

内湾の海水交流と鉛直混合に関する一考察*

宇野木 早 苗**

要旨: 大気, 外海, 陸水などの外部条件に影響されやすい内湾は, 海洋の構造が季節的に著しく変動している. その形成に関与する鉛直混合, 水平混合, 移流の大きさを, ボックス・モデルを用いて推定する試みを行った. 鉛直輸送の形態の季節的相違, 安定度の鉛直混合に及ぼす効果, 熱と塩分の鉛直混合の強さの比較, 内湾水の置換日数などについて, 多少の知見が得られたので報告する.

1. 内湾における海洋構造の季節変化

内湾の流況は潮流や風の作用で短時間に激しく変動しているが, 鉛直断面で平均的に見た場合には, 陸水や降水の影響を受けた密度の小さな海水は, 表面を覆って湾外に向い, 重たい外洋の水は内湾の下層にもぐりこむ. この間に, 鉛直方向の移流, 混合拡散, 連行作用などによって, 下層水の一部は平均として上層に運ばれ, ここに一つの鉛直循環が形成される. そして, 定常の場合には, 内湾の任意断面を通過する平均流量は, それより内側の淡水供給量に等しく, 塩分の輸送量は零に保たれる.

しかしながら, 容量の小さな内湾は大気, 外海, 陸水の季節変動の影響を受けることが大きく, その海洋構造と循環の強さは, 季節的に著しく異なる. 第1図に, 長期間の観測資料を基にして, 伊勢湾の主軸にそう2月と8月における水温と塩分の縦断面分布が描かれているが, 両季節における海洋構造の相違は真に対照的である¹⁾.

冬季には海面の冷却, 風による攪乱, 河川流量の減少などのため, 鉛直方向の混合が活発に行われ, 水温, 塩分の等値線は鉛直に立っている. しかるに夏季においては, 日射量と河川流量の増大,

おだやかな風のため, 高温低かん海水が伊勢湾の表面全体を覆って湾外にまで張出し, 水温, 塩分の等値線は水平に寝ている. そうして海洋要素の著しい変化帯は, 冬季には湾内外水の接触部として, 湾口の伊良湖水道より少し沖の水深急変部付近において鉛直的に, 夏季には上下層の境界として表面下数mの所に水平的に見出される. なお勾配の強さは, 冬季においては水温について, 夏季においては塩分に関して顕著である.

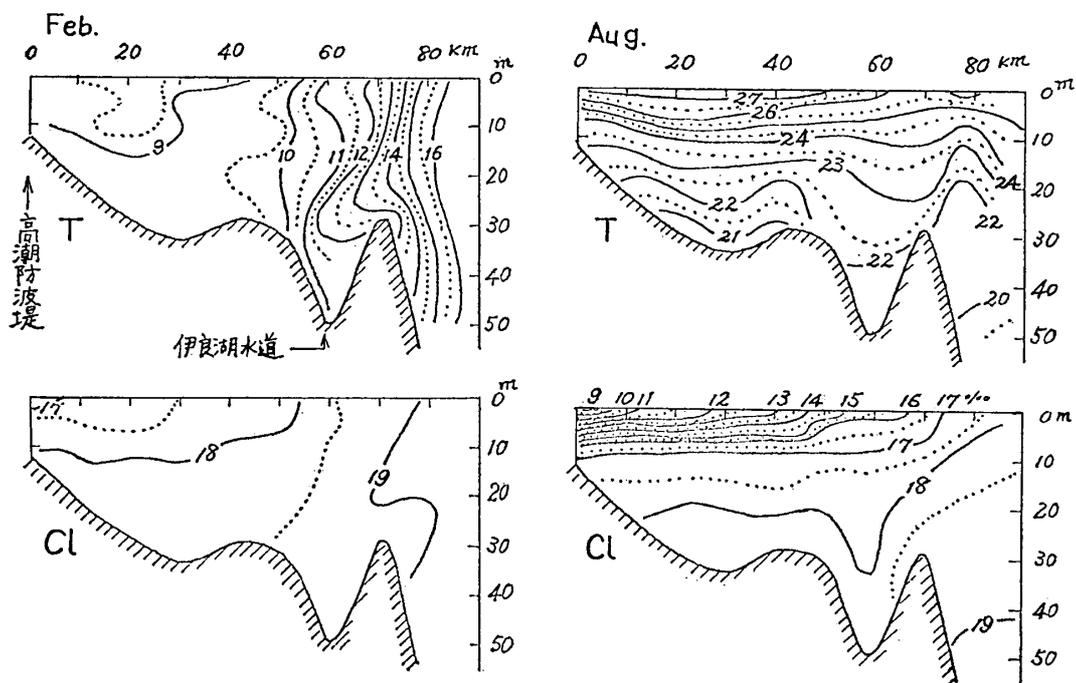
更に, 季節的推移を連続的に見るため, 浜名湖の湖心部(第5図の St. 6)における水温と塩分の各層における年変化を第2図に示す²⁾. 春から夏にかけて成層構造は著しく発達するが, 9月になると驚くほど急激に, 上下層の水温が均一になる. それ以降の寒候季には, ほんのわずかではあるが表層より下層の方が暖かく, 水温逆転が見られる. しかし塩分の方には, 9月以降において水温ほどの上下の一様性は認められず, 大気や外海の境界条件の差異はあるにしても, 熱と物質(塩分)の鉛直方向の輸送の強さが一見相異なることをうかがわせる. これらの季節変化の傾向は, 典型的な内湾である東京湾や伊勢湾においても同様に認められることで, その1例を第3図に掲げる.

