

## 論文の内容の要旨

論文題目：Frontogenesis and frontolysis in the Agulhas Return Current region  
(アガラス反転流域の水溫前線の強化・緩和過程)

氏名：大石 俊

### 1. 背景

従来、中緯度海洋は大気に対して受動的で、海洋が大気を強制する効果は小さいものとして考えられてきた。しかし、近年の衛星観測や数値モデルの発達に伴い、中緯度西岸境界流・続流域において、大量の乱流熱放出を伴う水溫前線が大気を強制することが明らかになってきた。従って、中緯度西岸境界流・続流域は大気場が海洋場を強制するとともに、水溫前線が大気場を強制する「中緯度大気海洋相互作用」領域として、現在、脚光を浴びている。しかし、中緯度大気海洋相互作用において重要な要素である水溫前線の強化・緩和過程の理解が抜け落ちている。そこで、本研究では、水溫前線を解像する高解像度の観測データおよび大気海洋結合モデルの積分結果を使用して、南インド洋南西部のアガラス反転流域の水溫前線の強化・緩和過程を定量的に調べた。この領域の水溫前線はアフリカ大陸から離れており季節風の影響が小さく、水溫前線に伴う大気海洋相互作用に着目することに適しているといえる。

### 2. 観測データを用いた混合層過程を通した海面熱フラックスによる水溫前線の緩和過程

観測データを用いた解析から、アガラス反転流域の水溫前線は ( $10^{\circ}$ – $70^{\circ}$ E,  $45^{\circ}$ – $40^{\circ}$ S) に位置し、その強度は  $4$ – $5^{\circ}\text{C } 100\text{km}^{-1}$  であることが明らかになった (図 1)。また、この水溫前線は南半球夏季 (冬季) にわずかに弱く (強く) なる季節性を持っていた。この水溫前線の強化・緩和過程を調べるために、混合層水溫の熱収支解析を行った。その結果、海

面熱フラックスによる水温前線の緩和作用と海洋項による水温前線の強化作用が釣り合うことで、この水温前線が一年を通して維持されていることが明らかになった。海面熱フラックスによる緩和作用について詳細に調べたところ、以下で述べるように、海面熱フラックスは混合層過程を通すことで、南半球夏季（冬季）に強く（弱く）水温前線を緩和する複雑なプロセスが明らかになった（図 2）。

前線の北側（南側）の暖水（冷水）域では、大きな（小さな）海面飽和比湿が生じる。一方、大気擾乱の通過に伴う大気比湿の南北移流により、大気比湿の南北差は小さくなる。故に、水温前線の北側（南側）で大気・海洋間の比湿差が大きく（小さく）なり、潜熱放出が大きく（小さく）なる。

南半球夏季において、短波放射は海面を強く加熱する。しかし、水温前線の北側の大きな（小さな）潜熱放出により、海面加熱が北側（南側）で弱く（強く）なり、水温前線が緩和される（図 2a）。これまではこの海面熱フラックスの効果のみが着目されていたが、実際には、混合層過程も考慮する必要がある。ここで、強い海面加熱時に海洋上層の成層が強化され、混合層深度は浅くなる性質を持つ。従って、加熱が弱い前線の北側の混合層が南側に比べて厚くなる。海面加熱に対して、北側の厚い混合層は暖まりにくく、南側の混合層は暖まりやすいので、水温前線の緩和作用が強化される。さらに、夏季の混合層は季節的に薄いため、海面熱フラックスへの応答が増幅され、この緩和作用はより強化される。

一方、南半球冬季では、前線の北側（南側）で潜熱放出が大きい（小さい）ために、強い（弱い）海面冷却が生じ、水温前線が緩和される（図 2b）。ここで、海面冷却が強いと

