

## 気象の高解像度数値予報

中山寛, 藤田司

気象庁

## High-Resolution Numerical Weather Prediction

by

Hiroshi Nakayama and Tsukasa Fujita

Japan Meteorological Agency

## ABSTRACT

A high-resolution numerical atmospheric model for disaster prevention and safe civil aviation has been developed at Japan Meteorological Agency. With this model, numerical experiments of a coastal front over Kanto Plane occurred on 5 December 2004 associated with a highly developed low were carried out on the supercomputer of CeNSS because the high-resolution experiments in a large domain requires powerful computer resources. The model results showed that the three-dimensional structure of the coastal front was well reproduced as the model grid resolution becomes finer, from 2 km to 0.5 km. This result suggests the turbulent kinetic energy is estimated more appropriately at finer resolution.

The performance of the high-resolution model was examined further by energy spectra of horizontal winds as a function of wave number( $k$ ). It was found that the energy spectra obeys approximately the  $k^{-5/3}$  spectral character of the observational spectra; this suggests that the high-resolution model simulates well the atmospheric condition.

## 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。

非粘性・断熱のモデル格子で直接表現できない現象、すなわちモデルの分解能より細かい現象、非断熱の現象、地表面状態など、大気の流れや温度場に作用する過程もモデルに含めないと、大気の状態を適切に再現できない。これらを物理過程（またはパラメタリゼーションともいう）と呼んで、気流の場を決める力学過程と区別している。物理過程には、大気と地表面との相互作用や降水過程、放射過程などがある。2節では、解像度と関係の深い物理過程の中から、降水形成過程と乱流過程について説明する。

気象庁が現在運用している現業数値予報モデルには、全球モデル (GSM)、台風モデル (TYM)、領域モデル (RSM)、メソモデル (MSM) 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 10km である。このモデルの運用は、防災気象情報の高度化を支援することを目的に 2001 年 3 月から開始された。当初は静力学近似を適用したメソモデル (静力学 MSM) によって 1 日 4 回 18 時間予報を行っていた。2004 年 9 月には、モデルのさらなる高解像度化にも対応するため、静力学 MSM から、静力学近似を行わないメソモデル (非静力学 MSM) による運用を開始した。さらに、2006 年 3 月からはより高解像度の水平格子間隔 5km での運用を開始する予定で

ある。

一方、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、高解像度局地モデルの開発を行っている。特定の都市や主要空港など限定的に水平格子間隔 2km 程度で短時間予報し、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す。この目的のため、非静力学モデル (NHM) の解像度を 5km から 500m まで向上させ、局地的な激しい気象現象を高分解能で予測するための数値予報モデルの開発を CeNSS 上で行っている。本研究では高解像度モデルがおもに対象とするメソ $\alpha$ ~メソ $\beta$  (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ている。3 節では、メソスケールの現象である沿岸前線を対象に行った実験について述べる。

モデルの解像度を高くすると、現象の 3 次元構造はよりよく表現されるが、発現時刻や発現場所のずれは避けることができないことが指摘されている。また、計算結果を評価するための高密度の観測データには限界がある。このため、別のアプローチとして、大気のパワースペクトルを評価することによって高分解能モデルの性能の検証を試みた。4 節では、水平風のパワースペクトルから行ったモデルの評価について述べる。

## 2 気象における数値モデルの物理過程

モデルの解像度を向上させた場合、地形の影響に起因するような現象 (強制モード) の予測精度は一般的に向上するが、梅雨前線帯の中規模降水系など (自由モード) の予測精度はいつも向上するわけではないことが知られている [1]。これは、じょう乱の発達・維持にとって重要な物理過程にも解像度に見合った精度が必要であることを





界層内や上端付近では以下の式で求められた混合距離が  $z$  方向で使われる。

$$l_{\infty} = 0.25 \left[ 1.8 h_{PBL} \left\{ 1 - \exp \left( -4 \frac{z - z_s}{h_{PBL}} \right) - 0.0003 \exp \left( 8 \frac{z - z_s}{h_{PBL}} \right) \right\} \right]$$

