

紀伊水道の海況変動について

國司 秀明・吉岡 洋・鈴木 徹

ON THE OCEANIC PROCESS AT KII-SUIDO

By Hideaki KUNISHI, Hiroshi YOSHIOKA and Toru SUZUKI

Synopsis

There appear marked discontinuities in water temperature and chlorinity at the mouth of Kii-Suido in winter. In connection with this, the process of yearly change in oceanic situation in the sea of Kii-Suido is described. The horizontal diffusion coefficients are estimated of $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ in the inside sea of Kii-Suido and of $2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ near the mouth of Kii-Suido from the distribution of the yearly mean chlorinity. The possibility that the former is explained as the shear effect of a horizontal circulation in the sea of Kii-Suido and the latter as the tidal mixing and the shear effect of a vertical circulation through Kii-Suido is discussed.

1. ま え が き

沿岸海域におけるいわゆる気象と海象とを一つの大気海洋過程としてとらえようとする立場から、その対象としてわれわれは瀬戸内海とその関連海域をとりあげることとし、まず紀伊水道を含む海域の海況特性に関する研究を開始した。この小論はその序論的な報告で、紀伊水道海域にみられる特徴的な海況の概要と今後の研究の方向について述べたものである。

2. 紀伊水道海域の海況特性

Fig. 1 に問題としている紀伊水道海域の図を示したが、この海域の最も特徴的な海況は、紀伊半島側日ノ御岬と四国側蒲生田崎とそれに続く伊島とによって挟められたいわゆる紀伊水道の付近に、冬季にかなりの定常性をもって出現するいちじるしい水温と塩分の不連続である。このことは、すでに古く市栄¹⁾によって指摘されたところであるが、最近著者の一人吉岡²⁾によっても再確認されている。その詳細はすでに他の機会に発表してあるので、ここでは簡単にその状況をまとめて示しておくこととする。

Fig. 2 は和歌山県と徳島県の水産試験場が1966年の2月上旬に行なった定期海洋観測の資料によって描いた表面水温および塩素量の分布図である。等温線、等塩素量線の紀伊水道付近への集中の状況から水温、塩分の不連続の存在とその程度をみることができよう。この図からは、たとえば水温について、おおまかに10 km で 5°C 程度の階段的な変化とみられるが、実際はさらにいちじるしいもののように、ちょうどこの時期に神戸海洋気象台の春風丸でとられた記録を調べた結果では、この 5°C の変化は2 km 程度の短かい距離の間に起っていた。**Fig. 3** に関西汽船の高知航路でのわれわれの観測例を示したが、この例のように0.8 km で 4°C 変化するといういちじるしい場合さえある。

すぐ後にも示すように、この水温と塩分との不連続は全く同じ位置に、しかも海底に迄達する形で起こっていて、いわば紀伊灘とでも呼ぶべき水道北部海域の海水と紀伊水道アプローチを占めている外洋水との境界を示すものと考えられ、この意味で水塊のフロントと呼ぶことができる。さらに興味深いことは、水温と塩分とのこのようないちじるしい不連続にもかかわらず、温度と塩分の密度に対する効果で相殺されて、密度的には全く不連続性の認められないことである。そのことも含めて、このような水塊のフロントの生成と

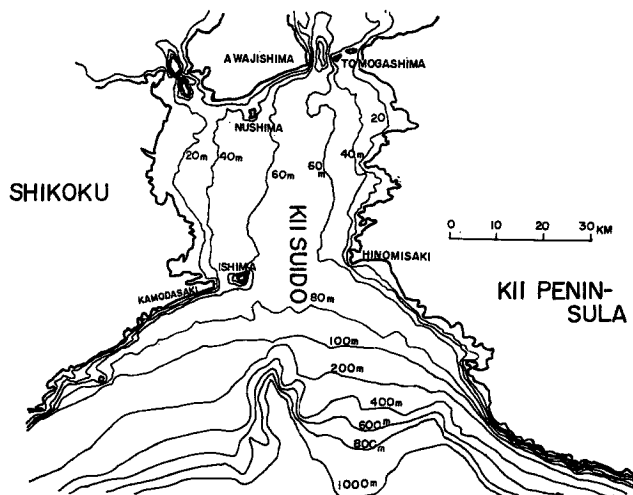


Fig. 1 Bottom topography of the sea of Kii-Suido.

