

東京湾における漂流の実験とモデル評価 (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 卷実・今西 孚士・福島 繁樹・松島 弘・西田 浩志・鈴木 英一：海上保安庁水路部沿岸調査課
下平 保直・平岩 恒廣：第三管区海上保安部水路部水路課

Drifting Experiment and Model Examination in Tokyo Bay

Minoru Odamaki, Takanori Imanishi, Shigeki Fukushima, Hiroshi Matsushima, Hiroshi Nishida, Ei-ichi Suzuki : Coastal Surveys and Cartography Division, Hydro. Dept., M. S. A.
Yasunao Shimohira, Tsunehiro Hiraiwa : Hydrographic Division, Hydro. Dept., 3rd R. M. S. H.

1. 研究の目的

東京湾は、湾の容積にくらべて湾口が狭く、閉鎖性の強い水域ということができる。このような水域の流れとしては、湾口付近では潮流が強いものの、湾奥にゆくほど潮流は弱まり、相対的に吹送流などの他の流れが強くなる。従って、水域内の海洋環境を考える上で、潮流だけではなく吹送流ほかの流れの実態や発生機構及びそれらに伴う物質移動について十分検討しておく必要がある。

本研究は、閉鎖性水域における風による流れ及び物質移動に対する影響を調査・評価する手法を開発することによって環境保全・災害防止等の施策に資することを目的とし、環境庁の公害防止等試験研究費によって実施した。

2. 研究の概要

(1) 前年度までの経過

本研究では、閉鎖性水域のモデルとして東京湾を選び、風による流動及び物質移動の調査・評価手法の開発を行う。従来の内湾域の調査は潮流を主な対象にしていたため、風の影響を十分に解析できる資料は少なく、また、風及び海洋構造の季節変化も大きいと考えられることから、第1, 2年度にそれぞれ冬と夏の観測を行って実態の把握を行い、第3年度にモデルの開発、第4年度に検証実験を行うこととした。第3年度までの成果は、すでに報告している(1, 2, 3)。

(2) 今年度の研究概要

平成3年度は、総合検証として4点で15日間の流れの観測と2日間の漂流実験を行った。また、7月まで水温鉛直分布の連続観測を行うとともに、毎月の海況観測を行ったが、海況については、前報(3)に詳しいので、ここでは省略する。

数値モデルについては、変化する風を入力して応答を確認する予定であったが、時間積分を長くすると計算不安定を起すことがわかったので、パラメータの設定等を再検討することとし、今回の検証は簡略モデル(4, 5)と比較することとした。

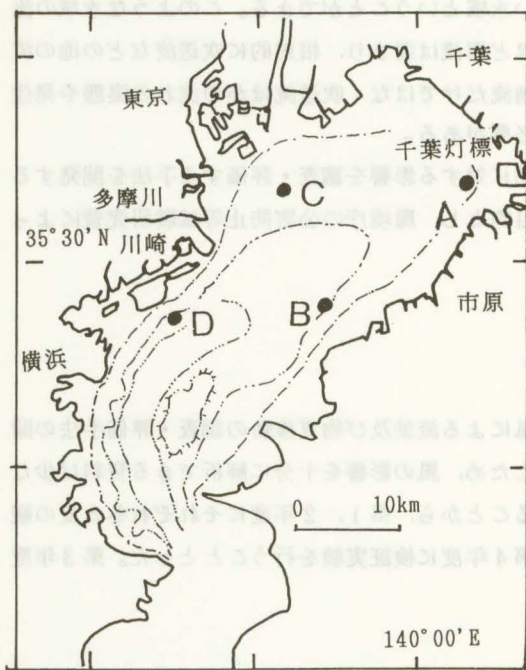
3. 東京湾流動・漂流モデル検証実験観測

(1) 計画と経過

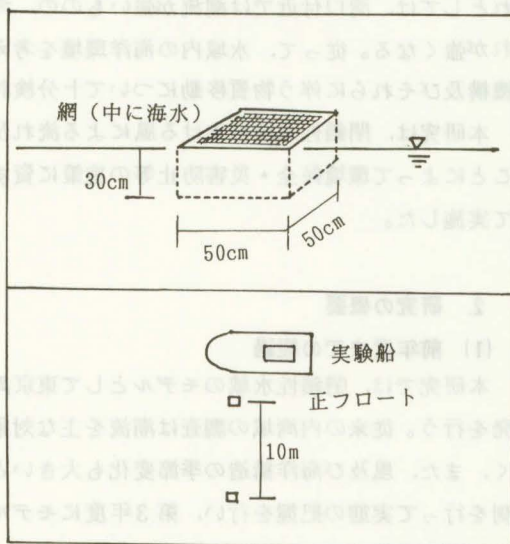
総合的な検証実験観測として4点からの漂流実験を行うこととし、それに合わせて適当な期間の流れと風の観測及び海況調査を行うこととした。

流れの観測点(第1図)は、昭和63年度と平成元年度に合わせることにしたが、湾奥西側の点は海上風観測を行う千葉灯標に合わせた。観測層は表層を密にした4層とし、期間は、潮流などの流れの成分を十分検討できるようにするため15昼夜とした。ただし、千葉灯標のA点は、ブイの設置の都合で海面下7m層のみとなった。測点の位置及び観測層は表1の通りである。

漂流実験については、漂流の基点は流れの観測点と同じとし、漂流物としては、各測点毎に、中に海水が入るキャンパス性のフロートを正副の2個用意した(第2図)。今回の漂流実験では、風圧流をできるだけ少なくするため、フロートの上面がほぼ海面ぎりぎりになるように調節した。位置測定は、GPS(Global Positioning System)により、10分毎に正副それぞれに行った。2個のフロートの距離が著しく離れた場合は、正はそのままで、副を正に近づけ、また、指定航路内に入って航行障害になる場合は、下流の航路外に移動させることとした。漂流実験は、時刻を合わせて4点同時とし、9時から15時までの6時間、2日間行うこととした。



第1図 検証実験観測測点図(平成3年3月)

