4.1 全球モデルによる熱帯低気圧発生予測に関す る調査¹

4.1.1 はじめに

台風等の熱帯低気圧は、急速に発達する温帯低気 圧と並んで災害をもたらすようなシビアな気象条 件を引き起こしうる擾乱である。後者については、 古典的な傾圧不安定の研究(Charney 1947; Eady 1949) 以来、その発生・発達のメカニズムが明らか にされてきており、現在の数値予報モデルでの再現 性は高く、多くの場合、数十時間程度のリードタイ ムを確保することが出来る。一方、熱帯低気圧につ いては、発生後の予報における進路や強度の精度は 近年急速に向上しているものの、その発生・発達に ついてのメカニズムの解明は十分に進んでおらず、 数値予報モデルでどの程度表現されるかについて も、議論の一致を見ていない。熱帯低気圧は、ひと たび発生すれば短い時間で日本を襲うことがあり、 特に南西諸島や九州地方ではリードタイムを長く とることが困難な場合がある(例えば2001年台風第 16号は、先島諸島付近で発生した。さらに発生から およそ12時間後には沖縄本島付近を通過している)。 このため防災的な観点からも、熱帯低気圧の発生を 予測することは重要である。

気象庁全球予報モデル(GSM)は2007年11月に 水平解像度が約20kmに高解像度化された。高解像 度化により、熱帯低気圧の発生・発達についての予 測精度が向上しているのではないか、との期待が寄 せられてきている。そこで本稿では、2008年の台風 を対象に、数値予報モデルによる発生の予測につい ての調査を試みる。

まず、台風発生の予測が現在の数値予報モデルに おいてどの程度のリードタイムをもって捕捉でき ているかを調べるため、センター間の国際比較を行 った結果を次節に示す。

次に、台風の発生過程で重要な役割をすると考え られている、熱帯波動の表現についての調査の結果 を示す。台風の発生には様々な過程が関与しており 未解明な部分が多く、発生の要因は事例ごとに異な るが、熱帯の波動擾乱が重要な役割をすることが指 摘されている(例えば、偏東風波動擾乱と赤道ケル ビン波が合流するような場では、下層に大規模なシ アや収束が形成され、熱帯低気圧の発生に適した場 となる(e.g, Yanai 1961a,b))。ここでは、個々の熱 帯低気圧の発生過程ではなく、熱帯低気圧の発生に 重要な環境場を与える、熱帯の波動擾乱の数値予報 モデルにおける表現を検証することとした。

本稿では波動擾乱を見るためにホフメラー図を 用いている。ホフメラー図の読み取り方について、 本稿の末尾に簡単にまとめてあるので、こうした解 析に不慣れな方は適宜参照願いたい。

4.1.2 台風発生予測の国際比較

本節では GSM での台風発生予測に関する性能を、 各センターの予報結果と比較した結果を紹介する。 検証に使用した予報値は、JMA の他に ECMWF(欧 州)・UKMO(イギリス)・NCEP(アメリカ)・CMC (カナダ)・CMA(中国)・KMA(韓国)・CPTEC (ブラジル)の計8センターのアンサンブル予報コ ントロールメンバーの海面更正気圧予報値である。 また、JMA と ECMWF に関しては、高解像度決定 論予報の予報値も検証に用いた。各センターの予報 値の詳細を表4.1.1 に示す。なお、JMAの決定論予 報以外の予報値は、THORPEX 双方向グランド全球 アンサンブル(TIGGE)のデータを使用した。

表 4.1.1 検証に用いた予報値の詳細*1

数值予報	モデルの	検証用予報
センター	解像度*2	値解像度
JMA(決定論)	TL959L60	0.25°
JMA	TL319L60	0.5625°
ECMWF (決定論)	TL799L91	0.5625°
ECMWF	TL399L62	0.5625°
UKMO	$0.833^\circ~ imes 1.25^\circ~ m L38$	0.5625°
NCEP	T126L28	0.5625°
CMC	0.9° L28	0.5625°
CMA	T213L31	0.5625°
KMA	T213L40	0.5625°
CPTEC	T126L28	0.5625°

*1 特に付記しない限り、各センターのアンサンブル予報モデル を表す。*2 T は二次格子を使用した三角形切断波数、TL は 線形格子を使用した三角形切断波数、L は鉛直層数を表す。

