

海底資源開発における施工方法に関する考察

平 林 丈 嗣

海洋国家である我が国において平成 19 年には海洋基本法が成立されたこともあり、近年では海洋開発、特に海底資源開発についても注力されている。特に平成 25 年の海洋基本計画の見直しでは、メタンハイドレード・熱水鉱床において民間主導の商業化を目指すと明言されている。

本稿では海底での採掘における課題に対し、水中施工機械・陸上無人化施工の知見から、海底資源掘削に適した施工方法について検討し、その条件を満たす掘削移動体の自由度、および性能について考察するものである。

キーワード：海洋開発、海底面、施工方法

1. はじめに

海洋国家である我が国において水中土木施工の技術開発の歴史は古く、水中ブルドーザや水中バックホウ等世界的に類を見ない施工機械が開発されており、河川や港湾における施工で実際に活用されている。また我が国では噴火や地震など自然災害が多く、その迅速な復旧を目的とした実施工を伴った技術開発は、無人化施工技術の急速な発展につながった。さらに深海での調査技術は既に世界のトップレベルにあると言って良く、平成 19 年には海洋基本法が成立されたこともあり、近年では海洋開発、特に海底資源開発についても注力されつつある。平成 25 年の海洋基本計画の見直しでは、メタンハイドレード・熱水鉱床において民間主導の商業化を目指すと明言されている。

しかし商業化のためには採掘コストが重要視され、海底における大規模な採掘技術が必要である。今までは Seafloor Mining Tool の開発が注視されてきた感があるが、実際には大規模かつ広範囲の施工が想定されるため、現実的な施工法について検討する必要がある。

2. 既存技術調査

(1) 水中における建設機械

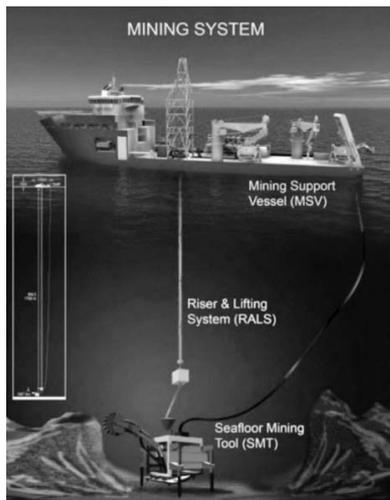
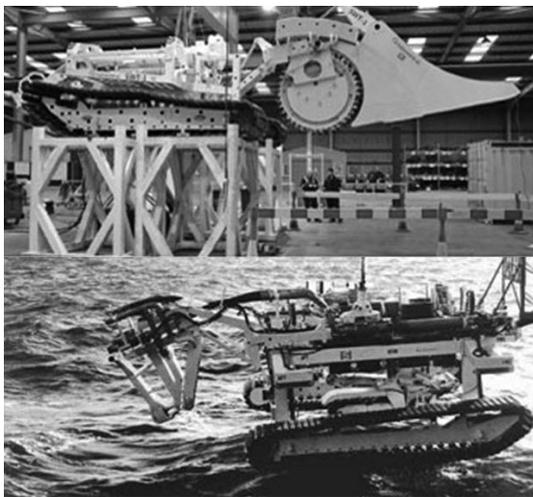
水中工事用施工機械として、日本国土開発株式会社が 1968 年に世界初の水中ブルドーザを開発している。油圧ショベルについては 1972 年に日立建機が水陸両用油圧ショベルを開発したのを最初として、1990 年台

に入ると、マリコン各社が独自に全没水型の水圧油圧ショベルを製作し、主にマウンド荒均し作業に用いられた実績がある。また、先端部を施工に合わせて変更することが可能であるため、ブレイカーによる岩破砕、ドラグヘッドによる構造物狭歪部の浚渫、第三海堡撤去工事ではウォータージェットによる堆積土砂の除去を実施している。このような水中施工機械は、水中における大規模施工を実施する際の効率化に非常に効果的であり、これら水中施工機械の技術開発の実績は、海底資源採掘においても役立つものと考えられる。

(2) Seafloor Mining Tool

海洋資源開発においても過去に技術開発がなされている。1970 年台にマンガンジュエル採掘を目的とした集鉱機が住友金属鉱山株式会社等により開発された実績がある。近年では 2012 年に独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構から採掘要素技術試験機の建造を受注した共同企業体が沖縄本島北西の水深 1,600 m の海底熱水鉱床で試掘に成功し、約 25 kg の硫化銅の採取に成功している。

