

局所気象現象の数値的研究

余田史絵 (指導教員: 金子 晃)

1 はじめに

近年、天気予報における情報科学の重要性はますます増大しつつある。特に、数値予報は今や天気予報において欠くことのできない技術である。数値予報の精度は向上しており、今後もますますの高精度化が期待されている。数値予報の精度に影響を与えるものとして、格子点の大きさと初期値が重要である。格子点の大きさは、小さいほど予測精度が高くなるが、計算量に大きく影響を与えるため限界がある。他方、パーソナルコンピュータの進歩は、従来スーパーコンピュータにしかできなかったこれらの計算の一部を個人レベルでも実行可能としつつある。現在の数値予報で運用されている、気象庁の非静力学モデルも元来ワークステーションで動かすものであったが、近年のパーソナルコンピュータの機能向上に伴い、パーソナルコンピュータでもかなり本格的な数値実験が十分できるようになった。また、個人レベルで予報の計算が可能となった場合、気象予報の配信に頼らず局所的な予測を現地で行えるようになることも期待できる。本研究では、非静力学モデルと、大気シミュレーションモデル WRF を改良し、パーソナルコンピュータで運用する。局所気象現象の例として、六甲山に吹く風の再現を試みる。

2 数値予報

気象力学の重要な応用が数値予報である。数値予報の目的は、観測によって得られた現在の気象状況を初期値として、気象現象の変化を記述する方程式系を時間について積分することによって将来の気象状況を予測することである。数値予報を行う手順としては、まずコンピュータで取り扱いやすいように規則正しく並んだ格子で大気を細かく覆い、格子点の気圧、気温、風などの値を世界中から送られるデータを使い、補間により求める。この計算に用いるプログラムを数値予報モデルという。

2.1 基礎方程式 (プリミティブ方程式)

数値予報のプログラム作成のもとになる基礎方程式は以下の通りである。

水平方向の運動方程式
Newton の運動方程式を回転する地球の表面に固定された座標系で書き直したもの:
水平方向の風 (u, v) の時間変化
= 移流効果 + コリオリ力 + 水平方向の気圧傾度力 + 摩擦力

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + 2\Omega v \sin \varphi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - 2\Omega u \sin \varphi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y\end{aligned}$$

ここに、 w は風速の鉛直成分、 p は気圧、 ρ は密度、 Ω は地球の自転角速度、 φ は緯度、 F は摩擦力
コリオリ力とは、慣性力の一種であり、慣性座標系上で記述された運動方程式を回転座標系に座標変換するこ

とで導かれる。

鉛直方向の運動方程式
静力学平衡 $\Delta p = -\rho g \Delta z$ の仮定の下で
鉛直方向の気圧傾度力 = 重力

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

気圧の時間変化率 $\omega := \frac{dp}{dt}$ を鉛直 p 速度と呼ぶ。
温帯性低気圧などを対象とする、水平スケールが数百 km ~ 数千 km、鉛直スケールが十数 km 総観規模の現象のように、縦横比 (横/縦) が 1 より非常に大きい場合には、次のような静力学平衡の仮定が非常に有効な手法となる。

$$\frac{dp}{dt} = -\rho g \frac{dz}{dt}$$

このとき、 $\omega = -\rho g w$ で、鉛直方向の風速成分と符号が逆になる。

連続の方程式 大気の質量保存則を表す:
密度 ρ の時間変化 = 移流効果 + 収束・発散による密度 ρ の変化

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial x} - v \frac{\partial \rho}{\partial y} - w \frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

熱力学方程式 熱エネルギーの保存則を表す:
温位の時間変化 = 移流効果 + 非断熱過程に伴う温位の変化

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - v \frac{\partial \theta}{\partial y} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} + H$$

水蒸気の輸送方程式 水蒸気量の保存則を表す:
比湿 q の時間変化 = 移流効果 + 非断熱過程に伴う加湿

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} + M$$

気体の状態方程式

$$p = \rho RT$$

以上は、 H, M という、観測では直接得られない、時間変化する量を含む (雲物理過程、降水過程等)。これらは種々のモデルに基づく補助方程式で本体と連動させて別途求める。

2.2 物理過程

数値予報モデルが扱う物理過程には、山岳などの地形の影響、太陽からの放射、地表面の摩擦、大気と地表面の熱や水蒸気の交換、雲の生成・消滅や降水などの偏微分方程式だけでは扱えない様々な効果が考慮され、モデルとして提案されている。

3 NHM:気象庁非静力学数値予報モデル

NHM (Non-Hydrostatic Model) は気象庁が気象研究所と協力して開発した局所激甚気象現象の解析に使うソフトで、ユーザーグループにも開発の支援を受けている。静力学近似は、気圧の鉛直経度が大気の重さに

