# 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）

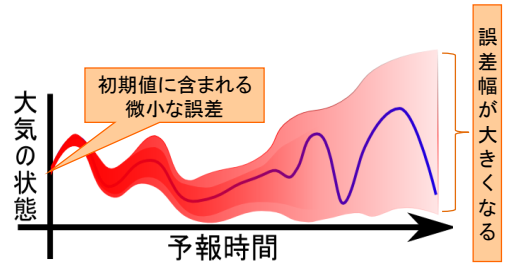
- 大気の振る舞いは時間方向、空間方向の偏微分方程式で記述される。
- 方程式とその数値解法（モデル）、初期条件、境界条件が分かれば
  未来の大気状態を予測できるが、次の問題がある。

  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、親モデルの誤差など）

  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（河野　2019; 本田・室井　2018）。

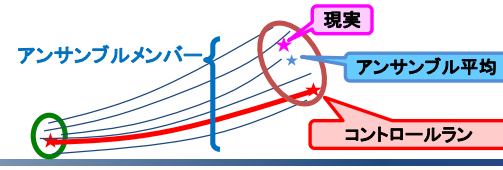
初期条件は、理想的には観測によって得られると期待される。しかし観測されたデータそのものが誤差を含むことや時間・空間的に連続な観測ができないことなどから、真の値を知ることはできない。また、領域モデルでは境界条件として、より広い予報領域を持つ数値予報モデルの予報値を用いるが、そのモデルの予報値にも誤差が含まれる。したがって数値予報に用いる初期値や境界値には必ず誤差が含まれる。

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。また大気の持つカオス的性質（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際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

- アンサンブル予報とは
  - 複数の数値予報の集合（アンサンブル）によって予測とその不確実性を事前に推定する手法
  - 初期値などに小さな摂動（揺らぎ）を与えて複数の数値予報の集合（アンサンブル）を作成する。
  - 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ランと呼ぶ。
  - 解析誤差、数値予報モデル、境界値の不確実性を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。
    （コントロールラン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、予報の初期値などに意図的に小さな摂動（揺らぎ）を与えることで初期値などの不確実性を表現し、摂動を加えた複数の数値予報の集団（アンサンブル）を得る。それぞれの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ランと呼ぶ。アンサンブル全体は摂動で考慮する不確実性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等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、解析値や物理過程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。

# 気象庁のアンサンブル予報システムにおける代表的な摂動作成手法

- 初期摂動作成手法
  - 初期値に含まれる不確実性を表現する手法。
  - 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。
- 確率的物理過程強制法（Stochastically Perturbed Physical Tendencies; SPPT法）
  - 数値予報モデルの不確実性のうち、物理過程の不確実性を表現する手法。
  - 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。物理過程の時間変化項にランダムな摂動を加える。
  - 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。
- 海面水温摂動
  - 下部境界値のうち、海面水温の不確実性を表現する手法。



気象庁で運用しているアンサンブル予報システムで用いられている摂動作成手法をいくつか紹介する。

初期値の誤差（解析値の誤差）については、微小な摂動を初期値に意図的に加えることにより表現できる。初期値の誤差は場所によって大きく異なり、観測のみから特定することはできない。また摂動が時間とともに成長する誤差を表現していることが望ましいが、ランダムに摂動を加えただけでは、予測の不確実性を正しく考慮することは難しい。そこで、成長する誤差を合理的に取り出す必要がある。そのための手法として、全球アンサンブル予報システム（GEPS）で用いられている「特異ベクトル法（Singular Vector: SV法）」がある。

数値予報モデルの不完全性については、その精度やインパクトから考えて、数値予報モデルの物理過程に着目した考慮が行われることが多い。確率的物理過程強制法（Stochastically Perturbed Physical Tendencies; SPPT法）（Buizza et al. 1999; 米原　2010）は、数値予報モデルの物理過程のもつ不確実性を取り扱う手法の一つであり、全球アンサンブル予報システムで導入されている（山口　2017）ほか、2023年3月にメソアンサンブル予報システムにも導入された（気象庁　2023）。これは予報の時間ステップ毎において、物理過程で計算される気温、比湿、風の時間変化量に対して、時間・空間相関が考慮された乱数をかけたものを摂動として足しこむ手法である。

