



# 第9回サイエンスカフェつくば これからの気象庁の数値予報

2021年11月6日

気象庁情報基盤部数値予報課  
数値予報モデル基盤技術開発室

佐藤芳昭

# 数値予報ってご存じですか？

- ①知っている
- ②言葉だけは知っている
- ③知らない

# 数値予報って何？

- 気圧や風、気温、湿度などがどのように空間に分布しているかが分かると、その値が少し先にどのように変化するか物理法則に基づいて計算することができます。これを繰り返し行うことで、その未来の状態を予測することができます。
  - 大気の「シミュレーション」を行っているのです。
- コンピュータによる数値計算で将来予測を行うので「数値予報」と言います。

## シミュレーション（広辞苑）：

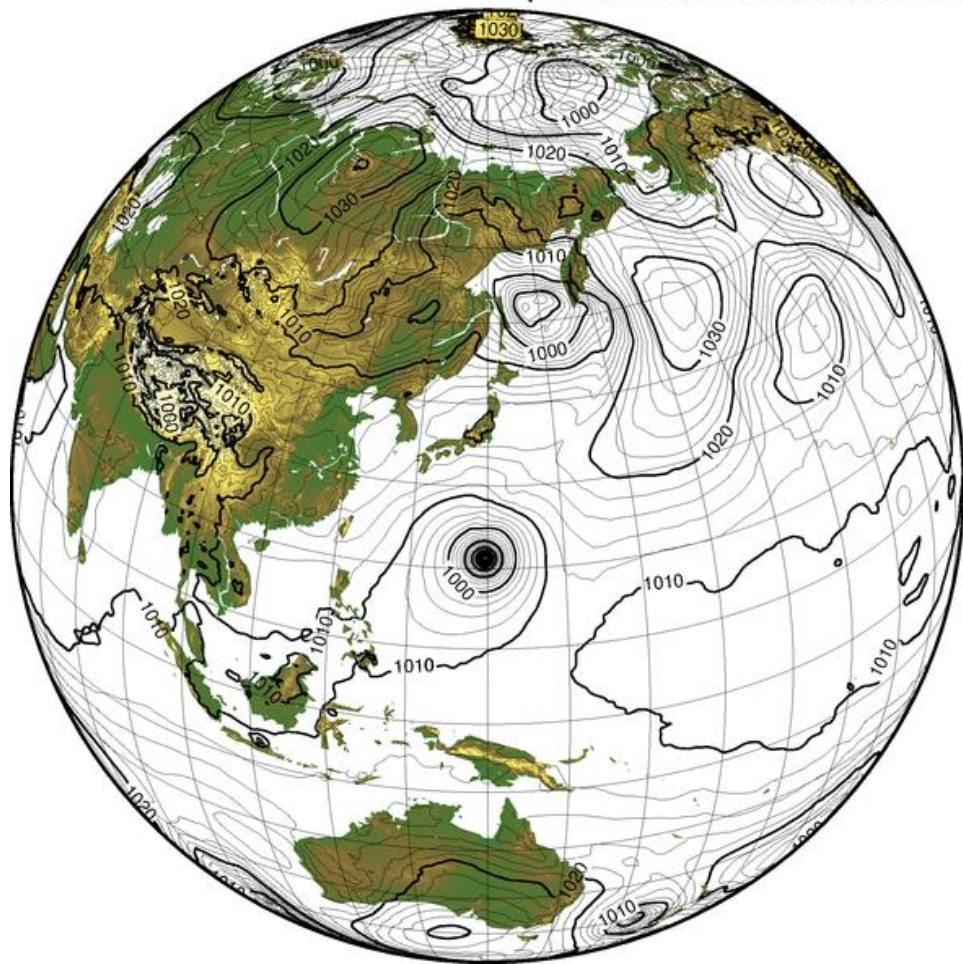
物理的・生態的・社会的等のシステムの挙動を、これとほぼ同じ法則に支配される他のシステムまたはコンピューターによって、模擬すること。

→数値予報では地球大気などの物理法則に基づく時間変化をコンピュータで模擬する

# 数値予報って何？

2019.10.09.12UTC FT=000

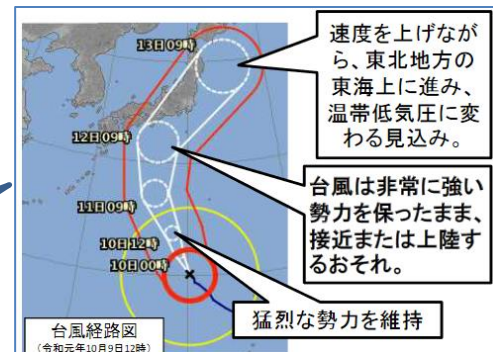
(Valid Time: 2019.10.09.12UTC)



このアニメーションは令和元年台風第19号の、数値シミュレーション結果です

- ・ 台風が日本の南海上にある3日前から東日本に台風が接近してくる予測を示していました
- ・ 数値予報では、このような計算を日々リアルタイムで実行しており、その結果を予報の基礎資料として活用しています

同日の予報資料





# はじめに

- 「数値予報」とは、大気や海洋などのシミュレーション計算を（現在の状態に基づいて）未来に向かって行い、予測対象の未来の状態を客観的に予測することです。
  - 詳細なシミュレーション計算を短時間で行うために、スーパーコンピュータを用いて行っています。
  - 毎日の暮らしを支える天気予報、台風情報、気象警報などは「数値予報」の予測結果を元に発表されています
  - 気象庁で数値予報の技術開発を担う「数値予報開発センター」が令和2年10月に、つくば市に設置されました
- 講演では、はじめに**数値予報開発センターを紹介**するとともに、**数値予報の仕組み**と、**気象庁の数値予報のこれから**についてお話しします。

# 自己紹介

- 昭和45年 5月 東京生まれ
- 平成 7年 4月 気象庁入庁（観測部測候課技術係）
- 平成 9年 4月 福岡管区気象台技術部予報課
- 平成12年 4月 気象衛星センターデータ処理部システム管理課
  - 平成13年 4月より予報部数値予報課併任
- 平成15年 4月 予報部数値予報課
- 平成19年 4月 米国気象局環境予測センター(NCEP) 客員研究員
- 平成21年 4月 予報部数値予報課
  - WMO/CBS\*統合観測部会 様々な観測が数値予報に与える影響評価 共同ラポータ（～H28）
- 平成23年 4月 予報部数値予報課 データ同化技術開発推進官
- 平成26年 4月 予報部数値予報課 数値予報モデル開発推進官
- 平成28年 4月 地球環境・海洋部気候情報課 気候モデル開発推進官
  - WMO/CBS\*統合観測部会 観測システムデザインと発展専門家チーム コアメンバー（～R1）
- 平成31年 3月 仙台管区気象台 気象防災部長
- 令和 2年 3月 予報部数値予報課 数値予報モデル開発推進官
- 令和 2年10月 情報基盤部数値予報課 数値予報モデル技術開発室長
- 令和 3年 4月 情報基盤部数値予報課 数値予報モデル基盤技術開発室長

数値予報開発  
センター

# 数値予報開発センター



# 数値予報開発センター

- 気象庁において数値予報の開発を担う部門

- 気象庁の数値予報モデルは職員により自主開発されています。

- 気象庁情報基盤部数値予報課（港区）の下部組織
  - 令和2年10月つくば市の高層気象台庁舎に発足
  - 以下の3技術開発室等の総称

- 数値予報モデル基盤技術開発室

- 数値予報開発センター総括
    - 部外連携推進、数値予報開発基盤の開発、ガイダンス（数値予報結果に基づく予報作業を支援するプロダクト、AIに関連が深い）の開発

- 数値予報モデル技術開発室

- 数時間から1週間の天気予報や気象情報・警報などに基礎資料を提供する全球モデルやメソモデル、局地モデルなどの開発

- 地球システムモデル技術開発室

- 1か月から数か月の季節予報、オゾンや黄砂などの環境に関する予測、波浪や高潮など海に関する予測といった、多種多様な予測情報の基となる数値予報モデルの開発



# 数値予報開発センターの業務

- 数値予報の精度改善方策を模索し、その実装と現業化（日々天気予報に用いるシステムに導入すること）までを実施。
  - 精度改善方策の模索は、文献調査から数値実験まで。また大学等研究機関との共同研究などで知見を得ることも重要。
  - その実装はプログラムの改良という形で実施。その効果を過去の一定期間の予報実験により確認、予測精度向上という成果が得られれば晴れて現業化。
  - とはいえ「こうすれば確実によくなる」という正解があるわけではないので、試行錯誤の連続。

# 数値予報開発センターの事務室



職員は高層気象台庁舎2Fにて、  
コンピュータを用いた調査開発を実施  
※もちろんテレワークも併用

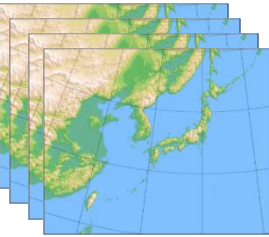
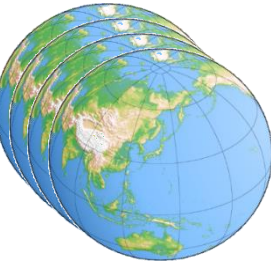
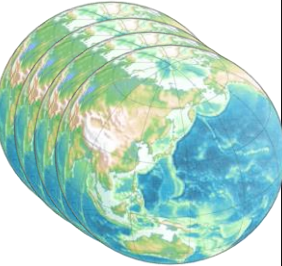