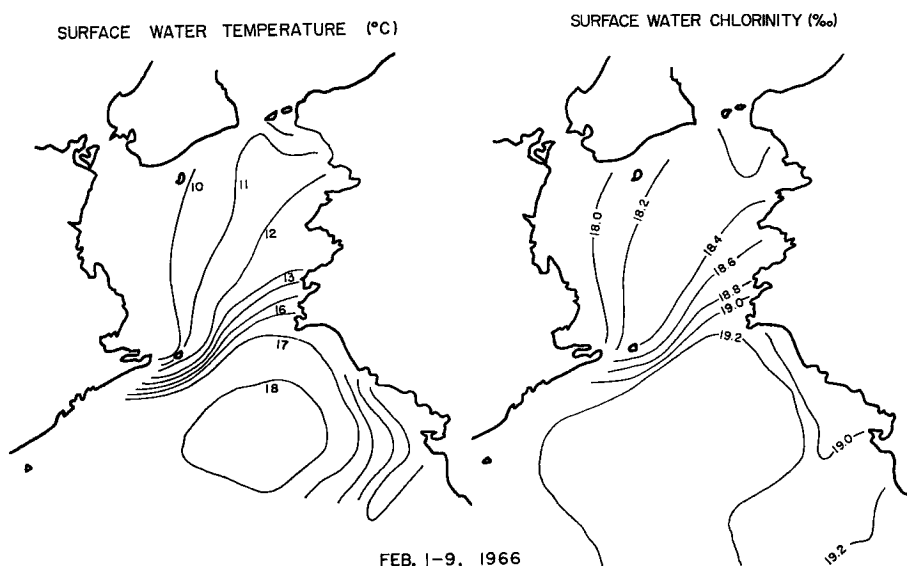


Fig. 2 Distributions of surface water temperature and chlorinity in winter. An oceanic front appears at the mouth of Kii-Suido.

維持ならびに消滅の機構を追求することが今後の一つの重要な研究課題であるが、ここではこの問題にこれ以上深入りしない。

Fig. 4 は、これまで述べてきた冬季の特異な海況が春から夏にかけてどのように変化していき、さらに秋を経て冬の状態がどのように出現してくるのかを示すために、再び和歌山県と徳島県の水産試験場の1966年の定期観測の資料によって、この海域の中央部に沿っての四季の縦断面図を描いたものである。冬の状態は全く特徴的で、明らかに底に到達する水温と塩分の不連続がみられる半面、すでに述べたように、密度の

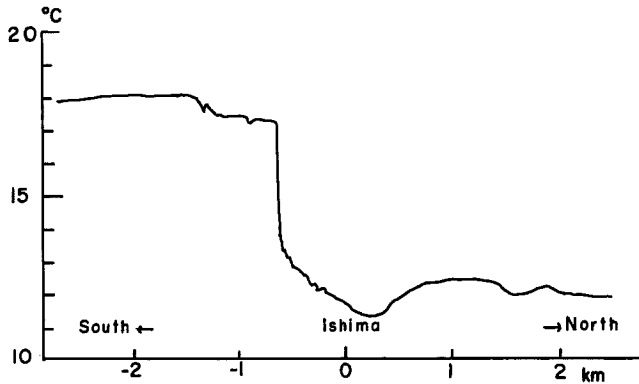


Fig. 3 Surface water temperature observed on the cruise through Kii-Suido on 19 th of January in 1970. The very distinct discontinuity in water temperature is shown off Ishima island.

分布には全く不連続が存在しない。晩春から初夏にかけての5月の図では、この水温、塩分の不連続がほやけだすとともに、下層に外洋水が侵入してきていることを示唆する分布が現われ、これから夏8月の成層状態へと移っていく。秋の冷却期に入った10月の図では、水温はほぼ全域にわたって一様となっているが、塩分の分布に二つの水塊が紀伊水道の部分で分離し始めようとしている傾向がうかがわれる。おそらくこのようにして再び冬の特徴的な分布へと移行するのであろう。

われわれは紀伊水道海域の海況の特性を冬季の特徴的な状態に一つの焦点を合わせながら、同時にそれを一年を通しての海況の推移過程の中にとらえてきた。このような記述的な現象の捕捉の段階からより定量的な段階へ研究を進めていく時に、二つの方向が考えられる。その一つはたとえば冬季のフロントの維持機構を精細に究明していくような方向で、それはそれなりの重要性を持ち、すでに述べたように、今後の重要な研究課題の一つである。しかし、他の一つの方向がある。それはそのようないわばメゾスケールでの現象を踏まえながら、さらにより大きなスケールで全体としての現象をとらえ理解していこうとする方向で、いわば前者を原因の追求の方向とすれば、これは結果の総合と意味の闡明の方向といえよう。次の節で述べることはこの方向での議論である。

