

潮汐流による底泥の巻き上げ現象のモデル化と浮遊泥量変動の再現

中川康之*・吉田秀樹**・谷川晴一***・黒田祐一****

潮汐流の作用により生じる底泥輸送現象のモデル化を目的として、有明海・熊本沖で約 1 ヶ月間連続観測した流れと浮遊懸濁物 (SS) 濃度の現地データを用いて、底泥の侵食量の予測において重要となる外力 (潮汐流) と底泥侵食量の関係を調べた。潮汐流の加速時に生じる浮遊懸濁物の総量 (浮遊泥量) の時間変化から、底泥の移動限界条件や侵食速度に関するパラメータの推定を行った。さらに、それらの結果をふまえた侵食量推定式を用いた数値計算により、潮汐流の作用に伴う浮遊泥量の時間変動が精度良く再現できることを示した。

1. はじめに

シルトや粘土を主成分とする粘着性底泥 (以下、底泥) の輸送現象の解明は、河口付近の地形変化 (干潟の発達、航路・泊地埋没など) の予測において重要であるのみならず、内湾等の沿岸域における生物・化学的な環境変動を予測する上でも重要な課題である。底泥の輸送量を定量的に予測するためには、外力に対する底泥の侵食あるいは堆積量の適切な評価が必要であり、これまで実験水路を用いた流れや波の作用下での泥の挙動特性の検討結果に基づく侵食・堆積過程のモデル化がなされている (たとえば, Mehta, 1988; Krone, 1993)。また、泥の侵食特性は海域ごとに異なるため、国内の有明海における現地底泥に対しても、侵食特性を把握するための実験的検討 (楠田ら, 1989; 村上ら, 1989) が行われている。

一方、室内での実験結果を基にして構築された既存の侵食・堆積速度推定式が底泥の輸送計算に広く用いられているものの、これらが実験条件に強く依存した現象を再現したものであり、実海域における泥の輸送現象の再現性には問題があることが Sanford・Halka (1993) や Winterwerp・van Kesteren (2004) により指摘されている。また、潮汐外力により常に侵食と沈降を繰り返しているような、底泥極表層を対象とした泥の侵食特性の評価は十分ではなく、潮汐流による底泥の巻き上げが顕著となる有明海を対象とした底泥輸送の計算結果において、浮遊泥濃度の時間変動の再現性に問題が残されている。(中川, 2002)

そこで本研究では、潮汐流を主な外力とした底泥輸送現象を適切に再現可能なモデルの構築に向けて、有明海

熊本沖で観測された流れと浮遊懸濁物 (SS) 濃度の現地データから、底泥の侵食特性に関する物性パラメータを推定することを試みた。さらに、それらの結果をふまえた侵食量推定式を用いて、底泥の侵食量に依存して変化する浮遊泥量の時間変動に関する数値計算を行い、現地データとの比較を通じて推定式の評価を行った。

2. 現地観測データと浮遊泥量の推定

(1) 現地観測データ

ここで用いた現地データは、平成 13 年 10 月中旬から同年 11 月中旬の約 1 ヶ月間、有明海東部に位置する熊本港沖の図-1 に示す水深 (D.L.) -7.5 m の地点における流況および濁度等の連続観測の結果である。

流況については、センサー面を上向きに海底設置した超音波式流速プロファイラー (Nortek 社製 Aquadopp Profiler, 2 MHz, 以下 ADCP) により、底面上 40 cm から海面下約 1 m までを層厚 30 cm として 30 分間隔で 2 分間ずつ測定している。後述する SS 推定に用いた超音波の反射強度も、本機により同様な時空間解像度により測定されている。また、光学式濁度計 (アレック電子株,

