

■ 特 集 ■ 採鉱技術からみた資源開発

マンガノジュールの採掘技術について

Mining Engineering of Deep Sea Manganese Nodules

伊 藤 福 夫*
Fukuo Itoh

1. はじめに

これまでに提案されている採鉱方法やそれに用いられる機器の種類は相当数にのぼっており、すでにその多くが紹介されている¹⁾。ちなみに、わが国と米国の特許（公開分）件数を数えてみると、表1に示すように、それぞれ167件および69件（いずれも～1976.9.30のもの）となる。しかし、経済的観点からみて、今のところ、実現性のある方式は僅かに流体方式とCLB方式の2通りに限定されると考えられており、実規模実験も、この2方式に集中している。本稿では、これら2方式について概述するとともに、流体方式の主要部分となる集鉱機と揚鉱法について解説する。

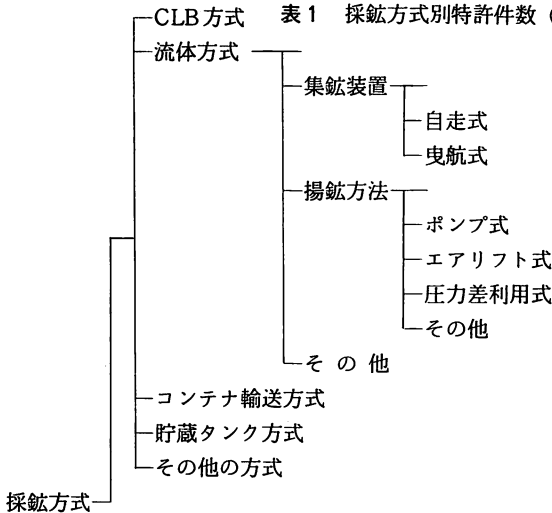
2. CLB式採掘法²⁾

CLB式採掘法は多数のバケットを取り付けたロープでループを作り、洋上の採掘船から海底に繰り出し、

船と海底との間を循環させることによって、ノジュールを採取しようとする採掘方式であり、図-1に示すように、採掘作業は1船だけで行う場合と2船を用いて行う場合がある。

CLB式採掘法で重要なことは、i) ロープがからみ合わないこと、ii) 個々のバケットの採取率がよいこと、iii) ロープの海底面上での開きが大きく、採掘軌跡が広く海底面をカバーし得ること、iv) 採掘軌跡を容易にコントロールでき、採掘面積のカバー率（cover area ratio）を大きくすることである。i)の問題については、ロープの改良とロープの間隔の拡大によって現実的に解決されており、ii)の問題についても、かなり満足すべき技術に到達しつつある。iii)については、トラクションマシンの工夫・改良、2船方式の採用などにより、なお技術的な面に問題を残しながらも、明るい見通しが得られている。しかし、iv)の問題については、今後の問題としてなお多くの問題点を残して

表1 採鉱方式別特許件数（～1979.9.30）



特許件数		
日本	米国	計
51	4	55
70	56	126
29	17	46
8	2	10
17	13	30
24	14	38
8	1	9
9	5	14
4	4	8
3	4	7
17	25	42
15	6	21
14	3	17
17	0	17
167	69	236

* 公害資源研究所資源第4部第1課長

〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16-3

いる。

CLB式採掘法が経済的に成り立つためには、日産2,000t以上のノジュール生産量を確保しなければならないと見積られている。これだけの生産量を得るためには、バケット1個の容量を1.5~2.0tとすると延べ1,333~1,000個のバケットを要し、バケット間隔を25~50mとし24時間連続操業を行うとしても、バケットの循環速度を約0.3~0.8m/secとしなければならない。問題は計画どおり、常時1.5~2.0t/個の採取量が得られるかどうかである。

ともあれ、CLB式採掘法の主な特徴は水深や海底地形によって大きな影響を受けないこと、ロープが採鉱船の動揺を吸収するために、波浪の影響がほとんどなくなること、少なくともロープの2個所が同時に切断しない限り、バケットを失うことがないこと、さらに、水力式採掘法に比べて、設備投資や操業資金が少なくて済む(1/3~1/10)ことであろう。

