



# 第1章 基礎編

## 1.5 アンサンブル予報

## 数値予報の誤差(不確実性)

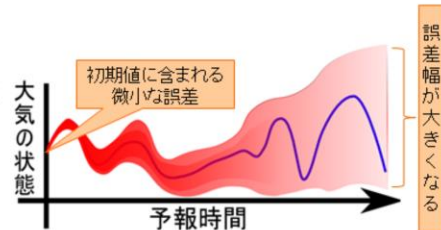
- 大気の振る舞いは**時間方向**、**空間方向**の**偏微分方程式**で記述される。
- **方程式とその数値解法(モデル)**、**初期条件**、**境界条件**が分かれば未来の大気状態を予測できるが、次の問題がある。

**初期条件・境界条件**: 真の初期値・境界値を知ることはできない。  
(観測値の誤差、時間・空間的な制約など)

**モデル**: 完全な方程式を知ることはできない。  
仮に知り得たとしても数値的に解くことで誤差が生じる。  
(物理過程のモデル化の不完全性、離散化による誤差など)

**大気のカオス的性質**: 初期値の微小な誤差が時間とともに増大する。

- 数値予報の結果にどの程度の誤差が含まれるか、一つの決定論的予報では判断できない。



大気の振る舞いは時間・空間に関する非線形偏微分方程式で記述されるため、未来の大気状態を予測するには解くべき方程式とその数値解法、そして初期条件および境界条件が必要となる。これらが正確に与えられるほど、精度の良い予測が可能になると期待されるが、現実には次に挙げるような問題がある。

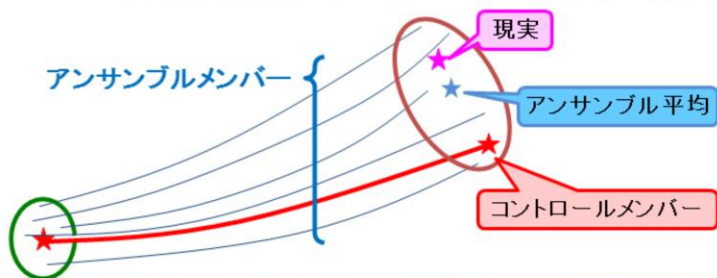
初期条件と境界条件について、これらは理想的には観測によって得られると期待される。しかし観測されたデータそのものが誤差を含むことや、時間・空間的に連続な観測ができないことなどから、これらの真の値を知ることはできず、数値予報に用いる初期値や境界値には必ず誤差が含まれる。

大気の振る舞いは様々な過程が影響を及ぼしあっているために、それを記述する方程式は非常に複雑なものであり、自然を完璧に記述する方程式は知られていない。仮に完全な方程式を知ることができたとしても、方程式を解析的に解くことができないため数値的に解くほかなく、その際には離散化などに起因する誤差が必ず生じる。また大気を持つカオス的性質(初期値鋭敏性)により、初期値に含まれる誤差が微小であったとしても、図のように予報時間が長くなるにしたがって予報誤差が急速に増大し、数値予報の精度を左右するまでに発達することが知られている。

これらの様々な要因によって、数値予報の結果には必ず誤差が含まれ、数値予報を利用するには予測に不確実性があることを考慮しなければならない。しかし予報誤差の成長速度は大気の状態に大きく依存するため、一つの数値予報の結果(決定論的予報)から予報誤差の大きさを事前に知ることはできない。

## アンサンブル予報

- データ同化で得られた解析値に摂動(揺らぎ)を与えて複数の初期値を用意し、数値予報モデルを実行することにより複数の予報値を得る。
  - 摂動は解析誤差(初期値に含まれる不確実性)を表現している。
  - それぞれの予測をアンサンブルメンバー(または単にメンバー)、摂動を与えていないメンバーをコントロールメンバー(またはコントロールラン)と呼ぶ。
  - 解析誤差の他に数値予報モデルや境界値の不確実性も考慮する必要がある。
- アンサンブル予報の利点
  - アンサンブルメンバーのばらつきによって予測の不確実性(信頼度)が推定できる。(ばらつきが小さいと予測の信頼度が高いと期待される、など)
  - 可能性のある複数のシナリオが考慮できる。(コントロールメンバーは大雨を予測していないが他のメンバーでは予測がある、など)