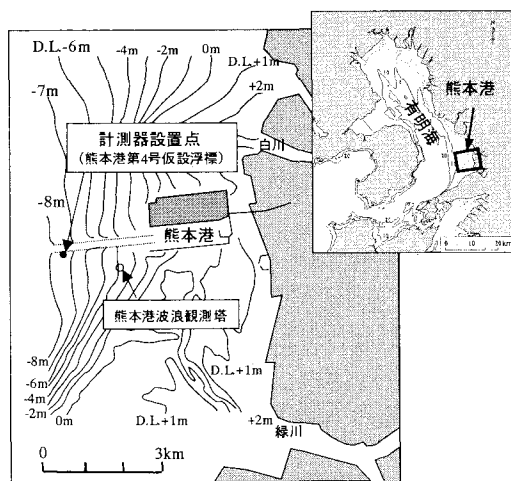


図-1 観測地点

* 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部

** 正会員 工修 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 所長

*** 正会員 国土交通省港湾局海岸防災課 (前下関港湾空港技術調査事務所技術開発課長)

**** 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 技術開発課 技術開発第一係長

ATU5-8M)を底面上20 cm, 同50 cm および海面下1 mの3層に係留し, 5分間隔で計測した. なお, 光学式濁度計の計測結果は, 観測地点にて採取された底泥試料を用いた出力結果の検定を基に, SS 濃度 (単位: mg/l) に変換した値で示してある.

(2) 超音波反射強度から SS 濃度への変換

ADCP により計測される超音波反射強度から海水中の SS 濃度を推定する試みが多数行われている. (たとえば, 川西ら, 2001; 横山・藤田, 2001; Gartner, 2004) ここでも上述の ADCP で測定された超音波反射強度から SS 濃度への換算を試み, 光学式濁度計との比較による精度検証をふまえ, SS 濃度分布の鉛直構造に関する時間的変化と潮汐外力との対応について検討した.

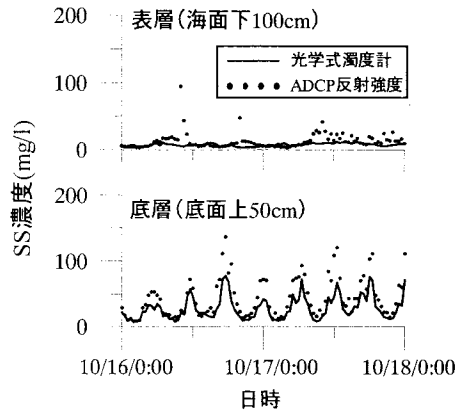
センサーから距離 D (m) だけ離れた地点の SS 濃度, SSC (mg/l), とそこでの懸濁物による音波散乱強度の関係は, 超音波流速プロファイラーにより受信された音波の反射強度 I (count), と音波のエネルギー減衰の影響を考慮して次式のように表現できる. (横山・藤田, 2001)

$$A \log SSC = I - B + k \log D + 2\alpha D \cdots \cdots (1)$$

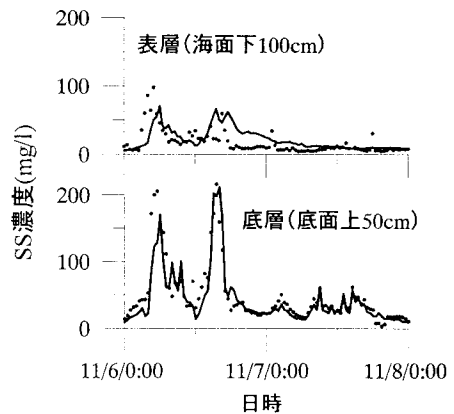
底面上50 cm で計測された光学式濁度計による SS 濃度と相当する水深層での反射強度との関係を, 式 (1) により近似し係数 A , 基準音圧 B (count) および拡散による減衰係数 k を求め, ここではそれぞれ, $A=30$, $B=95$ count, および $k=31$ とした. また, 吸収による減衰係数 α は音波の周波数の関数として表され2.8 count/m とした.

これらの係数を用いて ADCP の反射強度のデータから推定された SS 濃度を底面上50 cm および海面下100 cm での光学式濁度計による測定値と比較した結果が図-2である. 大潮期に顕著となる底面付近での濃度変動 (同図(a)) や, 高波浪期に見られた底面から表層付近にわたる濃度上昇の様子 (同図(b)) も精度良く推定できていることがわかる. 観測全期間を通じてみた場合, 特に水面付近においては植物プランクトンの増殖など懸濁物の質的な変化の影響と考えられる推定精度の低下がみられる場合があるものの, 本研究で対象とする底層付近での SS 濃度の推定には十分実用に耐えうる結果が得られていると考えられる.

