

京都大学・防災研究所 正員 道上 正規

京都大学・防災研究所 正員 村本 嘉雄

1. まえがき

京阪神の“水ガメ”琵琶湖は、図-1に示すように、貯水容量2.9億 m^3 の南湖と273億 m^3 の北湖からなっている。南湖沿岸には多くの人口を擁し、北湖に比べてその貯水容量が小さいため、一般に水質は南湖の方が悪化している。こうした南湖の汚水が北湖に流入すると、琵琶湖全域の水質の悪化をもたらすため、南湖水がどの程度北湖に流入するかも知ることは非常に重要な課題である。琵琶湖の湖流には種々のパターンが見られるが、ここでは従来から観測されてきた表面静振による南北湖の湖水の混合を検討することにしよう。

2. 観測結果の概要

図-1に示す琵琶湖大橋中央部の橋脚を利用して、サーミスター水温計およびアロペラ式電流計が鉛直方向にそれぞれ台づつ設置され、水温および流速の自己記録がとられている(建設省琵琶湖工事事務所)。その設置点の横断面図が図-2に示されている。

昭和50年8月23日に近畿をとおった台風も多し、琵琶湖に風雨をもたらしたが、その時、琵琶湖の各地点の水位、風向・風速と琵琶湖大橋の流速および水温の時間的変化が図-3に示されている。各地点の水位および流速変化より、周期約4時間の静振が発生していることに気付くであろう。このような静振は琵琶湖大橋付近を節とし、琵琶湖の南北端を腹とする unimodal 静振で、南湖で最もよく観測されるモードである。静振の発生原因としては、気圧の急変、風の急変や河川流入量の急変など種々の原因が考えられるが、ここでは風の急変がその発生原因に関係しているようである。しかし、発生原因に関しては別の機会を発表する予定である。

23日の7時から24日の5時までの一連の南流および北流による交流量は、北湖から南湖への流入量が $45 \times 10^6 m^3$ 、南湖から北湖への流出量が $30 \times 10^6 m^3$ である。その差、 $15 \times 10^6 m^3$ が北湖から南湖へ流入したものと考えられ、この値はその期間の琵琶湖放流量 $14 \times 10^6 m^3$ とほぼ等しくなっている。静振の流速は交互に振動している中で、南流によって静振発生前の北湖水が $45 \times 10^6 m^3$ 南湖に流入し、逆に北流によって南湖水が $30 \times 10^6 m^3$ 北湖へ逆流したと考えことはできる。それではどの程度の混合が起きているであろうか。幸いにも、図-3の水温変化図に見られるように、表面静振が発生したとき、北湖の内部静振によって、両湖の間には顕著な水温差が生じたので、この水温差を指標として水塊の混合程度を検討する。

3. 分散係数の推算

断面平均濃度を $\bar{S}$ として、恒流と静振による流速が共存する場合の1次元の Fick の式は次式で表される。

$$\partial \bar{S} / \partial t + (\bar{U}_s + \bar{U}_T \sin \omega t) \partial \bar{S} / \partial x = D_x \partial^2 \bar{S} / \partial x^2 \quad (1)$$

ここに、 $\bar{S} = 2R/T$ で T は静振の周期、 $\bar{U}_s = (1/A) \int_A U_s dA$ 、 $\bar{U}_T = (1/A) \int_A U_T dA$ 、 U_s 、 U_T ：それぞれ恒流および静振による流速の振動、 D_x ：分散係数である。いま、流速を $U = U_s + U_T \sin \omega t$ で表し、断面平均値からの偏差を u' で表すと、準定常状態では分散係数は次式のように表される。

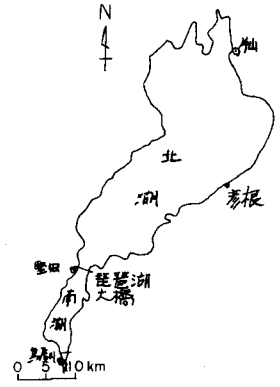


図-1 位置図

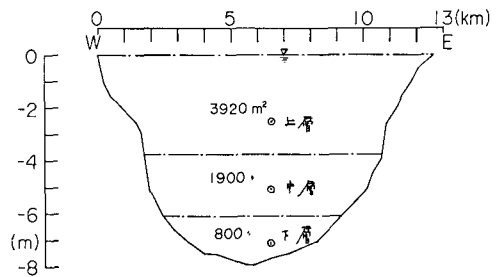


図-2 水温計・流速計の設置位置図

$$(1/AT) \int_0^T \int_A U' S' dA dt = -D_x dS/dx \quad (2)$$

ここに、 S' : 断面平均濃度からの偏差である。

(2)式より 23日 9:45 ~ 13:15 の 1 周期の D_x を求めると、 $D_x = 8.6 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となった。計算時の流量は、 $\bar{U}_S = 15.7 \text{ cm/s}$ 、 $\bar{U}_T = 45 \text{ cm/s}$
 $dS = 21.9 - 26.9 = -5^\circ$ 、 $dx = \bar{U}_S T + \int_0^T \bar{U}_T S' dt$
 $= 2.88 \times 10^5 \text{ cm}$ 、 $(1/AT) \int_0^T \int_A U' S' dA dt = 1.53 \text{ cm/s}$ が用いられている。いま、 $U_T' > U_S'$ と仮定して、恒流成分による分散効果を無視すると、 D_x は次のよう表される。

