

底泥の巻き上げと底面境界層内の乱れの現地観測

Field Survey on Resuspension of Fine Sediments and Turbulence Structures in a Bottom Boundary Layer

中川康之¹・吉田秀樹²・田中克己³・大波多昌志⁴

Yasuyuki NAKAGAWA, Hideki YOSHIDA, Katsumi TANAKA and Masashi OHHATA

3-D near-bottom velocities were measured with high resolution in space and time to elucidate dynamics in the bottom boundary layer and resuspension process of fine bottom sediment at a coast off the Port of Kumamoto. Acoustic devices, including Acoustic Doppler Velocimeters (ADV) and Acoustic Doppler Profilers (ADP), were introduced to the velocity measurement and they were compared with ambient suspended solid concentrations monitored at the same time. Tidal asymmetry was observed in the data both of current velocities and suspended solid concentrations near the bed and higher concentration appeared during flood tide with higher turbulence near the bed.

1. はじめに

シルトや粘土の微細粒子(底泥)の移動現象の解明は、泥質域での航路や泊地埋没などの地形変化の予測に有用だけでなく、栄養塩類をはじめとする化学物質の移動にも密接に関係するため、水域環境の動態を把握する上でも重要な課題である。泥質域が広範囲に分布する有明海の浅海部では、大潮期になると潮汐流の作用により底泥の巻き上げが頻繁に生じている(たとえば、中川ら, 2002)。

一方、堆積物の移動過程を解明するためには、海底境界に作用する流体力の特徴を適切に把握する必要がある。このような外力の評価に際しては、時間的に高解像度な流れの測定が可能な、超音波式ドップラー流速計 ADV による流速測定が近年では多く実施されるようになった。これにより、流れの乱れ成分の測定結果に基づく底面せん断応力の評価(たとえば、Kim ら, 2000)や、さらには ADV の超音波反射強度から懸濁物濃度を推定し、乱れ成分による懸濁物の輸送フラックスを算定した試みもいくつかみられる(川西ら, 1996; 灘岡ら, 2001)。

本研究では、底泥の移動を生じさせる外力条件の実態を明らかとすることを目的として、底面境界近傍での濁度測定と同時に詳細な流速測定に関する現地観測を実施した。ADV による定点での乱れ計測に加えて、空間的にも高解像度な測定が可能な超音波式流速プロファイラ

ー(PC-ADP)を導入した連続測定を行い、底面極近傍での流速分布構造と浮遊懸濁物濃度分布の時間変動の対応関係について調べた。

2. 現地観測の内容

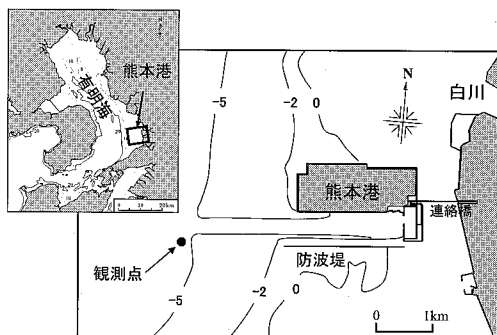


図-1 観測地点と水深コンター

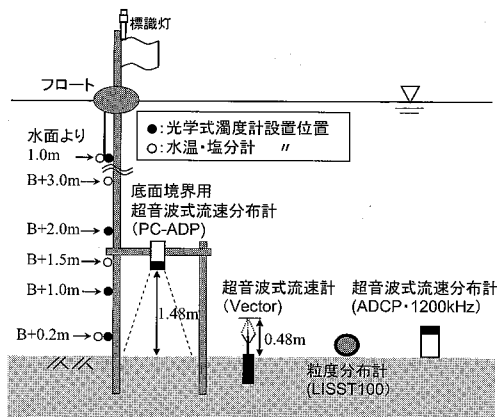


図-2 計測器設置の概要

- 1 正 会 員 工 修 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
- 2 正 会 員 工 修 国土交通省北陸地方整備局 新潟港湾・空港整備事務所 所長
(前・九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 所長)
- 3 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 課長
- 4 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 係長

