

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——

木田 秀次

DEVELOPMENT OF LOCAL CLIMATE MODEL

—— ON NESTING METHODS ——

By *Hideji KIDA*

Synopsis

The recent increase of interest on climate change is mainly directed to detailed description and prediction of local climate changes. The development of global climate models has been done so intensively, however the ability of super-computers limits the resolution of grids of the models.

In order to represent smaller-scale local climates, the use of a high resolution limited-area model is tested applying a new nesting method to coupling with a global model.

The proposed nesting method showed that a long-term integration could be so smoothly performed and that the local small-scale phenomena in climate could be well simulated in such a higher resolution model nested in a global model.

1. はじめに

数値モデルによる天気予報が初めて行われてから約40年が経過し、20年ほど前に方法論としてほぼ成功の段階に達したが、残された課題は、より長時間先の予報が可能か、及び、より細かいスケールの気象が予報できるか、という問題になったと考えてよいだろう。すなわち、長期予報とメソスケール天気予報である。

一方、気候を数値モデルで扱うという課題も数値天気予報とほぼ同じ歩調で発展してきたが、気候モデルでは、本質的に長時間の現象を扱うのであるから、数値天気予報とは違う問題がある。例えば、物理過程の中で時間スケールの長い過程については、明日明後日の天気予報にとってはほとんど無視して良いが、気候モデルにおいては考慮しなければならない。なぜなら、気象の長時間平均として定まる状態量は、そうした長時間スケールの物理過程がきいてくるからである。こういう意味で、気候モデルは気候モデルとして、数値天気予報モデルとは異なる独自の特徴を備えている。

さらに、気候を数値的に再現するといっても、気候の意味するところは結構幅がある。すなわち、時間スケールの点でも空間スケールの点でも幅が広すぎるほど広い。従って、目的とする対象を明確にしなくては気候モデルの内容も定まらない。純粋に一般性のある気候モデルというものはないとも言える。つまり、気候のどの面に関心を当てるかによって気候の数値モデルに組み込む必要のある物理・化学・生物過程は色々異なってくる。

ここで示す研究の一端は、比較的分解能の粗いグローバル気候モデルの情報を導入して、よりスケール

の小さい現象がローカル気候モデルで再現可能であるかどうかを検証した結果である。

グローバル・モデルから情報を得て稼働するローカル・モデルのことをグローバル・モデルの或る領域にネスティングされたモデルと呼ぶ。このようなネスティングの手法は、より細かいスケールの予報を必要とする天気予報のモデルに以前から用いられているもので、何も目新しいものではないが、気候の再現を目的とするモデルに採用されるようになったのは比較的最近になってからのことである¹⁾。すなわち、それまでは、ネスティングは気候モデルには無理であると考えられていたのである。

地球温暖化の話題が注目を集めるようになって、実際にその対策を取る段になると、地球全体というよりも、どの地域において一体どの程度の温暖化あるいは寒冷化が起こるのかが重要な問題になってきた。至極当然のことである。こういう社会的背景のもとに、地域の詳しい気候が扱える気候モデルの開発が必要になってきている。これに対する手法として最も確実でしかも安易には、グローバル・モデルの空間分解能をどんどん細かくしてやればよい。しかし、そうするためには、膨大な計算量をこなさなければならぬので、現在および近い将来の計算機の性能から判断して全く現実性がない。それで、ネスティングという手法が再認識されてきたのである。

2. ネスティングの方法

2.1 実空間領域境界結合

気候にしろ気象にしろ、我々が深く関心をもつのは地球全体の描象かあるいは特定の地域の描象かの何れかである。ここでは後者についての関心に答えるための方法論を論じる。Fig. 1は、グローバル・モデルとローカル・モデルの位置関係を概念的に描いたものである。すなわち、いま関心の対象としている地域は日本列島領域である。そして、その領域内においては、モデルの空間分解能がその領域外に比べて細かい。私見では、その分解能の差はおおよそ数倍から10倍ぐらいが適当であると考えている。そう考える根拠は、分解能の差が2・3倍程度であればネスティングの効果、つまり、計算量を大幅に節約するという効果がさほどでないからである。それなら一層のこと少々無理してグローバル・モデルをその程度に分解能に上げるなり、あるいは、計算機の進歩を少し待てばよいからである。分解能を数倍以上に上げるとなると、これは全くグローバル・モデルでは不可能な範囲になる。こういう時にはじめてネスティングという方法が生きてくる。

上述のことは、計算機の進歩ということと独立した関係にあって、いつの時点においても成り立つ関係である。従って、ネスティングという方法には一般性があり、何時でも有効な方法になりうる。ただし、その方法論が十分有意義な結果をもたらすものであることが前提である。