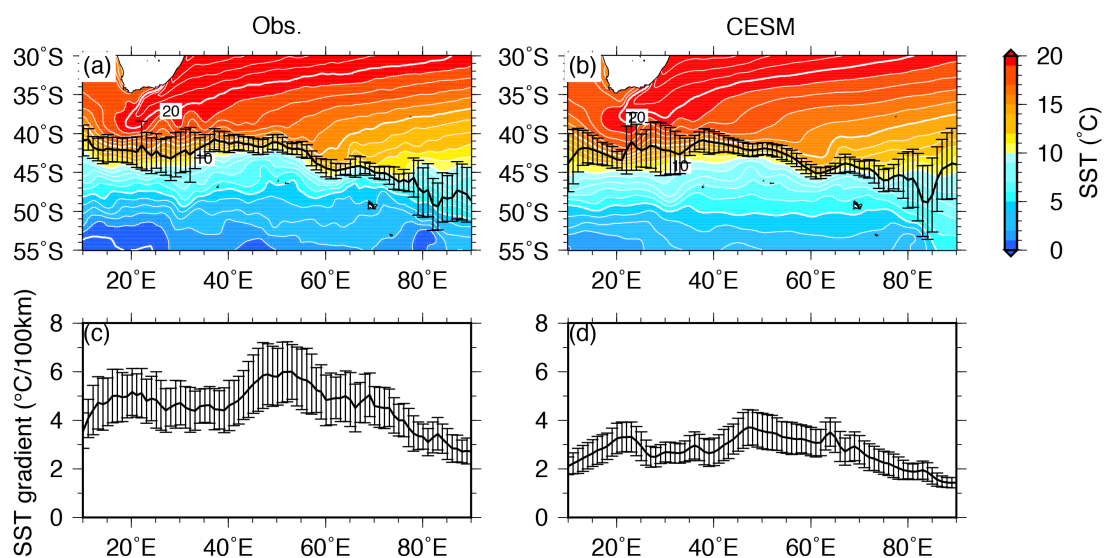


図 1. **a** 観測, **b** 高解像度大気海洋結合モデルの水温前線の位置の気候値. **c, d** (a), (b)と同様. ただし、水温前線の強度. エラーバーは解析期間における標準偏差を表す. (a), (b)の色・等値線は海面水温の気候値を表す. 細い（太い）等値線の間隔は 1（5）°C.

海洋内部の鉛直対流が活発になり、混合層深度の深化速度（エントレインメント速度）が大きくなる。そのため、北側の強い海面冷却は南側に比べて大きなエントレインメント速度を生じさせ、混合層をより厚くする。海面冷却に対して北側の厚い混合層は冷やされにくく、南側の薄い混合層は冷やされやすいので、緩和作用は弱まる。さらに、冬季の混合層は季節的に厚く、海面熱フラックスへの応答が減衰するので、この緩和作用はより弱くなる。

### 3. 高解像度大気海洋結合モデルを用いた海洋項による水温前線の強化過程

海洋内部の流速観測数は十分でないため、観測値を用いた解析では海洋項を残差として見積もっていた。そこで、高解像度大気海洋結合モデル CESM の積分結果を使用して、アガラス反転流域の海洋項による水温前線の強化過程を詳細に調べた。なお、CESM は、強度、位置、季節性などの水温前線の主な特徴、および水温前線帯での混合層深度をよく再現していた（図 1）。その結果、海洋項による水温前線の強化過程は、水平移流の寄与が支配的で、下層からの冷水の取り込み（エントレインメント）の寄与は小さかった。

水平移流による強化過程を詳細に調べたところ、前線に沿う強い流れの寄与は無く、前線に向かって合流する弱い流れが支配的な寄与を持つことが明らかになった（図 2）。この合流する流れにより、北側（南側）でより暖かい（冷たい）水が前線に向かうように移流され、水温前線が強化されていた。また、この合流する流れは、南半球夏季（冬季）に強く（弱く）なる季節性をもつため、水平移流による強化作用が夏季（冬季）に強く（弱く）なる季節性が生じていた。

