

航空機の運航に影響を与える気象の高解像度数値予報

中山寛, 本田有機
気象庁

High-Resolution Numerical Prediction for Aviation Weather

by
Hiroshi Nakayama and Yuki Honda

ABSTRACT

The Japan Meteorological Agency (JMA) operates a suite of numerical weather prediction models; the meso-scale model (MSM), the regional model (RSM), and the global model (GSM) with horizontal grid spacing of 5 km, 20 km and 60 km respectively. In addition, a high-resolution local forecast mode (LFM) with grid spacing of 2 km has been developed so as to prevent disaster and maintain safe civil aviation at JMA. With this model, numerical experiments of a wind shear in Haneda Airport on 26 February 2006 associated with a cold front aloft (CFA) and dry trough were carried out on the supercomputer of CeNSS.

The LFM successfully reproduced the observed time series variation of the wind at Haneda Airport, although the MSM failed to predict the ending time of the southerly wind. The reason is that the dry trough interacted with CFA did not propagate correctly in the MSM. The analysis using the frontogenetical function reveals that the frontolysis led by the one vertical circulation near the nose of CFA took place and resulted to the prevention of intensification of the front. On the other hand, the LFM could simulate the several vertical circulations so that the frontogenesis and the frontolysis appeared at different circulations. These results suggest the frontogenesis (frontolysis) is occurring more appropriately at finer resolution.

1. はじめに

気象における数値モデルは、物理法則に基づいて計算機を用いて大気の状態を計算し、予測や研究に用いるものである。支配方程式系は、時間発展式と診断式の6つの基礎方程式からなっており、時間発展式である運動方程式には Navier-Stokes の式に重力や地球回転の効果であるコリオリ力を考慮している。

気象庁が現在運用している現業数値予報モデルには、表1に示すように、全球モデル(GSM)、領域モデル(RSM)、メソモデル(MSM)などがある。この中で最も解像度が高いものはメソモデルであり、水平格子間隔は5kmである。

メソモデルの降水形成過程にはバルク法に基づく雲物理過程モデルが用いられている。これは、水物質を水蒸気、雲水、雨、雲氷、雪、あられの6つに分類し、核形成、拡散、併合、分裂、落下、融解などの過程を通して混合比や数濃度を予報するものである。しかし、空間分解能が雲の空間スケールより粗いモデルでは、雲自体をモデルで陽に表現することが出来ないため、降水形成が遅れたり、降水域が過少になったりする場合がある。そこで、「仮想的な雲」を作成して、この「雲」によって熱や水物質の再配分を行わせる積雲対流パラメタリゼーションが必要となる。水平格子間隔5kmのメソモデルでも、積雲を十分に解像することができないため、雲物理過程モデルに加えて積雲対流スキームである Kain-Fritsch スキームを併用している。

気象庁では防災情報や航空気象情報のさらなる高度化のため、高分解能局地モデルの開発を行っている。水平格子間隔2km程度で非常に激しい雨、を予測ターゲットとするほか、急激な風、視程、悪天域などの変化を高精度で予想することを目指している。そこで今回は、航空機の運航に影響を与えるようなメソ γ ~メソ β (数km~数百km)のスケールの現象について、高解像度化によるインパクトを実際の事例について調べ、モデルの検証を行った。

表1 気象庁が運用している主な数値モデル

種類	格子間隔	用途	予報期間	実行回数
メソモデル MSM	5km	防災情報	15時間	1日8回
領域モデル RSM	20km	天気予報	2日間	1日2回
全球モデル GSM	60km	天気予報 週間予報	1.5~ 9日間	1日4回

2. 2006年2月26日の羽田空港の風向急変

2006年2月26日、房総半島から神奈川県沖の沿岸に局地的な前線(沿岸前線)があって、その内陸側にあたる羽田空港では北よりの風が続いていた。現業数値予報モデルは、午後には沿岸前線の南側に入って南よりの強風と強い雨を予想していたが、実況では関東地方の冷たい空気に阻まれ、沿岸前線は停滞していた。図1に示すように17時40分~18時20分の40分間だけ南よりの風が変わり、10分間平均で最大25KTの強風が吹いた。これにより、羽田空港では滑走路チェンジ及び着陸復行が多発し、一時空中待機が26機にも上り、航空交通流に大きな影響を与えた。

図2は2006年2月26日15時(左)と21時(右)の地上天気図である。低気圧が太平洋沿岸を東北東進しながら関東地方に接近していた。一方、日本海には別の低気圧があって、この低気圧から伸びる寒冷前線が急速に東進しながら近づいていた。図3は26日16時から20時の関東地方のレーダーの観測による降水強度とアメダスの観測による風の分布図である。この期間、内陸の気温は10℃以下(図省略)で西から北より風となっており、海岸部では暖かい南よりの風が吹いていて、沿岸前線(茶色の破線)がほぼ停滞していた。17時になると、埼玉県付近に100kmスケールの収束線(茶色の実線)が現れ、これが南東進して20時には沿岸の前線とひとつになった。また、収束線の南東側にはそれに対応して発散域が見られ、18時以降は収束線付近または進行方向前方に沿って降水域が見られた。そして、この収束線が接近したときに羽田空港で強風を伴う南よりの風が吹いた。図4は収束線が通過したときの熊谷と水戸のウィンドプロファイラーの東西風と水平風ベクトルの時間高度断面図である。上空3~7kmでは、弱い西よりの風と強い南よりの風による前線が見られる。この上空の前線と、地上の収束線の通過のタイミングはほぼ一致していた。

