湾外域の海況変動を考慮した内湾の流動・密度場の 数値計算

正員 多部田 茂*

河合 剛 充**

Numerical Simulation of Currents and Density in a Bay Considering Variable Conditions
of Outer Ocean

by Shigeru Tabeta, *Member* Takemichi Kawai

Summary

When the phenomena in a bay are calculated, the open boundary is often located around the mouth of the bay. On the other hand, the effect of physical conditions of outer ocean is essential for such phenomena as thermohaline front or intrusion of warm water mass into the bay. However, it is difficult to elucidate the mechanism of such phenomena if the constant conditions are applied for the open boundary. In the present study, the influences of outer ocean state on the phenomena in the bay were investigated by numerical simulations. At first, the effects of fresh water discharge, surface cooling and outer ocean condition on the structure of thermohaline front was examined for an idealized model basin. Next, the numerical simulations were carried out for Tokyo Bay and the influence of water temperature distribution of Sagami bay was discussed. In the calculation considering the effects of outer bay region, the satellite remote sensing data was used for determining the sea surface temperature.

1. 緒言

一般に内湾を対象とした数値計算を行う場合、湾口部付近に開境界を設定する。一方、冬季に内湾湾口部付近で発生する熱塩フロントの変動や太平洋側の沿岸でしば

しば生じる黒潮系暖水波及のような現象は、外洋の物理場の影響を強く受けている。しかし内湾の物理現象の数値計算では開境界の境界条件として一定値を与えて扱う事が多かったため、上記のような現象のメカニズムを十分に明らかにする事は困難であった。熱塩フロントは海水や物質の交換に重要な働きをしていることが明らかになってきており¹⁾、従来の平均流だけを用いた海水交換量の見積もりは現実と異なる可能性があることが指摘されている²⁾。また、相模湾では黒潮流路の変動と関連して急激な水温上昇を引き起こす急潮の実体が様々な観測を通して明らかにされつつある³⁾。

* 東京大学

** デット・ノルスケ・ベリタス

原稿受理 平成 11 年 7 月 9 日

秋季講演会において講演 平成 11 年 11 月 18, 19 日

本研究では計算の対象海域を湾外域に拡大し、湾外
の海況が湾内の現象に与える影響について検討した。まず
始めに単純な形状のモデル湾で熱塩フロントの数値計算
を行い、淡水流入量や海面冷却の条件を変化させること
によってその形成位置の違いを調べた。また、外洋域の
海況を考慮することによって、湾内の計算結果がどのよ
うに影響を受けるかを検討した。次に実海域において湾
外域の海況を人工衛星によるリモートセンシングデータ
を用いて与えた数値計算を行い、その影響について検討
した。

2. 数値モデル

本研究では数値モデルとして Princeton Ocean Model
(POM)⁴⁾を用いた。POMでは鉛直方向に σ 座標を適
用しており、支配方程式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u D}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uv D}{\partial y} + \frac{\partial u \omega}{\partial \sigma} = & -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + f v D - \frac{g D^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + F_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v D}{\partial t} + \frac{\partial uv D}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial v \omega}{\partial \sigma} = & -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & - f u D - \frac{g D^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + F_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TuD}{\partial x} + \frac{\partial TvD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + F_T \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SuD}{\partial x} + \frac{\partial SvD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + F_S \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rho = f(T, S, p) \quad (6)$$

ここで、 u, v は水平方向流速、 ζ は海面変位、 T は水温、 S は塩分濃度、 ρ は海水密度、 f はコリオリパラメータ、 D は全水深で、 ω は σ 座標での鉛直流速で次式で与え

Fig. 1 Idealized model basin used for the calculations of thermohaline front

られる。

$$\begin{aligned} \omega = & w - \left[(\sigma + 1) \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + v \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

また、 F_x, F_y, F_T, F_S は水平方向の渦粘性項または渦拡散項である。 K_M, K_H はそれぞれ鉛直方向の渦動粘性係数、渦拡散係数で Turbulent Closure モデルを用いて計算される。

