

論文の内容の要旨

論文題目 Modeling global abyssal circulation by incorporating bottom boundary layer parameterization

(海底境界層モデルを組み込んだ海洋大循環モデルによる深層循環の研究)

氏名 中野 英之

1 はじめに

海洋の深層循環は、上層に比べて非常にゆっくりとしているが、熱容量が膨大なため熱輸送としては気候系全体に対して非常に大きな影響を持つ。そのため気候モデルにとって、海洋の深層循環の現実的な再現は非常に重要である。しかしながら、既存の海洋大循環モデル (OGCM) で再現されている深層循環には、現実との間に質的にも量的にも大きな差異がある。例えば、縁辺海で形成された重い水が外洋に下り落ちる overflow/downslope-flow が深層水形成に非常に大きな影響を持つことが指摘されているが、今までの OGCM では再現されていない。その再現には海底境界層 (BBL) の導入が必要と認識されつつあるが、BBL を陽に表現して全世界海洋モデルを平衡状態まで計算した例は未だない。また、モデルの解像度が粗く地形をうまく表現できていないことなどのために深層の水平循環パターンの再現には不十分な点が多く、非常に大切な事柄が数多く見過ごされている。

今回の研究では、BBL を採り入れた $1^\circ \times 1^\circ$ という平衡状態まで計算するものとしては比較的高解像度のモデルを開発し、これまでの OGCM の欠点を改善する。またその過程で今まで見過ごされてきた重要な事柄を指摘する。

2 海底境界層 (BBL) の扱い

BBL は OGCM の一番底の格子の下に等しい厚みの層を 1 層導入することで表現する。鉛直方向には OGCM と同じように交換するが、水平方向には BBL で計算された移流でやりとりをする。BBL において流速を計算する際に、重い水が斜面に対して約 45 度の角度でおりてくることを表現できるパラメタリゼーションを施す。このように、overflow/downslope-flow を表現する際に、移流を計算する BBL を導入したことが、過去に行なわれたトレーサーだけを修正するものと本質的に異なる。このタイプの BBL を導入した OGCM を全世界海洋に適用した例は未だない。

3 数値実験の設定

モデルは CCSR-OGCM を用いた。これは rigid-lid, Boussinesq, hydrostatic 近似のもとで primitive 方程式を解く multi-level model である。混合層モデル, 海水モデルは含んでいない。解像度は水平 $1^\circ \times 1^\circ$, 鉛直 40 層。北極海は含まない。このような解像度は平衡状態まで計算する気候モデルとしてはかなり高解像度であり, 今までのところ海洋循環を論じた論文は発表されていない。しかしながら, overflow/downslope-flow 及び深層循環の水平パターンを現実的に再現するためには最低限必要な解像度である。観測を用いて編集した季節変動する外力を与え, 平衡状態まで計算した。Nordic Seas 北部及び南極周辺の大陸棚の水は観測の外力だけでは表現が困難なので修正を施している。

4 Overflow/Downslope-flow の再現

図 1 は BBL を導入した場合と導入しなかった場合の海底に沿った塩分分布である。BBL を導入しない場合は, Nordic Seas から大西洋に向かって流入してくるはずの重い水が, Iceland の周りの浅くなっているところに束縛されている。これは典型的な既存の OGCM の欠点である。一方 BBL を導入した場合は, Nordic Seas からの低塩分水が Iceland の東側と西側の両方から下り落ちていくという現実によく似た水平構造を再現している。

また, このように overflow/downslope-flow によって深層水が生成されると, 最近盛んに OGCM に導入されている中規模渦のパラメタゼーションの 1 つである Gent and McWilliams parameterization (以後 GM) に対する感度にも大きな影響が生じてくる。GM は数々の成果をあげているが, 深層の構造に非現実的な影響があることと熱塩循環を非常に弱めてしまうことが問題となっていた。

図 2 は BBL を導入した場合と導入しなかった場合についての GM の効果を, 大西洋の東西平均密度で見たものである。BBL を導入しなかった場合には, 図 1 で見たような非現実的な密度勾配が Iceland の南及び南極の周辺に現れる。GM にはきつい密度勾配を緩めるといふ働きがあり, 非現実的な密度勾配を緩める過程において深層を過冷却する。これが, 深層水の性質の GM に対する非現実的な感度の原因といえる。またこの場合, 本来移流で運ばれるはずの重い水が GM の働きにより運ばれることになるので, たとえ疑似的に深層の性質が GM のない時に比べ現実に近付いたとしても流量は非現実的に減少してしまう。一方, BBL を導入した場合は, 問題となっていた Iceland の南における GM の効果は抑えられ, 流量も現実的な値を保つ。