台風発生の捕捉率は、気象庁の数値予報ルーチン で使用されている、台風トラック追跡プログラムを 用い、以下の方法により調査した。まず、気象庁台 風ベストトラックに基づき、台風発生後の最初の 12UTC を台風発生時刻とした。次に、各初期値の 予報値でこの時刻の台風中心位置周辺に海面気圧の 低圧部が表現されているかを調べ、表現の有無の割 合を各モデルの予報値ごとに集計した。その結果を 図 4.1.1 に示す。横軸は台風発生時刻における予報

¹ 堀田 大介、太田 洋一郎

時間で、縦軸は台風の存在割合である。台風発生に 関しては、ECMWF(決定論予報・アンサンブル予 報)・UKMOが比較的長い予報時間まで捕捉できて おり、JMAの決定論予報とアンサンブル予報などが それに続く形となっている。また、JMAとECMWF に関しては、決定論予報とアンサンブル予報コント ロールメンバーで捕捉率に大きな差はなく、モデル の解像度による発生予測精度の差があまり大きくな いことを示唆している。



図 4.1.1 2008 年の各センターの台風発生捕捉率の比較。 横軸は台風発生時刻における予報時間、縦軸は台風の捕 捉率[%]。実線はそれぞれ、黒・青が JMA と ECMWF の決定論予報、赤・緑・黄・水色・ピンク・橙・黄緑・ 濃緑が JMA・ECMWF・UKMO・NCEP・CMC・CMA・ KMA・CPTEC のアンサンブル予報コントロールメンバ ーを表す。

4.1.3 台風の発生・発達と熱帯の波動擾乱

次に台風の発生・発達と熱帯の波動擾乱の対応を 見るために、解析場での両者の対応を示す。図4.1.2 は2008年4月24日から2008年12月28日までの全球 解析における850hPaの南北風および東西風の時間 - 経度ホフメラー図を示したものである。いわゆる "松野-Gill応答" (Matsuno 1966, Gill 1980)を念頭 に、南北風(左)では西進する偏東風波動を検出す ることを意図して15°N~20°Nで平均を、東西風 (右) では東進する赤道ケルビン波を検出すること を意図して5°S~5°Nで平均をとった。さらに日変化 や長周期の変動を取り除くために2~10日のバンド パスフィルターを適用してある。また、台風の発生 ²した時刻・経度に9マークを付し、その後の経路に 対応する点に●印を、発生時からの中心気圧の深ま りに対応してサイズが大きくなるように描いてあ

南北風(左図)を見ると、7月以降の多くの台風 では発生の前に偏東風波動が存在していることが 確認でき、その規模(波長)はおよそ2000km(経 度で20度)程度である。西に北風(青)、東に南風 (赤)を持つ対になっていることから、低気圧性の 循環であることも分かる。これらの特徴は、西進す るロスビーモードの熱帯波動の構造とよく一致し ている(Matsuno 1966)。発生に先立つ偏東風波動 との対応は、台風第11,13,14,15,17,18,20,22号で顕 著である。

東西風(右図)を見ると、位相速度およそ10m/s (5日で経度およそ45度)で東進する擾乱が間欠的 に発生していることを読み取ることができ、これら は赤道ケルビン波を表していると考えられる。ただ し、台風の発生・発達と赤道ケルビン波の対応は前 述の偏東風波動擾乱ほど明らかではなく、台風第7 号の発生、台風第13,14,15,17号の発達との対応が、 かろうじて見られる程度である。

なお、赤い囲みで示したように、この図から、台 風の発生が頻繁に起こる時期と起こらない時期が 交互に繰り返され、その周期がおよそ40~50日であ ることも読み取ることが出来る。これは、よく知ら れているように(Nakazawa 1988, Liebmann *et al.* 1994)、赤道季節内振動(MJO)の位相と台風の発 生によい対応があることを示していると考えられ る。実際、台風が頻繁に発生した期間とWheeler and Hendon(2004)によるMJO指数の位相が海洋大陸か ら西太平洋にかかる期間はよく対応している(図 4.1.3)。

以上より、モデルにより台風の発生を予測する上 では、熱帯の波動擾乱、とくに西進する偏東風波動 のモデルでの再現性が関連している場合があるこ とが示唆される。

4.1.4 全球モデルでの熱帯の波動擾乱の表現

前節で台風の発生の多くが西進する偏東風波動 とよく対応していることが分かった。そこで、この 節では偏東風波動が予報モデルで表現できている かを検証する。以下では、発生前の偏東風波動が特 に顕著であった、台風第13,14,15,17号および第 20,22号に注目する。

