

表層型メタンハイドレート回収技術

大口径海底掘削装置

望月 幸司・岩本 駿介

メタンハイドレート（以下、MH）は、メタンガスと水分子が結晶化した氷状の物質であり、MH1 m³から約170 m³のメタンガスを取り出すことができる。日本海側の水深500 mから1,000 mの海底表面には、表層型MHと呼ばれるMHが多く存在しており、純国産の新たなエネルギー資源として期待されている。

表層型MHの研究開発は国家プロジェクトとして2013年から資源量調査が始まり、2020年から回収技術に関する要素技術開発が開始されている。本プロジェクトの一環として、表層型MH掘削用の大口径ドリルの開発を進めており、2022年度に表層型MH含有地盤を模擬した地盤を用いて陸上での掘削性能試験（以下、掘削試験）を行った。本報告では、表層型MHの研究開発のプロジェクト概要及び2022年度に実施した掘削試験について紹介する。

キーワード：海底資源開発、表層型メタンハイドレート、大口径掘削装置

1. はじめに

MHは高温・高圧環境下において、メタンガスと水分子が結びついてできた氷状の物質として存在しており、MH1 m³から約170 m³のメタンガスを得ることができる。図-1に示すように、日本近海の海底では、太平洋側において、水深1,000 m程度の海底面から200～300 m下に位置する砂及び砂泥互層の堆積物の粒子の隙間を埋めるように存在している砂層型MHと、日本海・北海道側において、水深500～1,000 mの海底面表面付近に存在する表層型MHとに分類される。日本の海域には、これらのMHが多く存在していると考えられており、純国産の新たなエネルギー資源になるだけでなく、将来的な水素・アンモニアの原料としても期待されている¹⁾。

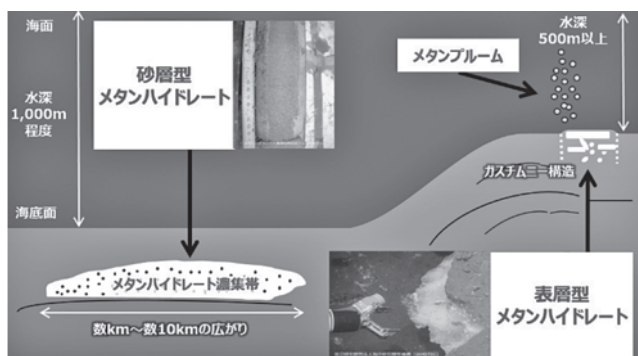


図-1 砂層型MHと表層型MHの賦存領域
(引用：(国研)産業技術総合研究所ホームページ)

2013年から始まった資源量把握の調査によると、調査海域内で表層型MHが存在する可能性がある箇所が1,742箇所確認された。その内の1箇所となる上越沖の海鷹海脚のエリアではメタンガス換算で約6億m³あることが分かった（2016年調査）。また、表層型MHは、塊状、層状、粒状など、様々な状態で賦存していることが確認された。

表層型MHの研究開発は国のプロジェクトとして行われている。政府により、5年ごとに見直されている「海洋基本計画」において、海洋に関する施策方針の中に、表層型MHの研究開発が含まれている。また、経済産業省により、海洋基本計画に基づいた開発計画（「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」）が策定されている。現在は、第3基海洋基本計画（2018年5月15日）及び2019年2月15日に改定された「海洋エ

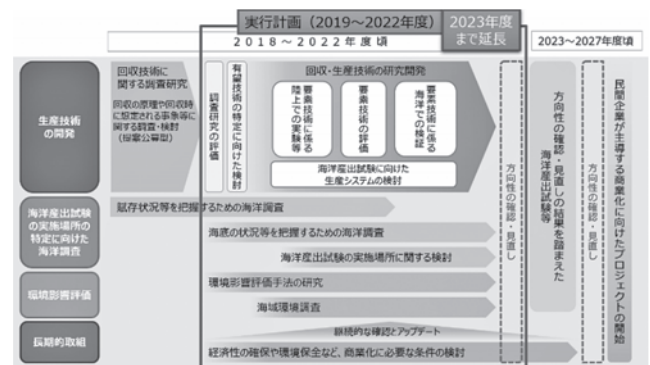


図-2 表層型MHの研究開発に関するロードマップ
(引用：(国研)産業技術総合研究所ホームページ)