3. 紀伊水道海域の水平拡散係数

Fig. 5 は、Fig. 4 に示した断面に沿う各月の観測塩素量について、深さ方向に表面から 50 m 層までの平均をとり、さらに1年間12個の値を平均した年平均平均塩素量の分布を示したものである。横軸に MOUTH とし示されているところが紀伊水道の位置を示しており、右側が内海側である。紀伊水道アプローチから紀伊水道へかけての値はかなり大きくばらついているが、全体的にみて、内海側と傾向が異なっており、ここでも紀伊水道のあたりに一つの不連続が存在するようにみえ、おおよそ図に実線と鎖線で示したようなこの海域の平均的な塩素量の分布を考えることができるであろう。この不連続は第一に冬季の不連続の反映と考えられるが、少しく内海側によっているのは他の季節からの影響と思われる。この不連続から内海側のさきに紀伊灘とよんだ部分での塩素量の値はほとんど直線上にのっていて、その勾配はおおよそ 0.065‰Cl/km である。われわれの次の問題はこれからこの部分の平均的な水平拡散係数を求めることである。

その計算を実際に行なうためには、この海域を通過する平均流量を知る必要がある。最近、速水・宇野木³⁾は瀬戸内海の一次元数値モデルによるすぐれた研究を行ない、この点に関しても興味深い多くの指摘と

