

東京湾における成層期の流れ場

日比野忠史*・中山恵介**・岡田知也**

1. はじめに

東京湾周辺の大都市間交通網の整備は今後益々必要性の高いものになっている。大都市間交通網の整備において東京湾の重要性は高く、一方で、水産やアメニティーに関して豊かな自然の恩恵を受けている。東京湾の整備においては水質環境保全・向上への努力は不可欠であり、環境と調和のとれた高度な発展が望まれている。東京湾は、房総半島と三浦半島に囲まれた袋状の内湾である。通常、房総半島先端の洲崎と三浦半島の剣崎以北が東京湾と定義され、富津岬と観音崎より北側が内湾、南側が外湾と呼ばれている。東京湾全体では面積約 1380 km²、平均水深は約 40 m である。東京湾内湾は面積約 960 km²、平均水深約 15 m で、京浜港（西側）沿いに、深くなっている。外湾に入ると急激に水深が深くなり、外湾口中央（浦賀水道）では水深約 300 m になっている。久里浜湾から数 km 沖では水深 200 m を越えている。

相模灘の大部分は黒潮系の海水によって占められているが、相模湾に親潮系の海水が流入してくる場合には急潮と呼ばれる非常に速い流れが東京湾に向かって流れ込むと考えられている。通常時には、黒潮の流れによって東京外湾では反時計回りの緩やかな環流があるものと考えられており、全体として、房総半島側および下層から外海水が東京湾へ流入し、三浦半島側の表層から東京湾系水が流出していると言われている。港湾技術研究所、海洋環境部による久里浜湾周辺（東京湾湾口）、大船渡湾（三陸）、三田尻港（周防灘）での観測では、外湾の海水流入によって港湾内の水質が劇的に変化していることを見出されており、内湾での水質変化を論じるためには湾内に流入する外海水の特性や流れの機構を知ることが極めて重要である。

本研究では東京湾における流れ場を中心とした自然環境を理解することを目的として、成層期の数ヶ月にわたる広域かつ連続の流動観測を行った。成層期における東京湾での水温・塩分分布の特徴は外湾においても躍層が形成されていることである。内・外湾の境界にある第三

海堡における 1946 年夏季の第二港湾建設局による 30 日間の測流では、上層で内湾から外湾へ流出、下層で外湾から内湾へ流入する残差流が観測されていることや残差流の流向が不安定になることが明らかにされており、外湾での成層状態が内湾の海水交換に与える影響が大きいことが示されている。

2. 本論文で用いたデータと観測の概要

東京湾内湾での海水交換機構を明らかにするために、本研究では東京湾全域のクロロテックによる STD 観測と係留点での水温・塩分・流速等の連続観測を行った。図-1 に本研究で行われた観測地点を示す。水温・塩分の連続観測は 3 地点（○；久里浜湾湾口；水深 6.5 m, 本牧沖；10 m と 22 m, 横須賀沖 53 m）、集中観測では 22 地点（図-1 の●）で水温・塩分・溶存酸素等の鉛直プロファイルを計測した。計測間隔は連続観測では 10 分、STD 観測では 10 cm としている。横須賀沖 53 m では ADP によ

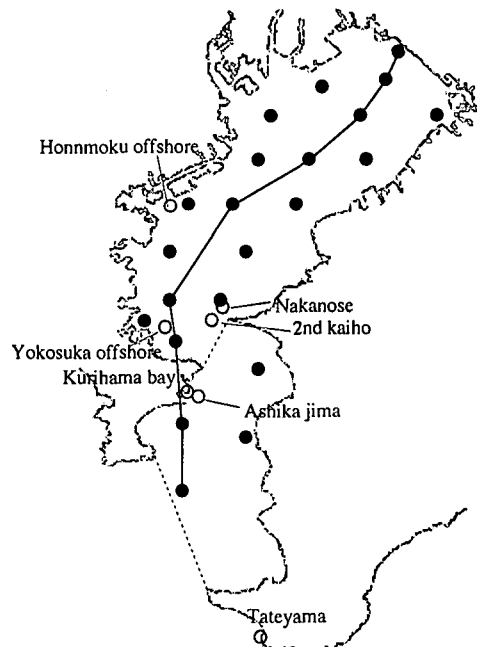


図-1 観測点（○：連続観測，●：広域観測点）

* 正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四地域環境工学講座
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部環境評価研究室