表-1 使用計測機器と測定内容

測定項目	使用機器	測定高さ	記録間隔など
流速	超音波式3次元流速計 (Nortek 社製 Vector)	0.48 m	1時間おきに 8 Hz で約2分間
	超音波式流速プロファイラー (底面境界用, Sontek 社製 PC-ADP)	0.05 ~ 1.4 m (約4 cm 間隔)	30分おきに 2 Hz で約4分間
	超音波式流速プロファイラー (RD-Instrument 社製 ADCP1200 kHz)	1.35 m ~ 水面下 0.3 m 程度 (30 cm 間隔)	10分おきに 2分間 (1 Hz) の 平均値を記録
濁度	メモリー式後方散乱型濁度計 (アレック社製 COMPACT-CLW)	0.2 m 1.0 m 2.0 m 水面下 1.0 m	10分おきに 0.5 Hz で1分間
水温 塩分	メモリー式小型水温・塩分計 (アレック社製 COMPACT-CT)	0.2 m 1.5 m 3.0 m 水面下 1.0 m	10分おきに 1 データ
粒度	現地式粒度分布計 (Sequoia 社製 LISST100)	0.2 m	30分おきに 15秒間隔で 1分間

2003年8月21日から9月18日(以下、西暦年は略記)までの約1ヶ月間にわたり、有明海東岸に位置する熊本港沖の水深約5.5 m (D.L.基準)の地点(図-1)において、各種計測器を図-2に示すように海底設置させて連続観測を行った。使用機器の内容と測定方法(設置高さ、測定スケジュールなど)を表-1に示す。

流速測定においては、底面境界近傍を対象としたADVおよびPC-ADPによる詳細観測に加え、流速場の概況を捉えるために通常の超音波式流速プロファイラー(RD-Instruments社製ADCP・1200 kHz)により底面境界付近を除く全水深層を対象とする流速分布測定を行っている。濁度については、観測地点で採取された堆積物を用いた濁水試料により測器の検定を行い、濁度計出力をSS濃度(単位: mg/l)に換算した結果をここでは示すものとする。観測点周辺の底質について、コアサンプルを採取し分析したところ、表層から泥深3 cmまでの表層のみ砂分が10%以上含まれるが、それ以深ではシルトおよび粘土の泥分が90%を占め、また含水比については表層部分(0-3 cm)で125%である。

3. 観測結果と考察

(1) 概況

ここで解析対象とするのは、図-3に示す8月29日および30日の大潮期であり、潮位差は最大で約4.5 mである。観測点の南東約1 kmの地点に設置されている波浪観測塔(国土交通省熊本港湾空港整備事務所)において計測された波浪情報も同図に示す。対象期間において、有義波周期が4秒程度に達する時期がみられるものの、有義波高では20 cmを超えることはなく、総じて静穏

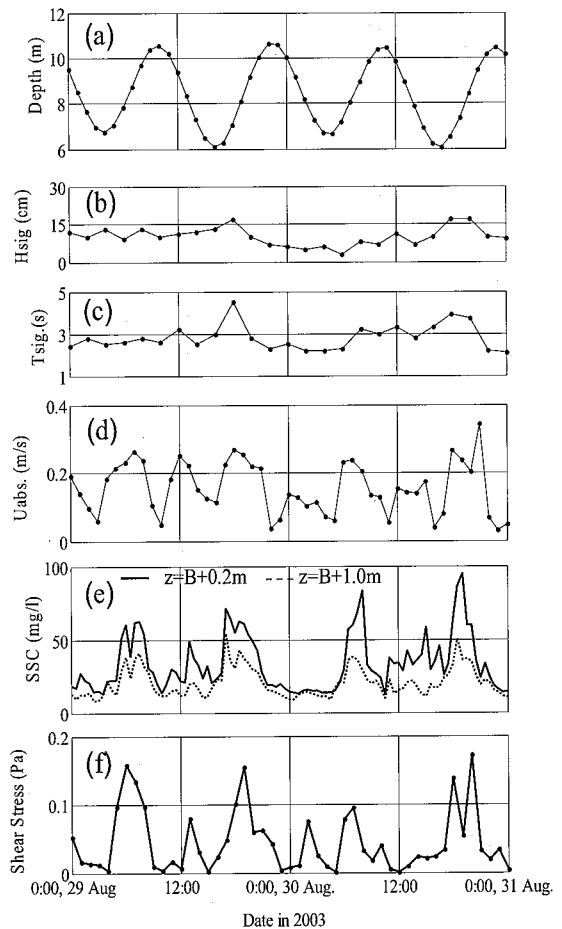


図-3 解析対象期間における潮汐・波浪・流況・濁度の時系列変化(上から順に(a)水深、(b)有義波高、(c)同周期、(d)底層流速絶対値(底面上約50cm)、(e)底層でのSS濃度(底面上20cmおよび100cm)、(f)せん断応力)

