

潮差と河川流量が河口域の成層強度と浮遊砂泥輸送量に与える影響

川西 澄¹・中村智史²・荒木大志³・水野雅光⁴

潮汐や河川流量等により河積・流れ場・密度場が短時間に大きく変化する河川感潮域における、密度成層強度、流速、浮遊砂泥輸送量の変動特性を解明するため、太田川放水路において長期連続観測を行った。潮汐の半日・半月周期変動によって密度成層強度、流速、浮遊砂泥濃度は大きく変動しており、潮汐位相によって密度成層強度が大きく変動するため、上げ潮期と下げ潮期では流速分布形が大きく異なる。その結果、平水時に浮遊砂泥は観測地点（河口から 2.8 km 上流）より上流方向へ輸送されている。日平均浮遊砂泥輸送率は、主に河川流量と潮差によって変動しており、それらの関係を定量的に把握できた。

1. はじめに

河川感潮域に流入する淡水量は、集水域への降水、蒸発散などにより季節的に大きく変化する。一方、河口からの海水の遡上は、水域に大きな密度差を引き起こし、密度流現象を生じさせる。両者の水量に応じて淡水と海水の接触・混合する状況は絶えず変化しており、流れ場は極めて複雑なパターンを呈している。河口域を循環する浮遊砂泥の挙動把握は数多く研究されているが、半日周期変動や、半月周期変動、河川流量の変化などの影響を受けている浮遊砂泥の実態把握は未だ十分ではない。河川流量と潮汐の相互作用によって流れ場が短時間に大きく変化する感潮域において、密度場と浮遊砂泥の輸送過程を把握することは、河道管理を行う上で重要である。また河口域では豊富な栄養塩が供給されており、そこでの河岸干潟の環境創出や保全を考慮する上でも、浮遊砂泥の動態を解明する必要がある。

そこで、本研究では水門操作と潮汐により著しい非定常性を示す太田川放水路において、3 年間に亘って断続的に行った長期連続観測結果から、密度成層強度や浮遊砂泥輸送量に対する潮差と河川流量の影響を、潮汐によって引き起こされる半日・半月スケールの変動や季節変動とともに明らかにすることを目的とする。

2. 観測概要

(1) 観測地点

太田川放水路は広島デルタの最西部に位置している。図-1(a)に示すように、河口から上流の市内派川との分岐点までの距離は約 9 km で、放水路上流端には祇園水門、市内派川側には大芝水門がある。祇園水門は平水時、2004 年 3 月中旬までは 3 つのゲート全てを開度 0.1 m

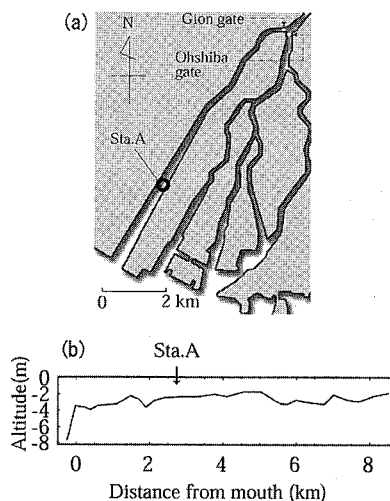


図-1 (a)観測地点と (b)河床縦断形状

としていたが、それ以降は右岸側の 1 つだけを開度 0.3 m としている。河川流量が $400 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えると、全てのゲートが全開とされる。また、大芝水門は常時全開となっている。感潮域であるため、放水路に流入する正確な河川流量は不明であるが、平水時は河川流量のおよそ 2 割、 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える出水時は 5~6 割程度が流入している。河床の縦断地形は図-1(b)に示すように、河口部から広島湾に向かって急激に深くなっているが、放水路内の河床勾配は非常に緩やかである。

(2) 測定方法

河口から 2.8 km 上流の地点において、2003 年~2005 年に亘って断続的に流速・水質の長期観測を行った。超音波ドップラー流速分布計 (Nortek 社製 1.5 MHz-NDP, 以下 NDP) を Sta. A に係留し、測定層厚 0.25 m, 平均時間 5 分, 測定間隔 20 分に設定し、0.75 m 以深の流速と散乱強度の鉛直分布を測定した。また、表層と底層における海水密度を把握するために、表層 (水深 0.1 m) に水温塩分計 (アレック電子社製 COMPACT-CT) を、底層 (河床上 0.4 m) に多項目水質計 (アレック電子社製

