

領域気候モデルの開発について (3)

木田秀次・市川栄男

京都大学大学院理学研究科

要 旨

領域気候モデルの可能性を調査するためネスティングの手法について、絶対過度保存則に基づく、ベータ・チャンネルモデルを用いて、全域高解像の場合とネスティングの手法を用いた場合の比較を行い、ネスティングのみでどの程度の再現性が得られるものかを調べた。大規模場の移流については、良く再現した。また時間内挿の間隔により境界で与えられる細かい波はフィルタリングされてしまい、ネスト内に移流してこない。すなわち、ネスティングモデルでは、ネスト内でネストの解像度に見合う構造を産み出す機構を備えている必要がある。

キーワード：ネスティング、数値予報、領域気候モデル

1. はじめに

細かい格子が必要な領域にのみ用い、その外部はより粗い格子によって覆って格子を入れ子細工のように組み合わせる。このことにより、大きな空間スケールの現象の効果を少ない計算時間で取り込める。細かい現象の解像度が上がって必要な現象を詳しく見ることができる。この手法をネスティングという。この手法の信頼性について調べた。

ここで用いるネスティングは、領域気候モデルを念頭に、Anthes, et. al (1989) の NCAR の領域モデルで採用されている簡単で応用性の高い手法を調べる。前回には、2 倍ネストを行いパラメータを決定した。今回は 10 倍ネストを行う。具体的には全領域高解像度 (10 倍) とネストした場合を比べ、ネストした結果はどの程度、高解像度の結果を再現するかを見ていくことにする。

2. 用いるモデル

2.1 方程式系

準地衡風近似を用いた非発散バロトロピックモデルを使う。

絶対過度保存則から

$$\frac{D\eta}{Dt} = \nu \nabla^2 \eta$$

η は絶対過度。右辺は数値粘性の項。

z ; 高度 (m)。 f ; コリオリパラメーターとして、地衡風近似

$$u = -\frac{g}{f_0} \frac{\partial z}{\partial y}, v = \frac{g}{f_0} \frac{\partial z}{\partial x}$$

を用い、ここで、

$$\zeta = \frac{g}{f_0} \nabla^2 z, \eta = \frac{g}{f_0} \nabla^2 z + f$$

である。

$45^\circ N$ を中心とする β 平面近似を用いる。中央差分で差分化し、緩和法 (accelerated liepmann 法 (S・O・R 法)) を用いて解き、Leap-Frog 法 (計算モードをおさえるため、47step 毎に松野スキームを挟む) で時間外挿する。

2.2 境界条件

上下の境界条件は、定数で固定する。左右の境界条件については、ネスト領域では、Anthes にならない、ラージスケールのモデルから値をもらい決め

る。ただし、高解像 (10 倍) の計算と低解像の計算では結果が変わったので、高解像 (10 倍) 計算の値を低解像の格子に落したものをを用いる。ラージスケールでは、cyclic boundary のチャネル・モデルを用いる。また、領域の広さは $15000\text{km} \times 6600\text{km}$ 、ネスト領域は $9600\text{km} \times 3000\text{km}$ 。fig. 1 に領域とネスト域を示した。格子間隔、時間ステップは粗

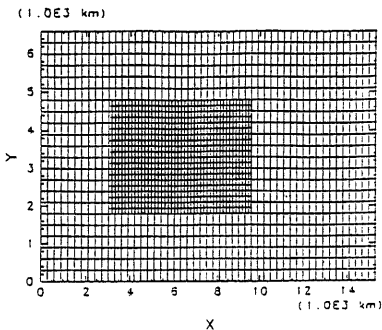


Fig. 1 Nested higher-resolution area and outer lower-resolution area.

いラージスケールモデル (1 倍計算) で、 300km 、 1500 秒、細かいラージスケールモデル (10 倍計算) で、 30km 、 150 秒。

ネスト領域で、 X 倍ネストについて $1500\text{km}/X$ 、 $1500/X$ 秒としておこなう。

3. ラージスケールモデル 10 倍と 1 倍の違い

次の 2 種類の場合で実験を行った。初期値の取り方をかえ、数値粘性項はノイズを消すための実験で用いた。

実験 1 波数 2 のロスビー波の移流。

実験 2 上記の波に波数 1-12 の小さな振幅の波を重ね合わせる。

これは、ネスティングで、どの程度の波まで移流で表せるかを示すのに用いられた。

3.1 実験 1

初期値を高度場で、

$z = 2000\cos(\frac{\pi y}{YD}) + 200\sin(\frac{\pi y}{YD})\sin(\frac{4\pi x}{XD})$ として与える。ただし、 x 軸方向の領域の広さ (15000km) を XD 、 y 軸方向の領域の広さ (6600

km) を YD とする。絶対渦度 η は中央差分によって得る。初期条件を fig. 2 に左側、絶対渦度、右側に帯状平均風速を示す。

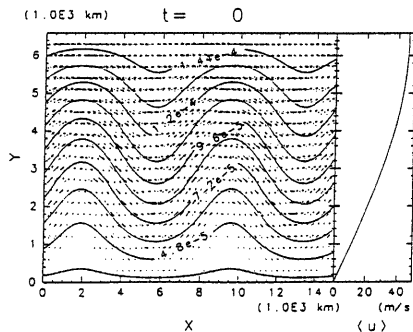


Fig. 2 Initial Condition of Experiment No.1. Left part of the figure is absolute vorticity field, right is zonal mean wind velocity.

