Review

日本におけるマンガン団塊探査の現状*

津 根 明¹ 岡 崎 正 次²

Current Situation of Manganese Nodule Exploration in Japanese License Area

by Akira TSUNE^{a*} and Masatsugu OKAZAKI^a

a. Deep Ocean Resources Development, Co., Ltd. 1-3-15 Nihonbashi-Horidome-Cho, Chuoh-Ku,
Tokyo, 103-0012, Japan (*Corresponding author, E-mail: tsune@dord.co.jp)

Exploration survey cruise of manganese nodule in the Clarion-Clipperton Zone (CCZ) has been conducted by DOMA (Deep Ocean Minerals Association) and DORD (Deep Ocean Resources Development Co., Ltd.) from 1975 to 1996 and 2011 to present. The manganese nodule survey of Japan in the CCZ during these periods is reviewed in this paper. From 1975 to 1987, the surveys were conducted in a wide area of the CCZ (3 million km²) in order to find and extract high potential areas of manganese nodules. After the registration of the Japanese license area (75,000km², consisting of West Area and East Area) in 1987, the aims of the surveys were shifted toward building up exploration techniques during 1987 to 1996, rather than extraction of high potential area. From 2011, exploration works were carried out in a selected area of the High Abundance Area (HAA), located in northwest of the West Area, for the purpose of increasing accuracy of manganese nodule resources by additional sampling, seafloor observation with taking photographs and acoustic sounding survey. Most of the area of the HAA, which is selected as a possible first target for commercial mining of Japan in future, is covered by the area of high nodule abundance of more than 10 kg/m². For the survey of 2012 in the HAA, AUV (Autonomous Underwater Vehicle) equipped with MBES, SBP, SSS and deep seas camera was used. Exploration equipment of modern technology such as AUV plays indispensable role in deep sea survey, and it is highly important to keep up with updated technologies for increasing quality of the surveys. Furthermore, the selection of model area(s) and the determination of the priority of survey contents are necessary for the preparation of the future survey plan.

KEY WORDS: Deep-Sea Mineral Resources, Manganese (polymetallic) Nodule, Contract for Exploration, Exploration Cruises and International Seabed Authority

1. は じ め に

深海底に分布するマンガン団塊は、1960年代以降から新たな鉱物資源として注目され、先進諸国によって探査・開発が進められてきた。日本においても1970年代から洋上調査が本格化し、旧地質調査所・旧公害資源研究所による学術的な調査航海と旧通商産業省資源エネルギー庁による探査航海（旧金属鉱業事業団に委託）が開始された。探査活動はハワイ南東のクラリオン・クリップトン断裂帯（Clarion-Clipperton Fracture Zone ; CCZ）から有望な海域を絞り込むために行われ、旧金属鉱業事業団から再委託を受けた深海底鉱物資源開発協会（DOMA）によって1975年から行われた。1982年には官民出資により設立された深海資源開発株式会社（DORD）がDOMAの洋上調査を引き継ぎ、1983年からは委託調査の他にDORD独自の予算による洋上調査（自主調査）も

委託調査と平行して行った¹⁾。1987年にはDORDはCCZのハワイ南東沖の位置にマンガン団塊の有望鉱区を登録し、排他的な探査権を獲得し、1996年まで洋上調査を継続した。

これと平行して、開発に必要な採鉱技術²⁾や製錬技術³⁾、環境調査⁴⁾等についても様々な取り組みが行われたが⁵⁾、特に採鉱技術については、旧通商産業省工業技術院の大型工業技術研究開発制度による「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」が進められ、水深2,200 mでの採鉱実証試験等が行われ、1997年に終了した²⁾。

2000年7月に国際海底機構（ISA ; International Seabed Authority）において探査規則「深海底における多金属性団塊の概要調査及び探査に関する規則」が採択されたことを受け、DORDは2001年6月にISAとの間で既保有鉱区に関する探査権の契約を締結した。その後DORDは契約に基づき、それまでの洋上調査結果の解析や関連技術調査等を進めたが、さらに資源量評価、採鉱システムの検討に必要な精度の情報を得る等のため、2011年から新たな調査機器も導入して洋上調査を再開した。

そこで、本稿で執筆する機会を借りDOMAおよびDORDが実施した1975～1996年の洋上調査と、近年実施している2011・2012年の洋上調査の目的・手法、その変遷についてまとめ

*2014年4月16日受付 2014年7月25日受理

1. 深海資源開発株式会社 資源調査部 主任技師

2. 正会員 深海資源開発株式会社 資源調査部 主席技師長

[著者連絡先] FAX: 03-3664-1930

E-mail: tsune@dord.co.jp

キーワード：深海底鉱物資源、マンガン団塊、探査契約、探査航海、国際海底機構

Table 1 List of navigation systems, samplers and the other survey instruments utilized for DORD exploration cruises for manganese nodule.

