

気象庁メソアンサンブル予報システムの開発

気象庁数値予報課 小野耕介

第9回気象庁数値モデル研究会

第45回メソ気象研究会

第2回観測システム・予測可能性研究連絡会

日時:2016.5.17 場所:気象庁講堂

講演の内容

- 概要

部内試験運用中のメソアンサンブル予報システムの概要及び予測事例、検証結果を紹介するとともに今後の開発について紹介する

- 内容

1. メソアンサンブル予報システムの概要
2. アンサンブルメンバーの予測特性
3. 検証
4. まとめと今後の開発

- 参考文献

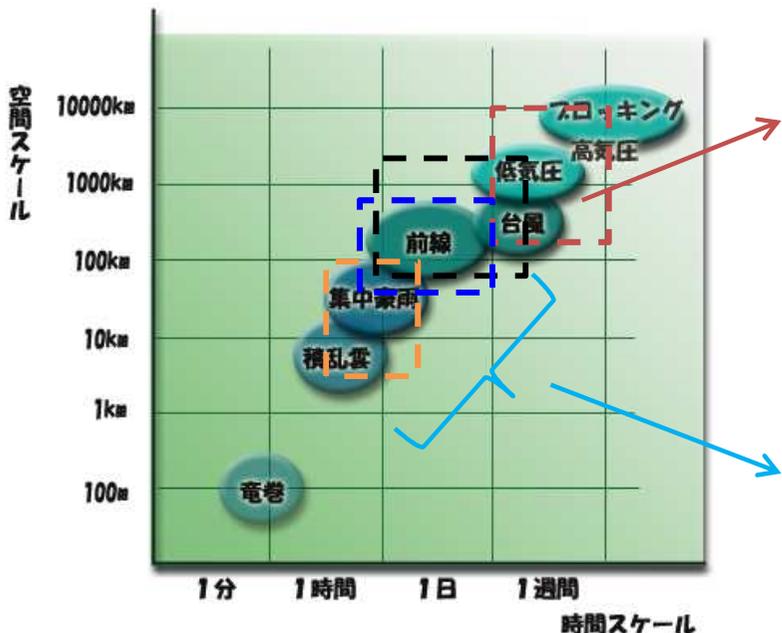
- 数値予報課報告・別冊第62号(気象庁予報部,2016)
 - » 気象庁ホームページに掲載

1. メソアンサンプル予報システムの概要

- 現業メソ数値予報システムとメソアンサンプルの目的
- メソアンサンプルの仕様
- アンサンプル撮動作成方法

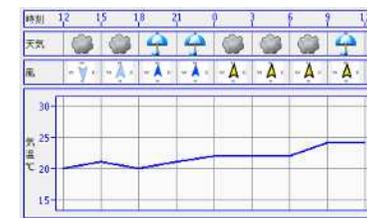
天気予報と予測可能性

週間天気予報と府県天気予報との違い



週間天気予報: 7日先までの予報、予測誤差が大きくなる
 → 決定論的予測が困難、アンサンブル予報の利用
 →→ 予報に加えて、**信頼度**や**予測範囲**

日付	17 土	18 日	19 月	20 火	21 水	22 木	23 金
東京地方	晴のち時々曇	晴時々曇	晴時々曇	曇のち雨	曇一時雨	晴時々曇	晴時々曇
府県天気予報へ							
降水確率(%)	0/0/20/10	20	20	50	50	30	20
信頼度	/	A	A	C	C	C	B
東京							
最高(°C)	25	25 (23~26)	25 (24~27)	20 (16~24)	23 (19~27)	23 (20~26)	25 (22~28)
最低(°C)	16	15 (13~17)	17 (15~18)	18 (16~20)	15 (13~18)	15 (12~18)	16 (13~19)



府県天気予報 (短期予報): 明後日までの予報
 → 何時からどのくらいの雨が降るのか、など
曖昧さを含まない情報が求められる

短期予報で利用するモデル

GSM: 総観場の予測

MSM: 1日先程度・GSMが解像するよりスケールの小さい現象の予測
 注意報・警報に資する情報

LFM: 数時間先・積乱雲等、警報に資する情報

一方で、(注警報の対象となる)スケールの小さい現象は1日程度先においても予測誤差の時間発展が速い → メソアンサンブルによる付加情報を与える

メソ予報とメソアンサンブル

気象庁現業局地/メソ数値予報システム

MSMがターゲットとする気象現象

	局地	メソ
目的	航空気象予報 防災気象情報	防災気象情報 航空気象予報
数値予報モデル	局地モデル (LFM) (asuca)	メソモデル (MSM) (JMA-NHM)
予報領域		
水平解像度	2 km	5 km
鉛直層数 (モデルトップ)	58 (20.2 km)	48+2 (21.8 km)
予報時間 (初期時刻)	9時間 (毎正時)	39時間 (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC)
初期条件	局地解析(3次元変分法)	メソ解析(4次元変分法)

→目先の数時間の予測

→半日から1日程度先予測

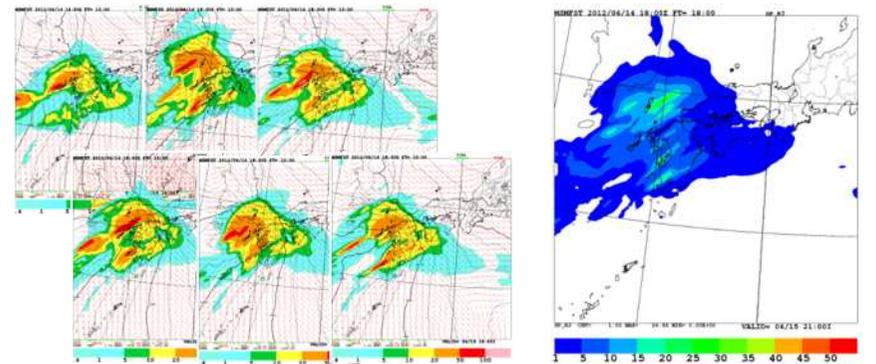
大規模場(メソ α ~総観規模)

MSMの予報時間内でも→
誤差の時間発展は大きい

積乱雲群(メソ β スケール~)

数10km以下のスケールの小さい現象はLFM

メソアンサンブルの導入



各メンバーを基にしたMSM
と異なるシナリオ

アンサンブルスプレッド
による信頼度情報

MSMに対する信頼度情報、複数の予測等を提供することで
気象現象の予測可能性に関わる情報が加わる

メソアンサンプルの仕様

設計思想

- ・予報はMSMと同設定:メソスケール現象の表現をMSMにそろえる(解像度を落さない)
(通常アンサンプル予報は決定論予報より低い分解能で行われることが多い)
- ・メンバー数:MSMと同スペック予報のため制限、少数メンバーで誤差を捕捉 → SV法

アンサンプル予報(コントロールラン(摂動を与えない予報)はMSMそのもの)

	開始	水平分解能	予報領域	予報時間	メンバー数	予報頻度
試験運用*1	H27.3	5km	MSM領域	39時間	11メンバー	1回/日、18UTC
本運用*2	次期計算機 導入(H30)後	5km	MSM領域	39時間	21メンバー	4回/日

*1:必要に応じてメンバー数増強・複数頻度の実験を行う

*2:本運用の仕様は確定ではない

初期摂動(特異ベクトル(SV)法)

	モデル	水平分解能	鉛直層数	摂動変数	評価時間	ノルム	算出数
メソSV	JMA-NHM	40/80km	38+2	運動量水平成分・ 温位・水蒸気	6/15時間	湿潤TE	10/10
全球SV	GSM	T63(約180km)	40	水平風・気温	24時間	乾燥TE	20

→以下、MSV・GSVと表記

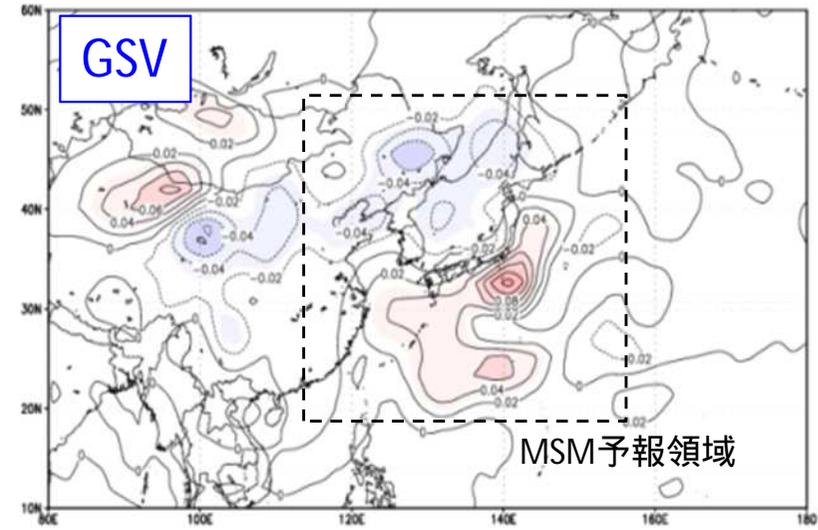
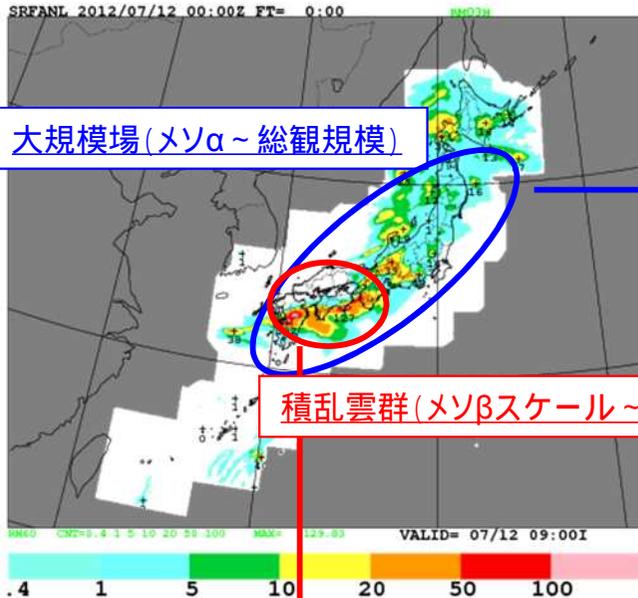
側面境界摂動(気象庁週間アンサンプル気圧面データより)

