

複数の次世代非静力学全球モデルを用いた高解像度台風予測実験

課題責任者

竹内 義明 気象庁気象研究所 研究調整官

研究分野

大気・海洋分野

1. 研究の目的と意義

日本に接近する台風への社会の関心は高い。特に台風による自然災害は社会・経済活動に深刻な影響を与えることから、その軽減のために台風の進路や強度の予測精度向上は常に社会から求められている。このような中、気象庁現業モデルの台風進路予測の誤差はこの十数年ではほぼ半減した一方で、強度予測の精度向上は小さく、大きな課題となっている。この原因の一つとして、モデルの水平解像度（2015年現在20km）が粗すぎるのが指摘されているが、水平解像度を高めて予測精度を向上させるためには、非静力学モデルの使用、解像度に見合った物理過程スキームの開発等を行い、全般的な気象予測および台風予測に含まれる系統的なバイアスを低減する必要がある。これまで、高解像度モデルは計算機負荷が大きいため、シミュレーションの事例数が厳しく限定され、系統的なバイアスを特定するに至っていなかった。

本研究では、全球モデルを7kmに高解像度化し5日先までの台風予測実験を実施する。得られた実験結果に対し、気象庁ベストトラック解析データを用いた検証及びモデル間の相互比較を行い、台風予測精度を定量的に評価するとともにマルチモデルアンサンブル予測の有効性を検証する。これにより、以下の成果を得ることが期待できる。

- 高解像度化することによる台風予測への効果、特に既存のモデルにも含まれているモデル固有の系統誤

差の理解

- モデルの調整及び感度実験の実施による、台風予測改善に向けたモデル改良のための知見の獲得
- 膨大な出力データを効率的に解析・研究する手法の確立
- 将来の気象庁現業モデル力学コアを選択する際の、参考となる技術情報の提供

本研究で得られる成果や知見は、計算機科学や大気科学の研究の進展に貢献するだけでなく、将来の気象庁高解像度現業数値予報モデルの開発に直接的・間接的に貢献することが期待でき、それによる気象庁モデルの台風予測改善を通じ、自然災害による被害軽減につながる。

2. 研究内容

本研究では、地球シミュレータ（ES）において、2013年9-10月にかけて日本に接近・上陸した台風を対象とした52初期時刻の5日予測実験を実施し、複数の高解像度モデルによる台風予測の評価を実施した。

使用したモデルは以下の通り（詳細仕様は表1参照）。

- 気象研究所が現業モデルをベースに二重フーリエ級数展開を用いて高速化した非静力学全球モデル（DFS）
- 海洋研究開発機構（JAMSTEC）、東京大学及び理化学研究所が開発した正20面体格子モデル（NICAM）

表1 各モデルの仕様

	DFS	GSM	MSSG	NICAM
空間分解能	7km	20km	7km	7km
格子	リデュースト等緯度格子	リデューストガウス格子	有限差分法	有限体積法
力学フレーム	二重フーリエ級数を基底とする非静力学スペクトルモデル	球面調和関数を基底とする静力学スペクトルモデル	陰陽	正二十面体
雲物理	Smith (1990)	Smith (1990)	Onishi&Takahashi (2012)	Tomita (2008)
積雲対流	Randall&Pan (1993)	Randall&Pan (1993)	-	-
大気境界層	MY2 (Mellor&Yamada, 1974, 1982)	MY2 (Mellor&Yamada, 1974, 1982)	MYNN2.5 (Nakanishi&Niino, 2004, 2006, 2009)	MYNN2 (Nakanishi&Niino, 2004, 2006, 2009)
放射	JMA (2013) Yabu (2013)	JMA(2013) Yabu (2013)	MSTRN-X (Sekiguchi& Nakajima, 2008)	MSTRN-X (Sekiguchi& Nakajima, 2008)
陸面・海面	SiB (JMA,2013)	SiB (JMA,2013)	バケツモデル (3次元海洋)	MATSIRO (Takata et al. 2003) 海面熱収支
接地境界層	Louis (1982) Miller (1989 海・不安定)	Louis (1982) Miller (1989, 海・不安定)	Zhang & Anthes (1982)	Louis (1982)

- JAMSTEC が開発した陰陽格子モデル (MSSG)
- DFS と同じ物理過程で水平解像度のみ 20km 相当に変えたモデル (GSM)

また、評価に利用した台風中心位置及び中心気圧については、気象庁ベストトラックデータ (以下、「ベストトラック」という。http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html) を使用した。

さらに、予測実験の実施に際し、DFS を ES へ移植したほか、各モデルについて最適化作業を実施して、計算の高速化やデータ出力の効率化を図った。加えて、大容量出力データを効率的に解析・可視化する手法に関する研究も実施した。

実施体制は表 2 の通りである。

表 2 実施体制

分担項目	担当者	所属
総括	竹内義明	気象庁気象研究所
DFS 移植、実験	吉村裕正	気象庁気象研究所予報研究部
NICAM 実験	中野満寿男	海洋研究開発機構
MSSG 実験	大西領 淵上弘光 佐々木亘	海洋研究開発機構 (株) NEC 情報システムズ 海洋研究開発機構
実験設計	上記 5 名 + 和田章義 川合秀明、新藤永樹	気象庁気象研究所台風研究部 気象庁気象研究所気候研究部
統計的検証、事例検証	那須野智江 沢田雅洋、山口宗彦 入口武史、杉正人	海洋研究開発機構 気象庁気象研究所台風研究部 気象庁気象研究所気候研究部
簡易可視化解析	川原慎太郎	海洋研究開発機構

3. 研究成果

表 3 に本研究で実施した 52 初期時刻、その時刻に存在した台風の対応、及びモデル計算の可否を示す。NICAM については、陸面過程の計算部分での不具合により 11 初期時刻について計算ができなかった。以下、結果の概要を記載し、キーセンテンスに下線を付す。

表 3 実験に用いた初期時刻、存在した台風、およびモデル毎の計算可否

初期時刻・モデル	存在した台風 (ベストトラックデータ、斜字は熱低、斜太字は温低)	DFS	GSM	MSSG	NICAM	
1	2013 年 9 月 12 日 0000UTC	18	○	○	○	○
2	2013 年 9 月 12 日 0600UTC	18	○	○	○	○
3	2013 年 9 月 12 日 1200UTC	18	○	○	○	○
4	2013 年 9 月 12 日 1800UTC	18	○	○	○	○
5	2013 年 9 月 13 日 0000UTC	18	○	○	○	○
6	2013 年 9 月 30 日 0000UTC	21、22、23	○	○	○	○
7	2013 年 9 月 30 日 0600UTC	21、22、23	○	○	○	×
8	2013 年 9 月 30 日 1200UTC	21、22、23	○	○	○	○
9	2013 年 9 月 30 日 1800UTC	21、22、23	○	○	○	○
10	2013 年 10 月 1 日 0000UTC	21、22、23、24	○	○	○	○
11	2013 年 10 月 1 日 0600UTC	22、23、24	○	○	○	×
12	2013 年 10 月 1 日 1200UTC	22、23、24	○	○	○	×
13	2013 年 10 月 1 日 1800UTC	22、23、24	○	○	○	×
14	2013 年 10 月 2 日 0000UTC	22、23、24	○	○	○	×
15	2013 年 10 月 2 日 0600UTC	22、23、24	○	○	○	○
16	2013 年 10 月 2 日 1200UTC	22、23、24	○	○	○	○
17	2013 年 10 月 2 日 1800UTC	22、23、24	○	○	○	×
18	2013 年 10 月 3 日 0000UTC	22、23、24	○	○	○	○
19	2013 年 10 月 3 日 0600UTC	22、23、24	○	○	○	○
20	2013 年 10 月 3 日 1200UTC	22、23、24	○	○	○	○
21	2013 年 10 月 3 日 1800UTC	22、23、24	○	○	○	×
22	2013 年 10 月 4 日 0000UTC	23、24	○	○	○	×
23	2013 年 10 月 9 日 0000UTC	24、25、26	○	○	○	○
24	2013 年 10 月 9 日 0600UTC	24、25、26	○	○	○	○
25	2013 年 10 月 9 日 1200UTC	25、26	○	○	○	○
26	2013 年 10 月 9 日 1800UTC	25、26	○	○	○	○
27	2013 年 10 月 10 日 0000UTC	25、26	○	○	○	○
28	2013 年 10 月 10 日 0600UTC	25、26	○	○	○	○

