

航空機により観測された非常に強い台風の雲解像モデルを用いた高解像度シミュレーション

課題責任者

坪木 和久

名古屋大学 宇宙地球環境研究所

著者

坪木 和久^{*1}

^{*1} 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

キーワード：雲解像モデル、台風強度、スーパー台風、航空機観測、高解像度シミュレーション

1. はじめに

台風の高精度予測は台風防災の面から重要であるとともに、高精度シミュレーションは、台風の内部構造や発達メカニズムに関する学術的理解の上でも重要である。近年、高解像度の非静力学モデルによるシミュレーションが可能となってきたが、その結果の検証のための観測データは限られている。名古屋大学を中心とする研究グループは、台風の航空機観測プロジェクト T-PARCII (Tropical cyclone- Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts)により、これまでスーパー台風などの非常に強い台風の航空機観測を実施してきており、台風の眼と内部コア周辺の観測データを取得してきた。

本研究では雲解像モデルを用いて、航空機により直接観測データの得られた台風について、シミュレーション実験を行い、その再現性を検証すると共に、構造や発達メカニズムを解明する。さらに雲物理過程や放射過程などの物理過程についての感度実験を行うことで、台風強度の高精度シミュレーションと各物理過程の役割を調べることが目的である。本稿では 2022 年 9 月に観測されたスーパー台風 Nanmadol について、これまでの実施してきたシミュレーション実験の結果をまとめる。

2. 数値モデルと実験設定

本研究で用いた雲解像モデルは、Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS3.4.3m; Tsuboki and Sakakibara 2002 [1], Tsuboki 2023 [2]) である。CReSS は 3 次元の領域非静力学モデルで、鉛直方向に地形に沿った座標系を用い、水平方向には緯度経度座標を用いている。雲に関わる物理量は雲物理のバルク法を用いており、積雲パラメタリゼーションは用いない。短波および長波による放射加熱・冷却は、Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) によって計算される。

計算領域は、経度方向に約 40 度、緯度方向に約 35 度、高さは上部スポンジ層の下端が 24 km である。設定の詳細は表 1 にまとめた。初期値・境界値には気象庁の全球客観解析、および JRA55 のデータを用いた。また、海面水温については OISST を初期値として与え、1 次元熱拡散モデルでその時間発展を計算している。

観測された台風の進路の精度を上げるため進路については、スペクトルナッジング (T sujino and Tsuboki 2020 [3]) を用いる実験も行った。

表 1：実験設定の主要パラメータのまとめ

格子数	1731×1539 (水平) ×83 (鉛直)
水平格子	緯度経度座標系
領域分割	x 方向：8、y 方向：128
水平格子間隔	0.0198 度 (経度)、0.0181 度 (緯度)
鉛直格子	最下層 100m、平均 350m
積分時間	5 日
雲物理過程	冷たい雨のパラメタリゼーション
海洋・陸地	鉛直 1 次元：61 層

3. スーパー台風 Nanmadol (2022)

台風 14 号 Nanmadol は、2022 年 9 月 13 日 18UTC に小笠原諸島近くで発生し、北西進しつつ 16 日 18UTC に大型で猛烈な強さに発達した。18 日 10UTC ごろ、大型で非常に強い勢力で鹿児島県に上陸し、19 日にかけて九州を縦断し、福岡県付近から東向きに進み中国地方を縦断した。九州、四国では総降水量が 500mm をこえ、死者 5 名に達した。鹿児島県に上陸した台風としては過去 4 番目に低い中心気圧で上陸し、社会的影響の大きな台風であった。

Nanmadol の気象学的特徴は、北緯 22.4 度という比較的高い緯度で発生し、北緯 25 度付近の高緯度で急発達をした。JTWC によると 16 日 12UTC に北緯 24.8 度でスーパー台風となり、17 日 06UTC に北緯 26.8 度までその強度を維持している。さらに気象衛星の観測から、少なくとも 15 日 18UTC には、二重壁雲構造をしており、それが、18 日 03UTC ごろまで維持されていた。2 日間以上にこの構造が維持されていたのは Nanmadol の大きな特徴である。