1 正会員 工博 広島大学大学院 助教授
2 正会員 工修 清水建設(株)
3 学生会員 広島大学大学院
4 正会員 国土交通省中国地方整備局

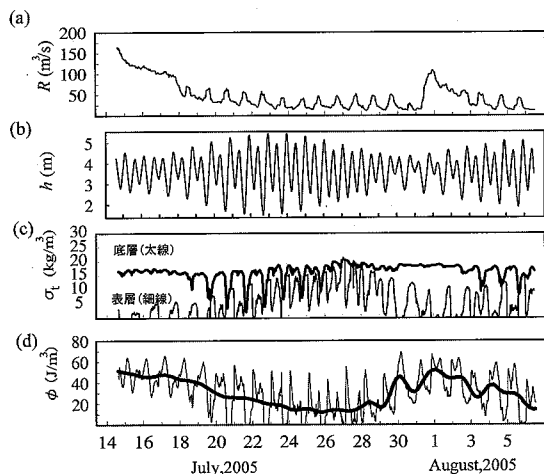


図-2 2005年夏季における (a)河川流量, (b)水深, (c)表底層密度, (d)密度成層強度の経時変化

TPM クロロテック)を設置し,連続測定した.測定間隔はそれぞれ2分,10分とした.NDP から得られる体積後方散乱係数は採水サンプルのSSおよび濁度計の値との比較結果を用いて,浮遊砂泥濃度に変換した.

3. 結 果

(1) 密度及び密度成層強度の長周期変動

密度及び密度成層強度の長周期変動と,その季節や河川流量による相違を把握するため,図-2~図-4に2003年夏季(6/24~7/9),2003年冬季(12/1~12/25),2005年夏季(7/14~8/6)における観測結果を示す.(a)は祇園水門と大芝水門の分岐点から約5km上流にある矢口第一水位観測所で測定された水位から算出した河川流量,(b)は観測地点における水深,(c)は表層・底層における密度の経時変化である.(d)は密度成層強度とその日平均値(太線)の経時変化であり,成層状態にある水柱を一樣な状態にするのに必要な単位体積あたりのエネルギー ϕ を用いた.

(c)より,いずれの観測期間においても小潮期は底層密度がほとんど変化せず,表層と底層での密度差が大きい事が分かる.大潮期は,河川流量によって程度は異なるものの,底層・表層共に大きく変化し,低低潮から高高潮に向かう上げ潮期には表層と底層で等しい値となり,鉛直的に均一に混合された状態になっている.しかし,下げ潮期になると表層と底層での密度差が再び大きなものとなっており,大潮期は短時間で混合形態が激しく変化していることが窺える. ϕ の日平均値は,いずれの観測期間においても潮差と河川流量に対応して変化しており,潮流混合の強い大潮期は成層強度が小さく,小潮期

