

大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」をめぐる 深海底鉱物資源開発技術の研究

鶴崎 克也 （旧資源環境技術総合研究所）

要旨

日本の今後の産業を支えるためには、電子産業、エネルギー産業や宇宙航空産業の基盤的な素材であるレアアース、レアメタル、金、銀、プラチナ、銅、ニッケル、コバルト、マンガンなどの鉱物資源の確保が重要である。これらの金属資源が我が国の排他的経済水域や公海の水深 2000m 以深の海底で発見され、資源小国のわが国にとって固有の資源として有望視されている。これらは、深海底マンガン団塊、コバルトリッチクラスト（CRC）鉱床、海底熱水鉱床、深海底堆積物に多量に含まれており、採鉱技術の確立がもてめられている。

現在、海底熱水鉱床については、2012 年に水深 1600m の海底硫化物マウンド域において採掘試験が実施され、多くの技術的課題が得られている。数年以内にも揚鉱試験を合わせた採鉱－揚鉱パイロット試験が計画されている。そのための基礎的な技術は、1981 年度に開始された工業技術院（AIST、現：産業技術総合研究所）大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」の成果によるところも大きい。

ここでは、同プロジェクト（1994 年度より海洋資源総合基盤技術の研究開発に変更）をめぐる、マンガン団塊の研究が開始された背景、公害資源研究所（後の資源環境技術総合研究所）での関連する基礎的研究、地質調査船「白嶺丸」におけるマンガン団塊の調査航海、技術研究組合「海底鉱物資源開発システム研究所」や金属鉱業事業団（現、石油天然ガス・金属鉱物資源機構）との協力、日米天然資源会議（UJNR）海底鉱物資源部会などの国際協力の活動から得られた成果などについて紹介する。

1. マンガン団塊開発ための研究開発の経緯

現在、深海に賦存するマンガン団塊、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト鉱床、レアアース堆積泥鉱床が、資源小国でありながら広い経済水域に囲まれた日本にとって、有望な鉱物資源として脚光を集めている。

深海底の鉱物が将来の鉱物資源として注目されたのは、約 50 年前のことであった。1965 年に米国の John L. Mero によって「The Mineral Resources of the Sea」が発表され、各種の海底鉱物の資源的なポテンシャルが指摘された。実は、マンガン団塊は、1870 年代の英国の有名なチャレンジャー号の調査航海で水深 4000～6000m の深海底で多数発見されていたが、100 年の後、各種の鉱物資源として注目されたのである。わが国では、早速、工業技術院公害資源研究所(当時、略称:公資研)の若手研究者によって当該書が翻訳され、1972 年に「海洋鉱物資源」¹⁾として刊行された。この時、注目を集めたのが、深海底マンガン団塊に含有される銅、ニッケル、コバルト、マンガンであった。陸上のこれらの資源の大半

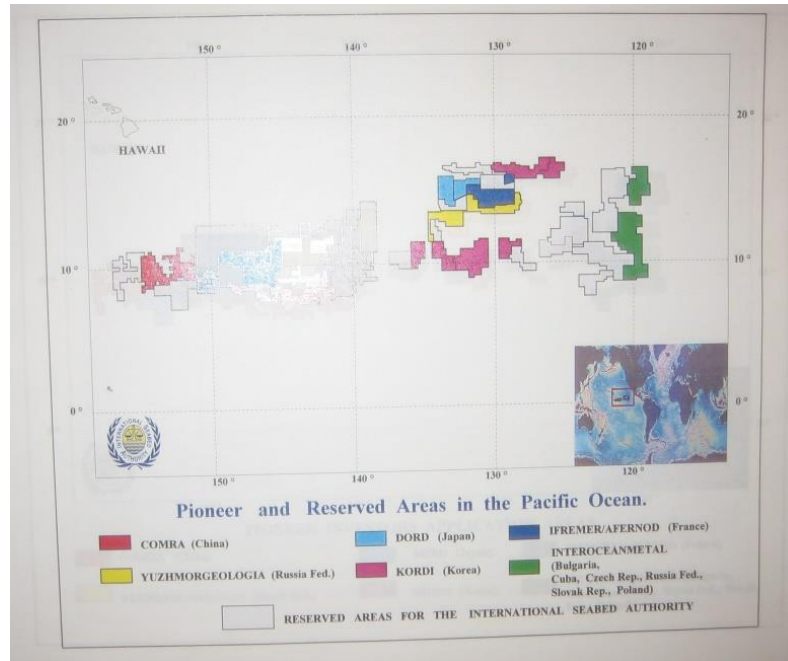
は政情不安なアフリカなどの発展途上国に偏在していた。また、当時の資源ナショナリズムの台頭などにより、低廉かつ安定的な確保は困難になっていくとの予測がなされたことから、米国はじめ先進各国で海底調査が始められ、鉱物資源としての有用性が認められてきた。

日本も、1970年代初めより、工業技術院地質調査所(当時、略称：地調)が地質学的見地から調査を始めた。その後、通商産業省(当時)は、1973年に地質調査船「白嶺丸」を建造し、地調の調査に供した。その間、公資研ではマンガン団塊の調査技術や開発技術の基礎的な研究を実施するとともに、地調の調査航海に同行し現場での技術開発を進めた。通商産業省は、さらに、探査専用船「第2白嶺丸」を建造し、金属鉱業事業団(当時、略称：MMAJ、現：石油天然ガス・金属鉱物資源機構)がハワイとメキシコの間の水深4000～5000mの海底のクラリオン断裂帯及びクリップarton断裂帯に挟まれた海域（C-Cゾーン、日本での通称：マンガン銀座）で本格的な探査を開始した。

このように、各国の探査がすすめられていくとともに、公海における秩序立った探査活動が求められ、そのための国際的なスキームが国際連合海洋法会議の場で整えられてきた。1982年に、深海底における探査活動のスキームを含む国際海洋法が成立した。このスキームでは、先行投資者に排他的探査鉱区を認めること、鉱区申請の際には同等の価値の2鉱区を申請し、そのうち1鉱区は国連下の国際海底機構（ISA）に譲渡し、将来的にはISAが発展途上国のために開発するというパラレル方式が採択された。さらに、開発に当たっては、その技術をISAに技術移転することが求められた。日本は、白嶺丸や第2白嶺丸の探査成果を基に、1987年に旧ソ連、フランスとともにC-Cゾーンに探査鉱区を登録した。また、インドは独自にインド洋に鉱区を登録した。米国は、この海洋法に賛成しておらず、自国の国内法で鉱区を認めた。イギリスやドイツも同様に、自国の国内法で鉱区を認可した。しかし、調査の実績については米国がリードしており、米国抜きには鉱区調整ができないため、海洋会議とは別にミッドナイト会合と称して鉱区調整が行われた。その後、中国、韓国、東欧諸国連合もC-Cゾーンにおいて鉱区登録を行った。第1図に、1999年当時の鉱区登録状況を示した。

一方、採鉱技術に関しては、米国を主たるメンバーとしたいいくつかの国際コンソーシアムが1970年代後半にC-Cゾーンで海底採鉱実験を実施した。日本でも、先行投資者として採鉱技術を保有していることが海洋法上で求められるため、1981年に、工業技術院大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」が開始された。本プロジェクトでは、国内の民間17社とMMAJとで構成された「技術研究組合マンガン団塊採鉱システム研究所」（後に22社）が採鉱技術の開発を進めた。

マンガン団塊の開発に伴う海洋環境影響の予測の調査についても、米国政府の海洋大気局（略称：NOAA）が1975年に深海採鉱環境影響調査（DOMES）を開始した。これは、前述のC-Cゾーンに、国際コンソーシアムの採鉱実験海域及び参照海域の3海域を設定し、海底の現況及び海水の性状等のベースライン調査を実施するとともに、コンソーシアムの採鉱実験で回収された底層水の排水拡散状況の調査を行った。また、海底を採掘機



第1図 1999年当時の各国の先行投資者の鉱区登録状況²⁾

が牽引された軌跡の観察も行った。その後、1990年には、海底攪乱検証実験（CIE）として底棲生物に対する影響を把握する計画を立てた。1991年には、深海底生態系影響実験（BIE）として、海底採掘機を模擬した海底攪乱機を製作し、海底において堆積土を放出し、その拡散状況及び底棲生物に対する影響を把握しようとしたが、海底攪乱機の作動が不備のため成果を得ることができなかった。その後、新たな第2世代海底攪乱機を製作し、海底攪乱実験を実施した。この実験では、海底堆積土の巻き上げ、放出、拡散、再堆積を模倣することができ、攪乱直後の海底への影響を把握するとともに、その後、1995年まで海底生態系への影響の追跡調査が行われた。本海底攪乱機は、その後、日本の探査鉱区においてMMAJが実施した同様な実験（JET）やインド洋におけるインドの探査鉱区での実験（INDEX）、東欧諸国連合の鉱区での実験（IOM-BIE）でも活用された。この第2世代海底攪乱機的设计は、日本が行ったものであった。

このように、1970年代後半から1990年代までに、マンガン団塊に関する地質学的研究、鉱区探査や採鉱技術の開発、環境影響調査など活発な活動が行われたが、その後の、世界的な経済活動の低迷及び国際海洋法の下で求められた採鉱技術のISAへの技術移転義務も緩和されるなどの理由により、技術開発の意欲の関心が低下してきた。しかし、近年、新興国の台頭に伴い各種鉱物資源の需要が高まってきており、とくに、海底熱水鉱床の開発に関心が高まり、頭書に述べたように、日本でもその採鉱試験が始まろうとしている。これらの技術には、少なからず、マンガン団塊採鉱システムの技術開発で培われた知見が活用されている。すなわち、深海底鉱物資源開発の嚆矢となったのが、マンガン団塊であった。

