



「計算科学が拓く世界」第2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4月17日5時限

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

数値予報精度の向上

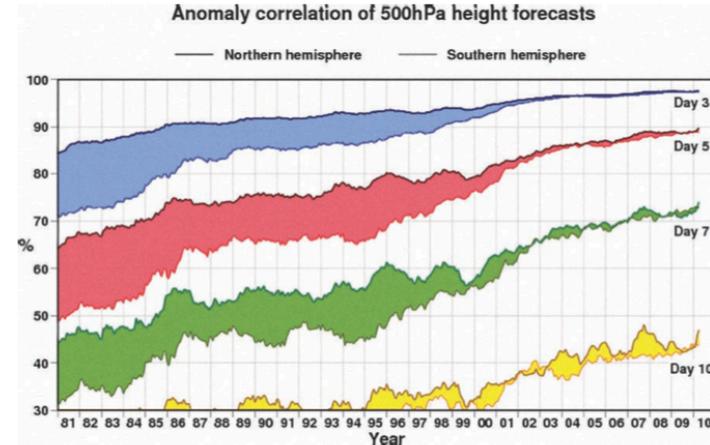


FIG. 1. Evolution of forecast skill for the extratropical Northern and Southern Hemispheres, January 1980–March 2010. Anomaly correlation coefficients of 3-, 5-, 7-, and 10-day ECMWF 500-mb height forecasts plotted as 12-month running means. Shading shows differences in scores between hemispheres at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

Shapiro et al. 2010

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

I. 大気の状態



- 海上, 上空の観測が必要
- 観測データを通報



Bjerknes (1904)

III. 方程式系

- 運動方程式 (3成分)
- 連続の式 (質量保存)
- 大気の状態方程式
- 熱力学の式

$$\frac{du}{dt} - fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$\frac{dw}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (q \mathbf{v}) = 0$$

$$p = \rho RT$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 0$$

Bjerknesでは
熱力学第2法則

Bjerknes (1904)

II. 大気の法則

- 大気は力学過程と物理過程からなる。
- 速度, 密度, 気圧, 気温, 湿度計7変数
- 凝結・蒸発を考慮すると不可逆になる。
- 微量成分を考慮すると方程式が増える。
- 宇宙線, 電磁気, 光学的な効果は未考慮。

Bjerknes (1904)

- 状態方程式は診断の式なので, 偏微分方程式・予報変数は6つ。
- 解析解を求めることは不可能, 不要。
- 一定の時空間スケール以上の現象が予測できれば良い。
- 問題を解くには, 問題を分割すべし。

IV. 問題の分割

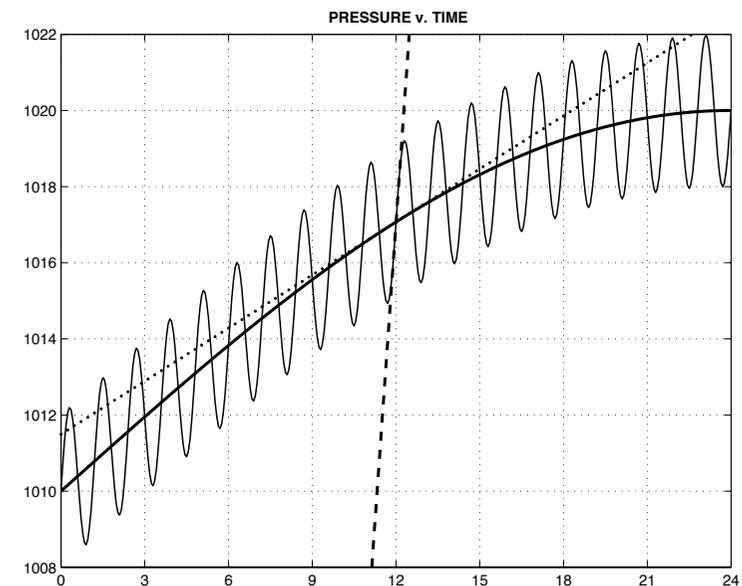
- 離散化して差分や数値積分を用いる。
- 力学変数と熱力学変数を別に解く。

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

V. 具体的な計算方法

- 運動方程式は幾何学的解法, 格子点間は内挿
- 山岳の影響も考慮できる。
- 地表摩擦, 放射, 海面での蒸発, 雲・降水過程は未知の部分が多く経験的な方法が必要。