(1) 測位システム

人工衛星測位装置	1~2時間毎に位置測定する。人工衛星が好条件下で測位が行えれば、誤差は100mより小さい。調査当初からGPSが本格的に導入される1994年まで使用された。	-
NNSS (Navy Navigation Satellite System)		
全地球測位システム	人工衛星を利用した測位システム。1998年時点で1日22時間以上の使用可能。相対精度は 10^{-5} ~ 10^{-7} が期待でき、また絶対精度も10数m程度まで可能である。	-
GPS (Global Positioning System)		
トランスポンダー航法システム	船と海底に配置した複数のトランスポンダーとの距離を音響的に測定し、船位と曳航体の位置を知るシステム。狭い海域(100~500km ²)での測位に適し、特定海域調査で使用した。	-
TPS (TransPonder navigation System)		
水中音響測位装置	船からの音波を曳航体や海中ロボットが受取り、再び船に音波を返す。そのときの応答時間や位相差を用いて距離や方位を計算し、相対位置を決定する。2011年に実施したFDCや2012年に実施したAUV調査ではUSBLが使用されている。	-
USBL (Ultra Short Base Line)		

(2) サンプリング機器

フリーフォールグラブ	ワイヤーを用いず船から海中へ投入すると自重で海底に落下し、サンプルを採取後、錘を自動的に捨て、ブイ浮力で海面まで浮上するサンブラー。通常、海底カメラを装着し採取前の海底面を撮影する。	試料採取 (マンガン団塊)
FG (Freefall Grab)		
スベードコアラ(ボックスコアラ)	ワイヤー付きウインチ巻上型サンブラー。縦、横、深さ約50cmのボックスでサンプリングし、マンガン団塊と底質物を採取する。投入の際、深海用カメラを装着する。環境調査用の試料を採取する場合はボックス内に3×3の9分割枠をはめ込んだ状態で投入する。	試料採取 (マンガン団塊と底質物)
SC (Spade-type box Corer)		
ピストンコアラ	ワイヤー付きウインチ巻上型の底質物サンブラー。着底するとコアチューブは堆積物に貫入する。最長12mの堆積物を採取できる。	試料採取 (底質物)
PC (Piston Corer)		
大口径コアラ	ワイヤー付きウインチ巻上型底質物サンブラー。約4~6m長のサンブラーで柱状の底質物試料を採取する。採泥管の上下端部には底質物の逸失を防ぐコアキャッチャーが装着されている。深海用カメラを装着。	試料採取 (底質物)
LC (Large Corer)		
マンガンドレッジ	ワイヤー付きウインチ巻上型サンブラーで、ワイヤーで海底面を引きずりながらサンプリングする。多量のマンガン団塊の採取に適する。ドレッジにはMDの他、形状・大きさの違いで幾つかの種類がある(例:アームドレッジ:AD)。	試料採取 (大量のマンガン団塊採取)
MD (Manganese nodule dredge)		
マルチプルコアラ	ワイヤー付きウインチ巻上型サンブラー。環境調査のための底質物不攪乱試料を採取する。脱着可能な8本のコアが中心部に装着されている構造である。深海用カメラを装着。	試料採取 (底質物;環境調査)
MC (Multiple Corer)		
ロゼットサンブラー	円筒状の採水ボトルを多数搭載した、ワイヤー付きウインチ巻上型サンブラー(2012年環境調査では12リットルボトルを24本搭載)。蓋を開いた状態で取付しており、船上より電氣的に蓋を作動させ、目的水深の海水を採取する。また、CTDを取付し、水質データをリアルタイムに取得する。	水質調査 (環境調査)
RO (Rosette sampler)		

(3) 海底観察など

深海テレビ	深海底観察用のカメラシステムで、海底面から1~2mを曳航し、照明で海底面を照らしてテレビカメラで撮影する。深度計を搭載する。自動計測装置によりマンガン団塊の分布密度を算出した。調査開始時から1984年まで使用。	海底観察
DTV (Deepsea TV)		
連続深海カメラ	錘が着底した際、ストロボ発光して撮影する曳航型の深海底写真撮影システムで、ウインチ操作で人為的に着底させ、撮影する。すべてバッテリーで駆動し、オフラインで写真データを取得する。CTDを搭載する。1983年から使用。	海底観察
CDC (Continuous Deepsea Camera)		
ファインダー付き深海カメラ	海底面から3m程度の高さを保ちながら曳航する。テレビカメラをスチール写真撮影用のファインダーとして装備したもので、船上のモニターから海底映像を観察しながら同時にスチールカメラで写真撮影を行う。CTDを搭載する。マンガン団塊調査では1995年から使用。	海底観察
FDC (Finder-installed Deepsea Camera)		
電気伝導度・水温・水深測定装置	海水の電気伝導度、水温、水圧を同時に測定できる計測器。これにより海水の塩分濃度、水深、密度及び水中音速(MBESデータ用)が算出される。単独で投入することもあるが、ROやFDCなどに取付する。	水質調査 (環境調査)
CTD (Conductivity Temperature Depth profiler)		

(4) 音響調査(地形調査など)

