

海洋環境変動予測のための観測とその評価

Survey and its evaluation for prediction of fluctuation in oceanic environment

財団法人	電力中央研究所	正会員	和田	明
	同上	正会員	角湯	正剛
	同上	正会員	荒木	洋

1. 緒 論

最近、人間活動と沿岸海域の環境とのかかり合いについて社会の関心が高まり、沿岸海域での海水の流動・拡散過程が現地観測、水理模型実験、数値モデルによるシミュレーション手法などの手段によって検討されるようになってきている。

沿岸海洋過程の研究分野においては、海洋の動的な状態を把握し、エコシステムへ影響をおよぼす多くの素過程の役割を明かにすることが一つの大きな研究目標となっている。それは流動にせよ、密度構造にせよ、海洋の物理的素過程そのものが、時間的・空間的にかなりの変動性をもっているからである。

沿岸海域における物質の拡散現象を支配する要因として、海水の流動・分散過程、地形条件および排水条件などの項目が考えられる。これらの要因が複雑に組み合わさって、海域における混合・拡散過程を形成している。したがって、実際に当面する個々の海域における流動・拡散特性は、これら要因をひとつひとつ検討して海況変化を支配する要因として、どういうものが支配的に作用するかを見きわめてゆくことによって得られるであろう。このような研究展開のうえにたつて、初めて信頼できる海洋域における流動・拡散モデルシステムが作られ、それに基づいて海洋における変動の予測も可能となると考えられる。

本文では、海洋環境を特長づける要因にふれて、物理学的過程についてこれを現実の海水の運動との関連でとらえ、現象の時・空間スケールと物理過程とがどのような関係にあるのか、また決定論的な過程と不規則な過程がどのように結びつくのか、あるいは多様な素過程の相互作用や重畳が沿岸過程の形成にどのような効果をもつのかを論ずる。特に、本邦沿岸海域で実施した水温、流動の連続観測資料の統計解析結果に基づいて、各種の要因（風、潮汐流、定常流成分など）が海洋環境変化におよぼす影響度合を検討すると共に、海洋環境変動の予測を展開する場合の現地観測と評価方法について述べる。

2. 海洋環境変動予測のための手順

わが国の沿岸海域は、海水流動特性からみて、潮汐作用によって周期性のある変動をもつて流れる海域と、周期性のほとんどない海域とに大別されることがわかる。一方、周期性の有無にかかわらず、いずれの海域についても、その海域の流速変動が海洋環境素過程に対して、どのような働き方をするのかを把握することが重要なことである。そのためには、海水の流動を構成する流速変動成分について、乱れとみなす部分と乱れ以外の流れとみなす部分に分けることが適切であると考えられる。

海域の流れと乱れとの区別は、現象自体のスケールとそれを取りあげるときの時間・空間スケールの問題によって決まる。海域において観測された流速変動記録を統計的に解析して当該海域の流動特性、拡散特性を考える場合、この時間・空間スケールを認識し、それに応じた特性を把握しなければならない。

海洋環境変動予測を行う場合の流動特性、拡散特性を把握するためのフローチャートを図-1に示す。図-1のなかの恒流成分を推定する方法として、対象とする現象の時間スケールで流速変動記録を移動平均すると、その時間スケール以下の高周波成分の乱れは除去され、それ以上の長周期成分のみが残ってくる。この移動平均された流速変動より対象海域における代表的な恒流成分を決定する。そのためには、移動平均された流速変動成分の頻度分布を計算し、最も頻度の高い成分を恒流成分として採用するのも一つの方法である。その場合、この恒流成分の継続時間についても十分検討する必要がある。

3. 外海域での流動と

分散特性¹⁾²⁾³⁾

海域には海流、吹送流、潮流などならびにそれらからエネルギーを与えられた大小さまざまな渦が存在し、対象とする時間・空間スケールによってその性質は異なるであろう。従って拡散現象を把握するに当っては、対象とする現象の時間・空間スケールを考慮した現地観測が不可欠であるものと考えられる。たとえば、数kmの空間スケールを対象とする場合には、それを支配する乱れの時間スケールは約1～2日程度と考えられ、その程度のスケールの乱れは約半月間の観測期間でもって十分把握できるものと考えられる。しかし、外海に直接面した海域では海流の分枝流、風などの影響を受け、数日以上の変動成分が流れのなかに含まれることがある。従って、大きなスケールの拡散現象を考える場合には長周期成分をどのように考え、拡散モデルのなかに取りこむかが重要な検討事項となる。