このような海洋構造の季節的相違は, 水平及び鉛直方向の物理量の輸送形態に, 密接に結びついているはずである. それ故, われわれは上記のような海洋要素の気候学的分布の変化から, 混合拡散や移流の強さを各季節について求めることを考える. そのため, 物質や物理量の連続条件に基礎を置いた最も簡単な解析法, すなわちボックス・モデルによる方法を用いる. もちろん, このようにして求めたものは, 実際の動的な変動におけるものとは直接には対応せず, これらの平均状態を表わすものと考えねばならない. なお, 本研究は

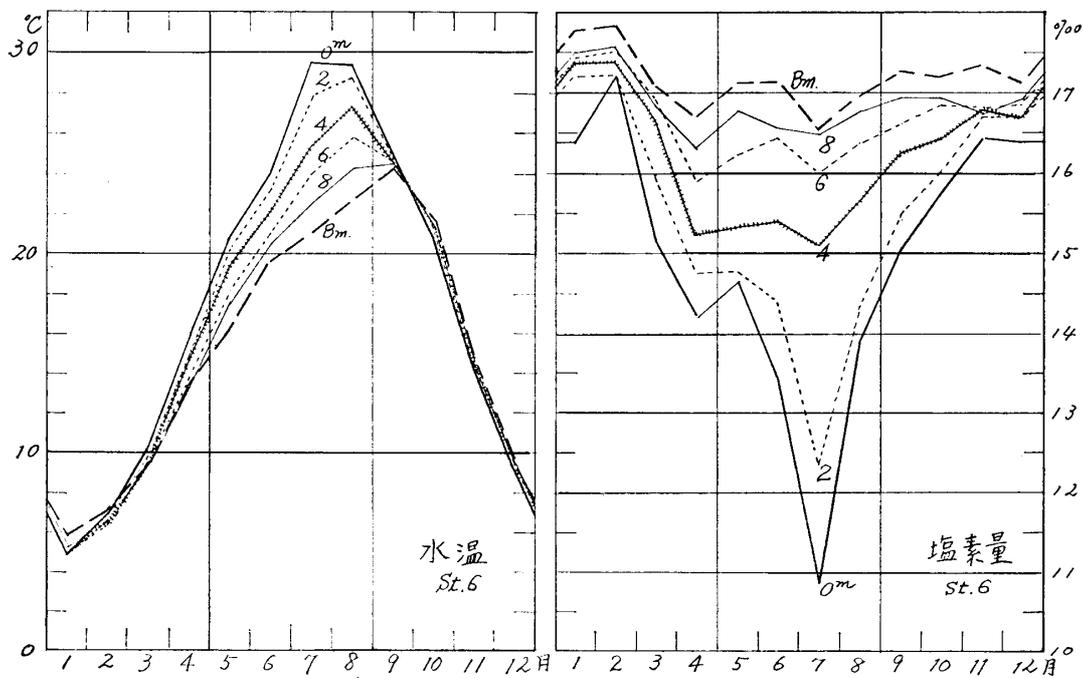
* 1973年12月28日受理

** 理化学研究所

宇野 木 早 苗

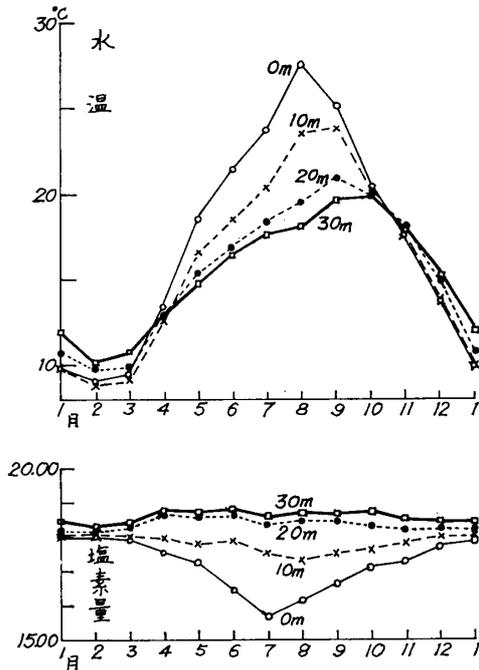


第1図 伊勢湾の軸にそっての水温(上図)と塩素量(下図)の縦断面分布図¹⁾
 左は2月, 右は8月 1950~1972年の平均



第2図 浜名湖の湖心における水温(左)と塩素量(右)の層別の年変化²⁾
 1966~1970年の平均

内湾の海水交換と鉛直混合に関する一考察

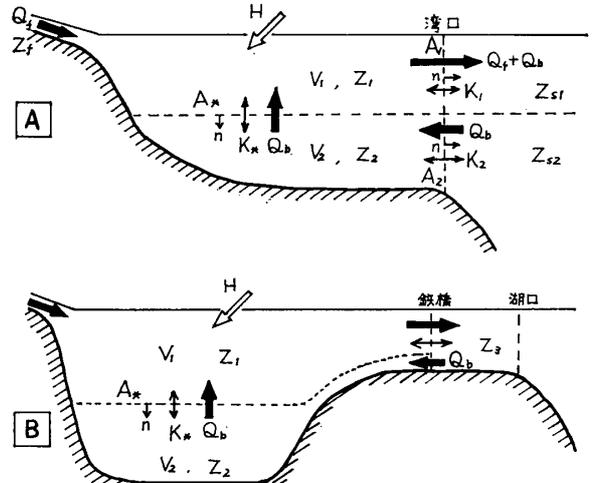


第3図 東京湾中央部における水温(上)と塩素量(下)の年変化, 1961~1970年の平均

実施途中であるが, この「沿岸海域における鉛直循環」に関するシンポジウムに, 中間結果を話題として提供し, ご教示ご批判をお願いすることにする。

2. 解析の方法

いま内湾が第4図Aに示すように, 上下二層に近似的に分けられる場合を考える。上層, 下層に対する量を, それぞれ添字, 1, 2でもって区別し, 物理量あるいは物質濃度を, 湾内において Z_1, Z_2 とし, 湾外において Z_{s1}, Z_{s2} とする。上層に加えられる淡水の量を Q_f , その濃度を Z_f , 下層に湾外から流入する海水量を Q_b とすれば, 水位の変動が無視できるとき, 上層から湾外に出ていく海水量は $Q_f + Q_b$ で与えられる。湾内外の海水の混合拡散に關与する水平方向の拡散係数(広義の意味に使用し, 分散係数も含む)を K_1, K_2 , 上下方向の拡散係数を K_* (上に同じ), 湾口部の断面積を A_1, A_2 , 二層の境界面積を A_* , 上下層の容積を V_1, V_2 としたとき, 連続方程式は次のようになる。



