

---

# 「計算科学が拓く世界」 第11回

地球・惑星・宇宙と計算科学 3

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12月13日5時限

---

# 災害気候研究とは

- 気象学を基礎として、大気組成の変化や、異常気象・異常天候の発現過程や予測可能性、気候変動とその機構を解明
- 大気モデルを用いた数値実験や、長期間の気象海洋観測データ、現業数値天気予報データの解析
- 理学研究科地球惑星科学専攻の協力講座、大気科学分科に所属

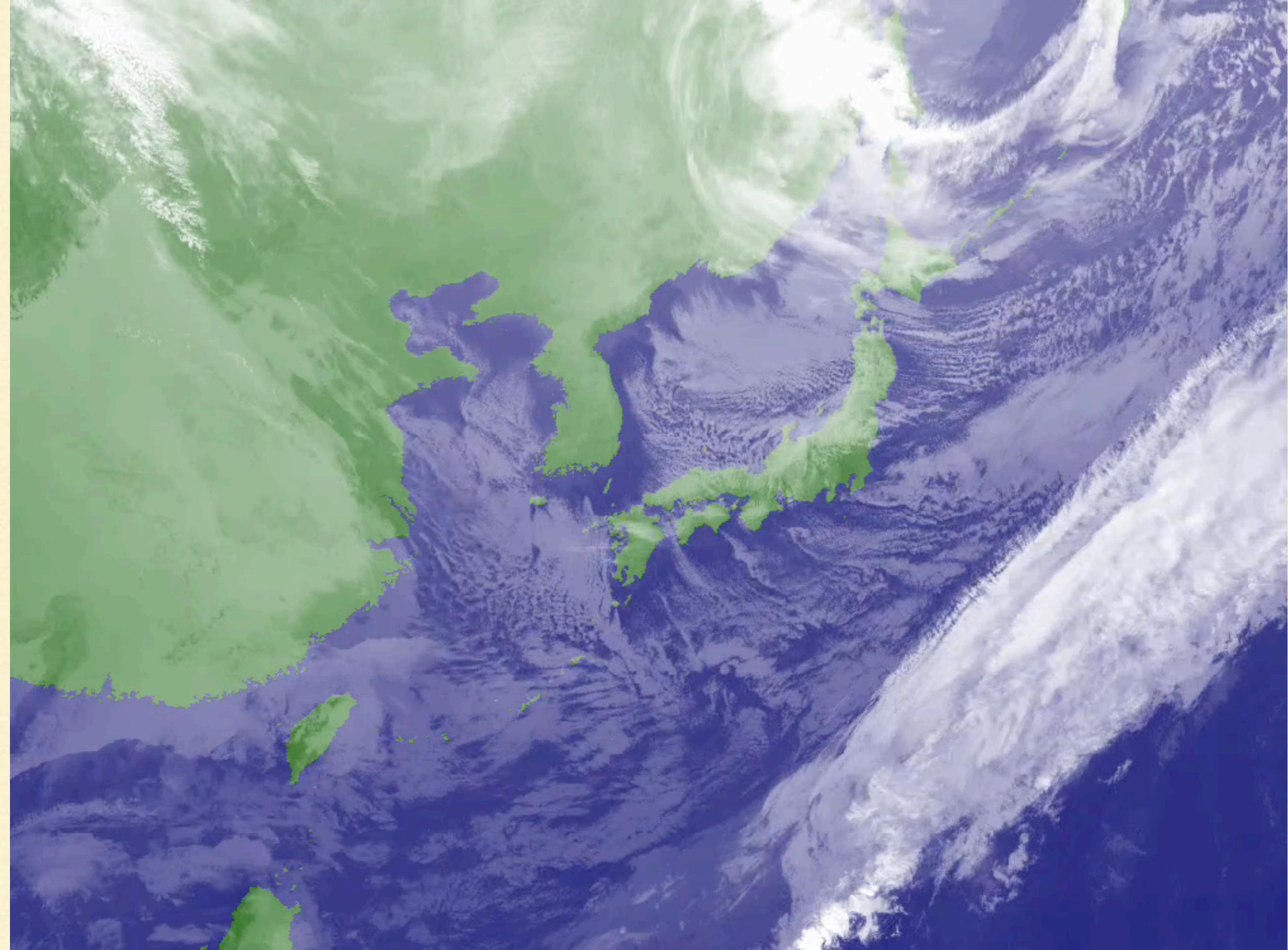


---

# 今日のお話

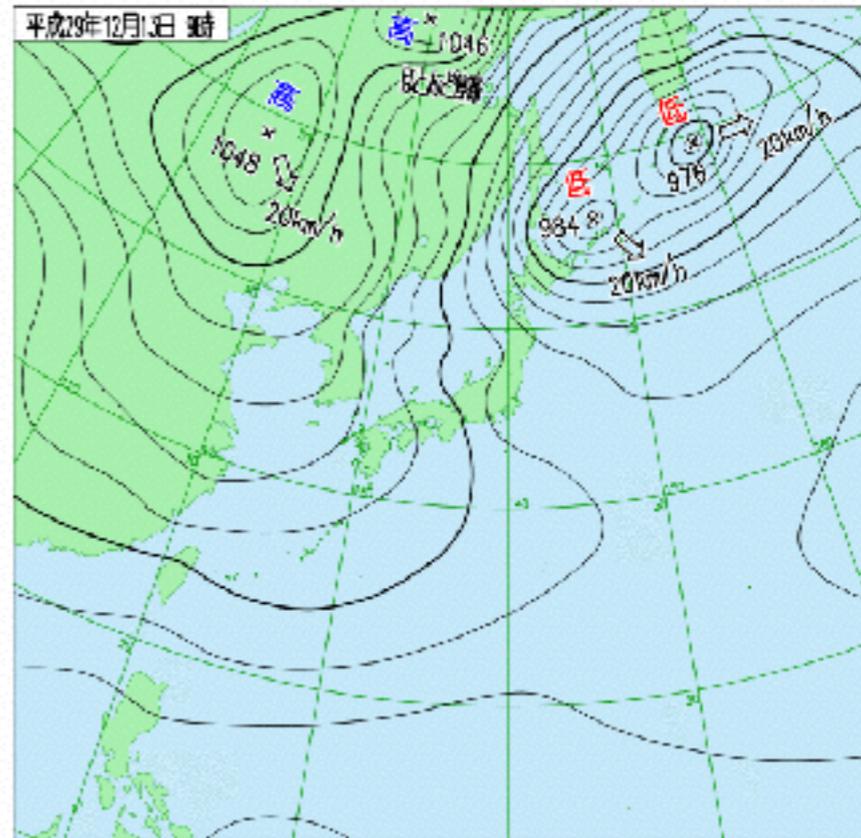
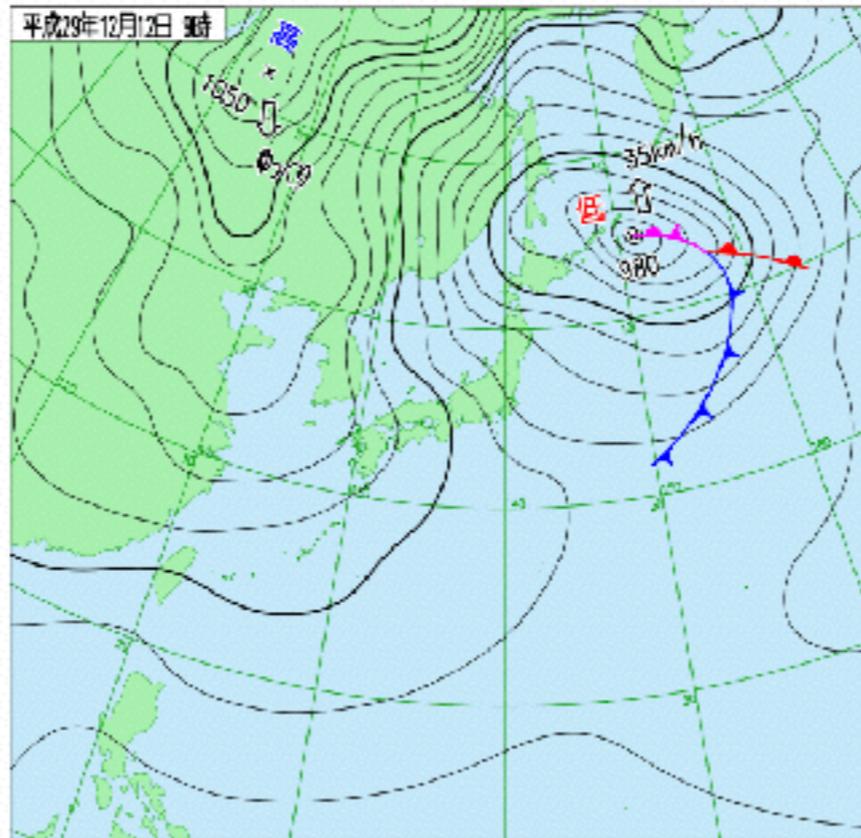
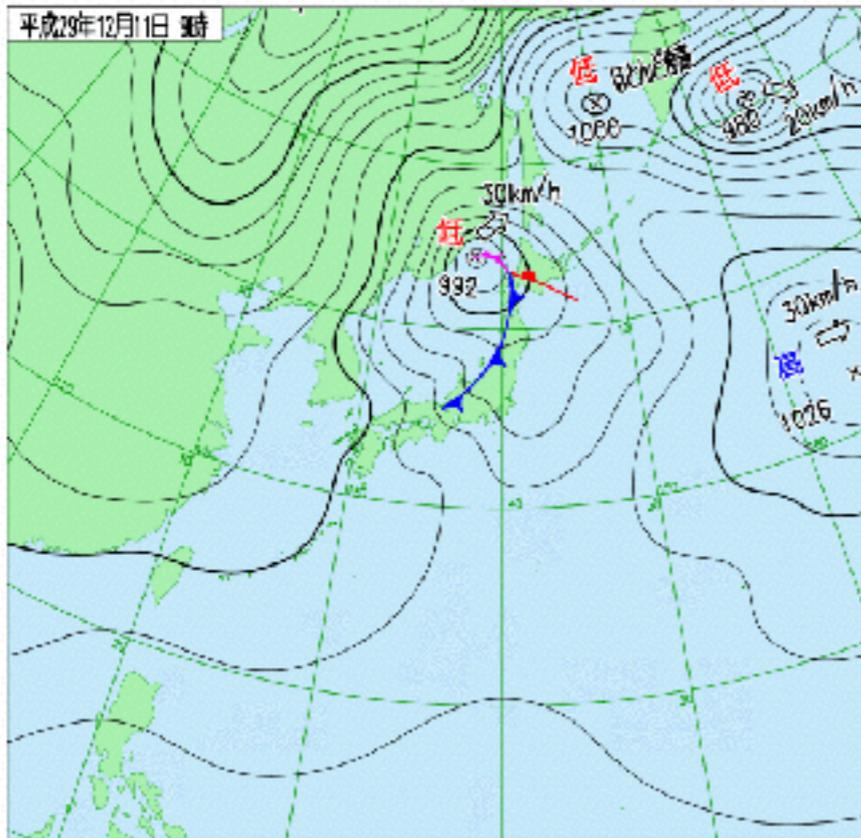
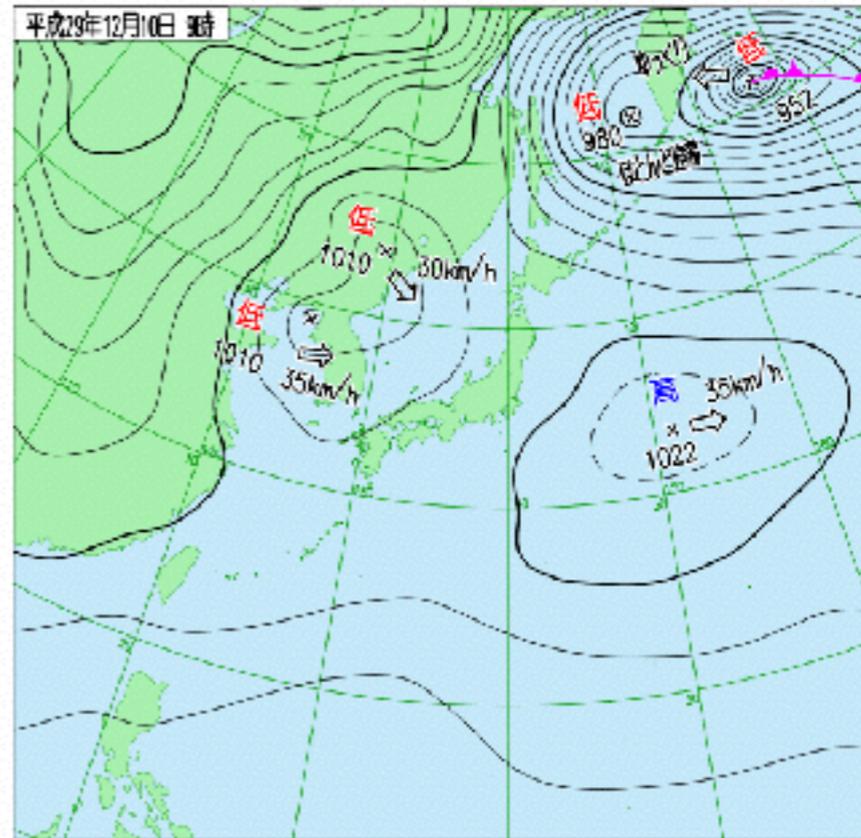
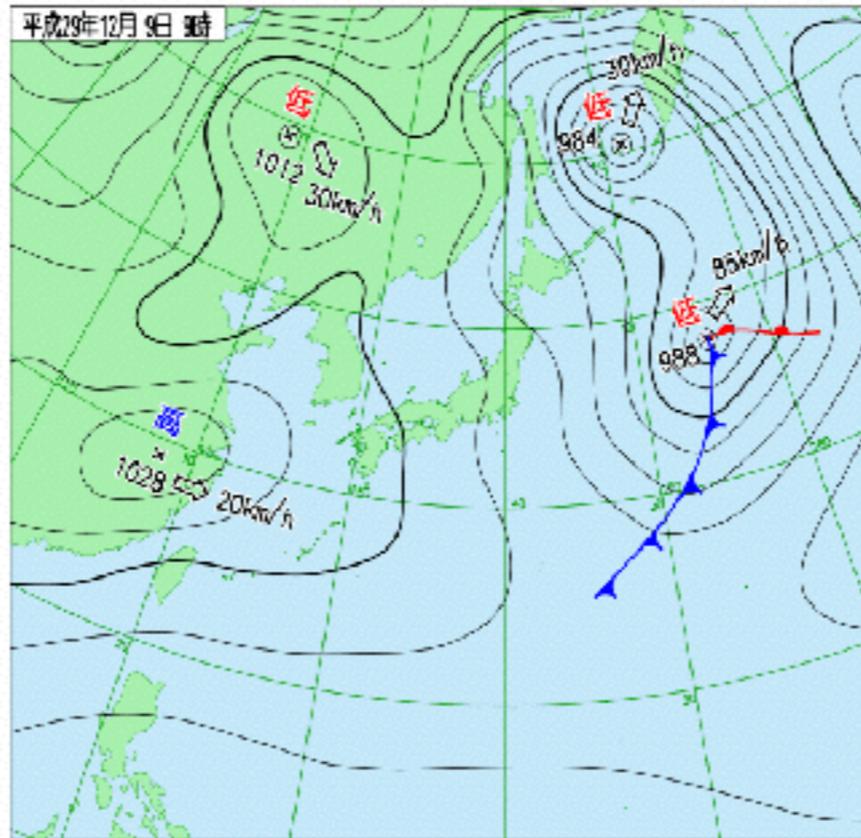
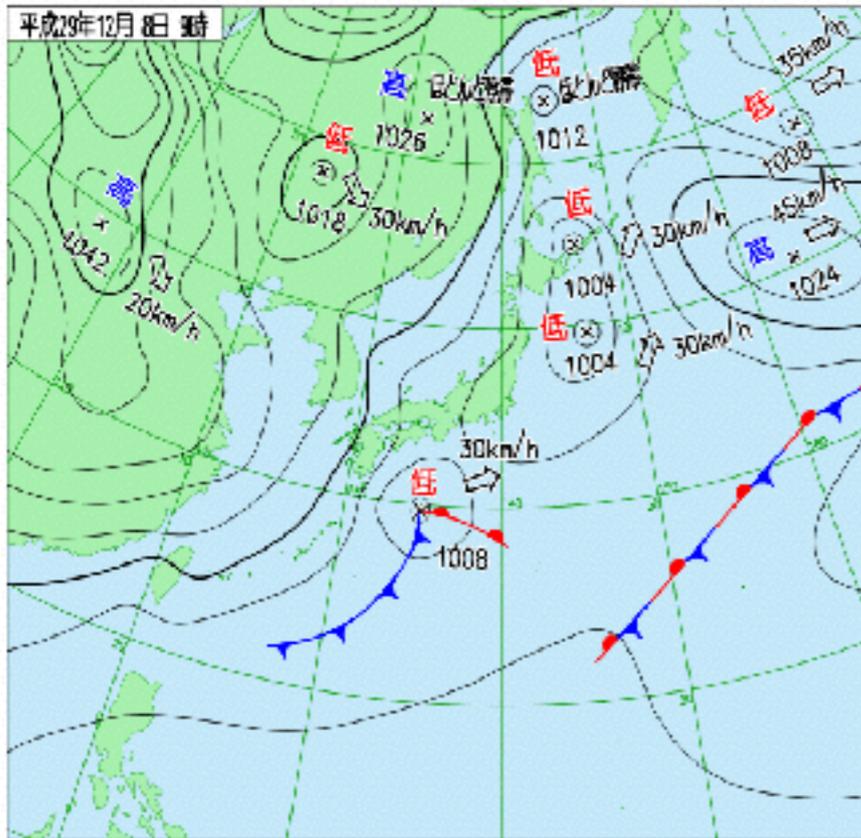
---