海外においてはオランダに本社のある IHC MERWEDE 社が Subsea Mining Crawlers を専用船舶とセットで既に 3 体も製作しており、同じグループ内の IHC Marine and Mineral Project によって実際の商用化につながっている。これはダイヤモンド掘削を目的としたものであり、施工水深は - 300 m と比較的浅海域での施工機械である（写真-1）。また多国籍開発ベンチャーの Nautilus Minerals 社が海底熱水鉱床を

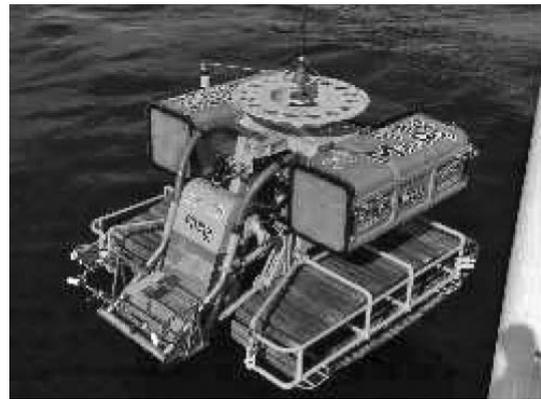
写真一 1 Subsea Mining Crawler¹⁾図一 1 Nautilus Minerals Mining System²⁾写真一 2 Cable laying Trenchers³⁾

ターゲットにした開発プロジェクトを進めており、数年の内に実施されることが予想されている（図一1）。

また海底での移動については海底ケーブル敷設のためのトレンチャー（写真一2）が既存技術として存在する。これは海底面に溝を掘りながら前進し、そこに海底ケーブルを敷設するものである。その移動機構には一般的にクローラが用いられており、不整地における安定性を確保している。ただしトレンチャーの場

合、クローラの能動的な回転による前進ではなく、船舶からの曳航により推進している。これは海底ケーブルが直線的な経路のみであることも理由としてあるが、掘削しながらの前進では抵抗が大きく、クローラの推進力のみではスリップにより地盤を掘ってしまいスタックする可能性も考えられる。

さらに近年では研究段階ではあるが韓国 KORDI が Deep-Ocean Mining System として MineRo（写真一3）を開発した。全長 5 m × 幅 4 m といった比較的小型でありながら、クローラの幅が非常に広くっており、軟弱地盤上において面圧を下げる目的と考えられる。

写真一 3 Deep-Ocean Mining System (MineRo)⁴⁾

(3) 海洋資源開発の課題

海底資源開発の商業化のためには大量の採取が必要である。今までは Seafloor Mining Tool の開発が注視されてきた感があるが、実際には大規模かつ広範囲の施工が想定され、まずは現実的な施工法について検討し、その施工法から合致した自由度や性能を持つ機体の開発が必要であると考えた。

例えば、数百メートル四方を 10 m 程度掘り下げるには表層部から平面的に数回に分けて掘削することが必要となる。しかし深海海底での施工における技術的課題は、耐圧・防水性能だけでなく、目視や光学センサによる地形形状の把握が困難であること、さらに動力源や浚渫土圧送ホースが有線となり移動時に制約が大きい、そして完全な無人遠隔操作が絶対条件となる。

このような施工条件において、災害復旧のための無人化施工や水中施工機械の開発を実施してきた知見を統合することで、技術的課題の抽出と開発の方向性を決めることとした。

3. 海底掘削施工方法の検討

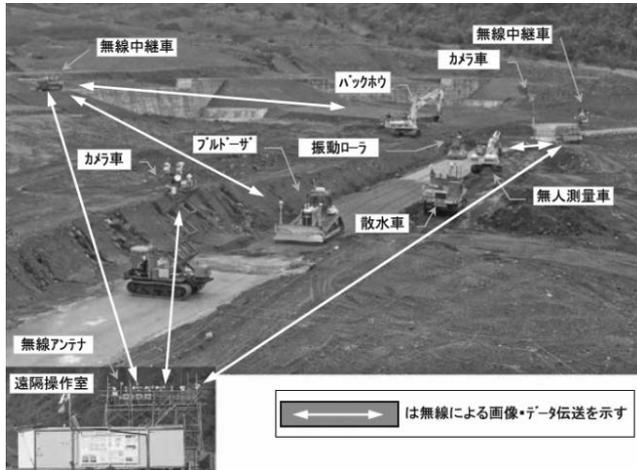
(1) 陸上における類似施工事例

大水深下における施工では、作業機械の遠隔操作技

術が必須となるが、火山や地震など自然災害の発生が多い日本において、建設機械の遠隔操作による無人化施工技術が発達している。1991年の雲仙普賢岳噴火災害から2000年の有珠山噴火災害、2004年新潟県中越地震、2008年岩手宮城内陸地震などに投入され、実施工を伴った技術開発により急速に発展している。