第4図 内湾(A)と浜名湖(B)の二層モデル

$$V_1 \frac{\partial Z_1}{\partial t} = -(Q_f + Q_b)Z_1 + Q_b Z_2 + Q_f Z_f + A_1 K_1 \left(\frac{\partial Z}{\partial n} \right)_1 + A_* K_* \left(\frac{\partial Z}{\partial n} \right)_* + H_1 \quad (1a)$$

$$V_2 \frac{\partial Z_2}{\partial t} = Q_b(Z_{s2} - Z_2) + A_2 K_2 \left(\frac{\partial Z}{\partial n} \right)_2 - A_* K_* \left(\frac{\partial Z}{\partial n} \right)_* + H_2 \quad (1b)$$

ここで, t は時間, $(\partial Z / \partial n)_1, (\partial Z / \partial n)_2, (\partial Z / \partial n)_*$ は面 A_1, A_2, A_* の法線方向の濃度勾配, H_1, H_2 は単位時間当りの各ボックスにおける物質の生成消費あるいは負荷の量である。

さて, 適当な水平方向の長さを L_1 と L_2 , 上下方向のそれを L_* とし, 微分を差分

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial n} \right)_1 \doteq \frac{Z_{s1} - Z_1}{L_1}, \quad \left(\frac{\partial Z}{\partial n} \right)_2 \doteq \frac{Z_{s2} - Z_2}{L_2}, \quad \left(\frac{\partial Z}{\partial n} \right)_* \doteq \frac{Z_2 - Z_1}{L_*}$$

で近似し, Z として熱量を考えると, 水温 T を用いて (1a, b) 式は,

$$(T_2 - T_1)\alpha_T + (T_{s1} - T_1)\beta_1 + (T_2 - T_1)\gamma = \frac{dT_1}{dt} + MT_1 - E \quad (2a)$$

$$\begin{aligned}
 &-\omega(T_2 - T_1)\alpha_T + (T_{s2} - T_2)\beta_2 + \omega(T_{s2} - T_2)\gamma \\
 &= \frac{dT_2}{dt} \quad (2b)
 \end{aligned}$$

と書き表わされる。一方、塩素量 C に対しては、

$$\begin{aligned}
 &r(C_2 - C_1)\alpha_T + (C_{s1} - C_1)\beta_1 + (C_2 - C_1)\gamma \\
 &= \frac{dC_1}{dt} + MC_1 \quad (3a)
 \end{aligned}$$

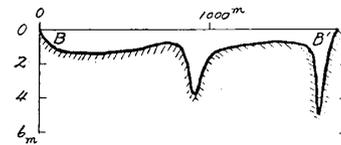
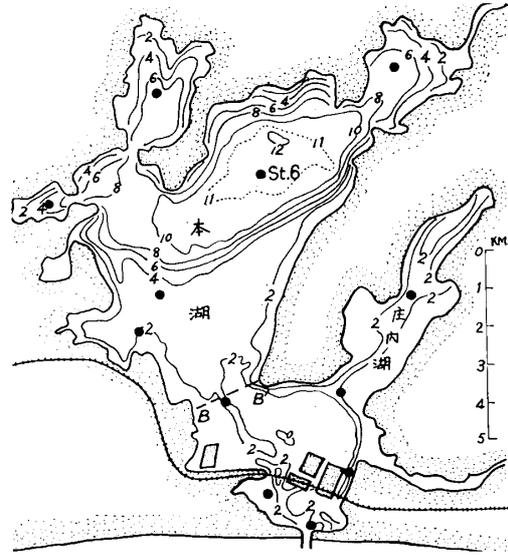
$$\begin{aligned}
 &-r\omega(C_2 - C_1)\alpha_T + (C_{s2} - C_2)\beta_2 + \omega(C_{s2} - C_2)\gamma \\
 &= \frac{dC_2}{dt} \quad (3b)
 \end{aligned}$$

が得られる。ここで、

$$\begin{aligned}
 \omega &= \frac{V_1}{V_2}, & M &= \frac{Q_f}{V_1}, & E &= \frac{H_1}{V_1}, \\
 \alpha_T &= \frac{A_*K_T}{V_1L_*}, & \alpha_S &= \frac{A_*K_S}{V_1L_*}, & \beta_1 &= \frac{A_1K_1}{V_1L_1}, \\
 \beta_2 &= \frac{A_2K_2}{V_2L_2}, & \gamma &= \frac{Q_b}{V_1}, & r &= \frac{K_S}{K_T} = \frac{\alpha_S}{\alpha_T}
 \end{aligned}$$

である。ただし、熱と塩分に対する拡散係数は、水平混合の場合には同一の値をとると考えるが、鉛直方向にはそれぞれ $K_* = K_T$ 及び K_S と區別しておく。なお、 K_S は塩分をトレーサーにした海水自身の拡散係数と考えてもよいであろう。上式ではまた、上層に供給される淡水量のもちこむ熱量は無視されている。淡水量は、陸水量と内湾の海面への降水量の和から、海面からの蒸発量を差引いたものである。

上記の諸量の中で、 $C(t)$ と $T(t)$ は、長期間の海洋観測資料を整理して求めることができる。 ω , M , E は、地形、水文、気象の資料を基礎にして推定できる。それ故未知量は、 α_T , r , β_1 , β_2 , γ の 5 個、すなわち K_T , K_S , K_1 , K_2 , Q_b の 5 個である。しかるに方程式は (2a, b), (3a, b) の 4 式であるから、未知量を一義的に決めることはできない。しかしながら、適当な条件を加えることによって、未知量がそのどこかに存在すると思われる存在範囲を決めることは可能であろう。例えば拡



第 5 図 浜名湖の地形図と BB' 線の水深断面図。黒丸は観測定点，等深線は m 単位

散係数 K_T , K_S , K_1 , K_2 は正と考えられる故、 α_T , r , β_1 , β_2 も正でなければならない。また下層への流入量 Q_b 、従って r も一応正と仮定できそうである。それ故、(2), (3) 式から α_T , β_1 , β_2 , γ を含んだまま解き、上記の条件を満足するように r の範囲を定める。そうすると、 r の上下限に対して未知量の存在すると思われる範囲が決まることになる。

