

冬季東京湾の風による流動の観測

佐藤 敏 : 海洋情報課

On Wind - Driven Circulations in Tokyo Bay ; the case of Winter Season

Satosi Sato : Oceanographic Data and Information Division

1. 研究の目的

東京湾奥部等の閉鎖性水域においては、潮流が比較的弱く、流れに対する風の影響が大きい。各種の汚濁物質の閉鎖性水域における移動・拡散・集積機構は、潮流と風を原因とする吹送流とによって決定される。しかしながら、従来の沿岸海域における流動調査は潮流を主な対象として行われており、風の影響まで含めた調査や研究は乏しく、海上を吹く非定常な風による物質の移動の機構については未だ解明されていない。

本研究は、海上風の流れに対する影響を把握し、物質の移動・拡散・集積を予測する手法を開発することを目的として、閉鎖性水域のモデル海域として東京湾を選び、その北部の湾奥部を中心に流動に対する風の影響について調査を行った。

2. 観測の概要

冬季の東京湾において、風に応答する吹送流の消長及び、その鉛直構造並びに湾内の場所による違いを評価するために、第1図のA, B, C, Dの4点において定置測流を、また、東京湾の北東部に位置する千葉灯標において海上風観測を昭和63年11月13日から昭和63年12月24日にかけて40昼夜実施した。

測点A, B, Cでは、特に海表面付近の吹送流の鉛直構造を把握するために、海面下0.5 mに自記式電磁流速計を、海面下1.5 m, 3 m, 7 m, 10 m及び海底上3 mにインペラ型ベルゲン流速計を設置して6層で流向流速を観測するとともに、インペラ型ベルゲン流速計では同時に水温及び電気伝導度(塩分)を観測した。

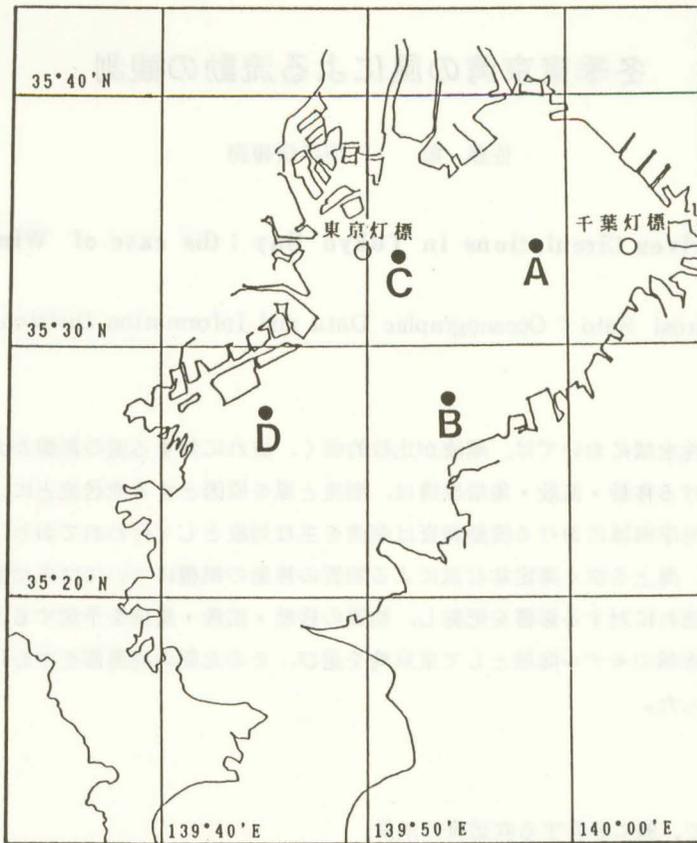
測点Dでは、NKK扇島ブイを利用して、インペラ型ベルゲン流速計を海面下3 m, 7 m, 10 m, 15 m, 20 m及び海底上3 m(海面下23 m)の6層に設置して流向流速、水温、電気伝導度の観測を行った。

千葉灯標においては、海面上16 m, 22 m, 30 mの3層に自記式風向風速計を設置して観測した。

観測期間中、測点によっては欠測も発生したが、概ね良好なデータを取得することができた。ただし、電気伝導度についてはセンサーの清掃を観測期間中に1度行ったものの、信頼できないデータも多かった。

第1表 測点位置

測点	北緯	東経	水深
A点	35°34.0'	139°58.5'	16m
B点	35°28.0'	139°54.0'	20m
C点	35°33.5'	139°51.5'	16m
D点	35°27.5'	139°45.0'	26m
千葉灯標	35°34'	140°03'	—



第1図 測点図

3. 観測期間の環境

3.1 海上風の概況

東京湾における海上風は、風向については冬季には北偏りの風（南に向かう風）が卓越し、夏季には南西ないし南の風（北に向かう風）が多く、風速については平均的には冬季に強く夏季に弱いという季節的变化を特徴としている。

第2図の風向風速頻度分布図にある通り、今回の観測でも北偏りの風が卓越しており、観測時期の風向風速は、冬季の風の特徴を持っていたといえる。ただし、平均的に見ると観測期間を通じてはほぼ北風が吹き続けていたが、11月25日から27日にかけての時期並びに、12月16日から17日にかけての時期には低気圧が通過し、南西あるいは西の強い風が吹いた。この時、海面上30m層の風向風速計は、20m/s内外の風速を記録し続けた。観測期間中の最大風速はこの西の風が強いときに記録されている。観測期間を通じて冬季の特徴である北風が卓越するが、時々、他の方向の風が出現するというのが観測期間の海上風の様子であった。

3.2 海上風の鉛直分布

海上風の鉛直分布を調べるために3層で風向風速の観測を行った。30m層の風向風速計は灯標の最上部よりも上に設置したため灯標の建物の影響はほとんど受けていないと考えられるが、設置高度の低い16m層で観測された風向風速は、かなり灯標の建物の影響を受けていたものと想像される。したがって、鉛直方向の風の分布については建物の影響を受けていないと考えられる北を中心とする方向（風向風速計は灯標の北側

に設置したので、北を中心とする方向の風は灯標の建物の影響を受けることが少ないと考えられる)の風についてのみ調べた。北を中心とする風向の観測期間全てのデータを以下のべき乗則にあてはめて、各層の風速について比較した。

$$\frac{W(Z_1)}{W(Z_2)} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^p \quad (3.2.1)$$

ここで、 Z_1, Z_2 : 高度

$W(Z_1)$: 高度 Z_1 における風速

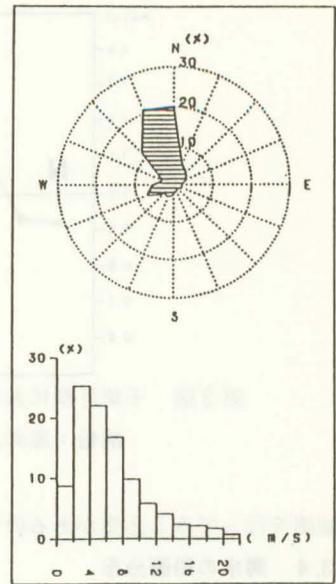
p : べき指数

この結果、30m層と22m, 16m層では、およそ $p = 0.45$ となった。

つまり、22m層の風は30m層の風を使って、

$$W(22) = W(30) \cdot \left(\frac{22}{30}\right)^{0.45} \quad (3.2.2)$$

と表記することができる。



第2図 風向風速頻度分布図
(千葉灯標海面上30m)

