

学 位 論 文 題 名

The Influence of Tropical Instability Wave-induced Sea Surface Temperature Variability on Atmospheric Boundary Layer : Satellite Data and In-situ Sonde Data Analysis

（東部赤道太平洋における海面水温偏差が大気境界層に与える
影響に関する衛星データ及びゾンデ観測データを用いた研究）

学位論文内容の要旨

東部赤道太平洋の SST 分布の特徴は、赤道湧昇によってできる SST の低い領域と、それに伴う東西に伸びる強い SST フロントである。一方、大気場は、低い SST を反映して全体として沈降場となっており、大気境界層の上端は強い気温逆転層に抑えられている。貿易風は、その境界層内を這うように、南半球側から北半球の熱帯収束帯（ITCZ）へと吹き込んでいる。このような特徴を持つ東部赤道太平洋域は、SST と自由大気が大気境界層を通してどのように結びついているかを調べるのに非常に適した領域であるといえる。Wallace et al. (1989) は、この SST フロントとそれを越える海上風南北成分の関係に注目し、「エルニーニョ／ラニーニャ」などに代表される SST フロントの年々変動に伴う海上風南北成分の偏差には、SST 偏差が及ぼす海面気圧（SLP）差では説明できない成分があることを示した。彼らは、この成分を説明するのに、大気境界層内の運動量鉛直混合のメカニズムを提唱した。冷たい海面から、フロントを越えて暖かい海面に吹き込んだ風は、下から暖められることで静的安定度が弱められ鉛直混合が増す。この鉛直混合が、上空の大きな運動量を海面付近へ運び、海上風偏差を生む、というものであった。

一方、この SST フロントは、本海域の海流系の南北水平シアに伴う力学不安定を解消するために起る南北流速変動によって、南北に蛇行（約 1000km の波長）することがよく知られている（赤道不安定波）。また、この南北流速変動/SST 偏差は 1 ヶ月で約 1000km という（大気に対して止まっていると仮定するのに十分）ゆっくりとした位相速度で西進することも知られている。Hayes et al. (1989) は、Wallace et al. の研究をふまえて、この SST フロントの南北蛇行によって生まれる東西に連続する SST 偏差に注目し、海上風との関係を調べた。彼らが用いたのは一点の海洋ブイの海上風と SST の時系列データのみであったが、SST 偏差の伝播性と、SLP による海上風偏差と鉛直混合による海上風偏差では SST との位相が異なることに着目することで、そこでの海上風偏差が、Wallace et al. の鉛直混合メカニズムで説明できることを示した。その後、Deser et al. (1993) の静止衛星の可視画像データ解析によって、雲量と SST 偏差に正の相関があることを示された。しかしながら、本海域のブイの空間解像度は十分でなく島もないため、さらなる解析は困難であり、いままでにこの SST 偏差と雲と海上風との相互関係に関してなされた研究はなかった。そこで本研究では、より高い空間解像度を持つ衛星データと、船上での GPS ゾンデ観測を組み合わすことで、これまでは不可能だった赤道不安定波による SST 偏差と大気境界層の関係を 3 次元的に明らかにすることを試みた。

まず、衛星で観測された海上風(Seawinds/QuikSCAT)と SST(TMI/TRMM)が、同位相速度で西進していることを利用し、すべての点の海上風と SST をある一点の SST に線形回帰させ、SST 偏差と海上風偏差の位相関係を調べた。その結果から、平均場の南東貿易風は、暖かい海面上で強められ、冷たい海面上で弱められていることが分かった。これは、Hayes et al. の結果と矛盾しない結果であり、鉛直混合メカニズムを支持しているといえる。さらに本解析によって、その海上風偏差が SST 偏差の境で収束発散を起こしていることが明らかになった。また、海上風偏差には、SST の低い領域から高い領域に向かって吹き込む成分、つまり SLP によると思われる成分も含まれていた。しかしながら、それは鉛直混合メカニズムによるものに比べて半分以下の程度であった。

