

## 夏季の東京湾の流動の観測

— 閉鎖性水域の風による流動及び物質移動等の調査・評価手法に関する研究 —

小田巻 実・佐藤 敏 : 沿岸調査課  
 松島 弘・西田浩志  
 下平保直 : 第三管区本部水路部

### Observation of Coastal Circulation of Tokyo Bay in Summer Prediction of Wind - Driven Currents and Mass Trans Port in an Enclosed Sea

Minoru Odamaki, Satoshi Sato : Coastal Surveys and Cartography Div.  
 Hiroshi Matsushima, Hiroshi Nishida  
 Yasunao Shimohira : Hydro. Dept. 3rd R. M. S. Hqs.

#### 1. 研究の目的

水路部では、東京湾のような内湾・内海域を対象に潮流図を刊行している。その中身は、潮流図という題名どおり、潮汐の上げ下げにともなった潮流の流況を表したものであり、他の要因による流れは含まれていない。従って、潮流図は、上げ潮流の最強、転流時、下げ潮流最強、転流時等の潮時毎に示されている。しかるに、実際の海面水位が台風や低気圧の通過などにより予報水位からずれるように、海上を強い風が吹けば、潮流予報もずれてくる。当然、潮流の弱い海域はその影響が強く出ることが考えられる。本研究の目的は、潮流以外の流れの原因として最も大きいと考えられる風による流れの調査・解析手法、さらに、流れと風に乗った物質の移動の予測・評価手法を開発することである。

#### 2. 研究の内容

潮流成分を調査するには、潮汐周期を目安として1日あるいは半月、1月等の観測期間を設定するが、風に応答する流れを見るには、潮汐周期の変化の上にさらに風の効果が乗っているので充分長い観測期間を取る必要がある。そこで、本研究に取り掛かるにあたり、第1年度に冬季の、第2年度に夏季の観測を実施したのち、第3年度に調査結果に基づく流動と物質移動の予測・評価モデルの開発、第4年度に検証実験を行うこととした。なお、昭和63年度の冬季の観測結果については、既に佐藤敏(1990)により報告されている。

##### 2.1 観測の概要

平成元年度は、昭和63年度と同様、図1及び表1に示す4点において6層の定置測流、千葉灯標において3層の海上風と気温の観測を平成元年9月11日から10月21日まで40日間実施するとともに、今年度は10月11、12日に当庁の測量船「天洋」によって東京湾全体の流況観測を実施した。期間中、係留系が切断されるなどのトラブルにより測点A、Cの0.5m層が9月16-19日の4日間、測点Cの7mと10m層が9月22-29日の8日間欠測したほかは、ほぼ順調であった。

表 1 観測点並びに観測項目概要

観測点	北緯	東経	水深	観測層	観測項目	
定置測流	A	35°34'00"	139°58'30"	15m	海面下0.5, 1.5, 3, 7, 10m, 海底上3m	流れ、水温、電気伝導度
	B	35°28'00"	139°54'00"	20m	海面下0.5, 1.5, 3, 7, 10m, 海底上3m	流れ、水温、電気伝導度
	C	35°33'30"	139°51'30"	15m	海面下0.5, 1.5, 3, 7, 10m, 海底上3m	流れ、水温、電気伝導度
	D	35°27'30"	139°45'00"	25m	海面下3, 7, 10, 15, 20m, 海底上3m	流れ、水温、電気伝導度
海上風観測	35°34'	140°30'		海面上16, 22, 30m	風向、風速、気温	

