

間隙水浸透場における有機泥の膨張特性

日比野忠史¹・小島佑允²・村上和生³・松本英雄⁴

閉鎖性の広島湾奥において、高含水比状態で堆積している有機泥の巻上がりにより栄養塩の溶出や貧酸素化が促進されている。底泥内を浸透する間隙水が海底の高濁度層の形成や沈降泥の圧密に及ぼす影響、特に高含水比状態を維持する機構について実験的に検討を行った。まず、広島湾奥域における海底堆積泥の性状の季節変動を示した。この結果を基に間隙水浸透実験を行い、浸透流により有機泥は高含水比状態を維持すること、有機物含有量と含水比の関係性から有機物量が多い底泥は多くの間隙水を保持するポテンシャルを有することを明らかにした。

1. はじめに

閉鎖性の強い内湾域や内海では、多量の栄養塩を含んだ高含水比の有機泥が堆積している場所が多い。有機泥が高含水比状態で堆積している場合には、巻上がり等による栄養塩の溶出や貧酸素化が促進されることが考えられる。海底に有機泥がゆるい（高含水比）状態で堆積している場合には、一般的に海底面上の流れにより容易に巻上がると考えられるが、実海域において有機泥が高含水比状態で堆積する機構や巻上りの機構は明らかにされていない。

海底に沈降した後の有機泥は、長期間にわたる自重および直上の海水重量の作用によって圧密が進行していくことが考えられる。しかし、広島湾奥海域では 300% を超える含水比状態が維持されていること、海底に沈降する有機泥の 90% 以上が海底を浮遊・移流する高濁度泥であることがわかっている（佐々倉ら, 2005）。また、Hibino ら (2005a) により、広島湾奥海底においては 2~4 cm/s の底面流速でしかないことが確認されており、底泥が底面せん断力によって巻き上がるためには、少なくとも 6 cm/s を上回る流速が必要であることを実験的に明らかにしている。さらに、底泥が高含水比状態に維持され、かつ高濁度層が海底に形成されるメカニズムとして、日比野ら (2005b) は底泥内の間隙水の移動との関連を指摘している。

本研究は、底泥内を浸透する間隙水が海底の高濁度層の形成や沈降泥の圧密に及ぼす影響、特に高含水比状態を維持する機構について実験的に明らかにすることを目的としている。

2. 広島湾における海底堆積泥の季節変動

広島湾奥域では、海域毎に有機泥が異なった状態で堆

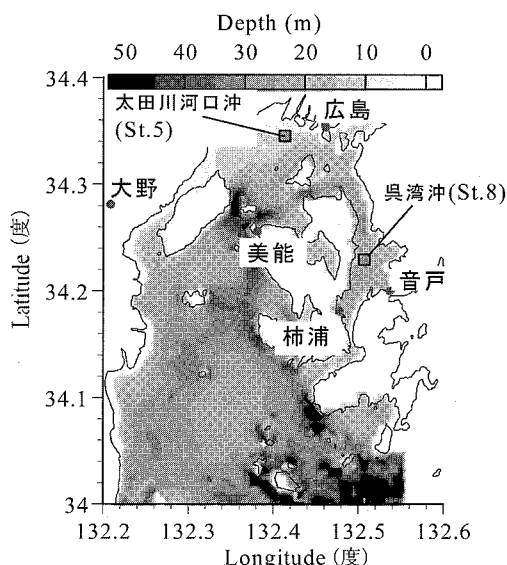


図-1 広島湾の海底地形と調査地点

積していることが明らかになっている。広島湾の湾奥と考えられる呉湾南奥と太田川河口沖 (St.8 と St.5, 図-1) では、性質の類似する有機泥が堆積しているにも関わらず、含水比状態や貧酸素化の状況が全く異なっている（田多ら, 2003）。

図-2 に太田川河口沖 (St.5) と呉湾南奥 (St.8) において 2005 年 6~12 月に採取された底泥の含水比、ORP（酸化還元電位）、IL（強熱減量）のプロファイルの経時変動が比較されている。図中の月日は観測日を示している。全ての分析項目とも深さ 30 cm の層に至るまで季節的に変化している。このことは、30 cm 深においても堆積泥が運動していることを示している。含水比は St.8 において St.5 と比較して 100~300% ほど高くなっているが、両地点とも経時的な変化は 30 cm 層まで大きくなっている。9 月 7 日には TY0514 が広島県を横断し、太田川では既往最大の 7,200 m³/s の洪水が起こっている。この洪水後に海底泥の性状は大きく変化しているこ

