

学 位 論 文 題 名

A Numerical Investigation of the Effects of the Subtropics on the Tropics Through the Ocean Circulation

(亜熱帯域が海洋循環を通じて熱帯域に及ぼす影響に関する数値的研究)

学位論文内容の要旨

中高緯度の海表面には、熱帯域に比べて低温の水、高塩の水が存在する。この水は亜熱帯域と熱帯域とを結ぶ海洋循環により熱帯域へ輸送されると考えられている。中高緯度の海表面に温度偏差が生じた場合にも、同様にその温度偏差が熱帯域へ輸送され、熱帯域に温度偏差をもたらすものと考えられる。それ故、熱帯域の温度、塩分場を理解するためには、中高緯度からの海水の輸送が及ぼす影響を明らかにする必要がある。亜熱帯域と熱帯域を結ぶ海洋循環については、近年になって盛んに研究が行なわれてきているが、その海洋循環による海水の輸送の、熱帯域の温度、塩分場形成に対する役割についての研究はあまり行なわれていない。熱帯域海洋の変動は大気を通じて地球規模の気候に影響を与えるため、その温度、塩分の基本場、偏差場の形成過程を明らかにすることは、地球の気候を理解する上で重要である。そこで本研究では、現実的な海洋大循環モデル (GCM) を用いて、海洋循環を通じて亜熱帯域が熱帯域海洋の温度、塩分場に与える影響を明らかにすることを目的とする。

この影響を明らかにするためには、まず、亜熱帯域から熱帯域への流路と、それによって輸送される海水の性質を知る必要がある。海水の性質は、その海水が海表面から亜表層へ沈み込む場所ではほぼ決定される。そこで、海水の性質を知るためには、熱帯域へ輸送される海水が、どこで海表面から亜表層へ沈み込むのかを明らかにする必要がある。ここではそのような領域を '交換領域' と呼ぶこととする。

交換領域は亜熱帯域の中央部から東部に存在する。そこから表層下に沈み込んだ海水は、西岸境界域あるいは海洋内部領域を通じて、直接、熱帯域へ更には赤道域へ輸送される。交換領域の分布には南北半球間に相違が見られる。2層モデルを用い、この相違は定性的には海岸地形の分布と、風により駆動される Ekman 湧昇の分布によると考えることができることが示される。交換領域は鉛直方向にも構造を持つ。これは、定性的には β -spiral と呼ばれる水平流速の鉛直構造によるものと考えられる。交換領域が鉛直構造を持つことから、海表面での交換領域の分布を調べる際には高い鉛直解像度を持つモデルを用いることが必要である。

次に、交換領域から沈み込んだ水が熱帯域亜表層の塩分分布に及ぼす影響を考える。同時に熱帯域亜表層の塩分場とトリチウム場の特徴の相違の原因についても考察する。この相違とは、トリチウム場は海洋内部領域を通じての北太平洋から赤道域への海水輸送を示唆するが、高塩分水の分布は北太平洋の水は西岸境界のみを通じて赤道へ達するこ

とを示唆する、というものである。

亜熱帯域の高海表面塩分領域から沈み込んだ海水は亜表層を通じて熱帯域へ輸送され高塩分の舌状分布を形成する。この高塩分舌は南半球では西岸、赤道へ達するが、北半球では西岸へ向かって伸びる。北半球では、亜熱帯域の東部の低海表面塩分領域から沈み込んだ水と、その水との混合によって低塩分化した水が海洋内部領域を通じて赤道へ達し、低塩分舌を形成する。ここで示された循環像は北半球での海洋内部領域経由の赤道への流路を示唆するトリチウム分布と矛盾せず、それと同時に観測から示される塩分分布の特徴も再現している。内部領域を経由して赤道へ輸送されるのが低塩分水であるために、高塩分水の分布に注目するとトリチウム分布との間に矛盾が生じるのである。トリチウム場と塩分場の特徴の相違はそれぞれの値の海表面での分布に起因する。すなわち、北半球では高海表面塩分は西岸境界を通じての交換領域に存在するが、トリチウムの極大値は内部領域を通じての交換領域に存在していることが上述のような2つの場の特徴の相違の原因となる。

