

## 海砂採取技術の変遷と最近の技術

機械事業部（鋳物）

### 1. はじめに

わが国の建設用細骨材や海洋土木工用骨材として、従来から海砂は重要な役割をはたしてきた。しかし最近、瀬戸内海における環境破壊問題が大きくクロ - ズアップされ、海砂採取も大きな転換期を迎えつつある。当社は古くから海砂採取用サンドポンププラントを製作しており、圧倒的な納入実績を有しているとともに、常に海砂採取装置の技術変遷におけるリ - ダとしての地位を維持してきた。

### 2. サンドポンプの技術変遷

海砂の採取機械としては、当初はガット船（グラブクレ - ン）によって採取していたが、昭和40年代初期（1965年頃）に採取効率がよく、大容量の採取能力があり、砂の船上選別が可能な装置として、サンドポンプによるサクシオンポンプ方式に変わった。近年、海砂の枯渇、沿岸の侵蝕、漁業権の影響、長年の砂採取による採取海域の高深度化などによって、水深が40～100m程度の高深度海域での砂採取が通常となっている。水深が深くなるとサクシオンポンプ方式では、ポンプの吸入負圧に限界があるため吸引する土砂水の含砂率が低下し、採取効率が悪くなる。そのため当初はポンプ吸入側の助勢装置として、エジェクタを付加した装置が一時流行したが、この装置が使われたのは極く少数であり、現在ではほとんどが姿を消している。昭和50年代中（1980年）ごろには油圧駆動式的水中サンドポンプが開発され、高深度においても、高濃度での砂採取が可能な装置として急速に普及し、ほとんどの海砂採取船が水中サンドポンプを搭載するようになった。水中サンドポンプは海底で駆動されるため、吸引負圧の消費が少なく、水深が深くなっても非常に高い含砂率での砂採取が可能である。最近では海砂採取船の大型化によって、大容量でシンプルなポンプ装置が求められるようになり、そのため電気駆動式の水

中サンドポンプが海砂採取システムの主流となりつつある。

### 2.1 サンドポンプによるサクシオン方式について

#### 2.1.1 装置の概要

海砂採取船の機関室に設置された大型のサンドポンプによって、海底に堆積している砂を海水と共に吸い揚げ、船上の砂選別機に圧送後、船倉に投入される方式である。

#### 2.1.2 ポンプ容量および駆動方法

ポンプの吸入口径としては 350～600mm、揚水量は1700～6000m<sup>3</sup>/h、全揚程は25mのサンドポンプが搭載されており、サンドポンプは船の推進用エンジンの反プロペラ側出力軸からエアクラッチを介して、Vベルトで駆動されるのが標準的である。

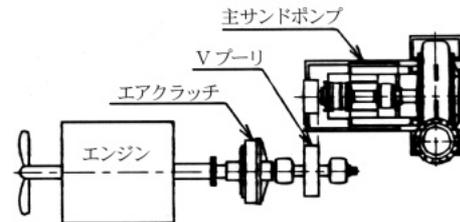


図2 機関室装置図

### 2.2 油圧駆動式水中サンドポンプについて

#### 2.2.1 ポンプの砂採取能力

サンドポンプによるサクシオン方式は水深10～30m程度の海域での操業を対照としており、実用的な水深としては25m程度が限度である。水深が深くなるとサクシオン方式ではポンプの吸込負圧に限界があり、キャピテーションの発生により砂の採取効率はどんどん低下し、40m以上の海域では採取不能となる。

#### 1) サクシオン方式における吸入負圧

ポンプの吸入負圧は次式によって計算される。

$$\text{吸込負圧} \quad V = hs' + hu' + hr$$

ここで、

$hs'$  : 吸込実高さによる負圧

吸込管の水中にある部分には自然に水が入るため、ポンプとしては水面から上のポンプまでの高さ $hs$  mだけ水を吸い上げなければならない。これに要する負圧を水柱で表すと、

