

瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散

速水 頌一郎*・宇野 木 早 苗*

要 約 瀬戸内海における海況の把握に努め、とくに内海の透明度が近年低下していることを示す。次に、河川・降水・蒸発による淡水供給と、外洋からの海水流入を考慮した一次元定常の拡散方程式の解を、現実の塩分分布に適用して、内海の平均拡散係数が $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となることを示す。内海を通りぬける恒流の存在は明確でない。一定量の物質を伊予灘や大阪湾に連続放出すると、外洋との交流が比較的大きいため、その濃度は低い。明石海峡から芸予海峡にいたる内海中央部に放出する場合には、濃度は高く広範囲にその影響がおよぶ。また、周防灘の西部においても物質は拡散しがたい。

1. ま え が き

瀬戸内海の海水交流と物質拡散に関しては、いままで海水汚染に関連して局地的には検討されてきたが、それだけでは不十分で、内海全体を眺めて内海と外洋との関係を大局的に把握する必要がある。このような観点から著者の一人速水とその協力者¹⁾は、かつて大阪湾と播磨灘の海水交流を検討し、明石海峡を通る潮流によって、潮汐の半周期ごとに約10%の海水が混合するという結果を得た。しかしながら、現象および機構の複雑さのため、必要とする資料は乏しく、観測にも多大の経費と期間を要するので、その後、瀬戸内海ではこの種の研究はあまり進展していない。

本研究はまだ初歩的段階ではあるが、問題の所在と研究の方向を見出すためになされたもので、その内容は、既存の観測資料を整理して大略の海況の把握に努めるとともに、拡散方程式の解と比較して、未知の諸要因の値に見当をつける。そして、内海への物質放出による濃度分布を理論的に推定しようとするものである。単純化した条件と限られた資料に基づいているので、検討改善を要する点が多いのはもちろんであるが、大綱は理解できたように思われる。よって、ここに報告し、大方のご批判を仰ぎたい。なお、この内容の詳細は参考文献 2) に述べてある。

2. 自 然 条 件

(1) 地 形

大阪湾から周防灘の範囲を含む瀬戸内海(図一1)は、本州、四国、九州との間で紀淡、鳴戸、豊予、関門の4つの海峡によって外海と連なり、東西約450 km、南北は最大数十 km の大きさを占めている。その中に大小約3 000 の島々を含み、さらに、海岸線の出入が激しく地形はきわめて複雑である。外海に通じる西の豊予海峡は、東の紀淡・鳴戸の両海峡の総断面積の3倍以上になっている。鳴戸海峡の断面積は紀淡海峡の約1/13に過ぎない³⁾。なお、外洋との海水交流を考えているので、瀬戸内海の範囲としてここでは紀伊水道や豊後水道をも含めて議論する。表一1には図一1に示す20 km 間隔の各断面における断面積と海面幅を、海図から読取って記してある。

表一1 瀬戸内海の20 km 間隔の断面(図一1)における値 (1)

断 面 座 標	断 面 積 A (km^2)	海 面 幅 b (km)	塩 素(上 層) Cl (0/00)	塩 素(下 層) Cl (0/00)	淡供 給 水量 q_A ・
I-1	27.810	96.0	18.85	19.06	22.7
2	3.981	60.0	18.83	19.07	13.6
3	1.884	36.0	18.49	18.77	139.9
4	1.680	36.0	18.45	18.66	259.9
5	0.370	5.9	18.30	18.51	146.5
6	1.377	54.0	17.44	17.86	556.1
7	0.244	4.0	17.46	17.79	48.4
8	0.264	19.5	17.61	17.58	91.5
9	1.131	49.5	17.56	17.58	98.4
10	1.788	55.5	17.69	17.73	34.9
11	0.639	36.0	17.59	17.71	127.2
12	0.195	18.0	—	—	146.7
13	0.204	12.0	17.90	18.01	171.6
14	0.252	27.0	18.14	18.23	13.7
15	0.810	42.0	18.09	18.21	39.0
16	0.633	34.5	—	—	19.8
17	0.215	6.2	—	—	51.5
18	0.705	22.5	18.29	18.35	52.9
19	1.239	30.0	18.18	18.33	152.3
20	1.788	48.0	18.29	18.40	165.4
21	1.899	46.5	18.47	18.55	39.6
22	2.202	40.5	18.48	18.53	45.9
II-1	22.428	108.0	—	19.10	-8.7
2	4.860	60.0	18.85	18.95	12.3
3	2.928	48.0	18.85	18.85	46.5
4	3.084	48.0	18.71	18.83	19.1
5	1.236	13.3	18.71	18.71	80.3
6	2.475	34.5	18.56	18.67	71.6