1 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
2 学 生 広島大学大学院工研究科
会 員 社会環境システム専攻
3 正会員 工修 中国新聞社(株)
4 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

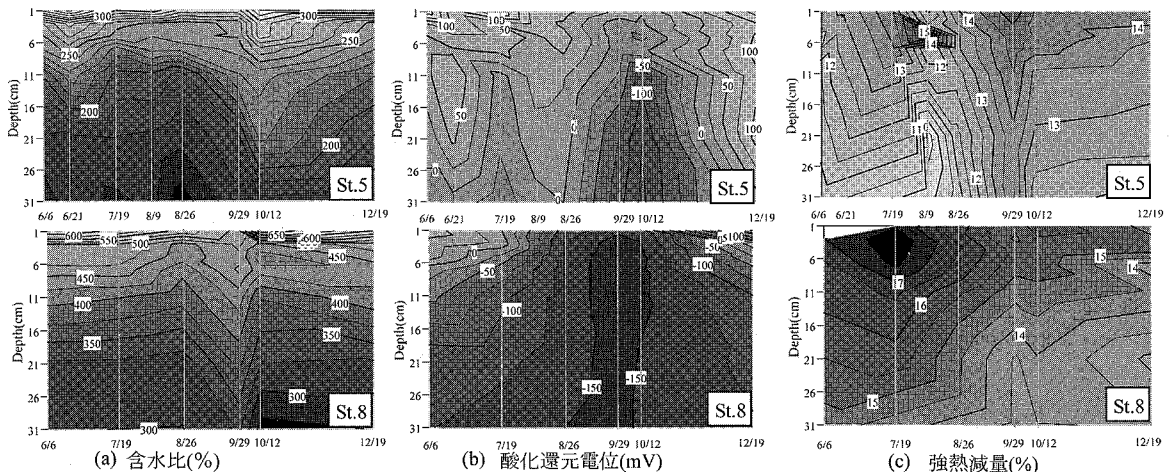


図-2 広島湾（上段が太田川河口沖；St.5，下段が呉沖；St.8）における海底体積泥の性状の経時変化

とがわかる。St.8ではSt.5に比較して還元的な状態にある。両地点とも台風TY0514を起因とする含水比の上昇によって底泥内がより還元的（ORPの低下）になっていることがわかる。この現象から含水比の上昇は底泥内の深い場から還元的な間隙水が上昇していくことによって起こっていることが推定できる。さらに、ILの変化からは有機物を多く含む物質が含水比の上昇とともに上層から下層へ移動していることが分かる。有機物の海底への輸送（海面からの沈降と濁質の水平移流）は夏～秋期に多くっており、この時期に間隙水の動きが活発になることで海底面に集積された有機物が底泥内に運ばれていることが考えられる。次章以降でこの現象がどのような機構で起こっているかを実験的に検討する。

3. 底泥間隙水浸透に伴う底泥膨張・巻き上がり

(1) 間隙水浸透実験

本実験は底泥内を浸透する間隙水によって堆積泥が高含水比状態を維持する機構と間隙水の浸透下における有機泥の沈降・堆積状況を明らかにすることを目的としている。鉛直上向きに浸透する流れが、透水係数の非常に低い細粒分で構成される有機泥を浮遊させる（海底濁度層の形成）可能性を明らかにするため以下の2点の検討を行う。