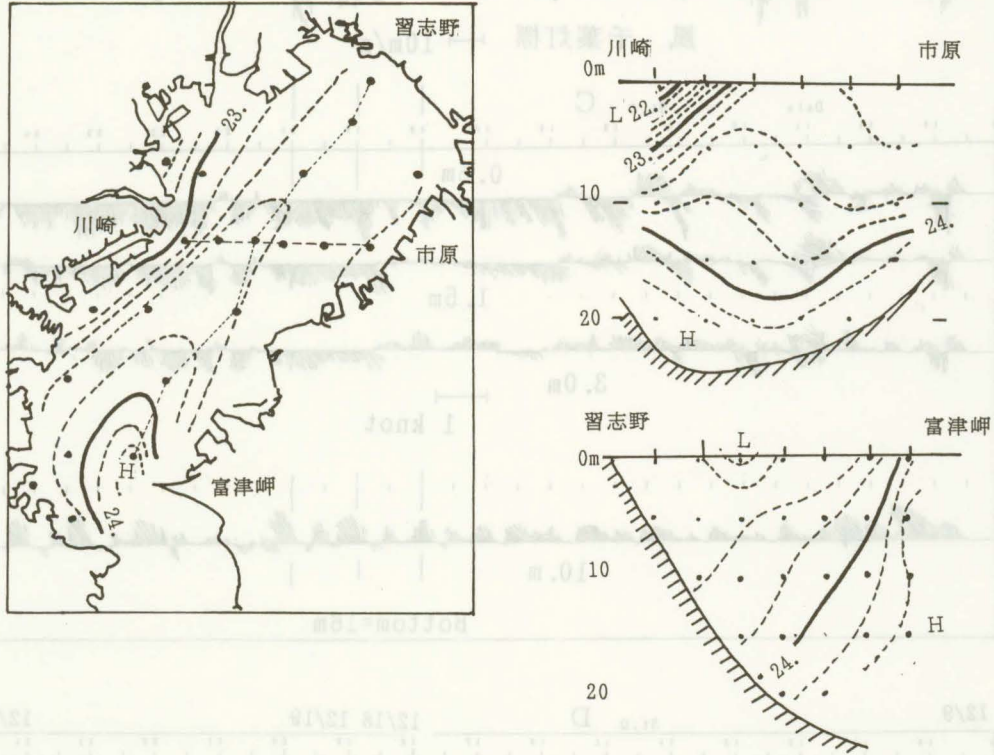


第2図 漂流実験用フロートと放出状況(平成3年3月)

流れと風の観測は12月9日から24日まで、漂流実験は12月18、19日の両日に実施した。

流動・漂流予測のモデルは、平成2年度に開発したものの試行が不十分であったので、従来の半経験モデル(4,5)によった。これは、現在流れについて、吹送流成分は過去から現在までの24時間の風の回帰式によって、潮流成分は調和定数で予測し、合算するものである。この回帰式や調和定数の値は、実際の海面下5m層の観測から算出・整理したものを湾内全体に内挿したものである。

漂流実験観測に合わせて12月17日から20日に行った海況観測（第3図）では、上層に低温低塩、下層に高温高塩の海水が分布し、密度的には上下層で0.001 g / cm³程度の差でありあまり差がなかった。水平的には、湾口に重い水があり、湾内は、中央部に重い水、沿岸に軽い水が分布しており、特に東京から横浜の岸沿いに分布する軽い水が顕著であった。



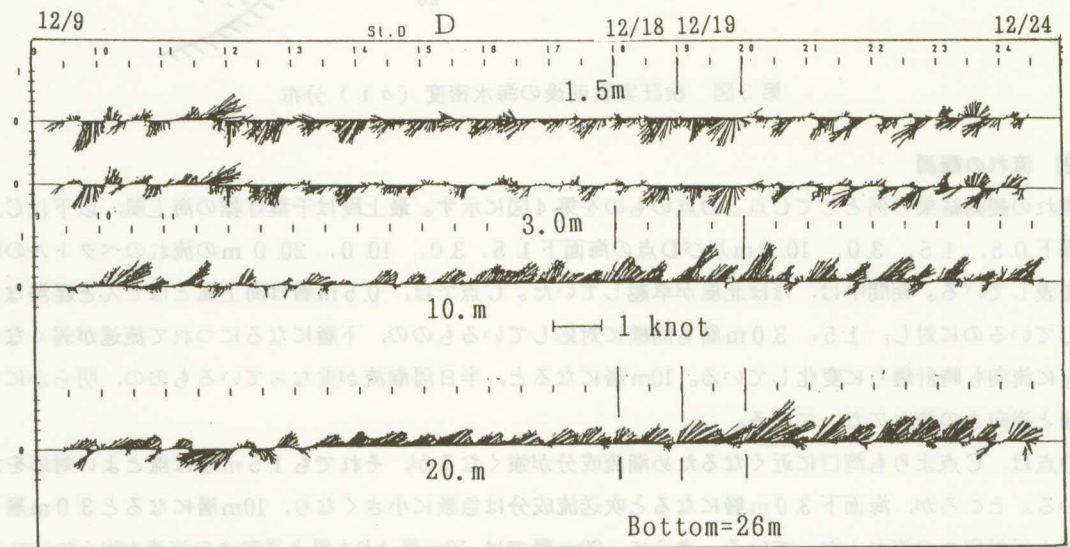
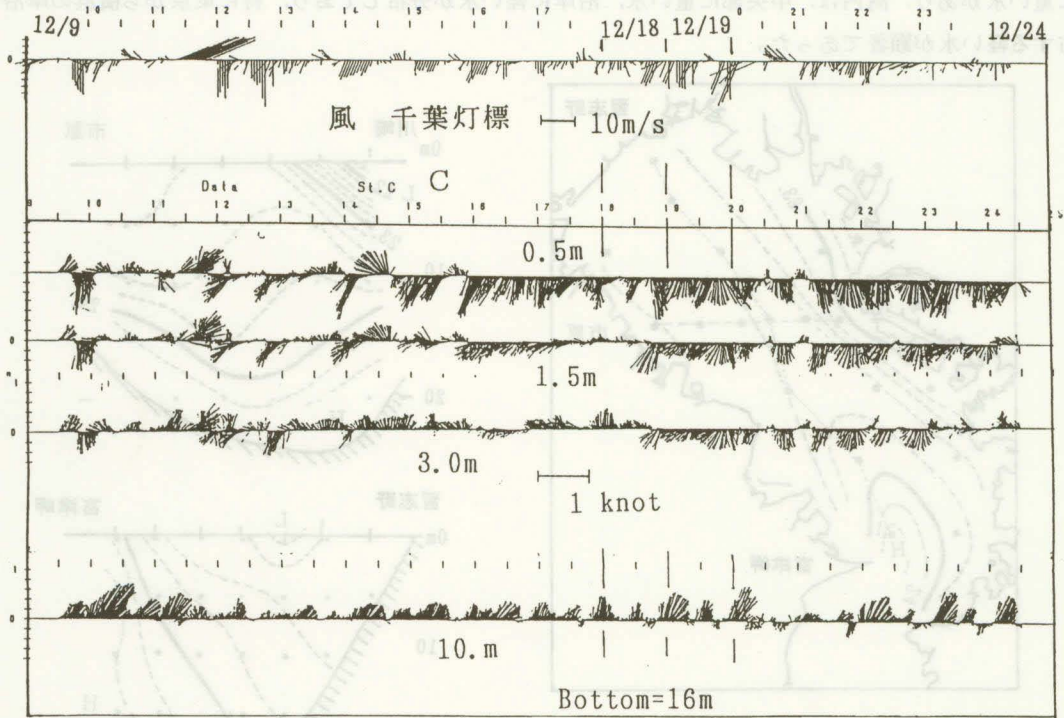
第3図 検証実験前後の海水密度 (σ_t) 分布

