

環境影響評価の現場観測：海底資源開発に向けて

後藤浩一^{*,**}・福原達雄^{*,**}・近藤俊祐^{*,**}・高島創太郎^{*,*3}・古島靖夫^{*4}・山本啓之^{*4}

要 旨

海底熱水鉱床開発に伴う環境影響評価についての法制度や標準的手法については、国際的にも議論が続いている。一方で深海での現場観測は多大な経費を必要とするが、商業レベルではいかにしてデータ品質を落とすことなく経済性・効率性を兼ね備えた調査観測を実施できるのかを求められている。SIP次世代海洋資源調査技術プロジェクト（以下、SIPプロジェクト）では、最新の調査技術と研究成果を導入した実用的な手法開発および経済性・効率性を兼ね備えた戦略的な評価手順の構築を目指した。深海生物群集を解析する手法として、微小生物（マイオフィアウナ）を対象とした画像解析による迅速検査法を開発し、遺伝子情報との組み合わせによる統合解析を検討した。海底での長期観測技術として、国内メーカーが深海底における長期モニタリング用機器として開発した「江戸っ子1号」による海底近傍の長期観測を実用化に取り組んだ。SIPプロジェクトで製作されたホバリング型AUV「ほぼりん」による海底マッピング調査を行い、海底の詳細地形や中型～大型生物の生息状況といった環境情報を効率的に取得した。開発に伴う濁質水の拡散を精度よく予測するための基礎データとして重要な乱流観測に取り組み、深海乱流の直接計測のプロトコルを作成した。SIPプロジェクトではこれらの新たな知見に基づいた技術開発と手法改良を進めたが、さらに資源探査の段階から効率的に事前調査を実施する環境影響評価のプロトコルを考案した。これは近年環境省が推奨している「戦略的環境アセスメント」の考え方を適用した技術で、開発の早い段階から環境の状況を解析することで、より戦略的に、海域条件を考慮した鉱区設定および適切な環境保全と影響緩和策の立案ができると考えている。今後においては、SIPプロジェクトでの成果と経験が民間企業に実装されることが、国際競争力のある海洋産業の発展につながると思われる。

キーワード：生物群集解析・ホバリング型AUV・江戸っ子1号・乱流観測・戦略的簡易アセスパッケージ

1. はじめに

近年、海底資源開発に向けた動きが活発になり、事業を進める上で深海の生物多様性と環境への影響を最小化するための環境配慮に注目がよせられている。これを実現するための適正な環境影響評価手法の確立は、国際的にも強く求められているところである。日本の排他的経済水域（EEZ）では、海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、レアアース泥等の豊富な海底資源が確認されており、海洋エネルギー・鉱物資源開発計

画（経済産業省、2019）に示されたように、中長期の取り組みによる技術開発および探査と調査が進められている。既に、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（以下、JOGMEC）は沖縄トラフにおいて海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱パイロット試験を実施し、水深1600mの海底から鉱石を回収することに成功した（山路ほか、2019）。この試験では、国際海底機構（International Seabed Authority, 以下、ISA）の環境ガイドライン勧告（International Seabed Authority, 2013）を参考に事前の環境調査と影響評価が実施された。一方、海底熱水鉱床など

2019年9月2日原稿受付；2019年12月5日受理

* 一般社団法人 海洋調査協会

〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 2-8-6 日本橋ビル 3F

** 株式会社環境総合テクノス

〒541-0052 大阪府大阪市中央区安土町 1-3-5

*3 いであ株式会社

〒154-8585 東京都世田谷区駒沢 3-15-1

*4 独立行政法人 海洋研究開発機構

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

深海での資源開発に対応した環境影響評価については、国際的に認められた基準と標準法がまだなく、その確立に向けた議論が国連のBBNJ等において継続されているのが現状である。

我が国においては、2014年から開始されたSIP次世代海洋資源調査技術プロジェクト（以下、SIPプロジェクト）において国立研究開発法人海洋研究開発機構（以下、JAMSTEC）が中心となり、民間企業との協働により資源探査と環境影響評価の技術開発を進めた。SIPプロジェクトのうち、（社）海洋調査協会のメンバーが参画した「生態系の実態調査と長期監視技術の開発」のテーマでは、最新の調査技術と研究成果を導入した実用的な手法開発および経済性・効率性を兼ね備えた戦略的な評価手順の構築を目指した。その結果として、国際機関のアーカイブでの技術プロトコルの公開、ISO技術規格への登録、および試験航海での実証などの成果をあげている。本技術報告では、SIPプロジェクトに参画した調査会社の視点から成果を紹介するとともにその実用性について解説を加えたい。

2. 調査観測技術

資源開発に伴う環境影響を定量的に評価するためには、採掘作業が始まる前に現場の物理化学条件、流向・流速、海底地形、生物分布などのベースラインデータが必要である。深海での調査観測は多大な経費を必要とするが、商業レベルではいかにしてデータ品質を落とすことなく経済性・効率性を兼ね備えた調査観測を実施できるのかを求められる。海洋の物理化学観測や生態系調査については、日本海洋学会によるガイドライン（海洋観測ガイドライン編集委員会，2018）および海洋調査協会の技術マニュアル（<https://www.jamsa.or.jp/contents/technical/index.php>）などにより信頼できる標準法が公表されている。生物調査については、新たな技術が導入された分析機器の登場と新たな知見の蓄積にともない、解析手法が大きく変化してきているが、機器と試薬類の商品化による実用的な手法の普及も進んでいる。