$$hs' = \quad \cdot hs$$

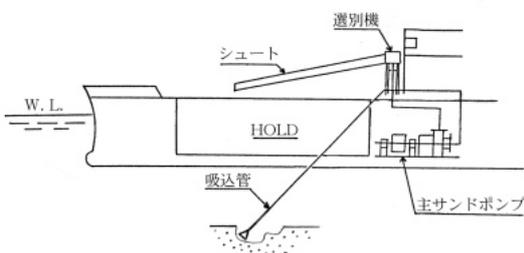


図1 海砂採取船

：スラリー - の液比重

hu' : 水深による負圧

海水だけを吸引する場合にはこの負圧は発生しないが、海水と砂の混合液を吸引すると吸込管の外側（海水）にくらべ内側の液比重が高くなり、この重い流体を引き上げる負圧が必要となる。水深を  $h_m$  とすると

$$hu' = hu ( \gamma_s / \gamma_w - 1 )$$

hr : 吸込管の抵抗による負圧

吸込管内を流体が流れると管壁の摩擦抵抗、吸込口の抵抗、曲り部の抵抗などの損失が発生し、これに見合う負圧が発生する。

$$hr = ( f_1 \times \frac{v^2}{2g} + f_2 \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} ) \{ 1 + ( \gamma_s / \gamma_w - 1 ) \}$$

$f_1, f_2$  : 抵抗係数

L : 吸込管長さ

v : 管内流速

g : 重力加速度

D : 吸込管径

$\gamma_s, \gamma_w$  : 土質係数

したがって、

$$V = \frac{Q}{\gamma_s} \cdot hs + hu ( \gamma_s / \gamma_w - 1 ) + ( f_1 \times \frac{v^2}{2g} + f_2 \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} ) \{ 1 + ( \gamma_s / \gamma_w - 1 ) \}$$

水深が深くなると必然的に吸込管も長くなるが、この式から、管内流速、液比重、吸込管径を一定とすれば、水深が深いほど、また、吸込管が長いほど大きな負圧が必要になることが判る。地球上の最大真空は76cmHgであり、ポンプが発生できる最大負圧は45～50cmHg程度しかなく、水深が深くなった場合は液比重  $\gamma_s$  を小さくする、すなわち砂の含砂率を低くしなければキャビテーションが発生し、ポンプは揚水不能となる。

### 2) 水中ポンプ方式の吸入負圧

水中ポンプは海底近くまで吊り降ろして駆動するため、前項の吸入負圧の大部分を吐出圧力に置換出来る。ポンプは動力さえ与えれば大きな圧力の発生は可能であり、いくら水深が深くなっても水中ポンプであれば非常に高い含砂率で効率良く砂の採取が出来る。

近年、海砂採取海域も高深度化している状況で、海砂が建設用骨材として、また、関西空港建設などの土木工用として供給されてきたのは水中サンドポンプの開発が大きく寄与していることは間違いない。しかしその反面、海環境破壊が大きく問題として取り上げられている昨今、技術の進歩と環境維持のマッチングを問われることにもなった。

### 2.2.2 装置の概要

海底で駆動される水中サンドポンプにより海水と共に吸込まれた砂はポンプ吐出管を通して船上の砂選別機に圧送され、船倉に投入される。

この装置には、水中サンドポンプ1台のみで砂採取する水中サンドポンプ方式と、機関室に設置された主サンドポンプとその吸入管に直列に組み込まれ、海底で駆動される水中サンドポンプとの2台のポンプによって砂を採取するサクシヨンプースタポンプ方式がある。サクシヨンプースタポンプ方式は主として比較的高深度で、大型の海砂採取船に適用される。

