

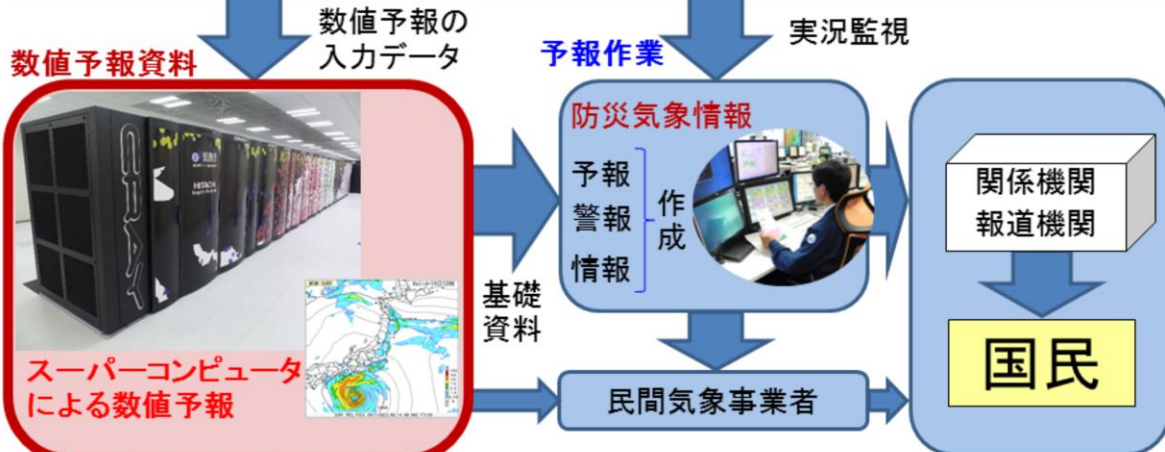


# 第1章 基礎編

## 1.1 概要

# 気象予報業務における数値予報の役割

## 観測資料



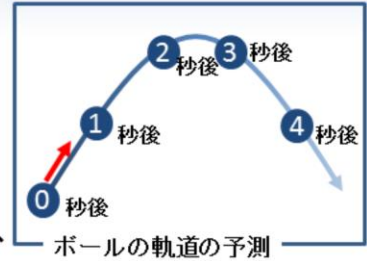
本節では、今日の天気予報の基盤技術となっている数値予報の基礎知識について、本田・室井(2018)を基に最近の更新を反映して、その概要を解説する。

風や気温などの大気状態や降水などの現象を把握するために、スライドにあるように直接観測や衛星観測などの様々な手段を用いて気象観測が行われている。観測・通報されたデータはリアルタイムの実況監視に利用されるほか、数値予報の入力データとして利用されている。数値予報では、現在の大気状態から未来の大気状態を予測し、気温や風、降水などについての各種数値予報資料を作成する。数値予報の一連の処理はスーパーコンピュータにより高速かつ確実に実行される。

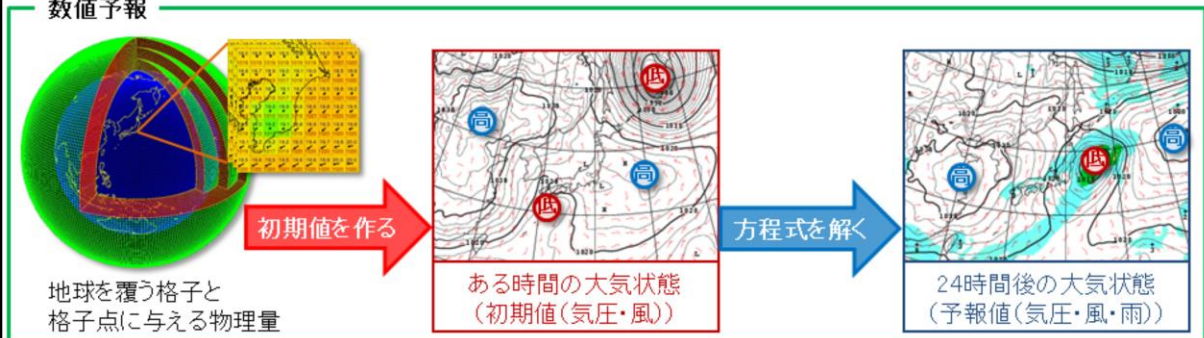
数値予報資料は天気予報、注意報・警報や気象情報などの防災気象情報を作成する際の基礎資料として利用され、防災気象情報は関係機関や報道機関を通じて国民に提供される。現代の天気予報や防災気象情報の作成作業に数値予報資料は必要不可欠であり、数値予報は予報業務における重要な基盤技術となっている。また数値予報資料は民間気象事業者にも提供されていて、様々な形で利活用されている。

