

間隙水の流動に伴う底質の性状変化

田 多 一 史*・日比野忠史**・松 本 英 雄***・村 上 和 男****

広島湾奥の海底付近に存在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検討した。まず、3 年間にわたって行ってきた浮泥調査をもとに浮泥の一般的な特性について示した。そして、浮泥層厚は海面表層からのデトリタス等の沈降、海底での水平移流（高濁度層の移流・沈降）、堆積泥の再浮泥化（海水の底泥への流入・浸透）によって形成されることがわかった。特に、夏期に海底に存在する浮泥は主に高濁質の移流によって形成されていること、呉湾沖での高濁質層の形成は底泥中からの間隙水の流出と深い関係にあることが明らかにされた。

1. はじめに

広島湾は、特有の入り組んだ地形により、瀬戸内海との海水交換が弱い閉鎖性の強い海域である。この様な海域環境において、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浮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、有機泥は過多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だけではなく、海水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）は、海底での貧酸素化の主な原因、栄養塩のキャリアーとして考えられている。

本研究の目的は、広島湾奥の海底付近に存在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、栄養塩分布、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. 浮泥の特性

(1) 一般的特性

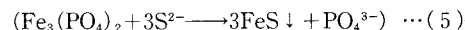
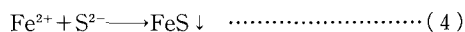
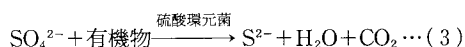
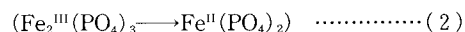
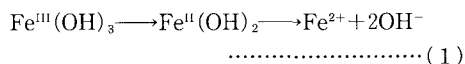
本研究で扱う浮泥とは、海水の動きに伴って漂う不安定な浮遊状態にある底泥のことである。浮泥の主成分はデトリタス等の有機物を多く含む凝集性のある微粒子であることから、その挙動は複雑で（滝・岡, 1982）季節的にも大きく変動することが予想される。浮泥に含まれる有機物は、微生物によって分解を受ける時に、溶存酸素の消費（渡辺, 1980）や栄養塩の溶脱を伴う。さらに、

堆積泥層は化学的にも強い還元状態となるために、有機物等が嫌気性分解する。その結果、悪臭ガスが発生する等、浮泥が海域に与える影響は大きい。

本論文では、2001 年から 3 年間にわたって行ってきた浮泥調査から、含水比；350%以上、土の湿潤密度；1.17 g/cm³以下、土粒子密度；2.5 g/cm³以下、シルト・粘土の土粒子で構成され、強熱減量値；10%程度、直上水が貧酸素化していない場合には酸化的状態（堆積泥は還元状態）、栄養塩は堆積泥の 1.5～2 倍程度と定義している（Tada ら, 2003）。

(2) 化学的特性

底泥中には不溶性の 3 価の鉄化合物（Fe(OH)₃、Fe₂(PO₄)₂等）がある程度存在しており、還元状態になると 2 価の鉄となり水中に溶け出してくる（その結果、PO₄³⁻が水中に溶け出すことになる）。この Fe²⁺は硫化水素と直ちに反応し、硫化第一鉄の沈降物が生成され黒色化する。これらの過程は、次のように表される（堀田ら, 2002）。



還元状態になると、硫化物イオンが間隙水中にも溶け出すことにより、底泥の含水比が数 100%である場合には硫化水素臭が強くなり、リンが溶出するという特性がある（ただし、底泥含有硫化物が 0.4 mg/g 程度で還元状態にあることが条件となる）。このような底泥の堆積状態が緩く硫化水素臭が強いといった現象は、広島湾奥の海域（宮島沖、江田内湾）で顕著であった（Tada ら, 2003）。

3. 底質の季節変動特性

(1) 底質の季節変動特性調査の概要

2001 年 10 月に行った湾奥域 8 地点での調査結果から、2002 年 5 月以降の底質の季節変動調査では、浮泥の堆積量が多かった広島湾奥部（呉湾奥 St.8, 図-1）を中