(1) 状況

時間変化を fig. 3 に示す。左側 1 倍計算、右側 10 倍計算。40、70、100 時間を示す。およそ、風により流されるのみである。しかし、線型なロスビー波の位相速度の式から、fig. 2 に示す $y=1800\text{km}$ あたりにはば定在する所がある。此の結果 10 倍計算では波の弱い砕波がみられ、この非線型効果により 1 倍計算と $y=2000\text{km}$ 帯で、違いが生じるようである。fig. 4 に 70 時間後のロスビー波の位相速度を引いた風の場の拡大図を示す。此の違いは、波長 $2000\text{km}-3000\text{km}$ (これは波数 6-7 にあたる) であり、1 倍計算でも表現されうものであるが、低解像度のものには明確には現れていない。

(2) ネスト実験での着眼点

大規模場は、変わらない。しかし、上述の $y=2000\text{km}$ 帯での位相のずれが 10 倍で再現されるかどうかのポイントである。

3.2 実験 2

初期値として、実験 1 の初期値に波数 1 から 12 の波を重ねる。

$$z = 2000\cos(\frac{\pi y}{YD}) + 200\sin(\frac{\pi y}{YD})\sin(4\frac{\pi x}{XD}) + 2\sin(\frac{\pi y}{YD})\sin(2\frac{\pi x}{XD}) + 2\sum_{k=3}^{12}\sin(\frac{\pi y}{YD})\sin(2k\frac{\pi x}{XD})$$

ただし、 x 軸方向の領域の広さ (15000km) を XD 、 y 軸方向の領域の広さ (6600km) を YD とする。絶

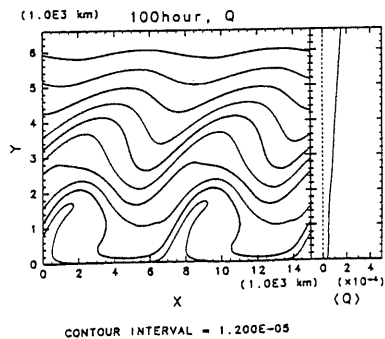
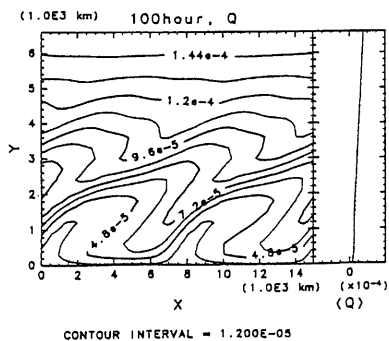
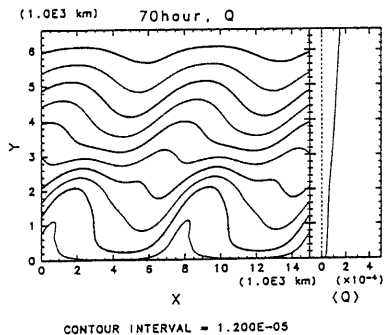
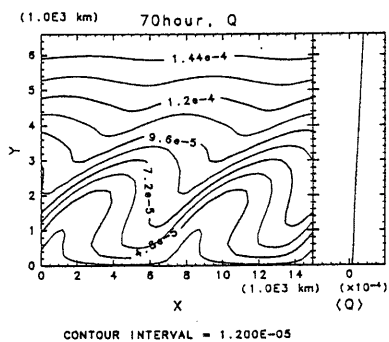
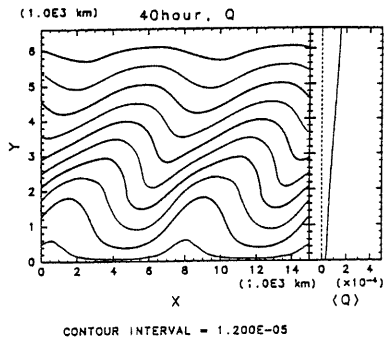
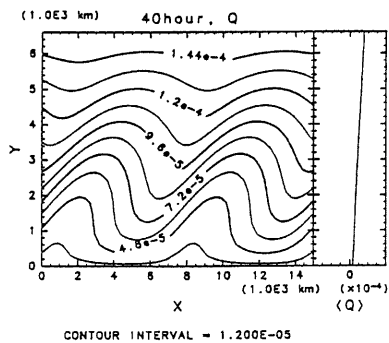


Fig. 3 Experiment No 1. Left side is a time sequence by Coarse-resolution model(x1) and right side is a high-resolution model(x10). The upper,middle,and bottom are showed at 40 hours ,70 hours and 100 hours.