(2) 流れの観測

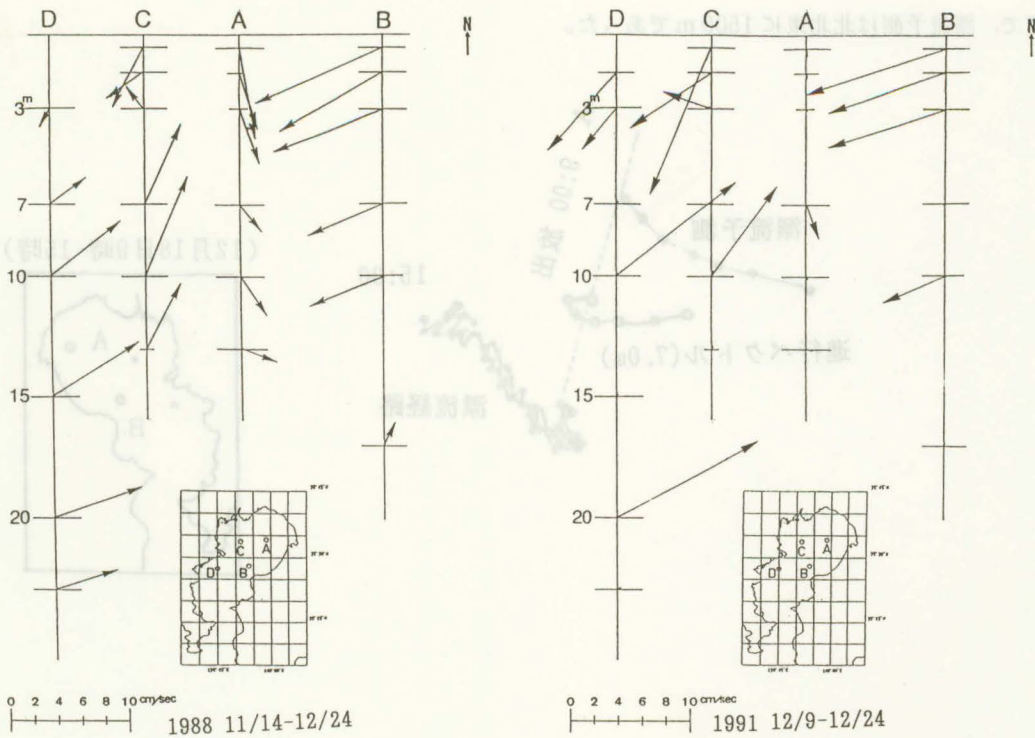
流れの観測結果の例としてC点とD点のものを第4図に示す。最上段は千葉灯標の海上風、以下はC点の海面下0.5, 1.5, 3.0, 10.0m及びD点の海面下1.5, 3.0, 10.0, 20.0mの流れのベクトルの時系列を表している。期間中は、ほぼ北風が卓越していた。C点では、0.5m層は海上風とほとんど遅滞なく対応しているのに対し、1.5, 3.0m層も同様に対応しているものの、下層になるにつれて流速が弱くなるとともに流向も時計廻りに変化している。10m層になると、半日周潮流が重なっているものの、明らかに0.5m層と逆向きの流れになっている。

D点は、C点よりも湾口に近くなるため潮流成分が強くなるが、それでも1.5m層は風とよい対応を示している。ところが、海面下3.0m層になると吹送流成分は急激に小さくなり、10m層になると3.0m層と逆に風と反対向きの流れとなっている。さらに、20m層では、10m層よりも風と逆向きの流速が強くなっている。

第5図は、観測期間中の平均流の分布について、昭和63年度と今回を比較したものである。今回の方が流速が少し強くなっているものの、両者の分布はほぼ一致しており、本研究で観測された流れの特性が一般性を持っていることを示している。



