

## 座談会

### レアアース泥の採泥・揚泥は戦略技術 焦らず段階を踏んで確実に商用化を目指す

#### <参加者>

東京大学 大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター 教授  
加藤泰浩 氏

東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻 教授  
高木周 氏

三井海洋開発 技術部 プロセスグループ ファンクション・マネジャー  
清水徹 氏

日揮 技術イノベーション本部 技術イノベーションセンター 副部長  
柿崎信郎 氏

東亜建設工業 土木事業部 エンジニアリング事業部 担当課長（海洋資源担当）  
森澤友博 氏

南鳥島周辺の高濃度レアアース泥を日本の産業を支える資源として活用するため、採泥・揚泥技術の開発が加速している。2017年中に50m、2018年には200mの深さから泥水を浮上させる実験を始め、実海域でのトライアルを見据えていよいよ動き始める。レアアース泥は水深5700mの海底にある。しかも、現場海域は世界有数の速い潮流で知られる黒潮が流れ、台風の通り道でもある。これほどの厳しい条件の海域の深海から、どのように資源を引き上げるのか。その方法と技術開発の進捗、さらには今後の展望を、「レアアース泥開発推進コンソーシアム」座長である東京大学 大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンターの加藤泰浩教授、採泥・揚泥技術部会のリーダーである同大学 高木周教授、さらには技術開発への参加企業の代表各氏に聞いた。



——「レアアース泥開発推進コンソーシアム」では、排他的経済水域（EEZ）内である南鳥島周辺海域の水深 5700m の海底からレアアース泥を引き揚げ、資源として活用することを目指して技術開発を進めています。これまで世界では、商用化されている鉱物資源の生産において、どの程度の深海から採掘している実績があるのでしょうか。

**清水** 海洋資源開発で最も進んでいるのは、石油と天然ガスの業界です。深海の海底からさらに数千 m 掘り進めて石油や天然ガスを商用採掘しています。メキシコ湾では水深 2900m から取り出しており、これが最も深い海底から生産している事例です。現在では、世界で使われている石油と天然ガスの 1/3 を海底から生産しています。

### 採泥・揚泥に向けた 2 つのチャレンジ

——既に、かなり深い海底から資源を取り出して活用しているのですね。レアアース泥があるのは水深約 6000m ですから、深さだけで比べれば約 2 倍に伸ばすチャレンジになるわけですね。



三井海洋開発 技術部 プロセスグループ  
ファンクション・マネジャー  
清水徹 氏

**清水** 石油や天然ガス向けの水深 3000m 向け技術を、水深 6000m 級でのレアアース泥の採泥・揚泥にそのまま適応することはできません。いくつかのイノベーションによって超えるべきハードルがあります。

石油採掘での海洋掘削機（ドリルリグ）は、20 インチ（約 500mm）の管を海上から海底まで下ろし、その中に先にドリルを入れて掘っていきます。周りの管は鉄製であり、目標となる海底が深くなるほど重たくなっていきます。そして、掘削設備全体の固有振動数が船の縦揺れの振動数に近づくと、共振して折れてしまう可能性が出てきます。そこで、もっと深くまで下ろすには、鉄の代わりに、チタンや炭素繊維



日揮 技術イノベーション本部  
技術イノベーションセンター 副部長  
柿崎信郎 氏

(CFRP)など軽い素材の管を使うこととなります。

**柿崎** もうひとつ、大きな違いがあります。地中に埋まっている石油や天然ガスには大きな圧力が掛かっているため、埋蔵している地層にドリルで掘った穴が到達すれば、自らの圧力で自噴します。しかし、レアアース泥には自ら吹き上がるような力は加わっていません。吸い上げるか、下から押し込むか、何らかの手段で海面まで引き揚げる力を加える必要があります。

## 経済性と連続生産に優れたエアリフト

——すると、水深 6000m という資源採掘としては未踏の深さと、自ら揚がる力を持たない資源の引き上げという 2 つのチャレンジがあるわけですね。レアアース泥を海底から引き上げる手段には、どのような技術の選択肢があるのでしょうか。

**高木** 大きく分けて、ポンプで生み出した圧力を使って押し揚げる「ポンプリフト」と、泥水に細かな気泡を含ませてその浮力で浮上させる「エアリフト」の 2 つがあります。

先日、1600m の海底にある熱水鉱床から鉱石が回収されて話題になりましたが、そこで使われていたのはポンプリフトです。ポンプリフトは研究が進んでおり、少ないエネルギーで効率よく水を汲み上げる技術が確立しています。様々な用途に利用される技術でもあり、出力や汲み上げる対象の違いに応じた設備の選択肢も豊富です。

