

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

Numerical Analysis of Flow and Density Structures in Ise Bay Area at Tokai Heavy Rain

村上智一¹・川崎浩司²・大久保陽介³・金 鎮勲⁴

Tomokazu MURAKAMI, Koji KAWASAKI, Yosuke OKUBO and Jinhoon KIM

Oceanographic phenomena in Ise Bay area are influenced by not only meteorological disturbances but also freshwater inflow from Three Kiso Rivers. In particular, large floods have a great impact on coastal currents and water quality. This paper is aimed at discussing flow and density structures in Ise Bay area at Tokai heavy rain, which was record-scale rainfall in Tokai area, from a perspective of numerical analysis with an Atmosphere-Ocean-Wave coupled model. The validity and utility of the coupled model was verified by comparing the observation results with the computation ones regarding wind speed, rainfall, tidal level, coastal current and so on. The change of flow and density structures before and after Tokai heavy rain was, furthermore, examined based on the numerical results.

1. はじめに

伊勢湾海域は、木曾三川（揖斐・長良・木曾川）からの淡水流入の影響が大きく、特に出水時には、河川流量の増加に伴いエスチュアリー循環が卓越し、湾内の流動や水質を大きく変化させる（山尾ら、2002）。このような出水は、伊勢湾において年に数回発生しているが、2000 年 9 月の東海豪雨時の大出水は、図-1 に示すように、木曾三川の年平均流量 $397 \text{ m}^3/\text{s}$ を大きく上回る過去最大の $15113 \text{ m}^3/\text{s}$ を記録し、湾内の流動・密度構造に極めて大きな影響を及ぼしたものと考えられる。それゆえ、伊勢湾海域の防災や環境問題への対策を講じるためにも、豪雨による激しい気象擾乱に起因した観測・数値的研究の困難さを克服し、最大規模の出水時の海水流動・密度・水質構造を解明する必要がある。

伊勢湾海域では、これまでに観測的研究（関根、1996；藤原ら、1996；柳ら、1998 など）や数値的研究（千葉・武本、2000；笥ら、2002；村上ら、2006a など）が数多く実施されており、台風や豪雨といったイベント時ではないものの、水温・塩分・密度分布や残差流系などが明らかにされてきた。また、出水時の伊勢湾海域を対象とした研究では、河川流量の変動に対するエスチュアリー循環量を明らかにした山尾ら（2002）の研究や、数値モデルを用いて 2001 年 6 月の出水時の流動・密度構造を解析した村上ら（2006b）の研究などがある。し

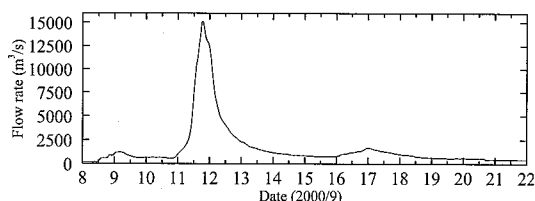


図-1 東海豪雨時の木曾三川（揖斐・長良・木曾川）の流量

かしながら、これらの研究で取り扱われた木曾三川の河川流量は、最大でも $8188 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、東海豪雨時の半分程度の流量である。そのため、東海豪雨時の出水のような最大規模の淡水流入が、伊勢湾の流動・密度構造に与える影響は明らかにされていない。

そこで本研究では、東海豪雨時の伊勢湾海域を対象に、大気-海洋-波浪結合モデル（村上ら、2006a）を用いて再現計算を行う。この結合モデルは、気象モデルによって面的・時間的に詳細な気象場を再現できるのみならず、気象場と海洋場のインターフェースとなる海面境界過程において働いている大気・海洋・波浪場の間の相互作用を評価することが可能であり、出水時の河川プリュームの挙動に大きな影響を及ぼす風（摩擦速度）などを適切に評価できるものと考えられる。そして、大気・海洋・波浪場について結合モデルの精度検証を行い、このモデルが東海豪雨時の伊勢湾海域の数値解析を可能とする精度を有していることを示す。その後、この計算結果を解析し、流動・密度構造について検討を行う。

2. 数値計算の概要

本研究では、気象現象から海象現象までを同時に精度良く扱うことのできる大気-海洋-波浪結合モデルを用いる。このモデルは、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

