

瀬戸内海における流況と分散特性

和田 明*・角 湯 正 剛*

1. ま え が き

瀬戸内海の海水は、潮汐流により毎日2回、紀伊水道、豊後水道および関門海峡を通じて内海水と外海水の往復運動が生じている。この他に、黒潮の本土接近に伴う内海への外海水の流入現象などが考えられる。このようにして瀬戸内海には潮汐流による周期的な往復流のほかに、恒流の存在も考えられ、加えて、湾、灘での環流によって海水交換に大きな役割を果たしている。

内海における物質の拡散問題は、それを取扱う時間・空間スケールによりその視点が異なる。たとえば、長寿命性の拡散物質の長期間の拡散問題を取扱う場合には、潮汐による往復流は流れというよりはむしろ大きな渦と考えられるが、短時間の物質の拡散を問題にする場合には、潮汐流は流れとして把握しなければならない。

瀬戸内海における物質の拡散問題については、工業排水による水質の悪化、赤潮の発生等公害防除の立場からさまざまな検討が行われている。しかし、これらの検討もそのほとんど全てが局地的な問題を対象に行われているにすぎない。瀬戸内海全体を対象に拡散問題を論じたのは、筆者の知るところでは、速水・宇野木¹⁾が、長期間の拡散問題として、瀬戸内海を一次元的に分割し、塩分分布との比較により、内海の拡散係数として約 $10^7 \text{cm}^2/\text{sec}$ の値を求めたものだけである。タイムスケールの小さい拡散問題は、空間的にもスケールが小さく、局地的な問題としての取扱いが可能である。しかし、瀬戸内海の規模は、東西で450km 南北では18~50km 程度であり、その中に数多くの工業地帯の存在することから、局地的な問題であっても相互に干渉しあい、タイムスケールの短い問題であっても内海全体として拡散問題を取扱う必要がある。この問題を取扱う際の困難性は、その問題を決定する諸々のパラメーター（流況特性、拡散係数等）の推定に依存している。そのためには、瀬戸内海全域で同時に長期間の流動観測を実施し、個々の海域ではなく、瀬戸内海全域の流況と分散特性を把握しなければならない。

本文は、瀬戸内海におけるタイムスケールの短い拡散問題を論じるための第一歩として、内海における流況と分散特性について論じたものである。本文中において使

用したデータは、環境庁が昭和47年7月~8月の約1月間実施した潮流速の連続観測記録、および塩分濃度、運輸省が大阪湾で昭和46年8月に実施した約半月間の潮流速連続観測記録、および通産省が昭和46年9月に実施した5日間の潮流速連続記録に基づくものである。

2. 流速変動の調和解析

内海における潮流は、衆知のように周期的な往復流である。したがって、この潮流を周期が既知な流れにフーリエ展開できる。すなわち、潮流速を次式で表わす。

$$U(t) = u_0 + \sum_{i=1}^n u_i \cos \left(\frac{2\pi}{T_i} t - k_i \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $U(t)$: 観測された流速、 u_0 : 恒流速、 u_i : 周期 T_i の流速の振幅、 k_i : 周期 T_i の流速の遅角。

式(1)に基づき、潮汐の4大分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 潮)と同周期で、各測点の連続観測記録のフーリエ展開を行った。 M_2 潮(周期12.42時間)、 K_1 潮(周期23.93時間)についての潮流楕円要素を表-1に示す。全ての測点で半日周潮流(M_2 潮)が卓越している。また、 M_2 潮流の潮流楕円は、大阪湾を除いて、長軸方向が極端に大きく、ほぼ直線的な往復運動を行っている。

各測点について、恒流速を図示したのが図-1である。用いたデータの観測期間が異常潮位の生じた時期であり、夏季の代表的な恒流のパターンと考えることはできないが、次のような特徴が見出される。

