

吹送流における自転と成層の効果

京都大学防災研究所 正員 村本嘉雄 正員 大久保賢治
東海旅客鉄道(株) ○正員 堤 要二

1.はじめに 琵琶湖南湖の吹送流観測¹⁾で認められた成層時に表層流が風向から右偏する現象は、非回転系では解釈できないものである。無次元数 $E_v = \nu / f H^2$ (ν : 渦動粘性係数 f : コリオリパラメータ H : 水深)に着目し、水理実験と気象学の相似則から、この偏向現象が地球自転効果によることを検証する。

2.回転管路実験 管径 $D = 2$ cmの塩ビ管路系を回転台に設置し、直線部2.7 m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 $R_e = VD/\nu$ の関係を図-1に示す。回転に伴う抵抗増加は $R_e = 10^4$ で微小となるが層流域では既往の実験値²⁾と同様に $\lambda \propto R_e^{-1}$ の関係が維持され抵抗増加が顕著に現れる。一方、 λR_e と管路エクマン数 $E = \nu / f D^2$ の関係を従来の結果³⁾⁻⁴⁾と併せ図-2に示す。 λR_e は E の減少とともに増加する。本実験は湖流で重要な $E_v = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ の範囲にあり、抵抗増加は図中の太線 $\lambda R_e = 64 + 4 E^{-1/2}$ で表せる。

3.吹送流の領域の区分と遷移 水温と濁度の鉛直分布の時間変化から渦動粘性係数 ν の鉛直分布を推定し、成層の強化に伴う ν の減少を現地で確認した⁵⁾。水深 H と惑星境界層の厚さ $h = u_* \tau_* / f$ の比

$$\theta = H/h = \beta f H^2 / u_* = \beta E_v^{-1}$$

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

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

(L : オブコフ長、 μ_* : 表面ロスビー数、 η_* : 安定パラメータ⁶⁾)に注目し、2つの極端な条件を考える。

(1) 弱風・成層・深水条件; $u_* = O(0.1 \text{ cm/s})$, $\gamma = O(10^{-1})$ では $\theta = O(1)$, $E_v = O(10^{-2})$

(2) 強風・非成層・浅水条件; $u_* = O(1 \text{ cm/s})$, $\gamma = 1$ では $\theta = O(10^{-2})$, $E_v = O(1)$ 、

すなわち、 E_v の変化は μ_* (u_* と L) に支配される。これを模式的に示したのが図-3である。 μ_* 線と交わる直線 (A) は、 $f = 10^{-4} (\text{s}^{-1})$ における浮力束が一定 ($u_*^3 = f L$) の条件を示し、熱的条件が一定でも μ_*

が大きく変化することがわかる。(1)は深水、(2)は浅水条件の代表的状況を表し、 $L = H$ を境に現象は遷移する。(1)の吹送流は自転の効く顕著なスパイラル構造となり、これが本研究で注目する流速分布である。(2)では応力の回転が無視でき、流速分布は非回転系の対数則に近いものになる。