$h_{PBL}$  は仮温位の鉛直プロファイルを用いて、以下の条件が成り立つ最大の高度  $h$  としている。

$$\theta_v(z) < \theta_{va} \quad z < h$$

ここで、 $\theta_v$  は水蒸気を考慮した仮温位で、 $\theta_{va}$  は地表の仮温位である。

### 3 CeNSS を用いた気象の高解像度計算

高分解能モデルを実行するにあたり、粗いモデルから順次高分解能モデルへのネスト（より高分解能のモデルを入れ子にしていく）が必要となる。これは、初期値・境界値の分解能が粗いと、境界での情報不足のために解像度に応じた予報ができない可能性があるからである。また、モデルの境界付近で計算不安定が起きやすくなる問題もある。今回の実験では、高分解能モデルを実行するために、次のような手順に従った。図2に示すように初めに格子間隔 5km のモデル (5-km NHM) を実行する。このとき、初期値には気象庁で運用しているメソモデルのための局地解析 (格子間隔 10km)、境界値には領域モデルの予報結果 (格子間隔 20km) を用いる。次に格子間隔 5km のモデルの結果を用いて格子間隔 2km のモデル (2-km NHM) を実行し、その結果を用いて格子間隔 500m のモデル (500-m NHM) を実行した。それぞれの初期値・境界値は 1 段階粗い格子間隔のモデルの予想結果を用いた。5-km NHM では雲物理過程モデルに Kain-Fritsch 対流パラメタリゼーション (K-F) を併用し、2-km NHM と 500-m NHM では雲物理過程モデルだけを用いた。各格子間隔でのモデルの仕様は、表2に示すとおりである。

実際に起きた激しい気象現象について、高分解能モデルを用いてシミュレーションを行った。台風第27号が2004年12月4日に東シナ海で温帯低気圧に変わり、急速に発達しながら5日朝にかけて本州を通過した。これに伴って、全国的に大荒れの天気となり、千葉市では最大瞬間風速 47.8m/s の強風が観測され、熊谷市では最高気温 26.3℃と記録的な高温となった。図3は気象庁で運用している変分法を用いたメソ客観解析の高度約 500m の風速とそのベクトルの分布で、地上前線を重ね合わせている。台風が温帯低気圧の構造に変化して再発達するにつれ、南西風が次第に強まっていったが、5日03時では関東付近に強風が見られない。図4は、アメダスによる気温と風の分布である。矢羽根は風の吹いてくる方向を示し、風速が強いほど羽根の数は多い。気温 12℃以下、風速 4m/s 以下の冷気が、夜間に内陸で形成されているが、低気圧にともなう温暖前線の接近で、南西 10m/s 以上の強風域が南から広がり、冷気との間で大きな温度

傾度と風の不連続が現れている。これは沿岸前線と呼ばれ、より大きなスケールの温暖前線や寒冷前線と区別されるメソスケールの現象である。

図5は、500-m NHM の計算領域で、5日6時の地上における気温と風の分布の計算結果を各解像度で比較したものである。アメダスと比較すると、沿岸前線は低い解像度でも表現されているが、その位置は解像度を上げることでよりよく表現されていることがわかる。