初期時刻・モデル	存在した台風 (ベストトラックデータ、斜字は熱低、斜太字は温低)	DFS	GSM	MSSG	NICAM
29	2013年10月10日1200UTC	○	○	○	○
30	2013年10月10日1800UTC	○	○	○	○
31	2013年10月11日0000UTC	○	○	○	○
32	2013年10月11日0600UTC	○	○	○	○
33	2013年10月11日1200UTC	○	○	○	○
34	2013年10月11日1800UTC	○	○	○	○
35	2013年10月12日0000UTC	○	○	○	○
36	2013年10月12日0600UTC	○	○	○	○
37	2013年10月12日1200UTC	○	○	○	○
38	2013年10月17日1200UTC	○	○	○	○
39	2013年10月17日1800UTC	○	○	○	○
40	2013年10月18日0000UTC	○	○	○	○
41	2013年10月18日0600UTC	○	○	○	○
42	2013年10月18日1200UTC	○	○	○	×
43	2013年10月18日1800UTC	○	○	○	○
44	2013年10月19日0000UTC	○	○	○	×
45	2013年10月19日0600UTC	○	○	○	○
46	2013年10月19日1200UTC	○	○	○	○
47	2013年10月19日1800UTC	○	○	○	○
48	2013年10月20日0000UTC	○	○	○	○
49	2013年10月20日0600UTC	○	○	○	○
50	2013年10月20日1200UTC	○	○	○	×
51	2013年10月20日1800UTC	○	○	○	○
52	2013年10月21日0000UTC	○	○	○	○

3.1 台風強度予測

図1に台風強度（中心気圧）の検証結果を示す。水平解像度7kmのモデルはいずれもGSMと比べて台風強度をよく再現していた。具体的にはGSMは予測1日後に既に台風の強度を十分に再現できず、それ以降弱めに予測する特徴を有していたのに対し、高解像度モデルはより台風を強めに予測するようになった。DFSについてはGSMとは逆に台風強度をベストトラックより強めに予測する特徴を有していた。特にDFSとGSMはほぼ同じモ

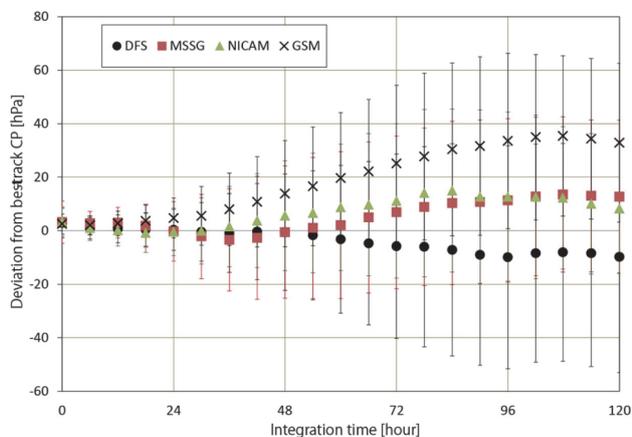


図1 2013年台風第18、22、23、24、26、28号に関する65ケースの台風（NICAMは45ケースの台風）の台風強度予測結果から計算された気象庁ベストトラックからの中心気圧差の平均値及び標準偏差のモデル毎の時系列。

デル仕様であることから（表1）、図1に示された結果は、水平解像度の高解像度化により台風強度予測、特に台風の発達予測が改善されることを示唆する。

図2に、各モデルの強度予報の特徴を調べるため、ベストトラックと各モデルの中心気圧の予報値の散布図を示す。GSMは950hPa以下に低下する事例はほぼ再現できていないのに対し、水平解像度7kmの3つのモデルではより低い中心気圧を再現している。DFSは920hPa以下に低下する事例を再現することがあるが、予報3日目以降に過発達している事例が顕著で、ベストトラックでは見られない900hPaを下回るものもあった。MSSGは930hPa前後まで再現し、他のモデルに比べて予報1日目でも過発達している事例が多い。NICAMはDFS、MSSGと比べて極端な低下をする事例が少なく全体的にばらつきが小さいものの、940hPa以下に低下する事例は十分に再現できていないことが分かる。

各事例に対する強度の再現性の共通点・相違点を調べるため、生涯最大強度（最低気圧）と最大気圧低下率、それらに達したタイミング（ベストトラックとのずれ）を表4に示す。事例ごとに見ると、台風第18号（NICAMを除く）や第23号では最大強度は過発達な一方、台風第24号や第28号でのそれは発達が不十分である。最大気圧低下率のタイミングは、台風第24号はどのモデルもベストトラック解析よりも早く、そのほかの事例はモデル間のばらつきが大きい。最低気圧に達するタイミングはベストトラッ