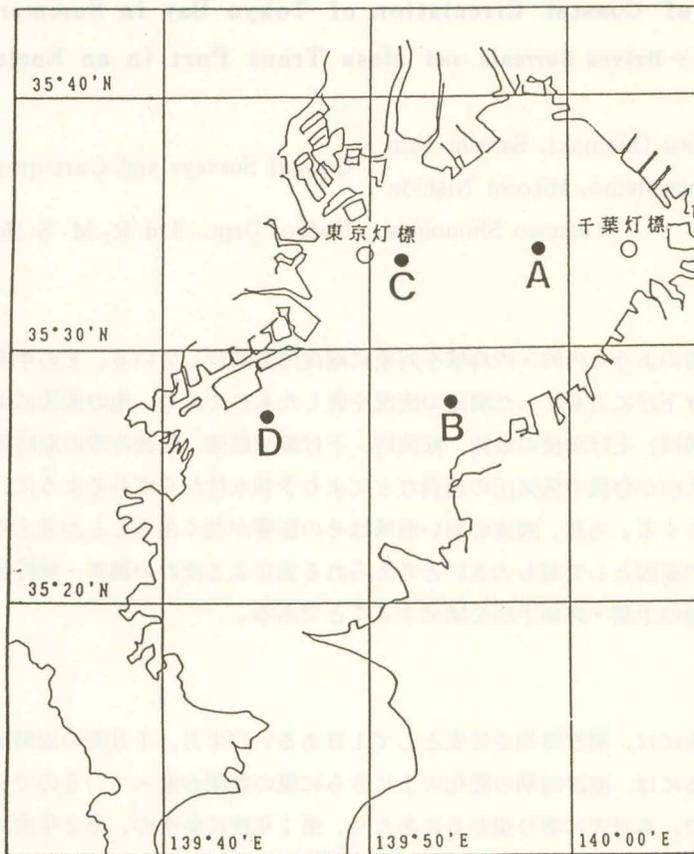


図 1 測点の配置

2.2 観測期間中の気象概況

東京湾においては、冬季は北寄りの、夏季には南ないし南西寄りの風が卓越し、風速は冬季に強く、夏季は比較的弱いとされている。図2に今回観測された千葉灯標の30m層の海上風と気温の時間変化を示す。観測期間の前半は、本州東方にある太平洋高気圧の勢力が強く、南風が吹き気温も20℃以上と高めで夏の特徴をよく示した。後半は、太平洋高気圧の勢力が弱まるとともに西の大陸性高気圧が張り出して西高東低の冬型に近くなり、北風が多くなるとともに気温も低下した。

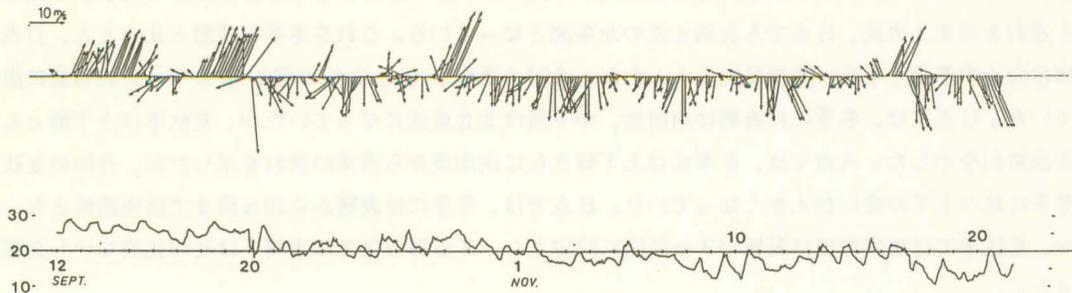


図2 千葉灯標の海面上30mで観測された風と気温

千葉灯標30m層の風を東京湾周辺のものと比較してみると、日平均風速は周辺の地点に比べ約2倍となっていたが、日平均風の風向については大きな違いは見られなかった。そこで、以下の解析については、東京湾の海上風の代表値として千葉灯標の30m層のものを採用することとした。

### 2.3 観測結果

#### (1) 資料処理

資料の解析にあたって、まず2時間以下の成分を除去するローパスフィルターを通して、毎正時値を作成し、基本データとした。さらに、流れの変動を各周期成分毎に検討するために、潮流成分についてはドゥッドソンの方法による1ヶ月の調和分解、長周期成分についてはトンプソン(1983)のタイドカラーフィルターによって算出した。