大阪湾を除いて、表層(水深2m層)と中間層(水深10~30m層)でその方向に大きな差異はなく、水深方向では少なくとも表層より中間層までは同方向に流動している。内海の恒流については、古くから東向流の存在が知られている²⁾。今回用いたデータは全てが同時期ではないし、その観測期間も異なるが、夏季という同じ季節のデータという点でみると、恒流としては全体として西向流の傾向を示している。そして、播磨灘、大阪湾では時計方向の回転運動を行っており、備讃瀬戸、斎灘ではそれぞれかなり大きな西向、北西向の流れを呈している。

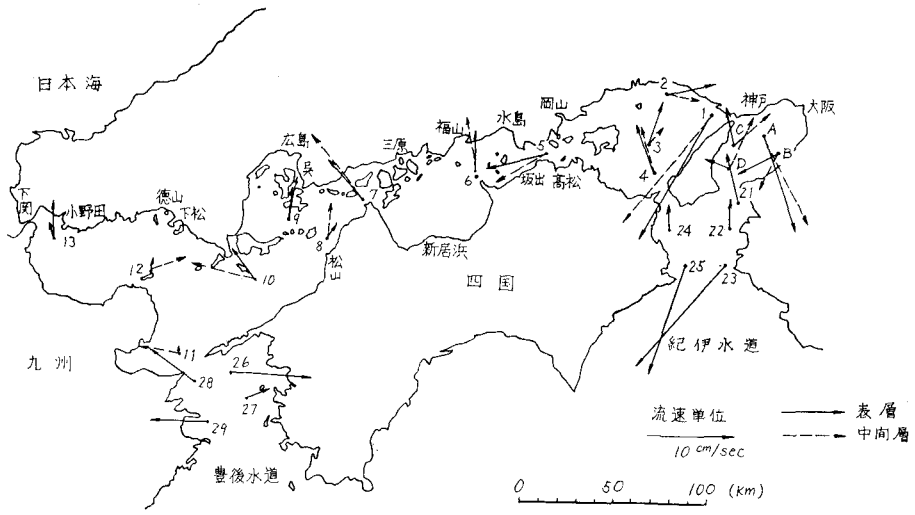
図-2に M_2 潮成分の潮流楕円の長軸方向の要素を示す。恒流速と同様、大阪湾を除いて表層、中間層ともほぼ同方向でその大きさも等しい。大阪湾については、潮汐の出入口の明石海峡、友ヶ島水道とも狭いこと、観測