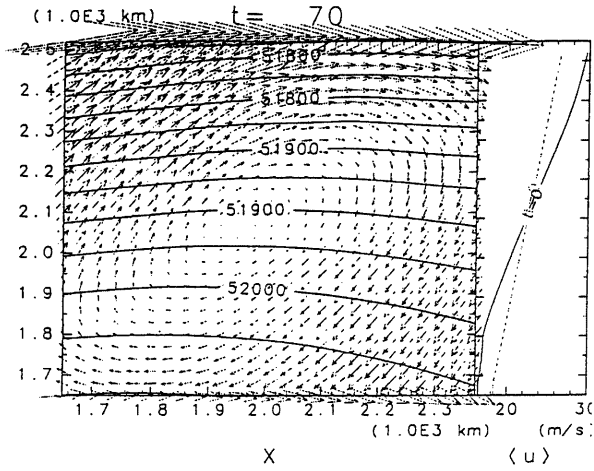


Fig. 4 A regional wind field except rossby wave phase speed at 70 hours. The region ($x=1650-2370\text{km}$, $y=1650-2520\text{km}$) is magnified.

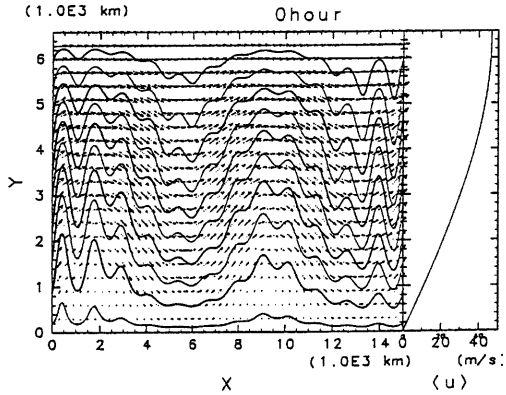


Fig. 5 Initial Condition of Experiment No. 2. Left part of the figure is absolute vorticity field, right is zonal mean wind velocity.

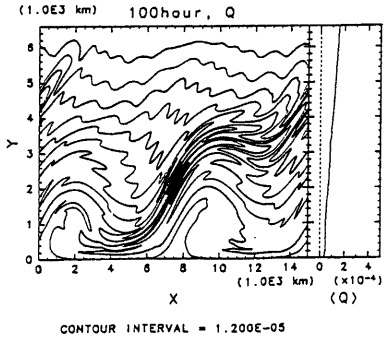
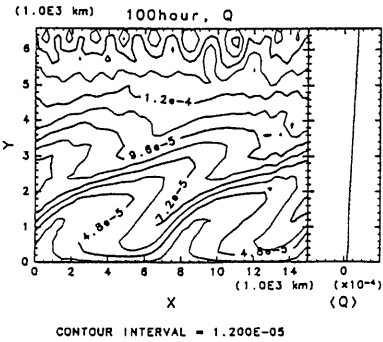
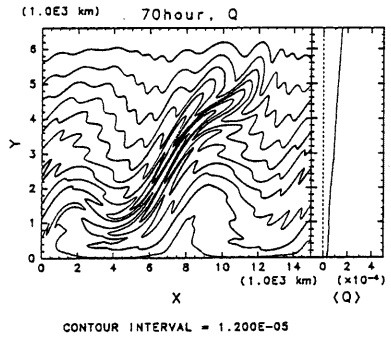
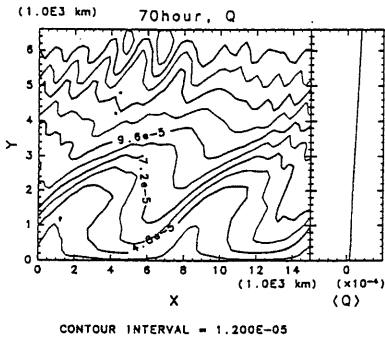
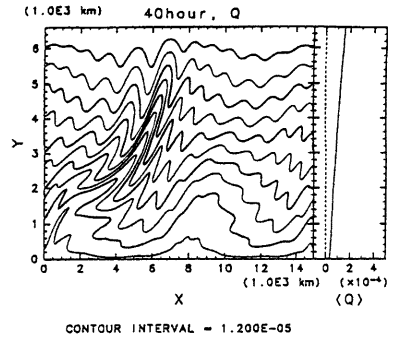
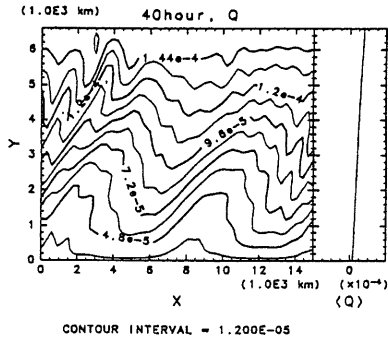


Fig. 6 Experiment No 2. Left side is a time sequence by Coarse-resolution model(x1) and right side is a high-resolution model(x10). The upper,middle,and bottom are showed at 40 hours ,70 hours and 100 hours.

