

学位論文題名

Numerical Study on the Atmospheric Response  
to Meso-Scale Sea Surface Temperature Anomalies  
in the Kuroshio Extension

(黒潮続流域における中規模海面水温偏差に対する大気応答の数値的研究)

学位論文内容の要旨

高解像度衛星データや船上観測により、黒潮続流域における海洋中規模(~数100km)の海面水温(SST)偏差と海上大気場との関係が明らかになっている。特に、正(負)のSST偏差上の海上風は周囲よりも強く(弱く)なるというSST偏差と海上風速の正相関は、海盆規模の大気海洋の関係と異なっており、注目を集めている。この正相関はSST偏差の直上の下層大気が暖められ、鉛直混合が盛んになった結果、上層の運動量が下層へ運ばれるために風速が増大するという鉛直混合メカニズムによって説明されている。しかし、衛星および観測データからはSST偏差に対する大気境界層応答の3次元構造を求めることや、鉛直混合メカニズムを定量的に見積もることは難しい。更に、これまでの数多くの研究では、時間平均場での大気境界層内の海洋中規模SST偏差に対する応答に焦点を当てており、大気境界層より上の自由大気や、黒潮続流域上を通過する総観規模擾乱への影響を議論した研究はほとんどない。そこで本研究では、高解像度(水平格子約50km)の大気大循環モデル(AGCM)を用いて、黒潮続流域における海洋中規模SST偏差に対する大気境界層応答の定量化およびより大きい空間スケールの大気応答を検証する。

標準実験として、AMSR-eにおける2006年1月平均値を境界条件の下、2006年1月1日から40日間の時間積分を行ったところ、過去の研究と同様に、時間平均した海上風偏差の空間パターンには中規模SST偏差と正の相関関係が見られた。さらに他の大気場偏差もSST偏差とよい対応関係にあり、中規模SST偏差のやや下流側に気温・比湿・鉛直p速度の偏差が見られ、大気境界層応答の3次元構造が明らかになった。海上風偏差がどのように駆

動されているのかを調べるために、海上風偏差成分に対して運動量収支解析を行った。最も卓越していた成分は気圧傾度力であり、鉛直混合メカニズムを説明する乱流混合は海上風偏差に対して摩擦項として働いていた。しかし、大気境界層上部において正(負)のSST偏差上で下向き(上向き)の乱流フラックス偏差があり、これは鉛直混合メカニズムが働いていることを示唆する。そこで、鉛直混合メカニズムの役割を調べるために、同じ境界条件および初期値を用いて、黒潮続流域のみ運動量拡散係数を平滑化した感度実験を行った。海上風偏差の振幅は標準実験に比べて半減しており、運動量収支解析では気圧傾度力は標準実験とほぼ同等であったものの、乱流混合による摩擦効果は標準実験よりも強くなっていた。さらに大気境界層上部における乱流フラックス偏差は消失していた。この結果は気圧傾度力によって駆動された海上風偏差が鉛直混合メカニズムによってさらに増幅されるということを示す。標準実験で見られた海上風偏差のうち、その約50%は鉛直混合メカニズムによって説明されると見積もられ、海洋中規模SST偏差に対する大気境界層の応答を定量化することができた。

海洋中規模SST偏差に対して、その空間スケールより大きい大気場はどのような影響を受けるのかを調べるために、理想化したAGCMを用いて2通りの水惑星実験を行った。まず、南北緯30度に最大南北勾配をもつ南北対称・東西一様のSST境界条件の下、季節を1月に固定し等温静止状態から半年間スピナップさせ、半年間の時間積分を行った(CTL実験)。さらに、黒潮続流域を想定した北緯30度、東経140~190度の領域(VKEと略)において理想化した海洋中規模SST偏差を重ねた境界条件の下、1年間時間積分を行った(ESPR実験)。ESPRにおいて、VKEの下流(北緯30~40度、東経190~280度)において正の高度場偏差が卓越し、その極側には負の高度場偏差が卓越していた。さらにこの領域においては、総観規模擾乱の活動が強くなっており、Eベクトルの発散および渦度フラックス収束による診断から、ESPRにおける総観規模の時間変動場の違いによって大循環場の違いが説明された。総観規模擾乱のラグ回帰解析から、ESPRでは総観規模擾乱がVKEを通過した後、その勢力をより強く保ったまま下流域へ伝播していくことが示された。さらに総観規模擾乱がVKEを通過する際、擾乱の中心付近に海洋中規模SST偏差と同等の空間スケールの正と負の雲水量偏差が生じており、その振幅は正の雲水量偏差の方が約1.8

倍大きかった。つまり正味ではESPRにおける総観規模擾乱はVKE通過時により多くの潜熱を放出しており、その結果総観規模擾乱の活動がより長続きするということが示唆された。海洋中規模SST偏差が存在することで、その上を通過する総観規模擾乱の寿命が長くなり、その結果下流でストームトラックが強まり、新たに大循環場が強制されることを示唆する。

# 学位論文審査の要旨

主 査 准教授 谷 本 陽 一  
副 査 教 授 山 崎 孝 治  
副 査 教 授 久保川 厚  
副 査 准教授 稲 津 将 (大学院理学研究院)  
副 査 准教授 渡 部 雅 浩 (東京大学気候システム  
研究センター)

## 学 位 論 文 題 名

# Numerical Study on the Atmospheric Response to Meso-Scale Sea Surface Temperature Anomalies in the Kuroshio Extension

(黒潮続流域における中規模海面水温偏差に対する大気応答の数値的研究)