エネルギー・鉱物資源開発計画」に示されている表層型 MH の研究開発ロードマップ（図一 2）に従い、経済産業省からの委託事業として、（国研）産業技術総合研究所が委託先となり、再委託を受けた機関が開発に取り組んでいる²⁾。

2023 年現在、表層型 MH の研究開発は、「生産技術の開発」、「海洋産出試験の実施場所の特定に向けた海洋調査」、「環境影響評価」の 3 つの柱と商業化に向けて必要な条件を検討するための長期的取組で進んでいる。生産技術の開発については、「掘削技術」、「揚収技術」、「分離技術」の 3 つの要素技術に分けて技術開発が行われている。今回報告する掘削試験は、「生産技術の開発」の要素技術のうち、「掘削技術」に該当する。

2. 表層型メタンハイドレート回収技術のコンセプト³⁾

表層型 MH を回収する方法として、図一 3 に示す広範囲鉛直掘削法の開発を行っている。

(1) 広範囲鉛直掘削法の概要

広範囲鉛直掘削法とは、浮体式生産設備（FPS）からライザー管を鉛直方向に降ろし、その下端に装備している大口径ドリルによって、海底面下の表層型 MH を掘削・回収する方法である。なお、水平方向に掘削範囲を広げる場合は、一旦、ドリルを海底面上まで上げてから FPS を移動させ、再度ドリルを降ろして掘削する。表層型 MH の掘削からメタンガスの生成までの一連の流れは以下となる。

- ①海底地盤表面に大口径ドリルを押し付けて回転することで掘削を行う。
- ②ライザー管の途中にガス（今回はメタンガス）を注入することで発生するガスリフトによって、掘削物

を周辺泥海水と共に大口径ドリル底面から吸い込み、浮体生産設備まで揚収する。

- ③浮体式生産設備のガス化タンクにて、揚収した MH をメタンガスに分解する。
- ④浮体式生産設備で生成したメタンガスは、海底パイプラインによって陸側へ移送する。また、生成したメタンガスの一部をガスリフト用のガスとして使用する。
- ⑤浮体式生産設備で MH と分解した周辺泥海水は、泥水排出ラインを通じて、海底部の窪地に排出する。

(2) 広範囲鉛直掘削法の特徴

本回収方法は以下の特徴を有する。

- ①大口径ドリルは掘削と吸込みを同時に行うため、掘削による操業ブルームが発生せず、環境に与える影響が小さいシステムとなる。
- ②大口径ドリルは資源回収船から吊り下げた状態で掘削を行うため、海底面を自走して掘削する水中クローラでは対応困難な、軟らかい地盤、凸凹した地盤でも掘削が可能となる。
- ③ガスリフト方式による掘削物の揚収は、商業レベルでの海底資源回収方法として長年にわたり、多数の実績がある。海中に水中ポンプ等の動機器がないため、揚収部のダメージが最小限に抑えられるほか、駆動源となるガスコンプレッサが FPS 上にあるため、メンテナンスが容易である。

