

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

日向博文*・八木 宏**・杉田 繁樹***

1. はじめに

冬期に内湾湾口部で発生する熱塩フロントは、湾外への物質フラックスや湾内の生態環境にとって重要な役割を果たしていると考えられている。東京湾における熱塩フロントは長島ら (1979) により報告されて以来、いくつかの観測や基礎的な数値実験が行われてきた。長島らの観測によると熱塩フロント形成時における東京湾湾口部の平均的な流動構造として、水平的には千葉県側で流入、神奈川県側で流出、鉛直的には下層で流入、表層で流出する事、また大潮期に比べ小潮期に顕著である事、フロントがシャープな場合には数百メートルで3~5°C程度の温度差がある事等を明らかにした。Yanagi et al. (1989) は湾軸方向の観測により、水温、塩分、栄養塩類、溶存酸素量、クロロフィルが熱塩フロント域でスカーフ状の断面構造を形成している事を示すと共に、診断モデルを用いた断面2次元計算によりフロント部に向かう数 cm/s の収束流、フロント部で0.1 cm/s 程度の鉛直下降流が存在する事を示した。さらに1年を通して湾内から湾外に流出する窒素の約4割が熱塩フロントによって冬期の3ヶ月間に流出されうるとし、熱塩フロントが従来考えられていた様に湾内外の障壁ではなく、むしろ物質交換を促進させていると指摘した。また、熱塩フロントの変動性に関して、柳ら (1989) は海面冷却量、河川流量、外洋水温、外洋塩分が熱塩フロントの強度や形成位置に与える影響を基礎的な数値実験により検討した。

この様にこれまでの熱塩フロントに関する研究は、湾軸方向に沿った比較的短期間の観測や、単純化された条件下での基礎的な数値計算が中心であり、実際の東京湾の複雑な地形に対応した熱塩フロントの3次元構造や、非定常過程を反映させた形での海水交換や物理メカニズムに関する議論はほとんど行われていない。また、千葉県水産試験場により冬期に度々外洋水が富津岬付近まで波及し、のり養殖等に深刻な被害を与えている事実が報

告されており、非定常な熱塩フロントの動態を把握する事が冬期における湾内の沿岸漁業や海水交換にとって非常に重要であると考えられる。そこで本研究では、実際の東京湾の地形を対象とし、観測データを用いたデータ同化とリアルタイムシミュレーション (以下 RTS) を1995年11月から1996年3月まで行い、実際の東京湾湾口部における熱塩フロントの3次元構造をその非定常性を考慮した上で検討する事を試みた。

2. 海象・気象条件の概要

2.1 気象条件

図-1に1995年11月から1996年3月に東京管区気象台、横浜測候所で計測された日平均日射量、気温、及び第2海堡で観測された日平均風速ベクトルを示す。

気温はトレンドとして1月末から2月中旬にかけて下降し、その後再び上昇しているが、途中1月中旬から2月中旬にかけて2、3日で10°C以上も日平均気温が変化している。全天日射量の傾向としては12月下旬から1月上旬にかけて最も少なくなり、その後上昇傾向になるが、

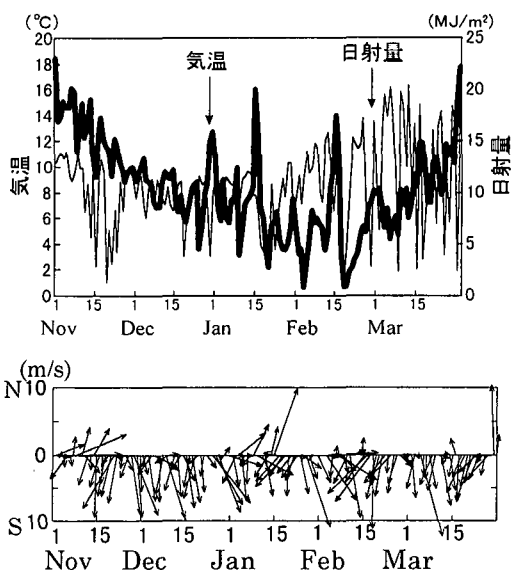


図-1 日平均日射量、気温及び日平均風速ベクトル

* 正 会 員 工 修 東京工業大学工学部土木工学科 助手
 ** 正 会 員 工 博 東京工業大学工学部土木工学科 助教授
 *** 学生会員 東京工業大学大学院土木工学専攻