さらに、Deser et al. の研究をふまえ、衛星で観測された大気の水蒸気量(TMI/TRMM、SSM/I/DMSP)や雲水量(同)を用いて同様な解析を行った。水蒸気量の正の偏差は、基本的に海上風収束と一致した。東側領域(西経 105 度付近)では、平均風において南北風成分が卓越していることに対応して、海上風偏差においても南北風成分も卓越する。そのため、北緯 1 度を中心とする SST 偏差の北側と南側にそれぞれ海上風収束発散が現われる。しかしながら、北側の収束域には水蒸気量偏差が現われるが、南側には現われない。これは、南から北への平均場の水蒸気量の増加を反映したものだと考えられる。すなわち、水蒸気偏差は、海上風収束だけでなく、平均場の水蒸気量分布とも関係して現われることが分かった。一方、雲水量偏差は、赤道付近では、水蒸気量偏差とは完全に一致せず若干東へ位相がずれる。そして、雲水量と SST の位相関係は Deser et al. の結果と矛盾しない。しかしながら、SST 偏差の南北構造が大きくなる中央領域(西経 135 度付近)において、ITCZ に近い緯度帯(北緯 6 度付近)では、雲水量偏差と水蒸気偏差は一致するようになる。雲水量と水蒸気量と同様に、降水量(TMI/TRMM、SSM/I/DMSP)をある点の SST に線形回帰させると、雲水量と水蒸気量の偏差が現われた領域と同じ領域に降水量偏差が現われる。この降水量偏差が赤道付近の雲水量偏差には現われないことから、赤道付近では降水を伴わない層雲、ITCZ 付近では降水を伴う対流性の雲が、それぞれ SST 偏差と関係していると考えられる。

以上のような衛星データ解析結果をふまえて、SST 偏差上空の大気境界層の鉛直構造をべるために、1999 年 9 月、水産庁調査船「照洋丸」の協力により、本海域における GPS ソンデ観測および船上連続気象観測を行った。SST 偏差の最も大きい北緯 2 度線上(西経 140~110 度)を航行、海上の風、気温、水温、湿度などの気象要素を連続観測しながら、約 3 波長の SST 偏差を横切り、計 36 点のゾンデ観測に成功した。

ゾンデ観測によると、大気境界層は 1km 付近に存在する強い気温逆転層によって抑えられていた。この気温逆転層によって、大気中の水蒸気の大部分がこの境界層内に閉じ込められていた。この気温逆転層の高さは明らかに SST 偏差と対応していた。SST 偏差が正の領域では、負の領域の時と比べて約 500m も高い位置に存在する。この SST 偏差に対応した気温逆転層の高度変動は、平均場の水蒸気量の強い鉛直傾度を反映して、大きな水蒸気量偏差を生む。ここで見積もられる水蒸気量偏差は、衛星データの線形回帰解析から見積もられた鉛直積算水蒸気量偏差を十分説明できる量であった。

現場で観測された大気境界層内の風は、ITCZ 上でのシノプティックスケールの南北風擾乱(偏東風波動)に強く影響されていた。気温逆転層を通してほぼ鉛直一様なその擾乱のために、南北風成分と SST 偏差の対応ははっきりとしない。しかしながら、東西風成分は海上で SST と逆相関であり、衛星データ解析結果と矛盾しない。また、上空に行くにしたがって正の相関となる傾向にある。この結果から、SST 偏差に対応して境界層内の運動量が鉛直方向に再分配されていることが想像される。つまり、Wallace et al. が提唱した鉛直混合メカニズムを支持する結果である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 久保川 厚
副 査 教 授 山 崎 孝 治
副 査 助教授 谷 本 陽 一
副 査 助教授 新 野 宏 (東京大学海洋研究所)
副 査 準教授 謝 尚 平
(ハワイ大学国際太平洋研究センター)

学 位 論 文 題 名

The Influence of Tropical Instability Wave-induced Sea Surface Temperature Variability on Atmospheric Boundary Layer : Satellite Data and In-situ Sonde Data Analysis

(東部赤道太平洋における海面水温偏差が大気境界層に与える
影響に関する衛星データ及びゾンデ観測データを用いた研究)