1 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
2 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
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 学生会員 修(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学
専攻

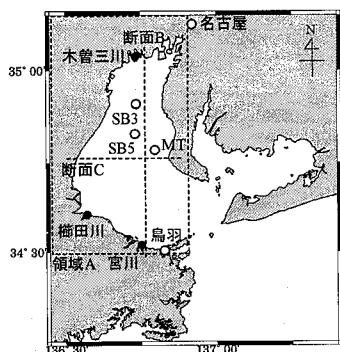


図-2 計算領域および観測点；○は観測点，●は河川を示す。

CCM (村上ら, 2004) および波浪モデル SWAN (デルフト工科大学) によって構成されている。そして、これらのモデルは、PC-Linux 上のシェルスクリプトで結合され、風速、摩擦速度、潜熱・顕熱フラックス、短波・長波放射、蒸発・降水量、気圧、海面温度、流速、水面変位、波浪による粗度高さおよび波齢が海面境界過程として取り扱われる。

気象モデル MM5 では、側面境界において雲を直接取り扱わず水蒸気量として扱っているため、側面境界から十分に離れなければ雲が発生せず、降水量の精度が悪くなることが報告されている(大澤ら, 2002)。そこで、気象場の計算領域は、本州を覆う大領域Ⅰ(格子間隔 18 km)、中部地方を覆う中領域Ⅱ(格子間隔 6 km)および伊勢湾を覆う小領域Ⅲ(格子間隔 2 km)の 3 つの領域を設定し、これらの双方向ネスティング計算を行うことにする。

海洋モデル CCM および波浪モデル SWAN の計算領域は、図-2 に示す領域(水平解像度 30 秒)とする。これらの領域と気象場の小領域Ⅲを結合させて計算を行う。

計算期間は、東海豪雨時の前後を含めた 2000 年 9 月 8 日～22 日(UTC)とする。気象場の初期値・境界値には、ECMWF(水平格子間隔 2.5°)の再解析データを用いる。海洋場の初期値・境界値には、日本周辺潮汐モデル NAO99Jb(国立天文台)を用いて計算した潮位および中部国際空港株式会社・愛知県企業庁によって観測された水温・塩分のデータを使用する。また、河川流量を適切に評価するために、主要 10 河川の毎時観測データ(国土交通省中部地方整備局)を海洋モデルに与える。

3. 結合モデルの精度検証

海域の流動・密度構造を数値的に検討する際、高精度な海水流動計算が前提条件であり、それを示す精度検証が必須となる。ここでは、大気・海洋・波浪場の観測データと計算結果を比較し、結合モデルが東海豪雨時の伊勢湾海域の数値解析を可能とする精度を有していることを実証する。