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

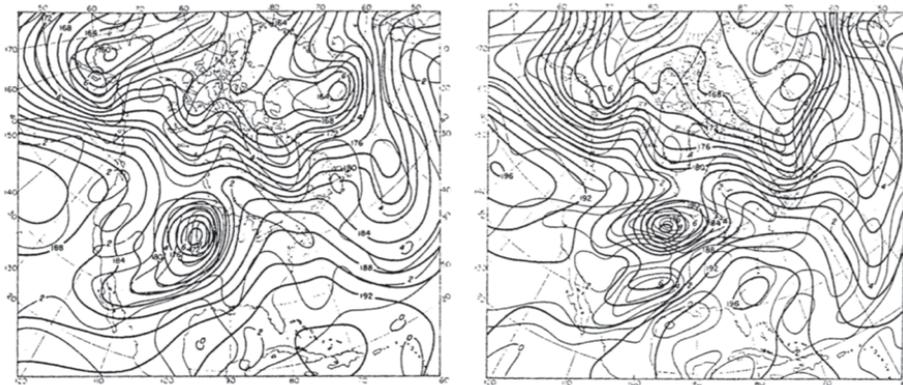


Figure 1. The ENIAC forecast starting at 0300 UTC, 5 January, 1949. Left panel: Analysis of 500 hPa geopotential (thick lines) and absolute vorticity (thin lines). Right panel: Forecast height and vorticity (from Charney, et al., 1950). Height units are hundreds of feet, contour interval is 200 ft. Vorticity 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

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

PHONIAC

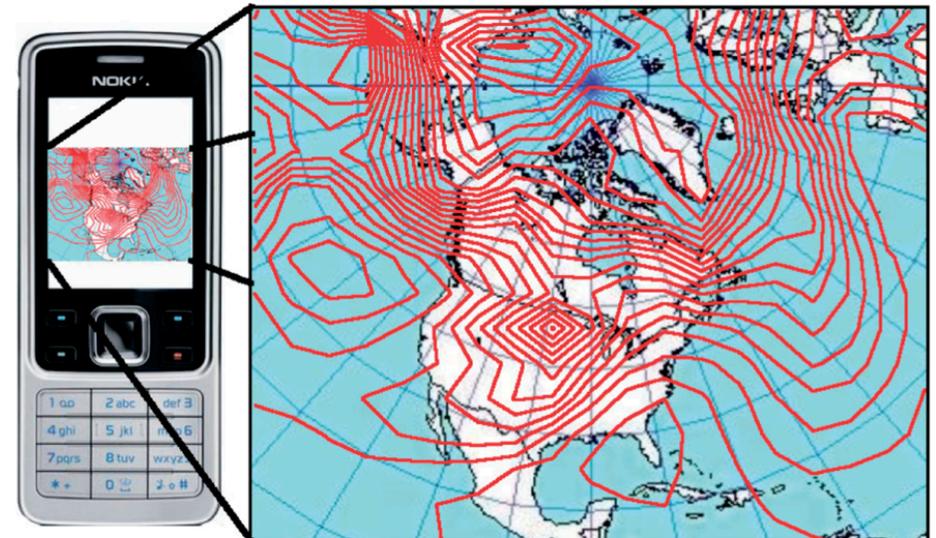


Figure 3. The Nokia 6300, dubbed PHONIAC (left) and the forecast for 0300 UTC, 6 January, 1949 (right) made with the program `phoniac.jaz`. The contour interval is 50 m, as in Figure 2. The complete forecast area, including boundary points, is shown.

