

# 大船渡湾における流況・水質の現状再現と 養殖カキの役割について

片岡 真二\* ・田中 昌宏\*\*・小林 英一\*\*\*  
小島 洋\*\*\*\*・Marinus Bokhorst\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

岩手県大船渡湾などリアス式海岸の湾では、地形が急峻な上に閉鎖性が極めて強いいため、富栄養化の進行に伴って、成層期には底層の貧酸素化が生じ、養殖貝など生物環境への悪影響が懸念されている。こうした富栄養化と底層の貧酸素化への対策は、閉鎖性海域に共通した課題であり、全国各地で様々な検討がなされている。著者らは、こうした社会的ニーズに応えるため、大船渡湾を対象に閉鎖性海域における浄化対策に関する自主的な共同研究を開始した。本研究では、浄化対策検討の第一歩として、数値シミュレーションによる流れと水質の現状再現計算を実施し、貧酸素化の形成要因を明らかにすることを目的とする。

## 2. 大船渡湾の特性と既往の研究

大船渡湾は陸中海岸国立公園内にあり、図-1 に示す様に長さ約 6 km 幅約 1 km に対し、最大水深が約 35 m と非常に急峻で閉鎖性の強い典型的なリアス式海岸である。このため静穏な海域が創られ、天然の良港であると同時に養殖などの水産業に絶好の場所を提供している。しかし、1967 年に湾口津波防波堤が完成し湾の閉鎖性がより強くなる一方、周辺の経済発展に対して下水道整備が遅れたために流入負荷が増大し、湾の水質環境は悪化してきた。ここ 15 年間では、10 年が COD の環境基準(A 類型; 2 mg/l 以下) を達成していない状況である。

宮沢・早川 (1994) は湾口防波堤建設以前からの水質及び漁獲高のデータを解析し、大船渡湾の環境変化について詳しく検討している。これによると、カキの養殖筏一台当たりの生産量は湾口防波堤建設後の方が建設前に比べて減少しており、その原因を次のように推論している。湾口防波堤建設に伴う滞留時間の長期化によって成層化の度合いが強くなった。同時に流入負荷の増大によって富栄養化が進行し、底泥への有機物沈殿が増大し

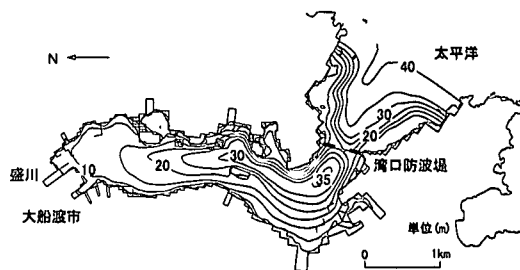


図-1 大船渡湾の計算に用いた水深図

た。このため底層の貧酸素域が拡大し、筏一台当たりの生産量が低下した。さらに、Hayakawa (1990) は 1979 年から 1989 年の、大船渡湾奥、湾口防波堤外、及び三陸海岸沿いの数点の観測点での水質データを解析し、大船渡湾内の水質を考える上で、湾内水と沿岸外海水との海水交換特性が極めて重要である事を明らかにした。一方、日本水産資源保護協会 (1995) 及び Terasawa et al. (1995) は 3 次元の流れ及び生態系モデルによる本格的な検討を行っている。この検討では、最終的に養殖カキをモデルに組み込み、大船渡湾の物質循環におけるカキの役割の重要性を指摘している。解析結果によると、植物プランクトンの生産 (3.92 tonC/day) のうち、約 30% (1.24 tonC/day) がカキに摂餌され、ほぼ同量の排泄物 (1.05 tonC/day) が海底に堆積する。この排泄物の分解に伴う酸素消費が貧酸素化を加速している。村上・長坂 (1996) は湾全体を一つのボックスとした鉛直一次元の物質循環モデルにより、年間を通しての水温成層と溶存酸素の再現を目的とした検討を行っている。この検討の結果底層の貧酸素水塊の形成には水温成層による鉛直混合の抑制が深く関係しており、さらに感度解析による検討から、海水交換の促進、外海水の導入、栄養塩の底質からの溶出の抑制、鉛直混合の促進が底層水の水質改善に有効である事を示した。