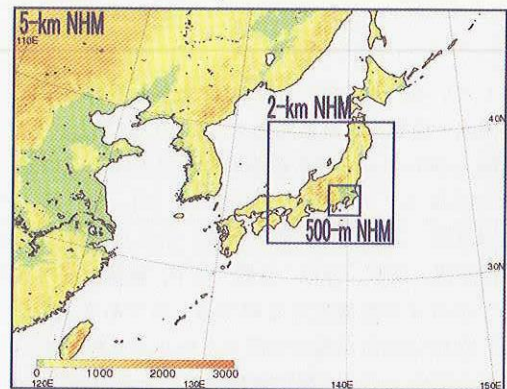


図2: 格子間隔 5km, 2km, 500m のモデルの計算領域

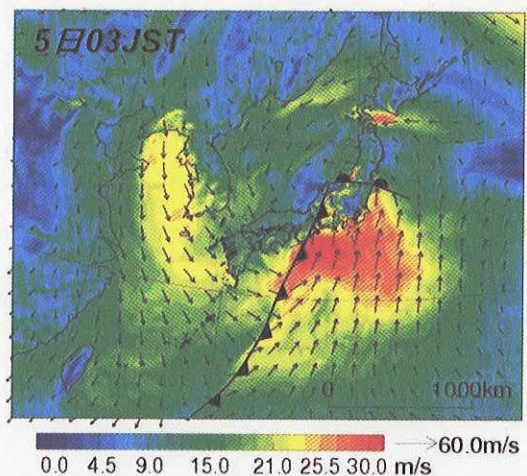


図3: 2004年12月5日3時のメソ客観解析。高度約 500m の風速とそのベクトルと地上前線。

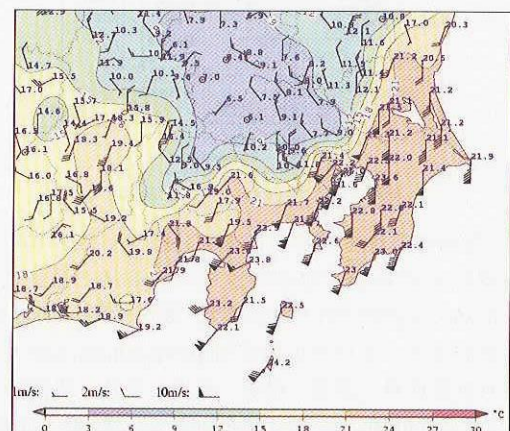


図4: 2004年12月5日6時のアメダスによる気温と風の分布。



表 2: 各格子間隔の NHM の仕様

	5-km NHM	2-km NHM	500-m NHM
初期時刻	2004.12.04 12UTC	2004.12.04 15UTC	2004.12.04 18UTC
予報時間	12 時間	9 時間	6 時間
初期値	MSM 解析値 (10km)	5-km NHM 予報値	2-km NHM 予報値
境界値	RSM 予報値 (20km)	5-km NHM 予報値	2-km NHM 予報値
降水形成過程	雲物理 +K-F	雲物理	雲物理
格子数 (X×Y×Z)	719×575×50	500×500×60	500×500×60
$\Delta t$	24 秒	10 秒	3 秒
ノード数*	8×4+1	5×5+1	8×6+1
計算時間 (CPU 時間)	6.4 時間 (5)	7.7 時間 (6)	9.1 時間 (7)

\* 計算領域を縦×横のように水平方向に分割し、計算時間短縮のために出力専用ノードを 1 ノード使用している。1 ノードにつき 4 プロセス使用。

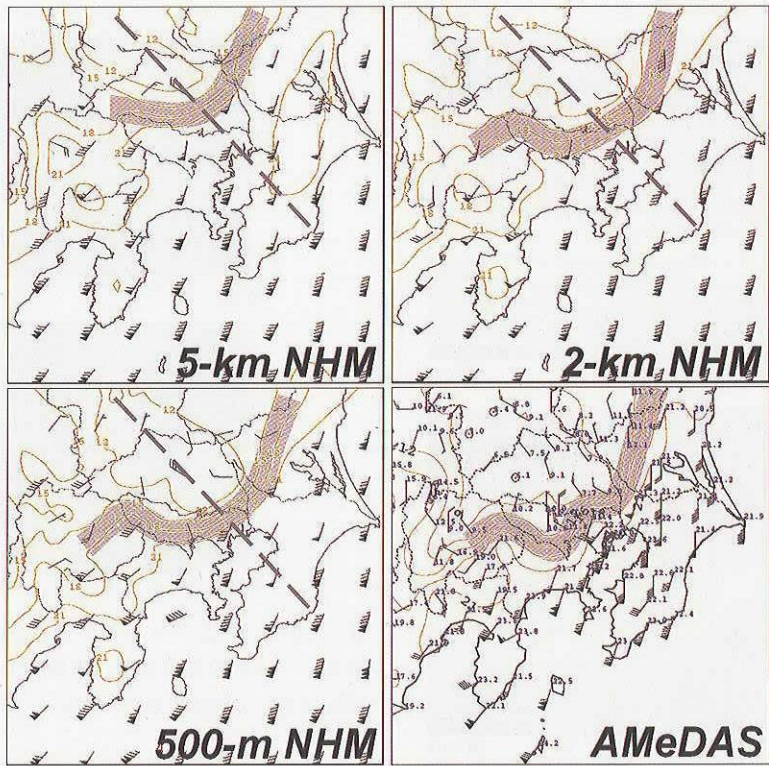


図 5: 2004 年 12 月 5 日 6 時の各解像度の予報とアメダスの気温と風の分布。陰影は沿岸前線に対応する領域。破線は図 6、図 7 の断面の位置。矢羽根は図 3 と同じ。

