

地質標本館 特別展



深海の新しい 資源にせまる

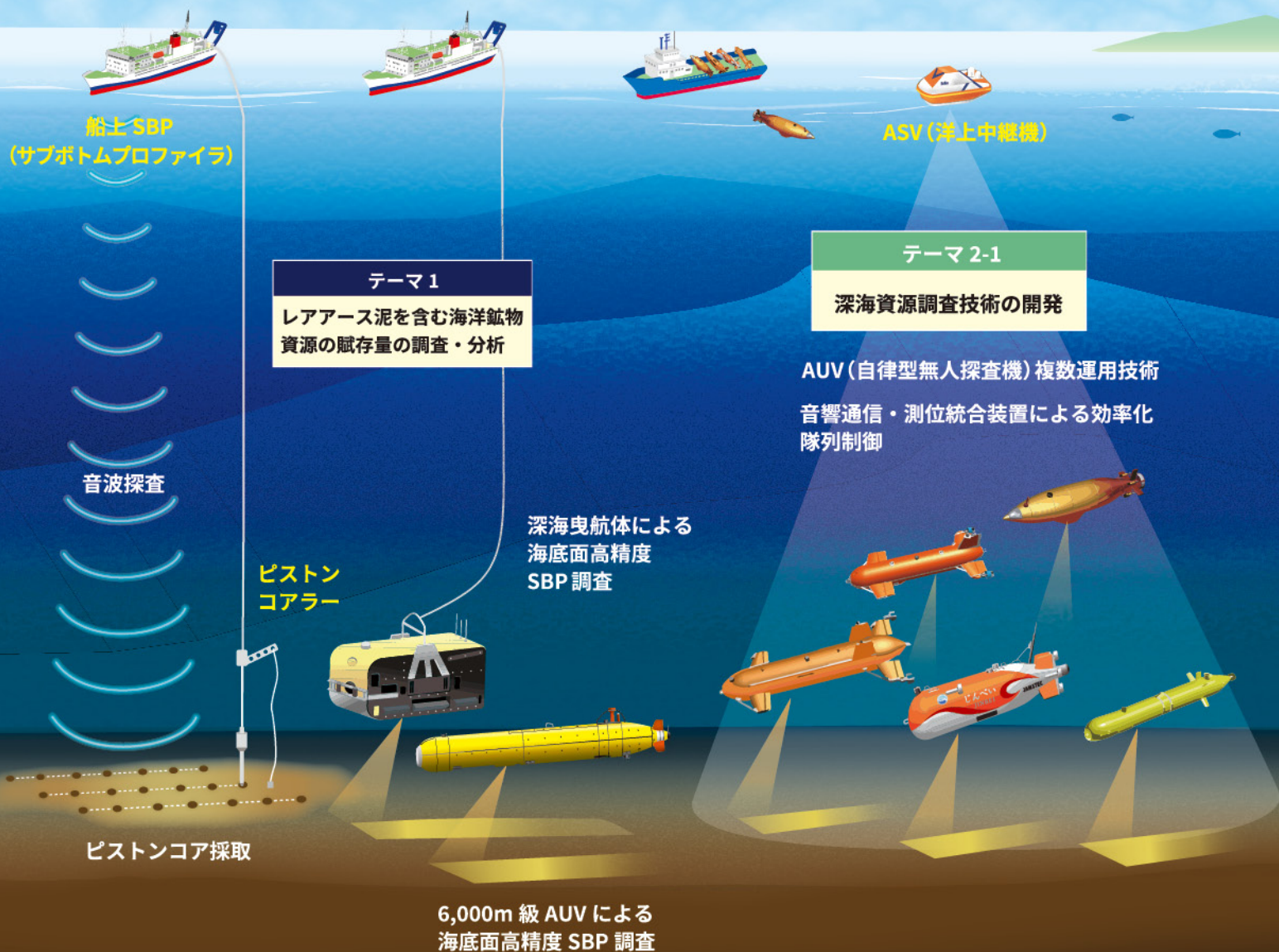
—SIPプロジェクトによる革新的な地質調査—

協力：SIP 革新的深海資源調査技術
© SIP/JAMSTEC

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター

深海の新しい資源にせまる

—SIP プロジェクトによる革新的な地質調査—

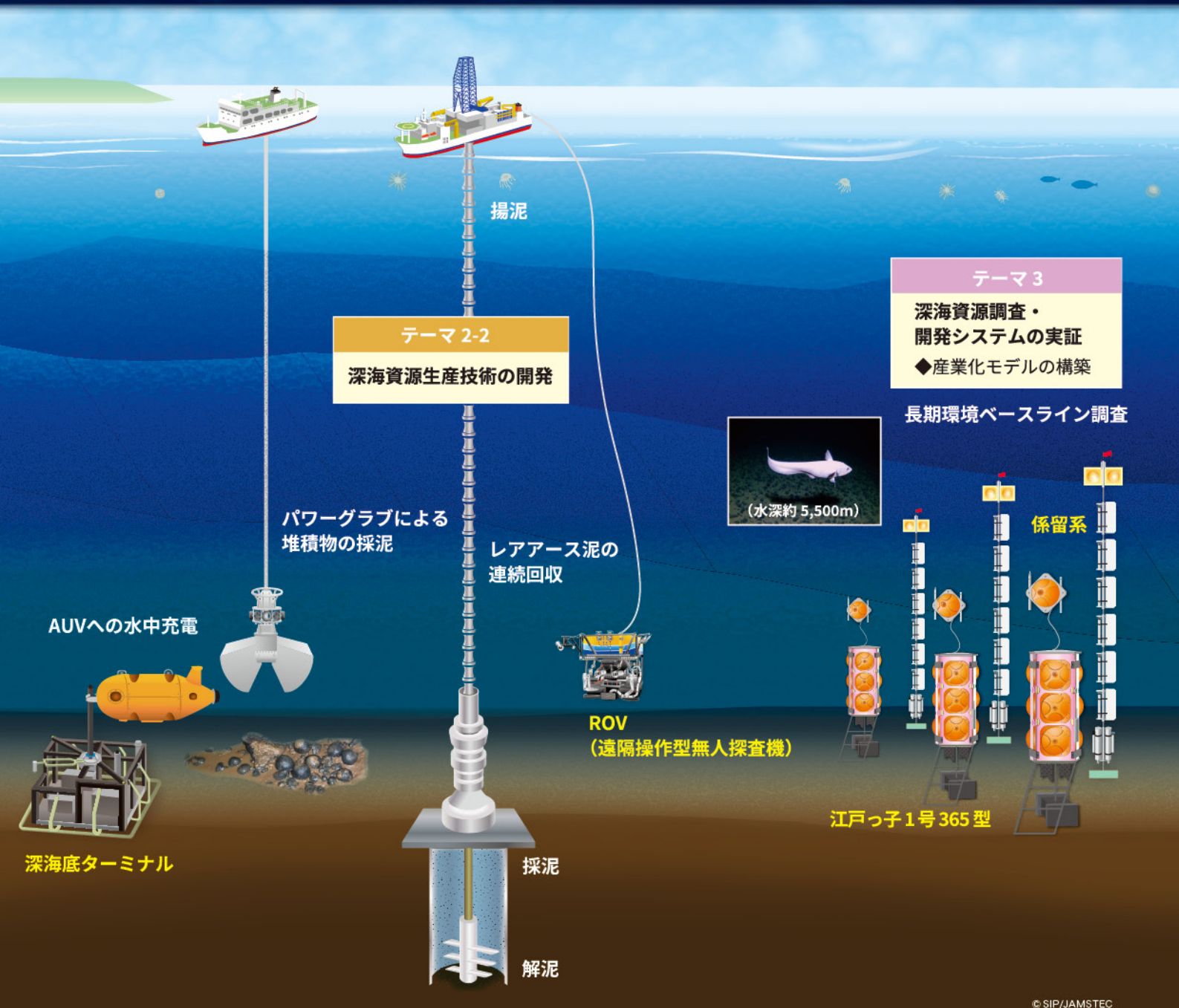


戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 革新的深海資源調査技術における海底調査・開発のイメージ

はじめに

日本は世界第6位の大国だということをご存じですか？ 領海、排他的経済水域などの水域面積は447万平方キロメートル（うち領海は43万平方キロメートル）であり、日本の領土面積は世界で第61位ですが、領海および排他的経済水域の広さでは世界第6位ということです（山田，2005）。日本は、四方を海に囲まれる海洋国家です。広大な日本の海は、時として大きな被害をもたらす大地震や津波を引き起こす場合があります。一方で、日本は古くから、海の恩恵を享受して成り立ってきました。その恵みの一つとして、海の底には、エネルギー資源や鉱物資源の分布が推定されています。海の中の資源として、日本の深海底での鉱物資源の開発を進め、経済的に実現可能になれば、日本の基幹産業の発展に向けた安定供給の確保に貢献できます。また、資源の安定供給の実現は、日本の安全保障の観点からも重要です。

