

海底クリーニングシステムに関する研究・開発

独立行政法人水産大学校 海洋機械工学科 横田源弘

1. 調査のねらい

養殖場の海底には残餌や養殖魚の排泄物が堆積しており、生育環境としては極めて悪い状態となっている。対策としては、底泥を浚渫により取り除くか、上から海砂を散布・被覆するか、石灰を散布する方法が採られているが、いずれも大がかりな工事であり莫大な費用がかかる。更に、覆砂は別な場所から砂を運んで敷き詰めるために、生物にとっては環境破壊につながる危険性がある。理想的な対策は、コストを抑えながら海底に堆積した有機物のみを取り除くことである。そこで本調査では、海底に堆積した汚泥をできるだけ環境に悪影響を与えずに除去・回収できる海底クリーニングシステムを開発することを目的とする。

高速水噴流は、水中構造物の切断・洗浄、海底の土壌等の掘削・穿孔などの分野に応用されているので、問題の汚泥層を流動化し、除去・回収の可能性がある。そこで、曝気式下水ポンプを用いて、致命的なコンクリート管等の劣化を防止しつつ水輸送を行う手段と同様に、高圧水噴流用ノズル内の低圧部に自然または強制的に通気して、曝気を兼ねた高速水中混気水噴流の利用が考えられる。水中混気水噴流による、曝気しつつ海中汚泥層を除去・回収する技術の確立を目的として、「垂直下向きに噴射された水中混気水噴流の挙動」、および「下向きに噴射された水中混気水噴流の砂土掘削特性」について解明する。さらに1年目から開発・製作している、「混気水噴流方式による表層汚泥回収装置」、すなわち海底クリーニングシステムの全構成装置を完成させることにより、実海域で試運転し性能調査を行うことである。

2. 垂直下向きに噴射された水中混気水噴流の挙動

水中混気水噴流による、曝気しつつ海中汚泥層を除去・回収する技術の確立を目的として、試作した混気二流体ノズルの流動特性、噴流まわりの空気層ならびに気泡群の様相を種々の通気圧力について系統的に明らかにする。

2.1 実験の装置と方法

水中噴流試験水槽は、縦 1.5m、横 4m、高さ 1.5m のもので、この水槽の両側面には縦 1300mm × 横 630mm の気泡観察用窓が設けてある。

供試した二流体ノズルは、図 2-1 に示すように、水ノズルと空気ノズルの間にコーン状のスリットを持つ構造のものである。二次側空気は高圧ホースを経て、スリットから空気ノズルに供給されている。

噴流の任意点における動圧は、3次元移動装置に固定された L 型ピトー管（元管 3、全圧口径 1.5、静圧口径 0.5、静圧孔数 3）により測定した。

水中混気水噴流の様相は、40 μ s のストロボ光源とこれに同期した CCD カメラを用いて、ストロボビジョンスコープの画像としてとらえられた。

2.2 実験結果

垂直下向き水中混気水噴流に特有な噴流界面上の強力なせん断力と多量の気泡による浮力とに起因する著しい動圧減衰特性を知る目的で、図 2-2 には水ノズル径 $d_w=6$ mm、空気ノズル径 $d_a=10$ mm、噴流吐出圧力 $P_0=0.59$ MPa の代表的な場合を取り上げ、噴流軸上の動圧 P_x を、水単独噴流の通気なし ($P_g=0$ MPa)、自然通気 ($P_g=0.1$ MPa)、強制通気 ($P_g=0.2\sim 0.3$ MPa) の場合の種々のスタンドオフ距離 λ について対比してみた。以下では、このような曲線を噴流減衰曲線という。ここで、 P_0 はノズル出口（すなわち、空気ノズル出口）の動圧、 λ はノズル出口からの距離である。まず、噴流界面の著しいせん断力による激しい減衰効果により水噴流が急速に減勢されている通気なしの場合のそれに比し、自然通気の場合の動圧減衰曲線が大幅に改善されている事実は注目に値する。明らかに、自然通気によって噴流界面上に多量の気泡が発生し、噴流界面の水層を著しく縮小し、せん断力を大幅に低減しているわけである。例えば、軸上動圧がノズル出口の動圧にほぼ保たれている初期領域の長さ L と水ノズル径 d_w の比 L/d_w について比較すると、通気なしの場

