

第2章 トピックス

2.1 局地モデルの特性¹

2.1.1 はじめに

数値予報課では飛行場予報と防災情報作成支援の高度化を目的に、水平解像度2kmの局地モデル（Local Forecast Model; 以下、LFM）とその初期値作成のための局地解析（Local Analysis; 以下、LA）で構成される局地数値予報システムの開発を行っている。2010年11月からは図2.1.1の計算領域を対象に、航空ユーザー向けプロダクトの試験提供を含む試験運用を開始した。局地数値予報システムの基本的な仕様については、永戸ほか（2010a）を参照願いたい。

試験運用当初は、航空ユーザー向けプロダクトの作成に必要な羽田空港周辺の領域を含み、かつ LFM の本運用に向けた開発・改良を進めるため、東北地方南部から九州地方を覆う領域（以下、西日本領域。図 2.1.1 参照）を設定していた。その後、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災による被災地への詳細な気象情報への需要の高まりを考慮し、東日本を中心とした領域（以下、東日本領域。図 2.1.1 参照）に変更した。西日本領域に対しては 2011 年 5 月末までの期間について実験を行い、これにより 2010 年 6 月に開始した 1 日 8 回 3 時間毎の実験運用の期間とあわせ、西日本領域における 1 年間の実行結果が蓄積された。

LFM の予報特性に関しては、試験運用に先立って実施された予備実験に対する統計検証が行われており、LFM は強い降水の予報頻度が MSM と比較して実況に近いものの、空振りが多いという特性があること、LFM は予報初期（FT=2 頃まで）において降水の予報頻度が少ない傾向にあることが報告されている（氏家 2009；平原 2010）。地上気象要素では、MSM と比較して気温（主に夜間）、風速について平方根平均二乗誤差（RMSE）が小さくなる傾向がみられ、特に風速の RMSE はほぼすべての時間帯で MSM と比較して小さいこと、高層気象要素でも大気下層において風速の RMSE が小さくなる傾向が確認されている（平原 2010）。これらの予報特性は、夏季または冬季を対象とした統計検証結果により示されたものであったが、実験運用の期間を含めて 1 日 8 回 3 時間毎の予報頻度となった 2010 年 6 月以降の、各季節（夏季：2010 年 6–8 月、秋季：2010 年 9–11 月、冬季：2010 年 12 月–2011 年 2 月、春季：2011 年 3 月–5 月）について統計検証を実施したところ、程度に相違はあるものの傾向としては同様の結

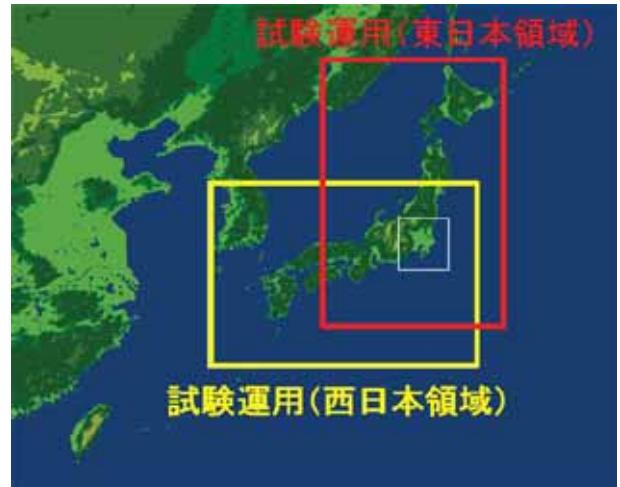


図2.1.1 試験運用における局地モデルの計算領域。西日本領域（黄色い線で囲まれた領域）と東日本領域（赤い線で囲まれた領域）をそれぞれ示す。航空ユーザー向けプロダクトの描画領域（関東地方を覆う白線で囲まれた領域）も示す。

果が得られ、通年的な特性であることが確認された（図略）。実施した検証方法は、検証対象を 1 日 8 回のすべての予報結果を用いた以外は平原（2010）と同様である。

本節では、ここで示した LFM の全般的な予報特性に加え、防災情報作成支援、飛行場予報の高度化の観点から、特に降水、風に関する予報特性について着目した LFM の検証結果について報告する。なお、本文中で用いた統計的な指標の詳細については巻末付録を参照していただきたい。

2.1.2 気圧配置別降水検証

上述のように、LFM は防災気象情報作成支援の高度化にも寄与することが期待されており、このために LFM の詳しい降水予報特性を把握することは重要である。第2.1.1項で述べた通年的な傾向も、季節ごとに見ていくとその程度には差異があり、特に夏季においては降水の過少予報傾向が強いなどの特徴が見られる（平原 2010）。さらに、例えば夏季の降水にも日々の気圧配置などによって様々なパターンがあり、これらの大気の大きな場の違いによって LFM の降水の予報特性も異なっていることが考えられる。そこで本項では、季節別検証を発展させ、より降水形態の違いを反映した予報特性を示す目的で、気圧配置別による分類を用いた降水検証を行った。

(1) 気圧配置型の分類手法と分類結果

検証領域は前項の降水検証と同等で、図2.1.1の西日本領域のうち陸域とその海岸線から40km以内の

¹ 2.1.1 平原 洋一、2.1.2 田村 一卓、
2.1.3, 2.1.5 森安 聰嗣、2.1.4 石水 尊久

領域である。検証対象は、LFMの1日8回3時間毎の実験を行った2010年6月から2011年5月までの1年間の全初期値で、期間内のLFMデータ欠損（5初期値）を除いた2915事例となる。気圧配置と降水域の判断資料には速報天気図（SPAS）と解析雨量を利用した。また、簡便のため気圧配置の判断はLFMの予報初期時刻において行い、分類の区分にはできるだけ任意性を排除できるよう次の6つの型（吉野2002）を基準に設けた。

- I. 西高東低冬型 II. 気圧の谷型
- III. 移動性高気圧型 IV. 前線型
- V. 南高北低夏型 VI. 台風型

以後、Iは冬型、IIは低気圧型、IIIは高気圧型、Vは夏型と略記する。検証領域内で、各型を判断する基準は以下の通りとする。なお、複数の型に該当するような場合には、上に来る型を優先する。

- VII. 台風型…検証領域内に台風または熱帯低気圧から伸びる降水域がかかっている場合。
- IV. 前線型…太平洋高気圧北縁に伸びる停滞性の前線による降水域がかかっている場合。
- II. 低気圧型…停滞性でない前線、つまり数日内に通過する温帯低気圧に伴う前線や、温帯低

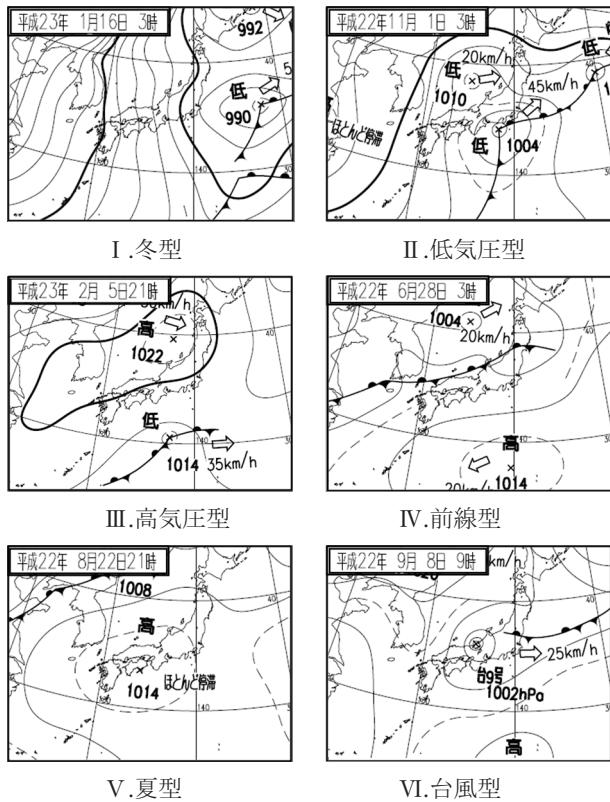


図2.1.2 分類に用いた6つの気圧配置型の典型例

気圧単体による降水域がかかっている場合。なお、天気図上に解析されていない小規模な低気圧は考慮しない。

- I. 冬型…冬季に典型的な「西高東低」の気圧配置が卓越する場合。要因となる低気圧が通過した後の状態で判断する。
- V. 夏型…夏季に典型的な「南高北低」の気圧配置が卓越する場合。領域内が太平洋高気圧に広く覆われている状態かどうかで判断する。
- III. 高気圧型…太平洋高気圧ではない移動性の高気圧が支配的な場合。日本域が高気圧間の鞍部に位置するような場合もこの分類に含める。

以上6つの型の典型例を図2.1.2に示す。

この基準をもとに2915事例を分類すると、各分類の事例数は表2.1.1の内訳となった。この分類結果を用いて、LFMの降水を対解析雨量で検証した結果を以下に示す。

(2) 気圧配置別に見た検証結果

以後の検証では格子内最大1時間降水量を対象とする。図2.1.3は、検証格子20kmにおける検証結果で、左列が20mm/h以上の降水に対する予報時間（FT）別、右列がFT=3における降水量閾値別に見た統計検証結果で、上段がバイアススコア（BI）、下段がエクイタブルスレットスコア（ETS）を表す。

20mm/h以上の強雨に対するFT別のBI（図2.1.3左上）を見ると、気圧配置の分類によってBIの推移が異なってくる様子が見て取れる。低気圧型・前線型・夏型・台風型ではFT=3までの間にBIが増加し、特に台風型でその傾きが大きい。また、全体的には、どの分類型においても予報初期でBIが低い。これは、氏家（2009）や平原（2010）で見られた傾向がどの分類型にも当てはまる事を示している。

FT=3における閾値別のBI（図2.1.3右上）を見ると、FT=3までにBIの増加傾向が見られた4つの型は、閾値が上がることでもBIが増加し、20mm/h以上の閾値すべて予報過多となっている。特に台風型では、10~20mm/h程度の閾値でも予報過多の傾向が強い。これらの積乱雲の発達しやすいような気圧配置では、LFMは強雨の予報が過多となりやすい傾向が見て取れる。他方、高気圧型や冬型では予報過多の傾向は見られない。高気圧型は閾値による変化が最も少なく、強雨ほど極端にBIが大きくなる傾向は抑えられている。しかし、ETSのFT別（図2.1.3左下）や閾値別（図2.1.3右下）の結果を見ると概ね低い水準にあり、空振りや見逃しも多いことがわかる。

表2.1.1 2010年6月1日～2011年5月31日における気圧配置別の分類結果

	I. 冬型	II. 低気圧型	III. 高気圧型	IV. 前線型	V. 夏型	VI. 台風型	合計
事例数	461	683	751	559	361	100	2915

冬型は5mm/h前後の閾値をピークにBIが1を超えることがなく、全体的に予報過少でETSも低い。実況で弱雨が中心となる冬型では、弱雨の表現が過少傾向というモデルの特徴が現れやすくなっていると考えられる。

閾値別ETSについて注目すると、夏型が他と異なった振る舞いをしており、1mm/h程度の弱い雨に対しては他の型に比ベスコアが低いものの、15mm/h以上の閾値になるとスコアが上位のグループと同等になっている。また、同じ検証条件でLFMとMSMのETSを比較すると、2mm/h以上の降水では全ての型でLFMがMSMを上回り、特に夏型で差が顕著であった（図略）。そこで、夏型の強雨の予報特性についてさらに詳しく解析を行った。図2.1.4は、LFMとMSMの20mm/h以上の降水に対するBIとETSを、予報対象時刻ごとに示したものである。なお、検証格子は20kmである。18JST前後の時間帯で、LFMの夏型ではBIが1より低く、ETSは相対的に高くなっている。これは、観測に対して予報頻度が少ないにも関わらず、予報の当たる確率が相対的には上がっていることを示している。一方で深夜から午前中にかけてはBIとETSの関係が逆になっており、一転して予報精度の悪い時間帯であることがわかる。こ

れに対しMSMでは、全体的にBIが小さく、ETSも小さい。MSMでは20mm/h以上の降水予報が過少となっており、これが予報精度の低下に影響していると考えられる。これらの結果から、夏型の午後に見られるような局地的な対流性降水に対しては、LFMとMSMで予報特性に差が見られ、LFMで強雨の表現性が向上していることがわかる。