# 数値予報って天気予報の他何に使われているかご存じですか？

- ① 1 か月予報
- ③ 海氷予測

- ② 航空気象情報
- ④ (①～③) 全部

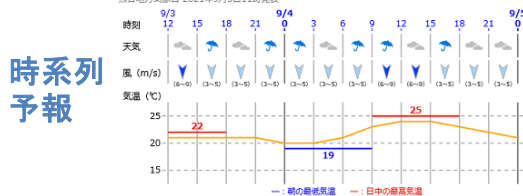
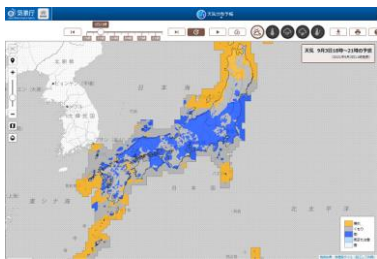
# 気象庁で運用中の数値予報モデル（１）

|                 | 局地モデル<br>(LFM)                                                                    | メソモデル<br>(MSM)                                                                    | メソEPS#<br>(MEPS)                                                                   | 全球モデル<br>(GSM)                                                                      | 全球EPS#<br>(GEPS)                                                                    | 季節EPS#<br>(JMA/MRI-<br>CPS2)                                                        |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| モデル<br>領域       |  |  |  |  |  |  |
| 水平<br>解像度       | 2km                                                                               | 5km                                                                               | 5km                                                                                | 約20km                                                                               | 約40km (18日まで)<br>約55km (それ以降)                                                       | 大気約110km、<br>海洋約50～100km                                                            |
| 予報<br>期間        | 10時間<br>(毎時)                                                                      | 51時間 (00,12UTC)<br>39時間 (03,06,09,<br>15,18,21UTC)                                | 39時間<br>(00,06,12,18UTC)                                                           | 264時間<br>(00,12UTC)<br>132時間<br>(06,18UTC)                                          | 5.5日 (06,18UTC)<br>11日 (00UTC)<br>18日 (12UTC)<br>34日 (週2回)                          | 7か月<br>(半月1回)                                                                       |
| メン<br>バー数       | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 21                                                                                 | 1                                                                                   | 51 (18日まで)<br>25 (それ以降)                                                             | 13/初期値<br>【51/月 (複数初期値)】                                                            |
| 主要な<br>目的       | 航空気象情報<br>防災気象情報<br>降水短時間予報                                                       | 防災気象情報<br>降水短時間予報<br>航空気象情報<br>分布予報<br>時系列予報<br>府県天気予報                            | 防災気象情報<br>航空気象情報<br>分布予報<br>時系列予報<br>府県天気予報                                        | 分布予報<br>時系列予報<br>府県天気予報<br>台風予報<br>週間天気予報<br>航空気象情報                                 | 台風予報<br>週間天気予報<br>早期天候情報<br>2週間気温予報<br>1か月予報                                        | 3か月予報<br>暖候期予報<br>寒候期予報<br>IL-ニコ監視速報                                                |
| 初期値<br>解析<br>手法 | 3次元変分法                                                                            | 4次元変分法                                                                            | メソモデルの初期値<br>+ SV*の摂動<br>(初期値+側面)                                                  | ハイブリッド<br>4次元変分法                                                                    | 全球モデルの初期値<br>+ SV*の摂動<br>+ LETKF**の摂動                                               | 大気：4次元変分法<br>海洋：3次元変分法<br>+ BGM***法の摂動                                              |

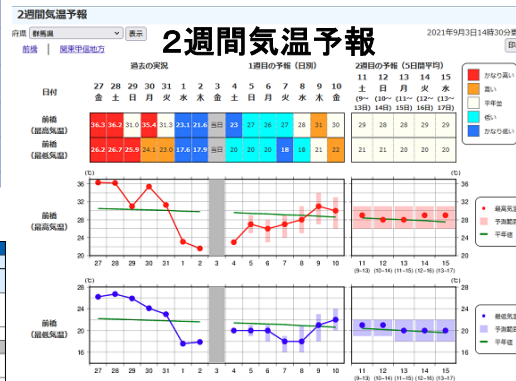
#EPS: アンサンブル予報システム / \*SV: 特異ベクトル / \*\*LETKF: 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ / \*\*\*BGM法: 成長モード育成法



# 数値予報モデルとその利用例



|                         | 1日                                      | 2日 | 3日 | 5日 | 1週 | 2週 | 4週 | 3か月 | 6か月 |
|-------------------------|-----------------------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| 局地モデル<br>2km (~10h)     | 防災気象情報、降水短時間予報、航空気象情報、分布予報、時系列予報、府県天気予報 |    |    |    |    |    |    |     |     |
| メソモデル<br>5km (~51h)     | 防災気象情報、降水短時間予報、航空気象情報、分布予報、時系列予報、府県天気予報 |    |    |    |    |    |    |     |     |
| メソEPS<br>5km (~39h)     | 防災気象情報、航空気象情報、分布予報、時系列予報、府県天気予報         |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 全球モデル<br>20km (~11d)    | 分布予報、時系列予報、府県天気予報、台風予報、週間天気予報、航空気象情報    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 全球EPS<br>40-55km (~34d) | 台風予報、週間天気予報、早期天候情報、2週間気温予報、1か月予報        |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 季節EPS<br>110km (~7m)    | 3か月予報、暖候期予報、寒候期予報、エルニョ監視速報              |    |    |    |    |    |    |     |     |
|                         | 1日                                      | 2日 | 3日 | 5日 | 1週 | 2週 | 4週 | 3か月 | 6か月 |



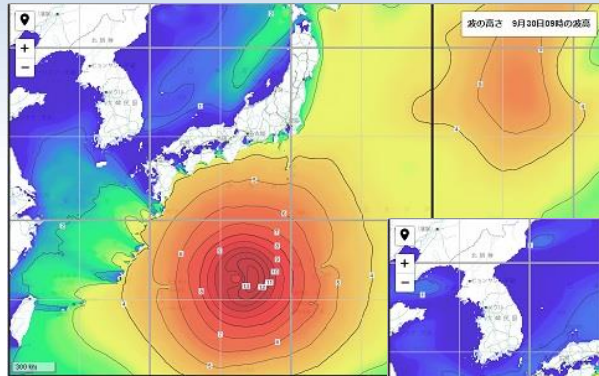


# 気象庁で運用中の数値予報モデル（2）

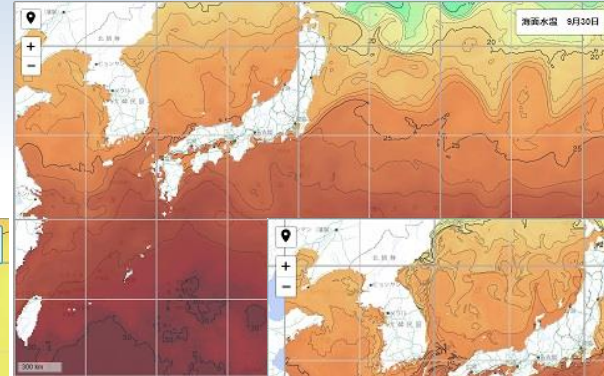
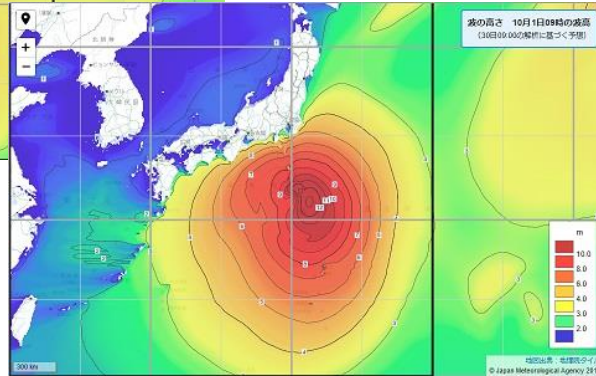
| 数値予報モデル<br>(略称)    | 予報領域<br>水平分解能                 | 予報期間<br>(初期時刻または実行頻度)                | 主要な目的            | 初期値解析手法            |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------|
| 全球波浪モデル            | 全球（除極域）<br>約55km              | 5.5日間 (00,06,18UTC)<br>11日間 (12UTC)  | 外洋波浪予報           | 最適<br>内挿法          |
| 沿岸波浪モデル            | 日本周辺 約5km                     | 5.5日間 (00,06,12,18UTC)               | 波浪予報             | 最適<br>内挿法          |
| 波浪アンサンブル<br>予報システム | 全球（除極域）<br>約55km              | 11日間 (00,12UTC)<br>(51メンバー)          | 週間天気予報（波浪）       | 最適<br>内挿法          |
| アジア域高潮モデル          | 北西太平洋 約4km                    | 132時間 (00,06,12,18UTC)               | 高潮情報<br>(海外で利用)  | — <sup>1</sup>     |
| 日本域高潮モデル           | 日本周辺沿岸部<br>約1～16km            | 39時間<br>(00,03,06,09,12,15,18,21UTC) | 高潮情報<br>(警報・注意報) | — <sup>1</sup>     |
| 日本沿岸海況監視<br>予測システム | 日本近海 約2km<br>北太平洋 約10km       | 11日間（日本近海,1日1回）<br>31日間（北太平洋,1日1回）   | 海面水温・海流1か月予報     | 北太平洋<br>4DVar      |
| 海氷モデル              | オホーツク海南部<br>12.5km            | 7日間 (00UTC、週4回)                      | 海氷情報             | — <sup>2</sup>     |
| 全球エーロソルモデル         | 全球 40km                       | 4日間 (12UTC)                          | 黄砂情報             | 2DVar <sup>3</sup> |
| 全球化学輸送モデル          | 全球 110km                      | 5日間 (12UTC)                          | 紫外線情報            | ナッジング <sup>3</sup> |
| 領域化学輸送モデル          | 東アジア域 20km                    | 72時間 (12UTC)                         | スモッグ<br>気象情報     | ナッジング              |
|                    | 日本域 5km                       | 51時間 (12UTC)                         |                  | — <sup>3</sup>     |
| 地球システムモデル<br>(温暖化) | 全球<br>大気約110km<br>海洋約30～100km | 将来予測<br>20～100年                      | 地球温暖化予測情報        | IAU<br>(海洋のみ)      |
| 地域気候モデル<br>(温暖化)   | 日本周辺<br>20km, 5km, 2km        | 将来予測<br>20年～（60年×100メンバー）            | 地球温暖化予測情報        | —                  |