3.3 海上風の水平分布

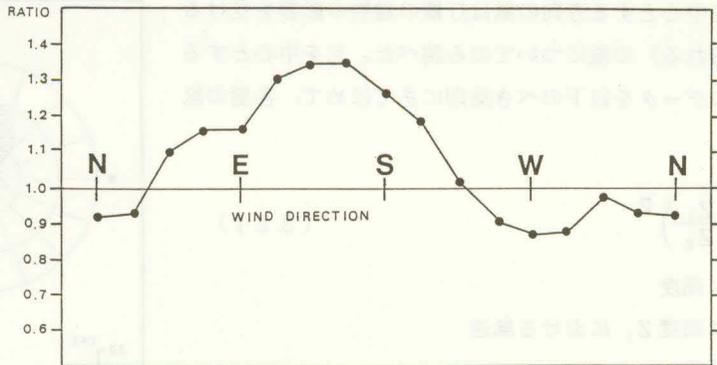
次に、東京湾内における海上風の水平分布について調べてみた。東京都港湾局が常時、海上風観測を実施している東京灯標(第1図参照)の海面上22mの高さの観測記録と千葉灯標の風向風速との比較を行った。比較に使用した千葉灯標の風は、風向としては海面上30mの記録をそのまま使い、風速に関しては、(3.2.2)式のべき乗則を30m層の風の観測記録にあてはめて、東京灯標と同じ22mの風速に修正したものをを用いた。

風向に関しては、東京灯標における風向と同時刻の千葉灯標における風向に違いはほとんどなく、東京湾上では風向はどこでもほとんど同じであるという従来の報告を支持する結果となった。

風速については従来と異なった結果が得られた。例えば、港湾気象要覧(日本気象協会、1982年)に掲載されている東京湾全体での風向別風速比較図を見ると、風向がどの方向であろうとも、東京灯標における風速は千葉灯標付近の風速に比べて常に大きく、その比率は約1.2倍から1.6倍程度になっている。ところが、今回行った観測記録を用いた比較では風向によっては千葉灯標の方が東京灯標よりも風速が大きくなるという結果が得られた。

第3図は横軸に風向をとり、縦軸に千葉灯標における風速に対する東京灯標の同時刻の風速の比率を表わした図である。東または南の風の場合には、東京灯標の風速は千葉灯標に比べてかなり大きくなっているが、西から北の風の場合には、同程度の大きさの風速であるか、あるいは千葉灯標の風速の方がやや大きいという結果が得られた。観測期間中は、北の風が卓越していたので、この方向の風のデータ数は多く、結果の信頼性はかなり高いと考えられる。

港湾気象要覧に掲載されている図は、東京湾の周囲に位置する地上の観測点のデータと東京灯標における観測データとから作成されているが、海上観測点が東京灯標だけであったため、湾内の海上風の風速の正確な分布は把握できなかったのではないかと想像される。吹送流を定量的に推測するためには、その駆動力である海上風の大きさを把握しなければならないが、それを行うためには、今後、ある程度空間的に密に海上



第3図 千葉灯標における海上風に対する東京灯標における海上風の風向別風速比
横軸：風向，縦軸：（東京灯標の風速）／（千葉灯標の風速）

風観測を行ってみる必要があるのではないかと考えられる。

3.4 海水の鉛直分布

冬季の東京湾の海水の鉛直分布の特徴としては、上層に低温・低塩分の海水が、下層に高温・高塩分の海水が存在し、密度的には鉛直的にはほぼ一樣になることが挙げられる。今回の観測においてもほぼその様な傾向が全測点においてみられ、冬季の特徴を備えた時期に観測を行っていたことがわかる。

観測結果の例として、第4図にB点における水温、塩分及び密度の鉛直分布の時系列変化を示す。水温については観測開始から時間が経過するにつれて徐々に下降していつているが、ほぼ全期間にわたって上層の水温が下層よりも低くなっている。塩分についても、概ね常に上層の塩分値は下層よりも低くなっている。そして、密度は鉛直的には常にほぼ一樣になっている。

ただし、上に挙げた傾向が壊れたことが、2度ほど観測されている。それは、11月25日から27日の期間と12月16日から17日の期間の強い南西ないしは西の風（東に向かう風）が吹いた時期である。この時、第4図を見てわかる通り、B点の水温は鉛直に一樣になっている。それも上層の水温が下層に伝わる方向で、即ち、低い方の水温で一樣になっている。この時は、他の測点でも水温の鉛直分布に変化が見られる。同じ東京湾の東側に位置するA点ではB点と同じように水温は上層の低い水温で一樣になる。一方、東京湾の西側に位置するC、D点ではやや異なった傾向を示した。11月25日から27日にかけての場合には、両測点でも水温の鉛直分布は上層の低い水温で一樣になったが、12月の場合には、C点の水温の鉛直分布は一樣にならず、横浜沖のD点では下層の高い水温で上から下まで一樣となった。

