



最新の気象予測 ～その理論と技術～

北海道大学地球惑星科学集中講義
札幌管区気象台 室井ちあし

集中講義の内容

- 1日目
 - 気象予測の基礎
 - 気象とコンピュータ
 - 数値予報モデル
- 2日目
 - 数値予報モデル(続)
 - データ同化
 - アンサンブル予報
 - (セミナー) 北海道の気象災害リスクと防災気象情報



アンサンブル予報

北海道大学地球惑星科学集中講義
札幌管区気象台 室井ちあし

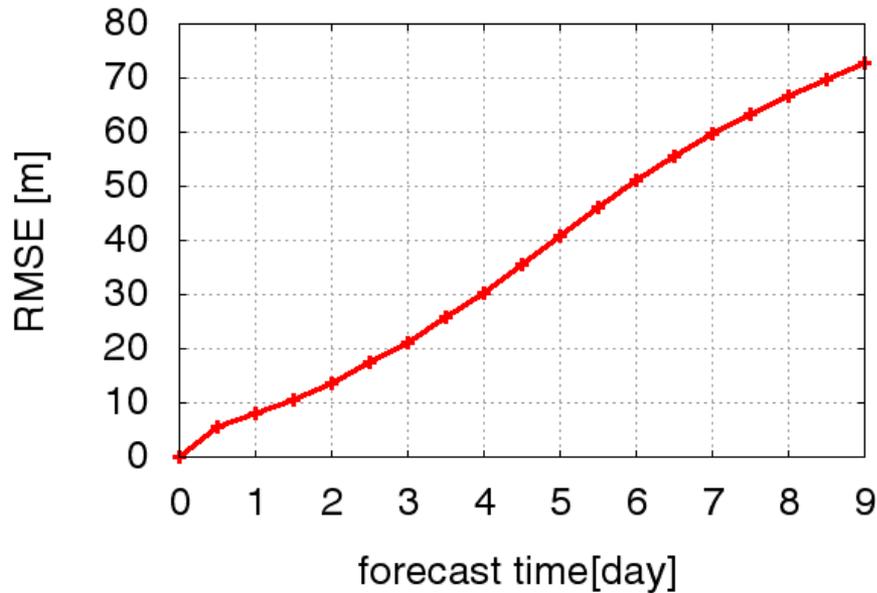
アンサンブル予報とは



数値予報モデルの予報誤差

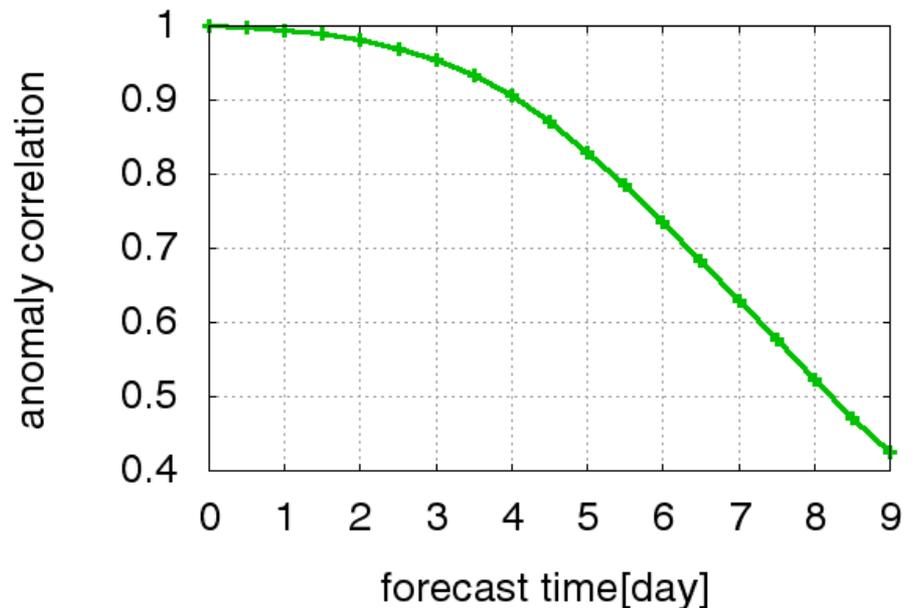
予報時間が進むにつれて誤差は増え、
予報が持つ情報は価値を失っていく

Z500 RMSE (2008/08 mon-mean)



Z500のRMSE
北半球領域20N-90Nでの

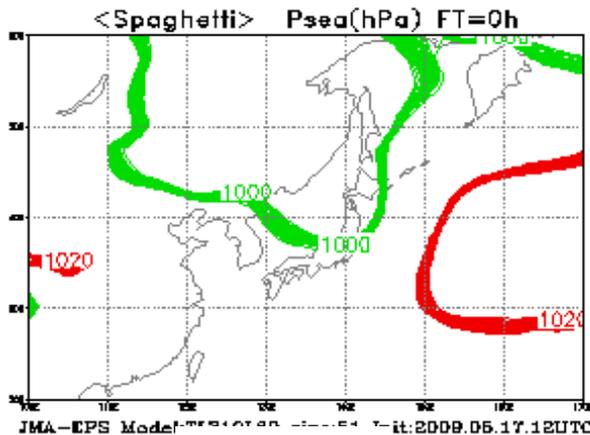
Z500 ANCOR (2008/08 mon-mean)



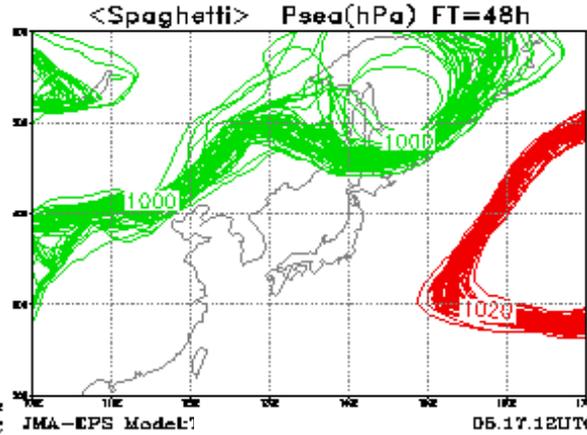
Z500のアノマリ相関係数
(気候値との差で見た、予報と解析の相関)
北半球領域20N-90Nでのもの

天気図での実例 (予報モデルの結果)