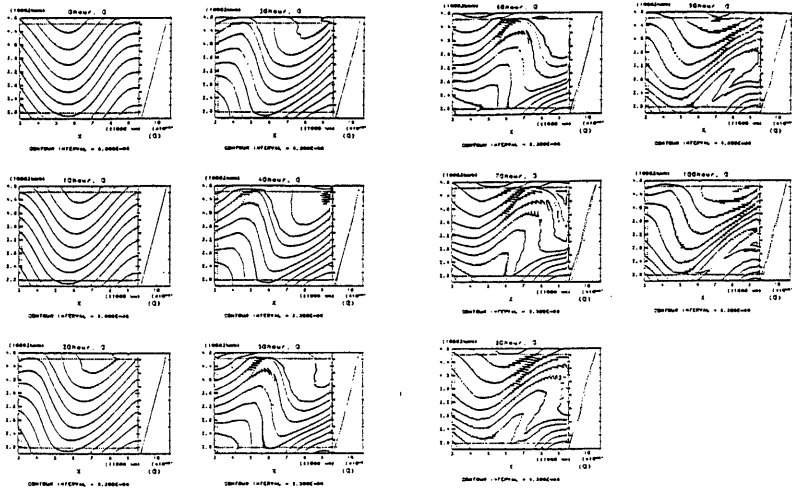


Fig. 7 A time sequence for nested model(x10) of experiment No 1. Dashed lines show the relaxation regions.(7 grid points)

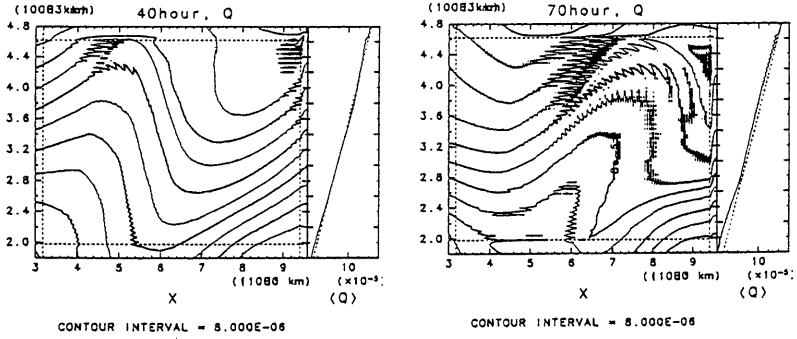


Fig. 8 Same as Fig.7 except that time increment is 50 seconds.(show 40,70hours)

対過度 η は中央差分によって得る。初期条件を fig. 5 に
左側、絶対過度、右側に帯状平均風速を示す。

(1) 状況

時間変化を fig. 6 に示す。左側 1 倍計算、右側 10 倍計算。40、70、100 時間を示す。およそ、風により流されるのみである。ただ、1 倍ではうまく表現しきれない波を含んでいるので、例えば 20 時間 $x=1000\text{km}$ の急な波が、流れるうちに弱まって、50 時間にはもはや南半分 ($y=3000\text{km}$ 以下) では波数 2 の波の卓越で落ち着いている。一方 10 倍計算では、20 時間 $x=1000\text{km}$ の急な波が、流れて 50 時間、70 時間となっても残り、むしろ強まっている。

(2) ネスト実験での着眼点

上述の移流によって表される微細構造を表現できるかがポイントである。

4. 具体的なネスティングの方法とパラメーター

4.1 具体的な形

ネスティングの手法は、以下のように、Anthes et al (1989) に従い、ニュートニアン・ダンピングと拡散項を含んでいる。緩衝域は境界から隣接した実験により 5 点、7 点、21 点などとし、Coarse Model からの内挿は、通常は、10 時間毎に線型的になされる。また空間的にも、もっとも簡単な双一次補間 (bilinear interpolation) を行っている。

$$\left(\frac{\partial \eta}{\partial t}\right)_n = F(n)F_1(\eta_L - \eta_M) - F(n)F_2\nabla^2(\eta_L - \eta_M)$$

ここで $F(n)$ は線型的に減少し、

$$F(n) = \begin{cases} (gaku - n)/(gaku - 1) & (n = 2, 3, \dots, gaku) \\ 0 & (n \geq gaku) \end{cases}$$

さらに、

$$F_1 = \frac{1}{a \cdot \Delta t}$$

$$F_2 = \frac{\Delta x^2}{b \cdot \Delta t}$$

また、 η は絶対過度。

Δt は時間間隔。 Δx は格子間隔。

添字の L は、10 時間毎の Coarse Model からの空間双線形内挿値、時間線形内挿値。

M は Nested Model での計算値。

n は、最も近接した境界からの格子の数 ($n = 1$ が、境界)。

$gaku$ は、緩衝域の広さ (格子点の数で示す)。

a, b は、ニュートニアン・ダンピング、拡散項の各効果の強さを調節する定数で大きいほど効果が小さい。

4.2 パラメーター

此の手法において、パラメーターとなるのは、

1. a 、ニュートニアン・ダンピングの大きさ
2. b 、拡散項の大きさ
3. $gaku$ 、緩衝域の大きさ (格子の数で表す。)
4. 時間内挿の間隔 (通常は 10 時間とするが、20 時間内挿、2.5 時間内挿の実験も行う。)

がある。

5. 実験 1、10 倍ネスト

5.1 緩衝域の広さ

$a=8, b=24$ 、時間内挿は 10 時間毎にして、緩衝域の広さの効果を調べる。

- 緩衝域を 7 点、時間間隔 100 秒

fig. 7 に時間変化の様子を示す。ここでは、時間間隔 100 秒にしてある。2grid wave は出る。計算時間は、11 分 34 秒 13 で時間間隔は 3 分の 2 にしているが、全域計算 45 分 43 秒 36 と比べると、領域の広さで、

$$\frac{221}{502} \cdot \frac{101}{221} = 0.20119522$$

となるので、時間間隔を狭めたことを考慮すると 0.30179283 と約 10 分の 3 となるところが、約 4 分の 1 となり計算コストとしては良好である。領域の狭さに比例して減っている。

