

野見湾における夏期の流況と水質変動に関する現地観測

山 本 潤*・中山 哲 厳*・時 吉 学**・宮 地 健 司***

高知県の野見湾において、夏期に水質・流況を観測した。その結果、大規模な内部潮汐を捉えることができた。湾内底層に流入する水塊は外海由来の低温・高塩分の性質を有し、湾口から流入し数時間遅れで湾中央、湾奥部へと伝わっていることが観測値から確認できた。この現象を数値計算で再現するには、湾口部での水温と塩分濃度の鉛直分布の観測値を境界条件として用いることが必要であり、表面潮汐のみでは再現できなかった。内部潮汐を再現した計算、及び表面潮汐のみの計算において湾内のマーカー残留率を比較したところ、両者に大きな差が生じ、野見湾内の海水交換に内部潮汐が大きく寄与していることが示唆された。

1. 序 論

高知県の野見湾は、湾奥に漁業集落を有し、湾全体が静穏な海面養殖漁場として高密度に利用されている閉鎖性水域である。古くから養殖に伴う自家汚染等により水質・底質悪化が進行し、赤潮・貧酸素水塊の発生、寄生虫、魚病の蔓延等による養殖魚類の斃死被害が深刻な問題となっていた。こうした問題は全国の閉鎖性内湾を利用した養殖漁場でよく見られ、各地でそれぞれ対策が求められている。当地域では、経験的に高水温時の餌止め、生け簀の避難等の対策をとっていたが、養殖の管理をより効率化するために、水質を自動観測して各漁家に配信するシステムが導入されることになった。また、長期的には大規模な水質改善対策の事業構想も検討されている。本研究では、今後の水質観測システムを活用した養殖漁場全域の水質予測、養殖漁場の環境改善策の提案に向けた取り組みの第一段階として、特に夏期の成層が発達した状況を対象に、野見湾において現地観測を行い、流況と水質変動機構の把握を行った。

2. 研究方法

(1) 現 地 観 測

図-1 に示す野見湾の湾口部 (ST.1)、湾中央部 (ST.2)、湾奥部 (ST.3) の 3 カ所に連続観測用の係留系 (図-2) を設置した。それぞれの場所では鉛直方向に 1 m 間隔で水温計、概ね 5 m 間隔で塩分計と溶存酸素計を固定し、2001 年 7 月 12 日より 10 分間隔で約 40 日間の観測を行った。湾口部及び湾奥部には超音波ドップラー流速計 (ADCP) を設置し、鉛直方向の流速分布を計測した。湾中央部には水中照度計 5 台、クロロフィル計 1 台、湾軸側方にある外海との開口部 (ST.4, ST.5) に波高・流速計 (WH) を設置した。同時に ST.1~3 と ST.A, ST.B において採水・採泥を行い、その他多点において測深及

び垂下式水質計による水温、塩分、DO、クロロフィル、濁度の鉛直分布の観測を行った。水質分析は、COD、全窒素、全燐、クロロフィル、底質分析は強熱減量、COD、硫化物、全燐、全窒素、C/N 比を行った。

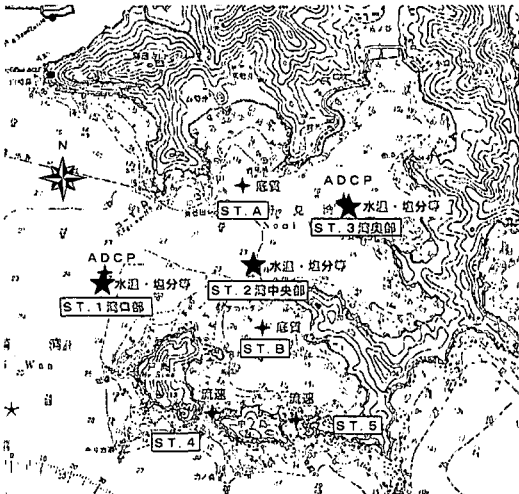


図-1 調査位置図

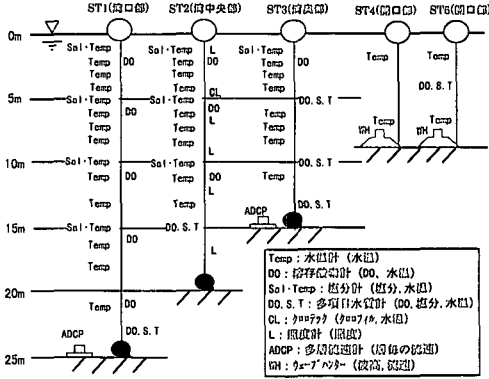


図-2 係留系設置状況

* 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
** 正会員 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所研修生
[(株)復建調査設計より出向]
*** 正会員 工修 国土交通省河川局海岸室 [元水産工学研究所]

