

浅水湖の吹送流と渦動粘性係数

Wind Driven Currents and Eddy Viscosity in a Shallow Lake

京都大学防災研究所 正員 ○大久保賢治 K. Ookubo

京都大学防災研究所 正員 村本 嘉雄 Y. Muramoto

1. はじめに

湖流の主要な成分は風による吹送流であり、この現象については、従来からの風洞実験の蓄積もあるが、実験と現地の流速分布を同列に扱うのは困難と考えられているようである。この原因が現地観測における測定粗さにあると考えて、比較的細かい時間・空間（鉛直）分解能をもつ観測を行った。目的とするのは湖流の数値解析における計算パラメータの決定であるが、特に、鉛直渦動粘性係数とその鉛直分布が最も重要な問題と考えられた。流速分布とともに、濁度¹⁾や水温²⁾のようなスカラー量の鉛直拡散を補助観測することで渦動粘性係数の特性を明らかにし、流速分布の検証に結びつける。この吹送流観測については、すでに示している²⁾ので以下2.でその主要な結果を述べ、3.で水温・濁度から求めた鉛直渦動拡散係数について検討する。さらに、4.では安定度の関数とみなせる渦動粘性係数を用いて流速分布を検討する。また、安定成層時に自転効果が強く現れる現象について5.で考察する。

2. 観測の結果

1986年冬、琵琶湖南湖西岸の唐崎沖400m地点において2回4日にわたる吹送流観測を行った。測定した項目は風向・風速、気温、正味放射等の気象量と流速2成分（電磁流速計による）、濁度および15層水温（一部は気温）である。観測時期が11、12月であったので湖面冷却と鉛直混合が卓越し、湖水の密度は一様と予想したが、日射等の影響で水温差1～2℃の弱い水温成層が形成された。吹送流を取扱う際のひとつの前提は均質流とする点であると思われるが、現地の流速分布に大きく影響するのは、こうした弱い水温成層であることが判明した。

図-1は11月観測時の概況であり、上から正味放射（黒柱）、瀬田の気温・湿度（下棒付き○、□）、唐崎気温、表層水温（○または●）及び鉛直平均水温である。表層水温は平均水温より低い場合に●を用いた。対岸の烏丸半島と唐崎で実測した風ベクトルを比較したが、唐崎の風は測定高度範囲の鉛直平均風である。中段は水温成層の変化であり、パターンの相違は0.2℃の水温差を表す。日中形成された成層は日没とともに破壊されるが、18～翌1時頃には風向変化による気温上昇に伴って成層している。特に、夜半から明け方にかけては風が強く、通常ならば湖水冷却が起こったと思われるが、気温が水温より2～3℃高い上、湿度が高く飽差が小さかったため平均水温はほとんど一定であった。

下段には鉛直平均流速ベクトルおよび2成分3組の流速分布 u 、 v を示す。鉛直分布は平滑処理（3層・3時点移動平均）を行い、次に鉛直平均流を差引いた後、+ x 方向がそれぞれ、表面流向・風向・西向きとなるように回転変換したものであり、ハッチは負の値を示す。成層時に風と直角（- y ）方向に強い流れの存在する点がここで最も重要な特徴である。さらに、11月観測の鉛直平均流では表面静振の変動は顕著でないが、後半の平均流は風と逆向きで、このとき湖岸部で順流とすれば、湖岸と観測地点の距離（400m）を径とする水平順環流の存在が推察される。

表面流速方向の成分を主流と見なし、それらを対数則及び対数・直線則で整理するとともに、摩擦速度・表面流速・水面粗度長のような水面パラメータを検討した。これらを用いて吹送流の水面抵抗係数を評価した結果、本観測が滑面範囲にあったことを確認した²⁾。吹送流の流速分布は安定度により支配されるが大気と同様の関係³⁾にあることがわかった。ここでは水温に欠測のない11月の観測結果を主に用いることとし、観測の時間帯毎に風速・摩擦速度・成層状態を表-1に示す。