51個の予報を重ねて描いたもの海面更正気圧



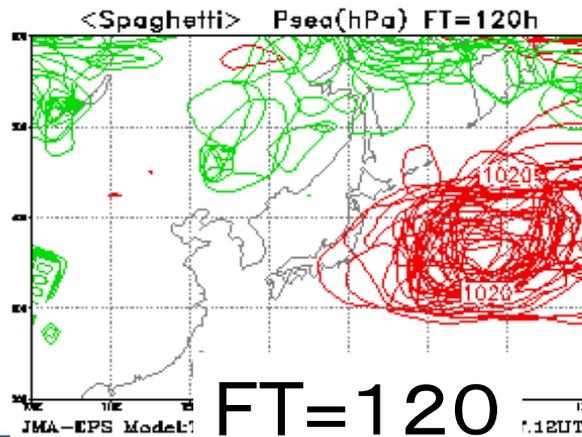
FT=0



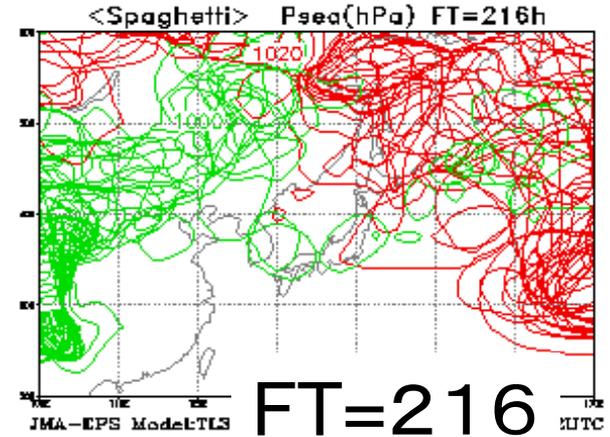
FT=48

9日後には
かなり異なる

初期値でこの程度
の違い



FT=120

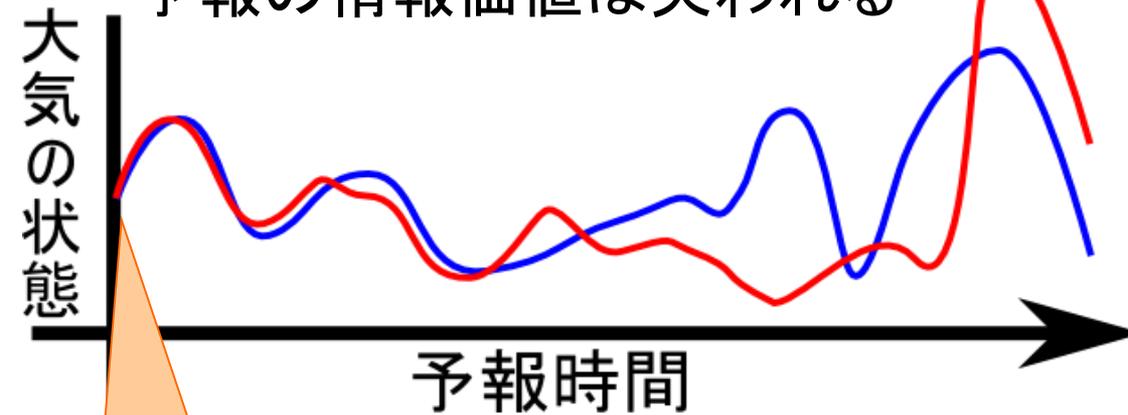


FT=216

誤差の成長の模式図

1つの予報と確率予報

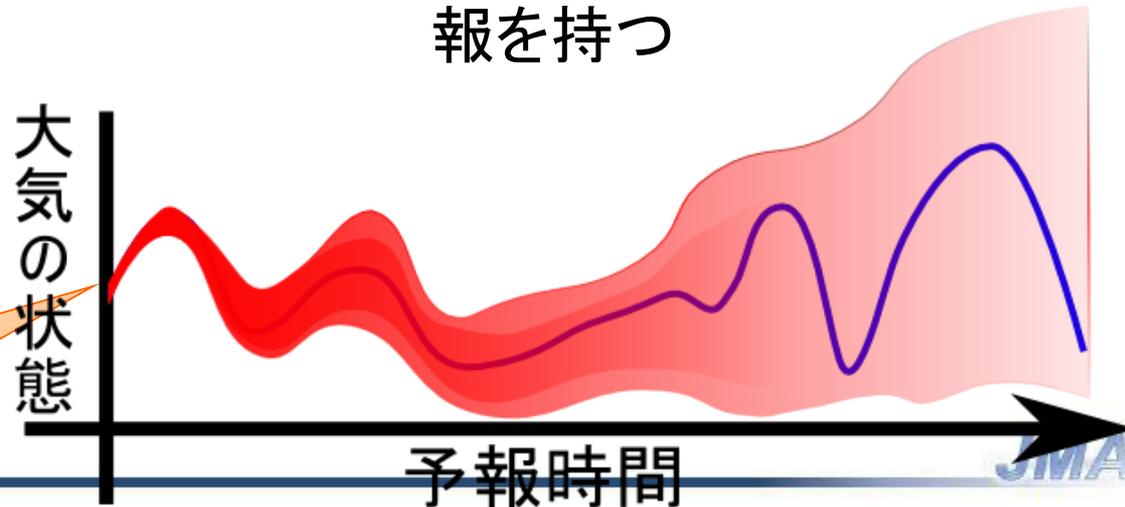
初期時刻における違いは拡大し、
予報の情報価値は失われる



誤差の時間発展の全体像
を見ることが可能
確率情報はより有効な情
報を持つ

ほとんど等しい
2つの初期値

初期値誤差の範囲



大気現象の予測可能性

予測対象とする現象により、予測可能限界は異なる

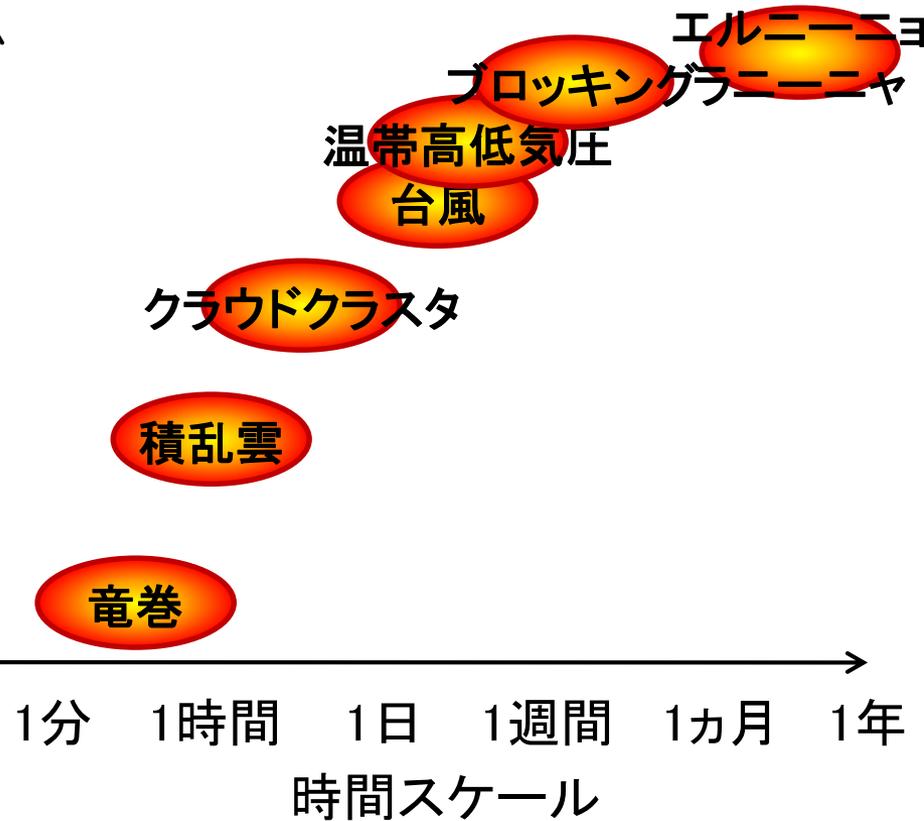
主な現象の代表的時空間スケール

平均的な予測可能性限界

- メソスケール現象
→数時間から数日
- 温帯高低気圧
→2週間程度
- エルニーニョ現象
→半年から数年?

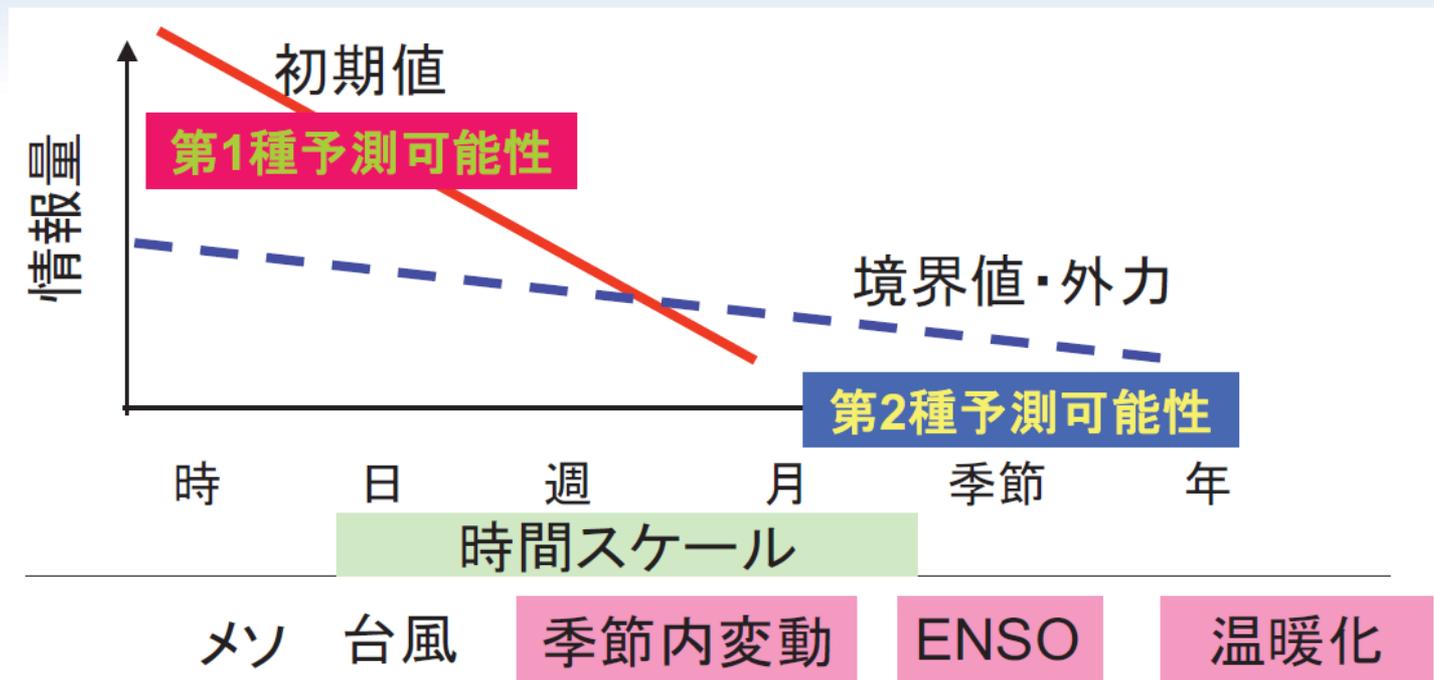
空間スケール
10000km
1000km
100km
10km
1km
100m

現象の時間空間スケールに依存する



個々の予報では、初期状態に応じて予測可能限界(ある精度を下回る時間)は変わる

第1種、第2種の予測可能性



予報時間が短いうちは大気初期値問題による予測が主。

予報時間が長くなると境界値・外力の影響(言い方を変えると

陸面・海面初期値からの予測精度)が大きくなる。

*1か月予報はその狭間にいる。

数値予報の不確実性の源

- 大気の振る舞いは**時間方向**、**空間方向**の偏微分方程式で記述されるので、**解く方程式とその数値解法**（**モデル**）、**初期条件**、**境界条件**が必要である。

初期条件： 真の初期値を知ることはできない

境界条件： 真の境界値を知ることはできない

モデル： 自然を完璧に記述する方程式を知ることはできない。あつたとしても有限の格子・時間間隔で離散化することに伴って誤差が生じる。パラメタリゼーションには大きな不確実性を伴う。

相空間

モデルの扱う変数の数(自由度)をNとすると、このN個の変数を座標にするN次元の空間を「相空間」と呼ぶ

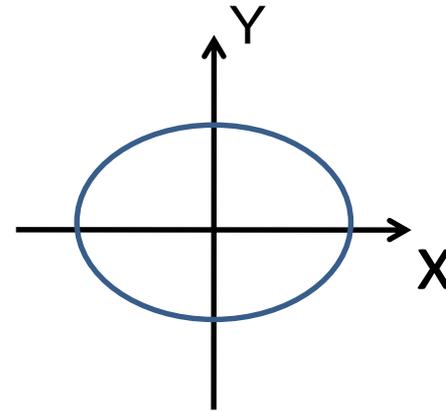
この相空間上では、「ある状態」=「1つの点」であり、「時間変化」=「一本の軌跡」である。

例: 単振動

質点の位置をx,速度をyとすると、単振動は相空間上で楕円軌道をとる

$$\frac{dx}{dt} = y$$

$$\frac{dy}{dt} = -\omega^2 x$$



数値予報モデルは $N \doteq M(\text{格子数}) \times K(\text{予報変数})$ の変数を扱う

(現状ではだいたい $10^5 \sim 10^9$)

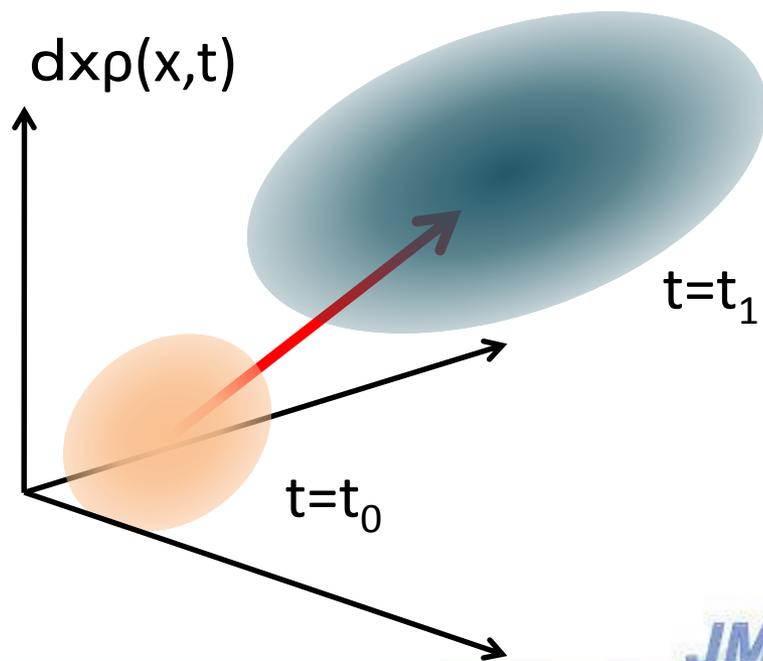
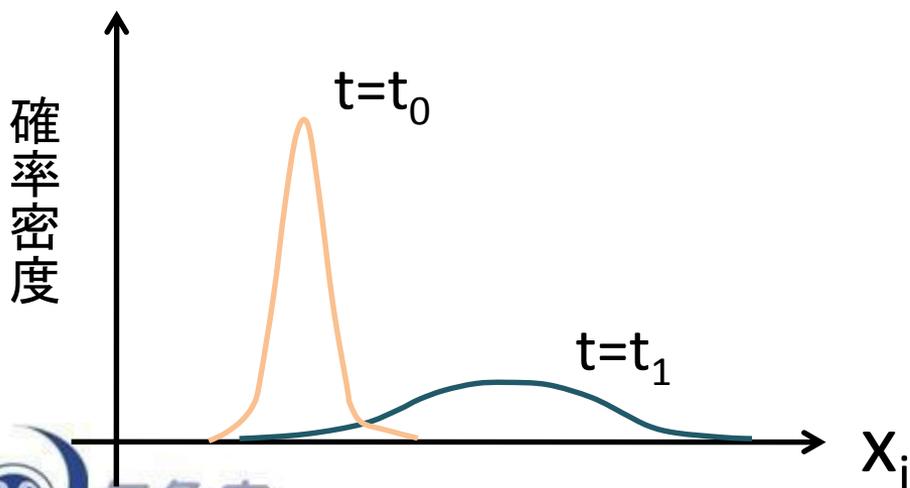


