

石垣島吹通川河口域のサンゴ礁-藻場-干潟-マングローブ連成系 における水理及び温熱環境特性

田村 仁*・灘岡和夫**

サンゴ、海草藻場、干潟、マングローブ等が相互に連成する形で集約的に存在している石垣島吹通川河口域を対象とし、現地観測および数値解析を実施することにより、各生態系要素における海水流動特性とそれに伴う温熱環境特性を解明することを試みた。その結果、夏期において極浅海域では低潮位時刻と日射量最大時刻の相対関係の影響がきわめて強く、それに伴い水温ピーク値に大きな違いが生じるとともに、干潟や汀線付近は低貯熱容量影響によって高水温水塊ソース域となる一方で、マングローブ林は日射遮蔽効果による低水温水塊ソース域と位置づけられ、温熱特性から見て各沿岸生態系要素はそれぞれ密接に関連しているものと考えられる。

1. はじめに

熱帯・亜熱帯の沿岸生態系ではサンゴ礁が単独で存在することはまれで、「マングローブ-干潟-海草藻場-サンゴ礁」といった各生態系要素が互いに連成した形で存在することが多い。この連成系においては、各生態系要素が物理環境的にも生物環境的にも互いに密接に影響を及ぼし合っていることから（例えば、Benjamin・Isaac, 2002）、この連成系が健全な形で維持されるメカニズムや環境外乱に対する応答過程を明らかにしていくには、各要素間の相互作用過程を具体的に明らかにした上で、そのトータルシステムとしての物理・生物過程の内容を把握していく必要がある。そのためには、各要素システム間の相互作用を支配するさまざまな輸送プロセスを解明する必要があるが、この種の連成系における水理特性やそれに伴う熱・物質輸送特性に関する知見はきわめて限られているのが現状である。

そこで、本研究では、サンゴ、藻場、干潟、マングローブ等が相互に連成する形で集約的に存在している石垣島吹通川河口域を対象とし、現地観測および数値解析を実施することにより、各生態系要素における海水流動特性とそれに伴う温熱環境特性を解明することを試みた。

2. 現地観測概要

現地観測は沖縄県石垣島西岸吹通川河口周辺のマングローブ及びその前面リーフ海域（図-1）を対象として行った。リーフ内には岸から沖に向けて干潟、海草藻場、サンゴ帯が連成する形で存在している。なお海草藻場の優占種はウミシヨウブである。対象海域リーフは石垣島東海岸と比較すると十分には発達しておらず、所々に窪

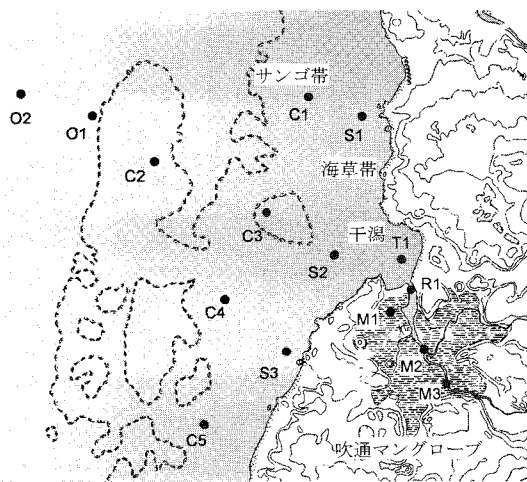


図-1 吹通マングローブ及びリーフ海域と測器設置地点

みが存在し極めて複雑なリーフ地形となっている。観測期間は夏期を対象として、2004年7月31-8月9日に行っている。観測測器は図-1に示すように、吹通川マングローブ域内クリーク3地点（M1-M3）、吹通川河口1地点（R1）、干潟1地点（T1）、海草藻場内3地点（S1-S3）、サンゴ帯5地点（C1-C5）、リーフ外2地点（O1, O2）に設置した。測定項目は水平2次元流速、波浪、水位、水温、塩分、濁度、クロロフィル a 量等である。また同時にマングローブ内（M1）、干潟（T1）、海草藻場（S2）に観測やぐらを設置し、熱収支特性に着目した観測として、主として温湿度、空中・水中における上向き・下向き短波放射量、地中伝導熱、風向風速等を各地点にて同時計測を行っている。

