「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

2012年4月18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

数値天気予報に必要なもの

- 初期値, 境界条件
- 物理法則
  - 運動方程式
  - 連続の式（質量保存）
  - 大気の状態方程式
  - 熱力学の式

Bjerknes (1904)

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

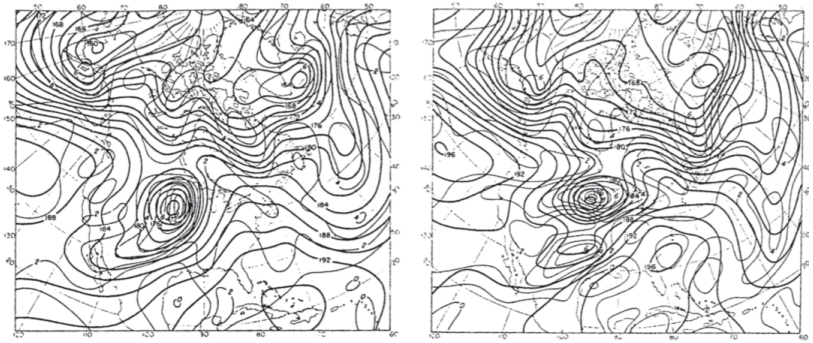


Figure 1. The ENIAC forecast starting at 0300 UTC, 5 January, 1949. Left panel: Analysis of 500 hPa geopotential (thick lines) and absolute vorticity (thin lines). Right panel: Forecast height and vorticity (from Charney, et al., 1950). Height units are hundreds of feet, contour interval is 200 ft. Vorticity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

MATLABによる再現

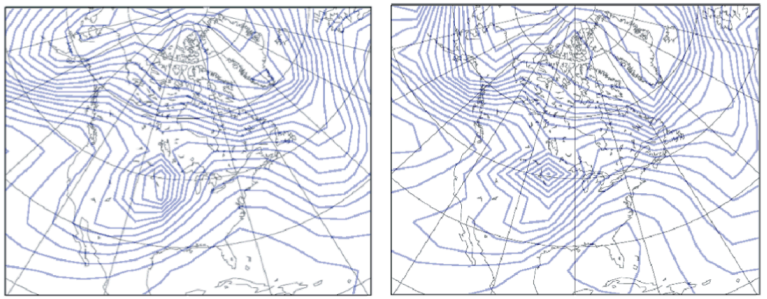
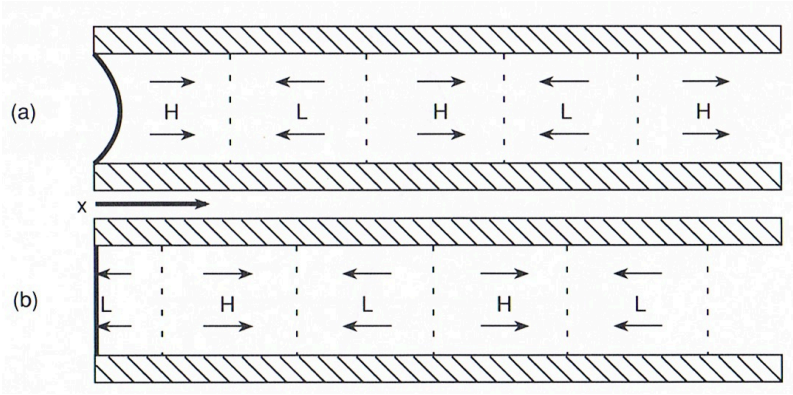


Figure 2. Reconstruction of the ENIAC 24-hour forecast starting at 0300 UTC, 5 January, 1949. Left panel: Analysis of 500 hPa geopotential. Right panel: 24-hour forecast geopotential made with the program `eniac.m`. No contour smoothing has been applied and boundary rows have been clipped, as in CFvN. The contour interval is 50 m.

