

リーフ地形効果に着目した石垣島東岸裾礁域の流動構造に関する研究

田村 仁* ・ 灘岡 和夫** ・ Enrico Paringit***
三井 順**** ・ 波利井佐紀***** ・ 鈴木 庸 彦*****

本研究では、石垣島東岸の複雑な地形がリーフ内流動構造及ぼす影響を把握するため、まず、対象海域で現地観測を行い、リーフ内やチャンネル周辺における基本的な流動パターンの把握を試みた。また、このような複雑な地形的特徴をできるだけ正確に反映した数値流動解析を行うべく、衛星リモートセンシング画像からの逆推定アルゴリズムによって対象海域リーフ内の高精度水深マップを作成し、新たに改良を加えた準 3 次元浅水乱流モデルにより対象海域の海水流動シミュレーションを行った。その結果、現地観測において確認されたリーフ内北上流を再現し、チャンネル地形効果がリーフ内流動構造に大きな影響を及ぼしていることが示された。

1. はじめに

サンゴ礁生態系の保全・回復策を検討する上で、サンゴ礁への赤土流入・堆積、淡水流入、熱輸送などの様々な環境ストレスの実態を定量的に把握する必要がある。そのためには、これらの物質・熱輸送現象を支配しているサンゴ礁内・周辺での海水流動の構造を明らかにする必要がある。本研究で対象とする沖縄県石垣島東岸は、岸沖方向に、水深 2 m 程度の礁池 (moat)、サンゴが発達した内側礁原 (inner reef flat)、干潮時に干出する礁嶺 (reef crest)、さらに外洋に面する急勾配の礁斜面 (reef slope) と続く典型的な裾礁 (fringing reef) 域である。また、局所的に礁嶺が裂け礁池と外洋を繋ぐクチ (channel) が発達しており、リーフ内流動パターンはこれらの複雑な地形構造に大きく影響され決定されていると考えられる。

石垣島東岸を対象とした既往の研究は、これまでもリーフ内温熱・流動特性に関する研究 (灘岡ら, 1999, 2001, 二瓶ら, 2001), 「赤土汚染」に関する研究 (大見謝, 1996), 白化に伴うサンゴ群集被度変化に関するもの (茅根ら, 1999) など現地観測を中心に物理・化学・生物学の側面から研究が進められてきている。

本研究では、石垣島東岸の複雑な地形がリーフ内流動構造に及ぼす影響を把握するため、まず、対象海域で現地観測を行い、リーフ内やチャンネル周辺における基本的な流動パターンの把握を試みた。また、このような複雑な地形的特徴をできるだけ正確に反映した数値流動解析を行うべく、Enrico & Nadaoka (2002), Enrico (2003)

によって開発された衛星リモートセンシング画像からの逆推定アルゴリズムによって対象海域リーフ内の高精度水深マップを IKONOS 画像から作成した。さらに灘岡ら (2000), 田村・灘岡 (2001) によって開発された準 3 次元浅水乱流モデルを新たにリーフ海域に適用するためにいくつかの改良を行い、対象海域の海水流動シミュレーションを行った。

2. 現地観測結果と考察

(1) 現地観測概要

現地観測は 2002 年 7 月 21 日から 8 月 7 日まで沖縄県八重山諸島の石垣島東岸で行った。今回対象としたリーフ海域 (図-1) には 3 つの大きなチャンネル (北からトゥールクチ、イカクチ、モリヤマクチ) が発達している。この内のトゥールクチは礁池に達する大規模なチャンネルであり、水路中央部で水深 15-20 m 程度と急深となっている (図-2)。観測では石垣島東岸北部のトゥールクチ付近から南側の轟川にかけてリーフ内 6 点 (E1, E2, E3,

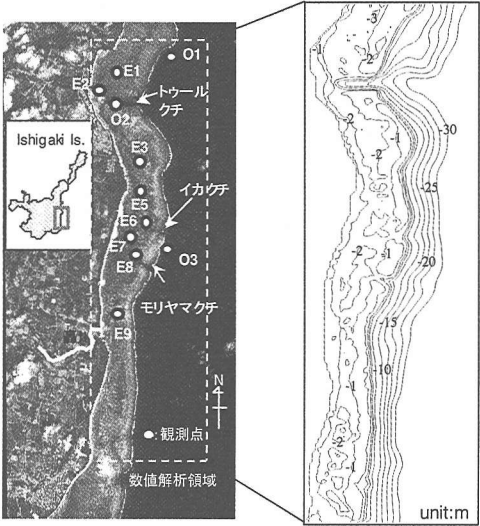


図-1 対象海域と測定点

図-2 対象海域水深

* 学生会員 修(工) 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻博士課程 日本学術振興会特別研究員
** フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
*** 博(工) 日本学術振興会外国人特別研究員 東京工業大学准客員研究員
**** 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 修士課程
***** 博(理) 東京工業大学大学院助手 情報理工学研究科情報環境学専攻