3. 現地観測結果と考察

（1）流動特性

図-2は現地観測によって得られたリーフ内における10分間平均水平流速の平面プロットを示したものである。

* 正会員 博(工) (独)海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター

** 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

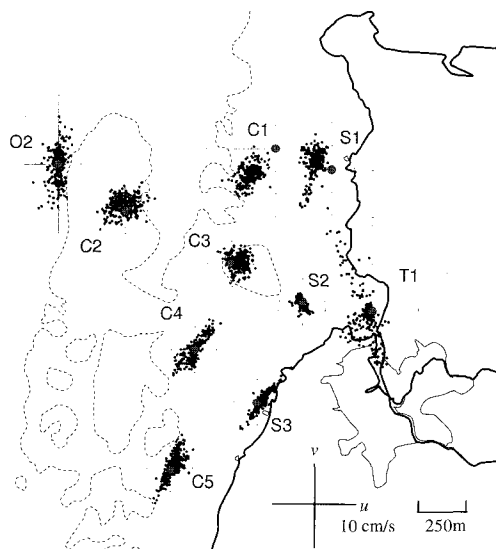


図-2 10分間平均水平流速の平面分布図

流速レベルは最大10 cm/s 程度と小さく、時系列変動から潮流に対応していることが確認されている。また、リーフ内南部 (S3, C4, C5) においては汀線に沿うように北東-南西に主軸を持つ流速分布となっているのに対し、中央部 (S2, C3) では明確な主軸を持たない。さらに北部 S1 で北西, C1 で南西の平均流成分が卓越している。一方、干潟 (T1) においては下げ潮に伴う沖向き流速が顕著であり、上げ潮・下げ潮間で極めて非対称的な流速分布を有している。

(2) 水温特性

図-3 は、(a)短波放射量、(b)河口 (R1) における全水深、及び (c) マングローブ内 (M3)、吹通川河口 (R1)、干潟 (T1)、海草藻場 (S2)、サンゴ帯 (C4) における水温の時系列データ (8/1-8/4までの4日間) を示している。ただし干潟においては、干出時の水温データを、同時に測定している塩分、水位を参考にして取り除いて示している。ここでは示していないが、この期間では気温・湿度、風速レベルといった気象条件がほぼ同様となっている。しかし、8/1-8/2までと8/3-8/4までで、水温ピークの現れ方に、前半では大きく後半では小さいといった明らかな違いが確認できる。しかも水深のごく浅い干潟やマングローブでその差が顕著である。8/1-8/2においては日中の低潮位と日射量ピークが重なりあうことで、河口部においては急激な水温の上昇が、一方、マングローブ内においては日中であるにもかかわらず緩やかではあるが水温の低下がみられる。このとき干潟域は干出状態であるが、続く冠水時には水温が36℃にも達している。続く上げ潮時には、この干潟や汀線周辺で加熱された高水温海水が河口部を通じてマングロー