第 4 図 検証実験時の流れの記録



第5図 観測期間（15日間）の平均流分布

(3) 漂流検証実験

第6図は、18日の漂流実験結果である。黒丸のついた太い実線が正のフロートの漂流経路である。参考のため、白丸のついた実線などで流速計で観測された流れのベクトルをつなぎ合わせた進行ベクトル図を示す。また、細い実線は、簡略モデルによる計算結果である。18日は、北東～北の風1-3m/s程度で、風が弱い状態であった。ちなみに、第8図に風のベクトルの進行ベクトル図を示した。また、潮汐表によると、18日の東京湾口の潮流は、10時38分が上げ潮流最強0.8ノットで、実験時間は、ほぼ湾奥に向かう上げ潮流の時間に対応している。

A点では、実際の漂流が6時間で北東に約600m程度に対し、7m層の進行ベクトルでは西に400mではほとんど流れず、漂流予測では西南西に800m程度であった。

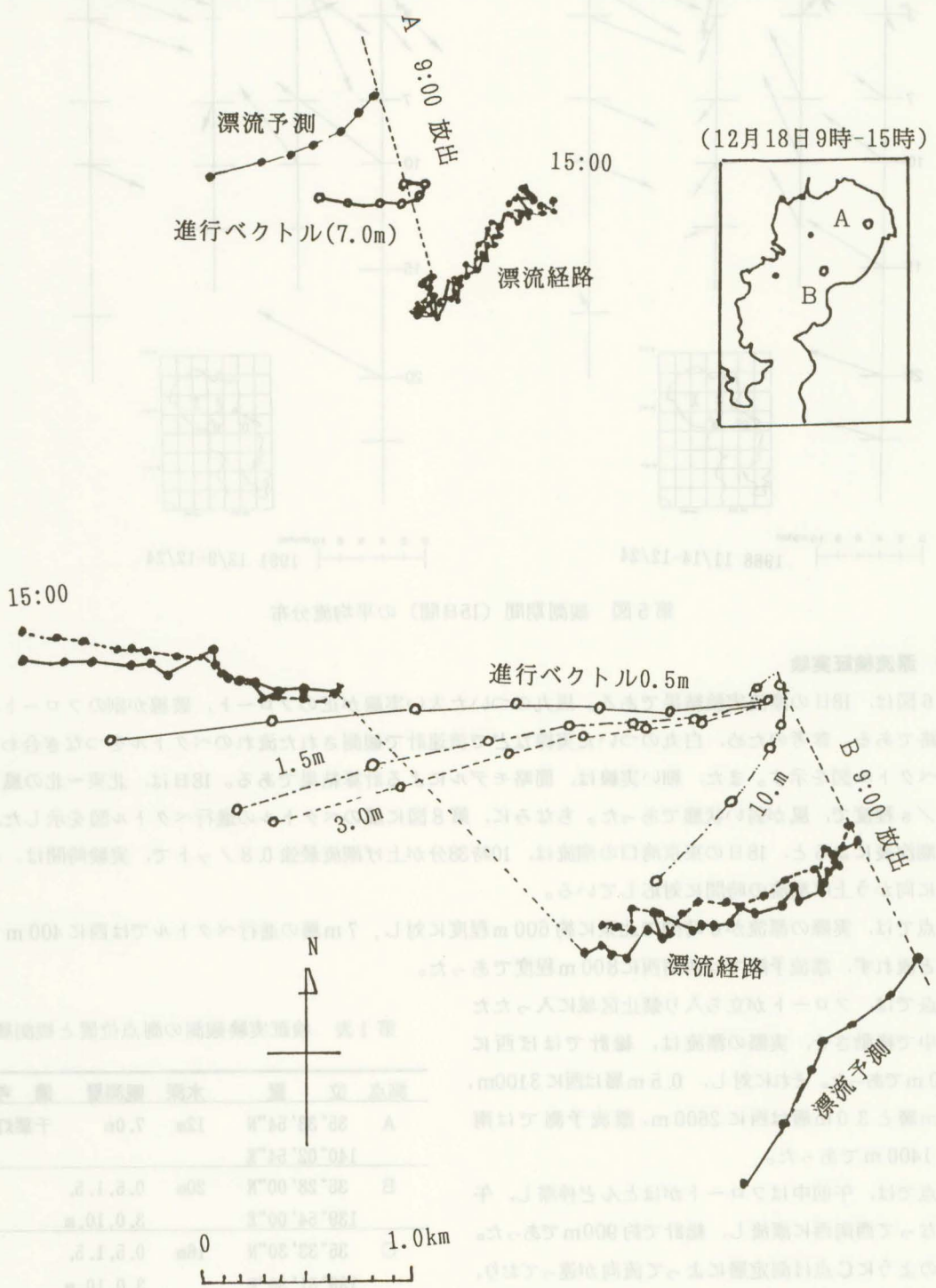
B点では、フロートが立ち入り禁止区域に入ったため途中で移動させ、実際の漂流は、総計ではほぼ西に2800mであった。それに対し、0.5m層は西に3100m、1.5m層と3.0m層は西に2600m、漂流予測では南西に1400mであった。

C点では、午前中はフロートがほとんど停滞し、午後になって西南西に漂流し、総計で約900mであった。前述のようにC点は測定層によって流向が違っており、0.5m層は南南西に3300m、1.5m層は西に1700m、5.0m層は北東に1900m、10.0m層は北西に1900