境界条件の不確実性を考慮するために、下部境界条件の１つである海面水温に摂動を与える手法（太田・堀田　2016）がある。

# 気象庁のアンサンブル予報システム

- 大気モデルのアンサンブル予報システムとして、全球アンサンブル予報システム（GEPS）、メソアンサンブル予報システム（MEPS）を運用。
- 波浪モデルのアンサンブル予報システムとして、波浪アンサンブル予報システムを運用。
- 大気海洋結合モデルのアンサンブル予報システムとして、季節アンサンブル予報システム（季節EPS）を運用。

| | 全球アンサンブル予報システム | メソアンサンブル予報システム | 波浪アンサンブル予報システム | 季節アンサンブル予報システム |
|---|---|---|---|---|
| 水平解像度 | 約27km（18日先まで）<br>約40km（18日以降） | 5km | 約55km | 大気：約55km<br>海洋：約25km |
| 予報領域 | 地球全体 | 日本付近 | 極域を除く地球全体※2 | 地球全体 |
| 初期時刻 | 00,06,12,18UTC※1 | 00, 06, 12,18UTC | 00,12UTC | 00UTC |
| 予報時間 | 132時間（06,18UTC）※1<br>264時間（00UTC）<br>18日間（12UTC）<br>34日間（12UTC 火・水） | 39時間 | 264時間 | 240日間（7カ月間） |
| メンバー数 | 51メンバー | 21メンバー | 51メンバー | 5メンバー |

※1　06,18UTCの気象業務支援センター経由でのデータ提供は台風の条件を満たす場合のみ。
※2　南緯75度～北緯75度、西経180度～東経180度。

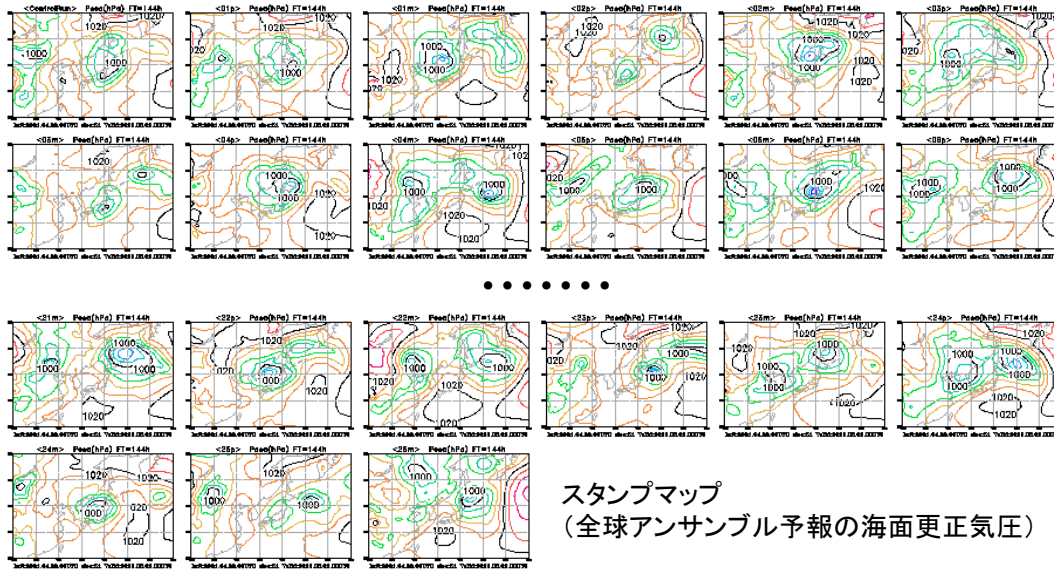


気象庁では、全球アンサンブル予報システム、メソアンサンブル予報システム、波浪アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システムを運用している。これらのアンサンブル予報システムを用いて、決定論予報だけでは得られない予測の（不）確実性に関する情報を提供している。表にはアンサンブル予報システムの主な仕様を示している（主に外国支援目的に使用しているものを除く）。

