

博士（地球環境科学） 稲 津 將

学 位 論 文 題 名

GCM Response of the Extratropical Atmosphere
to Tropical and Extratropical SST Forcings

(GCM における熱帯および中緯度の
海面水温強制に対する中高緯度大気の応答)

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

北半球冬季、上部対流圏に存在する亜熱帯ジェット気流には、東アジアと北米東部にジェットコアが存在し、そこで風速が極大となる。このようなジェット気流の東西非一様性に対応して、中高緯度には東西波数2または3の定常波動が存在する。また、中緯度の傾圧渦活動が盛んな領域として定義されるストームトラックは、ジェットコアの下流域の極側に局在化している。これらの循環場の東西非一様性の原因は、大気の下部境界条件である地形、海陸分布や、熱源の東西非一様性にあると考えられている。しかし、これらの強制力の中で熱源分布は、大気循環を通して決定されるため、気候形成に及ぼす影響は詳しく分かっていない。本研究では、偏西風ジェットコア、中高緯度の定常波動、およびストームトラックの形成に及ぼす熱源の影響を解明するために、水平解像度T42、鉛直20層のCCSR/NIES大気大循環モデルにおいて、熱帯または中緯度の海面水温(SST)分布を理想的に与えて長時間積分を行い、その結果について詳しく解析を行った。

本研究では、まず、日本上空に顕著にみられる偏西風ジェットコアの形成に対する熱帯のSSTの寄与を調べた。これまでの研究で、ヒマラヤ山脈やロッキー山脈などの地形分布が、亜熱帯ジェットの東西非一様性の形成に大きな影響を与えることは示されているが、SST分布や海陸分布の効果といった熱源分布が持つ効果については十分な理解は得られていない。そこで、熱源分布として特に重要な熱源として特に重要と思われる、熱帯のSST分布と中緯度の海陸配置の寄与をそれぞれ独立に抽出し比較できるように、次の2つの実験を行った。まずは、熱帯のSST分布に東西波数1の偏差成分を与えた水惑星実験、他方は、ユーラシア大陸を模した、北緯20度以北の半分の面積を占める標高0メートルの大陸を置き、SST分布を東西一様に与えた実験である。後者では、中高緯度の地表面気温に大きな東西非一様性を生じるにもかかわらず、上層の定常波の振幅は小さい。それに対して、前者では非常に顕著な亜熱帯ジェットコアが熱帯の暖水域の北側に形成された。すなわち、亜熱帯ジェットコアの形成にとって重要な熱源は、中緯度における海陸分布ではなく、熱帯のSST分布であることがわかった。

次に、山岳分布を含む各地表面条件によって中高緯度で励起される定常波動の特徴とその励起メカニズムを明らかにするため、理想化大気大循環モデル実験の結果について詳しい解析を行った。理想化した山岳が励起する定常波動は中高緯度で非常に大きい振幅を持ち、かつ成層圏へ鉛直伝播する特徴を持っていた。また、理想化した海陸分布が励起する定常波動は、高緯度域にのみ存在し、振幅も小さい。一方、熱帯のSST分布は亜熱帯・亜

寒帯にも、大振幅の定常波動を、以下のようなプロセスで励起することが示された。まず、熱帯域の SST が高い領域で、局的にハドレー循環が強くなり、極へ向かう強い発散風をもたらす。この発散風に伴う惑星渦度の南北移流と相対渦度の東西移流が釣り合って、亜熱帯域に高気圧性循環が生じる。さらに、高気圧性循環の極側では、発散風に伴う渦管の伸縮と相対渦度の東西移流が釣り合い、低気圧性循環が生じる。亜熱帯ジェットコアは、この高気圧性循環と低気圧性循環によって形成される。また、熱帯の SST 分布に対する中緯度大気の応答は非線形的な特徴を持つことも示された。

さらに本研究では、熱帯および中緯度の SST 分布に対する中緯度ストームトラックの応答についても調べるために、太平洋の中緯度 SST 分布を模して、SST の東西偏差成分として中緯度域での SST 南北勾配を、東西波数 1 で与えた水惑星実験と熱帯 SST 分布を与えた水惑星実験を比較した。熱帯の SST 分布を与えた実験では、現実大気のように、亜熱帯ジェットコアの下流に東西方向に局在化したストームトラックが出現した。それに対し、中緯度の SST 分布を与えた実験では、大振幅の定常波は存在しないにもかかわらず、中緯度域における SST 南北勾配が大きい経度帶の大気下層の傾圧度が大きくなり、その下流域でストームトラックは顕著に局在化した。これよりストームトラックの局在化は、大気下層の西風鉛直シアーの東西非一様性とは密接に関連しているが、大気上層の定常波動は必ずしも関連しないことが示された。