数値予報の結果に含まれる予報誤差(予測の不確実性)を事前に推定するための手法にアンサンブル予報がある。アンサンブル予報では、データ同化によって得られた解析値に摂動(小さな揺らぎ)を意図的に与えることで解析誤差(初期値に含まれる不確実性)を表現し、摂動を加えた複数の初期値に対して数値予報モデルを実行することで複数の予報値の集団(アンサンブル)を得る。それぞれの初期値に対する数値予報モデルの予測をアンサンブルメンバー(または単にメンバー)、摂動を加えていないアンサンブルメンバーをコントロールメンバー(またはコントロールラン)と呼ぶ。メンバーの一つ一つは決定論的予報であるが、アンサンブル全体は解析誤差の範囲内で実現しうる大気状態の集団であり、未来の大気状態を確率的に把握することができる。

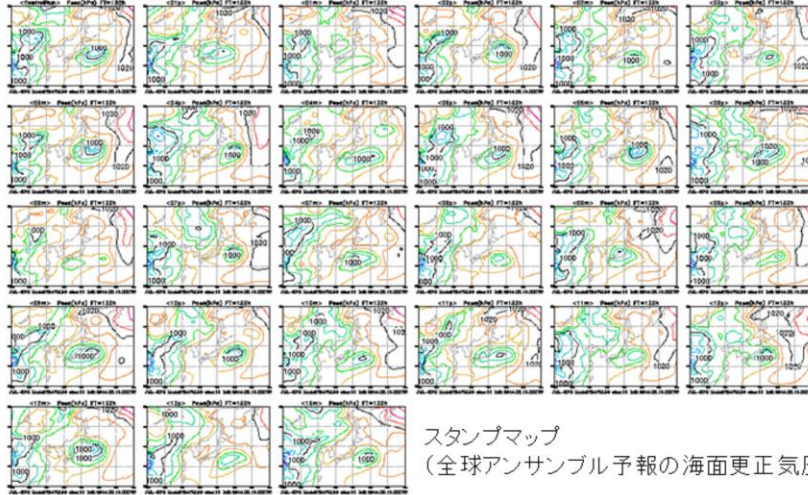
それぞれのメンバーは解析誤差を考慮した数値予報モデルの予測であり、メンバーのばらつき具合によって予測の不確実性(信頼度)を見積もることができる。例えば、ある予報時間でメンバーのばらつきが大きい場合、解析値に含まれる微小な誤差が時間発展とともに増大しやすい大気状態であることを意味し、予測の不確実性が大きいことが示唆される。

アンサンブル予報では、解析誤差として初期値に与えた摂動が予報誤差として成長しうる範囲で複数の予測が得られる。単一の決定論的予報(コントロールラン)では予測が外れてしまう場合でも、アンサンブル予報では現実をメンバーの集団の中に確率的に捕捉することができることも利点の一つである。

ここでは初期値の誤差を考慮したアンサンブル予報について述べたが、一般に大気の不確実性を考慮したアンサンブル予報のためには、数値予報モデルの不完全性による誤差と海面水温など境界条件の誤差も考慮する必要があると言われている。

## アンサンブル予測の代表的なプロダクト スタンプマップ

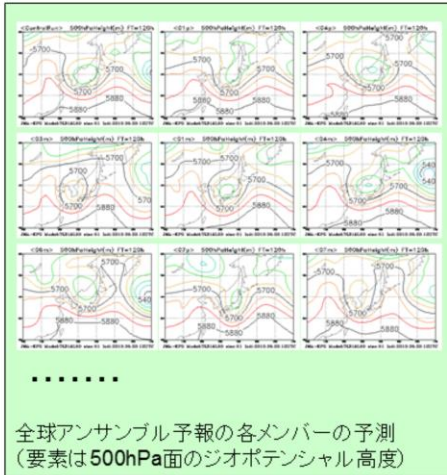
- 各メンバーの予測を表示した図。
  - 各メンバーの予測結果を一つ一つ確認して判断するのは容易ではないため、何らかの加工を行ったプロダクトを利用する必要がある。