* 正会員 電力中央研究所 技術第二研究所

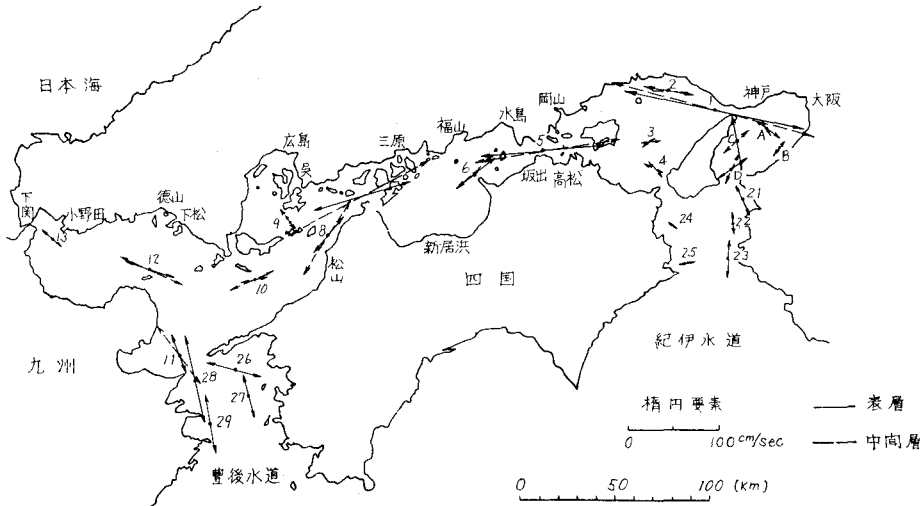
表—1 瀬戸内海における潮流橢円要素

測点 No.	観測点	観測日 数	半日周潮 (M_2 潮)				日周潮 (K_1 潮)				恒流	
			長軸		短軸		長軸		短軸		N方向	E方向
			流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速		
1	明石海峡	33	101.5	101.1	11.5	3.0	83.6	30.4	353.6	2.1	-28.3	-15.7
		33	104.9	116.2	14.9	2.5	92.3	36.3	2.3	1.6	-24.9	-19.5
3	播磨灘	12	235.3	6.3	145.3	1.8	359.2	3.0	89.2	2.5	4.5	1.4
		17	259.9	10.6	169.9	4.5	187.7	3.3	97.7	1.4	2.3	1.9
5	備讃瀬戸	22	265.5	73.6	355.5	2.6	261.7	12.6	171.0	0.0	-4.2	-16.9
		24	261.1	80.3	351.6	3.4	75.3	14.5	165.3	0.1	-7.3	-14.0
6	備後灘	14	231.0	28.6	141.0	1.1	86.7	4.1	356.7	0.5	5.1	-0.3
		24	226.7	26.7	316.7	1.0	48.2	3.3	318.2	1.0	8.6	-1.5
7	鞆灘	20	252.0	57.9	342.0	5.8	67.9	11.4	157.9	1.6	11.2	-10.4
		21	241.9	93.8	331.9	6.9	57.7	16.7	147.7	2.4	15.9	-13.2
8	安芸灘	16	217.4	27.6	307.4	4.2	224.7	11.1	134.7	0.3	2.1	1.0
		16	213.6	51.1	303.6	2.0	41.0	12.9	131.0	3.4	7.6	0.7
10	伊予灘	37	72.7	14.1	342.7	0.2	82.9	5.7	172.9	1.9	9.2	-6.9
		30	63.7	29.7	153.7	0.8	83.8	8.1	173.8	3.7	3.1	-13.2
12	周防灘	18	115.8	28.5	25.8	3.3	331.6	7.4	241.6	1.7	1.3	0.2
		18	114.4	39.6	24.4	2.2	284.0	10.2	14.0	0.7	0.9	3.7
13	下関	18	134.1	19.2	224.1	5.6	144.2	3.6	54.2	1.7	3.4	-0.2
		20	320.1	15.8	230.1	2.1	315.8	5.6	225.8	0.3	1.9	-0.5
23	紀伊水道	5	2.5	22.4	272.5	4.0	358.9	8.6	268.9	1.2	-17.3	-17.3
25	"	5	75.7	10.5	345.7	2.3	284.9	11.2	14.9	4.8	-17.8	-5.3
27	豊後水道	5	346.2	26.2	76.2	7.0	62.3	11.4	152.3	6.4	1.7	3.7
29	"	5	347.3	34.0	77.3	6.1	333.0	15.5	63.0	3.8	-0.2	-14.9
A	大阪湾	17	144.5	10.9	54.5	4.7	77.0	5.9	167.0	0.2	-18.9	6.7
		10	128.4	14.3	38.4	7.7	357.7	4.8	267.7	3.4	-22.5	12.0
D	大阪湾	10	53.8	18.2	143.8	4.4	154.3	7.2	64.3	2.1	2.4	-6.5
		12	24.2	17.7	114.2	2.4	129.3	16.3	39.3	3.0	9.2	3.7

(注) 同測点のうち上段は表層, 下段は中間層の観測点
流向は北より時計方向の角度, 流速の単位 (cm/sec)



図—1 瀬戸内海における恒流速分布図 (夏季)

