

中国・黄河から渤海に流入する高濁度水塊の挙動特性に及ぼす 潮流及び風応力の影響

中辻啓二¹・志水克成²・山中亮一³

近年, 中国では急激な経済の発展に伴って沿岸域の環境汚染が深刻化している。急激な近代化のために渤海に流入する黄河では農業・工業・生活用水の過剰取水があり, 下流域で干上がってしまう“断流現象”が生じた。このため, 中国政府はダムを建設し, 土砂を一気に渤海まで流す調水調沙事業を推進している。本研究では, 黄河から流入する高濁度水塊の挙動特性に及ぼす潮流・風応力の影響を明らかにすることを目的に, 潮汐, 気象擾乱, 波浪, 密度流, 濁度分布, 底質の巻き上げを考慮した数値実験と衛星画像からその影響を検討した。その結果, 流入する土砂はほとんどが来州湾に沈降すること, 海底面摩擦速度において, 潮流に起因する量と, 強風の連吹に起因する変化量が同程度であることがわかった。

1. はじめに

近年, 中国では急激な経済の発展に伴って沿岸域の環境汚染が深刻化している。とくに中国北東部に位置する閉鎖性海域の渤海(図-1 参照)では, 中国海洋環境公報(2004)によると, 無機窒素と活性リン酸塩, 石油類による汚染が深刻である。渤海全域の 35% の海域でそれらが環境基準に達していないと報告されている。また, 沈殿物中に DDT, ヒ素, カドミウムが多く含まれているとの報告もある。これらの主な原因は, 下水処理やゴミの無害化処理などの社会基盤整備の遅れであり, 汚水は主に河川経由で渤海に流入する。渤海には黄河, 遼河, 海河という大河川からの淡水流入がある。とくに黄河は流量が中国における第二の河川であり, 河川水が高濁度であることで知られている。

この黄河の流量変動特性は 1970 年頃を境に大きく変わる。近年では急激な近代化のために農業・工業・生活用水の過剰取水があり, 下流域で干上がってしまう“断流現象”が生じた。そのため中国政府はダムを建設し, 土砂を一気に渤海まで流す調水調沙事業を推進している。大量の濁質がこの調水調沙事業による放水時(図-2 参照)に渤海に流入する。この濁質はリンや重金属のキャリアとして働くため, 流入する高濁度水塊の挙動を把握することは, 渤海の環境保全を考えるうえで重要である。

そこで, 本研究では黄河から流入する高濁度水塊の挙動特性と, それに及ぼす潮流・風応力の影響を明らかにすることを目的として, 潮汐, 気象擾乱, 波浪, 密度流, 濁度分布および底質の巻き上げを考慮した 3 次元数値実験を実施し, 衛星画像ならびに濁度分布からその影響を検討した。

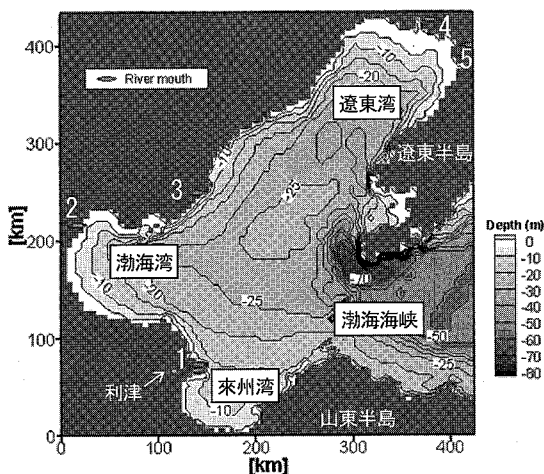


図-1 渤海の水深分布と河口位置
(1: 黄河, 2: 海河, 3: ロワン河, 4: 双台子河, 5: 遼河)

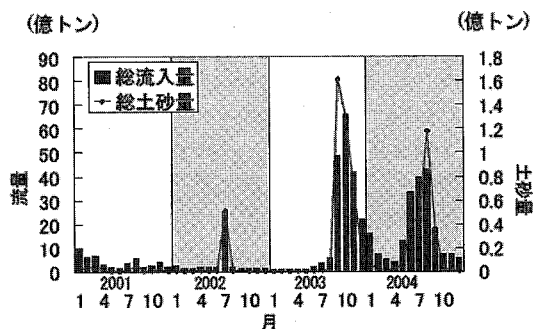


図-2 調水調沙事業にともなう黄河の月別総流入量と総土砂量の変化(利津における観測値)
(国務院水利部水利委員会, 2005)

2. 数値モデルの概要

本研究では, 準 3 次元バロクリニック流動モデル

1 フェロー 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻
2 正会員 修(工) 中国電力株式会社
3 正会員 博(工) 横浜国立大学助手 大学院環境情報研究院

ODEM (中辻ら, 1991) により, 流動場および密度場を計算した. 流動モデルの詳細は山中ら (2004) と同様である.