3. 水力式採鉱法

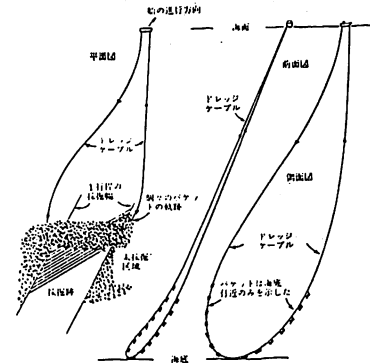
この方式は集鉱機 (collector) と揚鉱装置との組合せから成っている。集鉱機には水力式、機械式および両者の組合せ方式がある。揚鉱装置にはサクシオンポンプ、エアリフトポンプ、ライトメディアリフトおよびサクシオンポンプとエアリフトポンプとの組合せ方式などがある。集鉱機、揚鉱装置に関する研究、特許、ノウハウが多いが、詳細は全く不明である。

3.1 集 鉱 機^{3)~8)}

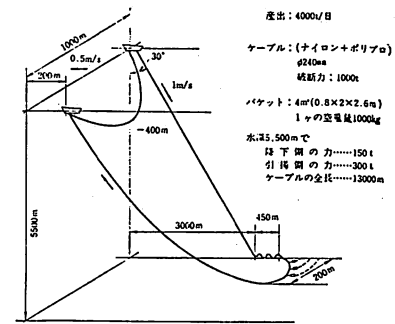
集鉱機の基本的条件——集鉱機に果された基本的条件は4つある。まず第1に信頼性 (reliability) である。信頼性と結びついている最も重要な因子は単純性であろう。一般に、設計が複雑になればなるほど、すなわち集鉱システムを構成しているコンポーネントが多くなればなるほど、そして個々のコンポーネントが複雑になればなるほど、システム全体としての信頼性は低下する。深海底では、人が装置の側について絶えず保守管理することができないため、このことはとくに重要なポイントとなる。

第2に、フレキシビリティ (flexibility) があげられる。同一採鉱区域内であっても、地形、底質、ノジュールの分布などの採掘環境が著しく変化するため、変化によって集鉱能率に支障をきたさないだけのフレキシビリティをもたす必要がある。

第3に、頑丈であることが要求される。一度操業を開始すると、少なくとも1年以上は集鉱機を海上へ回



(A) 1 船式 CLB



(B) 2 船式 CLB

図-1 CLBシステムの採掘模式図

収することなく稼働しなければならない。海底下での作業には予測し得ない障害がある。これに打ち勝って生きのびる能力 (Survivability) が必要である。

第4に、選別分離能力をもつことである。集鉱機の機能は海底からノジュールを集めることと集めたノジュールをライザーへ搬送する2つの機能を果たさなければならないが、オーバーサイズのノジュールでライザーを詰まらせたり、大量の堆積土で海上を汚染しないために、適当な大きさのノジュールのみを選別、分離する機能をもたなければならない。ノジュールの最大許容寸法はライザーの導管直径の1/3以下に保つ必要がある。

実用的集鉱機のタイプ——マンガノジュールを集鉱し、選別分離した後ライザーに搬送するための動力源の有無によって、集鉱機は受動型と能動型に分けられる。前者はバケットであり、後者はさらに機械式と水力式に分けられる。受動型は動力源が不要であり、最も単純であるが、集鉱の機能効率も極めて低い。機械式は集鉱効率は高いが、構成コンポーネントが多く、複雑となり、また動力効率は低い。水力式は集鉱効率も動力効率もともに高い。このような分け

