

日本沿岸の内部潮汐波強度の推定

栃木 謙一*・八木 宏**・ブリラシド***

グローバル潮汐モデルを反映させた広域沿岸潮流モデルを構築することによって、日本沿岸（太平洋側）における内部潮汐波強度とその伝播特性を把握することを試みた。その結果、①内部潮汐波強度が大きい海域は、津軽海峡周辺、関東・東海沿岸（房総～伊豆諸島海域～遠州灘）、豊後水道周辺～日向灘、九州西岸であること、②半日周期内部潮汐波は、i) 海底地形の起伏が大きく潮流が大きい領域、ii) 大陸棚が発達した単調な地形の領域、ii) 海峡や湾口部に大きく特徴が分類されること、③日周期内部潮汐は半島、湾口、岬など平面地形変化が大きい海域において発生し内部拘束波として伝播することを示した。

1. はじめに

内湾域の水質や物質循環を考える上では、陸域からの負荷量評価と同時に内湾～外海域間の海水交換を考えることが重要となる。外海域との海水交換過程については、これまで潮流、密度流、吹送流を中心に検討が進められているが、最近の現地観測に基づく研究によって、内部潮汐波が内湾の海水交換にとって重要な要素であることが明らかになりつつあり（例えば、阿呆ら, 1999；上野ら, 1999a, b；日向ら, 2000；山本ら, 2002；Yanagi ら, 1992）、そのメカニズムの解明や定量的評価手法の確立が望まれている。しかしながら、外海域から押し寄せる内部潮汐波については、その発生領域や沿岸域への伝播特性が十分に理解されていないために、内部潮汐波を内湾域の流動・水質計算に反映させる際には、湾口部における観測結果を境界条件とする経験的な取り扱いにとどまっている（例えば、上野ら, 1999b；山本ら, 2002）。今後、外海域の海洋構造変化に対する応答も含めた形で内部潮汐波の振る舞いを明らかにし、一般性を持たせた形で内湾域の海水交換に与える内部潮汐波の役割を定量化するためには、日本の沿岸に押し寄せる内部潮汐波の全体像を明らかにすることが必要であると考えられる。そこで本研究では、グローバル潮汐モデルを反映させた日本沿岸の高精度潮流計算を行うことによって、これまで部分的にしか明らかにされていない日本沿岸域の内部潮汐波強度とその伝播特性を把握することを試みた。

2. 数値計算概要

(1) 数値計算モデルの基本構成

日本沿岸域の潮流を数値モデルによって正確に再現するためには、地球全体を伝播する海洋潮汐波を正確に沿岸流動計算に反映させることが重要となる。そこで本研究では、Matsumoto ら (2000) によって開発されたグロー

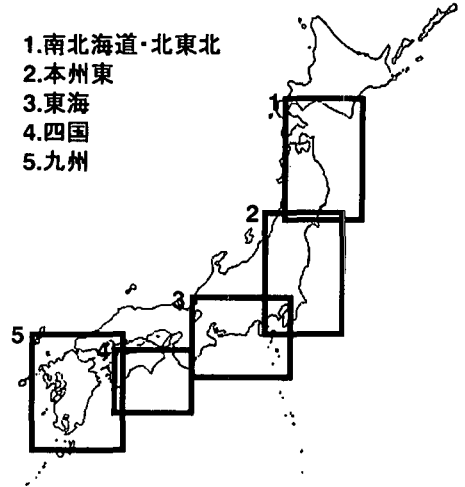


図-1 計算対象領域

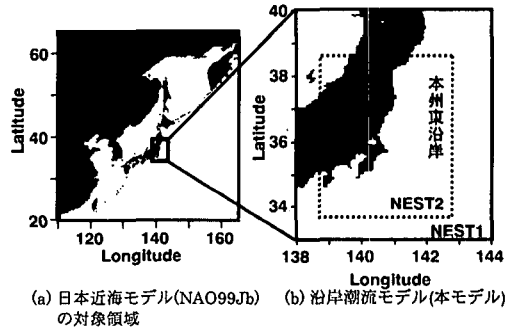


図-2 ネスティングの概念図

バル潮汐モデル NAO 99 b の計算結果を反映させた広域沿岸潮流モデルを構築することを試みた。Matsumoto らの海洋潮汐モデルは地球全体を対象としたグローバル潮汐モデル NAO 99 b と日本近海を対象とした潮汐モデル NAO 99 Jb から構成されており、基礎方程式は、起潮力項を含んだ球面座標系表示の水深積分型運動方程式と連続式である。これに過去 5 年間の海面高度計 (TOPEX/POSEIDON) データと日本沿岸 219 箇所求められてい

