



## 「計算科学が拓く世界」第5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  
2014年5月8日5時限

## 今日のお話

- 数値天気予報の歴史
- データ同化
- 大気大循環モデル
- 台風進路予測
- 課題

## 数値予報精度の向上

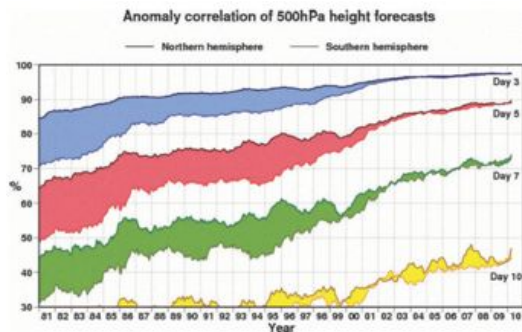


FIG. 1. Evolution of forecast skill for the extratropical Northern and Southern Hemispheres, January 1980–March 2010. Anomaly correlation coefficients of 3-, 5-, 7-, and 10-day ECMWF 500-mb height forecasts plotted as 12-month running means. Shading shows differences in scores between hemispheres at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

---

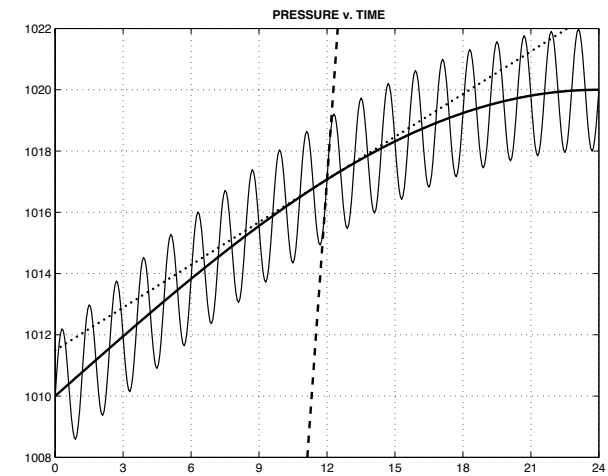
1. 現在の大気の状態の精度のよい推定値
2. 大気の状態の時間発展を記述する精度の良い方程式系

Bjerknes 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



Lynch 2006

## 予報工場



NOAA/L. Bengtsson

## 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

## ENIACによる世界初の数値天気予報

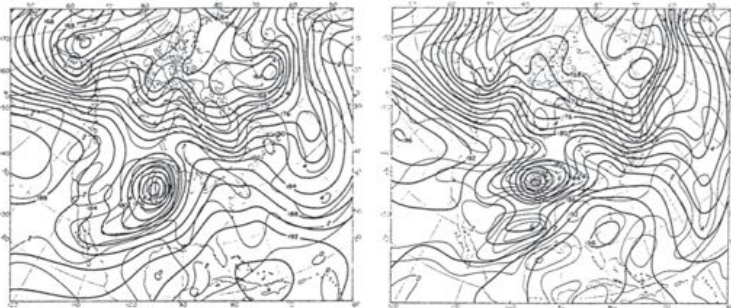


Figure 1. The ENIAC forecast starting at 0300 UTC, 5 January, 1949. Left panel: Analysis of 500 hPa geopotential (thick lines) and absolute vorticity (thin lines). Right panel: Forecast height and vorticity (from Charney, et al., 1950). Height units are hundreds of feet, contour interval is 200 ft. Vorticity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

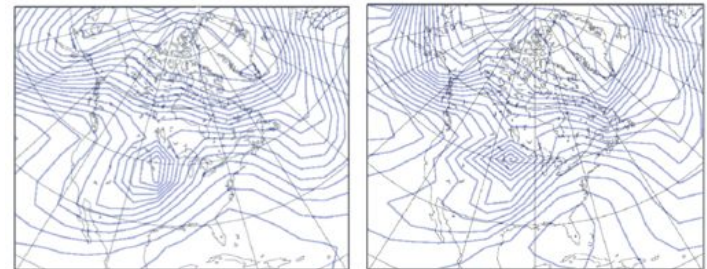


Figure 2. Reconstruction of the ENIAC 24-hour forecast starting at 0300 UTC, 5 January, 1949. Left panel: Analysis of 500 hPa geopotential. Right panel: 24-hour forecast geopotential made with the program `eniac.m`. No contour smoothing has been applied and boundary rows have been clipped, as in CFvN.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