日本の深海には、レアアースに富んだ堆積物があることが報告されています（Kato *et al.*, 2011）。このレアアースは、これからの産業を支えるとても貴重な資源といえます。これは、日本の貴重な海洋鉱物資源として注目されていますが、5,000～6,000mの深海底に賦存しており、世界的に見ても、調査技術や回収技術が未だ確立されていません。これに対して、その分布と状態を調べ、効率のよい回収技術を確認するため、国の戦略的イノベーション創造プログラム



© SIP/JAMSTEC

(SIP) の「革新的深海資源調査技術」ではさまざまな技術開発を進めており、海洋鉱物資源の採泥・揚泥を可能とする技術を世界に先駆けて確立することを目指しています。

上の図は SIP プロジェクトの主な研究開発項目を示しています。研究開発は、次の通り、調査・分析、技術開発、システム実証に分けられています。その中には、4つのテーマがあり、それぞれ独立して進めるのではなく、出口戦略となるテーマ3への技術移転を進めています。

- テーマ1 : レアース泥を含む海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析
- テーマ2-1 : 深海資源調査技術の開発 (深海 AUV 複数運用技術、深海底ターミナル技術)
- テーマ2-2 : 深海資源生産技術の開発 (レアース泥の採泥・揚泥技術)
- テーマ3 : 深海資源調査・開発システムの実証

産業技術総合研究所 (産総研) では、過去 40 年以上にわたり日本周辺海域の海洋地質学的研究およびその成果としての海洋地質図の出版を行っており、日本の中で海洋の地質調査のできる唯一の組織といえます。海域の地質調査による資料の取得からその解析・分析を一貫して行うことができ、SIP プロジェクトにおける「レアース泥を含む海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析」の一環として、南鳥島海域のレアース泥の高濃度分布域で、開発ポテンシャルの高いサイトの調査を行っています。この特別展では主に地層の様子を調べるための地質学的なアプローチについてご紹介します。

海洋鉱物資源とは何か

地球の営みの中でできる海底の鉱物資源

地球はダイナミックな惑星で、常に物質が循環し、元素の移動と濃集が起きています。これは地球の内部に保持される熱や、水惑星であることと深く関連しています。鉱物資源は、このような地球の活動により、地下あるいは海底を含む地表の岩石中に有用元素が濃集して形成されます。

社会の産業の中で利用するには、鉱石から必要な元素を取り出して、化学形を変換、精製することが必要になります。このよ

うな、採取から製品化までのコストを考慮した上で、経済的に採取・利用に見合う濃集体を鉱床といいます。つまり、地質学的な濃集体が鉱床になりうるかどうかは、世界的な経済情勢を受けた鉱物の値段の変化、採取・利用の技術開発に依存しています。鉱床タイプは、その成因との関連によって、形成される場所が偏在しています。

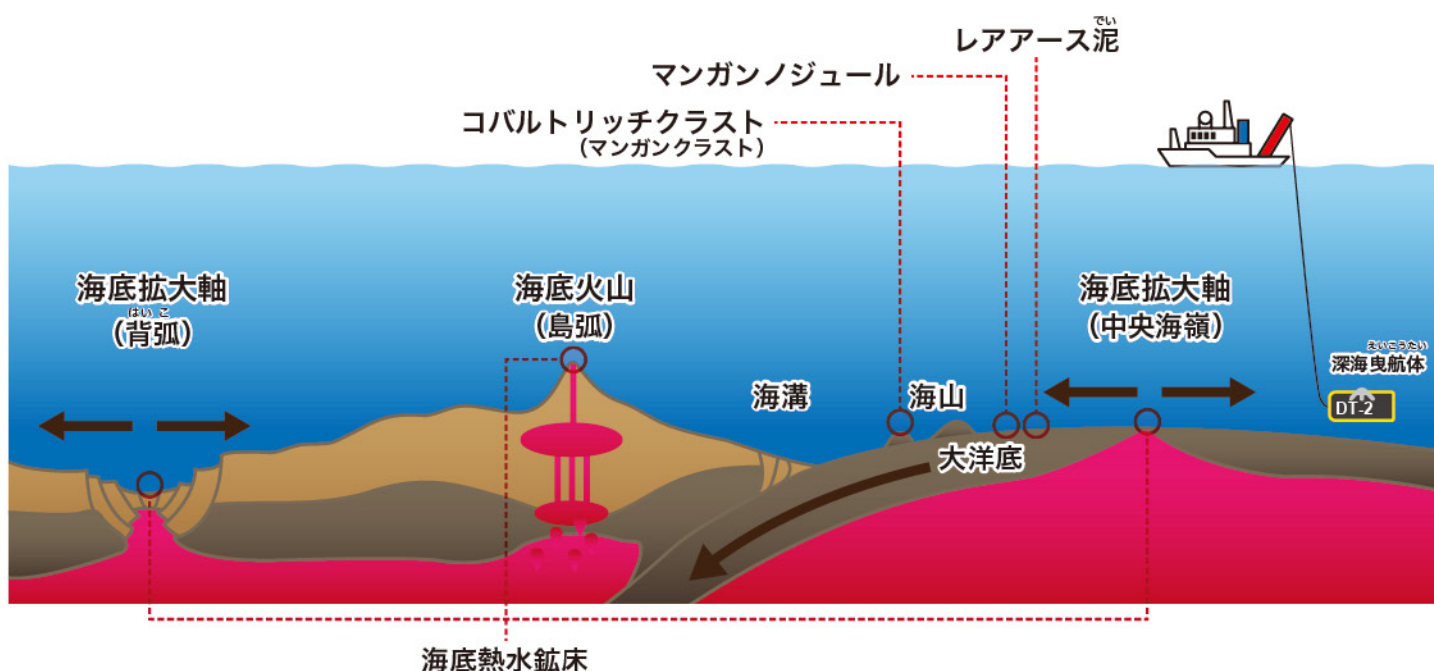


図1 海洋鉱物資源とテクトニクス

海の資源

1972年に東太平洋で海底熱水鉱床が初めて発見されました。海底でも陸上と同様に偏在する有用資源の存在が明らかになったのです。以来、海底に存在する鉱床への注目が高まり、海洋資源の科学的研究と開発に向けた工学的研究が始まりました。現在の海洋で重要な金属資源とされ、調査が進められているものは、海底熱水鉱床、マンガンノジュール、コバルトリッチクラスト、レアアース泥の4つです。世界第6位の広大な排他的経済水域を持つ日本には、この4種類すべての鉱物資源が存在しています。

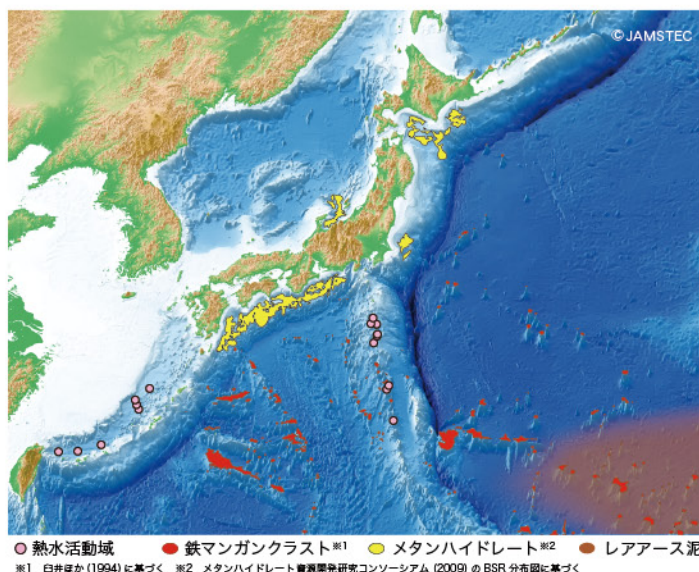


図2 日本の周りにおける資源は、図1のような地球の営みに伴って分布しています

代表的な海洋鉱物資源

①海底熱水鉱床

海底熱水鉱床は、海底火山などに分布する硫化鉱物などから構成されており、亜鉛、鉛、銅などのベースメタルおよび金、銀といった貴金属の資源として注目されています。海底熱水活動に伴って形成される熱水性の鉱床で、数千年～数万年の時間スケールで形成されていると考えられています。写真1はチムニーと呼ばれる熱水噴出孔です。チムニーから噴き出す水には塩分や金属成分がたくさん溶けています。陸上の鉱床に匹敵する高品位を持つことが知られています。