図—2 瀬戸内海における M_2 潮の長軸方向の潮流振幅

期間が夏季であることから水温躍層が形成され、後述の塩分の水平分布図からも認められるように淡水が表層を流れること等より、表層と中間層で流向の異なる複雑な流況となっている。また、明石海峡、備讃瀬戸、斎灘と比較的幅の狭い部分では、50~100 cm/sec とかなり大きな潮流振幅を有する。また、播磨灘へ流入する潮流は、鳴門海峡よりも明石海峡から流入する方が圧倒的に大きい。豊後水道については、全測点とも水道に平行な流向であるが、紀伊水道では、東側の部分のみ水道に平行な流向で、西側の部分では、水道より $60^\circ \sim 90^\circ$ 回転した方向で、その振幅も小さい傾向となっている。

3. 流速変動の自己相関曲線

流速変動の記録に基づいて、速度場の乱流成分間の自己相関係数が時間の経過に伴いどのように変化するかを明らかにするために自己相関係数を計算した。

潮流楕円の長軸方向の自己相関曲線は、全測点とも内海特有の半日周潮周期で振動する形状を示す。しかし、その振幅は各海域で異なる。図—3 に特徴的な5測点の表層の自己相関曲線を示す。図中の記号は、表—2 に示

表—2 記号と観測点

記号	測点
—x—	紀伊水道(ST-23)
—○—	大阪湾(ST-D)
--- --	播磨灘(ST-3)
———	備讃瀬戸(ST-5)
— · — · —	伊予灘(ST-10)
—△—	豊後水道(ST-27)

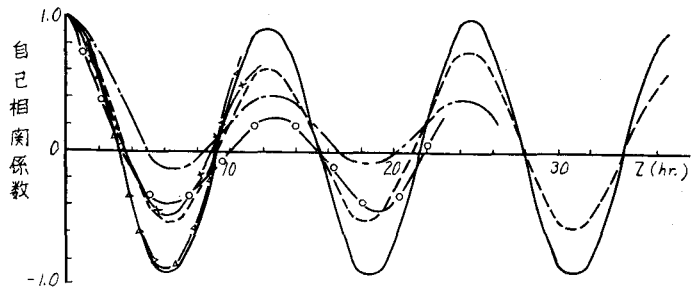
す観測点を示す。潮流振幅の大きな備讃瀬戸、豊後水道では、ほぼ相関係数が1に近い振幅の振動形状を示している。伊予灘における相関係数の大きさは、遅れが12時間の場合よりも24時間の場合のほうが大きく、日周潮の影響の加味された形状である。大阪湾では、その振幅は小さく、半日周潮以外の乱れがかなり大きい。播磨灘では、その振幅も小さく、相関係数がプラス側に偏っていることから、かなり長い周期の振動成分が存在している。この長周期成分の原因については、観測回数が一回だけであるために判然としない。

潮流楕円の短軸方向の自己相関曲線については、全ての測点とも単調に減少し、比較的早い lag time で相関係数が零となり、いわゆるランダム成分の流れの様相を示している。