方とは別に、曳航型が実用的である。したがって、曳航型水力式の集鉱機が最も望ましい集鉱機といえよう。

現在、開発研究中ではあるが、実用性の高いと思われる2, 3の集鉱機を紹介しよう。

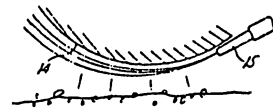


図-2 装置の原理図

(1) 浅川の水力式集鉱機⁹⁾

住友金属鉱山(株)浅川良男の発明によるもので、日本の他米、西独、英、仏、加、豪6ヶ国の特許となっている。

図-2に示すように、円柱面14の外側に接し、ノズル15から接線方向に水を噴射すると、水噴流は円柱面に沿って流れ、円柱面に向かう吸引力を生ずる。この吸引力を利用して海底のノジュールを吸い上げようというのが、この装置の原理である。噴射速度 $V = \sqrt{2gh}$ ($g \doteq 9.8 \text{ m/sec}^2$, h は周囲の気圧を水柱で表わした値 m)で求められ、水深5,000mの深海では V は313 m/sec以上であれば吸引力が発生する。図-3に本装置の集鉱部の断面を示した。円柱面14に沿ってノズル15および補助ノズル22から水を噴射させ、堆積土とともにノジュールを吸引、ダクト7を経て捕収室4に搬送する。この過程で適当な目の大きさをもった網9と格子11によって堆積土およびオーバーサイズのノジュールを装置外に分離排出する。このような集鉱部数連を1つの枠組み1の中に組みこみ、これをそり7に乗せてある。図-4および図-5に、それぞれ集鉱機の上面、両側面図および縦断面図を示した。

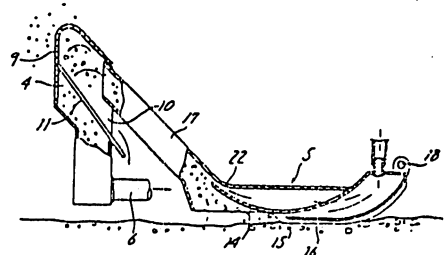


図-3 集鉱部の断面

H. Brockett, R. A. Pettersの集鉱機について紹介しよう。

彼らは前述した浅川良男(住友金属鉱山KK)の特許に基づいて曳航型水力式の集鉱機を開発することとした。これは集鉱機が比較的速い速度で海底面を掃航しながらノジュール採取ができることと小さな障害物や凹凸の影響を受けないことから、商業的に最も実用的な型式であると判断されたことによる。

次に、集鉱幅を決定した。これが決まると集鉱機の大きさが決まる。集鉱幅は、たとえば必要なノジュールの供給量、年間稼働日数、採取率、採掘速度、ノジュールの濃集密度など、多くのパラメーターの関数である。彼らは年間生産量を100万t(乾燥重量、ノジュールには約30%程度の水分を含んでいる)、年間平均稼働日数300日、ノジュール濃集密度10 kg

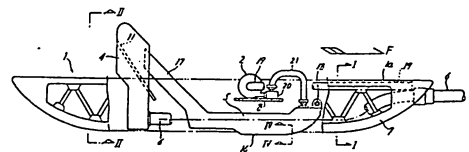


図-5 集鉱機の断面図

(2) Brockettらの集鉱機¹⁰⁾

Inco(カナダ)、AMR(西独)、Sedco(米)およびDomco(日本)で組織されている国際コンソーシアムOMI(Ocean Management Inc.)では、1978年にマンガン銀座の一案で、水力式によるマンガンノジュールの実規模の採鉱実験を行ない成功した。そのときに使用された集鉱機の原型と堆定されるF.

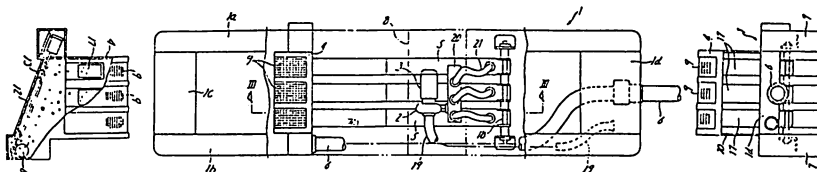


図-4 集鉱機の上面図および両側面図

/m², 採取率50%と仮定し, 図-6から集鉱幅を23 m とした。

幾つかの縦型のドレージヘッドが, ライザーシステムにつながる給鉱管を中心に左右対称に配置され, 中央および左右各1脚のそり状ランナーによって支えられている。このような一連のドレージヘッドとコンベアの配列を立体的に示すと図-7のようになる。ドレージヘッドはオペレーターによって個々に制御できるようになっている。組立てられた集鉱機の全長および全幅はそれぞれ20mおよび30mであり, 重量は大気中で約50tとなる。