水中サンドポンプは高深度の海底で駆動されるため、軸受部は海水の侵入を防ぐため特殊なメカニカルシール構造となっている。

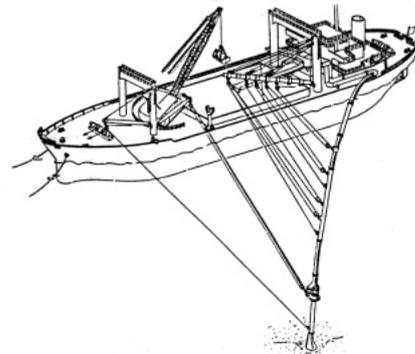


図3 水中サンドポンプ方式の海砂採取船

### 2.2.3 ポンプ容量および駆動方式

水中サンドポンプ方式およびサクシヨンプースタポンプ方式の配管径としては 400～600mm、揚水量としては 2000～6500m<sup>3</sup>/h、砂の採取能力としては最も大型の機種で1時間当たり、1500m<sup>3</sup>程度の砂を採取することが出来る。水中サンドポンプは油圧モータによって駆動されるが、油圧ポンプおよび主サンドポンプは船の推進用エンジンによりエアクラッチを介してVベルトで駆動される。油圧ユニットとしてのバルブユニットおよびオイルタンクユニットは機関室に据え付けられ、水中の油圧モータまで油圧配管される。油圧装置は水中サンドポンプの特殊な使用条件に対して十分に適応できるように設計されており、万一、

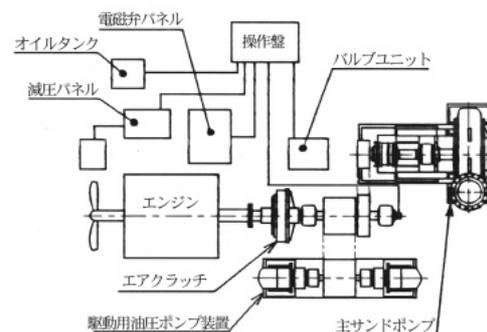


図4 サクシヨンプースタポンプの機関室配置図

油圧管路から油洩れが生じた場合には、油の流出による海洋汚染を防止するため、自動的に油圧ポンプを停止させる非常停止装置が組み込まれている。小型の機種においてはポンプと油圧モータは直結駆動されるが、大型機種ではポンプと油圧モータの間に水中減速機を介して駆動される。最大の機種においては2台の油圧モータでギヤボックスを介して駆動する二機一軸の駆動方式となっている。

## 2.3 電動式水中サンドポンプについて

### 2.3.1 特徴

油圧駆動式水中サンドポンプと比較して電動式には次のような長所、短所がある。

#### 1) 長所

- (1) 大容量の水中ポンプが可能である。
- (2) 配管ロスがないため電動機の出力を効率的に使える。
- (3) 電動機のシャフトに直接インペラを取り付けることができるため、ポンプ構造が簡単である。
- (4) 油圧配管がないため、配管ラインがシンプルである。
- (5) 電動機は耐久性に優れているためメンテナンスコストが低い。
- (6) 機関室内の騒音、振動がない。
- (7) 油の漏洩による海洋汚染の心配がない。

#### 2) 短所

- (1) イニシャルコストが高い。
- (2) 重量が重い。
- (3) ポンプが過負荷になった場合、瞬時に停止するためポンプ内に砂が詰まって再起動できなくなる可能性がある。
- (4) 電動機の起動時に大きな入力が必要とするため、発電機を駆動するエンジン馬力が大きくなる。
- (5) 取扱いを誤ると生命の危険がある。

### 2.3.2 装置の概要

#### 1) 水中サンドポンプ

図5に水中サンドポンプの組立構造図を示す。

最近では長年の砂採取によって土質が粗くなっている海域が多く、インペラやケーシングなどの交換部品の耐摩耗性について、さらに長寿命なものが要求されている。そのためポンプ接液部の部品は材質の改良、肉厚の増加などによって耐久性が向上されたものとなっている。

電動機のシャフトに直接主インペラとサブインペラが取り付けられている。サブインペラは、主インペラによって発生した圧力水が電動機側へ洩れるのを防ぐ役目を果たすとともに、サブインペラによって吐出された圧力水がポンプ吸入管にエゼクタ水として入れられる。このエゼクタ水は水中ポンプの詰まり防止に使用される。

#### 2) 水中電動機

電動機は高深度の海底で運転されるため、十分に信頼できるシール性が要求される。電動機の内には油が封入されており、ベローズを使用した均圧装置との組合せによって、常に水深圧と電動機内圧をバランスさせる油封均圧構造となっている。