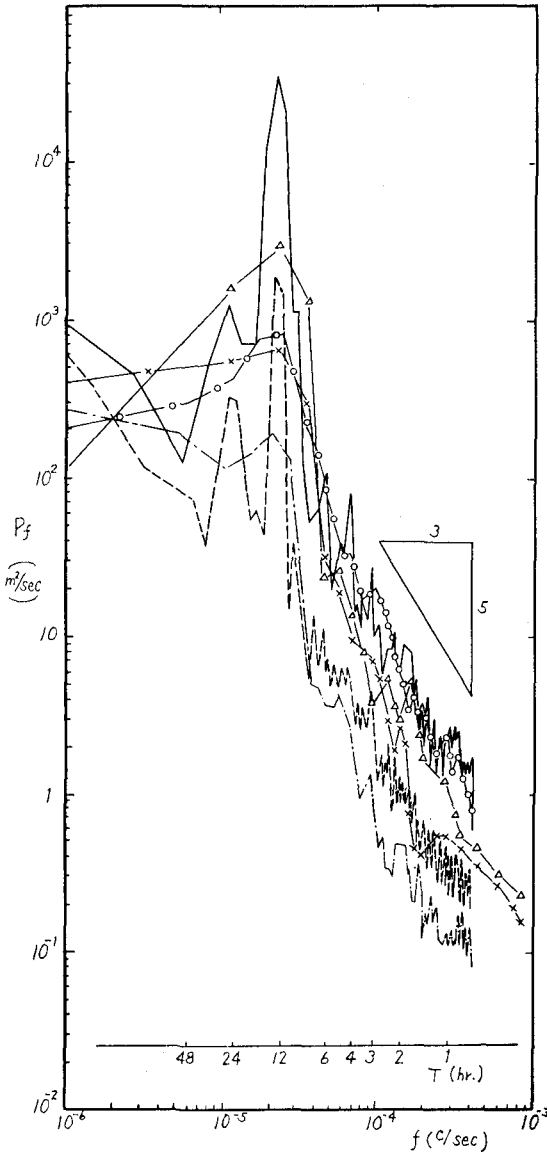
4. 流速変動のエネルギースペクトル分布

乱流速度の重要な特性の一つは、そのスペクトル関数 $F(f)$ であり、これは成分 u について次式で表わされる。

$$F(f) = 4 \int_0^\infty R_u(\tau) \cos 2\pi f \cdot \tau d\tau \quad \dots\dots\dots (2)$$



図—3 瀬戸内海における流速変動による自己相関曲線



図—4 瀬戸内海における流速変動のエネルギースペクトル

ここで、 $R_u(\tau)$: 成分 u の自己相関係数、 f : 周波数。

図—4 に自己相関曲線と同じ 5 測点での潮流柵門の長軸方向の流速変動のエネルギースペクトルを示す。全測点とも明らかに 12 時間周期のところでピークを有する形状となり、半日周潮成分のエネルギーが卓越している。備讃瀬戸、伊予灘では 24 時間周期のところでもまた小さいピークを有し、これらの測点では日周潮成分のエネルギーもかなり大きいと考えられる。播磨灘では、自己相関曲線の形状からも推定されるように、長周期成分

が半日周潮成分よりも大きなエネルギーを有しており、他の 4 測点とは異なったエネルギースペクトルの形状を示している。12 時間周期より高周波成分については、全ての測点で単調に減少する傾向を示し、またそのエネルギーレベルも各測点の潮流振幅にほぼ比例しており、振幅の大きな備讃瀬戸、豊後水道で大きく、播磨灘ではそれより 1 オーダー小さい。

5. 拡散係数

拡散係数は、G. I. Taylor の定理を用いて、次式より算定できる。

$$\left. \begin{aligned} K_x &= \overline{u_L^2} \int_0^\infty R_{Lu}(\tau) d\tau \\ K_y &= \overline{v_L^2} \int_0^\infty R_{Lv}(\tau) d\tau \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 R_{Lu} , R_{Lv} : それぞれ、 x , y 方向のラグランジ自己相関係数、 $\overline{u_L^2}$, $\overline{v_L^2}$: ラグランジ変動速度の自乗平均。

上記の観測点における速度記録は、固定した定点における流速変動記録であり、オイラー系の諸値である。オイラー系とラグランジ系間の関係は非常に複雑であるが、ミクロスケールのオイラー、ラグランジ速度の自己相関分布の相似性に基づくことによって、オイラー速度による拡散係数は次式で表わされる。

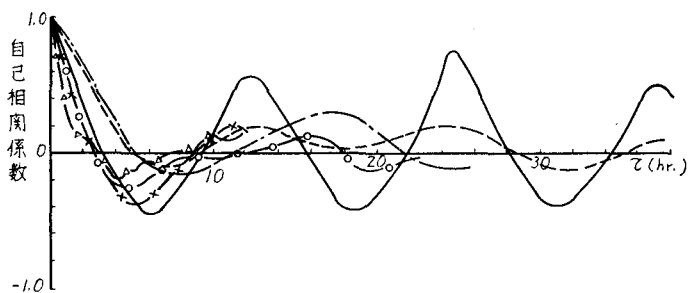
$$K_x = \overline{u_E^2} \cdot \beta \theta_{Eu}, \quad K_y = \overline{v_E^2} \cdot \beta \theta_{Ev} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\overline{u_E^2}$, $\overline{v_E^2}$: それぞれオイラー速度の自乗平均、 $\beta = \theta_{Lu} / \theta_{Eu}$, $\theta = \int_0^\infty R(\tau) d\tau$: integral time scale.