高塩分水やトリチウムと同様に、交換領域内に生じた海表面温度偏差も熱帯域へ輸送され熱帯域の温度場に影響を与えるものと考えられる。この過程は、北太平洋の海表面温度や地球規模の大気に見られる数十年スケールの変動に対する「遅延振動子仮説」の鍵となる部分でもある。ここでは北太平洋の海表面温度偏差を海洋の密度場に影響を与えない passive tracer であると考えた場合に、どの様に表層下に入り赤道へ輸送されていくのかを GCM を用いて明らかにする。

赤道に達する tracer は、北太平洋の楕円形の海表面温度偏差と同符合を持つが、その大きさは北太平洋で与えられたものより非常に小さく、その比は10%以下である。赤道に達する tracer の濃度の減少は、北アメリカ沖の逆符合の海表面温度偏差を持つ水との混合、及び、南半球の水との混合による。赤道域への輸送行程中、亜熱帯循環域南西部において、北側に存在する直接赤道域へ水が輸送されない領域からの tracer の漏れにより、北太平洋で沈み込んで運ばれてきた水は tracer の再供給を受ける。この「漏れ」は北太平洋から赤道への輸送の近道を形成し、tracer の赤道への輸送時間は10年程度となり、純粹に移流による時間の3分の2程度となる。本研究で得られた passive tracer の亜表層での分布は、これまでに観測された数十年スケールの温度偏差に一致しており、本研究で示された輸送過程は現実の北太平洋での温度構造の変動に関与するものと考えられる。

亜熱帯域の、熱帯域にくらべ低温の海水は、熱帯域へ輸送され、熱帯域内で温められた後、再び亜熱帯域へ輸送されることで、熱帯域から熱を奪う。ここでは、熱帯域上層を1つの箱として扱い、この箱への亜熱帯域の水の流入出による低温化の効果を見積もる。

海表面を通じて熱帯海洋に与えられる熱量は、亜熱帯域からの低温水の流入出によって奪われる熱量とほぼ釣り合う。この低温化の効果のおよそ半分は亜熱帯域で海表面から沈み込み、直接熱帯域へ輸送された海水によってもたらされる。残りの半分は、より深い層の水によるものであり、このような深い層の水が重要であることが示される。熱帯域へ流入する際の海水温が20°Cより低い温度帯では、低温化させる効果は、ほぼその流入温度に依らないことが示された。これは熱帯域への輸送量が流入温度に伴ない減少するためである。この熱帯域への輸送量の温度への依存性は、定性的には、通気温度躍層理論から理解することが出来る。

これらの結果から、亜熱帯域の海表面分布は、海洋循環を通じて拡散の影響を受けなが

ら熱帯域亜表層に輸送され、そこでの分布に投影されることが示された。このため、海洋循環を通じて亜熱帯域が熱帯域へ及ぼす影響は、亜熱帯域での温度、塩分等の海表面分布に強く依存することが明らかとなった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 竹 内 謙 介

副 査 教 授 久保川 厚

副 査 助教授 謝 尚 平

副 査 助教授 山 中 康 裕

副 査 教 授 山 形 俊 男 (東京大学大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

A Numerical Investigation of the Effects of the Subtropics on the Tropics Through the Ocean Circulation

(亜熱帯域が海洋循環を通じて熱帯域に及ぼす影響に関する数値的研究)

北太平洋では、風応力の分布により、北から亜寒帯循環、亜熱帯循環、熱帯循環が形成され、これらは流量（海流の鉛直積分）的にみればそれぞれ閉じた循環となっていて、研究の対象としても独立して取り扱われることが多く、循環の間の海水交換に関する研究はそれ程多くない。