このように大船渡湾では、底層の貧酸素化が深刻な問題であり、その原因を明らかにし、対策を考える上で、成層化による鉛直混合の抑制、外海との海水交換特性及び養殖カキの排泄物の海底への沈降などが重要な要素であると考えられる。

\* 正会員 工修 (財)港湾空間高度化センター 理事  
\*\* 正会員 工博 鹿島技術研究所 主任研究員  
\*\*\* 工修 三菱重工長崎研究所 主務  
\*\*\*\* 正会員 東亜建設工業 課長  
\*\*\*\*\* Delft Hydraulics, The Netherlands

表-1 計算条件

| 計算期間 | 10日(風無し)+2.5日(風有り)        |                                     |
|------|---------------------------|-------------------------------------|
| 初期条件 | 水温                        | 14°C                                |
|      | 塩分                        | 34                                  |
| 河口条件 | 流量                        | 334,903 m <sup>3</sup> /day (9河川合計) |
|      | 水温                        | 20.5°C                              |
|      | 塩分                        | 0                                   |
| 境界条件 | 潮汐                        | 振幅 0.451 m 周期 12 時間                 |
|      | 水温                        | 表層 18°C 底層 14°C                     |
|      | 塩分                        | 34                                  |
| 風条件  | 風速 2.2 m/s 風向 南南西         |                                     |
| 気象条件 | 湿度 81.8%                  | 気温 20.38°C                          |
|      | 日射 387.7 w/m <sup>2</sup> | 雲量 82%                              |

本研究では、こうした既往の研究を参考に、最終的には浄化対策の評価に使える数値モデルの構築を目指し、まず流れと水質の現状再現シミュレーションを行い、養殖カキの役割について検討した。

### 3. 流れのシミュレーション

#### 3.1 数値モデルの概要

数値モデルは、オランダ・デルフト水理研究所が開発し、鹿島が共同で改良を進めている流動モデル DELFT 3 D-FLOW (Delft Hydraulics (1998a)) を用いる。DELFT 3 D-FLOW は、静水圧近似を仮定した準 3 次元モデルで、鉛直方向に  $\sigma$  座標系を用い、鉛直拡散係数の評価には  $k-\epsilon$  モデルを使用している。

##### a) 計算格子

計算格子を図-2 に示す。開境界は、湾口防波堤より太平洋側に 1.5 km 程度に設定し、水平方向は直交曲線格子で分割し、鉛直方向は、 $\sigma$  座標上で 10 層等分割とした。水深は大船渡湾港湾計画図から計算格子点での水深を求めたが、計算の安定性から開境界上では 40 m で一定とし、計算領域内部と滑らかに接続した (図-1 参照)。

##### b) 計算条件

本研究では、水質が悪化する夏季を対象に、その平均的な流れのシミュレーションを行う。計算条件は日本水産保護協会 (1995) を参考に、夏季の平均的な気象、海象条件を一定に与え、定常状態となるまで計算した。用いた計算条件を表-1 にまとめた。

#### 3.2 $\sigma$ 座標系の補正

最近我国でも  $\sigma$  座標を用いたモデルが用いられるようになってきているが、大船渡湾の様に地形が急峻な場合には、水平メッシュの鉛直の傾きが大きくなり、みかけの鉛直混合が水平拡散項によっても生じるため、鉛直混合が過剰となり、密度成層の形成がうまく計算できないという問題点を抱えている。本モデルはこの問題を解決するための補正ルーチン (以下クリープ補正と呼ぶ) を有しており、本研究でもその有効性を検討した。

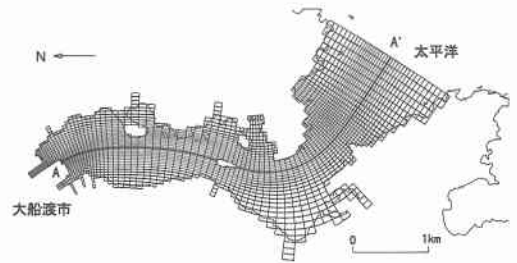
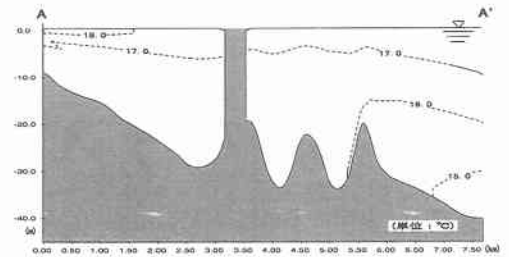
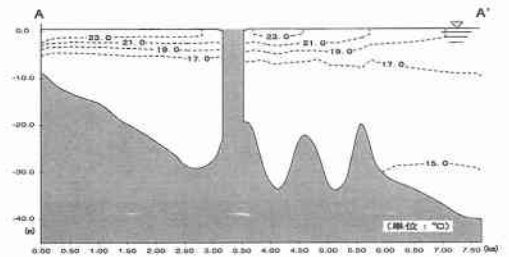


