



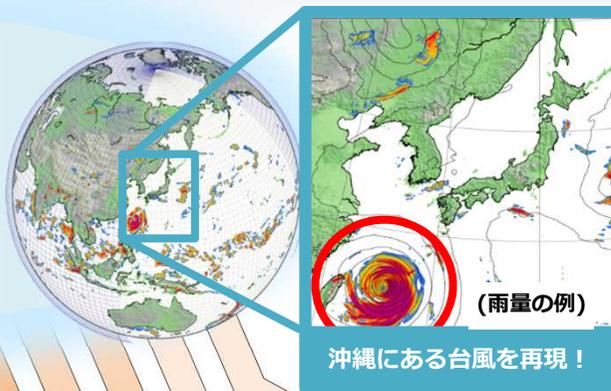
メソアンサンブル予報の紹介

気象庁予報部数値予報課
2019.3.13気象・地震等の情報を扱う
事業者等を対象とした講習会(第6回)

- 
1. 数値予報システムとアンサンブル予報
 2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS
 3. メソアンサンブル予報
 4. まとめ

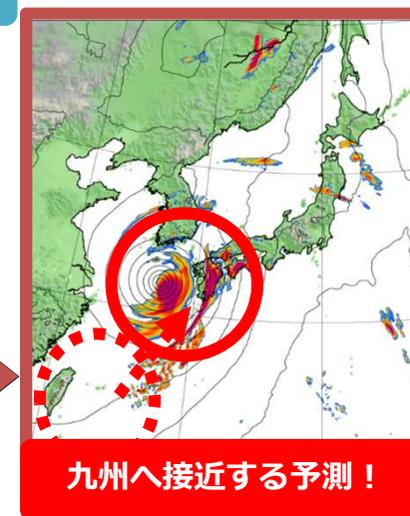
1. 数値予報システムとアンサンブル予報

現業数値予報システムの処理の流れ



① 世界中から集めた観測データをもとに、スーパーコンピュータを用いて現在の大気状態を再現
(初期値作成)

② 物理法則に則り、スーパーコンピュータを用いて未来の大気状態をシミュレーション
(時間積分)



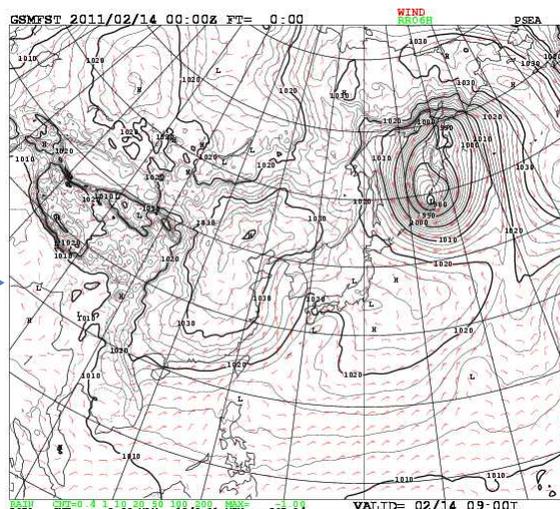
1. 数値予報システムとアンサンブル予報

数値予報と誤差： 数値予報の処理過程

- 計算機上に構築した仮想の大気(海洋・陸面)において、
- ある特定の時刻の状態を数値的に解析し(初期値作成)、
- それを、数値予報モデルにより物理法則に従って時間発展させて、未来の状態を数値解として計算する(時間積分)。

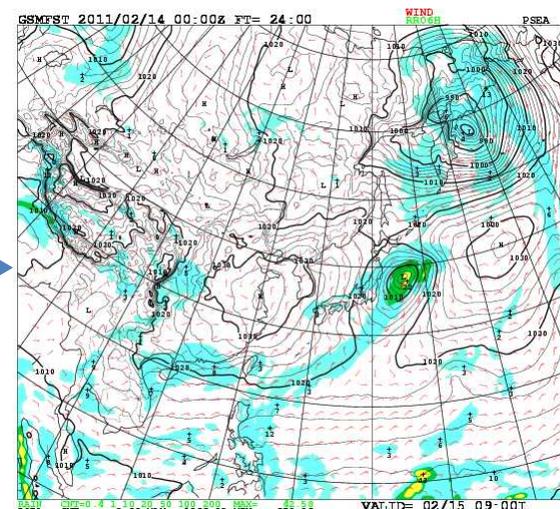


→
数値
解析



ある時間の大気状態
(初期値)

→
時間
積分



未来(24時間後)の大気状態
(予報値)

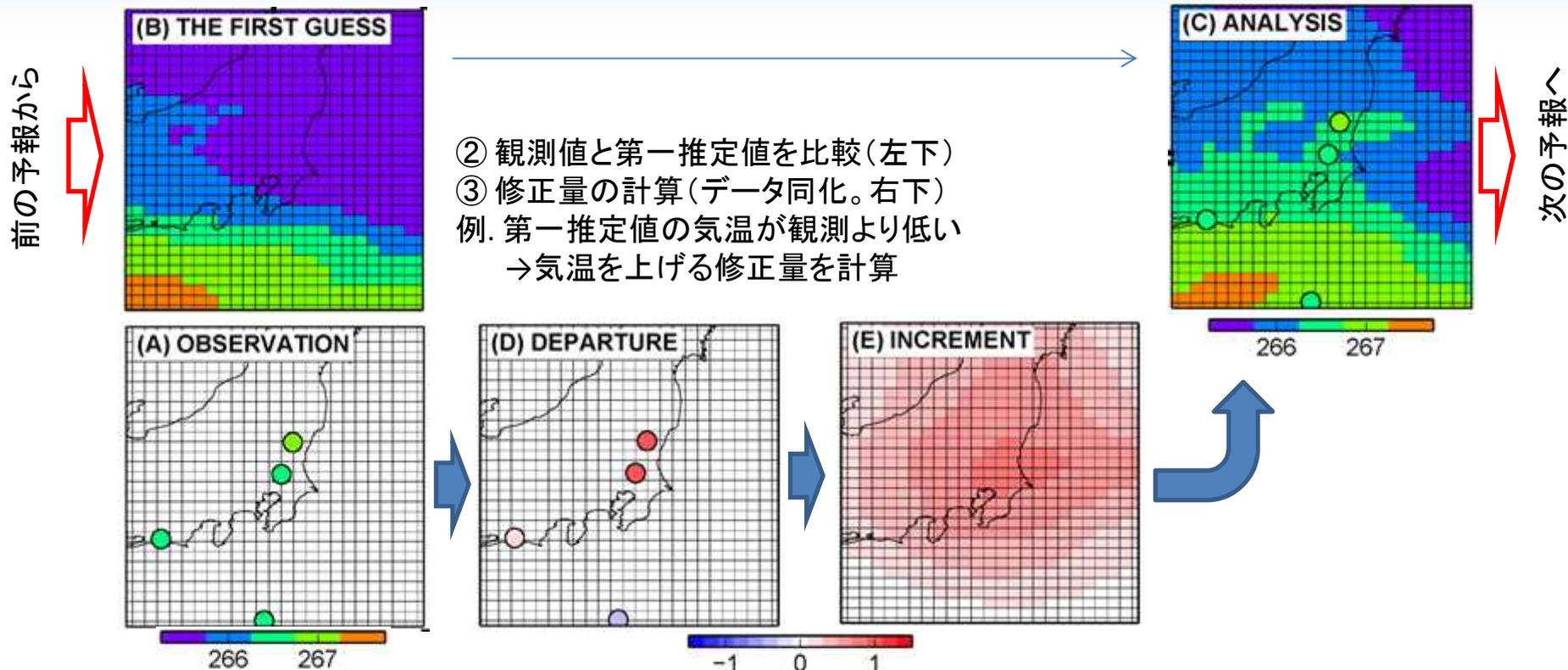
ただし、数値予報の結果には様々な要因により誤差が生じる

1. 数値予報システムとアンサンブル予報

数値予報と誤差： 初期値作成

① 第一推定値(たたき台となる場。前回予報値など)と観測値を準備

④ 第一推定値に修正量を加え初期値(解析値)を計算



誤差の要因

- ・ 第一推定値の誤差
- ・ 観測値の誤差、時間・空間的にまばら(限られた情報)
- ・ 修正量の誤差(データ同化手法(近似・分解能))



「初期値の不確実性」
 観測誤差やデータ同化手法の不完全性による制約のために、現実の大気の状態を完全に知ることができないため、初期値は必ず誤差を持つという性質

1. 数値予報システムとアンサンブル予報

数値予報と誤差：時間積分

計算機上に構築された仮想の大気・海洋・陸面。ある時刻の状態を、物理法則に従って時間発展させて、未来の状態を数値解として計算する。

物理法則

- 各種物理量(ここでは状態を表す気温や風ベクトルなど。時間と空間の関数)の保存を表す式(支配方程式)
- 各種物理量の関係を表す方程式(状態方程式)など

時間発展

- 時間に関する偏微分方程式を積分する
- 気象予測に用いる方程式は解析解を得ることは難しいため、各種物理量を時空間方向にとびとびの値(離散化)としてコンピュータで計算(数値予報)
- 支配方程式から各種物理量の時間変化率を計算し、少しずつ未来の状態を予測することを繰り返す