T-PARCII は Nanmadol について、9 月 16 日午後と 17 日午前に航空機観測を実施し、周辺、内部コア領域、及び眼内部への貫入観測を実施、眼内部の暖気核をドロップゾンデにより直接観測した。これにより急発達時における暖気核構造とその発達を観測している。この急速な暖気核の発達に伴い、中心気圧の急速な低下が起こったと考えられる。

4. シミュレーション実験の結果

全球客観解析を初期値・境界値として 4 つのシミュレーション実験を実施した。初期値はすべて 2022 年 9 月 15 日 06:00UTC である。標準実験ではスペクトルナッジングを使用していないが、他の 3 つでは使用した。図 1 にこれらの実験の結果として、中心気圧の時間変化を示した。標準実験では生涯最低中心気圧が 897hPa に達し、やや過発達となっている。スペクトルナッジングを導入すると、発達が抑制され、935hPa 程度までしか発達しない (図 1 緑線)。計算領域を西に経度で 4 度ずらすとやや発達し、930hPa まで中心気圧が低下する (図 1 青線)。中心気圧の発達の程度は最初の 12 時間はベストトラックと同じ程度であるが、それ以降やや遅くなる傾向が見られる。また、放射過程をオフにすると、最大で 10hPa あまり中心気圧が低下する (図 1

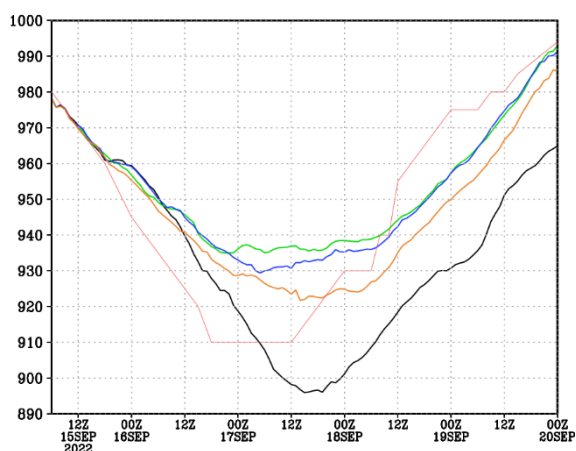


図 1：気象庁全球客観解析を初期値・境界値としたスーパー台風 Nanmadol のシミュレーションの中心気圧の時間変化。2022 年 9 月 15 日 06:00UTC を初期値として、4 つの感度実験を行った。標準実験（黒実線）、スペクトルナッジング（緑）、スペクトルナッジングと領域を西に 4 度移動（青）、さらに放射過程をオフ（オレンジ）。赤線は気象庁ベストトラックの中心気圧。