一方、浜名湖はいわゆる内湾とは異なるが、沿岸海洋学的には口が狭くて閉鎖性の特に強い内湾と考えることが可能であり、また境界条件が比較的押さえやすいので、ここに取り上げることとする。第 5 図に示すように、浜名湖は国道や鉄道のある幅狭い陸地や鉄橋によって、狭小な南部水域と、広大な北部水域に分けられる。南部水域は幅 200 m の狭い湖口で外海に連絡している。一方、北部水域の南半分は 4 m 以浅の浅海域であるが、北半分は水深が急に深まり、10 m の水深が長円形の盆状に広がり、最深部は 12 m 余りになっている。この湖心深部には、第 5 図に併せ示してある水深断面図から理解できるように、浅海域を

内湾の海水交流と鉛直混合に関する一考察

南北に走る幅狭い滞筋を通して、塩分の濃い外洋性の水が運び込まれているようである。

それ故、浜名湖のモデルとして、第4図のBを考える。第4図Aと異なって、下層には滞筋を通過しての一方向的な海水流入 Q_b のみを考え、水平混合 K_2 は無視する。また、湖口と鉄橋間の南部水域は、大部分が2m前後の浅海であるので、一層とみなし、その水温を T_3 、塩分を C_3 とする。このモデルは、貝毒の研究に関連して平野が用いた浜名湖のモデルと多少異なっている³⁾。しかるとき、下層に注目すると、(2b)、(3b) に対応して

$$\frac{dT_2}{dt} = -(T_2 - T_1)\alpha_T' + (T_3 - T_2)\gamma' \quad (4)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = -r(C_2 - C_1)\alpha_T' + (C_3 - C_2)\gamma' \quad (5)$$

が得られる。 r は前と同じく K_S/K_T であるが、

$$\alpha_T' = \frac{A_* K_T}{V_2 L_*} = \omega \alpha_T, \quad \gamma' = \frac{Q_b}{V_2} = \omega \gamma$$

である。(4)、(5) より α_T' と γ' を求めると

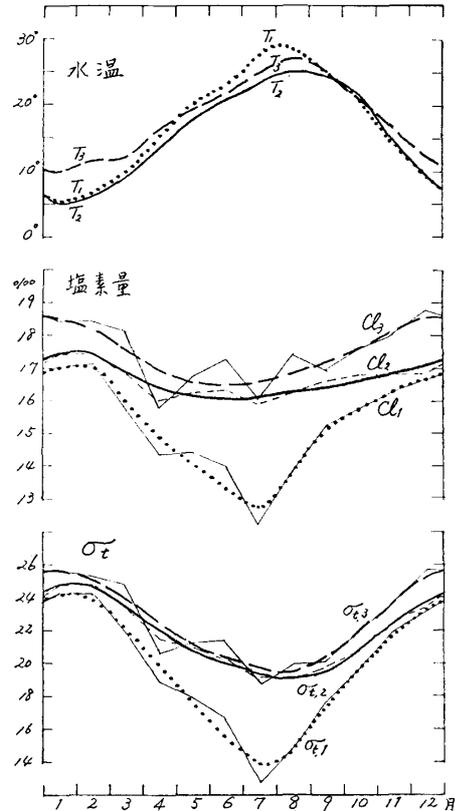
$$\alpha_T' = \frac{(C_3 - C_2) \frac{dT_2}{dt} - (T_3 - T_2) \frac{dC_2}{dt}}{(T_1 - T_2)(C_3 - C_2) + r(T_3 - T_2)(C_2 - C_1)} \quad (6)$$

$$\gamma' = \frac{r(C_2 - C_1) \frac{dT_2}{dt} + (T_1 - T_2) \frac{dC_2}{dt}}{(T_1 - T_2)(C_3 - C_2) + r(T_3 - T_2)(C_2 - C_1)} \quad (7)$$

となる。両式の右辺には、 r が未知であるので、前に述べたと同じように

$$\begin{cases} \alpha_T' > 0 \\ \gamma' > 0 \\ \frac{k_S}{k_T} \leq r \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

の条件を満足する r の存在範囲をさがすことにする。(8) の最後の条件は、塩分と熱の広義の拡散



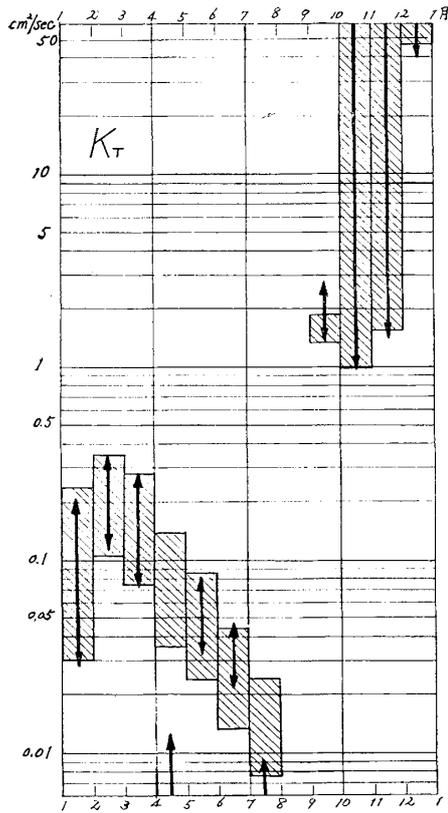
第6図 浜名湖の各ブロック(第4図B)における平均の水温、塩素量、 σ_t の年変化

係数の比 r は、塩分と熱の分子拡散係数の比 k_S/k_T より小さくなることは無く、また物質の混合拡散が熱のそれより強くなることは無い、ということの意味している。この条件はAの内湾の場合にもあてはまる。この3条件を満たす r の範囲から、 α_T' と γ' の範囲、従って、 K_T 、 K_S 、 Q_b の存在範囲が推定され、未知量はこの範囲のどこかに位置することになる。