浮遊粒子 (SS) の輸送は ODEM の移流拡散方程式を解くことにより計算した. 本モデルでは, SS の沈降と, 海底面における境界条件として巻き上げと堆積のフラックスを考慮した. 沈降速度 W_s は図-1 に示す黄河河口の利津における中央粒径の観測値 ($=0.031 \text{ mm}$) を用いて Rubey (1933) の式により算出した. 海底面における再浮上フラックス q_e , 沈降フラックス q_d は以下の式 (1), 式 (2) に従い算出した. すなわち, 海底面摩擦速度 u_{*b} を指標とし, 定められた限界摩擦速度を海底面摩擦速度の計算値が上回れば巻き上げ, 下回れば堆積となる.

$$q_e = \begin{cases} M\rho(u_{*b}^2 - u_{*ce}^2), & (u_{*b} \geq u_{*ce}) \\ 0, & (u_{*b} < u_{*ce}) \end{cases} \quad (1)$$

$$q_d = \begin{cases} 0, & (u_{*b} > u_{*cd}) \\ C \cdot W_s, & (u_{*b} \leq u_{*cd}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで,

- u_{*ce} : SS 再浮上の限界摩擦速度 [m/s]
- u_{*cd} : SS 堆積の限界摩擦速度 [m/s]
- M : 侵食速度定数 [s/m]
- ρ : 直上水の密度 [kg/m^3]
- C : 直上水の SS 濃度 [mg/l]
- W_s : SS の沈降速度 [m/s]

である. u_{*ce} , u_{*cd} , M の値は Christiane Kuhrtz ら (2004) によるバルト海における SPM 計算に使用されたパラメータを援用した. それらの値は表-1 に示す.

海底面摩擦速度 u_{*b} は潮流による摩擦速度と波浪による摩擦速度を合成することにより求めた. まず, x , y 方向の摩擦速度 u_{*x} , u_{*y} を式 (3), 式 (4) により算出した.

$$u_{*x} = u_{*ix} + u_{*w} \cos \theta \quad (3)$$

$$u_{*y} = u_{*iy} + u_{*w} \sin \theta \quad (4)$$

ここで, u_{*ix} , u_{*iy} は x , y 方向の潮流による摩擦速度であり, u_{*w} , θ は波浪による全摩擦速度とピークの波向きである. そして, これらを式 (5) により合成することで海底面摩擦速度 u_{*b} を得た.

$$u_{*b} = \sqrt{u_{*x}^2 + u_{*y}^2} \quad (5)$$

ここで, 潮流による摩擦速度 u_{*i} は ODEM により計算された最下層の流速を基に, 小池ら (2000) に従い式 (6) により算出した.

$$\frac{\bar{U}}{u_{*i}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (6)$$

ここで,

- $\bar{U}$: 水平流速 [m/s]
- u_{*i} : 海底面摩擦速度 [m/s]
- κ : カルマン定数 [$=0.4$]
- z : 海底面上の高さ [m]
- z_0 : 粗度高さ [m]

である. 式 (6) に以下に示す滑面における粗度高さの式

$$z_0 = \frac{\nu}{9u_{*i}} \quad (7)$$

を用いることで潮流による海底面摩擦速度 u_{*i} を求めることができる. ここで, ν は直上水の動粘性係数 [m^2/s] である.

波浪による海底摩擦速度 u_{*w} は, デルフト工科大学が開発した波浪推算モデル SWAN を用いて算定した有義波高 H , 有義周期 T , ピークの波向き θ を用いて以下の手順により求めた. まず底面水粒子速度 u_b を次式で算出する.

$$u_b = \frac{\pi H}{T \sinh(2\pi h/L)} \quad (8)$$

ここで, h は水深 [m], L は波長 [m] である. 波長 L は, 分散関係式を周期と波長で書き換えた式 (9) の近似式である式 (10) により算出した.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (9)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left\{2\pi\sqrt{\frac{h}{gT^2}}\left(1 + \sqrt{\frac{h}{gT^2}}\right)\right\} \quad (10)$$

ここでは, 海底面のせん断力は Grant&Madsen (1979) に従い次式で求めるとする.

$$\tau_{b,w} = \frac{1}{2}\rho f_w u_b^2 \quad (11)$$

ここで,

- $\tau_{b,w}$: 波浪の作用による海底面せん断力 [N/m^2]
- f_w : 海底面摩擦係数 ($=0.05$)
- ρ : 直上水の密度 [kg/m^3]

である.

式 (11) より式 (12) が導かれ, これより波浪の作用による摩擦速度 u_{*w} を得る.

$$u_{*w} = \sqrt{\frac{\tau_{b,w}}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{2}f_w u_b^2} \quad (12)$$

3. 計算手順

計算領域は図-3 に示す渤海全域とした. 水平方向の計算格子は 4 km から 6 km までの間で格子間隔を変化させ, 図-3 に示すように設定した. 計算に用いたパラメータは表-1 に示した通りである. 計算対象期間は

2002年1月から2003年12月までの2年間とした。差分時間間隔は15sと設定した。計算領域東側の開境界において、主要4分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1) を考慮した潮汐を与え、平均水位、水温、塩分、海流成分はJCOPE再解析データ(宮澤ら, 2003)に基づき与えた。海表面における風向、風速、気温、気圧、日射量の空間分布はNCEP再解析データに基づき経時変化を考慮して設定した。河川は図-1に示した5河川を考慮し、黄河の流量とSS濃度は図-2に示す利津における観測値に基づき設定した。SS堆積密度の初期値は全域で0とした。波浪による摩擦速度の時空間変動はSWANにより計算された有義波高、有義周期、ピークの波向きから計算して各計算格子に与えた。

4. 波浪推算結果

底質の巻き上げの支配因子のひとつである波浪特性について、SWANによる計算結果を検討する。渤海では風向・風速に季節的な特徴がある。世界気象資料(気象庁)によると、渤海では冬季は北風成分が卓越し風速が10m/s以上の日もある。夏季には南風成分が卓越し、風速は最大でも4m/s程度である。そこで北北東風と南風が連吹し、風速が12m/sと大きかった2003年10月11日と4月16日における有義波高の分布を図-4に示す。

図-4(a)は北風成分が卓越した2003年10月11日における有義波高の分布を示す。渤海中央部において波高が1.8mを超えているが、各湾の湾奥では1.0m以下であり、渤海中央を中心とした同心円状に広がる分布特性を有している。とくに吹送距離が長くなる風下に位置する來州湾、渤海湾において波高が減衰している。これは渤海中央に比して各湾の水深は浅くなっており、そのため海底摩擦による減衰効果が有効に働いているためだと考えられる。この様な波高分布は高山ら(2003)の解析でも現れている。

一方、図-4(b)は南風が連吹した2003年4月16日の有義波高の分布である。有義波高は遼東湾西岸で1.4mを超え、海岸線近くを除いて、吹送距離に従って波高が高くなる分布特性を示している。この分布特性は北風成分が卓越した場合と大きく異なっている。この相違は吹送距離と水深分布の違いによるものである。風向の違いにより、有義波高の分布特性が大きく異なることがわかった。黄河河口が位置する來州湾では、有義波高は北風成分が卓越する時の方が大きく、有義波高は最大で約1.5m程度であることがわかった。また、來州湾南岸近くでは波高は南北方向いずれの風向条件下においても0.5m以下となる結果を得た。

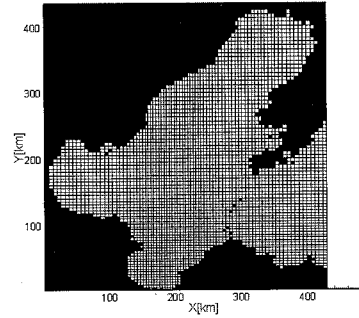
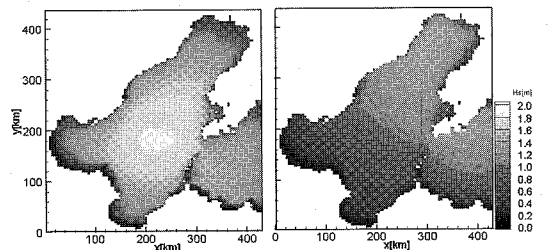


図-3 計算格子

表-1 計算に用いたパラメータ

格子数	東西方向: 85, 南北方向: 88 鉛直方向: 16
格子間隔	鉛直方向: (海表面から) 4 m, 2 m, 3 m × 8, 4 m, 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 10 m
底面摩擦係数	2.6×10^{-3}
壁面摩擦係数	1.0×10^{-4}
コリオリパラメータ	9.178×10^{-5} rad/s (北緯 39 度)
水平方向渦動粘性係数の基準値	$0.1 \text{ m}^2/\text{s}$
鉛直方向渦動粘性係数の基準値	$0.001 \text{ m}^2/\text{s}$
SS再浮上限界摩擦速度	2.0 cm/s
SS堆積限界摩擦速度	1.0 cm/s
SS沈降速度	$8.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$
侵食定数	$2.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$



(a) 北北東風時(2003年10月11日) (b) 南風時(2003年4月16日)

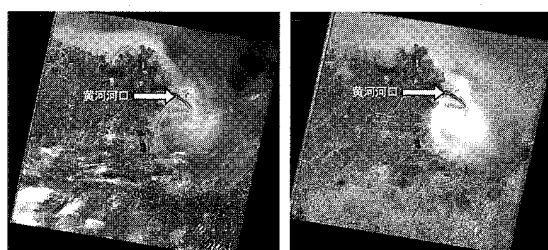
図-4 強風が連吹したときの波高分布

5. 黄河より流入する高濁度水塊の動態とそれによらず潮流と風応力の影響

図-5は2003年夏季と秋季にLandsat衛星により撮影された來州湾におけるトゥルーカラー合成画像を示す。図-2によると、図-5(a)に示す8月31日は調水調沙事業により黄河から渤海に流入する土砂量が急増する直前であり、図-5(b)に示す10月18日は流入土砂量のピーク時となっている。両図を比較すると、來州湾において、10月18日に図中の白色で表された高濁度水塊が8月31日に比して広範囲に分布していることがわかる。これは、調水調沙事業による土砂流入によるものである。衛星画

像が撮影された日時に対応する SS 濃度の数値計算結果を図-6 に示す。ここで、数値計算において SS の粒径はすべて利津で観測された中央粒径と同じであると仮定している。図-5 と図-6 を比較すると、数値計算により計算された高濁度水塊の分布は概ね衛星画像の分布特性と一致している。Yamanaka ら (2006) が浮遊物質の挙動を粒子追跡法により評価した結果においても同様の傾向を示していた。以上より、定性的な検討ではあるが、本研究の数値解析は現象をよく再現できていると言える。

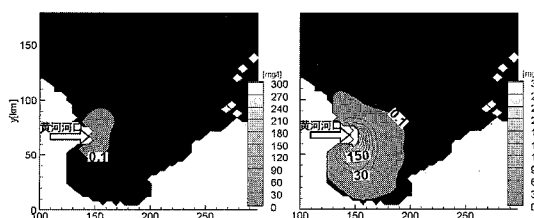
この調水調沙事業により渤海に流入する高濁度水塊の挙動を明らかにするため、図-7 に 2002 年 8 月の海表面における SS 濃度の経時変化を示す。図-2 より、2002 年 7 月に約 0.5 億トンの土砂が流入しており、その挙動を明らかにする。数値計算結果によると、図-7(a) に示す 8 月 1 日において來州湾全域に高濁度水が存在し、黄



