

「計算科学が拓く世界」第9回

地球・惑星・宇宙と計算科学 1

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

@takeshi_enomoto

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



2017年6月13日5時限

今日のお話

- 数値天気予報の歴史
- 大気大循環モデル
- 理解度チェック

数値予報の歴史

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

数値気象予測のための必要十分条件

1. 現在の大気の状態の精度のよい推定値
2. 大気の状態の時間発展を記述する精度の良い方程式系

BJERKNES, V., 1904: Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik (The problem of weather prediction, considered from the viewpoints of mechanics and physics). – Meteorol. Z. 21, 1–7. (translated and edited by VOLKEN E. and S. BRONNIMANN. – Meteorol. Z. 18 (2009), 663–667).

Bjerknes 1904

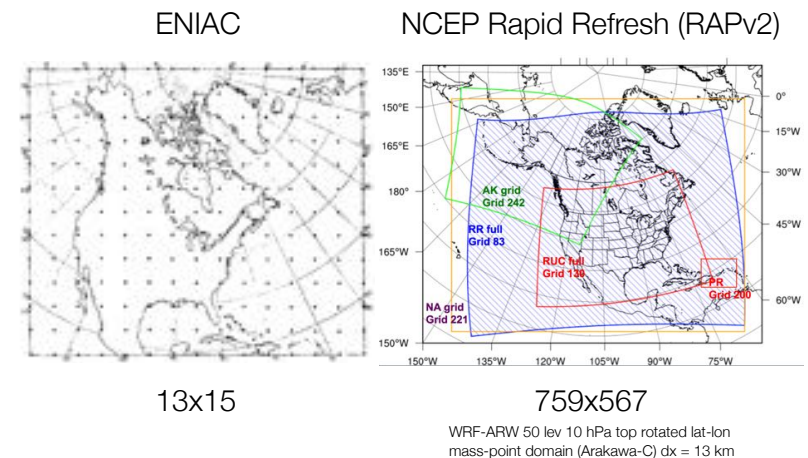
Richardsonの実験

- 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
- 将来高速な計算が可能になれば実現しうる夢

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
- cf. Colossus: 英国で Max Herman Alexander Newman が考案し、Thomas Harold Flowers が製作。
ドイツの暗号解読に利用

計算領域



数値予報精度の向上

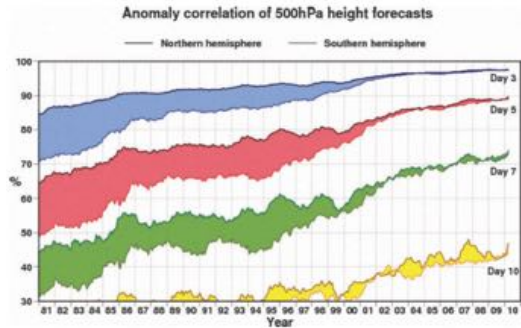
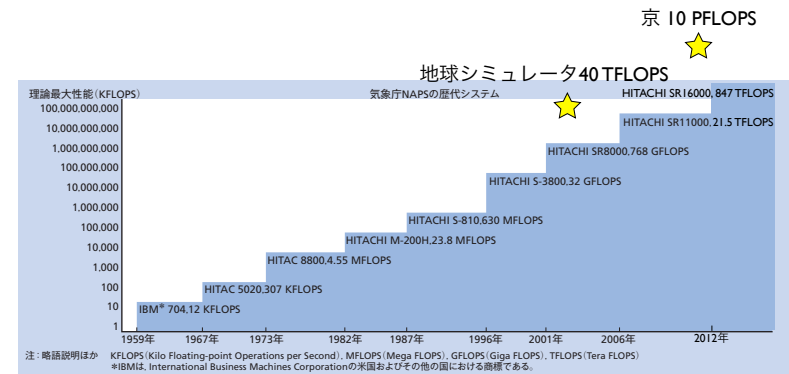


Fig. 1. Evolution of forecast skill for the extratropical Northern and Southern Hemispheres, January 1980–March 2010. Anomaly correlation coefficients for 3-, 5-, 7-, and 10-day ECMWF 500-mb height forecasts plotted as 12-month running means. Shading shows differences in scores between hemispheres at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