さらに, 本方法により推定された観測期間中の SS 濃度の鉛直分布の時間変化を示したものが図-3(a)である. また, 同図(b)には熊本港波浪観測塔 (図-1) で計測された観測期間中の有義波高および有義波周期についても示してある. 波浪擾乱等の影響により高濁度水が表層付近まで分布している11月6日を除いては, 潮流流による底泥の侵食 (巻き上げ) が主要因と考えられる SS 濃度



(a) 大潮時期の SS 濃度変動の比較



(b) 時化時の SS 濃度変動の比較

図-2 ADCP による超音波反射強度記録および光学式濁度計による SS 濃度の推定結果の比較

の増大が, 大潮時期を中心に海底面付近で顕著となっている.

これら, 海底面付近での SS 濃度の時間的変動と潮汐変動との関係については, 中川ら (2002) に示されているように, 上げ潮および下げ潮時の潮流流の加速期に濃度が増大し, 潮流速の減少と共に SS 濃度も減少している. そのような潮流流の加速期における SS 濃度の鉛直分布について, その時間変化を示したものが図-4である. 同図は大潮期に相当する10月16日から17日にかけての, 満潮から下げ潮 (同図(a)) および干潮から上げ潮 (同図(b)) の時期の結果をそれぞれ示している. いずれも潮流流の最速時に相当するタイミングで SS 濃度もほぼ最大 (図-4(a)中の③, および同図(b)中の⑥) となっている. また, これら SS 濃度の上昇期における鉛直分布は, 底面に向けて増大するものとなっていることから, これら SS の起源は底泥から巻き上げられた浮遊泥であると考えられる. 一方, 潮流流の減速期には, SS

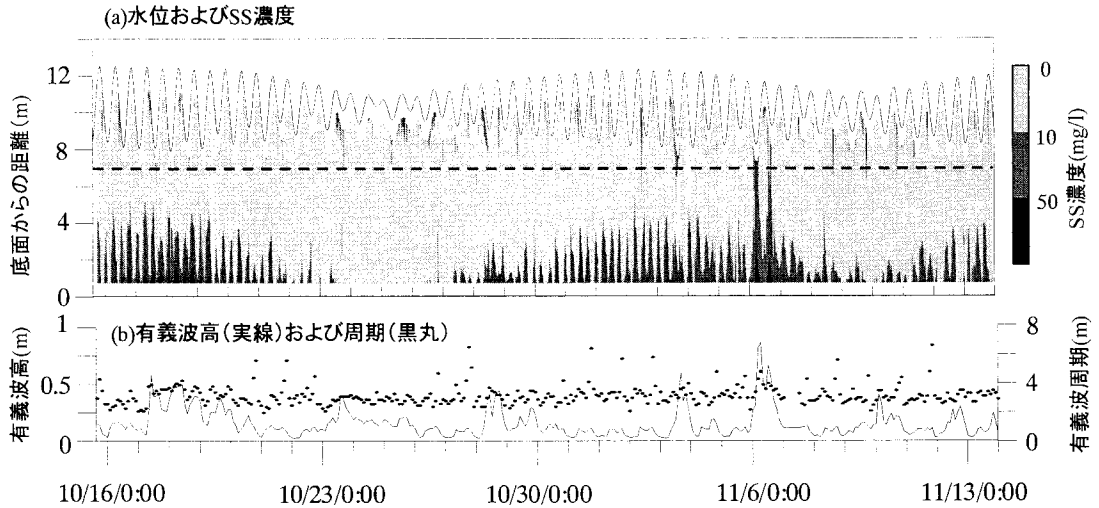


図-3 観測期間中（2001年）の水位および ADCP から推定した SS 濃度鉛直分布（上段）と波浪条件（下段）

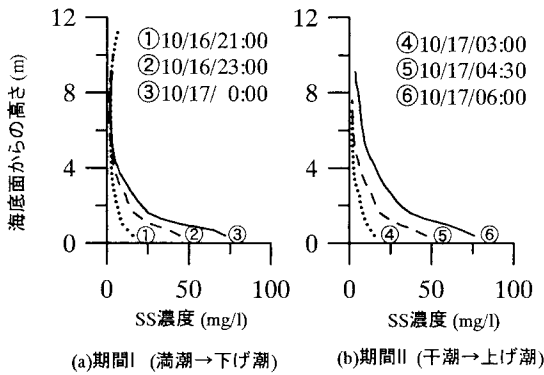


図-4 潮汐変動に伴う SS 濃度の鉛直分布の変化

濃度の減少（図-4(a)中の③から同図(b)中の④への変化）が生じている。

3. 侵食パラメータの取得

底泥の輸送を定量的に予測するためには、外力に対する底泥の侵食限界や侵食速度を適切に評価する必要がある。たとえば底泥の侵食速度(E)の推定式として式(2)がある。

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 M ；侵食速度係数 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{s}$)、 τ_b ；底面せん断応力 (Pa) および τ_e ；侵食に関する限界せん断応力 (Pa) である。この他にも、底面せん断応力項にべき乗の係数がかかるもの（たとえば、吉川, 1985）や exponential 型の関数として表現したもの（Mehta, 1988）もあり、いずれの推定式においても泥の鉱物組成や湿潤密度等の物性や堆積状態に依存した侵食強度に関するパ

