

底泥内での間隙水の動きと浮泥層の形成機構

日比野忠史*・村上和男**・松本英雄***

広島湾奥の海底付近に分布する浮泥層を含めた底質の性状変化と浮泥層の形成機構について明らかにする。このため、底質の変動に大きく影響されると考えられる海底流速、間隙水内の水温分布と濁度の関係等から底泥に流入する海水量を定量評価した。呉湾沖南奥での観測結果において濁度の上昇時に海底面における限界せん断応力は観測されておらず、水平流れによる巻き上がりは起こっていないこと、成層期には、底泥への海水の流出入量が大きく、海水の底泥への流入が卓越し、底泥の含水比を増加させていること、成層消滅後には、海水の流入よりも間隙水の流出によって底泥の圧密が起こっていることが明らかにされた。

1. はじめに

広島湾奥域は、特有の入り組んだ地形により、安芸灘（瀬戸内海）との海水交換が弱い閉鎖性の強い海域である。このような流動場において、湾奥部の海底表層付近には、含水比が高く非常に緩い堆積状態の有機泥層が形成されている。近年では、浅場や土砂供給量の減少および生活雑排水の流入（富栄養化）が多く、有機泥は過剰の状態でも河口域にヘドロとして堆積している場合が多い。沖合の海底に浮泥が過度に堆積すると、底生生物の棲息を阻害するのみではなく、海水域の水質悪化の原因になる。実際、底層水の酸素消費量は、浮泥の舞い上がり量に比例して増加することが明らかとなっており、海底付近に浮遊する有機泥（以後、浮泥と呼ぶ、本研究での浮泥の定義は広島技調の浮泥調査（2002）による）は、海底での貧酸素化の主な原因であると同時に栄養塩のキャリアーとなっている。本研究の目的は、広島湾奥の海底付近に分布する浮泥層を含めた底質の性状変化の機構について明らかにすることである。3ヶ年にわたる底質・水質調査から季節変動特性を明らかにし、底質の変動に大きく影響されると考えられる間隙水の流動、海底流速と濁度の関係等から底泥の挙動について考察した。

2. 底泥の季節変動特性

（1）季節変動特性調査の概要

2002年に行なわれた広島湾内の浮泥調査において浮泥の堆積量が多かった広島湾奥部（呉湾沖南奥 St.8）を中心に採泥調査を実施した。採泥は、船上より大口経パイプ（内径110 mm・長さ500 mmの亚克力製円筒）を用いた簡易不攪乱柱状採泥器を投入して行われた。パイプ内で採取された底層水をサイフォンによって採取した後、別々に採取された4本の柱状泥を実験室において層厚2 cm 毎

に分割した。それらを混同した底質（0-8 cm の4層、10-12 cm、20-22 cm の計6層）について分析が行われた。

（2）底泥の湿潤状態の季節変動

図-1 には、2001年10月～2003年11月に12回行われた底泥の分析結果の一例（(a) 含水比、(b) T-N）が示されている。図では分析を行った6層の中心での深さを各層の代表値として表している。含水比は、上層で370～630%、下層で200～330%程度の変動があり、5月～7月に低く、9月～11月に高くなる傾向にある。浮泥・堆積泥の季節変動から、底泥の数10 cm にわたり湿潤状態が変化し、栄養塩等が湿潤状態と類似の変動が起こっていることがわかる。堆積泥の数10 cm にわたり湿潤状態が変動するためには、新しい浮遊泥の堆積、あるいは、浮泥層の高濃度化（海水が堆積泥中へ流入し、高含水化した状態）が必要になる。夏季から秋季には20 cm 下層においても水分の供給がある。この時期には、有機泥等が海底に沈降し浮泥層が形成されており、海水の流入・浸透が加わることで底泥の膨張（含水比の増大）が起こるものと考えられる。浮泥は海底に有機泥（動植物プランクトンの枯死や細胞分泌物、排泄物等が土粒子と結合したもの）が浮遊・堆積することによって形成されている。海底付近で浮遊状態にある有機泥は、酸化分解や栄養塩の溶出等が促進され易い状態にある。海水の底泥への流入がなければ、徐々に土粒子としての物理挙動（圧密）が卓越して堆積泥となっていくと考えられる。