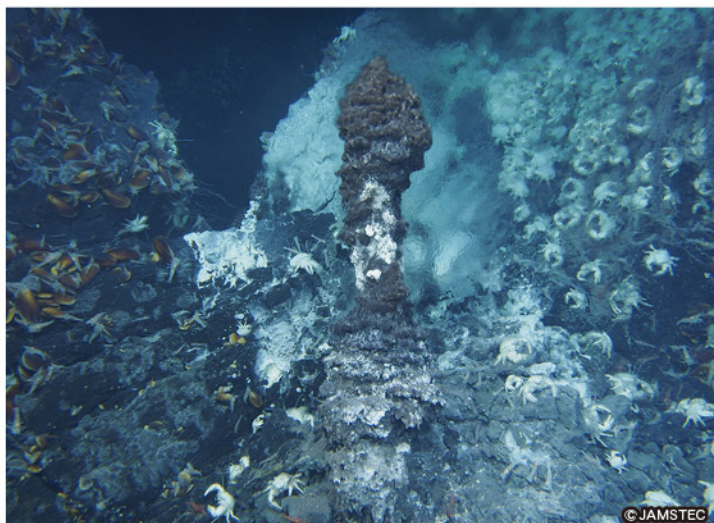


写真1 熱水噴出孔：チムニー（中央）
周りには二枚貝や白っぽいゴエモンコシオリエビがびっしり集まっています。

②マンガンノジュール

マンガンノジュール（マンガン団塊）は、水深4,000～6,000mの平坦な海底面上に分布するマンガン酸化物で、ニッケルや銅などが含まれる金属資源として注目されています。海水からの沈殿作用により数百万年を超える長い時間スケールで少しずつ成長していると考えられています。写真2は南鳥島沖でパワーグラブで堆積物を採取した際のマンガンノジュールの様子です。

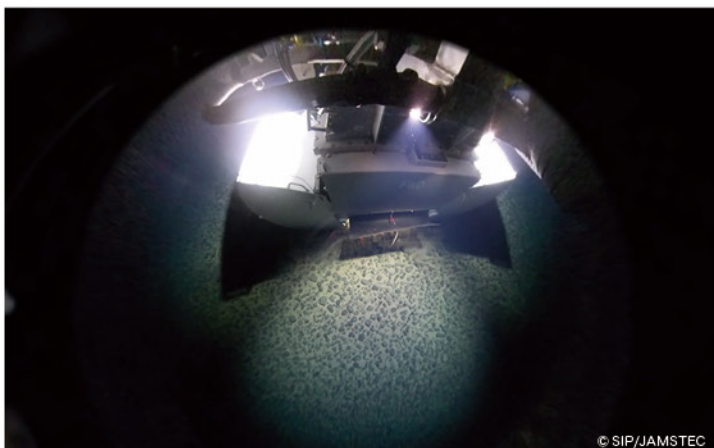


写真2 海底に分布するマンガンノジュールの様子
泥の表面に黒い大量のマンガンノジュールが散在しています。

③コバルトリッチクラスト

コバルトリッチクラストは、海山の斜面などで岩盤を覆って板状に成長したマンガン酸化物で、コバルト、ニッケル、白金などが含まれる金属資源として注目されています。海水からの沈殿作用により数百万年を超える長い時間スケールで少しずつ成長していると考えられています。



写真3 海底面を覆っているコバルトリッチクラスト

代表的な海洋鉱物資源

④レアアース泥

レアアースとは、現代さらには将来の新しい技術を支える資源となる17種のレアアース元素（希土類元素）を指します。レアアースを高い濃度で含む泥の堆積物をレアアース泥と呼び、これらは特定の海域の深海底に分布しています。太平洋のレアアース泥は2000年代以降に発見・報告されました。その成因などはまだまだ未解明で、現在まさにSIPプロジェクトを通じて研究が進んでいるところです。



写真1 実際に海底から採取された堆積物試料

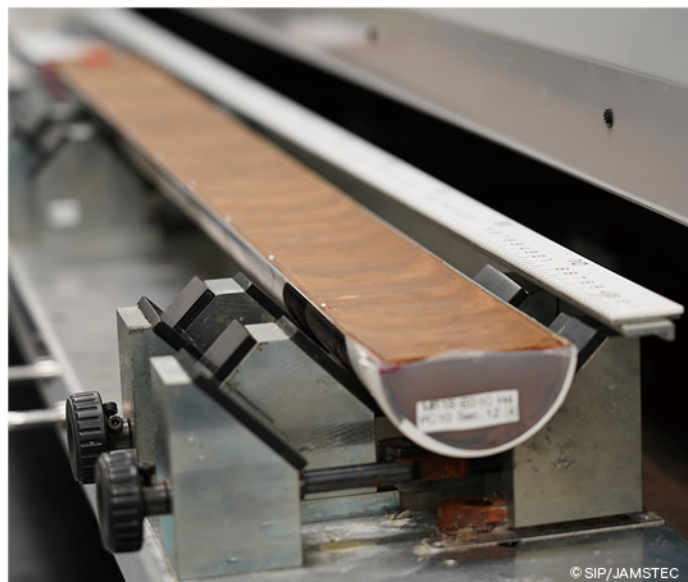


写真2 試料を半割してサンプルの採取や分析を行う

●レアアースの濃縮

レアアース泥を産業に利用するには、泥中のレアアース元素を濃縮する作業が必要です。SIPプロジェクトでは、将来の産業化に向けた第一歩として、調査海域から採取したレアアース泥の濃縮を実施します。

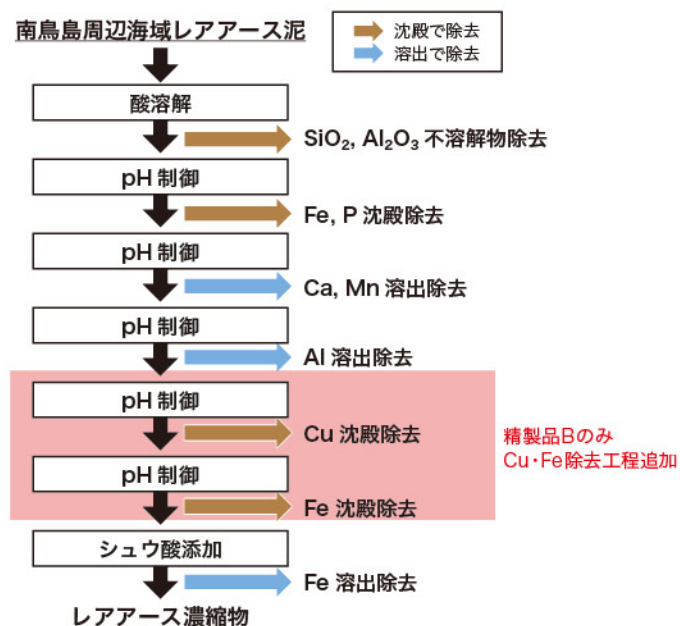


図 レアアース泥からレアアース元素を濃縮する過程
南鳥島周辺海域のレアアース泥の場合。

調査航海で採取した堆積物試料のうち、総レアアース濃度が1,400 ppm以上の区間のみを利用します。自然界の試料はさまざまな不純物を含んでいるため、化学薬品を用い、pHを調節しながら不要な元素を除去します。多くの作業段階を経て、目的のレアアース元素を濃縮していきます。最終的にはさらに精製を進め、各元素に分離したのちに、さまざまな産業の用途に適したレアアース製品に加工していきます。

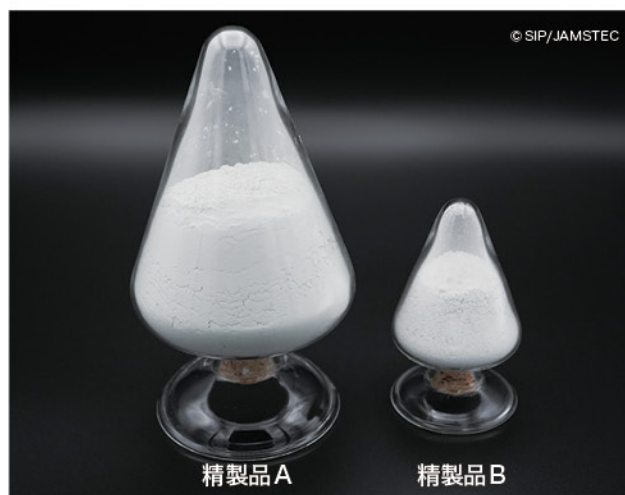


写真3 堆積物試料から精製したレアアース濃縮物

大陸棚のはなし

● 大陸棚とその延伸

領海の基線の外側 200 海里* (約 370 km) の線までの海域 (領海を除く) の、海底およびその下を「大陸棚」と呼びます。大陸棚は原則として領海の基線から 200 海里ですが、地質的および地形的条件等によっては国連海洋法条約の規定に従い延長することができ、排他的経済水域 (EEZ) の外側でも地質調査によって天然資源を開発するための権利が得られる場合があります。

