

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）

- a. 学際融合について
- b. 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

3. おわりに（今の時代をながめて）

- a. 学術・科学技術と社会
- b. 国際社会の中で、グローバル化の時代に

1. a はじめに — 学際融合について

❖ 稲盛財団 研究助成

● 研究対象分野: **自然科学**、人文・社会科学

- 平成4年度助成金「地球環境情報処理システムの開発」
- 当該年度の京都賞授賞対象分野に関する研究を優先

❖ 京都賞

● 先端技術 部門

- エレクトロニクス、バイオテクノロジー・メディカルテクノロジー、材料科学、情報科学

● 基礎科学 部門

- 生物学、数理科学、**地球科学**・宇宙科学、生命科学

● 思想・芸術 部門

- 音楽、美術、映画・演劇、思想・倫理

❖ 京都大学 学際融合教育研究推進センター

- 2010年3月発足
- 複数の学問領域を横断する学際的な教育研究を機動的かつ柔軟に推進する実施体制の整備
- 新領域を開拓する学際融合的な教育研究活動の支援

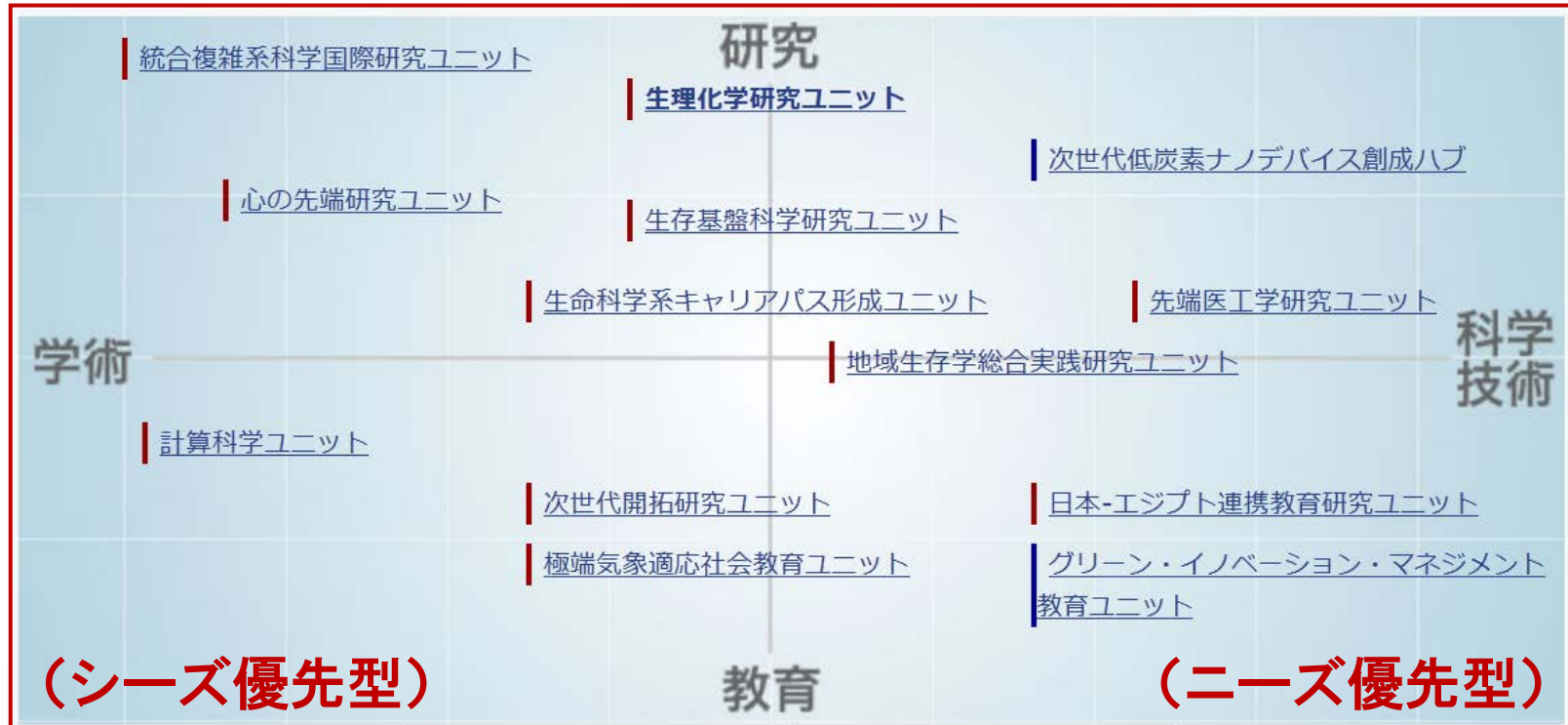
『新たな学問の芽を見つけ、育み、広く知ってもらおう』



Center for the Promotion of
Interdisciplinary Education and Research

<http://www.cpier.kyoto-u.ac.jp/>

❖現在支援中の教育研究ユニット(17)



●研究 vs 教育

➤現在 — 未来 自分 — 次世代

●学術 vs 科学技術

➤シーズ優先型 — ニーズ優先型

石井 紫郎, 2008.3: 「学術基本法」の制定を目指して. 学術月報/日本学術振興会編. 61(3), 162-164, ISSN 0387-2440

❖ 日本学術振興会 学術システム研究センター

● JSPS ↔ 科学技術振興機構 (JST)

● 学術分野 (科学研究費の4系、8分野・2領域)

➤ 人文社会系: 人文学、社会科学

➤ 理工系: 数物系科学、化学、工学

➤ 生物系: 生物学、農学、医歯薬学

➤ 総合・新領域系: 総合領域、複合新領域 → 学際融合

独立行政法人 JSPS 日本学術振興会
Japan Society for the Promotion of Science

文字サイズ変更 小 中 大 サイト内検索 サイトマップ

一般の方へ 研究者/機関担当者の方へ English

日本学術振興会について 事業のご案内 事業の成果 調達情報 職員採用情報 情報公開 アクセス方法お問い合わせ

TOP > 事業のご案内 > 学術システム研究センター ENGLISH

メニュー
MENU

- トップ
- 概要
- 組織
 - ▶ 所長ごあいさつ
 - ▶ 組織図・構成
- 運営委員会
- プログラムディレクター

学術システム研究センター
Research Center for Science Systems

学術システム研究センターは、第一線の研究者による学術の振興に関するシンクタンクとして、日本学術振興会事業への様々な提案・助言を行うとともに、科研費等の審査システム・評価業務に参画しています。

<http://www.jsps.go.jp/j-center/index.html>

1. b はじめに — 地球科学について

❖ 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

❖ 総合・新領域系 > 複合新領域

● 環境学

➤ 環境動態解析

● 社会・安全システム科学

➤ 自然災害科学

❖ 学術 vs 科学技術

● 知的興味 vs 社会的要請

❖ 国際宇宙ステーションからの眺め

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



<http://www.youtube.com/watch?v=ZGaQXx5IDWo&feature=related>
<http://eol.jsc.nasa.gov/Videos/CrewEarthObservationsVideos/>

❖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/crew-7/html/iss007e16249.html>

❖地球科学の特徴

●具体物を対象とした科学

➤宇宙科学や生物科学との類似性

○観察し記載する： 博物学（Meteorology）

○成り立ちや動態を理解する： 近代科学（Atmospheric Science）

➤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/飛翔体/ブイ）

→ 新たな**現象の発見**

→ 新たな**認識・理解**

➤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

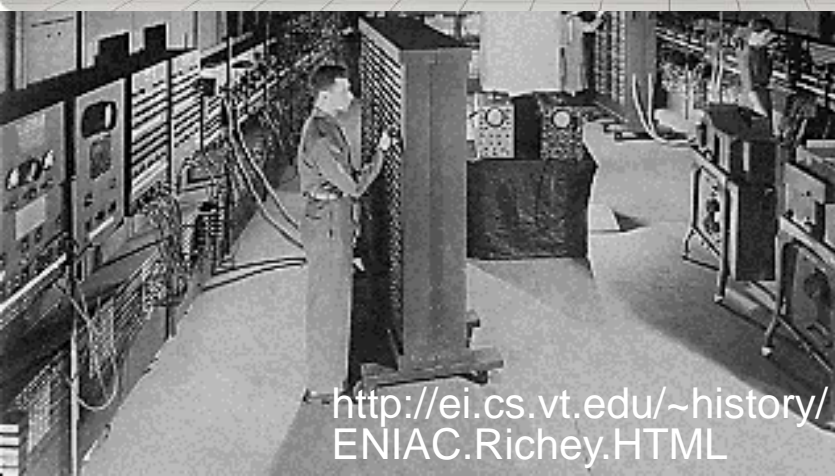
→ 新たな**発見・認識・理解**

❖ コンピュータ技術の進歩

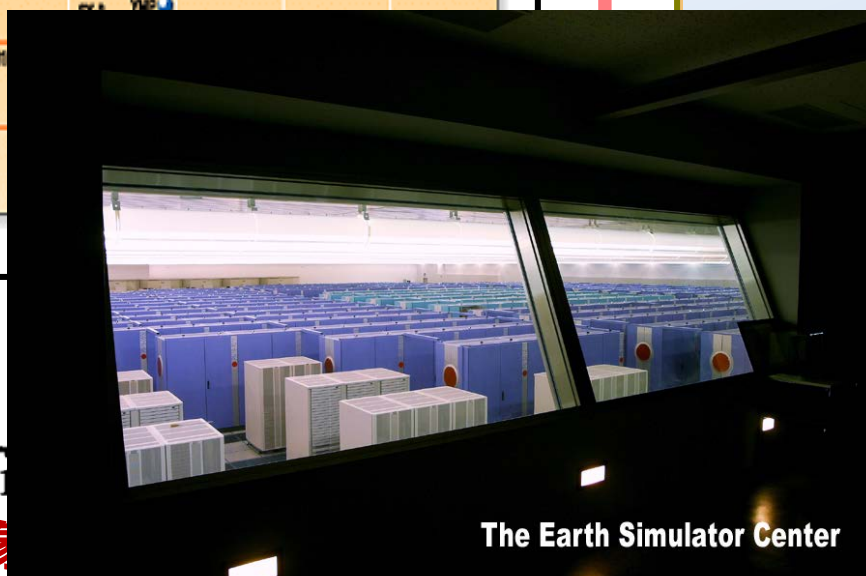
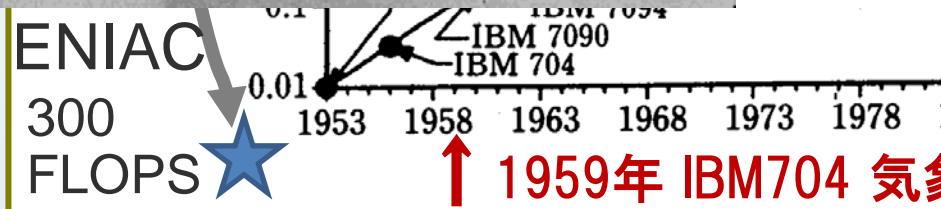
● 半世紀以上にわたる計算能力の指数関数的成長



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



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



The Earth Simulator Center



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）

❖ ワークショップ 「天気予報からカオスへ」

● 組織委員:

山口 昌哉、山元 龍三郎、廣田 勇、佐藤 文隆

● Edward Norton Lorenz (MIT)

*“How Good Can Weather Forecasting Become?
– The Start of a Theory”*

「天気予報はどこまで当たるか — ある理論の誕生」

● Shigeo Yoden (Kyoto U.)

“Local Lyapunov Stability and Atmospheric Predictability”
「局所リアプノフ安定性と予測可能性」

..... 約20年の歳月

● Yoden (2007)

“Atmospheric Predictability” 「大気の予測可能性」
(日本気象学会設立125周年記念論文集に収録)

この20年間は 「カオスから天気予報へ」 の時代

2. a 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)

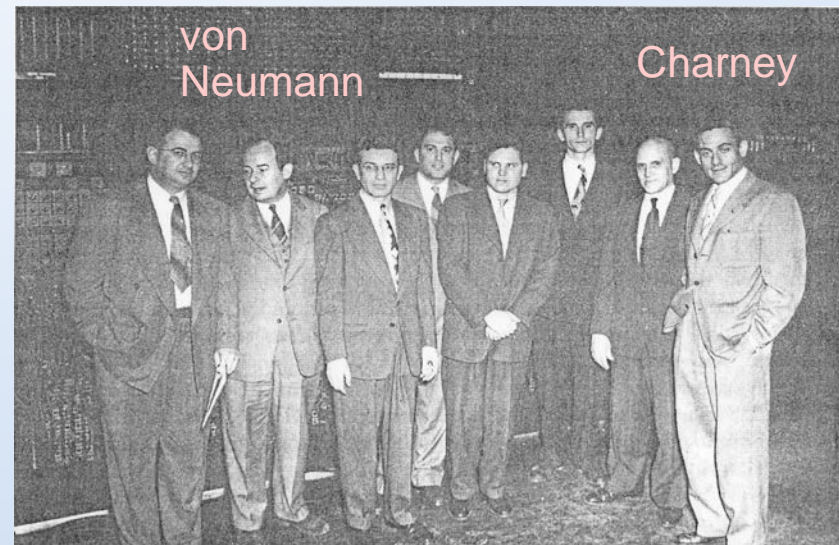
“Weather Prediction by Numerical Process”

- 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:

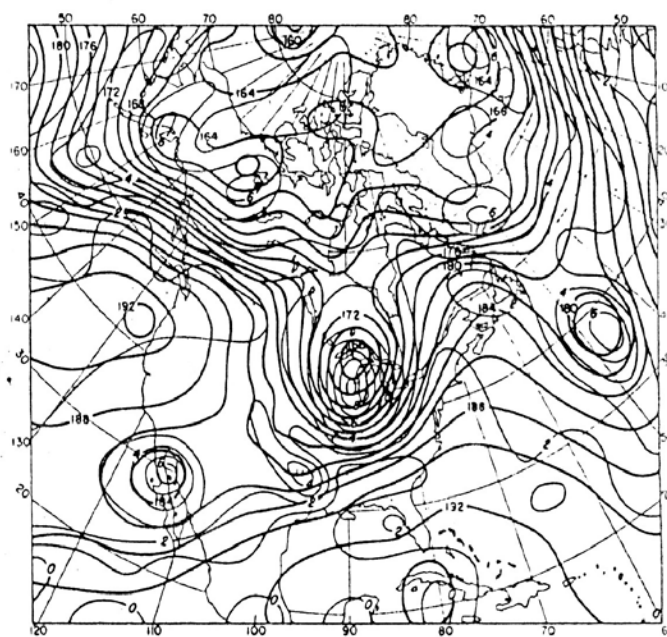
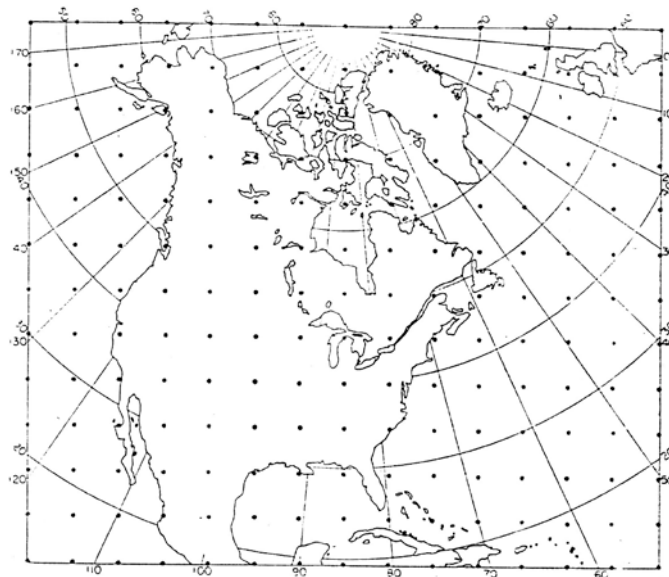
$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta_s z) = \frac{\partial \eta}{\partial s_1} \frac{\partial z}{\partial s_2} - \frac{\partial \eta}{\partial s_2} \frac{\partial z}{\partial s_1} = J_s(\eta, z), \quad (8)$$

where η is the absolute vorticity

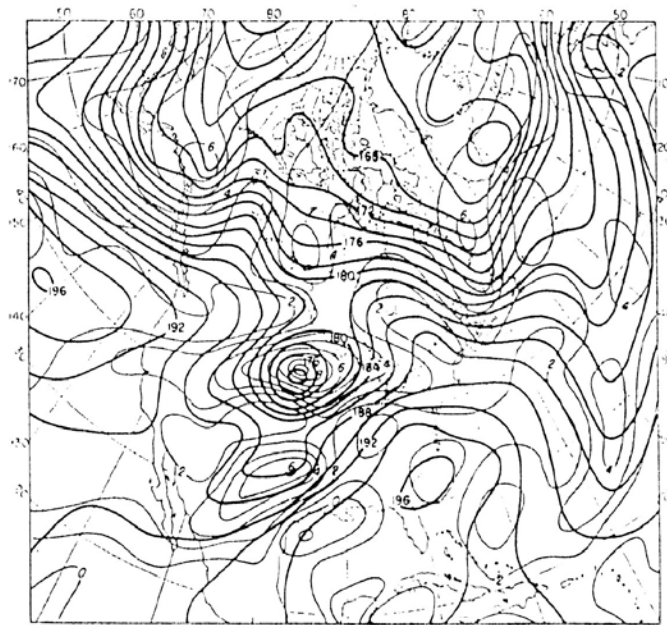
$$\eta = \frac{g}{f} \Delta_s z + f. \quad (9)$$

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)

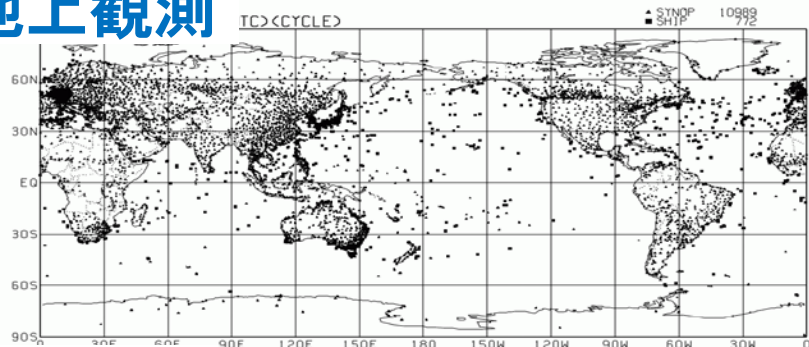
❖今日の数値天気予報

●実況の把握

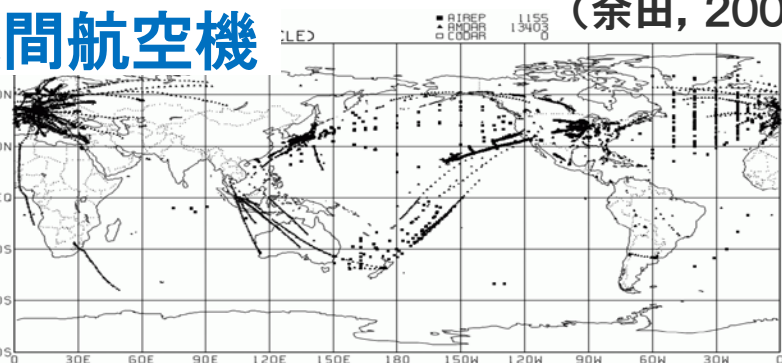
予測データ+観測データ

➤各種観測データ → WMOデータ収集システム GTS

地上観測

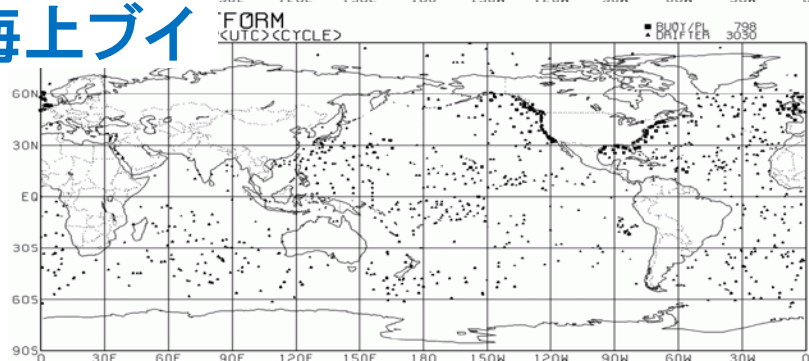


民間航空機

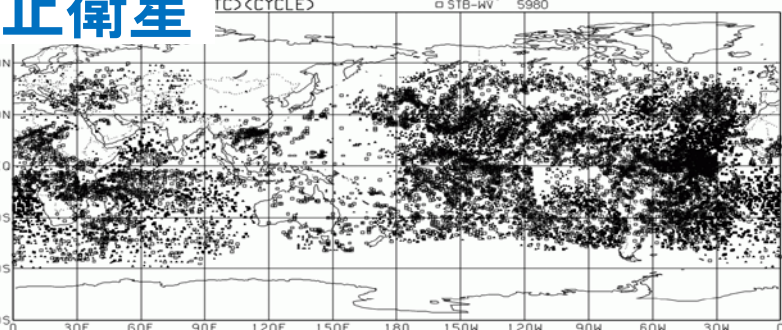


(余田, 2004)