空間分解能に差のある領域があるということは、その境目つまり領域の境界が存在することを意味する。境界の内と外とで空間分解能に境目が在ると、如何なる問題が生じるか。Fig. 2は、前図において、格子点モデルの場合の領域の内と外の格子点の位置関係を表したものである。すなわち、外側のモデル(例えばグローバル・モデル)では、内側のモデルで表現されている細かいスケールの現象が扱えないので、その小規模現象はスムーズに境界付近を移動・通過できない可能性があると思える。一方、外側

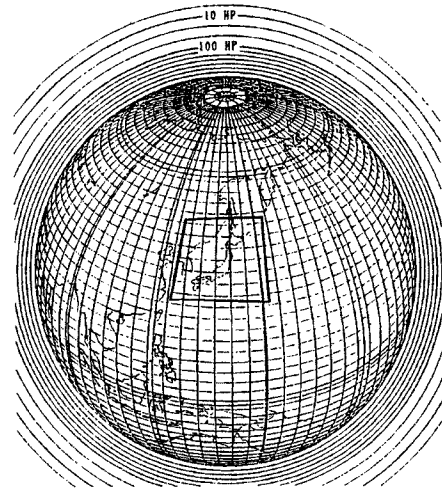


Fig. 1. A nested area in a global climate model.

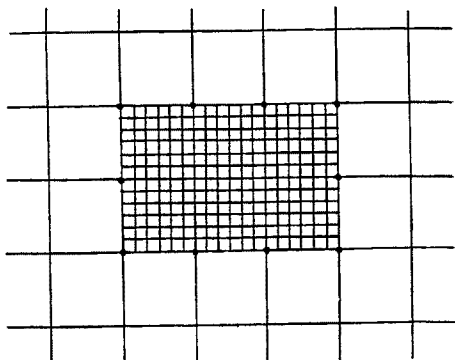


Fig. 2. Grids of nested higher-resolution area and outer lower-resolution area.

のモデルには小規模現象が表現されていないので、内側に向かって移動して来るべき小規模現象が存在しないということになる。すなわち、本来有るべき物理的実状にそぐわない状況が内側のモデルで起こる結果になる。念のため小規模現象の定義をしておくならば、外側のモデルの空間分解能では表現できないが、内側の高分解能のモデルなら表現できる比較的の小規模な現象をここでは小規模現象と呼ぶ。

さて、この問題に対して、内側のモデルから外に向かって移動するものについては、境界付近での計算に工夫をこらすことである程度は対処できる。例えば、領域の境界を単純な境界と考えず、幅のある境界地帯と考え、その境界地帯の中で小規模現象がスムーズに消散してしまうよう工夫するのである。

一方、外側から内側に向かって移動して来るべき小規模現象の表現については、なすすべが無い。これがネスティングの最大の泣き所であるといえる。これに対処するためには、内側のモデルの領域をある程度大きく取るほかない。この場合、問題の小規模現象のライフタイムから見た空間スケールすなわち移動空間のスケールが重要な判断要素になる。もし長時間存在し、長距離移動する小規模現象が重要な意味をもつ場合には、内側のモデルの領域が十分な広さを持たざるを得ないだろう。これに該当する例としては台風が考えられる。しかし、幸いな事に、外側のグローバル・モデルでも台風のおおよそは再現されているし、将来分解能が向上すれば一層台風も精度よく再現されるようになるだろう。従って、決定的に深刻な問題になるような小規模現象はあまりない、という見方もできる。ただし、領域モデルの領域の広さは Fig. 1 に示す程度には取ることを考えての事である。

さらに言及すると、ネスティングは、必ずしも1回だけ、つまり或る外側のモデルに或る内側のモデルが結合するだけに留まる必要はなく、その内側のモデルにさらに内側に一層高分解能のモデルを結合させることも可能である。このように、単に計算手法としては何重にもネスティングはできる。

格子点法によるモデルの場合には、Fig. 2 で見られるように実空間において明確な境界が存在し、図の中で黒丸で示した格子点で内外の両モデルで予報すべき物理量の情報が共有される。問題は内側のモデルにのみ存在する格子点の扱い方である。それには色々な考え方があるが、何か適当な内挿値を用いるのが普通である。

また、境界の共通の格子点については、外側のモデルの情報をそのまま与えることが多い。この場合は、内側のモデルが外側のモデルに一方的に情報を受けるとい意味になるので、この方法を一方向結合とか一方向のネスティングとか呼ぶ。内側のモデルの予報値を加味して共通の格子点の値を決めるという考え方も当然あって、この場合には双方向結合といえることができる。大方の場合は、一方向結合で十分である。