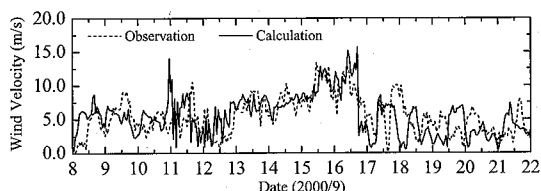


図-3 MT 局における海面上 10m の風速の観測値と計算値

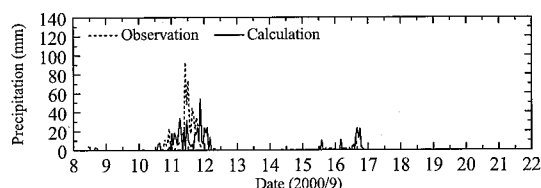


図-4 名古屋における降水量の観測値と計算値

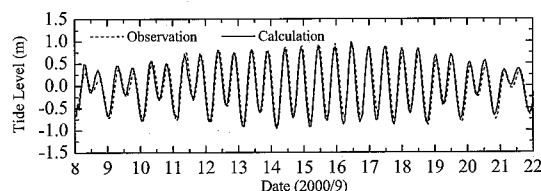


図-5 鳥羽における潮位の観測値と計算値

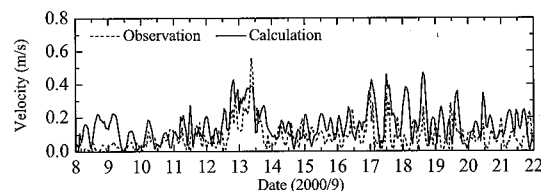


図-6 MT 局における表層(水深 2m)の流速の観測値と計算値

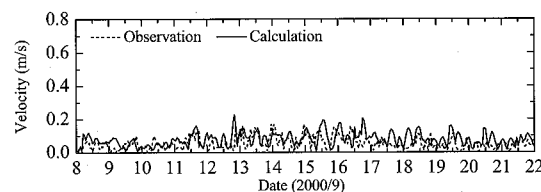


図-7 MT 局における底層(水深 11m)の流速の観測値と計算値

図-3 は、MT 局(図-2 参照)における海面上 10m の風速の観測値と計算値を比較したものである。これより、計算値は観測された風速の大きさや変動の傾向を良く再現していることがわかる。

図-4 は、名古屋(図-2 参照)における降水量の観測値と計算値を比較したものである。この図から、東海豪雨時の前後を含めた 10 日～12 日の積算降水量は、観測値と計算値が概ね一致していることがわかる。しかしながら、最大降水量やその発生時間の再現性がやや悪くなっている。この原因として、気象場の初期値・境界値に使用した ECMWF の再解析データの解像度が 2.5° と比

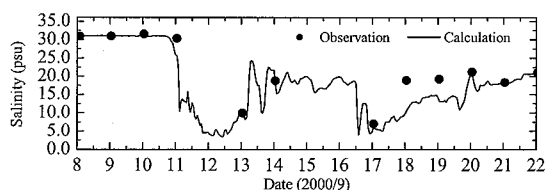


図-8 SB3における水深0.1mの塩分の観測値と計算値

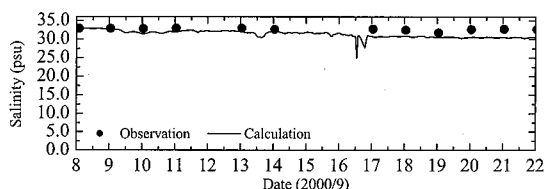


図-9 SB3における水深20mの塩分の観測値と計算値

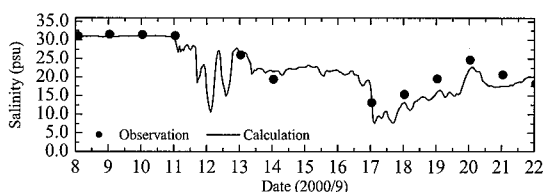


図-10 SB5における水深0.1mの塩分の観測値と計算値

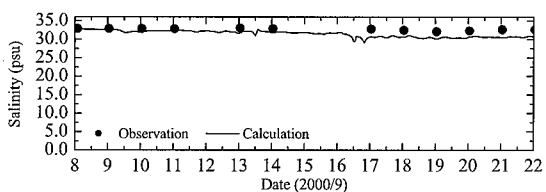


図-11 SB5における水深20mの塩分の観測値と計算値

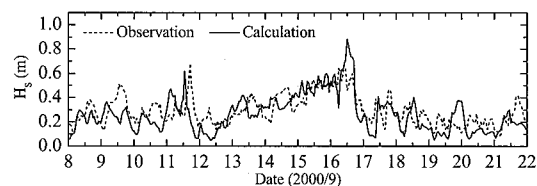
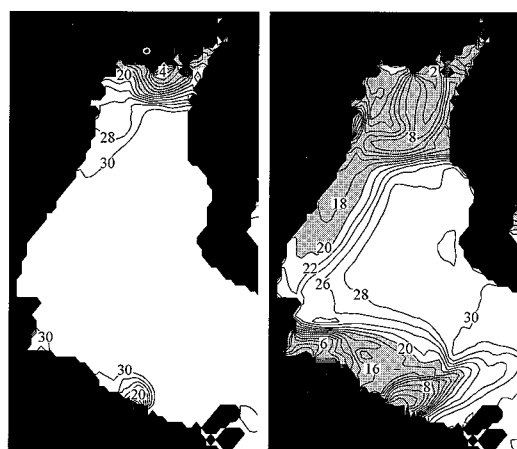