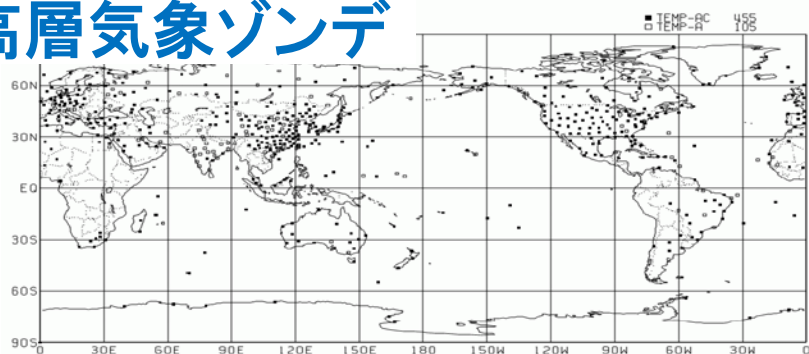
海上ブイ



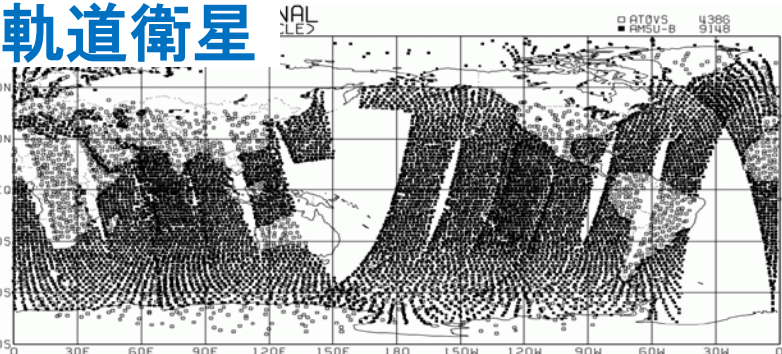
静止衛星



高層気象ゾンデ



極軌道衛星

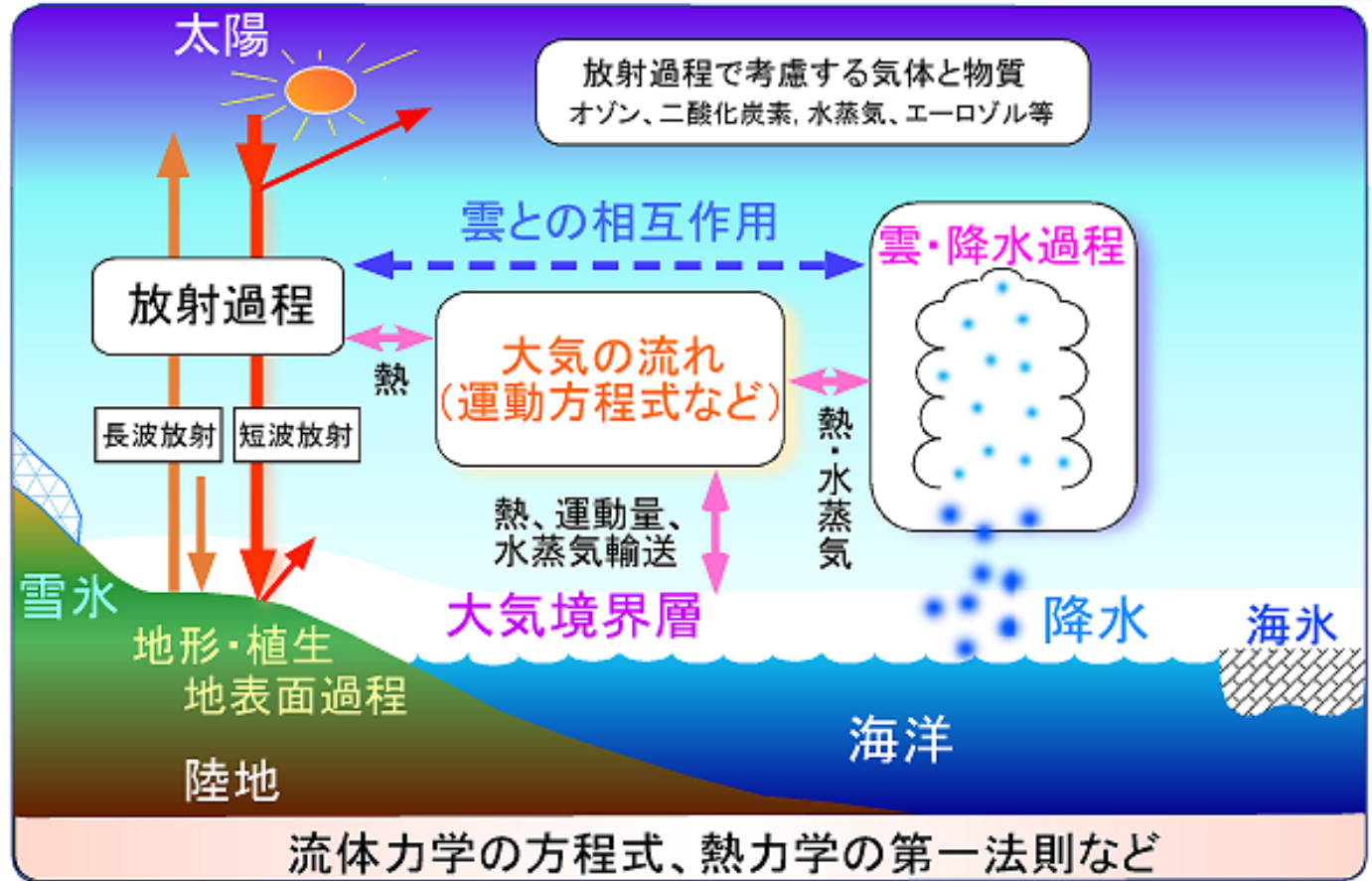


❖今日の数値天気予報

- 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

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

- 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

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

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

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

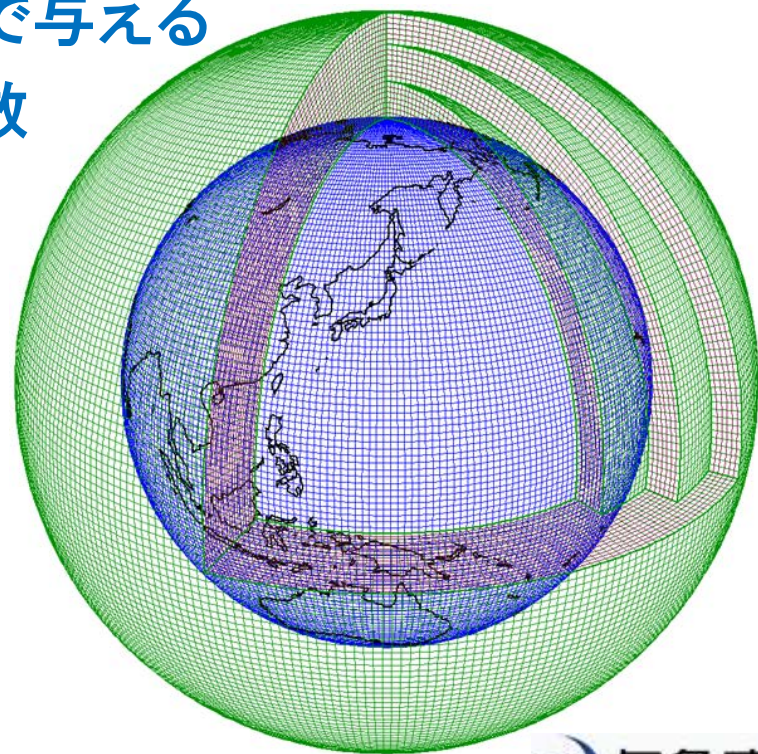
未知変数は、水平速度 \mathbf{v} , 鉛直 p 速度 ω ,
ジオポテンシャル Φ , および温度 T

+ 水蒸気収支方程式

水蒸気、雲、雨、雪、霰、雹、の間の相変化・形態変化を記述

● 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
- $\sim 960 \times (1, 920 \sim 20) \times 60 \times 6$ 変数
 \sim 南北格子 \times 東西格子 \times 鉛直 \times 変数
 $= 1, 312, 360 \times 60 \times 6$ 変数
 $= 472, 449, 600$
- \sim 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

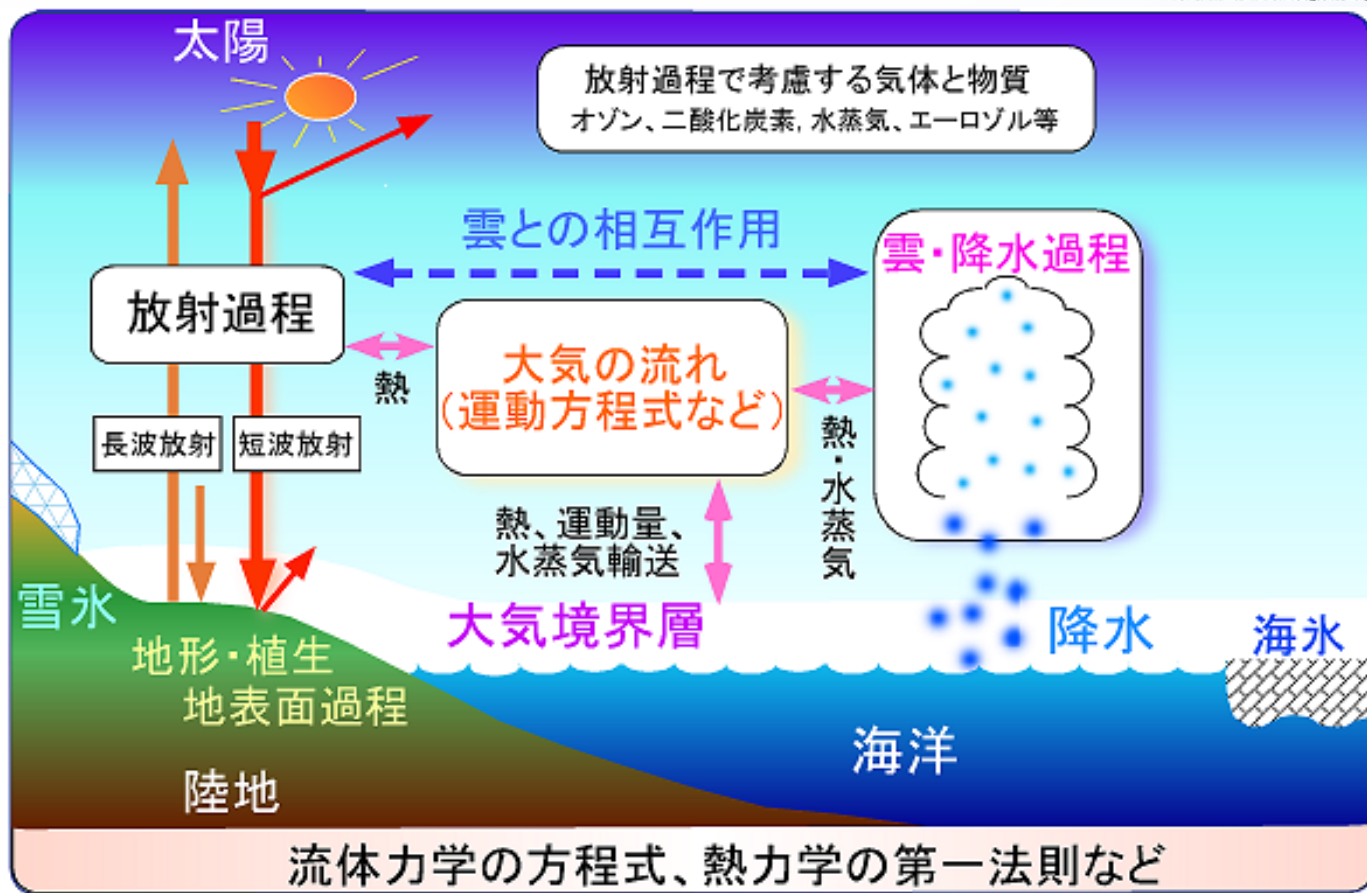
- 現在の状態: $x(t) \sim$ 5億個の数値データ
- 10分先の値を計算: $\Delta x / \Delta t = F(x) \rightarrow x(t + \Delta t)$
- $6 \times 24 \times 10 = 1440$ 回繰り返して、10日先の値を計算

❖今日の数値天気予報

- 実況の把握
- 将来の予測

予測データ+観測データ

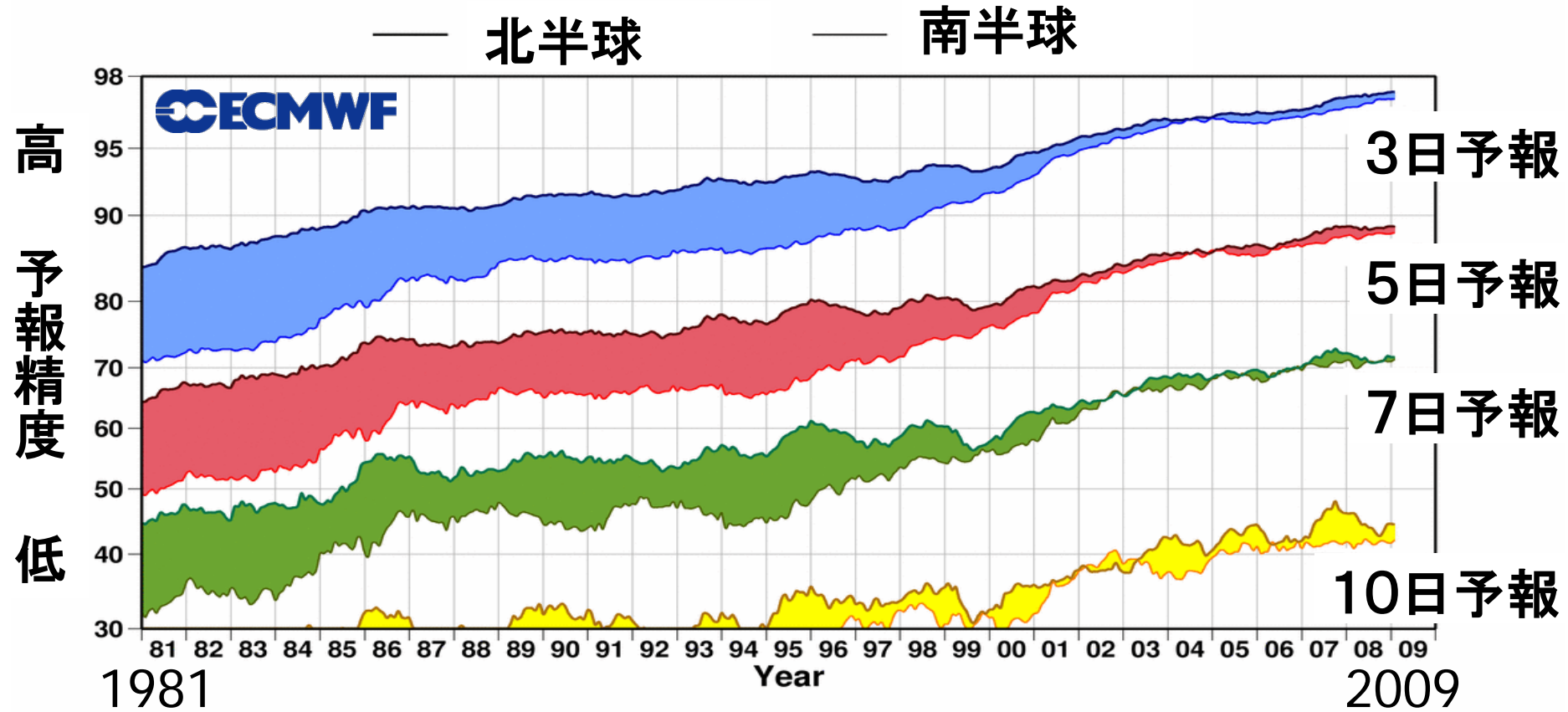
データ同化システム
数値予報モデル



- 予報情報提供

数値予報による予想天気図

❖ 数値予報精度の向上



● 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、...