深海底鉱物資源関連の調査研究・技術開発の経緯を第1表に示した。

第1表 深海底鉱物資源関連の調査研究・技術開発の経緯

年度 実施主体	71-75 S46-S50	76-80 S51-S55	81-85 S56-S60	86-90 S61-H2	91-95 H3-H7	96-00 H8-H12
一般特研等 公資研 資環研	MN 調査技術	MN 開発技術			CRC 鉱床評価	
大型プロジェクト 「マンガン団塊採 鉱システムの研究 開発」		81	97 研究所：MN の採掘性、揚鉱特性、環境保全技術 研究組合：採鉱システムの研究開発、海洋実験			
研究調査航海 白嶺丸：74～84	○	○○○○○ ○	○○○			
金属鉱業事業団 探査航海 (DOMA、DORD) 白嶺丸：75～ 第2白嶺丸：80～	MN75			87: 鉱区登録 (DORD)		96
			CRC85 HT MN	87 ← 環境 89 ←		96
					海底攪乱実験 JET: 94	
日米天然資源会議 海底資源合同部会	②③④ ⑤	⑥ ⑦ ⑧	⑨ ⑩	⑪ ⑫ ⑬		海底影響小委員会
米国政府		海洋影響調査 DOMES: 75-80			海底攪乱実験 CIE: 90 BIE: 91-95	
国際企業連合 KCON, OMI, OMCO, OMA		74~78: 採鉱実験				
国連海洋法条約 宣言：深海底及び その資源は人類共 同の遺産	70: 宣言 73: 第3次 海洋法 会合		82: 草案 83: 日署名 84: 鉱区 調整	87: 日登録	93: 60 か国 批准 94: 発効	96: 日批准

MN：マンガン団塊、HT：海底熱水鉱床、CRC：コバルトリッチクラスト

2. 深海底鉱物資源に関する研究開発の背景

1965 年の Mero の著作をきっかけに、深海底マンガン団塊が将来の鉱物資源として注目を集め、米国では、いくつかの企業が経済的な見地から調査を開始した。また、スクリップス海洋研究所を始め、いくつかの研究所では科学的見地からの調査が始められ、データの集積が行われた。それらの成果に基づいて、1970 年代には、米国の企業を中心とする 4 つの国際コンソーシアム（インコグループ、ケネコットグループ、US スティールグループ、ロッキードグループ）が結成され、開発技術が検討された。それぞれのグループには、日本の有力企業も参加していた。一方、米国政府では深海底の硬鉱物資源の開発に関する国内法のスキームが検討され始めた。

このような海外の動向を背景にして、日本では、1969 年に科学技術庁(当時)が「深海底資源開発に関する基礎的調査研究」を開始した。この調査研究では、我が国周辺のマンガン団塊の分布及び成因に関する予備調査と調査技術の確立を目的とし、地調などによって実施された。1969～72 年の調査航海では、大学の海洋調査実習船を用い、日本の南に広がる小笠原海台、マリアナ海嶺を対象として調査したが、試料採取機器が円筒ドレッジなどの簡単なもので、試料の採取はできるが賦存量など定量的な調査はできなかった。公資研は調査技術の確立の一端を担って、地調と協力して調査航海に参加し、海底試料採取用機器の検討を行うとともに、調査用ワイヤの張力等の計測及び試料採取用機器の挙動計測を実施し、試料採取の効率化を試みた。また、試作されていた深海底カメラを用いて海底観察を試みた。

一方、調査技術に関する基礎研究として、公資研ではマンガン団塊の定量的な調査ができるシャッター式のボックスサンプラーの開発及びマンガン団塊大量採取のための採取機器の検討を進めた。また、採鉱技術として提案されていた連続バケット方式（CLB 方式）のバケットの挙動や海底におけるバケットの軌道の解析を行い、バケットラインの効果的な循環方法などを検討した。さらに、海底における採掘の際に必要な因子として、海底堆積土の力学的特性の検討を行った。一方、海底で採掘したマンガン団塊を海面まで揚鉱する方法として提案されているエアリフト方式について、高さ 5m 及び 10m のパイプ輸送実験装置及び砂、砂鉄、粉炭、ガラス玉を模擬鉱石とした揚スラリー実験を行い、固液二相流、気固液三相流の流動特性を検討した。

産業界では、1974 年に、国内の鉱業、造船重機、電機、海運、商社の民間企業 35 社（後に 48 社）によって、「深海底鉱物資源開発協会（DOMA）」が結成された。この協会は、鉱物資源としてのマンガン団塊に関する海外の動向を調査するとともに、国連海洋法や米国の深海底硬鉱物資源法などの国内法規の情報を収集した。また、マンガン団塊の探査、採鉱、運搬、製錬に関する統一的な技術システムを検討した。1975 年からは、MMAJ の委託を受けて白嶺丸（1980 年からは第 2 白嶺丸）によるマンガン団塊の探査を C-C ゾーンで行うことになった。その後、1982 年には、MMAJ 及び非鉄金属鉱業 6 社を含む民間企業 43 社で「深海資源開発株式会社（DORD）」が設立され、C-C ゾーンでの探査は DORD に継承された。DOMA は、1984 年以降、海底熱水鉱床の開発、コバルトリッチクラスト鉱床の

採鉱システム、EEZ 内鉱物資源、大陸棚鉱物資源の探査などに関する調査研究を続け、1998 年に事業を終了した。

海外では、1970年代後半には、前述の米国の企業を中心に国際的な企業連合体であるコンソーシアムによって、C-Cゾーンにおける探査を実施するとともに、採鉱技術を実験レベルで確立していた。例を挙げると、INCO グループ（カナダのINCO 社他）は1978 年にハワイ沖水深5,000m においてポンプ方式、エアリフト方式の両方による採鉱実験を実施、数100 トンのマンガン団塊を採取している。また、U.S. Steel グループは1977 年から1978 年にかけて深海における採鉱実験を実施、多量のマンガン団塊を採鉱したが、揚鉱システムの検証はしていないと言われている。また、ロッキードグループは、マンガン団塊の採鉱実験と称して、ソ連の沈没した原子力潜水艦の一部を回収したと言われている。

3. 白嶺丸による調査航海

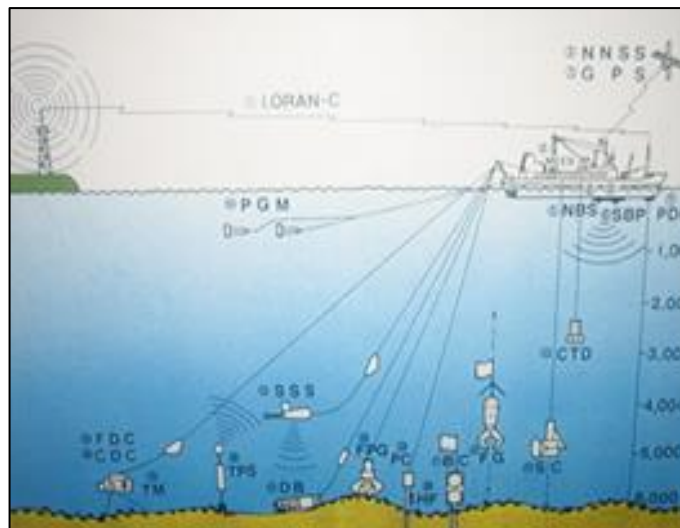
第2図に示した白嶺丸によるマンガン団塊の調査は、前述したように、地調によって実施された研究航海と DOMA によって実施された C-C ゾーンにおける探査航海の2本立てで実施された。地調による研究航海は、1974 年から 1983 年の 10 年間、毎年 2 か月の調査が行われた。最初の 5 年間は、ハワイ諸島南西の中央太平洋海盆を対象に実施され（GH74-5 ～GH79-1 航海）、後半の 5 年間は中央太平洋海盆から南東に 3000km、フィジー諸島東方に及ぶ海域（GH80-5 ～GH83-3 航海）を対象に、マンガン団塊の分布や成分と海底地形や海底地質との関係などの研究が実施された。公資研からも、各航海に参加し、マンガン団塊の調査技術や開発技術の基礎に関する研究を行った。



第2図 地質調査船「白嶺丸」³⁾

白嶺丸での研究航海は、第3図に示したように、物理探査と試料採取による調査が行われた。物理探査は白嶺丸から調査機器を曳航しながら実施するため、夜間、航行しながら行われ、昼間は主に海底の試料採取が行われた。試料採取は、海底約 4000m までサンプラーを降ろすため往復 3 時間ほどを要する。効率よく試料採取を行うためには、早朝、試料採取点に到着し、試料採取を行い、約 100km 離れた次の採取点に移動し、午後、2 回目の試料採取を行う。試料採取が終わると、夜間の物理探査が始まるという段取りで作業が進

められる。

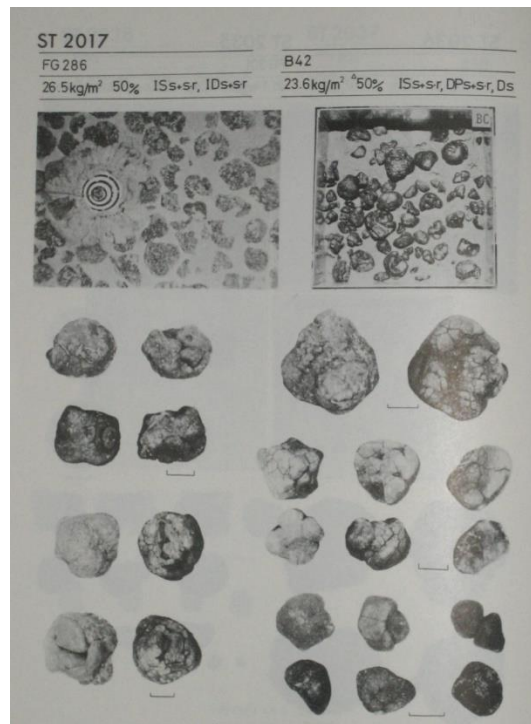


第3図 白嶺丸での調査手法³⁾

試料採取グループは、移動の間に、試料についての記載、測定、処理を行う。公資研からの参加者は、マンガン団塊や堆積土の物理、工学的な特性の測定を行うとともに、マンガン団塊の定量的な採取や大量採取のために試作したサンプラーの試験などを実施した。当初、用いられたサンプラーはグラブタイプのもので、海底堆積土の表面に分布するマンガン団塊の分布状態や堆積土の構造が非常に乱されて採取されていたため、新しく開発されたボックスタイプのサンプラーを導入した。その結果、マンガン団塊の分布密度や堆積土の特性を精度よく測定できるようになった。また、試料からサブコアサンプルの採取もでき、緻密な地質学的研究も可能になった。第4図に、海底表面が乱されない状態で採取されたマンガン団塊の様子、第5図に、マンガン団塊試料の整理状況を示した。



第4図 ボックスサンプラーで採取された試料（ボックスのサイズは40cm x 40cm）



第 5 図 マンガン団塊試料の整理 ⁴⁾
(左上：海底写真、右上：採取試料、下：代表的な試料)