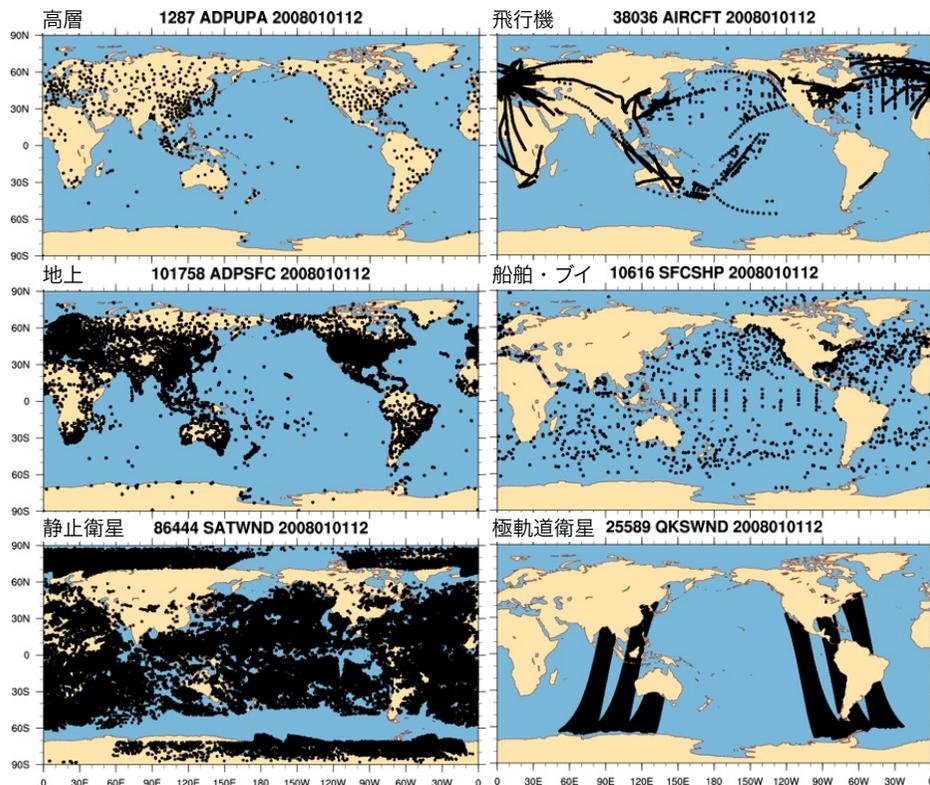
Lynch and Lynch 2008

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

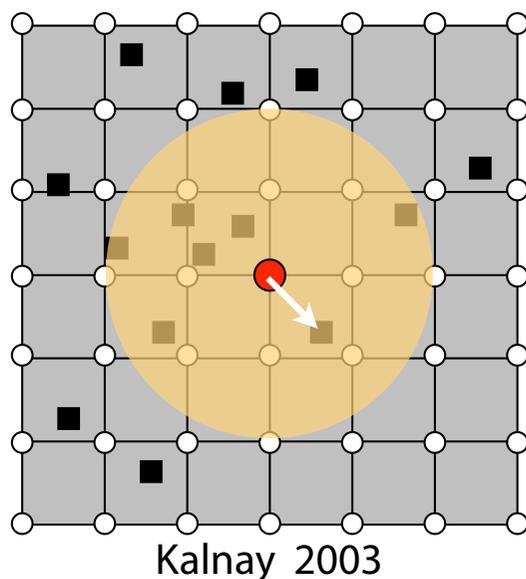
- 数値天気予報に必要な初期値を作る。
- 予測と観測との重み付き平均。



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



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。

重みをどう決めるか

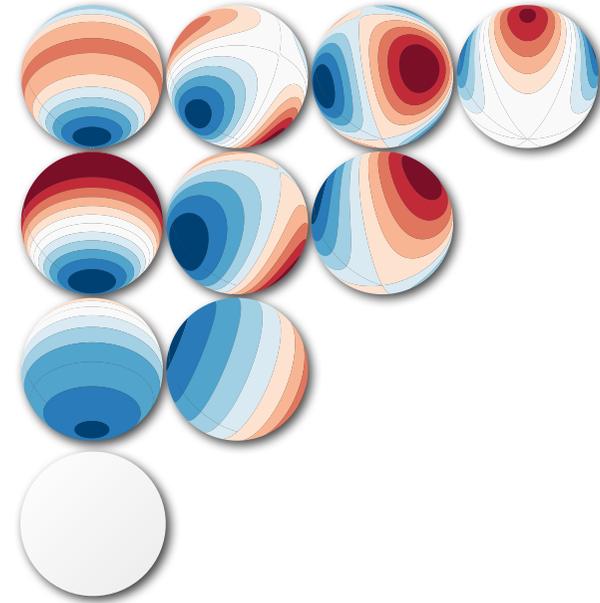
- 最小二乗法
- 精度（分散の逆数）に比例する。
- 解析精度は全ての精度の和。