夏型のLFMとMSMの違いをさらに見るために、検証格子を5kmと40kmに変えて閾値ごとに計算した捕捉率と空振り率を図2.1.5に示す。一般的に検証格子を広げれば最大降水量の捕捉率は上がるが、この図の10mm/h以上の閾値を見ると、MSMでは検証格子を広げても捕捉率が0.05未満に留まっている。つまり、MSMは観測に近い強雨そのものをほとんど予報できていない。これに対し、LFMでは検証格子を広げることで捕捉率が大きく上昇している。このことは、LFMは観測に近い強雨を予報するポテンシャルを持つこと、また、その予報は位置ずれを考慮して広めの領域で判断するほうが効果的であることを示している。一方、空振り率では、10mm/h程度までの降水に対してはMSMのほうが低いものの、それ以上の強雨に対してはLFMのほうが低いか、MSMとの有意な差が見られない結果となっている。

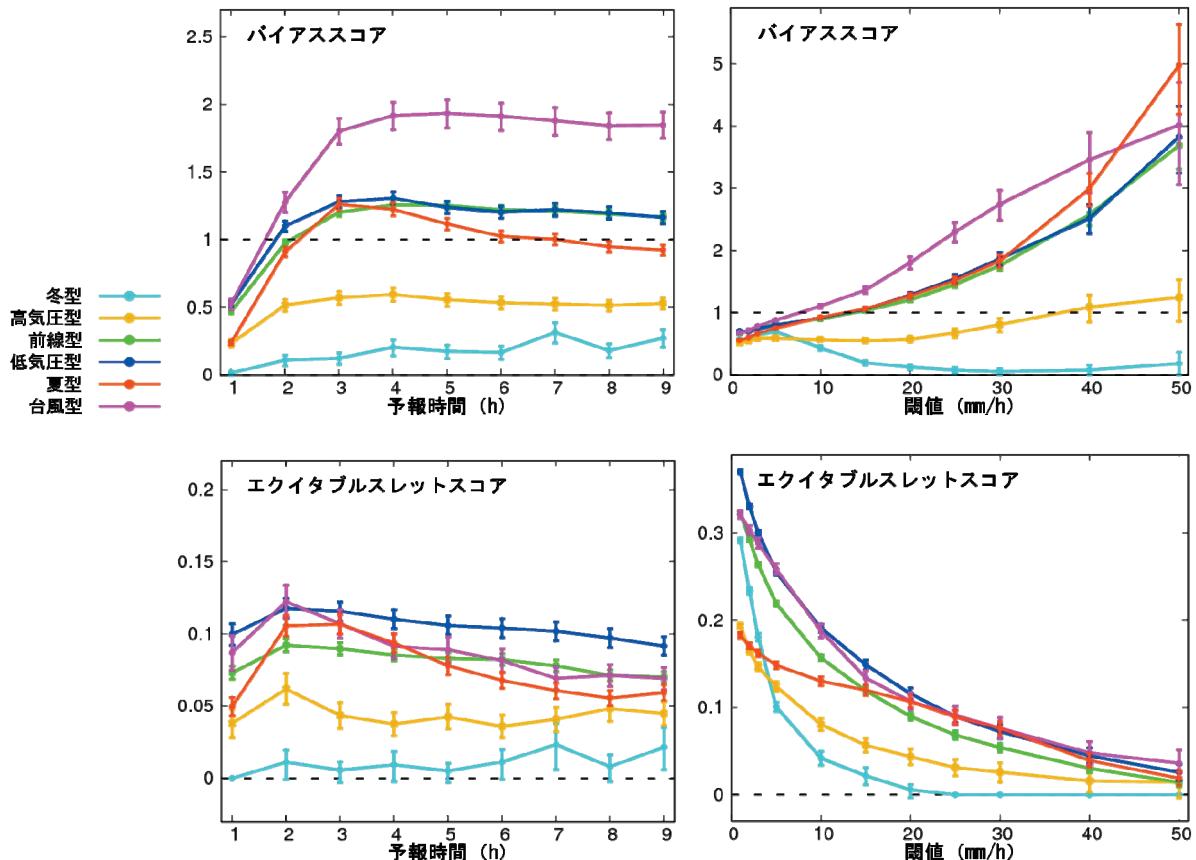


図2.1.3 検証格子20kmでの最大1時間降水量の気圧配置別バイアススコア（上段）とエクイタブルスレットスコア（下段）。左列は20mm/h以上の降水に対するFT別、右列はFT=3における閾値別の結果を表す。
水色：冬型、黄色：高気圧型、緑：前線型、青：低気圧型、橙：夏型、紫：台風型。エラーバーは95%信頼区間。

つまり、LFMは空振り率を上げることなく、夏型の強雨の予報精度を向上させていると言える。

なお、2010年11月にMSMのKFスキームの変更が実施され、以後のMSMはやや強雨予報の頻度が大

きくなるなど降水予報の性質が変化した（成田・森安 2010）。しかし、この影響は図2.1.4に示したMSMのBIがやや大きくなり、それに伴って各スコアがわずかにLFM寄りになる程度で（図略）、ここで示したLFMとの顕著な違いは同様に見られた。

(3) まとめ

LFMの強雨に対する予報特性を気圧配置別に把握する目的で、2010年6月1日から2011年5月31日の1年間を冬型・低気圧型・高気圧型・前線型・夏型・台風型の6つの型に分類し、LFMの最大1時間降水量について対解析雨量で統計検証を行った。この結果、気圧配置の違いによってLFMの強雨の予報特性が異なることがわかった。また、夏型においては午後の時間帯の対流性降水に対する予報精度がMSMより大きく向上していた。位置ずれや予報過多の傾向に留意すれば、LFMの目的である防災気象情報作成支援の上でも活用できると考えられる。ただし、この強雨の予報特性はMSMとの比較では向上が見られるものの、ETSの絶対値そのものは決して高くはなく、空振りや見逃しの事例も多く含んでいることを念頭に置く必要がある。

2.1.3 対流性降水の予報傾向

前項での気圧配置別検証では、夏型の午後の時間帯に発生する強雨のポテンシャルを捉えるという点で、LFMがMSMよりも優れていることを示した。総観場と発生時間から判断すると、この降水は主に大気の熱的不安定によって発生する対流性降水によるものであると考えられる。本項では、夏型の中でもこのような対流性降水に着目してLFMの予報傾向を詳しく述べる。

対流性降水の例として、日本の東海上に中心をもつ高気圧に覆われ、各地で猛暑日となった2010年8

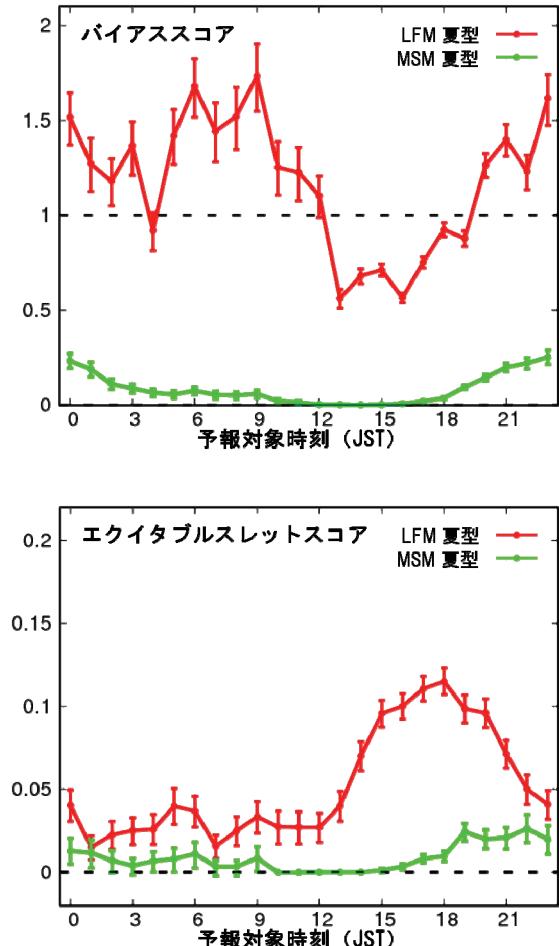


図2.1.4 20mm/h以上の降水を対象とした、予報対象時刻別バイアススコア（上）とエクイタブルスレットスコア（下）。赤：LFM、緑：MSM。エラーバーは95%信頼区間を示す。

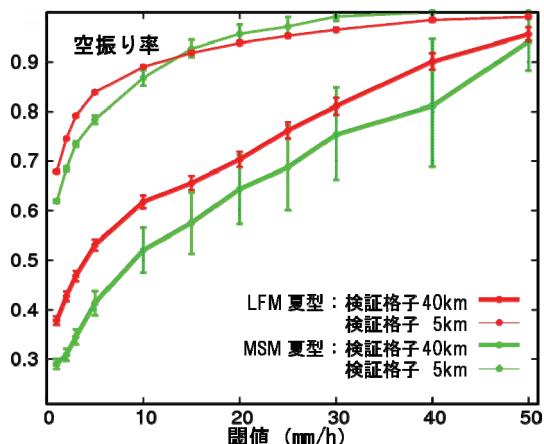
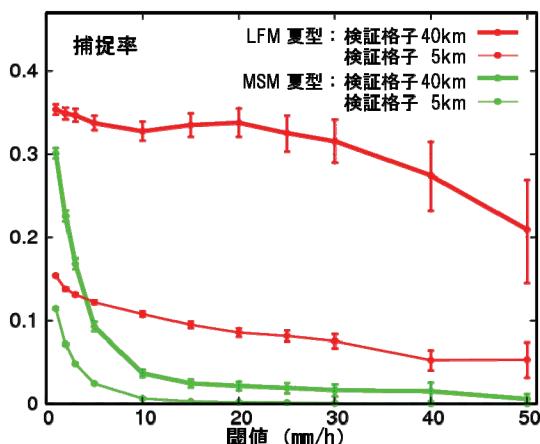


図2.1.5 FT=3における閾値別に見た捕捉率（左）と空振り率（右）。赤：LFM、緑：MSM、細線：検証格子5km、太線：検証格子40km。エラーバーは95%信頼区間を示す。

月24日の17JSTの解析雨量とLFM,MSMの予報（24日03UTC初期値のFT=5）を図2.1.6に示す。LFMの予報では、降水の位置ずれや降水量の過大評価が見られるが、中国、四国、近畿の山地に沿った対流性降水をよく予報している。これに対してMSMの予報では、降水のある地域は捉えているが、弱い降水が広がっているのみである。MSMの水平格子間隔は5kmであり、積雲対流をモデルの格子点で顕著に表現するには粗い。そのため格子で捉えられない積雲対流の寄与を対流パラメタリゼーション（Kain-Fritschスキーム（Kain and Fritsch 1990; Kain 2004））で表現する必要がある（成田 2008）。図に示されている弱い降水はこの対流パラメタリゼーションによって予報されたものである。ここで述べたこれらの傾向は、LFMとMSMそれぞれの対流性降水に対する一般的な予報の特徴といえる。

本項では、前項で夏型に分類された事例のうち、高気圧縁辺流による地形性降水が目立つ事例などを除いた、午後の内陸部での熱的不安定性の降水が主となる事例のみを対象にして、LFMの対流性降水に対する予報特性とMSMとの振る舞いの違いを記す。対象事例日数は、図2.1.6で示した例を含む26日である。これは、気圧配置別検証で夏型として扱った事例のうち約半数に当たる。

（1）対流活動の時間変化の表現

ここでは降水域の面積の時間変化に着目し、対流性降水の時間発展に対する予報傾向を把握する。まず、ある閾値以上の降水を予報した格子数に1格子あたりの面積を掛けたものを、その閾値の降水面積と定義する。事例毎に、降水面積の時系列を解析雨量・予報値とともに解析雨量の午後のピーク値で規格化したものを作成し、事例総数で平均する。事例日によって現象の激しさの程度が違うところを、規格化することで同列に扱うこととした。解析雨量データは元の緯度経度座標から、MSM, LFMで用いられている座標系²に変換したもの用いた。その際、格子間隔は1kmとした。また、対象領域は前項の検証の領域のうち、モデル内で陸地として扱われている領域のみとした。

図2.1.7にLFM,MSMそれぞれの、0.4mm/h以上ならびに20mm/h以上の降水面積の時系列を示す。モデルが対流性降水の時間変化を予報できているかを確認するため、初期時刻が朝の予報（21,00UTC初期値）を対象とした。MSMの0.4mm/h以上の降水面積はその時間変化、割合とも、解析雨量にある程度追随しているが、20mm/h以上の降水面積は0

