

国立公害研究所 正員 ○福島武夫
同上 正員 村岡浩爾

1. はじめに

浅い湖は負荷率(負荷/湖容積)が大きく、一般的に富栄養化しやすいが、水理的に見ても安定な水温躍層が存在しないなど海域深い湖とは異なる特性を有している。ここでは霞ヶ浦(高次入域)を対象に行なった湖流観測の結果及び分散係数を用いて湖内の長期本平混合現象を表現した結果を報告する。さらに湖形状による湖流混合の形態についてまとめたものを示す。

2. 湖流観測結果

図1に調査区域と地点を示す。ここでは1977年夏期に2回実施したT-T断面での固定点流動観測と1978年秋期に行なったSt.1~4, 4点でのフロート追跡による湖流観測の結果を報告する。前者は高次入

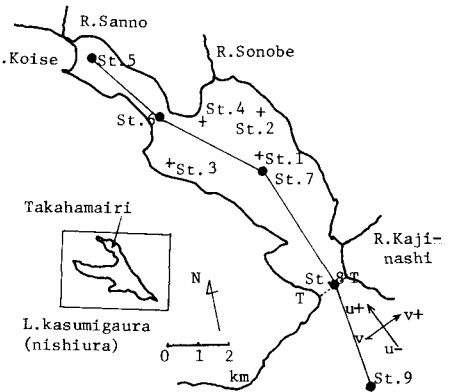


図1 調査地点

湖心域と接続する狭容部(中1km, 水深4~6m)において等間隔に4点, 深さ1m毎, 1時間毎に流速を測定したが、これを断面垂直, 平行成分に分けるとともに、それぞれの成分を平均流速, 断面平均の時間変化特性, 地点特性, 水深特性に分離し整理を行なった。図2, 3にその中で特徴的な結果を示す。(平均流速は7月5日012cm/s, 8月19日133cm/s程度の高次入よりの流出を示すが、特に8月19日の調査前には200mm程度の天降雨があった影響が出ており、平常時においては無視できると考えられる。)

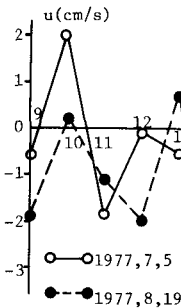


図2 uの断面平均の時間変化

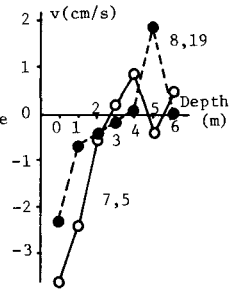


図3 vの水深特性

図2には断面垂直流速uの断面平均の時間変化を示したが、2回の調査とも流速波形の振幅2cm/s程度のセイシュが認められる。この振幅の大きさは表中のセイシュの流速を示す式により求める値とほぼ等しく、図2のセイシュと考えられる。次に周期は霞ヶ浦を3つの入域の結合と考えると形状を与えてNeumannの方法により得られる周期141, 101, 63...分の最大のものとほぼ一致している。図3には断面平行流速vの鉛直変化を示すが、2

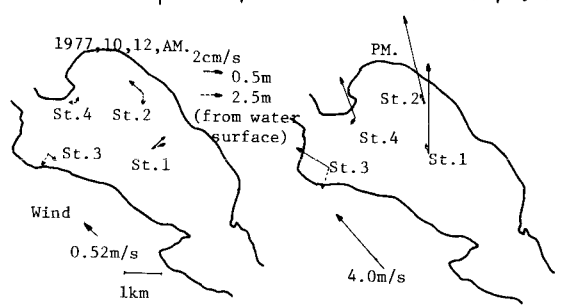


図4 フロート追跡による湖流観測結果

回の調査とも風向はENEとほぼ断面に平行、また風速は3~7m/sであった。図より特に表層で漂流、底層で逆流の吹送流が生じていることがわかる。なお表面流速は風速の1%程度であった。図4には後者のフロート追跡湖流観測の結果を示す。午前中は0.5m/sと弱風であったため、各点での流向流速はきわめて特徴を示さないが、午後には、4m/sの風になると、上層(水面下0.5m)で4~10cm/sと早い吹送流が生じた。0.5m水深での流速を表面流速に換算すると20cm/s程度となり風速の5%程度である。図4の分散係数は固定点観測で1%, フロート追跡で5%の値を得たわけであるが、前者は狭容部という影響が強く出たためと考えられる。実験海域での実験の報告値としては3%程度が多いが、糸越富所(諏訪湖), Bharmikis

(Fox Chain of Lakes)²⁾の測定値も5~10%と大きく、浅い湖においては底面地形により速い流れが生じる可能性が考えられる。

3. 混合現象

奥行きが深い湖では湾曲方向への分散現象が本質汚濁の観点より重要なものとなるが、ここでは凍水³⁾の行なう、E瀬戸内海での一次元分散解析に準じ、以下のように解析した。図1に示すSt.5~9の5点における電導度の各月値を用いて、高流入域での湾曲方向の混合現象を簡単に一次元分散現象としてとらえ、式(1)より分散係数 D_x を算定した。

$$D_x(x=x) = \left(\int_0^x \frac{\partial E}{\partial t} dA dx - Q E_0 + Q E_{L-x} \right) / A_{Ez} \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)_{x=x} \quad (1)$$