相空間上の確率密度関数

確率密度関数 $\rho(x,t)$: N次元 相空間上の関数

ある状態を $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N \mid x_i: \text{各格子点の気象要素}\}$
としたとき、時刻 t において

(状態の集合 A が実現する確率) $= \int_A dx \rho(x,t)$



決定論的・確率論的な予報

- 決定論的予報

- 1つの初期値から、1つの時間発展を予報

$$\frac{dx}{dt} = F(x, t)$$

$x=x(t)$: 予報変数の集合,
 F : 予報モデル

- 確率論的予報

- 初期値の確率分布から、確率密度関数の時間発展を予報

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(x, t) F(x, t)) + D[\rho(x, t)] = 0$$

ρ 確率密度関数
 D モデルの不完全性に
起因する項

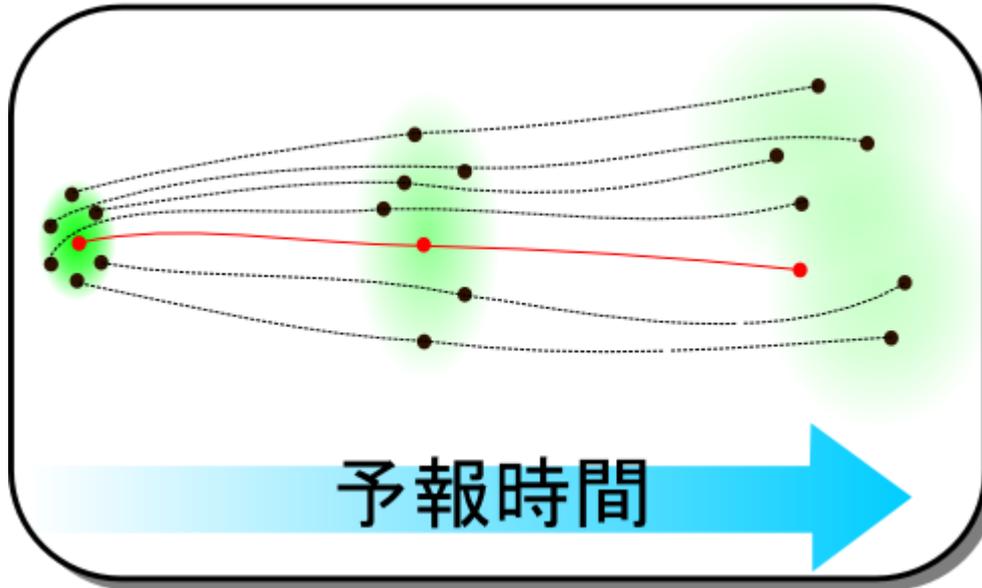
Fokker –Planck equation

アンサンブル予報

- 確率密度関数 (PDF)
 - 大自由度な相空間で定義される関数

⇒ 数値的にも**計算できない!**

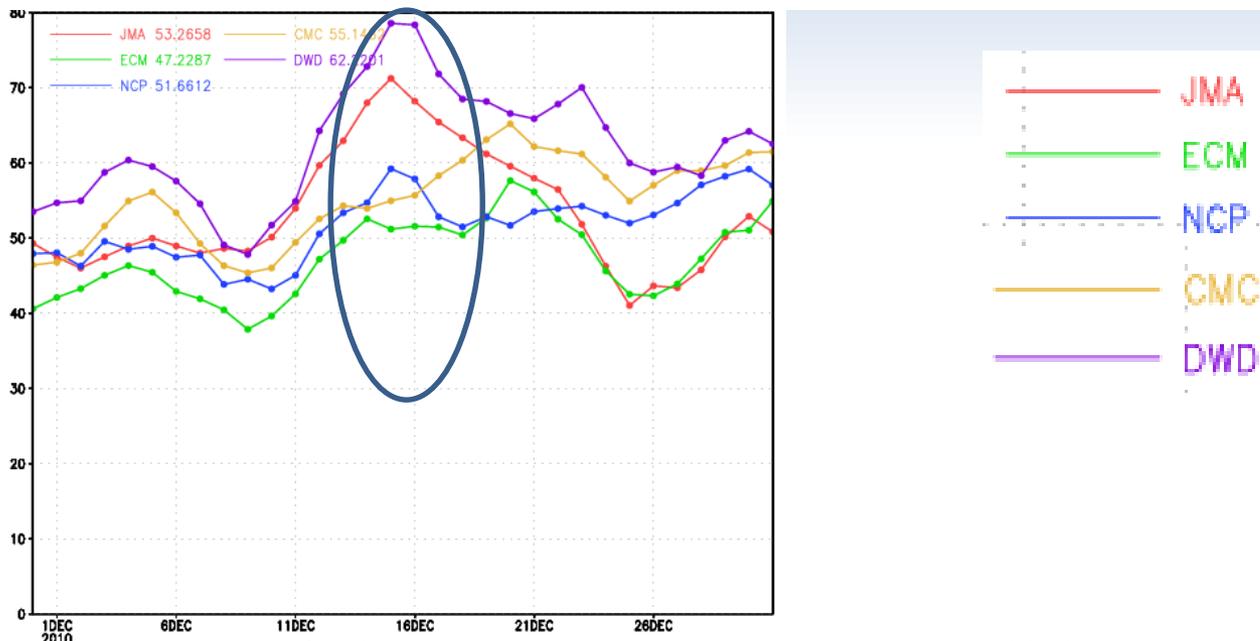
粒子で確率密度関数を推定する



この例では
7個の予報で
確率密度関数を
近似的に予報

予報誤差の変動

北半球500hPa高度5日予報の平方根二乗平均誤差(m, 前後2日移動平均)



・予報誤差はいつも一定ではなく、日によって変動する。平均的な予報誤差が、いつも指標となるわけではない。

・JMAの予報誤差の悪い日は他の数値予報センターの予報誤差も悪くなる時がある。

・モデルが悪いから、というわけでは必ずしもない。大気は場によって、誤差が広がりやすいとき、そうでないときがある。

流れによって変動する誤差成長の簡単な例 Lorenz(1963)モデル

初期値を $(x,y,z)=(0,1,0)$ であたえ、その周辺にランダムな摂動を与える。
解の軌道の振る舞いを見る

$$\Delta t = 0.01s$$

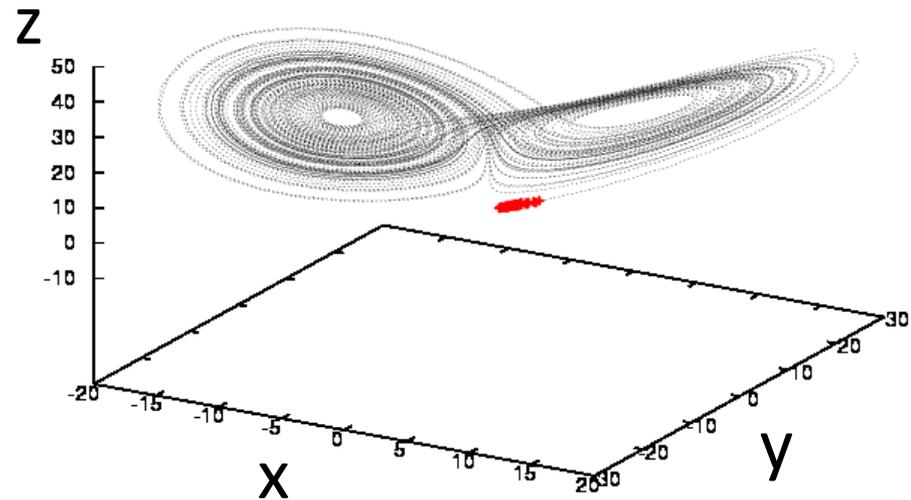
$$\begin{aligned}\frac{\partial X}{\partial t} &= -\sigma X + \sigma Y \\ \frac{\partial Y}{\partial t} &= -XZ + rX - Y \\ \frac{\partial Z}{\partial t} &= XY - bZ\end{aligned}$$

$$\sigma = 10$$

$$r = 28$$

$$b = \frac{8}{3}$$

非線形項



解はあまりばらつかない。

アンサンブル予報用語

• メンバー x^m それぞれの「予報」

• メンバー数 M

• コントロールラン x^0 摂動の入っていない予報

• アンサンブル平均 $\bar{x}_i = \frac{1}{M} \sum_m x_i^m$

• スプレッド $\sqrt{\frac{1}{M} \sum_m (x_i^m - \bar{x}_i)^2}$

アンサンブル予報の広がりを表す量

アンサンブル予報の種類

不確実性のモデリング

様々な理由で発生・拡大する予報の不確実性を、アンサンブルメンバーのばらつき(～PDF)でより適切に表現するための手法

詳細は省略、この他にも存在する。

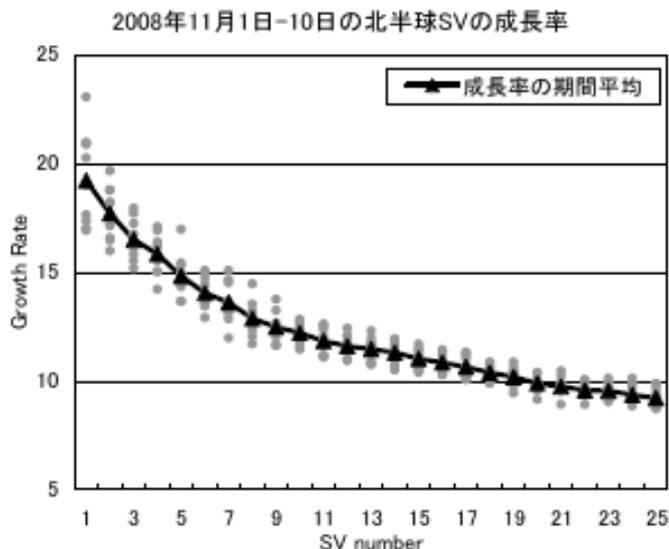
不確実性のありか	手法	
	独立に複数用意する	摂動を与える
初期条件 <初期値アンサンブル>	LAF法	EnKF BGM法 SV法
予報モデル <モデルアンサンブル>	マルチパラメタリゼーション法	SPPT SKEB
境界条件 (海面水温など下部境界、 領域モデルの側面境界) <境界値アンサンブル>	(省略)	(省略)

