

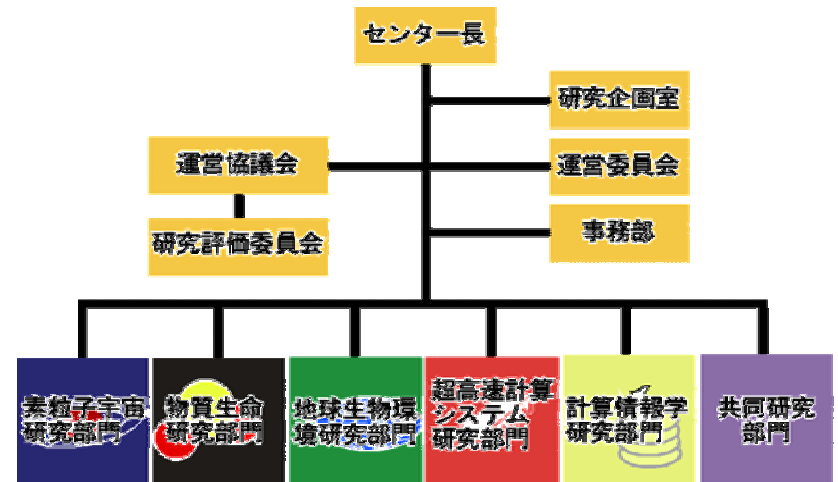
筑波大学CCS第1回シンポジウム2005.2.16/17

THORPEXと 気象データベース構築プロジェクト

筑波大学計算科学研究センター
地球生物環境研究部門
田中 博



地球生物環境研究部門



気象予測と気候予測

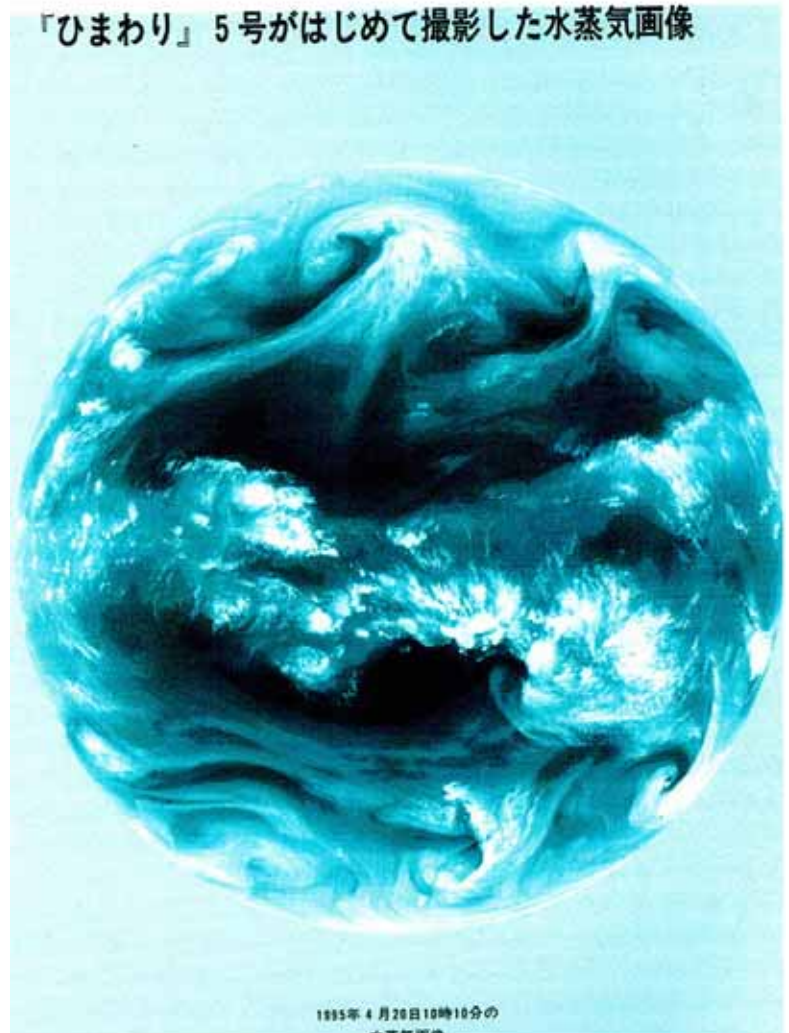
気象予測は初期値問題 気候予測は境界値問題

- 1 大気大循環モデルの発展
- 2 初期値問題とカオスの壁
- 3 アンサンブル予報
- 4 THORPEXプロジェクト
- 5 4次元同化：カルマンフィルター
- 6 気象大規模データベース構築

THORPEX (The **O**bserving System **R**esearch and **P**redictability **E**xperiment)
とは「大気観測システム研究・予測可能性実験」のこと。

大気大循環モデルの発展

大気大循環研究とは



気象力学理論

運動方程式
熱力学の式
連続の式
状態方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(u) + S$$

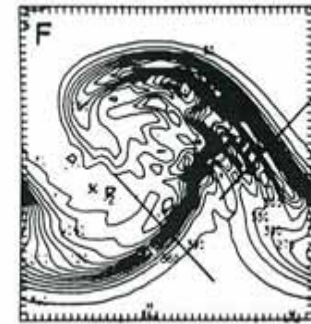
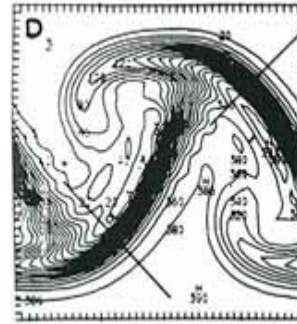
物理量の変化 = 内部力学効果 + 外部強制

大気大循環モデルと短期予報

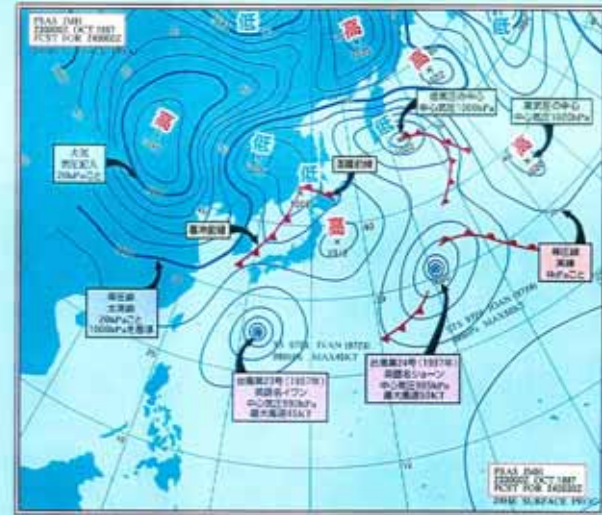
数値予報ってなあに？



数値予報とは、大気のリシユレーションといていふ。こんなふうに大気を小さく分けて、年々のフーフの場所の風や気圧をコンピュータで計算するのが数値予報なんだ。



アジア地上24時間予想天気図



基礎方程式系

Equations of motion:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial u}{\partial \phi} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{a} \tan \phi + \frac{uw}{a} = 2\Omega v \sin \phi - 2\Omega w \cos \phi - \frac{1}{\rho a \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_1,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial v}{\partial \phi} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u^2}{a} \tan \phi + \frac{vw}{a} = -2\Omega u \sin \phi - \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mathcal{F}_2,$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial w}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial w}{\partial \phi} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{(u^2 + v^2)}{a} = 2\Omega u \cos \phi - g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mathcal{F}_3.$$

Equation of continuity:

$$\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial (v \cos \phi)}{\partial \phi} + \frac{1}{\rho_R} \frac{\partial (\rho_R w)}{\partial z} = 0.$$

Thermodynamic equation:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \phi} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \mathcal{Q}.$$

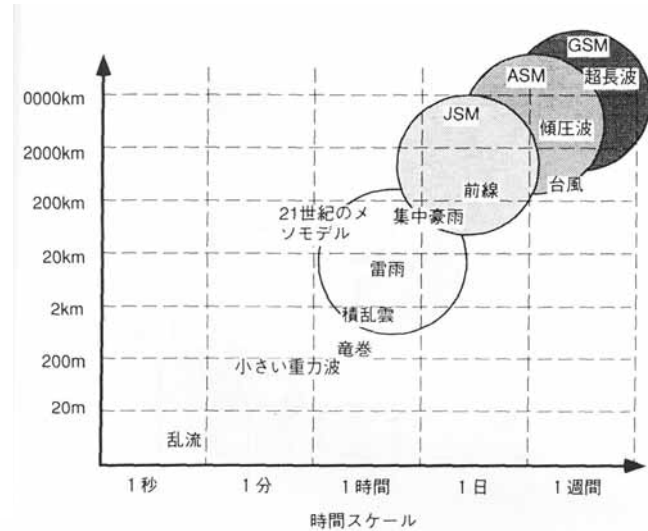


図5.1 気象庁の現在の各数値予報モデルが予報対象とする気象擾乱のスケール

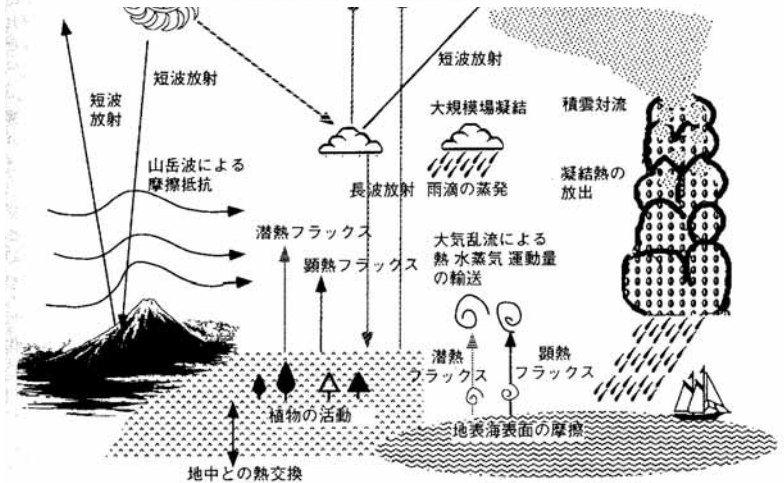


図5.12 数値予報モデルに取り込まれている物理過程。

水平鉛直グリッド

Model Resolutions

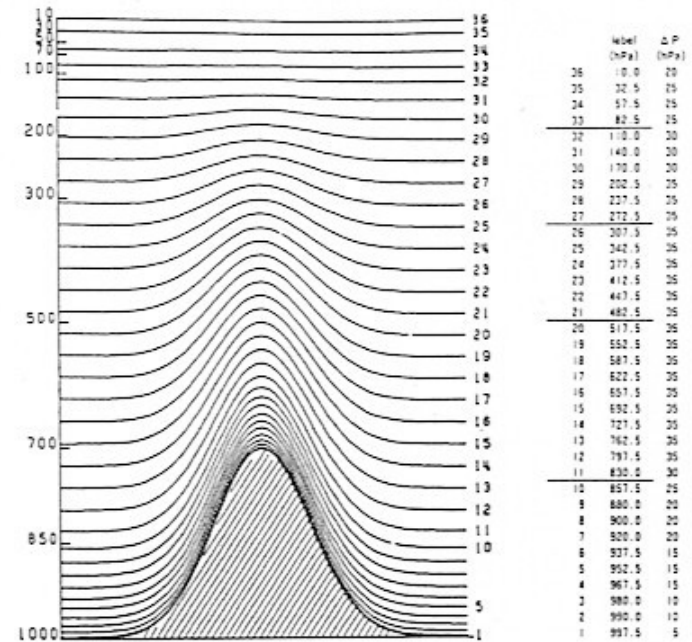
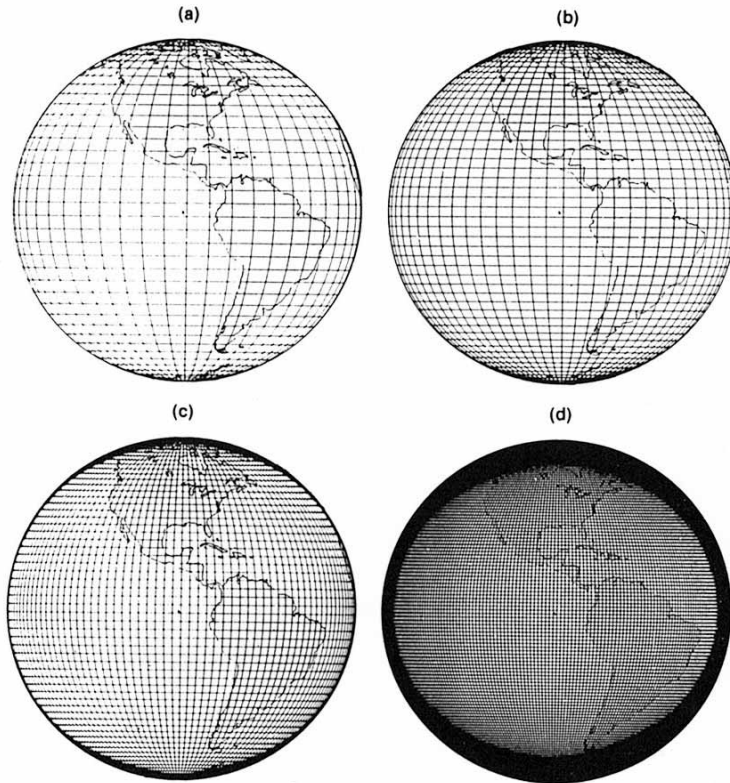