2.1 深海生物群集を解析する手法

深海生物の調査において比較的大きい種類を対象とする場合には、目視や画像での観察、およびトラップ等での個体採取が使われてきた。現在の潜水探査機で使われているカメラはいずれも高解像度であることから、画像解析による生物同定および生息密度の算出などが可能になってきている（Nakajima et al., 2014; Thornton et al., 2016）。HDクラスから4K/8Kビデオカメラの導入にともなう超高解像度画像の取得により画像解析技術が適用され、生物試料への依存度が低くなると予想している。深海での生物採取は準備と作業に時間を要する作業であ

ることから、画像解析による生物調査の割合を高めることは経費削減にもつながる。

体長1 mm以下の微小動物（メイオファウナ）は深海底に普遍的に生息し環境変化に敏感な生物群集であることから、環境影響評価での指標として有用とされてきた。微小動物の現存量調査では、熟練技術者による顕微鏡観察と選別作業等に多くの労力と時間を要し、測定精度は技術者の技量にも依存していた。この作業を自動化したのがフローサイトの技術である。SIPプロジェクトでは、Fig. 1.に示したようにプランクトンで使われてきたフローサイト技術を、試料前処理を工夫し、堆積物試料中のメイオファウナにも対応できる手法が開発された。解析の工程としては、顕微鏡観察が主流であった微小生物の形態同定と計測にイメージングフローサイト（例えば、FlowCAM；Fluid Imaging Technologies社製）を導入し、手作業によるデータ収集を自動化した（Kitahashi et al., 2018）。この手法であれば熟練技術者でなくても短時間で効率的に生物群集の画像データを取得することができる。普及に向けては、技術プロトコルを公開するとともに（Table 1.）、ビデオマニュアルを以下のURLにて公開している。

JAMSTECチャンネル，“メイオファウナ群集の迅速解析法”，

<https://www.youtube.com/watch?v=4uEkkVrM0oA>（accessed December 2, 2019）

SIPプロジェクトで開発されたイメージングフローサイトの手法は、民間でも導入が進み始めている。残された課題のひとつは、高解像度イメージングデータから情報を抽出する作業での専門技術者の負担軽減である。形態から生物を分類する作業を支援する深層学習による生物同定システムの開発は、省力化と精度向上につながるものと期待するところである。もう一つの課題は、生物の「種」同定には形態情報よりも遺伝子情報が使われていることである。発展が著しい環境DNAとメタゲノムによる系統群解析では、微小動物と微生物の群集構成を網羅的に調べることができる。この遺伝子データによる系統群構成とイメージングデータから得られた形態情報と個体数のデータを統合することで高精度な群集構造解析を行うことができる（Fig. 1.）。この群集構造の統合解析に関する基本技術は、実用化を目指してISOの専門部会（TC8/SC13/WG4）において、JAMSTECと民間会社が協力して、技術規格（ISO/NP23732）として登録申請がされている（Table 2.）。

2.2 海底での長期観測技術

海底鉱物資源の開発では堆積物層から海底近傍の海水中に攪乱をもたらすことから、ISAが示した勧告では、

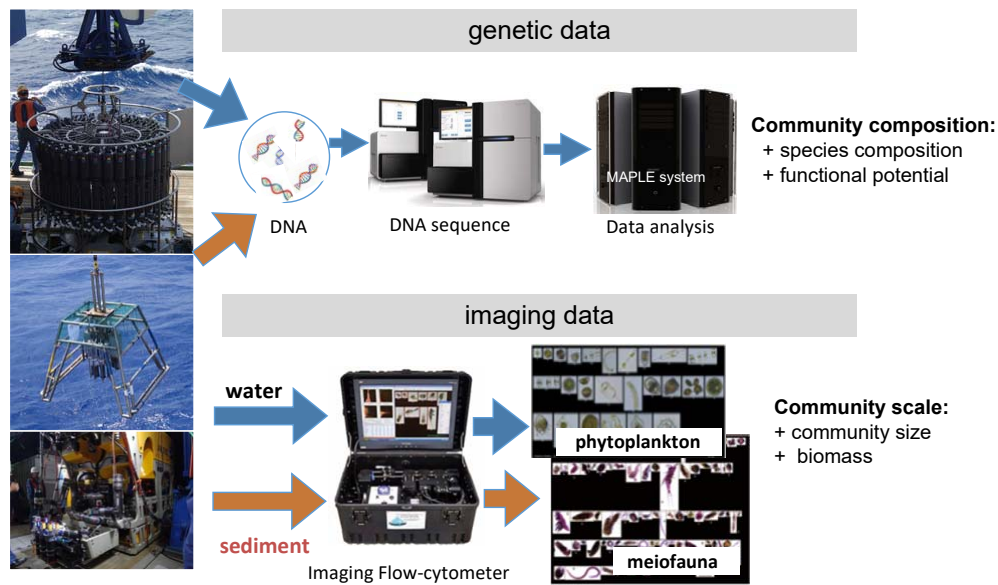


Fig. 1. The new techniques of biological and microbiological survey.

The survey of microorganisms and meiofauna requires the sample-oriented procedure. The environmental DNA extracted from water or sediment samples contains various genetic information of virus, bacteria, archaea, protista, meiofauna, and even megafauna. The flowcytometry is a sophisticated tool to measure individual counts and images of microorganisms and meiofauna. Imaging data is useful for morphological classification of community composition, and for measurement of population size by individual counts.

Table 1. Technical protocols for marine environmental assessment and monitoring.

