

学位論文題名

Mass balance of the subpolar gyre: intergyre exchange and deep water inflow using GCM tracer experiments.

（亜寒帯循環の流出入バランス：GCMトレーサー実験による
gyre間水塊交換と深層水の流入）

学位論文内容の要旨

北太平洋、亜熱帯循環と亜寒帯循環の間においては、他の海域とは異なる独特の方法で海水が移動しており、この交換を理解することは全球的な海洋循環場、物質循環また南北熱輸送の理解において欠かせない事である。Ueno and Yasuda(2000)は、このような交換流が実際に生じていることを、Levitusデータの解析によって示した。

これまで先行研究によって循環境界の間における水塊交換を可能にする各種メカニズムが提案されてきた。まず、第1にあげられるのはEkman輸送とその補償流という考え方である。循環境界は偏西風が卓越する領域であり、それに応じて亜寒帯から亜熱帯へと向かうEkman輸送が生じる。質量保存の観点からは、この輸送と同量の水塊が何処かで亜熱帯から亜寒帯へ移動していなければならない。ただし、もし内部領域で補償流が生じるならばSverdrup balance(Ekman層以深で積分したもの)の制約に抵触するので、このような補償流は西岸で循環境界を横切っていると考えられている。一方、別の観点として傾圧流ならSverdrup balanceの制約にはかからずに循環境界を移動することが十分に可能である。ventilated thermocline modelにおいて、このような流れが可能な領域がPedlosky(1984)らによって調べられた。更に近年、ventilated thermocline modelの問題点を解決する為に導入した混合層の東岸近傍の領域から、cross-gyre flowが生じている事がSumata and Kubokawa(2001)によって明らかになった。

ここまでは主に風成循環、表層の密度成層に関連した交換流のメカニズムをみてきたが、もし循環境界を海底まで延びるx-z断面と考えるならば、深層循環もこの断面を横切っており、亜寒帯の質量保存を考察する場合には欠かせない要素である。

本研究ではどの領域でどの程度の流量が交換されるか調べ、循環境界を横切る各メカニズムについて定量的な見積もりを与える事を目的とする。また、亜寒帯へ移動した水塊のその後の挙動についても、特に深層水の上昇に注目して、その移動経路について調べた。このような水塊移動を理解する為にはラグランジアン的な研究が不可欠であり、GCMを理想的な条件で駆動して得た定常場に於て粒子追跡を行うというアプローチでこの問題に臨んだ。GCMの条件設定は単純化されているが、上述の各交換メカニズムを再現することが十分可能である。

粒子の速度をモデルのgridデータから補間する際には、従来の線形補間とは異なる、質量保存を満足する様な補間を行った。これによって、粒子の移動を質量の移動に換算することが可能となった。

初期に緯度41Nのx-z断面に存在する粒子の軌跡を追跡した結果、以下に示される経路で亜熱帯循環から亜寒帯循環へ移動する粒子が存在した。換算流量も同時に示す。

(A) 亜熱帯の Ekman 層を經由した後、亜寒帯へと移動する粒子。 2.36 Sv ($10^6 m^3 s^{-1}$)

(B) 熱帯、深層経路で亜寒帯へ移動する粒子。

(B-1) その内、亜寒帯の 1000m 以浅に上昇する粒子 2.37 Sv

(B-2) 1000m 以深で亜熱帯へと戻る粒子 (この量は示さない)

亜寒帯から亜熱帯へ 1000m 以浅で移動する粒子については以下の通りである。

(C) 表層の Ekman 輸送によって亜熱帯へと移動する粒子 3.86 Sv

(D) 東岸近傍の 200m-800m で亜熱帯へ移動する粒子 0.66 Sv

(B-2) は深層水の return flow である。各粒子の移動メカニズムに関しては、(D) については粒子の軌跡の考察などから cross-gyre ventilation であることが示唆される。

Ekman 輸送の補償流によって交換される量については、比較実験を行うことでこれを確かめた。比較実験では、循環境界で Ekman 輸送をほぼ 0 にするが、Ekman pumping はこれまでの実験と同じになるような風応力を与えた。比較実験において得られた場で粒子追跡を行った結果、(A) の交換流は存在しなくなったが、(B-1) の交換流については大きな変化が見られなかった。これにより (A) は Ekman 流の補償流である事が示された。標準実験に於て、この (A) の流量は必ずしも (C) と対応しておらず、亜寒帯循環に於ては深層水まで考慮して流量バランスを考えなくてはならない。

更に、粒子が亜寒帯に移動してから辿る経路に関しても、興味深い知見が得られた。表層で亜熱帯から亜寒帯へ移動した粒子は亜寒帯に滞在する時間が短く、外縁部を数周する間に上昇し、表層の Ekman 層に達した後、亜熱帯へと輸送される。一方、深層で亜寒帯に移動した粒子は滞在時間が長く、回転しつつ上昇する間に亜寒帯の中心部へと徐々に移動する。結果として、深層の水塊が上昇する場所は亜寒帯の中心部に集中する傾向があることが示された。亜寒帯内に於ける水塊の平均滞在時間は (A) の水塊で 18.6 年、(B-1) の水塊で 130 年であった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 田 元 美
副 査 教 授 久 保 川 厚
副 査 助 教 授 山 中 康 裕
副 査 教 授 安 田 一 郎 (東京大学大学院理学系研究科)

学 位 論 文 題 名

Mass balance of the subpolar gyre: intergyre exchange and deep water inflow using GCM tracer experiments.