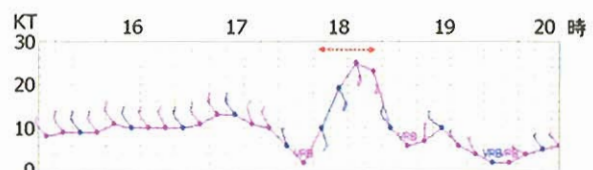


図1 2006年2月26日15~20時の羽田空港の風の変化。矢羽根は風の吹いてくる方向を示し、長い羽根が10KT、短い羽根が5KT。赤い矢印は南よりの風の時間帯。

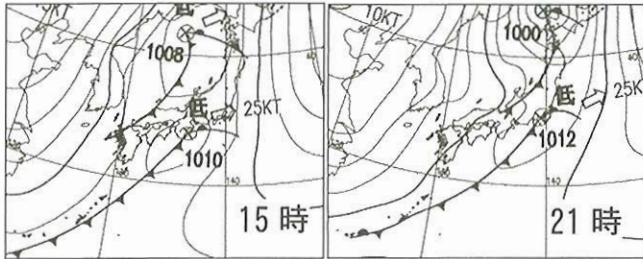


図2 2006年2月26日15時と21時の地上天気図

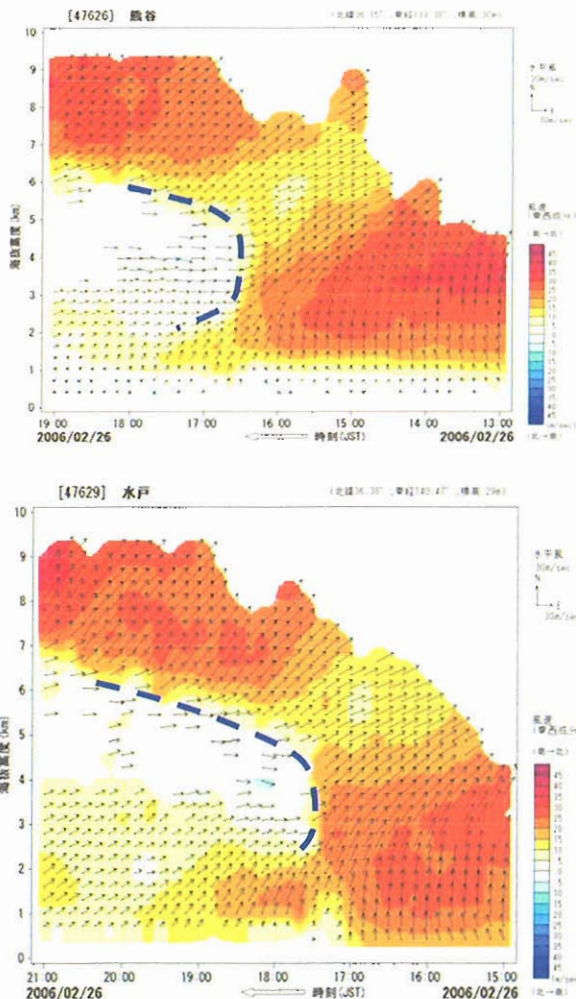


図4 収束線通過前後の熊谷と水戸のウィンドプロファイルの観測による東西風速と水平風ベクトルの時間高度断面図。

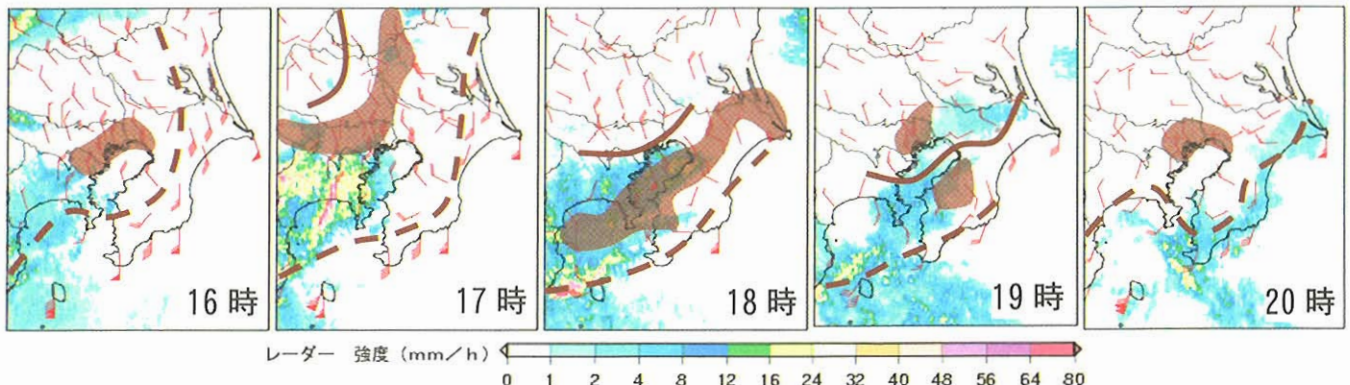


図3 2006年2月26日16時から20時の関東地方のレーダー観測による降水強度とアメダス観測による地上風。矢羽根は風の吹いてくる方向を示し、旗は10m/s、長い羽根が2m/s、短い羽根が1m/s。茶色の実線は収束線、茶色の破線は沿岸前線、茶色のハッチは発散域を示す。

3. 上空寒冷前線とドライトラフ

地上寒冷前線の前方にしばしば対流性の降雨バンドが出現することがある。冬から春のアメリカ中央部でしばしば観測されており、1950年頃からたくさんの研究がなされている。この現象は Locatelli ら(1995)によると、図5に示すようなメカニズムを持つ。低気圧が東進してロッキー山脈を越えるとき、メキシコ湾からの下層暖湿気がロッキー山脈の東側に沿って北上する。一方、低気圧に伴う寒冷前線面の背後にある低相当温位の空気は、ロッキー山脈を越えて沈降・断熱昇温して乾燥空気となる。両者が衝突し、温度傾度の弱い湿度前線を作る。地上の前線をドライトラフ、上空の寒気移流の前縁を上空寒冷前線(CFA)と呼ぶ。CFAの鼻より上の暖気側には前線強化過程による上昇気流が存在する。また、鼻の形をした密度の大きい寒気が侵入してくると、鼻の下の層内では静力学的に鼻の後から鼻先へ向かう圧力傾度が生じ、鼻の下と少しその後方に収束があり上昇流が生まれる。この上下の上昇流がひとつとなって降雨バンドが発生するというものである。

