



「計算科学が拓く世界」第10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12月3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

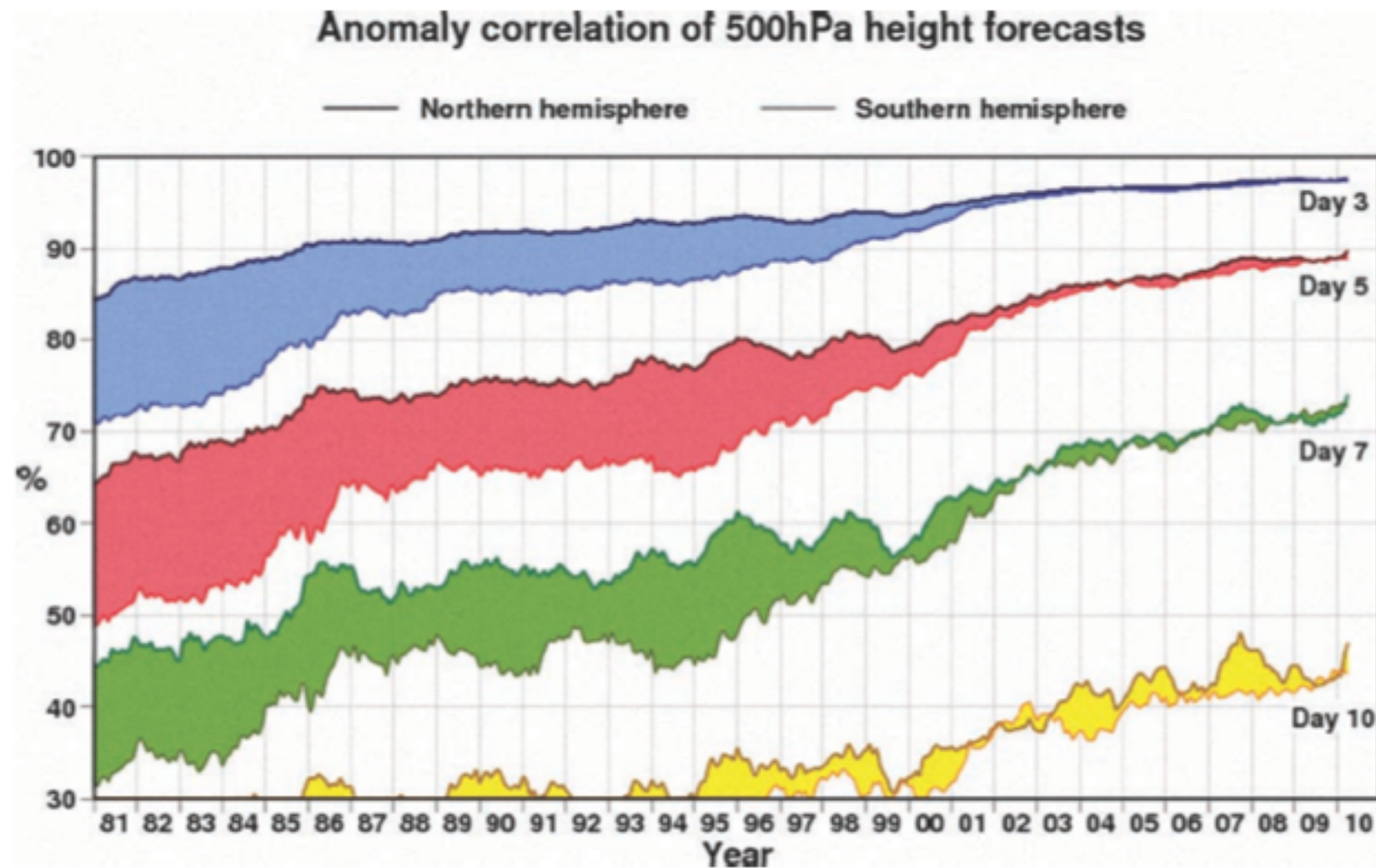


FIG. 1. Evolution of forecast skill for the extratropical Northern and Southern Hemispheres, January 1980–March 2010. Anomaly correlation coefficients of 3-, 5-, 7-, and 10-day ECMWF 500-mb height forecasts plotted as 12-month running means. Shading shows differences in scores between hemispheres at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