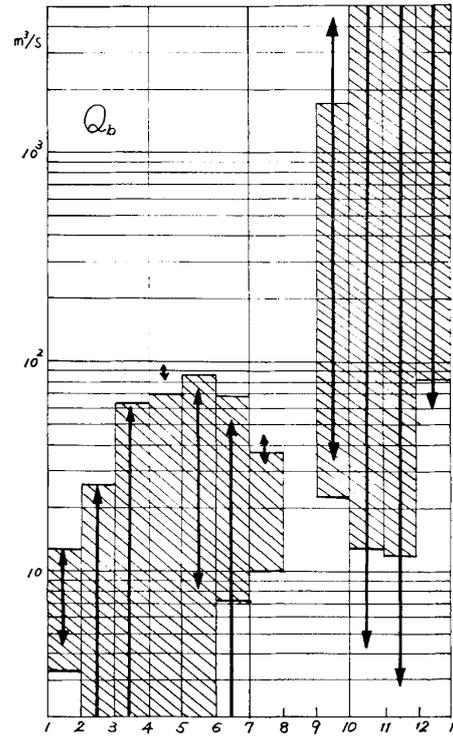
3. 浜名湖における解析

静岡県水産試験場浜名湖分場によって、第5図に示す12点において、毎月1回海洋観測が実施されているので、5年間の資料を整理して、第4図Bに示される3海域の月平均の水温と塩素量、 σ_t を求めた。その結果は第6図に描かれている。なお、塩素量の不規則な変化を適当に平滑したものも併せて示してある。ここで、上層と下層の境は、水温と塩素量の鉛直分布を考慮して4mに定めた。

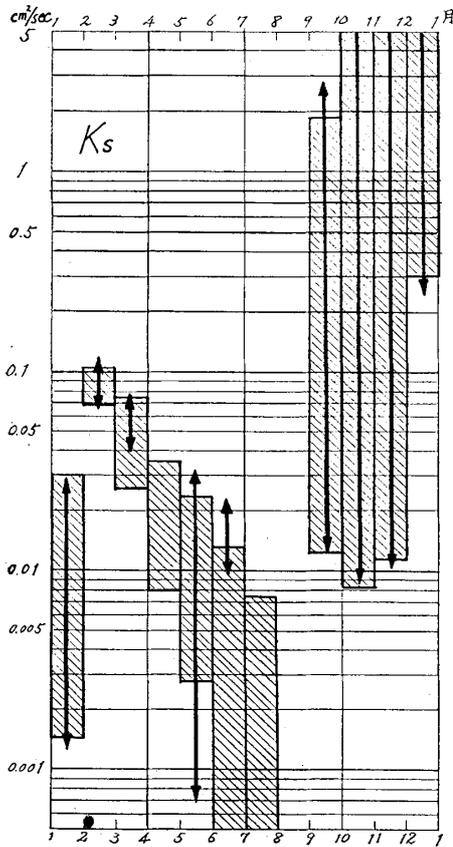
宇野 木 早 苗



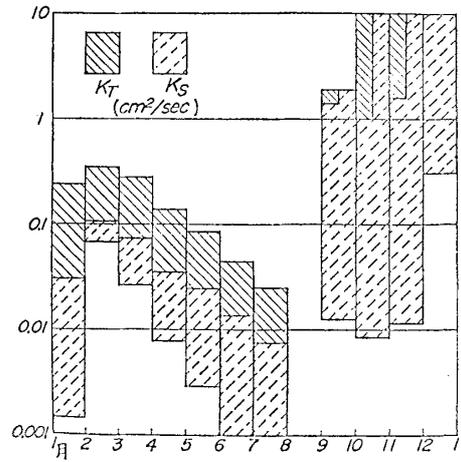
第7図 浜名湖における K_T の存在範囲の年変化



第9図 浜名湖における Q_b の存在範囲の年変化



第8図 浜名湖における K_S の存在範囲の年変化



第10図 K_T と K_S の比較

これらの資料を基礎にして、前節の後半に述べた方法で求めた K_T , K_S , Q_b の値を第7~9図に示す。いずれの場合も、鉛直に立った矢印は、第6図の生の値から求めた存在範囲、斜線部は第6図の塩素量に関して平滑曲線を用いた存在範囲である。そしてこれらの値は、ある月の中央日から翌月の中央日までの平均値を与えるものとみなされる。なお、拡散係数の値を決めるのに、鉛直方向の代表的長さ L_* が必要になるが、便宜的に上下層のそれぞれの中央点の間の鉛直距離を用い

内湾の海水交流と鉛直混合に関する一考察

第1表 $r=K_S/K_T$ の存在範囲

月	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~1
下限	.006	.193	.093	.056	.033	.009	.010	*	.009	.008	.007	.006
上限	1	1	1	1	1	1	1	*	1	.865	.289	.013

た。これは多少問題であるが、結果のオーダーを変えることは無いと思われる。 K_T と K_S の比較を容易にするため、平滑曲線による場合について両者を同一図に並べたものを第10図に示す。また r の存在範囲は第1表にまとめてある。以上のことから次のことが理解できる。

(i) 塩素量の生の曲線と平滑曲線を用いたものは、4~5月間を除いては、あまり大きな差異は生じていない。(ii) 季節の変わり目である8~9月間においては、(8)式の3条件を満たす範囲は見出し得なかった。その外の季節については一応範囲は求まったが、その範囲が広すぎて、このままでは明確なことはいい難い。(iii) しかし大局的に見て、拡散係数と移流量は、季節により著しく異なり、特に2月~8月間の傾向と、9月~1月間の傾向は非常に異なることは言い得るであろう。そして、その中間の1~2月間は両者の傾向とも異なっているように思われる。(iv) 2月~8月間では、鉛直混合の係数は、月が進むにつれて減少する傾向にあるが、移流量はそれと逆に増加する傾向にある。(v) 9月から1月にかけては、熱の鉛直拡散係数は飛躍的に大きくなっている。(vi) 塩分と熱の拡散係数の比 r の上限は、1~8月間ではすべて1に集まっているが、9月以降では9~10月間を除き、1よりも小さく、しかも月が進むにつれて小さくなっている。次に2季節に分けて、多少の考察を加える。