アンサンブルモデル

初期値集合作用成手法に求められるもの

少ないメンバーでPDFを予報する為
予報初期で成長率の高い誤差成分がほしい

例えば、ランダムに摂動を生成するモンテカルロ法だと、予報初期ではほとんどのメンバーがほぼ同じ予報となり非常に多くのメンバーを必要とする

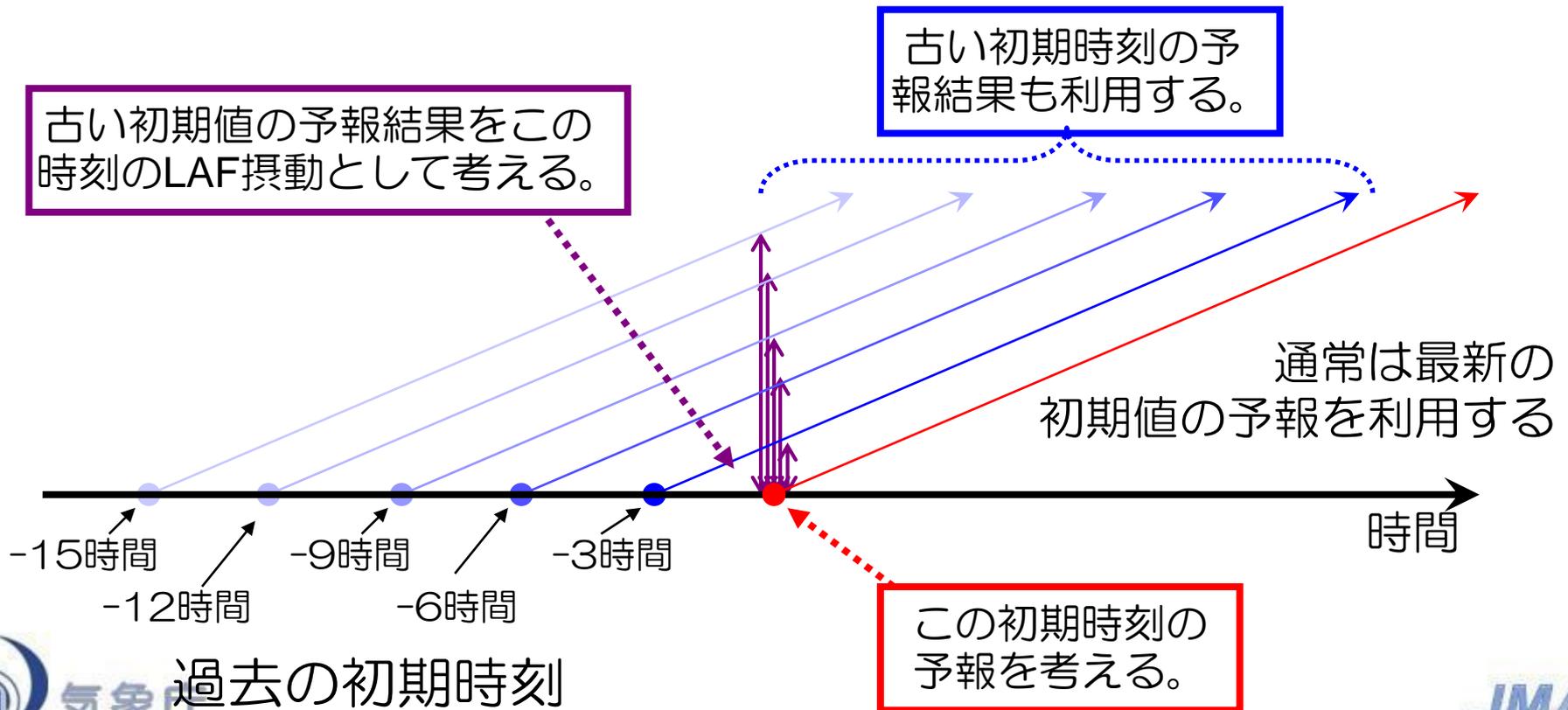


左図はある期間の摂動の成長率
縦軸は摂動の成長率
横軸は成長率を大きい順に並べたときの番号

中緯度帯においては成長率の高いモードはあまり多くない

LAF法

過去の解析時刻から得られた予報結果を合わせることによりアンサンブル集合（メンバー）を用意する手法。



過去の初期時刻

特異ベクトル(SV)法

- 初期時刻から、一定時間内で成長率の大きな摂動のモードを求め、初期摂動を作成する手法
- 摂動の大きさには任意性がある
- 気象庁の現業週間・台風アンサンブルではこの手法を利用

参考文献: Buizza, R. and T. M. Palmer. 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.* 52, 1434-1456.

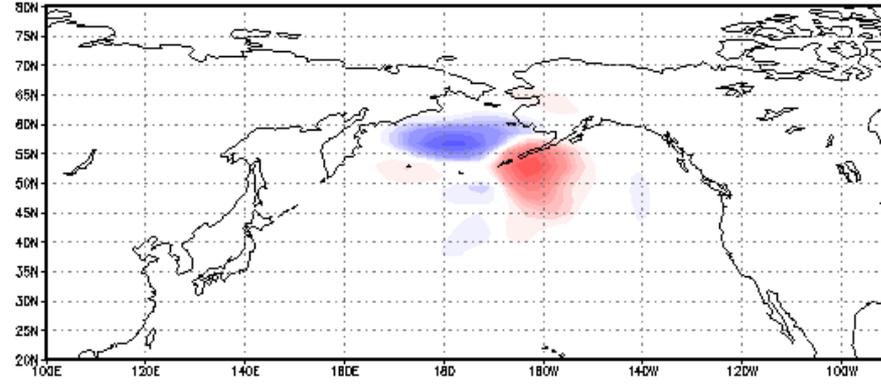
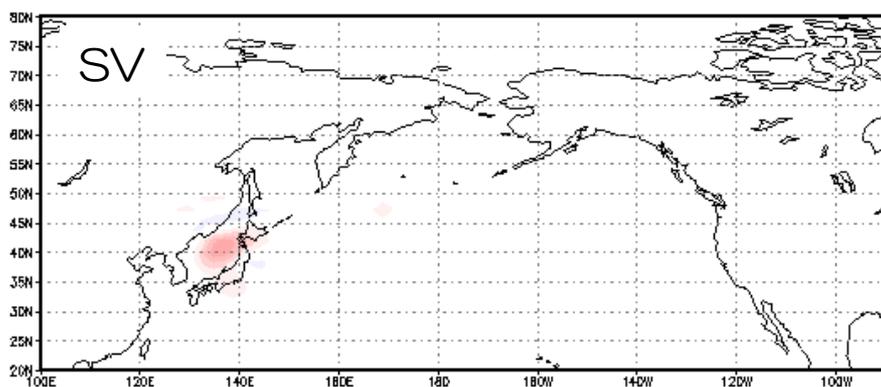
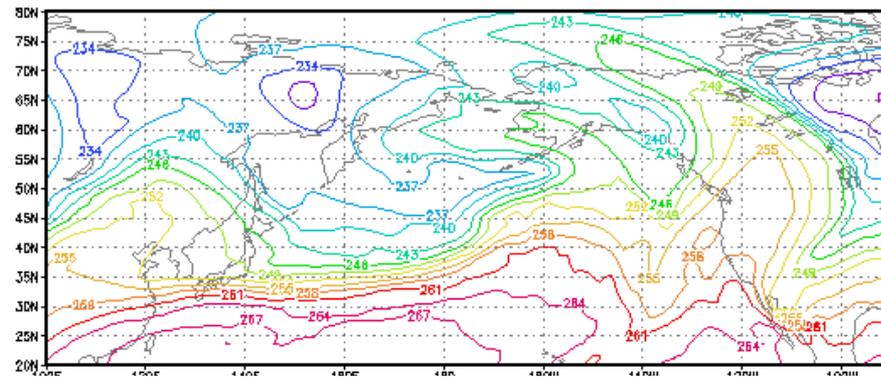
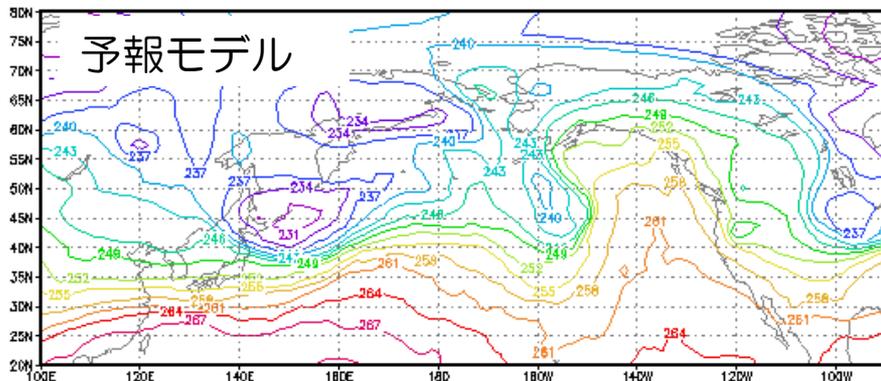
Ehrendorfer, M., R. M. Errico and K. D. Raeder, 1999: Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics. *J. Atmos. Sci.*, 56, 1627-1648.

Puri, K., J. Barkmeijer, and T. N. Palmer, 2001: Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 127, 709-731.