水平分解能	鉛直層数	摂動変数
1.25度(約125km)	10層(1000-100hPa)	水平風・気温・水蒸気

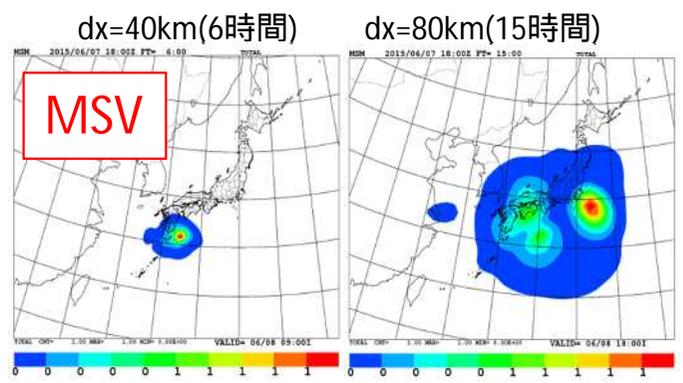
週間アンサンプルの予報水平分解能は40km
間引かれた予測値データを利用

下部境界摂動・モデルアンサンプル(未導入・開発中)

初期摂動: SV法



対象: 総観規模(メソ現象の環境)
対流圏全体をターゲット、水蒸気なし

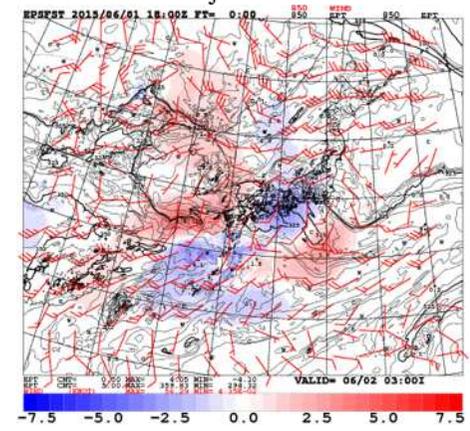


鉛直積算トータル
エネルギー表示

対象: メソスケール
対流圏下層をターゲット、水蒸気あり

初期摂動の計算(算出したSVの線形結合)
バリエーションミニマム法による結合係数計算

$$\sum_i a_i \times Msv40_i + \sum_j a_j \times Msv80_j + \sum_k a_k \times Gsv_k$$



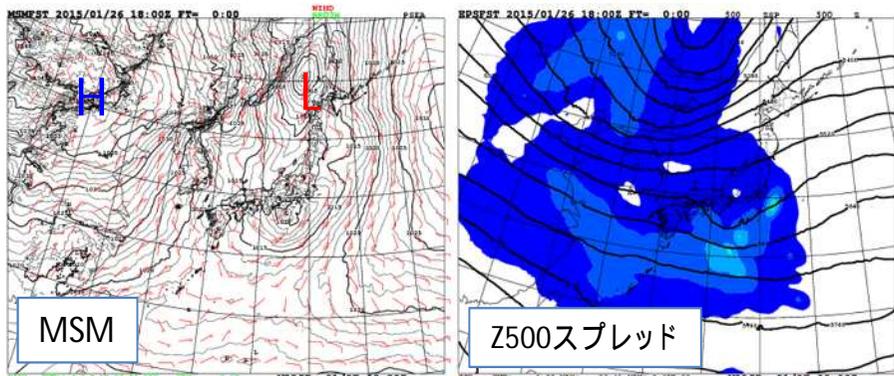
側面境界摂動

1. 側面境界摂動の必要性

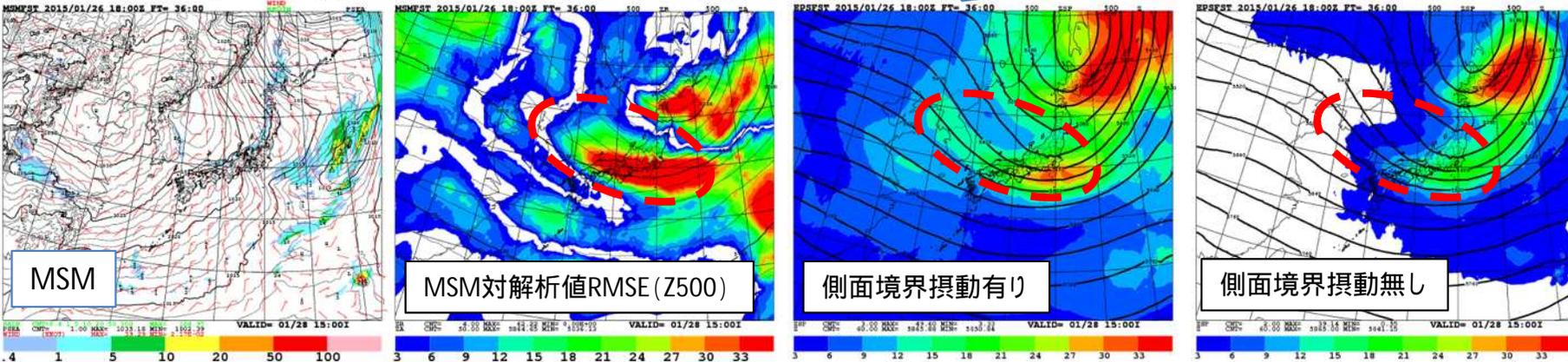
領域EPSでは側面境界値の不確実性を考慮する必要がある

- ・特に日本付近で流れの速い、冬季はその影響が早く予報領域内部へ伝わる
- ・(簡便なため)週間EPSからの摂動を利用

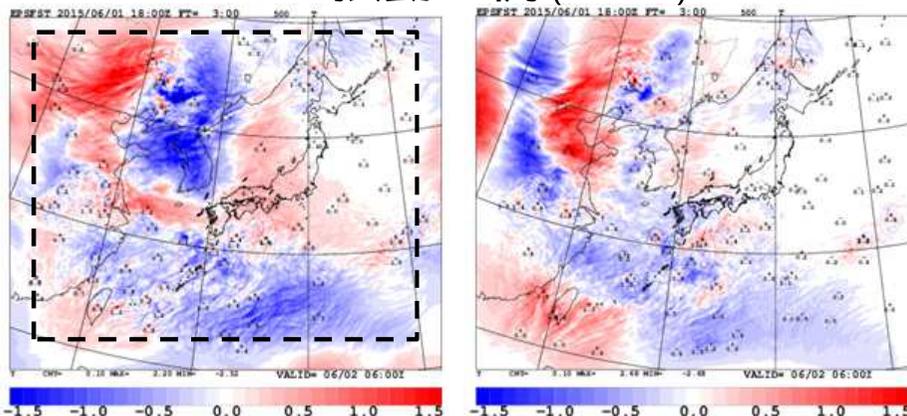
FT=0



FT=39



T500摂動の例 (FT=3)



初期摂動と側面境界摂動の相関無し(左)、有り(右)

2. 初期摂動パターンとの整合の重要性

現システムでは、初期摂動と側面境界摂動の間に相関がない側面境界値とともに(MSMから見た)摂動パターンが変わる(例)初期摂動によりMSMより下層が湿ったメンバーが、側面境界値の流入によりMSMより急に乾燥することが起こりうる → ひとつのシナリオに一貫性がない

現在、側面境界摂動に初期摂動で利用するGSVの線形時間発展を利用するよう開発中

海外センターとの領域EPSの仕様比較

諸外国の領域EPSの概要(2015年3月現在、フランス・日本は試験運用)

	英国	フランス	ドイツ	米国	カナダ	日本
水平分解能	2.2km	2.5km	2.8km	16km	15km	5km
予報時間	36h	42h	27h	87h	72h	39h
メンバー数	12	12	20	26	21	11
初期値	全球EPSからの ダウンスケーリ ング	全球EPSからのダ ウンスケーリ ング	複数全球EPSから のダウンスケーリ ング	領域BGM法+全球 EnKF	全球EPSからのダ ウンスケーリ ング	SV法
側面境界値	全球EPS	全球EPS	複数の全球モデル	全球EPS	全球EPS	週間EPS

【アンサンブル予報の仕様】

- ・対象とする領域の広さ・現象が異なるので仕様は様々

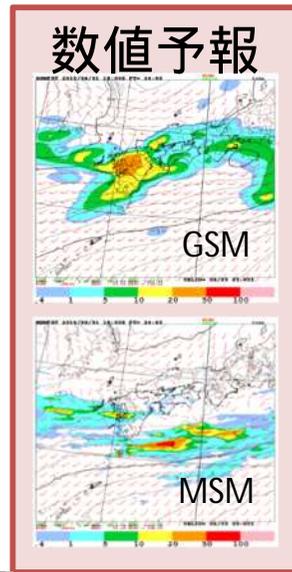
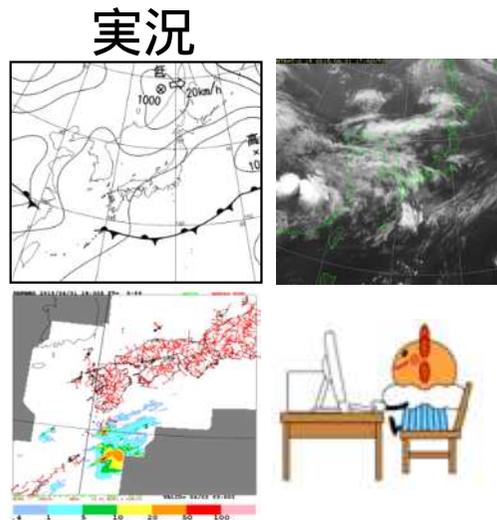
【アンサンブル用初期値・境界値】

- ・各センターとも全球EPSからのダウンスケーリングが主流
 - ・開発・研究レベルではアンサンブル同化手法を行っているセンターが多い
 - この際に、初期摂動と側面境界摂動の統合を検討する必要があり、
関連する論文もいくつかある
- ・初期摂動は、気象庁のようにスケールの大きい摂動と小さい摂動をそれぞれ作成し、
両者を結合して初期摂動を作成するセンターもある
 - ・米国・オーストリア(現業)、中国(現業?)、英国(研究)

