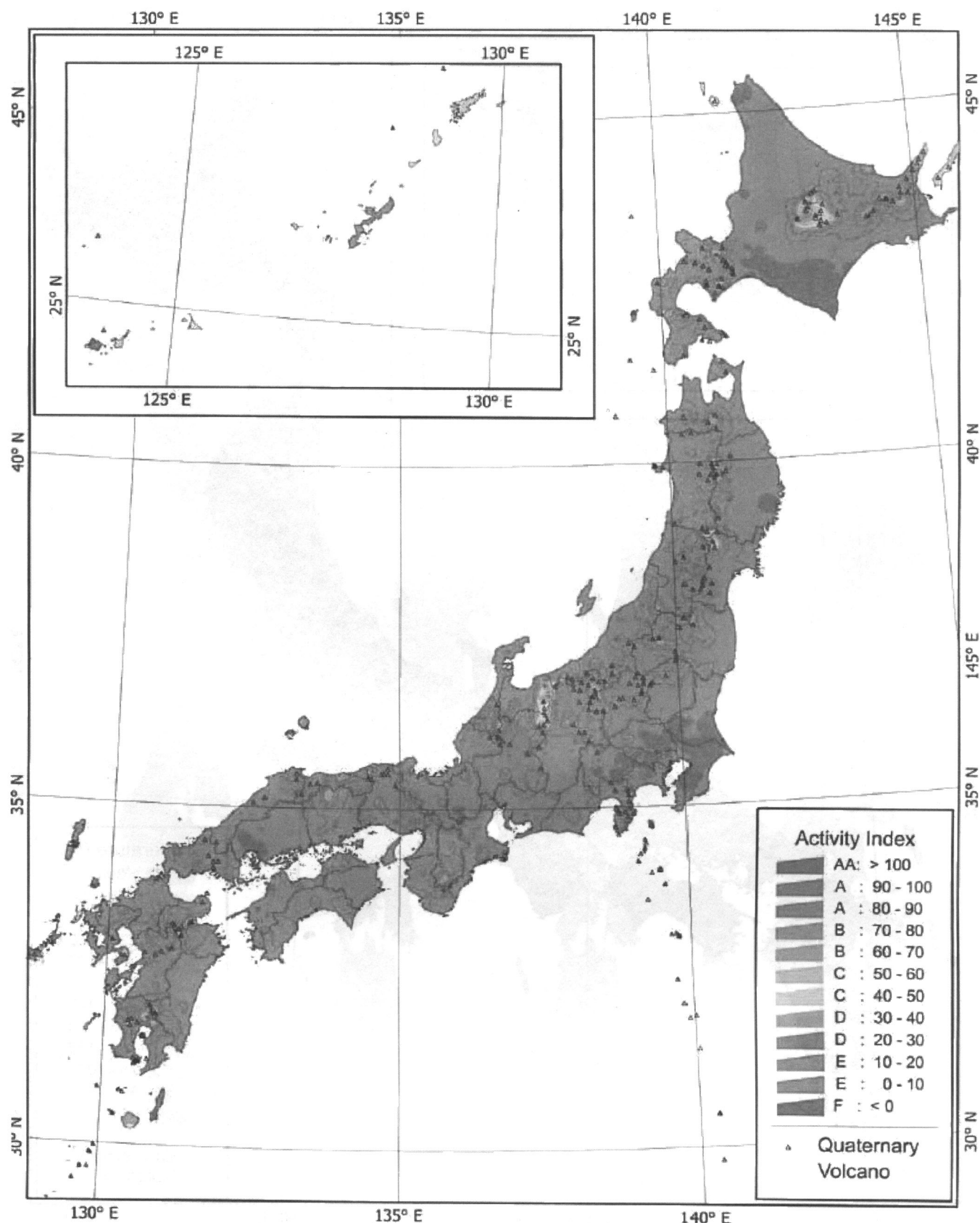


図6 活動度指数コンター図 (GSJ, 2007)

度カウンター図 (1000 m 深) である。誤差は含まれるものの、**図 4** の 1000 m 深の図に比べデータの空間密度が高く有効である。

図 6 は、林 (1982) の方法に基づく活動度指数図であり、地熱地域の温度階級を評価する指標を示している。多数の浅い温泉井データが少数の深い地熱井のデータをキャンセルしてしまう効果があるため、多くの地域で低めの値が出る傾向がある点に注意が必要である。

以上に例示した図は、GSJ (2007) に「日本の熱水系アトラス」として示されたうちのごく一部であるが、これらは全て数値地質図として GSJ (2009) に含まれており、行政区分や自然公園境界などと重ね合わせた表示や拡大・縮小表示も可能なので、ぜひご参照いただきたい (**図 7** 参照)。

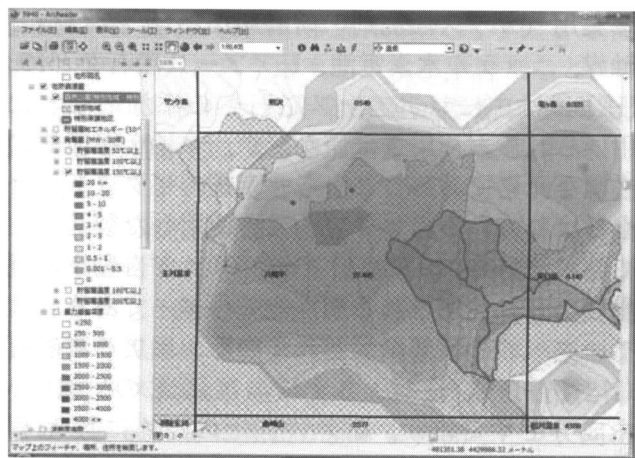


図 7 「全国地熱ポテンシャルマップ」の表示例 (GSJ, 2009)。地熱資源量分布と自然公園を重ね合わせたもの。

6. 今後の課題と方向性

資源評価は、その時点での、経済性等も含む資源の定義によって変化するものである。加えて、地熱資源は温度、賦存形態、賦存深度などが多様であり、従前より地熱資源の評価には多様な情報が用いられ、評価手法もまだ確立したものとはいえない。

近年の研究においても、資源開発の手法の進展にも伴って、資源の定義や評価手法を発展させて

いく必要がある。例えば、今後は新たに自然公園内で入手されたデータを更新していく必要があると同時に、EGS や温泉発電資源などの新しい地熱資源を視野に入れた資源評価手法の開発が課題であろう。EGS の対象となる地熱資源では、不透水性基盤岩によって境界される貯留層という単純な容積法モデルが適用されにくくなり、中間的な透水性を持つ領域の適切な評価法が求められるであろう。また、温泉発電資源は、一般に賦存深度は浅く、より局所的な条件の影響が大きくなると考えられる。より浅く、より低温の資源であることは、開発 (試行) の容易さにも結び付くので、この種の資源評価を全国に渡って行う場合には、算出する資源量の意味づけに注意することも必要であろう。

地熱資源評価に用いる多様なデータ全てを、事業者が自ら取得・整備することは困難であり、公表されたデータ (電子化されたものが望ましい) を利用することになる。研究者としては、データや手法の提供のより良いあり方の検討や実現も引き続き行っていく必要がある。

参考文献

- 米国スミソニアン科学史博物館 (ホームページ) http://www.volcano.si.edu/world/find_regions.cfm
- Bertani (2010) : Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review, Proceedings World Geothermal Congress 2010, No. 0008.
- GSJ (2007) : 日本の熱水系アトラス. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, pp. 110
- GSJ (2009) : 全国地熱ポテンシャルマップ. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, CD-ROM 版.
- 林 正雄 (1982) 深部高温地熱貯留層のターゲット. 日本地熱学会誌, 4, 81-90.
- 火力原子力発電技術協会 (2012) : 地熱発電の現状と動向 2010・2011 年.
- 気象庁火山噴火予知連絡会 (2011) <http://www.jma.go.jp/jma/press/1106/07b/katsukazan110607.html>
- 村岡洋文・阪口圭一・佐々木進・駒澤正夫 (2008) : 日本の熱水系資源量評価 2008, 日本地熱学会平成 20 年度学術講演会講演要旨集, B01.

レアメタルとレアアース

【Key Word】

レアメタル, レアアース, 鉱物資源, 中国, 輸出規制, 資源ナショナリズム

たかぎ てついち*
高木 哲一*

1. はじめに

金属資源は、鉄やアルミニウムなどの汎用金属、銅・鉛・亜鉛などのベースメタル、金・銀などの貴金属およびそれ以外の希少金属（レアメタル）に分類される。レアメタルは現在 31 鉱種が経済産業省によって指定されており、その安定確保のための施策が講じられている¹⁾。金属資源は、2004 年頃までの十数年間価格が安定していたため、経済力によって自由に輸入できるものと考えられてきた。もちろん、それまでも日本企業や政府系法人による海外金属鉱山への投資や開発がビジネスとして行われていたが、今日の危機的状況を見通してのものではなかった。ところが、2004～05 年頃から新興工業国の著しい経済成長を背景に金属資源、特にレアメタルの価格が急激に上昇を始めた。レアメタル危機の始まりである。このことは、安い原材料を海外から輸入し、付加価値の高い工業製品を輸出することによって利益を得るといった加工貿易のシステムが崩壊しつつあることを意味し、レアメタル危機が一過性の貿易問題ではなく、資源に乏しい日本の産業の根本を揺るがしていると言っても過言ではない。ここでは、レアメタル危機が最も端的に表れたレアアース問題を中心に解説してみたい。

2. レアアースとは

レアアース（希土類）はランタノイド 14 元素（La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu）に Sc, Y を加えた 16 元素の総称であり、レアメタルとしてはまとめて 1 鉱種として扱われる。レアアースは地球化学的に似た挙動を示すが、イオン半径の違いから各元素の性質が系統的に変化するた

* (独)産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 鉱物資源研究グループ長

め、ランタノイド元素はユーロピウムを境にライトレアアース（LREE:La～Eu）とヘビーレアアース（HREE:Gd～Lu）に区別される。LREE は、窯業用（ガラス添加剤・研磨剤など）、蛍光材料、触媒、ニッケル水素電池、レアアース磁石などに、HREE は主にレアアース磁石への添加剤などに用いられる。使用量は僅かだが、ハイテク産業に必須な元素であることから「産業のビタミン」とも呼ばれている。レアアースを使用した製品として特に注目されるのが、ハイブリッド自動車の駆動部などに使用される高性能モーターである。同モーターの心臓部に使われているレアアース磁石（Nd-Fe-B 磁石）は、ネオジム（LREE の一種）を主成分とするほか、耐熱性向上のために数%程度のディスプロシウム（HREE の一種）が添加されており、正にレアアースの塊である。国内で消費されるレアアースは、リサイクル品を除き、ほぼ全量を中国からの輸入に依存している。ところが、中国のレアアース輸出制限（後述）により、レアメタルの中でも特に著しい価格上昇と輸入量の減少が生じ、ハイテク産業が深刻な打撃を受けたのである。

3. レアアースの供給危機

レアアースは、1960 年代から 90 年代中頃まで

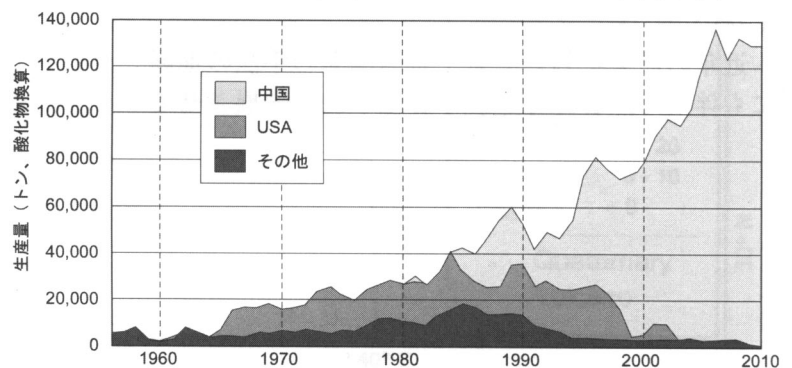


図 1 世界のレアアース生産量の推移²⁾

表1 中国によるレアアース輸出規制

輸出枠	(出展 中国商務部)					
	2007	2008	2009	2010	2011	2012 第1期
レアアース(t)	60,173	47,449	50,145	30,259	30,184	24,904

輸出税	2006年11月	2007年6月	2008年11月	2011年1月
ネオジウム	0%	10%	15%	25%
ディスプロシウム	0%	10%	25%	25%
テルビウム	0%	10%	25%	25%

主に米国の Mountain Pass 鉱山とインドの漂砂鉱床から生産されてきた。ところが、1990年代後半になるとレアアースの需要増に伴って中国の生産量が急増し、次第に中国の寡占化が顕著になった(図1)。Mountain Pass 鉱山は、中国の価格攻勢と鉱山開発に伴う環境問題により2002年に休山に追い込まれ、それ以降レアアース資源の生産はほぼ中国に独占されている。日本では、前述のNd-Fe-B磁石(1984年佐川真人氏らによる発明)、ハードディスク用セリウム系研磨剤など、レアアースのハイテク産業用途が急速に拡大し、2000年代前半約1万トン(酸化物換算、以下同じ)だったレアアース需要が後半には3万トンを超えた。ところが、中国によるレアアース資源の輸出枠縮小とそれに起因する価格高騰が2009年頃から顕在化し(表1)、2010年9月に発生した尖閣列島沖事件以降の事実上の禁輸措置により、深刻なレアアース供給不足が生じるに至った。2011年度に入りLREEは輸出が徐々に再開したが、同年8月には05年価格の30~80倍程度にまで暴騰した(図2)。同年度下半期にLREE価格は大幅に

下落した。これは、レアアースの需要家があまりの高値を嫌い買い控えたこと、セリウム系研磨剤などの代替材料技術が進展したこと、前述の Mountain Pass 鉱山や豪州 Mt. Weld 鉱山などLREEを主体とする鉱山の再生産が近づいたことなどによる。しかし、HREE価格は高止まりし、ほとんど入手できない状況が継続している。中国政府は、環境

対策等を理由に2011年度からレアアース資源採掘の総量規制を実施し、各鉱山の生産量を厳しく管理すると共に、日本向けの違法な輸出を徹底的に取り締まっている。

このような状況を受けて、2012年3月に世界貿易機関(WTO)において日本・米国・EUが共同で中国を相手取り、WTO協定に基づく協議要請(いわゆる提訴)を行った。これに対し中国は、輸出規制はあくまで環境対策によるものであり、WTOでも認められている範囲の措置であるとして、主張が真っ向から対立している。

レアアース市場は、経済的規模が他の金属資源と比べて極端に小さい。また、国際市場がなく時価で直接売買されるため、価格決定の仕組みが不透明である。したがって、これまでレアアース資源は非鉄鉱山大手各社の積極的な探査・開発の対象とはなりにくく、中小の鉱山・探査会社が多くの場合他鉱種の副産物として扱ってきた経緯がある。レアアース資源は、探査手法や選鉱・製錬方法も他の非鉄金属と異なるため、他鉱種で培われた技術をそのままレアアース資源に応用することも困難である。そのため、中国に替わるレアアース鉱山の本格的開発・生産が始まるまでにはまだ相当なリードタイムを要する。現在の状況が継続すれば、国内ハイテク産業が生産拠点を、レアアース資源が比較的入手しやすい中国に移転させる傾向が加速され、結果的に、レアアースを利用するハイテク産業が上流から下流まで中国に独占される可能性もある。

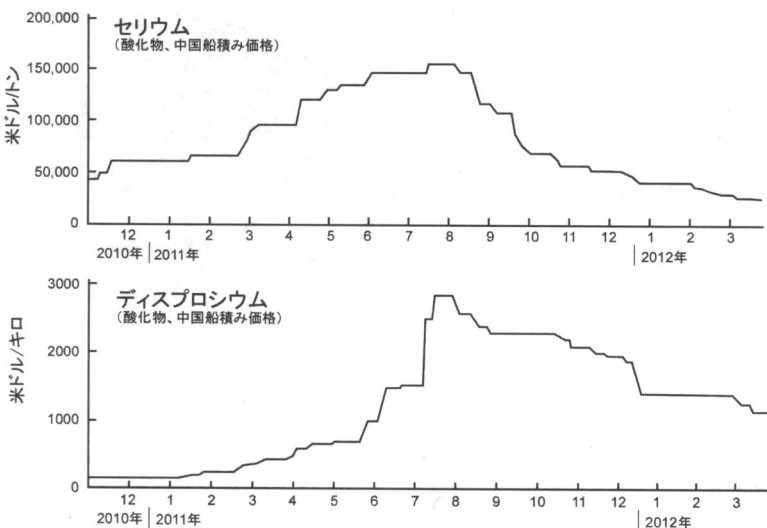


図2 最近1年間のレアアース価格の推移(出展: <http://www.metall-pages.com>)
 (2005年価格(Ce酸化物:約3000ドル/t, Dy酸化物:約40ドル/kg)と比較すると、2011年8月にそれぞれ約30倍, 80倍に高騰した。)

4. 世界のレアアース資源 4.1 中国のレアアース資源

世界のレアアース総資源量は1億1千万トンに達するが、中国の総資源量はその約50%を占めると見積もられている²⁾。中国のレアアース市場独占の背景には、安価な人件費・製造コストや巧みな資源戦略のみならず、品位や採掘性など鉱業的条件に優れた鉱床が存在することも事実である。内

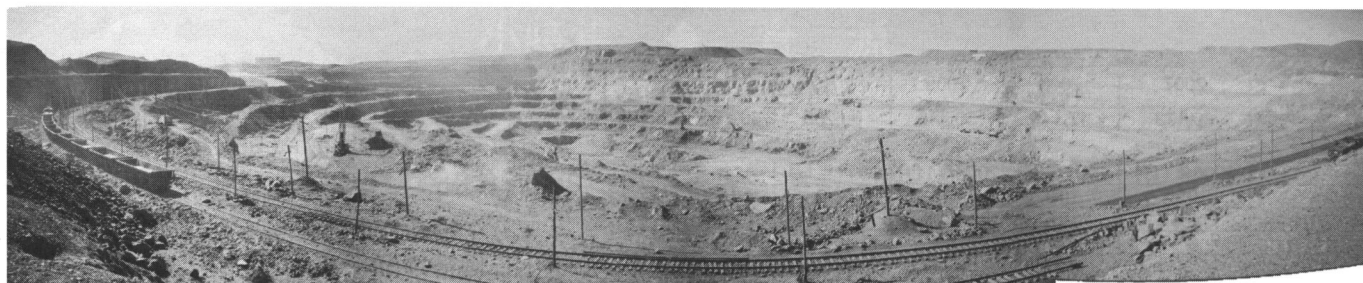


図3 中国内モンゴル自治区のBayan Obo 鉱山 (1997年撮影)。現在も世界最大のレアアース鉱山である。

モンゴル自治区のBayan Obo 鉱床 (図3) は、酸化鉄鉱床の一種であり³⁾、埋蔵鉱量 5740 万トン (レアアース酸化物 6%) と世界最大級である⁴⁾。Bayan Obo はモナザイト、バストネサイトなどを主要レアアース鉱物とする LREE 主体の鉱床であり、鉄の副産物として生産される。一方、江西省を中心に賦存するイオン吸着型鉱床は、花崗岩風化殻中に発達する⁵⁾。レアアース含有量は数百 ppm 程度であるが、硫酸アンモニウム溶液で溶解・浸出が可能のため、現地で風化殻に同溶液を注入し低地側で回収することにより容易に抽出が可能である。また、価格が高い HREE に比較的富む特徴を持つ。このため、同型鉱床は採掘性・採算性が高く、世界の HREE の独占的供給元となっている。現在、中国南部と気候・風化条件が似ている東南アジア各地の花崗岩地帯で同型鉱床の探査が進められているが、まだ開発可能な鉱床は発見されていない。これらのほか、四川省で高品位なカーボナタイト型レアアース鉱床が生産を開始している⁶⁾。

4.2 中国外のレアアース資源

中国のレアアース資源の輸出制限を受けて、現在、中国外におけるレアアース資源の探査・開発が活発に行われている (図4)。

4.2.1 LREE (軽希土)

最も開発に近い鉱床は、米国カリフォルニア州東部の Mountain Pass 鉱床である (図5)。同鉱床はカーボナタイト型で、バストネサイトを主要レアアース鉱物とし、埋蔵鉱量 2000 万トン (レアアース酸化物 8.9%) と見積もられている⁸⁾。前述のように、1990 年代までは世界の主力レアアース鉱山であったが 2002 年に休山していた。しかし、今日のレアアース価格急騰を受けて 2011 年より生産を再開した。鉱山の基本設備や選鉱技術は既に整備されていることから、中国の採算性に対抗しうる数少ない LREE 鉱山の 1 つとして注目されている。次に有望な鉱床は、オーストラリア西部の Mt. Weld 鉱床である⁹⁾。同鉱床は潜頭型のカーボナタイト型鉱床であるが、岩体が過去に地表に露出していた際に強いラテライト化作用を被

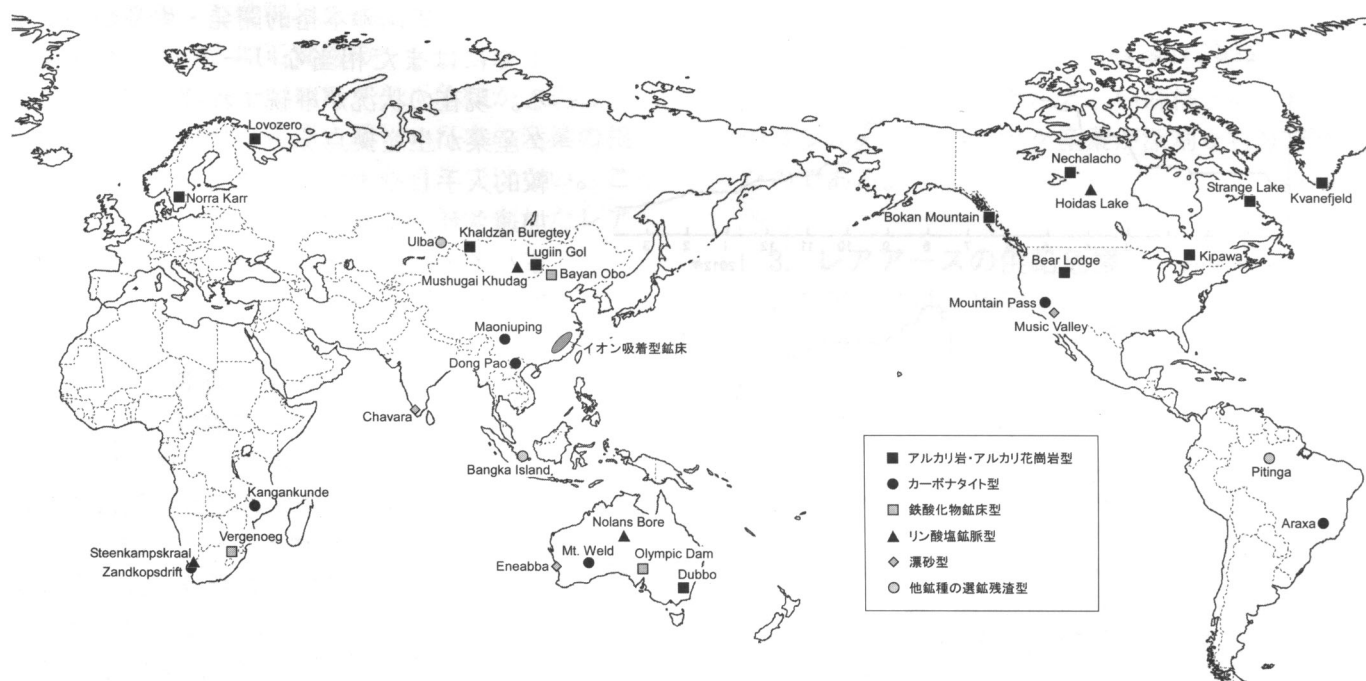


図4 世界のレアアース鉱床の分布 (引用文献7を元に一部改変)



図5 米国カリフォルニア州の Mountain Pass 鉱山 (2009 年 12 月撮影)。径 200 m ほどの露天採掘場だが、1990 年代前半まで世界の主力鉱山だった。2011 年に生産を再開した。

りレアアース品位が著しく向上している。埋蔵鉱量は 1750 万トン (レアアース酸化物 8.1%) と見積もられており、2011 年から本格的な採掘・生産が予定されていたが、マレーシアに建設中の選鉱・製錬所の稼働開始が遅れており、生産開始は 2012 年になる見通しである¹⁰⁾。2010 年代前半の生産開始を目指している鉱床としては、オーストラリア中部の Nolans Bore 鉱床が挙げられる。同鉱床は、花崗岩—片麻岩中に発達するフッ素リン灰石脈鉱床で、埋蔵鉱量は 3000 万トン (レアアース酸化物 2.8%) と見積もられている¹¹⁾。このほかやや小規模であるが、ベトナムの Dong Pao 鉱床、カナダの Hoidas Lake 鉱床などが 2010 年代前半の生産開始を目指して開発中である。生産開始時期は未定だがまとまった埋蔵鉱量が見込まれる LREE 鉱床としては、グリーンランドの Kvanefjeld 鉱床 (レアアース酸化物推定鉱量 490 万トン)、世界最大のニオブ鉱山であるブラジルの Araxa 鉱山、インド西岸の漂砂鉱床 (Indian Rare Earths)、モンゴル南部の Lugin Gol 鉱床、Mushugai Khudag 鉱床などがある。Mountain Pass, Mt. Weld 両鉱山に続き、2010 年代中甸～後半に他の鉱山も生産を開始すれば、中国産 LREE のシェアは次第に低下し価格も安定化すると予想される。

