

博士（地球環境科学）西川史朗

学位論文題名

A Study of Oceanic Mixed Layer Depth Front in
an Idealized Ocean GCM

(理想化された海洋大循環モデルを用いた海洋混合層フロントに関する研究)

学位論文内容の要旨

北半球亜熱帯循環域の北側には、海洋表層混合層の深さが北向きに急に深くなるフロント状の領域が存在することが知られており、混合層フロントと呼ばれている。過去の研究から、混合層フロントはモード水（低渦位水）の形成場所であり、亜熱帯反流の形成において重要な役割をしている可能性が指摘されている。本研究では、混合層フロントの形成メカニズムを理想化された海洋大循環モデルを用いて調べた。

まず、季節を混合層の最も深くなる晩冬期に固定した定常の場合について、混合層フロントの位置およびそこでのサブダクション過程について調べた。混合層フロントの位置は、亜熱帯循環において上層水平地衡流速ベクトルの向きが海面等密度線と平行となる位置と一致した。このことは、混合層フロントが南側のサブダクションの起こる領域と北側のサブダクションの起こらない領域の境界であることを意味する。混合層フロントでは、サブダクションの際、水粒子は海面等密度線を横切らない。混合層フロントでサブダクションされる水は、混合層フロントでの温度よりも高温の深い混合層領域から来る。深い混合層領域の水は東向きに移流されるにつれて冷やされ、流向が海面等密度線と平行となる混合層フロントにおいて温度が極小をとり、その後暖かい表層の下へサブダクションする。この混合層フロントにおけるサブダクション過程は、次のような混合層フロント形成のシナリオを与える。西岸付近において、西岸境界流による亜表層の暖水移流と海面冷却により深い混合層が発達する。暖水移流により海面水温は西ほど暖かくなっているため、深い混合層の水はジャイアにのって東向きに移流されるにつれ温度が下がり混合層は深くなる。流れの向きは東向きから次第に南向きになり、海面等密度線と平行となったところで海面水温の低下と混合層の発達は止まる。その後、海面水温は移流されてきた水の温度よりも高くなるので水は薄い成層の下へサブダクションされる。すなわち、深い混合層の水塊がその厚さを保って薄い成層した表層の下へサブダクションするので、サブダクションの場所では混合層深が急激に変化し、これが定常場における混合層フロント形成のメカニズムを与える。

次に、上述の定常モデルに簡単な季節変化を加え、季節変化がある場合の混合層フロントについて調べた。本研究では、海面水温の局所的時間変化と地衡流による移流の分布を

調べることにより、混合層フロントの季節変化のシナリオを以下のように考えた。混合層はおおむね晚冬期において最も深くなり、この最も深くなるときの混合層を冬期混合層と定義する。秋から冬にかけては、薄い表面成層が取り除かれて冬季混合層領域が拡大し、混合層フロントは徐々に南下する。冬から春にかけては、冬期混合層の上の表面に薄い成層が形成され、混合層フロントは後退する。晚冬期、表面成層が最も取り除かれて、混合層フロントは最も南の位置に来る。このとき、混合層フロントにおいては海面水温と混合層深の変化が一時的に止まるため、海面等温線に沿って混合層厚を持つ水がサブダクションするという過程が支配的に働き、これが冬期の混合層フロント構造をつくる。以上のシナリオは、季節変化のある場合も冬期の混合層フロントの形成は基本的には定常の場合と同様に説明されることを示唆する。そうだとすると、冬期混合層フロント形成の位置は混合層フロントの最も南に来るとき（晚冬期）の海面水温分布に敏感でなければならない。このことを確かめるため、晚冬期の海面水温分布を変えて混合層フロントの変化を見る実験を行い、海面水温分布の変化に対応した混合層フロントの変化が起こることを確かめた。

本研究から、混合層フロントの形成は海洋上層の地衡流循環場と（晚冬期の）海面密度場で決まっている（予想できる）可能性が示唆された。このことは、混合層深場と海面密度場を境界条件として考える場合に、これらが独立ではないことを示している。また、本研究は、混合層フロントの診断においては流れ場と密度場の気候値ではなく瞬間値を用いる必要があることを示唆する。