均圧装置のベローズにはバネが取付けられており、このバネ圧により電動機内部の油圧を外部水深圧より高めにすることによって、海水の侵入を防止する。軸封部はタンデムに組み合わされた2組のメカニカルシールを配置するダブルメカニカルシール構造である。二重構造となっているため、万一、海水側のメカニカルシールが破損しても電動機内部に海水が侵入することはない。

ケーブルの端末接続部も外部から海水の侵入を防止しなければならない。そのため、ケーブル端部にはゴムモール드를施行し電動機側には密封端子を設け、万一、端子箱内に海水が侵入しても、電動機内部にまでは海水が

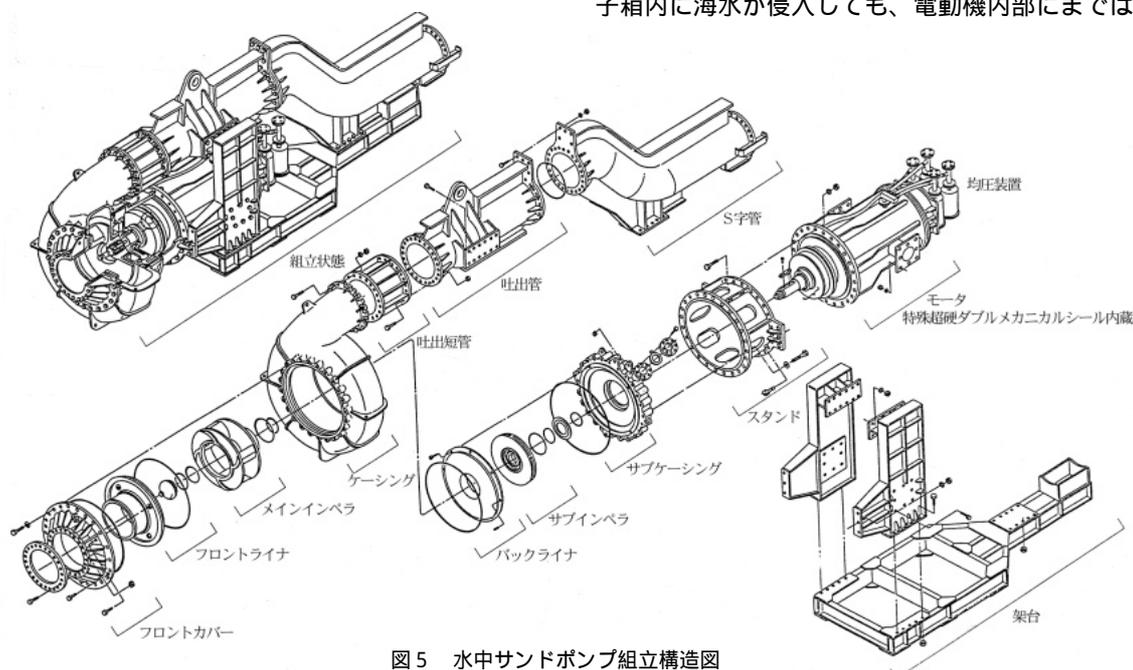


図5 水中サンドポンプ組立構造図

侵入することはない。

電動機の出力は、水中サンドポンプの過酷な使用条件に適應するため、過負荷耐量115%（連続）の余裕を持った設計となっている。

3) 発電機および始動装置

水中電動機の電源としては、自航船の場合は通常推進用エンジンの反プロペラ側出力軸から増速機を介して、3300V × 60Hz × 1200min<sup>-1</sup>の発電機を駆動する。

バージ船の場合はエンジン付発電機を据え付ける例が多いが、プッシュボートの推進用エンジンから増速機を介して発電機を駆動するケースもある。

電動機の始動装置は、発電機盤と始動機盤を一体型としたコンパクトな形状とし、発電機容量および始動時のエンジン負荷を極力小さく押さえるため、特殊な低電圧始動方式を採用している。

2.3.3 ポンプ容量

配管径としては 450～700mm、揚水量としては3500～11000m<sup>3</sup>/h、ポンプ駆動用水中電動機の出力は400～1400kWの各種ポンプがあり、全8機種が標準ポンプとしてシリーズ化されている。