に近い。つまり、MSMは対流性降水を短時間強雨としては予報する事が出来ず、現象が起こるエリアを弱い雨として表現していると考えられる。これに対してLFMは、0.4mm/h以上の降水面積の時系列からわかるように降水域全体としては過少となっているが、20mm/h以上の降水面積については実況で見られる対流性降水の時間変化をうまく捉えている。ただし、これは位置を含んだ検証ではないことに注意を要する。さらに後で触れるが、降水強度が過剰であるという問題もある。それらを踏まえたうえで、MSMで対流性降水の起りうる領域を把握し、その領域の中でLFMが予報するような強雨の発生を見込む、といった両モデルの併用が有効であろう。

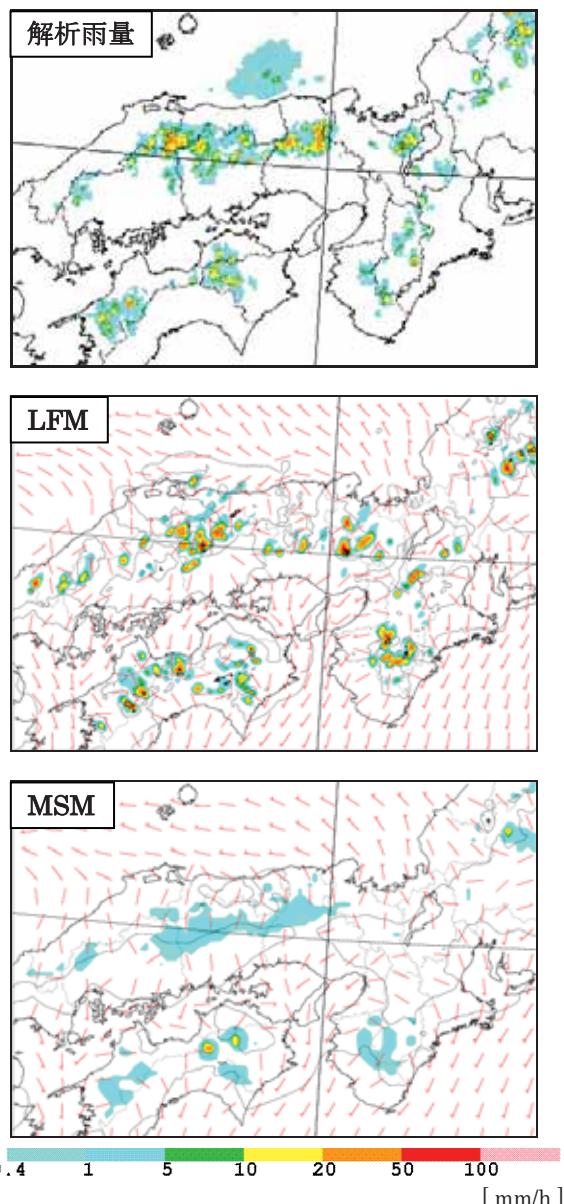


図2.1.6 対流性降水事例（2010年8月24日17JST）の実況、並びに予報。上：解析雨量、中：LFMの24日03UTC初期値のFT=5、下：MSMの24日03UTC初期値のFT=5。雨量は前1時間積算降水量。

² ランベルト正角円錐図法で投影した地図上に直交座標系をとる。

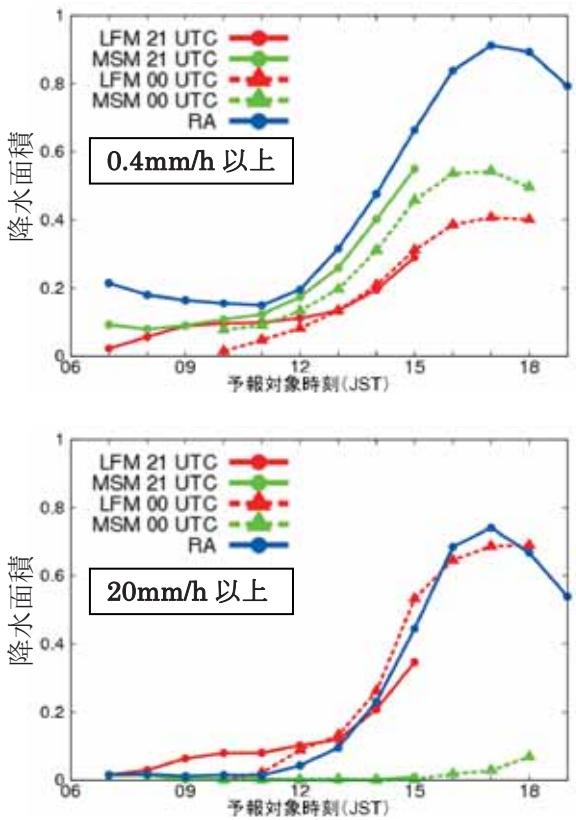


図2.1.7 対流性降水事例の降水面積の時系列。上段、下段はそれぞれ0.4mm/h以上、20mm/h以上の降水を対象としている。LFMを赤、MSMを緑で表し、21UTC初期値を実線と●、00UTC初期値を点線と▲で示した。青は解析雨量（実況）。各事例毎に解析雨量のピーク値で規格化したのち、全事例の平均をとった。縦軸は解析雨量のピークに対する割合(0–1)を示す。横軸は予報対象時刻 (JST)。

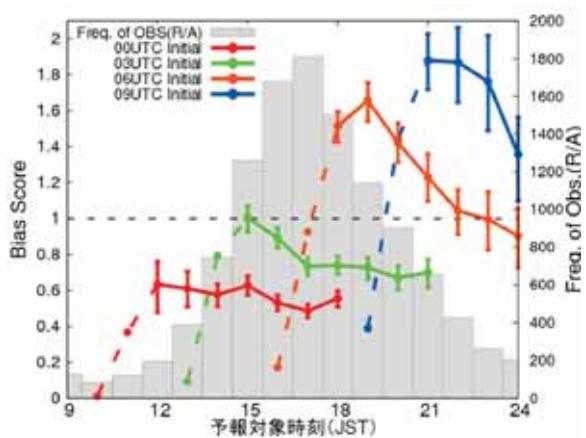


図2.1.8 対流性降水事例の初期時刻別のバイアススコア (BI)。10km検証格子内最大降水量が20mm/h以上を対象とする。折れ線が各初期時刻（赤：00UTC、緑：03UTC、橙：06UTC、青：09UTC）のFT=1～9のBI（左軸）を表し、95%信頼区間を示すエラーバーも付している。降水の立ち上がりの悪いFT=3までは点線で表している。棒グラフは観測の頻度を表す（右軸）。

(2) 初期時刻別の降水予報特性

LFMは毎時運用を計画している（本テキスト第3章参照）。9時間という短い予報時間が一日のどの時間帯を対象とするかで、予報の特性が異なる可能性がある。夏季の対流性降水の例で言えば、予報の始まりが地面を温めている段階であるか、または対流雲の生成期にあたるのか、あるいは最盛期であるか、というように初期時刻によって対流活動の異なるステージが予報対象となる。どの初期状態で始めても同様の予報を行うのか、つまり予報に一貫性があるのかを調査しておくことは予報作業上の助けになるだけでなく、もし異なる傾向があればLFMの開発、改善を進める上でも重要な手掛かりとなる。ここでは、初期時刻が日中にあたるものも含めて、初期時刻別の降水予報特性を調査する。調査対象は(1)と同じ対流性降水事例、全26日間である。

検証条件としては、第2.1.1項、第2.1.2項と同一の検証領域に対して検証格子を10kmにとり、検証格子内最大降水量20mm/h以上を対象とする。個々の対流雲を対象とした検証を意図してこの条件とした³。図2.1.8にFT毎のBIを初期時刻別に示す。同時に示した観測の頻度から、対流性降水の最盛期が17JST頃とわかる。LFMの予報は、初期時刻が夕方になるにつれ予報過多になる様子がわかる。対流現象の始まる前の初期時刻をみると、00UTC初期値は予報過少のまま（FT=2までを除くと）ほぼ横ばいに推移し、03UTC初期値の予報は15JSTでBIが1になるものの最盛期に過少となる。これに対し、06,09UTC初期値は予報過多傾向を持ち、対流活動の盛期を過ぎた時間帯に依然として強い降水を予報している。図2.1.9は初期時刻03,06,09UTCの21JSTに対する、閾値20mm/hおよび50mm/h以上の予報頻度を比較したものである。後の初期時刻ほど強い降水の頻度が多いことがわかる。このように夏季の対流性降水に対してLFMは、実況が現象の最盛期を過ぎたあとでも強い降水を予報する傾向があることがわかった。特に夜間に強い対流性降水が予報される場合、過剰である場合があるので利用には注意していただきたい。

(3) 地上気温の特徴

夏季の大気の熱的不安定をきっかけにした対流性降水を予報するためには、熱源となる地表面が十

³ 10km検証格子内最大20mm/h以上の降水に対する予報あり、ならびに観測ありの数を、LFMの降水予報分布とLFM格子に変換した解析雨量から抽出した20mm/h以上の降水セルの数（対流雲の水平スケールを10kmと仮定し、降水量のピークを中心とした直径10kmの領域が互いに重ならないようにして、降水量の多い順に特定した降水セルの数）とそれぞれ比較するとほぼ同数であった。

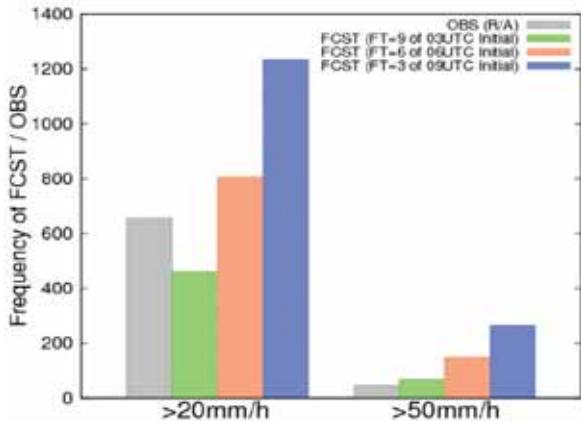


図2.1.9 21JSTを対象とした予報と観測の頻度。
10km検証格子内最大降水量が20mm/h以上の頻度を左側に、50mm/h以上の頻度を右側に示す。各初期時刻の予報の頻度は、03UTCはFT=9（緑）、06UTCはFT=6（オレンジ）、09UTCはFT=3（青）にあたる。解析雨量を灰色で示す。

分に温められることが重要である。地表面それ自体の検証は観測が不十分なために行えないでの、ここでは地表面温度を反映した量として地上気温を評価する。LFMの夏季における地上気温の特性として、日中に負バイアスが顕著で、夜間は正バイアスをもつことがこれまでの調査で明らかになっている（平原 2010）。今回の事例についても同様の傾向が予想されるが、対流性降水事例に限定して地上気温の平均誤差を調査する。

これまでの地上気温調査と同様に、LFM領域内のアメダス地点のうち、観測点を囲むLFM格子が4格子とも陸地として扱われている地点を対象とした。予報対象時刻ごとの平均誤差を初期時刻別に算出し、図2.1.10に示す。ここでは地上気温の時間変化を明瞭にするため、予報値、観測それぞれの平均気温も図示している（その差が平均誤差になる）。同図からはやはり、LFMの予報が日中の昇温に追随できていないこと、夜間に気温が下がっていないこと、つまり日変化が現実よりも小さいことがわかる。FT=0は正バイアスだが、日中の予報については、FT=1には負バイアスへ転じている。00,03UTC初期値の地上気温予報は、実況での最高気温の時間帯に平均で1度近く下回っており、これらの初期時刻の予報が対流性降水の最盛期を捉えられていないこととの関連が示唆される。しかし06,09UTC初期値に関しては、特段に気温が高いわけではなく、夕方以降の強い降水の予報過多の説明を与えるのは難しい。もとより対流性降水は地上気温のみで決まるわけではなく、大気の鉛直構造も見ていかなくてはならない。例えばデータ同化によってどのような成層状態をもつ初期値が作られているのかなども調査する必要がある。また、ここで求めた平均誤