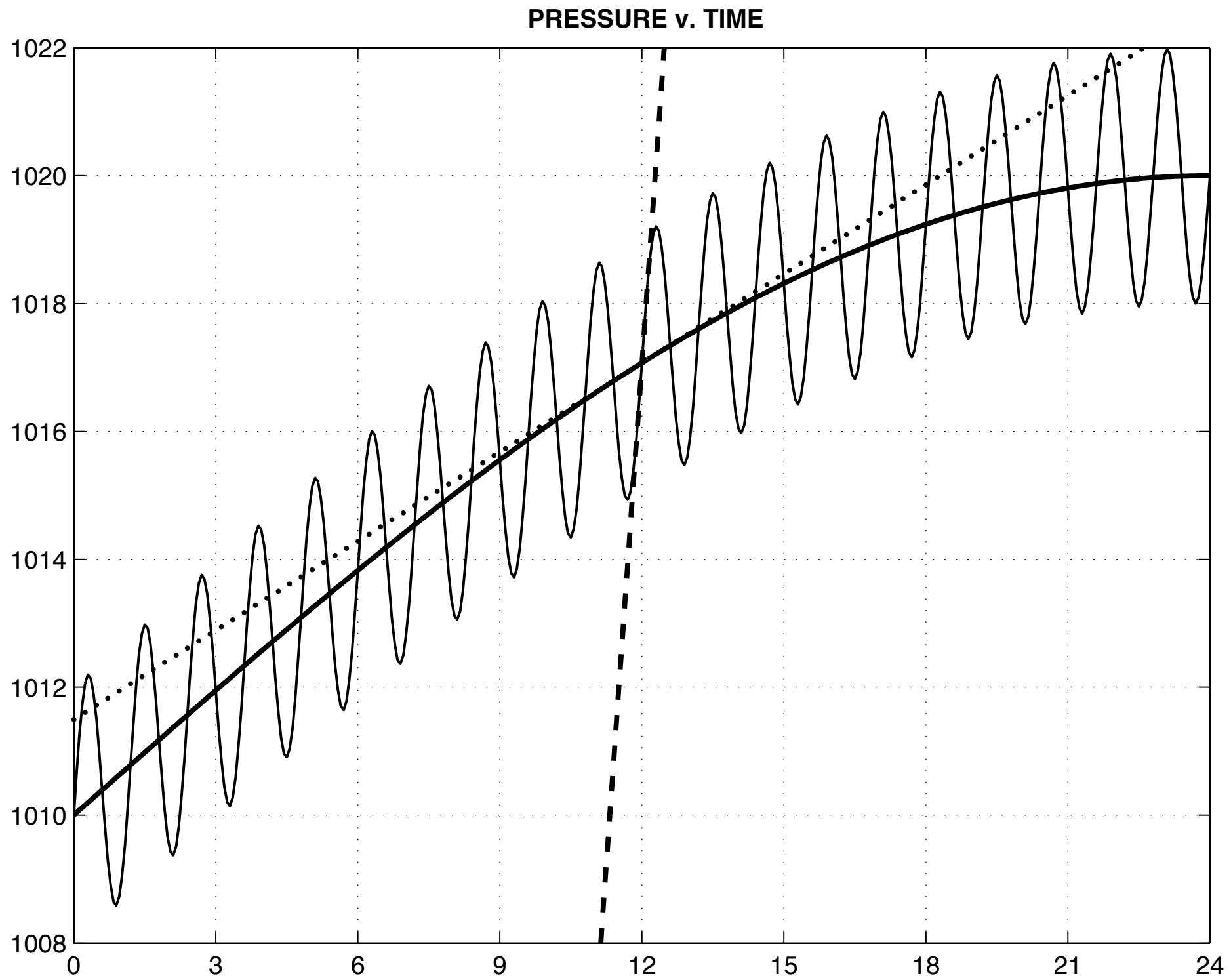
数値気象予測のための必要十分条件

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

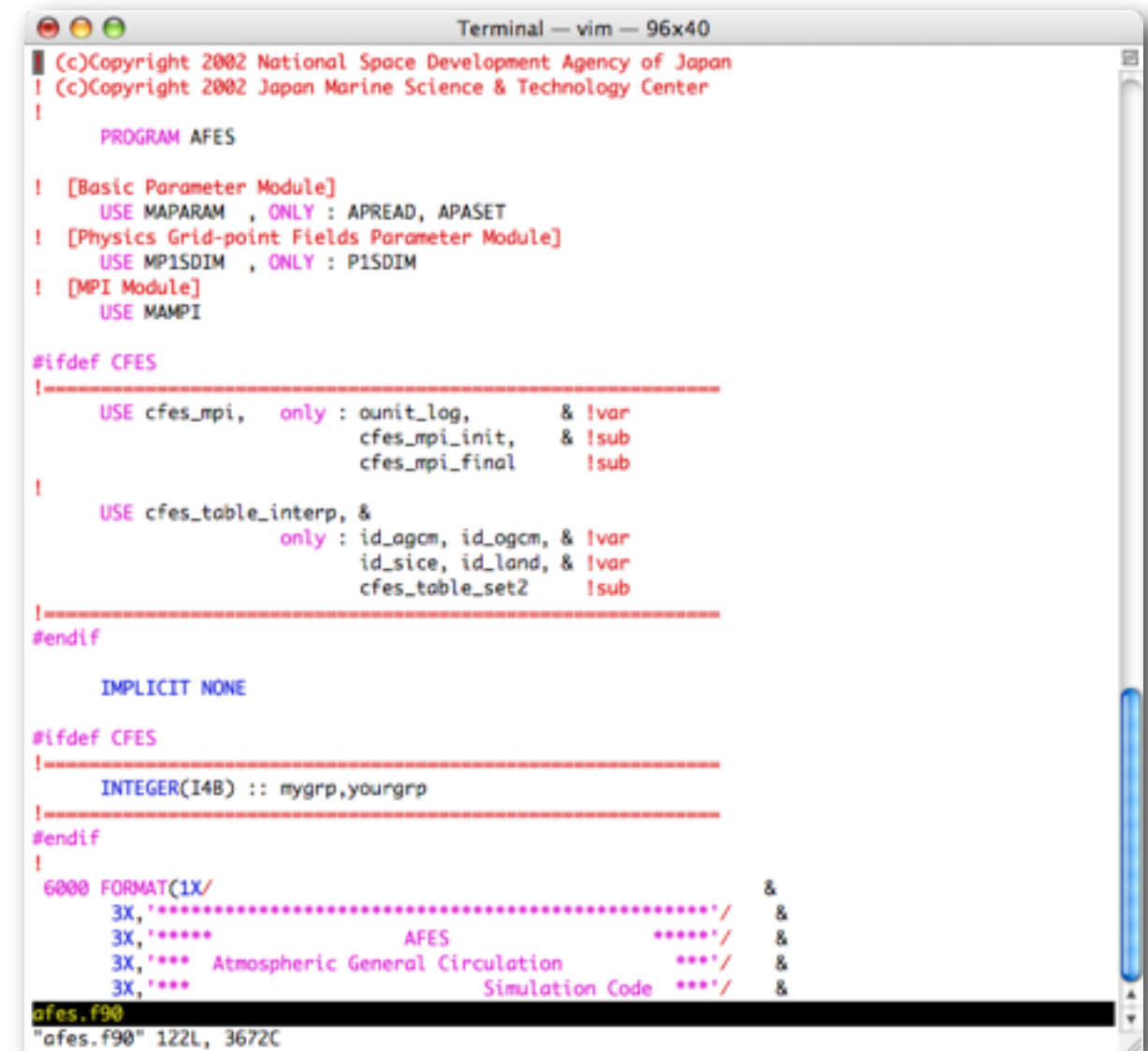
ENIAC: Electronic Numerical Integrator and Computer

- 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

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



```
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 MP1SDIM , ONLY : P1SDIM
! [MPI Module]
USE MAMPI

#ifdef CFES
!-----
USE cfes_mpi,  only : cunit_log,      & !var
                  cfes_mpi_init,    & !sub
                  cfes_mpi_final    !sub
!
USE cfes_table_interp, &
   only : id_agcm, id_ogcm, & !var
         id_sice, id_land, & !var
         cfes_table_set2    !sub
!-----
#endif

IMPLICIT NONE

#ifdef CFES
!-----
INTEGER(I4B) :: mygrp, yourgrp
!-----
#endif
!
6000 FORMAT(1X/
3X, '.....'/
3X, '***** AFES ****'/
3X, '*** Atmospheric General Circulation ***'/
3X, '*** Simulation Code ****'/
&
&
&
&
afes.f90
"afes.f90" 122L, 3672C
```

物理法則

- 運動方程式
- 熱力学の式
- 連続の式

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

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

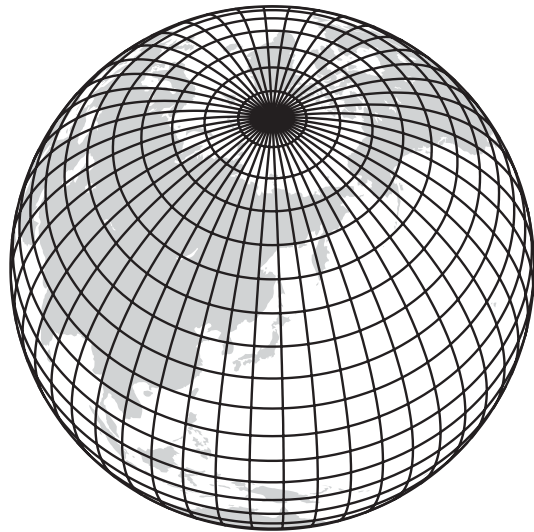
$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} = & -\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial (UT')}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial (VT')}{\partial \mu} + T' \delta \\ & - \dot{\sigma} \frac{\partial T'}{\partial \sigma} + \frac{RT_v \omega}{c_p \sigma p_s} + \frac{Q_{\text{diff}}}{c_p} -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

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

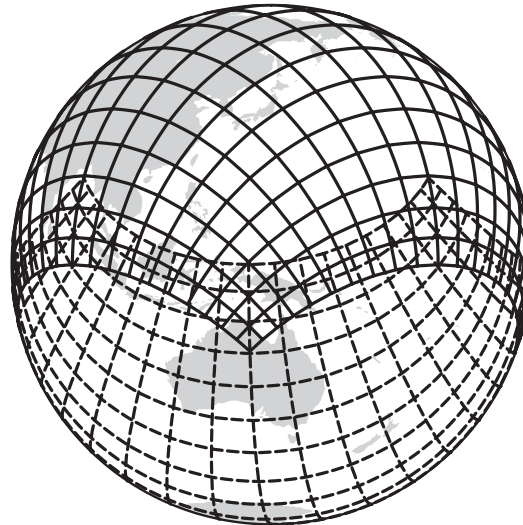
$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = -\int_0^1 \left(\frac{U}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial \ln p_s}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial \ln p_s}{\partial \mu} + \delta \right) d\sigma, \quad (5)$$