E5, E7, E9), チャネル付近に3点(トゥールクチ(O2), イカクチ(E6), モリヤマクチ(E8)), さらにリーフ外の水深13m程度の2点(O1, O3)に測定点を設け, メモリ式計測器による水平2次元流速, 水位, 水温・塩分の連続計測を行った。またトゥールクチ底面(O2)にはADCPを設置し, トゥールクチ内における水平方向流速の鉛直プロファイル計測した。

(1) 気象概況

石垣島気象台(伊原間)によって得られた観測期間中の風向風速によると, 8月4日から風速5m/s以上の南南東の風となるが, それ以外の期間では微弱風であり対象海域への影響は小さかったものと考えられる。

(2) リーフ外波浪概況

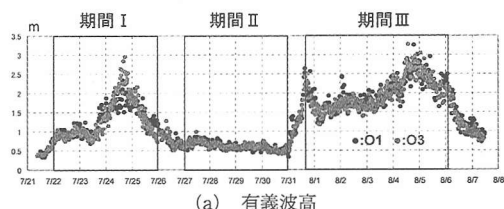
図-3はリーフ外に設置した観測点O1, O3における(a)有義波高, (b)有義波周期を表している。観測期間中の前半(期間Ⅰ: 7/23-7/25)と後半(期間Ⅲ: 7/31-8/6)においては有義波高が1mから3mと高波浪状態となっており, また, その間の期間Ⅱ(7/27-7/30)においては0.5mと比較的低波浪状態となっていることがわかる。さらに, 期間Ⅰでは風速は微弱であり有義波周期が10sから14sと比較的長いことからうねり性の波浪が卓越しており, 期間Ⅲにおいては周期7s程度であることから対象海域において風波が卓越していたものと考えられる。なお潮位に関しては, おおよそ, 期間Ⅰは大潮, 期間Ⅱは中潮, 期間Ⅲは小潮に対応している。

(3) リーフ内およびチャネル周辺における流動特性

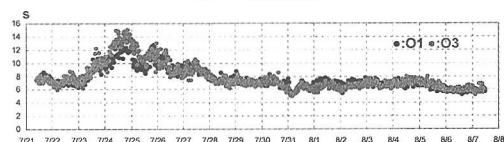
図-4はリーフ内(E1, E3)とイカクチ(E6), モリヤマクチ(E8)において得られた5分間平均水平流速の時系列に関して観測値とその25時間移動平均値を示したものの(ただし, 東向・北向流速を正), また, 図-5はトゥールクチ底層に設置したADCPによって得られた

クチ内部の水平流速の鉛直プロファイル(正: 東向流速, 負: 西向流速)である。これから, リーフ外において高波浪状態となる期間Ⅰ, Ⅲに対応して, トゥールクチ北に位置するE1においては南西方向の, また, トゥールクチ南に位置するE3では北西方向の, それぞれトゥールクチに向かう平均流速が卓越していることがわかる。また, トゥールクチでは期間Ⅰ, Ⅲともにリーフ外へ向かう顕著な方向流が卓越していることがわかる。このことを明確にするために, リーフ外有義波高(O3)とリーフ内の各地点での主軸方向流速(5分間平均値)の相関関係を示したものが図-6であるが, リーフ内流速が有義波高の増加に対応していることがわかる。

また, 図-7は, リーフ内とトゥールクチに設置した7個の水位計から得られた水位の25時間移動平均値を表したものである。ただし, 得られた流速データが微弱であった7/29 0:00から7/30 1:00までの一潮汐間の平均水位を基準とした値として示している。これから, 期



