

Lower Atmospheric Response to Extratropical Ocean Front

(中緯度海洋フロントに対する下層大気の応答)

学位論文内容の要旨

中緯度帯における海盆スケールの海上風速と海面水温の関係は、時間変動場において海上風速が強い（弱い）領域で海面水温が低い（高い）という空間構造によって特徴付けられてきた。これは風速変化に伴う潜熱放出が海面水温の変化に大きく寄与しており、大気から海洋への強制が中緯度帯において支配的であることを示唆している。一方、近年の高解像度人工衛星観測データによると、中緯度海流フロント域の一つである黒潮続流においては、海面水温フロントの冷（暖）水側で海上風速が弱い（強い）という空間構造の存在が明らかになりつつある。このような空間構造は潜熱放出の原理では説明することができず、黒潮続流において海上風速が海面水温の分布によって変調を受けていることを示唆している。しかしながら、中緯度帯独特の強い大気強制や海上での観測データが少ないという問題点もあることから、中緯度海洋が大気へ及ぼす影響については時間変動の場だけではなく気候学的な場についても多くの不明な点が残されている。そこで本研究では、中緯度海流フロントに伴う大気の応答を調べるために以下2つの解析を行なった。

第1の解析では、中緯度海流フロント域の1つであるブラジル海流－マルビーナス海流フロントに対して、高解像度の人工衛星データと船舶観測データを用いて海面付近の安定度と海上風速の関係を調べた。南大西洋のアルゼンチン沖(南緯 35–50 度)では岸に沿って大陸棚が広がっており、亜寒帯循環系のマルビーナス海流がその斜面に沿って北上している。それに対し、沖合では亜熱帯循環系のブラジル海流が南下しているため、それらの海流の間には明瞭な海面水温フロントが1年中形成され、その東西に海面水温の暖水舌と冷水舌構造が卓越している。それに対して、海面付近の風速場は冷水側で風速が弱く、暖水側で風速が強くなっており、特に冷水側においては風速の極小域が海面水温の極小域と一致している。この海面水温と海上風速の関係は「風が強いと大気から海洋への熱放出が促進され、それにより水温が冷える」という潜熱放出の原理では説明がつかないため、海面水温が風速場に影響を及ぼしていることを示唆している。さらに、マルビーナス海流とブラジル海流が作り出す海面水温フロントは南北方向に伸びており、気候学的な西風と直交している。そのため、海上を吹く中緯度特有の西風はこの海面水温フロント上で発散している。このような特徴は1年を通して見られ、黒潮やメキシコ湾流に伴う海面水温フロントでは見られない特徴である。

海面水温が風速を変化させるメカニズムの1つとして、大気の静的安定度の変化による鉛直混合メカニズムが熱帯域に対する過去の研究によって指摘されている (Wallace et al. 1989)。海面付近の静的安定度は海面水温と海上気温の差 (SST-SAT) が大きい（小さい）ほど不安定（安定）になるものの、人工衛星では気温が測定できないため、本研究では船舶資料から得られた SST-SAT を作成した。SST-SAT の分布は、暖かいブラジル海流（冷たいマルビーナス海流）の上で大きく（小さく）、大気下層は不安定（安定）になっている。大気が不安定な海域では鉛直混合

が起りやすいため、運動量が大きい上層の空気が下層に下りてきて海上風を加速するのに対し、安定な海域では鉛直混合が起りにくいいため海上風の加速は小さいと考えられる。

さらに本研究では経年変動の場においても海洋から大気への強制が存在することを示した。これまでの研究では中緯度帯における支配的な大気強制のため、経年変動の場に関しては海面水温偏差と海上風偏差の間には負の相関関係のみが提示されてきた。それに対してこの海面水温フロント上では海面水温偏差と海上風偏差が互いに正の有意な相関を示している。さらに船舶による海上気象要素データを用いて、このフロント上で平均した海上風速、および SST-Ta の偏差の時系列は互いに有意な正の相関を示している。これは経年変動の場においても気候学的な場と同様に海面水温が大気下層の鉛直安定度を変化させ、それによって鉛直混合の強さが変化して下層風の加減速を引き起こすことを示唆している。