2. b 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

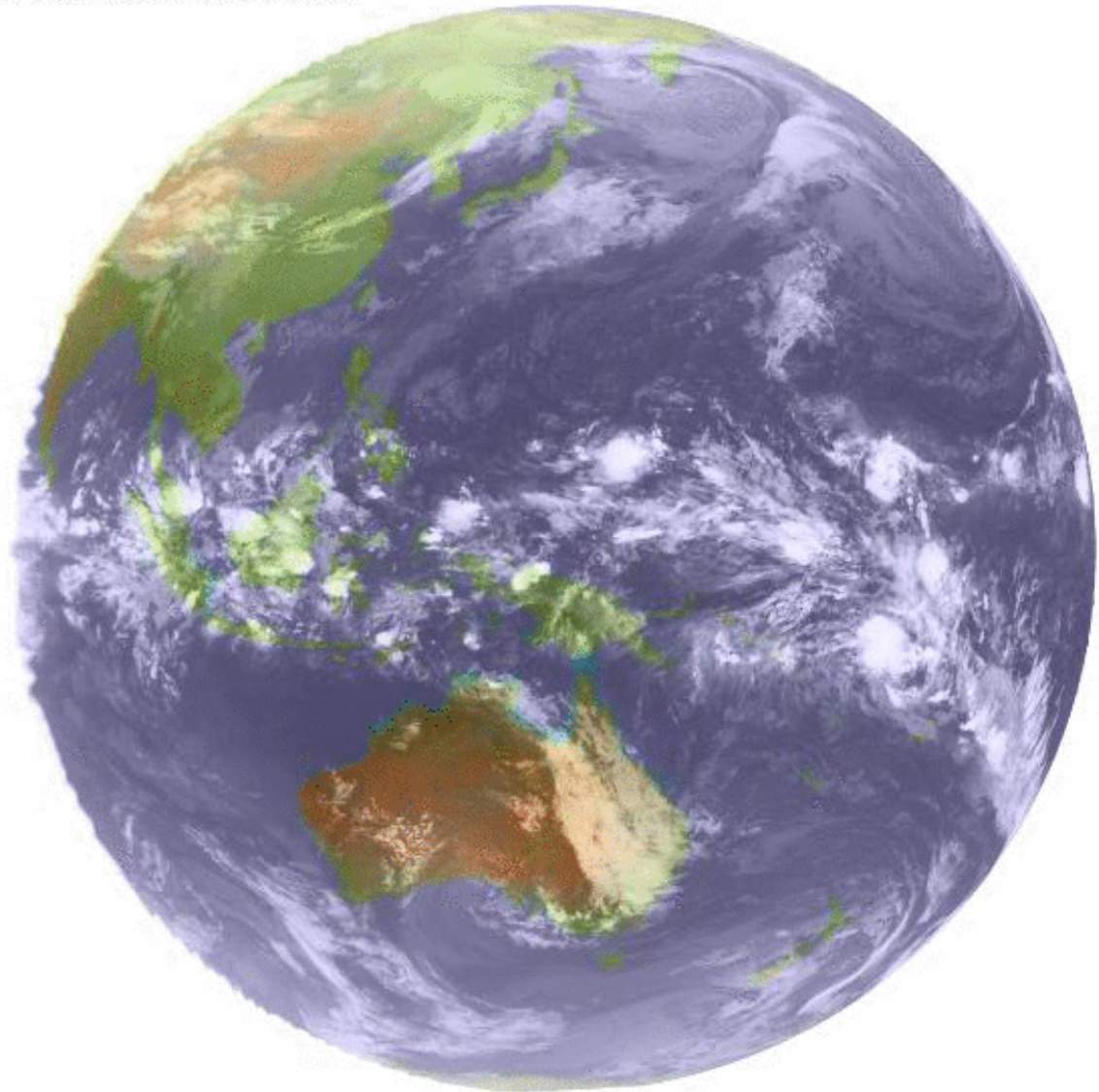
- 赤外線(IR)
- 2004年12月
10～14日

● 温帯/寒帯

- ジェット気流
- 低気圧・高気圧
- 前線

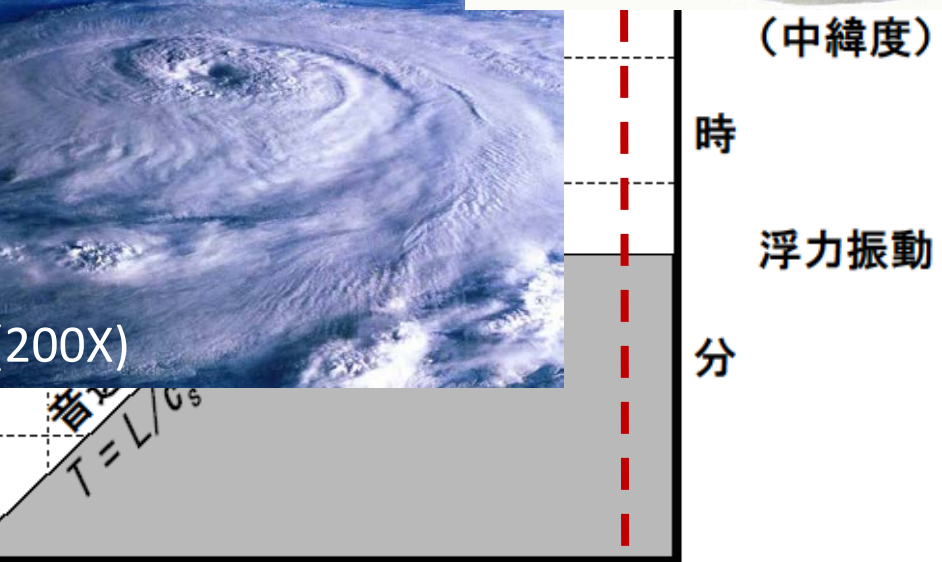
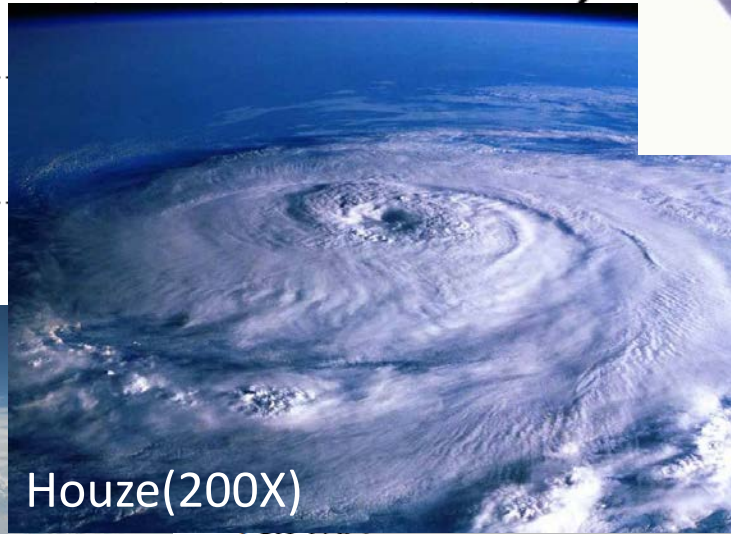
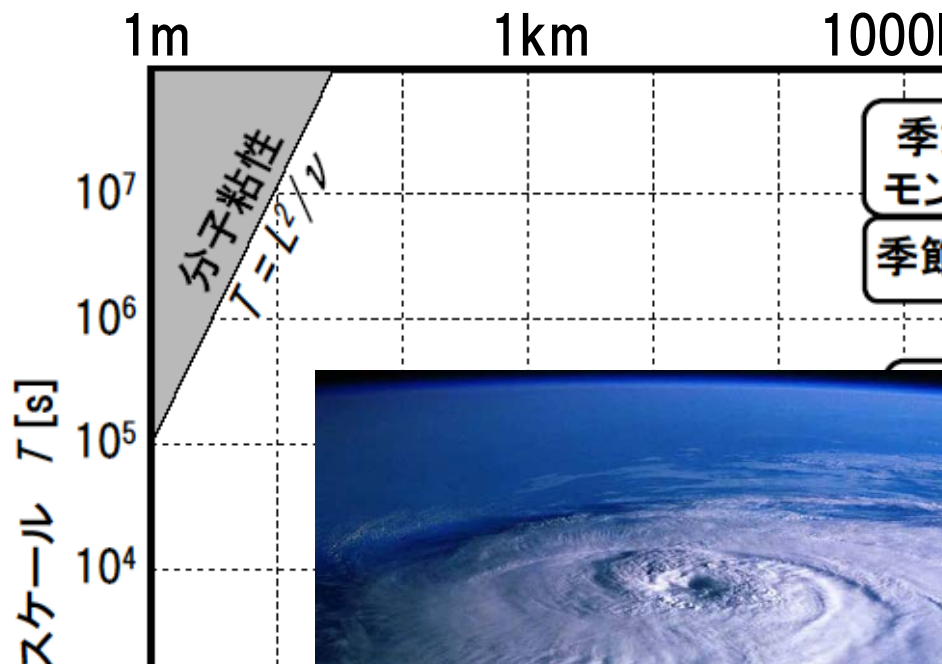
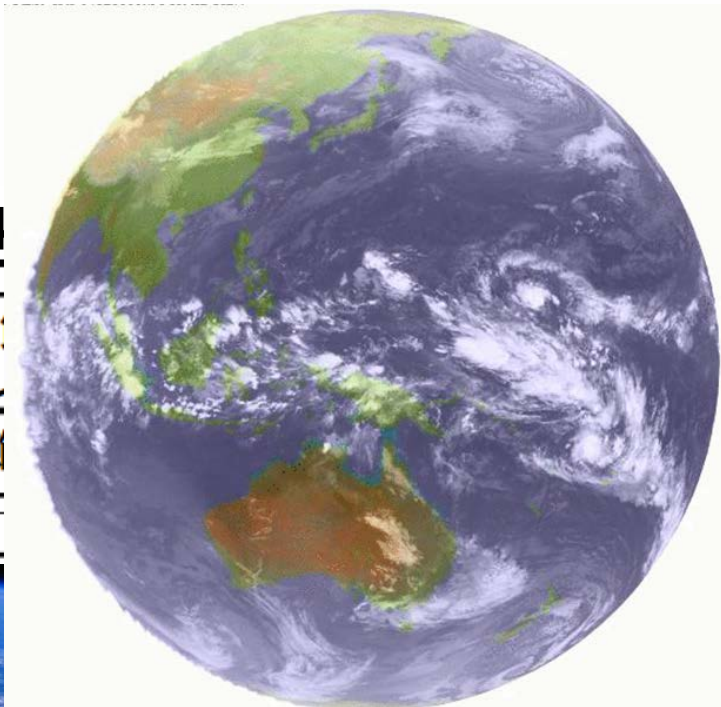
● 熱帯

- 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



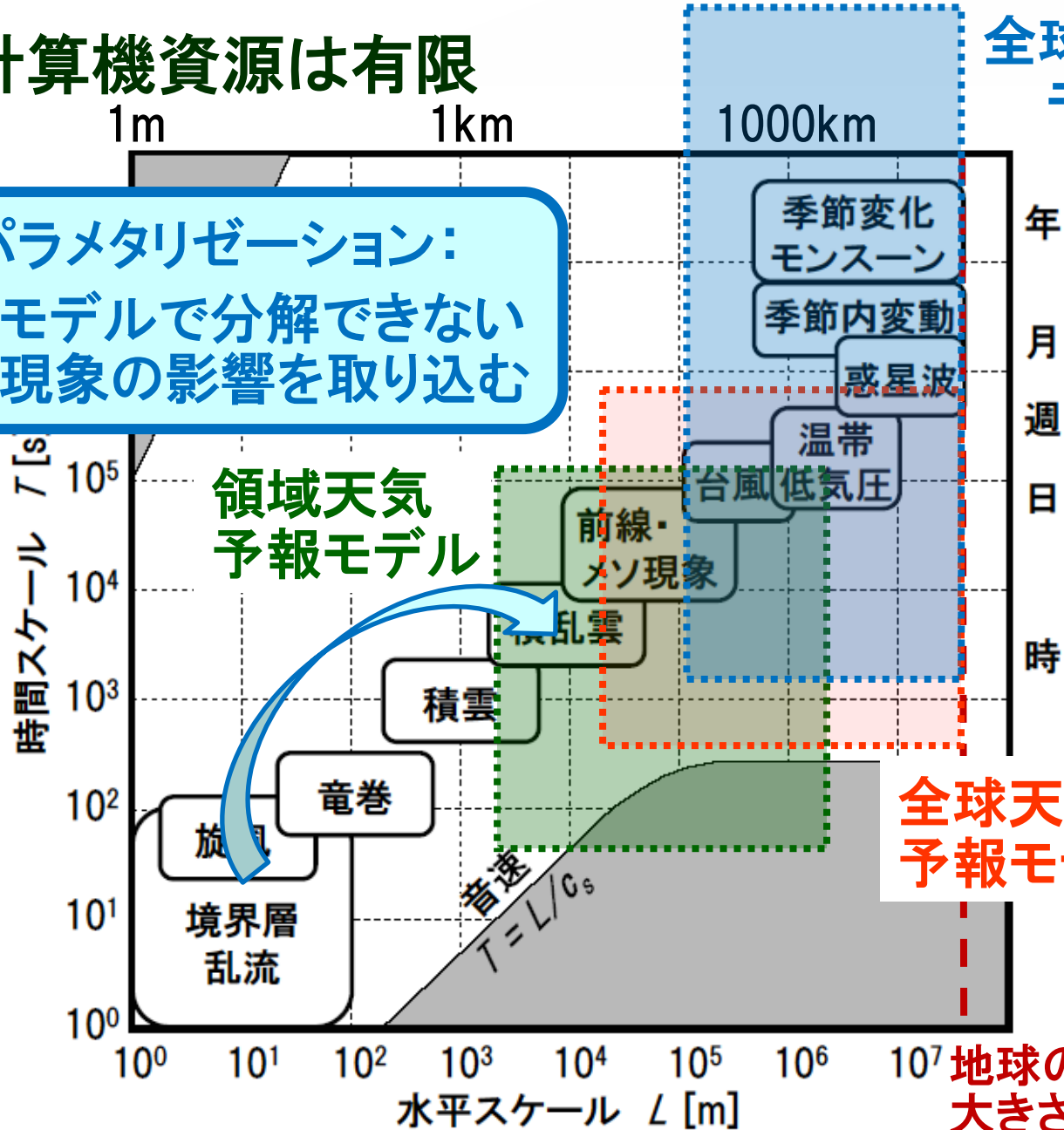
地球の
大きさ

❖ 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

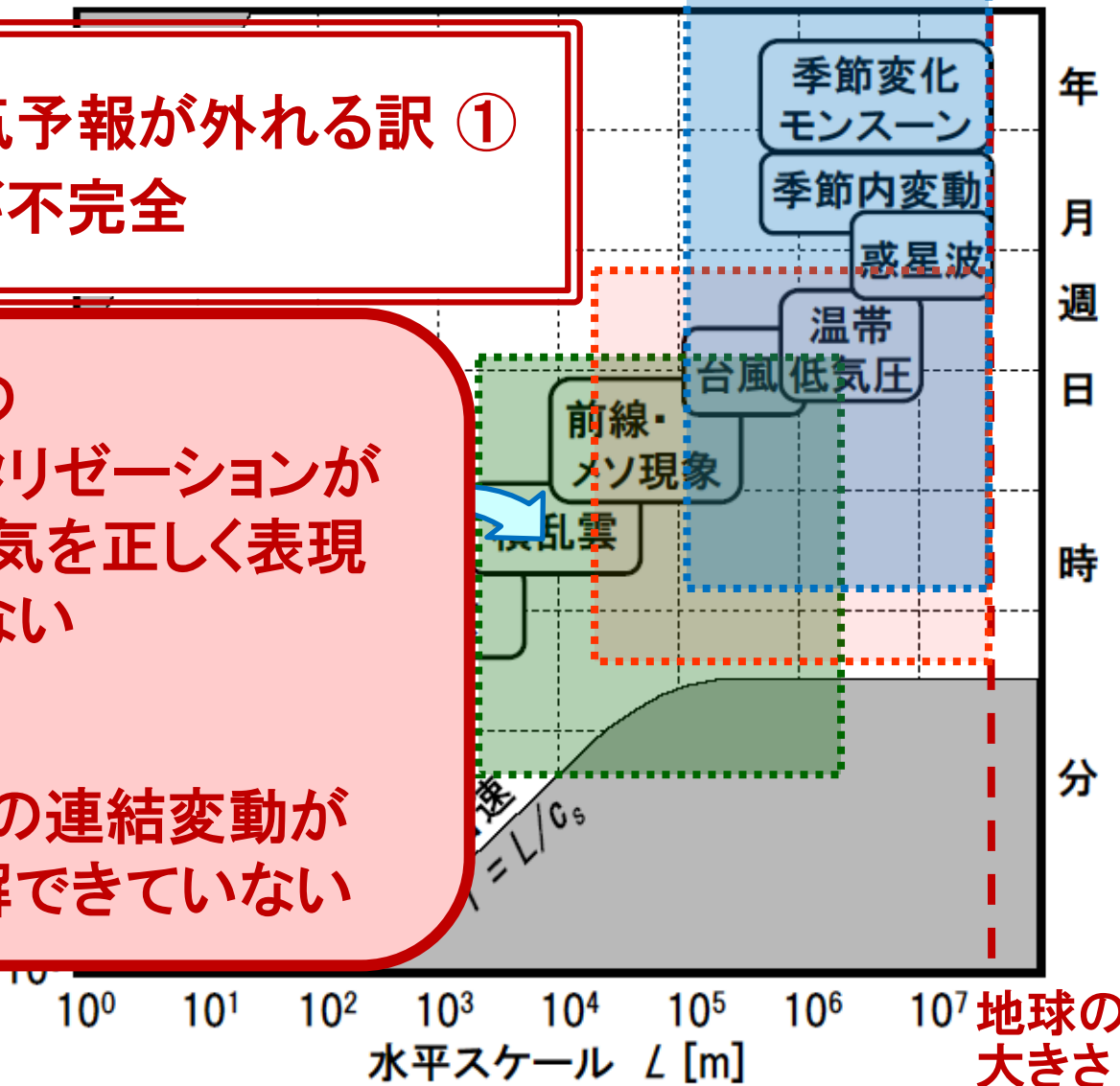
1000km

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



地球の
大きさ



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

❖ 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」

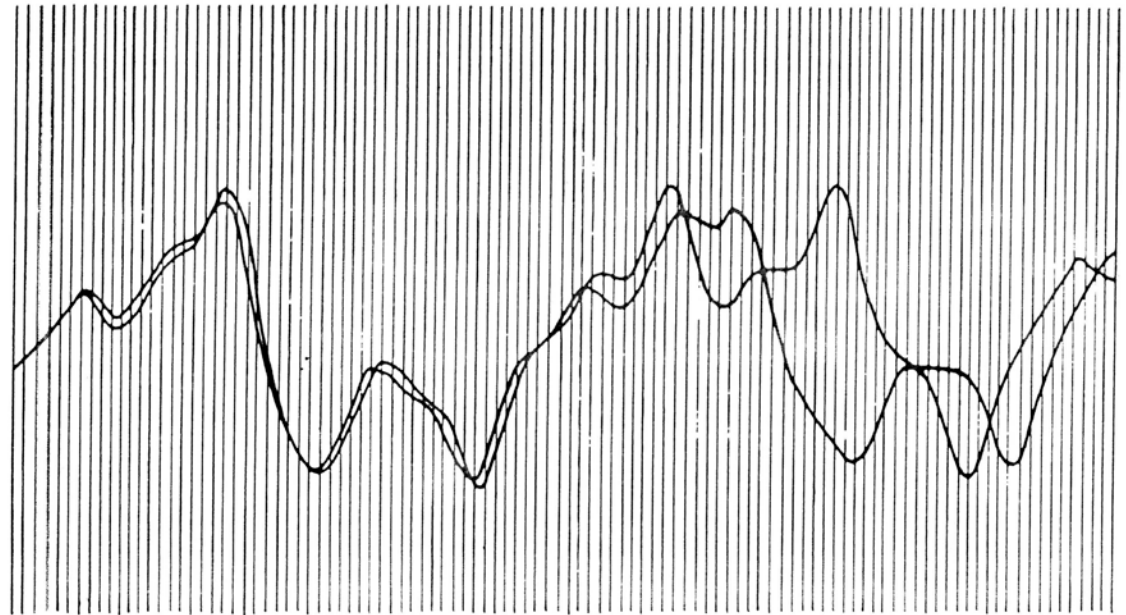
● Lorenz (1963)

“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



Edward N. Lorenz / Adolph E. Brotman

Gleick (1987)