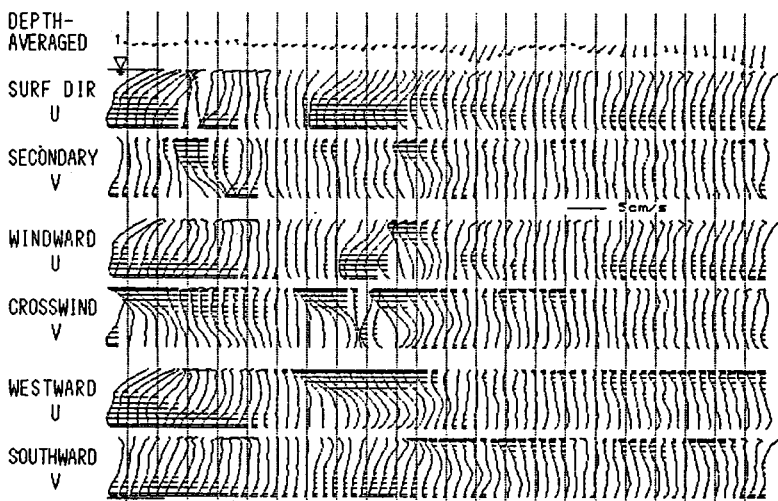
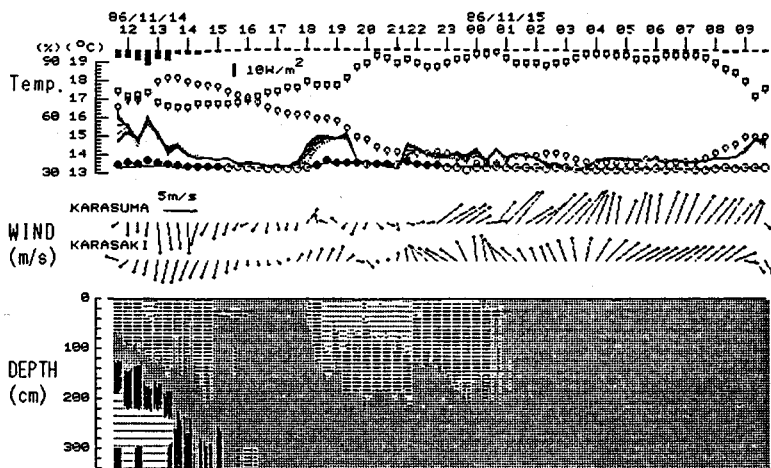


図-1 第1回観測 (86/11/14~11/15)

表-1 時間帯毎の吹送流の条件

	時間帯	風速	摩擦速度	成層状態	期間 (図5)
86/11/14	11:30~15:00	2.7 m/s	0.32 cm/s	有 (消滅過程)	1
86/11/14	15:20~18:40	1.2	0.16	無 (最後に形成)	1
86/11/14	19:00~22:40	1.7	0.22	有 (弱いが持続)	2
86/11/15	23:00~ 2:20	3.2	0.38	無 (最初のみ)	2
86/11/15	2:40~ 6:00	4.0	0.50	無	3
86/11/15	6:20~ 9:40	3.4	0.42	無	3

3. 渦動拡散係数の評価

水温・濁度分布の時間変化から渦動拡散係数の鉛直分布とその時間変動について検討し、渦動粘性係数の推定に用いる。図-2は唐崎地点における水温・濁度拡散係数 K_z を浮力振動数 N で示したものである。Jassby・Powell⁴⁾は、深水湖における変温層以深の水温拡散係数 K_H が N に反比例する結果を示しているが、浅水湖のデータには上部混合層の値も含まれており、 $N^2 = (g/\rho)(d\rho/dz)$ に反比例しているようである。また、水平拡散等の影響と思われるが、濁度拡散係数は水温拡散係数より大きめになることがある。平均的には、

$$K_z = 1.0 \times 10^4 N^{-2} \quad (1)$$

のような関係となった。Kullenberg⁵⁾に従い、風速 W と流速勾配を用いて図-3のように整理すると、少なくとも文献⁵⁾の図の範囲（横軸が 10^6 以上）では、提案されている式