Lynch and Lynch 2008

## PHONIAc

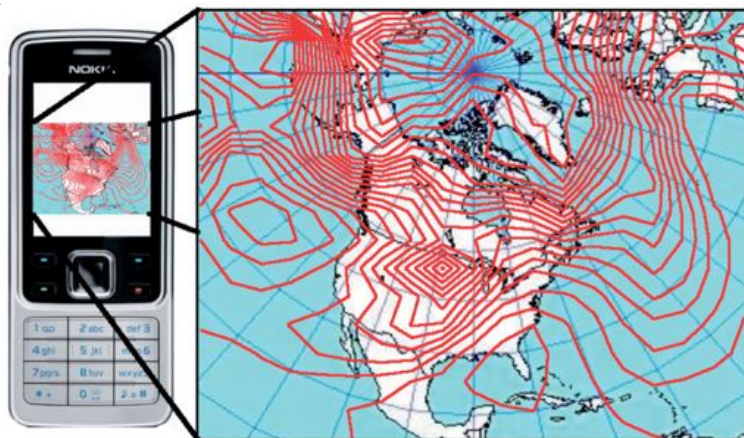


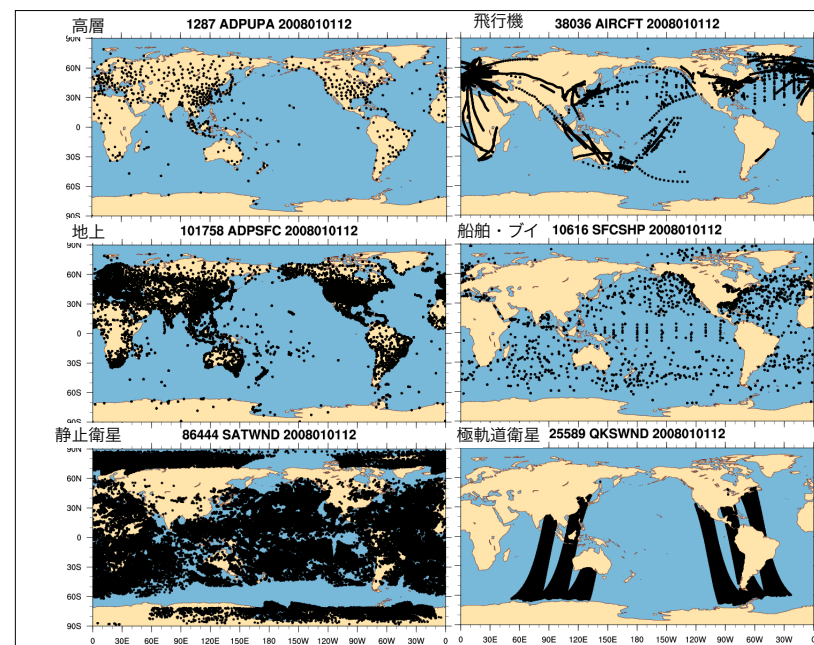
Figure 3. The Nokia 6300, dubbed PHONIAc (left) and the forecast for 0300 UTC, 6 January, 1949 (right) made with the program *phoniac.jar*. The contour interval is 50 m, as in Figure 2. The complete forecast area, including boundary points, is shown.

Lynch and Lynch 2008

## データ同化

### データ同化とは

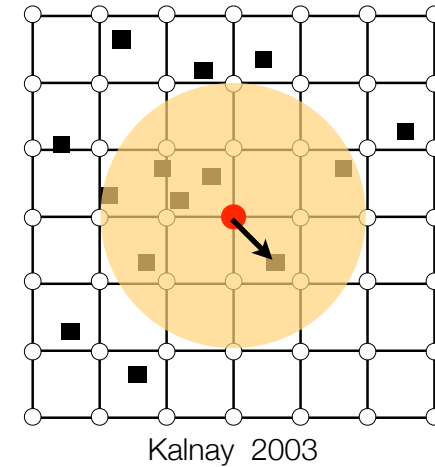
- 数値天気予報に必要な初期値を作る。
- 予測と観測との重み付き平均。



## 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



## 統計的推定

- 2つの気温の測定値
- 誤差に関する仮定: バイアスなし, 分散は既知, 無相関
- 平均二乗誤差を最小化

## データ同化の原理

- 精度の良いデータに重く, 悪いデータに軽く重みをつけて平均する。

$$x^a = \frac{1/\sigma_1^2}{1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2} x_1 + \frac{1/\sigma_2^2}{1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2} x_2 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sigma^a{}^2} = \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} \quad (2)$$