ナロービーム音響測深機	30kHzの音波を用いた音響測深機。周波数が高いので、指向角が高く精度の高い測定が可能である。調査当初の水深はNBSで測定していた。	地形調査
NBS (Narrow Beam echo Sounder)		
マルチビーム音響測深機	船底から指向角の小さい音波(15.5kHz)を扇状に発射し、水深の2倍の幅の海底地形をリアルタイムで描くことが出来る。1991年に導入後、航区全域を走り、20mコンターの地形図を作成した。	地形調査
MBES (Multi-narrow Beam Echo Sounder)		
サブボトムプロファイラー(表層断面探査装置)	船底から周波数の低い(3.5kHz)音波を出し、反射波を受信することにより海底表層部の断面データを表示し収録する。	地形調査
SBP (Sub Bottom Profiler)		
ナロービームサブボトムプロファイラー	n-SBPでは周波数の違う2つの音波を発振し、その周波数差から指向角の狭い3.5kHzを作り出す。このことにより解像度の高い(比較的浅部の)海底表層部のデータを取得出来る。	地形調査
n-SBP (narrow-Sub Bottom Profiler)		
精密音響測深機	12kHzの音波を用いた音響測深機。ピンガー(曳航体の海底面からの高さ測定器)にも利用する。	地形調査
PDR (Precision Depth Recorder)		
多周波数超音波探査装置	3つの異なった周波数を用い(n-SBPの3.5kHz、PDRの12kHz、NBSの30kHz)、各反射音圧強度を測定し、マンガン団塊の分布密度・面積率等を計測するシステムである。	資源調査
MFES (Multi-Frequency Exploration System)		
サイドスキャンソナー	海底面の微細な地形変化を広範囲に調査する機器。海底面からの距離を数10m~100mに保持しながら曳航し、指向性の鋭い扇状の超音波を発射し、反射波を受信する。反射波の強度に応じ白黒階調(濃淡)で地形変化を記録する。	地形調査
SSS (Side Scan Sonar)		

(5) 水中ロボット

自律型無人潜水機	MBES・CTD・深海カメラ・濁度計など多数の調査機器の取付可能な潜水機で、2012年度に実施した探査航海では主に地形データの取得と海底面の写真撮影を行った。投入前に潜行計画をあらかじめプログラムに組み込むことで、自動的にデータを取得する。調査項目によって高度を変えており、海底観察では5m、地形調査では80mの高度を保ち潜航した。	地形調査 海底観察
AUV (Autonomous Underwater Vehicle)		

マンガン団塊調査報告書(4次概査のまとめ)(DORD非公表資料、1998年)からの引用及び一部加筆・修正。

Fig.1 Location map of the survey area for Japanese exploration cruises mostly as pioneer investor in the Clarion-Clipperton Fracture Zone (3 million km²). The black frames indicate Japanese license areas, 75,000 km², consisting of West Area and East Area. The wet resources of both of the West and East Area were calculated to be 513 million tons and 170 million tons, respectively.

た。洋上調査の歴史は新規調査機器の使用・調査技術の進歩とともにあり、数10年の間に数多くの調査機器を用いた。主な調査機器をTable 1にまとめ、本稿では表に記す略語を使用する。1996年以前の調査経緯や調査船、調査内容や各国の動向等についてはすでに幾つか総説・解説が公表されており^{1,6,8-11)}、特に松本ら⁶⁾では1996年以前のDOMA及びDORDの洋上調査の調査方法・結果については述べられているため、本稿ではなるべく重複を避けるよう留意した。2011・2012年には環境調査で底質物のサンプリングや水質調査などを実施しているが⁷⁾、本稿では詳細は述べず、調査機器や調査数など簡単に触れるに留めた。また、DORDは現在、探査契約が終了する2016年までにマンガング塊開発の経済性を再評価すべく、洋上調査の他に、採鉱及び製錬システムに関する動向調査・机上検討等を行っているが⁷⁾、本稿では特に洋上調査の内容に限って述べる。なお、ISAの公式文書ではpolymetallic nodule (多金属性団塊) という用語が使用されているが、本文ではなじみのある“マンガング塊”を使用する。

2. 1975～1996年の探査航海

2・1 調査地域

調査地域である太平洋のハワイ東南方沖のCCZは世界で最も広範囲にマンガング塊が分布している海域として知られている。同地域の水深は4,000～6,000 mで東から西に向かって深くなり、東部ではほぼ5,000 m以浅で、西部ではほぼ5,000 m以深である¹²⁾。CCZはニッケル、コバルト、銅の合計品位が約2.5%以上のマンガング塊が密に分布しており、米国、旧西ドイツ等の先進国の大企業により1960年代から1970年代にかけて積極的な探査が行われた。現在では、CCZ内に日本を含め11の国ないしは団体がISAから探査権を取得し探査活動を行っている(2013年5月現在)。先に述べたようにDOMAおよびDORDはCCZの幅約500～1,000 km、東西方向約4,600 km (165～123°W)の約300万km²の範囲(Fig. 1)において1) 賦存状況の概要把握、2) 有望地域の選定を行い、そして1987年に排他的探査権を申請した後は、3) 同鉱区の資源量を推定するために洋上調査を実施した。

2・2 調査概要

有望地域の選定や概略資源量の把握のためには広範囲にわたるマンガング塊の品位や分布状況(分布密度;単位はkg/m²)のデータを蓄積する必要がある。品位は経済的に注目している金属元素(Co, Ni, Cuなど)の含有量で、サンプリングしたマンガング塊の化学分析によって得られる。調査船には蛍光X線分析装置が設置されており、船上で分析値を求めた。また分布密度はFG・SCによるサンプリング(直接的調査)だけでなく、海底観察(やや

広域・間接的調査)、音響調査(広域・間接的調査)によって推定された。

調査航海は1975年から1996年まで毎年行われ、1975～1979年は「白嶺丸」^{10,13)}、1980～1996年は「第2白嶺丸」⁶⁾を調査船として使用した。これらの調査船は(マンガング塊委託調査・自主調査合わせて)年間約70日から最大で290日程度運航した。なお基本的には1航海(Leg)は30日前後で計画され、ホノルルー調査海域の往復に合計6～12日程度要するので、実質的に調査日数はLeg毎に20日前後となる。