* 正会員 工修 中電技術コンサルタント(株)

** 正会員 工博 広島大学助教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻

*** 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

**** 正会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部都市基盤工学科

心に全12回の採泥調査を実施した。

採泥は、船上より大口径パイプ(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(井澤ら, 1990)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、実験室において層厚2 cm毎に分割した。別々に採取された4本の柱

状泥を同様に分割し、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) 堆積泥の季節変動特性

図-2には、2001年10月～2003年11月に12回行われた堆積泥の分析結果が示されている。縦軸は採泥位置、横軸は観測月が示されている。

分析された全層において、土の湿潤密度、含水比、土粒子密度が季節的に変化している(図-2(a)-(c))ことがわかる。土の湿潤密度は、上層で1.1～1.16 g/cm³、下層で1.19～1.23 g/cm³程度の変動があった。季節的に湿潤密度は、5月～7月に大きく9月～11月に小さくなる傾向にある。含水比は、上層で370～630%、下層で200～330%程度の変動があり、土の湿潤密度と同様に、5月～7月に低く9月～11月に高くなる傾向にある。土粒子密度は、全層にわたり2.45～2.61 g/cm³程度の変動があり、上層で小さい傾向にあるが、季節的な変動が大きくでている(8月に小さく11月に大きくなる傾向)。