次に、本研究では、中緯度域におけるどのような SST 分布がストームトラックを局在化させるのに最も効果的であるかを明らかにし、また、その局在化メカニズムを解明するため、東西波数 1 の SST 東西偏差を北緯 30 度、40 度、50 度で与える 3 種類の水惑星実験 (M30, M40, M50) を行った。その結果、M30 の実験で、もっとも効果的にストームトラックが局在化することがわかった。一方、M50 では、ストームトラックが存在する緯度帶である北緯 40 度付近に、M30 と同様な SST 南北勾配の東西非一様性が存在するにもかかわらず、ストームトラックは局在化しない。実験 M40 でも、ストームトラックは局在化しなかった。以下で説明するように、総観規模擾乱から定常波動へのフィードバック機構により、ストームトラックがはじまる経度帶で大気下層の鉛直シアーが維持されることが原因であることが明らかとなった。すなわち、M30 では、SST の南北勾配の東西非一様性が大きな緯度帶は北緯 40 度付近であり、それはストームトラックが存在する緯度帶と一致する。したがって、SST 南北勾配の変化に伴って大気下層の傾圧度が変化するため、総観擾乱の活動度も東西方向に変化する。一方、北緯 30 度付近の SST の東西変化は蒸発量の東西変化を生じ、それは低気圧活動に伴う降水量の東西変化をもたらす。このため、非断熱加熱分布も東西非一様となり、定常波が励起されると期待される。実際、時間平均した熱力学方程式の収支を計算したところ、ストームトラック域で極大となる非断熱加熱は大部分は、温位の東西移流と釣り合うが、一部は断熱冷却と釣り合う。その結果、地表付近に発散場の東西偏差成分をもたらし、それに伴う渦管の伸縮が地表面摩擦と釣り合うように、ストームトラックがはじまる経度帶の大気下層の高低気圧循環が形成される。一般に、傾圧性波動の発達は西風鉛直シアーの減少をもたらすが、この高低気圧循環によって、大気下層の西風鉛直シアーが維持され、ストームトラックが局在化するのである。一方、実験 M50 では、SST 自体の絶対値が小さいため、蒸発量の東西変化が生じない。また、実験 M40 では、SST 南北勾配が大きい緯度帶がストームトラックが存在する緯度帶と一致しない。このため、この 2 つの実験では、上記のフィードバック機構が働かず、ストームトラックは局在化しないと理解できる。一方、過去の研究においては、移動性擾乱の運動量・熱フラックスに注目して、ストームトラックと時間平均循環との相互作用が調べられてきた。本研究で行った理想的な大気大循環実験の範囲では、定常波動の形成にとって、これらのフラックスの寄与は小さかった。このことは、時間平均流と順圧的エネルギー変換が、ストームトラックの形成に対しても副次的であることを矛盾しない。

学位論文審査の要旨

主査 教授 山崎 孝治
副査 教授 長谷部 文雄
副査 助教授 谷本 陽一
副査 教授 木本 昌秀
(東京大学気候システム研究センター)
副査 準教授 謝 尚平
(ハワイ大学国際太平洋研究センター)
副査 助教授 向川 均 (京都大学防災研究所)

学位論文題名

GCM Response of the Extratropical Atmosphere to Tropical and Extratropical SST Forcings

(GCMにおける熱帯および中緯度の
海面水温強制に対する中高緯度大気の応答)

北半球冬季の、上部対流圏の亜熱帯ジェット、ストームトラックなどの気候場には、大きな東西非対称性が見られる。この東西非対称性の形成に関する研究、特に定常波に関しては古くから研究がなされ、チベットやロッキーなど大規模山岳の効果と海陸分布などの熱的コントラストが重要であるとされてきた。しかし、熱的コントラストとは海陸分布なのか海面水温分布、それも中緯度なのか低緯度なのか、その定量的評価と形成機構についてはまだ詳しく調べられていないかった。本研究では、この東西非対称性の形成に対する熱帯と中緯度の海面強制の役割を、理想化された条件で大気大循環モデルを用いて調べた。

第1部では、偏西風ジェットコアの形成（定常波の形成）に対する熱帯の海面水温強制の寄与を、中緯度の海陸分布に伴う強制の寄与と比較し調べた。各々の強制力を取り出すため、熱帯の海面水温強制を含む水惑星実験と、北緯20度以北の半分の面積を占める平坦な大陸を置いた実験の二つを比較した。大陸実験では、中高緯度の地表面気温に大きな東西非対称性が存在するにもかかわらず、上層の定常波の振幅は小さい。一方、熱帯の海面水温強制実験では、非常に強い偏西風域が熱帯の暖水域の北に形成された。熱帯の暖水域は、局所的にハドレー循環を強化し、その発散場に伴う渦管の伸縮や惑星渦度移流が渦度強制となって亜熱帯域で強い高気圧生循環を形成する。従って、この循環に伴って、ジェットコアが熱帯暖水域の北側に形成される。

第2部では、中緯度の海面水温に対するストームトラックの応答を調べた。そのため、海面水温強制を与える緯度を変えた3つの実験を行った。その結果、北緯30度に海面水

温強制がある場合、最も効果的にストームトラックが励起されることがわかった。この実験ではストームトラックの中心軸と海面温度の南北勾配の東西変化の大きい緯度が、重なっている。また北緯 30 度付近の海面水温の東西変化は、蒸発量の東西変化を生じ、それがさらに低気圧活動によって降水量の東西変化に伴う非断熱加熱の東西非一様を生じさせる。この非断熱加熱によって励起された定常波が、ストームトラックの中心部の上流側で、大気下層の西風の鉛直シアを維持し、ストームトラックを東西方向に局在化させる。さらに、このようなフィードバック機構の存在が、中緯度の海面水温強制によってストームトラックが東西方向に局在化するのに本質的であることが示された。

中緯度の海面水温変化が、どれだけ大気に影響するかは、近年注目されている研究課題であるが、熱帯の海面水温に対する応答と異なり、大気の応答が微妙であり、場所やモデルにより異なるなど、まだほとんど理解が進んでいなかった。申請者はストームトラックに注目し、ストームトラックの東西非一様性に伴い非断熱加熱が定常波を励起し、それがさらに傾圧度を維持しストームトラックを局在化するという新たなフィードバック機構を提案した。申請者の研究は、気候平均場の東西非一様性という大循環の古典的問題から、中緯度海面水温に対する大気の応答という気候研究の最先端まで、一石を投じ、極めて示唆に富んだ結果を得ており、この研究により、今後、中緯度の気候の理解が進むと期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として優秀・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充分な資格を有するものと判定した。