#### (2) 観測期間中の平均流と平均風

全観測期間中の平均風は、北の風、 $1.8\text{ m/s}$ であった。図3に各測点の平均流の分布を示す。3m層以

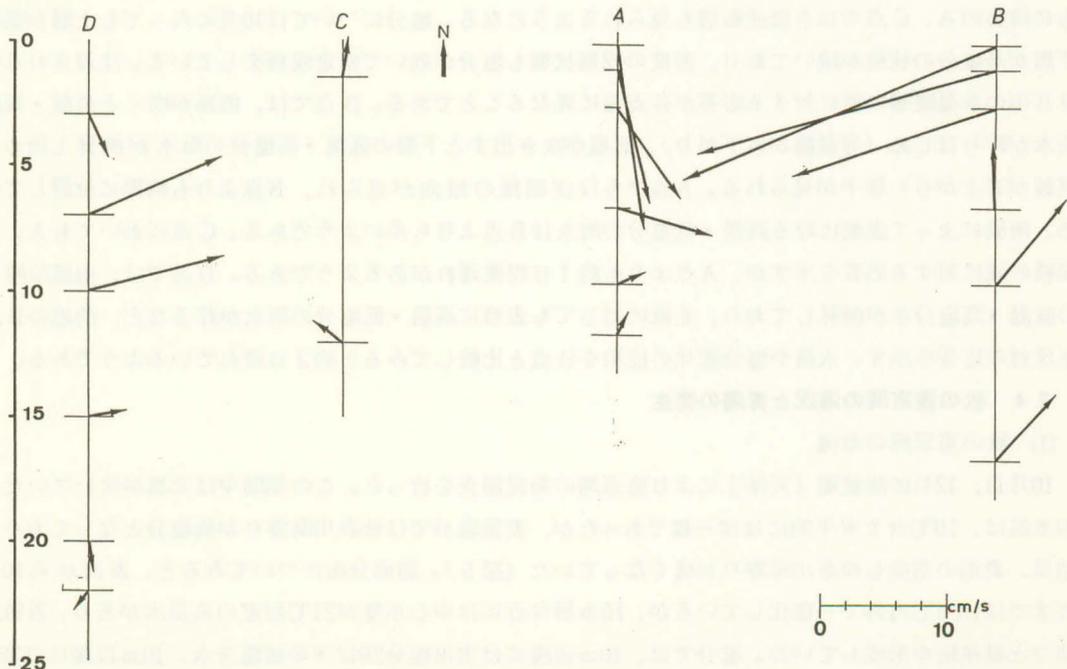


図3 各測点における全期間の平均流分布

浅の表層では、時計まわりに千葉県側を南西に向かう流れが顕著である。ところが中層になると、D点では表層と逆向きの東北東流、B点でも表層と逆の北東流となっている。これを冬季の状態と比べると、D点では表層は両方の季節とも弱い南流傾向にあったが、今回の夏秋季では流れの強い層が7 mと10 m層に限定されていた。C点では、冬季には表層は南西流、中下層は北北東流になっていたが、夏秋季は上下層ともに弱い北流傾向を示した。A点では、冬季には上下層ともに南南東から南東の流れを示したが、今回の夏秋季は、冬季に比べ上下の違いが大きくなっていった。B点では、冬季には表層から10 m層まで西南西流となっていたが、夏秋季では西南西流は表層の3 m以浅に限定され、7 m層以深では表層とは逆の北流ないし北東流であった。

### (3) 海上風・流れ・水温・塩分・密度の長周期成分

図4-1は、各点の流れの長周期成分を1日毎にプロットしたものである。

B点の表層は南風に対してよく反応しないものの、北風になると西南西の流れがすぐに出現するようである。

A点に表層も北風に対しては同じ向きの流れがすぐに出現するが、南風に対しては方向がずれた東向きの流れが出現する。

C点の表層0.5 m層は、海上風と対応して北風の時には南向きの流れとなるが、3 m層になるとその流れが弱くなるだけでなく、時には反対向きになるなど複雑な応答を示している。

D点の表層3 m層は南風に対しては反対向きの南の流れが発生しているものの、北風に対しては同じ方向の弱い流れを示す。ところが、同じD点の中層7 mと10 m層では、北風に対して反対向きの強い北東向きの流れが発生している。

図4-2に各点の水温鉛直分布のイソプレットを示す。各測点とも9月中は7~10 m層付近に水温、塩分密度の躍層が認められるものの、北風が卓越し始める10月2日頃を境に水温躍層が消滅し、一様化するとともに湾奥のA、C点では水温逆転層も見られるようになる。塩分については10月に入っても上層が低塩分で下層が高塩分の状態が続いており、密度の成層状態も塩分が効いて安定成層をしている。注目されるのは、9月中の水温躍層の風に対する応答が各点毎に異なることである。B点では、南風が吹くと高温・低塩分の海水が貯りはじめ（等温線が右下がり）、北風が吹き出すと下層の低温・高塩分の海水が湧昇し始める（等温線が右上がり）様子が見られる。A点でもほぼ同様の傾向が見られ、B点よりも湾奥に位置しているため、南風によって表層に貯る高温・低塩分の海水はB点よりも多いようである。C点においてもA、B点と同様の風に対する応答を示すが、A点よりも約1日程度遅れがあるようである。D点では、南風の時に下層の低温・高塩分水が湧昇しており、北風に対しても表層に高温・低塩分の海水が貯るなど、前述のB点とは正反対の応答を示す。水温や塩分変化の位相をB点と比較してみると約2日遅れているようである。