図-2 計算格子図



(a) クリープ補正無し



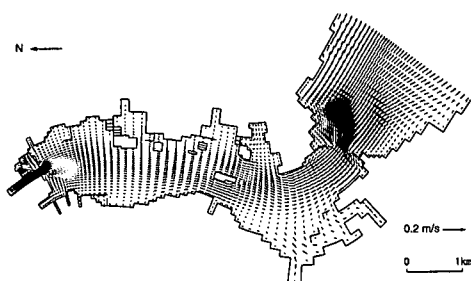
(b) クリープ補正有り

図-3 水温の縦断面図 (A-A'断面)

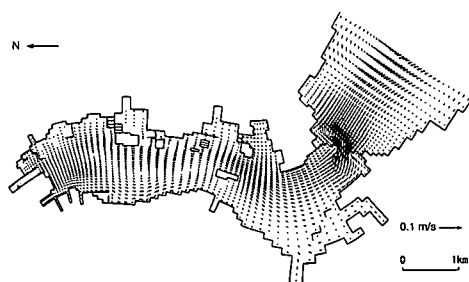
クリープ補正とは、詳しくは文献(田中ら, 1996; Stelling and Kester, 1994) を参照されたいが、水平方向の拡散フラックスと圧力勾配の計算には、 $\sigma$  座標ではなく水平方向の計算格子を用いるものである。

#### 3.3 結果及び考察

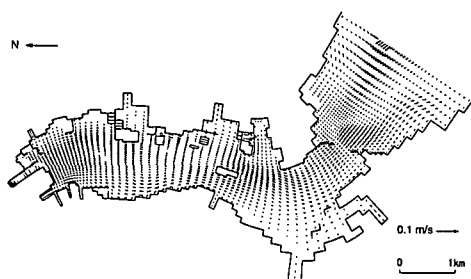
図-3 は水温の縦断面図を示しており、(a) がクリープ補正無しの場合、(b) が有りの場合である。クリープ補正が無い場合には湾内の水温は 16~18°C でほぼ一様となり成層化が起っていない。一方、クリープ補正を行った場合には、表層で 23°C、底層では 16°C と強い成層が形成されており、実測の特性 (Hayakawa, 1990) と良く一致している。したがって、大船渡湾のような急峻な地形に対しては、通常の  $\sigma$  座標系を用いたモデルでは密度成層のシミュレーションが困難である事がわかる。また、紙面の制約でここには示せないが、当然この密度場の結果の違いは、流れ場にも大きく影響し、ひいては水質結果に大きく影響する事を確認した。



(a) 第1層



(b) 第5層



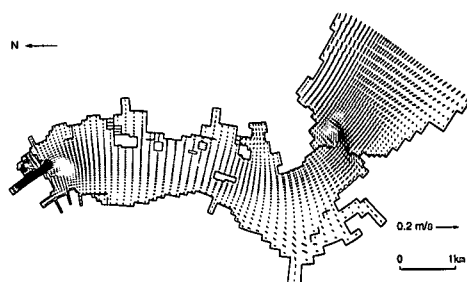
(c) 第10層

図-4 残差流ベクトル図

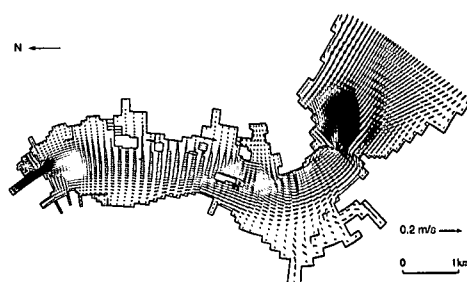
図-4は残差流の第1層(表層), 第5層及び第10層を示しており, 第1層は太平洋に向かって流出, 第5層は流入, 第10層は再び流出と二重の鉛直循環を示している。これは, 密度分布による重力循環と湾口から湾奥に向かう南西風による鉛直循環が重なってこのような二重の鉛直循環構造が形成されたものと考えられる。