3. ポンプ配管システムの技術変遷

海底の水中サンドポンプから船上の砂選別機まで含砂水を圧送するパイプラインは、荒天時の波浪に耐える強度と耐摩耗性、操作性が要求される。パイプラインは船の航行中はデッキ上に格納され、砂の採取を始める際に複数台のウインチにより海中に吊り降ろされる。

パイプラインは砂採取海域の水深に応じた長さが必要であるが、当初はデッキ上に直線的に配管するシステムが普通であった。しかし、最近では採取海域の水深が深くなってきているため、船の全長より長いパイプラインを要求されることが多い。そのため一般的な直線配管方式では対応できず、鋼管やゴムホースを使用して船尾でUターンさせる方式、ゴムホースをクリスマスツリーのように高く吊り上げる方式、ゴムホースをホースリールで巻き取る方式などが開発されてきた。この過程でスィベルエルボ、ユニバーサルジョイントといった特殊な配管接続装置、また、ホースリールのドラム径を極力小さくするため許容曲率半径が従来品の1/2以下の特殊な耐摩耗ゴムホースが開発された。

ホースリール方式はリールの据付スペースが大きい、重量が重い、ブリッジから前方視界が悪いといった問題を含んでいるが、現状では最も長く配管できる方式である。

図6から図8に代表的な配管方式を、図9にユニバーサルジョイントを示す。

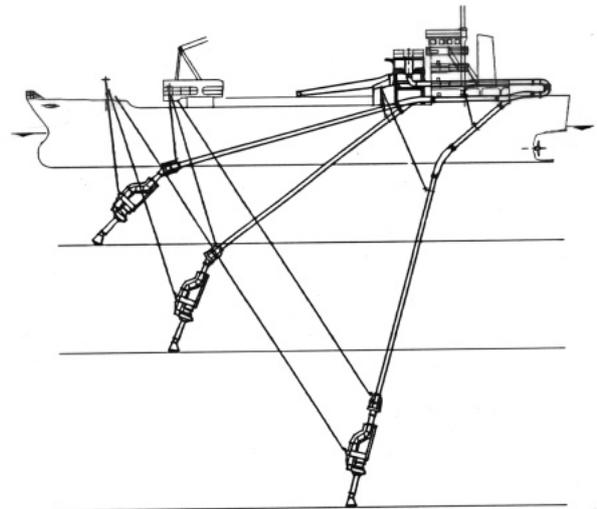


図6 デッキ配管方式

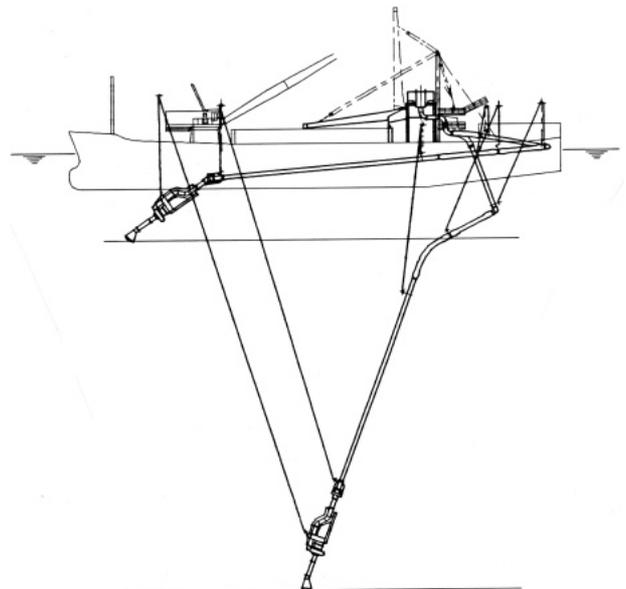


図7 スィベルエルボUターン方式

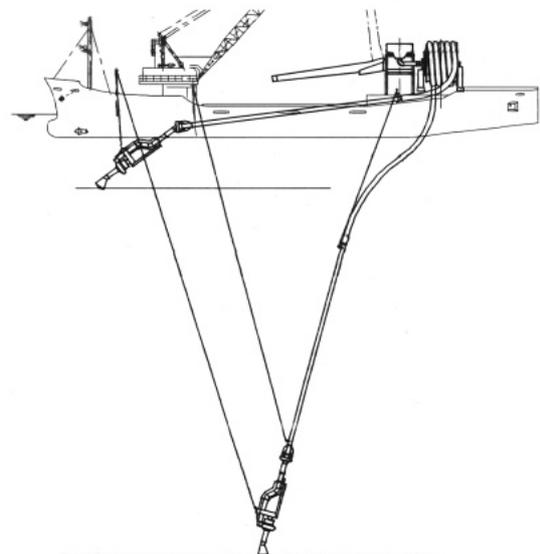


図8 セミリール方式

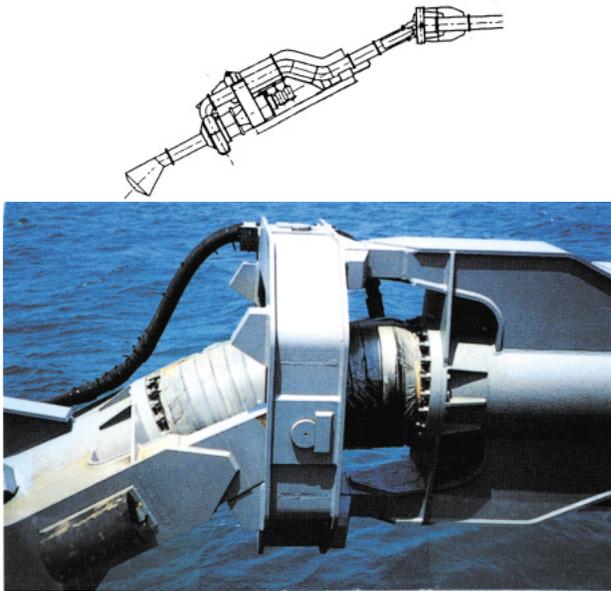


図9 ユニバーサルジョイント