3. 単純な形状のモデル湾での熱塩フロントの数値計算

3.1 計算条件

まず Fig.1に示すようなモデル湾を用いて熱塩フロントの計算を行った。内湾域は長さ 25km、幅 10km、水深 50m であり、計算格子は水平方向には 1km、鉛直は 5 層とした。冬季のエスチュアリーを想定し、河川からの淡水の流入 (R_f) および海面冷却 (F_b) を考慮する。Case M1 を標準ケースとし、Case M2, M3 ではそれぞれ海面冷却量、淡水流入量を変えた。以上のケースでは外洋域での水温・塩分 (T_o, S_o) は常に一定値とした。Case M4 では Fig.1の領域 A の水温を計算開始時の 15.5℃から 20 日後には 20.5℃になるように線形に上昇させた。Case M5 では領域 B の水温について同様の変化を与えた。計算条件を Table 1にまとめて示す。

3.2 計算結果

Fig.2は Case M1 の計算開始 30 日後の内湾域 (Fig.1の領域C) の長手方向鉛直断面の水温、塩分濃度、密度、流速の分布である。外洋寄り (図の右側) で高温・高塩

Table 1 Conditions of calculations for the idealized model basin

Case	R_f [m^3/sec]	F_b [W/m^2]	T_o, S_o
M1	50.0	144.0	15.5 °C, 34.0psu
M2	50.0	192.0	15.5 °C, 34.0psu
M3	100.0	144.0	15.5 °C, 34.0psu
M4	50.0	144.0	variable in A
M5	50.0	144.0	variable in B

分、湾奥（図の左側）に近いほど低温・低塩分となっており、湾の中央よりやや湾口側に水温・塩分が急に変化しているフロントが形成されている。また、この時の密度はほぼ一様で、フロント付近でやや大きい。流れは、海面付近ではフロントに向かう方向に流れ、逆に中下層ではフロントから離れる方向に流れている。

Case M2 では Case M1 の場合よりも海面冷却を強く与えたため、Fig.3(a) に示すように熱塩フロントは Case M1 の場合よりも湾の奥の方に形成された。また、淡水流入量を多く与えた Case M3 では、Fig.3(b) に示されているように熱塩フロントの位置は Case M1 よりも外洋よりになった。以上は既往の知見（例えば柳ら⁵⁾）と同様の結果を示している。

湾外域に一定の条件を与えた Case M1～M3 では内湾のある位置に熱塩フロントが形成されたが、変動する水温を与えた Case M4, M5 では外海域の水温が上昇するにつれて暖水が内湾域に侵入する。Fig.4は計算開始18日後の海表面水温分布であるが、外洋（図の右側）から暖水が湾内に入ってきている様子が示されている。内湾域と外洋域の境界を開境界とする計算する方法では両者の結果に差は生じない。しかし、外洋域の水温分布の違いを考慮した本計算では暖水塊の貫入の仕方に差異がみられた。つまり、外海から内湾への暖水波及のような現象を計算する際には外洋の海況を考慮する必要があると言える。

4. 実海域でのシミュレーション

4.1 計算条件

次に東京湾において湾外域の海況を人工衛星によるリモートセンシングデータを用いて与えた数値計算を行った。計算領域は Fig.5に示すように相模湾を含む海域とし、水深が150m以上の地点の水深はすべて150mとした。計算格子は東京湾内では東西方向45"（約1130m）×南北方向30"（約930m）、湾外では2倍の大きさとした。また、相模湾を含む三浦半島より南側の湾外域では、NOAA/AVHRRによる海表面水温を用いてこの海域での海況変動を数値計算に反映させる。このとき、以

(a) temperature [°C]

(b) salinity [psu]

(c) density [σ_t]

(d) velocity

Fig. 2 Calculated thermohaline front in the model basin (Case M1).