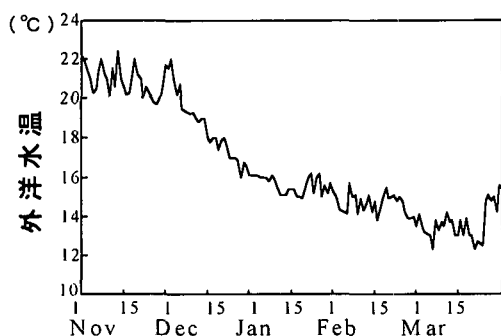


図-2 千葉県布良沖の外洋表層水温

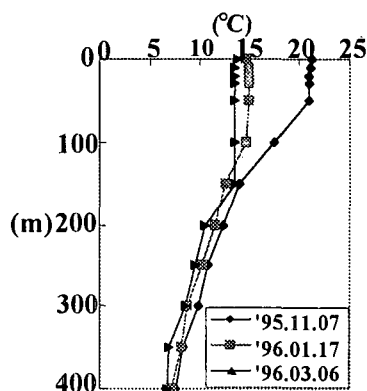


図-3 相模湾沖の水温の鉛直分布

3月に入ると気候が不安定なため変動が激しくなっている。風速は計算対象期間中ほぼ北よりの風が卓越している。ただし、11月上旬、1月中旬、3月下旬には南寄りの風が卓越する。風速は10 m/sを超える事はまれであり、平均して5 m/s程度である。

2.2 外洋水温

図-2に千葉県、神奈川県、及び商業用フェリーによって観測された千葉県布良沖の外洋表層水温を示す。12月より水温が下降しはじめおよそ3月末まで下降する傾向にあり、一冬を通して外洋の表層水温は8°C程度変化する。また図-3は第3管区海上保安本部により観測された相模湾沖の水温の鉛直分布である。11月上旬では水温が様な混合層の厚さは50 m程度であるが、その後混合層の厚さは増大し3月には125 m程度にまで達する。混合層から下層の水温はほぼ直線的に変化しており、水深200 m地点の水温は1冬を通して2.0°C程度変化している。

2.3 衛星画像による表層水温構造特性

図-4に12, 1, 2月におけるNOAA/AVHRRの熱赤外画像を示す。12月上旬には既に湾口部に明確なフロントが形成されており、湾口部の等温度線は放物型をし

ている。1月21日の画像を見ると等温度線が湾口部でS字形をしており、外洋水が千葉県側を湾内に向かって侵入している様に見える。他の画像を調べても湾口部において等温度線がS字形をしている日が多いが、千葉県側で暖水が湾内に向かって侵入しているかどうかは衛星画像だけでは判断できない。一方、2月5日における湾口部の等水温線はかなり複雑な形をしている事が分かる。また、上で示した様に日射・気温等の気象条件や外洋の水温が数日単位で大きく変動している事からも推測できるが、一冬を通して衛星画像を調べた結果、熱塩フロントが数日の時間スケールで大きく変動している事が確認できた。ただし衛星の空間分解能上の問題により、表面水温の空間勾配は従来の観測結果に比べ緩やかになっている。

3. 数値計算の概要

様々な観測結果や衛星画像によって、冬期における東京湾を取り巻く海象・気象条件は大きく変動している事が分かった。従って、外洋の水温を固定した既存の計算方法では、東京湾湾口部における実際の熱塩フロントを再現する事が困難である事は容易に推察できる。そこでここでは観測値を用いて、出来るだけ現実に近い状況を再現する事を目的とするデータ同化とRTSを、1995年～1996年の冬期を対象として行い、実際の東京湾湾口部の流動特性を解明することを試みる。

3.1 数値モデル

計算に用いた数値モデルは鉛直方向に静水圧近似を仮定した準3次元モデルである。用いた方程式は運動方程式、連続式、塩分、水温に関する移流拡散方程式、状態方程式および、海面での熱収支式である。

鉛直渦動粘性係数・渦動拡散係数及び水平渦動粘性係数・渦動拡散係数はそれぞれ式(1)、(2)に示す0方程式モデルを用いて計算した(Darid A, 1994)。

$$\left. \begin{aligned} A_v &= \frac{A_z}{(1+10R_i)^{1/2}} \\ D_v &= \frac{A_z}{(1+3.3R_i)^{3/2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} A_z &= \left[\kappa z \left(1 + \frac{z}{H} \right) \right]^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \\ R_i &= -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{-1} \\ A_h &= A_{h0} + C_3 \Delta L^2 \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

κ は0.4, C_3 は0.01, A_{h0} は5 m²/s, ΔL は計算格子サイズとした。

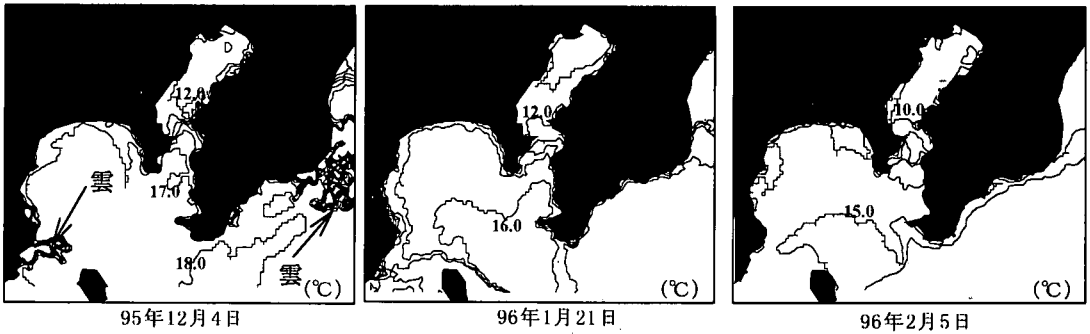


図-4 12, 1, 2月における NOAA/AVHRR の熱赤外面像

表-1 計算条件

計算条件	1995. 11. 1~1996. 3. 31
初期条件	水温：表層 20.0°C, 底層 11.44°C, 塩分 34.5‰
格子数	東西方向 56
	南北方向 88
	鉛直方向 22
格子間隔	東西方向 1000~2500 m
	南北方向 1000 m
	鉛直方向 2.0~30.8 m
開境界	水位 M_2 分潮
	水温 千葉県水試富津分場報告(東京湾口海況図)・水路部
	塩分 一定 (34.5‰)
河川流量	東京湾 主要 5 河川, 流量は宇野木・岸野 (1977) による (比率: 旧江戸川 41%, 荒川: 26%, 隅田川: 17%, 多摩川: 10%, 鶴見川: 5%)
風	第 2 海堡
気象条件	東京管区気象台, 横浜測候所

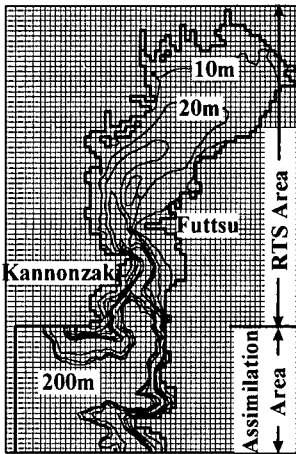


図-5 計算対象領域(●は第 3 管区海上保安本部の観測点を示す)

3.2 計算条件

図-5 に計算対象領域を, 表-1 に計算条件を示す. 計算領域, 初期条件, データ同化手法について多少説明を加える.