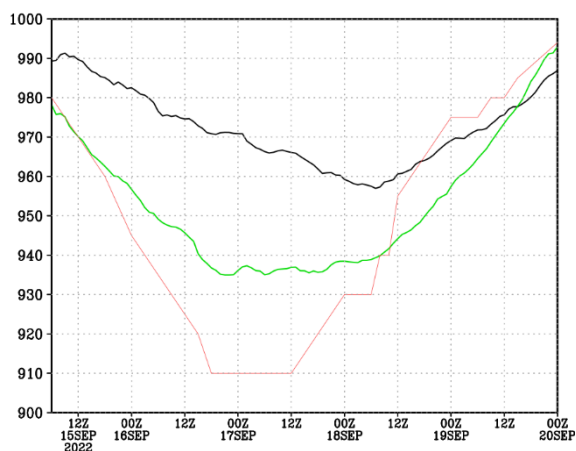


図 2：赤線と緑線は図 1 と同じ。黒実線は初期値・境界値として JRA55 を使用した場合の中心気圧の時間変化。

オレンジ線)。これらの実験では海洋混合層の厚さは 15m で共通である。

初期値・境界値として JRA55 を使用した実験を、全球客観解析の実験と比較した。同じ計算設定で比較した結果を図 2 に示す。JRA55 を使用すると、発達が大きく抑制され、全球客観解析の結果と最大で中心気圧が 30hPa ほど高くなり、台風の発達がみられない。初期値を異なる時刻からはじめても、計算領域を図 1 の青線のものにしても、同様に発達が抑制されて、Nanmadol のシミュレーションとしては、実際とは大きく異なる結果となる。降水の分布も眼の壁雲などの組織化が非常に弱いものとなる。これらの結果から JRA55 は Nanmadol のシミュレーションには適さないといえる。

次に移動経路について気象庁ベストトラックと比較

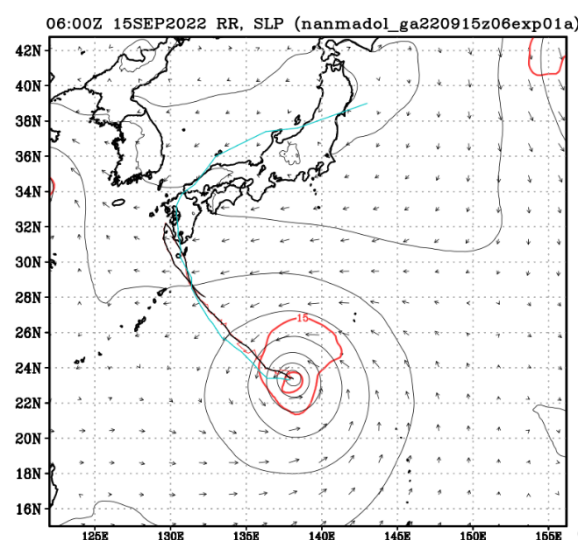


図 3：図 1 の黒実線の実験の初期値および台風の移動経路。黒線は中心の経路、赤線は最低気圧の経路、水色線は気象庁ベストトラックの台風の経路。

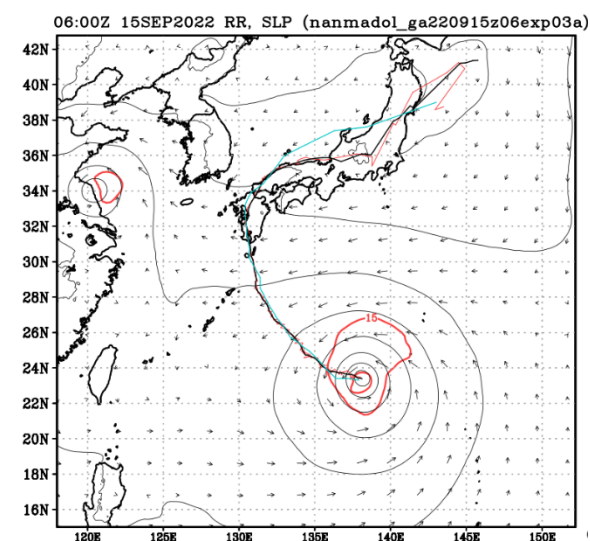


図 4：図 3 に同じ。ただし計算領域を西に経度 4 度移動し、スペクトルナッジングを使用した。

する。図 3 は図 1 の標準実験の台風の移動経路と初期値である。九州に近づくまでは移動経路は観測によく対応している。しかし観測では鹿児島に上陸するのに対して、標準実験では九州の西を進む結果となる。さらに九州北部に達した後、南下するという実際とは大きく異なる結果となった。

