

宍道湖・中海の塩分分布特性

南

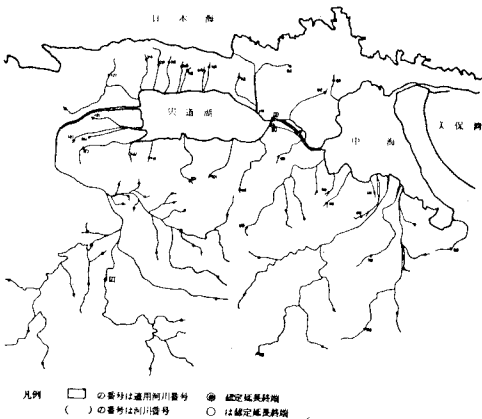
勲*

1. ま え が き

宍道湖—中海は、島根・鳥取両県にまたがる半塩湖である。農林省は、中海の一部干拓と同時に宍道湖—中海の淡水化事業を進めている。

本計画において淡水化された水は将来多方面の利用が望まれるために、とくにその水質に関する研究が重要課題となっている。図—1 は、宍道湖—中海の平面図および流入流出河川との関連を示す。本文は、現状の塩分分布特性を電子計算機を使用してシミュレーションし、若干の水理学的な特性を明らかにしようとしたものである。

図—1 宍道湖・中海流入主要河川



2. 宍道湖・中海の水中特性

宍道湖は斐伊川などの流入があり、また佐陀川によって日本海と通じ、大橋川によって中海と通じる。中海は飯梨川などの流入があり、大橋川によって宍道湖と連結し境水道によって日本海と連結している。日本海の潮汐は、現在佐陀川から宍道湖に伝わり若干の水面変動が生じている。一方、境水道を通じて潮汐が中海におよびその影響のため、中海の水面変動は現在 10 cm 程度が観測されている。

以上の潮汐による水面変動は、大体半日周期が卓越しているが、必ずしもスムーズな $\sin$ 曲線を示していない。しかし、数日間の平均としてマクロな検討を行なう

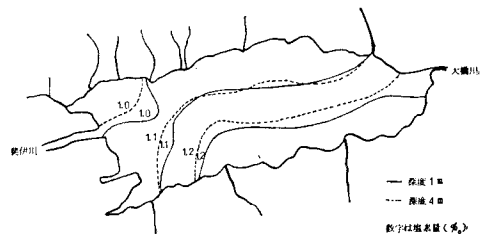
場合には、潮汐の影響を無視し平均潮位・平均流入量・平均塩分濃度として取り扱うことができる。半日周期より短い時間単位の検討を行なう場合には、潮位・水位・流入水量・塩分分布ともに、つねに変動している。本文においては、マクロな立場に立って平均的に取り扱い、宍道湖—中海の塩分分布とくに表層部の塩分分布を解析しようとする。

3. 塩分収支に関する特徴

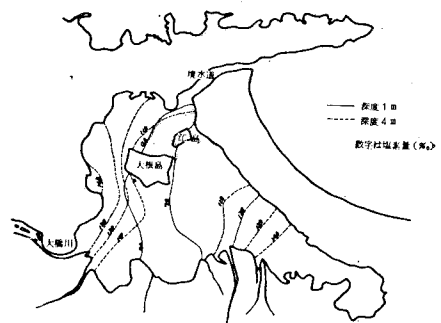
宍道湖の塩分の対流的な供給は、佐陀川からの逆流と大橋川からの逆流に依存している。とくに、季節的に冬期から春期にかけては、日本海潮位が宍道湖潮位よりも相対的に高くなることがあり、海水が佐陀川を通じて逆流していることが明らかにうかがわれる。しかしこれと同時に、中海からの逆流による影響もうけている。

図—2 は、宍道湖内における塩分分布の実測例¹⁾である。中海の塩分の供給は、境水道を通じて生じ、これもやはり日本海からの塩分逆流が主体をなすが、しかし、上流側宍道湖からの流入の影響もうけている。図—3 は中海内における塩分分布の実測例²⁾を示す。図—4 は宍道湖および中海の塩分分布の時期的な変動³⁾を示す。