本節では、福島、新潟、ならびに遠州灘沖合海域で実施された流動

の長期間連続観測の検討結果から、当該海域の流動・拡散の変動特性について述べる。

沿岸の流れに周期性のない外海域において、1日程度の拡散現象を考えると、1日以下の短周期変動は乱れとして拡散過程に作用し、長周期変動は移流効果（恒流成分）として寄与するであろう。図-2は各地点での24時間平均流の汀線に平行な方向の独立出現頻度分布を季節的に表わしたものである。図中の太線はそれぞれ汀線方向、岸沖方向の夏季・冬季別の平均値を示す。

福島地点では、夏季には5cm/sの南流の発生頻度が高いことを示しているが、冬季には南方分速頻度分布は比較的一様な形状を示す。このことと併せて、図-4に示す15日平均流ベクトルから当該海域においては南流が基本的流れであり、その上に数日の変動周期を有する流動現象が重畳されているものと推定される。¹⁾

新潟地点では北上する対馬暖流の影響を受けて沿岸に平行に北上する流れが卓越し、15日平均流の流速は約10cm/sである。また図-2から夏季には北向き10cm/sに卓越した頻度が認められる。冬季にはその分布の幅が広がる傾向を示している。

遠州灘沖地点では、一年中を通じ東向きの発生頻度が高く、その分布の幅が広がり、15日間平均流も同じ傾向で、夏季よりも冬季に大きな値を示す。

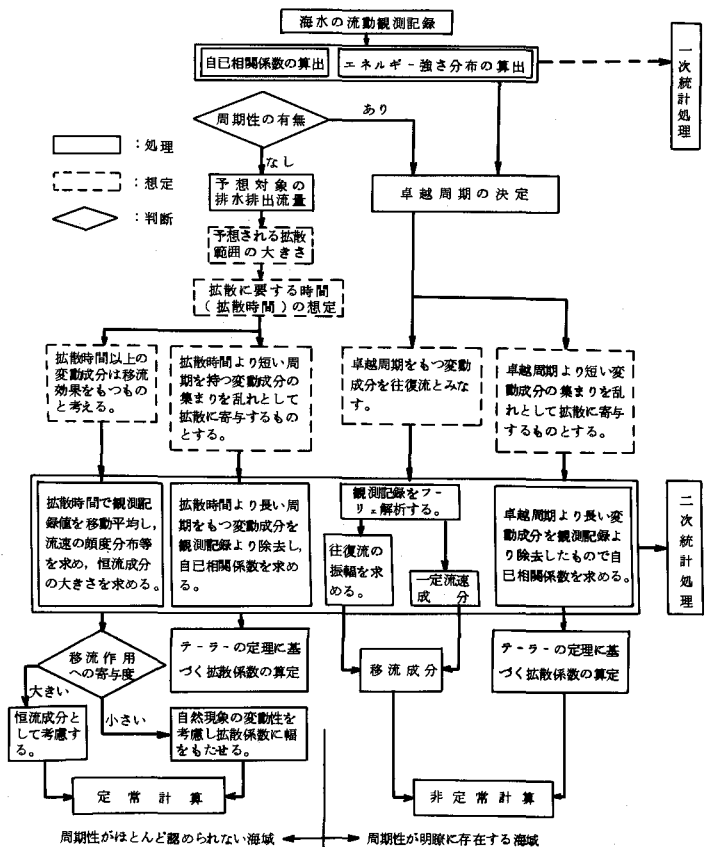
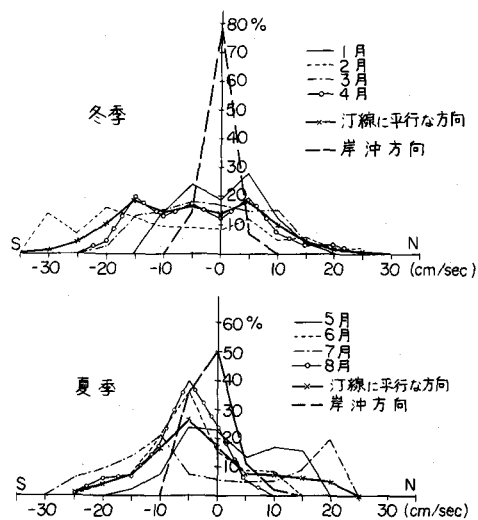
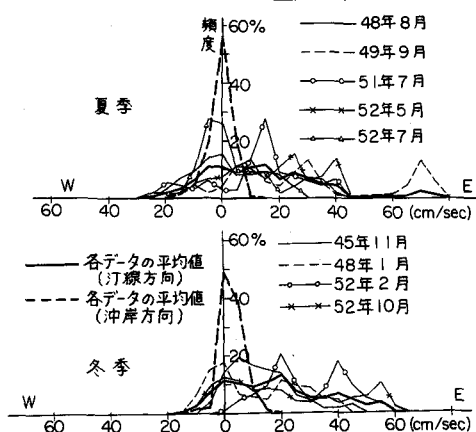