支配方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F$$

時間変化率

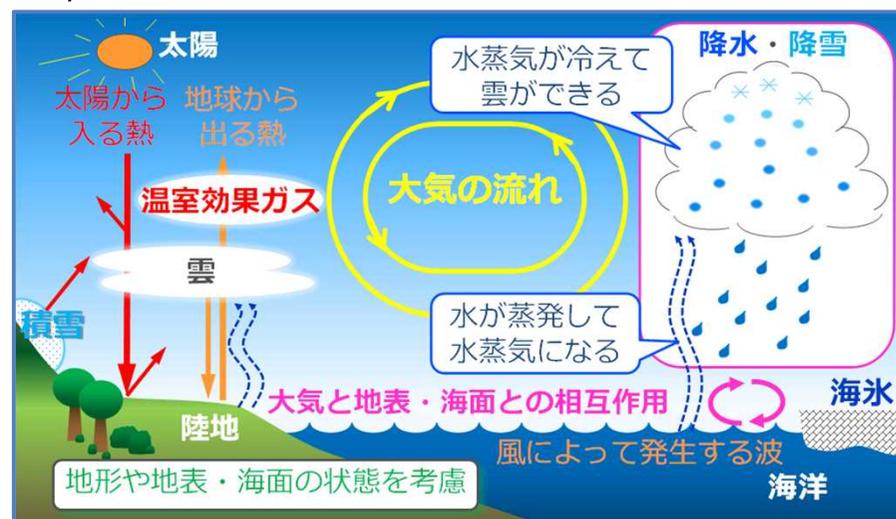
ϕ : 大気の状態

⇒

離散化された支配方程式

$$\phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$

未来の値 ある時刻の値



誤差の要因

誤差への寄与

- 不完全な定式化
- 解像できないプロセス
- 自然の性質として確率的なプロセス



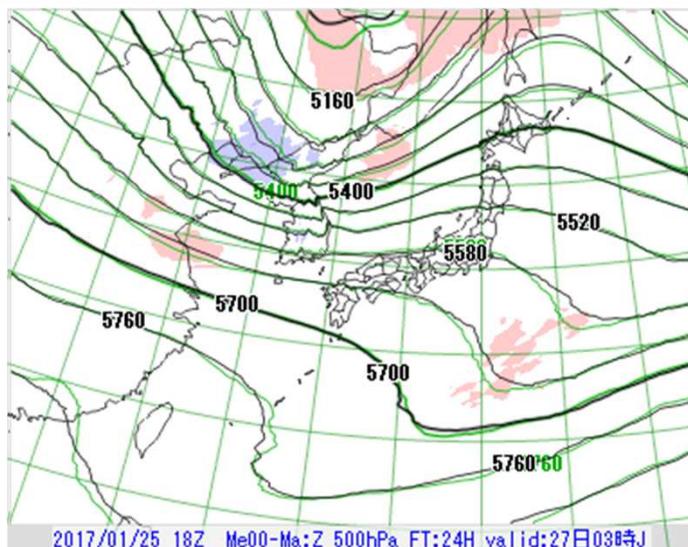
「数値予報モデルの不確実性」

1. 数値予報システムとアンサンブル予報

数値予報と誤差： 予報誤差の例

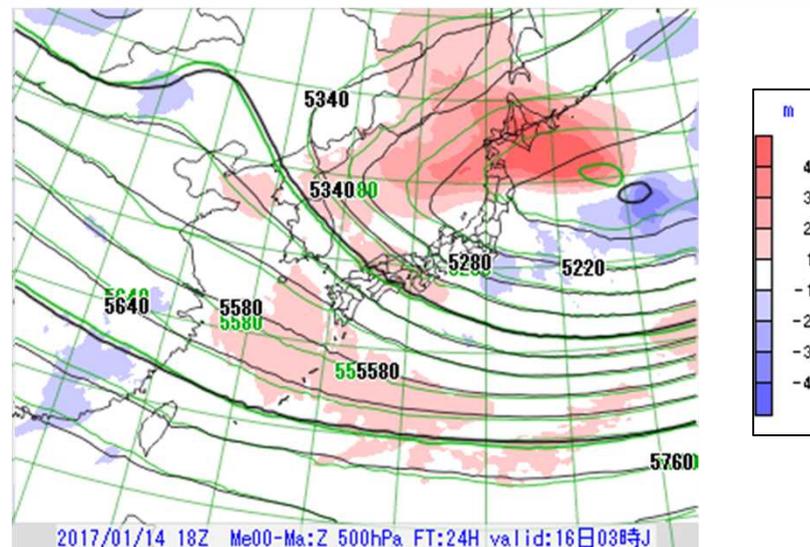
MSM予測値－MSM初期値(色が濃いほど誤差が大)、FT=0～24

MSM: 水平格子間隔5kmの日本とその周辺の領域を対象とする現業領域数値予報モデル



2017.1.25 18UTC初期値

500hPa高度



2017.1.14 18UTC初期値

予測誤差の特徴

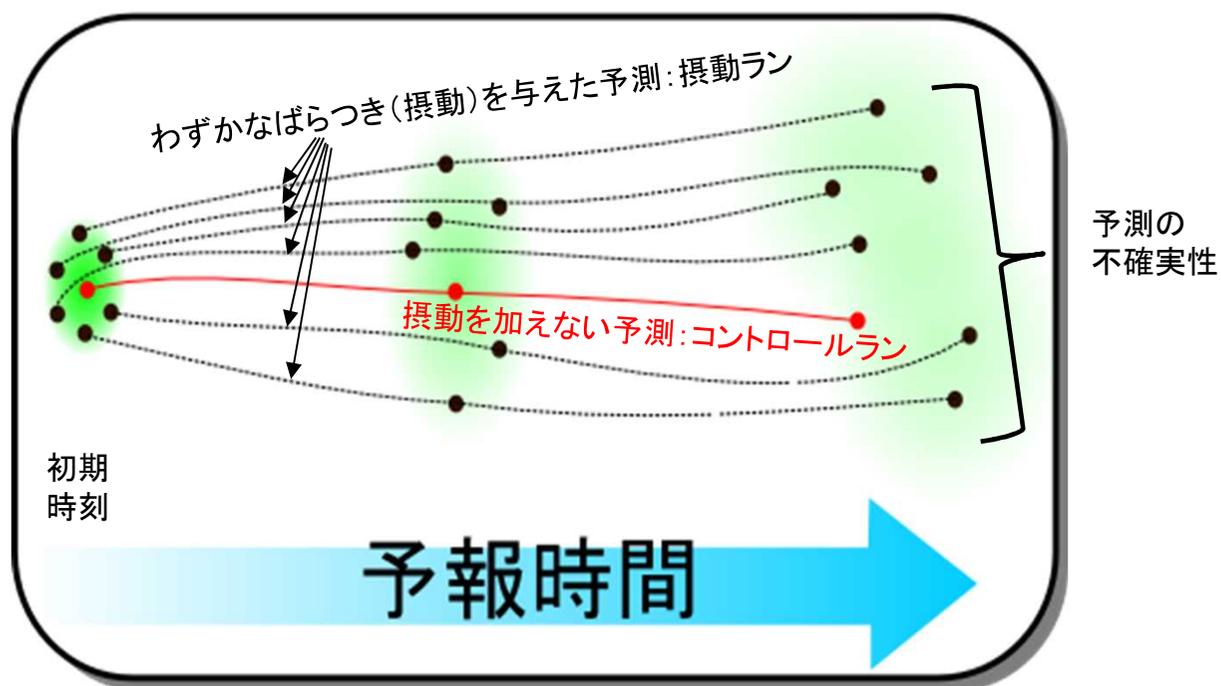
- ・初期値に含まれるわずかな誤差が、予報時間が進むにつれて増大
→大気のカオス的な振る舞い
- ・予測誤差の時間発展は初期値によって異なる
- ・また、同じ初期値でも誤差が大きいところ/小さいところがある
→予測誤差の時間発展は場の流れに大きく依存する
- ・領域モデルでは、側面境界値の誤差の寄与も重要。

1. 数値予報システムとアンサンブル予報

アンサンブル予報とは

数値予報の処理過程(初期値作成、時間積分など)において生じ得る誤差の要因に対応する、わずかなばらつき(摂動)を加えた複数の予測(アンサンブルメンバー)によって、予測の不確実性を評価する手法。