① 底泥の高含水比状態保持の可能性

堆積泥下端から、鉛直上向きに流れる浸透を起こすことによって、含水比が高い状態に保たれる可能性を検討した。

② 浸透流場での有機泥の堆積に及ぼす影響

上昇流が存在する場での有機泥の沈降状態、堆積後の有機泥の分布状態を明らかにして、有機泥の鉛直浸透流場での水分保持特性等について検討する。

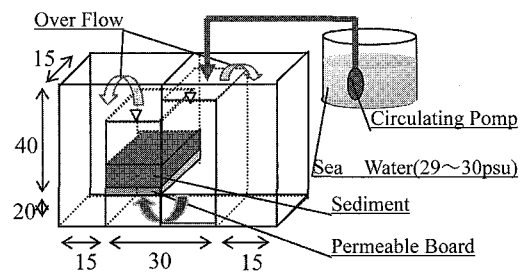


図-3 底泥間隙水浸透実験装置（単位：cm）

(2) 底泥間隙水浸透実験の手法

図-3に本実験に使用する実験水槽の模式図を示す。実験では広島湾で採取された底泥（2005年9～10月St.5採取表層浮泥）と海水（29 psu）が用いられた。底泥はあらかじめ含水比を測定しておき、使用する有機泥量が同一量（乾燥重量367～372 g）となるように計量した後、海水と混合して水槽に流入させた。実験は流入泥を沈降させつつ、水頭差を付与して行なわれた。各実験ケースでの実験条件は表-1に示されている。

水頭差を-1 cm～5 cmに変化させ、堆積底泥の収縮状態（堆積泥厚さ）を計測した。変動する泥層厚は経時的に測定され、底泥層の平均含水比 $\bar{w}$ （堆積泥全体の重量に対する間隙水重量の割合）を(1)式で算出した。

$$\bar{w} = \frac{\rho_w (V - \frac{M_s}{\rho_s})}{M_s} \times 100(\%) \quad (1)$$

M_s は使用底泥質量、 V は全体積（ cm^3 ）、 ρ_s は土粒子密度（ g/cm^3 ）、 ρ_w は水の密度（ g/cm^3 ）である。泥層の透水係数は、水槽上縁からの越流量から求められた。

実験は底泥の圧縮がほぼ終了するまで、約70時間実

表-1 実験条件 (ΔH (cm): 水頭差, H (cm): 実験終了時の底泥層厚さ, M_s (g: 乾燥重量): 使用底泥量, IL (%): 実験終了時における有機物含有量(底泥層全体の平均))

実験 No	ΔH	H	M_s	IL
Case. 1	-1	5.9	372	11.7
Case. 2	0	6.6	367	12.6
Case. 3	0	6.0	371	11.9
Case. 4	0	6.6	372	12.0
Case. 5	0.5	7.8	372	11.6
Case. 6	1	9.9	367	13.5
Case. 7	1	8.8	371	11.9
Case. 8	2	9.4	368	11.8
Case. 9	5	8.8	307	12.2
Case. 10	0 $\leftrightarrow$ 1	7.6	372	14.9
Case. 11	0	6.6	372	12.0

施した。圧縮終了後に底泥を表面から厚さ 1 cm ごとに層切りし、含水比、強熱減量、粒度分布を測定した。さらに、底泥表面から 1 cm において、直上水を採取し濁度を測定するとともに粒度分布を測定した。

(3) 間隙水浸透場での有機泥の膨張特性

図-4 に沈降・堆積泥の平均含水比の経時変化を示す。水頭差の大きさに関わらず、全てのケースにおいて底泥は時間の経過とともに圧縮されている。流入泥は 10 分程度で海水層と底泥層に分離し、粒子の沈降と圧密が同時に進行する状態となり、70 時間後には、底泥の平均含水比は一定値に近づく。水頭差によって鉛直上向きの流れは発生するが、底泥粒子の顕著な巻き上がりは確認されていない。

流入泥の堆積厚さ(膨張量)は浸透流の影響を受けており、浸透流のある場合には実験終了時の平均含水比は最大 570%，浸透流のない場合には 300% 以下となった。泥内の浸透量が大きくなると、堆積泥の膨張状態が維持できていることから、現地底泥の高含水比状態を維持する要因として、間隙水の浸透が考えられる。

図-5 には水頭差と実験終了時の平均含水比の関係、図-6 には実験終了時の透水係数と含水比の関係が示されている。水頭差が 1 cm 以上の場合には、底泥の膨張量を示す平均含水比は水頭差に依存せず、600% を越えることはない(図-5)。この結果は、底泥の保持できる間隙水の量には上限があり、浸透量が增大しても、膨張量が大きくならないことを示している。堆積泥が最大膨張量に達した後は、水頭差は浸透に利用されていることがわかる(図-6)。水頭差が大きくなり、土粒子構造が維持できなくなると、水道が形成され、流れは水道に集中することになる。すなわち、浸透によって堆積泥は膨

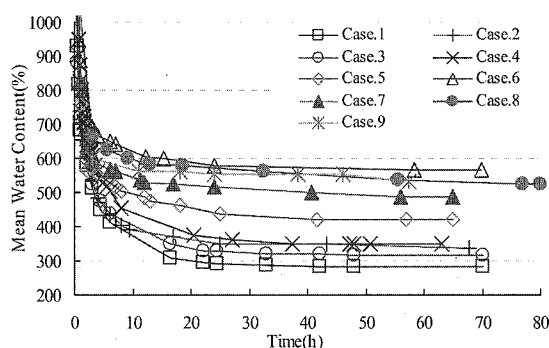


図-4 平均含水比の経時変化 (Case.1-11)

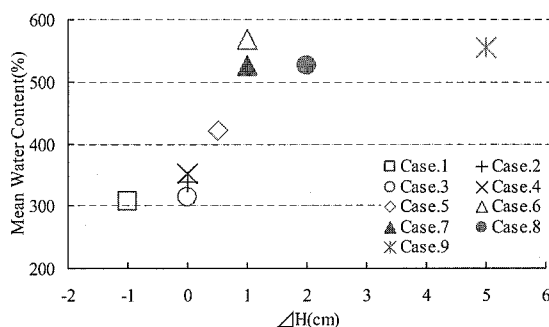


図-5 水頭差 (ΔH) - 実験終了時の平均含水比 (Case.1-9)

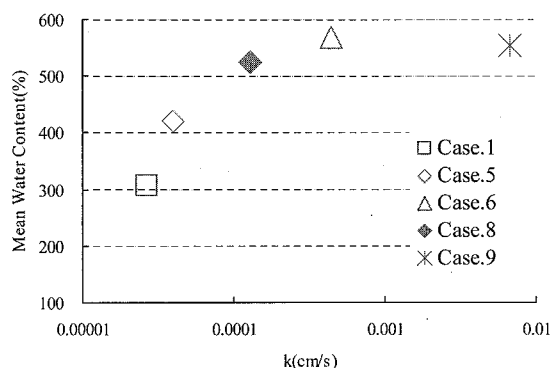


図-6 実験終了時の透水係数と平均含水比の関係

張するが、浸透流によって濁質(堆積泥)が巻き上がる現象にはつながらないことが明らかにされた。

(4) 水頭の変化に伴う堆積底泥の膨張と巻き上がり

海底面に働く圧力は潮汐により変動しているため、浸透流の向きは潮汐に伴って変化していることが考えられる。図-7 には水頭差を 1 時間ごとに 0 cm と 1 cm に変化させ、計測した底泥沈降開始 3 時間後までの底泥直上 1 cm における濁度の変化が示されている。図には比較のために行った水頭差 0 cm の場合の濁度変化も示して

ある。水頭差を1 cmにした1時間後と2時間後では浸透にともなう巻き上がりにより濁度が上昇したが、平均含水比が約600%となった3時間後には濁度の上昇はなかった。底泥の圧縮が進行し、沈降状態から堆積状態に移行することによって巻き上がりは発生しないことがわかる。

4. 有機物含有量が堆積泥の膨張に与える影響

図-5では、同水頭差(0 cmと1 cm)において平均含水比にはばらつきがみられた。このことから含水比を変動させる要因として浸透流以外の現象があることが示唆される。本章では、有機泥の膨張と有機物含有量の関係および堆積状態における粒土分布から浸透流場での有機泥の挙動について検討する。有機物は底泥内において、土粒子を結合させており(大坪, 1985)、有機物の存在は底泥内の空隙を増大させる働きを有している。堆積泥の性状が高含水比状態の形成に関与していると考えられる。

(1) 有機物による間隙水の保持

堆積底泥に多く含まれる有機物は、粘土粒子間の結合の主要因とされ、主に粘土鉱物との間に粘土-有機物複合体を形成して底泥中に存在する。底泥中の土粒子は粒子間の化学的な結合(分子間力など)の他に、このような要因により団粒化する傾向があると考えられる。図-8は2003年7月に採取された海底堆積泥に、ヘキサメタリン酸ナトリウム溶液を混ぜ、底泥粒子を分散させた試料と分散させずに測定した試料の粒度分布を比較したものである。底泥は現地海底において $3\mu\text{m}$ 以下の微細な粒子が結合した状態で存在していることがわかる。図-9は実験終了時の表層泥(0~1 cm)の含水比とILの関係を示したものである。有機物含有量を多く含むことによって、含水比が大きくなっていることから、有機物量が大きい底泥は多くの間隙水を保持するポテンシャルを有することがわかる。

