

# 密度流におけるコリオリ効果に関する研究

京都大学防災研究所 正員 村本 嘉雄

〃 〃 大西 行雄

〃 〃 〇大久保 賢治

〔はじめに〕琵琶湖の南湖は、東西2~3km, 南北15km程度の水域であるが、この水域で冬季に発生する密度流現象は、地球自転の効果を強く受け、コリオリ項を含まない数値モデルでは誤った評価を与えてしまう。このことを、我々は、本大会の別の講演で指摘する。一般に、表面流系よりも密度流のような内部流系の方が、コリオリ効果を受けやすいことが知られている。本研究では、単純化された条件下での水槽実験と数値実験により、密度流におけるコリオリ効果をパラメータ化しようとする。

〔無次元パラメータ〕本研究では、コリオリ効果すなわち回転の効果と、非回転の基本場からの変形として考える立場をとる。そこで基礎式を無次元化するにあたり、水平流速および浮力 $[g(\bar{p}-p)/\bar{p}]$ の尺度 $U$ と $B$ を、それぞれ $A^{1/3}L^{4/3}$ ,  $A^{2/3}L^{4/3}H^{-1}$  ( $A$ は全浮力束,  $L$ は水路横幅,  $H$ は水深)のようにとる。さらに時間の尺度を $T=L/U$ とすれば、静水圧近似のブーシネ流体の運動方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \{(u \cdot \nabla)u + w \frac{\partial u}{\partial z}\} + \frac{1}{Ro} k \times u = -\nabla p + \frac{\delta^2}{Re} \left( \frac{v_h}{v_v} \right) \nabla^2 u + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = b$$

ここに、 $Ro = A^{1/3}L^{-4/3}f^{-1}$ ,  $Re = A^{1/3}L^{-4/3}H^2\nu_v$ ,  $\delta = H/L$ はそれぞれ“浮力ロスビー数,” “浮力レイノルズ数,” 形状比である。境界条件まで含めて考えれば、現象を支配するパラメータは、上の3つの他に外部フルード数 $Fr = U/\sqrt{gH}$ ,  $\nu_h/\nu_v$  (水平、鉛直渦動粘性係数の比), さらに $\sigma_h$ ,  $\sigma_v$  (水平、鉛直渦動プラントル数)がある。また $Ro/Re = Ev$  (エクマン数)の関係がある。上の7つのパラメータのうち、現在の問題にとって特に重要なものは、 $Ro$ ,  $Ev$ の2つであろう。以下の実験では、これら2つの無次元パラメータの役割が調べられる。

〔回転水槽実験〕水槽実験は、直径60cmで反時計回りに回転する回転台上に、底面積30cm X 30cm, 深さ10cmの水槽を載せて行った。水槽の鉛直壁の1面の中央部に、縦4cm, 横7cmの冷却板が埋込まれ、対岸には、同じ面積のヒーターが適宜取付けられた。水温分布は32本のサーミスタで計測、浮力分布に換算された。流れの可視化は、チモールブルーを加えた食塩水の電気分解による。

表-1の実験条件は $H=5\text{cm}$ ,  $L=7\text{cm}$ の形状についてのもので、Run 110は回転がなく、他は回転を与えた場合のものである。表中の $T_0$ は冷却開始から計測までの無次元時間、 $\Delta$ は無次元浮力の鉛直偏差(水面と底面との差)の水平面内の平均値である。回転の有無にかかわらず、 $\Delta$ の値はほぼ一定しており、上記の無次元化の妥当性がわかる。さて次に、水路幅を熱源幅に拘束するためのアクリル製の枠ならびにヒーターを取除いて行った $H=5\text{cm}$ ,  $L=30\text{cm}$ の形状についての実験

| Run No. | $Ro$ | $Ev$                  | $T_0$ | $\Delta$ |
|---------|------|-----------------------|-------|----------|
| 110 (2) | 0    | -                     | 10.0  | 25.0     |
| (3)     | 0    | -                     | 6.7   | 27.3     |
| (4)     | 0    | -                     | 19.3  | 23.3     |
| (5)     | 0    | -                     | 21.6  | 28.0     |
| (6)     | 0    | -                     | 18.9  | 27.7     |
| (7)     | 0    | -                     | 26.7  | 26.9     |
| (8)     | 0    | -                     | 37.5  | 27.0     |
| (9)     | 0    | -                     | 42.6  | 26.1     |
| (10)    | 0    | -                     | 7.2   | 26.7     |
| (11)    | 0    | -                     | 11.4  | 26.6     |
| (12)    | 0    | -                     | 22.1  | 27.2     |
| (13)    | 0    | -                     | 55.4  | 26.4     |
| (14)    | 0    | -                     | 69.1  | 26.1     |
| 114 (1) | 12.0 | $4.79 \times 10^{-4}$ | 23.0  | 24.0     |
| (2)     | 10.3 | $4.79 \times 10^{-4}$ | 29.0  | 28.3     |
| (3)     | 9.6  | $4.79 \times 10^{-4}$ | 19.3  | 31.7     |
| (4)     | 9.0  | $4.79 \times 10^{-4}$ | 44.4  | 29.4     |
| (5)     | 8.2  | $4.79 \times 10^{-4}$ | 60.7  | 29.3     |
| (6)     | 8.4  | $4.79 \times 10^{-4}$ | 121.1 | 26.6     |
| 117 (1) | 19.3 | $2.71 \times 10^{-4}$ | 43.0  | 29.6     |
| (2)     | 16.3 | $2.71 \times 10^{-4}$ | 26.7  | 29.0     |
| (3)     | 19.7 | $2.71 \times 10^{-4}$ | 23.4  | 25.0     |