GSMで、擾乱の構造をどの程度の予報時間まで保 っことができるかを調べるため、ルーチンのGSMの 予報を調査した。図4.1.4は、図4.1.2の左の図と同じ ものを台風第13,14,15,17号について、ルーチンの全 球予報を用いて、同じ予報時刻のものをつなげて描 画したものである。左から解析、24,48,72時間予報 を示している。予報時間が長くなるにつれて擾乱の シグナルが弱くなっている様子が分かる。例えば台 風第13号を見ると、予報時間が長くなるにつれて振 幅が弱く(色が薄く)なっている。台風第14号では、 FT72では対応する擾乱の構造を読み取ることは難 しい。これらのケースでは、予報モデルは、偏東風

² ここでいう台風の発生はベストトラックに基づいている。

波動の構造を維持することが出来ていないと推測 出来る。

図4.1.5は図4.1.4と同じものを、台風第20,22号に ついて示したものである。台風第20,22号について は、発生に先行する偏東風波動の構造が、72時間予 報においても維持できていることが分かる。

以上のとおり、台風の発生に先行する偏東風波動 は、現在のGSMは表現できる場合とできない場合が ある。

4.1.5 まとめ

本稿ではまず、台風の発生が現在の数値予報モ デルによって、どの程度のリードタイムを持って予 測できているかについて、TIGGEデータベース等を 用いて国際比較を行った。この結果から、台風発生 の捕捉という点では、解像度は(現在の現業全球モ デルのもつ範囲内においては)必ずしも重要ではな いことが示唆された。

次に、熱帯低気圧の発生・発達の多くの場合において熱帯の波動擾乱、特に西進する偏東風波動が関 連していることを、全球解析のデータにより調べ、 予報モデルが熱帯低気圧の発生を予測できるため には、これらの再現性が関連している可能性がある ことを示した。

また、現在のGSMでは、これらの擾乱の構造の維 持が十分でない場合があることを示した。

熱帯低気圧の発生をよりよく予測できるように なるためには、熱帯の波動擾乱を再現できるよう、 モデルを改良する必要があろう。今後も継続的に調 査を続けていく必要がある。

補足:ホフメラー図の読み取り方

ホフメラー図とは、縦軸に時間軸、横軸にある方 向の空間軸をとりある物理量の等値線をプロットし た図のことで、波動の位相伝播や群速度伝播を可視 化するためによく用いられる。波動の伝播のホフメ ラー図による解析をホフメラー解析と呼ぶこともあ る。

ホフメラー図で表現される現象が具体的にどのようなものであるかを示すために、例として図4.1.6に 台風第14号の発生前後(9月12~21日)の各日の 00UTCにおける解析場の850hPa風ベクトル2-10日 周期バンドパス成分の流線を、10°Nから20°N、 120°Eから180°の領域で描画したものを示す。ホフ メラー図との対応を分かりやすくするため、南北風 を陰影で示してある。図中に赤い曲線で示したとお り、9月12日には150°E~180°にかけて、西に低気 圧性、東に高気圧性の流れを持つ波状の擾乱があり、 西に伝播している。伝播しながら西の低気圧性の部 分の位相伝播が減速し、東の高気圧性の部分が追い つくことで、9月16日にははっきりと孤立した低気 圧性循環が発生している(波動の力学の観点ではこ れを「砕波」と呼ぶことがある)。孤立した低気圧性 循環は9月17日には台風第14号となり、その後、西 に進んだ。

上述の現象をホフメラー図で見ると、図4.1.4の最 左図のようになる。「砕波」の生じた9月16日頃を境 に、青・赤のパターンの横方向の長さが短くなり、ま たパターンの傾きが変わっている。このように、熱 帯低気圧の発生しやすい環境場を作る偏東風波動と 熱帯低気圧(あるいは台風)そのものとは、ホフメ ラー図では横方向の波長の変化や、パターンの傾き (位相速度)の変化をてがかりとして、識別するこ とが出来る。

参考文献

- Charney, J.G, 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J.Meteor.*, **4**, 135–162.
- Eady,E.T., 1949: Long waves and cyclone waves. *Tellus*, 1, 33-52.
- Gill,A.E., 1980: Some simple solutions for heat-induced tropical circulation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 447–462.
- Liebmann,B., H.H. Hendon, and J.D. Glick, 1994: The Relationship Between Tropical Cyclones of the Western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian Oscillation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 72, 401-411.
- Matsuno, T., 1966: Quasi-Geostrophic Motions in the Equatorial Area, *J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II*, **44**, 25-43.
- Nakazawa, T., 1988: Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific, J. Meteor. Soc. Japan, 64, 17–34.
- Wheeler,M.C., and H.H. Hendon, 2004: An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction, *Mon. Weather. Rev.*, **132**, 1917–1932.
- Yanai, M., 1961a: A detailed analysis of typhoon formation, J. Meteor. Soc. Japan, 39, 187–214.
- Yanai, M., 1961b: Dynamical aspects of typhoon formation, J. Meteor. Soc. Japan, 39, 283-309.



