

論文の内容の要旨

論文題目 A study on the upper tropospheric warming around the Tibetan Plateau and seasonal evolution of the Asian summer monsoon
チベット高原付近の対流圏上層昇温とアジアモンスーン季節進行に関する研究

氏名 田村 徹

本研究は、チベット高原付近大気上層の昇温に着目して、夏季アジアモンスーン形成期における季節進行メカニズムの解明を目的としている。夏季アジアモンスーンによる降水は、世界人口の半数以上を占める当域に暮らす人々の社会・経済活動にとって、水資源供給、食料生産また自然災害という観点から、重要な自然現象である。また、今後予測される地球温暖化により、アジアモンスーンシステムへの影響も危惧されており、将来の変動予測の必要性も高まっている。このような背景から、夏季アジアモンスーンに対する理解の向上は、科学的な興味からだけでなく、社会的な利益という観点からも、気象・水文学分野の研究者にとって意義のある研究対象の1つであると考えられる。

地球規模の循環システムであるアジアモンスーン形成メカニズム解明については、古くから精力的に取り組まれてきた。既往の研究により、アジアモンスーンの駆動源として、2つの考え方が示されてきた。1つは、チベット高原の加熱に代表される海陸熱コントラストによる大陸規模の海陸風とみるものである。もう1つは、モンスーン降水活動による対流加熱に対する大気応答とみなすものである。典型的には、この2つの考え方は、季節進行の中でそれぞれの役割を果たすと考えられてきた。モンスーン開始以前においては、北半球における日射の増大と共に、チベット高原を中心にユーラシア大陸上の大気を加熱することで南北方向の気圧傾度を生成する結果、モンスーン循環やその降水活動を開始させる。そして、一旦降水活動が始まれば、その対流加熱と大気応答により、その後のモンスーン循環が駆動・維持されるというものである。

しかしながら、この説明では困難な点がいくつかある。まずチベット高原の加熱による大気下層への影響を考える際、チベット高原のような赤道域から離れた熱源に対する松野一ギル型の大気応答は、熱源の西側に主に限られるはずである。チベット高原の加熱による下層の西風形成がベンガル湾やアラビア海にまで及び、対流域を形成するというのは困難であるように思われる。また海陸熱コントラストという説明では、ベンガル湾からアラビア海へと西へ進行するアジアモンスーンの季節変化を説明し難い。一方、もし対流加熱とその大気応答がモンスーン形成期においても重要な役割を果たすと仮定すると、「アジア

モンスーン開始はチベット高原上空と南方の海洋上の大気上層の南北温度傾度逆転と一致する」という既往の研究から明らかにされた点について、説明が難しいように思われる。

以上のように、既往の研究では、夏季アジアモンスーンの形成過程は十分には理解されていない。このような背景をもとに本研究は、夏季アジアモンスーンの形成過程における季節進行メカニズムを解明することを目的とした。本研究では、夏季アジアモンスーンを理解に対する2つ考えの接点となるチベット高原付近の大気昇温にまず焦点を当て、その上で季節進行のメカニズムについて探った。

第2章では、本研究の理解のため、夏季アジアモンスーンの形成期における大気場の季節進行を大気加熱に着目して詳述した。以下、第3章より本研究の成果となる。

第3章では、チベット高原における地表面加熱の大気上層昇温への役割について検証した。この中で、大気領域モデルを用いた仮想2次元実験を行った。衛星観測による積雲活動から夏季アジアモンスーンの形成期を3つの時期に分割し、各々の平均的な初期条件での大気温度の日中変化を解析した。すると、急激な大気上層昇温の観測される5月においては、主に高度7 km程度の乾燥対流活動が再現され、大気加熱は上層まで届くものではなかった。一方、その前後の積雲活動活発期においても、高度10 kmを超す湿潤対流活動が再現されたが、温度上昇はせいぜい10 km程度までであった。このことから、観測で確認されるような高度200 hPa (12 km)にも達する昇温には、チベット高原の地表面加熱を起因とする直接的かつ局所的な要因ではなく、総観規模現象に由来する間接的かつ広域的要因が寄与することが示唆された。