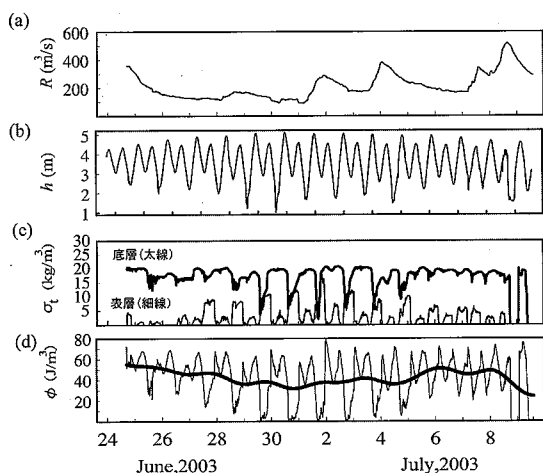


図-3 2003年夏季における (a)河川流量, (b)水深, (c)表底層密度, (d)密度成層強度の経時変化

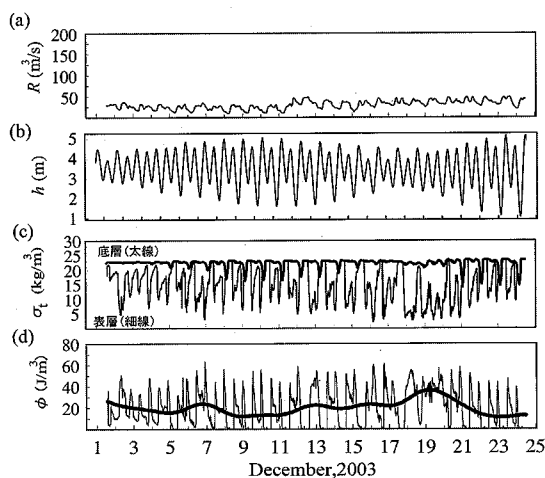


図-4 2003年冬季における (a)河川流量, (b)水深, (c)表底層密度, (d)密度成層強度の経時変化

になると増加することが分かる.2003年冬季の場合(図-4), ϕ の日平均値は大潮期 12.3 J/m^3 ・小潮期 36.7 J/m^3 であり,2005年夏季(図-2)は大潮期 15.2 J/m^3 ,小潮期 51.9 J/m^3 となっており,平常時は小潮期の方が大潮期より3倍程度 ϕ の日平均値が大きい.河川流量が多い2003年夏季の場合(図-3),大潮期 32.9 J/m^3 ,小潮期 57.1 J/m^3 であり,他の観測期間に比べて大潮期でも大きな値となっている.しかし,2003年7月8日のように河川流量が $400 \text{ m}^3/\text{s}$ を越えて祇園水門が全開にされると,底層の塩水まで一挙に河川水に押し流され,日平均 ϕ は小さくなっている.

図-5に,大潮期(潮差2.5~4m)と小潮期(潮差0.5~2m)における河川流量と日平均成層強度の関係を示す.大潮期は,河川流量の増加に伴って日平均 ϕ が緩やかに増加し,流量が約 $230 \text{ m}^3/\text{s}$ の時にピークを