3. 掘削試験の概要

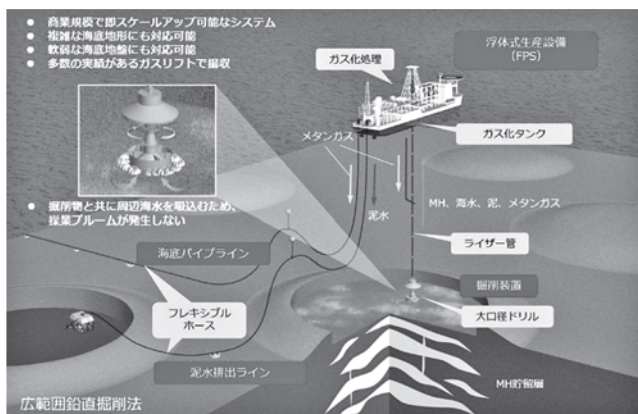
(1) 試験の種類と目的

表層型 MH 掘削に適した掘削装置を開発するためには、実際に表層型 MH 含有地盤を掘削して、種々のデータ取得、掘削状況の確認が必要となる。しかし、海洋での試験は困難なため、陸上で実際の海底地盤に近い地盤を製作して掘削試験を実施することにした。

表層型 MH は軟泥地盤中に塊状、層状、粒状といった様々な状態で賦存している。表層 MH を商業段階で掘削する際には、より多く MH が含まれている地盤が望ましく、塊状の MH をターゲットとして掘削することになるが、軟泥地盤の割合が大きい粒状 MH が存在する地盤を掘削することも想定される。そこで、今回は、2 つの地盤を製作して試験を行った。

(a) 模擬地盤掘削試験

粒状 MH が内部に 20% 賦存する海底下数十メートルにおける軟泥地盤を想定した模擬地盤を用いて試験を実施した。軟泥中にある粒状 MH は、MH と同等の密度を有する $\phi 10$ mm のポリプロピレン製ボール



図一 3 表層型 MH 回収システム

(以下、PP ボール)、軟泥地盤を同等の強度に調整した流動化処理土を用いて模擬地盤を製作した。

本試験では、ドリルが海底地盤を掘削中に、掘削された軟泥地盤と共に粒状MHも一緒に回収されることを確認することを目的とした。

(b) 大型氷掘削試験

表層型MH100%の地盤を想定して、表層型メタンハイドレートと同等の強度を持つ大型氷の模擬地盤を用いて試験を実施した⁴⁾。

商業段階では、主に、塊状のMHを掘削することになると考えられる。そのため、本試験では、表層型MH掘削に適した掘削装置開発に向けて、掘削中の掘進速度、ドリル設置圧、ドリル掘削トルク等、設計に必要なデータを取得することを目的とした。

(2) 試験の原理

(a) 実施場所

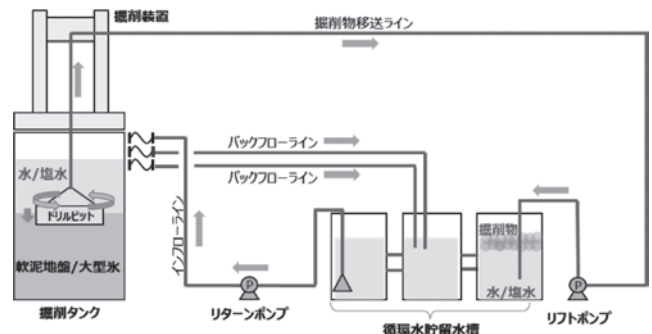
模擬地盤掘削試験、大型氷掘削試験ともに、北海道北見市のオホーツク地域創生研究パークにて実施した(写真—1)。試験設備の設置に約30m×30m以上の敷地が必要であった。また、大型氷掘削試験では、データ取得のためにできる限り大きな氷塊が必要となるが、市販されている氷では対応できないため、外気温を利用して試験用の大型氷を製作する必要がある。オホーツク地域創生研究パークは広い敷地を有しているだけでなく、冬季は最高気温も氷点下となる期間が長いので、本試験の実施場所とした。