2.2 スペクトル空間境界結合

次に、本研究で示すネスティングの考え方を述べる。気象や気候の数値モデルは、その基本となる方程式系は流体の運動方程式である。それは、偏微分方程式の形をとるが、これに対する数値解法として差分方式とスペクトル方式との2つのアプローチがある。差分の場合には実空間に格子点を配置することになる。つまり、Fig. 2 である。スペクトルの場合には、スペクトル空間上で整数の波数の重ね合わせによる表現になる。従って、実空間的には全ての位置において値が存在し、この性質において格子点法と異なる。

数値解法に2通りの手法があるなら、ネスティングの方法にもそれらに対応して2通りあって当然である。こういう考えは、実は結果としてたどり着いた考えである。ネスティングにスペクトルの方法を導入

しょうとした経緯はもっと現実的な対処に迫られたからに他ならない。それは後に触れるとして、ここでは、ネスティングとしては新手法といえるスペクトル空間結合法を論じる²⁾。

ある特定の地域に関心をおくということには変わりはない。つまり、内側と外側という実空間上の境界が存在する。すなわち、Fig. 1のような関係である。しかしながら、内側の領域については、スペクトル表示をする点で先の格子点モデルとは違う。スペクトルの重ね合わせとして各格子点の値を表現するには、格子点モデルにおける格子点の数だけの整数波数が必要で、自由度という観点からは何れのモデルとも同じである。さて、領域内をスペクトルで表現するためには Tatsumi³⁾が提案したような準基底関数という概念を導入する必要がある。すなわち、領域内の物理量が空間的に必ずしも周期関数になっていない条件を取り除くための関数である。ここでは、その詳しい話には入らないが、要するに領域内の状態分布を大規模な成分とそれより小規模な成分に分けて考えることが容易になることを指摘するに止める。

すなわち、ある物理量を $F(x)$ とすると、

$$F(x) = F_l(x) + F_s(x)$$

ただし、ここで $F_l(x)$ は大規模成分の総和、 $F_s(x)$ は小規模成分の総和を表す。

いま、ネスティングで関心があるのは $F_s(x)$ の方であるが、その時間変化は、成分間の非線形効果の和としてあらわせるので、非線形項を象徴的に N と表すならば、

$$\partial F_s / \partial t = N(F_l, F_l) + N(F_l, F_s) + N(F_s, F_s) + \text{生成項など}$$

この関係式を内側のモデルから見た時には、第1項はいわゆるダウンワード・カスケードで領域内に小規模現象が生成されることを表しており、第3項は小規模どうして閉じた関係とアップワード・カスケードの可能性を表している。第2項は大規模と小規模の相互作用である。

もし、 F_l が正しく扱われていれば、第1項は適切に計算できるので、その効果による F_s の時間変化は正しく求められる。第2項については、実空間でみた領域の境界付近で F_s が適切でない可能性があるのが問題があるが、現実的にはその境界付近の影響は領域全域とくに領域中央部に対しては差ほど大きくないだろうとやや楽観的に推測できる。これは後に示す計算結果の現実において支持されていると考えられる。

以上の議論から、領域内の大規模現象は外側のモデルの分解能で表現されている大規模な現象に当たると解釈すると、内側の高分解能でのみ表現される現象は上の関係式の F_s に相当すると考えることも可能である。もしそうであるならば、Fig. 3に示すようにグローバル・モデルのスペクトル領域とローカル・モデルのスペクトル領域とを波数空間の世界において結合するという計算手法も有り得ると言える。

具体的には、いま関心のある領域に関して、波数のスペクトル表示を行い、両モデルに共通の波数の小さいスペクトル領域があるようにさせる。そして、その領域のスペクトル成分については外側のモデルの

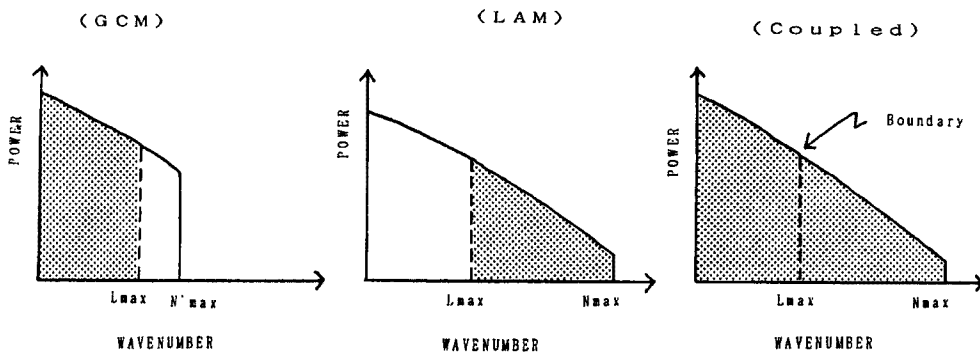


Fig. 3. A conceptual description of the spectral boundary nesting method.