* 正会員 理博 東海大学教授 海洋学部

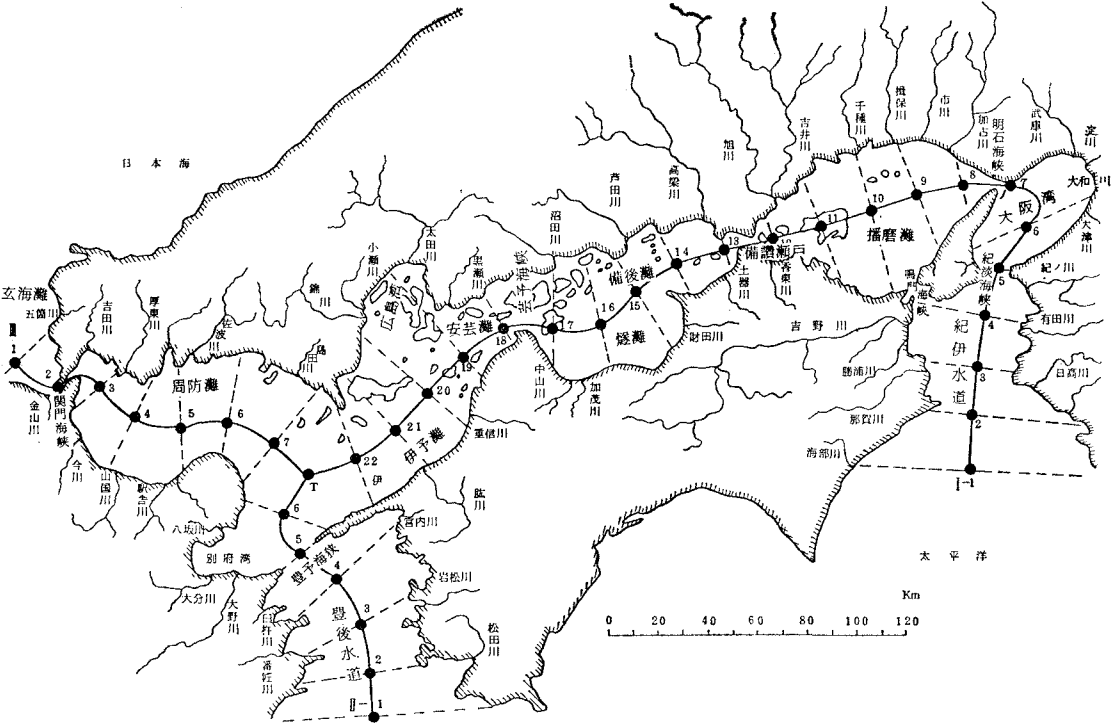


図-1 瀬戸内海の複合内海モデルと断面の座標

(2)

表-2 瀬戸内海の各海域における海上気象要素の平均値

断面 座標	断面 面積 A (km ²)	海面 幅 b (km)	塩素(上層) 量 Cl (0/00)	塩素(下層) 量 Cl (0/00)	淡水 給 水量 qA *
Ⅲ-1	0.924	30.0	—	19.00	4.3
2	0.011	0.6	—	—	56.0
3	0.126	18.0	17.74	—	85.5
4	0.507	37.5	17.80	17.92	37.4
5	0.768	36.0	—	—	106.5
6	1.215	39.0	18.12	18.31	13.1
7	1.809	45.0	18.28	18.41	37.6
T	2.162	20.3	18.44	18.55	-2.0

* 単位 10⁶ m³/km²・year

(2) 淡水の供給

内海における物質の分布を理解するには、そこに供給される淡水の量を知らねばならない。淡水は陸水および海面への降水によって供給されるが、一方、海面からの蒸発によって失われる。資料(3)記載の降水量分布図から7つの海域の降水量を読取ると表-2 のようになる。蒸発量の算定は経験式 $E = kw(e_w - e_a)$ によった。蒸発量 E (cm/year), 風速 w (m/sec), 表面水温に対する飽和水蒸気張力 e_w (mb), 大気中の水蒸気張力 e_a (mb) である。比例定数 k の値は確定していないが、ここでは3.7の値を用いる⁹⁾。各海域の蒸発量は、推算の基礎となる各気象要素とともに表-2 にかかげてある。降水量、蒸発量とも外洋に近いほど大きく、内部にはいるほど小さくな

項目	豊後水道	周防灘	伊予灘	備後灘	播磨灘	大阪湾	紀伊水道
降水量 (mm/year)	1700	1600	1400	1200	1200	1300	1600
気温 (°C)	16.0	15.0	15.5	15.0	15.0	15.0	15.5
湿度 (%)	76	76	76	75	75	71	74
風速 (m/sec)	6.2	5.5	5.5	5.5	5.4	4.9	5.4
表面水温 (°C)	19.0	18.0	17.5	17.5	17.0	17.5	18.5
蒸発量 (mm/year)	1850	1530	1320	1450	1290	1410	1640
降水蒸発量差 (mm/year)	-150	+70	+80	-250	-90	-110	-40

っている。

一方、瀬戸内海には大小さまざまな多数の河川が流入している。主なものは図-1 に描かれている。これらの累年平均の河口流量を、中国電力㈱が求めているので⁵⁾、これを利用する。これは建設省の昭和40年流量表を基にして、年間の河口流量は流域面積と年降水量に比例するとの仮定のうゑに計算されたものである。河川の総流入量は約 6×10^{10} m³/year に達する。

各海域における降水量と蒸発量の差を求めると、表-2 の末段の値が得られる。全般的に蒸発量が降水量を上まわっているが、一部では逆になっている。その差は平均約 100 mm/year である。推定値の精度、とくに蒸発量の精度に問題があるので、地域的相違をそのまま認めてもあまり意味がないから、今後は降水・蒸発の差し引きとして、年間 100 mm の厚さに相当する淡水量が、内海

一様に失われるものと仮定する。この量は内海全体で約 $3 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{year}$ となって、前記の河川流入量の数%である。これらの値を用いて、内海の主軸の単位長さ当りに供給される淡水の量 q_A を見積ると表-1 の値が得られる。場所によって非常に大きい差異がある。もっとも淡水の供給が大きいのは大阪湾である。

(3) 水温と塩分

瀬戸内海全域の海況については、古くは30数年前の宇田・渡辺⁶⁾の報告が、最近では神戸海洋気象台³⁾のものがあ。いずれも貴重な資料であるが、われわれの計算結果と比較対照するには不便が感じられたので、水産庁刊行の昭和38年から40年までの水産試験研究機関海洋観測資料を基にして、水温、塩素量、透明度について統

計を行なった。その際、東海大学丸Ⅱ世が、昭和44年の9月に実施した瀬戸内海一周のときの観測資料も追加した。深さに関しては、深さ10m以浅と以深とに分けて集計し、10m以浅を上層、以深を下層と名付けた。資料数の総計は、水温は約19600、塩素量は約16600、透明度は約4500である。しかし資料の分布は、空間的にも季節的にもかなり不均一で、資料不足のため結果の精度に問題がある部分も多い。

これらの詳細は別に報告する考えであるが、一例として冬と夏における水温と塩素量の分布を図-2と3に示す。冬季には上層下層ともほとんど差がなく、海水はよく混合しているが、夏季には高温低かんの水が上層に、低温高かんの水が下層にあって、成層していることが認