→ Time

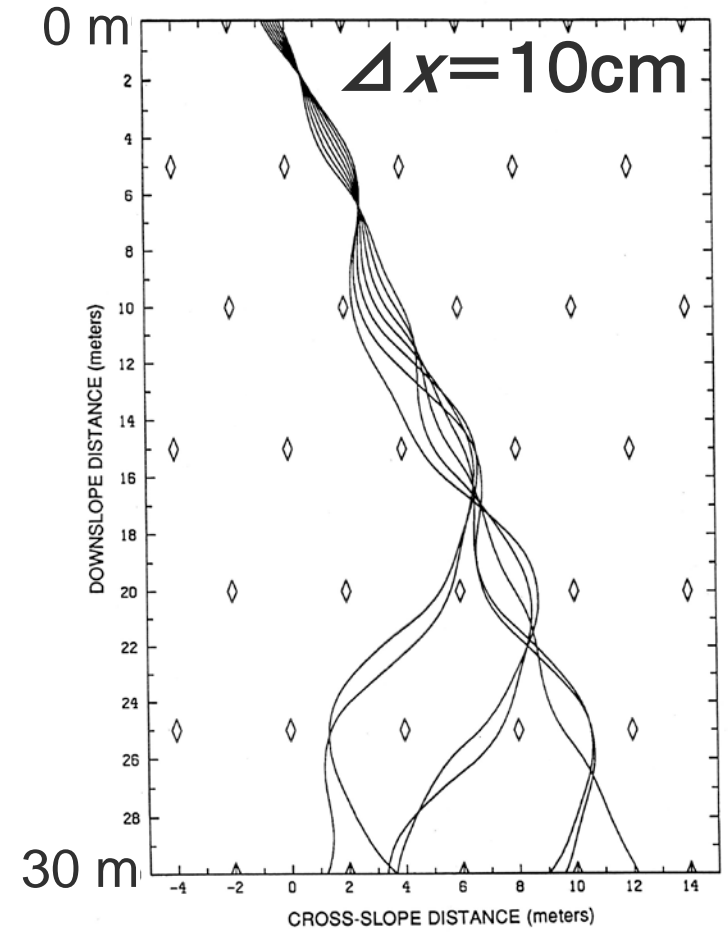
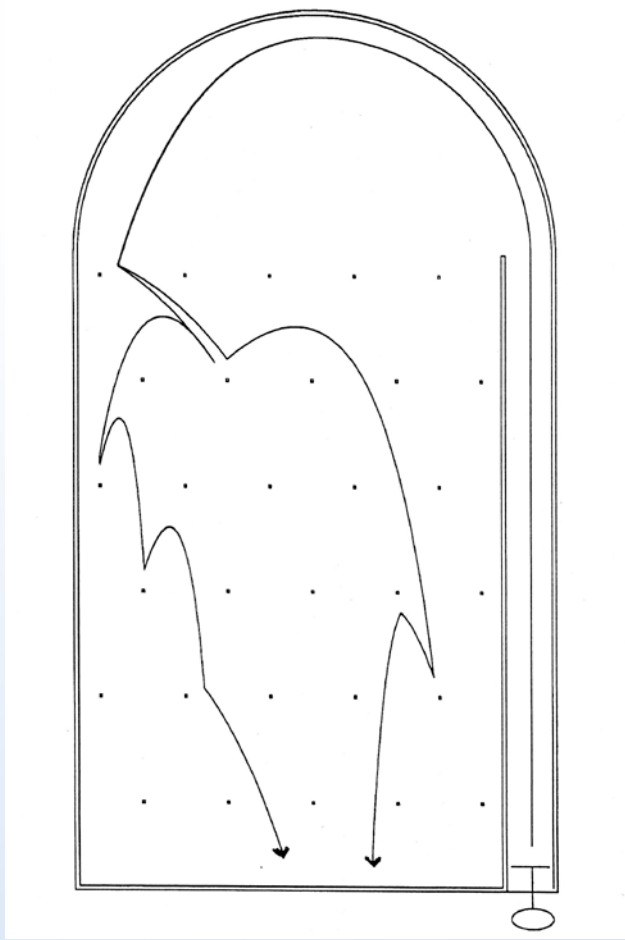
❖「カオス」の遍在性

●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



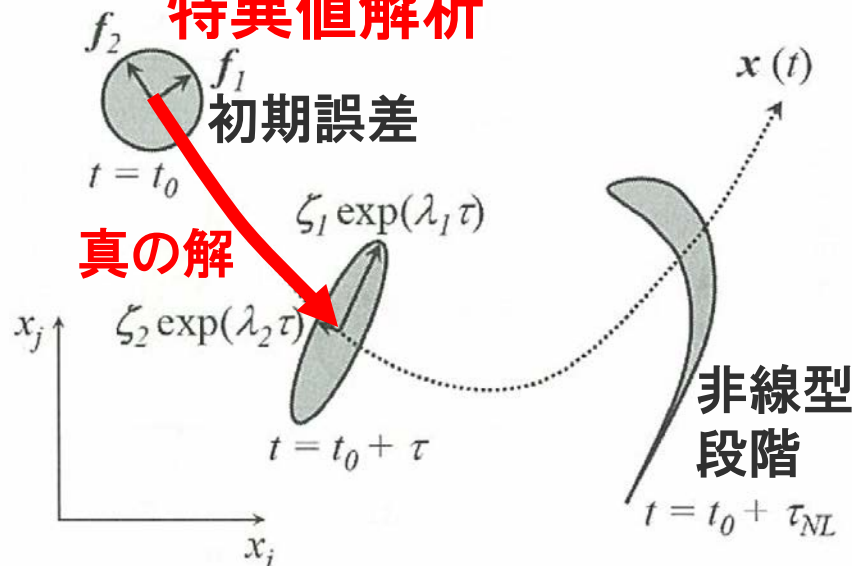
❖ 天気予報の当たり外れ

● 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

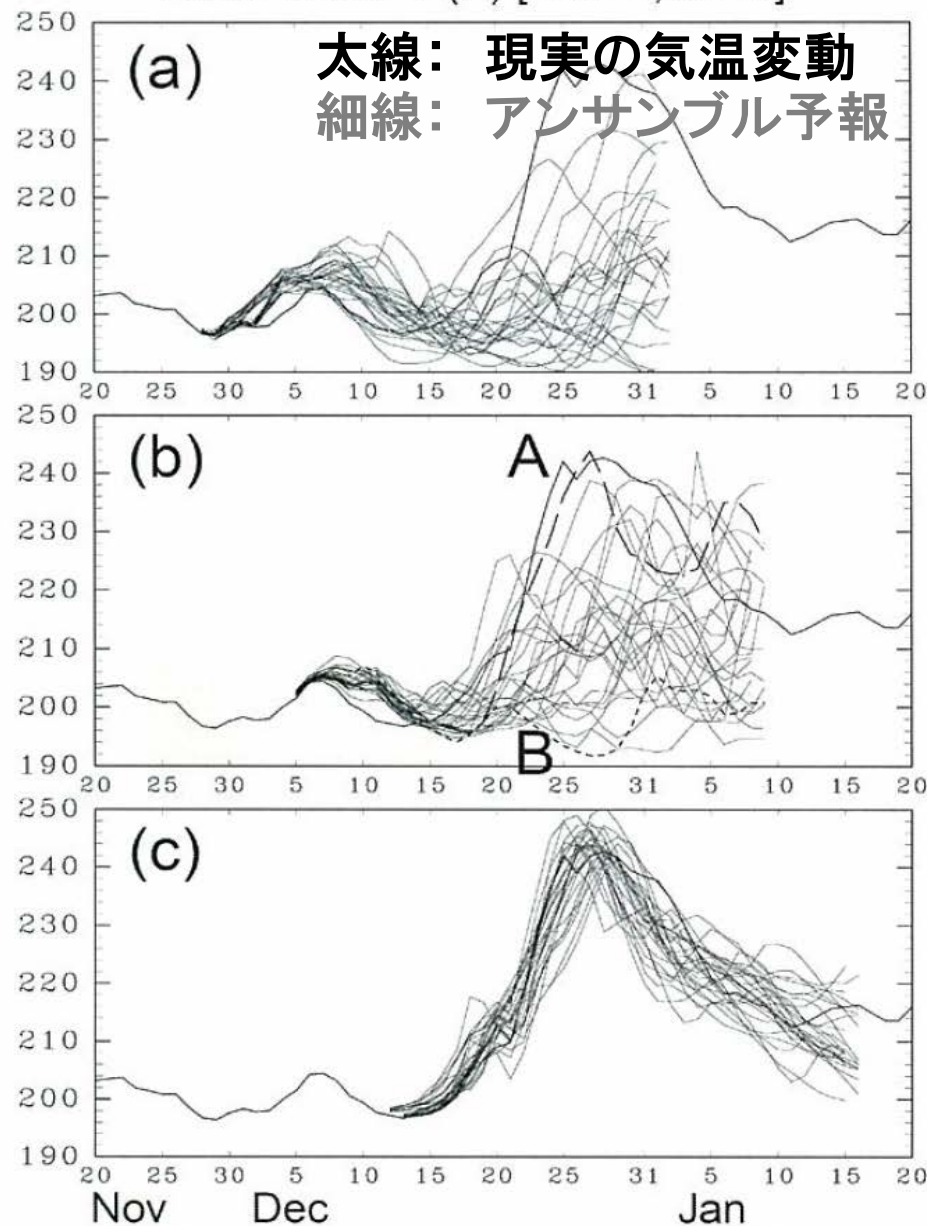
● 誤差成長の理論

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]



Mukougawa et al. (2005)

2002

● “流れ場”に依存した予測可能性の変動

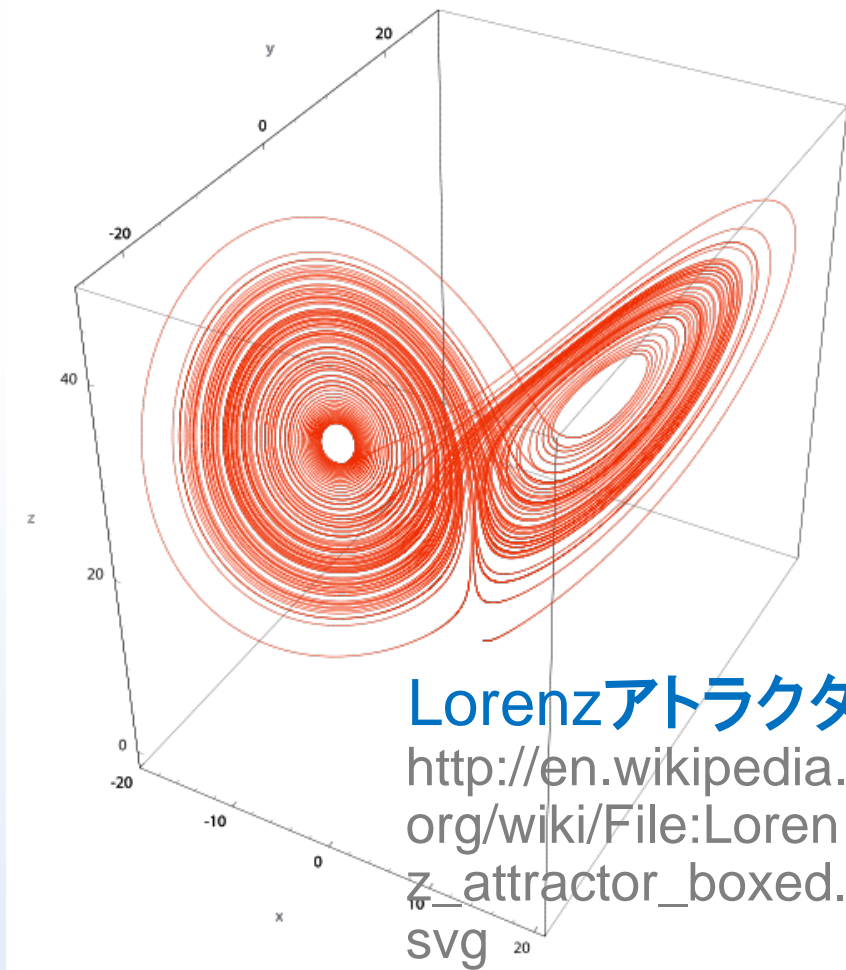
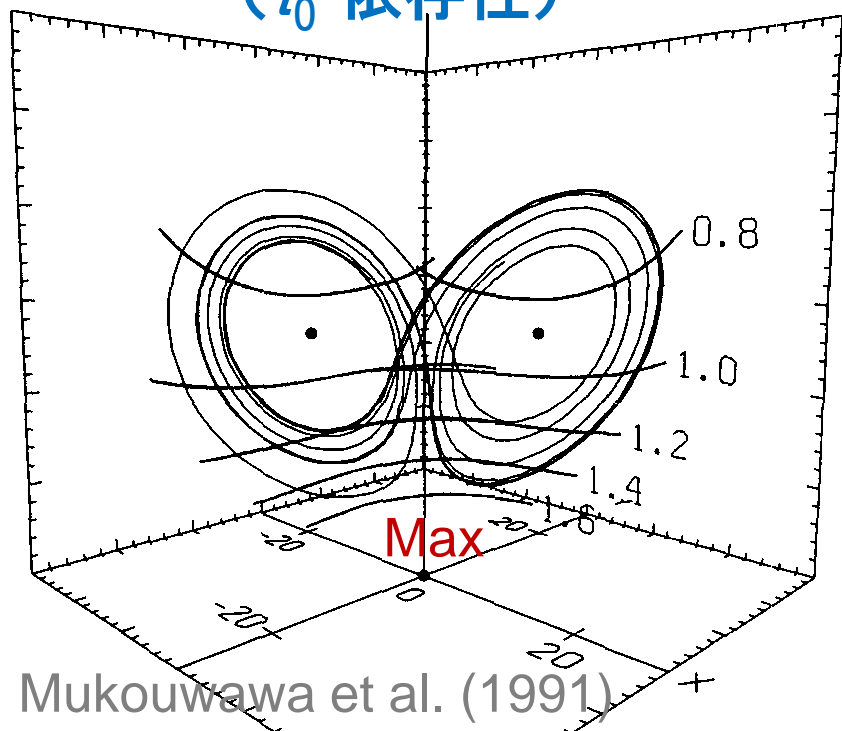
➤ Lorenz方程式の例

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

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

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

➤ 有限時間 τ で定義した 誤差成長率の局所性 (t_0 依存性)



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、を求めることが可能

❖「カオスから天気予報へ」

●カオス研究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は、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(確率的情報)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、...

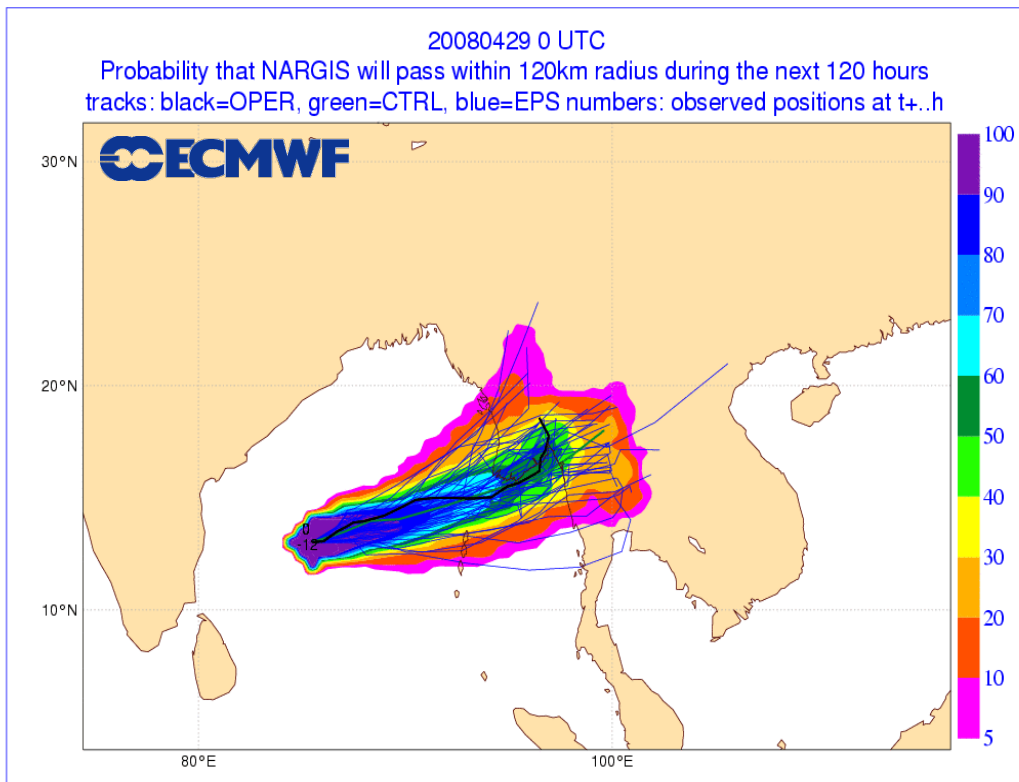
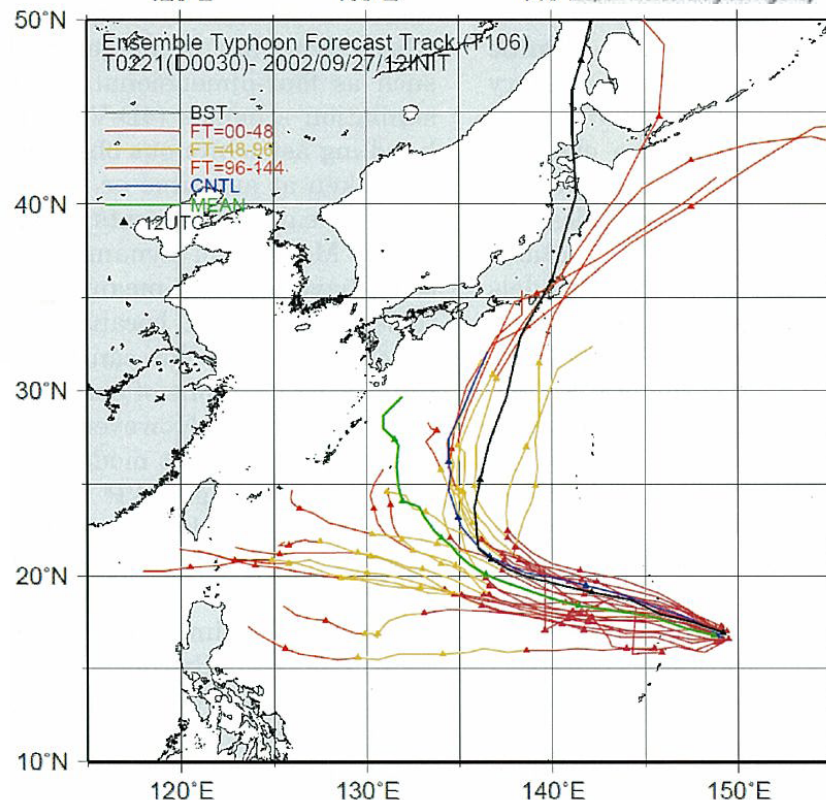
❖「カオスから天気予報へ」の一つの例

● 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



●インタラクティブな予報

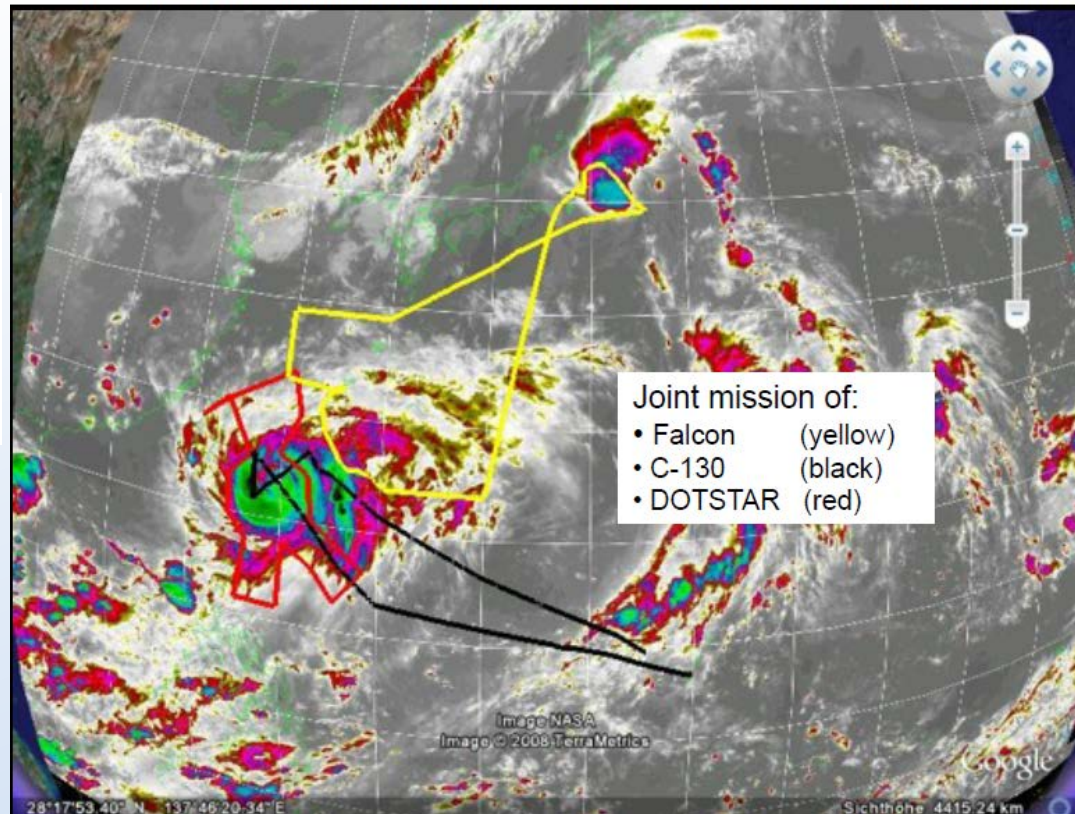
- 事前に誤差成長が大きい場所の特定
- その場所への機動的観測 → 初期値誤差を削減
- もう一度、予報を繰り返す → さらに精度の高い予報