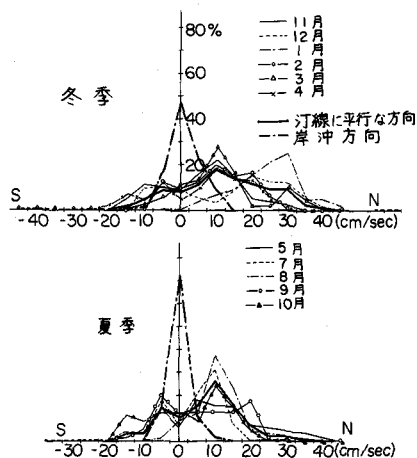
図-1 海洋環境変動予測のための手順



(A) 福島地点

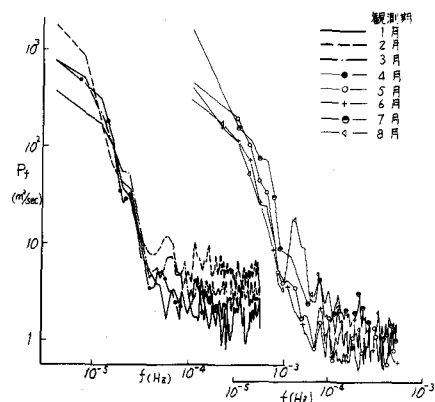


(B) 遠州灘地点

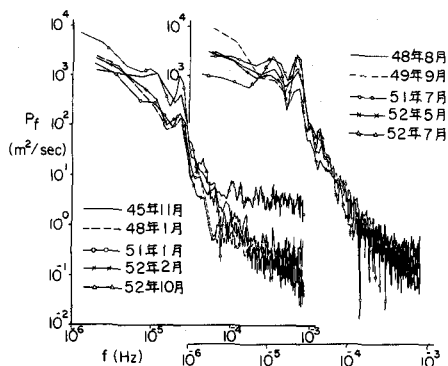


(C) 新潟地点

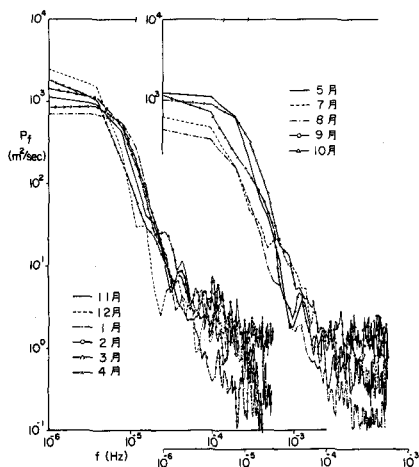
図-2 24時間平均流の独立出現頻度分布
(沿岸に平行な方向)



(A) 福島地点



(B) 遠州灘地点



(C) 新潟地点

図-3 各月別における流速変動のエネルギー
スペクトラム (沿岸に平行な方向)

図-3は3地点での汀線に平行方向における流速変動の季節的な特徴を把握するために、各月別に15日間データに分割して求めたエネルギースペクトルである。

福島地点ならびに新潟地点におけるスペクトル形状は各月で若干の相違はあるが、ほとんど同じ形状でエネルギーレベルも同一レベルにある。このことから、短周期変動の統計的特性の季節的な変動は比較的小さいものと考えることができる。一方、遠州灘沖地点では、冬季にはランダムな流れが卓越し、夏季にはその上に1日および半日周潮の潮汐流成分が重畳されている。このように、冬季と夏季とでは流れの特性にかなりはっきりした差が認められる。