特異ベクトル法による計算例

FT=0

FT=48



傾圧帯付近にSVが計算されることが多い

アンサンブルカルマンフィルター

- アンサンブル予報とデータ同化が融合した手法
- カルマンフィルタをアンサンブルを使って定式化

データ同化（解析）

予報誤差

解析誤差

アンサンブル予報

流れに依存した予報誤差を使って解析し、その解析誤差を反映したアンサンブル摂動を生成する。

確率的物理過程強制法

物理過程の時間変化項に**ランダムな摂動**を加える手法

元の予報方程式 確率的な摂動項

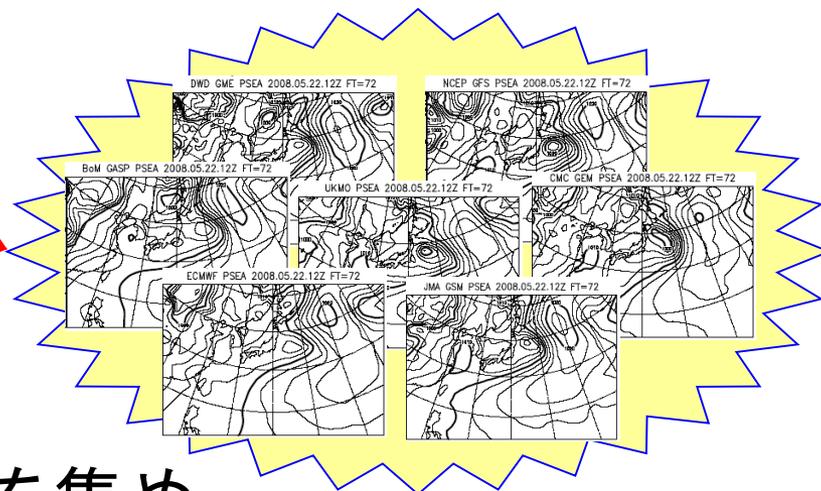
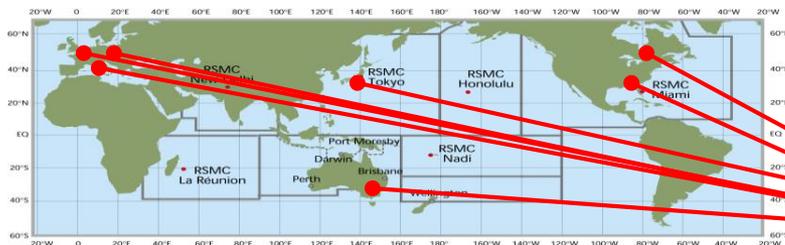
$$\frac{\partial x(t)}{\partial t} = F(x;t) + r(\lambda, \phi; t)P(x;t)$$

P : 物理過程による時間変化項
 $r(\lambda, \phi; t)$ 平均が0の確率変数集合
 λ : 緯度 ϕ : 経度

時間積分の各ステップで、物理過程の時間変化項に応じてランダムな摂動を足しこむ
パラメタリゼーションで表現できない不確実性を確率的な摂動項で表現

マルチモデル法

- 複数のモデルを用いてアンサンブル予報を行う手法
- 海外の数値予報センターの結果を利用する方法もマルチモデル法の応用である(初期場が異なるので、初期値アンサンブルとモデルアンサンブルの複合形である)。



複数の数値予報モデルの結果を集め
アンサンブルメンバーを構成する

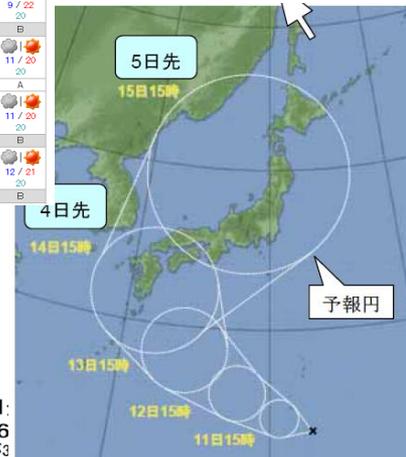


アンサンブル予報の応用

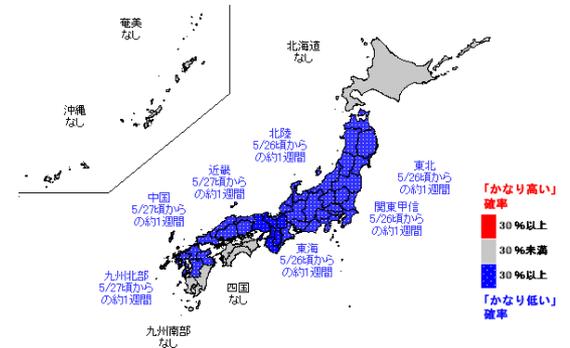
気象庁における現在のアンサンブル予報の利用分野

- 台風進路予報
- 週間天気予報
- 季節予報
 - 異常天候早期警戒情報
 - 1か月予報
 - 3か月予報
 - 暖候期・寒候期予報
- エルニーニョ予測

日付	21 木	22 金	23 土	24 日	25 月	26 火	27 水
札幌 府庁圏予報	9 / 16 0/0/0/0	9 / 15 50	10 / 15 60	9 / 15 70	6 / 14 30	6 / 14 10	7 / 14 20
旭川 府庁圏予報	7 / 23 0/0/0/0	10 / 27 20	12 / 22 50	11 / 21 30	7 / 22 20	8 / 23 10	9 / 22 20
札幌 府庁圏予報	10 / 27 0/0/0/0	14 / 24 30	19 / 20 50	12 / 20 30	11 / 21 20	10 / 21 10	11 / 20 20
青森 府庁圏予報	11 / 24 0/0/0/10	14 / 21 80	13 / 19 50	11 / 16 30	10 / 19 30	10 / 21 10	11 / 20 20
秋田 府庁圏予報	13 / 23 0/0/0/0	15 / 23 80	15 / 20 50	13 / 19 30	12 / 20 30	12 / 21 10	12 / 21 20



平均気温 平成21年5月19日:
情報の対象期間: 5月24日~6
「かなり高い」または「かなり低い」確率が3
地域名の下に示す期間が、30%以上と予想される期
地図をクリックすると、該当地域の発表状況や内容を表示します。



週間・台風EPS

EPS: アンサンブル予報システム

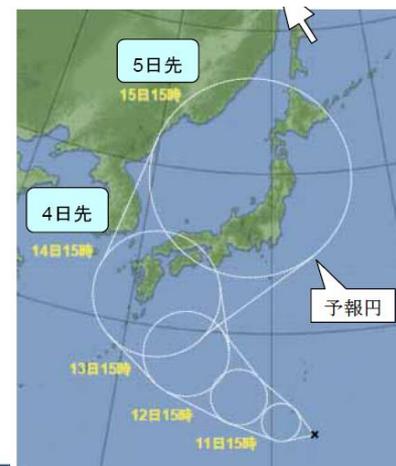
週間EPS - 週間天気予報

- 予報の信頼度、降水確率、気温の予測範囲の資料としても使われる

日付		31 木	1 金	2 土	3 日	4 月	5 火	6 水
東京地方 府県天気予報へ		曇	曇時々晴	曇	曇一時雨	曇	曇	曇
降水確率(%)		20/10/20/20	30	40	50	40	40	40
信頼度		/	/	C	C	B	C	C
東京	最高(°C)	23	25 (22~27)	24 (21~26)	23 (19~27)	24 (23~29)	24 (20~27)	24 (19~27)
	最低(°C)	17	18 (15~19)	17 (15~19)	17 (15~19)	17 (15~19)	18 (16~20)	18 (16~20)

台風EPS - 台風進路予報

- GSMの予報結果と合わせて利用され、台風予報の不確実性(予報円等)の評価の資料となる



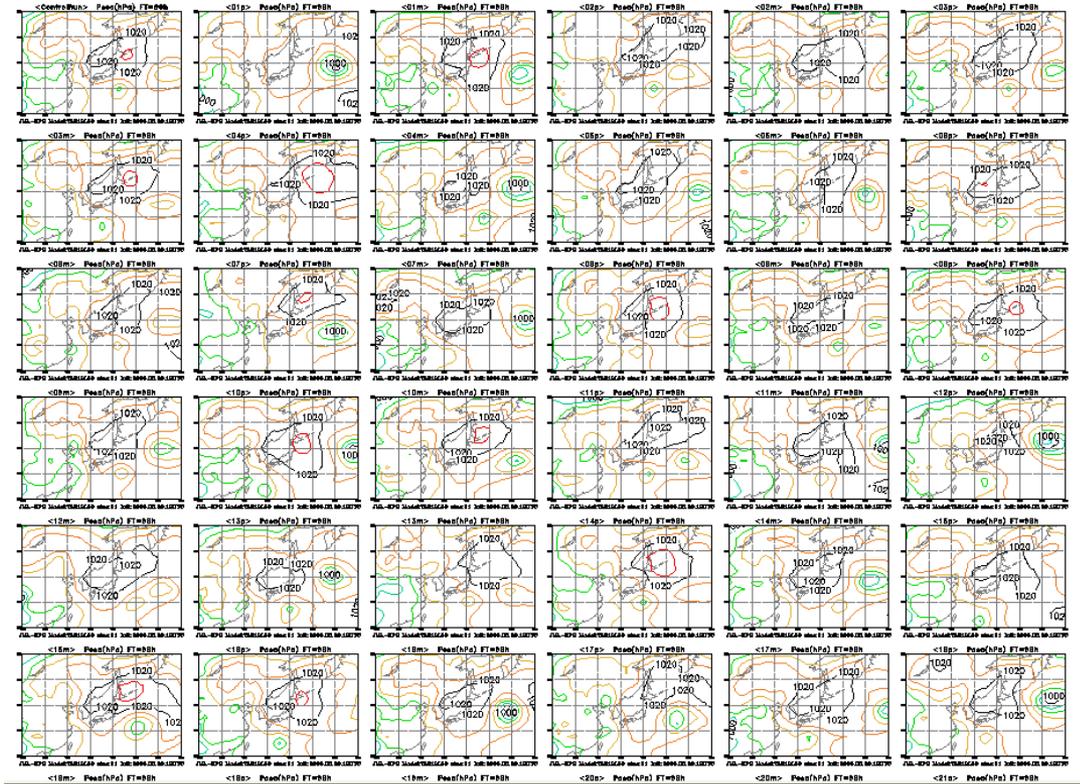
アンサンブル予報の応用事例

- 電力気象
 - 夏季の電力需要の危機管理支援
- 農業気象
 - 農業気象災害の防止軽減等
- 国際協力
 - アジア域の予報をWWWで提供
 - 香港天文台へプロダクト提供
- 洪水予報と水資源管理
- 波浪予報



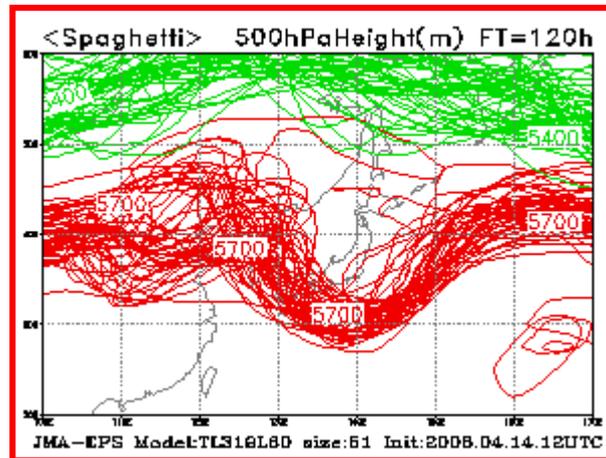
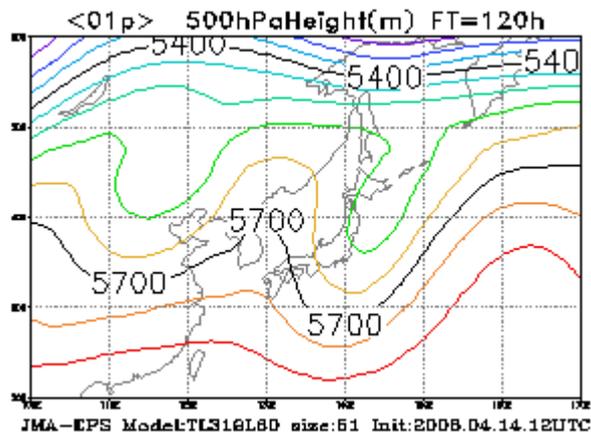
スタンプマップ