- | |
|--|
| <p>#1: Application of environmental metagenomic analyses for environmental impact assessments
 #2: Genetic connectivity survey manuals
 #3: Microstructure Measurements around Deep Sea Floor - direct measurements of the deep-sea
 #4: Acquisition of Long-Term Monitoring Images near the Deep Seafloor by Edokko Mark I
 #5: A rapid method to analyze meiofaunal assemblages using an Imaging Flow Cytometer
 #6: Onboard bioassay for seawater quality monitoring using delayed fluorescence of microalgae
 #7: How to map the resilience of hydrothermal vent fields: a tutorial
 #8: Functional assessment of microbiota in various environments using MAPLE</p> |
|--|

<http://www.oceanbestpractices.net/handle/11329/359>

The OceanBestPracticesSystem Repository (OBPS-R) is an open access, permanent, digital repository of community best practices in ocean-related sciences and applications maintained by the International Oceanographic Data and Information Exchange (IODE) of the UNESCO-IOC as an IOC (IODE, GOOS) coordinated activity.

ベースライン調査において海底面の物理的変化や大型生物の分布と活動を把握するための長期観測を求めている。また、海底面の物理的変化や大型生物の活動は、経時的に変動していることから一年間の長期観測を推奨している (International Seabed Authority, 2013)。

SIPプロジェクトでは、国内メーカーが深海底における海底観測用機器として開発した「江戸っ子1号」のプロトタイプを改良して深海中での長期観測の実用化に取り組んだ。「江戸っ子1号」は、浮力体でもあるガラス球に観測用ビデオカメラとバッテリーなどを格納すること

で軽量化と小型化を実現した観測機器である (Miwa et al., 2016)。Fig. 2. に示すように、船からの投下 (フリーフォール) で海底設置し、観測終了後に音響機器による切離信号により自己浮上するという簡易なオペレーションで海底観測ができる。「江戸っ子1号」は、水深8000mにおいて短時間観測ができる可搬型の観測プラットフォームとして開発されたが、長期観測の実用化に向けては耐久性と電力供給などの課題を解決して、観測実績を重ねる必要があった。その成果である熱水活動域での耐候性を重視したHSG型および長期観測と機能拡張性

Table 2. ISO technical standards proposed for Marine Environmental Impact Assessment.

ISO/ NP23730	General technical requirement on marine environmental impact assessment
ISO/ NP23731	Performance specifications for long term in situ image-based surveys in deep sea environments
ISO/ NP23732	General protocol for observation of meiofaunal community
ISO/ NP23734	Onboard bioassay for seawater quality monitoring using delayed fluorescence of microalgae

These proposals are submitted on the Technical committee 8/ Subcommittee 13/ Working group 4 for Marine Environmental Impact Assessment, under the International Standard Organization (ISO).

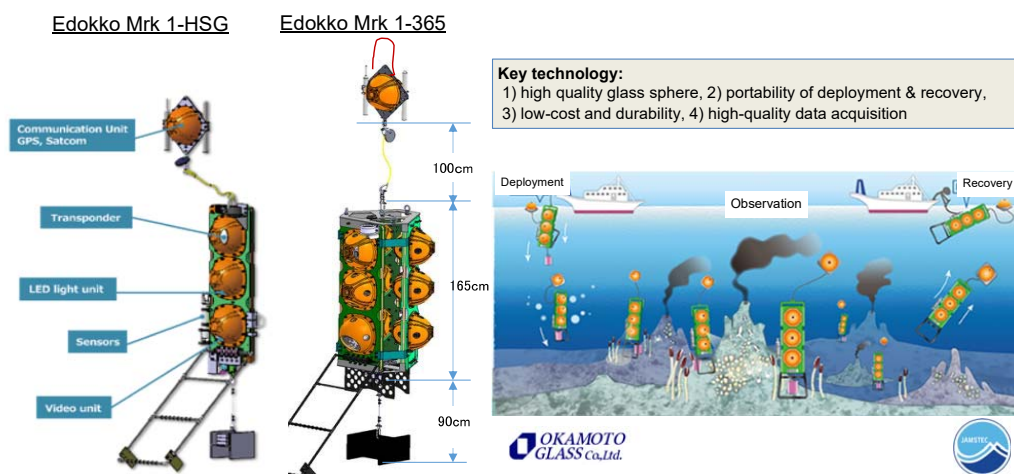


Fig. 2. Portable and standalone seafloor observation platform, Edokko Mrk 1.

The Edokko Mrk-1 is composed of pressure-resistant glass float with a built-in observation tools, which is manufactured by Okamoto Glass Co., Ltd. Three combined glass-spheres consisted of time-lapse camera system, LED array illumination and transponder device. Iron weight bundled Lander settle out by own weight to be dropped into the sea from the research vessel. Disconnection of the iron weight is carried out by acoustic command to the transponder. Type 365 is assembled with three units of HSG to extend the battery capacity for one-year long observation and to increase the payload capacity as observation platform.