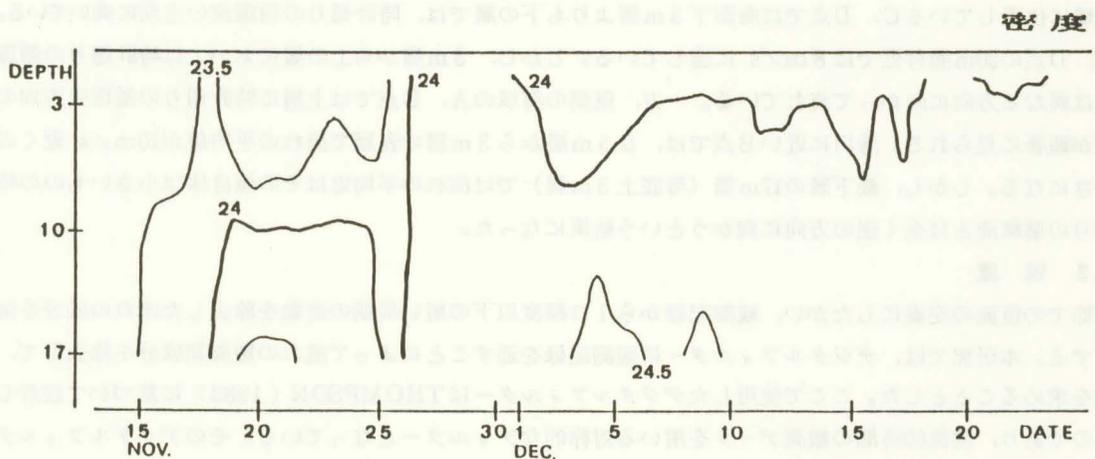
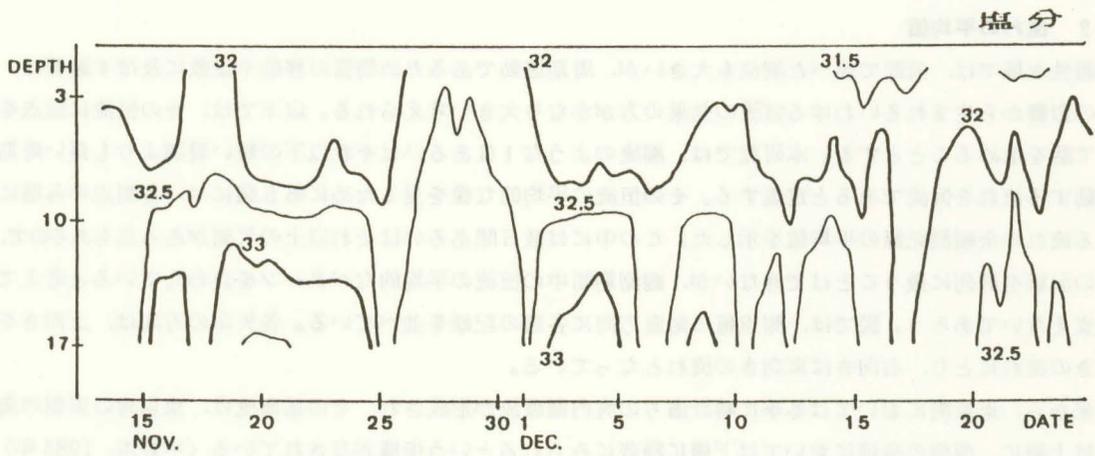
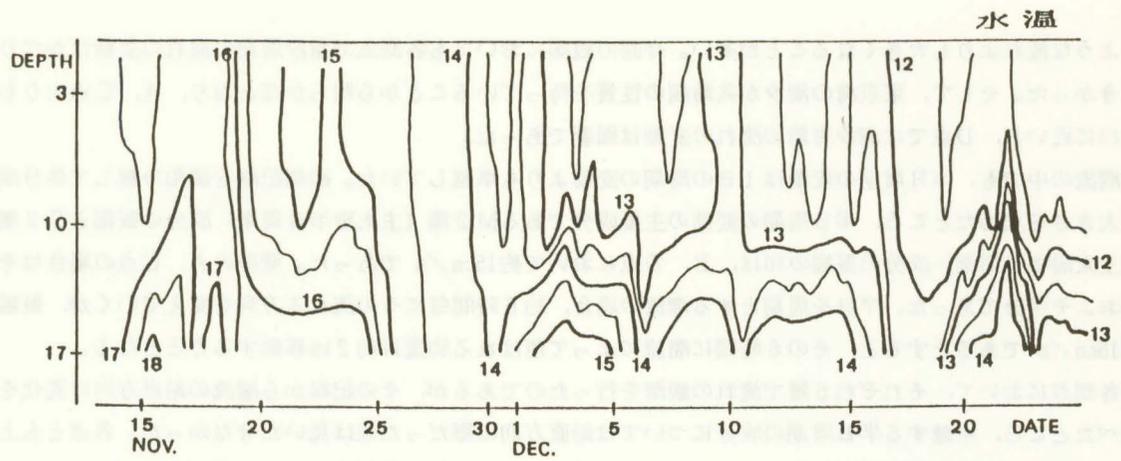
以上のような冬季の特徴的な鉛直構造が壊れるという現象も観測されたが、観測期間の大部分が上層に低温・低塩分、下層に高温・高塩分という構造であった。

以下では、定置測流の観測結果と海上風との比較について報告する。

4. 流況

4.1 潮流

東京湾の潮流は外洋から入射した潮汐波とそれが湾奥で反射した反射波とが重なった定常波という共動潮の性質を基本的には備えている（宇野木他，1980年）ので、今回の観測で定置測流を行った湾奥部の潮流は湾口部に比べると比較的弱くなるのであるが、それでも、いわゆる恒流と呼ばれるような長い周期で変動す



第4図 B点における水温、塩分及び密度の鉛直分布の時系列変化
 単位：水温（ $^{\circ}\text{C}$ ），塩分（実用塩分），密度（ σ_t ）

るような流れよりも大きくなることが多い。今回の観測においても各測点で潮汐周期の流れの変動はかなり大きかった。そして、東京湾の潮汐が共動潮の性質を持っていることから明らかなとおり、A、C点よりも湾口に近いB、D点では潮汐周期の流れの変動は顕著であった。

潮流の中でも、半日周期の変動は1日の周期の変動よりも卓越していた。観測記録を調和分解して各分潮の大きさを求めたところ、半日周期の変動の主要成分であるM2潮（主太陰半日周潮）成分の振幅とS2潮（主太陽半日周潮）成分の振幅の和は、B、D点において約15cm/sであった。湾奥のA、C点の場合はそのおよそ半分であった。半日を周期とする潮流の場合、約6時間毎にその流れる方向を変えていくが、振幅が15cm/sであるとすると、その6時間に潮流によって運ばれる物質は約2km移動することとなる。

各測点において、それぞれ6層で流れの観測を行ったのであるが、その記録から潮流の鉛直方向の変化を調べたところ、卓越する半日周期の成分については鉛直方向に際だった差は見いだせなかった。各点とも上層から下層まで半日周期成分の流れの方向、そしてその振幅、位相とも鉛直にはほぼ一様であった。したがって、冬季の潮流の場合には、第1近似としては鉛直方向の変化を考慮する必要がないと思われる。