3. 高濃度浮泥層の流動特性

本章では海底に500%以上の含水比で存在する浮泥層（高濃度浮泥層）の形成と挙動について検討する。

（1）底泥内での間隙水の動きと浮泥の挙動

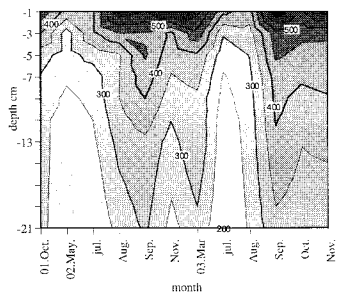
a) 浮泥の堆積機構調査の概要

呉湾沖南奥（水深約22 m）において2003年8月19日から62日間の連続観測が行われた。海水と間隙水の交換の存在を把握するため、底泥内での水温・圧力および海底面上での流速・濁度・水温・DOの測定、セグメント

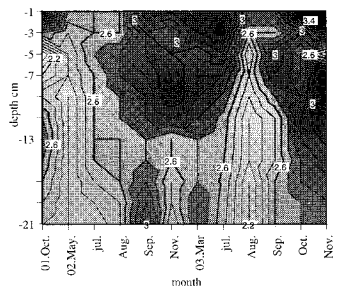
* 正会員 工博 広島大学助教授大学院工学研究科

** 正会員 工博 武蔵工業大学工学部都市基盤工学科

*** 正会員 工修 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所所長



(a) 含水比 (%)



(b) T-N (mg/g)

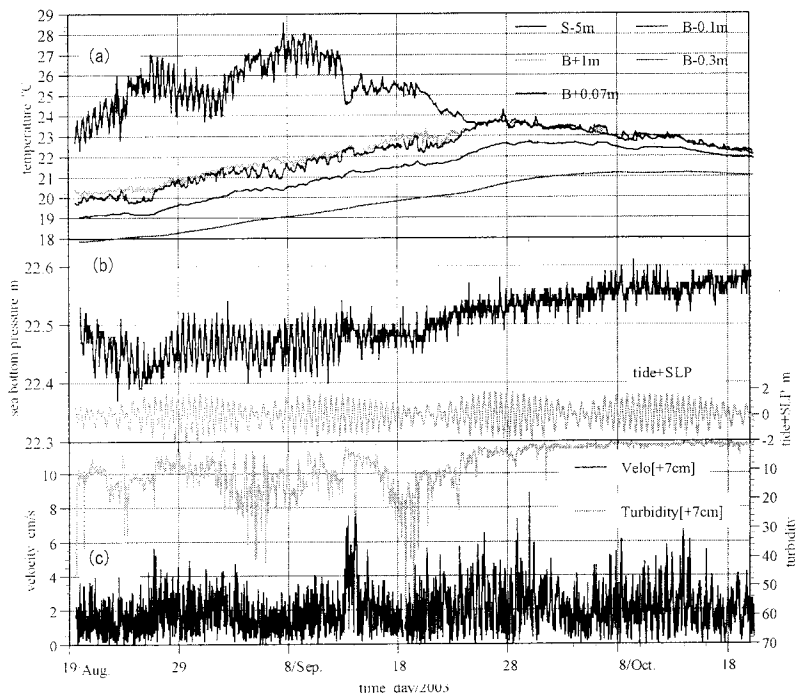
図-1 底泥水分特性の分析結果
(2001年10月～2003年11月)

図-2 (a)海中～泥水温, (b)海水柱の水頭と潮位, (c)海底流速と濁度の経時変化

トラップによる沈降泥および浮遊泥の捕獲（約15日毎×4回）を行った。水温は、海面下5m, 海底面上1m, 50cm, 7cm, 海底面（0cm）と底泥内の泥深-10cm, -20cm, -30cm, 濁度は海底面と底面上50cm, 流速は海底面上7cm, 50cmで測定された。セジメントトラップは、表層（海面下5m）と底層（海底面+1m, +0.5m; +0.5mでは横流入のみをトラップするため、かさ付き）および埋没型沈降物サンプラー（1m間隔の格子に計9個; 3×3埋設）が海底に設置された。

b) 底面流速と濁度

図-2に表層, 下層, 底泥内の水温および海底での水圧, 流速, 濁度の経時変化を示した。図の上段から, (a)海中（海面-5m, 底+1m）, 海底（底+7cm）, 泥中（底-10cm）での水温, (b)潮位・気圧分を除いた海底面上にある水塊の圧力水頭, (c)底層流速（海底上7cm）と底層濁度（海底上7cm）の関係が示されている。