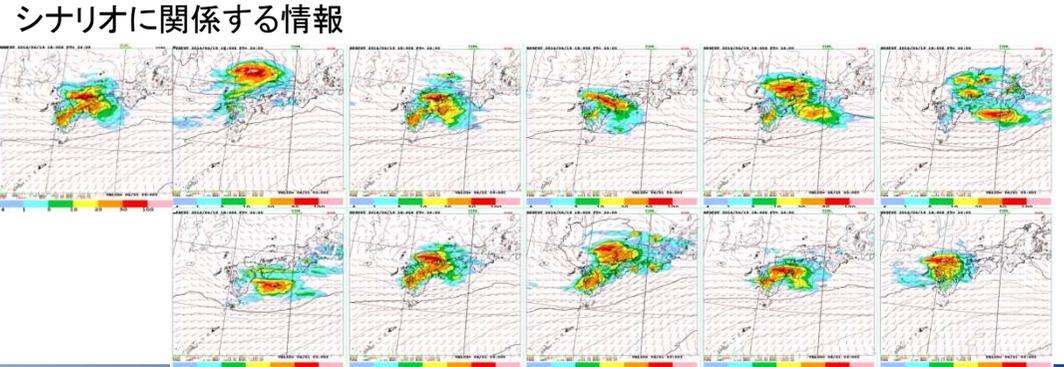
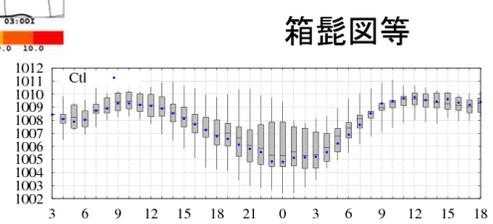
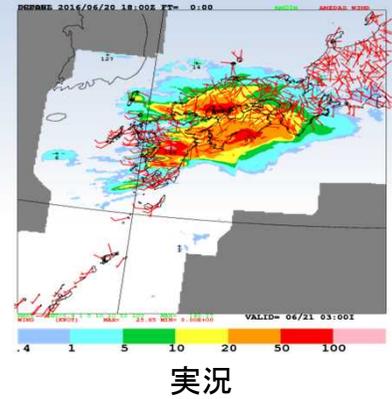
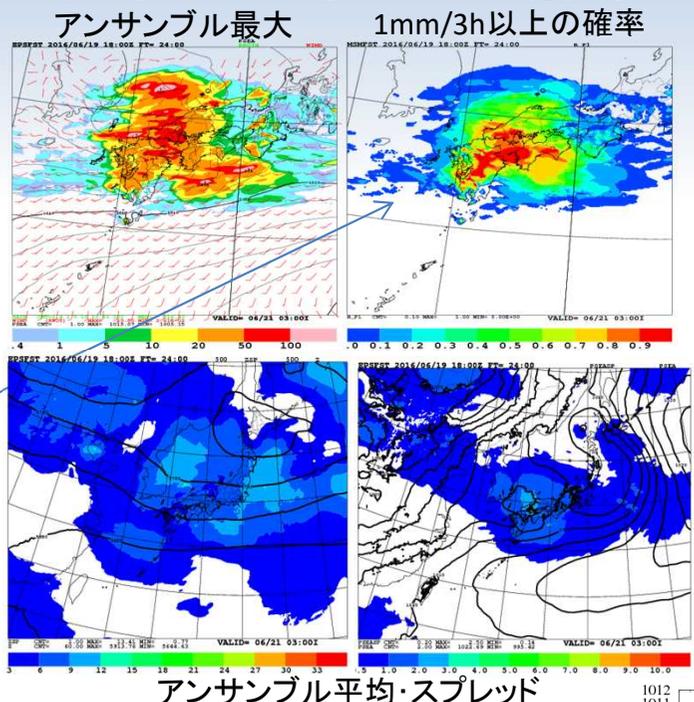
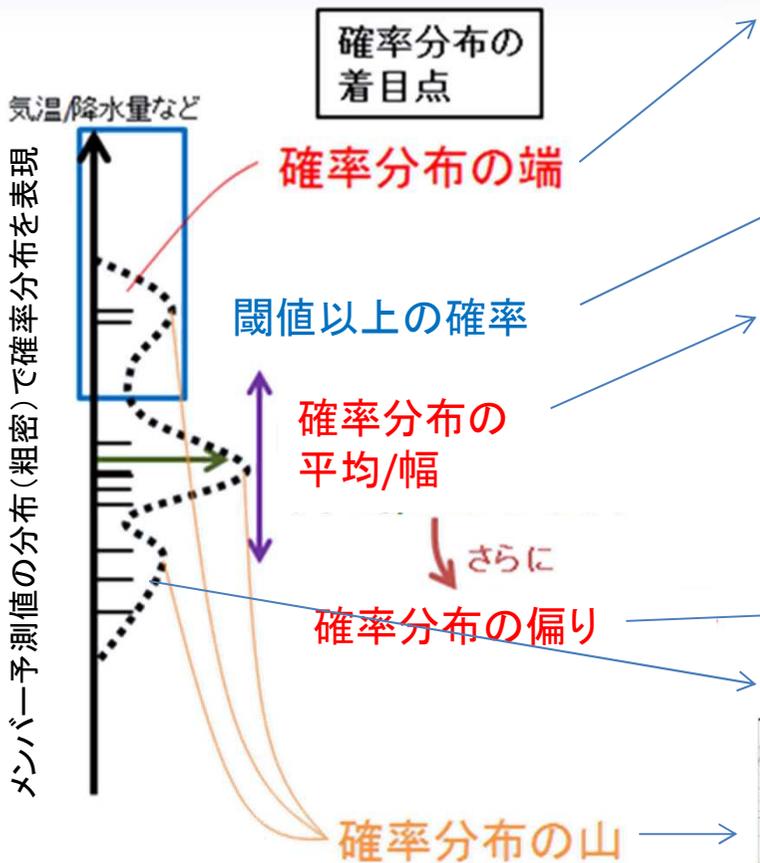
アンサンブル予報の予測結果から、メンバーの統計量を計算することで、予測の信頼度や確率情報などが得られる。



1. 数値予報システムとアンサンブル予報

アンサンブル予報から得られる情報

アンサンブル予報はメンバーのばらつきで予測値の確率分布を表現



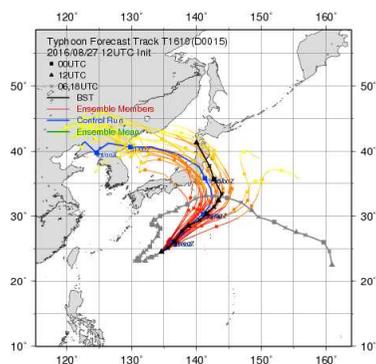
- 
1. 数値予報システムとアンサンブル予報
 2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS
 3. メソアンサンブル予報
 4. まとめ

2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS

現業数値予報システム

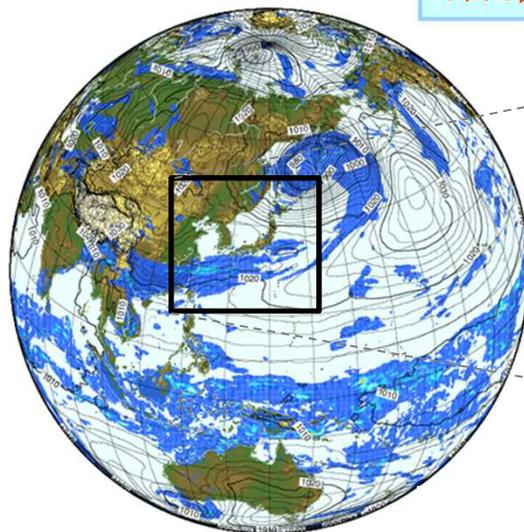
全球アンサンブル予報システム (GEPS)

水平分解能 ~40km
1日2回264時間予報
27メンバー
(台風向けに、1日2回132時間予報を追加)



アンサンブル予報

全球モデル (GSM)



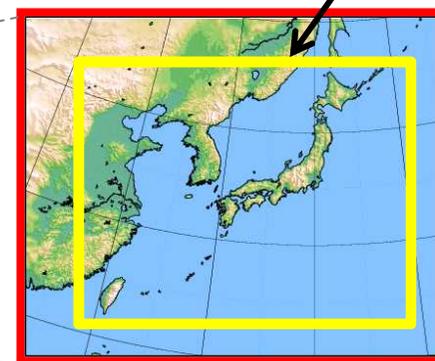
決定論的予報

(一つの初期値から一つの時間発展を予報)

水平分解能 ~20km
1日3回132時間予報
1日1回264時間予報

局地モデル (LFM)

水平格子間隔 2km
1日24回10時間予報



メソモデル (MSM)