無人化施工における床掘作業として、赤松谷川9号床固工工事が類似事例として挙げられる。赤松谷川9号床固工工事は、雲仙普賢岳の火山活動に伴う火砕流や土石流災害から地域の安全を確保するための砂防施設を施工する工事であり、建設機械をリモートコントロールする無人化施工により、危険警戒区域内におけるRCCコンクリート14,058 m³の砂防堰堤を施工している。

本工事の施工は危険警戒区域を境に有人施工区域と無人施工区域にまたがっており、無人施工区域では土石流や火砕流が発生する恐れがあった。そのため、遠隔操縦装置を装備したブルドーザ・バックホウ・重ダンプ・振動ローラ等の建設機械を、危険警戒区域外にある遠隔操作室から、多様な管理システムを導入した情報化施工を実施している。図一2の施工機械はすべて無人で運用されており、密集した範囲に様々な種類の施工機械により作業されているのがわかる。



図一2 RCC Construction method⁵⁾

(2) 陸上無人化施工技術の海底資源開発適応に関する課題点

前項の赤松谷川9号床固工工事は様々な遠隔操作機械が適応されており、海底資源開発に流用可能性の高い要素技術も数多く存在する。しかし施工手順についてはそのまま海底資源開発に繋げることは下記の点において困難である。

①水中では有線となることから、移動体の経路や台数が制限される

- ②地盤が軟らかく、ダンプトラック等による高速移送ができない
- ③濁水によりカメラ映像での確認や光学測量による出来型管理が困難
- ④使用可能な位置計測センサの精度が低い
- ⑤情報量が少ないため、オペレータの判断が困難
- ⑥長距離自走による目的位置への移動配置ができない

上記項目①②については浚渫土砂の移送に関連する。水中での土砂はバケツで積み込むと飛散することが考えられ、またコンテナ等の容器に送り込むとした場合でも、接続のための手順が必要となる。また移動体は動力供給のため有線となることから、近接する複数台の同時運用は困難であり、ダンプ等運搬車両を使うメリットは低いと考えられる。そのため、浚渫土の移送についてはホース圧送が適しているものと考えられる。

③④はセンシング技術に関する課題点である。陸上と異なり、水中では電波の減衰が大きく、また懸濁物質も想定されるため、GPSやレーザーレンジファインダー等の電波式・光学式測量機が使用できない。

水中での位置検出には一般に音の伝搬時間を計測し、三角測量の原理で計測する事が一般的である。しかし光と比較して音の波長は長く、計測の分解能および精度は低い。また音速は水温によって変化するため、深度を軸とした温度変化プロファイルを計測することが難しい大水深の施工では、近くの基準点からの相対位置を計測する方法が適している。また同様の理由から、船舶から水中の地形を高精度に取得することも困難と考える。そのため、施工場所近辺の全体地形を認識することは難しく、掘削装置周辺の相対的な高さ変位の情報を活用する必要がある。

⑤は操作入力系に関する課題である。内界外界情報の不足や劣化はオペレータの操作判断に影響するため、必要最低限の自由度を持つ簡素な機構が望ましい。つまり速度制御や複数関節の同時制御を排除し、シーケンス制御的な操作入力を基本とする機構が海底資源開発における掘削機に適していると考えられる。

⑥は施工機械の設置に関する課題である。陸上無人化施工の場合、安全な場所から自走することで作業位置へ移動することが可能であるが、水中施工においては船舶からの投入・揚収となる。また、複数の施工機械や周辺装置を個別に投入することはケーブルの絡まりなどの可能性があるため、ユニット化することが適しているものと考えられる。