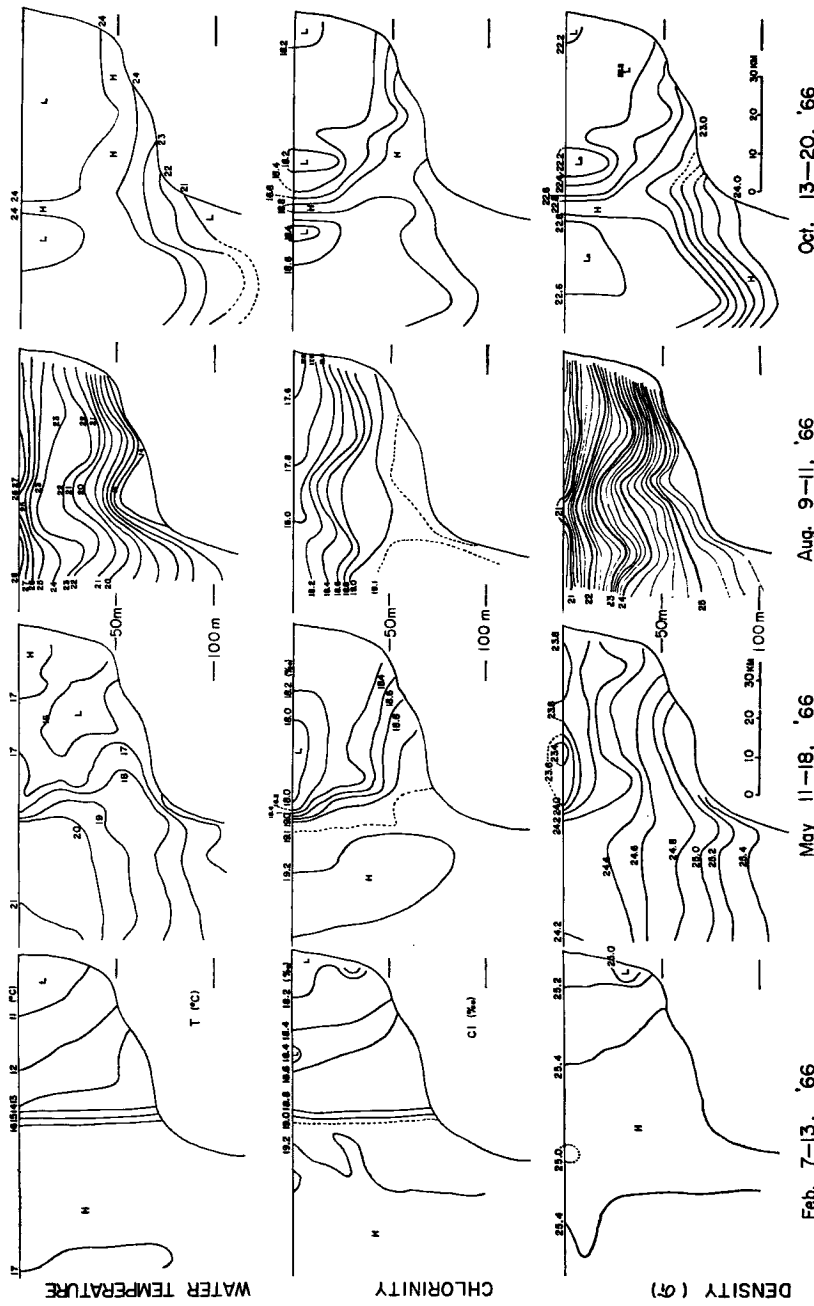


Fig. 4 The process of yearly change in the oceanic situation in the sea of Kii-Suido. The discontinuities in water temperature and chlorinity in winter are remarkable, but there is no discontinuity in density.

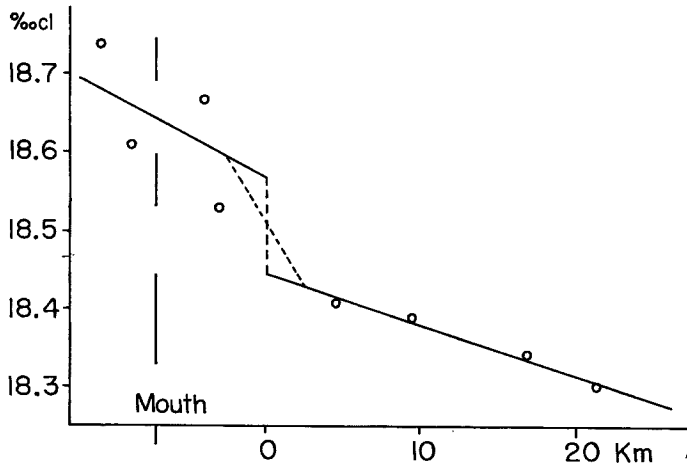


Fig. 5 Distribution of the yearly mean chlorinity in the sea of Kii-Suido.

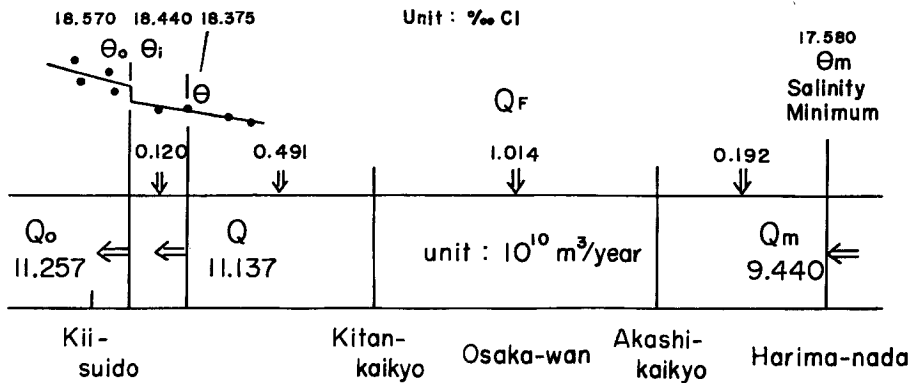


Fig. 6 Schematic figure showing the supply of fresh water and the eastward transport of sea water in the east part of Seto Inland-Sea.

示唆とを与えた。われわれもその指摘と示唆とを参考にして、塩素量の最小が存在する播磨灘東部での妥当と思われる東向流量と、そこから紀伊水道へかけての同じく妥当と思われる淡水供給量とを示したのが Fig. 6 である。なお図には計算に必要な塩素量の値もいっしょに示してある。

いま播磨灘東部での最小塩素量を θ_m 、東向流量を Q_m とし、問題としている紀伊灘での水平拡散係数を K 、横断面積を A 、塩素量と流量をそれぞれ θ 、 Q とし、さらにこの間の淡水供給量を Q_F とすれば、

$$Q\theta - AK \frac{d\theta}{dx} = Q_m \theta_m, \quad Q = Q_m + Q_F \quad (1)$$

の関係が成立するから、

$$K = \{Q_F \theta + Q_m (\theta - \theta_m)\} / A \frac{d\theta}{dx}$$

によって K の値を求めることができる。このあたりの横断面積の値 1.78 km^2 を用いて、計算結果は $1.06 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ という大きな値となる。

