



「計算科学が拓く世界」第11回

スーパーコンピュータを 用いた気象の予測

防災研究所 榎本 剛

enomoto.takeshi.3n@kyoto-u.ac.jp

2013年12月18日5時限

数値予報精度の向上

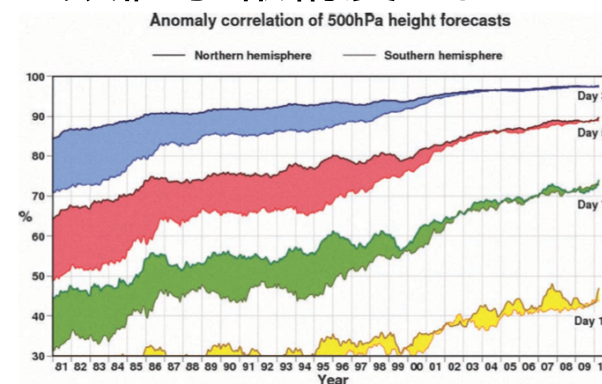


FIG. 1. Evolution of forecast skill for the extratropical Northern and Southern Hemispheres, January 1980–March 2010. Anomaly correlation coefficients of 3-, 5-, 7-, and 10-day ECMWF 500-mb height forecasts plotted as 12-month running means. Shading shows differences in scores between hemispheres at the forecast ranges indicated (adapted and extended from Simmons and Hollingsworth 2002).

Shapiro et al. 2010

数値天気予報の父たち

- V. Bjerknes (1904)
原理的に数値天気予報は可能
- L. F. Richardson (1922)
手計算でやってみたが...
→145 hPa/6hの非現実的な気圧変化
- J. Charney, R. Fjørtoft and J. von Neuman (1950)
ENIACを使った1日予報

The necessary and sufficient conditions
for a rational solution of the problem of
meteorological prediction

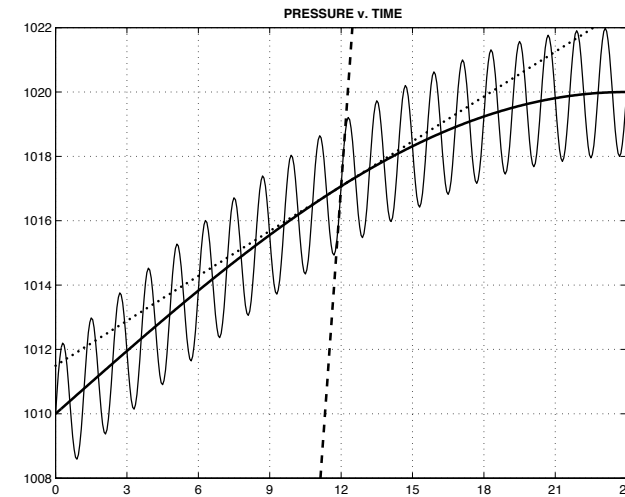
1. One has to know with sufficient accuracy the state of the atmosphere at a given time.
2. One has to know with sufficient accuracy the laws according to which one state of the atmosphere develops from another.



Bjerknes 1904

Richardsonの実験

- 鉛直に積分した浅水モデルでの理想実験
- 傾圧モデルでの気圧変化傾向の試算
 - 145 hPa/6hの非現実的な気圧変化



Lynch 2006

Weather Prediction by Numerical Process

*Perhaps some day in the dim future
it will be possible to advance the computations
faster than the weather advances and
at a cost less than the saving to mankind
due to the information gained.
But that is a dream.*

Richardson 1922

ENIAC: Electronic Numerical Integrator and Computer

- 世界最初の汎用電子計算機（1946年）
- John Mauchly と Presper Eckert が設計
- Mauchly は計算で天気予報をしたいと考え、コンピュータに興味を持った