ク解析に比べてほぼ全事例、全モデルで遅れており、共通している（MSSGの台風第23号を除く）。このように、

複数の事例を見ることで事例ごとの特徴を理解でき、かつ各モデルの得意・不得意な点を明らかにできる。

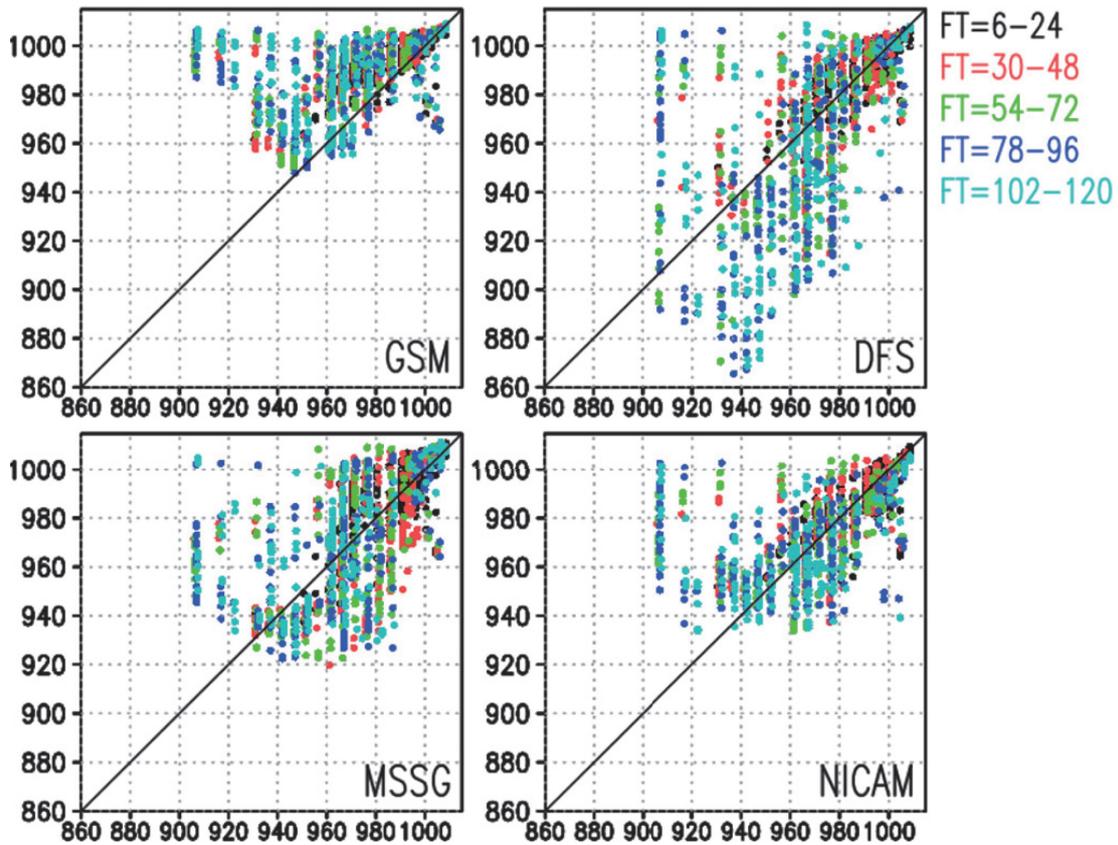


図2 ベストトラック解析（横軸）と各モデル（縦軸）の中心気圧の散布図。色の違いで予報時間の違いを表す。

表4 各モデルにおける生涯最大強度と最大発達率の再現性。

セル内の数字は上から生涯最低気圧（Pmin:hPa）、最大気圧低下率（dPmin:hPa/day）、ベストトラックに対する生涯最低気圧（hPa）に達した日時に対するラグ（hour）、最大気圧低下率に対するラグ（hour）。

	#	GSM	DFS	MSSG	NICAM	Besttrack	事例の特徴
T1318	5	987.3 -10.8 12.0 0.0	952.5 -27.6 9.6 8.4	938.6 -37.7 12.0 -21.6	965.6 -18.5 18.0 0.0	960 -25	モデル間のばらつきやや大きい。Pminの差はNICAMが最も小さい。
T1323	9	974.0 -7.7 28.0 4.0	919.2 -38.0 19.3 6.7	954.1 -21.4 -13.3 -16.7	949.9 -22.6 21.3 -10.0	960 -15	GSM以外は過発達、dPminも大き過ぎる。MSSGだけPminのタイミング早い。
T1324	5	993.7 -3.1 -18.0 10.8	942.2 -30.1 21.6 -15.6	974.6 -29.5 14.4 -6.0	971.7 -18.3 20.4 -2.4	935 -35	どれも弱め。発達開始は早い。Pmin, dPminの差はDFSが最も小さい。
T1326	15	962.6 -13.7 36.0 7.2	902.1 -55.5 22.8 6.8	935.6 -44.0 18.0 -23.2	951.8 -19.5 33.6 -10.4	930 -40	モデル間のばらつき大きい。Pmin, dPminの差はMSSGが最も小さい。
T1328	7	997.0 -2.6 31.7 -18.9	940.0 -37.7 40.3 16.3	961.4 -23.8 30.9 -0.9	967.6 -18.5 45.4 30.9	905 -70	どれも弱め。dPminも小さい。眼の水平スケールが小さく、難しい事例
モデルの特徴		Pminに至るタイミング遅い、弱め、dPmin小	Pminに至るタイミング遅い、過発達傾向、dPmin大	dPminに至るタイミング早い	Pminに至るタイミング遅い、dPmin小		

3.2 台風進路予測

図3に台風進路（中心位置）予測の検証結果を示す。解像度に依らず、どのモデルも南西方向のバイアスをもっていたことが分かる。この結果は、モデルの高解像度化が必ずしも台風進路予測の精度向上に資するわけではないことを示唆している。

南西方向へのバイアスの事例依存性を示すため、予測5日目での中心位置の差を各台風事例で示す（図4）。予測された経路は南西側にバイアスを持っているものが多いが、事例依存も大きいことが分かる。例えば、台風第18号はどのモデルにおいても南西方向に10度以上ずれているが、台風第23号、25号については南西方向へのバイアスは見られない。また、GSMと高解像度モデルの結果に大きな差がみられないことから、進路予測の向上には高解像度化以外の要因（初期値化や物理過程の改良）が重要であることが示唆される。

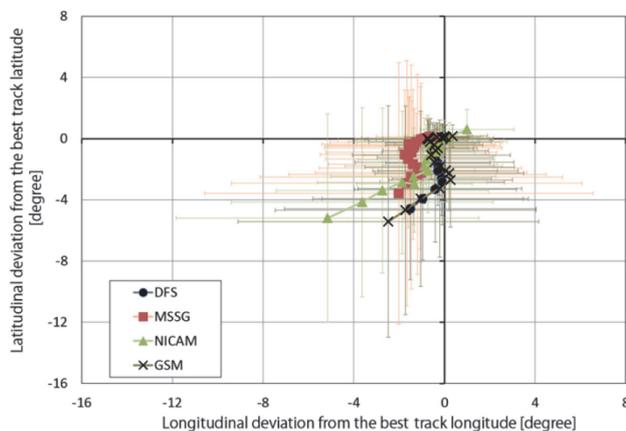


図3 2013年台風第18, 22, 23, 24, 26, 28号に関する65ケース（NICAMは45ケース）の台風進路予測結果のベストトラックに対する中心位置差の平均（丸、四角、三角、バツ印）及び標準偏差（エラーバー）のモデル毎の6時間毎の時系列（原点から最も離れている点が120時間予測に対応）。

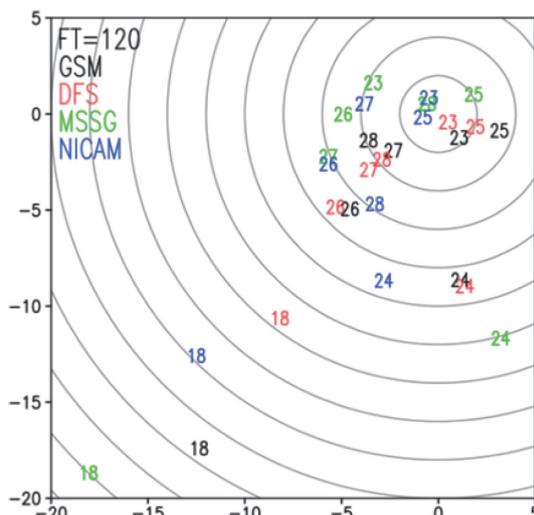


図4 図3のFT=120における中心位置差の平均値を各台風事例に分けたもの（2013年台風第18, 23, 24, 25, 26, 27, 28号）。数字は各台風番号、色で各モデル結果を示す。横軸は経度、縦軸は緯度方向の差。

3.3 台風事例毎の特徴

ここでは個別の台風について、経路及び中心気圧に加え、台風の内部構造、特に台風中心へ向かう流入（インフロー）層の厚さ、最大風速半径、温暖核の大きさ及び高度、台風中心から遠ざかる流出（アウトフロー）層に着目することにより、各モデルで表現し得る台風構造の特徴を詳細に考察する。