図-5は第1層の(a) 上げ潮時, (b) 下げ潮時の流速ベクトルを示している。ここで特徴的な事は, 上げ潮時でも表層は湾中央部から太平洋に向かって流出していることである。このことは, 横山 (1981) による航空機によるリモートセンシング解析及び長坂ら (1997) のADCPによる観測でも確認されており, 大船渡湾の大きな特徴の一つである。

以上の様に, 本モデルにより大船渡湾における夏季の流動特性が良く再現された。



(a) 上げ潮時



(b) 下げ潮時

図-5 表層の流速ベクトル

## 4. 水質のシミュレーション

### 4.1 生態系モデルの概要

水質モデルは, 流動モデルと同じくデルフト水理研究所が開発した汎用水質モデル DELFT 3 D-WAQ (Delft Hydraulics (1998b)) を基本に構築した。

水質モデルの基本となる生態系モデルの概念図を図-6に示す。大きく浮遊系と底泥系に分かれ, 浮遊系は植物プランクトンを中心として, 炭素, 窒素, リン及び溶存酸素の循環がモデル化されている。底泥系は, 有機物物質の浮遊系における移流拡散過程以外のすべての過程がモデル化されている。また, 大船渡湾では養殖カキが生態系に影響を及ぼすと考えられるため, 今回新たにカキモデルを開発し, その影響も把握する事とした。

モデルの詳細及びパラメータの値は田中・稲垣 (1997) と基本的に同じであるが, 表-2に示すパラメータに関しては水産資源保護協会 (1997) を参考に与えた。

なお, 水質の計算では定常解を得るために, 長期間の計算が必要であるため, 計算格子を粗くし, 水平方向は図-7のようにし, 鉛直方向は5層とした。計算は各変数の時系列からほぼ定常と判断されるまで継続したが, 以下で示す結果は90日間の計算結果である。

### 4.2 カキモデル

本研究では, 日本水産保護協会 (1995) のカキを含む生態系モデルを参考にカキのモデル化を試みた。

図-8はカキの物質循環における役割を概念的に示し

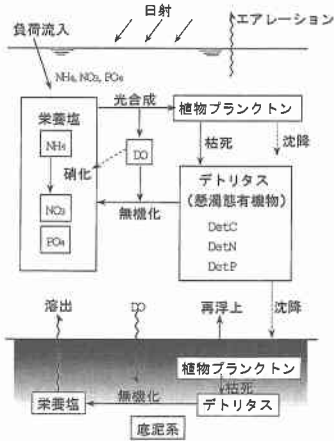


図-6 生態系モデルの概念図

表-2 水質モデルのパラメータ

|                   |              |
|-------------------|--------------|
| 最大増殖率             | 2.3(/d)      |
| 死亡率定数             | 0.02(/d)     |
| 窒素の半飽和定数          | 0.014(gN/m³) |
| リンの半飽和定数          | 0.003(gP/m³) |
| 最適日射量             | 96(W/m²)     |
| ベースの消散係数          | 0.176(/m)    |
| プランクトン濃度に比例する消散係数 | 1.5(m²/gC)   |
| デトリタス濃度に比例する消散係数  | 0.06(m²/gC)  |
| プランクトンの沈降速度       | 0.1(m/day)   |
| デトリタスの沈降速度        | 0.324(m/day) |
| 水平拡散係数            | 0.5(m²/s)    |



図-7 水質計算に用いた計算格子及びカキ筏の分布

たものである。すなわち、カキは水中のプランクトンやデトリタスを摂餌し、擬糞や糞を排出する。この糞の沈降速度は2-3 cm/sで水深10 mであれば、10分程度で海底に達し、水質変化の時間スケールからすれば、瞬時に底泥に堆積すると考えてよい。この糞の分解に伴う酸素消費が底層の貧酸素化を引き起こす大きな要因と考えられる。日本水産保護協会のモデルでは、こうした機構を考慮し、カキもバイオマスまでモデル化している。