(2) 再現計算

野見湾全域を 50 m×50 m, 鉛直 2 m の格子に切り, マルチレベルモデルで現象を再現した。運動方程式は水平方向のみを陽解法で解き, 鉛直方向は静水圧近似とした。鉛直流速は連続式, 水温と塩分は移流・拡散方程式, 密度はクヌーセン式で求めた。潮汐は観測当日の値を別途行った計算により再現し, 各時間ステップ毎に沖側の開境界に入力した。計算には日本造船学会 (2000) の MEC モデルのソースコードの一部を利用した。

また, 内部潮汐を再現するために, 沖側の開境界側に湾口部 (ST.1) で観測された水温と塩分濃度の鉛直分布データを鉛直及び時間的に線形補完し, 各時間ステップ (1.5 s) 毎に入力した。なお, 渦動粘性係数を水平・鉛直方向それぞれ 1.0, 0.01 m²/s, 拡散係数を水平・鉛直方向 1.0, 1.0×10⁻⁶ m²/s とした。計算は満潮時に開始し, 流速の初期値を 0 として与えた。計算結果は, 湾中央部 (ST.2) と湾奥部 (ST.3) において時系列出力を行い, この地点での観測結果と比較し計算精度を検証した。同時にマーカー移動計算も行った。計算開始時に湾内に設置しておいたマーカーを毎時カウントし, 湾内の残存率を表示した。これにより内部潮汐の効果を検証した。

3. 現地観測の結果と考察

(1) 水質・底質分析結果

表一に水質分析結果, 表二に底質分析結果を示した。COD は湾口部 (ST.1) から湾奥部 (ST.3) に向かい, 1.0~3.0 mg/l 程度の値を示し環境基準の中位以上の類型に属する値が多く見られた。底質の COD は, 日本水産資源保護協会による水産用水基準を満たしていたが, 硫化物の分析結果は同基準を上回っていた。

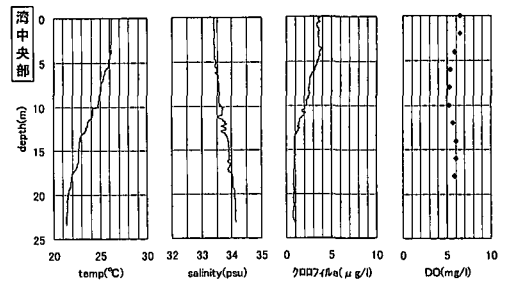
表一 水質分析結果

採取場所	ST 1	ST 1	ST 2	ST 2	ST 2	ST 3	ST 3	ST 3
分析項目	0 m	5 m	0 m	5 m	22 m	0 m	5 m	17 m
CDO (mg/l)	1.3	1.3	2.9	2.3	1.1	3.2	3.0	1.8
全窒素 (mg/l)	0.45	0.35	0.32	0.34	0.19	0.32	0.27	0.23
全磷 (mg/l)	0.013	0.016	0.023	0.028	0.013	0.013	0.021	0.022
クロロフィル a (μg/l)	1.9	2.4	4.6	4.2	0.7	5.8	6.3	0.6

表二 底質分析結果

採取場所	ST 1	ST 2	ST 3	STA	STB
分析項目					
水分 (%)	24.0	33.9	32.4	29.8	33.5
強熱減量 (%)	4.5	7.4	6.3	6.0	7.5
硫化物 (mg/kg)	130	460	420	350	230
全窒素 (mg/kg)	720	2900	1600	1900	1800
全りん (mg/kg)	610	11000	1900	6100	2600
CODsed (mg/kg)	5600	14000	15000	11000	17000
C/N 比 (—)	47	11	13	17	13