(a) 2003 年 8 月 31 日

(b) 2003 年 10 月 18 日

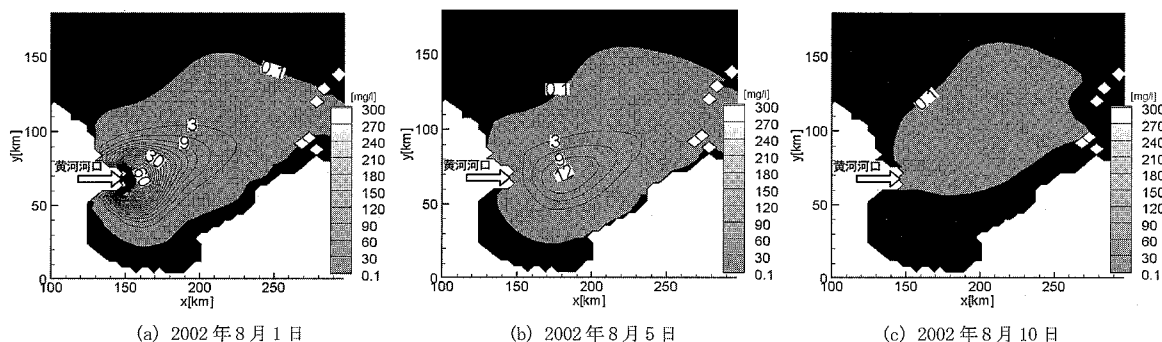
図-5 黄河河口周辺の Landsat 衛星画像



(a) 2003 年 8 月 31 日

(b) 2003 年 10 月 18 日

図-6 数値計算による黄河河口周辺の SS 濃度分布 (海表面)



(a) 2002 年 8 月 1 日

(b) 2002 年 8 月 5 日

(c) 2002 年 8 月 10 日

図-7 数値計算による黄河河口周辺の SS 濃度分布 (海表面)

河河口周辺では SS 濃度が 100 mg/l を超える海域もある。しかし、図-7(b) に示す 4 日後の 8 月 5 日には SS 濃度の分布の中心は來州湾中央海域となり、SS 濃度は最大で 12 mg/l に減少した。これは、多くの濁質が沈降・堆積したためと考えられる。さらに 5 日後の 8 月 10 日においては、図-7(c) に示されたとおり海表面に高濁度水塊は認められない。以上より、黄河から渤海に流入する流入土砂の多くは、流入後 10 日間程度の時間スケールで一旦來州湾に沈降・堆積することがわかった。

つぎに、高濁度水塊の挙動に及ぼす潮流と風応力の影響を検討するため、2003 年 10 月に対応する数値計算において、海上風を考慮しない場合の数値計算を行い、考慮した結果との比較を行った。図-8 は黄河河口付近における海底面摩擦速度と海上風の風向・風速の経時変化を示す。海底面摩擦速度は海底近傍の土砂の挙動に強く関与する。

図-8(a) に示す海上風を考慮した場合、潮流の周期変化に対応して海底面摩擦速度が変化するものの、10 月 10 日前後に見られるような周期的ではない変動を示す期間も認められる。図-8(b) に海上風を考慮しなかった場合の結果を示す。ここでは図-8(a) とは異なり、潮流に対応した周期的な時間変動を示している。いずれの時期においても潮流のみでは SS 再浮上境界摩擦速度を超えていない。つぎに、これらの差を取り、図-8(d) に示す同時期の気象条件と比較する。摩擦速度の偏差のピーク時と、海上風の風速が約 7 m/s 以上になる時期を比較すると、対応関係があることがわかる。とくに強風が連吹した 10 月 12 日前後と 10 月 23 日前後はその影響が大きく、気象影響による変化量は潮流による摩擦速度と同程度であった。ここでは概ね気象の影響が摩擦速度を減衰させる方向に作用している。風向によっては、強風時においてイベント的に來州湾の堆積土砂が巻き上げられる可能性があると考えられる。

6. 堆積土砂量

図-9 に來州湾に堆積した土砂量の経時変化を示す。

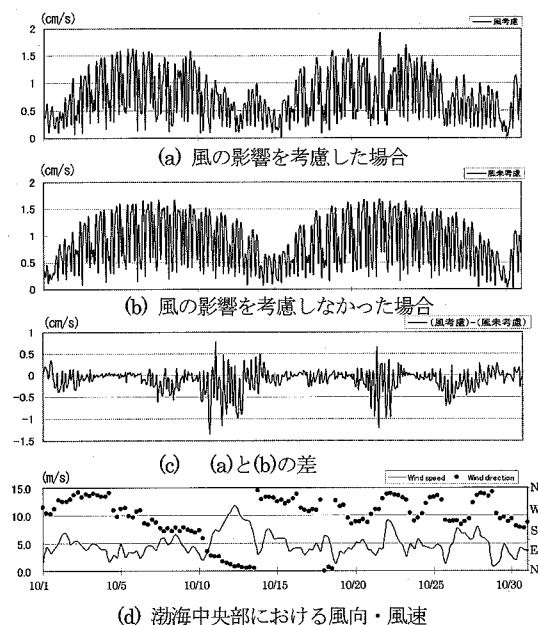


図-8 黄河河口周辺の海底面摩擦速度と海上風との関係 (2003年10月)

