

## 第4章 事例検討

### 4.1 2013年1月14日の関東大雪<sup>1</sup>

#### 4.1.1 はじめに

2013年1月14日、南岸低気圧の通過に伴って、関東地方南部を中心に大雪に見舞われた。この事例では、GSMとMSMで降雪をもたらす気温低下の表現が大きく異なっており、その結果、それぞれのモデルの予報結果を利用して作成される降雪量ガイダンスにも大きな差が出た。

本節では、この大雪事例を取り上げ、予報結果を検証するとともに、大雪に至った過程の解析、それを踏まえたGSM、MSMのモデルの特性と利用上の留意点を述べる。第4.1.2項で実況経過をまとめ、第4.1.3項でガイダンスの予測結果、およびその予測に至った背景について述べる。そして、そのガイダンスの入力データとなったGSM、MSMのモデルの予報について、第4.1.4項では総観場の観点から検証する。第4.1.5項では、この事例の予報において重要なポイントとなった気温の低下について、現実およびモデルのプロセスに注目して解析し、その気温低下の要因、その低下がモデルによって異なった原因、それを踏まえたモデル利用上の留意点を述べる。

#### 4.1.2 実況経過

図4.1.1は、1月14日09JSTと21JSTの地上天気図である。1月13日09JSTに台湾の北東の海上で発生した低気圧は、急速に発達しながら本州の南岸を進み、14日日中に関東の南海上を通過、15日には関東の東海上へ抜けた。関東地方では、14日未明頃から降り始めた雨が、朝から昼前にかけて雪へと変わり広い範囲で積雪となった。14日21JSTまでの前12時間降雪量は、東京（千代田区大手町）で8cm、横浜（横浜市中区山手町）で13cmを記録し関東地方南部を中心に大雪となった（図4.1.2）。

図4.1.3は、14日06JSTから21JSTまでの毎時大気解析による地上気温と風向・風速およびアメダスで観測された地上気温、図4.1.4は同期間の気象レーダー画像と地上気象観測の天気のプロット図である。これらの図を用いて本事例の地上気温と風、降水の実況経過について説明する。

14日06JSTの時点では、関東地方の平野部は地上気温が概ね4℃以上あり、観測結果からも未明から始まった降水は平野部では雨であった。09JSTにかけ地上気温は徐々に下がるが、雨から雪に変わった

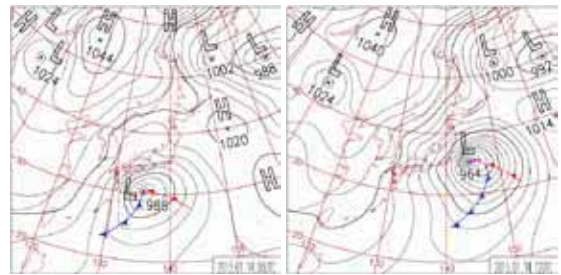


図4.1.1 地上天気図 2013年1月14日09JST（左図）  
同日21JST（右図）

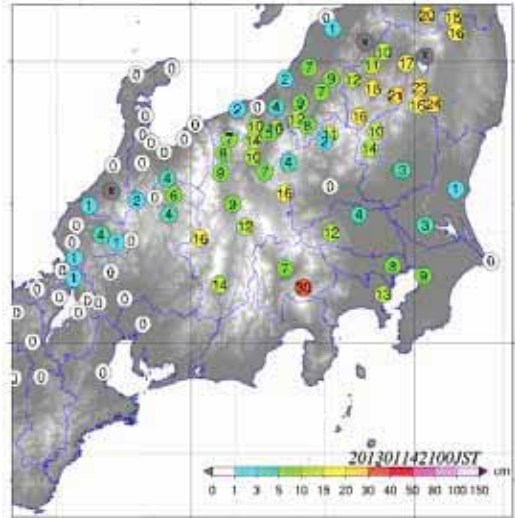


図 4.1.2 2013年1月14日21JSTまでの12時間降雪量（毎正時の前1時間積雪深差が正の場合を積算）、×は期間中に積雪深の欠測を含むことを表す。

のは標高の高い地域やその周辺のみである。この後、10,11JSTにかけ、北関東内陸や東京都多摩、神奈川県北部で地上気温は0℃付近まで急激に低下し、12JSTには関東平野の大部分の気温が0℃付近に達した。この間、平野部では主に北風が吹いているものの、風が横切る方向への温度勾配は大きくなく、気温の低下への寒気移流の影響は大きくないことが伺える。標高の高い地域だけであった降雪は、この急激な気温の低下により平野部の広範囲に広がり、12,15JSTには気象庁本庁など関東地方の多くの気象官署で雪を観測した。地上気温は15JSTには千葉県北東部を除く平野部で0℃付近まで低下したが、降水の終わりとともに昇温し始め、21JST頃には関東地方の降雪は終わった。

#### 4.1.3 ガイダンスの予測

本事例について、GSMおよびMSM最大降雪量ガイダンスをはじめとする降雪に関するガイダンスが、どのような予測であったかを述べる。なお、最大降雪量ガイダンスの作成手法については古市・松澤(2009)、古市(2010)を適宜参照願いたい。

<sup>1</sup> 第4.1.1項 原 旅人、第4.1.2項・第4.1.3項 白山 洋平、  
第4.1.4項 榎垣 将和、第4.1.5項 原 旅人、氏家 将志、  
第4.1.6項 原 旅人

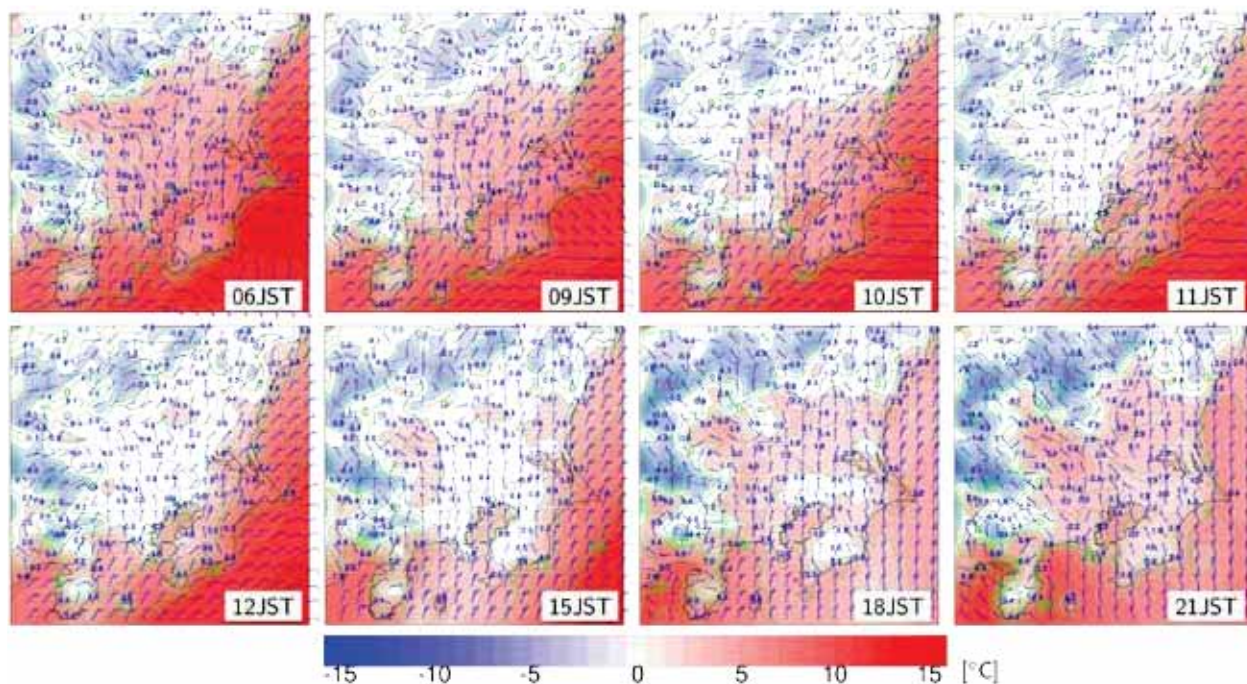


図 4.1.3 2013 年 1 月 14 日 06JST から 21JST までの毎時大気解析による地上気温（赤青塗り分け、等値線は 1°C 間隔）と風向・風速（青の矢羽根、単位は m/s）、アメダス観測による気温（青数字）。上段左から 06,09,10,11JST、下段左から 12,15,18,21JST。

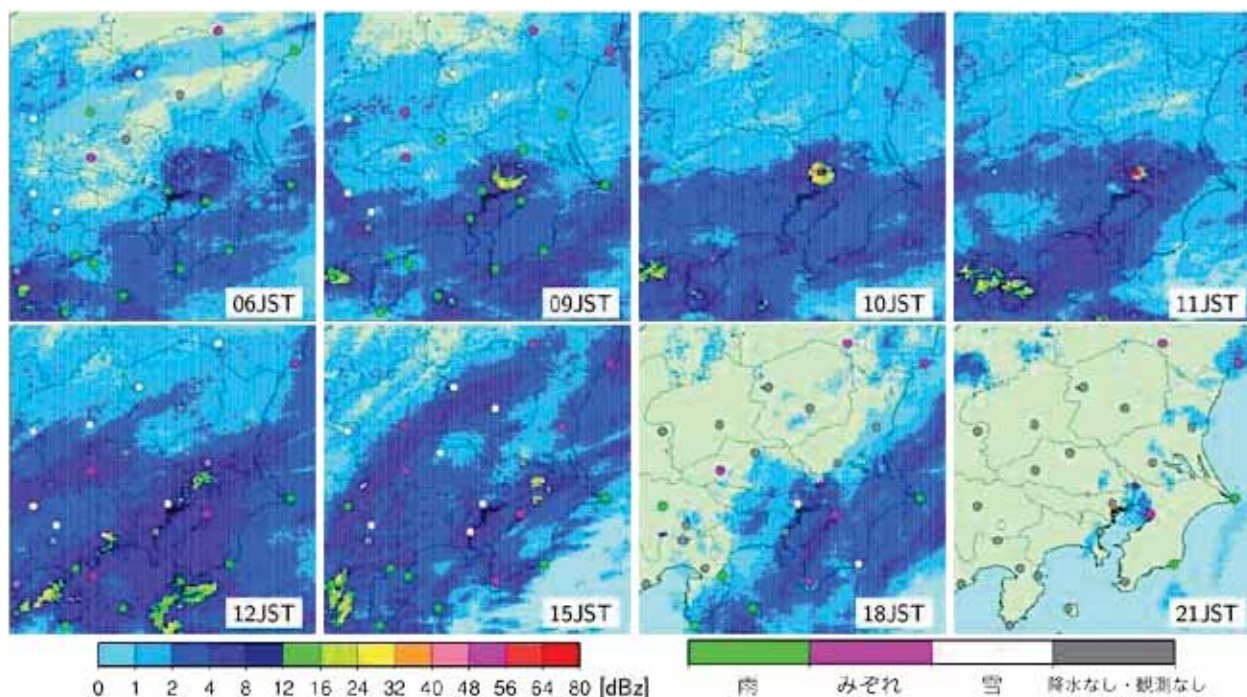


図 4.1.4 2013 年 1 月 14 日 06JST から 21JST までの気象レーダー画像と地上気象観測による天気。上段左から 06,09,10,11JST、下段左から 12,15,18,21JST。凡例は左がレーダー反射強度[dBZ]、右が天気で緑色が雨、紫色がみぞれ、白色が雪、灰色は降水現象なしまたは観測時間外を表す。赤い星印は東京レーダーの位置を示す。

### (1) 最大降雪量ガイダンスの予測

図 4.1.5 に、1 月 14 日 21JST を予報対象時刻とする GSM と MSM の前 12 時間最大降雪量ガイダンス（以後、GSM-MAXS12 および MSM-MAXS12 と記す）

を示す。なお、GSM-MAXS12 は 1 月 13 日 00UTC 初期値、MSM-MAXS12 は 1 月 13 日 03UTC 初期値である。GSM-MAXS12 では、降雪が予測されたのは標高の高い地域だけで、関東地方の平野部では降雪は

ほとんど予測されなかった。

一方のMSM-MAXS12では、関東地方平野部の広い範囲で3cm前後、特に都心を中心に5~10cmの降雪を予測しており、14日の大雪を概ね予測できていた。しかし、前3時間最大降雪量ガイダンスでは、平野部の広範囲で降雪が始まるのは14日15JSTからと予測しており、実際の降雪より数時間遅れていた(図略)。

## (2) ガイダンスの予測結果の検討

GSMとMSMの最大降雪量ガイダンスが大きく異なる降雪量予測であった点、また概ね適中していたMSMガイダンスであっても、降雪の始まりが実況に比べて遅れていた要因について、ガイダンスの作成手法に沿って検討する。なお、ここではGSMガイダンスは1月13日00UTC初期値を、MSMガイダンスは1月13日03UTC初期値を用いる。

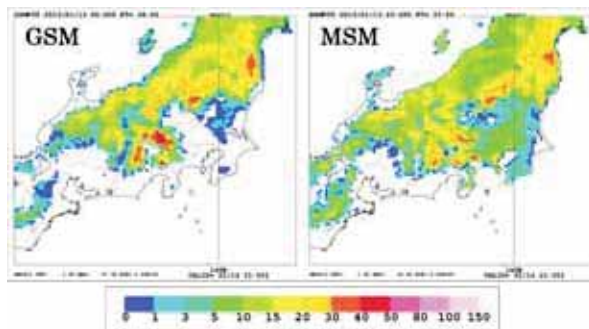


図4.1.5 2013年1月14日21JSTまでの前12時間最大降雪量ガイダンス、左図はGSM-MAXS12(2013年1月13日00UTC初期値、FT=36)、右図はMSM-MAXS12(2013年1月13日03UTC初期値、FT=33)。