この構造は、先に示した観測結果と一致していることが分かる。したがって、17時頃に突然発生して南東進し、羽田空港を通過した収束線は、ドライトラフであったと考えられる。以降、この収束線をドライトラフと呼ぶことにする。

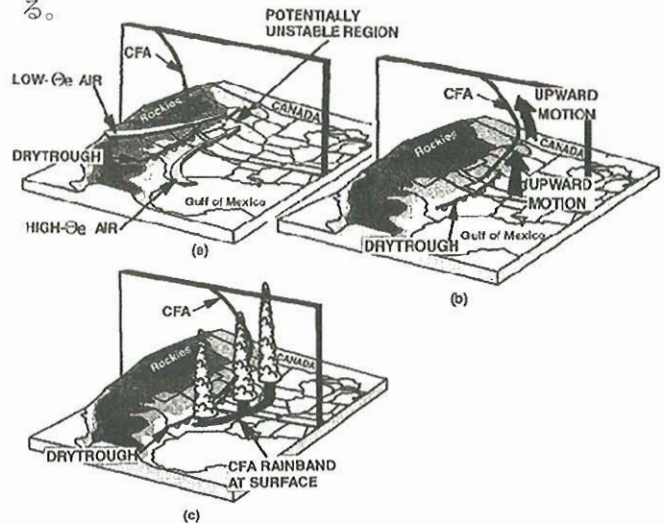


図5 ロッキー山脈の東側の上空寒冷前線(CFA)に伴う降雨バンド形成の模式図。(a)ロッキー山脈越えの暖かく乾燥した低相当温位の空気とメキシコ湾からの暖かく湿った高相当温位の空気が出会い、ドライトラフの東側に対流不安定域を作る。(b)CFA に結びついた上昇流域。(c)CFA とドライトラフに対する CFA 降雨帯の位置(Locatelli et al. 1995)。

4. CeNSS を用いた気象の高解像度計算

これまで述べた現象に関して、気象庁が現在運用している数値予報モデルの予想結果と実験中の高分解能局地モデルの予想結果を比較し、再現性の違いを考察する。

はじめに、解像度の低い順に数値予報モデルの大まかな計算方法を述べる。領域モデル(RSM)は、RSMの前回予報値を第一推定値として4次元変分法で解析(データ同化)したものの初期値とし、全球モデル(GSM)の予報値を側面境界値として実行される。RSMは09時と21時の1日2回、解析及び予報を行っている。2006年2月26日09時初期値の予報結果を比較対象とする。メソモデル(MSM)もRSM同様に、MSMの前回予報値を第一推定値として4次元変分法で解析(データ同化)したものを初期値とし、RSMの予報値を側面境界値として実行される。MSMは00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21時の1日8回、解析及び予報を行っている。風向急変のあった時刻の直近にあたる2006年2月26日15時初期値の予報結果を比較対象とする。