- 緩衝域を 7 点、時間間隔 50 秒

時間ステップが増えたぶんだけ、ノイズの振幅が増えている。此のノイズが時間ステップ毎に現れるノイズであることが分る。したがって、時間間隔を短くすれば良いものでもないことが分る。fig. 8 に 40 時間、70 時間の様子を示す。

- 緩衝域 600km = 10 倍の 21 点

鍵状ノイズはわずかになり、2grid wave も小さくなる。滑らかにつなげるには、緩衝域は広いほどよいことが分る。しかし、緩衝域と、ネスト内部の位相の違いが見られる。fig. 9 に 40 時間、70 時間の様子を示す。計算時間も 11 分 55 秒 17 であり、ほとんど変わらない。したがって、計算コストの面を見ても、緩衝域は格子の数ではなく実際の距離で取るべきで

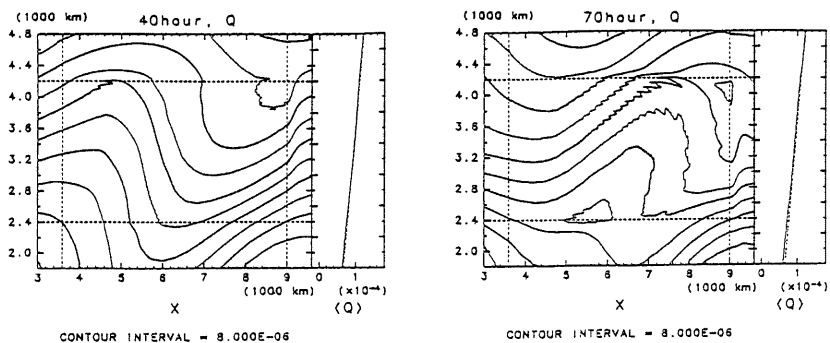


Fig. 9 Same as Fig.7 except that relaxation region is 21 grid points.(show 40,70hours)

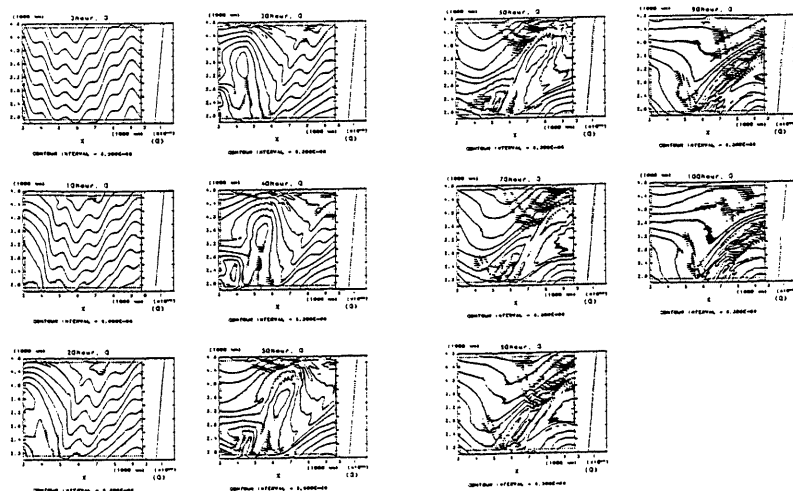


Fig. 10 A time sequence for nested model(x10) of experiment No 2. Dashed lines show the relaxation regions.(5 grid points)

あったことが分る。

5.2 実験1のまとめ

全域 10 倍の結果から元データを得ているので、位相は一致しているはずだが、10 倍ネストにおいても位相は一致せず、此の手法の適用には注意が必要である。

ノイズは流出境界の西側から生じる 2grid wave と、流入してきた波の表現の悪さと緩衝域での位相差から生じてくるノイズの成因として 2 通りあり、合計 3 個所から発生した。

緩衝域は広いほど滑らかに大規模場をつなぐうえ、計算時間もほとんど変わらず負担にならない。

6. 実験2、10 倍ネスト

6.1 状況

緩衝域 5 点でかつ $a=8, b=24$ のもので行う。
 $x=5000\text{km}, y=2200\text{km}$ から北東に延びる 8.e-5 の急峻なコンタ - の構造は良く表現したまま流れていく。時間方向のエリアシングにより、西から流れてくる波は風速 30m/s として、10 時間で、約 1000km となることより、最大でも波長 2000km (波数約 7 に対応する) の波が解像限界であるが、此の限界以下の波は表現されていないことが示唆される。ノイズは、実験 1 に見られた 3 個所で起っており、さらに今回はネストの元データ自体が表現し着れない波を抱えているので、(特に 60 時間、70 時間の南側緩衝域に見える) ノイズとして内部に影響を与える。したがって、南側、西側から次第に差が広がっていく。

y 軸方向にとったスペクトルを比較すると、ネスト域での波数 4 から 9 が弱くなっていることが解る。fig. 10 に時間変化の様子を示す。fig. 11 左に全域 10 倍計算のネスト域でのスペクトル、中央に 10 時間内挿による 10 倍ネストのネスト域でのスペクトル、右に 2.5 時間内挿による 10 倍ネストのネスト域でのスペクトルを各々 70 時間での様子で示す。