※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。

# アンサンブル予報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。
  - 詳細な予測結果の確認や分析には便利だが、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。何らかの加工を行ったプロダクトの利用が重要。



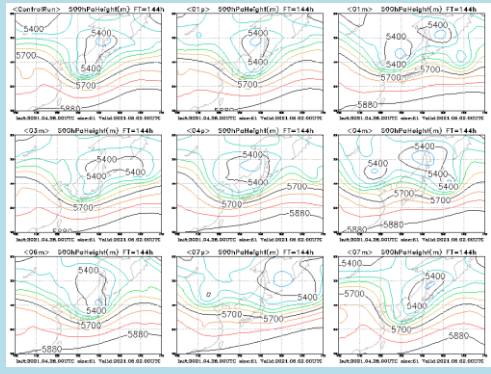
スタンプマップ
（全球アンサンブル予報の海面更正気圧）



図は全球アンサンブル予報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。アンサンブル予報では複数の予報結果が得られるが、それぞれのメンバーの予報値は数値予報モデルを実行した結果であり、予報値は物理量の間で整合したものになっている。スタンプマップを活用すると、メンバー間での予測結果の違いを詳細に確認してその要因の分析なども行うことができる。しかしアンサンブル予報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報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も重要となる。

# 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

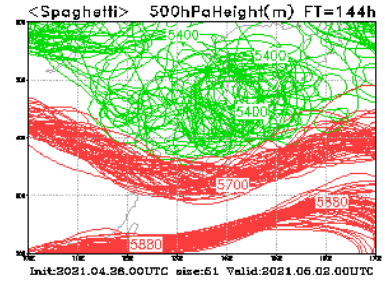
- 特定の等値線を全メンバーについて重ね描きした図。
  - メンバー間における予測の違いやばらつきの大きい場所を、一枚の図で比較的容易に確認できる。



全球アンサンブル予報の各メンバーの予測
（要素は500hPa面のジオポテンシャル高度）

重ね描き

スパゲッティダイアグラム

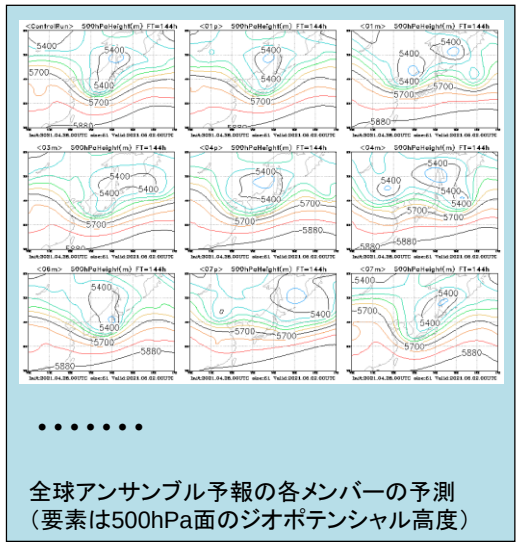





左図は全球アンサンブル予報の予測値（500hPa面ジオポテンシャル高度）を示している。各メンバーの予測値を、右図のように特定の等値線について一枚の図に重ね描きしたものをスパゲッティダイアグラムと呼ぶ。スパゲッティダイアグラムでは、メンバー間における予測の違いや、メンバーのばらつき具合を一枚の図で確認できる。例えばこの図からは、日本付近に深いトラフを表現しているメンバーが多いが、その深さについてばらつきが大きいことが読み取れる。

