

## 論文の内容の要旨

論文題目      Dynamics of non-linear horizontal convections  
with and without rotation  
(非回転系・回転系における非線形水平対流の力学)

氏名                      森 厚

本研究では底面付近の温度コントラストによる水平対流を扱う。

大気・海洋・内核など、回転成層流体を扱う地球流体力学の中で、水平対流は最も重要な位置を占める問題である。大気の場合には、太陽からの短波放射、長波放射の両方の観点から地表面付近は重要な役割を果たし、特に冬季の大陸上の放射冷却は大気大循環の重要な駆動源になっている。海洋についても、海面は大気との熱・水分の交換の場であり、熱塩循環を引き起こす原因となっている。

このような水平対流であるが、メカニズムはこれまでで十分に明らかになっていないとは言い難い。特に、これまでの研究は定常解や周期変動する外力に対する応答として記述され、時間発展問題としての記述は少なかった。そこで本研究では、時間発展問題として扱うこととした。

初めに、非回転系で問題を考えた。一様に成層している二次元のブシネスク流体が、初期に静止していたとする。底面の半無限領域で温度が時刻  $t = 0$  に一定の値だけ下げられたとする。そしてその後の流体の運動を調べる。適切な無次元化を行うことにより、方程式系は二つの無次元量で記述できることが分かった。無次元の成層パラメタ  $\Gamma'$  と、プラントル数  $Pr$  である。理論的な考察の結果、無次元の経過時間と無次元の成層パラメタ  $\Gamma'$  とに基づき、流れの様子は次の3通りに分類できることがわかった。ただし、簡単のためにプラントル数依存性は除いた。

### 1. 拡散レジーム

$t$  が十分小さい時に実現するレジームである。

このレジームのとき、温度場は熱伝導方程式だけで決まる。流れの場は、温度場の水平温度傾度を強制力を持つ渦度方程式に支配されるが、流れが弱いために基本場の温度の移流と非線形項は相対的に小さく無視できる。

水平方向にも鉛直方向にも特徴的な長さは拡散距離で与えられる。

## 2. 重力流レジーム

$t$  が十分大きく、 $\Gamma'$  が十分小さい時に実現するレジームである。

このレジームのとき、成層の効果は無視できるが、非線型項は線形項と同程度となり、無視できない。また、アスペクト比が十分小さく、水平微分に対して鉛直微分は相対的に大きい。冷却された流体は重力流となって流れ出す。鉛直方向の特徴的な長さは拡散距離で与えられるが、水平方向の特徴的な長さは重力流の到達距離で与えられる。

## 3. 重力波レジーム

$t$  が十分大きく、 $\Gamma'$  が十分大きいときに実現する。

非線型項は無視でき、温度の基本場の鉛直移流が重要である。また、アスペクト比が十分小さい。温度の偏差や流れ場は、水平方向に重力波として伝わる。

鉛直スケールは拡散距離で決まるが、水平方向の距離は重力波の到達距離で決まる。

さらに興味深いことに、それぞれのレジームについて、適当に無次元化を行い直すと  $\Gamma'$  に対する依存性を無くすことができ、プラントル数依存性だけがある方程式系を得ることができる。その上、それぞれのレジームに対して自己相似解が存在することが示された。ここで、自己相似解とは、鉛直スケール・水平スケール・物理量の振幅を適切な時間依存性をもつ関数でそれぞれスケール変換して得られる、時間に陽に依存しないような空間構造のことである。

次に回転系について考察を行った。回転系では、二次元平面に直行する方向の流速  $u$  も考慮する必要がある。また、非回転系の場合と同様に方程式を無次元化すると新たに回転の効果を表す無次元パラメタ  $f'$  が現れる。

まず、回転系と非回転系の関係については、経過時間  $t$  が十分小さい場合 (具体的には慣性周期よりも十分小さい場合) に、非回転系の結果をそのまま適用できることが分かった。経過時間が慣性周期よりも長くなると、系の時間発展は非回転系の場合の自己相似解からずれ、準定常的な状態へと移行する。この準定常的な状態は、 $mitG'$  と  $f'$  によって3通りに分類できる。

### 1. 回転系の拡散レジーム ( $f'$ が十分大きい場合)

特徴的な長さは水平方向・鉛直方向ともにエクマン境界層の厚さで与えられる。

### 2. 回転系の重力流レジーム ( $f'$ が十分小さく、 $mitG'$ が十分小さい場合)

鉛直方向の特徴的な長さはエクマン境界層の厚さで与えられ、水平方向にはエクマン境界層の厚さをもつ重力流が、慣性周期の間に到達する距離で与えられる。

### 3. 回転系の重力波レジーム ( $f'$ が十分小さく、 $mitG'$ が十分大きい場合)

鉛直方向の特徴的な長さはエクマン境界層の厚さで与えられ、水平方向にはエクマン境界層の厚さをもつ重力波が、慣性周期の間に到達する距離で与えられる。

また、回転系の場合でも、適切に無次元化をしておくと、 $f'$ ,  $\Gamma'$  に依存せず、プラントル数だけの依存性があるような方程式系を得ることができた。

ここまでで得られた結果は、既存の水平対流に対する見直しを与えるものである。例えば、クールアイランドのように、底面の限られた領域に温度偏差が与えられたとする。このときの定常な水平対流の鉛直スケールに関する議論が行われてきた。それらの結果は本研究で示した重力流レジームや重力波レジームを使って説明できる。すなわち、成層が強い場合には、クールアイランドの両端から発生した重力波がクールアイランドを横切って初めて定常に近付くと考えられ、そのときの鉛直スケールが循環の鉛直スケールを与えられ、これを適用すると、確かに結果は過去の理論と一致する上に、定常に達するまでの時間についての情報も得られたことになる。

このような二次元の解についての安定性は、解の現実性を考える上で重要である。特に回転系の場合には、傾圧不安定が起こる可能性がある。そこで室内実験を行った。室内実験では、いわゆるディッシュパントタイプの回転水槽を用い、回転水槽の底面の中心部分で流体が冷却できるようにした。これまでの理論的な結果から、準定常的な回転系の二次元水平対流は3通りに分類できること、そして、回転系の拡散レジーム・重力波レジームでは線形の応答が卓越していることが分かっている。これと、線形方程式の解が一通りであることを考えると、不安定になる可能性があるのは回転系の重力流レジームであり、他の二つのレジームでは不安定になる可能性は極めて少ない。そこで、基本場の成層が無い状態で実験を行った。また、理論では並進対称性を仮定したが、室内実験ではそれを仮定することは難しいので、軸対称性を持つ実験装置で実験を行った。

実験の結果、軸対称な流れはパラメタによっては不安定で、円周方向に波数を持った擾乱が現れることがわかった。安定性の境界を特定するため、実験を繰り返したところ、ほぼ、冷却域の大きさが変形半径程度が境目となり、相対的に変形半径が小さいと不安定化するような傾向がみられた。

本研究の結果は水平対流に対する包括的なイメージを与えるもので、今後の更なる新展開が期待できる。