図 3.5 新領域モデルの鉛直レベル。
右は地上気圧を1000hPaとしたときの値。850・500・300・100hPaの
レベルを実線で示した。(気象庁提供)

演算速度の変遷

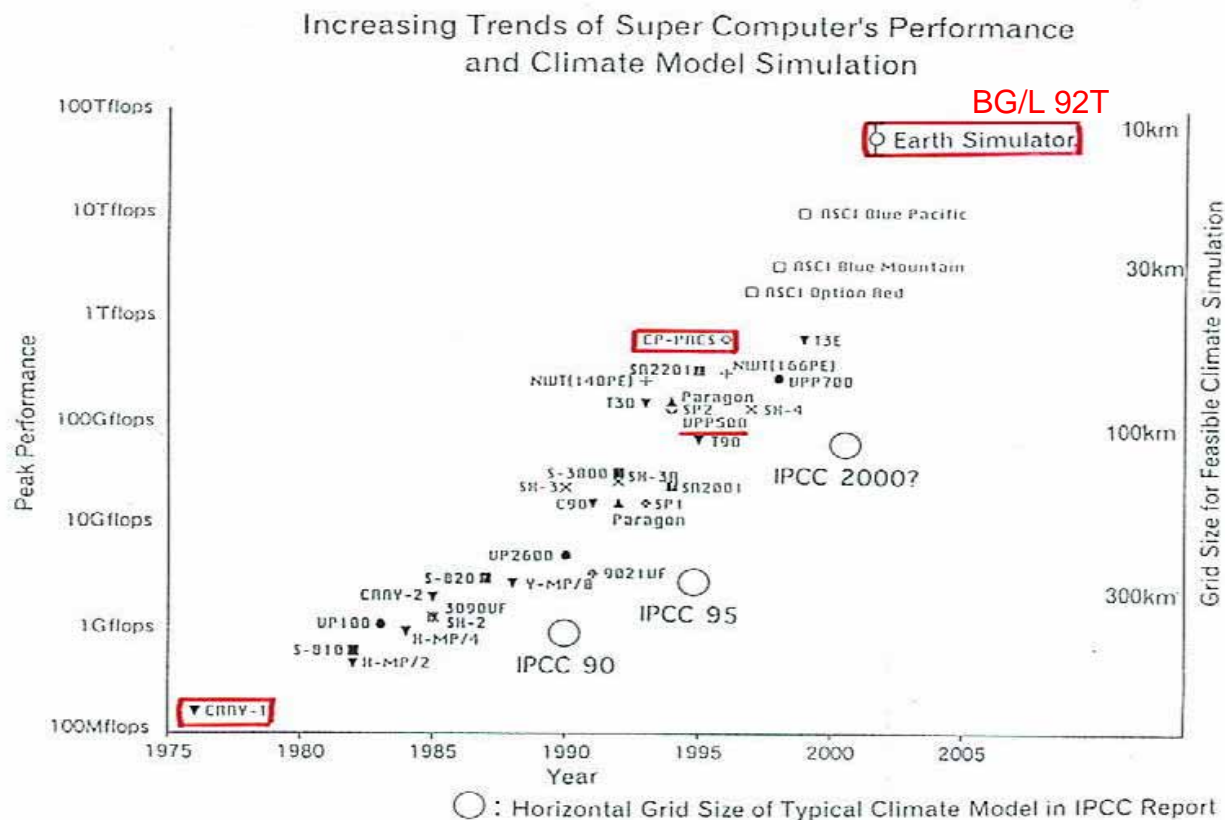
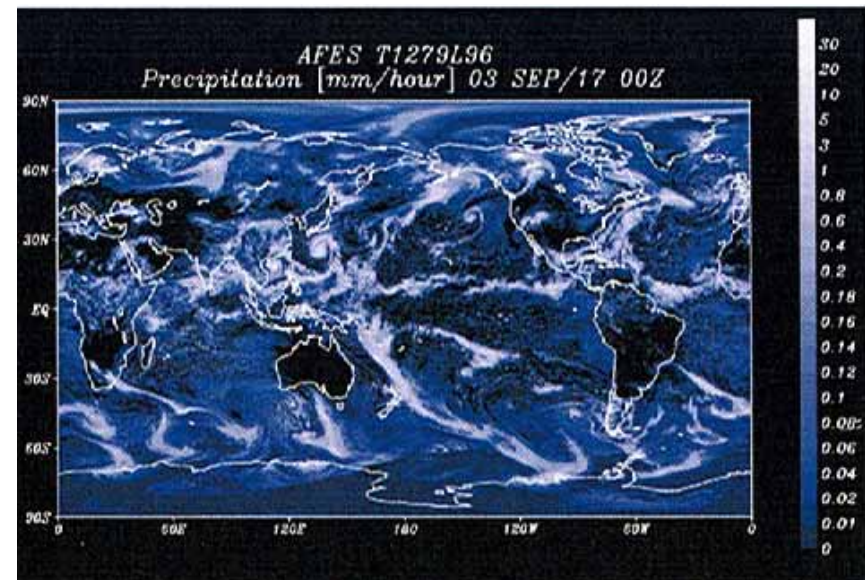
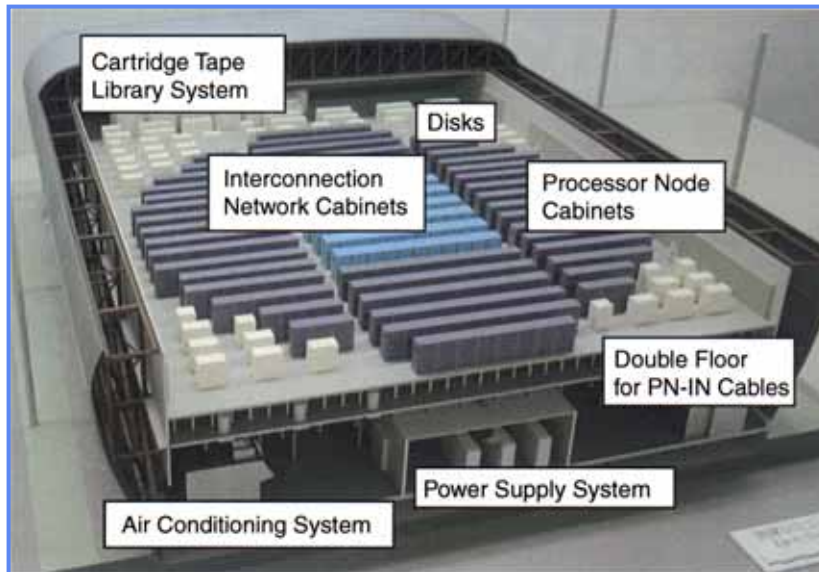


Figure 7-1: Increasing Trends of Super Computer's Performance and Climate Model Simulation

大気大循環モデル → 気候システムモデル → 地球システムモデル

Earth Simulator
(Super Computer)

10年で 40T flops → 4P flops?

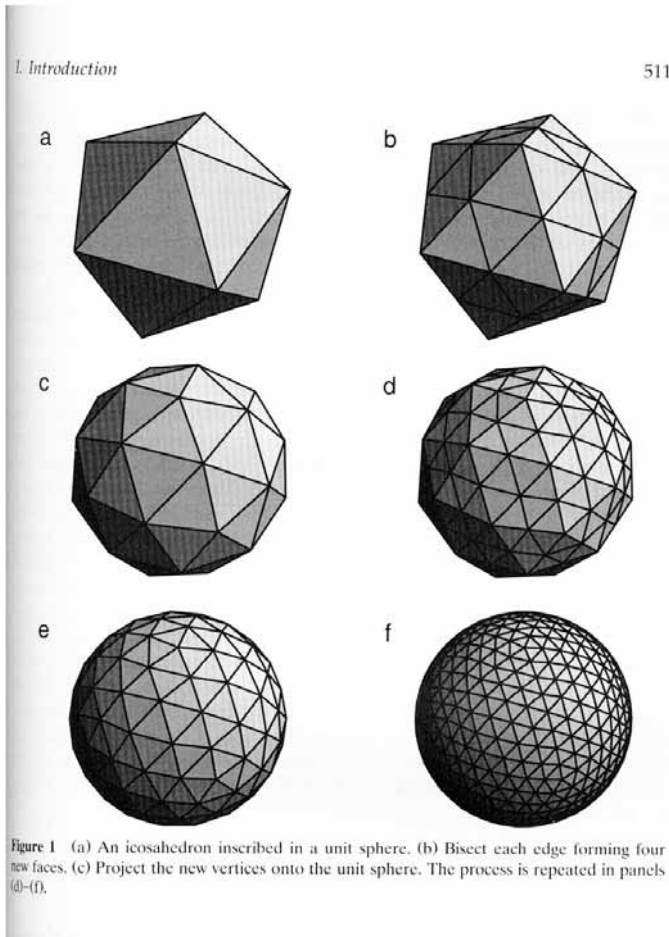


(Ohfuchi et al. 2005, EOS)

将来の格子網

正多面体格子

10年後の予測



大気の格子網

10km \rightarrow 1km 10倍
t 1分 \rightarrow 0.1分 10倍

海洋の格子網

1km \rightarrow 0.1km 10倍
t 10分 \rightarrow 1分 10倍

陸域の格子網

1km \rightarrow 0.1km 10倍
t 100分 \rightarrow 10分 10倍

トータルとして 10000倍

初期値問題とカオスの壁

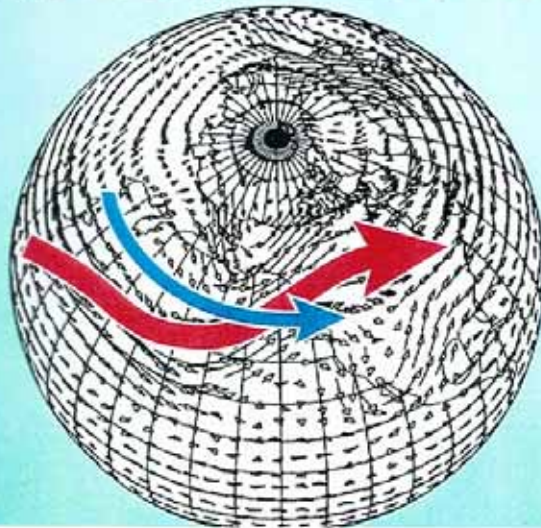
(観測による初期値からの数値積分)

プラネタリー波

(ジェット気流の蛇行)

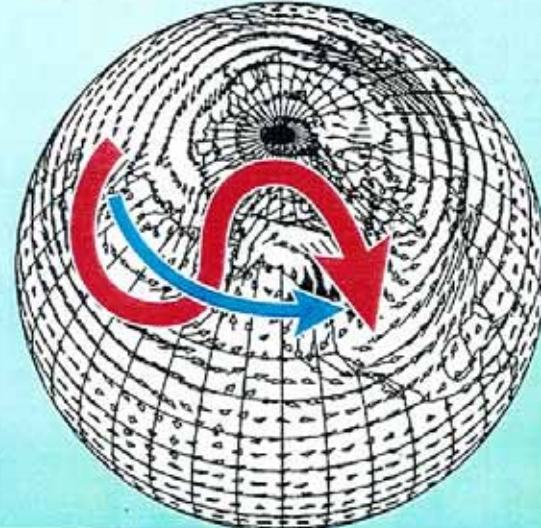
500hPaの風ベクトル

(1989年1月24~28日平均)