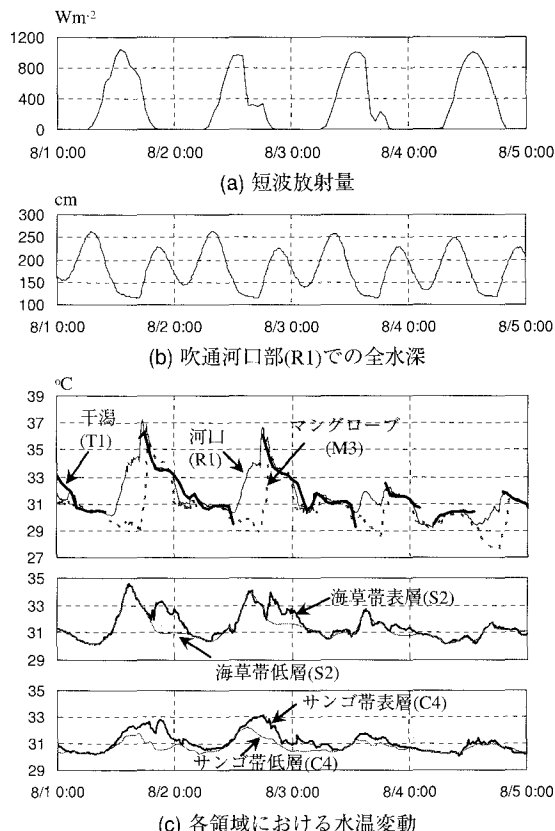


図-3 短波放射量・全水深と各領域における水温の時系列変動

ブ内へ輸送されるために、河口部とマングローブ内において急速な水温上昇が生じている。一方、下げ潮時には、マングローブ内 swamp からの低水温の輸送によると思われる水温低下が、マングローブ内、河口、干潟で確認される。つまり、夏期において干潟や汀線付近はその低貯熱容量特性によって高水温水塊ソース域となる一方で、マングローブ林は日射遮蔽効果による低水温水塊ソース域と位置づけられる。このように、温熱特性から見て、各沿岸生態系要素は互いに明瞭なコントラストを持つとともに、水塊の移流効果によってそれぞれ密接に影響を及ぼしあっているものと考えられる。

また、8/3-8/4においては8/1-8/2のような明確な水温ピークが各観測地点で生じておらず、さらにリーフ内における水温成層は前期間と比較してほぼ生じていない。このように極浅海域においては低潮位時刻と日射量最大時刻の相対関係の影響がきわめて強く、それに伴いこのような水温ピーク値に違いが生じるものと考えられる。

4. 数値シミュレーション手法

より定量的かつ広範囲での流動及び温熱環境特性を把

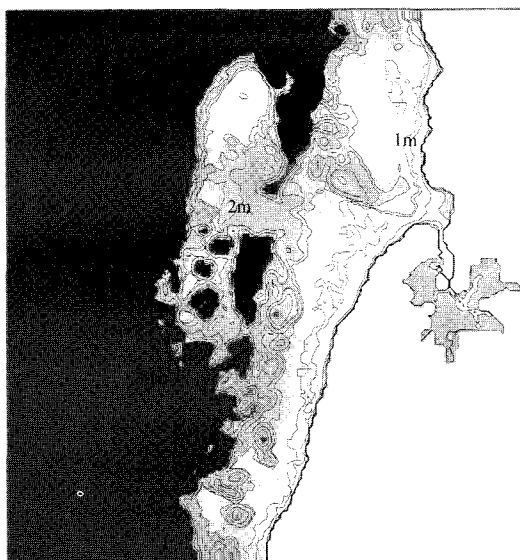


図-4 数値解析領域及びその水深分布

握することを目的として数値シミュレーションを行った。

(1) 浅水域連成系を対象とした数値モデルの概要

数値解析に用いたモデルは、まず流動モデルに関しては、浅水域を対象とし、そこでの水深スケール以下の乱れをソース項を含めてモデル化することで本対象海域の様な極浅海域に非常に適した乱流モデルである SDS-2DH モデル (Nadaoka・Yagi, 1998) をベースとしている。これにリーフ内における礁嶺部、干潟、またマングローブ内における swamp といった低潮位時に干出する領域を数値的に評価するために移動境界条件を取り込むとともに、波浪効果を評価できる流動モデル (田村ら, 2003, 2004a) を用いている。本数値解析ではさらにマングローブ林の植生による流体抵抗を評価するため、Nadaoka・Yagi (1998) に基づいてその抵抗を評価している。

一方、浅水域の温熱特性を高精度に評価するため、短波放射量の海中・海底面での吸収・反射効果、さらに海底面での地中伝導熱を考慮した熱収支解析手法 (二瓶ら, 2001) を基にした数値熱輸送モデル (田村ら, 2004b) を用いている。

(2) 数値解析条件

数値解析に用いた地形は、リーフ内に関しては Ikonos によって撮影された衛星画像 (2002年8月撮影) から逆推定手法 (Paringit・灘岡, 2002, Paringit, 2004) を用いて水深マップを作成するとともに、マングローブ内における水深データは二瓶ら (2002) による測量結果に基づいている。数値解析領域及び使用した水深データを図-4に示す。

数値解析期間は、現地観測期間を含むように2004年7

表-1 数値解析に用いた主なパラメータ

時間刻み幅 (s)	0.5
東西方向格子幅 (m)	20
南北方向格子幅 (m)	20
移動境界適用閾値 (cm)	2
海底摩擦係数	0.02
海表面アルベド	0.06
海底面アルベド	0.1
短波放射吸収係数 (1/m)	0.1