図は全球アンサンブル予測の各メンバーの海面更正気圧を表示したスタンプマップを示している。スタンプマップでは各メンバーの予測結果を確認できるが、アンサンブル予測ではメンバー数に応じて予測結果が増えるため、限られた時間内に行わなければならない予報業務などにおいて、一つ一つを隈なく見て判断するのは容易ではない。統計的な処理などアンサンブル予測の結果を加工したプロダクトを利用し、効率的に予測結果を把握することが重要となる。

## アンサンブル予報の代表的なプロダクト スパゲッティダイアグラム

- 特定の等値線を全メンバーについて重ね描きした図。
  - メンバー間における予測の違いやばらつきの大い場所を、一枚の図で比較的容易に確認できる。



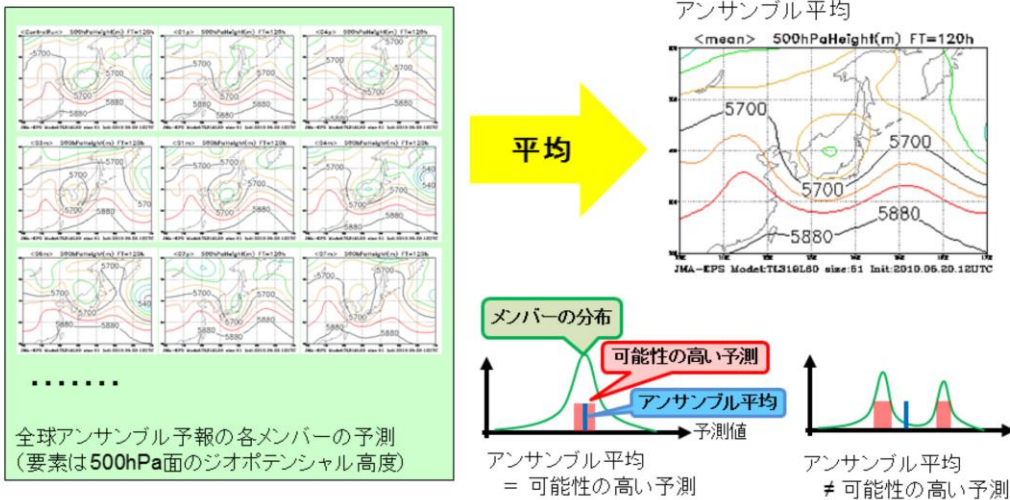
重ね描き



左図は全球アンサンブル予報の予測値(500hPa面ジオポテンシャル高度)を示している。各メンバーの予測値を、右図のように特定の等値線について一枚の図に重ね描きしたものをスパゲッティダイアグラムと呼ぶ。スパゲッティダイアグラムでは、メンバー間における予測の違いや、メンバーのばらつき具合を一枚の図で確認できる。例えばこの図からは、日本付近に深いトラフを表現しているメンバーが多いが、その深さについてばらつきが大きいことが読み取れる。

# アンサンブル予報の代表的なプロダクト アンサンブル平均

- 全メンバーの予測を平均したもの。
  - 決定論的予報よりも確からしい予測となっていることが期待される。



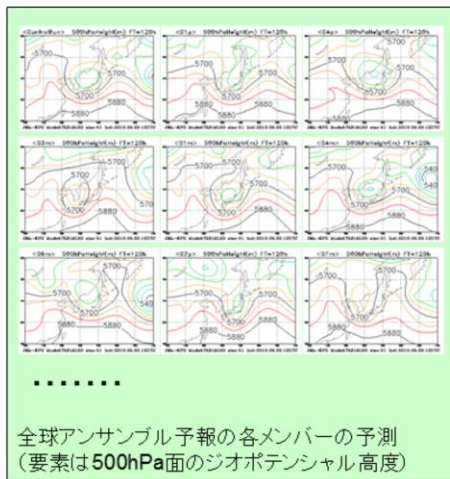
全メンバーの予測を平均したものをアンサンブル平均と呼ぶ。一般にはアンサンブル平均の平均平方二乗誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) はコントロールメンバーと比較して小さいことが期待される。