を重視した 365 型の 2 機種が市販され (Fig. 2.), 国内の海底資源開発プロジェクトで採用され長期観測および現場計測への実用化が図られている (三輪ほか, 2019)。

「江戸っ子 1 号」には、環境条件を測定する物理化学センサー、生物音響を記録するハイドロフォンなどの観測機器を取り付けることができる。生物調査用にはベイト (餌) を付けることができるため、設置した周辺に生息する捕食性の大型動物を蝟集することができる (Lavaley et al., 2017)。これにより、潜水探査機では観察が難しい移動性の大型生物の分布と活動に関するデータを効率よく収集できる。このビデオ観察の手法についても技術規格 (ISO/NP23731) として ISO に登録申請をしている。「江戸っ子 1 号」のビデオマニュアルと観察映像は、以下の URL にて公開されている。

JAMSTEC チャンネル, “「江戸っ子 1 号」によって撮影された映像”,

<https://www.youtube.com/watch?v=IKsJAORvJzs> (accessed December 2, 2019)

JAMSTEC チャンネル, “江戸っ子 1 号による深海底での長期間モニタリング”,

https://www.youtube.com/watch?v=MP4T4J4pz_8&feature=youtu.be (accessed December 2, 2019)

2.3 ホバリング型 AUV 「ほばりん」による海底マッピング技術

SIP プロジェクトでは、複数機同時運用が可能な自律型海中ロボット (AUV) が開発された。AUV はあらかじめ設定した範囲を自動観測する探査機で、海底資源開発などの海洋産業では省力化を進める技術として期待されている。既に、海底地形調査や物理探査 (Kawada and Kasaya, 2018; Constable et al., 2018; Kasaya et al., 2019) だけでなく、水深 4000 m 付近の深海底における大型底生生物の分布調査 (Milligan et al., 2016; Morris et al., 2014; Simon-Lledo et al., 2019) にも使われている。

SIP プロジェクトで作製された AUV 「ほばりん」は海底から約 3 m の高度を維持しつつ、毎秒 0.2 m 程度の微

速で自動航走しながら海底面の高解像度データを収集することができる (Fig. 3)。このホバリング型 AUV は海底から一定の高度を低速で航行できるため、高品質な海底観察のイメージングデータを撮ることができる。プロジェクト航海で実施した水深 1600 m 付近の熱水活動域での海底マッピングでは、本体底面に設置されたステレオカメラにより海底の 2 m x 3 m 範囲を 5 秒ごとに連続撮影し、その画像をモザイク合成して海底環境のマップを作成した。1 回の潜航では概ね 0.1 km x 0.1 km 範囲を網羅的に調査することができ、画像に加えて、プロファイリングソナーによる測量や化学センサ等による海水の物理化学的性状を同時にマッピングすることができた。小型のホバリング型 AUV に搭載できる電池容量は限られているため、調査航海では 8 時間を目処に潜航調査を実施した。遠隔操作型の潜水探査機による海底マッピングと比べると潜航中に実施できる作業項目と航行時間は制約されるが、小型の AUV はウインチなどの大型船上装置が不要であるとともに他の観測機器を同時運用できるという利点がある。ホバリング型 AUV で得られた情報は、開発対象の熱水鉱床周辺の海底状況を確認できるとともに、その周辺に生息する大型生物を確認することができる。

2.4 乱流観測技術

海底鉱物資源開発では、開発に伴い発生する濁質水 (ブルーム) の拡散と懸濁物質の再堆積が、周辺環境や深海生態系に影響することが想定されている。その影響の度合いを適正に把握するためには、懸濁物質の拡散範囲を正確に推定することが求められる。深海平原に分布するマンガン団塊の国際鉱区として知られている Clarion-Clipperton Zone (CCZ) 海域周辺での研究では、海底からの懸濁物が中規模渦流により遠距離を運搬される可能性が指摘されている (Aleynik et al., 2017)。ま

た、熱水活動域や海山など複雑な海底地形では、海底近傍に乱流構造を伴う強い鉛直混合流が形成されることが数値モデルの解析から示されている (Iwamae and Hibiya, 2012)。物理モデルに基づく数値シミュレーションの手法による海底近傍における乱流の数値モデル解析には、懸濁粒子の動態を支配する鉛直混合に対する鉛直渦拡散係数を固定値やリチャードソン関数で与えるなど、改善すべき点があると指摘されている (東ほか, 2017)。

海底近傍での乱流の調査研究の歴史はまだ浅いが、乱流微細構造を海底直上まで計測できる乱流計が開発され観測域が拡大したことにより (Shang et al., 2017)、多くのデータが蓄積し、精度のよい解析が進んでいる。海洋大循環に対しては、深海の底層流による混合がもたらす影響を解析した研究成果などが既に報告されている (Naveira Garabato et al., 2019)。プランクトン群集の分布調査では、乱流構造の影響が顕著に検出されることから、乱流計をプランクトン分布の観測センサーとして利用する手法が考案されている (山崎ほか, 2016)。深海底近傍における乱流計測の知見はまだ少ないが、乱流構造がもたらす効果は大きいと想定され、海底資源開発で発生する濁質水 (ブルーム) の拡散傾向を精度良く予測するための基礎データとして乱流観測が重要である (東ほか, 2017)。

SIP プロジェクトでは、相模灘、伊豆諸島および沖縄トラフの海域において乱流計による観測を実施した。Fig. 5. には沖縄トラフ海域において観測した乱流強度と水温の時系列変動を示した。観測結果では乱流強度が強くなるタイミングで水温が変動しており、異なる性質の水塊貫入が示唆された。乱流構造が発生した原因については、海底地形や潮汐、流向流速計での観測結果などのデータから解析を進めている (Furushima et al., 2019)。