図-12 MT局における有義波高の観測値と計算値

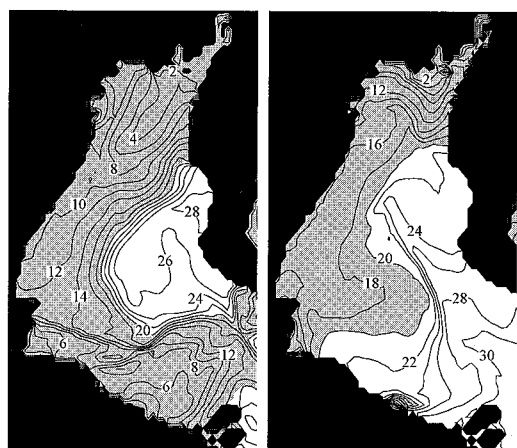
較的粗いことやMM5の大気境界層スキームなどに問題が残されているものと考えられ、これらの改善が今後の課題である。なお、大出水時の伊勢湾の表層塩分濃度は、河川からの淡水流入が支配的であり、降水の影響は小さいことが明らかとなっている(村上ら, 2006b)。また、降水量は河川流量と密接に関わっているが、本研究では観測された河川流量を海洋モデルに与えており、河川流量の評価に降水の計算精度の影響は及ばない。

図-5は、鳥羽(図-2参照)における潮位の観測値と計算値を比較したものである。これより、計算値と観測値は、ほぼ一致していることがわかる。



(a) 9月10日21時

(b) 9月11日23時



(c) 9月12日23時

(d) 9月15日11時

図-13 領域Aにおける海面塩分の水平分布；コンターは2psu 隙間、灰色トーンは20psu 以下の低塩分水塊を示す。

図-6および図-7は、MT局における表層(水深2m)および底層(水深11m)の流速の観測値と計算値をそれぞれ比較したものである。これらの図より、表層の強い流速から底層の弱い流速までを概ね再現していることがわかる。ただし、8日～9日の間において表層の流速の計算値は、やや過大評価傾向となっている。

図-8～11は、SB3およびSB5(図-2参照)における水深0.1mおよび20mの塩分の観測値と計算値をそれぞれ比較したものである。観測値は所々欠落しているものの、計算値は、いずれの観測点および水深でも塩分の変動傾向を良く再現していることがわかる。このことから、結合モデルは東海豪雨時の大量の淡水流入による急激な塩分低下のみならず、出水後の塩分濃度の変動も再現可能であると判断される。また、木曽三川の河口に近いSB3から湾中央付近のSB5の両観測点ともに再現

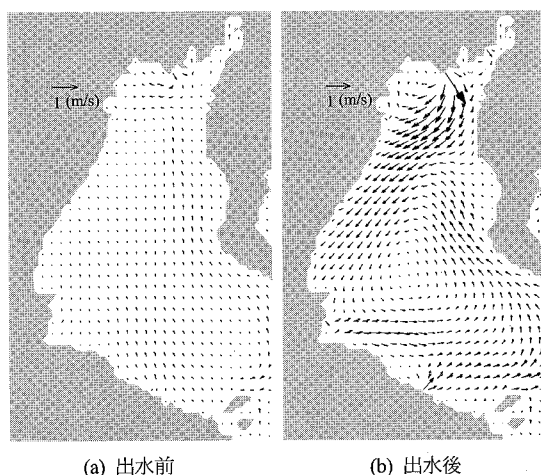


図-14 領域 A における出水前 (8 日 0 時～11 日 0 時) と出水後 (11 日 0 時～14 日 0 時) の時間平均海面流速

性が良いことから、結合モデルは東海豪雨時の河川プリュームの挙動も正しく評価しているものと考えられる。

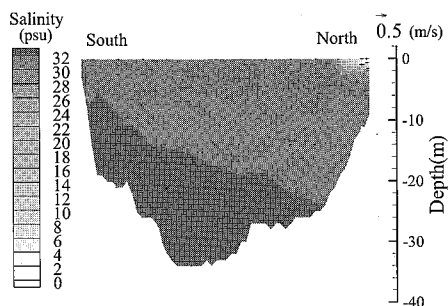
図-12 は、MT 局における有義波高の観測値と計算値の比較を示したものである。計算値は、16 日 12 時付近でやや過大評価となっているものの、それ以外では観測値の変動の傾向を良く表している。

以上より、大気-海洋-波浪結合モデルは、東海豪雨時の伊勢湾海域の気象・海象現象を再現できることが示された。よって、この計算結果を用いた流動・密度構造の解析も信頼できるものと判断できる。