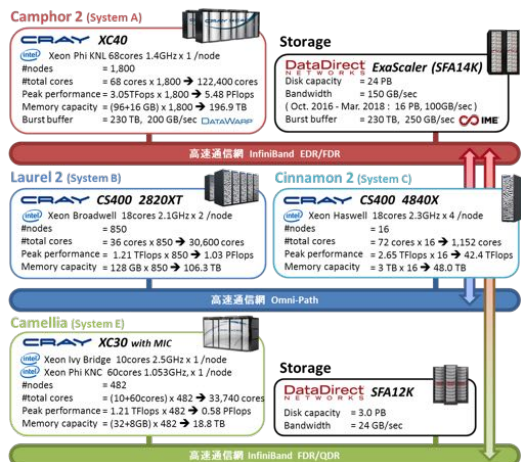
Shapiro et al. 2010

気象庁NAPS歴代システム



日立評論 2010/5, に室井 (2011) のデータを加筆

本学のシステム



現業機関のシステム

- ・ 欧 ECMWF: (3.8 Pflops) 23, 24位
- ・ 英 MetOffice: 11位 (6.5 Pflops), 38, 39位 (2.7 Pflops)
- ・ 韓 Nuri, Miri (2.7 Pflops) 46, 47位
- ・ 仏 Prolix2, Beaufix (2.1 Pflops) 50, 51位
- ・ 米 NOAA: Luna, Surge (1.6 Pflops) 62, 63位
- ・ cf. 気象庁気象研究所: 富士通 (0.94 Pflops) 120位

大気大循環モデル

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・海氷等の境界条件
- ・ 物理法則をプログラムしたモデル

数値モデル

- ・ 大気の従う法則
- ・ 運動方程式
- ・ 熱力学第一法則
- ・ 連続の式
- ・ 垂格子現象のパラメタ化
- ・ 時空間離散化

```
Terminal -- vim -- 96x40
(c)Copyright 2002 National Space Development Agency of Japan
(c)Copyright 2002 Japan Marine Science & Technology Center
PROGRAM AFES
[Basic Parameter Module]
USE MAPARAM , ONLY : APREAD, APASET
[Physics Grid-point Fields Parameter Module]
USE MPISDIM , ONLY : PISDIM
[MPI Module]
USE MAMPI
#ifdef CFES
USE cfes_mpi, only : omit_log, & lvar
cfes_mpi_init, & lsub
cfes_mpi_fini, isub
USE cfes_table_interp, &
only : id_ogcm, id_ogcm, & lvar
id_sice, id_land, & lvar
cfes_table_set2 isub
#endif
IMPLICIT NONE
#ifdef CFES
INTEGER(148) :: mygrp, yourgrp
#endif
*****
6000 FORMAT(1X/
3X,'*****'
3X,'***** AFES *****'
3X,'*** Atmospheric General Circulation ***'
3X,'*** Simulation Code ***'
)
$Fes.F90
$Fes.F90 1221, 3672C
```

大気大循環モデルと領域大気モデル

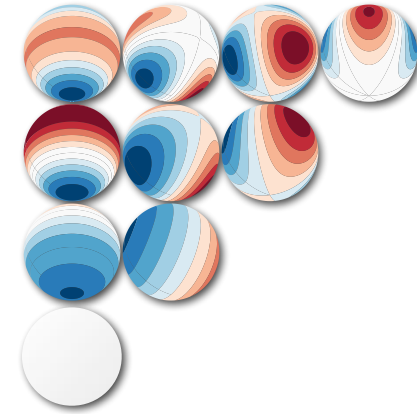
- ・ 大気大循環モデルは、地球全体の大気の流れを計算
 - ・ 球面上で解く必要がある。
 - ・ 側面境界は不要である。
- ・ 領域大気モデルは、一定の範囲を細かく計算
 - ・ 局所デカルト座標を基本とし、球面を考慮
 - ・ 側面の境界条件が必要

球面に伴う問題点

- ・ 時間刻み幅は、最小の格子間隔で決まる。
- ・ 球面上をなるべく一様な格子で覆うことが理想。
- ・ 例えば、緯度経度座標を考える。
- ・ 格子を緯度や経度で等間隔にとると、緯線と経線は直交し都合がよい。
- ・ しかし、極に近づくほど東西格子間隔が狭くなる。

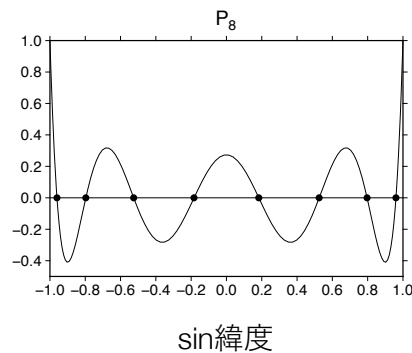
球面調和函数

- ・ ラプラス方程式の角度方向の解
- ・ 三角切断で均一な解像度
- ・ スペクトル変換法: 変数を毎回変換
- ・ 例えばT574のTは三角切断, 574は切断波数