ものを用いる。この部分が、上述の F_i に当たる。従って、外側のモデルでグローバルの観点から表現した大規模現象とは少しだけ異なる。

このような考え方にに基づきネスティングを行う方法を従来の格子点の境界で結合する方法と区別して「スペクトル空間境界結合」と命名した。この方法は、格子点モデルの方法といくつかの点で大きな違いを生む。例えば、大規模現象については外側モデルと殆ど同じであるから、当然の結果として大規模な気象の場の位相速度がスムーズにつながり、両モデルの間でズレができない。また、大規模現象に関する物理過程が外側のモデルに結果として一致するが、小規模現象については、内側のモデルのそれに従う。これは、気候モデルというものを開発する上で実用上興味ある特徴である。

3. 計算結果について

3.1 GCM に対するネスティングの試行

かなり抽象的な説明にとどまったが、スペクトル空間境界結合によるネスティングの概念を述べたので、次に、実際この方法で計算した例について見てみよう。

関心のある領域は前述したように日本列島とその周辺であるので、領域モデルがカバーするのは、Fig. 4 に示されている領域とする。この図は、GCM によりグローバルに計算されている中から、この領域だけを取り出して描いた地上気圧分布である。カムチャッカ沖に発達した低気圧があり、日本付近は高気圧に覆われている。時期は1月1日である。初期条件として、この日の状態を採用する。

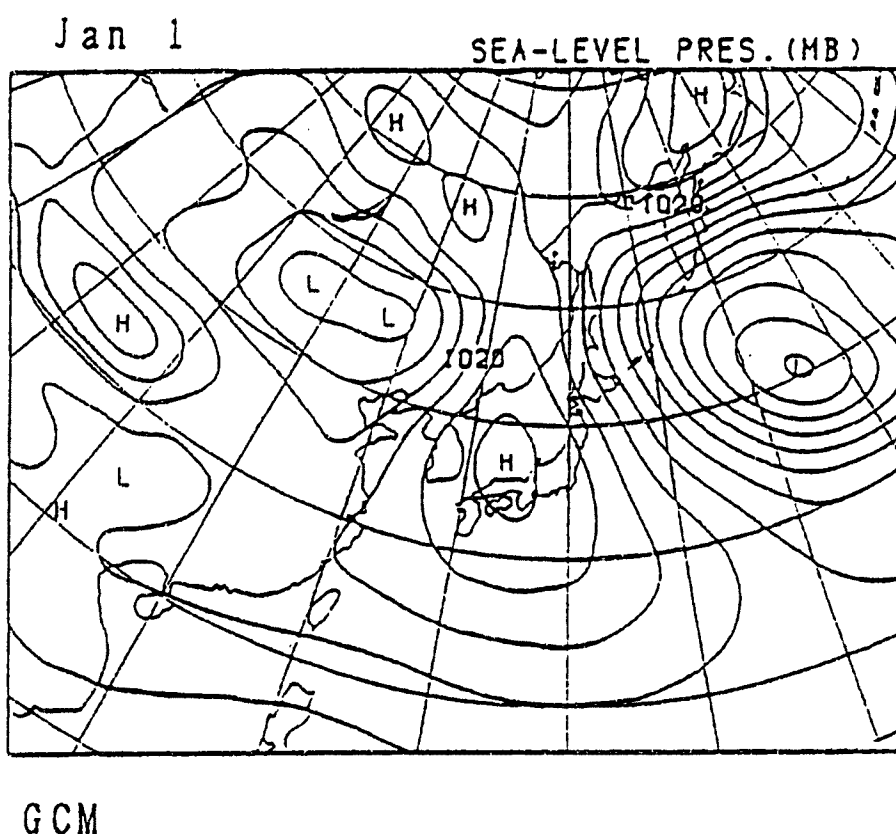


Fig. 4. Area and initial surface pressure for an inner model nested within a global model.