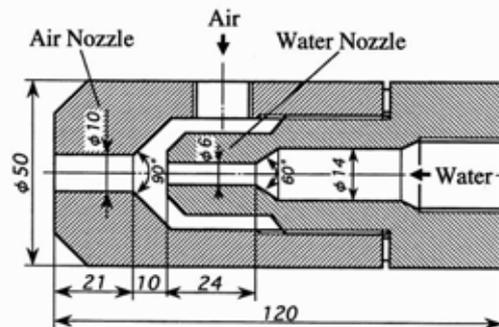


図 2-1 混気二流体ノズル

合の約 2 から自然通気の場合の約 20 に非常に大幅に改善されている。しかしながら、 $0.1 P_m/P_0$ の初期領域近傍に視野を限定すれば、強制通気して、気泡量が増すほど気水中のせん断力ならびに浮力による動圧減勢効果が現れ、比 L/d_w は逆に減少している。すなわち、初期領域の長さを可及的に長くする観点からは、いたずらに通気を強めるのは必ずしも得策ではないと言える。なお、強制通気による水への運動量付加効果は、期待のように、 X/d_w 50 大スタンドオフ距離側に現れ、噴流の到達距離を増大させている。

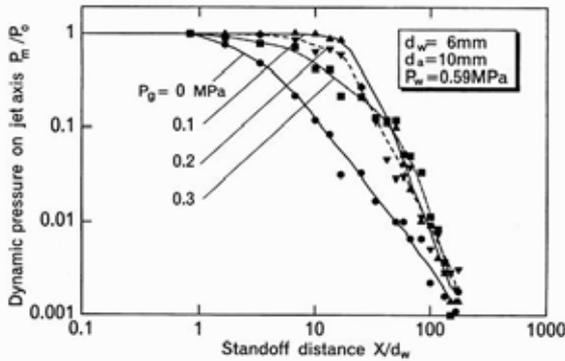


図 2-2 噴流減衰曲線

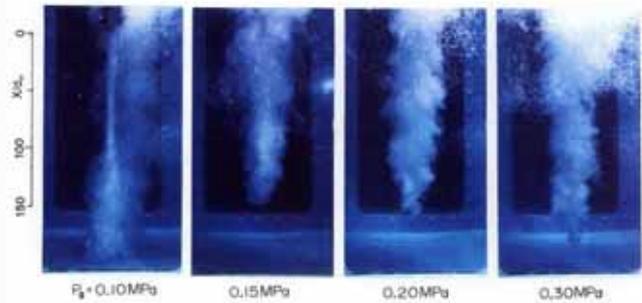


図 2-3 水中混気水噴流の様相 ($P_w=0.59\text{MPa}$)

上記の通気効果をより詳細に明らかにするために、図 2-3 には、種々の通気圧力 P_g における噴流まわりの空気層、気泡群の様相を示す。明らかに、 $P_g=0.1\text{MPa}$ の自然通気の状態と $P_g=0.15\text{MPa}$ の強制通気の状態とは著しく異なっている。すなわち、自然通気の場合には、ノズル出口より X/d_w 15 の初期領域内では、高速噴流のまわりに安定的な空気層が取り囲み、周囲水と噴流とをほぼ隔離したピンチ状態で流動しているので、初期領域内の動圧減衰の著しい軽減が結果されている。この空気層が急激に崩壊した後の X/d_w 20~100 の不安定領域では、高速噴流が直に周囲水に接し、激しいせん断力が作用するために、動圧減衰が急激に増大し、通気なしの動圧減衰率に急速に接近していく。写真では、噴流まわりのせん断層内の渦内に発生した微小キャビテーション気泡群によって、やや細い噴流界面が見て取れる。そして、この下流では、このキャビテーション気泡と通気空気との干渉混合によって爆発的に気泡群が大発生し、乱流拡散領域へと移行し、やがて試験水槽の底面に達し、上方に浮上していく。また、この場合には、動圧減衰が小さいので当然のことながら、気泡群の到達距離が非常に長い。この事実は、このような混気水噴流による曝気を行う観点からは注目に値しよう。

これに対して、強制通気の場合には、例えば $P_g=0.15\text{MPa}$ の場合でも、乱流拡散領域への移行を示す爆発的な気泡群の大発生が既に X/d_w 30 で認められるから、動圧減衰を弱める空気層の発生領域は無視できるほど小になり、主として、噴流水と通気空気の混合流体からなる乱流拡散領域を形成している。 P_g の増加とともに、通気空気の運動量増加に、体積的に膨張している混合流体の運動に周囲流体のエントレインメントも加わり、噴流幅、到達距離、浮上気泡の数が急激に増大している。