図 4.1.2 全球解析における850hPaの風の2-10日周期バンドパス成分の時間-経度ホフメラー図。左図は15N-20Nで平均した南北成分、 右図は5S-5Nで平均した東西成分で、単位はm/s。●印は台風の発生を表し、その右の数字は台風の番号を示す。●印は発生後の台風 の位置を表し、その大きさは発生時からの中心気圧の深まりに対応する。縦軸は時間軸で目盛りの数字は月日を表す。詳細は本文を 参照。



図 4.1.3 Wheeler and Hendon(2004)によるMJO指数の位相と振幅の時間・経度断面図。縦軸は時間、横軸は経度で、MJO指数の位相に対応する経度に点を打ってある。点の色はMJO指数の振幅に対応する。(気候情報課により作成された図を一部加工)



図4.1.4 台風第13,14,15,17号の発生と西進波動擾乱の対応を示すホフメラー図。陰影のスケールは図4.1.2と同じである。詳細は本 文を参照。



図4.1.5 台風第20,22号の発生と西進波動擾乱の対応を示すホフメラー図。陰影のスケールは図4.1.2と同じである。詳細は本文を 参照。



図4.1.6 台風第14号の発生前後(9月12~21日の00UTC)の解析場における850hPa風ベクトル2-10日周期バンドパス成分の流線。陰 影は南北風成分で、スケールは図4.1.2と同じ。

4.2 高分解能局地モデルの開発と実験運用1

4.2.1 はじめに

気象庁では、水平解像度5km のメソ数値予報モ デル(以下、MSM)を現業運用しているが、飛行 場予報と防災情報作成支援の高度化、降水短時間予 報への入力データの高精度化を目的として、気象庁 非静力学モデル(以下、JMA-NHM)をベースに水 平解像度2kmの高分解能局地モデル(Local Forecast Model;以下、LFM)の開発を行っている。 LFMは平成22年度末に試験運用、平成23年度末に 本運用される計画であり、将来的には降水短時間予 報の領域を網羅する領域を対象に毎時運用する計 画である。表4.2.1に、開発・運用計画を示す²。

本節では、LFMの概要や、これまでの予備的な実 験運用から明らかになってきた、MSMに比べLFM の優れている点、問題点などについて述べる。特に、 雷雨の事例と、夏季の降水予測に関する統計検証を 取り上げて紹介する。

4.2.2 予備実験について

LFMの予測精度を調査し、問題点を明らかにする ため、2007年6月から2009年3月まで、関東周辺の 約300km×300kmの狭領域(図4.2.1)で予備的な 実験運用(以下、予備実験)を試みた。予報頻度は 1日8回3時間毎で、予報時間は12時間である。また、 LFMの飛行場予報モデルとしての利用可能性を検 討するため、予報部予報課航空予報室、航空交通気 象センター、成田航空地方気象台、東京航空地方気 象台の協力を得てLFMの利用方法についても調査 を行った。実験運用期間中は予報結果を気象庁内の イントラページを通じて、上記航空気象官署に公開 して調査に役立てていただいた。またGPVから任



図 4.2.1 予備実験における LFM の計算領域。色は モデルの標高(m)を示している。

意方向の断面図を対話的に作成できるツールも提 供し、利用していただいた。

MSMの予報プロダクトは初期時刻から130分 (00,06,12,18UTC 初期値) または150分 (03,09,15,21UTC 初期値) 以内で配信が完了する が、本運用時におけるLFMの予報プロダクトは初期 時刻から70分後に配信されることを想定している。 この場合、LFMはMSMに比べ、より新しい観測を 取り込んだ初期値を予報作業に利用できる。例えば、 00UTC初期値のMSMを利用するには02UTC 以降 まで待つ必要があるが、同じ初期値のLFMはそれよ りも1時間以上早く利用可能である。また、00UTC のLFMの親モデル(側面境界を与えるモデル)は前 日21UTCのMSMである。これらのことから、以下 の項で、LFMとMSMの予報結果を比較する場合は、 LFMの初期値に対して3時間前の初期値のMSMを 比較対象とする。

	領域	期間
予備実験	関東領域	2007年6月~2009年3月
実験運用*	東北地方~九州地方	2009年8月~2011年2月
試験運用	同上	2011年3月~2012年2月
本運用	本運用開始時は試験運用に	2012年3月~
	同じ。将来的には試験運用	
	時の領域に北日本、沖縄・	
	奄美を加えた3領域	