産総研などの研究機関によって大陸棚の調査が行われ、2012 年、国連により 31 万平方キロメートルに及ぶ面積の延長が認められ日本の管轄海域となりました。エネルギー資源やレアメタルなどの獲得競争が激しくなる中で、天然資源に乏しい日本としては自国の資源の量を早急に調査し、将来の開発への準備も同時に進める必要があります。

* 1 海里は 1,852 m に相当

● 排他的経済水域

排他的経済水域 (EEZ : Exclusive Economic Zone) とは、漁業や、石油などの天然資源を掘ったり、科学的な調査を行ったりする活動を、他の国に干渉されずに自由に行うことができる水域です。海に面している国は、自分の海 (領海) の外側に決められた幅を超えない範囲で排他的経済水域を設定することができます。海に面している国は、これらの活動を行う他は、排他的経済水域を独り占めしてはならないことになっています。たとえば、他の国の船が通ったり、飛行機が上空を飛んだり、他の国が海底にパイプラインを作ったりすることを禁止することはできません。

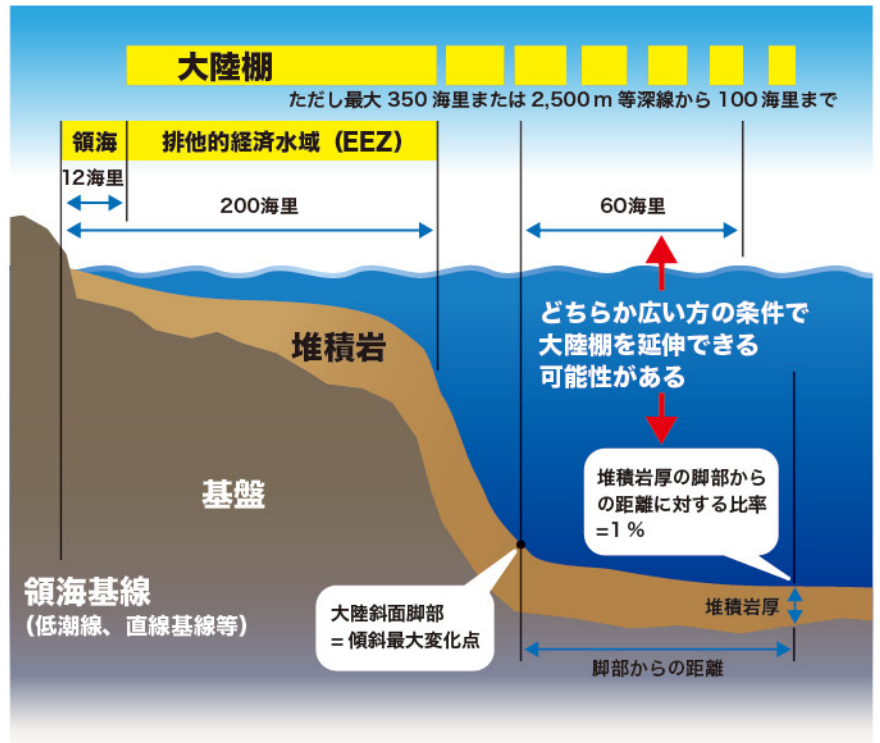


図 1 国連海洋法条約の大陸棚

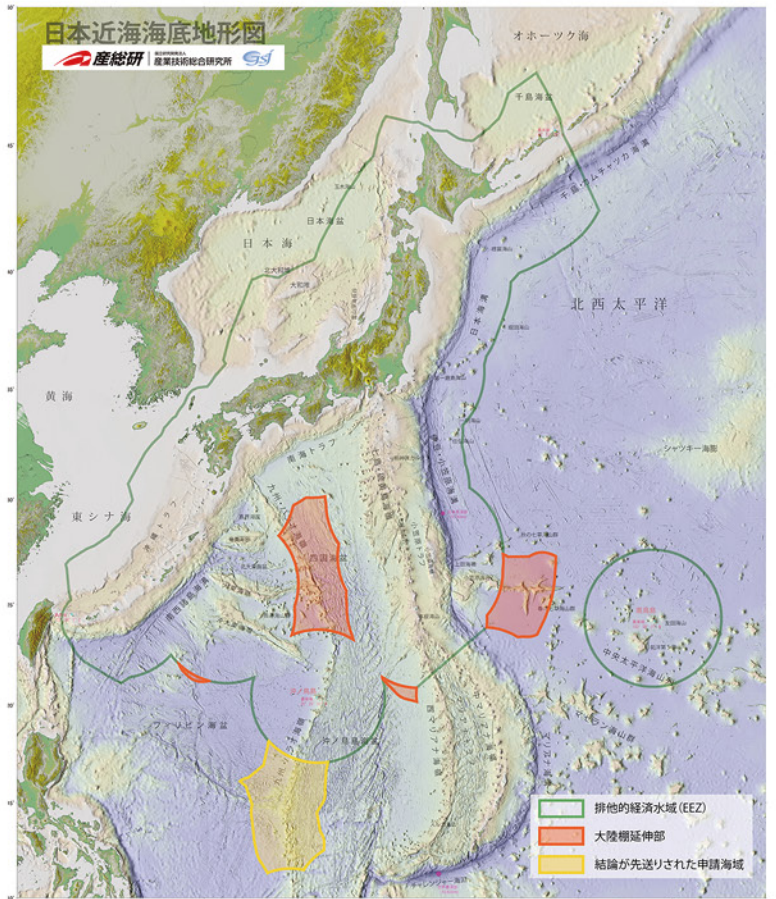


図 2 排他的経済水域と大陸棚延伸部

海底堆積物の採取

深海底で資源が多く分布する場所を見つけるために、海底堆積物を採取・分析します。右図のようにピストンコアラなどを使用して、多くの地点で堆積物を採取します。ピストンコアラは海底面下深く（最長 20 m）の泥質な堆積物を採取することができます。パワーグラブでは、礫やマンガンノジュールなどの粗い粒子を含む堆積物を大量に採取することができます。また、このように採取された堆積物は、深海底で資源を採取する技術やレアアースの濃縮・精製技術の開発に利用されます。