一方、エアリフトは、1970 年代後半にマンガン団塊を水深 5000m の海底から引き揚げるプロジェクトの中で、ポンプリフトと共に技術開発が進められました。ところが、その後は、エネルギー効率に優れたポンプリフトでうまくいけば、エアリフトの開発を進める必要は特にないとのことと、その後の研究開発が途絶えていました。ただし、エアリフト

には、ポンプリフトにない優位性があります。壊れにくいことと、メンテナンスが簡単なことです。この点が欠かせない用途では、とても有用な手段になります。

——レアアース泥の採泥・揚泥では、どちらの技術の利用を想定しているのでしょうか。

**高木** エアリフトの利用を前提に技術開発を進めています。

ポンプリフトは、確かにエネルギー効率が高く、実績も豊富です。しかし、仕組みが機械仕掛けであるため、故障が付きもので、定期的なメンテナンスにも手間が掛かります。6000mの深海から泥水を押し上げるためには、ポンプ自体を大型化する必要があります、しかもそれを海底もしくは海中に置くことになるのです。これを、海上まで持ち上げて、修理や点検・保守する作業には、大きな負担と巨額の費用が掛かります。



**東京大学 大学院工学系研究科  
機械工学専攻 教授  
高木周 氏**

一方、エアリフトは、空気を運ぶチューブは海中深くまで下ろす必要がありますが、空気を送り込むためのコンプレッサは船の上に置けます。極めてシンプルな仕掛けであり、故障しにくい技術であると言えます。運用性とメンテナンス性ではエアリフトが優れています。

**加藤** それぞれの方式には利害得失がありますが、実用化した場合の経済性や連続生産の可否に着目して、私たちは、エアリフトを第一候補にしました。

有事の場合にだけ使う天然備蓄といった観点からの活用ならば、経済性や連続生産は二の次で済むかもしれません。しかし、私たちは常時活用できる国産資源としての生産と、それを前提にしてレアアースを活用した新産業の創出を目指しています。このため、経済性や連続生産での適性がとても重要なのです。

## 採泥しやすい場所を探し、そこから生産を始める

——レアアース泥は、海底面から 2m 位下に堆積していると聞いています。6000m という水深に比べれば、海底面下 2m はささいな違いに見えます。しかし、それでも地中に埋まっていることは確かです。この点は、どのようにクリアする見込みなのでしょうか。

**加藤** 表面の泥をまず引き揚げてしまい、その後にレアアース泥を採掘するというのも 1 つの考え方です。ただし、それでは経済性が低くなってしまいます。そこで、私たちは高濃度レアアース泥が海底面に近い場所、理想的には露出している場所をまず探し、そこから生産を開始したいと考えています。そして、商用的な生産を進めながら、採泥の難易度が高い場所にも適用できる技術を追って開発していきます。



東京大学大学院工学系研究科  
加藤泰浩 教授

こうしたシナリオを見据えて、東京大学 工学系研究科の中村謙太郎准教授を中心に、南鳥島の周辺海域で海底面からどの位の深さに、レアアース泥の高濃度層が分布しているのか調査しています。そして、科学的理論と調査結果を積み上げて考察すると、表層に露出している部分がある公算が高いという感触を得ています。

**清水** あらゆる資源開発は、まずは露天掘りできる場所から生産を始め、そこで取れなくなると、穴を掘ったり、海から採掘することを考えます。表層に露出している部分をまず探して、そこを商用採掘の起点とするのは極めて順当な発想だと考えています。

## 基礎データを着実に蓄積する

——現在、採泥や揚泥に向けた技術開発は、どこまで進んでいるのでしょうか。

**高木** 先ほど、1970 年代後半にマンガン団塊の引き揚げでエアリフトによる実海域実験が行われたという話をしました。その後日本でも、マンガン団塊の引き揚げに関する大型プ

プロジェクトが進み、1990年代後半には、エアリフトを使った実海域での実験も検討されたのですが、その前段階として実施された、深さ200mの立型水槽を使った実験の基礎データ以外は、当時のデータがほとんど残っていません。そこで、以前の結果が再現できることを、なるべく早く確認したいと考えています。2017年度中に50mまで管を下ろしてエアリフトの実験を行い、2018年度には200mでの実験を行います。マンガン団塊を押し上げる海水を媒体としたエアリフトとは違い、今回は、レアアースを含んだ泥水を引き揚げることになります。海水と泥水では性質が大きく異なりますから、双方の差異を見極めながら揚泥に関する知見を蓄積したいと思います。