* 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻
** 正会員 博(工) 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科
*** 修(工) 千代田化工建設(株)

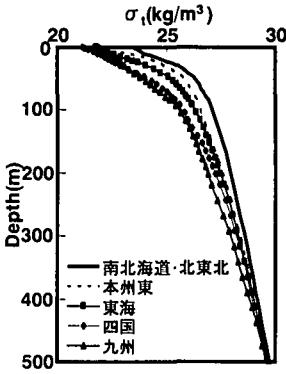


図-3 各計算領域に与えた鉛直密度分布

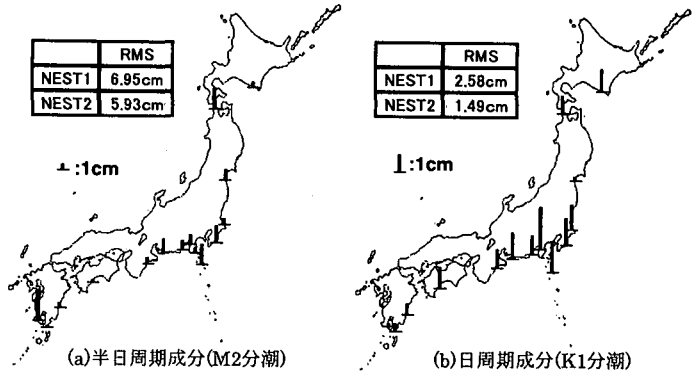


図-4 本計算結果と検潮所における調和定数の差の分

る調和定数を同化させることで日本近海の潮流計算を主要 16 分潮に対して可能としている。本研究では、Matsumoto らが開発した日本近海モデル NAO 99 Jb の計算結果を POM (Princeton Ocean Model) に基づいて構築した沿岸潮流モデルにネスティングさせることにより日本沿岸域の広域潮流計算を行い内部潮汐波強度を推定することを試みた。計算は、図-1 に示すように日本の太平洋側の沿岸域を 5 つの領域 (北海道・東北、本州東、東海、四国、九州) に分割し、各領域に対して NAO 99 Jb の計算結果をベースとした沿岸潮流計算を行った。

(2) ネスティング計算手法

本研究の沿岸潮流モデルでは、沿岸域の複雑な潮流場を精度良く表現するために、2 段階のネスティングを行った。図-2 に示すように、第一段階として、Matsumoto らの日本近海モデル NAO 99 Jb から沿岸潮流モデル NEST 1 (2 次元水深積分モデル: 順圧計算) へのネスティングを行い、第二段階として沿岸潮流モデル NEST 1 から NEST 2 (3 次元モデル) へのネスティングを行った。空間解像度は日本近海モデル NAO 99 Jb が $1/12^\circ$ 、沿岸潮流モデル NEST 1、NEST 2 がそれぞれ $1/24^\circ$ 、 $1/60^\circ$ であり、3 次元計算である NEST 2 では鉛直方向 60 層の不等間隔格子 (表層で格子間隔が小) を採用した。

具体的なネスティング方法については、2 段階のネスティングに異なった手法を採用している。まず NAO 99 Jb から NEST 1 については、両者の基礎方程式系が異なること、NAO 99 Jb では海面高度計データや検潮記録を用いたデータ同化を行っていることを考慮して、NAO 99 Jb の結果を NEST 1 の境界条件として与えるのではなく、次式を用いて NEST 1 の領域全体に反映させる形にした。

$$X_i = \lambda X_1 + (1 - \lambda) X_n \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 X は水位、線流量を表し、添え字 1、 n はそれぞれ NEST 1、NAO 99 Jb の結果を表す。また、 λ は重み係

数であり、沖合海域で NAO 99 Jb モデルの結果を反映し、浅海域では沿岸潮流モデルに一致するように水深に比例して与えた。一方、NEST 1 から NEST 2 へのネスティングにおいては、NEST 1 の計算結果 (水位、線流量) を NEST 2 の境界条件として与えている。ここでは、Xing & Davies (1998) に従い、次式の境界条件を採用した。

$$V_{N_2} = V_{N_1} \pm \sqrt{\frac{g}{H_{N_2}}} (\eta_{N_2} - \eta_{N_1}) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\eta_{N_2} = \eta_{N_1} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 V は NEST 2 の開境界に直角な水深平均流速成分、 η は水位、 H は水深を表し、添え字 N_1 、 N_2 はそれぞれ NEST 1、NEST 2 の結果を表す。