- 予報を観測で修正する。(1: 予測  $x^f$ , 誤差  $\eta$ , 2: 観測  $y$ , 誤差  $\varepsilon$ )

$$x^a = x^f + \frac{1/\sigma_\varepsilon^2}{1/\sigma_\eta^2 + 1/\sigma_\varepsilon^2} (y - x^f) \quad (3)$$

## 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。

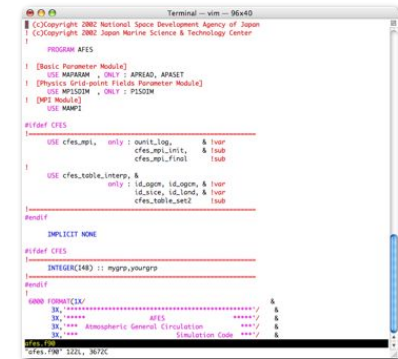
## 様々なデータ同化手法

- ・ 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。

## 大気大循環モデル

## 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





## 物理法則

- 運動方程式
- 熱力学の式
- 連続の式

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

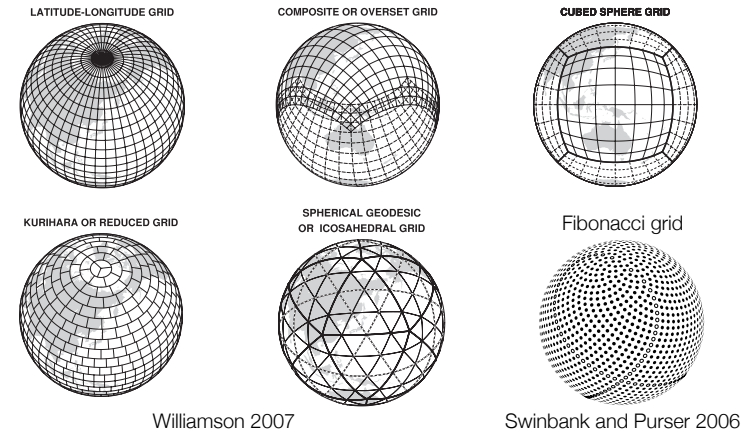
$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial N_u}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial N_v}{\partial \mu} - \nabla^2 (E + \Phi + RT_0 \ln p_s) - \mathcal{D}(\delta), \quad (2)$$

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

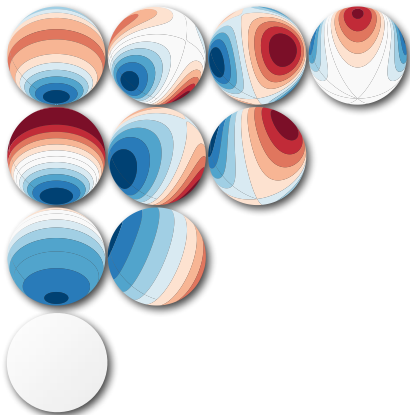
$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial (Uq)}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial (Vq)}{\partial \mu} + q\delta - \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} - \mathcal{D}(q), \quad (4)$$

