

# 3次元非静水圧数値モデルによる極域海洋モデリング

\*松村義正 羽角博康 (東京大学大気候システム研究センター)

## 1 はじめに

数千年の時間スケールを持つ海洋大循環は、高緯度域において冷却および結氷にともなう塩分排出によって局所的に形成された高密度水が海底まで沈み込む過程と、低中緯度域にて潮汐による内部重力波を起源とする乱流混合によって浮力を得た深層水が湧昇する過程によって維持されている。これらのプロセスは静水圧近似を行った海洋大循環モデル (OGCM) では本質的に解像されないものであり、現在の OGCM による現実的な深層循環の再現は経験的なパラメタリゼーションに大きく依存している。また現実的な深層循環を維持するようにチューニングされた拡散係数等の値が、必ずしも直接観測と整合しないなど問題も多い。このような現状では、例えば温暖化予測実験のように現在とは大きく異なる状態をシミュレートする際の信頼性に疑問が生じる。

そこで我々は深層水形成過程や乱流混合を陽に解像する 3次元非静水圧海洋モデルを開発し、これを用いた数値実験によって海洋大循環を駆動する比較的小さいスケールのプロセスを定量的に明らかにすることを目的として研究を行っている。その結果を元により高精度かつ一般的なパラメタリゼーションを開発し OGCM に導入することにより、OGCM の信頼性向上に寄与できるものと期待している。本講演では開発したモデルの概要を紹介し、続いて極域での深層水形成過程を想定した予備実験の結果を紹介する。

## 2 開発したモデルの概要

開発したモデルは Boussinesq 近似、Rigid lid 近似を適用した 3次元非圧縮非静水モデルであり、流速の 3成分および温位・塩分を予報する。海水の密度は状態方程式を用いて予報された温位、塩分および静水圧力から診断する。圧力を静水圧項と非静水圧項に分割し、後者は連続の式と Navier-Stokes 方程式から導かれる 3次元 Poisson 方程式によって診断する。こうして求められた非静水圧力項を用いる事により、流速の 3成分を独立に時間発展させても連続の式との整合性が保たれ、安定に積分を継続できる (Marshall, 1997)。

前述のように非圧縮非静水モデルでは圧力を診断するために毎タイムステップにおいて 3次元 Poisson 方程式を解く必要があるが、これは計算量が極めて多く海洋非静水モデル普及の妨げとなってきた。特に広く用いられてきた共役勾配法は計算量が全格子点数の  $3/2$  乗に比例するため、高解像度の実験を行うことは困難であった。また FFT を用いたスペクトル法は海底地形を扱えないために海洋モデルには適当でない。そこで我々は Multigrid 法を共役勾配法の前処理行列として作用させる手法 (Nakajima, 2002) を用いた。Multigrid 法の計算量は格子点数にほぼ比例し、また領域全体の情報を必要としないので容易に並列化できるため、高解像度の実験

に適していると考えられる。実際我々の実装においても格子点数の増加に対して計算時間がほぼ比例関係にあった。地形の複雑さや収束判定の閾値にもよるが、計算時間は静水圧モデルに比較しておよそ 3 倍程度であり、実用に耐え得るものであると考えている。

3次元 Poisson 方程式を避けるために、非圧縮仮定をせず圧縮系の方程式を解くという選択肢もある。圧縮系では音波が生じるが、海水の音速は約 1500 m/s であり、これは海洋において一般的な流速と比較して 1000 倍以上大きい。したがって音波を陽解法によって解像するにはタイムステップ間隔を従来よりはるかに短くとらねばならなくなり、現実的でないと思われる。

## 3 実験設定と結果

南極沿岸ポリニーヤでの冷却および塩分排出によって形成された高密度水が斜面を下り降りる過程を対象として次のような理想化実験を行った。東西一様で 1%勾配をもつ斜面の上部に局所的に高塩分の水塊を置き、静止状態から実験を開始する。領域は東西 512 km, 南北 256 km, 鉛直 3200 m であり、東西方向には周期境界とする。

水平解像度を 8 km とした高解像度実験と、2 km とした低解像度実験で結果に顕著な違いが見られた。高解像度実験では高密度水が斜面を下る過程でフロントにおいて傾圧不安定が発達し、水平スケール 10 km 程度の渦が生じる。この渦が高密度水を内部に蓄えながら移動することにより塩分の輸送が行われる。一方低解像度実験においては不安定は発達せず渦も形成されない。この場合地衡流調節がなされた後は高密度水は斜面上に留まる傾向にあり、さらに斜面での下降流の補償流として生じる上向きの流れによって高密度水の一部が逆流するような挙動が見られた。

斜面を下る高密度水塊は、周囲の軽い水との混合によって密度は減少し体積が増える。またこの時運動量保存則から沈降速度も減少する。しかし水平解像度を 2 km とした高解像度実験においてもこのような微小スケールのエントレインメント過程は十分に解像されていない。そこで実験結果から見積もった典型的な高塩分水の沈降速度と塩分差を用いて、高密度水塊の境界のみを局所的に切り出した理想化実験を行ったところ、境界面で Kelvin-Helmholtz 不安定が発達し、生じた渦の消散によって高密度水塊と周囲の軽い水が効率的に混合されることがわかった。また生じる渦のスケール、および結果的になされる拡散の大きさは境界面での密度差に依存し、密度差が小さいほど生じる渦のスケールが大きい。

今後はこのような Kelvin-Helmholtz 不安定による混合過程まで解像する高解像度の数値実験を行うことにより、南極沿岸での深層水形成を定量的に評価する予定である。