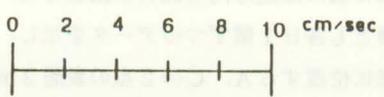
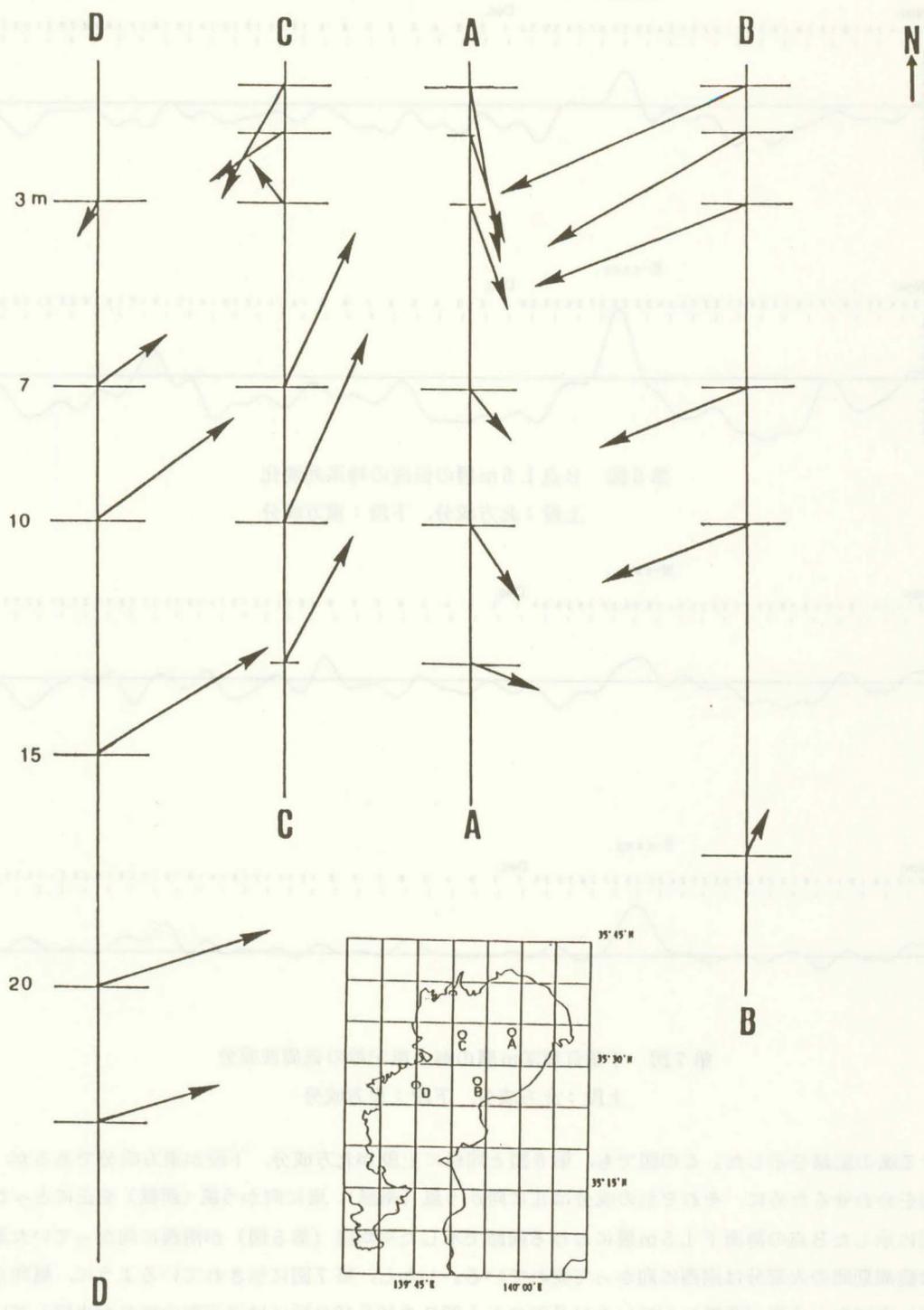
4.2 流れの平均値

閉鎖性水域では、前節で述べた潮流も大きい、周期運動であるため物質の移動や拡散に及ぼす影響は、風等の影響から生まれるいわゆる恒流の効果の方がかなり大きいと考えられる。以下では、その恒流に焦点をあてて話を進めることとする。本研究では、潮流のような1日あるいはそれ以下の短い周期よりも長い周期で変動する流れを恒流であると定義する。その恒流の平均的な像を見るために第5図には、各測点の各層における流れの全観測記録の平均値を示した。この中には数日間あるいはそれ以上の欠測がある点もあるので、全ての記録を同列に扱うことはできないが、観測期間中の恒流の平均的なパターンを表わしていると考えて差し支えないであろう。図では、測点毎に鉛直方向に各層の記録を並べている。各矢印の方向は、上向きを北向きの流れにとり、右向きは東向きの流れとなっている。

従来から、東京湾においては冬季に時計廻りの湾内循環流が形成され、その循環流は、東京湾の東側の海域では上層に、西側の海域においては下層に顕著にみられるという指摘がなされている（宇野木、1985年）が、今回の観測における流れの平均値についても同様な傾向がみられた。第5図にある通り、東京湾の西側の海域に位置しているC、D点では海面下3m層よりも下の層では、時計廻りの循環流の方向に向いている。特に、D点の20m層付近では8cm/sに達している。しかし、3m層から上の層においては時計廻りの循環流とは異なる方向に向かって流れている。一方、東側の海域のA、B点では上層に時計廻りの循環流方向の流れが顕著に見られる。湾口に近いB点では、0.5m層から3m層の表層で流れの平均値が10cm/s近くの大きさになる。しかし、最下層の17m層（海底上3m層）では流れの平均値はその値自体は小さいものの時計廻りの循環流とは全く逆の方向に向かうという結果になった。

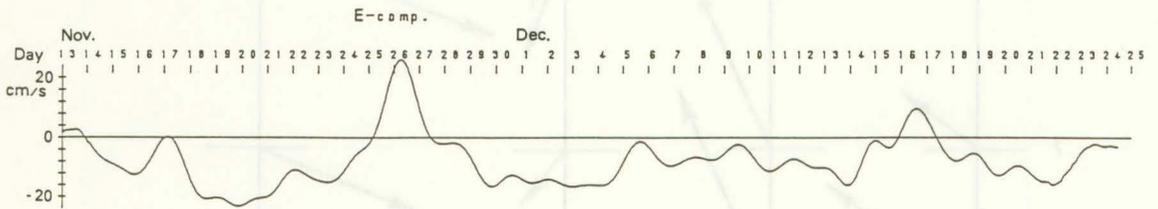
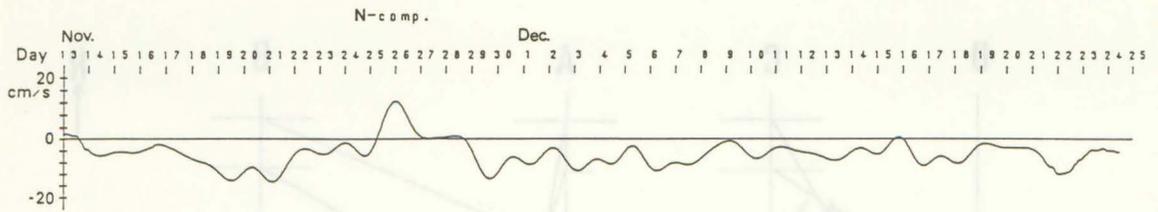
4.3 恒流

前節での恒流の定義にしたがい、観測記録から1日程度以下の短い周期の変動を除去した流れの成分を恒流とする。本研究では、デジタルフィルターに観測記録を通すことによって流れの短周期成分を除去して、恒流を求めることとした。ここで使用したデジタルフィルターはTHOMPSON（1983）に基づいて設計したものであり、前後60時間の観測データを用いる対称的なフィルターとなっている。そのデジタルフィルターを通して得られた恒流の記録を第6図に示す。第6図は東京湾の東側の海域に位置するB点の海面下1.5m層の記録である。上段が北方成分、下段が東方成分であり、それぞれ、北に向かう流れと東に向かう流れを正にとっている。第7図には、同じデジタルフィルターを通して短周期成分を除去した千葉灯標の30m層