# 数値予報とは

- 大気現象を支配する方程式をコンピュータ(計算機)で解くことで、未来の大気状態を予測すること。
- 数値予報の基本的な考え方
  - ボールの軌道の予測と原理は同じ。  
(最初のボールの位置や速度、ボールに加わる力が分かればボールの軌道が予測できる)
  - 数値予報では、現在の大気状態を計算機上に作り、方程式を解いて未来の大気状態を予測する。



## 数値予報



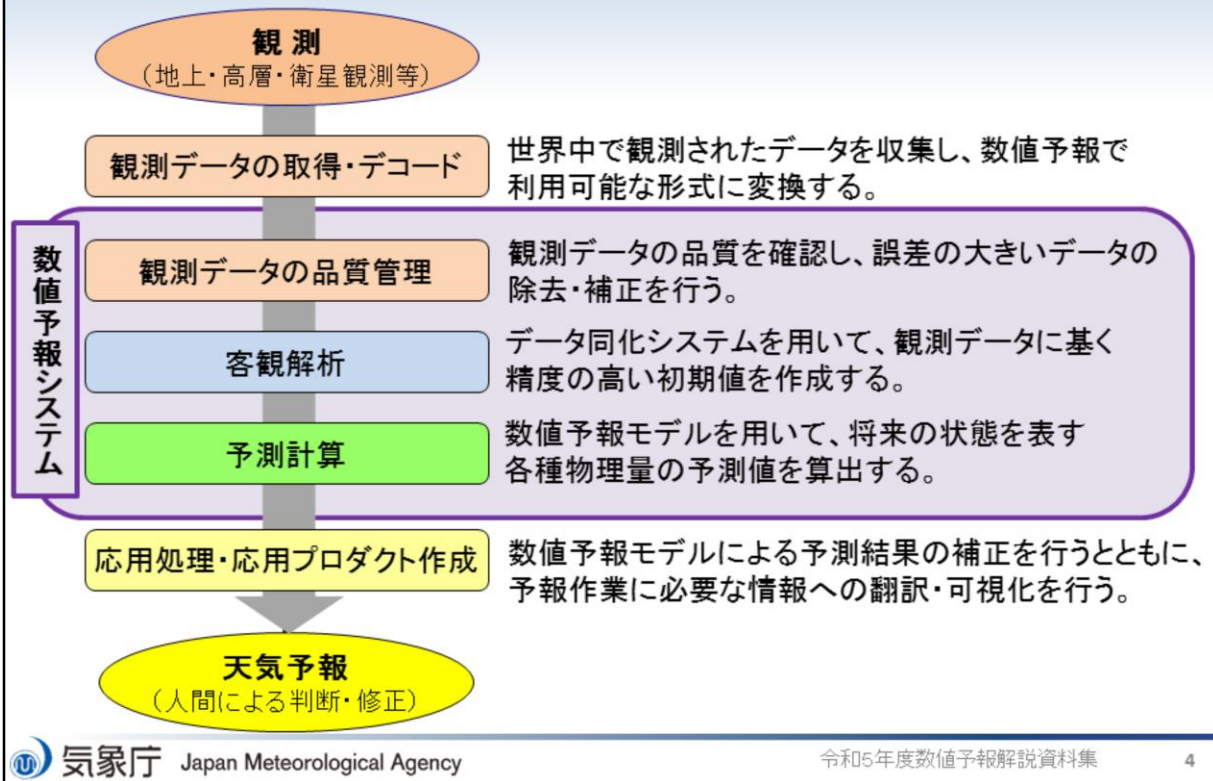
数値予報とは計算機を用いて地球大気の数値シミュレーションを行い、ある時点の大気状態から未来の大気状態を予測することを指す。