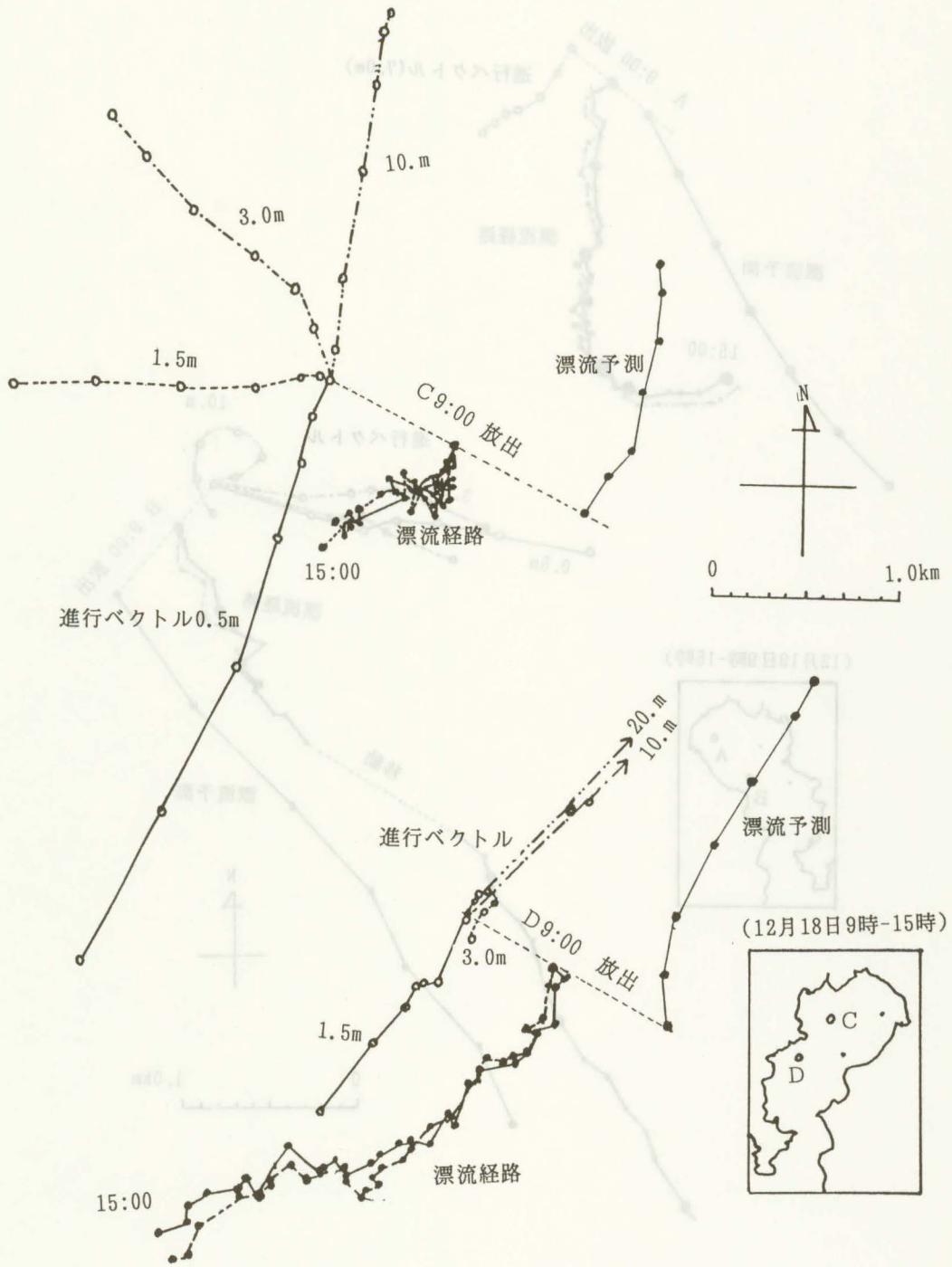
第1表 検証実験観測の測点位置と観測層

測点	位置	水深	観測層	備考
A	35°33'54"N 140°02'54"E	12m	7.0m	千葉灯標
B	35°28'00"N 139°54'00"E	20m	0.5, 1.5, 3.0, 10. m	
C	35°33'30"N 139°51'30"E	16m	0.5, 1.5, 3.0, 10. m	
D	35°27'30"N 139°45'00"E	26m	1.5, 3.0, 7.0, 10. m	