6.2 時間内挿

10 時間内挿と 2.5 時間内挿を比較する。10 時間内挿では時間方向のエリアシングが起っていることが確認される。スペクトルの図からも 10 時間内挿の 10 倍ネストで消えていたネスト域での波数 4 から 11 (すなわち全域で波長 600km から 1650km) の波のスペクトルが大きく、全域 10 倍の様子を表現できていることを示す。また、ノイズは多少押さえられて

いる。しかし鍵状ノイズは出ているようである。70 時間の $x=7000\text{km}, y=3000\text{km}$

の付近の急峻な 3 つの波は、コンタ - の密度は違うが、捕らえられている。

fig. 11 右に 2.5 時間内挿による 10 倍ネストのスペクトルの 70 時間での様子を示す。fig. 12 に 40 時間、70 時間の様子を示す。

6.3 緩衝域を 21 点にする。

● 時間内挿 10 時間

元になる 10 時間毎の内挿データでは、細かい波数も表現するが、ネスト部分では時間方向のエリアシングにより細かい構造を表していない。したがって、緩衝域とネスト内部で波の構造に違いが生まれている。これが、新たなノイズを生んでいることがはっきり分る。しかし、全般にノイズは減少しており、時間方向のエリアシングがなければ、実験 1 で見たようになりネストの結果は良くなるようである。計算時間はノイズが減るためか、11 分 22 秒 58 とかえて早くなっている。fig. 13 に 40 時間、70 時間の様子を示す。

● 時間内挿 2.5 時間

ここでは、時間方向のエリアシングがなくなるように、2.5 時間内挿を行う。すると 40 時間後に顕著なように、緩衝域 5 点の実験に比べ格段にノイズも少なくなっており、緩衝域はある程度広く取るべきであることが分る。注意したのは、時間が立つにつれ、やはり緩衝域とネスト内部の位相差が目立ってくることである。そのため、緩衝域とネスト内部の継ぎ目からノイズが発生している。70 時間の $x=7000\text{km}, y=3000\text{km}$ の付近の急峻な 3 つの波は、コンタ - の密度は違うが、捕らえられている。しかし、緩衝域で位相がずれていて、緩衝域を狭く 5 点にとったときに比べノイズは減るが、再現範囲は狭まっている。計算時間は、11 分 56 秒 56 である。また今までも見られたが、南側でずれが大きい。元データそのものも下方からノイズ的なコンターが引かれている。ここでは、帯状平均風速自体は小さいはずなので、実験 1 で波数 2 の場がここで、わずかながら砕破していたことにも関係あるのではないかと推測される。fig. 14 に 40 時間、70 時間の様子を示す。

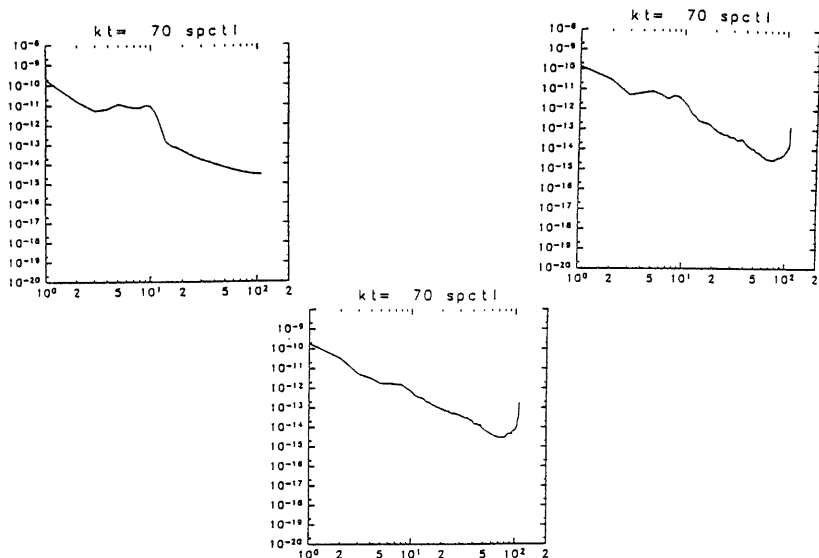


Fig. 11 Experiment No 2. Spectral of wind of the high-resolution model in nested region(left),with time interpolation of 10 hours (middle) and with time interpolation is 2.5 hours(right).

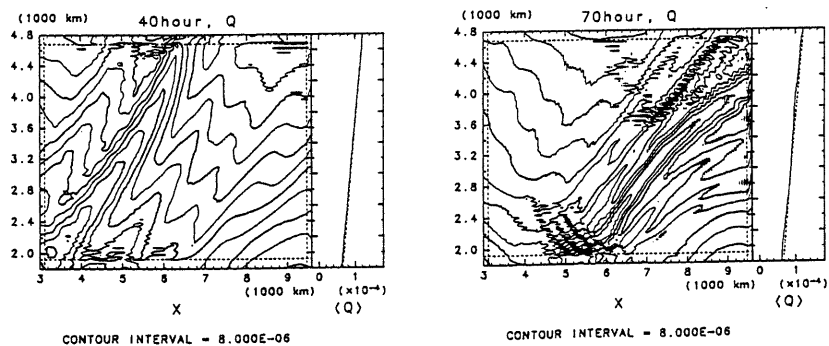


Fig. 12 40 hours and 70 hours in time interpolation of 2.5 hours. Dashed lines show the relaxation region(5 grid points).