水平格子間隔 5km
1日6回39時間予報
1日2回51時間予報

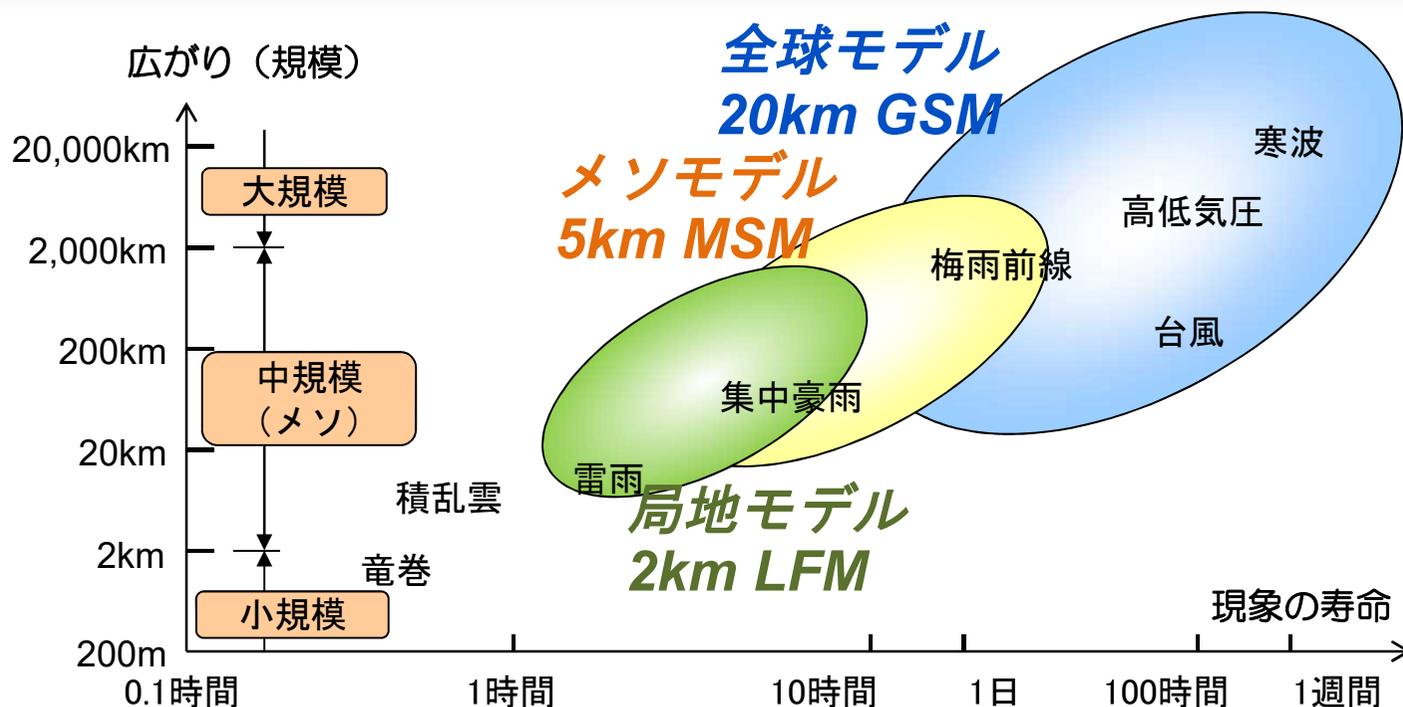
メソアンサンブル予報システム (MEPS)

部内試験運用中

水平格子間隔 5km
1日4回39時間予報
21メンバー

2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS

全球モデルと領域モデル



数値予報で表現できる気象現象は、格子間隔に依存するため、対象とする気象現象に応じて、利用するモデルを選択！！

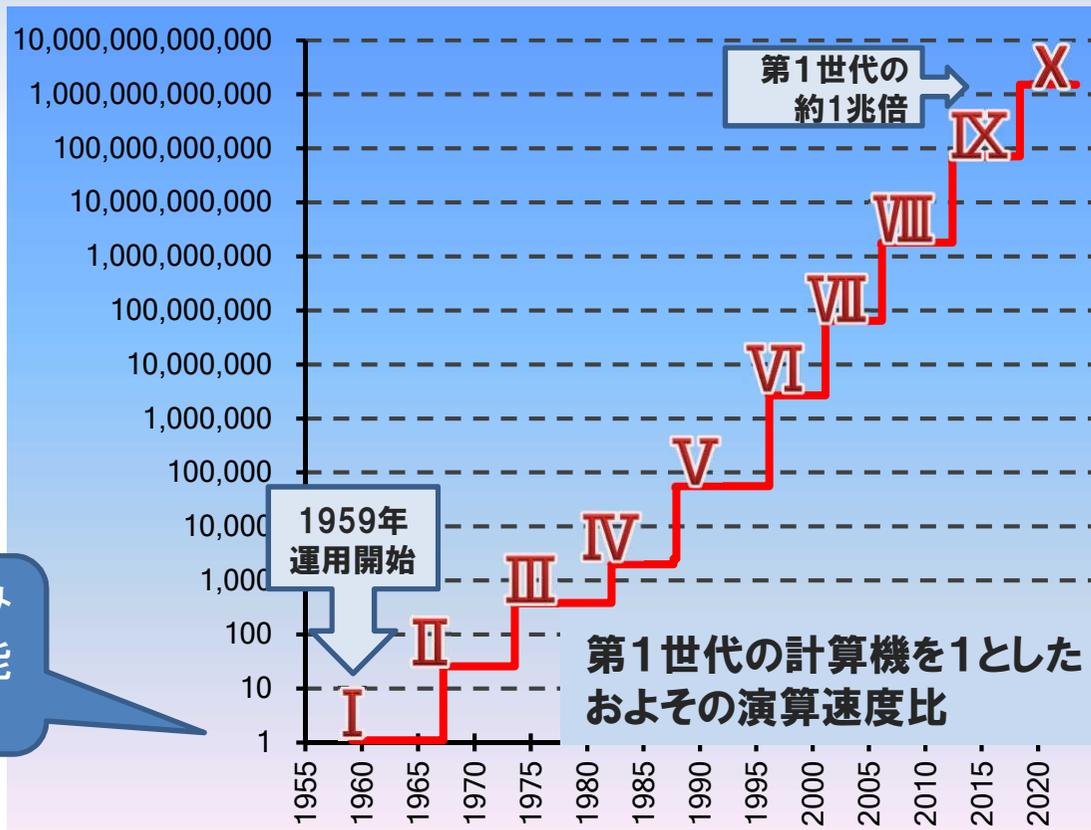
2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS

気象庁の現業数値予報システム一覧

数値予報システム (略称)	水平 分解能	鉛直層数 (最上層)	予報期間 (初期値の時刻 または実行頻度)	初期 値	主な利用目的
局地モデル(LFM)	2km	58層 (約20km)	10時間(毎時)	局地 解析	航空気象情報、防災気象 情報、降水短時間予報
メソモデル(MSM)	5km	76層 (約22km)	39時間(03,06,09,15,18, 21UTC、毎日) 51時間(00,12UTC、毎日)	メソ 解析	防災気象情報、降水短時 間予報、航空気象情報、 LFMの側面境界条件
全球モデル(GSM)	約20km	100層 (0.01hPa)	132時間(00,06,18UTC、 毎日) 264時間(12UTC、毎日)	全球 解析	天気予報・週間天気予報、 台風の進路・強度予報、 MSMの側面境界条件
全球アンサンブル 予報システム	約40km	100層 (0.01hPa)	5.5日間、27メンバー (06,18UTC#) 11日間、27メンバー (00,12UTC、毎日) 18日間、13メンバー (00,12UTC、土・日曜日)	全球 解析	台風の進路予報、 週間天気予報、 異常天候早期警戒情報
	約55km		34日間、13メンバー (00,12UTC、火・水曜日)		1か月予報
季節アンサンブル 予報システム	大気 約110km 海洋 約50~100km	大気60層 (0.1hPa) 海洋52層 +海底境界層	7か月間、 計51メンバー (00UTC、毎月)	気候 デー タ 同化	3か月予報、 暖候期予報、 寒候期予報、 エルニーニョ現象の予測

#全般海上予報区(赤道~北緯60度、東経100~180度)内に台風が存在する、または同区内で24時間以内に台風になると予想される熱帯低気圧が存在する場合、または、全般海上予報区外に最大風速34ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24時間以内に予報円または暴風警戒域が同区内に入ると予想された場合に実行される。

2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS 気象庁のスーパーコンピュータシステムの変遷



北半球のみ
水平分解能
381km

全球 約20km
日本周辺
5km及び2km

2018年6月5日
第10世代スパコン
運用開始！



Cray製 XC50

- 段階的にコンピュータシステムを更新するとともに、数値予報技術の開発を継続的に実施。現在では数値予報は気象予報業務の根幹となっている。
- 第10世代数値解析予報システム(NAPS10)は、前世代の約10倍の処理能力を持つ。

2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS 第10世代スーパーコンピュータシステム



- 2018年6月5日稼動開始
- Cray社(& Hitachi) XC50、東京都清瀬市に設置
- 演算速度 847 TFLOPS → 18166 TFLOPS (業務処理能力は旧システムの**約10倍**)
- 主記憶容量 108 TB → 528 TB
- 磁気ディスク 348 TB → 10608 TB

2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS

新しいシステムでの改良・開発計画

- 全球モデル
 - 予報時間延長(84時間→132時間(2018年6月に実施)、1日2回264時間)
 - 高分解能化(水平:約20km→約13km、鉛直:100層→128層)
- 全球アンサンブル予報システム
 - 高分解能化(水平:約40km→約27km、鉛直:100層→128層)
 - メンバー数増強(27メンバー→51メンバー)
- メソモデル
 - 予報時間延長(1日2回39時間→51時間(2019年3月に実施))
 - 鉛直層数増強(76層→96層)
- **メソアンサンブル予報システム**
 - **本運用開始**
 - 鉛直層数増強(76層→96層)
- 局地モデル
 - 予報時間延長(9時間→10時間(2019年3月に実施))
 - 鉛直層数増強(58層→76層)