以下に調査項目毎に使用した機器とその調査内容について概説する。

2・3 調査結果

(1) 地形調査 海底地形調査は12kHz PDR (1975～1979年)および30kHz NBS (1980～1990年)により実施し、サンプリング地点間を移動する間に測定し、等深線間隔が200mの海底地形図を作成した。なお、PDR、NBSはいずれも直下測深による方法である。1991年からは15.5kHz MBESを導入し、船の左右方向に幅広い(下に90度の範囲に)音波を出し、多数の受波器で受信することにより、広範囲を一度に測深することが可能になった。そして1996年までに取得鉱区内において等深線間隔が20mの海底地形図を作成した。なお、調査当初の測位システムはNNSS¹⁴⁾であったが、1986年にGPSが導入された。

表層堆積物調査はPDRやNBSに比べて低い周波数の3.5kHz SBPおよびnSBPを使用し、海底地形調査同様、サンプリング地点間を航走中に測定した。SBPの記録紙には海底地形と海面下の地層が濃淡で示されており(不透明層・透明層と呼ばれる)、この濃淡のパターンで表層堆積物を分類した。そして、底質物の音波反射特性と地質的特徴との関連をみるため、PCなどの柱状サンプラーで底質物を採取した。

(2) 地質調査(サンプリング) サンプリングは採取内容により次の4つの方法に分類される: 1) マングング塊を採取する方法(主にFGを使用)、2) マングング塊と底質物とを不攪乱状態で採取する方法(SCを使用)、3) 底質物の柱状試料を採取する方法(PCやLCを使用)、4) 大量のマングング塊を採取するドレッジによる方法(MDなどを使用)。サンプリング後の処理については松本ら⁶⁾に詳しいので詳細は割愛するが、マンガング塊に対してはサイズ区分、形態記載、切断面記載等を、底質物に対しては底質物記載や物性試験等を実施した。その後、品位分析やX線回折試験等の室内試験に供する試料準備を行った⁶⁾。さらにサンプリング機器に取り付けた海底カメラで着底直前の海底写真を撮影し、各写真に対し画像処理を行った(後述)。

Fig.2 Schematic illustrations showing strategies for locations of sampling points. (a) Standard grids for surveys and intervals of sampling points for each survey stage. (b) three sampling locations for each sampling point.

処理後のデータは、有望地域の絞り込みを行うために整理・活用した。マンガン団塊の地質的情報を地域間で比較するために調査海域を大きく西部海域、中央海域、東部海域の3つに区切り⁶⁾、さらにそれぞれの区域を小分割し、地域毎の特徴を整理した。その他、例えばマンガン団塊の分布密度と海底静止画像におけるマンガン団塊の被覆面積率との関係や、音響装置による反射音圧と分布密度の関係など探査技術・手法の向上のためにデータを整理した。

(3) 地質調査（海底観察） 深海カメラによる海底観察調査（DTV, CDC, FDC を使用）は、マンガン団塊の賦存状況およびその連続性を確認するためのデータを迅速に収集するために実施した。海底観察には分布密度自動計測システム、カラー映像やステレオ撮影等、様々な技術が導入されたが、基本的な調査プロセスとしては、得られた映像・写真データから画像処理でマンガン団塊の面積率、粒径、単位面積当たりの個数を求め、分布密度を計算するという順序で行った。実際のマンガン団塊は底質物上にある程度埋没しているため、画像処理から得られる分布密度は実測値と差が出てくる。そのため、揚収したマンガン団塊から得られた情報と、深海カメラの海底画像から得られた情報とを比較することにより、最終的には画像データから分布密度をより正確に推定するための経験式を得た。

(4) 有望地域の絞り込みと特定海域調査 調査当初は緯度・経度ともに1° (60 nm ; 1nm=1.852 km) の方眼を基線とした図面を用い、測点間隔は Fig. 2a に示すように、緯度・経度それぞれ1°の交点と方眼の中心点との間の距離を42.4 nm とした(1次調査)。データをコンパイルしつつ次段階のサンプリング候補地を定め、2次調査では1次調査の中点を埋めるように測点を追加し、42.4 nm の半分の21.2 nm を測点間隔とした。以下同様に3次調査10.6 nm、4次調査5.3 nm とし、有望地域を絞り込むべくサンプリングを行った。各測点におけるサンプリングは複数回行い(その多くは Fig. 2b に示すように二等辺三角形の形になるような場所で3回行った)、資源量の計算の際にはそれらの採試点データの平均値を各測点のデータとして用いた。そして高品位、高分布密度地域を探しながら調査範囲を300万 km² から約8万 km² まで絞り込んだ。

有望地域における調査は1983年以降、委託調査とは別に自主調査でも開始された。そして1987年には Fig. 1 に示す2箇所(西鉱区と東鉱区)約75,000 km² で探査鉱区を取得し、1987年以降

Fig.3 West Area of Japanese license areas. (a) bathymetry map and (b) abundance distribution map. A northwest rectangle: High Abundance Area, A southeast rectangle: Selected area for developing exploration techniques. A southeast small rectangle: JET Area for environmental survey (JET: Japan Deep-Sea Impact Experiment).