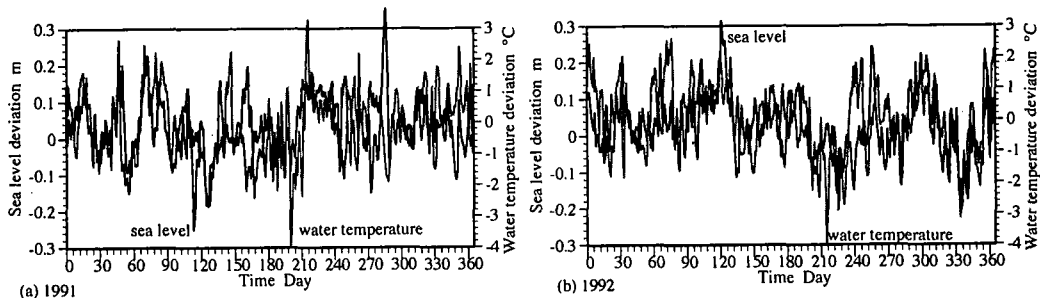


図-2 日平均水位 (1977-1996 の平均値との偏差) と館山での表層水温 (1985-1995 の平均値との偏差) の関係

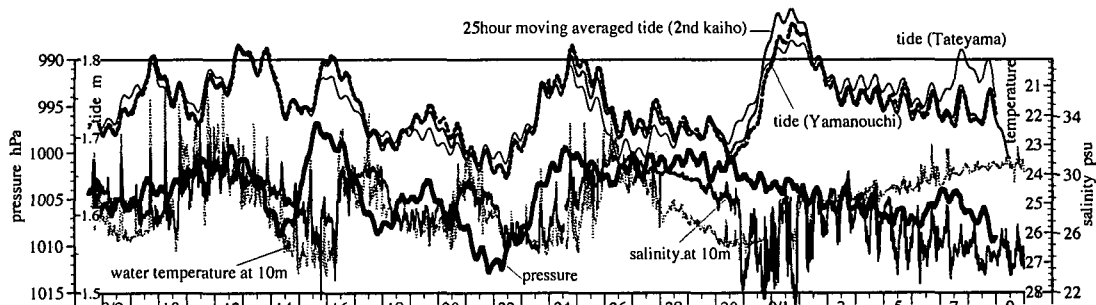


図-3 本牧沖での塩分・水温、館山、第二海堡と山之内での水位および横浜での気圧の関係 (1998. 8. 7-9. 9)

る流速分布の計測を行っている。また、館山の水温・水位は気象庁の観測によっている。

3. 外海水位の変動と海水交換

3.1 東京湾境界での水位と水温の変動

図-2 に (a) 1991 年, (b) 1992 年の館山での並年との水位偏差と水温偏差の経時変化を示した。図から水位変動と水温変動の対応が良いことがわかる。水位と水温との対応が良いのは東京湾に流入する水塊は黒潮流路との関連が強いためと考えられる。黒潮の内と外では水位差が約 1 m, 水温差は約 5°C ある。すなわち、黒潮が東京湾に接近することによって東京湾境界での水位と水温は上昇し、両者の相関は高くなる。ちなみに、水位と水温の相関は黒潮流路によって異なり、非蛇行接岸型や八丈島西側で大蛇行する場合には相関は悪くなっている (日比野ら, 2000)。

3.2 気圧・水位変化に伴う内湾水の流動

図-3 に 1998 年 8 月 7 日～9 月 10 日の本牧沖水深 10 m での水温、塩分および館山、第 2 海堡および本牧 (山ノ内) での 25 時間移動平均潮位 (水位) と気圧 (横浜) を示した。図から 8 月 26 日頃までは水位および気圧変化との対応が良く、本牧沖での塩分・水温変化との対応も良い (水位上昇に伴って塩分・水温上昇) ことがわかる。水位上昇に伴って本牧沖上層で水温・塩分が上昇するのは図-2 で示したように外湾水の内湾への流入があるた

めと考えられる。8 月 30 日頃からの水位上昇は気圧変化と対応しておらず、本牧沖上層での急激な塩分低下が観測されている。これは、河川流出 (洪水波の伝播) によって湾内での水位が上昇したためである (詳細は 4.2 節で述べる)。これらの現象は、成層期における内湾域での海水流動に対して気象変化が主要な外力となっていることを示している。以下では気象の変化によって起こる内湾水の海水交換について検討する。

