

東海豪雨時における伊勢湾海域の海水交換と土砂輸送 に関する粒子追跡解析

Particle Tracking Analysis on Seawater Exchange and Soil Transport in Ise Bay Area at Tokai Heavy Rain

川崎浩司¹・村上智一²・戸田圭亮³・大久保陽介⁴

Koji KAWASAKI, Tomokazu MURAKAMI, Keisuke TODA and Yosuke OKUBO

This paper intends to develop a three-dimensional material transportation model which is composed of an Atmosphere-Ocean-Wave coupled model and two types of particle tracking models with water and soil particles. The model was used to estimate seawater exchange and soil transport in Ise and Mikawa Bay areas during Tokai heavy rain. The numerical results revealed not only the quantitative estimation of the seawater exchange among Ise Bay, Mikawa Bay and Open Sea but also the dynamic behavior of freshwater particles from rivers. Furthermore, the transportation and sedimentation of soil particles as well as flow and density structures at the head of Ise Bay were examined in detail based on the results of numerical simulation with fine grid meshes.

1. はじめに

わが国の代表的な閉鎖性内湾である伊勢湾海域は、気象擾乱のみならず河川流入の影響を非常に受けやすいといわれている。特に、2000年9月の東海豪雨時においては、木曽川の最大流量が平均流量の約30倍を記録する大出水となり（図-1参照）、湾内の物理環境に多大な影響が及んだものと考えられる。村上ら(2007)は、東海豪雨時における伊勢湾海域を対象に、大気-海洋-波浪結合モデルを用いた数値計算を実施した。そして、観測結果との比較により気象急変時における同モデルの妥当性・有用性を検討し、湾内の流動・密度構造が出水に伴い大きく変化することを明らかにした。しかし、閉鎖性内湾の水環境を考える上で重要な指標である海水交換性については未検討である。海水交換に関する既往の研究例として、小林ら(1995)は東京湾湾奥部における海水交換性を把握するために粒子追跡による計算方法を提案し、海水交換率と気象場・海洋場の因果関係について検討した。伊勢湾海域に対しては、藤森ら(1976)が塩分濃度の現地観測により、また林ら(2007)が粒子追跡を用いた数値計算によりそれぞれ海水交換率を算定している。しかし、出水時に着目した検討例はこれまでほとんどなく、河川の大出水がもたらす海水交換性の影響は不明のままである。

さらに、伊勢湾海域においては、環境省が取り上げた答

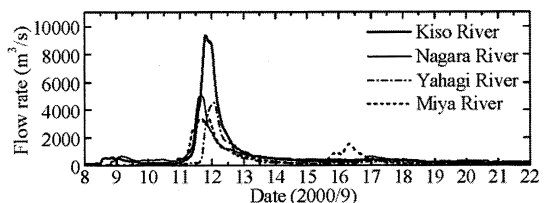


図-1 東海豪雨時における主要河川の流量

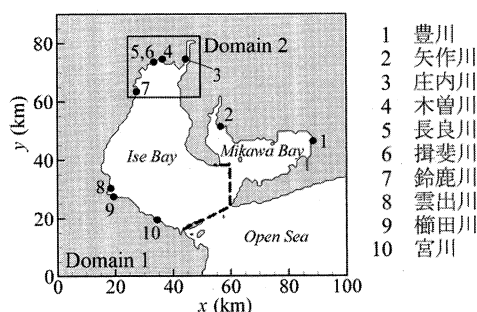
志島でのゴミ漂着問題や名古屋港での土砂堆積問題といった水環境問題が顕在化しており、早急な解明が望まれている。前述のように、伊勢湾海域は河川流入の影響を受けやすく、河川起源の諸物質が水環境の悪化を引き起こしている可能性が高い。よって、上述の問題を解決するためには、湾内における河川起源物質の輸送特性に対する検討が必須である。伊勢湾海域では、数値計算により台風後における流木群の漂流経路を特定した目黒ら(2006)などの研究例はあるものの、特に出水時を対象とした物質輸送に関する研究はあまり実施されていない。

本研究では、激しい気象擾乱の影響下においても高精度な計算が可能な大気-海洋-波浪結合モデルにより流動・密度場の再現計算を行い、その上で得られた海水流動場に基づき、3次元粒子追跡解析を実施する。そして、東海豪雨時における伊勢湾・三河湾・外洋間の海水交換性について定量的に検討するとともに、河川流入水の動態と河川起源土砂の輸送特性を議論する。