格子系

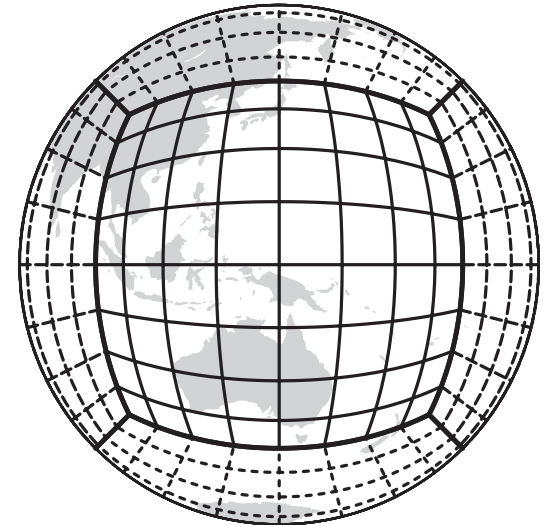
LATITUDE-LONGITUDE GRID



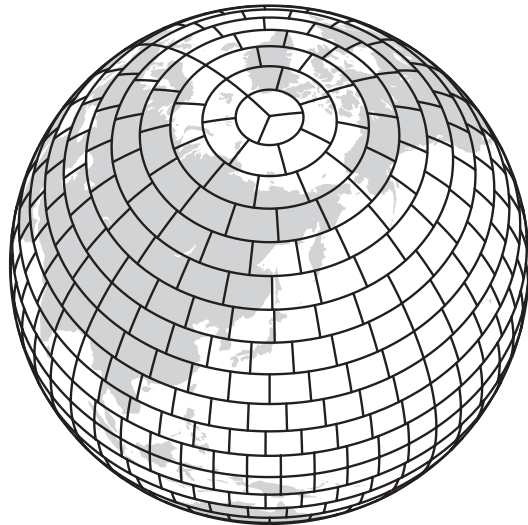
COMPOSITE OR OVERSET GRID



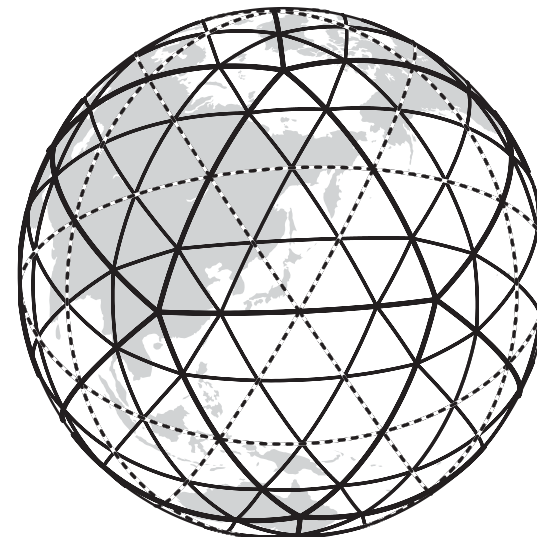
CUBED SPHERE GRID



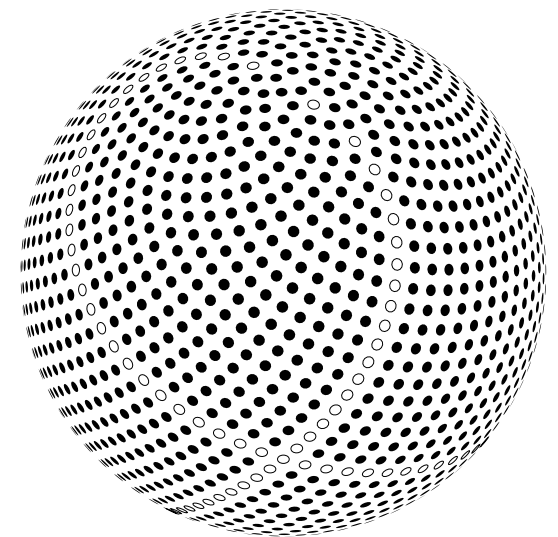
KURIHARA OR REDUCED GRID



**SPHERICAL GEODESIC
OR ICOSAHERAL GRID**



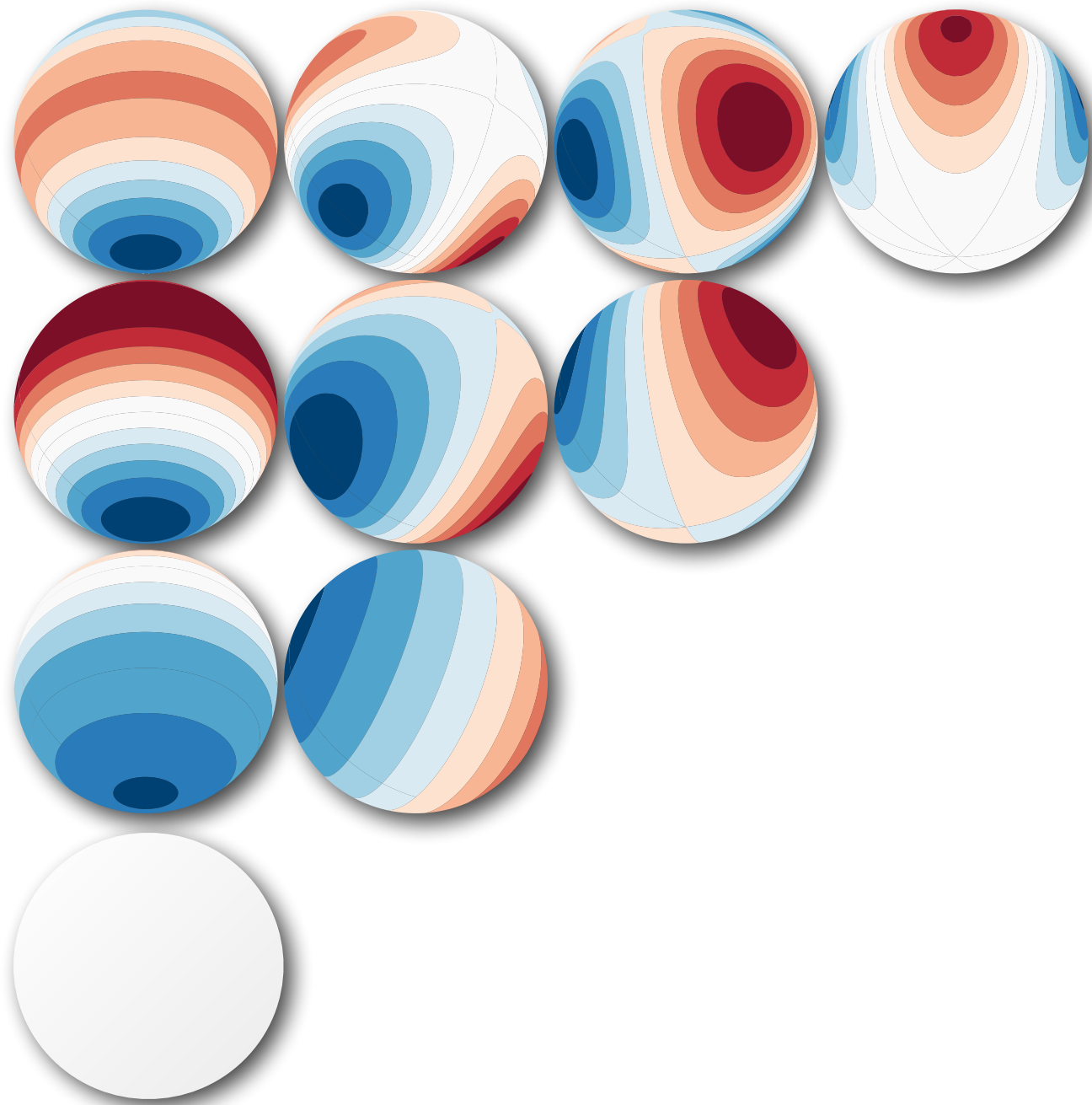
Fibonacci grid