表 4.2.1 高分解能局地モデルの開発と運用計画

*開発用の計算機資源やモデルの高速化の状況次第で領域の大きさが変更される 可能性がある

¹ 氏家 将志

²本田(2008)から解像度、運用開始時期の計画が若干変 更されている。

	MSM	LFM
格子数(x×y×z)	721×577×50	151×151×60
水平解像度	5km	2km
積分時間間隔	24 秒	10 秒
初期時刻	00, 03, 06, 09,	同左
	12, 15, 18, 21UTC	
予報時間	15 時間 (00,06,12,18UTC)	12 時間
	33 時間(03,09,15,21UTC)	
初期値作成	メソ4次元変分法(メソ解	3 次元変分法と狭領域 MSM
	析、2009年4月7日00UTC	の 1 時間予報を繰り返す解
	より非静力学モデルに基づ	析予報サイクル(局地解析)
	くシステムに更新)	
雲物理過程	3-ice のバルク法	3-ice のバルク法
	2008年12月18日00UTC	数濃度は予報しない
	より、雲氷の数濃度を予報	
積雲対流パラメタリゼーション	Kain-Fritsch スキーム	使用しない

表 4.2.2 MSM と	:予備実験における	LFM の主な仕様
---------------	-----------	-----------

4.2.3 予備実験におけるLFMの概要(MSMとの違いを中心に)

表4.2.2にMSMとLFMの主な仕様について示す。 表に示されていない過程についてはMSMとLFM では共通のものを用いている。MSMの詳細な仕様 については、原(2008)を参照されたい。MSM、 LFMの予報モデル本体はいずれもJMA-NHM をベ ースとしているがMSMとLFMで解像度の他に大き く異なる点は、積雲対流の扱いと初期値の作成方法 である。

水平解像度5kmのMSMでは積雲対流を陽に表す ことができないため、雲物理過程とKain-Fritsch ス キームを併用しているが、より高解像度のLFMでは、 現在は積雲対流パラメタリゼーションを用いてい ない。積雲を陽に表現すること、積雲対流パラメタ リゼーションの不確実性を避けることを目的とし ており、短いタイムスケールの局地的な豪雨の再現 性が向上すると期待する。

MSMの初期値はメソ4次元変分法(2009年4月7 日00UTC初期値より非静力学モデルに基づくもの に更新、第3.5節)により作成されている。LFMは 毎時の運用を計画しているため、限られた時間内で 最新の観測データを有効に使うことが求められて いる。そのため、LFMの初期値は、初期時刻に対し て6時間前の現業MSMの3時間予報値を第一推定値 として、計算時間の短い3次元変分法と、狭領域の MSM(水平解像度5km)による1時間予報を繰り返 して作成される(図4.2.2)。同化に使用する観測デ ータはウインドプロファイラ、ドップラーレーダー、 航空機自動観測、毎時衛星風に加え、アメダスの気 温と風を使用している。特にアメダスの気温と風の 同化は現在気象庁で運用されている予報モデルの



(00UTC 初期値の例)。図中の「3DVAR」は 3 次 元変分法による解析を示す。

初期値作成には使われておらず、LFMの特徴³である。これは、下層の局地的な循環を表現することを 目的としている。以後、LFMの初期値作成に用いられる解析システムを「局地解析」と呼ぶ。

4.2.4 雷雨の予報事例

雷雨やガストフロントを精度良く予測するには、 そのトリガーとなる積乱雲の発生とその積乱雲の 衰退時に卓越する下層の冷気外出流を表現するこ とが重要である。以下では、局地解析により初期場 の下層の循環の表現が改善されたことで、雷雨の発 生が比較的良く予測できた事例と、実況にはない積 乱雲がLFM内で発生したために下層の循環が現実 と食い違い、予測が悪化した事例の2事例について 述べる。後者については、LFMの利用可能性に関す る調査を通じて、東京航空地方気象台からLFMの問 題点として指摘を受けた事例である。このような事 例を今後改善していくことが飛行場予報にLFMを 役立てる上でも重要であると考える。