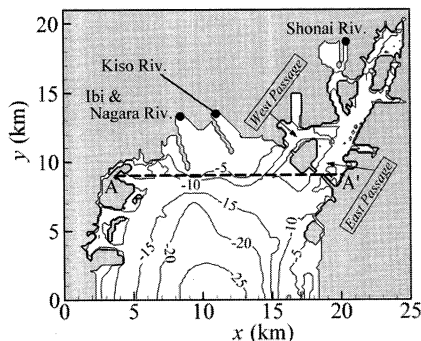
2. 3次元物質輸送モデル

本研究では、大気-海洋-波浪結合モデルと、海水流動により移動する水粒子と自重沈降速度を考慮した土粒子に対する3次元粒子追跡モデルを組み合わせた3次元物質輸送モデルを構築した。そして、同モデルを使用し、図-2

- | | | |
|--------|------|---|
| 1 正会員 | 博(工) | 名古屋大学准教授 大学院工学研究科
社会基盤工学専攻 |
| 2 正会員 | 博(工) | 豊橋技術科学大学産学官連携研究員
工学部建設工学系 |
| 3 学生会員 | 学(工) | 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤
工学専攻 |
| 4 正会員 | 修(工) | パシフィックコンサルタンツ株式会社
大阪本社水工技術部港湾・海岸グループ |



(a) 大領域



(b) 小領域

図-2 計算領域

(a)のDomain 1に示す伊勢湾海域全体(大領域)およびDomain 2に示す伊勢湾湾奥部(小領域)においてそれぞれ計算を実施した。以下に、数値モデルの概要と各領域における計算方法について説明する。

(1) 数値モデルの概要

大気-海洋-波浪結合モデルは、気象モデルMM5(ペンシルベニア州立大学・米国大気研究センター)、海洋モデルCCM(村上ら, 2004)、波浪モデルSWAN(デルフト工科大学)によって構成され、各モデル間で風速、気圧、海面温度などの変数を交換している。東海豪雨時など激しい気象擾乱の影響下における結合モデルの妥当性・有用性は、村上ら(2007)によりすでに検証されている。

3次元粒子追跡モデルは、個々の粒子をラグランジュ的に追跡する数値モデルであり、本研究では結合モデルから得られた流動場に基づいて粒子追跡計算を実施する。粒子追跡の際には、①拡散効果は考えない、②海面から粒子は飛び出さない、③陸地との境界では完全反射するといった条件を課している。また、本モデルは、海水流動のみにより移動する質量を持たない仮想粒子(水粒子)、および自重により沈降する比重の効果考虑した土粒子の両方に対して追跡可能な数値モデルとなっている。

土粒子に対しては、球体と仮定し、沈降速度 w_s (m/s)を次式で表されるRubeyの実験式に基づいて与えた。

$$\frac{w_s}{\sqrt{sgd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}} \quad (1)$$

ここで、 d は土粒子径(m)、 g は重力加速度($=9.8\text{m/s}^2$)、 ν は動粘性係数(m^2/s)である。また、 s は土粒子の水中比重であり、結合モデルから得られた密度を用いて計算した。

土粒子が海底面に到達した場合には、シールズ数 ϕ を次式により計算し、限界シールズ数 ϕ_c を超えるときのみ粒子は掃流するといった条件を課した。

$$\phi = \frac{f_w U_b^2}{2sgd} \quad (2)$$

ここで、 U_b は底面流速(m/s)、 f_w は係数($=0.3$)である。限界シールズ数は、 $\phi_c = 0.06$ とした。

(2) 大領域での計算方法

はじめに、結合モデルにより流動・密度場の再現計算を行う。計算期間は東海豪雨の前後を含む2000年9月8日から22日(UTC)までの14日間とする。CCMおよびSWANの計算領域は図-2(a)のDomain 1であり、水平解像度は1kmである。MM5では3層の双方向ネスティング計算を行っている。各モデルの初期値・境界値の詳細については村上ら(2007)を参照されたい。

大領域では、つぎの2種類の粒子追跡計算を実施した。まず、伊勢湾・三河湾・外洋間の海水交換性を定量的に把握するために、伊勢湾、三河湾に水粒子を3次元的に配置し、14日間の期間、粒子を追跡した。ここで、両湾および外洋の境界を図-2(a)中の破線に示すように設定した。初期配置は、図-3(a)および図-4(a)に示すとおりであり、東西・南北方向には1km間隔、鉛直方向には水面下2m, 6m, 10m...の4m間隔とした。配置した水粒子の総数は、伊勢湾では7929個、三河湾では1230個である。