<sup>1</sup>高潮モデルの初期値は大気予報によるスピニアップ（ハインドキャスト）により作成。<sup>2</sup>海氷モデルの初期値は衛星画像等の解析により作成。<sup>3</sup>全球エーロソルモデル・全球及び領域化学輸送モデルの大気場はGSM・MSM等の数値予報モデルによる予報値を使用。

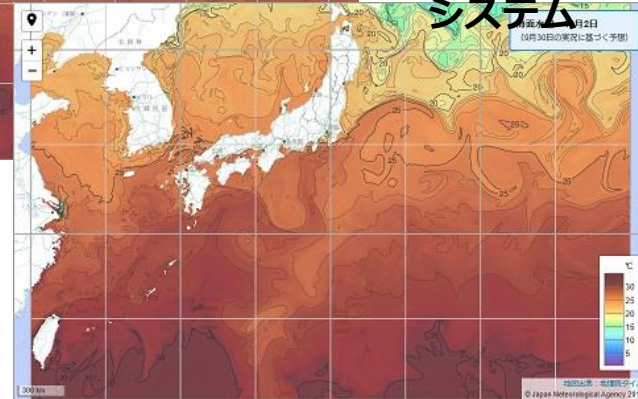
# 数値予報モデルとその利用例



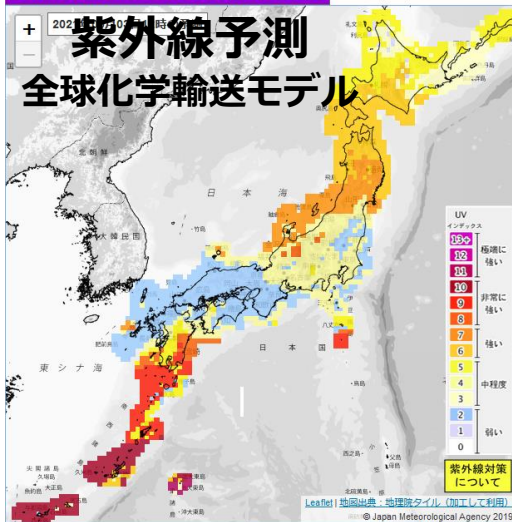
**波浪解析・予測**  
沿岸波浪モデル  
全球波浪モデル



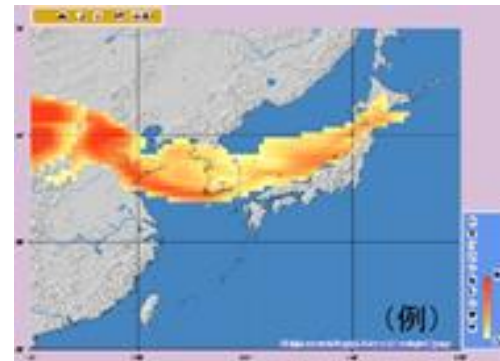
**海面水温  
解析・予測**  
日本沿岸海況  
監視予測  
システム



紫外線の予測分布図：2021年09月03日06時発表



**紫外線予測**  
全球化学輸送モデル



**黄砂予測**  
全球エーロゾルモデル

# 事前質問

- Q: 天気予報で出てくるものの以外で数値予報ができるものは何かを知りたいです。例えば、ある時刻での雲量とか紅葉（1本の木での紅葉する葉の割合）など。
  - 雲量は計算しています（上層／中層／下層／全雲量）
  - 紅葉については、対象となる木がどのような気象の条件で紅葉するのかを把握し、それを計算式とすることで原理的には可能
    - ただし、当然ながら、数値予報にも誤差がありますし、木々にも個体差があるので、計算結果が必ずしも正しくなるとは限りません。
    - たとえば以前気象庁で実施していた桜の開花予想では桜の花芽の成長量と日平均気温の関係から予測を行っていました
      - →今なら数値予報から日平均気温の予想値を算出し、これを与えて予測することは可能

## 気象庁が実施していた「さくらの開花予想」

気象庁のさくらの開花予想は、花芽が休眠から覚めて生長に入り開花するまでの生長量を、気温により推定する手法を用いてきました。この手法により、各地の気象台等が継続して観測しているさくらの木が開花する日を予想しました。（開花とは、花が5～6輪開いた状態のことです。）

さくらの開花日は、日平均気温から以下の式にあてはめて求めた「DTS（温度変換日数）※」を、積算開始日から積算し、所定量に最も近い値になった日とします。さくらの開花予想は、本式にこれまでの気温と今後予想される気温をあてはめて予想していました。

※ DTS（温度変換日数）を用いた開花予測は、柑橘類、梨などの果樹でも研究されている

$$DTS(日) = \exp \{ 9.5 \times 10^3 \times (t - 288.2) / (t \times 288.2) \}$$

t : 当該日平均気温の絶対温度 (K)

DTS（温度変換日数）：ある温度における1日分の生長が15℃に換算すると何日分に相当するかを示す量

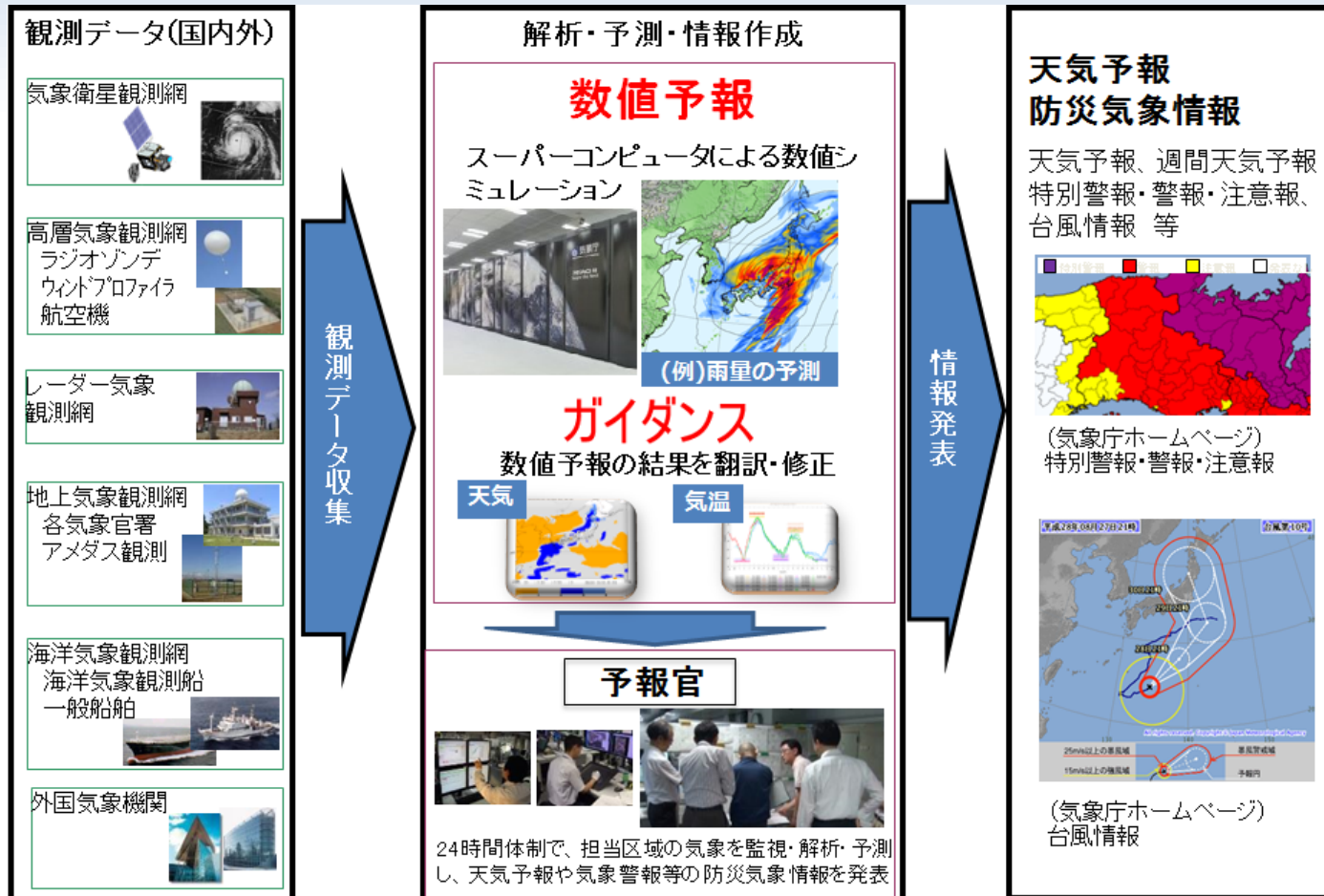
この積算開始日と所定量は地点毎に異なっており、過去30年間の各地のさくらの開花日と当時の気温をもとに、統計的な手法により最速となる量を算出しました。