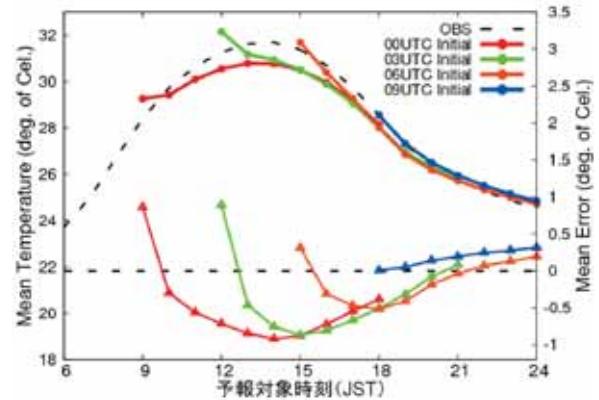


図2.1.10 対流性降水事例に対する地上気温予報の対アメダスでの平均誤差。上部に観測の平均気温（黒点線）と各初期時刻（赤：00UTC、緑：03UTC、オレンジ：06UTC、青：09UTC）のFT=0～9の平均気温（●；左軸）を示し、下部に観測との差、すなわち平均誤差（▲；右軸）を示す。

差は、上で述べた観測点全ての統計であるので、直ちに局所性のある対流性降水と結び付けることはできないことも注意するところである。

(4) まとめ

対流性降水事例に対して、いくつかの観点で検証を行った。LFMは、MSMでは予報が難しい対流性降水の時間変化をよく予報していることがわかった。しかし00,03UTC初期値の予報は対流活動の最盛期で予報過少であり、06,09UTC初期値の予報は、実況が対流活動の盛期を過ぎたあとでも、強い降水を過剰に予報する傾向があった。対流活動を駆動する地表面の状態を評価するため地上気温の検証を行ったが、日中の地上気温の負バイアスが00,03UTC初期値の対流性降水の予報過少のひとつの証左を表す一方で、06,09UTC初期値においては対流活動との関連は示されなかった。これらの結果をふまえ、今後さらなる調査を行い、改善に繋げていきたい。

最後に、地上気温と対流性降水の予報の関連を示すものとして、2011年8月7日の事例を紹介する。この日、本州は高気圧に覆われ日中昇温し、午後山沿いを中心に対流雲が発達した。さらに夕方には首都圏でも短時間強雨があった。図2.1.11に当日の15JSTを対象とした降水と気温のLFMの予報（8月6日21UTC初期値のFT=9と8月7日03UTC初期値のFT=3）と実況を関東周辺について示す。6日21UTC初期値は実況にある対流性降水のほとんどを予報できおらず、地上気温は実況より低くなっている。一方、7日03UTC初期値の結果をみると栃木や山梨で50mm/h以上の降水が予報されており、地上気温はより観測に近づいた分布をしている。このときも

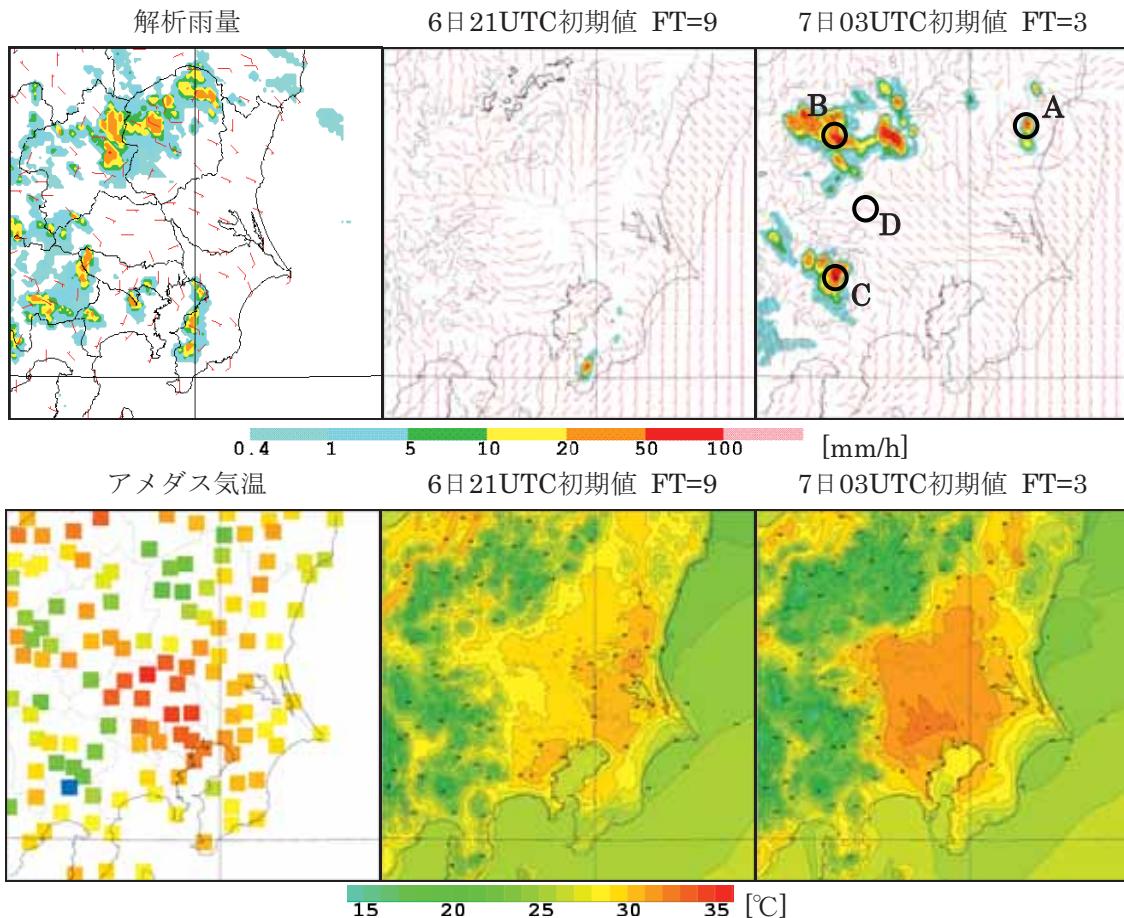


図2.1.11 2011年8月7日15JSTに対する観測と予報。上段は前1時間降水量で、左から解析雨量、6日21UTC初期値のFT=9、7日03UTC初期値のFT=3。丸で囲んだA～D点の13JSTでのCAPEを表2.1.2にまとめた。下段は地上気温で、左からアメダス、6日21UTC初期値のFT=9、7日03UTC初期値のFT=3。

初期時刻が進むにつれ激しい降水を予報していく傾向があったことがわかる。上段右図の丸印で示した点の13JST（7日03UTC初期値で対流性降水が起こる前）におけるCAPEは、7日03UTC初期値において地表面の温度が十分高いことを反映した結果かなり大きくなっている（表2.1.2）。7日03UTC初期値の予報は、解析で風系の改善がなされたために海風が内陸に侵入した結果、山地で対流性降水が予報された面もある。しかし日中に内陸へ海風を呼び込むことや、潜在不安定な大気をつくりだすことは、やはり内陸の地表面の加熱が重要である。なお、この事例では親モデルのMSMもほとんど降水予報ができていなかった。

表2.1.2 図2.1.11上段右で示したA～D点での、13JSTにおけるCAPE(J/kg)。900hPaの気塊を持ち上げたときの値を示す。

	6日21UTC初期値	7日03UTC初期値
A	853	1789
B	212	1652
C	94	562
D	0	64

2.1.4 航空気象業務向け地上風向・風速検証

LFM運用の主要な目的の一つは、航空官署における飛行場予報支援である。LFMの特徴の一つとして、高解像度化により地形の表現が向上することが挙げられる。これによって、地形の影響を受け易い地表付近の風の場の予報精度向上が期待されている。一方、飛行場周辺の風の予報は、航空機の運行計画の基になる情報であり、さらに、風向・風速の急変は、航空機の離発着等の安全な運航に重大な影響を及ぼす気象要因の一つである。これらのことから、LFMを飛行場周辺の風の予報支援に適用するためには、予報特性を把握することが重要である。

平原(2010)は、2010年の実験運用期間を対象に、夏季（2010年6月・8月）・冬季（2009年12月・2010年2月）に分けてLFMのアメダス観測値に対する地上風検証を行った。その結果、夏季・冬季とも12-21UTCの夜間に中心に、地上風速の正バイアスがMSMより改善していること、LAにおいてアメダス風向・風速がデータ同化に用いられていることから、予報初期時刻においてLFMの地上風速バイアスが特に小さいことを示した。なお、平原(2010)は海陸のそれぞれに分類されるモデル格子毎の予報

特性の違いに配慮（瀬川 2005）して、観測点を囲むモデル格子が全て陸地となっているアメダス観測地点を対象とした。このため、東京国際空港（以下では羽田と表記）など、沿岸部に位置して海の影響を受ける地点での地上風予報特性については、明らかにされているとは言えない。

本項では、LFMの飛行場周辺の風の予報特性を調査するため、試験運用時のプロダクト作成対象となっている羽田を主な対象とし、地上付近の風向・風速の予報特性について調査した結果を報告する。調査は、2010年1-12月の期間について行い、LFM、MSMの羽田地点を囲むモデル格子4点の値を線形内挿した値を羽田地点の値とみなし、羽田の定時飛行場実況気象通報（METAR報）による観測値と比較した。

（1）地上風速についての検証

図2.1.12は、予報時刻毎の地上風速の平均誤差を示す。LFMの対観測風速バイアスはMSMと比べ小さいこと、またLFMとMSMのバイアスの差は、予報開始から1時間後にかけて急速に減少し、その後は予報時間の経過に伴い緩やかに減少することが分かる。これらは何れも、平原（2010）で見られた傾向と同じである。一方、LFM、MSMともに風速に負バイアスが見られている。平原（2010）では、夏季の日中を除くと両モデルとともに正バイアスであり、この結果は平原（2010）とは逆の傾向を示していることがわかる。さらに、季節別に同様の調査を行ったところ、寒候期と比較して暖候期の方がバイアスの差が拡大する傾向があることもわかった（図略）。これも逆の傾向を示している。このことは、地上風速を決める要素である地上気温などの分布に季節依存性があることを示唆している。

次にバイアスの日変化を見る。図2.1.13は予報対象時刻毎の地上風速の平均誤差である。日中は、夜間と比べLFM、MSMともに負バイアスが大きいこと、LFMの方がMSMと比べ日中の負バイアスが小さくなっていることが見てとれる。また、季節毎に見たところ、寒候期より暖候期の方がこの傾向が顕著になることが分かった（図略）。

今回、地上風速の検証に用いたデータは、平原（2010）と同様に、地点を囲むモデル格子4点の値を線形内挿した値であるが、平原（2010）は4点すべてが陸格子となる地点のみを用いたのに対し、今回、羽田地点の内挿に用いたのは、LFMでは2格子、MSMでは3格子が海上の格子であった。海上の格子の数の違いは、モデル解像度の違いによる地形の違いを反映したものである。図2.1.14に羽田付近のLFMとMSMの海と陸それぞれの格子の分布を示す。海陸の違いは、粗度や熱容量などの違いを通じて、

地上要素の予報に大きな影響を与えるため、平原（2010）との傾向の違いは、海陸の違いによるものである可能性は高い。

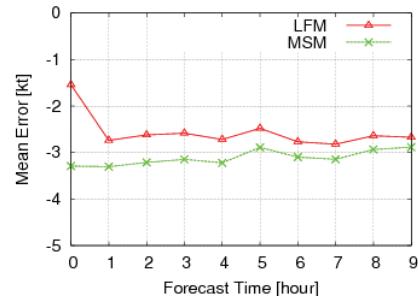


図2.1.12 羽田における2010年の予報時間毎の地上風速の平均誤差。縦軸の単位はkt。赤はLFM、緑はMSMの地上観測値に対するバイアスを表す。

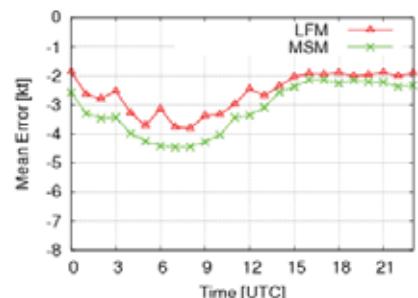


図2.1.13 図2.1.12と同じ。ただし羽田における2010年の予報対象時刻（UTC）毎の地上風速の平均誤差。

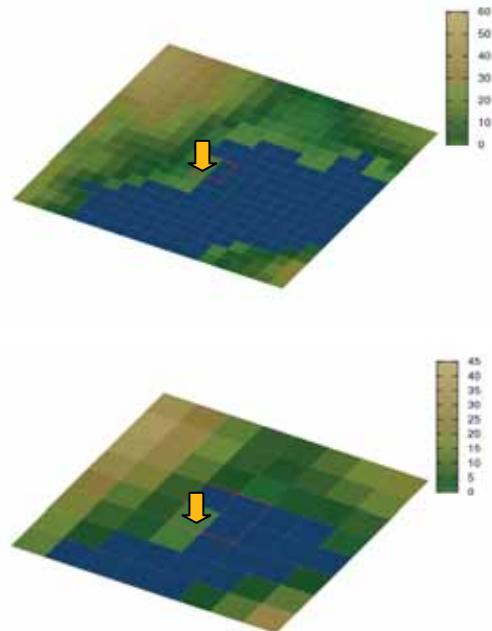


図2.1.14 羽田周辺の海陸分布。上図はLFM、下図はMSM。図の赤枠で囲まれた領域が羽田の観測地点を囲む4格子点を示す。黄色の下矢印は観測地点を含む格子を示す。藍色で示す格子は海陸比が0.5未満を示す。陸地に相当する格子は、標高(m)別に色分けして示す。