(b) システム全体概要

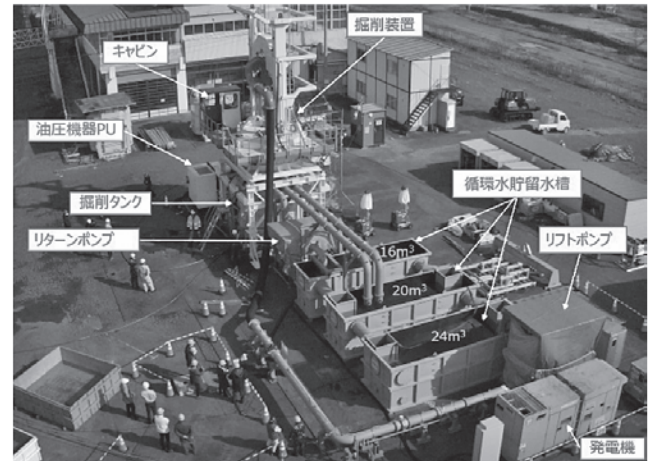
本試験設備の概略図を図—4、大型氷掘削試験時の試験設備をドローンで撮影した全体写真を写真—2に示す。模擬地盤掘削試験、大型氷掘削試験ともに、若干の仕様変更はあるものの、同じ試験装置を用いて実施した。試験装置の原理は次の通りである。

事前準備

①掘削タンク内に掘削対象となる地盤(模擬地盤、大



図—4 試験設備概略図



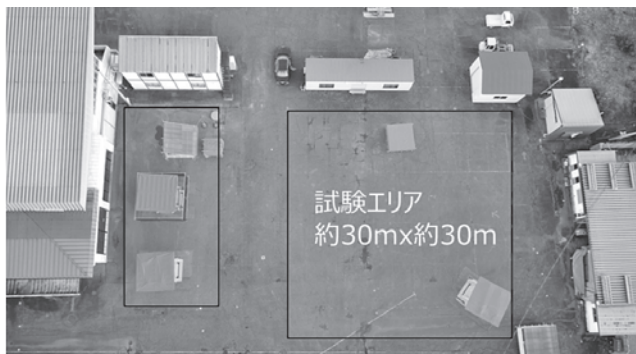
写真—2 試験設備全体写真(北見工業大学提供)

型氷)を製作する。

②循環水貯留水槽内に、模擬地盤掘削試験では水、大型氷掘削試験では凍結対策として塩水を満水状態まで貯める。

試験手順

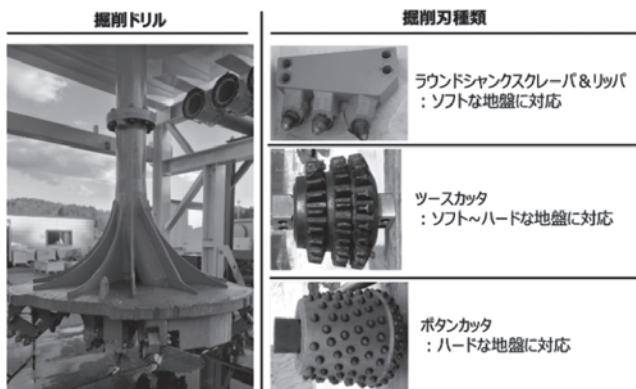
- ①掘削装置の下まで掘削タンクを移動させて所定の位置に設置する。
- ②リターンポンプを起動させて、循環水貯留水槽から掘削タンク内へ水/塩水を送り、循環水貯留水槽と掘削タンク間で水/塩水を循環させる。
- ③掘削ドリルを掘削対象地盤の表面付近まで降ろし、リフトポンプを起動する。掘削ドリル底面から循環水貯留水槽へ水/塩水の移送を開始する。掘削タンク内の液面が下がると、掘削ドリル底面から空気を吸い込んでしまうため、常に掘削タンク内が満水状態になるようにリターンポンプとリフトポンプの流量を調整する。
- ④掘削ドリルを回転させながら降ろし、所定の深さまで掘削対象地盤の掘削を行う。
- ⑤掘削完了後、リターンポンプ、リフトポンプ、掘削ドリルの運転を停止する。掘削ドリルを上昇させ、掘削タンクを掘削装置の外側へ移動させる。



写真—1 試験エリア上空写真(北見工業大学提供)

表一 掘削ドリル概略仕様

材質	炭素鋼
サイズ	直径 2.65 m
掘削面	吸込口 1 箇所, 掘削刃取付部 15 個
掘削刃	①ラウンドシャンクスクレーパー&リップ ②ツースカッタ ③ボタンカッタ