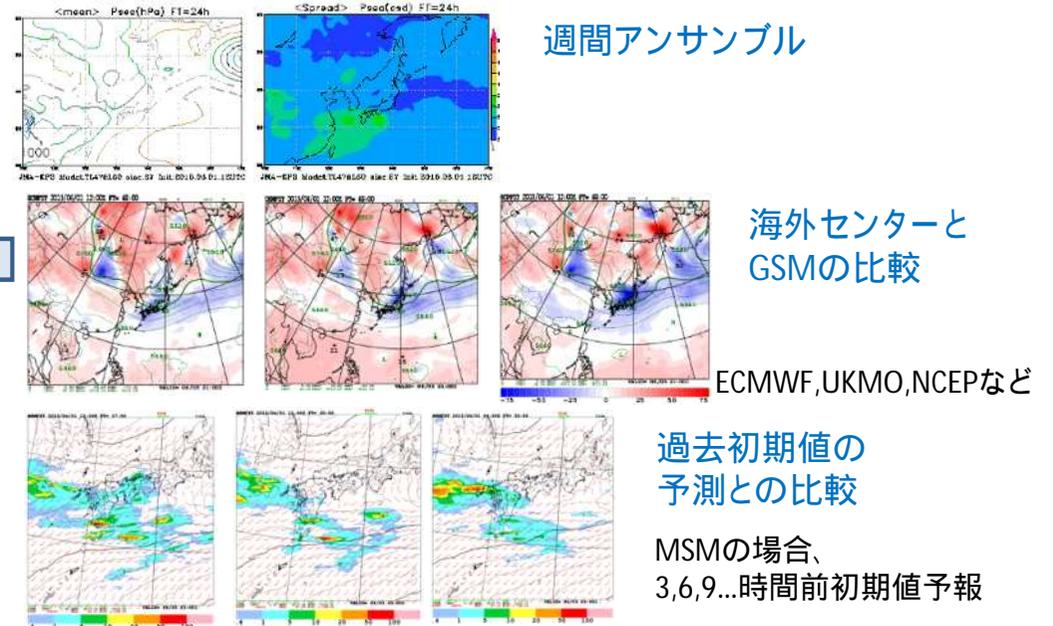
2. アンサンブルメンバーの予測特性

- メソアンサンブルからの出力
- 事例紹介と各メンバーの予報特性

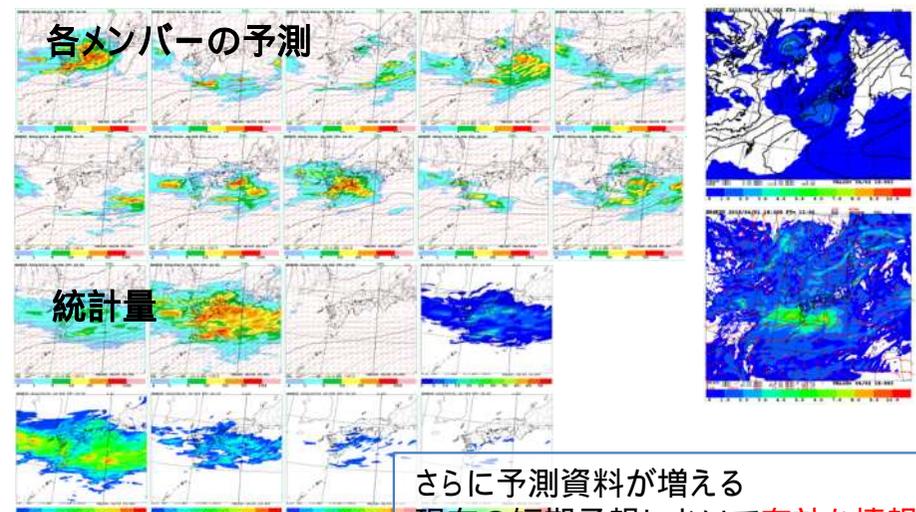
短期予報作業で利用される数値予報資料



予測の不確実性に関する情報(現在)



メソアンサンブル(新規)



さらに予測資料が増える
現在の短期予報において有効な情報は？

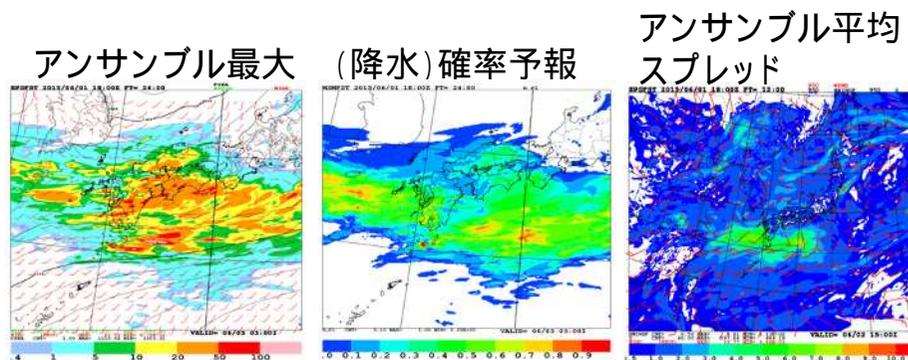
ひとつのシナリオを確定

シナリオに基づき、いつどの程度の雨が降る等を決定・発表

短期予報での利用が想定されるメソアンサンブル予測資料

アンサンブル予報は
確率密度分布の離散近似

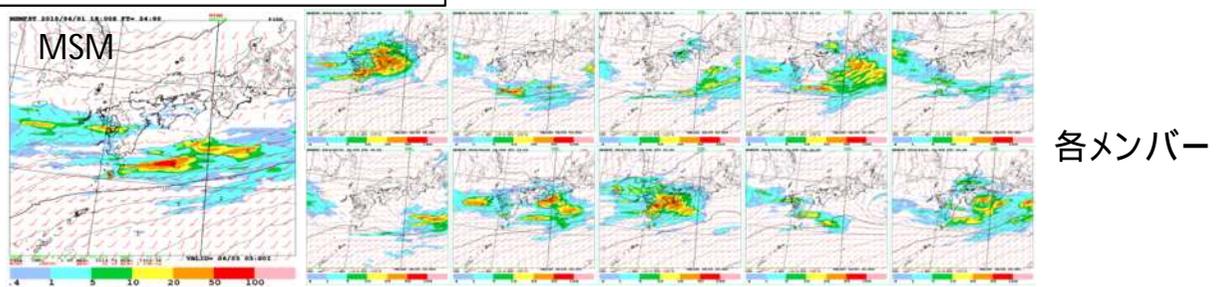
1.統計量



アンサンブル最大:最悪シナリオのクイックルック
確率予報:未検討
アンサンブル平均:精度の良さを生かしたガイダンスの入力としての利用
スプレッド:週間EPSより高い分解能の(メソスケールの現象の)信頼度情報

ただし統計量は予測値と異なり、物理量間で整合が取れているわけではなく、その解釈が困難なため、シナリオの決定に直接資する情報の取り出しが困難(確率予報により見逃しが減る等の利用可能性はあるので使い方は今後要検討)

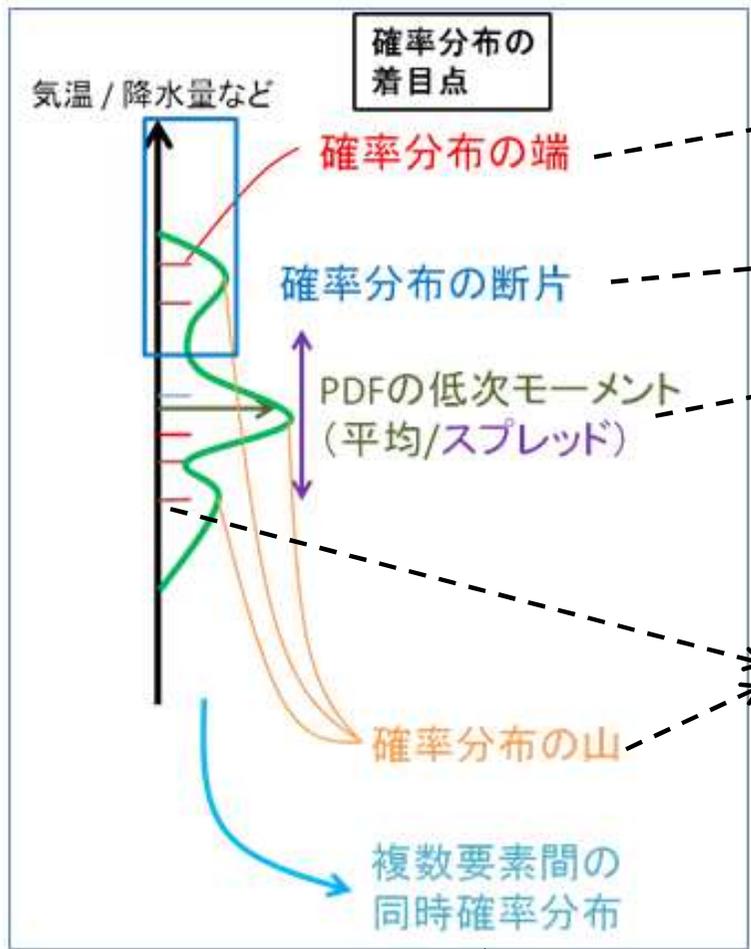
2.各メンバーの予測



各メンバーの予測は情報量が多いものの、シナリオという観点で現在の予報作業になじみやすく、MSMより実況に近いシナリオ、別なシナリオなどの観点から個々の予報について、その特性把握、利用に向けた検討を行っている

3.現象の要因解析

→ 各メンバーの予測特性を事例とともに紹介

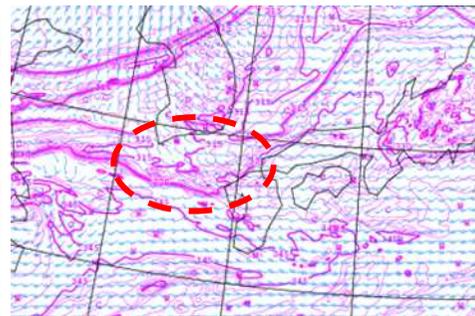
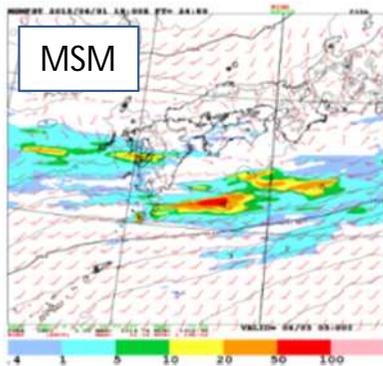
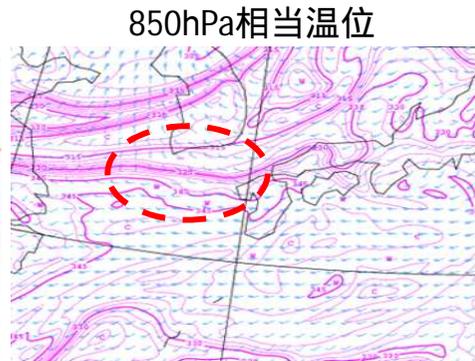
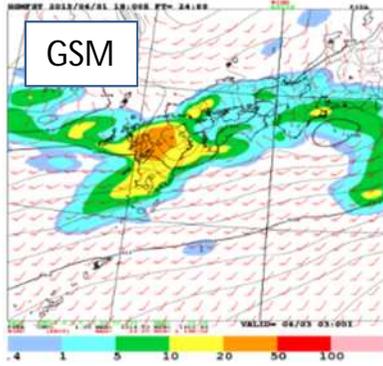