(3) 内部潮汐波の計算について

本計算では、密度成層が最も発達した夏季における内部潮汐波強度を把握することを目的として、各領域の塩分及び水温の鉛直分布を日本海洋データセンター (JODC) が提供している『経緯度 1 度メッシュの水温統計、塩分統計』の 8 月の統計データに基づき各領域の代表値を図-3 のように決定し、これを各計算領域全体に水平一様に与えた。対象とした潮汐成分は、半日周潮が M_2 分潮、日周潮が K_1 分潮であり、周期の違いによる内部潮汐波強度や伝播特性の違いを調べた。計算は 7 日間行ったが、4 日目以降については流れの状態がほぼ安定したと判断されたことから、計算開始後 4 日目から 7 日目までの計算結果 (流速、塩分、水温) に対して調和解析を行い、その振幅と位相から各領域の基本的な内部潮汐波特性を把握した。なお内部潮汐波の強度を表示するにはいくつかの表現が考えられるが、ここでは簡便に、次式を用いて表現した。

$$H = \frac{\rho_{amp}}{\partial \rho_0 / \partial z} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 ρ_{amp} は調和解析から求めた密度変動振幅、 $\partial \rho_0 / \partial z$ は各領域に初期条件として与えた塩分・水温から計算し

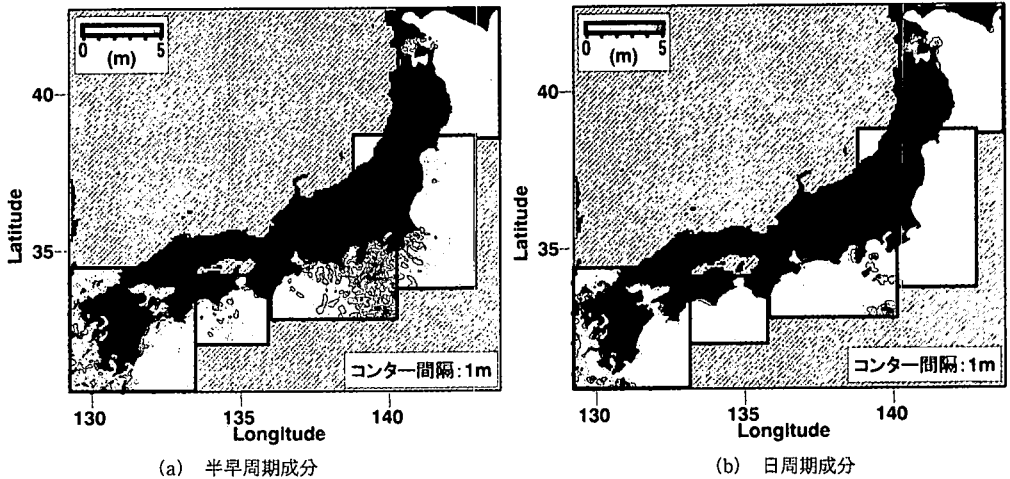


図-5 内部潮汐波強度（密度変動パラメータ）の平面分布

た密度分布の鉛直密度勾配を表している。式(5)で定義された H は、長さの次元を持っており内部波高が大きいほど大きくなることから内部潮汐波の波高を代表するものと考えられる。本研究では、これを密度変動パラメータと呼ぶこととし、内部潮汐波強度の表示はこれを用いて行った。

(4) 沿岸域における外部潮汐の再現性

内部潮汐を評価するためには、その基本となる外部潮汐を正しく表現している必要がある。そこで、本モデルによる外部潮汐の再現性を検討するために、日本沿岸の代表的な検潮所における調和定数（日本海洋データセンター提供）を本計算結果と比較した。図-4(a), (b)はそれぞれ半日周期成分(M_2 分潮)および日周期成分(K_1 分潮)について、各検潮所の調和定数とNEST2の計算結果から求めた調和定数の差を示したものである。観測結果と計算結果の差については場所によって傾向に違いがあるものの、全地点データに対するRMS値(root mean square)で評価すると、半日周期成分(M_2 分潮)が6 cm程度、日周期成分(K_1 分潮)が1.5 cm程度であり、このことから本計算では広領域に対して比較的高い精度で外部潮汐計算が行われていることが確認された。