下のようないわゆる nudging 法を用いてデータ同化を行った。

$$D_a = D_c + \phi_n(D_o - D_c) \quad (8)$$

ここで D_c は計算値、 D_o は観測値、 D_a は同化値、 ϕ_n は同化の係数である。相模湾沖における観測データによると、この時期には約水深150mまではほぼ水温が一定の混合層となっていると考えられるので、本計算では D_o の値として全水深で海表面の観測値を用いた。ただし同化の係数 ϕ_n を海面から離れるにつれて小さくした。

(a) Case M2

(b) Case M3

Fig. 3 Vertical structure of temperature [°C] along the longitudinal section of the model basin

(a) Case M4

(a) Case M5

Fig. 4 Difference of Sea surface temperature [°C] in the inner bay area due to outer ocean condition

Fig. 5 Observed sea surface temperature of calculation area on December 30, 1996

計算開始時の水温分布は 1996 年 12 月 30 日に得られた観測値 (Fig.5に示す) をもとに与えた。東京湾内への淡水の流入は江戸川、荒川、隅田川、多摩川、鶴見川の 5 つの河川を考慮した。また、 $96.0\text{W}/\text{m}^2$ の海面冷却を常時与えた。外洋域に与える条件として、水温を全域で 14.0°C に固定した場合 (Case T1)、初期条件のみに観測値の情報を与えた場合 (Case T2)、随時データ同化によって観測値の情報を与えた場合 (Case T3) について計算を行った。

4.2 計算結果

Fig.6は Case T1 の計算開始 20 日後の海表面水温分布である。外洋域で一定の水温塩分を与え続けた場合には十分時間が経過すると熱塩フロントが形成される。地球自転の効果でフロントは神奈川県側の方がシャープになっている様子がわかる。

Fig.7は Case T2, T3 の 1 月 6 日 (計算開始 7 日後) の海表面水温分布である。外洋の海況変動に観測データを用いない Case T2 では、湾口部付近の水温分布は神奈川県側で高く千葉側で低くなっている、暖かい外洋水が浦賀水道付近まで入り込んでいる。一方、外洋域でデータ同化を行った Case T3 では、湾口部で千葉側で水温が高く神奈川県で水温が低くなっている、外洋水は Case T2 の場合よりは深く侵入していない。Fig.8は 1 月 4 日における NOAA/AVHRR の熱赤外面像による海表面の水温分布である。本論中の計算では風や海面熱収支の時間変動を考慮していないので計算結果と観測値を直接比較して議論することは難しいが、湾口部で千葉側の水

Fig. 6 Calculated sea surface temperature at 20 days after the beginning of the calculation (Case T1)

(a) Case T2 (b) Case T3
Fig. 7 Calculated sea surface temperature of Tokyo bay on January 6, 1997

温が高いことや外洋の暖水の侵入の程度などは Case T3 に近い傾向を示している。今後、詳細な議論を行うためにはより現実に近い条件下で計算を行う必要がある。

5. 結言

本研究では外洋の海況変動を考慮した湾内の流動・密度場の数値計算を行った。まず単純な形状の湾で熱塩フロントおよび湾内への暖水波及の数値計算を行い、このような現象の計算には外洋の海況を考慮することが重要であることを示した。次に東京湾・相模湾でのシミュレーションを行い、外洋の影響を考慮した計算を行う際には、データ同化が有効な手段となりうることを示した。

Fig. 8 Observed sea surface temperature of Tokyo bay on January 4, 1997

本研究に際して、横浜国立大学の井上義行教授、荒井誠教授からは数々のご助言をいただいた。また人工衛星 NOAA による観測データについては東北大学大型計算機センターのデータベース JAIDAS を利用した。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Yanagi, T., et. al. : Thermohaline front at the mouth of Tokyo Bay in winter, *Continental Shelf Research*, Vol.9, pp.77-91, 1989
- 2) 日向博文, 八木宏, 杉田繁樹: 熱塩フロントを考慮した冬期東京湾の海水交換特性に関する数値計算, *海岸工学論文集*, 第 44 巻, pp.391-395, 1997
- 3) 松山優治, 他: 相模湾の急潮, *沿岸海洋研究ノート*, 第 30 巻, 第 1 号, pp.16-26, 1992
- 4) A. F. Brumberg, G. L. Mellor : Three-Dimensional Coastal Ocean Models, *Coastal and Estuarine Sci.*, 4, pp.1-16, 1987
- 5) 柳哲雄, 田丸浩之: 愛媛大学工学部紀要, 第 11 巻, pp.233-240, 1989