図—2 宍道湖における塩分濃度等値線図



図—3 中海における塩分濃度等値線図



* 正会員 京都大学教授 農学部

図-4 中海・宍道湖の塩分濃度の季節的变化

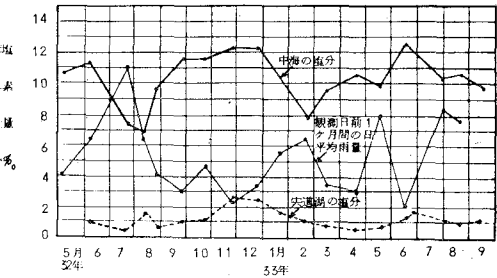
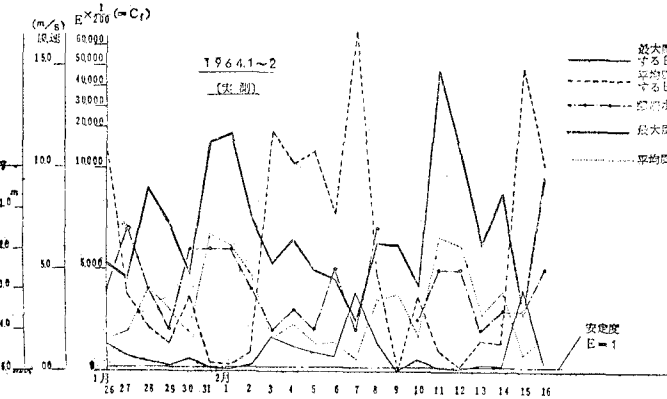


図-5 安定係数 E —風速



以上の塩分流入は対流的に発生するものが主体的原因をなしているが、これ以外に拡散現象によって発生する塩分分布がある。一般に、対流的に日本海から逆流した塩分は密度差により湖底に沿い、下層に蓄積される。上層部には、河川より流入した淡水が位置するようになる。これ以外に、地下水によるもの、下層塩分の鉛直拡散などもあるが、最も重要な問題は風浪によって発生する塩分鉛直拡散の影響を調べることである。図-5 は、中海における風速の傾向を示す。

4. 宍道湖・中海の塩分分布のモデル化

現状における宍道湖—中海の塩分分布を見ると、日本海からの対流的な塩分の流入流出があるが、この海水はいずれも宍道湖—中海の底位部に流入し、上層部には周辺の河川から流入した淡水層が存在している。もちろん淡水層と塩水層との境界における塩分濃度の変化率については、それほど明瞭ではないが、平均的に見て、不完全ではあるが、一種の二層密度分布をもった淡水湖となっている。

	淡水層水深	淡水層塩分濃度	下層塩水層塩分濃度	淡水層容積	塩水層容積
宍道湖	≒4.5m	≒0.2%	≒1%	$2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$	$5.0 \times 10^7 \text{ m}^3$
中海	≒3m	≒1%	≒2%	$2 \times 10^8 \text{ m}^3$	$1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$

もちろん細かく見れば、両湖は潮汐の影響を受け、水位・流速・塩分濃度・躍層水深がつねに変動している

が、少なくとも数日間の平均的なものについて考えると、これらの値はほぼ一定値を持つものとしてマクロな解析の対象として考察することができる。図-6 に、宍道湖—中海の塩分分布のモデル化を示す。