の調査は委託調査・自主調査ともに鉱区内に限定して行った。

鉱区登録以降は探査航海の目的を探査技術(鉱床評価手法及び精査方法等)の確立に移行し、1989年以降は特定海域と呼ばれるやや狭い範囲で集中的に調査を行った。特定海域は緯度8°55′～9°20′N、経度146°12′～146°44′W(約2,700 km²)の範囲で、1989年以降環境調査を実施しているJET海域⁴⁾を含む(Fig. 3a)。特定海域では1) GPS・MBESの地形位置精度を把握する調査、2) 深海カメラによる連続的な(80 m 間隔)海底写真撮影、さらに、より効率的にマンガン団塊の分布状況を知るための技術として、3) 地形調査で使用する音響測深技術を用いて、海底反射音圧の強度とマンガン団塊の分布密度の関係を調査した。

2・2 課題

概査終了後の地形図の精度は、地形概略の把握には十分である。しかし地形と分布密度の関係を把握することや、採鉱可能領域(採鉱機のオペレーションが可能な平坦地や緩斜面)や障害物の判定、そして最適な集鉱システムを考える上ではまだ十分ではない。調査開始当初、マンガン団塊は起伏のない比較的平坦な海底に分布していると考えられてきたが、地形調査を進めるにつれ、その分布域は必ずしも平坦でないことが判明した。例えば西鉱区においては、ほぼ南北方向に発達する尾根-谷状地形(比高200m)が多数みられ、地形図上では幅数km～10 km程度の縞模様として認められる(Fig. 3a)。

特定海域における調査から、マンガン団塊の分布密度が地形的特徴とともに数100 m～1 kmのオーダーで変動している可能性が示唆されたが、有望海域における平均サンプリング間隔は10 kmのオーダーであり(5.3 nm)、より正確な資源量を求めるにはまだ

Table 2 Statistical data of chemical compositions of manganese nodule in High Abundance Area.

manganese nodule data	DORD survey data in High Abundance Area (1979~1988)		
	Ni [%]	Cu [%]	Co [%]
Number	202	202	202
minimum	0.72	0.42	0.09
maximum	1.61	1.30	0.37
average	1.36	1.02	0.24
S.D.	0.12	0.14	0.03
S.D./average	0.09	0.14	0.14

Table 3 Chemical compositions of manganese nodules in Central Pacific Basin, Clarion-Clipperton Fracture zone and High Abundance Area.

Region Morphological type Origin	Central Pacific Basin*			CCZ**	HAA***
	hydrogeneous smooth	mixture intermediate	diagenetic rough	-	-
Number of analysis	314	35	86	308	201
Elements (ave.)					
Ni [%]	0.56	1.10	1.39	1.21	1.36
Cu [%]	0.38	0.99	1.32	1.00	1.02
Co [%]	0.32	0.20	0.14	0.26	0.24
Mn [%]	19.3	25.5	27.5	26.2	28.21
Fe [%]	14.5	10.3	6.6	6.6	6.65
Mn/Fe	1.48	2.62	4.63	3.97	4.24
Ni+Cu+Co [%]	1.26	2.29	2.85	2.47	2.62

*data from Usui and Moritani (1992).

**data from Halbach et al. (1988)

***DORD survey data (1979-1988) in High Abundance Area

Table 4 The aims, methods and results of 2011 and 2012 survey cruises.

分類	目的	2011-2012年の調査実績	
地形(音響)調査	採鉱可能領域の把握や資源量の推定のため、地形等に関するデータを取得する	AUV	11測線(176.2 nm)
地質調査 (海底観察)	マンガン団塊の分布状況を把握し、地形と分布密度の関係に関するデータ等を取得する(数~数10m間隔の写真撮影)	FDC AUV	3測線(22.7 nm) 2測線(14.6 nm)
地質調査 (サンプリング)	マンガン団塊・底質物の産状・品位・物性に関する基礎情報を取得する(特に地形データとの関連を把握する)	SC	9点、LC 2点
環境調査	JET海域の環境影響評価および高密度分布域におけるベースライン調査等を行う	SC	12点、MC 22点 RO 4点(CTD装着3点) FDC 2測線(6.1 nm)
その他	製錬実験用試料の採取	MD or AD	11回

粗いと言える⁷⁾。サンプリングだけで広い範囲における分布密度の周期変動を調査するのは膨大な数が必要となり現実的ではないため海底観察や音響調査による方法を活用する必要がある。

一方、品位についての地域差は分布密度ほどは大きくない。後述する2011年以降の調査地域(現在準精査を行っている高密度分布域)では過年度調査(1996年度まで)で202点のサンプリングを実施しており、その品位の統計量をTable 2に示す。Table 2をみると基本的には変動係数は小さく地域間変動は小さい。しかし地形的特徴と品位との関係など、よくわかっていないことも多い。さらにGPSを導入する1986年以前のデータは位置精度が落ちるため、データの十分な吟味とより位置精度の高いサンプリングも必要であると考えられる。

なお、品位の値は典型的なCCZの値と近く、Usui and Moritani¹⁵⁾の分類に従うとmixture~roughタイプに属する(Table 3^{15, 16)})。マンガン団塊の化学的特徴は海底近傍の酸化還元環境や堆積物の堆積速度など海洋環境に影響されることが知られているが¹¹⁾、この海域のマンガン団塊は粒径によって品位に差があり、複雑な環境履歴を経ていることが予想される。