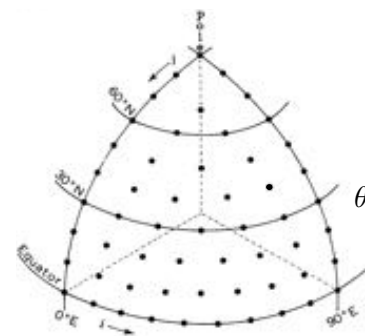


スペクトル変換法の球座標

- ・ 東西方向
 - ・ 等間隔
 - ・ フーリエ展開
 - ・ 高速フーリエ変換
- ・ 南北方向
 - ・ ガウス緯度
 - ・ ルジャンドル多項式の0点
 - ・ ルジャンドル変換



Kurihara格子



極から赤道までN個

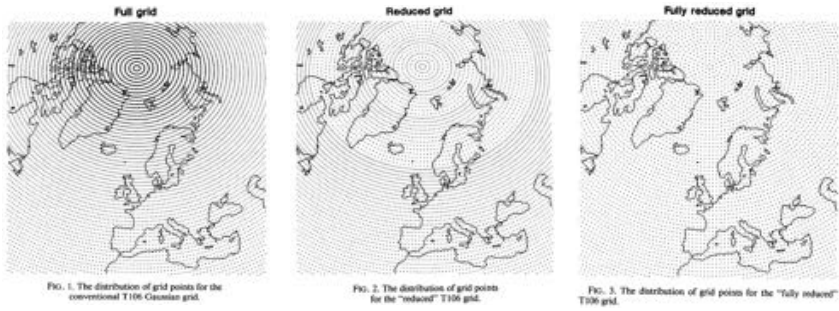
j番目の緯度円に4(j-1)個

$$\theta_j = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{j-1}{N} \right) \quad \Delta\theta = \frac{\pi}{2N}$$

$$\lambda_{i,j} = \frac{\pi}{2} \frac{i-1}{j-1} \quad \Delta\lambda_j = \frac{\pi}{2} \frac{1}{j-1}$$