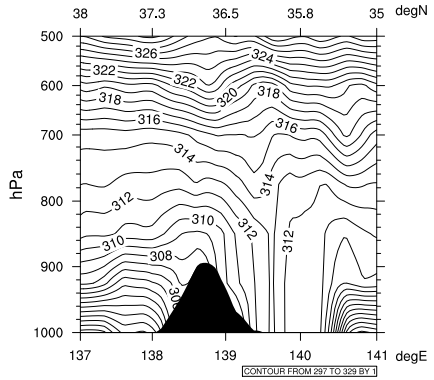
Lynch and Lynch 2008

音波



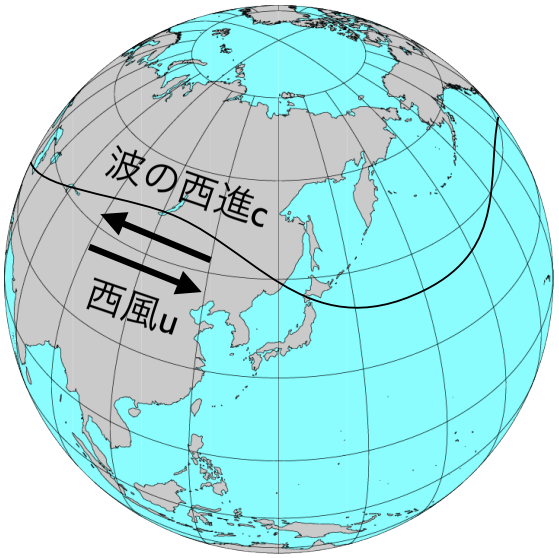
Holton 1992

フェーンに伴う山岳波



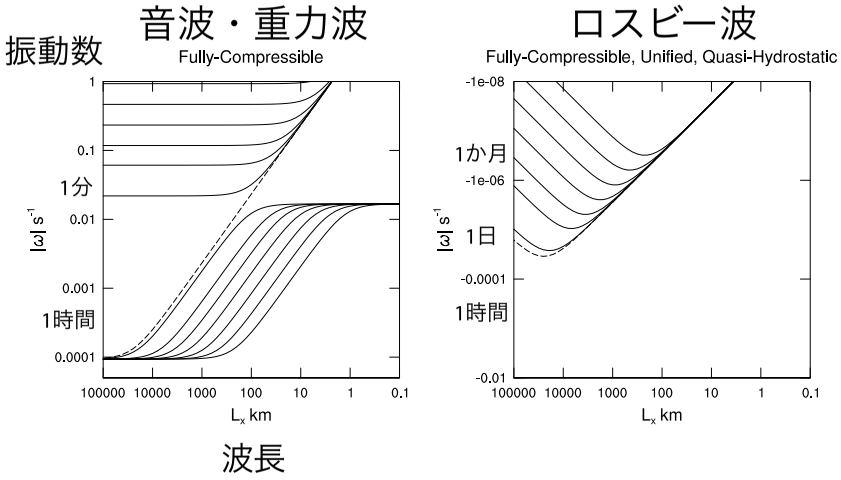
Enomoto et al. 2009

定常ロスビー波



波の種類	位相速度	復元力
音波	320 m/s	圧縮
内部重力波	波長30 kmで 50 m/s	浮力
ロスビー波	準停滞	コリオリ力の 緯度変化

分散関係



波の除去が鍵

波の種類	Richardson 1922	Charney et al. 1950
音波	除去	除去
重力波	含む	除去
ロスビー波	含む	含む

その後の発展

- 順圧渦度方程式
- プリミティブ方程式系（Richardsonに回帰）
- 全球化
- 高解像度化
- 物理過程の精緻化

様々な工夫

- セミ・インプリシット法
  - 重力波を遅くする。
- セミ・ラグランジュ移流
  - 時間刻み幅を長く、前線構造を正確に。

数値予報精度の向上

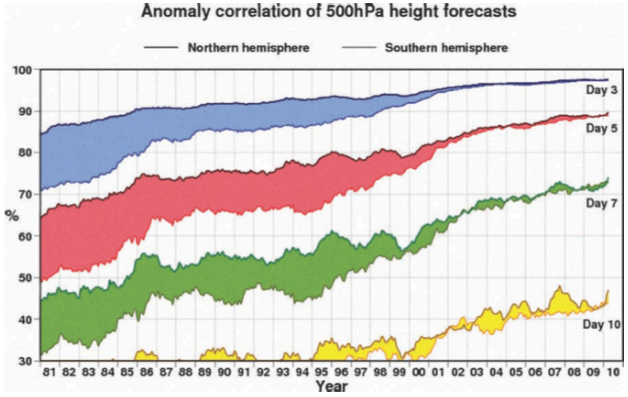


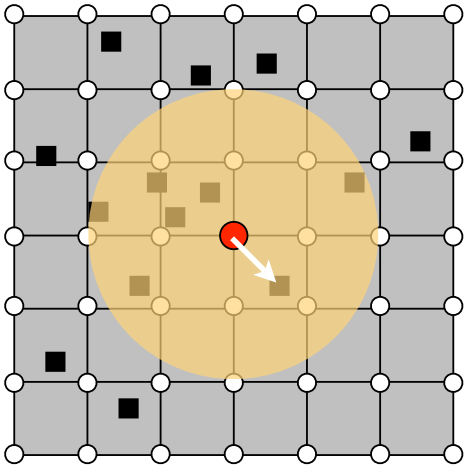
FIG. 1. Evolution of forecast skill for the extratropical Northern and Southern Hemispheres, January 1980–March 2010. Anomaly correlation coefficients of 3-, 5-, 7-, and 10-day ECMWF 500-mb height forecasts plotted as 12-month running means. Shading shows differences in scores between hemispheres at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

