

数値予報の歴史、現状、課題

元気象庁気象研究所 増田善信

1, 正確な天気予報を出すためには

天気予報とは

晴れ、曇り、雨、雪、霧などの天気状態と、気温、湿度、風向、風速などを、ある広がりを持った領域で、これらの量や状態の時間経過も含めて予測し、発表すること

晴れ、曇り、雨、雪、霧などの天気状態は大気の物理量ではなく、気圧、気温、風、水蒸気量など大気の物理量の空間分布と変化、特に水蒸気量の空間分布と、相変化も含めた変化に関係したものである

気圧、気温、風、水蒸気量は物理法則によって変化しているので原理的には予測でき、予想天気図をつくることができる。それをいけば予報は可能

「気象学は精密科学だ」 V. ビャークネス (1913年)

正確な予想天気図をつくるための必要十分条件

大気を変化させる物理法則について正確な知識を持つこと

正確な初期値 (風向、風速、気圧、気温、水蒸気量) を持つこと

正確な天気予報を出すための条件

正確な予想天気図を持つこと

予想天気図から正確に天気に翻訳すること

予報時間に間に合うこと - 高速電子計算器の出現と高性能化

2, 正確な予想天気図をつくるために - 数値予報の原理

空気は流体。従って流体力学の法則で運動している

V. ビャークネス (1904) 「力学的、物理的基礎にたつ天気予報の問題」

例えば、運動の式 (ニュートンの運動法則): 力は加速度に等しい

$$V / T = F$$

F: 空気に働く力 (気圧傾度力、コリオリーの力、摩擦力など)

$$F \text{ が分かれば、} (V)_{t=t+\Delta t} = (V)_{t=t} + (F)_{t=t} \Delta t$$

で、 Δt 時間後の風が求まる。これを繰り返せばよい

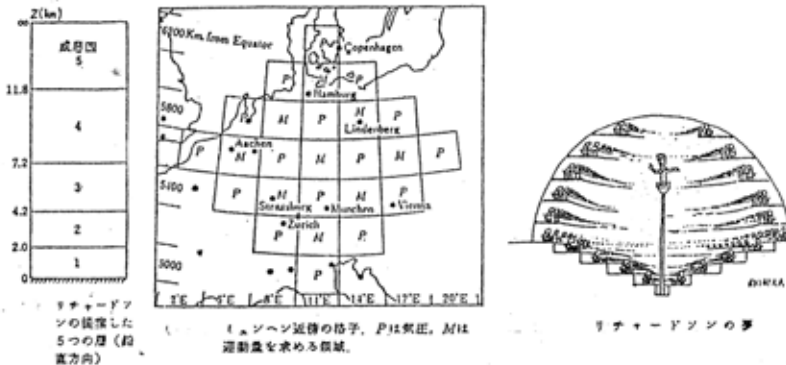
連続の式、熱力学の式、水蒸気変化の式も同じ形式。従って、密度 (気圧)、気温、水蒸気量も同じ方式で求まる

3, リチャードソンの挑戦と失敗

L. F. リチャードソン (1922) 「数値的手法による天気予報」

V. ビャークネスの考えを具体化 大気を5層に分け、全世界を3200個の格子点で覆い、54000人の人を使えば、24時間予報ができ、しかも予報時間に間に合う - “リチャードソンの夢”

1910年5月20日の天気図からミュンヘン付近の1点の気圧変化を計算 6時間の気圧変化の計算値、145 hPa にもなる。理由分らず長年放置



4, リチャードソンはなぜ失敗したかー気象現象とノイズ

大気中には色々なスケールの現象があるー乱流から超長波まで
スケールと加速度(変化率)

高低気圧の気圧変化 1日で10hPaの気圧変化
 $= 10 \text{ hPa} / 1 \text{ 日} = 10 \text{ hPa} / (24 \times 60 \times 60) \text{ sec} = 10^{-4} \text{ hPa/sec}$

乱流の気圧変化 1分で約0.1hPaの気圧変化
 $= 0.1 \text{ hPa} / 1 \text{ 分} = 0.1 \text{ hPa} / 60 \text{ sec} = 10^{-3} \text{ hPa/sec}$