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

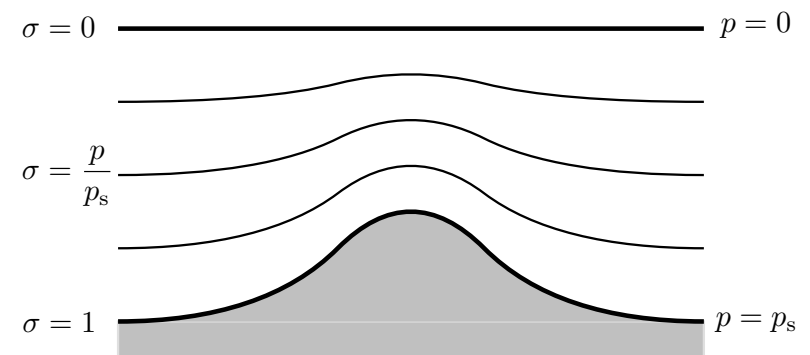
## 格子系



## 球面調和函数

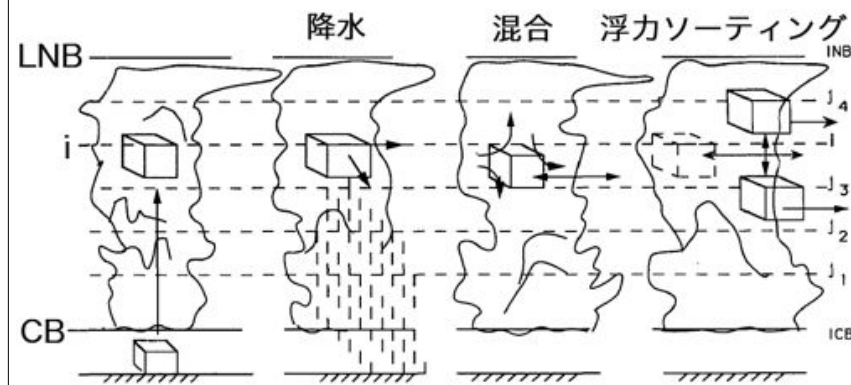


## 鉛直離散化



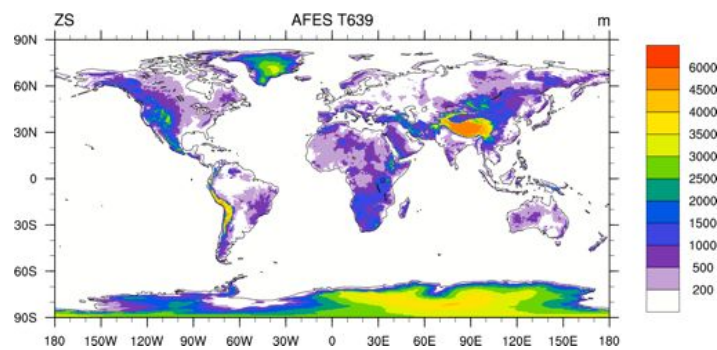
## パラメタ化

- ・ 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



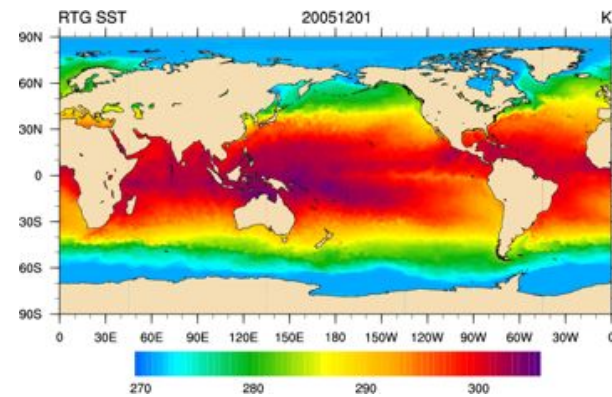
Emanuel 1991