$$K_z = 8.9 \times 10^{-8} W^2 N^{-2} |dq/dz| \quad (2)$$

と同じ程度となる。ただし、 $q = (u^2 + v^2)^{1/2}$ は水平流速絶対値である。一方、リチャードソン数 $Ri = N^2 / (dq/dz)^2$ を用いた図-4では、

$$K_z = Ri^{-1} \quad (3)$$

となり、連行係数と同様、 Ri に反比例する傾向を示す。(1),(3)より平均流速勾配は $10^{-2}(s^{-1})$ 程度と小さいことがわかる。

水温は時間変化の絶対値が小さく、また水面付近では対流等の影響でばらつく。一方、濁度拡散係数は沈降のためフラックスの符号は安定し、水温の場合に比べると正の拡散係数を得る割合が高く拡散係数値も若干大きい。ここでは沈降速度を $w_s = 0.01 cm/s$ としたが、結果は w_s の評価¹⁾によっても変化する。鉛直平均拡散係数は吹送流の鉛直平均粘性係数⁶⁾

$$w_n = 0.043 u_* h \quad (4)$$

と同じ程度である（ u_* ：摩擦速度、 h ：水深）が、成層界面では、動粘性係数の10倍程度まで小さくなる。次節では、鉛直分布の傾向をより

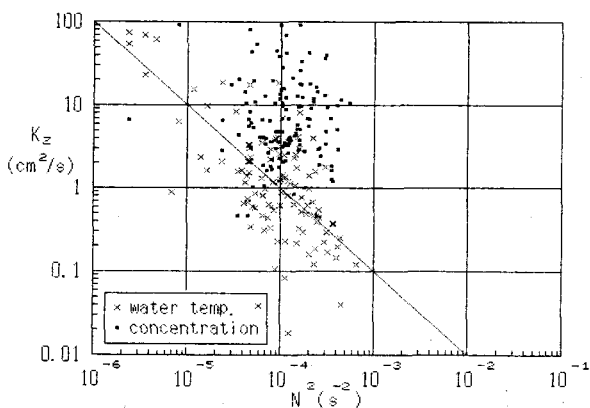


図-2 N^2 と鉛直拡散係数

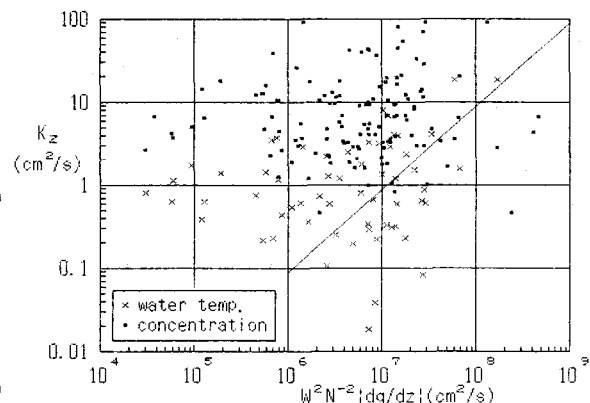


図-3 風速と鉛直拡散係数

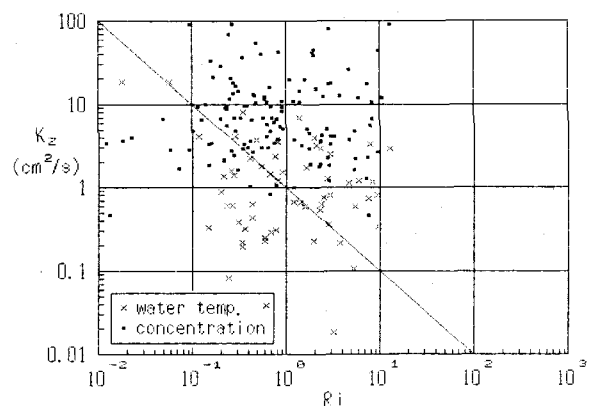


図-4 Ri と鉛直拡散係数

明瞭にするため温度差の小さい逆成層を除去してから、同様の解析を行った。

4. 渦動粘性係数と流速分布

図-5は、表-1に示す時間帯毎の平均的な拡散係数鉛直分布である。非成層時は開水路と同様の放物線分布とみなせるが、浮遊砂を考慮して β の補正をし、

$$K_z = \beta \kappa u_* z (1-z/h) \quad (5)$$

と比較した。図より $\beta = 1.5$ が得られた。水面近くの薄い高速流動層の存在により若干非対称な分布となっており、(5)式では表現できない。海洋での成果等⁷⁾を参考に