(亜寒帯循環の流出入バランス：GCMトレーサー実験による
gyre 間水塊交換と深層水の流入)

北太平洋亜熱帯循環と亜寒帯循環の間においては、他の海域とは異なる独特の方法で海水が移動しており、この交換を理解することは全球的な海洋循環場、物質循環、また南北熱輸送の理解において欠かせない事である。このような交換流が実際に生じていることは、既存データの解析によって提示されていた。先行研究によって提案された循環境界の間における水塊交換を可能にする各種メカニズムは、まず第一には Ekman 輸送とその補償流という考え方である。循環境界は偏西風が卓越する領域であり、それに応じて亜寒帯から亜熱帯へと向かう Ekman 輸送が生じる。質量保存の観点からは、この輸送と同量の水塊が何処かで亜熱帯から亜寒帯へ移動していなければならない。別の観点として東西密度勾配に伴う南北傾圧流があげられ、また海面混合層が東岸近傍で作る東向流がより下方で南下流となることも示されてきた。さらに海底まで延びる南北循環を含むと、全海洋深層循環の一端として存在する深層北上流が湧昇し、表層近くで南下する循環も欠かせない要素である。

本論文ではどの領域でどの程度の流量が交換されるか調べ、循環境界を横切る各メカニズムについて定量的な見積もりを与える事を目的とした。また、亜寒帯へ移動した水塊のその後の挙動についても、特に深層水の上昇に注目して、その移動経路を調べた。このような水塊移動を理解する為にはラグランジアン的視点が不可欠であり、GCM を理想的な条件で駆動して得た定常場に於て粒子追跡を行うというアプローチを用いた。GCM の条件設定は単純化されているが、上述の各交換メカニズムを再現することが十分可能であった。粒子の速度をモデルの grid データから補間する際には、従来の線形補間とは異なる、質量保存を満足する様な補間を行った。これによって、粒子の移動を質量の移動に換算することが可能となった。

初期に北緯 41 度の東西断面に存在する粒子の軌跡を追跡し、亜熱帯循環から亜寒

帯循環への主要な経路は

- (A) 亜熱帯の表層を經由した後に亜寒帯へ流入
- (B) 熱帯深層経由で亜寒帯へ移動し、亜寒帯の1000m以浅へ上昇

いっぽう亜寒帯から亜熱帯への主要な経路は、

- (C) 1000m以浅で表層Ekman輸送によって亜熱帯へ流入

これ以外の亜熱帯亜寒帯交換は

- (D) 熱帯深層から亜寒帯へ流入するが1000m以深で亜熱帯へ戻る深層循環であった。

Ekman輸送(C)の補償流として北上する量については、比較実験を行うことによって確かめた。そこでは循環境界でEkman輸送をゼロにするが、Ekman pumpingは基本実験と同じになる風応力を与えた。比較実験において得られた場で粒子追跡を行った結果、(A)の交換流はほぼ存在しなくなり、(B)の交換流がわずかに減少した。これにより、Ekman流の補償流は主に(A)、一部は(B)が担っている事が示された。

更に粒子が亜寒帯に移動してから辿る経路に関しても、興味深い知見を得た。表層で亜熱帯から亜寒帯へ移動した粒子は亜寒帯に滞在する時間が短く、亜寒帯循環の外縁部を数周する間に上昇し、表層のEkman層に達した後に亜熱帯へと輸送される。いっぽう深層で亜寒帯に移動した粒子は滞在時間が長く、回転しつつ上昇する間に亜寒帯の中心部へと徐々に移動する。結果として、深層の水塊が上昇する場所は亜寒帯の中心部に集中する傾向があることが示された。亜寒帯内に於ける水塊の平均滞在時間は(A)の水塊で18.6年、(B-1)の水塊で130年であった。

この研究で用いた数値モデルは既存のものであるが、申請者は粒子を流して、それを追跡する手法を非常に精密にした。そのことによって、気候変動に重要な影響をもつ海洋南北循環における主要なメカニズムを示唆したことが高く評価された。この研究結果によって示された南北循環量は、地球温暖化の鍵となる海洋炭素循環やその他の環境破壊物質の挙動と、地球環境の将来予測に貴重な情報である。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として熱心かつ真摯であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、申請者が博士(地球環境科学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。