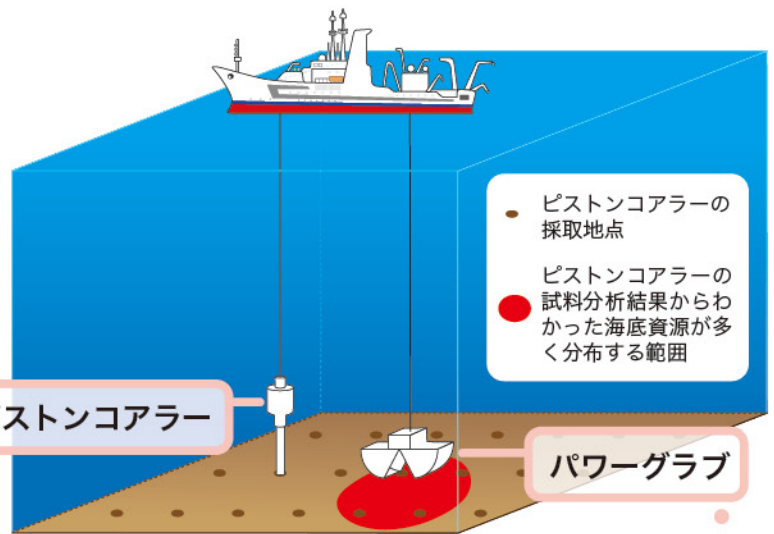
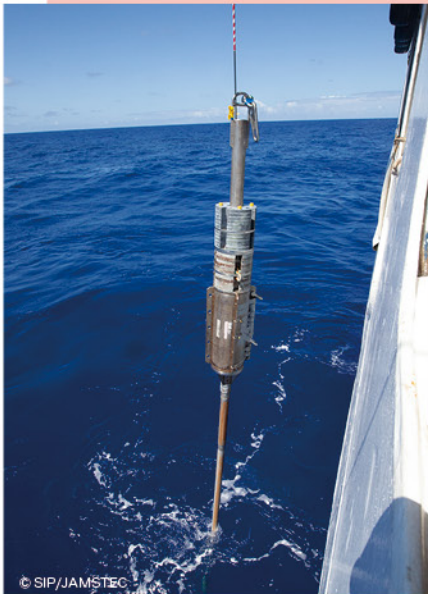
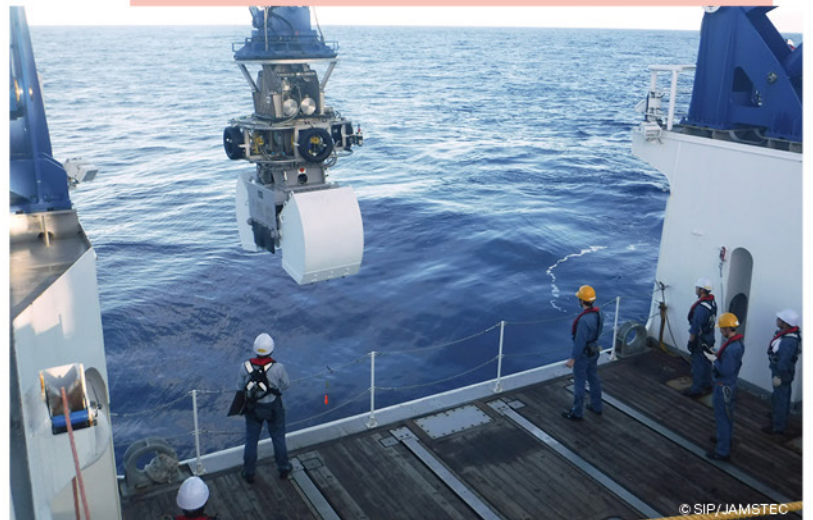


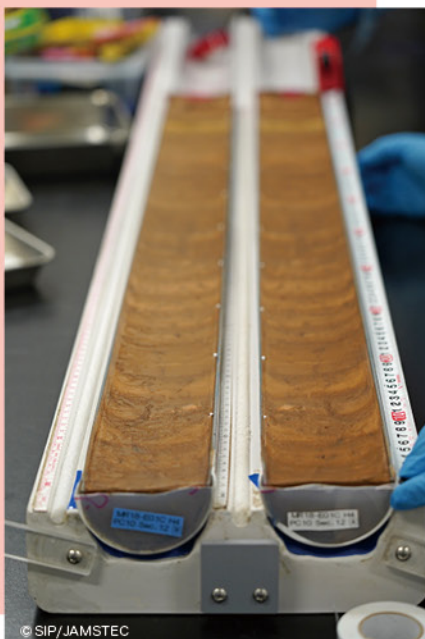
図 海底堆積物採取のモデル図
ピストンコアラでは柱状の堆積物を、パワーグラブでは大量の堆積物を採取できます。



© SIP/JAMSTEC



© SIP/JAMSTEC



© SIP/JAMSTEC

写真1 ピストンコアラ（上）と採取された試料（下）



© SIP/JAMSTEC

写真2 パワーグラブ（上）と採取されたマンガンノジュール（下）

海底堆積物の分析

採取した堆積物の粒度や構造などの特徴や含まれる元素などについて分析し、レアアースが濃集する地層を探します。

右図はピストンコアラで採取した試料の分析結果のモデル図です。試料を深度ごとに分析し、レアアースの濃度が高い層を調べます。

● 機器を使って調べる

採取した試料を素早くかつ非破壊で測定するために、X線を使います。堆積物の構造などを調べるためにX線CT装置（写真1）、元素濃度を調べるためにXRFコアシャナー（写真2）を使います。



写真1 X線CT装置

● 観察と分析

試料を分割して、色や粒子の特徴などをよく観察します（写真3）。上記のX線装置の測定や観察の結果を基に、より正確な元素濃度などにより求める層を決め、必要な量をサンプリングして分析します（写真4）。



写真3 試料を観察している様子

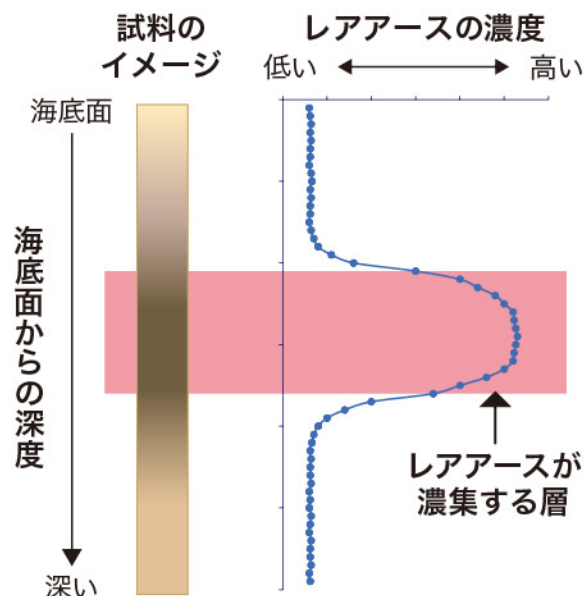


図 ピストンコアラで採取した堆積物試料の分析結果イメージ図
試料を深度方向に分けてレアアースなどの分析を行います。



写真2 XRFコアシャナー



写真4 試料からのサンプリングの様子

新たな高分解能曳航型探査パッケージ AISTs の開発

● ^{えいこう}なぜ曳航システムが必要か？

海洋の探査では、海中を伝わる音波（音響）を利用します。高い周波数の音波を使えばデータの解像度は高くなりますが、高周波は遠くまで届かないため、海面付近からの探査には適していません。また、物をよく観察したい時には近づいて見るように、音響探査の対象も近ければ近いほどよく観測できます。

そこで、探査機を深海底に近づけて調査船でひく深海曳航式^{*}にすることで、対象物のある海底に近づき、さらに高周波を使った高解像度の探査を実現させます。

産総研で新たに取り組む「曳航システム」は、実際に海底の露頭^{らうとう}に近づき、ものを観察することを目指しています。しかも、一度の曳航探査でたくさんのデータを取得することを目指した統合的な探査パッケージ AISTs (Advanced Integrated Sensors Towing system for High-resolution Geo-survey) を開発しています。

^{*}船でケーブルなどでつないだ海中の機器をひくことを曳航といえます。

● ^{えいこうたい}深海曳航体 (DT-2)

DT-2 の既存の機器は、音響を使った地層探査装置で、精密な地形調査ができます。さらに、サイドスキャンソナー (SSS) は堆積物の種類や凹凸を反映して、反射強度の違いが地層の変化を示します。SSS データは、海水の異常も見つけることができます。サブボトムプロファイラ (SBP) は浅層の地層の断面を示すもので、地層の褶曲や断層を見ることができます。CTD (電気伝導度 (塩分)・水温・水深計) / 音速時計を付けて、海水中の音の伝わる早さも正確に出すことで精密な調査を可能にします。

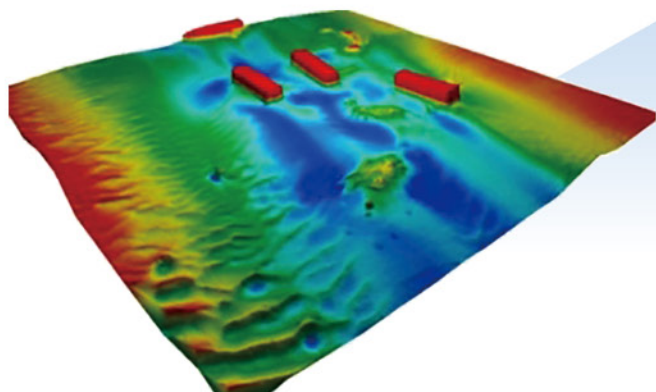
開発中の探査パッケージ AISTs は、それぞれの目的に合わせて、たとえば、化学センサー、絶対塩分センサー、マルチチャンネルストリーマケーブルも一緒に曳航できるシステムになっています。