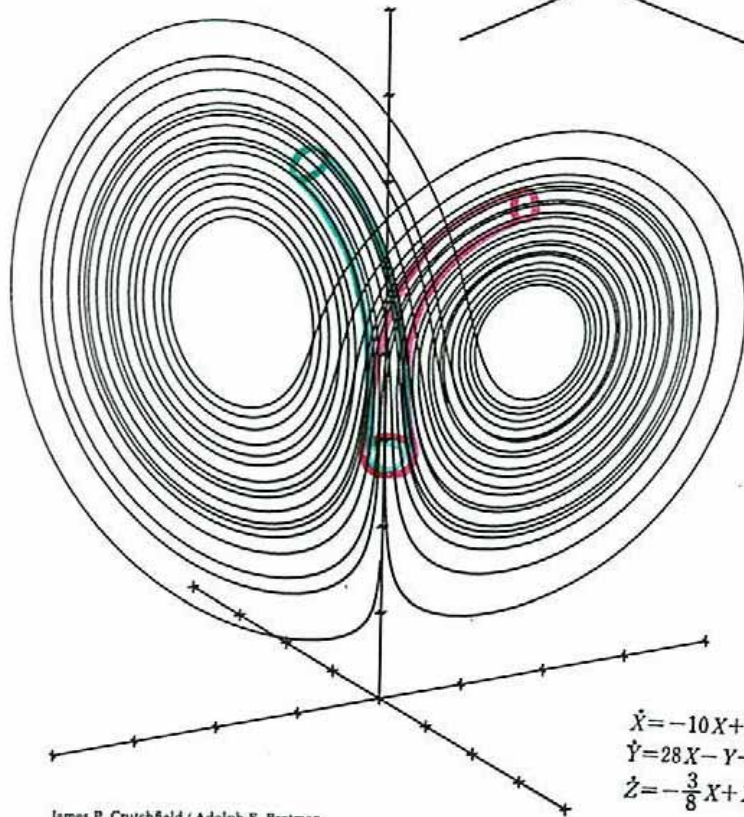
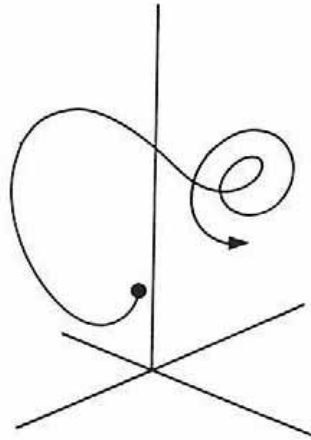
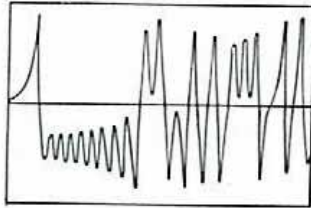


500hPaの風ベクトル

(1989年2月3~7日平均)



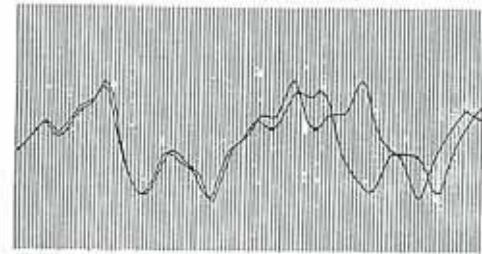
Lorenz Chaos



$$\begin{aligned}\dot{X} &= -10X + 10Y \\ \dot{Y} &= 28X - Y - XZ \\ \dot{Z} &= -\frac{3}{8}X + XY\end{aligned}$$

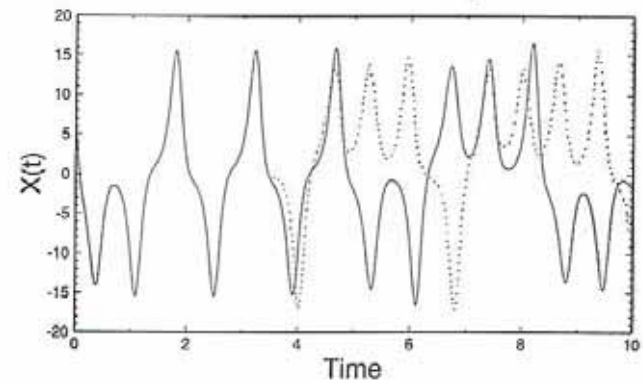
James P. Crutchfield / Adolph E. Brotman

The Butterfly Effect 17
(ドワフライ効果)

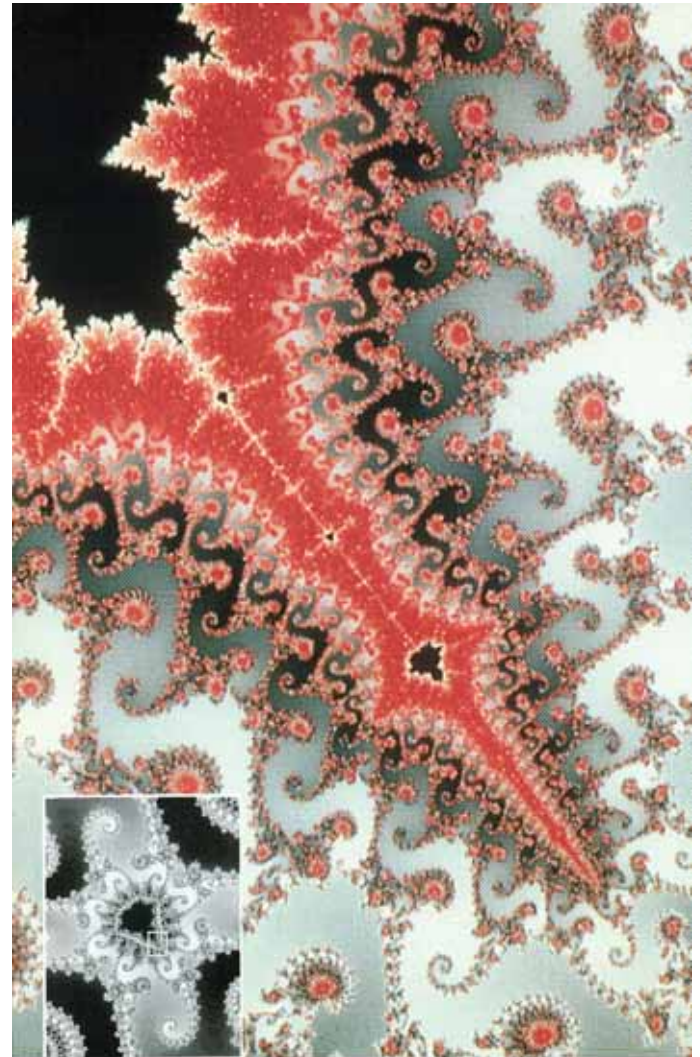
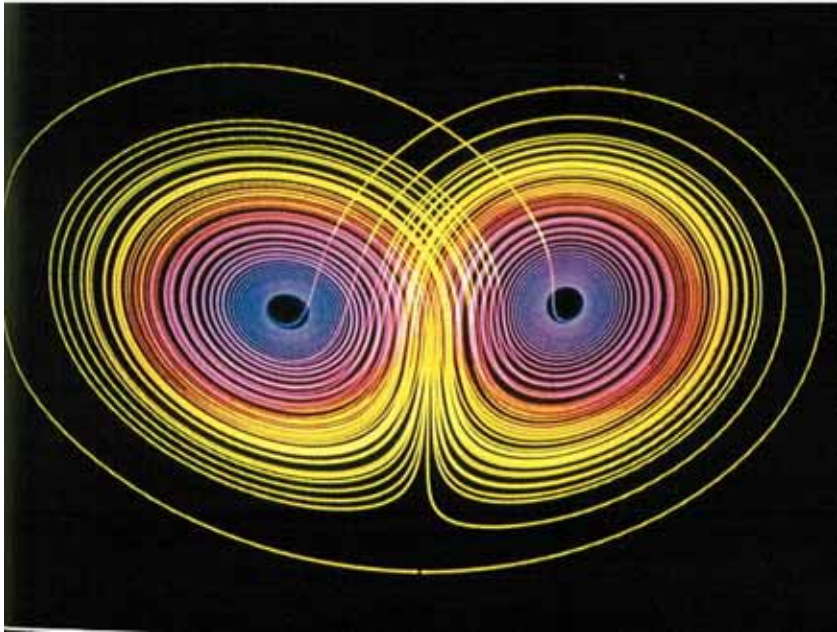


HOW TWO WEATHER PATTERNS DIVERGE. From nearly the same starting point, Edward Lorenz saw his computer weather produce patterns that grew farther and farther apart until all resemblance disappeared. (From Lorenz's 1961 printouts.)

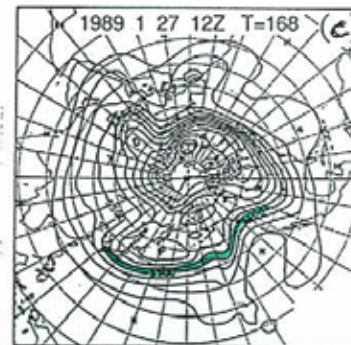
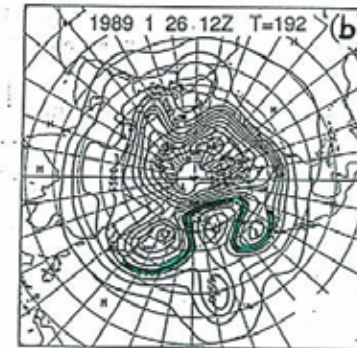
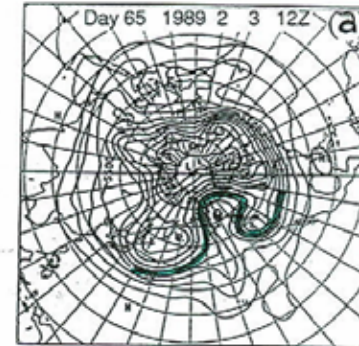
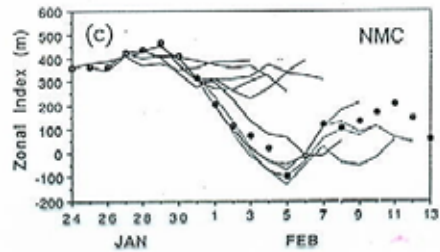
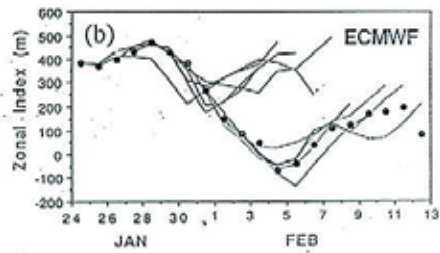
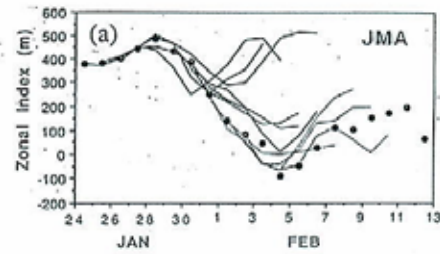
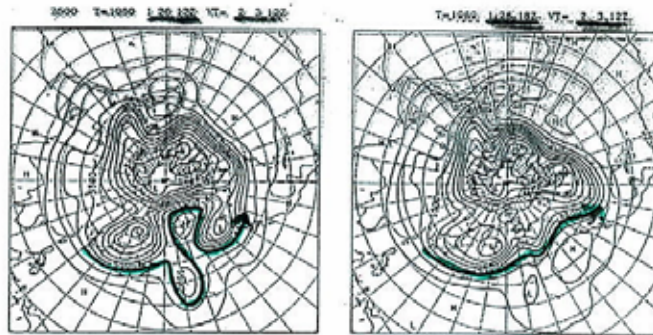
Chaos in Lorenz System



カオスとフラクタル



大気に見られるカオス性



第3図 (a)1989年2月3日12GMTの500mb等圧面高度場解析図、(b)1月26日12GMTを初期値とする8日予報、(c)1月27日12GMTを初期値とする7日予報。

大気の予報限界・アンサンブル予報

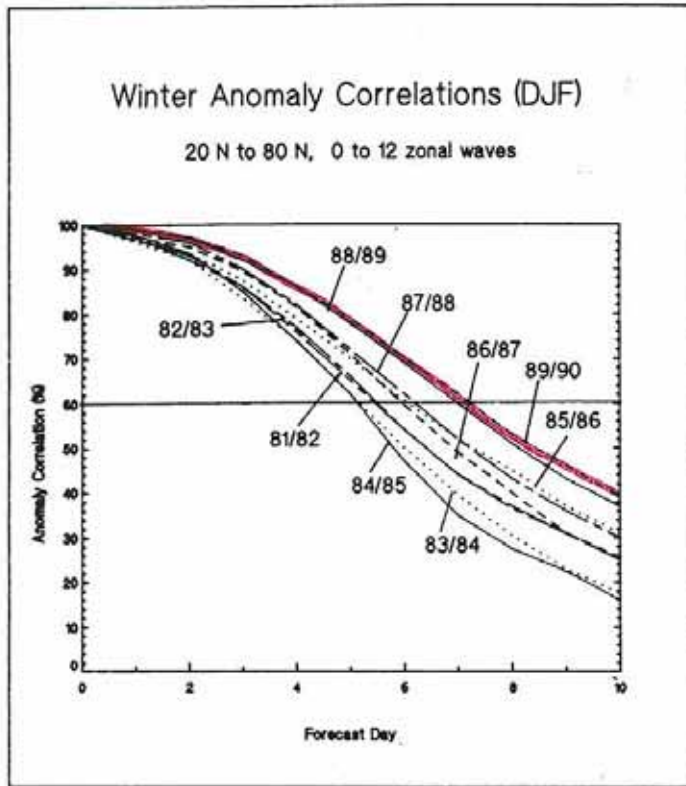
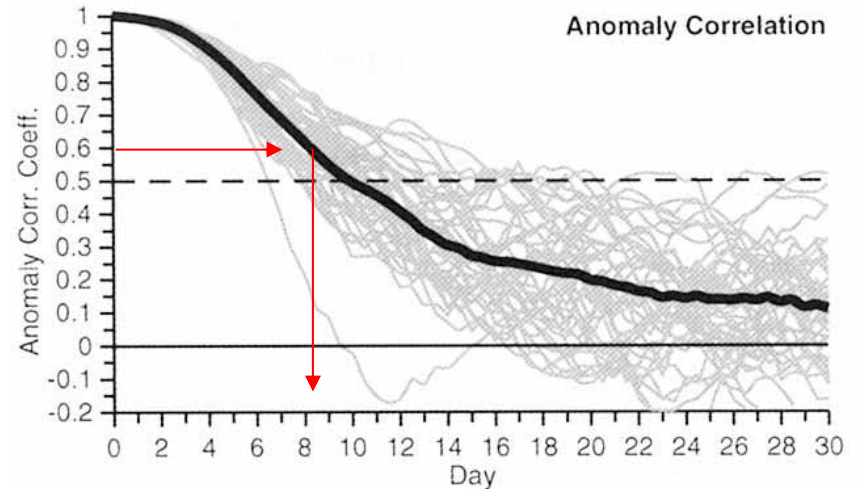


FIG. 6. Anomaly correlation (see footnote 2) as a function of forecast length for the December-January-February winter seasons of 1981/82 throughout 1989/90. The anomaly correlation is computed from 20°N to 80°N and includes only zonal wavenumbers 0 to 12.