シナリオの決定が難しい事例

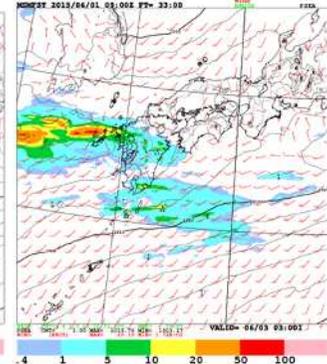
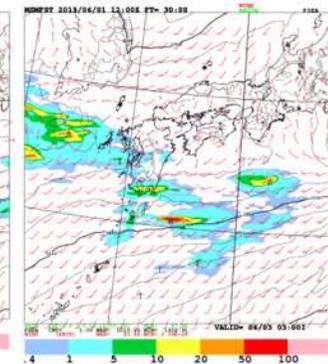
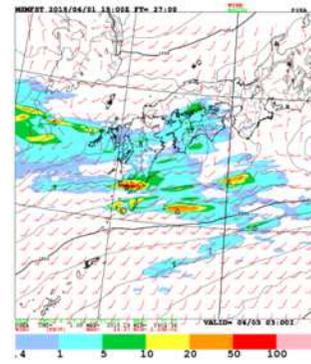
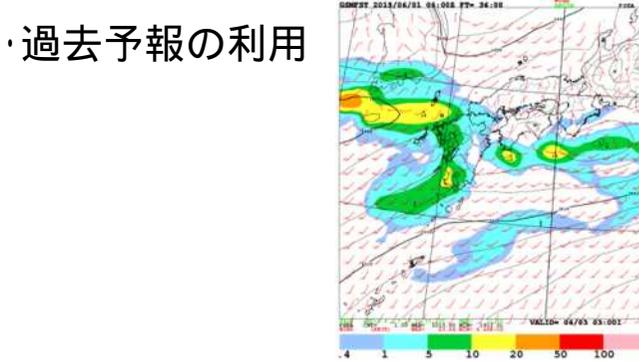
予報初期時刻: 2015.6.1 18UTC (6.2 03JST)
FT=24 (6.3 03JST)

現在の予測資料から把握できる不確実性

・過去予報の利用



前線に対応すると考えられる
相当温位傾度の大きい領域
の走向が異なる



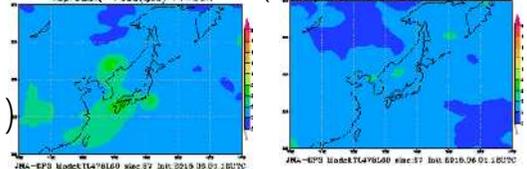
古いGSM

古いMSM

この他

- ・週間アンサンブルの利用
- ・GSMと海外センターの比較 (略)

Psea(左)とZ500(右)のスプレッド

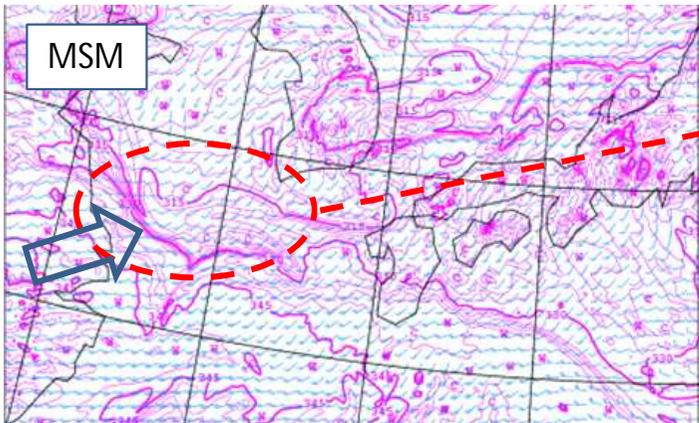
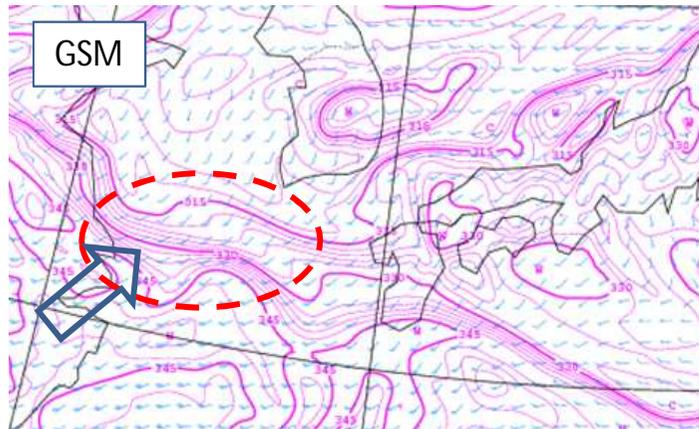


→ 上層の不確実性は小さい

モデル間で降水予測にばらつきがあり、下層にその起源があると考えられる
→ 初期時刻における下層に注目(特に上流となる東シナ海)

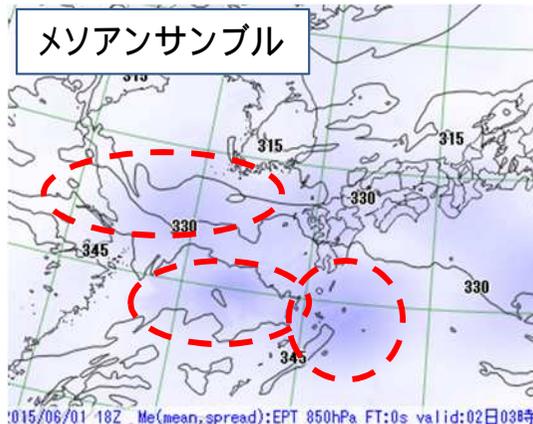
初期時刻の下層相当温位の特徴

850hPa相当温位初期値

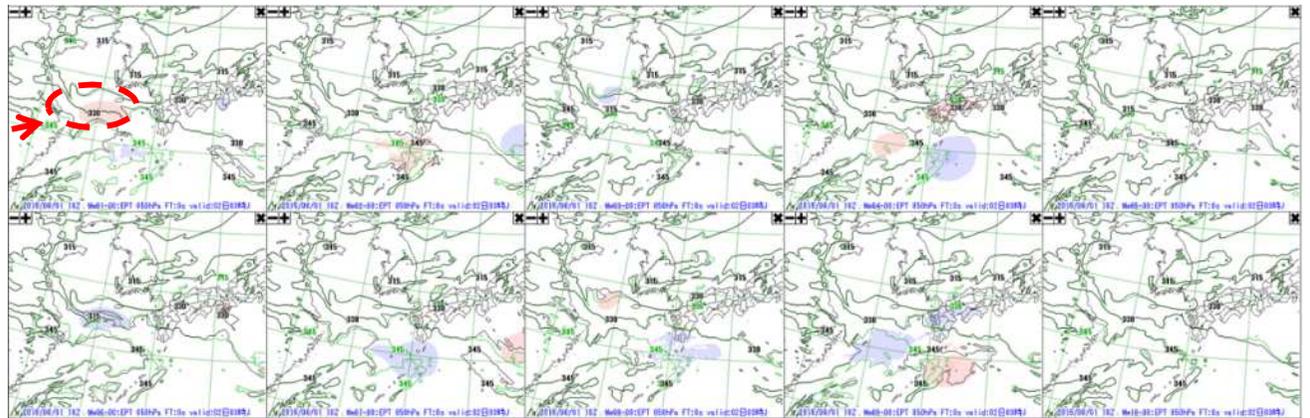


東シナ海の前線に対応すると考えられる
相当温位傾度が大きい領域とそれに向かう流れに差異
・前線はGSMが北、MSMがやや南
・前線に向かう流れはGSMが南西、MSMが西南西

850hPa相当温位のメソアンサンプルによる初期スプレッドと各メンバーの初期摂動



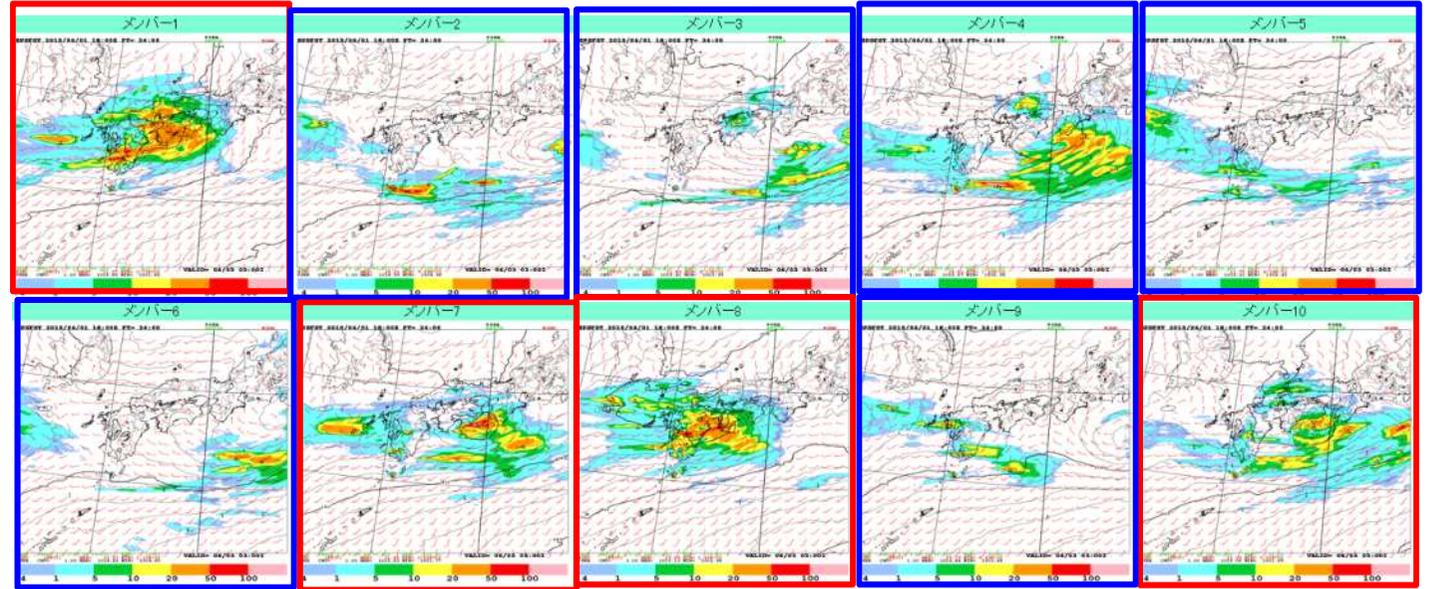
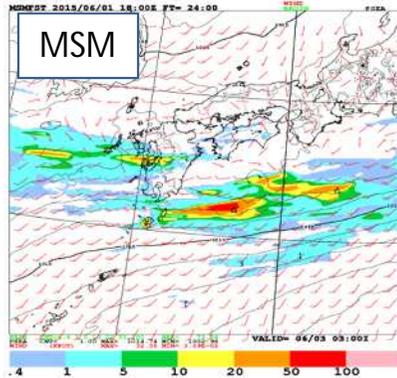
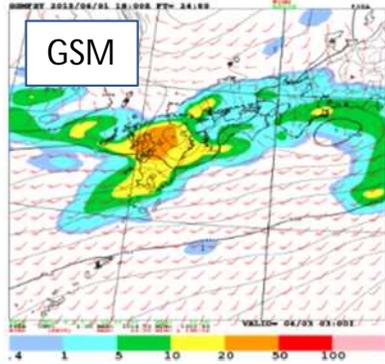
【初期スプレッドにより感度が大きい領域】
・相当温位傾度が大きい領域
・高相当温位の先端
→ ここでは前者に着目