2.3 結論

得たる結果を要約すれば次のようになる。

- (1) 試作した混気二流体ノズルにおいては、自然通気近傍の通気によって、主要な掘削特性値である初期領域の長さ L が約 10 倍も長くなり、噴流の掘削特性が通気によって通気なしの従来の高速水中水噴流のそれに比し飛躍的に改善されることが明らかになった。
- (2) 自然通気近傍の通気によって、気泡群の到達距離も著しく長くなる事実は曝気の観点から注目に値する。
- (3) 強制通気の場合には、通気なしの場合よりかなりせん断力が弱い気水流中の乱流拡散領域を形成している。したがって、この場合の掘削特性は、通気なしの場合のそれよりはかなり良いが、自然通気の場合のそれよりかなり悪い。しかし、空気量がかなり多いことから、曝気の観点からは強制通気も捨てがたい。

3. 下向きに噴射された水中混気水噴流の砂土掘削特性

海底クリーニングシステムの開発において、高速水噴流用ノズル内低圧部に通気して、嫌気性

バクテリアを好気性バクテリアに効果的に変える曝気を兼ねた高速水中混気水噴流の効果的利用が考えられた。

この高速水中混気水噴流の汚泥の掘削特性の解明を目途として、汚泥層を細かい海砂の砂土層で近似し、試作した混気二相流体ノズルによる高速水中混気水噴流の砂土掘削特性を、試験水槽内において、種々の通気圧力 P_g 、ノズル傾き角、吐出圧力 P_w 、水ノズル径 d_w 、空気ノズル径 d_a の固定ノズル、速度 V_f で移動する移動ノズルの場合について系統的に解明する。

3.1 実験の装置と方法

噴流砂土掘削試験に供した水槽の縦、横、高さはそれぞれ1.5m、4m、1.5mであり、この水槽の底部には供試砂土（やや細かい海砂、密度2650kg/m³）を十分な深さ1.1mだけ一様に、どの小実験でも一様砂土強度となるように敷き詰めている。この水槽の両側にはレールが敷いてあり、その上をノズル固定装置が取り付けられている台車が走り、ノズルの位置を任意に設定できるようになっている。後述のように、ノズルと砂土の間の相対速度 V_f （以下ノズルの移動速度という）が掘削特性に著しく効くので、台車のワイヤを介して巻取り機で牽引する手法を用いてノズルの移動速度を任意につけられるようにしている。

図3-1には、混気水噴流を吐出する供試二相流体ノズルの形状を示す。内径 d_w の水ノズルと内径 d_a の空気ノズルの間に幅7mmの環状スリットを持つ構造のもので、通気用空気はこの環状スリットから、水噴流のまわりを取り囲む環状空気層を形成し、水噴流界面の強いせん断層をおおむね除去し、噴流の掘削特性を著しく向上するように設計されている。表3-1には、供試ノズルの寸法を示す。供試ノズルは水ノズルおよび空気ノズルがそれぞれ5種類で、自由に組み合わせることが可能である。

周知のように、砂土は一度掘削されるとその強度は著しく低下するので、各小掘削実験の初期土砂強度が十分同一となるように、小実験ごとに水槽底面の砂土を全面的に掘り起こし、均一に良く混ぜ合わせ、踏み固めた後、一様水締めを行っている。

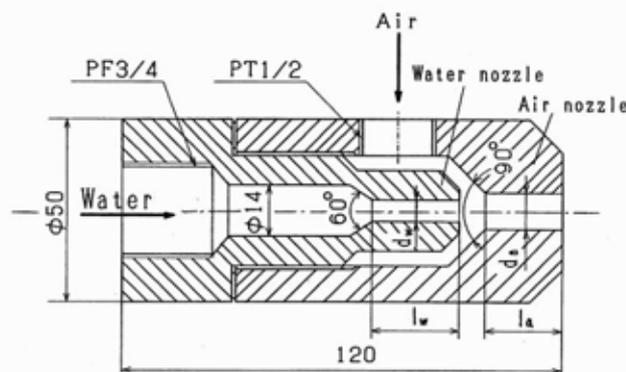


表3-1 供試二相流体ノズルの寸法

Water nozzle			Air nozzle		
No.	dw mm	lw mm	No.	da mm	la mm
1	2	8	1	6	19
2	4	16	2	8	20
3	6	24	3	10	21
4	8	32	4	12	22
5	10	40	5	14	23