## 2.4 秋の東京湾の海況と青潮の発生

### (1) 秋の東京湾の海況

10月11、12日に測量船「天洋」により東京湾の海況調査を行った。この期間中は北風が吹いていた。表面の水温は、19°C台で水平的にはほぼ一様であったが、表面塩分では神奈川県寄りが低塩分となっており、その結果、表面の密度も神奈川県寄りが低くなっていた（図5）。鉛直分布についてみると、表面から10 m層付近までは19.5°C内外で一様化しているが、15 m層付近には中心示度が21°C程度の高温水があり、表層水との間で水温逆転を形成していた。塩分では、10 m以浅には実用塩分29以下の低塩分水、10 m以深には33以上の高塩分水が分布しており、この塩分分布が効いて密度的には安定していた。すなわち、秋の東京湾で冷却が

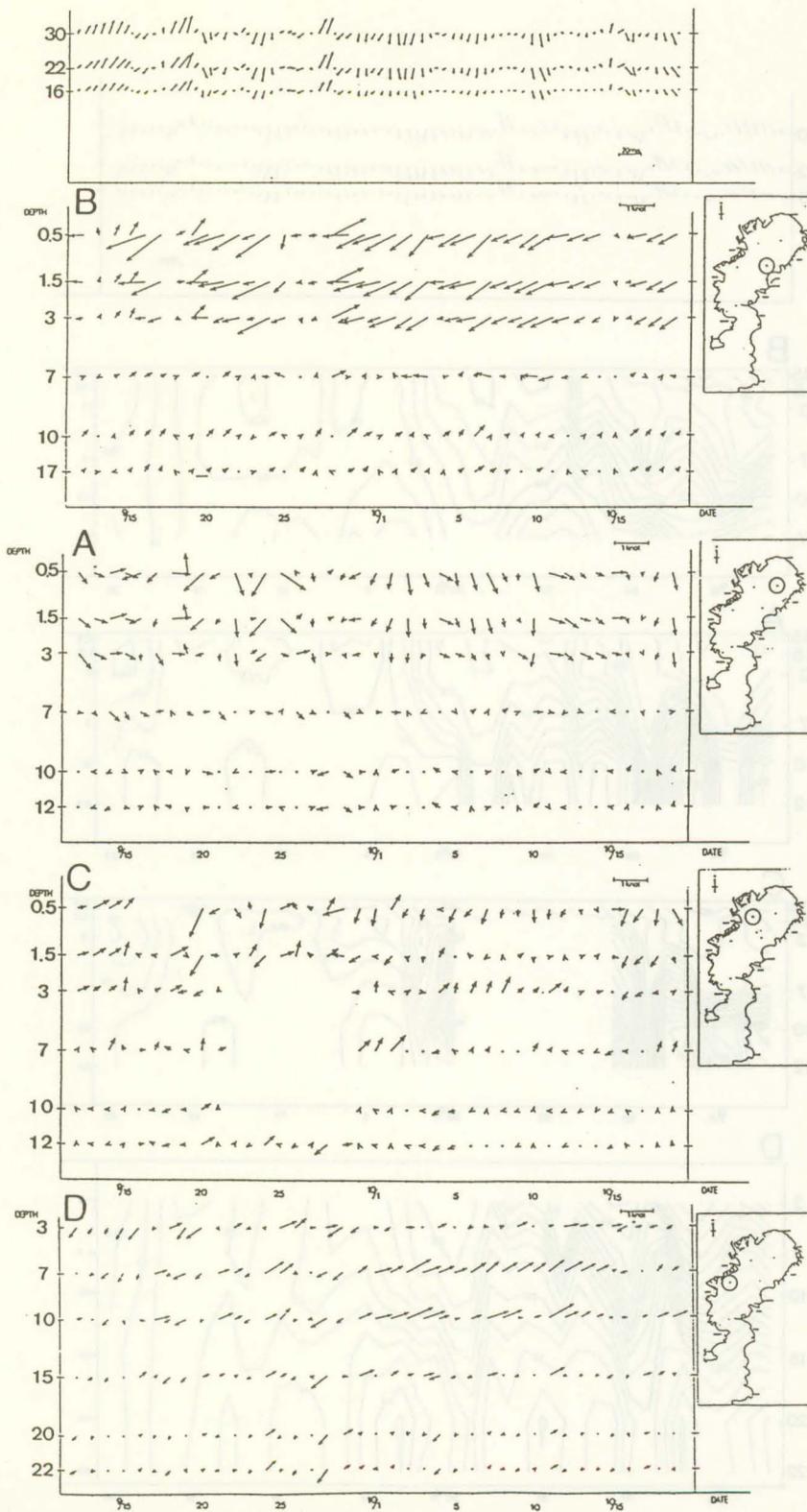


図4-1 各測点の流れの長周期成分，上から海上風，B，A，C，D点

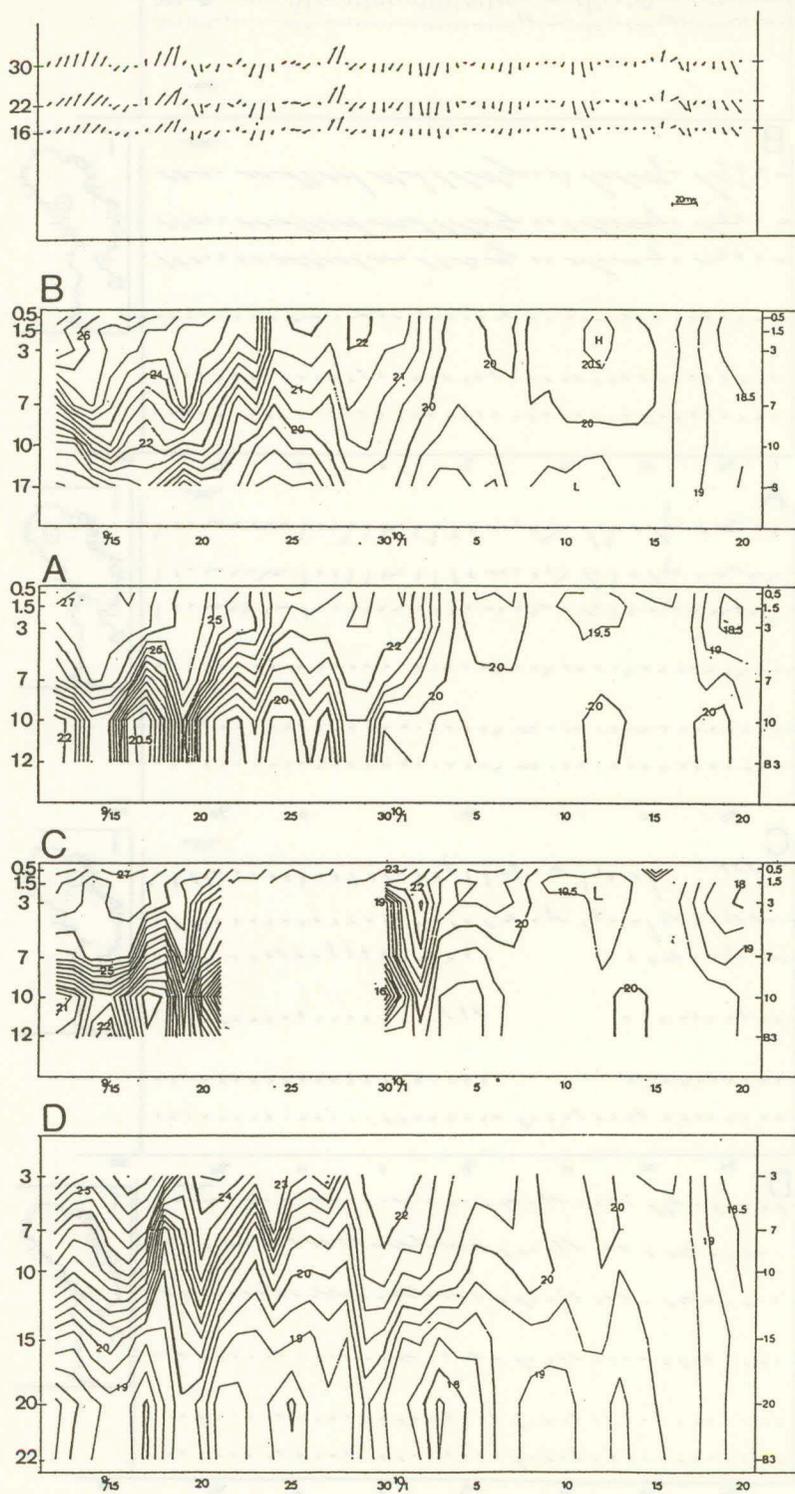


図4-2 各測点の水温の長周期成分, 上から海上風, B, A, C, D点

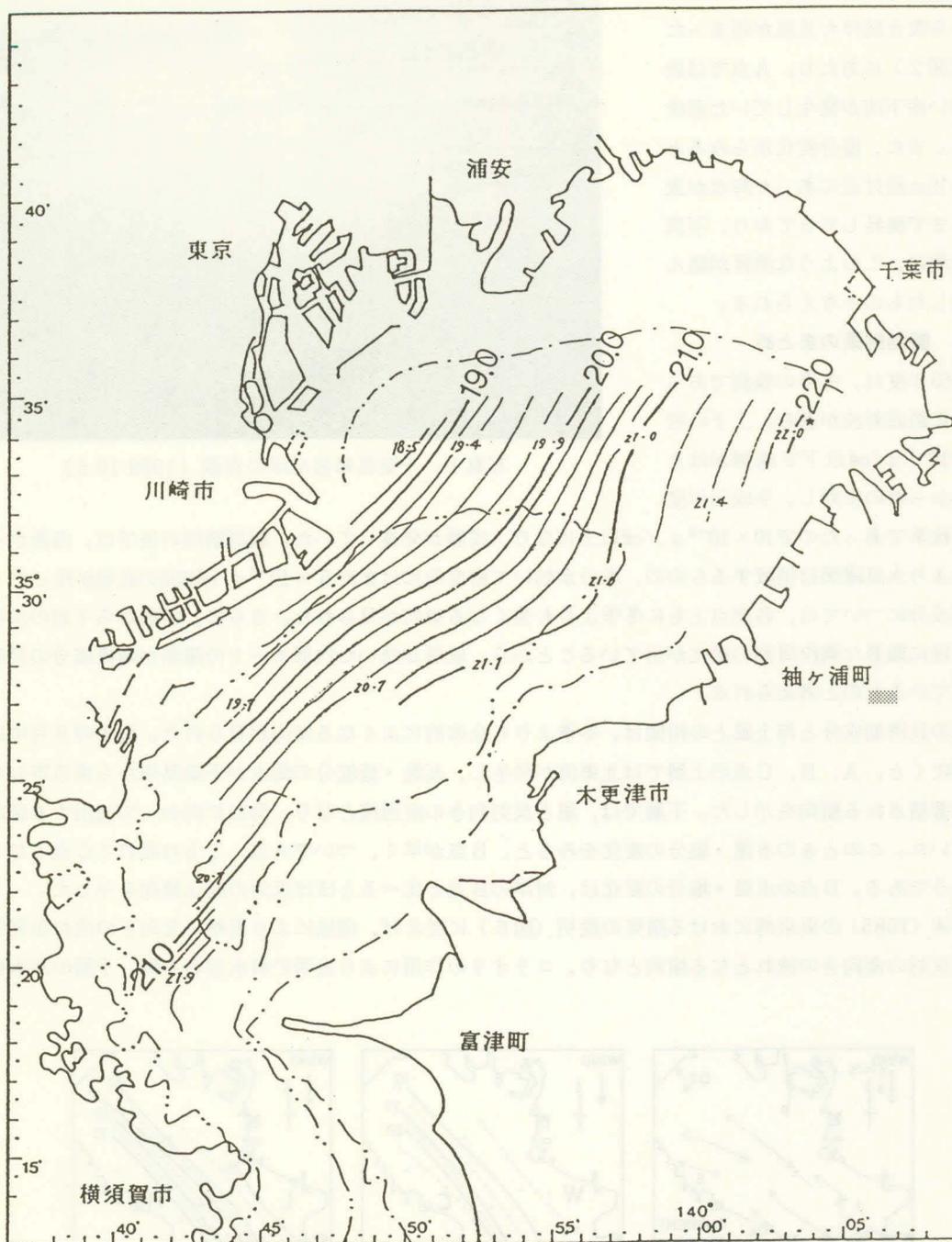


図5 表面密度 ( $\sigma_t$ ) 分布 (1989. 10. 11-12)

始まったものの、密度的にも上下一様となるような対流はまだ始まっていなかったことを示している。

(2) 青潮の発生

観測期間中の10月5日11時30分頃に当庁のヘリコプターから幕張沖に青潮が発生しているとの報告があっ

た(写真1)。この時期は、10月1日頃から吹き続けた北風が弱まった時期(図2)にあたり、A点では表層で強い南下流が発生していた直後である。また、塩分変化からみると7m~10m層付近にあった海水が表面近くまで湧昇してきており、写真1の青潮は、このような湧昇が絡んで発生したものと考えられる。