3.3.1 2013年台風第18号

2013年台風第18号の予測実験の結果を図5に示す。経路予測について、MSSGのみ西進バイアスが顕著であったものの、大部分のケースにおいて、転向位置の予測は妥当であった。しかしながら転向後は、各モデル及び初期値によるばらつきが大きかった。

中心気圧に関しては、MSSGは過剰に中心気圧を深める傾向にあった。一方、DFSおよびNICAMはほぼベストトラックに近い中心気圧を再現した。ただし台風が北緯30度付近に達した9月15日の中心気圧の急降下については、再現できなかった。GSMはほとんど中心気圧を深めていなかった。

2013年台風第18号の予測実験で得られた軸対称平均動径風及び接線風分布の例を図6に示す。モデルの物理過

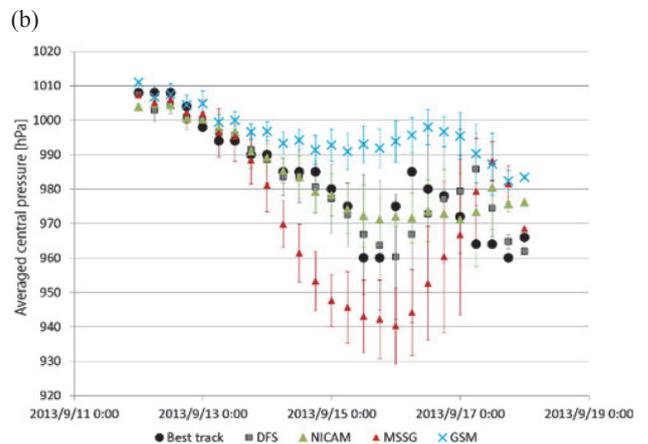
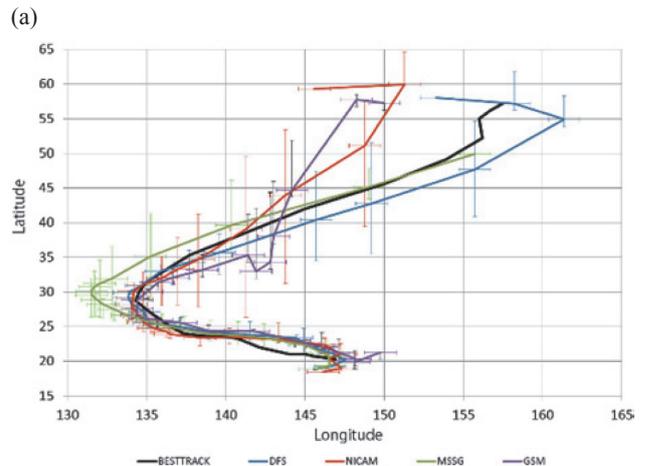


図5 2013年台風第18号に関する5初期値の台風予測結果。(a) 平均経路及び標準偏差、(b) 平均中心気圧及び標準偏差の時系列。黒線及び黒丸はベストトラック。

程の設定が同じであるDFS (図 6a) とGSM (図 6b) を比べると、対流圏下層での動径成分で表される台風中心への流入、接線風速の大きさ及び最大となる半径、対流圏上層に見られる台風中心から外へ向かう動径風の表現について大きな差が見られ、高解像度化によってより現実的な台風の構造が再現されていることが分かる。

DFS (図 6b)、MSSG (図 6c)、NICAM (図 6d) は同じ水平解像度であるにも関わらず、その軸対称構造は大きく異なる。MSSG (図 6c) では大気境界層における動径風の流入がもっとも強く、またその層は厚い。接線風速や対流圏上層での台風中心から外側へ向かう動径風も強く、またその層厚も非常に厚い。NICAM (図 6d) の結果はGSM に近く、比較的 center から離れたところに接線風の最大が見られ、DFS や MSSG に比べ最大風速半径が大きい。このように非静力学系モデルで水平解像度が同じであっても、物理過程などの仕様が異なることにより、シミュレートされる台風の構造に大きな違いが見られることが明らかとなった。

3.3.2 2013年台風第26号

事例による共通点と相違点を述べるために、台風第18号と同様に発生後北西進し、転向後北東進した2013年台風第26号の結果を示す。台風第18号と異なり、南西バイアスが顕著で、どのモデル、どの水平解像度においても共通して見られた。また、MSSGが台風第18号の場合とは異なり東寄りの経路を示している (図 7a)。

台風中心気圧についても台風第18号と異なる特徴が見られる。MSSGが発達期に中心気圧をやや過剰に深めている点、DFSが最発達期を超えて過剰に中心気圧を深めている点が顕著である。一方でNICAMの中心気圧の変化傾向はGSMの変化傾向と類似しており、その変化率がより大きいという特徴が見られた (図 7b)。

図 8 に軸対称平均動径風及び接線風分布の例を示す。台風第18号の場合と同様、DFSとGSMの構造の違い (図 8a, b) や、MSSGの大気境界層における動径風流入層及び対流圏上層における動径風流出層の層厚が厚い特徴 (図 8c) が見られる。接線風速の分布、特に最大接線風速半径の位置