大気海洋相互作用は気候変動の理解において最も重要な要素の一つである。しかし、大気変動に対する海洋の影響を観測データに基づいて調べることは一般に難しく、未だその変動機構は明確にはなっていなかった。そこで、申請者は、東太平洋低緯度において海流の力学的不安定により生ずることが知られている周期約1ヶ月、波長約1000kmの熱帯不安定波(TIW: Tropical Instability Wave)が3度程度の海面水温変動を伴うことに着目し、この海面水温の変動に対する海面から約1.5km程度までの大気境界層の応答を、多様な衛星観測データと水産庁の観測船照洋丸からのゾンデ観測データにもとづき、3次元的に解析した。これは海面水温偏差に対する大気の応答を理解する上で極めて有用である。

過去の研究から、このTIWに伴う海面水温の振動が海上風および低層雲を変動させることは指摘されていた。しかし、これまでは海上風の観測は係留ブイに頼らざるを得なかったため、赤道不安定波動に伴う海上風の変動の時空間分布や海上風と雲の相互関係等は明らかにはされていなかった。そこでまず、衛星で観測された海上風偏差(Seawinds/QuikSCAT)と海面水温偏差(TMI/TRMM)が、同位相速度で西進していることを利用し、すべての点の海上風と海面水温をある一点の海面水温に線形回帰させることにより、海面水温偏差と海上風偏差の位相関係を調べた。これにより、南東貿易風が暖かい海面上で強められ、冷たい海面上で弱められているという結果を得た。海面水温偏差と正の相関を持つ成分からの残差として得られる成分はその半分以下との結果を得た。このことは、暖

かい海洋上で境界層の静的安定度が減少し、鉛直混合が盛んになるという考えを支持するものである。

次に衛星観測による大気の水蒸気量・雲水量・降水量に関して同様の解析を行い、水蒸気量の正の偏差の位置は、基本的に海上風収束の位置と一致することを示した。また、水蒸気偏差の南北分布から、水蒸気偏差は、海上風収束だけでなく、平均場の水蒸気量分布とも関係して現われることが分かった。雲水量偏差は、赤道付近では、水蒸気量偏差とは完全に一致せず若干東へ位相がずれる。降水量偏差は、熱帯収束帯付近では雲水量と水蒸気量の偏差と同じ領域に現われるが、赤道付近では現われないことから、赤道付近では降水を伴わない層雲、熱帯収束帯付近では降水を伴う対流性の雲が、海面水温偏差に伴って発生していることが示唆された。

海面水温偏差の影響は、海面近くの大気境界層で最も顕著と考えられるが、衛星観測では十分な鉛直分解能が得られないため、大気の応答機構を直接検証することはできない。そこで、申請者は海面水温偏差上の大気境界層の鉛直構造を調べるため、1999年9月、水産庁調査船「照洋丸」に乗船して、対象海域（西経140～110度）の北緯2度線に沿って約3波長の海面水温偏差を横切り、GPSゾンデ観測および船上連続気象観測を行った。

ゾンデ観測の結果、海面水温の変化に対して、混合層の厚さが大きく変わることで、また、大気中の水蒸気の大部分がこの混合層の中に閉じこめられており、その厚さの変化が衛星で観測された水蒸気量偏差を生み出すことが示された。現場で観測された大気境界層内の東西風成分は下層で鉛直シアの変化を伴い、海面付近では衛星観測と同様に海面水温との逆相関を示した。このことは、海面水温偏差に対応した鉛直混合が実際に起きていることを支持する。一方、南北風成分は偏東風波動に伴う風速変動に強く影響されており、海面水温偏差との対応は明瞭でなかった。さらに、水平対流が目立たない理由としては、混合層上端の逆転層内での温度の偏差が重要であることを示唆した。

以上、本研究は東部太平洋程度海域の熱帯不安定波に伴って生ずる大気の応答特性とその機構に関して、これまで海上ブイによる1点観測や限られた衛星観測から断片的に得られていた知識に、水平空間分解能の良い最新の衛星観測データ（海上風、水蒸気・雲水・雨水の鉛直積分量）や鉛直分解能の良いGPSゾンデ観測を付け加えることにより、海面水温偏差・海上風偏差・水蒸気偏差の変動に統一的な理解を与えたものである。

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）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。