

東京湾の潮流観測とシミュレーション

市原正史*・大村哲夫**・福代倫男**・野澤良一**

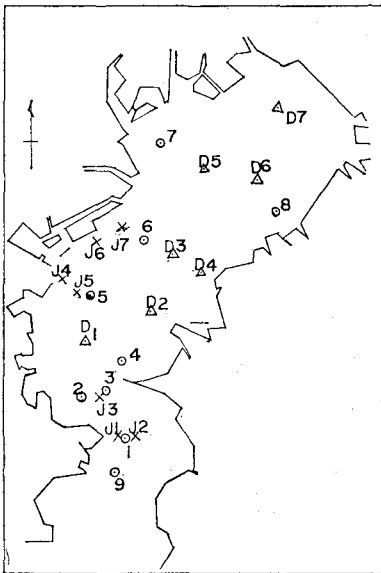
1. はじめに

東京湾の流況については、古くより多くの現地観測や研究が行われてきている。その中で、東京湾の恒流は、① 冬期に湾内において、時計回りの環流が存在する¹⁾。② 西岸沿いに南下流が存在する^{2),3)}。③ 湾口部において、上層流出、下層流入の傾向がみられる^{4),5)}。等の現象が把握されている。

本文は、運輸省第二港湾建設局が、昭和 53, 54 年度にわたって行った潮流現地観測および数値シミュレーションをとりまとめたものである。潮流観測は、東京湾の流況、特に恒流の実態と、その変動特性および季節的差違の把握、さらに外力条件との関係の把握に主眼を置き、数値シミュレーションは、恒流の再現性および形成要因ならびに流況の季節的差違に主眼を置いた。

2. 潮流現地観測

(1) 観測方法



図—1 測点図

潮流観測は、ベルゲン流速計を使用し、観測項目は、流向、流速、水温、塩分であり、観測位置および期間は、図—1、表—1 に示すとおりである。

表—1 観測期間

季節 測点	秋 (11~12月)	冬 (1~2月)	春 (5~6月)	夏 (7~8月)	備 考
St. 1~9	○	○	○	○	30日間, St. 9 は 春, 夏のみ St. 1, 2, 9 は 3 層, 他は 2 層
St. D1~D7		○		○	15日間 2層
St. J1~J7		○		○	15日間 2層

(2) 観測結果および考察

a) 流況の実態

流況の実態を把握するために、流速曲線の作成および潮流調和解を行った。その結果、① 流況は、潮汐との関連が強く、特に半日周期の変動が顕著である。② 流速は下層より上層が大きく、地域的には、湾口部が大きく（寒候期で 30~60 cm/s、暖候期で 25~55 cm/s）湾奥部で小さい（15 cm/s 以下）ということがわかった。

b) 恒流

恒流の平均的パターンと、その変動を把握するために、観測期間中の平均流（図—2 参照）、日周期以下の周期の潮流を近似的に除去した 25 時間移動平均流を計算し、その頻度分布をもとめ、current rose を作成した。

恒流パターンは、寒候期と暖候期で異なる。寒候期は、① 湾内において、下層では時計回りの環流、上層も明確ではないが、下層と同じパターンを示す。② 西岸沿いに上層で南下流、下層で北上流がみられる。③ 流速は、東側では、上層が下層に比して速く、西側では同じ程度である。④ 湾口部は、西側上層で流出、その他で流入傾向を示す。⑤ 湾の北部、中央部は、恒流の短期間の変動が激しい。暖候期は、① 湾内においては、明確な環流はみられない。② 西岸の上下層に南下流が生じ、これらに連なって湾内の下層に反時計回りの環流を示唆する流れがみられる。③ 湾口部では、西岸上層で流出、中層は流入、下層は変動が激しく、東岸では流入傾向を示す。