全てのアンサンブルメンバーの予報を表示してアンサンブル予報を利用する。
ただし、全てのメンバーの予報結果を見ることは困難なので、何らかの加工を行って利用することが多い。

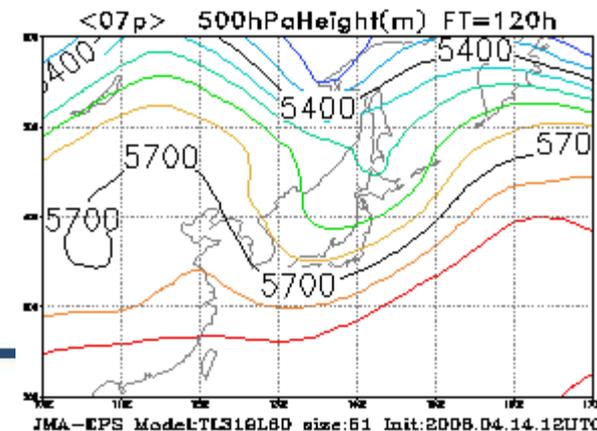
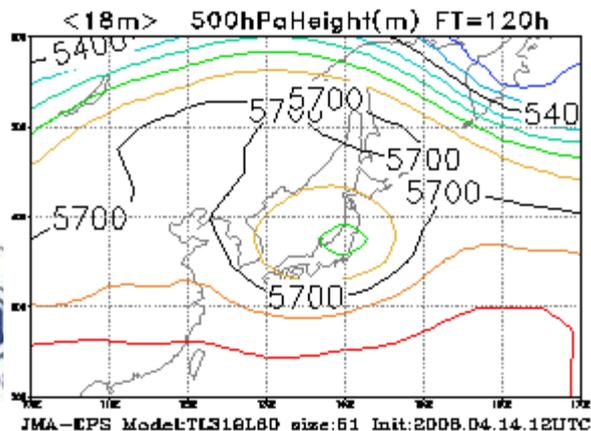


スパゲッティダイアグラム

特定の等高度線を、全アンサンブルメンバー分について描画することにより、アンサンブルメンバー間における予報の違いや、ばらつきの大きい場所を、比較的容易に一枚の図で確認することを可能としている。



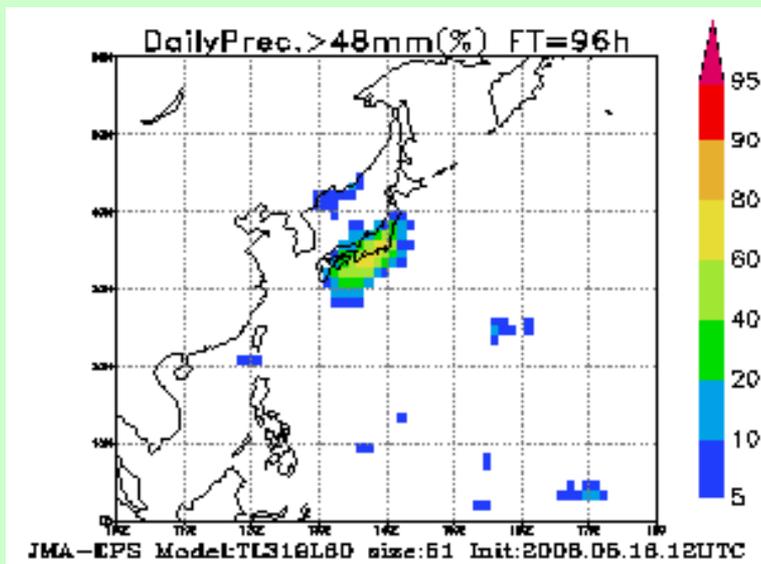
スパゲッティダイアグラム（赤枠図）とアンサンブルメンバーの予報。中国大陸でメンバー間のばらつきが大きく、東経115度付近に気圧の谷を予報しているメンバーと予報していないメンバーがあることがわかる。