(3) 掘削手順

深海での掘削では土砂を連続的に洋上に移送する経路が必要であり、その方法については油田等で実績のあるライザーパイプをベースに、スラリー状にした鉱物含有土砂をエアにより浮上させる方式が提案(図-3)されている。しかし細長い形状のライザー管では高精度な位置決め、および、移動は困難であるものと予想される。そのため海底面での土砂掘削、集鉱は作業機械が別途必要となることが予想され、これらの作業機械により揚収装置周囲の広範囲を施工することが考えられる。しかし作業機械も有索となることから作業範囲が限定されるため、ユニット化したベースにより設置・移動する方法が考えられる。図-4に提案する掘削移動体ベースの概念図を示す。このような比較的大規模な施設を海底面へ投入設置する技術については、原油ガスの産出でSSBI(海底生産システム: Subsea Separation, Boosting and Injection system)を設置している既存技術(写真-4)が参考となるものと考えられる。

なお、円周すり鉢状に掘削する方法は、移動体の左右クローラの走行距離や回転数を高精度に制御する必

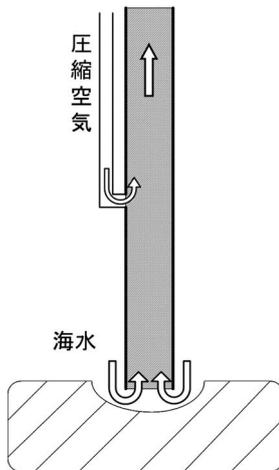


図-3 Air-lift system

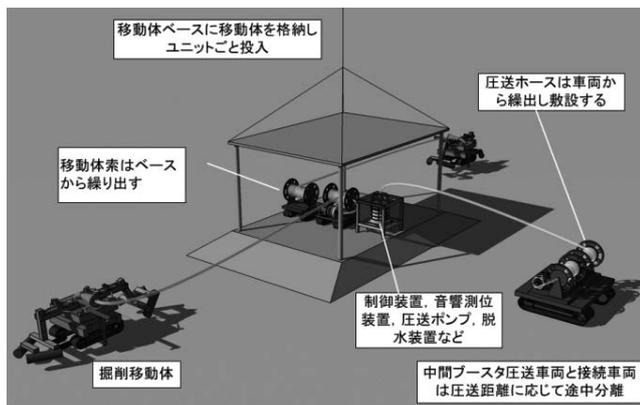


図-4 Subsea Base Unit



写真-4 Subsea Separation, Boosting and Injection system⁶⁾

要があり本件では適さない。基本的な掘削移動体の運動は直線軌跡と定点での回転による方向転換のみとすることが適しているものとする。

ここで、ベースからライザー管へ浚渫土を圧送可能な距離を1,000 mとし、ライザー管とベース投入用ワイヤ、洋上での母船同士の干渉を防ぐため、最低近接距離を500 mと条件設定する。

掘削移動体ベースはまずライザー管から1,000 m離れた場所に設置される。その後、移動体から圧送ホースを繰り出しながら揚収ライザーに近接させ、本体ごとジョイントする。掘削移動体は、地点より30 m程度離れた場所において200 m幅を全後進しながら掘削する。

移動体が端部に到達した後、方向を45度転換し後進することで次のレーンに移行する。次のレーンに移行し、前列と並行となるよう車体の方位決めを行った後に、後進掘削とする。このような運動にすることで、移動体から延びる複合ケーブルの干渉を防ぐ。

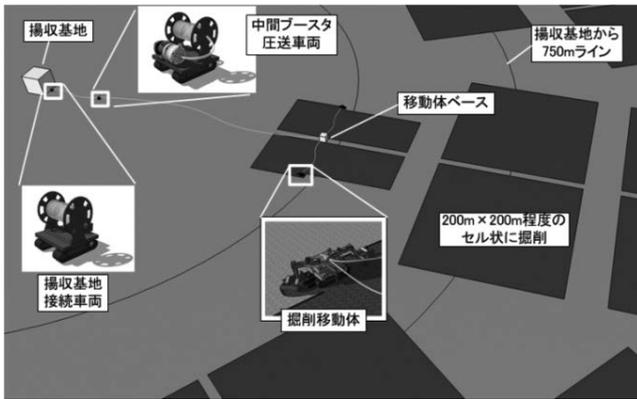
200 m × 200 mを深度方向に1 m程度掘削したのち、次段の掘削作業に入る。帰路では地盤の安息角を十分に保つように幅を減少させる。

この手順を繰り返し目的深度に達成したのち、移動体をベースに格納する。その後、ベースを海底面から引き上げ、船舶移動によって次の掘削位置に移動させる。このため、掘削の範囲は図-5のようなセル状に掘削する方法を提案する。