流入した河川水が、宍道湖—中海を流下して日本海に流出する過程において、上層淡水中へ混入する塩分の機構として、つぎのものがあ

(i) 下層塩水層の上層への混入

a. 潮汐による影響

b. 平均的淡水流下による影響

c. 風浪による影響

(ii) 周辺地下水からの塩分量

a. 湖底土からの分子拡散

b. 周辺地下水流入量

(iii) 対流的な塩分混入

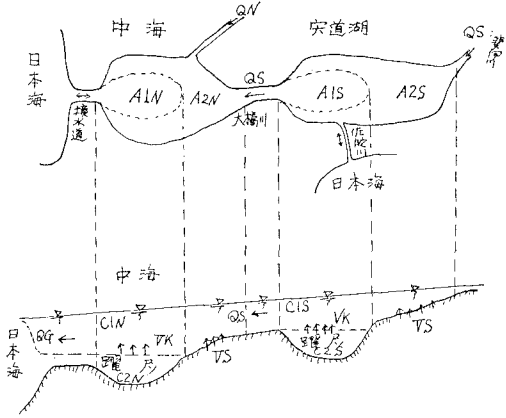
a. 潮汐による逆流・順流

b. 流量変化に伴う境界面の変動

両湖の塩分濃度には、流入河川の搬入する流入量の影響も大きい。なおこのほかに各種の要素があるが、これらの両湖の淡水層中の塩分濃度の変動に対し、支配的な要因とはならないと考

え解析においては一応無視することに

図-6 宍道湖・中海の塩分分布モデル



5. 風浪が塩分分布に与える影響の理論的考察

風速と塩分濃度との関係は、今後淡水化計画をたてる場合の重要問題になると考えられるので、それをとくに取り出して考える。

風速によって宍道湖・中海に発生する浅海波の解析は吹送時間・Fetch によって必ずしも正確ではない。しかし、両湖の表層塩分濃度の変化をシミュレートするためには、まずこの計算が必要となる。つぎに波浪特性から塩分の鉛直拡散係数を求めるために式 (2), (4) の浅海波

が存在するときのものを用いる。

$$\beta_m = 0.636 k^2 \frac{LA}{2T} \frac{\sinh \frac{2\pi}{L}(z+D)}{\sinh \frac{2\pi}{L}D} \tanh \frac{2\pi}{L}(z+D) \quad (1)$$

ここに,

β_m : 理論的鉛直拡散係数 (運動量)

k : Kármán の定数 ≈ 0.4

L : 波 長 (m)

A : 波 高 (m)

T : 周 期 (sec)

D : 全水深 (m)

z : 水面からの深さ (m)

鉛直方向の塩分拡散係数は次式^{4), 5)}で与えられる。

$$\tilde{\beta}_{sn} = \tilde{\psi}_r^2(\omega) \tilde{\beta}_m \quad (2)$$

筆者の実験結果⁴⁾によれば,

$$\tilde{\psi}_r^2(\omega) = 6.0(1+R_i)^{0.6} \left(1 + \frac{z}{D}\right)^{-2.2} \left(\frac{A}{L}\right)^{2.6} \quad (3)$$

となる。この拡散係数によって発生する塩分濃度分布は次式⁵⁾で求め得られる。本式の誘導においては、乱子の分布に等方性分布を使用し、各乱子がそれぞれ独立に重力場下において拡散するものとし、それらを合成して求めたものである。

$$t \gg \frac{z}{w_r} \text{ とすれば,}$$

$$C_n(z, t) = \frac{C_2}{2} e^X \left\{ e^{\frac{-X}{\sqrt{\beta_{sn}}}} (1 + \operatorname{erf}(\sqrt{\beta_{sn}t})) + e^{\frac{X}{\sqrt{\beta_{sn}}}} (1 - \operatorname{erf}(\sqrt{\beta_{sn}t})) \right\} \quad (4)$$

$$C(z, t) = \int_{R_0}^{R_\infty} \frac{2 \bar{U} R_0 R_n^2}{R_0^2 + R_n^2} C_n(z, t) dR \quad (5)$$

下層塩水層から、上層中への塩分混入速度は、次式で与えられる。

$$VK = \frac{1}{T \cdot C2} \int_0^T \int_0^{H1} C(z, t) dz dt \quad (6)$$

$\psi_r^2(\omega)$: パラメーター

R_i : Richardson 数

t : 時 間

W_r : 乱子の静水中沈降速度

$C2$: 底層塩分濃度

X : パラメーター

β_{sn} : n 乱子に対する鉛直拡散係数

erf : 誤差関数

$\bar{U}$: 平均流速

R_0 : 最大乱子半径

R_∞ : 最小乱子半径

6. 宍道湖淡水層内の塩分変化方程式^{2), 3)}

$$CIS = \frac{ES}{DS} + \left(C2S - \frac{ES}{DS} \right) e^{-DS \cdot t} \quad (7)$$

$$DS = (QS + VK \cdot A1S + VS \cdot A2S) / V1S \quad (8)$$

$$ES = (CIS \cdot QS + VK \cdot A1S \cdot C2S + VS \cdot A2S \cdot C2S) / V1S \quad (9)$$