4.2.2 HREE (重希土)

HREE は、LREE に比べて地殻存在度が 10 分の 1 程度しかないことから、有望な鉱床も非常に少ない。現在、最も期待される HREE 鉱床は、カナダ北西部の Nechalacho (Thor Lake) 鉱床である。同鉱床は閃長岩・花崗岩類が熱水変質作用を被って形成されたもので、ゼノタイム、ジルコン、フェルグソナイトなどを主要レアアース鉱物とする。推定埋蔵鉱量は 1 億 7600 万トン (レアアース酸化物 1.43%) と巨大だが、北極圏に近い厳し

い地理環境にある¹²⁾。次に注目されるのが米国アラスカ州南部の Bokan Mountain 鉱床である¹³⁾。本鉱床はアルカリ花崗岩から派生する数本の脈状鉱床で、推定埋蔵鉱量は 670 万トン (レアアース酸化物 0.58%) と小規模だが、HREE の比率が 40% と極めて高い。また、海岸に隣接しアクセスしやすい利点がある。オーストラリア東部の Dubbo 鉱山は、ジルコニウム鉱山として開発されており、副産物としてレアアースの生産も期待されている¹⁴⁾。ユーダイアライトを主要レアアース鉱物とし、推定埋蔵鉱量は 7320 万トン (レアアース酸化物 0.75%) と大きく、HREE もある程度の資源量が見込まれている。前述の Nolans Bore 鉱床、Kvanefjeld 鉱床なども LREE 主体ではあるものの一定の HREE ポテンシャルが確認されている。また、ベトナム北部、モンゴル西部、南アフリカ、カナダ東南部などにも小～中規模な高品位 HREE 鉱床が確認されている。一方、他鉱種の選鉱残渣から HREE を回収する計画も進められている。カザフスタンではウラン鉱石選鉱残渣から HREE を回収する計画が進められており¹⁵⁾、同様な他鉱種残渣からの回収計画がブラジルやインドネシアのスズ鉱山、南アフリカの蛍石鉱山・リン灰石鉱山などでも検討されている。これら選鉱残渣からのレアアース資源は、品位・鉱量・構成鉱物・生産時期などの詳細が公開されていないものが多く、資源ポテンシャルは十分に確認されていないが、元来廃棄される物質の再利用なので採掘コストがかからず、さらに新たな鉱山開発を伴わず環境負荷が比較的小さいという利点がある。したがって、これら残渣型鉱床は採掘性・採算性でも中国のイオン吸着型レアアース鉱山に対抗できる可能性があり、今後の開発の進捗が注目される。しかし、上記の鉱山・鉱床の生産開始時期は早くても 2010 年代中甸～後半と予想されており、中

国からの HREE の輸出がほぼ停止している現状が継続する限り、数年間は厳しい供給不足が継続する可能性が高い。

4.2.3 海底レアアース資源

2011 年、東京大学の研究グループにより、太平洋各地の海底ボーリング試料の系統的分析に基づき、特に東太平洋の海底表層堆積物中に比較的高濃度なレアアースが含まれることが報告された¹⁶⁾。賦存量が膨大であり、弱酸で容易に抽出が可能であるなど、資源ポテンシャルが高い点で注目すべき結果である。海洋底資源の開発にあたっては、いずれの鉱種においても、採算性と同時に、海洋汚染防止条約（ロンドン条約、マルポール条約等）の観点から環境問題が問われる。また、公海での鉱区設定に関する国際法の枠組みも明確ではない。これらの問題を解決し、実際の採掘・生産に至るまでには、まだ相当な時間を要すると予想される。

5. レアアース資源開発の課題

5.1 採算性

LREE の価格は、2011 年 8 月の最高値から一転して値下がりに転じ、11 月には最高値の 3 分の 1 になった（それでも数年前の 10 倍近く高値）。今後、国内産業の脱レアアースや中国の価格攻勢によりさらに値下がりする可能性があり、中国外のレアアース（特に LREE）鉱山は、最終的には中国の鉱山に近い採算性がなければ生き残ることが難しい。したがって、レアアース資源の供給安定性確保は、中国外における、中国並みに採算性の良いレアアース鉱山開発の成功にかかっている。そのためには、1) 高品位で選鉱・製錬も容易、2) レアアースが他鉱種の副産物、3) インフラストラクチャーが既整備、4) 生産から利用までのサプライチェーンが完成、などの好条件が複数備わっていることが望ましい。特に 4) は、政府関連機関や総合商社がつなぎ役となり、合弁会社を設立するなど戦略的に推進する必要がある。Mountain Pass, Mt. Weld 両鉱山は 2) 以外の条件を概ね備えており有望であるが、他の鉱山・鉱床はまだこれらの条件が不十分なものが多い。

5.2 選鉱・製錬技術

鉱石中の各レアアース元素は、鉱石からレアアース鉱物を分離・濃集して精鉱を作る選鉱プロセスと精鉱を溶解して特殊な溶媒を用いて各レアアース元素を分離する製錬プロセスを経て抽出される。Mountain Pass, Mt. Weld 両鉱山では、レアアースが主としてバストネサイトなど易溶性の炭

酸塩鉱物に含有されており、選鉱・製錬が比較的容易である。ところが、レアアース鉱床には難処理鉱物を主体とするものが少なからず存在し、開発の妨げになっている。例を挙げると、リン灰石を主体とするレアアース鉱石は、肥料原料の副産物として回収できる可能性が期待されているが、硫酸で溶解すると石膏と共にレアアースが沈殿し回収が難しい。同様に、ユーダイアライト、ジルコン、モサンドライト、アラナイトなどの珪酸塩鉱物を主体とするレアアース鉱石は、酸溶解するとシリカゲルと共にレアアースが沈殿し回収が難しい。カーボナタイトの風化によるレアアース鉱床は、モナズ石、ゼノタイムなどのレアアース鉱物が一般に極細粒であり、さらに難溶性レアアース鉱物のフローレンサイトが含まれることも多く、選鉱・製錬に非常に手間がかかる。これらの課題を解決するには、鉱床ごとの鉱物学的評価や選鉱・製錬技術開発が必要であり、鉱山会社のみならず大学・公的研究機関などが協力して対応しなければならない。

5.3 放射性物質の処理

レアアース資源開発における共通の課題に、副産物のトリウムの扱いがある¹⁷⁾。トリウムは放射性物質であり、多量に集めると核原料物質として扱わなければならない¹⁸⁾。トリウムはどの岩石にも微量に含まれる元素だが、レアアース鉱床ではしばしば含有量が数百 ppm を超える場合がある。特にモナズ石を多く含むレアアース鉱石では希に含有量がパーセントオーダーに達する。高濃度なトリウムを含む残渣は放射能が高くみだりに残土として処分できないため、レアアース資源を開発する鉱山会社はその対応に苦慮している。基本的に現地の法体系に基づいた慎重な処理が求められるが、開発途上国では放射性物質取扱いに関する法体系が不十分な場合があり、政府間レベルで法体系整備も含めた対応が必要になることもある。

6. 今後の資源戦略

現在のレアメタル危機は、鉱物資源を経済力に任せて自由に輸入できる時代が終焉を迎えたことを我々に示した。新興工業国の消費量急増や資源ナショナリズムの高まりなどにより、偏在性の強い他鉱種（例えば、タンゲステン、アンチモン、リチウム）でもレアアースと同様な危機が生じる可能性は否定できない。日本が鉱物資源を海外から安定的に確保するには、この問題を一過性のものと捉えることなく、日本の民間企業・公的機関等が探査段階から資源開発に積極的に関わること

のできる枠組み作り，探査・研究予算，大学での人材育成など長期的戦略の構築が重要である。とりわけ，野外調査能力を持つ若い人材を育てる教室の拡充が望まれる。

謝辞

本稿を作成するにあたり，渡辺 寧博士には様々なレアアース資源に関する情報をいただいた。ここに深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 高木哲一，地質ニュース，No. 670, pp. 4-7, 2010.
- 2) USGS, Mineral Commodity Summaries, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>, 2011
- 3) 金沢康夫・中嶋輝允・高木哲一，資源地質，Vol. 49, No. 3, pp. 203-216, 1999.
- 4) Wu, C., Yuan, Z. and Bai, G., Rare Earth Minerals: Chemistry, origin and ore deposits. pp.281-310, Chapman & Hall, London, 1996.
- 5) Murakami, H. and Ishihara, S., Resource Geology, Vol. 58, No. 4, pp. 373-401, 2008.
- 6) 石原舜三，地質ニュース，No. 624, pp. 10-29, 2006.
- 7) 渡辺 寧，資源地質，Vol. 62, No. 2, pp. 103-122, 2010.
- 8) Murakami, H. and Ishihara, S., Resource Geology, Vol. 56, No. 2, pp. 197-204, 2006.
- 9) 西川有司・藤井 昇，地質ニュース，No. 470, pp. 6-17, 1993.
- 10) <http://www.lynascorp.com/>
- 11) Arafura Resources Ltd., Nolans project progress report, <http://www.arafuraresources.com.au/>, 2010.
- 12) http://avalonraremetals.com/projects/rare/thor_lake/
- 13) Long, K.R., Van Gosen, B.S., Foley, N.K., and Cordier, D., Scientific Investigation Report, pp.2010-5220, USGS, 2010.
- 14) <http://www.alkane.com/au/projects/nsw/dubbo>
- 15) http://www.sumitomocorp.co.jp/news/2009/20090812_110044.html
- 16) Kato, Y., Fujinaga, K., ほか7名, Nature Geoscience, Vol. 4, pp. 535-539, 2011.
- 17) 亀井敬史, 平和のエネルギートリウム原子力. 雅粒社, 東京, p. 86, 2011.
- 18) ウラン又はトリウムを含む原材料, 製品等の安全確保に関するガイドライン, 文部科学省, p. 24, 2009.

土木研究所資料 第4176号に準拠

土層強度検査棒



重量 4kg
計測時間 約1~2分
計測強度値 c, φ

(独)土木研究所 材料地盤研究グループ 地質チーム 開発

国土地理院技術資料H-1-No.10に準拠

滑動崩落危険度評価



Site 02
2011年12月19日 14:00~

盛土形状計測・相対的滑動崩落発生可能性評価支援システム



安定解析・対策工設計

土質強度等入力項目	入力値	標準値
過剰間隙水圧高 us (m)	3.0	3.0
単位体積重量 γ (kN/m ³)	18.0	18.0
側面粘着力 c1 (kN/m ²)	39.0	39.0
側面内部摩擦角 φ1 (度)	35.0	35.0
底面粘着力 c2 (kN/m ²)	0.0	0.0
底面内部摩擦角 φ2 (度)	25.0	25.0

標準値と異なる値を入力した際は、入力値と標準値の相対比がマーカーが表示されます。

移動体積の計算方法: [面積A×深さD] or [幅W×長さL×深さD]

幅W/深さD比: 14.9

盛土形状計測



GISに出力: 谷埋め盛土ハザードマップ



有限会社太田ジオリサーチ <http://www.ohta-geo.co.jp>

海底熱水鉱床 ～開発に向けた取組と課題～

おか もと のぶ ゆき*
岡本 信行*

【Key Word】

海洋エネルギー・鉱物資源開発計画, 海底熱水鉱床, 沖縄トラフ, 白嶺

1. はじめに

我が国周辺海域に確認されている海底熱水鉱床の開発を目指して、探査・開発に向けた取組が強化されている。

特に、平成21年(2009年)3月に経済産業省によって策定された「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」を踏まえて、資源量評価、採鉱や選鉱・製錬プロセスからなる生産技術、開発に伴う環境影響評価について、それぞれ併行して検討が行われている。

本稿では、海底熱水鉱床の開発に向けた取り組みの現状や課題について、紹介したい。

2. 海底熱水鉱床の特徴

海底熱水鉱床は、地下深部に浸透した海水がマグマ等の熱により熱せられ、地殻に含まれている有用元素を抽出しながら海底に噴出し、それが冷却される過程で、熱水中の銅、鉛、亜鉛、金、銀等の重金属が沈殿してできた多金属硫化物である。

一般に、水深1,000-3,000mの中央海嶺の海底拡大軸や西太平洋の島弧-海溝系の背弧海盆に分布し、世界で約350箇所程度発見されている(図1)。

我が国周辺海域では、島弧-海溝系に属する沖縄トラフや伊豆・小笠原海域において、(独)海洋研究開発機構(JAMSTEC)や(独)産業技術総合研究所(AIST)等の科学的調査や(独)

石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)による海洋資源調査によって、20カ所程度の海底熱水鉱床の徴候が発見されている。

これらのうち特に沖縄トラフの伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域のベヨネース海丘においては、JOGMECの資源調査を中心とした海底テレビカメラやサンプリングによって広範囲に熱水活動域が確認されている(図2)。

深海底の鉱物資源には海底熱水鉱床の他、マンガン団塊やコバルトリッチクラストが知られているが、中でも海底熱水鉱床の分布水深が浅い特徴がある。さらに日本の周辺で確認された海底熱水鉱床の分布水深が700-1,600mと世界的にも浅く、技術的・経済的にも開発に有利であると期待されている。

なお、誤解のないように補足すると、「鉱床」と

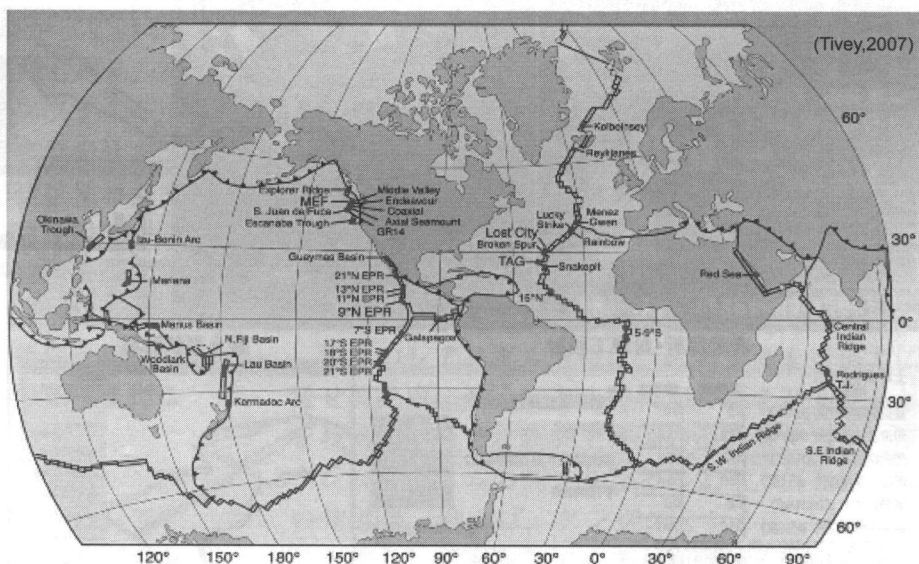


図1 世界の海底熱水活動の分布

* 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 深海底調査課長

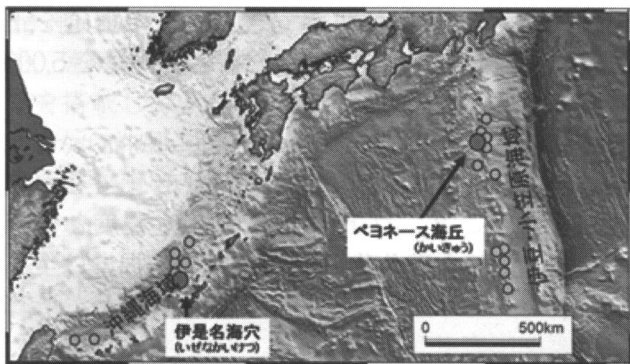


図2 我が国周辺海域の海底熱水鉱床（徴候）の分布

は鉱床学的には「資源として利用できる元素が濃集し、経済的に採掘できるもの」と定義されている。「海底熱水鉱床」は、開発事例もなく経済的に採掘可能か判断できるレベルの探査まで進展していないため、正確には鉱床という言葉は適当ではない。また、英語では「Sea-floor Massive Sulphides」などと表現し、鉱床 (Deposits) とは呼んでいないのが事実である。しかし「海底熱水鉱床」という言葉は、広く一般に浸透していることから、この表現を用いるのが通例となっているが、本来の鉱床の意味を十分に理解しておく必要がある。

3. 海底熱水鉱床の開発計画について

平成19年(2007年)7月に、海洋に関する基本的事項を定めた「海洋基本法」が発効し、翌平成20年(2008年)3月には、同法を踏まえて、海洋に関する施策を集中的かつ総合的に推進するため「海洋基本計画」が閣議決定された。特に、この計画の中で、これまで商業化されていない未開発の海底熱水鉱床について、今後10年程度を目途に商業化の実現を図ることが目標として定められた(これは10年後に、商業採掘が開始されるという意味ではなく、開発主体となる民間企業が商業化採掘に移行するかどうかを判断できる材料を提示できる時期を指すものである。)

経済産業省(METI)は、これを受け、平成21年(2009年)3月、10年間の海底熱水鉱床の商業化までの行程表(ロードマップ)「海底熱水鉱床開発計画」を策定し、全体を2期に分け、各期を前半・後半に区分し、それぞれ中間及び最終評価を実施し、効率的かつ効果的に計画を推進することとしている(図3)。

ただし、海洋基本計画は、5年毎に見直すことになっており、これまでの状況変化を踏まえ、平成24年度中に見直しが行われる予定である。また、開発計画においても平成24年度末に第1期最終評価が行われる予定であり、前述の開発計画

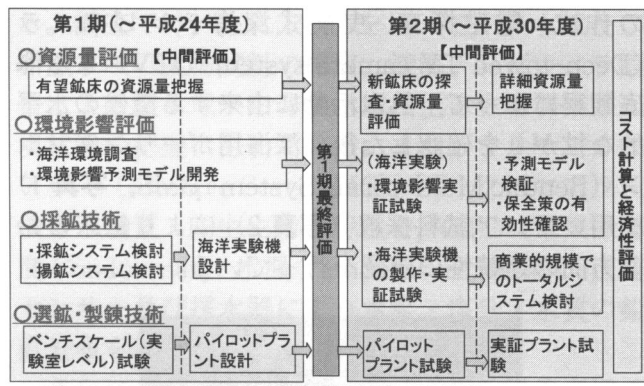


図3 海底熱水鉱床開発計画(ロードマップ)の概要

の見直し内容を踏まえて適切な対応がなされる可能性がある。

4. 実施体制

海底熱水鉱床の開発に向けての取り組みは、METIからの委託を受けたJOGMECが中心となり、AIST, JAMSTEC等の研究機関、大学、民間企業の協力の下、資源量評価、環境影響評価、採鉱技術、選鉱・製錬技術についての検討をそれぞれ併行して実施している。

また、開発計画を効率かつ効果的に推進するため、有識者からなる「海底熱水鉱床開発委員会(委員長:平朝彦JAMSTEC理事(現理事長),副委員長:浦辺徹郎東京大学教授)(事務局:JOGMEC)」を設置している。また、海底熱水鉱床の開発には、多岐にわたる分野の検討が必要であることから、委員会の下、それぞれ技術分野毎にワーキンググループ(WG)を設置し、詳細な技術検討を行うとともに、必要に応じ合同会議を行い、分野間での情報共有を図っている。

なお、取り組みにあたっては、JAMSTEC等の他機関が保有する船舶や調査機器の活用を図るとともに、AIST、大学、民間企業との共同研究や委託等により、積極的な省庁連携を図っている。

5. 海底熱水鉱床の開発に向けた取組の現状

5.1 資源量評価

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域において、海底熱水鉱床(徴候)が確認されている区域を中心に、ボーリング調査、物理探査等を実施し、鉱床の垂直方向の連続性や品位等の資源情報を取得し、資源量の把握に努めている。

具体的には、自律型無人探査機(Autonomous Underwater Vehicle: AUV)や有索無人潜水機(Remotely Operated Vehicle: ROV)を用いて数10cmから1mの解像度を有する精密海底地形図

の作成，電磁探査，曳航式深海テレビカメラ（Deep-towed TV camera system:DTV）による海底観察によって，熱水活動に由来する徴候の水平的な拡がりを確認した後，深海用ボーリングマシン（Benthic Multi-coring System:BMS，写真1）を用いてコア試料採取（写真2）により鉱床の鉛直方向の連続性の確認を行っている。



写真1 深海用ボーリングマシン（従来の機械では，海底下最大20mまでの掘削が限界）



写真2 深海用ボーリングマシンで採取された海底熱水鉱床コアの一例

これまで沖縄海域伊是名海穴において100本以上のボーリング調査等の結果（図4），マウンドはもとより，その下部にも硫化物の存在が確認（図5）された。このことから，仮にマウンドが全て硫化物であり，その下部の硫化物も同規模存在するものと仮定すると，現時点での伊是名海穴における海底熱水鉱床の概略資源量（鉱石重量）は約500万トンと試算された。また，日本周辺海域には科学的調査等により伊是名海穴やベヨネース海丘を含め20数カ所程度の海域で海底熱水鉱床の鉱徴が確認されており，また今後の調査によってさらに新たな鉱徴が発見される可能性もある。これらの海域に存在する好適な地質的特徴を勘案すると，その半数に当たる10ヶ所で伊是名海穴と同

規模の鉱床の存在が期待できる。この推定を下に，日本周辺海域全体では，総概略資源量を5,000万トン程度と推定されている。

ただし，これまで資源量の把握に用いている深海用ボーリングマシンは海底下20mまでしか掘削できないこと，コア回収率が40%程度と低調のため，正確な硫化物の分布状況の把握には至っていない。このため，現段階では，資源量の計算に必要な国際基準に準拠していないため，今後，国際基準に準じた方法で計算すべくデータの蓄積を図ることが必要である。

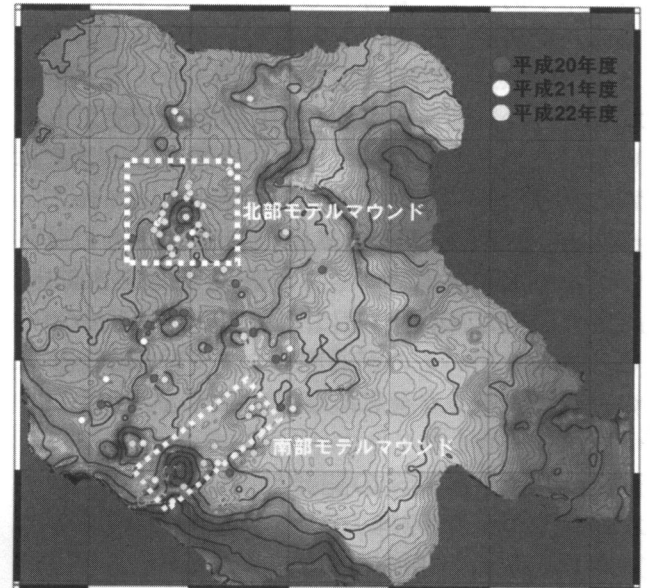


図4 伊是名海穴のボーリング掘削位置図

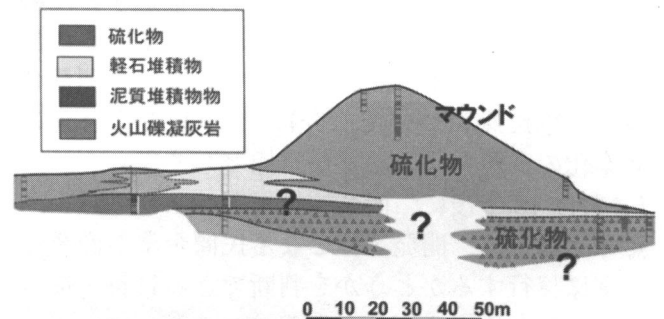


図5 伊是名海穴北部モデルマウンドの鉱床モデルの概念図

JOGMECでは，これらの課題を解決すべく，新たに2種類の掘削装置（海底下50m及び400m掘削を可能）を装備する海洋資源調査船「白嶺（はくれい）」を就航させた（写真3）。

「白嶺」は，我が国周辺海域の海洋資源の探査・開発を推進するために建造された海洋資源調査船で，平成22年（2010年）7月，三菱重工業株式会社下関造船所で起工，平成23年（2011年）3月進水後，船内工事を経て，平成24年（2012年）1月末に完成した。総トン数6,283トン，全長118.3

m, 幅 19.0 m の調査船で, 前述の大型掘削装置の他, 遠隔無人探査機 (ROV) 等の各種最新調査機器を搭載している。「白嶺」は平成 24 年 (2012 年) 2 月から沖縄海域等において掘削装置など大型調査機器を用いた海底鉱物資源の賦存量調査等に着手している (図 6)。