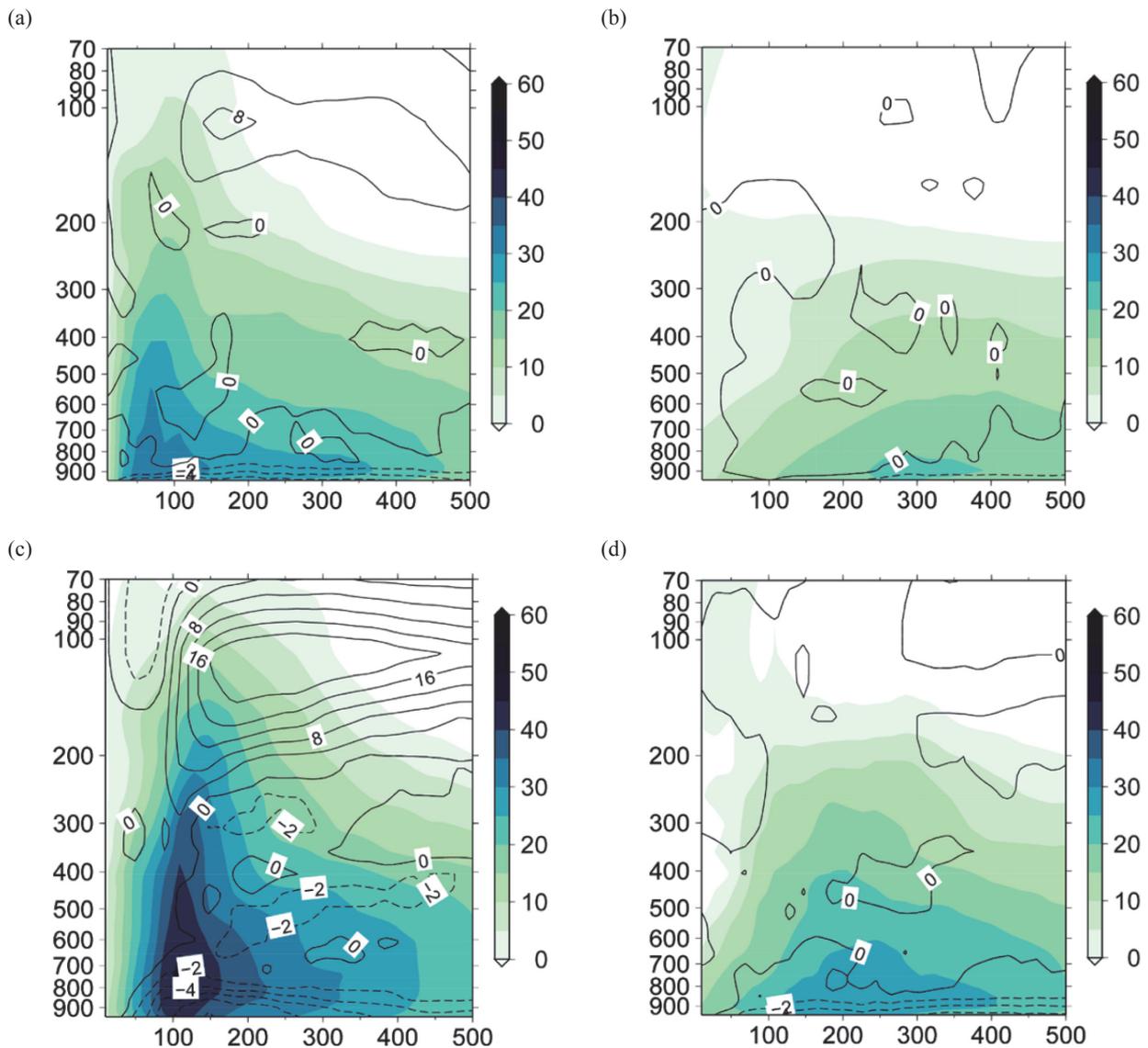


図 6 2013年9月13日0000UTC初期値、48時間後の軸対称平均動径風 (コンター、太線は外側、破線は内側へ向かう流れ。間隔は4m/s及び2m/s) 及び接線風 (シェード)。(a)DFS、(b)GSM、(c)MSSG、(d)NICAM。

について、DFS と MSSG は整合しているが NICAM ではより外側に見られ (図 8d)、これも台風第 18 号の結果にも

見られた特徴である。このように、台風の構造には台風事例に依らずモデル毎の特性が共通して見られる。

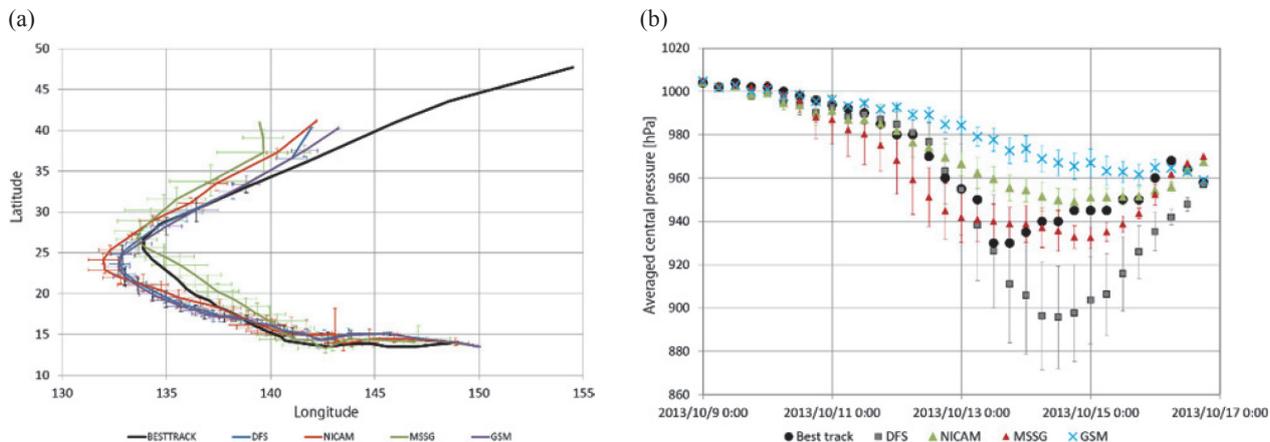


図 7 2013 年台風第 26 号に関する 12 初期値の台風予測結果。(a) 平均経路及び標準偏差、(b) 平均中心気圧及び標準偏差の時系列。黒線及び黒丸はベストトラック。

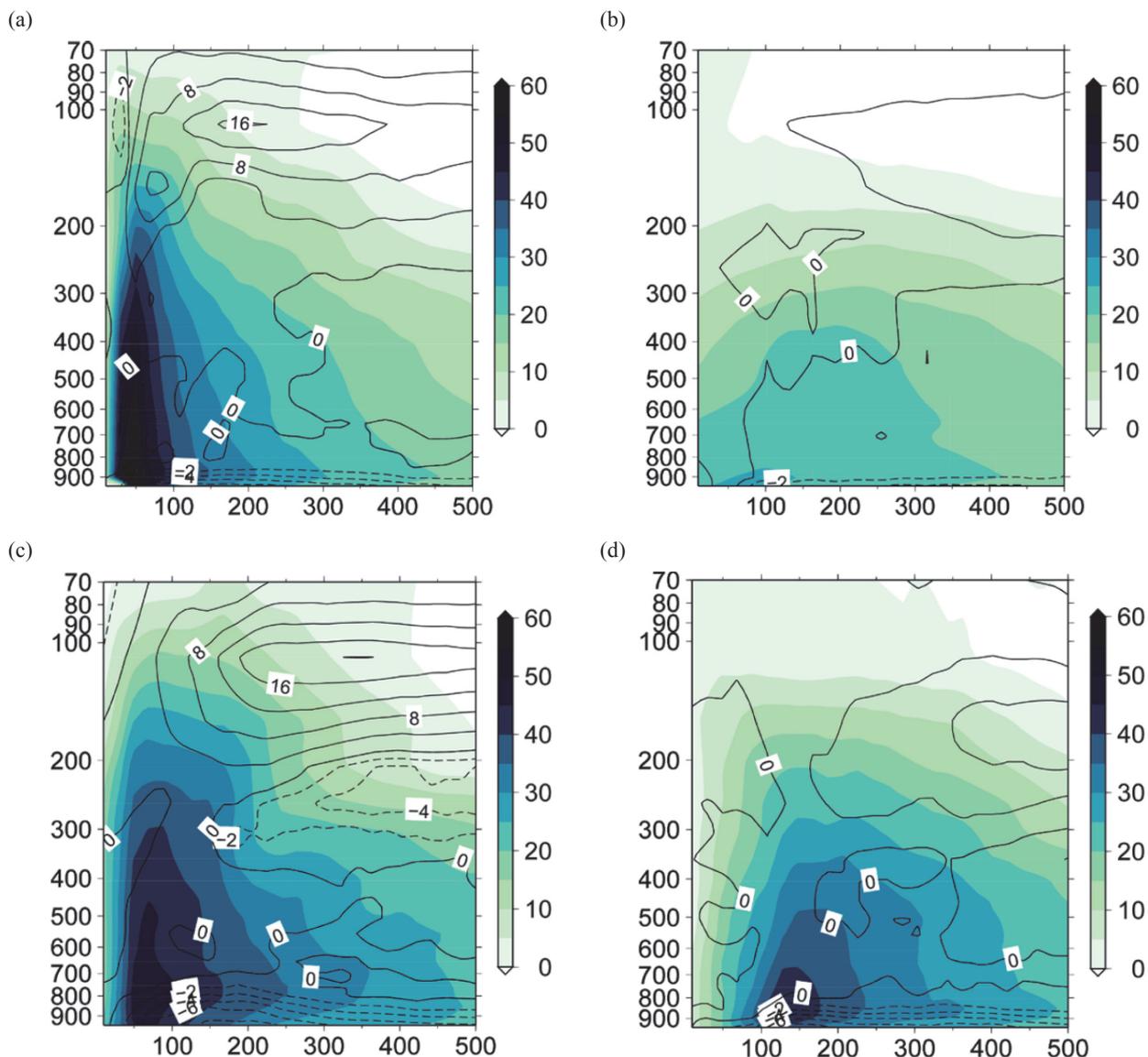


図 8 2013 年 10 月 10 日 1200UTC 初期値、72 時間後の軸対称平均動径風 (コンター、太線は外側、破線は内側へ向かう流れ間隔は 4m/s 及び 2m/s) 及び接線風 (シェード)。(a)DFS、(b)GSM、(c)MSSG、(d)NICAM。