(1) 計算領域

東京湾の数値計算を行う場合, 湾口付近に開境界を設定するのが一般的であるが, 本研究では湾口部における流動に着目しているため, 開境界を湾口部から離す必要があり計算領域を大きく設定した. 三浦半島以南をデータ同化領域, 湾口及び湾内部を RTS 領域とし, また計算負荷の問題から 200 m より深い領域に関しては一様に水深 200 m とした.

(2) 初期条件及びデータ同化手法

水温の初期条件としては水路部, 及び千葉県水試富津分場の観測結果から, 水深 50 m までは一様に水温 20.0°C, 水深 200 m での水温を 11.44°C とし, その間は線形補完により与えた. また塩分は 34.5‰ を全域で一様に与えた.

三浦半島以南の水温・塩分は外洋の影響を強く受けていると考えられるが, 従来の計算方法ではこの影響を十分に表せない. そこでデータ同化領域を三浦半島以南に設定し, そこでの水温・塩分は, 下に示すデータ同化項を加えた移流拡散方程式を解いた (David P, 1991).

$$\frac{1}{\alpha}(\phi_b - \phi_c) \dots \dots \dots (3)$$

ここに α : 定数, ϕ_b : 同化領域における水温観測値, ϕ_c : 同化領域における計算値. 従って同化領域内の塩分・水温は外洋の影響が反映されていると考えられる. また, 開境界における内部波の発生を出来るだけ押さえるため開境界にスポンジ層を設けた. また計算を進めると共に開境界における混合層厚さ, 表層・底層水温は観測値を基に変化させて与えた.