(2) 堆積泥の粒度と有機物含有量

本節で示す粒度分布は浸透実験水槽の深さ1 cmあたりに堆積した泥の実重量によって表されている。なお、底泥内の有機物量を算定するときの仮定として、底泥は土粒子と有機物のみにより構成されており、強熱減量測定時の 600°C 乾燥により失われた底泥重量を有機物の全量とし、残存物は全て土粒子であるとした。

図-10に実験後に堆積した底泥試料の内で含水比または有機物量(算定値)が同等である2つの試料(表-2)の粒度分布が示されている。①含水比が同等である場合、有機物量が大きい試料は $10\mu\text{m}$ を越える粒子量が多いこと、②有機物量が同等である場合、 $10\mu\text{m}$ を下回る粒子量に大きい差が生じていること、③含水比、有機物量

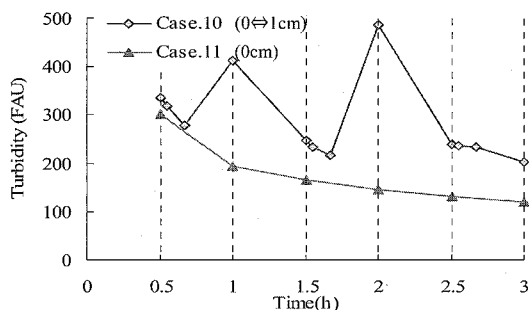


図-7 水頭差(ΔH) - 実験終了時の平均含水比

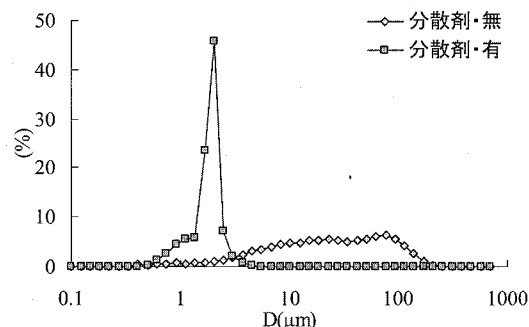


図-8 2003年7月 St.8 底泥粒度分布(分散剤有/無)

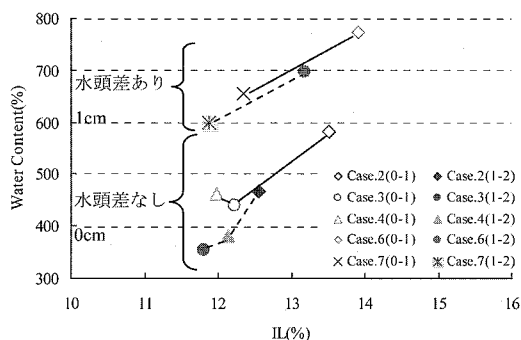


図-9 有機物含有量 - 実験終了時の平均含水比
水頭差=0cm (Case.2, 3, 4), 水頭差=1cm (Case.6, 7)
(各 Case の底泥表面から —: 0-1cm, ---: 1-2cm)

とも同等である場合には粒度分布曲線はほぼ一致することがわかる。なお、有機物量が同量含有される図-10(b)では小粒径の粒子が多くなっているのは浸透流によって土粒子骨格が緩い状態で保れていると考えられる。

有機物を多く含む底泥は、粒径が $10\mu\text{m}$ を超える粒子に偏る傾向がある。有機物を多く含む有機泥は密度が小さく相対的に上層に堆積することになる。このため上層において含水比は高い傾向となる。