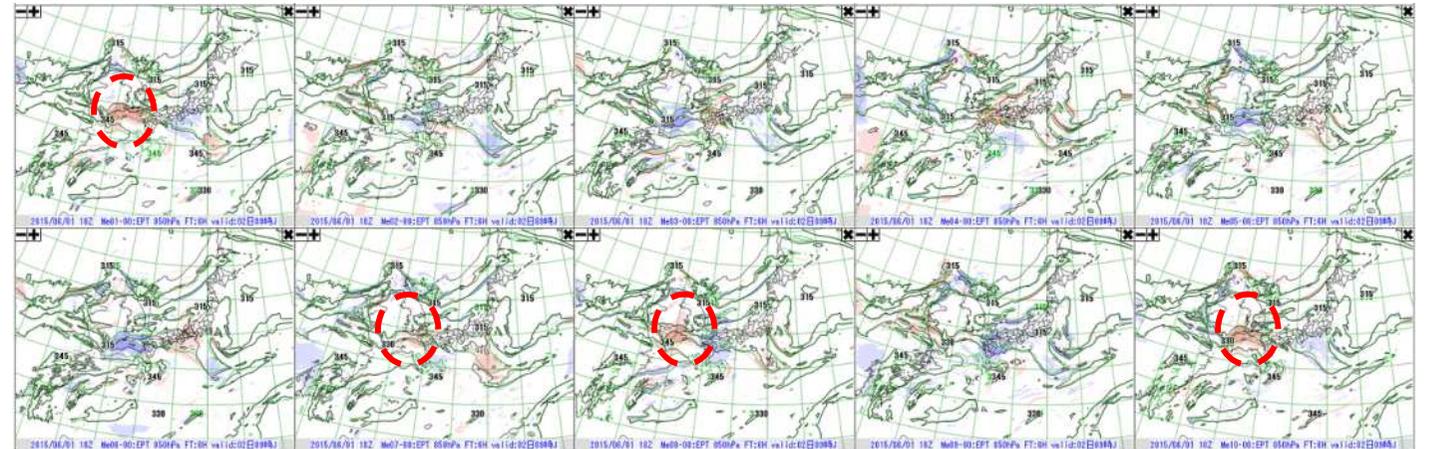
メソアンサンプルでも、過去予報においても見られなかった
前線をMSMより北よりにシフトさせるメンバーが存在

メソアンサンブルによる予測 (FT=24)

各メンバーによる降水予測



850hPa相当温位摂動 (摂動 = メンバー予報 - MSM)



前線を

- ・MSMより北に予測するグループ
- ・MSM付近に予測するグループ

→以上のシナリオを想定 →現象の起源が東シナ海と推測されるので実況監視で注目する

実況の経過

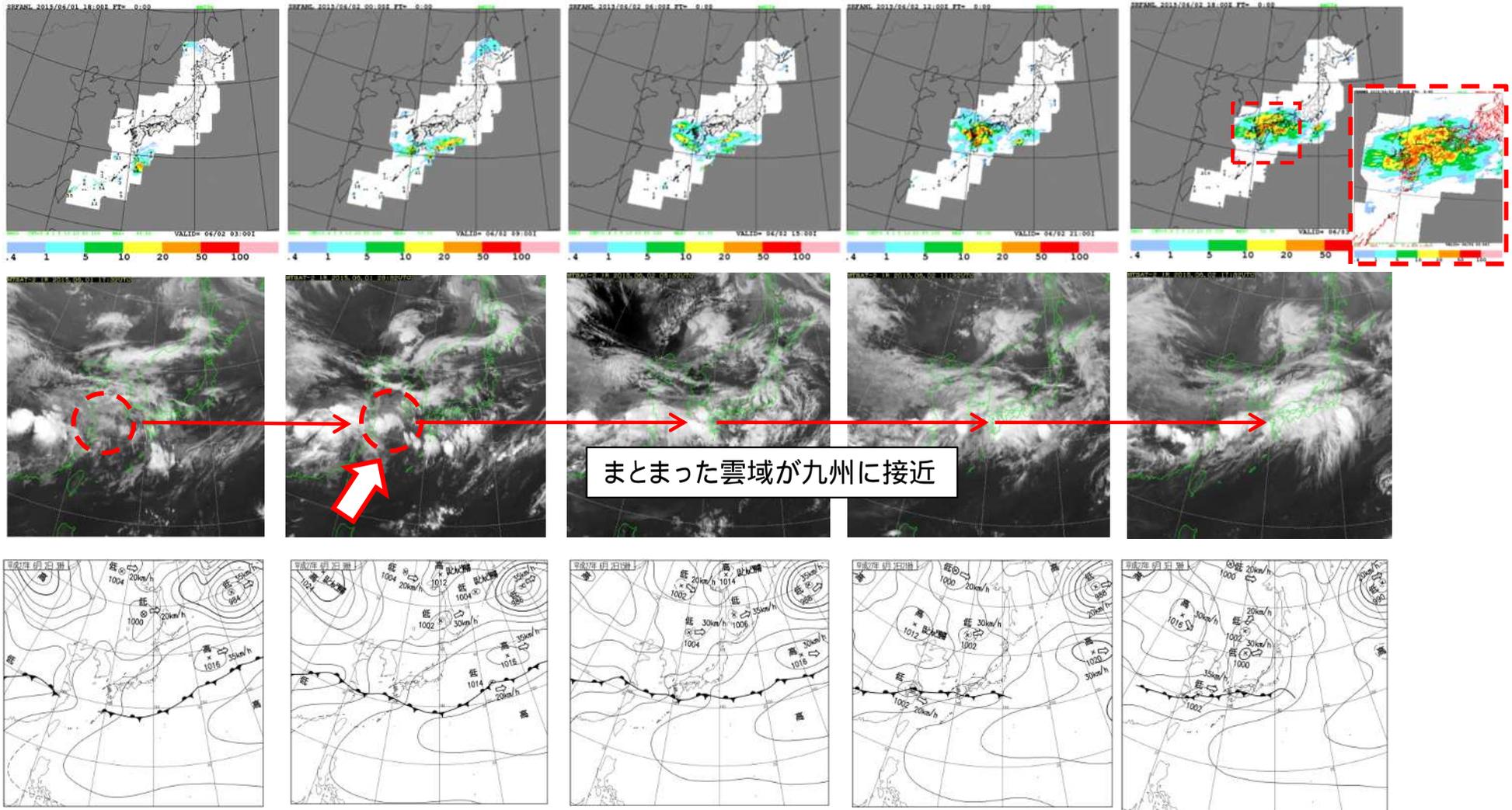
6.2 03JST
(FT=0)

6.2 09JST
(FT=6)

6.2 15JST
(FT=12)

6.2 21JST
(FT=18)

6.3 03JST
(FT=24)

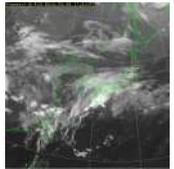


実況推移の早い段階で、予測結果と比較することで北よりのシナリオの選択
九州での降水量の見積もりにメソアンサンブルを利用するなどの利用が考えられる

各メンバー利用時の着目点

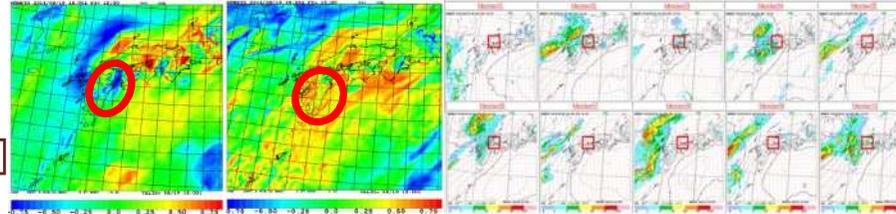
3. 降水量とある要素のラグ相関による実況監視のポイント把握
(ただしより多数メンバー・動的な実行が望まれる)