図3-1 供試二相流体ノズルの形状

3.2 実験結果

3.2.1 固定ノズル ($V_f=0$ m/s) の場合

図3-2には、ノズルの移動速度 $V_f=0$ m/s、ノズルの高さ $h=0$ mm、ノズル傾き角の場合の種々のノズル（水ノズル径 $d_w=2\sim 10$ mm、空気ノズル径 $d_a=6\sim 14$ mmと5段階に変えている）、種々の吐出圧力 $P_w=0.3\sim 0.6$ MPa、種々の通気圧力 P_g における噴流の運動量 M (N)と掘削深さ l (cm)の関係を示す。

通気なしの水噴流のみの掘削特性の実験式は、岩田¹⁾、伊澤・岩本・浅川²⁾等によって報告されているが、通気の影響および実験式は知見しないので、図3-2から以下のような掘削深さ l (cm)の実験式を求めてみた。

(1) 通気なしの $P_g=0$ MPaの場合： $l = 8.8(M - 0.2)^{0.54}$

(2) 強制通気 ($P_g=0.1\sim 0.3$ MPa) の場合： $l = a(M + b)^{0.37}$

ここで、 M は噴流の運動量(N)、常数 a は通気圧力 P_g (MPa)により定まる(表3-2参照)。常数 $b = 3.35 \log_{10} P_g + 3.6$ 。

明らかに、掘削深さ l は水ノズル径 d_w 、空気ノズル径 d_a および吐出圧力 P_w にはほとんど依らず、運動量 M と通気圧力 P_g のみに依るといふ注目すべき事実が見て取れる。また、予想通り図3-2から、掘削深さ l は運動量 M および通気圧力 P_g の増大とともに増大する傾向も見て取れる。

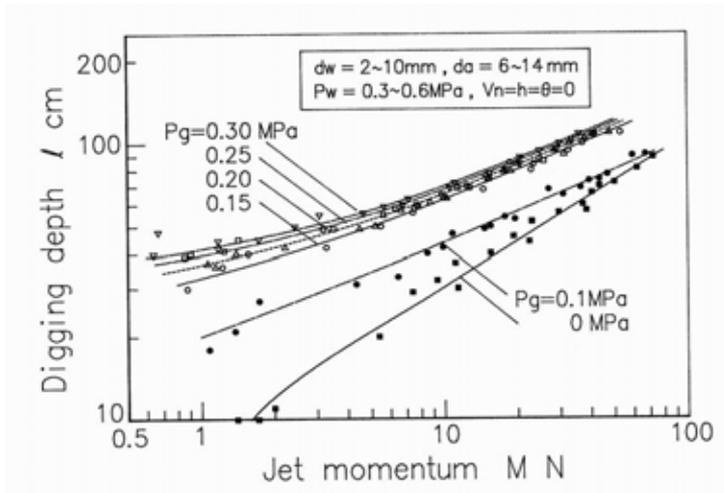


図 3-2 掘削深さ l の通気圧力 P_g 依存性

表 3-2 実験式の定数 a

P_g (MPa)	a
0.10	18.5
0.15	26.0
0.20	26.8
0.25	27.5
0.30	28.0

3.2.2 移動ノズルの場合

図 3-3 には、ノズル移動速度 $V_n=0.5\text{m/s}$ の $h=0$ の場合を例に取り、最適強制通気 ($P_g=0.15\text{MPa}$) と通気なし ($P_g=0\text{MPa}$) の場合における掘削深さ l と水動力 L_w の関係を対比してみた。図中には種々の水ノズル径 d_w 、空気ノズル径 d_a のデータも記入してある。明らかに、最適強制通気の場合の掘削深さが通気なしの場合のそれより 1.5~1.8 倍も大きいので、移動ノズルの場合には、通気による掘削特性改善効果が著しく大になると言える。したがって、移動混気水噴流を使用すれば、十