本モデルは、目的が底層の貧酸素化を中心とする水質の現状再現にあるため、問題を単純化し、カキのバイオマスは計算せず、カキを植物プランクトン及びデトリタ

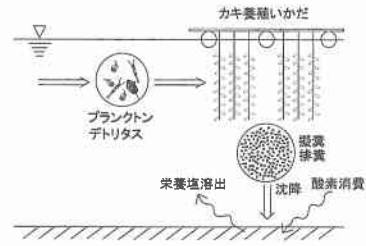


図-8 カキの物質循環における役割

スのシンク及びソースとして分布させるものである。

モデルの基礎式は以下の通りである。

カキの摂餌速度は、次式で表わされる。

$$C_r = F_r \cdot n \quad (1)$$

ここに、 $C_r$ ；摂餌速度 ( $\text{m}^3/\text{m}^3/\text{d}$ )、 $F_r$ ；濾過速度 ( $\text{m}^3/\text{ind}/\text{d}$ )、 $n$ ；カキの固体密度 ( $\text{ind}/\text{m}^3$ ) であり、濾過速度  $F_r$  は次式で表わされる。

$$F_r = \frac{L^{0.96} \cdot T^{0.95}}{2049} \quad (2)$$

$$L = \frac{W^{0.317} \cdot 10^{1.669}}{10} \quad (3)$$

ここに、 $L$ ；カキの体長 (cm)、 $T$ ；温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、カキの重量 ( $\text{g}/\text{ind}$ )。カキの存在する計算格子では次式に従うシンクが配置される。

$$\frac{\partial C_{\text{phy},w}}{\partial t} = -C_r \cdot C_{\text{phy},w} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{\text{det},w}}{\partial t} = -C_r \cdot C_{\text{det},w} \quad (5)$$

一方、このカキの存在する計算格子の直下の底泥には次式に従うソースが配置される。

$$\frac{\partial C_{\text{phy},s}}{\partial t} = +C_r \cdot C_{\text{phy},w} \cdot (1 - AE) \quad (6)$$

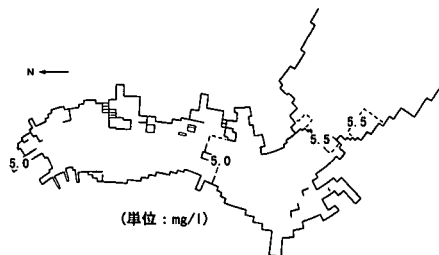
$$\frac{\partial C_{\text{det},s}}{\partial t} = +C_r \cdot C_{\text{det},w} \cdot (1 - AE) \quad (7)$$

ここに、 $C_{\text{phy},w}$ ；水中の植物プランクトン濃度 ( $\text{gC}/\text{m}^3$ )、 $C_{\text{det},w}$ ；水中のデトリタス濃度 ( $\text{gC}/\text{m}^3$ )、 $C_{\text{phy},s}$ ；底泥中の植物プランクトン濃度 ( $\text{gC}/\text{m}^3$ )、 $C_{\text{det},s}$ ；底泥中のデトリタス濃度 ( $\text{gC}/\text{m}^3$ )、 $AE$ ；カキの同化効率。

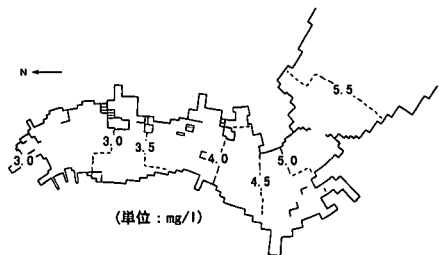
なお、上記モデルパラメータ及びカキの分布状況(図-7参照)はすべて日本水産保護協会(1995)に従った。

#### 4.3 結果及び考察

図-9は底層の溶解酸素の分布を示しており、(a)はカキモデル無し、(b)はカキモデル有りの結果である。カキモデルが無い場合には、湾奥でも4 mg/l以下には下がらず貧酸素化は起こっていない。これに対しカキモデルを導入した結果は、酸素が湾内の半分以上で4 mg/l以下まで減少し、貧酸素化がシミュレートされている。図-10は表層の植物プランクトンの濃度を示しており、同様に