第4章において、チベット高原付近の大気上層昇温は、熱帯対流活動に対する大気応答が重要な役割を果たすことを示した。始めに、熱収支解析に基づき、ハドレー循環の下降域における断熱加熱が大気上層昇温に重要な役割を果たすことを示した。更に、数値モデルを用いた対照実験を行うことで、熱帯対流活動とチベット高原の大気上層昇温に対する役割について検証した。この結果、ベンガル湾からの潜熱供給を起因とする対流加熱は、その北西部に松野ーギル型の大気応答を形成する。大気上層においては、高気圧性循環に伴う下降風により断熱加熱をチベット高原付近に誘引することが示された。一方、チベット高原はその上層に高気圧性循環を形成し、高原西方に断熱加熱を誘引するが、高原上空は逆に冷却してしまう。その結果、チベット高原による加熱効果はその上空において、せいぜい300 hPa程度であることが示された。このことから、チベット高原上の大気昇温には、2つの熱源が必要であることが提起される。1つは、海洋を起源とする対流加熱に対する大気応答であり、圏界面付近から下方へ断熱加熱をもたらす。もう1つは、チベット高原の地表面に由来する、陸面から上方への非断熱加熱である。

第4章の結論は、対流加熱とその大気応答が、チベット高原上空と南方の海洋上の大気上層の南北温度傾度逆転をもたらすということを示唆する。すなわち、夏季アジアモンスーン形成期における、大気上層における海陸熱コントラストとモンスーン循環の形成は、陸面加熱に由来するものだけではなく、対流加熱とその大気応答も重要な役割を果たすとい

うことが提起される。

このことから、第5章において、対流加熱の夏季アジアモンスーン形成と季節進行に対する役割を探求した。まず4月の過去30年における相関解析から、東南アジアモンスーン開始以前に確認されるベンガル湾付近のモンスーントラフ発達は、チベット高原南方上層の昇温と最も相関が強い。第4章が示したように200 hPaにおける昇温はチベット高原の地表面加熱ではなく、対流加熱に由来する断熱加熱によりもたらされる。そこで、チベット高原上層の昇温と対流活動・大気下層の循環場の相関をとることで、東インド洋赤道付近の対流活動と双子状の低気圧性循環を形成するその大気応答が、ベンガル湾付近のモンスーントラフの形成と密接に関連していることが示唆された。更にその検証のため、領域モデルを用いた対照実験を行った。標準実験に加え、東インド洋赤道付近の潜熱供給を取り除いた比較実験を行い、赤道付近の対流活動がチベット高原南方の上層昇温をもたらし、同時に赤道東インド洋に双子状の低気圧を形成することが示された。また、対流加熱の役割を除去した比較実験では東南アジアモンスーン開始は再現されず、対流加熱の必要性が検証された。

一方、5月における相関解析から、インドモンスーン開始以前に確認されるアラビア海付近のモンスーントラフ発達は、チベット高原南西域の上層昇温と最も相関が強い。4月と同様に、上層の昇温と対流活動・下層循環場の相関により、チベット高原南西域の昇温、すなわちアラビア海付近のモンスーントラフの発達は、ベンガル湾付近の対流活動とそこから西に延びる低気圧性循環と密接に関連していることが示された。その検証のため、標準実験、ベンガル湾付近の潜熱供給を取り除いた対照実験を行った。ベンガル湾付近の対流活動がチベット高原南西域の上層昇温をもたらし、同時にベンガル湾からアラビア海へと西方に延びる低気圧性循環・インド南端部の降水系を形成することが示された。また、ベンガル湾付近の対流加熱を取り除いた実験ではインドモンスーン開始は再現されなかったことから、対流加熱の季節進行に果たす重要な役割が検証された。

以上のように本研究の解析により、チベット高原等の陸面加熱がモンスーンを形成するとその既存の理解に対し、モンスーン開始以前における対流活動が遠隔的にチベット高原付近の大気上層を加熱し、同時にその大気応答が夏季アジアモンスーンの季節進行に不可欠な駆動源であるという新しい知見を提供した。

最後に、本研究により、対流加熱とその大気応答が夏季アジアモンスーン形成期における季節進行に重要な役割を果たすことが提起されたが、陸面の間接的役割も当然無視することは出来ない。例えば、4月末における海洋性大陸の対流活動によって南北対称な低気圧を形成するが、北半球の低気圧がより発達する。季節進行に伴う加熱効果だけでなく、インドシナ半島の陸面加熱・地形効果や、陸面による間接的な海面温度上昇への寄与などが示唆される。対流加熱とその大気応答における、海・陸・大気の相互作用のさらなる理解・検証が夏季アジアモンスーン季節進行のより一層の理解には不可欠であると考えられる。