β は 0.4~6 の間にあることが実験より導き出されている³⁾。

周潮流成分を流れとみなすため、半日周潮より低周波の成分を除去して自己相関曲線を求める必要がある。図—5 に半日周潮より低周波成分を除去した自己相関曲線を示す。備讃瀬戸で除去しきれない半日周潮成分が存在しているが、他の測点は相関係数が単調に減少し、比較的早い lag time で 0 となるランダム成分による自己相関曲線の形状となる。

半日周潮より低周波成分を除去した乱れについて拡散



図—5 半日周潮より低周波成分を除去した乱れによる自己相関係数

表-3 瀬戸内海における拡散係数

測点 No.	観測点	$\overline{U_x^2}$ (cm^2/sec^2)	θ_x (hr.)	K_x ($10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$)	$\overline{U_y^2}$ (cm^2/sec^2)	θ_y (hr.)	K_y ($10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$)
1	明石海峡	625 729	1.19 1.39	26.7 36.6	412 357	1.01 1.01	15.0 12.9
3	播磨灘	40 28	2.61 2.73	3.7 2.8	40 44	2.46 5.33	3.5 8.7
5	備讃瀬戸	222 205	1.48 1.34	11.9 9.9	64 104	1.19 0.86	2.8 3.2
6	備後灘	119 85	2.00 1.11	8.6 3.9	92 41	1.05 1.08	3.5 1.6
8	安芸灘	59 202	1.12 1.30	2.4 9.4	35 445	0.89 1.17	1.1 18.8
10	伊予灘	58 62	2.32 2.14	4.9 4.8	53 77	1.23 1.51	3.0 4.2
12	周防灘	98 79	1.65 1.57	5.9 4.5	88 69	1.90 1.27	6.1 3.5
23	紀伊水道	81	1.25	3.7	34	1.45	1.8
25	〃	23	0.97	0.8	34	0.91	1.1
27	豊後水道	74	0.75	2.0	114	0.78	3.2
29	〃	81	0.56	1.6	117	0.47	2.0
A	大阪湾	55 33	0.88 0.85	1.7 1.0	38 24	0.85 0.69	1.2 0.6
D	大阪湾	90 190	0.71 0.84	2.3 3.0	110 123	0.83 0.99	3.3 3.6

係数を計算した結果を表-3に示す。表中の x 方向は M_2 潮成分の長軸方向、 y 方向は短軸方向である。これより、内海の水平方向の拡散係数は、半日周潮流の大き

な明石海峡、備讃瀬戸を除いて、 K_x 、 K_y は表層、中間層とも $10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ のオーダーであり、ほぼ等方性の乱流場であると考えられる。明石海峡については、 K_x 、 K_y とも $10^6 \text{cm}^2/\text{sec}$ と等方性であるが、備讃瀬戸では、 $K_x = 10^6 \text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $K_y = 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ と異方性の値を示す。これは、明石海峡は大阪湾から播磨灘へと流向が著しく変化するため y 方向の変動速度もかなり大きくなるのに対し、備讃瀬戸での流向はほとんど変わらず、そのため y 方向に関しては1オーダー小さくなったものと考えられる。また、integral time scaleはほぼ全ての測点で1~2時間であり、半日周潮より高周波成分の乱れは、1~2時間周期の渦が卓越している。