分析結果は乾燥試料当たりの濃度



図一3 水質の鉛直分布

(2) 水質の鉛直分布

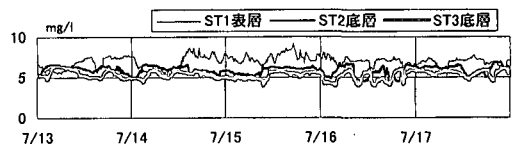
図一3は垂下式水質計による 7 月 12 日分の観測結果の一例である。水温と塩分の鉛直分布がほぼ同様の傾向を示し, ある水深で急激に値が変わるような明確な躍層は存在せず, 表層から底層にかけて緩やかに変化している。ただし, 表層と底層の値の差は決して小さくはない。クロロフィルについては, 概ね低い値であるが, 中には水深 5 m 付近~10 m の間にピークが見られるものもある。ただし, その高さは一定ではなく, ピークも顕著ではない。DO について, 鉛直方向の有意な変化は見られず, 底層においても表層とほとんど変わりなく, 高い値であった。

(3) 溶存酸素濃度の時系列データ

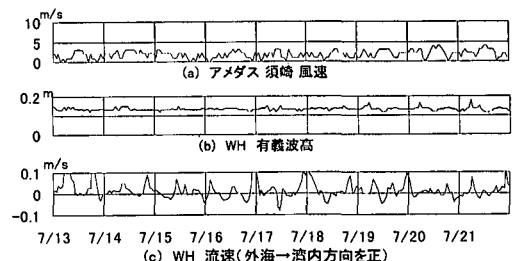
図一4に, 湾口部 (ST.1) の表層及び湾中央部 (ST.2)・湾奥部 (ST.3) 底層の溶存酸素濃度の時系列データを示す。DO は表層, 底層, すべての点で概ね高い値を示し, 貧酸素水塊の発生は認められなかった。

(4) 開口部・外海の状態

図一5に, 須崎市の風速, 開口部 (ST.5) で観測された



図一4 溶存酸素濃度



図一5 開口部・外海の状態

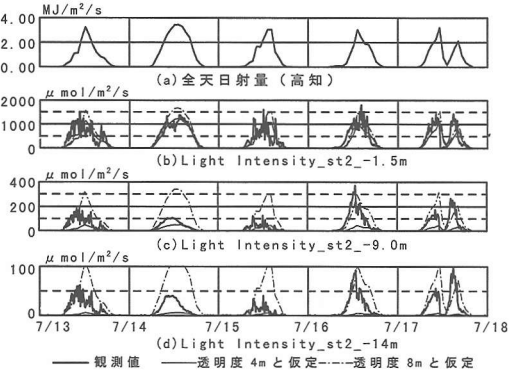


図-6 全日射量と照度の時系列データ

波高、外海-湾内方向（北方）流速を示す。観測期間中の有義波高は10~20 cm、流速値は10 cm/s程度であった。後述する湾内の水温・塩分変動と、開口部の流速や波高変化、風速との間に明確な相関関係は現時点では見られなかった。故に、湾内の水質変動・流況に、この開口部はあまり影響していないと言える。

(5) 照度の時系列データ

中村 (1990) の方法に倣い、短波放射による水中の熱フラックスを $q(z)$ とし、正味の短波放射量を Q_0 、短波放射のうち水表面近傍で吸収される割合を β 、消散係数を k_s 、水深を z とすると、以下の(1)式となる。ここで β

は0.4が用いられている。

$$q(z)=(1-\beta)Q_0\cdot\exp(-k_s\cdot z) \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$1\text{ W/m}^2=4.0\text{ }\mu\text{mol/m}^2/\text{s} \cdots \cdots \cdots (2)$$

また、稲田 (1984) の換算式から(2)式が得られ、全日射量MJ/m²/hを照度計の単位（ここでは光量子密度） $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ に変換すると、その比率は1.8:2000となる。以上を用い、全日射量から各水深の照度が計算できる。

図-6 (a) は気象協会発行の地上気象観測資料日原簿より得られた高知(観測地点 47893)の全日射量、(b)~(d) の太実線は上から湾中央部 (ST.2) の水深1.5, 9.0, 14.0 m に設置した照度計で観測された光量子密度の観測値である。他の曲線は照度を計算する際に透明度を4, 8 m と仮定して、水深 z での照度 $I(z)$ 、表面近傍の照度を I_0 とし、(3)式で算出した値である。ここで、消散係数 k_s は透明度 D_s を用いて(4)式で表現できる。

$$I(z)=I_0\cdot\exp(-k_s\cdot z) \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$k_s=1.7/D_s \cdots \cdots \cdots (4)$$