な条件となっている。

底面付近の流速(底面上約50 cm)は、潮汐変動における上げ潮および下げ潮時に20 cm/s前後の流速となり、相対的に上げ潮時の流速の方が速くなっている。一方、底層付近のSS濃度についてみると、ほぼ流速変動に対応して流速の増大時にSS濃度も高くなる傾向が見られる。本観測地点よりも約1 km沖合の水深約10 mの地点(以下、沖合観測点)で行った観測結果では、上げ潮および下げ潮時のいずれにおいても底層付近でのSS濃度の上昇がみられる(中川ら, 2002)のに対して、本調査地点では後に詳述するように、流速分布の潮汐間での非対称性がみられることが特徴的であり、それに対応して底層付近のSS濃度も上げ潮時の方が相対的に高くなる。

SS濃度の上昇時における浮遊粒子の粒径特性について、現地式粒度分布計(LISST100)により測定された

浮遊懸濁物の粒径分布を図-4に示す。同図では、下げ潮最強流時(8月29日, 13:00)および上げ潮最強流時(同19:00)と干潮時付近(同16:00)における測定結果を示しており、最もSS濃度が上昇した上げ潮時(19:00)においては、測定対象の全粒径域で粒子濃度(体積濃度)が上昇し、特に200 μm 付近でピークがみられる。観測地点周辺では、堆積物の粒度組成としてシルト分以下(74 μm 以下)が主体であることを考慮すると、200 μm 程度の細砂分が選択的に巻き上げられているとは考えにくい。したがって、測定結果にみられる200 μm 付近のピークは、シルトあるいは粘土粒子により形成されるフロック径に相当しているものと思われる。本件については、採水等による懸濁物の観察により実証する必要がある。

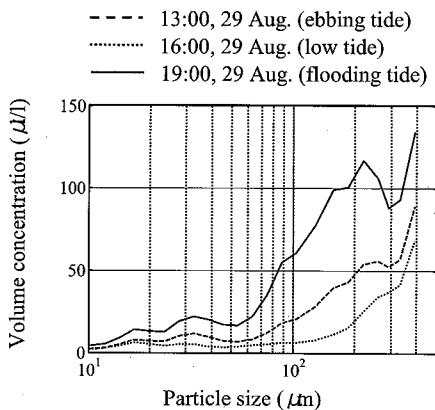


図-4 浮遊懸濁物の粒径分布測定例

さらに図-3中の最下段には、ADVのデータから次式により、測定層におけるせん断応力を推定した結果を時系列で示してある。

$$\tau = \rho \sqrt{(u'w')^2 + (v'w')^2} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ρ :海水密度(=1020 kg/m³)、 u' 、 v' 、 w' :流速の乱れ成分(m/s)である。流速の乱れ成分は各測定バーストごとの全期間(約2分間)での平均値からの変動分とし、波動成分の分離はせずに、せん断応力を求めた。算定されたせん断応力と、SS濃度の変動との対応をみると、せん断応力が0.1 Paを超えるとSS濃度が増大する傾向が見られる。このような底面付近でのせん断応力の増加と、SS濃度の増大が対応するケースについては、観測地点周辺も含めて堆積泥の巻き上げが主要因となって海底付近のSS濃度の増大が生じているものと考えられる。一方、せん断応力が小さいにもかかわらず、SS濃度の上昇が8月30日12:00~15:00頃の下げ潮時にみられ、これらは移流の影響が卓越したものと考えられる。ただし、このような現象はすべての下げ潮

時に生じているわけではない。

(2) SS濃度等の水質鉛直分布

SS濃度、塩分および水温の鉛直分布について、8月29日11:00(満潮付近)~19:00(上げ潮)の期間の主な潮時での測定結果を図-5に示す。SS濃度については、図-3の時系列図でも示したように、干潮時から上げ潮時にむかって濃度が増大し、その鉛直分布は上層より下層に向かって増大する分布となっている。この傾向については、沖合観測点での結果と同様であり(中川ら, 2005)、巻き上げられた底泥の移流が生じているものと考えられる。