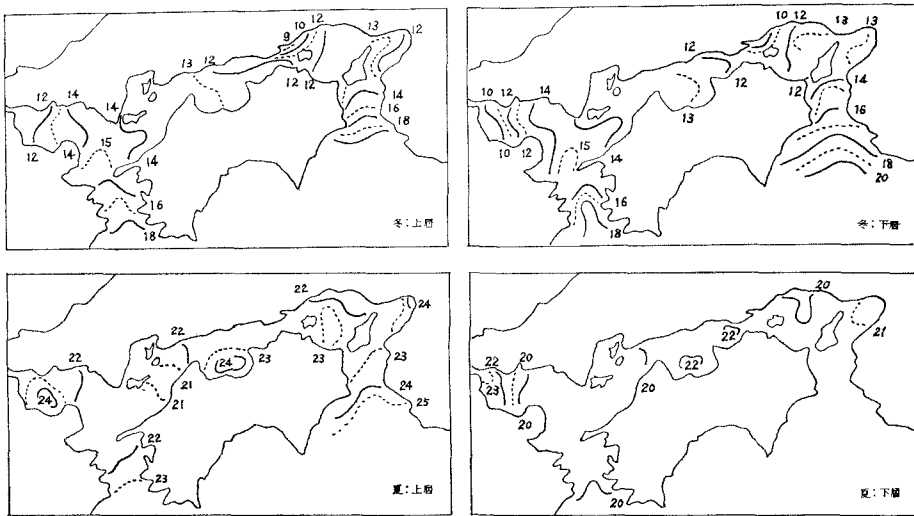


図-2 冬と夏の水温の分布 (単位 $^{\circ}\text{C}$)、左は上層 (10 m 以浅)、右は下層 (10 m 以深)

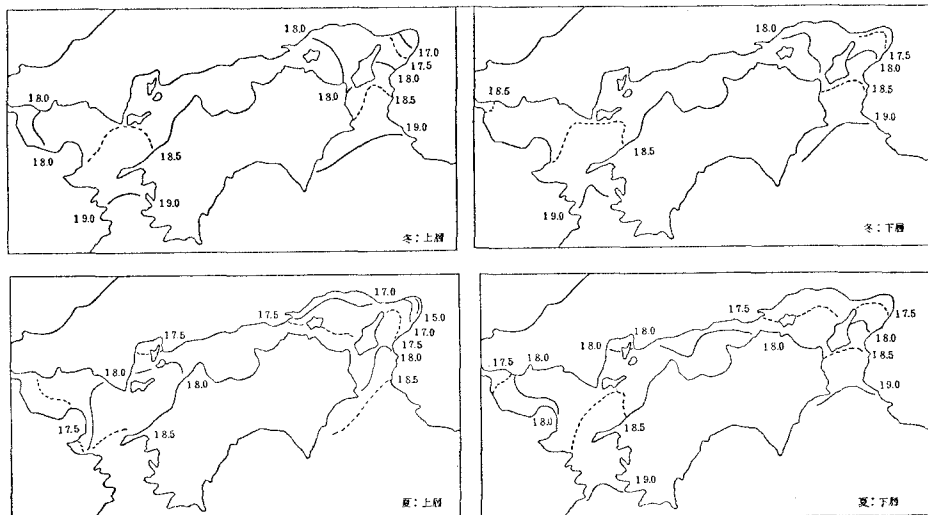


図-3 冬と夏の塩素量の分布 (‰)、左は上層 (10 m 以浅)、右は下層 (10 m 以深)

められる。図-1の20km間隔の各断面における塩素量の平均値が表-1に示してあるが、分布の様子は図-4に描かれている。図にはまた、宇田・渡辺⁷⁾の求めた σ_{15} からの換算値、および神戸海洋気象台の分布図から拾った値も示してある。3者の間にはかなりの相違が見られるが、この原因として整理方法の相違、観測資料の精度、資料数の精疎などが考えられる。

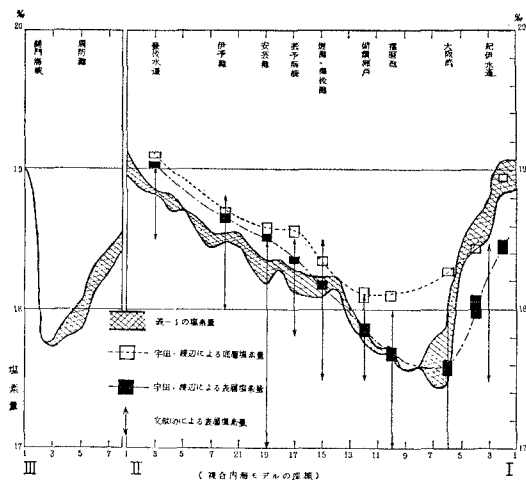


図-4 瀬戸内海における塩素量の分布

網目の上端は下層平均で下端は上層平均。白四角(宇田・渡辺の σ_{15} より換算)の上下端は季節平均の変動幅。表層に関する黒四角も同様。矢印(文献3)は表層塩素量の各海域の季節平均の変動範囲。

塩分は外洋から内部に進むほど低くなっていて、河川水の供給のもっとも豊富な大阪湾がもっとも低い。しかしこれは上層だけであって、下層を見れば播磨灘がもっとも低い。周防灘では西に向うほど塩分が低くなっていて、関門海峡を通じての海水交流はそう顕著でないことを表わしている。図-4で興味があるのは、10mを境とする上層と下層の平均塩分が、それほど違ってないことである。これは年平均として上下の混合が比較的良好に行なわれていることを意味し、断面平均値を用いての一次元の拡散理論の適用も、近似的には可能なことを表わしている。

(4) 透明度

透明度は、豊後水道や紀伊水道の入口では15m以上もあるが、内部に入るほど低下する。とくに、大阪湾、播磨灘の本州側、備讃瀬戸、広島湾、周防灘西部では4~6m以下となり、大阪湾奥部では2m以下となっている。現在の透明度を30数年前と比較すると、図-5と6が得られる。これらによると、備讃瀬戸から大阪湾にかけての透明度が、1年を通じて最近著しく悪化したことに気が付く。ただし透明度は、海域の生物学的、化学的、物理的性質に依存するから、透明度の悪化がそのまま海

