

Response of tropical cyclone structure to a global warming using a high-resolution global nonhydrostatic model

その他のタイトル	高解像度全球非静力学モデルを用いた熱帯低気圧の温暖化による構造変化に関する研究
学位授与年月日	2016-02-29
URL	http://doi.org/10.15083/00073182

論文の内容の要旨

論文題目

Response of tropical cyclone structure to a global warming using a high-resolution global nonhydrostatic model

(高解像度全球非静力学モデルを用いた熱帯低気圧の温暖化による構造変化に関する研究)

氏名 山田 洋平

熱帯低気圧は暖かい熱帯の海洋上で発生し、海からの熱を熱源として維持・発達する自然現象であり、豪雨や強風を伴い人間社会にも人的・経済的被害をもたらす自然災害の要因の一つである。地球温暖化が熱帯低気圧に与える影響は科学的だけでなく社会的にも関心の高い研究題目であるため、熱帯低気圧の地球温暖化に対する応答は数値シミュレーションの結果を用いて活発に研究されている(Knutson et al. 2010; IPCC, 2013)。多くの先行研究では熱帯低気圧の発生頻度や強度の将来変化に注目した研究であった。しかし熱帯低気圧による被害の規模は熱帯低気圧の頻度や強度だけでなく構造(風速の空間分布)にも影響を受ける。地球温暖化時に熱帯低気圧の構造がどのように変化するかを議論することは重要である。

先行研究で熱帯低気圧の構造の将来変化の議論が多くない理由としては、現実的な条件下で全球規模の数値実験を実施するにはモデルの水平格子間隔が粗く(数十 km~100km)、モデルがシミュレートする熱帯低気圧が非現実的に大きく、現実的な構造を持った熱帯低気圧を再現できなかった(McDonald et al. 2005; Camargo 2013)ためと考えられる。近年では計算機性能の向上により、先行研究よりも水平格子間隔が細かいモデルによる現実条件下で全球実験が可能となった。高解像度モデルでは低解像度モデルよりも小さなサイズの最大風速半径を持った熱帯低気圧が再現され、水平格子間隔が 20km 以下の

モデルでは熱帯低気圧の特徴的な構造である眼を再現できるモデルも存在する (Murakami et al. 2012)。

観測研究からは熱帯低気圧の水平スケール (最大風速半径や眼の半径) は事例や強度ごとに数 km ~ 100km の幅でばらつくことが知られている (Weatherford and Gray 1988; Kimball and Mulekar 2004)。同じ強度であっても熱帯低気圧の発達段階 (発達期・成熟期・衰退期) によって異なることも報告されている (Merill 1984)。このことから地球温暖化による熱帯低気圧の構造の変化を議論するには十分な事例数を用いて特定の発達段階で同じ強度の熱帯低気圧を統計的に比較することが必要であると考えられる。

計算機の演算性能の向上はこの数年でも目まぐるしく、理化学研究所計算科学研究機構では京コンピュータが運用されている。京コンピュータの利用によって水平格子間隔 14km の全球非静力学モデル NICAM (Tomita and Satoh 2004; Satoh et al. 2008, 2014) を用いて 30 年分の現在気候再現実験と将来実験が実施された (Kodama et al. 2015; Satoh et al. 2015)。これらの実験で発生した熱帯低気圧の数 (84.4 個/年) は現実に 30 年間で観測する熱帯低気圧の数 (82.1 個/年) に匹敵し、熱帯低気圧の眼や斜めに傾いた構造が再現されており、熱帯低気圧の構造の将来変化を議論するのに有用であると考えられる。そこで本研究では 14km 格子を用いた NICAM の出力から地球温暖化に対する熱帯低気圧の構造の将来変化を議論する。

現在気候実験の積分期間は 1978 年 6 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日までで、将来気候実験では 2074 年 6 月 1 日から 2104 年 12 月 31 日までである。初期値は ERA-40 (Dee et al. 2011) を用い、積分開始から最初の 7 ヶ月はスピナップ期間として解析から除外した。海面水温と海水の情報は外部境界条件として与えた。現在気候実験では観測 (HadISST; Rayner et al. 2003) の月平均値を使用した。将来気候実験では CMIP3 (Meehl et al. 2007) のマルチモデルアンサンブル平均から得られる将来の海面水温と海水の変化を観測に加えて作成した (Mizuta et al. 2008)。CO₂ 濃度は SRES A1B シナリオに従った。モデルで再現された熱帯低気圧は Sugi et al. (2002) に基づき抽出した。抽出した熱帯低気圧は Roberts et al. (2015) に倣い最低中心気圧で 6 階級に分類した。