アンサンブル予報ではメンバーの分布は確率分布を表していて、分布がピークとなる予測値が出現する可能性の高い予測となっている。メンバーが正規分布する場合にはアンサンブル平均が最も可能性の高い予測となるが、メンバーが正規分布しない、例えば複数のピークを持つ分布の場合はアンサンブル平均と最も可能性の高い予測は一致しない。このためアンサンブル平均だけで判断するのではなく、メンバーの分布も合わせて確認する必要がある。

またアンサンブル平均は統計量であるため、数値予報モデルの予測値のように物理量の間で整合した値にはなっていないことにも注意が必要となる。

# アンサンブル予報の代表的なプロダクト アンサンブルスプレッド

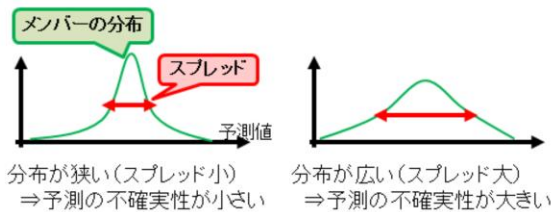
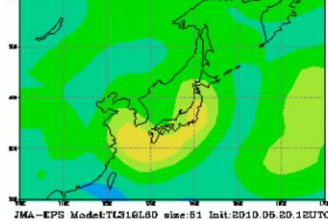
- 統計学の標準偏差に対応する量。
  - 予測の不確実性の大きさ(信頼度)を表している。



統計処理

アンサンブルスプレッド

<Spread> 500hPaHeight(m) FT=120h

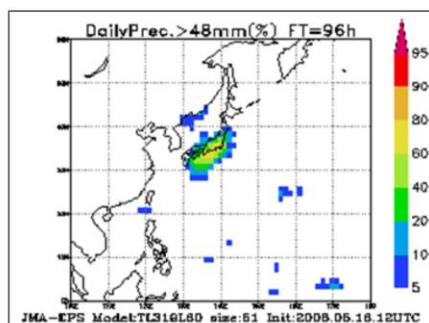


全メンバーの予測について標準偏差を求めたものをアンサンブルスプレッド(または単にスプレッド)と呼ぶ。スプレッドはメンバーのばらつき具合を表す量で、スプレッドの大きさから予測の不確実性の大きさを判断できる。一般にスプレッドの大きさはアンサンブル平均のRMSEと同程度になることが期待されることから、スプレッドが大きいほど予測の不確実性が大きい(信頼度が低い)と考えられる。なお、スライドに示したアンサンブルスプレッドの図は気候学的変動量により規格化されている。

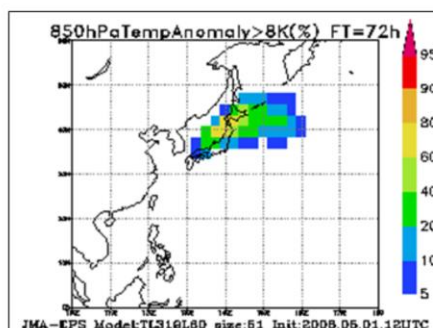
メンバーが狭い範囲に分布している場合はアンサンブル予報のスプレッドが小さく、アンサンブル平均と近い値が出現すると期待されるが、メンバーの分布が広がっている場合はスプレッドが大きく、アンサンブル平均から離れた値が出現する確率が高くなる。