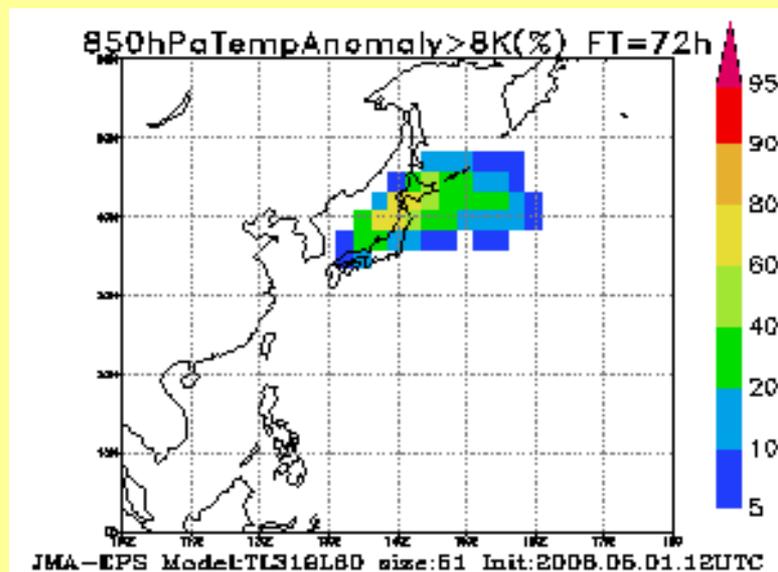
確率分布図

あるの閾値以上の現象（気温の平年偏差が8度以上や降水量が48mm/1日以上）が発生する割合の確率

降水量が 48mm/1日以上
となる確率。

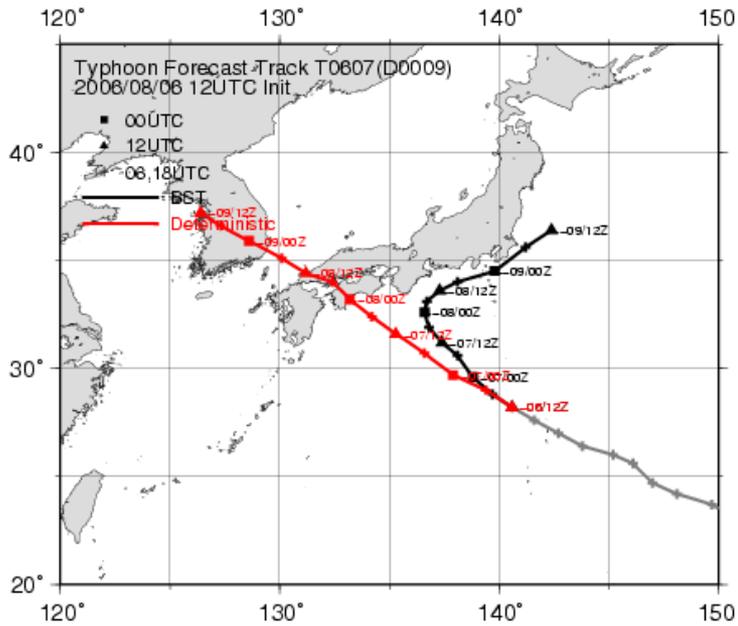


850hPa面気温の偏差
が8度以上となる確率。

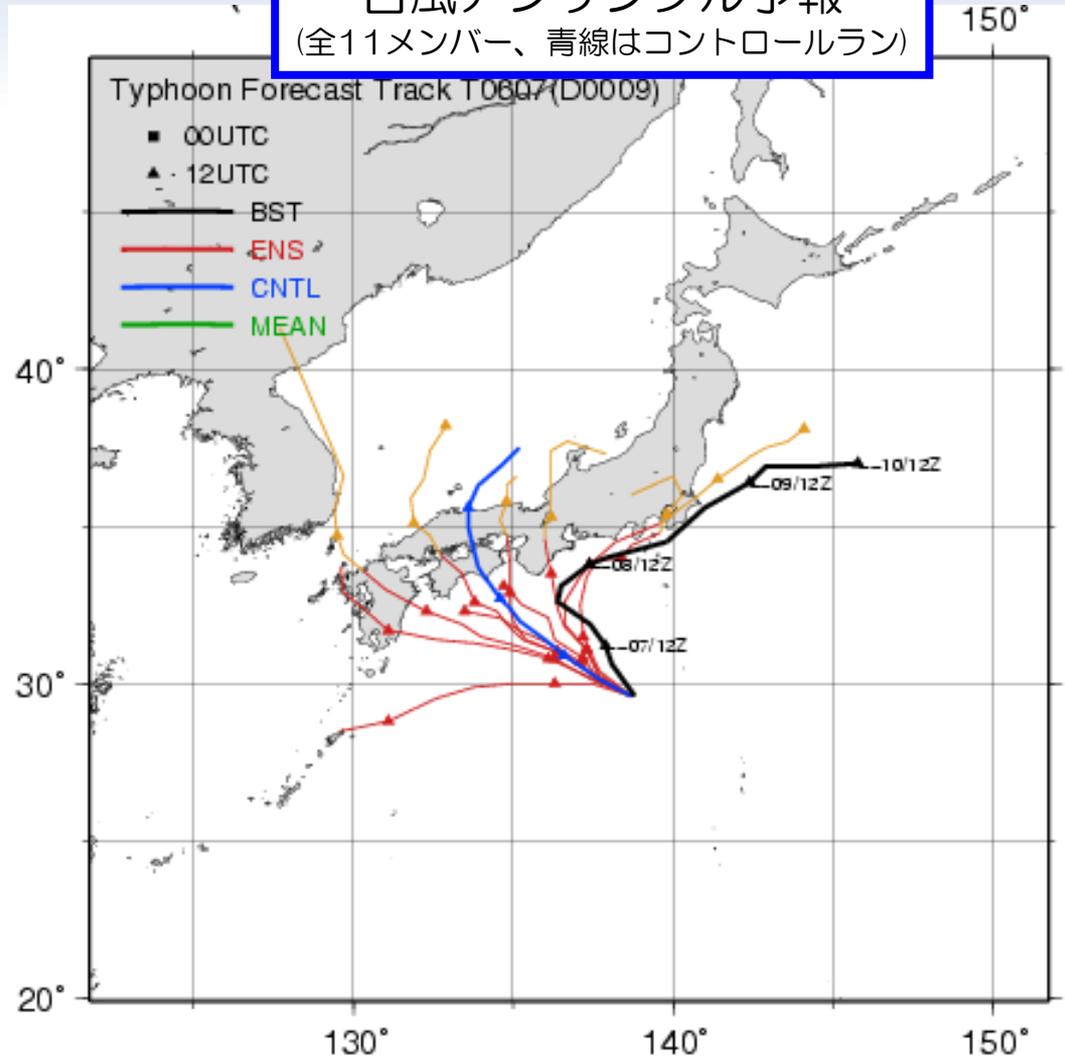


台風進路予報図

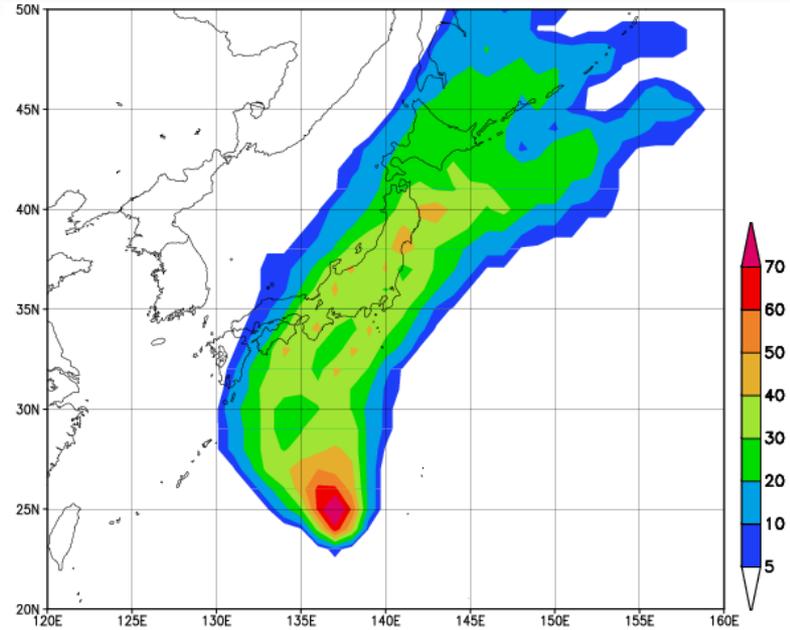
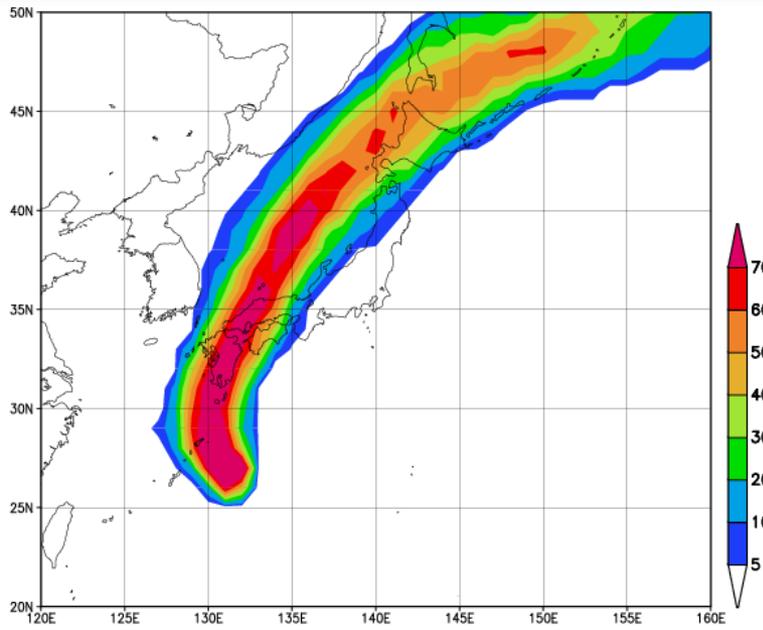
全球モデル(GSM)による予報



台風アンサンブル予報 (全11メンバー、青線はコントロールラン)



台風接近確率図

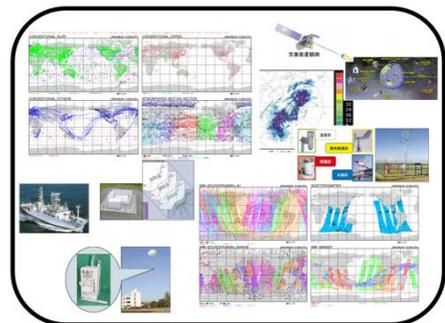


予報期間内に台風が中心が120km以内を通過する確率。台風が通過する可能性のある場所、およびその確率値を確認することが出来る。

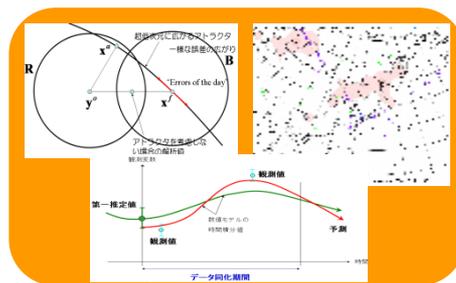
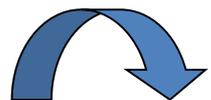
観測システムへのフィードバック

観測データ
観測誤差

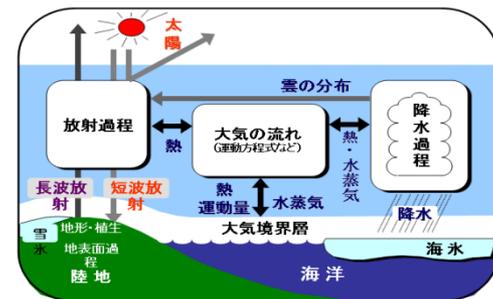
解析値
解析誤差



観測・通信網



データ同化



数值予報

観測の最適化情報

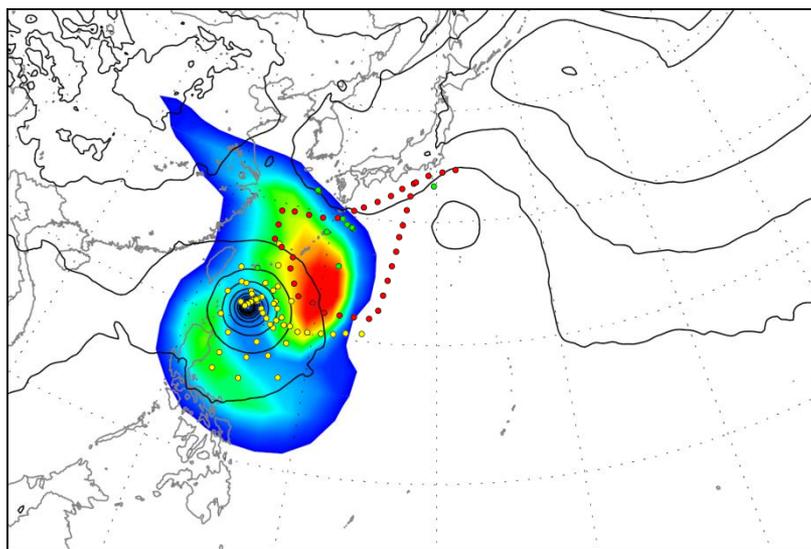
予報誤差
第1推定値

解析予報システムは観測がどのようなインパクトを予報に与えるかを推定できる

現在THROEPX等国際的な協力の下研究が進められている

感度解析

初期場の誤差の予報結果への影響が大きい領域を
事前に求めることができる



2008/09/11 00UTC

台風周辺の感度領域
予報場に対してSV計算した、
その第1成長SVの鉛直積算トータルエネルギー

アンサンブル予報関連技術を用いて、「最適な観測」を
の情報を得ることが可能

- 機動的な観測
 - 飛行機等の利用
- 効率的な観測
 - 観測の時間間隔の調整

気象庁の国際的な役割(アンサンブル予報)

東アジア各国向けのアンサンブルwebによる予報支援(地点時系列やスタンプマップ)。アンサンブル予報検証Lead Centerを担当しており、世界のアンサンブル予報現業運用センターの検証のデータ収集と可視化を行っている。

The image displays several screenshots from the JMA and Lead Centre for Verification of Ensemble Prediction System websites. The top-left screenshot shows the JMA medium-range EPS Web site with a grid of forecast maps. The top-middle screenshot shows the Lead Centre for Verification of Ensemble Prediction System Web site, featuring the JMA logo and a welcome message. The top-right screenshot shows a diagram of probabilistic verification for W850 greater than 10mps at NH grids, including a Reliability Diagram, Sharpness Diagram, Brier Score, and ROC curves. The bottom-left screenshot shows a time series plot of forecast or accumulated precipitation. The bottom-right screenshot shows a table of contents for the verification results, including sections for Monthly Exchange, Monthly Diagrams, and Time sequence.

Contents

Contents	Deterministic verification	Probabilistic verification
Monthly Exchange	Deterministic tables	Reliability tables
Monthly Diagrams	CMC OPTEC ECMWF JMA KMA UKMO	CMC OPTEC ECMWF JMA KMA UKMO
Time sequence	CMC OPTEC ECMWF JMA KMA UKMO	CMC OPTEC ECMWF JMA KMA UKMO

This is a trial page of the open web site. JMA verification results are only available.

THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験)

The Observing System Research and Predictability Experiment.

WMO (世界気象機関) 主導による国際研究計画 (実施期間: 2005-2014)

目的: **High Impact Weather** の **予報精度向上**
(社会・経済に影響を与える気象現象)
対象予報期間: **1日~14日**



副課題

観測システム
開発・評価

データ同化
観測戦略

予測可能性
力学物理過程

社会・経済へ
の影響評価



衛星

観測値

機動観測



無人
飛行機

データ同化
4次元変分法

解析値

予報誤差
情報

数値モデル
力学・物理過程
アンサンブル
予報

従来予報
確率予報

ユーザー
要請予報

利用者
応用
評価



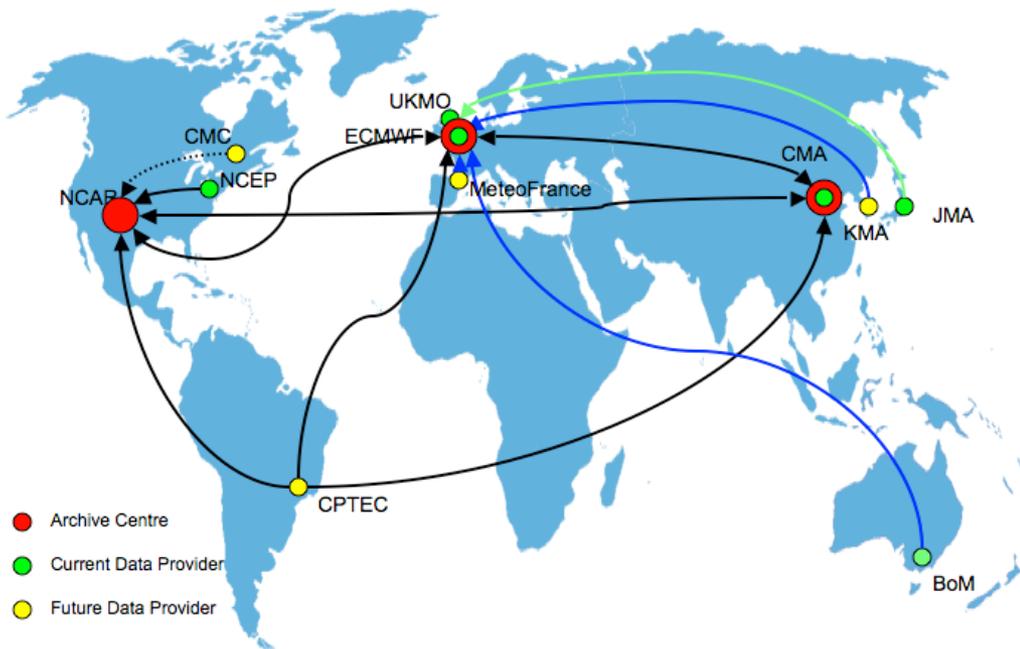
自動
ゾンデ
©Vaisala

全球双方向予報システム(GIFS)の実現を目指す

Thropex Interactive Grand Global Ensemble

TIGGE

世界で運用されている中期予報のアンサンブル予報結果のデータを交換し、予測可能性の調査に役立てる。



TIGGEのデータポリシー(研究目的での利用など)に則っていれば、誰でも利用できる。ただし48時間の遅延配信となっている。ECMWF, NCAR, CMAの3センターで全てのセンターの予報データが提供されている。