内海における拡散係数については、筆者らはこれまでも沿岸より1~3km付近の約10測点における潮流速の実測結果より、半日周潮より高周波成分の乱れの拡散係数として $10^4 \sim 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ の値を得ている。今回の実測は、沿岸部でなく、ほぼ流れの中央部に位置しているところからそれより1オーダー大きくなったのであろう。

6. 内海における塩素量の分布

内海における塩素量濃度(Cl‰)の分布は、豊後水道、紀伊水道、および関門海峡より入る外海水の塩素量が内海に注がれる河川水、工場排水、降雨、蒸発等の淡水の負荷により外海よりも低い塩素量の分布を示す。これは、前述の比較的短時間の流れや分散効果によるのではなく、長期間の海水の移流、分散による交換作用によるものであるが、海水の流動状態を示す一つの指標として夏季および冬季に内海の700点余りで同時に観測を行った結果を図-6および図-7に示す。

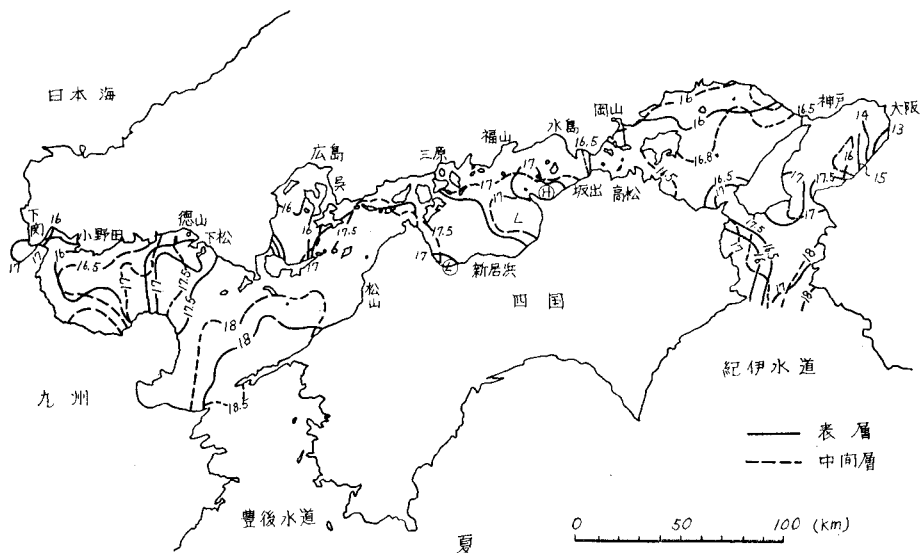
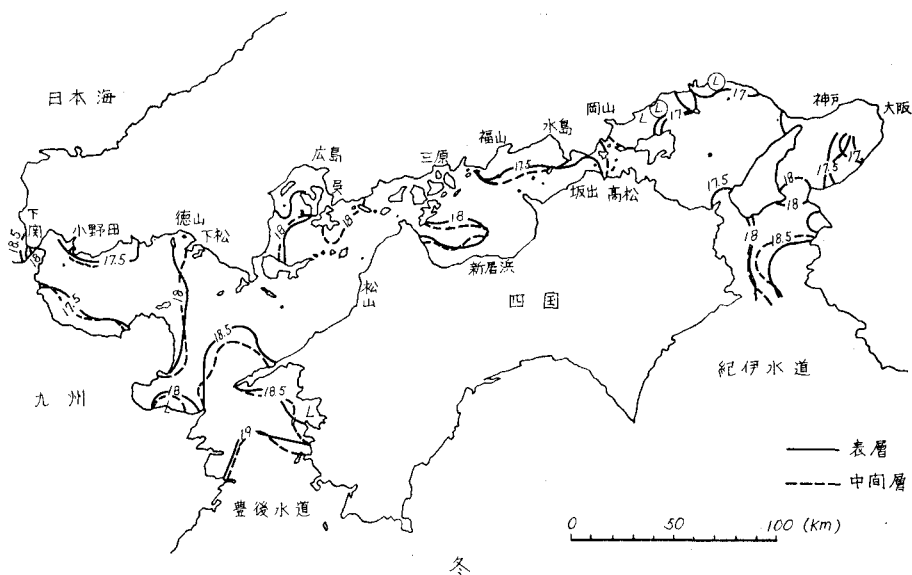