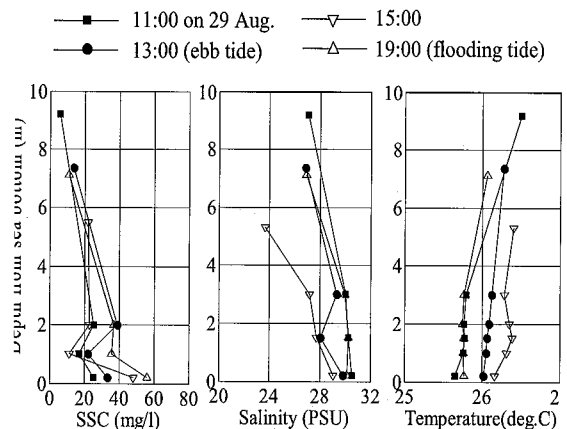


図-5 SS濃度、塩分、水温の鉛直分布

一方、塩分ならびに水温の測定結果についてみると、いずれも潮位変化に応じて全層にわたって変化がみられる。干潮時になると、塩分では最大で3 PSU程度の低下、水温は全層を通じて0.5度程度の上昇がみられる。このような変化は、観測点の北東部に流入する白川からの河川水の影響や、岸側に存在する干潟部で熱せられた比較的高温な水塊が、潮汐の変動に伴って移流しているためと思われる。なお、流れ場の鉛直構造に影響することになる、これら塩分および水温の鉛直分布については、底面上3 mから水面下1 mの間のデータを欠いているため、詳細な躍層の構造は把握できないものの、たとえば塩分については底面上3 m以内に比べてそれよりも上層では塩分の低下量が大きくなっており、上下層間での水塊の差異がみられる。

(3) 平均流速および乱れの鉛直分布

底泥の巻き上げに対する流れの作用について検討するため、1潮汐間の流速場の構造を時系列で示したものが、図-6である。同図ではADCPおよびPC-ADPにより測定されたバースト毎の平均流速プロファイルを、東方成分(上段)および北方成分(下段)についてそれぞれ示し、満潮時から下げ潮、干潮、上げ潮を経て次の満潮

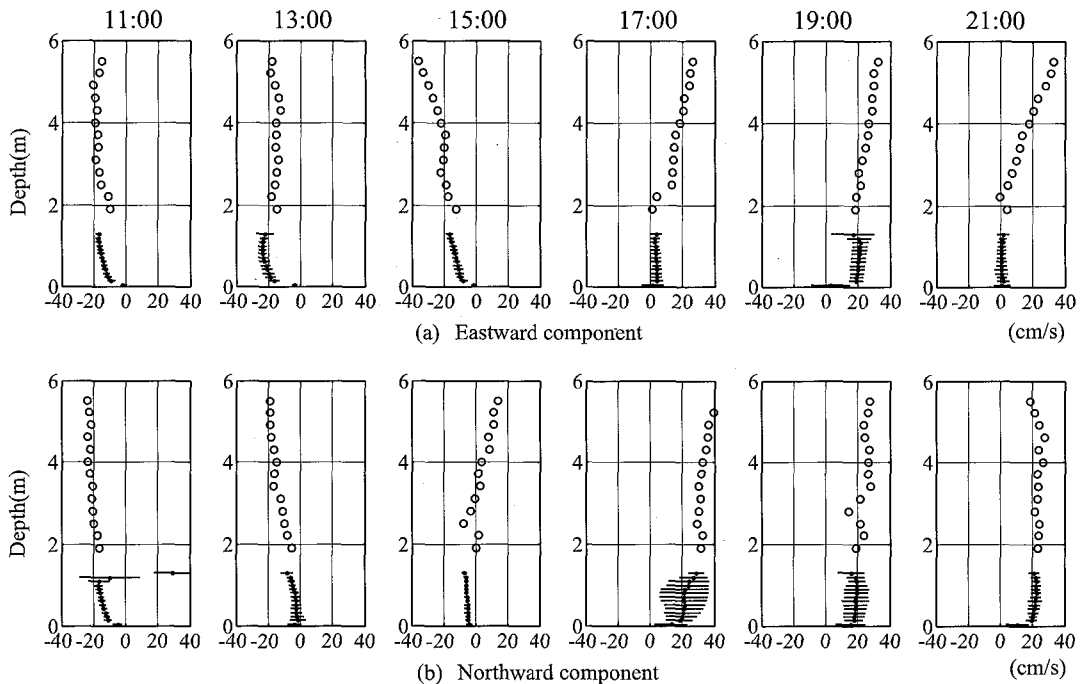


図-6 1 潮汐間 (2003 年 8 月 29 日 11:00 ~ 21:00) における平均流速および変動流速の鉛直分布
(○: ADCP による平均流速, ●: PC-ADP による平均流速, - : PC-ADP による変動流速)