図 6 は 5 日 6 時の各解像度の NHM の沿岸前線を横切る鉛直断面図である。等風速線と温位が描かれており、暖色系のほうがより温位が高いことを示している。風速約  $5\text{ms}^{-1}$  以下かつ温位  $290\text{K}$  以下の青い領域が冷気に対応し、断面図中央に風速の水平勾配の大きな前線面がある。5-km NHM の冷気は薄く、内陸側へ後退している。図 7 は 5-km NHM から 500-m NHM、2-km NHM から 500-m NHM の風速を引いたものである。赤いほど風速の正の偏差が大きいことを示している。断面に沿って風速差を見ると、前線面に沿って 5-km NHM と 500-m NHM の風速差が大きくなっており、冷気内での差は小さい。冷気の進行速度は冷気内の風速と暖気内（沿岸前線の南側）の風速に比例するので、5-km NHM の冷気の後退は、暖気側の強風の寒気側への拡大によってもたらされているこ

とが分かる。なお、2-km NHM で風速差が大きくなっているのは、高度  $1\text{km}$  付近の前線面であり、冷気の進行にはほとんど影響ないが、環境としての流れ場の違いから冷気流のヘッドの形状に違いが現れている。

図 8 は移動する大きなスケールの温暖前線にあわせて各予報時刻で前線を横切るようにとった断面図で、5-km NHM から 2-km NHM を引いた風速（等値線）と乱流エネルギーを示している。乱流エネルギーの差の大きい場所で風速差が大きくなっており、渦拡散によって、強風域が北へ広がっていることが分かる。両者の違いは、non-local 風境界層過程によって 5-km NHM の混合層内の乱流エネルギーが大きくなっていることによる。2 頃までは前線が海上にあって海面温位が高いため、混合層の高さが高く、両者の違いが高度  $1\text{km}$  を越えている



が、3 時頃からは前線は陸上に到達し、地表面温位が低いために混合層の高さが低くなって、違いは高度 500m 付近までに抑えられている。図 7 をもう一度見ると、5-km NHM には non-local 風境層過程が使われているので、高度 500m 付近にも風速の違いが現れているが、2-km NHM と 500-m NHM は non-local 風境層過程を用いていないので、むしろ高度 1km 付近に風速の違いが現れていると考えることが出来る。なお、乱流エネルギーは前線面の鉛直シヤーとその移流による寄与が優勢であった。このことから、5-km NHM の関東付近の沿岸前線の内陸への後退は、関東以遠から進んできた温暖前線の前線面での風速分布の分解能や乱流過程による予想誤差がもたらしたものであることが分かった。