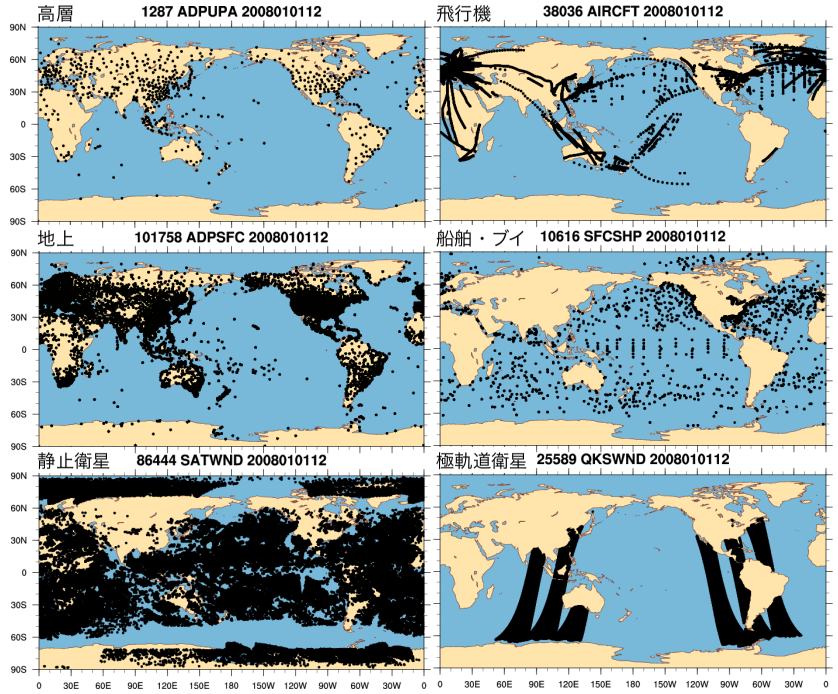
Shapiro et al. 2010

気象の予測

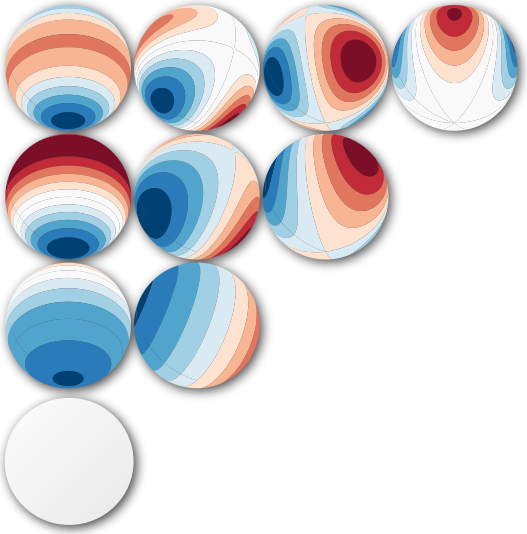
- 偏微分方程式をコンピュータで解く
- 観測データを同化した初期値
- 地形, 海面水温・海氷等の境界条件
- 物理法則をプログラムしたモデル

データ同化