$$K_z = \beta \gamma \kappa u_* z \exp(-\eta z) \quad (6)$$

で近似すると、 $\gamma = 2$ 、 $\eta = 0.01(\text{cm}^{-1})$ を得る。

中立時の渦動粘性係数の分布は $\beta = 1$ とし、

$$w_N = \kappa u_* z (1-z/h) \quad (7)$$

$$w_N = \kappa u_* z \gamma \exp(-\eta z) \quad (8)$$

と考えた。(8)式で表される深さに伴う w の減衰には、特に、前半部における成層の影響も若干含まれるであろうが、成層時の K_z は中立時の値より1オーダー小さく、このように単純に時間平均した場合は、その影響は小さいと考えられる。すなわち、(8)を深度とともに減衰する応力の表現とみなす。

安定成層の効果は中立時の粘性係数を基本として、 R_i の関数

$$w = w_N (1 + \sigma R_i)^{-n} \quad (9)$$

で表す。ここでは、単純に $\sigma = 1$ 、 $n = 1$ とした。昭和60年の濁度・流速観測では1/1000程度の水面勾配を仮定し、コリオリ・鉛直粘性項を与えて時間積分する方法で層流解に近い放物線的分布を得た¹⁾。これは実測値と比較的合致したが、数値粘性と水温成層をともに無視した結果とわかった。今回の観測値を用い、この点を調べてみる。図-6は(8)、(9)式を用いた成層時の流速分布の計算結果である。まず、数値粘性と成層をともに無視して単純に計算すると結果は放物線分布に近い(点線)。ところが、実際は流速の大きい表層では数値粘性が大きく、これを抑えるため(8)式から $0.5 q \Delta z$ を差引いて計算すると非成層吹送流の対数則的流速分布(破線)となり、これが(8)式に対応した分布である。ただし、数値粘性が増大し見かけの粘性係数が負となる場合は動粘性係数のオーダーでとどめる($w_{\min} = 0.06 \text{ cm}^2/\text{s}$)が、この段階で運動量は下方に伝達されにくくなる。粘性係数を変化させた場合は表面流速が非常に増加するため風速の3.3%を上限とした。一方、成層を考慮するため(9)式はつぎのように用いた。実測水温から N^2 分布を与え計算時間