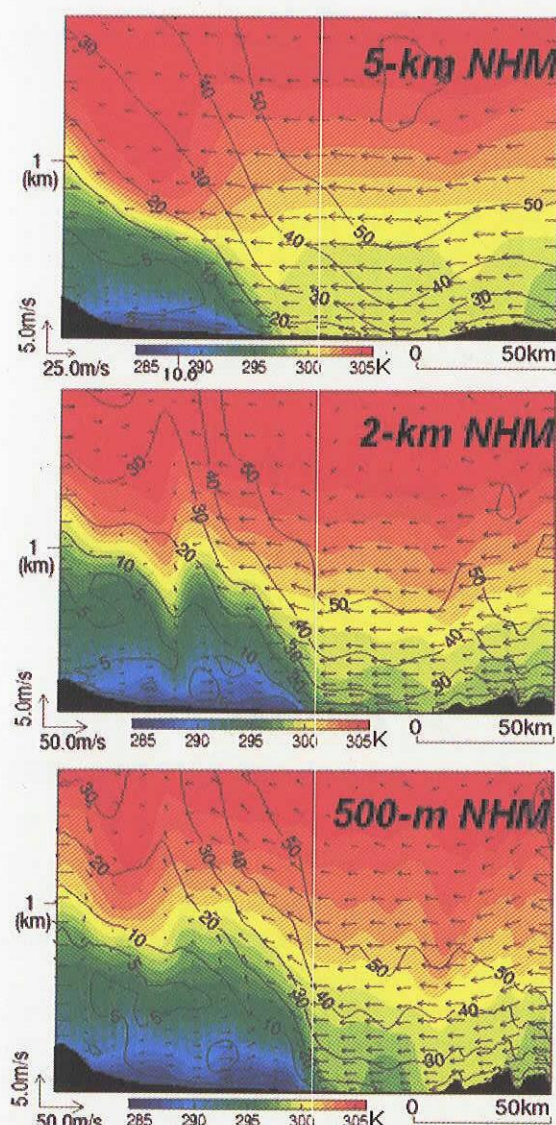


図 6: 2004 年 12 月 5 日 6 時の沿岸前線を横切る図 5 の破線に沿った鉛直断面図。風速の等値線と温位の分布。図中下方の黒は地形。

#### 4 気象の数値モデルにおける大気スペクトルの評価

モデルの予想結果がどれだけ正確かを評価する場合、実際に観測された雨や風などの気象要素と比較することがもっとも有効である。しかし、モデルの水平分解能を向上させると、現象の 3 次元構造はよりよく表現される一方で、発現時刻や発現場所のずれは避けることができないとも言われている。このずれによって、従来の一般的検証方法では高解像度化の効果が正当に評価できない場合がある。ここでは、別のアプローチとして、大気のパワースペクトルを評価することによって、モデル性能の検証を試みた。

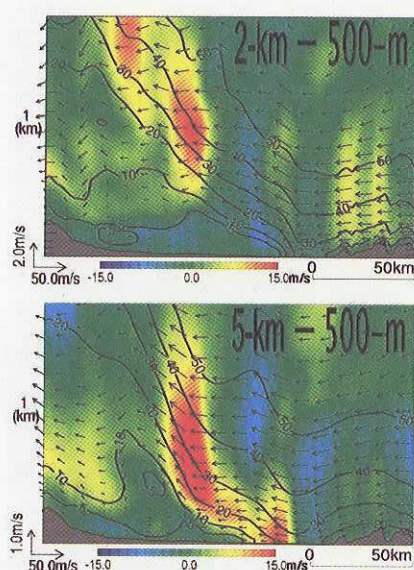


図 7: 2004 年 12 月 5 日 6 時の沿岸前線を横切る図 5 の破線に沿った鉛直断面図。解像度による風速の違い。等値線は粗い分解能の風速。図中下方のグレーは地形。

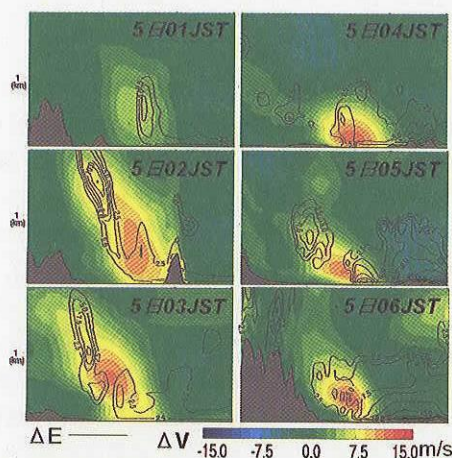


図 8: 移動する温暖前線に合わせてとった鉛直断面図。5-km NHM から 2-km NHM を引いた風速差の分布と乱流エネルギーの差の等値線。図中下方のグレーは地形。