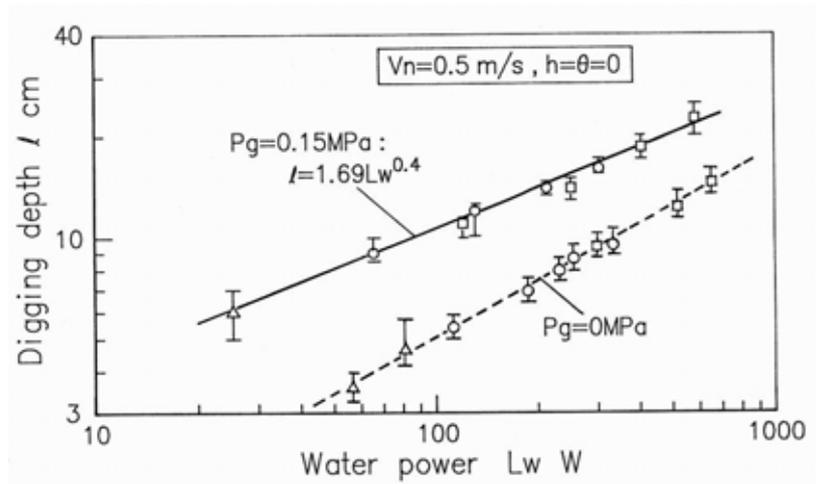


図 3-3 移動ノズルによる掘削深さ l への通気の影響
 d_w-d_a : 4- 8(), 6- 10(), 8- 12()

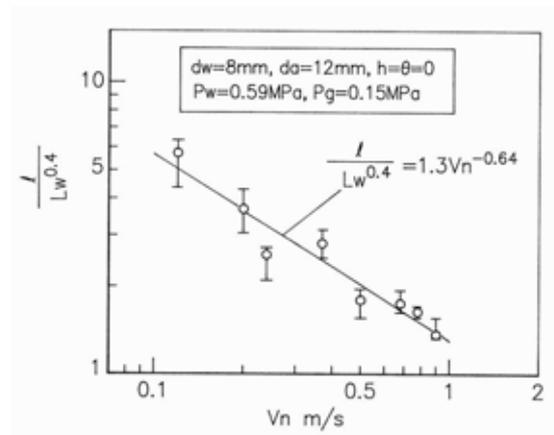


図 3-4 掘削深さ l のノズル移動速度 V_n による著しい変化

分な小掘削エネルギー - 化が達成される。

次に、最小自乗法により実験式を求めてみると、最適通気圧力 $P_g=0.15\text{MPa}$ の場合には、 $l=1.69L_w^{0.4}$ となる。

図 3-4 には、ノズル移動速度 V_n の効果をより明らかにするために、水ノズル径 $d_w=8\text{mm}$ 、空気ノズル径 $d_a=12\text{mm}$ 、 $h=0$ 、吐出圧力 $P_w=0.59\text{MPa}$ 、最適通気圧力 $P_g=0.15\text{MPa}$ の場合について、掘削深さ l と移動速度 V_n の関係を示す。図 3-4 から実験式を求めると、 $l=1.3V_n^{-0.64}L_w^{0.4}$ になる。

3.3 結論

得たる結果をまとめると次のようになる。

- (1) 前章で示した自由水中混気水噴流特性からも期待されたように、掘削特性に対する通気の効果は絶大である。固定ノズルの零傾き角の実験から、掘削深さ l は噴流の運動量 M と通気圧力のみにより、水ノズル径 d_w 、空気ノズル径 d_a 、すなわちノズル形状には依らないことが分かった。また、 l の実験式も求めた。
- (2) 掘削特性に対する移動速度 V_n の影響も顕著である。すなわち、掘削深さ l は $V_n^{-0.64}$ の形で著しく変化する。

4. 開発した海底クリーニングシステムの概要

図 4-1 には、システムの構成を示す。このシステムは、大別して汚泥回収装置、汚泥分離装置、沈殿槽および気水供給部からなる。特に、図 4-2 に示すように汚泥回収装置は混気水ノズル、フード、揚泥ホース、フードを支持する枠体、フロート、およびスキー形底板を有して構成されている(図 4-3 の外観写真も参照)。この装置は、水と空気だけを混ぜた噴流を移動させながら海底から有害な有機物や汚泥、火山灰などのみを巻き上げて取り除く方式である。更に、海底面で閉鎖的に処理することにより周りを濁らせず、水環境を悪化させないという特徴を持つ装置である。また、この装置は漁業者が自らの漁場や養殖場の環境を改善するために、通常の漁船で曳航できる程度の小型で操作が簡単な装置である。曝気を兼ねた混気水噴流によって海底が耕耘されるので、汚泥除去後の砂層や残留汚泥層中の生物膜の生成が助長され、その結果汚泥層中の有機物が微生物によって効果的に分解・処理されることが期待できる。

図 4-4 には、扇形混気水噴流を吐出する PVC 製混気水ノズルの構成を示す。内径 6mm の水ノズルと内径 10mm の空気ノズルの間に幅 6mm の環状スリットを持つ構造で、ノズル噴射口に出口幅 2.5mm のノズルキャップを取り付けることによって扇形混気水噴流が形成される。