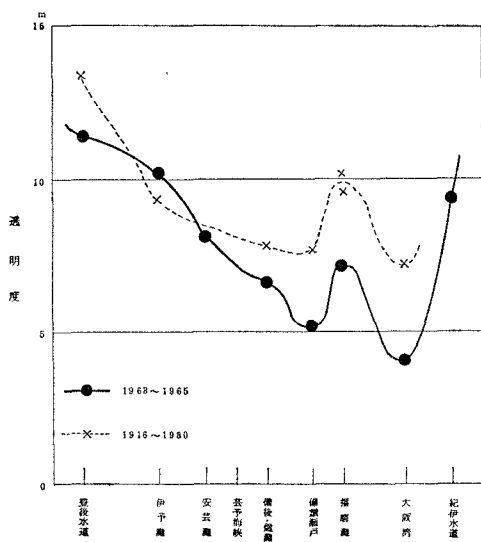


図-5 瀬戸内海の年平均透明度、2つの期間1916~1930と1963~1965の比較

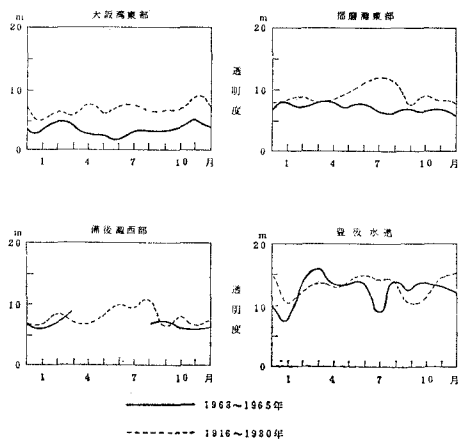


図-6 4海域における透明度の年変化

水汚染の進行と結びつかない場合もあるが、少なくとも人工的要因によって、内海の水の性質が大きく変化したのは確かである。なお、ごく最近、宇田と正田⁷⁾は、瀬戸内海東部の海水透明度とその経年変化について詳細な研究を行ない、われわれと同様な結果を得て、「栽培漁業の中心的水域である内海生産を荒廃、破滅におとし入れる危険が迫っている」と警告している。

(5) 流動と平均水面

内海にはわが国屈指の強い潮流が見られるが、内海の物質が外洋に出ていくためには、潮流を含めた乱流による混合拡散と、恒流による輸送が重要である。この恒流として、西から東に向う流れが古くからいわれていたが、これを実証する明確な事実は見出されていない。これに関し日高⁸⁾は、測流結果からはその実在性を全然否定する要素は見当たらないが、その勢力は至極弱いもの

で、一般に流速計には感じられない程度であろうと述べている。一方、内海に供給された淡水量に相当する海水は、どこからか外洋に出ていかねばならない。いま、仮に、周防灘から播磨灘に至る海域に供給される淡水量が、明石海峡を通るものとすれば、平均流速は 0.5 cm/sec となる。したがって日高の推論にしたがえば、内海に恒流が存在するならば、その流量は内海に流入した淡水量と同程度か、その数倍程度と推測される。

一方、恒流の存在は平均水面の勾配に結びつくので、これについて検討したが、資料の精度の問題で結論が得られていない。なお、図-7 に示す平均水面の経年変化を考えると、内海全体はほぼ一様に上下しているが、黒潮が南方に大きく迂回し紀州沖に顕著な冷水塊が出現したとき、内海の平均水面は急速に低下している。このように外洋における流況の変動は、内海内部の平均水面や流動にも相当の影響をおよぼすので、検討を要する。また、各海域には、多かれ少なかれ水平軸または鉛直軸の循環流が存在し消長をくり返している。これは物質輸送には重要な役割を果たしているが、断面の平均の流れと

しては消し合い、これによる物質輸送の効果は拡散係数の中に含まれる。

3. 内海における一次元定常の拡散理論

問題の大綱を把握することを目的とし、細部には拘泥しないという立場から、本論では一次元定常の場合を考える。図-8 の I の細長い内海の主軸にそって x 軸をと

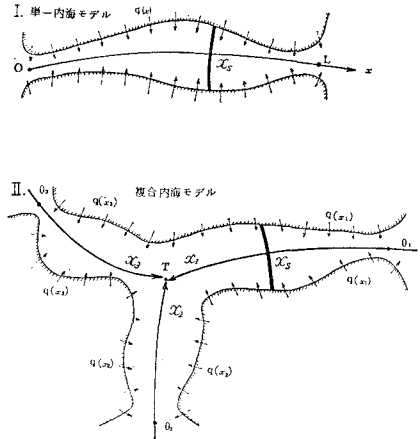


図-8 瀬戸内海に関する2つのモデル (I. 単一内海, II. 複合内海)

り、内海の長さを L とする。保存性物質の濃度 (単位質量の海水に含まれる物質の質量) を $C(x)$ 、断面積を $A(x)$ 、拡散係数を $K(x)$ とする。 K には移流以外の混合拡散に関与するすべての要因が含まれている。海水密度 ρ は一定とする。入口 $x=0$ を通って単位時間に流入する海水の量を Q_0 、内海の主軸の単位長さ当り単位時間に供給される淡水の量を $q(x)$ 、放出物質の質量を $m(x)$ とする。このとき任意の断面を通る流量は

$$W(x) = Q_0 + \int_0^x q(\xi) d\xi \quad (1)$$

で与えられる。一方、物質に関する連続の式は

$$\frac{d}{dx} \left\{ AK \frac{dC}{dx} - WC \right\} = -\frac{m}{\rho} \quad (2)$$

である。

(1) 単一内海に対する解

式 (2) を境界条件

$$(C)_{x=0} = C_0, (C)_{x=L} = C_L \quad (3)$$

のもとに解くと、

$$C(x) = e^{\int_0^x E d\xi} \left\{ C_0 \int_x^L \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta + C_L e^{-\int_0^L E d\xi} \int_0^x \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta - \int_0^L \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta \cdot \int_0^x \frac{M}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta + \int_0^x \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta \cdot \int_0^L \frac{M}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta \right\} / \int_0^L \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta \quad (4)$$