ボックスタイプのサンプラーの導入に際しては、後述するが、1976 年に米国の DOMES 調査航海に参加した際に、日本の試料採取技術の遅れを痛感した結果を反映したものであった。さらに、このサンプラーに小型海底カメラを装着し、試料が採取される直前の様子を観察できるようにした。この小型海底カメラにしても、本来は、ドイツから輸入したフリーフォールサンプラーに装着されていたものであったが、耐圧容器を開けてみると、中には日本の安価な小型カメラが組み込まれていたのに唖然とした。このように、白嶺丸での調査航海の初期では、日本の海洋調査技術とりわけ海底試料採取技術は大変遅れていた。

前述したように、地調及び公資研によるマンガン団塊の調査は、1974 年から 1983 年まで毎年 2 か月の公海で実施された。これらの白嶺丸での調査航海の結果、地調では、太平洋の一部でのマンガン団塊の分布マップが出来上がり、その鉱物学的な研究も進んだ。また、公資研の研究においては、数多くの地点のマンガン団塊の粒度分布や深海底堆積土との付着力の測定や堆積土の物理的、工学的特性など、マンガン団塊を採掘する際に必要となる因子を明らかにできるとともに、実験室での研究用に多数のサブコアサンプルを入手した。また、マンガン団塊の大量採取を試み、公資研の他の研究室での製錬の研究に供することができた。第 6 図に、マンガン団塊を大量に回収している様子を示した。



第6図 大型ドレッジで採取された大量のマンガン団塊

—閑話休題—「白嶺丸航海日誌」

某月某日 出港

おとそ気分も抜けやらぬ、1月の出港である。「白嶺丸」の基地は東京湾の最奥部の船橋にある。二ヶ月にわたる調査航海のスタートが切られようとしている。調査団員は、家族や同僚との別れを惜しみ、乗組員は、船長をはじめ、皆、出港の準備にキビキビと忙しい。白嶺丸は徐々に棧橋から離れようとしている。何十本もの五色の紙テープが投げられ、次第にテープの中央が垂れて海面に触れてくる。いくつかは既に切れているが、しかし、いつもの某氏のテープはしつこく切れない。テープも人柄を表すのか。出港はしたが、何か吹っ切れない。前途に低気圧が居座っているのだ。東京湾は波も無く、静々と南下し、数時間後に館山沖に着いた時、今日はここで仮泊するという。航海初日ということで、船に慣れない団員も多いし、低気圧をやり過ごすためである。そこで、まずは前途を祈って乾杯ということになる。館山の灯を遠く見ながら、乾杯に乾杯を重ね、いつしかウトウトと。

某月某日 出港2日目

夜中にガラガラという音を聞いたような気がする。目が覚めて、部屋からでると、そこには伊東の鳩屋ホテルがあり、遠くには雪をかぶった富士山が。これはどうしたことかと聞いたところ、夜中に海が時化て、錨が流されそうになったので、西風を避けるため、伊豆半島の陰に逃げ込んだとのこと、多くの調査団員が船酔いで苦しんだとのこと。ちっとも知らなかった。

某月某日 音波調査開始

ハワイ南西方の調査海域に到着。調査は、夜間は航行しながらの物理探査、昼間は 2〜3 点の観測点に留まって、試料採取という手順で行う。今夜は、手順どおり、エアガンを使って海底下の地質構造の調査を行っていた。直径約 7cm、長さ数 100m のビニールチューブ内に無数の受信器を配置したストリーマを船の後方に曳航し、エアガンの破裂音の海底からの反射を記録する。ストリーマは水面の雑音を拾わないように、かつ、水中に沈みすぎないように、重量調整用に油が注入されている。順調に記録が取れていたが、突然、信号が消えてしまった。船上の機器に異常はない。長いストリーマを点検することにした。ストリーマを巻き上げると途中で切断されている。切断面は鋭利に切られている。よく見ると大きなサメの歯が数本食い込んでいた。ストリーマには、ひまし油が注入してあったので、きっと便秘のサメが食いついたのだとの結論に達した。

某月某日 その翌日

昼間のサンプリング作業は、サンプラーを海底まで降ろし、海底の試料を採取し、船上に回収する。全行程で数時間を要する。調査船は同一地点に留まる必要がある。そのため、船長はプロペラ、スラストの制御に大変である。しかし、海の生物から見ると、何か大きな物が水面に漂っているものと見え、シイラやサメが寄ってくる。調査団員のほうもサンプラーが海中にある間には時間を持て余すことがある。そんな時に、昨夜の敵討ちということで、サメ釣りをやる。5 cm もある釣り針に飛魚などを一匹丸ごと付けてサメの目の前に落としてやる。ハリスには 2 mm のワイヤを使い、8 mm のロープにつなぎ、釣糸ならぬ釣ロープにする。サメが食いついたら、ループにしたロープを降ろし、サメのしっぽのところでループを絞め、逆さ吊りにして甲板に釣り上げる。釣り上げられたサメは、夜の肴になったり、ジョーズもどきの顎の骨を取られたり、そのまま海へ帰されたり、様々な運命をたどることになる。

某月某日 タヒチ入港

1 ヶ月の調査を終えて、タヒチのパペーテ港の沖。港外でタヒチのパイロットを乗せ、タヒチの国旗を掲げて入港したが、いくら待っても入国管理官が来ない。仕方が無いので、本船の事務局員と二人で掛け合いに行く。船のボートで送ってもらい、いざ上陸。最初は船酔いならぬ岡酔いで足元が揺ら揺らする。揺れる船に慣れると揺れない陸で安定が悪い。人工衛星でもこうなのかと考えながらガウンガウン通りを歩き、入国事務所で無事手続きを終えた。帰り道、ヨーロッパ人と思しき観光客からフランス語で道を聞かれた。突っ掛けサンダルに半ズボンの姿は、きっと現地ポリネシア人と間違ったに違いない。ここでは、本船は給水、給油、食料品の搬入、調査団は、試料の整理と数日間の休養である。あとで、ガウンガウン通りは、ゴーギャン通りであることを知った。

某月某日 後半調査

調査航海も軌道に乗ってくると、退屈してくることも多い。そんな時、楽しみは、やはり食べることにある。本船の司厨は、暦を忘れないように 1 の日と 15 の日には、タイの尾頭付きと赤飯を出すことにしている。また、船の場合は多くがそうであるように、昼食

が一番豪華である。昼食のデザートにはソフトクリームが出ることもある。海底堆積物のサンプルには、石灰質軟泥など少しクリーム色がかっていて、小さなつぶつぶが残っており、バニラアイスクリームにそっくりなものも多い。こういうサンプルが取れた時は、余分なサンプルを捨てずにビニール袋にとって置く。デザートにソフトクリームが出た時は、コックに頼んでコーンを分けてもらい、軟泥アイスを手際よく作る。これ見よがしに、研究室へ歩いていくと、目ざといアルバイト調査団員君が「あっ、二つめですか。いいですねえ。」と言ってくる。「欲しい?」と聞くと「欲しいです。」。「あげるよ。」で、彼は軟泥アイスに食いつく。「うー。これは何ですか。」。その後、彼は「これ、もらっていいですか?」。それから、彼の同僚が同じ目に会っていた。

某月某日 調査終了間近

今回の調査航海には、女性アルバイト調査団員君が参加していた。それも、たくましそうな女性である。さっそく、力試しを行う。当時、深海底を撮影する深海カメラは大きなフレームにカメラ、ストロボ、ピンガーなどが搭載されており、耐圧容器に収められているため、それぞれが 20kg 以上である。力自慢の彼女に、深海カメラを持っているところの写真を撮ってあげると言って、カメラを構える。ピントが合わない、合わないと言って時間を稼ぐ。早く、シャッター押してと、彼女が悲鳴を上げたが、なかなかピントが合わない。

航海の終わり頃、デッキでサンプラーの回収を待っていたとき、これまで、一緒に作業を行っていたアルバイト調査団員君数名が、筆者をデッキに押さえつけた。そのうちの一人が足にロープを巻きつけ、それをクレーンのブームに回し、逆さ吊りにした。もう、仕方が無い。怪我をしないように、両手を頭に回し、しばらく、揺れていた。彼らにいろいろ教えてあげた恩返しだった。

4. 大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」

DOMA の調査研究や公資研の研究及び国際海洋法や海外企業の動向を背景に、工業技術院は、1981 年に大型工業技術研究開発制度に基づく「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」を開始した。本プロジェクトは、当初計画では、研究開発期間 9 か年、予算総額 200 億円で、最終年度には実海域での海洋総合実験を実施することとなっていた。同年、MMAJ 及び非鉄金属鉱業 5 社、造船重機 7 社、電気機械工業 4 社、その他の合計 18 社（後に 22 社）で技術研究組合「マンガン団塊採鉱システムシステム研究所」が結成され、本プロジェクトの研究開発を受託した。また、公資研は基礎的な研究を担当することとなった。

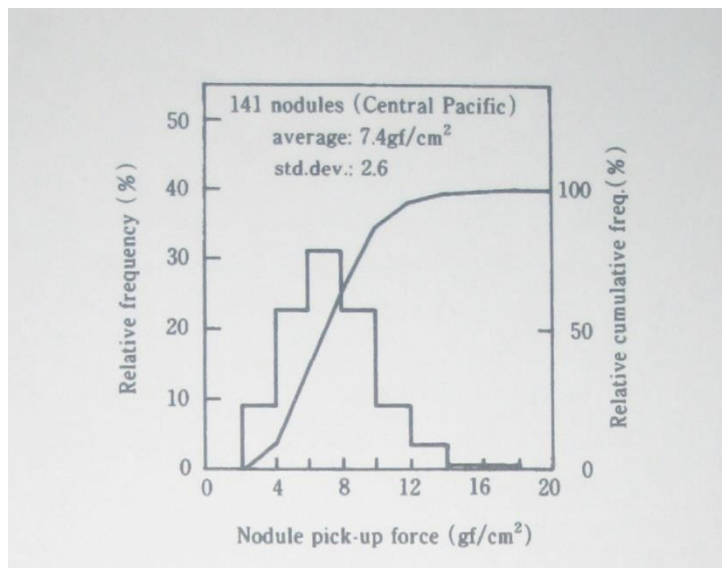
(1) 公資研での基礎的研究

本プロジェクトにおいて、公資研では、集鉱システムに関する基礎的研究として「マンガン団塊の採掘性に関する研究」、揚鉱システムに関する基礎研究として「マンガン団塊の揚鉱特性に関する研究」、トータルシステムに関する研究として「マンガン団塊の採鉱に伴う環境保全技術に関する研究」を実施した。