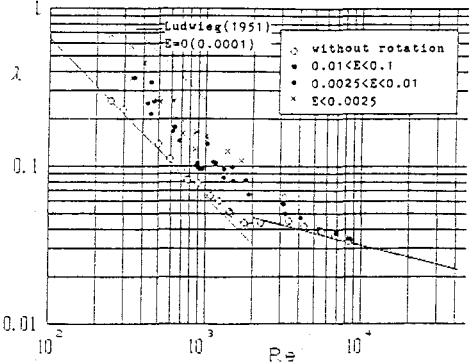


図-1 抵抗係数 λ とレイノルズ R_e の関係

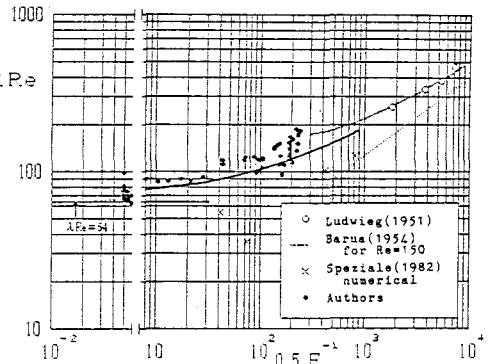


図-2 λR_e と管路エクマン数 E の関係

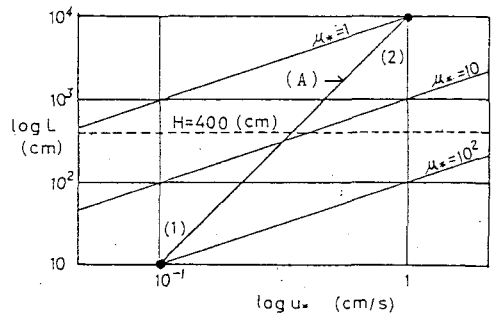


図-3 回転効果に注目した吹送流の区分図

4. 混合過程 μ_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、観測値の μ_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 $L = 10 \sim 100(\text{cm})$ 、 $\mu_s = 10 \sim 100$ であり、こうした μ_s の広範な動きは L の変動による。中段上は表層二次流成分（風下方向右向きを正）、下は表層全流速（風下方向を図の上向き）を示す。積分浮力 $B = \sum g_i d_i$ と $R_s = B / u_*^2$ を成層指標として用いた。観測中2回の成層が現れるが、風速 (u_*) の増加に伴って R_s が低下し B も減少する。浅水および深水条件の中間範囲は成層が破壊する遷移混合条件で、現実に限界値に近い $R_s (\approx 10)$ が出現し、激しい混合が生じている。これを進行過程として既往の公式⁷⁾と合致することも確認した。

5. 流れの抵抗と偏向特性 図-5は偏向の顕著な代表的流速分布（風向成分 u/u_* ；点線、直交成分 v/u_* ；実線、1時間平均値）である。各成分の表層値を、それぞれ流速係数及び二次流強度とみなせば、8及び-10の程度であり、主流（風向成分）の抵抗係数は増大することになる。これは回転効果の増大とともに二次流が強化し、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っており、2.の水理実験で得られた結果とも一致する。ただし、直交成分も含めた全流速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ており、成層破壊の時間規模（数時間程度）は持続する。一方、浅水から混合条件に移る場合（ u_* 減少）は密度流的な流速分布となる。

6. おわりに 回転管路実験では f の変化により E が変化する。 $u = v$ とみなせる層流範囲では f を大きくして $\theta = O(1)$ と保つことにより二次流が生じる。乱流では $\theta = O(10^{-2})$ 以下となり、本実験装置の回転速度 ($\text{Max } f = 1.2(\text{s}^{-1})$) では回転効果は現れなかったが、より高速の f を与えれば $\theta = O(1)$ となり、回転効果が生じるであろう。一方、現地では成層 L による u の広範な変化によって E あるいは μ_s が変化し、水深4m程度の浅水湖においても、大きな偏向（二次流）が生じる。従って、成層時には吹送流の計算や現地観測値の解析において、偏向現象を無視できないといえる。

参考文献 1) 大久保・村本：京大防災研年報、第30号B-2、1987。2) Ludwig: Ingen. Archiv, Vol. 65, 1951。3) Barua: Proc. R. Soc. Lond. A227, 1954。4) Speziare: J. F. M., 122, 1982。5) 大久保・村本：第32回水講, 1988。6) McPhee: Boundary-Layer Met., 21, 1981。7) Kato・Phillips: J. F. M., 37, 1969。

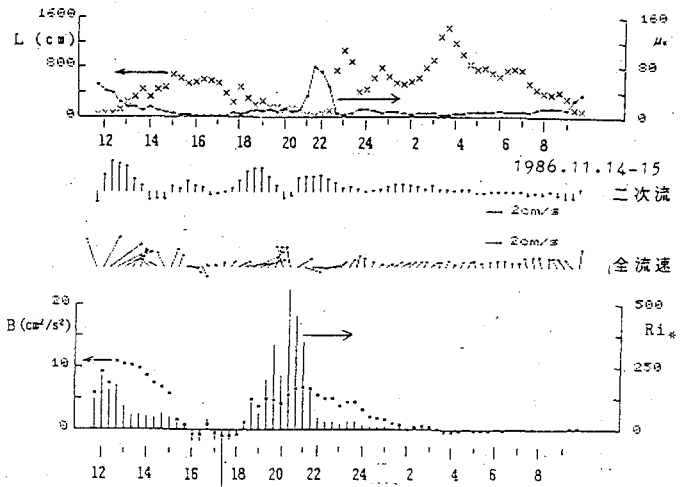


図-4 ロスビー数、表層流速、成層指標の時系列
(上段 ■: μ_s ×: L 、下段 ■: B |: R_{is})

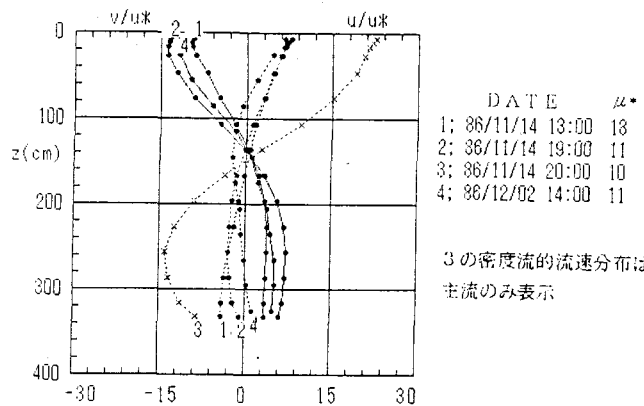


図-5 流速の風向成分と直交成分の無次元鉛直分布

3の密度流的流速分布は
主流のみ表示