

II-233

吹送流における成層と自転の影響

京都大学防災研究所 正員 大久保賢治

京都大学防災研究所 正員 村本 嘉雄

1.はじめに 琵琶湖南湖の吹送流観測¹⁾において、成層時の表層流が風向から右偏する現象が認められた。また、鉛直渦動粘性係数 ν は成層の強化とともに減少する傾向²⁾が明瞭であった。本報では、エクマン数 $E_v = \nu / f h^2$ (h :水深、 f :コリオリパラメータ)に着目し、回転水理実験の結果も併せて、自転による吹送流の偏向現象について検討するとともに、その発生条件を明らかにする。

2.回転管路実験 管径 $D = 2$ cmの管路系を回転台上に設置し、直線部2.7 m区間の圧力差を傾斜マノメータのビデオ解析(0.1 mm単位)、平均流速 V を流量センサーで測定した。抵抗係数 λ と $Re = VD/\nu$ の関係を図-1に示す。回転に伴う抵抗増加は $Re = 10^4$ で微小となるが層流域では既往の実験³⁾と同様 $\lambda \propto Re^{-1}$ の関係が維持され抵抗増加が顕著である。 λRe と管路のエクマン数 $E = \nu / \omega D^2$ ($E = 0.5 E_v$, ω :回転角速度)の関係を図-2に示した。湖流で重要な $E_v = 10^{-1} \sim 10^{-2}$ の範囲では、抵抗増加は $\lambda Re = 64 + 4 E^{-1/2}$ と表せる。

3.吹送流の領域区分と遷移 水深 h と惑星境界層厚 $\ell = u_* \eta_* / f$ の比を考える。

$$\theta = h / \ell = \beta f h^2 / \nu = \beta E_v^{-1}$$

$$\nu = \beta \gamma u_* h, \gamma = \gamma(\eta_*), \beta = O(10^{-2})$$

$$\eta_* = (1 + a R_s)^{-1/2}, a = 0.26, R_s = u_* / f L$$

ここに、 u_* :水面での摩擦速度、 L :オブコフ長で、 R_s :表面ロスビー数、 η_* :安定パラメータ⁴⁾である。 θ に注目して2つの条件を考える。

(a) 弱風・成層・深水条件; $u_* = O(0.1 \text{ cm/s})$ 、

$$\gamma = O(10^{-1}) \text{ では } \theta = O(1), E_v = O(10^{-2})$$

(b) 強風・非成層・浅水条件; $u_* = O(1 \text{ cm/s})$

$$\gamma = O(1) \text{ では } \theta = O(10^{-2}), E_v = O(1)$$

すなわち、 E_v の変化は R_s (u_* と L)に支配され、これを模式的に示したのが図-3である。 R_s 線と交わる直線(c)は $f = 10^{-4} (\text{s}^{-1})$ における定浮力東($u_*^3 = f L$)条件を示している。(a)は深水湖、

(b)は浅水湖の代表的条件を表し、 $L = h$ を境に現象は遷移する。(a)は本研究で注目した自転の効く顕著なスパイラル構造であり、(b)の吹送流では応力の回転は無視でき、流速分布は非回転系の対数則に近いものになる。以下では、この領域区分と遷移について観測値を用いて検討する。

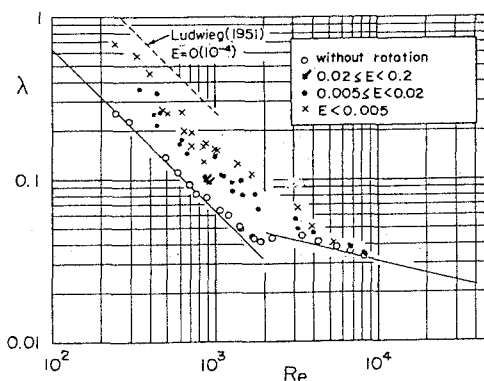
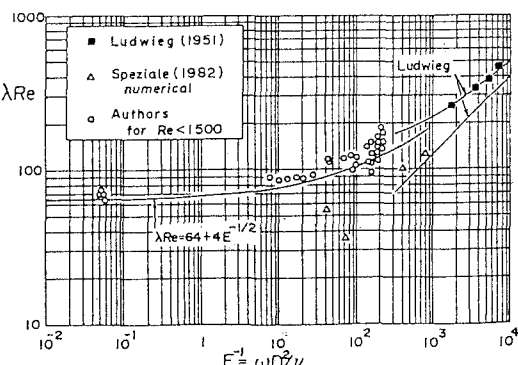
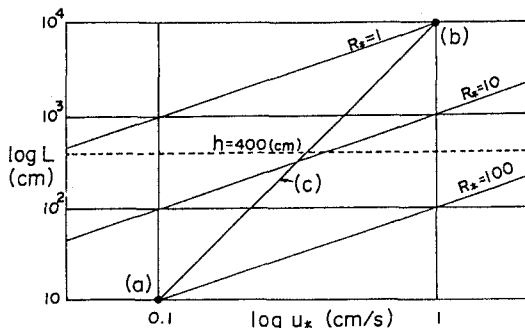
図-1 抵抗係数 λ とレイノルズ数 Re の関係図-2 λRe と管路のエクマン数 E の関係