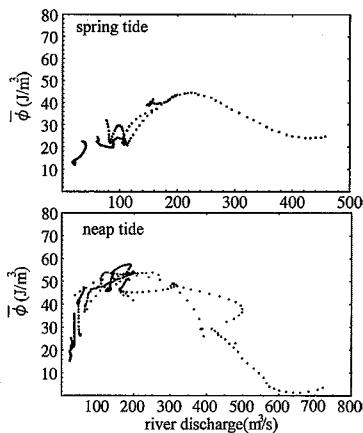


図-5 大潮期・小潮期における河川流量と日平均成層強度の関係

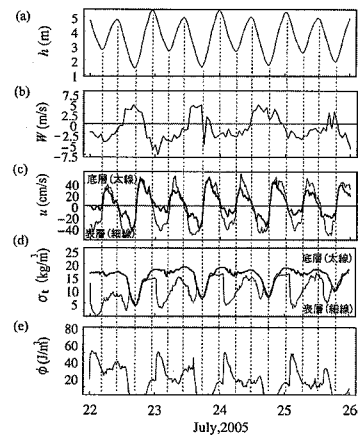


図-6 大潮期における (a)水深, (b)主流方向風速, (c)表底層流速, (d)表底層密度, (e)密度成層強度の経時変化

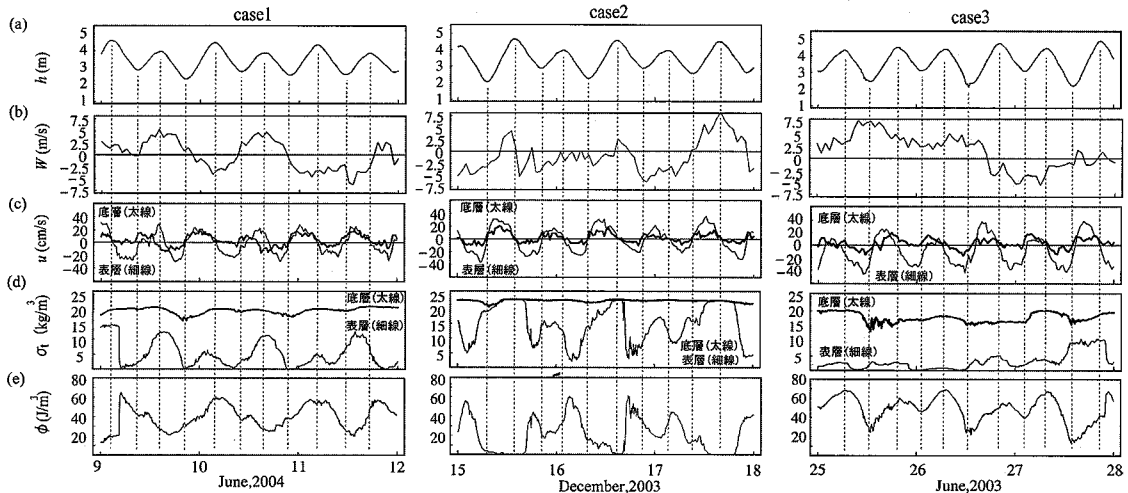


図-7 小潮期における (a)水深, (b)主流方向風速, (c)表底層流速, (d)表底層密度, (e)密度成層強度の経時変化

示している。小潮期は河川流量が $50 \sim 100 \text{ m}^3/\text{s}$ で日平均 ϕ が急激に増加しており、少ない流量でも密度成層が発達する事が分かる。このように、日平均成層強度の増加の仕方・大きさは異なるが、観測地点では大潮期・小潮期共に河川流量が $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度までは流量の増加に伴い成層強度が強められ、それ以上になると逆に弱められるという傾向がある事が明らかとなった。

(2) 密度及び密度成層強度の短周期変動

図-6と図-7に大潮期と小潮期における (a)水深, (b)主流方向風速, (c)表底層流速, (d)表底層密度, (e)密度成層強度の経時変化を示す。表層流速はNDPの測定第1層目である水深 0.75 m での流速、底層流速は水深の 80% における流速であり、流速・風速は上流方向を正とした。大潮期の底層密度は半日周期で変動しており、干潮時に極小値をとっているが、日潮不等の影響を強く受け、高低潮時の密度低下は小さい。表層密度の変動は

複雑であり、底層密度より早く極小値をとり、低低潮前後では鉛直的に均一な状態となり底層との密度差が無くなっている。 ϕ は潮流の流速分布に起因する密度場の変動機構である tidal straining (Simpson ら, 1990) に対応した周期的な変動を示している。 ϕ の時間変動は大きく、下げ潮初期の強い成層状態から、低低潮付近の強混合状態まで出現している。

小潮期は、底層密度の変化が非常に小さく、 ϕ の変化はほとんど表層密度の変化に起因している。図-7に示す小潮期の case1 は、9日、10日昼の下げ潮期に表層が上流方向、底層が下流方向という通常と逆の流れが生じている。これは、小潮期は成層強度が強く、渦粘性が小さくなり、風の影響を受けやすいためであると考えられる。大潮期はこのような流れの逆転は見られず、風の影響を受けにくい事が分かる。また、この期間の風は海陸風の特徴を持ち、低高潮から低低潮に向かう下げ潮期に

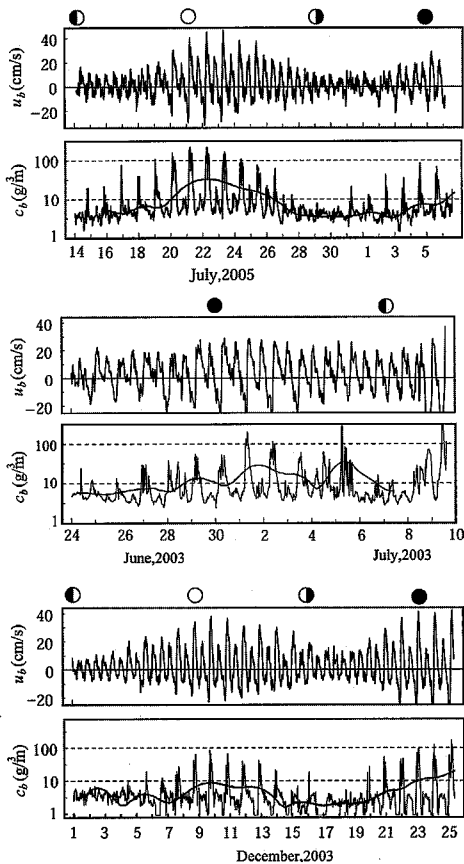


図-8 各観測期間における底層流速と底層濃度の経時変化

上流向き約 5 m/s の海風が吹くことにより淡水の流下が妨げられ、 ϕ は日周期の変動を示している。小潮期 case2 は、海陸風の特徴に加え、冬季の季節風の影響により河口向きの吹送時間が長い。この期間では case1 の期間のように表層の淡水流下が妨げられる事がなく、 ϕ は大潮期と同様に半日周期の変動を示している。このように小潮期は tidal straining に加えて、潮汐位相と風向の組み合わせや河川流量によって ϕ の変動パターンも複雑に変化している。

