

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540423

研究課題名(和文) 対流と傾圧不安定の相互作用に注目した高緯度海域における底・深層水形成過程の研究

研究課題名(英文) Bottom and Deep water formation due to the interaction of convective and baroclinic instabilities

研究代表者

秋友 和典 (AKITOMO KAZUNORI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10222530

研究成果の概要(和文)：傾圧流が存在する理想化された状況において、一様な海面冷却を加える実験を3次元非静水圧方程式に基づく数値モデルを用いて行った。初期に傾圧的に安定な流れは、海面冷却に伴う対流が混合層を形成するとともに不安定化し、高・低気圧性渦を生成する。高気圧性渦の性質は高緯度海域でしばしば観測される submesoscale coherent vortex (SCV) の性質に一致した。これらの渦に伴う下層への海水輸送量は基本場の等密度面勾配にほぼ比例する。その輸送過程をパラメタリゼーションによって再現するためには、非断熱過程(対流)が輸送過程に果たす役割を考慮する必要がある。

研究成果の概要(英文)：To investigate the interaction of convective and baroclinic instabilities, 3-D model experiments have been executed using a nonhydrostatic equation system. The baroclinic flow becomes unstable to develop into pairs of cyclonic and anticyclonic eddies in the convective mixed layer after cooling sets on. Properties of anticyclonic eddies resemble those of submesoscale coherent vortices (SCVs) which have been often observed in polar oceans. The downward transport associated with the eddies increases with background slope of isopycnals. It is needed to take into account the effects of diabatic processes (convection) for better parameterization of the eddy transport in a general circulation model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：海洋物理学、対流、傾圧不安定、高緯度海域、底・深層水

1. 研究開始当初の背景

海洋の底・深層水は主に高緯度海域の対流によって形成されるが、その形成や輸送過程に関連して、近年の観測は対流だけでは説明できない現象を報告している。すなわち、グリーンランド海、ラブラドル海では、冬季の対流混合によって形成された海水で構成される 10km スケールの高気圧性渦が深層に観

測され、底・深層水の形成・輸送の一形態である可能性が指摘されている(Gascard et al., 2002; Budeus et al., 2004 ほか)。また、不安定あるいは中立の成層が予想される冬季の深い対流混合層内に安定な密度成層構造が見つかっている(Pickart et al. 2002)。これらの現象の発見は、「底・深層水は対流によって形成される」というこれまでの描像を大き

く修正する可能性があり、現象の詳細なメカニズムを明らかにすることは、地球規模での長期的な気候の形成や変動を考える上で解決すべき重要な課題である。

傾圧不安定は対流とは逆に安定成層を促すように働き、また発達して渦を形成することから、上述の観測事実を説明し得る現象の一つである(観測された成層の強さは対称不安定による傾斜対流では説明できない)。混合層内に発生する傾圧不安定のスケールは小さく、その発達率は大きくなるのが中緯度海域で報告されているが(例えば Barth, 1994)、混合層以深にも弱い成層が見られる高緯度海域では、同様の傾圧不安定の発生・発達がさらに容易になり(Akitomo, 2006)、深くまで達することが予想される。また、傾圧不安定と対流のスケールが同程度になることから、互いに影響を及ぼしあうことが予想される。この結果、底・深層水の形成・輸送過程が、対流だけによる場合に比べて、質・量的に大きく変化する可能性がある。しかし、冬季の強い海面冷却のもとで両者が共存する場合に生じる現象やその底・深層水の形成・輸送に対する役割ははまだ十分に理解されていない。このため、対流や小スケールの傾圧不安定を直接再現していない(あるいは適切にパラメタ化できていない)現状のGCMでは、底・深層水形成が十分に現実的なものとなっていない可能性がある(例えば、Smith and Gent, 2004)。

[文献]