(b) を算出する際にも透明度を仮定しているが、水深が高々1.5 m と僅かなため透明度による違いは見られず、単位系の換算と水表面近傍の吸収割合 β が正しいかを検証できる。図では観測値と計算値がほぼ一致しているため、この換算は妥当であると言える。(c)、(d)を見ると、日によって当然ばらつきはあるが、透明度は概ね4~8 m 程度の範囲内である。午前中の照度は透明度を

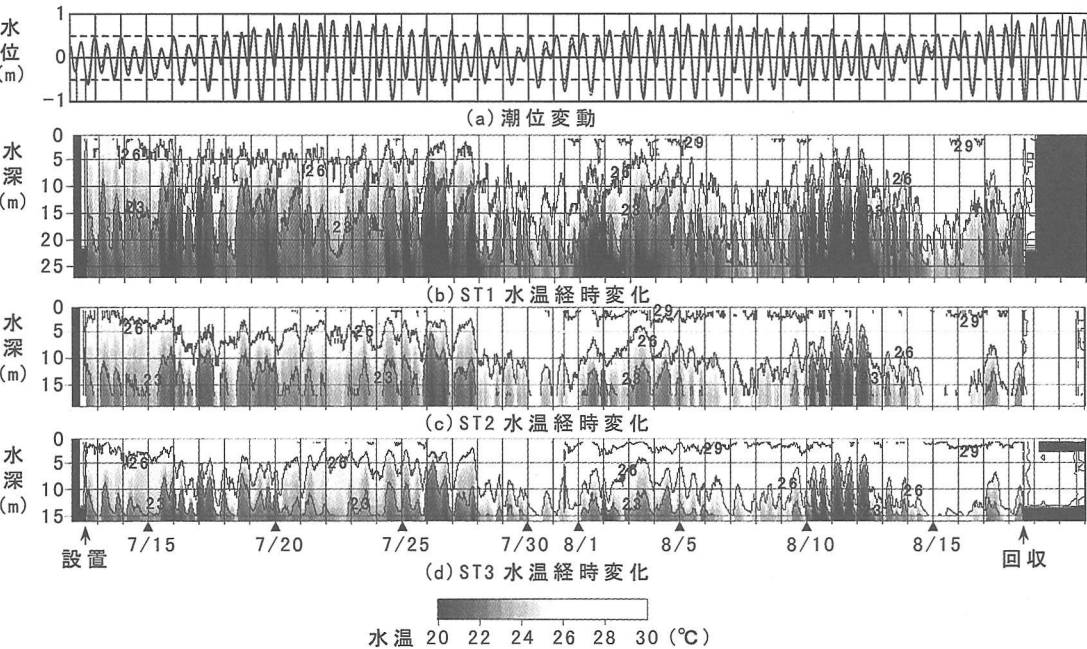


図-7 水温の経時変化

8 m と仮定したものに近く、午後のそれは透明度 4 m と仮定したものに近い傾向にある。平均すると透明度は約 6 m 程度の日が多い。一般に補償深度は透明度 D_s の 3 倍程度 (有田, 1998) と言われており、今回の観測値のみで判断すると、野見湾のほぼ全域が有効層であるといえる。

(6) 水温・塩分の時系列データ

図-7 は、縦軸に水深をとり、水温 20~30°C を濃淡で表現した。7 月後半から 8 月前半にかけて表層 30°C、底層 20°C になる日も見られ、表層と底層では、大きい日で 10°C 近くの水温差が生じた。しかし、7 月 30 日や 8 月 15 日等では、表層と底層の水温差が約 1°C 程度になることがあり、躍層が一時的に見られない状態が起きた。

図-7 で濃淡の境界線即ち等温線の上下変化を見ることにより、躍層が上下していることが確認できる。図の横軸の目盛りが 1 日であることから、内部潮汐の周期は約 1 日または半日程度と見られる。その振幅は縦軸の 5 m の目盛りと比べると、5~10 m 程度であることがわかる。また、図-7(a) に、観測期間中の潮位を開口部 (ST.5) での観測値 (点線) と、著者らが作成した潮位推算プログラムによる計算値 (実線) を重ねて示す。潮汐による水面の上下は小潮で約 1 m、大潮で約 2 m であったので、内部潮汐の振幅が格段に大きいことがわかる。