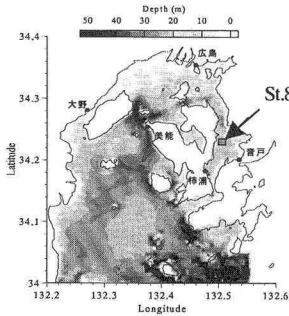


図-1 広島湾の地形と調査地点

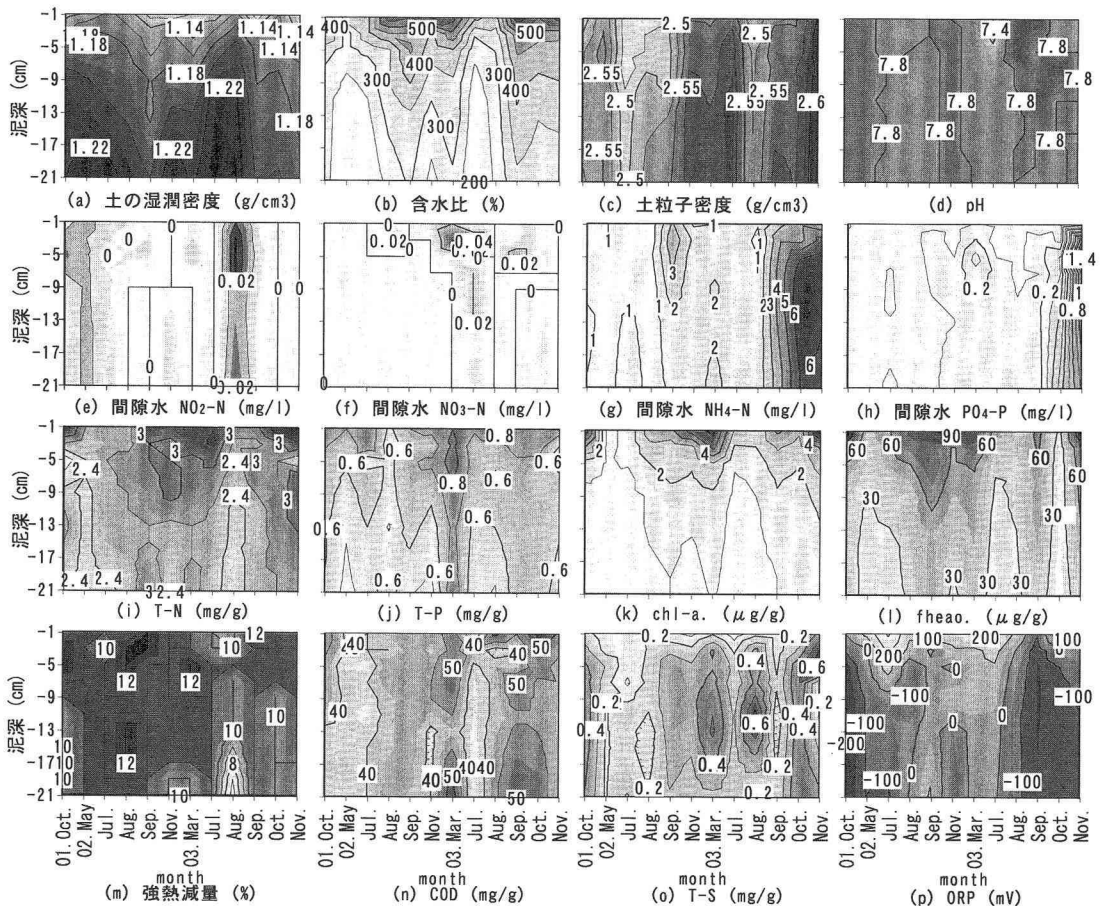


図-2 広島湾における底質の季節変動特性 (2001.10～2003.11)

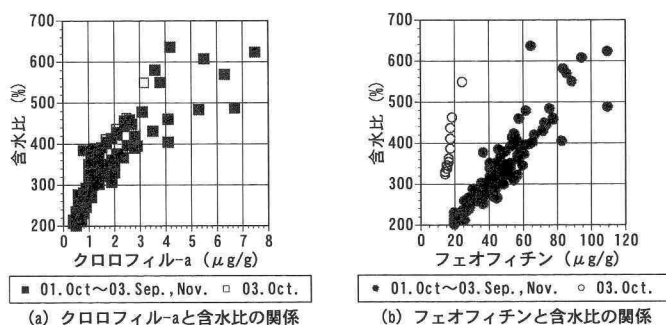


図-3 クロロフィル-a, フェオフィチンと含水比の関係

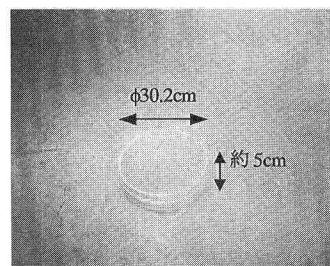


写真-1 埋没型沈降物サンプラー

間隙水内の栄養塩の変化(図-2(e)-(h))は、底泥状態(特に ORP, 図-2(p))に依存する傾向にある。堆積泥は還元的な状態にあるため、窒素は主にアンモニア態として存在している(硝酸・亜硝酸態は1/100のオーダー)。含水比が高く、還元的な状態が強いと、土粒子からの溶出により $\text{NH}_4\text{-N}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が大きくなる傾向にある(T-N, T-Pを体積換算すると、T-N, T-PはDIN, DIPと比べて $10^2\sim 10^4$ 倍大きい)。また、動植物プランクトンの死骸などに含まれる有機態窒素は、アンモニア態窒素に分解され、好氣的状態になると硝化が進む。2003年7月には、安定した硝酸態窒素が存在しており(図-2(e), (f)), この時期には好氣的な状態が形成されたことが推測できる。

堆積泥に含まれる T-N・T-P, クロロフィル-a・フェオフィチンの濃度は、浮泥厚の増加に伴い増加する傾向がある(図-2(i)-(l))。特に、含水比の300%とフェオフィチンの40 $\mu\text{g/g}$ の等値線が酷似している。ただし、2003年10月は、含水比とフェオフィチンの相関が他の季節と異なっている。堆積泥に含まれる T-N・T-Pの増加は微細粒子の運搬や底泥中に生息する底生生物の死亡等によって生じると考えられるが、クロロフィル-a・フェオフィチンは底生生物の死亡によっては増加しないものと考えられる。