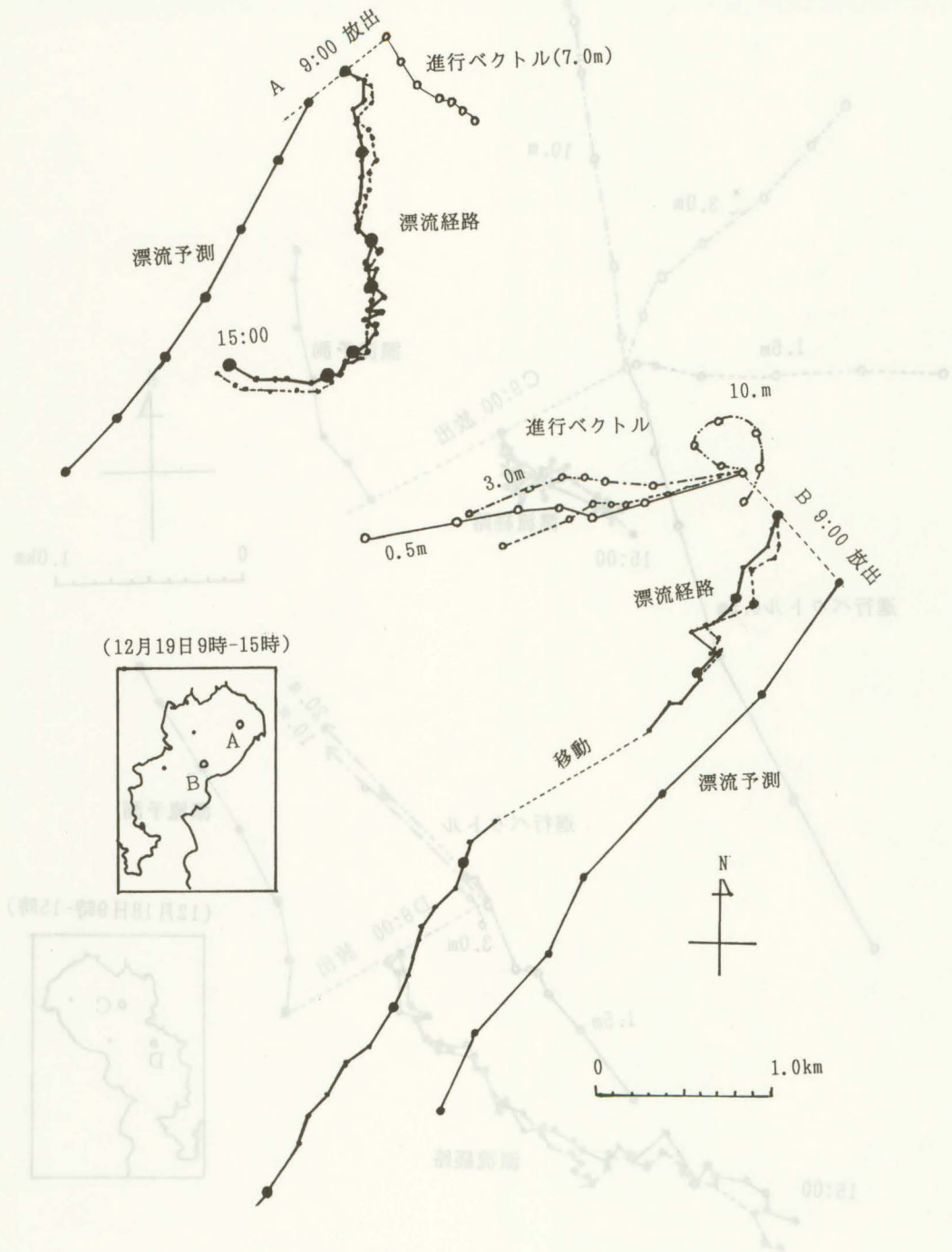
m程度で、漂流予測は北北東に1500mであった。



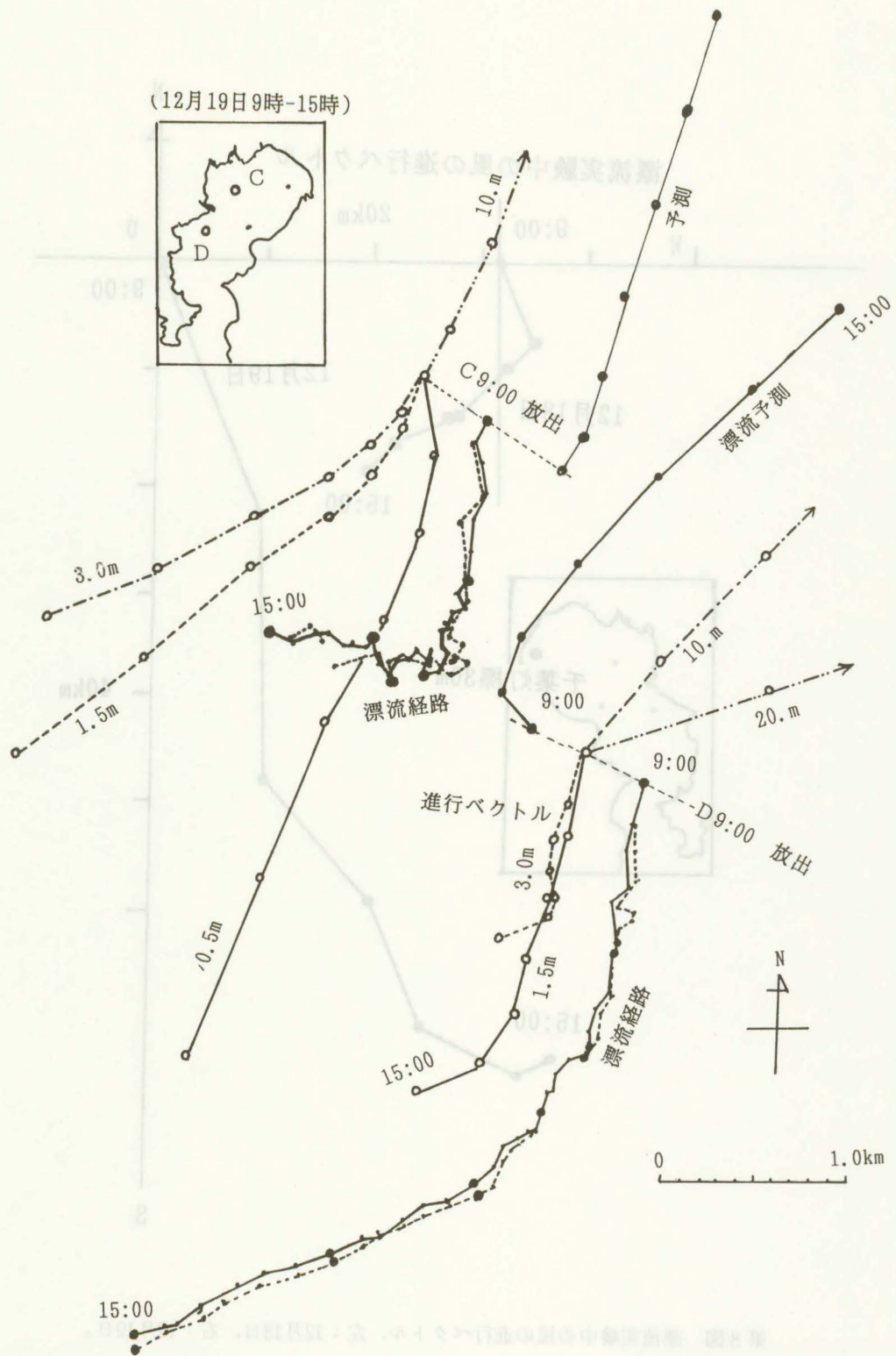
第6図 フロートの漂流経路と流れの進行ベクトル，及び漂流予測の比較：12月18日9時-15時，
(a) A, B点