●2008年 機動的台風特別観測

- THORPEX-Pacific Asian Regional Campaign 2008

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")



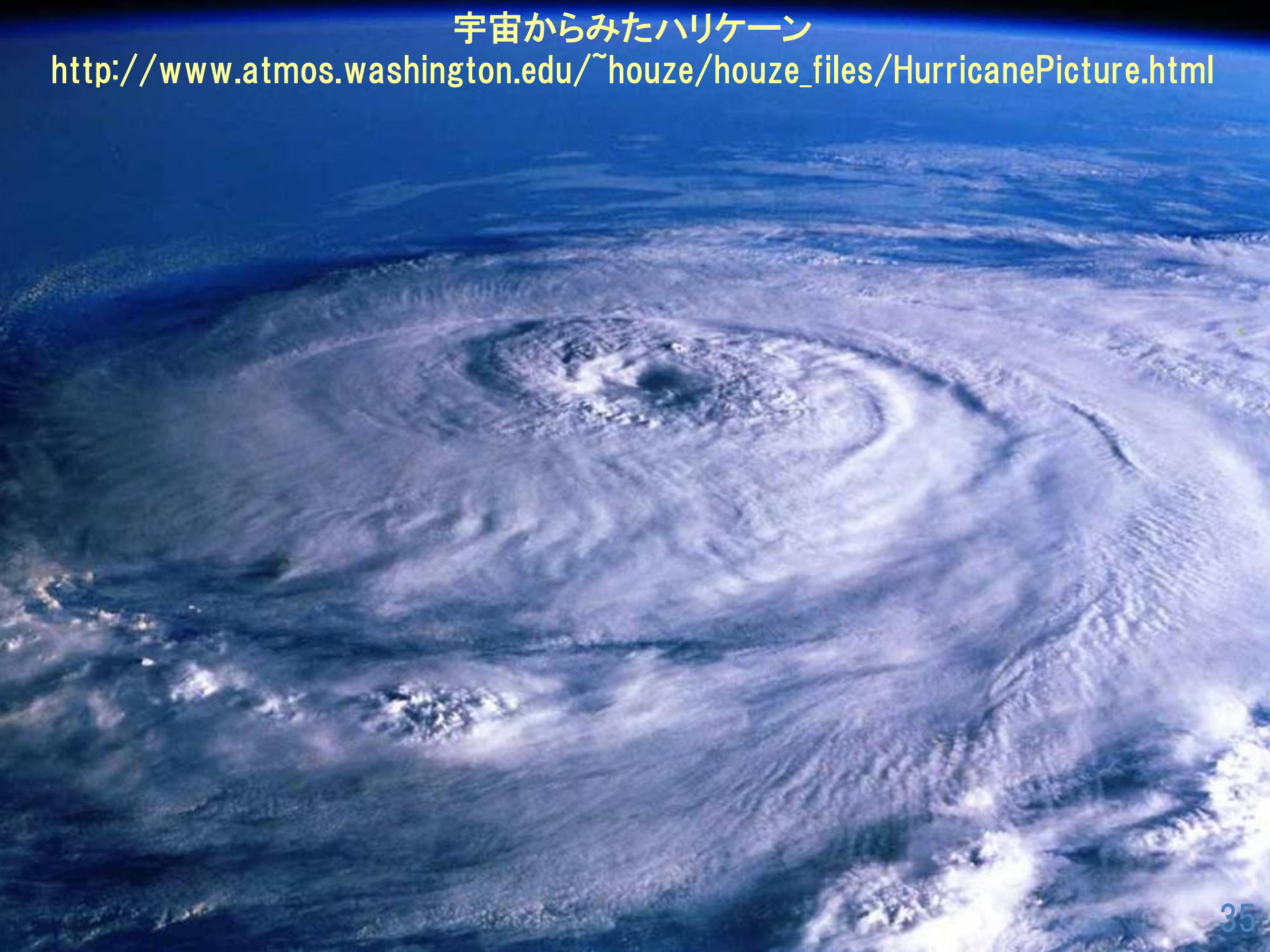
THORPEX
A World Weather Research Programme

http://www.wmo.ch/pages/prog/arep/thorpex/index_en.html

Nakazawa(2009)

宇宙からみたハリケーン

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

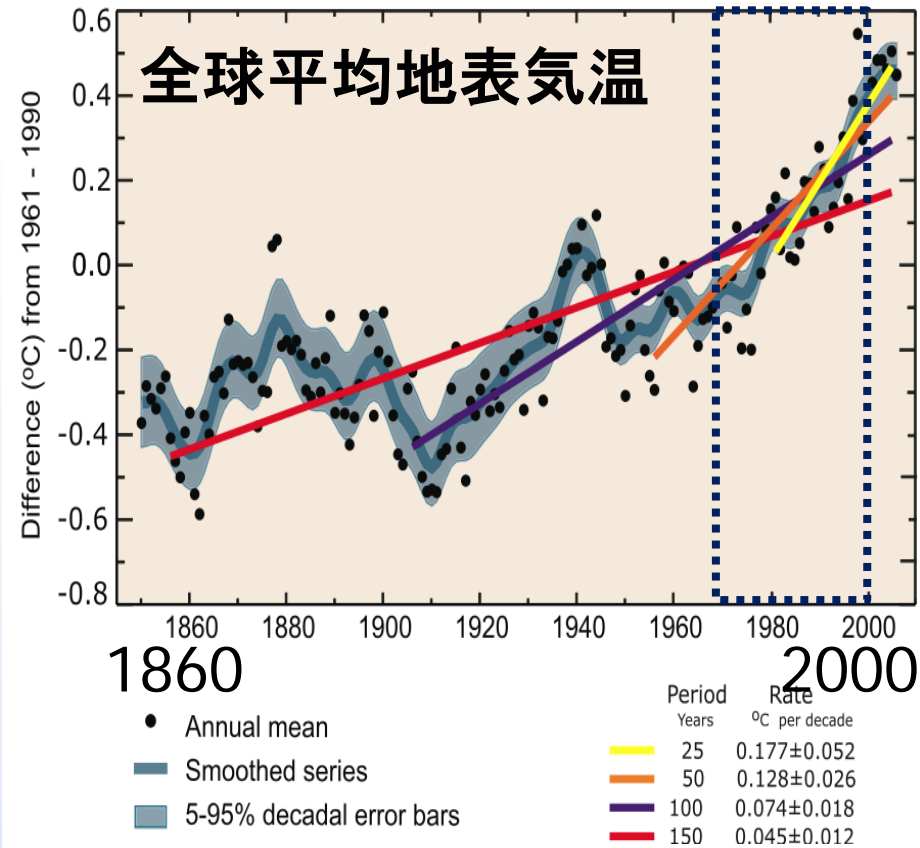
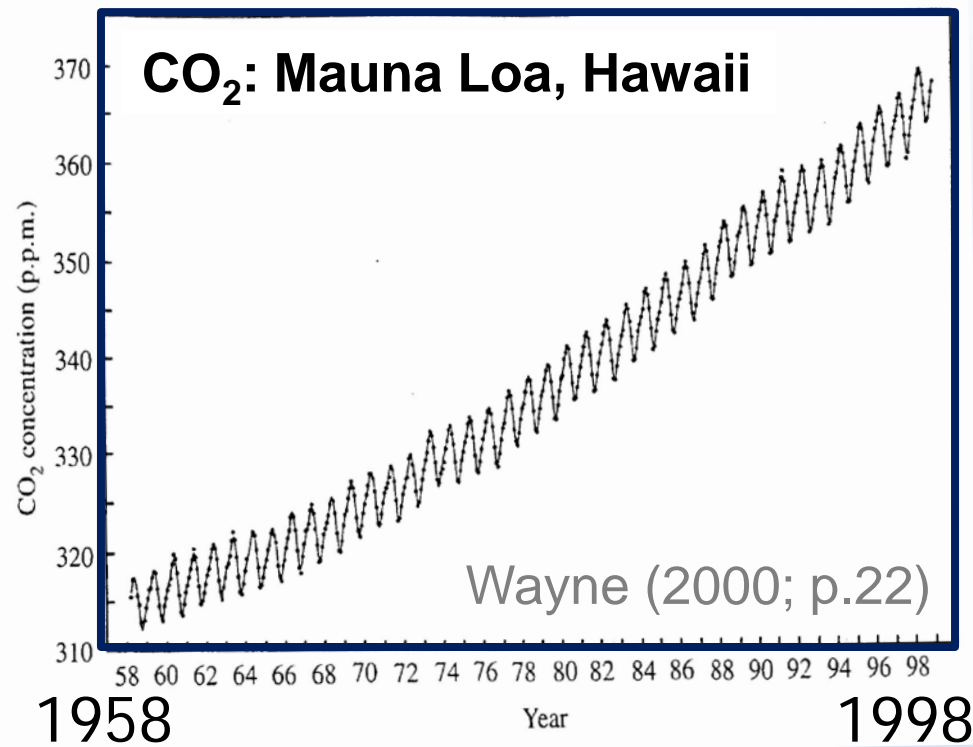


2. c 気候予測の不確実性

❖ 地球温暖化の観測的事実 (IPCC AR4; 2007)

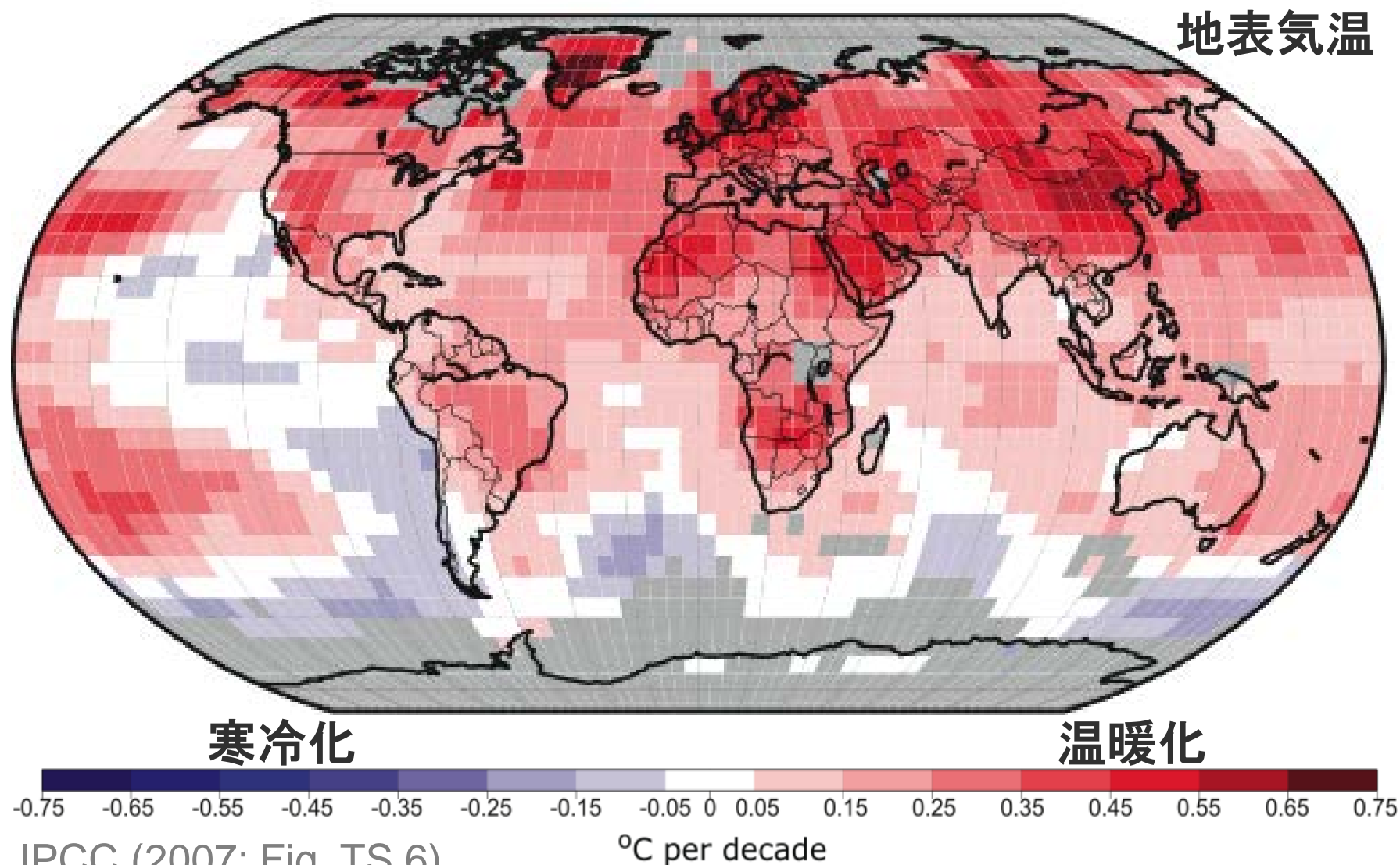
● 地表気温の上昇

● 大気中CO₂の増大



● 1979年から2005年までの直線トレンド

- 北半球と南半球
- 陸上と海上



❖ 気候モデルの概観

● 始まりは数値天気予報モデル（1950年～）

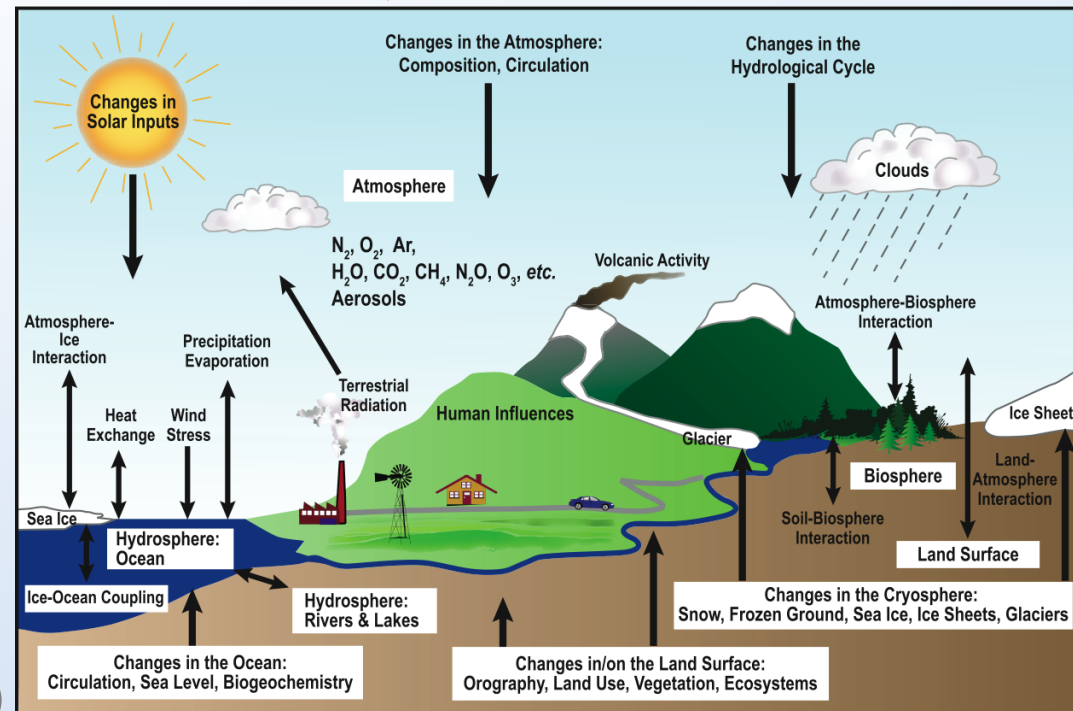
- 物理法則に基づいて大気の将来をコンピュータで予測
- 日々検証されてきた実用に耐えるモデル

● 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

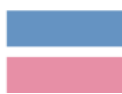
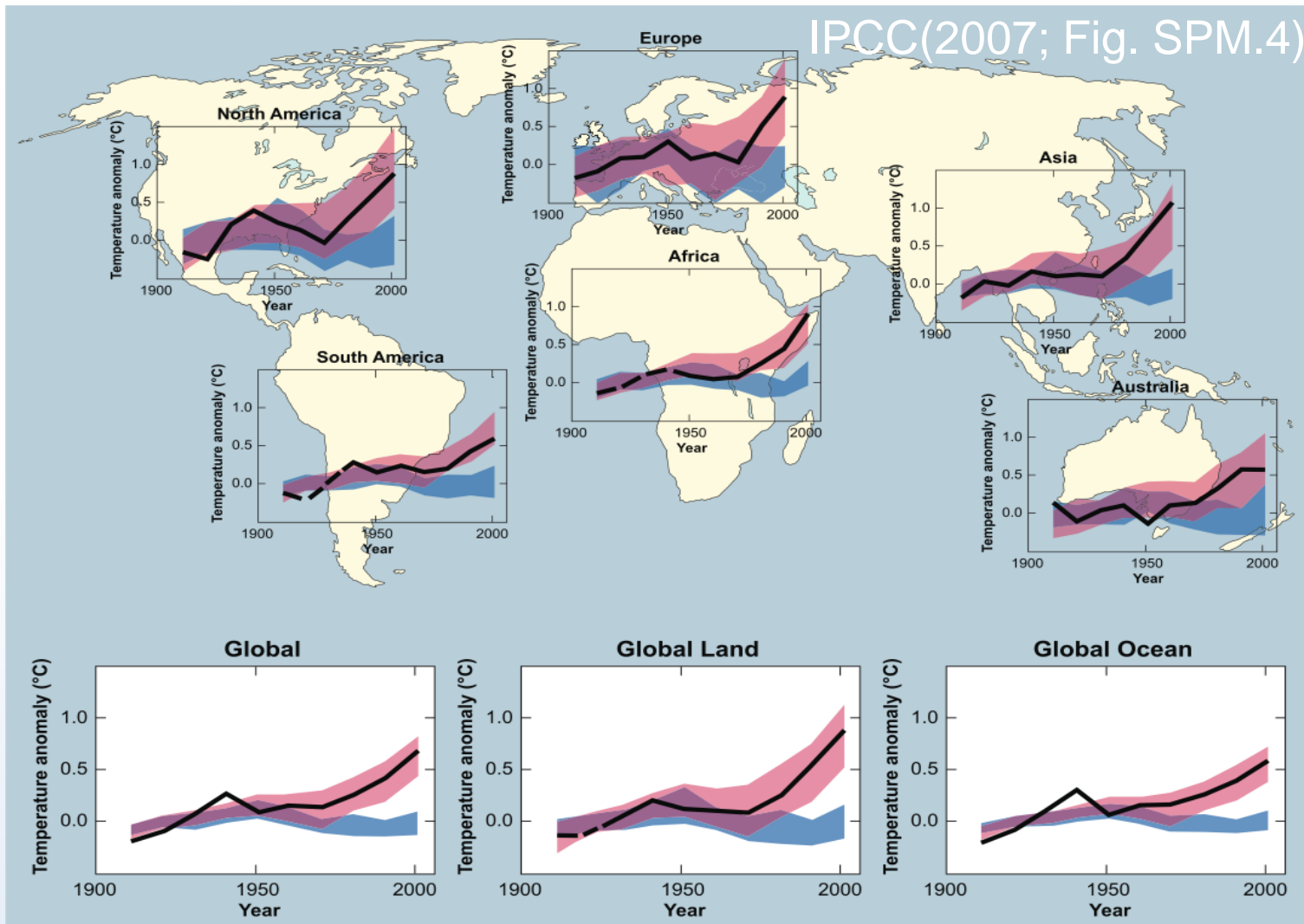
● 外部条件の変化に対するシステムの応答問題