図一 5 掘削ドリル (左), 試験に用いた掘削刃 (右)

(c) 掘削ドリル

本試験では、直径 2.65 m の大型ドリルを用いた。商業段階では直径約 7 m を想定しているが、試験設備が大きくなるため、必要なデータが取得可能な最小サイズとした。尚、掘削刃は実スケールとしている。掘削ドリルの概略仕様を表一に記す(図一5)。

尚、模擬地盤掘削試験では軟泥地盤とともに粒状 MH が回収されることを確認することが目的であり、掘削刃の種類は関係がないため、ラウンドシャンクスクレーパー&リップのみを使用した。一方で、大型水掘削試験では各掘削刃における掘削時の計測データが必要であったため、表一に示す 3 種類の掘削刃をそれぞれ装備して掘削した。

(d) 掘削装置

掘削装置は、海底掘削技術サービスを行っている HMH 社(独)より、地盤掘削用として多数の実績がある装置をレンタルした。本装置は、油圧により掘削ドリルを回転・昇降させる装置となっており、ドリル設置圧、ドリル回転数、掘進速度等を設定して掘削可能な装置となる。掘削装置の概略仕様を表二に記す⁵⁾。

(e) 掘削タンク

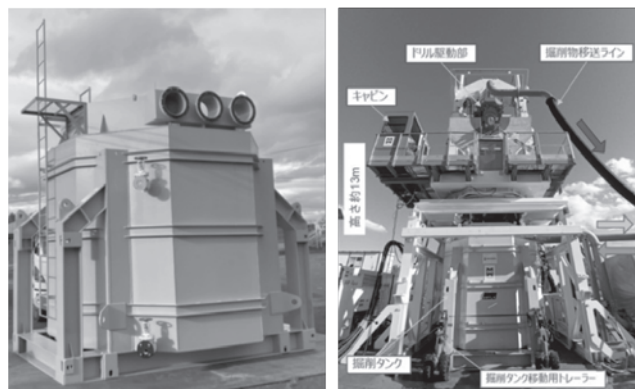
掘削タンクは、掘削対象となる地盤を製作するための鋼製タンクである。掘削試験の際には、本タンクを掘削装置の下部に設置して、掘削ドリルをタンク内部に降ろして掘削する。本タンク内の掘削対象地盤が掘削中に回転しないよう、八角柱のタンク形状を採用し

表二 掘削装置概略仕様

製造メーカー	HMH
機器名称	Wirth™ Pile Top Drill Rig Type PBA936s
シリンダ	最大スラスト力: 1,000 kN 最大プルバック: 1,700 kN
パワー スイベル	最大トルク: 360 kNm 最大速度: 20 rpm

表三 掘削タンク概略仕様

材質	炭素鋼
外形	対辺 3.2 m, 高さ約 3.7 m の八角柱形状



写真一 3 掘削タンク (左), 及び、掘削タンク設置後の掘削装置 (右)

た。本タンクを移送する際には、脱着可能な掘削タンク移動用トレーラーをタンクに取付け、トラックによる牽引によって移動させる。掘削タンクの概略仕様を表三に記す(写真一3)。

(f) リフトポンプ

リフトポンプは、掘削タンク内の掘削物と水/塩水が、掘削物移送ラインを経由して循環水貯留水槽へ送られるためのポンプである。本ポンプ内には掘削物が通過するため、固形物の輸送に適した吸込スクリー付き汚泥ポンプを採用した。尚、掘削物移送ラインの管内流速が商業化段階で想定されるライザー管内の流速と同程度になるように、本ポンプの容量を決定した。リフトポンプの概略仕様を表四に記す。

(g) リターンポンプ

リターンポンプは、循環水貯留水槽内の水/塩水が、インフローラインを経由して掘削タンク内へ送られるためのポンプである。本ポンプの容量は、リフトポンプの流量とバランスをとる必要があるため同等の