# 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。





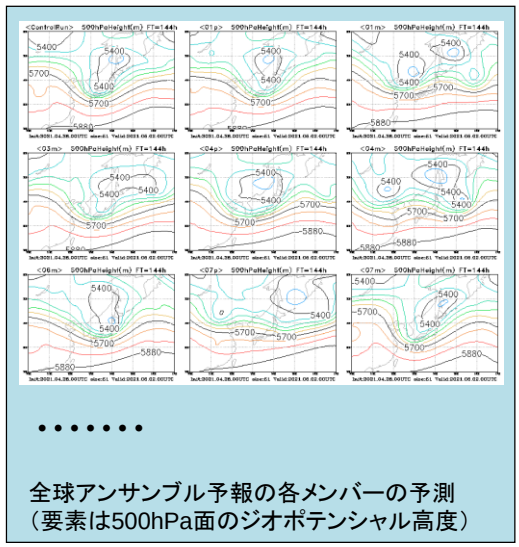

全メンバーの予測を平均したものをアンサンブル平均と呼ぶ。一般にはアンサンブル平均の二乗平均平方根誤差（Root Mean Square Error, RMSE）はコントロールランと比較して小さいことが期待される（高野　2002）。

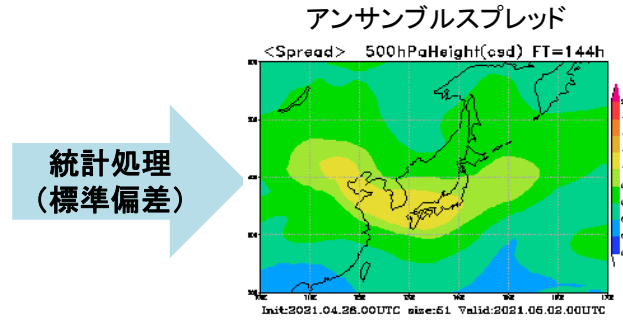
アンサンブル予報ではメンバーの分布は確率分布を表していて、分布がピークとなる予測値が出現する可能性の高い予測となっている。メンバーが正規分布する場合にはアンサンブル平均が最も可能性の高い予測となるが、メンバーが正規分布しない、例えば複数のピークを持つ分布の場合はアンサンブル平均と最も可能性の高い予測は一致しない。このためアンサンブル平均だけで判断するのではなく、メンバーの分布も合わせて確認する必要がある。

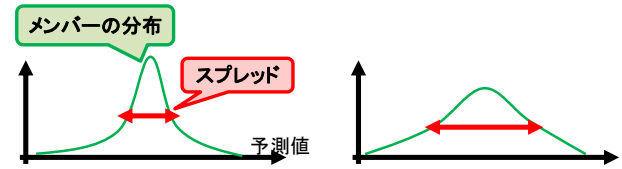
またアンサンブル平均は統計量であるため、数値予報モデルの予報値のように物理量の間で整合した値にはなっていないことにも注意が必要となる。

# 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。




分布が狭い（スプレッド小）
⇒予測の不確実性が小さい

分布が広い（スプレッド大）
⇒予測の不確実性が大きい

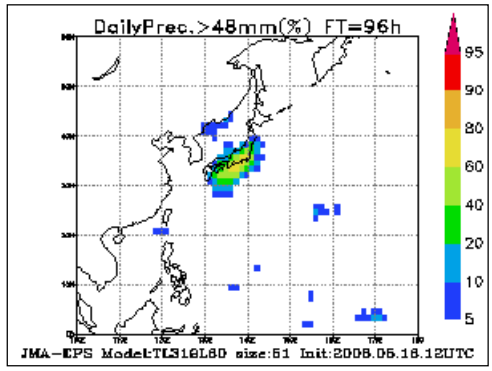


全メンバーの予測について標準偏差を求めたものをアンサンブルスプレッド（または単にスプレッド）と呼ぶ。スプレッドはメンバーのばらつき具合を表す量で、スプレッドの大きさから予測の不確実性の大きさを判断できる。一般にスプレッドの大きさはアンサンブル平均のRMSEと同程度になることが期待される（高野　2002）ことから、スプレッドが大きいほど予測の不確実性が大きい（信頼度が低い）と考えられる。なお、スライドに示したアンサンブルスプレッドの図は気候学的変動量により規格化されている。