Akitomo(2006):JGR,111,C09027,doi:10.1029/2005JC003284

Barth(1994): JGR, 99, 16095-16115

Budeus 他(2004):GRL,31,L05304, doi:10.1029/2003GL017983

Gascard 他(2002):Nature,416,525-527

Lilly 他(1999):JPO,29,2065-2098

Pickart 他(2002):JPO,32,428-457

Smith & Gent(2004):JPO,34, 2541-2564

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、傾圧流と海面冷却の共存する海洋を想定した理想的な状況で数値実験を行い、対流と傾圧不安定の相互作用による底・深層水形成のメカニズムを、対流だけによる場合との比較を通して明らかにする。また、海面冷却のもとで生じる傾圧不安定と生成する渦の特性(強さ・深さ・スケール)、対流混合層の成層化、および底・深層水の形成・輸送過程が、背景場の成層強度および傾圧流の特性(深さ・強さ)に依存して、どのように決まり、どのように変化するかを定量的に評価する。その結果をもとに、GCMでのパラメタリゼーション手法の問題点と改良の指針を示す。

3. 研究の方法

図1に示すように、理想化された傾圧流が存在する背景場に対して一様な海面冷却を加え続ける実験を、3次元非静水圧方程式によって行う。モデル領域(格子幅)は、対流と傾圧不安定のいずれもが再現できるように、水平100km(0.1km)、鉛直3km(3~50m)とする。成層の強さ、傾圧流の強さ・深さや海面冷却率はラブラドル海などでの観測結果をもとに設定する。線形安定性解析や鉛直2次元実験(対流だけが再現される)と比較しながら、海面冷却のもとで対流混合層内に発生する傾圧不安定やその後発生する渦の特性、およびそれらが対流活動と底・深層水形成に与える影響を明らかにする。また、対流と傾圧不安定が共存することで、これまでの観測事実と矛盾なく底・深層水の形成が起こり得るかを確認する。

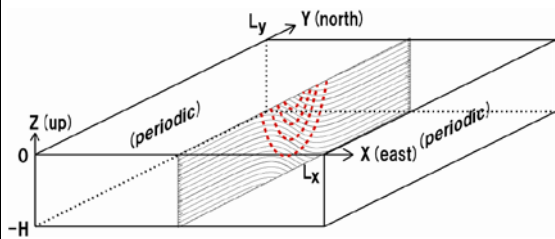


図1：モデル領域と初期場

主な実験ケースの初期場(y-z断面)図2に示す。成層強度を段階的に中緯度から高緯度まで変化させてケース・スタディを行う。対流混合のもと、高緯度海域の弱い成層が傾圧不安定の特性に与える影響を、成層が強い中緯度海域との違いに注目して明らかにする。また、成層強度の違いが生む底・深層水形成量の違いを評価する。さらに、傾圧流の強さと深さおよび冷却率を変化させてケース・スタディを行い、傾圧不安定(渦)の特性や底・深層水の形成量の違いを評価する。

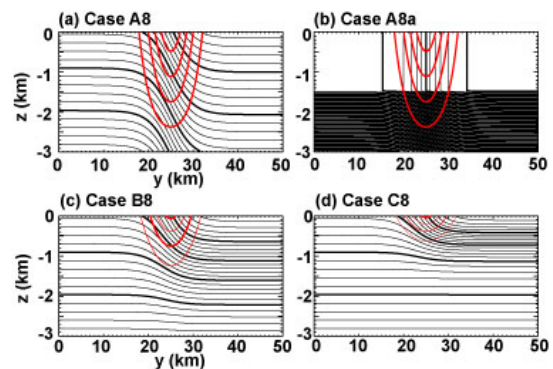


図2：主な実験ケースの初期場
黒線は等密度線を、赤線は流速uを示す

4. 研究成果

初期状態で傾圧的に安定な流れは、海面冷却にともなう対流がほぼ鉛直一様な混合層を形成することによって不安定化し、高・低気圧性渦を生成する(図3)。それらの性質は線形安定性解析から見積もられるものに一致した(図4)。すなわち、成層が弱いほど、よりスケールの小さな不安定がより早く成長する。