初期条件として GCM から全ての情報を内側のモデルがもらった後は、GCM からもらう情報は大規模現象つまり波数の比較的小さい成分の情報だけである。一方、実空間境界結合の方法による試行も行っている。

Fig. 5 は、GCM の 24 時間毎の地上気圧分布を約 16 日間にわたって示している。なお、この場合の GCM の分解能は数 100 Km 程度である。地上気圧分布で見ると、天気図などで見るとほとんど変わらない。すなわち、地上気圧分布にはあまり細かいスケールが表れないからである。

次に、伝統的な手法である実空間境界結合によるネスティングの結果を Fig. 6 に示す。これで見ると数日以内で GCM との差が大きくなり、それ以後は、ネスティングの意味がほとんど無いことが分かる。但し、ここで注意しているのは、内側のモデルの物理過程が長時間積分つまり気候モデル向きに出来ていないモデルを用いている点である。すなわち、ここで使っている領域モデルは、数値天気予報に現業用に使われていたもので、放射過程が欠けている。モデルの水平分解能は約 120 Km であるから、GCM より 5 倍程度分解能が細かい。放射過程が GCM と同じく組み込まれていれば、Fig. 6 ほどには悪い結果にならなかったであろうと予想はできる。しかし、いまの程度の広さの領域を扱う場合には、たとえ物理過程が GCM と同じであっても、遅かれ早かれ結果は似たようなものになる可能性がある。

これに対して、スペクトル空間境界結合によるネスティングの計算結果は Fig. 7 に示されている通り、極めてよく GCM のそれに一致している。手法の原理から当然の結果であるともいえる。それで問題のポイントは、領域モデルにおいて小規模現象が現実的に再現できているか、である。そういう目で見ると、確かに GCM の場合よりもこの領域モデルの方がより細かい変化を表現しているように見える。この細かい変化が果たして現実的かどうかは今すぐには判断できない問題である。これについては、別途の検証実験が必要である。

以上見たように、スペクトル境界結合によるネスティングは大変有望な結果を示唆している。

3.2 気候値の再現検証

本稿の研究の目的は、ローカル気候を再現するために、ネスティングによる領域気候モデルの可能性を明らかにすることである。そして、結局は、気候がどの程度再現できるかどうかの問題になる。それを検証するために Fig. 8 を示す。これは、GCM が再現した季節変化の中から 1 月を取り出し、領域モデルをネスティングして、その領域モデルの 1 カ月間の降水量の水平分布を描いたものである。すなわち、前節の 1 カ月積分の結果であると考えれば良い。

この図を見てすぐに気がつくのは、冬の降水は勿論大部分が雪であるから、日本列島の日本海側の多雪地帯が全然再現されていないことである。そして、日本海に多くの降水が見られる。これは恐らく事実でないから、気候の再現には成功していないといわざるを得ない。しかし、日本列島の南方沖の降水帯はある程度現実的であると思われるが、これも実際の観測値が少ないので比較が難しい。

このような気候モデルとしての不十分さは、分解能の未だ不十分であることを反映している。すなわち、いま領域モデルとして用いているモデルは水平分解能が 120 Km 程度であるから、日本列島の急峻な山系が全く表現されていない。これは、日本列島の局地気候の再現にとって致命的であることを示している。

