

論文の内容の要旨

論文題目

Potential Importance of Midlatitude Oceanic Frontal Zones for the Annular Variability in the Tropospheric Westerlies and Its Coupling with the Stratospheric Variability

(対流圏東西風の環状モード変動とその成層圏変動との結合に
対する中緯度海洋前線帯の潜在的重要性)

氏名 小川 史明

中緯度海洋前線帯は、中緯度における暖流と寒流の合流域であり、強い水温勾配および地表気温勾配を伴っている。南北幅は狭いものの、この海域は他の中緯度海域が示す大気変動に対する受動的な性質とは本質的に異なり、中高緯度対流圏大循環の形成に対して能動的に影響し得ることが近年の研究から明らかになりつつある。観測データや数値実験による先行研究では、移動性擾乱活動の活発域であるストームトラックとそれら擾乱により駆動される西風の極前線ジェットは、気候平均状態として中緯度海洋前線帯の近傍に形成され、そこでは強い地表気温勾配が擾乱活動を活発化させていることが示されている。一方、偏西風の長周期変動として中高緯度域の天候に深く関わる「環状モード変動」は極前線ジェットの南北変動として認識されてきたものの、海洋前線帯による影響に関心が払われたことはこれまで殆どなく、海洋前線帯の勾配を緩和させた場合に冬季の環状モード変動に変調が生じ得ることが数値実験による研究で指摘されているのみであった。

さらに、人為的影響により 20 世紀終盤に南極成層圏で生じたオゾン濃度の低下による「オゾンホール」の形成とそれに付随した低温化への応答として、南半球中高緯度の広い範囲で統計的に有意な対流圏西風の強化が観測されている。その水平構造は南半球環状モード(Southern Annular Mode, SAM)に類似していることが知られており、それに対して南大洋に存在する海洋前線帯が影響を与える可能性があるものの、環状モードを介した成層圏・対流圏結合変動における海洋前線帯の重要性については、これまで全く議論されてこなかった。

そこで本研究の目的は、中緯度の対流圏大循環の形成と変動において、従来看過されてきた中緯度海洋前線帯が与え得る影響について包括的に探求することである。現実の南半球を模して、大気大循環モデル(AGCM)の下方境界条件として東西一様な海面水温分布を与える「水惑星実験」にて、水温勾配の緯度や強度を系統的に変えることを通じて、対流圏環状モード変動の力学特性やその成層圏循環変動との結合に対し、中緯度海洋前線帯が対流圏波動擾乱を介して能動的に与え得る様々な影響の解明を目指す。

本論文の前半では、海洋前線帯の緯度が冬季対流圏環状モードの特徴をどれほど強く規定し得るかについて探求した。用いた水惑星実験においては、季節を冬季に固定し、中緯度の南西インド洋で観測される海面水温の南北分布を AGCM の境界条件として東西一様に与えた。この際、現実には南緯 45 度に位置する顕著な海洋前線帯を人為的に 5 度ずつ南北にずらして与えたり、南緯 40 度以南の水温を人為的に上げて前線帯に伴う水温勾配を消去したりして、数通りの異なる水温分布を与えた。

海洋前線帯が中高緯度に位置する場合、AGCM に現れた極前線ジェットの東西一様な長周期変動は海洋前線帯の緯度に強い依存性を示した。それは、東西平均東西風の変動のうち最大の分散を説明する偏差パターンとして統計的に抽出された冬季環状モードの性質にも反映されていた。環状モードの正の位相においては、極前線ジェットの軸が海洋前線帯の緯度に強く依存し、そのやや高緯度側に位置する傾向を示した。海洋前線帯近傍にはストームトラックを伴っており、活発な移動性擾乱活動に伴う西風運動量極向き輸送が極前線ジェットの西風を維持するよう働いていた。対照的に、環状モードの負の位相においては、海洋前線帯の緯度に依らず極前線ジェットは南緯 38 度付近に位置し、海洋前線帯がない場合の気候平均状態に良く対応していた。対流圏下層のストームトラックの緯度の海洋前線帯に対する依存性も、正の位相の場合に比べて著しく弱まった。すなわち、環状モードの負位相ではストームトラックと渦駆動の極前線ジェットの緯度は大気内部力学で決められており、大気下方の境界条件である水温勾配の影響が無視できるほど弱まることが示唆される。従って、少なくとも海洋前線帯が中高緯度に位置する場合の冬季環状モードは、中高緯度の対流圏大循環が下方境界条件としての水温前線の強い影響を受けるレジ

ームと大気内部力学で主に規定されるレジームとの間をゆらぐことの現れとして解釈できる。実際、海洋から大気への乱流顕熱フラックスの海洋前線帯での南北勾配は、環状モードの正（負）の位相で強（弱）まった。これは、海洋前線帯を挟んだ顕熱供給の南北差が移動性擾乱の頻繁な発達を促し、極前線ジェットの駆動にとって重要なことと整合的である。水惑星実験から得られた冬季環状モードの解釈は、極前線ジェットが亜熱帯ジェットから分離される”ダブルジェット”レジームと、極前線ジェットが弱まり亜熱帯ジェットだけが明瞭な”シングルジェット”レジームの間の遷移として環状モードが現れるという先行研究の解釈とも矛盾しない。寧ろ、これらのレジームが海洋前線帯の対流圏循環に対する影響が強いレジームと弱いレジームに対応することが明らかとなった。