一般的に、巻き上げは海底面上の流れによって海底面に堆積した濁質が海中に放出されることで起こると言われているが、図-2(c)では海底面流れと濁度との対応が悪く、海底面流れが濁度の上昇を直接起こしていないことがわかる。濁度の上昇は海底面上水温（+7cm）の低下（図(a)中の+1mの水温と比較）とともに起こっていることから、泥中から低温の間隙水が海水中に流出する時に濁質が流れとともに海水中に放出されることで起こると考えられる（田多ら, 2003）。温度躍層が消滅

した後は、濁度は上昇しておらず、底層水温は低下して（図-2(a)）、泥温と海底の水温差が小さくなっていることから泥中に熱が輸送されていることがわかる。さらに、9月30日頃までは、泥内10cmと30cmの水温差は大きくなっているが、濁度の減少とともに水温差は小さくなっている。水温差が大きくなるためには泥内10cmに海水の流入が、水温差が小さくなるためには海水の流入が制限されなくてはならない。

c) 温度躍層と高濁度層の消滅

底層での高濁度状態は、水温プロファイルが一様化する（表層と海底水温が同じになる）、時期に解消されており、温度躍層の消滅との関連が考えられる。図-2(b)に示した海水の重さには、成層期と非成層期で約15cmの水頭差が生じており、成層期には、非成層期に比較して軽い水塊が底泥の上に存在していることがわかる。

底泥の巻き上がりは小潮期に起こっている。地下水の流出を考えると大潮干潮期に陸域地下水位（現時点では海底面でのつり合いの対象地点は明らかではない）との水頭差が最大となるが、この時に濁度の上昇は観測されていない。さらに、濁度の上昇と日周潮との関連はないことから、底泥の巻き上がりが小潮期に起こるのは、水位の上昇量（満潮位）が小さいことが一因として考えられる。これは地下浸透の起こる時間スケールが半日周潮の時間スケールよりも長いことが考えられるが、間隙水の流動の起因については、今後の検討が必要である。

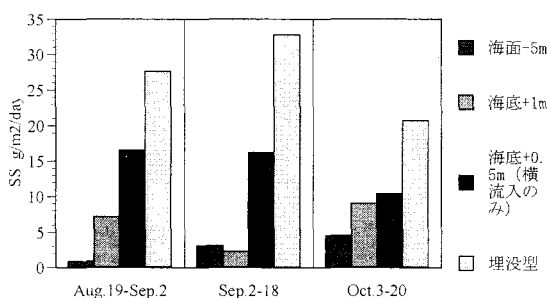


図-3 各層のセジメント(SS)トラップ量の経時変化
(8月19日～10月20日, 9月19日～10月3日は欠測)

d) 海底での底泥の挙動状況

図-3には各層のセジメント(SS)の捕捉量の経時変化(2003年8月19日～10月20日, ただし9月19日～10月3日は欠測)が示されている。捕捉されたSSは海底に近づくほど多くなっており, 底層に高濁度層が存在していること, 底層濁度の小さい10月3日～10月20日になると, 底層, 海底でトラップ量が小さくなっていることがわかる。さらに海底に設置した埋没型沈降物サンプラーには, 2003年8～9月に平均で4.5 cm, 9～10月に平均で1.8 cmの浮遊泥が堆積していた(多田ら, 2003)が, セジメントトラップの捕捉状態からは表層で生成された有機泥の沈降のみによって5 cmを超える浮泥の堆積は起こらないことがわかる。底層濁度とともにSSトラップ量が減少することから, 底層に形成される高濁度層が浮泥の輸送と強い関連があることが理解される。