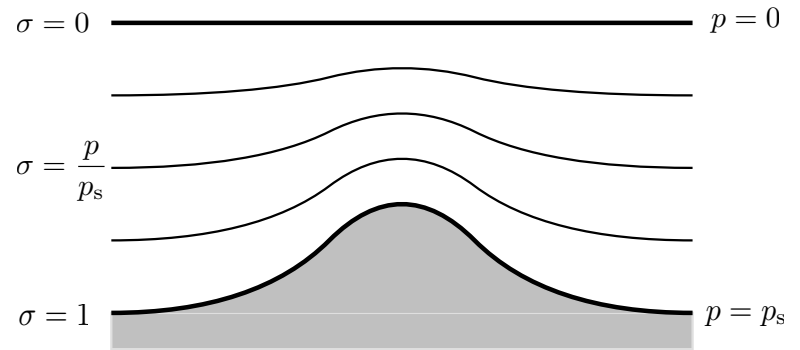
Kurihara 1965

Reduced格子

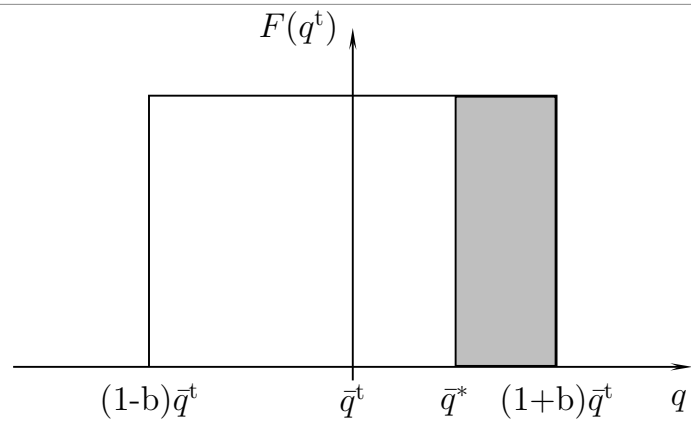


Hortal and Simmons 1991

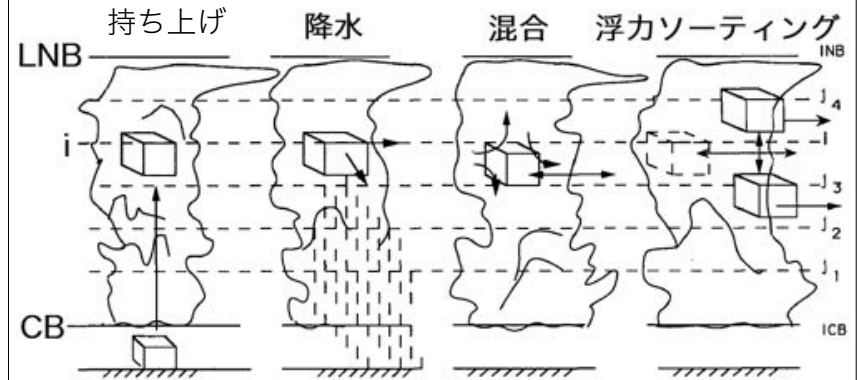
鉛直離散化



部分凝結



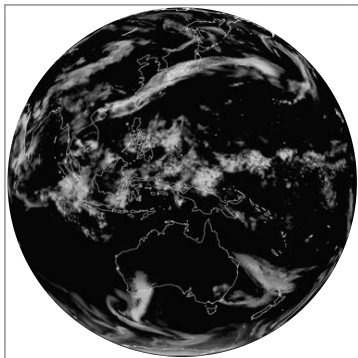
Le Treut and Li 1988



Emanuel 1991

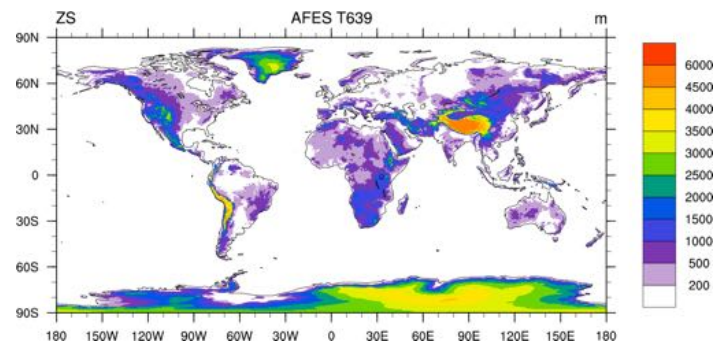
AFES

- 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



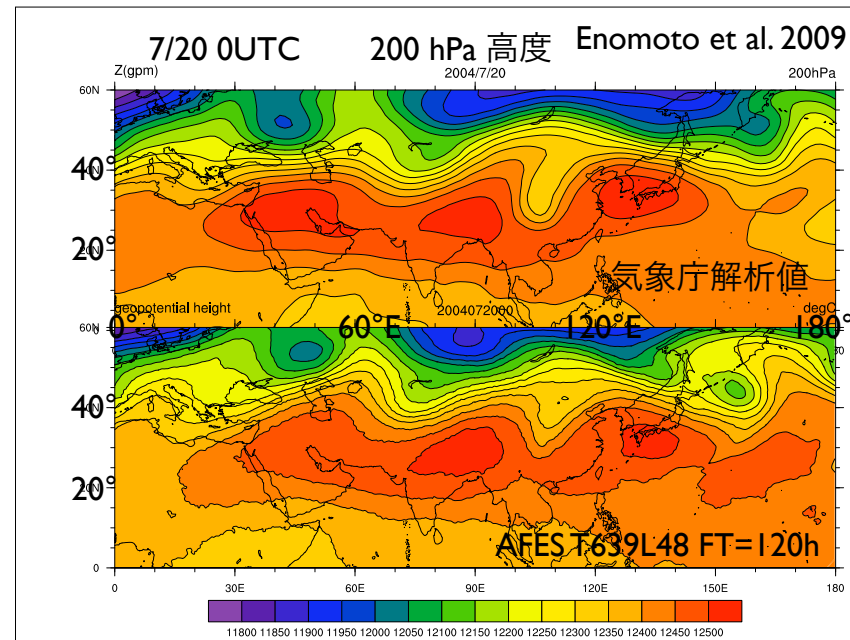
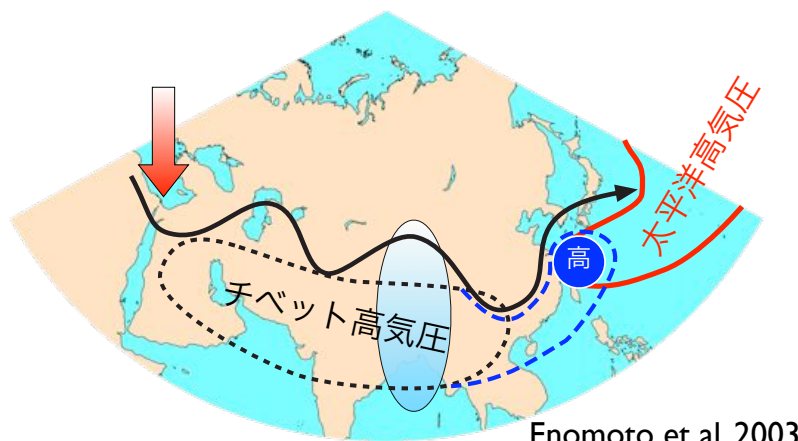
Numaguti et al. 1997; Ohfuchi et al. 2004;
Enomoto et al. 2008; Kuwano-Yoshida et al. 2011