3. 内部潮汐波特性に関する数値計算結果と考察

図-5に、本計算結果から得られた(a)半日周期、(b)日周期成分の密度変動パラメータの日本沿岸全体の平面分布を示す。また、図-6～図-8は、5つの計算領域から、本州東沿岸、東海沿岸、九州沿岸についてのみ、半日周及び日周期の密度変動パラメータ及び海底地形を示したものである(南北海道・北東北沿岸、九州沿岸については紙面の都合上省略)。各海域における内部潮汐波強度とその伝播特性を以下に示す。

(1) 南北海道・北東北沿岸

本領域では、津軽海峡周辺海域で内部潮汐波強度が大きいことが特徴である。半日周期成分については、津軽海峡大間崎沖に強制波動的な性質を有する強流帯内部潮汐波が生成され、下北半島の尻屋崎沖からは内部潮汐波が円形に周辺海域に伝播している。青森県東岸や北海道南岸(襟裳岬～室蘭)など大陸棚が比較的発達した単調な沿岸域では、大陸棚縁辺部で発生した内部潮汐波が岸に平行な峰を持って陸岸に向かって伝播するが内部潮汐波強度はあまり大きくない。一方、日周期成分については、下北半島の尻屋崎沖や北海道襟裳岬沖で発生した日周期内部潮汐波が陸岸に沿って岸を右に見る方向にそれぞれ伝播しており(尻屋崎沖:伝播速度54 cm/s程度、襟裳岬沖:伝播速度46 cm/s程度)、沿岸拘束波としての性質を持っている。

(2) 本州東沿岸

本領域の特徴は、房総半島先端を境にその北側と南側で性質に大きな違いがあることである。北側海域(南三陸、仙台湾、常磐・鹿島灘、房総)では比較的単調な大陸棚域が発達しており、半日周内部潮汐波は、i) 陸棚縁辺部で発生し等水深線に平行な峰を持って陸岸に向かって伝播するもの、ii) 局所的な地形変化部分(図-6(c)中矢印)がポイントソースとなり円形に伝播するものの重ね合わせとなっている。これに対して、南側海域では、大陸棚が狭く、半島、湾口、海嶺など地形変化が大きいことが特徴であり、潮流が強いために東京湾口(図-6(a)①)、相模湾(図-6(a)②)、伊豆諸島海域(図-6(a)③)では内部潮汐波強度が大きい。このうち東京湾口では、強制波動的な挙動を示す強流帯内部潮汐波が発達する。一方、日周期内部潮汐波は、鹿島灘以北の地形が単調な海域にはほとんど発生せず、犬吠崎沖周辺海域で