(a) 有義波高



(b) 有義波周期

図-3 リーフ外波浪概況

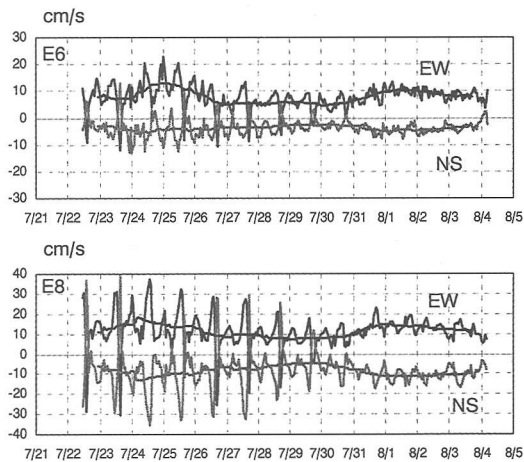
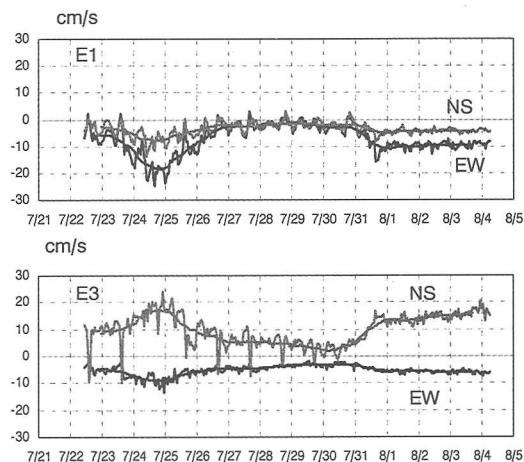


図-4 水平流速の時系列分布

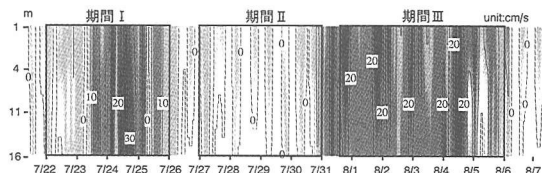


図-5 O2における東西方向流速の鉛直プロファイル

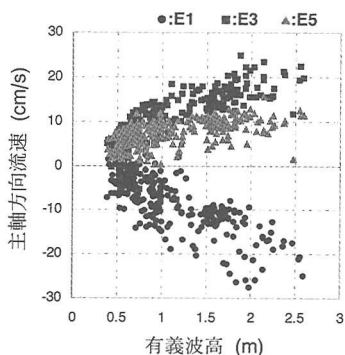


図-6 有義波高と主軸方向流速の相関

間 I, IIIにおいては、対象海域のトゥールクチ以南リーフ内 (E3, E5, E7, E9) で水位の顕著なセットアップが起こっており、さらにその勾配がトゥールクチに向かっていていることが分かる。特に E3 からトゥールクチ周辺 (E2, O2) にかけては急激な水位差がついている。この原因としては、次の様に考えられる。まず対象海域トゥールクチ以南リーフ内においては、礁斜面における碎波に伴い、wave set-up による水位の上昇が生じる。一方、トゥールクチの様な大規模なチャンネル付近においては碎波に伴う Radiation stress の明確な空間勾配がつきにくく、そのため顕著な水位上昇が発生しない。このことにより波浪が卓越する期間においてはリーフ内沿岸方向に北向きの水位勾配が生じ、北上流の発生とトゥールクチからリーフ外への質量輸送が引き起こされたものと考えられる。

3. 数値解析手法

(1) 準3次元浅水乱流モデルの概要

現地観測を対象として数値流動解析を行った。使用したモデルは、著者らが開発している準3次元浅水乱流モデル SDS-Q 3D Model (灘岡ら, 2000, 田村・灘岡, 2001) である。このモデルでは極浅水域における乱流モデルとして、灘岡・八木 (1993), Nadaoka & Yagi (1998) によって開発された SDS turbulence model を導入している。すなわち、乱れの分離スケールに関して、通常の LES で用いられる計算格子幅ではなく、浅水乱流場の物理構造上のキーとなる水深を用いることで水深スケール以下 (SDS 乱れ) とそれ以上の水平大規模渦スケールの現象

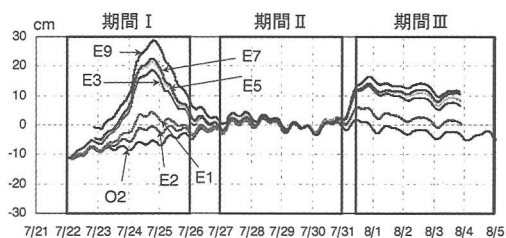


図-7 水位の25時間移動平均値

を分離する。水深スケール以下の乱れについては、その生成項も含めてモデル化し、渦動粘性係数を評価することで、大規模複雑乱流場での水平大規模渦の直接数値計算が効率よく行えるモデルとなっている。