表四 リフトポンプ概略仕様

製造メーカー	古河産機システムズ(株)
型式	吸込スクリー付き汚泥ポンプ(HSP-400C)
ポンプ容量	1,000 m ³ /h × TH 5.1 m

表—5 リターンポンプ概略仕様

製造メーカ	(株)浪速ポンプ製作所
型式	渦巻きポンプ (FEWV-400D)
ポンプ容量	1,000 m ³ /h × TH10.0 m × SH-1.0 m

容量が求められる。リターンポンプの概略仕様を表—5に記す。

(3) 実施体制

本試験の全体計画は三井海洋開発(株)、試験機器の製作は(有)平間機械工業所、工事詳細計画・機材手配・工事指揮は(株)アクティオ、掘削装置の運転はHMHが行った。また、模擬地盤の製作では、北見工業大学・日本大学・北海学園大学・(株)大伸によって仕様検討から実際の製作まで実施し、大型水の製作では北見工業大学・(有)平間機械工業所によって仕様検討から実際の製作まで実施した(図—6)。

(4) 模擬地盤掘削試験

(a) 試験期間

模擬地盤掘削試験は以下の期間で実施した。

- ①模擬地盤製作：2022年10月14日
- ②掘削試験：2022年10月20日

(b) 模擬地盤製作の概要

前述の通り、模擬地盤は、これまでの調査研究の結果、流動化処理土(泥水+セメント)にφ10mmのPPボールを混ぜて製作することにした。本試験では、約11m³の模擬地盤(掘削タンク内の模擬地盤高さ1.3m相当)が必要であったため、作業性を考慮し、模擬地盤製作用に開口部の広い鋼製タンクを別途用意し、重機を用いて模擬地盤を製作した。PPボールは模擬地盤中に可能な限り均一に分散させる必要があるため、泥水にセメントを加えた後、まだ流動性がある状態でPPボールを投入して攪拌した。十分な攪拌が

確認できた後、掘削タンクへ移送して所定の強度になるまで静置した(図—7)。

製作方法

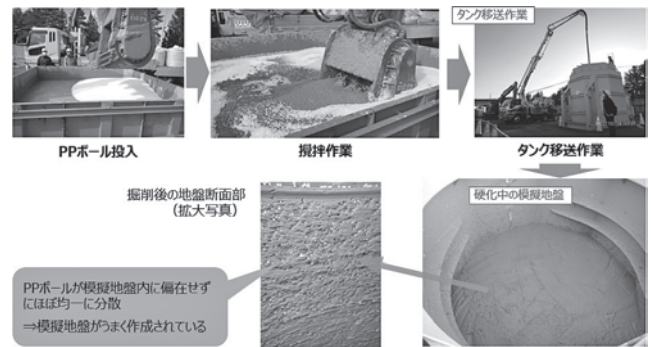
- ①模擬地盤製作用に開口部の広い鋼製タンクを用意する。
- ②水槽に泥水、セメントを投入して攪拌する。
- ③セメントが泥水に混ざった後、PPボールを投入して攪拌する。
- ④模擬地盤製作用の鋼製タンクから掘削タンクへ模擬地盤を移送する。
- ⑤所定の強度になるまで数日間静置