(3) 浮遊砂泥濃度と輸送率の変動特性

2005 年夏季、2003 年の夏季と冬季の底層（水深の 80 %）における流速、浮遊砂泥濃度とその日平均値（太線）の経時変化を図-8 に示す。浮遊砂泥濃度の顕著な上昇は大潮期の低低潮前後に発生しており、流速のピークと一致していることから、濃度変動は主に河床堆積物の再懸濁により引き起こされている事が分かる。日平均浮遊砂泥濃度は潮差に対応して半月周期変動を示しており、夏季と冬季を比較すると、2003 年と 2005 年夏季の最大値は共に約 30 g/m^3 、2003 年冬季の最大値は 17.3 g/m^3 であり、夏季の方が 2 倍程度大きくなっている。

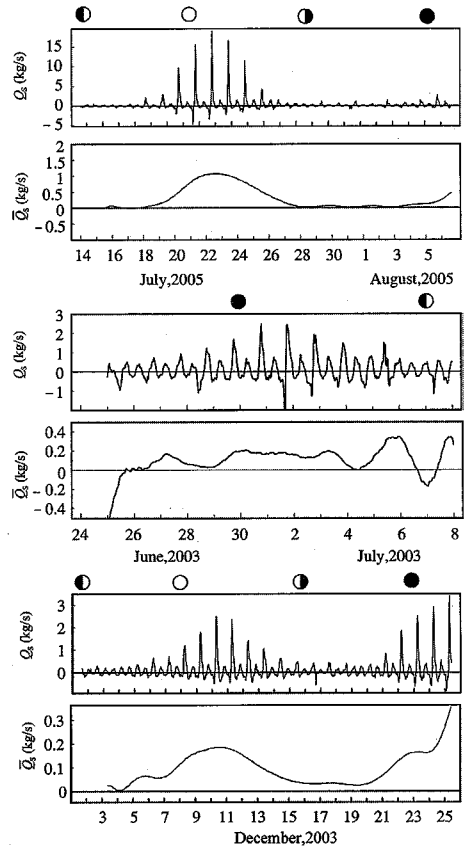


図-9 各観測期間における浮遊砂泥輸送率とその日平均値の経時変化

この要因として、2003 年冬季に比べて 2003 年夏季は河川流量が多く、2005 年夏季は潮差が約 0.4 m 大きい事に加えて、夏季は梅雨等による出水によって、再懸濁しやすい底質細粒分のピークが中流付近から河口付近へと移動してきているためであると考えられる。また、河口や上流端からの浮遊砂泥流入量の変化も考えられるが、それについては今後調査を行う必要がある。

図-9 に浮遊砂泥輸送率とその日平均値の経時変化を示す。なお、浮遊砂泥輸送率は次式により評価しており、上流向きを正としている。

$$Q_s = B \int_{z_0}^{z_1} u(z) C(z) dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで B : 川幅、 z_0 : 測定第 1 層目水深 0.75 m、 z_1 : 0.8 h m である。いずれの観測期間においても、輸送率の変動には大潮期低低潮前後の濃度のピークに対応したピークが見られる。また、この時間帯以外の輸送率の値は小さく、浮遊砂泥輸送は間欠的に発生している事が分かる。大潮期における上げ潮時の輸送率は下げ潮時の値より大きく、日平均輸送率の値が正になっている事から、浮遊砂泥は 1 潮汐間で上流方向へ輸送されている事が分