- 
1. 数値予報システムとアンサンブル予報
 2. 気象庁現業数値予報システムとMEPS
 3. メソアンサンブル予報
 4. まとめ

3. メソアンサンブル予報

MEPSの概要

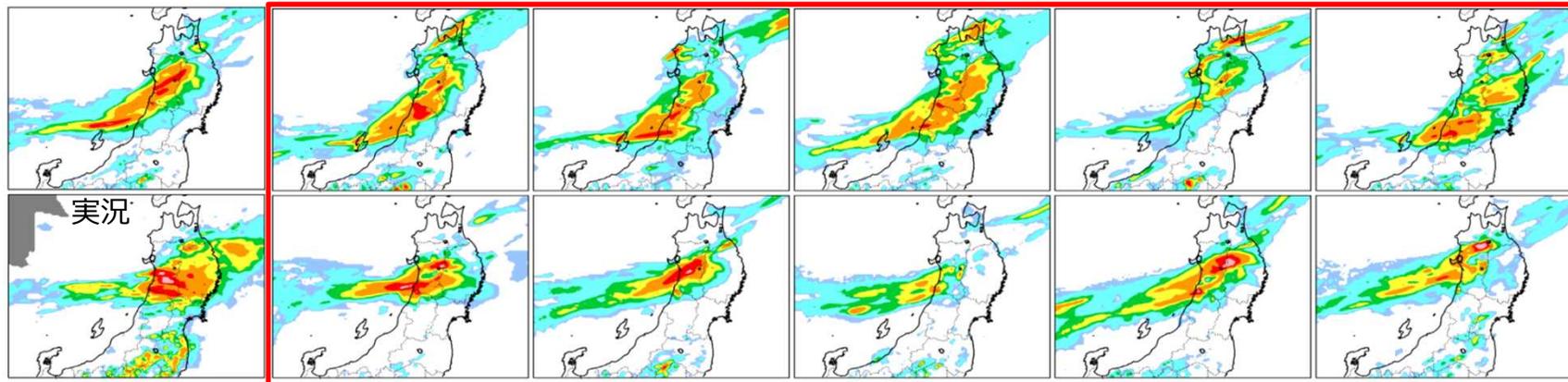
- メソ数値予報モデル(MSM)の予測に対して、信頼度等の情報を提供するために、複数の予測を計算、利用する、メソアンサンブル予報システム(MEPS)の運用を平成31年度6月頃に開始予定。
- 例えば大雨や暴風など災害をもたらす激しい気象現象が発生する可能性について、一つのMSMの予測結果のみでは把握が難しい場合でも、複数の予測結果を用いることによって、早い段階で把握することができるようになる。

部内試験運用実施中

MEPSによる前6時間積算降水量の予測例 2017年07月21日 18UTC初期値の15時間予報 (22日09UTC)

MSMによる予測

初期値等にわずかなばらつきを与えた予測



複数の予測結果を用いることによって、秋田県南部での強い降水の可能性を早い段階で把握

3. メソアンサンブル予報

MEPSの構成

MEPSの仕様	
予報モデル	asuca (MSMで用いている非静力学モデル)
水平格子間隔	5km
予報領域	MSM領域 
予報時間	39時間
メンバー数	21
予報頻度	4回/日 (00,06,12,18UTC)
摂動	初期摂動、側面境界摂動を考慮

MSMと同一：メソスケールの現象の表現をMSMにそろえる。

摂動の生成法

- ・ある評価時間での成長率が大きい誤差分布を抽出する手法(特異ベクトル法)を用いる。
- ・時間・空間スケールの異なるいくつかの特異ベクトル法を実行した後、得られた摂動を合成。

メソ特異ベクトル

全球特異ベクトル

メソ擾乱(α スケール以上)を対象とした摂動

総観規模擾乱を対象とした摂動

初期摂動

側面境界摂動

アンサンブル予報

3. メソアンサンブル予報

MEPS GPVの概要

- 00、06、12、18UTC初期値
- 39時間予報(地上3時間間隔、気圧面3時間間隔)、21メンバー
- 領域・格子間隔 MSM GPVと同じ
 - 領域 (47.6N,120E)―(22.4N,150E)
 - 格子間隔(地上) 緯度0.05 度×経度0.0625 度(格子数481×505)
 - 格子間隔(気圧面) 緯度0.1 度×経度0.125 度(格子数241×253)
- 送信完了時刻 初期時刻+3時間30分まで
- データ内容

地上

通報面	風	気温	海面更正 気圧	積算 降水量	日射量
地上	②	○	○	○	○

気圧面

通報面	高度	風	気温	相対湿度
975hPa		②	○	
950hPa		②	○	
925hPa		②	○	○
850hPa		②	○	○
500hPa	○		○	○
300hPa	○	②		

※表中「○」は各通報面に含まれる要素を示す。

※表中「②」は2要素分のデータ(風の場合、東西方向と南北方向の2要素)が含まれることを示す。

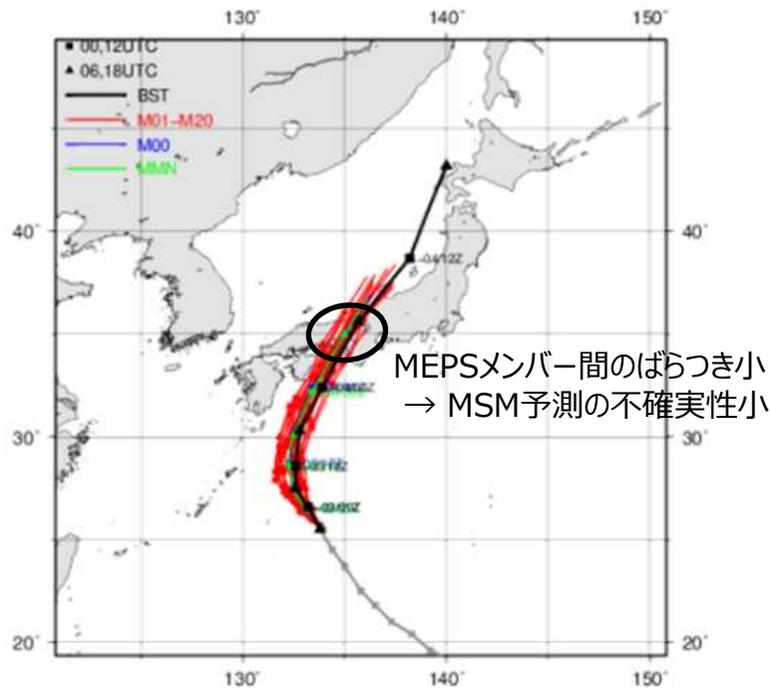
※詳細は、配信資料に関する技術情報第505号 <https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/505.pdf>

3. メソアンサンブル予報

MEPSによる平成30年台風第21号の進路予測

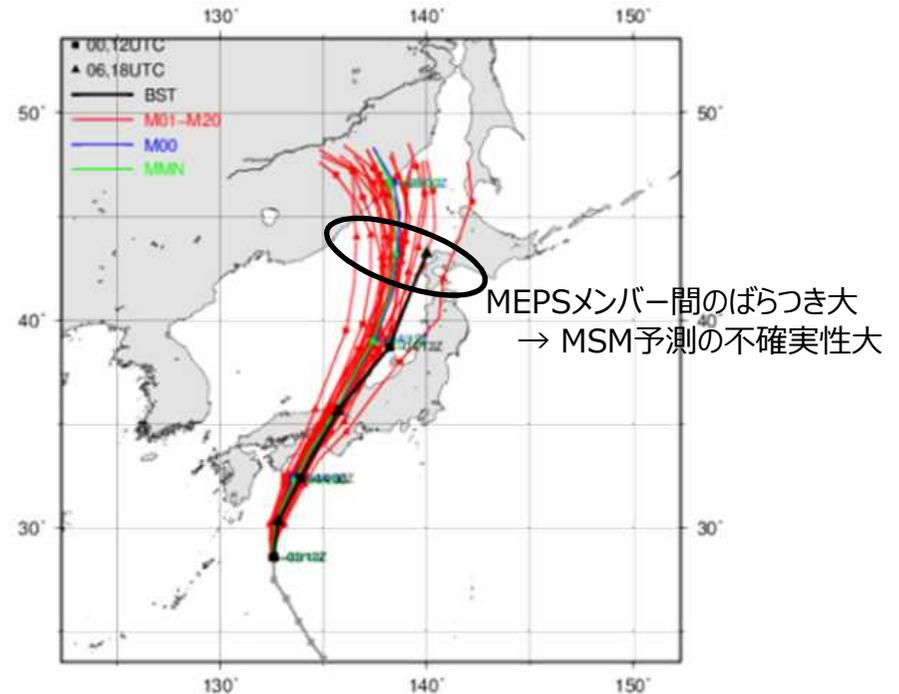
- MEPSメンバーによる予測のばらつきの大小が、MSMによる予測の不確実性の大小を表現。