図-8 は塩分濃度の鉛直分布の時系列データであり、縦軸に水深をとり、図中の濃淡で塩分濃度 30~35 psu を表現した。表層では約 32 psu、底層では約 34 psu であった。図-6 の水温鉛直分布と見比べると、7 月 15 日の午後~17 日で底層の水温が低くなっている同じ時刻に、図-7 では底層の塩分濃度も高くなっている。その他の日時においても水温鉛直分布図と塩分濃度鉛直分布図のそれぞれに見られる躍層の上下動の位相が一致していることから、外海由来の低温、高塩分の水塊が湾内に流入していることが示唆される。なお、水温計は 1 m 間隔、塩分計は概ね 5 m 間隔に設置したため、鉛直分布表示とした場合に、水温と塩分濃度とで同一水塊の挙動に違い

が見られる。それは鉛直方向の分解能の差によるものであり、ここでは鉛直方向により多く配置した水温計による分布図から内部潮汐の挙動を判断する。

4. 野見湾の流況の特性

(1) 観測結果から見た内部潮汐の挙動

図-9 (b) と (d) は、湾口部 (ST.1) 及び湾奥部 (ST.3) での ADCP により計測した流速の鉛直分布の時系列データの一例である。水温鉛直分布の経時変化からわかる内部潮汐の挙動と流動の関係を論じるために、(a) と (c) に水温鉛直分布の湾口部 (ST.1) と湾奥部 (ST.3) のデータも併せて示す。これにより、潮汐と内部潮汐の振幅や位相等の比較を行う。横軸はすべて時間 (日) で、ここでは 7 月 14 日~7 月 17 日としている。縦軸は (a), (c) では水深、(b), (d) では ADCP を底面に設置しているため、底面からの高さとしている。

(a) と (c) の水温経時変化図において、底層に低温水が見られる時間帯を比較すると、湾口部 (ST.1) から湾奥部 (ST.3) に向かい数時間のタイムラグが見られる。すなわち、湾口から湾内に流入した外海水が数時間の間に中央部を通過して湾奥に達したことが明かである。このことは、後述する数値計算で再現される。また、図-7 (b), (c), (d) を見ても、等温線のピークの位置が湾口部 (ST.1) から湾奥部 (ST.3) に向かって少しずつ遅れていることが確認できる。