ENIACによる世界初の数値天気予報

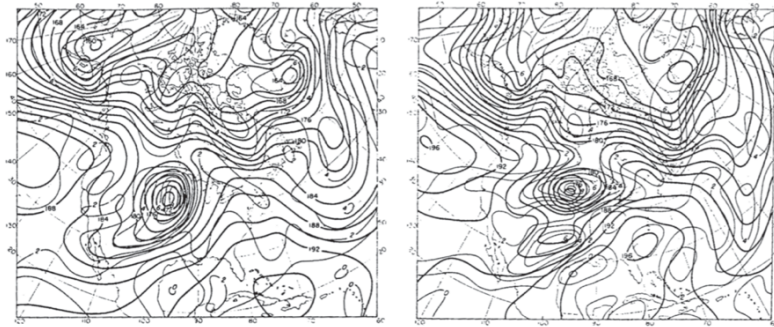


Figure 1. The ENIAC forecast starting at 0300 UTC, 5 January, 1949. Left panel: Analysis of 500 hPa geopotential (thick lines) and absolute vorticity (thin lines). Right panel: Forecast height and vorticity (from Charney, et al., 1950). Height units are hundreds of feet, contour interval is 200 ft. Vorticity units and contour interval are 10^{-5} s^{-1} . One line is omitted from the southern edge and two lines from the remaining edges.

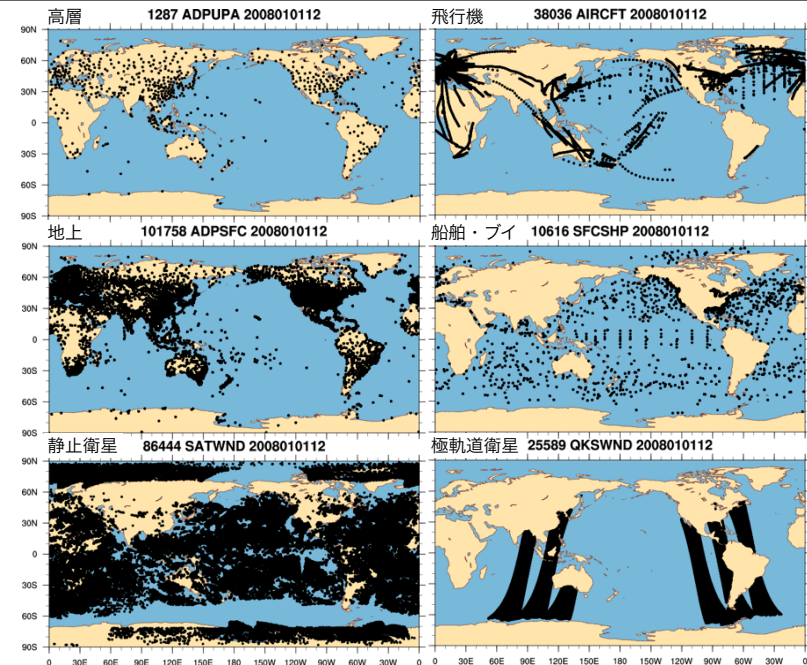
Lynch and Lynch 2008

数値天気予報の父たち

- V. Bjerknes (1904)
原理的に数値天気予報は可能
- L. F. Richardson (1922)
手計算でやってみたが...
→ 145 hPa/6hの非現実的な気圧変化
- J. Charney, R. Fjørtoft and J. von Neuman (1950)
ENIACを使った1日予報