図-3 吹送流の領域区分

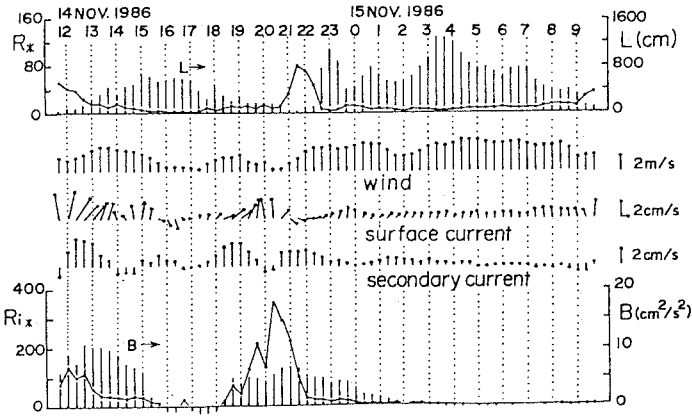


図-4 ロスビー数、表層流速、成層指標の時系列

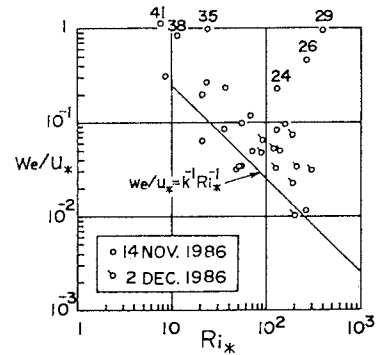


図-5 成層破壊時の連行係数

4. 混合過程 ロスビー数 R_s は一種のRichardson数でもあり、成層破壊と関係する。シア関数 ϕ を用いて流速分布から L を推定し、観測の R_s と成層指標の変化を求めた。これらを表層流速とともに図-4に示す。成層時は $L=10\sim100(\text{cm})$ 、 $R_s=10\sim100$ であって、 R_s の広範な動きは L の変動による。風速、表層全流速（風下を上向き）と二次流（風下右向きを正）を示す。成層指標には積分浮力 $B=\sum g_i d_i$ と $R_{i*}=B/u_*^2$ をとる。観測で2回の成層が現れるが、風速の増加に伴い R_{i*} は低下し B も減少する。浅水・深水の中間範囲は成層が破壊する遷移混合条件で限界値に近い R_{i*} （ ≈ 10 ）が出現し、激しい混合が生じる。これを連行過程とみて、上層厚 d を B/g'_{max} 、その時間変化で we を評価すると図-5に示すように既往の公式⁶⁾と合致する（図中の数字は分布の番号）。

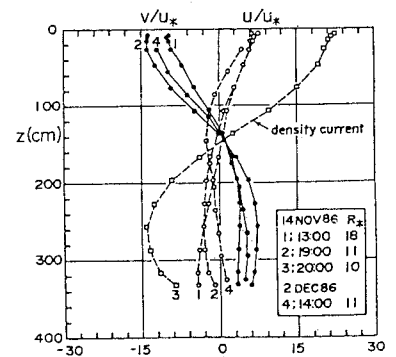


図-6 偏向が顕著な流速分布

5. 流れの抵抗と偏向特性

図-6は偏向の顕著な流速分布（風向成分 u/u_* ；点線、直交成分 v/u_* ；実線）を1時間平均値として示したもので、各成分表層値をそれぞれ、流速係数および二次流強度とみなせば、8及び-12の程度であり、主流（風向系）の抵抗係数は増大する。これは回転効果により二次流が強化し、主流の抵抗が増加するというロスビー数相似則の傾向に従い、また、2.の水理実験で得た結果とも一致する。ただし、直交成分も含めた全流速（流向系）の抵抗係数は滑面範囲にある¹⁾。観測でみられた大きな偏向は深水から混合条件へ移るときに現れ、成層破壊の時間規模（数時間程度）は持続する。一方、 u_* が減少して浅水から混合条件に移る場合であるが、図の例3では、風の緩みに対応して密度流的な流速分布となっている。

6. おわりに 回転管路実験では、 $w=\nu$ の層流範囲で f により E を制御し、 $\theta=O(1)$ に保ったが、乱流では $\theta=O(10^{-2})$ 以下となり、本実験の回転速度範囲では回転効果は現れない。一方、現地では成層 L による w の変化により E または R_s が変化し、水深4 m程度の浅水湖でも大きな偏向（二次流）が生じる。成層時には、吹送流の計算や現地観測値の解析において偏向現象が無視できない。なお、本研究は文部省科研費奨励研究（62750424）の補助を受けたことを付記し、実験に助力頂いた堤 要二氏（現東海旅客鉄道）に謝意を表す。

参考文献 1)大久保・村本：京大防災研年報、第30号B-2、1987。 2)大久保・村本：第32回水講、1988。 3)Ludwig: Ingen. Archiv, Vol. 65, 1951. 4)Speziare: J.F.M., 122, 1982. 5)McPhee: Boundary-Layer Met., 21, 1981. 6)Kato・Phillips: J.F.M., 37, 1969。