今日の予報限界は約8日

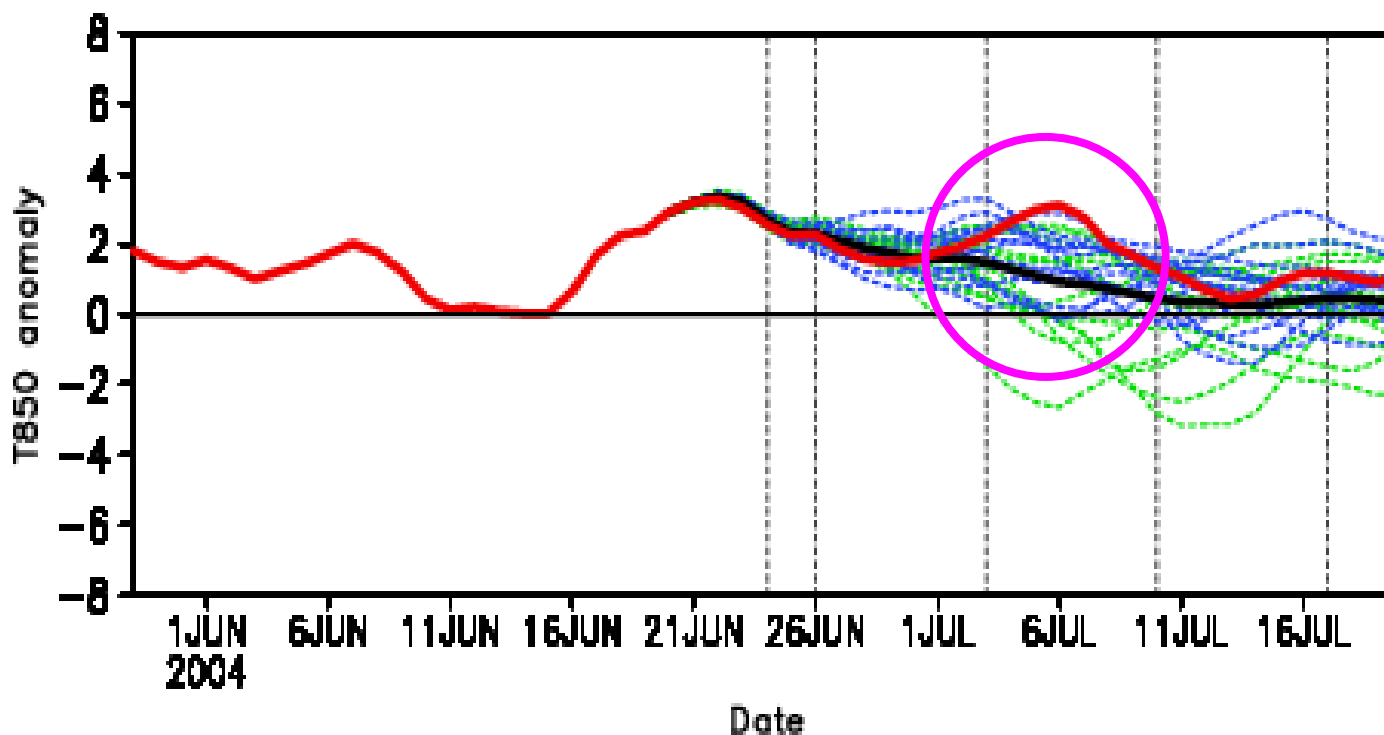


ECMWF Ensemble Forecasts (46 forecasts)
(Vitart 2005)

気象庁1か月数値予報モデルの仕様

モデル名	T106V0305 (週間アンサンブル予報と同じ)
予報時間	34日
水平分解能	1.125度,約110km
鉛直層数	40層
モデル最上層気圧	0.4hPa
メンバー数	26(BGM法とLAF法の併用)
海面水温	初期時刻の平年偏差固定
計算実行	毎週水曜日と木曜日の12UTC(21時)を初期値とし、各13メンバー

東日本の気温の予測 2004/6/24初期値



7日移動平均T850偏差予測 東日本上空

THORPEXプロジェクトとは

- 世界気象機関(WMO)が2003年から10年計画で実施
 - 初期値問題として、1日から2週間先までの予報精度向上が目的
 - データ同化システム、アンサンブル手法等の開発
 - 新規パラメタリゼーション等の実践的検証、モデルの改良
 - カルマンフィルタ等の先鋭データ同化手法の検討 (筑波大)
 - 物理過程に確率変数を導入したアンサンブル手法の検討 (筑波大)
 - 新観測システムと予測モデルの合体
 - 観測システムシミュレーション実験等
 - 機動的観測、鋭敏領域の詳細観測データ、トラジェクトリーマッチ観測
 - 次世代衛星データの同化手法開発、実践システムでの検証
 - 解析・可視化ツール、大規模データベースの開発 (筑波大)
 - 再解析・現業データ等の研究コミュニティへの流通 (筑波大)
 - 国際貢献
 - WCRP, IGBPへの研究コミュニティの参画
 - アジア諸国への実験的予測システムの技術移転、高度化教育等

気象庁

次期予報
解析システム
の提案

一括共同
研究契約の締結

現予報
解析システム
の改良点指摘

現業データ・現業予報解析システムの提供

実験的気象予測研究CONSORTIUM

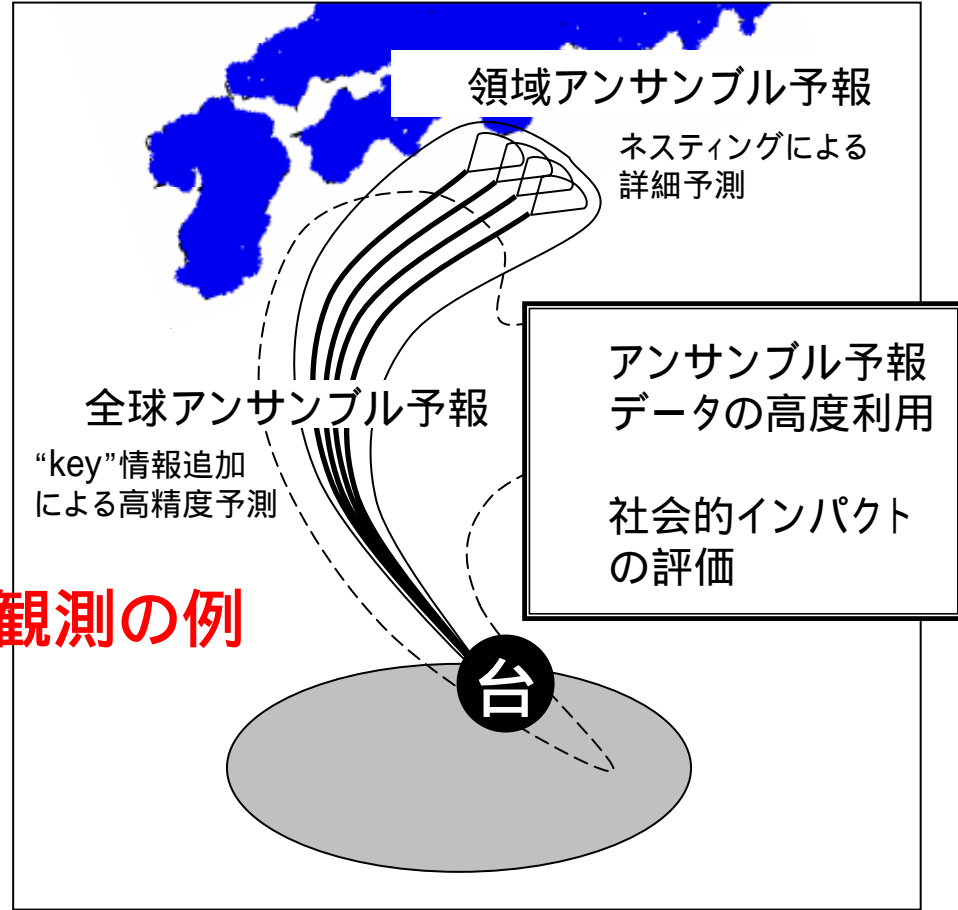
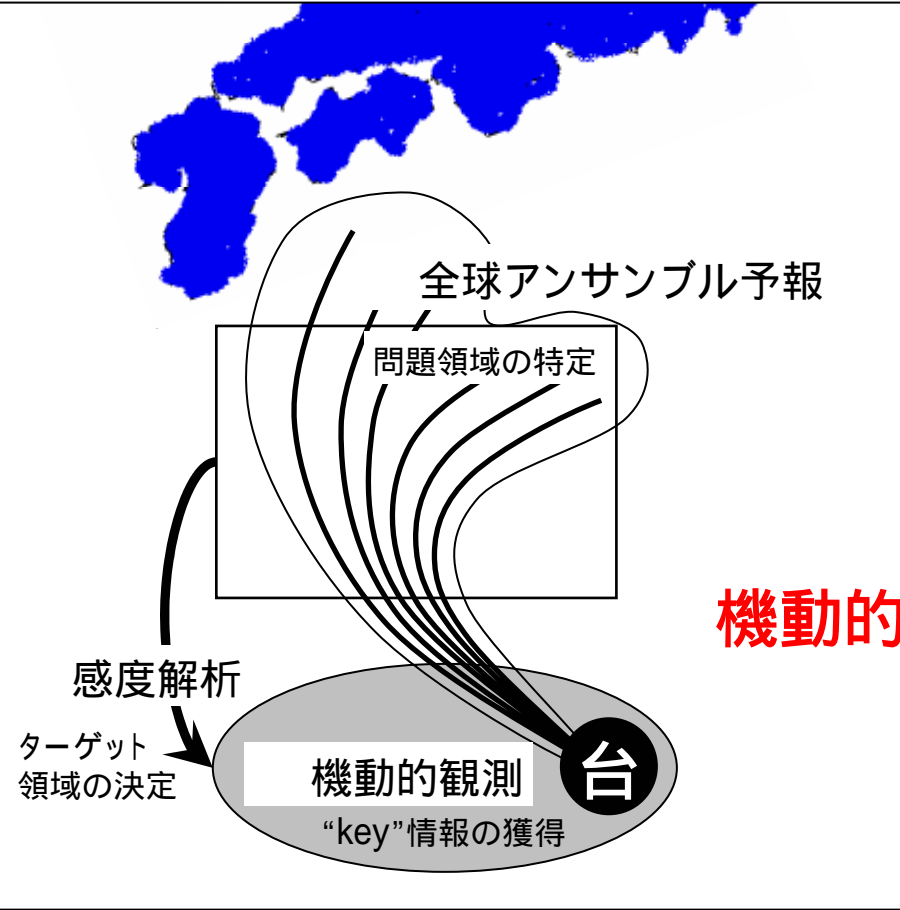
気象庁と大学・研究機関との統一インターフェイス

次世代予報解析
システム実験

事例解析・
ハインドキャスト実験

大学・研究機関

フロンティア・ESC・電力中研他



機動的観測の例

台風予報を例にとった、本計画のねらいの概念図

台風のような大雨をもたらす気象擾乱の予測には、雲や水蒸気など、大気中の「水」を観測し、初期値化することが重要である。従来のアンサンブル予測システムでは、複数の初期値を作成する際に「水」のからむ湿潤過程が考慮されていないため、4-5日先までの台風の進路予報に大きな誤差を生ずる可能性がある。本計画では湿潤過程を含む新しい初期値化手法を開発して、広域をカバーする全球大気モデルによるアンサンブル予報精度を向上させる。