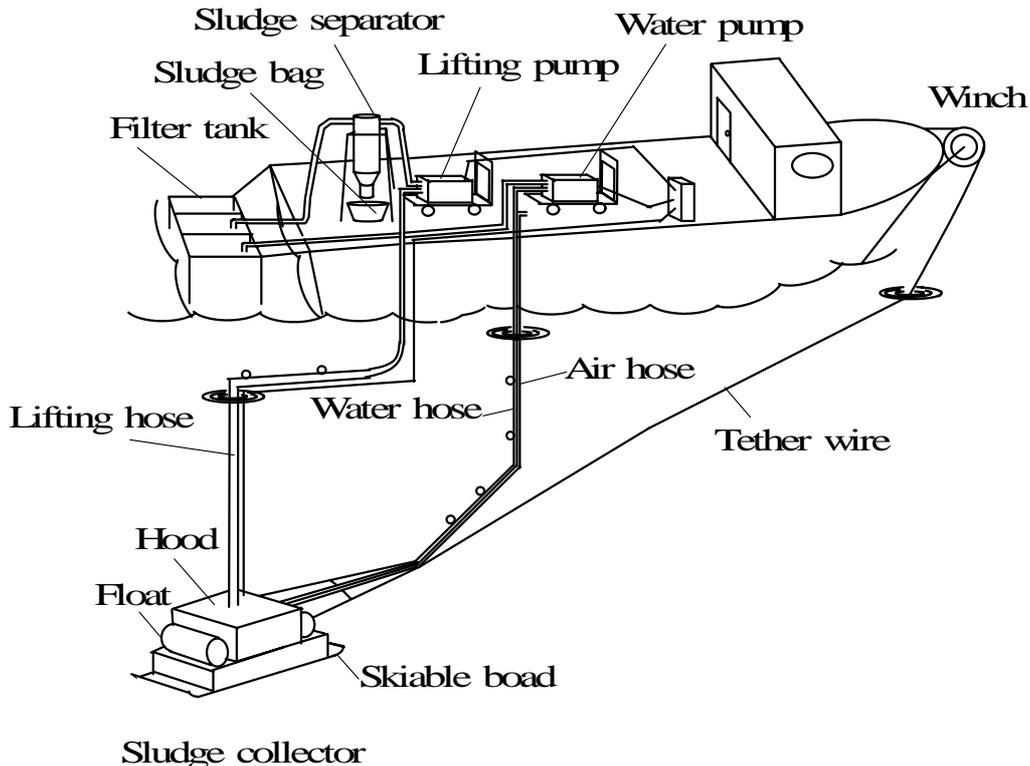


図 4-1 海底クリーニングシステムの概念図

図 4-5 には汚泥分離装置の外観写真を示す。汚泥分離装置には“ラバルセパレータ”（米国ラバル社製、KXL-0150 型）を採用した。揚収された有機汚泥をサイクロンセパレータで遠心分離し、汚泥と余水に分離する。