(c) 試験の実施

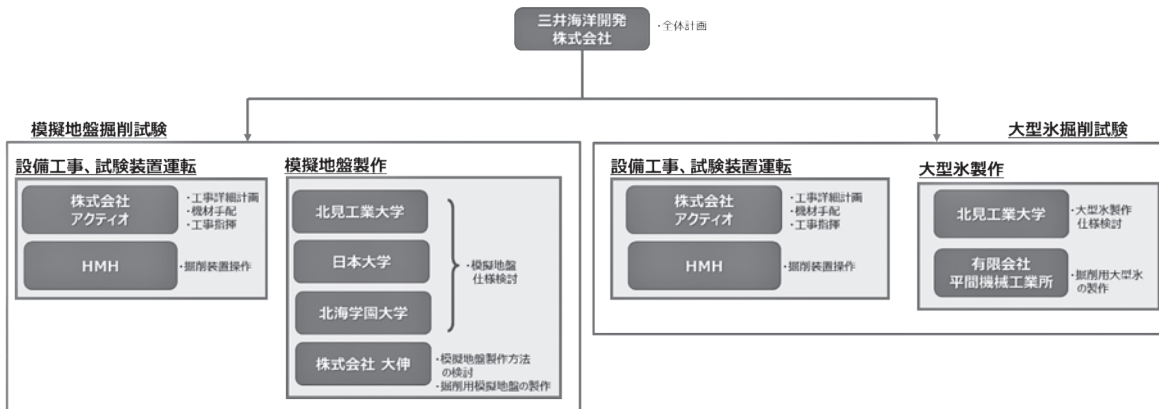
模擬地盤掘削試験では、掘削タンク1基を用いて、3.(2)(b)で述べた試験手順に沿って試験を実施した。

(d) 試験結果

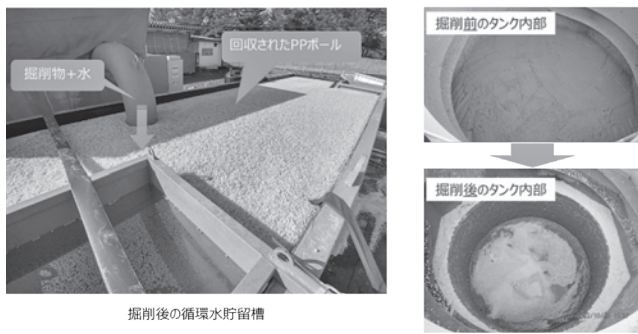
模擬地盤を掘削中、PPボールの吸込みを確認した。図—8の左写真に示す通り、掘削物が送られてくる一時貯留水槽には大量のPPボールが輸送されたことが確認できた。また、図—8の右写真に示す通り、掘削試験後、模擬地盤には綺麗な掘削断面が確認できた。以上より、本掘削装置は、軟泥地盤における掘削、粒状MHの回収ができることを確認した。



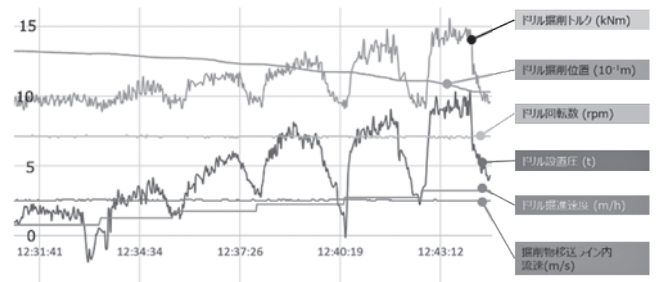
図—7 模擬地盤製作の様子



図—6 実施体制



図一八 模擬地盤掘削試験後の循環水貯留層、及び、試験前後の掘削タンク内の様子



図一九 大型氷掘削試験結果：掘削データ（一部抜粋）

(5) 大型氷掘削試験

(a) 試験期間

掘削試験に用いる大型氷の製作は、外気温で氷製作が可能となる2022年12月5日より開始した。掘削試験は、1月末より2月中旬にかけて、4つの掘削タンクを用いて実施した。

①大型氷製作：2022年12月5日～2023年2月6日

②掘削試験：2023年1月31日～2023年2月13日

(b) 大型氷製作の概要

大型氷掘削試験では、掘削タンク内に約11 m³（タンク内高さ1.3m相当）の水を製作して掘削を行った。これまでの実験により、外気温のみを利用して水から氷を製作する場合、製作期間が限られているため、掘削タンク内で製作される氷の高さは約1mが限界であった。そのため、掘削試験中にデータ取得しない範囲は市販されている氷塊を敷き詰めた後、隙間を水で埋めて氷塊を製作した。