空中に投げたボールの軌道の予測を例にとると、最初の状態(位置と速度)とボールに加わる力(重力や空気抵抗)が分かれば、支配方程式(ニュートンの運動方程式)を計算機で解いて1秒後のボールの状態が予測できる。1秒後のボールの状態が分かれば2秒後のボールの状態が予測でき、これを繰り返すことで地面に落ちるまでのボールの位置や速度を予測し続けることができる。ボールの軌道の予測と比べて大気現象を支配する方程式や実際のシミュレーションは複雑だが、数値予報でも基本的な考え方は同じである。

計算機では離散的な値しか取り扱うことができないため、数値予報を実行するには現実の連続した地球大気を細かい格子で分割して、空間を離散化する必要がある。時間についても同様に有限の時間間隔で離散化して取り扱う。格子上の各点には、ある時刻における気象要素(気圧、気温、湿度、風などの物理量)を与えて、計算機上で仮想的に地球大気を再現する。数値予報を開始する時刻における計算機上で再現された地球大気は初期値と呼ばれる。ボールの軌道の予測と同様に方程式を解いて少し先の予測を繰り返すことで、未来の地球大気の状態が予測できる。

スライドには数値予報の初期値と予報値の例を示している。初期値では低気圧が九州南方海上にあって、北日本は三陸沖に中心を持つ高気圧に覆われている。この状態から支配方程式を解いて得られた24時間後の大気状態の予測が右図の予報値である。予報値では九州南方海上にあった低気圧は24時間後には三陸沖に、三陸沖に中心を持つ高気圧は日本のはるか東へと移動し、北日本から東日本の広い範囲で雨が降る予測となっている。

# 数値予報の流れ



スライドには数値予報のおおまかな流れを示している。

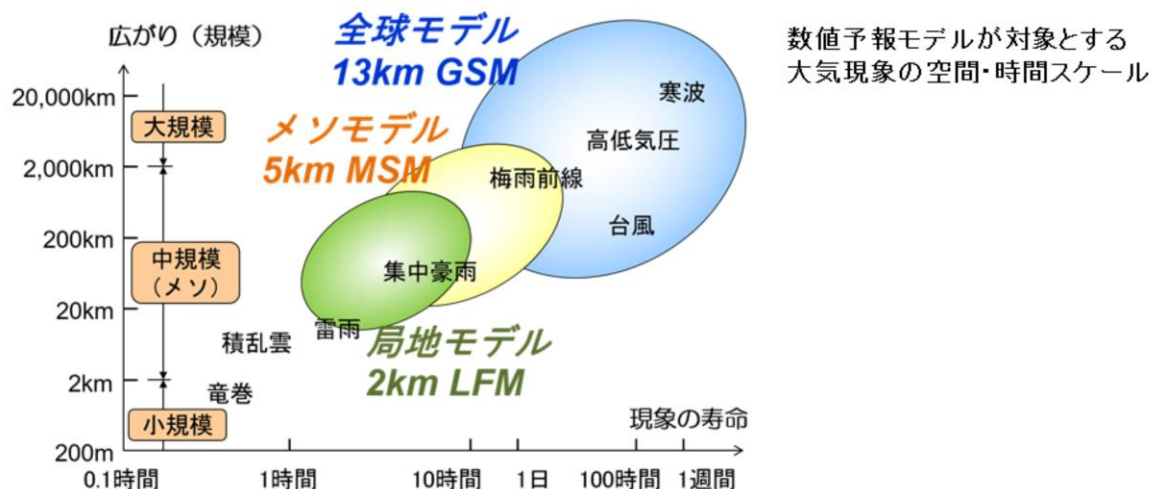
まず、現在の大気の状態を知るために、世界中の観測データを収集し、数値予報で利用可能な形式に変換(デコード)する。観測データには様々な要因で誤差が含まれていて、中には精度が悪く数値予報への利用に適さない観測データも存在するため、収集した観測データの品質を確認し、誤差の大きいデータについてはデータの除去、補正(品質管理)を行う必要がある。次に、品質管理により選別された観測データを利用して数値予報の初期値を作成する。数値予報の初期値を作成する過程を客観解析(データ同化)と呼ぶ。数値予報では初期値の精度が予測精度に及ぼす影響が大きいいため、精度の高い初期値を作成することは非常に重要である。