が得られる。ただし

$$E(x) = \frac{W}{AK}, M(x) = \int_0^x \frac{m}{\rho} d\xi \quad (5)$$

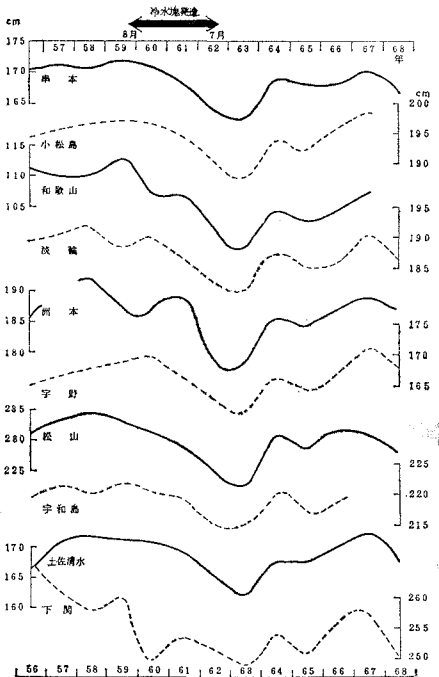


図-7 瀬戸内海各地の平均水面の変化 1956~1968 年

いま $x=x_s$ に放出物質の線源がある場合を考える。単位時間当りの物質の放出量を R とすれば、delta function を用いて、 $m(x)=R\cdot\delta(x-x_s)$ と表わされる。

$$p(x)=\int_0^x \frac{W}{AK} d\xi, F(x)=\int_0^x \frac{1}{AK} e^{-p} d\xi \dots (6)$$

といて、上記の $m(x)$ を式 (4) に代入すると

$$C(x)=e^{p(x)} \left[C_0 \{F(L)-F(x)\} + C_{Le}^{-p(L)} F(x) + \frac{R}{\rho} \{F(L)-F(x_s)\} F(x) \right] / F(L), \\ 0 \leq x \leq x_s \dots (7. a)$$

$$C(x)=e^{p(x)} \left[C_0 \{F(L)-F(x)\} + C_{Le}^{-p(L)} F(x) + \frac{R}{\rho} \{F(L)-F(x_s)\} \cdot F(x_s) \right] / F(L), \\ x_s \leq x \leq L \dots (7. b)$$

となる。このとき単位時間当りの断面内の物質輸送量は、 $\rho(WC-AK \cdot dC/dx)$ より求まり

$$S(x)= \begin{cases} S_0=\rho[C_0-C_{Le}^{-p(L)}-(R/\rho)\{F(L)-F(x_s)\}]/F(L), & 0 \leq x < x_s \\ S_L=\rho[C_0-C_{Le}^{-p(L)}+(R/\rho) \cdot F(x_s)]/F(L), & x_s \leq x \leq L \end{cases} \dots (8)$$

で与えられる。 $S_L=S_0+R$ である。

(2) 複合内海に対する解

現実の内海は図-1のように、紀伊水道、豊後水道、関門海峡をそれぞれ湾口とする3つの分岐湾が、点Tで結合しているとみなされる。鳴戸海峡は無視されているので多少問題であるが、断面積が小さいのでそう大きい誤りは生じないであろう。そこで図-8 IIのような複合内海モデルを考え、物質の線源が存在している分岐湾の諸量に添字1を付し、他には2または3を付す。湾口 O_i から分岐点Tに向けて x_i 軸をとり、それぞれの分岐湾に前項と同じ取り扱いをする。記号もそれに準ずる。すなわち、 L_i : 分岐湾の長さ、 x_s : 線源の x_1 座標、 R : 線源における物質放出量、 Q_i^* : 湾口における外洋からの海水流入量、 C_i^* : 湾口における物質の濃度、 C_T : 分岐点における物質の濃度である。 $W(x_i)$, $p(x_i)$, $F(x_i)$ も式 (1) と式 (6) にて表わされる。しかるとき式 (7) より各分岐湾における物質の濃度は、次のように与えられる。

$$C(x_1)=e^{p(x_1)} \left[C_1^* \{F(L_1)-F(x_1)\} + C_{Te}^{-p(L_1)} \cdot F(x_1) + \frac{R}{\rho} \{F(L_1)-F(x_s)\} F(x_1) \right] / F(L_1), \\ 0 \leq x_1 \leq x_s \dots (9. a)$$

$$C(x_1)=e^{p(x_1)} \left[C_1^* \{F(L_1)-F(x_1)\} + C_{Te}^{-p(L_1)} \right]$$

$$\cdot F(x_1) + \frac{R}{\rho} \{F(L_1)-F(x_1)\} F(x_s) \Big] / F(L_1), \\ x_s \leq x_1 \leq L_1 \dots (9. b)$$

$$C(x_2)=e^{p(x_2)} [C_2^* \{F(L_2)-F(x_2)\} + C_{Te}^{-p(L_2)} \cdot F(x_2)] / F(L_2) \dots (9. c)$$

$$C(x_3)=e^{p(x_3)} [C_3^* \{F(L_3)-F(x_3)\} + C_{Te}^{-p(L_3)} \cdot F(x_3)] / F(L_3) \dots (9. d)$$

これらの式で湾口濃度 C_1^* , C_2^* , C_3^* は境界条件として与えられるが、分岐点の濃度 C_T は未知の量である。しかし、これは各分岐湾から出ていく物質の量 ($-S_i^*$) は、線源から放出される物質の量に等しいという条件から定まる。 S_i^* は式 (8) を参照すると、 $S_1^*=\rho[C_1^*-C_T \exp\{-p(L_1)\}-(R/\rho)\{F(L_1)-F(x_s)\}]/F(L_1)$, $S_2^*=\rho[C_2^*-C_T \exp\{-p(L_2)\}]/F(L_2)$, $S_3^*=\rho[C_3^*-C_T \exp\{-p(L_3)\}]/F(L_3)$ となる。したがって

$$S_1^*+S_2^*+S_3^*+R=0$$

とおくことによって

$$C_T = \frac{\rho \sum_{i=1}^3 \frac{C_i^*}{F(L_i)} + \frac{R \cdot F(x_s)}{F(L_1)}}{\rho \sum_{i=1}^3 \frac{e^{-p(L_i)}}{F(L_i)}} \dots (10)$$