様々なデータ同化手法

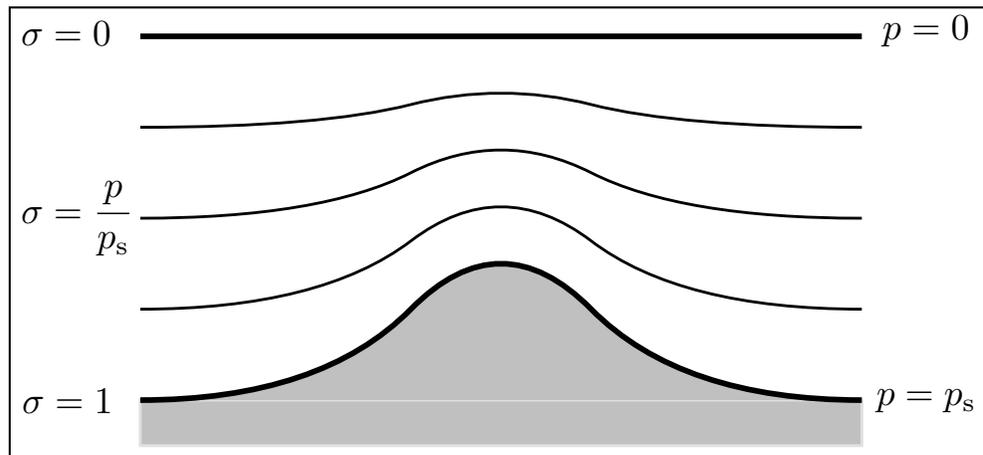
- 最適内挿法: 最小二乗法に基づく。
- 3次元変分法: 最尤法に基づく。
非線型の観測演算子を利用可。
- 4次元変分法: 時刻の異なるデータを利用可。
- アンサンブル・カルマンフィルタ:
日々変動する予報誤差が得られる。