また、擾乱の進路予報には、その周囲の広い領域（多くは海上）における気象観測データが重要である。この例では、大きな予報誤差を生じた西向きから東向き進路への転向点付近の問題領域を特定し()、感度解析により予報改善の鍵となるターゲット領域を決定する()。そして、速やかに航空機や新型バルーンを用いた機動的観測を展開して、ターゲット領域の“key”情報を獲得する()。得られた“key”情報を追加して高精度のアンサンブル予測を行う()とともに、数日先の全球モデル予測結果に埋め込んだ(ネスティングと呼ぶ)高分解能領域モデルによるメソアンサンブル予測手法を開発して、広域モデルでは表現しきれない局地的な豪雨分布の予測情報を得る()。

さらに、「実験的予測研究プラットフォーム」を構築して、アンサンブル予報データの高度利用法を試験開発する()とともに、ユーザーのニーズに応える気象予測情報の提供方法を提案しアンサンブル予報情報の社会的インパクトを評価する()。

Stochastic Physics

全球10kmグリッドでも、ミクロな現象の
パラメタリゼーションは必須



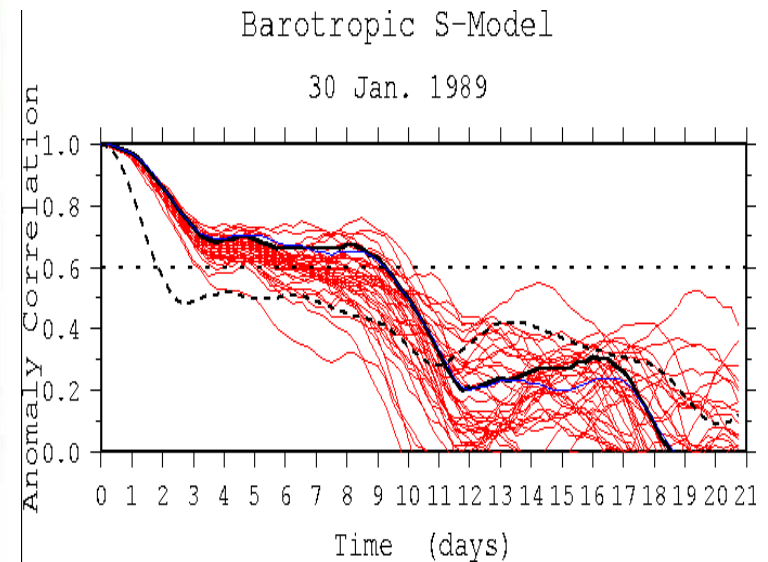
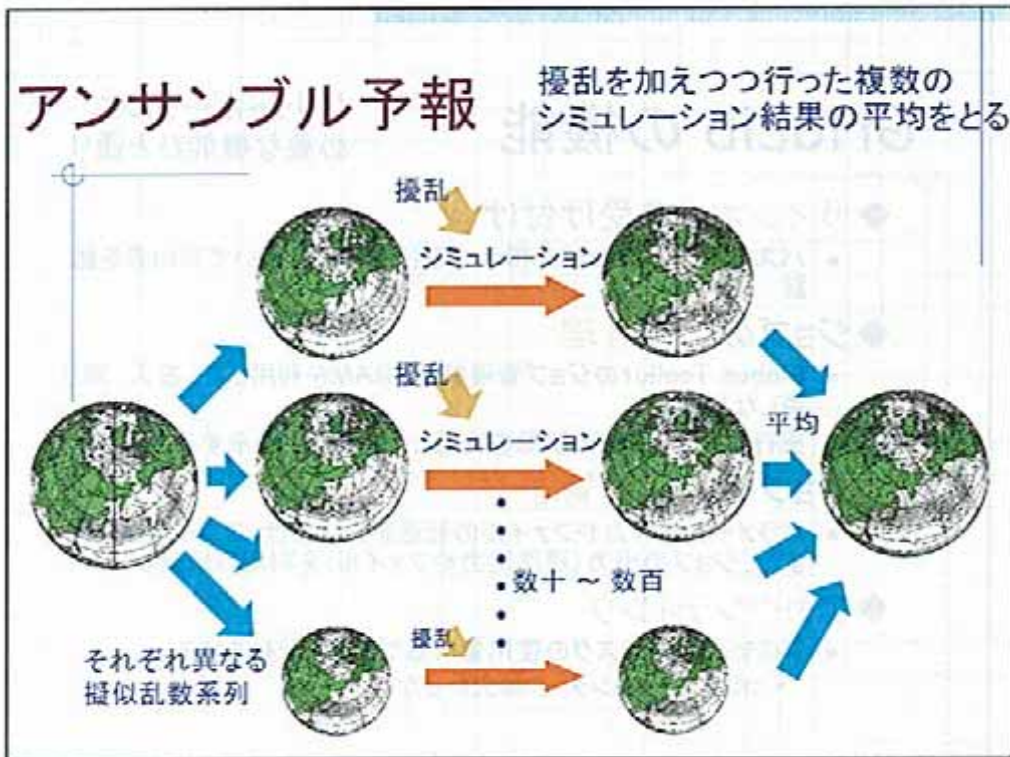
物理過程に確率過程を導入し
新たなアンサンブル予報を構築



Stochastic Physics アンサンブル予報の例

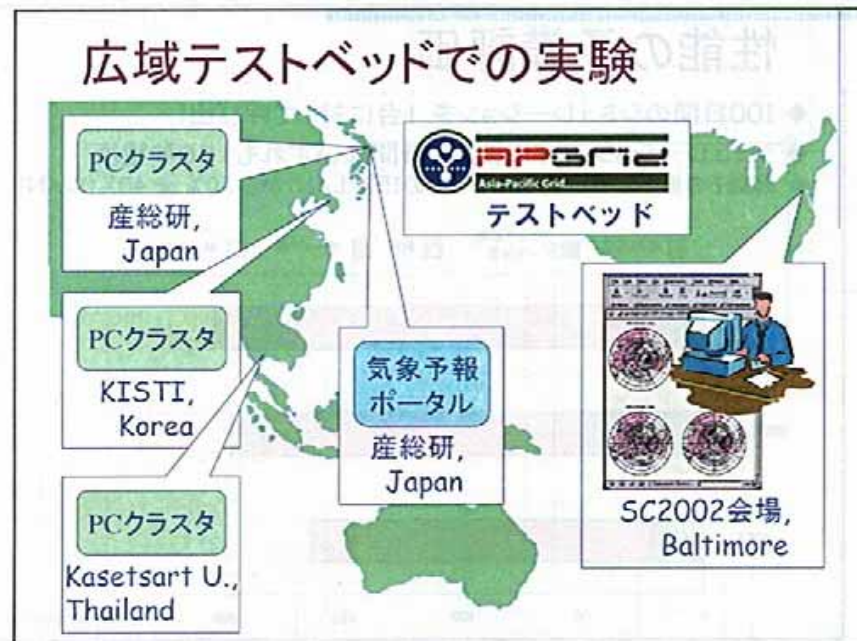
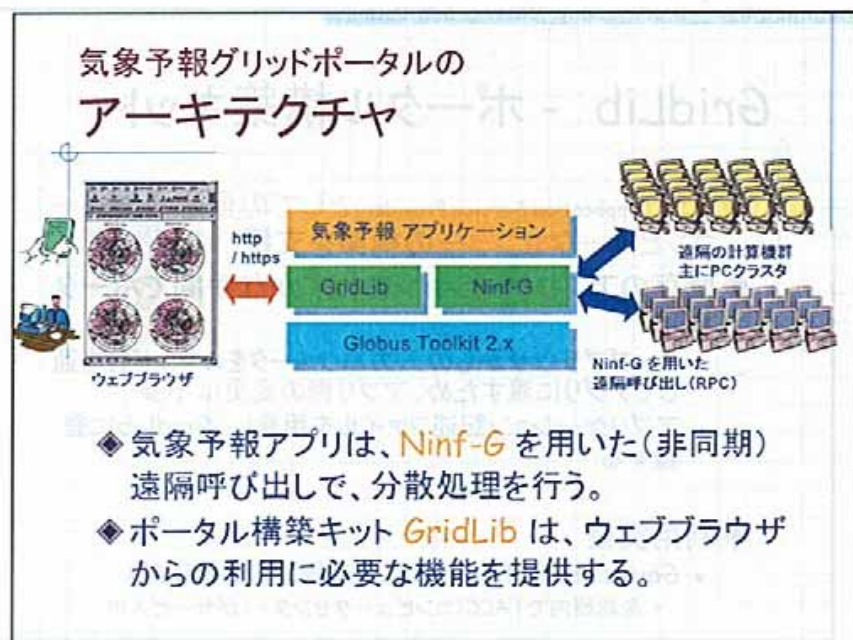
物理過程に確率変数

筑波大学の順圧大気大循環モデル



産業総合技術研究所との共同研究
(Takemiya et al. 2003)

気象予測グリッドポータル



PCクラスタによる1000のオーダーまでのアンサンブル予報実験が可能 (Takemiya et al. 2003)

4次元同化の原理

モデル(例) 移流方程式 $\frac{\partial T_f}{\partial t} = -U \frac{\partial T_a}{\partial x}$