高分解能局地モデル(LFM)は実験段階のため、初期値はMSMの予報値を内挿したものを用い、側面境界値もMSMの予報値を用いる。また、RSM、MSMは積雲対流パラメタリゼーションを併用しているが、LFMは積雲を解像しているとして積雲対流パラメタリゼーションを併用せず、雲物理過程のみを用いる。各モデルの仕様を表2に、計算領域を図6に示す。

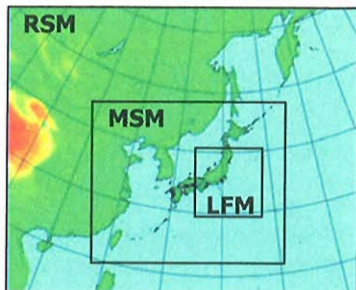


図6 領域モデル(RSM)、メソモデル(MSM)、高分解能局地モデルの計算領域。

5. 各モデルの予報結果

図3に示したように、実況では房総半島から神奈川県沖に沿岸前線がほぼ停滞していた。図7はRSMの予報結果であるが、沿岸前線の位置が内陸にずれており、羽田空港(赤×)に南よりの強風をもたらしたドライトラフは予想されていない。図8はMSMの予報結果である。沿岸前線の位置は、図3の実況とほとんど同じで、100kmスケールのドライトラフも予想されている。なお、RSMとMSMの予想の違いは、解像度によるものではなく、より最新の観測データを使って行われた解析によるものである。RSMと同じ09時初期値のMSMの予想では、やはり沿岸前線の位置は内陸側へずれていた(図省略)。図9は高分解能局地モデルの予想で、図8のMSMの予想とほとんど同じだが、18時から19時の収束線の位置がMSMより南東進している。

図10は羽田空港におけるアメダスと各モデルの風向風速の時系列である。RSMは期間中ほとんど南よりの風を予想しているが、MSMと高分解能局地モデルは北よりの風を予測し、一時的な南よりの強風をある程度予想している。しかし、高分解能局地モデルは実況と同じ40分程度で北よりの風に戻ったのに対して、MSMはさらに2時間近く南風を継続させている。ドライトラフの北西側は北よりの風となっており、南東側では南よりの風となっている。図8と図9の19時のドライトラフの位置を比較すると分かるように、高分解能局地モデルはわずか十数kmであるが、羽田を通過して南下している。つまり、MSMでは収束域が羽田空港をなかなか通過しなかったため、南よりの風が長引いたが、高分解能局地モデルは数十分で通過したため、実況と同じ風の変化が表現できたということである。

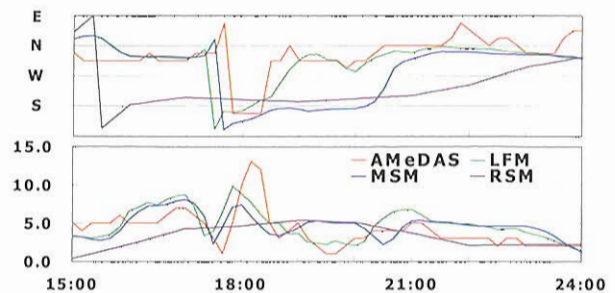


図10 2006年2月26日15時から24時までのアメダスと各モデルが予想した羽田空港の風向(上)と風速(下)。風速の単位はm/s。

表2 各数値モデルの仕様

	領域モデル RSM	メソモデル MSM	高分解能局地 モデル
初期時刻	2006.2.26 09JST	2006.2.26 15JST	2006.2.26 15JST
初期値	領域解析	メソ解析	MSM 予報値
境界値	全球モデル	RSM	MSM
格子数	325×257×40	721×577×50	600×600×60