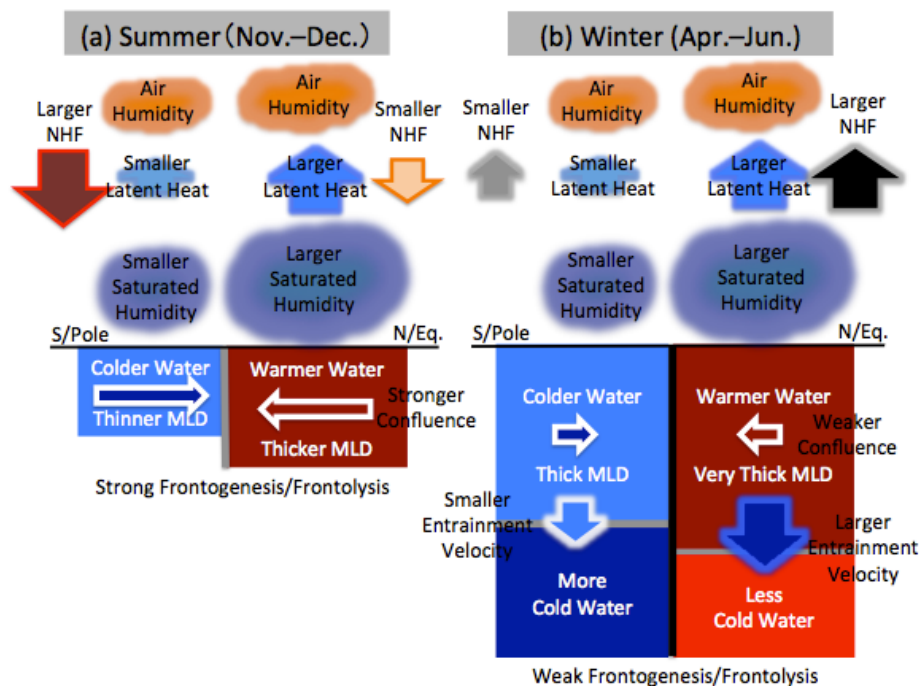


図 2. a 南半球夏季, b 冬季における  
アガラス反転流域の水温前線の強化・緩和過程の概略図。

エントレインメントについても詳細に調べた結果、南側と比較して北側でエントレインメント速度が大きく冷水を多量に取り込むため、エントレインメント速度の南北勾配は緩和作用として働く（図 2b）。一方、南側と比べて北側の混合層はより厚く、下層との水温差もより小さいために、エントレインメントにより冷やされにくい。よって、混合層深度および混合層と下層の水温差の南北勾配は強化作用として働く。従って、これら 3 種類の要素が前線強化・緩和作用として働き、相殺する傾向をもつために、エントレインメントは前線強化・緩和に対して大きな寄与を持たない。

合流する流れについて力学的な洞察を得るために、渦度収支解析を行った。その結果、前線を横切る方向に合流する平均流による前線の北側での高気圧性（低気圧性）の渦位移流が、前線を横切る方向の擾乱場・平均場の相互作用、および前線に沿う平均流による低気圧性（高気圧性）の渦度移流とつり合うことが明らかになった。

#### 4. まとめ

以上のように、海面熱フラックスによる緩和作用と水平移流による強化作用がおおよそつり合うことで、アガラス反転流域の水温前線は一年を通して維持されていた。本研究によって、混合層過程が海面熱フラックスの緩和作用に対して重要な役割を果たしていることが明らかになった。もし混合層過程を考慮せず、混合層深度が時空間的に一様であると仮定すると、海面熱フラックスによる緩和作用の季節性が消失し、水温前線は夏に強く冬に弱くなるという正反対の季節性を持つことになる。また、本成果は、計算機の発達により高解像度化が進み、前線を解像しつつある大気海洋結合モデルの相互比較プロジェクト CMIP6 に対し、混合層深度の再現性の重要性を提言するものでもある。さらに、本研究は前線を横切る方向に合流する弱い流れが前線強化に対して支配的な役割を持つことを明らかにした。これまで中緯度西岸境界流・続流域では、西岸境界流が暖水を輸送することで水温前線が形成されていると考えられてきた。西岸境界流域では西岸境界流が前線を横切るように南北方向に暖水を移流しているが、西岸境界続流域では西岸境界流は前線に沿うように流れるため暖水を移流することはなく、前線を横切る方向の弱い南北方向の流れが前線を強化する役割を持つことが本研究により指摘された。

本研究は、これまで理解が抜け落ちていた水温前線の強化・緩和過程を定量的に明らかにしたものであり、中緯度西岸境界流・続流域での中緯度大気海洋相互作用研究に大きく貢献するものである。また、本研究で使用した解析手法は、世界各地の水温前線に対して適用することや経年・十年規模の前線変動要因に関する研究に応用することが可能で、大気海洋相互作用のさらなる理解に貢献することが期待される。