同化方程式: $T_a(i) = T_f(i) + K(i)[T_o(i) - T_f(i)]$

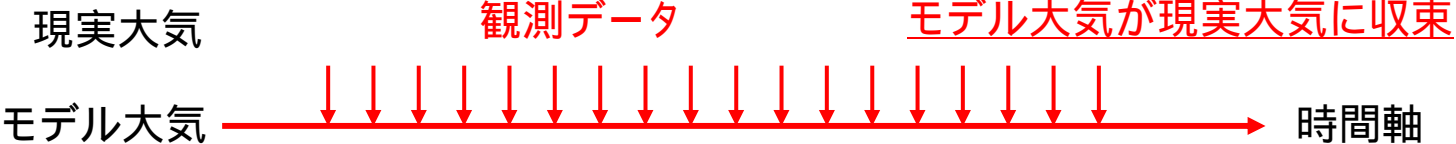


図3.9 予報解析サイクル（4次元間欠データ同化）の模式図。詳しくは本文参照。

観測が無くても予報値が残る！

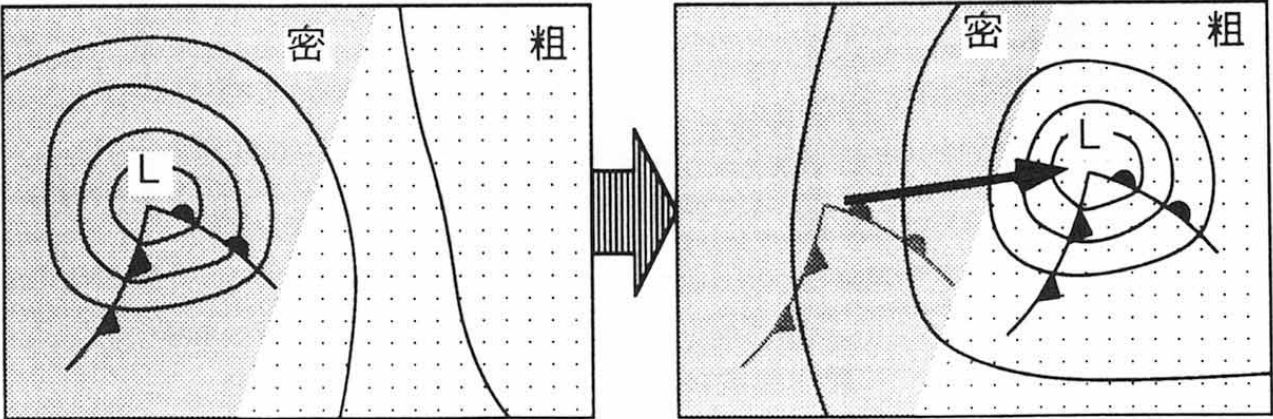


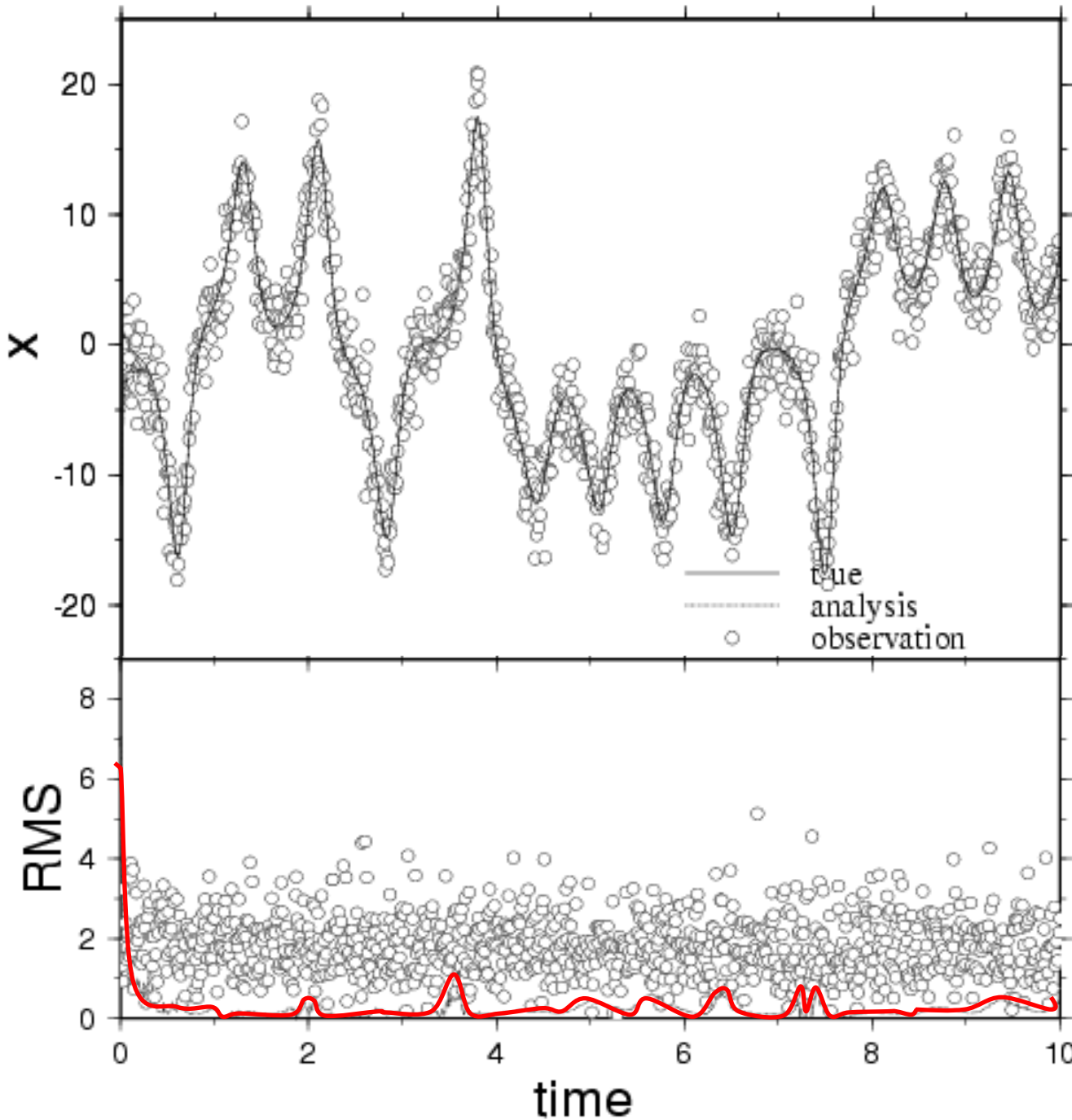
図3.10 観測データが密な部分の情報が，予報モデルによる予報を通じて，観測データの疎な部分に引き継がれていくことを表わす模式図。

究極の4次元同化:カルマンフィルターの開発

予報限界を伸ばす努力

1. モデルの改善 (高解像度化、非静力全球モデル、物理過程の理解)
2. 初期値の改善
 - ナッジング, 最適内挿法, 3D-Var, 4D-Var (近未来で達成)
 - Kalman Filter (15年後に達成予定)

$\mathbf{K}(i) = \mathbf{P}_f(i)[\mathbf{R}(i) + \mathbf{P}_f(i)]^{-1}$:カルマンゲイン 予報値と観測値のブレンド量の算出
$\mathbf{x}_a(i) = \mathbf{x}_f(i) + \mathbf{K}(i)[\mathbf{d}(i) - \mathbf{x}_f(i)]$:解析値の計算
$\mathbf{P}_a(i) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(i)]\mathbf{P}_f(i)$:解析誤差共分散行列の計算
$\mathbf{x}_f(i+1) = \mathbf{M}_{i \rightarrow i+1}\mathbf{x}_a(i)$:解析値を初期値とした予報値の計算
$\mathbf{P}_f(i+1) = \mathbf{M}_{n \rightarrow n+1}\mathbf{P}_a(i)\mathbf{M}_{n \rightarrow n+1}^T + \mathbf{Q}(i)$:予報誤差共分散行列の計算



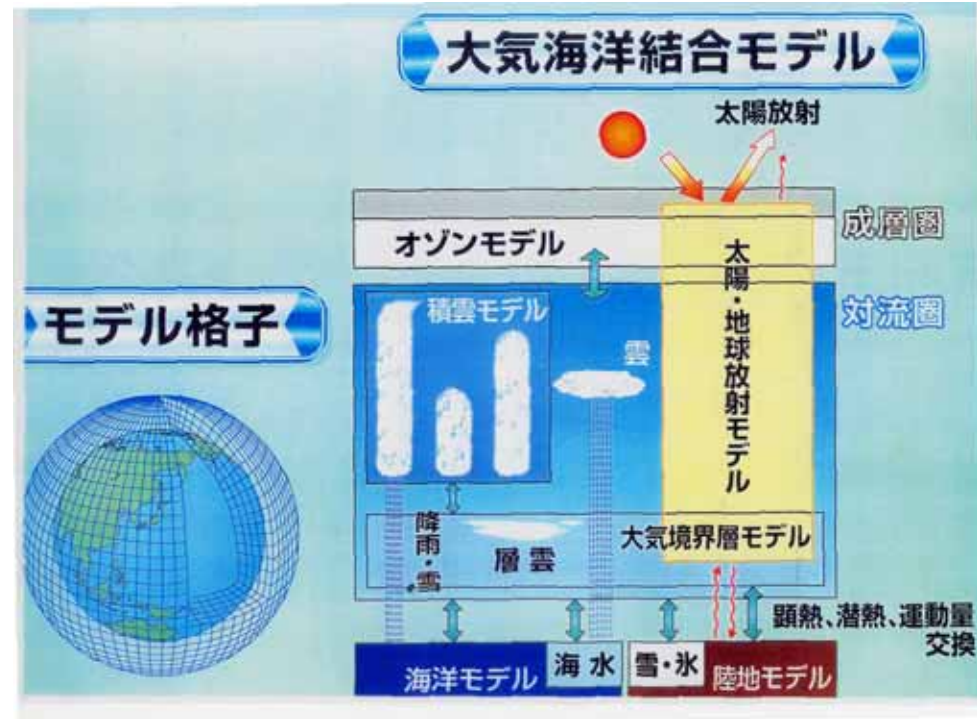
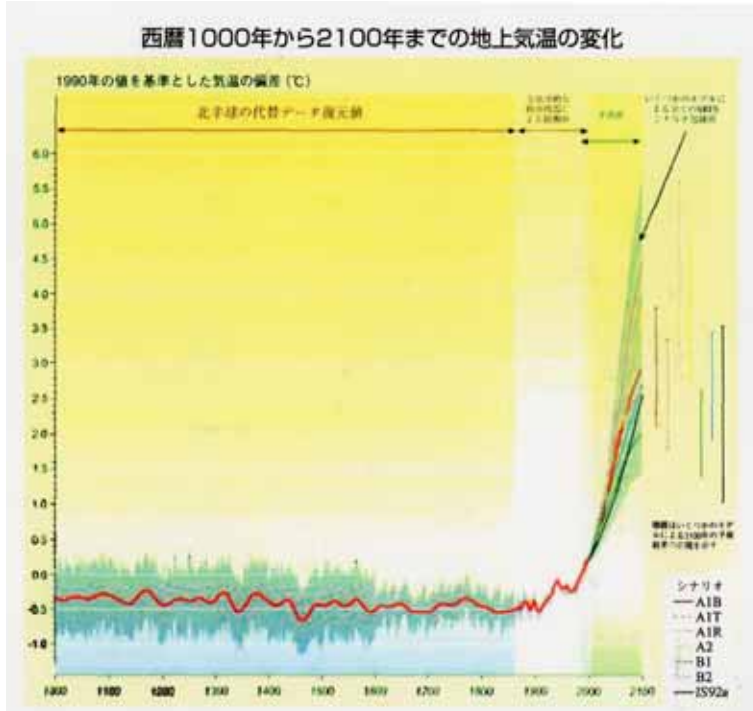
カルマンフィルターの
実験

4次元同化の夢

巨大な行列の逆行列
計算が必要

(Nohara and Tanaka 2003)

地球温暖化予測



京都議定書発効

読賣新聞

発行所
読賣新聞東京本社
第46307号

〒100-8055
東京都千代田区大手町1-7-1
電話 (03)3242-1111(代)
http://www.yomiuri.co.jp/

2005年(平成17年)2月17日 木曜日

世界初! メタルローラー搭載! フェザーの3枚刃。
肌をおさえて、深剃りできる。
エアシステム駆動



MR3
http://www.feather.co.jp

13版S

金重視鮮明に 2
こ黒人の思い複雑 6
で肝がん半減 38
朱、堤家の遺訓? 39
輝「にぎやかな天地」 10

派収支報告書

「2億数千万円記載せず」

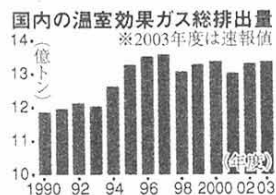
理事長 79
理として
(6) 並
取り、並
とも並
書に記

温暖化防止へ京都議定書発効

小泉首相は、京都市で開かれた京都議定書の発効記念式典に、首相官邸から生中継でメッセージを寄せ、「地球温暖化は既に現実のものとなっている。温室効果ガスの排出を続けば、将来の世代に地球規模で影響が生じる」との認識を示した。その上で、「日本には優れた環境技術があり、各国への普及を推進していく」と述べた。

また、「温室効果ガスを多量に排出している国で、いまだに京都議定書を批准していない国がある」とし、議定書を離脱した米國を暗に批判した。

首相がメッセージ



地球温暖化防止のための京都議定書が十六日、発効した。これにより、先進国に課された二酸化炭素(CO₂)など温室効果ガスの削減目標は国際公約となり、法的拘束力が生じた。議定書誕生の舞台となった京都市では同日、政府主催の記念行事が開かれるなど祝賀ムードに包まれたが、日本政府には今後、削減目標達成という高いハードルが待ち構えている。(関連記事2・7・8・11面)

CO₂ 6% 削減 (90年比)

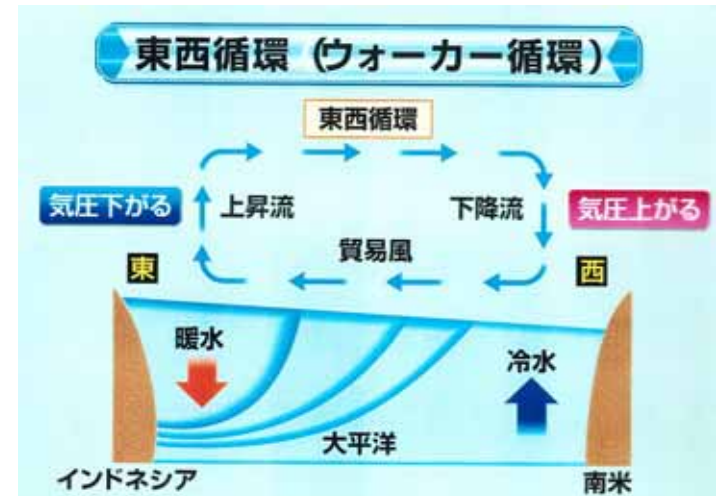
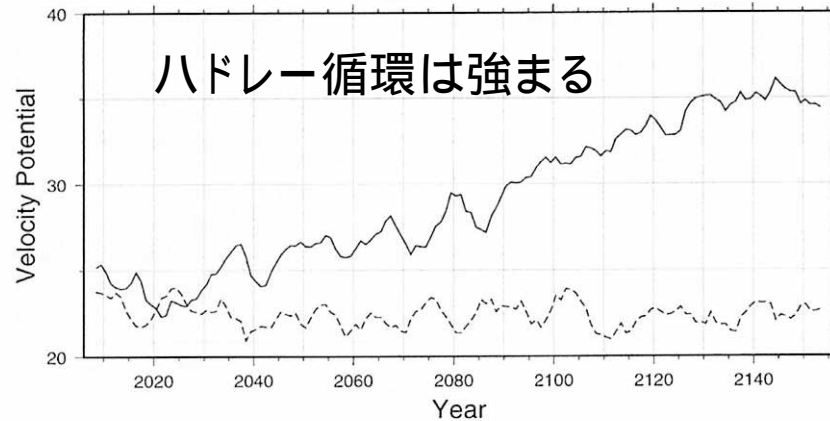
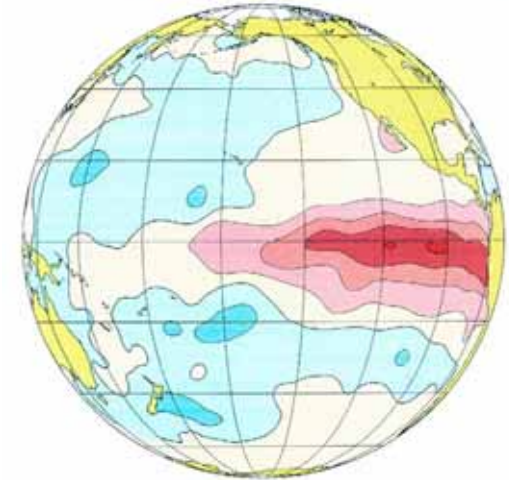
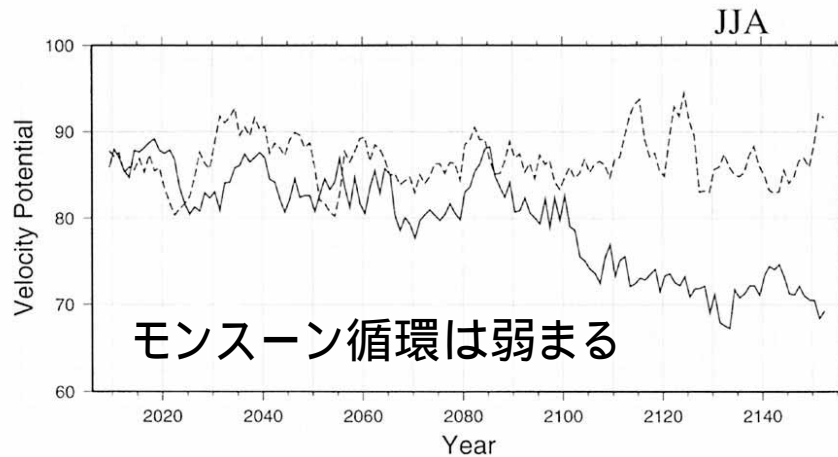
日本、国際公約に