ラメータを適宜設定する必要がある。設定すべきパラメータの数が比較的少なく、扱いが平易な式(2)が実海域での数値シミュレーションに用いられる場合が多く、本研究においても実用上の利点から式(2)による侵食速度の推定を検討した。

式(2)による侵食速度の推定においては、泥の物性に依存するパラメータとして、侵食速度係数および限界せん断応力の2つを設定する必要がある。ここで、巻き上げ現象の空間的な一様性が強く、2.で示した潮流速の加速期における SS 濃度の変化は、主に底泥からの供給や沈降過程により支配されるものと仮定すると、底泥の侵食特性を現す2つのパラメータは、水中部分の浮遊泥量の時間増加率と底面せん断応力との関係を通じて以下の手順により求めることができる。

まず、超音波の反射強度から推定された SS 濃度の鉛直分布を基に、各測定時における観測地点の海底面上の水柱内に存在する懸濁物の総重量（浮遊泥量）を求める（図-6）。ただし、潮位変動に伴う全水深の変化や、植物プランクトンなど底泥の巻き上げ以外の要因によって考えられる表層付近での SS 濃度の急激な上昇などの影響を排除するため、ここでは底面上 7 m（図-3(a)中の破線部分）までの SS 濃度を基に浮遊泥量を算定した。

つぎに抵抗係数 (C_f) を 0.0026 と仮定し、潮流流の実測値、 U 、（図-5）を用いて式(3)（ここに ρ ：海水密度）により底面せん断応力を求めた。

$$\tau_b = \rho C_f U^2 \dots \dots \dots (3)$$

また、浮遊泥量の測定間隔（30分間）での差から浮遊泥量の時間増加率を求めた。さらに両者の値を x 軸、 y 軸としてプロットすると、観測値に対する近似直線の x 軸交点の x 座標値から限界せん断応力 (τ_e) が、また近