図-5は各月データの24時間以下の高周波成分による拡散係数 K_x （汀線に平行な方向）、 K_y （岸沖方向）の値を季節的にプロットしたものである。

福島地点については、 K_x の値は各月の値とも $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ の近傍で半オーダー程度のバラツキであるが、 K_y はこれより若干変動幅

が大きく、1オーダー程度の差が認められる。自然の変動性を考慮しても、拡散係数は1オーダー内におさまる、比較的一定した値となっていることが認められる。新潟地点での拡散係数の変動特性は、福島地点とほぼ同じであり、 K_x 、 K_y とも1オーダーの範囲内にある。

遠州灘地点については図-5から明らかのように拡散係数 K_x 、 K_y でも約1オーダーの幅で分布している。また夏季は冬季にくらべ、 K_x 、 K_y とも半オーダー前後大きな値を示し、沖合500m～700mの沿岸に近い測点では沖合にくらべ小さな値を示すことが多い。

上記のように、1日程度の拡散現象に着目し、Taylorの理論を自己相関の相似性の仮定のもとにオイラー系に拡張して求められる拡散係数について、3ヶ地点のデータを各月ごとに15日データに分割してその値を求めた結果、拡散係数の変動は半オーダーないし1オーダー程度で空間的にも季節的にも変動は少ない。

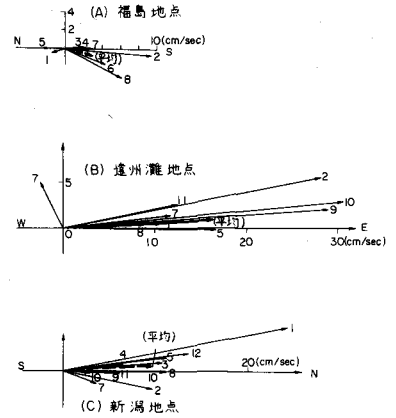
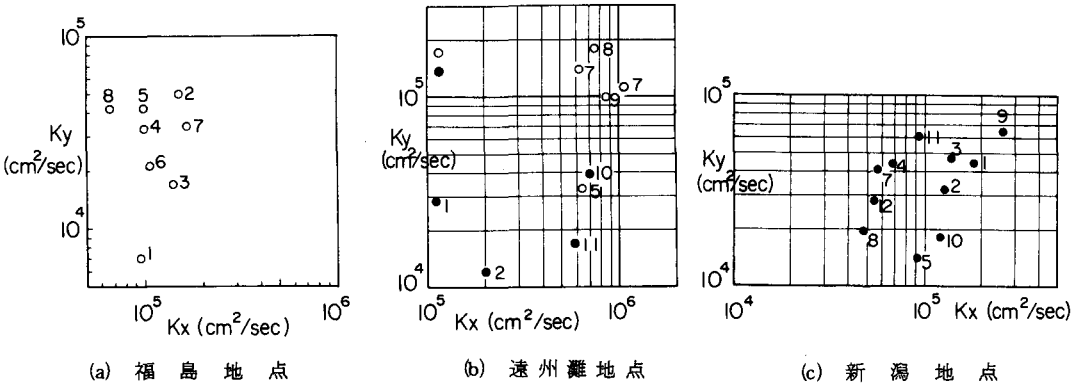


図-4 各月における平均流のベクトル



(図中の数字は観測月を示す。)

図-5 24時間スケールに対応した拡散係数

4. 内湾での循環流特性

外洋では水温や塩分の決定する機構に関して、潮流は支配的とはならない。しかし、内湾水域においては潮流はこの現象の恒常性と規則性とあいまって最も卓越した流系である。これまではこの潮流によって物質

の分布が決定されていると一般に考えられてきた。

一方、振動性の潮流と異なって、流速は小さいが一方向に流れるいわゆる恒流成分が物質の分散により大きい影響をおよぼすことが考えられる。実際の内湾水域における海水運動のなかには、潮汐の周期よりも長い時間変動をもつ恒流と称せられる流れが存在している。たとこの恒流の大きさは潮汐成分にくらべて小さいこと、恒流自身を正確に測定できないことならびにその成因が不明確なことがあって、これまであまり考慮されていなかった。しかし、最近では水質汚染の問題と関連して、この恒流が物質分布の形成に大きな役割を果たすことが指摘されるようになった。⁴⁾

湾内での循環流（一種の恒流）の成因は多種多様であると考えられる。25時間平均流としての恒流には潮汐残差流、風による吹送流、重力対流などの過程が含まれている。これらの過程が循環流のなかにどの程度含まれているか分離することは困難であるといえる。