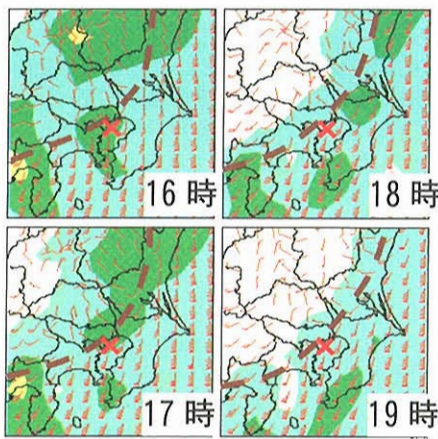


図7 2006年2月26日09時初期値のRSMの16時から19時の1時間降水量と地上風の予想。矢羽根と茶線は図3と同じ。

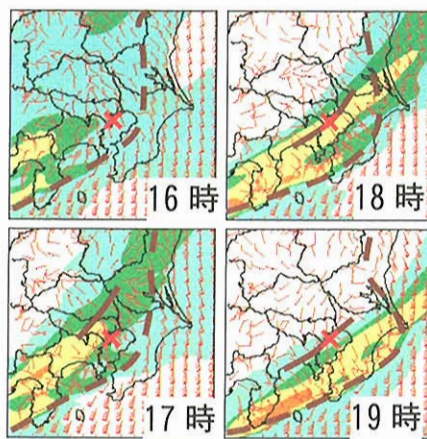


図8 2006年2月26日15時初期値のMSMの16時から19時の1時間降水量と地上風の予想。矢羽根と茶線は図3と同じ。

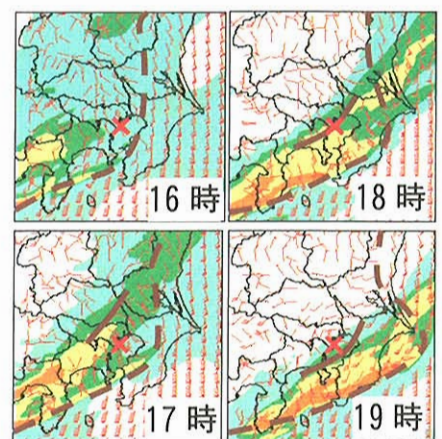


図9 2006年2月26日15時初期値の高分解能局地モデルの16時から19時の1時間降水量と地上風の予想。矢羽根と茶線は図3と同じ。

6. 上空寒冷前線とドライトラフの構造

本来、寒冷前線は寒気が暖気の下面にもぐりこんで出来る前線なので、温度によって識別される。しかし、寒冷前線がロッキー山脈のような山岳を越えて進むとき、3で述べたように、寒冷前線の背後にある低相当温位の空気が沈降・断熱昇温して乾燥空気となるため、温度傾度は小さくなるが、湿度では明瞭に識別されるようになる。関東地方においても、寒冷前線が日本海から関東地方へ進んでくるとき、越後山脈などの脊梁山脈を越えるため、同様の現象が起きうると考えられる。

図 11 は、2006 年 2 月 26 日 16 時から 19 時の 1 時間ごとの高分解能局地モデルの図中 A-B に沿った湿度、鉛直速度の断面図である。湿度傾度の大きいところを CFA として青い破線で示している。また、ドライトラフと沿岸前線の断面図上の位置をそれぞれ青色と茶色の矢印で示した。沿岸前線の位置は期間中ほとんど変化しないが、乾燥した空気が関東平野上空へ進んでくる 17 時頃に、CFA の鼻の下にドライトラフが見られるようになる。そして、乾燥空気および CFA は時間とともに進行し、それにつれてドライトラフも進行している。また、CFA の鼻の暖気側には高度 2km より上方に最大 2m/s 程度の上昇流と、寒気側の高度 4km 以下には下降流からなる前線強化過程に伴う鉛直循環が見られる。なお、沿岸前線上にも上昇流が見られるが、これはほぼ停滞している。

図 12 は図 11 と同様だが、MSM によるものである。解像度が低いため上昇流の最大 0.2m/s 程度と小さく、下降流も弱い。しかし、18 時頃までの CFA や鉛直速度の分布は概ね同じで、ドライトラフの位置にも違いはない。しかし、19 時になると CFA の鼻の暖気側の上昇流は弱まり、沿岸前線のものひとつになっている。そして、湿度の分布を見ても分かるように、脊梁山脈を越えてくる低相当温位の空気の進行が高分解能局地モデルに比べて遅れている。図 13 は、高分解能局地モデルと MSM の風の東西成分の違いを表した断面図で、高分解能局地モデルから MSM を引いたものである。また、高分解能局地モデルの CFA も合わせて示している。CFA の鼻先に沿って暖気側で前線に向かう風が強まっており（青い領域）、寒気側でも前線に向かう風の強まっている領域（黄色い領域）が東西方向に広がっている。したがって、この CFA の鼻先付近の風速の増大は、高分解能局地モデルの前線活動が活発であったためと考えられる。これによって、高分解能局地モデルは、低相当温位の空気をより進行させ、結果として、ドライトラフが南東進した。

7. 上空寒冷前線の強化過程

前線の強化を量的に表す物理量として、一般に温位の水平傾度の時間微分をとったものが知られ、これは前線形成関数（例えば小倉，2000）と呼ばれている。

$$F \equiv \frac{d}{dt} |\nabla_h \theta| \quad (1)$$

前線の強化及び弱体化がどのような要素によって生じているかを調べるため、式(1)を以下のように分解する。

$$F = \text{合流項} + \text{水平シア項} + \text{傾斜項} + \text{非断熱項} \quad (2)$$

式(2)の各項は、

$$\text{合流項} = -\frac{1}{|\nabla_h \theta|} \left\{ \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right\}$$

$$\text{水平シア項} = -\frac{1}{|\nabla_h \theta|} \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\text{傾斜項} = -\frac{1}{|\nabla_h \theta|} \left(\frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$$

$$\text{非断熱項} = \frac{1}{|\nabla_h \theta|} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \right\}$$