A. 成層形成期

2月から8月までは z 軸を鉛直上方にとったとき平均的には $\partial T/\partial z > 0$, $\partial C/\partial z < 0$ の成層形成期に当り、安定度は月と共に増加しているが、これに対応して、鉛直拡散係数は上記のように減少している。MUNK と ANDERSON は、躍層の発達している場合について、熱と塩分の鉛直拡散係

数は等しいと考え、これらを Richardson 数 R_i ($=N^2/\Omega^2$, N は Brunt-Väisälä 周波数, Ω はシアアの強さ) の関数と考え、

$$K_* = K_0(1 + a_1 R_i)^{-3/2} \quad (9a)$$

の関係を導いた⁴⁾。一方、KENT と PRITCHARD によれば、

$$K_* = K_0(1 + a_2 R_i)^{-2} \quad (9b)$$

が期待できる⁵⁾。更に、指数関数形の

$$K_* = K_0 e^{-a_3 R_i} \quad (9c)$$

の形なども提案されている。

しかし、潮流その他のため流況が刻々と変化する estuary において、しかも1カ月間の平均としての Richardson 数の定義は、簡単ではない。そこで流れの代表値として、流速の2乗平均の平方根 $\sqrt{\bar{v}^2}$ を、長さのスケールとして海域の代表的深さ D を考え、Richardson 数に対応するものとして、

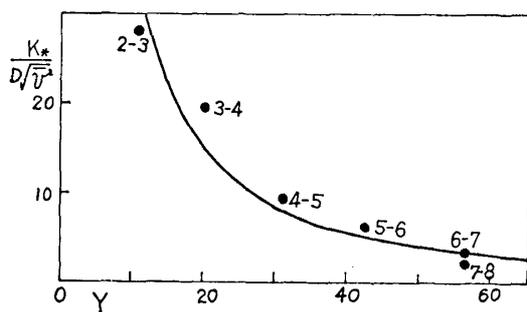
$$Y \equiv \frac{N^2 D^2}{\bar{v}^2} = -\frac{g D^2 \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \bar{v}^2} \quad (10)$$

を用いることにする。潮流が卓越している場合には、その振幅を U_0 とすれば、 $\bar{v}^2 = U_0^2/2$ となり $Y = 2N^2 D^2/U_0^2$ と表わされる。しかし

$$\frac{K_*}{D\sqrt{\bar{v}^2}} = f(Y) = \lambda(1 + a_4 Y)^{-p} \quad (11)$$

の形を仮定してみる。

2~8月間に対して、MUNK らに倣って $r=1$ とすれば、 $K_* = K_T = K_S$ は一義的に決まり、それは第10図で K_T と K_S が接触した所の値で与え



第11図 K_* と Y との関係
 実線は(12)式, 黒丸は観測より求めたもの, 黒丸の傍の数字は月を示す

られる。これに(11)式をあてはめると

$$\frac{K_*}{D\sqrt{v^2}} = 0.0014(1+Y)^{-3/2} \quad (12)$$

が得られる。この式と原資料との比較は第11図に示されている。指数 $-3/2$ が, Munk-Andersonの(9a)式の指数と一致しているのは興味深い。しかし, (12)式は $a_4=1$ と置いてあるので再検討の必要がある。

B. 水温逆転期

9月から12月までは, 平均的に見た場合上層が低温低かん, 下層が高温高かん, すなわち $\partial T/\partial z < 0$, $\partial C/\partial z < 0$ になっている。それ故, 塩分は安定化の, 水温は不安定化の役割をもっている。海水の密度 ρ は, 水温と塩分の関数であるから, 熱と塩分に対する海水の膨張率を, それぞれ

$$a \equiv -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}, \quad b \equiv \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial C}$$

と記す。さて, 上下層の塩分差を ΔC , 温度差を ΔT としたとき, この塩分差と温度差の密度変化に対する寄与の比は, $J \equiv b\Delta C/a\Delta T$ で与えられる。静力学的には, この比が1より大きいとき安定, 等しいとき中立, 小さいとき不安定になる。われわれが問題にしている9~12月の間では, この比はすべて1より大きくなり安定である。しかしこの場合でも, 熱と塩分の分子拡散係数の相違により, 条件次第では overstable mode の対流が起り得ることは, 最近の熱塩対流論の教えるこ

とである⁶⁾ (熱塩対流論については, 本シンポジウムで岩田憲幸氏の総合報告がなされている)。われわれの気候学的現象を, 分子拡散の現象に直ちに結びつけるのは問題であるが, 動的な変動の過程においては, J の値もさまざまな値をとることが考えられ, この期間の海洋構造の形成を考える上に, 強制対流と共に, このような対流も今後注目する必要があると思われる。なお, 月が進むと共に塩分の拡散係数と熱の拡散係数の比が, 次第に小さくなっているが, これが何によるのかは, 今後検討すべきことである。そして, この期間に対し成層形成期と同じモデルを用いたが, 別の取り扱いが必要かも知れない。

4. 東京湾における解析

内湾の典型例として東京湾を対象に, 同様な解析を試験的に行った。1961年から1970年の10年間に, 千葉県内湾水産試験場及び神奈川県水産試験場金沢分場で得られた海洋観測資料約4万個を整理して, 水温と塩分の月毎の平均的空間分布を作り, 更に東京湾に供給される淡水量や熱収支の推定を行い, 2節の前半に述べた方法を適用する。テスト段階であるため, 各月において満足すべき結果は未だ得られていないが, 比較的矛盾の少ないと思われる5~6月間の解析結果をここに述べる。上下層の境は15mの深さに置いてある。