以上の工夫により開境界における不自然な流れはある程度軽減出来た. また係数 α の大きさに関しては, 今回の計算では計算領域内の拡散項に比べデータ同化項が 1

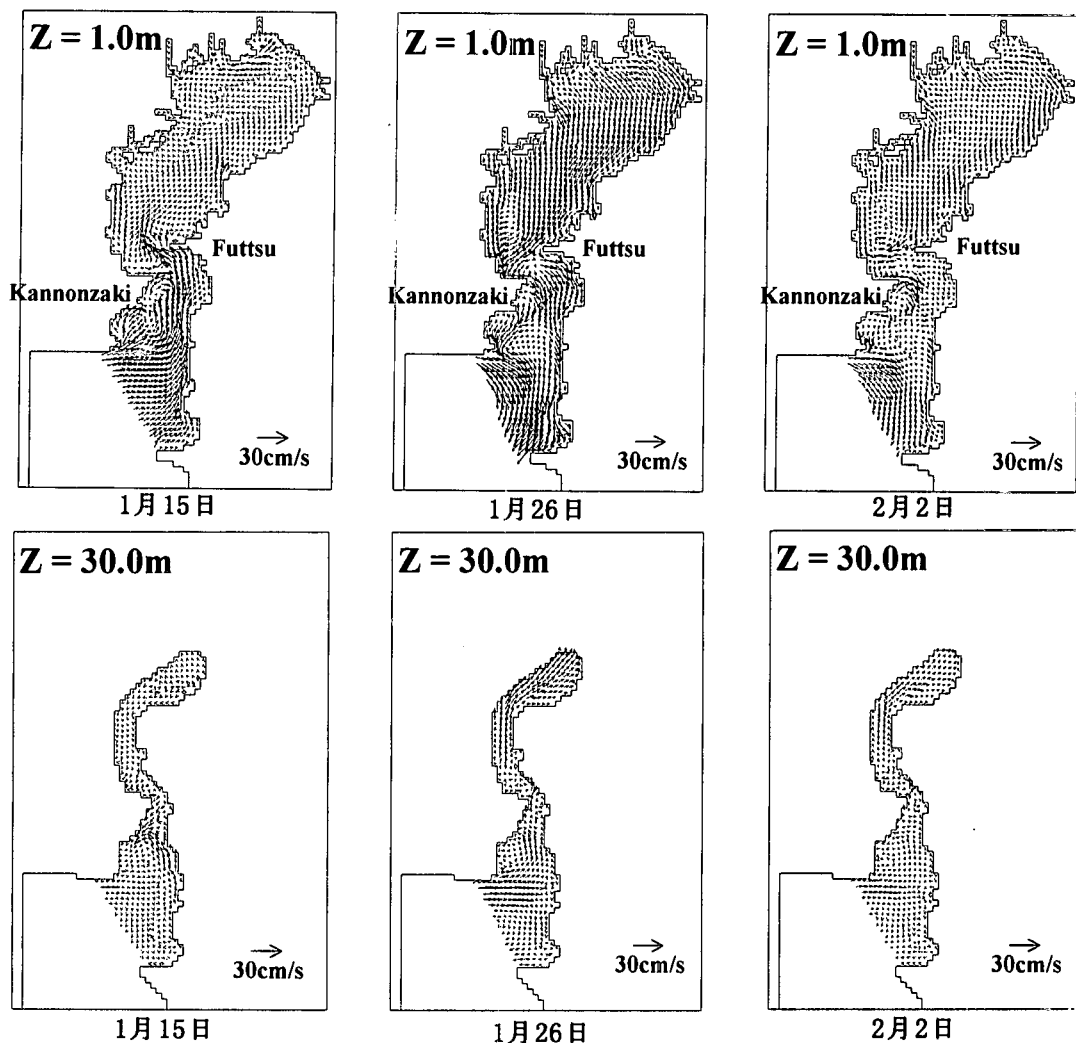


図-6(a) 25時間平均流速

オーダー小さくなる程度に設定した。

4. 東京湾湾口部における熱塩フロントの3次元構造

図-6に1月15日、1月26日、2月2日の水温および、25時間平均流速を示す。1月15日は日平均気温が 16.0°C と非常に暖かい日であり、また16日にかけて南寄りの海上風が卓越しており、16日には風速が 10 m/s 程度まで達する。1月26日は 10 m/s を超える北よりの海上風が吹き、日平均気温も 3.5°C 程度と比較的寒い日であった。また2月2日は計算期間中で最も日平均気温(0.6°C)が低く、海上風は $7\sim 8\text{ m/s}$ の北寄りの風であった。

1月15日の表面水温分布を見ると、湾口部を介した水温差が $1.5\sim 2.0^{\circ}\text{C}$ と非常に緩やかである。湾口部の等温

度線はS字型をしており、湾口中央部から千葉側にかけて外洋水が湾内に流入しているように見える。事実1月15日の表面流速分布を見ると、千葉側を外洋から湾内に向けて侵入する流れが明確に見られる。これを補って水深 30 m 層では湾内から外洋に向かって流出する流れが見られる。この流動構造は長島らが示した平均的な流動構造と大きく異なっており、非常に興味深い。このような外洋水の湾内への侵入に対し、海上風が非常に重要な働きをしているとは考えられるが、現時点では外洋水侵入のメカニズムは明らかになっていない。

1月26日になると表層水温の空間勾配はきつくなっている。湾口部における温度コンターはS字型ではなく、放物型をしているのが特徴的である。これは強い北よりの海上風と観音崎沖の地形の効果によって、湾内水が千葉県側で流出している為だと考えられる。この結果

もまた長島らが示した平均的な冬期における湾口部の流れと異なっているが、実際にはさらに強い北寄りの海上風が吹いていると考えられるので、現実にはこの日見られた流速・水温構造が頻繁に起きている可能性が高いと思われる。水深 30 m での流速を見ると表層による流れを補って湾内に流入する流れが確認できる。2月2日には再び湾口部でS字型をした等温度線が見られるが、湾口部表層における流れは、この場合も千葉県側で流出傾向にある。基本的に北風が卓越すると湾口部表層では流出傾向にあるが、北寄りであっても海上風が弱ければ、観音崎沖の時計周りの渦が卓越する場合があります、この場合は等温度線はS字型になると考えられる。