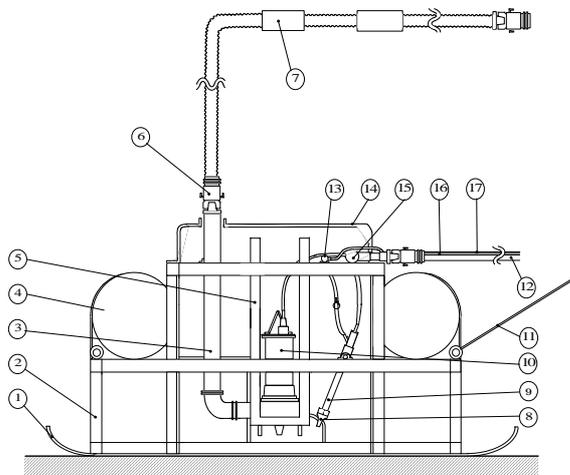


図 4-2 汚泥回収装置

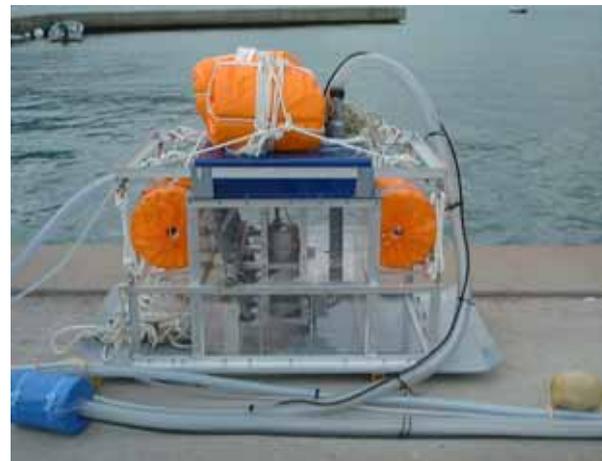


図 4-3 汚泥回収装置の外観写真

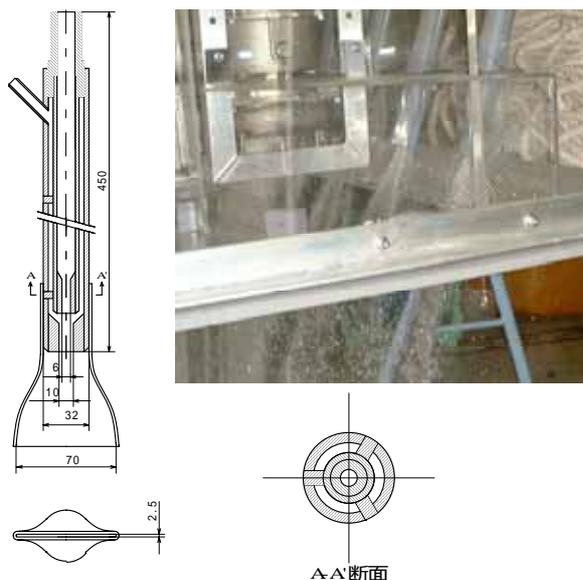


図 4-4 扇形混気水ノズル



図 4-5 汚泥分離装置の外観写真

5．実海域における性能試験

実際の海域においてシステムの機能を確認するために、噴射試験、走行試験および曳航中の揚泥試験を行った。併せて、汚泥分離装置の分離試験も実施した。試験海域は水産大学校前の岸壁近くの海底で、水深は実験中 4~5m であった。

5．1 実験の装置と方法

図 5-1 には実験装置の系統図を示す。空気と海水は、汚泥回収装置に取り付けてある扇形混気水ノズル（前段 5 本）へそれぞれ噴流用高圧ポンプと自然通気で送られる。そして、海底の汚泥が扇形混気水ノズルによって掘削・流動化される。流動化された汚泥水は揚泥用ポンプを用いて揚泥ホース（内径 50mm、長さ 40m の屈曲性透明ホース）を通り揚泥される。揚泥ホース内には多量の汚泥が含まれるため、海底から揚泥後汚泥分離装置へは供給補助ポンプを新たに追加した。

汚泥分離装置によって分離される汚泥と汚水については、まず前者は汚泥分離装置の下部より排出・回収される。後者はろ過タンク内のサンドポンプを介して噴流用高圧ポンプに送られる。噴流用高圧ポンプで加圧された汚水は混気水ノズルへ供給され、混気水噴流として再利用（再循環）されるので周りの海域を汚さないという特徴を持つシステムである。図 5-2 には、実験中の揚泥ホースの様子を示す。

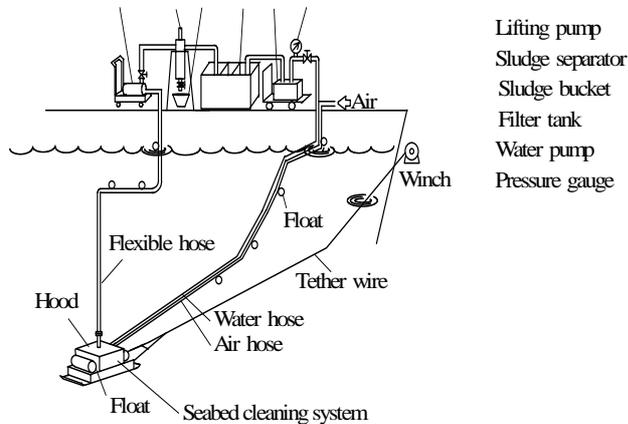


図 5-1 実験装置の概略



図 5-2 実験中の揚泥ホースの様子

5.2 実験結果と考察

5.2.1 海水中での噴射試験

図 5-3 には、海水中における噴射試験を示す。試験条件は海水中 1m 水深、ノズル差圧 0.15MPa、自然通気状態である。予想されるように、写真から 5 本の扇形混気水噴流が海水中に噴出し、吸引された空気でも可視化されている。結果を見る限り、ほぼ良好な噴射状態であると言える。