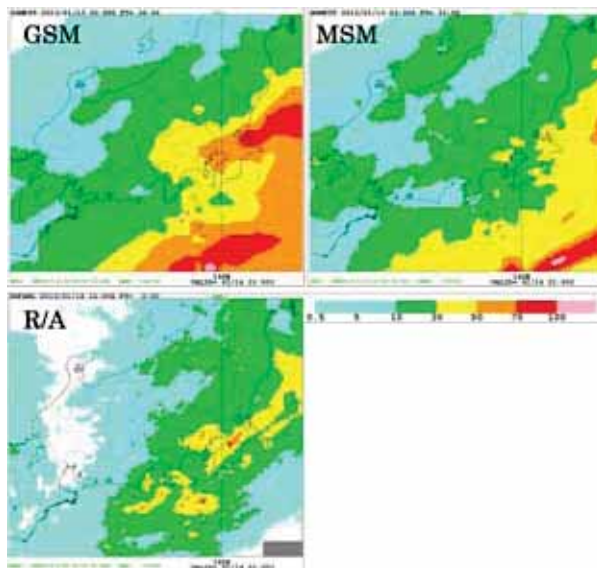


図 4.1.6 12 時間積算した平均降水量ガイダンスと解析雨量、対象時刻は 2013 年 1 月 14 日 21JST。左上図は GSM-MRR12(2013 年 1 月 13 日 00UTC 初期値)、右上図は MSM-MRR12(2013 年 1 月 13 日 03UTC 初期値)、左下図は解析雨量。

スは1月13日03UTC初期値を用いる。

図4.1.6は、GSMおよびMSMの平均降水量ガイダンス<sup>2</sup>を1月14日21JSTまでの12時間分積算した降水量(以後、GSM-MRR12およびMSM-MRR12と記す)と、1月14日21JSTまでの12時間分積算した解析雨量である。両者はともに、関東地方を中心とした広範囲にまとまった降水を予測しており、GSM-MRR12はやや過大な予測ではあるものの、降水の分布や量について実況に近い予測であった。このことから、GSM-MAX12の関東地方平野部で降雪が予測されなかったのは、入力となる降水が予測されなかったことが原因でないことが分かる。

図4.1.7と図4.1.8は、1月14日09,12,15JSTを予報対象時刻とする、GSMおよびMSMの格子形式気温ガイダンスと降水種別ガイダンスである。実況では10JSTから12JSTにかけて関東地方の平野部で急激に0°C付近まで気温が下がったが、GSMガイダンスではここまでの気温の低下を予測できず、下がっても2°C前後の予測で、降水種別ガイダンスは雨の予測となっている。降水種別が雨である場合は、平均降水量に乗じる雪水比は強制的に0となるため、GSM-MRR12がどれだけ実況に近く予測されても降雪量としては予測されなかった。

一方のMSMガイダンスでは、図4.1.3で示したよりも3時間ほど遅れたものの14日15JST頃には、関東地方平野部の広範囲で地上気温が0°C付近まで低下する予測ができていた。これにより降水種別ガイダンスは、平野部の広い範囲で雪か雨を予測していた。このような場合は、予測された地上気温に応じて雪水比が決まり、雪水比と平均降水量とを乗ずることで降雪量が予測される。

ここで、この格子形式気温ガイダンスの予測の違いは、モデルの地上気温の予測の違いから生じていることを示す。図4.1.9はGSMおよびMSMの1月14日09,12,15JSTを予報対象時刻とする地上気温である。GSMは、時間が進んでも実況で見られた気温の低下は予測できていない。一方のMSMは、09JSTではGSMと予測に大きな違いはないが、12JSTでは内陸部から徐々に気温が低下し始め、15JSTには平野部で1°C前後となるなどGSMとは大きく異なった気温分布を予測している。このように気温の低下するタイミングに実況とのずれはあるものの、MSMでは1°C前後まで気温が低下することを予測できていたため、MSM最大降雪量ガイダンスが関東地方の平野部で降雪を予測できたと言える。

<sup>2</sup> 最大降雪量ガイダンスの入力には、GSM 平均降水量ガイダンスの格子間隔を 20km から 5km に周囲 4 点内挿で格子変換したものを利用する。

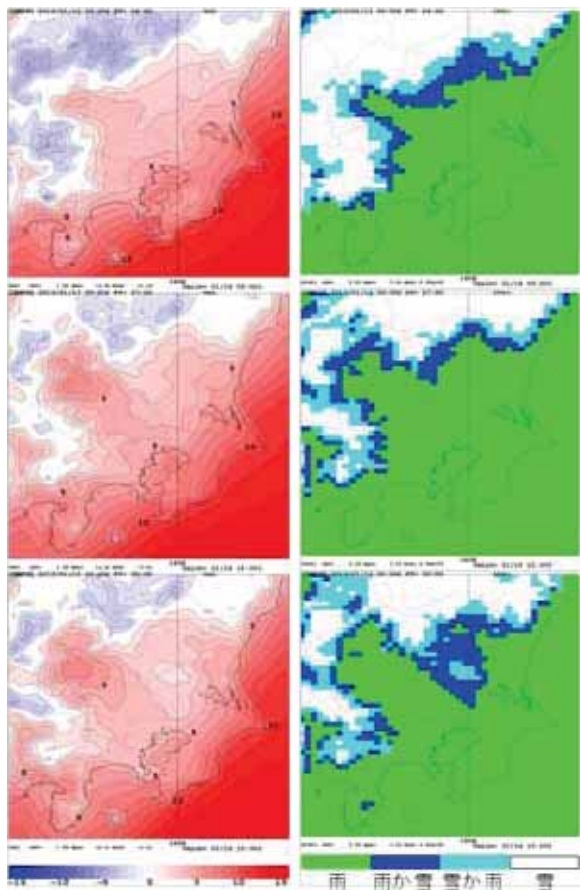


図 4.1.7 上段から 2013 年 1 月 14 日 09,12,15JST を予報対象時刻とした GSM 格子形式気温ガイダンス (左列) と降水種別ガイダンス (右列)、2013 年 1 月 13 日 00UTC 初期値の FT=24,27,30、降水種別ガイダンスの配色は緑色が雨、青色が雨か雪、水色が雪か雨、白色が雪を表す。

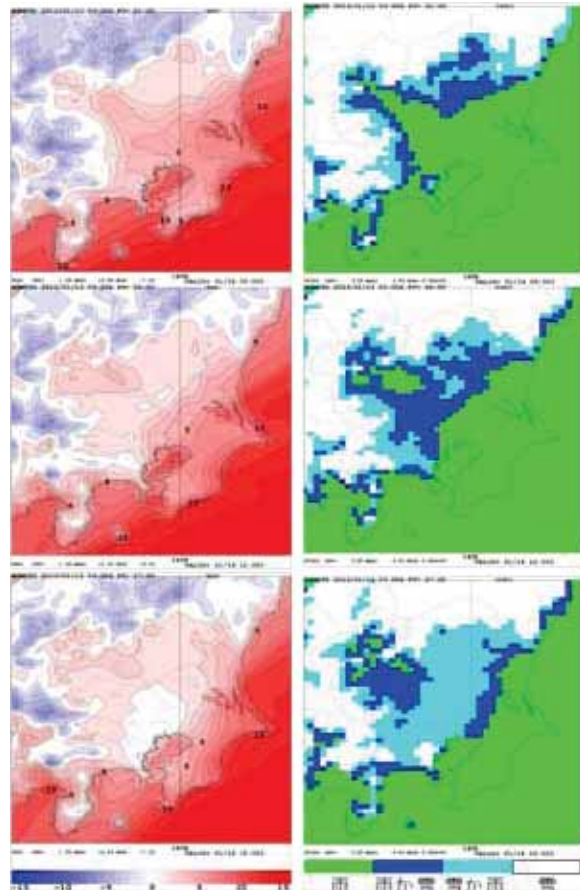


図 4.1.8 上段から 2013 年 1 月 14 日 09,12,15JST を予報対象時刻とした MSM 格子形式気温ガイダンス (左列) と降水種別ガイダンス (右列)、2013 年 1 月 13 日 03UTC 初期値の FT=21,24,27、降水種別ガイダンスの配色は図 4.1.7 に同じ。

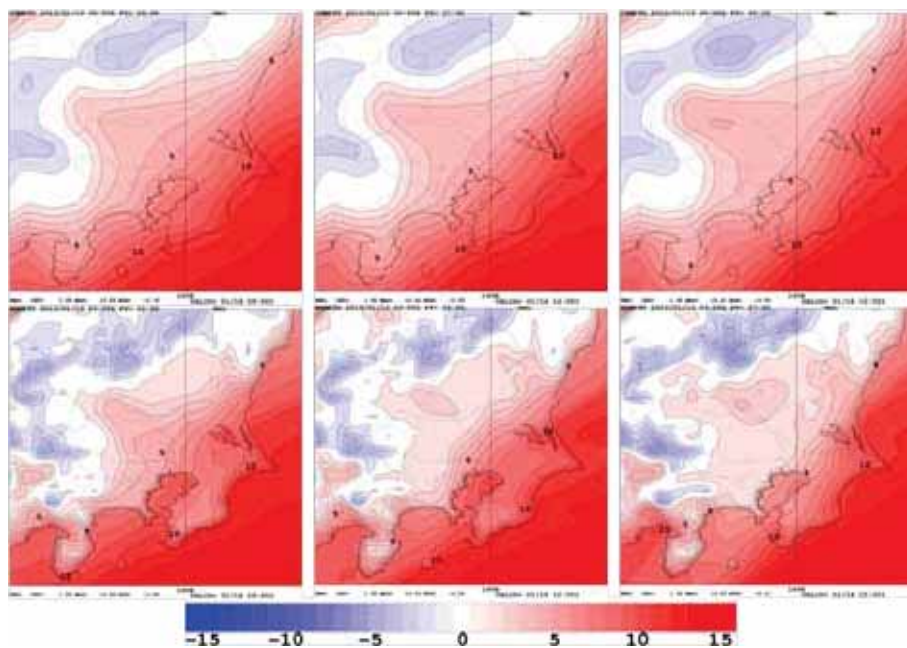


図 4.1.9 2013 年 1 月 14 日 09,12,15JST を予報対象時刻とした GSM 地上気温 (上段) と MSM 地上気温 (下段)。GSM は左から 2013 年 1 月 13 日 00UTC 初期値の FT=24,27,30、MSM は左から 2013 年 1 月 13 日 03UTC 初期値の FT=21,24,27。

#### 4.1.4 モデルによる総観場の予想

本事例は、関東における大雪がその社会的影響の大きさから特に注目されたケースである。一方、風についても千葉県銚子で最大瞬間風速38.5m/sを記録するなど、低気圧の発達具合もこの時期としては顕著なものであり、モデルが低気圧の発達を的確に予想できていたかどうかにも注目に値する。以下の項でモデルの降雪予想を検証・考察するにあたって、総観スケールでの低気圧の予想を検証しておくことは重要であろう。そこで本項では、降雪予想を検証する前段階として、モデルがこの低気圧の発達や進行をどう予想していたかをまず検証したい。なお、現業予報作業では数日先の予報を行う場合、全球モデル(GSM)の予想が用いられることから、本項では主にアンサンブル予報システムを含む全球モデルの予想を検証した結果について論じることとする。

#### (1) GSMの予想

ここでは、本事例におけるGSMでの低気圧発達の予想を、初期時刻の新しいものから古いものにさかのぼって確認していくこととする。図4.1.10は、2013年1月14日06UTC (15JST)を予報対象時刻としたモデルの予想である。この図では、低気圧が日本の南岸を通過した2013年1月14日当日の午前および前日の日中を初期値とする予想を示している。この初期時刻においてはMSMの予報期間も本事例をカバーしていることから、MSMの予想も併せて表示した。また、比較のため解析雨量および全球解析値、メソ解析値を併せて示した。この図から、14日当日午前の予想である13日18UTC初期値GSM予想(図4.1.10(b))と13日21UTC初期値MSM予想(図4.1.10(e))は、いずれも解析値(図4.1.10(a),(d))と比較して低気圧の発達・位置をよく表現しており、降水についても6時間降水量20mm以上の分布等が両者で概ね整合していることが分かる。一方、前日を初期値とする13日00UTC初期値GSM予想(図

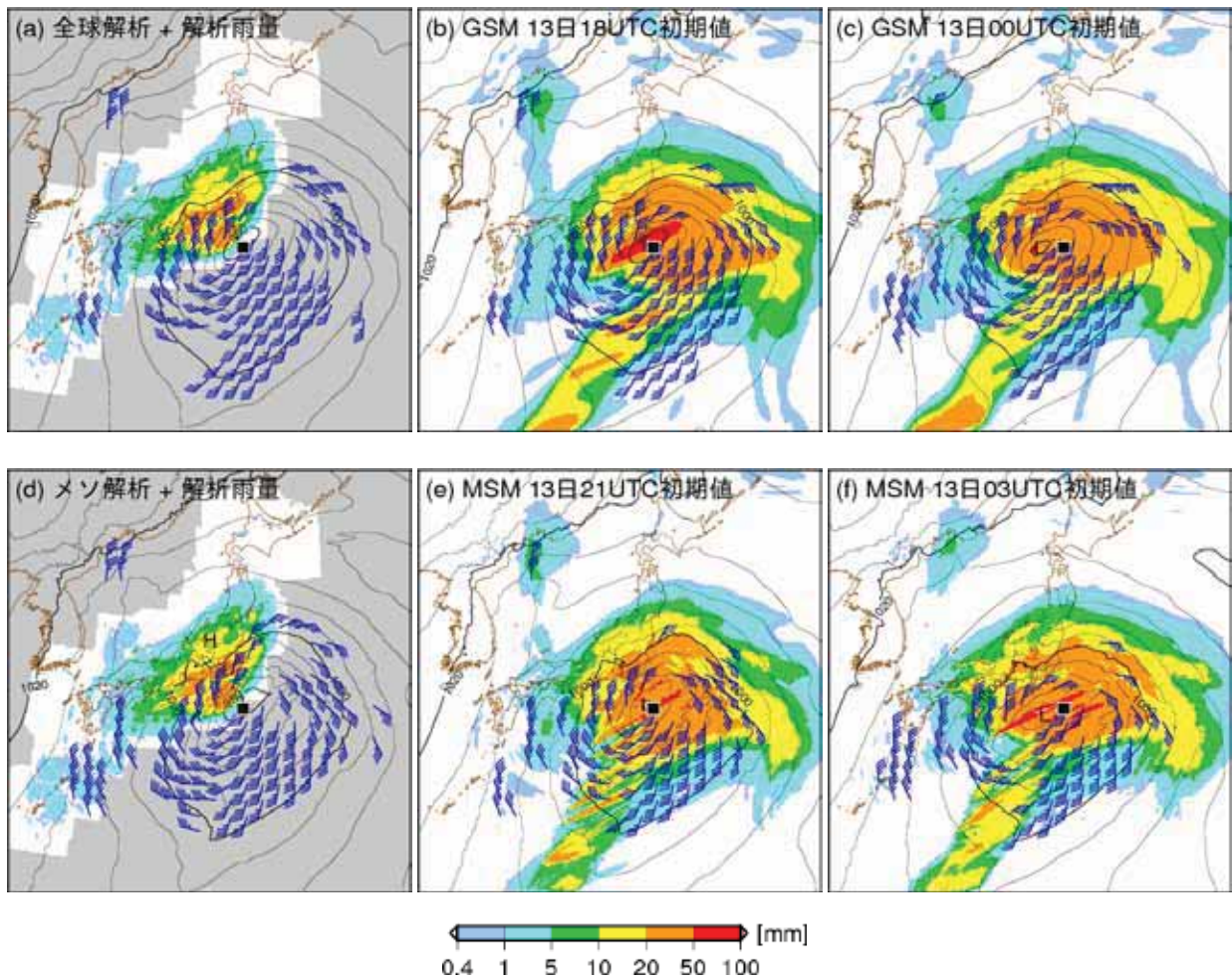


図 4.1.10 2013年1月14日06UTC(15JST)を対象とした海面更正気圧(hPa、等値線)、6時間降水量(mm、カラー)、地上風速(ノット、矢羽根)。(a)全球解析値および解析雨量、(b)13日18UTC初期値GSM予報値、(c)13日00UTC初期値GSM予報値、(d)メソ解析値および解析雨量、(e)13日21UTC初期値MSM予報値、(f)13日03UTC初期値MSM予報値。矢羽根は風速35ノット以上の領域を描画している。図中の黒い四角は、地上天気図での低気圧の中心位置を示している。