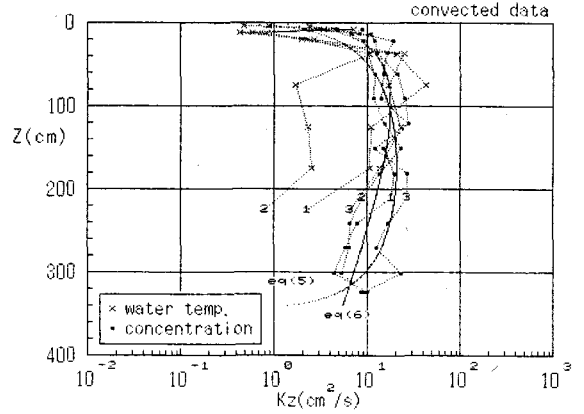


図-5 K_z の鉛直分布
数値は表-1の期間に対応する

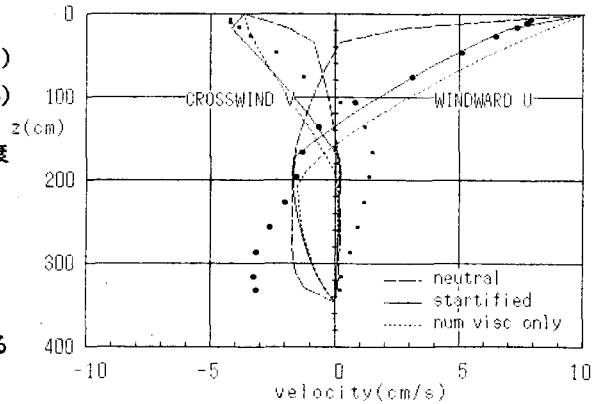


図-6 渦動粘性係数による
流速鉛直分布の変化

中は変化しないとする。なお、安定成層に限るため、 $Ri < 0$ となるときは $Ri = 0$ (中立) とした。(9)式は特に、静止状態から時間積分していくときに効果的である。すなわち、流速が増加すると数値粘性も増大するが、同時に Ri が減少 (速度勾配増加) して数値粘性除去による w の減少を遅らせ結果として成層域全体に運動量を輸送することができる。ただし、過安定条件として Ri の最大値は 10 とした。以上の考慮をしても、数値粘性を完全に除去すると、成層吹送流は再現されなかった。このことは成層吹送流に数値粘性と類似な物理的效果があることを示唆していると思われる。例えば、並列せん流のような対流のフラックスを想定し、数値粘性の大部分を残して計算した結果が実線 (ここでは、数値粘性の 6 % のみをカットした) であり、主流表層付近では、観測値 (風向系) とかなりよく一致している。一方、二次流成分については流れのみの偏向では説明できず、水面上 1 m 以下 (風の観測層以下) の領域で風も偏向するとし、その角度は右 20 度を仮定した。次節で、この流れの偏向について考察を加える。

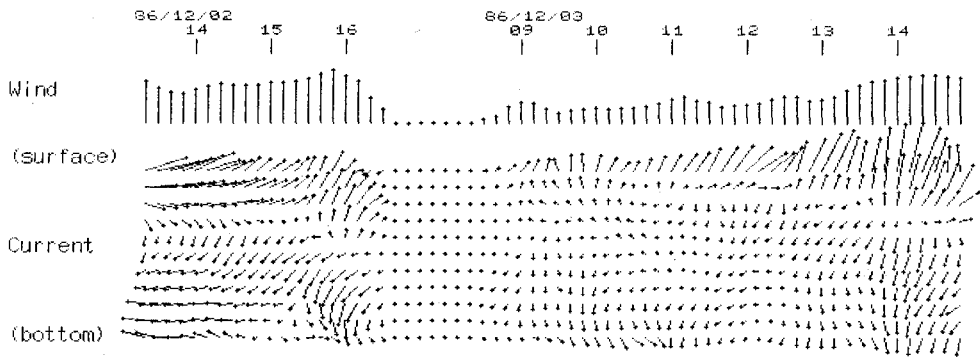


図-7 風下を基準にした流速ベクトルの鉛直分布 (1986年12月)

5. 自転効果

図-1では表層に安定な水温成層が存在すると、表面流速が風下方向から 20~30 度右偏することが認められる。ずれの方向から考えてこれはエクマンスパイラルと考えられ、前節までの議論から安定成層により表層の渦動粘性係数、従って、鉛直エクマン数 $E_v = \nu / f h^2$ が減少し、スパイラルが現れやすくなると解釈できる (f ; コリオリパラメータ)。ところが 11 月の観測では風向変化も相当激しく、成層時に偏向が大きいのは確かであるが、直ちに自転効果と断定できなかった。これに対し、風向が比較的安定していた 12 月の観測における風向系の各深度における流速ベクトルを図-7 に示す。上層の渦動粘性係数に基づく鉛直エクマン数は $O(10^{-3})$ であり、確かに自転が効果的となる範囲である。図-8 は風向に対して流れが右偏している表層