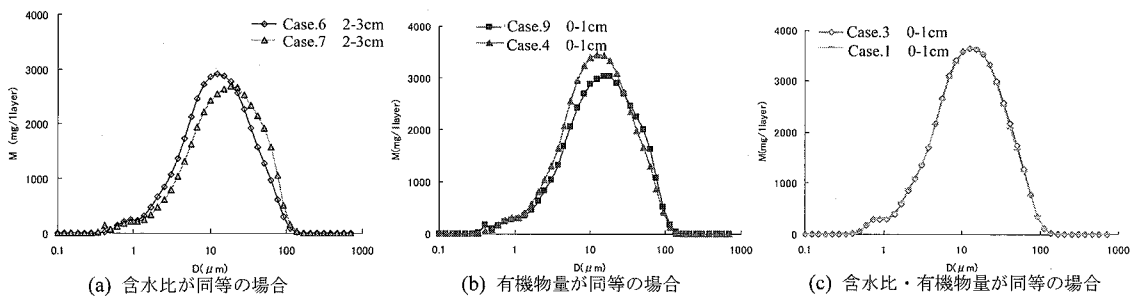


図-10 粒度分布 (質量換算) 比較

表-2 粒度分布比較試料(含水比または有機物量が同一の場合の比較)

	Case. 6 2-3cm	Case. 7 2-3cm	Case. 4 0-1cm	Case. 9 0-1cm	Case. 3 0-1cm	Case. 1 0-1cm
w(%)	574	577	461	504	439	443
IL(%)	12.5	13.9	12.0	12.9	12.2	12.1
M(mg/層)	37,500	36,590	45,850	42,210	47,950	47,580
有機物量(mg/層)	4,670	5,060	5,490	5,460	5,870	5,740

5. おわりに

本研究では、底泥内を浸透する間隙水が海底の高濁度層の形成や沈降泥の圧密に及ぼす影響、特に高含水比状態を維持する機構について実験的に検討を行った。以下に主要な結論を示す。

間隙水浸透実験により、間隙水の浸透場における有機泥の膨張特性を明らかにした。水頭差を付与することにより鉛直上向きの流れは発生するが、底泥粒子の顕著な巻上がりは確認されなかった。流入泥の膨張量は浸透流の影響を受けており、浸透流のある場合には実験終了時における平均含水比は最大 570 %、浸透流のない場合には 300 % 以下となる。泥内の浸透量が大きくなると、堆積泥の膨張状態が維持できていることから、現地底泥の高含水比状態を維持する要因として、間隙水の浸透が示唆される。

底泥の保持できる間隙水の量には上限 (含水比 600 % 以下) が存在し、浸透量が増大しても、膨張量が大きくなることはない。浸透流が大きくなり、土粒子構造が維持できなくなると、底泥内に水道が形成され、流れは水道に集中する。このことから、浸透により堆積泥は膨張するが、浸透流により堆積泥が巻上がる現象にはつながらないことが明らかになった。

同水頭差において堆積泥の実験終了時の平均含水比にばらつきがみられたことから、含水比を変動させる要因として有機物の作用が示唆された。底泥を分散させた結果、 $3\mu\text{m}$ 以下の微細な粒子が有機物の土粒子への結合

作用によって、団粒化し底泥粒子が形成されている。有機物含有量と含水比の関係性から、有機物の存在により底泥内の間隙は増大され、有機物量が多い底泥は多くの間隙水を保持するポテンシャルを有することがわかった。

本研究では、浸透場において有機泥を投入する際、一度に沈降・堆積させている。しかし、現地における有機懸濁物質の沈降・堆積は連続的である。今後は、浸透場において連続的に有機泥を投入し、現地の再現性を高めた実験が必要である。

参考文献

- 佐々 倉 論, 日比野 忠 史, 高御堂 良 治, 村上 和 男, 松本 英 雄 (2005) : 広島湾奥海域における有機懸濁物質の沈降特性, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 911-915.
- Tadashi Hibino, Kazuo Murakami, Hideo Matsumoto (2005) : Pore Water Movement in the Consolidated Sediment at the Sea Bottom, Proceedings of the Third International Conference on Asian and Pacific Coasts.
- 日比野 忠 史, 村上 和 男, 松本 英 雄 (2005) : 底泥内での間隙水の動きと浮泥層の形成機構, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 920-930.
- 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, pp. 991-995.
- 大坪 国 順 (1983) : 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告.
- 日比野 忠 史, 村上 和 男, 松本 英 雄 (2005) : 底泥内での間隙水の動きと浮泥層の形成機構, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 961-965.