学位論文審査の要旨

主査 教授 久保川 厚

副査 教授 池田 元美

副査 教授 三寺 史夫

副査 助教授 須賀 利雄（東北大学大学院理学

研究科）

学位論文題名

A Study of Oceanic Mixed Layer Depth Front in an Idealized Ocean GCM

（理想化された海洋大循環モデルを用いた海洋混合層フロントに関する研究）

中緯度海洋の鉛直密度分布には水温躍層と呼ばれる構造がある。この水温躍層構造がどのようにして作られるかということに関しては、1980年代に通気水温躍層理論(Luyten et al. 1983)が提出され、それと、亜表層の流れの駆動機構である渦位一様化の理論(Rines and Young 1982)が海洋上層の構造を与える基本的な理論となっている。この通気水温躍層理論は、水温躍層構造には南北の海面密度傾度とともに混合層の深さ分布が重要であることを示す(Williams 1991等)。他方、数値実験では、海洋上層には混合層フロントと呼ばれる混合層が高緯度方向に急に深くなる構造が見られ、この混合層フロントからサブダクトされる鉛直一様水塊に伴う海洋上層構造が亜熱帯反流を駆動している可能性を示す理論(Kubokawa 1999)が提出され、また、現実の亜熱帯モード水等の形成における混合層フロントの重要性も指摘された(Xie et al. 2000)。さらに、近年の観測では、現実の海洋でも、シャープな混合層フロントがあることが見出されている。しかしながら、そのような混合層フロントの位置がどのようにして決まっているのか、また、何故そのような構造が生じるのかは不明のままであった。申請者は、理想化された海洋大循環モデルを用いてこの問題を扱った。

申請者は、まず、季節を混合層が最も深くなる晩冬期に固定した定常の場合について、混合層フロントの位置を調べ、混合層フロントの位置は亜熱帯循環において上層地衡流速度ベクトルの向きが海面等密度線と平行となる位置と一致することを示した。この位置はサブダクションの起こる領域とサブダクションの起こらない領域の境界である。モデル内の亜熱帯循環の海面密度は西岸境界流の熱移流により西では軽く、東に行けば東西に一様になる。他方、上層地衡流は時計周りの回転を示す。それ故、上層地衡流ベクトルと海面等

密度線がこの関係を満たす点は亜熱帯循環北部の各海面等密度線に一つずつ決まり、それを繋いだ線が混合層フロントになる。また、その成因に関しては、混合層フロントでは、水粒子は海面等密度線を横切らず、混合層内の水がその厚さを伴ったまま表層の薄い成層の下に入り込むので、混合層深がそこで不連続に変化すると説明した。これらのことより、混合層フロントは南側のサブダクションの起こる領域と北側のサブダクションの起こらない領域の境界であり、各密度面に着目すると、その密度面での通気領域の西端から混合層の低渦位水が亜表層に潜り込む形になっていることが分かる。

次に、申請者は、上述の定常モデルに簡単な季節変化を加え、季節変化がある場合の混合層フロントについて調べた。混合層は概ね晚冬期に最も深くなり、この最も深くなるときの混合層を冬期混合層と定義した。秋から冬にかけては、薄い表面成層が取り除かれて冬季混合層領域が拡大し、混合層フロントは徐々に南下する。冬から春にかけては、冬期混合層の上の表面に薄い成層が形成され、混合層フロントは後退する。晚冬期、混合層フロントは最も南の位置に来る。このとき、混合層フロント位置では海面水温と混合層深の変化が一時的に止まるため、海面等温線に沿って混合層厚を持つ水がサブダクションするという過程が支配的に働き、これが冬期の混合層フロント構造をつくる。すなわち、季節変化のある場合も冬期の混合層フロントの形成は基本的には定常の場合と同様に説明される。また、サブダクション期間(混合層水が永年水温躍層の下に潜り込む時期)は晚冬季の約1ヶ月であることも示し、この定常と同じ機構で作られる冬季混合層フロントが海洋亜表層への沈み込みに関して重要であることを示した。

上述のように、海洋上層構造の決定において重要な役割を果たす混合層フロントの位置と成因とサブダクションについて、本研究は明確な説明と描像を与えた。このような簡明な描像は、海洋上構造に関する理論的解釈の今後の発展に大きく寄与すると考えられるとともに、近年急速に観測データの増えている海洋上層構造や混合層分布および現実的な数値シミュレーション結果の解釈においても大変有用であると予想される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また、申請者が研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、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と判断した。