両期を比較した場合、湾口部、西岸上層の恒流パター

* 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長

** 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所

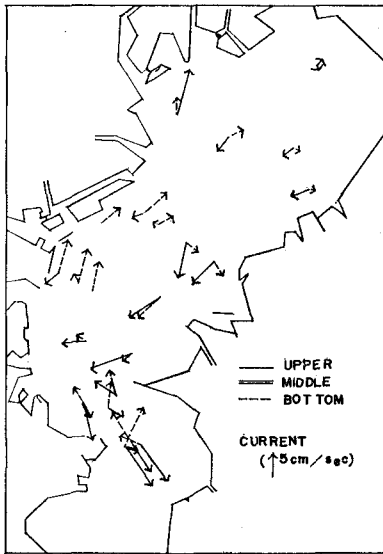


図-2 恒流図 冬期

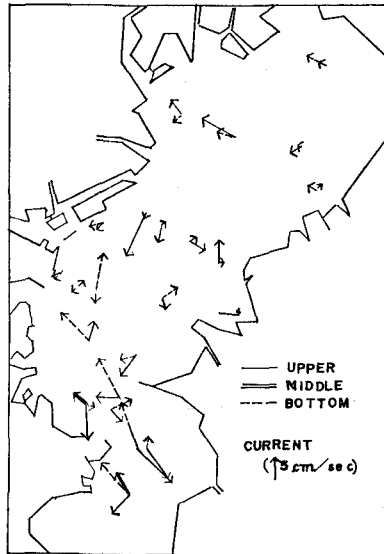


図-3 恒流図 夏期

ンには、あまり季節差がない。しかし、湾内においては、相反するパターンを示す。また、湾口部の測点の中層に注目すれば、寒候期では、下層と類似した流向であったのが、暖候期では、下層と類似した流向、もしくは、独自の流向を示す。

c) 外力との関連

1) 潮汐の影響 潮流の恒流に対する相対的な強さは、湾口部においては圧倒的に潮流が強いが、湾奥部においては同じ程度であり、また潮流は湾奥部に向かうに従って弱くなるのに対し、平均流は潮流ほど差がない。また、季節的な変化をみれば、夏期においては湾口部で上下層逆位相の流れがみられる。

以上潮汐について述べたが、図-4 等から潮汐が影響を及ぼす範囲は湾口付近であり、湾全域の恒流を形成す

が、南西風が吹いた場合は反時計回りの環流となり、その応答時間は 3 時間ぐらいで変わりはじめ、12 時間もたてばほぼ完全に変わるようである。夏期に北西風が吹いた場合は、上層での強い流出、下層での強い流入がみられ、湧昇流が湾奥部に発生し応答時間は冬期と同じ程度である。

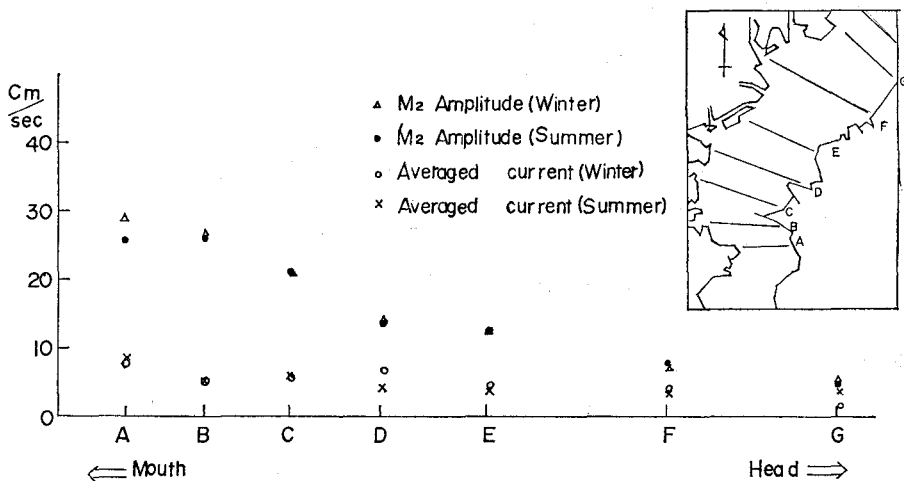
以上のように、風と流れは相関がみられること、また 25 時間移動平均流の変動スペクトルのピークと風のスペクトルのピークがほぼ一致することから、湾内の恒流は風に強く支配されていると考えられる。また、その応答の様子にも夏期は鉛直循環が持続しやすい等の季節差がみられる。

3) 淡水流入の影響 東京湾には多量の河川水が流入し、しかも大河川が北西部に偏在する。これが流況の

る主要因ではないと考えられる。

2) 風の影響 風と流れの関係を把握するために、両者の相関を検討した。冬期は東側で、上下層とも正の相関を示し、特に上層が高い。一方、西側の上層は測点により正負が異なり、低い。また下層は高い負の相関を示す。夏期はほとんどの測点で上層は正、下層は負の相関を示し、西側は冬と同様上層が低く下層が高い。東側は上層が高く下層が低い。