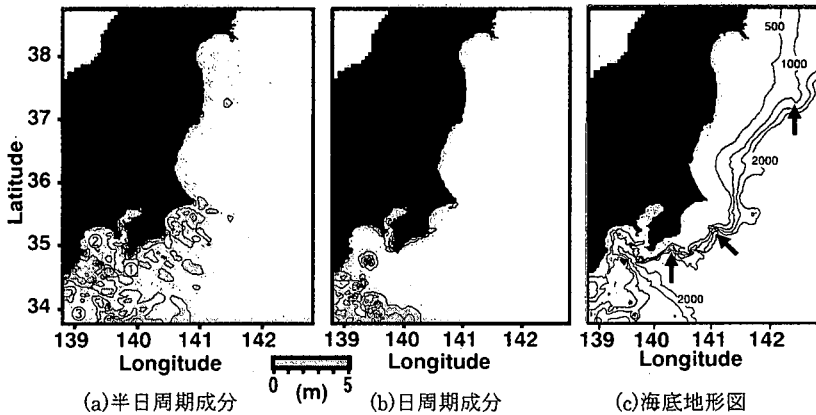


図-6 本州東沿岸における内部潮汐波強度（密度変動パラメーター）の平面分布と海底地形図

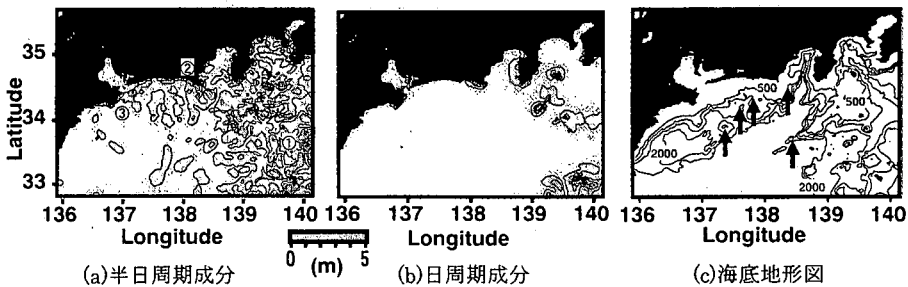


図-7 東海沿岸における内部潮汐波強度（密度変動パラメーター）の平面分布と海底地形図

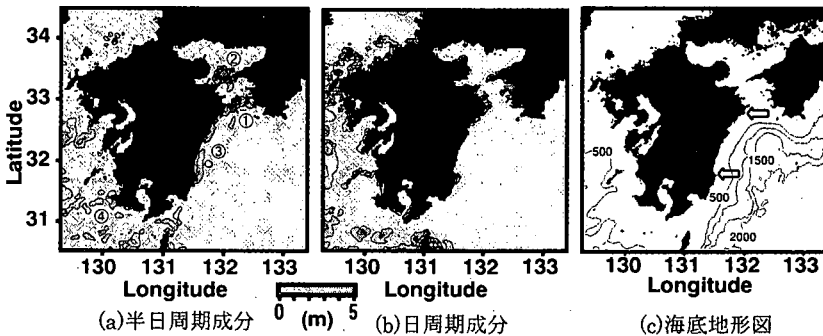


図-8 九州沿岸における内部潮汐波強度（密度変動パラメーター）の平面分布と海底地形図

発生して房総沿岸を南向きに伝播するもの、東京湾口部で発生して浦賀水道東岸に沿って伝播するもの、また伊豆諸島周辺海域で発生して島に拘束され、時計回りに回転するものなどが存在し、沿岸拘束波としての性質が強い。

(3) 東海沿岸

半日周期成分は相模湾から伊豆諸島海域（図-7 (a) ①）、遠州灘（特に御前崎沖：図-7 (a) ②）、伊勢湾口外縁部（図-7 (a) ③）において強度が大きい。特に伊豆諸島海域（伊豆海嶺）は地形変化が大きく潮流が強いために強い内部潮汐波が励起される傾向がある。遠州灘

から熊野灘にかけての大陸棚が比較的発達した海域では、図-7 (c) 中に矢印で示した部分がポイントソースになり内部潮汐波が円形に伝播すること、遠州灘や熊野灘の陸棚縁で発生した内部潮汐波が岸に平行な峰を持って岸に伝播することなどが、特徴として挙げられる。また、伊勢湾口外縁部では強流帯内部潮汐波が発達する。一方、日周期成分については、御前崎沖、志摩半島沖で発生した日周内部潮汐波が陸岸に沿って西向きに伝播すること（御前崎沖：伝播速度 66 cm/s 程度、志摩半島沖：伝播速度 37 cm/s 程度）、伊豆半島沖で発生した内部潮汐波が陸岸に沿って駿河湾内へ伝播すること（伝播

表—1 本計算結果に基づく日本沿岸（太平洋側）の内部潮汐波特性の分類

	半日周期成分	日周期成分
大陸棚縁	仙台湾～房総・遠州灘～熊野灘・佐波湾・日向灘など	
島・岬・海嶺	伊豆諸島（伊豆海嶺）・室戸岬沖など	襟裳岬・伊豆諸島・御前崎・室戸岬・種子島など
海峡・水道・湾口部	津軽海峡・東京湾口部・伊勢湾口外縁部・紀伊水道・速吸瀬戸など	津軽海峡・東京湾口部・駿河湾など

速度 121 cm/s 程度), また伊豆諸島周辺で発生した内部潮汐波が島に拘束され, 時計回りに回転することなどが特徴である。

(4) 四国沿岸

半日周期内部潮汐波は, 紀伊水道外縁部, 室戸岬沖海域, 土佐湾の大陸棚縁辺部で強度が大きい。室戸岬沖に水深が浅い海域が存在しており, そこがポイントソースとなって円形に伝播する内部潮汐波と土佐湾沖陸棚縁において発生し岸に平行な峰を持って陸岸に向かって伝播する内部潮汐波が重合している。日周期成分については室戸岬周辺で比較的強い日周内部潮汐波が励起され, それが土佐湾岸に沿って伝播速度 58 cm/s 程度で西向きに伝播する。