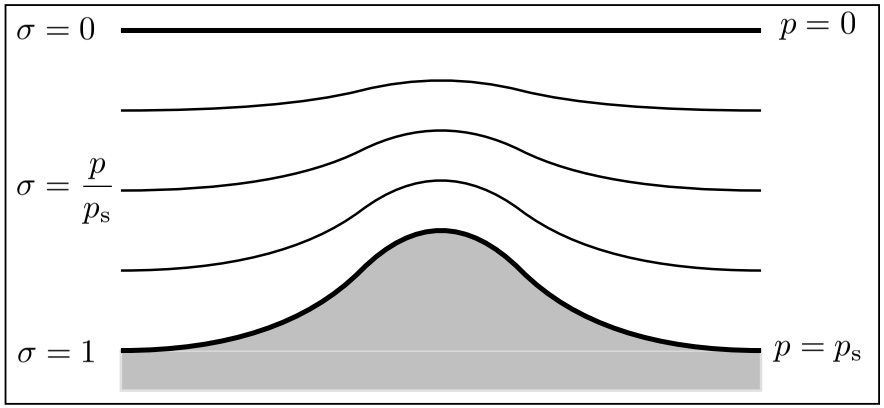




球面調和函数

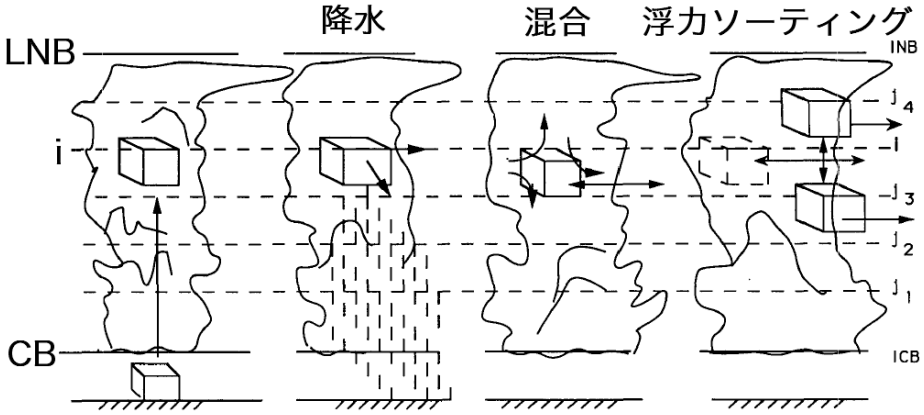


鉛直離散化



パラメタ化

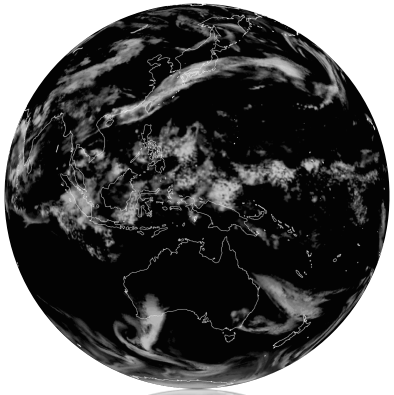
- 格子間隔より小さな現象
- 格子の量で表現
- 物理的考察，観測事実に基づく経験則
- 乱流，積雲対流，雲物理