である。ここで、 θ は温位、 ω は鉛直 P 速度である。合流項と水平シア項はそれぞれ、合流及びシア変形によって前線が強化される効果である。傾斜項は、一般に上空ほど温位が高くなっているため、寒気側に上昇流、暖気側に下降流という循環があるときに鉛直の移流によって水平温度傾度が強化される効果である。非断熱項は、放射や凝結によって生じる加熱分布の違いによる効果である。

図 14 は、高分解能局地モデルと MSM の前線形成関数の断面図で、それぞれの CFA も合わせて示している。CFA の鼻先に注目すると、高分解能局地モデルは前線強化と弱体化が交互に分布しているが、MSM は明らかに前線弱体化が生じている。図 15 と図 16 は、それぞれ高分解能局地モデルと MSM の前線形成関数の各要素である。前線を弱体化させているのは傾斜項であることが分かる。図 11 を見て分かるように、MSM は CFA の暖気側にひとつの上昇領域があり、これに対応して前線の弱体化が起こっているが、高分解能局地モデルは上昇領域が複数に分かれていて、前線強化と弱体化が交互に現れて全体としての弱体化を抑制している。

8. まとめ

気象庁が現在運用している数値予報モデルの中で最も解像度が高いのは、水平格子間隔 5km のメソモデル(MSM)である。また、気象庁では防災情報や航空気象情報のさらなる高度化のため、水平格子間隔 2km の高分解能局地モデルの開発を行っている。

2006 年 2 月 26 日 18 時頃に羽田空港で 40 分間の南よりの強風が吹いたため、滑走路チェンジ及び着陸復行が多発し、航空交通流に大きな影響を与えた。この現象は、上空寒冷前線(CFA)とそれに伴うドライトラフによるもので、水平スケールは 100km 程度だった。どちらのモデルもドライトラフを表現することが出来たが、MSM は南よりの風の継続時間が実況に比べて 2 時間程度長く、高分解能局地モデルは実況とほぼ一致していた。これは、高分解能局地モデルが実況どおりドライトラフを進行させていたのに対して、MSM は停滞させていたためだった。前線形成関数を用いて検討した結果、MSM では、CFA の暖気側に生じたひとつの鉛直循環が CFA 自体を前線弱体化させて、CFA 背後の低相当温位の空気の進行を弱めていたことが分かった。一方、高分解能局地モデルにも鉛直循環は生じていたが、それは複数存在しており、前線強化と前線弱体化が交互に現れて、全体として弱体化しなかったため、CFA 背後の低相当温位の空気を呼び込み、ドライトラフを進行させていた。

今後も引き続き、航空機の運航に影響を与えるような現象について、高解像度計算を行い、予測精度の向上やメソスケールの気象現象の解明につなげていきたい。

参考文献

- 1) Locatelli, J. D., et al., 1995: Structure and Evolution of Winter Cyclones in the Central United States and Their Effects on the Distribution of Precipitation. Part III: The Development of a Squall Line Associated with Weak Cold Frontogenesis Aloft. Mon. Wea. Rev., 123, 2641-2662
- 2) 小倉義光, 2000: 総観気象学入門, 東京大学出版会, 289pp.