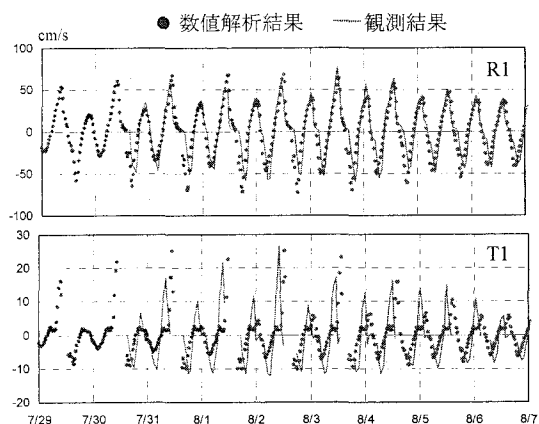
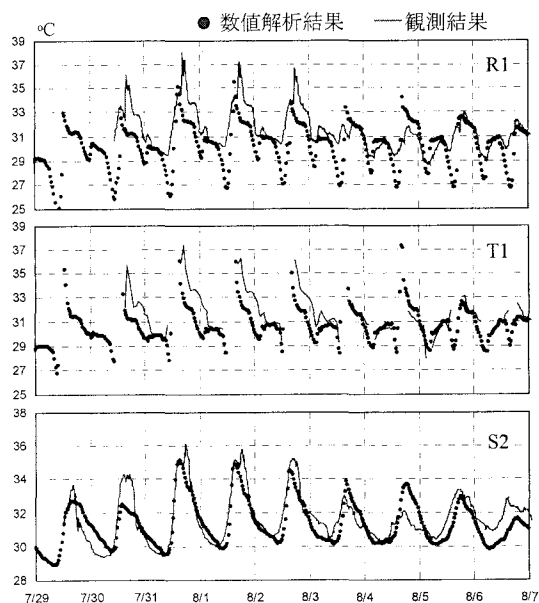
図-5 現地観測と数値解析との比較
(南北流速：北向き正)

図-6 現地観測と数値解析との比較 (水温)

月25 - 8月15日までを対象として行うことで各物理量の初期条件依存性をある程度低減させている。観測期間中は比較的低波浪状態 (平均有義波高: 11 cm), 低風速

レベル（平均風速：3.2 m/s）であったことから、本数値解析において流れの駆動力は潮汐のみとしており、潮汐予測システム NAO.99b (Matsumoto et al., 2000) の潮位データから16分潮の調和定数を算出し、沖側境界で潮位変動を与えている。その他、流動計算における境界条件として北側、南側はスリップ境界条件とし、干潟を含む海陸境界およびマングローブ内には移動境界条件が適用されている。水温に関しては上記の境界で熱フラックスゼロとして与えているが、海底面においては田村ら (2004 (b)) と同様に海底面熱フラックスを考慮している。

一方、初期条件は流動計算に関しては静水状態とし、水温に関しては観測結果を参考とし、おおよその平均値である29℃を全解析領域で与えた。

さらに熱輸送計算に用いる気象条件は、石垣島気象台による一時間毎の短波放射量、気温、水蒸気圧、海面気圧、風速を用いて、海表面での潜熱フラックス、顕熱フラックスを各バルク式で、長波放射量を Stefan-Bolt-

zmann 則により評価し与えている。ただし、吹通マングローブ域内では、特にマングローブ林による日射及び風の遮蔽効果を考慮して、干潟とマングローブにおいて得られた現地観測結果の簡単な比較から、それらのうち短波放射量、風速レベルに関してそれぞれ1/20、1/2として与えている。その他、計算に用いた主要なパラメータを表-1 に示す。

5. 数値解析結果と考察

(1) 本数値解析モデルの妥当性の検証

図-5, 6 は、数値解析結果と現地観測結果との比較であり、それぞれ南北方向流速と水温時系列を示している。干潟域 (T1) においては下げ潮時の最大流速発生時に多少の時間差が確認されるが、それ以外は流速変動幅、流速のピーク値、干潟域 (T1) における流速の非対称的な特性などを再現できている。また、図-6 より最大水温値や日較差など、概ね各海域における現地観測結果