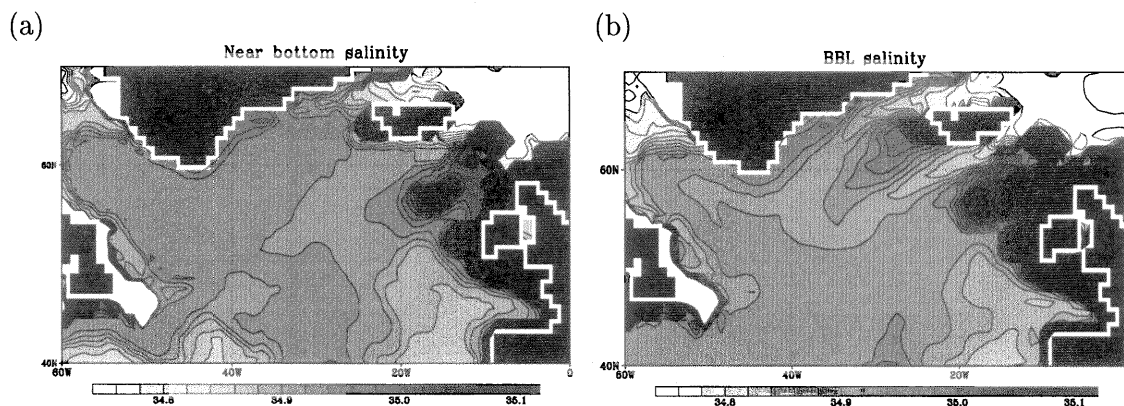


図 1: Iceland 周辺の海底付近の塩分分布。(a) BBL を導入しない場合。(b) BBL を導入した場合。等値線間隔は 0.005psu。

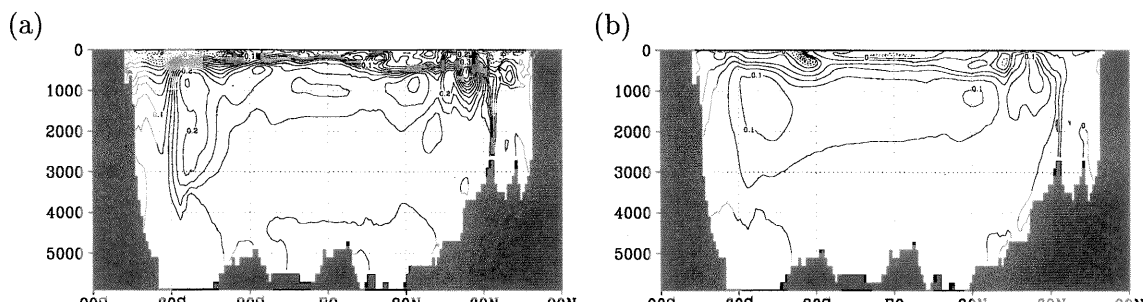


図 2: GM を導入したことによる大西洋の東西平均密度の増加. (a) BBL を導入しない場合. (b) BBL を導入した場合. 等値線間隔は 0.02 kg/m^3 .

5 深層循環の水平構造

南極周辺で作られる底層水のなかで、オーストラリアの南に位置する Adélie Coast 沖における底層水は東インド洋の底層水の性質に大きな影響を与える。しかしながら既存のモデルでは、解像度が粗く地形の扱いが不十分であることや、西岸がない場所での底層水形成が困難であることなどのため再現されていなかった。本研究の BBL を導入した $1^\circ \times 1^\circ$ モデルでは Adélie Coast 沖における底層水形成を再現することができた。この底層水それは東インド洋に留まらず、太平洋にも大きな影響がある (図 3)。

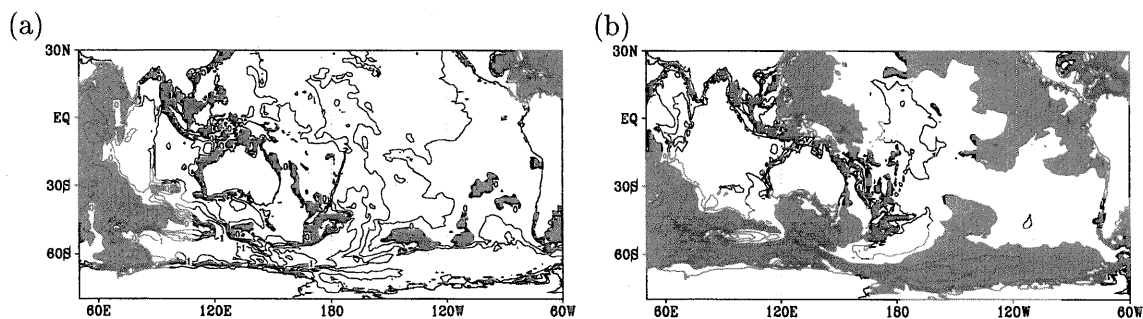


図 3: Adélie Coast 沖で深層水形成をやめた時の、海底付近の (a) 温度の上昇, (b) 塩分の上昇. 影のついた部分は低下を示す. 等値線間隔は 0.2°C . と 0.005 psu .