4. 気象変化と東京湾内湾水の海水交換

4.1 成層期の外海水位の変動に伴った海水流動

図-4 には横須賀沖低層に低水温塊が流入した時 (1999 年 9 月 16 日 15:10-16:00) の横須賀沖における流速成分 (▲: 海底+2~30 m; 下層, ●: 31~45 m; 中層, ○: 46~53 m; 上層), 図-5 には 9 月 13~19 日に本牧沖 (水深 10 m, 22 m), 横須賀沖 (水深 53 m) および久里浜湾湾口部において観測された水温、溶存酸素、塩分、流速 (南北成分, 正が北方向, 底上 10 m, 35 m, 51 m), 潮汐 (太線は日平均水位, 右軸目盛), 横浜気象台における気象条件が示されている。流速は横須賀沖海底 (-53 m) に設置された ADP (超音波流速プロファイラー) によって 1 m 毎に計測されたものである。なお、横須賀沖低層に低水温塊が流入する以前 (13~15 日) には本州に秋雨前線が停滞しており、14 日には TY 9916 が宮崎に上陸 (15 日に TD 化) している。

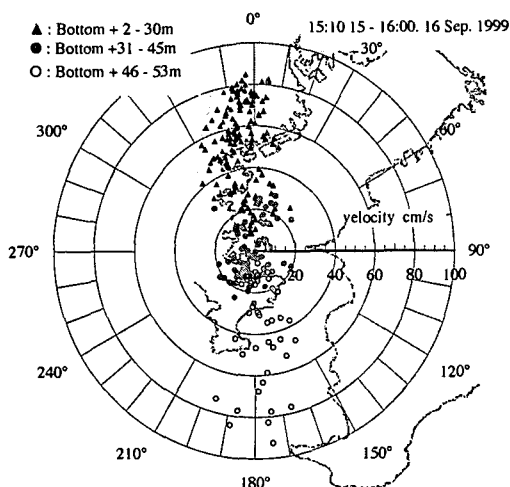


図-4 横須賀沖における流速プロファイル
(測定間隔 1 m, ADP 設置位置 - 53 m)

1) 外海の水位低下と湾外水の内湾下層への流入

9月13～15日に発達した秋雨前線, 低気圧(TY 9916)の影響によって東京湾周辺の水位上昇が起こった後, 9月15日18時頃には前線が消滅し, 低気圧(TD)が東京湾北西を通過したために, 気圧上昇・水位低下が起こり, 東京湾から湾外に向かう流れ(上層)が生じている。湾口部(横須賀沖)での流速プロファイルは水温低下が生じた16日15:40(上げ潮)に低層で80 cm/sを越える湾奥方向の流れが生じている(図-4)。その2潮汐(1日)前に上層での転流(湾奥方向流速0.5 m/sから湾外方向流速0.5 m/s), 低層湾奥方向への流速の増大および水位低下(気圧上昇)が生じている。この時, 北西方向の風速が上昇し始め(1 m/s), 55 mm/hの降雨が観測されているが, 横浜での風・雨のみによってこの転流を説明することは難しい(図-5)。

図-5から①横須賀沖の海底(水深53 m)における水温の急激な低下($18^{\circ}\text{C} \rightarrow 15^{\circ}\text{C}$)時には塩分の上昇(34 → 34.5)と顕著な下層流速の増大が観測されていること, ②下層流速の増大は上層流速の転流後に起こっていること, ③気圧の上昇と潮位低下に伴って上層流速の転流後から起こり始めていること, ④本牧沖22 mと横須賀沖53 mの水温変化のパターンが類似していること, ⑤本牧沖22 mでの塩分と溶存酸素の日周期以上の変化が対応しており, 横須賀沖53 mで急激な水温低下があった後は日周期の変動も対応していることがわかる。すなわち, 低気圧の通過に伴って外海の水位低下→内湾上層水塊の流出→内湾下層への外湾水の流入が生じており, 外海水は本牧沖で奥まで流入し, 湾奥に溶存酸素の供給を行っていることがわかる。なお, 水位低下後の上層での転流は気圧上昇後, 直ちに起きるのではなく, 下げ潮に伴っ