Emanuel 1991

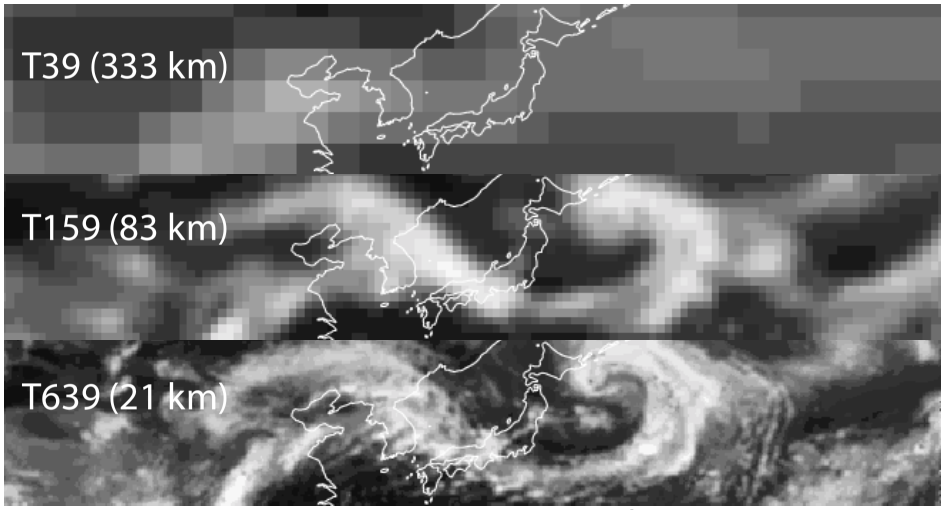
AFES

- 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

水平解像度依存性



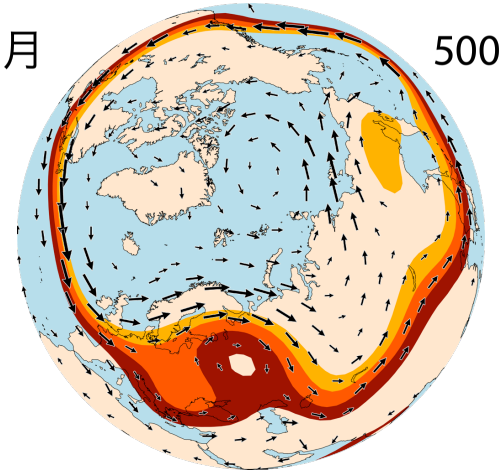
2004/7/17 21UTC (FT=69h)

熱波

- 持続する高気圧により発生
- フェーン現象・都市化により強化
- 長期間, 広範囲, 多くの人々に影響
- 熱中症, 森林火災, 不作・不漁等

ロシアのブロッキング

2010年7月



500hPa (u,v), z

熱波による被害の例

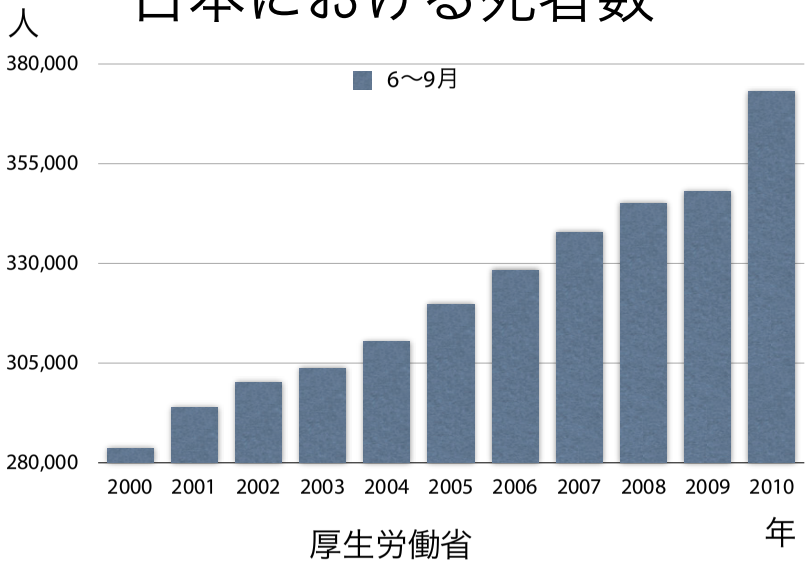
- 2003欧州: 15,000人熱波に関連して死亡
- 2010ロシア:
  - 大規模森林火災,
    スモッグ発生, 原発危機
  - 8月の死者が2009年を大幅に上回る