データ同化により得られた初期値から、数値予報モデルを用いた予測計算を実行することで、未来の大気の状態を表す各種物理量の予測値を算出する。数値予報モデルの実行により得られた予測値は数値の羅列であり、ユーザーが利用しやすい形式に加工する必要がある。この過程を数値予報の応用処理、応用処理で得られる結果を応用プロダクトと呼ぶ。応用プロダクトには、可視化した図形式の資料や、利用しやすい要素への変換、統計的な修正を行った「ガイダンス」と呼ばれる資料があり、これらは天気予報や防災気象情報作成の際の基礎資料として用いられる。

以上の数値予報の流れのうち、観測データの品質管理から予測計算までを含めた処理を実行するプログラム群を数値予報システムという。

# 気象に関する数値予報モデル

- 解像度や予報領域、予報時間が異なる複数の気象に関する数値予報モデルを運用。
  - 全球モデル: 地球全体が対象。予報時間は長いが低解像度。
  - 領域モデル: 特定の地域が対象。予報時間は短いが高解像度。
- 予測対象とする現象によって適切に使い分けることが重要。



気象現象には、高気圧や低気圧、台風、梅雨前線などの大規模な現象から、積乱雲や集中豪雨、竜巻などの小規模な現象まで、様々な空間的広がりを持った現象が存在する。この気象現象の空間的な規模(広がり)を空間スケール、寿命(持続時間)を時間スケールと呼ぶ。現象の空間スケールと時間スケールには相関があり、例えば、大規模な現象である台風の寿命は数日から十日程度だが、台風の周辺で発生する個々の積乱雲は小規模な現象でその寿命は30分から1時間程度である。

数値予報モデルが予測対象とする現象の空間・時間スケールは数値予報モデルの解像度に依存し、解像度が高いほど小さい空間・時間スケール(小規模・短寿命)の現象が予測可能となる。図に示すように、高解像度な領域モデルでは全球モデルよりも細かいスケールの現象を予測対象とすることができる。モデルによって予測対象とする現象の時間・空間スケールが異なることやモデルの予測可能限界を理解した上で、現象や用途に合わせてそれぞれの数値予報モデルを適切に利用することが望ましい。

## ・全球モデル(GSM、全球アンサンブル予報システム)

地球全体を予報領域とした数値予報モデルで、水平格子間隔はGSMが約13km、全球アンサンブル予報システムが約27km(18日先まで)、約40km(18日以降)。台風予報、短期予報、週間天気予報、防災気象情報、航空気象情報等の作成に利用される。

## ・メソモデル(MSM、メソアンサンブル予報システム)

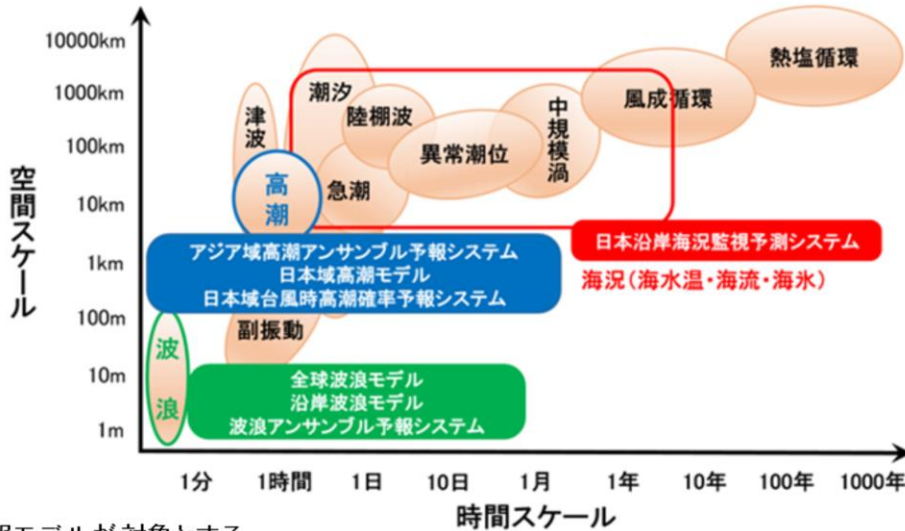
日本周辺を予報領域とした数値予報モデルで、水平格子間隔は5km。短期予報、防災気象情報、航空気象情報、降水短時間予報等の作成に利用される。