$$D_x = D_{T0} + D_{T1} \quad (3)$$

ここに、 D_{T0} 、 D_{T1} : それぞれ、静振による鉛直および横断方向の分散係数を表す。

1) 鉛直レー効果 分散効果を検討するにあたって、 T と鉛直方向の乱流拡散による混合時間の比を知る必要がある。

$$T_v' = T / (h^2 / 0.053 h u_*') = 2.83$$

ただし、 $h = 5.3 \text{ m}$ 、 $T = 3.5 \text{ hr}$ 、 $\bar{U}_T / u_*' = 20$ とする。 $T_v' \rightarrow \infty$ の中立状態の分散係数を $D_{T\infty}$ とすれば、Bowden²⁾ によって求められ $D_{T\infty}$ は次のように表されている。

$$D_{T\infty} = (1/2) 14 u_*' h = 0.35 \bar{U}_T h = 8.3 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s} \quad (4)$$

$T_v' > 1$ では、福岡³⁾ や Holley⁴⁾ によって指摘されたように、 $D_{T0} \approx D_{T\infty} = 8.3 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。安定度が増すと、鉛直乱流拡散係数が減少し、分散係数が増大すること知られているが、Fisher⁵⁾ の定義による $Ri_E = \frac{g \Delta \rho h}{\rho \bar{U}_T^2} \times (\bar{U}_S / \bar{U}_T)^3$ と求め、 $D_{T0} / D_{T\infty} = f(Ri_E)$ を求めると、 $f(Ri_E) \approx 8$ になる。これより、 $D_{T0} = 6.6 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ となり、(2)式の定数効果とほぼ一致する。ここに、 Ri_E : estuarine Richardson No.、 $\bar{U}_T$: 振動法の R.M.S. を表す。

2) 横断レー効果 $T_h' = T / (b^2 / 0.23 h u_*') = 8.6 \times 10^{-4}$ となり、横断方向の混合に要する時間が静振の周期よりもはるかに長いので、この効果は分散にはほとんど寄与がなく、 $D_{T1} \approx 0$ とみなせよう。

3) 混合モデル 福尾らは潮汐混合をボックスモデルで考察し、 D_x として次式をえている。

$$D_x = (\beta/4) U^2 T \quad (5) \quad \text{ここに、} U = (2/\pi) \bar{U}_T, \quad \beta: \text{交換率と呼ばれ、} \beta \approx 0.1 \text{ の観測値がえられている。}$$

これより D_x を計算すると、 $D_x = 2.6 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ となり、(2)式の定数効果よりやや大きいとなる。

4. あとがき 振動の大きい静振であったが、その分散係数は $8.6 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ で、これは安定度を考慮した鉛直レー効果によってほぼ説明される。もし密度勾配が形成されなければ、静振による分散係数は $10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーであろう。一方、交換率は 0.1 以下になるように、両湖水の混合は劇的に弱くなるであろう。最後に、資料を提供していただいた建設省琵琶湖工事事務所の村田所長、竹本調査課長に謝意を表します。

参考文献

- 1) Taylor, G.I.: Proc. Roy. Soc., A223, 1954.
- 2) Bowden, K.F.: J. Fluid Mech., 21, 1965.
- 3) 福岡: 第19回水理講演会論文集, 1975.
- 4) Holley, E.R. et al.: Proc. ASCE, Hy8, 1970.
- 5) Fisher, H.B.: J. Fluid Mech., 53, 1972.
- 6) 連水: 海岸工学講演集, 1956.

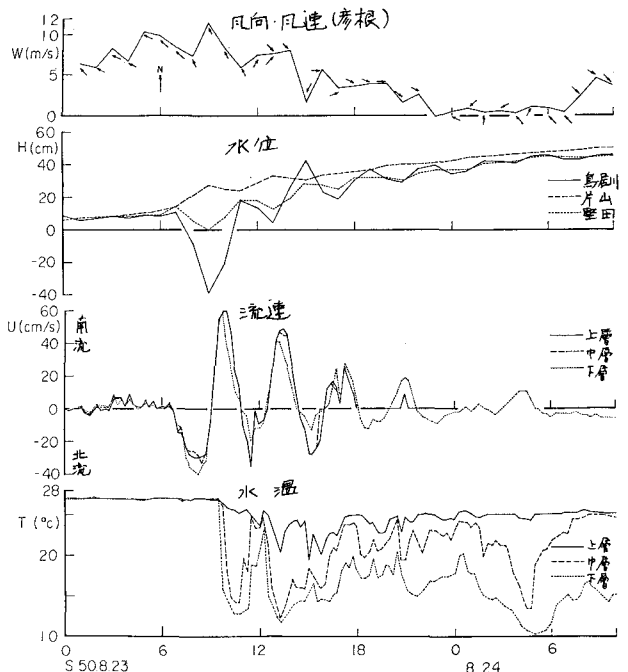


図-3 風向・風速、水位、流速および水温の変化