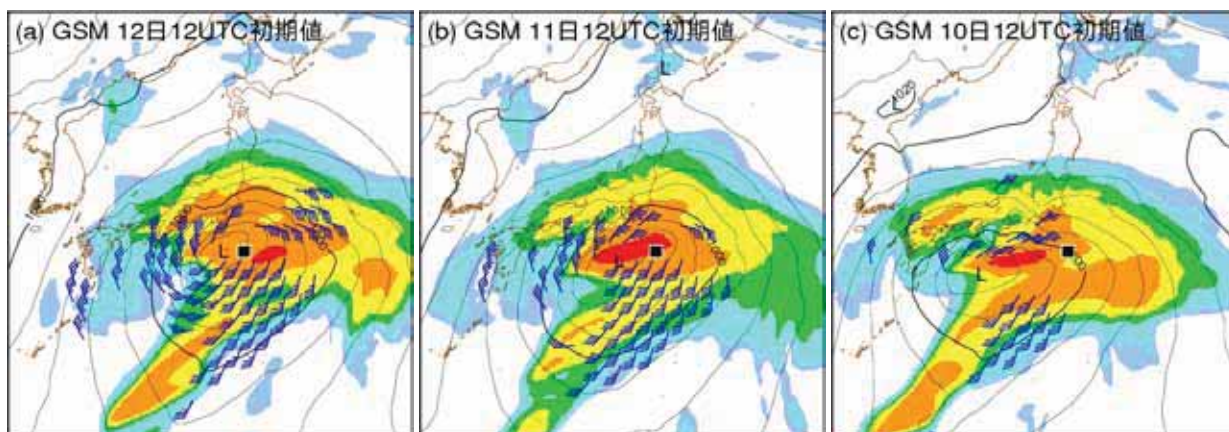


図 4.1.11 図 4.1.10 と同じ。ただし、(a) 1 月 12 日 12UTC 初期値 GSM 予報値、(b) 1 月 11 日 12UTC 初期値 GSM 予報値、(c) 1 月 10 日 12UTC 初期値 GSM 予報値。

4.1.10(c)、13日03UTC初期値MSM予想（図4.1.10(f)）では、6時間降水量20mm以上の領域の広がりなどを見る限りでは、後の初期値の予想とほぼ同様の予想をしているように見えるが、低気圧中心位置や中心気圧で比較すると、GSM、MSMいずれも進行速度が実況よりも遅く、気圧の下がり方もやや小さかったことが分かる。ここで、MSMの予想にGSMと似た傾向が認められるのは、本研修テキスト第1.3節で述べられているように、MSMが側面境界条件をGSMから得ている影響であると推察される。

次に、図4.1.11で、低気圧通過の約2～4日前を初期値とするGSMの予想を確認する。この図によると、初期値が古い予想ほど、低気圧の中心位置は西寄りになっており、低気圧の進行を遅めに予想していたことが分かる。低気圧の強度は、初期値の古い予想ほど中心気圧の下がり方が小さく、それに伴って風

の予想も風速35ノット以上の領域が狭くなるなど、発達度が弱くなる傾向が認められる。特に4日前に相当する10日12UTC初期値のGSM予想（図4.1.11(c)）は風速35ノットの広がり小さいなど、3日前の11日12UTC初期値のGSM予想（図4.1.11(b)）との差が顕著であった。

古い初期値の予想ほど低気圧の発達が弱めで進行速度が遅いという上述の傾向を、以下では500hPa面でのトラフの予想と合わせて確認する。図4.1.12は、低気圧通過の2～5日前を初期値とするGSMの予想であり、14日12UTCを予報対象時刻とした海面更正気圧および500hPa面高度を示している。4日前に相当する10日12UTC初期値（図4.1.12右から2列目）の予想では、500hPa面での高度5160～5400m付近のトラフが解析と比較して非常に浅く表現されており、5400～5640m付近のトラフの位相も遅れて予想されていた。これに対応して、地上

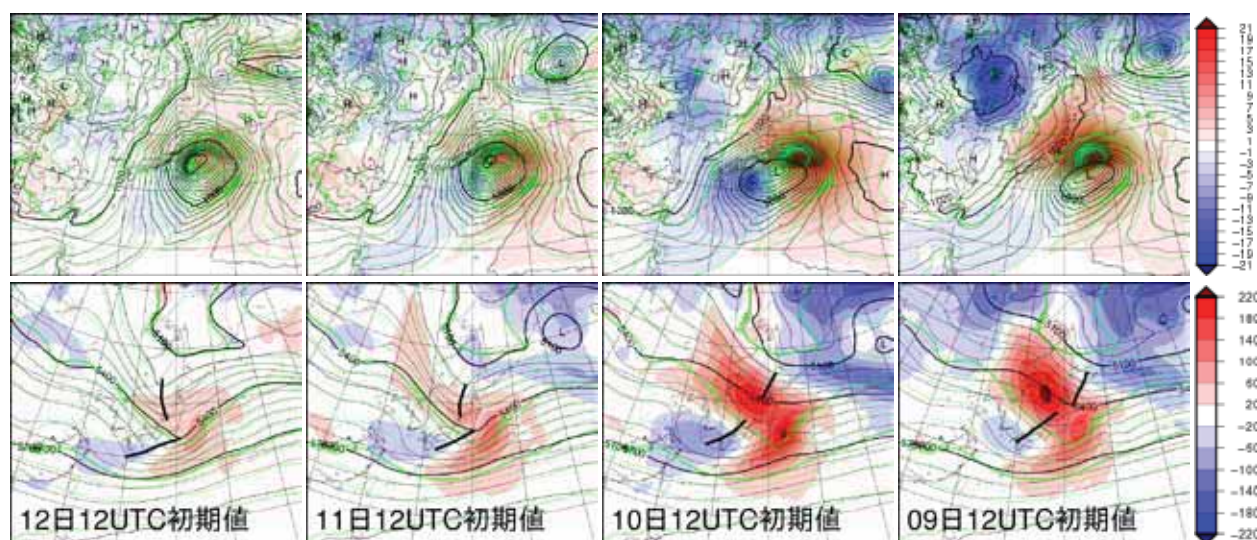


図 4.1.12 2013 年 1 月 14 日 12UTC(21JST)を対象とした GSM 予想。上段は海面更正気圧(hPa)、下段は 500hPa 面高度(m)。左から右に、1 月 12 日 12UTC 初期値、11 日 12UTC 初期値、10 日 12UTC 初期値、9 日 12UTC 初期値予報を示した。図中、緑線は全球解析による解析値、黒線は予報値。陰影は予報－解析間の差を表す。また、下段の黒太線は予想における 500hPa のトラフを示している。

の低気圧も発達 degree が弱く、位置も解析値と比較して南西～西南西にあるなど、進行が遅い予想となっていた。その1日後の11日12UTC初期値の予想(図4.1.12左から2列目)では、同様の傾向は引き続きある程度認められるものの、500hPa面におけるトラフの深さおよび位置の表現が改善し、低気圧の予想位置・発達度合いも解析値に近づいた。これ以降の初期値では一貫して解析値からの差が小さくなる傾向であった(図4.1.12左)。これらから、GSMは概ね3日前から低気圧の発達とその進行速度を予想できていたと言える。

初期値が新しくなることに応じた低気圧の予想の変化が、GSM特有の傾向であったかを確認するため、主要な海外数値予報センターの予想との比較を行った。なお、海外数値予報センターの数値予報システムについては、加藤(2010)などを参照されたい。欧州中期予報センター(ECMWF)の予想は、4日前の10日12UTC初期値で500hPa面5160～5400m付近のトラフが浅く、かつ5400～5640m付近のトラフの進行が遅く予想されており、対応する地上の低気圧も南西寄りに弱めに予想されている点や、3日前の11日12UTC初期値になるとこれらが大きく改善されていることなど、GSMの予想で認められた傾向と似ていた(図略)。他の主要な海外数値予報センターである英国気象局(UKMO)、米国環境予測センター(NCEP)についても、4日前の初期値からの予想では誤差が大きく、3日前に予想が大きく改善した傾向はほぼ同様であった(図略)。

## (2) アンサンブル予報システムによる確率的予想

気象庁では、予報の不確実性を見積もる一つの手段として週間アンサンブル予報システム(以下、週間EPS)を運用している。以下では、週間EPSが本事例をどのように確率的に表現していたかを確認す

る。図4.1.13に、2013年1月14日12UTCを対象とした、地上(海上)風速および6時間降水量が閾値を超過する確率を示した。ここで風速の閾値は35ノット、6時間降水量の閾値は10mmとしている。比較のため図4.1.13左列には解析値の図を示した。強風・降水とも初期値の古い予報ほど顕著な現象の発生確率は小さく、特に5日前にあたる9日12UTC初期値と4日前にあたる10日12UTC初期値予想との差が顕著であった。関東の東海上での35ノット以上の風の確率は、5日前の初期値では40%以下と比較的低い予想であったが、4日前の初期値になると50%を超え、2～3日前の初期値と同程度の発生確率が予想された。また、関東周辺での10mm以上の降水確率に着目すると、5日前初期値では20%未満であったが、4日前初期値では40%以上となり、やはり5日前と4日前の初期値の間で差が顕著であった。

このように、週間EPSによる確率的予想では、GSMによる決定論的予想よりもおよそ1日早い4日前から顕著現象の発生可能性を示すことができていた。今回の事例は、アンサンブル予報による確率予報資料が、より長いリードタイムを持って顕著現象を予報するのに有効であることを示す一例と言えよう。

## 4.1.5 気温の時間変化率に着目したモデルの予想の分析

前項までは、本事例における実況の経過や、総観規模でのGSMの再現性、およびガイダンス等のプロダクトの予報結果について示した。これらの資料から、降水が雨となるか雪となるかの判別に重要な気温の予測について、GSMでは実況ほど気温が下がらなかったのに対し、MSMでは気温の低下する時刻に遅れが出ているものの、実況とほぼ近い推移をし

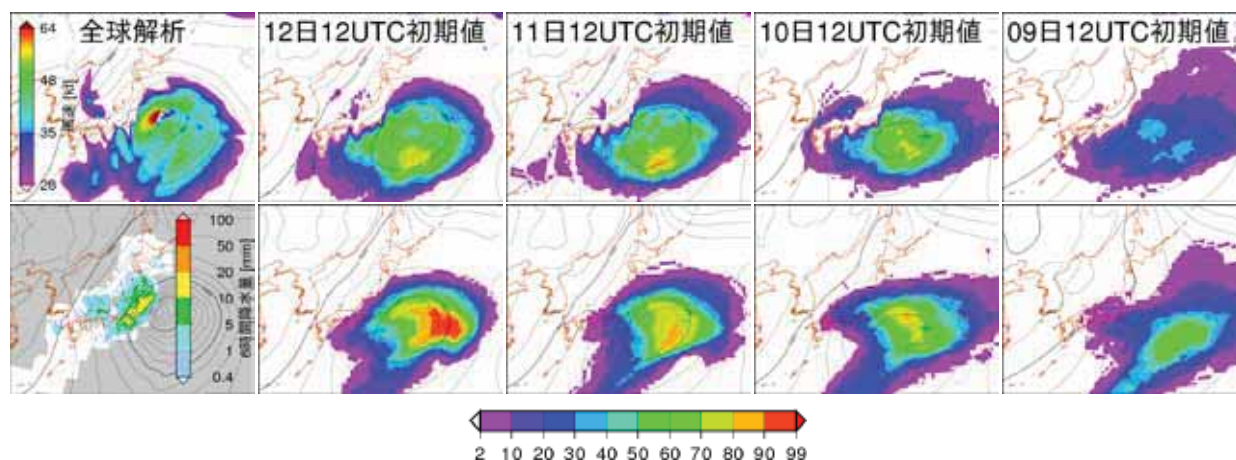


図 4.1.13 週間 EPS から予想された風、降水の発生確率(%)。予報対象時刻は 2013 年 1 月 14 日 12UTC。陰影は(上段)地上・海上風速が 35 ノットを超過する確率、(下段)6 時間降水量が 10mm を超過する確率(%)。等値線は海面更正気圧(hPa)のアンサンブル平均を表す。左 2 列目から右はそれぞれ 12 日 12UTC、11 日 12UTC、10 日 12UTC、9 日 12UTC を初期値とした予想。左列は 14 日 12UTC の全球解析風速、解析雨量。

ており、その気温低下の予想の違いが降雪量ガイダ  
 ンスの大きな違いになって現れたことがわかった。  
 本項では、それぞれの数値予報モデルがどのような  
 過程で気温を予測していたかについて述べる。モデ  
 ルの気温予測の結果そのものだけでなく、モデルの  
 気温がどのようにして予測されているかを理解す  
 るため、気温の変化に寄与する各過程の加熱率にも  
 注目して解説する。