乱流観測の手法は既に確立されており商業ベースでの環境影響評価のベースライン調査にも取り入れることは

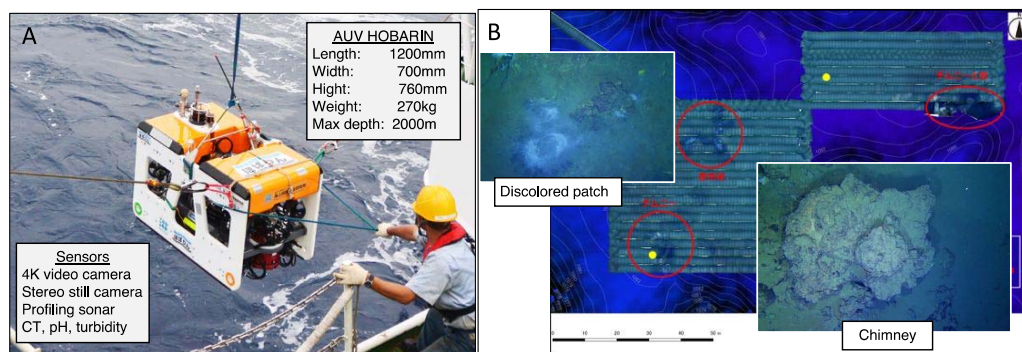


Fig. 3. Hovering type autonomous underwater vehicle (AUV) Hobarin.

This AUV is a small-sized system, and easy to handle on any type of support ship without specific facility for deployment and recovery (A). The hovering type AUV can cruise on tracking lines programmed before deployment and takes high quality pictures of seafloor at a low altitude. This habitat map and photo (B) was observed with the hovering type AUV.

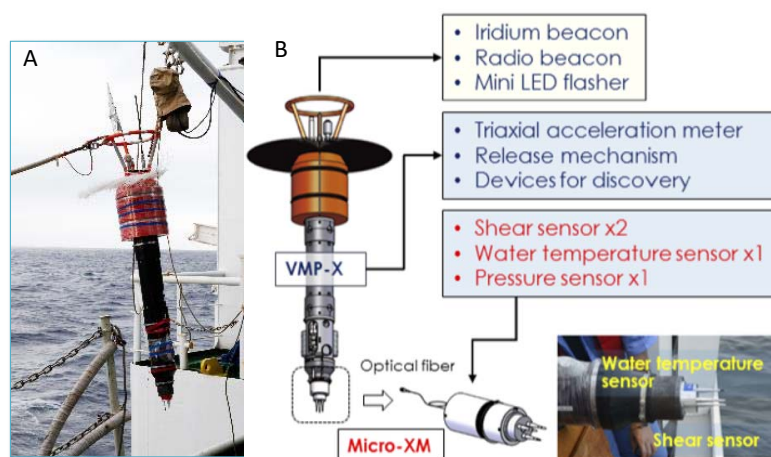


Fig. 4. Untethered free-fall vertical microstructure profiler VMP-X.

The VMP-X can be deployed directly from ship deck (A). The major components of the VMP-X system (B) are the MicroXM at the bottom of the instrument, a rubber coupler, and release system that attaches the MicroXM to an acrylonitrile butadiene styrene tube that forms a freely flooding hull. The top section of the hull is surrounded by a cylinder of syntactic foam (orange color). An aluminum recovery ring is attached to the top end of the hull, along with a radio beacon, a strobe light, and a combined GPS receiver and satellite transmitter. The datalogger and control unit are mounted inside the hull. All components are rated to a depth of 6000 m.

可能である。今後、深海での乱流観測データを蓄積することで、懸濁粒子の動態予測モデルとシミュレーションの精度向上が見込めると考えられる。

SIP プロジェクトでは海底混合層の動態（乱流強度）を高精度に解析することを目指し、投下式乱流微細構造プロファイラー（VMP-X；Rockland Scientific International 社製，Micro-XM；JFE アドバンテック社製）による表層から海底表面までの乱流構造を実測した。観測手法は技術プロトコルとして整理され，Table 1. に示す国際アーカイブスにおいて公開し，ビデオによる操作マニュアルは以下に示す URL において公開した。

JAMSTEC チャンネル，“深海乱流の直接計測の方法”，
https://www.youtube.com/watch?v=_x5sqop6Hgc&feature=youtu.be (accessed December 2, 2019)

3. 先進的な環境影響評価技術の導入

日本国内では，2008 年より JOGMEC が主体となり民間企業と協働して海底熱水鉱床の探査と技術開発のプロジェクトを推進してきた（経済産業省・石油天然ガス金属鉱物資源機構，2018）。2018 年には，沖縄トラフ海域の水深 1600 m の海底において採鉱・揚鉱パイロット試験を実施し，鉱石を船上に回収することに成功した（Okamoto et al., 2019b; 山路ほか，2019）。このパイロット試験に先立っては，ISA 環境ガイドライン勧告を参考に既存の海洋観測技術を活用した事前調査を 3 年余りか

けて実施し，物理化学環境と生物群集の特性を把握した。パイロット試験では得られたデータをもとに環境影響評価が行われ，大きな影響はないことが確認されている（Okamoto et al., 2019a）。パイロット試験では，採鉱・揚鉱だけでなく，採掘作業に伴う濁質水（ブルーム）や海中騒音などに関する環境モニタリングを実施している（山路ほか，2019）。この従来のプロトコルでは，探査により有望海域を選定した後に環境調査が実施されるので，パイロット試験までに時間を要していた。

SIP プロジェクトでは新たな知見に基づいた技術開発と手法改良を進め，開発技術による深海鉱物資源開発の経済性と効率性の向上を目指した。環境影響評価に関しては，深海底での資源探査の段階（概査，準精査，精査）から効率的に事前調査を実施する環境影響評価のプロトコルを考案した。プロトコルの基本には，環境情報を早い段階で取得することで適正な環境配慮型の開発を実現する「戦略的環境アセスメント」の考え方を適用した。この「戦略的環境アセスメント」とは開発事業の計画立案段階で複数案を設定し環境保全のために配慮すべき事項について検討するものである。海底資源開発の場合，陸上と同じ運用はできないが，開発対象の適地選定の判断材料になる環境情報を早い段階で参照することができれば，無駄なく環境配慮の要素を取り入れた開発計画を立てることができると考える。Fig. 6. に示したように，探査と別工程で環境調査を実施した場合は，探査部門と環境部門との情報伝達の遅れにより対応の不具合が