日本は
八二一
排出量の
九〇年比
二〇〇三
年比
を省エネ
を省エネ
消費削減
1.6%
量取引

気象研モデルによる温暖化予測

IPCC AR4に参加

エルニーニョ

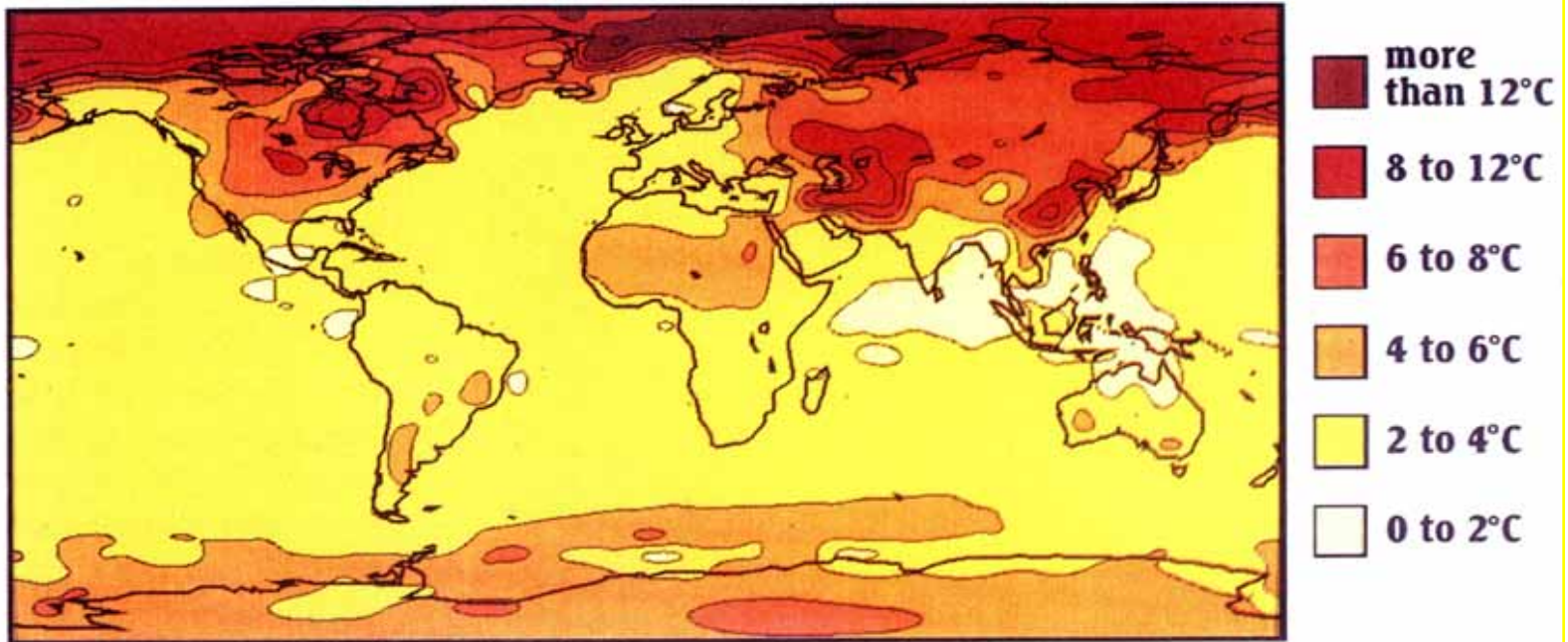


(Tanaka et al. 2004)

CO2倍増実験

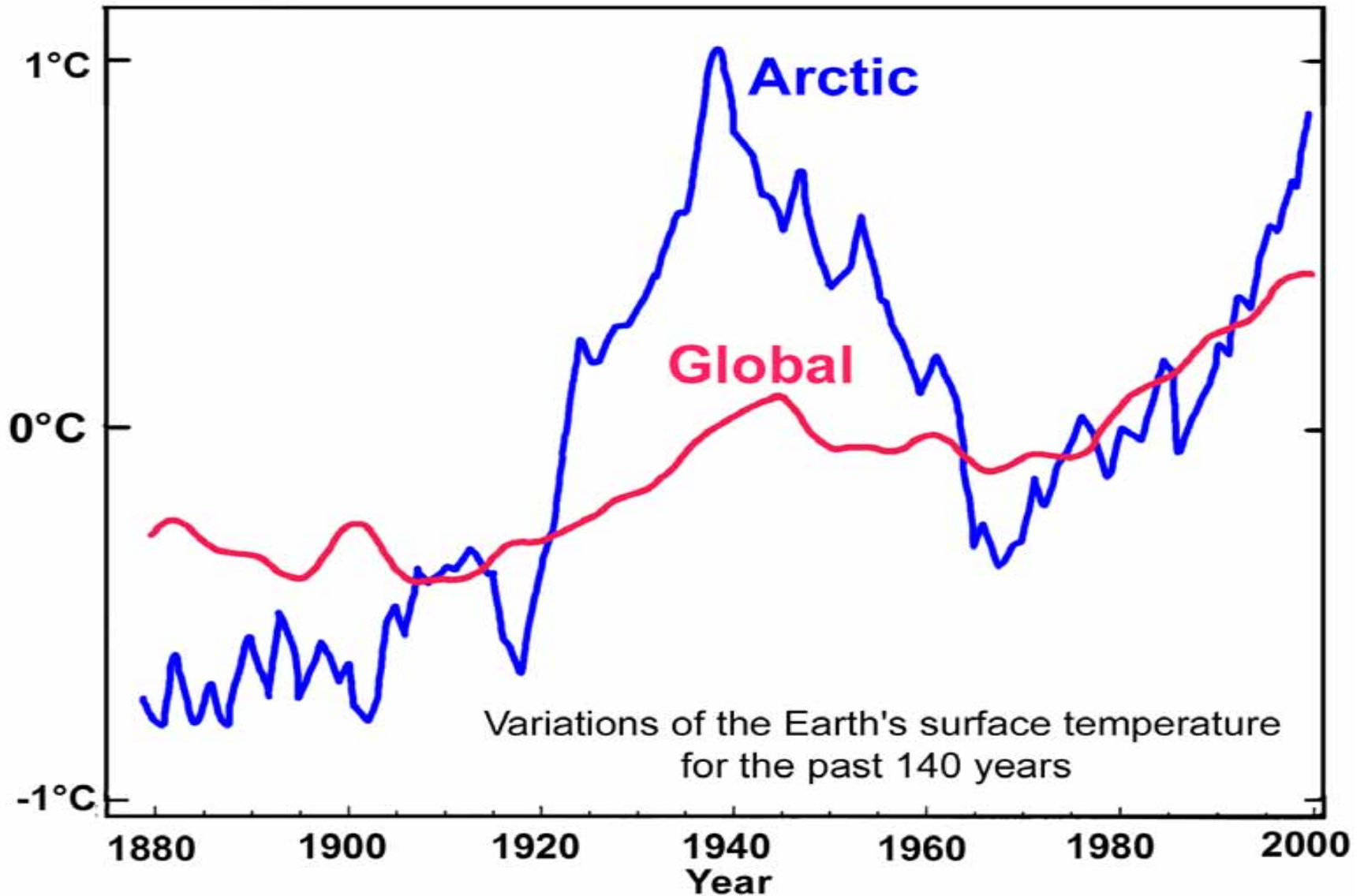
大気中の二酸化炭素増加を想定したコンピューターの気候予測は特に冬期の北極圏の気温上昇を予測している。

IPCC, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS



Projections from computer models predict large temperature increases in future arctic winters (Dec., Jan., Feb.) after CO₂ has doubled in the atmosphere.

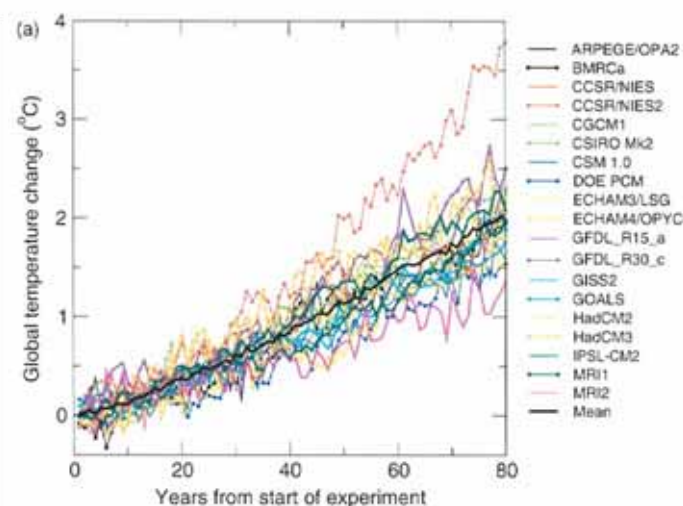
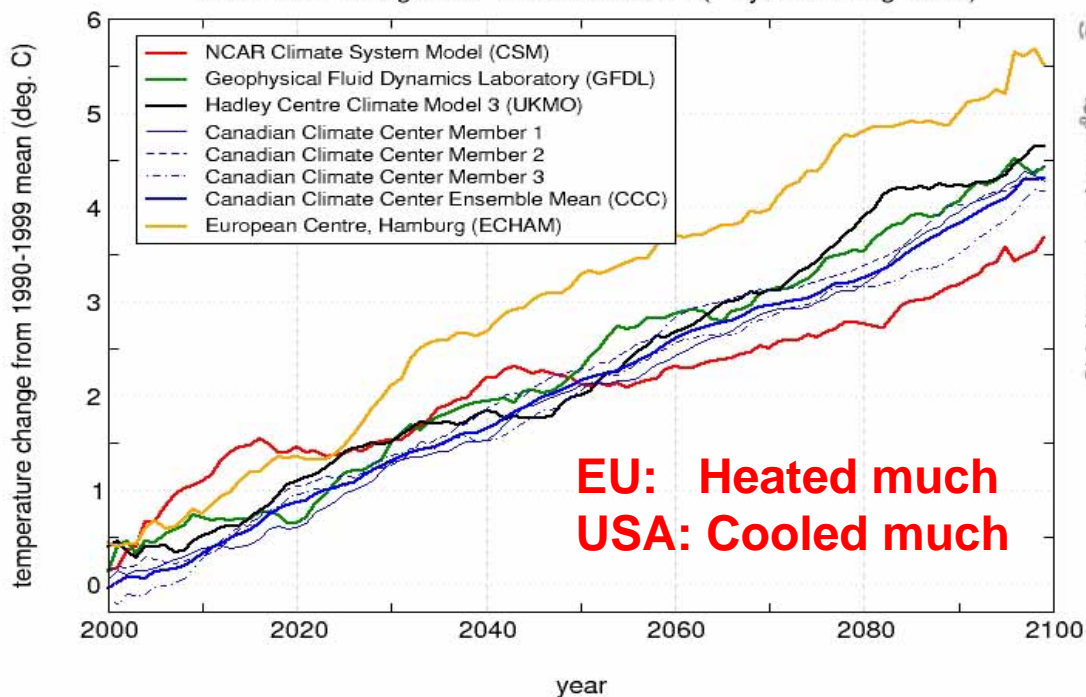
Global average (red) and the Arctic (blue) temperature variations during the last 140 years



極域気候変動の将来予測

極域の重点的観測が重要課題

GCM Projections - Arctic Surface Air Temperature
60N - Pole : Change from 1990-1999 mean (11-year running mean)



環境省 Heated much ?
国交省 Cooled much ?