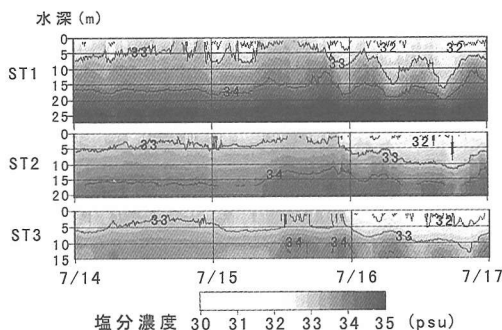


図-8 塩分の経時変化

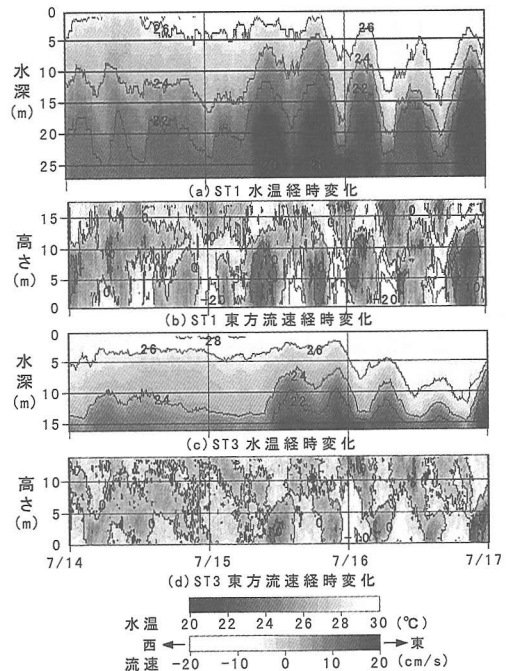


図-9 流速分布の経時変化

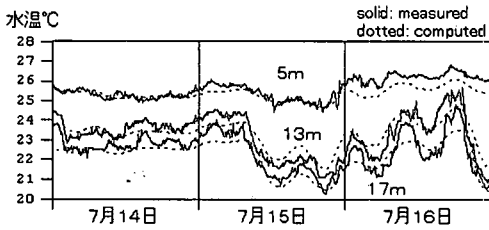


図-10 湾中央部の水温の計算結果、観測値比較図

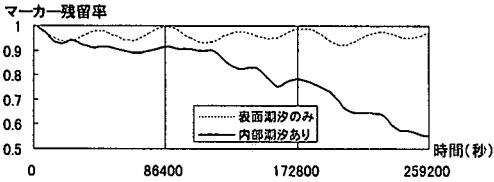


図-11 マーカーの湾内残留率

(b), (d)において、東方(湾内方向)流速を正にとり濃淡で流れの強さを表現した。(a), (c)で底層に低温水が見られる時間帯には、(b), (d)で底層に東向き即ち湾内方向への流れが卓越していることが確認できる。また、表層と底層の水温差が小さくなる(底層の水温が上がる)時は、底層において西向き、即ち湾外方向への流れが卓越している。さらに底層で湾内方向の流れがある時は、表層では湾外方向へ、底層で湾外方向の流れがある時は、表層では湾内方向へそれぞれ逆向きの流れが生じている。また、それらは約半日周期で交互に繰り返している。

(2) 計算結果

図-10が湾中央部(ST.2)における観測結果と計算結果の比較を行ったものである。計算では7月14日午前0時から3日間分を再現した。縦軸は水温 $^{\circ}\text{C}$ である。図中の黒の実線は各層の水温計で観測された水温である。点線は数値計算により再現された結果である。現地観測で得られた湾口部の水温・塩分濃度分布を境界条件として逐次入力すれば、水温変動が正しく再現された。図では観測結果と計算結果がほぼ一致し、各層の水温を正確に算出できたことから、湾口から湾内に流入した外海水が数時間の間に中央部を通過して湾奥に達した現象が概ね再現できたと言える。しかし、湾奥部の水温について、その変動の位相は合っているものの、観測値の大きな水温変動を計算で再現しきれない、即ち、計算値が湾奥部の内部潮汐の振幅を過小に見積もっている。また、表層

の熱収支まで正確に再現していない問題が残っている。

以下、こうした問題を前提に、海水交換量を検討する。図-11は7月14日の計算開始時に湾内にあったマーカーの残存率をカウントしたものである。横軸は計算を開始した7月14日午前0時からの経過時間(秒)であり、1日盛りは24時間、全部で3日間表示してある。実線は現地観測で得られた水温・塩分濃度分布を入力し内部潮汐を再現させたもの、点線は表面潮汐のみのものである。両者では残存率が大きく異なり、野見湾の海水交換において、ここで観測された内部潮汐が大きく寄与していることがわかった。

5. 結 論

本調査により明らかになったことは以下の通りである。野見湾の夏期の状況として、表層と底層で 10°C 近い温度差が生じ成層化していたが、底層で貧酸素水塊の発生は見られなかった。各種計測機器により、大規模な内部潮汐を捉えることができた。湾口部のデータを境界条件として用い、湾内の水温・塩分の変動が数値計算で再現できた。この内部潮汐は野見湾内の流況・水質変動に大きく寄与しているとの計算結果が得られた。

今後は、密度成層が破壊される秋期に連続観測を実施し、貧酸素水塊の挙動を捉える予定である。また、計算の問題点の解消とともに、養殖に伴う汚濁負荷を把握し、湾全体の有機物の収支について検討したい。

謝辞：本研究は、運営費交付金及び水産基盤整備調査費委託により行われた。本調査を進めるにあたり、須崎市水産課、高知県水産試験場、高知県漁港課、野見湾地先の野見漁業協同組合、大谷漁業協同組合の方々には多大なる協力を頂いた。大成建設の上野成三氏には貴重な助言を頂いた。計算にはMECモデルのソースコードが参考になった。紙面にて心よりお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 有田正光 (1998): 水圏の環境, 東京電気大学出版局, 404 p.
- 稲田勝美 (1984): 光と植物生育, 養賢堂, 415 p.
- 中村由行 (1990): 閉鎖性水域における温度成層の形成のモデル化, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 794-798.
- 日本造船学会 (2000): MECモデルワークショップ (第1回), 日本造船学会海洋環境研究委員会海洋モデル検討専門委員会, 107 p.