第2の解析では、黒潮続流域において GPS ラジオゾンデ観測を行い、海面水温フロント近傍での気圧・気温・湿度・風向風速の鉛直構造を調べた。北緯 30 - 37 度の GPS ラジオゾンデ観測データを用いて、SST-SAT が 1°C よりも小さいときを安定、 5°C よりも大きいときを不安定として、仮温位と風速に対してコンポジット解析を行った。海面付近の静的安定度の指標である SST-SAT は、観測期間を通して海面水温の変化を反映するように海面水温が高い（低い）海域で SST-SAT も大きくなるという正の相関関係が見られた。

SST-SAT $< 1^{\circ}\text{C}$ のときは仮温位が高度とともに増加しており大気境界層が安定な状態を示しているのに対し、SST-SAT $> 5^{\circ}\text{C}$ のときは仮温位が高度約 600m までほぼ一様になっている。仮温位の鉛直変化率に違いが見られたのは高度 1300m（約 850 hPa）までだったことから、海面付近の大気安定度の影響がその高度まで及んでいたと考えられる。一方、風速の鉛直分布は高度約 600m よりも下層で安定度によって差が見られ、SST-SAT $< 1^{\circ}\text{C}$ （SST-SAT $> 5^{\circ}\text{C}$ ）のときは風速の鉛直シアが大きく（小さく）なっている。その結果、高度 1500m の風速を基準値としてみた海上風速は SST-SAT $> 5^{\circ}\text{C}$ のときの方が SST-SAT $< 1^{\circ}\text{C}$ のときよりも約 4 m s^{-1} 大きくなっている。

今回の観測によって得られた風速と仮温位の鉛直分布は、黒潮続流において鉛直混合メカニズムが作用していることを支持している。大気の安定度が大きい（小さい）場合は大気境界層内の鉛直混合が抑制（促進）され、運動量の混合も抑制（促進）される。その結果として、海上風速は周辺よりも小さく（大きく）なり、風速の鉛直シアは大きく（小さく）なると考えられる。それゆえ、本研究において示された中緯度海流フロントにおける観測事実は、大気と海洋の相互作用が一方方向ではなく、双方向であることを示唆している。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 谷 本 陽 一
副 査 教 授 池 田 元 美
副 査 教 授 藤 吉 康 志
副 査 教 授 江 淵 直 人
副 査 竹 内 謙 介

(海洋開発研究機構地球環境観測研究センター
プロジェクトディレクター)

学 位 論 文 題 名

Lower Atmospheric Response to Extratropical Ocean Front

(中緯度海洋フロントに対する下層大気の応答)

中緯度大気海洋系に対する従来の概念では、潜熱放出を伴う大気から海洋への強制効果が支配的であると考えられてきた。この場合の海面水温と海上風速の関係は負の相関関係として特徴づけられる。一方、近年の高解像度人工衛星観測データによると、黒潮続流では海面水温フロントの冷(暖)水側で海上風速が弱い(強い)という正の相関関係を示すことが指摘されており、海上風速が海面水温の分布によって変調を受けていることを示唆している。しかしながら、中緯度海洋がどのようなプロセスを介して大気に影響を与えているかについてはまだ明らかではない。そこで申請者は中緯度海流フロントに伴う下層大気の応答を調べるために以下2つの解析を行なった。