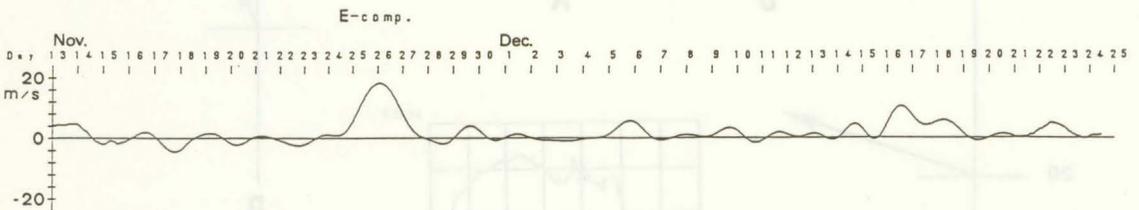
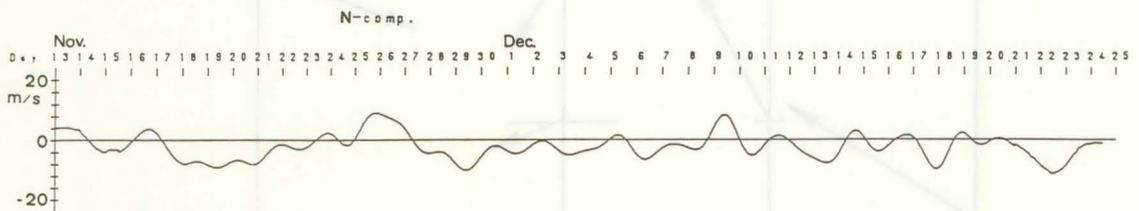


CONSTANT FLOW

第 5 図 定置測流値の平均



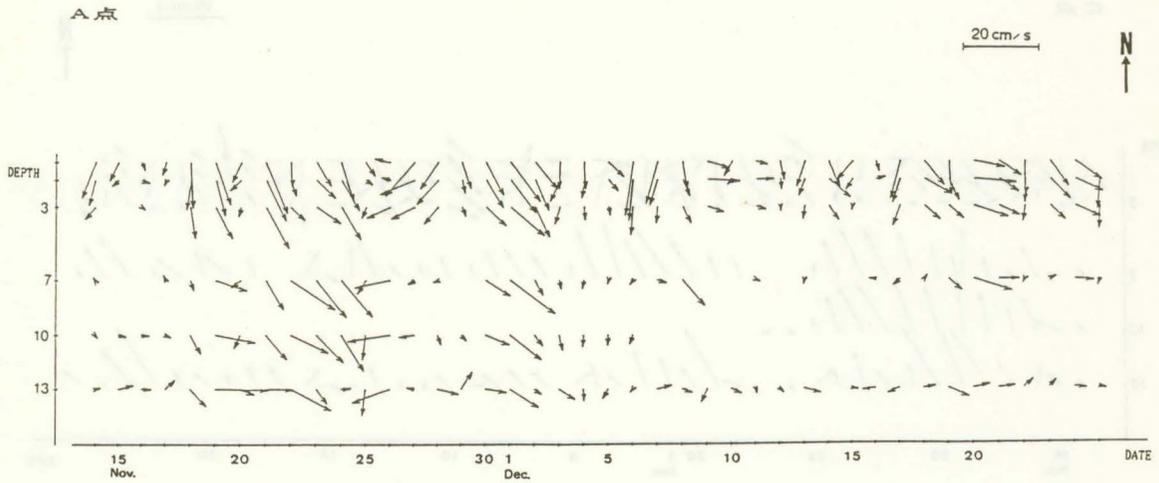
第6図 B点1.5m層の恒流の時系列変化
上段：北方成分，下段：東方成分



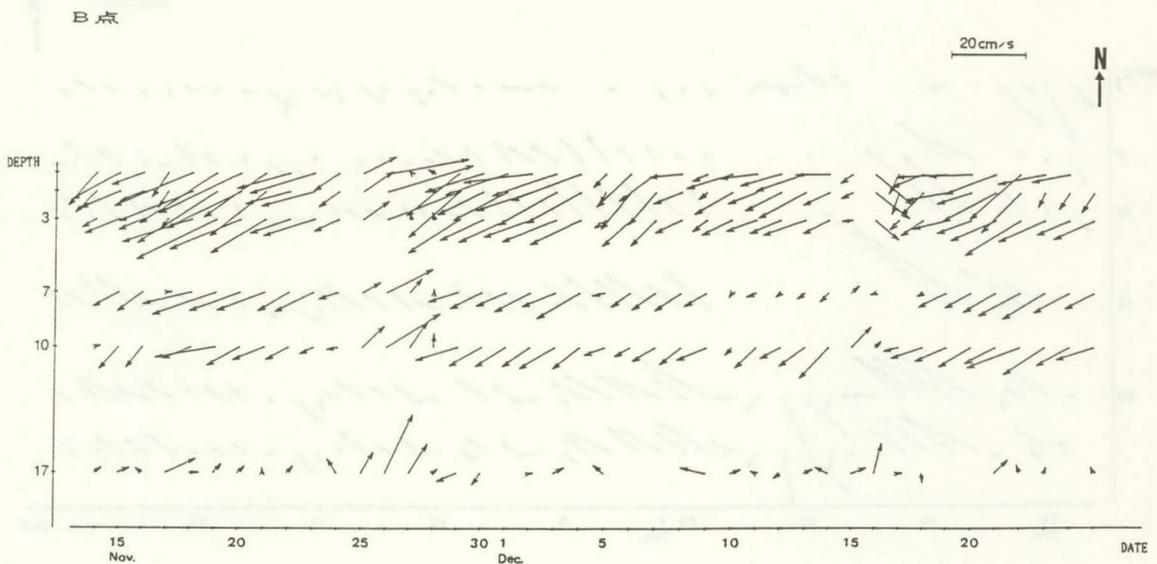
第7図 千葉灯標30m層の海上風記録の低周波成分
上段：北方成分，下段：東方成分

における風の記録を示した。この図でも、第6図と同様に上段が北方成分、下段が東方成分であるが、流れと方向を合わせるために、それぞれの成分は北に向かう風（南風）、東に向かう風（西風）を正にとっている。第6図に示したB点の海面下1.5m層における前節で示した平均値（第5図）が南西に向かって流れていた通り、恒流は観測期間の大部分は南西に向かって流れている。しかし、第7図に示されているように、風向が変化して強い東に向かう風（西風）が吹いた11月25日から27日や12月16日頃には逆方向の流れが出現している。

第8図には4測点における恒流を矢印を使って示している。各層とも各日1個ずつのデータを示し、上向きの矢印は北向きの流れを表わしている。この図を見ると、湾奥部に位置するA、Cの2点の表層3mまでの層においては変動が激しく見えるのに対して、湾口に近いB点の表層3mまでの層においては、強い東に