### (1) 数値予報モデルにおける気温の時間変化

室井(2012)に示されているように、気温は熱力学  
 の方程式に基づいて予報されており、気温の時間変  
 化<sup>3</sup>は、「移流」と「断熱圧縮・膨張による変化」<sup>4</sup>と  
 「非断熱加熱」の和によって表される（現実の大気  
 でも同じである）。

$$\begin{aligned} \text{温度の時間変化率} = & \\ + & \text{温度の移流} \\ + & \text{断熱圧縮・膨張による変化率} \\ + & \text{非断熱加熱率} \end{aligned}$$

一般に「非断熱加熱」とは、放射過程や雲の凝結・  
 蒸発に伴う加熱を指すが、数値予報モデルでは、格  
 子サイズよりも小さいスケールの現象、例えば乱流  
 や積雲対流による熱の鉛直輸送も便宜的に非断熱  
 加熱に含める。通常、数値予報モデルでは、移流と  
 断熱圧縮・膨張は力学過程で計算され、非断熱加熱  
 は物理過程で計算される。GSMおよびMSMでは、  
 非断熱加熱率は以下の項に分解される。

$$\begin{aligned} \text{非断熱加熱率} = & \\ + & \text{乱流に伴う熱の鉛直輸送による加熱率} \\ + & \text{格子スケールの凝結・蒸発・融解による加熱率} \\ + & \text{積雲対流に伴う熱の鉛直輸送による加熱率} \\ + & \text{長波放射による加熱率} \\ + & \text{短波放射による加熱率} \end{aligned}$$

格子スケールの凝結・蒸発・融解は、いわゆる「雲  
 過程」で計算される（中川 2012；原 2012など）。  
 以下、水蒸気の凝結や雲水の蒸発<sup>5</sup>を「凝結」、雨の  
 蒸発を「蒸発」、氷・雪の融解を「融解」と簡略化  
 して表記する。

<sup>3</sup> MSM では温位を予報変数としているが、温度の方が直  
 観的でわかりやすく、また GSM と並行して議論しやすく  
 するため、MSM の中で計算される温位の時間変化率は、  
 定圧の仮定のもと、気温の時間変化率に換算して論ずる。

<sup>4</sup> MSM のように温位を予報変数とすれば、温位は断熱過  
 程における保存量であるため、温位の予報方程式には断熱  
 圧縮による変化率の項は現れない。

<sup>5</sup> 蒸発はモデルの中の定式では負の凝結である。

### (2) 実況データの分析を通じた気温低下の要因の 考察

モデルによる時間変化率の分析を行う前に、まず、  
 気温低下の要因を実況などから絞り込んでいく。

実況で気温の大きな低下が見られた時には、以下  
 の状況にあったと考えられる。

- 関東地方はすでに厚い雲に覆われて、短波放射は  
 雲によって遮られており、下層の短波放射による  
 加熱はほぼ無視できる。
- 雲からの長波放射による加熱と地表面付近の長  
 波放射による冷却がほぼ釣り合うため、長波放射  
 の寄与も無視できる。
- 現地気圧は10JSTから12JSTで5hPa低下してい  
 る程度であり、大きな場の気圧変化に伴う断熱圧  
 縮・膨張による温度変化も無視できる。
- 前線に伴う層状の雲による降水であることから  
 積雲対流に伴う加熱の影響も除外できる。

以上より、残る要因は、温度の移流、乱流による  
 熱輸送、凝結・蒸発・融解による加熱・冷却となる。

さらに、実況データを用いて気温低下の要因を絞  
 り込んでいく。図4.1.3の毎時大気解析およびアメダ  
 ス観測による地上気温の実況を時系列で見ると、  
 10JSTから12JSTにかけて、1時間で約2Kの低下が  
 関東地方の広い領域で見られる。温度の移流は、温  
 度傾度とそれを横切る風の強さの積であらわされ  
 るが、このときの温度傾度は東京湾西側付近以外で  
 は比較的小さく、風も弱いことから、2K/時とい  
 う大きな気温低下を移流だけでは説明できず、関東  
 地方の気温低下の要因として、温度の移流は主たる  
 ものではないと言える。一方、東京湾の西側付近に  
 は大きな気温傾度帯があり、そこを冷たい方から暖  
 かい方に横切って北風が吹いていることから、移流  
 による強い冷却がある。したがって、大きな気温下  
 が見られる関東地方の中でも、東京湾周辺とそれ  
 以外でその要因が異なっていることが示唆される<sup>6</sup>。

また、10JSTでの関東地方の湿球温度<sup>7</sup>の実況はお  
 おむね2℃以上であったが、風が弱く、短時間で  
 大気が入れ替わる状況ではなかったことから、降水  
 の蒸発によって気温が低下できるのはその湿球温  
 度である2℃程度までと考えることができる。しか  
 し、実況では関東の広い範囲で0～1℃まで低下  
 していることから、降水の蒸発だけではない、別の  
 冷却源

<sup>6</sup> 関東の太平洋岸では等温線が南北に伸びており、そこ  
 に東から北北東の風が吹いている。この風は温度傾  
 度帯を暖かい方から冷たい方に横切っており、弱  
 いながらも暖気移流になっている。北寄りの風が  
 常に寒気移流になるわけではないことに注意が必  
 要である。

<sup>7</sup> 湿球温度とは、定圧の状況のもとで、水蒸気を蒸  
 発させて断熱的に冷却し、飽和に達した時の温度  
 であり、蒸発に伴う冷却によって達しうる気温の  
 下限値である。

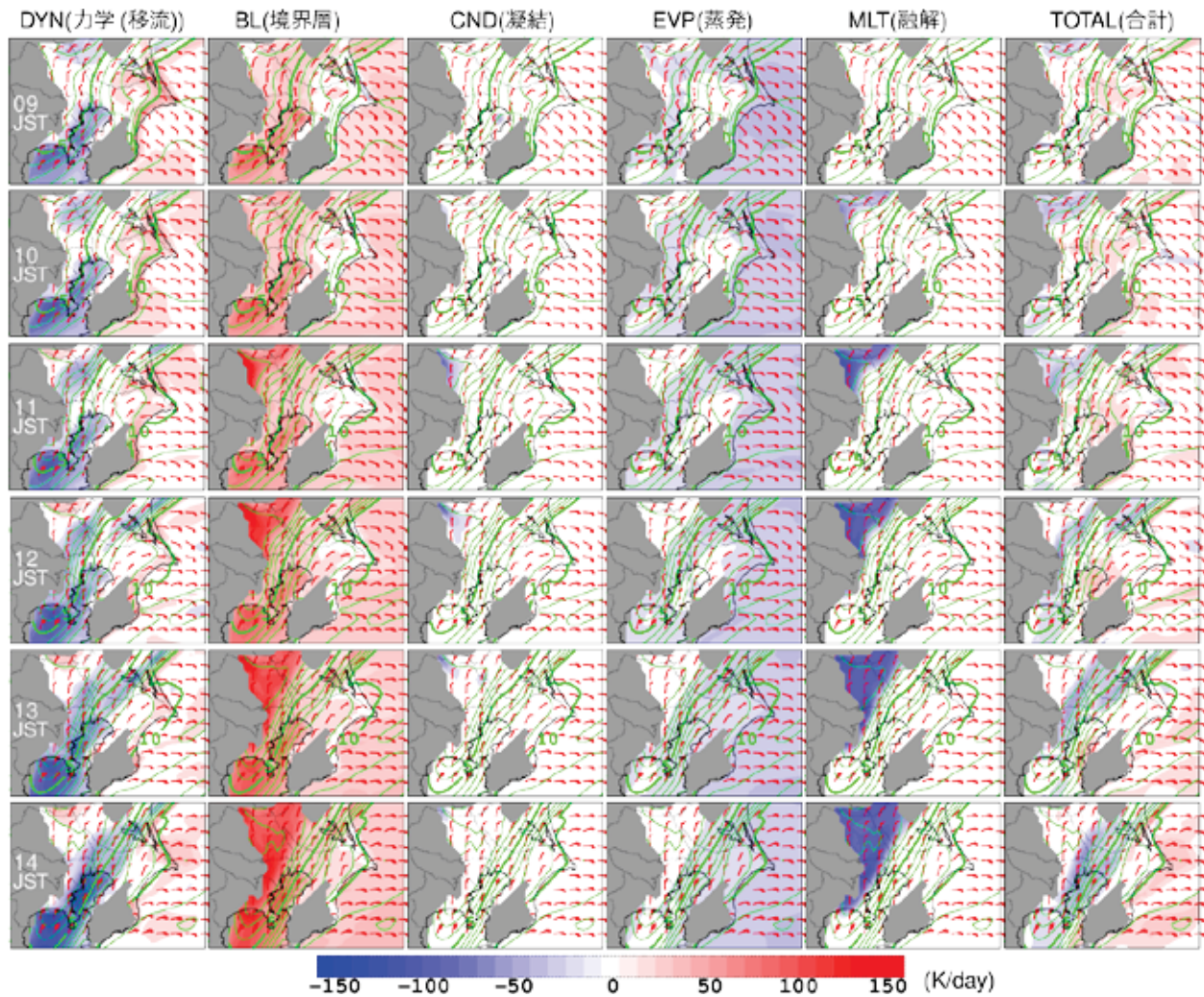


図 4.1.14 MSM (13日 03UTC 初期値) の高度 50m 面における (左から) 力学 (移流)、境界層乱流輸送、水蒸気の凝結 (雲水の蒸発を含む)、雨の蒸発、雪の融解による気温変化率とその合計 (赤青塗り分け、前 1 時間平均、単位:K/日)。上段から 14 日 09, 10, 11, 12, 13, 14JST を予報対象時刻とするもの。各図の緑の等値線 (1°C 間隔、5°C ごとに太線)、矢羽根はそれぞれ 50m 面の温度、風を示す。灰色部分は 50m よりモデル標高が高い領域を示す。

があったことが示唆される。

### (3) MSM・GSMの気温の変化率の違い

以下、前日にモデルで降雪を予報できたかという観点で、GSMは13日00UTC初期値、MSMは13日03UTC初期値の予報結果を解析する。

すでに、第4.1.4項で示したように、この段階では降水をもたらした南岸低気圧の進行位相がやや遅れていたものの、14日18JSTまでの24時間で60mmを超える降水量は、おおむね実況とモデルで合致していた。

MSM、GSMそれぞれで計算された地表に近い高度 (MSMは50m面、GSMは990hPa面) における移流、乱流輸送、凝結 (雲水の蒸発)、雨の蒸発、および融解による温度の時間変化率 (前1時間平均) を、09JST~14JSTについて図4.1.14と図4.1.15に

示す。MSMでは、降水の蒸発によって関東全域で冷却されているのに加え、10JST以降、北関東から融解による非常に強い冷却が南に広がっており、その強い冷却に対応して、気温が急激に低下していることがわかる。また、その冷却によって、東京湾付近に強い温度傾度帯が形成され、そこに北風が吹いたことによる寒気移流によって東京湾付近が冷却されていることもわかる。MSMでは、時間のずれはあるものの、北関東や東京湾における大きな気温低下を表現しており、実況の特徴とよく似ている。一方、GSMでは、北関東の融解による冷却がMSMより弱く、また同じ温度変化率 (10K/日) の領域が広がっている。このように、北関東での冷却が弱かった結果、東京湾付近の移流による冷却も小さくなったと推察される。

北関東および東京湾周辺を代表する地点として

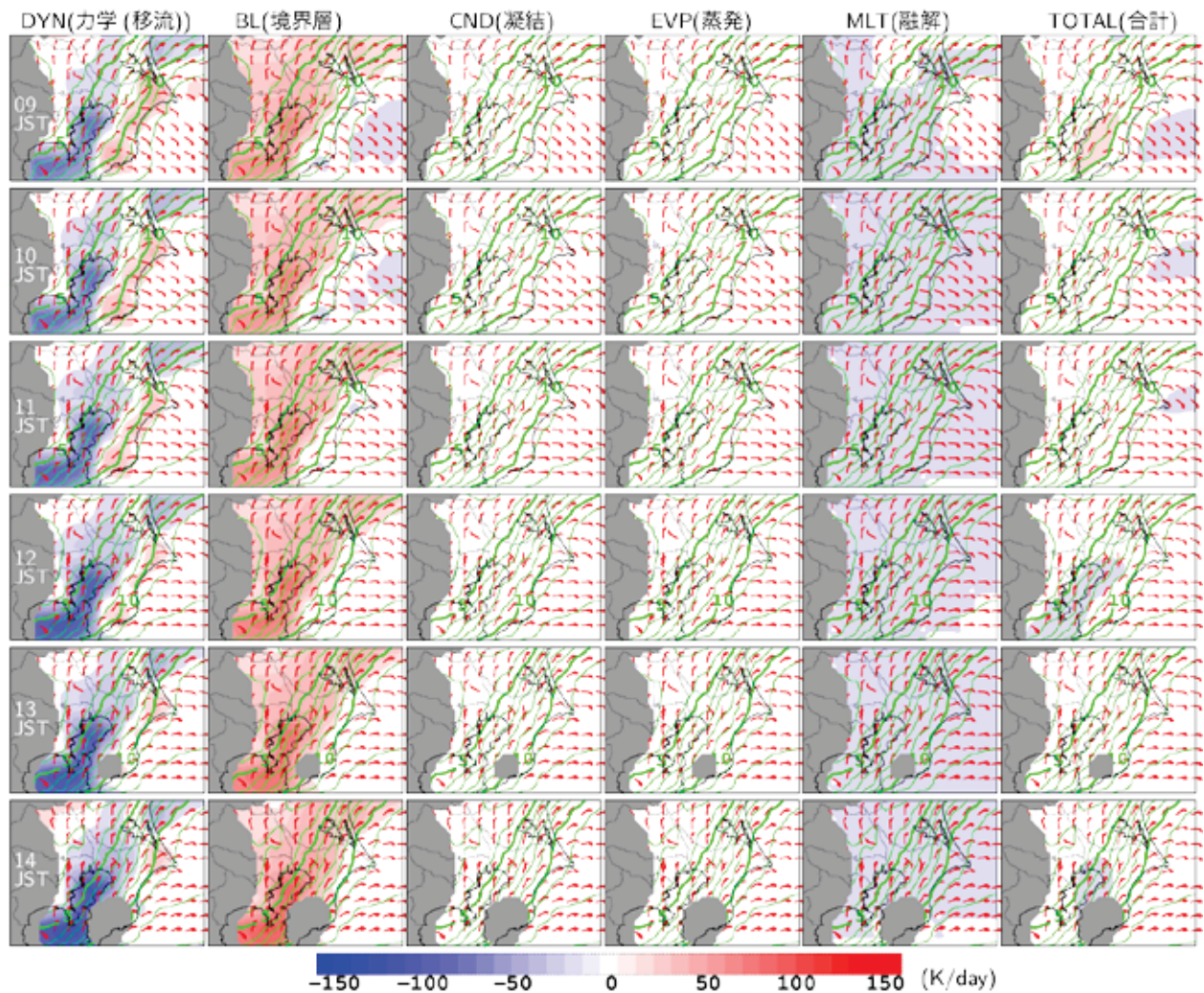


図 4.1.15 図 4.1.14 と同じ。但し、GSM の 990hPa 面での各過程の気温変化率、気温、風。灰色部分は地表面気圧が 990hPa より低い領域を示す（時間によって変化する）。