## AFESに用いている地形



水平解像度 20 km

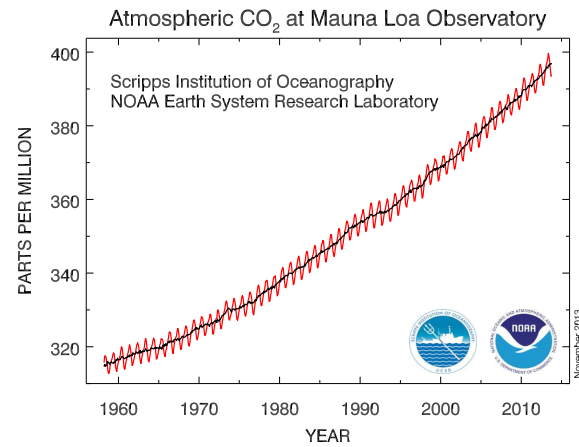
## 海面水温の例



米国海洋大気庁 RTG 海面水温

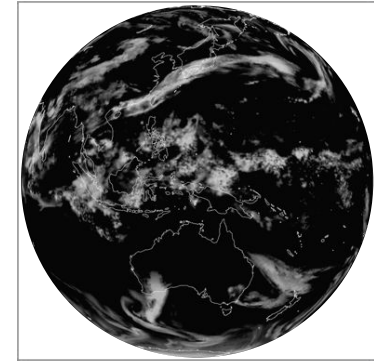


## 二酸化炭素



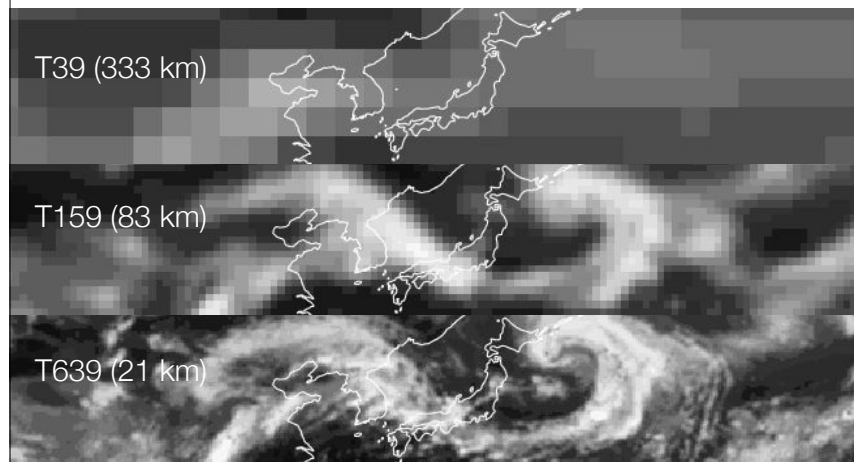
## AFES

- ・ 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



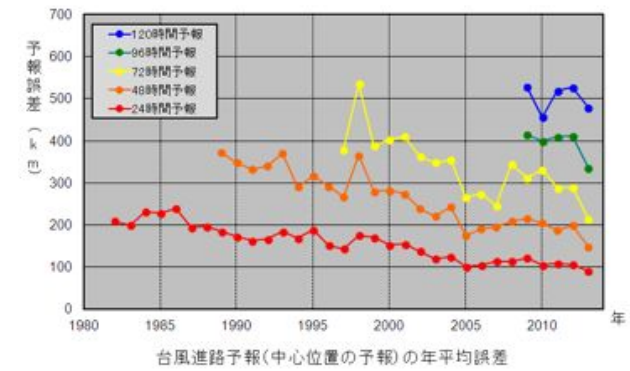
2004/7/17 21UTC (FT=69h)