2. 実況との比較
例: 海上から近づく擾乱の
観測データとメンバーの比較



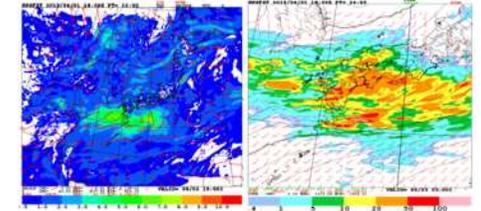
観測

着眼点



降水量(赤枠)と下層風速・相当温位との相関係数

1. アンサンブル予報結果から
・現象の不確実性などの把握

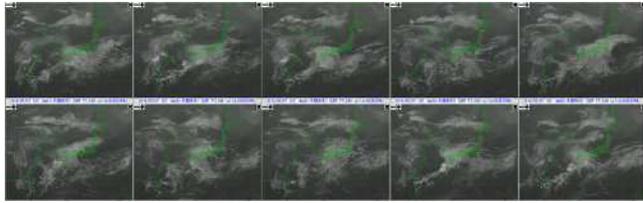


←複数のシナリオ等の想定

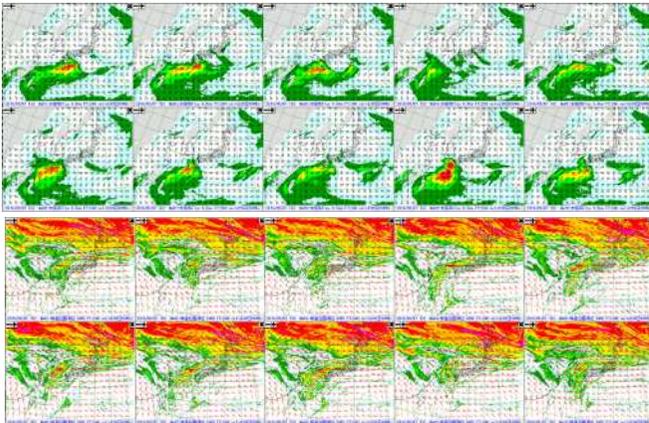
・メンバーの着目点: 初期摂動の確認

1. 予報に感度のある領域に摂動がはいったかどうか
2. 解析値と観測値に系統的な乖離がある場合(解析値は完全に観測値に近づかない)
→似た摂動パターンをもつメンバーに着目

各メンバー



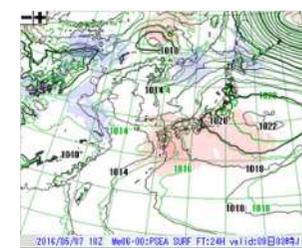
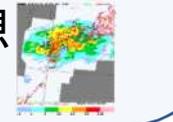
(豪雨の)実況監視に即したモニターの整備
各メンバーの予想衛星画像、
500m水蒸気フラックス、渦位...



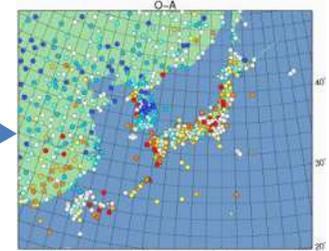
現在



現象の予想
される時刻



初期摂動



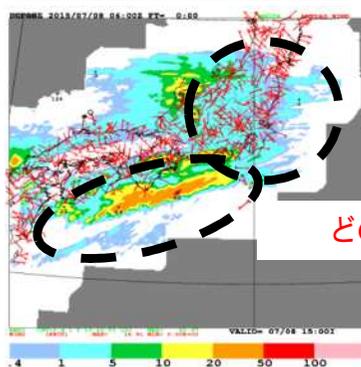
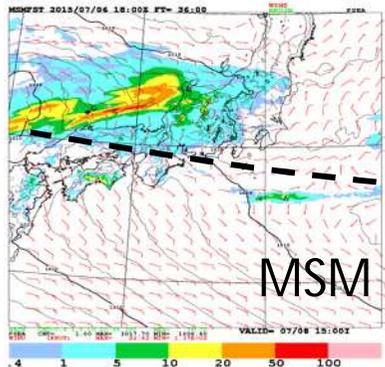
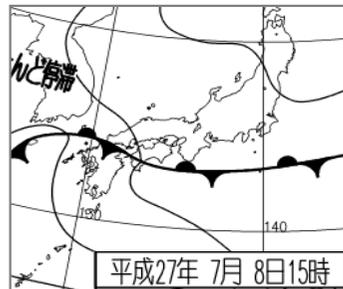
観測 - 解析値

各メンバーの予測に関わる注意点

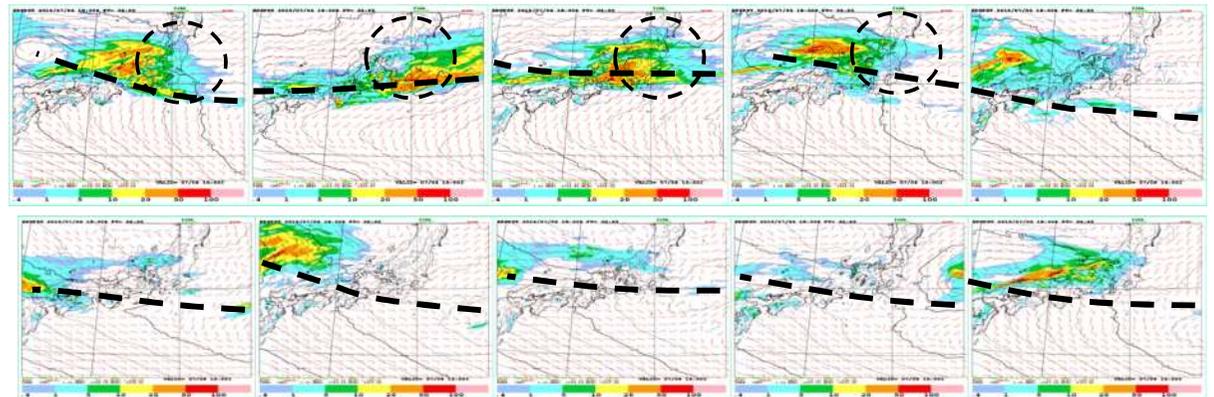
降水分布・地点予想(気温の推移など)が実況と対応していても、**そこに至る気象学的プロセスが実況と異なる場合**が比較的多い

- 各メンバーの予測プロセスを把握する必要がある
 - **全メンバーがはずれる**こともある
 - MSMが苦手な現象はアンサンプルでもその予測精度は悪い
- 実況と対応の良いメンバーも、**領域・時間は限定**される(事例・検証結果は後のスライドで)
- 長時間MSMより良い予測メンバーは少ないので、予測そのものをあるメンバーに置換することは困難
 - SV法では解析誤差に関わる情報を持たない
 - 他の摂動手法ではどうなのか？
 - クラスタ解析は着目する現象・領域・時間に限定して動的に行う必要

2015.7.6 18UTC初期値
FT=36 (7.8 15JST)



東日本に降水を予測するメンバーがあっても前線の位置がずれている



どのメンバーも予測できていない降水

→ MSM及び各メンバーの精度比較

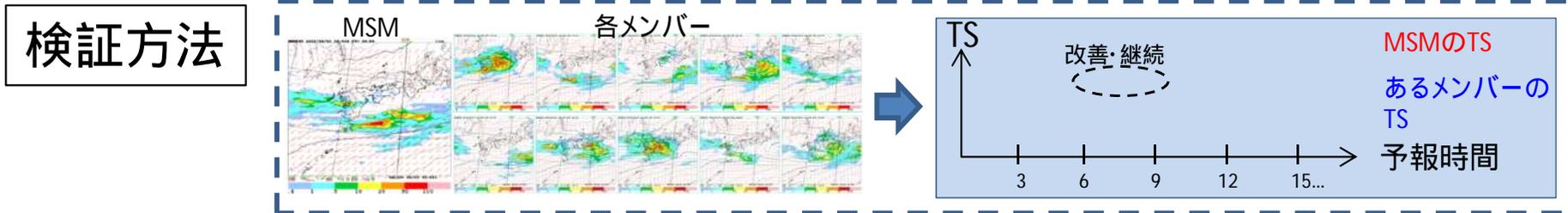
3. メソアンサンブル予報システムの検証

- 1. 各メンバーの降水予測精度
 - シナリオの観点からMSMとの比較
- 2. アンサンブル平均・スプレッド
- 3. 降水確率予報精度
 - アンサンブル予報で行われる検証

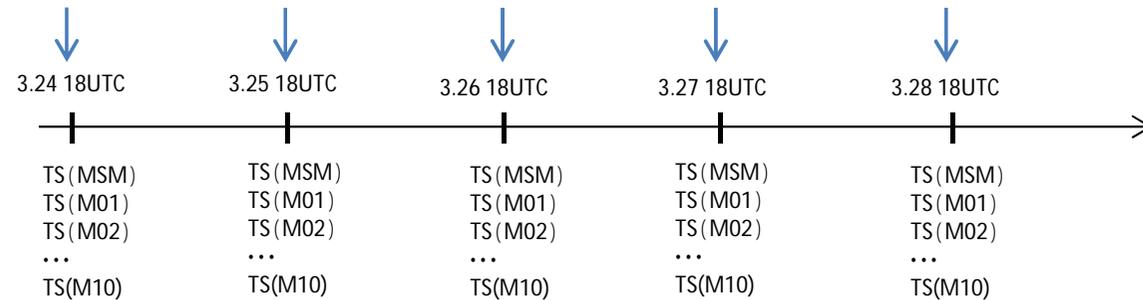
MSMと各メンバーの予測精度比較

スコアの比較だけでなく、MSMを上回るメンバー数・その継続時間を計算
 今回はスレットスコア (TS) に着目する

$$TS \equiv \frac{FO}{FO + FX + XO}$$



1. 毎初期値TSを計算

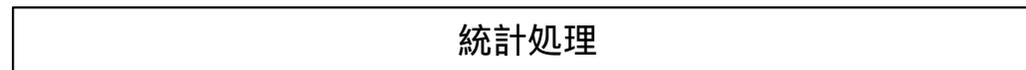


2. CTLと各メンバーを比較



3. 統計処理

スコアだけでなく、MSMを上回るメンバーの数や継続時間を統計処理



得られるもの

- ・TSがMSMを上回ったメンバー (以後、**改善メンバー**と呼ぶ) の数
- ・改善メンバーが連続してMSMを上回り続けた時間 (以後、**継続時間**と呼ぶ)
- ・改善メンバーのバイアススコアも同時に抽出

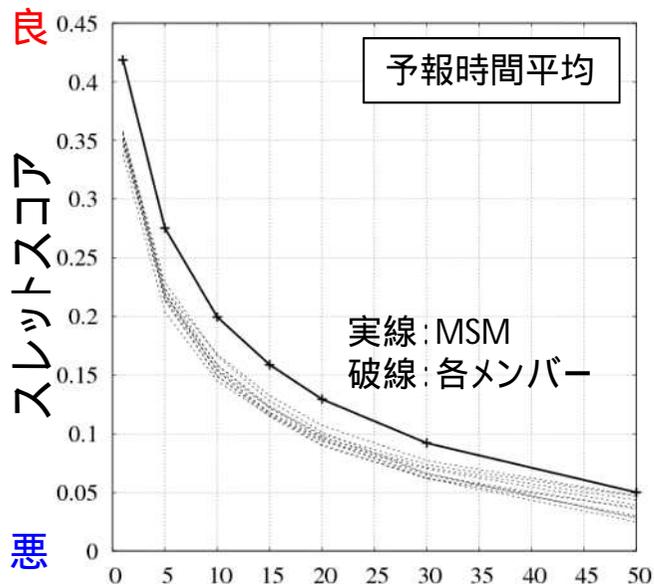
 ・その他 (今回は示さないが)