次に風向急変に伴う流況の変動について考察する。冬期は通常時計回りの環流である

図-4 M₂ 分潮及び平均流の強さの湾の主軸方向に沿っての変化

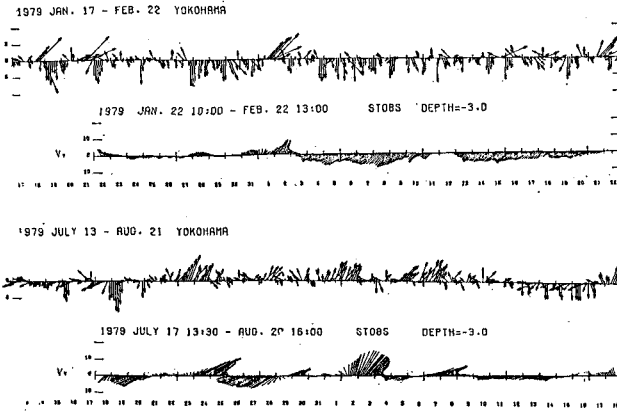


図-5 風の変動と、25時間移動平均流の変動 冬(上)と夏(下)

差を生む原因の一つとなっている。また季節的に流入量は暖候期で多く、寒候期で少ない(1960~1974年の統計では暖候期で $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{月}$ 、寒候期で $0.3 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{月}$)。また寒候期は低温、低塩分で、しかも海面冷却があり、上下層の混合を促進している(密度差 $2 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$)。暖候期は高温、低塩分で、しかも海面加熱のため密度躍層が発達しやすい(密度差 $2 \sim 5 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$)。これらの現象は、寒候期においては湾口熱塩前線を生む要因となり、暖候期には内部モードの変動を生み出す場を形成する。

3. 数値シミュレーション

(1) 基礎方程式

本計算は、「密度の拡散過程を含む二層レベルモデル」を用いた。これは非圧縮性流体の連続の式と流体の運動方程式および密度の拡散方程式の連立方程式を解くものである。

1) 連続の式

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(u_u D_u + u_l D_l)}{\partial x} + \frac{\partial(v_u D_u + v_l D_l)}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$w + \frac{\partial(u_l D_l)}{\partial x} + \frac{\partial(v_l D_l)}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

2) 運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_u}{\partial t} + u_u \frac{\partial u_u}{\partial x} + v_u \frac{\partial u_u}{\partial y} + w \frac{\partial u_u}{\partial z} \\ = f v_l - \frac{1}{\rho_u} \frac{\partial P}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_u}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_u}{\partial y^2} \\ + \gamma_a^2 u_u \frac{\sqrt{u_u^2 + u_v^2}}{D_u} \\ - \gamma_i^2 (u - u_l) \frac{\sqrt{(u_u - u_l)^2 + (v_u - v_l)^2}}{D_u} \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial v_u}{\partial t} + u_u \frac{\partial v_u}{\partial x} + v_u \frac{\partial v_u}{\partial y} + w \frac{\partial v_u}{\partial z}$$

$$\begin{aligned} = -f u_u - \frac{1}{\rho_u} \frac{\partial P}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_u}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_u}{\partial y^2} \\ + \gamma_a^2 v_u \frac{\sqrt{u_u^2 + v_u^2}}{D_u} \\ - \gamma_i^2 (v_u - v_l) \frac{\sqrt{(u_u - u_l)^2 + (v_u - v_l)^2}}{D_u} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial u_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial u_l}{\partial y} + w \frac{\partial u_l}{\partial z} \\ = f v_l - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_l}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_l}{\partial y^2} \\ + \gamma_i^2 (v_u - v_l) \frac{\sqrt{(u_u - u_l)^2 + (v_u - v_l)^2}}{D_l} \\ - \gamma_b^2 u_l \frac{\sqrt{u_l^2 + v_l^2}}{D_l} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial v_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial v_l}{\partial y} + w \frac{\partial v_l}{\partial z} \\ = -f u_l - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 v_l}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_l}{\partial y^2} \\ + \gamma_i^2 (v_u - v_l) \frac{\sqrt{(u_u - u_l)^2 + (v_u - v_l)^2}}{D_l} \\ - \gamma_b^2 v_l \frac{\sqrt{u_l^2 + v_l^2}}{D_l} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