さらに、運動量方程式に関しては水平方向流速の鉛直プロファイルを低計算負荷で評価できるように、水平方向流速の鉛直分布関数 (Legendre 多項式) を仮定し、これを用いて流速を多成分連成表示させ、重み付き残差法の一つである Galerkin 法を用いて水深積分することで準三次元化を行っている。

(2) リーフ海域に用いるためのモデルの拡張

(a) 浅水方程式の鉛直積分範囲

既存の SDS-Q3D モデルにおいては水深方向積分範囲を水深 $-h$ から静水時水位 0 として連続式、運動量方程式の定式化を行っている。しかし今回対象としている裾礁型リーフ海域では、特に礁池水深に対する潮位変動が大きいこと、礁嶺においては干潮時に干出することから鉛直方向積分範囲を $-h$ から任意時刻の水位 η として新たに定式化した連続式・運動量方程式を使用した。

(b) 移動境界条件の適用

リーフ内の流動構造に関して非常に重要であると考えられる干潮時の礁原での干出効果を数値的に取り扱えるよう移動境界条件を適用した。SDS-Q 3D モデルは σ 座標系と同様に鉛直方向に関して海面・海底面に沿って流速成分を定義するモデルであるので容易に移動境界条件を適用することが可能である。移動境界の設定においては、基準水深 δ を設定し、計算領域中で全水深 $d = h + \eta$ が δ 以下となったメッシュでの流量フラックスを 0 として扱った。

(c) 波動効果の評価

現地観測結果からも明らかなように対象海域において、特に高波浪期に対応して海浜流成分が卓越する。本計算においてはエネルギー平衡方程式 (Karlsson, 1969) を用いることで Radiation stress を評価し流動計算に反映させた。また、礁斜面・リーフエッジにおける碎波に伴う波高減衰を考慮するため、Dally ら (1985) による碎波変形モデルのパラメタを改良した Kuriyama (2001) の手法を用いた。ただし、潮位変動に伴う碎波位置・波高

表一 計算に用いたパラメタ

流動計算		波浪計算	
時刻幅 (s)	1	期間II	期間III
EW 方向空間解像度 (m)	50	周波数分割数	10
NS 方向空間解像度 (m)	50	方向角分割数	35
流速成分数	1	方向集中度パラメタ	25 25
移動境界基準水深 (cm)	2	有義波高 (m)	0.7 1.5
底面摩擦係数	0.04	有義波周期 (s)	7 7
コリオリパラメタ (1/s)	6.02×10^{-5}	入射角 (°)	0

減衰を再現するため、砕波変形モデルにおいて水深 h でなく全水深 d を用いて評価した。

(d) 対象海域高精度水深データ

リーフ海域において高精度で数値流動解析を行うために最も重要となる要素の一つが、礁原における詳細な水深データである。本計算においては、近年著者らによって開発された衛星画像データの逆解析手法 (Enrico・灘岡, 2002, Enrico, 2003) に基づき、IKONOS によって撮影された対象海域の衛星画像からリーフ内の極浅水域における水深データを算出した。また、リーフ外水深に関しては海図に基づく等水深線と接続させることで対象海域の水深データを作成した。

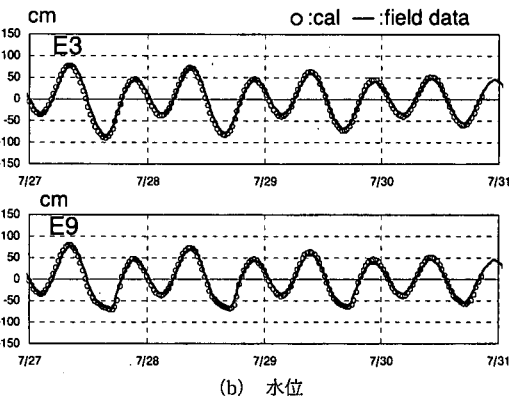
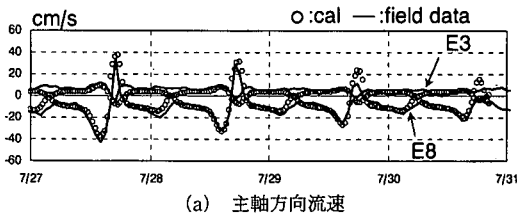
(3) 数値計算条件