(3) 公資研の集鉱機

公害資源研究所では, 機械式と水力式との併用型の集鉱機(基本形)を開発し, 特許出願した。

この集鉱機は図-8に示したように, 外側フレームと内側フレームの2部から構成されており, 前者にはモーター, ポンプ, スクリーン, 濃集部等を具備し, 後者には掬い刃, ノズル, 流送管等を具備している。両フレームはそれぞれ独立にそり状の接地板上に搭載され, 軟かい堆積層上に支持されるようになっている。

掃航しながら, 掬い刃によって掬い上げられたノジュールと堆積土は分離され, 後者はスクリーンを通して集鉱機外へ吹き飛ばされ, ノジュールのみが濃集部に集められる。濃集部には解放のスクルーコンベアがセットされているため, これにより, ノジュールは連続的に揚鉱パイプ内に供給されるようになる。

目下, 実用化するための研究が続けられている。

3.2 エアリフトポンプによる揚鉱法^{1))~3))}

エアリフトポンプは1779年ドイツのLöscherによ

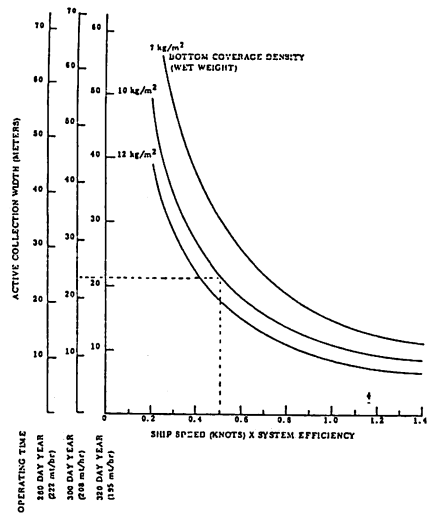


図-6 100万トン/年の生産量をあげるための集鉱機の有効幅

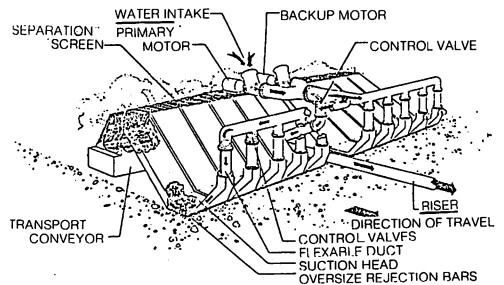


図-7 Brockett らの集鉱機の主要部の見取図

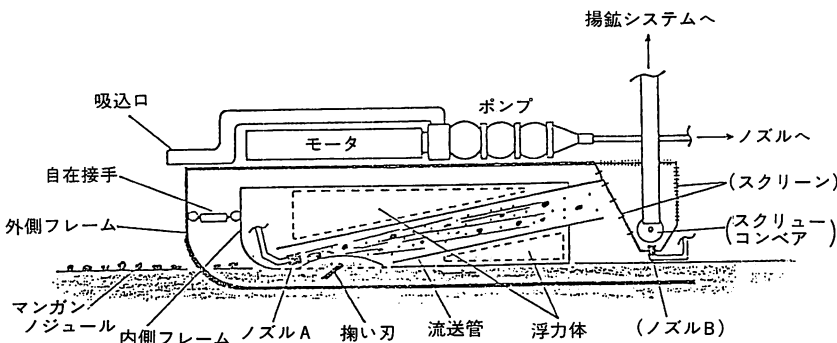


図-8 公資研の集鉱機(概念図)

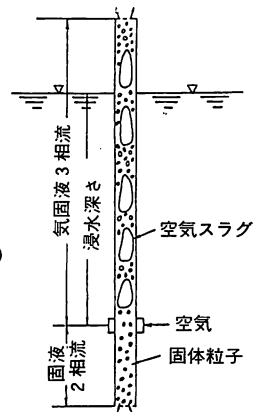


図-9 エアリフトポンプの解析モデル

て考案され、1846年、米国ペンシルバニアにおいて採油に適用して成功して以来、実用化されているもので、目新しいアイデアではない。図-9に示すように水中に浸水させた揚鉱管の途中から空気を吹込むことにより管内の見かけ上の密度を小さくし、外圧との差を利用して揚水（気液2相流）または揚鉱（気固液3相流）するもので、装置の構造は簡単であるが、固体粒子輸送効率率は15%以下と極めて低い。管長が短かく、管径の細いものについては多くの研究があり、揚鉱特性についてもかなりよく知られているが、管長が数1,000mと長く、管径も6m以上の太いものについてはほとんど知られていない。また、後述するように、幾つかの国際コンソーシアムにおいて、実規模に近い規模で実験が行なわれたが、その詳細は全く発表されていない。公害資源研究所で実施している研究から明らかにされた点を要約すると次のとおりである。