## 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

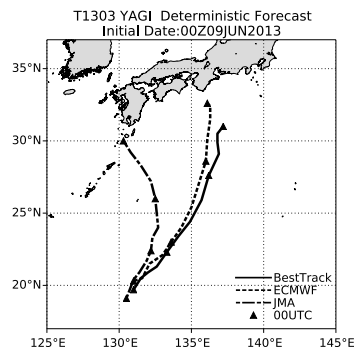
## 台風進路予測

## 台風進路予測誤差

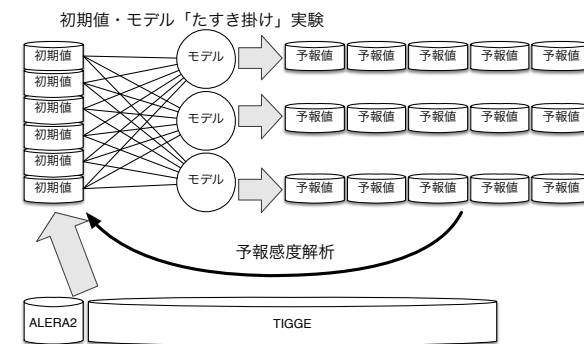


気象庁

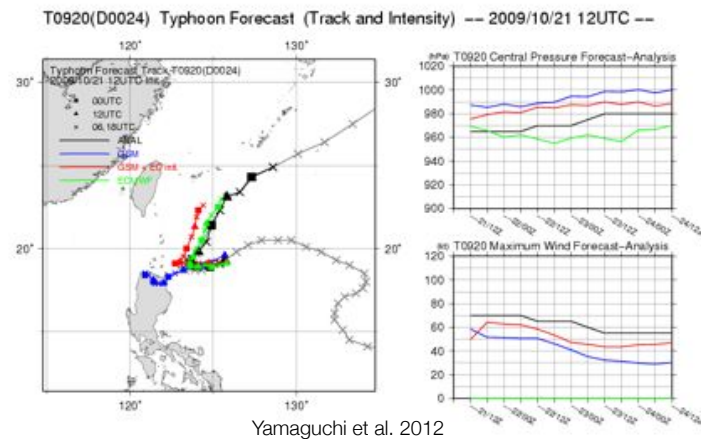
## 2013年台風第3号YAGI



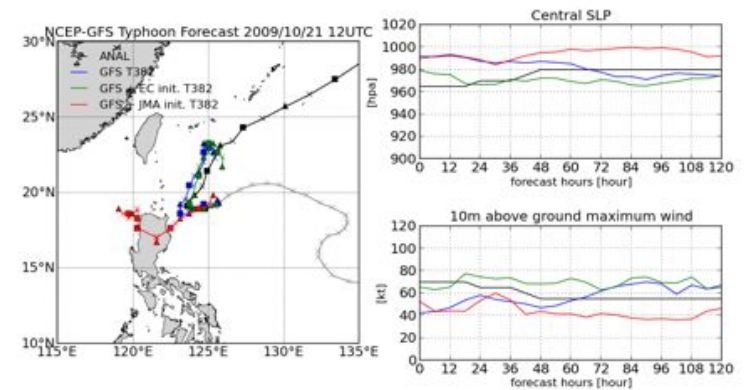
## たすき掛け実験



## T0920 (Lupit): 初期値に敏感

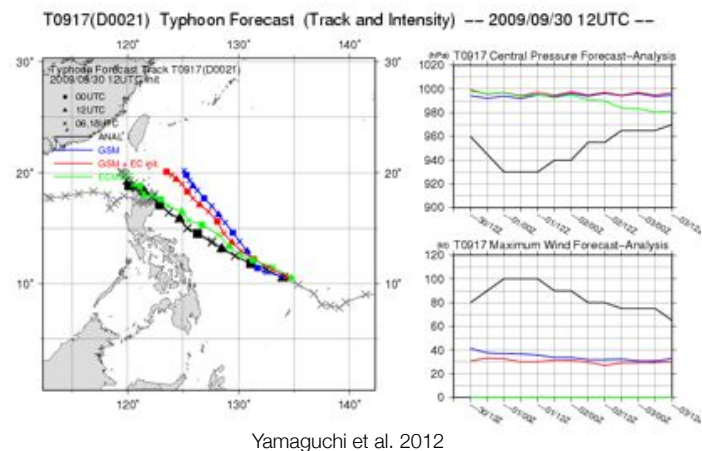


## T0920: NCEP GFS T382L64

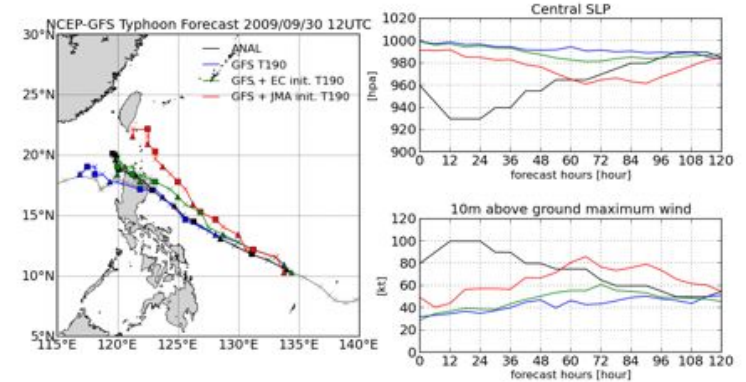


宮地 2014

## T0917 (Parma): モデルが重要



## T0917 (Parma): NCEP GFS T190L64



宮地 2014