そこで、海陸の違いが及ぼす影響を確認するため、図2.1.12と同じ期間について、羽田の観測地点を囲む4格子のうち、羽田に最も近い陸の格子（図2.1.15）と、その東側に隣接する海の格子（図2.1.16）にそれぞれ着目し、2010年の予報時間毎の平均誤差を求めた。図からLAの予報初期のバイアスの減少は、陸格子で顕著であること、海格子は、LFM, MSMともにバイアスが小さいことが分かる。

のことから、まず羽田の観測データが、モデルの海格子の値に近いことが分かる。そのため、風速の弱い陸格子の観測データでは負バイアスが大きくなっているが、このことが、平原（2010）とはバイアス傾向が異なる要因であると思われる。LAでは、この傾向を受けて、特に陸上で風速を強める傾向の修正が加えられるため、予報初期のバイアスは小さくなるが、LFMによる予報が始まるとモデルの場に急速に適応し、粗度の大きい陸格子では予報初期の短時間にバイアスは急速に大きくなる（平原 2010）。その結果、図2.1.15に見られるように、予報開始から1時間後以降ではLFMとMSMのバイアスにはほとんど違いが見られなくなる。一方、海格子ではLFMとMSMにバイアスの違いはほとんどみられないが、観測点に近いMSMの海格子のうち陸の影響をより多く受ける格子では、負バイアスとなる傾向が見られた（図略）。図2.1.12で全体的にMSMのバイアスが大きくなっているのは、この海格子の影響によるものであった。

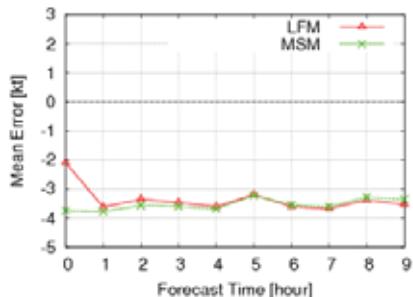


図2.1.15 図2.1.12と同じ。ただし羽田を囲むモデル格子4点のうち観測点を含む格子（陸）が対象。縦軸の単位はkt。赤はLFM、緑はMSMの地上観測値に対するバイアスを表す。

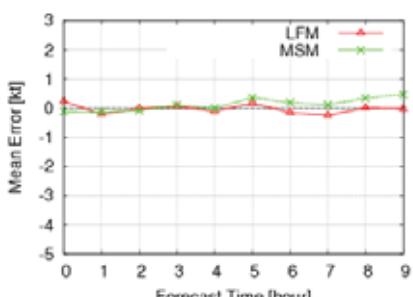


図2.1.16 図2.1.15と同じ。ただし羽田を囲むモデル格子4点のうち、図2.1.15の東側に隣接する格子（海）が対象。

このように、羽田のように沿岸部に位置する空港の地点予報用の数値予報プロダクト作成に利用する場合は、モデルの海陸の違いによる地上要素の予報特性を十分に把握しておく必要がある。

(2) 地上風向変化に着目した検証

飛行場付近の風向は、航空機の離着陸に使用する滑走路の決定に大きな影響を与える。このため、風向変化を事前に予測することは、運行計画上有用である。また、風速と同様に風向の急変は、離着陸時の安全運航に影響を及ぼすため、風向急変の事前予測に資する数値予報に基づく情報も求められている。ここでは、羽田地点で見たLFMの地上風向の予報特性について調査した結果を記述する。

(a) 検証方法

本項でも、航空気象観測通報による地上実況およびMSMとの比較によって、羽田におけるLFMの風向変化の予報特性を調査する。以下では、LFMとMSMにおける「風向変化」を、航空気象観測における通報上の定義を参考に、30分間隔の格子点値において、前30分値との風向差が60度以上であると定義する。弱風時の風向変化を除外するため風速は3kt以上を条件とする。これより短い時間間隔の風向変化を伴う事象も、航空機の安全運航上重要であるが、ここでは取り上げず、今後の課題としたい。

羽田地点において、LFMで風向変化が見られた事例を、2010年1月-12月の1年間について調査した。LFMの風向変化が予報時間（予報初期時刻から9時間）内に存在した初期時刻を「事例」として数えた場合、65事例が該当した。同様の条件で見たときに、MSMで風向変化が見られたのは22事例であった。ちなみに、同じ条件で航空気象観測通報における「風向変化」を確認したところ、248時刻が該当し、これをLFMの予報があった「事例」に反映させると、421事例となる。なお、ここでは特別飛行場実況気象通報（SPECI報）や風向不定は除外している。

ここで、風向変化が観測された事例のうち、LFMで風向変化がみられたのは38事例、MSMでは17事例であった。以下では、LFMとMSMの両方で風向変化が見られた予報事例の特徴について述べる。

(b) 全般的な特徴

風向変化が低気圧や前線などの大規模な場の影響によってもたらされる場合は、概ねLFMはMSMと似た風向変化の予報特性を示していた。特に、寒冷前線などに伴う地上収束線の通過事例については、LFM、MSMとも観測された風向変化との対応は良かった。このうち、降水を伴う場合、LFMの方が、MSMよりも観測に近い風向変化を示し、降水

系の表現が良い事例が見られた。

一方、夏季の高気圧圏内での熱雷や、寒冷前線前面の暖湿流場などによる不安定降水事例では、降水の位置ずれによって、また、台風に伴う降水系の強度や形状などでは良い予報をしている場合も、それが羽田付近を通過するタイミングのずれなどによって、観測とは異なる風向を示す事例も見られた。この特徴は、氏家（2009）で報告されている。

このように、LFMの風向変化の予測特性は、降水系を伴う気象場の予測結果に大きく依存する傾向がみられた。以下に、それらの特徴を示す事例を紹介する。

(c) MSMと比較してLFMの表現が良い事例

総観場で前線が解析されていない場合であっても、降水や温度傾度を伴うなど、地上収束線が明瞭な事例においては、LFMがMSMと比べて観測との対応が向上した例が見られた。地上収束線の通過による風向・風速の変化が、航空機の運航に影響を及ぼした例は、竹之内・中山（2008）でも示されている。ここでは、2010年7月24日06UTC初期値の結果を取り上げる。これは、図2.1.17で示すように、北日本を気圧の谷が通過する際に、降水を伴った地上収束線が関東地方を通過した事例で、羽田では風速27ktのガスト、及び落雷が観測通報された。

図2.1.18は、羽田における地上風の時系列の比較を示す。LFMでは観測と同様に、12UTC頃に南から北によりに風向が変化しているが、MSMでは風向変化は予想されていない。この事例については、MSMは降水系やそれに伴う明瞭な地上収束線の表現が十分ではなく（図2.1.19a、図2.1.19c）、地上収束線の通過に伴う風向変化を予想することができなかった。LFM（図2.1.19b）は対照的に、観測に近い降水系やそれに伴う地上収束線と、その推移を

予想した。

この事例では、予報初期時刻において、地上気温の分布等がLFMの方が観測に近いことから（図略）、LAにおいて、アメダス観測データを同化している効果があったと考えられる。

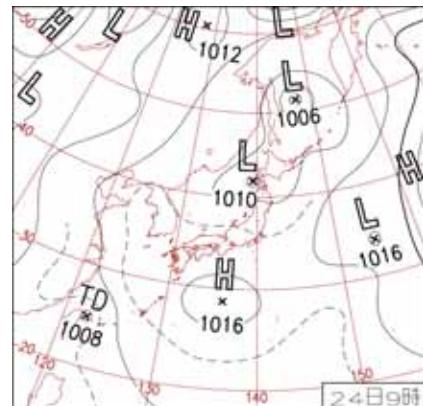


図 2.1.17 地上天気図（2010 年 7 月 24 日 9 時）

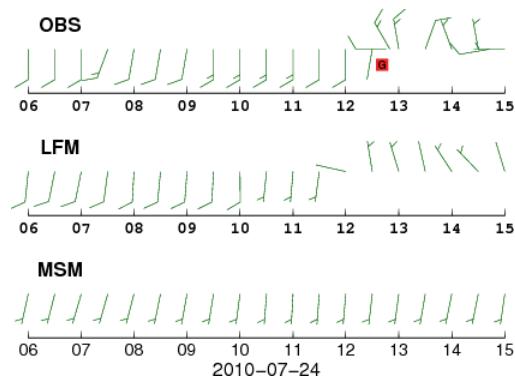


図 2.1.18 2010 年 7 月 24 日 06-15 UTC 羽田の地上風向風速時系列。長矢羽根は 10kt、短矢羽根は 5kt の風速を表す。上：METAR 報、図中赤の G は SPECI 報でガストの通報があった時刻を示す。中：LFM 時系列。下：MSM 時系列。

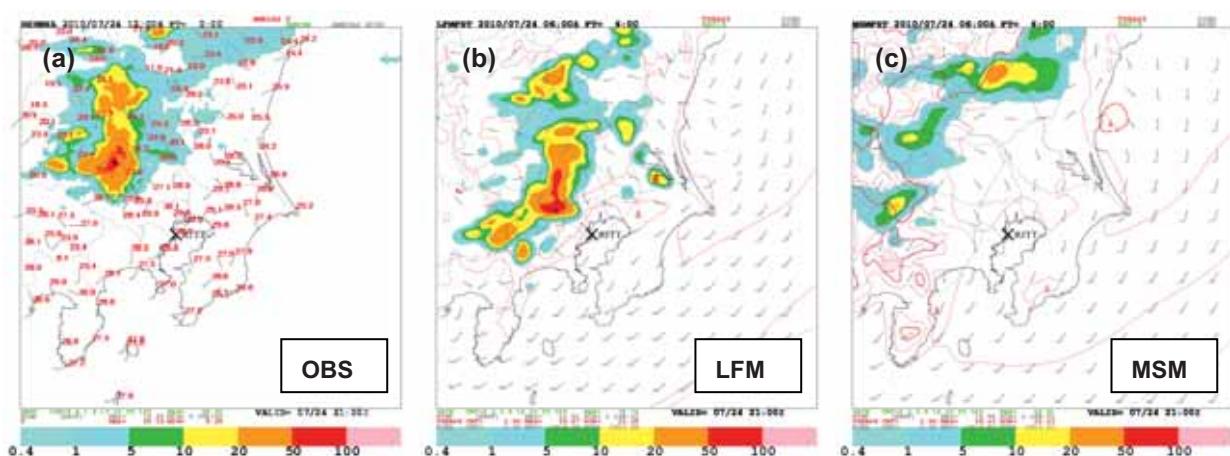


図 2.1.19 2010 年 7 月 24 日 12 UTC における(a) 解析雨量 1 時間値 mm/h、アメダス気温 °C、地上風向・風速。図中の X 印は、羽田地点を示す。(b) LFM(2010 年 7 月 24 日 06 UTC 初期値, FT=6)、地上風向・風速、等値線(赤)は標高補正された地上気温、前 1 時間降水量。(c) MSM(2010 年 7 月 24 日 06 UTC 初期値, FT=6)、地上風向・風速、等値線(赤)は標高補正された地上気温、前 1 時間降水量。なお風向・風速の長矢羽根は 10kt、短矢羽根は 5kt を表す。