熱帯低気圧の発生数や強度の将来変化に注目すると全球で発生数は減少 (-23.2%) し、強い熱帯低気圧の発生割合は増加する傾向であった。発生数の減少は先行研究で報告されているモデルの不確実性の範囲に収まっており、NICAM の結果は先行研究を後押しする結果であった。

熱帯低気圧の周りの壁雲の変化に注目すると、現在気候実験の結果から熱帯低気圧は強度が強くなる (最低中心気圧が低くなる) と壁雲の雲頂高度が高くなることがわかった。温暖化時にもこの関係は変わらないが、同じ強度で比べたときに将来の台風の方が壁雲の雲頂高度が高くなっていることが分かった。雲頂高度が高くなったことは温暖化時に圏界面高度が上昇することの影響を受けていると考えられる。

壁雲の雲頂高度の増加によって壁雲内の水物質の変化が予想される。個相と液相の水物質の量（IWP と LWP）の変化をモデル結果で比較すると温暖化時には IWP と LWP が増加していることが分かった。LWP の半径分布が最大になる半径は壁雲の半径に対応すると考えられる。モデルの結果では LWP の最大の位置と最大風速半径の位置が一致していた。この関係は観測的な先行研究（Jorgensen 1984）でも報告されており、NICAM が現実の熱帯低気圧の構造を再現していることを示唆していると考えられる。IWP は最大風速半径よりも外側に最大値をとり、NICAM でシミュレートされた熱帯低気圧の壁雲は外側に傾いていることがわかる。

強度で分類した 10m 高度の接線風速の半径分布を比較すると、最低中心気圧が 980hPa 未満に発達した熱帯低気圧の接線風速は、将来実験において壁雲域の外側の縁よりも外側で増加していることが分かった。壁雲域の外側の縁は、現在と将来で海面更正気圧を比較した時に将来最も気圧が低下した領域に対応していた。この気圧の低下は壁雲の雲頂高度が高くなったことと関係していると考えられる。

先行研究では加熱が増加すると大気柱が暖められて密度が減少し、その大気柱の下で気圧が減少することが報告されており、Hydrostatic adjustment と呼ばれている（Smith 1981; Wang 2009）。本研究でも同様のメカニズムが働いたと考えられる。温暖化時に雲頂高度が増加した壁雲の内部では、対流性の雲の存在高度が高くなり、水物質が現在気候よりも高い高度で凝結し非断熱加熱を増加させる。壁雲域の非断熱加熱の増加によって、大気柱が加熱され密度が減少して、その下の気圧を低下させる。壁雲は外側に傾いた構造を持っているため、壁雲域の外側の縁の下で気圧が最も低下する。気圧が最も低下した半径よりも外側では気圧勾配は現在よりも将来の方が大きくなるため、傾度風平衡の関係から壁雲域の外縁の下よりも外側で接線風速が増加したと考えられる。14km の実験からわかった壁雲の雲頂高度の変化と非断熱加熱の増加と接線風の分布の将来変化の関係は 7km の実験でも同様の結果が得られた。

このメカニズムでは「壁雲の斜めに傾いた構造」をモデルがシミュレートしていることが重要である。壁雲の傾きの再現性に関しては水平格子間隔が 10km 未満の領域モデルによって多くの議論が行われており（Fierro et al. 2009; Gentry and Lackmann 2010; Sun et al. 2013）、事例にもよるが数 km の水平格子間隔でも壁雲の傾き度合は収束せず、水平格子間隔が小さくなるにつれて壁雲がより直立することが報告されている。

14km や 7km の水平格子を用いた実験は領域モデルを用いた先行研究(数 km)に比較すると解像度は粗い、粗いモデルでは壁雲はより倒れた構造を持つと考えられる。壁雲の傾き度合は温暖化時に非断熱加熱が増加する領域の位置に影響を与えられと考えられる。本研究で得られた結果が妥当であるかを検証するために、熱帯低気圧の二次循環を記述する Sawyer-Eliassen のモデルを用いて壁雲の傾きを変えた渦に対して上部壁雲域で加熱率を増加させて二次循環の応答を比較した。上部壁雲域で加熱率を増加は、本研究で得られた壁雲の雲頂高度の増加による非断熱加熱の増加を模している。Sawyer-Eliassen モデ

ルの結果から壁雲の傾きに関係なく壁雲の外側では接戦風の増加が確認でき、本研究で得られた知見を後押しするものであった。

本研究から 980hPa 未満に発達した熱帯低気圧は、壁雲域の外側の縁よりも外側で接線風が増加することが分かった。このことから将来の熱帯低気圧は現在と同じ強度であっても強風半径は広がることが予想される。