³予報モデルの初期値には使われないが、毎時大気解析では、アメダスの気温と風が同化されている。

(1)MSMよりも良く予測できた事例:2008年8月5日

2008年8月は、関東地方において、局地的大雨が多 数発生した。特に、8月5日は、局地的な短時間強雨に 伴う増水で、東京都豊島区で死者が出る等、社会的に も大きな影響が出た事例であった。また、成田航空地方 気象台においても最大1時間降水量が72.0mmを記 録し、同官署での観測史上最大となった。地上天気図 (図4.2.3)を見ると、日本の東海上に前線があり、関東 地方北部にものびている。東日本太平洋側での総観ス ケールの風向は北東風であり、関東平野では東京湾か らの海風による南風と収束しやすい場になっている。こ のような風系は、藤部ほか(2002)で述べられている、夏 季の午後に東京付近で局地的な降水が起こりやすい パターンのひとつとよく似ている。

図4.2.4の上段に8月5日01,03,04UTCにおける解 析雨量とアメダスによる気温、風の分布を示す。実況で は01UTCにおいて千葉県の北部に等温線の混んだ局 地的な前線がみられ、この領域で風の収束と積乱雲に



図 4.2.3 2008 年 8 月 5 日 00UTC の地上天気図



図 4.2.4 2008 年 8 月 5 日(左)01UTC、(中)03UTC、(右)04UTC における、標高補正した気温(等値 線、℃)と地上風(ベクトル、m/s)および前 1 時間降水量(mm)。上段:アメダスと解析雨量。中段:8 月 5 日 00UTC 初期値のLFM、下段:8 月 4 日 21UTC 初期値の MSM。図中の黒、青の四角、黒丸はそれ ぞれ、成田、羽田、東京の観測地点の位置を示している。

対応した降水が見られる。03UTCになると降水域は東 京都23区と千葉県の中央部に広がった。広がった降水 域に対応するように、地上の低温の領域も広がっている。 このことから、これらの積乱雲は局地的な前線上で発生 した積乱雲からの冷気外出流と東京湾からの海風の収 束によってもたらされたと推測する。図4.2.4中段、下段 のように、LFMでは01UTCにおける大気下層の気温と 風がMSMに比べ、実況に近くなっており、局地的な前 線と風の収束がある程度表現されていた。図4.2.5は8 月5日00UTCにおける、局地解析による高度20mおよ び東経140.5度に沿った鉛直断面の気温と風のインクリ メント(解析値と第一推定値の差)を示している。茨城県 で気温を下げ、千葉県で気温を上げるインクリメントが 入っており、局地解析によって前線を強める修正が入っ ている。この前線を強めるようなインクリメントは地上付 近を中心に見られ、4日21UTCから5日00UTCまでの1 時間ごとの解析予報サイクルを通して入りつづけていた (図略)。地上気温の同化によって、下層の局地的な前 線の表現が向上したものと考える。03UTCにおける、 LFM、MSMの降水、気温、風の予想を見ると、MSM は千葉県の広い範囲で弱い降水を予測しているものの、 局地的な短時間強雨は予測できていない。また、MSM による降水はそのほとんどが積雲対流パラメタリゼーシ ョンによってもたらされたものであり(図略)、積雲の形成、 組織化等を陽には表現していない。LFMでは03UTC で局地的な前線に対応して強い降水を予測している点、 降水域が23区へ広がっている点は実況と対応が良い。 しかし、FT=3よりもFT=4のLFMの方が03UTC の実 況の降水と気温の分布に近い。このことから、LFMは対 流の発生を良く予測しているが、降水域と低温域の千 葉県中部への南下はタイミングが遅れているものと考え る。また、千葉県の北部から23区までは実況に比べ、線 状に降水帯が形成されているのが目立った。図4.2.6 は成田における気温と前1時間降水量の時系列である。 実況では冷気外出流の侵入にともない、01UTCから 02UTCにかけて気温が約4度下がり、その後、02UTC から03UTCまでに70mm/h を超える降水が観測され ている。LFMでは気温の急激な変化や降水は1時間ほ ど遅れているものの、表現されている。一方、MSM で は気温の変化はほとんど表現されていない。強雨の位 置やタイミングを正確に予測することは難しいが、この事 例においては短時間強雨の予測に関して、高いポテン シャルを持っている点で、LFMはMSMより優れている と考える。

(2)予測が悪化した事例:2008年8月21日

2008年8月21日は羽田では09-11UTC にかけて雷 電を観測し、ガストフロント通過にともなって最大瞬間風 速21.6m/s、最大風速17.0m/sを観測した。この日は地 上には明瞭な擾乱はなかったが、中層から上層中心の



図 4.2.5 2008 年 8 月 5 日 00UTC における、気温(陰 影、℃)と風(ベクトル、m/s)の局地解析による インクリメント。上段:高度 20m 面、下段:東経 140.5 度に沿った高度 6000m までの鉛直断面。モ デルの標高よりも低い高度については表示してい ない。