## アンサンブル予報の代表的なプロダクト 確率分布図

- 全メンバーに対して特定の現象が予測されるメンバーの割合。
  - 注目している現象について予測の確からしさを把握するために用いられる。



24時間降水量が48mm以上となる確率



850hPa面気温の偏差が8℃以上となる確率

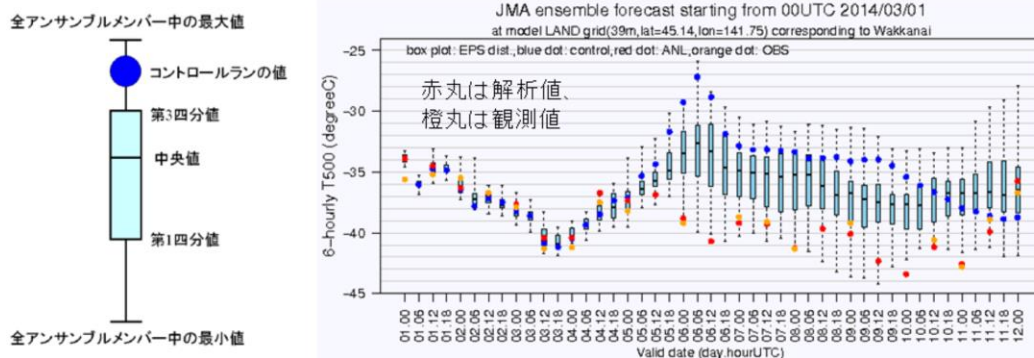
全メンバーに対して、特定の現象が予測されるメンバーの割合を表した図を確率分布図と呼ぶ。特に、ある閾値以上の現象が発生する確率(超過確率)を表す図を超過確率分布図と呼び、注目している現象について予測の確からしさを把握するためによく用いられる。

2枚の図はそれぞれ24時間降水量が48mm以上となる確率、850hPa面での気温の気候値からの偏差が8℃以上となる確率を表した確率分布図であり、超過確率が高いほど予測が確からしいことを表している。



## アンサンブル予報の代表的なプロダクト 箱ひげ図 (EPSgram)

- アンサンブル予報の特定の地点での時系列図。
  - メンバーの中央値、最大値、最小値、第1四分位点、第3四分位点の時系列図。
  - 第1四分位点と第3四分位点の間を箱と呼ぶ。



ある地点での500hPa面の気温についての箱ひげ図

特定の地点についての、メンバーの中央値、最大値、最小値、第1四分位点、第3四分位点の時系列図を箱ひげ図 (EPSgram) と呼ぶ。各予報時間でのアンサンブルスプレッドの情報やその変化傾向が確かめられる。また、コントロールランの値も合わせて描画することで決定論的予報の信頼度の情報も合わせて得られる。

図は箱ひげ図の例を示している。この図からは予報期間のはじめはメンバー間のばらつきが小さく、中盤で急速に大きくなっていることが読み取れる。またこの図では解析値と観測値を合わせて描画していて、実況の観測値がメンバーの予測の範囲内に概ね捕捉できていることが分かる。

## 気象庁のアンサンブル予報システム

- 気象庁では全球アンサンブル予報システム(GEPS)およびメソアンサンブル予報システム(MEPS)を運用。

	GEPS	MEPS
水平解像度	約40km	5km
鉛直層数	100層	76層
初期時刻	00,06,12,18UTC <sup>※1</sup>	00, 06, 12,18UTC
予報時間	132時間(06,18UTC) <sup>※1</sup> 、 264時間(00,12UTC)	39時間
メンバー数	27メンバー	21メンバー
初期摂動作成手法	SV法 <sup>※2</sup> +LETKF <sup>※3</sup>	SV法
境界摂動作成手法	海面水温摂動(下部境界)	SV法(側面境界)
モデルアンサンブル手法	確率的物理過程強制法	なし

※1 06,18UTCの配信は台風の条件を満たす場合のみ。

※2 特異ベクトル(Singular Vector)法

※3 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(Local Ensemble Transform Kalman Filter)

気象庁で運用している全球アンサンブル予報システム(Global Ensemble Prediction System, GEPS)およびメソアンサンブル予報システム(Meso-scale Ensemble Prediction System, MEPS)の主な仕様を表に示している。

※1 全般海上予報区(赤道-60° N、100° -180° E)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。

## 参考文献

- 計盛正博, 2019: A.1 数値予報システム. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-15.
- 河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2019: メソアンサンプル予報システム. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-15.
- 本田有機, 坂本雅巳, 藤田匡, 室井ちあし, 2018: 数値予報モデル. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 84-89.
- 本田有機, 室井ちあし, 2018: 概要. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 66-71.
- 山口春季, 2017: 全球アンサンプル予報システムの導入. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35-41.