が求まる。流量についても、各分岐湾から外へ流出する海水量と、内海に供給される淡水量の総和は等しいという条件から、

$$r_i^*=Q_i^* \Big/ \sum_{j=1}^3 \int_0^{L_j} q(x_j) dx_j \dots (11)$$

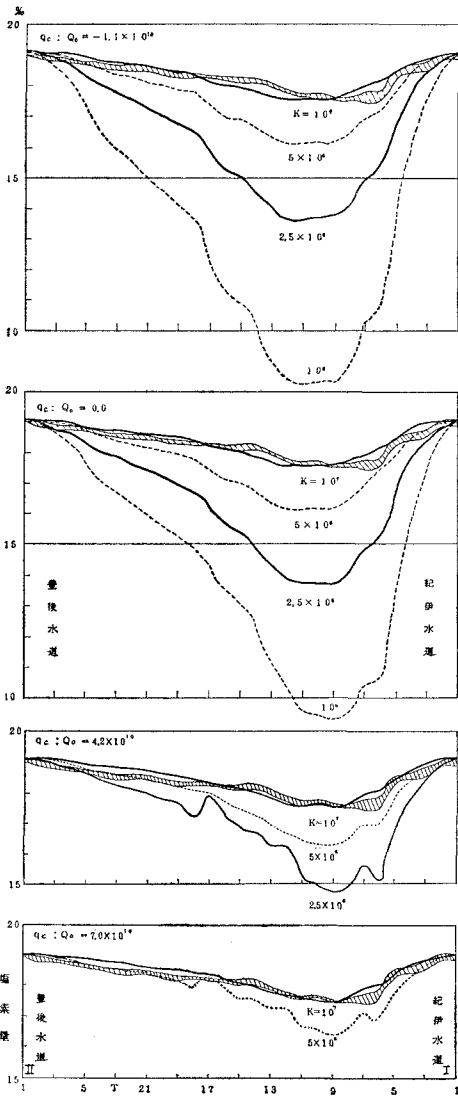
で表わせば

$$r_1^*+r_2^*+r_3^*+1=0 \dots (12)$$

が成り立つ。

4. 塩分の分布に関する計算結果

塩分の分布を考える場合には、内海内部における物質源は無視できるので式 (7) または (9) において $R=0$ とおけばよい。最初に単一内海を考える。これは図-1において豊後水道から紀伊水道までを考え、周防灘を無視した場合であって、今回の計算ではこのモデルが主体である。原点 $x=0$ は、豊後水道の入口 (図-1の II-1の断面) におかれている。 Q_0 , q , K については未確定の要因が多いので、これらに種々の値を仮定して計算を行なう。なおここでは K が内海全体に一樣な場合を取り扱う。若干の計算例を図-9, 10, 11に示す。図-9は淡水供給が q_c の場合で、このときは表-1の q_A に比して、河口流量が $1/4$ だけ少なくなっている。その理由として q_A に含まれる河口流量は、流量が流域面積に比例すると仮定しているので、平野部が山間部より一般に雨量が少ないことを考慮すると、あるいは多少大き過ぎる



図—9 淡水供給量 q_c の場合の単一内海モデルによる塩素量の分布、斜線部の上下端は下層および上層の実測塩素量を表す。

とも考えたからである。ただし $1/4$ という数値は便宜的なものである。図—10は海域内の塩素量最小値に注目したものである。両図において、斜線部の上下端は、実測塩素量の下層および上層における値を表わしている。

これらの図から、 $K=10^6 \sim 5 \times 10^6$ の場合は、現実よりはるかに小さな塩素量の分布しか得られないが、約 10^7 の値を用いれば、現実の分布をほぼ説明できることがわかる。そして、 $K=10^7$ の場合には、2 節の (5) 項で推論した恒流の範囲内では、海水流入量の多少は、塩分の分布、とくにその最小値に対しては、それほど大きく響いてこないことが理解できる。図—11は、 q_A と q_c の場合について、海水流入量を種々変えたときの分布を

比較したものである。われわれが計算した範囲内では、 $K=10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ としたとき、淡水供給量が q_c で、海水流入量が $Q_0=7 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year}$ のときが、もっとも現実に近い分布が得られる。 Q_0 は正の値だから、これは東向流を意味する。淡水量が q_A の場合には、現実の塩素量分布を説明するために、 K は 10^7 よりもっと大きい値が必要になる。ただ未確定な要素が多いので、一義的に決めるのは困難であるが、諸種の状況から判断して、 $K=10^7$ 程度が実際に近いのではないと思われる。

以上は周防灘を無視した場合であるが、式(9)を用いて複合内海(図—1)について計算した例を図—12に示す。この場合は未確定の要因がさらに多いので、テスト計算の意味で適当に r_i^* の値を決めた。したがって、計算値は実測値に必ずしも十分には一致していないが、傾向は前と同じである。拡散係数はやはり 10^7 の程度である。周防灘では計算と実測との一致がよくないが、拡散係数は 10^7 よりもっと小さいかも知れない。ただここでは観測資料が少ないので、その充実が必要である。

5. 線源からの物質の拡散

拡散係数を 10^7 、淡水供給量を q_c 、 $Q_0=7 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year}$ 、 $C_0=C_L=0$ とし、線源の位置がそれぞれ、伊予灘、安芸灘、備後灘、備讃瀬戸、播磨灘、大阪湾にある場合に、 $R=10 \text{ ton/sec}$ の割合で物質を連続放出したとき得られる濃度分布を比較したのが、図—13である。放出量が異なれば、それに比例して濃度を増減すればよい。 Q_0 が種々異なる場合にも、ほとんど同じ濃度分布が得られた。これらの結果から、同じ分量を流しても、外洋に近い伊予灘や大阪湾の線源では、外洋との交流がよくて比較的濃度は低いが、明石海峡と芸予海峡という非常に狭い海峡に挟まれた内海中央部の場合には、物質の濃度は高く、その影響は広範囲におよぶことが明瞭に認められる。なお、参考のため、 $K=10^7$ の場合とともに、 2.5×10^6 、 5.0×10^6 の場合の各線源における濃度を図—14に描いておく。拡散係数が小さければ、内海中央部の高濃度は一層顕著になる。