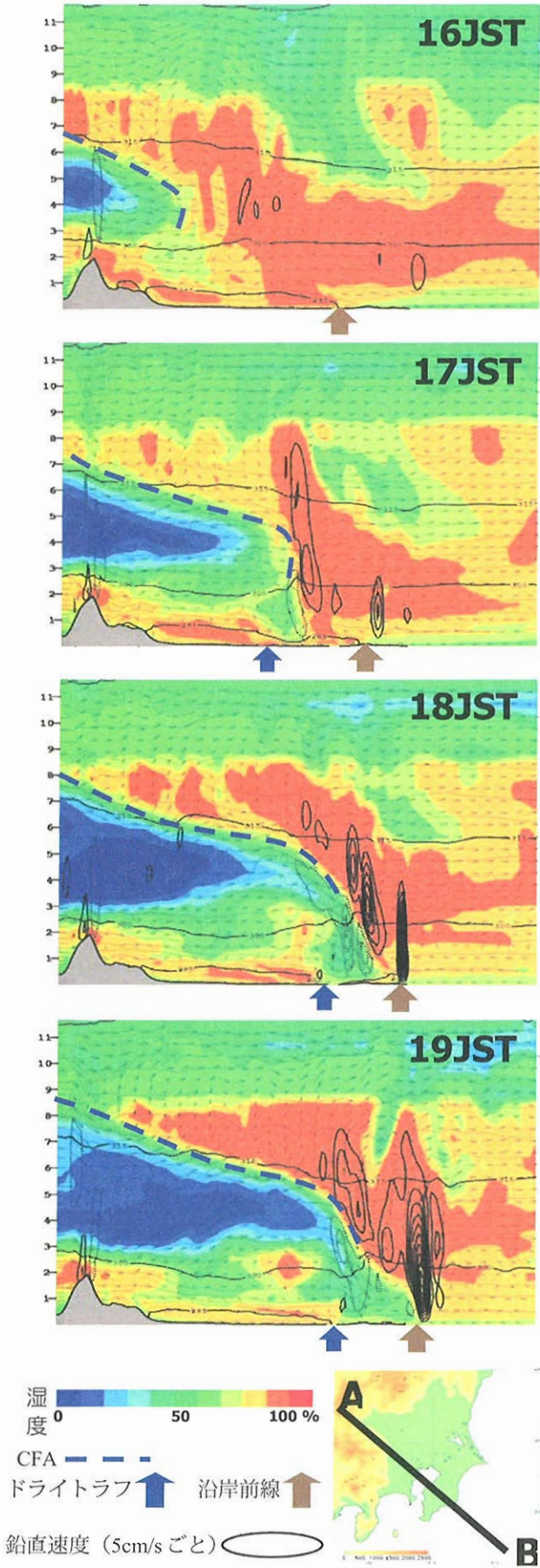


図 11 2006年2月26日16時から19時の高分解能局地モデルの図中A-Bに沿った湿度、鉛直速度の断面図。

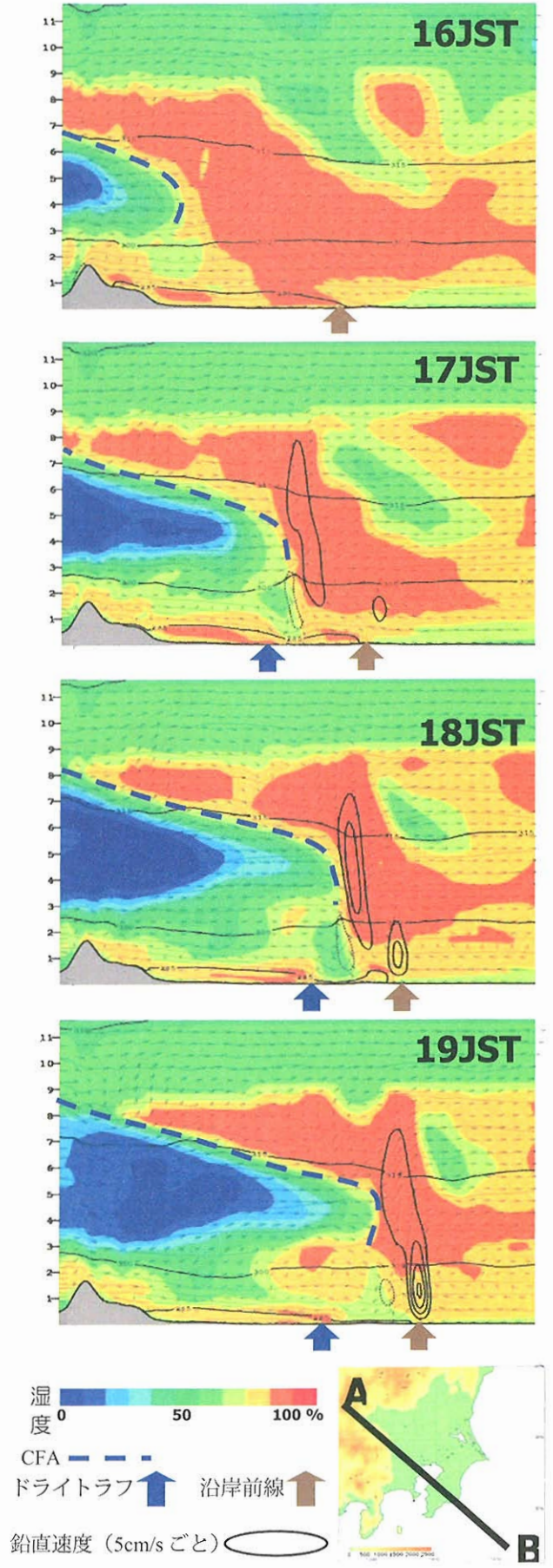


図 12 2006年2月26日16時から19時のメソモデルの図中A-Bに沿った湿度、鉛直速度の断面図。

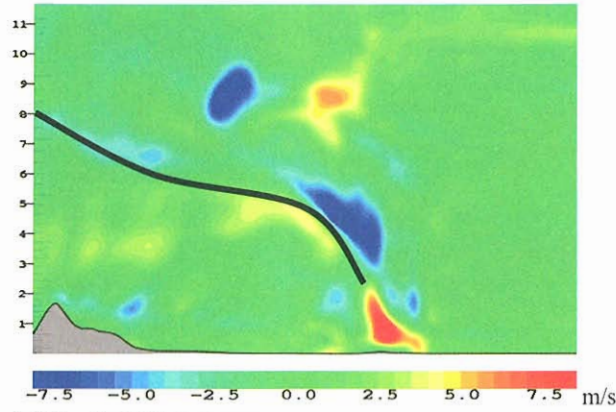


図 13 2006年2月26日18時の風の東西成分の差（高分解能局地モデルーメソモデル）。実線はCFA。断面は図11と同じ。

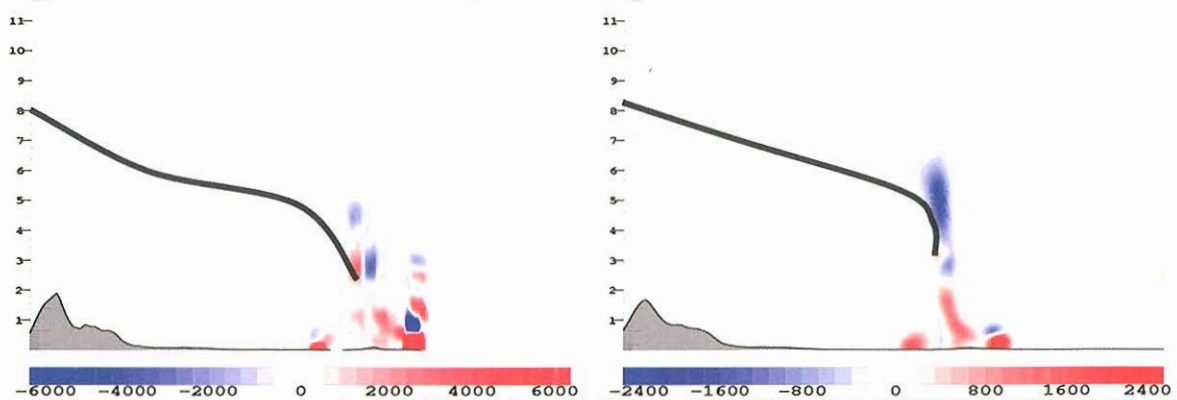