## ・局地モデル(LFM)

日本周辺を予報領域とした数値予報モデルで、水平格子間隔は2km。防災気象情報、航空気象情報、降水短時間予報の作成に利用される。

# 海洋に関する数値予報モデル

- スケールの異なる海洋現象を予測し災害を軽減するために、予測対象ごとに各種の海洋に関する数値予報モデルを運用。



数値予報モデルが対象とする  
海洋現象の空間・時間スケール



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和5年度数値予報解説資料集

6

海洋では、図に示されるように、海上の風によって生じる数m～数100mスケールの波浪から、海水温と塩分による密度差で駆動される地球規模の熱塩循環まで、様々なスケールの現象が起きている。気象庁では、予測対象ごとに「波浪モデル」、「高潮モデル」、「海況モデル」といった各種の海洋に関する数値予報モデルを運用している。

## ・波浪モデル(全球波浪モデル、沿岸波浪モデル、波浪アンサンブル予報システム)

海上の風の予測値を用いて、海上における波の発達・減衰やうねりの伝播などを予測する。高波時に発表される波浪警報・注意報や、毎日の波浪予報、船舶向けの波浪図などに利用される。

## ・高潮モデル(アジア域高潮アンサンブル予報システム、日本域高潮モデル、日本域台風時高潮確率予報システム)

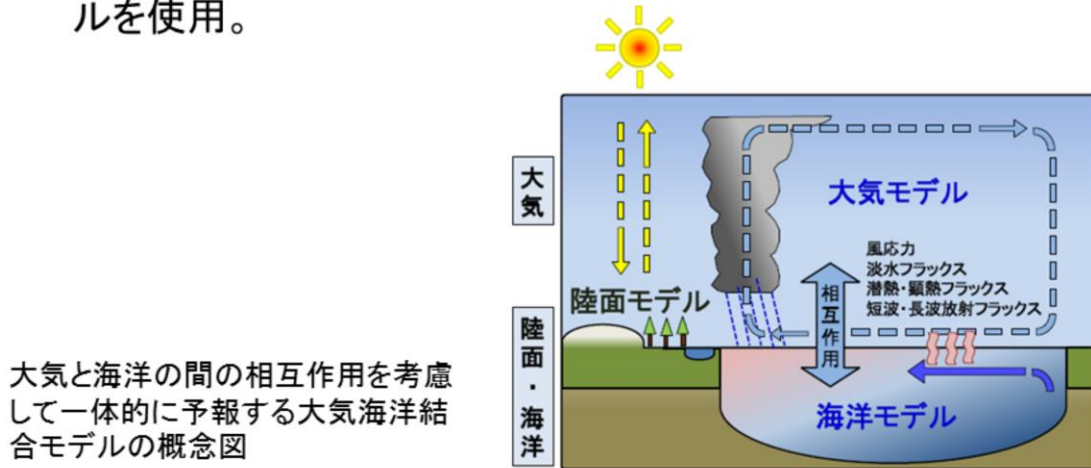
台風の接近時などに海面気圧の変化と海上の風の予測値から潮位の上昇量を予測する。高潮災害が危惧される場合の高潮警報・注意報の発表に利用される。

## ・海況モデル(日本沿岸海況監視予測システム)

黒潮や親潮等の日本周辺の海流や海水温の状態を予測する。海面水温・海流1か月予報の発表、水産業、また他の数値予報モデルとともに船舶の安全運航、海上の警備救難等でも利用される。

# 大気海洋結合モデル

- 1か月を超える予報では、大気の変動と海洋の変動は互いの影響を強く受ける。
- 季節予報で用いられる季節アンサンブル予報システムには、大気と海洋の変動を一体として予測する大気海洋結合モデルを使用。