(4) 掘削面精度の確保

大水深下の水中では施工範囲全体の地形の認識が困難であるため、大量の資源採掘のためには、層的に深く掘る方法が必要であると考えられる。しかし平面的に掘るためには高さ方向の機体の位置を高精度に認識する必要がある。

掘削は幅10 m程度で線的に掘削する方式となるも



図—5 Conceptual diagram for drilling in cellular

のと考えられ、また地盤が軟弱である場合は土砂が隣の列から崩れる可能性があり、一度に掘削可能な深度については、数10 cm から1 m 程度と大きくとれないものと考えられる。そのため、列ごとに精度を持たせた掘削を進めていく必要があるものとする。

掘削による高さを揃えるためには、掘削後の高さを認識する必要があるが、大水深化海底面において広域の視認や光学測量機による計測は困難である。また海中航行体による海底面計測についても、測位データをグローバル座標系にするためには海中航行体の座標を高精度かつリアルタイムに計測する必要がある。また掘削作業後に状況を確認したとしても、不陸があった場合にはその場所に戻り再度作業することとなるため、施工中の計測は必要である。

そこで本掘削移動体の座標計測方法として、高さ方向の精度を高めたSBLを用いることが考えられる。計測精度を向上させるためには、ベースを基準点とした相対座標での計測が挙げられる。さらに受信機の一つを鉛直方向に取り付けることで、深度方向の誤差を少なくすることが考えられる。また移動体が停止状態にあれば動揺震動等の影響を受けないため、平均化等により位置誤差を収束させることも可能であり、移動中については高精度の加速度計で移動量を積分することで補正することも有効である。これにより大水深下の海底地盤上においても高精度で移動体の深度を計測することが可能であるものと考えられる。

移動体の高さは、すなわちクローラの接地している場所の海底深度となり、XY平面座標とともに記録することで地盤形状の平面的な認識が可能となる。

また既に掘削した列の高さを基準とする方法も考えられる。掘削ヘッドの高さを隣の列の高さと合うように制御すれば、誤差の積分はあるものの、局所的に大きな不陸は発生しないと考えられる。

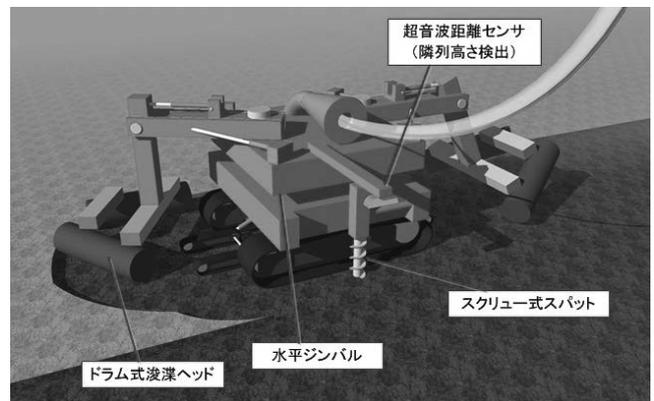
4. 掘削移動体機構検討

(1) 移動機構

不整地における作業機械では、クローラが移動に用いられることが多い。これは接地する面積を増やし単位面積あたりの面圧を下げることで軟弱な地盤でも移動可能であり、かつある程度の不陸のある地面でも作業反力を伝える能力が高いためである。

しかし泥質な海底面である場合、クローラの回転力だけで移動することは困難であるものと考えられる。これは推進力によりクローラ接地面の荷重が動的となるため、クローラが地盤を掘削することとなる場合があるためである。また本件のように直線的な軌跡を必要とする場合、左右クローラの回転差を監視する機構も必要である。ここでクローラについては対地力のみ受けるものと考え、移動に必要な力をスパット脚の前後移動によって発生させることが対策としてあげられる。

また、本機構においては施工時を考慮すると直進性能を高める必要がある。左右にスパットを配置した場合、左右の移動量を同じにするような物理的なリンク機構を設置する必要がある。図—6に提案する移動機構について示す。



図—6 Seafloor drilling mobile mechanism

(2) 動力発生源

各部を駆動させる動力源については電気モータの回転力により流体ポンプを駆動させ、その圧力を供給する方式が適していると考えられる。これは電気モータに比べて減速比を高くすることが容易であるため、作動流体の配管のみで各駆動部の機械的要素を簡素化できるほか、流体ポンプ以降は内部が非圧縮性流体で満たされており、耐圧環境性能も高くなる。