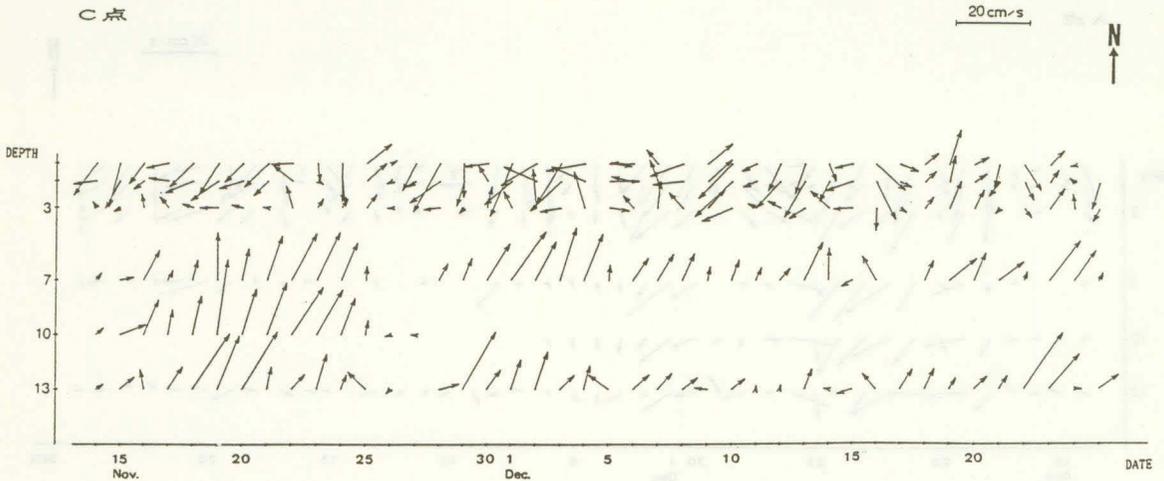
第8図-a A点の恒流



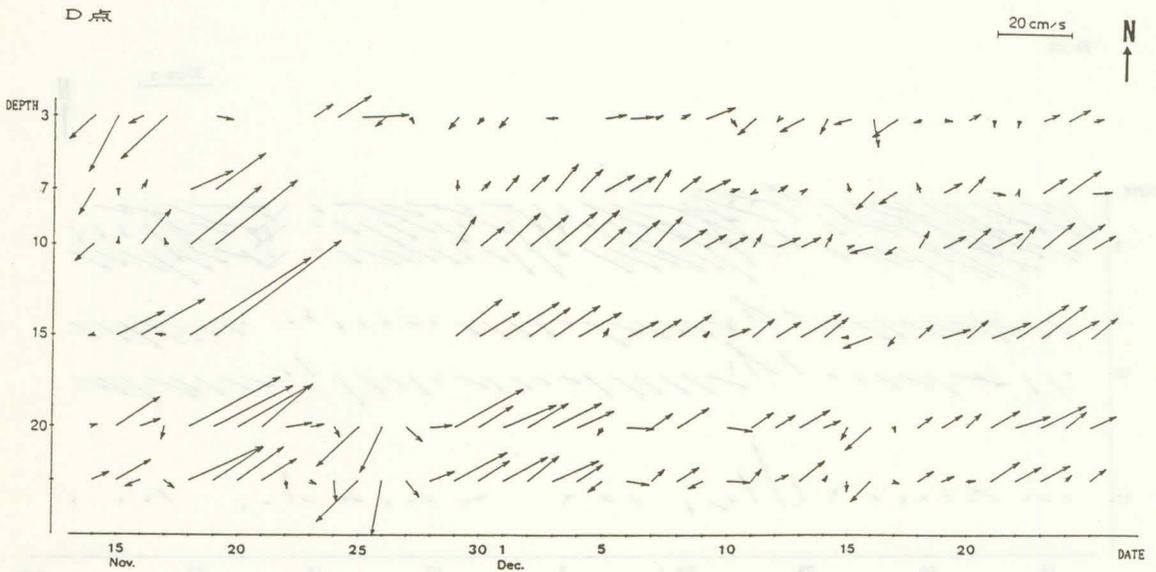
第8図-b B点の恒流

向かう風（西風）が吹いた時期を除くと、ほぼ一定の時計廻りの循環流の方向に流れるという特徴が現われている。一方、海面下3 mよりも下の層では以下のような特徴が現われている。東京湾の西側に位置するC、Dの両点ではほぼ時計廻りの循環流の方向に流れる。ただし、D点では強い西風の吹いた時期には流向は完全に逆転している。東京湾の東側の点でも時計廻りの循環流の方向に流れているように見えるが、A点では表層と同じく流向があまり一定していない。また、B点の最下層では、それよりも上の層とは異なる方向に流れている。

各点各層の恒流に対してMEM法を用いることによってスペクトルを求めてみたが、大潮小潮の変動に対応する周期（約 14.7 日）のところにはスペクトルのピークは出現せず、この時計廻りの循環流を形成する



第8図-c C点の恒流



第8図-d D点の恒流

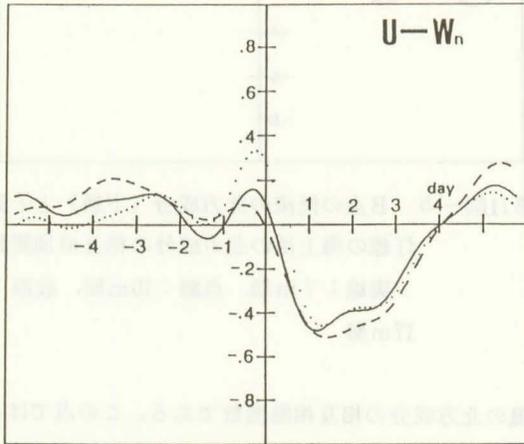
恒流は潮流に起因するものではなさそうである。従来から、冬季の時計廻りの循環流については、風が主たる原因であると考えられてきたが、今回の観測でも風の変動にしたがって恒流が変動しているように見え、その考えを支持する結果となっているようである。

4.4 風に対する恒流の応答

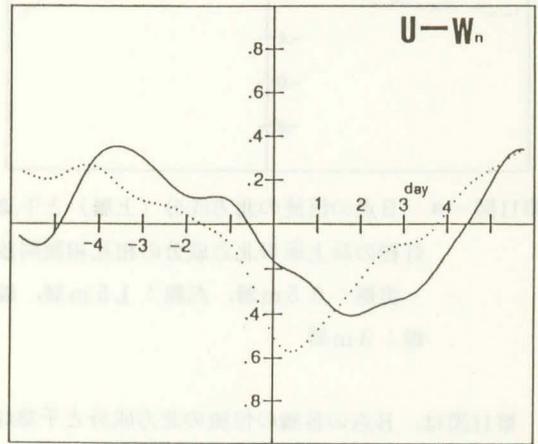
恒流がどの程度風と関連があるかを調べるために、千葉灯標における30m層の海上風の記録からデジタルフィルターを用いて短周期成分を除去した記録と、各点各層の恒流との間の相互相関を求めた。