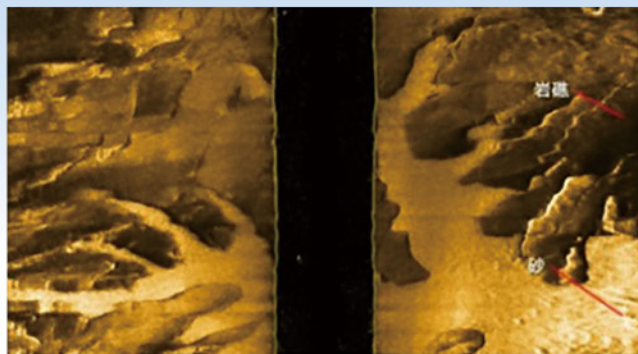
セシウム磁力計



既存センサー



詳細海底地形探査



サイドスキャンソナー (SSS) :
海底反射強度図

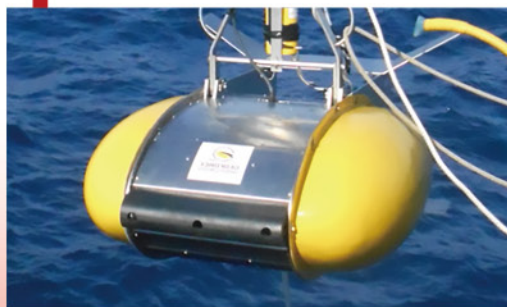
絶対塩分センサー



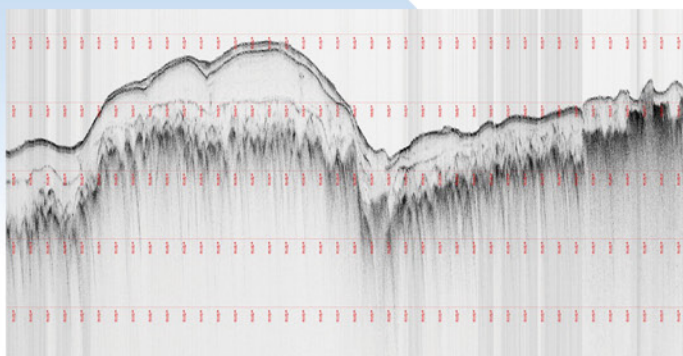
新規導入

高分解能音源

新規に導入した高分解能音源装置。海底下の地質構造を観測するためにブーマーおよびスパーカー音源をひとつの曳航体^{ようしゅう}に合わせて搭載し、曳航体を揚収することなく船上から音源を切り替えることが可能な曳航音源装置です。



マルチチャンネルストリーマケーブル
(民間企業共同研究)



サブボトムプロファイラ (SBP) :
海底下詳細断面



光ファイバー通信

サブボトムプロファイラを用いた 海底下の構造探査

サブボトムプロファイラ（SBP）とは地下数十メートルの構造を把握することができる技術で、音波を使って地下の構造を把握します。通常は船に据え付けられたものを用いて、広範囲な探査を行います。ただし、海洋鉱物資源の把握には採取した試料と比較できるような、もっと細かい構造が見えるデータが不可欠です。そのため、海底に近い場所から SBP データを取得できる深海曳航体（DT-2）^{えいこうたい}を使って、より高精度な探査も行い、研究を進めています。



写真1 深海曳航体（DT-2）の投入作業

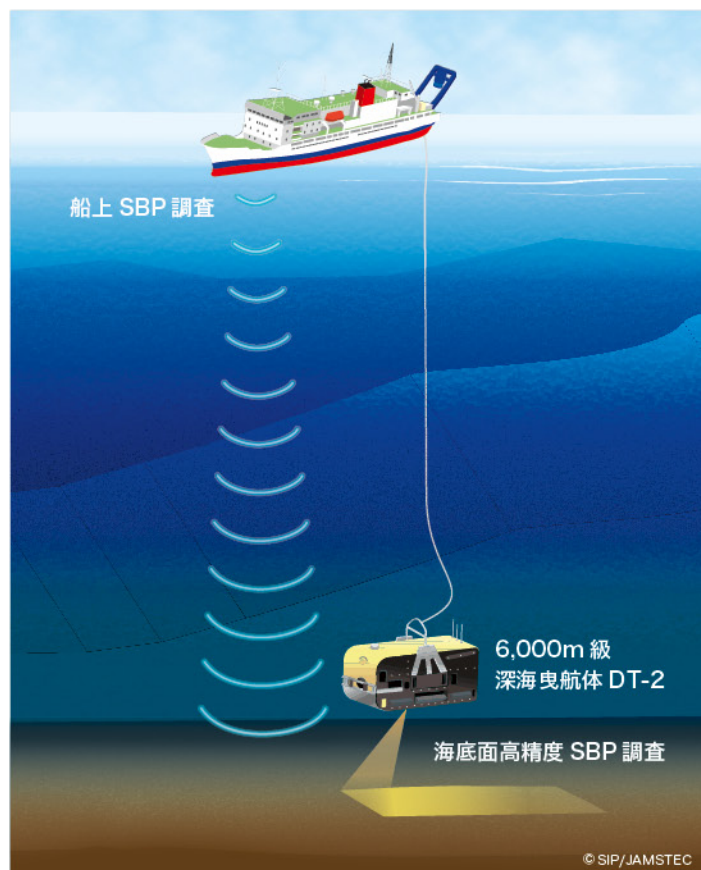


図1 船上の SBP 調査と深海曳航体の SBP

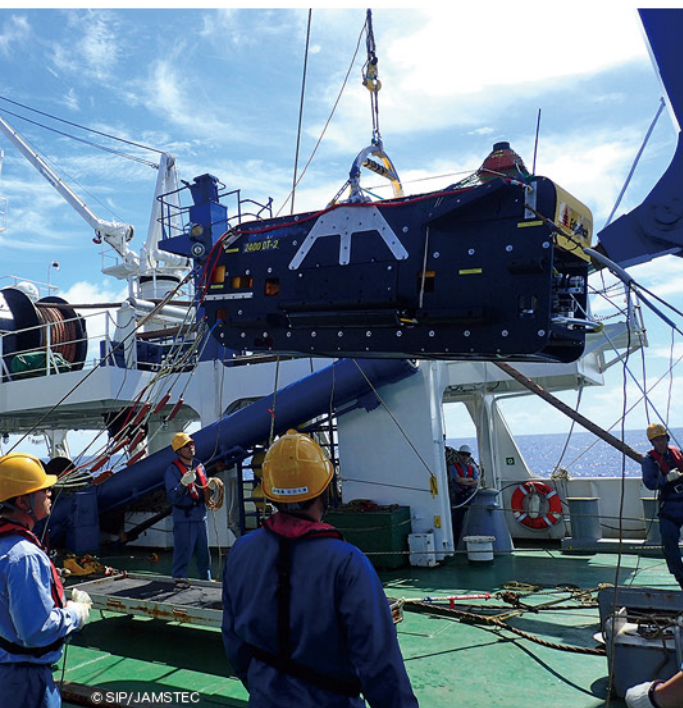


写真2 深海曳航体（DT-2）の投入作業

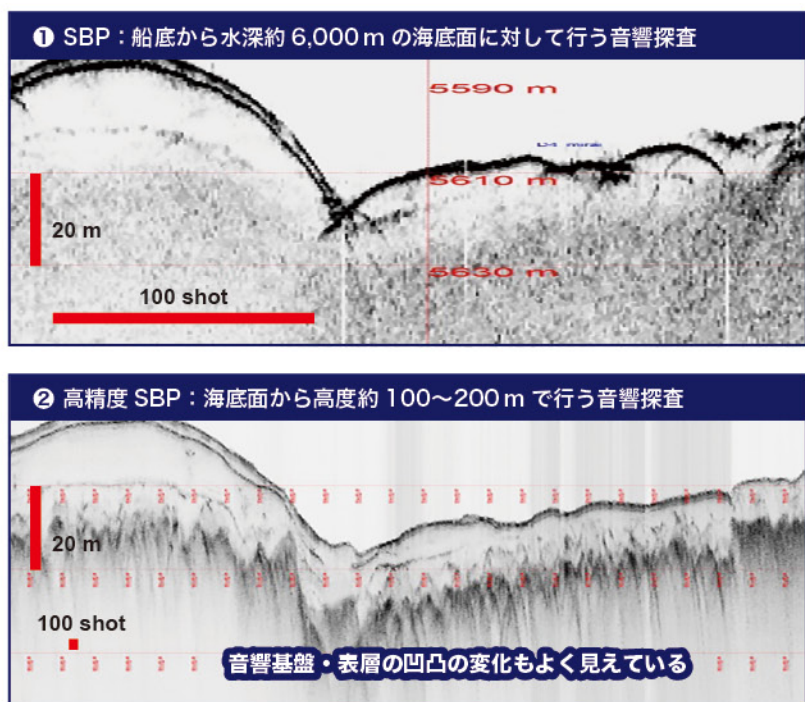


図2 船上からの取得データ（上）と曳航体による取得データ（下）

産総研による新たな開発

● 深海曳航式ストリーマケーブル (民間企業共同研究)