**——まずは、レアアース泥を対象にしたエアリフトでの揚泥の基礎データを蓄積するわけですね。**

**高木** はい。水深6000mでは地上の600倍の圧力がかかります。このため、もし海底で泥水に微小な気泡を含ませた場合、海面に到達するときには体積が600倍に膨らみます。海底での小さな気泡も、浮上する過程で膨らみ、それが合体してさらに大きくなると、気体だけが抜けて泥水を浮上させる力を持たなくなります。つまり、流動様式が変化してしま



**東亜建設工業 土木事業部  
エンジニアリング事業部  
担当課長（海洋資源担当）  
森澤友博 氏**

い、揚泥できなくなるのです。このような事態を避けるためには、水深が余り深くなり過ぎず、かつエアリフト効果が十分に得られる深さで気泡を注入することを考えます。そして、その場合でも、流量様式の変化を予測することがとても重要です。海水の場合と泥水の場合では、大きく違ってくると予想されますので、泥水を用いたデータを基にして流動様式の変化を予測できるモデルを確立しておかないと、安全かつ効率よくレアアース泥を引き揚げることはできません。

**森澤** 私たちは、2015年に、水深10mでエアリフトによる泥水の引き揚げ実験を行いました。流動様式を把握するため、現地のレアアース泥を掘った時に出来上がる泥水の物性を模擬して、実験しました。

**高木** 10mの実験でも、実際に試してみても気づくことがありました。泥水の浮上過程で気泡が大きくなると、最終的には泥水と空気が管の中を交互に上がってくる状態になります。それによって設備に振動が生じます。10mの実験では、実験装置本体の計測部ではこの振動に対する対応をしていたので問題なかったのですが、計測部より下流、エアリフト管上部の排水に向けて管が曲がっている部分で、管の振動による破損が生じました。このようなことも、一度経験し、問題点を洗い出し、きちっと対応すれば、未然に防ぐことができます。

## 現場は潮流が速い、台風の通り道

——実験データと経験の蓄積の大切さを感じる話ですね。

**高木** 実海域では、さらに複雑な現象が起きる可能性があります。今実施している実験では、水の中に管をまっすぐ下ろすことができます。しかし実際の現場では、そんな理想的な条件の下で揚泥できるわけではありません。海中に下ろす管は斜めに傾き、しかもその管を下ろしている船は海上で動きます。そのような条件下で、流動様式がどのように変化し、設備にはどのような現象が起きるのかを予測し、先回りして対策する必要があります。こうした揚泥条件の変化による影響は、200mの立型水槽を使った実験だけでは不十分で、確認できません。たとえば、海上技術安全研究所の保有している大型水槽なども用いて基礎データを取っていく必要があります。

**柿崎** 現場で起きる可能性がある現象について検討しています。水深6000mの大深度から、しかも世界で最も潮流が速い黒潮の中で設備を正常な状態で稼働させる必要があります。また、対象となる海域は台風の通り道でもあります。台風が来た時には、船と設備を一時的に切り離すといった措置を取る必要もあります。こうした措置をどの位の時間で完了できるのか、また黒潮の潮力に耐え、台風が来た中で設備が損害なく運用がどのような設計で耐えることができるのか検討しています。

## あせらず、段階を踏んで技術を磨く

——50mの実験ではエアリフトの基礎データを蓄積し、200mの実験では現場で起きる現象を想定しながらのデータを蓄積し、着実に知見を深めていくのですね。その後は、すぐに実海域でトライするのでしょうか。

**高木** 200mの実験までで得たデータを基に、エアリフトを使った揚泥で起きる現象を予測するためのシミュレーションモデルを作ります。そして、作ったモデルにより、1000mの水深で起きる現象を予測し、その妥当性を実際の1000m実験と照らし合わせて検証します。そして、次のステップでは、石油の生産で実績がある3000mでもう一度実験。その後に水深6000mに挑戦するぐらいの段階を踏んだ方がよいでしょう。

挑む水深が深くなればなるほど、実験の規模も予算も大きくなります。予測精度を確認できないまま、いきなり深いところに挑むと、うまくいかなかった時の損失が大きすぎます。このため、慎重に段階を踏んでいくのが良いと思います。

——どんなに商用化を急ぎたくても、一か八かで突っ込むわけにはいかないですね。

**高木** 国民の税金を使い、大きな予算を掛けて進めるプロジェクトですから、失敗は許されないというプレッシャーを感じています。最後の水深6000mへのトライは一発で成功させたいと考えています。そのためにも、基礎データの蓄積とモデルの検証と修正が何より重要になります。