第9図はA点の各層の恒流の東方成分（東向きの流れが正）と千葉灯標の風の北方成分（北向きの風が正）との相互相関関数である。流れと風の方向を合わせるために風については北向きの風（南風）を正として相関を調べた。図は縦軸が規格化した相互相関関数を表わし、横軸を風に対する恒流の応答の遅れにしている。

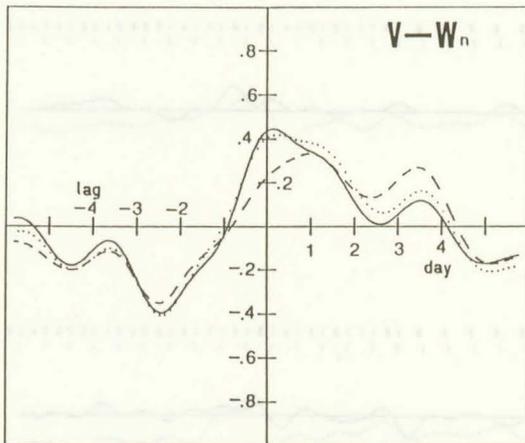
応答の遅れが1日で正の相関を持っている場合は、風が変化して、その1日後に風と同じ方向の変化が恒流に現われるということを意味している。第10図には同様に、A点の各層の恒流の北方成分（北向きの流れが正）と第9図と同じ千葉灯標の風の北方成分との相互相関関数を示している。第9図、第10図を見ると全般的にA点の恒流と風の相関はあまり大きくないが、変動の激しい表層付近の恒流の北方成分は応答の遅れがほとんどなしに風が吹く方向に流れ、それから1日ほど遅れて、恒流の東方成分に影響が現われているように見える。



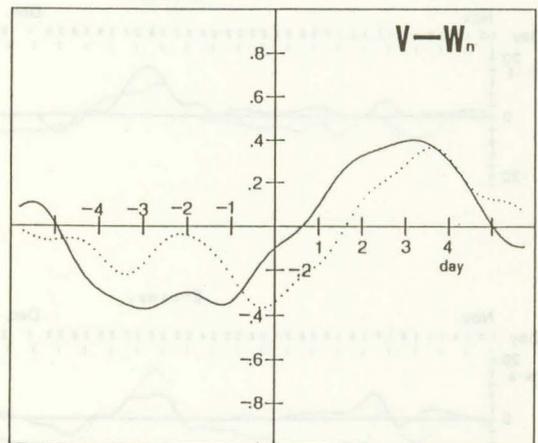
第9図-a A点の恒流の東方成分（上層）と千葉灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
実線：0.5m層，点線：1.5m層，破線：3m層



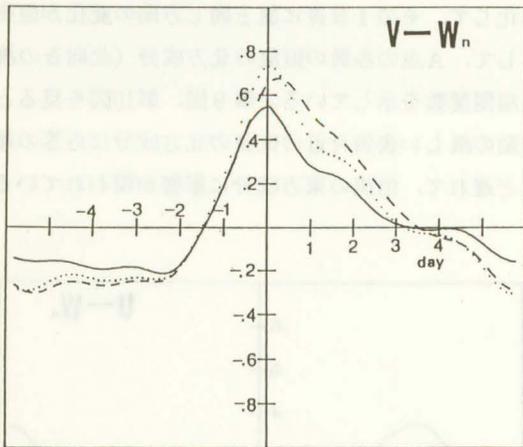
第9図-b A点の恒流の東方成分（下層）と千葉灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
実線：7m層，点線：13m層



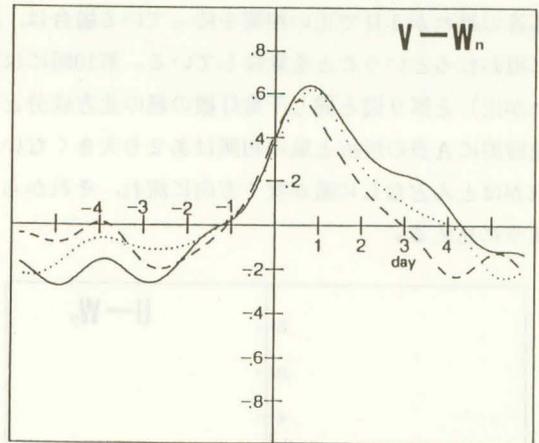
第10図-a A点の恒流の北方成分（上層）と千葉灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
実線：0.5m層，点線：1.5m層，破線：3m層



第10図-b A点の恒流の北方成分（下層）と千葉灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
実線：7m層，点線：13m層

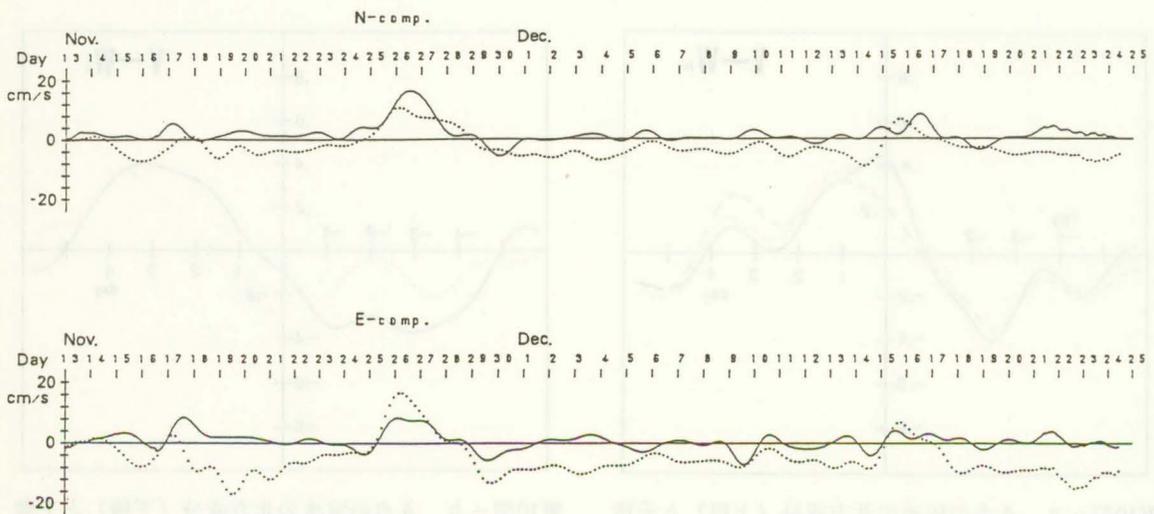


第11図-a B点の恒流の北方成分(上層)と千葉灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
 実線: 0.5 m層, 点線: 1.5 m層, 破線: 3 m層