2004年9月に採取された底泥の ^{210}Pb 法による年代分析から, 平均堆積速度が0.91 cm/yearと算出された。8月～10月の2ヶ月間に堆積した浮遊泥の厚さ(観測期間の平均約3 cm/month)は, 平均堆積速度の30倍程度の値を示している。非成層期に高濁度層が形成されていないことから, 主に成層期に堆積が起きているとすれば, 年間10 cm程度の堆積があると考えられる。また, 含水比が600～700%の高濃度浮泥層が200～300%程度にまで圧密されると厚さは1/2～1/3程度になることから, 埋没型沈降物サンプラーから得られた堆積速度は, ^{210}Pb 法による平均堆積速度の数倍の値となっている。サンプラーに沈降した浮泥は再浮上しないことから, サンプラーに沈降した浮泥量が ^{210}Pb 法によって求められた堆積速度の数倍の値をとったものと考えられる。これらのことは, 高濁度層が存在する成層期には, 海底付近で浮泥が活発に動いていることを示している。

(2) 高濃度浮泥層の巻き上げ実験

a) 実験の概要

巻き上げ実験は図-4に示す造波水路を用いて行われた。実海域での状態を再現するために, 実験では海底埋

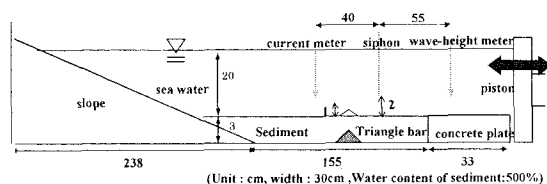


図-4 巻き上げ実験に用いた造波水路(単位: cm, 水路幅30 cm)

表-1 巻き上げ実験条件

	最大流速 (cm/s)	底面せん断応力 (Pa)	周期 (s)
F1	2.6～3.0	0.01～0.02	7.4～8.5
F2	4.6～5.0	0.02～0.03	3.8～4.1
F3	6.0～7.0	0.04～0.05	2.5～2.6
F4	8.2	0.07	1.9
F5	11.2	0.15	0.5

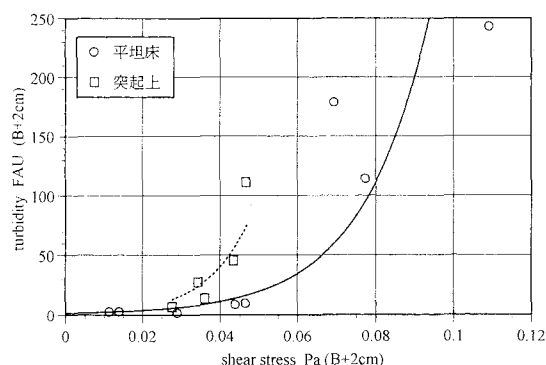


図-5 底面せん断力と巻き上がり量の関係

没型沈降物サンプラーによって回収された沈降泥と海水が用いられた。回収泥は海水と混合(1:2)した状態で水路に流入され, 水路内で沈降させた後, 水深が20 cmになるまで海水を増入した。この結果, 水路内に沈降した浮泥の含水比は約500%で平坦な堆積状態が形成され, 実海域に近い堆積状態を作ることができた。堆積泥の表面は平坦形状と, 浮泥を堆積水路上に三角凸起を配置して作成した約1 cmの起伏を持つ水底形状の2ケースを行った。

巻き上げを起こすための流れは, 波によって生じさせた。実海域での海底流速(図-2(c))が数 cm/s であることから, 表-2に示す波条件で実験は行われた。巻き上げの状態は濁度によって表している。濁度は堆積泥上の2 cmの点でサイフォンによって採水された海水の光減量から測定された。また流速は採水地点と同様の海底上2 cmの点で電磁流速計によって測定された。

b) 巻き上げに必要な水平流速

図-5には, 表-2に示した実験条件で実施した巻き上げ実験の結果が示されている。海底形状が平坦な場合には,

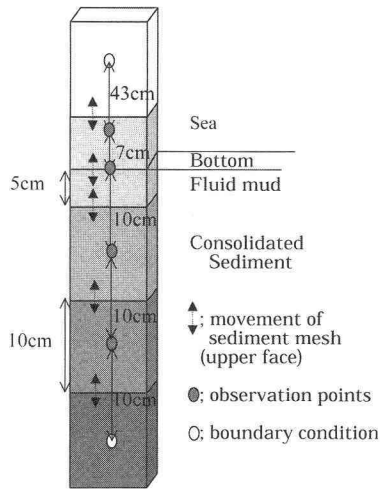


図-6 間隙水流動モデル (初期メッシュ)

表-2 底泥の物性 (初期条件)