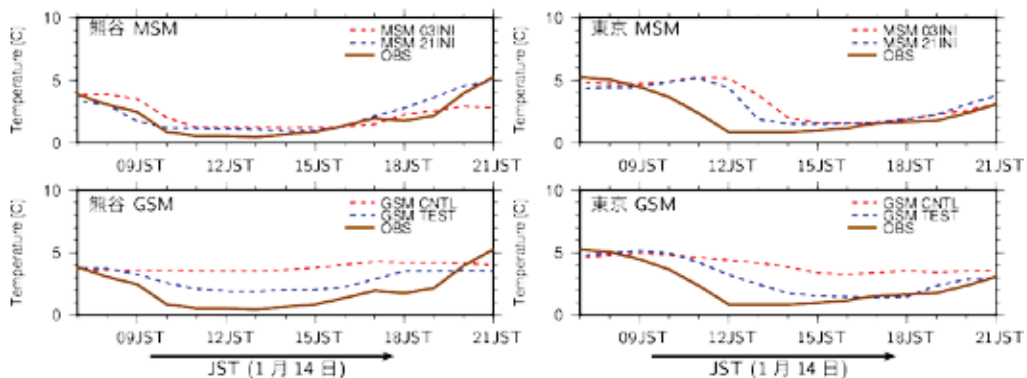


図 4.1.16 熊谷（左）と東京（右）における MSM（上段）と GSM（下段）の地上気温予報値とアメダス観測値。横軸は予報対象時刻（14日、JST）を示す。それぞれの図で茶色は観測値、MSM の図で、赤破線は 13日 03UTC 初期値、青破線は 13日 21UTC 初期値の予報、GSM の図で赤破線は現業（ルーチン、基準実験）、青破線は対照実験の予報値を示す。

熊谷および東京を選び、先に述べたことを詳細に解析する。まず、この2地点におけるGSMとMSMの地上気温の時系列を図4.1.16に示す（それぞれの現業モデルの予想は赤破線に対応）。これによると、GSM

は両地点での気温の低下をほとんど予想できていないのに対し、MSMでは、（上に述べたように、時間の遅れはあるものの）気温低下を表現していたことがわかる。

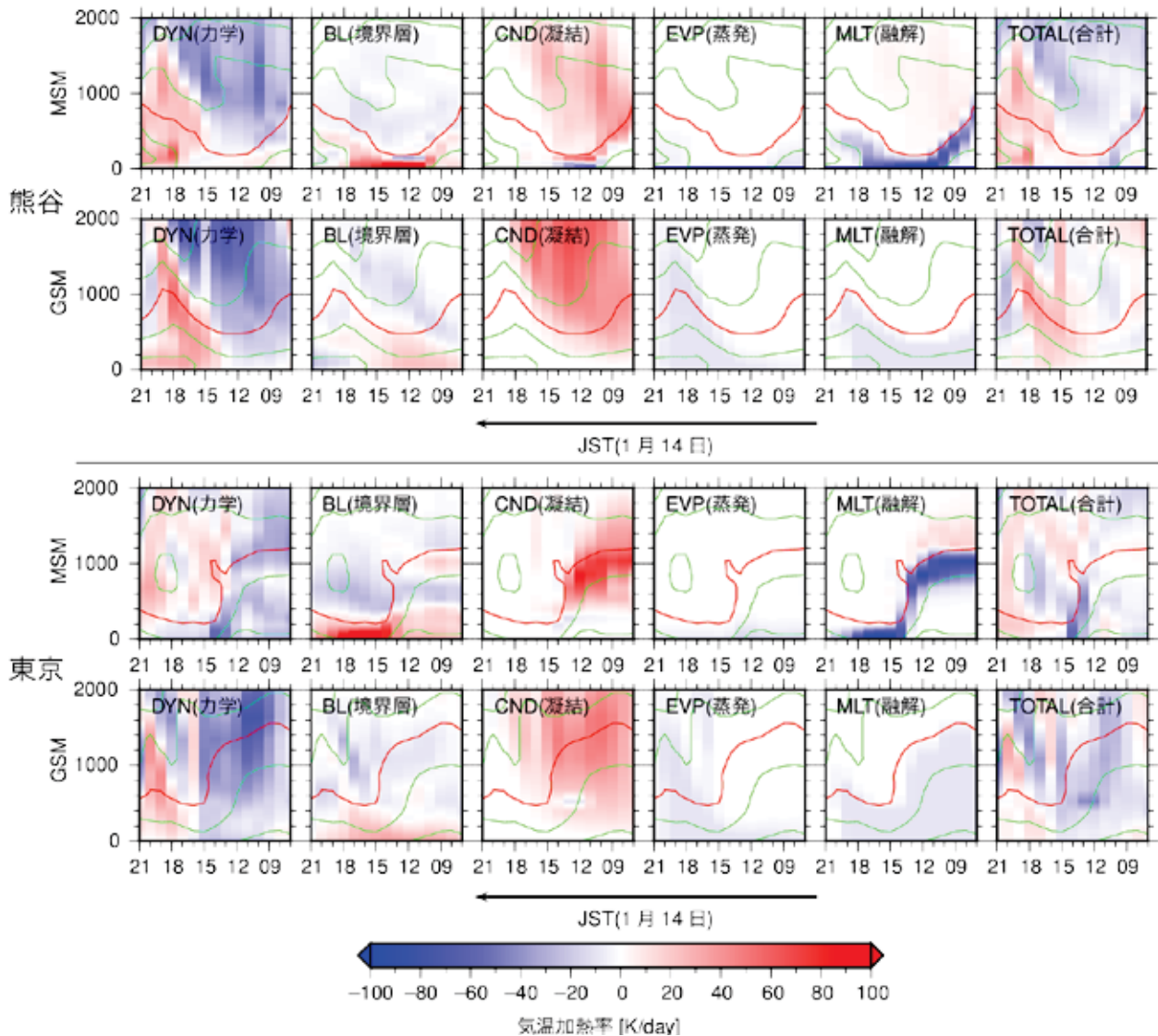


図 4.1.17 熊谷 (上 2 段)、東京 (下 2 段) における MSM (各上段) と GSM (各下段) の各過程の気温時間変化率 (赤青塗り分け)、気温 (緑の等値線 (2K おき)、0°C の等値線は赤) の鉛直時間断面図。各図、横軸は予報対象時刻 (14 日、JST) を示し、右から左へと時間は経過する (右端は 14 日 07JST に対応)。縦軸は高度 (単位:m)。なお、TOTAL (合計) にはここに示していない積雲対流、短波・長波放射による寄与を含んでいる (以下同様)。

その差の原因を探るために、この 2 地点について、MSM と GSM それぞれで計算されている各プロセスの気温時間変化率の鉛直時間断面を図 4.1.17 に示す。融解による気温の時間変化率に注目すると、MSM では、低気圧にもたらされた氷相の水が、0°C 線の下で融けて熱を吸収して冷却しており、非常に強い (最大 150K/日) 冷却層が薄い層に集中している。融解による冷却に対応するところには凝結による加熱も見られる。一方、GSM では、0°C 線の下で融解による冷却、それに対応する凝結による加熱が見られることは MSM と同じであるが、その冷却は MSM に比べて非常に小さく (10K/日)、MSM より厚い層内に分布している。熊谷における MSM の予想では、凝結による加熱より融解による冷却が大きくなった結果、0°C 線を時間経過とともに降下させ

ている様子がわかる。それに対して、GSM では、07JST 時点で 0°C 線の位置が高い上に融解による冷却が弱い。寒気移流によって 10JST ごろまで 0°C 線を降下させてはいるものの、その下降幅は MSM に比べて小さく、その結果、地上付近の気温が下がらなかった。一方、東京における MSM の予想では、14 日 09JST から 12JST にかけて 0°C 線が高度約 1200m の位置に維持されており、気温の時間変化率の総和が該当部分ではほぼゼロになっていることと対応している。これは、融解による強い冷却はあるものの、それを主に凝結による加熱が打ち消して釣り合っている状態にあることを示している。14JST までの 1 時間に、その釣り合いが崩れて急激に冷却された結果、0°C 線が高度 200m 付近にまで低下しており、これが MSM の予想における東京の急激な気

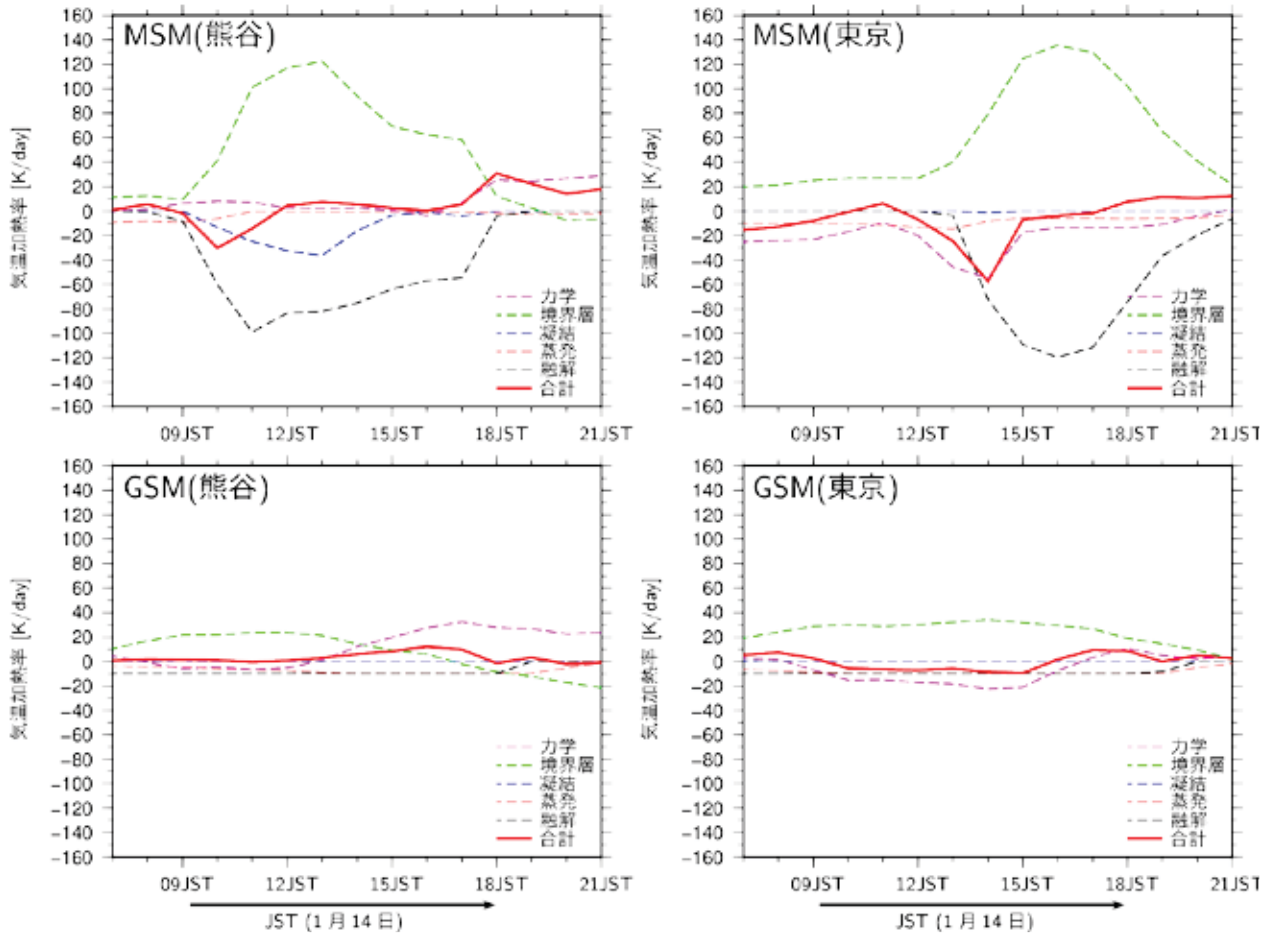


図 4.1.18 熊谷の海面高度 60m (左) と東京の海面高度 40m (右) における MSM (上段) と GSM (下段) の各過程の気温時間変化率の時系列。横軸は予報対象時刻 (14 日、JST)。

温低下に対応する。それに対し、GSMでも0°C線が急激に下降する時間帯はあるものの、熊谷同様、07JSTの時点での0°C線の位置がMSMよりやや高く、0°C線の降下幅も小さかった。

地表面に近い大気の気温時間変化率を見ると、夜間には放射冷却によって地表面温度が大気温度より低くなったため、境界層乱流による輸送によって地表面付近の大気は冷却されていたが(図略)、降水の蒸発や寒気移流によって大気が更に冷却されて、やがてGSM・MSMともに06JSTごろには地表面温度の方が大気温度より高くなり、境界層乱流による気温変化は加熱に転じた。MSMでは、0°C線が降下して地表近くに融解による冷却層が下がってきたのに対応して、境界層乱流輸送による強い加熱が地表面付近で見られるが、これらはほぼ釣り合っており、気温時間変化率の総和は大きくはない。