3) 密度の拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_u D_u)}{\partial t} + \frac{\partial(u_u D_u \rho_u)}{\partial x} + \frac{\partial(v_u D_u \rho_u)}{\partial y} + w \bar{\rho} \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x D_u \frac{\partial \rho_u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y D_u \frac{\partial \rho_u}{\partial y} \right) \\ - K_z \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_l D_l)}{\partial t} + \frac{\partial(u_l D_l \rho_l)}{\partial x} + \frac{\partial(v_l D_l \rho_l)}{\partial y} + w \bar{\rho} \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x D_l \frac{\partial \rho_l}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y D_l \frac{\partial \rho_l}{\partial y} \right) \\ - K_z \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

表-2 記号の説明

x, y, z : 直交座標系(ただし z 軸は上方), u_u, u_l : x 方向の上層, 下層の平均流速, v_u, v_l : y 方向の上層, 下層の平均流速, w : 境界面における鉛直流速, t : 時間, ξ : 水位, D_u, D_l : 上層, 下層の厚さ, P : 圧力, A_x, A_y : 水平渦動粘性係数, f : コリオリ係数, $\gamma_a^2, \gamma_i^2, \gamma_b^2$: 海面摩擦係数, 内部摩擦係数, 海底摩擦係数, ρ_u, ρ_l : 上層, 下層の密度, $\bar{\rho}$: 上下層の平均密度, K_x, K_y : x 方向, y 方向の水平渦動拡散係数, K_z : 鉛直渦動拡散係数

(2) 計算法

計算法は ADI 法を用い, $\Delta t = 90 \text{ sec}$ で行った。計算範囲は神奈川県川島と、千葉県富津湾を結ぶ線以北の東京湾内全城とした。また格子間隔は 1 km とし、第三海堡周辺の流れの主軸と格子を一致させた。オープンバウンダリーは潮位で与え、振幅は M_2 潮の 36.0 cm 、周

期 12 時間とした。また、風、淡水流入量は、潮流観測期間の平均値を用いた。

(3) 計算結果および考察

a) 再現性

1) 潮流 観測値と計算値の潮流楕円を比較し、潮流の再現性を考察した。その結果、各測点で上下層とも再現性は満足できた。しかし、観測値が上下層で異なる向きを示すものについては再現性はよくない(例えば D_1)。潮流は、一般的に様モードであるが、海底地形の影響で一致しない点もあり、その測点は、上層での再現性はよいが下層で悪い。

2) 恒流 恒流の再現性を検討するために、計算値の中に観測値(計算条件に近い気象条件を示した日の平均流)を併記し比較した(冬期は1月29日、夏期は北偏風の吹いた7月19日と南偏風の吹いた7月23日)。

冬期は密度躍層ができないため、上層厚を 10 m としたところよい再現性を示した。冬期の計算結果を図-6 に示す。

夏期は 5 m 程度に密度躍層が存在したため、上層厚は 5 m とした。北偏風が吹いた場合の計算結果を図-7 に、南偏風が吹いた場合の計算結果を図-8 に示す。また、北偏風が吹いた場合は、冬期と同じ状況であるが、湾口部における恒流の状況については、夏期の上層流出、下層流入が顕著であった。