# 数値予報のしくみ



# 天気予報や防災気象情報ができるまで

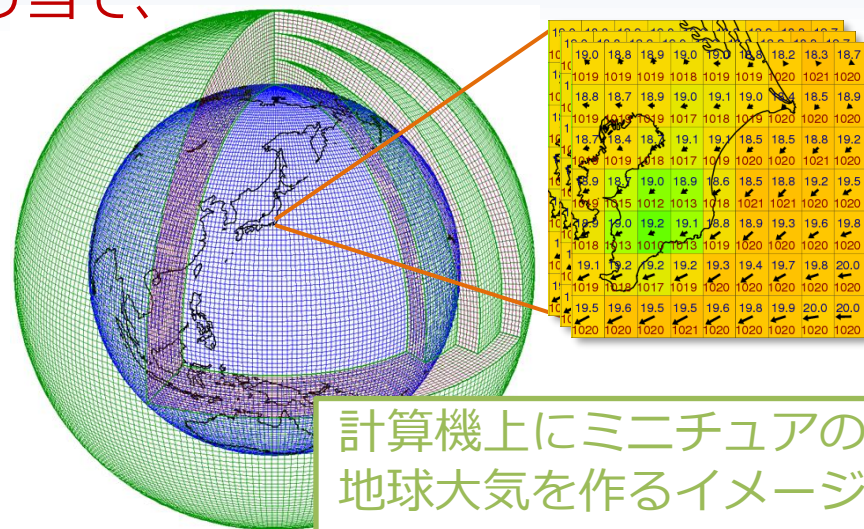
【天気予報・防災気象情報が発表されるまでの流れ】



- 数値予報とガイダンスは、日々の天気予報・防災気象情報の基盤
- これらの精度を向上するためには、数値予報・ガイダンスの精度向上が不可欠

# 数値予報とは

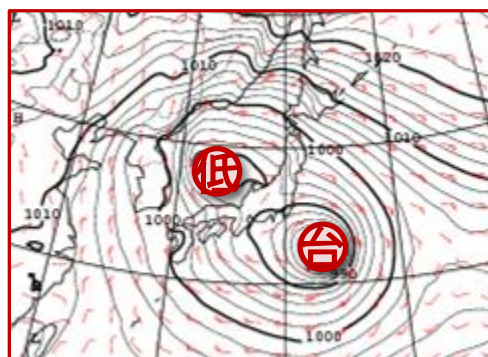
- 地球大気の数値シミュレーション
  - 地球大気を細かい格子に分割、**それぞれに、ある時刻の気圧、気温、湿度、風などの気象要素の値を割り当て、**
  - 物理法則に基づいて、各格子の未来の気象要素の値を計算します**
- 高速な計算機（スーパーコンピュータ）が必要
  - 複雑かつ膨大な計算を決められた時間内に行うため



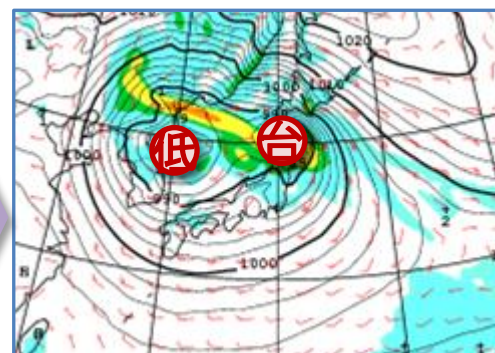
## 格子数と計算量の例

**格子数** 約1億7000万

**計算量** 数百兆回/24時間予報



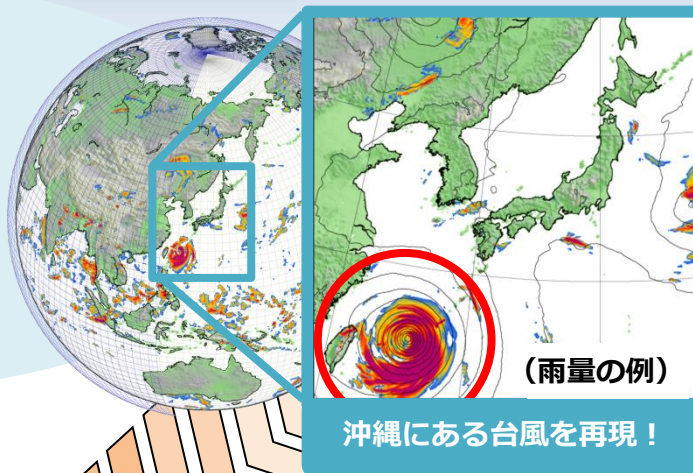
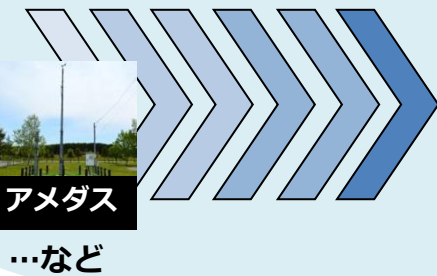
ある時間の大気状態  
(初期値 (気圧・風))



未来（24時間後）の大気状態  
(予報値 (気圧・風・雨))

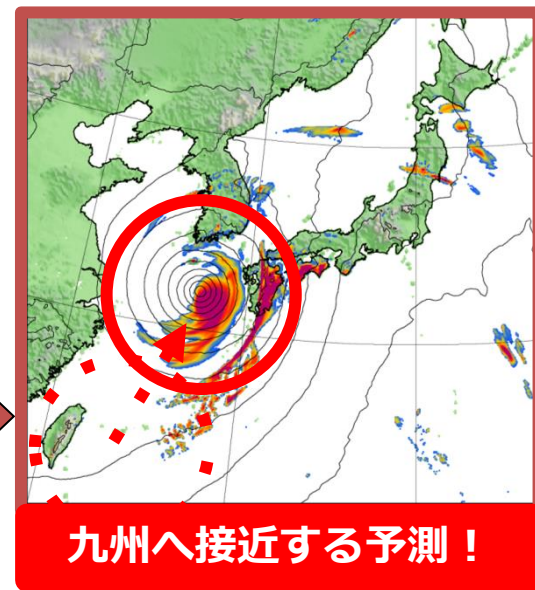
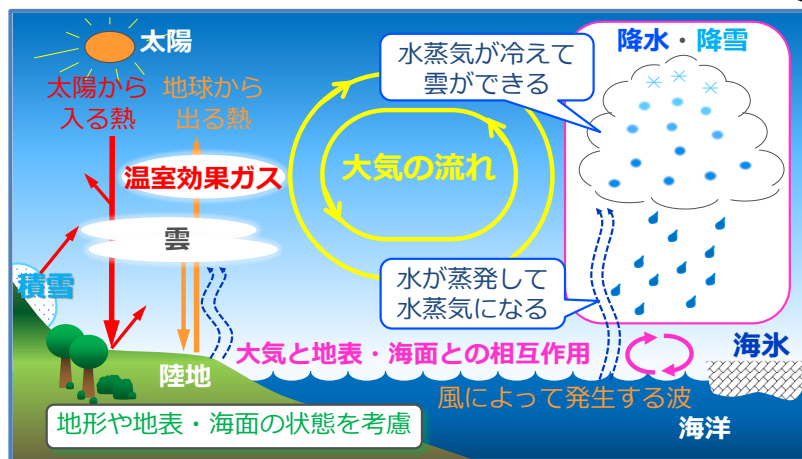
# 数値予報の流れ

## 様々な観測データ



- 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)

- 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



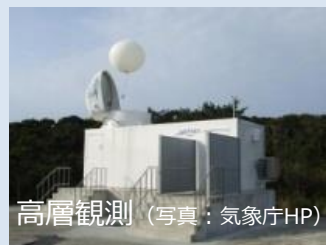


**数値予報で利用している観測  
データは1日当たりどのくらい  
と思いますか？（全球モデルの場合）**

- ①数万
- ②数十万
- ③数百万



# 数値予報で利用している観測



高層観測 (写真: 気象庁HP)



地上観測  
(写真: 仙台管区HP)



ブイ観測  
(写真: 気象庁HP)



航空機観測 (写真: YS提供)



海上観測 (写真: 気象庁HP)

直接観測



ウィンドプロファイラ  
(写真: 東京管区HP)

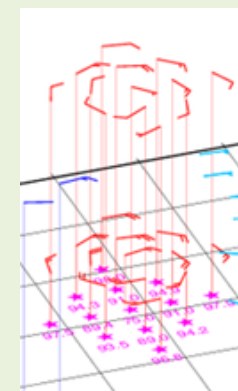


(ドップラー) レーダー  
(写真: 大阪管区HP)