この $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ という値は速水・宇野木³⁾の研究でも瀬戸内海全域での妥当な値として得られているが、このような大きな水平拡散係数の値は、いったいどのようにして可能となり、何を意味しているのであろうか。われわれは一つの可能性として、Fig. 7 の (a) に示したようなこの海域における一つの環流を考えてみた。すなわち、図のような直径 $B=36 \text{ km}$ の円の中心から直線的に変化する流速分布を考え、この中央部の横断面のあたりで、流速と塩分 u, θ を、この横断面での平均値 $\bar{u}, \bar{\theta}$ と、それからの偏倚 u_1, θ_1 とにわけ、横方向の水平拡散係数を K_y として、

$$u_1 \frac{d\bar{\theta}}{dx} \simeq K_y \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y^2}, \quad u_1 = -\frac{2u_0}{B}y$$

が成り立つものとする、この流系による shear effect として、いわゆる分散係数 K が、

$$\bar{u}_1 \bar{\theta}_1 = -K \frac{d\bar{\theta}}{dx}, \quad K = \frac{1}{30} \frac{u_0^2 B^2}{K_y} \dots\dots\dots (2)$$

と与えられる。

いま K_y の値を $10^4, 10^5, 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ として計算すると、最大流速 u_0 がそれぞれ $0.5, 1.7, 5.0 \text{ cm/sec}$ という値で K の $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ が得られる。この結果をみると、このような考え方がそう無理ではないように思われ、これは一つの水塊形成力的な意味を持つものではないかと考えられる。なお、この $1.06 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ という値は、よく知られたリチャードソンの $4/3$ 乗則、 $K=0.02 L^{4/3}$ における L の値として、先の 36 km を用いて得られる値 $1.10 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ にきわめて近いことは注目すべきことであろう。

一方、紀伊水道や内側の塩分の不連続部では、拡散的な塩分フラックスの部分ニュートンの冷却法則の形、すなわち不連続の外側および内側の塩素量をそれぞれ θ_0 および θ_i として、 $Ak(\theta_0 - \theta_i)$ と表わすのが適当であるから、ここを通過する流量を Q_0 とし、さらにここまでの淡水供給量を再び Q_F と書けば、(1) 式の代りに、

$$Q_0 \frac{\theta_0 + \theta_i}{2} - Ak(\theta_0 - \theta_i) = Q_m \theta_m, \quad Q_0 = Q_m + Q_F \dots\dots\dots (3)$$

と書くことができるから、

$$k = \left\{ Q_F \frac{\theta_0 + \theta_i}{2} + Q_m \left(\frac{\theta_0 + \theta_i}{2} - \theta_m \right) \right\} / A(\theta_0 - \theta_i)$$

によって拡散率とでもよぶべき k の値を求めることができる。このあたりの横断面積の値 1.88 km^2 を用いて、 k の値は 5.50 cm/sec となる。

この k という量は、この不連続が実際には巾を持っているとすると、その巾を Δx として、 $K/\Delta x$ に対応すると考えられるが、Fig. 6 に斜めの鎖線で示したように、この不連続が 5 km の巾で起こったとすると、前と同様な計算によって $K=2.08 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。次の問題はこの値をどう解釈したらよいかである。この点に関して、二つの可能性があるように思われる。一つの可能性は前と同じような水平方向での shear effect を考えることであるが、もう一つの可能性として、むしろ鉛直方向での問題のとらえ方がある。

それは、まず、いわゆる潮汐混合として、紀伊水道からの潮汐が備讃瀬戸を越えて備後灘・畿灘まで及んでいることを考慮し、仮に速水・福尾・依田⁴⁾が明石海峡で得た水平拡散係数の推定式 $K=0.1 UL$ (U は潮汐に伴う漲潮または落潮の平均流速、 L はそれによる海水の移動距離) が成立つとすると、潮差 1 m で $0.6 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 1.5 m で $1.4 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度の拡散係数が期待されるが、なおこれだけでは少しく不足であり、これと同じ程度の効果が、前節で述べたような毎年春から夏に向って繰返されている外洋水と内海水との密度対流的な交換によって、起こっているのではないかとする考えである。

非常定性まで考慮したこの効果に関する理論は現在まだ存在しないが、Fig. 7 の (b) に示したような定常ないわゆる緩混合の Estuary に関する理論^{5), 6)}によれば、平均値を取扱う場合の水平拡散係数には、潮汐混合 K_x のほかに、粗い近似で充分ではないが、

$$K_{ss} = \frac{R^2}{K_y} \left\{ \frac{2}{105} + \frac{19}{420} \left(\frac{g\epsilon H^4}{48 A_x R} \frac{d\bar{\theta}}{dx} \right) + \frac{19}{630} \left(\frac{g\epsilon H^4}{48 A_x R} \frac{d\bar{\theta}}{dx} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (4)$$