3. 2011・2012年の探査航海

3・1 調査地域

1996年までに行った探査航海は、調査内容からして基本的に

概査段階である。今後F/S等を実施して採掘の可能性を検討するためには、操業開始後最初に開発が行われる地域を選定し、より精度の高い調査を実施する必要がある。従って2011年以降は西鉱区北西部の高密度分布域を対象に調査することとした。高密度分布域は、緯度10°15'~50'N、経度148°20'~149°10'Wの枠(Fig. 3aの北西部の枠)に囲まれた、約5,900 km²のDORD鉱区を指す。この5,900 km²という数字は、仮に1日1 km²(10 kg/m²で1万t/日)、年間300日操業することを想定すると、約20年操業できる面積であると計算される。高密度分布域の水深は概ね5,100 mから5,500 mの範囲で、中央部(148°30'W~149°0'W)は水深5,150~5,250 m程度の高まりをなし、その東西両側は南北方向に走る谷や尾根が分布する(Fig. 3a)。過年度の調査の結果、この海域はマンガン団塊の分布密度が高いことが判明しており、概ね10 kg/m²以上で、前述の中央部の地形的高まりには15 kg/m²以上の地帯も存在する(Fig. 3b)。鉱区全体の平均分布密度が8 kg/m²程度であり⁷⁾、西鉱区の分布密度は高密度分布域を除くと5~10 kg/m²が主体をなすため同地域が高い分布密度を示すことがわかる。

3・2 調査概要

2011年と2012年の2ヵ年で実施した調査結果の概要をTable 4に、高密度分布域における資源調査の調査実績位置図をFig. 4に、使用した調査機器写真をFig. 5に示す。

Fig.4 (a) Sampling locations, FDC lines and AUV tracks conducted in 2011 and 2012 survey cruises in High Abundance Area. The area demarcated by the rectangle in (a) is enlarged in (b).

2011年10－12月、第2白嶺丸にて35日間の調査を実施した。予定した曳航式SSS調査は海象不良により実施できず、FDCによる海底観察を3測線、SC7地点およびLC2地点のサンプリングを実施し、高密度分布域の中央部におけるマンガン団塊の分布状況の確認を行った。また製錬試験に供するためドレッジを実施し200 kgのマンガン団塊を採取した。環境調査ではJET海域において、海底かく乱実験(1994年に実施)後の環境影響を把握・評価するため、FDC海底観察とサンプリングを行った。

2012年は長年使用した第2白嶺丸が廃船になったことを受け、ハワイ大学所有のR/V Ka'imikai-O-Kanaloa (KOK)をチャーターして調査を実施した。2012年の調査は8月－9月のLeg1(31日間)、9月－10月のLeg2(23日間)からなる。Leg1ではサンプリング調査(SC2地点、環境調査も実施)、Leg2ではAUVによる地形調査と海底写真撮影を実施した。AUVはウッズホール海洋研究所所有の“Sentry”を使用した。

3・3 調査結果

(1) 地形調査 ウッズホール海洋研究所の“Sentry”は最大6,000 m水深まで潜行可能なAUVである(詳細な仕様は同研究所のホームページを参照のこと; <https://www.whoi.edu/>)。MBES・SSS・SBP・CTD・深海カメラなど多数の調査機器の取り付けが可能で、海底面及び海底面付近の多様な情報が取得できる。本航海のAUV調査は潜航16時間前後(潜航距離40 km程度)、揚収後のデータ吸い取りと充電等で20時間前後、合計35－40時間のサイクルで行った。AUVは計11回潜航し、総長326 kmの距離で地形データを取得した。地形調査範囲はFig. 4に示さ

Fig.5 Survey instruments used in 2011 and 2012 surveys. (a) SC, (b) LC, (c) FDC, (d) AUV, (e) MD, (f) MC, (g) CTD and (h) RO.

Fig.6 Bathymetric map of a part of High Abundance Area located in the northwest of West Area of Japanese license area. Detail map with 2 m contour lines obtained from 2012 cruise (within a white frame in the figure) is overlaid on map with 20 m contour lines obtained from 1990's MBES data.

Fig.7 Gradient distribution map of a part of the High Abundance Area. Map depicted from 2012 AUV data is overlaid on one depicted from 1990's MBES data.

Fig.8 Example of features of manganese nodules distribution obtained from image processing of seafloor photographs taken by AUV camera.

れるように、2011年度に実施したFDC測線を含むように設定され、約10 km×2～3 kmの2つの領域（西部約24 km²、東部約21 km²）である。Fig. 6にAUV調査で取得したデータから作成した等深線間隔が2 mの海底地形図を、Fig. 7に傾斜分布図を示す。Fig. 6、Fig. 7のそれぞれの上部には、1996年以前に第2白嶺丸のMBES調査で取得したデータで作成した図面（等深線間隔が20 mの海底地形図、傾斜分布図）を載せている。これらの図面データから、採鉱可能領域の把握や資源量の推定を行った。

(2) 地質調査（サンプリング） 2011年以降の資源量調査のためのサンプリングは、採取効率等の観点からFGは使用せず、SC、LCのみで対応し、原則1測点1回行うこととした。そして2011・2012年の両年でSC、LCそれぞれ9点、2点のサンプリングを実施した（Table 4）。サンプリング後の試料に対しては、従来行っている方法と同様の処理を行った。ただし品位分析や密度測定などの室内試験のほとんどは陸上に試料を持ち帰った後、専門の業者に依頼した。今後もサンプリングデータのコンパイルを行い、AUVで取得した地形データとマンガン団塊の分布状況について考察を進める予定である。