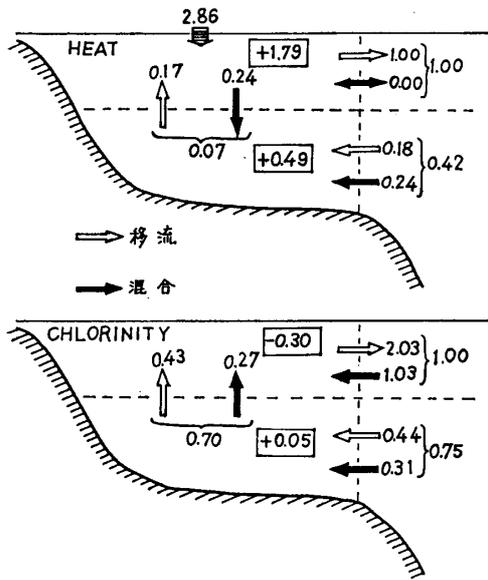
5~6月間においては, r の存在範囲は0.78と1の間にあり, その上下限における各未知量の値は第2表に示してある。表によれば, 水平方向の拡散係数は $7 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の前後であって上層の方が下層よりやや大き目であること, 鉛直方向の熱と塩分の拡散係数の間にはあまり大きな差はなく, $0.2 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の程度であることなどが分る。

第2表 東京湾5~6月間における交流要因の大きさ

r	α_T month ⁻¹	α_S month ⁻¹	β_1 month ⁻¹	β_2 month ⁻¹	γ month ⁻¹
1	0.14	0.14	0.50	1.16	0.016
0.78	0.15	0.12	0.53	1.06	0.000

r	K_T cm ² /sec	K_S cm ² /sec	K_1 10 ⁶ cm ² /sec	K_2 10 ⁶ cm ² /sec	Q_0 m ³ /sec
1	0.18	0.18	7.57	6.52	72
0.78	0.20	0.15	8.07	5.99	0

内湾の海水交流と鉛直混合に関する一考察



第12図 東京湾5~6月における熱収支(上)と塩分収支(下)比率を示す
 矩形の中は存在量の1ヶ月間における増減を表わす

なお、 r のわずかな差異が、 Q_b の値に大きな差異を生じている。

この期間は成層形成期であるので、MUNKらに倣って、以下においては熱と塩分の鉛直方向の拡散係数は同じと考える。第2表の $r=1$ の場合の数値を用いて、(1a, b)式の各項の大きさを求め、その結果を第12図に示す。上は熱収支、下は塩分収支を表わし、いずれの場合も、上層において湾から外に与えられる水平方向のfluxを1として示されている。

東京湾において、5~6月の1ヶ月間に、大気から海面に与えられる熱量の2/3は上層の海水を暖めるために使用され、1/3は外海へ逃げていく。上層における湾内外の水温差は微弱であるため、混合拡散による水平輸送は無視できる。上下層の熱交換は、混合による下方輸送と、移流による上方輸送にはあまり大きな差が無く、差引きとして安定した成層の効果が認められる。この間、下層の温度はかなり上昇しているが、これの大部分は外海から供給され、移流と混合の効果は3:4の割合になっている。

次に塩分収支を見ると、外海から湾内下層へ、移流と混合拡散により輸送される塩分量のごくわ

ずかの部分が、下層の塩分濃度を変えるのに使用され、大部分は上層に持ち込まれる。その折、移流効果が拡散効果より多少大きい。上層にはこの下層からの供給と、水平混合によって外海から塩分が加わるが、その和以上に多量の塩分が水平移流で外海へ流出しているため、差し引き上層の塩分濃度は急激に減少している。なお本計算では、河川流量による熱の流入を無視しているが、これは必ずしも無視できず、これを考慮すると、本節の結果は多少異なるはずである。

これらの結果を用いて、ここで東京湾の海水の置換日数を見積ってみる。(1a, b)式を辺々相加起来、空間微分を例のごとく差分で近似すると、

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(V_1 Z_1 + V_2 Z_2) = & - \left\{ \left(Q_f + Q_b + \frac{A_1 K_1}{L_1} \right) Z_1 \right. \\ & + \frac{A_2 K_2}{L_2} Z_2 \left. \right\} + \left\{ \frac{A_1 K_1}{L_1} Z_{s1} + \left(Q_b + \frac{A_2 K_2}{L_2} \right) \right. \\ & \left. \times Z_{s2} + H_1 + H_2 + Q_f Z_f \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

となる。右辺の第1項は、湾から出ていく量、第2項は湾に加わる量を表わす。いま置換日数として、湾内における存在量を、単位時間に湾から外へ出ていく量で割ったものと定義すれば

$$\begin{aligned} \tau_z = & \frac{V_1 Z_1 + V_2 Z_2}{\left(Q_f + Q_b + \frac{A_1 K_1}{L_1} \right) Z_1 + \frac{A_2 K_2}{L_2} Z_2} \\ = & \frac{\omega Z_1 + Z_2}{\omega(M + \beta_1 + \gamma) Z_1 + \beta_2 Z_2} \quad (14) \end{aligned}$$

で与えられる。

第2表の数値を利用すると、熱に注目した場合の置換日数は41日、塩分に注目した場合には40日となる。かって杉浦は、5月における東京湾の置換日数として、28日という値を得ている⁷⁾。同氏の扱いは本報のと多少異なるが、割合近い値となっているのは興味深い。ただし、これらは湾内全体の平均であるから、湾口に近い部分の入れ替わりは、ここで得た日数より早く、湾奥に近い部分は、長くなることを留意すべきである。なお、こ

宇野木 早苗

この計算は定常状態が続くと仮定しての置換日数であるが、実際は非定常であり、更に季節が異なれば、交流に関与する要因の大きさが異なり、置換日数も違ってくることは当然考慮しておかねばならない。

5. むすび

本報では、内湾の海洋構造が季節的に著しく異なることに注目し、これらの構造に関与する交流要因の強さを、構造自身に語らしめることを考え、ボックス・モデルの方法を適用した。その結果、成層形成期と水温逆転期における鉛直輸送の形態の相違、成層形成期における鉛直混合と安定度の関係、水温逆転期における熱と塩分の拡散係数の相違、あるいは東京湾の5~6月間の熱収支と塩分収支及び置換日数などについて、定量的な知見を多少得ることができた。