5.2.2 汚泥回収装置の走行安定性

汚泥回収装置の走行状態は曳航速度 0.1~0.3m/s の範囲で調べられた。その結果、ノズル差圧が 0.1MPa では 0.1~0.15m/s 程度が汚泥回収装置の走行状態としては安定していた。しかしながら、走行速度が 0.2m/s を超えると不安定になる兆しが現れた。一方、ノズル差圧が 0.2MPa と高圧になると、噴流による推力増大だけでなく空気による浮力が汚泥分離装置に作用するため不安定になり、流動化された汚泥水が外部に漏れ出た。この問題は汚泥回収装置に前後各 10kg の錘を取り付けることによって解決された。そこで、汚泥回収装置が安定に走行出来る曳航速度は 0.15m/s 以下と判断された。なお、曳航速度は掘削深さにも影響する。速度が速くなると掘削深さは浅くなり、一方遅くなると深くなる。



図 5-3 汚泥回収装置内の混気水噴流の様相（底部前面より撮影）



図 5-4 曳航試験後の海底の状態

5.2.3 曳航中におけるシステムの揚泥性能

試験条件はノズル差圧 0.1MPa、曳航速度 0.1~0.15m/s程度、自然通気状態である。図 5-4 には、曳航試験後の海底の様子を示す。潜水調査結果によると、曳航スタート時には 5~10cm 位掘削されているが、曳航状態では幅 0.7m、掘削深さは 1~2cm の表層が揚泥されていた。しかし、底泥が軟らかい場所では 2~3cm 位掘削されていた。なお、曳航状態で汚泥を除去・回収中には周囲へ汚泥が拡散しないことを確認した。しかしながら、噴射量が揚泥水量を超えると汚泥回収装置内に噴射量が滞留するので汚泥回収装置が浮き上がり、周囲へ汚泥が拡散した。従って、噴射量と汚泥を含む揚泥水量のバランスが大事であることが分かった。これは、噴流用高圧ポンプ吐出弁と汚泥分離装置への供給補助ポンプ吐出弁の開度を調節することで解決された。今回の試験結果から、稼働時間当たりの処理面積を試算すると、200m²/hr 程度となる。揚泥量を試算すると、2~4m³/hr と見積られる。しかし、実際は試算の半分ぐらいの性能であろう。以上のように、試験条件は不十分であったが、実用面における性能、改良点等が把握できた。しかし、海底泥の硬軟等の状態、曳航速度、ノズル差圧等は掘削深さに影響するので、揚泥性能も変わる。今後更に詳細な試験を重ねる必要がある。

5.2.4 汚泥分離装置の性能

曳航中に揚泥した汚泥水を汚泥分離装置で分離できるかどうかを試験した。試験の結果、比重の重たい砂、泥等は十分分離可能であるが、浮泥のように比較的軽いものは分離できなかった。この汚泥分離装置の性能は、カタログによると 74 μm の場合回収率が 98% とされているが、今回の試験ではこの性能までは達していない。汚泥分離後の浮泥水はポンプを介して再循環されるので、ろ過タンク内にはフィルター等を介して更にろ過する必要があることも分かった。

5.3 結論

今回の調査では、不十分ではあるが実際の海域におけるシステムの試運転から、海底の表層汚泥に対するこのシステムの回収能力、汚泥回収装置の走行安定性および汚泥分離装置の分離効果が認められた。

6. 調査のまとめ

海底クリーニングシステムの開発において、高速水噴流用ノズル内低圧部に通気して、嫌気性バクテリアを好気性バクテリアに効果的に変える曝気を兼ねた高速水中混気水噴流の効果的利用が考えられた。この水中混気水噴流による、曝気しつつ海中汚泥層を除去・回収する技術の確立を目途として調査した結果、自由水中混気水噴流特性からも期待されたように、掘削特性に対する通気の効果は絶大であること、ノズルの移動速度の影響も顕著であること等が明らかになった。

3 カ年の本調査では、第一の目的として海底クリーニングシステムを完成させることであった。幸いにも完成にこぎ着け、海で試運転することもでき、所定の性能、システムの改良点等を把握できた。今後の課題としては、種々の対象海域で本システムの総合試験や海域環境などの海域実験を実施し、ソフトウェアを含め総合的に検討を行う必要がある。

引用文献

- 1) 岩田, 水中施工における水力掘削の利用と研究, 作業船, 80(1972), 105-112.
- 2) 伊澤・岩本・浅川, 海底ケ - ブル埋設用ウォ - タジェット掘削特性, 国際通信の研究, 112(1982), 291-29