写真 3 海洋資源調査船「白嶺」

5.2 環境影響評価

海底熱水鉱床の開発に当たっては環境への配慮が必須である。我が国では, 環境影響評価法の成立, 戦略的環境アセスメントの導入により, 事業者に対して従来よりも実質的な環境対策が要求されるようになった。平成 20 年 (2008 年) には生物多様性基本法が成立し, 生物全般を対象とした保全・再生が国内で初めて法制化された。海底熱水鉱床の開発はこれまでに前例がないため, 環境に配慮した取組みを中長期的に推進し, 環境への影響を可能な限り回避・低減化する方法を検討する必要がある。特に, 海底熱水鉱床とその周辺の海底には, 「化学合成生態系」と呼ばれる貴重な生態系が存在している。

このため, 資源量評価調査が実施されている海域を中心に, 海流, 水質, 生息生物の状況等を把握するため, 環境ベースライン調査を実施してい

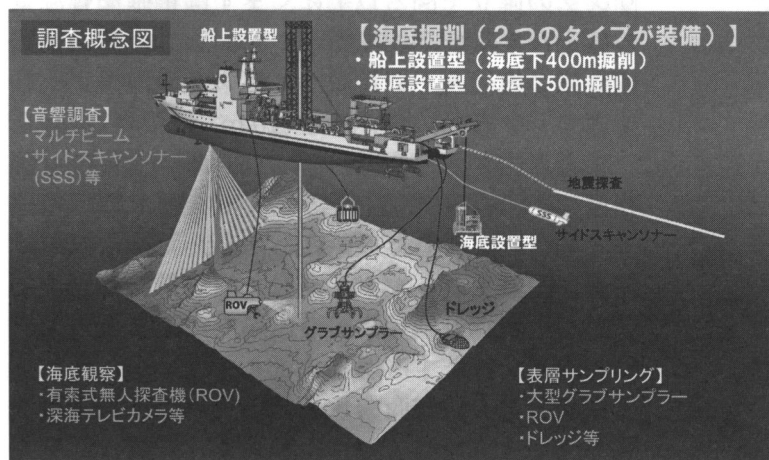


図 6 海洋資源調査船「白嶺」のイメージ

る。調査では, 主に ROV を用いて, 熱水域及び非熱水域の生物試料の採取, 深海テレビカメラ観察による熱水域から非熱水域に至る生物群集の出現状況の把握に努めている。また, マルチプルコアラー (Multiple Corer: MC), ボックスコアラーにより底質・底生生物の特性を, CTD (電気伝導度 Conductivity, 水温 Temperature, 水深 Depth) センサー及び採水器により水温・塩分・水質の鉛直分布を調査している。

さらに, 洋上調査と併行して, 調査対象海域の年間を通じた海流, 流速などの情報を収集することを目的に, 伊是名海穴及びベヨネース海丘で 2 種類の係留系 (超音波ドップラー流速計 (ADCP) 及び沈降粒子捕捉装置 (セジメントトラップ)) を設置し, それぞれ海底近傍から上層域までの鉛直的な流向・流速及び沈降粒子量等の季節変動及び経年変動を計測中である。

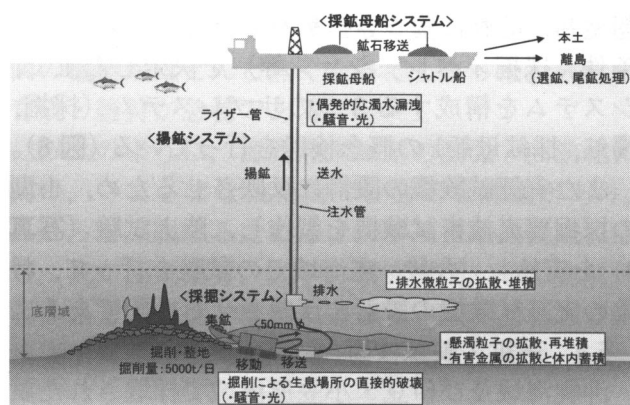


図 7 海底熱水鉱床の採掘において懸念される環境影響の概念

これまでの調査の結果, 伊是名海穴では熱水性生物が多い傾向にあり, また濁度や重金属濃度が高く, 沈降粒子の中に熱水起源粒子が多く含まれたことから, 熱水の影響が比較的広範囲に及んでいると考えられる。一方, ベヨネース海丘では, 伊是名海穴に比べて熱水活動が不活発であり, 表層プランクトンを起源とする沈降粒子が多いなどの特徴が見られた。

また, 採掘に伴う環境影響を予測するためのモデル開発に着手している。海底熱水鉱床の採掘において懸念される環境影響として考えられるものは, ①採掘による懸濁粒子の拡散・再堆積の影響, ②揚鉱排水の拡散の影響, ③熱水域及び非熱水域を含む生態系への影響である (図 7)。

この環境影響の概念に基づき, 環境ベースライン調査のデータを利用しながら, 以下の

モデルの開発を行っている。

- a) 懸濁粒子の拡散・再堆積モデル
- b) 揚鉍排水の拡散モデル
- c) 底層域・表中層域生態系影響・回復予測モデル

さらに、生物の遺伝子学的研究により、環境保全策の検討のためのデータを蓄積した。これまでの解析の結果、現時点において、伊是名海穴あるいはベヨネース海丘に固有の種はいないことが確認されている。また、各種について遺伝子の移動を調べた結果、伊是名海穴及びベヨネース海丘は遺伝子の供給源ではないことが確認されている。

5.3 採鉍技術

深海底鉍物資源の商業的採掘は世界的にも事例がなく、環境影響に配慮しつつ、経済的に採掘できる技術の開発が求められている。このため、海底熱水鉍床の徴候が確認されている沖縄海域等を対象に採鉍システムの技術検討を行っている。

現時点では、商業的採掘規模を5,000トン/日と想定し、それに基づき採鉍対象条件（海象、採掘条件、採掘オペレーション等）を決定した上で、システムを構成する3つのサブシステム（採掘、揚鉍、採鉍母船）の概念検討を行っている（図8）。

また実証試験機の設計に反映させるため、小型の採掘要素技術試験機を製作し、陸上試験（写真4）を実施し、今後、実海域での試験を行って、将来の実証試験機の設計に反映させる計画である。

5.4 選鉍・製錬技術

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域で採取された試料を用いて、それぞれ両海域の鉍石の選鉍学的特徴の把握を行った上で、実験室規模での選鉍試験や製錬試験を行っている。これまでのところ、両海域から採取された試料の鉍物特性が異なることから、それぞれの海域に適用した選鉍プロセスを提案した。一例として、沖縄海域伊是名海穴で採取された試料については、浮遊選鉍基礎試験により、銅、鉛、亜鉛を含む産物を回収し、鉄の硫化物と分離できる可能性を見出したが、金属硫化物が微粒であるため、通常のプロセスに比べて、その処理には多くの解決すべき課題があることも判明している。また、製錬試験においては、鉍石から直接製錬が可能となるフローシステムも提案している。一方、新たな製錬法の取組としてケミカルリーチング及びバイオリーチング法の適用性を検討した結果、銅、鉛、亜鉛等の基礎的浸出データ等が得られたものの、まずは発生する大量の残渣処理の問題解決が重要であることが指摘された。

5.5 実証試験候補海域の選定

将来の実証試験候補海域について、資源量評価、

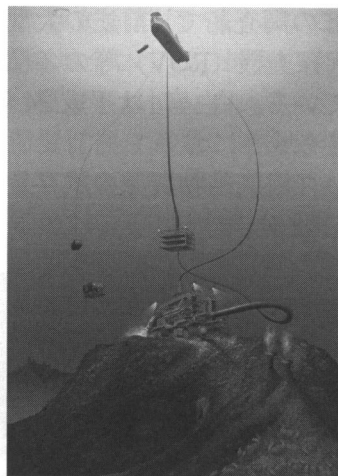


図8 商業生産時の採鉍システム概念図

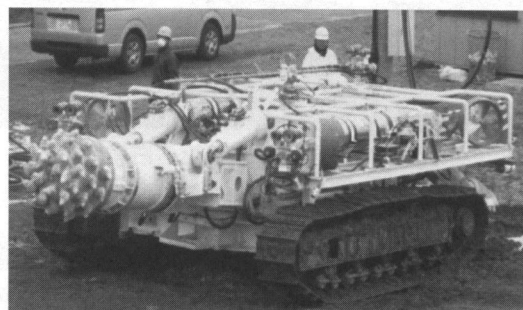


写真4 採掘要素試験機の一例

環境影響評価、採鉍技術及び選鉍・製錬技術の検討結果を踏まえつつ選定を行った。

その結果、現時点の情報から、資源量が見込まれ、生物多様性の維持が可能であり、岩盤特性、選鉍・製錬特性が比較的把握できている点を考慮すると、将来の実証試験を実施する候補海域を、沖縄海域伊是名海穴を優先順位1位とし、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘を2位とすることが妥当との結果が出されている。

6. 商業化へ向けた課題について

深海底鉍物資源の商業化において、エンジニアリングの確立を図る以上に、まずは正確な資源量の算定が最重要課題である。しかし、従来の調査船「第2白嶺丸」に搭載されていた深海用ボーリングマシンでは、掘削能力(20m)に限界がある。

また、掘削長に対するコア回収率が平均40%程度であり、80-90%程度を求める陸上鉍床の探査の場合と比較して低いことから、正確な資源量評価が困難であった。こうした課題解決のために就航した海洋資源調査船「白嶺」は、これまでの調査限界を打破する切り札として期待される。

また、世界的な商業化事例のない深海底鉍物資源を開発・生産していくためには、採掘技術の開発はもとより、開発に伴う環境影響評価を最小限

にする必要がある。また、実際に海底から揚がってきた鉱石をどこで処理するのかといった問題やパブリックアクセプタンスも大きな課題の一つである。特に前者は、かつては我が国にも鉱石を処理する選鉱施設が多数存在したが、現在では海外から中間処理鉱石（精鉱）として輸入されており、鉱石選鉱場は存在しないため、新たな選鉱場の建設が必要である。また選鉱過程において、膨大な選鉱尾鉱が発生するため、その堆積場の確保や鉱害対策も必要であろう。さらにこれまでの調査により明らかになりつつある鉱石中の不純物である高濃度の砒素含有の問題がある。現状では一定以上の砒素を含有する鉱石については日本の製錬所は受け入れが困難である。

このように、深海底鉱物資源の商業化に向けて、様々な課題が多く、着実に解決に向けた取組の継続が不可欠である。

7. おわりに

深海底鉱物資源は、1970年代にハワイ沖のマンガン団塊の開発機運の高まりの中、世界的な注目が集まり、我が国をはじめとする先進諸国が競って開発競争に乗り出した。その後、1980年代に入り、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラストへの注目が集まったものの、1990年代に入り金属価格の低位低迷時期を迎え、急速に開発機運が低下してしまった。

そうした中で、2003年以降、中国をはじめとするBRICs諸国の経済発展による金属資源の需要の高まりから、金属価格が高騰し、再び深海底鉱物資源に注目が集まってきている。中でも、カナダ・バンクーバーに本社を置くNautilus Minerals社は、パプア・ニュー・ギニアの領海内において、同国政府から鉱業権が付与され、2014年の生産開始を目指し採鉱システムの製作中である。また、中国、韓国、インド等は、マンガン団塊の開発を目指して採鉱実験が着実に行われていること、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト探査を積極的に行っていることなど、海外でも政府機関レベルでの取組強化が図られている。

さらに、近年の科学技術の進展に伴い、AUVやROVをはじめとする無人探査機に搭載された高度な探査機器が開発され、リアルタイムに高精度な地形・物理探査データ、さらには海底映像を見ながら精密に試料採取できる技術が開発されている。

一方、国際ルールとしては、国連海洋法条約に基づき公海域（深海底）の深海底鉱物資源を管理

するために設立された「国際海底機構（本部ジャマイカ）」がマンガン団塊の探査ルールを策定し、我が国を含む8つの国・連合体が海底機構から排他的な探査権利を付与されている。また、海底熱水鉱床の探査ルールが2010年5月に策定され、2011年7月に中国やロシアが探査権を取得した。現在、同機構ではコバルトリッチクラストの探査ルールの策定に向けた審議を行っている。

以上のように近年、民間レベルによる活動や新たな技術開発による高精度データの取得、国際ルールの進展など、深海底鉱物資源を取り巻く環境は大きく前進している。

こうした状況の中、我が国も国レベルで海底熱水鉱床をはじめとした深海底鉱物資源の開発に向けた取組が強化されている。しかし、現状では、海洋資源に携わる技術者、研究者が少なくなってきた。海外では国立研究所が中心となって人材確保・育成が行われているが、日本ではかつて海洋資源の研究開発に取り組んでいた研究機関の機能がほとんど無くなってしまった。人材の育成・維持が急務である。

以上のように、海底熱水鉱床の開発・商業化に向け、さまざまな技術的・社会的な課題があり、これらを克服するためには、中・長期的視点に立ち、我が国産業界、大学、研究機関、その他関係者の協力・連携・理解によるオールジャパンでの地道な取組が不可欠である。

〈参考文献〉

- 経済産業省：海洋エネルギー・鉱物資源開発計画，2009資源エネルギー庁他：海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書，2011
- 増田信行：海底鉱物資源とその開発に向けた動向，Explosion, Vol. 20, No. 3, 2010
- 岡本信行：海底鉱物資源を取り巻く国際動向と海底熱水鉱床開発に向けた取組状況，第15回「資源開発基礎講座」～深海底鉱物資源（海底熱水鉱床）の探査開発～，2011
- 岡本信行：海底熱水鉱床開発の今後の展望について，海洋生物，191号（2010年12月号），2010
- 上田英之：海底熱水鉱床開発に向けてJOGMECの取組み，資源・素材2010（福岡），2010
- 岡本信行：日本の資源庫「海底熱水鉱床」とは何か，週刊エコノミスト，2010.2.16号，2010
- Tivey M.K. : Generation of Seafloor Hydrothermal Vent Fluids and Associated Mineral Deposits, Oceanography Vol. 20, No. 1, 2007

海洋の基盤情報である海底地形データの整備 —海洋の利用開発に向けて—

【Key Word】

大陸棚、海底地形、基盤情報、水深、測深機、海上保安庁

かとう ゆきひろ
加藤 幸弘*

1. はじめに

国連海洋法条約に基づいて設置されている「大陸棚の限界に関する委員会」は、2012年4月19日（ニューヨーク現地時間）、我が国の延長大陸棚の申請に対し、一部の海域については先送りとしたものの、6つの海域について勧告を行った。勧告では、4つの海域において併せて約31万平方キロメートルを延長大陸棚として認定している。今後、我が国は、新たに認められた大陸棚において、海底およびその下の鉱物その他の非生物資源や、定着性の生物を探索し、開発する権利を有したことになる。

日本は四方を海に囲まれ、古来から海底資源、水産、海運等の海の恩恵を受けて、経済活動を営んできている。今回の委員会の勧告は、日本の管轄する海域が拡張されたということだけではなく、我が国の全体の経済的な基盤が広がったことも意味し、今後、新たに付け加わった海域を含めた海洋の新たな利用、開発の取り組みが求められる状況となった。

この小文では、このような海洋、特に海底の利用のために不可欠な基盤情報である海底地形データ、特に深海を対象とした測量について、大陸棚調査例とし、その特徴、整備に向けての取り組みについて紹介する。

2. 海洋の基盤情報としての海底地形データ

日本の排他的経済水域および大陸棚は、国土面積（48万平方キロメートル）に比べて広大（排他的経済水域の面積は405万平方キロメートル）であり、地理的な分布を見ると、日本列島の南方に広がっている。例えば、南方に広がる排他的経済水域を有している領土のうち、最南端の沖ノ島島ま

では、東京から約1,730 km、南鳥島までは約1,870 kmの距離がある。このような広大な排他的経済水域は、また水深が1,000 mを超える深海が大半を占めている。特に、太平洋プレートが西方に沈み込んでいる伊豆・小笠原海溝においては、水深が9,000 mを超える世界の中でも有数な深海底が分布する。このように我が国の排他的経済水域は、北海道、本州、四国、九州、沖縄から遠く離れた離島周辺にも分布し、また、深海底が大部分を占めていることが特徴である。

深海や沿岸海域において海洋を利用する際、例えば海底に漁礁等、構造物を展開する、あるいは、海底ケーブルを敷設するのに、基礎的に情報として、海底の地形データが欠かせない。例えば、海底に機器を設置するに当たって、機器の仕様等を決まるため海底における水圧を算出することや、ケーブル等の障害となる急峻な崖や火山を避けるために、水深値、地形データが不可欠である。

しかしながら、日本の排他的経済水域は、水深が深く、陸から離れた海域が大部分である。このような条件は、海底地形を計測する上で、測量船の位置を正確に決めることが困難となる、あるいは水深が深く測深精度を高めるのが困難である等、技術に大きな障害となる。そのため、日本の排他的経済水域については、今世紀になっても十分な精度を持つ水深が整備されていない。日本の管轄海域が広がり、海洋のフロンティアを利用開発する機運が高まっている今、海底地形データの整備こそ最初に取り組むべき課題であろう。

3. 海底地形データの計測手法—マルチビーム音響測深機の進歩—

海底地形調査は、現在マルチビーム音響測深機が主流となっている。我が国においても、深海において測深を行うほとんどすべての測量船、海洋

* 海上保安庁海洋情報部 海洋調査課長

調査船に装備されており、深海の地形調査はマルチビーム音響測深機で計測されている。マルチビーム音響測深機は船底に取り付けられ送波部から、海底に向かって扇状に広がる複数の音波ビームが発振し、その音波が海中を伝わり、そして海底面で反射し、海面まで戻ってきた音波を、同じく船底に取り付けられた受信部で受信する。計測しているのは、船底から発振した音波が、海底面から反射して戻ってくるまでの時間であり、その時間を海水中の音速度で補正し、水深の値を得ている。マルチビーム測深機は、機種によってその仕様は異なるが、海上保安庁の大型測量船に装備されている機器は、一度の計測で水深の3倍を超える広い範囲の水深を測定することが可能である。

このマルチビーム音響測深機は、1983年に日本で初めて測量船「拓洋」に導入された。それ以前は船から単一の音波を発振し、水深を計測するシングルビームの測深機が使われていた。さらに以前の明治、大正時代には、ロープの先に取り付けたおもりを船から垂らす方法で水深の測定が行われてきた。シングルビーム測深機は、船の航跡に沿った水深データしか計測できず、また、それ以前のロープを使った計測方法では、船が停船する時しか計測できなかった。そのため、これらの測深手法では、海底に計測されていない領域が多く残され、海底地形は少数の計測データに基づいて、人間が主観的に推測した結果として表現されていた。これに対し、マルチビーム測深機は、海底面をくまなく計測することができ、初めて海底地形そのものを計測することが可能となったという意味で画期的な調査機器となっている（図1）。

時代とともに新たな技術が開発され、海底地形調査の効率と解像度は驚くほど良くなっている。しかし、現在においても日本周辺の排他的経済水域や領海の中に、シングルビーム測深機やロープを使った計測による水深値しかない領域も広く残されているのが現状である。

4. 海洋地形データの整備への取り組み—大陸棚調査の事例—

海上保安庁海洋情報部は、組織的に海底地形データの収集を明治以来行ってきた。測量の成果は海図として刊行されている他、海上保安庁は、海洋の基盤情報の整備のために、「沿岸の海の基本図」「大陸棚の海の基本図」作成のための測量を行ってきた。最近、成果がとりまとまった調査としては冒頭でも紹介した大陸棚申請のベースとなった大陸棚調査がある。大陸棚調査は、大陸棚の申請のために必要な海底地形データを収集することを第一の目的としているが、対象となる海域は、今までシングルビーム測深機のそれも量が極めて少ない海底地形データしか存在しない領域であった。そのため、大陸棚調査を行うに当たっては、対象となる海域の基盤情報を整備するというのも目的としていた。対象となる日本南方の海域は広大であり、調査は結局26年もの長期間が必要となった。今後も必要とされる外洋における基盤情報整備のための調査の先行事例として、大陸棚調査について、そもそもの目的である海洋法条約で規定された大陸棚の定義とその調査の成果について紹介する。

①国連海洋法条約に規定される大陸棚

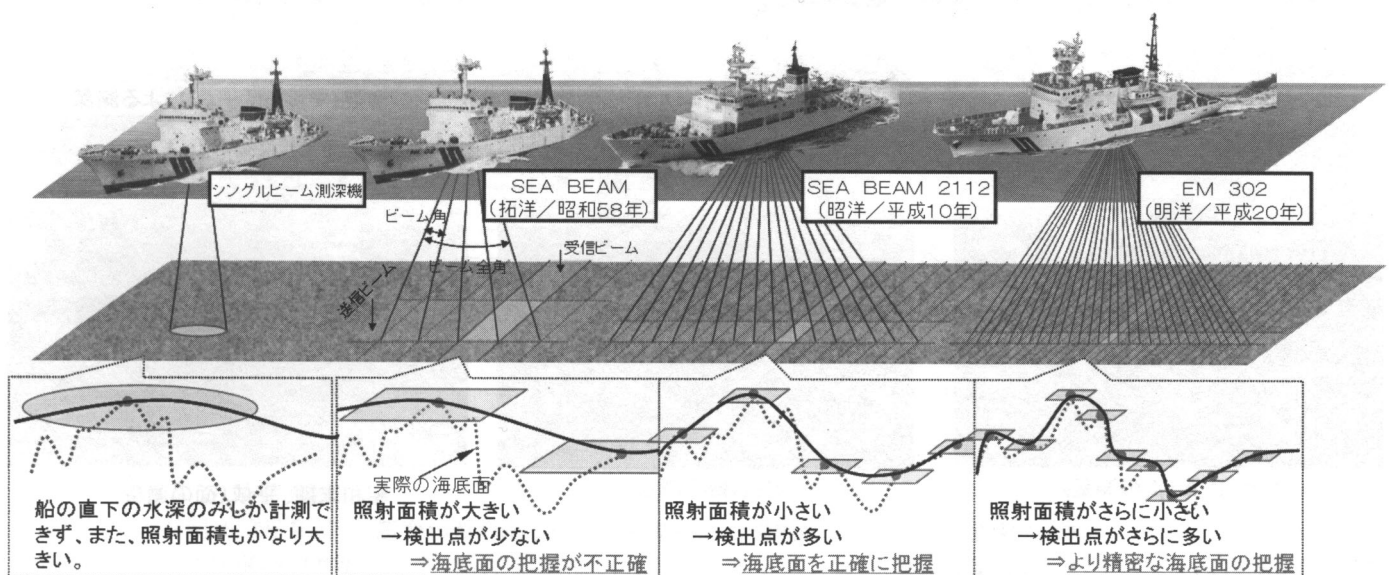


図1 海底地形データを計測するための測深手法の変遷

国連海洋法条約（1982年採択、1994年発効）は、特段境界が存在しない海洋を、主に領海基線からの位置関係に基づき、沿岸国の権利が異なるいくつかの領域を規定している。大陸棚についても、条約第76条で規定されている領域の一つである。ただしここで言う大陸棚は、地形学で定義する大陸棚ではなく、その範囲も大きく異なることに留意する必要がある。第76条では、大陸棚は「当該沿岸国の領海を超える海面下の区域の海底及びその下であってその領土の自然延長をたどって大陸棚縁辺部の外縁に至るまでのもの又は、大陸棚縁辺部の外縁が領海の幅を測定するための基線から200海里の距離まで延びていない場合には、当該沿岸国の領海を超える海面下の区域の海底及びその下であって当該基線から200海里の距離までのものをいう。」と規定し、また、第77条で、沿岸国が、「海底及びその下の天然資源（鉱物その他の非生物資源並びに定着性の種族に属する生物）の探査、開発を行う主権的権利」を有する領域としている。沿岸国が第76条の規定に従い、200海里を越えて大陸棚の範囲を獲得するには、条約によって設置された「大陸棚の限界に関する委員会」に対して、200海里を越えて大陸棚が延びていることを示す科学的データを添えて申請を行い、審査を受け、そして同委員会の勧告を得る必要がある。

大陸棚は、上記のプロセスを経て初めて200海里を超える設定が可能となる点が、原則として領海基線からの位置関係によって、範囲が決定する領海や排他的経済水域とは異なる。したがって、このプロセスを実行するためには、条約、「大陸棚の限界に関する委員会の科学的・技術的ガイドライン」の規定に基づき、海底の地形・地質に関する

科学的情報を収集して大陸棚限界委員会に提出し、当該地形・地質が大陸棚になるための条件を満たしているということを証明することが必要となる。その中でも、特に海底地形データは、大陸棚の範囲を説明する上で最も重要なデータであり、その質や量によって結果が左右される。

なお、「大陸棚の限界に関する委員会」は海洋法条約の締約国の選挙で選ばれた海洋の専門家である21名の委員で構成されている。現在、日本から浦辺徹郎東京大学大学院理学系研究科教授が委員となっている。