リチャードソンは天気と無関係な乱流、すなわちノイズを計算していたのである

5, 長波の発見とスケールの概念 - ロスビーの先見性

上層観測の普及と長波の発見

C. G. ロスビー (1939) 長波の移動が最も簡単な流体力学の式で記述されることを明らかにする

大気中には空間的にも時間的にも特徴を持ったスケールの擾乱がある

天気に関係する主要な現象

(ア)主として大規模な水平運動の現象 高、低気圧に付随した天気

(イ)主として小規模な鉛直運動の現象 雷雨、集中豪雨など激しい天気現象

これらの擾乱は階層的に分布しており、第一近似として孤立系として取り扱える

h	1ヶ月	1日	1時間	1分	1秒
10 ⁵ m	気象学 (大規模な擾乱) プラネタリー波、長波、短波、波列				マイクロスケール
2x10 ⁴ m		高気圧 (低気圧) 気象学 (大規模な擾乱)			マイクロスケール
2x10 ³ m		積層雲 積層雲			メソスケール
2x10 ² m		積層雲 積層雲	積層雲 積層雲 積層雲		メソスケール
2 m			積層雲 積層雲 積層雲		メソスケール
200 m			積層雲 積層雲 積層雲		メソスケール
20 m			積層雲 積層雲 積層雲		メソスケール
WMO 大気科学委員会 (1997)	気象スケール	気象スケール	メソスケール	メソスケール	メソスケール

図1.1 時間・空間スケールによる大気中のじょう乱の分類。(下山紀夫, 1997)

6, 大規模運動の特徴を利用したノイズの除去 - チャーニーの功績

大規模運動の特徴

空気はほとんど水平運動をしている（準水平運動）

風は等圧線にほぼ平行に吹いている（準地衡風運動）

地衡風からの僅かなずれが、僅かな収斂、発散を生み、それが天気現象（雲や雨や雪）をつくっている

準地衡風近似の導入とノイズの除去（J・G・チャーニー（1947年））

7, 数値予報の実用化 - プリンストン高級研究所のチームワーク

大気の中層（500 hPa 付近）は鉛直流が最大 500 hPa は非発散高度バロトロピック（順圧）予報が可能

チャーニー・エリアセン（1949）

45 N 緯度帯に沿った 500 hPa 面の高度の 24 時間予報に成功

電子計算機 ENIAC による最初の数値予報（チャーニーなど、1950年）24 時間予報を 4 例

$s = 736 \text{ km}$ 予報領域 15×18 計算機 ENIAC

November Storm の予報の成功（1953）と JNWPU の設立（1955）

$s = 300 \text{ km}$ 予報領域 19×19 計算機 I.A.S.

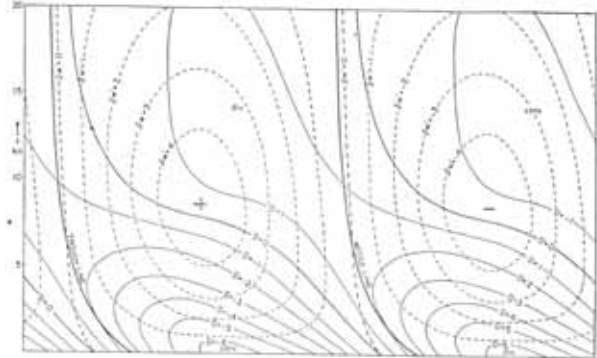
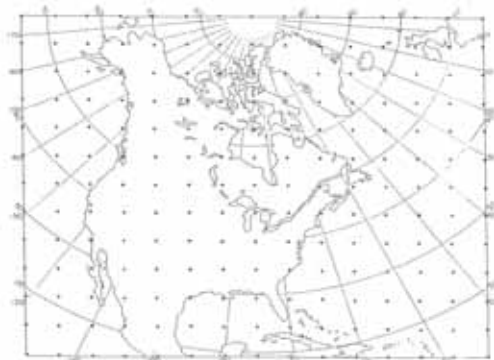
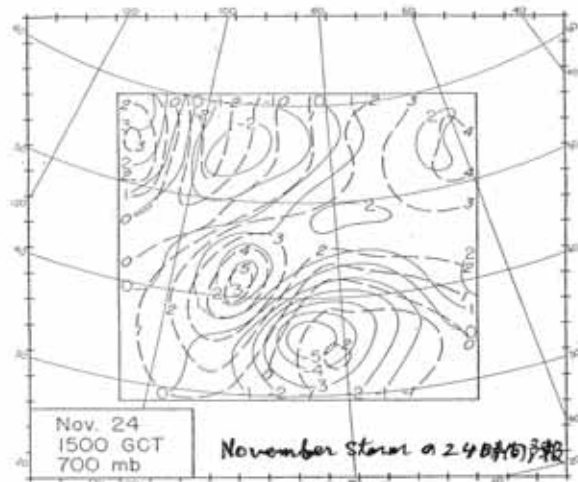