ここでは、東京湾、三河湾の二つの例をとって、恒流という現象を明確にすることに重点をおいて説明をしよう。

A 東京湾の場合⁵⁾

図-6は既往の観測値を整理して寒候期の東京湾の恒流として発表されたものである。⁶⁾これによると湾内部に時計回りの環流が存在していることが認められる。恒流の要因として、東京湾では潮汐が常に存在するから、潮流の非線形性と地形とが結びついた潮汐残差流が先ず考えられる。

簡単なため、密度一様の一層モデルを仮定して東京湾口に半日周潮を与えたときの潮汐残差流を求めた結果、湾奥から中央部にかけて図-7で示される時計回りの環流が認められたが、流速値が数cm/sと小さく、このモデルによる東京湾の環流は潮汐残差流では説明できないように思われる。

図-7は寒候期に卓越している北北東の季節風による吹送流系が卓越すると想定して実施した数値実験の結果である。湾中央部から湾奥部まで含めた環流のパターンは潮汐残差流の混合よりも風による方が実測値に近く、風成作用が大きいことを示している。またこの場合の環流のパターンは等水深線に類似していて、海底地形の変化が海域における循環に影響をもつことがいえる。

この場合、恒流の主因は本当に風であろうか？しかし、現時点では実際の海域での潮汐残差流の発生機構が未解明であること、時空間スケールの大きい流れの場に対する風成作用の持続性がないことなどの点から考えて、恒流はどのようなものか今後検討する必要があるだろう。そこで、東京湾内の流れの水平乱れの統計的特性の観点から、流況