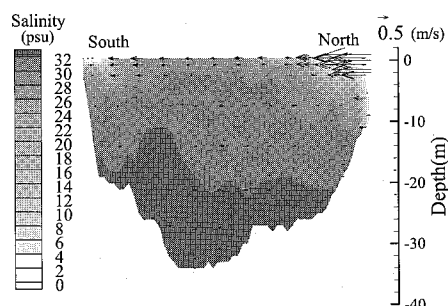
4. 流動・密度構造の数値解析

図-13 は、領域 A (図-2 参照) における海面塩分の水平分布を示したものである。10 日 21 時 (図-13(a)) は出水前であり、低塩分水塊は木曾三川の河口付近に限られている。11 日 23 時 (図-13(b)) は出水直後であり、木曾三川、宮川および櫛田川 (図-2 参照) から淡水が湾内に流入していく様子が認められる。出水から 1 日経過した 12 日 23 時 (図-13(c)) の図より、20 psu 以下の低塩分水塊が湾中央の東側を除く湾全域に広がっていることがわかる。さらに 2 日半経過した 15 日 11 時 (図-13(d)) では、高塩分である外洋水の影響を受け、湾口部付近において塩分濃度が高くなり、出水前の状態に戻りつつある。しかし、湾口以外の塩分濃度は出水前に比べて大きく低下したままであり、東海豪雨時の出水の影響は、河口付近のみならず湾中央付近までの塩分濃度を長期間にわたって低下させるものといえる。

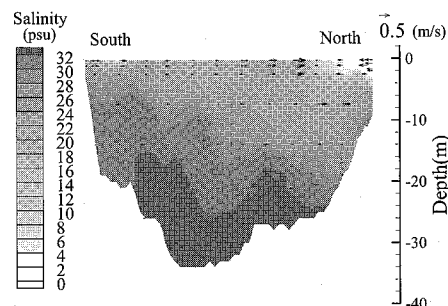
図-14 は、領域 A における出水前 (8 日 0 時～11 日 0 時) と出水後 (11 日 0 時～14 日 0 時) の時間平均海面流速の計算結果を示したものである。出水前の期間を



(a) 9 月 10 日 21 時



(b) 9 月 12 日 3 時

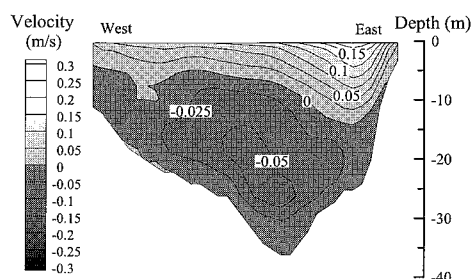


(c) 9 月 13 日 23 時

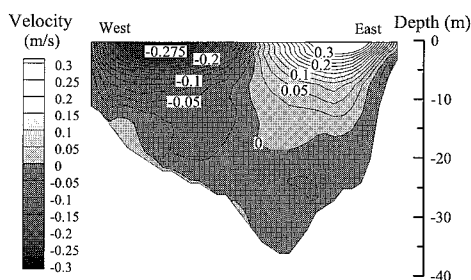
図-15 断面 B における塩分分布および流速分布

示す図-14(a) より、湾奥部において時計回りの循環流が存在していることが確認できる。ただし、その流速は非常に小さいものである。これに対して、出水後では、湾奥部での時計回りの循環流および湾中央部の反時計回りの循環流が強く現れている。この循環流は、コリオリ力の影響を受けた河川プリュームが西よりに沿って流れることに起因して発生したものと推察される。また、東側で強い流入がみられ、これによって外洋から高塩分の海水が流入し、前述の図-13(c) に示されたように湾中央東側で塩分濃度が高くなったものと考えられる。

図-15 は、断面 B (図-2 参照) における塩分および流速の鉛直分布を示したものである。出水前である 10 日 21 時 (図-15(a)) は、全ての水深において流速が小さくなっている。また、湾奥部のみに低塩分水塊が存在し



(a) 出水前



(b) 出水後

図-16 断面Cにおける出水前（9月8日0時～11日0時）と出水後（9月11日0時～14日0時）の時間平均流速分布；正の値は北に向かう流れ、負の値は南に向かう流れを示す。