3.4 可視化・ビッグデータ処理

海洋研究開発機構・地球情報基盤センターでは、可視化結果の並列表示によるモデル間比較を目的とした二種類の Web アプリケーションを開発した。一つは、可視化ソフトウェア GrADS によって別途用意した可視化結果を HTML 上で並列表示するための Java アプリケーションである。本アプリケーションでは、表示する物理量やモデルの表示順をプルダウンメニューにより変更することができる。今回、各モデルの結果を並列表示できるように設定し、結果の簡易比較を GUI で行えるようにした(図9)。モデル別あるいは全モデルの時間発展のアニメーション

表示も可能であり、詳細で定量的な比較を行う前の俯瞰的な比較に適した可視化ツールといえる。

もう一つは、Google Earth 用ボリューム可視化ソフトウェア VDVGE による可視化結果を並列表示するための Web アプリケーションである。本アプリケーションでは、Google Earth API を用いて Web ブラウザ内に複数の Google Earth を表示し、その上に可視化結果をオーバーレイ表示する(図10)。図9に示したものと同様に、時間発展のアニメーションができるだけでなく、三次元的な視点の変更を可能とした。これらのアプリケーションの開発により、視覚的なモデル間比較を容易とするだけでなく、各モデルに特有な現象の表現や物理量の特徴の把握が実現できる。

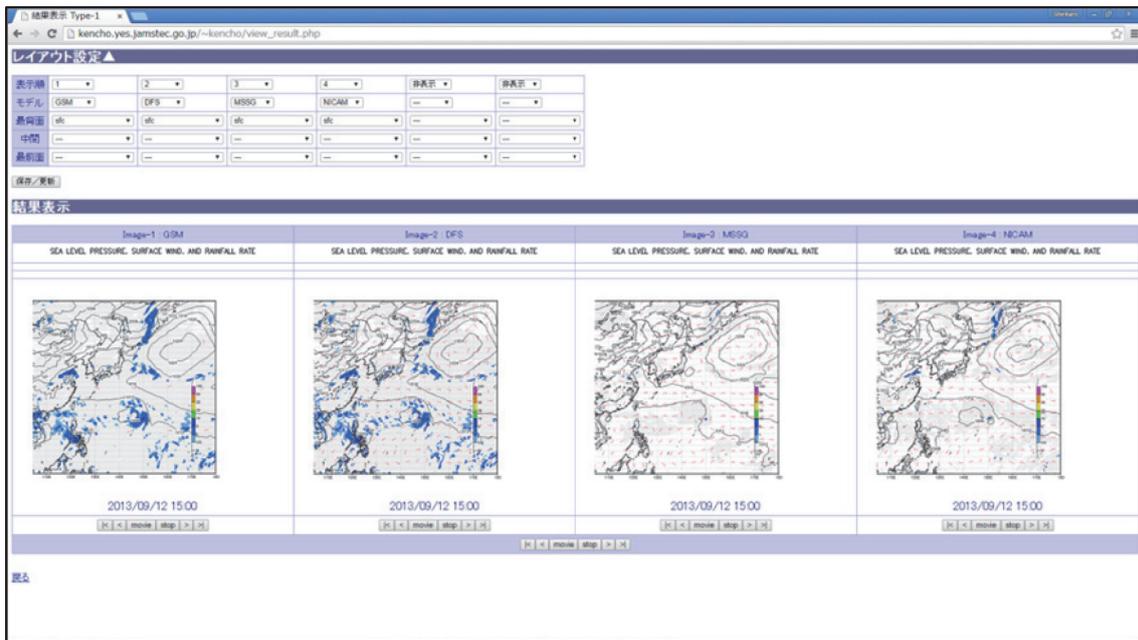


図9 簡易モデル結果比較 Web アプリケーションによる表示例。例として、海表面気圧、海表面風速、降水量を表示している。

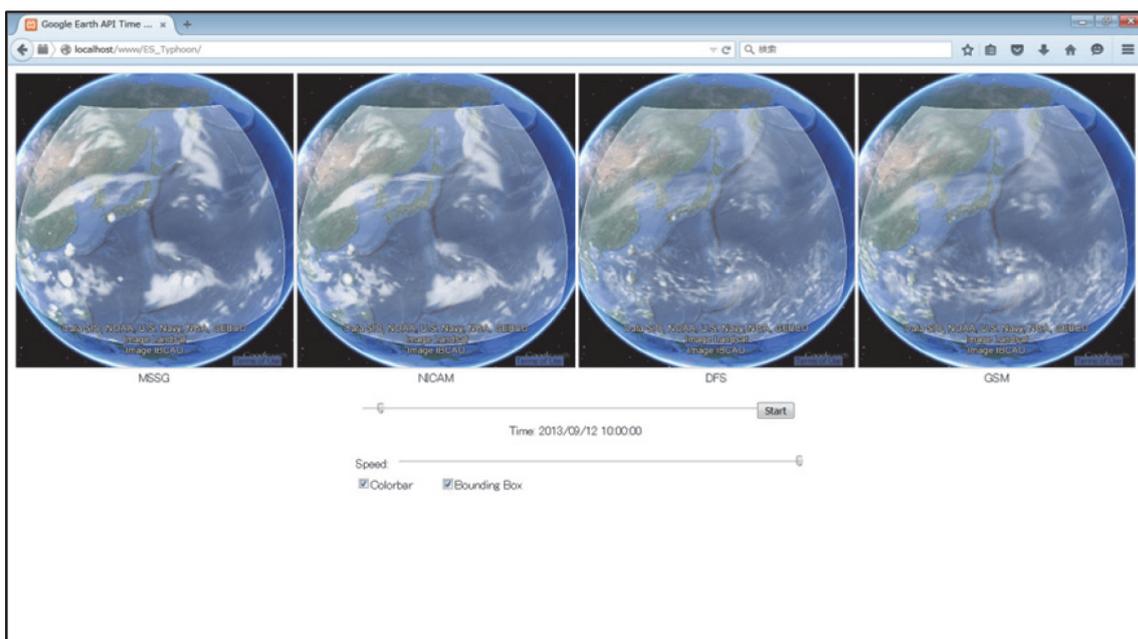


図10 VDVGE と Google Earth API を利用した Web アプリケーションによる表示例。2013 年台風第 18 号の OLR を表示している。Google Earth API を用いてインタラクティブな視点位置の変更ができる。