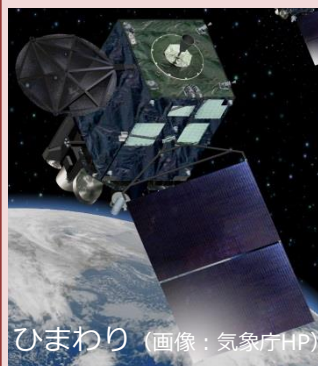
GNSS受信機  
(写真: 観測部提供)

リモートセンシング 遠隔観測



台風ボーガス

疑似観測



ひまわり (画像: 気象庁HP)



METEOSAT  
(image: © ESA)



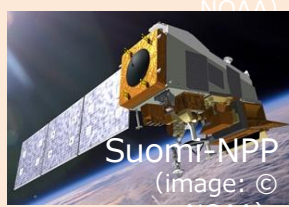
GOES (image: © NOAA)

静止軌道衛星

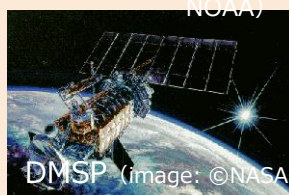
現業衛星



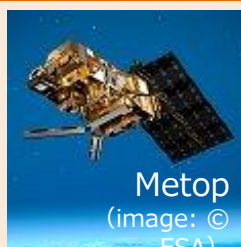
NOAA  
(image: © )



Suomi-NPP  
(image: © NOAA)



DMSP (image: © NASA)



Metop  
(image: © ESA)

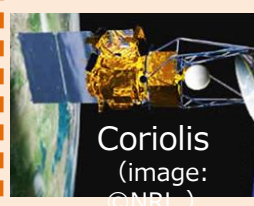


FY-3  
(image: © CMA)



GPM主衛星  
(image: © JAXA)

地球観測衛星



Coriolis  
(image: © NRL)

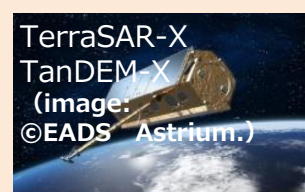


Aqua  
(image: © NASA)

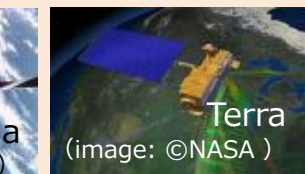


GCOM-W1「しずく」  
(image: © JAXA)

GNSS掩蔽衛星



TerraSAR-X  
TanDEM-X  
(image: © EADS Astrium.)



Terra  
(image: © NASA)

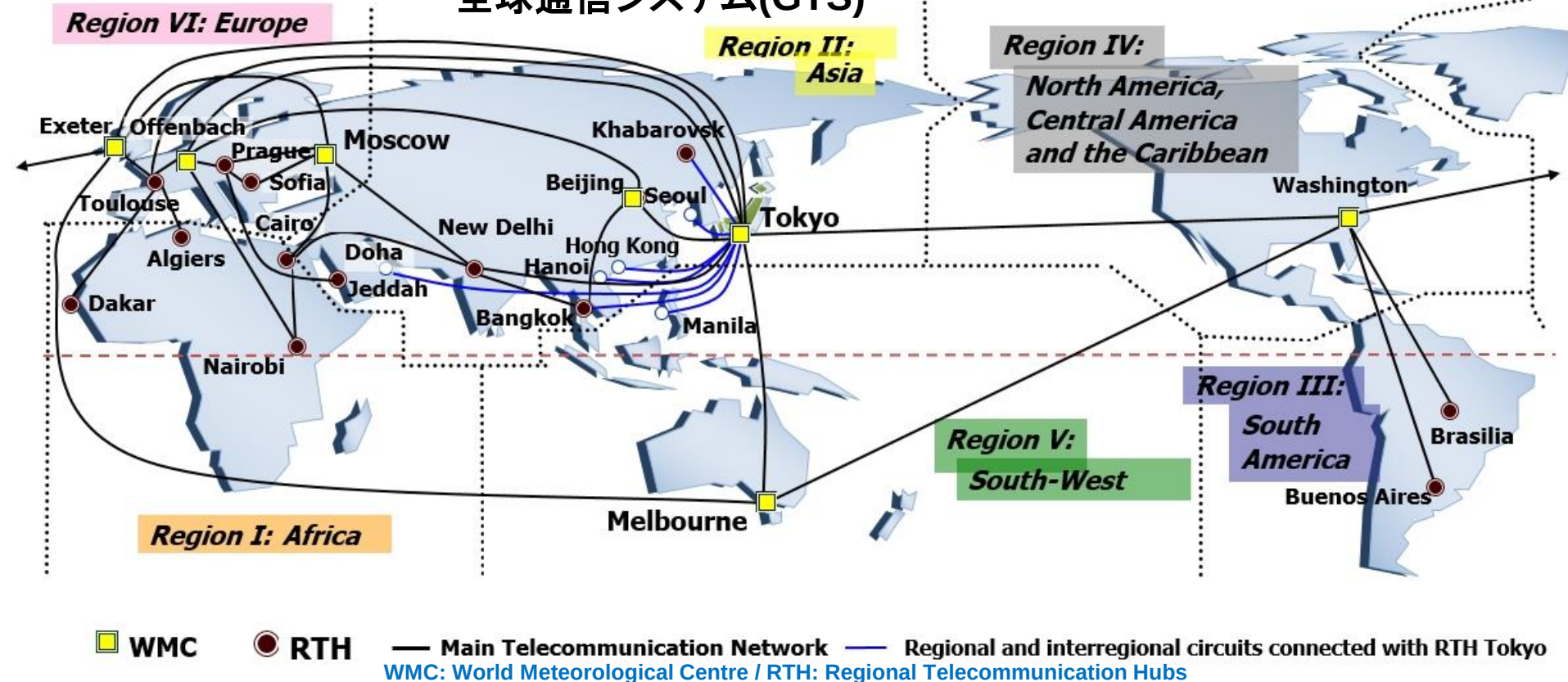


Megha-Tropiques  
(image: © CNES)

低軌道衛星

# 観測データの収集

## 全球通信システム(GTS)



### Schematic overview of Global Telecommunication System (GTS)

[https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rth/RTH\\_Tokyo.html](https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rth/RTH_Tokyo.html)