第1の解析では、中緯度海流フロント域の1つであるブラジル海流－マルビーナス海流フロントに対して、高解像度の人工衛星データと船舶観測データを用いて海面付近の安定度と海上風速の関係を調べた。この海域では冷たいマルビーナス海流側で海面付近の風速が弱く、暖かいブラジル海流側で風速が強くなっている。この海面水温と海上風速の関係は潜熱放出の原理では説明がつかないため、海面水温が風速場に影響を及ぼしていることを示唆している。このような特徴は1年を通して見られ、黒潮やメキシコ湾流に伴う海面水温フロントではある特定の季節しか見られない特徴である。海面水温が風速を変化させるメカニズムの1つとして、大気の静的安定度の変化による鉛直混合メカニズムが熱帯域に対する過去の研究によって指摘されている (Wallace et al. 1989)。海面付近の静的安定度は海面水温と海上気温の差 (SST-SAT) が大きい(小さい)ほど不安定(安定)になるものの、人工衛星では気温が測定できないため、申請者は船舶資料から得られた SST-SAT

を作成した。SST-SAT の分布は、暖かいブラジル海流（冷たいマルビーナス海流）の上で大きく（小さく）、大気下層は不安定（安定）になっている。大気が不安定な海域では鉛直混合が起こりやすいため、運動量が大きい上層の空気が下層に下りてきて海上風を加速するのに対し、安定な海域では鉛直混合が起こりにくいため海上風の加速は小さいと考えられる。

さらに申請者は経年変動の場においても海洋から大気への強制が存在することを示した。過去の研究では中緯度帯における支配的な大気強制のため、経年変動の場に関しては海面水温偏差と海上風偏差の間には負の相関関係のみが提示されてきた。それに対してこの海面水温フロント上では海面水温偏差と海上風偏差が互いに正の有意な相関を示している。さらに船舶による海上気象要素データを用いて、このフロント上で平均した海上風速、および SST-SAT の偏差の時系列は互いに有意な正の相関を示している。これは経年変動の場においても気候学的な場と同様に海面水温が大気下層の鉛直安定度を変化させ、それによって鉛直混合の強さが変化して下層風の加減速を引き起こすことを示唆している。

第2の解析では、黒潮続流域において GPS ラジオゾンデ観測を行い、海面水温フロント近傍での気圧・気温・湿度・風向風速の鉛直構造を調べた。北緯 30 - 37 度の GPS ラジオゾンデ観測データを用いて、SST-SAT が 1°C よりも小さいときを安定、 5°C よりも大きいときを不安定として、仮温位と風速に対してコンボジット解析を行った。海面付近の静的安定度の指標である SST-SAT は、観測期間を通して海面水温の変化を反映するように海面水温が高い（低い）海域で SST-SAT も大きくなるという正の相関関係が見られた。

SST-SAT $< 1^{\circ}\text{C}$ のときは仮温位が高度ともに増加しており大気境界層が安定な状態を示しているのに対し、SST-SAT $> 5^{\circ}\text{C}$ のときは仮温位が高度約 600m までほぼ一様になっている。仮温位の鉛直変化率に違いが見られたのは高度 1300m（約 850 hPa）までだったことから、海面付近の大気安定度の影響がその高度まで及んでいたと考えられる。一方、風速の鉛直分布は高度約 600m よりも下層で安定度によって差が見られ、SST-SAT $< 1^{\circ}\text{C}$ （SST-SAT $> 5^{\circ}\text{C}$ ）のときは風速の鉛直シアが大きく（小さく）なっている。その結果、高度 1500m の風速を基準値としてみた海上風速は SST-SAT $> 5^{\circ}\text{C}$ のときの方が SST-SAT $< 1^{\circ}\text{C}$ のときよりも約 4 m s^{-1} 大きくなっている。

今回の観測によって得られた風速と仮温位の鉛直分布は、黒潮続流において鉛直混合メカニズムが作用していることを支持している。大気の安定度が大きい（小さい）場合は大気境界層内の鉛直混合が抑制（促進）され、運動量の混合も抑制（促進）される。その結果として、海上風速は周辺よりも小さく（大きく）なり、風速の鉛直シアは大きく（小さく）なると考えられる。それゆえ、申請者が示した中緯度海洋フロントにおける観測事実は、大気と海洋の相互作用が一方方向ではなく、双方向であることを示唆している。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また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申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。