ついで、東海豪雨時における湾内での河川水の動態、および答志島における漂流ゴミ問題との関連性を検討するために、伊勢湾・三河湾に流入する主要10河川から1時間毎に水粒子を放流し、追跡計算を実施した。なお、各河川の河口位置は図-2(a)に示すとおりである。

(3) 小領域での計算方法

大領域計算に引き続き、本研究では、名古屋港周辺部など伊勢湾湾奥部における水理現象を詳細に把握することを目的に、図-2(a)に示すDomain 2を計算対象領域とした小領域計算を実施した。結合モデルの計算条件は大領域計算と基本的に同様であるが、小領域の範囲外における河川や外洋の影響を考慮するため、小領域計算の開境界は大領域計算で得られた水温、塩分値を用いた。また、航路の掘り下げ部など複雑な水深分布を再現するために、図-2(b)に示す詳細な地形データ(水平解像度200m)を作成し、使用した。以上のような計算条件のもとで再現計算を実施した。なお、これまで東海豪雨時における伊勢湾湾奥部を対象とした詳細な流動・密度構造が検討されていないことから、粒子追跡に先立ち、流動・密度構造について議論することとした。

ついで、河川起源の土粒子挙動を把握するために、図-2

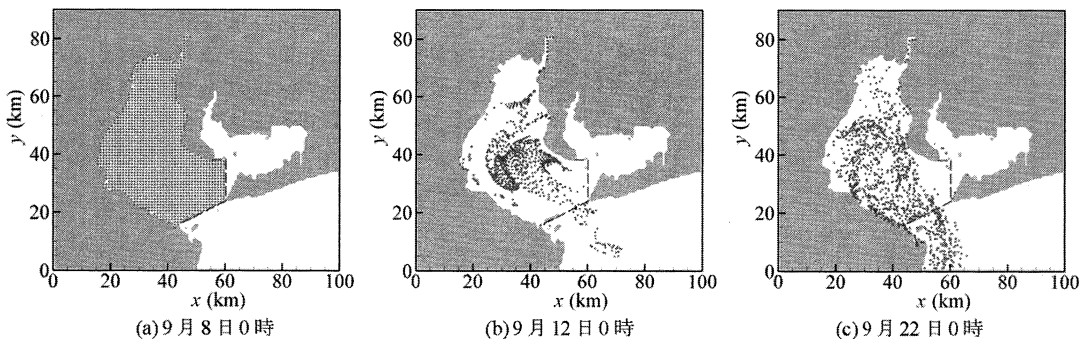


図-3 伊勢湾に配置した水粒子分布の経時変化；表層(水面下4mまで)に存在する粒子のみ表示

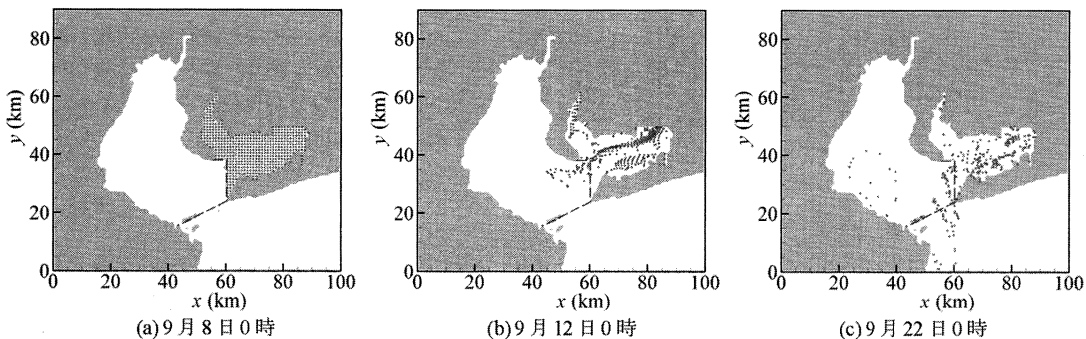


図-4 三河湾に配置した水粒子分布の経時変化；表層(水面下4mまで)に存在する粒子のみ表示

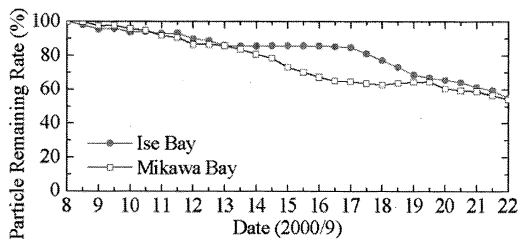


図-5 伊勢湾・三河湾における粒子残存率

(b)に示す3河川から土粒子を1時間毎に放流し、追跡計算を行った。土粒子は、粒径0.07mm, 0.01mm, 0.007mm, 0.006mmのシルト4種類と0.004mmの粘土であり、密度はいずれも $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の一定値とした。

3. 伊勢湾海域における粒子追跡解析

(1) 伊勢湾・三河湾・外洋間の海水交換性