図-6 瀬戸内海における塩分分布 (夏季)

夏季の塩素量の分布より次の事実が認められる。内海全域で表層よりも中間層のほうが塩素量濃度が高く、特に大阪湾、播磨灘、広島湾、周防灘で著しい。夏季には表層で水温が高く、下層で低いいわゆる水温躍層が生じ、鉛直方向の混合が悪く、そのため水温の高い河川水は表層を漂うこととなり、特に水の交換



図—7 瀬戸内海における塩分分布 (冬季)

の悪い上記の海域では表層に低塩素のものが存在することになる。また、大阪湾では低塩素の表層水は東南部へ押し出されるような分布をしており、恒流の項で述べたように時計方向の恒流の存在していることが確認される。紀伊水道では東部が高く西部が低い濃度分布を示し、紀伊水道より入る外海水の主流は東部に偏っていることが推察される。豊後水道では、その濃度分布からも外海水は全断面一様に入り、関門海峡よりの海水の交換は少ない。後述の冬季の場合も同様であるが、内海の東部と西部から徐々に低くなってゆく塩素量濃度は、備讃瀬戸付近で同一の値、すなわち最も低い濃度を示している。

冬季の塩素量の分布は、夏季と異なり、表層と中間層ではほぼ同じ濃度を示し、鉛直方向の混合のよく行われていることが認められる。また、紀伊水道では、夏季に認められなかった非常に sharp な境界線である oceanic front が発生している。

この oceanic front については、国司⁴⁾らが STD 観測結果からこの存在を認めており、紀伊水道より外洋への流出過程は、front に沈降を伴う収斂流があることを予想している。事実、紀伊水道では潮流が1ノットにも達し、冬季には風速がかなり大きいこともあって、oceanic front を形成させる機構として上記の物理過程の存在が大きいものと思われる。

このように瀬戸内海の流動過程を明らかにしていくとき、各水道、灘などにおける固有水塊の形成、それらと外洋水との相互作用による物理過程に考慮を払いながら研究を展開すべきであると考えらる。

7. ま と め

瀬戸内海において夏季に行われた25測点の潮流速の連

続観測記録の統計解析より、内海における流況と分散特性について次の特徴が見出される。

(1) 内海における潮流は、半日周潮流が卓越し、その潮流振幅は内海の幅の狭い海域で50~100 cm/secと速く、湾や広い灘では10~30 cm/sec程度である。また黒潮による外海水の内海への流入は、豊後水道ではほぼ横断面で一様に流入するのに対し、紀伊水道では東部よりの流入が多く、西部よりの流入は少ない。

(2) 内海における半日周潮より高周波成分の乱れによる拡散係数は、潮流振幅の大きな海域で $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、その他の海域では $10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ のオーダーである。

8. お わ り に

内海における流況と分散特性について述べてきたが、膨大な資料のため、まだ細部の考察の段階に至っていない。今後は、これらの資料の整理、考察をもとに内海全域における流れと分散について、短時間スケールでの数値シミュレーションを行う予定である。

最後に、これらの資料の計算を行っていただいた三菱総合研究所の恵羅嬢に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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, pp. 385~393, 1970.
- 2) 日高孝次: 瀬戸内海の東向流について, 海と空, Vol. 17, pp. 100~104, 1937.
- 3) Hay J. S., and F. Pasquill: Diffusion from a continuous source in relation to the spectrum and scale of turbulence, Adv. Geophys. Vol. 6, pp. 345~365, 1959.
- 4) 国司秀明・吉岡 洋・鈴木 徹: 紀伊水道の海況変動について, 京都大学防災研究所年報, No. 14 B, pp. 511~518, 1971.