堆積量は図-2に示す流入土砂量が多い2002年7月、2003年9月から11月に急激に増加し、この期間中に大きく減少する様子は認められない。主に堆積する場所は図-10に示すとおり黄河河口から約70 kmまでの範囲の海域であり、黄河河口に近いほどSS堆積密度は高い。堆積土砂の移動の可能性についてはさらなる検討が必要と考える。しかしながら、2年間の数値計算では、大規模な巻き上げ現象に伴う堆積物の移動は認められなかった。この2年間の総流入土砂量は約6.2億トンであり、総堆積量は約4.08億トンであるから、およそ66%が来州湾に堆積したことになる。また、SSの外海への大規模な流出も認められないことから、堆積していない土砂の多くは底層付近に滞留していると考えられる。

7. おわりに

本研究では、流動・波浪モデルに基づくSSの堆積・巻き上げを考慮した3次元数値解析を行い、黄河から渤海に流入する高濁度水塊の挙動に及ぼす潮流と風応力の影響について検討した。その結果、流入する土砂はほとんどが来州湾に沈降し、海底面摩擦速度において、潮流に起因する量と、強風の連吹に起因する変化量が同程度であることがわかった。また、2002年から2003年と対象とした長期再現計算を行うことにより、この期間における総流出土砂量の約66%が来州湾に堆積することがわかった。今後は、堆積による地形変化や粒度組成などを考慮したより高精度の解析を実施したいと考えている。

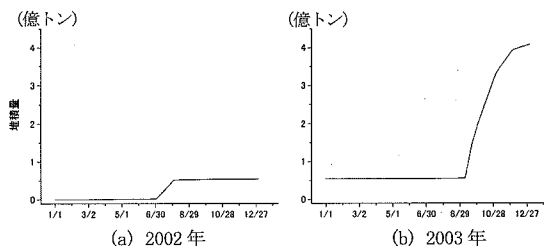


図-9 数値計算による来州湾におけるSS堆積総量の変化

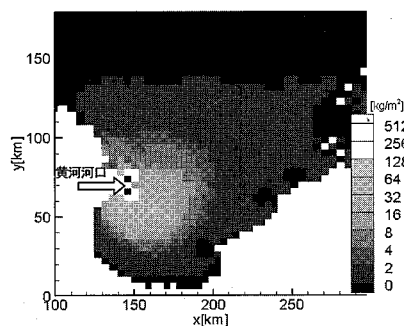


図-10 数値計算による黄河河口周辺のSS堆積密度 (2003年12月31日)

参考文献

- 気象庁(2003,2004):世界気象資料CD-ROM
- 小池勲夫ら(2000):海底境界層における窒素循環の解析手法とその実際,産業環境管理協会,195p.
- 国務院水利部黄河水利委員会(2005):黄河泥沙公報,17p.
- 高山知司・木村雄一郎(2003):渤海湾内の波浪に関する簡易推算法の精度,海洋開発論文集,第19巻,pp.899-904.
- 中国国家海洋局(2004):中国海洋環境公報(オンライン),<http://soa.gov.cn/hygb/>,参照2006-3-23.
- 中辻啓二・山本信弘・山見晴三・室田明(1991):淀川洪水流の振る舞いに及ぼす密度流と潮流の相乗効果,海岸工学論文集,第38巻,pp.186-190.
- 宮澤泰正・山形俊男(2003):JCOPE 海洋変動予測システム,月刊海洋,第12号,pp.881-886.
- 山中亮一・志水克成・中辻啓二(2004):大規模閉鎖性水域の渤海における流動構造の季節変動特性,海岸工学論文集,第51巻,pp.321-325.
- Christiane Kuhrts(2004):Wolfgang Fennel, Torsten Seifert: Model Studies of transport of sedimentary material in the Western Baltic, Journal of Marine Systems 44, pp.167-190.
- Guangzue Li, Helong Wei, Yeshen Han and Yiji Chen(1998): Sedimentation in the Yellow River delta, part I: flow and suspended sediment structure in the upper distributary and the estuary, Marine Geology, Vol. 149, pp.93-111.
- Rubey, W. W.(1933): The size distribution of heavy minerals within a water-laid sandstone, Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 3, pp.3-29.
- Yamanaka, R., K. Nakatsuji, S. Liang and Y. Inoue(2006): Effects of thermal stratification and wind blowing on hydrodynamics in the Bohai Sea with notably shallow depths, Proceedings of 9th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling(ECM9), pp.235-252.