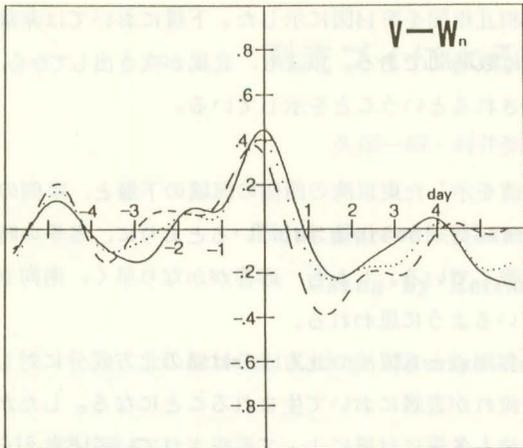


第11図-b B点の恒流の北方成分(下層)と千葉灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
 実線: 7 m層, 点線: 10 m層, 破線: 17 m層

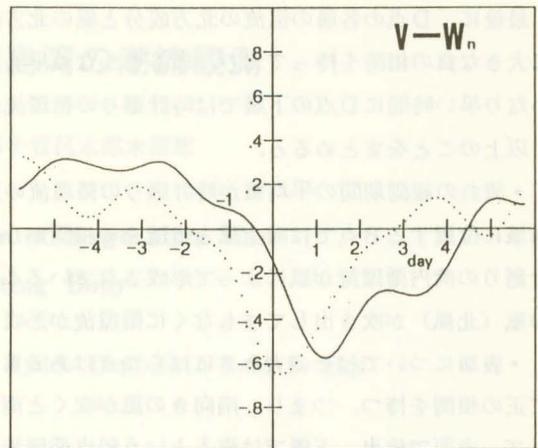
第11図は、B点の各層の恒流の北方成分と千葉灯標の風の北方成分の相互相関関数である。この点ではどの層でも風との相関がかなり高くなっている。また、応答は深い層ほど遅れる傾向にある。このB点で注目すべきことは、観測期間の流れの平均値では上層と逆方向になっていた最下層の17m層も風の変動に対しては上層と同じ傾向の応答をしていることである。つまり、平均的な北風の状態では上層とは違った方向に流れるが、風が強くなると、上層と同じ方向に流れていくということを意味している。第12図には、このB点の最下層とその上の海面下10m層の恒流の時系列変化を示した。この図から、平均的には最下層とその上の



第12図 B点の恒流の時系列変化
 点線: 10 m層, 実線: 17 m層



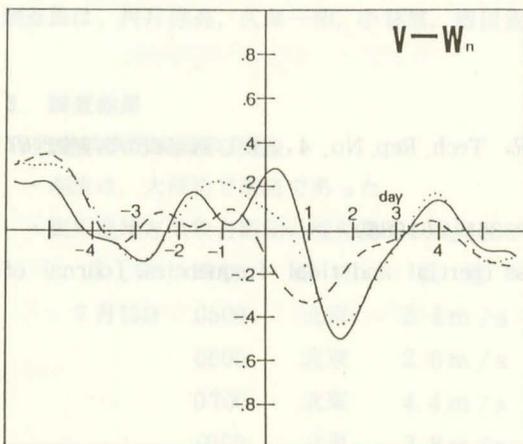
第13図-a C点の恒流の北方成分（上層）と千葉
灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
実線：0.5m層，点線：1.5m層，破
線：3m層



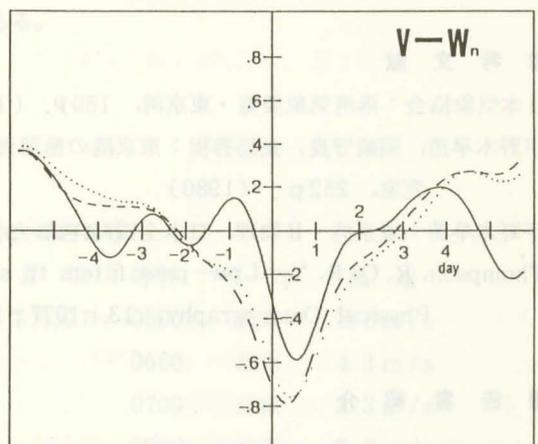
第13図-b C点の恒流の北方成分（下層）と千葉
灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
実線：7m層，点線：13m層

層では恒流は異なったレベルにあるが、その異なったそれぞれのレベル上に同じ様な変動が重なっているのがわかる。

第13図は、C点の各層の恒流の北方成分と風の北方成分の相互相関である。上層では恒流は風と正の相関を持っている。すなわち、南に向かう（北風）が吹けば、恒流は南に向かう。一方、下層では負の相関を持ち、南向きの風が吹くと恒流は北に、時計廻りの循環流の方向に流れることを示している。



第14図-a D点の恒流の北方成分（上層）と千葉
灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
実線：3m層，点線：7m層，破線：
10m層



第14図-b D点の恒流の北方成分（下層）と千葉
灯標の海上風の北方成分の相互相関関数
実線：15m層，点線：20m層，破線：
23m層

最後に、D点の各層の恒流の北方成分と風の北方成分の相互相関を第14図に示した。下層においては非常に大きな負の相関を持っており、応答もかなり早く、遅れは数時間である。つまり、北風が吹き出してから、かなり早い時間にD点の下層では時計廻りの循環流が形成されるということを示している。

以上のことをまとめると、

・流れの観測期間の平均値が時計廻りの循環流の方向の値を示した東京湾の西側の海域の下層と、東側の海域に位置するB点では海上風と恒流との相関がかなり高く、従来から指摘されているとおりに、冬季の時計廻りの湾内循環流が風によって形成されていることを示唆している。しかも、応答がかなり早く、南向きの風（北風）が吹き出してまもなく循環流が形成されているように思われる。

・表層についてはその大きさにばらつきはあるものの、各測点とも恒流の北方成分は風の北方成分に対して正の相関を持つ、つまり、南向きの風が吹くと南向きの流れが表層において生まれることになる。したがって、表面で流出、下層では流入という鉛直循環流的な恒流も冬季には風によって形成されていると考えられる。

・B点の最下層の恒流が平均的状态では、時計廻りの循環流と逆の方向であるのに、南向きの風が強くなると時計廻りの循環流の方向に向かう傾向があることから、湾内循環流の流出、流入をそれぞれ受け持つ場所の空間的分布は海上を吹く風の強弱に依存している可能性が大きいと考えられる。

5. まとめ

北偏風の卓越する冬季を選んで海上風と流れの観測を行って、東京湾において海上風が流れに及ぼす影響について調べた。その結果、冬季の恒流成分には海上風の影響が非常に大きく、冬季の北偏風に対応して早い応答時間で時計廻りの循環流が形成されること、そして、同時に表層で流出、下層で流入といった鉛直循環流の性質も兼ね備えていること、さらに、その流出、流入の空間的分布は海上風の強弱によって変化することなどの知見を得ることができた。

参 考 文 献

日本気象協会：港湾気象要覧・東京湾，180p.（1982）

宇野木早苗，岡崎守良，長島秀樹：東京湾の循環流と海況，Tech. Rep. No. 4，理化学研究所海洋物理研究室，262p.（1980）

宇野木早苗：東京湾・II物理，日本全国海洋誌，p. 344—361.（1985）

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

報 告 者 紹 介



Satoshi Sato

佐藤 敏 平成元年12月現在、

本庁水路部海洋情報課海洋情報官付