

相模灘海域を含む東京湾広域流動拡散計算

川上 俊雄*・船越 晴世**・松浦 寿彦**

1. はじめに

水質の汚染を予測する手法として、模型実験や数値シミュレーションがある。これらの手法を用いて、海域、特に内湾域の汚染を予測する場合、対象領域を湾口までとするのがほとんどであった。しかし、湾域周辺への生産機能や人口の集中によって、流出汚濁負荷量が増大し湾内の汚染が進行するにつれ、湾口から外洋への汚染物質の流出および、外洋水の湾内への流入という湾口を通じての湾内そして外洋との相互関係が問題となってきた。これらの相互関係を、従来のように湾口に境界を設けた対象領域では確かめることはできず、対象領域を外洋まで拡張する必要がある。その利点としては、最も評価したい湾口付近における境界条件の影響が除かれ、汚染物質の外洋への流出形態をより正確に再現できることが、あげられる。また、問題点としては、汚染物質の拡散現象に重要な役割を果たす内湾とは違った外洋の恒流成分を、実際の海域の流況と同じようにいかに再現するかということである。数値シミュレーションにおいては、流動計算で得られた流動場を使用して拡散計算を行う。このため、領域拡張に伴う問題点である流動計算の再現性を解決しなければ、汚染物質の外洋への流出形態のより正確な再現もなされない。

本論文は、このような観点から、領域を相模灘、伊豆大島を含む海域まで拡張し、そこでの流動、特に恒流成分の再現性を検討し、あわせて湾内汚染物質が外洋に与える影響を数値シミュレーションにより、みようとするものである。

2. 自然条件

より再現性のよい数値モデルを作成するため、東京湾および相模灘海域での自然条件を調べ、流動の支配要因を把握した。

相模灘での流動は、黒潮分枝流の流入経路により、通常三通りのパターンがあるといわれている¹⁾。このうち、最も普通にみられるパターンが図-1に示すような大島

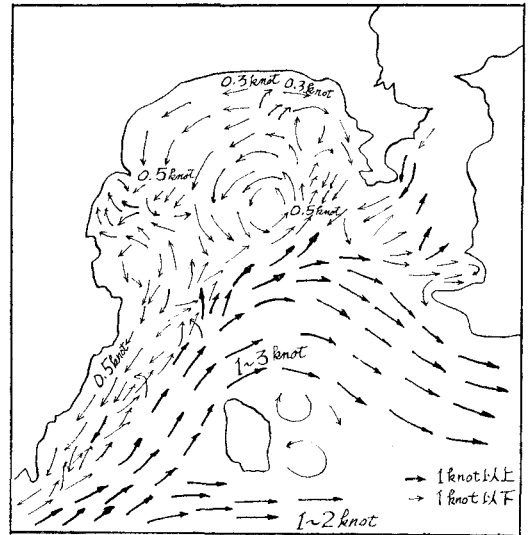


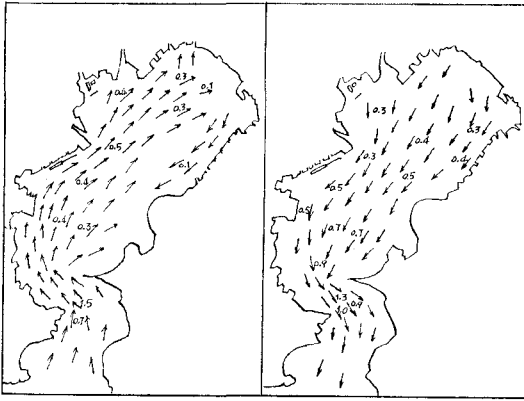
図-1 相模灘の流況

西水道から東～北東方向に流入してくる場合である。宇田²⁾(1937)によると、相模灘に流入した黒潮分枝流は普通、大島北方で北東に転じ、流速は表層で0.1ノット以上で、最強流は1~3ノットを示す。大島東方においては東流を示し、房総洲崎沖から外房沖合に向かって流出する。相模灘北部では、時として反時計回りの環流が発達し、流速は0.5ノット程度を示す。また伊豆半島東岸に沿って、黒潮分枝流の反流がみられ、流速は0.5ノット程度である。第三のパターンは、大島～房総間から流入した黒潮分枝流が大島西水道から西流するタイプであり、第三のパターンは、西水道から南下するタイプである。このように相模灘の流動は黒潮分枝流の流入という点で特徴的である。

東京湾の流動を支配しているものとしては、潮汐流の他に、相模灘からの外洋水の流入、河川水や太陽放射によって引き起こされる密度流、夏期、冬期の卓越風による吹送流等が考えられる。過去に行われた調査から、東京湾内の流動特性は次のように言われている³⁾。山田(1971)によるとまず、潮汐流についていえば、図-2のような流れが湾の大勢として示される。潮汐流は湾口部、とりわけ観音崎周辺で早く、最強時には1.5ノット

* 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所調査課長

** 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所



図—2 東京湾の潮汐による流動

以上の流速が観測され、最奥部では、0.4 ノット以下となっている。また地形的条件から、漲潮時の主流は神奈川県側を北上し、千葉県側での潮流は西側より弱い傾向にある。東京湾の恒流については、富津崎以北の内湾部に一つの大きな時計回りの循環流があり、また東京港沖合から西岸沿いに南下する恒流も存在する。

東京湾、相模灘の風については⁴⁾、東京湾内では、風速 5.0~9.9 m/sec の出現率が一番高く、盤洲鼻沖では出現率が年間を通じて、40% 以上である。この範囲の風速について方向別の出現率をみれば、10 月から 3 月にかけては、N 象限の風が卓越し、6 月から 8 月については S および SSW 方向の風が卓越している。東京湾口では一般に、冬期に N~NE、夏期に S~SW の風向が他に比べて卓越し、春と秋には両者の方向が共に卓越する。また、相模灘沿岸域でも、夏期に S~SW、冬期に N~NNE の風向が卓越する。

3. 基本方程式

海洋での流動は、次式で示される運動ならびに連続方程式で表現される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

ここに、 t : 時間、 f : コリオリ係数、 p : 圧力、 τ_x, τ_y : z 軸に垂直な面で x, y 軸方向に働くせん断力、 ρ : 流体の密度を表わす。

式 (1), (2) を式 (3), (4) を用いて変形し、二次元単層モデルで計算を行うために二次元化 (水深方向に平均

化) を行くと次式のようにになる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h)v] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho(h + \zeta)} + \frac{\tau_{sx}}{\rho(h + \zeta)} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho(h + \zeta)} + \frac{\tau_{sy}}{\rho(h + \zeta)} = 0 \quad (7)$$

ここに、 u, v は $-\zeta \leq z \leq h$ 間の平均流速、 $\tau_{bx} = \gamma^2 \rho u \sqrt{u^2 + v^2}$ 、 $\tau_{by} = \gamma^2 \rho v \sqrt{u^2 + v^2}$ 、 $\tau_{sx} = \gamma^2 \rho a W_x^2$ 、 $\tau_{sy} = \gamma^2 \rho a W_y^2$ (ρ_a : 空気密度、 W_x, W_y : x, y 軸方向の海面上の風速) である。

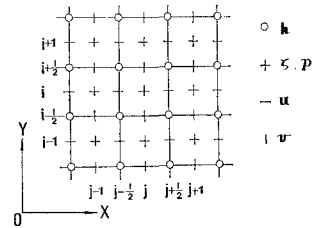
この式 (5), (6), (7) が、流動計算に用いる基本方程式である。物質拡散計算においても同様に二次元単層モデルで計算を行うため、二次元化した次式を用いる。

$$\frac{\partial [(h + \zeta)P]}{\partial t} + \frac{\partial (MP)}{\partial x} + \frac{\partial (NP)}{\partial y} = \frac{\partial [(h + \zeta)K \frac{\partial P}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)K \frac{\partial P}{\partial y}]}{\partial y} + P_a \quad (8)$$

ここで、 P : 鉛直方向平均物質濃度、 M : x 軸方向の流量、 N : y 軸方向の流量、 K : 拡散係数、 P_a : 投入負荷量。

流動計算の計算手法は、流速 u, v および水位 ζ を 1/2 タイムステップごとに交互方向 (x, y 軸) に計算する Leenderste, J. J. によって紹介された A.D.I. 法⁵⁾を用いた。この計算プログラムは、運輸省港湾技術研究所で開発されたものを一部改変したものである。二次元計算領域を一次元化し、記憶容量の縮小をはかるなどを行った。

拡散計算における計算手法は陽解法を用いた。各変数の格子点配置は、図—3 に示す。これら差分式の詳細な誘導はここでは省略する。



図—3 格子点配置図

4. 数値計算条件

2. で述べた自然条件の中で外洋、相模灘の流動を支配していると思われる黒潮分枝流を再現するため 図—4 に示すような 2 つの領域を設定した。1 つは、東京湾の長軸方向に y 軸をとる A ケースであり、いま 1 つは東西南北方向に x, y 軸をとる B ケースである。これら 2 つの領



図—4 黒潮分枝流計算領域

これらの領域は、すべて 1.5 km の格子群とした。メッシュ数は、A ケースで約 3 500, B ケースで 4 700 である。

恒流計算においては境界条件として、固定水位を用いる場合と固定流速を用いる場合があるが、黒潮分枝流計算では後者をとった。A ケースでは、境界インフロー地点で 1 ノットを、B ケースでは伊豆半島、大島間を流れる流量が A ケースと同じであろうと思われる 0.52 ノットを与えた。またアウトフロー地点では流入量と同じ流出量を与える流速とした。領域内の初期流速は 0 とした。

吹送流計算は、海面での風の応力として、従来高潮計算等で用いられてきた、 $\tau=0.0026\rho_a W^2$ を与え計算した。境界条件は、風によって作られる流れが開境界を通じて流入、流出しないものとし、開境界上で黒潮分枝流計算と同条件とした。このことは、短期間の風の作用と黒潮分枝流の相模灘への流入とは無関係であることを仮定している。吹送流の初期流速は、黒潮分枝流計算結果 30 時間後の値を採用した。風速は、自然条件から領域全域に 7 m/sec を与えた。また、風向は夏期 SSW, 冬期 N 方向の風を与えた。

潮流計算においては、境界に水位と位相を与えて計算した。強制水位点は、石廊崎、新島沖、野島崎の 3 点でその間は線形補間した。強制水位点での振幅と位相を表—1 に示す。

表—1 強制水位点における振幅と位相

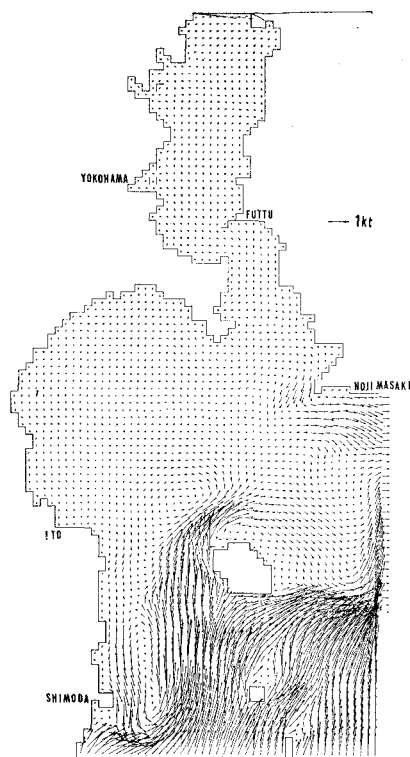
強制水位点	石 廊 崎	新 島 沖	野 島 崎
振 幅 (cm)	113	192	110
位 相 (分)	-30	-28	0

拡散計算では、湾内の汚染物質の外洋への流出形態をみるため、計算領域はほぼ全域にわたって観測値がある塩分を対象として行った。初期濃度として、黒潮分枝流の濃度に近い 34.5‰ を与え、開境界では、初期濃度に固定した。また当海域に流入する河川水の濃度は 0‰ として与えた。拡散係数は、東京湾内で $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、相模灘で $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ を使用した。

5. 計算結果

黒潮分枝流計算を 30 時間まで行った。図—5 に 30 時

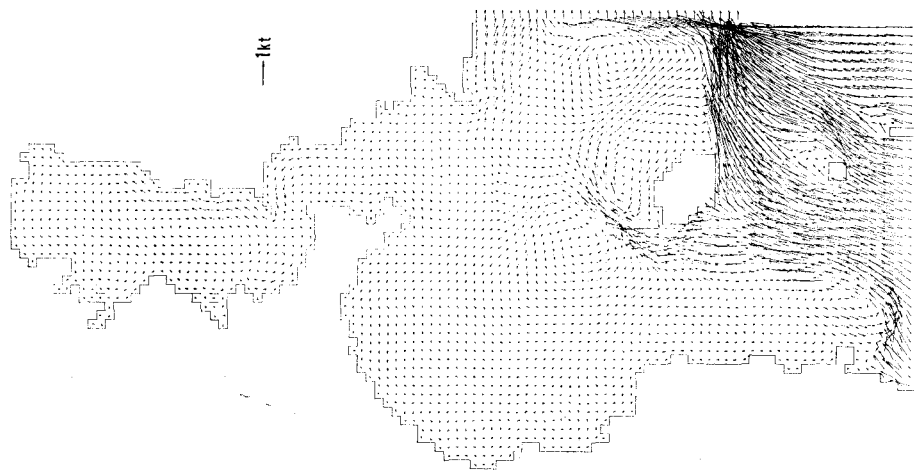
域において、現象で 10 時間黒潮分枝流計算を行い、よりよく現象を再現できると思われる領域を決定し以後の黒潮分枝流計算と吹送流、潮流計算を行った。こ



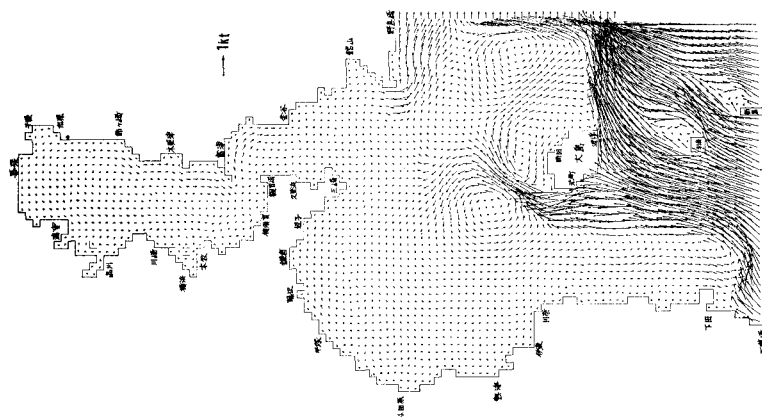
図—5 黒潮分枝流計算結果

間後の計算結果を示す。石廊崎と新島を結ぶ開境界から流入した黒潮分枝流は大島西水道と南水道にわかれ西水道を通過した流れの主流は、大島を迂回し、南水道からの流れと合流し、房総沖へぬける。西水道での流速は 1.0~2.0 ノットである。伊豆半島東岸域では、南下する反流がみられる。この反流域での流速は、下田沖合で約 0.7 ノットの最大流速を有している。相模灘では、微弱的な右回りの環流がみられ、三浦半島三崎沖合には、左回りの渦流がある。また、大島北方にも左回りの渦流がみられる。これらの計算結果を図—1 と比較すれば、伊豆半島東岸域および大島周辺海域については、流動パターン、流速ともほぼ似かよっている。

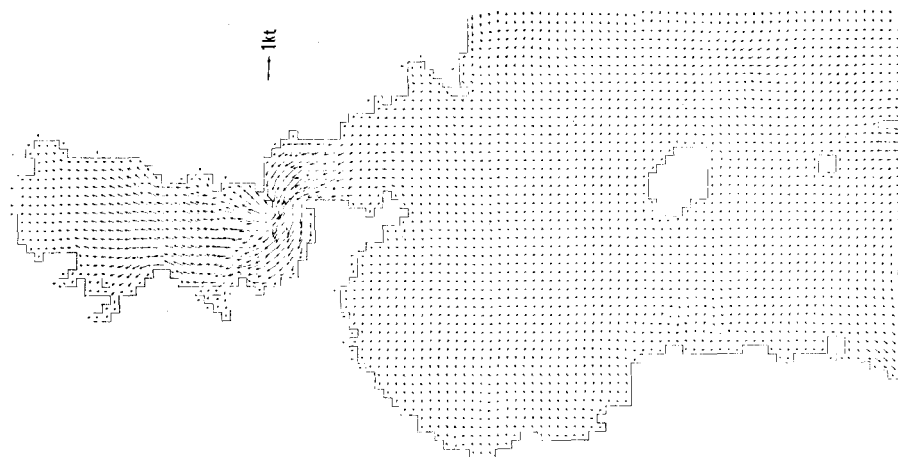
次に、30 時間後の吹送流計算結果を図—6, 7 に示す。SSW 風吹送流では、時間の経過とともに、伊豆半島東岸域の反流は北上し、大島北方の環流と合流し、反流は消滅している。また、西水道の分枝流の主流は東方に寄り強流地帯を形成し、流速は 1.0~2.4 ノットである。相模灘には左回りの一大環流が発達する傾向がみられる。東京湾口では、富津崎を回り込み、湾内に流入する流れがみられる。図—1 と比較すれば、相模湾海域では、伊豆半島東岸の反流を除き、パターン、流速ともほぼ類似している。N 風吹送流の場合、大島周辺海域では、SSW 風とほぼ同じであるが、相模湾奥では右回りの渦流がみられる。東京湾には、通常あるといわれている右