**加藤** 現在獲得している予算では、50mと200mの実験を実施できます。1000mと3000mの実験、そして実海域での6000m級のトライは、現在の戦略的イノベーションプログラム(SIP)に続いて内閣府が平成31年から実施する「ポストSIP」で予算措置していただき、実施したいと考えています。



採泥と揚泥は、プロジェクトの本丸であり、学術的にもとても意義のあることです。ポスト SIP の実施期間である 5 年間の 4 年目くらいまでに揚泥実証試験を成功させたいと考えています。並行して、探査や揚泥試験で入手した泥を精錬して製品にするまでのフローを確立し、平成 36 年には、資源の生産からものづくりまで一貫した商用化に技術的なメドをつけたいと考えています。

## ますます高まるレアアース泥の戦略的価値

——レアアースが安定的に利用できるようになると、産業界に与えるインパクトは計り知れないものがあります。

**柿崎** このプロジェクトには、トヨタ自動車も参加しています。2017 年に入って、日本の主力産業である自動車業界を取り巻く環境は大きく変わりました。欧州や中国で 2040 年にエンジン車の販売をやめ、電気自動車（EV）を中心に置くことになりました。EV を作るためには、レアアースとコバルトの安定確保が欠かせません。いくら日本の自動車産業の技術力が高くても、これらの資源なしでは EV は作れないからです。

レアアース泥周辺には、マンガン団塊もたくさんあり、そこにはコバルトが多く含まれています。レアアース泥とマンガン団塊を同時に開発する技術に関しては難易度が上がりますが、経済性向上の手段として検討していくことになるでしょう。



**森澤** 日本では、工業製品を作るために、レアアースなどの資源を中国など海外に依存しています。こうした状況は、安定調達に不安を抱えている側面と同時に、産出国の国民に負担を掛けているということでもあります。レアアースを得る際に、トリウムやウランなど放射性物質の残渣が出るからです。南鳥島周辺海域のレアアース泥は、こうした危険な残渣が

出ない極めて良質な資源です。日本国が、日本の技術で、日本の資源を開発して、私たちが技術で開発していくことができるというのは、とても素晴らしいことだと考えています。

## 採泥・揚泥の手段自体が大きな産業になる

——レアアース泥を採泥・揚泥する技術を確立できれば、大深海から資源を得る強力な手段を得ることになります。コンソーシアムに参加している企業は、レアアース泥以外の資源採掘への展開も見据えているのでしょうか。

**清水** エアリフトは、深海から、どのようなものでも引き揚げるポテンシャルを秘めた技術です。熱水鉱床の鉱物にも、メタンハイドレードにも応用できます。また、ナミビアや南アフリカでは水深 200m位以内までの水深域での海洋ダイヤモンドは商業生産されています。日本の EEZ にある資源だけではなく、世界中の海底にある価値ある資源を揚げられる技術を手中にできます。

**柿崎** 日本の EEZ において、潮流が速く、大型台風がくる海域の大深度から資源を引き揚げる難易度の高い技術を確立できれば、世界中どこでも通用する技術になるでしょう。その技術の国際競争力は極めて高いと見ています。

**加藤** 私たちのプロジェクトで開発している採泥・揚泥技術は、水平展開できる技術なのです。レアアース泥で言えば、南鳥島周辺海域だけではなく、クック諸島やタヒチなど様々なところにあります。レアアース泥を揚げる技術だけでも、日本で確立した技術を、海外で売り込むことができるでしょう。

**高木** 多様な資源を対象にし、様々な場所で使う技術にするためには、汎用性の高い技術を開発する必要があります。そのためには、エアリフトを使った深海からの資源の引き揚げで起きる現象をきっちり把握し、モデル化しておくことが極めて重要です。再現性の高いモデルが確立できれば、条件を変えて、応用展開していく際の拠り所ができます。

**加藤** 日本の庭先である EEZ 内にあるレアアース泥を資源として活用する技術は、必ずや私たちの手でモノにしたいと考えています。得られる国産のレアアースも、その手段である大深度から資源を引き揚げる技術も、日本の産業の発展に与えるインパクトは極めて大きいことは明らかです。この技術が確立した暁には、若い世代にとって、深海の資源開発が魅力的な産業になることでしょう。

(企画：テクノアソシエーツ、聞き手・まとめ：伊藤元昭／エンライト)