データ同化とは

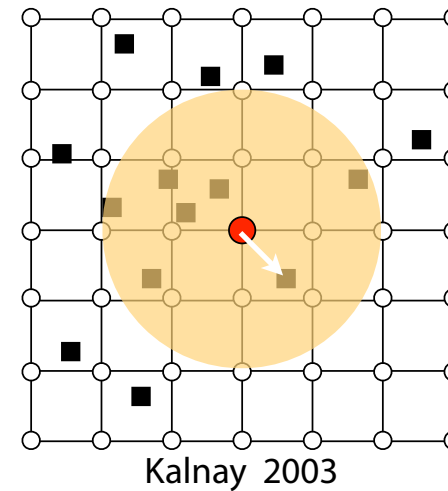
- 数値天気予報に必要な初期値を作る。
- 予測と観測との重み付き平均。



品質管理

- データが信頼できるか確認。
- 可能なものは修正。
- 気候値や予報値から大きく外れていないか。
- 航路から外れていないか。

データ同化



重みをどう決めるか

- 最小二乗法
- 精度（分散の逆数）に比例する。
- 解析精度は全ての精度の和。

観測演算子

- 観測と予測とを比較する。
- 観測の場所に内挿。
- モデルの変数から観測の変数を作る。

様々なデータ同化手法

- 最適内挿法: 最小二乗法に基づく。
- 3次元変分法: 最尤法に基づく。
非線型の観測演算子を利用可。
- 4次元変分法: 時刻の異なるデータを利用可。
- アンサンブル・カルマンフィルタ:
日々変動する予報誤差が得られる。

数値モデルとは

- 物理法則を
プログラムで表現
- 離散化
- パラメタ化

```

Terminal -- vim -- %64.0
(c)Copyright 2002 National Space Development Agency of Japan
(c)Copyright 2002 Japan Marine Science & Technology Center

PROGRAM AFES

! [Basic Parameter Module]
USE NPARAM , ONLY : APREAD, APASET
! [Physics Grid-point Fields Parameter Module]
USE MPMOD , ONLY : PDSIDN
! [DPI Module]
USE WAMP1

!<F&er CYES
-----
      USE cyes_ , only : sumt_log , & lvar
                        cyes_mpl_init , & tsub
                        cyes_mpl_final , & tsub
!
      USE cyes_table_interp , &
                        only : id_sagon , id_sagon , & lvar
                        id_size , id_land , & lvar
                        cyes_table_setz , & tsub
-----
endif

IMPLICIT NONE

!<F&er CYES
-----
      INTEGER(40) :: myga_pumpg
!
endif

GOON FORMAT('CL\
3X,*****<br><br>=====') &
3X,***** AFES *****' &
3X,*** Atmospheric General Circulation ***' &
3X,*** Simulation Code *****' &

<b>cyes</b>
cyes_FWP_12Z1, 367Z

```

物理法則

- 運動方程式
- 熱力学の式
- 連続の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial N_v}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial N_u}{\partial \mu} - \mathcal{D}(\zeta), \quad (1)$$

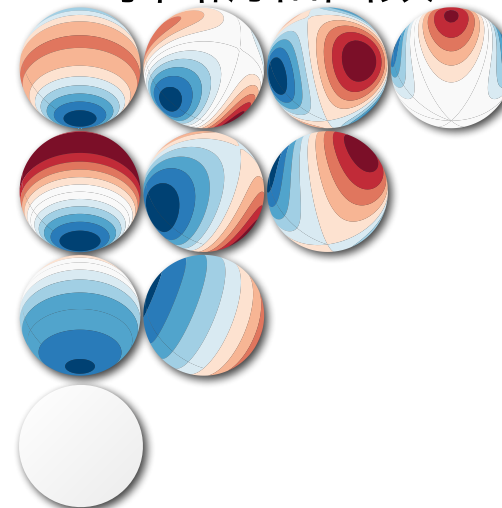
$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial N_u}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial N_v}{\partial \mu} - \nabla^2 (E + \Phi + RT_0 \ln p_s) - \mathcal{D}(\delta), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} = & -\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial(UT')}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial(VT')}{\partial \mu} + T' \delta \\ & - \dot{\sigma} \frac{\partial T'}{\partial \sigma} + \frac{RT_v \omega}{c_p \sigma n_s} + \frac{Q_{\text{diff}}}{c_p} - \mathcal{D}(T'), \end{aligned} \quad (3)$$