#### 4.1 付属装置の最近の技術

##### 4.1 パイプライン吊降ろし装置の自動化

水中ポンプおよびポンプに接続されているパイプラインは、適当な位置を何箇所かのダビットウインチで吊られており、このダビットウインチによってポンプとパイプラインは、海水中に吊り降ろされる。パイプラインが海水中に没するとウインチを操作しているオペレータは、ラインの状態を目視できなくなるが、ラインを自然な状態で海底まで吊り降ろすためには高度な熟練が必要である。

このため配管ラインを船のデッキ面から設定された水深の海底まで吊り降ろす作業および採砂作業終了後、配管ラインを海底からデッキ面まで吊り揚げの作業を、マスタハンドル1本の操作で自動的に行えるウインチの自動運転システムが実用化されている。これは2個の近接スイッチでワイヤの巻揚げ、巻下げ方向およびワイヤの繰出し長、巻込み長を検出しシーケンサで制御することによって自動運転するものである。本システムを使用すると、経験の浅いオペレータでもパイプラインを損傷することなく、配管ラインの海底への降下およびデッキ上への格納作業が可能である。

##### 4.2 水中ポンプの自動採砂運転装置

水中ポンプを海底に降下させた後、砂の採取運転を行うが、効率良く砂を採取するためには、適正な含砂率を保つように水中ポンプを運転する必要がある。

水中ポンプによる採砂運転はオペレータが、水中ポンプ吊りウインチをコントロールすることによって行って

いるが、この運転もオペレータの十分な経験を必要とする作業である。

水中ポンプの採砂運転をオペレータの手を介さないで、自動的に水中ポンプ吊りウインチをコントロールする、水中ポンプ自動採砂運転装置が開発されている。水中ポンプを吊っているワイヤの荷重は、水中ポンプに接続されている吸入管の先端が海底に着地すれば軽くなり海底から離れると重くなる。

この原理を利用してワイヤにかかる荷重をピン型ロードセルによって検出し、シーケンサにあらかじめ入力された高含砂率を得るための最適荷重を常に保持するように、ウインチが自動コントロールされるものである。現状ではオペレータの若干の補正を必要とするが、近い将来において完全自動化は可能であると考えられる。