ECMWF: <http://tigge.ecmwf.int/tigge/d/tigge/>

NCAR: <http://tigge.ucar.edu/home/home.htm>

CMA: <http://wisportal.cma.gov.cn/tigge/index.jsp>

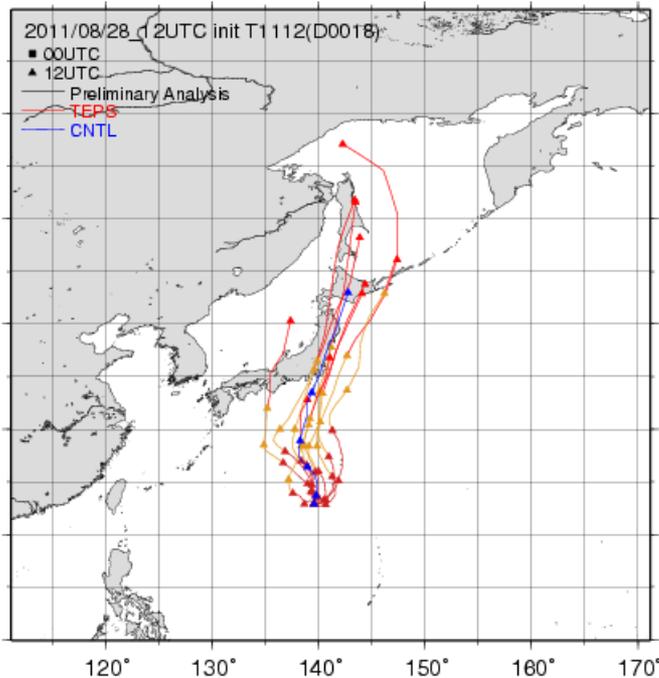
10センターから毎日300GBのデータが提供されアーカイブされている。

台風EPSメンバー数の増強調査 — T1112の事例 —

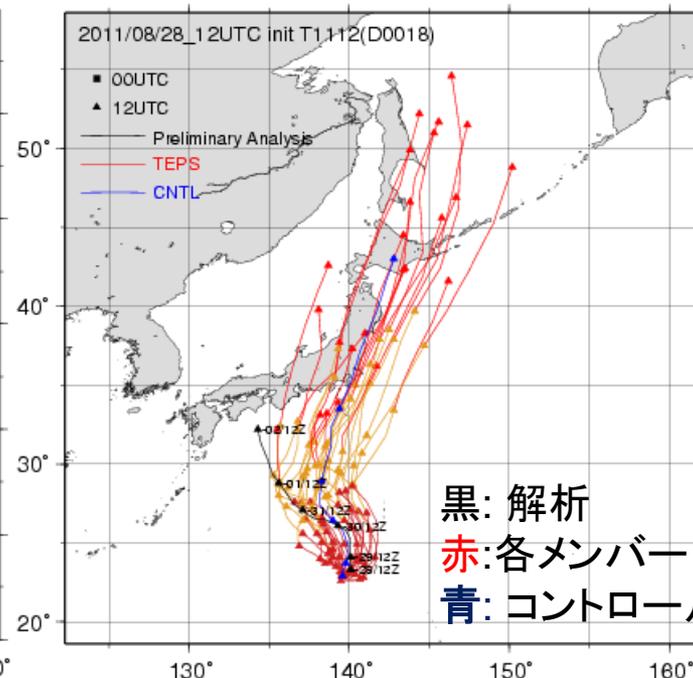
• メンバー数増強 11 → 25

— 台風進路の信頼度情報の精度向上

現業台風EPS(11メンバー)



試験結果 (25メンバー)



- 2011年台風第12号を例に、25メンバーの台風アンサンブル予報を試験的に実施
- メンバー増により、進路予報の信頼度をより明瞭に示すことが可能に

2011/8/28 12Z初期値 120時間予報

二週目予報への延長

- **初期値問題としての大気EPSの予測可能性: 2週間程度**
 - 現在は、**週間EPS**と**1か月EPS**がこの予測期間を担っている
 - 海外主要センターは2週間程度の予報時間のEPSを運用



ECMWF	10+5 days
UKMO	15 days
NCEP	16 days
CMC	16 days

- **現状の問題点**
 - 各々のEPSの開発成果の共有や相互活用が進みにくい
 - 各々が生成する作業支援資料に違いが生じることがある
- ⇒ 開発・運用資源の効率的な使用と各支援資料の整合を図るため、庁内の開発協力関係を強化して1つのEPSを運用する

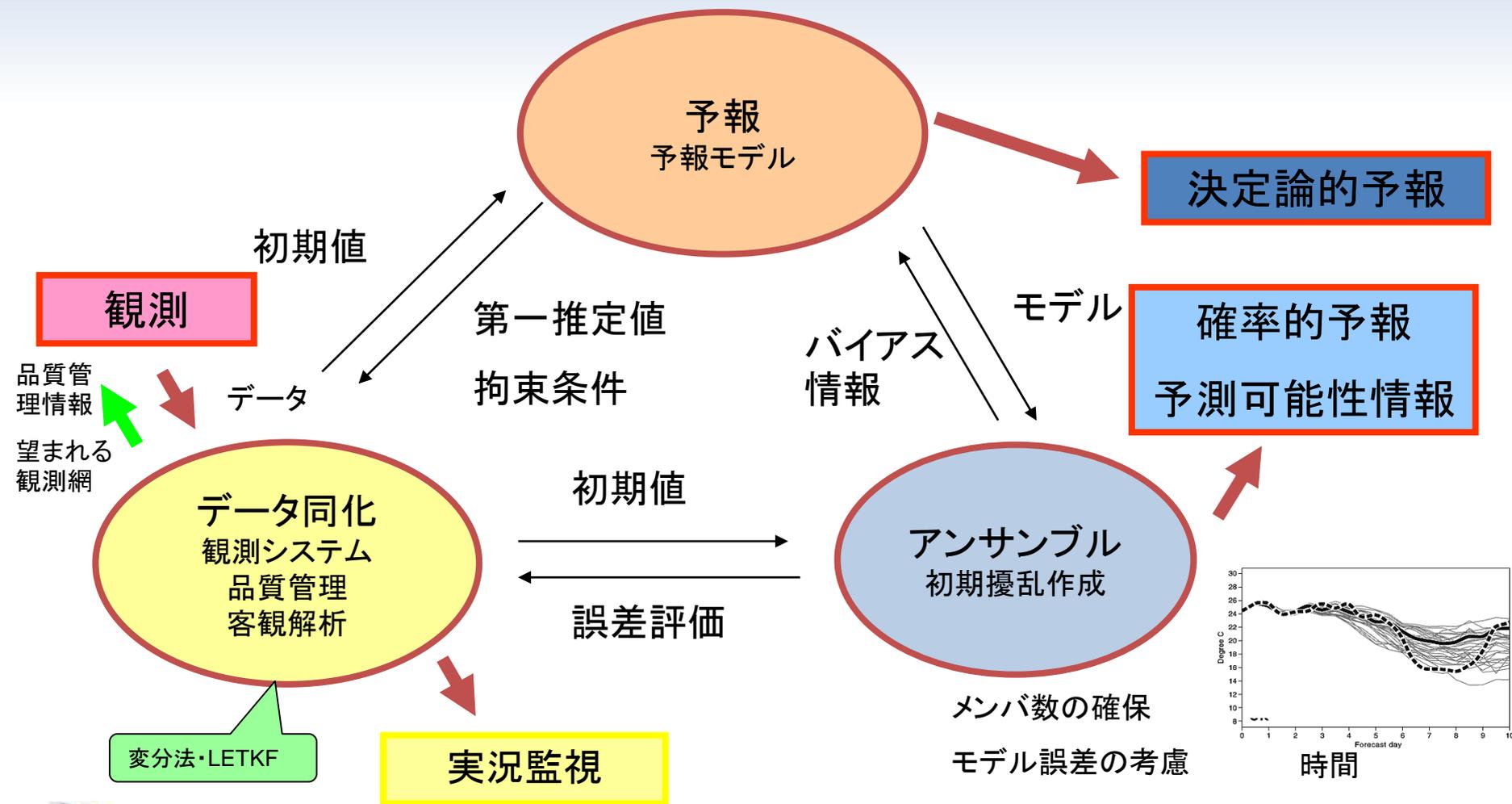
領域アンサンブル予報

世界で開発運用されているさまざまな領域モデルをベースとした、領域アンサンブル予報システムが開発(一部運用)が進められている。

- ・ MOGREPS: 英国気象局のUnified Modelがベース。
- ・ SREF: 米国NCEPのWRFなど複数のモデルを用いたメソEPS。本運用。
- ・ LAMEPS: フランス気象局のALADINがベース。
- ・ COSMO-DE Ensemble: ドイツ気象局の領域モデルがベース。
- ・ REPS: カナダ気象局のGEMの領域版モデルがベース。
- ・ LAPS-EPS: オーストラリア気象局の領域モデル(LAPS)がベース。
- ・ WRF-MEPS、GRAPES-MEPS: 中国のWRFおよびGRAPESがベース。
- ・ NHM/JMA: 気象研究所がNHMをベースに研究を行っている。数値予報課でも、次期NAPSでの運用開始を目標に開発。

本田有機,2008:世界のメソ数値予報システム. 数値予報課報告・別冊第49号, 気象庁予報部. 7-11.

高度化した数値予報



予報モデルを中心技術として、多くの技術体系からなる巨大なシステム



おわりに
もういちどレポート問題

レポート: どれか選択して回答

1. 1次元線形移流方程式を複数の数値計算法を用いてシミュレーションを実行し、計算結果について考察せよ。
2. 数値予報モデルの物理過程について、その概念とともに、積雲対流、境界層などのプロセスをひとつ取り上げて、その意義と課題について考察せよ。
3. 決定論的予報とアンサンブル予報について、その概念と予測可能性に触れながら、考察せよ。
4. データ同化の概念と気象分野で実際に利用される手法、その課題と展望について、考察せよ。
5. 天気予報の精度を100%にできるかどうかについて、天気予報全般あるいは台風や集中豪雨といった気象現象の一例をとりあげて、その予測可能性や数値予報モデルの課題とともに考察せよ。
6. 気象予測と社会とのかかわり、数値予報(コンピュータを用いた客観的な予測技術)が確立したことによる社会的影響と意義などについて考察せよ。