②大陸棚調査における海底地形調査

海上保安庁は、大陸棚の申請を見据えて、国連海洋法条約が採択された年の翌年である1983年から、調査を開始している。調査開始に合わせて、日本で初めてマルチビーム測深器を搭載した大型測量船「拓洋」が就役した（図2）。「拓洋」は、外洋における長期間の調査を想定した、2,400トンの大型測量船であり、マルチビーム測深機他、海上重力計、マルチチャンネル反射法地震波探査装置等、当時の最新鋭の調査機器を装備した。

「拓洋」のマルチビーム測深機の威力は大きく、今までは数少ない水深データから推察していた深海底には、蛇行する海底谷や、巨大な火山である海山が多数分布していることが明らかとなった。しかしながら、調査を開始した当初は、GPSがなかったために船の測位精度が悪く、また、マルチビーム測深機自体も現在の機種と比べると、性能が劣っており、一度に計測できる測深幅が水深約0.8倍しかなかった。その結果、調査スケジュールの関係もあり、海底地形調査は測線の近傍でしか、面的な海底地形データを取得することはでき

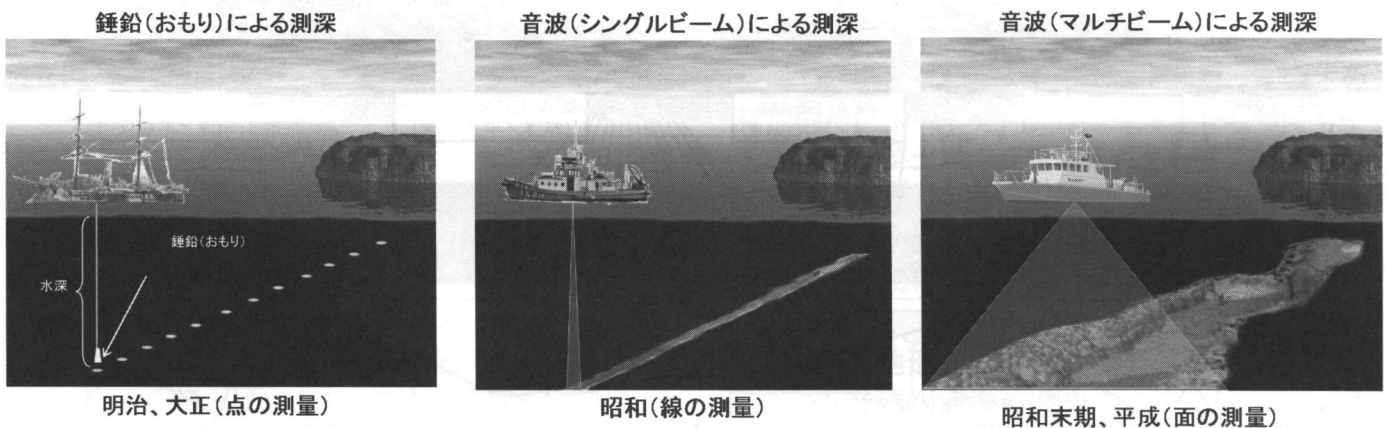


図2 海上保安庁の測量船に搭載されている測深機の変遷

昭和58年に初めてマルチビーム測深機を導入した。その後も、より空間分解能の高い、またより広い範囲の海底を測定可能なマルチビーム測深機を順次導入している。

なかった(図3-a)。これは、海底を面的に計測しデータで地形を把握し、データの無い測線間の地形を推測するという主観的な作業の関与を排除するという、マルチビーム測深機の調査思想を実現できず、未だシングルビーム測深機と同様の地形測量に止まっていたことを意味している。

1998年には、大陸棚調査を加速させるために、新たに3,000トンの大型測量船「昭洋」が就役した。「昭洋」には、「拓洋」と同様、マルチビーム測深機をはじめとする調査機器が装備されている。「昭洋」が就役した時点では、技術も進歩に伴い、マルチビーム測深機の性能も大幅に向上し、一度の水深の約3倍を超える幅の海底を測量することが可能となった。その結果、本来のマルチビーム測深機の調査思想である海底面を100パーセントカバーして測量することが実現できるようになった(図3-b)。

その後、「拓洋」と「昭洋」の2船が中心となって、大陸棚の申請を見据えつつ、可能な限り海底面を100パーセントカバーして測量するように調査計画を立て、2008年まで海底地形調査を行った。その結果、調査開始時点では大変データ密度が低く、海底地形の詳細が全くわかっていなかった日本の南方海域において、海底地形の詳細が明らかとなった(図4)。また、大陸棚の申請に備え、品質管理も徹底して行った結果、今までに例の無

い、統一された品質の海底地形データが整備することができた。

このように整備された海底地形データを解析することによって、日本の大陸棚申請が準備され、結果として冒頭に紹介した勧告を得ることができた。

5. 今後の基盤データ整備のための海底地形調査

大陸棚調査は26年もの長期間を要したため、途中調査機器の技術の進歩があり、また、測量データの習得の考えか方の変化があった。その結果、初期のデータと後期のデータとの精度、密度について差異大きくなってしまった。初期のデータの中には、その後のデータに置き換えられたものも存在する。逆の見方をすれば、調査期間が長期にわたったことから、調査データ全体を評価し、精度や密度が不十分でない判断した海域についてはデータの取り直しを行えるだけの時間があつた。

今後基盤情報である海底地形調査を進めるに当たって必要とされるのは、調査を開始する段階で、最終的な成果を決めて、データ密度、精度などの調査仕様の設計を行うことが極めて重要である。このような考え方に基づいて、調査を進めていけば、海洋の利用開発のための基盤情報は効率的に

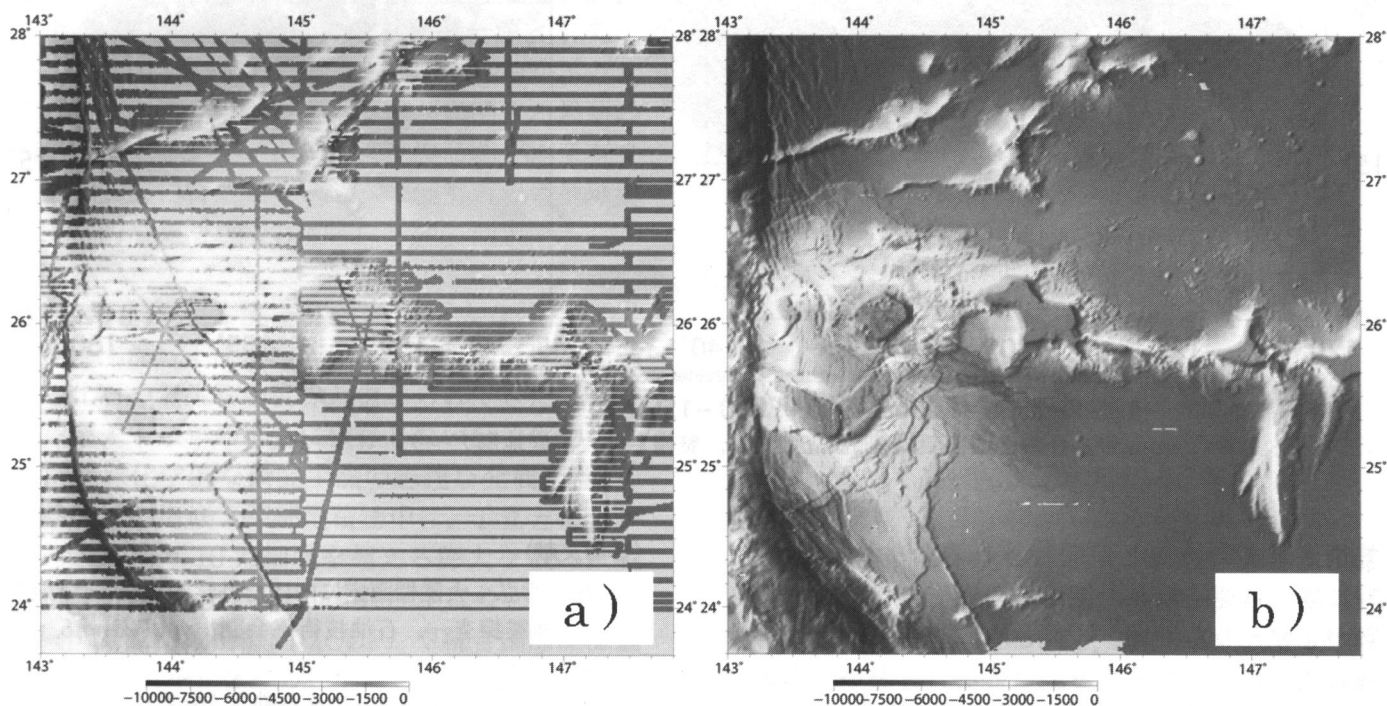


図3 大陸棚調査における海底地形データの例、小笠原諸島東方に位置する小笠原海台の海底地形図

大陸棚調査の初期(1997年時点のデータ)は、a)で示されるように測線(東西方向)と測線の間、測量を行っていない海底が残されていた。一方、大陸棚調査の後期(2008年時点のデータ)は、海底をほぼ100パーセントカバーして測量を実施している。

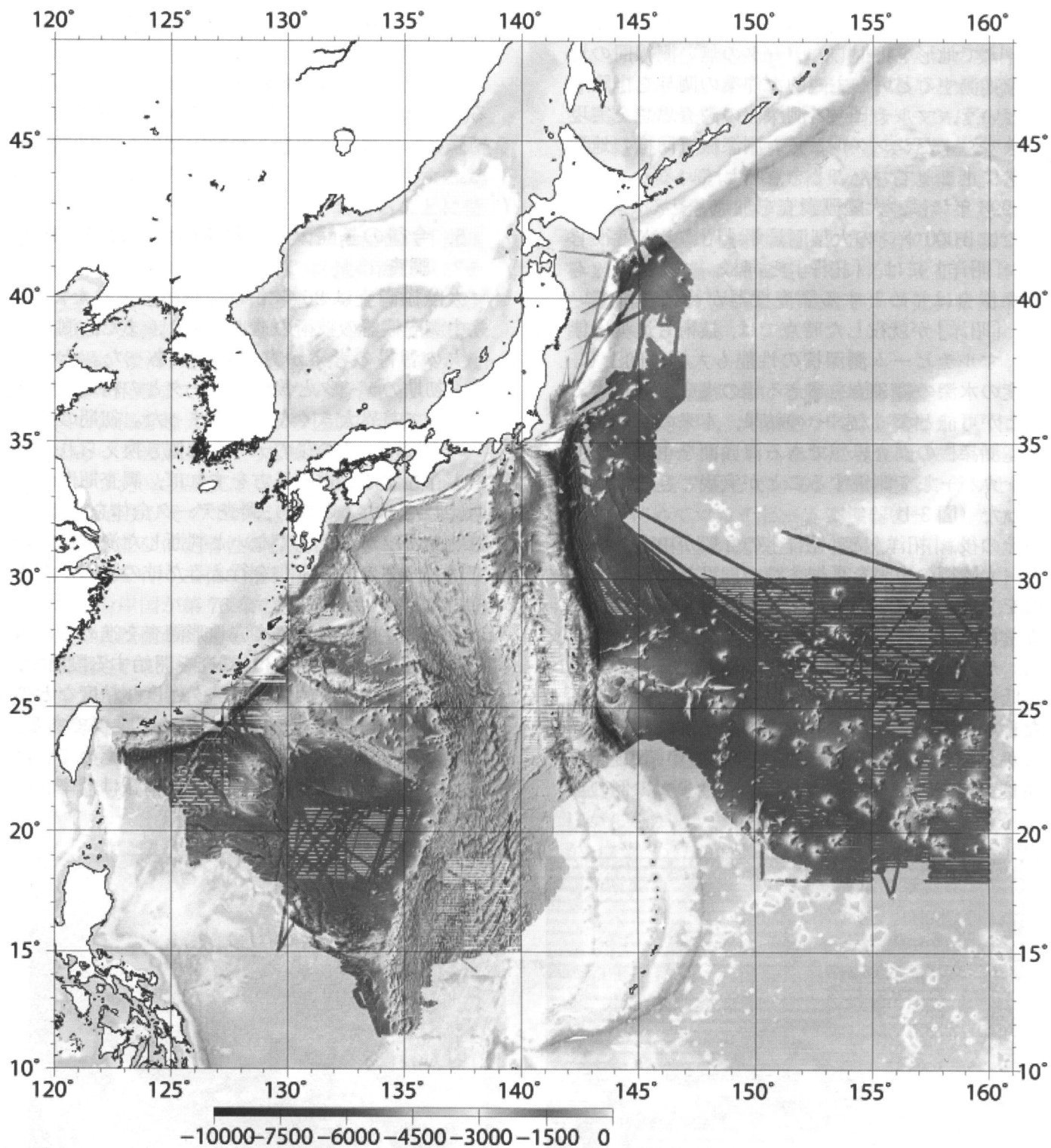


図4 大陸棚調査の結果，整備された海底地形データ

整備されていくことが期待される。なお，海域，特に陸から遠く離れた深海域の調査には膨大な経費が必要となるため，今後とも調査が不十分な海域も残されることとなる。この場合においても近代的な調査が終了するまで情報の整備を待つのではなく，既存の海底地形データの品質を評価した上で利用していくことも考えなければならない。

〈参考文献〉

- 1) 加藤幸弘：大陸棚画定に向けた科学的調査—大規模2D地震探査—，石油技術協会誌，vol. 72, no. 5, pp. 425-428, 2007.
- 2) 楠 勝浩：大陸棚調査を巡る動き《後編》，季刊水路，vol. 156, pp 12-19.

海底下生命圏と炭化水素資源

—地球内部の持続的物質循環システムの理解と利活用—

【Key Word】

科学海洋掘削, 地下生命圏, 微生物, 炭素循環, メタン菌, 二酸化炭素地中隔離

いな がき ふみ お*
稲 垣 史 生*

1. はじめに

日本近海をはじめとする世界各地の大陸沿岸の海底堆積物には、メタンハイドレートなどの天然ガスや石油・石炭などの炭化水素系エネルギー物質が存在する。海底下深部に埋没した陸源もしくは浅海性の高濃度有機物の分解・熟成・濃縮過程において、テクトニクス的な要因や地熱や圧搾などの物理化学的要因の他に、海底下深部に生息する微生物の代謝活動が関与している可能性がある。

一方、これまでの地球深部探査船「ちきゅう」などを用いた科学海洋掘削による研究成果から、海底下には地球の全生命体炭素の割近くに相当する膨大な数の微生物バイオマスが存在し、埋没した有機物を主要な代謝エネルギー源として生存・生育する海底下微生物生態系の存在が示されている。本稿では、海底下生命圏に関する最新の知見を交えながら、地球および生命圏が本来有する持続的な物質循環システムの理解とその地球生命工学的な利活用の可能性について概説する。

2. 海底下生命圏：微生物の巨大な生息空間

従来、海底下深部環境は地球環境の歴史を記録する化石や無生物の世界と信じられてきた。しかし、過去十余年の培養に依存しない分子生物学や生物地球化学的な研究手法の急速な発展に伴い、大陸沿岸の海底下深部堆積物中に、1立方センチメートル当り10万細胞を超える膨大な数の微生物群集が存在することが明らかになった¹⁾。現在、国際深海掘削計画（ODP）や統合国際深海掘削計画（IODP）などの科学海洋掘削により、主に

大陸沿岸域から得られた堆積物コア試料の顕微鏡観察から、海底面から深度1,626 m、現世から約1億1千万年前までの地層中に微生物の存在が確認されている²⁾。現在、これらの微生物細胞の計数データなどから、海底下には地球表層の全生命体炭素の約10%を占める、巨大な微生物バイオマス（ $\sim 3.5 \times 10^{30}$ 細胞）が存在すると考えられている（図1）^{3,4)}。海底下生命圏の発見と理解は、1960年代から始まった約半世紀におよぶ科学海洋掘削の歴史において、巨大隕石の衝突による生命の大量絶滅や古環境変動の解明、プレートテクトニクス理論の実証や海洋地殻の構造と進化の解明などに匹敵する、マイルストーン的な科学成果の一つであると言えよう。

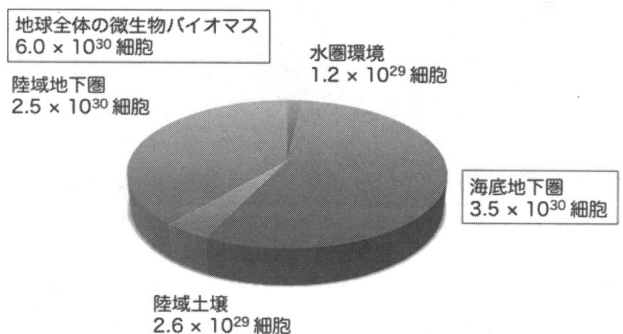


図1 地球上の全微生物細胞に対する海底下堆積物中の微生物量の占める割合（Whitman *et al.*, 1998 を改変）。

当初、掘削された堆積物コア試料に含まれる微生物細胞の数は、アクリジンオレンジという蛍光色素で微生物細胞を染色し、船上で肉眼の蛍光顕微鏡観察によって評価されていた。本手法は、観察者による細胞と鉱物などの非生物粒子の識別や検体試料の調整方法に差異があることや、揺れる船上で高倍率の顕微鏡観察が困難であることから、信憑性や再現性・客観性に問題があった。し

* (独)海洋研究開発機構 海底資源研究プロジェクト
地球生命工学研究グループ・高知コア研究所地下生命圏研究グループ グループリーダー・上席研究員

かしながら、現在、密度勾配遠心と超音波処理を用いた堆積物コア試料からの効率的な細胞剥離法や⁵⁾、二重螺旋構造を持つ DNA にアクリジンオレンジよりも特異的に吸着する蛍光試薬 SYBR Green I を用いて、染色された DNA に由来する蛍光波長のみを画像解析処理によって抽出する、肉眼観察に依存しない客観的な手法が開発されたことにより⁶⁾、海底下の膨大な微生物バイオマスの存在が再確認されている (図 2)。科学海洋掘削における生命検出・計数技術の進歩は、大陸沿岸の肥沃な海底下生命圏の実証評価のみならず、外洋の還流域における超低栄養環境の海底下空間⁷⁾や沖縄トラフの背弧海盆系熱水環境⁸⁾などの低バイオマス環境において、海底下生命圏の空間的な規模や限界点、それを規定する環境要因など理解する上で、極めて有効かつ不可欠な手法となっている。

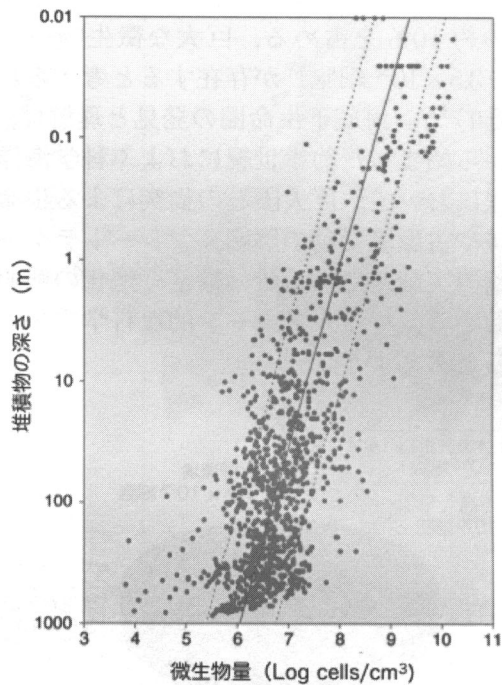


図 2 蛍光色素アクリジンオレンジで染色された細胞の蛍光顕微鏡を用いた直接計数のプロファイル (Parkes *et al.*, 1994 を改変)。

3. 海底下微生物群集の多様性

海底下に生息する微生物群集の多様性は、一般的に、掘削されたコア試料から直接抽出された環境ゲノム DNA を鋳型に用いて、全生物にとって必須なタンパク質合成の場であるリボソームを構成する RNA (リボソーム RNA) をコードする遺伝子の一部を PCR 法によって増幅し、その遺伝子配列を既存のデータベースと照合する手法が用いられている。筆者らの研究グループでは、2002 年に行われた国際深海掘削計画における初

めての海底下生命圏を主目的とした掘削調査航海である ODP Leg 201 航海で得られた、ペルー沖や東太平洋赤道域の堆積物コア試料などから、上記手法によって微生物群集の多様性解析を行い、海底下の堆積物に存在する微生物の多くが、バクテリアもしくはアーキア (古細菌) に属し、これまでに培養されたことのない多様な新規微生物系統であることを明らかにした (図 3)⁹⁾。

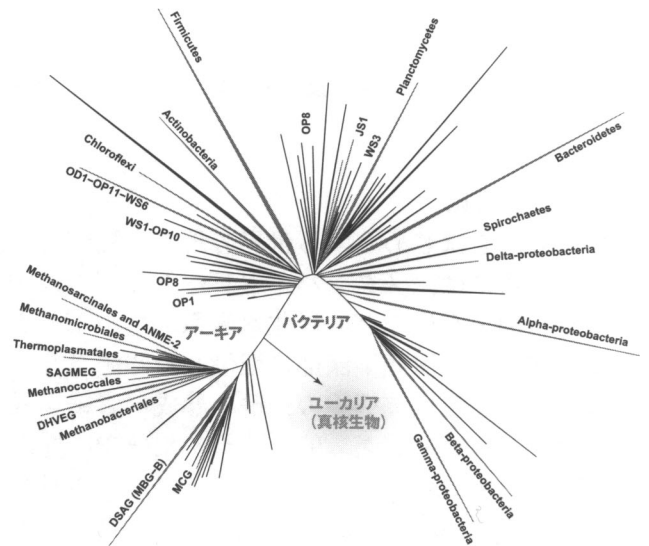


図 3 地球上の生命を構成する三つの系統ドメインであるバクテリア・アーキア・ユーカリアを示すリボソーム RNA 遺伝子配列に基づく系統樹。科学海洋掘削により採取されたコア試料から、生理・生化学的特徴が明らかになっている既知の微生物系統とは系統学的に離れた、性状未知の多様なバクテリア・アーキアが海底下に生息していることが明らかとなった (Inagaki *et al.*, 2006a を改変)。

一方、堆積物コア試料から環境ゲノム DNA を抽出する際、アーキアなどの強固な細胞壁構造をもつ微生物細胞や孢子などの休眠細胞状態にある細胞は、通常の酵素的な処理や市販の DNA 抽出キットでは溶菌されないものが多いため、得られたデータには大きなバイアスがかかっている可能性があった。さらに、既存の遺伝子配列データベースを基に作られた PCR 法による遺伝子増幅用のプライマーを用いた場合、その配列に一致しない遺伝子を持つ未知系統の微生物が海底下生命圏から検出されていない可能性があった¹⁰⁾。今後の海底下生命圏研究は、より化学的な細胞壁破碎処理などにより、溶菌率を高めたバイアスの少ない環境ゲノム DNA 抽出法⁴⁾を用いて、デジタル PCR 法とマイクロ流体デバイスを組み合わせた新しい遺伝子定量法¹¹⁾や次世代高速シーケンサーを用いた大量遺伝子解読¹²⁾などの分子生物学的分析結果と、生細胞のバイオマーカーである完全体

極性脂質の定量・定性解析や同位体比組成⁴⁾などの有機地球化学・生物地球化学の分析結果を、多面的に組み合わせて環境を解釈・評価する必要がある。これまでに、多面的アプローチにより、定量的な遺伝子解析が困難であったアーキアが大量に大陸沿岸の海底堆積物内に生息していることが示唆されている⁴⁾。海底下深部のように、生体内で代謝可能なエネルギー基質（呼吸のための酸化還元物質）の供給速度が極めて低い、極限的な環境に生息する微生物が、地球生命史においてどのように環境に適応・進化したのか、もしくはどのような地質学的・水理学的環境条件であれば生命は生存できるのかなど、生命科学に関する多くの基礎的で重要な疑問が、将来の科学海洋掘削を通じた学際研究によって明らかにされるであろう。

4. 下北八戸沖石炭層生命圏調査：海底下深部微生物生態系の機能と炭素循環の解明

2006年、独立行政法人海洋研究開発機構が有する地球深部探査船「ちきゅう」は、2007年以降の統合国際深海掘削計画（IODP）における本格的な運用を前に、下北半島八戸東方沖約80kmの地点にて慣熟試験航海（CK06-06）を実施した。本慣熟試験航海では、海底下約365mの堆積物コア試料をノンライザー掘削で連続的に採取すると共に、海底下約650mまでのライザー掘削試験を行った。掘削された堆積物コア試料は、極めて速い堆積速度で形成された更新世を中心とする珪藻質粘土であり、火山灰層や砂・シルト層に孔隙充填型のメタンハイドレートを含む、有機物に富んだ特性を有していた。上述の画像分析による最新の微生物細胞検出・計数法を用いて、掘削された365mまでの堆積物コア試料に含まれる微生物量を詳細に測定したところ、南海トラフなどの他の大陸沿岸域の海底堆積物と比べて10倍から100倍以上の、肥沃な地下生命圏の存在が明らかになった⁶⁾。また、堆積物コア試料中に多くの菌体外酵素活性が確認された¹³⁾。さらに、海底下212mの約46万年前に形成された堆積物コア試料に含まれる微生物細胞を、安定炭素・窒素同位体（¹³C・¹⁵N）で標識した栄養基質と共に一定期間培養し、全体の細胞数に対する栄養基質を同化した細胞の割合とその同化活性速度を、超高空間分解能二次イオン質量分析器（NanoSIMS）により測定したところ、約80%以上の微生物細胞が基質の同化活性を示す“生理学的に生きている”細胞であり、一つの細胞が一日当りに同化する炭素・窒素の基質の量が、推定1京分の1グラム以下（大