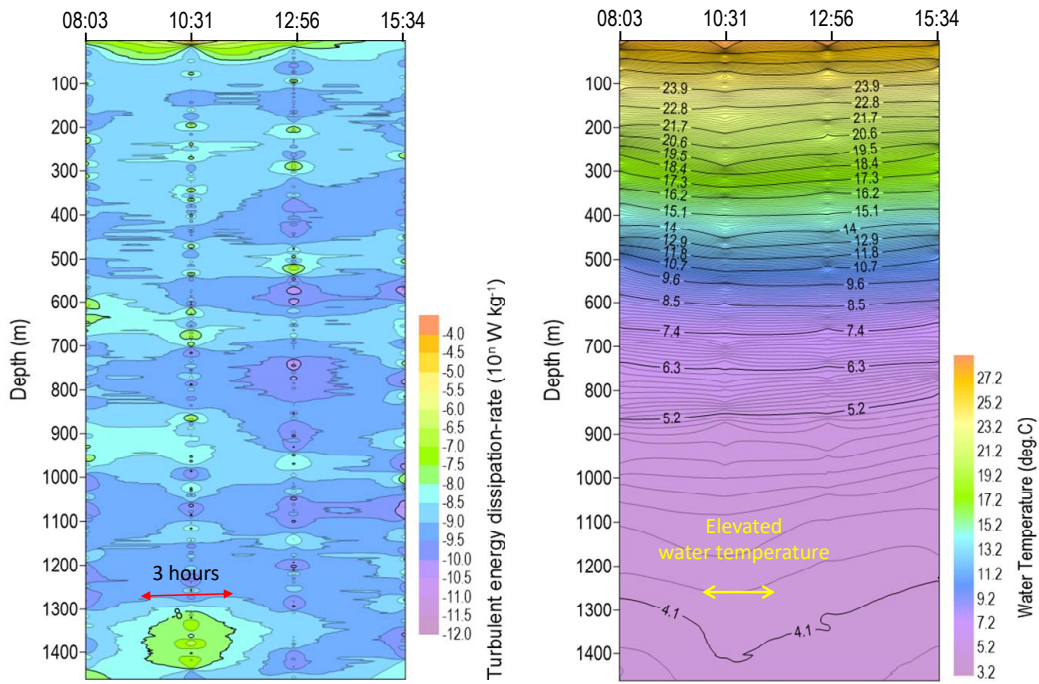
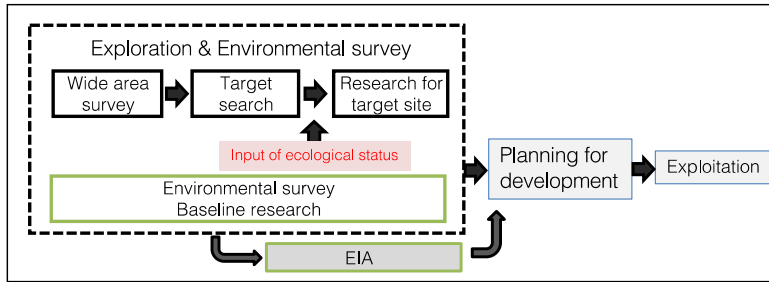


Fig. 5. Time-series fluctuations of turbulence and water temperature. The turbulent intensity (ϵ) near the sea bottom changed from 10^{-10} to 10^{-7} ($W kg^{-1}$) and the maximum ϵ value was observed from a flood tide between ebb tides. Moreover, the ϵ was relatively strong around the bottom, and water temperature increased to 0.1-0.2 °C. This profile was determined on hydrothermal vent field of Okinawa Trough. The white-line rectangles indicate typical area which detected strong turbulent energy and temperature raise.

New strategic protocol for marine EIA



Conventional protocol for marine EIA

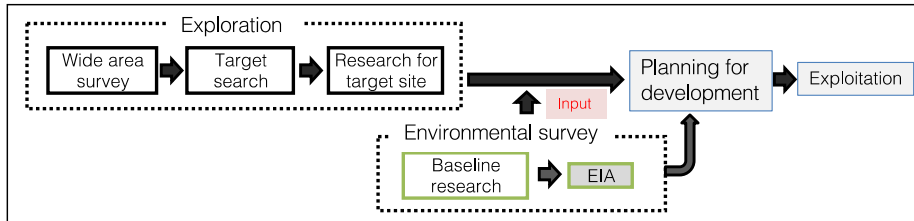


Fig. 6. Protocols of marine environmental impact assessment.

In case of conventional protocols for seabed mining, the environmental survey and process of environmental impact assessment (EIA) has been planned after the exploration cruise to search deposition site of target ore in the convention protocol. The new protocol modifies the schedule arrangement of exploration and environmental survey to reduce the ship time. The EIA process starts within early phase of exploration for target search to collect base line information on habitat condition and possible effects from exploitation.