ア) 恒流の形成要因 潮汐残差流、吹送流、密度流の3つをそれぞれ別個に計算し、それを恒流(3つの要素を含んだもの)と比較することによって形成要因を考察した。

潮汐残差流は、湾口部のみで流速が大きく、湾内はきわめて小さい。さらに恒流の状況としては、湾口部において、西側流

出、東側流入の傾向がみられる。

吹送流は、湾全域で流速が大きく、かつ地域的な差があまりない。恒流の状況は上層で右偏しながら湾口部へ

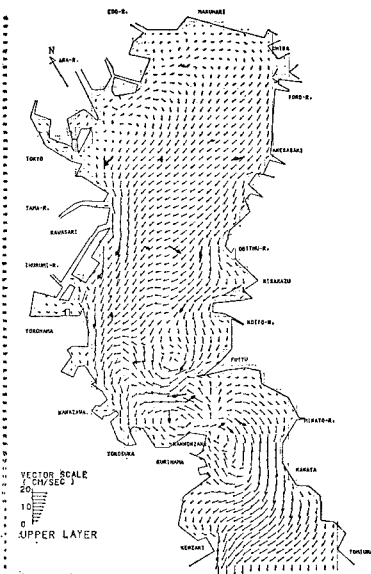


図-6(1) 恒流比較(冬季) 上層

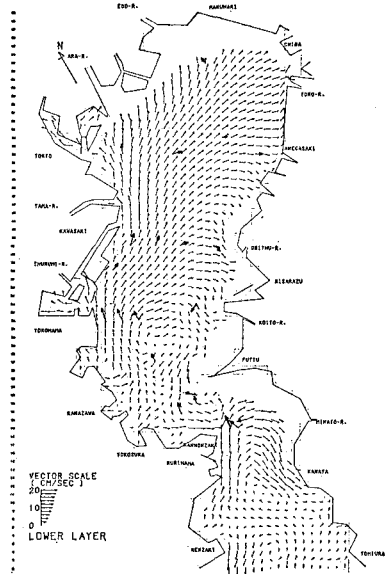


図-6(2) 恒流比較(冬季) 下層

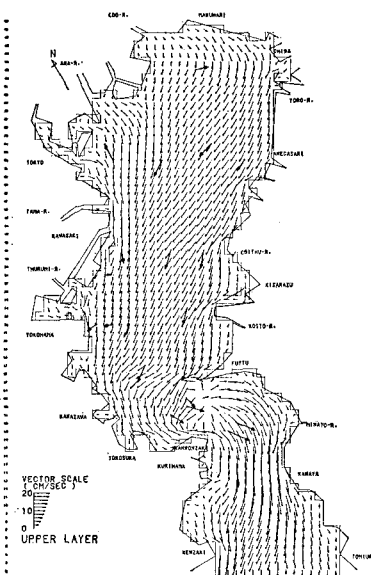


図-7(1) 恒流比較(夏季) 上層(北偏風)

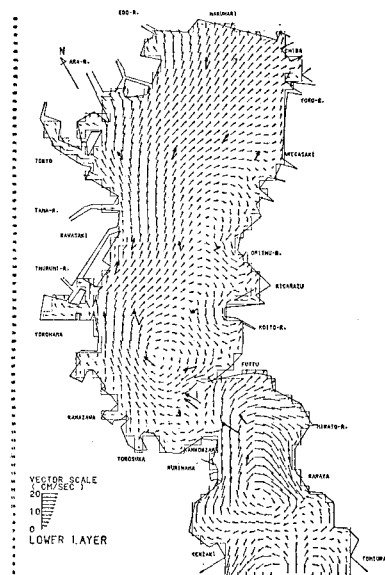


図-7(2) 恒流比較(夏季) 下層(北偏風)

表-3 計算ケース

項目	層厚	潮汐	風況	淡水流入量	密度
潮汐残差流	6 m	M_2 潮	—	—	—
吹送流		—	NNE 5.0 m/s	—	—
密度流		—	—	$15\,886 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$	上層 $\sigma_t = 24.3$, 下層 $\sigma_t = 25.0$
恒流		M_2 潮	NNE 5.9 m/s	$15\,886 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$	上層 $\sigma_t = 24.3$, 下層 $\sigma_t = 25.0$

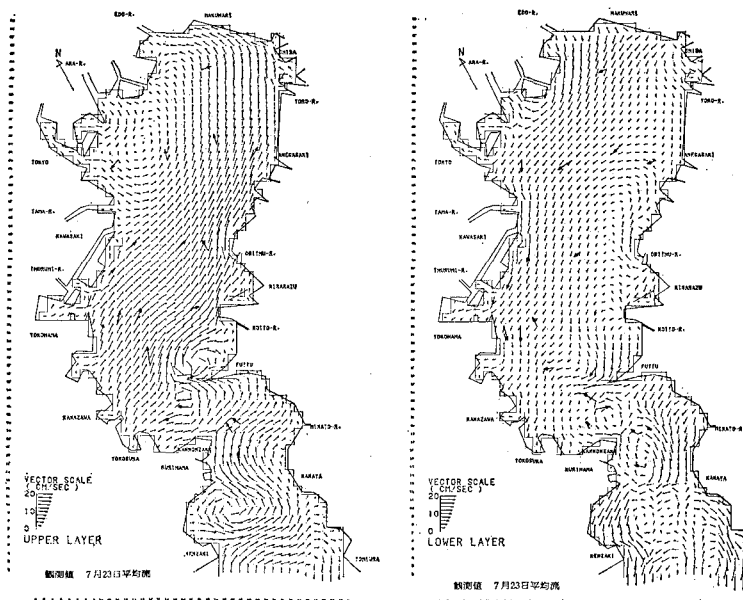


図-8 (1) 恒流比較(夏季)上層(南偏風)