2.5 観測結果のまとめ

昭和63年度は、冬季の観測であったために鉛直対流が進み、上下の密度差が $10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 以下で成層がほとんどなかったのに対し、平成元年度は、夏秋季であったので $10 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 以上になり、成層が発達していた。観測期間の後半は、海面からの冷却により水温躍層は消滅するものの、塩分が効いて密度的にはまだ $5 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 程度の成層が残っていた。

潮流成分については、各測点ともに冬季よりも強くなる傾向が見られた。さらに、中層から下層の水温・塩分記録に顕著な潮汐周期の変化が出ていることから、成層が効いた内部モードの運動が潮流成分の発達に  
関与しているものと考えられる。

流れの長周期成分と海上風との相関は、冬季よりも全体的によく相関が見られた。前半の9月中は、南風が吹くと、A、B、C点の上層では北東流が発生し、高温・低塩分の海水が千葉県側から東京寄りの湾奥部に蓄積される傾向を示した。下層では、風と反対向きの南西流となり、湾口に向かって流出する傾向となっていた。このときの水温・塩分の変化をみると、B点が早く、ついでA点、1.5日遅れてC点となっているようである。D点の水温・塩分の変化は、対岸のB点と比べるとほぼ反対の変化傾向を示した。

宇野木(1985)の東京湾における湧昇の説明(図6)に従えば、南風により表層に北向きの流れが発生し、下層に反対の南向きの流れとなる傾向となり、コリオリの作用により表層の海水は右方向、下層の海水は左



写真1 千葉県幕張沿岸の青潮(1989.10.5)

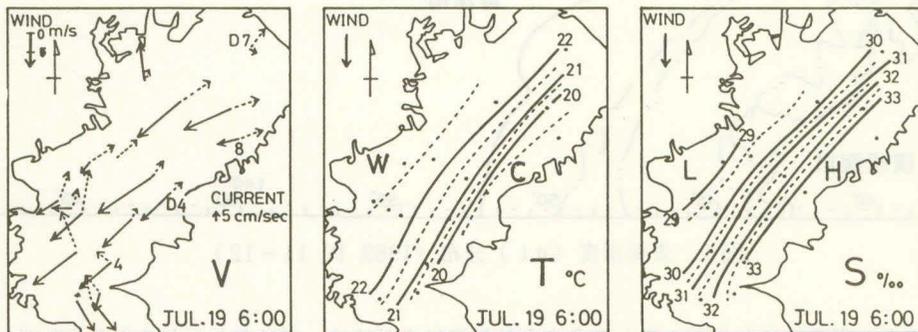


図6 東京湾成層期に北風が吹く場合の、恒流(左、実線は上層、破線は下層)、水温(中)、塩分(右)宇野木(1985)による。

方向に輸送され、千葉県側で沈降、神奈川県側で湧昇が起き、その結果、B点とD点では反対の水溫・塩分の変化が現れたものと考えられる。また、図5の「天洋」の観測時には北風であったため、図6とは逆に、神奈川県側に軽い水が集まって沈降、千葉県側で下層から重い水が湧昇してきていたものと考えられる。

今回の観測では、B点では表層に風と同じ向きの強い流れ、D点では表面近くでは風と同じ向きの弱い流れがあるが中層の7-10m層では風と反対向きの強い流れとなっていた。長島(1982)は、成層のない状態で東京湾の主軸方向に風が吹いて定常となった時の横浜-木更津間の断面流速分布(図7)を示したが、千葉県側の表層は風と同方向で強く、神奈川県側の水深の極大部の中層に風と反対向きの強い流れが出現している。すなわち、千葉県側は浅いため単位の海水が風から受ける力が大きく、神奈川県側の深いところでは単位の海水が受ける力は相対的に弱く、湾の長軸方向に海水が吹き寄せられて生じた圧力勾配によって中層の逆向きの流れが作られている。さらに、長島(1975)の計算による水平循環(図8)では、北風の場合、時計回りの循環が生じ、千葉県側は風と同方向、神奈川県側は風と反対方向の流れとなっている。これらの計算結果と今回の観測による平均流の分布はよくあっている。ただし、前半の時期には南風となっていたのにもかかわらず、時計回りの循環となっており、成層の強かったことも合わせ、風の効き方についてさらに検討する必要がある。