図 14 2006年2月26日18時の高分解能局地モデル（左）とメソモデル（右）の前線形成関数の断面図。単位は $10^{-1}K/100km \cdot 3時間$ で、赤は前線強化、青は前線弱化。実線はCFA。断面は図11と同じ。

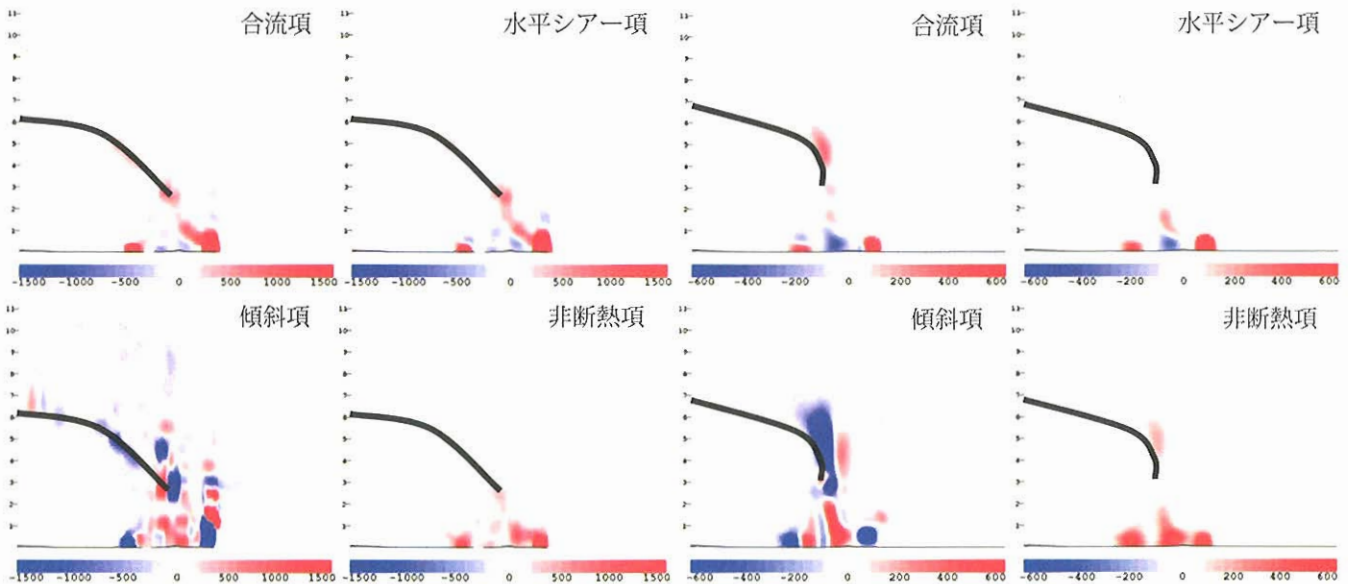


図 15 2006年2月26日18時の高分解能局地モデルの前線形成関数の各要素の断面図。単位は $10^{-1}K/100km \cdot 3時間$ で、赤は前線強化、青は前線弱化。実線はCFA。断面は図11と同じだが、CFAの鼻付近を拡大。

図 16 2006年2月26日18時のメソモデルの前線形成関数の各要素の断面図。単位は $10^{-1}K/100km \cdot 3時間$ で、赤は前線強化、青は前線弱化。実線はCFA。断面は図11と同じだが、CFAの鼻付近を拡大。