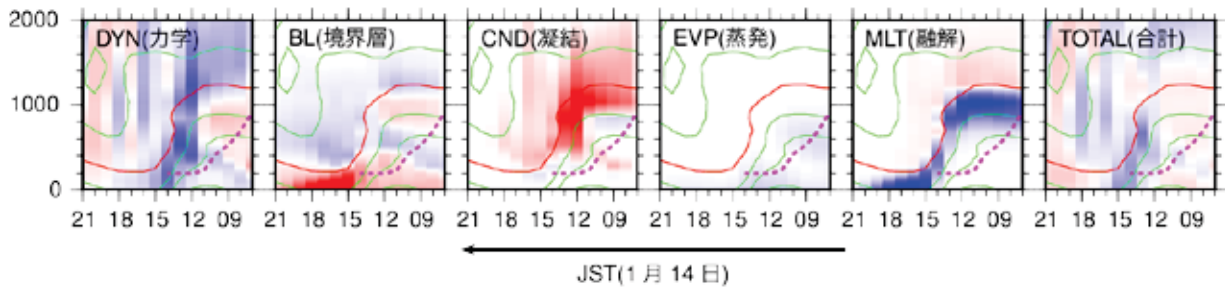
GSMでも同様の傾向が見られるが、融解による冷却が小さいことに対応して境界層乱流輸送による加熱もMSMより小さくなっている。なお、長波放射、短波放射、積雲対流スキームに伴う加熱は、すでに考察したように、蒸発や融解によるものに比べ

て相対的に小さかった(図略)。

さらに、大気最下層付近での様子を詳しく見るため、2地点の地表面付近の高度における気温の変化率の各過程からの寄与を、GSM、MSMそれぞれについて時系列で示す(図4.1.18)。MSMでは、熊谷において、融解による冷却が先行して気温を急激に下げた後、少し遅れて境界層の加熱が大きくなり、融解による冷却とほぼ釣り合っている。一方、東京においては、寒気移流による冷却によって地上付近にまで雪が達するような気温まで低下したのち、それに少し遅れて融解による冷却が大きくなり、さらに少し遅れて境界層の加熱が大きくなって、寒気移流や融解の冷却などと釣り合っている。熊谷、東京ともに、大きな冷却ののちには、しばらくの間、気温の時間変化率がほぼゼロとなる時間帯があり、それに対応して、地上気温が一定である状態が観測されている。MSMでは、その状況を精度よく予想している。

一方、GSMの蒸発・融解による加熱率はほぼ一定(10K/日)となっている。GSMは長い時間刻み幅(600秒)で安定に積分できるように、蒸発および、

### MSM(13日 03UTC 初期値)



### MSM(13日 21UTC 初期値)

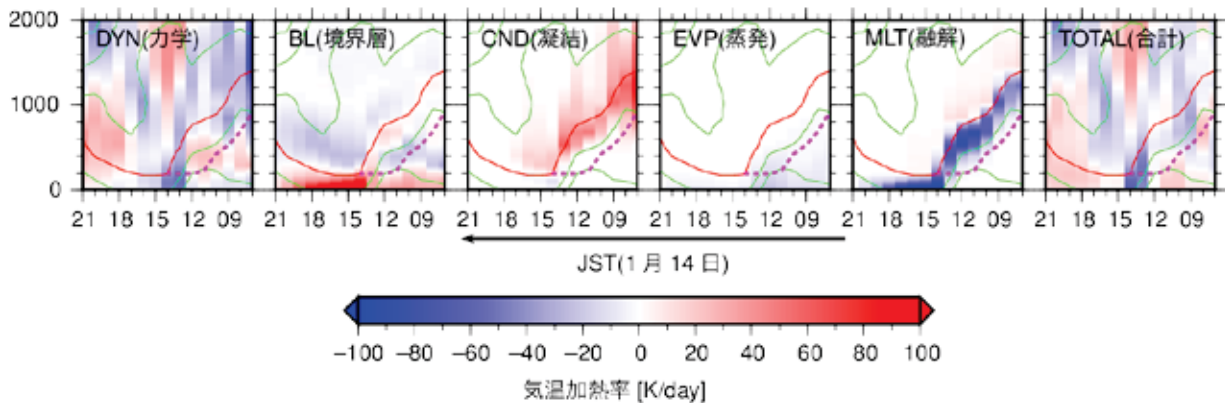


図 4.1.19 柏における MSM の 13 日 03UTC 初期値（上段）と 13 日 21UTC 初期値（下段）からの予報の各過程の気温時間変化率、気温の鉛直時間断面。図の見方は図 4.1.17 と同じ。桃色の破線は、ブライドバンドの半径から推定した融解層の高度を示す。

融解による冷却率をそれぞれ最大10K/日に制限しており、本事例ではその上限に達したため、蒸発・融解による寄与を合わせた雲過程による加熱率がモデルの各層で20K/日で頭打ちとなっている。融解（蒸発）熱の上限に対応して、融解（蒸発）する雪（雨）の量も、各層で10K/日の融解（蒸発）熱に対応する量が上限となっており、その上限値によって融解（蒸発）しきれなかった雪（雨）は、その下の層で融解（蒸発）している。その結果、特に熱量が大きい融解では、0°C線の下から地上付近まで、10K/日の冷却が鉛直方向に広く分布していることが図 4.1.17 の GSM の融解による気温時間変化率から明瞭にわかる。

このように、ある程度の降水量があつて<sup>8</sup>、蒸発や融解による冷却率が10K/日に達してしまうと、蒸発や融解による冷却が本来より下層にまで広がって、下層で冷却が過剰となり、地上付近の気温が低めに予想されることがある。実際に、図4.1.21（左）に示したように、降水が始まるころのGSMの気温の時間変化は、まだ地上付近では融解熱による冷却を受

けていないMSMに比べて大きく、14日03JSTから09JSTにかけてはGSMの方が地上気温が低くなっている。これは下層まで広がった融解熱を起源とする冷却が寄与していると考えられる。

一方、MSMが表現していたように、融解による冷却が支配的になる場合には、GSMはその上限値によって冷却が抑制されてしまい、その冷却による急激な気温低下を表現できない。本事例でも、融解による冷却が表現されていなかったために、降雪に至るほどの急激な地上気温の低下を予想できなかったものと考えられる。

#### (4) MSMの気温低下の遅れの原因

ここまで見てきたように、MSMでは、気温の急激な低下、およびその後の気温の一定状態の継続については表現していたものの、気温の低下のタイミングが実況より2~3時間遅れていた。次に、その原因について探る。

図4.1.4のレーダー画像では、東京レーダーがある千葉県柏市（同図の星印）を中心に円状の強いエコーが見られる。これは、ブライトバンドと呼ばれるもので、融解層がレーダービームを強く反射することから現れるものである。このブライトバンドの円形の領域は、時間の経過とともに小さくなっている。

<sup>8</sup> 1時間降水量10mm相当の固体降水が地上付近の厚さ1000mの層で全て均一に融解すると、加熱率は約70K/日となる。

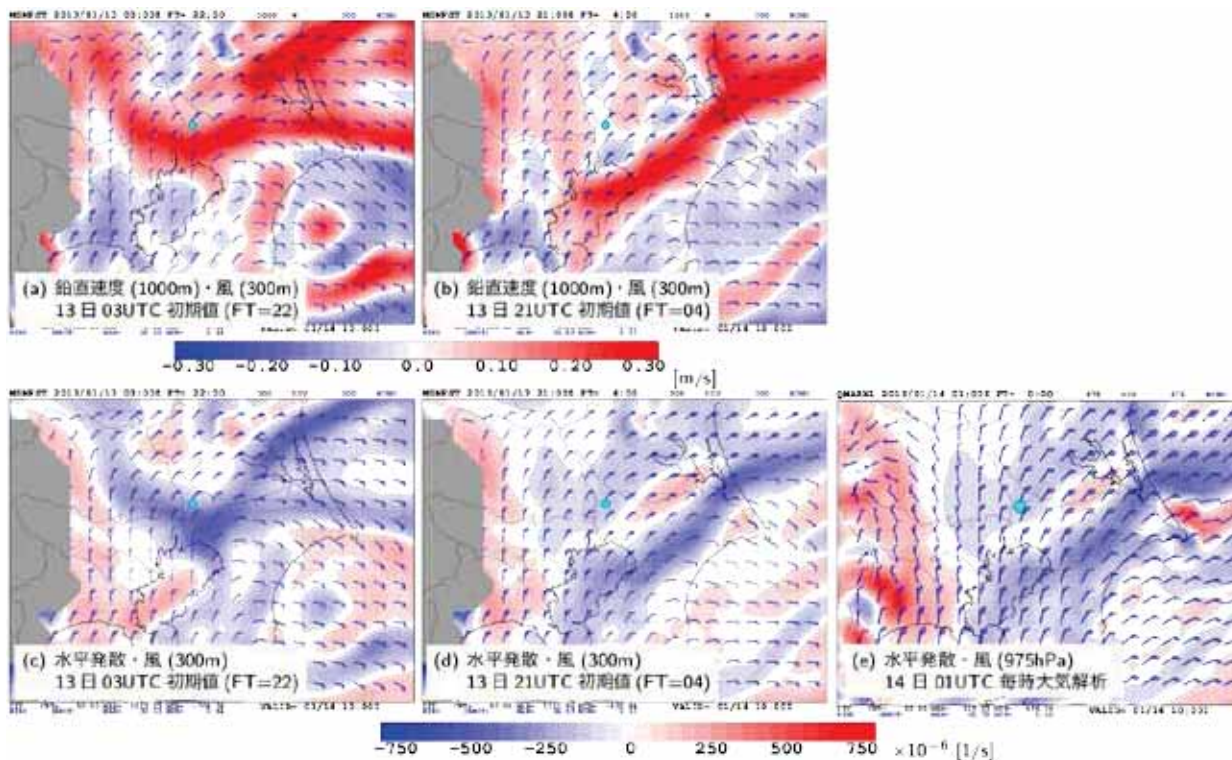


図 4.1.20 MSM による 14 日 01UTC (10JST) における(a)高度 1000m 面での鉛直速度 (赤:上昇流、青:下降流)、高度 300m 面での風 (青の矢羽根、単位:ノット) の 13 日 03UTC 初期値の予報。(b) (a)と同じ、ただし、13 日 21UTC 初期値の予報。(c) 高度 300m 面での水平発散 (赤:発散、青:収束) と風 ((a)と同じ) の 13 日 03UTC 初期値の予報、(d) (c)と同じ、ただし、13 日 21 UTC 初期値の予報。(e) (c)と同じ、ただし 975hPa 面での毎時大気解析。各図の水色の印は東京レーダー (柏) の位置を示す。

これは、融解層が下降していることを意味し、先に見たモデルの中での気温低下のプロセスと同じ描像である。柏におけるMSM各プロセスの気温の時間変化率、MSMが予想する気温、およびブライトバンドの円形の領域の半径から推測した<sup>9</sup>融解層の高度を示したのが、図4.1.19 (上段) である。融解層が0°C線の直下にほぼ対応するとすれば、融解層が徐々に低下しているのに対し、MSMでは東京と同様に融解層が一定の高度を数時間維持した後、急激に下降しており、そのタイミングが実況に比べて遅れているようである。

融解によって大気が冷却されると、飽和水蒸気量が小さくなることから、飽和状態になっていた空気からは凝結が発生する。また、上昇流がある場合も (上空の方が気圧が低いために) 断熱膨張により冷却され、同様に飽和水蒸気量は小さくなる。実際、上昇流の大きさと凝結による加熱は連動しており、上昇流が弱まったタイミングで凝結熱が小さくなったことにより融解による冷却が大きくなり、0°C線が急激に下降したことがわかっている (図略)。

<sup>9</sup> ここでは、東京レーダーの極座標データで、最もエコー強度が強い円の半径をブライトバンドの半径とした。

凝結による加熱が大きい高度1000mにおける上昇流の平面的な分布をみると (図4.1.20(a))、柏付近には収束帯 (図4.1.20(c)) に伴う10~30cm/s程度の上昇流があり、北関東についても上昇流が予想されている。しかし、毎時大気解析 (図4.1.20(e)) によれば、その収束帯は実況では南にずれており、MSMが予想した柏や北関東における上昇流は実況では存在しない、または弱かったのではないかと推測される。この10cm/s程度の上昇流が凝結熱を生み、冷却を妨げるなど、気温の急激な低下の表現の有無に関係していたと考えられる (付録参照)。

この実況にない収束域 (上昇流域) の生成は、南岸低気圧の位相の遅れに関係している。実際に、13日21UTC初期値のMSMでは、南岸低気圧の進行位相、収束域の位置は実況と合っており (図4.1.20(d)と(e))、13日03UTC初期値に比べて上昇流の大きさも小さい(図4.1.20(b))。しかし、この初期値においても、03UTC初期値よりは小さいものの気温低下の遅れが見られている (図4.1.16のMSMの図の青破線)。この初期値のMSMについて、13日03UTC初期値と同様に、柏における時間変化率と0°C線の動向を見てみると (図4.1.19 (下段))、0°C線を一定高度

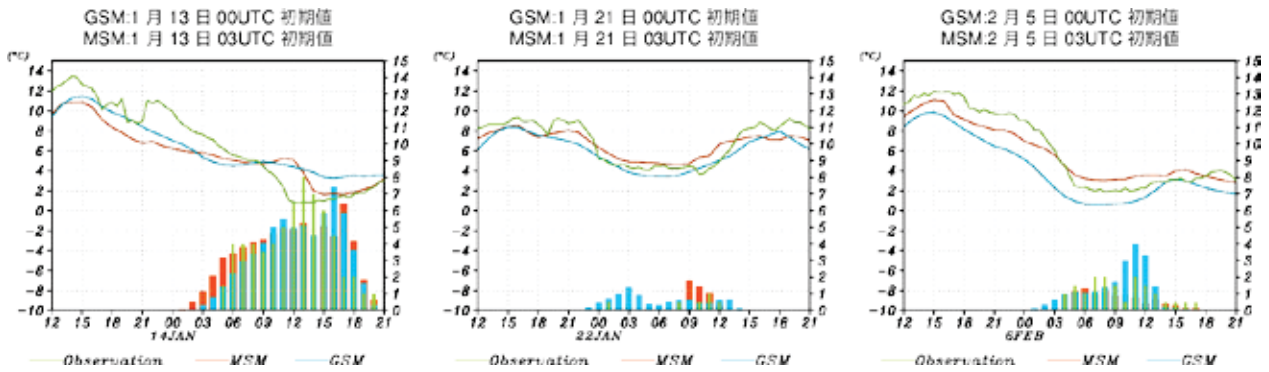


図 4.1.21 1月13日～14日(左)、1月21日～22日(中央)、2月5日～6日(右)のMSM予報(赤)、GSM予報(青)、アメダス観測(緑)による東京の気温(折れ線グラフ、左縦軸)と降水量(棒グラフ、右縦軸)の時系列。横軸は予報対象時刻(JST)。