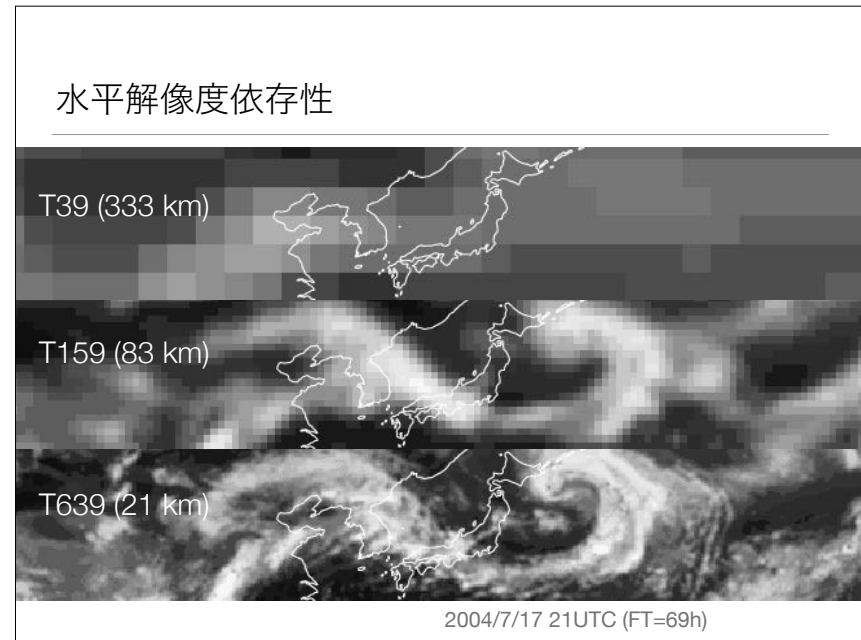
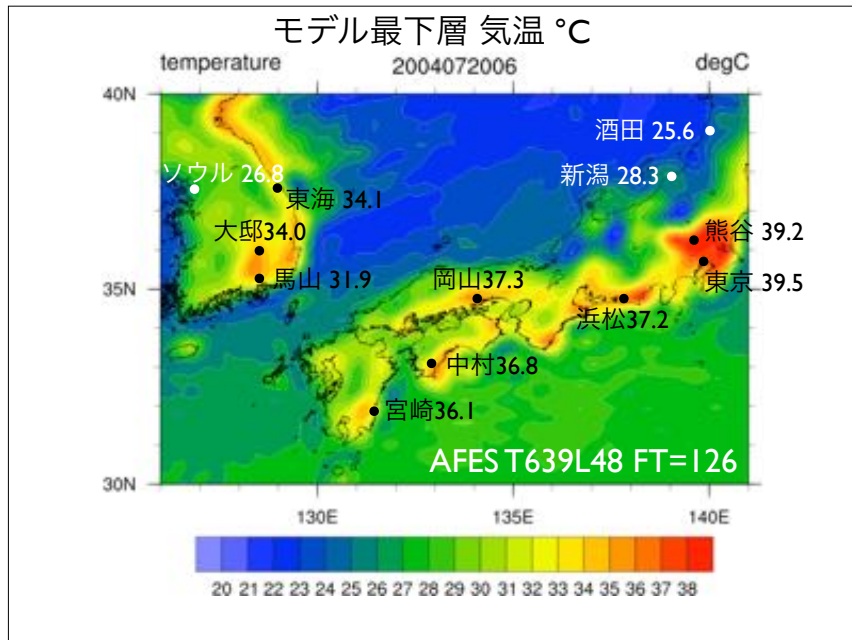
AFESに用いている地形



水平解像度 20 km

シルクロード・パターン





AFESプロジェクト
 (Atmospheric GCM For the Earth Simulator)
 (Y.-Y. Hayashi, Y. O. Takahashi, W. Ohfuchi, T. Enomoto, etc)

CPS
 Center for Planetary Science

● 様々な惑星の大気大循環を理解したい
 ✓ 火星、金星、木星、水惑星...
 ・ 共通の大気大循環モデルとしてAFESを使用

私は金星グループのメンバーとして金星計算を実行

杉本 (慶応大)