しかし長期間の海底作業において、回転軸、シリンダ擦動部から海水混入のほか、配管の破裂、ホースの裂け等、海水が混入する可能性が否定できない。海水

が混入した場合、電氣的に精密な制御を行う比例電磁弁に不具合が生じることが考えられ、完全無人である大水深での作業においては復旧が困難である。そこで、各駆動部を個別に駆動させ、また電磁弁等を用いず、電気モータの回転・停止のみで駆動させることで長期間の駆動が考えられる。

ただしギアポンプやトロコイドポンプなど回転機構を有するポンプの場合、摺動面積が多くなるため、不純物の混入に対して弱点となる可能性がある。そのため、海底で長期間の駆動を考えた場合、スラリーポンプなどで利用されている方式を応用すべきと考える。

(3) 浚渫ヘッド位置制御

海底地盤は浚渫ヘッドにより掘削されるが、その浚渫能力以上に動的荷重をかける場合、車体の浮き上がりにつながるため、位置制御ではなく力制御が有効である。しかし、電動モーターと異なり油圧シリンダによる力制御は配管に圧力制御弁およびセンサを設けるなど機構上複雑となる。そのため浚渫ヘッド自重により落下させる、もしくはスプリング等により不感帯のような範囲を持たせる機構が有効となる可能性がある。

また一定速度で移動中に浚渫すると高さ方向の精度が確認しにくいいため、機体を停止した後に浚渫ヘッドのみ移動させる機構が有効であると考え。また平面的に浚渫するためには、ヘッドの高さや角度を一定に保つ必要がある。ここで機体を停止固定する際に、ある程度水平を保持する機構を上部体を持たせ、浚渫ヘッドをワイプさせる機構とすることで、掘削の面的制御が容易となる。

(4) ケーブル取回し・接続

機体を動作させるための動力線、信号線については常時接続する必要がある。これは掘削機械を海底まで降ろすためのベースと接続するものであり、ベースと移動体の距離に応じて線の繰り出し巻き取りをおこなう必要がある。

この機構について数100m近くの距離を巻き取るドラム等を移動体側に搭載すると配置や重量バランス等を考慮する必要があるため、ベース側に設置する。ただしケーブルを、中性浮力程度にし、地面との摩擦を減らす必要がある。ただし機体付近については旋回時の干渉（踏みつけ等）を防ぐため、直上に浮かす。

浚渫土は一旦ベースに送られ、遠心分離等により脱水され粘土の高い浚渫土となる。この浚渫土をベース

から揚収装置まで送る必要がある、この圧送ホースについても移動体で移動させる必要がある。この圧送ホース接続のため、採鉱とは別の移動体を持つ必要がある。

揚収場所までの接続のための移動体については、水中部を航行し機動性が高く自由度も高い水中航行式ROVが考えられるが、浚渫土圧送時の圧力損失のため500m程度の間隔でブースターを設ける必要がある、さらに掘削移動体の故障時の回収のことを考慮すると、前述と同様のクローラ機構によるものが適していると考え。

5. おわりに

海底資源開発における資源採掘は、大規模な施工を完全無人化で実施する必要がある。またその特殊な条件から、センシング技術や移動体経路についても制限が多い。本稿では、陸上無人化施工技術および水中建設機械技術の知見から、海底資源採掘の施工手順を想定し、必要となる掘削移動体の自由度について検討を行った。

海底資源採掘の実現可能性に関しては、コストや需要量なども要因として存在するが、少なくとも技術的な部分については実現可能なだけの技術力を有しておくことが重要であると考えている。本稿における提案については、多くの技術開発項目が存在しており、深海の耐圧機構だけでなく海洋土木、無人化施工技術など様々な分野の知見を集結させ、海底資源採掘のための技術開発を進めていきたい。

JCMMA

《出典》

- 1) <http://www.ihcmerwede.com/>
- 2) Underwater Mining Institute annual conference 2008
- 3) <http://www.deeppoceangroup.com/>
- 4) Chang-Ho Lee, "A Study on the Driving Performance of a Tracked Vehicle on an Inclined Plane according to the Position of Buoyancy", Proceedings of the Ninth ISOPE Ocean Mining Symposium
- 5) 供田, 岩崎, 岡本, 「赤松谷川9号床固工工事における無人化施工」, 建設の施工企画, 2010.08
- 6) <http://www.fmctechnologies.com/>

【筆者紹介】

平林 丈嗣 (ひらばやし たけつぐ)
独立行政法人 港湾空港技術研究所
新技術研究開発領域
計測・システム研究チーム
研究官