複合内海の場合のテスト計算例を図—15に示す。図—13と比較すると、周防灘の有無にかかわらず、両者は共通領域ではよく類似している。周防灘においては、その東部に放出したときには、あまり濃度は高くないが、西部に流したときにはかなり濃度は高くなる。塩分の場合と同じく、関門海峡による海水交流は、それほど大きくないと推測される。

6. 考 察

塩素量の分布を説明するために、内海全体に一樣な拡散係数を用いたとき、その値として約 10^7 が得られた。等方性乱流理論によれば、乱流スペクトルの平衡領域に

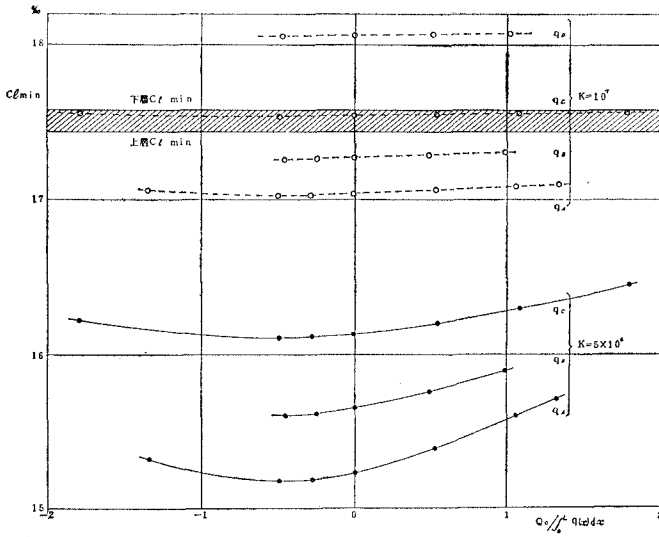


図-10 湾口流入量対淡水供給量比($Q_0 / \int_0^L q(x) dx$) と塩素量最小値 (Cl_{min}) の関係

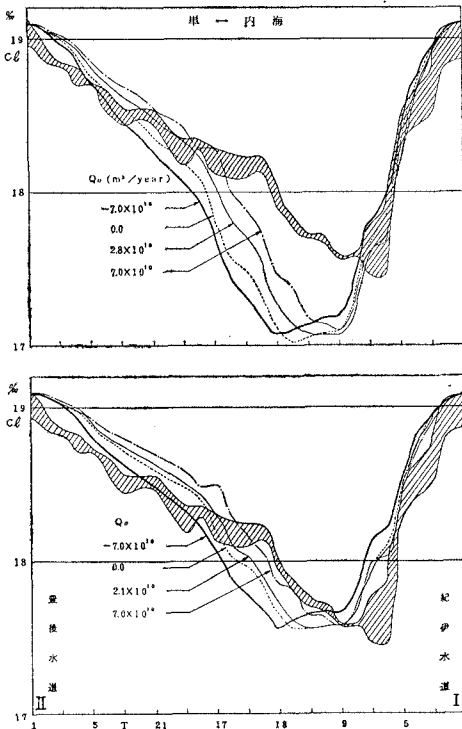


図-11 湾口流入量 Q_0 と塩素量分布の関係; $K=10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$; 上は q_A , 下は q_C ケース

おいては、拡散係数は現象のスケール l の $4/3$ 乗に比例し、海洋の場合には cm, sec の単位で $K=0.01 \times l^{4/3}$ が成立つといわれている。現在の問題において、現象のスケールとして何をとりべきか判然としないが、かりに内海の幅をとれば、およそ $l=5 \sim 50 \text{ km}$ の程度だから、 K

は $4 \times 10^5 \sim 8.6 \times 10^6$ の範囲にあり、内海平均としては 10^7 より小さ目である。ただし、拡散実験によれば、係数 0.01 の値はかなり幅があり、さらに $4/3$ 乗則にあてはまらない例も報告されている。

内海では潮流が一般に強く、しかも地形が複雑であるから、水平および鉛直方向のシアが発達し、Taylor⁹⁾ の指摘した分散の効果も顕著であろう。また長期間の平均値の分布を考えているので、潮流による乱れだけでなく、気象・海象の擾乱の積み重ねの影響も無視できないであろう。一次元の場合には循環流の効果も拡散係数の中に含まれてくる。これらの要因は必ずしも独立ではないが、これらの総合として 10^7 という大きい値が得られたものと思われる。拡散係数がこのように大きいことは汚染対策上有利である。なお、拡散係数は現象のスケールに応じて異なるから、局地的

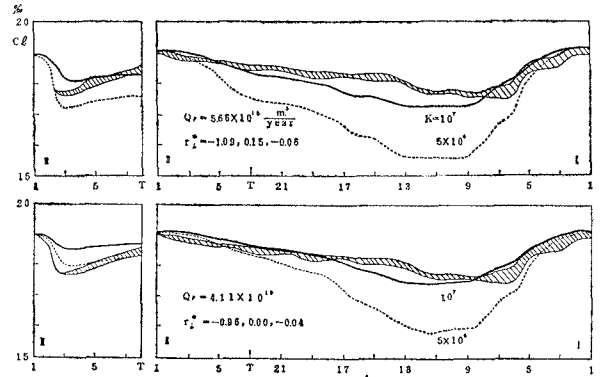
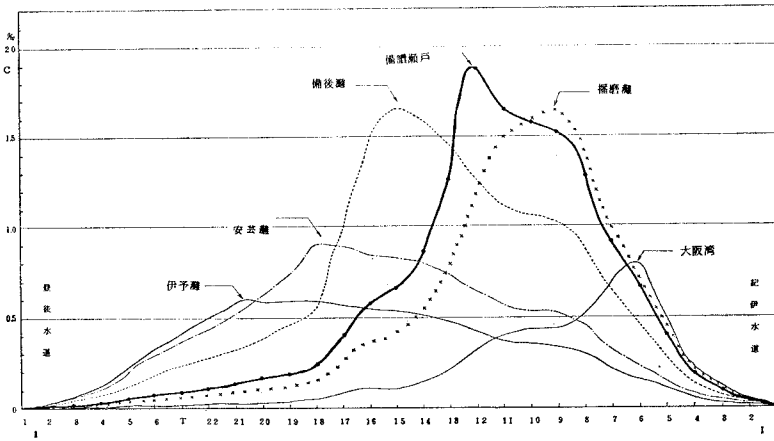