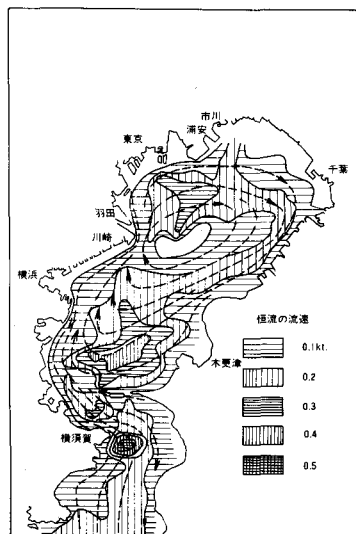


図-6 東京湾の寒候期での恒流系⁶⁾

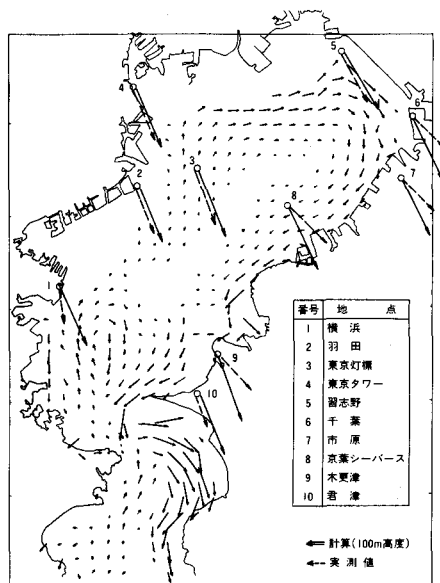


図-7 風の吹送に伴う環流のパターン（計算）

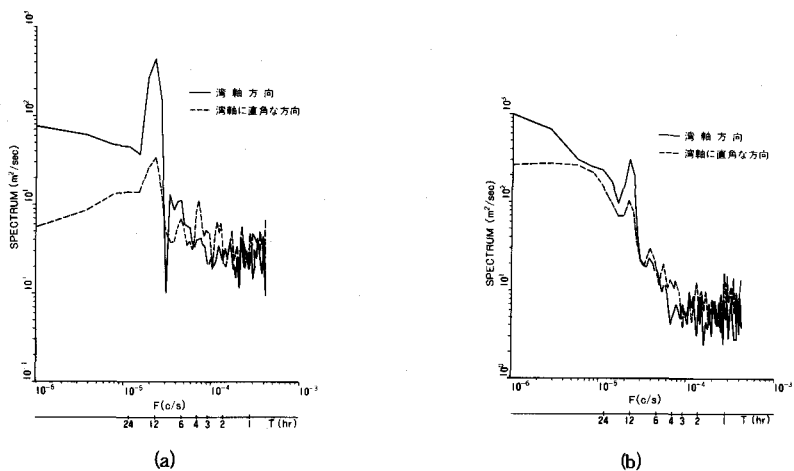


図-8 東京湾東部海岸付近の流速変動の
エネルギー・スペクトル

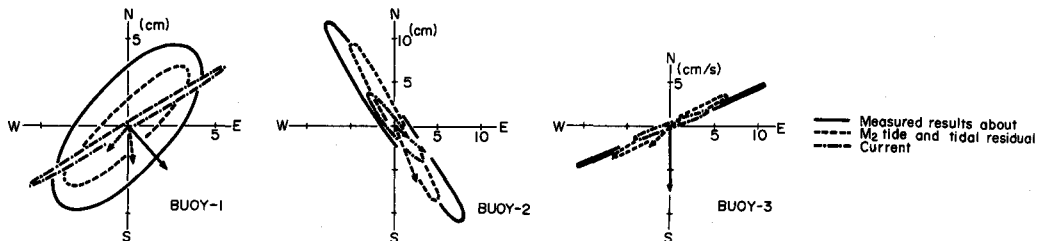


図-9 各ブイでの季節別流況(潮流楕円と恒流成分)

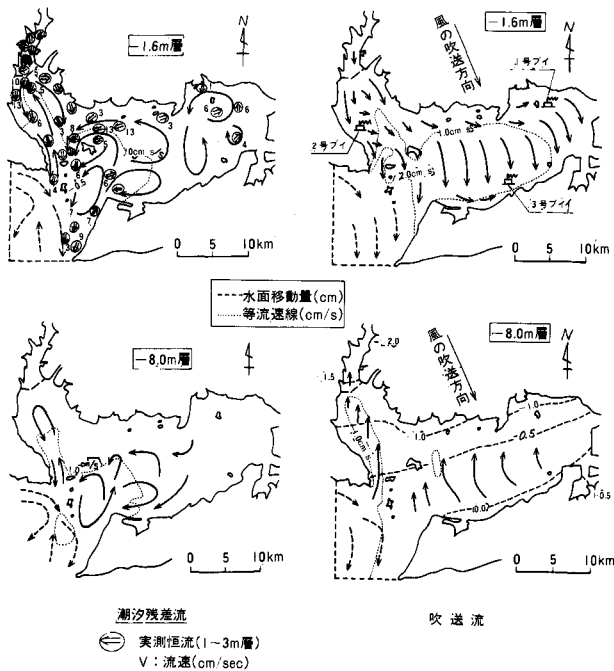


図-10 三河湾内の流動の模式図

特性を検討してみる。図-8(a),(b)は寒候期、湾東部域で測定した流速変動のエネルギースペクトルを示す。統計解析の結果より、ある時期では半日周潮流が卓越しているが、他の時期では半日周潮流の周期に相当する周波数へのエネルギー集中度は小さく、より長周期成分にエネルギーが集中している。このことは湾内においても周期成分が微弱で不規則な過程が卓越する場合があることを示している。この場合、潮汐周期よりも大きな時間規模を持つ、いわゆる恒流が卓越するものと考えられる。このことから、外洋からの影響も含めた内湾での流動機構を見直す段階にあるように思われる。

B 三河湾の場合⁷⁾

三河湾内の潮流は半日周潮流が卓越し、とくに M_2 分潮成分の存在が顕著であることが流動測定結果から確認されている。夏季においては顕著な密度躍層が形成されるが、冬季においては海面から海底まではほぼ一様な分布となる。湾付近での年間を通しての風の特徴は秋季から春季にかけての北西寄りの風と、夏季の南寄りの風に大別される。このうち、冬季における北西寄りの風の風向別発生頻度は約90%ときわめて顕著で、かつこの期間の平均風速は 6.6 m/s と最も大きい。このことから、三河湾の湾内水はこの冬季風により循環させられることが予想される。

三河湾には、愛知県水産試験場所属の海況観測ブイが図-10に示す3箇地点に設置され、水面下1m層の流向流速が1時間ごとに観測されている。図-9に冬季(12~2月)、春季(4~6月)、夏季(8月)の季別の平均流ならびに M_2 分潮潮流楕円を示す。冬季においては、1, 3号ブイで、風の吹送方向に流れる顕著な恒流成分が存在し、その大きさは図-9に示すように M_2 潮のほぼ60%におよぶが、これらの恒流は春季、夏季には弱まり、方向も変化することが認められる。