図11 長波の東西断面図、太い実線は鉛直速度の鉛、実線は水平速度、点線は運動量の鉛直成分を示したもので、チャーニー（1947）



ENIACによる最初のバロトロピック予報に用いた格子図



8, わが国の数値予報の始め—当初のモデルを止めアメリカのモデルでルーチン数値予報グループの結成（1953）と関式法による実用化

富士フィルム（Fujic）富士通信機（FACOM 100）電気試験所（MARK）IBM 650 など使える計算機はなんでも利用 - 朝日新聞の学術奨励金の貢献 IBM 704 の導入とルーチン化（1959）

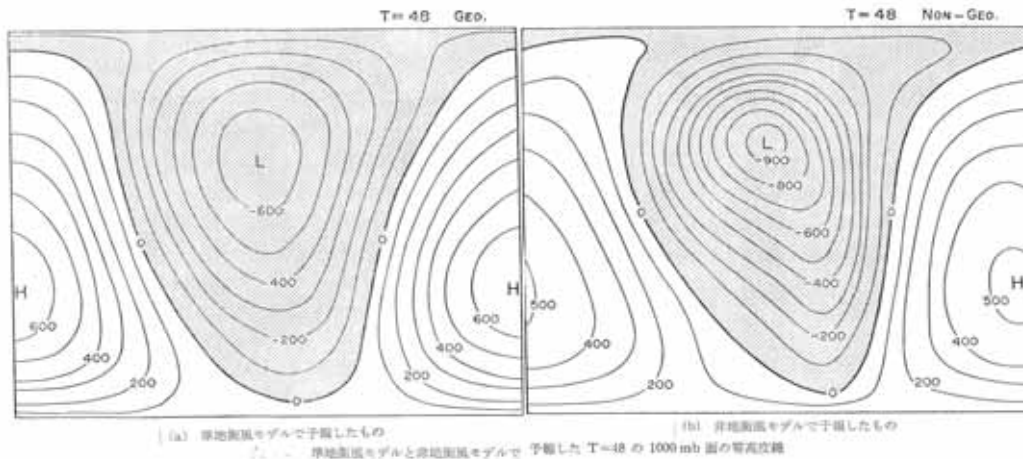
当初の 2 層バロクリニックモデルでのルーチンが、500 hPa 面のバロトロ

ピックモデルに 発達する低気圧を用いたテストはルーチンには向かない
5層客観解析と4層バロクリニックモデルのルーチン

9 , 準地衡風近似から非地衡風モデルへ

準地衡風近似の限界

用いる風は地衡風 実際の風ではないので風の精度を上げる必要がある
高・低気圧の非対称的発達が予想できない
低気圧の閉塞過程が予測できない



北半球 3層非地衡風バランスモデルから北半球 4層プリミティブモデルへ

9 , 数値予報の現状

全球モデル (GSM) 水平解像度 0.5625° (TL319) 水平格子点数 640×320 40層 (地上 ~ 0.4 hPa)

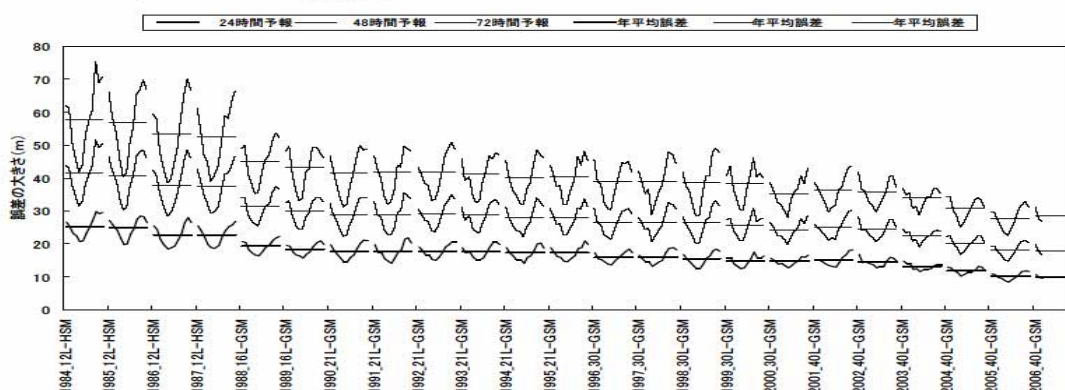
領域モデル (RSM) 水平解像度 20 km 水平格子点数 325×257 40層 (地上 ~ 10 hPa)