### 気象には国境がありません

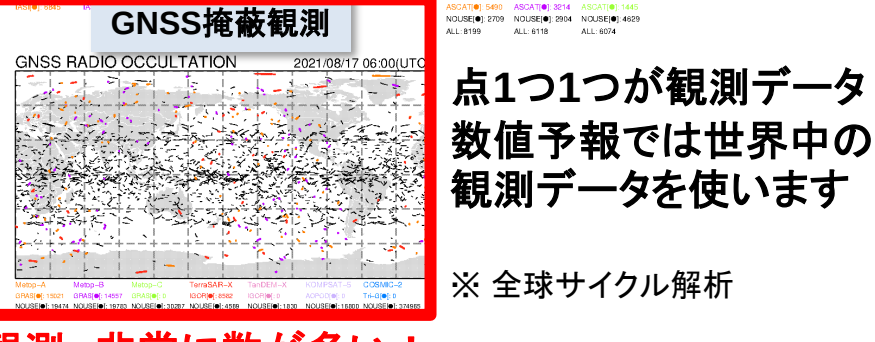
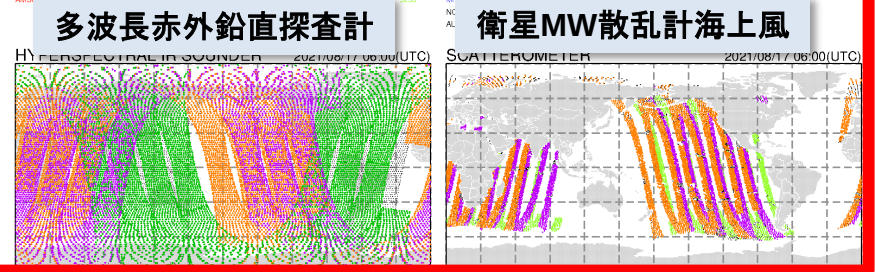
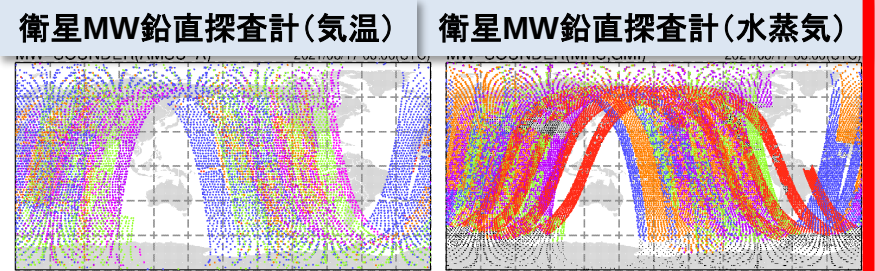
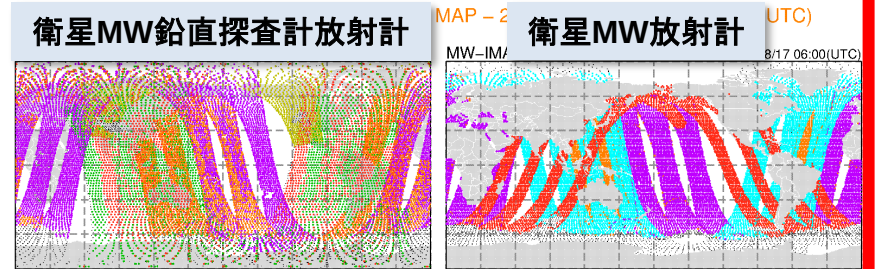
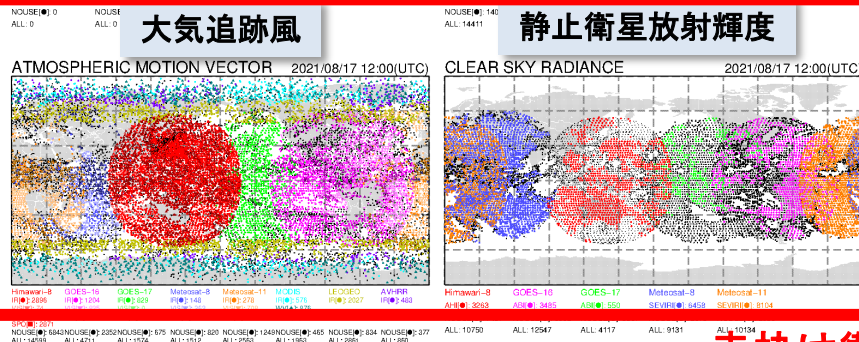
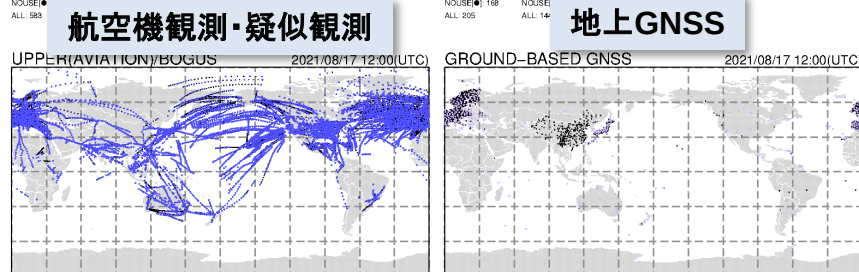
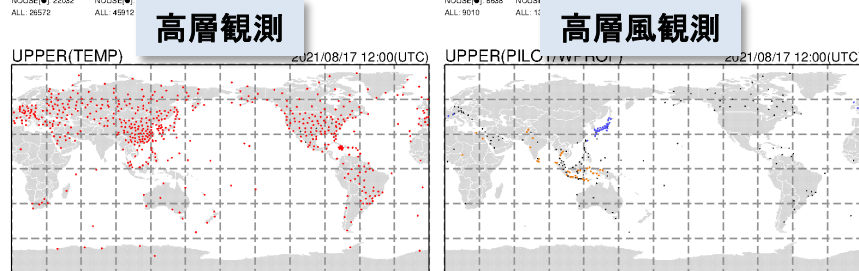
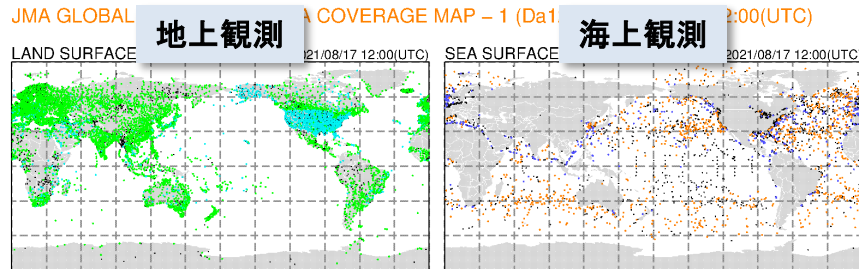
日本付近の天気を予測する為に世界中の観測データが必要となります