船から音を発振して、ストリーマケーブルで戻ってくる音を受振します。戻ってくる信号を並べることで、地層の重なり方を調べます。地層の様子をより正確に、より細かい測定（高分解能）で知るために行っている新たな取り組みが、深海曳航式ストリーマケーブルの新たな開発です。

12チャンネルのストリーマケーブルを開発しました (Yamazu *et al.*, 2019)。ストリーマケーブルを曳航式にすることによって、反射断面の分解能をあげることが可能になります (Bowen, 1984)。



写真 深海曳航ストリーマケーブルの投入作業

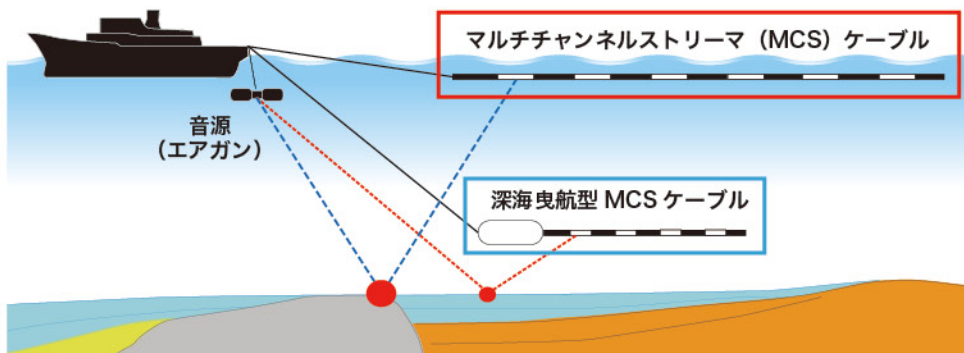


図1 船を走らせながら地層を調べる様子
開発中のケーブルは水深 2,000 m まで沈めて調査することができます。赤丸は調査の分解能をイメージしています。深海曳航式ストリーマケーブルを使えば、より細かい構造を読み取れます。



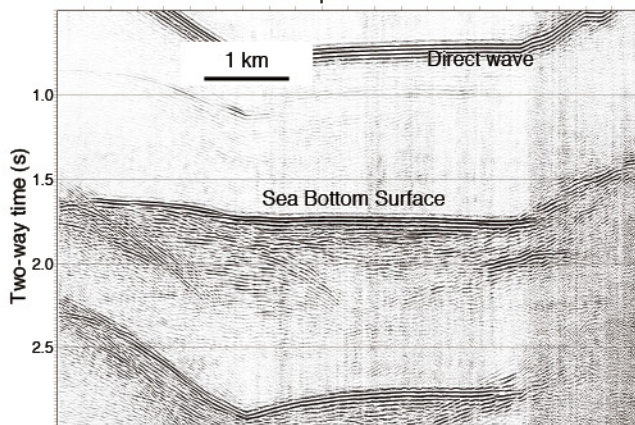
図2 開発したストリーマケーブルの受波部
図は1チャンネル分で、これを連結することでマルチチャンネルにできます。チャンネル間の長さも自由に変えることができます。今回は12個を連結しました。デジタルデータを収録して、イーサネットにてデータ通信を行います。

● 実際の断面

実際に駿河トラフにて同じ音源で発振した音を収録した記録を比べてみます。図3の左は深海曳航式ストリーマケーブルで取得したデータで、右は同じ音波を表層で取得したものです。縞模様が深海曳航式の方が明瞭で細かいことが分かります。また、駿河トラフは急な斜面のため、海面まで音波が戻ってくる間に、

斜面で反射した音波が、ケーブルに先に届いてしまいます (図3右)。これによって斜面の陰が地層のように見えます。深海曳航式のケーブルでは、直下の音がケーブルに先に届くので、本物に近い地層の重なり方を観察できます。

深海曳航式ストリーマケーブル
deep-towed



表層曳航式ストリーマケーブル
surface-towed

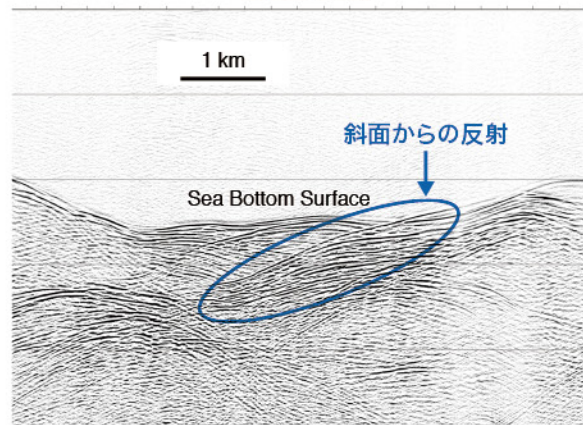


図3 表層曳航式と深海曳航式のケーブルの比較

深海底の環境ベースライン調査

深海の資源開発に際しては、開発による環境への影響を最小化することが、国際的に求められています。

この環境影響評価に関して、たとえば2013年に国際海底機構 (ISA) が定めた公海上のマンガンノジュールに関する環境調査のガイドライン (ISBA/19/LTC/8) では、海洋学的环境ベースラインデータの調査収集と、そのデータに基づいた環境影響評価を行うこととされています。

ここでいう環境ベースラインデータとは、人為的な影響を受けない自然な状態でのデータを指しています。そして環境ベースライン調査で測定すべき特性とその調査方法は、おおむね右表にならって行うべきとされています。

調査すべき特性	調査方法
[a] 海洋物理特性	CTD観測、 流向流速観測等
[b] 地形・地質特性	地形測深調査等
[c] 海洋化学特性	採水・化学分析等
[d] 堆積物特性	底質特性、化学分析等
[e] 生物群集特性	生物分析、映像解析等
[f] 堆積作用特性	沈降粒子観測等

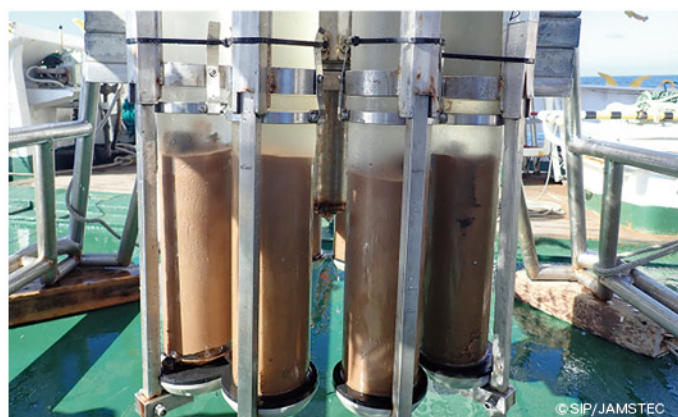


写真1 マルチブルコアラ (小型表層採泥器) による堆積物特性調査



写真2 採取されたマンガンノジュール

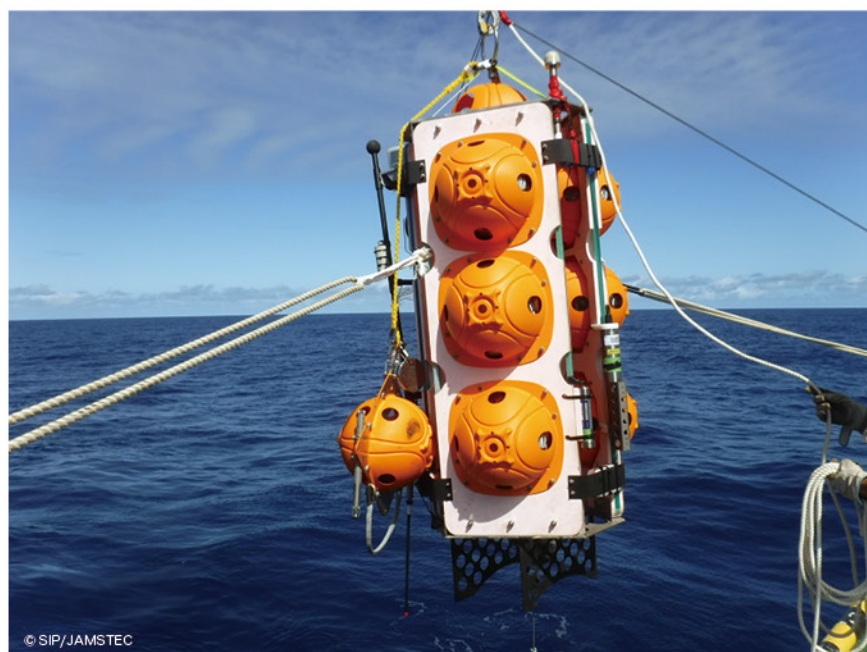


写真3 江戸っ子1号365型 (海底環境を1年間継続して観測できる観測装置)