図-3、図-4はそれぞれ伊勢湾、三河湾に配置した水粒子分布の経時変化を示したものである。両図より、伊勢湾—三河湾間、そして両湾から外洋への水粒子の移動が確認できる。一方、各湾から流出しない粒子も存在する。そこで、図-5に各湾における粒子残存率の経時変化を表す。ここで、粒子残存率は初期配置した粒子数に対して湾内に残存している粒子数の割合を表す。同図より、粒子残存率は両湾ともほぼ直線的に減少しており、9月22日の計算終了時における粒子残存率は、伊勢湾で55%、三河湾で54%であっ

表-1 東海豪雨時における海水交換率

	14日間の 海水交換率 (%)	1日あたりの 海水交換率 (%)
伊勢湾	45	3.2
三河湾	46	3.3

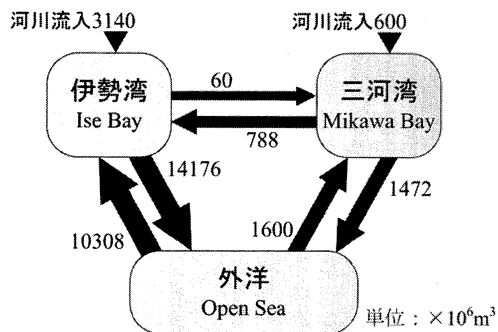


図-6 伊勢湾・三河湾・外洋間の海水交換量

た。逆に、交換された粒子の割合である海水交換率は、表-1のとおり、伊勢湾で45%、三河湾で46%となる。これらの値は14日間における海水交換率であり、1日あたりに換算すると、それぞれ3.2%、3.3%となる。本研究と算定方法が異なるものの、藤森ら(1976)および林ら(2007)は伊勢湾における海水交換率を求めている。両研究とも平水時を対象としており、1日あたりに換算すると、両者とも海水交換率は約1%となっている。この平水時の海水交換率と

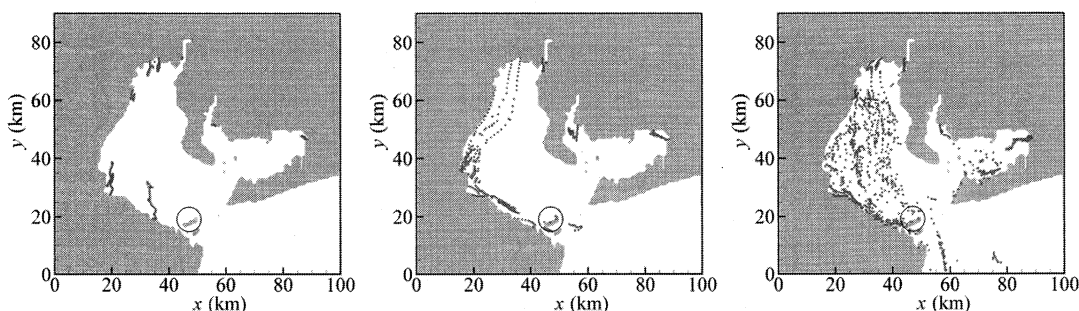


図-7 河川から放流した水粒子の分布；表層(水面下4mまで)に存在する粒子のみ表示。○印は答志島を示す。

比較して、本研究で得られた東海豪雨時における海水交換率は約3倍であることから、東海豪雨時では大出水の影響により海水交換が活発化したものといえる。

つぎに、東海豪雨時の14日間における両湾および外洋間の海水交換量の算定を行う。水粒子1個は、初期配置時の間隔より $4.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積をもつ直方体の水塊1個と等価と考えることができる。このことから、移動した水粒子の数を海水体積に換算することができる。また、大出水時を対象としていることから、河川からの流入量を考慮する必要がある。さらに、伊勢湾・三河湾における海水容量は変化しないとすれば、図-6のように海水交換量を算定することができる。同図より、伊勢湾-三河湾間の交換量が非常に小さい一方、伊勢湾-外洋間の海水交換量が非常に大きいことが判明した。