(5) 九州沿岸

半日周期内部潮汐波は, 豊後水道の大陸棚縁 (図—8 (a) ①), 速吸瀬戸周辺 (図—8 (a) ②), 日向灘沿岸域 (図—8 (a) ③), 天草灘から種子島・屋久島にわたる九州西岸の広い陸棚域 (図—8 (a) ④) において大きな強度を示す。このうち, 速吸瀬戸周辺では強制力的であり海峡部の強い潮流に伴う強流帯内部潮汐波であるのに対し, 日向灘では大陸棚縁で発生して沖から沿岸に向かって伝播する弱流帯内部潮汐波である。九州西岸域は大陸棚が発達しており, 複雑な地形変化と強い潮流のために大陸棚上の広い領域で内部潮汐波が励起されそれが陸岸に向かって伝播する。一方, 日周期内部潮汐波については, 九州東岸の図—8 (c) 中の矢印で示した部分で発生した日周期内部潮汐波が岸に沿って南向きに伝播する性質があること (伝播速度 54 cm/s 程度), 九州南岸及び西岸域の島 (種子島, 屋久島等) でその周辺で発生した内部潮汐波が島に拘束され時計回りに回転することなどが特徴である。

4. ま と め

グローバル潮汐モデルを反映させた広域沿岸潮流モデルを構築し, 日本沿岸 (太平洋側) の内部潮汐波強度とその伝播特性について検討を行った。本数値計算から得られた特徴をまとめると以下ようになる (表—1 参照)。

(1) 半日周期成分の内部潮汐波強度は, 津軽海峡周辺海域, 関東・東海沿岸域 (房総～伊豆諸島海域～遠州灘), 豊後水道周辺～日向灘, 九州西岸で大きい。このうち伊豆諸島海域や九州西岸域のように潮流が強く地形変化が大きい海域では, 複数のソースから強い内部潮汐波が生成され, 全体として複雑な流動場が形成される。これに対して, 本州東沿岸のように大陸棚が発達した単調な海域では, 大陸棚縁で発生した岸に平行な峰を持って陸岸に向かって伝播する成分にポイントソースから円形に伝播する内部潮汐波成分が重合した形が一般的である。一方, 津軽海峡, 東京湾口, 伊勢湾口, 豊後水道などでは強流帯内部潮汐波が発達する。

(2) 日周期成分は, 半島, 岬, 湾口など平面的な地形変化の大きいところで発生しており, 沿岸拘束波としての性質が顕著で, 岸を右に見る方向に伝播する。島付近に発生した内部潮汐波は, 島に拘束されて時計回りに回転する。

謝辞: 本研究を行う上で調定数データを提供して頂いた日本海洋データセンター (JODC) に謝意を表します。本研究は文部省科学研究費基盤研究 (c) 『多重スケール沿岸海洋モデル構築に基づく外海栄養塩流入フラックス算定の試み』(代表者: 八木 宏, 課題番号: 13650563) の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

参 考 文 献

- 阿呆勝之・杜多 哲・高柳和史・藤原建紀 (1999): ADCP を用いた五カ所湾の内部潮汐観測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 401-405.
- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・片倉徳男・岡田美穂・関根義彦・藤井秀博 (1999a): 水質環境の動的変化に着目した英真湾の現地観測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1051-1055.
- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・藤井秀博 (1999b): 内部潮汐を考慮した英真湾の流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 466-470.
- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp. 329-395.
- 日向博文・八木 宏・灘岡和夫・斎藤輝彦・田淵博嗣 (2000): 夏季東京湾における内部潮汐波の基本特性について, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 426-430.
- 山本 潤・中山哲殿・時吉 学・宮地健司 (2002): 野見湾における夏季の流況と水質変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1086-1090.
- Matsumoto, K., T.Takanezawa and M.Ooe (2000): Ocean Tide Model Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan, J of Oceanography, Vol. 56, pp. 576-581.
- Xing, J. and A. M. Davies (1998): A three-dimensional model of internal tides on the Malin-Hebrides shelf and shelf edge, J of Geophysical Research, Vol. 18, pp. 27821-27847.
- Yanagi, T., M.Shimizu, T. Saino and T. Ishimaru (1992): Tidal Pump at the Shelf Edge, J of Oceanography, Vol. 48, pp. 13-21.