- 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



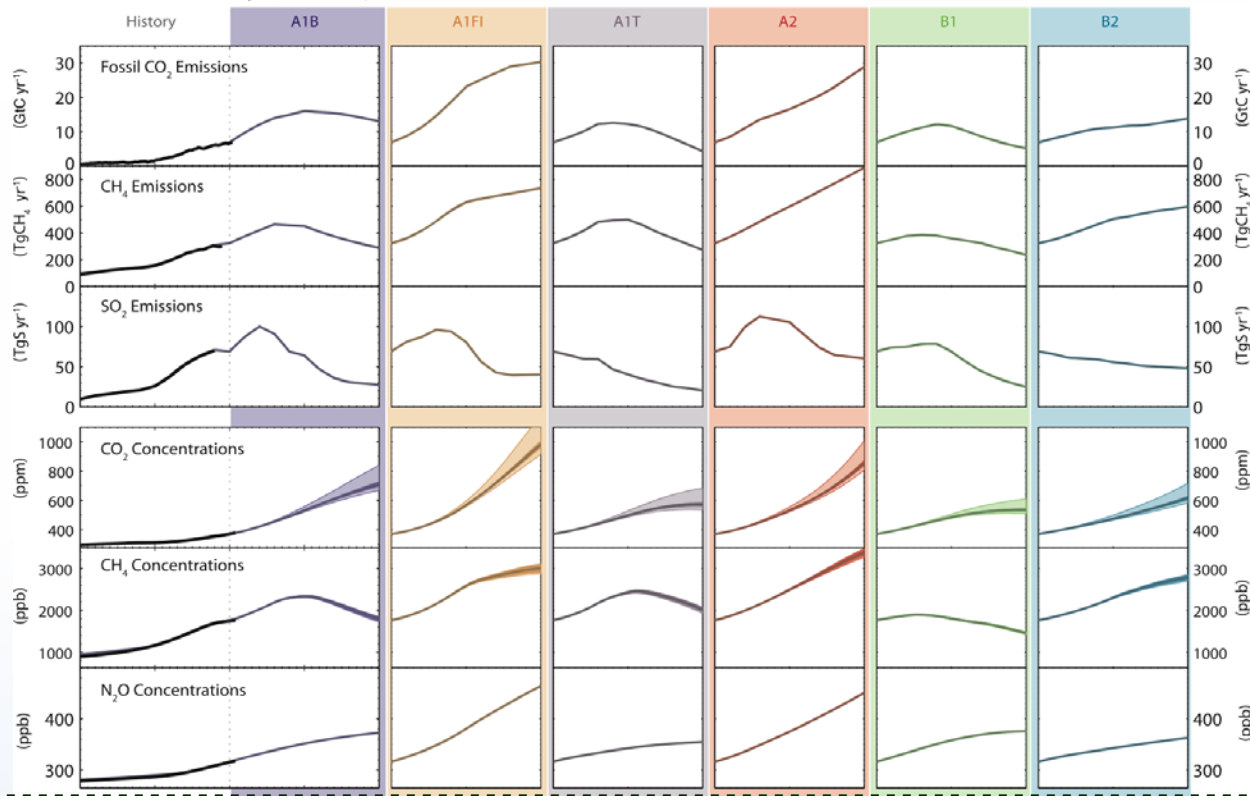
自然強制変動のみを与えた場合
+ 人為起源強制

— 観測結果

❖ 21世紀の温暖化予測実験

● 6つのシナリオ

- CO₂排出量
- CH₄排出量
- SO₂排出量
- CO₂濃度
- CH₄濃度
- N₂O濃度



● 予測結果

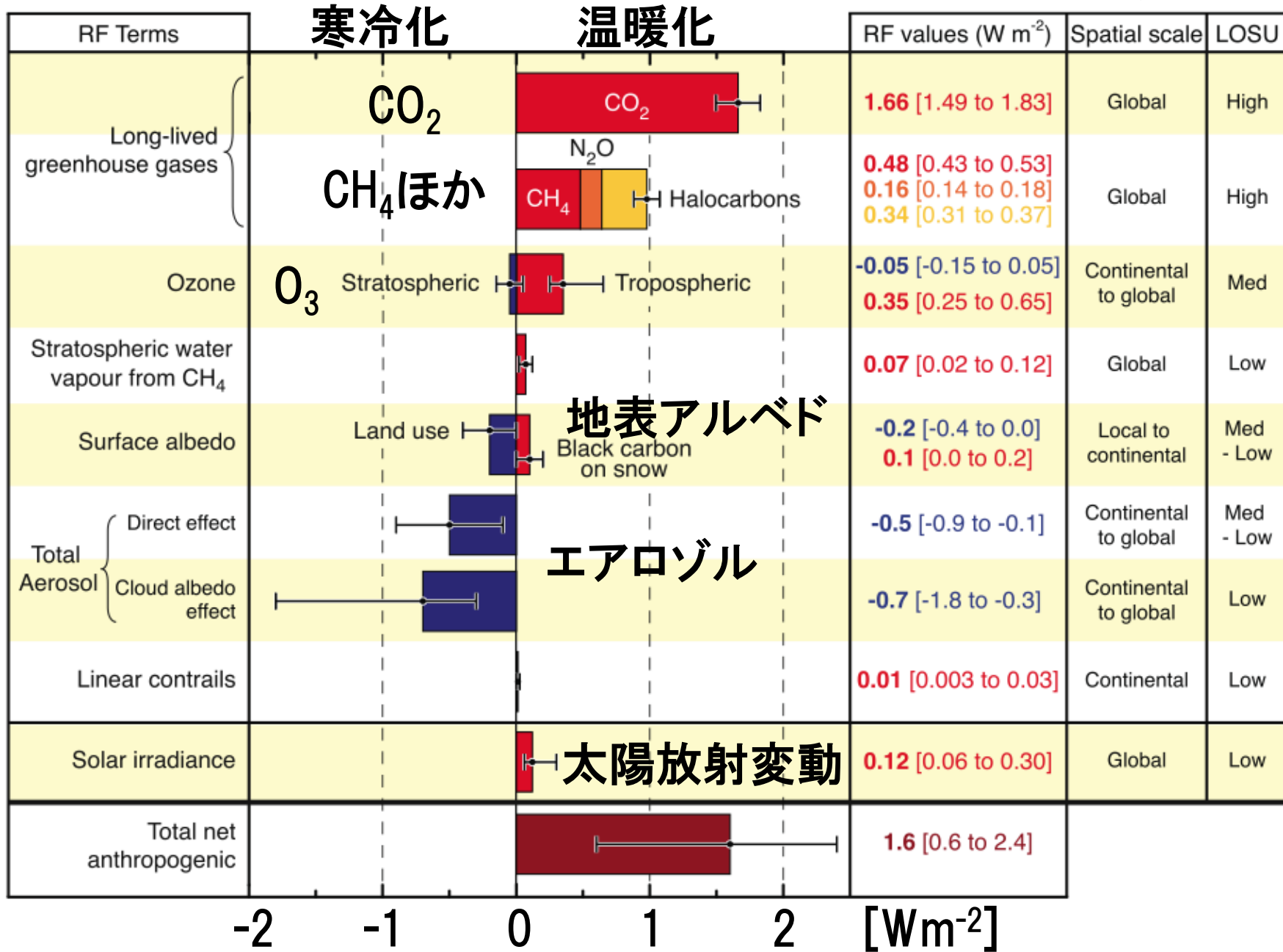
- 放射強制力
- 全球平均気温

● 全球平均した放射強制力

IPCC (2007; Fig. SPM.2)

人為起源

自然変動

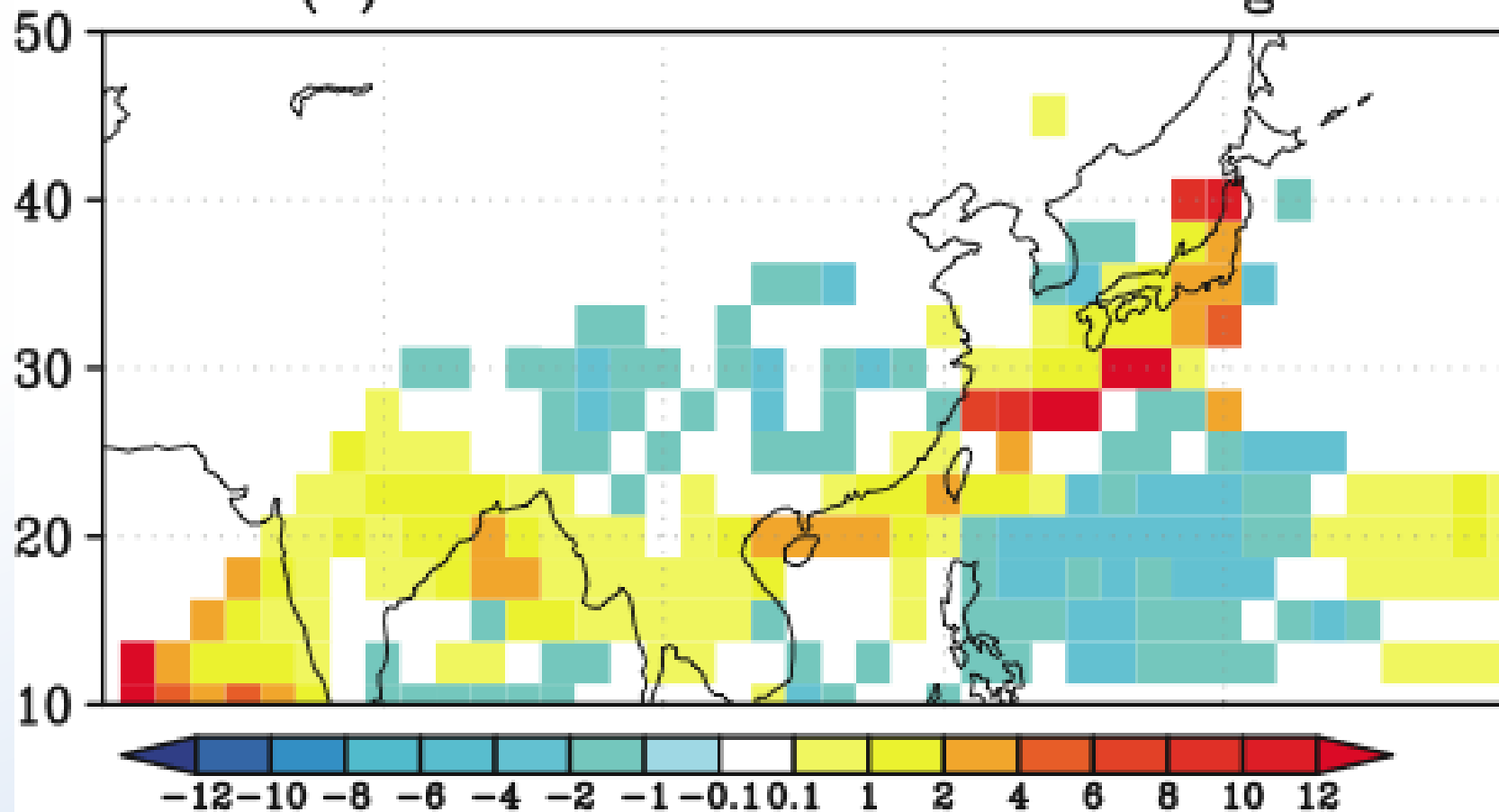


●きめ細かな温暖化予測

➤梅雨明け日の変化

○20世紀末(1981-2000)を基準にした21世紀末(2081-2100)までの変化

(a) Withdrawal MME15w Change

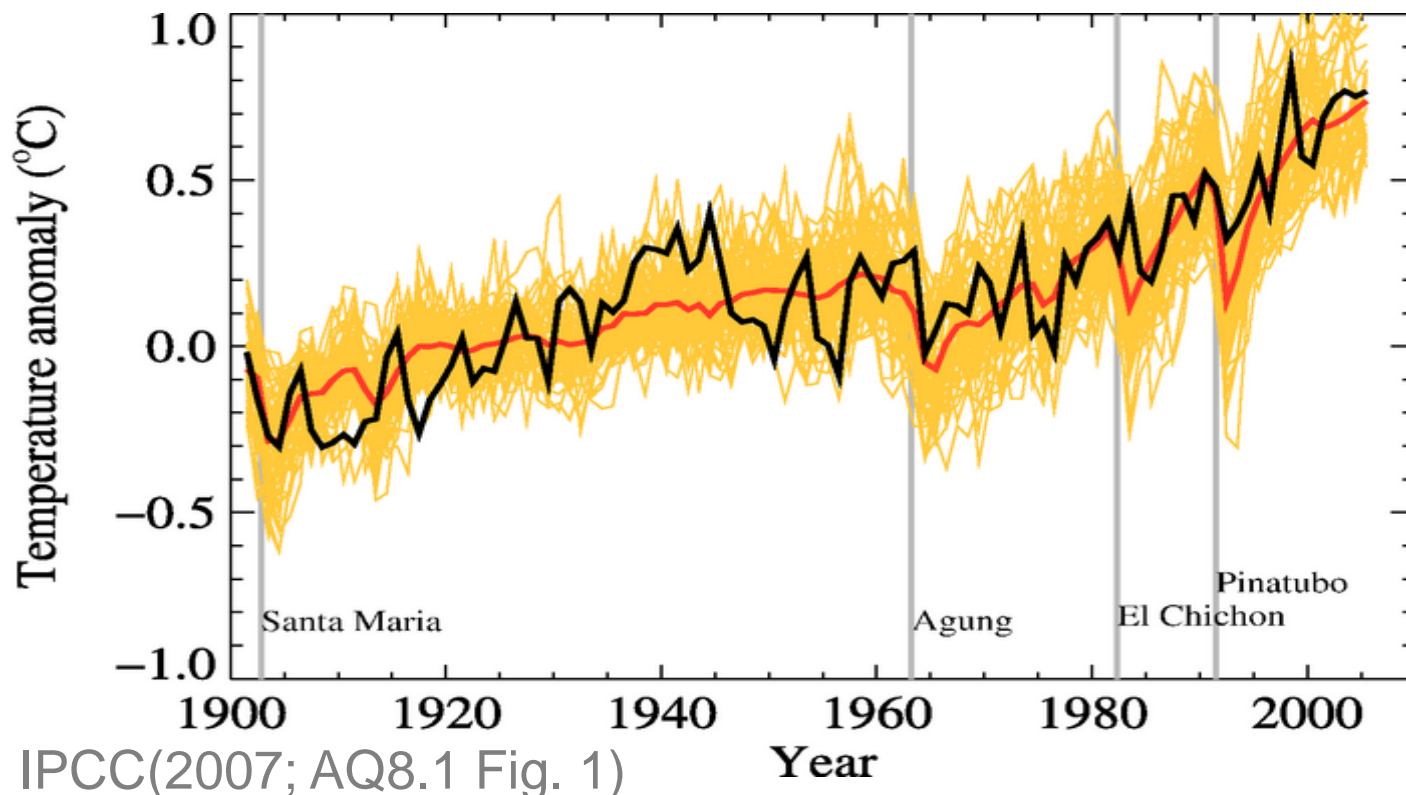


❖ 温暖化予測の不確実性

① モデルが不完全 + 自然内部変動の存在

黒線： 観測

黄線： 14の気候モデル、58シミュレーションの結果



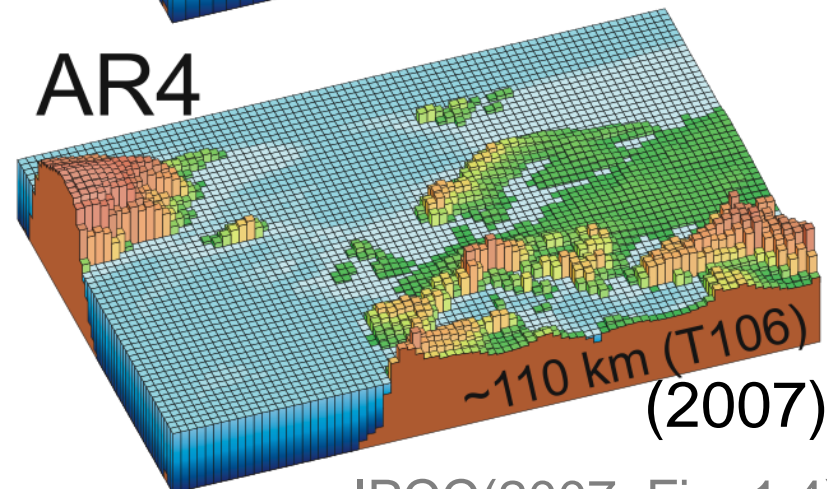
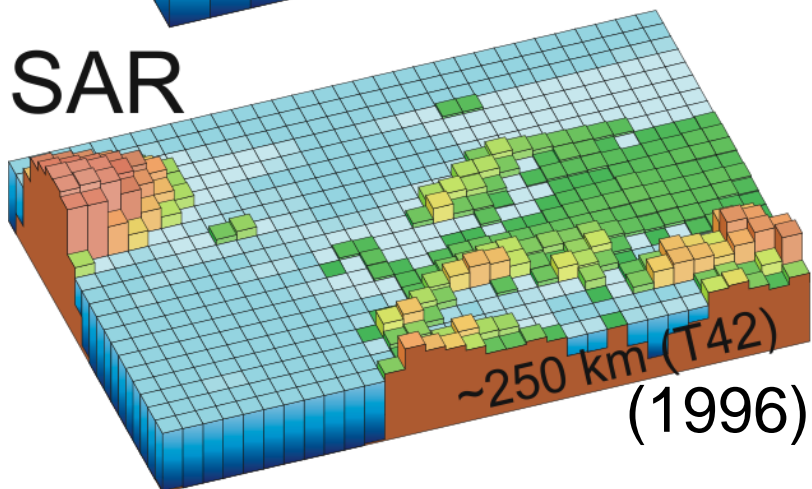
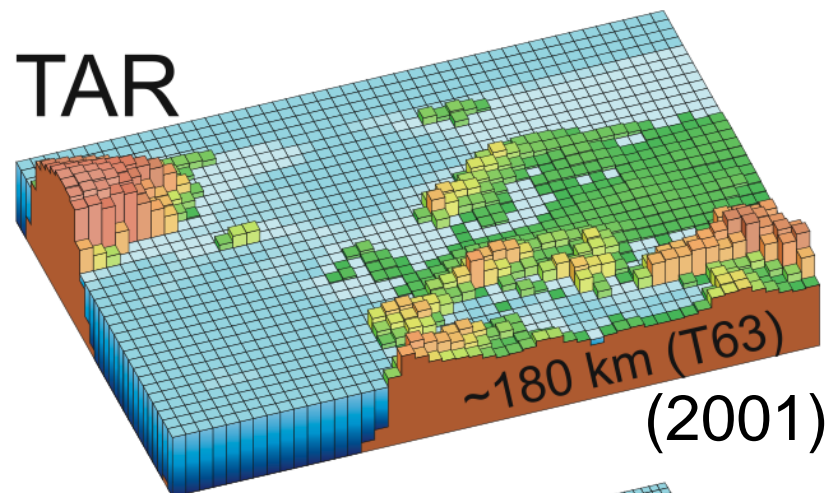
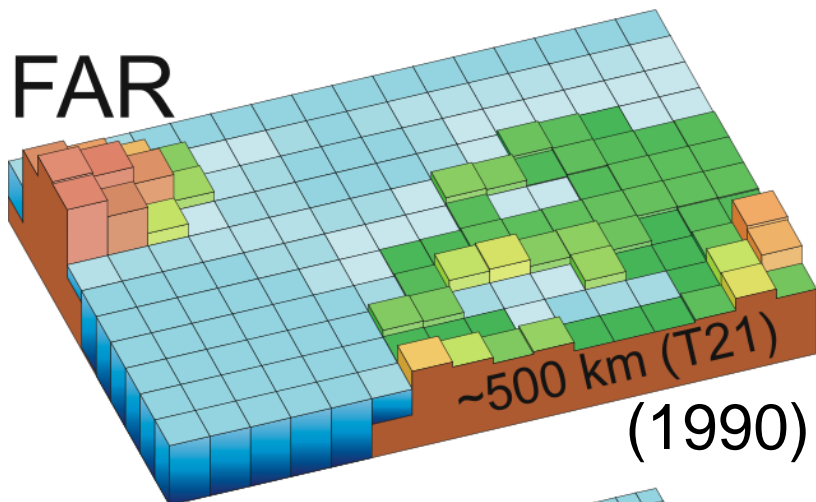
● 自然内部変動