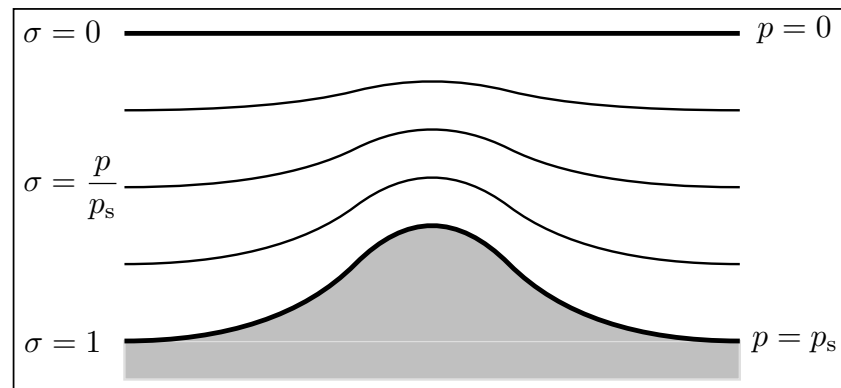
$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial(Uq)}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial(Vq)}{\partial \mu} + q\delta - \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} - \mathcal{D}(q), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = - \int_0^1 \left(\frac{U}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial \ln p_s}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial \ln p_s}{\partial \mu} + \delta \right) d\sigma, \quad (5)$$