- ・地上、高層検証でも同様のことが可能
- ・降水検証との相関

【対解析雨量による検証】

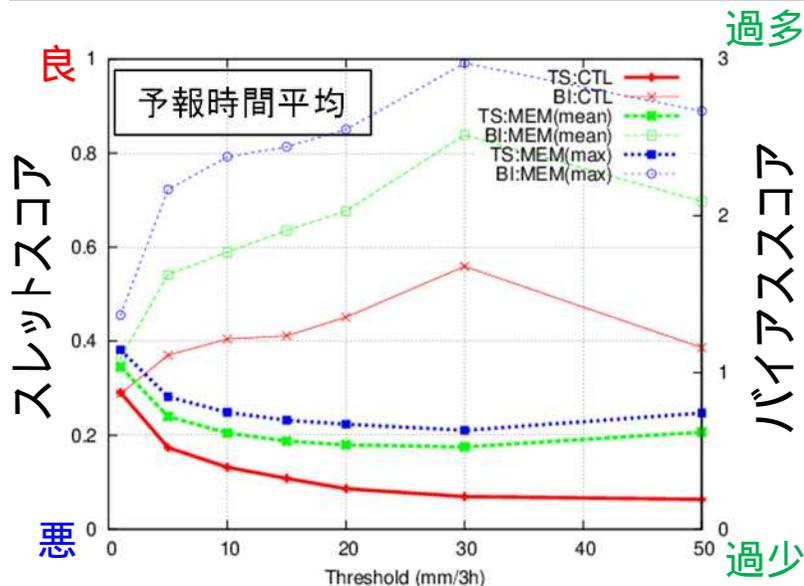
- ・20km格子平均、3時間降水量
- ・日本全域を対象
- ・サンプル数222
(2015.3.24 - 10.31)

1. MSMと各メンバーのTS



→ 各メンバーの統計的な予測精度はMSMより悪い

2. MSM及び改善メンバーのスコア比較

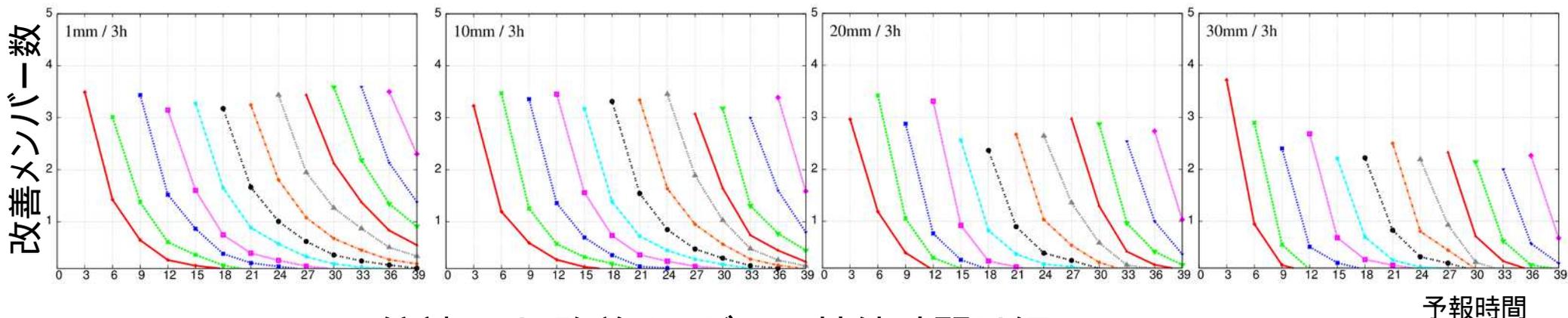


- ・MSM
- ・改善メンバーの平均及び最大TSの期間統計

→ 改善メンバーのTSは強雨ほどMSMを改善する一方で降水は過多 (事例は次のスライド)

3. 改善メンバー数とその継続数

各予報時間において、改善メンバーが引き続く予報時間においてもMSMより改善しているメンバー数

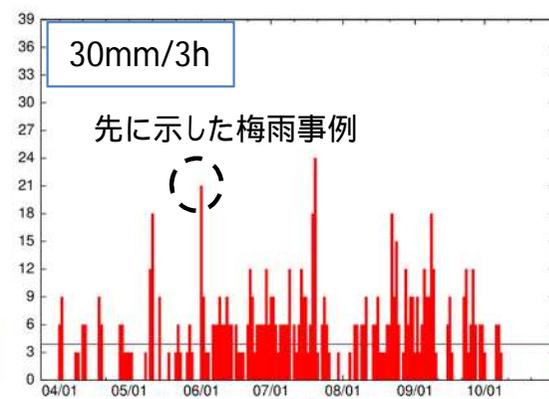
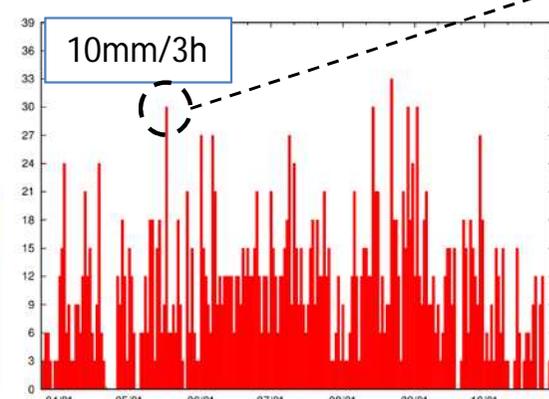
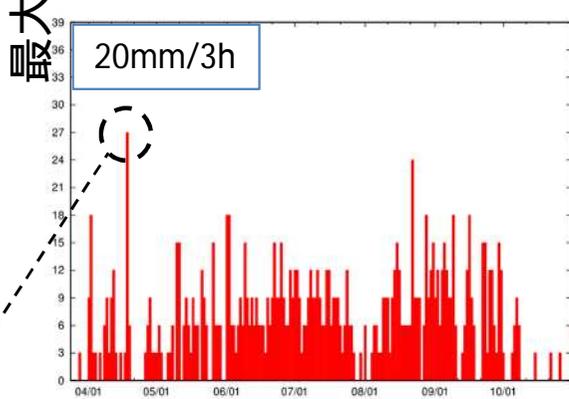
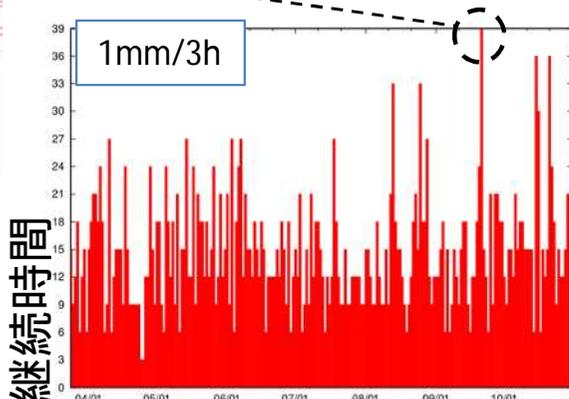
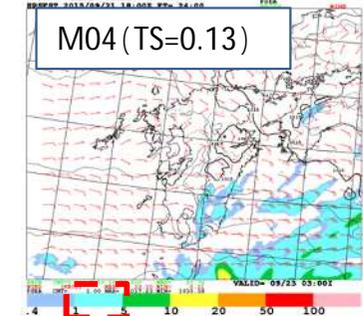
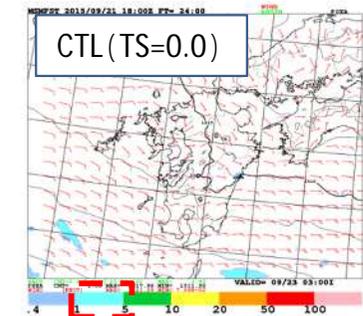
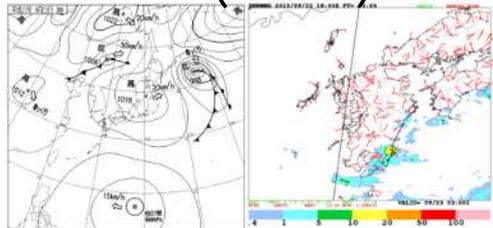


→ (統計では) 改善メンバーの持続時間は短い
各事例ごとに最も継続時間の長い改善メンバーは？

3. 改善メンバーの中の最大継続時間と事例

毎初期値、最長のものを抽出

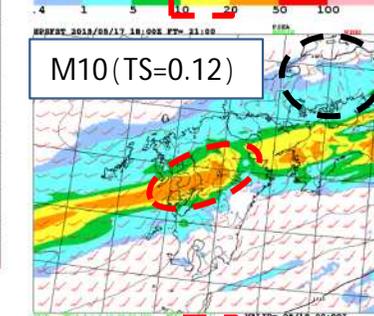
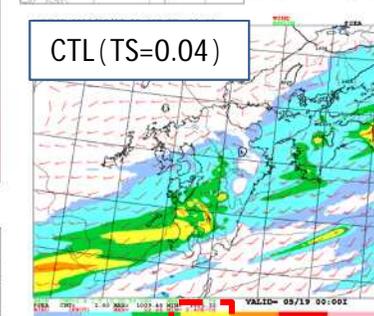
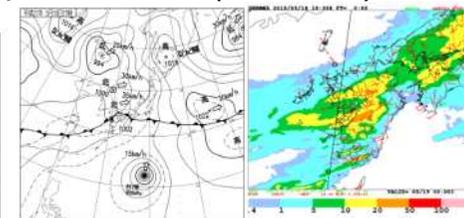
9.21 (FT=24)



最大継続時間

月/日 (初期時刻は全て18UTC (03JST)、2015年)

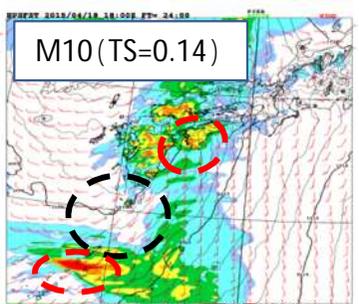
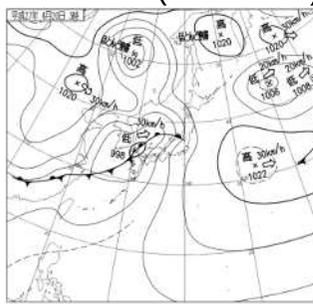
5.17 (FT=21)