腸菌などの10万分の1以下）と極めて低速であることが明らかとなった（図4）¹⁴⁾。

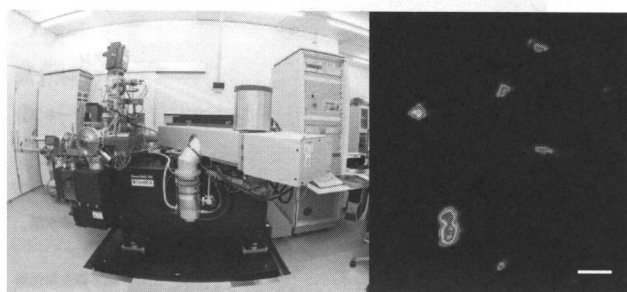


図4 超高分解能二次イオン質量分析器 NanoSIMS 50L（写真左）。最先端研究基盤事業により、海洋研究開発機構高知コア研究所のクリーンルーム内に整備された。（写真右）¹³Cで標識されたグルコースを細胞に取り込んだ海底下微生物細胞の NanoSIMS イメージ。下北八戸沖から採取された海底下約219m 約46万年前の堆積物試料から検出された（Morono *et al.*, 2011 を改変）。スケール：1マイクロメートル。

下北半島八戸東方沖の肥沃な海底下生命圏を支える一つの地質学的な要因として、海底下深部における未成熟かつ水素指数の高い石炭層（褐炭・瀝青炭など）の広域分布が考えられる。1999年に経済産業省および石油公団により実施された基礎試錐「三陸沖」では、当該海域の海底下に、埋没した白亜系～古第三系の前弧堆積盆に挟まれる複数枚の石炭層が確認されており、浅部～炭層にかけて胚胎する天然ガスの根源岩として機能していることが示唆されている¹⁵⁾。一般に、石炭層に含まれる陸源（または浅海性）有機物の分解および熟成プロセスを促進する主要な要因は、現場の温度と圧力と考えられている。一方、海底下浅部海成層～深部陸源夾炭層にどのような微生物生態系が分布しているか、またどの微生物種がどの程度の速度で有機物の分解・熟成プロセスおよびその最終分解産物である天然ガス（メタン）の生産に寄与しているか、については、その多くが推論の域を出ない。

上述のように、海底下の炭化水素資源環境の学術的重要性を鑑み、独立行政法人海洋研究開発機構では、平成22～24年度の文部科学省および日本学術振興会による最先端研究基盤事業「海底下実環境ラボの整備による地球科学-生命科学融合拠点の強化（「ちきゅう」を活用）」の一環として、2012年7月6日～9月15日にかけて、「ちきゅう」を用いたIODP第337次航海による下北八戸沖石炭層生命圏探査を実施する予定である¹⁶⁾。本IODP航海では、2006年の「ちきゅう」の慣熟試

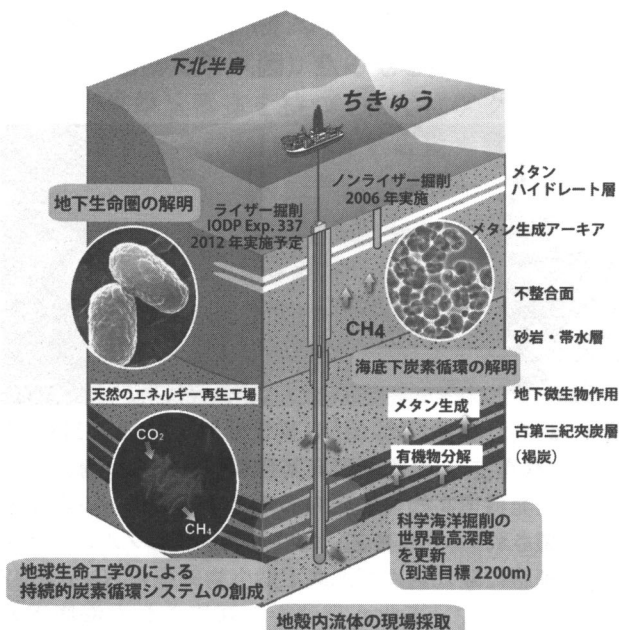


図5 統合国際深海掘削計画 (IODP) 第337次航海下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査で目指す科学目標の模式図。

験航海で設置された、海底下650 mまでのライザー孔 C9001 Hole D を用いて、さらに深部の始新統陸源堆積物～漸新統-新第三系海洋性堆積物の不整合面(海底下約1,650 m)や、海底下2,000 m付近の始新統夾炭層のコア試料が採取される(図5)。学術的に極めて重要であるにも関わらず、通常の Rotary Core Barrel (RCB) では良質(マッシュ)なコア試料の連続採取が困難であると予想される不整合面や夾炭層の掘削には、コア長が27 mのクロージャースystem付き大口径インダストリーコア(Hydro-Lift Coring System, Baker Hughes Coring Services, Inc.)を使用する予定である。また、ライザー掘削に伴うマッドガスの化学分析のために、循環泥水のガンボシェーカーの上流ラインにデガッサーを設置し、可能な限り空気の混入が少ないマッドガスを専用のコンテナラボ内に引き入れ、ガスクロマトグラフ・四重極型質量分析計・メタン炭素同位体センサー・レアガス検出器・ラドンセンサーなどのオンラインモニタリング分析を行いながら、オフライン分析用のマッドガス試料のサンプリングが可能な、マッドガス分析ラボを新規に構築した。さらに、掘削後のライザー孔を用いた各種孔内計測の一環として、Schlumberger社のNMRおよびQuick Silverプローブを用いた、地層内流体の現場環境モニタリングと流体試料の保圧ボトル採取が予定されている。通常、海底下1,000 mを超える大深度のコア試料は、化学成分分析に必要な十分量の間隙水を得ることは困難である。そのため、Quick

Silverプローブを用いた地層内流体採取(1トリップで内側をガラスコーティングされた約500 ccのボトルを6本採取可能)が果たす科学的役割は大きい。例えば、夾炭層の砂岩に含まれる間隙水やガスの化学成分分析や、地下帯水層水圏環境に生息する微生物の単一細胞レベルの分析、炭層に由来する微生物にとっての(水素や有機酸などの)栄養成分の分析、ヨウ素同位体分析による深部物質移動プロセスの研究¹⁷⁾などは、Quick Silverプローブを用いたオペレーションによって初めて可能となるだろう。

また、ライザー掘削を用いたIODP第337次航海下北八戸沖石炭層生命圏探査は、その学術的重要性・新規性以外にも、現在の科学海洋掘削における世界最高掘削深度(米国ジョイデスレブリューン号による海底下2,111 m)や世界最深度の海底下生命の検出記録(海底下1,626 m)²⁾など、約半世紀におよぶ掘削地球科学で培われていたいくつかの世界記録を更新する「ちきゅう」の挑戦でもある。

5. 海底下メタン菌の重要性：地球生態系におけるキープレーヤーが持つ莫大な代謝活性ポテンシャル

地球上のほぼ全ての食物連鎖において、メタン生成菌は有機物の最終分解者として、食物連鎖を担う生態系の底辺を支えるキープレーヤーである。実際に、メタン生成菌は、人間や他の動物の腸内環境や陸域土壌・河川・沼地・活性汚泥など、地球表層の様々な環境に広範に生息し、有機物分解の末端プロセスに重要な役割を果たしている。大陸沿岸の海底下生命圏においても、メタン生成菌の生態学的な重要性は変わらない。しかし、地球表層の生命圏に比べて、栄養源となる海水中の有機物の沈降速度や深部地層内への物質供給速度が極めて遅いため、その有機物分解プロセスは地質学的時間スケールを要している。例えば、ヒトの腸内環境の活発な生態系と比べると、その有機物分解に関わる基本的な機能は似ていても、時間スケールは別次元の世界と言えよう。

従来、海底下の嫌気的な堆積物に生息する海底下微生物の多くは、試験管を用いた一般的な嫌気バッチ培養では分離が困難であると言われてきた。しかしながら、排水処理分野などで応用されているダウンハンギングスポンジ(DHS)型のバイリアクターを用いて、2006年の「ちきゅう」の慣熟試験航海で下北八戸沖の海底から得られた堆積物コア試料をスポンジに吸着させ、嫌気海水

ベースの培地を上流から低速で添加する、フロースルー型の嫌気連続培養を試みたところ、リアクターの稼働開始から179日目に微生物起源のメタンの生成が認められ、631日～800日を超える熟成期間を経て、メタン生成菌をはじめとする多様な海底下微生物群集を集積・活性化させることに成功した(図6)¹⁸⁾。今後、同様のリアクター技術によって活性化された海底下微生物群集は、未培養微生物の純粋分離・培養研究の接種源として、また微生物代謝産物や天然ガス生成プロセスの生化学的・地球化学的研究のためのアプローチとして、その重要性が増すことが期待される。

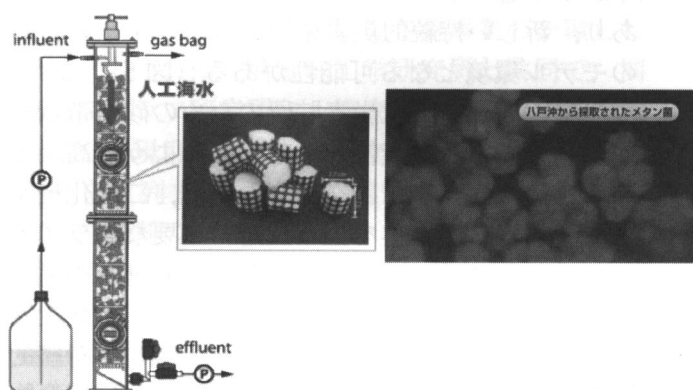


図6 ダウンハンギングスポンジ (DHS) 型バイオリアクターの概略図。

下北八戸沖から採取されたコア試料から、メタン生成菌をはじめとする多くの海底下微生物の活性化に成功した。写真はコア試料から分離・培養されたメタン生成菌の一種 (Imachi *et al.*, 2011 を改変)。

一方、天然の海底下メタン生成活性を測定するために、¹⁴Cで放射性標識された微量のトレーサー基質(炭酸や酢酸など)を海底堆積物のコア試料に直接添加し、一定時間放置後に生成された¹⁴C標識メタンの線量を液体シンチレーションにより測定すると、一般的に1~10 pmol/cm³/dayレベルの極めて低い活性であることが知られている。これは、仮に間隙水中に1モルのCO₂が存在した場合、CO₂を全て天然ガス(CH₄)に変換するのに5万年~50万年の歳月を要する事を意味している。しかしながら、上述のDHS型バイオリアクターを用いて下北八戸沖の海底堆積物から純粋分離された菌株のメタン生成活性は、1~10 mmol/cm³/dayの高い値を示している。これは、海底下のメタン菌が、天然の低栄養供給堆積物環境における生息条件から試験管内における高栄養条件までの、幅広いエネルギー条件に順応して生育可能な、特殊な生理能力を持つことを示している。即ち、pmol/cm³/dayとmmol/cm³/

dayとの間には10⁹(10億)倍の莫大な代謝活性ポテンシャルの幅があり、試験管内のような条件さえ整えば、1モルのCO₂を天然ガス(CH₄)に変換するのに数十万年もの地質学的時間を要する自然界のプロセスを、我々人間の世代時間スケール(もしくはそれ以下)にまで短縮できる可能性を示している(図7)。

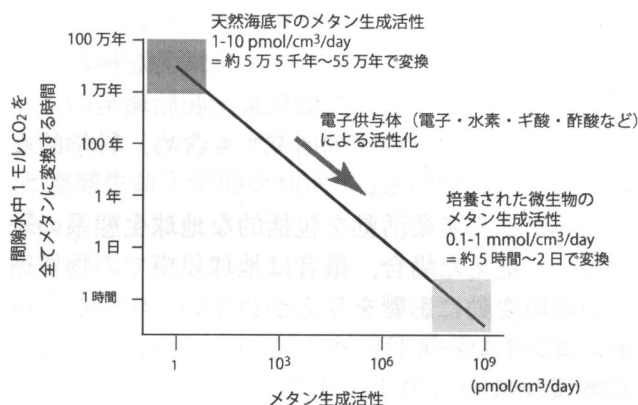


図7 海底下堆積物中に生息するメタン生成菌の代謝活性ポテンシャル。

地球生態系におけるメタン生成菌の役割は、有機物の末端分解プロセスを担う最終分解者として機能するばかりではなく、水素や二酸化炭素などの無機物から有機物を生産する一次生産者としての役割があることを追記しておきたい。これは、太陽光エネルギーに依存する光合成を起点とした生態系とは異なり、地球内部エネルギーであるマグマに由来する無機化学成分を起点とした独立栄養型の微生物生態系の存在を示唆するもので¹⁹⁾、初期地球における生態系構築および生命の進化を考える上で極めて重要である。

6. バイオ CCS 構想：持続的炭素循環システムの創成にむけて

近年の大気中の二酸化炭素濃度の急激な上昇に伴う地球温暖化対策の一つとして、産業的炭素の排出量削減に資する地層中への二酸化炭素の回収・貯留技術(CCS: Carbon Capture and Storage)が世界各国で検討されている。米国や豪州を中心とする大陸国では、油ガス層などの陸域地下資源や帯水層を中心に、資源回収を伴う経済的な大規模 CCS の手法開発が進んでいる。また、二酸化炭素の(半)永久的な鉱物学的固定法として、中央海嶺や海底下深部の玄武岩や超塩基性岩への CCS も検討されている²⁰⁾。一方、陸域地下資源に乏しく、生活圏や森林・活断層が密集し、海嶺からの距離が遠い我が国においては、沿

岸の海底堆積物への二酸化炭素隔離が検討されはじめている。海底下空間を活用した二酸化炭素隔離は、二酸化炭素の主要な排出源の一つである火力発電の需要が高まる中、確かに産業的二酸化炭素の排出量の大幅削減および低炭素社会実現の切り札になるかもしれない。しかしながら、現段階では、海底下深部地層における二酸化炭素の拡散挙動や鉱物との二次的化学反应による物性や間隙水化学組成の変化、生物学的な炭素循環機能への影響等について、候補地となる地域的な検証や環境アセスメント、液体二酸化炭素胚胎環境のようなナチュラルアナログ的研究²¹⁾も含め、科学的な知見は限られている。

人間による産業活動を包括的な地球生態系の一部として捉えた場合、筆者は地球規模での物質循環や環境変動に影響を与えかねない工学的なカーボンコントロールは、少なくとも「持続的」な炭素循環システムの中で構築されるべきだと考える。即ち、例えば中央海嶺付近への鉱物学的な二酸化炭素隔離（炭酸塩として固定する方法）は、二酸化炭素が固定された地殻プレートがテクトニクス的に収束し、再びマントル活動を通じた地球の循環システムに戻るまでに1億年以上の年月を要し、炭素循環の動的なマスマバランスを損なうリスクに対して、あまりに不可逆的な手法のように

見える。

海底下地層中への CCS を持続的な炭素循環システムの一部とするには、二酸化炭素をメタンやバイオマスなどの有機物に変換するエネルギー源が必要である。人為的に二酸化炭素の変換エネルギーを地中に添加することは非効率で現実的ではないため、自然界に既に存在しながらも経済的に資源開発への展開が見込めないような（もしくは既に開発された後の）在来型高エネルギー環境場の利活用を考える必要があるだろう。その一例として、日本近海に存在する海底下の夾炭層環境は、不整合面や泥岩・石炭層が二酸化炭素の漏洩を防ぐシール層やトラップ層として機能する可能性があり、新しい持続的炭素循環システム創出のためのモデル環境となる可能性がある（図5）。また、夾炭層環境は二酸化炭素貯留のための砂岩帯水層が挟在している可能性がある。そのような高エネルギー環境が存在する空間において、二酸化炭素から天然ガスの変換を担う反応の主要なドライビングフォースは、メタン生成菌を含む地下の従属栄養微生物生態系に他ならない。もし二酸化炭素から天然ガスへの変換が効率的に実現する持続的炭素循環システムが構築されれば、それは廃棄物としての CO₂ をエネルギーに再生する可逆的な二酸化炭素・エネルギー問題同時対応策となるだ

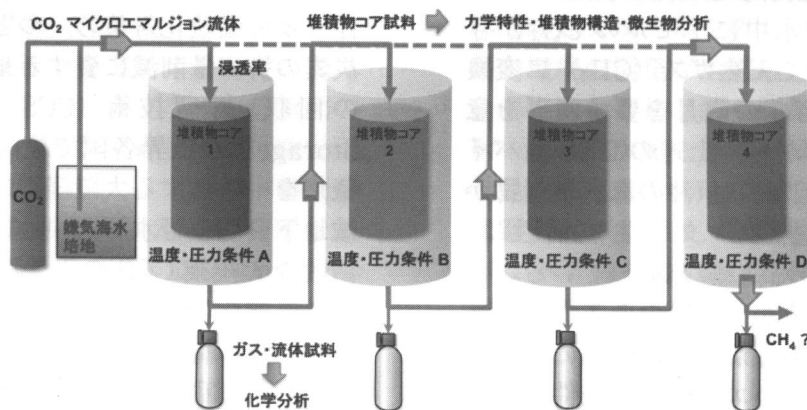
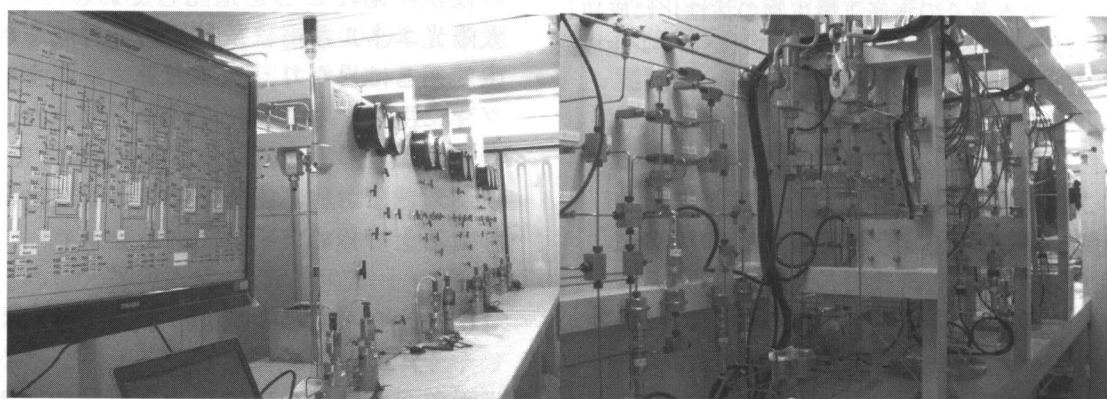


図8 海洋研究開発機構高知コア研究所に整備された「ジオバイオリクターシステム」の外観と模式図。海底下地層中への CCS に伴う様々な現象を、時空間的に再現することが可能。

ろう。さらに、海底下の未成熟な夾炭層環境は、下北半島東方沖のみならず、東南アジアやオーストラリア北東部にかけての太平洋西岸に広く分布している。我々は、地球が本来持つ生態系の機能やジオシステムの機能を活用した二酸化炭素地中隔離に伴う持続的炭素循環システムを「バイオ CCS 構想」と呼んでいる。

バイオ CCS のような持続的な炭素循環システムを実現するには、陸上実験施設において、さまざまな環境・堆積物特性・温度圧力条件下で堆積物コア試料と CO₂ 含有流体を反応させ、「CO₂-水-鉱物-生命」の相互作用を地球化学的・物理化学的・生物化学的に検証する必要がある。海洋研究開発機構では、最先端研究基盤事業の一環として、電力中央研究所地球工学研究所と共同で、同機構高知コア研究所に、海底下環境の温度・圧力条件を再現可能な 4 つの独立した高圧反応チャンバーを直列または並列で連結し、液体・超臨界 CO₂ を微細なマイクロエマルジョンとして混合した流体をコア試料に連続的に添加可能な、「ジオバイオリクターシステム」を構築した(図 8)。高圧反応チャンバーをつなぐ流路には、バイパスをとおしてガスや流体に含まれる CO₂ 反応産物のサンプリングができるような工夫がされている。本ジオバイオリクターシステムにおいて、深部～浅部の海底下堆積物環境を模した 4 つの異なる温度・圧力条件のチャンバーを連結することで、海底下の二酸化炭素の挙動を時空間的にシミュレーションすることが可能となる。今後、「ちきゅう」によって採取される下北八戸沖の夾炭層試料をはじめとして、これまでに科学海洋掘削や基礎試錐などで得られた様々なコア試料を、ジオバイオリクター装置により CO₂ 流体と反応させ、地球環境に不可逆的な負荷を与えない、可逆的かつ持続的な炭素循環システムの創出に繋げていきたい。

7. おわりに

海底下の生命活動には、地球上のあらゆる生命にとって必須の「水」の存在と、生命活動を維持するための代謝エネルギー基質の持続的な供給システムが不可欠である。本稿では、大陸沿岸の炭化水素と微生物を中心に話を展開したが、海底下における代謝エネルギー基質は炭素化合物ばかりではなく、熱水中に溶存する遷移金属やマグマに由来する無機化合物であっても良い。すなわち、天然ガスや金属鉱床などの生成場および形成プロセスは、海底下において生命が存在しうる場所と

生物エネルギー的な条件に近接したシステム環境であると言える。今後の地球深部探査船「ちきゅう」による科学海洋掘削の展開に合わせ、超高感度・高速・高精度な生命科学・地球化学の最先端分析技術が適用されれば、海底下深部における生命の起源や進化、地球表層と地下圏との相互作用、地球環境や物質循環に対する役割などの基礎的で重要な科学的命題が、次々と明らかにされていくだろう。海底下生命圏の理解のような新しい学術基盤構築を進めると同時に、現在の社会が直面しているいくつかの地球規模での問題に対して活路を見いだすような、新しい持続的炭素循環システムと地球生命工学的な利活用手法の創出が期待される。

謝辞

本稿の執筆にあたり、独立行政法人海洋研究開発機構海底資源研究プロジェクト・高知コア研究所・地球深部探査センター、高知大学海洋コア総合研究センター、一般財団法人電力中央研究所地球工学研究所の池川洋二郎博士、ブレーメン大学 Kai-Uwe Hinrichs 教授、統合国際深海掘削計画に謝辞を表します。本稿で紹介された研究成果の一部は、文部科学省および日本学術振興会による最先端研究基盤事業「海底下実環境ラボの整備による地球科学-生命科学融合拠点の強化(「ちきゅう」を活用)」および最先端次世代・研究支援プログラム「エネルギー再生型海底下 CO₂ 地中隔離(バイオ CCS)に関する地球生命工学的研究」によるものです。

〈参考文献〉

- 1) Parkes, R.J., Cragg, B.A., Bale, S.J., Getliff, J.M., Goodman, K., Rochelle, P.A., Fry, J.C., Weightman, A.J., and Harvey, S.M. (1994) Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments. *Nature*, 371, 410-413.
- 2) Roussel, E.G., Bonavita, M.-A.C., Querellou, J., Cragg, B.A., Webster, G., Prieur, D., and Parkes, R.J. (2008) Extending the sub-sea-floor biosphere. *Science*, 320, 1046.
- 3) Whitman, W.B., Coleman, D.C., and Wiebe, W.J. (1998) Prokaryotes: the unseen majority. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 95, 6578-6583.
- 4) Lipp, J.S., Morono, Y., Inagaki, F., and Hinrichs, K.-U. (2008) Significant contribution of Archaea to extant biomass in marine subsurface sediments. *Nature*, 454, 991-994.
- 5) Kallmeyer, J., Smith, D.C., Spivack, A.J., and D'Hondt,