	海水	0-5 cm	5-15 cm	15-25 cm
ρ_d	—	0.245	0.328	0.345
ω	—	3.76	2.73	2.57
C	4.00	3.83	3.79	3.77
k	0.0873	0.0783	0.0791	0.0795

底面流速が6.0 cm/s (底面せん断応力; 0.04Pa, 突起がある場合には5.0 cm/s, 0.03 Pa) を超えると底面から浮泥の巻き上がりが確認された。さらに, 8.2 cm/s の底面流速 (0.07 Pa) を超えると表面がはがされ, これによって巻き上げ量が増大した。中川 (2001) の東京湾の観測においては, 0.08 Pa 程度のせん断力で巻き上がりが生じており, 高濃度浮泥層においても, 0.1Pa 程度の流速が浮泥の巻き上がりが必要であることが理解される。図-2(c) に示された呉湾奥での観測結果において濁度の上昇時に 8 cm/s を越える流速は観測されておらず, 水平流速による巻き上がりは起こっていないことが示唆される。

4. 間隙水・海水の海中・堆積泥への流出入と濁度

(1) 間隙水浸透量の推定法

a) 間隙水流動モデルの考え方

間隙水の流動量は鉛直一次元の移流・拡散方程式に実測された温度を用いることで推定された。すなわち, 水温の変動は鉛直方向の熱伝導と水塊移流によるとし, 実測値から熱伝導分を引いた熱量分が移流量として求められた。図-6 にモデルの概念図が示されている。用いた水温は海底面を基準に +50 cm, +7 cm, 0 cm, -10 cm, -20 cm, -30 cm で10分間隔で測定されたものである。図に示されたメッシュの高さは初期の値である。

間隙水 (海水) の移流量に応じて, メッシュ高さを変化されることで底泥層の膨張・収縮を表した。海底面上50 cm と泥中-30 cm の水温は境界条件として用いている。このため, 泥中境界メッシュ (最深層) に上層から流入する移流量は, 上層の値で外挿することによって求めている。以下にモデルの考え方について示す。

- ① 間隙水の流動は鉛直方向に卓越する。
- ② メッシュの伸張・収縮は間隙水の流出量によって決まり, 計算メッシュ間の土粒子の移動は無い。
- ③ 海底面で測定された水温は, 流入時には海水, 流出時には浮泥層の水温を代表している。
- ④ 観測された温度は間隙水移動に伴うメッシュ高さの変化に関わらず, 初期メッシュ内の水温を代表する。

b) 堆積泥の物性 (伝熱特性)

堆積泥または, 海水の熱拡散係数は次式による。

$$k = \frac{\lambda}{C}$$

$$C = \rho_d \cdot (C_s + C_w \cdot \omega)$$

ここに, k : 熱拡散係数 [cm^2/s], λ : 熱伝導率 [W/cm^2], C : 体積比熱 [$\text{J}/\text{cm}^3\text{C}$], ρ_d : 土粒子の乾燥密度 [g/cm^3], C_s : 土の質量比熱 [$0.84\text{J}/\text{gC}$], C_w : 海水の質量比熱 [$3.93\text{J}/\text{gC}$], ω : 含水比 [g/g] である。

本計算で初期条件として用いた2003年8月19日の観測値が表-3 に示されている。

(2) 海水 (間隙水) の流出入に伴う底泥含水比の変動と底泥の巻き上がり

図-7 には, 計算で求められた浮泥層 (0 ~ 5 cm) と堆積泥層 (-5 ~ -15 cm と -15 ~ -25 cm) の含水比と柱状採泥された底泥 (浮泥層, 堆積泥層) の含水比 (9月18日と10月18日観測) が比較されている。計算された含水比は実測値をよく表わしており, 推定量の妥当性が示唆される。ただし, 下層堆積層への間隙水の流入が過少評価されており, 堆積層では水平方向からの流れが鉛直方向の流れと同オーダーで存在することも考えられる。

図-8 は(a)海底面を流出入する海水 (間隙水) の流量 (計算値) および(b)海底上7 cm での濁度 (観測値) の経時変化が示されている。濁度変化は海底面を通過する海水の流出入量とよい対応をしており, 海水の流出入が海底の高濁質層の形成に大きく寄与していることがわかる。また成層期には, 海水の流出入量が大きく, 海水の底泥への流入が卓越し, 浮泥層の含水比を増加させている (図-7) ことがわかる。一方, 成層消滅後には, 海底面での海水の流出入が少ないことによって海底からの濁質の供給が少ないことが推定でき, この期間には海水の流入よりも間隙水の流出によって底泥の圧密が起こって