近年、エルニーニョ現象のため、熱帯海洋への関心が高く、熱帯海洋の数値モデル実験も多く行われている。しかし、変動に注目が集まるあまり、基本的な海洋構造がどのようにして形成されているか、と言う問題が軽視される傾向がある。熱帯海洋の中下層水は中高緯度から供給されるが、それが具体的にどこから、どれだけ、どのような経路で行われているかは基本的な海洋構造の維持機構の研究ばかりでなく、エルニーニョのような変動の理解にも重要である。実際、最近注目されている十年スケールの気候変動に関して、中高緯度から熱帯中層への海水供給が振動サイクルの一翼を担っているという仮説が提唱されている。

しかし、これまで理論的な考察、理想化された層モデルによる研究はあったものの、より具体的、定量的な研究がなかった。申請者の研究はこの問題を現実的な太平洋の数値モデルを用いて解明した。このモデルの結果は現実の海洋構造を良く再現しており、解析の有意性を示している。

申請者はまず、中緯度海域でエクマン収束により海面から下層に押し込まれる海水がその後どのような経路たどるかを計算し、亜熱帯循環を再循環するもの、西岸境界域を通じて熱帯に達するもの、内部領域を通過して熱帯に達するものに分類し、それぞれについて源流域（以降窓と呼ぶ）を特定した。これらは理論的に求められたものと定性的に一致し、

理論が基本的な機構を説明していることを示している。しかし、申請者はこの窓と、対象となるもの（例えば塩分）の海面における分布の微妙な関係が熱帯における分布に敏感に反映することを示し、現実的なモデルで具体的に窓の分布を求めることが必要かつ有効であることを示した。

申請者は、塩分とトリチウムの分布に注目した。熱帯太平洋の塩分分布は中層における赤道を挟んでの南で高塩、北で低塩という塩分フロントで特徴付けられる。申請者は流路分析など数値モデルの特性を生かした解析で、これらの分布が亜熱帯域における窓の分布や経路と密接な関係があることを示し、特に北半球では高塩分水が熱帯に達する経路中、熱帯収束帯で生成された低塩分水の影響を受け、低塩分化することが南北の非対称性の原因であることを示した。また、従来の研究では北半球における海洋内部を通る経路の有無について結果がわかれており、また塩分とトリチウムがそれぞれ片方の結果を支持する分布をしているため、決着していなかった。申請者は内部経路は存在するが、拡散の効果で塩分分布にはそれが現れないことを示し、両者を矛盾無く説明することに成功した。

申請者は更に十年スケールの変動において中高緯度での海面水温変動が熱帯にどれだけ影響を与えるかを、トレーサーを用いた数値実験で調べた。仮設では中高緯度海面水温—熱帯海洋—大気—中高緯度という順に変動が伝播し、振動が起きるとされるが、その最初のプロセスでどれだけの情報が伝達されるかは不明であった。従来、この海面水温変動では海洋中央部のものだけが注目されてきたが、申請者は海洋東端付近にある逆の偏差の重要性を指摘し、その影響等で熱帯に現れる偏差は10分の1程度になってしまうことを示した。また、熱帯に達する経路の途中で再循環経路の海水の影響を強く受けるため、変動の周期によっては更に熱帯への影響が小さくなることも示した。

中高緯度と熱帯の海水交換は熱帯海洋の熱収支にも重要な役割を担っている。本研究ではその役割についても解析し、熱帯海洋が海面で受ける熱の約半分が中高緯度との海水交換で冷却されていることを示した。

この様に本研究は熱帯太平洋における海洋構造の形成、維持機構の解明に大きく貢献し、更に十年スケール変動などの気候変動に関しても重要な知見を加えたもので、申請者が研究者として研究活動を行うために必要な高度な研究能力と学力を有していることを示している。よって審査員一同は申請者が博士（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。