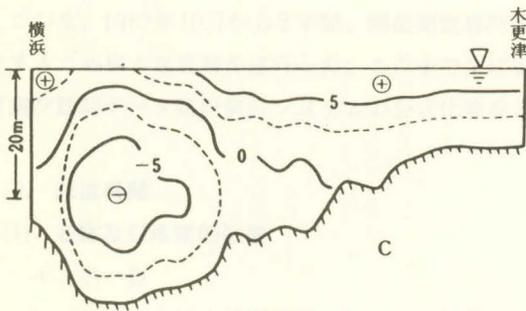


図7 湾の主軸方向に吹く風による横浜-木更津断面内の流れの分布。長島(1982)による。

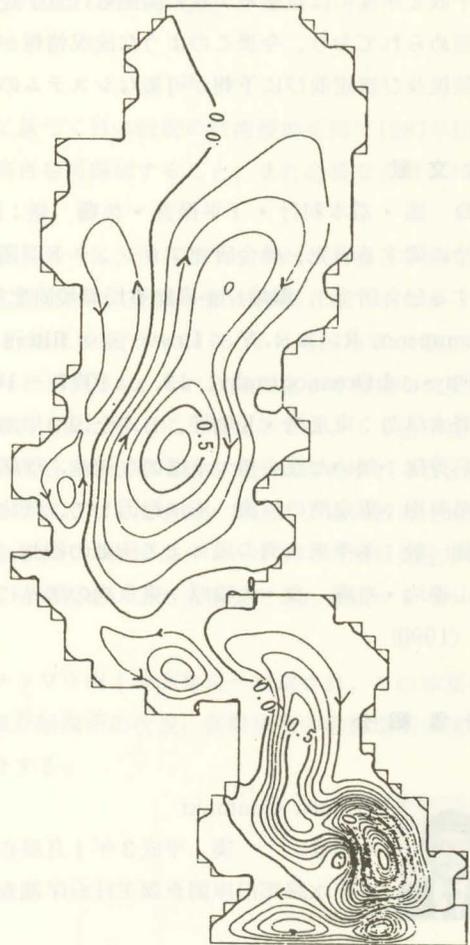


図8 東京湾の主軸方向に吹く風による流れの流量流線分布。長島(1975)による。

さらに、今回の観測では、水溫・塩分の変動が湾奥部を反時計回りに約2日でB-A-C-Dと伝播する様子が見られた。本研究と別ではあるが、松山ら(1990)は、数値計算によりこのような反時計回りの伝播は内部ケルビン波によるものであることを明らかにしている。今回、海上風は4、5日周期で南風と北風が繰り返しており、風が反対向きになる周期と、水溫・塩分の変動が千葉県側のB点から対岸の神奈川県側の

D点まで伝播する周期が近くなっている、内部ケルビン波との共鳴効果により前述の湧昇・沈降が増幅されていることが想像される。

### 3. むすび

今回、観測された神奈川県側の中層でできる風と反対向きの流れは、いわゆる「潮と波が反対向き」の状態となって「潮波」を大きくし、航海上も問題となる現象と思われる。また、水温や塩分の変動が反時計回りに伝播する現象も「青潮」などに関連して注目される。今後、これらの現象をさらに詳しく解析するとともに、平成2年度には数値モデルの開発も行う予定である。さらに、東京湾は、横断道路など巨大プロジェクトが進められており、今後このような流況情報がますます重要となると思われることから、リアルタイムの流況監視及び推定並びに予報が可能なシステムの構築をめざして行きたい。

### 参考文献

塩崎 愈・益本利行・下平保直・佐藤 敏：閉鎖性水域の風による流動及び物質移動等の調査・評価手法に関する研究，総合研究プロジェクト別環境保全研究成果集「昭和63年度海洋・湖沼の汚染防止に関する総合研究」，環境庁企画調整局環境研究技術課編（1989）

Thompson, R. O. R. Y. : Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *Journal of Physical Oceanography*, 13, p. 1077 - 1083 (1983)

宇野木早苗：東京湾・II物理，日本全国沿岸海洋誌，p. 344 - 361 (1985)

長島秀樹：傾いた底を持つ水道の吹送流．理研報告，58，p. 23 - 27 (1982)

長島秀樹：東京湾の恒流-風に起因して，理化学研究所シンポジウム（未印刷）(1975)

佐藤 敏：冬季東京湾の風による流動の観測，水路部技報8，p. 1 - 14 (1989)

松山優治・当麻一良・大脇厚：東京湾の湧昇に関する数値実験，沿岸海洋研究ノート，28，1，p. 63-74 (1990)

### 報告者紹介



Minoru Odamaki

小田巻 実 平成3年1月現在，  
本庁水路部沿岸調査課主任沿岸調査官