ており、それ以外の湾中央部などでは、ほぼ鉛直一様の塩分分布となっている。出水直後の12日3時（図-15(b)）では、5m以浅の上層において湾奥部から湾口部に向かう大きな流速がみられ、湾内水が外洋へ流出している様子が認められる。また、塩分分布からも低塩分の河川ブリュームが湾中央部に向かって発達していることがわかる。一方、5m以深では、上層と流向が逆転しており、外洋から湾奥部へ向かって海水が流入している。これらのことから、東海豪雨時の大出水によって伊勢湾全域で大規模なエスチュアリー循環が卓越することが明らかとなった。そして、13日23時（図-15(c)）では、河川からの淡水流入の影響は湾全域に広がり、5m以浅の上層では、24psu以下となっていることがわかる。また、湾奥部の下層の塩分濃度は、前述の図-9および図-11においても示されたように出水の影響をほとんど受けず、計算期間中一定の濃度となっている。このため、表層と底層の塩分差が大きくなり、出水後に成層が発達したものと考えられる。

図-16は、断面C（図-2参照）における出水前（8日0時～11日0時）と出水後（11日0時～14日0時）の時間平均流速を示したものである。これらの図より、出水前では、上層で流入、下層で流出となっていることがわかる。これに対して出水後では、上層の東側で強い流

入、西側で強い流出となっている。これは、前述の図-14(b)において示した出水に起因した反時計周りの水平循環流によって現れたものと考えられる。これらのことから、大出水は流速の水平分布のみならず鉛直分布にも大きな影響を与えていることが示され、湾全域で複雑な3次元的流動構造が形成されているといえる。

5. おわりに

本研究では、過去最大の大出水となった東海豪雨時の伊勢湾海域を大気-海洋-波浪結合モデルを用いて再現し、その流動・密度構造を解析した。その結果、エスチュアリー循環の急激な発達など東海豪雨時の伊勢湾の流動・密度構造を示すことができた。そして、最大規模の河川流入が伊勢湾の流動・密度構造を一変させることを明らかにした。これらのことから、本研究は出水と関連性のある赤潮や貧酸素水塊などの伊勢湾の海域環境問題の対策につながるものと期待できる。

謝辞：海洋観測データは中部国際空港株式会社・愛知県企業庁より、河川流量データは国土交通省中部地方整備局よりそれぞれご提供頂いた。また、ECMWFのデータの取得の際に岐阜大学・小林智尚教授のご協力を頂いた。ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 大澤輝夫・深尾一仁・安田孝志(2002)：伊勢湾地域における高解像度気象場の再現計算とその精度検証，海岸工学論文集，第49巻，pp. 181-185.
- 寛 茂穂・藤原建紀・山田浩且(2002)：伊勢湾における密度・流動構造の季節変化，海岸工学論文集，第49巻，pp. 386-390.
- 関根義彦(1996)：伊勢湾，沿岸海洋研究，第34巻，pp. 20-33.
- 千葉 賢・武本行正(2000)：伊勢湾数値シミュレータの研究・第4報（ゼロ方程式鉛直渦粘性・渦拡散モデルの導入と夏季流動場解析），四日市大学環境情報論集，第4巻，第1号，pp. 33-62.
- 藤原建紀・福井真吾・杉山陽一(1996)：伊勢湾の成層とエスチュアリー循環の季節変動，海の研究，5巻4号，pp. 235-244.
- 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.
- 村上智一・川崎浩司・山口将人・水谷法美(2006a)：気象場に支配される伊勢湾を対象とした大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証，海洋開発論文集，第22巻，pp. 103-108.
- 村上智一・川崎浩司・山口将人・水谷法美(2006b)：大出水時における伊勢湾の海水流動の再現計算とその流動構造について，海洋開発論文集，第22巻，pp. 811-816.
- 柳 哲雄・黒田 誠・石丸 隆・才野敏郎(1998)：伊勢湾の夏季の残差流，沿岸海洋研究，第35巻，第2号，pp. 185-191.
- 山尾 理・笠井亮秀・藤原建紀・杉山陽一・原田一利(2002)：河川流量の変動にともなう伊勢湾のエスチュアリー循環流量・栄養塩輸送量の変化，海岸工学論文集，第49巻，pp. 961-965.