これは以下のように説明される。太平洋深層水の起源は、南極を取り囲む海嶺に遮られるため、南極周辺で生成された底層水が直接来るのではなく、南極海を一周する Circumpolar Deep Water の下部が New Zealand 南から流入する。そして太平洋に入る直前にオーストラリアの南でその直下をなされる Adélie Coast 沖を発した底層水の影響を大きく受ける。

深層循環の最も基本的な Stommel-Arons theory 理論を、底層で北上し中深層で南下するという子午面循環の layered structure を持つ太平洋に適用すると、東西流は底層では東向きで中深層では西向きとなる。しかし、 ^3He 分布から、太平洋の中深層には、緯度により向きが異なる東西流があることが示唆されている。今回の実験では、はじめて、そのような東西流を緯度分布まで正しく再現した (図 4)。これらの東西流は風成であることを示すことができた。この風成循環の速さは 1mm/s 程度と非常に小さいが、熱塩循環が弱い場所ではそれに打ち勝つには十分な大きさである。

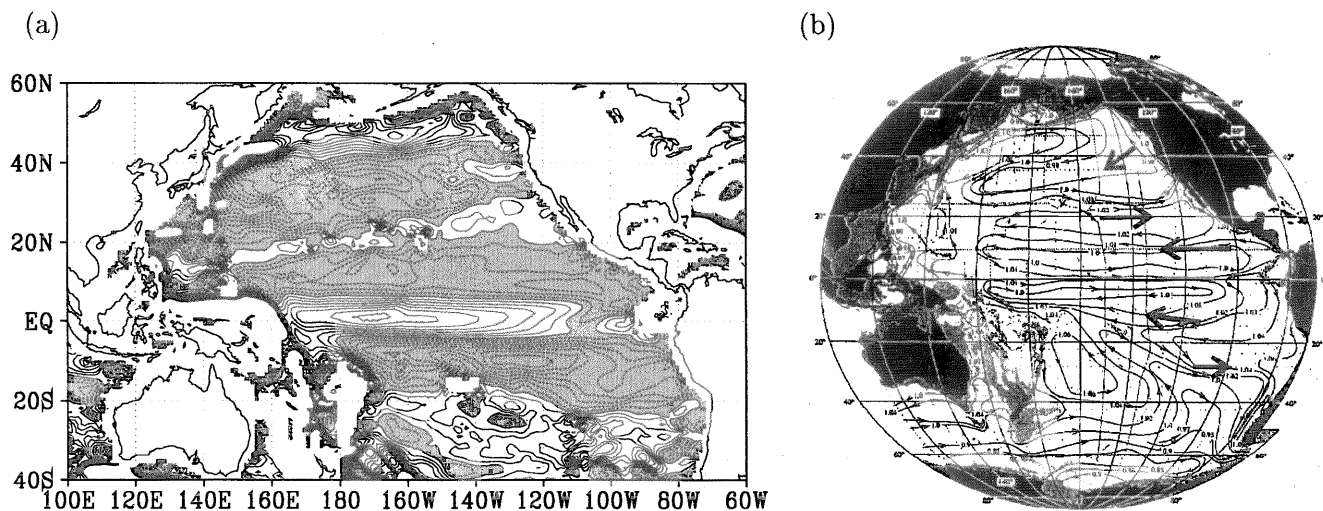


図 4: (a) 太平洋 2405m 深の流速の東西成分. 影がついた部分は西向き. 等位線間隔は $5 \times 10^{-4} \text{m/s}$. (b) 太平洋 2500m 深の steric height. 太い矢印は ^3He 分布から推定した流れ [Lupton, 1998 より].

6 まとめ

BBL を組み込んだ解像度 $1^\circ \times 1^\circ$ の OGCM を用いて, 全世界海洋の深層循環の研究を行なった. その結果, 観測と似た構造を持つ overflow/downslope-flow が再現でき, 深層循環の水平パターンの大まかな特徴をとらえることができた. この overflow/downslope-flow による深層形成により, GM で問題となっていた深層水に対する非現実的な感度等が抑えられることになった.

BBL の導入及び $1^\circ \times 1^\circ$ の解像度により地形の表現が正確になったことで, Adélie Coast 沖における底層水形成に成功し, その底層水が東インド洋だけでなく, Circumpolar Deep Water 下部との混合過程を通して太平洋の深層にも多大な影響を与えることを示すことができた. 太平洋の中深層で緯度により東西の流れの向きが異なる循環をはじめてモデルで再現し, その循環は風成循環を考慮することで説明できることを示した.