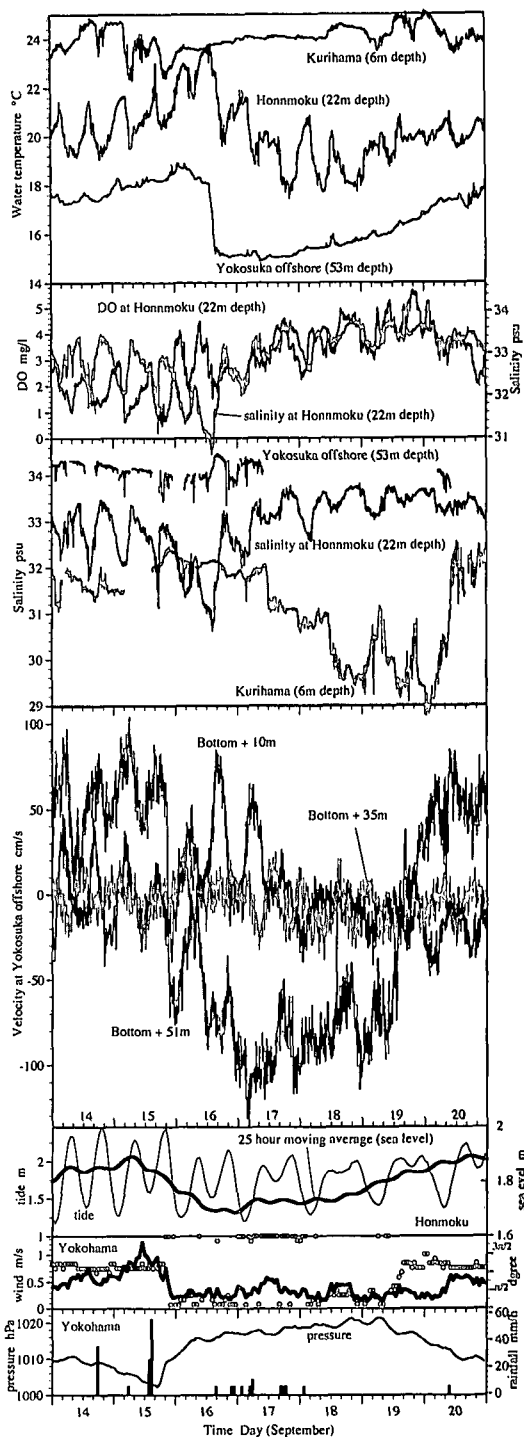


図-5 水温, 塩分, 溶存酸素流速, 潮汐, 気象要素の経時変化

て起きている。

2) 内湾上層水塊の流出と高気圧の張り出し

横須賀沖上層(海底上51 m)流速の変化は気圧, 水位

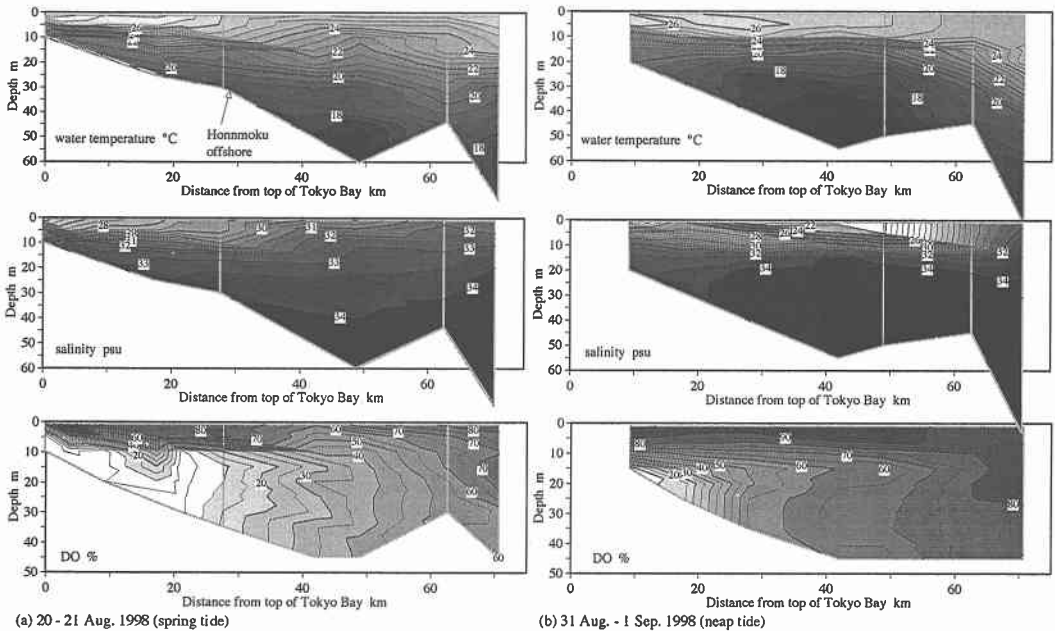


図-6 成層期の東京湾縦断水温、塩分、溶存酸素（飽和度）分布

（高気圧の張り出し）との対応が良い。気圧上昇（水位低下、9/15 18:00 頃）後に上層流速の転流（流入→流出）が生じ、気圧が低下（9/19 10:00 頃）するまで流出（南方向への流れ）が継続している（図-5）。横須賀沖上層水塊が流出している期間には本牧沖 22 m には外海水（高塩分・低水温）の流入が継続し、久里浜での塩分が低下（東京湾内湾水が湾外に流出）している。横須賀沖下層での湾奥に向かう流れは水位が上昇傾向になるまでの上げ潮期間に生じている。

以上のように、低気圧（停滞前線、台風）通過後に起こる外海の水位低下が成層期の東京湾における海水交換を促進する主要な外力であることが考えられる。

4.2 河川流出に伴った湾内水位上昇による海水流動

図-6 には (a) 洪水前；1998 年 8 月 20～21 日と (b) 洪水後；8 月 31～9 月 1 日に観測された水温、塩分と溶存酸素（飽和度）の断面分布、図-7 には 8 月 19 日～9 月 2 日の荒川河口、本牧沖、第 2 海堡での 25 時間移動平均水位、図-8 には図-6(b) に対応する観測の塩分の水平分布（水深 1 m と 10 m）およびプリュームに沿った観測点の塩分プロファイルが示されている。この期間の水位、気圧等は図-3 に示されている。