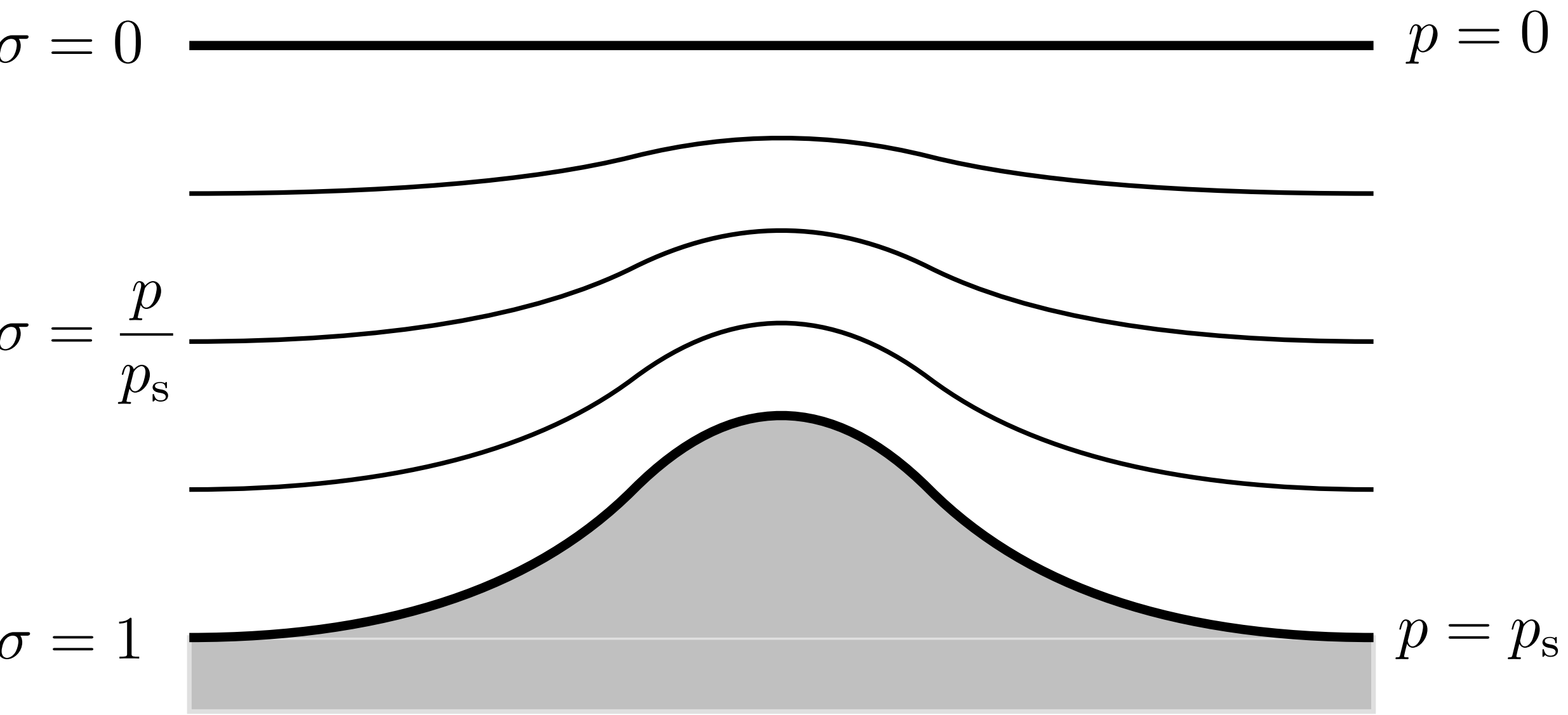
Williamson 2007

Swinbank and Purser 2006

球面調和函数



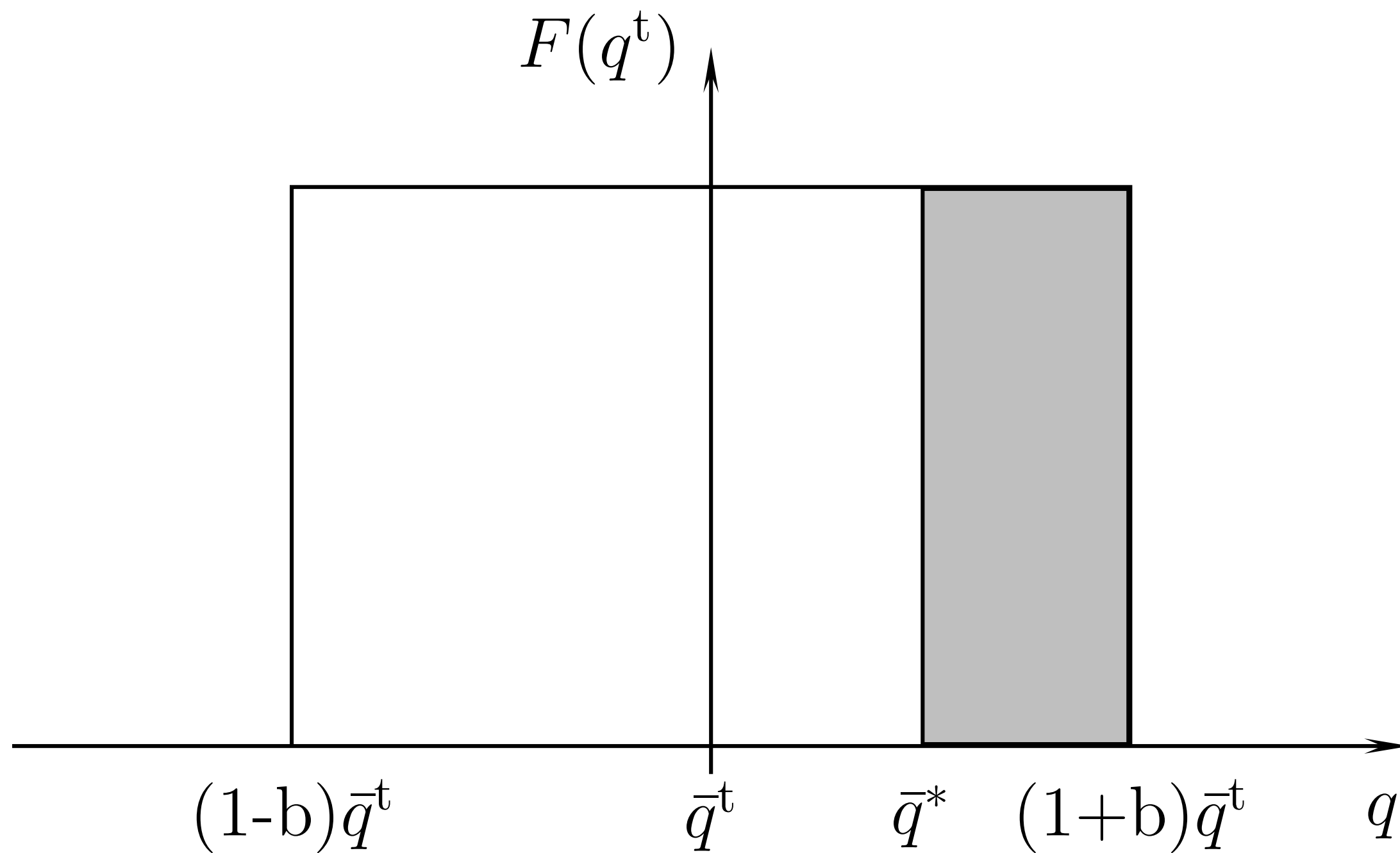
鉛直離散化



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

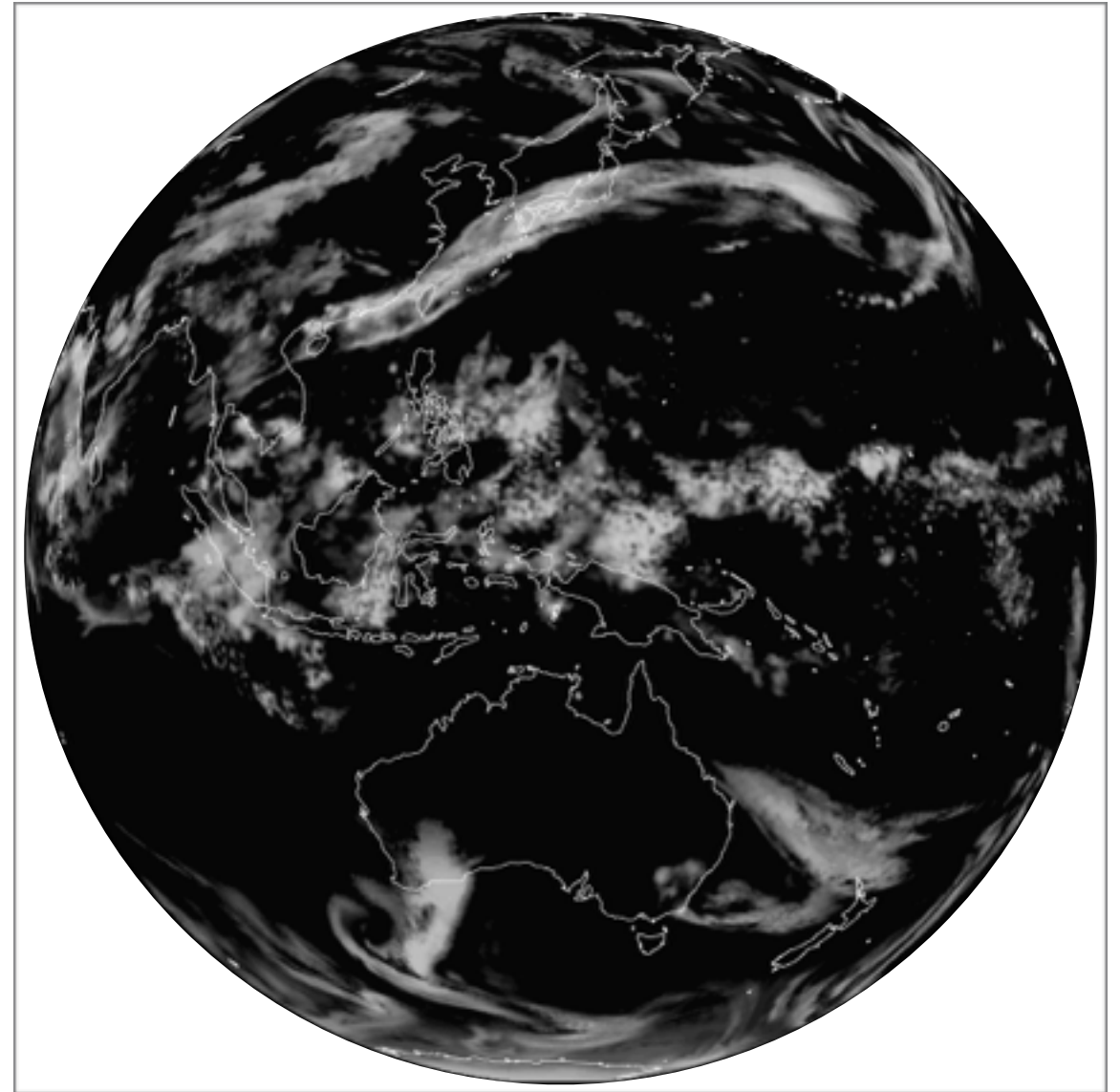
部分凝結



Le Treut and Li 1988

AFES

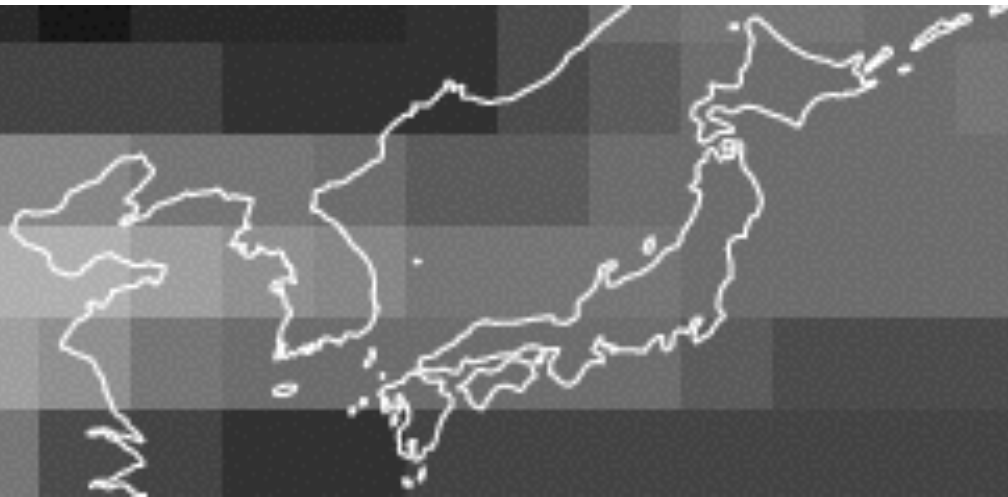
- 地球シミュレータ用
大気大循環モデル
- スペクトル変換法
- 格子間隔～約10 km