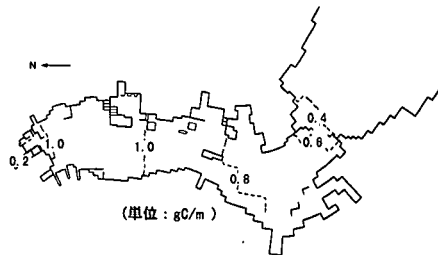


(a) カキモデル無し

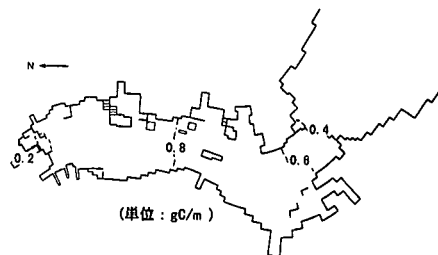


(b) カキモデル有り

図-9 底層の溶存酸素濃度分布



(a) カキモデル無し



(b) カキモデル有り

図-10 表層のプランクトン濃度分布

(a) はカキモデル無し、(b) はカキモデル有りの結果である。これより表層の植物プランクトンはカキの摂餌により2～3割程度減少していることがわかる。

このようにカキは表層のプランクトンやデトリタスを摂餌するという点では、水質を改善しているが、糞や殻をかなりの割合で排泄し、その沈降速度が極めて大きいために、結局は有機物を湾内の海底に堆積させ、貧酸素化を促進していると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では大船渡湾における夏季の流れと水質の現状再現計算を行い、良好な結果を得た。主な結論を以下にまとめる。

- 1)  $\sigma$  座標の短所である急峻地形での過剰鉛直混合を、クリープ補正により解決し流況現状再現に成功した。
- 2) 養殖カキを生態系モデルに組み込むことにより、底層の貧酸素現象が再現でき、カキ養殖が貧酸素水の形成に与える影響が明らかとなった。

以上の現状再現の解析から、浄化対策を考える上で、カキの排泄物の処理、鉛直混合及び海洋水との混合の促進が重要であると考えられる。今後本研究成果を大船渡湾の浄化対策検討に有効に活用することとしたい。

**謝辞：**本研究を進めるに当たり、第二港湾建設局釜石港湾工事事務所より大船渡湾の水質データを提供して頂いた。また運輸省港湾技術研究所・村上和男前特別研究官、東海大学海洋学部・中田喜三郎教授より貴重な助言を頂いた。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 田中昌宏・G. S. Stelling and A. Markus (1996): 東京湾の残流のシミュレーションとそれが水質解析に及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1121-1125.
- 田中昌宏・稲垣 聡 (1997): 生態系モデルを用いた東京湾夏季の水質シミュレーション, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 261-266.
- 長坂 猛・鶴谷広一・村上和男・浅井 正・西守男雄 (1997): 大船渡湾の成層と貧酸素水塊に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1066-1070.
- 日本水産保護協会 (1995): 底質環境保全調査報告書, 平成6年度, p. 407.
- 宮沢公明・早川康博 (1994): 大規模構造物と環境収容力—人工構造物(大船渡湾湾口防波堤)が湾内に及ぼす影響—, 沿岸海洋研究ノート, 第32巻, pp. 29-38.
- 村上和男・長坂 猛 (1996): 熱交換を考慮した鉛直一次元モデルによる貧酸素水塊の形成, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1126-1130.
- 横山隆三 (1981): リモートセンシングによる大船渡湾の海水交流機構の解明, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 1, pp. 15-33.
- Delft Hydraulics (1998a): DELFT 3 D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.00.
- Delft Hydraulics (1998b): DELFT 3 D-WAQ, Delft water quality model, Technical ref. and User's manual, release 4.30.
- Hayakawa, Y (1990): Mean seasonal changes of dissolved inorganic nutrients in the Ofunato estuary, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 56, pp. 1717-1729.
- Stelling, G. S. and J. A. Th. M. Van Kester (1994): On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, Int. J. Numerical Method in Fluids, Vol. 18, pp. 915-935.
- Terasawa, T, K. Nakata and K. Taguchi (1995): Numerical modeling on the Ofunato Bay ecosystem including the oyster farming, Pro. 4th Int. Conf. On Estuarine and Coastal Modeling, ASCE, pp. 530-541.