海況観測ブイの流動観測データに対し、24時間の移動平均をほどこし、1日以上長周期の流動の変動特性を検討した結果、冬季には卓越風によるものと考えられる流れが継続し、風向風速の変動に呼応して流動の長周期変動が存在していることを示唆している。これらの変動周期は季節により異なる。冬季には卓越した季節風の存在により、変動周期が10日以上におよぶことがある。春季においては、3, 4日の周期で変化する天候に従って風向風速もめまぐるしく変化するため、流動は3, 4日の変動周期をもって変化する。夏季の変動周期は2, 3日程度であって、長時間にわたり同一方向に継続する流れは生じにくい。

このことから、湾内水の流動特性として、潮汐流、潮汐残差流のほかに、風の吹送に伴う流動の長周期変動が存在していることが認められ、とくに冬季には、卓越した冬季季節風の存在により、変動周期が10日以上におよぶ安定した流動の存在が認められる。

このように観測結果から求めた恒流が、数理モデルによってどの程度説明され得るかについて多少検討したので、その結果を述べる。

吹送流に関する解析結果の模式図を、代表的水深について図-10に示す。これより、平面的な循環というよりはむしろ風の吹送方向における鉛直循環流が卓越するという結果が得られている。図-10には海況観測ブイの位置が示されているが、この付近における流動ベクトルは図-9に示した冬季の平均流の流向と一致している。

一方、潮汐流の解析結果より、1潮汐時間の平均流速を求め、これを潮汐残差流として図示したものが図-10である。図中には、密度成層が形成されない10月から4月にかけての寒候期での潮流観測より得られた恒流の流向流速をあわせて示している。この場合、潮汐作用に起因する鉛直循環流の存在は認められず、潮汐流ならびに潮汐残差流は水平運動の卓越する大きな渦、および水平循環流としての性質が卓越しているものと考えられる。湾内部においては観測資料が少ないこともあって系統的な流向を示さず、解析結果を実測値に対応させるのは困難であると考えられる。しかし、図中に示した寒候期の実測恒流は、計算で顕著な平面循環流の認められる海域において、その流動パターンに比較的良好一致を示している。循環の形状は閉鎖的な環流が認められ、外部との海水交換はあまり活発でないことは宇野木の結果⁸⁾と同じである。

上記のように、三河湾においては潮汐往復流に伴う大きな水平渦、潮汐残差流としての水平循環流のほか

に、季節風が卓越する冬季には、風の吹送による鉛直循環流が形成され、これらの因子が湾内の分散過程に影響をおよぼすことが予想される。

5. 水温変動の特性¹⁾⁵⁾⁹⁾

自然海域に放出される排水、特に温排水についての影響評価を行なうには、対象とする海域の自然水温変動の特性を把握する必要がある。自然界の水温形成過程を知ることは拡散のモニタリングの面からだけではなく、海生生物への影響を推しはかる観点からも重要である。一般に、海域での水温変動は季節的な周期変化をくり返す。従って、水温変化は以下に示す3つの周期成分から成り立つものと考える。

$$T = T_L + T_M + T_H$$

ここに、 T_L は1ヶ月に相当するデータを移動平均することにより得られる低周波成分で季節変化を表わす。 T_M は $T - T_L$ のデータを25時間移動平均して求めたもので、1日から1ヶ月間の期間にわたる中規模周期変動である。 T_H は高周波成分で原データより T_L と T_M を差し引いた後に残る短周期変動である。

図-11(A),(B)はそれぞれ福島沖ならびに瀬戸内海中央部の海面下2～2.5層で長期間観測された水温記録をもとに変動特性を解析した結果の一部であり、上から原データ(1時間平均値)および T_H の時系列特性を示したものである。

T_L 成分は季節的にみてほぼ正弦波的形状を

示すが、春季から夏季にかけての水温上昇期に、内海では小さな変動を含む単調増加の様相を示す。一方、外海域にあっては、比較的長い周期成分をともなつて大きい水温変動を示しながら、水温が上昇している。この水温変動特性から、水温変動と流速変動との間には強い相関関係が存在するものと考えられ、大規模な水塊移動現象の生起が考えられる。

図-12は各月の T_H 成分の標準偏差(σ_H)を示したものである。冬季、夏季では、内海と外海との間に多少の差異が認められるが、変動幅を3 σ で定義すると1日以下の短周期変動における季節変化は小さく、