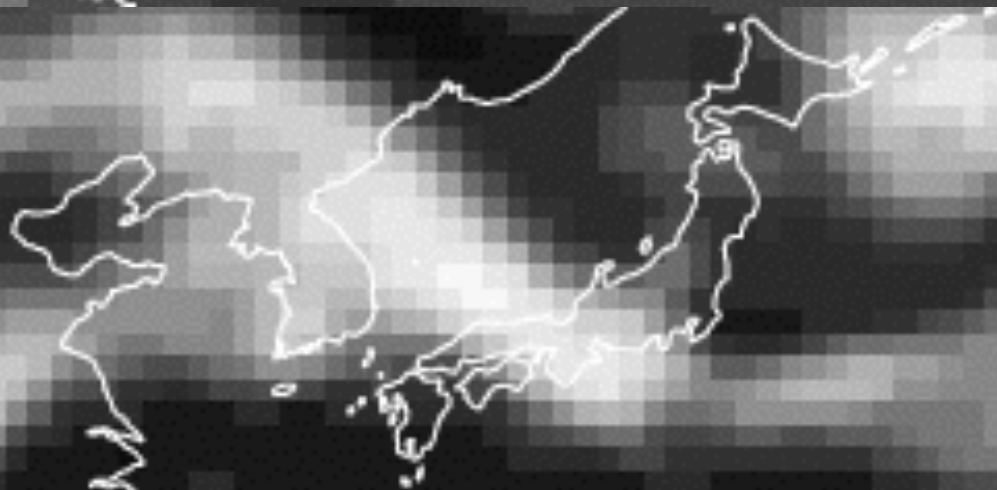
Numaguti et al. 1997; Ohfuchi et al. 2004;
Enomoto et al. 2008; Kuwano-Yoshida et al. 2011

水平解像度依存性

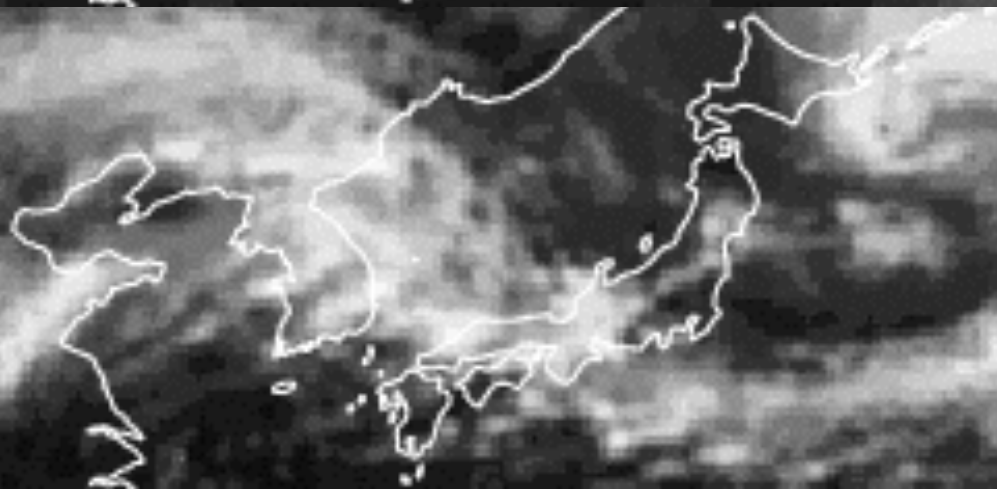
T39 (333 km)



T159 (83 km)



T639 (21 km)



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

データ同化

データ同化とは

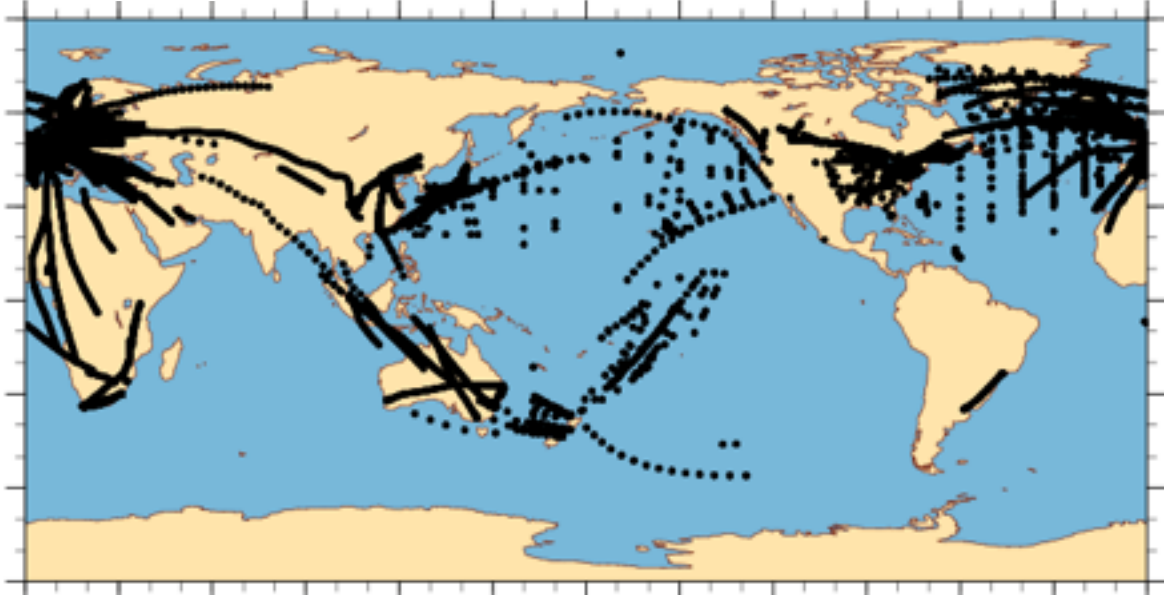
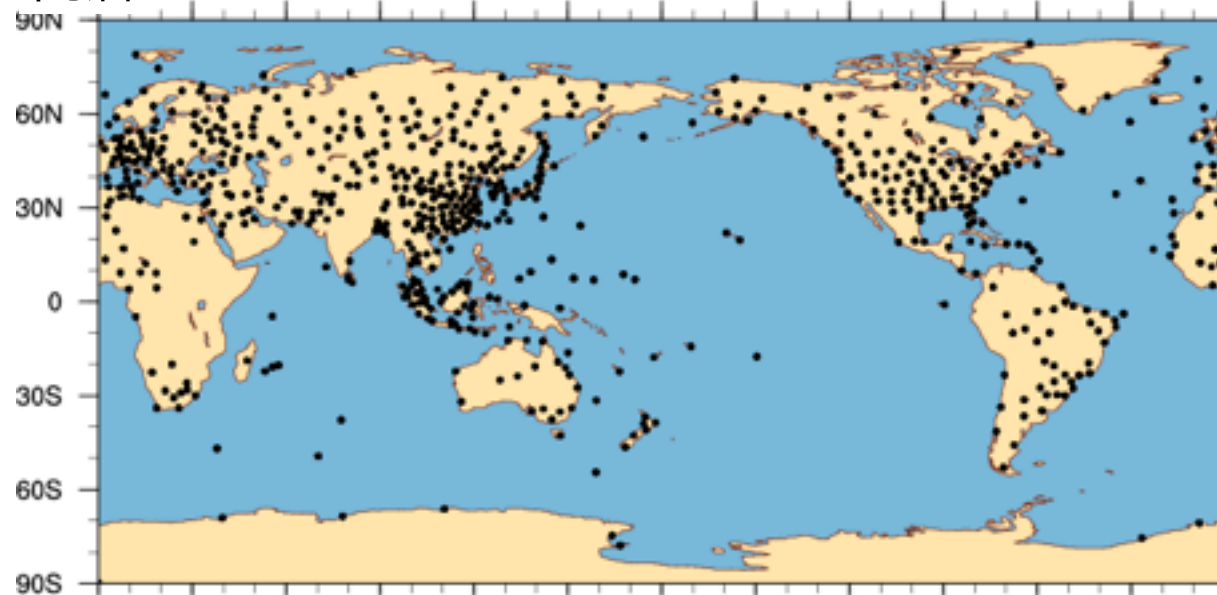
- 数値天気予報に必要な初期値を作る。
- 予測と観測との重み付き平均。