6.4 数値粘性を加える。

上記の緩衝域とネスト内部の位相差によるノイズを押さえ、滑らかにつなぐため、数値粘性をかける。ここでは、ノイズが減ったことも考慮して、粘性の拡散係数を小さく波数 50 が 4 日でダンブする (1つの波が 10 点で表されるとする 10 倍計算の意味を損なわない程度)の小さいものにする。

- 時間内挿 10 時間

計算時間は 11 分 28 秒 80 である。わずかにノイズが減少したが、緩衝域を滑らかにつなぐほどではなかった。fig. 15に 40 時間,70 時間の様子を示す。

- 時間内挿 2.5 時間

計算時間は 12 分 16 秒 72 であり、わずかに増した。ノイズは減少したが、緩衝域を滑らかにつなぐほどではなかった。fig. 16に 40 時間,70 時間の様子を示す。

数値粘性は次の表 1 に拡散係数の大きさを示す。や

e-folding time(day)	wave number	diffusive parameter
4	35	13462
0.4166666 =10(hour)	110	13083
4	44	8518
4	50	6596
0.4166666 =10(hour)	250	2533
4	100	1649
4	110	1362

Table 1 table of the diffusive parameter

はり、時間内挿の効果が重要である。いくら細かくしても移流で流れてくる波は内挿時間間隔を良くしなくてはネスト域で表現しない。数値粘性をかけないと ctrl のように、ノイズに侵されてしまう。4 日 50(これは 1つの波を 10 点で表すとして 500 点つまり全域約 10 倍に当る。)では弱く、70 時間を見てもノイズが目立つ。表も参考にして、およそ波数 35(1つの波を 10 点で表すとする、これは約 7 倍の解像度である)の波が 4 日でダンブするぐらいの数値粘性ならば、許容範囲であろうと思われる。(図には示していない)。此の波数を全域計算できちんと表すには、計算時間は全域 10 倍での $0.7^3 = 0.343$ 約 3 分の 1 で済むはずであり、意味を持つ解像度も考慮すると、ネストのコストはいいことになる。し

たがって、ノイズを消すことは計算コストに微妙に関係しており、意味を持つネストは数値粘性のかけ方に敏感である。

7. 実験 2 のまとめ

大規模場で表現されていても、移流によりネスト域に伝播してくる波は、時間内挿の間隔が大きいと、エリアシングが起りネスト域で表現できない。したがって、ネストの元データの内挿時間間隔を小さくできないのならば、大規模場のラージスケールモデルの解像度を単純にあげても無意味である。言い換えると、大規模場が表現できていればネストの元データは十分であり、ネスト域では独自の物理過程によって微細構造を産み出すようにしておくべきであることが分る。

緩衝域は広くしないと、ノイズが増し此のノイズの除去のため数値粘性を加えなくてはならず、せっかくのネストの解像度を犠牲にすることになる。そのため、全域を落した解像度で計算するもののほうが、ノイズも少なく、さらにコスト面でも有利になり得ることがある。

緩衝域はある程度広く取るべきだが、緩衝域とネスト内部での位相差は時間が立つにつれ目立ってきて、ノイズの原因になる。此のノイズが内部を汚染していくので、逆に緩衝域を広く取ると再現領域が狭まっていく。パラメーターのチューニングは微妙な問題である。

8. まとめ

領域気候モデルの可能性を調査するため絶対過度保存則に基づく、ベータ・チャンネルモデルを用いて、全域高解像の場合とネスティングの手法を用いた場合の比較を行い、ネスティングのみでどの程度の再現性が得られるものかを調べた。大規模場の移流については、良く再現した。しかし元データそのものを高解像度の結果から得ているにも関わらず、ネスト内部の位相は外の位相より進んだ。此の原因は時間内挿が線型であるため、入射してくる波が振幅を押さえられ、ガタガタした波になるためではないかと推測されるが、以後の調査が必要である。

緩衝域は広くしないとノイズが増し、此のノイズの除去のため数値粘性を加えなくてはならなくなる。そのため、全域を落した解像度で計算するもののほうが、ノイズも少なく、さらにコスト面でも有利になり得ることがある。

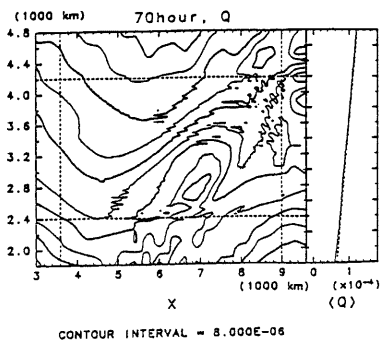
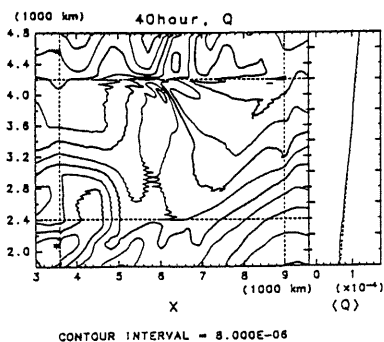