Time series of temperature(°C) and 1-hourly precipitation(mm) 2008.AUC.05.00UTC - 2008.AUG.05.09UTC Station=45121



 図 4.2.6 2008 年 8 月 5 日 00UTC-09UTC の成田に おける、前 1 時間降水量(棒グラフ)と地上気温 (折れ線グラフ)の時系列。緑:アメダスによる 観測、赤:8月5日00UTC 初期値のLFM、水色: 8月4日21UTC 初期値のMSM。

寒気トラフが通過(図4.2.7)するタイミングで、活発化した積乱雲が関東地方を北東から南西へと通過した。図 4.2.8は8月21日09UTCにおける実況と03UTC初期値のLFM,00UTC初期値のMSMを示している。実況では千葉県と茨城県の県境付近に発達した積乱雲に対応する降水が見られる。MSMは実況と同じ位置に対流パラメタリゼーションによって弱い降水を予測している。 LFMは実況で見られる降水を予測しておらず、東京都の西部に、実況には無い強い降水を予測している。この時点でLFMはガストフロントをもたらした積乱雲を予測できていないと言える。実況では10UTCになると、茨城県の降水は衰弱し、北東風の進行とともに、千葉県と東京都に新たな積乱雲に伴う降水が表れる。MSMでは09UTCとほぼ同じ位置に降水域が見られる。一方、



図4.2.7 2008年8月21日00UTCにおける、500hPa 高度(黒等値線、m)、気温の・9℃線(赤等値線)、 渦度(陰影、10⁻⁶s⁻¹)の解析値。



図 4.2.8 2008 年 8 月 21 日(左) 09UTC、(右) 10UTC における、標高補正した気温(等値線、℃)と地上 風(ベクトル、m/s)および前 1 時間降水量(mm)。上段:アメダスと解析雨量。中段:8月 21 日 03UTC 初期値の LFM、下段:8月 21 日 00UTC 初期値の MSM。図中の黒、青の四角、黒丸はそれぞれ、成田、 羽田、東京の位置を示している。

LFMでは、東京都の西部の実況にはない積乱雲から の冷気外出流により、東京都や神奈川県では北西の風 を予測しており、09UTCより実況との食い違いが大きく なっている。また、東京湾で偽の収束域を作っており、 12UTCには、実況にはない強い降水を再び予測して いた(図略)。図4.2.9は羽田における、気温と降水量、 風の時系列である。実況ではガストフロントの通過にとも ない、気温の低下と風向風速の急変が見られる。しかし、 LFMは実況にはない対流雲が作る循環によって風向 が実況と異なっている。また、MSM、LFM ともに気温 の急変は表現されていない。この例のように、ガストフロ ントのきっかけになる積乱雲を予測できていないことと、 実況にはない積乱雲を予測していることにより、その後 の下層の循環が現実と大きく食い違う場合もLFMの予 報事例ではいくつか見られた。このことは積乱雲を適切 に表現することが降水予測だけでなく、局地循環を予 測する上でも重要であることを示している。

4.2.5 統計検証

前項では事例検証でMSMとLFMの表現の違いを 示したが、この項では実験運用期間での統計的な検 証結果で、MSMとLFMの予測精度の違いを見る。 降水検証の検証格子は20kmである。第1.1節で述べ たように、2008年の夏季は不安定降水が多く、MSM の降水予測はバイアススコアで見ると、近年に比べ て全国的に予報過少であり、関東地方で見てもその 傾向が見られた(図略)。しかしながら、図4.2.10 に示すように、格子内最大降水量に関して、LFMは いずれの閾値に関してもバイアススコア、スレット スコアともにMSMを上回っている。特に、閾値が 大きくなる程、バイアススコアが1に近付いている。 LFMは強い降水の頻度をMSM よりも良く捉えて いる。ただし、的中率、空振り率で見ると、LFMは 的中率も高いが、空振り率もMSMよりも高い(図 略)。格子内平均1mm以上の降水量の精度を予報時 間別に見ると(図4.2.11)、FT=3以降に関しては、 LFMとMSMは同等かそれ以上のスコアだが、FT=1 のLFMのバイアススコア、スレットスコアはMSM に対し極端に低い。同じ初期値のLFMとMSMを比 較しても低い。閾値を5mm/hにしても同様の傾向が 見られた(図略)。このことは予報初期の弱い降水の 立ち上がりが遅いことを示している。考えうる理由 としては、第4.2.4項で示したように、モデルの中で のメソ対流系の形成が実況より遅いことや、解析予 報サイクルにおける過飽和の取扱いの問題(竹之内 2008) が挙げられる。