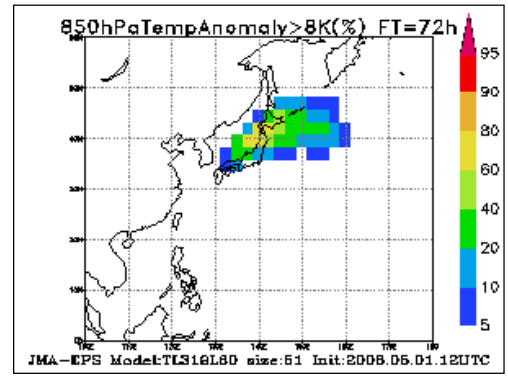
メンバーが狭い範囲に分布している場合はアンサンブル予報のスプレッドが小さく、アンサンブル平均と近い値が出現すると期待されるが、メンバーの分布が広がっている場合はスプレッドが大きく、アンサンブル平均から離れた値が出現する確率が高くなる。

# 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

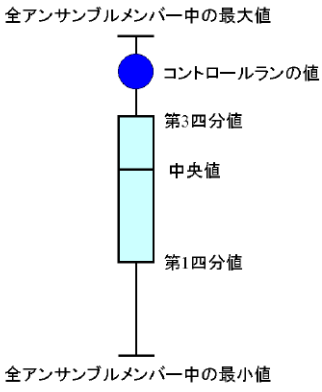


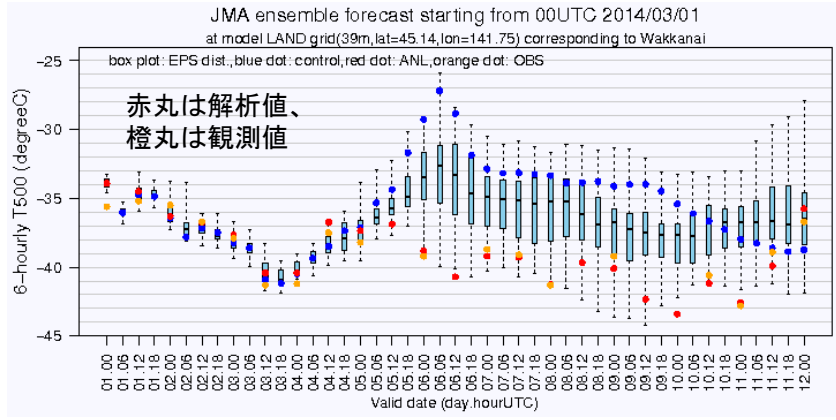
全メンバーに対して、特定の現象が予測されるメンバーの割合を表した図を確率分布図と呼ぶ。特に、ある閾値以上の現象が発生する確率（超過確率）を表す図を超過確率分布図と呼び、注目している現象について予測の確からしさを把握するためによく用いられる。

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。

# 参考文献


- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016: 海面水温摂動の開発. 数値予報課報告・別冊第62 号, 気象庁予報部, 77–84.
- 河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2019: メソアンサンブル予報システム. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–15.
- 気象庁, 2023:メソアンサンブル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入. 数値予報開発センター年報（令和4年）, 気象庁数値予報開発センター, 76-80.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, **201**, 73-103.
- 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: 全球アンサンブ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.
- 米原仁, 2010: 週間アンサンブル予報へのモデルアンサンブル手法の導入. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 62–65.
- Buizza, R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999:Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. Quart.J. Roy. Meteor. Soc., 125, 2887–2908.