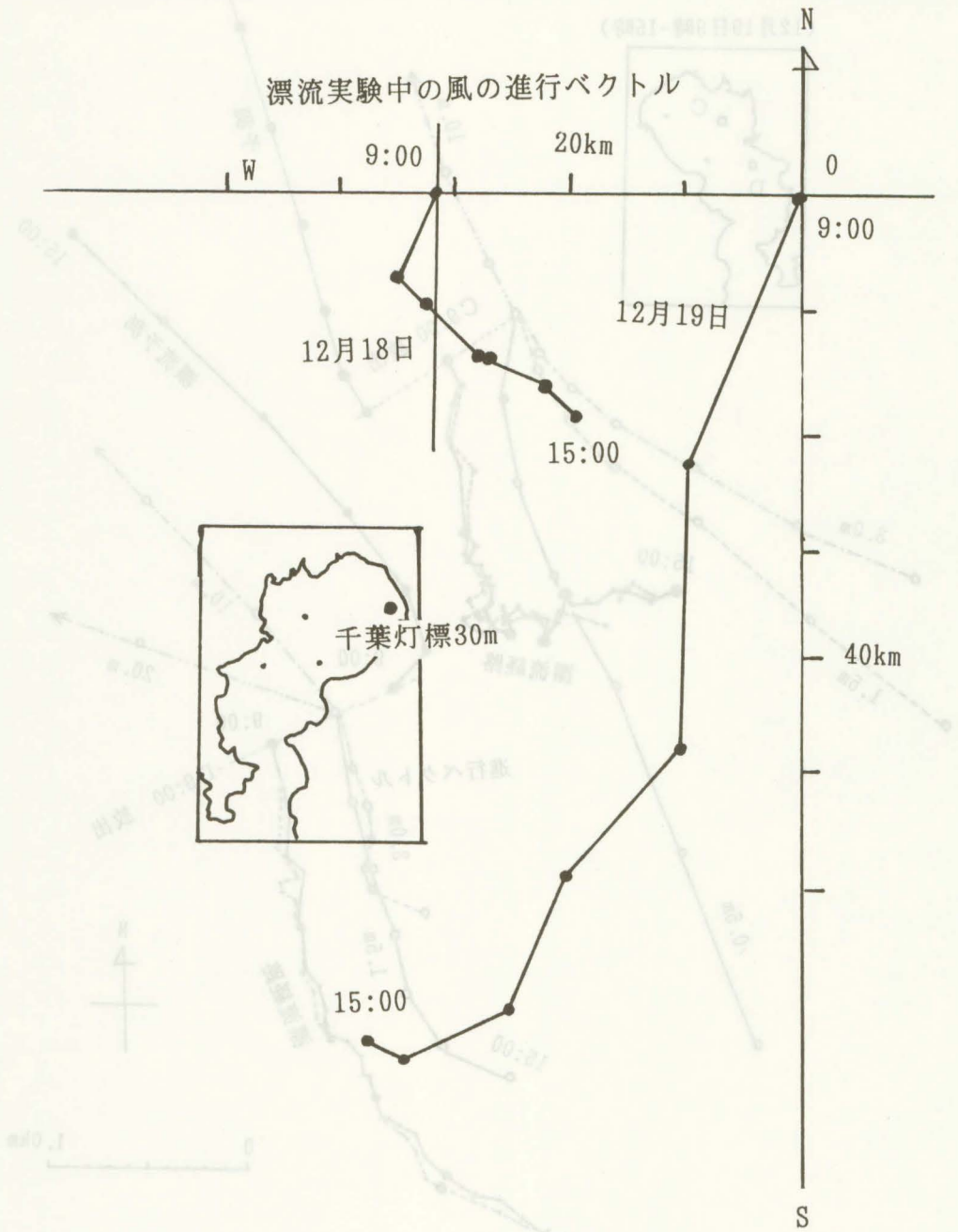
(a) A. B. C. D. 各点の漂流経路と漂流予測の比較 (12月18日9時-15時) (b) C, D点



第7図 フロートの漂流経路と流れの進行ベクトル，及び漂流予測の比較：12月19日9時-15時，
(a) A, B点



(b) C, D点



第8図 漂流実験中の風の進行ベクトル，左：12月18日，右：12月19日。

D点では、フロートは南西に2600m漂流した。1.5m層は南西に1300m、3.0m層はほとんど基点の周辺に停滞、10.0m層と20.0m層は北東に2100mで、漂流予測は北東に2000mであった。

第7図は、19日の実験結果である。19日は、北～北北東の風約4.0m/sで、18日より風が強かった。また、東京湾口の潮流は、12時15分が上げ潮流最強0.6ノットで、18日と同じくほぼ上げ潮の状態で行った。

A点では、13時頃までは南に1700m、その後、西に800m、最終的に6時間で南南西に1800m漂流した。7.0m層は南東に700mで、漂流予測は南西に2500mであった。

B点では、18日と同じくフロートが立入禁止区域に入ったため途中で移動させた。移動前の11時30分までの漂流距離は南西に1400m、移動後は南西に4100mで、流下するに従って漂流速度が速くなった。0.5m層は西に2100m、1.5m層は西に1400m、3.0m層は西に1700m、10.0m層は時計廻りに回転しほとんど移動しなかった。漂流予測は、南西に3700mであった。

C点では、A点と同じく11時頃まで南に1500m、13時頃まで停滞した後、15時まで西に1000m、全体で南西に1800m漂流した。0.5m層は南南西に4000m、1.5m層は南西に3100m、3.0m層は南西に2500m、10.0m層は北北東で、漂流予測は北北東に2600mであった。

D点では、11時頃まで南に1800m、その後、西南西に2800m、全体で南西に4000m漂流した。1.5m層は南南西に2000m、3.0m層は南南西に1100m、10.0m層と20.0m層は北東方向であった。漂流予測は北東に2800mであった。

(4) 漂流検証実験のまとめ

風の弱い18日の実験では、

1) フロートは、湾奥部のA点とC点では、ほとんど停滞したままなのに対し、湾中央部のB点とD点では、ほぼ湾口方向に約0.2ノットで漂流した。

2) 漂流経路は、表層(0.5m、1.5m)の流れの進行ベクトルと方向は合うものの、距離はかなり異なり、C点では1/3以下であった。

3) 中下層は、表層と比べ、流速が弱くなったり、流向が反対になったりするため、フロートの漂流経路と全く合わない。

4) 漂流予測は、B点では方向は合うものの、他の点では合わず、距離にもかなりずれがある。予測の偏りとしては、全体として東側のA・B点では湾口に向い、西側のC・D点では湾奥に向かう傾向がある。