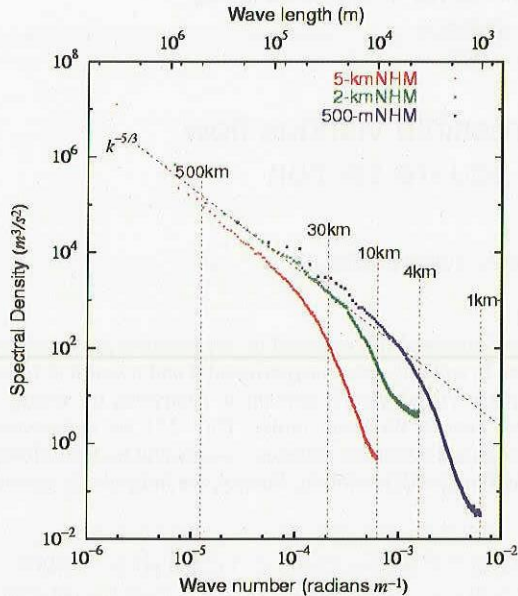


図 9: 2004 年 12 月 5 日 6 時の各解像度の計算結果から求めた自由大気中の東西風のパワースペクトル。

1960～1980 年代に航空機を使った大気中の水平波数スペクトルの観測が行われた。その観測結果からスペクトルについて次のことが分かっている。高気圧や低気圧などの数千 km のスケールではスペクトルの傾きが波数の-3 乗となっており、準地衡風乱流によるエンストロフィーのカスケードが原因とされている [6]。また、およそ 500km 以下のメソスケールではスペクトルの傾きが波数の-5/3 乗となっており、3 次元乱流によるエネルギーのカスケード、または、2 次元乱流 (成層乱流) によるエネルギー (対流や内部重力波) の逆カスケードの 2 説が提案されている。

パワースペクトルからモデルの高解像度化の妥当性を評価する場合は、最大波数付近のスペクトルに着目する [7]。現実の大気では、高波数へカスケードしたエネルギーは、最終的に粘性によって熱となって消散する。また、数値計算に伴う離散化のエラーは最大波数領域でもっとも大きい。スペクトルの傾きが観測結果と一致し、最大波数付近で急激に減衰するという事は、大気中の諸現象が適切に扱われ、乱流過程やフィルターが解像度を損なわずに離散化のエラーを取り除いているということである。また、波数の-5/3 乗のスペクトルから急激に減衰し始める格子間隔が実効的な格子間隔といえることができる。

図 9 は、東西風のパワースペクトルを各解像度で比較したものである。スペクトルに非現実的なピークなどがないことから、モデルは大気の状態を適切に計算していることが分かる。5-km NHM の波長 500km 以下のメソスケール領域でパワーがやや小さくなっているのは、計算領域の違いによるものと考えられる。500-m NHM は逆に波長 10km から 100km でパワーがやや大きくなって

いるが、これはフーリエ変換に伴うトランケーションエラーである。また、実効格子間隔はだいたい  $10\Delta x$  と見ることができるが、計算モードのエラーを抑えるためとは言っても、やや大きく、乱流過程やフィルターの調整の必要があるかもしれない。

## 5 まとめ

水平格子間隔を 5km から 500m まで解像度を向上させ、局地的な激しい気象現象の高解像度予測のための数値予報モデルの性能を評価した。解像度を上げると沿岸前線の位置がよりよく表現されるようになった。これは、解像度を上げることによって、乱流エネルギーの評価がより妥当となり、大気境界層内の温暖前線面での風速分布が正確に予報されるようになったためであると考えられる。

モデルの水平分解能を向上させると、地形に影響を受ける気流の表現が現実近づき、積雲対流の組織化を陽に表現できるなどのメリットがある。ただし、現象の 3 次元構造はよりよく表現される一方で、発現時刻や発現場所のずれは避けることができないとも言われている。モデル性能の評価方法にも検討が必要である。ひとつのアプローチとして、モデル大気のパワースペクトルを解析した結果、これまで観測された結果とよく一致し、最大波数領域でのエネルギーの減衰も適切であった。しかし、スペクトルから得られた実効格子間隔はやや大きめで、乱流過程やフィルターの調整の必要があるかもしれない。

今後も引き続き、顕著な悪天事例を中心に高解像度計算によるモデルの検証を行い、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行きたい。

## 参考文献

- [1] 永田雅, 1994: 数値予報の実際. 数値予報課報告・別冊 41 号, 112-144
- [2] 山田芳則, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 52-74
- [3] Molinari, J., and M. Dudek, 1992: Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 326-344.
- [4] Klemp, J. B. and R. B. Wilhelmson, 1978: The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1070-1096.
- [5] 斉藤和雄, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 90
- [6] Charney, J. G., 1971: Geostrophic turbulence. *J. Atmos. Sci.*, 28, 1087-1095.
- [7] Skamarock, William, 2004: Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 132, pp. 3019-3032.