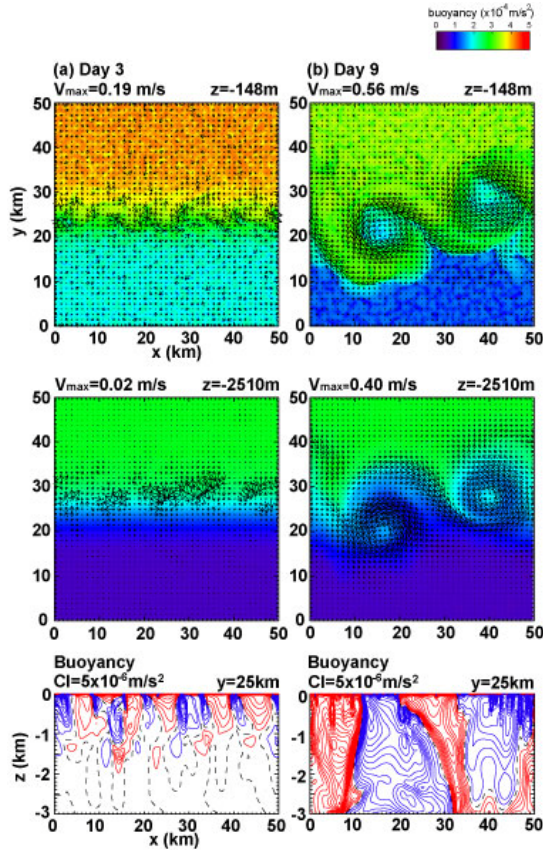


図3 : Case A8 の結果

上層、下層の水平流ベクトルと密度の水平断面(x-y)と前線域(20km<y<30km)での密度偏差断面(x-z)。(a)3日目、(b)9日目

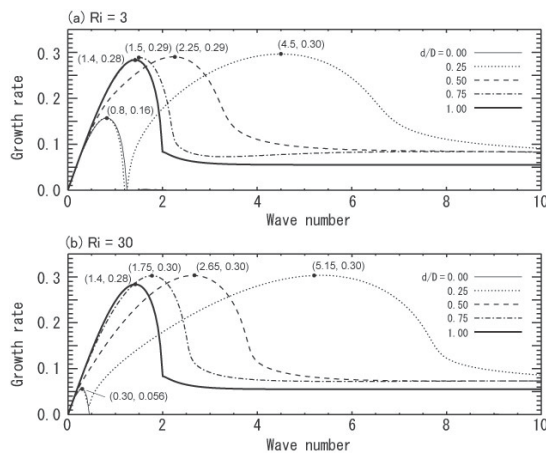


図4 : 線形論に基づく傾圧不安定の成長率

鉛直一様な上層と成層した下層の層厚比 d/D によって、最大発達率とその波数が変化する。(a) Ri=3, (b) Ri=30

傾圧流が全水深にわたる場合には、海底付近に形成される高気圧性渦は非常に微弱であるのに対して(図3)、傾圧流が全水深に及ばない場合には、対流混合層の底に顕著な高気圧性渦が形成される(図5)。また、その渦は混合層水を効果的に取り込み、海面付近に形成される低気圧性渦と対をなして、傾圧流帯(密度前線帯)から速やかに遠ざかることが認められた。また、高気圧性渦に取り込まれた海水層には弱い成層構造が見られた(図6)。3次元的な傾圧不安定による再成層効果が2次元的な傾斜対流のそれに勝る。傾圧不安定渦のこれらの性質は、ラブラドル海やグリーンランド海でしばしば観測される submesoscale coherent vortex (SCV)の性質に一致しており、対流と傾圧不安定の相互作用が SCV の生成機構として働く可能性が示された。