有機物の指標である強熱減量と COD(図-2(m), (n))は、シルト粘土分子は有機物と結合しやすく、砂分の少ない浮遊粒子が結合・堆積して有機物量を増加させている。強熱減量は10~12%を維持しており、有機物が安定した形で存在しているためと考えられる。内部生産 CODは海域で生産された CODであり、動植物プランクトン由来の CODとして定義される。また分解速度が速く、一昼夜で50%が無機化する。浮泥で CODが高いのは、浮泥に内部生産 CODが多く含まれていることが考えられ、季節では3月~8月に高く、特に2003年に高い傾向にある。T-Sは、浮泥層よりも堆積泥層で大きくなる傾向にあるが、季節変動は現れていない(図-2(o))。

(3) 堆積泥内での浮泥の形成と浸透

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った。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、堆積泥の浮泥化(海水の堆積泥中への浸透)が必要になる。

図-3にはクロロフィル-a, フェオフィチンと含水比の関係が示されている。クロロフィル-a, フェオフィチンとも含水比との対応が良いことがわかる。クロロフィル-aの存在時間が数日のオーダーであることから、夏季~冬季にかけて浸透によって新鮮な有機物が下層にまで供給されていることが予想できる。さらに、底泥内の栄養塩分布も含水比と良く対応していることから、間隙水の浸透とともに泥自体も動いていることが考えられる。

季節的には、夏季から冬季にかけて新鮮な底泥間隙水が下層にまで供給されている傾向にある。このため、有機泥等が海底表層に沈降し浮泥層が形成されるとともに、海水の流入・浸透により堆積泥が浮泥化(含水比の増大)するものと考えられる。

海底に設置した埋没型沈降物サンプラー(写真-1)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が、埋設したバケツ等の状態から堆積のみによって数10 cmにわたって湿潤状態が変わることは考えにくい。すなわち、夏季~秋季に泥の堆積状態が緩くなるのは、海水の泥中への浸透が強く関連していると考えられる。土質の性状では、夏季に非常に緩い堆積状態、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、少なくとも底泥表層の数10 cmの範囲で間隙水(海水)が底泥内で鉛直方向に流動していることが示唆される。

4. 底泥内での間隙水の動きと浮泥の挙動

(1) 浮泥の挙動調査の概要

2003年8月19日～10月20日の約60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、堆積泥内での水温・圧力および海底面上での流速・濁度・chl-a・水温・DOの測定、底泥の攪乱状況を直接測定するためのビーズ（中空ボールにゼリー状の液体を注入し、堆積泥と同等の比重1.2として作成）柱の埋設、埋没型沈降物サンプラーによる浮遊泥の捕獲を行った（写真-1）。水温は、海底上50, 7 cm, 海底面(0 cm)と泥深10, 20, 30 cm, 濁度は海底面と底上50 cm, 流速は海底上7, 50 cmに設置された。直径約1 cmのビーズ40個を地中約20 cmまで埋設し、約15日（8月19日～9月2日）後にダイバーによる柱状採泥を行い、ビーズの鉛直移動状況を確認した。さらに、表層（海面～5 m）と底層（海底+1 m, +0.5 m）にセジメントトラップ（+0.5 m; かさ付き, 横流入のみをトラップ）と、容積約20 lの埋没型沈降物サンプラーを海底に1 m間隔の計9個設置し、浮遊泥の堆積状況（約15日毎×4回）が確認された。

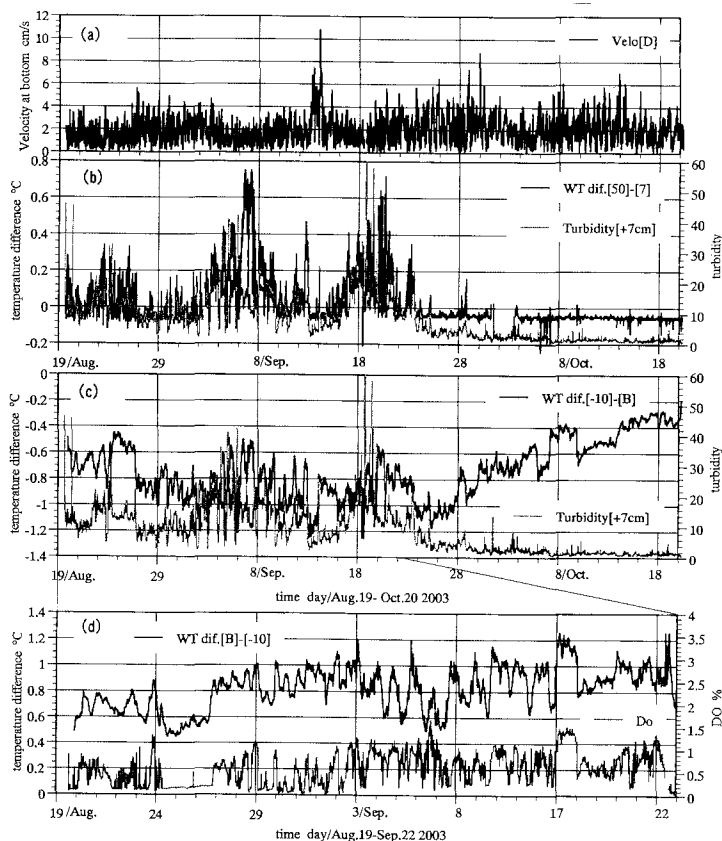


図-5 流速、水温、濁度、DO との関係

(2) 間隙水の流出と濁度、DO の変動

図-4 に水温（底上+0 cm, 50 cm）と泥温（-10 cm）の経時変化、図-5 に流速、水温、濁度、DO との関係を示した。図-5 の上段から、(a)底層流速（海底上7 cm）、(b)海底上50 cm と7 cm の水温差および底層濁度（海底上7 cm）、(c) 泥中（泥深-10 cm）と海底（0 cm）の水温差および底層濁度、(d) 貧酸素期（8/19-9/22）の海底と泥中（泥深-10 cm）の水温差および底層 DO（海底上50 cm）の関係が示されている。

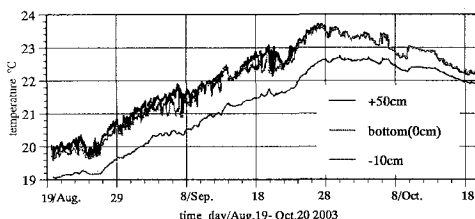
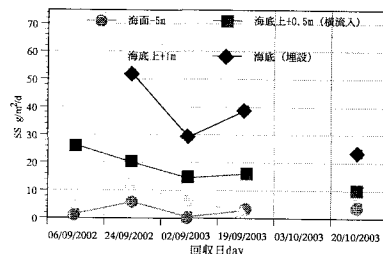
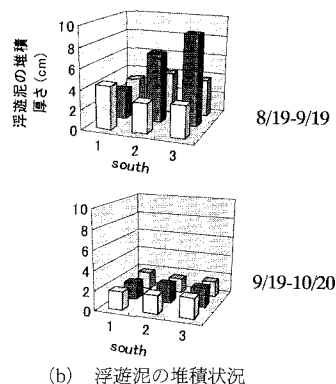


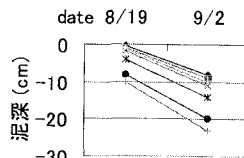
図-4 水温、濁度の経時変化



(a) SSトラップ量の経時変化



(b) 浮遊泥の堆積状況



(c) ビーズの沈降状況

図-6 浮泥の挙動

一般的に、巻き上げは流れによって底泥が上昇することと起こると言われているが、図-5では流れが濁度の上昇を直接起こしていないことがわかる。濁度の上昇は底層水温の低下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と考えられる。

さらに、DOと海底と泥中(-10 cm)の水温差(濁度の逆変動)との対応が良い(海底での水温低下時に、濁度上昇、DO低下)ことから、泥中間隙水が海水に流出すると、濁質が浮遊し、DOの消費(あるいは、無酸素水の泥中からの流出)が起こることが予想できる。

貧酸素が解消された後は、濁度は上昇しておらず、底層水温は低下して(図-4)、泥温と海底の水温差が小さくなっていく。この時期には、底層水温の変動に小さい遅れで泥温が変化していることから、泥中に熱が輸送されていること(海水の底泥への流入)が推定される。

(3) 海底での底泥の挙動状況

図-6(a)には各層のSSトラップ量の経時変化(2002年8月20日~9月24日, 2003年8月19日~10月20日, ただし9月19日~10月3日は欠測), (b)には9個の埋没型沈降物サンプラーにたまった浮遊泥の堆積状況, (c)には中空ボール設置約15日後の鉛直方向の挙動が示されている。SSフラックスは海底に近づくほど大きくなっており、底層では底層濁度の影響を強く受けていること、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。底層濁度とSSトラップ量が少なくなることは、底層に形成される高濁度の層が浮泥の輸送と強い関連があることが理解される。

海底0 mに設置した濁度計には、設置後の9月2日までに5 cm以上の浮泥中によって埋没していたこと、海底に埋設された9個のトラップの中央に設置されたトラップに6 cm以上の浮泥が補足されていたこと(図-6(b)), ビーズの状態から8 cm程度の浮泥の堆積があったこと(図-6(c))から、底層に高濁質層が存在しており、濁質が移流・沈降することで呉湾奥に浮泥が蓄積されることが予想できる。

星加・塩沢(1982)による呉湾の底泥堆積速度の約11 mm/yearと比較すると、この浮遊泥の堆積結果は、数100倍の値を示しており、海底で浮泥が活発に動いていることが予想できる。

5. おわりに

本研究では、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(海水の底泥への流入・浸透)によって決定されることが示された。夏期に海底に存在す

る浮泥は主に高濁質の移流によって形成されていること、呉湾沖での高濁質層の形成は、底泥中から間隙水が流出すること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の性状から、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) 浮泥・堆積泥に含まれる栄養塩の季節変動から、底泥の数10 cmにわたり湿潤状態が変化し、栄養塩、特に、クロロフィル-a、フェオフィチンが湿潤状態と同様に変動している。

3) クロロフィル-a、フェオフィチンと含水比の対応が良いことから、夏季~冬季にかけて浸透によって新鮮な有機物が下層にまで供給されていることがわかった。さらに、底泥内の栄養塩分布も含水比と良く対応していることから、間隙水の浸透とともに泥自体も動いていることが考えられる。

4) 底質の巻き上げは流れによって底泥が上昇することと起こると言われているが、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。さらに濁質の放出と同時にDOの消費(あるいは、無酸素水の流出)が起こっている。

5) 夏期における浮泥の生産は、間隙水の流出に伴って濁質が底質に浮遊し、底層に高濁質層を形成することが原因となっている。

謝辞: 本調査は、国土環境株式会社、(財)港湾空港高度化センターの協力を得て、実施された。記して、謝意を表する。

参考文献

- 井澤博文・清木 徹・伊達悦二(1990): 大口径パイプを用いた簡易不攪乱柱状採泥器の試作, 水質汚濁研究, 第3巻, 第5号, pp. 320-323.
- 滝 和夫・岡 正義(1982): 粘性を有する河川底泥の巻き上がり現象, 第10回環境問題シンポジウム講演論文集, pp. 1-6.
- 星加 章・塩沢孝之(1982): 堆積物からみた呉湾の汚染の歴史, 中工試報告, No. 18, pp. 9-18.
- 堀田哲夫・天野光歩・山下芳浩・陳 飛勇・東海林光(2002): 停滞性沿岸域での悪臭ガス発生に関する調査, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1101-1105.
- 渡辺慶二(1980): 東京湾における概要, 港湾, pp. 31-36.
- Tada, K., T. Hibino, C. T. Kim and K. Shimizu (2003): The Characteristic of Fluid Mud and Coastal Water Quality in the Hiroshima Bay, Asian and Pacific Coasts 2003, pp. 218-219.