- S. (2008) New cell extraction procedure applied to deep subsurface sediments. *Limnol. Oceanogr. : Methods*, 6, 236-245.
- 6) Morono, Y., Terada, T., Masui, N., and Inagaki, F. (2009) Discriminative detection and enumeration of microbial life in marine subsurface sediments. *ISME J.*, 3, 503-511.
 - 7) Expedition 329 Scientists. (2011) South Pacific Gyre seafloor life. *IODP Preliminary Report*, 329. doi : 10.2204/iodp. pr. 329.2011.
 - 8) Expedition 331 Scientists. (2010) Deep hot biosphere. *IODP Preliminary Report*, 331. doi : 10.2204/iodp. pr. 331.2010.
 - 9) Inagaki, F., Nunoura, T., Nakagawa, S., Teske, A., Lever, M.A., Lauer, A., Suzuki, M., Takai, K., Delwiche, M., Colwell, F.S., Nealson, K.H., Horikoshi, K., D'Hondt, S., and Jørgensen, B.B. (2006a) Biogeographical distribution and diversity of microbes in methane hydrate-bearing deep marine sediments on the Pacific Ocean Margin. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 103, 2815-2820.
 - 10) Teske, A., and Sørensen, K.B. (2008) Uncultured archaea in deep marine subsurface sediments : have we caught them all? *ISME J.*, 2, 3-18.
 - 11) Hoshino, T., and Inagaki, F. (2012) Quantification of environmental DNA using microfluidics and digital PCR. in review.
 - 12) Hoshino, T., Morono, Y., Terada, T., Imachi, H., Ferdelman, T.G., and Inagaki, F. (2011) Comparative study of seafloor microbial community structures in deeply buried coral fossils and sediment matrices from the Challenger Mound in the Porcupine Seabight. *Front. Microbio.*, 2, paper no. 231.
 - 13) Kobayashi, T., Koide, O., Mori, K., Shimamura, S., Matsuura, T., Miura, T., Takaki, Y., Morono, Y., Nunoura, T., Imachi, H., Inagaki, F., Takai, K., and Horikoshi, K. (2008) Phylogenetic and enzymatic diversity of deep seafloor aerobic microorganisms in organics- and methane-rich sediments off Shimokita Peninsula. *Extremophiles*, 12, 519-527.
 - 14) Morono, Y., Terada, T., Nishizawa, M., Hillion, F., Ito, M., Takahata, N., Sano, Y., and Inagaki, F. (2011) Carbon and nitrogen assimilation of deep seafloor microbial cells. *Proc. Natl. Acad. Sci., U.S.A.*, 108, 18295-18300.
 - 15) 大澤正博, 中西敏, 棚橋学, 小田浩 (2002) 三陸～日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉍床ポテンシャル. 石油技術協会誌, 第67巻1号, pp. 38-51.
 - 16) Inagaki, F., Hinrichs, K.-U., Kubo, Y., and the Expedition 337 Project Team. (2010) Deep coalbed biosphere off Shimokita : microbial processes and hydrocarbon system associated with deeply buried coalbed in the ocean. *IODP Scientific Prospectus*, 337. doi : 10.2204/iodp. sp. 337.2010.
 - 17) Tomaru, H., Fehn, U., Lu, Z., Takeuchi, R., Inagaki, F., Imachi, H., Kotani, R., Matsumoto, R., and Aoike, K. (2009) Dating of dissolved iodine in pore waters from the gas hydrate occurrence offshore Shimokita Peninsula, Japan : ¹²⁹I results from the D/V *Chikyu* shakedown cruise. *Res. Geol.*, 59, 359-373.
 - 18) Imachi, H., Aoi, K., Tasumi, E., Saito, Y., Yamanaka, Y., Saito, Y., Yamaguchi, T., Tomaru, H., Takeuchi, R., Morono, Y., Inagaki, F., and Takai, K. (2011) Cultivation of methanogenic community from seafloor sediments using a continuous-flow bioreactor. *ISME J.*, 5, 1751-1925.
 - 19) Takai, K., Gamo, T., Tsunogai, U., Nakayama, N., Hirayama, H., Nealson, K.H., and Horikoshi, K. (2004) Geochemical and microbiological evidence for a hydrogen-based, hyperthermophilic subsurface lithoautotrophic microbial ecosystem (HyperSLiME) beneath an active deep-sea hydrothermal field. *Extremophiles*, 8, 269-282.
 - 20) Goldberg, D.S., Kent, D.V., and Olsen, P.E. (2010) Potential on-shore and off-shore reservoirs for CO₂ sequestration in Central Atlantic magmatic province basalts. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 107, 1327-1332.
 - 21) Inagaki, F., Kuypers, M.M.M., Tsunogai, U., Ishibashi, J., Nakamura, K., Treude, T., Ohkubo, S., Nakaseama, M., Gena, K., Chiba, H., Hirayama, H., Nunoura, T., Takai, K., Jørgensen, B.B., Horikoshi, K., and Boetius, A. (2006b) Microbial community in a sediment-hosted CO₂ lake of the southern Okinawa Trough hydrothermal system. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 103, 14164-14169.

地中熱利用と地質情報

[Key Word]

地中熱, ヒートポンプ, 有効熱伝導率, 地質情報, 再生可能エネルギー

ささ だ まさ かつ
笹 田 政 克*

普及段階に入った地中熱利用

わが国では地中熱の認知度が低い状況が続いていたが、2010年に国の政策の基本文書の1つである「エネルギー基本計画」に初めて「地中熱」が取り上げられ、翌2011年からは経済産業省の「再生可能エネルギー熱利用加速化」政策の中で補助金事業が開始された。これまでに培われてきた技術的基盤の上に、ようやく地中熱利用の普及が本格化しようとしている。

地中熱は、発電等に利用される高温の地熱エネルギーとは異なり、年間通して温度が一定である特性をもつ、私達のすぐ足下にあるエネルギーである。地表付近の地温は、昼夜あるいは季節により大きく変動するが、どの地域でもおよそ10mの深さになると、地温は年間通して一定となる。その温度はその地域の年平均気温にほぼ等しい(図1)。したがって、地中と地表と間では夏と冬で10~15℃の温度差が生じており、この温度差を利用して冷暖房等を効率よく行うのが地中熱利用である。冷暖房での利用のほか地中熱を熱源とし

て給湯や融雪もできる。

小文では、地中熱利用のうち普及が進んでいるクローズド型の地中熱ヒートポンプシステムを中心に、基本的知識を整理するとともに、利用にあたって必要な地質情報について述べる。

地中熱ヒートポンプシステム

地中熱の利用方法にはいろいろなものがあるが、それらを利用原理および利用機器に基づき区分すると、地中熱を熱伝導で利用する方法、空気循環により地中で熱交換を行う方法、水循環により地中熱を利用する方法、ヒートパイプを用いる方法、ヒートポンプを用いる方法に大別される。これらの中で世界的に見ても最もポピュラーな利用方法がヒートポンプを用いる方法である。地中熱ヒートポンプシステムには、地中熱交換器を用いるクローズド型(クローズドループ)と地下水

ヒートポンプの熱源として利用
温度調節が可能で汎用性が高い

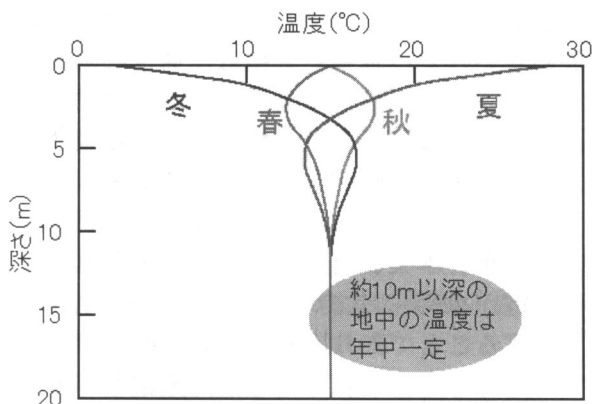


図1 季節ごとの地温—深度分布 (地中熱利用促進協会, 2011)

ヒートポンプシステム

住宅・ビル等の冷暖房・給湯、プール・温浴施設の給湯
道路等の融雪、農業ハウスの冷暖房など

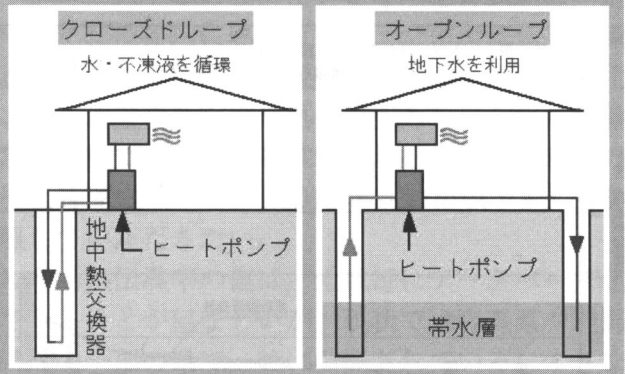


図2 地中熱ヒートポンプシステム (地中熱利用促進協会, 2011)

* NPO 法人 地中熱利用促進協会 理事長

と熱交換するオープン型（オープンループ）とがある（図2）。

クローズド型は、地中から熱を取り出すために地中熱交換器内に流体を循環させ、汲み上げた熱をヒートポンプで必要な温度領域の熱に変換するシステムである。地中熱交換器内を循環させる流体には、通常は不凍液または水を用いる。

地中熱交換器には、垂直型、水平型、傾斜型があり、垂直型のものには掘削孔（通常50m～150m程度）を利用するボアホール方式と杭（基礎杭・採熱専用杭）を利用する杭方式とがある。通常はUチューブと呼ばれる高密度ポリエチレン製の採放熱管が挿入される。一方、水平型は垂直型と比べて広い場所が必要なため、わが国ではまだ普及が進んでいないが、米国ではスリンキーと呼ばれるスパイラル状の採放熱管を水平に設置する方式も普及している。

普及状況

世界的に見ると地中熱利用は2000年頃から大きく伸びてきており、現在では主要な再生可能エネルギーの1つと言えだけの設備容量をもつに

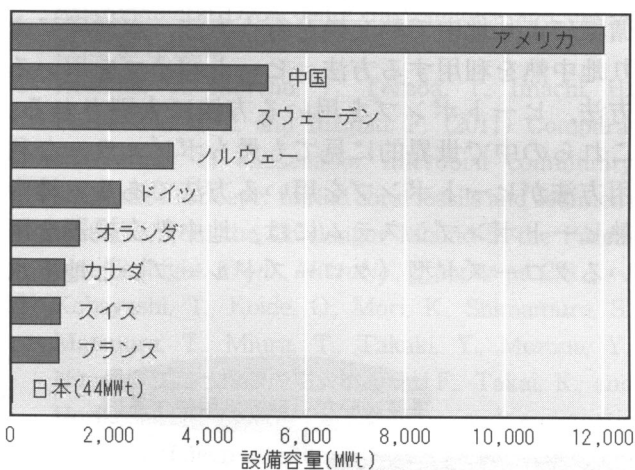


図3 各国の地中熱ヒートポンプ設備容量 (Lund et al., 2010)

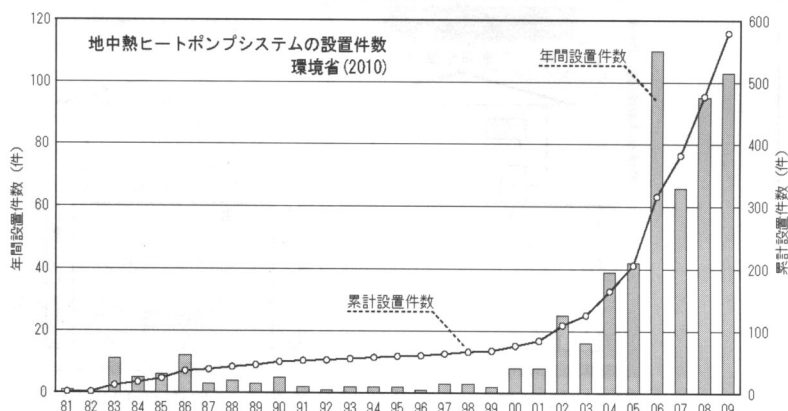


図4 わが国の地中熱ヒートポンプの設置件数 (環境省, 2010)

至っている（図3）。わが国においても最近の伸びには著しいものがあるが（図4）、欧米諸国と比較すると設備容量で2桁低く、大きく後れをとっている。しかし、このことは見方を変えると、わが国は潜在的需要を大きく抱えている状況にあるともいえる。冒頭に述べた経済産業省の再生可能エネルギー熱利用拡大の政策（太陽熱・バイオマス熱・雪氷熱・温度差エネルギー・地中熱が対象）では、民間事業者には3分の1、地方公共団体と非営利団体には2分の1の補助金を交付する事業が実施されており、2011年の地中熱利用の採択件数は27件（全採択数136件の20%）であった。この事業は2012年も継続される。

最近の地中熱ヒートポンプシステムの導入事例をあげると、羽田空港の国際線ターミナルビル（2010年）、東京大学理想の教育棟（2011年）、富士通長野工場（2012年）、IKEA福岡新宮ストア（2012年）、東京駅前のJPタワー（2012年）、東京スカイツリー（2012年）、セブンイレブン（2012年3店舗）などがある。

導入効果

地中熱ヒートポンプシステムのエネルギー・環境面での優れた点に、省エネ・節電効果、CO₂削減効果、ヒートアイランド現象抑制効果がある。

再生可能エネルギーである地中熱の利用は、灯油ボイラーなどの化石燃料を用いたシステムを代替した場合に、大きな省エネ効果がある。また、地中熱ヒートポンプシステムの冷暖房は、空気熱源のヒートポンプシステム（通常のアコン）と比較しても、気温と地温の温度差が利用できるため、夏の冷房と冬の暖房で消費電力が大幅に削減できる。ヒートポンプの利用においては、熱源温度と利用温度の差が小さい方が、コンプレッサーの消費電力が少なく済むので、特に夏の暑い日や冬の寒い日では地中熱利用は、通常のアコンより大きな省エネ効果をもたらす。灯油ボイラーと空冷チラー等からなる在来システムと地中熱ヒートポンプとのエネルギー消費量等の実績の比較を図5に示す。

東日本大震災以降は、省エネとともに節電が求められている。省エネはkWhを下げることであり、節電はkWを下げることでありとされているが、節電という視点で見ると、地中熱利用は消費電力が最大となる夏のピークカットに効果がある。通常のアコンと比較して、地中熱ヒートポンプはとくに夏の冷房における消費電力が少

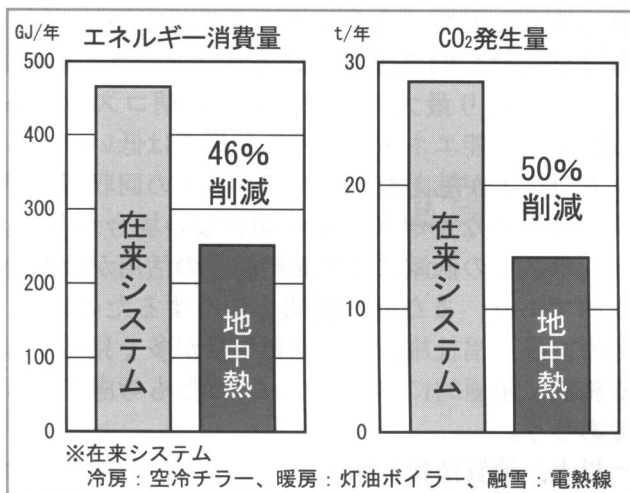


図5 弘前市まちなか情報センター (石上ほか, 2010)

ない。地中熱ヒートポンプの利用実績を年間通して見ると、夏の電力消費量のピークが冬のピークより小さい場合があることがわかる (図6)。

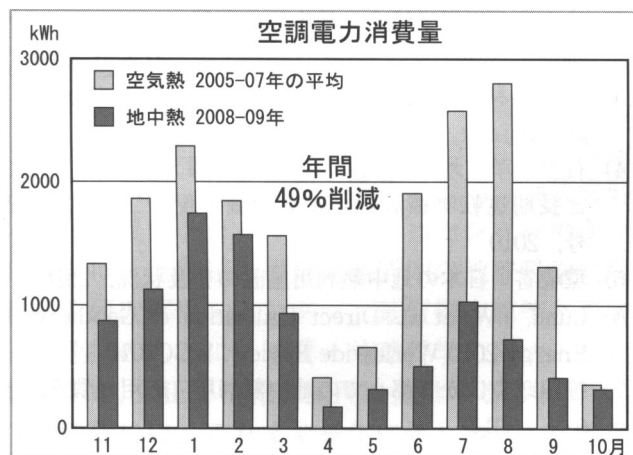


図6 東京都心のオフィスビル (笹田, 2011)

東日本大震災での原発事故以降、CO₂削減で大きな役割を果たすはずだった原子力発電所の再稼働が進まない状況となっているが、CO₂発生量の削減は継続して取り組まなければならない課題である。地中熱ヒートポンプでは、再生可能エネルギーの熱を利用しているので、石油を利用する暖房機器、融雪施設を代替した場合に、大きなCO₂削減効果がある (図5)。

地中熱利用が環境性に優れているもう一つの点として、ヒートアイランド現象の抑制効果がある。大都市圏において顕著に現れているヒートアイランド現象の主な要因は、アスファルトやコンクリートのような建造物と建物からの排熱であるが、地中熱ヒートポンプは空気熱ヒートポンプのように排熱を大気中に放出しないので、ヒートアイランド対策に効果的である。地中熱の場合、夏季の

冷房排熱は地中に放熱されるが、冬季には地中から採熱するので、放熱と採熱のバランスのとれた持続的運転がされていれば、再生可能エネルギーの利用に伴う環境へのインパクトは最小限に抑えることができる。

クローズド型の設計

クローズド型の地中熱ヒートポンプシステム (図1) は、メンテナンスがほとんど必要ないため適用範囲が広く、住宅・建築物・プール・融雪施設等に適用されている。クローズド型を用いた空調システムの設計では、通常の設定設計に必要な建物側の熱負荷を求めるだけでなく、地中での熱交換可能量を求める必要があり、システムを設置する場所の地層の有効熱伝導率の値が必要となる。規模の大きなシステムの設計では、ボアホール等を用いて熱応答試験を行い、地層の有効熱伝導率を求める。一方、100 kW以下の小規模なシステムの設計では文献値等で代用することが多い。このようにして得られた地層の有効熱伝導率の値のほか建物の熱負荷、利用時間、ヒートポンプの性能等から、設計ツールを用いて必要な地中熱交換器の長さ及び配置を決める。実際に設計を行うには市販の地中熱システム用設計ツールを用いると便利である。

有効熱伝導率という地質情報

地中熱の利用には、通常深さ50 m～150 m程度の地質情報が必要とされる。クローズド型の設計では、上述したように一般的な地質データのほかに地層の熱物性値として有効熱伝導率の値が必要となる。一方、オープン型では揚水を行うので、地層の透水性や地下水の水質等のデータが必要となる。クローズド型の場合も地下水流があると熱交換効率が上がるので、地下水に関するデータは有用である。

クローズド型の設計に必要な熱応答試験は、地中熱熱交換器内に熱負荷を与えた循環流体を循環して得られる循環流体温度や地中温度の経時変化より、地盤の熱物性や熱交換能力を推定する地盤調査試験である。この試験の詳細は地中熱利用の施工管理マニュアル (2012年秋に出版予定) を参照していただきたい。

有効熱伝導率の値は、地域毎にデータベース化されることが望ましいが、現状では青森県や群馬県等の一部の県で一般に公開されているにすぎない。2010年の「緑の分権改革推進事業」で地中熱に取り組まれた青森県では、40箇所熱応答試験

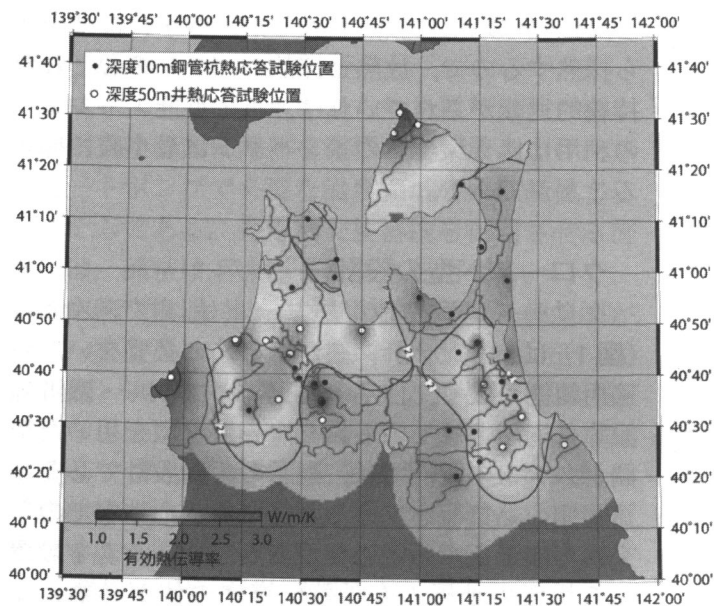


図7 青森県の有効熱伝導率の分布（青森県，2011）

が行われ（図7），また黒石市でも地中熱のデータが20か所で取得された。青森県内で有効熱伝導率の分布を見ると，地質との相関が高く，堅く古い地質単元のところで高く，沖積平野のような未固結で若い地質単元のところで低い傾向が認められる（青森県，2011）。一方，この結果とは別に未固結の地層でも砂礫層中に地下水が流れている場合等では，地下水による熱の移流効果があるため，実質的な熱交換能力は，固結した岩石の熱交換能力よりも高い場合もある。

おわりに

地中熱利用は，2010年に国のエネルギー政策に

載るようになり，また地方でも熱心な自治体が，普及に向けて動き出している。このような中で，普及にあたり最大の問題は高い初期コストである。再生可能エネルギーの熱利用では低いランニングコストが魅力だが，初期コストの回収期間が長いとなかなか導入に踏み切れない場合が多い。初期コストの低減には当面補助金の活用が最も効果的であり，また回収期間を短くするためには，医療施設，福祉施設等の熱利用量が多く見込まれる施設に積極的に導入していくことも考慮すべきであろう。

以上，地質情報と関連付けながら地中熱利用の概要について述べてきたが，さらに詳しくお知りになりたい方は，NPO法人地中熱利用促進協会のホームページをご覧ください。

〈参考文献，URL〉

- 1) 青森県：青森県地中熱・温泉熱利用ポテンシャル調査報告書。210 p., 2011.
- 2) 地中熱利用促進協会：地中熱の利用（パンフレット）2011
- 3) 地中熱利用促進協会：ホームページ <http://www.geohpaj.org>
- 4) 石上 孝：地中熱利用冷暖房・融雪システムの概要と長期運転実績評価，建築設備と配管工事 48巻2号，2010
- 5) 環境省：日本の地中熱利用施設の普及状況，2010
- 6) Lund, J.W. et al.: Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review, WGC2010
- 7) 笹田政克ほか：都心での地中熱利用，応用地質 51巻6号，2011

地質調査情報センター

わた なべ よし お
渡 部 芳 夫*

1. はじめに

地質調査総合センターは、産総研における「地質の調査」業務に係わる対外的な窓口の役割を果たし、社会ニーズの的確な把握、研究成果としての地質図類・地質情報の提供に務めます。「地質の調査」に関連する研究部門・連携研究体・研究関連部署全体を一括して、地質調査総合センターと総称します。

一方、地質調査情報センターは、地質調査総合センターの窓口として、「地質の調査」に関する企画立案と調整、地質情報の整備と公開、地質資料の管理と提供を行っています。当センターのミッションは、産業技術総合研究所内の地球科学に関連する研究部門・センター、地質標本館等との密接な連携のもとに、地質・地球科学に関する信頼性の高い、公正な情報を国民に提供することです。

その際には、これまで長年に渡り継続的に蓄積されてきた情報の整備を継続しつつ、今後新たに創生される最新の知見を体系的に融合し、地質情報が公共財として誰でも必要なときに利用できること、また高い信頼性と利便性の双方を持った地質情報を提供することとしています。

2. ミッションと組織

現在の地質調査総合センターの前身である地質調査所は、明治15年(1882年)に創立されて以来、全国の地質図の作成や地下資源開発に関する調査、研究を実施し、1945年以降は地球科学全般に渡る調査研究・開発機関となりました。平成13年(2001年)の中央省庁再編に伴い「地質調査所」の名前はなくなりましたが、それまで地質調査所が行ってきた研究と業務は「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」が引き継いで継続しています。

地質調査情報センターでは、平成24年4月1日より、特に情報統合と品質管理に重点を置いたミッションの整理を行うと共に、組織改編と人員拡充を行いました。当センターの業務内容、特に情報サービスの全体に関しては、公式ホームページから詳しくご紹介していますので、本稿では今回の組織再編の基本的な目的と目指すところを中心に、組織ごとに以下の3つのキーワードとあわせてご説明したいと思います。

地質・衛星情報整備企画室

Quality and Integrity : Administration for Integration

多様な形で生み出される調査研究成果は、柔軟に取り扱うことにより価値が高まります。そのために必要な情報の品質と完全性を確保することが非常に重要です。JISや各種の国際標準への準拠のもとで衛星画像情報と地質情報との統合を進めつつ、その結果として発信される全ての情報は引き続き完全なものであることを目指します。GEO Grid プロジェクト¹に代表される最新の技術基盤の整備による統合データベースの作成が計画されております。しかしながら、従来の研究成果データベース：RIO-DB²から地図系データベース³への移行が、産総研の中で先行されることとなっています。