気象庁では全世界の観測データを収集し、予測を行っています

観測データは、図のような通信網やインターネットなどを使って収集します



# 観測データの分布の一例



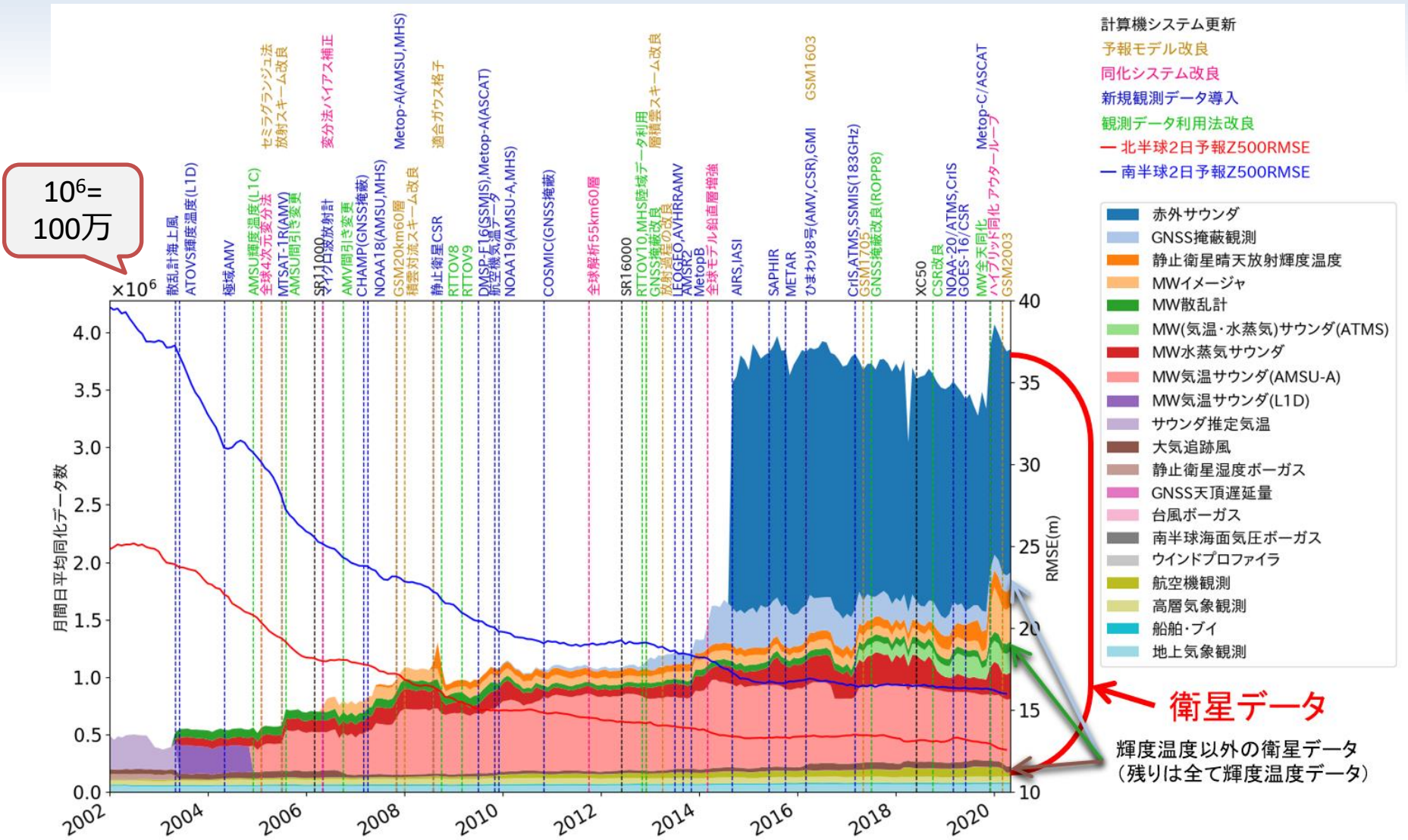
点1つ1つが観測データ  
数値予報では世界中の  
観測データを使います

※ 全球サイクル解析

赤枠は衛星観測。非常に数が多い！



# 全球サイクル解析で利用している観測 データ量とスコアの経年変化（～2020年4月）

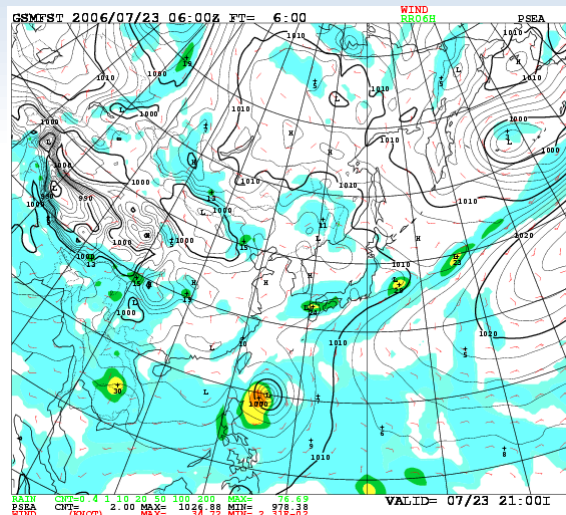




# 初期値の作成

1

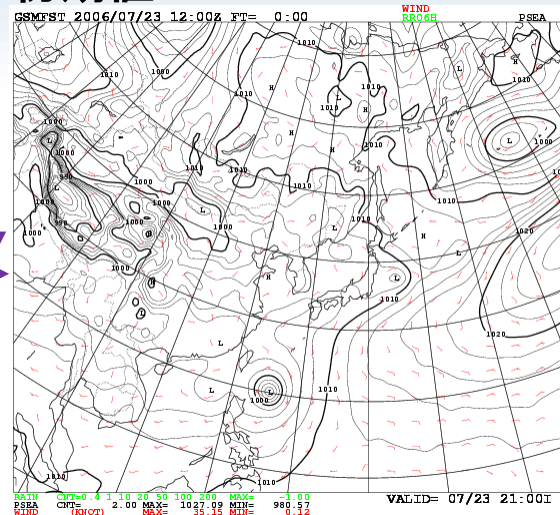
## 前回初期値からの予測値



3

## 初期値の作成

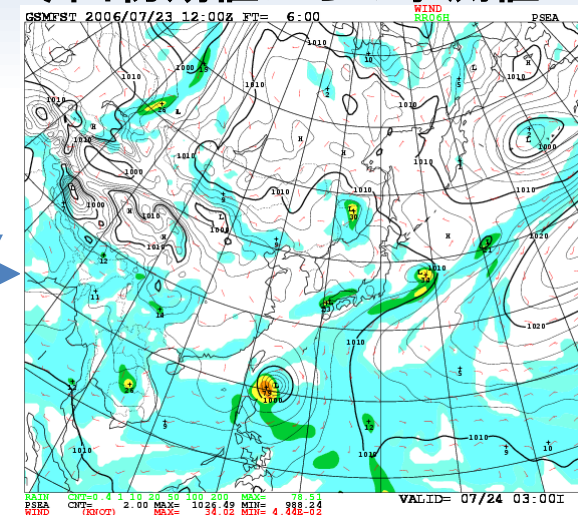
### 初期値



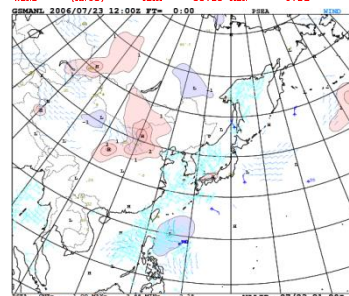
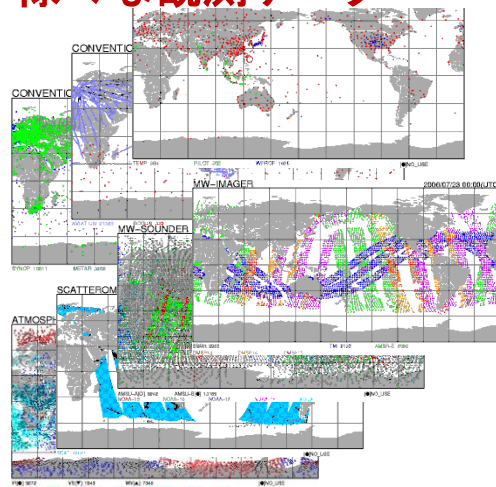
4

## 予測計算

### 今回初期値からの予測値



## 2 様々な観測データ



### 1からの修正量

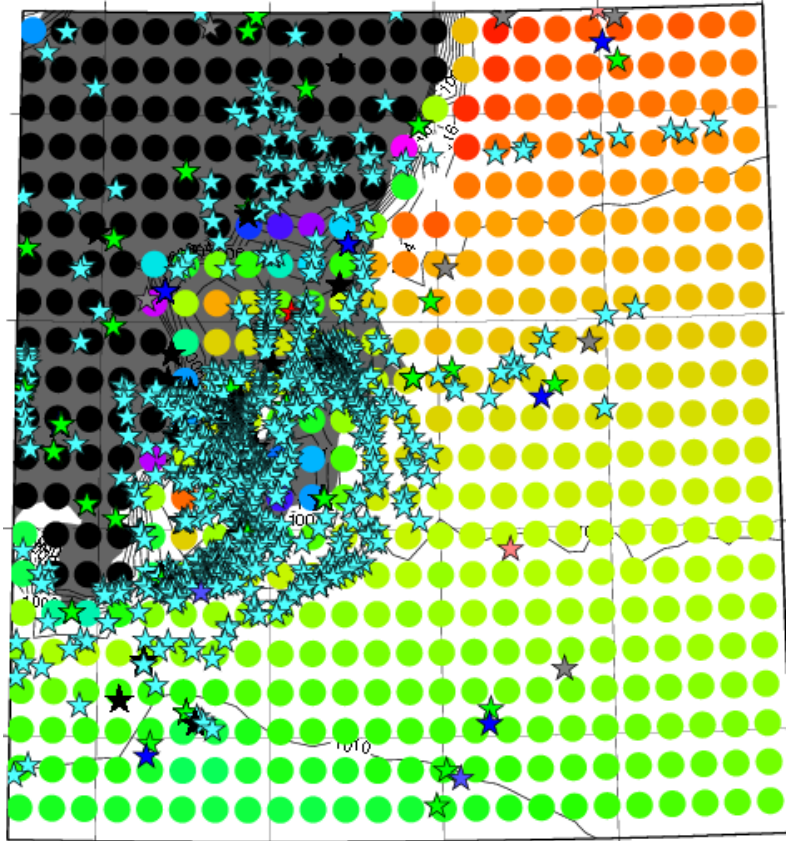
観測データの取得・デコード・品質管理

- 前回初期値からの予測値を観測データによって「修正」
- こうして初期値ができます
- この初期値から予測計算を行うことで今回初期値からの予測値を計算
- 今回初期値からの予測値も、次に初期値を作る時に用いられます

# 「今」の大気の状態（＝初期値）を作る

- 観測データの分布には偏り
- 予測計算のためには規則正しい格子で「今」の大気の数値が必要  
→その時点で得られるもっとも確からしい格子での値を観測データで修正

格子点(○)と入電した観測データ(☆)の例  
(観測データは格子点に比べるとまばら.....)

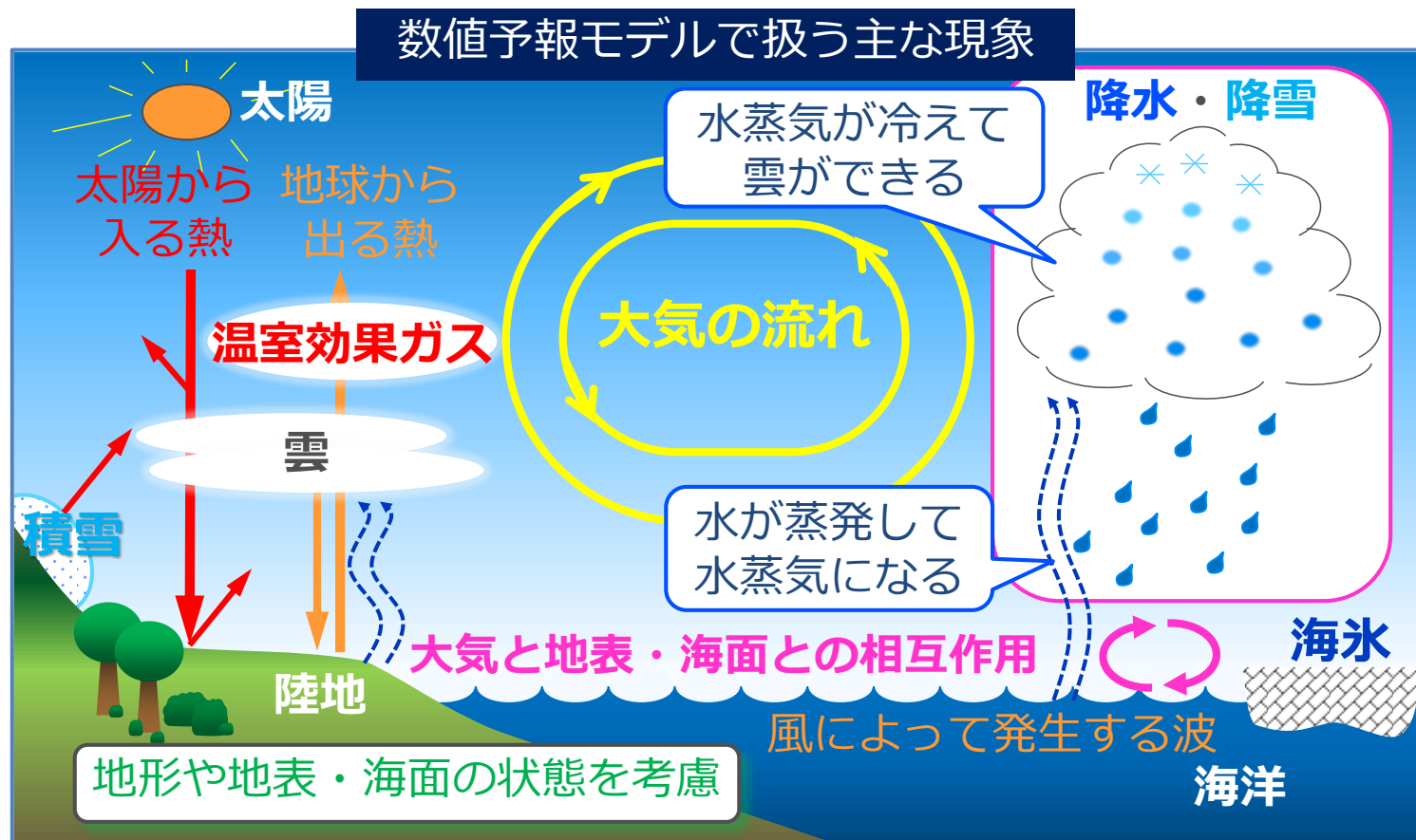


- 「今」の大気の数値を初期値といいます
- 観測データだけで初期値(格子点の数は約1億7000万※)を作ることはできません
- 前回初期値の数値予報結果は全格子点の情報を持っているので、これを「下書き」として使い...
- 観測データ(分布に偏りがある)を利用して前回の数値予報結果(下書き)を修正
- 初期値を精度よく再現することが予報精度向上に決定的に重要

|   | 観測データ          | 前回初期値の数値予報結果            |
|---|----------------|-------------------------|
| ◎ | 基本的には現実を反映している | 全格子・全要素のデータがある          |
| × | 全格子・全要素のデータがない | 観測値と比べると、現実に沿っているか定かでない |