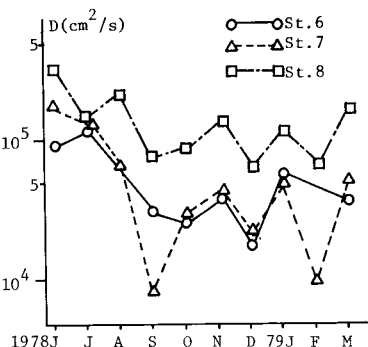


図5 分散係数の月別変化

E : 電導度, A : 横断面積, Q : 河川流量, E_0 : 河川本電導度

表 湖流の形態による流動・混合現象の大きさ

Q, E_0 としては図1に示す高流入流入4河川での月平均値を用いて計算し、図5に結果を示す。(1)式より D_x を1ヵ月平均値として求める妥当性を評価するためにSt.6, 7, 8までの滞留時間を計算すると、St.6: 26~120日, St.7: 85~380日, St.8: 135~540日となり30日より相当大きく、この平均値は妥当であると考えられる。図5よりSt.6, 7で $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$, St.8で $7 \sim 20 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーの値をもつことがわかる。これを表に示す流の形態による混合係数と比較すると、セイシュによる往復流分散係数 $1 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ ($U_p = 2 \text{ cm/s}$, $T = 150 \text{ min}$)、吹送流・鉛直循環流・吹送方向 $2.3 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ ($h = 4 \text{ m}$, $k_z = 0.068 \times 0.5 \times U_{*h}$, $U_{*h} = 0.5 \text{ cm/s}$)、直向方向 $1.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ と比べていずれも小さく、水平循環 3×10^4 ($L = 2.5 \text{ km}$, $U = 4 \text{ cm/s}$)とほぼ一致を示す。また $4/3$ 乗則 $k(\text{cm/s}) = 0.01 \sim 0.09 L^{2/3}(\text{cm})$ では $1.5 \sim 14 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の値となり大きすぎる。この結果、高流入の沿岸部では吹送流によるE形性の水平循環流が混合に大きく寄与しているものと予想される。

4. 湖形状による湖流・混合特性

湖における流動の形態は一般に吹送流、風起因のセイシュ(内部セイシュも含めて)、河川固有流の三者が考えられるが、それぞれの流の大きさ、滞留時間、エネルギー及び混合への寄与の大きさを湖形状 L, h により整理してみたのが表である。2.の固定点流速測定の結果では吹送流≒セイシュ>河川固有流を得たが、これは湾口部であるため、一般的に湖においては表に示されるように河川流量、 $L/h^{1/2}$ が極端に大きくなければ吹送流が卓越すると考えられる。次に混合の程度であるが、3及び表に示すように深い湖でも浅い湖においても吹送流による水平循環流が大きく寄与することが予想される。河川固有流については、深い湖ではエネルギーの供給の大きさでは吹送流に對抗する程度と考えられ、混合への寄与の割合も増加してゆくと考えられる。

(表中で吹送流・鉛直循環流、セイシュのときは、全水深にわたる k_z が一定であると仮定してある。)

[文献] 1) 土木学会論文報告集 No. 276 (1978), 2) WRR 14(4), (1978), 3) 第17回海洋工学講演会論文集(1978), 4) J of Fluid Mech. Vol. 15 (1959), 5) 本利科学 No. 108 (第20巻1号), 6) 第5回海洋工学講演会論文集(1956)。

流の形態	吹送流	風起因のセイシュ	河川固有流
流の速度	$U_w = \frac{U_0 h}{4 \rho k_z}$	$U_p = \frac{\pi}{4} \frac{U_0 L}{\rho g^{1/2} h^{1/2}}$	$U_r = Q / L h$
エネルギー (湖全体)	$E_k = \frac{U_0^3 h}{4 \rho k_z} A \frac{h^2}{60 k_z}$ or $E_{wT} = \frac{U_0^3 h}{4 \rho k_z} A T_w$	$E_p = \frac{U_0^3 h}{4 \rho k_z} A \frac{L^2 k_z}{24 g h^3}$	$E_r = \frac{1}{2} \rho Q U_r^2 T_R$ $= \frac{1}{2} \rho L^2 h U_r^2$
滞留時間	T_w	$\propto \frac{2\sqrt{2} L^{1/2} h^{1/2}}{g^{1/2} \pi^{1/2} k_z^{1/2}}$	滞留
混合の大きさ	1. 鉛直循環流 a. 吹送方向 $D_1 = \frac{U_0^2 h^4}{1680 \rho^2 k_z^2}$ b. 直向方向 $D_2 = \alpha_1 k_z$ $\alpha_1 \approx 3$ 2. 水平循環流 $D_3 = \alpha_2 U_w L$ $\alpha_2 \approx 0.03$	$D_p = \alpha_3 U_p^2 T_s$ $\alpha_3 = 0.1/4$ T_0 : 風の力, L : 湖の水平スケール, h : 水深, k_z : 鉛直分散係数, Q : 河川流量, U_r : 河川流速, A : 湖表面積, T_R : 滞留時間, α_1 : Elder ⁴⁾ , α_2 : 王井 ⁵⁾ , α_3 : 凍水 ⁶⁾	押し出しflowとほぼ等しい。 (湾流的混合) 恒流