¹ <http://www.geogrid.org/>

² <http://riodb.libbase.aist.go.jp/>

³ 地図系データベース：産総研 RIO-DB を中心としたデータベース間の系統的な結合を図り産総研データベースとし、その広範で有機的な利用を促進することを目標に、現在は日本地図に関連づけられるデータベースの間の結合を地図系データベースとして当センターにより進めています。

* (独)産業技術総合研究所 地質調査情報センター
センター長

この業務を統括・実施する部署として本年度より地質・衛星情報整備企画室を設置し、地質の調査に係る地質情報および衛星画像情報の整備について、企画、統括および管理を行っていきます。最重点課題は、これらの諸情報がより高度に利用されるために必要な標準化を、地質情報ならびに衛星画像情報の双方に適用し、各種情報との統合、連携および融合を推進することです。具体的には、地質関連のデータベースの統合化と効率運用、国際標準に基づいた地図系データバンクの構築、GEO Grid 融合課題による他ユニットとの連携を通じて、資源探査・自然災害軽減・環境保全などの地球規模の社会的問題の解決に貢献できるよう、地質情報と衛星画像情報の整備と発信の企画調整を行います。

現時点で、産総研での公開データベースは産総研リポジトリの一環として、研究情報公開データベース (RIO-DB) より発信されています。その中で地球科学関連のデータベースは、活火山データベース等 35 件に上りますが、地図情報 (緯度経度等) を含むものは最終的に数値化した上で可能な限りベクトル化し、インターネット配信する方針です。当整備企画室では、さらにそれらの要素データベースの公開に際し、配信を国際標準に準拠して行うことで、他の国際標準に対応した地理空間情報とも容易に統合し、多種情報を重ね合わせて表示できる利便性の向上に取り組んでいます。これらの国際標準はデータ配信プロトコルや記述に関する WMS, WFS, WCS 等で、それぞれ、OpenGIS Web Map Service Interface Standard (複数のソースから地理情報付地図画像を表示させる HTTP サービス)、OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard (インターネット上の地理情報に関する属性等を直接扱うためのサービス)、OpenGIS® Web Coverage Service Interface Standard (衛星画像等の地理的空間データをネットワークを介して交換することのできるサービス) に準拠することによって、国際的に発信されている地理情報との統合や重ね合わせが可能となり、その結果として多くの価値が新たに提供されることとなります (図 1)。

現時点では、世界中の地質調査機関が参加する 100 万分の 1 グローバル地質図プロジェクトである One Geology へ、この国際標準準拠の元で参加しています (図 2)。

これらに加えて、さらに衛星による全球的観測とデータの国際標準配信の準備を進めています。これは自然災害に対する防災や、資源探査等の全

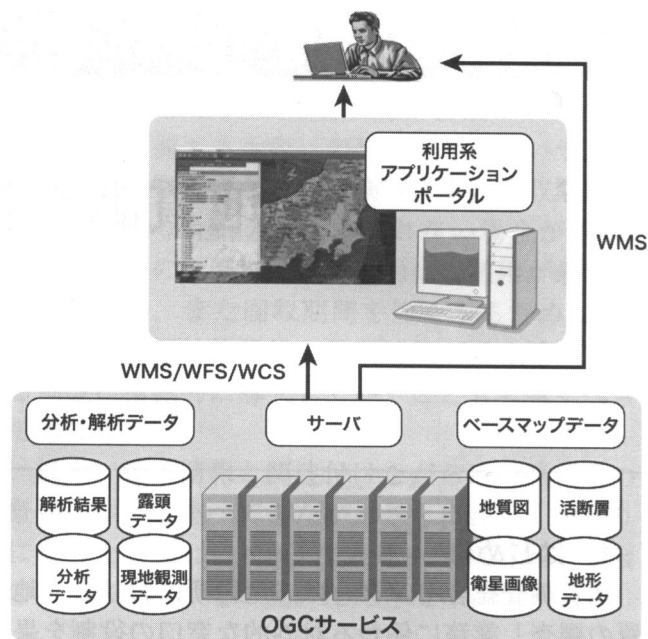


図 1 情報の重ね合わせと配信の標準化



図 2 国際標準化による One Geology (グローバル地質図流通システム) でのアジア圏でのリーダーシップ
<http://www.onegeology.org/>

地球的な観測に資するためのもので、地質情報に加え、衛星画像情報と統合を目指したデータベースインフラの整備を進める計画でおります。これらによって、産総研の地図系データバンクが、ユーザーの要求に応じた地質情報、地理空間情報の提供を可能とするものとなることを目指しています (図 3)。

一方、当センターから発信される産総研の研究情報データベースは、特定の目的を持った専門家に加えて、一般の学生や社会人にもより利用しやすくわかりやすい形で、広く社会に提供していく方針です。特に、平易な表現方法による工夫や解説の追加を模索し、より身近な言葉で地質情報を利用できるような取り組みのいくつかを、研究ユニットのグループと共に行っています。その一つ

の例となる試みは、現在地質情報研究部門で進められている「20万分の1 シームレス地質図」の機能拡張に現れています（図4）。

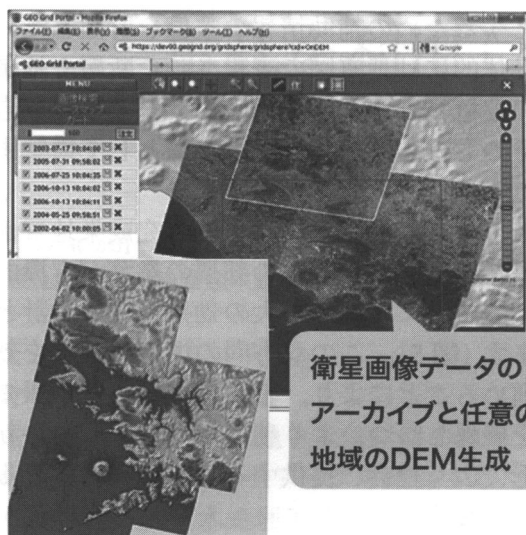


図3 衛星による全球的観測データの国際標準配信と地質情報の統合



図4 20万分の1 シームレス地質図におけるわかりやすさ機能

地質・衛星情報アーカイブ室

Core Information and Raw Data: Archive for Communities

研究開発により蓄積される多様な情報は、社会へ発信する成果の品質保証の根拠にもなるものです。公表済み既往情報である文献・地図類のデータベースや衛星画像アーカイブ等に加えて、GSJから発信される情報の品質基準の根拠ともなる未公表調査データのアーカイブを整備し、これらのメタデータを管理することにより、一連の社会への成果発信の作業を裏付けます。

地質・衛星情報アーカイブ室は、地質・地球科学情報および衛星情報に関して、メタデータの整

備・充実を促進します。特に地質文献データベースを構築・維持・管理し、国内外への情報発信を行います。また、国内外関連機関との出版物交換等を通じて、地質関連資料類の集積管理および地質調査に係わるオリジナルデータの集積管理を体系的に行い、日本における中核的な地質関連アーカイブ機関として機能します。

当アーカイブ室で扱う代表的な地質・地球科学情報のデータベースは、地質文献データベース等のメタデータ整備・管理による GEOLIS 系をはじめとして、以下のようなものがあります。

- 地質文献データベース⁴
(GEOLIS+, G-MAPI)
- 地質情報総合メタデータ⁵
(日本版・アジア版)

省庁と連携して地理情報に関する政府クリアリングハウスのデータ整備も担当しておりますが、これらは順次統合しクラウド化する計画です。

なお、これらに加えた業務として、地質資料情報の集積管理・提供を国内外地質関連機関との地質情報の相互交換も含めて進めており、国内随一の収集数を持つ地質文献資料室と地質図ライブラリー⁶は、一般からの閲覧も可能です。

地質・衛星情報サービス室

Public Communication and Services: One-stop

「地質の調査」に関する研究成果は、従来から地質図や研究報告という形態で整備・公開を進めてきましたが、地質調査総合センターでは基本的な情報発信をデジタル化することとしました。数値化された形態でのインターネット配信によって、各種標準に準拠した均一の品質と完全性の元で情報提供を行うと同時に、従来媒体による提供等、多様な社会ニーズへの対応サービスを一貫した窓口を設けて進めていく計画です。

この業務を実施するため、地質・衛星情報サービス室を設置し、地質・地球科学および衛星情報に関する整理された高品質の情報を、研究成果出版物と地質調査総合センターのホームページを通して発信しています。研究成果出版物は JIS に準拠して編集・校正を行い、紙・CD-ROM・オンラインジャーナルの形で出版し、内外の研究・行政機関に提供するほか、既刊出版物の在庫を管理し

⁴ <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/DB011/index.html>

⁵ <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/GeoMetaDate/MetaJapan/index.html>

⁶ <http://www.gsj.jp/geology/library/index.html>

て一般ユーザーにも頒布しています。在庫切れ地質図類は、電子化データからオンデマンド印刷で提供を継続しています。また他の出版物も電子化してホームページから提供しています。このほか地質調査総合センターと旧地質調査所の著作権を管理して、2次利用に対応しています。

代表的な地質図幅、海洋地質図、沿岸地質図等の地球科学図出版実績として、20万分1地質図幅については、1956年から整備を開始し、57年の歳月をかけて2010年に124区画全部をカバーし完成させました。またこれらを基に統一凡例の策定の中で、全区画間でつなぎ目の無い、統一感の取れたシームレス地質図も公開されています。5万分の1地質図幅については、1952年から整備を開始し、全国1274区画のうち、2011年末時点では943区画（約74%）をカバーしています。

一方、出版物形態のものとしては、地質調査研究報告は2012年より完全電子化出版⁷に移行しました。これらのほかに、地質調査総合センター研究資料集⁸、地質図カタログ⁹等の配信をインターネット上で行っています。

3. 現状の問題意識と今後のビジョン

2011年3月11日に発生した東日本大震災によって、地質情報の重要性が再認識されるに至りましたが、産総研でこれまで社会に発信してきた地質情報は、必ずしも一般の利用者、自治体関係者、報道機関、地質コンサルタントなどの幅広いユーザーに利用しやすい形で提供できていたとは言えず、地質情報そのものの存在も広く行き渡っているとは言えないとの反省をしています。

一般市民層のユーザーは、必ずしも地質情報の存在や価値をご存じない場合が多く、情報発信の際には理解しやすい平易な表現方法による工夫や解説の追加等、より身近な言葉で地質情報を理解していただける取り組みを行います。

一方、学術目的や国土利用開発等の専門家向けに対しては、それぞれで必要とされる詳細な地質情報に対応すると同時に、それらの情報の品質保

証を行うことが必要とされます。これらのことから、現在当センターで公表している地質情報はJIS等の国内標準に準拠していますが、今後は標準準拠だけでなく、公表情報の客観的品質確認を可能とするための補助情報の整備を計画しています。具体的には地質図で表現された断層や地層境界等の位置精度を示す現場調査データや採取岩石試料そのもののリポジトリを機関として構築する計画です。

これらの、当センターによる研究成果地質情報の発信業務は、それぞれの部署の業務が有機的に機能することにより、最大の効果を得る設計としています（図5）。この双方向の情報の流れを効果的に進めることにより、整備された地質情報の信頼性を確保しつつ、より利用しやすく、わかりやすい形で広く社会に提供することが可能になると考えています。

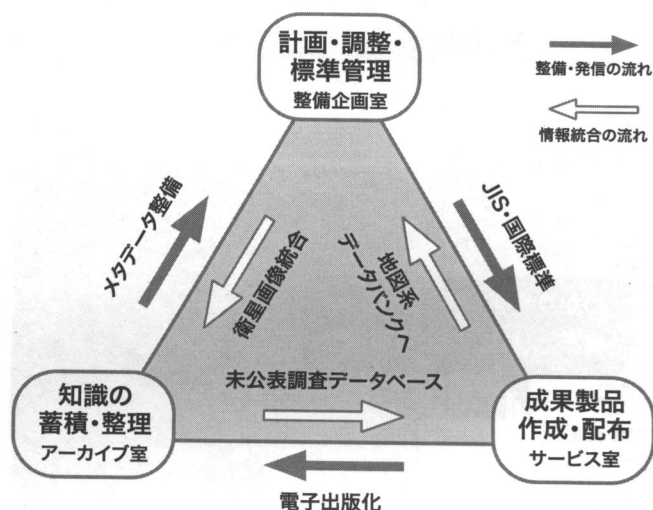


図5 当センターに於ける地質・衛星情報の整備・発信と情報統合の流れ

産総研ならびに地質調査総合センターとしての研究成果情報は、社会のニーズに対応して今後も適切な情報形態とサービスになるように心がけるつもりです。読者の皆様からのご要望やご意見を以下でお待ちしています。

フォーム：http://unit.aist.go.jp/geoc/inquiry/inquiry_geoc.html
メールアドレス：gicweb-ml@aist.go.jp

⁷ <http://www.gsj.jp/publications/bulletin/index.html>

⁸ <http://www.gsj.jp/researches/openfile/index.html>

⁹ <http://www.gsj.jp/Map/>

単孔を利用した鉛直・水平透水試験

【Key Word】

原位置試験，鉛直透水試験，透水異方性調査，単孔を利用した透水試験，定常法

いぬい 乾 かず ゆき
一 幸*

1. はじめに

建設工事において、地下水位以深の地下工事が行われる際には、ドライワークを確保するために、多くの場合、地下水処理工法が検討される。

地下水処理工法には、止水性山留め壁等によって根切り部内への地下水の流入を防ぐ止水工法と、根切り部内に流入する地下水を排水する排水工法とがある。排水工法では、ディープウエル工法が多用されるが、適用に際しては、周辺地域を含めた地下水位低下量と必要揚水量とを把握しておく必要がある。排水設計では地盤の透水性に関する各種のパラメータ（透水係数、透水量係数、貯留係数など）を地盤調査で確認しておくことが重要である。

従来、排水設計に必要な帯水層の透水性に関するパラメータは揚水試験などの調査で得られてきた。しかしながら、揚水試験は排水設備、敷地や工期などの諸条件に制約があり、推定値や仮定により設計定数を設定している場合もある。

最近ではFEMによる地下水シミュレーションにより、止水壁の根入れ深さと揚水量の関係を求めたり、地盤条件が複雑で井戸理論が適用しにくい場合の解析が行われている¹⁾。地下水シミュレーションでは水平方向と鉛直方向の透水係数を個別に設定することができるが、水平・鉛直方向の透水異方性を評価できる試験方法が確立されていないため、解析結果と実際との間にギャップを生じる場合もある。

ここでは、これまでに実施した12件の事例に基づき、開発した鉛直透水試験装置を用いて単一のボーリング孔で帯水層の鉛直方向の透水係数を求め、単孔を利用した透水試験方法²⁾により水平

方向の透水係数を求める透水異方性調査手法・手順について紹介する。

2. 鉛直透水試験と透水異方性調査の概要

開発した鉛直透水試験装置はロータリー式三重管サンプラーに小型揚水ポンプを装着した構造であり、原位置での鉛直方向の透水係数を評価する装置である。図1に試験装置の概念図を示し、表1に試験装置の仕様を示すとともに、その特徴を以下に挙げる。

- ① サンプリング動作後に、原位置に固定した状態のサンプラー内試料に、試料下方から上方のポンプに向かう地下水の流れを発生させて、定常揚水を行い、鉛直方向の透水係数を得ることができる。
- ② 試験装置は、通常のサンプラーで用いるライナーチューブの代わりにゴムパッカーを取付け、空圧でパッカーを膨らませ、試料の外周面と密着させて漏水を防ぐ構造を有する。
- ③ 試験深度の直上までケーシングを挿入し、鉛直試験装置を回収した後に、同じ試験区間にスクリーン加工した測定用パイプを孔底に挿入し、定常法による透水試験を行い、水平方向の透水係数を求める。これにより、同一深度における透水異方性の評価可能とする。
- ④ 鉛直透水試験後のサンプリング試料から、試験対象土層の層相が直接確認できる。また、物理試験の実施も可能である。

3. 調査方法

透水異方性調査のフローチャートを図2に示す。具体的な調査の流れは次のとおりである。

- ① 削孔およびケーシング設置：試験深度の直上まで、大型の油圧ボーリング機械を用いて削孔を行い、ケーシングを設置する。

* 株式会社 東京ソイルリサーチ東京支店 技術調査部

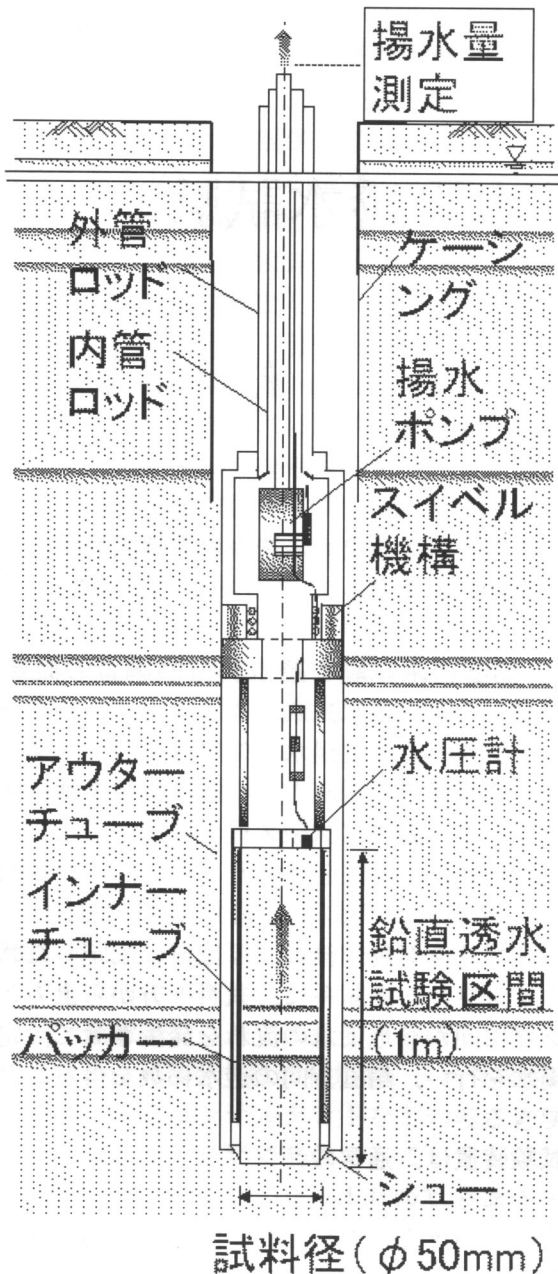


図1 鉛直透水試験装置の概要³⁾

表1 鉛直透水試験装置の仕様³⁾

項目	仕様	
寸法	全長	2320mm
	外径	93mm
	質量	43kg
外管ロッド	直径	60mm
内管ロッド	直径	40.5mm
揚水ポンプ	最大揚水量	$5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
	最大揚程	90m
	電源	AC 100V

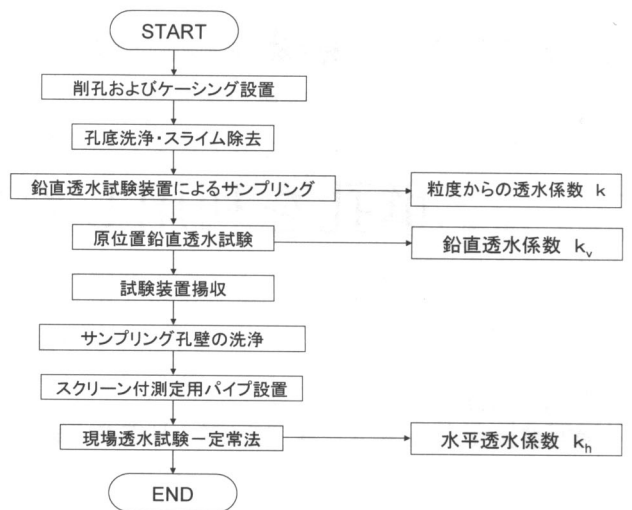


図2 透水異方性調査の流れ

- ②孔底洗浄とスライム除去：乱れの少ない試料の採取方法と同様に、孔底の洗浄ならびにスライム除去を行う。
- ③鉛直透水試験装置によるサンプリング：鉛直透水試験に先立ち、試験区間のサンプリングを行う（試験装置内に、対象土層を乱れの少ない状態で内包する）。
- ④原位置鉛直透水試験：サンプリング削孔の後に、試験装置を原位置に静置したまま、内蔵の揚水ポンプによりサンプリング試料中を鉛直方向に浸透した地下水を定常揚水する。このときの揚水量と平衡水位との水位差より式(1)を用いて鉛直方向の透水係数 k_v を求める。なお、水圧ならびに揚水量はデータロガーおよびパーソナルコンピュータを用いた自動計測としている。計測時間は秒単位とした。

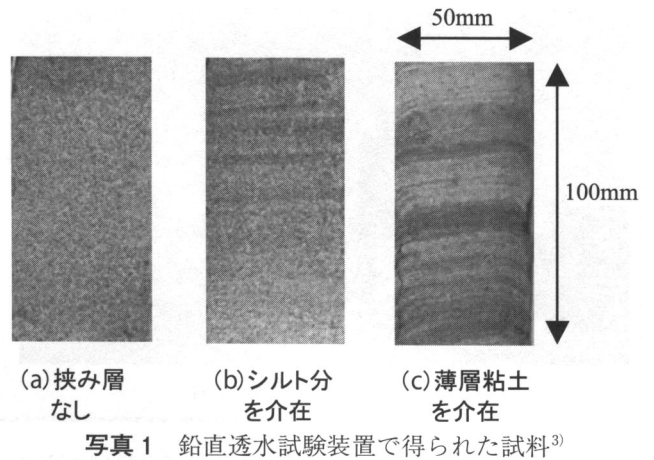
$$k_v = \frac{Q \times L}{\Delta h \times A} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

- k_v ：鉛直透水係数 (m/s)
- Q ：揚水流量 (m^3/s)
- L ：試験区間長 (m)
- Δh ：平衡水位との水位差 (m)
- A ：試験区間断面積 (m^2)

- ⑤試験装置の揚収：試験装置を地上に揚収する。試験装置を解体して、サンプリング試料を目視観察するとともに、土質試験用試料を選定する。写真1に採取した試料の例を示す。同写真に示したように、砂層であっても浸透方向に直交するシーム状の粘性土を狭在する場合もあり、透水特性の異方性が容易に推察できる。

- ⑥サンプリング孔の洗浄：鉛直透水試験装置による削孔は清水で行い、泥水による試験への影響を低減する。
- ⑦スクリーン付測定用パイプ設置：単孔を利用した透水試験の試験中に孔壁の崩壊を防ぐ目的でスクリーン付測定用パイプを設置する。スクリーンの開孔率は約30%としている。
- ⑧現場透水試験：単孔を利用した透水試験を鉛直透水試験と同様に定常法により行う。試験区間は鉛直透水試験深度に合わせて設定する。単孔を利用した透水試験で得られる透水係数は水平方向の透水性が卓越するものといわれており²⁾、同試験で得られた透水係数を水平透水係数 k_h とする。



上述の成田砂層に対して実施した鉛直方向の透水係数と水平方向の透水係数の関係をまとめて図4に示した。

透水異方性調査で得られた成田砂層の鉛直透水係数 k_v は、概ね水平透水係数 k_h の1/10~1/100の範囲にあり、ばらつきを生じている。

成田砂層中には、前述のようにシーム状に粘性土が介在しており、 k_v と k_h の関係に示されるように、透水性の異方性を生じる一因となっているものと推定される。

4. 鉛直透水試験結果

鉛直透水試験結果は図3に示すように、試験装置に内蔵した電気式水圧計で水頭を計測し、累積揚水量を電子天秤で質量として計測して水頭、累積揚水量～計測時間の関係で整理する。

図3に示した定常状態を示す透水係数評価区間(時間 $t_0 \sim t_1$)において、水頭と平衡水位との差を Δh とし、同区間の累積揚水量の差から単位時間当たりの揚水流量 Q を求めて、式(1)により鉛直透水係数 k_v を算出する。

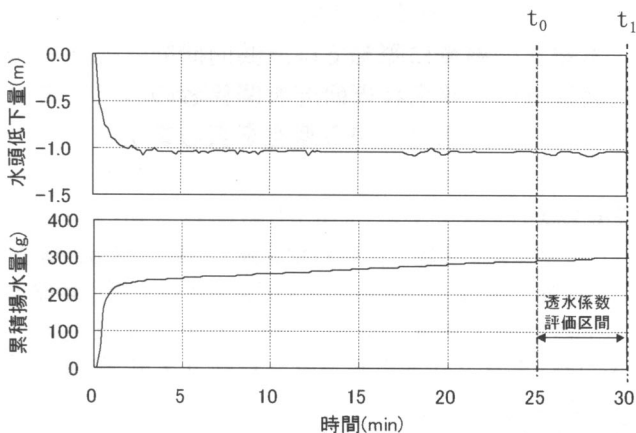


図3 鉛直透水試験における水頭、累積揚水量～時間の関係³⁾

図3は千葉県北部一帯の台地を構成する洪積砂層(成田砂層・写真1参照)での例である。 Δh を1m程度とした場合、概ね試験開始後25~30分で定常状態に至る。

Δh を0.5, 1.5mと段階的に変化させても、定常状態に至る時間はほぼ変わらず、それぞれの段階で得た k_v の平均値を鉛直透水係数とした。試験に要した時間は約2時間であった。