高層

1287 ADPUA 2008010112

飛行機

38036 AIRCFT 2008010112

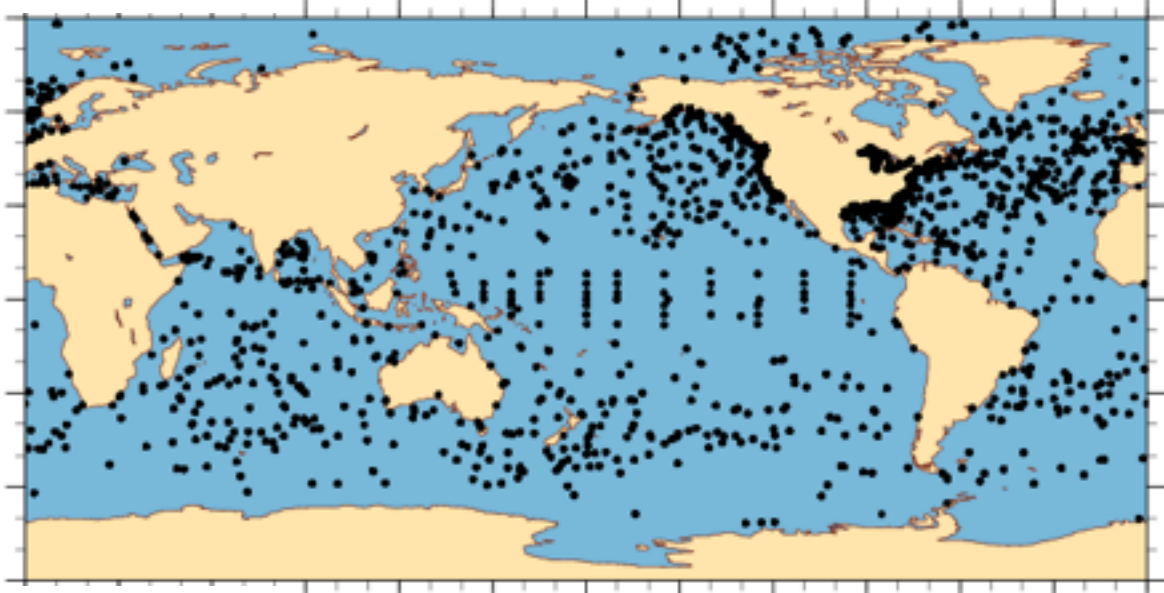
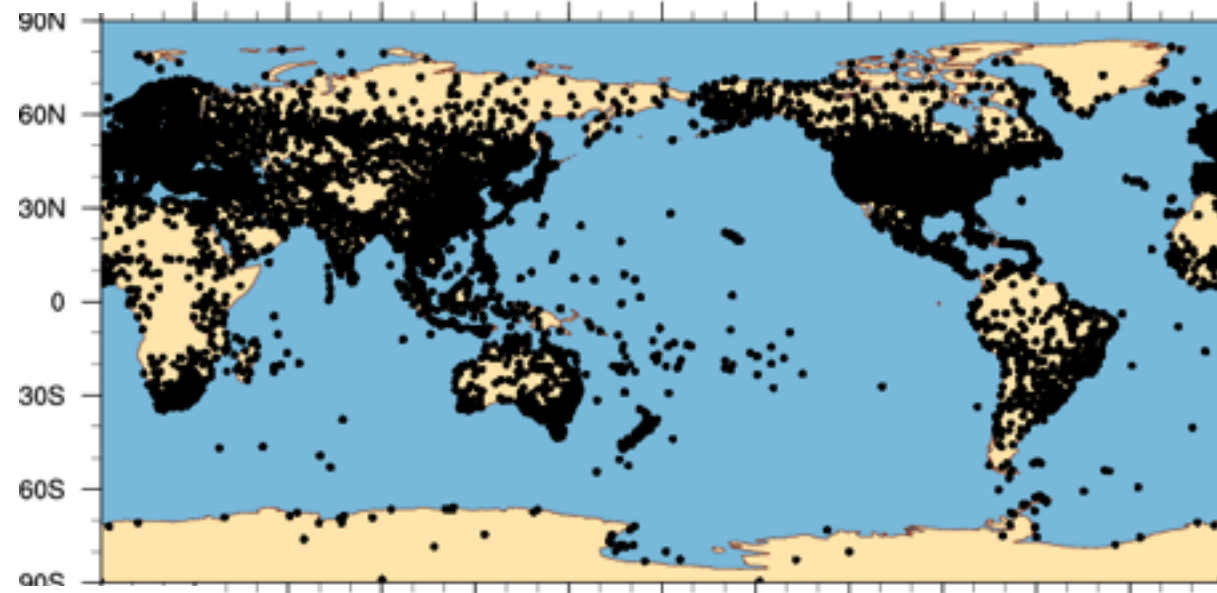


地上

101758 ADPSFC 2008010112

船舶・ブイ

10616 SFCSHP 2008010112

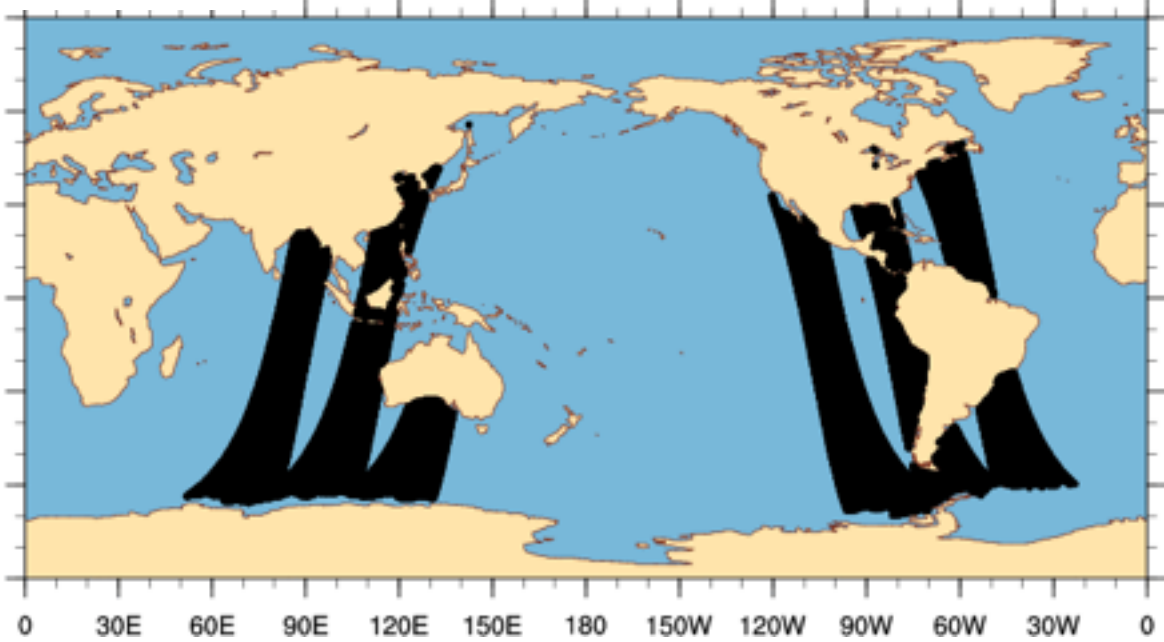
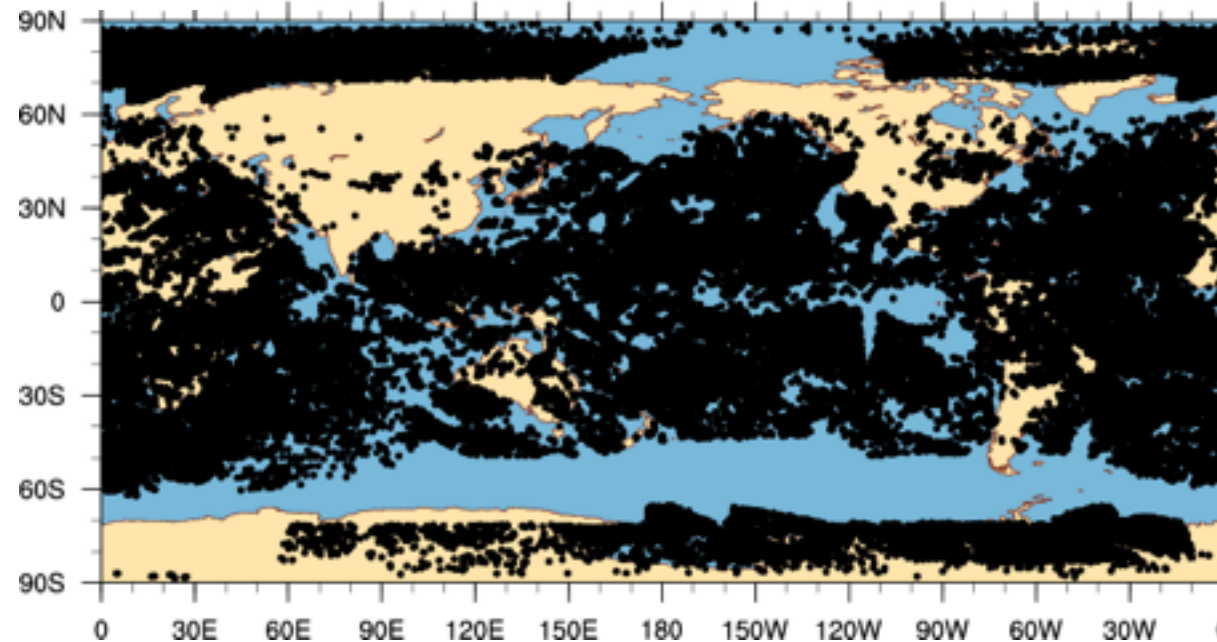