(3) 地質調査（海底観察） FDCおよびAUVの観察測線は、高密度分布域を東西に横断するように設定した。Fig. 4に示すように、FDCは3測線（合計42 km）、AUVは2測線（合計約27 km）実施し、AUV2測線はFDC測線と平行になるよう東西方向に設定した。AUVの計画測線をFDC測線と平行に設定したのは1) AUV測線とFDC測線に囲まれた、極狭い領域の正確な資源量を算出し、従来の推測資源量との差を比較するため、また2) 東西方向の地形変化（当海域は南北方向に延びた谷～尾根地形が繰り返す地形）に伴い分布密度も変化している状況を正確に把握するためである。

FDCやAUVで撮影した海底静止画像（デジタル画像）に対しては、陸上に持ち帰った後マンガン団塊の面積率・長径・個数データを取得するため画像解析を行った。解析対象は、FDCでは約30 m間隔で撮影した画像で、AUVでは約3.3秒毎（約2.4 m毎）に撮影したが、FDCデータと同様30 m間隔で（12枚おきに）抽出した画像である。東西方向のトレンドを知るために解析した画像枚数はFDCは1,115枚、AUVは合計906枚である。なお、FDCで得られた海底静止画像（30m間隔）とAUVで得られた海底静止画像（約2.4 m間隔）の解析結果を比較すると両者のマンガン団塊の面積率・長径・個数の変動の様子は極めて類似しており、変動のスケールは一般に30 mより大きい。従ってAUVデー

Table 5 Statistical data of features of manganese nodule distribution obtained from image processing of seafloor photographs taken by AUV camera.

manganese nodule data	imageprocessing data of seafloor photographs obtained from 2012 AUV survey.				estimated abundance [kg/m ²]
	depth [m]	coverage [%]	long axis [cm]	number [#/m ²]	
Number	906	905	905	905	905
minimum	5140	0.9	2.49	17.5	0.4
maximum	5382	47.8	7.63	996.2	21.9
average	5245	34.2	4.23	370.5	11.4
S.D.	63	10.9	0.98	218.0	3.7
S.D./average	0.01	0.32	0.23	0.59	0.32

タを30 m間隔で抽出したことに問題はないと考えられる。

画像処理・解析には市販のソフトウェアを使用し、ソフトウェアの自動処理とマニュアル操作を組み合わせながらマンガン団塊の被覆面積や平均粒径、単位面積当たりの個数を求めた。具体的には適当な閾値を用いてマンガン団塊（暗色）と海底堆積物（明色）を2値化し、マンガン団塊を自動抽出した後、最後に手動で誤認識等を修正した。画像解析により求めた面積率等のデータを、経験式に代入することにより画像毎の分布密度の推定値を計算した。なお、上記のような、画像処理の手動で行う部分を減らし、PCソフトウェアによる完全自動化を目指すことは今後の課題の1つである。

Fig. 8はAUVの撮影画像の解析から求められた粒径、1m²当たりの個数（以下、個数）、面積率、ならびにこれらのデータから求められた推定分布密度を、緯度（横軸）に対してプロットした図である。またTable 5にはこれらのパラメータに対する統計量を示す。マンガン団塊の平均粒径（長径）は4～6cm、1m²当たりのマンガン団塊の個数は200～600個で推移している。粒径と個数は逆相関の関係にあり、これらの積で求められる面積率は約40%程度で概ね安定しているようである。しかし、Fig. 8の矢印部分でみられるように地形的に局所的な凹地で面積率が急激に下がっているようなところもある。また、分布密度についてもTable 5に示すように平均は11.4kg/m²で、±2σでは4～18.8kg/m²と大変ばらつきがある。面積率（または分布密度）が急激に下がる場所は傾斜が5°以上の地帯が広く分布し、底質物下層の古期堆積物の露出している様子が確認されることもあり、

Table 6 Status of contracts for exploration for manganese nodule.

国*	探査契約	申請者
IOM	2001.3.29	InterOceanmetal Joint Organization (ブルガリア、チェコ、スロバキア、ポーランド、ロシア、キューバ)
ロシア	2001.3.29	Yuzhmorgeologiya
韓国	2001.4.27	The Government of the Republic of Korea
中国	2001.5.22	The China Ocean Mineral Resources Research and Development Association
フランス	2001.6.20	IFREMER AFERNOD
日本	2001.6.20	Deep Ocean Resources Development Co., Ltd.
インド**	2002.3.25	The Government of India
ドイツ	2006.7.19	The Federal Institute for Geosciences and Natural Resources of the Federal Republic of Germany
ナウル	2011.7.22	Nauru Ocean Resources Inc.
トンガ	2012.1.11	Tonga Offshore Mining Ltd.
ベルギー	2013.1.14	G-Tec Sea Minerals Resources NV.
イギリス	2012年申請	UK Seabed Resources Ltd.
キリバス	2012年申請	Marawa Research and Exploration Ltd.
シンガポール	2013年申請	Ocean Mineral Singapore Pte. Ltd.