(2) 河川流入水の動態特性

図-7は各河川から放流した水粒子の水平分布を示している。図-7(a)に示す大出水前と比較して、河川流量が最大となる図-7(b)の前後では粒子の移動速度が非常に大きくなる。また、木曽三川から放流した粒子は湾西部を通過して南方へ移動していることから、湾西部では塩分低下など河川水の影響が大きく生じているといえる。

つぎに、図中○印で示した答志島に着目する。図-7(b)、(c)をみると、水粒子が答志島に到達していることが確認できる。したがって、河川水とともにゴミが輸送されていると仮定すれば、答志島に漂着するゴミは河川起源である可能性が高いと推測できる。また、結合モデルは風の影響を精度よく評価できることから、ゴミの漂流源や漂流経路特定のために本モデルは大いに活用できるものといえる。しかし、物体形状の違いによる漂流特性については今後の課題である。

4. 伊勢湾湾奥部における粒子追跡解析

(1) 流動・密度構造

図-8は出水直後における湾奥部での表層流速分布を示したものである。木曽三川の河口付近で流速が非常に大きくなっていることに加え、流向がコリオリ力の影響により大きく右向きに変化している様子が確認できる。

図-9は湾奥部における表層塩分分布を示している。ま

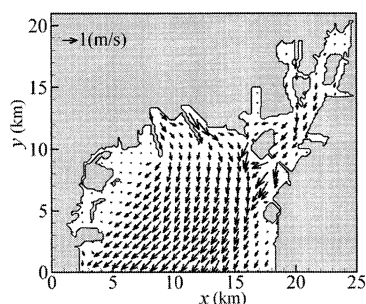
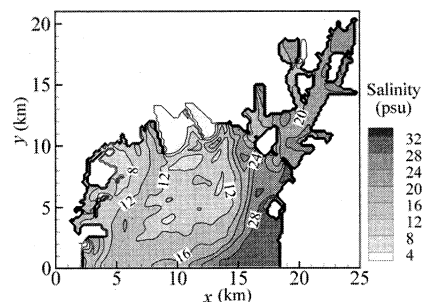
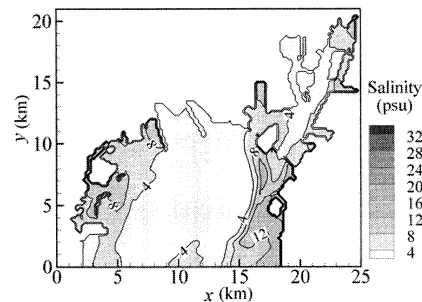


図-8 出水直後(9月12日12時)の表層流速分布



(a) 出水直前(9月11日0時)



(b) 出水直後(9月12日12時)

図-9 湾奥部における表層塩分分布

た、図-10にA-A'断面(図-2(b)参照)における塩分の鉛直分布を示す。出水前を示す図-9(a)および図-10(a)をみると、河口表層では低塩分となっており、底層全体と湾東部の表層では28psu以上の高塩分となっている。図-9(b)およ