➤ 大気・気候システムの内線型性に起因

●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

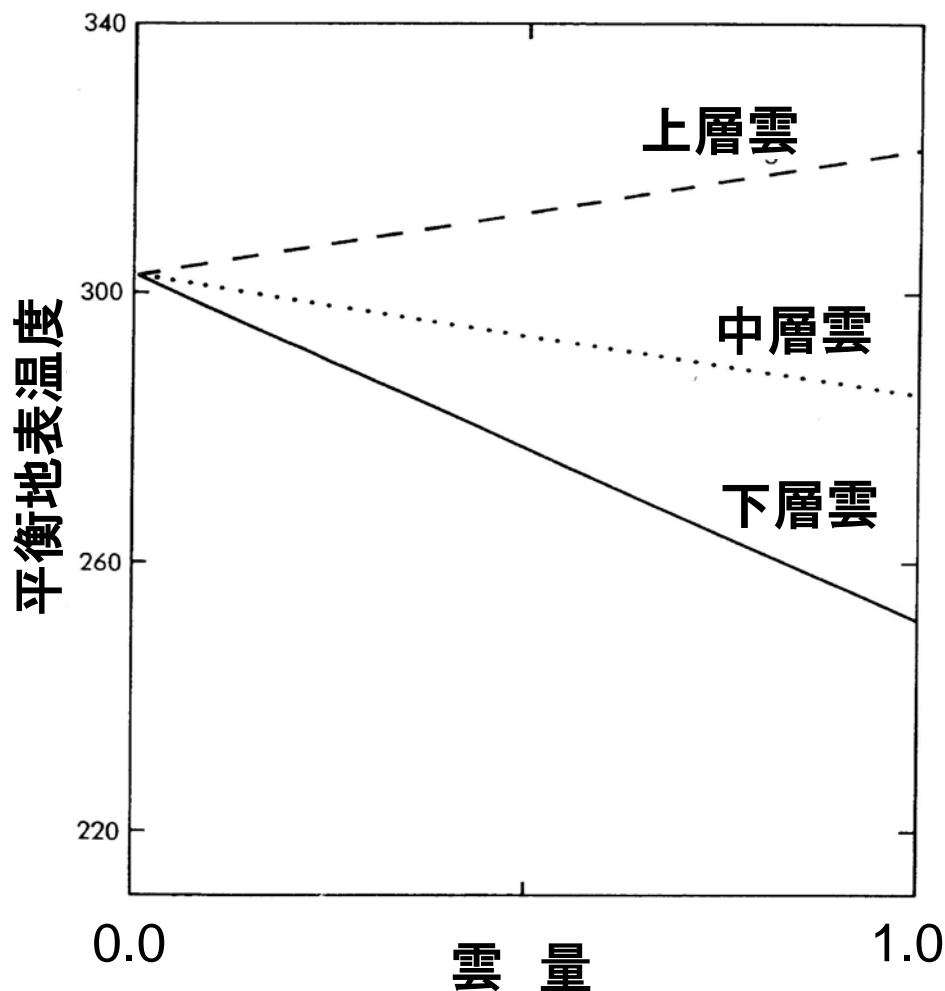
← 多階層の連結変動がよく理解できていない



IPCC(2007; Fig. 1.4)

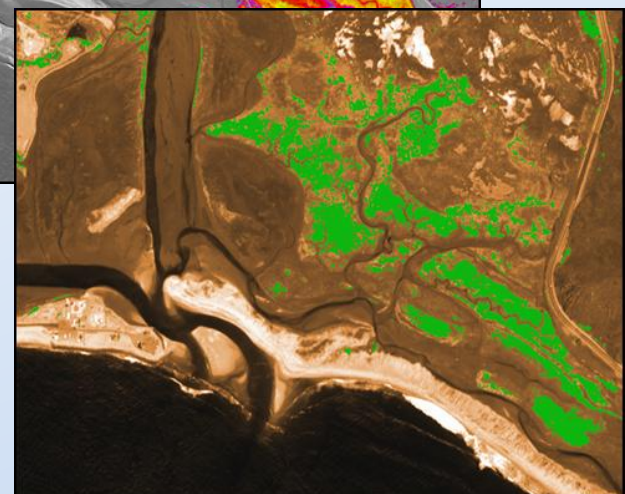
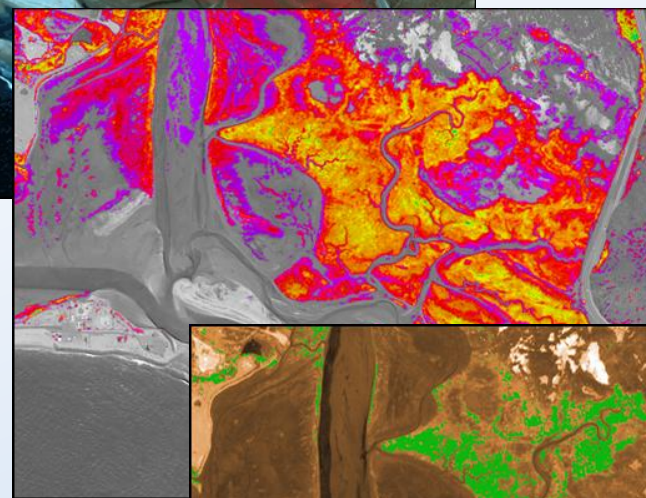
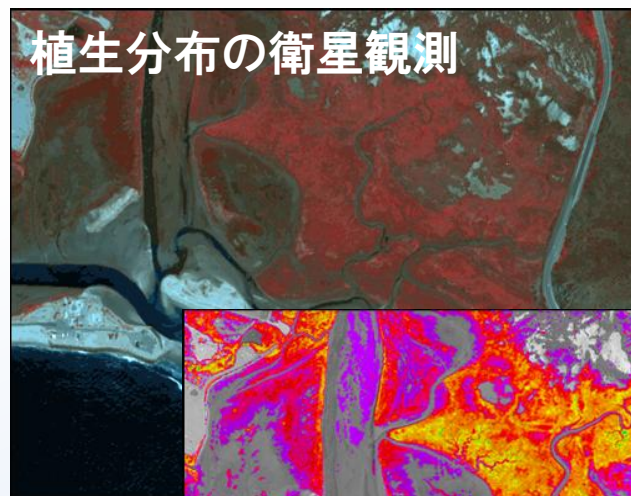
●不確実性の要因(2): 雲の効果

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



QuickBird —
Copyright ©
2010
DigitalGlobe

❖ 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

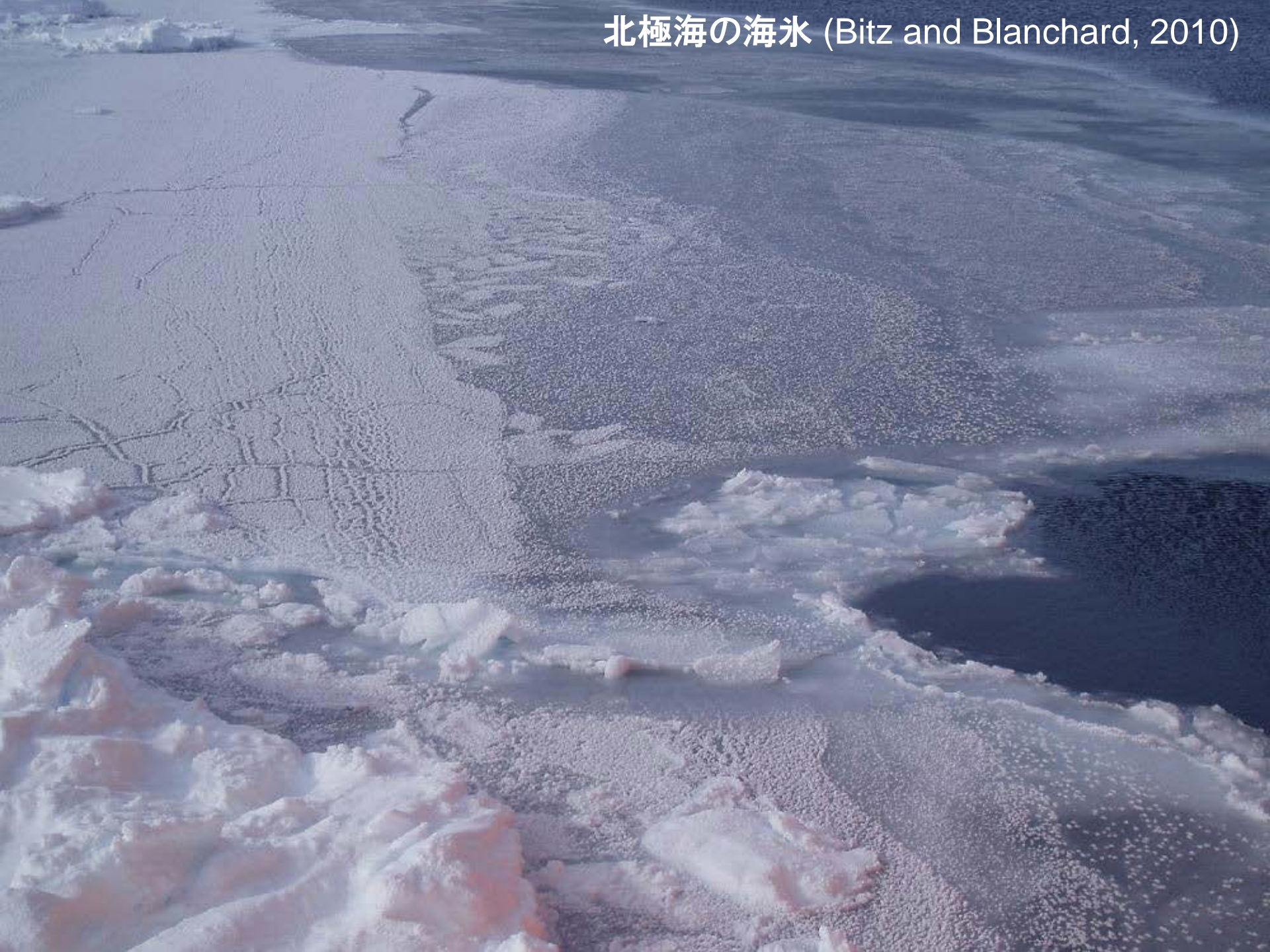
モデルの空間分解能、雲の効果、支配法則定式化の困難さ、...

❖ 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

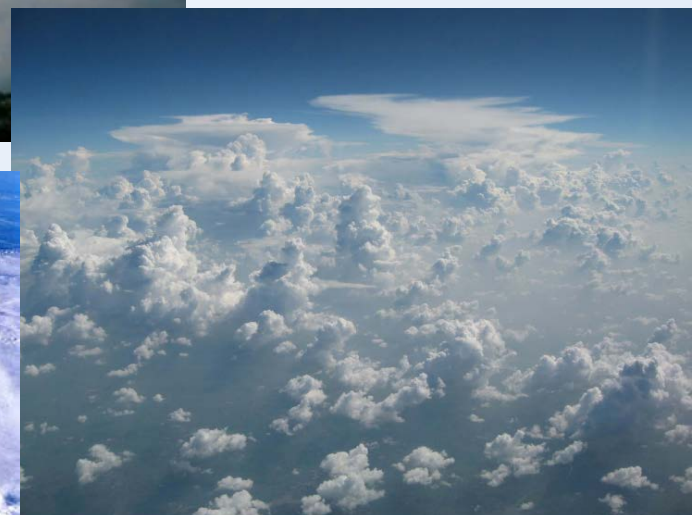
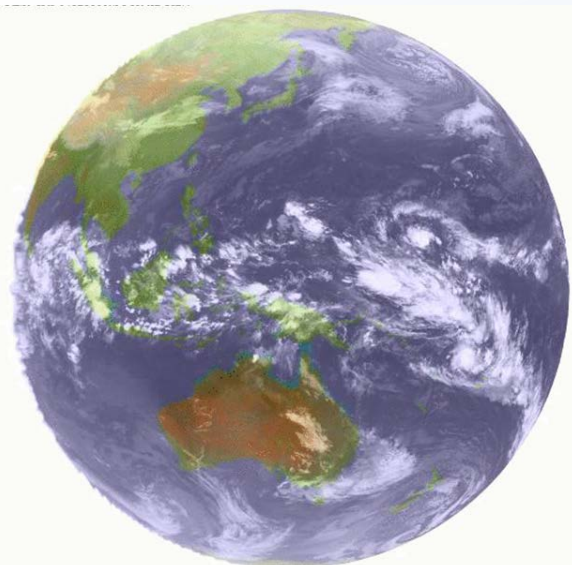
北極海の海氷 (Bitz and Blanchard, 2010)



3. a 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
-

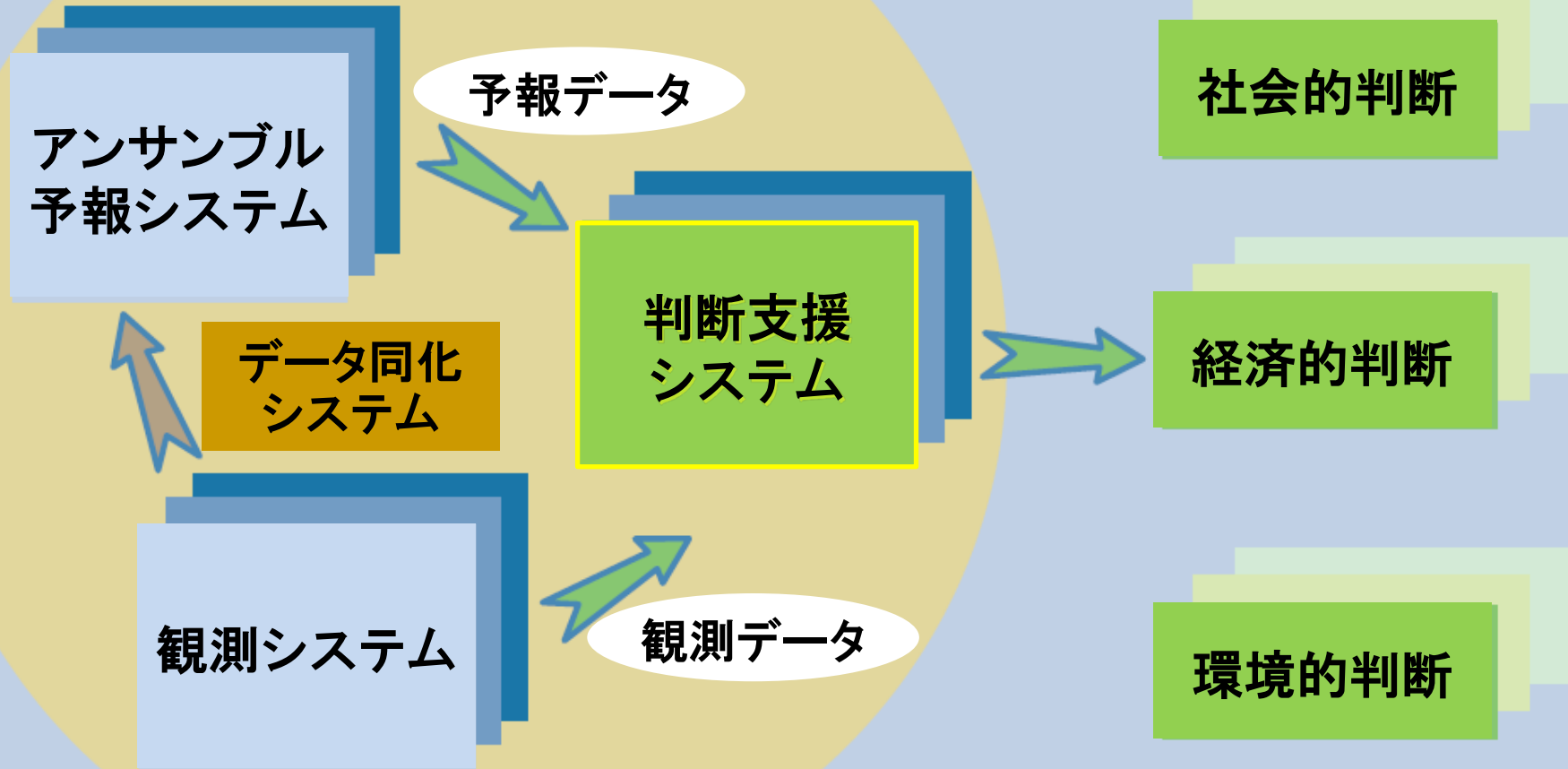


❖ 科学技術的課題 — 数値天気予報の近未来形

● WMO THORPEX プロジェクト (2005~2014)

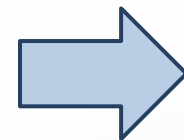
- 社会的影響の大きい極端気象の早期予測システムの開発
- 観測・予報データの高度利用法を開発

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

➤確率的な表現

➤事象の発現頻度の違い

○降雨、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. b おわりに ー国際社会の中で、 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』



ジャカルタ豪雨(2007)



タイ洪水(2011)