3.5 成果創出の加速について

本課題により、これまで限られた事例でしか行えなかった高解像度の全球モデルについてまとめた事例数での実験を実施でき、台風強度・進路の系統誤差を統計的に評価できたこと、高解像度化の台風強度精度向上への明らかな効果を確認できたこと、台風の事例依存性を確認できたこと、台風強度に密接に関係している台風の詳細構造のシミュレーションデータセットを作成できたこと、何よりこれらを気象庁および海洋研究開発機構の複数の高解像度全球モデルで条件を揃えて実施できたことにより、気象庁のモデル開発に資する気象研究所中期研究計画の促進とともに、海洋研究開発機構の中期目標・中期計画で行うモデルの改良にも大きく寄与するものとなった。

4. 想定される波及効果

複数の次世代全球高解像度（水平解像度約7km）大気モデルによる台風予測が実現したことにより、大気科学及び計算機科学の側面で新たな進展を得た。2013年9-10月の台風事例に限定されるものの、水平解像度高解像度化による台風強度予測の精度向上が見込まれるという本課題で初めて得られた成果は、次世代台風予報及びそれにかかわる情報の改善に貢献することが期待される。高解像度化モデルにおける台風発達プロセスの解明や、進路予測の系統誤差の原因究明と改善は、科学的な観点からも重要な課題であり、引き続き詳細な研究を行う必要がある。

さらに、次節で示す技術支援により次世代全球高解像度（水平解像度約7km）大気モデルが高速化されたことは特筆すべき成果である。最先端の計算機科学の知見を大気モデルの高速化へ適用し、計算機コストを軽減した実績は、高速化の知見を今後の研究や将来の現業モデルの開発を加速すると期待される。加えて可視化・ビッグデータ処理技術の開発・適用により、計算された台風の移動・強化・構造変化過程を科学的に解明することが容易となるだけでなく、各モデルの改善にも資する。以上、今回新たに得られた科学・技術的知見は、大気科学・計算機科学のコミュニティに対して有益であり、防災上重要となる台風の予測を通じて、社会に還元されることが期待される。

文献

- [1] Japan Meteorological Agency, 2013: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO technical progress report on the global data-processing and forecasting system and numerical weather prediction, 188p. <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/index.htm>
- [2] Louis, J. F., M. Tiedtke, and J. F. Geleyn (1982), A short history of the operational PBL parameterization at ECMWF. *Proc. Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization*, Reading, United Kingdom, ECMWF, 59-79.
- [3] Mellor, G. L. and T. Yamada (1974), A hierarchy of

turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.

- [4] Mellor, G. L. and T. Yamada (1982), Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.
- [5] Miller, M. J., Palmer, T. N. and R. Swinbank (1989), Parameterization and influence of subgridscale orography in general circulation and numerical weather prediction models, *Meteor. Atmos. Phys.*, **40**, 84-109.
- [6] Nakanishi, M. and H. Niino (2004), An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound.-Layer Meteor.*, **112**, 1-31.
- [7] Nakanishi, M. and H. Niino (2006), An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Bound.-Layer Meteor.*, **119**, 397-407.
- [8] Nakanishi, M. and H. Niino (2009), Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895-912.
- [9] Onishi, R. and K. Takahashi (2012), A warm-bin-cold-bulk hybrid cloud microphysical model. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1474-1497. doi: 10.1175/JAS-D-11-0166.1
- [10] Randall, D. and D.-M. Pan, 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. The representation of cumulus convection in numerical models, *AMS Meteorological Monograph Series*, **46**, 137-144.
- [11] Sekiguchi M and T. Nakajima (2008), A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **109**, 2779-2793
- [12] Smith, R. N. B. (1990), A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 435-460.
- [13] Takata K, S. Emori, T. Watanabe, (2003), Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change*, **38**, 209-222.
- [14] Tomita, H. (2008), New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **86A**, 121-142. doi: 10.2151/jmsj.86A.121
- [15] Yabu, S. (2013), Development of longwave radiation scheme with consideration of scattering by clouds in JMA global model, *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. **43**. 4.07-4.08.
- [16] Zhang D. and R. A. Anthes (1982), A high-resolution model of the planetary boundary layer—sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 Data. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1594-1609.

Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast (TYMIP-G7) - The First Term: Statistical Study for Land Approaching Typhoons -

Project Representative

Yoshiaki Takeuchi Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Authors

Yoshiaki Takeuchi^{*1}, Masahiro Sawada^{*1}, Hiromasa Yoshimura^{*1}, Akiyoshi Wada^{*1}, Masuo Nakano^{*2}, Tomoe Nasuno^{*2}, Ryo Onishi^{*3}, Hiromitsu Fuchigami^{*4}, Wataru Sasaki^{*3}, Shintaro Kawahara^{*3}, Munehiko Yamaguchi^{*1}, Takeshi Iriguchi^{*1}, Hideaki Kawai^{*1} and Eiki Shindo^{*1}

*1 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

*2 Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*3 Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*4 NEC Informatec Systems, Ltd.

A project “Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast” (TYMIP-G7) aims at the improvement of 5-day tropical cyclone (TC) track and intensity forecasts. In the first term of this project from June to September 2015, we performed 52 runs for nine Typhoon cases from September to October in 2013 on the Earth Simulator, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) using the following three 7-km mesh global atmospheric models, the nonhydrostatic global spectral atmospheric model using Double Fourier Series (DFS), Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG), and Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) as well as a 20-km mesh hydrostatic Global Spectral atmospheric Model (GSM). We found that global 7-km mesh models contribute to reduction in systematic positive errors of central pressures predicted in GSM with a 20-km mesh. However, the advantages of high resolution model on TC track prediction could not be confirmed.

Keywords: Numerical Weather Prediction, Global Atmospheric Model, Typhoon, Model Intercomparison

1. Introduction

Three nonhydrostatic global atmospheric models have ever been developed in each research group for each purpose in Japan. We expect that a future operational high resolution nonhydrostatic NWP model will be realized in early 2020s. The main objective of the project “Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast” (TYMIP-G7) is to statistically quantify and understand the advantage of high-resolution global atmospheric models on the improvement of 5-day tropical cyclone (TC) track and intensity forecasts, aiming at the improvement of 5-day TC track and intensity forecasts. We statistically evaluated errors of TC forecasts based on Regional Specialized Meteorological Center (RSMC) Tokyo best track data for gaining the advantages of the application of higher resolution model to TC forecasts using the results of the following three 7-km mesh nonhydrostatic atmospheric models (DFS, MSSG, and NICAM) as well as a

20-km mesh hydrostatic operational atmospheric model of JMA (GSM) for various targeted TC cases.

2. Experimental design

2.1 Targeted Cases

In this term, the targeted cases were selected from September to October in 2013 when the season was the most active TC season since 1951. We could calculate 52 runs for nine TCs (Table 1). Unfortunately, we detected some flaws in NICAM so that we could not implement some numerical experiments [1].