i) 基礎的現象

- 管内流れ；空気送入部下部に気固液三相流が生じる。
- 流動パターン；気固液三相流区間の流動状態は、供給空気量、浸水率等によって多様なパターンを示すが、一般には、供給空気量の増加にともない、気泡流、スラグ流（ピストン流を含む）、フロス流等の流動様式が認められる。また、固体粒子は、ほとんど水流中に含まれる。
- 圧力損失；とくに、気固液三相流区間の圧力損失は、供給空気量（ボイド率）の増大にともない著しく増加し、固体粒子による付加損失も高まる。

ii) 特性

- 輸送量曲線；任意の浸水率における送気量と混合体輸送量との関係は、最初急激に増加し、最大値に達するが、その後は送気量を増加しても、逆に輸送量は徐々に低下する。これは、ポンプの起動力の増加割合より諸損失の増加割合の方が大きくなるためである（図-10）³¹⁾。
- 効率；効率は極めて低く、揚水効率は40~50%、固体粒子は10~15%であり、コンプレッサー効率を考慮すると、さらに小さくなる（図-11）³¹⁾。

iii) 問題点

- 管内上昇空気の膨張抑制
- 空気の最適送入深度、最適送込量の決定
- (b)に対する最大輸送量の把握

3.3 実規模実験

これまでに、2, 3の実規模に近いマンガンノジュール

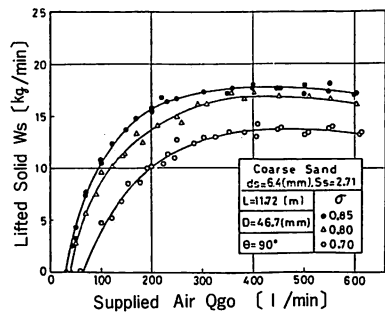


図-10 固体粒子輸送量曲線の一例

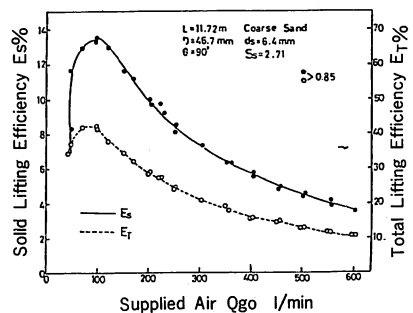


図-11 効率曲線の一例

ル採掘の現場実験が行なわれている。1969年に米国の Deepsea Ventures 社が大西洋の水深2,500 ftの Black Plateau でエアリフト方式による採掘実験に成功した³²⁾。図-12に、そのときの概念図を示した。その後、同社を含むコンソーシアム OMA グループが Deepsea Miner II（船長100m、幅15m）を用い、サンジェゴ南西約1,200マイルの太平洋上（水深5,000m）で、約30日間にわたり、エアリフトによる採鉱実験を行ない、50 t/Hのノジュール揚鉱（設計能力と等しい）に成功している³³⁾。

1977年から78年にかけて、コンソーシアム OMI グループが水深5,000mのハワイ南方約800マイルの海上でエアリフト方式および水力方式の2方法により採鉱実験を行ない、両方式とも成功した³⁴⁾。このとき使用された採掘船は採油専用船 Sedco 445（排水トン：17,150、船長：134、幅：21m）であり、揚鉱管は24.4cm、空気吹込み深さが2,000m以深、4段コンプレッサー3台を並列運転している。図-13に、そのときの採鉱概念図を示した。