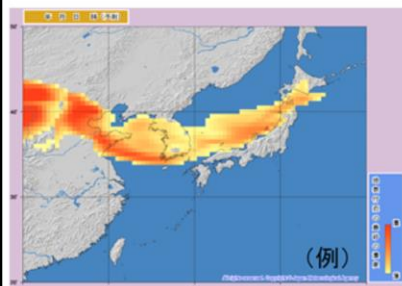


1か月先までの予報では気象に関するモデルが利用されているが、1か月を超える予報では、大気の変動と海洋の変動は互いの影響を強く受けるため、エルニーニョ・ラニーニャ現象等のような海洋の変動も、大気の変動と併せて予報することが必要になる。このため季節予報のためには、大気モデルと海洋モデルを結合し、大気と海洋を一体として予測する大気海洋結合モデルを使用している。

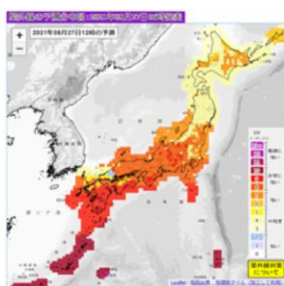
気象庁は、季節アンサンブル予報システムに大気海洋結合モデルを導入し、熱帯海洋変動に関連した大気海洋相互作用の再現性の向上を図っている。

# 物質輸送に関する数値予報モデル

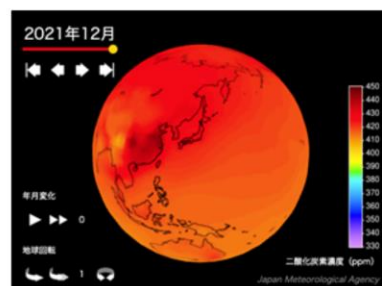
- 地球環境や気候に影響する黄砂、紫外線、二酸化炭素などを、物質輸送モデルを用いて監視・予測。



黄砂解析予測図※



紫外線の予測分布図※



二酸化炭素濃度の球面分布図※

※気象庁HPより

物質輸送モデルは大気中のある物質の発生・輸送・消滅過程等をシミュレートして動態を監視・予測する数値予報モデルで、日々の生活に身近な黄砂・紫外線の予測や二酸化炭素濃度の解析に用いられる。

## ・エアロゾルモデル(全球エアロゾルモデル)

エアロゾルは大気中に漂う数nmから数十 $\mu$ mの微粒子で、代表的なエアロゾルとしては黄砂、煙、海塩、PM2.5などがある。大陸などでの黄砂の舞い上がり、風による移動、雨などによる地上への降下を考慮して、大気中の黄砂の量や分布を解析・予測する。黄砂情報の作成に利用される。

## ・化学輸送モデル(全球化学輸送モデル、領域化学輸送モデル)

オゾンやその変化に関わる物質の風による移動、地上への降下、化学物質や光による反応を通じた変化などを考慮して、上空や地上付近のオゾン濃度を予測する。紫外線情報やスモッグ気象情報の作成に利用される。

