

京都大学防災研究所

正員

○大久保 賢治

〃

〃

大西 行雄

〃

〃

村本 嘉雄

〔はじめに〕湖沼や沿岸域の内湾や河口部では、淡水水の隣接や表面での熱流入などの要因で発生する鉛直循環流によって、内側と外側の水域間で水質の交換が生じている。これらは広義の密度流現象であり、水質混合問題の立場から、こうした現象の定量的評価・予測を行う際に、地球自転の効果を考慮するか否かが重要な問題となることを提起したい。従来の密度流研究では、現象を細長い地形に拘束された鉛直二次元面内のものとし、そこでのコリオリ効果は無視されてきたが、自転が効くか否かの基準は、水域の形状よりもむしろそのスケールに依存するはずである。また海域への河川水流出のように、地形の横拘束が除外された場合には、コリオリ効果がさらに複雑かつ重要になると思われる。一般に密度流のような内部流系の方が表面流系よりコリオリ効果を受けやすいことが知られている。ここでは、密度流に対してコリオリ効果がどの程度のスケールから重要となるのか、またどのような効き方をするのかを調べるために、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する。さらに、そこで得られた知見によって現地の密度流現象のシミュレーション結果が解釈できる例を、琵琶湖南湖の場合について述べる。

〔無次元パラメータ〕従来、湖沼の水平循環などを扱う際に用いられてきた無次元定式化は、コリオリパラメータチキ0という前提に立つもので、回転のある場合とない場合を同時に取扱うことができない。ここでは、コリオリ効果すなわち回転の効果を、非回転の基本場からの変形としてとらえようとする目的で、両者を同時に扱えるような無次元化を行った。まず、成層場を規定する外部パラメータとして、系に流入する全浮力束 A をとり、一種の相似関係として、水平流速と浮力の尺度をそれぞれ $U = A^{1/3} L^{-1/3}$, $B = A^{2/3} L^{-2/3} H^{-1}$ (L :水路幅, H :水深)にとる。さらに時間尺度を $T = L/U$ として、境界条件まで含めた無次元化を行うと、現象を支配する7つの無次元パラメータが現れる¹⁾。これらの中でコリオリ項の大きさを規定する Ro^{-1} と鉛直粘性項の大きさを規定する Re^{-1} の2つが、現在の問題にとって重要と考えられた。ただし $Ro = A^{1/3} L^{-4/3} g^{-1}$, $Re = A^{1/3} L^{-4/3} H^2 \nu^{-1}$ であり、また両者の間には $Ro/Re = Ev$ (鉛直エフマン数)の関係がある。以下の実験では、 Ro と Ev の役割が調べられるが、 Ro は A と結びつけられているので、これを“浮力ロスビー数”と呼ぶことにする。

〔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×30cm、深さ10cmのアクリル製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ている。水温分布は32本のサーミスターで計測、浮力分布に換算された。さらに、チモールブルーを加えた食塩水の電気分解により、冷却によって生じる下層流を可視化した。扱った形状は、(1)アクリル枠で水路幅を冷源幅に拘束した $L = 7$ cmの場合と(2) $L = 30$ cmの場合であり、ともに水深一定 $H = 5$ cmである。(1)の形状についての実験から、回転の有無に拘らず、流下平均的にみた無次元浮力の鉛直偏差はほぼ一定値(25~30)をとり、上記の無次元化の妥当性が確かめられた。一方(2)の形状に関する実験は、点源に近い部分冷却であり回転がない場合の底面の無次元浮力分布は同心円状になり、流れの方はこれと直交する面内の鉛直循環となる。これに対して、図-1は、回転がある場合

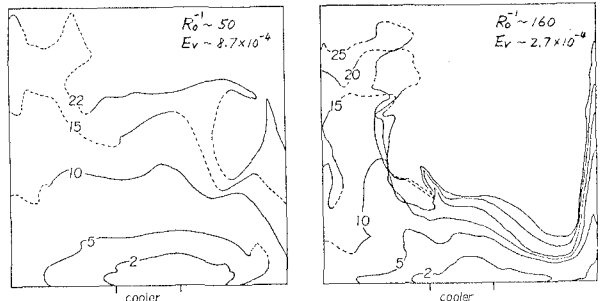


図-1

の下層水の流れる状況を示す例である。図中の数字は可視化開始からの時間(min.)である。冷却開始初期に冷源前面で沈降した水は、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。しかしフロント通過後の領域では、次第に横方向の鉛直循環へと移行していく。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示す。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。