##### 4.3 ジェット水海底掘削装置

現在認可されている海砂採取海域も長年の砂採取によって粘土層が出現したり、硬い土質に当たったりしているが、水中ポンプの吸込力だけでは十分に掘削できないため、砂採取に長時間を要するケースが増えてきている。

硬い土質の海域においても効率良く砂を採取する方法として、ジェットウォータの噴射によって掘削する装置が使用されている(図10参照)。

これは、200~1000 $\text{m}^3/\text{h}$ 程度の水を、吸入口のまわりに3~6本程度配置されたノズルの先端から、流速40~50 $\text{m}/\text{s}$ で噴射させて海底を掘削するものである。このジェット掘削装置には次のような特徴がある。

- 1) 硬土質層、粘土層を掘削するため、砂の採取時間が短縮できる。
- 2) 水中ポンプ吊りウインチ操作回数が少なくなり、安定した含砂率で連続運転が可能である。
- 3) 採取した砂は泥分の混入が少なく、品質がよくなる。



図10 強力なジェットウォータ噴射

#### 4.4 還流ポンプ装置

カーゴホールドに入った泥水は、通常船首側に設けられた排水口により船外に排出される。この排出された泥水によって海面が濁り、これが拡散されるため海洋汚染が問題となる。還流ポンプとは、ホールド内の泥水を自然排出するのではなく、ポンプによって強制的に水深30m程度の海中に排出させ、海洋汚染を防止する装置である。還流ポンプはホールドの船首側に据え付けられて、ポンプの吸入管は排水口に接続される。吐出管はデッキ上で海中への吊降しが可能な状態に配管され、ポンプ運転時は吐出口を水深30m以上まで降下させる。水中サンドポンプの含砂状態によって、ホールド内に入る泥水量も変化するが、還流ポンプを駆動しているエンジン回転数を制御することによって排水量を調節する装置となっている。



図11 海砂採取船全景

#### 5. 揚荷装置

海砂採取船(図11参照)の主な装置としては、

- ・ 海底から砂を吸い揚げるポンプ装置
- ・ ポンプ装置をデッキ上から海底へ降ろす荷役装置
- ・ 採取した砂を陸揚げする揚荷装置

などがある。

鋳物事業部では、ポンプ装置はもちろんのこと、荷役装置もすでに商品化しているが、今後の方向として、揚荷装置の商品化により海砂採取船におけるトータルシステムの技術確立に取り組んでいる。

現状、ほとんどの海砂採取船はグラブクレーンを揚荷装置として搭載しているが、この方式には、

- (1) クレーン操作には熟練された特殊技能が必要であるため、オペレーター不足による賃金の高騰。
- (2) 大容量な揚荷装置の要求に対応できない。
- (3) 船を岸壁に接岸しなければ砂の陸揚げができないため、干潮時などの水深が浅い場合には満潮までの待ち時間が生じることがある。

などの問題点がある。

大容量の揚荷能力があり、全自動運転が可能で、接岸しなくても砂の陸揚げ作業ができる揚荷装置として、平成10(1998)年8月、スウェーデンのBMHマリン社よりバルクリクレーマを技術導入した(図12参照)。

本装置は特殊なエンドレスチェーンにバケットを取り付け、連続バケットを回転させながら船倉内を走行・横行し、バケットがすくい上げた砂を旋回ブームコンベヤにて陸揚げする方式である。

この揚荷装置は、海砂だけでなく、石炭・コークス・鉄鉱石などの多種類のバラ物の揚荷が可能であり、一般貨物船も視野に入れて拡販を目指している。



図12 揚荷装置(バルクリクレーマ)

#### 6. おわりに

海の環境維持のため、広島県ではすでに海砂採取全面禁止となっており、さらに香川県においても平成17(2005)年度から全面禁止が決定されている。海砂に代わる代替骨材の開発は進んでいないが、日本国内における海砂採取はますます規制が強化されると予想される。現状では規制強化による国内産海砂の減少は、韓国・中国が主な供給源である海外産海砂で補う方向にある。

我々は長年築いてきた独自の技術にさらに改良を加え、新市場を海外に求めてグローバルな展開によって活路を見い出したいと考えている。

(文責 特品部・近藤 健)