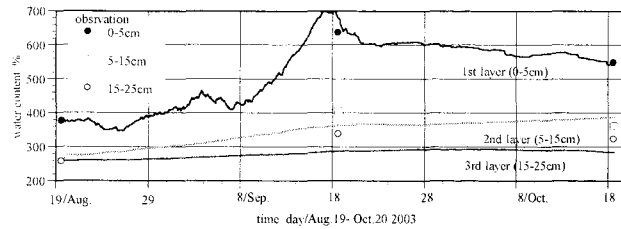


図-7 浮泥層と堆積泥層の含水比（計算値と実測地の比較）の経時変化

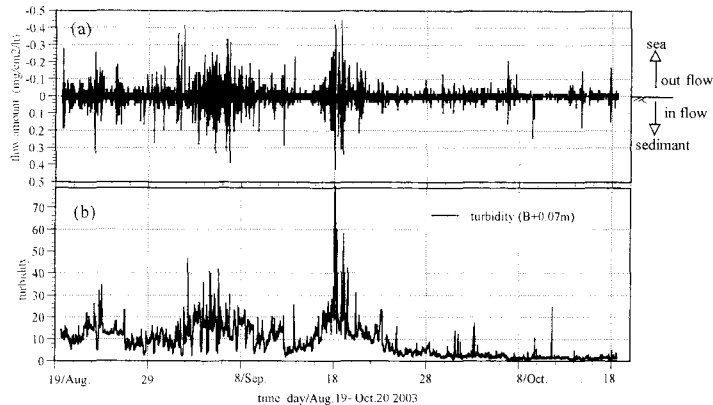


図-8 (a)海底面を通過する海水の流出入量（計算値）および(b)海底濁度（実測値）の経時変化

いることが理解できる。

4. おわりに

浮泥層厚は海面表層からのデトリタス等の沈降、海底での浮泥の水平移流（高濁質層の移流・沈降）、堆積泥の再浮泥化（海水の底泥への流出入・浸透）によって決定されることが示された。呉湾沖南奥では夏期に海底には浮遊泥が高濁質層を形成していること、高濃度浮泥層（含水比500%超）の形成は、海水の底泥への流入と底泥中からの間隙水の流出と強い関係があることを明らかにした。以上の結論に至った現象について以下にまとめる。

- 1) 土の湿潤密度等の土質的性状から、堆積泥は夏季に非常に緩い堆積状態に変わる。特に、含水比は、20 cm を越える泥深においても、季節的に200～300%程度の変化をしており、少なくとも間隙水が底泥内で鉛直方向に流動している。
- 2) 底質の巻き上げは海底流速が8.0 cm/s（底面せん断力；0.7 Pa）以下では起こらないことが実験により確かめられた。実測された海底流速は数 cm/s のオーダーであり、濁度と流速との相関はなかった。すなわち、呉湾沖南奥海底では直上流れが濁質の上昇を直接起こしておらず、濁度の上昇は、泥中から間隙水が海

中に流出する時に濁質が海中に放出されることによって起こることが推定された。

- 3) 実測された水温分布から、泥内を流動する間隙水量を定量化することができた。この結果から計算された含水比は実測値をよく表している。
- 4) 高濃度浮泥層は、成層期に底泥内での間隙水の流動が活発になり、海水の底泥内への流入が卓越することによって堆積泥層が膨張（含水比の増大）して形成されることを示すことができた。高濃度浮泥層が形成されると、間隙水の流出にともない濁質が底層に浮遊し、底層に高濁質層を形成されると推定できる。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（基盤研究(B)）の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- 中川康之(2001)：内湾域における泥質物の堆積と波浪による底面せん断力との関係，港湾技術研究報告，第40巻，第3号，pp. 3-16.
- 田多一史・日比野忠史・松本英雄・村上和男(2004)：間隙水の流動に伴う底質の性状変化，海岸工学論文集，第51巻(2)，pp. 991-995.
- 広島港湾空港技術調査事務所(2002)：浮泥汚濁検討調査報告書。