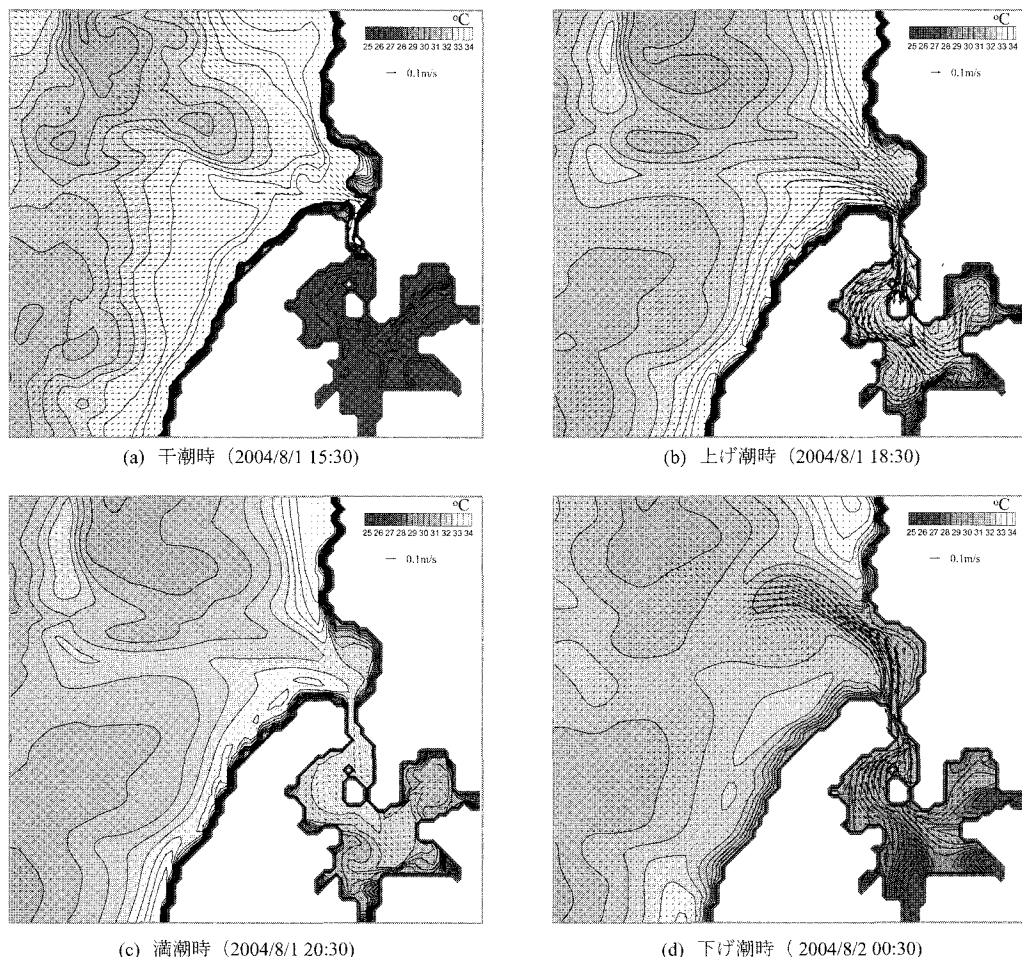


図-7 水温及び水平流速の空間分布

の水温変動パターンを再現できる結果となっている。ただし、吹通河口部においては、観測結果と比較して計算結果では下げ潮から干潮時に大きな水温低下が生じている。これはマングロープ内の低温水塊がこの時、河口部にまで達している結果であると考えられる。本海域においては低潮位時に干潟が干出するために、マングロープ水域とリーフ海域とが分断されることで河口部における水位変動は大きく歪んだ波形となる(図-3(a), または二瓶ら(2002))。実際、現地観測結果からもこのとき河口部における流速はほぼゼロとなっていることが確認されている。さらにこの干潟の地盤高がマングロープにおける海水交換に極めて大きな影響を与えることを二瓶ら(2003)は指摘している。よって、ここでの現地観測と数値解析の結果の違いは、数値解析に用いた地形データにおいて干潟地盤高の誤差によるものであると考えられる。実際、干潟域 T1 においては低潮位時における水温に観測結果と差がみられるが、これは極低潮位において貯熱量の差が顕著に表れてくるためであると考えられる。