先に示した梅雨事例

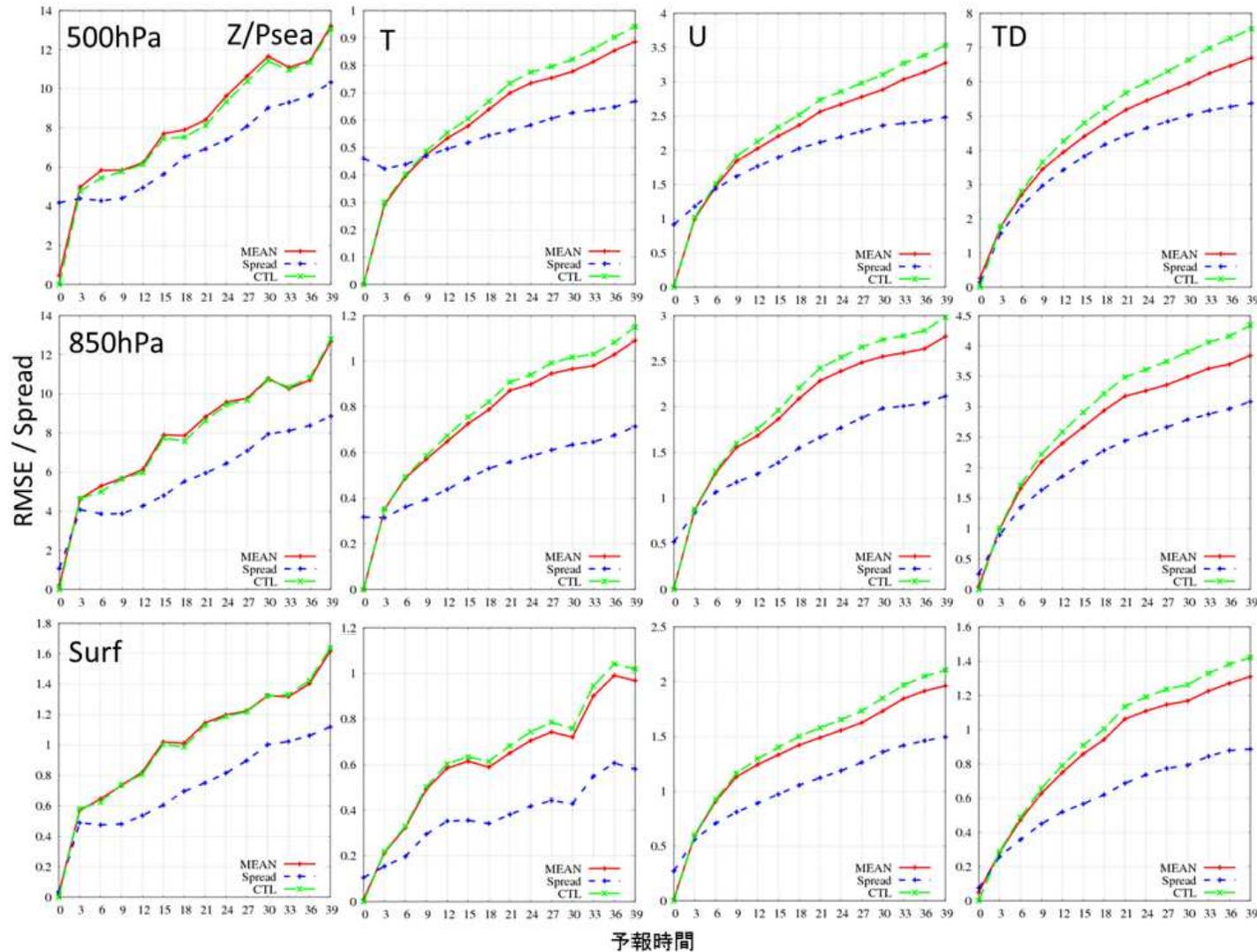
↑ 九州の予測は良いが
四国・瀬戸内の予測は悪い

4.18 (FT=24)



・前線等の環境場を修正したため
MSMより良い予報が長く続いた事例
→広域でMSMより良いわけではない
・降水過多の傾向も見られる

アンサンブル平均・スプレッド



解析値に対するRMSE

MSMのRMSE

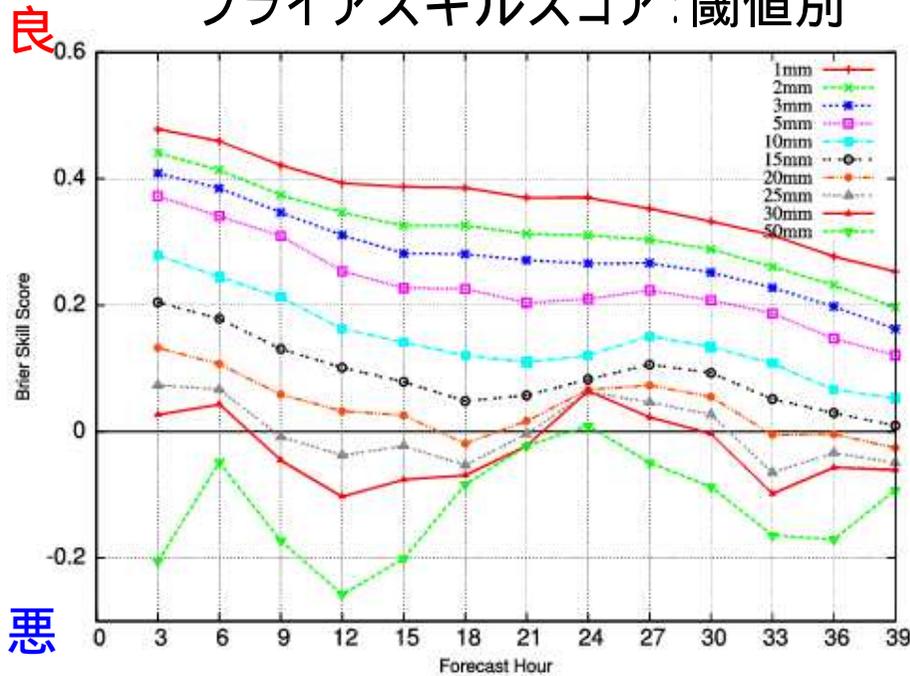
アンサンブル平均のRMSE

アンサンブルスプレッド

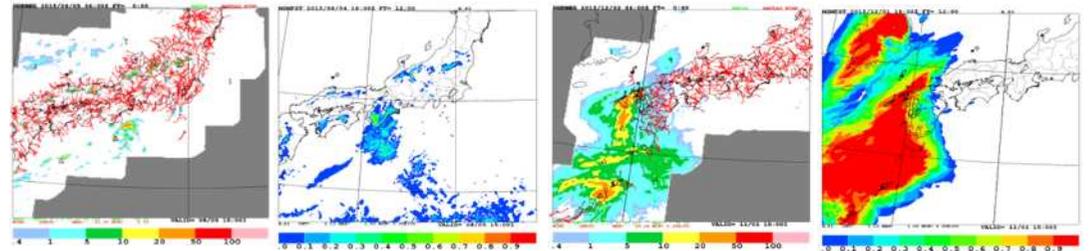
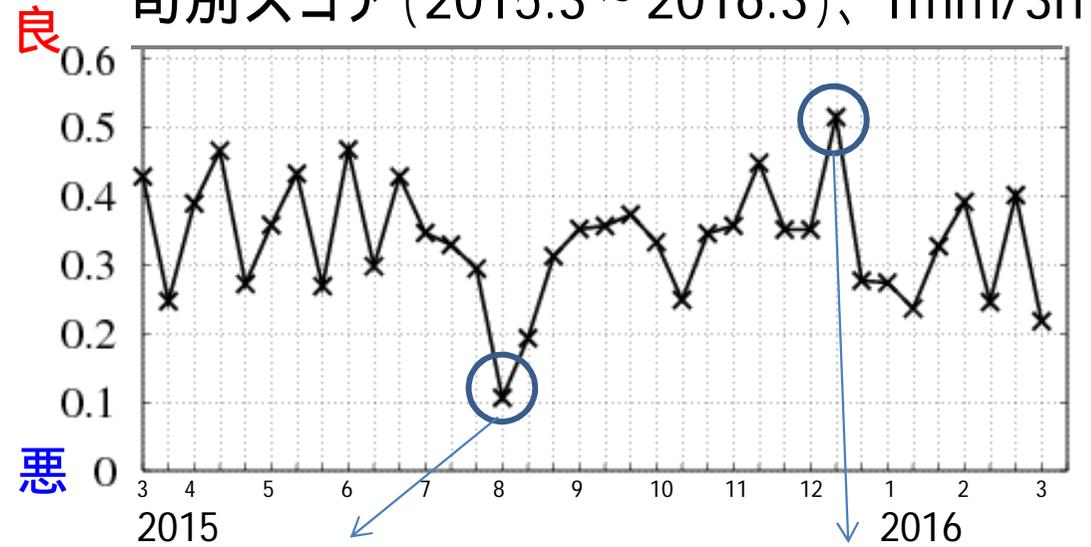
- ・スプレッドは誤差に比べ小さい
- ・全般に予報時間の経過とともにアンサンブル平均がMSMを改善
 - ・一方、PseaやZの改善が小さい
 - 側面境界摂動にもGSVを使うと改善
 - 初期摂動パターンとの整合をとることも踏まえ、変更に向けた開発中

3時間降水量に対する確率予報精度

ブライアスキルスコア：閾値別



旬別スコア (2015.3 ~ 2016.3)、1mm/3h



閾値20mm/3hの降水までBSS > 0
気候値予測より有用

4. まとめと今後の開発

- まとめ
 - 部内試験運用を2015.3より開始
 - 利用の検討として、現行作業となじみやすいシナリオの観点から、各メンバーの予測を中心に事例及び特性を紹介
 - シナリオの観点から各メンバーとMSMの精度比較、確率論的検証
- 今後の開発等
 - システム面の課題
 - 側面境界摂動
 - 週間EPS→GSVの線形時間発展の検討
 - asucaベースのシステム開発
 - MSM:今年度にJMA-NHM → asuca
 - メソアンサンブル:予報モデルとMSV → asuca
 - 利用方法検討
 - 引き続き、事例検討・知見蓄積
 - MSMとメンバー検証方法の開発
 - 降水以外の要素
 - メンバー選択等の客観的技術開発