以上より東京湾の熱塩フロントは、海上風・気温・日射等の気象条件や外洋水温に影響され、数日程度の時間スケールで大きくその流動構造を変化させている事が分かった。特に興味深いのは、南よりの風が卓越する暖かい期間には外洋水が表層で湾内に流入し、下層では湾内水が流出するという計算結果である。このようなダイナミックに変動する流動構造は従来の平均像からは想像しがたく、この様な非定常性を考慮せずに、平均流のみで一冬を通した海水交換を推定する事は不可能であると考えられる。

今回の計算で得られた熱塩フロントは、観測結果に比べると温度勾配が非常に緩やかであり、シャープな熱塩フロントを再現する事が大きな課題として残った。また、今後このような計算が発展するためには、計算結果を詳細に検討するだけの観測結果が必要不可欠である事は言うまでもない。

5. ま と め

本研究から得られた結果を以下に示す。

(1) 冬期における東京湾湾口部に発生する熱塩フロ

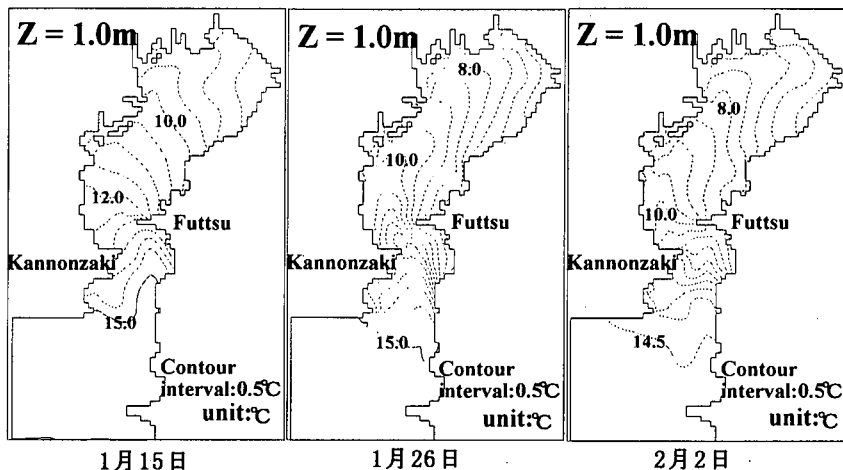


図-6(b) 水温分布

ントを対象としたデータ同化とリアルタイムシミュレーションを行い、定性的には良好な結果を得られた。

(2) 熱塩フロントは気象や外洋水温の影響を受けて、数日程度の時間スケールで変動している。

(3) そのため、従来考えられてきた様に平均流だけを用いた海水交換量の見積もりは真実と大きく異なる可能性がある。

謝辞: 本計算を行うに際し、千葉県水産試験場富津分場、第3管区海上保安本部、運輸省第2港湾建設局より貴重なデータを頂いた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇野木早苗・岸野元彰 (1977): 東京湾の平均的海況と海水交流, Tech. Rep. No. 1, 理研海洋物理研究室, 89 p.
- 長島秀樹・岡崎守良 (1979): 冬期における東京湾の流況と海況, 沿岸海洋研究ノート, 第16巻, 第2号, pp. 76-86.
- 柳 哲雄・田丸浩之 (1989): 愛媛大学工学部紀要, 第11巻, 4号, pp. 233-240.
- David A. B. (1994): A Model Study of the Buoyancy-Driven Circulation in the Gulf of Mexico, J. Phys. Oceanogr., Vol. 24, pp. 2387-2412.
- David P. S. (1991): The Open Boundary Condition in the United Kingdom Fine-Resolution Antarctic Model, J. Phys. Oceanogr., Vol. 21, pp. 1494-1499.
- Yanagi, T., A. Isobe, T. Saino and T. Ishimaru (1989): Thermohaline front at the mouth of Tokyo Bay in winter, Continental Shelf Res., Vol. 9, pp. 77-91.