上記に挙げた特徴は2007年の夏季でも同様の傾向が見られた。統計検証から、夏季におけるLFMはMSMよりも強い降水の予報頻度が良い反面、予報

初期の降水が過少であるという特性がわかった。 図4.2.12は、2008年8月における気温の対象時刻ご とのアメダスに対するMEとRMSEである。日中に



図 4.2.9 2008 年 8 月 21 日 03UTC-12UTC の(上段)羽田における、前 1 時間降水量(棒グラフ)と地上気温(折れ線グラフ)の時系列。緑:アメダスによる観測、赤:8 月 5 日 00UTC 初期値のLFM、水色:8 月 4 日 21UTC 初期値のMSM。(下段)地上風ベクトルの時系列図。



図 4.2.10 2008 年 8 月の関東領域における、格子内最大 前 1 時間雨量の閾値ごとの、解析雨量に対する(左) バイアススコア、(右) スレットスコア。



 図 4.2.11 2008 年 8 月の関東領域における、格子内平均 1mm/h 以上の降水の、解析雨量に対する予報時間ごと の(左)バイアススコア、(右)スレットスコア。
 MSM-same は LFM と同じ初期値の MSM の検証結果 を指す。

MSMよりも負バイアスがあるものの、RMSEは同 等か、MSM以上の成績が出ている。地上物理量の 中でも特に風向に関して、LFMはMSMよりも良い 精度を示していた。図4.2.13は2008年8月における、 風向の対象時刻毎のMEとRMSEである。全ての時 刻において、ME、RMSEともにLFMはMSMより もよりも精度が良い。これらは、局地解析により、 地上の風を同化していることが大きく影響してい る。このように地上気象要素についてもLFMは MSMよりも同等かそれ以上の予測精度を持ってい ることがわかった。

4.2.6 まとめと今後の課題

LFMの精度や問題点を把握するため、2007年6 月から2009年3月まで、関東地方に限定した領域で 予備実験を行った。夏季の雷雨の事例について、初 期場の下層の循環が解析で表現できる場合、積乱雲 の発生や、その後のメソ対流系も良く表現されるこ とがわかった。しかしながら、不安定降水が過度に 集中することや、偽の積乱雲からの冷気外出流によ り、下層の循環にも悪影響を及ぼし、飛行場予報の 上で重要な気温や風の急変が正しく表現できなく なる事例があることもわかった。また、統計検証で は、LFMはMSMより強い降水予測の頻度が良いこ とがわかった。その反面、予報初期の降水の立ち上 がりの遅れなどの問題点も明らかになった。今後は 計算領域を広げて、実験運用を進めるとともに、関 東領域での予備実験で問題になった事例について 調査を進める予定である。

今後検討すべき重要な課題としては積雲対流の 扱いが挙げられる。高解像度モデルでメソ対流系を 表現するには積雲対流スキームを用いず、雲物理と 力学で対流を陽に表現することが望ましい。その一 方で、積雲対流スキームを併用し、成層を安定化さ せることで格子スケールの過剰な降水を抑制でき るということも知られている(Bouttier, et al. 2005; 成田 2006)。水平解像度が2km程度のモデルにおけ る、積雲対流の扱いは各国のモデルで様々であり (竹之内 2008)、明確な答えは得られていない。 LFMにおける積雲対流の扱いについても、今後も文 献を調査しつつ検討する必要がある。

参考文献

- 竹之内健介,2008: 高分解能局地モデルの課題.数 値予報課報告・別冊第54号,気象庁予報部, 207-213.
- 成田正巳,2006: 降水予測の改良. 平成18年度数値 予報研修テキスト,気象庁予報部,88-91.



図 4.2.12 2008 年 8 月の関東領域における、アメダスに対 する気温の(左) ME、(右) RMSE。



- 原旅人,2008: 現業メソ数値予報モデルの概要. 数 値予報課報告・別冊第54号,気象庁予報部,18-26.
- 藤部文昭,坂上公平,中鉢幸悦,山下浩史,2002: 東京23区における夏季高温日午後の短時間強雨に 先立つ地上風系の特徴.天気,**49**,395-405.
- 本田有機,2008: メソ数値予報の将来計画.数値予 報課報告・別冊第54号,気象庁予報部,12-17.
- Bouttier, F., G. Hello, Y. Seity, S. Malardel, and C. Lac, 2005: Status of the AROME project in MF in winter 2006. *ALADIN NEWS LETTER*, **29**, 4.1.