(2) 浅水域連成系における水温輸送パターン

図-7 は、数値解析によって得られた水平流速と水温の平面分布を示している。日中の低潮位時に、特に干潟及び汀線周辺で加熱された高水温海水が、続く上げ潮によりマングロープ内へ輸送され、その後広範囲に拡散されており、それに伴いマングロープ内水温が上昇していることが確認できる。一方、下げ潮時には河口部では沖に向かうジェットが形成され、それによりマングロープ内で冷却された低温水塊がリーフ内へ流出している。現地観測結果でも確認されたように、最低潮位がおおよそ日中に生じる夏期においては、干潟・海草帯とマングロープ内では極めて顕著な水温コントラストが形成されており、潮汐に伴いそれが輸送されることから、温熱特性から見て沿岸生態系はそれぞれ密接に関連しているものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、サンゴ、海草藻場、干潟、マングロープ等が相互に連成する形で集約的に存在している石垣島吹通川河口域を対象とし、現地観測および数値解析を実施することにより、各生態系要素における海水流動特性とそれに伴う温熱環境特性を解明することを試みた。現地観測より、夏期において干潟や汀線付近は低貯熱容量影響によって高水温水塊ソース域となる一方で、マングロープ林は日射遮蔽効果による低水温水塊ソース域と位置づけられ、温熱特性から見て各沿岸生態系要素はそれぞれ密接に関連しているものと示唆された。さらに極浅海域においては低潮位時刻と日射量最大時刻の相対関係の影響がきわめて強く、それに伴い水温ピーク値に大きな

違いが生じるものと考えられる。

一方、本数値解析モデルを用いて、各海域における流動・水温変動を概ね再現できることが確認でき、干潟・汀線周辺からマングロープ内への高水温水塊輸送を再現した。

謝辞：現地観測を行うに当たり、当時、東京工業大学大学院情報環境学専攻修士課程の熊谷航氏、同修士課程の渡辺雅樹氏、現東京工業大学大学院情報環境学専攻修士課程の山本高大氏、備船について平良正義氏にご助力頂いた。また数値解析に用いたマングロープ域水深データは東京理科大学二瓶泰雄助教教授に提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。なお本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A (1) (一般) (研究代表者：灘岡和夫、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

- 田村仁・灘岡和夫・Enrico Paringit・三井順・波利井佐紀・鈴木庸彦(2003)：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、海岸工学論文集、第50巻、pp. 386-390.
- 田村仁・灘岡和夫・Enrico Paringit(2004a)：石垣島東岸裾礁域の流動特性に関する現地観測と数値解析、土木学会論文集 No. 768/Ⅱ-68、pp.147-166.
- 田村仁・灘岡和夫・熊谷航(2004b)：裾礁タイプサンゴ礁域における海水流動・温熱環境特性に関する数値シミュレーション、海岸工学論文集、第51巻、pp.1061-1065.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・綱島康雄・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.
- 二瓶泰雄・佐藤慶太・青木康哲・西村司・灘岡和夫(2002)：ネスティング計算法を用いた吹通川マングロープ水域における高解像度流動シミュレーション、海岸工学論文集、第49巻、pp.416-420.
- 二瓶泰雄・綱島康雄・佐藤正也・青木康哲・佐藤慶太・灘岡和夫(2002)：現地観測に基づくマングロープ域の水温・放射環境に関する研究、海岸工学論文集、第49巻、pp.1206-1210.
- 二瓶泰雄・中村武志・綱島康雄(2003)：現地観測に基づくマングロープ河口域における sill 形状と海水交換特性の検討、海岸工学論文集、第50巻、pp.1121-1125.
- Paringit, E. C.・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.
- Benjamin M. Mwashote and Isaac O. Jumba(2002) :Quantitative aspects of inorganic nutrient fluxes in the Gazi Bay (Kenya) : implications for coastal ecosystems, Marine Pollution Bulletin 44, pp.1194-1205.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe(2000) : Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, Journal of Oceanography, 56, pp.567-581.
- Nadaoka, K. and H. Yagi(1998) : Shallow water turbulence modeling and horizontal large-eddy computation of river flow, J. of Hydraulic Eng., pp.493-500.
- 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.