- 数値天気予報の歴史
  - 大気大循環モデル
  - 気象とスーパーコンピュータ
  - データ同化
  - 理解度チェック
-



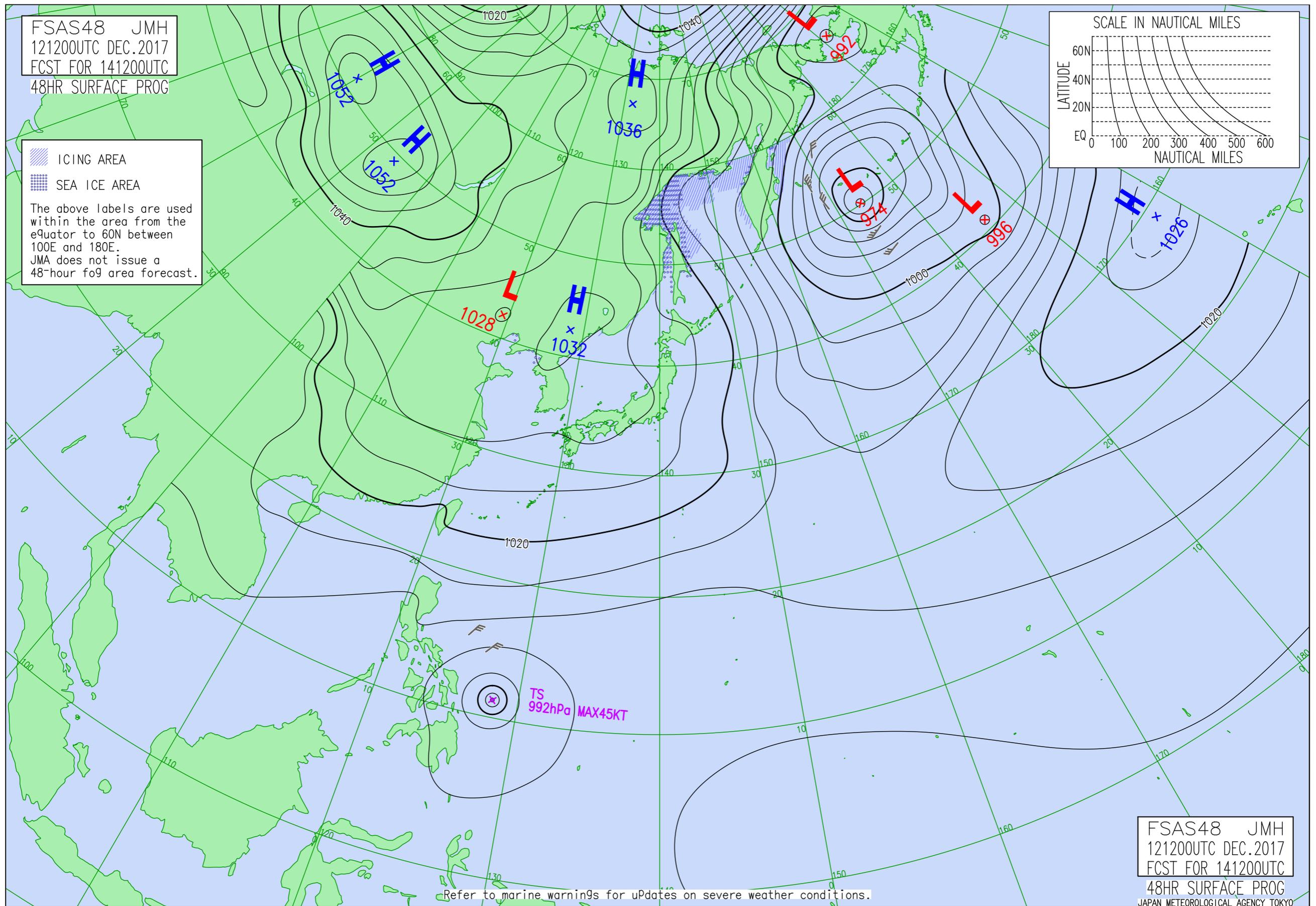
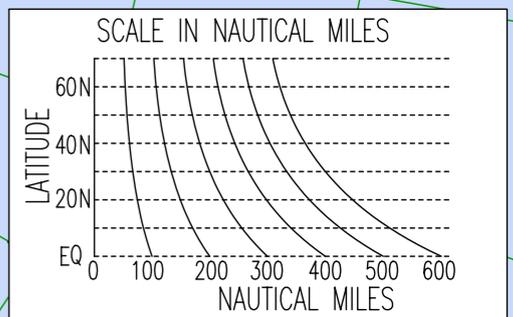
2017.12.13 12:00JST (13 DEC 2017 03:00UTC)

HIMAWARI JMA



FSAS48 JMH  
121200UTC DEC.2017  
FCST FOR 141200UTC  
48HR SURFACE PROC

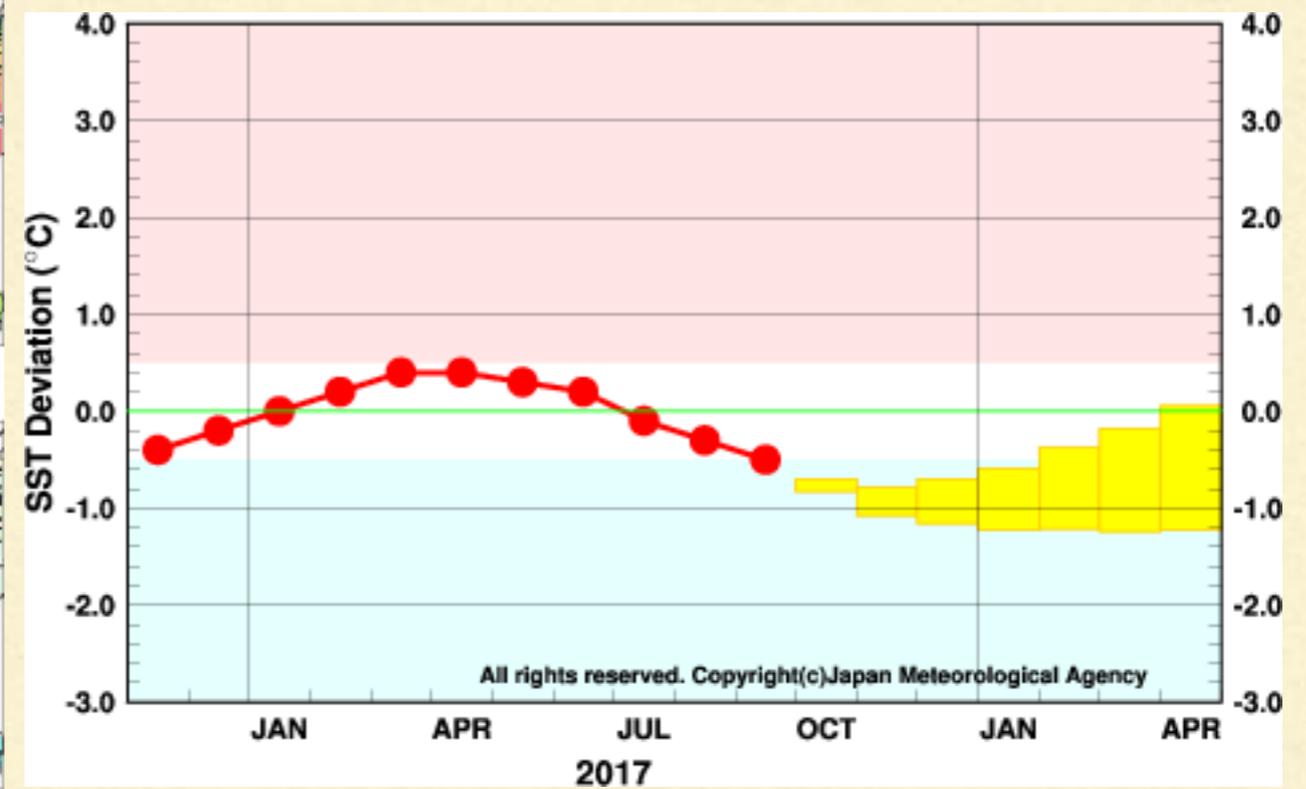
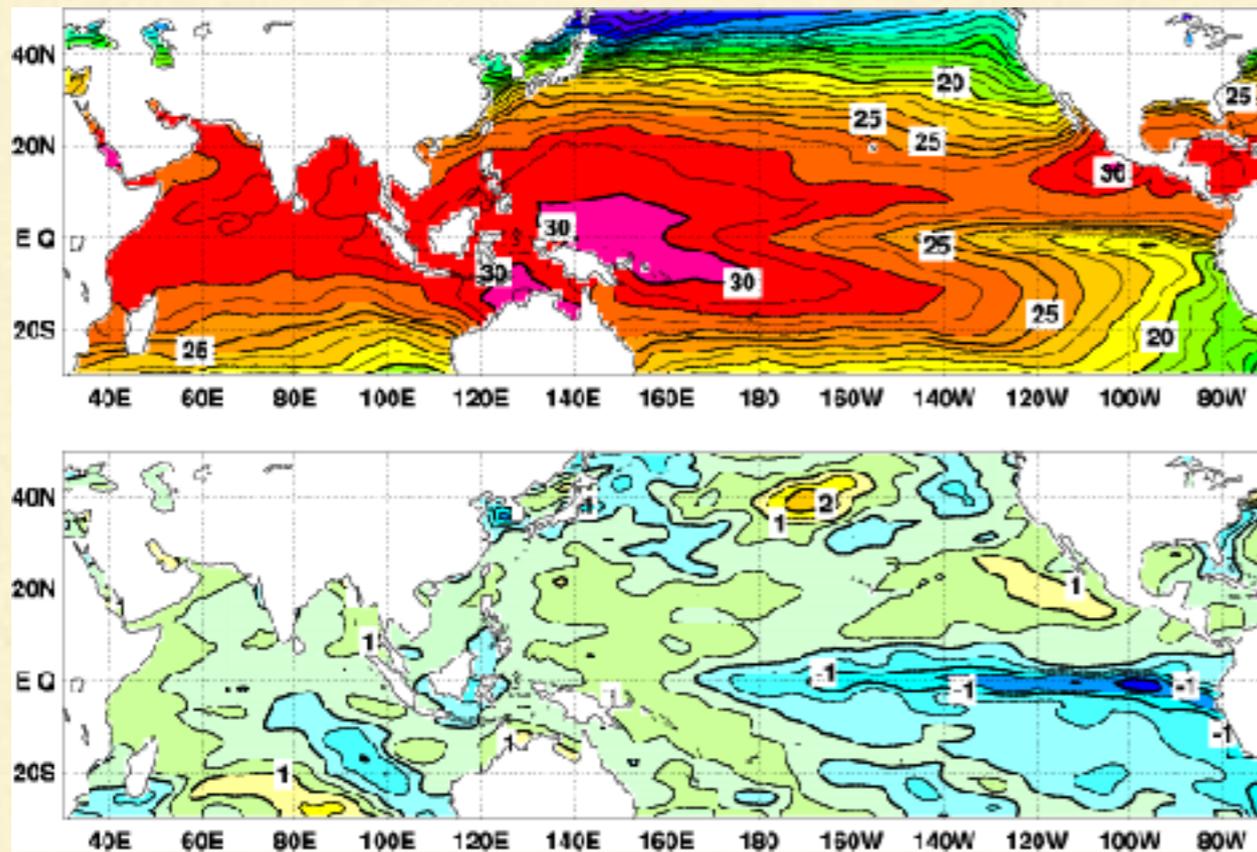
 ICING AREA  
 SEA ICE AREA  
The above labels are used  
within the area from the  
equator to 60N between  
100E and 180E.  
JMA does not issue a  
48-hour forecast for  
this area.



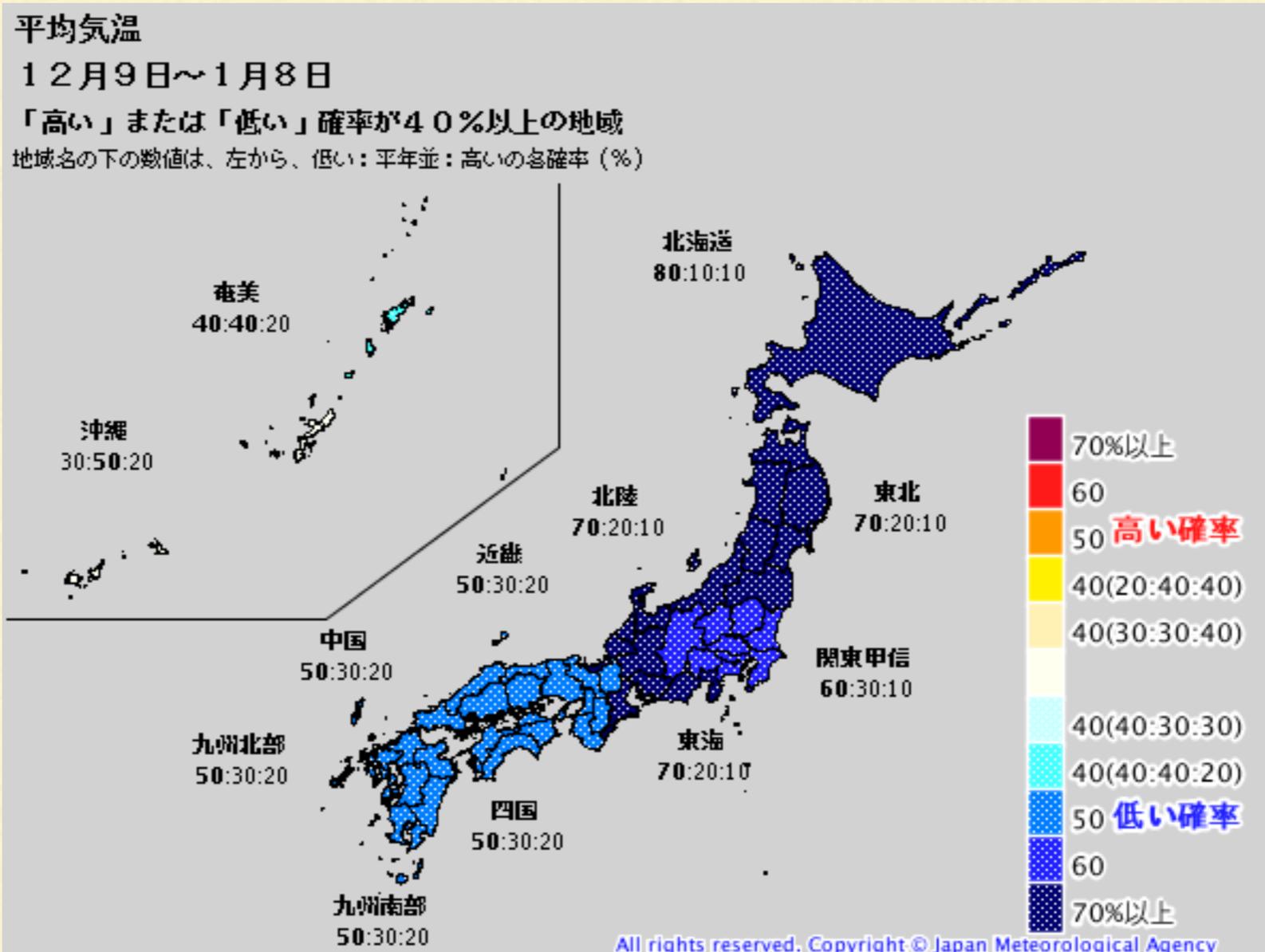
Refer to marine warnings for updates on severe weather conditions.