(c) 試験の実施

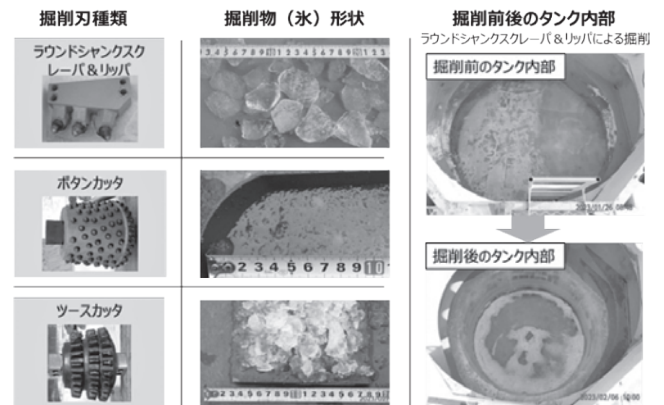
大型氷掘削試験では、3種類の掘削刃において掘削データが必要であったため、掘削刃を都度交換して掘削試験を行った。そのため、大型氷掘削試験では、掘削タンクは4基用意し、3.(2)(b)で述べた試験手順に沿って試験を実施した。

尚、今回の試験では、掘削物移送ライン内流速、ドリル回転数を設定した値になるように調整し、ドリル掘進速度を段階的に増加させて、ドリル設置圧、ドリル掘削トルク等を計測していった。

(d) 試験結果

今回計画していた全ての計測データを取得することができた。計測データの一部を図一9に示す。ドリル掘進速度の増加に合わせて、ドリル設置圧、ドリル掘削トルクも増加することが確認できた。

また、図一10に示す通り、掘削刃によって掘削された氷の形状に特徴があることが分かった。ラウンドシャンクスクレーパ&リップでは数cmの氷塊であ



図一十 大型氷掘削試験結果：掘削物（氷）形状、掘削タンク内の様子

たが、ツースカッタでは1cm程度の氷塊であり、ボタンカッタはシャベット状となっていた。掘削試験後の大型氷の掘削断面は、模擬地盤掘削試験の時と同様に、綺麗な円筒形状になることを確認した。

4. おわりに

本掘削試験により、今回の目的であった、表層型MH掘削用ドリル開発に必要な掘削データの取得、掘削物の回収状況等を確認することができ、表層型MH掘削用ドリル開発に向けて大きな一歩となった。

2023年度中には、海洋エネルギー・鉱物資源開発計画が改定され、表層型MHの研究開発に関する新しいロードマップが示されると考えられる。今後も、我が国の新しいエネルギー資源となるよう、表層型MHの商業化実現に向けて取り組んでいく所存である。

最後に、本掘削試験は、経済産業省のメタンハイドレート研究開発事業の一部として、委託先である国立研究開発法人産業技術総合研究所からの再委託によって実施した。(国研)産業技術総合研究所、本試験に携わった関係者皆さまのご指導、ご協力により成功できたこと、ここに感謝の意を表します。

《参考文献》

- 1) (国研) 産業技術総合研究所 ホームページ
<https://unit.aist.go.jp/georesenv/topic/SMH/introduction.html>
- 2) 「カーボンニュートラルに向けたメタンハイドレート開発の位置付け」
経済産業省 資源エネルギー庁 石油・天然ガス課, 2021年12月
- 3) 三井海洋開発㈱ ホームページ
https://www.modec.com/jp/business/newbiz/methane_hydrate.html
- 4) 「表層型メタンハイドレートを模擬した氷試験体の製作と強度評価」,
地盤工学会北海道支部技術報告集 61 105-110, 2021年
- 5) HMM ホームページ
<https://hmmw.com/service/rcd-rigs-pile-top-drill-rigs/>



[筆者紹介]

望月 幸司 (もちづき こうじ)
三井海洋開発㈱
事業開発部
マネージャー (プロジェクト エンジニアリング)



岩本 駿介 (いわもと しゅんすけ)
三井海洋開発㈱
事業開発部
プロジェクト エンジニア