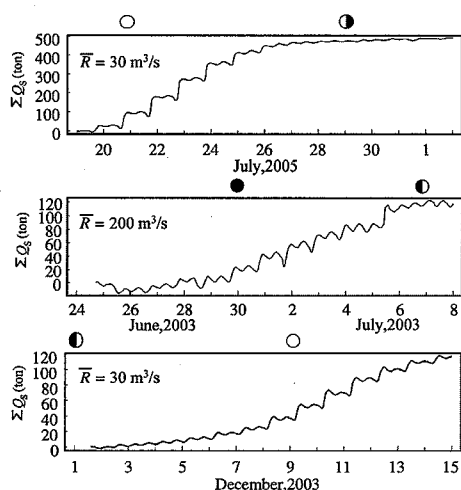


図-10 各観測期間における累積浮遊砂泥輸送量の経時変化

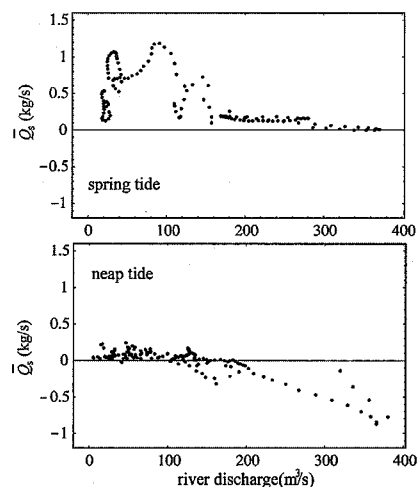


図-11 大潮期・小潮期における河川流量と浮遊砂泥輸送率の関係

かる。2003年夏季は河川流量が多いため、2005年夏季に比べて上流向き輸送率の値が小さく、小潮期では日平均輸送率の値が負になっている。また、2003年冬季も浮遊砂泥濃度が小さいため、輸送率の値は小さい。

図-10に大潮小潮周期14日間の累積浮遊砂泥輸送量の経時変化を示す。2005年夏季では14日間で約500トンが上流方向へ輸送されているが、流量の多い2003年夏季は輸送量が抑制されている。また、2003年冬季では夏季と流量が同程度であっても累積輸送量は1/4程度に過ぎない事が分かる。

図-11に観測地点での大潮期(潮差2.5~4m)と小潮期(潮差0.5~2m)における河川流量と日平均浮遊砂泥輸送率の関係を示す。浮遊砂泥輸送率の値は季節的にも変化していると考えられるが、冬季はデータ数が乏しいため、今回は夏季のデータのみ評価している。大潮期の日平均

輸送率は、河川流量が約100 m³/sの時に最大となり、流量がそれ以上になると流量の増加にともない減少する事が分かる。しかし、河川流量が水門操作の行われのない400 m³/s以内であれば、下流方向への輸送は生じていない。また、河川流量が30 m³/s以下では流量の減少にともない日平均輸送率も減少している。これは、河川水の流入量が減少し過ぎるとtidal strainingによる密度成層の変動が無くなり、流速分布の非対称性も生じなくなるためであると考えられる。小潮期は日平均輸送率の値は小さく、上流方向への輸送はほとんど生じていない。逆に、河川流量が約140 m³/s以上になると日平均輸送率は負となり、下流方向へと輸送される事が分かる。

4. 結 論

潮汐の半日・半月周期変動によって、密度成層強度、流速、浮遊砂泥濃度は大きく変動している。また、浮遊砂泥濃度は季節的にも変化している。

潮汐位相によって密度成層強度が大きく変動するため、上げ潮期と下げ潮期では流速分布形が大きく異なる。その結果、累積すると平水時の浮遊砂泥は、河口から2.8 km上流地点では上流方向へ輸送されている。

日平均成層強度と日平均浮遊砂泥輸送率は、主に河川流量と潮差によって変動している。Sta. Aにおける大潮期の日平均浮遊砂泥輸送率は、河川流量が約100 m³/sの時に最大となり、水門が全開とならない流量が400 m³/s以内であれば下流方向への輸送は生じない。小潮期は上流方向輸送がほとんど生じておらず、河川流量が140 m³/s以上になるとSta. Aより下流方向へ輸送される。

謝辞：本研究の一部は(財)河川環境管理財団の平成17年度河川整備基金と、中国建設弘済会の助成の下に行われた。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 伊福 誠, 合田宏隆, 中田正人(2003): 脇川感潮域における懸濁物質の挙動, 水工学論文集, 第47巻, pp. 1165-1170
- 川西 澄, 水野博史(2001): 浅水感潮域における水中音響散乱体の変動特性, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1045-1050.
- 川西 澄, 松山幸彦(2002): 内湾域に存在する海中懸濁粒子からの音響散乱, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 991-995.
- 川西 澄, 筒井孝典(2004): 浅水感潮域における密度成層の変動特性, 水工学論文集, 第48巻, pp. 781-786.
- 清水健司, 入江光輝, 石川忠晴(2004): 利根川感潮域における乱流と底泥の巻き上げに関する現地観測, 水工学論文集, 第48巻, pp. 769-774.
- Simpson, J.H. and J.R.Hunter (1974): Fronts in the Irish Sea, Nature, Vol.250, pp. 404-406.
- Simpson, J.H., Brown, J., Matthews, J. and Allen, G. (1990): Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification, Estuaries, Vol. 13 (b), pp. 125-132.