図-6 に示した洪水前と洪水後を比較すると、洪水後には水温 18°C、塩分 34 の等値線が湾内中層で盛り上がり（溶存酸素の上昇）、湾外から溶存酸素を含む水塊が下層に流入しているのがわかる。さらに、図-7 と 8 から湾内水位は河川水の流出に伴って急激に増加しており、①

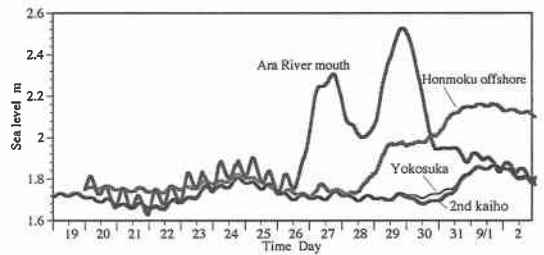


図-7 荒川河口、本牧沖、横須賀新港、第 2 海堡での 25 時間移動平均水位（19 Aug.-2 Sep. 1998）

河川プリュームが湾口方向に伝播していること、②河川プリュームは湾全体に分散しておらず、湾内西側沿いに伝播していること、③第 2 海堡の西南西約 7 km にある横須賀新港で水位が早く上昇している（29～31 日間でのみ水位差）ことがわかる。洪水（TY 9804）後に湾内下層への外湾水の流入（海水交換）が起こっているのは、8 月 29 日頃からの河川水の流入による上層水塊（河川プリューム）の湾外への流出と密接に関連していることが推測される。すなわち、内湾上層の海水密度が多量の河川水によって小さく、かつ、湾内水位の上昇（湾内の水塊体積の増加）によって湾内上層水が湾外に流出し、これを補償するために外湾水が湾内下層に流入したと考えられる。

次に、水平水面での鉛直 2 次元におけるプリュームの伝播速度（Simpson・Britter, 1997）を用いてプリューム

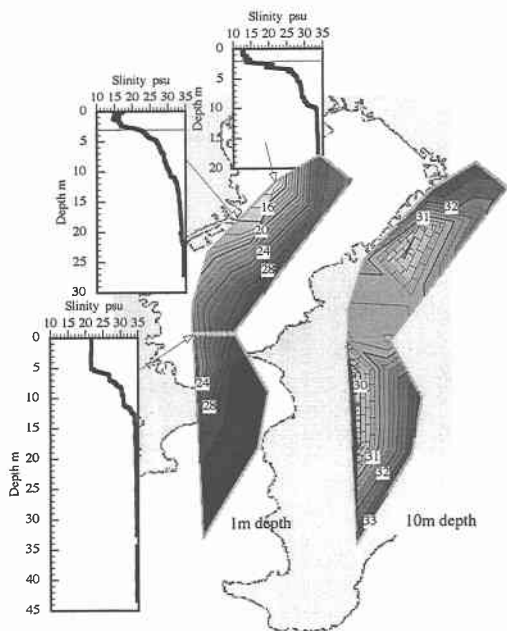


図-8 東京湾における塩分 (1 m, 10 m 水深) の水平分布および塩分プロファイル (31 Aug.-1 Sep. 1998)