2.2 Models

We used three 7-km mesh non-hydrostatic global atmospheric models in TYMIP-G7. A Nonhydrostatic Global Spectral Atmospheric Model using Double Fourier Series (DFS) has been developed in the Meteorological Research Institute (MRI) of JMA. Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment

Table 1 List of the initial time for the experiment (Modified from Nakano et al. [1])

Seq. # of cases	Initial time (6 hourly)				Related typhoons	Not available cases for NICAM
	Start time		End time			
1 – 5	2013/9/12	0000UTC	2013/9/13	0000UTC	Man-yi	0 cases
6 – 22	2013/9/30	0000UTC	2013/10/4	0000UTC	Wutip, Sepat, Fitow, Danas	8 cases
23 – 37	2014/10/9	0000UTC	2014/10/12	1200UTC	Danas, Nari, Wipha	0 cases
38 – 52	2015/10/17	1200UTC	2015/10/21	0000UTC	Wipha, Francisco, Lekima	3 cases

Table 2 Brief description of specification for each global nonhydrostatic model. (Modified from Nakano et al. [1])

	DFSM	GSM	MSSG	NICAM
Horizontal resolution	7 km	20 km	7 km	7 km
Horizontal Grid configuration	Reduced linear equally-spaced latitude grid	Reduced linear Gaussian grid	Yin-yang grid	Icosahedral grid
Number of grids in horizontal direction	8845592	1312360	11184128	10485760
Vertical coordinate	Hybrid sigma-pressure coordinate	Hybrid sigma-pressure coordinate	Terrain-following coordinate	Terrain-following coordinate
Vertical levels	100 (top:0.01hPa, bottom: 999.0429 hPa (*1) (about 8 m))	100 (top:0.01hPa, bottom: 999.0429 hPa (*1) (about 8 m))	55 (top: 40 km, bottom: 75m)	38 (top: 36.7 km, bottom: 80 m)
Dynamical core	Non-hydrostatic spectral model using double Fourier series	Hydrostatic spectral model using spherical harmonics	Non-hydrostatic grid model using finite difference method	Non-hydrostatic grid model using finite volume method
Time step (s)	200	400	Variable	30
Cloud physics	Smith (1990)	Smith (1990)	Onishi & Takahashi (2012)	Tomita (2008)
Cumulus convection	Randall & Pan (1993)	Randall & Pan (1993)	Not used	Not used
Planetary boundary layer	MY2 (Mellor & Yamada, 1974, 1982)	MY2 (Mellor & Yamada, 1974, 1982)	MYNN2.5 (Nakanishi & Niino, 2004,2006,2009)	MYNN2 (Nakanishi & Niino, 2004, 2006, 2009; Noda et al. 2010)
Radiation	JMA (2013), Yabu (2013)	JMA (2013), Yabu (2013)	MstranX (Sekiguchi & Nakajima, 2008)	MstranX (Sekiguchi & Nakajima, 2008)
Land and ocean	SiB (JMA, 2013)	SiB (JMA, 2013)	Bucket (Option: 3D ocean model)	MATSIRO (Takata et al. 2003) Slab ocean model
Surface boundary layer	Louis (1982), Miller (1989, Ocean/ Unstable atmosphere)	Louis (1982), Miller (1989, Ocean/ Unstable atmosphere)	Zhang & Anthes (1982)	Louis (1979)

(*1): full-level pressure when the surface pressure is 1000 hPa

(MSSG) has been developed in JAMSTEC. Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) has been developed in collaboration with JAMSTEC, the University of Tokyo and RIKEN Advanced Institute for Computational Science. In addition, we used the hydrostatic operational atmospheric model of JMA (GSM) with a horizontal grid spacing of approximately 20 km as a baseline to quantify the advantage of higher-resolution models (Table 2).

The computational performance is one of the metrics to evaluate the operational numerical weather forecast model. DFS was optimized for the Earth Simulator at the beginning of this project so that the performance became approximately 4 times faster than before.

3. Results

In order to compare the results of numerical experiment among the four models visually and simultaneously, we have developed a Web application that allows to display multiple

visualization results simultaneously (Fig. 1). The application enables us to make a comparison of numerical experiments among the four models more easily.

To quantify the advantages of high resolution on TC

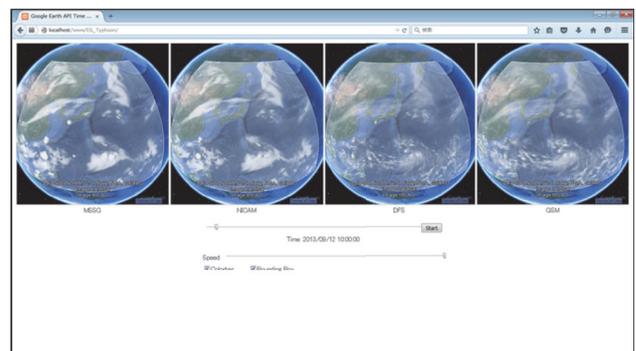


Fig. 1 Screen capture of the Web application. OLR at 14 September 2013, 10:00:00 UTC simulated in the experiments initialized at 12 September, 2013 06:00:00 UTC is displayed. (After Nakano et al. [1])

prediction, we examined the TC prediction with reference to RSMC Tokyo best track. Figure 2 shows the time series of the bias of central pressure with the standard deviations for each model. The errors of predicted central pressure in DFSM, MSSG and NICAM show relatively small bias compared with the error in GSM, respectively. Thus, global 7-km mesh models contribute to reduction in systematic positive errors of predicted central pressures. In addition, the diversity of the bias gives us the expectation on the advantages of the Multi Model Ensemble (MME) forecasts by using the results of the three models.

In this study, the error of TC track prediction was also examined as well as that of TC intensity prediction. However, we could not clearly confirm the advantages of high resolution model on TC track prediction.

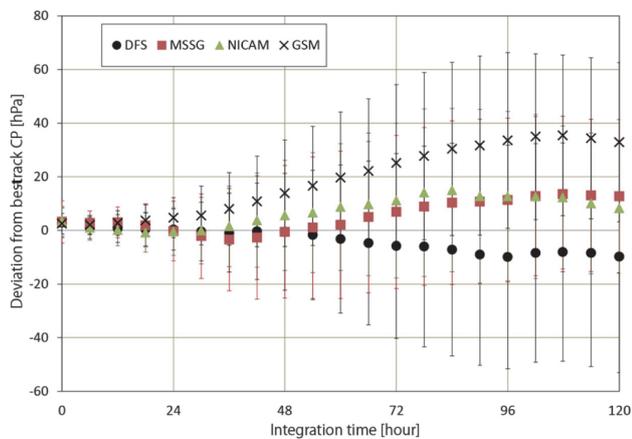


Fig. 2 Errors of the predictions of central pressures for GSM, DFSM, MSSG and NICAM. Error bars indicate the standard deviation of central pressure difference between the prediction and JMA best track.

4. Conclusions and Future works

We concluded that global 7-km mesh models contribute to reduction in systematic positive errors of central pressures predicted in GSM with a 20-km mesh for TCs travelling around and approaching to Japan in 2013 although we could not confirm the advantages of high resolution model on TC track prediction.

In the next term of this project, we will extend the scope of model intercomparison to address a lifecycle of a TC such as genesis, rapid intensification, recurvature, extratropical transition in addition to Madden-Julian Oscillation (MJO) and Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO) associated with TC genesis. In addition, we will quantify the advantages of MME approach on TC track and intensity forecasts.

Acknowledgement

This project was conducted as “The Earth Simulator Strategic Project with Special Support” of JAMSTEC. All numerical experiments are run on the Earth Simulator (NEC SX-ACE). The authors thank Ms. Mikiko Ikeda, Mr. Yuichi Saitoh for support to conducting the experiments on the Earth Simulator.

References

- [1] M. Nakano, A. Wada, M. Sawada, H. Yoshimura, R. Onishi, S. Kawahara, W. Sasaki, T. Nasuno, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sugi, and Y. Takeuchi, “Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast (TYMIP-G7): Experimental Design and Preliminary Results,” *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2016-184, in review, 2016.