時までを 2 時間おきに示している。また、底面近傍のみの流速分布測定を対象とした PC-ADP の測定においては、バースト毎に 2 Hz (約 4 分間) のデータを取得していることから、平均流速に対する変動分 ($\pm\sqrt{u^2}$, $\pm\sqrt{v^2}$) を横線に表示することにより、乱れの程度の鉛直方向の差異も示している。なお、同図では干潮時水深 (約 6 m) 以下の分布のみ示しており、また ADCP および PC-ADP 両機器ともに、センサーに近い側の観測結果にばらつきが多くみられたため、それらの層 (底面上 1.4 ~ 1.7 m) での測定データはここでは除いて示している。

図示した水深域全体における流速プロファイルを見ると、必ずしも対数則にしたがう分布にはなっておらず、シアー流れのような直線分布もしくは上に凸な分布形状もみられる。また PC-ADP により測定された底層 (底面上 1.4 m 以下) とそれよりも上層において不連続な流れの分布になっている場合もあり (たとえば 29 日 17:00 の東方成分)、塩分・水温でみられた上下層での水塊の違いに起因しているものと考えられる。

底泥の巻き上げに深く関与する底層付近での乱れ特性についてみると、北方成分 (図-6(b)) の 17:00, 19:00 および東方成分 (図-6(a)) の 19:00 に特に強い乱れ (変動流速) の増大が顕著であることがわかる。このような流速変動の増大は、ここでは図示はしていないが

29 日 6 時 ~ 7 時, 30 日 18 時 ~ 19 時などの干潮から上げ潮に流れが移行し始める位相において頻繁にみられ、いずれも SS 濃度が大きく上昇する時間帯に対応している (図-3)。したがって、平均流速の増大だけでなくこのような変動分が存在が底泥の巻き上げが生じる重要な要因になっているものと考えられる。一方、下げ潮時の底層での流れについては、図-3 で示したように上げ潮時に比べて最強流時の流速絶対値は小さく、流速変動分についても比較的小さい (図-6)。このように、本観測地点では下げ潮時と上げ潮時で流れの特性が異なり、SS 濃度の変動もそれに対応して下げ潮と上げ潮時で非対称なものとなっている。

(4) 流速の変動要因の解析

底面境界付近での流速変動が増大し、かつ底層付近での SS 濃度の上昇が顕著であった時期について、ADV により測定された流速データを FFT 解析することにより、その変動成分の周期特性について検討した。図-7 は (a) 29 日 17:00 および (b) 同 19:00 における水圧データと流速 (水平 2 成分) の時系列データから得られた各項目に対するパワースペクトルである。干潮から上げ潮の転流した直後の 29 日 17:00 の結果をみると水位変動および流速変動に対して、3 ~ 4 秒程度の周期帯にピークがみられ風波の影響による流速変動が生じている。図-3 における波浪観測の結果によると、29 日 18:00 に