その他、kennecott グループによる集鉱機の開発

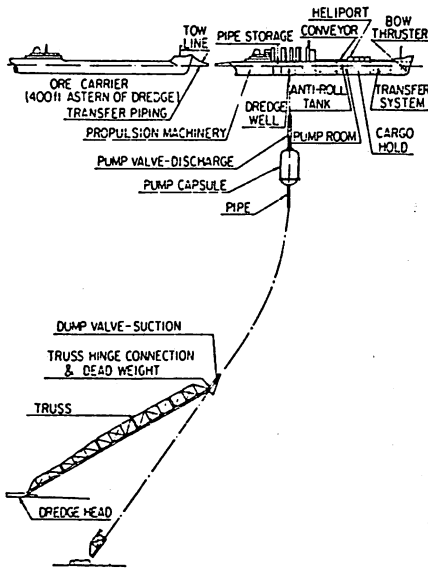


図-12 Deepsea Ventures 社の採掘実験

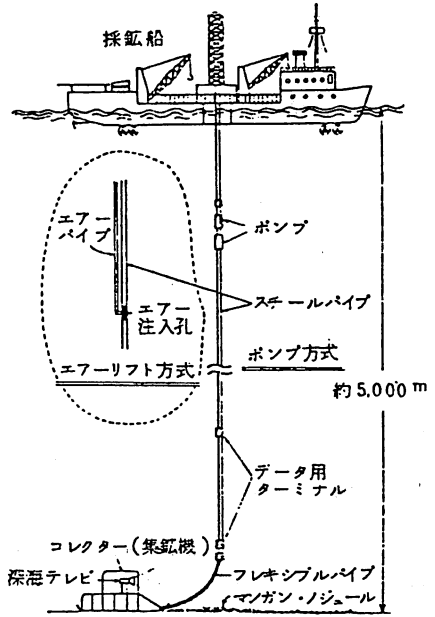


図-13 OMI の採鉱システム概念図

(1974年), フィージビリティ解析の完成(1979年)がみられ, LockheedグループのOcean Minerals Co.では, 1978年, カリフォルニア沖(水深1,800m)でGlomar Explorerを用いた採鉱実験が行なわれたと伝えられている。

いずれの実験についても, 詳細な内容の発表が行なわれておらず, 未だに不明の点が多い。当分は, 各国とも, 企業秘密として発表を控えるであろう。

4. おわりに

足かけ9年目を迎えた第3次国際海洋法会議は最終

段階ともいべき第10会期の会議を今まさに了えようとしている。このまま順調に進めば, 年内にも条約調印まで漕ぎつけられるであろう。そして, 探査の許可(1983年頃), 鉱区の許可, 条約批准(1988年頃), 採掘権認可, 実操業(1990年頃)へと突入していくであろう。わが国においても, 1981年度より, 工業技術院の大型プロジェクトとして, 「マンガン団塊採鉱システム」研究が開始される。筆者はこの開発研究の陣頭に立たされることになったが, 本誌読者諸氏の関心を喚起するとともに, ご支援賜わんことを切望して筆をおきたい。

参 考 文 献

- 1) たとえば
伊藤福夫, “マンガンノジュール開発の概要” エネルギー・資源, Vol. 2, No. 2,
- 2) 資源協会海洋資源研究委員会, “CLBシステム研究報告書”, p.1~94, 昭和55年12月
- 3) 伊藤福夫, “マンガンノジュールの集鉱機(1)”, 日本鉱業会誌, Vol. 96, No. 1114, p. 50, 1980
- 4) 伊藤福夫, “マンガンノジュールの集鉱機(2)”, 日本鉱業会誌, Vol. 97, No. 1115, 投稿中, 1981
- 5) G. Chaziteodorou, “Extraction and Haulage of Manganese Nodule from the Deep Sea”, Meerestechnik, Vol. 5, No. 2, p. 37~43, 1974
- 6) F. H. Brockett, W. M. Kollwentz, “An International Project—Nodule Collectors”, O. T. C. 1978, p. 441~447
- 7) Otto R. Heine, “An Experimental Nodule Collection Vehicle Design and Testing”, O. T. C., 1978, p. 741~750
- 8) F. H. Brockett, R. A. Petters, G. M. White, “Designing on Ocean Mining Collector System”, O. T. C., 1979, p. 95~99
- 9) 浅川良男, “海底鉱物採取装置”, 特公昭 53-14481 (特許 935640)
- 10) F. H. Brockett, R. A. Petters, “A Proposal for a Commercial Scale Manganese Nodule Collector Design”, OTC Rep. 1980, p. 308~313
- 11) たとえば
深海底鉱物資源開発協会: “マンガン団塊の採鉱技術開発研究報告書”, (1980)
- 12) 河野正吉: “海底採鉱用エアリフトの簡易計算法” 作業船, 101, 36~42, (1975)