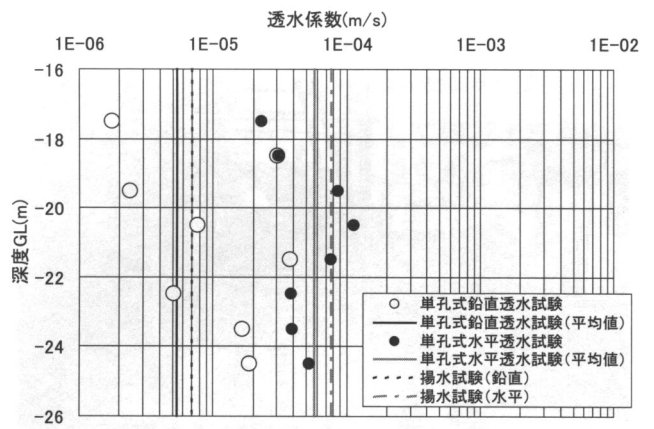


図4 透水異方性調査で得た k_v と k_h の関係⁴⁾

5. 現地作業状況

現地作業状況の例を写真2~4に示す。

前述のように、鉛直透水試験装置は、水圧計ケーブルや揚水量計測用ホースの保護として二重管ロッドを用いている(写真4参照)。このため、外管ロッドの直径は $\phi 60$ mm となり、一般のボーリング調査で用いるボーリング機械に比較して、大型の機械を用いる必要がある(写真5参照)。

調査地への搬入には、大型トラックやクレーンの使用も必要となる場合があり、一般的な地盤調査に加えて、敷地条件や、工期等について注意が

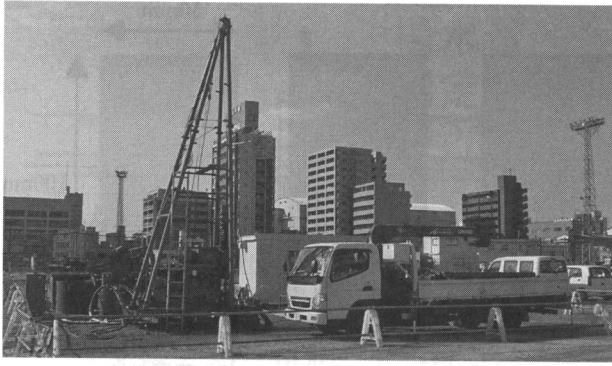


写真2 現地作業場の例

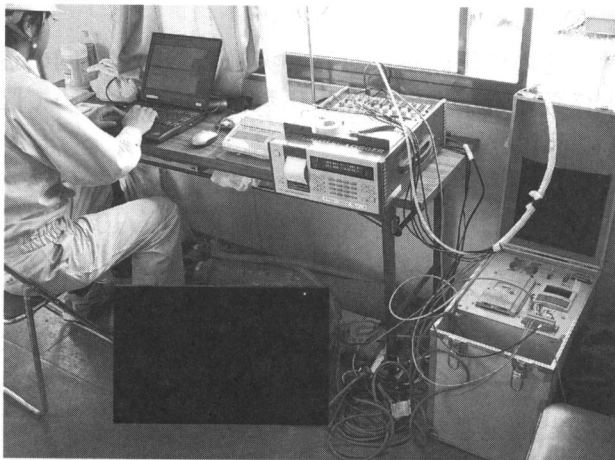


写真3 水圧および揚水量の計測状況



写真4 ボーリングロッド（二重管）の継ぎ足し状況

必要である。



写真5 透水異方性調査に用いる大型ボーリング機械

6. おわりに

前述のように本調査では、大型ボーリング機械を用いており、一般的なボーリング調査に比較して、作業範囲が広く、クレーンの利用も伴っている。しかしながら、揚水試験に比較すると、短期間で帯水層のパラメータを得ることができ、今後多方面での活用が期待される調査手法であると考えられる。

本論文の執筆に際しては、共同研究者である株式会社竹中工務店技術研究所関係者の方々にご協力いただき、末尾ながら謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：山留め設計施工指針，222p.，2002.
- 2) 地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会編：地盤調査の方法と解説，pp.377-393，2004.
- 3) (株)東京ソイルリサーチ：技術カタログ，G-08，2010.
- 4) (株)東京ソイルリサーチ：社内資料.

鹿児島市内の温泉と 西郷隆盛が湯治した温泉

1. はじめに

鹿児島県は全国有数の温泉県であり、県内各地に多数の温泉があり、県民と県外及び海外からの観光客に喜ばれています。特に、昨年3月の九州新幹線の開通により全国的に有名な霧島温泉郷や指宿温泉を訪れる観光客も多くなり、しかも県内各地の温泉宿も賑わっています。

本稿では、鹿児島市内の温泉の湧出状況と地質について述べるとともに、明治の偉人西郷隆盛が湯治した県内の鄙びた温泉を紹介いたします。

2. 鹿児島市内の温泉について

鹿児島県内には主な温泉地が約40もあり、源泉は2000以上と全国で2番目に多いと言われています。「温泉王国・鹿児島」にあって、鹿児島市内の源泉数は約270と県庁所在地では日本一を誇っています。

市内の温泉銭湯はJR鹿児島中央駅周辺や天文館などの中心地はもとより、住宅地まで市内一円に湧き出しています。市内の温泉銭湯は、徒歩10分圏内にあり、「普段着で温泉」という贅沢ができるからスゴイと言われています。

市内の温泉銭湯は約75箇所と県庁所在地ではずば抜けて多く、名高い旅館・ホテルはもちろん、銭湯と呼ばれる公衆浴場の多くは温泉であり、しかも銭湯の入浴料はほとんどが大人360円、子供が140円とリーズナブルで早朝6時から22時頃まで営業しています。

ところで、市内の温泉の長所は、表示がしっかりしており温泉分析書が新しいとされています。また、全国でも珍しく飲泉ができる施設が非常に多いのも特徴です。

市内の温泉は、東西8km、南北20kmの広域に分布し、市街地全域にわたって地下には温泉水

の存在が知られています。温泉の掘削深度は東側程深く、400~900m、中には1000mを超えるものもあります。湧出温度は40~55℃です。

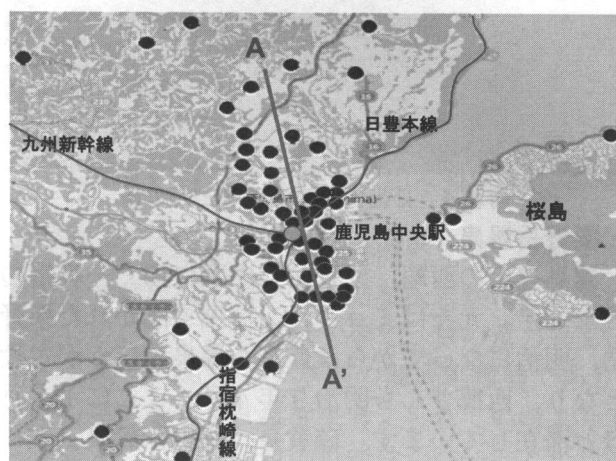
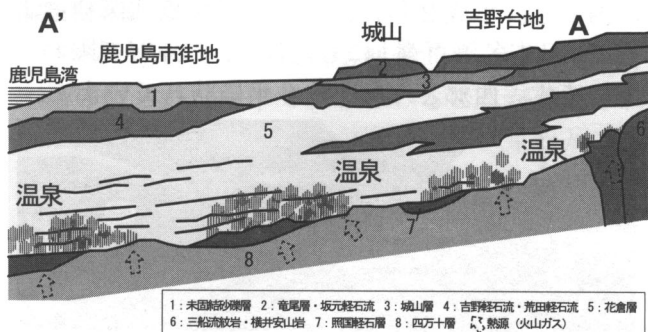


図1 鹿児島市内の温泉と地質断面線位置図

市内の温泉の大半は、主として四万十層群中の割れ目・空隙に賦存している温泉水を採取しています。下図には、市内の温泉の賦存状況と地質との関係を示します。

泉質は、単純泉、食塩泉、両者の中間にあたる重曹泉です。これらの分布から平面的には単純泉が城山地区を中心に市内北部から西部にみられ、海岸部に食塩泉、他地域に重層泉が多いとされています。また、鹿児島市の対岸には桜島が毎日噴煙を上げており、ここにも海岸沿いの7箇所に食塩泉が湧出し、いずれも風光明媚な温泉として知られています。



1: 米田層(砂礫層) 2: 竜尾層・坂元層(石炭) 3: 城山層 4: 吉野層(石炭)・荒田層(石炭) 5: 花倉層 6: 三船層(軟岩)・横井山層 7: 照国層(石炭) 8: 四万十層 ①: 熱源(火山ガス)

図2 鹿児島市内温泉の賦存状況と地質断面図(1), 2)に加筆

3. 西郷隆盛が湯治した県内の温泉について

鹿児島市内の温泉とは別に西郷隆盛が訪れたお気に入りの日当山温泉を始め、個性的で風情のある温泉を紹介いたします。

・日当山（ひなたやま）温泉

鹿児島空港から国分平野に降りた、天降川の両岸に広がる温泉郷です。泉質は肌にやさしいナトリウム炭酸水素塩泉です。西郷さんも明治元年、2年、7年、9年と頻りに訪れた温泉郷で、昔から鹿児島島の奥座敷として栄えてきました。



写真1 日当山温泉の西郷どんの湯

・栗野岳温泉

霧島連山の西端、栗野岳の中腹に湧く一軒宿の温泉です。元々はミョウバン採掘で開かれた栗野岳、明治になってからは豊富な温泉のほう为主役となり、西郷さんも明治9年4月、ここに1ヶ月ほど滞在しています。硫黄泉、明礬緑礬泉（ドロ湯）、蒸気湯（蒸風呂）の3種が楽しめます。



写真2 栗野岳温泉の南洲館

・川内高城（せんだいたき）温泉

鎌倉時代にその名を記された歴史ある温泉で、四方を山に囲まれた小さな盆地の中に位置する県内でも有名な温泉郷です。ここの泉質は単純硫黄泉で、俗化されていない鄙びた人情味あふれる湯治湯です。平成2年には、日本温泉療法医会によって「日本名湯百選」にも選ばれ、常連客で賑わっています。西郷さんも明治6年に訪れています。



写真3 川内高城温泉の日本名湯百選記念碑

・吹上（ふきあげ）温泉

古くは伊作温泉と呼ばれた湯治場で、戦前からの鄙びた宿が数件と町営の公衆浴場があります。

泉質は県内トップクラスの単純硫黄泉です。西郷さんは明治3年と7年に逗留したとされています。



写真4 吹上温泉のみどり荘

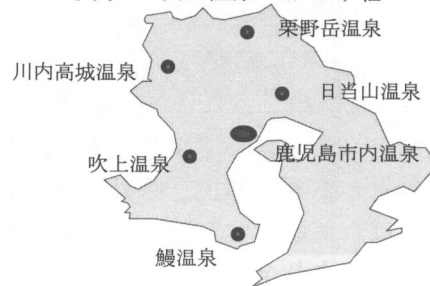


図3 西郷隆盛が訪れた温泉位置図

・鰻（うなぎ）温泉

西郷さんは明治7年来遊。この時期、佐賀の乱に敗れた江藤新平が西郷さんを訪ね、二人で激論したとも伝わっています。ちなみに温泉が位置する鰻池は約5500万年前、池田湖の形成と同時期にマグマ水蒸気爆発で形成され、火口に水が溜まってできた湖です。泉質は単純硫黄泉です。



写真5 区営鰻温泉

4. あとがき

大地の恵みである温泉について、少しばかり触れてみました。鹿児島にお越しの際は、是非近場の温泉銭湯なり風光明媚な温泉宿を尋ねられ、一時の湯を楽しんでいただければと思います。

〈参考文献〉

- 1) 鹿児島大学理学部地学科応用地質学講座：「かだいおうち」, 2000
- 2) 藤田俊一・坂元隼雄：鹿児島市及びその北部地域の温泉水の貯留機構に関する地球科学的解釈, 2001
- 3) 露木利貞：鹿児島市内温泉の賦存状態, 1975.
- 4) 露木利貞：鹿児島県の地質と温泉, 1992
- 5) 南日本新聞社：温泉雑学, 1991.
- 6) 鹿児島市観光振興課：温泉三味かごしま市, 2011.

〔南九地質株式会社 満尾裕一〕

各地に残すべき地形・地質

平成20年岩手・宮城内陸地震で出現した崩壊地形とカルデラ内湖底堆積物の大断面 (宮城県栗原市)

崩壊地形群の概要

平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の発生と同時に、宮城県栗原市・荒砥沢ダム北方の栗駒山南東山麓に最大高150mに及ぶ大崩壊が生じた。山体斜面の一部土塊が最大幅約900m、長さ約1,300mの範囲にわたって最大300mも滑動したため、残された山体側と移動土塊との間が分離して生じた大地質露頭である。



写真1 荒砥沢ダム湖左岸側から崩壊地を望む(写真中(A)(B)の位置は図2参照)

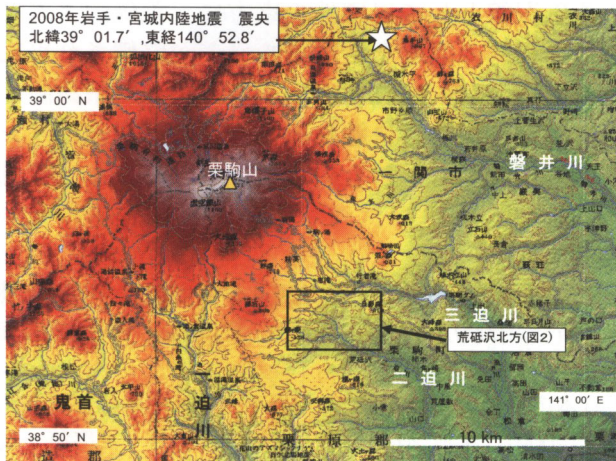


図1 位置図 栗駒山南東麓



図2 位置図 栗原市荒砥沢北方

この「荒砥沢地すべり」を含め多くの露頭出現で、未詳であった崩壊地内の地質層序が明らかにされ

た。すなわち下位より①砂岩泥岩互層、②軽石凝灰岩、③細粒凝灰岩、④溶結凝灰岩がほぼ水平に堆積している。これらはすべて、負の重力異常構造から示されるカルデラ内の湖底堆積物であり、また、その地質年代は従来考えられていたよりずっと若く、中期更新世の可能性が高いことが判明した。

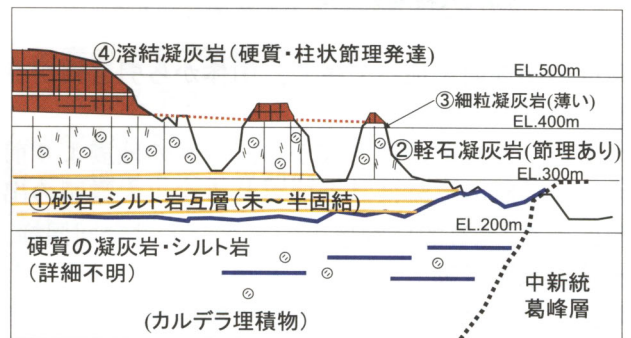


図3 北西-南東方向の地形及び層序概念図

地質層序

①のうち特に砂岩は固結度が低く、すべり面は、本層の限られた層準で生じていることが確認されている。②は軟岩であるが岩盤全体に東西及び南北2系統の節理が疎らに発達している。④は何枚かのユニットがあり、溶結度の高い部分では柱状節理が良く発達し、上部には泥流堆積物(ラハール)が分布する。

巨大なすべりは、①の水平面と②に発達する高



写真2 旧道切断地点 (A) より西方を望む



写真3 既存節理に沿う分離崖 (A) の東方 写真右下矢印に人物スケール

角度の節理面を使って生じ、山体から引き剥がされたのであった。

また、地震前の地形図から、今回の地震より前の山体分離の痕跡は読み取られるが、大露頭の出現により、地質的にも過去のイベントは今回同様、土塊の水平滑動であったことが示された。すなわち過去の移動土塊に残された④溶結凝灰岩の基底高度(写真4の赤矢印)に山体側と比較して差が認められない。

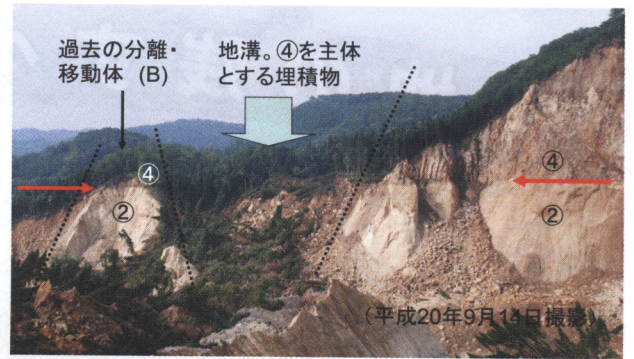


写真4 過去の水平山体分離の痕跡。(A) から西方 (B) を望む。

巨大地質災害は、貧弱な露頭ゆえに地質説明に苦慮してきた地質技術者に対して皮肉にも大きなプレゼントを与えたといえる。

崩壊地の修復

当該地域は現在、山地災害の対策工事がなされている。大露頭は、地震直後の荒々しさは消えつつあるが、崩壊の輪郭と地質断面の一部は残されている。

崩壊地の中であって消失した道路は、新たに市道荒砥沢線として崩壊地の東方に、荒砥沢ダムと市道馬場駒の湯線を結ぶ新ルートが整備され平成24年4月28日に開通した(図2)。

本稿が皆様の目に触れるころにはビューポイントの整備計画も進むものと期待される。

【参考文献】

平成20年岩手・宮城内陸地震4学協会東北合同調査委員会(2009)平成20年岩手・宮城内陸地震災害調査報告書

日本応用地質学会平成20年岩手・宮城内陸地震調査団(2009)「平成20年岩手・宮城内陸地震」災害第一次現地調査報告. 応用地質, vo. 50, no. 2, p. 98-108.

東北森林管理局(2008)岩手・宮城内陸地震に係る山地災害対策検討会分科会資料(荒砥沢地すべり)

[(株)東北開発コンサルタント調査部 橋本修一]

各地の博物館巡り

岐阜県瑞浪市 「瑞浪市化石博物館」



化石博物館エントランス

化石のまち「みずなみ」

岐阜県の南東部に位置する瑞浪市。市一带に分布する瑞浪層群では1500～2000万年前の新生代の化石が多く発見されます。陸地や海・湖に砂泥が積もり出来た地層のほか火山灰で出来た地層も含むため、貝・魚・植物・動物など1000種類以上の豊富な産出があり、「瑞浪化石」として岐阜県の天然記念物に指定されるほどです。

博物館の全体像

瑞浪市民公園内にある当博物館では、展示テーマ「2000万年にわたる瑞浪の自然の変遷を化石や地質をもとに再現すること」をもとに所蔵25万点から瑞浪地域で産出された約1000点を展示、さらに県内外の化石も並んでいます。また瑞浪層群の歴史と共に日本列島の地質層の変遷についても学ぶことが出来ます。館内は以下の詳細なテーマごとにコーナーが設けられており、豊富な展示内容に目移りします。

〔メインテーマ〕

瑞浪の地質と化石/まわりの様子/そのころの海と陸/古瀬戸内海/新生代の日本/瀬戸湖と古木曾川/コハクと昆虫の世界/地のめぐみ/瑞浪の自然



瑞浪化石として有名な「ビカリアのおさがり」

〔サブテーマ〕

瑞浪化石の分類/古生物の生活/化石のいろいろ/瀬戸内海/岐阜県の地質と化石

また映像コンテンツも充実しており、初心者や子供にもわかりやすく案内してくれます。



イメージキャラクターのデスモとMio

①恐竜のようで恐竜ではない！？

デスモスチルスという動物をご存知でしょうか。今から約1000万年前まで生息していた哺乳類で、瑞浪市で世界初の頭骨発見がなされたことで話題になりました。瑞浪化石の代表でもあります。展示してある化石の大きさといい形といい、恐竜と見間違えてしまうほどの迫力です。



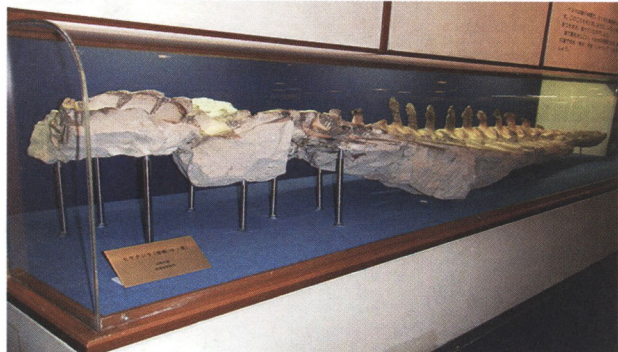
デスモスチルスがお出迎え

化石で見ると恐竜のようですが、生息当時はずんぐりしたカバのような可愛らしい生き物だった

ようです。デスモチルスの絵画も展示してありますので、化石と実物を見比べてみるのも面白いのではないのでしょうか。

②瑞浪のクジラ

瑞浪地域は中新生（約 2300 万年前から 500 万年前）に湖となり、のちに海の時代を迎えて瑞浪層郡を堆積してゆきました。



瑞浪 IC 付近で産出したヒゲクジラの脊椎

かつての瑞浪の海には大きなヒゲクジラやマッコウクジラの祖先、イルカなどが生息したようです。瑞浪層郡のひとつ、山野内部層では中央道瑞浪インターチェンジ付近にて約 20 頭もの大量のクジラ化石が見つかりました。陸地の瑞浪市でクジラの化石が発見されるのですから、地層の歴史・変遷を観じます。

③コハクと昆虫の世界

化石が数多く展示される中で、色鮮やかに一際目を引くのがコハクと昆虫の世界のコーナーです。1973 年の中央道の工事の際に、瑞浪市釜戸町の現場から「虫入りコハク」が大量発見。これまでの日本ではないほどの産出量の多さで注目されました。コハクの中の虫さん達は 1600 万年前の姿をそのまま見せてくれています。

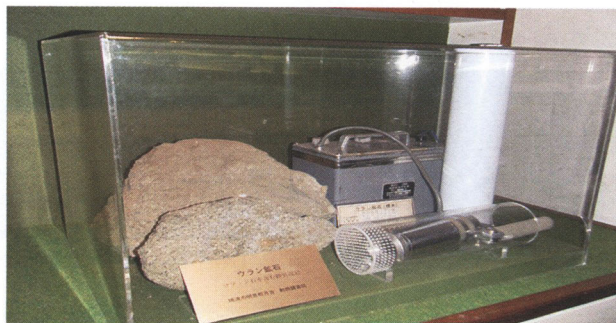


アリのコハク（約 500 倍）

④放射線測定！？

地のめぐみのコーナーではガイガーカウンターがお目見えします。原発の影響で一般の私達も存在を知る事となったガイガーカウンターですが、古くからウラン鉱石の探鉱にも使われていたとの

こと。展示品は昭和 34 年製で、ボタンを押すと動作音を聞くことができます。放射線はもともと自然界にも存在していたのですね。



ウラン鉱石とガイガーカウンター

⑤化石採集を体験

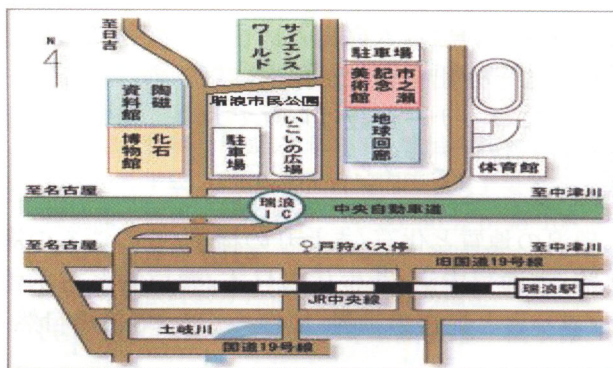
瑞浪市化石博物館では近くに野外学習地を設けており、化石の観察や採集を体験することができます。実際に昨年来館者のうち 6 割を超える方が化石採集を体験しています。

おわりに

化石をみるだけでなく、化石を通じて地層の歴史を学ぶ事ができる当博物館は非常に勉強になると観じました。また、大人から子供まで世代を問わず楽しめる場所です。公園内の他の施設も含め、是非一度訪れてみてはいかがでしょうか。

所在地ほか

JR 中央線瑞浪駅から徒歩 30 分・タクシー 5 分
中央自動車道瑞浪 IC より 3 分



住所	〒509-6132 瑞浪市明世町山野内 1-13	
電話	0572-68-7710	
開館時間	9:00 ~ 17:15 (月曜日定休)	

入館料(高校生以下は無料)	個人	団体 (20名以上)
	大人	200円 150円

瑞浪市化石博物館動画チャンネル
youtube.com/user/MizunamiFossilMuseum
((株)興栄コンサルタント 小野慶太)