

Temperature changes in the tropical tropopause layer

(熱帯対流圏界層における気温変動)

学位論文内容の要旨

熱帯対流圏界層 (Tropical tropopause layer; TTL) は熱帯の成層圏と対流圏の間の層であり空気塊は熱帯対流圏から TTL を通って成層圏に流入する。TTL は成層圏と対流圏で最も低温な領域の一つであり 100 hPa 高度付近 (熱帯対流圏界面) に最低温領域である Cold-point tropopause が存在する。この領域内の低温によって成層圏に流入する空気塊の水蒸気は凝結・脱水し成層圏大気は乾燥している。成層圏の水蒸気は成層圏の放射バランス・力学・大気化学を通じてオゾン消滅過程等に影響を与えるため、それを制御している TTL の気温は気候変動を考える上で重要な要素であり、多くの研究がなされている。本研究は TTL の気温変動の原因を熱力学・力学的観点から解析し、その変動メカニズムを明らかにすることを目的とする。

熱帯対流圏界層気温の変動の主な時間スケールとして経年変動、季節変動、季節内変動がある。経年変動に関して、エルニーニョ南方振動 (El Niño Southern oscillation; ENSO) 等の熱帯海面水温の変化に伴って対流構造が大きく変化することから、熱帯圏界層気温に影響を与えると考えられる。大気大循環モデルを用いて熱帯海面水温に単純な変化を加えて対流を変化させ、その際の熱帯圏界層気温の変化とその要因を調べた。熱帯海面水温の東西傾度を半減させた場合に熱帯圏界面・下部成層圏気温が上昇した。対流の東西一様化が起き、熱帯圏界面付近での波による東風運動量収束の弱化で上昇流が弱化したが、熱帯圏界面付近において上昇流の弱化のみでは気温変化を説明できず、鉛直熱フラックス (VHF; $\overline{w'\theta'}$) 発散の変化が熱帯圏界面・下部成層圏の気温上昇、熱帯上部対流圏の気温低下に大きく寄与していることが明らかになった。また熱帯海面水温の東西傾度を倍増した場合、VHF 発散の変化で熱帯圏界面・下部成層圏の気温低下、上部対流圏の気温上昇が生じた。この VHF 発散の働きはこれまでの研究では効果が小さいと無視されてきたが、本研究にてその効果が TTL 気温に無視できない影響を及ぼすことが示された。熱帯海面水温の東西傾度の減衰とは現実にはエルニーニョに対応すると考えられるため、顕著なエルニーニョのあった 1997/98 年冬季の海面水温を使用したモデル実験を行った。その結果、モデルの結果と再解析データ (ERA-Interim) で共通して VEHF 発散の弱化が熱帯 100 hPa 面気温の上昇に寄与したことが明らかになり、上述の実験が現実大気のエルニーニョ時に対応することを示した。

季節変動に関しては、熱帯 125-70 hPa では北半球冬季に冷たく夏季に暖かい気温の季節変動をしており、再解析データ (ERA-Interim) を用いてその季節変動を形成する熱力学的要因と、それが形成されるメカニズムを調

べた。70-125 hPa では主に上昇流の北半球冬季に強く、夏季に弱い変動に伴う気温変化が気温の季節変動を形成していた。125-70 hPa での上昇流の季節変動は変形オイラー平均方程式の西風運動量収支を用いた定常 downward control に基づく残差鉛直流推定から 70hPa では 10 hPa より下層の摩擦項（重力波等の解像できない波の効果を含む運動量収支の残差項）、125, 100 hPa では 70 hPa より下層の波の運動量輸送を表す EP フラックスの収束と、摩擦項により駆動されていることが示された。70 hPa では摩擦項が残差鉛直流を駆動するが、過大評価となり定常 downward control からのずれを示す西風時間変化率が過大評価を弱める変動を駆動した。125, 100 hPa では北半球冬季に強く夏季に弱い上昇流の変動を EP フラックス収束が駆動し、4 月の強い上昇流は EP フラックス収束と摩擦項によって駆動されることが明らかになった。その EP フラックス収束の変動は南北 eddy 運動量フラックス ($\overline{u'v'}$) と鉛直運動量フラックス ($\overline{u'w'}$) が支配的であり、100 hPa でその寄与は同程度、125 hPa では鉛直運動量フラックスが倍の寄与を占めた。

季節内変動に関して、成層圏突然昇温(Stratospheric sudden warming; SSW) はその原因となる冬半球中緯度成層圏でのプラネタリー波の収束による西風減速が極域成層圏での下降流と熱帯成層圏での上昇流を駆動することから、その影響が TTL にも及ぶのではないかという議論がなされている。そこで顕著な SSW が発生した 2009 年 1 月について TTL 気温の変動要因とそれを形成するメカニズムについて再解析データ (ERA-Interim) を用いて調べた。SSW 開始直後の 2009 年 1 月 16 日以降に熱帯成層圏は上昇流による顕著な気温低下が生じ、そのシグナルは下方伝播し 70 hPa までは明瞭に現れた。150-100 hPa でも 2009 年 1 月 18 日前後から気温低下が生じたものの、70 hPa よりも気温低下が生じる時期が早く SSW との関連性は不明瞭である。熱収支解析から 2009 年 1 月 18 日前後に 150-100 hPa で上昇流に伴う気温低下が生じ、その後 150-125 hPa では対流の弱化、東西一様化に伴う VHF 収束の加熱の弱化が 1 月末までの気温低下傾向を維持した。この上昇流は変形オイラー平均方程式を用いた残差鉛直流推定から北半球中緯度対流圏から熱帯に伝播した波が東太平洋・大西洋で上方伝播し、収束したことによる南北 eddy 熱フラックスの収束が主な駆動源で、その波は SSW の起源となった成層圏に伝播したプラネタリー波と同様のアラスカ周辺から発生したものであることが明らかになった。また同時に SSW に伴う成層圏の作用により駆動される上昇流は 100 hPa より下層では小さいことが示された。