写真4 江戸っ子1号365型による深海生物の映像観察

深海底の近くで流れを測る

江戸っ子1号365型をプラットフォームとした深海環境モニタリングシステムの開発

深海底付近の流速と水中音は、深海底鉱物資源開発に係わる基礎的かつ重要な環境影響評価の項目です。

このため、フリーフォール・自己浮上型モニタリングシステムである「江戸っ子1号」を観測プラットフォームとし、流速と水中音を含めた環境データを1年間長期観測可能とする深海環境モニタリングシステムの開発を行っています。

開発にあたり、測定原理が異なる2種の流速計を取り付けた江戸っ子1号 HSG 型を水深 5,500 m の深海底に投入し、無事回収された流速計データを現在互いに比較しています。



写真1 水中音の録音装置 (株) 昌新/ (株) KANSO テクノス提供

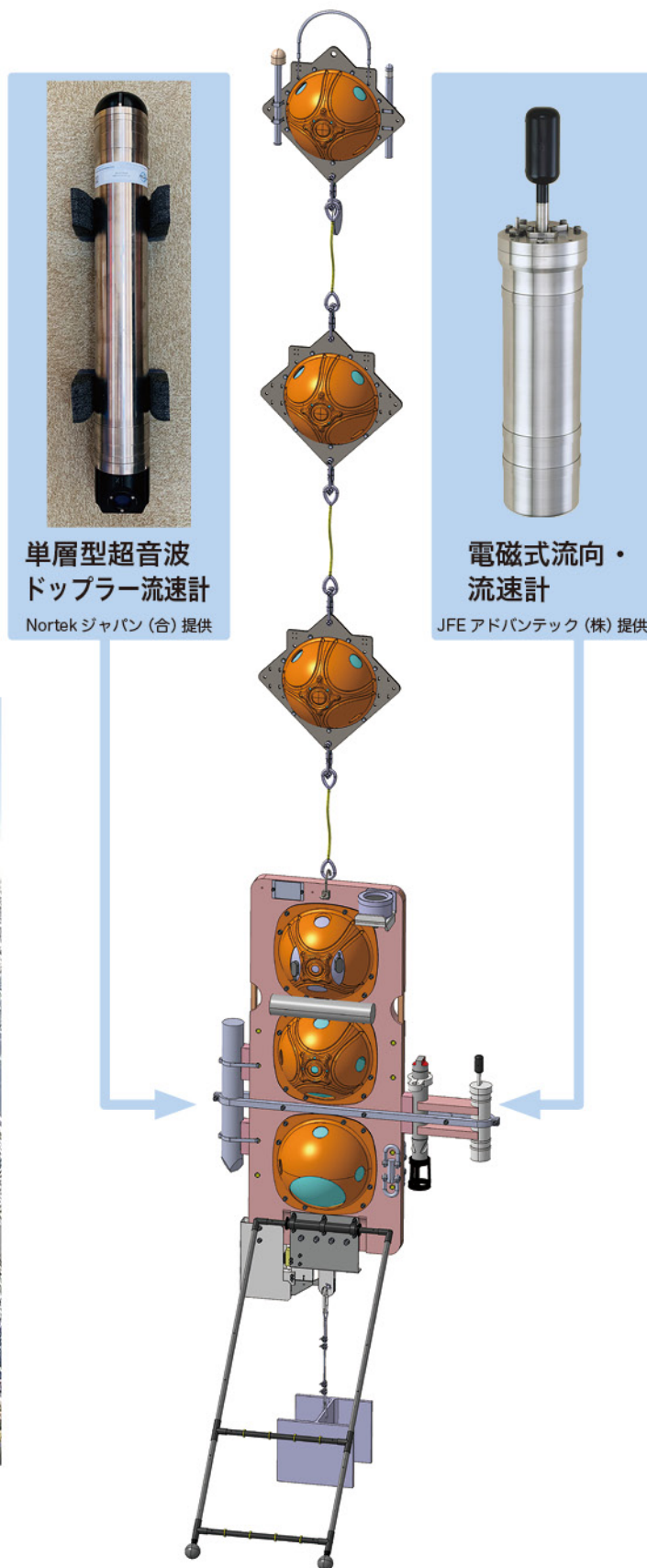


図 江戸っ子1号 HSG 型への機器搭載の概念図 岡本硝子 (株) 提供



写真2 江戸っ子1号 HSG 型の観測プラットフォームの船上準備 (左)、投入作業 (右)

【参考文献】

- Bowen, A.N. (1984) A high-resolution seismic profiling system using a deep-towed horizontal hydrophone streamer. *Mar. Geophys. Res.* 6, 275–293.
- ISA (2013) Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for marine minerals in the area. ISBA/19/LTC/8.
- ISA (2019) Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for marine minerals in the area. ISBA/25/LTC/6.
- Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology (2017) Acquisition of long-term monitoring images near the deep seafloor by Edokko Mark I. Version 1, 28 Feb 2017. Kanagawa, Japan, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 16pp. (SIP Protocol Series No. 4).
- Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., Yakaya, Y., Kitamura, K., Ohta, J., Toda, R., Nakashima, T. and Iwamori H. (2011) Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, 4, 535–539.
- Lin, T. H., Chen, C., Watanabe, H. K., Kawagucci, S., Yamamoto, H. and Akamatsu, T. (2019). Using soundscapes to assess deep-sea benthic ecosystems. *Trends in ecology & evolution*, 34(12), 1066–1069.
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (2009) 日本周辺海域におけるメタンハイドレート起源 BSR 分布. 3p.
- 白井朗・飯笹幸吉・棚橋学 (1994) 日本周辺海域鉱物資源分布図. 地質調査所特殊地質図, 33.
- 山田吉彦 (2005) 日本の国境, 新潮新書, 206p.
- Yamazu, T., Haraguchi, K., Inoue, T. and Arai, K. (2019) Development of a highly flexible and high-resolution deep-towed streamer, *J. Mar. Sci. Eng.*, 254.

【執筆】

はじめに	荒井晃作 ¹	2-3
海洋鉱物資源とは何か	高下裕章 ¹	4
代表的な海洋鉱物資源：①海底熱水鉱床	高下裕章 ¹ ・山下幹也 ¹	5
代表的な海洋鉱物資源：②マンガンジュール、③コバルトリッチクラスト	山下幹也 ¹ ・高下裕章 ¹	5
代表的な海洋鉱物資源：④レアアース泥	山下幹也 ¹ ・高下裕章 ¹ ・荒井晃作 ¹	6
大陸棚のはなし	山下幹也 ¹	7
海底堆積物の採取	天野敦子 ¹ ・片山 肇 ¹	8
海底堆積物の分析	天野敦子 ¹ ・片山 肇 ¹	9
新たな高分解能曳航型探査パッケージ AISTs の開発	荒井晃作 ¹ ・井上卓彦 ¹	10-11
サブボトムプロファイラを用いた海底下の構造探査	高下裕章 ¹	12
産総研による新たな開発	荒井晃作 ¹ ・井上卓彦 ¹	13
深海底の環境ベースライン調査	長尾正之 ¹	14
深海底の近くで流れを測る	長尾正之 ¹ ・大西庸介 ² ・赤松友成 ³	15

¹地質調査総合センター 地質情報研究部門 ²株式会社 KANSO テクノス ³生物音響技術研究所

【図・写真・試料提供】

SIP 革新的深海資源調査技術
国立研究開発法人海洋研究開発機構
株式会社昌新、株式会社 KANSO テクノス、Nortek ジャパン合同会社、
JFE アドバンテック株式会社、岡本硝子株式会社

【編集】

荒井晃作	地質調査総合センター	地質情報研究部門
高下裕章	地質調査総合センター	地質情報研究部門
山下幹也	地質調査総合センター	地質情報研究部門
森田澄人	地質調査総合センター	地質情報基盤センター
澁谷 史	地質調査総合センター	地質情報基盤センター


【デザイン・レイアウト】

都井美穂 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

【発行】2020年10月6日

【発行元】

国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質調査総合センター
〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7
<https://www.gsj.jp>

クリエイティブコモンズ ライセンス表示 改変禁止 
ただしクレジット表記されている画像の使用は著作権者の許諾が必要です