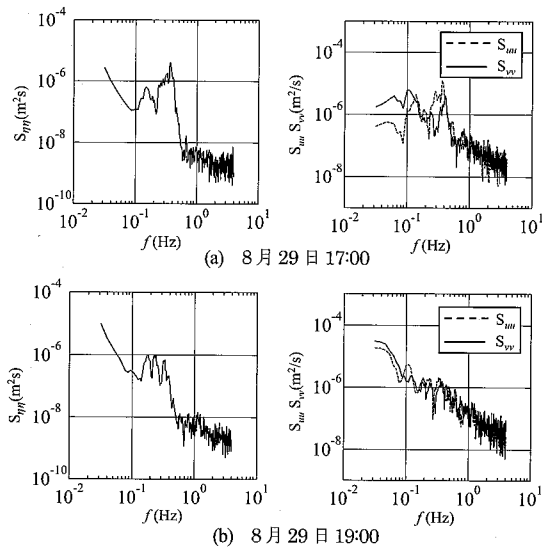


図-7 水位(左)と流速(右)変動のエネルギースペクトル

は有義波高は 15 cm 程度ではあるものの、周期が 4 秒程度にまで他の時間帯よりも長くなっている。仮に周期 4 秒、波高 20 cm、水深 6 m を仮定すると、微小振幅波理論によれば底面での軌道流速振幅は約 10 cm/s となり、ここで観測された変動流速と同程度となる。また 7 ～ 8 秒程度の周期帯にも 2 次的なピークがみられる。

一方、29 日 19:00 の結果においては、10 秒以下の周期帯には、17:00 におけるほどの明瞭なピークはみられないが、流速変動に対するパワースペクトルにおいては、それよりも長周期側のエネルギーが大きくなっており、流速変動の要因が比較的周期の長い成分によるものであることを示唆する結果となっている。これらの結果をふまえると、巻き上げに関与する主要外力の評価においては、波高計データからは比較的に静穏に見える時期においても平均流速の増大だけでなく、風波や周期が 10 秒以上の長周期な流速変動の影響を詳細に評価することが重要であると考えられる。

4. おわりに

底泥の移動を生じさせる外力条件の実態を明らかにすることを目的として、底面境界近傍での濁度測定と同時に詳細な流速測定に関する現地観測を有明海熊本港沖で実施した。超音波式流速プロファイラー (PC-ADP) など導入し、底面極近傍での流速分布構造と浮遊懸濁物濃度分布の時間変動の対応関係について調べた。その結果、下げ潮および上げ潮時の間で流れの特性に違いがみられ、それに対する巻き上げ等に起因する SS 濃度の変動も上げ・下げ潮間で異なり、上げ潮時により濃度が高

くなる傾向がみられた。このような潮汐間での非対称な変動は、干潟域でも観測されており (日村ら, 2007), 特に底泥の輸送方向を特徴づける重要な特性である。

さらに、本調査の観測結果からは、通常の ADCP 観測では測定が困難な、底面近傍約 1.5 m 以内の流速および乱れ変動の様子を捉えることに成功した。上層部の平均流の評価だけでは、底層での懸濁物質の濃度変化を支配する外力評価には不十分であり、また底層付近の流速においても平均値だけでなく、風波成分などによる流速の変動成分の評価が重要であることを示した。なお、底泥の巻き上げには風波の影響が重要であることは、これまでの観測結果 (たとえば、瀬口ら, 1989) によっても示されている事実ではあるが、今回の観測では有義波高が 15 cm 程度の比較的静穏な条件でも、平均流の増大だけでなく変動流速の程度により底面境界での SS 濃度の増減に影響を及ぼしていることが示された。

謝辞：現地観測の実施ならびに波浪観測データの提供など、調査の遂行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ことを付記し、関係者各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 川西 澄・小谷英史・余越正一郎(1996): 超音波ドップラー流速計を用いた感潮域の流動と懸濁物質濃度の現地観測, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1086-1090.
- 瀬口昌洋・渡辺 潔・加藤 治(1989): 有明海奥部浅海域における底層の流れと濁りについて, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 819-823.
- 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, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 566-570.
- 中川康之・吉田秀樹・谷川晴一・黒田祐一(2005): 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, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 441-445.
- 灘岡和夫・若木研水・二瓶泰雄・今井陽介・青木康哲・丸田直美・大見謝辰男・満本裕彰・小林 孝・藤井智史(2001): 現地観測に基づく石垣島サンゴ礁海域の流動特性と微細土砂・熱輸送特性に関する解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1151-1155.
- 日村健一・山西博幸・徳永貴久・荒木宏之・大石京子(2007): 泥干潟における懸濁物質の動態に関する研究, 日本水環境学会年會講演集, p. 137.
- Friedrichs, C. T., L. D. Wright, D. A. Hepworth and S. C. Kim (2000): Bottom-boundary-layer processes associated with fine sediment accumulation in coastal seas and bays, Continental Shelf Research, No. 20, pp. 807-841.
- Kim, S. C., C. T. Friedrichs, J. P.-Y. Maa and L. D. Light (2000): Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 5, pp. 399-406.