生じ易い。一社) 海洋調査協会が主体となり考案したプロトコルでは、早い段階から環境の状況を解析することで、より戦略的に、海域条件を考量した鉱区設定および適切な環境保全と影響緩和策の立案ができると考えている。また、探査の段階から環境影響評価に使えるデータを収集することで備船費などの経費削減も企図した。

4. まとめ

民間企業と研究機関が協働した SIP プロジェクトでは、最新の調査技術と研究成果を導入した実用的な手法および経済性と効率性を兼ね備えた環境影響評価技術を開発し、実証航海において実用性を確認するという成果が得られた。開発した技術は、国際的に通用する技術とするために国際機関のアーカイブでの技術プロトコルの公開および ISO 技術規格への登録が進められた。2019年に経産省が示した「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」では、2020年代後半には民間企業による海底鉱物資源開発への参画を想定して法制度の整備および探査、採掘、環境影響評価の技術開発を進めるとしている。今後においては、SIP プロジェクトでの成果と経験が民間企業に実装されることが、国際競争力のある海洋産業の発展につながると考える。

謝辞

本稿の内容には、SIP 次世代海洋資源調査技術プロジェクトの成果に依るところが多く、特に JAMSTEC 北橋倫氏、国立環境研究所東博紀氏をはじめ、多くの研究者の方々から助言をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

Aleynik, D., Inall, M.E., Dale, A., and Vink, A. (2017): Impact of remotely generated eddies on plume dispersion at abyssal mining sites in the Pacific. *7*, 16959, doi: 10.1038/s41598-017-16912-2.

東 博紀・古島靖夫・古市尚基・福原達雄 (2017): 相模灘の深海底乱流を対象とした現場観測と鉛直混合スキームの性能評価. 土木学会論文集 B2, *73*, 1_79-1_84.

Constable, S., Kowalczyk, P., and Bloomer, S. (2018): Measuring marine self-potential using an autonomous underwater vehicle. *Geophys. J. Int.* **215**, 49-60.

Furushima, Y., Higashi, H., Fukuhara, T., Matsuda, T., Furuichi, N., Yamamoto, H., and Fukushima, T. (2019): Continuous observation of turbulent flow near the hydrothermal venting area in the Okinawa Trough, Japan, *International Ocean and Polar Engineering Conference*. ISOPE, Honolulu, pp. 106-111.

International Seabed Authority (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*, Kingston, Jamaica.

Iwamae, N., and Hibiya, T. (2012): Numerical study of tide-induced mixing over rough bathymetry in the abyssal ocean. *68*, 195-203, doi: 10.1007/s10872-011-0088-2.

海洋観測ガイドライン編集委員会 (2018): 海洋観測ガイドライン. 日本海洋学会.

経済産業省 (2019): 海洋エネルギー・鉱物資源開発計画.

経済産業省資源エネルギー庁・石油天然ガス金属鉱物資源機構 (2018): 海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書.

Kasaya, T., Hyakudome, T., and Iwamoto, H. (2019): Using AUV-ASV Combo to Find Hydrothermal Sulfide Deposits, *Sea Technology*, Vol.60, No.8.

Kawada, Y., Kasaya, T., (2018): Self-potential mapping using an autonomous underwater vehicle for the Sunrise deposit, Izu-Ogasawara arc, southern Japan, *Earth, Planets and Space*, *70* (1), 142.

Kitahashi, T., Watanabe, H.K., Tsuchiya, M., Yamamoto, H., and Yamamoto, H. (2018): A new method for acquiring images of meiobenthic images using the FlowCAM. *MethodsX*, *5*, 1330-1335, doi: 10.1016/j.mex.2018.10.012.

Lavaley, M., Duineveld, G., Bergman, M., and van den Beld, I. (2017): Long-term baited lander experiments at a cold-water coral community on Galway Mound (Belgica Mound Province, NE Atlantic). *145*, 22-32, doi: 10.1016/j.dsr.2015.12.014.

Milligan, R.J., Morris, K.J., Bett, B.J., Durden, J.M., Jones, D.O., Robert, K., Ruhl, H.A., and Bailey, D.M. (2016): High resolution study of the spatial distributions of abyssal fishes by autonomous underwater vehicle. *Sci Rep*, *6*, 26095, doi: 10.1038/srep26095.

Miwa, T., Iino, Y., Tsuchiya, T., Matsuura, M., Takahashi, H., Katsuragawa, M., Fukuba, T., Furushima, Y., Fukuhara, T., Fukushima, T., and Yamamoto, H. (2016): Underwater Observatory Lander for the Seafloor Ecosystem Monitoring using a Video System, *Techno-Ocean*. IEEE, Kobe, pp. 333-336.

三輪哲也・飯野由佳里・高柳麻佐子・福場辰洋・近藤 俊祐・古島靖夫・福島朋彦・山本啓之 (2019): 「江戸っ子 1 号 365」を用いた長期間タイムラプス海底観測の検討. ブルーアースサイエンス・テク 2019, 横浜, pp. 43-44. <https://www.jamstec.go.jp/maritec/j/blueearth/2019/pdf/best19-p43.pdf>.

Morris, K.J., Bett, B.J., Durden, J.M., Huvenne, V.A.I., Milligan, R., Jones, D.O.B., McPhail, S., Robert, K., Bailey, D.M., and Ruhl, H.A. (2014): A new method for ecological surveying of the abyss using autonomous underwater vehicle photography. *12*, 795-809, doi: 10.4319/lom.2014.12.795.

Nakajima, R., Komuku, T., Yamakita, T., Lindsay, D.J., Jintsu-Uchifune, Y., Watanabe, H., Tanaka, K., Shirayama, Y., Yamamoto, H., and Fujikura, K. (2014): A new method for estimating the area of the seafloor from oblique images taken by deep-sea submersible survey platforms. *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, *19*, 59-66, doi: 10.5918/jamstec.19.59.