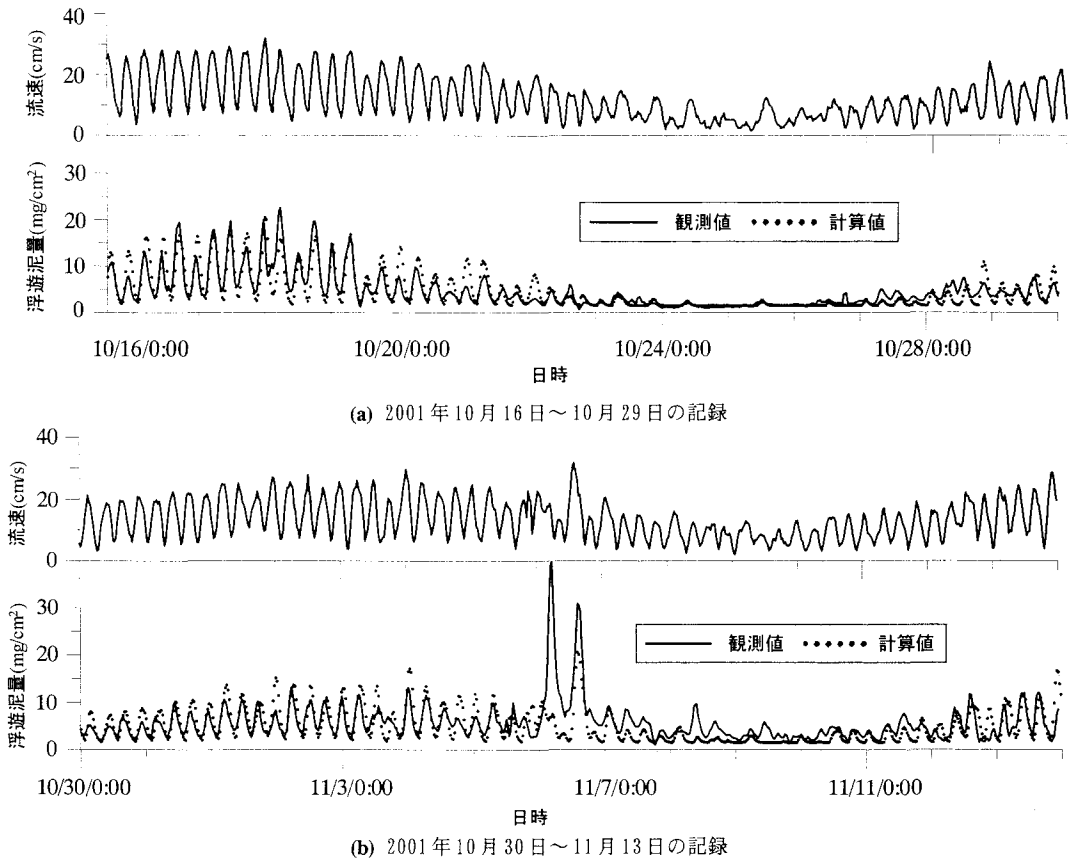


図-6 観測期間中における流速（底面上40 cm）および浮遊泥量の観測結果と計算結果の比較

似式の傾きに τ_0 を乗じて侵食速度係数 (M) がそれぞれ求められる。一例として、図-4 に示した浮遊泥量の増加時期に対する、上記の関係を整理した結果を図-7 に示す。観測期間中の大潮時期のデータ（サンプル数=17 データ）を対象として同様な整理を行い、各パラメータの平均値求めたところ、 $M=0.033$ ($\text{kg}/\text{cm}^2/\text{min}$)、 $\tau_0=0.0235$ (Pa) となった。

4. 浮遊泥量の再現計算

このようにして得られたパラメータを導入した侵食速度推定式を用いて、浮遊泥量の時間変動の再現計算を試みた。浮遊泥量の時間変化が、底面からの供給あるいは沈降のみにより支配されると仮定すると、浮遊泥量 (TSL) の時間変化は次式により表現される。

$$\frac{d(TSL)}{dt} = E - D \quad (4)$$

ここに、 E は侵食速度、 D は底面への浮遊泥の堆積速度であり、堆積速度 (D) について泥の沈降過程を対象とした場合には次式を用いるのが一般的である。

$$D = w_s p C_0 \quad (5)$$

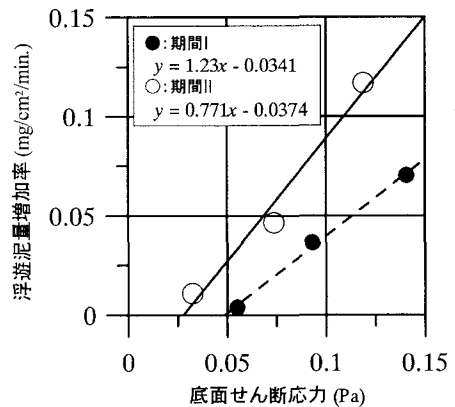


図-7 浮遊泥量の増加率と底面せん断応力の関係

ここに、 w_s ：泥粒子の沈降速度、 p ：沈降確率、および C_0 ：底面直上の泥粒子濃度である。

浮遊泥量の再現計算では、流速の観測値（図-5）を基に式（3）で求まる底面せん断応力に対し、前章で得られたパラメータを用いた侵食速度（式（1））と沈降確率を1とした堆積速度（式（5））から、浮遊泥量の時間変

動を式(4)により計算した。沈降速度を0.18 cm/s とし、また小潮期の浮遊泥量レベルをバックグラウンド値とした場合の計算結果を図-6の観測結果に重ねて示す。11月6日に見られる浮遊泥量の極端な増大は、波浪による底泥の巻き上げや干潟域等からの高濁度水の移流の効果が影響しているものと考えられ、本計算ではこれらの要因は考慮されていない。しかし、それ以外の期間では、潮流変動に対応した浮遊泥量の時間変動が、大潮期・小潮期を含めた観測全期間を通じて良好に再現されている。このことは、本観測海域における浮遊泥量の時間変動に対し、水平方向の移流の効果よりも潮汐流の強弱に対応した底泥の巻き上げと沈降が支配的であるという仮定と、そのような条件で取得された侵食速度係数等のパラメータの値が妥当であることを意味する。

なお、底泥移動の計算では、式(5)中の沈降確率を次式で表す場合も多く見られる。(たとえば、Krone, 1993)

$$p = \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}\right) \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 τ_d ：沈降に関する限界せん断応力である。 $\tau_d = \tau_c$ として式(6)を用いた場合の計算結果を $p=1$ とした上記の計算結果と比較して図-8に示す。外力が τ_d 以下のときのみ沈降が生じるとする式(6)の考え方では、潮流速の減速期においても作用外力が τ_d を下回るまで継続して侵食が生じるため、図-8に示すように浮遊泥量の減少期の再現に問題が生じる。浮遊泥の水平方向の輸送量を検討していく際には、このような位相関係も含めた浮遊泥量変動の再現が重要であることを考慮すると、式(6)を用いるよりも $p=1$ とした計算方法の方が適切である。このような見解は米国 Chesapeake 湾をはじめ海外での観測結果の検討において同様な指摘が既になされており (Sanford・Halka, 1993; Winterwerp・van Kesteren, 2004)、ここでの検討結果でも同様な結論が導かれたことになる。

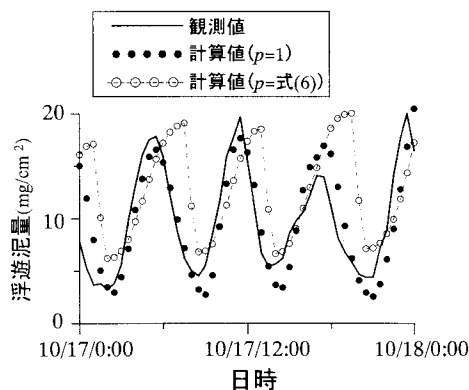


図-8 沈降条件の違いによる浮遊泥量計算結果の差

5. おわりに

有明海熊本沖で実施された流況および濁度観測による約1ヶ月間の連続観測データを用い、特に ADCP の反射強度データから推定される SS 濃度の鉛直分布を基に、潮汐流による底泥の巻き上げ現象のモデル化に必要な底泥の移動限界や侵食速度に関するパラメータを取得した。さらにこれらのパラメータを用いた侵食速度推定式により、潮汐外力に支配される現地での浮遊泥量の変動が精度良く計算できることを観測結果との比較を通じて確認した。今後は、浮遊泥の鉛直分布の再現や3次元モデルへの取り込みにより、実海域における広域的な底泥輸送の予測精度の向上を図る予定である。

謝辞：現地調査の実施にあたり、国土交通省九州地方整備局熊本港湾空港整備事務所の協力を得た。関係者各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 川西澄・水野博史・内田卓志(2001)：1.5MHz 超音波ドップラー分布計を用いた感潮域における懸濁粒子の動態観測，海工論文集，第48巻，pp. 1096-1100.
- 吉川秀夫 編著(1985)：流砂の水理学，丸善株，543p.
- 楠田哲也・山西博幸・吉見博之・二渡了(1989)：攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究，海工論文集，第36巻，pp. 314-318.
- 中川康之(2003)：有明海における底泥輸送現象のモデル化，港湾空港技術研究所報告，第42巻，第4号，pp. 25-42.
- 中川康之・今林章二・末次広児(2002)：有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析，海工論文集，第49巻，pp. 566-570.
- 村上和男・菅沼史典・佐々木均(1989)：円形回転水路による底泥の巻き上げりと沈降に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第28巻，第1号，pp. 43-76.
- 横山勝英・藤田光一(2001)：多摩川感潮域の土砂動態に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp. 937-942.
- Gartner, J. W. (2004)：Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California, Marine Geology, Vol.211, pp. 169-187.
- Krone, R. B. (1993)：Sedimentation revisited, In Mehta A. J. (Ed.) Nearshore and estuarine cohesive sediment transport, American geophysical union, Coastal and estuarine studies, pp. 108-125.
- Mehta, A. J. (1988)：Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion, In Dronkers, J. and W. van Leussen (Eds.) Physical processes in estuaries, Springer-Verlag, pp. 427-445.
- Sanford, L. P. and J. P. Halka (1993)：Assessing the paradigm of mutually exclusive erosion and deposition of mud, with examples from Chesapeake Bay, Marine Geology, Vol. 114, pp. 37-57.
- Winterwerp J. C. and W. G. M. van Kesteren (2004)：Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment, Elsevier, 466p.