年	ロシア	モスクワ
2009	150,689	8,905
2010	191,951	15,016

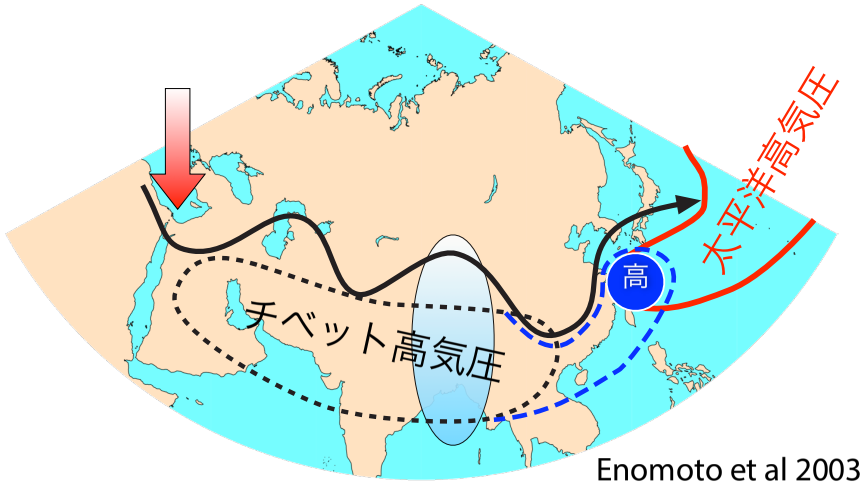
2010年夏 日本猛暑

- 救急搬送53,843名, 167名死亡
- 6〜9月の死者が急増
  - 〜2009年: 前年比0.89〜3.6%増加
  - 2010年: 前年比6.7%増加