Naveira Garabato, A.C., Frajka-Williams, E.E., Spingys, C.P., Legg, S.,

- Polzin, K.L., Forryan, A., Abrahamsen, E.P., Buckingham, C.E., Griffies, S.M., McPhail, S.D., Nicholls, K.W., Thomas, L.N., and Meredith, M.P. (2019): Rapid mixing and exchange of deep-ocean waters in an abyssal boundary current. *116*, 13233-13238, doi: 10.1073/pnas.1904087116.
- Okamoto, N., Igarashi, Y., Matsui, T., and Fukushima, T. (2019a): Preliminary Results of Environmental Monitoring of Seafloor Massive Sulphide Excavation and Lifting Tests in the Okinawa Trough, *29th International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers Honolulu, Hawaii, pp. 78-84.
- Okamoto, N., Shiokawa, S., Kawano, S., Yamaji, N., Sakurai, H., and Kurihara, M. (2019b): World's First Lifting Test for Seafloor Massive Sulphides in the Okinawa Trough in the EEZ of Japan, *29th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, pp. 1-7.
- Shang, X., Qi, Y., Chen, G., Liang, C., Lueck, R.G., Prairie, B., and Li, H. (2017): An Expendable Microstructure Profiler for Deep Ocean Measurements. *34*, 153-165, doi: 10.1175/jtech-d-16-0083.1.
- Simon-Lledo, E., Bett, B.J., Huvenne, V.A.I., Schoening, T., Benoist, N.M.A., Jeffreys, R.M., Durden, J.M., and Jones, D.O.B. (2019): Megafaunal variation in the abyssal landscape of the Clarion Clipperton Zone. *170*, 119-133, doi: 10.1016/j.pocean.2018.11.003.
- Thornton, B., Bodenmann, A., Pizarro, O., Williams, S.B., Friedman, A., Nakajima, R., Takai, K., Motoki, K., Watsuji, T.-o., Hirayama, H., Matsui, Y., Watanabe, H., and Ura, T. (2016): Biometric assessment of deep-sea vent megabenthic communities using multi-resolution 3D image reconstructions. *Deep-Sea Res. Part I*, *116*, 200-219, doi: 10.1016/j.dsr.2016.08.009.
- 山崎秀勝・増永英治・Foloni-Neto, H., ・Gallager, S. (2016): 沿岸域におけるプランクトン生態のモニタリング手法の開発. 沿岸海洋研究, *53*, 159-163.
- 山路法宏・岡本信行・塩川 智・川野誠矢・櫻井宏信 (2019): 海底熱水鉱床採鉱・揚鉱パイロット試験の功績. *J MMLJ*, *135*, 42-51, doi: 10.2473/journalofmmij.135.42.

Deep-sea observation for environmental impact assessment : for the development of marine mineral resources

Koichi Goto^{***}, Tatsuo Fukuhara^{**}, Shunsuke Kondo^{**}, Sotaro Takashima^{**3},
Yasuo Furushima^{*4} and Hiroyuki Yamamoto^{*4}

ABSTRACT

Environmental impact assessment (EIA) is an indispensable process for mining activity. The discussion on legal framework of EIA for deep-sea mining is continued in domestic and international committees. The international standards of technical protocol for commercial-based deep-sea EIA are under development stage. It is required how to conduct the deep-sea survey and monitoring with economic efficiency of process, and how to keep the data quality. The project of the SIP next-generation technology for ocean resource exploration (hereinafter referred to as “the SIP project”) aimed at the development of a practical method incorporating advanced research technologies and knowledges, and the establishment of a strategically evaluating procedure with economic efficiency. The rapid inspection method based on an image analysis for benthic meiofauna has been established as application of imaging flowcytometer. The integrated analysis of meiofauna community is studied by using combined information of morphological data from flowcytometer and genetic data from metagenomics. As for the long-term observation on seafloor, we established practical method of long-term observation using portable/standalone observation platform “Edokko Mark 1”, which is a commercial product of the domestic manufacturer, designed as a long-term monitoring device on the deep seabed. We conducted a sea-floor mapping using AUV “Hobarin”, which can cruise keeping on height of several meters, to collect the detailed topography of seabed and the information on habitat condition. The method of turbulence observation, which may be essential data for accurate prediction of turbid water diffusion, was established. These new methods and procedures were published as several technical protocols for environmental impact assessment conducting surveys and monitoring on the stage of resource exploration. The manual of new commercial-based EIA protocol for deep-sea mining were compiled by the concept of “strategic environmental assessment” recommended by the Ministry of the Environment. These manuals anticipate user’s needs for strategic approach to make a sustainable development with environmental considerations regarding seabed mining. In the future, the knowledges and experiences of the SIP project will enhance the business progression of private companies, and lead the international marine industry.

Keywords: Biodiversity, Hovering type AUV, Edokko Mark 1, Turbulent flow, Strategic environmental impact assessment

Manuscript received September 2, 2019; Accepted December 5, 2019.

* Japan Marine Surveys Association
2-8-6, Nihonbashihonmachi, Chuo-Ku, Tokyo 101-0023, Japan

** KANSO CO.,LTD.
1-3-5, Azuchimachi, Chuo-ku, Osaka 541-0052, Japan

*3 IDEA Consultants, Inc.
3-15-1 Komazawa, Setagaya-ku, Tokyo 154-8585, Japan

*4 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
(JAMSTEC)
2-15, Natsushima-cho, Yokosuka-city, Kanagawa, 237-0061,
Japan