2018年9月3日3時初期値の予測



MEPSメンバー間のばらつき小
→ MSM予測の不確実性小

2018年9月3日21時初期値の予測



MEPSメンバー間のばらつき大
→ MSM予測の不確実性大

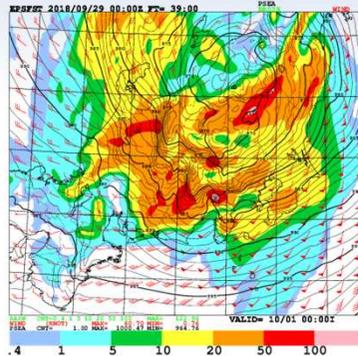


3. メソアンサンブル予報

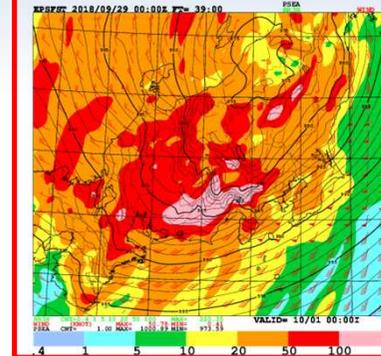
MEPSによる平成30年台風第24号に伴う降水予測

2018年9月29日 9時初期値 39時間予報

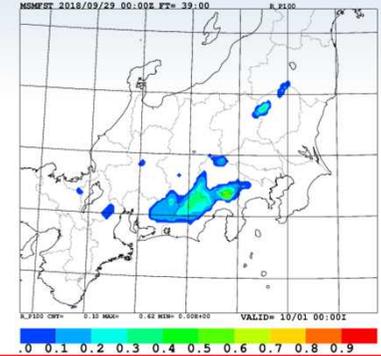
- 本事例のMEPSは、MSMより早い段階で東海地方での強雨の可能性を予測。
- 初期値更新に伴って、実況の強雨域と対応するように、より高い可能性を予測。