Fig. 13 Same as Fig.10 except that relaxation region has 21 grid points.(show 40,70hours)

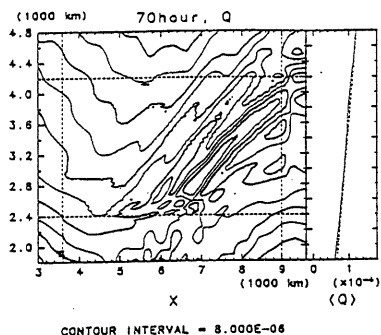
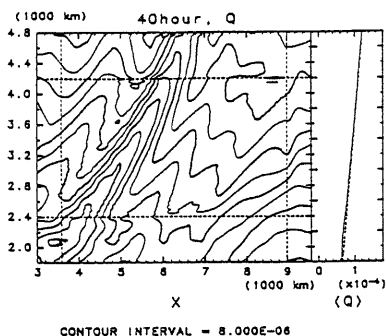


Fig. 14 Same as Fig.13 except that time interpolation is 2.5 hours.

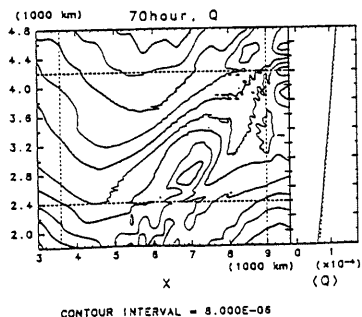
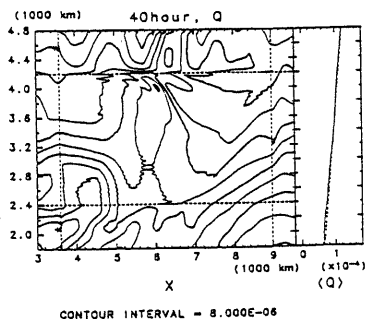


Fig. 15 Same as Fig.13 except for the numerical diffusion included.

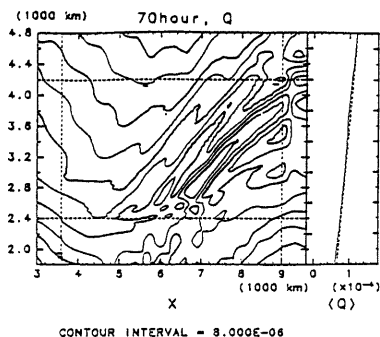
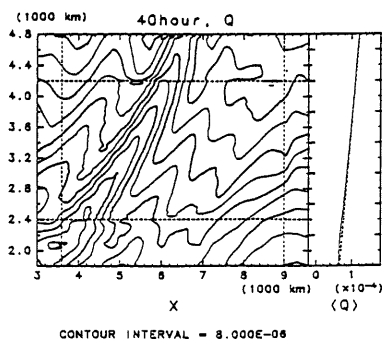


Fig. 16 Same as Fig.14 except for the numerical diffusion included.

緩衝域はある程度広く取るべきだが、緩衝域とネスト内部での位相差は時間が立つにつれ目立ってきて、ノイズの原因になる。此のノイズが内部を汚染していくので、逆に緩衝域を広く取ると再現領域が狭まっていく。すなわちネスティングパラメーターのチューニングは微妙な問題である。

時間内挿の間隔により細かい波はフィルタリングされてしまい、ネスト内に移流してこない。したがって、ネスティングを行う際は境界条件に微細な情報を与えても仕方なく大規模場の情報のみで十分である。そして、ネスティングモデルでは、ネスト内でネストの解像度に見合う構造を産み出す機構を備えている必要がある。

謝辞

作図においては地球流体電脳ライブラリーを使用致しました。数値計算は、東大気候システム研究センターとの共同研究に基づき、京大大形計算機センターの vpp500 を使用致しました。

参考文献

- 木田秀次, 1995: 局地気候モデルの開発について - 特にネスティングの問題 -, 京大防災研年報, 第 38 号 B-2, 249-258.
- 木田秀次, 市川栄男 1996: 局地気候モデルの開発について (2), 京大防災研年報, 第 39 号 B-2, 193-206.
- Anthes, R.A., Y.H. Kuo, E.Y. Hsie, S. Low-Nam and T.W. Bettge: Estimation of skill and uncertainty in regional numerical models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 115, 1989, 763-806.
- Davies, H.C.: A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 1976, 405-418.
- Chen, J.H. and Miyakoda, K: A nested grid computation for the barotropic free surface atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 102, 1974, 181-190

DEVELOPMENT OF LOCAL CLIMATE MODEL (3)

Hideji KIDA and Hideo ICHIKAWA
Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

Comparing a high-resolution numerical model with a nested limited-area model, some numerical tests of long-term integrations of the nested model are performed to investigate the possibility of application to high-resolution local climate models.

Assuming that the lower-resolution model is joined at the lateral boundary of the high-resolution model, we confirmed that by this simple coupling method well.

Keywords : nesting; numerical prediction; regional climate model