そしてこの解析法も、大局的な見方をする上にある程度有効であるとの印象を受けたが、しかしここに示したのは、初歩的段階であって、今後検討改善を要する点が数多いことが認められる。層の分け方、ボックスの作り方が結果に微妙に利いてきて、海洋構造に合ったボックスを作ることが重要になり、このモデルを適用するのが無理な場合もあり得る。従って、浜名湖の場合、年間を通じて同じ深さで2層に分けたのも再検討を要する。なお、混合拡散と移流がうまく分離されているか否かの吟味も必要である。また、未知量と方程式の数が一致せず、一義的に決められないので、今後は他の海洋要素を導入することを考えねばならない。その際、生成、消費が量的に把握できている要素が必要で、これに関して、化学、生物の分野の方からご教示をいただければ有り難い。

また、1ヶ月に1回の生の観測結果を、その観測月の代表値と、考えるのは誤差が大きいので、長期間のなるべくたくさんの資料を統計処理して、各月の平均的分布を作り、これを基にして解析を行った。それ故、同じ季節であっても、年によって大いに異なることを考慮しなければならない。しかして最も重要なことは、このようにして形式的に求めた交流要因が、1ヶ月という長期間

の、しかもボックスという大きな海域の平均値を与えていてどのような流動・分散・拡散過程によりもたらされたかについては、何らの情報も与えてくれないことである。実際には、動的な流動・分散・拡散の基本過程を、場合場合に応じて観測から把握していくことが極めて大切である。現在既存資料の解析と共に、この面からも検討を進めていく積りで準備を進めている。従って本報告で得た値も、中間的なもので今後検討改善を必要とするものであることをご了承願いたい。なおわれわれは、汚染物質の拡散に関する数値計算や水理模型実験においても本報告で強調している所の、沿岸海域の海洋構造や交流要因の著しい季節的差異について適確な認識をもち、これを十分に考慮に入れていく努力が大切であると思われる。

謝辞：終わりに臨み、貴重な海洋資料の利用についてご厚意を賜った千葉県、神奈川県、静岡県、愛知県及び三重県の各水産試験場の関係者の皆様、並びに東京湾の資料解析にご協力いただいた稲吉資久氏（当時東海大学大学院）と奥田真司氏（当時東海大学海洋学部）に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 宇野木早苗・岸野元彰・岡見 登 (1973): 伊勢湾の海況と海水交流(第1報). 昭和48年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p. 136.
- 2) 宇野木早苗 (1972): 浜名湖の海況と海水交流(序報). 中部地区における自然災害の実態と予測に関する総合研究, 第3回シンポジウム論文集, pp. 217-228.
- 3) 平野敏行 (1955): 浜名湖に於ける湖水の循環, 陸水, 外洋水の流入及び湖流に就いて(貝毒の研究に関連して). 日本水産学会誌, **20**, 783-792.
- 4) MUNK, W.H. and E.R. ANDERSON (1948): Notes on a theory of the thermocline. *J. Mar. Res.*, **7**, 276-295.
- 5) KENT, R.E. and D.W. PRITCHARD (1959): A test of mixing length theories in a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.*, **18**, 62-72.
- 6) TURNER, J.S. (1965): The coupled turbulent transports of salt and heat across a sharp density

内湾の海水交流と鉛直混合に関する一考察

interface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **8**, 759-767.

- 7) SUGIURA, Y. (1964): Time and space variation of the T-Cl relation in Tokyo Bay. *Oceanog. Mag.*, **15**, 67-79.

質 疑 応 答

問: 紀伊水道など奥行きに比べて幅の狭くない多くの海湾では、水平循環による交流が相当大きい、このモデルではこの効果が mixing の項に入っているがどう思うか。(東北大・理, 杉本隆成)

答: お説の通り、このようなモデルで出した広義の混合拡散係数の中には、水平循環による交流効果も当然含まれる。しかし水平循環の存在、強さ、季節変化について、十分な知識が無く、観測も簡単で無い現状においては、現在非常に欠けている内湾の大局的交流能力を推定する上に、このような係数の値を量的に把握しておくことも、十分意味のあることと考える。そしてこの中味を、観測や理論により力学的に明確にし、より現実に近いモデルに近づいていくのが、今後の大切な仕事と考える。

問: 湾内成層時、鉛直混合係数の減少に伴う水平方向の混合強化の程度はどのくらいか。(電力中央研, 和田 明)

答: 東京湾の場合は、各月の値が出ていないので今の所お答えできない。浜名湖の場合は、下層について水平混合は考えてないが、鉛直混合と水平移流とを比較すると、第7,8図と第9図の比較から明らかなように、 $r=1$ の場合、成層形成期において鉛直拡散係数が減少すると、水平移流量 Q_0 は逆に増大する傾向がほぼ認められ

る。量的な関係は図をご覧願いたい。

問: (1) 浜名湖の鉛直混合係数 K_r , K_s の年間変動のうち、1~2月の見積値が成層期の値に似ているが、どのように説明されるか。(2) 浜名湖のような汽水湖の循環期は、始め部分循環、後に全循環となる。二層モデルや数年の平均値を用いるさい、特に注意を要すると思うがどうか。(広島大・水畜産, 小山治行)

答: (1) 1~2月は、本文でも述べたように水温逆転期から成層形成期への移り目であって、両期のいずれとも傾向が異なるように思われる。このような微妙な時期は、ここで用いた荒っぽいモデルは適当でなく、検討を要すると思われ、本文でも議論の対象から外してある。(2) この時期に対して、成層形成期と同じ二層モデルを用いたが、第7~9図の結果を見ると、改善を必要とするようである。循環期に合った取り扱いが必要で検討していきたい。ただこの種の手扱いは、当然平均的、静的なものであって、動的な過程の把握は別に考えねばならない。

問: 水温の混合係数 K_r , 塩素量の混合係数 K_s の値が違うという考え方は理解できるとして、水(海水それ自身)の混合係数も考えなければならぬが、それに関してどのように考えられるのか。その値はどれ位になるとお考えか。(原研, 福田雅明)

答: 塩分は溶けた状態であるから、分子拡散は別として、今考えている広義の混合拡散に対しては、水自身と同じ挙動をしていると考えられる。それ故、ここで塩素量から得た値は、塩素量をトレーサーにした海水の混合拡散係数を表わすと解釈している。水自身の自己拡散に注目して求めた例については知識が無い。