数値解析領域は図一1の点線部で示した東西方向 3200 m, 南北方向 9600 m の領域とした。また、水深データは上記の手法によって得られた図一2で示したものをを用いた。流動計算においては、現地観測によって得られた沖合水位データを M2, S2, K1, O1 の主要4分潮に調和解析して沖側境界条件として与えた。また、北側, 南側, 陸域境界は壁面 slip 境界条件として扱った。また、波浪計算においても流動計算と同様の計算格子を用いた。沖合入射波条件として Bretschneider-光易型スペクトル, 方向関数は光易型方向関数を有する多方向不規則波を与えた。なお本計算に用いたパラメタは表一の通りである。

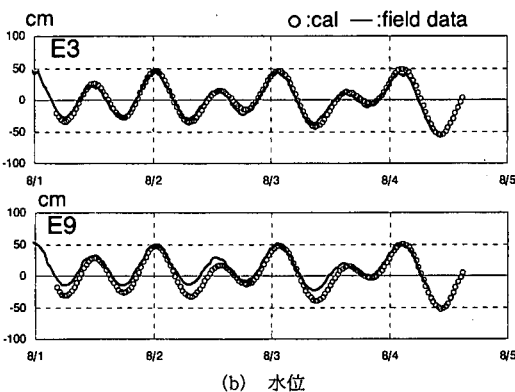
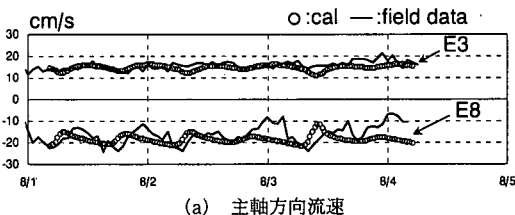
4. 数値流動解析結果と考察

(1) 現地観測データとの比較による本計算モデルの妥当性の検証

図一8 (a), (b) は、観測期間IIに対応して行った数値解析結果と観測結果に関して、それぞれ主軸方向流速と水位に対して比較したもの、図一9 (a), (b) は、同様に期間IIIに対応したものである。対象としているリーフ海域では大潮-中潮にかけての潮位変動が大きい干潮から上げ潮に向かう数時間程度に、クチを通じて外洋からの海水がリーフ内に流入してくる急激な流向変化が生じることを灘岡ら (2000) は指摘している。図一8 (a) に見られる流速変動はそれに対応しており、現地観測結果と比較しても十分な精度で現象を再現できていること



図一8 計算値と観測値の比較 (観測期間II)



図一9 計算値と観測値の比較 (観測期間III)

がわかる。また、図一8 (b) から、リーフ内 E9 における水位変動が干潮時において歪んでいる様子が、数値計算上でも再現できていることがわかる。さらに、高波浪期に対応した図一9 (a), (b) より、wave set-up による水位上昇量に関して、計算結果と観測結果で干潮時に多少誤差は生じているものの、主軸方向流速成分での一方向