MSMによる降水量 (mm/3h)
台風の進行が速く、東海地方の強雨域を表現していない。

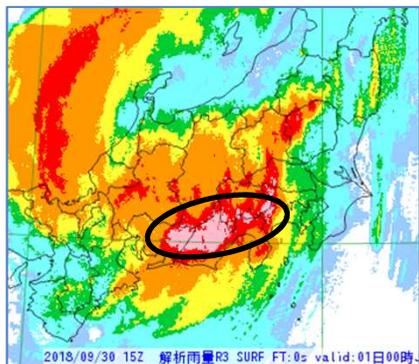


MEPS最大降水量 (mm/3h)
強雨域を表現するメンバーが存在し、強雨の可能性を予測。



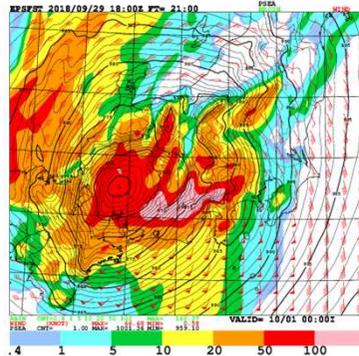
MEPS100mm/3h以上の確率
東海地方での確率を表現。

予測対象時刻の実況
解析雨量 (前3時間)
2018年10月1日0時

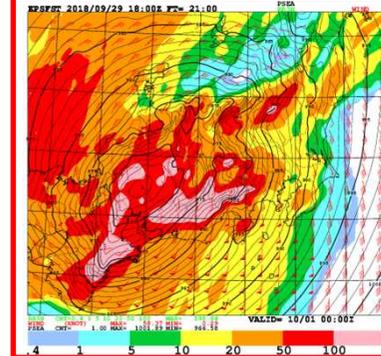


東海地方の南斜面の降水
100mm/3h 以上に着目。

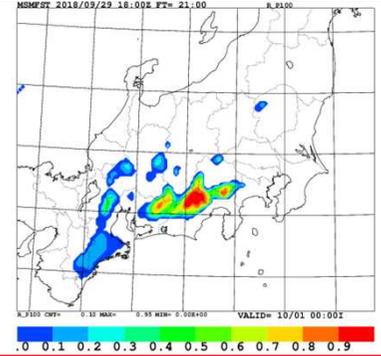
18時間後の初期値
2018年9月30日 3時初期値 21時間予報



MSMによる降水量 (mm/3h)
台風進路予測が実況に近くなり、強雨域を表現。



MEPS最大降水量 (mm/3h)
東海地方での強雨の可能性をより強く表現。

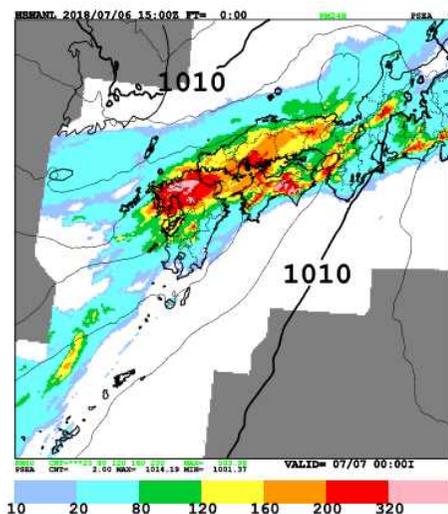


MEPS100mm/3h以上の確率
強雨域を表現するメンバーが増え、確率が高まる。

3. メソアンサンブル予報 MEPSによる平成30年7月豪雨の予測

MEPSによる、前24時間積算降水量が
閾値以上となる確率の予測

予測対象時刻の実況
解析雨量 7月6日15UTC
前24時間積算降水量

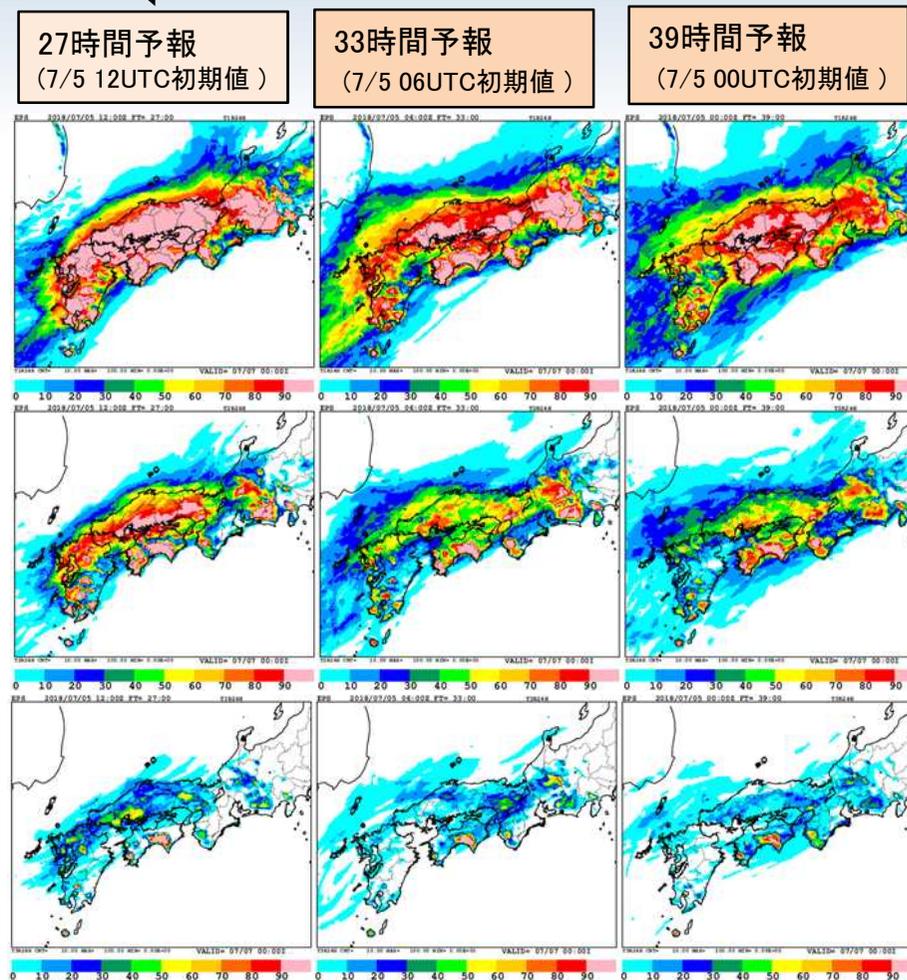


閾値50mm/24h

閾値100mm/24h

閾値200mm/24h

初期値更新



本事例では、前線に伴うスケールの大きい強雨域の分布については、MSMの予測で概ねとらえられていた。

このため、MEPSの前24時間積算降水量の確率分布についても実況と対応した結果が得られた。

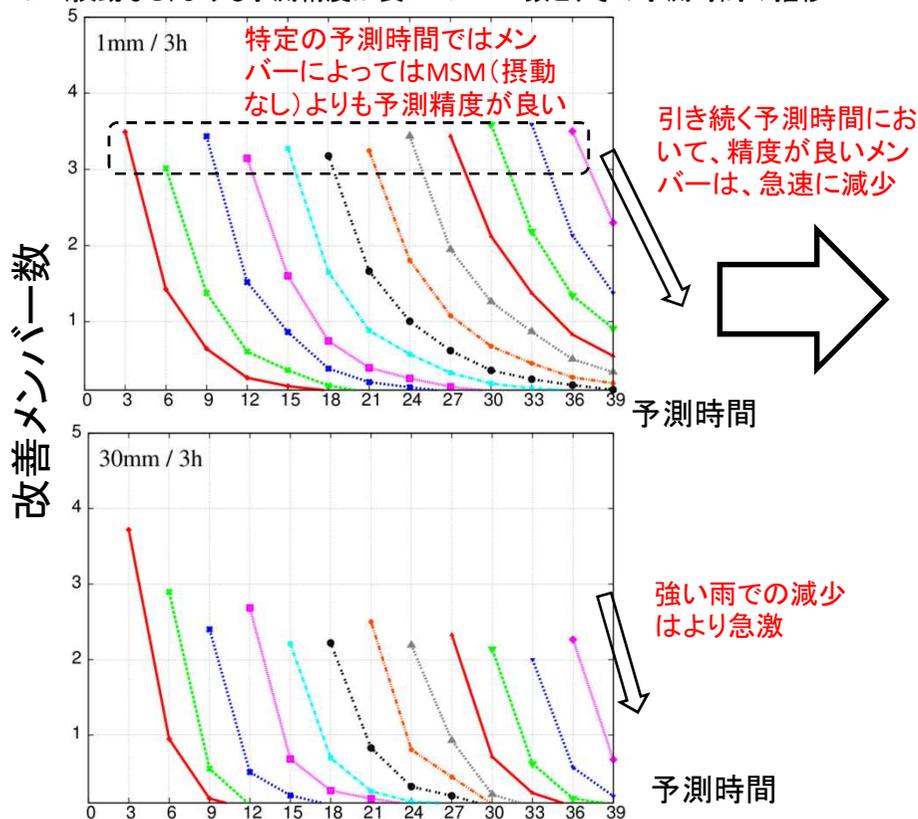
3. メソアンサンブル予報

MEPS各メンバーのシナリオ予測について

3時間積算降水量の予測精度

- 各メンバーの予測精度は、MSM(摂動なし)より低いものが多い。
- 特定時刻ではMSM(摂動なし)よりも予測精度が良い場合でも、その持続時間は短い(強い雨でより顕著)。 → シナリオとして特定メンバーの予測を継続して用いることは困難。

MSM(摂動なし)よりも予測精度が良いメンバー数と、その予測時間の推移



特定の予測時間ではMSM(摂動なし)よりも予測精度が良い場合でも、その持続時間は短い

予測時間 メンバー	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	○	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×	○
3	○	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	○	×
4	○	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×
5	×	○	○	○	×	×	×	○	×	×	○	×	×
6	×	○	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×
7	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○
8	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
9	×	×	×	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×
10	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×	○	○	×

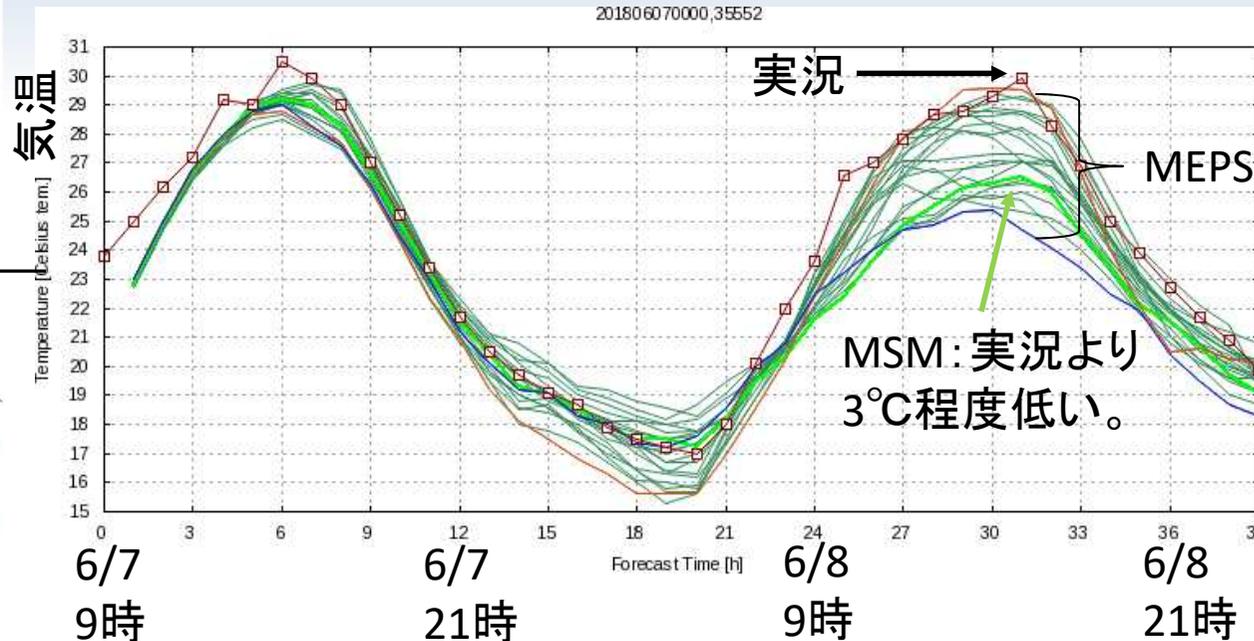
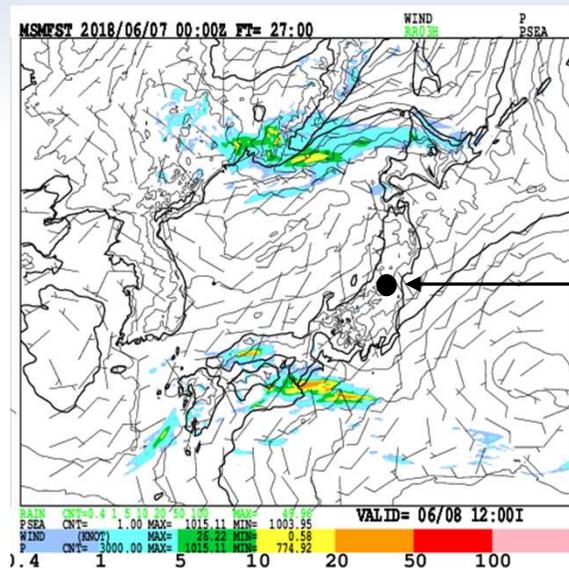
MSMよりも予測精度が良いメンバーを○、そうでないメンバーを×

統計期間: 2015年3月24日~2015年10月31日18UTC初期値のみ。11メンバーによる結果
(各予測時間ごとに予測精度の良いメンバーが存在する事例を抽出し、その推移を調査)

3. メソアンサンブル予報

MEPSによる平成30年6月8日の気温予測(米沢)

米沢のMSM気温ガイダンス,MEPS気温ガイダンス(開発中)