4m/sの風の吹いた19日では、

5) 湾奥のA・C点の漂流経路はよく似ており、湾央のB・D点も、方向に若干のずれはあるもののよく似ている。A・C点の漂流速度は約0.2ノット、B・D点は約0.4ノットであった。

6) C・D点では、フロートが流下するに従って、加速する傾向が見られた。

7) 18日と同様、漂流方向は、表層(0.5m、1.5m)の進行ベクトルとよく似ているが、漂流距離は、C点では約半分、B・D点では2倍となっていた。

8) 中下層の進行ベクトルは、漂流方向・距離ともまったく合わない。

9) 漂流予測は、18日と同様、A・B点の方向は合うものの距離は合わず、他の点では方向・距離とも合わない。予測の偏りとしては、18日と同様、A・B点では湾口、C・D点では湾奥に向かう傾向が見られた。

以上の結果をまとめると、表層の漂流に関するかぎり、

- 湾の東西の違いよりも湾の奥と中央の違いが大きく、各測点に対する風の吹送方向と距離に依存しているようである、
- 表層と中下層の流れが異なっているため、ほかの深さの流れの進行ベクトルではまったく合わない、
- C点では、進行ベクトルと漂流経路の違いが大きく、河川水の流入などで場所や深さによる相違が大きくなっていることが考えられる、
- B・D点では、風下の湾口方向に行くにしたがって漂流速度が加速し、特に、B点では西に流れる場合はあまり加速が見られず、南西に行くとき大きく加速しており、方向による違いが大きい、などが見られた。
- 簡略モデルによる漂流予測は、5 m層の流れの観測にもとづく方法であるため、中層の進行ベクトルとは合うものの、表層の漂流経路とは合わず、特に、第5図の中層(3 m-10 m)に見られる時計廻りの循環が強く含まれているため、東半分では湾口に、西半分では湾奥に向かう傾向が強調されているようである。

4. まとめと今後の方針

(1) 漂流検証のまとめ

今回の漂流検証実験から、密度の一樣な冬季であっても流れの上下差が大きく、漂流する層に合わせた流れによって漂流予測を行わなければ、距離だけでなく方向さえも合わないことがわかった。表面の吹送流については、ほぼ風の吹送方向になるので、風圧係数または風圧面積を見かけよりも大きく取ることで、漂流経路と予測を近づけることは可能と思われるが、湾口に向かう場合加速されることに注意する必要がある。今回の吹送流による漂流を風圧流と見なし、平均風との比を求めると、18日は0.2~6.5%、19日は2.0~4.7%となり、常識的に言われている風圧係数3%と同じぐらいの値となる。従って、今回と同じ様な湾奥から湾口に風が吹く場合、表層の吹送流として、湾奥では風の0.2~2.0、湾央では4.7~6.5%を考慮しておく必要がある。中層・下層を漂流する場合も、深さによって流下方向が違ってくることに注意する必要があり、特にC・D点では海面下数mで流向が大きく変わってしまい、海面下3m程度であってももはや表層ではないことに注意が必要である。

(2) 本研究の成果

本研究の成果として、第4、5図のような流れの詳しい鉛直分布が把握されたことがあげられる。今まで、多層の流れの観測といってもせいぜい2、3層にすぎず、表層を密にした6層の観測を行ったことは世界的にも例がない。その結果、中層に極大部を持つような分布などが得られ、しかも場所によってそれぞれに特徴を持つことがわかった。このことは、従来、理論的にはいわれていた(6、7)ものの、実際に現場で確認されたのは初めてである。さらに、成層のある場合には、流れが数倍に発達し、上中下層の流れの違いも顕著になることがわかった。また、成層の発達期に内部モードの波動が湾内を反時計廻りに伝播することを、理論的な研究(8)とはほぼ時期を同じくして、本研究の観測で確認した。そして、観測の期間中に青潮が出現し、内部モードの波動がこの出現に関連していることが示唆された。

一方、密度成層を表現できる三次元数値流動モデルを開発し、成層の有無によって流況がかなり変化することや内部モードの波動が反時計廻りに伝播することを計算上で再現した。しかし、計算の安定や鉛直分解能に問題点が残る、今後とも改良を進めて行くことにしている。

さらに、研究の締めくくりとして、漂流検証実験を行ったところ、以上のような流れの三次元構造を考慮することが漂流予測の精度向上に不可欠であることが、あらためて認識された。また、今回は表層のみの漂流実験であったが、機会を見て、中下層を漂流させるような三次元の実験を行ってみたいと考えている。

(3) 今後の方針

内湾域の流れについて、潮流成分は鉛直的にさほど差はないものの、その他の吹送流などには大きな差があり、実用的な漂流予測の当り外れを左右していることがわかった。そして、このような差の出現に密度成層が深く関係していて、しかも青潮の出現などにも関連していることがわかった。今後は、密度成層やその変動、流れの鉛直分布などを的確に再現できるように数値計算モデルの改良を図っていくとともに、このような鉛直構造に注目した海況調査を充実させ、より確度の高い漂流予測を行うようにしたいと考えている。

参考文献

- (1) 佐藤敏：冬季東京湾の風による流動の観測，水路部技報 8， 1-14 (1989)。
- (2) 小田巻実・佐藤敏・松島弘・西田浩志・下平保直：夏季の東京湾の流動の観測，水路部技報 9， 67-76 (1991)。
- (3) 小田巻実・佐藤敏：内湾域の三次元数値流動モデルの開発，水路部技報10， 30-35 (1992)。
- (4) 日本水路協会：沿岸域の流況及び漂流の予測並びに提供システムの研究， 133 p， (1984)。
- (5) 小田巻実：沿岸域における漂流予測の試み，沿岸海洋研究ノート，第23巻，第2号， 148-154,(1986)。
- (6) 宇野木早苗：東京湾・II物理，日本全国沿岸海洋誌， 344-361 (1985)。
- (7) 長島秀樹：傾いた底を持つ水道の吹送流。理研報告， 58, 23-27 (1982)。
- (8) 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, 63-74, (1990)。