討が必要であるが、洪水による湾内水位上昇と湾内上層水の密度低下によっても外海水位変動による場合とともに成層期の海水交換 (上層からの流出, 下層への流入) を促進させる主要な要因であると考えられる。

5. おわりに

東京湾には相模湾 (本州南岸) 固有の冷水塊や黒潮系の暖水塊が流入し、東京湾内の海水交換を促進している。本論文では、東京湾に流入する水塊とその機構 (外力) について検討した。以下に結論をまとめる。

(1) 黒潮は高水温・高水位の水塊を有しており、黒潮が東京湾に接近すると東京湾境界での水温と水位は上昇する。このために、館山での水温変動と水位変動の相関は高く、東京湾外湾の境界水位によって水温の境界条件を与えることが可能となる (水温プロファイルのモデル化は必要)。

(2) 成層期には非成層期に卓越する朔望周期の流れの影響は小さい。成層期における内湾域での海水流動に対して気象変化が主要な外力となっており、気象変化に伴う外海水位の低下や洪水ブリュームの伝播によって内湾の海水交換が促進されている。

①外海水位低下に伴った海水流動 低気圧の通過に伴って外海の水位低下→内湾上層水塊の流出→内湾下層への外湾水の流入が生じており、外海水は本牧沖に奥まで流入し、湾奥下層に溶存酸素の供給を行っている。

②河川ブリュームの伝播に伴った海水流動 内湾上層の海水密度が東京湾湾奥 (荒川、多摩川等) から流出した河川水によって小さく、かつ、湾内水位の上昇 (洪水波) によって湾内上層水が湾外に流出 (河川ブリュームが内湾上層水塊を湾外に連行) し、これを補償するように湾内下層に湾外水が流入することで海水交換が促進される。

本論文は 1998-1999 年に港湾研究所で行われた東京湾観測の一部をまとめたものである。東京湾観測の全般については港研報告 Vol. 39, No. 1 を参照されたい。

謝辞: 本観測の実施に関しては運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所に多大なる御支援をいただいた。海域での水温は海況解析データ (気象庁), 気象庁海洋観測資料 No. 86 を用いている。ここに、記して謝意を表する。

参考文献

- 日比野忠史, 野村宗弘, 岡田知也, 古川恵太 (2000): 東京湾における密度構造の変化と流れ場—黒潮の流れと東京湾—, 港湾技術研究所報告, Vol. 39, No. 1, pp. 25-55.
- J. E. Simpson and R. E. Britter (1979): The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface, J. Fluid Mech., Vol. 94, part 3, pp. 477-495.

の伝播形態について検討する。伝播速度 U は次式で近似的に表される。

$$U = \sqrt{g h_0}$$

ここに, $g = (\rho_2 - \rho_1)g/\rho_1$, ρ_1 はブリューム内の密度, ρ_2 は海水密度, h_0 はブリューム厚さである。

実海域においてはブリュームの形状、密度状態を測定することが難しく、ブリュームは時間とともに形状を変えて伝播しているために上式で伝播速度を求めることは困難であるが、図-6 と 8 から、 $\rho_1 = 1013.4 \text{ kg/m}^3$ (塩分 22, 水温 25.5°C), $\rho_2 = 1015.1 \text{ kg/m}^3$ (塩分 24, 水温 25°C), $h_0 = 2 \text{ m}$ (多摩川河口付近でのブリューム厚を用いた) とすると、伝播速度は 0.18 m/s と求められる。荒川河口から本牧沖は約 25 km (第 2 海堡は約 50 km) であるから、この速度でそれぞれの地点に到達していると、本牧沖までは約 1.6 日で到達する。洪水流が非定常で 30 日には減衰し始めていること、潮流があること等を考えれば、計算結果は実測値を比較的良好に表している。さらに、本牧沖への到達時間は約 2 日、第 2 海堡へは約 4.3 日で到達しており、伝播速度の減衰は小さい (図-7) ことから、河川ブリュームが鉛直 2 次元的な振る舞いをしていえる。

この機構 (河川ブリュームが外湾に流出することによる湾外水の下層への貫入、ブリュームによる湾内水の連行、フロント前面での混合等) については、さらに、検