〔数値実験〕先述の無次元方程式系を、鉛直6層分割の三次元数値モデルによって解く。水面は、側壁の冷源と等強度の熱源になっている。層分割は、水面から5, 20, 50, 70, 95%の相対深度で行った。図-2は、(1)の形状について、 E_v を固定し R_0 を変えた3つのケースについて上から4層目の定常状態の水平流と浮力分布を示しており、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の鉛直循環面はほぼ横向きになり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。

〔琵琶湖南湖の計算例〕ここでの対象は、琵琶湖の南・北湖境界付近の冬季密度流現象であり、手法は鉛直2~3層分割の三次元モデルである。水平格子は500m正方形で、初期条件は全湖モデルの11月中旬の計算値とこの南湖モデルに割振った。湖面浮力束は現地水温データから求めた月間平均値を与えている。図-3に計算開始1ヶ月後の第2層の流況を示す。湖峡部の流れは短軸方向を向き、南湖から北湖への逆流(密度流)は生じていない。これに対し $f=0$ として同じ計算を行うと図-4のように逆流が、平均的な湖面冷却量で常に発生することになり、実際の密度流が寒波の到来に反応して発生する間歇現象であることを説明できない。次にコリオリ項を含めても逆流の発生する例を示す。図-5は計算開始後15日目の、図-6は10日目から浮力束を4倍にしてさらに5日目の流況であるが、後者では相当の逆流が発生している。両者の相違は浮力ロスビー数の増大によるコリオリ効果の減少により説明できるだろう。このように、数倍の浮力束変化で現象が異なって見えることは、この現象の R_0 が1のオーダーであることを示している。以上のことから、コリオリ効果は密度流の流下を阻害し、この効果は基本的には浮力ロスビー数に支配されることがわかった。

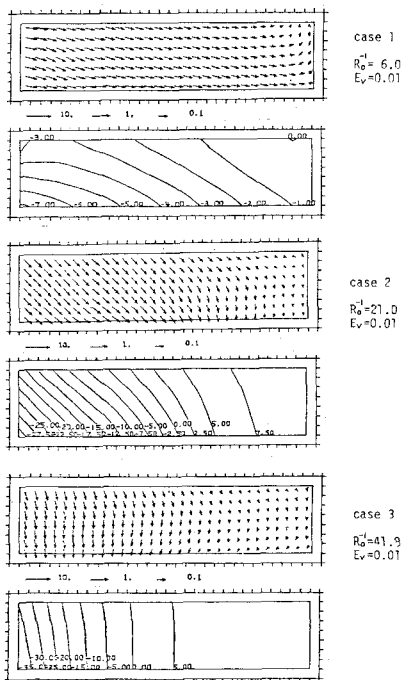


図-2

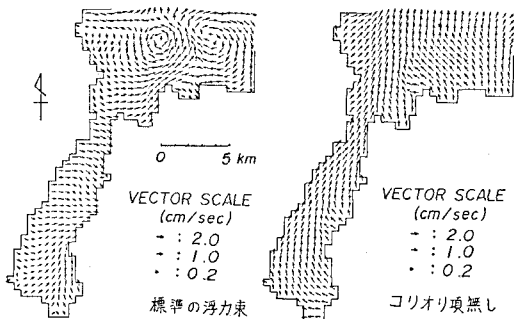


図-3

図-4

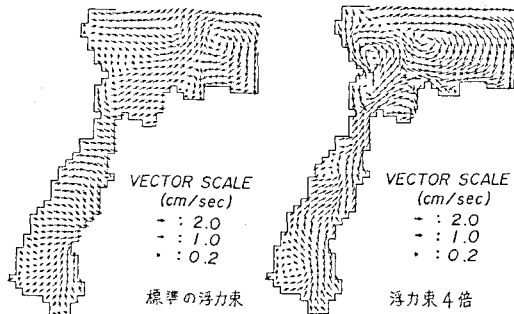


図-5

図-6