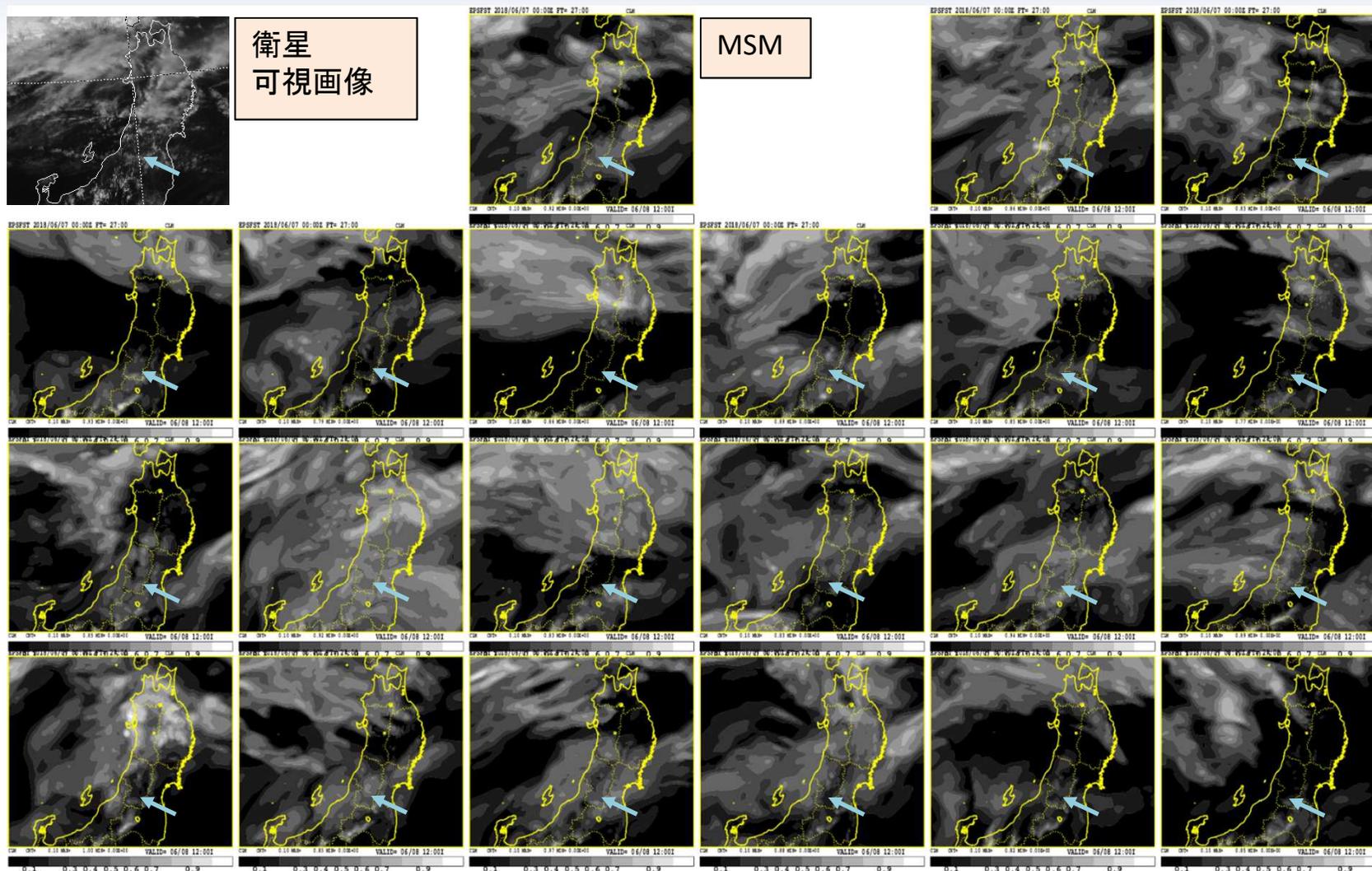


- 西日本では停滞前線、北海道では日本海の低圧部の影響で雲が多いが、関東から東北にかけては雲がまばらで、晴れる所も多い予想。
- スケールの小さい雲域がかかるかどうかにより左右されて、気温の予測に不確実性。
- MSMでは実況より3°C低い最高気温予測。
- MEPSではばらつきが大きく、実況に近い予測のメンバーもある。

3. メソアンサンブル予報

MEPSによる平成30年6月8日の気温予測(米沢)

MEPS各メンバーの中層雲量の予想を見ると、
米沢の辺りはCTRLよりも雲が少ないメンバーが多い。

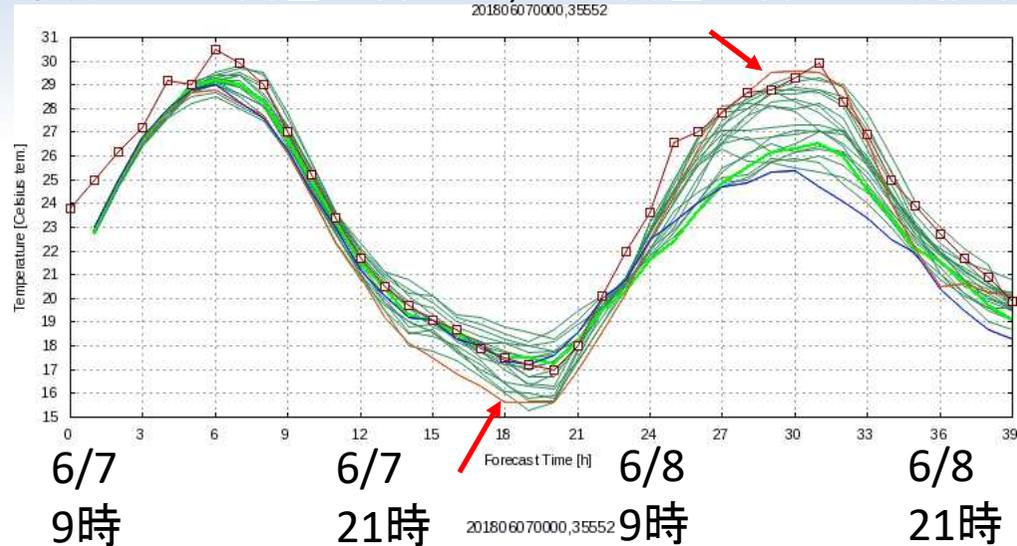


3. メソアンサンブル予報

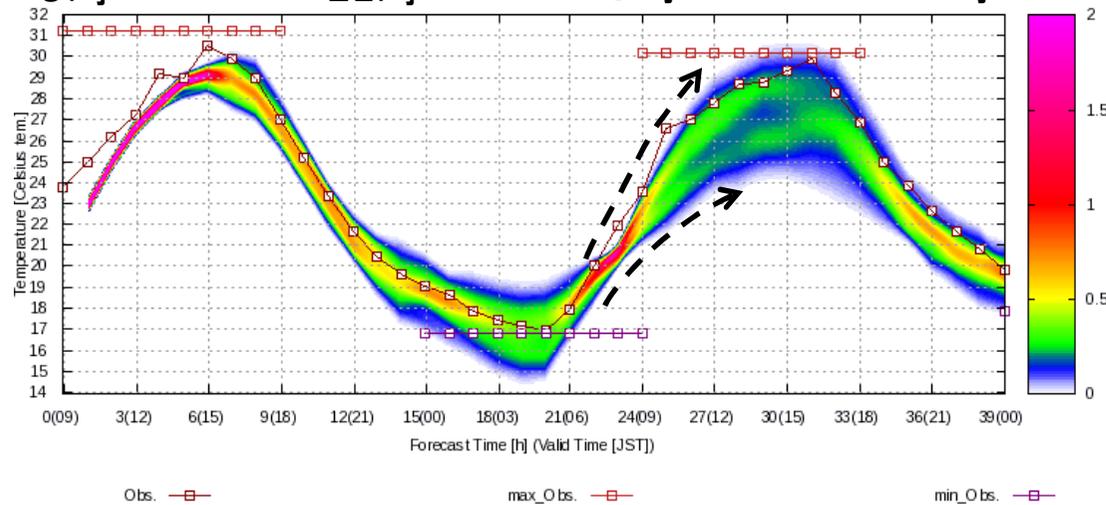
MEPSによる平成30年6月8日の気温予測(米沢)

米沢のMSM気温ガイダンス,MEPS気温ガイダンス(開発中)

実況に近い6/8昼の高温を予測するメンバーは、明け方の予測は実況より低く推移。



一方、メンバーの全体的な分布をみると、6/8昼の気温が高く推移するシナリオと低く推移するシナリオの可能性を示している。



有効なシナリオ抽出のためには複数メンバー(クラスター)の利用、対象とする事例や気象現象に応じた時間・空間スケールの選択などが課題となる。

4. まとめ

- メソモデル(MSM)の予測に対して、ばらつきを持った複数の予測を計算し、信頼度・不確実性等の情報を提供することを目的に、平成31年6月頃のメソアンサンブル予報システム(MEPS)の運用開始を予定している。
- MEPSの構成
 - 21メンバー 1日4回(00,06,12,18UTC) 39時間予報
 - MSMと同一の予報モデル・予報領域・水平格子間隔(5km)・鉛直層数(76層)。=> MSMと同様の現象を表現。
- 利用についての留意点
 - MEPSメンバーによる予想のばらつきの大小から、MSMによる予測の不確実性の大小を把握することができる。
 - MEPSによる複数の予想から、雨量や気温などの確率分布を計算でき、これを活用することで、MSMより精度の高い予報を行える可能性がある。
 - MEPSは、MSMと同程度のスケール現象を予測対象としており、MSMで解像・予測が難しい現象はMEPSにおいても同様である。
 - MEPSの各メンバの精度は、統計的にはMSMより劣る。また、ある特定メンバーを抽出し、このメンバーのみを継続的に利用する予測手法は、基本的には適切ではない。有効なシナリオ抽出のためには複数メンバー(クラスター)の利用、対象とする事例や気象現象に応じた時間・空間スケールの選択などが課題となる。

MEPSを一緒に使い倒しませんか？

- MEPSを使い倒すノウハウについては発展途上ですので、みなさまと一緒に探っていきたいと考えております。
- 来年度の本講習会では、MEPSについての庁内のノウハウを、皆様にお伝えしていく予定です。
- また、ビジネス上の課題をMEPSを使って解決していくためのヒントとなるような、勉強会やイベント等も開催していく予定です。
- 平成30年7月豪雨を含む1か月分のMEPSデータ(2018年6月20日～2018年7月19日)を、気象業務支援センター(オフライン)及びWXBC(クラウド)より提供していますので、是非ご利用ください。



お問い合わせ先:

一般財団法人 気象業務支援センター 配信事業部 [haisin\[at\]jmbasc.or.jp](mailto:haisin@jmbasc.or.jp)

WXBC(気象ビジネス推進コンソーシアム)事務局 [info\[at\]wxbc.jp](mailto:info@wxbc.jp)

※WXBC(クラウド)での提供はH31.3まで。来年度も準備でき次第提供予定。