International Arctic Research Center

日米共同研究



アラスカ大学国際北極圏研究センター (日米共同出資により1998年に設立)

CAMP プロジェクト (Climate of the Arctic: Modeling and Processes, NSF/USA)

JAMP プロジェクト (Japanese Arctic Monitoring and Process study, 特定領域申請中)

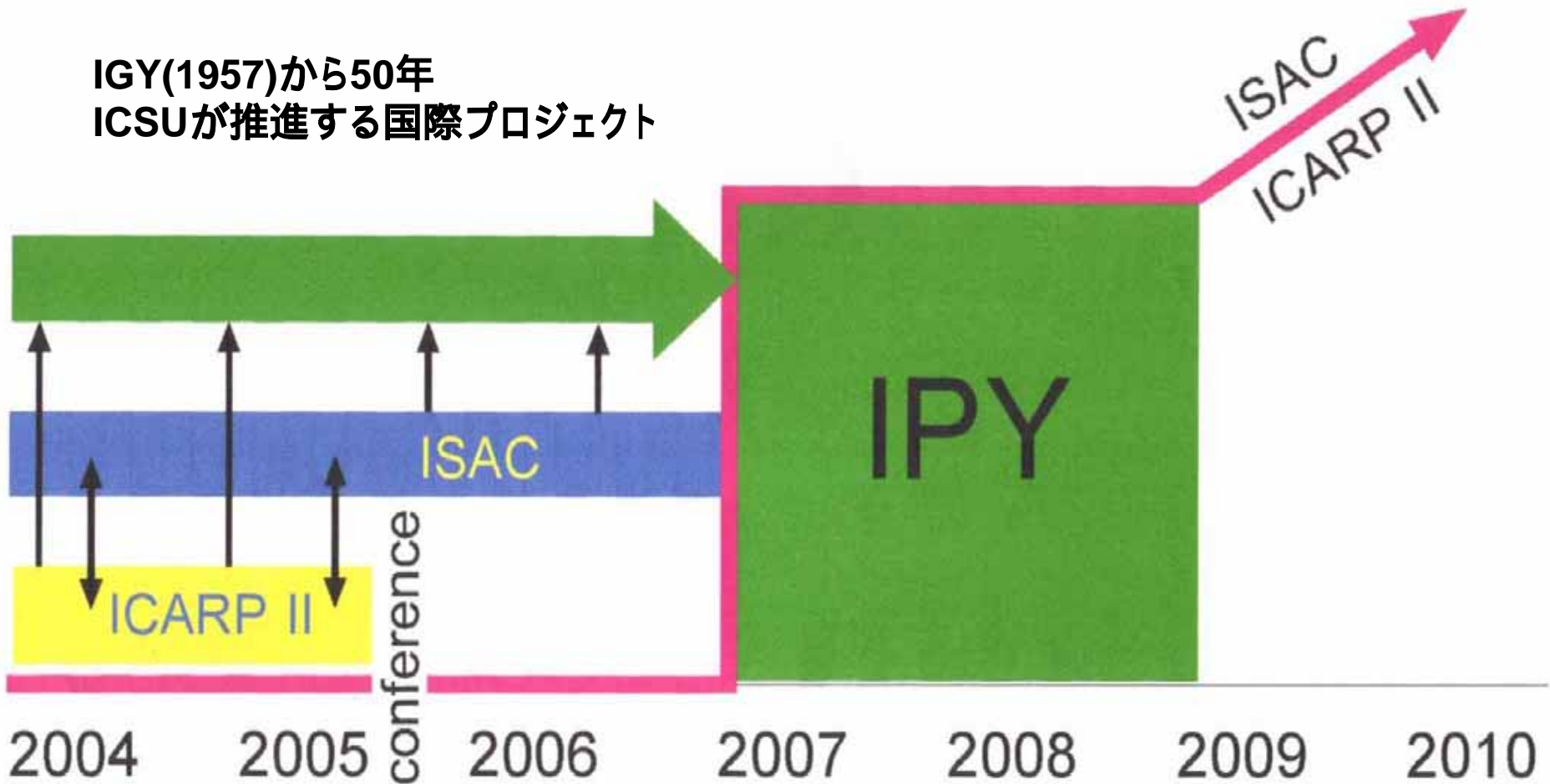
International Polar Year

Planning

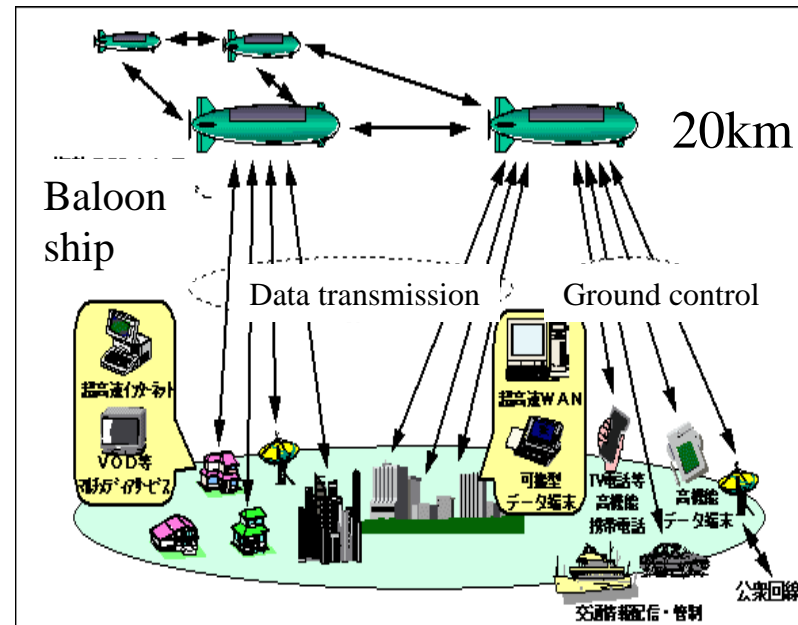
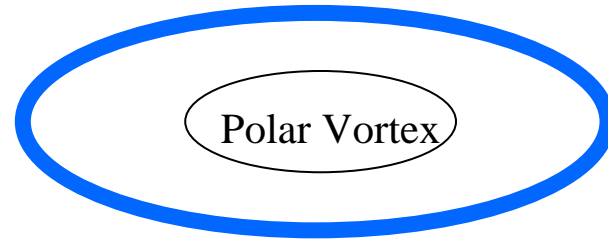
Snapshot

Long-term
implementation

IGY(1957)から50年
ICSUが推進する国際プロジェクト

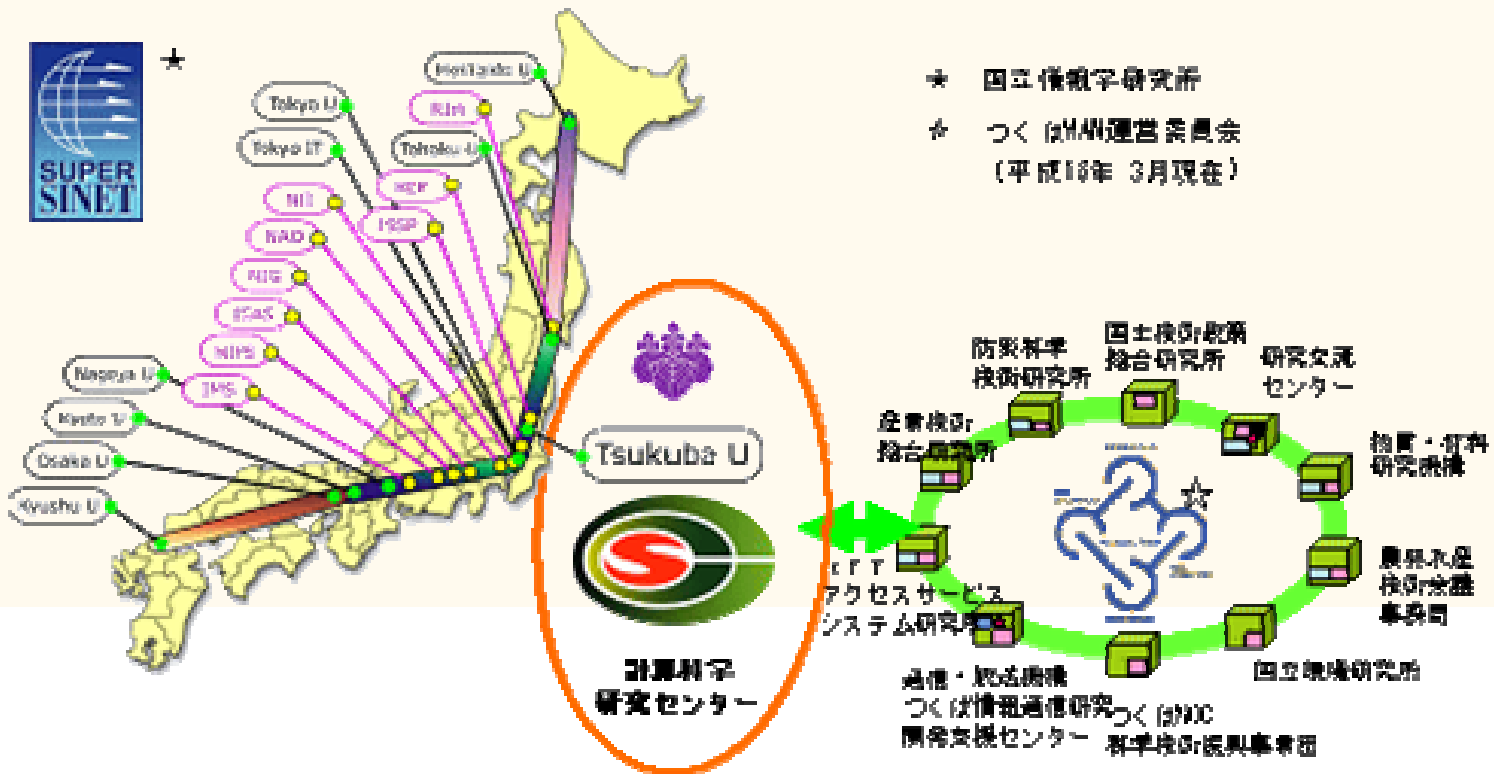


Vortex Chaser Project



IPYに向けて、極渦の静穏域に成層圏プラットフォームを自律的に停滞させ、24時間継続観測を行う計画 (15年後)

気象大規模データベースの拠点としての 筑波大学計算科学研究センター





CP-PACS / 2048PU



分散磁気ディスク



フロントエンド・ホスト

ファイルサーバ
並列システム制御サーバ



磁気テープ
ライブラリ



Iras



Markarian



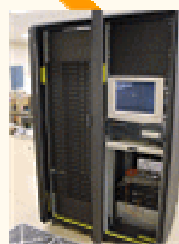
可視化システム



Perseus
(IA-32クラスタ)



GRAPE-6




Orion
(Alphaクラスタ)



Pilot-3

気象庁GPVデータの保存と公開

Center for Computational Sciences, University of Tsukuba 1/2 ページ




Center for Computational Sciences
University of Tsukuba


[日本語](#) [Top](#) [About the Center](#) [Research](#) [Projects](#) [Colloquium](#) [Workshops](#)

CCS Databases

CCS DataBases

- Lattice QCD Archive
- **JMA/GPV Data Archive**

 Lattice QCD Archive

 **JMA/GPV Data Archive**

表一

全球数値予報モデル GPV (GSM)	136MB/日	2000年9月～
領域数値予報モデル GPV (RSM)	40MB/日	
メソ数値予報モデル GPV (MSM)	87 MB/日	2001年4月～
1か月アンサンブル数値予報モデル GPV (SF1)	198 MB/日	
週間アンサンブル数値予報モデル GPV	63 MB/日	2001年7月～
全球波浪数値予報モデル GPV	4 MB/日	2001年8月～

筑波大学計算科学研究センター

地球環境研究部門の将来展望

まとめ



地球生物環境研究部門



- 気象予測とカオスの壁

THORPEXプロジェクト (10年先)

Stochastic Physics アンサンブル予報 (15年先)

4次元同化・カルマンフィルター (15年先)

- 気候予測と長周期変動

大気大循環モデルの展望 (20年先)

IARCとの国際共同研究 (10年先)

極域気候変動とIPYプロジェクト (10年先)

END