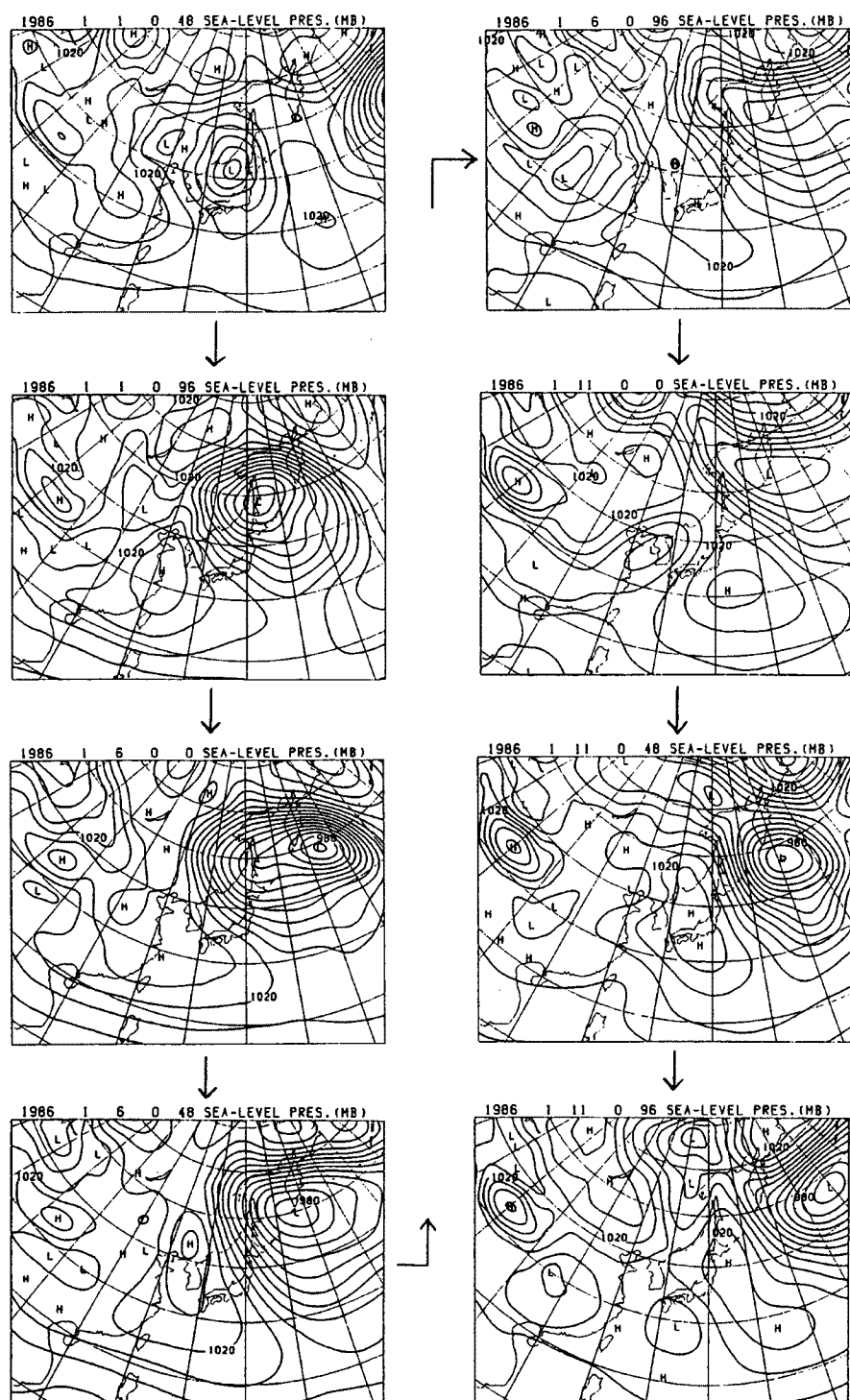


Fig. 5. A time sequence of surface pressure patterns calculated by a GCM. Every 24 hours along the alows (from the left top to the right bottom) with the initial of Fig. 4.