よって求められるという近似だが、メソスケール現象を対象とするメソ予報でも、対流現象は小規模であるため水平スケールが鉛直スケールと同程度あるいはそれ以下であり、静力学方程式の関係は成立しない。そこで非静力学モデルに更新され、方程式として完全圧縮方程式系（鉛直方向の加速度として重力加速度以外も加わる）が採用されるなど、鉛直流や降水過程がきめ細かく計算されている。2004年9月から、数値予報に非静力学モデルが導入され、現在では水平分解能が約5kmに高解像度化した。予報時間が18時間から15時間と短くなる一方で、予報回数が1日4回から1日8回に倍増した。これによって新しい観測を取り込んだ予報を頻繁に行うようになった。現在、解析から予報の出力までは約2時間である。今後も高解像度化が期待される。

3.1 NHMの基本ソフトとデータ構造

NHMはフリーソフトではないため、気象庁数値予報課に申請し、IPアドレスを登録してftpやcvsを用いてソースの貸与を受け、解析を行った。まず、基本ソフトの準備と関連ユーティリティのメイクを行った。以下に主要なプログラムとデータを示す。

1. NusDaS

気象庁が常用している独自のデータフォーマットであり、気象庁のサイトから取り込んだ観測データやNHMの主プログラムfcst_nfxの計算結果の出力もこのフォーマットとなる。

2. fcst_nfxの入出力データ

fcst_nfxは非静力学モデルの数値計算の主プログラムで、139個のFortran90のソースから成り、libnwp.a, libnusdas.aなどもリンクする。

3. nhmcst_n01の入出力データ

nhmcst_n01は、GTOPO30から作成した10度(1km)毎の地形データ。

4. nhmsfccnst_n01の入出力データ

nhmsfccnst_n01は地表面パラメータデータを作成するプログラム。

5. nhmgrd_n01の入出力データ

主プログラムで使用する初期値、境界値データを準備するためのツール。

6. その他の入出力データファイル ptgrd (地表面データ), mfin (初期値データ), mfex (境界値データ), mtuv (), BANDCNX (放射定数データ), band.dat (同), band2004.dat (同), OZN_T42L68_clm.dat (オゾン気候値データ), constant_aertod_0608.dat (エアロゾル気候値データ)

7. ネームリスト namelistnnnn.txtの形をした名称のファイルで、nnnnは0000から始まる4桁の番号である。

3.2 使用計算機環境

diamond: Opteron 2431 2.4GHz 6コア × 2, メモリー 32 GB

OS: CentOS 5.3

goophy: Intel Core i7 3.0GHz 4コア (Intel 仮想技術で8コアに見える), メモリー 8 GB

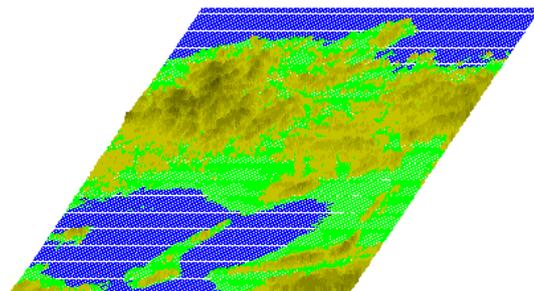
OS: Ubuntu 10.04 (x64版)

shiezo: AMD Athlon(th) 64 X2 2.4GHz 2コア, メモリー 8 GB

OS: Ubuntu 9.04 (x64版)

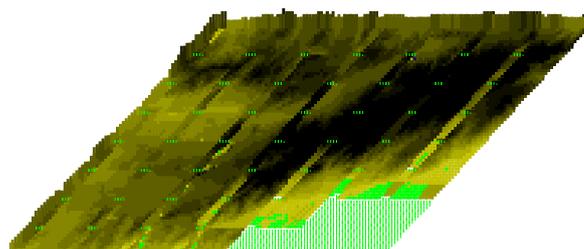
3.3 定数データの準備

NHMを動かすのに必要な各種定数と基本的なデータの準備をする。地形データにはUSGS (US Geological Society)のGTOPO30という標高データとGLCCの土地利用データ、さらに国土交通省の土地利用データを用いる。取得したファイル群からNHM付属のツールを用いて10度毎に分割したNHM用の1kmメッシュデータ(標高データと海陸データ)を作成する。



図：GTOPO30から得た六甲山付近の立体表示

しかしこの格子は約1km間隔なので、山の周辺の局地的な計算には地形データを自分で用意する必要がある。



図：用意した地形データからの六甲山付近表示

3.4 実装

上で準備した標高データを用いて、気象庁のサイトから取り込んだ2011年1月00日のデータを環境場として、初期・境界条件とし、NHMを動かして季節風(いわゆる六甲おろし)の計算を試みた。

4 まとめと今後の課題

本研究では、自ら用意した山岳データを用いて、気象庁非静力学モデルを実行し、季節風の挙動を調べた。今後はメッシュを細かくし、より精細な地形、また他の地形についても表現したい。

参考文献

- [1] James R. Holton, "An introduction to DYNAMIC METEOROLOGY Fourth Edition", Elsevier, 2004.
- [2] 小倉義光.: "気象力学通論", 東京大学出版会, 1978.
- [3] Kazuo Saito, Teruyuki Kato, Hisaki Eito: "NHM_Manual",