図—6 SSW 風吹送流計算結果



図—7 N 風吹送流計算結果



図—8 漲潮時の潮流計算結果

回りの環流があらわれている。また、湾口では、富津崎を回り込み、湾外へ流出する流れがみられる。

潮流計算は4潮汐行った。図-8に漲潮時の計算結果を示す。流速については、相模灘の水深が深いため、微弱であるが、東京湾については、実測値とほぼ同様の結果が

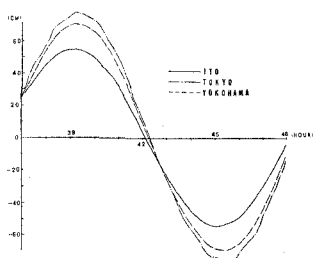


図-9 3地点の潮位変化

表-2 3地点の推算潮位と計算潮位

地名	推算潮位		計算潮位	
	潮位差 (cm)	位相 (分)	潮位差 (cm)	位相 (分)
伊東	108	0	110	0
横浜港	144	10	140	12
東京港	160	9	154	12

得られた。また、伊東、東京港、横浜港の潮位変化を図-9に示し、その地点の推算潮位と計算潮位を表-2に示す。これをみると、推算値の振幅、位相と計算値のそれらは、ほぼあっており、再現性は良好である。

次に、塩分拡散計算の30潮汐後の結果を図-10に示す。この図は、冬期のものであるが、東京湾では、西岸に濃度は低く、東岸に高い実測値とほぼ同様のパターンを示し、西岸沿いに低濃度帯は拡がっている。こ

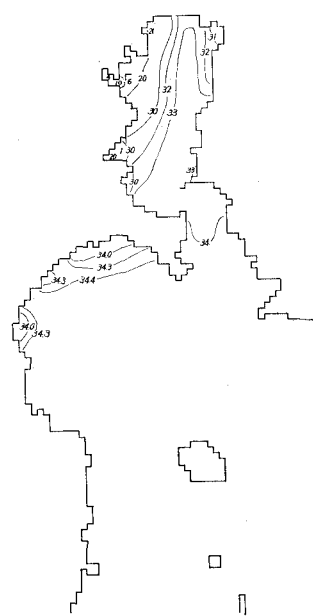


図-10 塩分濃度分布

の拡散計算終了時点で、まだ濃度は低下しつつあるが、まだ外洋への低濃度域の拡がりはみられなかった。

6. まとめ

以上、相模灘海域を含む東京湾広域流動計算から、次の結果が得られた。

(1) 相模灘について、一層流モデルを用いた夏期吹送流計算結果では、宇田²⁾によって示された実測値とほぼ同様の流況が得られた。

(2) 東京湾内の吹送流計算結果では、夏期に左回り、冬期に右回りの環流が表われている。冬期の結果は、通常東京湾にあるといわれている恒流のパターンと類似したものである。

(3) 吹送流計算では、夏期、冬期とも大島周辺海域の流況はほぼ同じであり、相模湾奥、東京湾内では違った流れを示している。このことから、大島周辺海域では黒潮分枝流による流れが隆盛であり、風によって影響を受けないことがわかった。

これらのことから、海流、吹送流が卓越する海域の流況を予測する流動計算を行い、流動の再現性についての検討を行うとともに、内湾域の汚染物質の外洋への流出形態を検討した。この結果、この予測手法によって十分再現性のある計算を行うことができることを確認した。ただし、係数値や差分法について、更に検討し、引続いて現地データとの比較を行って、モデルをより妥当なものとしなければならない。

参考文献

- 1) 静岡県水産試験場伊東分場：相模湾における海流ビン放流結果，昭和46年2月。
- 2) 宇田道隆：「ぶり」漁期における相模湾の海況及び気象と漁況との関係，水産試験場報告第8号，1937年。
- 3) 山田紀男：「東京湾の潮流」，水路要報91号，1971年。
- 4) たとえば運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所東京湾々央気象海象調査報告書（第5報），昭和47年3月。
- 5) 金子・堀江・村上：A.D.I.法による潮流汚染拡散の数値計算，港研報告第14巻第1号，1975年3月。