静止衛星

86444 SATWND 2008010112

極軌道衛星

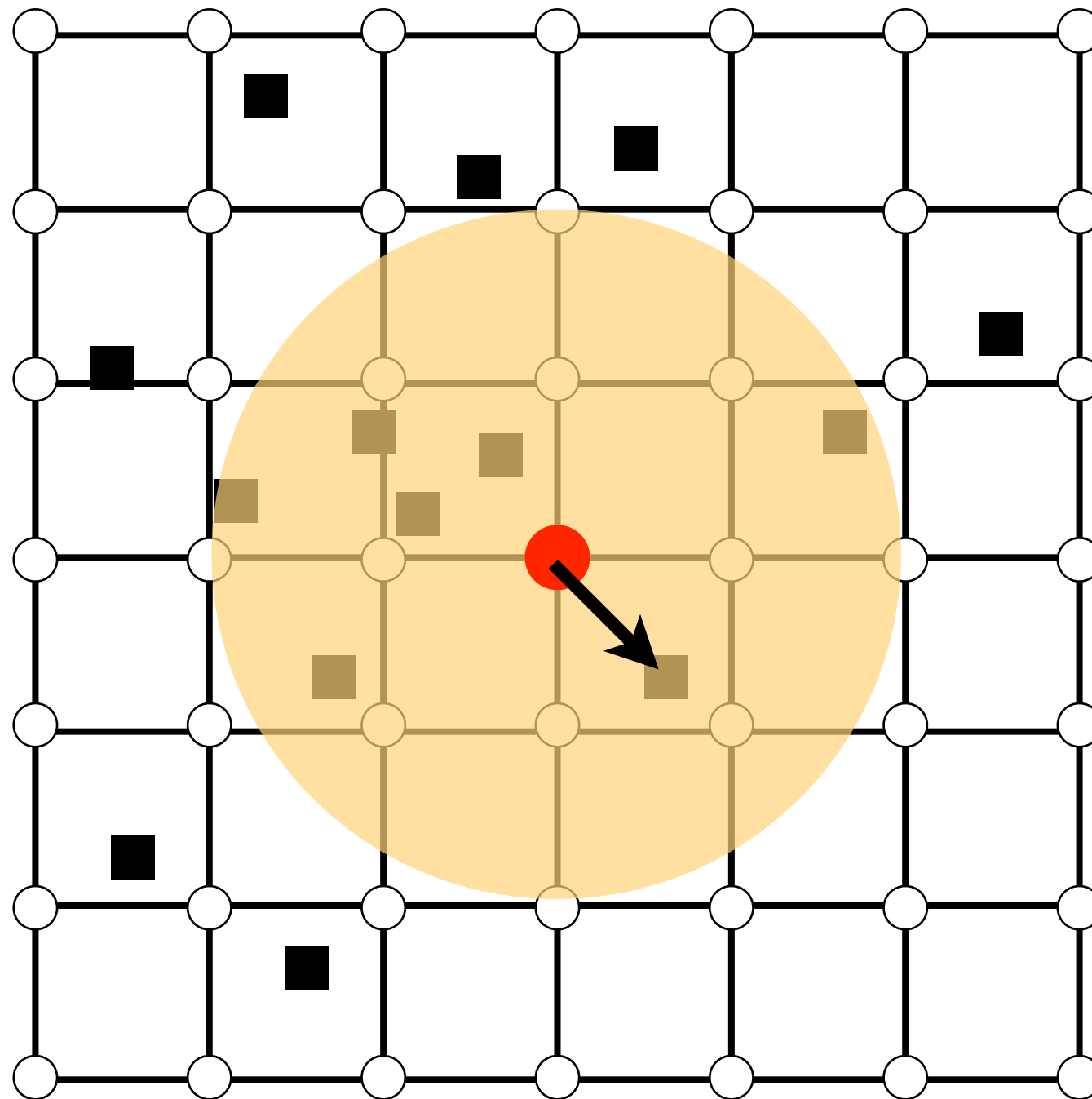
25589 QKSWND 2008010112



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。

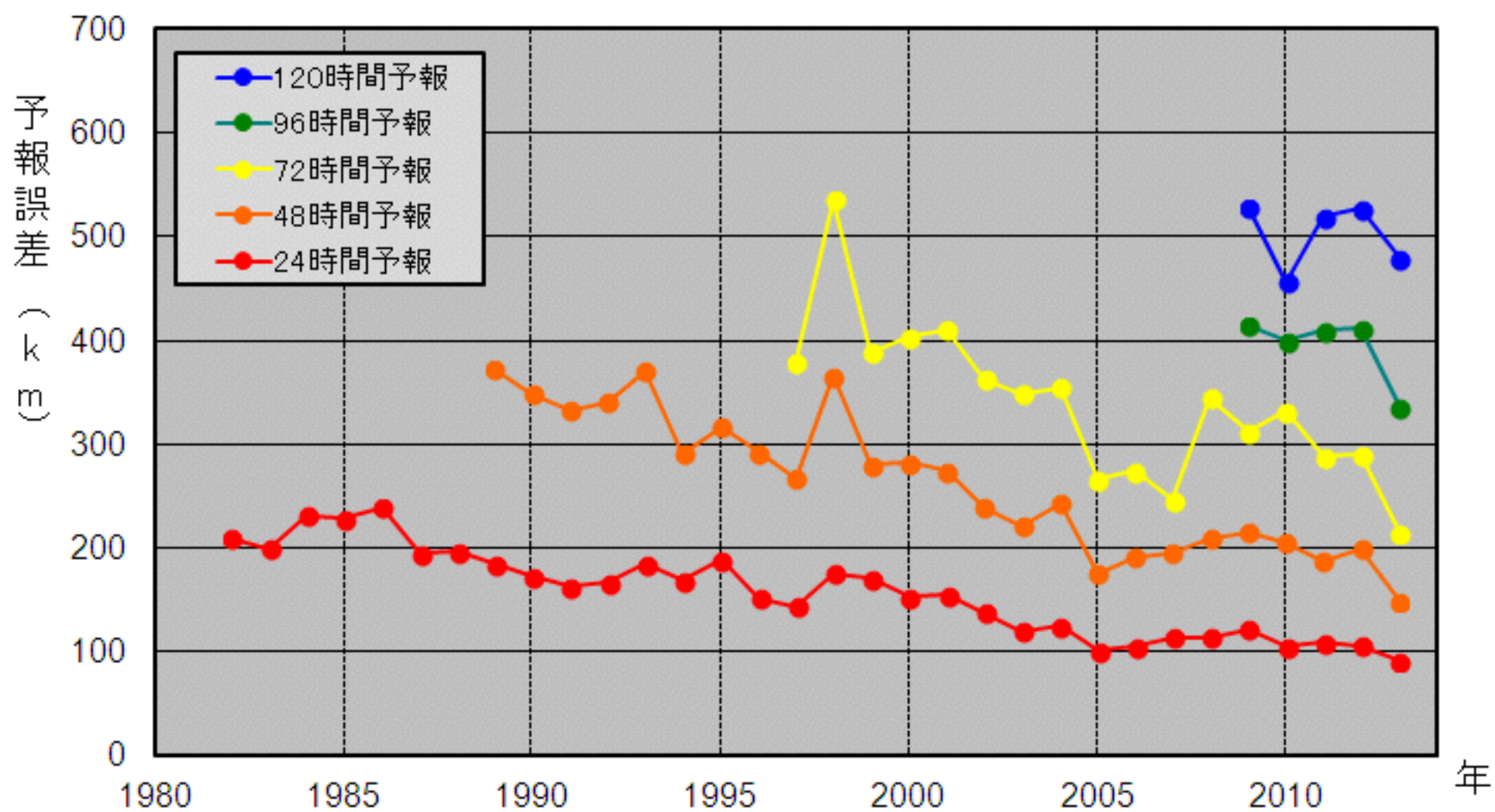
データ同化



Kalnay 2003

台風進路予測

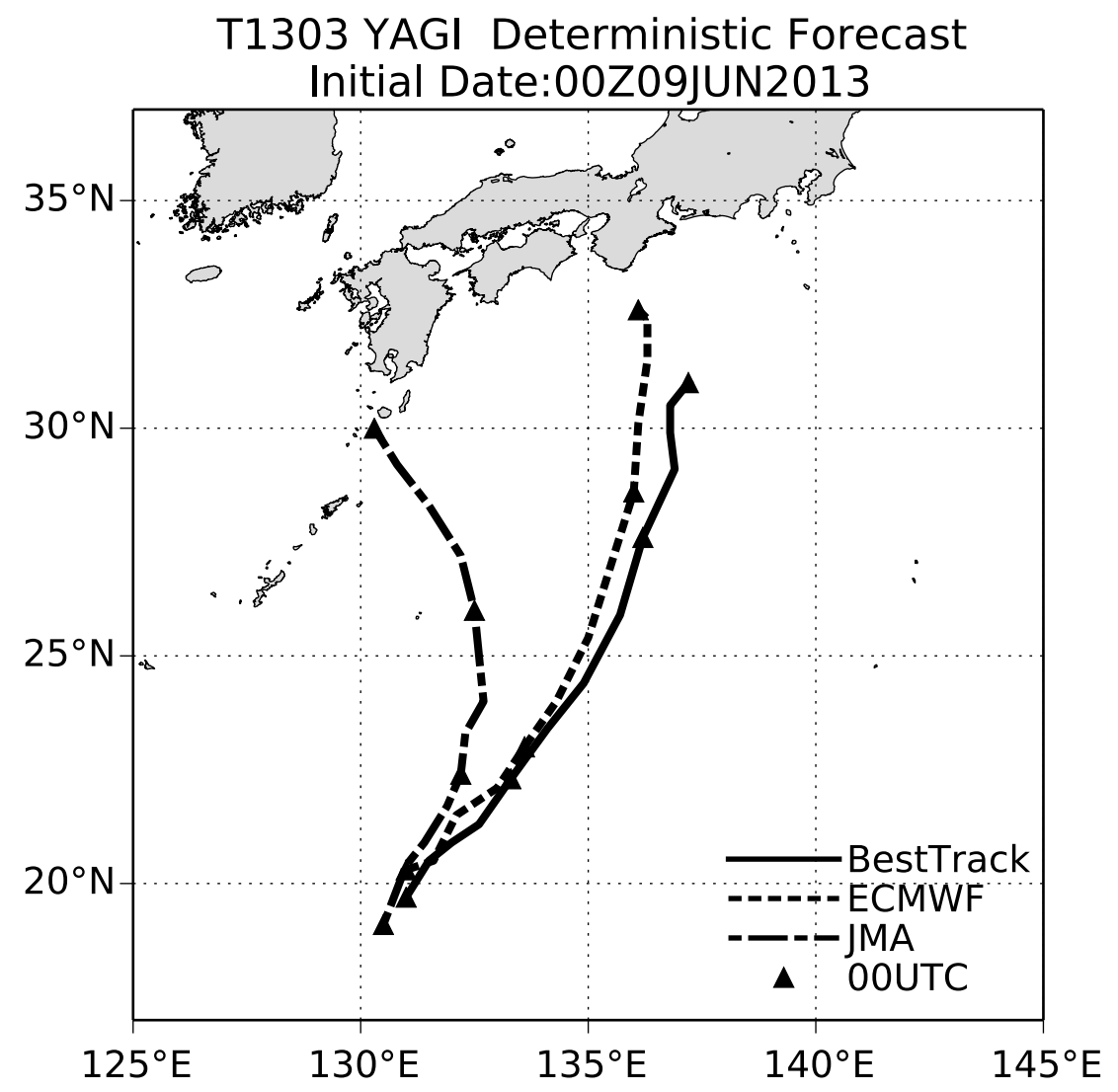