高解像度衛星計測や船上における大気直接観測により、数 100km 程度のスケールをもつ海洋中規模渦に伴う海面水温 (SST) 偏差と海上大気偏差場との関係が明らかにされつつある。1000km より大きい海盆スケールの海面水温と海上風速には負相関が見られ、これは大気から海洋の強制を意味する。一方、海洋中規模渦に伴う SST 偏差と海上風速には正相関が示され、海洋から大気への影響を示唆している点で注目されている。この正相関は、主に暖水上 (冷水上) で運動量の鉛直混合が大きい (小さい) ために生じると考えられてきた。しかし、SST 偏差に対する大気境界層応答の 3 次元構造を求め、運動量収支の視点から鉛直混合の大きさを観測データから定量的に見積もることは困難であった。また、中規模 SST の影響が大気境界層の変質を通して、より上空の自由大気や中規模 SST 偏差より大きい空間スケールの大気場へ及んでいるのかについては議論の余地が未だ多く残っている。そこで申請者は、高解像度 (水平格子約 50km) の大気大循環モデル (AGCM) を用いて、黒潮続流域における海洋中規模 SST 偏差に対する大気境界層応答の定量化およびより大きい空間スケールの大気応答を検証した。

標準実験として、衛星計測による高解像度海面水温場を境界条件に設定し、2006 年 1 月 1 日から 40 日間の時間積分を行ったところ、過去の研究と同様に、時間平均した海上風偏差の空間パターンには中規模 SST 偏差と正の相関関係が見られた。さらに他の大気場偏差も SST 偏差とよい対応関係にあり、中規模 SST 偏差のやや下流側に気温・比湿・鉛直速度の偏差が見られ、大気境界層応答の 3 次元構造が明らかになった。海上風偏差がどのように駆動されているのかを調べるために、海上風偏差成分に対して運動量収支解析を行った。

最も卓越していた成分は気圧傾度力であり、鉛直混合メカニズムを説明する乱流混合は海上風偏差に対して摩擦項として働いていた。しかし、正(負)の SST 偏差上の大気境界層上部において下向き(上向き)の乱流フラックス偏差があり、これは鉛直混合メカニズムが働いていることを示唆する。そこで、鉛直混合メカニズムの役割を調べるために、同じ境界条件および初期値を用いて、黒潮続流域のみ運動量拡散係数を平滑化した感度実験を行った。海上風偏差の振幅は標準実験に比べて半減しており、運動量収支解析では気圧傾度力は標準実験とほぼ同等であったものの、乱流混合による摩擦効果は標準実験よりも強くなっていた。さらに大気境界層上部における乱流フラックス偏差は消失していた。この結果は気圧傾度力によって駆動された海上風偏差が鉛直混合メカニズムによってさらに増幅されるということを示す。標準実験で見られた海上風偏差のうち、その約 50%は鉛直混合メカニズムによって説明されると見積もられ、海洋中規模 SST 偏差に対する大気境界層の応答を定量化した。

海洋中規模 SST 偏差に対して、その空間スケールより大きい大気場はどのような影響を受けるのかを調べるために、理想化した AGCM を用いて 2 通りの水惑星実験を行った。まず、南北緯 30 度に最大南北勾配をもつ南北対称・東西一様の SST 境界条件の下、季節を 1 月に固定し等温静止状態から半年間スピナップさせ、半年間の時間積分を行った(水惑星標準実験)。さらに、黒潮続流域を想定した北緯 30 度、東経 140-190 度の領域(仮想黒潮続流域)において理想化した海洋中規模 SST 偏差を重ねた境界条件の下、半年間時間積分を行った(水惑星比較実験)。

水惑星標準実験および比較実験において、仮想黒潮続流域を通過する総観規模擾乱および擾乱にともなう各物理量に対してコンポジット解析を行い、そのコンポジット値の偏差(比較実験-標準実験)をとることで中規模 SST 偏差が総観規模擾乱に与える影響を調べた。総観規模擾乱が仮想黒潮続流域の上を通過する際、擾乱の中心付近に海洋中規模 SST 偏差と同等の空間スケールの正と負の雲水量偏差が生じており、その振幅は正の雲水量偏差の方が約 1.8 倍大きかった。また海面潜熱フラックスも正の SST 偏差にともなう偏差の振幅の方が大きく、正味として比較実験の方がより多くの水蒸気を獲得す傾向にあると考えられる。さらに仮想黒潮続流域を通過した後、比較実験の擾乱の方がより多くの凝結加熱を仮想黒潮続流域下流域で放出しており、その領域で気温の上昇が見られた。この気温上昇の分布は中緯度における傾圧性を強めるもしくは変調させる分布にあると考えられる。同様の気温偏差分布は時間平均場においても見られた。

仮想黒潮続流域下流域において、総観規模擾乱の統計量を標準実験と比較実験で比較したところ、比較実験の方が高緯度側(北緯 40-50 度 西経 170-80 度)で上層における擾乱の標準偏差および下層における擾乱にともなう極向き熱フラックスが強化されていた。同じ領域において、上層・下層とも時間平均場における正の高度場偏差が見られ、総観規模擾乱による渦度フラックス収束による診断から比較実験の仮想黒潮続流域下流域において、総観規模擾乱の変調によって高度場偏差が形成されていることが示唆された。これらの結果は、黒潮続流域における中規模 SST 偏差が総観規模擾乱に影響を与え、その結果より大きい空間スケールの大気場に影響を与えることが示唆された。

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（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。