FSAS48 JMH  
121200UTC DEC.2017  
FCST FOR 141200UTC  
48HR SURFACE PROC  
JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY TOKYO

# ラニーニャ現象



# 1か月予報



---

# 数值予報の歴史

---

---

# 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
-

---

# 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
-



---

# 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
-

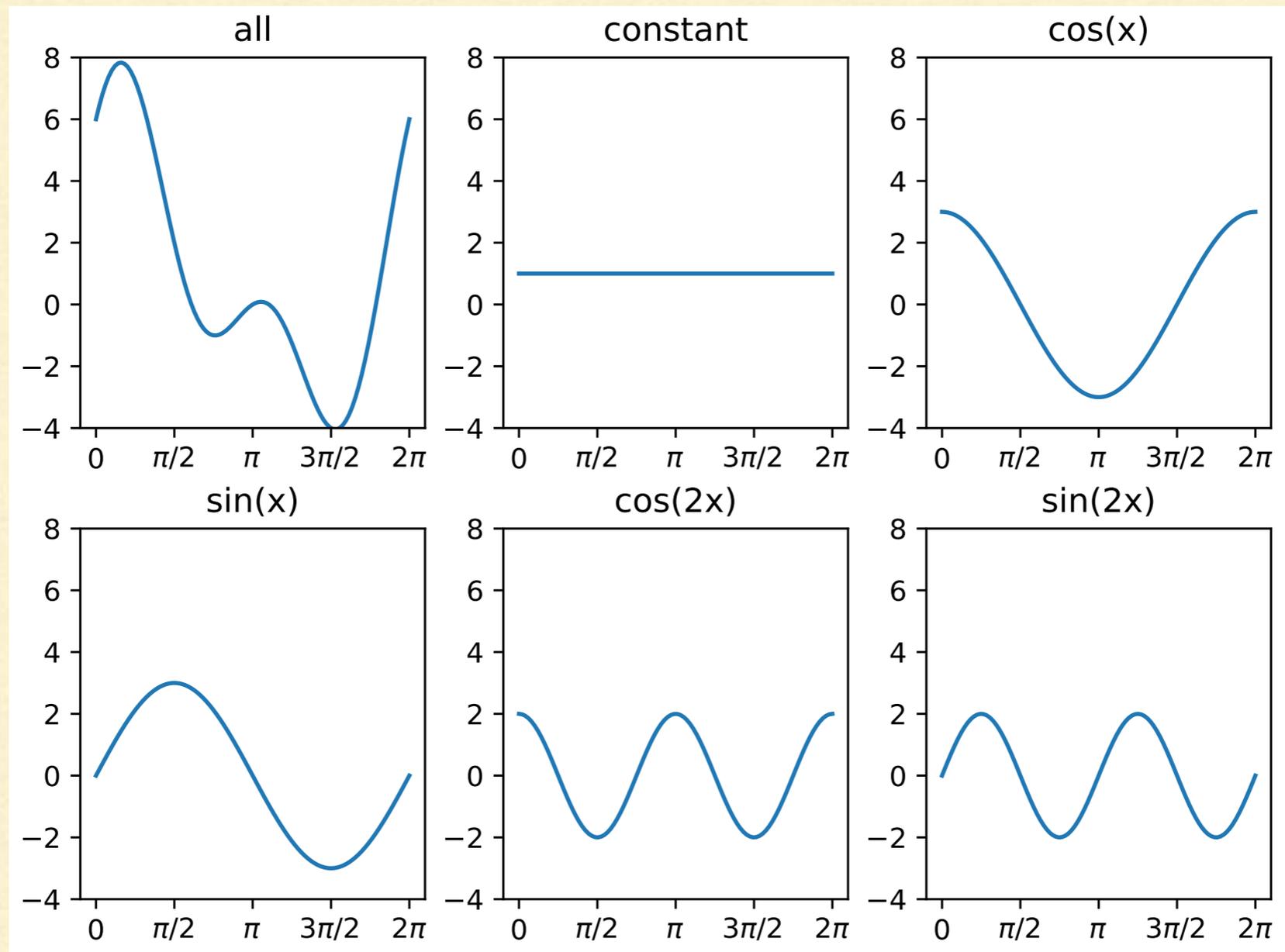
---

# 球面に伴う問題点

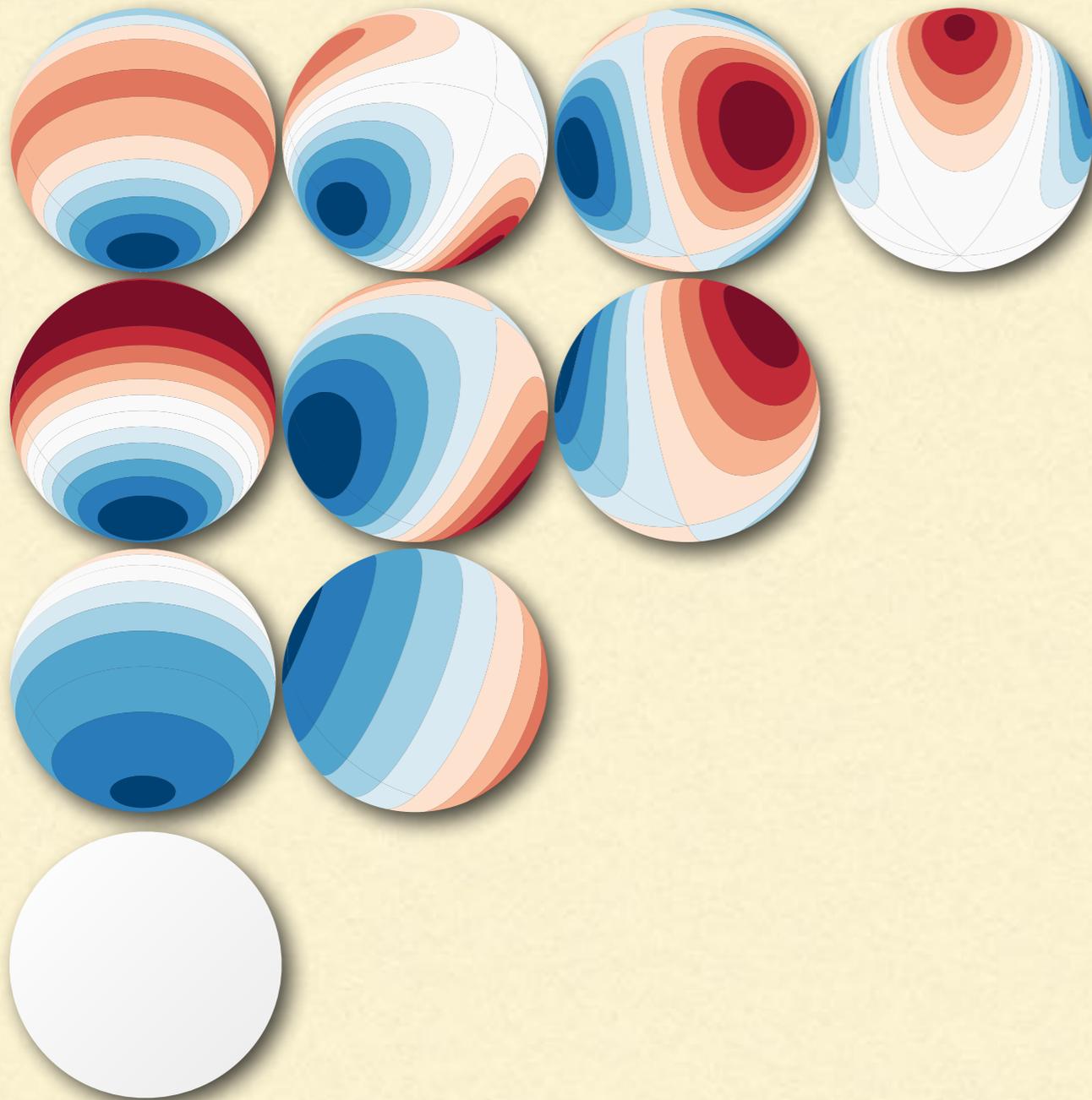
---

- 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。
-

# スペクトル法



# 球面調和関数



- 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

# Reduced格子

Full grid

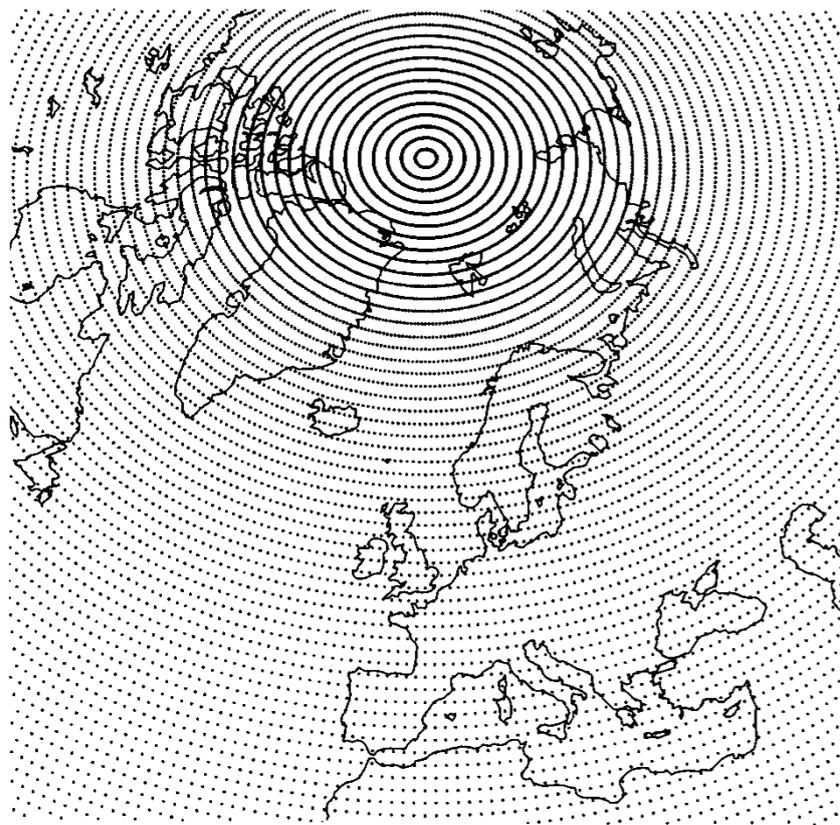


FIG. 1. The distribution of grid points for the conventional T106 Gaussian grid.

Reduced grid

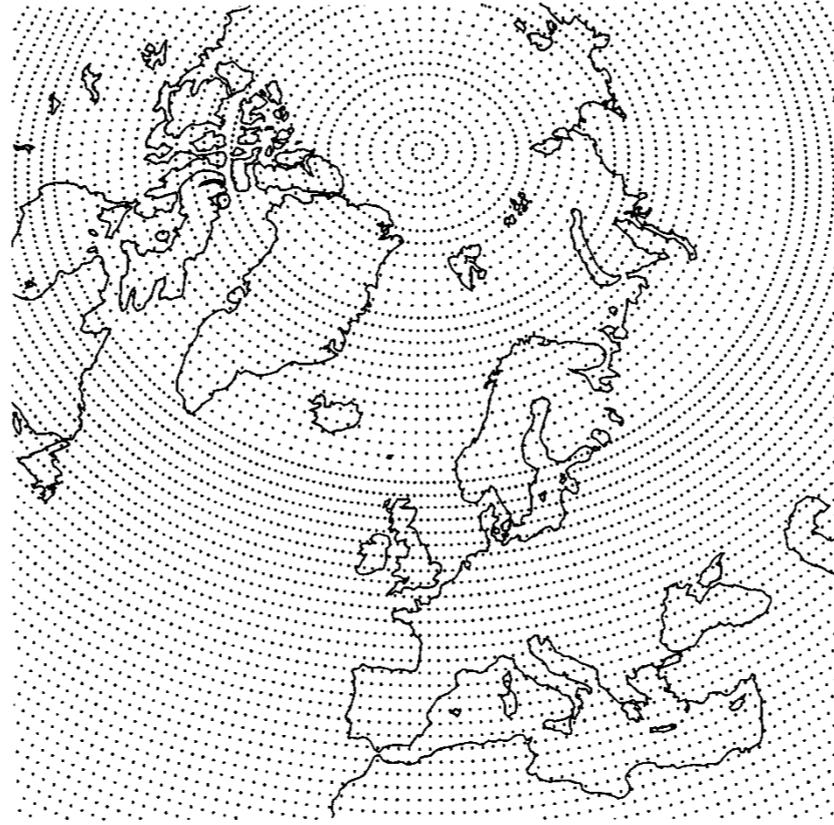


FIG. 2. The distribution of grid points for the "reduced" T106 grid.

Fully reduced grid

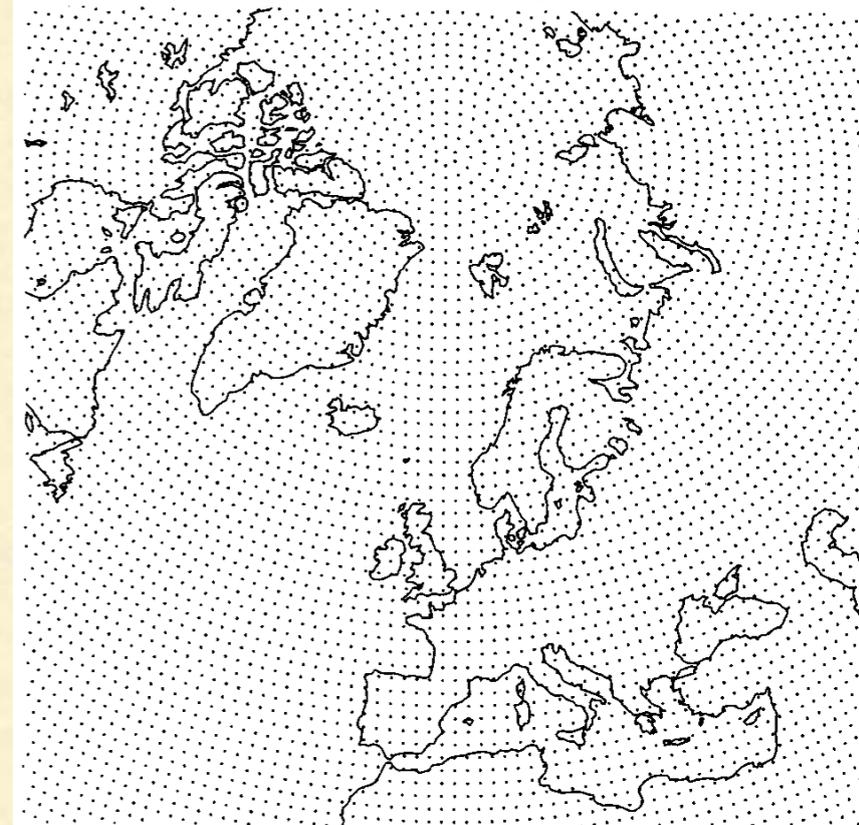
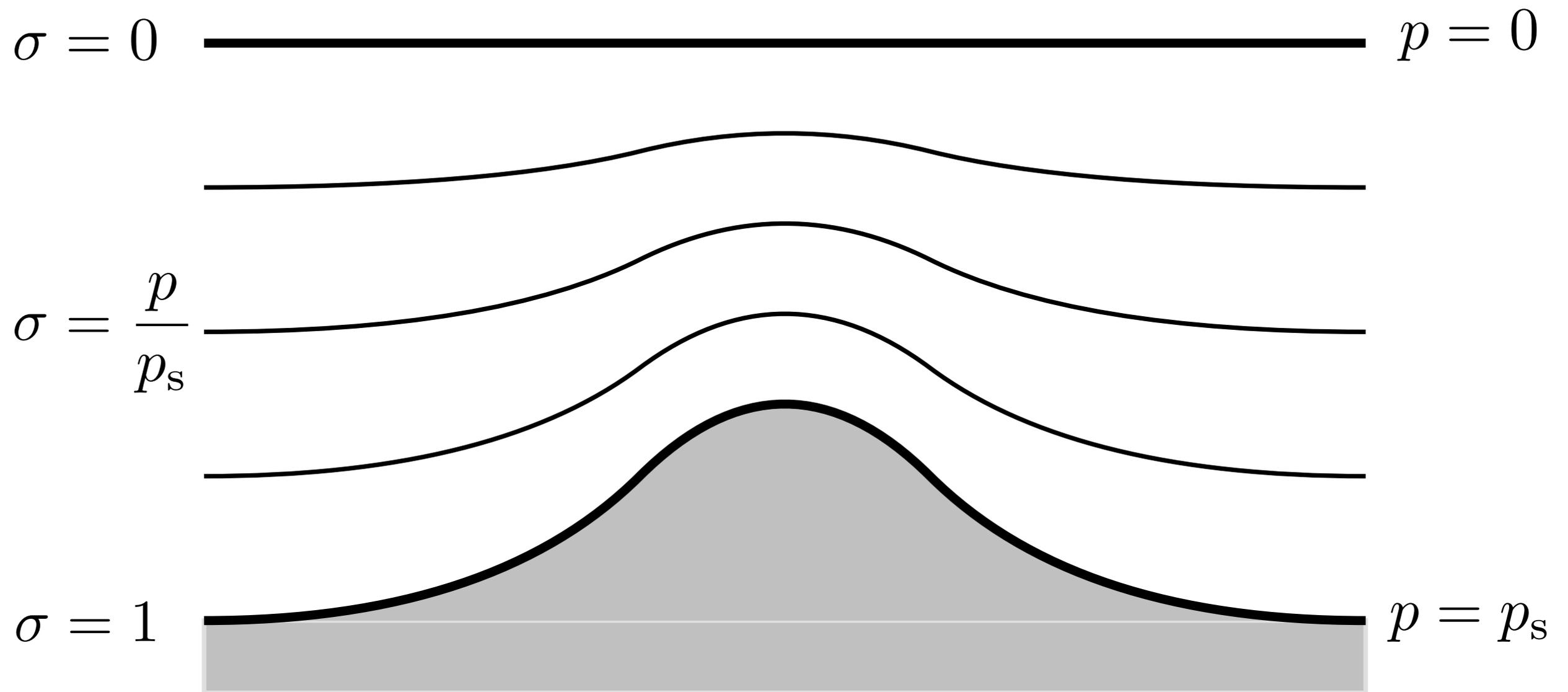


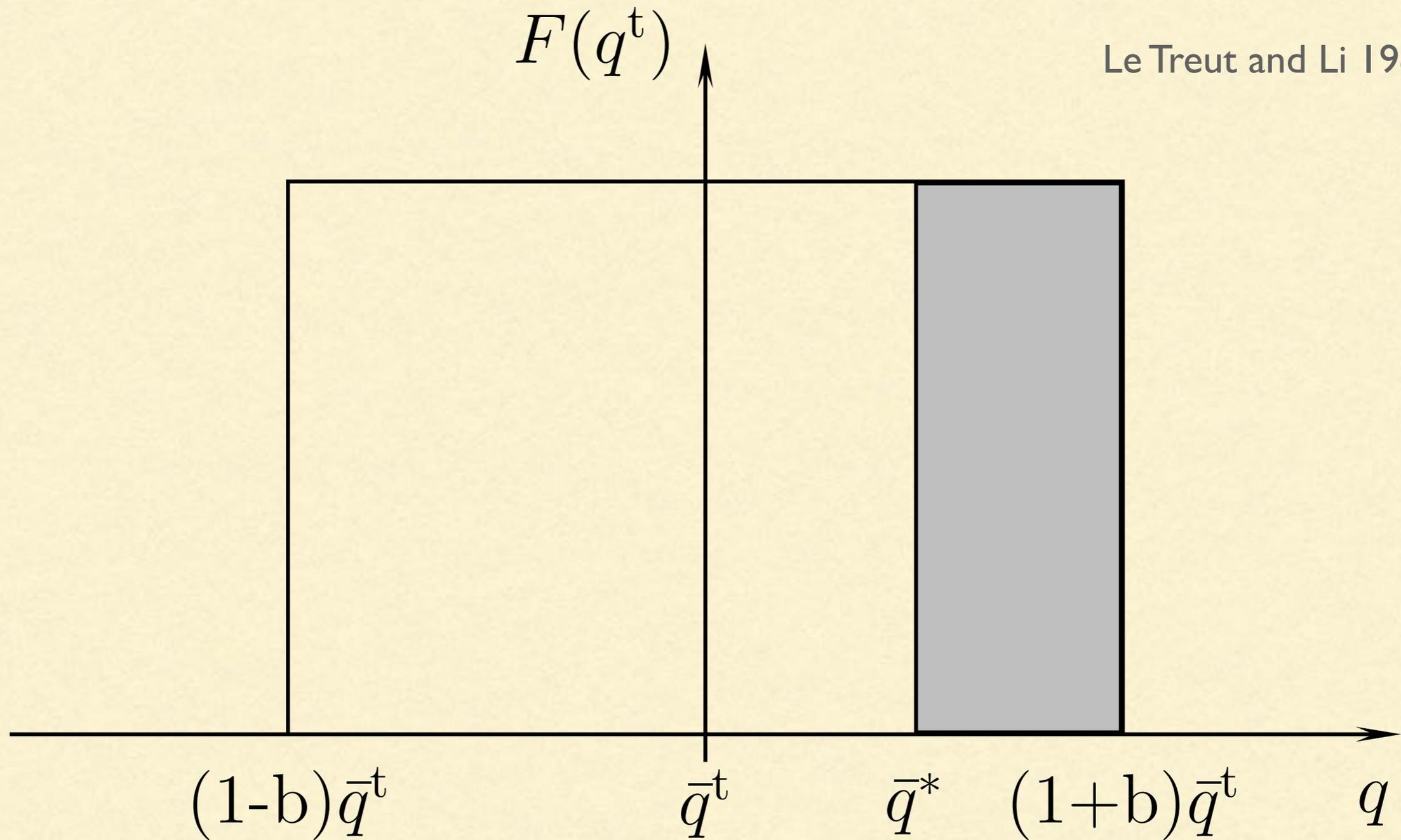
FIG. 3. The distribution of grid points for the "fully reduced" T106 grid.

Hortal and Simmons 1991

# 鉛直離散化



# 部分凝結



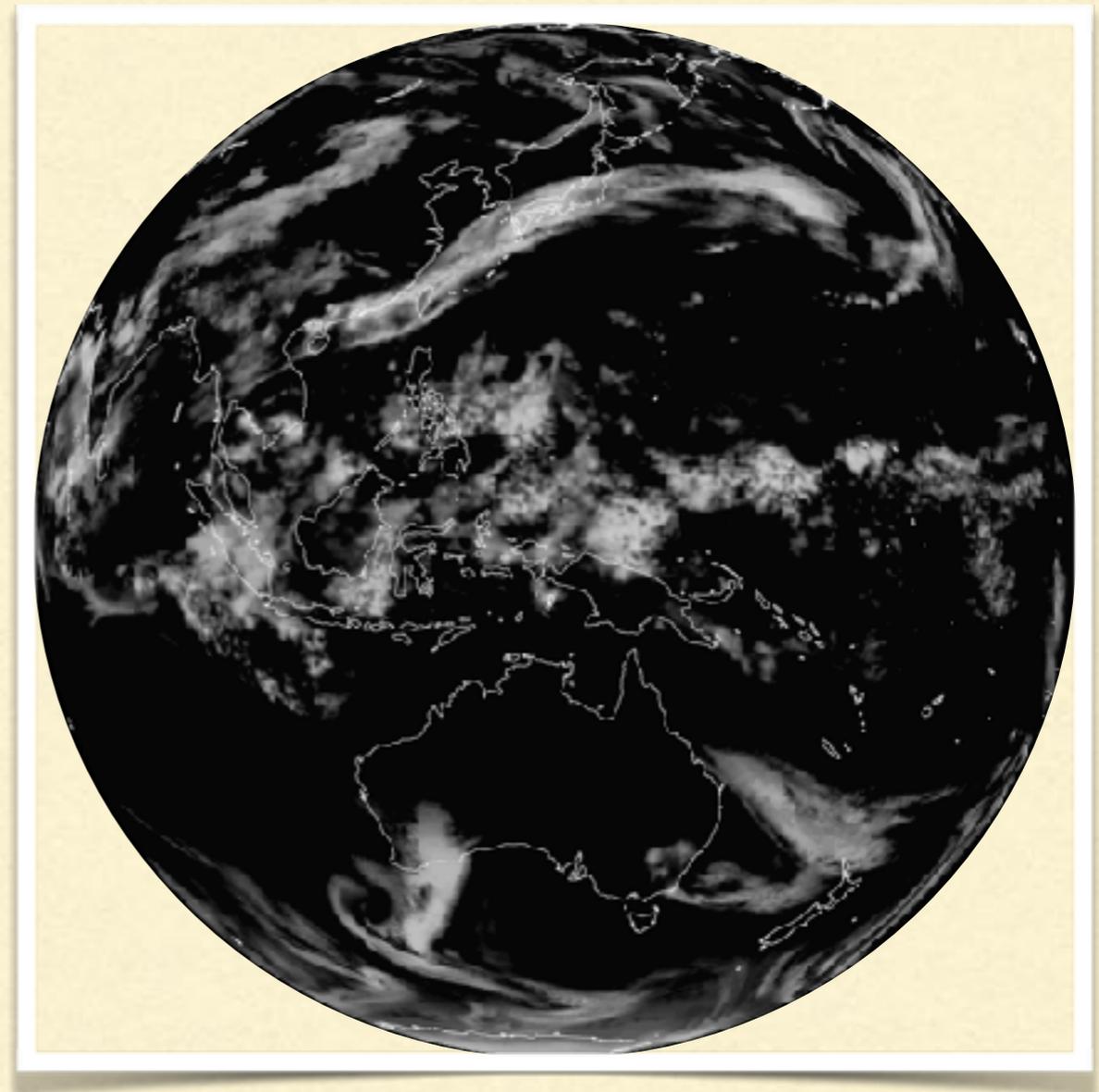
Le Treut and Li 1988

---

# AFES

---

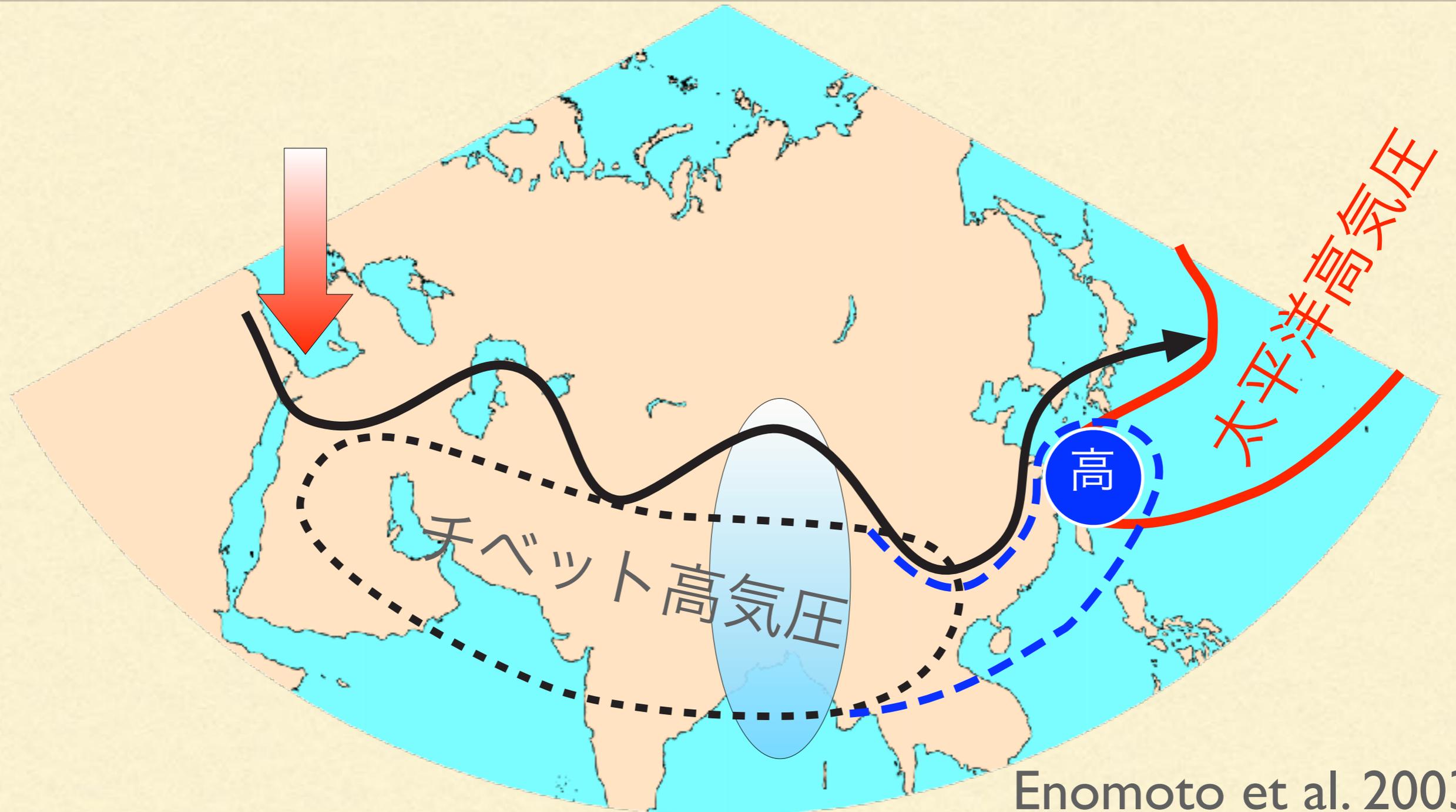
- 地球シミュレータ用  
大気大循環モデル
- スペクトル変換法
- 格子間隔～約10 km



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

---

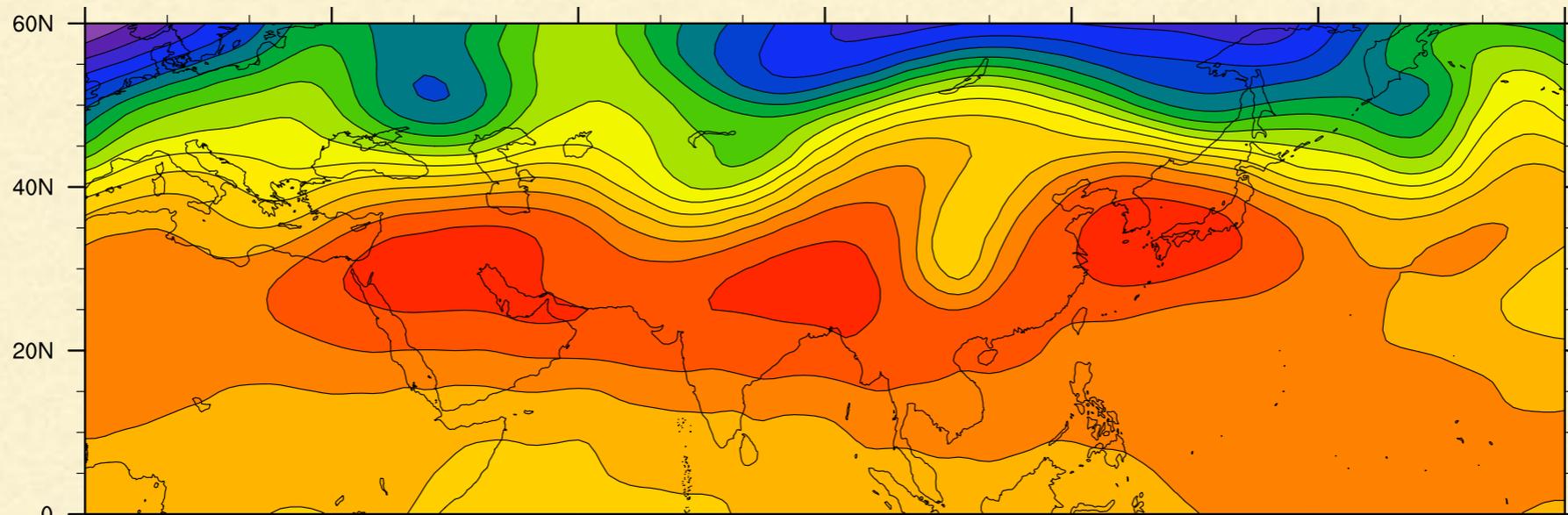
# シルクロード・パターン



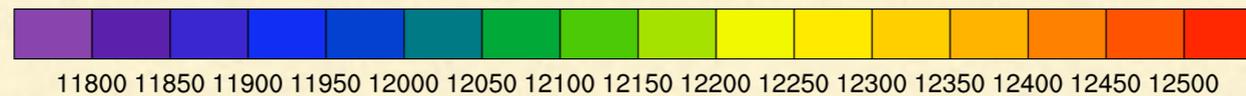
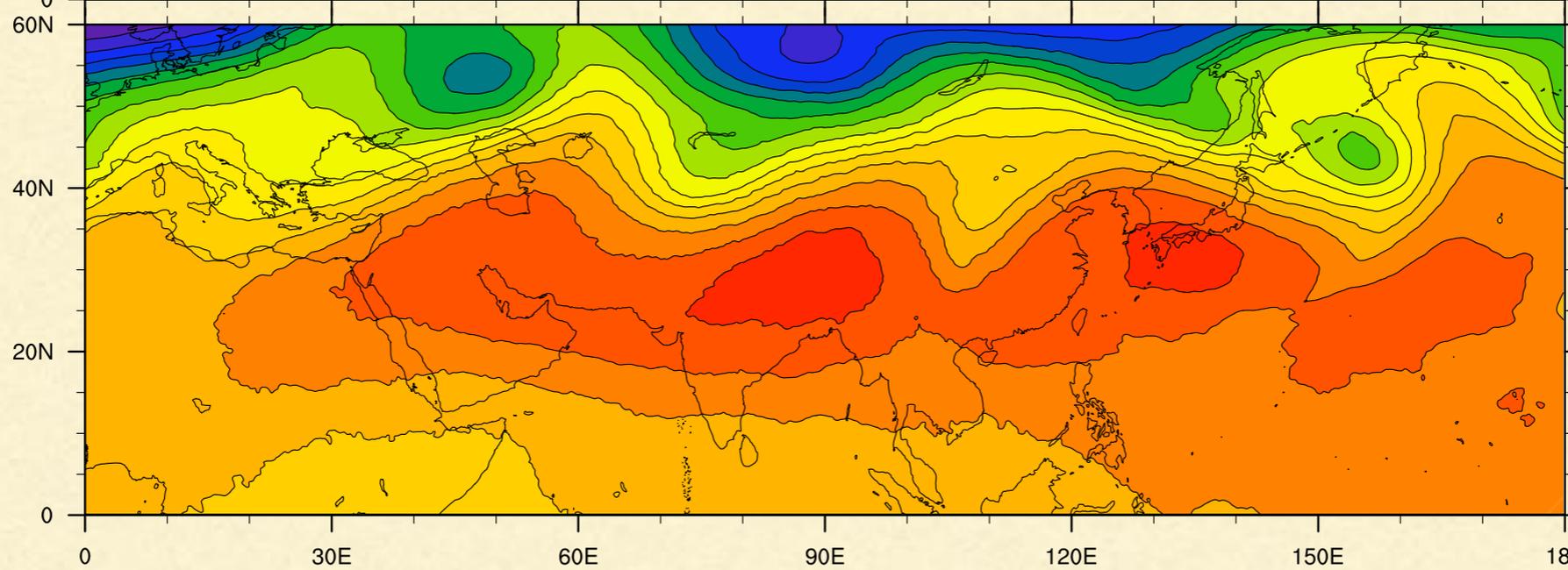
Enomoto et al. 2003

# 2004/7/2 200 hPa 高度

解析値

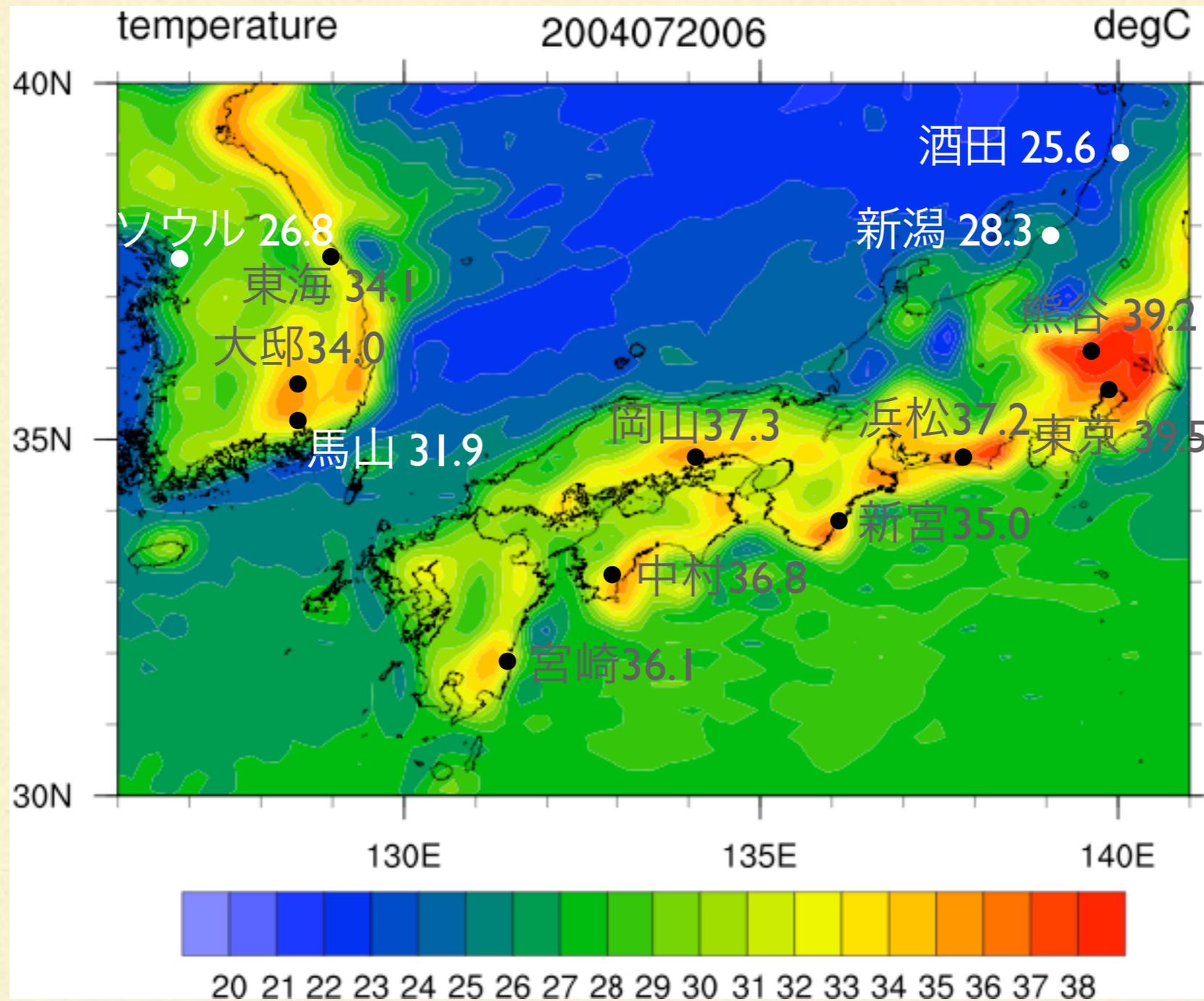


120時間  
予測値



AFES T639L48

# モデル最下層気温 126時間予測



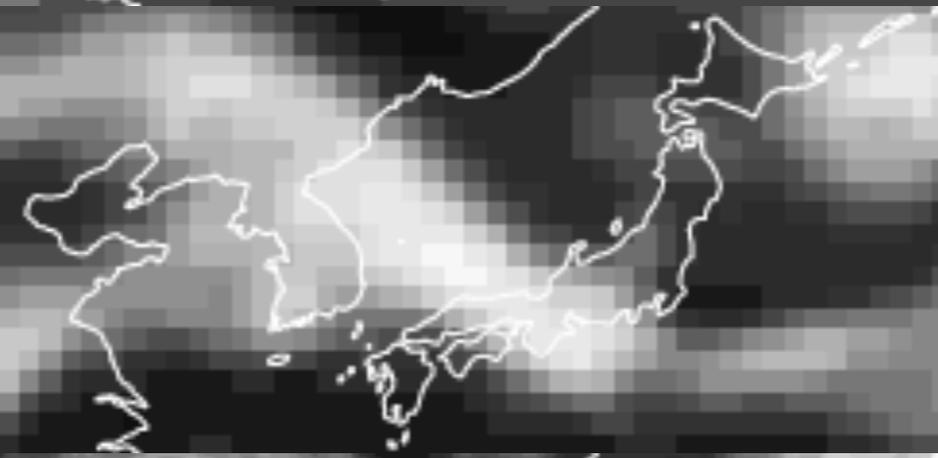
AFES T639L48

# 水平解像度依存性

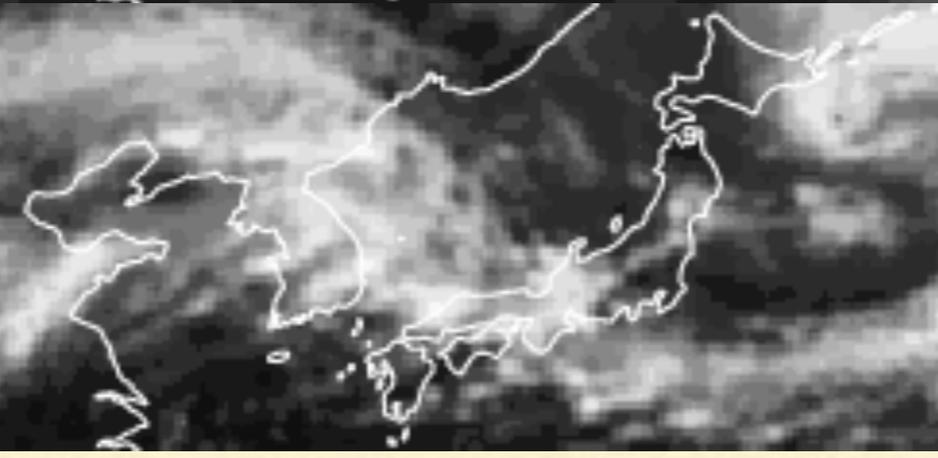
T39 (333 km)



T159 (83 km)



T639 (21 km)



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

---

# 気象とスーパーコンピュータ

---

---

# Top 500

---

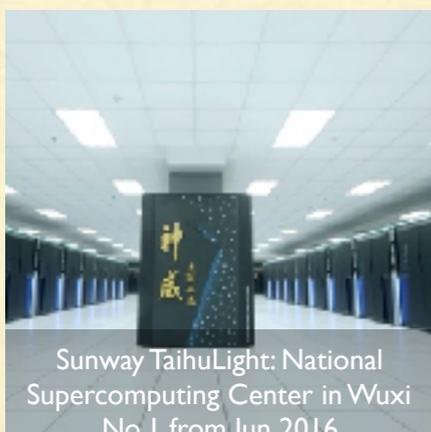
	NAME	COUNTRY	R <sub>MAX</sub> PFLOP/S	POWER MW
<b>1</b>	<b>Sunway TaihuLight</b>	China	93.0	15.4
<b>2</b>	<b>Tianhe-2 (Milkyway-2)</b>	China	33.9	17.8
<b>3</b>	<b>Piz Daint</b>	Switzerland	19.6	2.27
<b>4</b>	<b>Gyokou</b>	Japan	19.1	1.35
<b>5</b>	<b>Titan</b>	USA	17.6	8.2

The new number four system is the upgraded Gyokou supercomputer, a ZettaScaler-2.2 system deployed at Japan's Agency for Marine-Earth Science and Technology, which was the home of the Earth Simulator. Gyokou was able to achieve an HPL result of 19.14 petaflops, using PEZY-SC2 accelerators, along with conventional Intel Xeon processors. The system's 19,860,000 cores represent the highest level of concurrency ever recorded on the TOP500 rankings of supercomputers.

<https://top500.org>

---

# 歴代1位のマシン



Sunway TaihuLight: National Supercomputing Center in Wuxi  
No.1 from Jun 2016



Tianhe-2 (MilkyWay-2) : National University of Defense Technology  
No.1 from Jun 2013 until Nov 2015



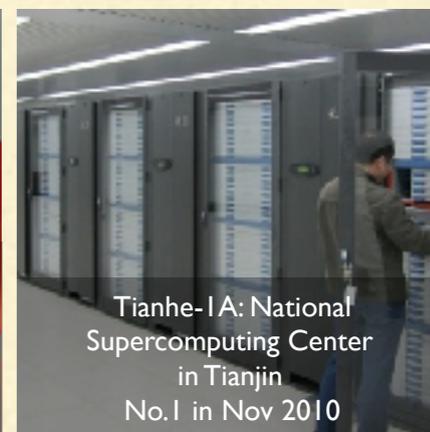
Titan: Oak Ridge National Laboratory  
No.1 in Nov 2012



Sequoia: Lawrence Livermore National Laboratory  
No.1 in Jun 2012



K Computer:  
RIKEN Advanced Institute for Computational Science  
No.1 from Jun 2011 until Nov 2011



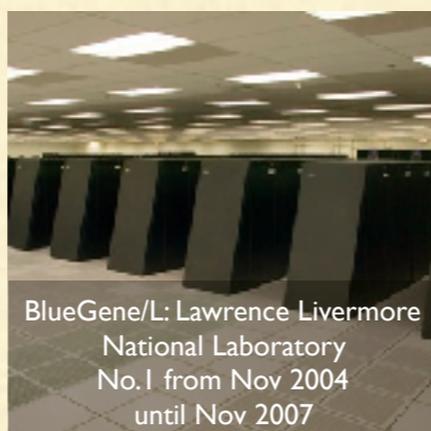
Tianhe-1A: National Supercomputing Center in Tianjin  
No.1 in Nov 2010



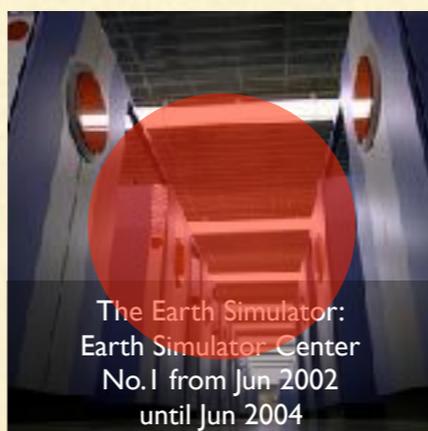
Jaguar:  
Oak ridge National Laboratory  
No.1 from Nov 2009 until Jun 2010



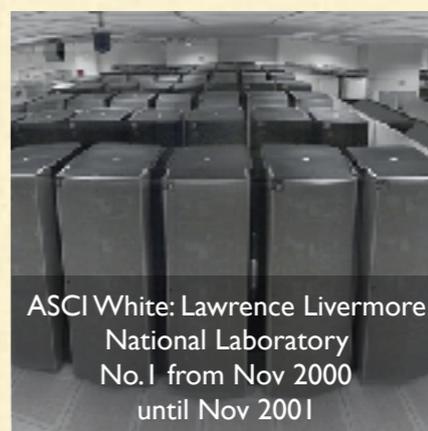
Roadrunner:  
Los Alamos National Laboratory  
No.1 from Jun 2008 until Jun 2009



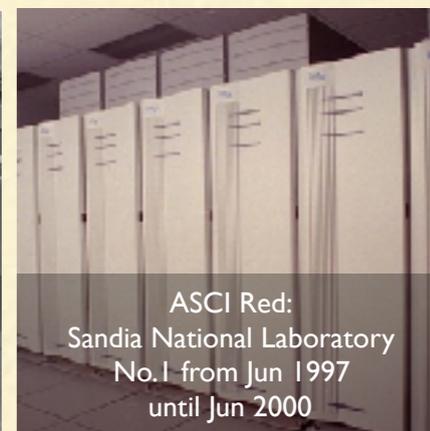
BlueGene/L: Lawrence Livermore National Laboratory  
No.1 from Nov 2004 until Nov 2007



The Earth Simulator:  
Earth Simulator Center  
No.1 from Jun 2002 until Jun 2004



ASCI White: Lawrence Livermore National Laboratory  
No.1 from Nov 2000 until Nov 2001



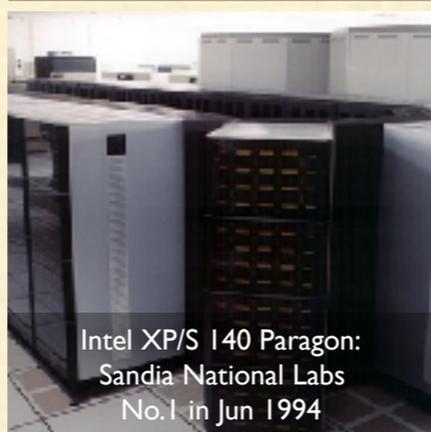
ASCI Red:  
Sandia National Laboratory  
No.1 from Jun 1997 until Jun 2000



CP-PACS:  
University of Tsukuba  
No.1 in Nov 1996



Hitachi SR2201:  
University of Tokyo  
No.1 in Jun 1996



Intel XP/S 140 Paragon:  
Sandia National Labs  
No.1 in Jun 1994

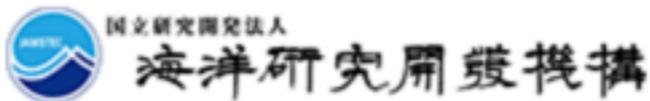


Numerical Wind Tunnel: National Aerospace Laboratory of Japan  
No.1 in Nov 1993



CM-5: Los Alamos National Lab  
No.1 in Jun 1993

# プレスリリース



2017年 11月 14日

株式会社ExaScaler

株式会社PEZY Computing

国立研究開発法人海洋研究開発機構

**スーパーコンピュータシステム「Gyoukou (暁光)」が  
スパコンランキングTOP500で国内1位 (世界4位) ・ Green500で世界5位を  
同時に獲得**

## 1. 概要

株式会社ExaScaler (代表取締役社長 木村 耕行、以下「ExaScaler」) 及び株式会社PEZY Computing (代表取締役社長 齊藤 元章、以下「PEZY Computing」) が共同開発し、国立研究開発法人海洋研究開発機構 (理事長 平 朝彦、以下「JAMSTEC」) 横浜研究所に設置した大規模液浸型スーパーコンピュータ「暁光 (Gyoukou)」は、世界のスーパーコンピュータシステムのランキングである「TOP500」 ([※1](#)) で国内第1位 (世界第4位)、エネルギー消費効率の良いスーパーコンピュータシステムのランキングである「Green500」 ([※2](#)) で世界第5位を同時に獲得しました。

本ランキングは、米国コロラド州・デンバーで11月12日より開催中のスーパーコンピュータの国際会議であるSupercomputing Conference (SC17) で米国東部標準時 (EST) 11月13日午前9時 (日本時間11月13日午後11時) に公表されました。詳細な順位は、下記のホームページにて公開されております。

【TOP500リスト】 <https://www.top500.org/lists/>

【Green500リスト】 <https://www.top500.org/green500/lists/>

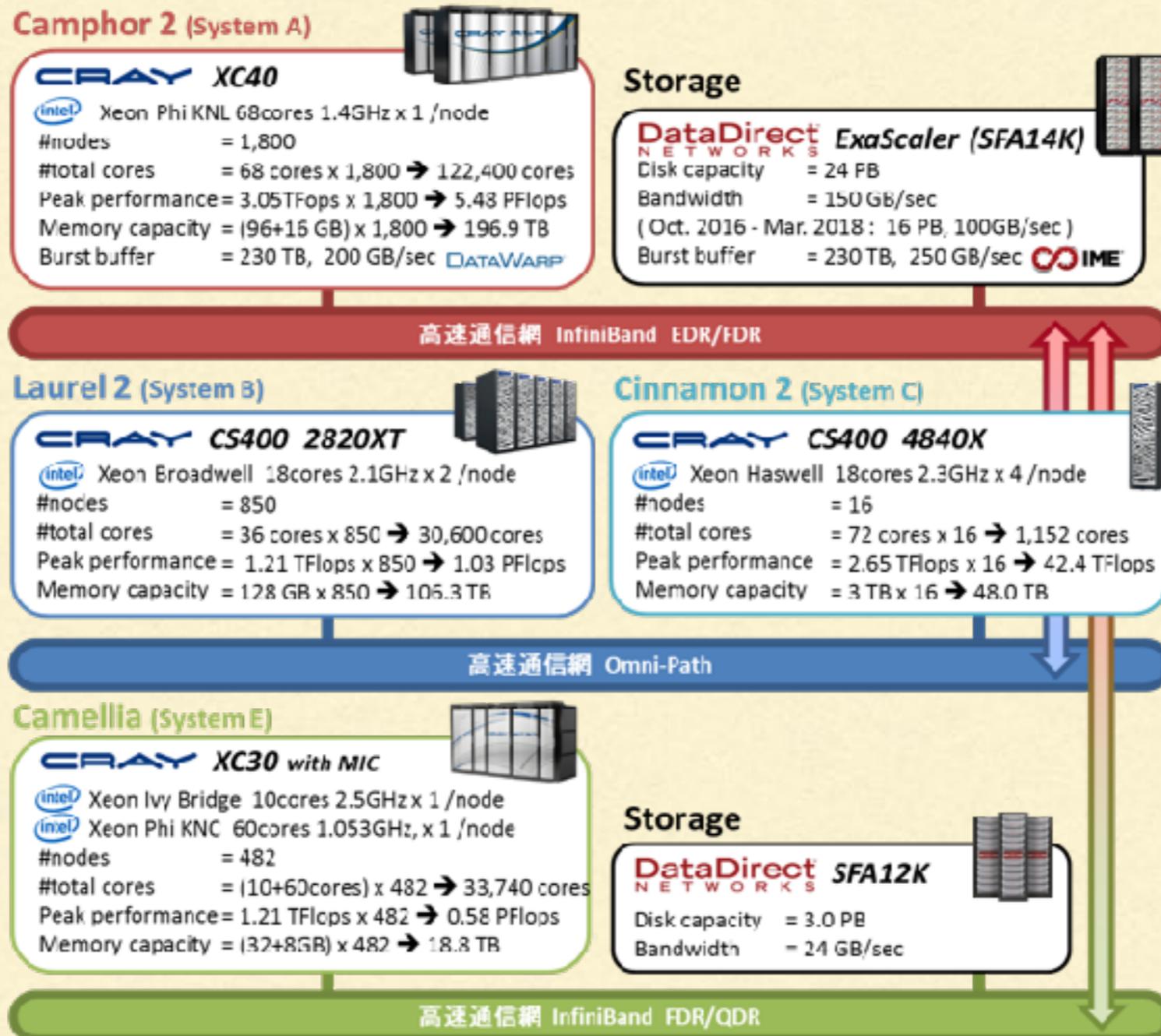
---

# November 2017

---

- 2017/11/13発表。第48回目
  - $\sim 10$ 位 > 10 Pflops >  $\sim 181$ 位 > 1 Pflops
  - 中国がシステム数・総実効性能で米国を凌駕
  - 日本はシステム数で3位。
  - 日本一は東大・筑波大のOakforest-PACS（9位 13.6 Pflops）からJAMSTECにある曙光（4位 19.1 Pflops）に
  - 京大のCamphor 2（3.1 Pflops）は41位（日本で6位）
-

# 京都大学のスーパーコンピュータシステム



---

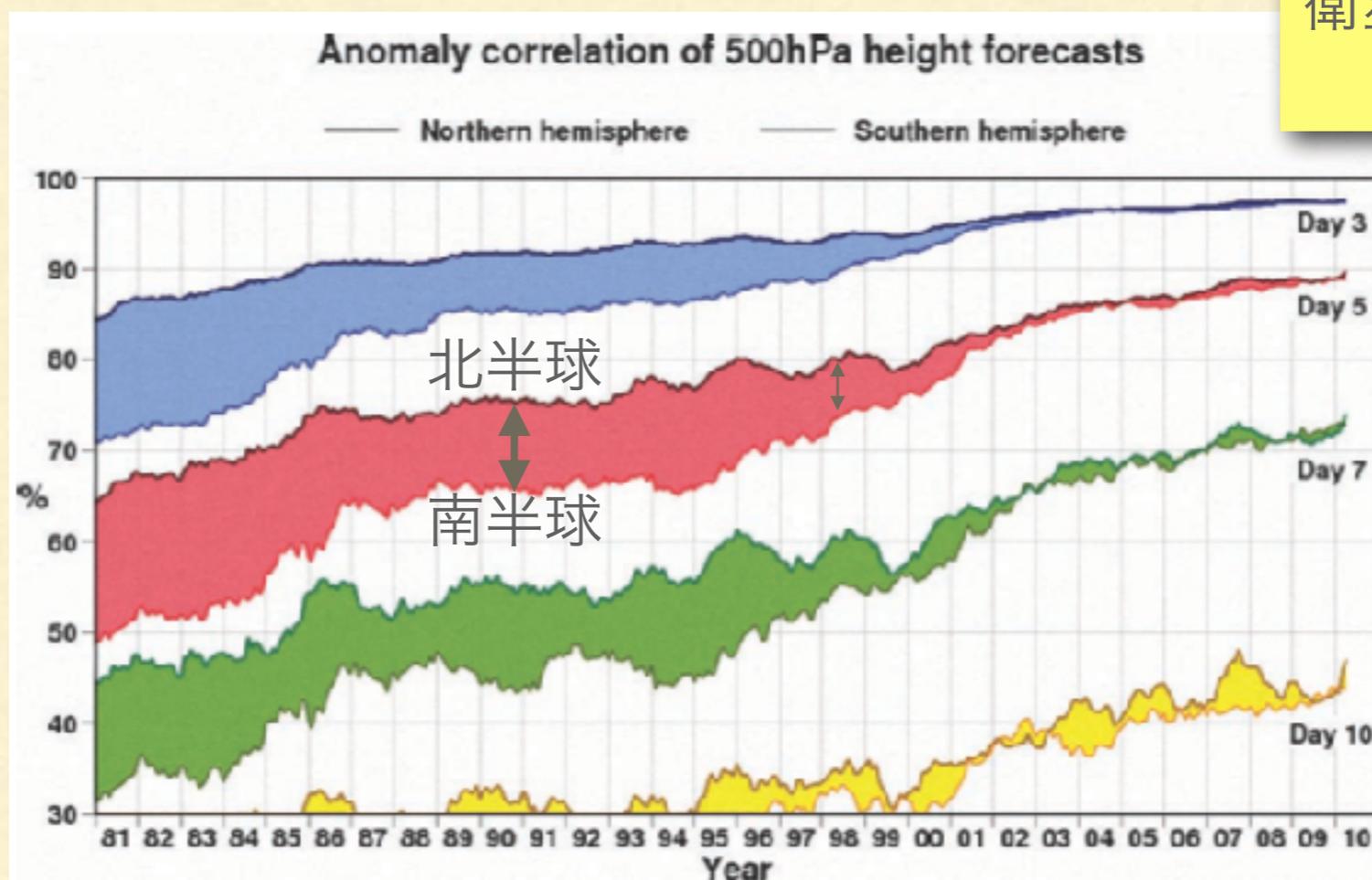
# 現業機関のシステム

---

- 欧 ECMWF: (3.8 Pflops) 27, 28位
  - 英 MetOffice: 15位 (7.0 Pflops), 46, 47位 (2.8 Pflops)
  - 韓 Nuri, Miri (2.9 Pflops) 57, 58位
  - 仏 Prolix2, Beaufix (2.2 Pflops) 61, 62位
  - 米 NOAA: Luna, Surge (1.6 Pflops) 80, 81位
  - cf. 気象庁気象研究所: 富士通 (0.99 Pflops) 185位
-

# 数値予報精度の向上

衛星データの活用で  
差が縮まる



**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).**

---

# データ同化

---

---

# データ同化とは

---

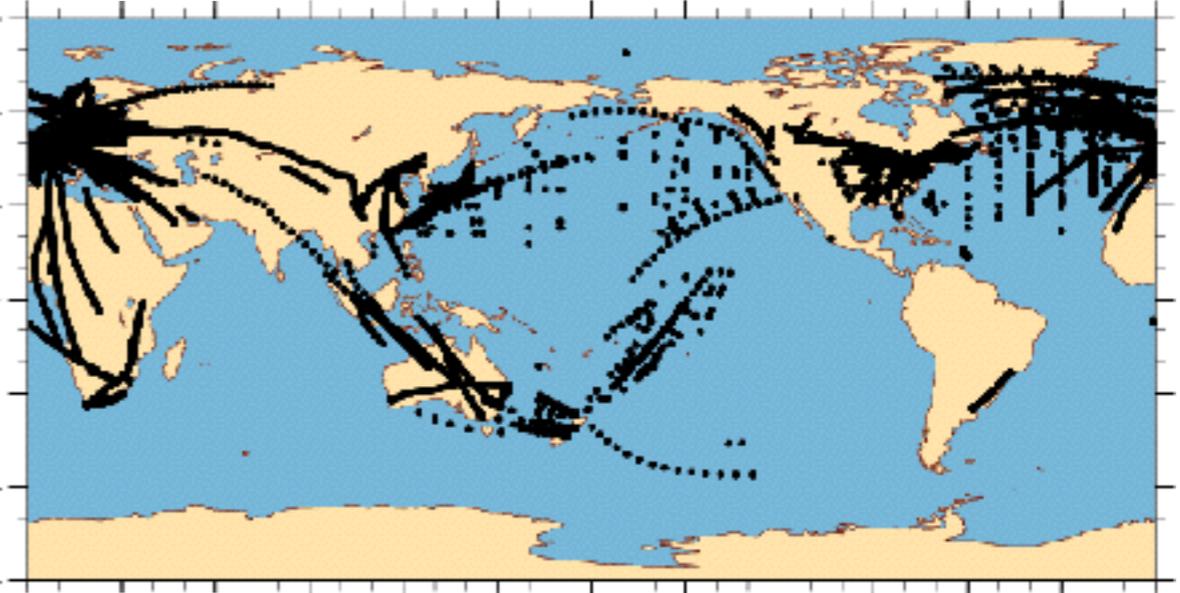
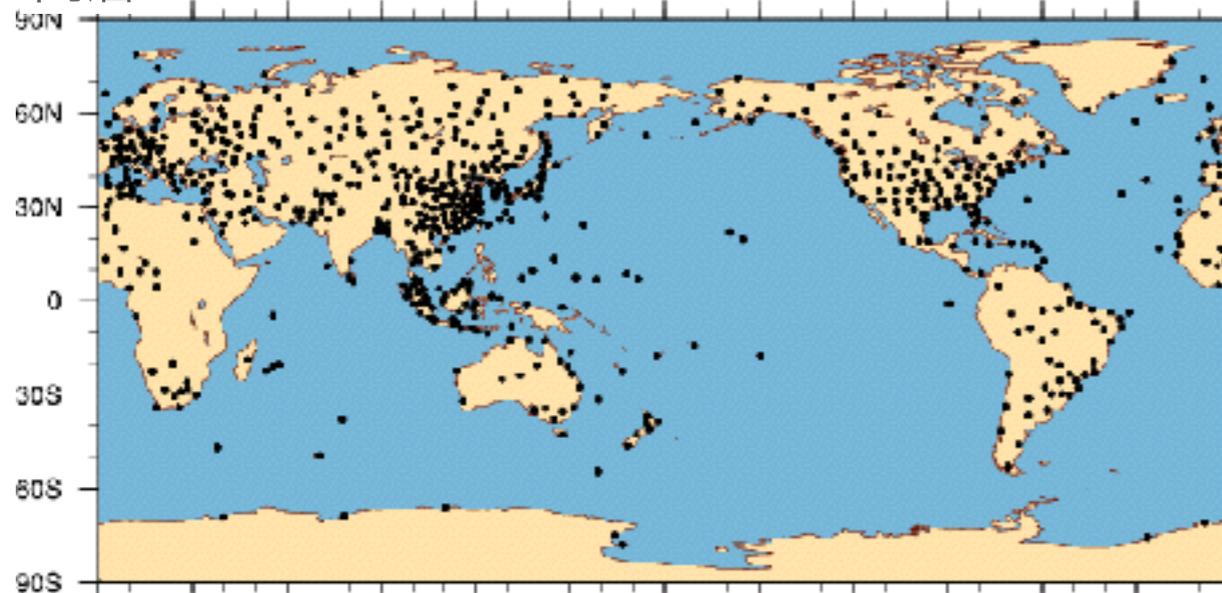
- 数値天気予報に必要な初期値を作る。
- 予測と観測との重み付き平均。

高層

1287 ADPUPA 2008010112

飛行機

38036 AIRCFT 2008010112

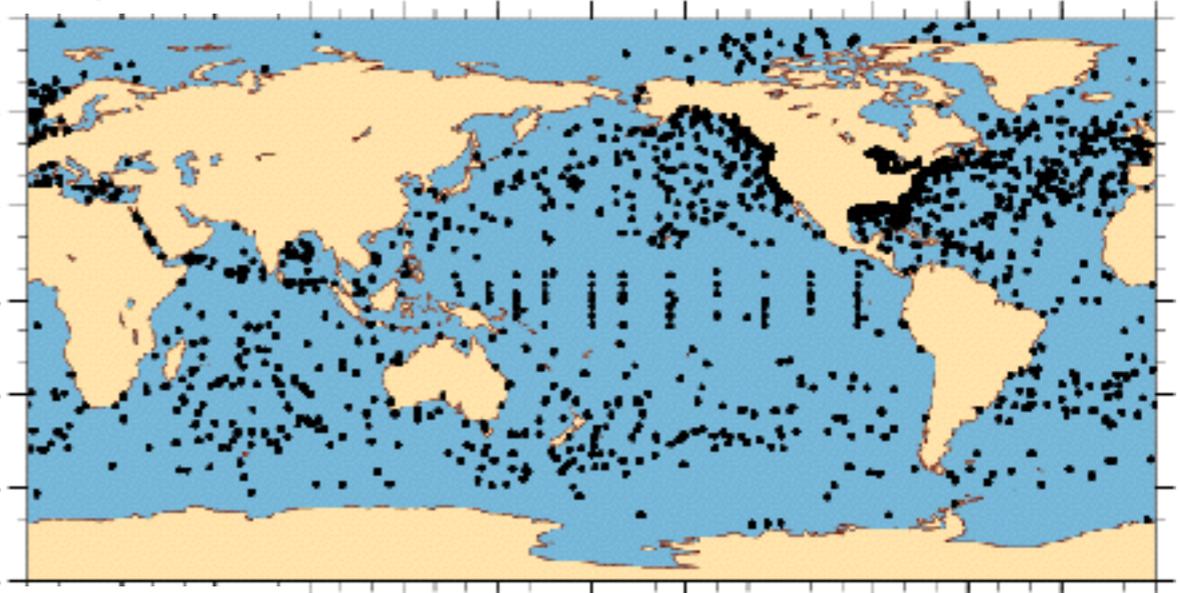
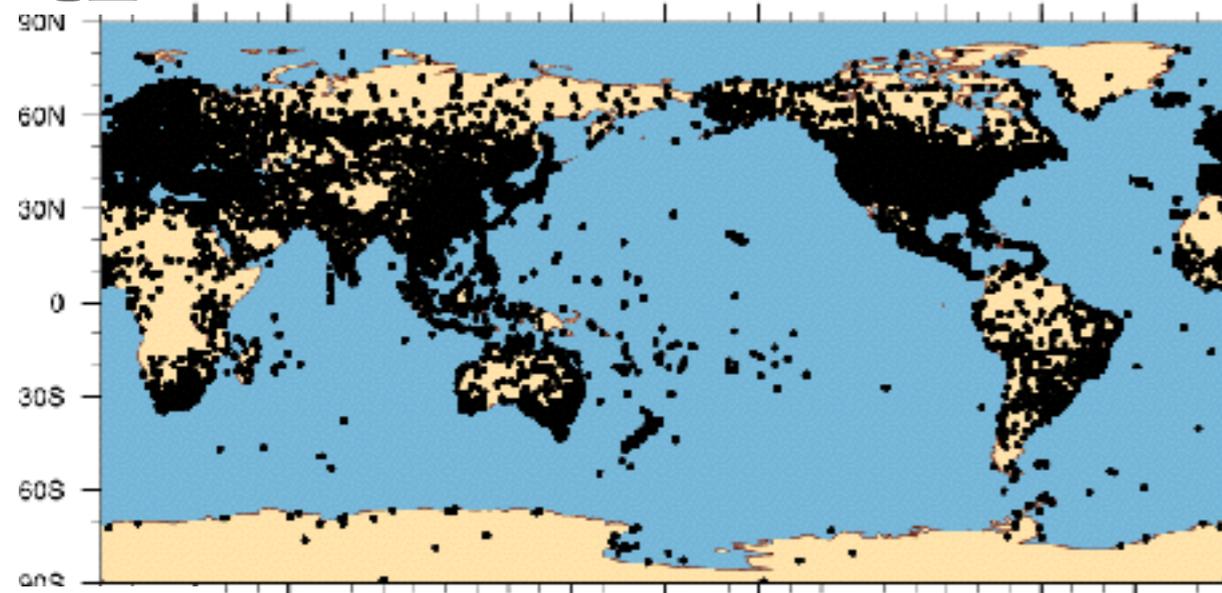


地上

101758 ADPSFC 2008010112

船舶・ブイ

10616 SFCSHP 2008010112

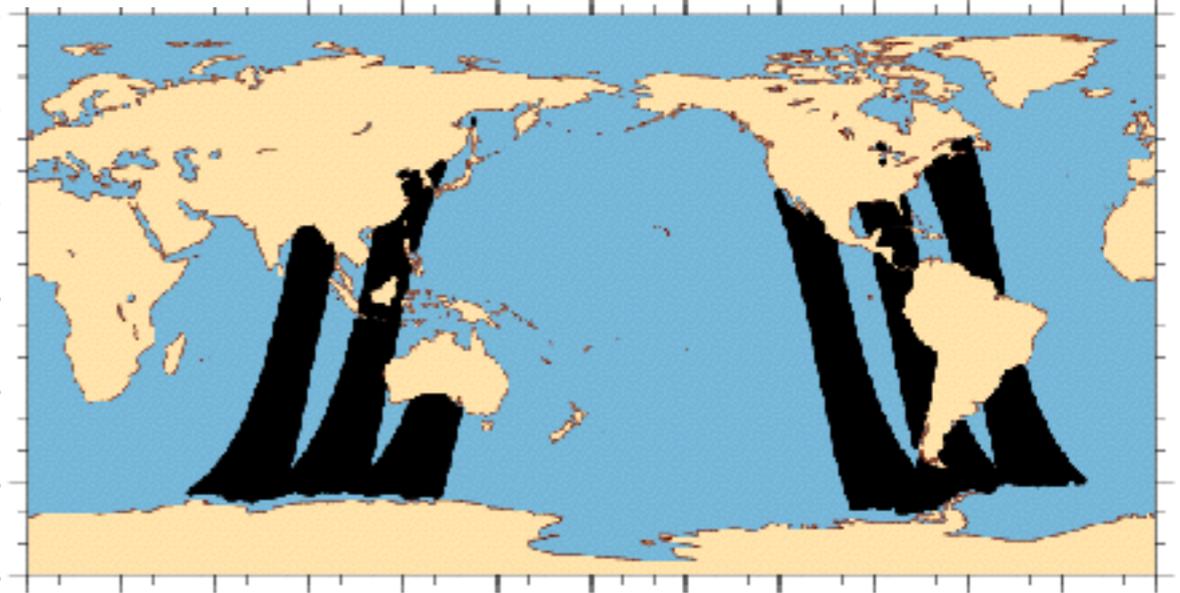
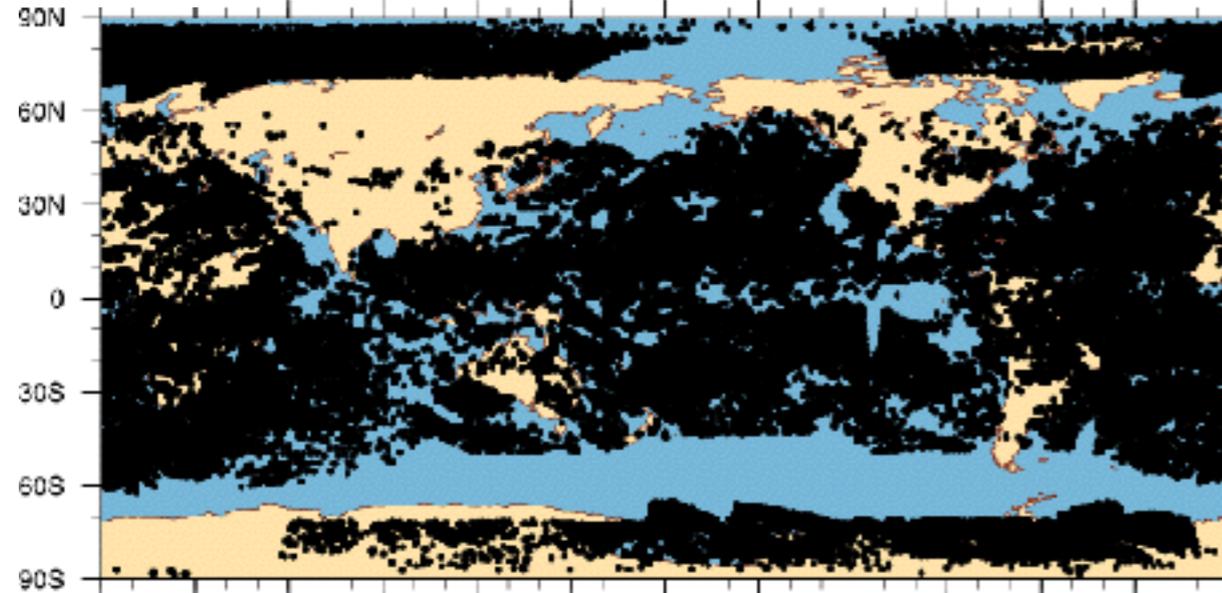


静止衛星

86444 SATWND 2008010112

極軌道衛星

25589 QKSWND 2008010112



0 30E 60E 90E 120E 150E 180 150W 120W 90W 60W 30W 0

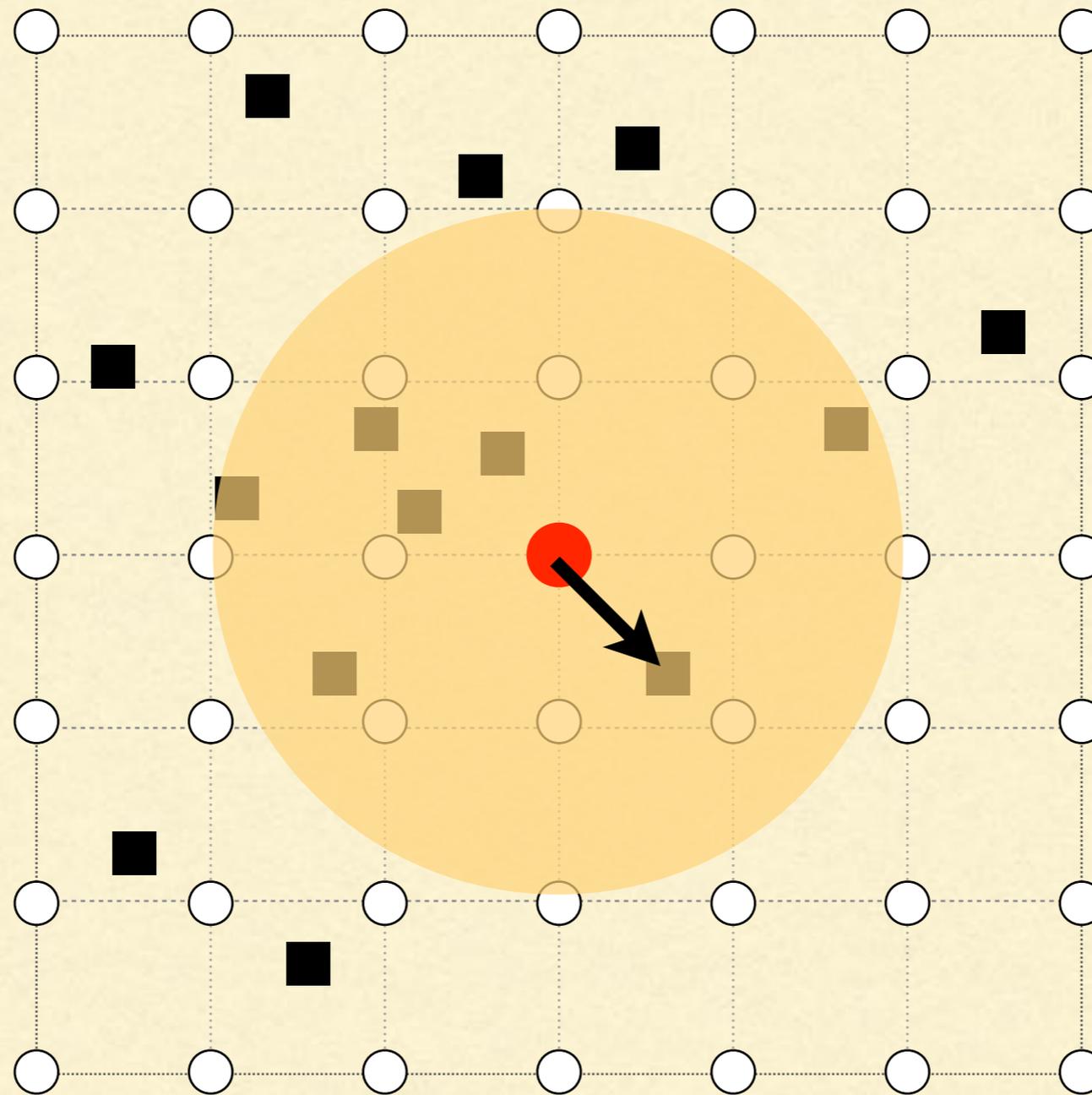
---

# 品質管理

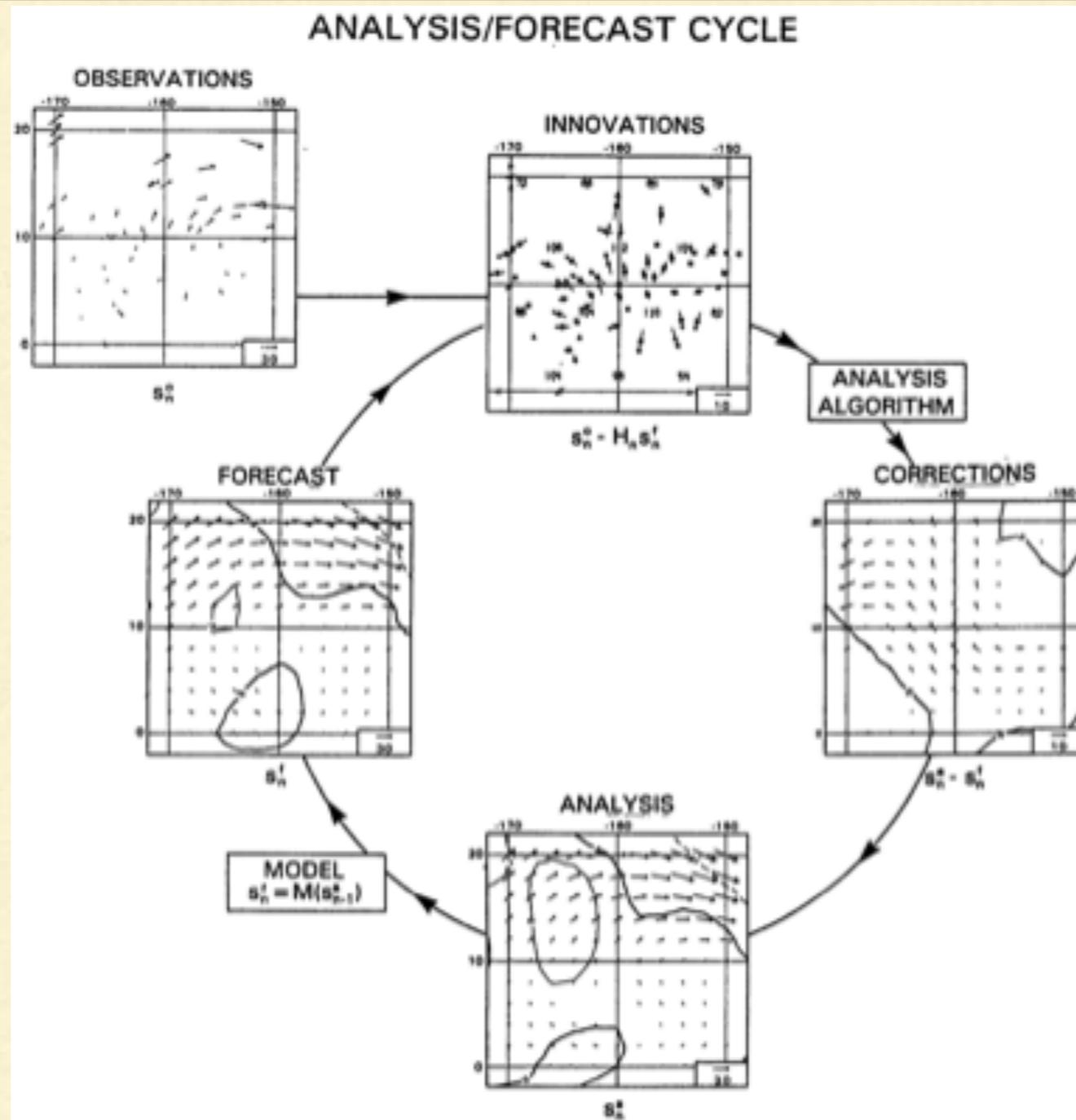
---

- 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



# 予報・解析サイクル



Daley 1997

---

# 様々なデータ同化手法

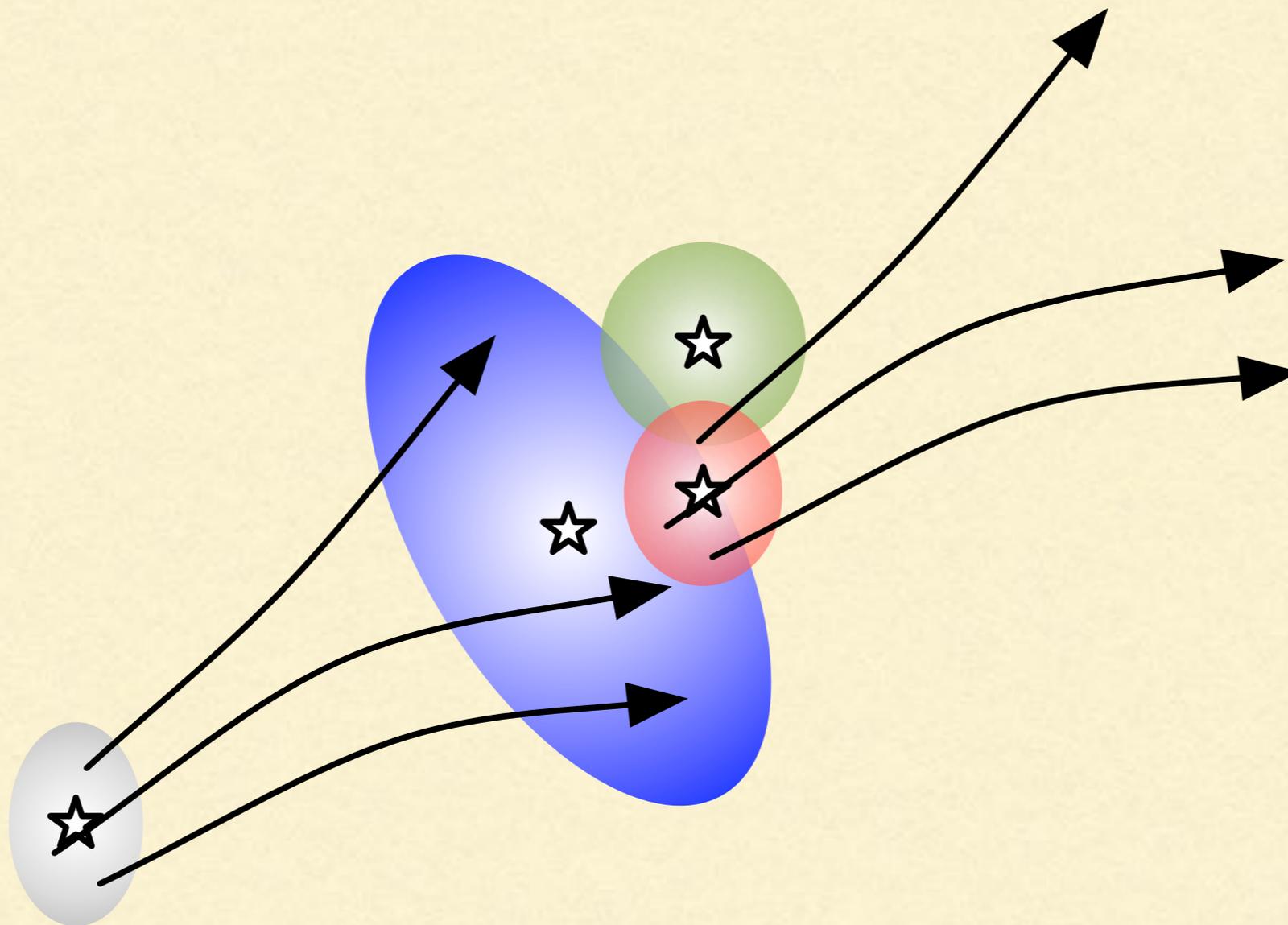
---

- 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。
-

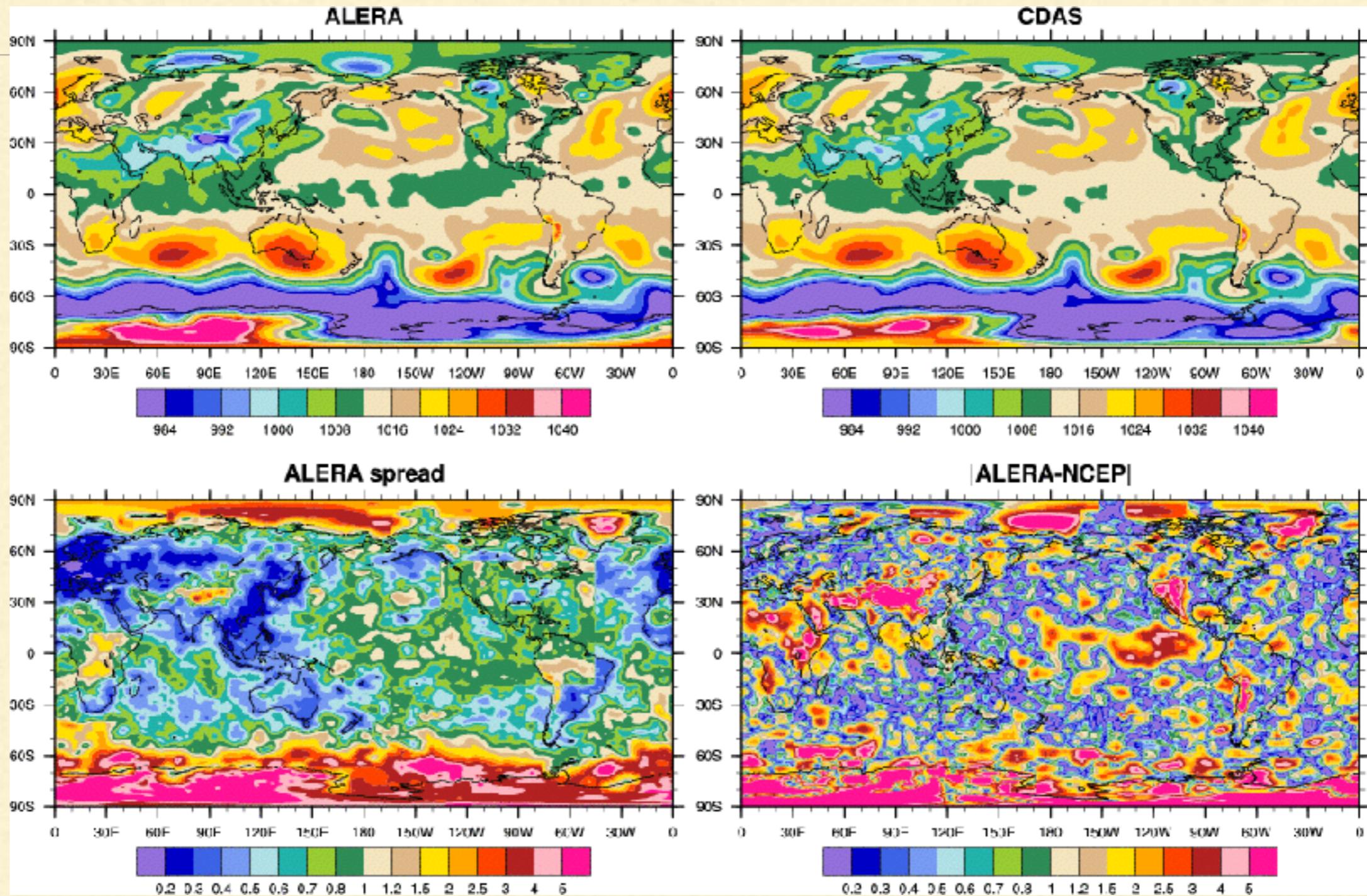
---

# アンサンブル・カルマンフィルタ

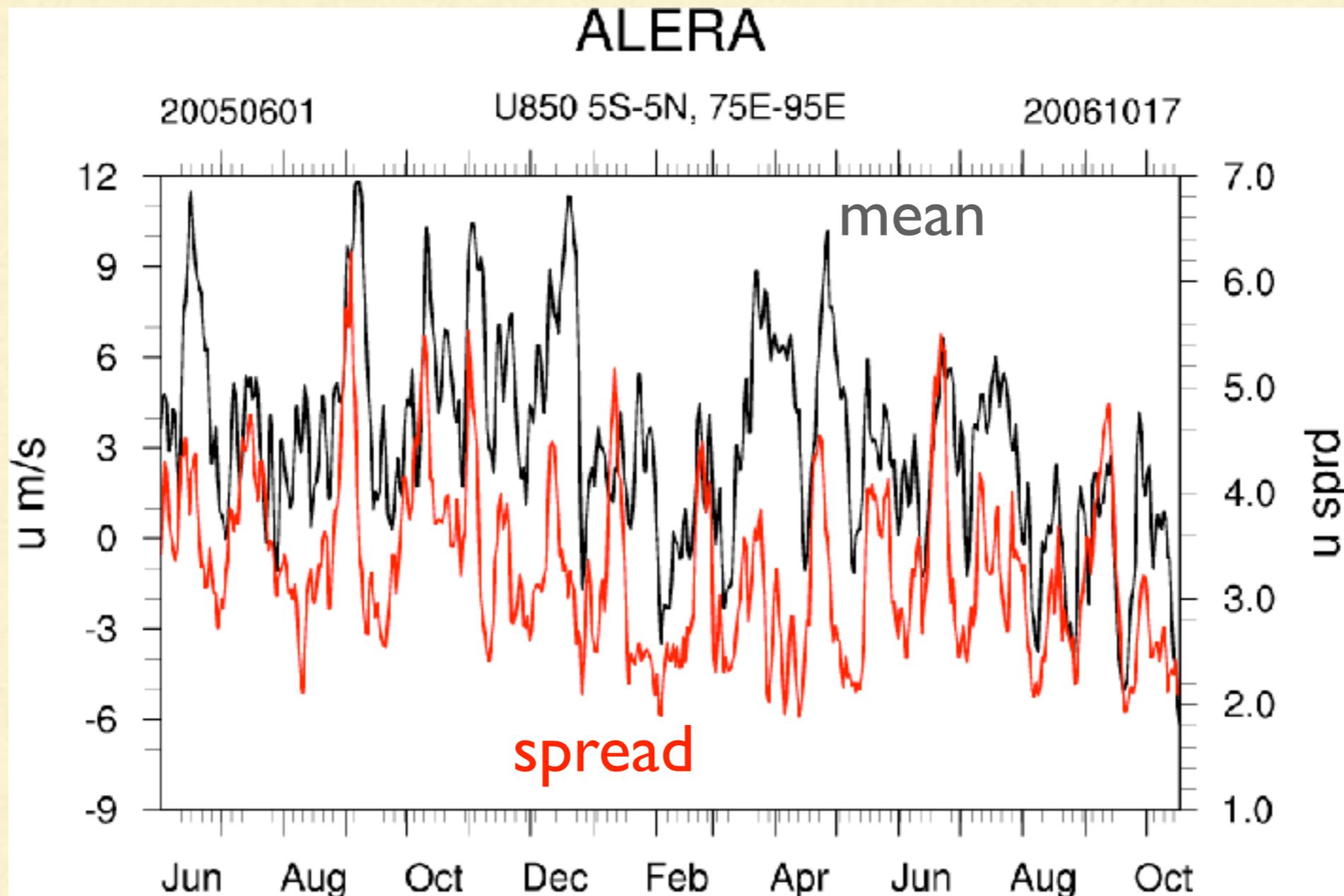
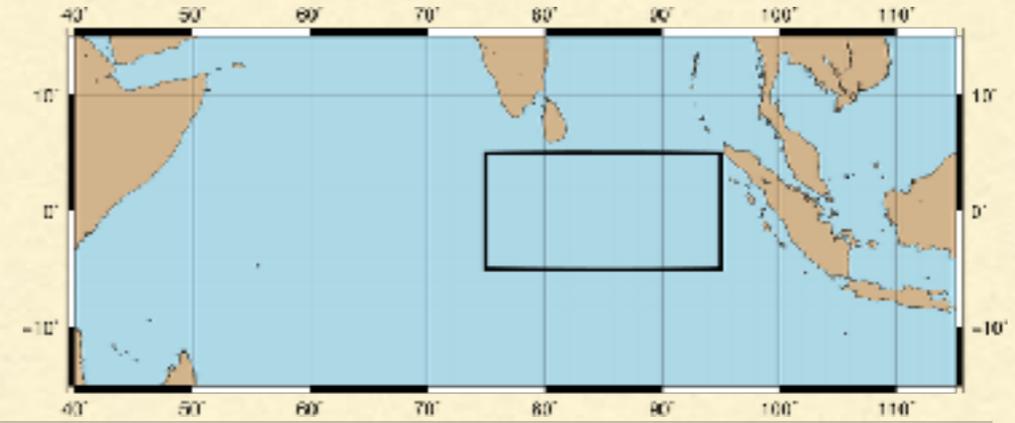
---



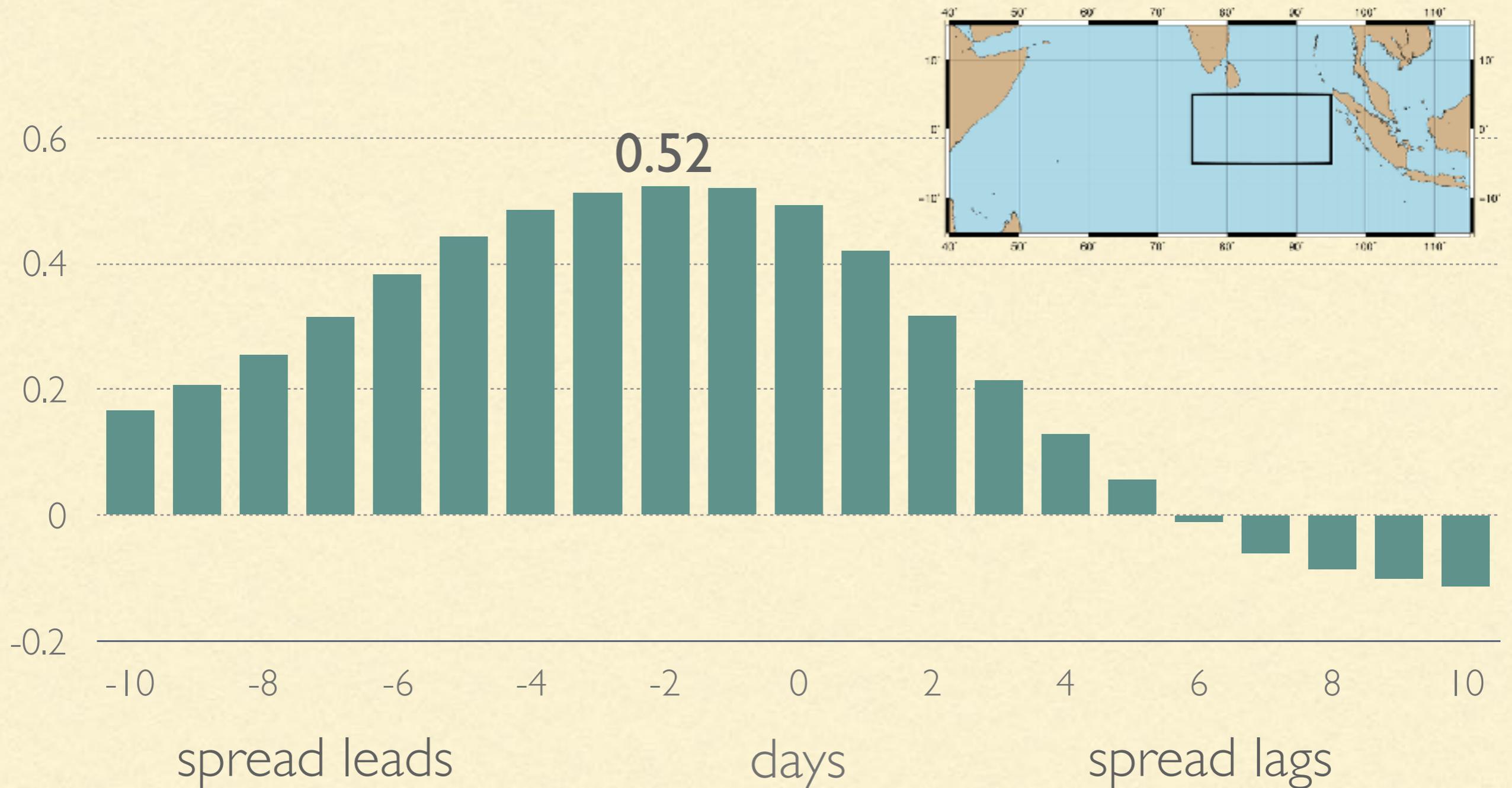
# ALERA



# Westerly bursts



# Lag correlation between mean and spread



# 成層圈突然昇溫

2006/1/12

2006/1/16

2006/1/22

解析誤差最大

東風最大