に維持した03UTC初期値と異なり、21UTC初期値では、0°C線は時間経過とともに下降しているが(東京でも同様(図略))、ブライドバンドによって推定した0°C線と比べると、下降が3時間程度遅れている。しかし、下降速度自体は、ブライドバンドから推定した値とよく合っている。それにもかかわらず、気温低下が遅れた原因は、初期値の0°C線の高度が実況より高かったためと推察される。ブライドバンドから推定した0°C線の高度に幅があることを考慮しても、07JSTにおけるモデルの0°C線の高さはブライドバンドからの推定値に比べて高い。総観規模の場と上昇流の分布が実況に近くなったために、各プロセスの加熱と冷却のバランスが現実になり、実際に0°C線の降下速度はブライドバンドから推定した実況と近いものになった。しかし、モデルの初期値を作成するメソ解析では、第一推定値を与えるそれ以前の予報でも0°C線の低下を予想できていなかったことに加え、それを修正する観測データも乏しいことから、初期値における0°C線の高さの誤差が大きくなり、結果的に地表面付近における気温の低下の予想の遅れにつながったと考えられる。

このように、雪をもたらす気温低下のプロセスには、モデルの中で不確実性が大きい複数の要因が関係している。10cm/s程度の上昇流が融解層付近の気温の動向を左右し、0°C線の高度はその後の気温低下の動向に大きな影響を与える。また、この事例でも見られたように、蒸発や融解によって大気が冷却され、地表面温度より大気温度が低くなれば、境界層からの加熱が加わり気温の低下を妨げる。たとえばモデルの地表面温度が実況より高ければ、実況ほど気温が下がらずに、ほぼ一定の気温が維持されることもある。また、地表面温度はそれまでの予想の経過(それ以前の日中の加熱や夜間の冷却)にも影響される。降雪に至るプロセスは複雑であり、かつ、そのプロセスの表現に不確実性があることを念頭において、モデルを解釈することが重要である。

### (5) 他の南岸低気圧事例での検証

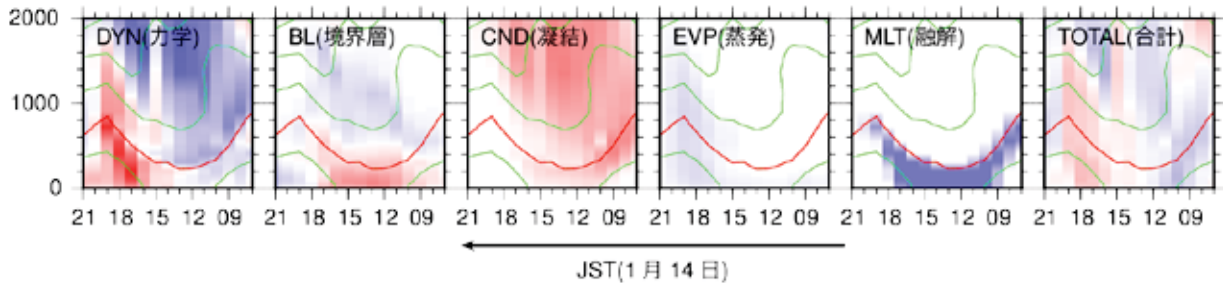
これまでに確認できた降雪に至るプロセスを踏まえ、他の南岸低気圧の事例についても、以下で簡単に検証する。

#### (i) 2013年1月21日の事例

2013年1月20日から21日にかけて、本州の南岸を低気圧が通過した。低気圧の発達度合いとしては、2013年1月14日より小さかった。低気圧に先行する降水が雪となることも想定されたが、実際には雪にはならず、雨となった。図4.1.21(中央)はこの事例の東京における地上気温と降水量の観測値、GSM予想値、およびMSM予想値の時系列である。モデルの気温は21日の夜以降、GSMが実況より低め、MSMが実況より高めに推移しているものの、概ね実況に追従しており、気温が2°Cを下回ることにはなかった。東京の地上付近の降水が始まる時刻での湿球温度の実況は2°C程度であり、14日の事例と同様、降水の蒸発だけでは降雪になるような気温低下にはつながらない<sup>10</sup>。14日の事例でみられたような雪の融解熱による冷却が大きくなるためには、ある程度まとまった降水量が必要である。しかし、1時間降水量は実況、予想ともに1mm程度で少なく、たとえ降水の蒸発によって湿球温度まで冷却できたとしても、融解層付近の雪の融解によるさらなる強い冷却および融解層の降下による急激な気温低下には至らなかった。このように、この事例では低気圧の発達も弱く、降水量が少なかったために降雪になるほどの気温低下には至らなかった。

<sup>10</sup> 降水が始まる前の地上付近の気温の冷却には、長波放射による冷却、それに伴って形成される安定境界層内の冷却も寄与するが、降水が始まる直前から降水が続いている間にはこれらの寄与の和はほぼ無視できることが多く、主な冷却源は水の相変化に伴う熱の吸収と寒気移流となる。

熊谷



東京

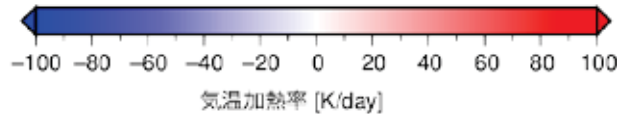
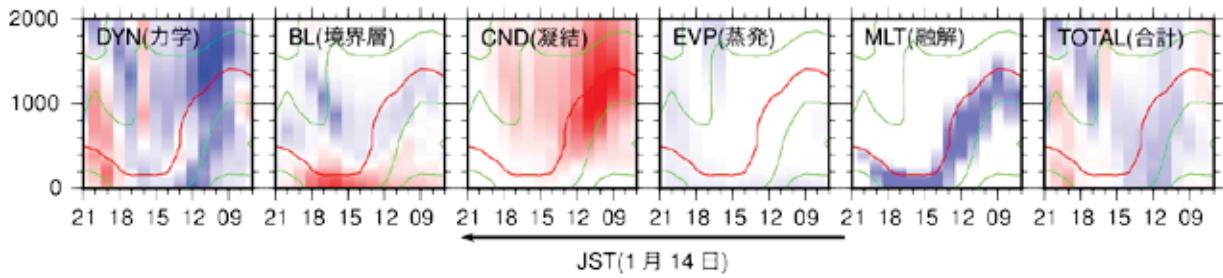


図 4.1.22 図 4.1.17 と同じ。ただし、蒸発・融解熱の上限値を変更した GSM (対照実験) によるもの。GSM (基準実験) の同様の図は図 4.1.17 の GSM の図を参照。

なお、この事例においては、GSMの降水の融解による冷却は1月14日の事例よりも小さく、蒸発による冷却も下層で上限を超えることはなかった。

(ii) 2013年2月6日の事例

本事例の前日の予報では、南岸低気圧が関東に接近<sup>11</sup>、GSMで関東の広い範囲で1°C以下の地上気温を予想していたため、降雪の可能性が想定された。一方、MSMでは東京で3°C台、関東のその他の地域(房総を除く)で1~3°Cまでしか低下しない予想であった。

GSMとMSMの気温予想の間にこのような差が生じた原因はいくつか考えられる。その一つが、前日の気温上昇の違い(図4.1.21(右))と0°C線の高度である。前日には、東京では実況で気温が約12°Cまで上がり、MSMでは約11°Cまで上がる予想だったものの、GSMの予想では約10°C止まりであった。その後も、GSMの東京における気温予想はMSMのそれより低めに推移したが、前日の日中の気温上昇の

差がその一因であると推察される。また、前日12JSTにおける0°C線の高度はGSMが地上約800mに位置していたのに対し、MSMでは同1400mに位置し、600mもの差があった。その後、GSMの0°C線はその高度を維持し、一方、MSMでは寒気移流によって徐々に0°C線を降下させたものの、降水が始まった6日03JSTごろでも、依然、MSMの方が約200m高い状態であった。降水が始まるとMSM、GSMともに下層で蒸発に伴う冷却によって気温がさらに低下したが、GSMでは0°C線の高度が低い上に、0°C線の下での融解層で融解による冷却率がモデル内の上限値を超えたために、融解層で融けきれなかった分の融解熱を起源とする冷却が地上付近にまで広がった。実際に、図4.1.21(右)を見ると、降水が始まったところから、GSMの地上気温の時間変化が大きくなっているのがわかる。

その後、実況でも見られるように、MSM、GSMともに、気温がほぼ一定になる時間が数時間継続するが、その気温はMSMとGSMで大きく異なっている。MSMでは、寒気移流と蒸発による冷却と境界層の乱流輸送による加熱が、地上付近ではほぼ釣り合い、気温の推移も実況に近い。一方、GSMでは、融解を起源とする冷却も加わって、釣り合いが実現されており、一定となった気温は実況に比べて低い。

<sup>11</sup> この事例では、数日前からの予報で南岸低気圧が1月14日の事例より発達する予報となっており、より多くの降雪の可能性も考えられた。初期値が新しくなるにつれて低気圧の発達も弱くなっていったが、依然として、降雪の可能性が想定された。

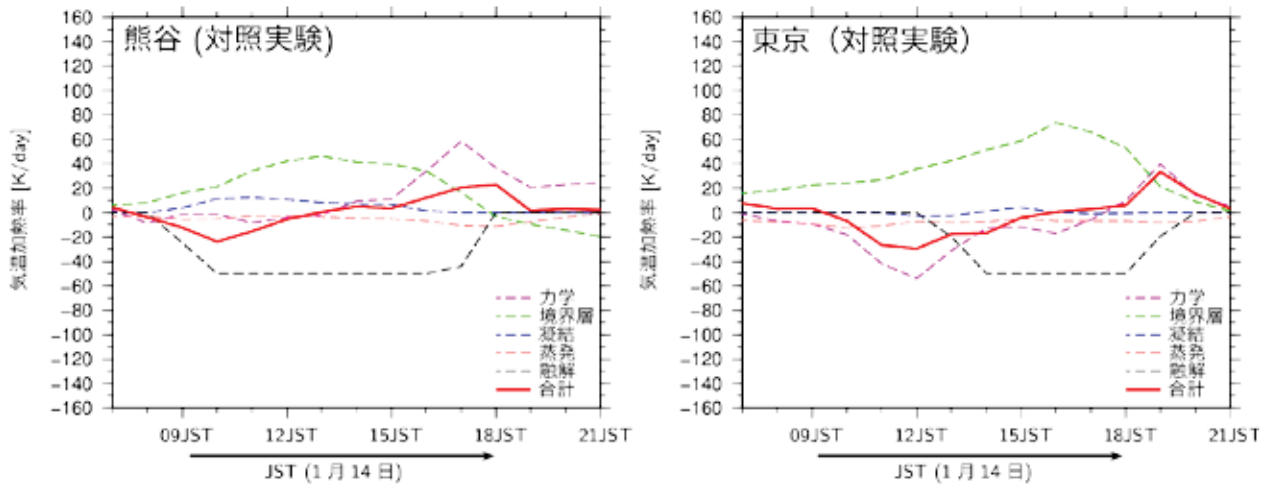


図 4.1.23 図 4.1.18 と同じ。ただし、蒸発・融解熱の上限値を変更した GSM (対照実験) によるもの。GSM (基準実験) の同様の図は図 4.1.18 の GSM の図を参照。

一般に、地表面温度が同じであれば、冷却が強いほど、釣り合いが実現する気温は低くなる。この事例でも、融解を起源とする冷却が加わって、冷却が大きくなっているため、MSMや実況よりも一定となる気温が低く予想されてしまったものと考えられる。

この事例では、降水量が1月14日の事例ほどは多くなかったため、融解層が地上付近まで降下することはなく、その冷却が支配的にならなかったと推察される。しかし、GSMでは、融解による冷却率が上限値に達しており、融解層で融けきれなかった分の融解熱に伴う冷却を下層まで広げていた。このこと、前日の日中の気温上昇が不十分だったことも加わり、気温の予想が実況より低かったものと考えられる。

#### (6) GSMにおける、蒸発・融解熱の上限設定の影響

GSMでは降水の蒸発・雪の融解熱による冷却率に、モデル計算上の上限値が設定されていることを(3)で述べた。この設定の影響を調べるため、降水の蒸発・融解による冷却率の上限を、それぞれ10K/日から50K/日に引き上げた実験を行った。以下では現業GSMの結果を「基準実験」、冷却率の上限を引き上げた実験を「対照実験」と呼ぶ。

図4.1.15で見たように、基準実験では融解による弱い広範囲の冷却が持続して見られたが、対照実験では、図4.1.14のMSMのように、融解による冷却が北関東から広がる様子が見られた(図略、ただし冷却の大きさはまだMSMの方が大きい)。その様子を、熊谷と東京における、各過程の気温時間変化率の鉛直時間断面で見たものが図4.1.22である。図4.1.17で見たように、基準実験(現業モデル)では10K/

日の厚い融解層が気温の0°C線の下から地上までの範囲で現れているが、対照実験では、0°C線の直下に強い融解による冷却が起きている。この強い冷却の影響で、気温の0°C線は降下し、地上付近まで到達する。図4.1.23は熊谷と東京における、地表面にごく近い下層での気温の時間変化率の時系列を示したものである。基準実験(図4.1.18のGSM)と比較して、東京での寒気移流が大きくなっているのは、関東北部からの移流が強くなることに対応している。また、融解による冷却も大きくなり、上限値の50K/日近くまで達している。これらの冷却と釣り合うように境界層による熱輸送も大きくなるが、全体としては、冷却方向に働く状態となった。そのため、基準実験よりも地上気温が低くなる結果が得られた(図4.1.16のGSMの青破線)。しかしながら、冷却率の上限を100K/日まで大きくすると、気温の時系列に急激な温度変化に伴うノイズが現れた(図略)。

以上のように、蒸発熱・融解熱の上限は今回の事例における気温の予測に大きく影響していたが、計算安定性に影響する問題でもある。従って、蒸発・融解熱のモデル内の適切な扱いと計算安定性を両立させることは、今後のGSM改善の課題である。