## ・二酸化炭素輸送モデル(二酸化炭素輸送モデル)

二酸化炭素の吸排出量を解析して、それをもとに濃度分布を計算する。世界の大気中の二酸化炭素の分布状況を図示する二酸化炭素分布情報の作成に利用される。



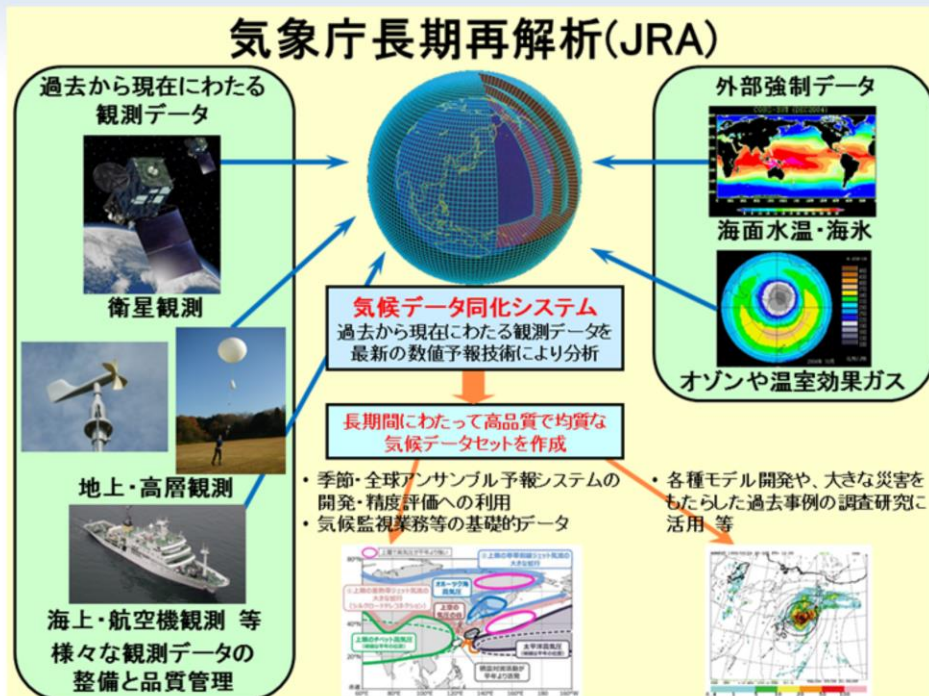
## 決定論的予報とアンサンブル予報

- 数値予報モデルでは、初期値と予報値が一対一対応の関係にある。(初期値が決まれば予報値が決まる)
  - 初期値や境界値、数値予報モデルに含まれる誤差により、予測には必ず誤差が含まれる。
- 決定論的予報
  - データ同化によって得られた解析値を初期値として実行される数値予報。
  - 数値予報の誤差の大きさは、その時々の大気状態で異なるため、一つの決定論的予報の結果で予測の誤差を見積もることはできない。
- アンサンブル予報
  - 予測の誤差を見積もるために、揺らぎを与えた複数の初期値から実行される数値予報。
  - 決定論的予報では知り得ない、予測の誤差や不確実性、信頼性といった情報がアンサンブル予報では得られる。
  - 初期値だけでなく境界値や数値予報モデル自体の不確実性を考慮するアンサンブル予報や、これらを組み合わせたアンサンブル予報もある。

数値予報モデルでは、初期値が与えられれば計算結果である予報値は一意に求まる。このためデータ同化によって得られた解析値を初期値として実行される数値予報を「決定論的予報」と呼ぶ。しかしどれだけ精度良く求めても初期値や境界値には誤差が含まれる。また数値予報モデル自体も、モデル化の際の近似や仮定、あるいは空間・時間の離散化のために予測には必ず誤差が生じる。数値予報では初期値に含まれる僅かな誤差が時間の経過とともに増大するが、この誤差の成長は大気の状態によって大きく左右され、同じ数値予報モデルを用いても、予測に含まれる誤差はその時々の大気の状態によって異なる。そのため、最も尤もらしい解析値のみを初期値として数値予報モデルを実行する決定論的予報では、予測の誤差(不確実性)を事前に知ることはできない。

決定論的予報に対して、予測の誤差を見積もるために、初期値に僅かな揺らぎを与えて行う複数の予測を「アンサンブル予報」と呼ぶ。あるいは境界値や数値予報モデルを置き換え、これらの不確実性を考慮するアンサンブル予報もある。アンサンブル予報では、複数の予報値を利用することで予測の誤差を事前に見積もることができ、予測の信頼性に関する情報を得ることができる。