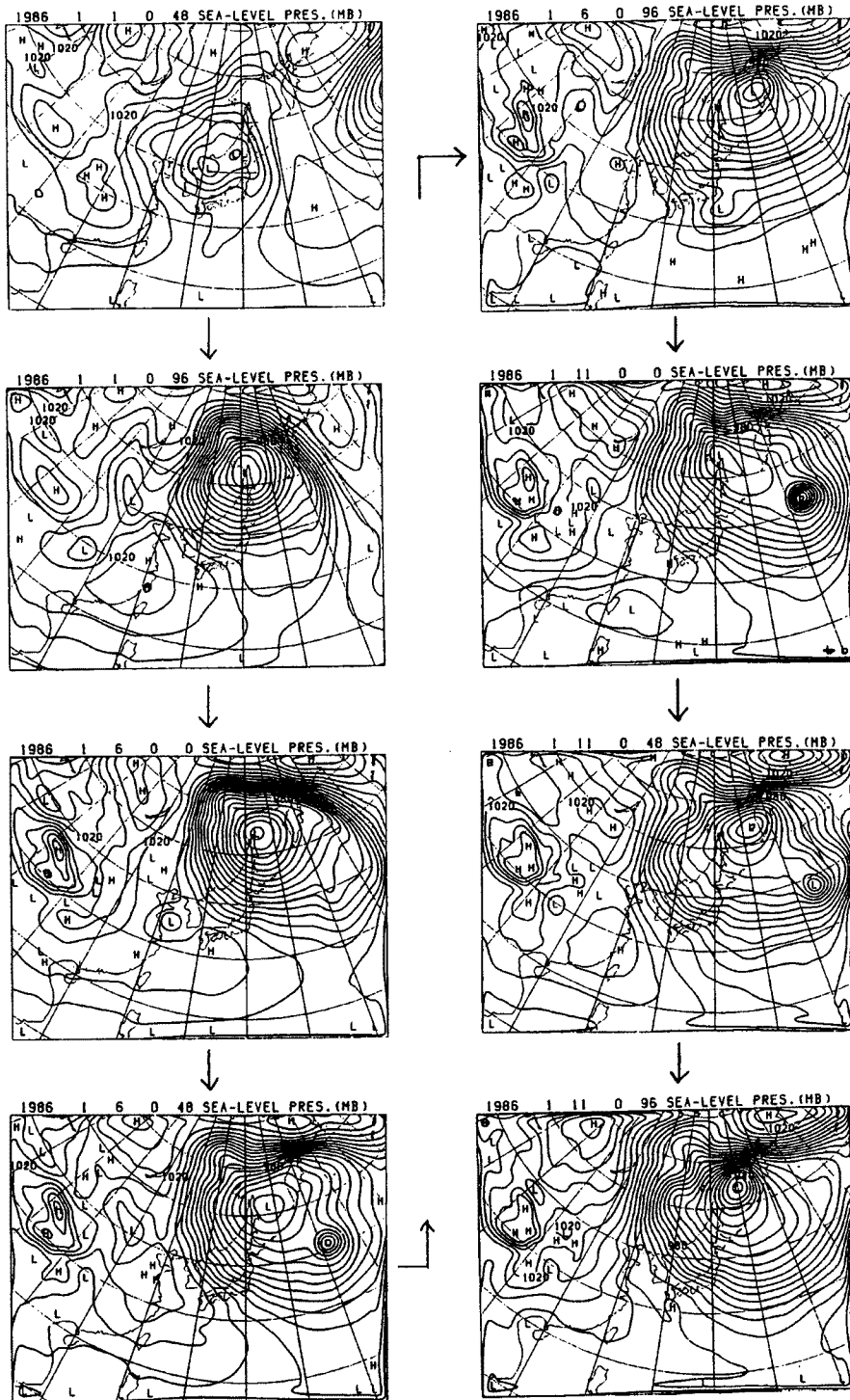


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for a model nested by the grid lateral boundary method.