図-12 複合内海モデルによる塩素量の分布、影の部分の上下限は下層および上層の実測塩素量

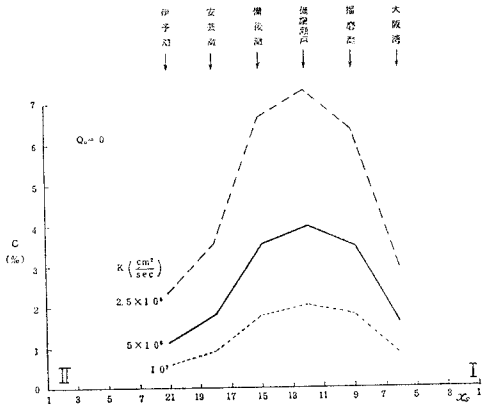
な問題に対しては、もっと小さい値をとらねばならない。そのとき本報告の結果は、境界条件として利用できるであろう。

もっとも簡単な一次元の理論を適用するにしてさえも、諸要因の実態についての理解が乏しいため、現状では結論を得るに困難を覚えることが多い。精度をあげるためには、さらに3次元の取り扱いが必要であるが、その際には塩分その他の物質の分布や流動に関する知識が一層強く要求される。瀬戸内海の水質汚濁と物質拡散をより良く理解するためには、今後綿密な調査観測による基礎資料の集積や水理模型実験も必要であろう。

ともあれ、乏しい資料と単純な仮定の上に議論を進めてきたので、検討改善を要する点が多いのであるけれども、狭い明石と芸予の両海峡に挟まれた瀬戸内海中央部と、狭い関門海峡に通じる周防灘西部が、他の海域にく



図—13 物質の連続放出源の位置が異なる場合の濃度分布の比較, 単一内海モデル,
 $q_0, Q_0=7.0 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year}, K=10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}, R=10 \text{ ton/sec}.$



図—14 連続放出の場合の線源の濃度, 横軸は線源の位置, $q_0, R=10 \text{ ton/sec}$ の場合
 (点線は図—13の包絡線に相当する)

らべて大局的に海水の交流が良くないことは確かであろう。瀬戸内海は、決して無限の包容力をもつものではない。貴重な伝統ある日本人の生活環境として、われわれは瀬戸内海を新しい見地からもっと理解したい。

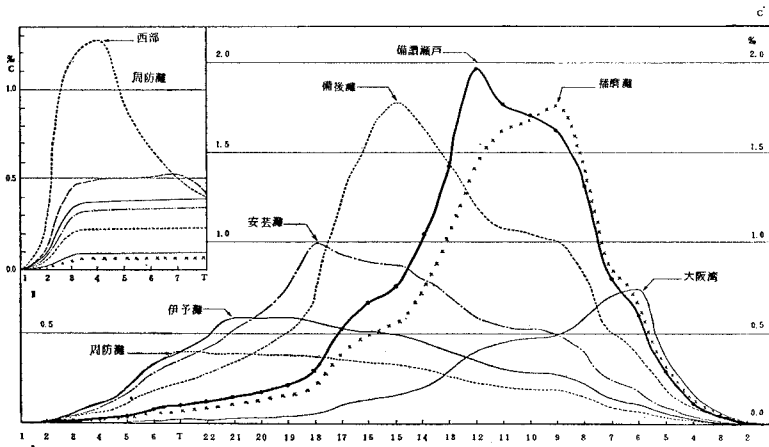
謝 辞：終りに臨み、有益な助言をいただいた東海大学の中野猿人、渡辺信雄、宇田道隆の3教授と気象研究所の菱田耕造研究部長、観測資料の整理に努力された下門義克、高林厚雄、下江宏の海洋学部学生諸君、計算にご協

力願った伊藤忠電子計算サービス部の佐藤愛子嬢、さらに、資料につきご厚意を受けた海上保安庁水路部、気象庁海洋課、三洋水路測量部、その他関係各方面に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 速水頌一郎・福尾義昭・依田大介 (1956) : 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, pp. 49~53.
- 2) 速水頌一郎・宇野木早苗・中野猿人・渡辺信雄 (1970) : 瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散, 東海大学調査報告 68. pp.
- 3) 海洋気象学会(1967) : 瀬戸内海の気象と海象 360 pp.
- 4) Sverdrup, H. U. and others(1947) : The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology, Prentice-Hall, New York, p. 120.
- 5) 中国電力(1969) : 瀬戸内海に流入する全河川の年間総流量, 未刊資料

- 6) 宇田道隆・渡辺信雄 (1933) : 瀬戸内海の平年各月海況, 水産試験場報告, 第3号, pp. 137~164.
- 7) 宇田道隆・疋田 茂 (1970) : 瀬戸内海東部の海水透明度とその経年的変化, 昭和45年度日本海洋学会春季大会講演予稿集, p. 43.
- 8) 日高孝次(1937) : 瀬戸内海の東向流について, 海と空, Vol. 17, pp. 100~104.
- 9) Taylor, G. I. (1954) : The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. Proc. Roy. Soc., Series A, 223, 1155, pp. 446~468.



図—15 瀬戸内海 (複合内海モデル) の連続線源による濃度分布, $K=10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}, R=10 \text{ ton/sec}, Q_F=5.56 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year}, r_i^*=-1.09, 0.15, -0.06$