図-8 (2) 恒流比較(夏季)下層(南偏風)

向かい、下層はその補流として湾奥部へ向い、鉛直循環が顕著にみられる。

密度流は、西岸のみで流速が大きく、他の海域では微弱である。恒流の状況は上層南下、下層北上である。

以上がそれぞれの概要であるが、比較したことによる考察を以下に記す。

① 潮汐残差流は湾口部のように潮流が強く、地形の複雑な海域で寄与し、この海域で恒流と類似しているため湾口部の恒流は潮汐が主因を成すものと考えられ、この海域ではあまり季節差がないことからいえる。

② 吹送流は湾内全域で流速が大きく、西岸沿いを除く湾全域で恒流と類似している。さらに観測値が季節的変動を示すこと、風と恒流の相関が高いことから湾内の恒流は風によって形成され则认为られる。

③ 密度流は湾内西岸の恒流の要因となっている。また、恒流と密度流を比較した場合、恒流の方が南下流の幅が狭く、風のおしつけの効果がみられる。さらに、上層の南下流、下層の北上流によって湾の縦断方向の鉛直循環もあるように思われる。

イ) 潮流の季節的変動 下げ潮、上げ潮時は、上下層ともそれぞれ湾奥から湾口へ、湾口から湾奥へ向かう流れとなり、流速は湾口部が速く湾奥部が遅いという両期の共通性を示すが、湾内においては、冬期では上層が下層に比べて速いものに対し、夏期では逆の場合もある。これは、冬期の流れが海底摩擦の効いた上下層一体の流

れであるのに対し、夏期は密度躍層により上下層の流れがある程度分離しているためと考えられる。

干潮、満潮時は湾内においてはそれぞれ恒流に近いパターンを示し、上下層異なった流れとなるが、湾口部では下げ潮、上げ潮の影響が残り、上下層一様の流出、流入を示す。また、これら両者の流れがぶつかる海域には環流が生じるようである。

4. おわりに

今回の調査結果をまとめると以下になる。

① 東京湾の恒流は、寒候期は時計回りの環流、暖候期は、明確でないが、反時計回りを示

唆する流れが表われる。

② 東京湾の恒流形成要因として、潮汐残差流、吹送流、密度流があり、潮汐残差流は湾口部に、吹送流は、西岸域を除く湾全域に、密度流は西岸域で強く作用する。

③ 冬期の潮流は、上下層一体の流れであるが、夏期の潮流は、密度躍層によってある程度分離している。

なお、調査の実施にあたって貴重な助言をいただいた都立大学 堀口孝男教授、理化学研究所 宇野木早苗主任研究官、運輸省港湾技術研究所 堀江毅室長に、この場をかりて深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小平野弘: 東京湾の潮流, 水路要報, 25 号, pp. 245~253, 1951.
- 2) 山田紀男: 東京湾の潮流, 水路要報, 91 号, pp. 85~90, 1971.
- 3) 東京電力(株)・新日本気象海洋(株): 東京湾流動調査報告書, 230 pp., 1972.
- 4) 長島秀樹・岡崎守良: 冬季における東京湾の海況, 沿岸海洋ノート 16 巻, pp. 67~75, 1979.
- 5) 岡崎守良: 冬季の東京湾口における観測から, 海洋科学, 11 巻, pp. 196~207, 1979.
- 6) 運輸省第二港湾建設局: 東京湾海洋構造調査報告書(第四報), 1979.
- 7) 運輸省第二港湾建設局: 東京湾口航路潮流調査報告書, 1979.
- 8) 運輸省第二港湾建設局: 東京湾口航路に係る潮流計算調査報告書, 1980.
- 9) 運輸省第二港湾建設局: 東京湾海洋構造調査報告書(第五報), 1980.