(d) MSMと比較してLFMの表現が良くない例

羽田地点において、LFMの方が風向変化のタイミングが良くなかった例として、図2.1.20に2010年9月8日03UTC初期値の事例を示す。これは、本州に上陸した台風第9号の影響による強雨事例である。図2.1.21に示すように、LFMは07-08UTCにかけて観測でみられた風向変化を予報できておらず、観測から遅れて09-10UTC頃に予報している。

羽田で風向変化が観測された2010年9月8日08UTCの観測を図2.1.22aに示す。台風に伴う複数の降水系が関東南部から静岡にかけて見られ、神奈川西部と、東京湾付近に特に強い降水が観測されている。羽田の風向変化はこの降水系の通過によりもたらされたと考えられる。

LFMの予報結果（図2.1.22b）では、降水系の予報は、MSM（図2.1.22c）と比べて、降水強度・形状ともに観測に近いが、降水系の位置がやや北にずれており、これが羽田地点での風向変化のタイミングのずれの原因となっている。一方、MSMでは降水系の強度・形状は観測とかけ離れているものの、降水系の位置が観測に近いために、観測で見られた風向変化のタイミングを良く予報出来たと思われる。このように、降水系が存在する場合、地点における風向の変化は、降水系の位置や時間に大きく依存することが多い。しかしながら、その発生・発達する場所やタイミングには不確実性があるため、その位置ずれやタイミングのずれに留意する必要がある。

(3) まとめ

LFMの飛行場予報支援資料としての予報特性を把握するために、まず、羽田地点の地上付近の風向・風速に着目した調査を行った。陸上格子のみを対象としたこれまでの検証結果と異なり、観測と比較した際のバイアスの傾向や、バイアスの日変化が

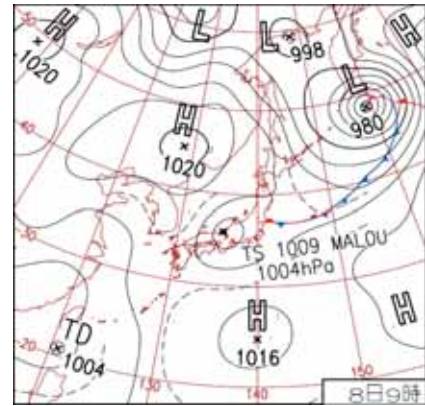


図 2.1.20 地上天気図 (2010 年 9 月 8 日 9 時)

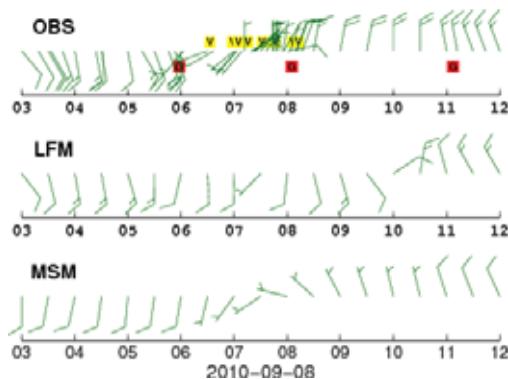


図 2.1.21 2010年9月8日03-12UTCの羽田の地上風向・風速時系列。長羽根10kt、短羽根5ktの風速を表す。上:METAR報/SPECI報、図中の赤のGはSPECI報中でガストが、黄色のVは風向変化的通報があった時刻を示す。中:LFM時系列。下:MSM時系列。

従来の検証結果とは逆の結果となった。これは、観測データが、粗度が小さく風が強い傾向となるモデルの海格子の値に近く、相対的に風の弱い陸格子で負バイアスの傾向となるためであった。また、同じ海格子でも陸格子に囲まれてその影響を受けやす

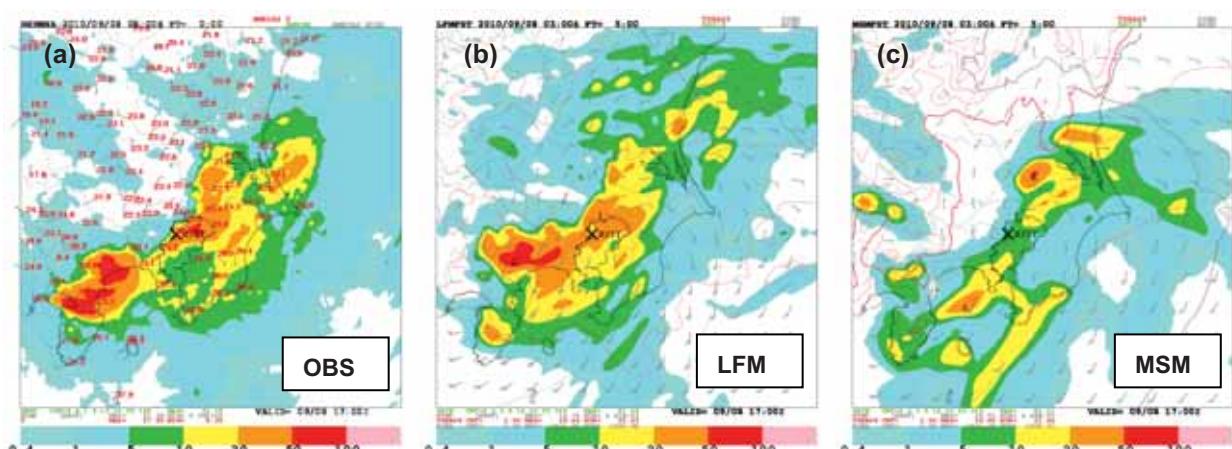


図2.1.22 図2.1.19と同じ、ただし2010年9月8日08UTCにおける、(a)解析雨量1時間値mm/h、アメダス気温°C、地上風向・風速、(b) LFM(2010年9月8日03UTC初期値,FT=5)、(c) MSM(2010年9月8日03UTC初期値,FT=5)。

いところでは風が弱くなる傾向も見られた。このように、羽田のように海に近い地点では、モデルの海陸の違いによる地上要素の予報特性を把握する必要性が示唆された。風向変化の予報特性については、その結果が降水系の予測結果に大きく依存する特徴があらためて確認できた。

2.1.5 まとめと今後の課題

試験運用期間を含んだ通年のLFMの予報を行い、結果を統計的に解析したところ、これまで研修テキストなどで報告してきた強い降水の過多などの予報特性が、季節で相違があるものの傾向としては年間を通じたものであることがわかった。

また、気圧配置別に分類した統計検証を行った結果、LFMの降水予報特性に気象場による違いが見られ、強い降水の過多が特に起きやすい場があることなどがわかった。今回行った分類の中で、太平洋高気圧下にある夏型では、日中の強雨の予報精度に関してMSMより優れていることや、検証格子を広くとればその優位性が顕著になることが示された。すなわち、ある程度の位置ずれを見込むと、LFMは夏型における強雨のポテンシャルを捉えるのに有効であると言える。

MSMに対するさらなる優位性を示すため、対流性降水の事例に絞って分析を行った。その結果、LFMは日中の対流性降水による強雨の時間変化をよく予報していることがわかった。しかし初期時刻別に分析してみると初期時刻が夕方に近づくほど、現実の対流活動の盛期は過ぎているにもかかわらず、より強い降水を予報する傾向があることがわかった。また、地上気温に関しては日中の負バイアスが顕著であり、熱的不安定による対流活動を駆動するのに十分地表面が温まっていない場合があると考えられる。そのため実況で激しい対流活動がある場合でもLFMがほとんど予報しない事例が存在する。

モデルの中で地上気温が十分上昇していないのに夕方以降の対流活動が活発になるのは矛盾しているように見える。モデルが潜在不安定な成層を長く保持し続けているのかもしれないし、あるいは初期値において観測程度の地上気温を持っていることが関係あるのかもしれない。いずれにしても、LAで作られる初期値も含めて対流活動に伴う成層状態の変化を含めた詳細な分析や、地上気温の昇温を妨げている原因の調査など進めていく必要がある。

また、防災情報に資するための短時間強雨に関する検証だけでなく、航空機の安全運航にとってより重要な、風向急変の予測可能性についての詳細な検証を進めていくことも重要な課題である。

今回、1日8回の試験運用を年間通じて実施したこ

とで、多様な気象場の予報が蓄積された。また初期値別の観点での検証も可能になり、様々な方向から検証、さらにはそれを踏まえての改善を行っていきたいと考えている。

そしてLFMの予報精度向上には、LAの改善も重要である。これについては永戸ほか（2010b）や藤田・倉橋（2010）に現在取り組んでいる課題について挙げられているので参照願いたい。数値予報課では、次期計算機での本運用に向けて、引き続きLA、LFMとも精度向上のため開発を進めていく予定である。

参考文献

- 氏家将志, 2009: 高分解能局地モデルの開発と実験運用. 平成21年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 90-96.
- 永戸久喜, 石田純一, 藤田匡, 石水尊久, 平原洋一, 幾田泰酵, 福田純也, 石川宜広, 吉本浩一, 2010a: 局地数値予報システムの概要. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- 永戸久喜, 石田純一, 藤田匡, 佐藤芳昭, 2010b: 今後の計画. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 25-27.
- 瀬川知則, 2005: 地上気象要素の検証. 平成17年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 21-23.
- 竹之内健介, 中山寛, 2008: 地上収束線の通過に伴う風向急変の事例. 数値予報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 199-202.
- 成田正巳, 2008: 現業メソ数値予報モデルの湿潤過程の改良. 数値予報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 75-80.
- 成田正巳, 森安聰嗣, 2010: メソモデルの対流スキームの変更. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 53-61.
- 平原洋一, 2010: 全般検証. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 4-10.
- 藤田匡, 倉橋永, 2010: 局地解析. 数値予報課報告・別冊第56号, 気象庁予報部, 68-72.
- 吉野正敏, 気候影響・利用研究会, 2002: 日本の気候—I—最新データでメカニズムを考える—, 二宮書店, 275pp.
- Kain, J.S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An Update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170–181.
- Kain, J.S. and J.M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784–2802.

2.2 観測データ未入電時におけるガイダンスの精度¹

2.2.1 はじめに

平成23年（2011年）東日本大震災の際に東北地方の太平洋沿岸のアメダス地点の多くが被災し、長期にわたって観測値が欠測となった。ガイダンスには観測値を元に予測式を日々最適化しているものが多くある（付録Aを参照）。観測データが途絶えるとこれらのガイダンスの予測式は最適化されず、観測データが途絶える前の予測式を用いた予測を継続することとなる。このことがガイダンスの精度にどの程度影響するかが懸念される。

観測データが未入電となることによるガイダンスの精度への影響を調べるために、東日本大震災と同じ季節にあたる平成22年（2010年）の3月から翌年7月までの16か月間、全国のアメダス地点の観測デー

タが未入電となったと仮定した実験を行った。本節ではその結果を報告する。

2.2.2 調査方法

実験では、平成22年（2010年）3月11日以降、全国のアメダス地点のデータが未入電となったと仮定して平成23年（2011年）7月までの16か月間のガイダンスを作成した。風ガイダンス（MSM定時風ガイダンス、MSM最大風速ガイダンス）、気温ガイダンス（MSM最高・最低気温ガイダンス）を対象に、同期間のルーチンのガイダンスの結果との精度を比較した。以降、実験の結果をtest、ルーチンの結果をcntlとする。検証結果は03UTC初期値の結果を紹介する。

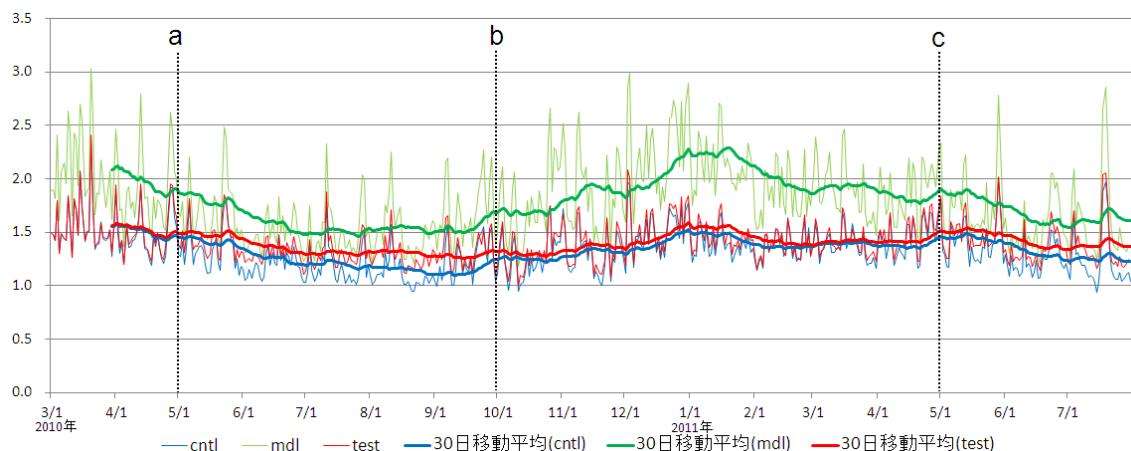


図 2.2.1 定時風ガイダンスの風速の初期時刻別の RMSE の時系列図。赤は test、青は cndl、緑は mdl (MSM の予測値) を表示している。太線は 30 日移動平均。縦軸の単位は m/s。a は 2010 年 5 月 1 日、b は 2010 年 10 月 1 日、c は 2011 年 5 月 1 日を示す。