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 准教授 堀之内 武

副 査 准教授 藤 原 正 智

副 査 主任研究官 黒 田 友 二 (気象研究所気候研究部)

学 位 論 文 題 名

Temperature changes in the tropical tropopause layer

(熱帯対流圏界層における気温変動)

熱帯対流圏界層 (Tropical tropopause layer, TTL) は熱帯の成層圏と対流圏の間の層であり空気塊は熱帯対流圏からTTLを通して成層圏に流入する。TTLは成層圏と対流圏で最も低温な領域の一つであり100hPa高度付近 (熱帯対流圏界面) に最低温度領域であるcold-point tropopauseが存在する。この領域内の低温によって成層圏に流入する空気塊の水蒸気は凝結・脱水し成層圏大気は乾燥している。成層圏の水蒸気は成層圏の放射バランス・力学・大気化学を通してオゾン消滅過程等に影響を与えるため、それを制御しているTTLの気温は気候変動を考える上で重要な要素であり、多くの研究がなされている。本研究はTTLの気温変動の原因を熱力学・力学的観点から解析し、その変動メカニズムを明らかにすることを目的とする。

TTL気温の変動の主な時間スケールとして、経年変動、季節変動、季節内変動がある。経年変動に関して、エルニーニョ南方振動 (El Nino Southern Oscillation; ENSO) 等の熱帯海面水温の変化に伴って対流構造が大きく変化することから、TTL気温に影響を与えると考えられる。大気大循環モデルを用いて熱帯海面水温に単純な変化を加えて対流を変化させ、その際のTTL気温の変化とその要因を調べた。熱帯海水温の東西傾度を半減させた場合に熱帯圏界面・下部成層圏の気温が上昇し、熱帯上部対流圏で気温が低下した。対流の東西一様化が起き、熱帯圏界面付近で波による東風運動量収束の弱体化で上昇流が弱体化したが、これだけでは気温変化を説明できず、鉛直熱フラックス発散の変化が熱帯圏界面・下部成層圏の気温上昇、熱帯上部対流圏の気温低下に大きく寄与していることが明らかになった。また逆に熱帯海面水温の東西傾度を倍増した場合、鉛直熱フラックス発散の変化で熱帯圏界面・下部成層圏の気温低下、上部対流圏の気温上昇が生じた。この鉛直熱フラックス発散の働きはこれまでの研究では効果が少ないと無視されてきたが、本研究にてその効果がTTL気温に

無視できない影響を及ぼすことが示された。熱帯海面水温の東西傾度の減衰とは現実にはエルニーニョに対応すると考えられるため、顕著なエルニーニョであった1997/98年冬季の海面水温を使用したモデル実験を行った。その結果、モデルの結果と再解析データ（ERA-Interim）で共通して鉛直熱フラックス発散の弱화가熱帯100hPa面の気温上昇に寄与したことが明らかになり、現実にも鉛直熱フラックスの効果が重要であることが確認された。

季節変動に関しては、熱帯125-70hPaの気温は北半球冬季に冷たく夏季に暖かい季節変動をしており、再解析データ（ERA-Interim）を用いて、その季節変動を形成する熱力学的要因と、形成メカニズムを調べた。100hPaでは、主に上昇流の季節変化（冬に強い）が気温変動を形成していたが、70hPaでは放射加熱と上昇流の両者が寄与していた。さらに上昇流の季節変化を変形オイラー平均方程式の西風運動量収支を用いた定常downward controlに基づく残差鉛直流推定から70hPaでは10 hPaより下層の摩擦項（重力波等の解像できない波の効果を含む運動量収支の残差項）、125, 100 hPaでは70 hPaより下層の波の運動量輸送を表すEPフラックスの収束と、摩擦項により駆動されていることが示された。

季節内変動に関して、成層圏突然昇温（Stratospheric sudden warming; SSW）はその原因となる冬半球中緯度成層圏でのプラネタリー波の収束による西風原則が極域成層圏での下降流と熱帯成層圏での上昇流を駆動することから、その影響がTTLにも及ぶのではないかという議論がなされている。そこで顕著なSSWが発生した2009年1月についてTTL気温の変動要因とそれを形成するメカニズムについて再解析データ（ERA-Interim）を用いて調べた。SSW開始直後の2009年1月16日以降に熱帯成層圏は上昇流による顕著な気温低下が生じ、そのシグナルは下方伝播し70hPaまでは明瞭に現れた。150-100hPaでも2009年1月18日前後から気温低下が生じたものの、70hPaよりも気温低下が生じる時期がやや早くSSWとの関連は不明瞭である。熱収支解析から2009年1月18日前後で150-100hPaで上昇流に伴う気温低下が生じ、その後150-125hPaでは対流の弱化・東西一様化に伴う鉛直熱フラックス収束の加熱の弱화가1月末までの気温低下傾向を維持した。上昇流については、変形オイラー方程式を用いた推定から北半球中緯度対流圏から熱帯に伝播した波が東太平洋・大西洋で上方伝播し、収束したことにより駆動されたことがわかった。この波はSSWの起源となった成層圏に伝播したプラネタリー波と同様にアラスカ周辺から発生したものであることが明らかになった。また同時にSSWに伴う成層圏の作用により駆動される熱帯の上昇流は100hPaより下層では小さいことが示された。

これらの成果は、熱帯対流圏界層の気温変動、ひいては成層圏の水蒸気変動や気候変動を理解する上で重要な知見を与えるものである。

審査委員一同は、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、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、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。