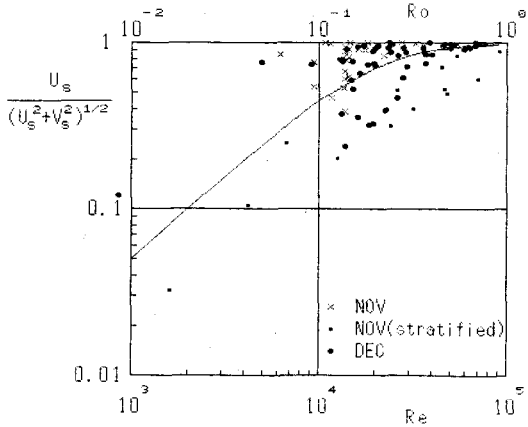


図-8 主流の相対強度

データに限り、全流速と風向成分 u の比を琵琶湖大橋断面における下層密度流観測で得た経験的關係³⁾で示したものである。成層時に右偏が顕著になり、偏向特性が密度流の場合とほぼ同一であることがわかった。図中の曲線は

$$u / (u^2 + v^2)^{1/2} = 1 / (1 + A^2 R_0^{-2})^{1/2} \quad (10)$$

を示し、上記の密度流に適合する $A = 0.2$ についてのものである。ここに、 $R_0 = u / f b$ はロスビー数であるが、幅 b が捉えにくい量であるため、図では概略の換算で $R_0 = u h / \nu$ (ν : 動粘性係数) も示す。 $A = \kappa h / \beta b$ (ただし、 $\nu_m = \beta u_* h$) であるから、 $\kappa = 0.4$ 、 $h = 4 \text{ m}$ 、 $b = 400 \text{ m}$ とすると、 $A = 0.2$ に対応する β は 0.02 となり、表層での平均的な渦動粘性係数のオーダーを支持する。曲線の下方にあるデータ群はより小さな A の値を示唆しているが、 b が大きいのか、 β がさらに大きいことを示しており、いずれも説明の可能な傾向である。

6. むすび

琵琶湖南湖で行った吹送流観測により、冬の日中に形成される弱い水温成層が吹送流の流速鉛直分布に大きく影響することがわかった。1～2℃程度の成層は吹送流流速範囲で $R_i = 0.1 \sim 1$ の範囲を含み、成層効果が重要で、拡散・粘性係数比も大きく変化する領域にあたる。水温・濁度から評価した渦動拡散係数を浮力振動数、風速およびリチャードソン数で表示した。さらに、鉛直分布に関しては浮遊砂の補正を考慮すると既往の分布型とよく一致することがわかった。次に拡散係数分布から求めた中立時の渦動粘性分布を用いて流速分布を計算した。中立時の渦動粘性分布に対し、数値粘性を除去すれば非成層の吹送流が計算される。一方、数値粘性を除去しないと、中立条件でも成層した吹送流が計算されてしまう。このことから安定成層時には対流による鉛直方向の輸送過程が重要と推察された。渦動粘性係数の安定度表示に加えて、数値粘性を与えることにより、成層した吹送流の観測値と合致する計算結果が得られた。このように、安定成層時には渦動粘性係数が減少するので、湖流のエクマン数が低下してスパイラル構造が現れやすくなる。観測記録には、これを示すような部分がいくつかあり、いずれも成層時であることが認められた。表面流速の風向成分と全流速の比を検討した結果、密度流観測で得た偏向特性と整合性があり、渦動粘性係数の値でいえば偏向が自転効果によるといえる領域にあることがわかった。

最後に、本観測は水島賢明氏(現中国電力)の協力によるところが大きく、漁業組合の方々の御協力とともに心より感謝致します。また、観測が文部省科学研究費61750508の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 大久保・村本: 京都大学防災研究所年報、29B-2、pp.549-560、1986.
- 2) 大久保・村本: 京都大学防災研究所年報、30B-2、pp.569-582、1987.
- 3) Kondo et. al: J. Atmos. Sci., Vol.35, pp.1012-1021, 1978.
- 4) Jassby・Powell: Limnol. and Oceanogr., Vol.20, pp. 530-543, 1975.
- 5) Kullenberg: Tellus, Vol.23, pp.129-135, 1971.
- 6) 村岡・福島: 国立公害研究所研究報告、第19号、1978.
- 7) Henderson-Sellers: Engineering Limnology, Pitman, 1984.
- 8) 大久保・村本: 土木学会年次学術講演会概要集、pp.454-455, 1987.