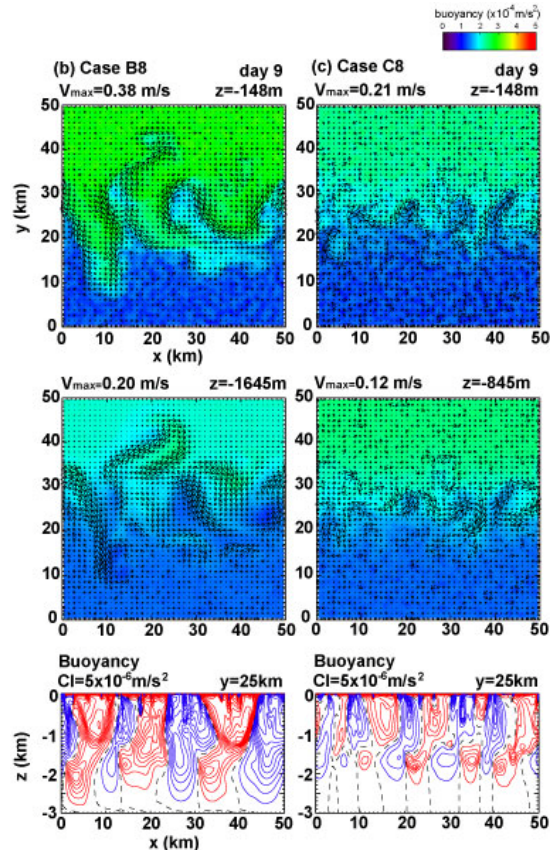


図5 : 傾圧流が全推進に及ばない場合の結果 (a) Case B8, (b) Case C8。他は図3と同じ。

海面冷却下で混合層内に励起される傾圧不安定の輸送過程に対する役割を、背景の密度成層強度の違いに注目して調べた。成層強度が中低緯度で見られる程度の場合、傾圧不

安定はほぼ混合層内に限られ、下層への熱輸送も少ない。これに対して、高緯度での成層強度のもとでは、混合層の深さを遙かに越える不安定が生じ、それとともに下層への輸送が対流混合だけの場合に比べて強化され、底・深層水の効果的な形成を引き起こす。また、下層への輸送量は基本場の等密度面勾配にほぼ比例することが明らかになった。

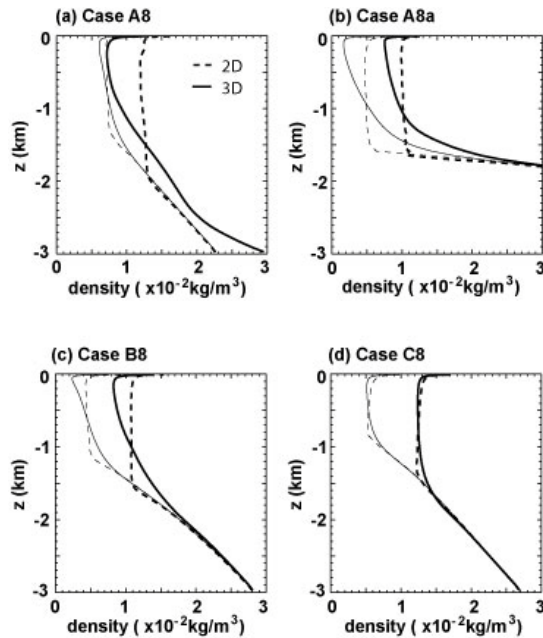


図6：鉛直密度分布の時間発展
密度は前線域(20km<y<30km)で水平平均したもの。
密度成層は3次元実験(実線)の方が鉛直2次元実験(y-z断面；破線)より強く、その差は時間とともに大きくなる。(a) Case A8, (b) Case A8a, (c) Case B8, (d) Case C8。

以上の結果を受けて、海面冷却下で発生・発達する傾圧不安定による輸送過程をいわゆる Gent-McWilliams のパラメタリゼーション(以下、GM スキーム, Gent and McWilliams (1991))によってどの程度再現されるかを調べた。冷却の作用によって混合層内に発達する傾圧不安定の成長率が基本場のそれより2~4倍大きいことを考慮し、混合層内での渦輸送係数、等密度面拡散係数を下層より4倍大きく設定して水平10km格子での実験を行った。基本場の成層が強い場合は、混合層内および深層における水温の鉛直分布が良好に再現されることを確認した。一方、成層の弱い場合には、底・深層における水温分布が十分には再現されない。この場合には、GM スキームでは考慮されていない非断熱過程(対流)が輸送過程に対して本質的な役割を果たしていると考えられ、そのパラメタリゼーションには新たな定式化が必要であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Akitomo, K. (2011): Two types of thermobaric deep convection possible in the Greenland Sea, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 116, C08012, doi:10.1029/2010JC006635.
- ② Akitomo, K. (2010): Baroclinic instability and submesoscale eddy formation in weakly stratified oceans under cooling. *Journal of Geophysical Research*, 査読有, vol.115, C11027, doi:10.1029/2010JC006125.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋友 和典 (AKITOMO KAZUNORI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10222530

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし