

数値天気予報と気候予測 — 不確実性を伴う予測



よでん しげお
余田 成男

京都大学 理学研究科 地球惑星科学専攻

目次

1. はじめに（自己紹介をかねて）

- 気象学・地球科学について

2. (本編)

- 数値天気予報と気候予測 — 不確実性を伴う予測

Yoden, S., 2007: Atmospheric predictability. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **85B**, 77-102. (125th anniversary issue of the Meteorological Society of Japan, invited review article)

3. おわりに（今の時代をながめて）

- 学術・科学技術と社会
- 国際社会の中で、グローバル化の時代に

1. はじめに

❖ 国際宇宙ステーションからの眺め

- Time Lapse View from Space, Fly Over | NASA, ISS



Time lapse sequences of photographs taken with a low-light 4K-camera by the crew of expedition 28 & 29 onboard the International Space Station from August to October 2011..

❖私の研究対象： 地球大気

- 対流圏 地上～10 km
- 中層大気(成層圏・中間圏) 10～80 km
- オーロラ 100～200 km (緑色光)
- 国際宇宙ステーション 400 km
- 地球半径 6400 km

●非常に薄い

➤非等方

←地球の**重力**

●よく混ざっていない

➤非均質

←地球の**自転**

●時々刻々と変化

➤非定常



<http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/crow-7/html/iss007e16249.html>

❖ 研究分野:

科研費 系・分野・分科・細目表(2017年度まで)

● 理工系 > 数物系科学 > 地球惑星科学

➤ 数学、天文学、物理学、地球惑星科学、プラズマ科学

○ 固体地球惑星物理学、気象学・海洋物理学・陸水学、
超高層物理学

○ 地質学、層位・古生物学、岩石・鉱物・鉱床学、地球宇宙化学

● 理工系 > 化学

● 生物系 > 生物学

● 総合系 > 環境学

● 総合系 > 複合領域

➤ 環境解析学

○ 環境動態解析

➤ 社会・安全システム科学

○ 自然災害科学・防災学

❖ 学術 vs 科学技術

● 知的興味 vs 社会的要請

❖地球科学の特徴

●実体物を対象とした科学

- 宇宙科学や生物科学との類似性
- 数学や理論物理学との対照性

●技術革新・進歩と相俟って発展

➤エレクトロニクス技術:

観測センサー、データ記録媒体、
電気通信手段、搭載手段(人工衛星/飛行体/ブイ)

→ 新たな現象の**発見**

➤コンピュータ技術:

ハード、ソフトウェア

→ コンピュータ・シミュレーション、数値**実験**、大量データ処理



❖私の研究手法: コンピュータを駆使した地球流体 数値実験とデータ解析

❖コンピュータ技術の進歩

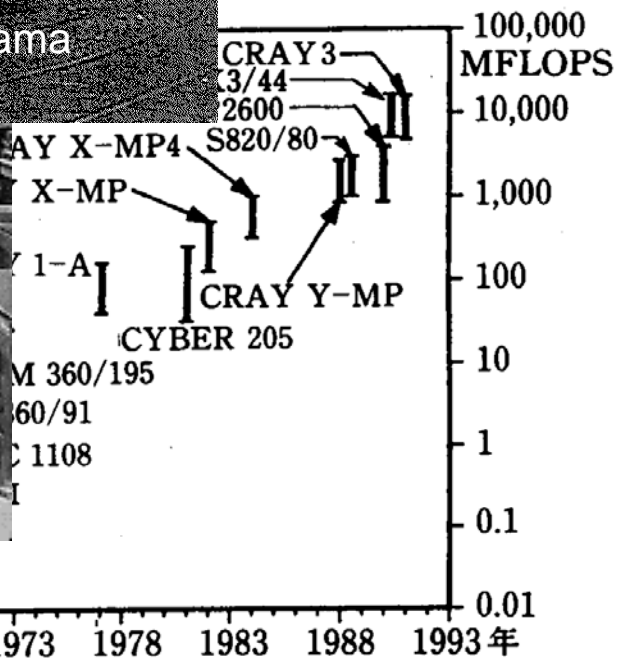
●半世紀以上にわたる計算能力の指数関数的成長



In 1959, JMA welcomed IBM704, the first one in the Orient, in Yokohama (taken from Furukawa, 2012)



<http://ei.cs.vt.edu/~history/ENIAC.Richey.HTML>



ENIAC

300
FLOPS



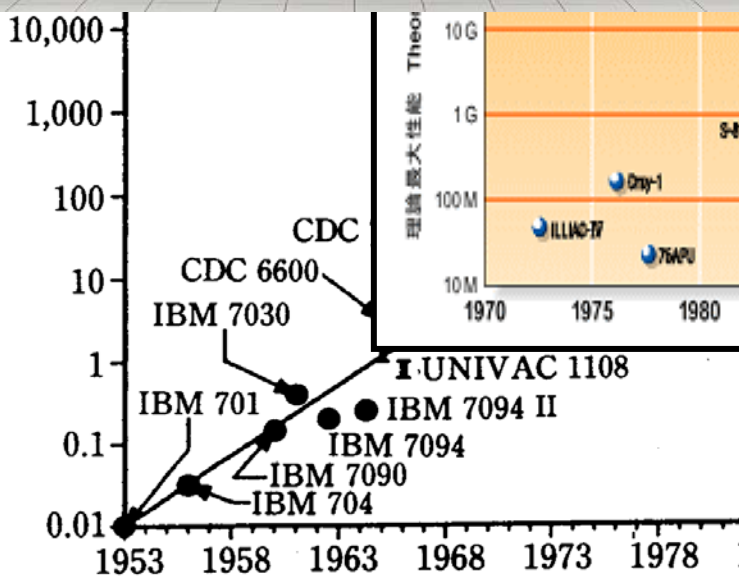
↑ 1959年 IBM704 気象庁納入

❖コンピュータ技術の進歩

●半世紀以上にわたる計算能力の指数関数的成長



★ 京
K computer
10.51 Peta FLOPS
(2011, Nov.)





昭和基地でのオーロラ（2003; 第43次南極地域観測隊 吉識宗佳氏撮影）

2. 数値天気予報と気候予測 — 不確実性を伴う予測

❖ 1991年京都賞 基礎科学部門

● Edward N. Lorenz

気象学における**天気および気候の予測問題の理論的基盤を固めて、現代の大気物理学・気象学のコンピュータによる研究基盤を確立。**

それに伴う**決定論的カオスの発見**によって、ニュートン以来の近代科学の自然観に劇的な変革を与え、広い分野の基礎科学に大きな影響を与えた。

1991 KYOTO PRIZES
Commemorative
WORKSHOP

第7回京都賞
受賞記念
ワークショップ



Edward Norton Lorenz
(1917年生まれ、アメリカ)
気象学者、マサチューセッツ工科大学名誉教授

■ 代表的著書、論文
1955年 「高緯位置エネルギーと大循環の維持」 Tellus 7巻
1963年 「決定論的・非周期的な流れ」
Journal of Atmospheric Sciences 20巻
1967年 「大気循環の本質とその理解」
1972年 「世界気象機関からの刊行物」 8巻
1980年 「大気の不規則性に關する」 19の研究論文
Bulletin of American Meteorological Society

「天気予報からカオスへ」

山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)
山本義典(編) 『天気予報からカオスへ』 気象出版社(1991年)

2.1 数値天気予報の歴史と現状

❖ 歴史

- V. Bjerknes (1904)

“Das Problem von der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik”

- Richardson (1922)

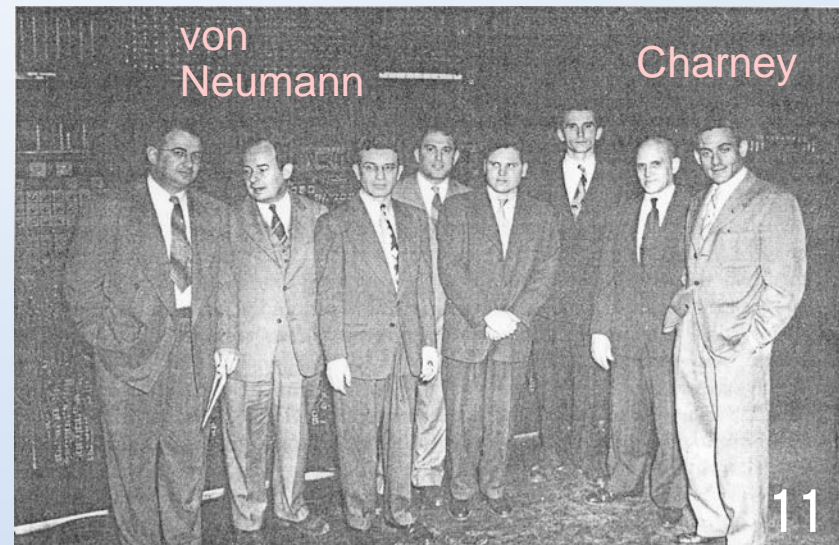
“Weather Prediction by Numerical Process”

- Charney, Fjörtoft and von Neumann (1950)

“Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation”

ENIACによる数値天気予報

Electronic Numerical Integrator
and Computer



● Charney et al. (1950)

➤ 水平2次元準地衡渦度方程式

obtain the quasi-geostrophic vorticity equation:

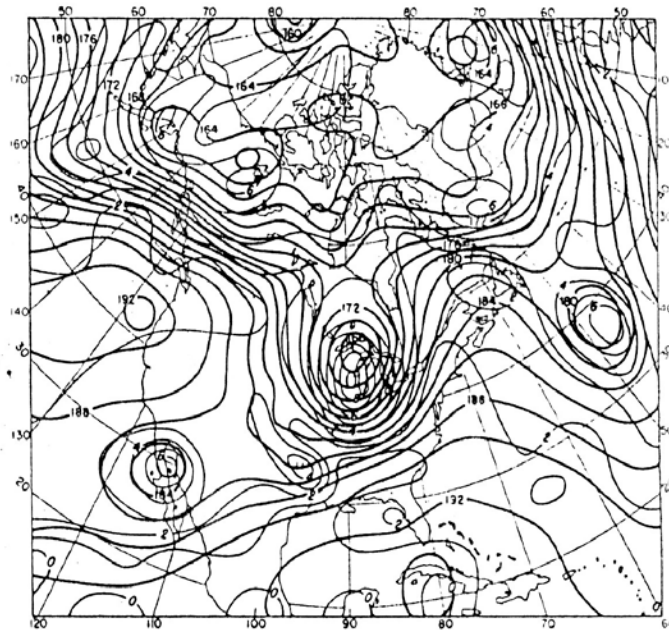
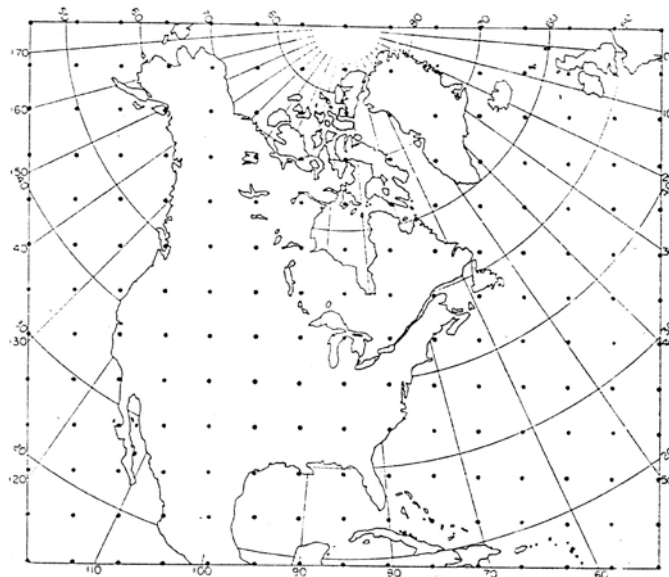
$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta_s z) = \frac{\partial \eta}{\partial s_1} \frac{\partial z}{\partial s_2} - \frac{\partial \eta}{\partial s_2} \frac{\partial z}{\partial s_1} = J_s(\eta, z), \quad (8)$$

where η is the absolute vorticity

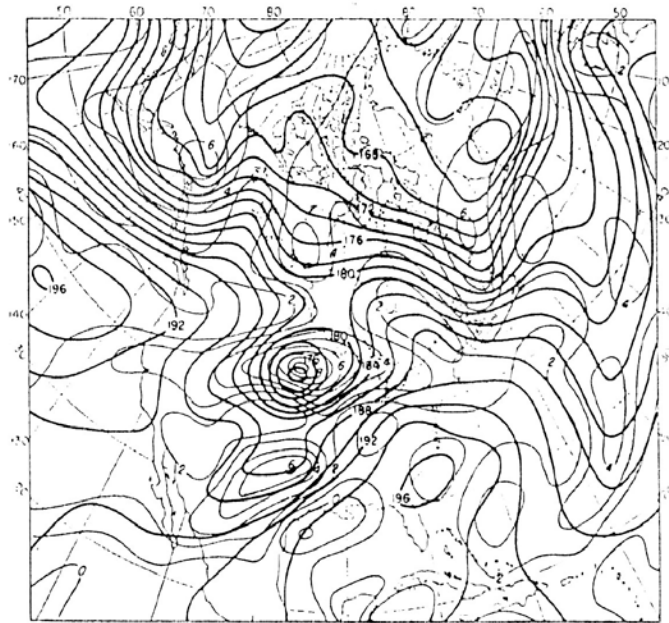
$$\eta = \frac{g}{f} \Delta_s z + f. \quad (9)$$

Here Δ_s is the surface spherical Laplacian operator, and J_s is the Jacobian of η and z with respect to s_1 and s_2 . Equation (8) is

➤ 離散化:
dt ~ 1 hour
dx ~ 700 km
(15x13 格子点)



observed(t=24hours)



forecasted(t=24hours) 12

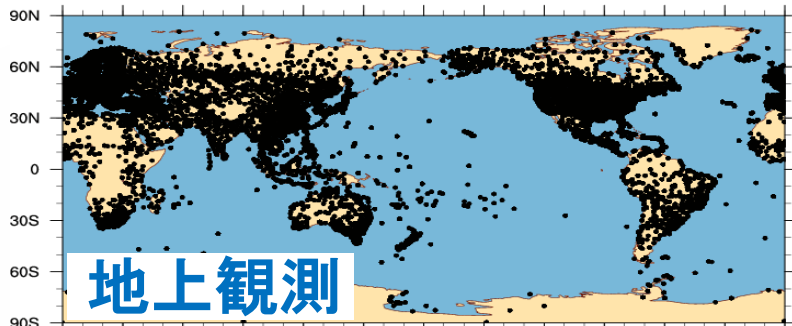
❖今日の数値天気予報

●実況の把握

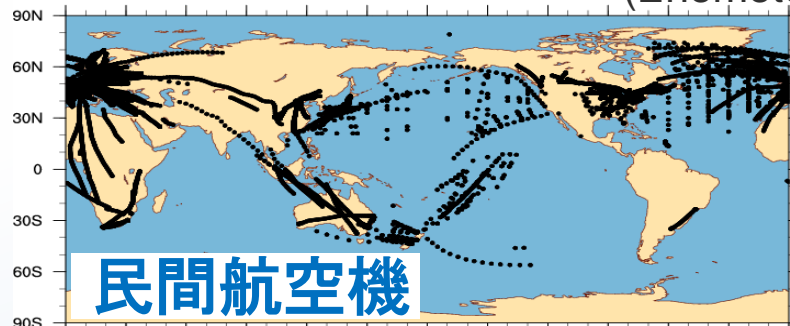
予測データ+観測データ

➤各種観測データ → WMOデータ収集システム GTS

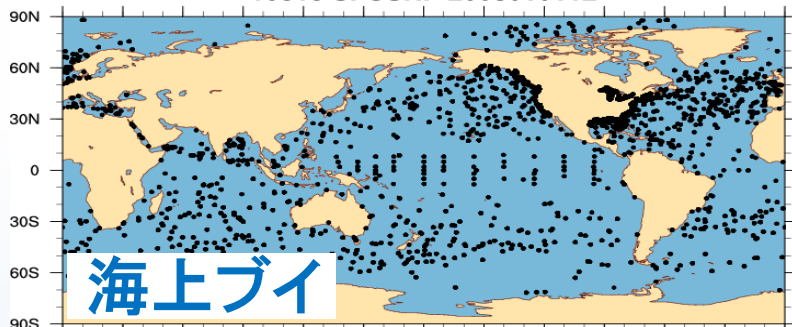
101758 ADPSFC 2008010112



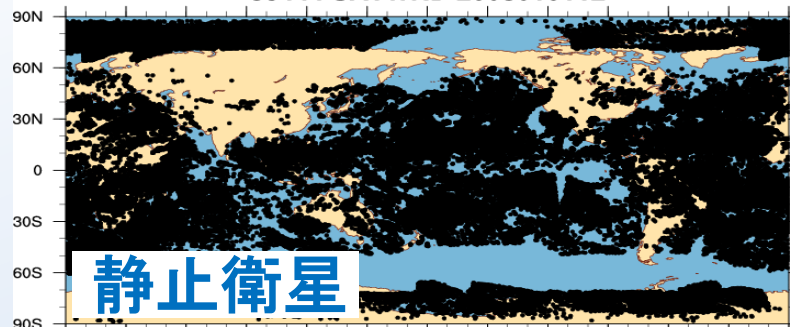
38036 AIRCFT 2008010112 (Enomoto, 2012)



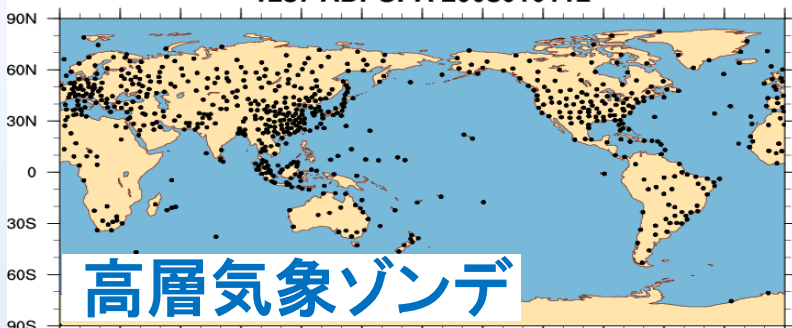
10616 SFCSHP 2008010112



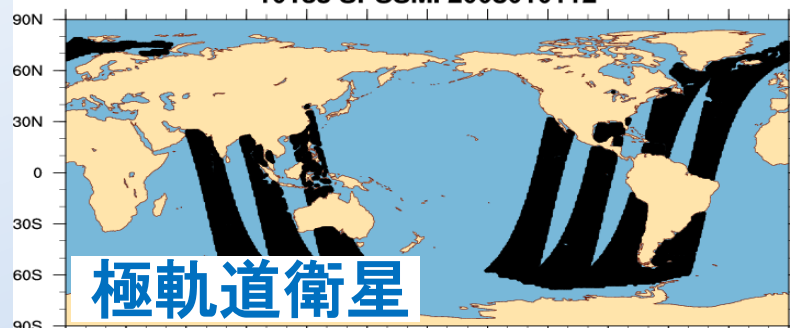
86444 SATWND 2008010112



1287 ADPUPA 2008010112

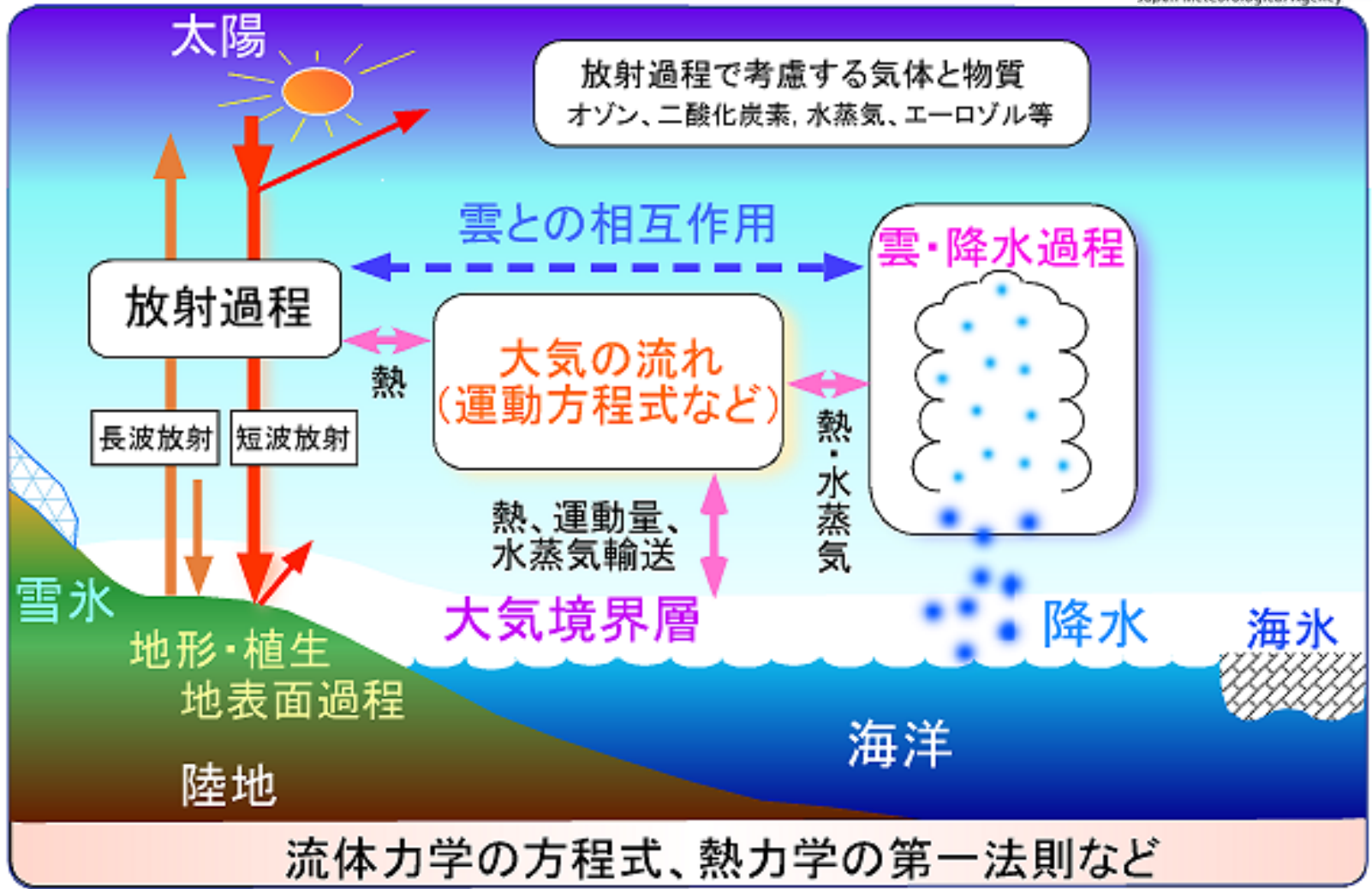


10135 SPSSMI 2008010112



- 実況の把握
- 将来の予測

予測データ+観測データ



データ同化システム
数値予報モデル

数値予報による予想天気図

数値予報モデル

- 運動方程式(水平成分) ← 運動量保存則

$$\frac{Dv}{Dt} + f\mathbf{k} \times \mathbf{v} = -\nabla_p \Phi + F,$$

- 静力学平衡(+状態方程式)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p},$$

- 連続方程式 ← 質量保存則

$$\nabla_p \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0,$$

- 熱力学方程式 ← エネルギー保存則

$$\frac{DT}{Dt} - \frac{RT}{c_p p} \omega = \frac{Q}{c_p}.$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x_i}$$

$$\nabla = e_\lambda \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + e_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} + e_r \frac{\partial}{\partial r}$$

未知変数は、水平速度 \mathbf{v} , 鉛直 p 速度 ω , ジオポテンシャル Φ , および温度 T

+ 水蒸気収支方程式

水蒸気、雲、雨、雪、霰、雹、...間の相変化を記述

● 偏微分方程式系を時間・空間について**離散化**

➤ 未知変数の値を有限の格子点のみで与える

➤ $\sim 960 \times 1,920 \times 60 \times 6$ 変数

～南北格子 \times 東西格子 \times 鉛直 \times 変数

$= 1,312,360 \times 60 \times 6$ 変数

$= 472,449,600$

➤ ~ 5 億次元の連立「差分」方程式系

● **初期値問題**としてコンピュータで数値的に時間積分

➤ 現在の状態: $x(t) \sim 5$ 億個の数値データ

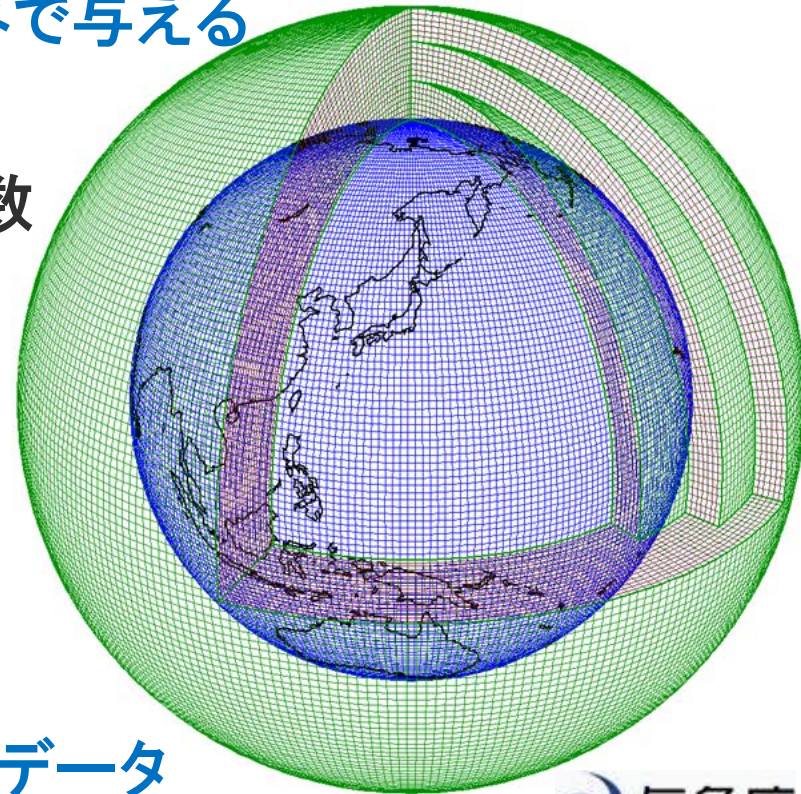
➤ 10分先の値を計算: $\Delta x / \Delta t = F(x) \rightarrow x(t + \Delta t)$

➤ $6 \times 24 \times 10 = 1,440$ 回繰り返して、10日先の値を計算

● 将来の天気図を作成

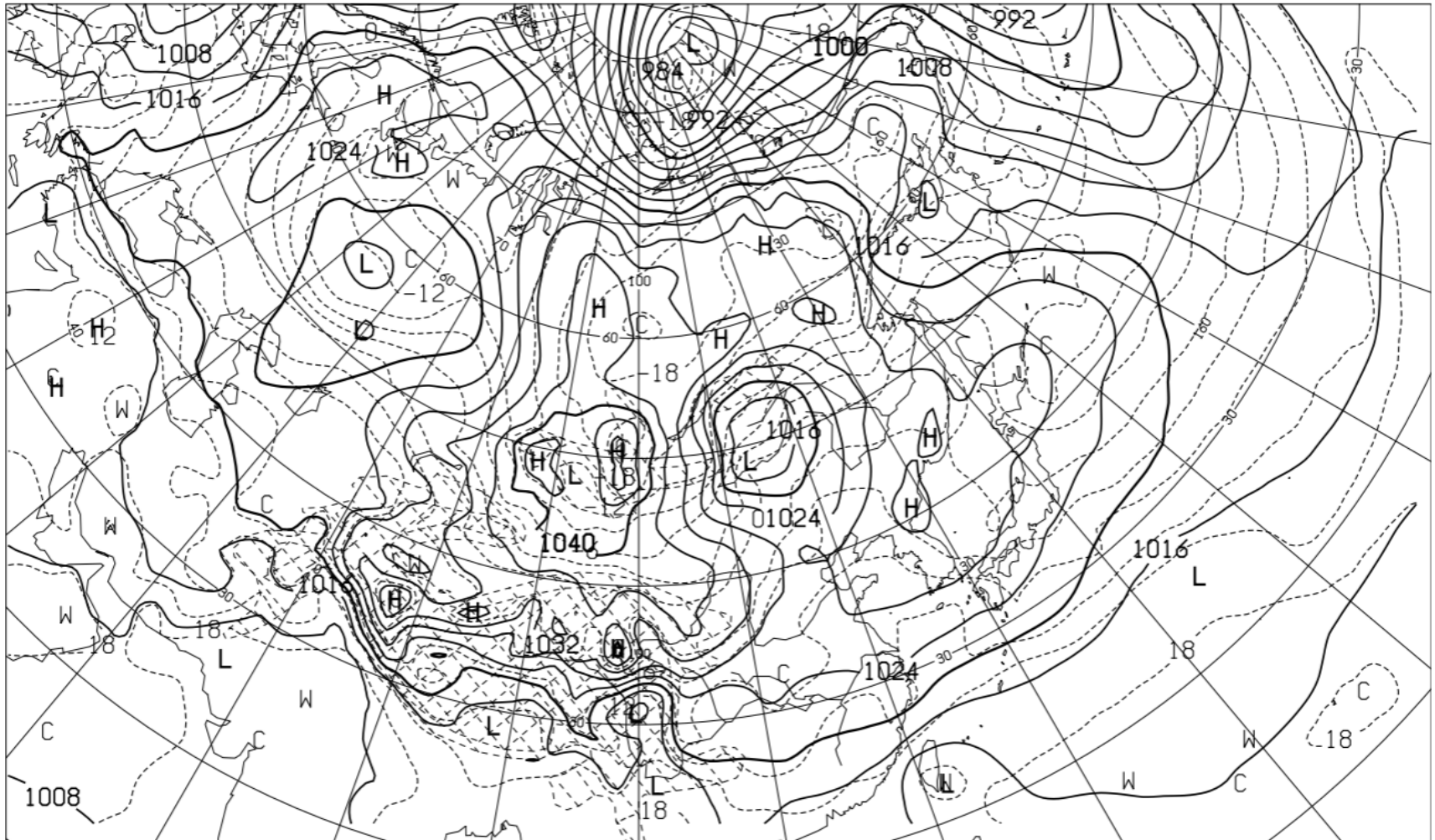
➤ <http://www.jma.go.jp/jp/metcht/suuchi.html>

● 天気予報の作成



● 予想天気図の一例

▶ 10月24日正午初期値 240時間予報
(11月3日正午用) 極東地上気圧・850hPa気温



FEAS24

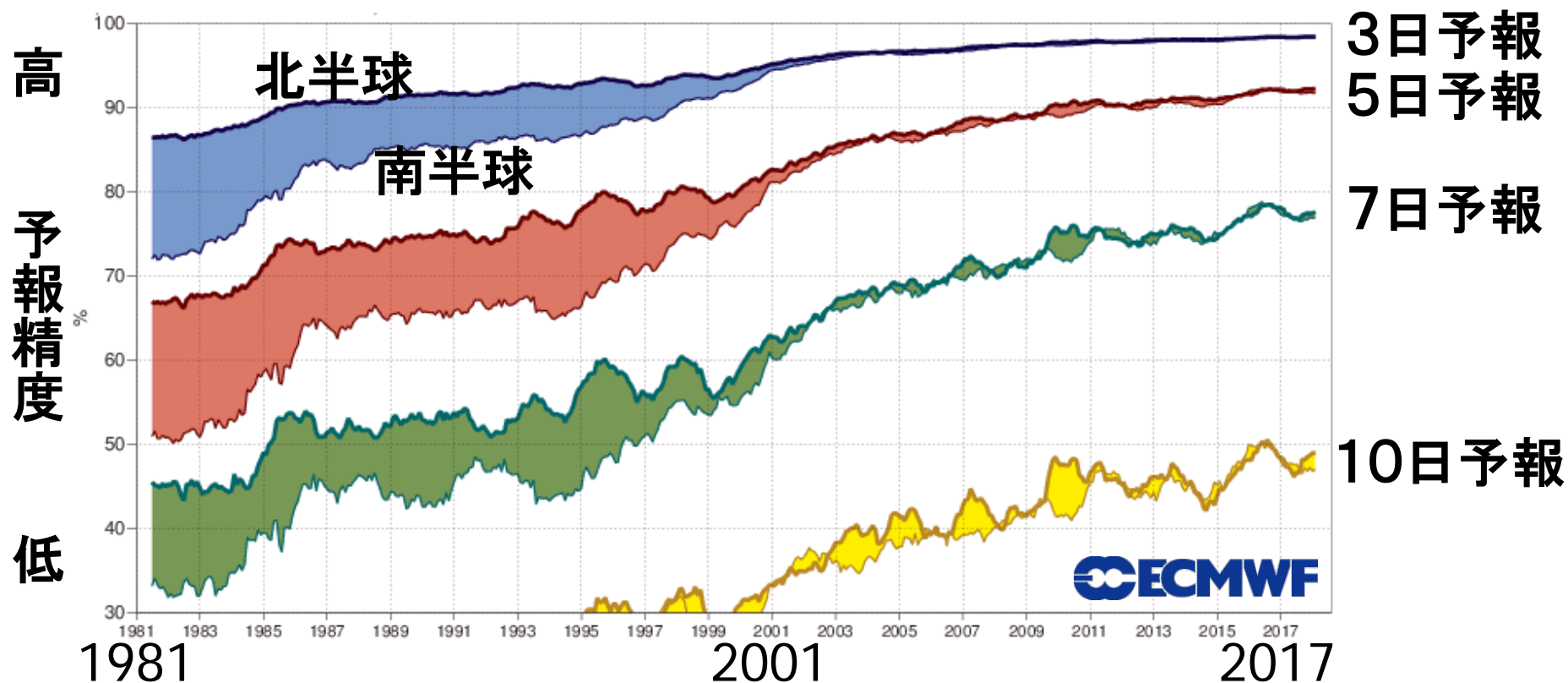
241200Z OCT 2018

SURFACE PRESS(hPa) AND TEMP(C) AT 850hPa

(VALID 031200Z NOV 2018)

❖ 予報精度の向上

● ヨーロッパ中期予報センターの3～10日予報



● 数値予報モデルの性能向上

➤ 高分解能化、微物理過程の精緻化、アンサンブル予報化、...

● 初期値データの品質向上

➤ 新観測データ(特に衛星観測)の活用、データ同化の向上、



EarthSpacecraft: SatellitesProduced by: NASA/MODIS/USGS
<http://www.solarviews.com/browse/earth/bluemarblewest.jpg>

2.2 数値天気予報の当たり外れの科学

❖ 気象変動の実態

GOES9 IR1 04121000JST Kochi Univ.

● 気象衛星画像

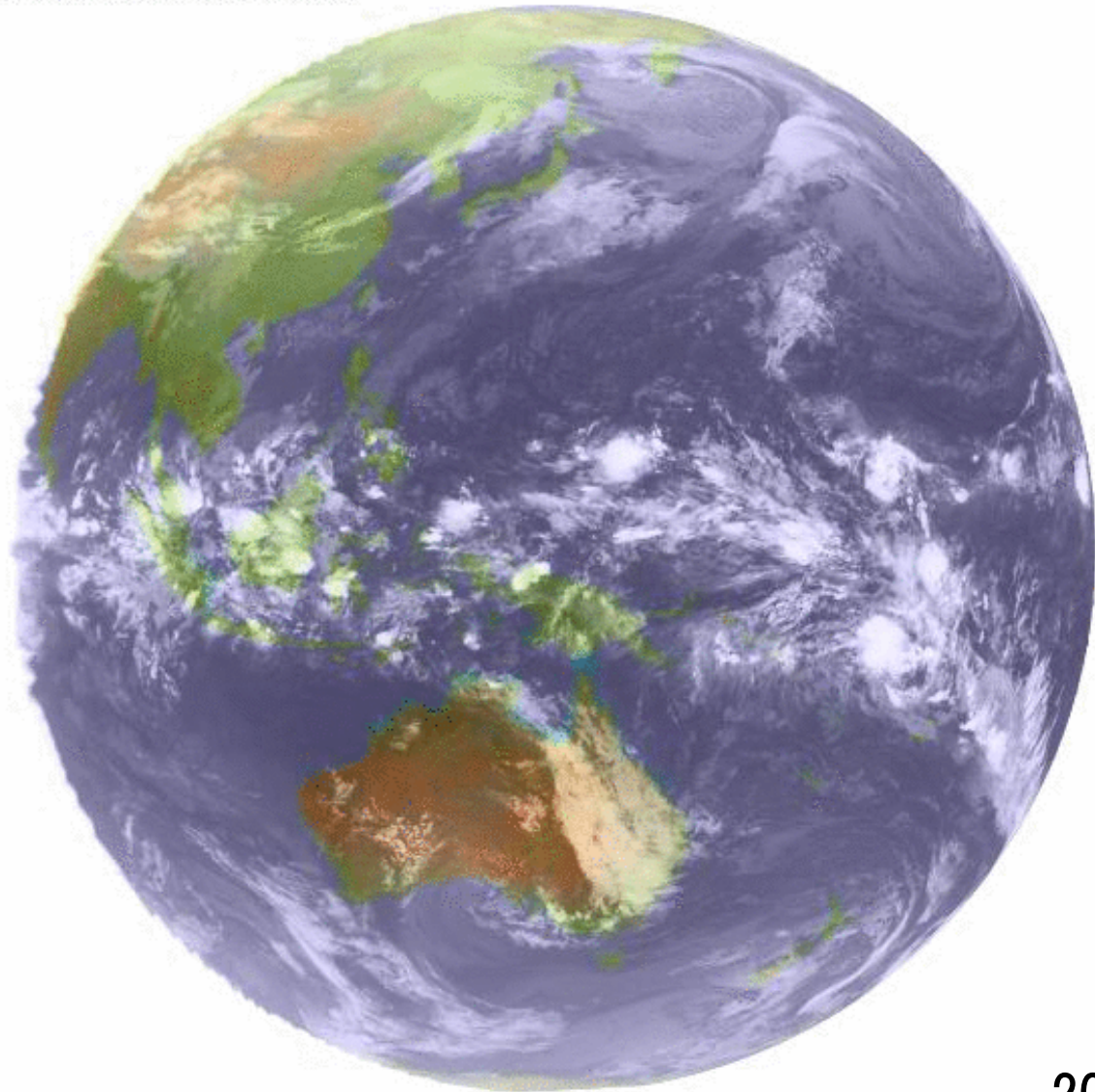
- 赤外線(IR)
- 2004年12月
10～14日

● 温帯/寒帯

- ジェット気流
- 低気圧・高気圧
- 前線

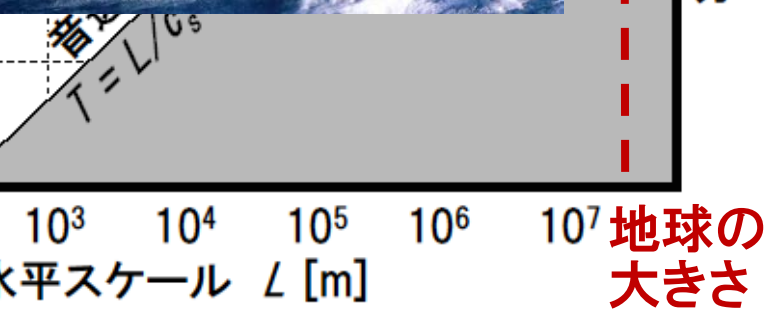
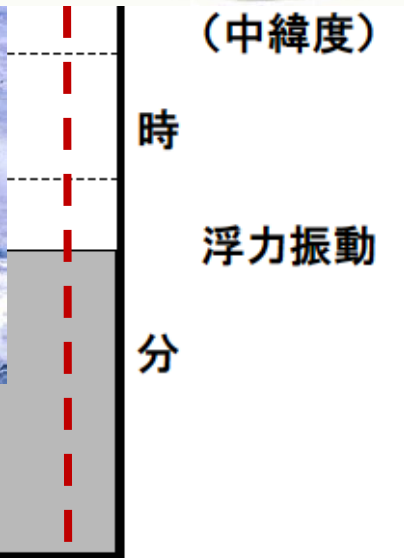
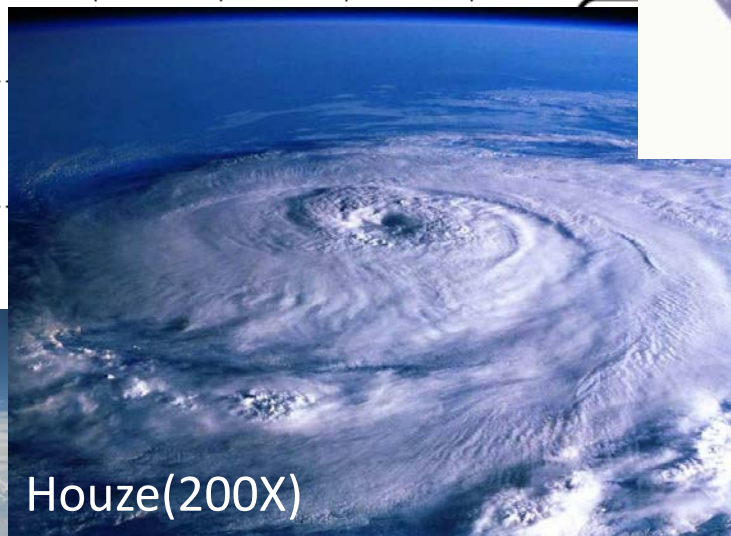
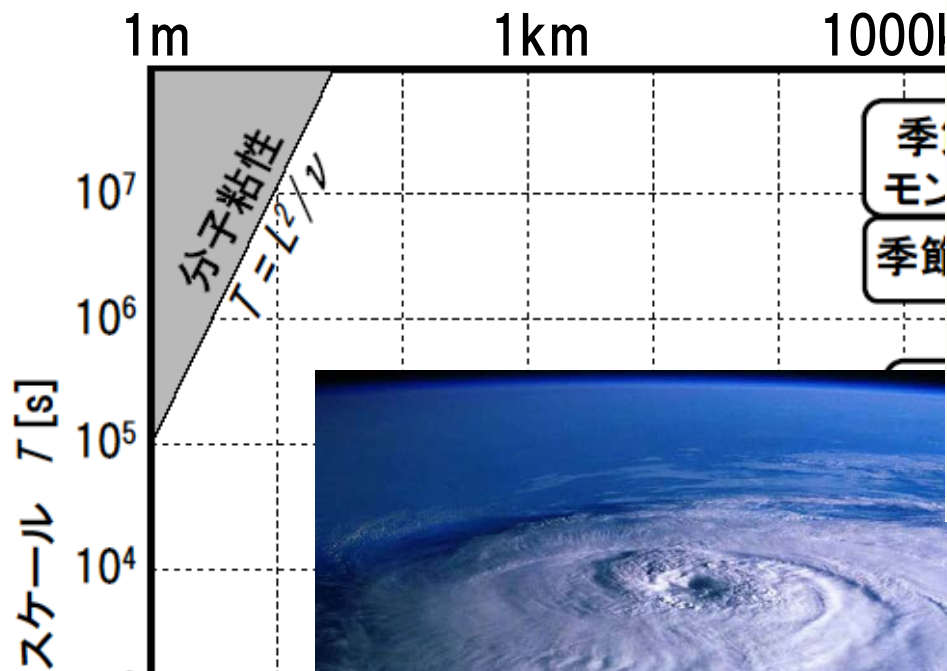
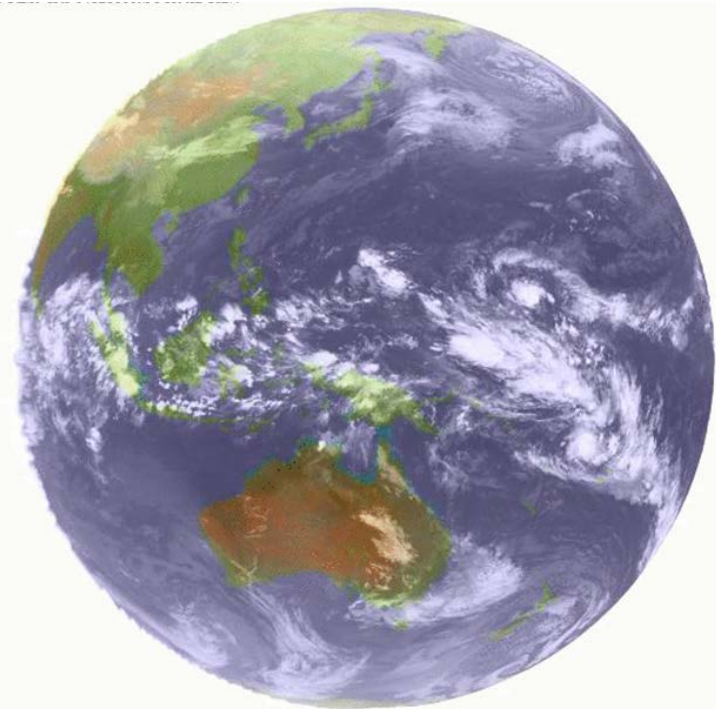
● 熱帯

- 積雲対流の
組織化
- 熱帯擾乱



● 多階層連結変動

← 現象の空間的・時間的な階層性



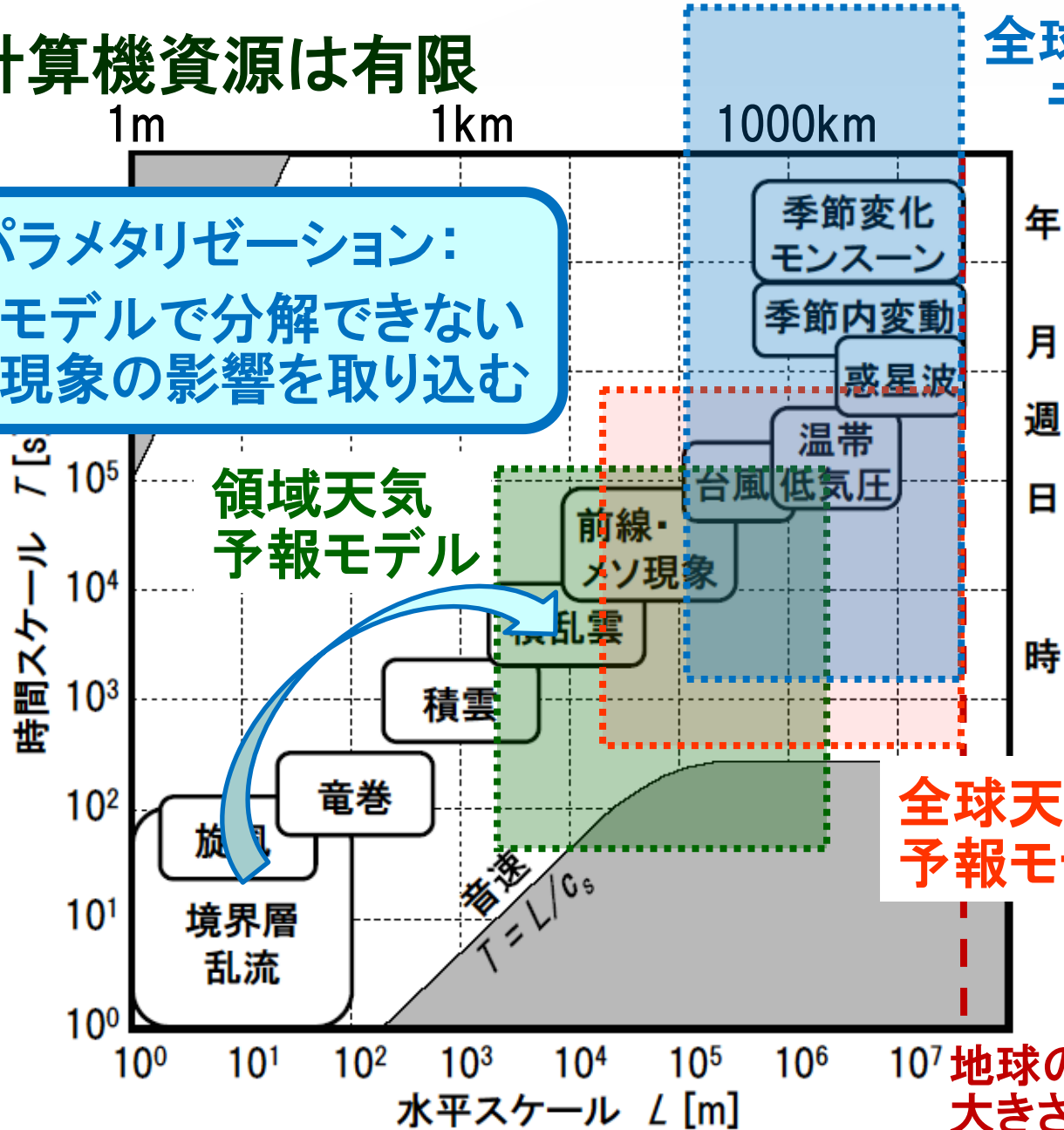
Tsuda(2009)

❖ 数値予報モデルの分解能

● 計算機資源は有限

全球気候
モデル

パラメタリゼーション:
モデルで分解できない
現象の影響を取り込む



❖ 数値予報モデルの分解能

● 計算機資源は有限

全球気候
モデル

1m

1km

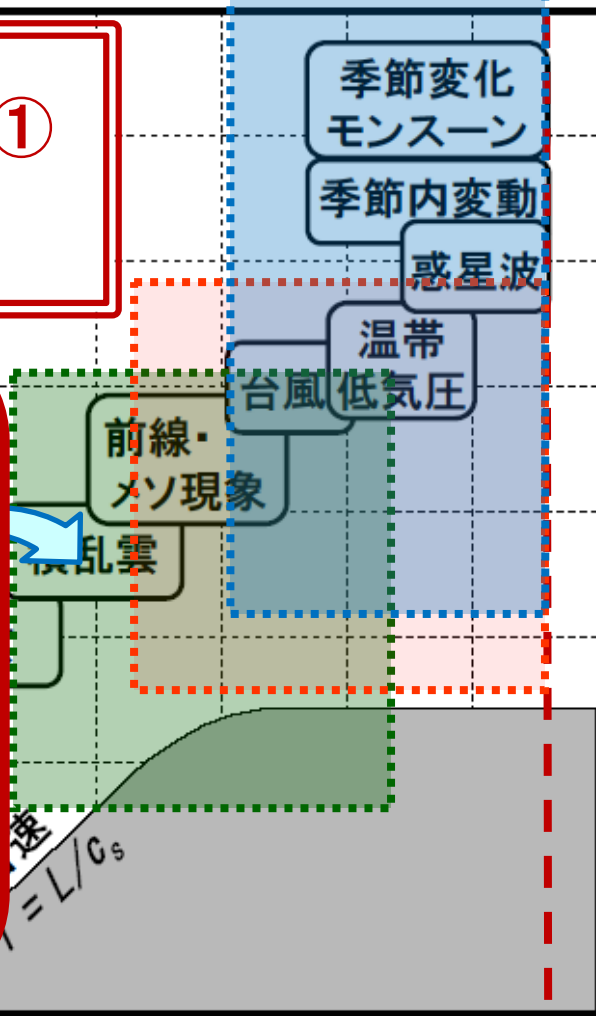
1000km

数値天気予報が外れる訳 ①
モデルが不完全

これらの
パラメタリゼーションが
現実大気を正しく表現
していない



多階層の連結変動が
よく理解できていない



年
月
週
日
時
分

10⁰ 10¹ 10² 10³ 10⁴ 10⁵ 10⁶ 10⁷ 地球の
水平スケール L [m] 大きさ

❖ 数値天気予報が外れる訳

① モデルが不完全

② たとえモデルが完全でも、大気運動が「カオス」

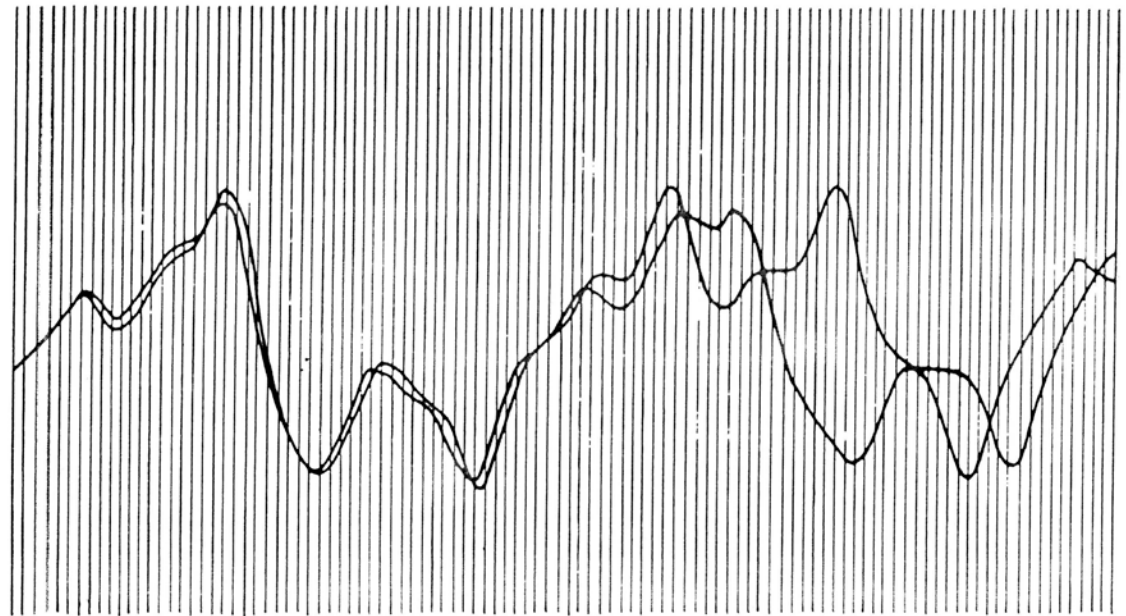
● Lorenz (1963)

“Deterministic nonperiodic flow”

● カオス = 初期値に対する鋭敏な依存性

● 初期値が完全に
決まらなければ
予測には限界

予測可能性



Gleick (1987)

→ Time

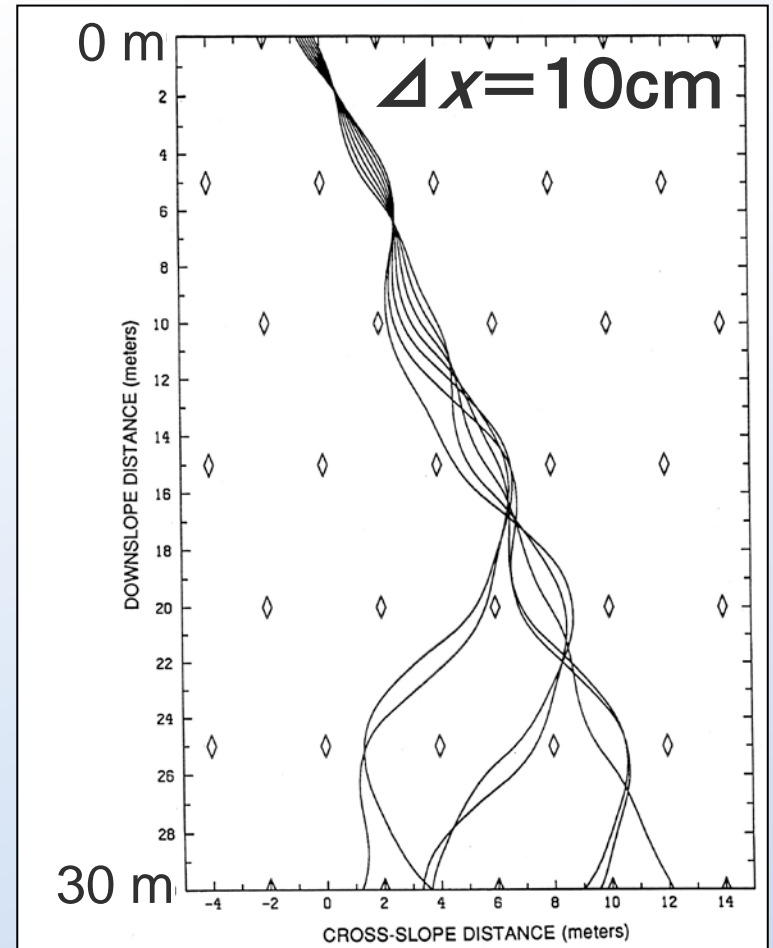
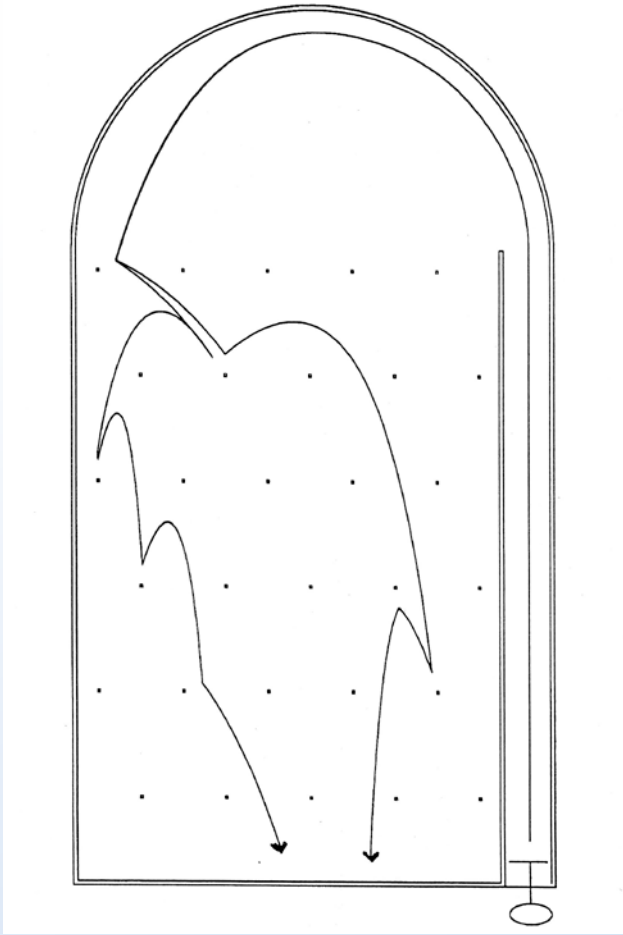
❖「カオス」の遍在性

●Lorenz (1993)

➤ubiquitous (至る所にある)

○ピンボール

○モーグル・ゲレンデを滑り落ちるスキー板



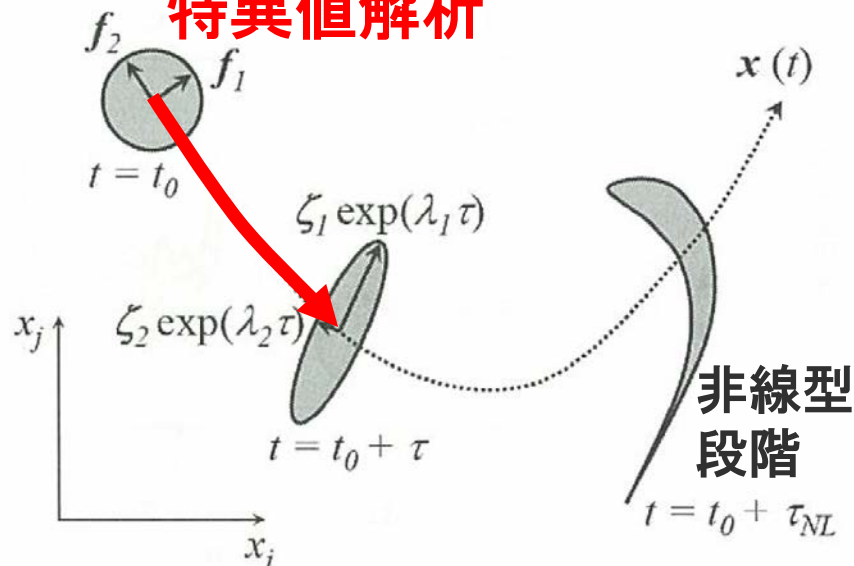
❖ 天気予報の当たり外れ

● 1ヶ月アンサンブル予報

- 初期値に微小摂動を加えて予報を繰り返す
- 流れ場に依存した予測可能性の変動

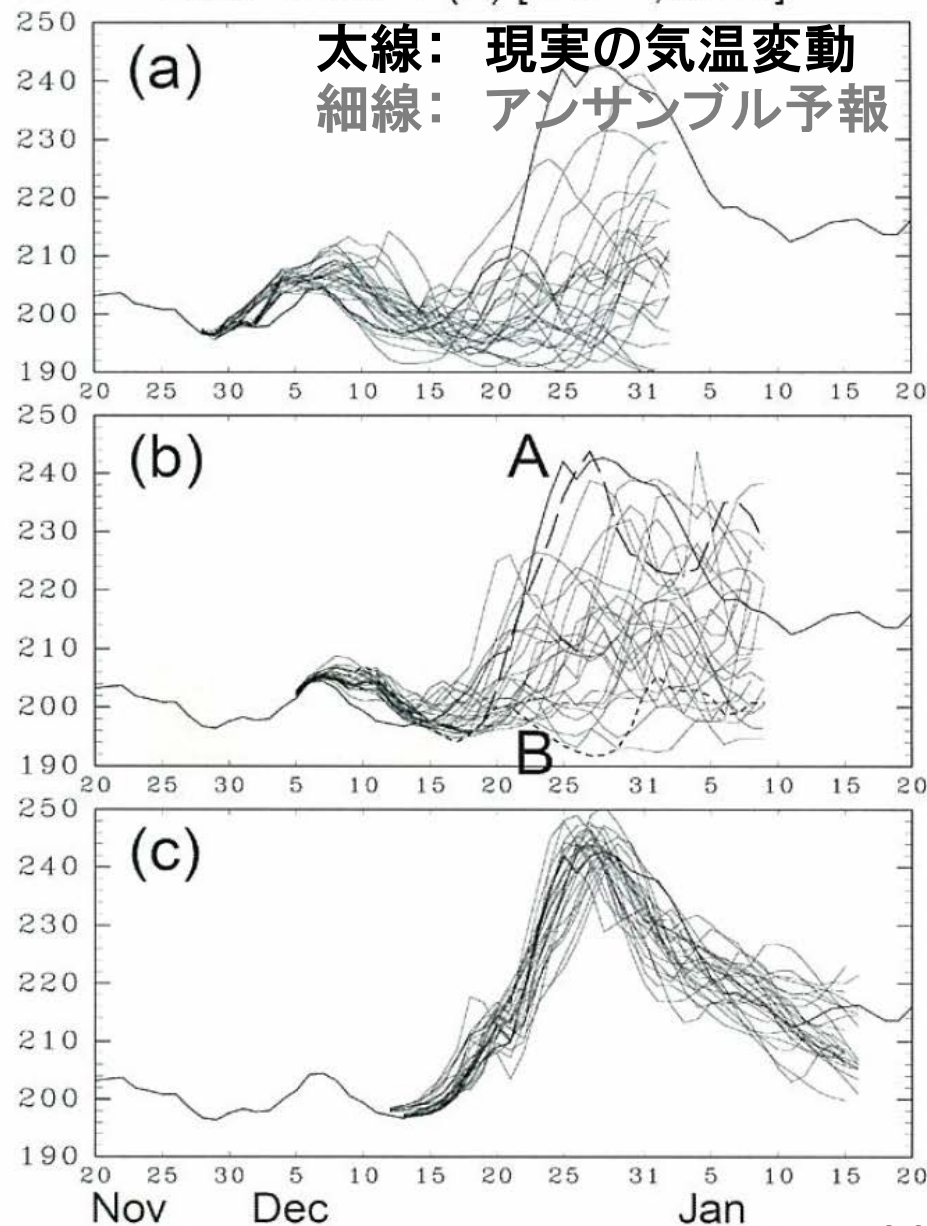
● 誤差成長の理論

接線型システムでの
特異値解析



成層圏突然昇温現象の予報例3つ

Zonal-Mean T (K) [10hPa, 80°N]



● “流れ場”に依存した予測可能性の変動

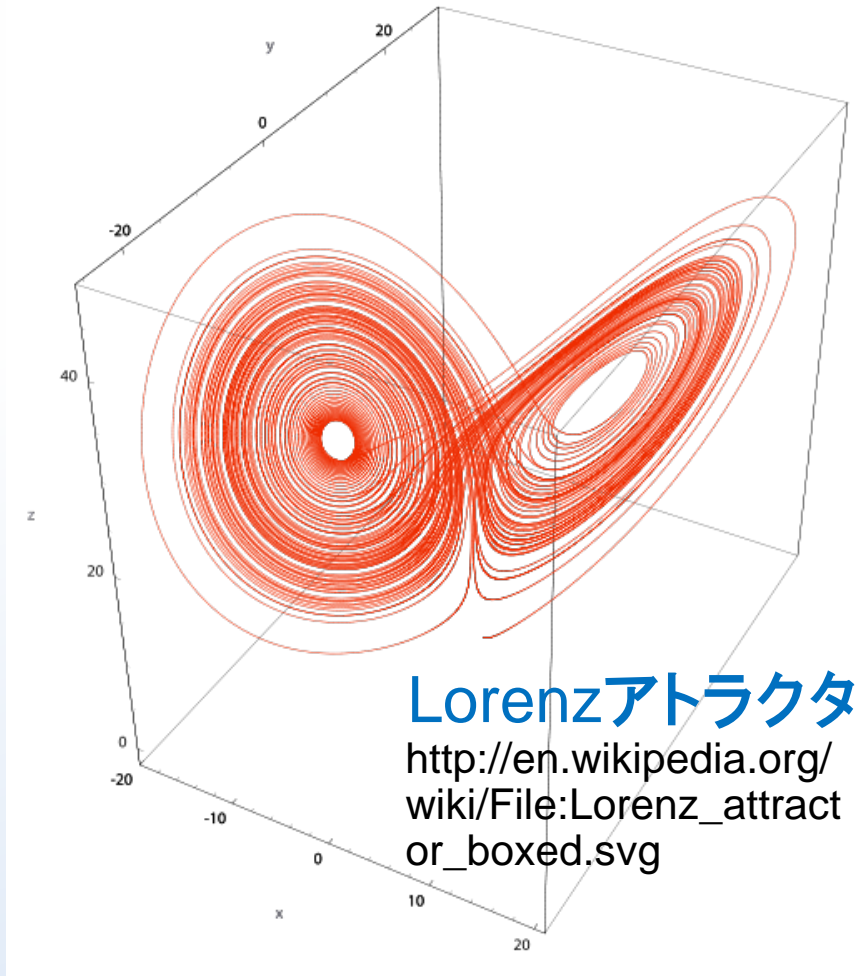
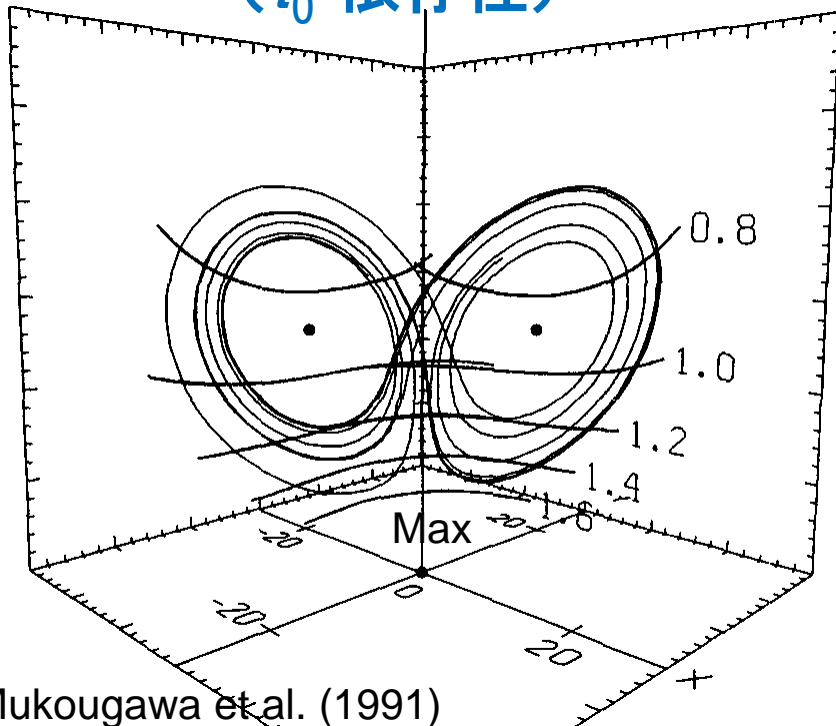
➤ Lorenz方程式の例

$$dx/dt = -10x + 10y$$

$$dy/dt = 28x - y - xz$$

$$dz/dt = -8z/3 + xy$$

➤ 有限時間 τ で定義した 誤差成長率の局所性 (t_0 依存性)



Lorenzアトラクタ

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lorenz_attractor_boxed.svg

何時、何処で、どのような
摂動を与えると、ある評価
期間にその摂動が最も
発達するか、を求める問題

❖「カオスから天気予報へ」

●カオス理論を現業の数値天気予報に応用するには？

1. 観測される大気状態は誤差を含む

○真の状態 + 誤差の確率分布

2. 誤差の確率分布がどのように時間発展するか

○線型段階(微小)から非線型段階(有限振幅)へ

○解析力学におけるリウヴィルの定理の応用

○少数自由度系では応用可能でも、**大自由度系では不可能**

3. 経験則： 中・高緯度大気モデルで急激に増幅する成分はそれほど多くない

○急激に増幅する成分に限って、時間発展を求めてはどうか →

●「アンサンブル」予報

1. 初期値をかえて、数十回の数値予報を繰り返す

○事前に、**急激に増幅する成分**から順に求めて、初期摂動とする

2. アンサンブル予報結果の活用

○予報誤差の大小(=**予報の信頼度**)、予報誤差の大きな場所、・・・ 28

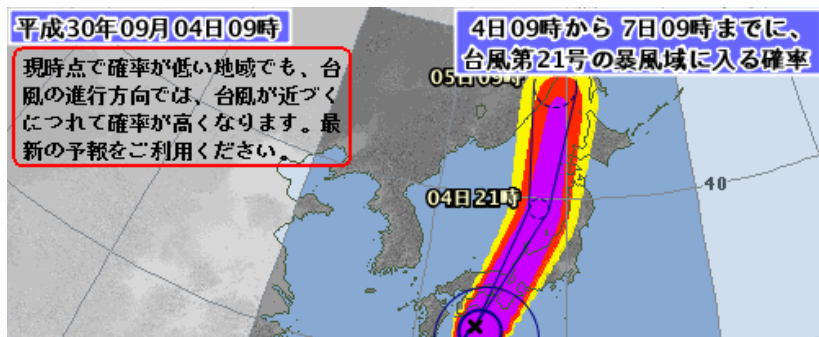
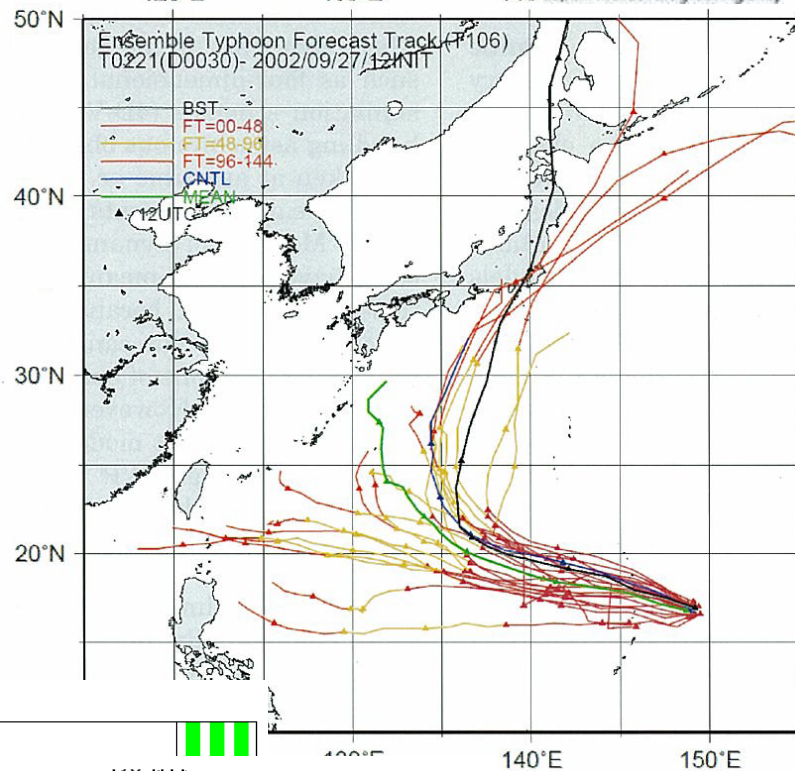
❖「カオスから天気予報へ」の一つの例

● 台風進路のアンサンブル予報

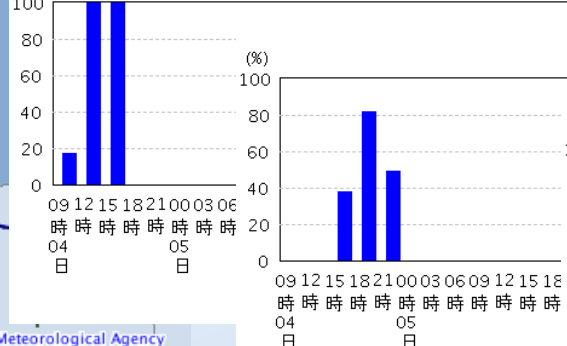
➤ 2007年度に現業化

● 確率情報

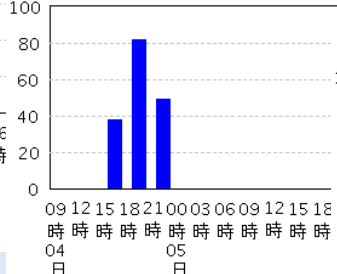
➤ 台風の接近確率マップ



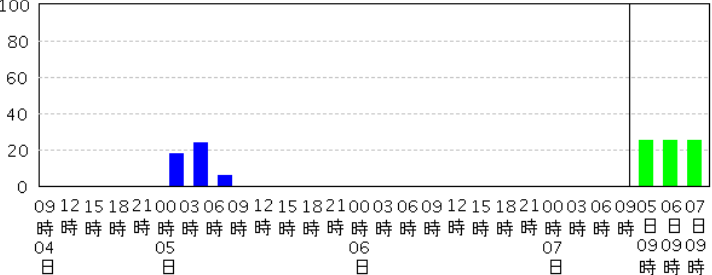
京都・亀岡



新潟地域



石狩中部



●インタラクティブな予報

- 誤差成長が大きい場所の特定
- その場所への機動的観測 → 初期値誤差を削減

●2008年 機動的台風特別観測

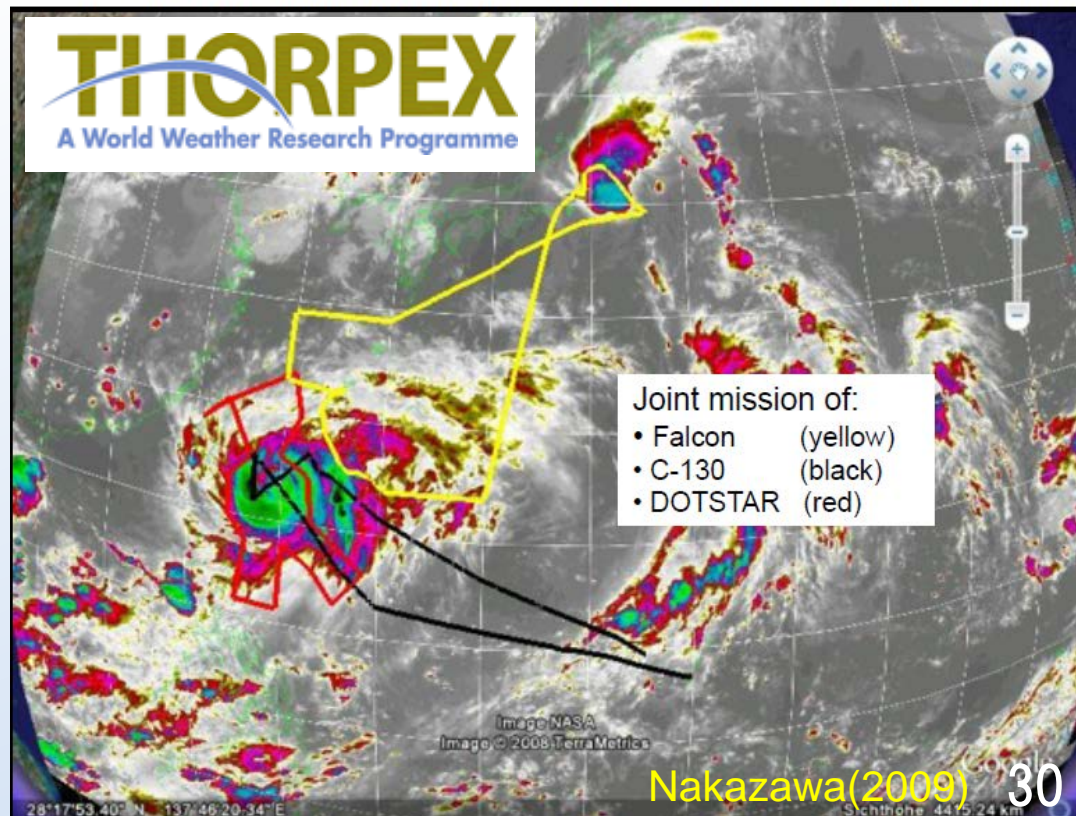
- THORPEX-Pacific Asian Regional Campaign 2008

●2017・18年

航空機3機による初めての台風同時観測

TY-core, TY-environment and distant sensitive region (“Sinlaku”)

産経フォト

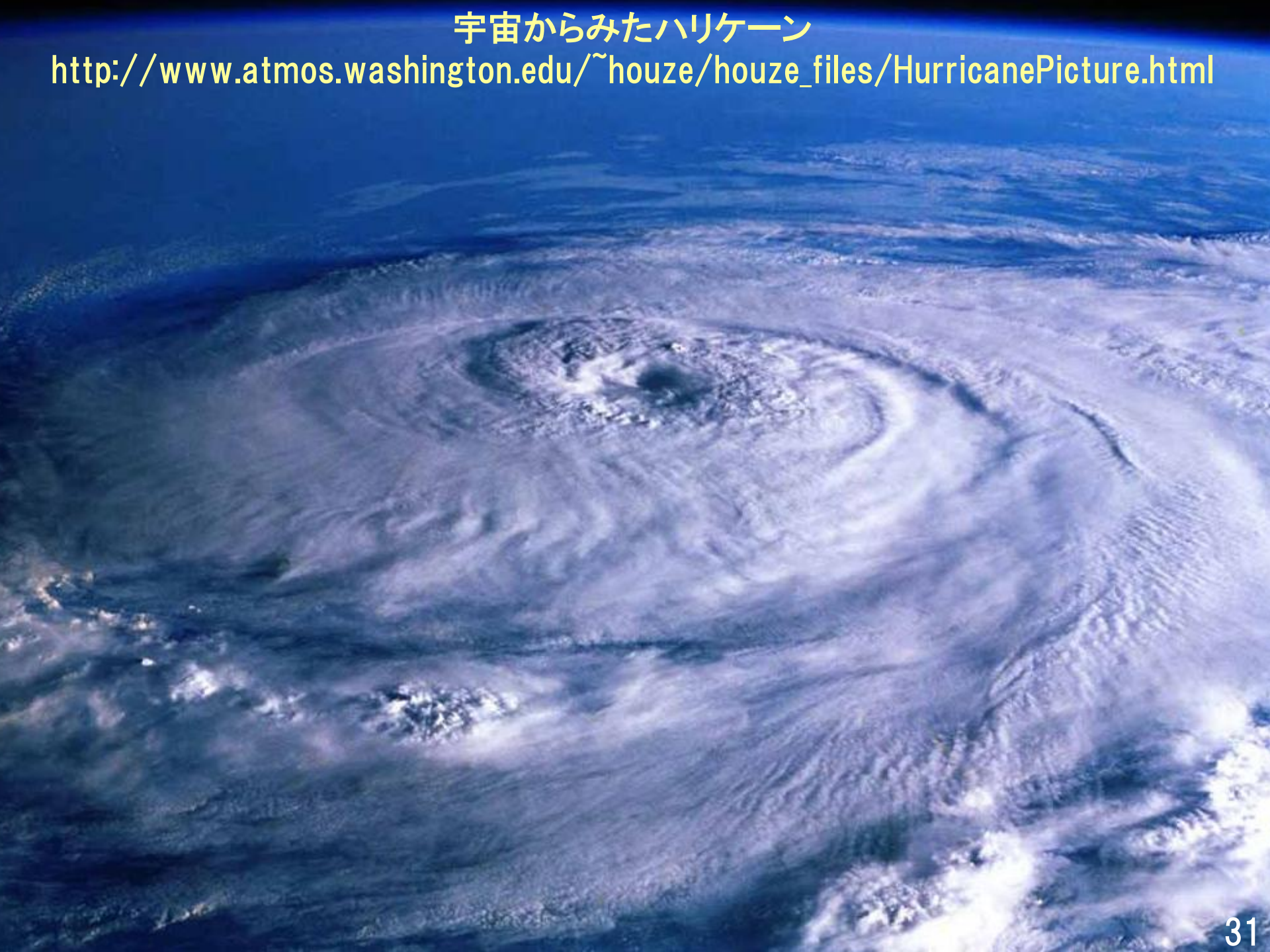


飛行機から撮影された台風21号の目の中の映像=21日午後、沖縄の南の海上
(坪木和久・名古屋大教授提供)

©2017 The Sankei Shimbun & SANKEI DIGITAL

宇宙からみたハリケーン

http://www.atmos.washington.edu/~houze/houze_files/HurricanePicture.html



2.3 気候予測の不確実性

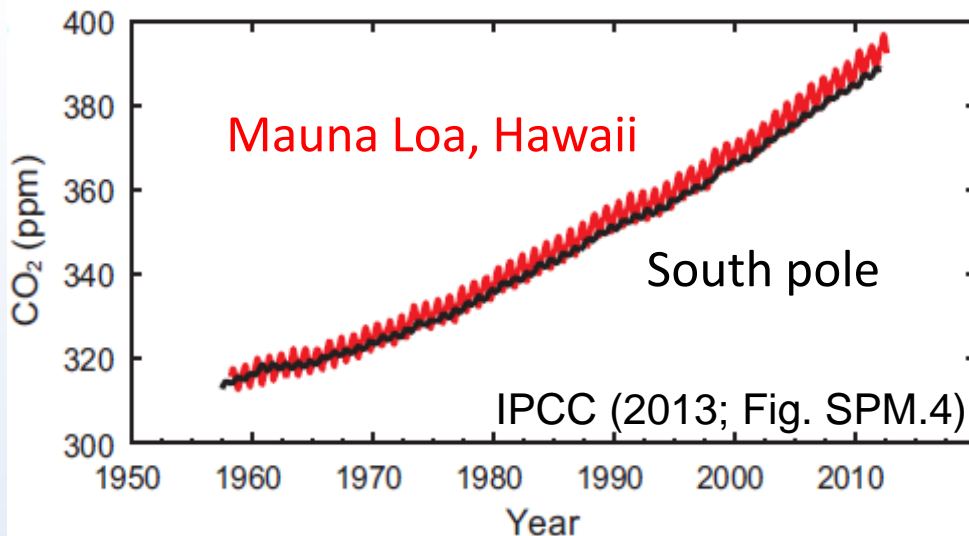
❖ 地球温暖化の観測的事実

● 地表気温の上昇

- 年々変動、経年変化
- ハイエイタス：
地球温暖化停滞

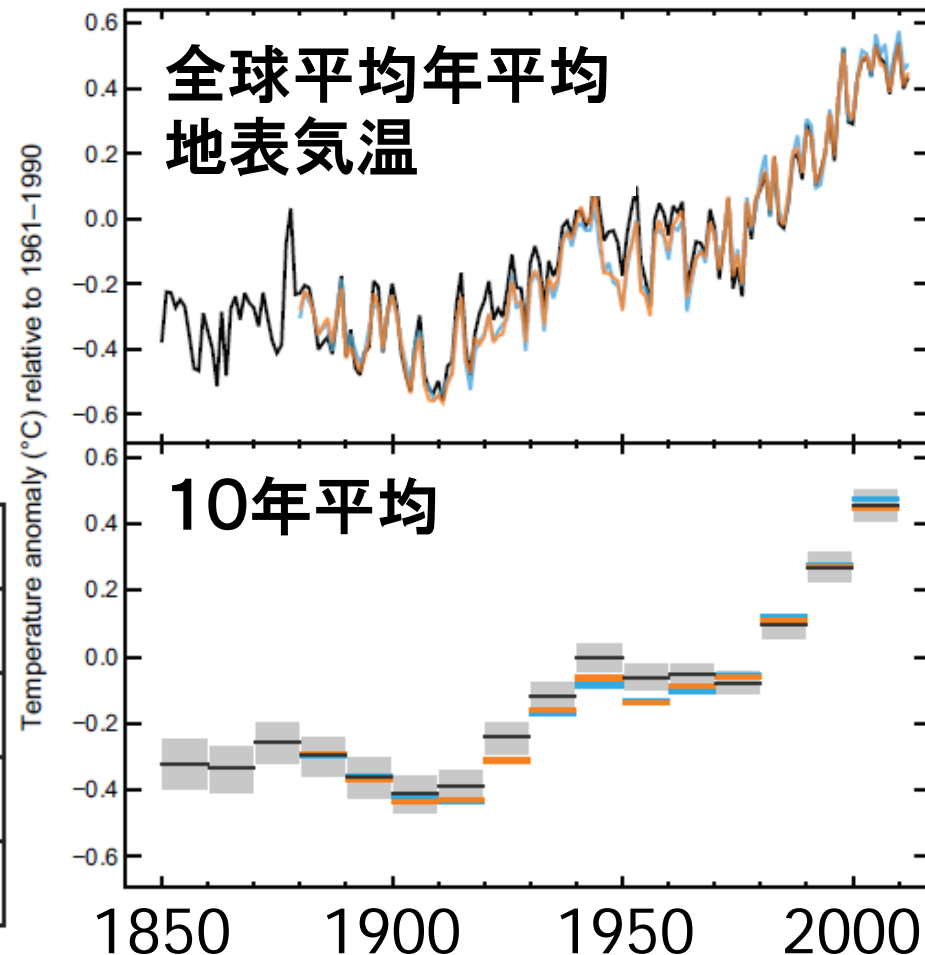
● 大気中CO₂の増大

Atmospheric CO₂



(a)

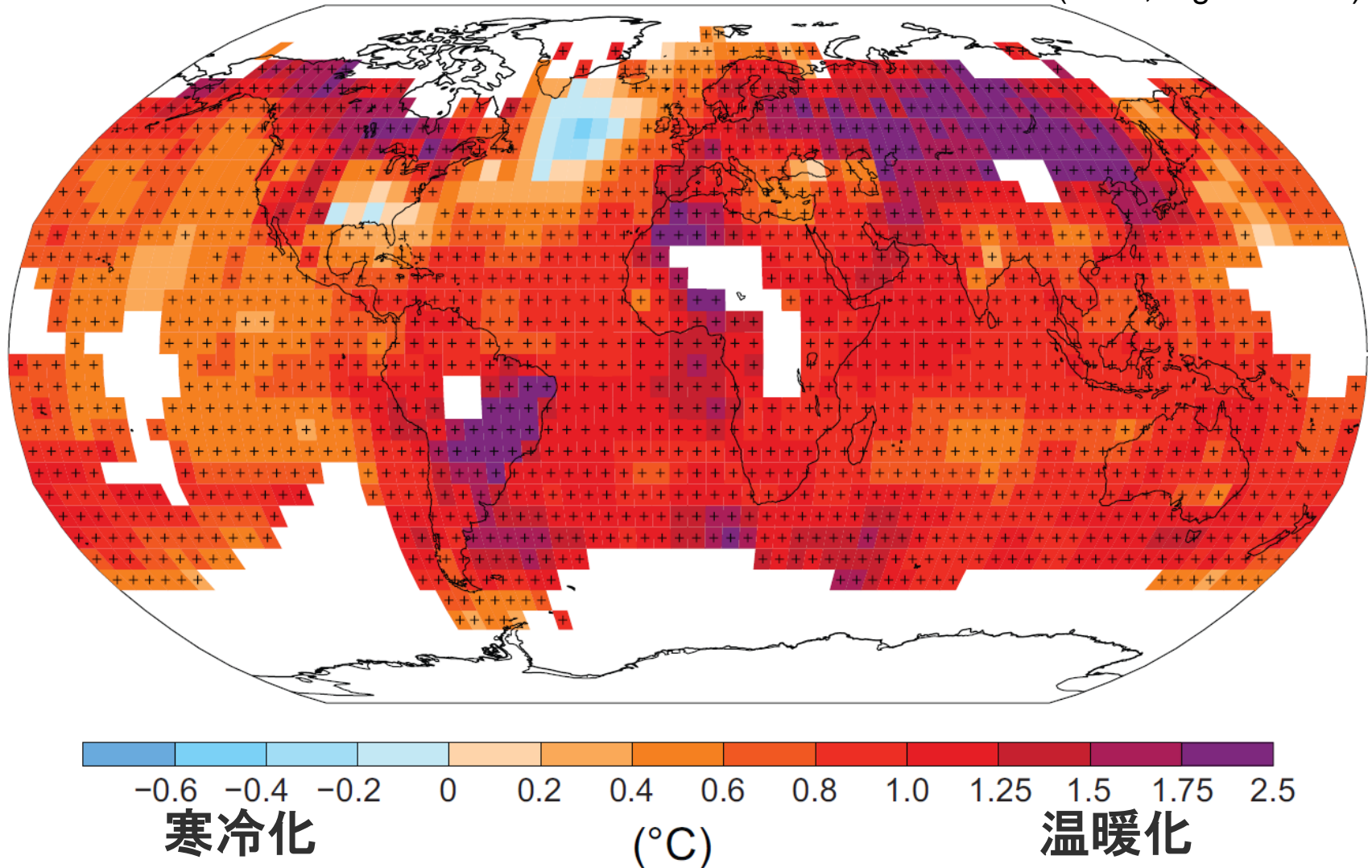
IPCC (2013; AR5 Fig. SPM.1a)
Observed globally averaged combined land and ocean
surface temperature anomaly 1850–2012



● 地表気温の1901年から2012年までの直線トレンド

- 北半球と南半球
- 陸上と海上

IPCC (2013; Fig. SPM.1b)



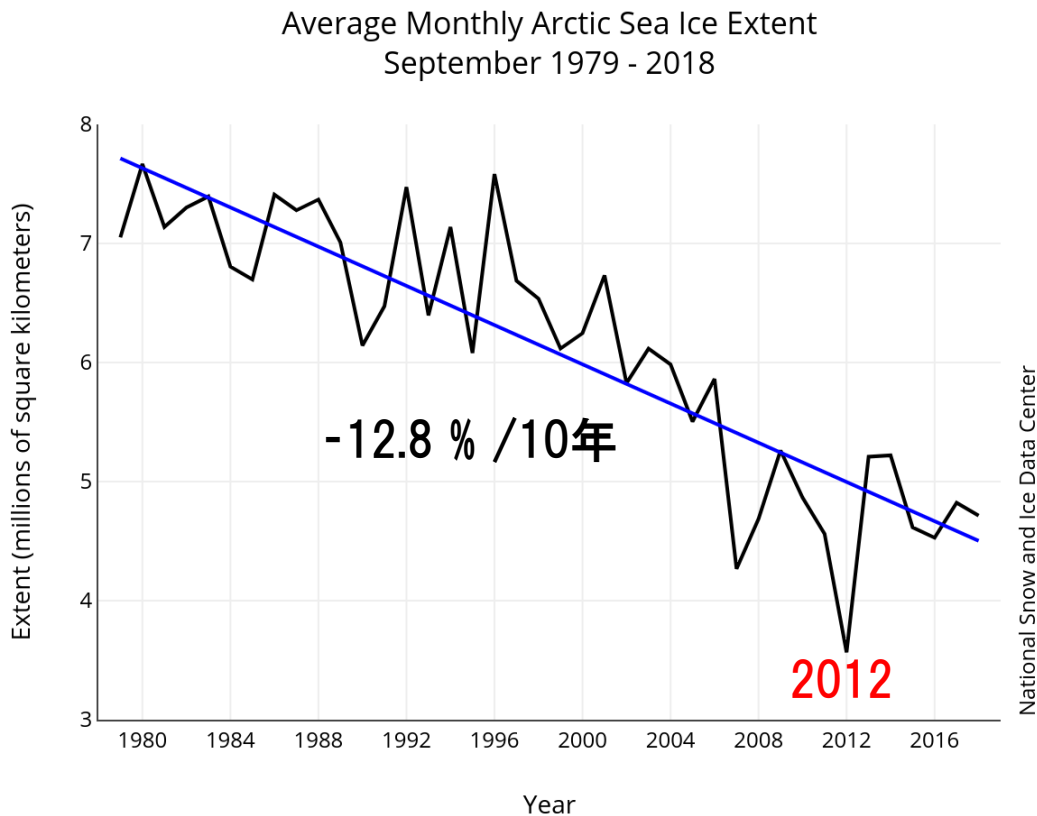
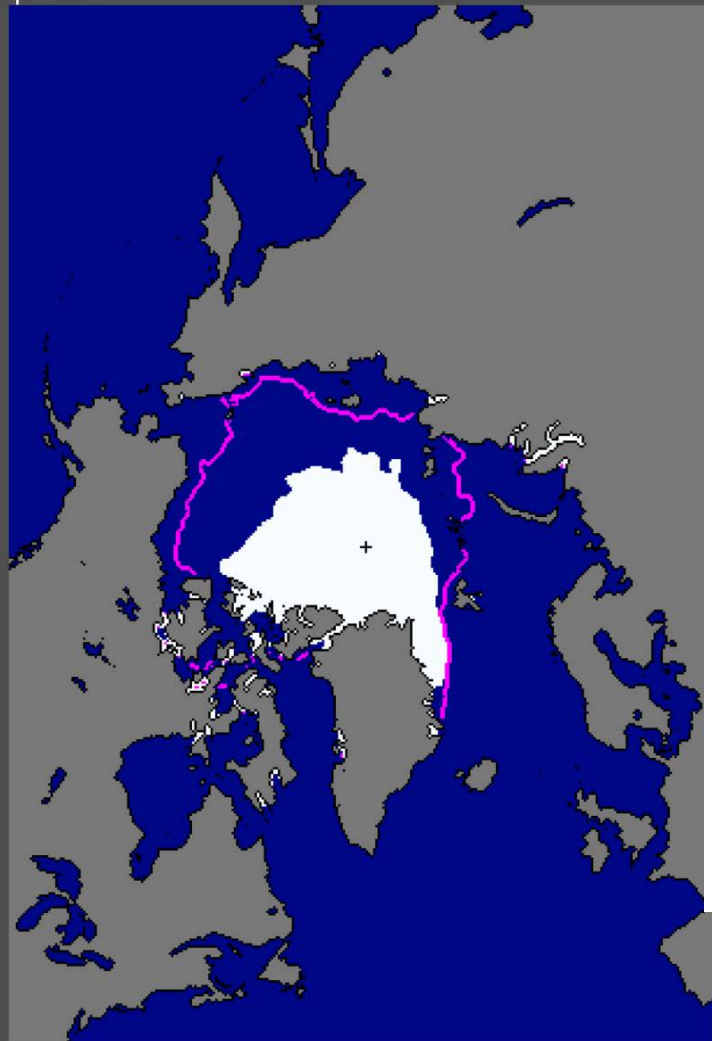
●近年の北極海の海水面積の減少

----- 1979-2000の
平均的な広がり

<http://nsidc.org/arcticseaicenews/>

2012年9月

Sea Ice Extent
Sep 2012



median
ice edge

❖ 気候予測モデルの概観

● 始まりは数値天気予報モデル（1950年～）

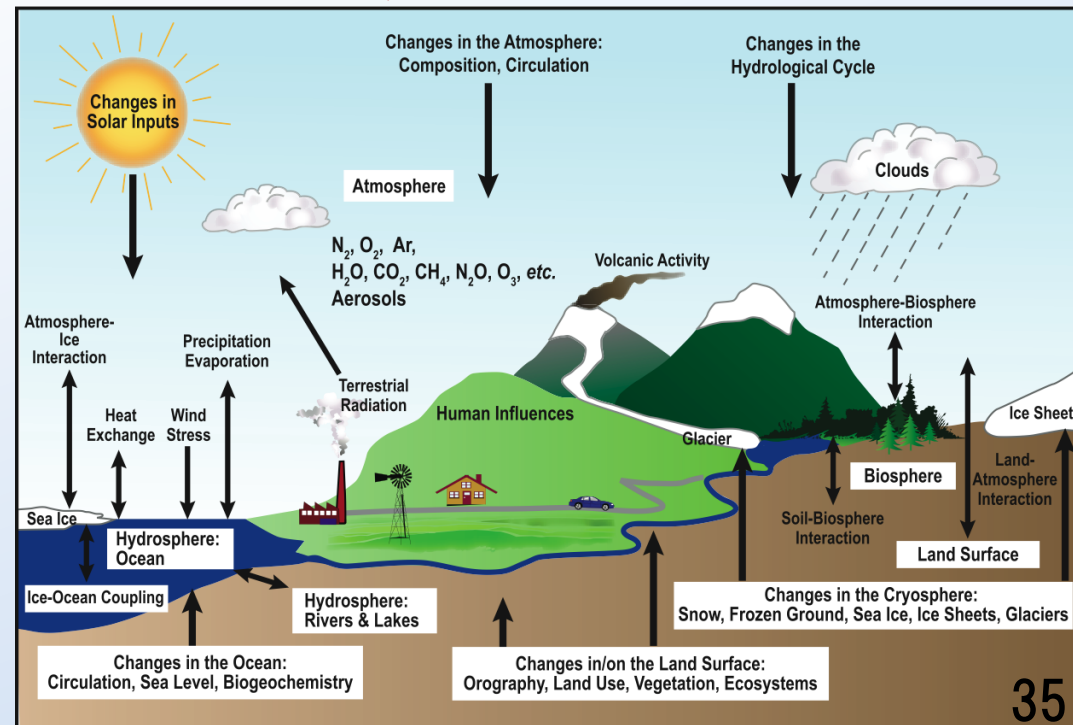
- 物理法則に基づいて大気の将来をコンピュータで予測
- 日々検証されてきた実用に耐えるモデル

● 気候予測モデルへの改変

- より長い時間スケールでは変動するものを内部変数に
- 海洋、陸水、雪氷、陸面、植生、… ↓ 気候システムの模式図
- 変動を支配する法則（方程式系）の構築

● 外部条件の変化に対するシステムの応答問題

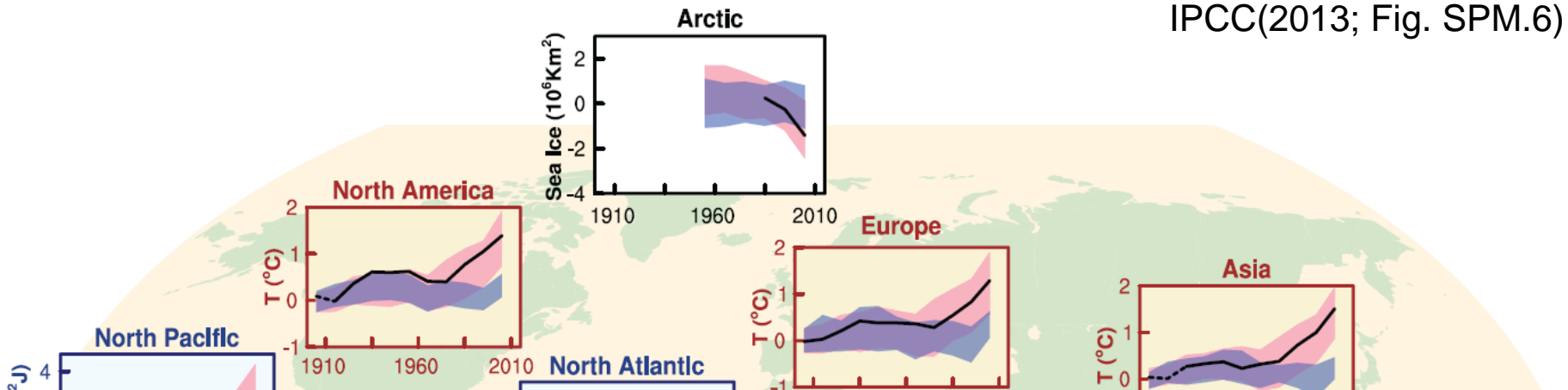
- 温室効果気体
- 太陽活動の変動



❖ 気候モデルの性能検証

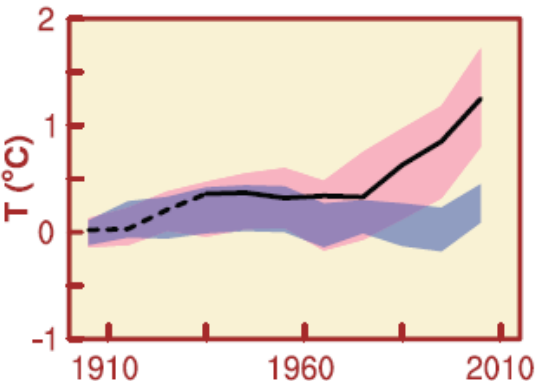
● 20世紀の気候変動再現実験

IPCC(2013; Fig. SPM.6)

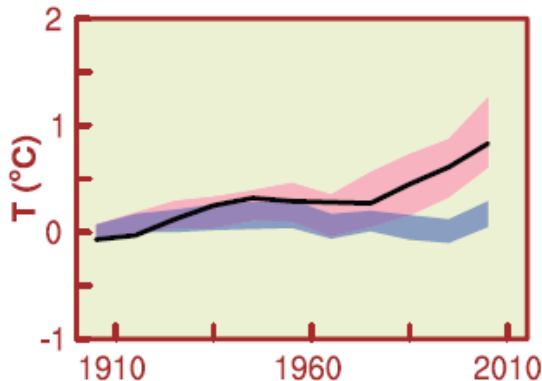


Global averages

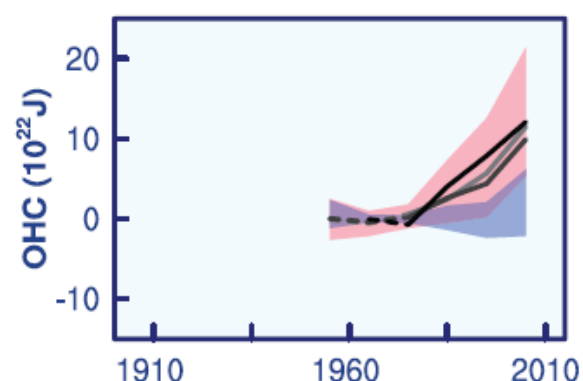
Land surface



Land and ocean surface



Ocean heat content



≡ 観測結果

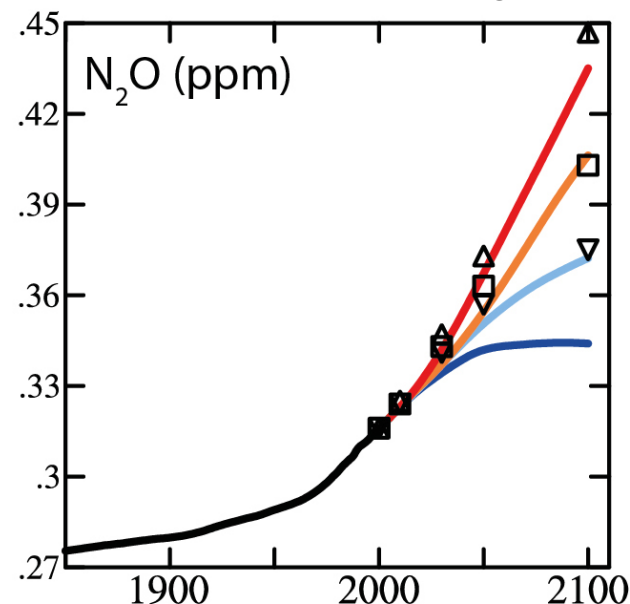
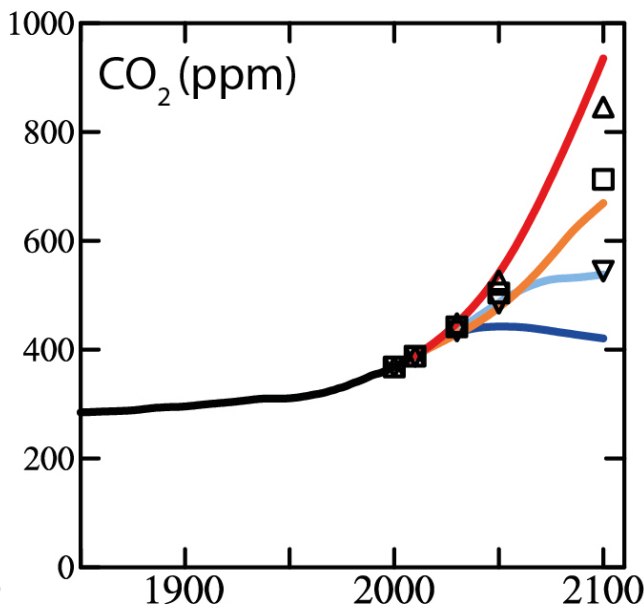
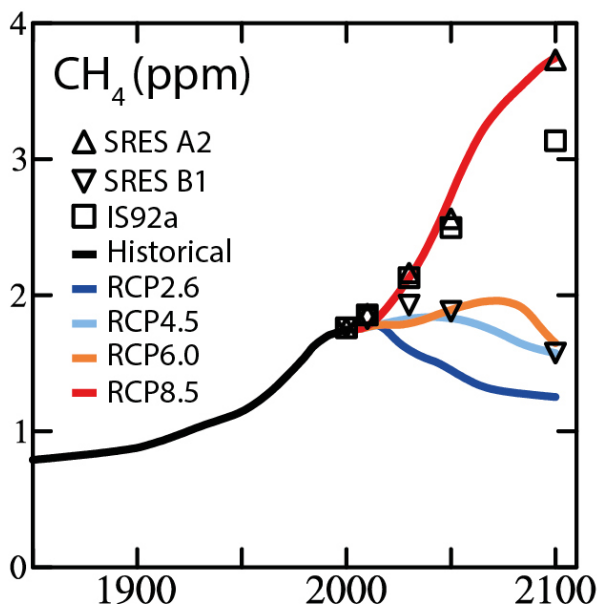
■ 自然強制変動のみを与えた場合
+ 人為起源強制

❖ 21世紀の温暖化予測実験

● 人間活動予測シナリオ:


● Representative Concentration Pathways (RCP) 代表的濃度経路

IPCC (2013; Fig. 8.5)



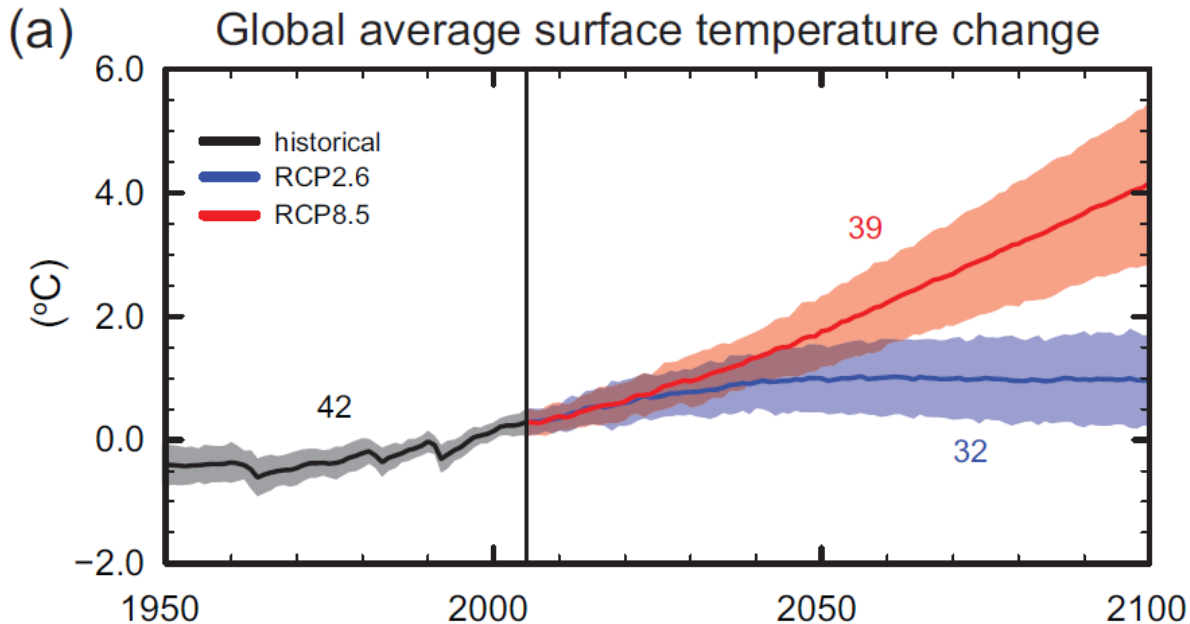
略称	シナリオ (予測) のタイプ
 RCP 2.6	低位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 2.6W/m ²) 将来の気温上昇を 2°C以下に抑えるという目標のもとに開発された排出量の最も低いシナリオ
 RCP 4.5	中位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 4.5W/m ²)

<http://www.jccca.org/ipcc/ar5/wg1.html>

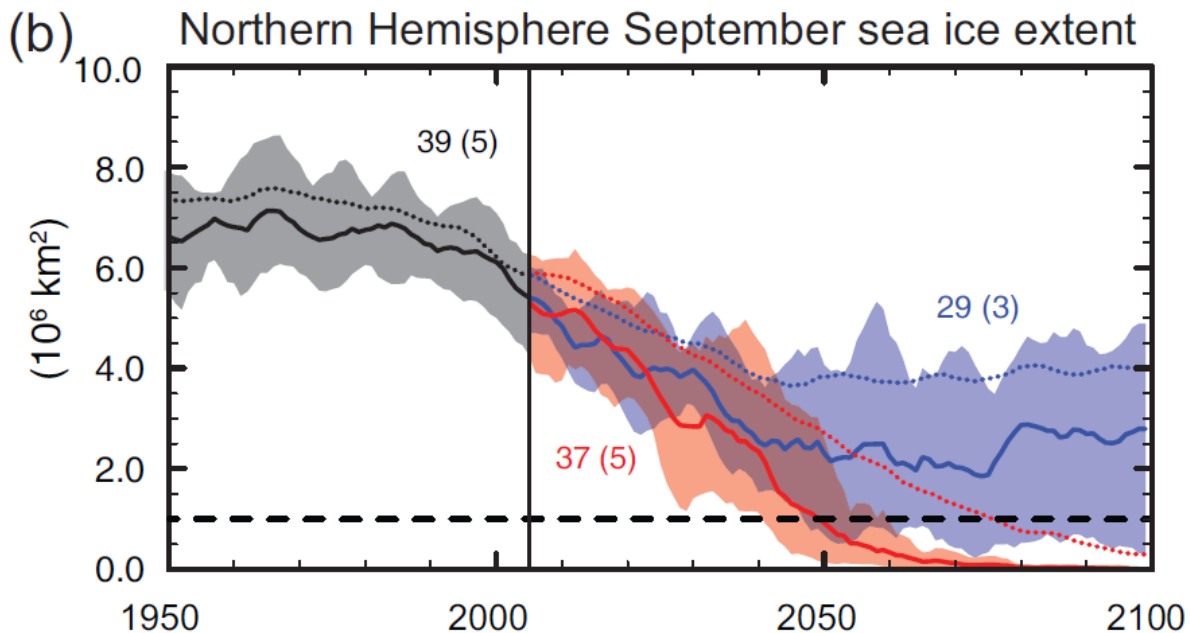
 RCP 6.0	高位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 6.0W/m ²)
 RCP 8.5	高位参照シナリオ (世紀末の放射強制力 8.5W/m ²) 2100年における温室効果ガス排出量の最大排出量に相当するシナリオ

● 21世紀温暖化 予測実験結果

➤ 全球平均
地表気温



➤ 北半球海水
9月

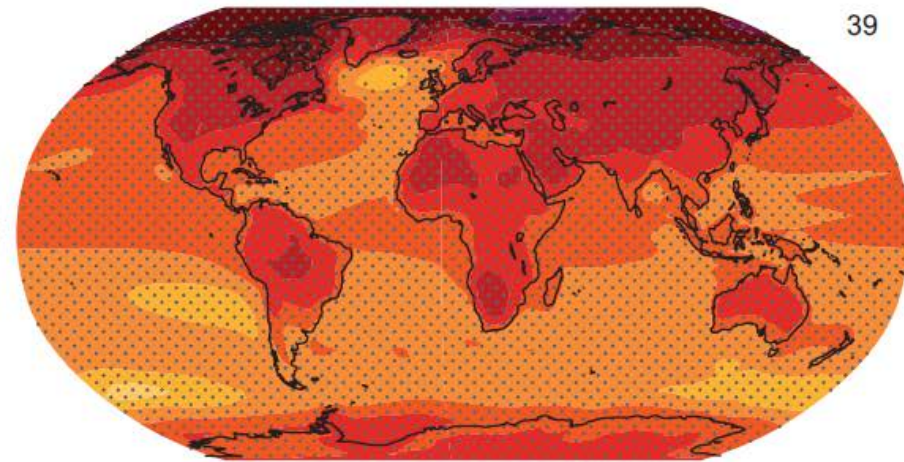
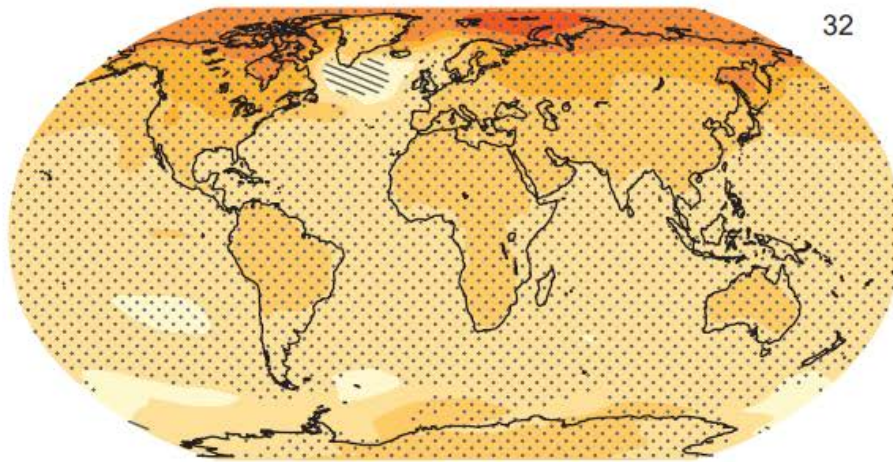


IPCC(2013; Fig. SPM.8)

地表气温变化 RCP 2.6

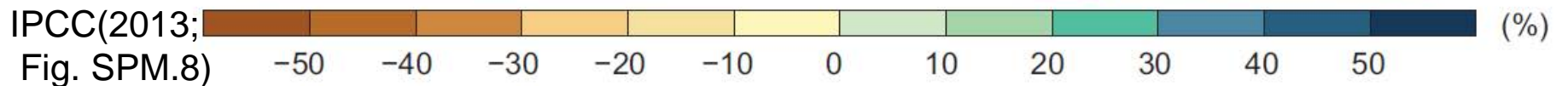
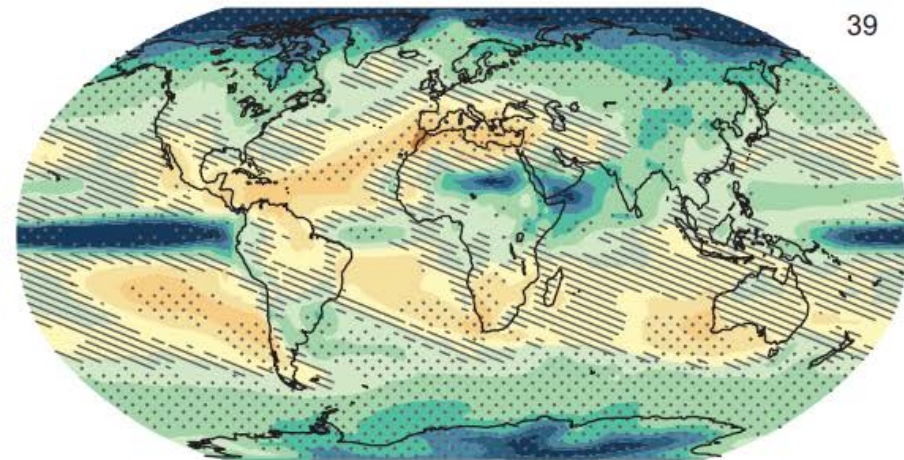
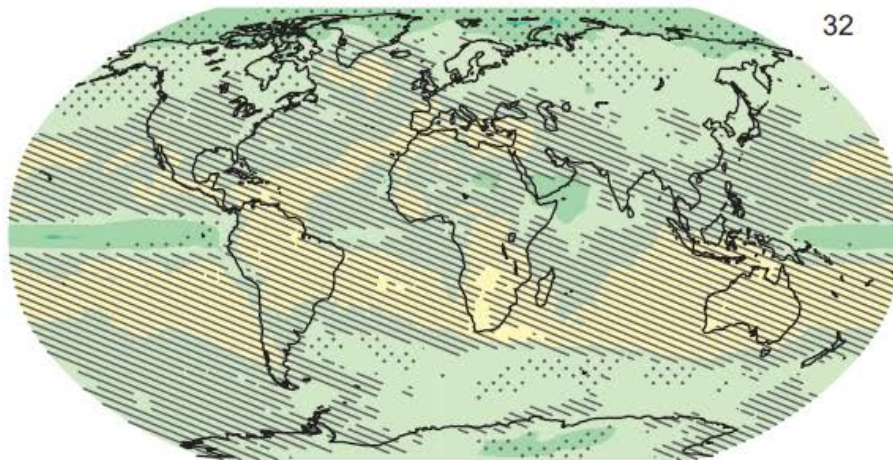
RCP 8.5

(a) Change in average surface temperature (1986-2005 to 2081-2100)



降水量变化

(b) Change in average precipitation (1986-2005 to 2081-2100)

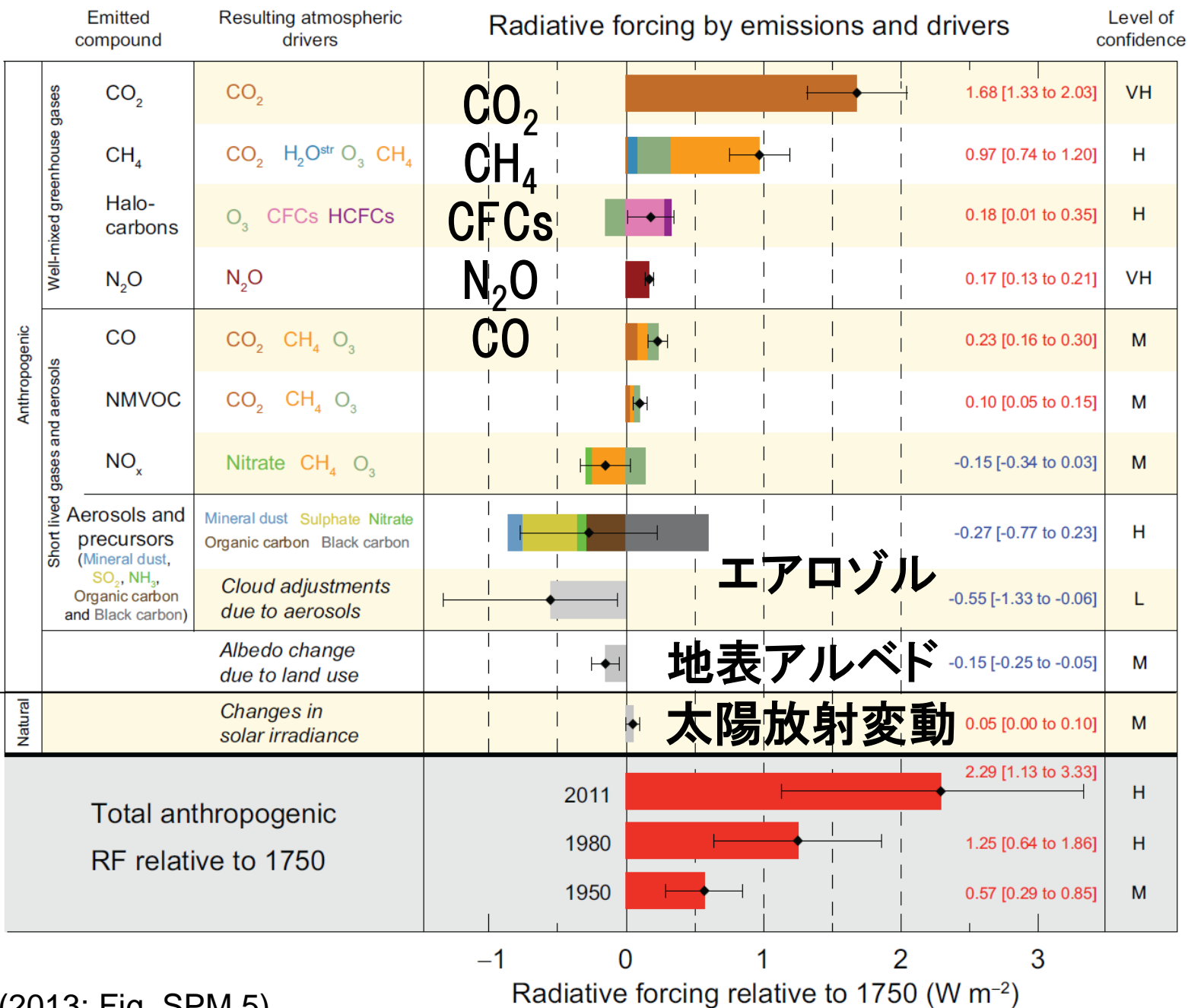


IPCC(2013;
Fig. SPM.8)

● 全球平均放射強制力

人為起源

自然変動

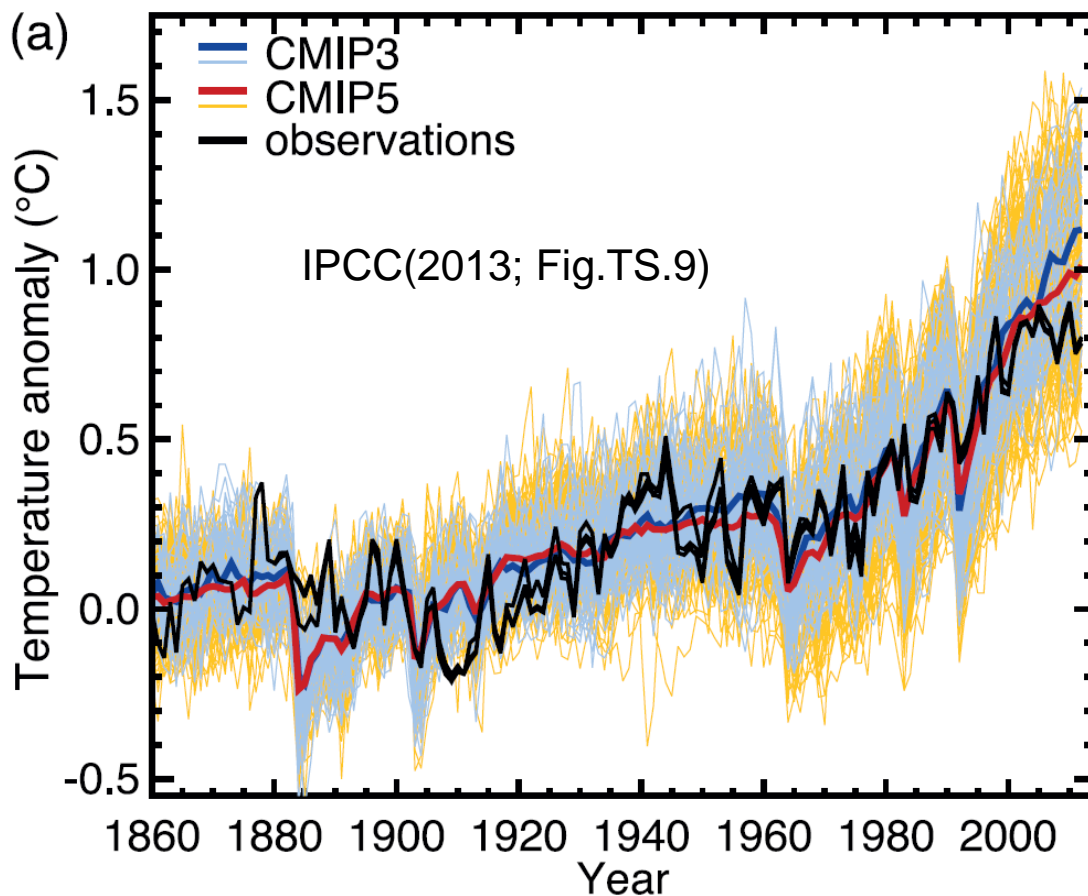


❖ 温暖化予測の不確実性

① モデルが不完全 + 自然内部変動の存在

黒線： 観測

黄色線と水色線： AR5とAR4用の全気候モデル計算の結果



● 自然内部変動

➤ 大気・気候システムの非線型性に起因

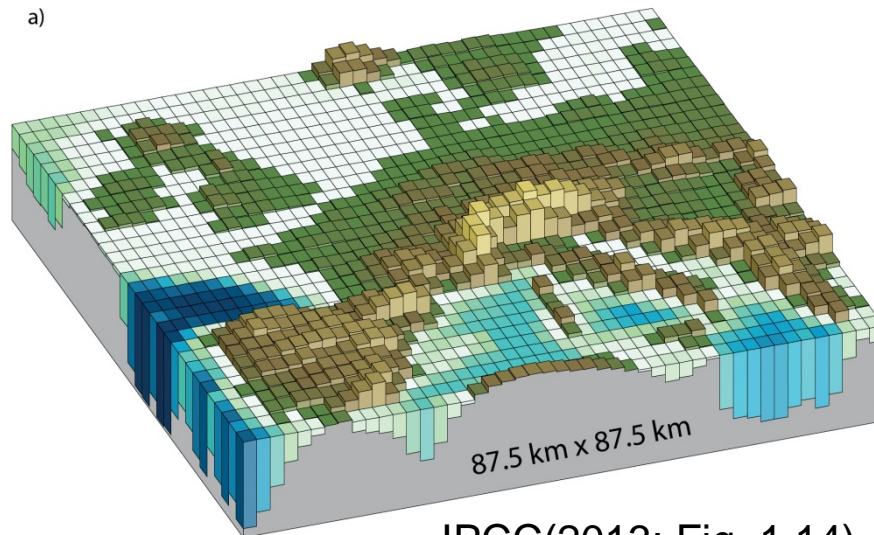
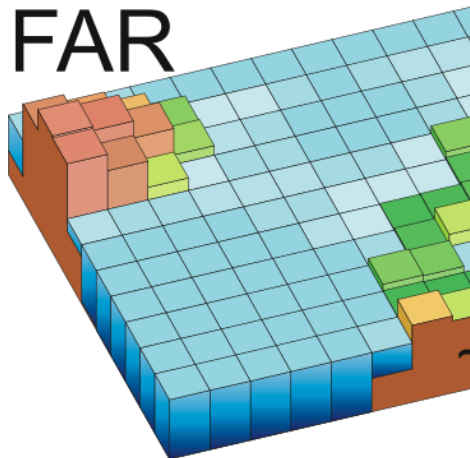
●不確実性の要因(1): モデルの空間分解能

▶ 格子間隔以下の効果のパラメタリゼーションが不完全

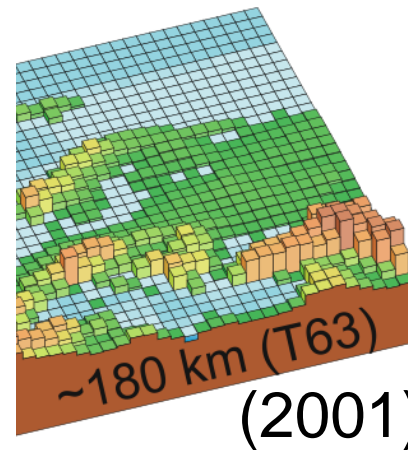
← 多階層の連結変動がよく理解できていない

a)

FAR



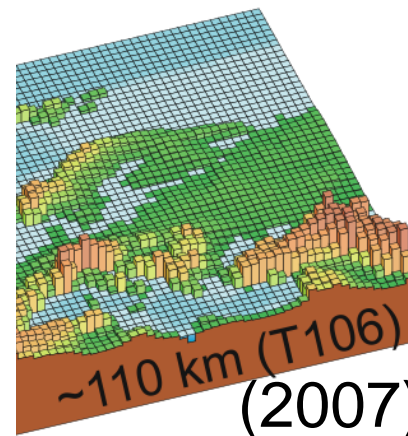
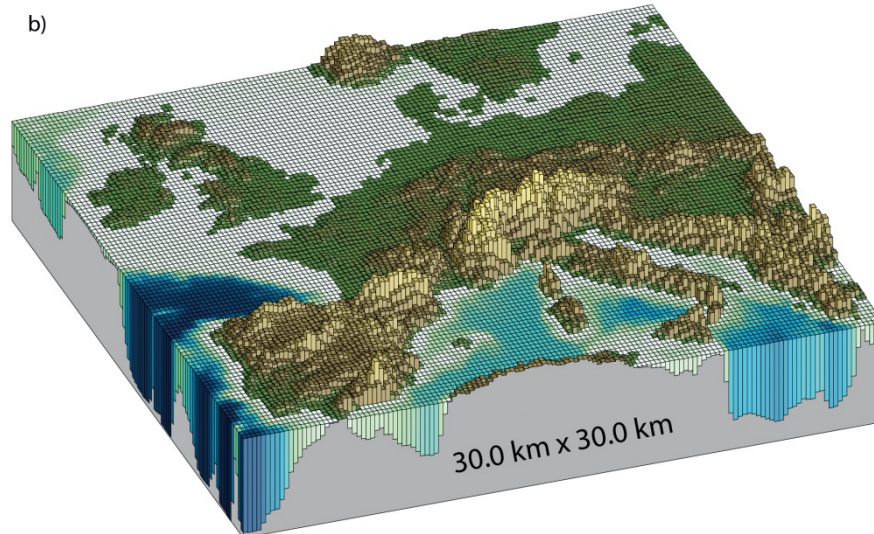
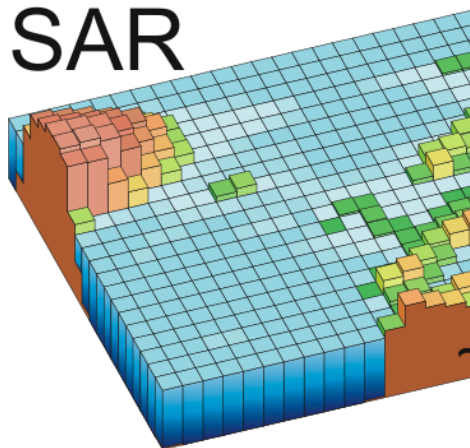
IPCC(2013; Fig. 1.14)



(2001)

b)

SAR

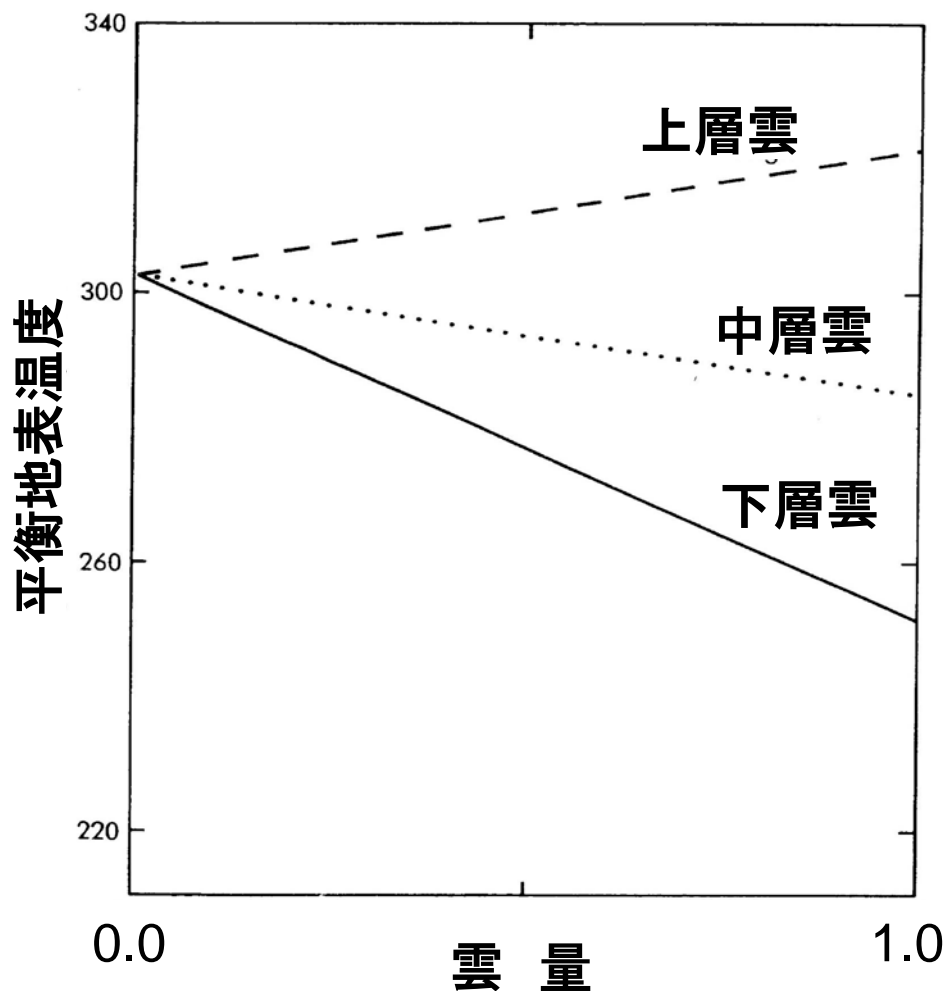


(2007)

IPCC(2007; Fig. 1.4)

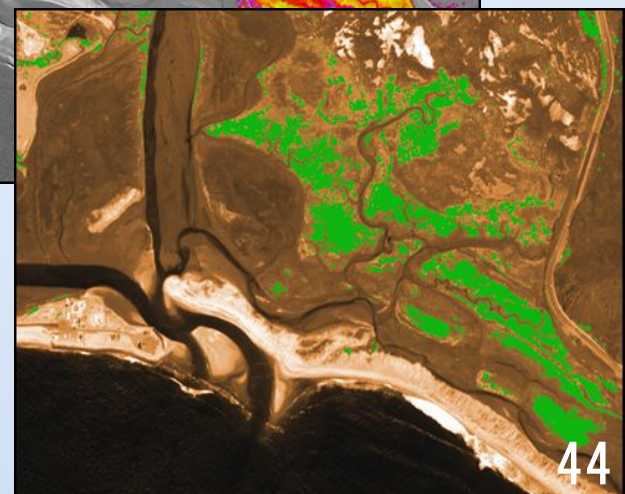
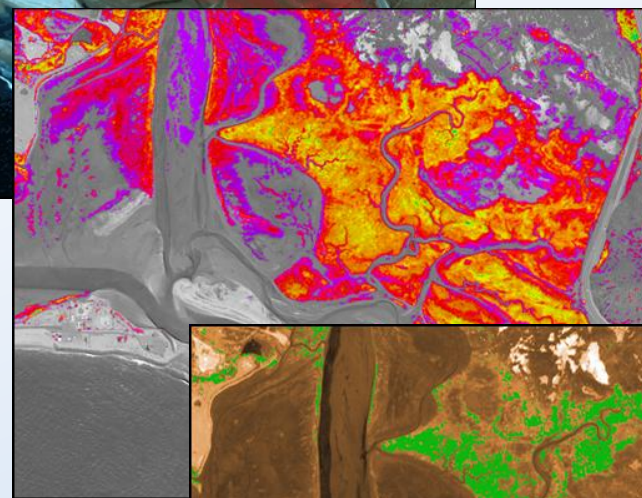
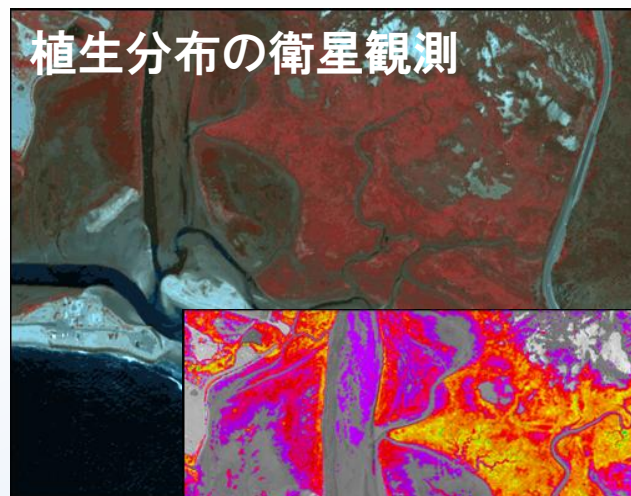
●不確実性の要因(2): 雲の効果

- (水平規模) ≪ (格子間隔): パラメタリゼーションが必要
- とくに、熱帯域では積雲対流が駆動源
- タイプと量に依存した温暖化・寒冷化効果



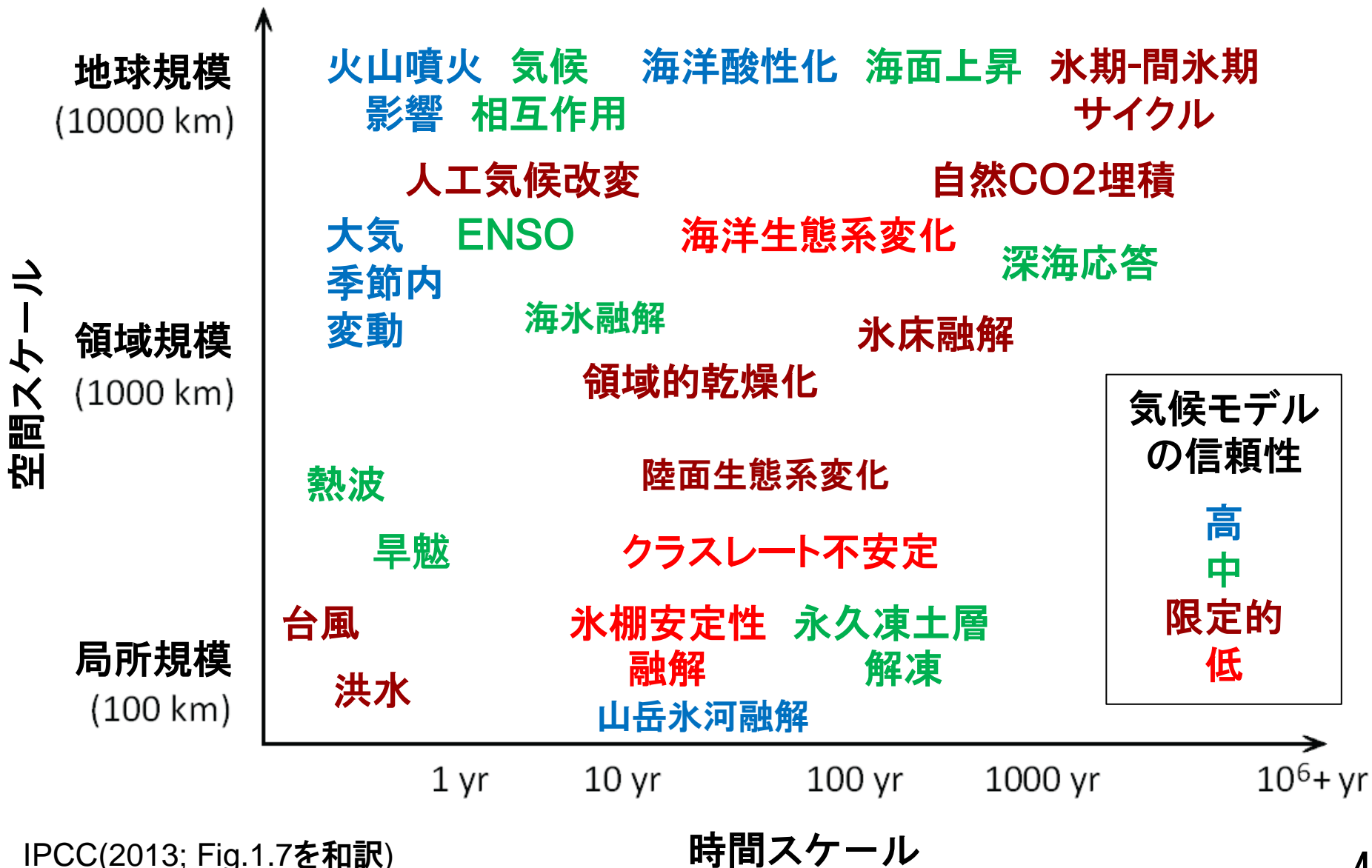
●不確実性の要因(3): 支配法則定式化の困難さ

- 極度に非線型: 陸水の流れ、海氷の割れ目、...
- 物理法則の範疇外: 植生の消長など



QuickBird —
Copyright © 2010
DigitalGlobe

● 主要な気候現象の時間空間スケールと気候モデルの信頼性・不確実性



❖ 数値天気予報が外れる訳

① モデルが不完全

② たとえモデルが完全でも、大気運動が「カオス」

観測的な制約により、初期値が完全に決まらない

→ 初期値誤差の増大により、予測には限界がある

❖ 気候予測の不確実性

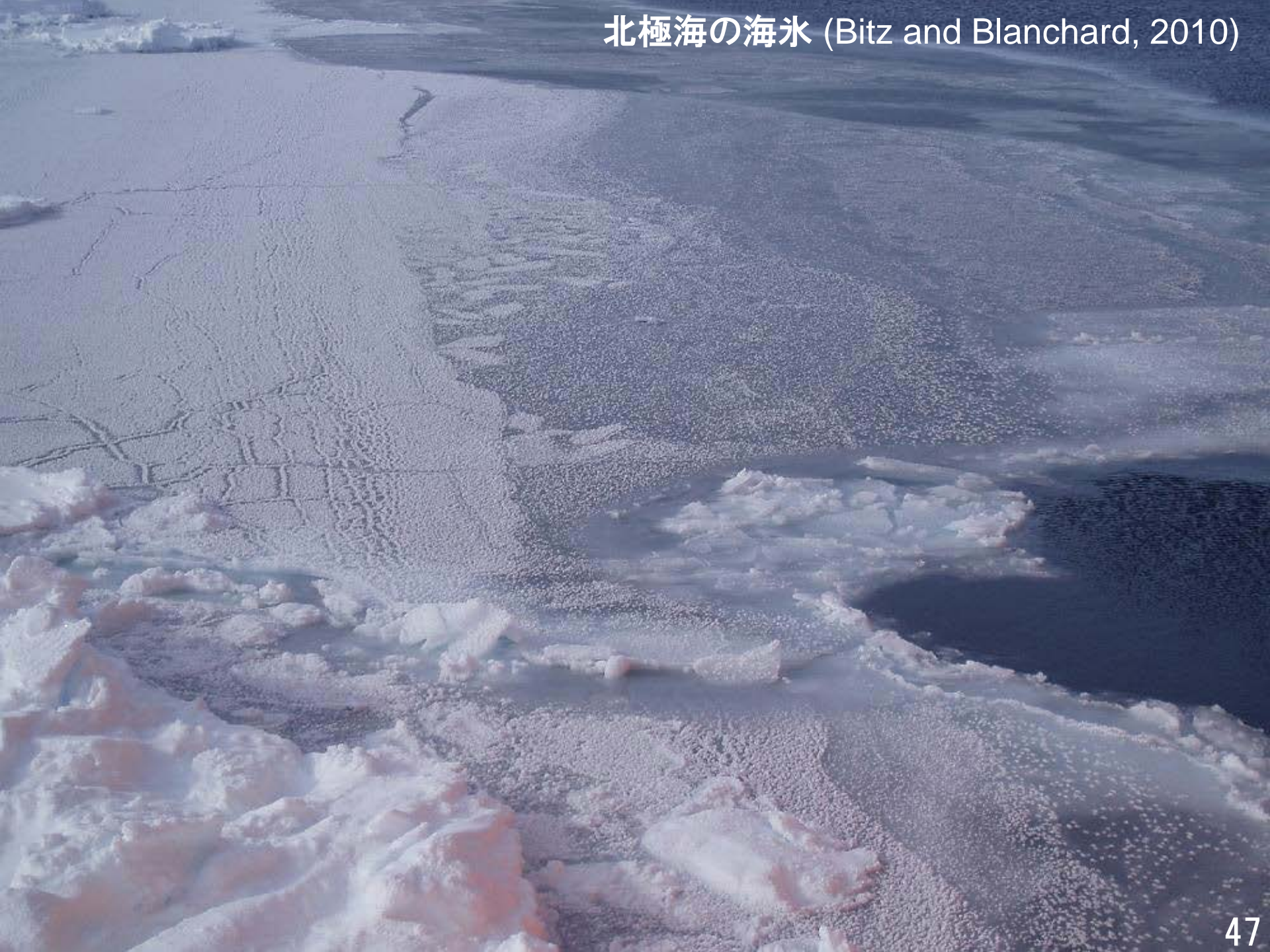
① モデルが不完全

モデルの空間分解能、雲の効果、支配法則定式化の困難さ、...

❖ モデル検証の違い

数値天気予報モデルは、日々検証されてきたモデル

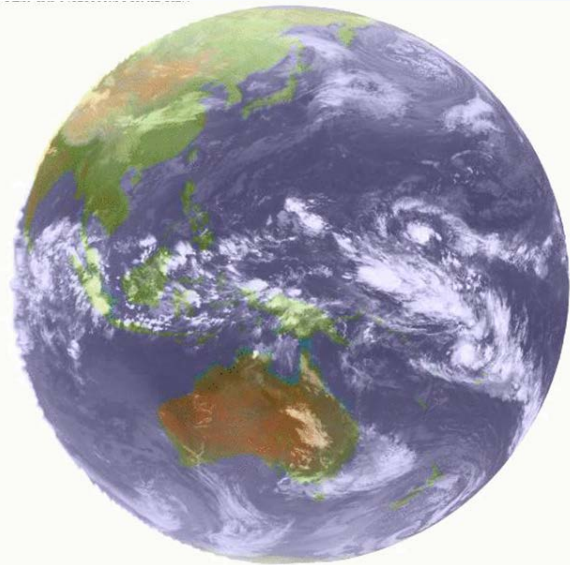
気候モデルは、限られた数の20世紀気候変動再現実験



3.1 おわりに — 学術・科学技術と社会

❖ 気象学の学術的課題

- 多階層連結変動
- 物理 \leftrightarrow 物質
- 非線型複雑系
- (系外)惑星大気
-

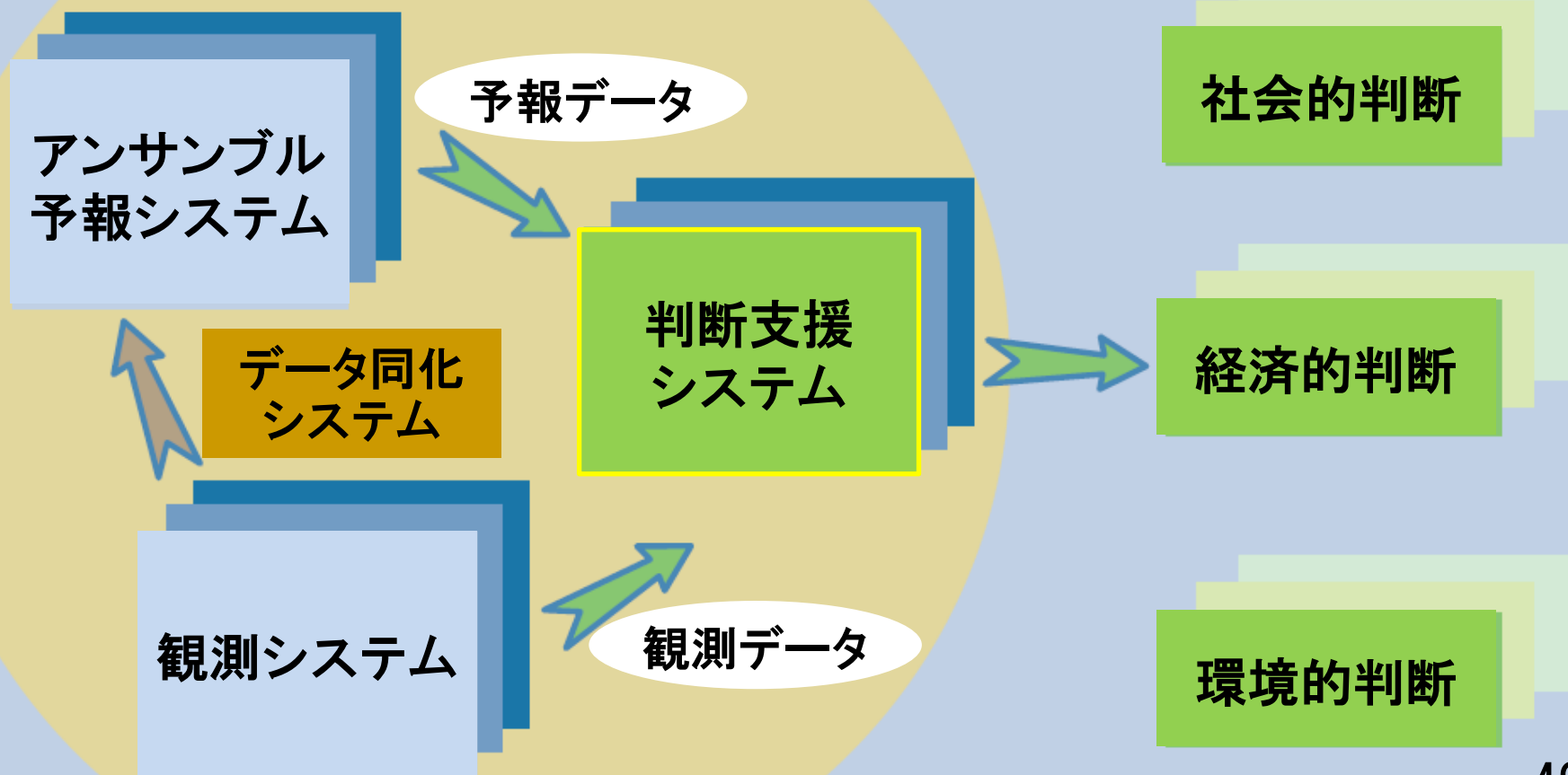


❖ 科学技術的課題 — 数値天気予報の近未来形

● WMO THORPEX プロジェクト (2005~2014)

- 社会的影響の大きい極端気象の早期予測システムの開発
- 観測・予報データの高度利用法を開発

気象データ管理システム



❖不確実性を伴う予測と社会の関係

●数値天気予報、気候予測、放射性物質拡散

➤それぞれの不確実性

●不確実な情報の情報価値

➤「無謬性の科学」という範疇の外

➤確率的な扱い

➤事象の経験頻度

○台風、地震、巨大火山噴火、の予測の同異

●科学と社会

➤信奉と懐疑

➤科学的知識(リテラシー)の普及の大切さ

➤自分で考えることの重要性

➤参加型共同研究の可能性

3.2 おわりに — 国際社会の中で、 グローバル化の時代に

❖ 2007-9年度 科学技術振興調整費

● アジア科学技術協力の戦略的推進

自然災害への対応に資する防災科学技術分野の研究開発
『東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究』



❖ 国際プロジェクトの年月(余田の個人的状況)

- 2003-07年度 京都大学21世紀COEプログラム
「活地球圏の変動解明」(KAGI21)
- 2009-13年度 グローバルCOEプログラム
「極端気象と適応社会の生存科学」
- 2011-17年度 博士課程教育リーディングプログラム
「グローバル生存大学院連携プログラム」
- 2015-17年度 JSPS研究拠点形成事業
「海洋大陸における気候変動下の極端気象に関する国際共同研究」
- 2018-20年度 JSPSインドネシアとの共同研究
「海洋大陸における気候変動下の極端気象に関する基礎学術研究とその社会的応用」
- 2016年10月～ WCRP/SPARC activity SATIO-TCS
Stratospheric and tropospheric influences on tropical convective systems

❖ KAGI21 International Summer/Spring Schools

- 国際的な次世代人材育成
- 総計 22 か国から 306 人の院生・若手研究者
- 2004～07: ITB Bandung, 2週間x4回
- 2009, 11, 13, 15, 18: 琵琶湖畔研修施設・京大, ~10日間x5回
 - 第1回: 2004年7月11～26日; 13か国から50人の参加者



July 22, 2004

❖ KAGI21 ISSs



❖時代背景

●観測技術の進歩

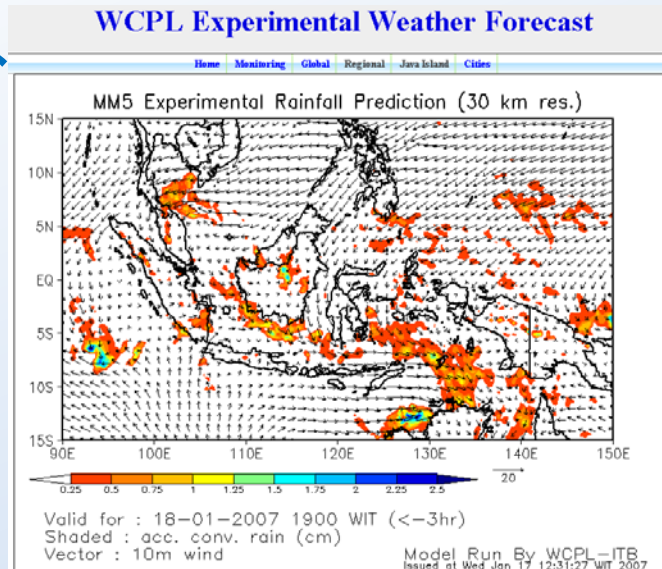
京都大学赤道大気レーダー@西スマトラ, インドネシア



●計算環境の改善

➤コンピュータ、
ネットワーク

バンドン工大
での実験的
数値天気予報



❖ 国際的な研究者ネットワークづくり

- 防災科学技術の普及と減災意識の啓発
- アジアのなかの日本



❖ チャレンジ

- 熱帯域アジアの研究者と協働して**熱帯気象学**を発展
- 研究者ネットワークの強化と次世代育成



ご清聴
ありがとう
ございました



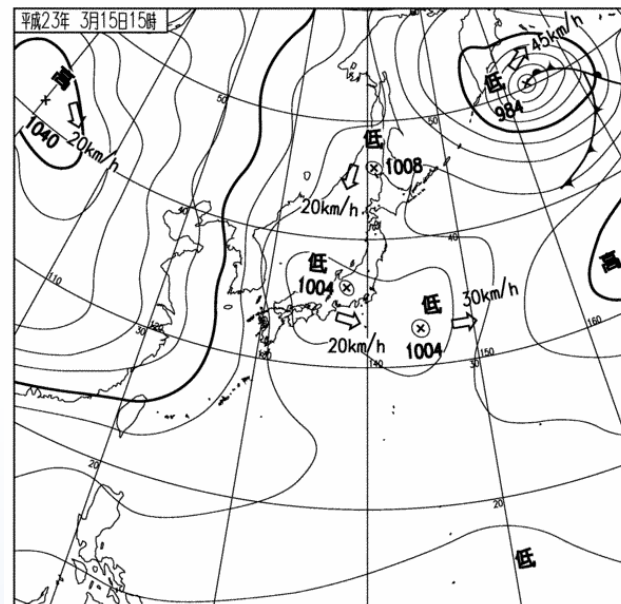
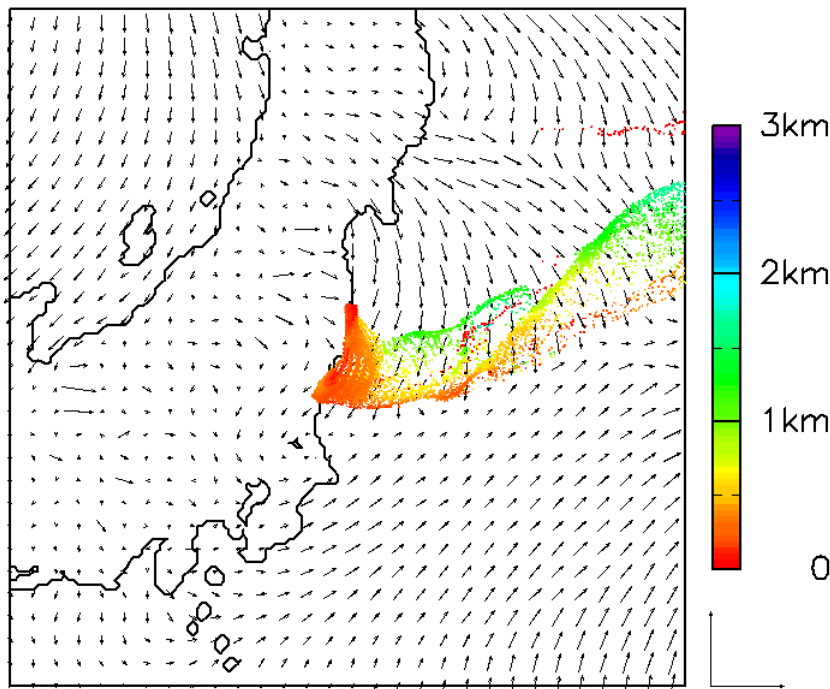
ISS022E052281

❖放射性物質の移流拡散予測

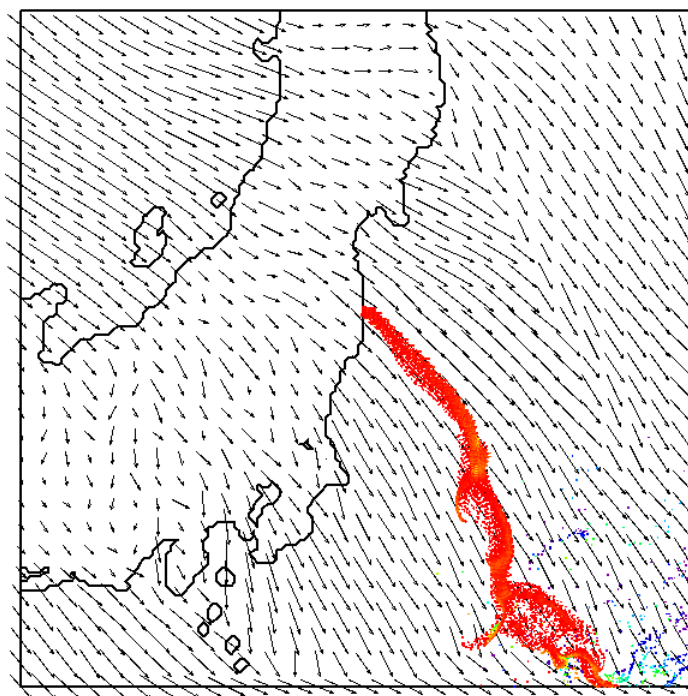
- 流れ場の予測の不確実性
- 粒子運動予測の不確実性

➤ラグランジュカオス

2011-03-15 00:00:00 JST



2011-03-16 18:00:00 JST



❖線香の煙の時間変化

●スナップショットと時間平均