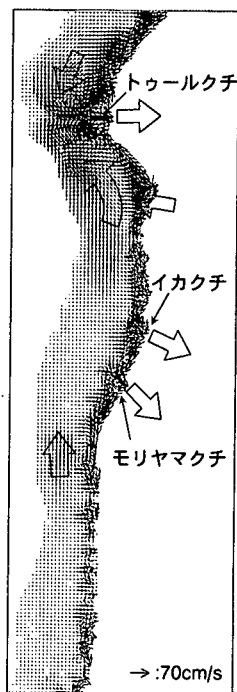


図-10 残差流成分

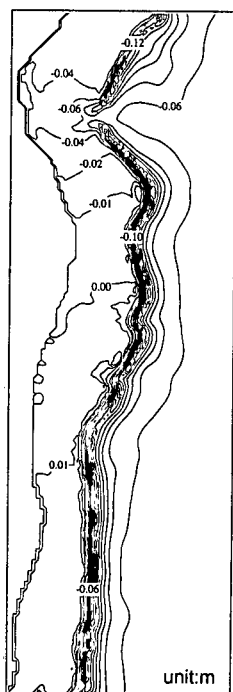


図-11 平均水位

的な流動パターンといった特徴を再現できていることがわかる。

(2) リーフ内残差流パターンと平均水位

図-10は、期間Ⅲに対する計算結果でリーフ内における残差流成分を表している。これから、トゥールクチ、イカクチ、モリヤマクチにおいてはリーフ内からリーフ外へ流出する残差流成分、対象海域北部礁嶺からは顕著な流入があることがわかる。さらにリーフ内においては、トゥールクチを挟んでトゥールクチに向かう流れが卓越しており、クチ南側ではおよそ2500mに渡り北上流が卓越していることから、トゥールクチがリーフ内流動構造に大きな影響を及ぼしていることがわかる。図-11は期間Ⅲにおける平均水位を示しているが、北上流に対応して、トゥールクチ南リーフ内においては南から北に向けて水位勾配がついている。また、特にトゥールクチ付近での水位勾配が顕著であることがわかる。さらに、礁斜面において wave set-down により平均水位の低下が起こっていることがわかる。これら本計算によって得られた流動パターンと観測結果との比較からも本計算の妥当性が伺える。

5. おわりに

本研究では、石垣島東岸リーフ海域を対象として、そこでの複雑な地形がリーフ内流動構造及ぼす影響を把握するため、現地観測と数値解析により、リーフ内の基本

的な流動パターンの把握を試みた。その結果として、現地観測から波浪が卓越する期間においてはリーフ内で顕著な水位のセットアップが起こり、また、トゥールクチ周辺ではセットアップは起こらず、このため沿岸方向に北向きの水位勾配が生じ、リーフ内で北上流が発生することが確認された。一方、数値解析結果は現地観測結果を精度良く再現できており、トゥールクチチャネル地形効果がリーフ内流動構造に大きな影響を及ぼすことが示された。今後、リーフ内海水滞留時間、熱輸送過程や礫川からの赤土流出・輸送過程に関して定量的な議論を数値解析を基に進める予定である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究A(1)(一般)(研究代表者：灘岡，課題番号：14205071)を得て行ったものであることを付記する。

参考文献

- Enrico Paringit・灘岡和夫 (2002): 多バンド・リモートセンシングに基づくサンゴ礁マッピングへの逆解析手法の応用, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1191-1195.
- 大見謝辰男 (1996): 赤土堆積がサンゴに及ぼす影響, 沖縄県衛生環境研究所報, 第30号, pp. 79-86.
- 茅根 創・波利井佐紀・山野博哉・田村正行・井出陽一・秋元不二雄 (1999): 琉球列島石垣島白保・川平の定例線における1998年白化前後の造礁サンゴ群集被度変化, 日本サンゴ礁学会, Galaxea, Vol. 1, pp. 73-82.
- 田村 仁・灘岡和夫 (2001): 準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルの開発に基づく港口部での底質浮遊と輸送に関する解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 526-530.
- 灘岡和夫・八木 宏 (1993): 浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用, 土木学会論文集, No. 473, pp. 25-34.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・横堀達也・熊野良子・大見謝辰男 (1999): サンゴ礁海域の水環境に関する陸水・外洋水影響の検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1181-1185.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・網島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水 (2001): サンゴ礁海域の温熱環境特性に関する多面的観測と解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1146-1150.
- 灘岡和夫・田村 仁・八木 宏・二瓶泰雄 (2000): 準三次元浅水乱流モデルの開発に基づく三次元大規模渦構造の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 466-470.
- 灘岡和夫・若木研水・二瓶泰雄・今井聡介・青木康哲・丸田直美・大見謝辰男・瀧本裕彰・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.
- Dally, W. R., R. G. Dean and R. A. Dalrymple (1985): Wave height variation across beaches of arbitrary profile, J. Geophys. Res., Vol. 90, No. C6, pp. 11, 917-11, 927.
- Paringit, E. C. (2003): Integrated monitoring and modeling of a coastal-land coupled environmental system based on remote sensing, 東京工業大学学位論文, pp. 98-141.
- Karlsson, T. (1969): Refraction of continuous ocean wave spectra, J. Waterways and Harbors Div., Proc. of the ASCE, Vol. 95, No. WW 4, pp. 437-448.
- Nadaoka, K. and H. Yagi (1998): Shallow water turbulence modeling and horizontal large-eddy computation of river flow, J. of Hydraulics Eng., pp.493-500.
- Kuriyama, Y. (2001): Hydro- and Morpho-Dynamics on a Barred Beach, 東京工業大学学位論文, pp. 60-63.