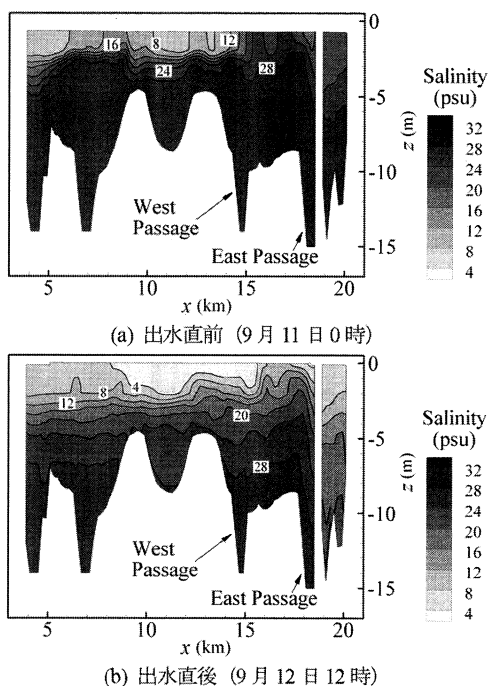


図-10 A-A'断面における塩分の鉛直分布

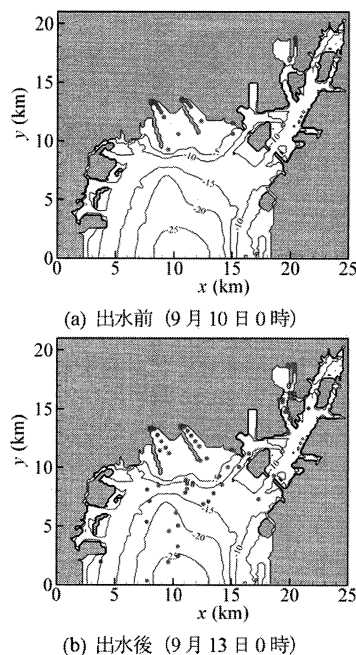


図-11 土粒子の分布(粒径0.01mmの場合)

び図-10(b)に示す出水直後をみると、表層では低塩分水塊が湾奥部全域に広がり、塩分成分が発達していることが判明する。紙面の都合上、図示しないが、その後、低塩分水塊は底層にも到達するものの、外洋からの塩分輸送により徐々に解消していく様子を確認した。しかし、計算終了時においても出水前の塩分環境には回復せず、湾奥部においては出水の影響が長期間にわたり残留したことが明らかとなった。

(2) 河川起源土砂の動態特性

図-11は粒径0.01mmの場合に対する土粒子の空間分布を示したものである。出水前を示す図-11(a)をみると、土粒子は河口付近に堆積している。一方、図-11(b)の出水後では、湾内の強い南向きの流れにより土粒子はほとんど堆積せず、湾奥部のみならず湾中央部へと流されている。なお、このとき、堆積していた土粒子も底面の流速増加に伴い再び移動を開始することを確認した。さらに、他のシルト土粒子(粒径0.07mm, 0.007mm, 0.006mm)を放流した場合においても、沈降速度の大小により土粒子が底面に到達するまでの所要時間に差異がみられるものの、土粒子の挙動特性は粒径0.01mmの場合とほぼ同じであった。一方、粒径0.004mmの粘土土粒子では、沈降速度が約1.4m/dayと極めて小さいため、底面に到達する土粒子は少なく、大多数の土粒子は堆積することなく出水時の強い流動により湾中央部へ運ばれた。以上のことから、東海豪雨時には伊勢湾湾奥部に流入した土砂の多くが湾中央部まで運ばれたと推察される。

5. おわりに

本研究では、大気-海洋-波浪結合モデルと水粒子・土粒子に対する3次元粒子追跡モデルを組み合わせた3次元物質輸送モデルを構築した。そして、東海豪雨時における伊勢湾・三河湾・外洋間の海水交換性を定量的に評価するとともに、河川流入水および河川起源土砂の動態を明らかにした。今後も引き続き、同モデルを活用した数値計算により、伊勢湾海域における水環境問題について検討していく予定である。

参考文献

- 環境省：漂流・漂着ゴミ対策、漂流・漂着ゴミに係わる国内削減モデル調査(オンライン), http://www.env.go.jp/earth/marine_litter/index.html, 参照2008-04-25.
- 小林卓也・三村信男・塚田光博(1995): 三次元潮流シミュレーションによる東京湾の海水混合の解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1071-1075.
- 林 英文・今里哲久・辻本哲郎(2007): 伊勢湾・三河湾の海水交換に関する数値実験, 沿岸海洋研究, 第44巻, 第2号, pp. 177-190.
- 藤森研一・稲富隆昌・内田豊彦・園山哲夫(1976): 伊勢湾水理模型実験と現地調査(第2報) - 伊勢湾の海水交流について -, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 518-523.
- 村上智一・川崎浩司・大久保陽介・金 鎮勲(2007): 東海豪雨時における伊勢湾海域の流動・密度構造の数値解析, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 371-375.
- 村上智一・安田孝志・大澤輝夫(2004): 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 σ 座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 366-370.
- 目黒邦夫・佐藤慎司・鯉淵幸生(2006): 海岸に漂着する流木群の挙動解析, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1301-1305.