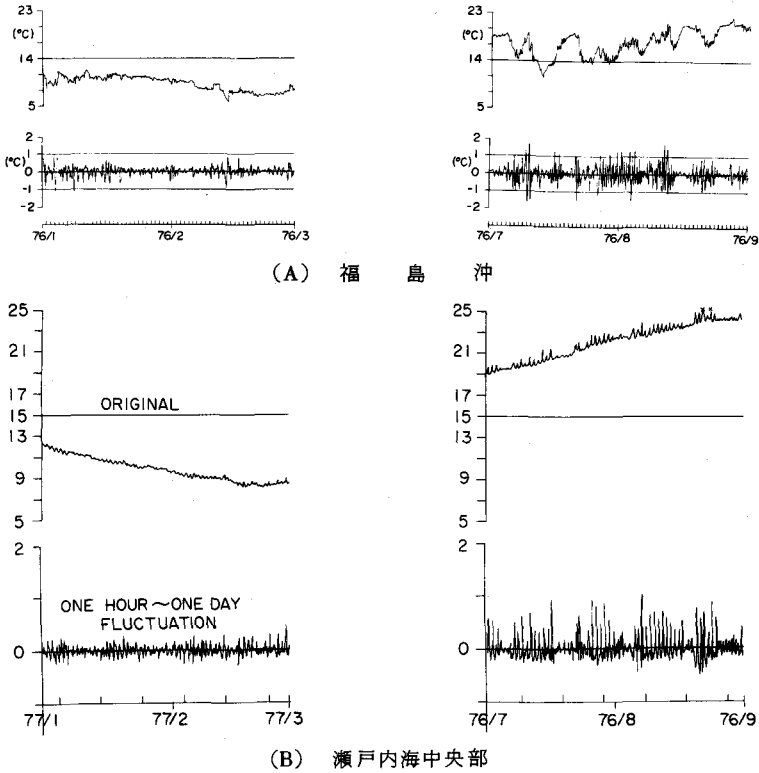


図-11 水温変動の時系列特性

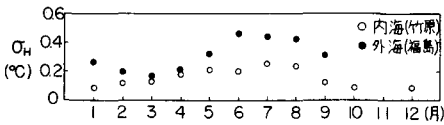


図-12 水温の短周期変動(1時間～1日)の標準偏差

変動幅は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度である。

従って、上記の温度変動場のなかに、海生生物が生息しているわけである。また、温度記録による水温の時間的変動からして、自然海域において 1°C 以内の水温の変化を定義することは、夏季においてはきわめて困難であり、冬季においても不可能なことを考えられる。

6. む す び

沿岸海域における海洋環境変動の予測を展開する場合、流動・拡散モデルによる実験だけでできることに限界があることは今さらいうまでもない。実証的な現地調査、個々の基礎的現象に関する基礎的実験との間に相互に有効なフィードバックを繰り返すことが要求される。特に現実的要請にこたえる予測実験に際しては、対象とする海域ならびに問題に対して、どのような現象が基本的であるかを評価するのは極めて重要であり、そのためには現地観測データが不可欠であり、また現象に応じて異なる流動・拡散モデルを考えることが大切であろう。

参 考 文 献

- 1) 加藤 正進・和田 明・角湯 正剛：福島沖合海域における流動と拡散特性，第22回水理講演会論文集，1978.
- 2) 角湯 正剛・和田 明：太平洋沿岸海域における流動特性，第32回土木学会年次学術講演会概要集，1977.
- 3) 小森 修蔵・田中 寛好・和田 明：砕波帯近傍における温排水の移流拡散に関する実験的検討，電中研報告№377018，1978.
- 4) 樋口 明生・柳 哲雄・柏井 誠：潮流による拡散の水理模型実験について(M)，京都大学防災研究所年報，第17号B，1974.
- 5) 和田 明：沿岸付近の物質拡散，1978年度水工学シリーズ，78-B-6，土木学会水理委員会
- 6) 山田 紀男：東京湾の潮流，水路要報，91号，1971.
- 7) 和田 明・宮池 克人：湾内水の循環機構に関する研究，電中研報告№377025，1978.
- 8) 宇野木 早苗：沿岸の海洋環境に関する数値実験，沿岸海洋研究ノート，第13巻，2号，1976.
- 9) 角湯 正剛・和田 明：瀬戸内海東部海域における水温変動の特性，昭和53年度土木学会年次学術講演会概要集，Ⅱ部