#### 4.1.6 まとめ(降雪が見込まれる場合のモデルの解釈の留意点)

2013年1月14日の関東の降雪事例を対象に、実況、ガイダンス、ガイダンスの入力となったモデル(MSM, GSM)の総観場、および気温低下に至るモデルの表現を、モデルの中で計算される気温の時間変化率に着目して解析した。

ガイダンスの作成手法に沿って、その入力を順に追うことで、地上気温が0°C付近まで低下すること

を予測できていたかどうか、GSM と MSM の最大降雪量ガイダンスの予測の違いの要因であることがわかった。また、MSM 最大降雪量ガイダンスで予想された降雪の始まりが実況よりも遅かった点については、MSM モデルの地上気温の低下が実況に比べ遅かったことが原因であることもわかった。このように最大降雪量ガイダンスは、格子気温ガイダンスやその基となるモデルの地上気温の予測の影響を大きく受ける。従って、ガイダンスを利用する際には、モデルの気温予想とセットで見えていくことが必要である。

総観場の予想については、GSM は降雪をもたらした低気圧の発達と東進をおおむね3日前から予測できており、週間アンサンブル予報は GSM よりも早い段階で顕著現象の可能性を示していた。一方で、古い初期値の予想ほど低気圧の発達が弱く、進行速度が遅いという傾向が見られた。この例に限らず、冬の南岸低気圧の予報はリードタイムが長い段階では低気圧の発生や大まかな進路については予想できているものの、日本に降雪をもたらすか否かや、降り始めのタイミングについては誤差が大きく、特に低気圧の東進が遅れる傾向も多く見られた。

モデルの中で計算される気温の時間変化率に着目すると、低気圧に先行する降水の蒸発による冷却によってある程度気温が低下したところに、北関東では雪の融解熱、東京では、北関東で冷却された大気による寒気移流と雪の融解熱によって、気温が低下していた、という点はMSM、GSMともに概ね同じであったが、MSMでは、気温低下のタイミングが実況より2~3時間程度遅れていた。また、GSMはMSMに比べ、気温の時間変化率の振幅が小さい傾向があり、地上で降雪となる状態まで気温が低下しなかった。MSMの気温低下のタイミングは、10~20cm/s 程度の比較的小さな上昇流の数十kmスケールの分布や、初期値における0°C線の数百mの高度の違いなど、モデルの不確実性が大きい部分に影響されており、それらのわずかな違いで予想が大きく変わる場合があることがわかった。

GSMでは、降水の蒸発と雪の融解熱にモデルの計算を安定にするための上限値が設定されており、1月14日の事例でこの上限値に達して、融解による冷却や、関東北部から南部への寒気移流が小さくなったことから、降雪に至るほど気温が低下しなかったことがわかった。一方、この上限値に達すると、気温の0°C線から離れた下層で、融解層で融けきれなかった雪が融解することで、実況よりも過大に冷却される場合もあることも、2月6日の事例を通じて示した。蒸発熱と融解熱の上限を引き上げる実験を行った結果、GSMの気温変化の振る舞いがMSMによ

る予測に近づいた一方で、計算安定性に悪影響を及ぼすことも判明した。

雨雪の判別にあたり、気温予測値だけでなく、その変化をもたらす過程まで含めて検討することは、モデル間の予想の違いや予測の妥当性の判断にとって有用である。特に、降水の蒸発や雪の融解量の大きさは降水量に依存するため、降水量の多寡も注目すべき点である。一方、降水量がほぼ同じでMSMとGSMで気温の下がり方に差が出る場合は、気温の下がるプロセスの違いがあると考えられる。特に、GSMでは、蒸発や融解による冷却の上限値に達するような降水がある場合には、融解を起源とする冷却が融解層の下に鉛直方向に広がって、冷却が過大になることがある一方、0°C線の直下にある融解層の冷却は抑制されて、融解層の降水やそれに伴う冷却の表現が十分ではない場合がある。しかし、この設定は計算安定性にも影響するため、問題の解決に至っていない。そのため、降水量が多い事例において、GSMで蒸発や融解に伴う気温の低下が十分に表現できない場合があることに留意いただくとともに、これらによる気温低下が見込まれるときには、MSMの予想も参考にするなどしていただきたい。MSMでも、降雪の際の気温の低下の予想には、上昇流や低下する前の気温の違いが影響しうること、加えて、気温の低下を予想していても、そのタイミングにずれがある可能性についても留意いただきたい。

これまで、南岸低気圧による太平洋側の降雪事例における雨雪判別や、それに基づく積雪の予報については、下層気温を支配する物理過程として、降水の蒸発による冷却の効果に注目し、主に地上気温と湿度の予測に基づいて行われてきた。湿度に注目するのは、蒸発に伴う冷却では湿球温度までしか気温は低下せず、湿度が高い、すなわち湿球温度が高い場合には、降雪となるのに必要な冷却が降水の蒸発によって得られないからである。しかし、今回の事例のように、冬季としては大量の降水があるときには、雪の融解による冷却の効果が支配的になるなど、地上気温と湿度の予測だけでは不十分で、下層の気温・湿度プロファイルと降水量にも注目が必要な場合がある。加えて、下層気温・湿度のプロファイル、降水量、下層風系など、総合的な予測精度が関係してくることに注意が必要である。

今回のような雪の事例に限らず、現実大気やモデル内の現象のプロセスを理解しようとすることは、モデルの予想の有効活用に大いに資するものと考えられる。室井(2012)なども活用し、数値予報モデルの振る舞いと対応する現象の理解に努めることを推奨したい。

付録 非断熱冷却に伴う凝結による加熱と上昇流の影響

以下、飽和している状態（つまり雲の中）を考え、外部からの非断熱冷却や上昇流に伴う断熱膨張による冷却によって、飽和水蒸気量の減少分が凝結する状態を仮定する。この凝結に伴って解放される潜熱による気温の時間変化率は次のように記述できる。

$$\left[\frac{\partial T}{\partial t}\right]_{\text{net}} \equiv \left[\frac{\partial T}{\partial t}\right]_{\text{cond}} + \left[\frac{\partial T}{\partial t}\right]_{\text{ext}} = A \left[\frac{\partial T}{\partial t}\right]_{\text{ext}} + Bw$$

$$A \equiv \frac{1}{1 + \frac{L}{C_p} \frac{\partial q_s}{\partial T}} \quad (0 < A < 1),$$

$$B \equiv \left[ \frac{L}{C_p} \frac{\partial q_s}{\partial T} \Gamma_m - \frac{L q_s}{R_d T} \Gamma_d \right]$$

(通常の温度では  $B > 0$ ),

$T$ : 気温,  $q_s$ : 飽和水蒸気比湿,  
 $L$ : 潜熱,  $C_p$ : 大気 of 定圧比熱,  
 $R_d$ : 乾燥空気 of 気体定数,

$\left[\frac{\partial T}{\partial t}\right]_{\text{ext}}$ : 非断熱冷却による気温時間変化率 ( $< 0$ )  
 $\left[\frac{\partial T}{\partial t}\right]_{\text{cond}}$ : 凝結に伴う加熱による気温時間変化率  
 $\left[\frac{\partial T}{\partial t}\right]_{\text{net}}$ : 正味の気温時間変化率

$\Gamma_d = \frac{g}{C_p}$ : 乾燥断熱減率 ( $g$ : 重力加速度),  
 $\Gamma_m = \frac{g}{C_p} \frac{1 + \frac{L q_s}{R_d T}}{1 + \frac{L}{C_p} \frac{\partial q_s}{\partial T}}$ : 湿潤断熱減率,

$w$ : 鉛直速度

右辺第1項は、 $A < 1$  なので、外部からの非断熱冷却が凝結による加熱によって一部が打ち消されることを示し、第2項は上昇流の存在によって凝結に伴う加熱が発生することを示す。 $A > 0$  なので、上昇流がない場合には、非断熱冷却を凝結による加熱が上回ることはない。

以下、融解層の典型的な状況である  $0^\circ\text{C}$ 、 $900\text{hPa}$  である場合を考えると、 $A$  は約  $0.57$  で、つまり、凝結による加熱をあわせた正味の冷却は元の非断熱冷却の約  $57\%$  となる。しかし、右辺第2項により、上昇流がある場合には、その冷却はさらに弱められる。たとえば、MSM による雪の融解による典型的な冷却率は  $100 \text{ K/日}$  であり、非断熱冷却と凝結による加熱の和は  $57\text{K/日} = 6.6 \times 10^{-4} \text{ K/s}$  である。このときの湿潤断熱減率は  $6.3 \times 10^{-3} \text{ K/m}$  であるので、 $B$  は約  $3.5 \times 10^{-3} \text{ K/m}$  であり、このとき、約  $19 \text{ cm/s}$  の上昇流があれば、右辺第1項と第2項はほぼ等しくなり、正味の加熱はゼロとなる。このように、比較的小さな上昇流が、融解層付近の熱収支に大きく寄与し、そのわずかな違いによって正味が加熱の正負

が変化する微妙なバランスの熱収支となっている。

また、 $A$  は気圧が高いほど大きく、また上昇流は一般に下層ほど小さいため、下層ほど右辺第1項の非断熱冷却の寄与が大きくなる。このことは、下層で融解層の降下速度を大きくするのに寄与する。また、冷却によって周囲より重くなることで負の浮力が働いて大気はより下降しやすくなり、さらに（先に述べたように）下層では冷却が強くなるので、負の浮力が大きくなりやすい。このように、下層ほど融解層の降下する速度は大きくなりやすいことがわかる。

参考文献

加藤輝之, 2010: 最近の全球数値予報システムの成績の推移. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 30–32.

中川雅之, 2012: 雲過程. 数値予報課報告・別冊第58号, 気象庁予報部, 70–75.

原旅人, 2012: 雲物理過程. 数値予報課報告・別冊第58号, 気象庁予報部, 76–89.

古市豊, 松澤直也, 2009: 最大降雪量ガイドンス. 平成21年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 27–38.

古市豊, 2010: 降雪ガイドンスの改良と利用. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 78–81.

室井ちあし, 2012: 数値予報モデル. 平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23–41.

## 4.2 2013年4月6日から7日にかけて発達した低気圧<sup>1</sup>

### 4.2.1 はじめに

2013年4月6日から7日にかけて、日本付近を低気圧が発達しながら通過し、西日本から北海道にかけての広い範囲で強い降水や強風をもたらした（以下、本節内では本事例と表記）。本節では、本事例についてGSM、MSM、週間アンサンブル予報システム、及びGSMガイダンスの予想の特徴について解説を行う。

次項以下では、第4.2.2項で本事例の実況について簡単に記述する。第4.2.3項では全球モデル(GSM)の予想結果について、第4.2.4項では週間アンサンブル予報システムの予想結果について、それぞれ特徴を記述する。第4.2.5項ではMSMの予想結果をGSMの予想と比較しながら、本事例での下層の風の予想についての特徴を解説する。第4.2.6項では太平洋側で観測された強風について、GSMとGSMガイダンスの予想を、観測と比較しながら検証する。第4.2.7項ではMSMとGSMの予想の降水の特徴とその要因について解説し、更に第4.2.8項では他の事例を引用した説明も交えて、GSMとMSMの予想に違いが生じる要因について考察する。

### 4.2.2 実況

図4.2.1に、本事例について6時間毎の低気圧の中心位置、及び中心気圧を示す。4月5日21JSTに東シナ海で発生した中心気圧1002hPaの低気圧は、6日の日中には対馬海峡を通過して日本海に入り、急速に発達しながら北東進した。7日09JSTには秋田沖で

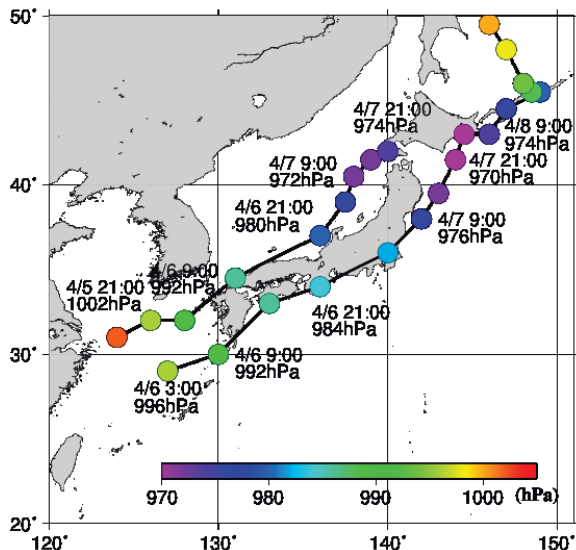


図 4.2.1 低気圧の中心位置、及び中心気圧。時刻は日本標準時(JST)。

中心気圧が972hPaとなり、同日21JSTに渡島半島付近まで進んで不明瞭になった。一方、6日03JSTに東シナ海で前述の低気圧の南に発生した中心気圧996hPaの低気圧は、同日九州の南から四国・紀伊半島の太平洋沿岸を通過した。7日朝までに東海・関東の沿岸を通過し、同日09JSTに金華山沖に達し

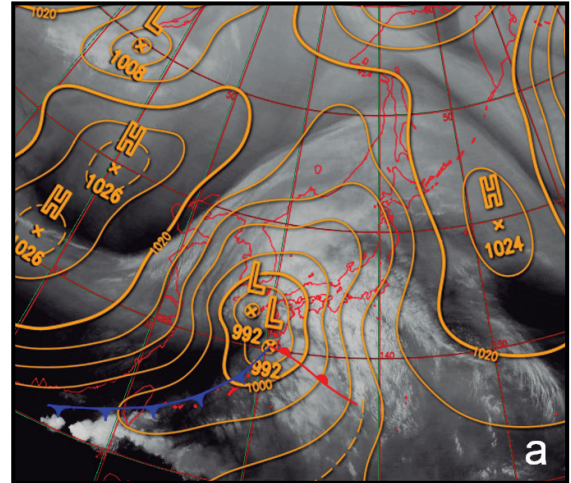


図 4.2.2 速報天気図（数値は気圧で、単位は hPa）と気象衛星ひまわりによる水蒸気画像の合成。a:4月6日09JST、b:6日21JST、c:7日09JST。

<sup>1</sup> 4.2.1, 4.2.9 坂本 雅巳、小泉 友延、原 旅人、4.2.2～4.2.5 坂本 雅巳、4.2.6 小泉 友延、4.2.7, 4.2.8 原 旅人