- 13) 河野正吉：“エアリフト，摩擦係数のきめ方と計算法”，作業船，109，44～51，(1977)
- 14) 植木士朗：“エアリフトに関する研究（第3報）”採鉱と保安，25〔8〕，(1979)
- 15) 河野正吉：“エアリフトの研究（第3報）”，作業船，120，32～38，(1978)
- 16) R. Düring：“Grundlagen der hydraulisch-pneumatischen Förderung (I. Teil)”，Meerstechnik，9〔4〕，125～129 (1978)
- 17) R. Düring：“Grundlagen der hydraulisch-pneumatischen Förderung (2 Teil)”，Meerstechnik，9〔5〕，157～164 (1978)
- 18) R. Düring：“Grundlagen der hydraulisch-pneumatischen Förderung (3. Teil)”，Meerstechnik，9〔6〕，189～195 (1978)
- 19) G. G. Freiberg：“Airlift-Prinzip zur Gewinnung von Manganknollen aus großen Meerestiefen”，Neue Bergbautechnik，8〔6〕，344～351，(1978)
- 20) C. H. Boes, R. Düring, E. Waßerroth：“Hydraulisch-Pneumatischer Antrieb”，Schiff und Hafen，3〔24〕，143～147，(1972)
- 21) 川島俊夫，野田佳六，益山忠，尾田俊一：“エアリフトポンプによる固体粒子の水力輸送”，日本鉱業会誌，91〔1054〕，765～772，(1975)
- 22) 野田佳六，川島俊夫，大平和宣：“エアリフトポンプによる固体粒子の水力輸送（第2報）”，日本鉱業会誌，96〔1103〕，19～24，(1980)
- 23) 岡山義邦，八木得次：“エアリフト工法について”，港湾技術研究所講演会講演集，205～235，(1977)
- 24) M. Weber：“Das Air Lift-Verfahren und seine Einsetzbarkeit zur Förderung von Mineralien aus der Tiefsee”，Meerstechnik，7〔6〕，189～199，(1976)
- 25) 宇佐美毅，山門憲雄：“混相流に関する研究（第1報）”，採鉱と保安，21〔12〕，(1975)
- 26) 宇佐美毅，山門憲雄：“混相流に関する研究（第2報）”，採鉱と保安，25〔4〕，(1978)
- 27) 宇佐美毅，山門憲雄：“エアリフトポンプによる固体粒子の輸送性能（第1報）”，日本鉱業会春季大会講演要旨集，(1978)
- 28) 宇佐美毅，山門憲雄：“エアリフトポンプによる固体粒子の輸送性能（第2報）”，日本鉱業会春季大会講演要旨集，(1979)
- 29) 宇佐美毅，山門憲雄：“エアリフトポンプによる固体粒子の輸送性能（第3報）”，日本鉱業会春季大会講演要旨集，(1980)
- 30) 宇佐美毅，山門憲雄：“エアリフトポンプによる固体粒子の輸送特性（第1報）”，日本鉱業会誌投稿中
- 31) 宇佐美毅，斎藤隆之，“エアリフトポンプによる固体粒子の輸送について”，採鉱と保安，Vol. 26，No. 7，p. 20～21，1980
- 32) E. J. Lecourt, D. W. Williams：“Deep Ocean Mining-New Application for Oil Field and Marine Equipment” Offshore Technology Conference, 859～874, 1971
- 33) 深海底鉱物資源開発協会，“海外鉱物資源の開発”，DOMA ニュース，No. 20，p. 13，1981
- 34) W. M. Kollwentz：第3回国際海洋シンポジウム報告書，78～86，(1978)