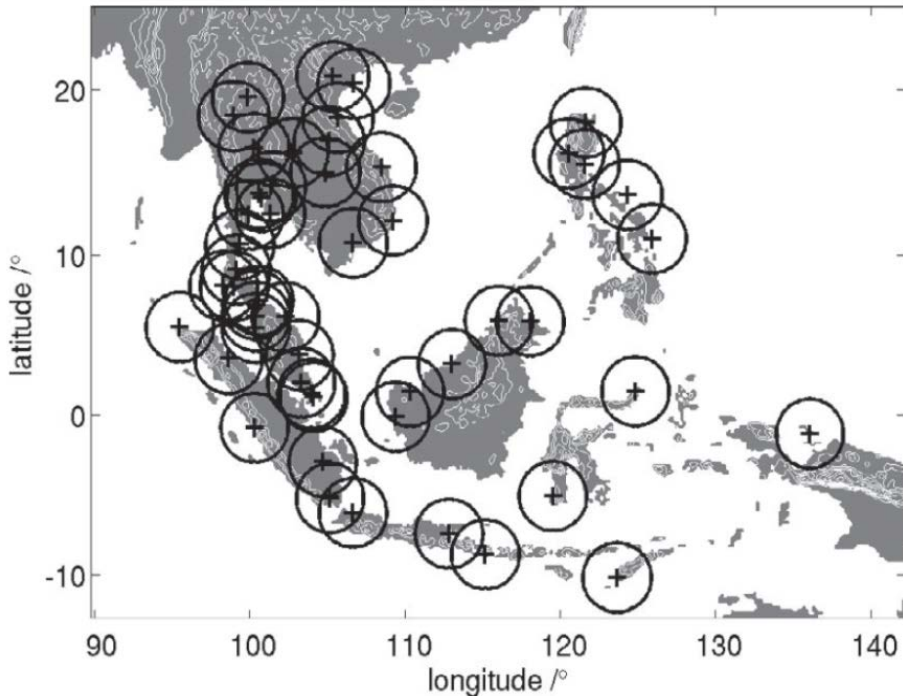
❖時代背景

- 観測技術の進歩
- 計算環境の改善
 - コンピュータ、ネットワーク

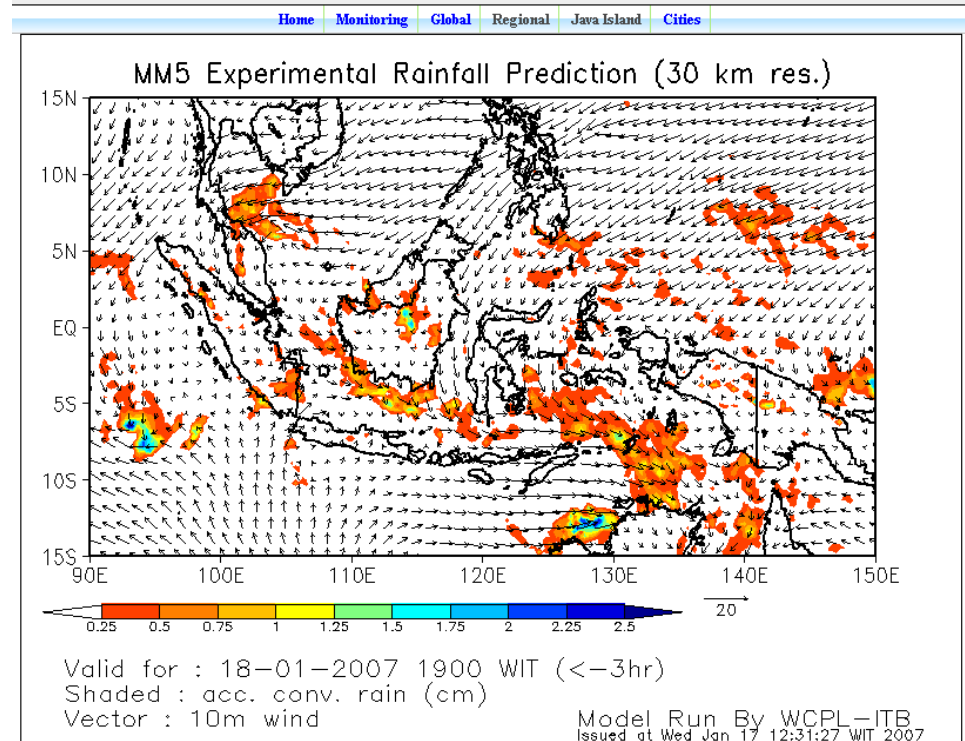
インドネシア・
バンドン工大
での実験的
数値天気予報
(Hadi 2006)



WCPL Experimental Weather Forecast



東南アジア気象レーダーネットワーク
の近未来展望 (Koh & Teo 2008)



❖ 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



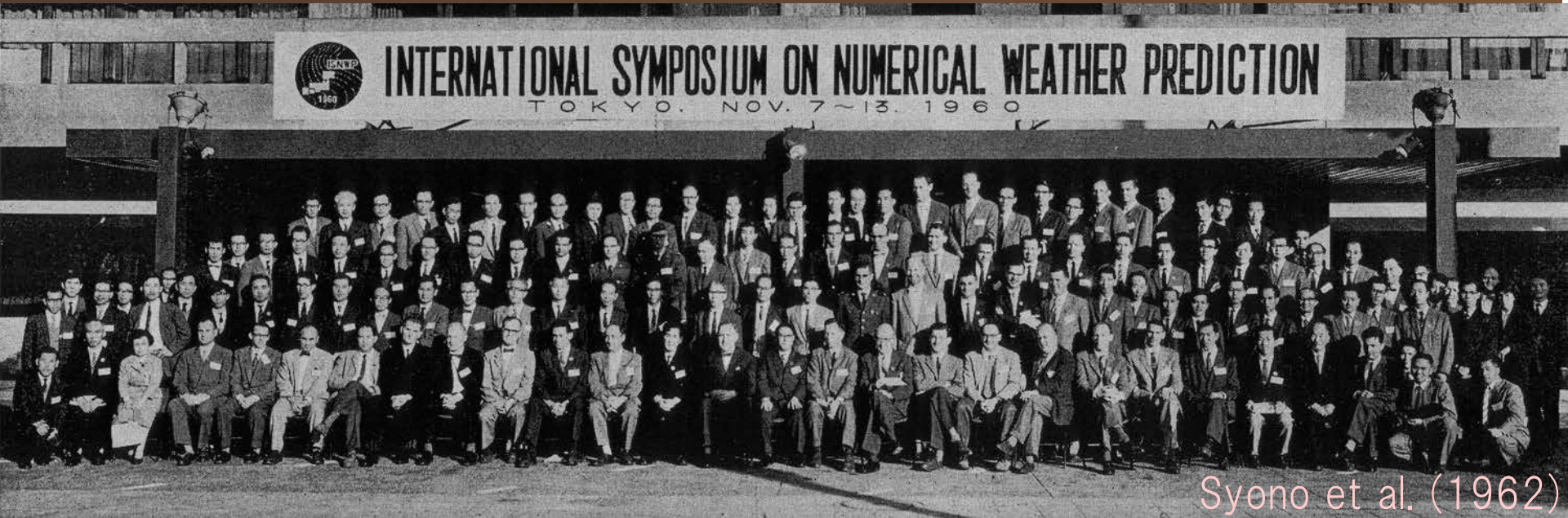
ご清聴
ありがとう
ございました



ISS022E052281

● 第1回の数値天気予報国際シンポジウム (1960) 東京

- J. Charney, R. Fjörtoft, J. Smagorinsky, E. Lorenz, H.L. Kuo, S. Syono, Y. Ogura, A. Arakawa, K. Gambo, T. Matsuno, ...



Syono et al. (1962)

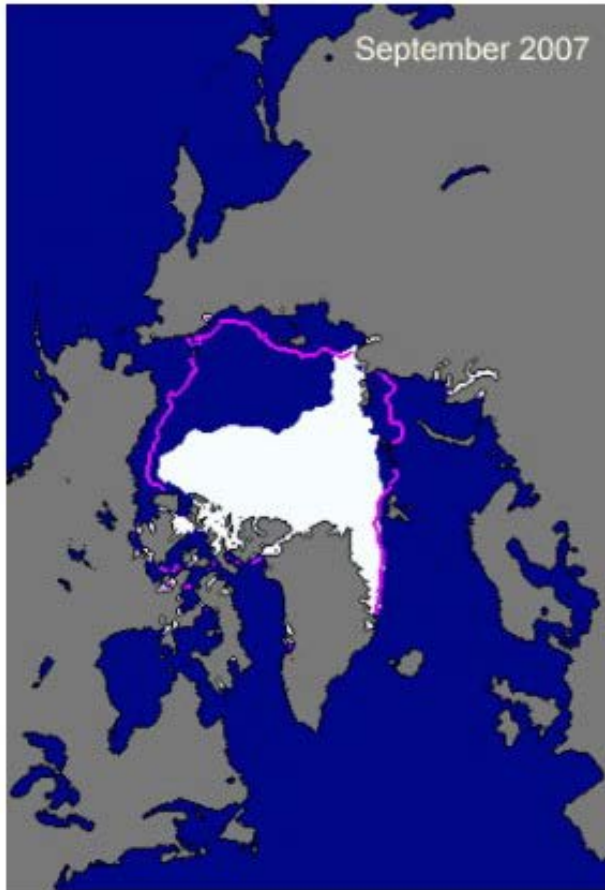
● 正野スクール

- 1950～60年代、米国への頭脳流出
- 気象・気候数値モデル開発の中核
- 「気象のことば科学のこころ」
廣田 勇(2007;成山堂書店)



● 北極海の海氷の広がり

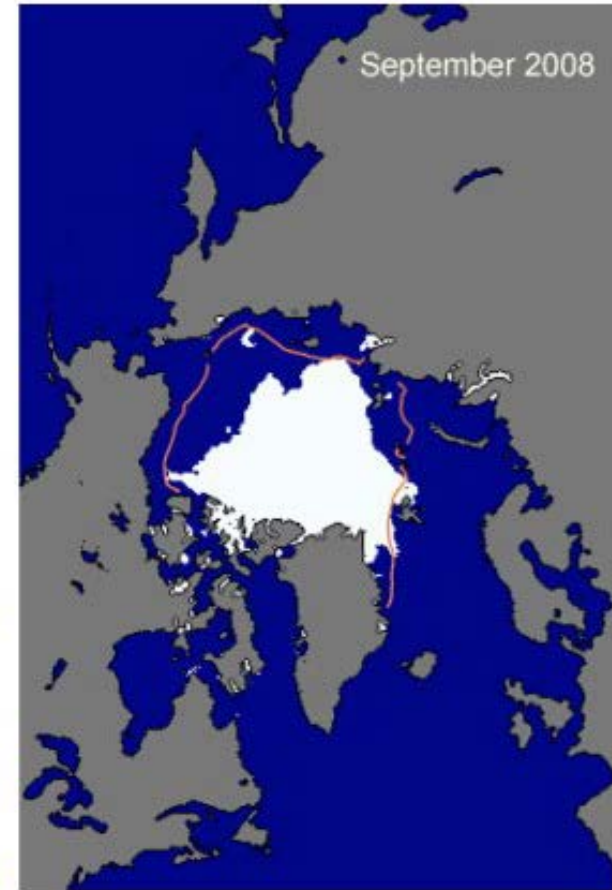
2007年9月



2008年3月

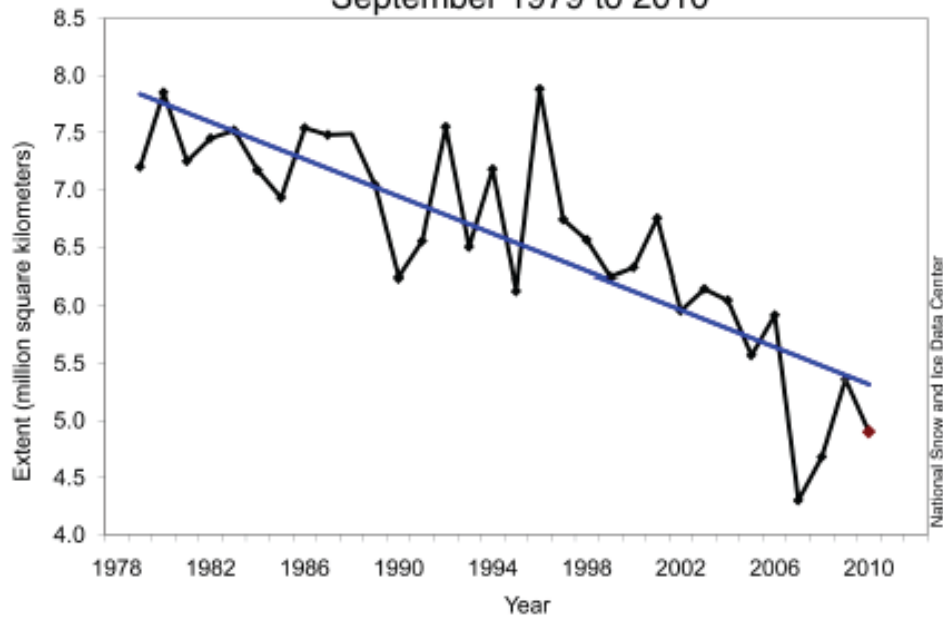


2008年9月



----- 1979-2000の平均的な広がり

Average Monthly Arctic Sea Ice Extent
September 1979 to 2010



-11.2% sea ice extent per decade

1979-2000年の
平均的な広がり

Sea Ice Extent
Sep 2010



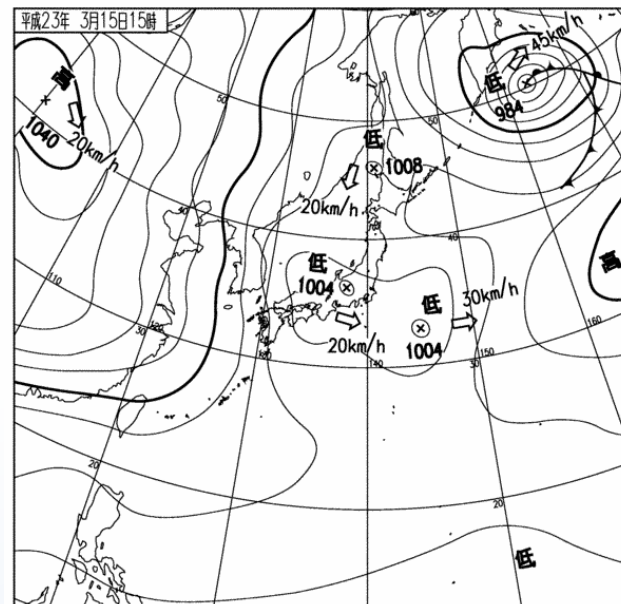
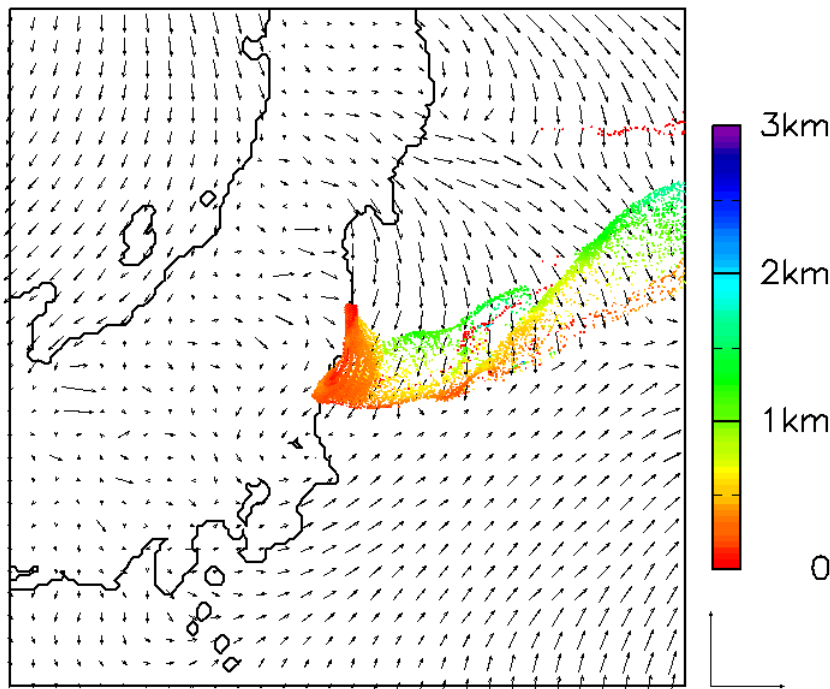
Total extent = 4.9 million sq km

❖ 放射性物質の移流拡散予測

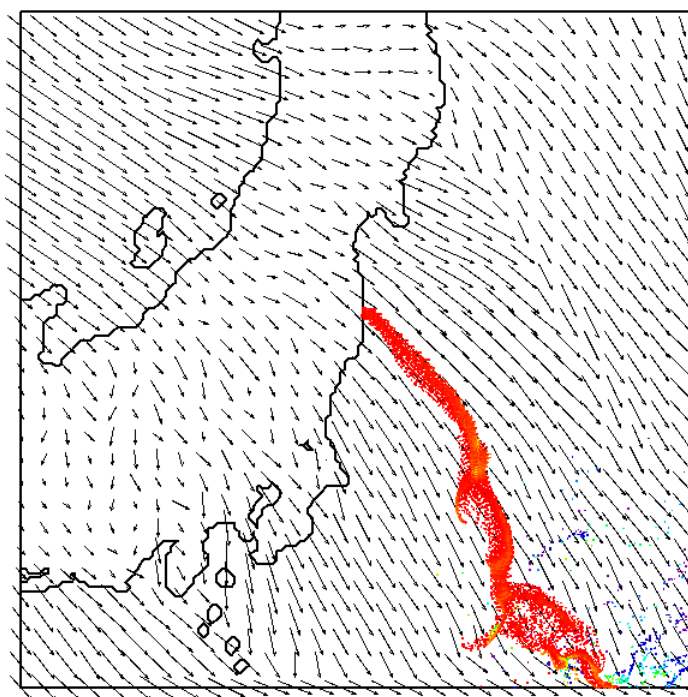
- 流れ場の予測の不確実性
- 粒子運動予測の不確実性

➤ ラグランジュカオス

2011-03-15 00:00:00 JST

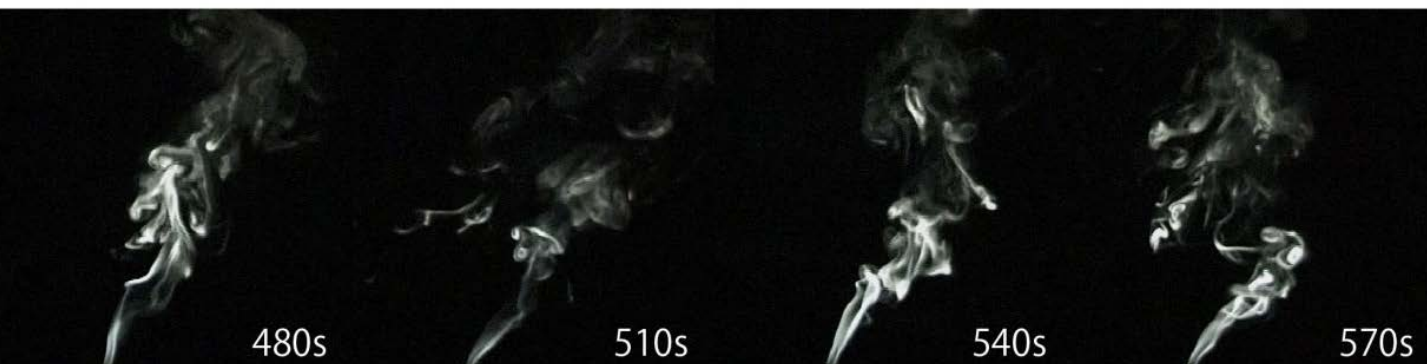
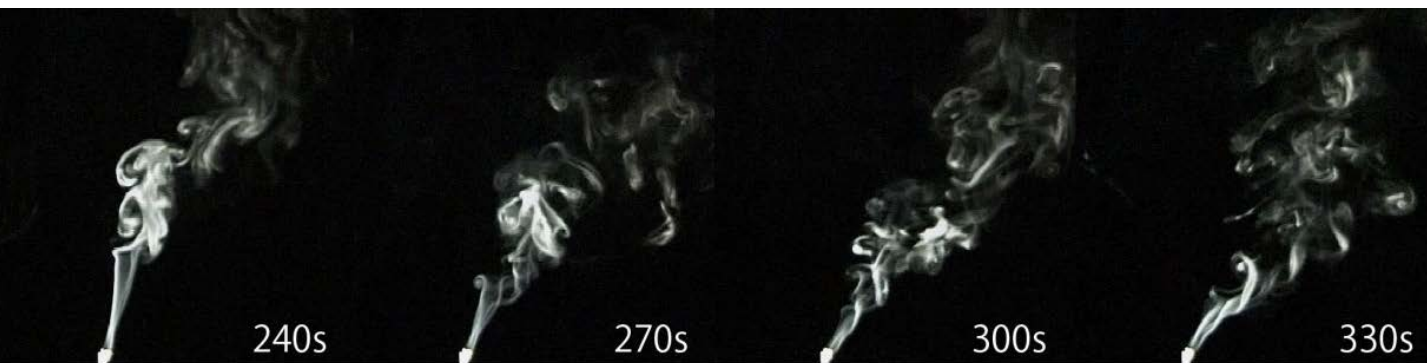
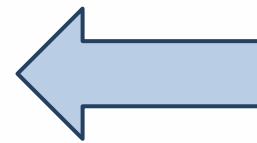


2011-03-16 18:00:00 JST



❖線香の煙の時間変化

●スナップショットと時間平均





気象ゾンデ観測
(潮岬)