球面調和函数



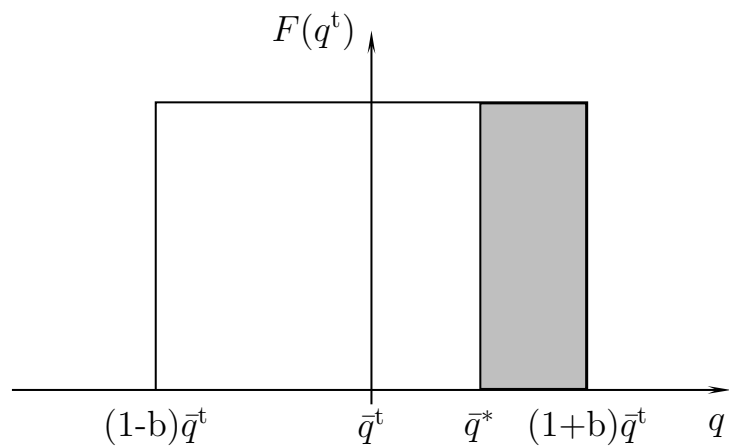
鉛直離散化



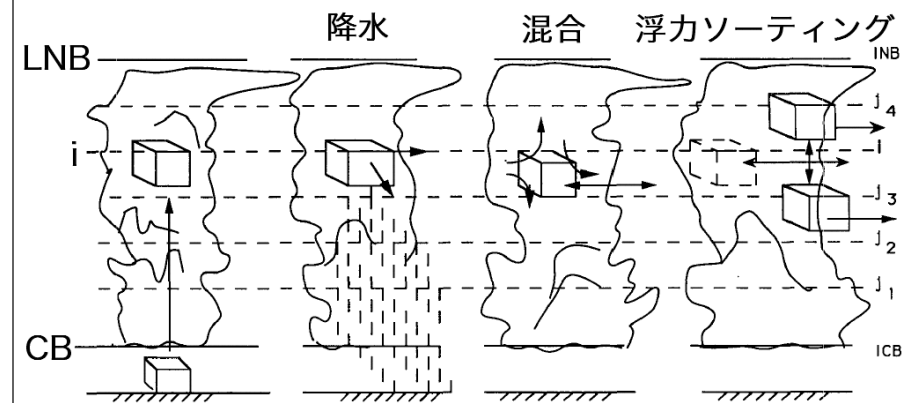
パラメタ化

- 格子間隔より小さな現象
- 格子の量で表現
- 物理的考察, 観測事実に基づく経験則
- 乱流, 積雲対流, 雲物理

部分凝結

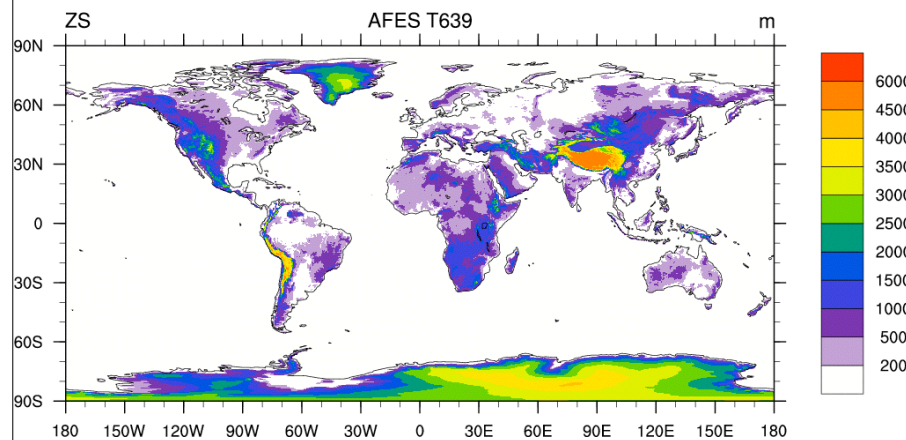


Le Treut and Li 1988



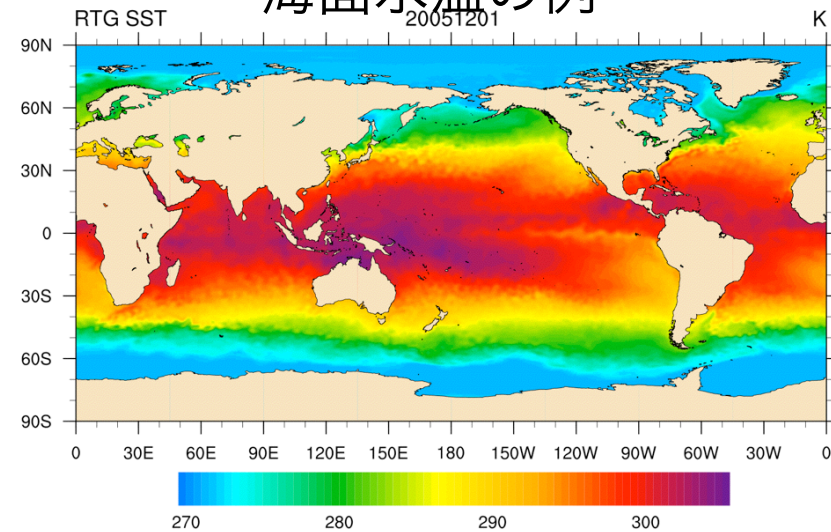
Emanuel 1991

AFESに用いている地形



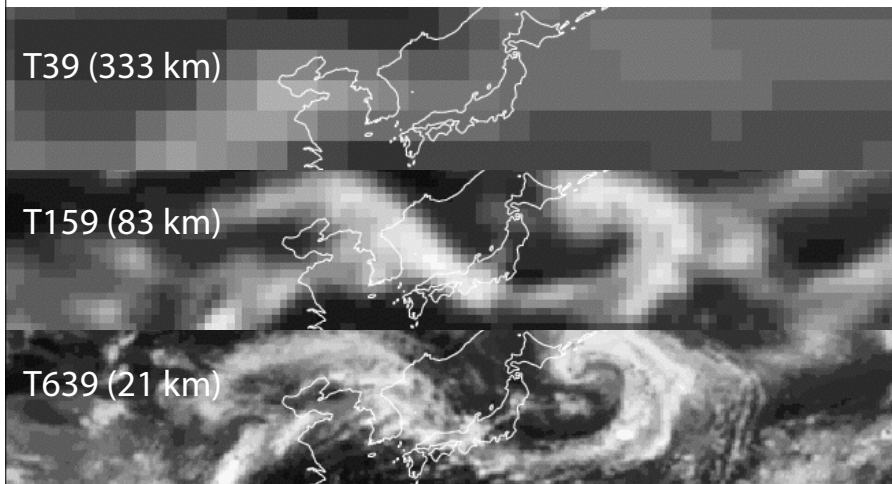
水平解像度 20 km

海面水温の例



米国海洋大気庁 RTG 海面水温

水平解像度依存性



2004/7/17 21UTC (FT=69h)

気象の予測

- 偏微分方程式をコンピュータで解く
- 観測データを同化した初期値
- 地形, 海面水温・海水等の境界条件
- 物理法則をプログラムしたモデル