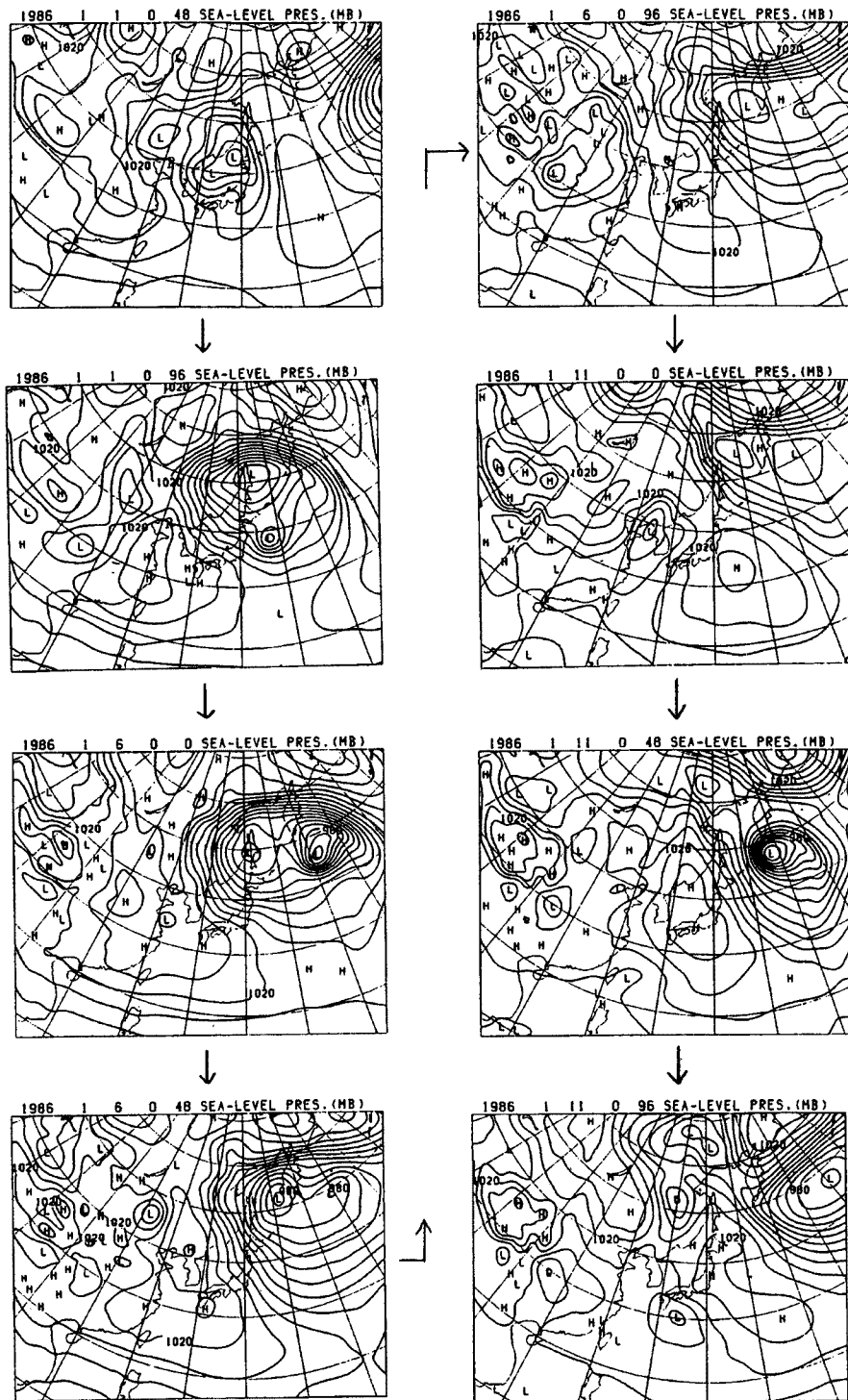


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for the spectral boundary method.

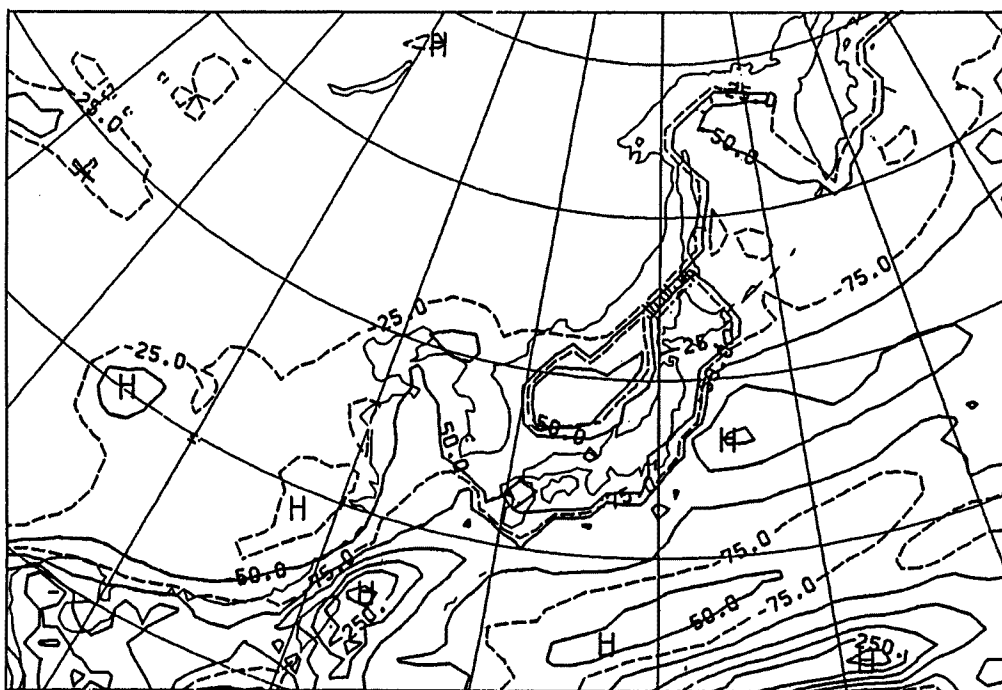


Fig. 8. The monthly amount of precipitation calculated by a model nested by the spectral boundary method.

4. 結 語

グローバル気候モデルにきめの細かいローカル気候モデルを結合させるネスティングの問題点を調べた結果、スペクトル境界結合と呼ぶ手法が有効であることが判明したが、同時にローカル気候モデルの分解能が十分高いものであるべき点が認識された。

謝 辞

本稿を記述するに当たり、村松教授ほか災害気候部門のスタッフから色々と貴重な見解を頂いた。ここに記して、感謝する。

参 考 文 献

- 1) Gorge, F., and G. T. Bates : The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 117, 1989, pp. 2325 - 2347.
- 2) Kida, H., T. Koide, H. Sasaki and M. Chiba : A new approach for coupling a limited area model to a GCM for regional climate simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 69, 1991, pp. 723 - 728.
- 3) Tatsumi, Y. : A spectral limited-area model with time-dependent lateral boundary conditions and its application to a multi-level primitive equation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 64, 1986, pp. 637 - 664.