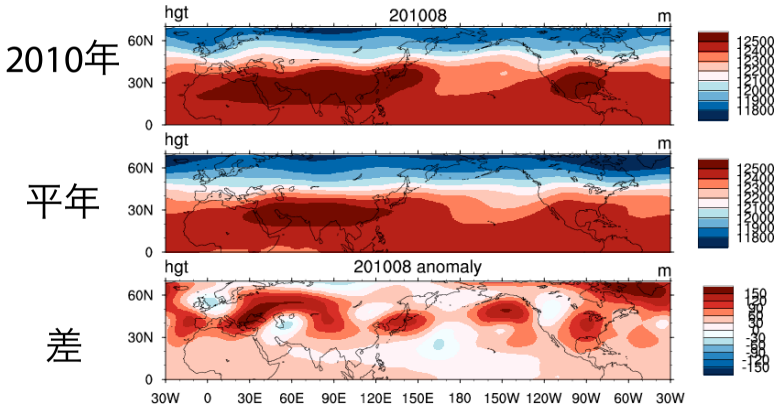
日本における死者数

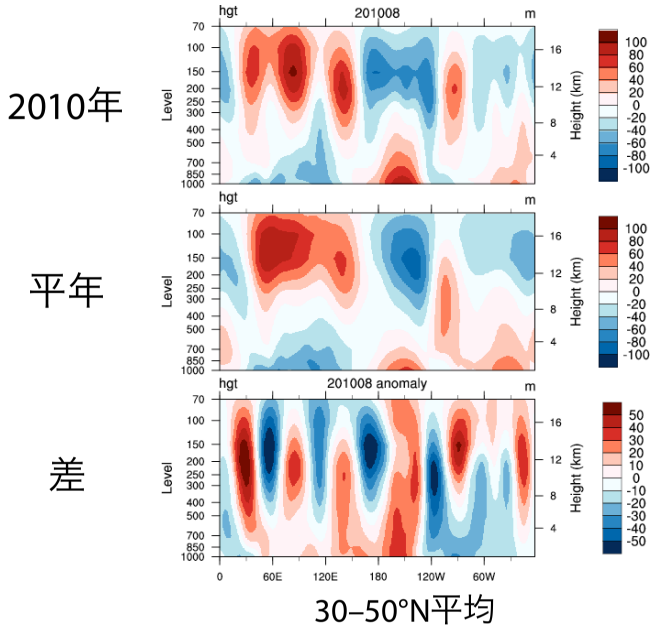


シルクロード・パターン



8月のチベット高気圧

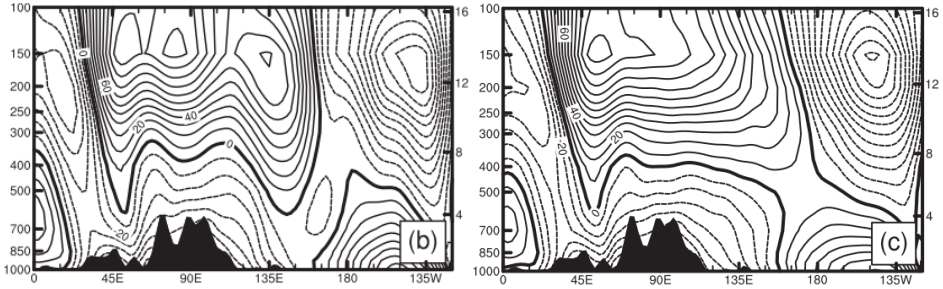




30–50°N平均

小笠原高気圧の年々変動

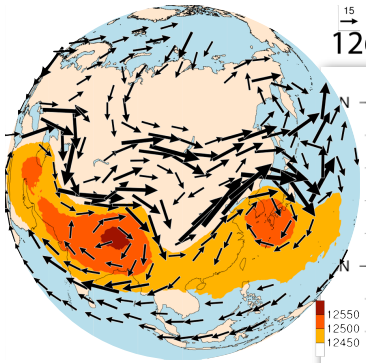
蛇行年 (1972, 73, 85, 94,95)　　非蛇行年 (1952, 70, 75, 79, 96)



30–45°N平均

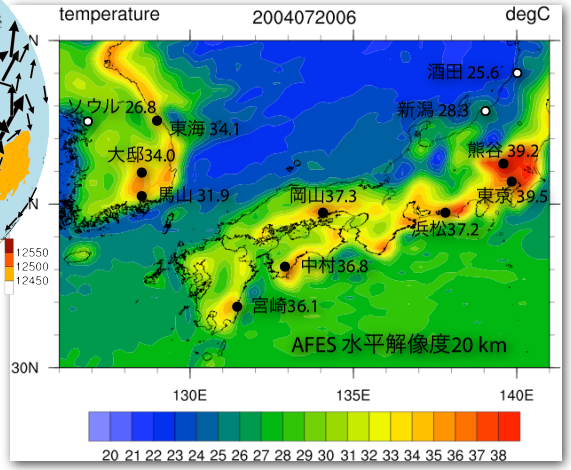
Enomoto 2004

2004年関東猛暑のシミュレーション



地球シミュレータ用
大気大循環モデルAFES
Enomoto et al. 2009

126時間予測とAMeDAS観測との比較



熱波の予測

- 数週間前から, シルクロードパターンは
  予測できる可能性がある.
- ブロッキングの維持のメカニズムはよく
  分かっているが, 発生, 衰弱の予測は難しい.
- 季節予報は, 海と一緒に予測することで,
  格段に進歩したが, まだ改善の余地がある.