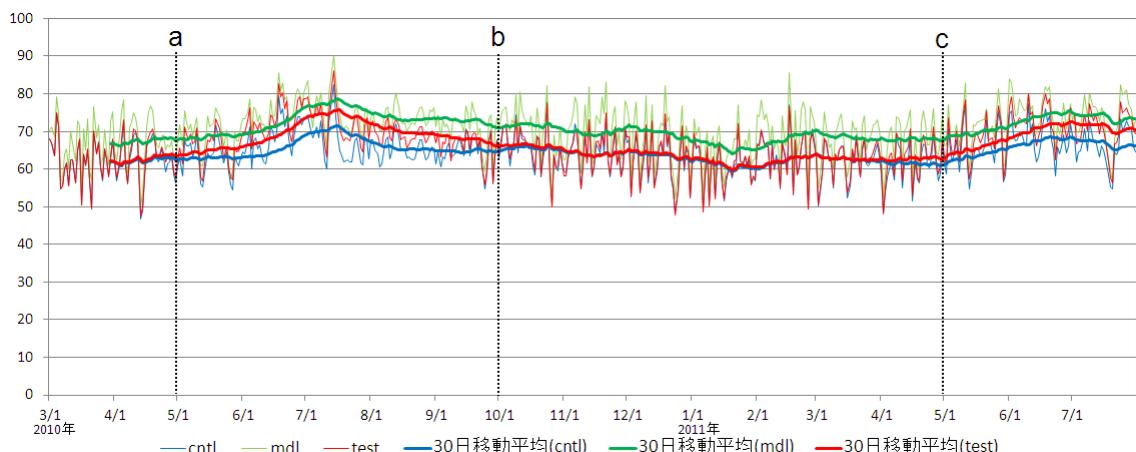


図 2.2.2 定時風ガイダンスの風向の初期時刻別の RMSE の時系列図。赤は test、青は cndl、緑は mdl (MSM の予測値) を表示している。太線は 30 日移動平均。縦軸の単位は度。a は 2010 年 5 月 1 日、b は 2010 年 10 月 1 日、c は 2011 年 5 月 1 日を示す。

¹ 小泉 友延、後藤 尚親

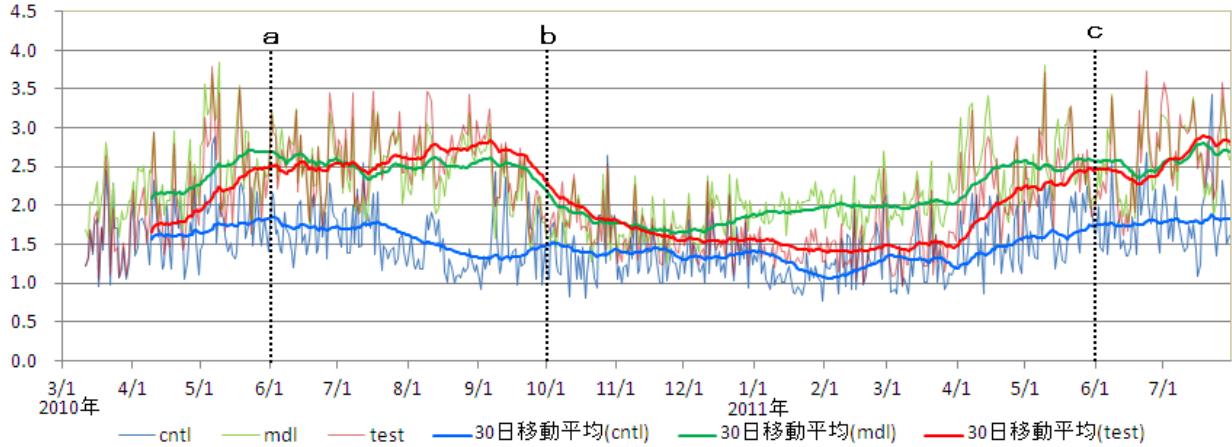


図 2.2.3 最高気温の RMSE 時系列グラフ。赤は test、青は cntl、緑は mdl(MSM の予測値)を表示している。太線は 30 日移動平均。縦軸の単位は°C。a は 2010 年 6 月 1 日、b は 2010 年 10 月 1 日、c は 2011 年 6 月 1 日を示す。

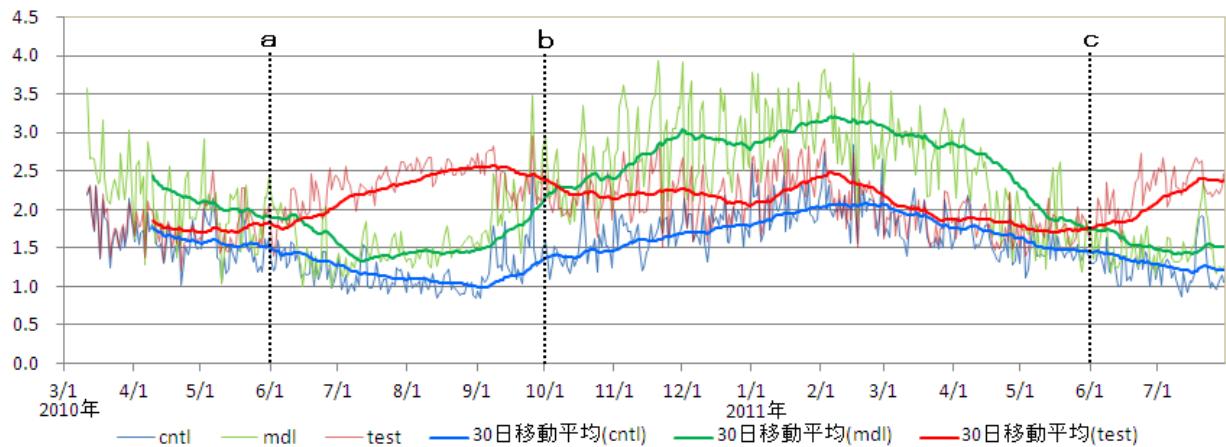


図 2.2.4 最低気温の RMSE 時系列グラフ。赤は test、青は cntl、緑は mdl(MSM の予測値)を表示している。太線は 30 日移動平均。縦軸の単位は°C。a は 2010 年 6 月 1 日、b は 2010 年 10 月 1 日、c は 2011 年 6 月 1 日を示す。

2.2.3 調査結果

(1) 風ガイダンス

風ガイダンスでは、初期時刻ごとに全アメダス地点のFT=1～24までの予測と観測結果から風向と風速のRMSEを求めて精度を検証した。

図2.2.1は、定時風ガイダンスとMSM地上風の風速のRMSEの時系列グラフである。同様に図2.2.2は風向のRMSEの時系列グラフである。なお、MSM地上風はアメダス地点に最も近い格子の値で検証した。風速、風向ともに、観測データが未入電となってからしばらくはcntlとtestとの差はほとんど見られないが、季節の変わり目となる5月頃（図2.2.1、図2.2.2のa）からtestとcntlとの精度の差が大きくなつた。季節が夏から秋に変わり10月（図2.2.1、図2.2.2のb）になると再びtestとcntlとの精度の差は小さくなり、翌年の5月頃（図2.2.1、図2.2.2のc）になるとまたtestとcntlとの精度の差が大きくなつた。こ

のようにtestとcntlとの精度の差に季節変化が見られたが実験期間を通じてtestはMSMの予測値よりも精度はよかつた。最大風速ガイダンスについても同様の結果であった（図は省略）。

testとcntlとの精度の差に季節変化が見られたのは、観測データが途絶えて予測式の最適化が停止したことにより、予測式がモデルのバイアスの季節変化に対応できなくなつたためと考えられる。一方、予測式の最適化が正常に行われていたcntlは、モデルのバイアスの季節変化に対応し、1年を通じて良い精度を維持することができた。

(2) 気温ガイダンス

気温ガイダンスでは、初期値ごとに全アメダス地点の翌日の予測と観測結果から最高気温と最低気温のRMSEを求めて精度を検証した。

図2.2.3は、最高気温のRMSEの時系列グラフである。同様に図2.2.4は最低気温のRMSEの時系列グラ

フである。なお、MSM地上気温はアメダス地点に最も近い周囲4格子を内挿した値で検証した。最高気温、最低気温ともに、観測データが未入電となってから季節の変わり目となる5月頃まではtestはmdlに比べて精度が高いことを確認出来たが、6月頃（図2.2.3、図2.2.4のa）になるとtestの精度がmdlの精度より悪くなった。季節が夏から秋に変わり10月（図2.2.3、図2.2.4のb）になると再びtestの精度がmdlの精度を上回るようになり、翌年の6月頃（図2.2.3、図2.2.4のc）になると再びtestはmdlに比べて精度が悪くなかった。

この実験のようにtestの精度に季節変化が見られたのは、予測式の係数が固定されているため、モデルの気温や風系のバイアス傾向が変化することに対応できず、精度が悪くなったことが考えられる。一方、係数更新が正常に行われているctlについては季節変化に伴い係数を適切に更新するため1年を通じて良い精度を維持していることも確認できた。

2.2.4 まとめ

調査の結果から、観測データが未入電となった場合のガイダンスの精度は、データが未入電となった期間よりも季節に依存することがわかった。観測データが未入電となっても、季節に変化がない期間であればガイダンスはある程度の精度を維持するが、季節が変わると精度が悪くなり、気温ガイダンスではMSMの予測値よりも精度が悪くなる時期があった。これは観測データが未入電となることによりガイダンスの予測式の日々の最適化ができなくなり、ガイダンスの予測式が数値予報モデルのバイアスの季節変化に対応できなくなったためと考えられる。

実験のように1年以上にわたって観測データが未入電となることは想定し難いことであるが、短期間であっても季節の変わり目を含む場合はガイダンスの精度が維持されない場合がある。観測データが継続して未入電となっている地点がある場合は、周辺の地点の予測値と比較することにより該当地点のガイダンスの予測値が妥当であるかを確認しながら利用することが望ましい。

2.3 省電力GPUコンピューティング¹

2.3.1 はじめに

数値予報とは、地球の大気を支配する物理法則を数値的に解くことであり、コンピュータを使うことを前提に、その業務や開発が成り立っている。コンピュータの歴史を振り返ると、古くは歯車を使った機械式のコンピュータも作られた。筆算に比べると速いものの、毎秒1演算（単精度実数演算のことをフロップス(FLOPS)という。したがって、1 FLOPS）程度の速度にとどまった。もっと高速に動作させるために電子回路が用いられるようになり、プロセッサ、メモリ、入出力装置という現在のコンピュータの構成が広く用いられるようになった。数値予報で用いるスーパーコンピュータも当然ながら、こうした構成からなる、いわば「電子部品の巨大な塊」である。

コンピュータの歴史はその高速化の歴史でもある。単体のプロセッサの高速化、複数プロセッサコアを1つのパッケージに封入するマルチコア化による性能向上、複数の処理を同時に処理できるように工夫された超並列コンピュータの台頭など、演算性能はわずか60年余りでおよそ200万倍と、大きく向上した。一方、真空管からトランジスタ、LSIというテクノロジーの進歩により集積化が進められ、省電力化や省スペース化にも取り組まれてきた。