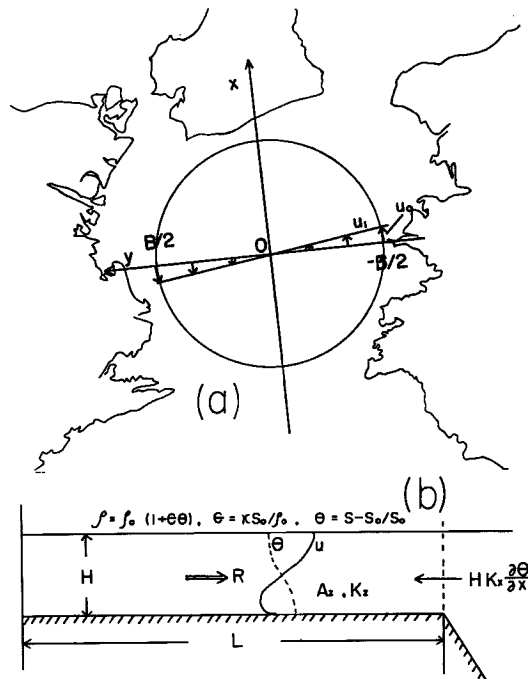


Fig. 7 Schematic figure for illustrating the horizontal diffusion coefficients due to shear effects.

で与えられる鉛直方向での shear effect に基因する水平の分散係数 K_x が加わる。ここに A_z , K_z はそれぞれ鉛直方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数で、 R は単位巾あたりの流量である。また、図にも示したように、 ϵ は塩分と密度との関係を表す量で、 θ はここでは基準の塩分 S_0 に対する比で表わされた相対塩分である。 g は重力の加速度である。

さて、深さ H を 50 m としてこの分散係数の値を概算してみると、仮に A_z と K_z は等しいとして、それらの 100, 120, 150 cm^2/sec という値で、ほぼ 2.0, 1.0, $0.6 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$ という分散係数の値が得られる。これらの A_z と K_z の値は、近似を進めると、それらの数倍の値となると推定される。この結果は、鉛直拡散係数のこれらの値がそう無理なものではないと考えられるから、この紀伊水道付近での平均的な海況の決定には、このような鉛直方向での過程を少なくとも充分考慮すべきことを示唆すると考えられるのである。

4. む す び

前節で述べたわれわれの考えはもちろんまだ充分確立されたものでなく、今後多くの点で観測事実を照して検討していかなければならないが、ここでわれわれが強調したいことは、今後瀬戸内海の流動拡散過程をとり扱っていく時、一つの方向として、各灘での固有な水塊の形成過程というような観点と、それらの海水の相互交換による一様化過程という観点とに考慮を払いながら、研究を進めていく必要があるということである。

この研究は、まえがきでもふれたように、瀬戸内海とその関連海域の大気と海洋の現象を一つの大気海洋過程としてできるだけ総合的にとらえようとする立場から、筆者らの所属する理学部海洋物理学研究室と中島暢太郎教授をはじめとする防災研究所の災害気候部門ならびに白浜海象観測所との協力によって進められている一連の研究の一環であることを記して、関係しておられる諸氏の御援助に深く感謝するものである。

また、資料の提供や観測の便をはかっていただいた、神戸および舞鶴の海洋气象台、和歌山県ならびに徳島県の水産試験場、関西汽船株式会社などの関係の方々にも同時に感謝の意を表する。さらに、観測の実施には理学部の田中耕三郎技官と防災研究所の芹沢重厚技官が協力されたことをとくに記して謝意とする。

参 考 文 献

- 1) 市栄 誉：紀伊水道の海況(1951)：神戸海洋气象台彙報，第 164 号，昭 28，pp. 253-278.
- 2) 吉岡 洋：冬期紀伊水道に発生する oceanic front について，海と空，46 巻，2 号，昭 46，pp. 1-14.
- 3) 速水頌一郎・宇野木早苗：瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散，第 17 回海岸工学講演会論文集，昭 45，pp. 385-393.
- 4) 速水頌一郎・福尾義昭・依田大介：明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について，第 3 回海岸工学講演会講演集，昭 31，pp. 49-53.
- 5) Hansen, D. V.: Salt Balance and Circulation in Partially Mixed Estuaries, ESTUARIES, 1967, pp. 45-51.
- 6) Kunishi, H.: A Theory on Partially Mixed Two-Dimensional Estuaries, (to be published).