メソ数値予報モデル (MSM) 水平解像度 5 km 水平格子点数 721×577 50層 (地上 ~ 21800 m、約 40 hPa)

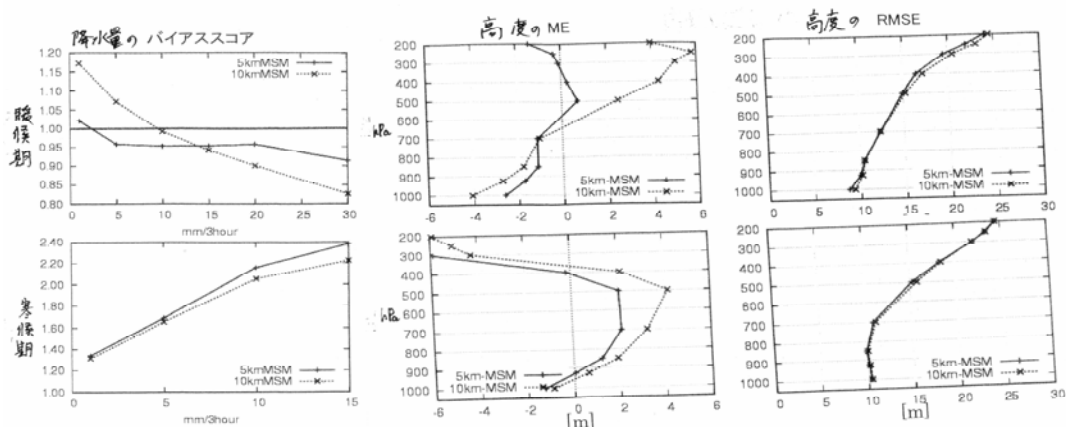
10 , 数値予報の精度

グローバルモデルの精度

全球モデルの予報誤差 (500hPa高度のRoot Mean Square Error)



非静力モデルの精度



1 1、 予報可能性とカオス アンサンブル予報

1 2、 数値予報の将来

中・長期予報の確立

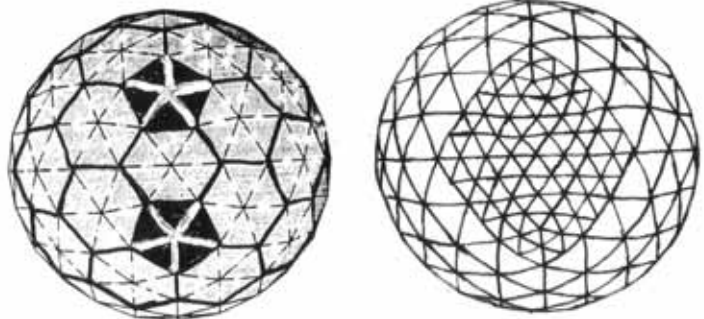
ブロッキングの予報精度を高める

エルニーニョの変化の予測

予報精度を上げるために

スペクトルモデルか格子モデルか - 六角メッシュの利点

(ア) スペクトルモデルは空間の誤差がないという利点があるが、たとえ適合ガウス格子を使っても、極地方と赤道地方の格子密度に大きな差がある



(イ) スペクトルモデルでは孤立した山岳などの表現が不十分

準地衡風近似に匹敵するブレイクスルーするような革命的理論よ出でよ

(ア) 格子間隔を小さくしたり、層の数を増やすことで予報精度は上がるか。計算不安定を避けるため、セミラグランジュ法を使っても時間間隔が小さくなる

(イ) 今一度スケール・アナリシスをして、別の予報方式を考える必要はないか
グリッドスケールの現象とサブグリッドスケールの現象、それぞれの変化の式を連立させて解く方法など

分かりやすい予報解説を求めて

緊急な情報と日常の予報の区別

コンピュータを駆使した分かりやすい解説図

予報の根拠が分かるような解説を

(2 0 0 6 ・ 7 ・ 5)