このような歴史を経て、コンピュータの演算性能は飛躍的に向上した。さらに、数値予報で用いるようなスーパーコンピュータは年々大規模になり、プロセッサの数も飛躍的に増え、消費電力は上昇し続けている。このランニングコスト上昇の問題は非常に頭の痛い課題で、かつその解決にはコンピュータの設計者、製造者、そして利用者が一丸となって取り組む必要がある。世界のスーパーコンピュータの性能ランキングとして、年2回開催される国際コンピューティング会議で毎回発表されるTOP500が有名であるが、消費電力あたりの性能のランク付けを行うGreen500も実施されている。こうした取り組みは、高速化ばかりではなく、消費電力が少なく環境負荷の小さいコンピュータを全体で考えていくこう、重視していくこうという流れに他ならない。

コンピュータの消費電力については、数値予報モデルの開発に取り組む数値予報課としても無関心ではいられない。本節ではこの省電力コンピュータに向けた取り組みとして、最近注目されている「GPUコンピューティング」とその数値予報への利用の現状と課題について、東京工業大学（以下、東工大）との共同研究の成果を中心に述べる。

なおテラやペタといった情報量の接頭語が登場する。説明の便宜のため、これらの一覧を表2.3.1に示す。

表 2.3.1 情報量の接頭語

名前	記号	漢字	十進数表記
なし	なし	なし	1
キロ	K	一千	1,000
メガ	M	百万	1,000,000
ギガ	G	十億	1,000,000,000
テラ	T	一兆	1,000,000,000,000
ペタ	P	千兆	1,000,000,000,000,000
エクサ	E	百京	1,000,000,000,000,000,000

2.3.2 GPUとは

GPUとはGraphics Processing Unitの略で、グラフィック表示の処理を行うプロセッサのことである。ゲームなどの3次元コンピュータグラフィクスの処理では、視点の変更、物体の平行移動や回転の処理など膨大な量の計算が必要になり、その処理を行う専用のユニット（アクセラレータ）としてGPUが広く利用されている。このGPUをグラフィック処理以外の科学技術計算に活用しようという動きが広がっており、汎用的な処理ができるGPGPU(General-Purpose computing on GPUs)へと進化している。以下、ここではGPUとGPGPUとを区別せず、単にGPUコンピューティングと呼ぶこととする。

GPUの魅力は、演算性能が非常に高く、かつ安価で省電力であることである。特に、気象計算でも頻出する繰り返し計算において、その能力を最大に発揮できる。図2.3.1にここ数年のCPUとGPUとの性能の比較を示す。GPUでは1TFLOPSを超える性能を持つものがあり、パソコンショップで数万円程度の価格で購入することができる。パソコンで利用す

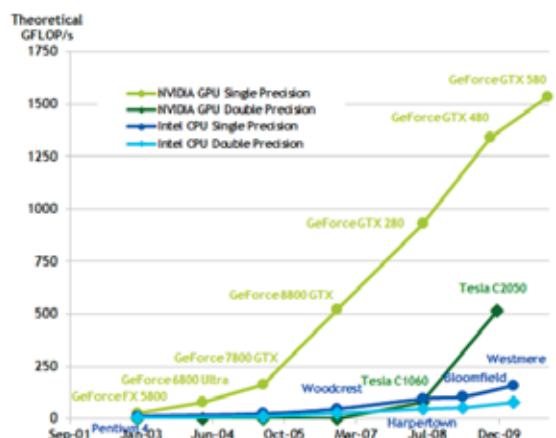


図 2.3.1 GPU（緑系）とCPU（青系）の理論性能比較のトレンド。(NVIDIA, 2011)

¹ 室井 ちあし

ることからもわかるように、スーパーコンピュータとしては少ない消費電力である。数値予報の計算にとって非常に重要な、メモリアクセスが高速である点も大きな魅力である。

ゲーム機で計算をするという発想は新鮮に思われるかもしれないが、パソコンの PCI Express などの拡張バスに挿入するグラフィックスボードばかりでなく家庭用ゲーム専用機が高速の処理能力を持ち、かつ安価であることは知られていた。すなわち、これを科学技術計算に使おうという考えは新しいものではないが、充実した開発環境が整えられ、ユーザーフレンドリーになったのは最近のことである。

このように、GPU は多くの魅力に満ちあふれているが、その利用にあたっては様々な努力が必要であり、今まさに技術開発が進められている分野である。

2.3.3 数値予報での GPU 利用の取り組み

気象庁では東工大と共同で、実際のGPUを用いた数値予報に向けた研究開発を実施しているので、その取り組みについて紹介する。

高速で安価、省電力という様々なメリットのある GPU を気象計算、数値予報の分野でも利用すべく、気象庁が現在開発を進めている次世代メソモデル *asuca* (河野ほか 2011) のプログラムを GPU に対応できるように書き換え、東工大のスーパーコンピュータ TSUBAME 2.0 (東京工業大学 2011, 図 2.3.2) 上で動作するように移植を行った。TSUBAME 2.0 は2010年11月のTOP500 で世界第4位、2011年6月に世界第5位にランギング、さらに Green500 でも世界第4位に入っている、日本を代表するスーパーコンピュータである。安価な PC サーバに GPU を搭載しクラスタ化、かつ省電力性が高いことが、従来のスーパーコンピュータにはない大きな特徴である。

後述するように、移植には大きな手間がかかることが最大の障害であり、これを前提にして研究方針の検討が進められた。

移植するモデルとしてこの次世代メソモデルを



図 2.3.2 東京工業大学のスーパーコンピューター TSUBAME2.0 (東工大のご厚意による)。

選択した理由は、気象庁にとっては将来のメソモデル・局地モデルにふさわしいコンピュータの仕様について知見を得ることができること、一方東工大側としては、既存の全球モデルGSM や非静力学メソモデル JMA-NHM の気象モデルはプログラムが煩雑かつ膨大であるため、GPU化の作業が相当困難であること、などが主な理由である。

GPUを利用するにあたって、方針が大きく2つある。ひとつは部分的にGPUを利用する方法、もうひとつは全部GPUを利用する方法である。前者は、例えば大きな計算コストを必要としGPU利用が比較的容易である物理過程のみを GPU に対応させるという方法で、後者は文字通りモデル全体をGPUに対応させる方法である。前者は開発コストが低いというメリットがあるものの、得られる高速化のメリットが少ない。後者は開発コストが非常に大きいものの、計算時間短縮という点で得られる成果は大きいと期待できる。米国ではメソモデル WRF に対して、一部のみをGPU を活用して高速化する前者の方法が先駆的に行われている(Michalakes, J. and M. Vachharajani 2008)。これに勝る性能を得るために、東工大は後者の、すなわち次世代メソモデル全部をGPU利用する方針を採用した。

なお GPU 上でモデルをコーディングするにあたって、CUDA (Compute Unified Device Architecture) と呼ばれるC言語の統合開発環境が用いられており、C言語と似た言語が採用されている。一方ここで取り上げた次世代気象モデル *asuca* や気象庁の全球モデル、非静力学メソモデルをはじめ伝統的な数値予報モデルはみな、科学技術計算用に設計された Fortran 言語で記述されている。したがって、Fortran から CUDA への書き換えが必要となり、実際にFortran から C 言語へ、さらに C 言語からCUDA へとコードの書き換えが行われている。また計算効率を高めるために、単なる言語の翻訳ではなく、プログラム構造の修正も必要になる。Fortran のままGPU対応する技術も最近登場しているが、得られる性能が未知であったため、ここでは採用されなかった。なおこの書き換えにあたっては学際的な研究開発が必要であり、関与する研究者・開発者全体で方針を正しく決めることが肝要である。ここがGPUコンピューティングの実利用の鍵を握るといつても過言ではない。

この取り組みの結果、*asuca* のGPU対応版は TSUBAME 2.0 の 3990 個の GPU を使って 145TFLOPS という非常に高い実効性能を達成した。

(参考であるが、気象庁のメソモデル(MSM)の実効性能は0.7TFLOPS程度である。) またMSM の予報値データを初期条件・境界条件として水平解像度 500m、格子数 $4792 \times 4696 \times 48$ という日本全体を

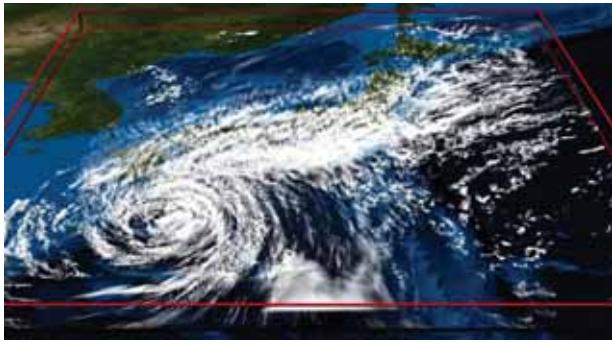


図 2.3.3 水平解像度 500m 格子で日本全体を覆って、次世代メソスケール気象モデル *asuca* で計算した雲分布（下川辺, 2011 より）。

覆う広い領域をとった場合でも、TSUBAME2.0 の 437GPU を用いて実行することができた（下川辺ほか 2011; Shimokawabe et al. 2011）。その計算結果の一例を図2.3.3 に示す。

詳細な事情は割愛するが、気象計算、数値予報分野での GPU 利用は一般に困難だと考えられていた。大雑把にいえば、数値予報モデルの物理過程は比較的 GPU 対応は容易であるのに対して、力学過程を高速に動作させることは困難である。前述の、部分的に GPU を使用する方法が米国で先駆的に行われたのは、このような事情がある。今回の気象庁と東工大との取り組みは、気象モデルを全部 GPU 利用するように対応させたという意味で画期的であり、気象分野での GPU 利用可能性を示したと言える。

2.3.4 今後の課題

省電力の取り組みとして GPU の活用について述べてきた。これまでの取り組みにより、計算時間に大きな制約がある現業の数値予報においても、ある程度の利用可能性があることがわかつたが、実際の業務での利用までには、解決すべきいくつかの課題がある。

これまで、気象庁の局地モデル、メソモデルでの利用を念頭におき、GPU 上で次世代メソモデルの移植・開発が行なわれてきた。しかし気象庁の数値解析予報システムにはそれ以外にも、全球モデル、全球・メソのデータ同化、アンサンブル予報システムなど、多数のモデルが運用されている。スーパーコンピュータ上のモデルすべてを GPU 利用におきかえるには、これらも GPU 対応にする必要がある。

これには今後さらなる研究開発が必要であり、実用化までには中長期的な視野で検討する必要がある。あくまでもひとつの可能性であるが、それまでの間、段階的な GPU への移行も検討する必要がある。すなわち、スーパーコンピュータを GPU と従来型からなる、ハイブリッドタイプのシステムにすることも、当面は数値予報システムの一部の移植のみで済むことから有効と思われる。

開発環境の整備についても課題である。これまでの取り組みは上述のとおり、CUDA という C 言語の開発環境が用いられているが、従来の Fortran プログラムからの書き換えに大きな手間がかかる。自動変換プログラムや Fortran のまま GPU 化を行う技術には今後大きな期待がかかる。一方ハードウェアにおいても、GPU そのものを発展的に解消して、従来の CPU と統合しようという動きも存在する。その場合、コンピュータの仕様はどうなっていくのか、プログラミング言語・開発環境は何を使うことになるのか、大いに注目される。

GPU はパソコンで広く用いられていることから市場に数多く流通しており、製造側の事情として単価を下げやすいという特徴があるため、高性能で安価な「GPU コンピューティング」というビジネスモデルが成立している。将来 CPU と統合した場合、市場規模の小さいスーパーコンピュータの利用者と今後どのような関係でコンピュータが発展していくのかにも、注目すべきである。

参考文献

- 河野耕平、荒波恒平、原旅人、北村祐二、室井ちあし, 2011: 気象庁における非静力学モデル *asuca* の開発状況, 第13回非静力学モデルに関するワークショップ.
- 下川辺隆史, 青木尊之, 石田純一, 河野耕平, 室井ちあし, 2011: メソスケール気象モデル ASUCA の TSUBAME 2.0 での実行, ながれ, 日本流体力学会, 第30巻第2号, 75–78.
- 東京工業大学, 2011: TSUBAME 2.0 の仕様
- NVIDIA, 2011: CUDA Programming Guide Version 4.0
- Shimokawabe, T., T. Aoki, T., J. Ishida, J., K. Kawano, K., and C. Muroi, C, 2011: 145 TFlops performance on 3990 GPUs of TSUBAME 2.0 supercomputer for an operational weather prediction., First International Workshop on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences: Applications and Frameworks (IHPCES), Singapore.
- Michalakes, J. and M. Vachharajani, 2008: GPU Acceleration of Numerical Weather Prediction. Parallel Processing Letters 18, No. 4, 531–548.