図 4 は図 1 の青線の結果の台風の移動経路と初期値で、この実験では台湾を含む領域で、かつスペクトルナッジングをオンにしてある。経路は九州北部を抜けて中国地方を東に移動するまで、ほぼベストトラックと同じとなっていて、進路予測が高精度であることが分かる。中国地方から日本海に抜けるところでベストトラック（水色線）からモデルの結果（黒実線および赤実線）が南にずれている。これは予報計算の問題というよりは温低化が始まり、気圧分布に非対称性が表れることで、中心の推定が不確実となったからである。この結果よりスペクトルナッジングは台風の進路を決定する上で効果的といえる。

前述のように台風 Nanmadol の降水構造についての顕著な特徴は、長時間維持された二重壁雲構造である。この再現は現段階では不十分であるが、標準実験でそれに近いものが得られている。図 5 は標準実験の初期値から 58 時間の 9 月 17 日 16:00UTC の地上降水分布と海面気圧の分布である。台風の眼を取り囲む壁雲がよく再現されている。ただし Nanmadol の眼の特徴は非常に小さいということである。航空機観測が実施された 9 月 17 日 01:35UTC には、眼の直径が 30km もないほどであった。シミュレーション実験の結果は、直径が 50km ほどとなっており、観測よりやや大きい。図 5 では眼を取り囲む壁雲の外側にもうひとつ外側壁雲が形成されており、二重壁雲構造が再現されているといえる。ただし、観測ではこの構造が 2 日間以上にわたって維持されたが、標準実験ではそれほど長期間の持続はみられなかった。この点も今後、改善をしていく必

要がある。

5. まとめ

2022 年の T-PARCII プロジェクトで観測されたスーパー台風 Nanmadol について、9 月 15 日 06UTC を初期値とする 5 日間のシミュレーション実験を実施した。中心気圧の時間変化からやや過発達となったが、中心気圧の低下率は、ある程度観測と対応しており、急発達はおおむね再現された。Nanmadol の特徴である、小さな眼についてはやや大きい、ある程度再現されており、二重壁雲構造に似た構造もみられた。今後、初期値・境界値データやパラメータを変更した実験を行い、再現性を高めたうえで、観測と詳細に比較し暖気核などの構造を調べる。再現性を高めるとともに、強度をコントロールする物理過程の改良を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Tsuboki, K., and A. Sakakibara, “Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator”, *High Performance Computing*, edited by H. P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki, 243-259, Springer, New York, (2002)
- [2] Tsuboki, K., 2023: High-Resolution Simulations of Tropical Cyclones and Mesoscale Convective Systems Using the CReSS Model. Park, S.K. (eds) Numerical Weather Prediction: East Asian Perspectives. Springer Atmospheric Sciences. Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-40567-9_19
- [3] Tsujino, S. and K. Tsuboki, 2020: Intensity change of Typhoon Nancy (1961) during landfall in a moist environment over Japan: A numerical simulation with spectral nudging. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 1429-1454, doi:10.1175/JAS-D-19-0119

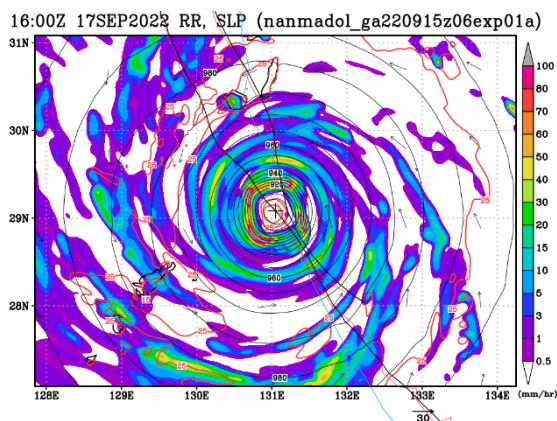


図 5 : 図 1 の黒実線の実験の初期値から 58 時間の 2022 年 9 月 17 日 16:00UTC の地上降水強度（カラースケール）、地上気圧（黒実線）、25m/s の地上風速線（赤実線）、および地上風（矢印）。十字は中心位置。