* リストは2013年5月現在。灰色部の3国(イギリス・キリバス・シンガポール)は現在申請中。

国際海底機構のHP(<http://www.isa.org.jm/>)から引用した。

**インド以外はClarion-Cripperton Fracture Zoneにて申請。インドはインド洋にて申請。

この傾向が調査海域でどの程度一般的であるのか、さらに調べる必要がある。

画像処理の結果をもとに、AUV・FDC 両測線に囲まれた極狭い範囲における、より正確な資源量の推定を試みているが、幾つか課題が残されており、今後も引き続き検討する予定である。

4. 今後の航海計画について

現在 DORD は ISA との探査契約を締結しており、探査航海や環境航海、その他の事業について取りまとめ毎年、年次報告書を提出する義務があるが、その報告書は ISA の法律技術委員会メンバーに閲覧され、評価や提言を受けている。そのなかには今後の航海の調査内容について言及しているものもある。例えば 2001 年に採択された環境ガイドラインを通じて、環境影響評価を行うための環境データの取得を強く推奨している。このような提言に対して適切に対応するため、2013 年の航海では、引き続き環境ベースラインデータの取得の他に、推奨項目として挙げられている ADCP 係留系を投入する計画を立てている。マンガン団塊の航海は探査データの取得および上記のような環境調査のために実施しているが、航海日数には限りがあるため、探査・環境それぞれの優先順位や必要調査項目を考慮した上で効率的な航海計画を立てる必要がある。

その他、探査契約を締結している諸外国の動向や最新の探査技術等の情報収集も航海計画の立案と無関係ではない。2013 年 3 月現在、マンガン団塊に関して ISA と探査契約を締結している国・機関は 11 あり、Table 6 に示すように、ここ 2 年でナウル・トンガ・ベルギーが契約し、2013 年 5 月現在もイギリス・キリバス・シンガポールが申請中で飛躍的に数が増えている。また、調査開始

当初日本は先行投資者として技術開発の面で国際的に優位にあったものの、近年は逆に諸外国での採鉱システムの開発等の活動が活発化している⁵⁾。採鉱システムのタイプによっては収集すべき(重要度の高い)地質データの内容も変わる可能性もあるため、諸外国の動向を把握することが重要になる。また、探査技術についても近年大きく進歩し、AUV 調査のように今後の詳細な地形・地質データ取得においては高度な機器・技術の導入は不可欠であるため、継続的に ISA の主催する会議や学術会議等に参加し情報収集することが必要である。

なお AUV 調査でカバーできる調査範囲は現状では 1 航海当たり 50 km² 程度であり、現在の方法をそのまま踏襲し、数 10 年かけて鉱区全体の詳細な地形データを取得するのは現実的ではない。そのため高密度分布域(あるいは、その他のモデル地区)でデータを取得し、そのデータから得られた知見を他の地域に適用していくことが必要となり、適切に調査地域を選定することが大変重要になる。

謝辞 本調査は、経済産業省の委託を受けた JOGMEC の調査の一環として実施された。経済産業省並びに本業務に携わった関係各位に感謝の意を表します。

本稿で述べたマンガン団塊の探査航海は旧通商産業省(現経済産業省)資源エネルギー庁からの委託事業で旧金属鉱業事業団(現独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構)が深海資源開発株式会社に再委託したものであり、本稿で使った文章や表の一部は、下記の引用文献リストからは省略するが、1997 年に旧金属鉱業事業団・深海資源開発株式会社が取りまとめたマンガン団塊総括報告書及び 2011 年・2012 年の委託調査の年次報告書から引用している。本文中で述べた課題等の見解については個人的なものが含まれていることをおことわりしておきたい。

References

- 1) Y. Shiga: Shigen Chishitsu, **51** (2001), 41-53.
- 2) A. Inokuma, H. Okada, and T. Oyama: Journal of MMIJ, **112** (1996), 974-983.
- 3) K. Kojima: Journal of MMIJ, **112** (1996), 968-973.
- 4) H. Moriwaki: Journal of MMIJ, **112** (1996), 1021-1025.
- 5) T. Yamazaki: Kinzokushigen report, **36** (2007), 970-981.
- 6) K. Matsumoto, N. Murayama and K. Matsui: kinzokushigen report, **36** (2006), 692-713.
- 7) A. Tsune and M. Okazaki: 23rd Ocean Engineering Symposium, (Nihon University), OES23-92, (2012).
- 8) T. Moritani: Journal of geography (Chigaku Zasshi), **87** (1978), 1-20.
- 9) K. Matsumoto: Chishitsu News, **550** (2000), 13-17.
- 10) T. Moritani: Journal of geography (Chigaku Zasshi), **550** (2000), 18-23.
- 11) 白井朗: 海底鉱物資源—未利用レアメタルの探査と開発, (オーム社, 2010), pp.200.
- 12) International Seabed Authority: A geological model of polymetallic nodule deposits in the Clarion Clipperton fracture zone, ISA Technical Study No.6 (international Seabed Authority, 2012).
- 13) A. Mizuno, J. Chujo and E. Inoue: Chigaku News, **238** (1974), 1-12.
- 14) J. Chujo, T. Ishihara and F. Murakami: Bulletin of the Geological Survey of Japan, **28** (1976), 69-102.
- 15) A. Usui and T. Moritani: *Geology and offshore mineral resources of the central Pacific Basin 14*, (ed. Keating Bolton; Springer, 1992), pp. 205-223.
- 16) P. Halbach and D. Puteanus: *Geochemical trends of different genetic types of nodules and crusts. In The manganese nodule belt of the Pacific ocean* (ed. P. Halbach, G. Friedrich, and U. Von Stackelberg), pp. 61-69.