# 長期再解析

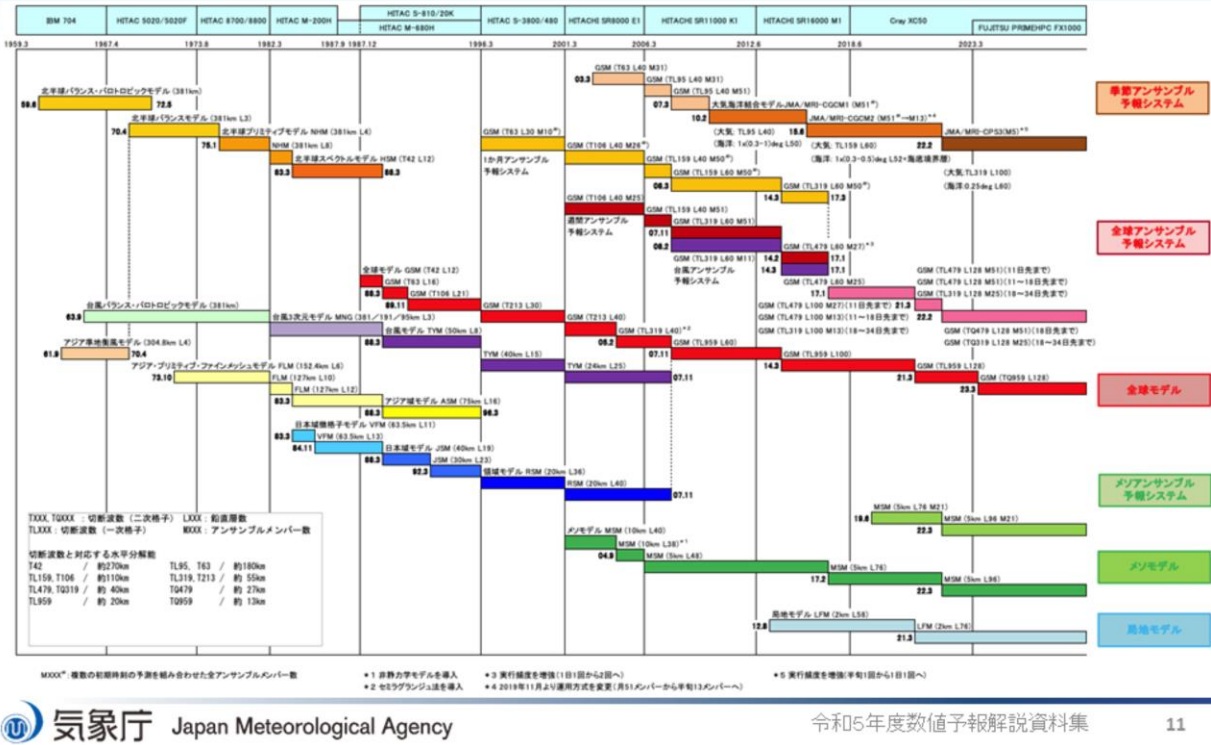


異常気象の分析を含めた気候の監視や季節予報をよりの確に行うためには、過去の気候もできるだけ正確に把握する必要がある。このため、過去数十年にわたって蓄積した観測データを、最新の数値予報技術により分析する「長期再解析」にて過去の気候データを作成し、気候の監視や季節予報に活用しているほか、国内外の研究活動等で広く利用されている。

長期再解析では、過去から現在にわたって観測データが最新の数値予報技術で解析され、長期間にわたって高品質で均質な気候データセットが準リアルタイムで作成されている。

気象庁は2006年に約25年間の全球長期再解析を始め、2013年に約55年間の長期再解析を実施した。さらに2023年には最新の技術を用いた約75年間の長期再解析を実施した。

# 気象庁のスーパーコンピュータと 数値予報システムの歴史



スライドには気象庁のスーパーコンピュータと数値予報システムの変遷を示している。

現在運用中のスーパーコンピュータシステム(2018年6月5日から運用開始)は第10世代目のもので、その理論最大性能は18,166TFLOPS(1TFLOPSは1秒回に1兆回計算できることを示す単位)、第9世代のスーパーコンピュータシステムの約10倍の性能となっている。

数値予報システムについても継続的に開発を実施し、観測データの利用の拡充、データ同化システムの高度化、数値予報モデルの精緻化や高解像度化を繰り返してきた。観測データの処理やデータ同化、数値予報モデルの実行、応用プロダクトの作成など、数値予報システムの運用には膨大な計算量が必要となる。数値予報システムの高度化にはさらなる計算量が要求されるため、より高度な数値予報システムを運用するにはより高性能なスーパーコンピュータが不可欠であり、数値予報とコンピュータ技術とは密接な関係にある。

# 参考文献

- 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.