台風進路予測誤差



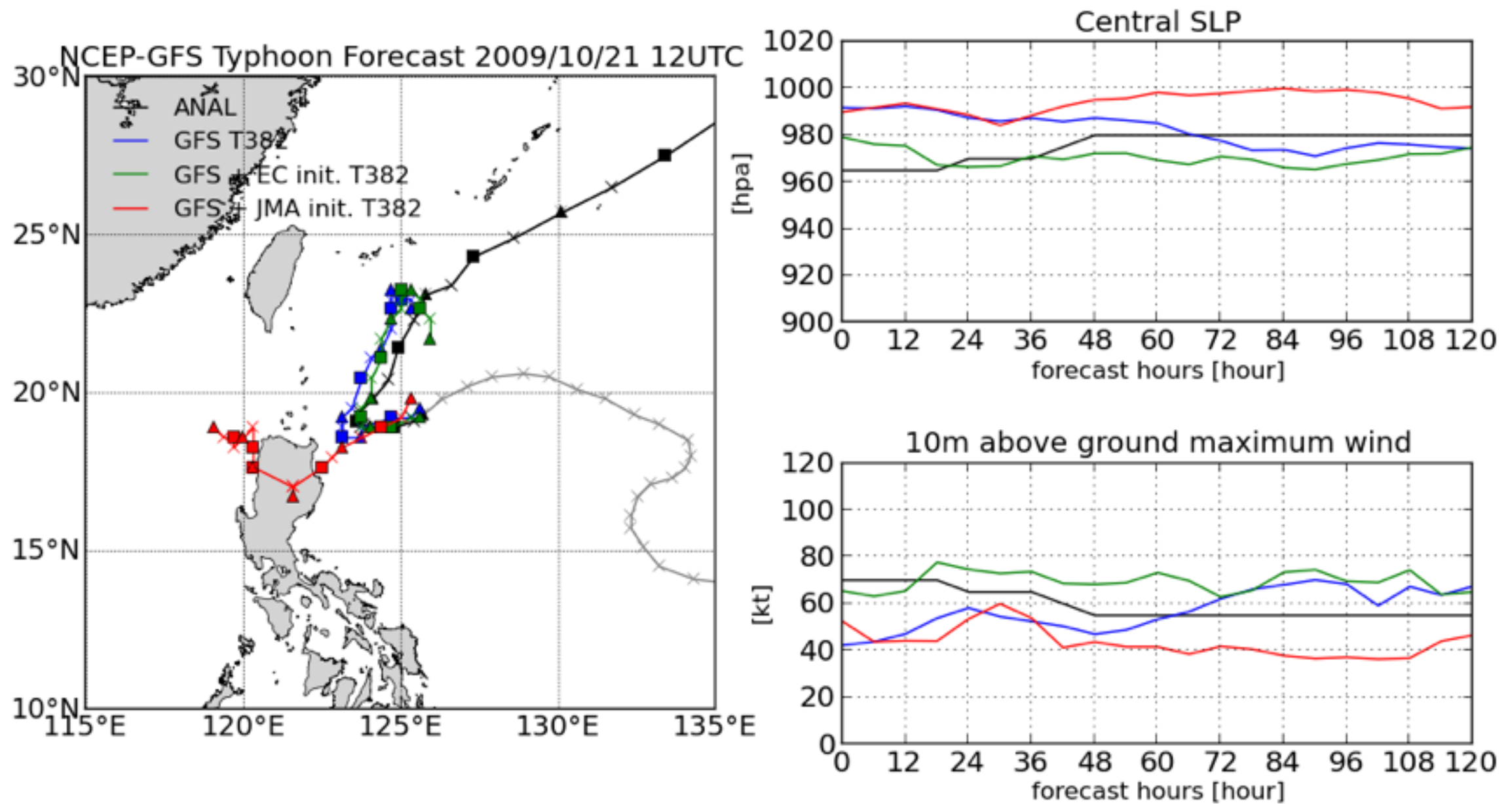
台風進路予報(中心位置の予報)の年平均誤差

気象庁

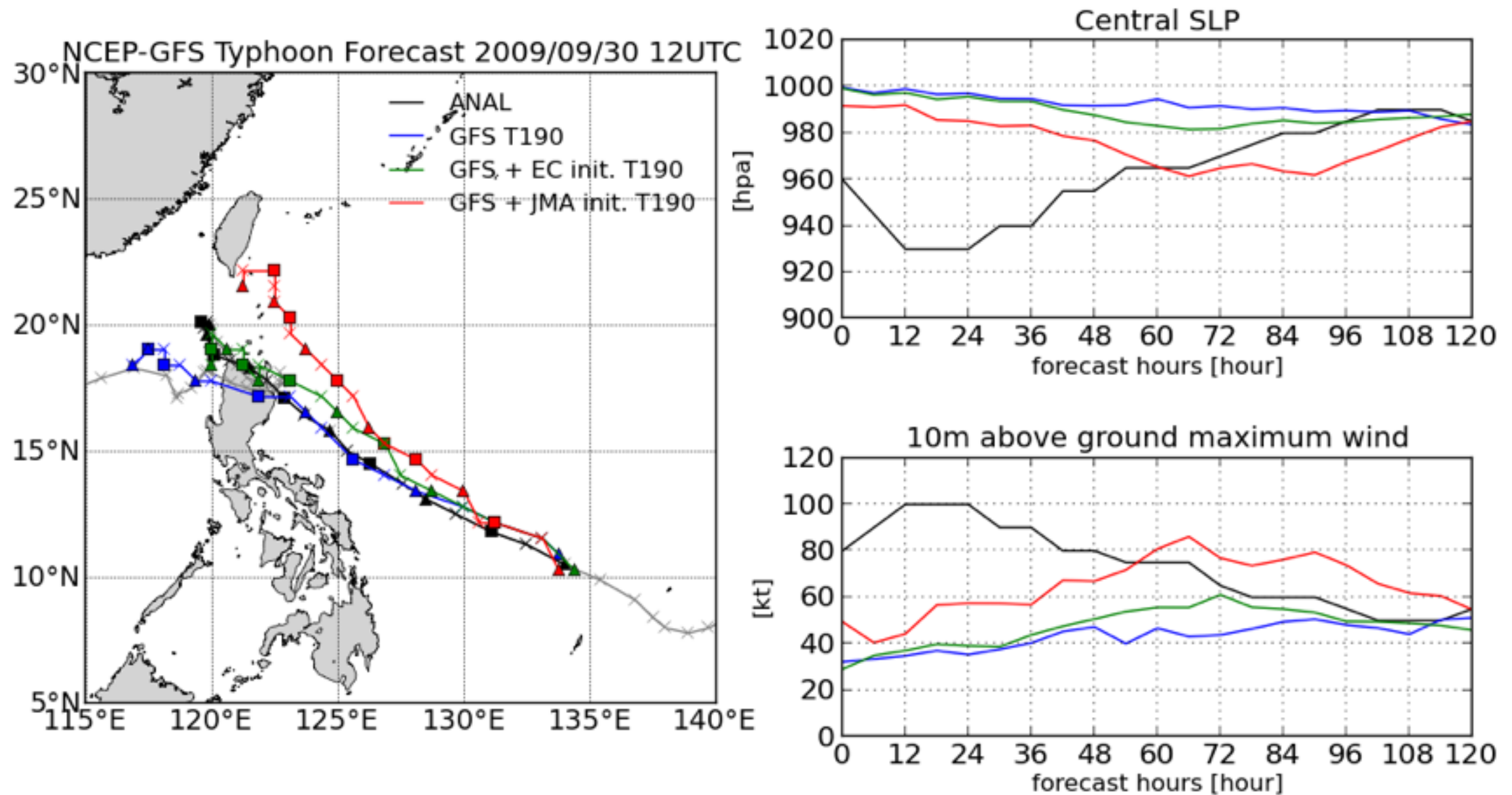
2013年台風第3号YAGI



T0920: NCEP GFS T382L64



T0917 (Parma): NCEP GFS T190L64



アンサンブル予報実験

2009年台風第20号: 転向予測が難しかった事例