中海の淡水層内の塩分変化方程式²⁾

$$C1N = \frac{EN}{DN} + \frac{FN}{DN - DS} e^{-DS \cdot t} + \left(C2N - \frac{EN}{DN} - \frac{FN}{DN - DS} \right) e^{-DN \cdot t} \quad (10)$$

$$DN = (QG + VK \cdot A1N + VS \cdot A2N) / V1N \quad (11)$$

$$DS = \left(CIN \cdot QN + \frac{ES}{DS} \cdot QS + C2N \cdot VK \cdot A1N + C2N \cdot VS \cdot A2N \right) / V1N \quad (12)$$

$$FN = \frac{QS}{V1N} \left(C2S - \frac{ES}{DS} \right) \quad (13)$$

$C1S$: 宍道湖表層塩分濃度

t : 計算時間

$C2S$: 宍道湖湖底塩分濃度

QS : 宍道湖への全流入量 (佐陀川をも含む)

VK : 下層塩分の鉛直混入速度

$A1S$: 宍道湖の躍層面積

VS : 湖底土からの塩分混入速度

$A2S$: 淡水層と接触する湖底土面積

$V1S$: 宍道湖の淡水層容積

CIS : 宍道湖への河川流入水の全平均塩分濃度 (佐陀川, 大橋川をも含む)

$C1N$: 中海表層塩分濃度

$C2N$: 中海下層塩分濃度

QG : 中海から境水道への流出量

$A1N$: 中海の躍層面積

$A2N$: 中海淡水層と接触する湖底土面積

$V1N$: 中海の淡水層容積

CIN : 中海への流入水の全平均塩分濃度

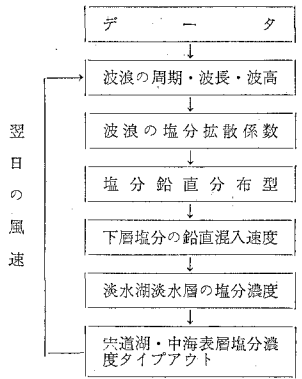
QN : 中海への河川流入量

7. 宍道湖—中海が風浪によってうける淡水層中の塩分濃度に対するシミュレーション

風浪による塩分混合を推定するためには、系列的な水理解析を行なう必要がある。このためには、日平均風速を与え、式(1)から、式(10)までの解析を行ない、毎日の宍道湖・中海の塩分濃度変化を数学モデルによりシミュレーションした。

本研究の結果、重要な水理学的要素として、波浪による下層塩水の上層淡水への混入速度 VK として、風速 10 m/sec 程度で

宍道湖・中海表層塩分濃度の日変化
シミュレーション用フローチャート



$VK \div 10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ (m/sec)}$

の値を推定することができた。この値は、風浪が存在しないときの宍道湖の実測値 $VK \div 10^{-8} \text{ m/sec}$ に対してはるかに大きい値となっている。

参 考 文 献

- 1) 農林省：中海地区全体実施設計書 (1)，昭 41 中国四国農政局
- 2) 南 勲：宍道湖・中海淡水化過程水理模型実験結果の解析的考察 (2)，昭 44，農林省
- 3) 南 勲：淡水化過程の解析法に関する理論的研究，農業土木学会投稿中
- 4) Isao Minami : On the Vertical Diffusion of Salinity due to Wave Action, Coastal Engineering in Japan Vol. X
- 5) Isao Minami : On Vertical Salinity Diffusion into Fresh Water over Salt Water due to Turbulence, IAHR (1969) (京都)