水惑星実験において環状モードの極性反転として表れた”レジーム”間の遷移は、観測される冬季 SAM と整合的に、長周期の波状擾乱によって引き起こされていた。遷移イベントは、東西一様な西風強制というよりも、寧ろ準停滞性ロスビー波束の射出に伴う局在化した西風強制で引き起こされていた。一方、短周期擾乱からのフィードバックは環状モードの極性を変えるのではなく、それを維持する役割をしていた。

さらに、本研究の解釈は、冬季 SAM における東西一様な偏差に重畳する海盆間での南北構造の差異を理解するために有用である。各海盆で東西平均した対流圏下層の西風軸は、SAM の負位相にはいずれも南緯 42 度付近に位置する一方、正位相では海洋前線帯の緯度の差異に対応し、西風軸は南太平洋では南大西洋・インド洋に比べ 10 度も高緯度側に位置する。これらの特徴は水惑星実験の結果と良く対応するだけでなく、冬季南半球の気候平均状態は両レジームの重ね合わせと再解釈することも可能である。

上記とは対照的に、水惑星実験において海洋前線帯が亜熱帯（緯度 30 度や 35 度）に位置する場合、環状モード変動はレジーム性を殆ど示さず、極前線ジェットの気候平均状態周りの南北摂動として現れる。これは現実の冬季南半球では観測されないが、海洋前線帯を除去した実験での環状モード変動の特徴に似る。その要因としては、ハドレー循環の下降運動によって亜熱帯海洋前線帯に沿った擾乱の傾圧的発達が抑制される傾向が考えられる。

論文の後半では、別の水惑星実験を用いて、大気循環の対流圏・成層圏鉛直結合に対する海洋前線帯の潜在的な重要性を評価した。具体的には、人為起源の成層圏オゾン減少に対する対流圏循環の応答が海洋前線帯の存在にどの程度依存するのか調査した。その結果、20 世紀終盤に南極上空で観測されたようなオゾン減少が水惑星実験において与えられた場合、東西一様な海洋前線帯が中緯度であれば対流圏の波活動が有意に応答して東西風偏差を形成し、実際に観測されたような夏季対流圏の西風強化が再現されるのに対し、その水温勾配を緩和するとこうした現実的な応答が現れないことが分かった。この際、オゾ

ン減少への応答としての成層圏西風強化が対流圏にまで及ぶ過程は、自励的な変動としての成層圏東西風の年々変動が対流圏に及ぶ過程と本質的に同様と考えられる。実際、水惑星実験における対流圏の東西一様な年々変動としての環状モードは、海洋前線帯が存在する場合は観測される SAM と整合的な南北構造を示す。対照的に、前線帯の水温勾配を緩和すると対流圏の波活動が弱まり、中緯度・亜寒帯域の西風が弱化するのに伴い年々変動としての環状モードの南北構造は著しく歪められ、成層圏の変動との結合が著しく弱まったと解釈できる。従って、成層圏オゾンの減少で強制された東西風偏差の対流圏への下方伸展に対して、海洋前線帯が対流圏波活動の活発化と西風強化を介した対流圏・成層圏の環状モードの結合の強化を通じて下支えしていることが示唆される。ただし、成層圏の自然変動に伴う対流圏擾乱活動の変調は、オゾン減少に対する応答として現れるものと同様に西風を強制する一方で、それを引き起こす擾乱活動の変調自体はやや異なっており、その解釈は今後の重要な課題であると考えられる。しかしながら本研究は、これまで活発に議論されながら十分な理解が為されてこなかった、成層圏オゾン減少に対する対流圏の気候応答のメカニズムにおいて、今まで完全に無視されてきた海洋前線帯が実は極めて重要であり得るということを初めて示したものである。

今回の研究は、中高緯度の気候大循環に対する中緯度海洋前線帯の重要性の把握において大きな進歩をもたらした。これまでの多くの研究で、中緯度海洋前線帯が中高緯度大気のスームトラックや極前線ジェットの気候平均状態に対して重要であることは示されていた。本研究ではさらに、対流圏中高緯度域に卓越する長周期変動としての東西一様な環状モード変動とそれを介した成層圏・対流圏結合変動、そして環状モードとして現れる長期変化に対しても、中緯度海洋前線帯の水温勾配の影響が考慮されなければならないことを初めて明らかにした。これらの新しい観点は、中高緯度対流圏大循環の根本的描像を理解する上で重要な貢献をなし得るものである。また、数値気候モデルにおいて海洋前線帯を適切に表現することが、環状モード変動の表現や、気候の再現性、信頼性の高い気候の将来予測に対しても重要であることが示唆される。