(i)マンガン団塊の採掘性に関する研究

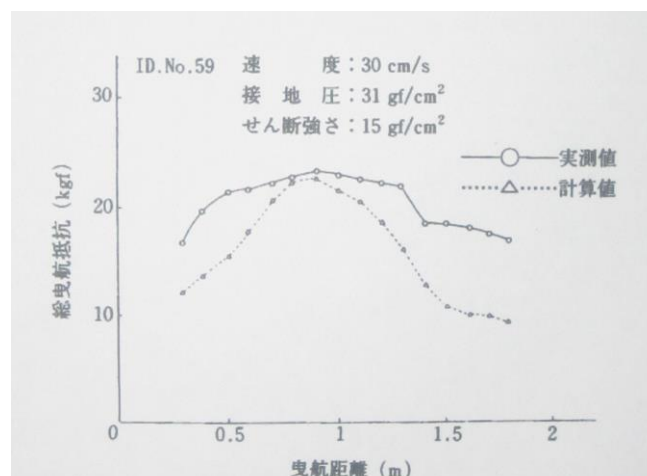
集鉱システムの設計に必要となるパラメータを明らかにするための研究は、「海底の土質特性」、「海底との相互作用」、「取込特性」の3つに区分される。

「海底の土質特性の研究」では、白嶺丸での調査航海の船上において、攪乱のない状態の海底試料について、マンガン団塊の粒度分布や堆積層との付着力を把握した。測定結果の一部を第7図に示した。また、深海底堆積層の物理的及び力学的特性（粒度分布、密度、含水比、せん断強さ、鋭敏比、粘着力、内部摩擦角、弾性定数、粘性定数など）を船上及び実験室で把握した。また、集鉱機の着底時を想定した衝撃を与えた場合の力学的特性の把握を行った。



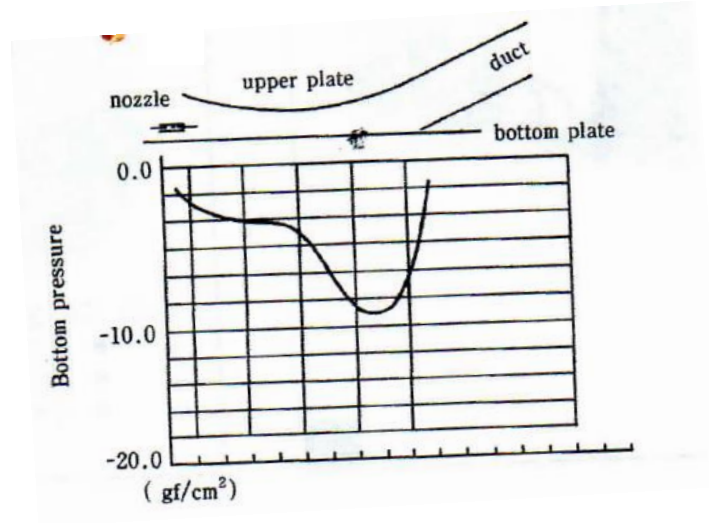
第7図 マンガン団塊と堆積層の付着力⁵⁾

「海底との相互作用の研究」では、集鉱機が深海底堆積層上で運動する際に受ける抵抗を、模擬堆積層上において集鉱機のそり部の模型の曳航実験を実施し、その特性を把握した。測定結果の一部を第8図に示した。



第8図 模型そりの曳航抵抗⁵⁾

「取り込み特性の研究」では、研究組合で提案されている水流式取り込み機構の要素模型を用い、海底面に発生する負圧と調査船上で計測したマンガン団塊と堆積層との粘着力とを比較検討し、集鉱性能を推定する基礎資料を得た。実験結果の一部を第9図に示した。

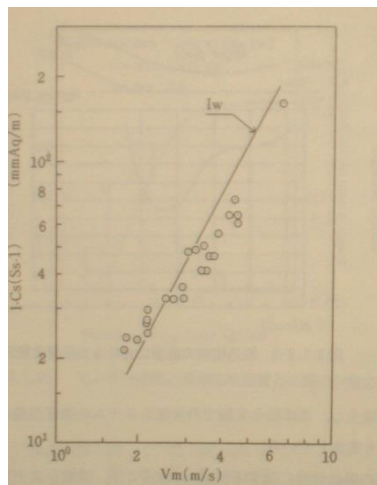


第9図 水流式取り込み機構で発生する負圧⁵⁾

(ii) マンガン団塊の揚鉱特性に関する研究

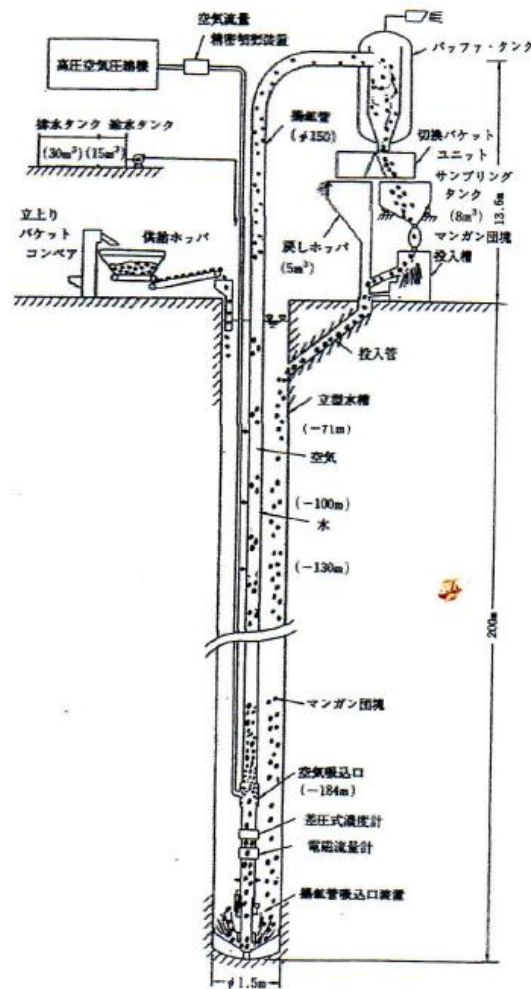
マンガン団塊の揚鉱特性に関する研究においては、ポンプリフト方式及びエアリフト方式による揚鉱システムの設計を行うための基礎データを得ることを目的として、研究を実施した。

「ポンプリフト方式」に関する研究では、高さ 30m の管路内を模擬マンガン団塊を遠心ポンプにより循環させ、管内濃度、吐出濃度、固体粒子の上昇速度などと圧力損失の関係を検討し、固液二相流の流動特性を解明し、ポンプリフトシステムの設計を行うための基礎データを得た。固液二相流の実験結果の一部を第 10 図に示した。

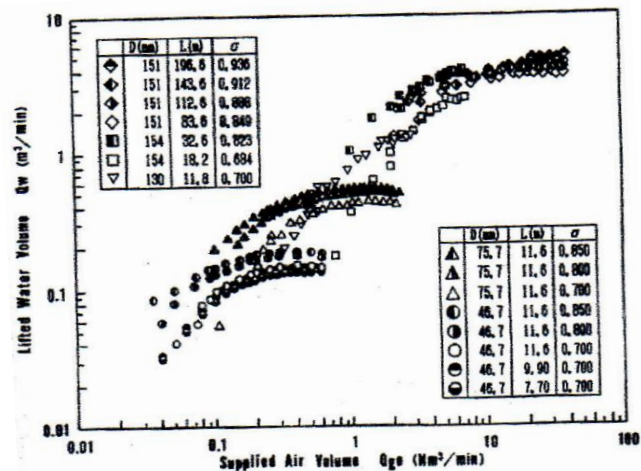


第 10 図 固液二相流における圧力損失と平均流速⁵⁾

「エアリフト方式」に関する研究では、公資研内の地中に建設した 200m 立型水槽に水深 180m、130m、100m、70m に空気吹き込み口を備えた口径 150 mm 揚鉱実験パイプを設置し、試料としてマンガン団塊とほぼ同じ物性を有する模擬マンガン団塊及び砂利、砂などを用いた大規模な気液固三相流の実験により流動特性を解明し、エアリフトシステムの設計を行うための基礎データを得た。200m 立型揚鉱実験装置を第 11 図に示した。エアリフトにおける揚水量特性の実験結果の一部を第 12 図に示した。



第 11 図 200m 立型揚鉱実験装置 ⁵⁾



第 12 図 エアリフトによる揚水量⁵⁾

(iii) マンガン団塊の採鉱に伴う環境保全技術に関する研究

マンガン団塊の採鉱は、海底面を攪乱しながらマンガン団塊を集鉱し、底泥を含んだ深層水とともにマンガン団塊を流体ドレージ方式で採鉱船に持ち上げ、不要な深層水を海面近くで排出する。したがって、マンガン団塊の採鉱は海域の表層と底層の環境に大きなインパクトを与えることが予想される。

本研究では、ベースラインとして、表層域及び底層域の環境を把握するとともに、採鉱に伴う環境影響を予測するモデルを作成した。当初計画では、本研究は1989年度から1993年度までの5ヶ年計画とし、1991年度の海洋採鉱実験にあわせて底層における環境影響調査を実施する予定であった。しかし、採鉱実験が先送りされたため、1994年度にMMAJにより日本西鉱区で行われた海底攪乱実験を対象にマンガン団塊の採鉱による底層環境への影響評価を行うこととした。

「表層域環境」の研究においては、水質特性として、水温・塩分・栄養塩の分析により、対象海域は赤道表層水や赤道中層水などの典型的な低緯度海域の水塊の存在が確認できた。また、生物特性として、クロロフィル・プランクトンの分析を行った。

「底層域環境」の研究では、流動特性、沈降物質特性、底質特性、微小な底棲生物特性などを把握した。

「環境影響予測モデル」の研究では、MMAJによって実施された海底攪乱実験（後述）を対象に底層流及び懸濁底泥の再堆積のシミュレーションを行った。その結果、実験結果をよく再現でき、底層拡散モデルの精度と信頼性が確認できた。

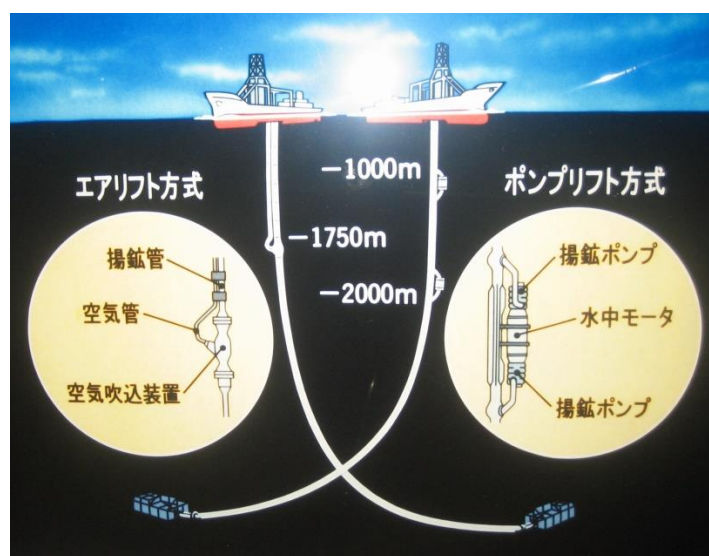
(2) マンガン団塊採鉱システムシステム研究所での研究開発

(i) 研究開発の基本計画

①当初の基本計画

本プロジェクトは1981年度から開始し、研究開発期間9か年で、マンガン団塊を連続して大量に効率よく採鉱するマンガン団塊採鉱実験システムを開発し、最終年度の1989年には水深約5,000m前後のマンガン団塊の賦存する海域で第13図に示したような海洋総合実験を実施し、将来の採鉱システムの技術的及び経済的実現可能性を確認する計画であった。

このマンガン団塊採鉱実験システムは、トータルシステム及び集鉱システム、揚鉱システム（ポンプリフト装置、エアリフト装置、揚鉱管装置）、ハンドリングシステム、計測制御システムの4サブシステムで構成するもので、1985年度までに、採鉱実験システムのための要素技術に関する実験研究、設計研究を行い、その後は、実際に海洋総合実験に用いる採鉱実験システムを設計、製作する計画であった。



第13図 当初計画のマンガン団塊採鉱システム海洋総合実験の概念図⁶⁾

②その後の計画変更

当初の基本計画では、海洋総合実験は、ハワイ沖の日本西鉱区の海底で行う予定であり、実行時期は1989年とされていた。その後、フランスからの技術協力及び共同海洋総合実験の申し入れ（途中で解消）や、大水深石油掘削及び塊状のCRC鉱床を対象とした採掘技術を併せて検討することになり、採掘対象を海洋資源全般へと拡大したため、名称が「海洋資源総合基盤技術」へと変更された。さらに、国連海洋法条約におけるISAへの技術移転義務の緩和が行われたことにより、商業生産技術の開発は急務ではなくなった。また、当時の世界経済の低迷により、深海底資源の商業ベースでの開発時期は、研究開発終了直後ではなく、研究開発終了時から10年以上の時間差が生じる可能性が大となり、商業的規模での実証よりは将来的な技術の進展に対応できるように特定要素技術の実証に重点を行うことが重要となった。最終的には、CRC鉱床の採掘のため、採鉱実験海域を水深約2,000mの南鳥島沖の海山とし、海洋総合実験を海洋実験に変更し、1997年に実施することになった。

た。海洋実験の内容は、一貫したシステムによる海洋総合実験から、4つの特定要素技術の実験すなわち、曳行機による採鉱実験、パイプハンドリング実験、ガスリフト実験、フレキシブルホース実験をそれぞれ個別に実施することとなった。

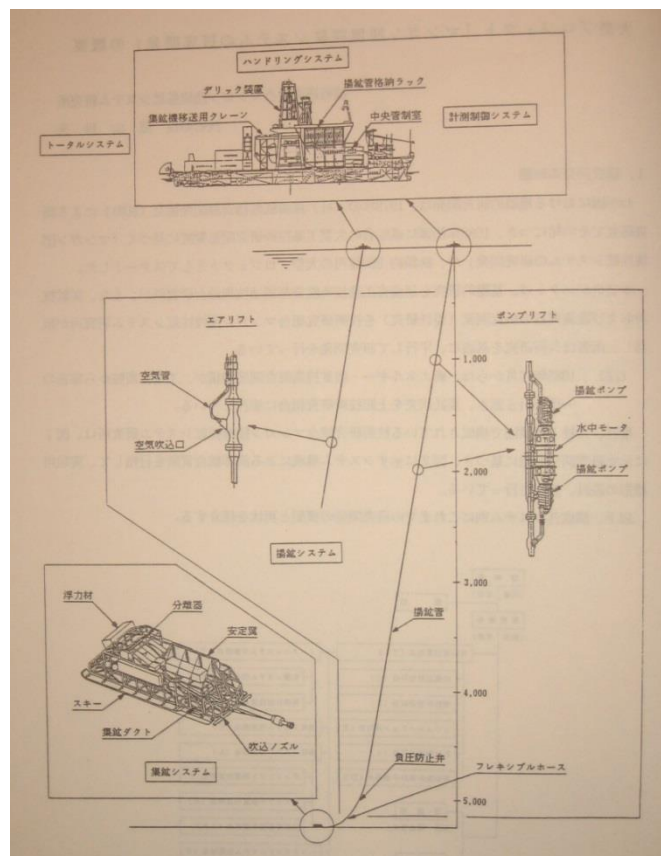
(ii)研究開発の内容と成果

① 研究開発の概要

本研究開発は、その研究段階に応じて3つの段階に分けることができる。すなわち、マンガン団塊採鉱システムの開発に必要な要素技術を研究開発する第1段階（1981年度～1985年度）、海洋実験を行うのに必要な機器の開発と製作を行う第2段階（1986年度～1996年度）、海洋実験を行い、開発された機器の機能を確認し、マンガン団塊の商業生産システムにつなげるために必要なデータを取得する第3段階（1997年度）である。

本研究開発の対象システムは、第14図に示したように、数多くの構成要素が結合した複合システムであるが、以下の4つの構成要素及びトータルシステムに大別できる。

- ・集鉱システム
- ・揚鉱システム
- ・ハンドリングシステム
- ・計測制御システム



第14図 数多くの要素が結合したマンガン団塊採鉱システムの構成⁷⁾

集鉱システムは、海底を移動しつつマンガン団塊を効率よく集鉱、採取して、揚鉱システムに送り込むためのシステムである。深海底で作動する類似システムはこれまでに開発実績が少なく、最も技術開発要素が高いものである。

揚鉱システムは、ポンプリフト装置、エアリフト装置、揚鉱管装置に分けられる。ポンプリフト装置及びエアリフト装置は、集鉱システムから送り込まれたマンガン団塊を海上まで輸送するための装置であり、揚鉱管装置は、マンガン団塊の運搬経路となるものである。ポンプリフト装置は揚鉱管の数か所に水中ポンプを設置して揚鉱に必要な搬送流を起こすもので、大水深での水中モータ・ポンプの開発とともに、大揚程の固液二相流の解析が必要となる。エアリフト装置は高圧空気を揚鉱管の途中に送り込むことによって揚鉱に必要な搬送流を起こすものであり、空気吹き込み口の下方は固液二相流となり、上方は気固液三相流の流れになり、それぞれの解析が重要である。揚鉱管装置は、マンガン団塊の運搬経路となる機能と同時に集鉱装置の曳航手段としての機能も有し、集鉱機との接続部は屈曲管となり、その上方は鉛直管となる。長大な鉛直管路とフレキシブルホースの動的挙動の解析が重要である。

ハンドリングシステムは集鉱システム、揚鉱システム等の海中機器を、揺動する採鉱船上から安全かつ効率よく、昇降、懸架し、曳航を行う装置である。

計測制御システムは、採鉱作業を円滑に能率よく実施するために、深海底から海上にいたる諸装置を総合的に計測、制御するシステムであり、各種計測装置や信号及び動力を伝送する大水深用複合ケーブルの開発が重要である。

これらのサブシステムを統合し、整合性を持たせて全体システムを完成させ、海洋実験を実施するためのトータルシステムは、実験の計画を行う部分と実験システム全体の統合を行う部分からなる。

第1段階においては、トータルシステム及び各サブシステムの機能や性能、形状について概念設計を行うとともに、各サブシステムについては、基本的な機能、性能を検討し、基本仕様を決定する設計研究と、構成する装置の性能を確認する機能確認実験からなる実験研究とを並行的に実施する。トータルシステムにおいては、要素技術段階における集約として基本設計を取りまとめ、システム全体の性能解析、採鉱実験船の基本設計を作成し、海洋実験計画を策定する。

第2段階では、基本設計に基づき、各サブシステムについて海洋実験機器、装置の詳細設計を実施し、実験機器の製作を行う。トータルシステムについては、総合採鉱性能解析、総合運動性能解析に基づき、具体的な海洋実験方案を作成する。また、商業採鉱システムの概念設計を実施し、経済性の試算を行う。

第3段階では、第2段階において各サブシステムとして開発、製作された実験機器を用いて特定要素技術の海洋実験を実施し、研究開発成果の検証と商業採鉱システムの設計に必要なデータを取得し、プロジェクトの成果の総合的取まとめを行う。

② 研究開発の成果の概要

前述したように本プロジェクトの研究開発は三つの段階に分けて推進された。その成果

について個々に紹介する。

(ア) 第1段階（1981年度～1985年度）

第1段階においては、トータルシステム及び各サブシステムにおいて、海洋総合実験を行う際に必要な採鉱実験システムの構成について基本的な機能、性能が検討され、それらの構成要素並びに構成機器についての性能試験、機能確認実験等がじっしされ、基本設計が取りまとめられた。

・トータルシステム（実験計画）

実験計画の策定に必要な商業採鉱システムの基本構想及び経済性が検討された。また、海洋総合実験の規模について、商業生産の設計データを精度よく推定するための実験規模の推定方法が検討された。

・トータルシステム（実験システム）

海洋総合実験の規模に対応できる実験船及び実験システムの構成及び基本的な設計条件の設定が行われた。実験船に関しては、必要とされる駆動力や、操船のシミュレーションが実施された。

・集鉱システム

集鉱機の採取方式などについて、実験機を作成し、公資研の模擬堆積土を敷設した長さ20mの横型実験水槽を用いた集鉱機能確認実験が行われた。また、本体形状等について検討され、集鉱システムの基本設計が行われた。

・揚鉱システム（ポンプリフト装置）

水中ポンプを構成する部品に関して、構造材料の選定や、性能試験、耐久試験等の機能確認実験が行われた。また、水中モータ等に関して、絶縁性、機能性等の確認が行われた。さらに、公資研の水深200mの揚鉱実験装置や模擬マンガング塊を用いた実験などで、固液二相流の流動が検討された。

・揚鉱システム（エアリフト装置）

エアリフト方式で大きな要因となる空気吹き込み口に関して、新たな開閉制御方法が開発され、作動特性が確認された。また、エアリフトの性能に関してシミュレーションプログラムが開発され、公資研の水深200mの揚鉱実験装置用いた実験による検証が行われた。さらに、揚鉱後の気固液の分離に関して効率的な分離装置が開発された。

・揚鉱システム（揚鉱管装置）

採鉱時、揚鉱時に揚鉱管装置に発生する応力等が計算され、その構造等が決定され、その製造方法及び溶接工法が確認された。また、超高張力フレキシブルホースに関しては、破断荷重、高圧下での内容積変化、座屈等に関して十分な性能を持つ材質、形状等が曲げ試験などで検討され、製作のための技術開発が行われた。さらに、採鉱時の曳行により発生するカルマン渦振動を減少させるためのフェアリング装置が検討された。

・ハンドリングシステム

集鉱機、揚鉱管装置等の各システムの水中での挙動、制御方法等が揺動テーブルを用いた水槽での模型実験並びにシミュレーションによって検討され、デリック装置等の基本設

計が行われた。

- ・計測制御システムの研究開発

高耐水圧の光・電力複合水中ケーブルの開発に加えてコネクタ部分に関しても十分な絶縁性、耐久性等を持つものが検討された。また、深海底で使用可能な音響探査システムが検討された。その性能に関しても限界特性、並びに雑音特性が確認された。これらの要素研究開発の結果、海洋総合実験に必要な機器の基本設計が行われた。

(イ) 第2段階（1986年度～1996年度）

計画変更に伴う基本設計に基づき海洋実験機器の設計、製作等が進められるとともに、海洋実験計画の抜本的見直しが行われ、具体的な実験方案が策定された。

第2段階において設計・製作された代表的なものに以下のものであった。

- ・トータルシステム

海洋実験のための実験船について詳細設計並びに儀装品の設計が行われた。

- ・集鉱システム

集鉱機本体及びそれに付属する安定翼、海底滑走用スキー等が設計、製作された。また海底泥・マンガン団塊分離装置、マンガン団塊破碎装置、各種モータおよび油圧機器とその耐圧容器が設計、製作された。製作された集鉱機を第15図に示した。



第15図 海洋総合実験のための集鉱機

- ・揚鉱システム（ポンプリフト装置）

高耐水圧の水中モータ、水中ポンプが各2基設計、製作された。また、それらに必要な電装品が設計、製作された。

- ・揚鉱システム（エアリフト装置）

低・中・高圧段の空気圧縮装置並びに空気輸送ホース及び空気吹き込み弁が設計、製作された。

- ・揚鉱システム（揚鉱管装置）

揚鉱管の製作装置やカルマン渦振動対策装置等の周辺装置が設計、製作された。また、高張力フレキシブルホースが設計、製作された。

- ・ハンドリングシステム

各種海底機器（集鉱機、揚鉱管、水中ポンプ等）のハンドリング装置の詳細設計が行われた。また揚鉱管ハンドリング用の嵌脱装置、把持装置及びデリック装置等が製作された。

- ・計測制御システム

管制システム並びにデータ処理・伝送システムに関するハードウェア及びソフトウェアが設計、製作された。また、集鉱機用の水中音響機器、センサー類が開発された。

(ウ) 第3段階（1997年度）

本プロジェクトの見直しにより、海洋総合実験に代えて、これまで研究開発してきた各種要素技術のうち、曳行機による採鉱技術、パイプハンドリング技術、ガスリフト技術、フレキシブルホースの4つの特定要素技術の検証・確認のための実験が実施された。

(a) 曳行機実験

流体ドレッジ方式による被曳行型集鉱機（曳行機）の大水深下での採鉱機能及び信頼性が確認された。

海洋実験は、南鳥島沖において台船から曳行機を約2000mの深海底に着底させた後、約1 kmの距離を曳航する集鉱実験が実施され、数トンのマンガン団塊の回収に成功し、マンガン団塊の集鉱性能が把握された。台船上でのハンドリング技術及び曳行技術の確立も図られた。併せて、各システムの制御、監視及び計測システム試験、高耐圧高張力光・電力複合ケーブルの諸特性の確認が行われ、設計通りに動作することが確認された。

(b) パイプハンドリング実験

瀬戸内海において、動揺・傾斜のある台船上で、マンガン団塊採鉱システムのための揚鉱管装置及び海底石油掘削におけるパイプ等の半自動によるパイプの嵌脱、揚降実験が行われた。これらの実験により、船体動揺時のパイプハンドリング特性について各種データが得られた。また、カルマン渦対策装置の防振効果、特性が確認された。

(c) ガスリフト実験

第2段階までに実施された、水深200mの実験設備による揚鉱試験からガスリフト性能シミュレーションの検証が行われた。その成果を踏まえ、ガスリフト（人工採油）技術の確立を目指した実験が行われた。その結果、空気圧縮機の性能、高压ガス圧縮特性、送気ホース装置の管内流動特性、ガスリフト装置運転制御特性等が確認された。

(d) フレキシブルホース曲げ特性実験

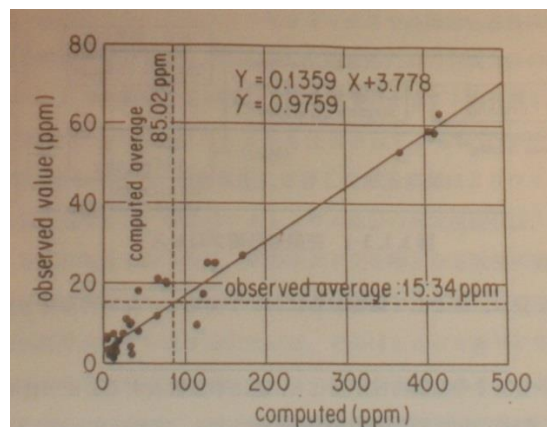
曳行機に接続するフレキシブルホースの曳行機の着底、離底時を模擬した実験が行われた。その結果、フレキシブルホースの挙動や曲げ特性等に関する各種データが得られた。

5. 日米天然資源会議「海底鉱物資源専門部会」を通じた国際協力

1964年に創設されていた天然資源の開発利用に関する日米会議（日米天然資源会議：UJNR）に、海底資源の科学技術に関する情報の交換や研究者の交流、共同研究を実施するために海底鉱物資源専門部会（MMP）が設置され、1970年に第1回合同会議が開催された。MMPは、日本側からは工業技術院の公資研、地調、中国工業技術試験所(当時)及び建

設省港湾技術研究所(当時)の研究者で構成され、米国側からは商務省海洋大気局、内務省鉱物管理局、米国地質調査所などの研究者及び行政担当で構成されたが、両国とも、適宜、構成員の交代やオブザーバの参加を得た。1970 年以來 1990 年までに、毎年あるいは隔年に相互の国で開催され、合計 13 回の合同会議が開催された。合同会議での主な検討対象は、米国が先行していたマンガン団塊を中心とする深海底鉱物資源の開発及び日本が産業として先行していた海底砂利資源の開発などであった。この間、米側の議長は、日本の若手研究者が米国での長期派遣の研究に従事するに際して、各研究者の研究テーマにふさわしい研究所や大学の紹介及び助言を行った。

海底砂利資源の開発については、米国の東部大都市周辺での骨材資源の枯渇により海底骨材の開発が求められていたが、採掘に伴う海洋環境の影響の悪化が懸念されていた。日本では、瀬戸内海や北九州で大規模な海底砂利の採取が行われており、米国としては、その現状や海面汚濁防止溢流システム (ATOS) を装備している日本の浚渫船の効果に関する知見を得たいとしていた。そのため、合同会議のスケジュールに瀬戸内海や北九州沖の海底砂利の採掘現場や下関の港湾建設局の浚渫船の視察を行った。その結果、米国から ATOS の効果を検証し、汚濁海水の拡散シミュレーションモデルを構築するための海洋実験の提案があった。本実験は、日本側が実験の場を提供し、実験計画を作成し、米国の予算によって実施された。実験に当たっては、公資研、中国工業技術試験所及び港湾技術研究所の研究員の協力によって、下関の港湾建設局の ATOS 装備の浚渫船を対象とした新門司港の航路浚渫現場において調査を実施した。この調査では、地元の漁船数隻で ATOS 使用時及び不使用時の汚濁排水の拡散の追跡調査を行った。米国からは、2 名の研究者が参加した。本調査に基づくシミュレーションモデルと実測値の対比を第 16 図に示したが、本モデルは、その後、米国海洋大気局 (NOAA) の Technical Memorandum として発表された。参加した米国の研究者は、日本の漁港の様子に非常に関心を持ち、ホテルの隣にあった魚市場に案内したところ、そこで小さな鮑を買い、その場でしょうゆをかけてもらって食べた。また、漁港では漁協に並んだタコツボを見て買いたいということで、お願いしたところ、新しいタコツボを提供されたが、フジツボのついた古いのがいいということで無償で分けてもらった。後日、彼に聞いたところ、ハワイの家に飾っていると言っていた。



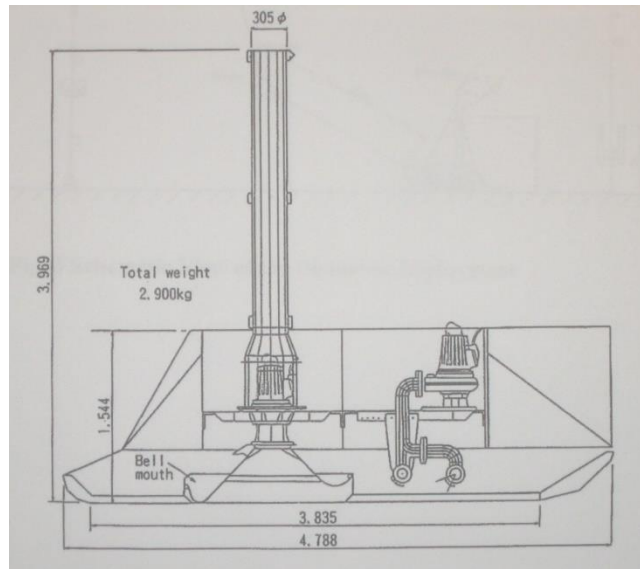
第 16 図 懸濁水の拡散の実測値とモデルの対比 ⁵⁾

マンガン団塊の採鉱に伴う環境影響に関しては、1975年～1980年に米国が実施した深海採鉱環境影響研究（DOMES）の調査航海に日本の研究者を参加させることができた。本調査は、米国のNOAAの調査船オーシャノグラフィ号（4000 t）を用い、コンソーシアムの採鉱実験域及びその他の参照域を対象に、採鉱実験前の海洋及び海底のベースラインを把握するとともに、実験中の排水状況、実験後の海底の変化を調査することとなっていた。日本の研究者は、1976年の調査航海に参加し、環境影響研究のみならず試料採取などの米国の進んだ調査方法などについて、多くの知見を得ることができ、日本の白嶺丸での調査に反映することができた。ボックスサンプラーに集合した調査団の写真を第17図に示した。

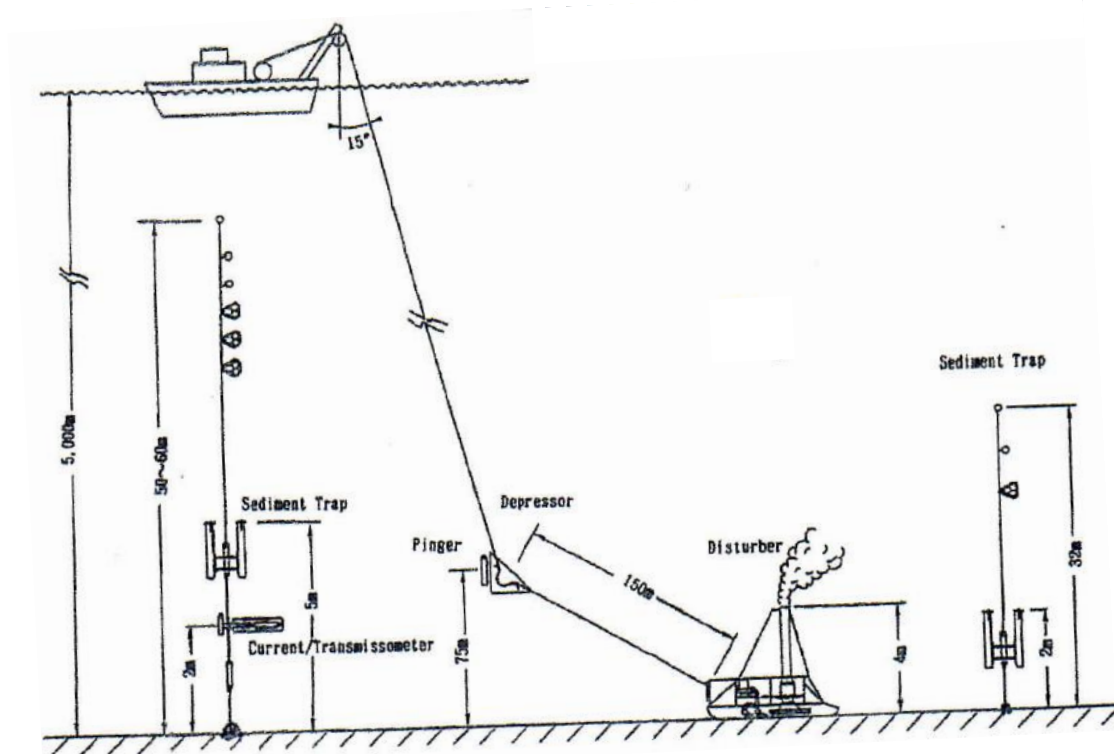


第17図 DOMES航海の調査団員（筆者は中段右から2人目）

また、第11回合同会議において、日本の大型プロジェクトで計画されていた海洋採鉱実験を対象とした環境影響に関する共同研究が提案された。その結果、1990年の第13回合同会議において、日本のMMAJ及び公資研の専門家、米国の海洋大気局及びウッズホール海洋研究所の専門家で構成された「マンガン団塊環境影響調査小委員会」を設け共同研究を実施することとした。この小委員会やその専門家会合は、1996年まで日本国内や米国、ハワイに係留中の白嶺丸船上で、合計7回開催された。しかし、日本の海洋採鉱実験が延期されたため、米国は、1991年、模擬採掘機を使用した海底生態系攪乱実験（BIE）を行った。この実験航海には、MMAJによって日本からも研究者を派遣した。この実験航海では、ソ連（当時）の調査船ユーズモールジオロギア号を用い、実験を行ったが、模擬採掘機の動作不良により、所定の成果を得ることはできなかった。その後、米側は、第2世代の模擬採掘機を製作するにあたり、日本側に協力を求めた。その結果、日本の設計に基づき、第2世代の模擬採掘機が製作された。第2世代模擬掘削機を第18図に、海底攪乱実験の模式図を第19図に示した。



第18図 第2世代模擬掘削機⁸⁾



第19図 海底攪乱実験模式図⁸⁾

1993年に、再度、日本の技術者の参加のもとに海底攪乱実験が行われ、所定の攪乱実験を行うことができた。その後、この模擬採掘機は、日本、インド、東欧諸国連合の海底攪乱実験にも使用された。

このように、UJNR 通じた共同研究が活発に行われるとともに、とくに、公資研の 4 名の若手研究者の米国での長期在外研究については、米側議長から、研究実施機関の紹介のみならず、滞在中にも何度か研究先を訪問し、適切なアドバイスを提示したり、研究先に研究予算を手配するなど、多大な協力を得ることができた。

—閑話休題—「米国環境影響調査航海日誌」

1976 年夏(DOMES 調査航海)、米国シアトル

米国海洋大気局 (NOAA) は 1975 年にマンガン団塊分布海域のベースラインを把握するとともに採掘による環境影響を把握するための調査 DOMES 計画を始めた。調査研究基地は、シアトルのワシントン大学キャンパス脇の NOAA の海洋研究所である。来週から始まる調査の打ち合わせが始まった。調査団長は NOAA の研究員でトルコ系の米国人である。調査団は NOAA の他、大学、研究所などからの研究員で、外国人は筆者一人である。海底から採取した試料の処理について話し合っている。さまざまな処理方法を話し合っているが、筆者のおぼつかない英語ではなかなか詳しいことが分らない。その中でもグリーンハンドの処理について、話がまとまらない。仕方が無い。それは何だと聞いたら、お化けの手だという。日本で言えば、河童の手か？米国人はこんなことをまことしやかに議論する。最後に団長が私一人のために再レクチャーしてくれた。団長の話はよく聞き取れる。その旨を伝え、団長は大喜び。何でも、彼のトルコ訛の英語は米国人を悩ませていたらしい。

1976 年夏、米国サンディエゴ港

DOMES 調査航海は、NOAA の調査船オーシャノグラフィ号を用いて、サンディエゴを出発し、調査点 C で調査を行い、ホノルルへ入港する。出港前に接岸しているサンディエゴの隣の桟橋には、ドイツの調査船が着いている。この調査船は、ドイツ、米国、カナダ、日本の企業グループの調査及び技術開発に従事している。調査機器を相互に見学しようということで、調査団の皆と乗り込んだ。デッキには、調査機器の他にこのグループが先駆けて実験しようとしている深海底採掘実験機がいくつか並んでいる。米国の連中は調査機器の方しか見学しない。あとで、団長に、実験機には興味は無いのかと聞いたところ、自分たちは他のグループの協力も得て調査を行うため、特定グループの実験機には関心を持ってはいけないのだと答えた。

1976 年夏、東太平洋上

ベースライン調査では、調査点が東太平洋のそれぞれ数 100km はなれた A、B、C 点に設定されている。A 及び C 点は米国のコンソーシアムの採掘実験予定地点である。B はその中間であり、いずれも、採掘実験の前後の海底の変化を調査するとともに、採掘実験中も同乗し、採掘排水を採取し、排水拡散の様子を観察する。海底堆積物の試料採取では、当時、日本ではグシャグシャに乱れた試料しか採取できなかったが、ここでは、海底の表面がきれいに保存されており、サンプラーの側板を外すと層序も整った試料が採取されていた。彼我の調査経験の差を感じざるを得なかった。グリーンハンドは取れなかったが。

1976 年夏、調査の休日

本船の朝食は研究員食堂でとる。コックが注文をとりに来る。いつも、料理の最後にハッシュドブラウンを頼んでいたら、そのうち、向こうから“and H B”と言ってくれるようになった。このコックがある日、娯楽室にあるピアノを弾いていた。聞くと、彼はプロのピアニストで、腱を痛めたので、治るまでアルバイトをやっているとのこと。夕食は、毎日、船長が船長室に研究員を一人ずつ呼んで一緒にとる。筆者の番には、ベトナム人のコック長が日本料理を作ったぞと言ってくれた。なるほど醤油味ではあったが、なんともいいがたかった。夜、船内の廊下を歩いていると、ある部屋から日本の歌謡曲が流れてくる。近くの研究員に聞くと、あいつはサムライだという。会ってみると、航海士の一人で、部屋には剣道具があり、毎日、竹刀を振っているとのこと。米国にはさまざまな人がいる。

本船は、日本の調査船とは違って、ノンアルコールである。しかし、魚心あれば水心。若い研究員から、今夜、秘密の会議を開くので来いと言う。ある航海士の部屋に行くと、どこから持ち込んだのかビールやハムが並んでいた。2 段ベッドの狭い部屋に 10 人ほど集まって楽しんだ。調査終了の日だけは、スチールビーチピクニックと称して、おおっぴらに、デッキでバーベキューを楽しめた。しかし、ビールの配給は 1 缶ずつで、名前のチェックをしながら配ってくれた。

調査終了後、ハワイのホノルル港に入港したが、同時期に白嶺丸も補給のために入港しており、相互の研究船の見学会を催したが、双方の説明を筆者が行った。第 20 図にホノルル港で船首を突き合わせて入港したオーシャノグラフィ号と白嶺丸の様子を示した。



第 20 図 ホノルル港でのオーシャノグラフィ号と白嶺丸

1991 年夏(BIE 航海)、米国ロングビーチ出航

DOMES 計画の約 15 年後、NOAA は海底攪乱機を試作し、それを海底で曳航し、海底堆積物を吸上げ、海底面近くの水中に排出し、海底面の乱れ及び濁りの再堆積が底棲生物に与える影響を調べる BIE 計画を開始したが、米国の経済状況は良くなく、自前の調査船を運行できなくなっており、ソ連（当時）の調査船を雇船し、調査を行った。今回も、筆者は米国の調査団の一員として参加した。ロングビーチの空港に降り立った筆者を 15 年前の団長らが迎えにきてくれた。開口一番、「お前のスーツケースは小さすぎる。インスタン

トラーメンをもう一ケース持って来なければならなかったぞ。乗り込むのはソ連の船だぞ。食べ物なんか無いぞ。」と脅かされた。事実、夕食時にはテーブルには、硬そうなパンと生のにんにく、長ネギ、キャベツが並び、岩塩をかけて食べている。これは大変だと思ったが、そのうち、ブロンドのウェイトレスがボルシチのボールと大きな豚肉のソテーを配膳した。また、ソ連の調査船にはサウナ風呂があり、乗組員たちと一緒に入り、彼らの習慣である小枝を束にした物で、お互いに背中を叩きあった。

1991 年夏(BIE 航海)、米国ロングビーチ出航後

出航後、米国の調査団とソ連の調査団との打ち合わせがあった。その夜、ソ連の団長が自分の部屋に來いという。部屋に行くと、どうも米国人の英語は分りにくい、その点お前の英語は分りやすいと、何年か前に聞いたような話になった。それから、おもむろに、部屋に鍵をかけて、ウオッカとチーズを取り出して飲めと言う。ソ連の調査船もドライシップであるが。さらに、面白い VTR があるからと言って、自慢のマル秘ビデオを見せてくれたが、相当に年期が入っており、画面は縞々の雨が降ってほとんど鑑賞に堪えなかった。

1991 年夏(BIE 航海)、東太平洋上

NOAA 設計の海底攪乱機は、どうもうまく機能してくれない。何回か海底に下ろして曳航するが、堆積物を排出するパイプが絡まったり、抜け取れたりした。最終的に、団長が日本で海底かく乱機を設計することができるかと聞いてきた。日本では、当時、マンガン団塊採鉱のための技術開発が行われており、当然、深海底採掘実験機も開発されつつあった。筆者は、胸を張って、新たな設計をすることはできると応え、帰国後、国内で検討することとした。後日、採掘実験機の設計に携わった技術者と相談し、概念設計を行い、米国に連絡を入れた。これを契機に、日米共同研究をすることになり、日本の設計、米国での製作で 2 代目海底かく乱機が完成した。この海底かく乱機は、まず、米国の BIE 計画で使用され、うまく機能したことが確認された。その後、本機は日本の海域での JET 計画においても成功裏に活用され、次いで、インド初め他の各国も本機を活用して深海底環境影響実験を実施した。筆者は、15 年を経て到達した日本の技術力の高さに鼻高々であった。

6. 金属鉱業事業団（当時：MMAJ）、企業との協力

MMAJ はマンガン団塊の探査については、白嶺丸、第 2 白嶺丸を保有するとともに、1975 年から DOMA に C-C ゾーンにおける探査を委託し、成果を上げてきた。DORD 設立後はその探査は DORD に継承された。その結果、日本は 1987 年に C-C ゾーンにマンガン団塊の排他的探査鉱区を得た。この間、公資研や地調は、DOMA 及び DORD の探査に関して、適宜、アドバイスをを行った。

また、MMAJ は、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト鉱床を対象とした深海底鉱物資源の開発に関して、直接的な資源調査だけでなく、試料採取のための底置きボーリング装置の開発なども行い、多方面から、積極的な事業を展開してきた。底置きボーリング装置などについては、実際に製作に及び実用化に成功している。これらの開発についても、委員会活動を通じて、公資研や地調の研究者が検討委員として関与し、その知見が参考に

された。

とくに、マンガン団塊の採鉱に伴う環境影響調査については、公資研や学界の協力のもとに、積極的に進められてきた。海洋環境や海底底生生物のベースライン調査については、第2白嶺丸の探査航海でルーチン的に実施され、多くのデータの集積ができた。また、MMAJは、米国の海底生態系影響実験（BIE）の最初の航海に公資研からの研究者を派遣し、米国の模擬採掘機の不備を指摘した。米国は第2世代の模擬採掘機を製作することとし、日本の協力を求めた。日本は、公資研及び企業の技術者の協力のもとに第2世代の模擬採掘機の設計を行い、米国での製作に寄与した。その結果、米国の再度のBIE実験の成功を導くことができた。既述したように、本模擬採掘機はその後の各国の実験にも用いられ、MMAJの評価は高まった。

DOMAについては、各種の委員会における公資研の研究者の協力は大きかった。大型プロジェクトの提案の基礎を策定した委員会においても、研究者の知見が大いに参考にされた。また、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト鉱床の探査手法や評価手法、採鉱システムの概念設計についても、委員会における研究者の知見が活用された。DOMA主催の米国の専門家を招いての講演会の開催時にも、米国の専門家との連絡調整など公資研の研究者が協力するとともに、海外視察においても関係機関を紹介したり、同行したりした。

7. 得られた成果と今後の展開

大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」における公資研の研究成果は、マンガン団塊の採掘性の研究として、深海底マンガン団塊や堆積土の工学的特性を明らかにするとともに海底における集鉱機と堆積土との工学的作用を明らかにした。また、マンガン団塊の揚鉱特性の研究として、長大鉛直管路における固液二相流及び気固液三相流の流動特性を明らかにした。さらに、マンガン団塊採鉱に伴う環境保全技術に関する研究として、日本鉱区の海洋の物理的・生物学的ベールラインや海底底生生物のベースラインを明らかにした。また、UJNR及びMMAJの研究計画に基づいて、日本鉱区における海底攪乱実験に協力するとともに、底層における懸濁水の拡散シミュレーションモデルを作成した。

大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」が発足した当時は、1990年代にはマンガン団塊の商業生産が始まるのではないかとの予測があり、また、国連海洋法では国際海底機構（ISA）に採鉱技術の技術移転が義務付けられていたため、早急な商業規模の採鉱システムの開発が求められていた。しかし、世界経済の低迷によるレアメタルの安値安定のために国連海洋法会議による商業生産開始の見通しが大幅に後ろ倒しになり、それに伴って採鉱技術の技術移転が緩和されるなどの理由により、マンガン団塊採鉱システムの開発が急務ではなくなった。したがって、マンガン団塊の商業ベースでの開発時期は、研究開発終了時よりも相当遅くなることが予想され、むしろ、本プロジェクトの最終段階では、将来的な技術の進展に対応できるような柔軟性を持った特定要素技術の開発に焦点を当てた研究開発になった。すなわち、パイプハンドリング、フレキシブルホース曲

げ特性、ガスリフトに関する実証実験と水深 2000m の平頂海山の粒状 CRC 鉱床を対象にした曳航型集鉱機の海洋実験が行われた。そのため、海洋実験においては、これまでの研究開発の成果の活用は極めて限定的なものになってしまった。

現在では、前述したように、マンガン団塊の開発の開始は相当後年になると予想されているが、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト鉱床については、各国やいくつかの企業が採鉱システムの開発を進めようとしている。日本においても、海底熱水鉱床の採掘機の海底における実証実験を行い、揚鉱システムと結合させたトータルシステムの実験を近年に計画している。これらの鉱床の賦存状況はマンガン団塊と異なる点も多い。例えば、マンガン団塊は軟弱な深海底堆積層の海底面上に分布しているが、熱水鉱床は海底に硬質の鉱物資源がマウンド状に分布しており、CRC 鉱床は海底の岩盤を薄く覆った状態で分布していると言われている。これらの相違点から、採掘機と海底との相互の工学的関係などはマンガン団塊の場合と非常に異なり、本プロジェクトで得られた成果を直接活用することには難点があると思われる。しかし、これらの鉱床が分布する水深は 1000m～2000m であり、採掘した鉱石は長大な管路で輸送する必要がある。この点からは、本プロジェクトで明らかにされた長大鉛直管路における固液二相流あるいは気固液三相流の流動特性が十分に活用されるものと考えられる。また、採鉱船上での揚鉱管や採掘機の設置・揚収のためのハンドリングシステム、フレキシブルパイプの取り回し、大水深における計測制御なども有効に活用できるものと思われる。

本プロジェクトは、世界の経済情勢、国連海洋法の動向などにより、基本的な計画を 2 転、3 転せざるを得なかった。それに伴う研究期間の延長も大幅となり、最終的には、異例の 17 年間の研究開発となった。資源開発に関する研究の困難さを目の当たりにすることができた。しかし、今日では、再び、海底熱水鉱床をはじめとする海底鉱物資源が脚光を浴びている。今後、本プロジェクトの成果の幾分かが効果的に活用されることを願うものである。

謝辞

大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」をめぐる深海底鉱物資源開発技術の研究の原稿をまとめるにあたっては、下記の方々の深い知見の提供を頂いた。ここに、感謝の意を表する。また、筆者自身、30 年を超える過去の記憶に基づくものも多く、記憶違いの部分もあるかと思われるが、ご容赦願いたい。

大阪府立大学大学院 海洋システム工学分野 山崎哲生教授

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 岡本信行課長

元技術研究組合 海底鉱物資源開発システム研究所 尾山哲夫技術部長

元技術研究組合 海底鉱物資源開発システム研究所 三浦 敏技術総括委員長

参考（代表的なもの）

- 1) 海洋鉱物資源、日本鉱業会、1972

- 2) Polymetallic Nodules Database、International Seabed Authority、1999
- 3) 金属鉱業事業団パンフレット
- 4) Cruise Report No. 20 (GH80-5)、地質調査所、1984
- 5) 公害資源研究所 70 年史、公害資源研究所、1990
- 6) マンガン団塊採鉱システム研究所パンフレット
- 7) マンガン団塊採鉱システムの研究開発 成果発表要旨集、1991
- 8) Proceedings: International Symposium on Environmental Studies for Deep-Sea Mining、金属鉱業事業団、1997
- 9) 特集：深海底鉱物資源開発の展開 Journal of MMIJ、資源・素材学会、2015
- 1 0) 17 年間の軌跡、海底鉱物資源開発システム研究所、1998
- 1 1) DOMA その後 9 年史、深海底鉱物資源開発協会、1998
- 1 2) 特集 国産資源 開発への挑戦 JOGMEC News、石油天然ガス・金属鉱物資機
構、2015
- 1 3) 海洋開発のおはなし、日本規格協会、1993

著者略歴

1968 年 熊本大学工学部資源開発工学科卒業
 同年 工業技術院公害資源研究所入所
 1976 年 米国で長期在外研究(DOMES 航海に参加)
 1976 年～1980 年 白嶺丸の調査航海に参加
 1981 年～ 大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」の研究
 1991 年 資源環境技術総合研究所海底工学研究室長
 同年 米国の BIE 実験航海に参加
 1996 年 (社)産業環境管理協会技術部長
 2006 年 同協会環境技術センター技術顧問

受理日：2016年6月11日