大気大循環モデル

球面調和函数



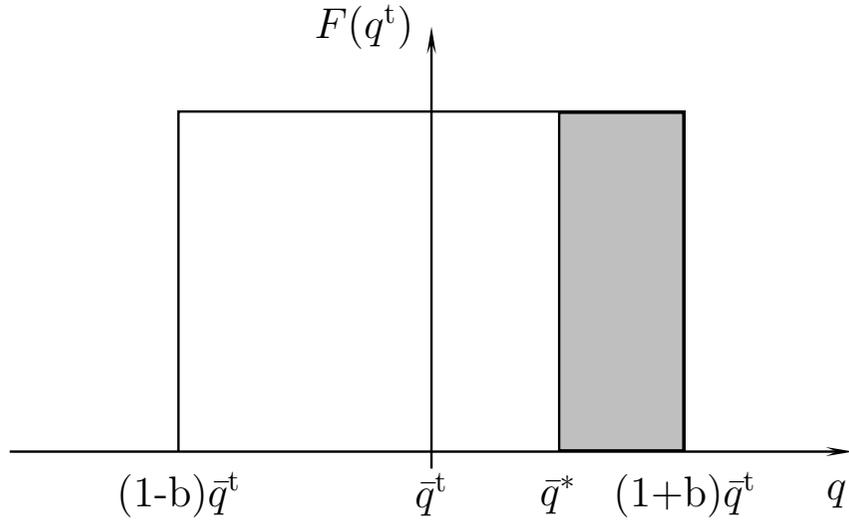
鉛直離散化



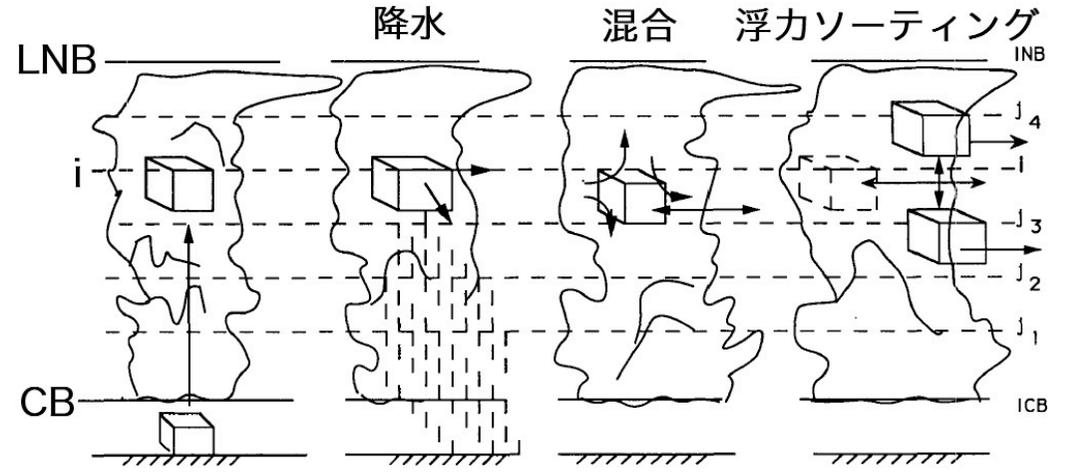
パラメタ化

- 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

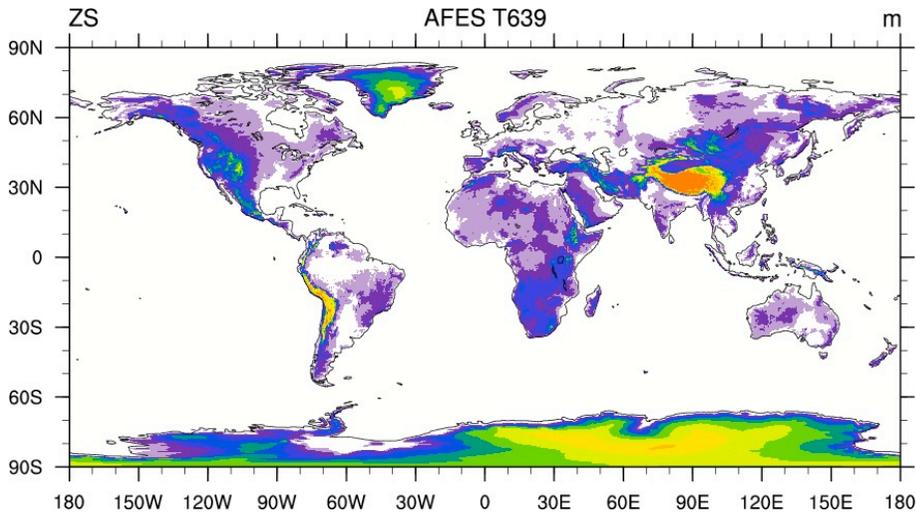


Le Treut and Li 1988



Emanuel 1991

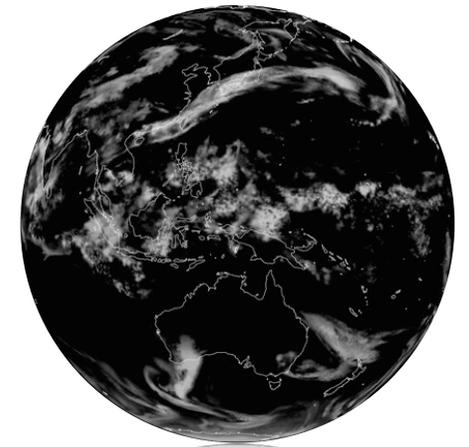
AFESに用いている地形



水平解像度 20 km

AFES

- 地球シミュレータ用 大気大循環モデル
- スペクトル変換法
- 格子間隔～約10 km



Numaguti et al. 1997; Ohfuchi et al. 2004; Enomoto et al. 2008; Kuwano-Yoshida et al. 2011