表-1

MURAMOTO YOSHIO, OONISHI YUKIO, OOKUBO KENJI

結果について述べる。点源に近い部分冷却であるから、回転のない場合の底面浮力分布は同心円状になり、流れの方は、等浮力線に直交する面内の鉛直循環となる。これに対して、回転のある場合には、冷却開始後初期に冷源前で沈降した水が、コリオリ効果によって右側に偏向され、右側の壁面に沿うフロントを形成しながら進行する。(図-1)しかし、フロント通過後の領域では、この縦方向の鉛直循環は維持されず、同図に見られるような横方向の鉛直循環が形成される。一方、浮力分布は、初期に冷水が右側に張出したものとなるが、十分時間が経過すると、非回転の場合のような同心円状分布を呈する。ただし、縦方向の浮力勾配は、回転のない場合と比べて強化される。

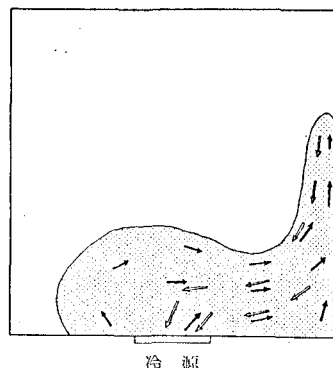


図-1

〔数値実験〕先述の無次元方程式を、鉛直6層分割の3次元数値モデルによって解く。数値実験では、側壁の冷源のみを仮定し、水面を熱源として解が求められた。ここで扱った形状は水路の横幅と長さの比が7/30の場合である。鉛直層分割は、水面から、全水深の5, 20, 50, 70, 95%の各深さで行われた。図-2は、 $E_v$ を固定して $R_0$ を変えた3つのケースについて、上から4層目までの、定常状態の水平流と浮力分布を示している。各図の左側の短辺が冷源になっている。 $R_0$ の減少にともない、回転がない場合の縦方向の鉛直循環は、横方向のそれへと偏向されていく。共通の小さな $E_v$ の値のため、偏向された循環面と等浮力線のなす交角は小さく保たれている。ケース3では、鉛直循環面がほとんど横向きになっていて、コリオリ効果の強さを示しているが、一方で等浮力線は、回転のない場合のように、冷源と平行になっている。

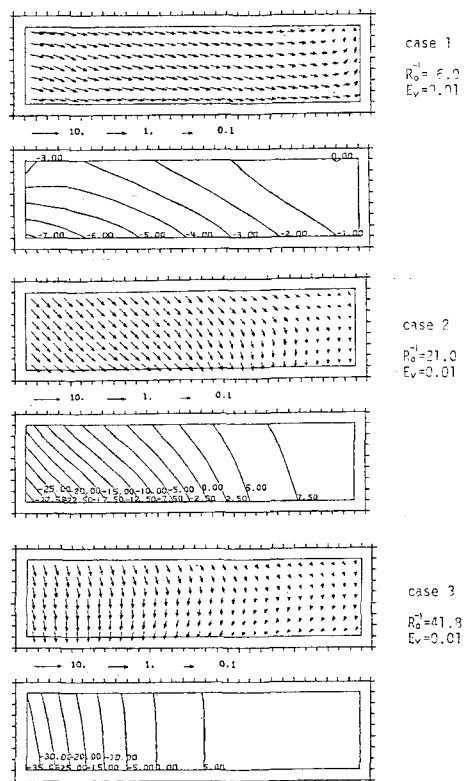


図-2

〔まとめ〕コリオリ効果は、密度流の流下を阻害し、縦方向の大きな浮力勾配を維持する。この効果は、基本的には $R_0 = A^{1/3} L^{-1/3} f^{-1}$ に支配される。回転のない場合の縦方向の鉛直循環面は、 $R_0^{-1}$ が40くらいにまで増加すると、ほぼ直角にまで偏向され、しかもこの流れは、浮力源近傍の狭い水平範囲に閉塞される。