# 数値予報モデルによる予測計算

- 初期値の各気象要素（気温、風、湿度など）から、物理法則に基づいて予測計算を行い、未来の大気の状態を予測します
- 予測計算には様々な方程式を利用している
  - これらの方程式をあわせて「**基礎方程式**」と言います



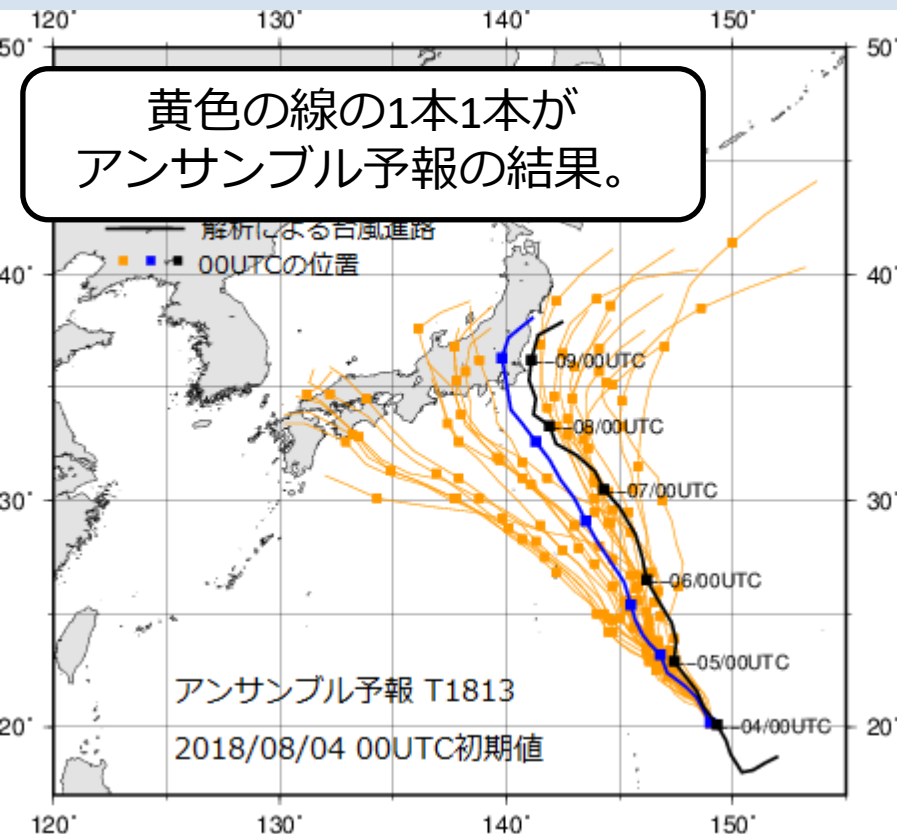


# 数値予報はなぜ外れる？

- 天気予報を見ていてわかると思いますが、数値予報は残念ながら外れることもあります。様々な要因があると思いますが、大枠としては以下のように分類できます。
  - 初期値解析の問題
    - 予測計算を行う元となる初期値作成では、そもそも観測がない場所の大気状態を正確に与えることは不可能ですし、計算機の性能等の制約から一定間隔の領域を平均的に扱う必要がありますので、そのことでも現実との差が生じます。
      - ※様々な観測や高度な手法を使ってできる限り初期値の差を小さくすることが重要
  - 予測計算の問題
    - 本来であればとても細かい気象の現象を、計算機の性能等の制約から一定範囲で平均的に扱って、予測計算しています。このため計算できる細かさの違いその他から現実との違いが生じます。
      - ※できる限り現実を模倣できるように計算手法を改良していくことが重要
  - 誤差の発展
    - これらの初期値解析の問題と予測計算の問題とで生じる誤差は、最初微小であっても予測計算を進めるに従って指数的に増大します（カオスと言います）。これが予想の誤差となって現れます。

# アンサンブル予報

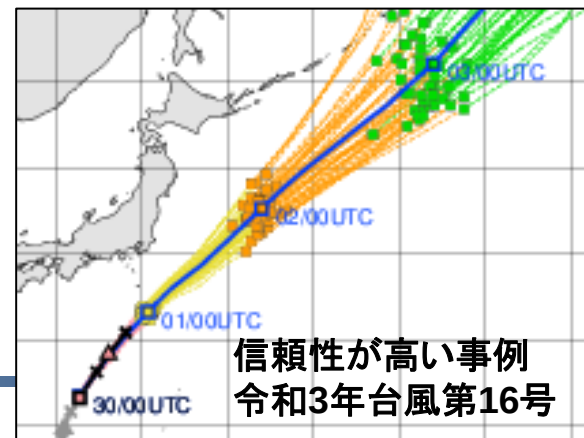
黄色の線の1本1本が  
アンサンブル予報の結果。



## 2018年台風第13号の予測結果

黒線: 実際の台風進路  
青線: 摂動を加えない予測結果  
黄線: 摂動を加えた予測結果

- 残念ながら数値予報は当たらないことも…
  - 原理的に100%当たる予測を行うことは不可能
    - カオスといいます
- このため、「アンサンブル予報」を行います
- アンサンブル予報とは、わずかに違う初期値等をたくさん用意し、予測を行うこと
- 黒線（実際の台風進路）に比べ、青線（摂動を加えない予測結果）は西にズレていますが、黄色の線の広がり範囲内には入っています
- 黄色の線の広がり具合から、予測がどれだけ信頼できるか、というのを評価できます
- 広がり小 → 信頼性が高い
- 広がり大 → 信頼性が低い

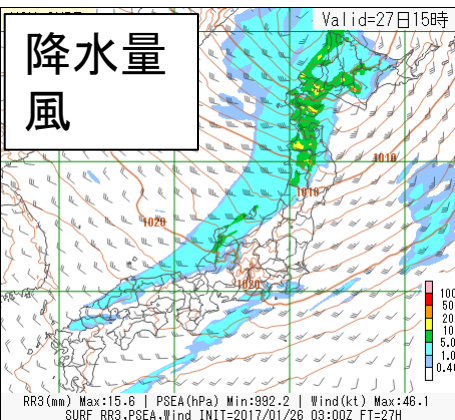


# 予測結果の可視化

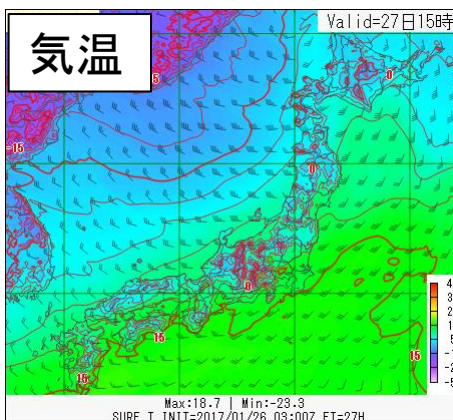
- 多様な気象要素に関する客観的な予測結果を提供
- データは広く社会に提供され、予報現場以外にも様々な場面で利用されている

## 数値予報の予測結果の可視化例

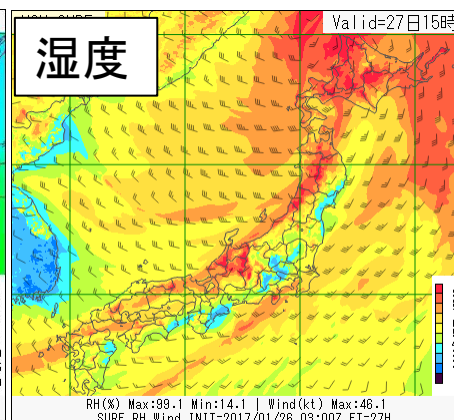
降水量  
風



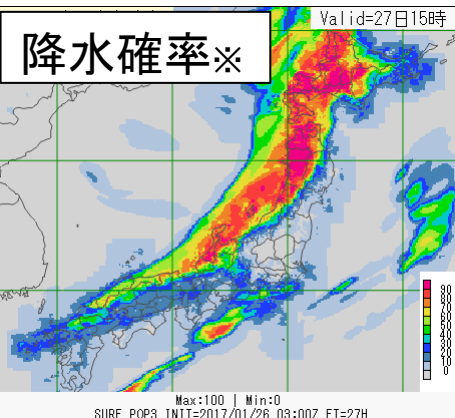
気温



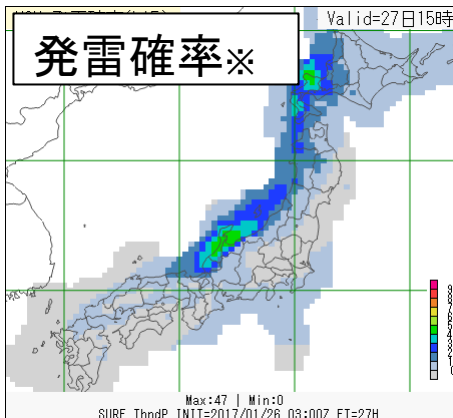
湿度



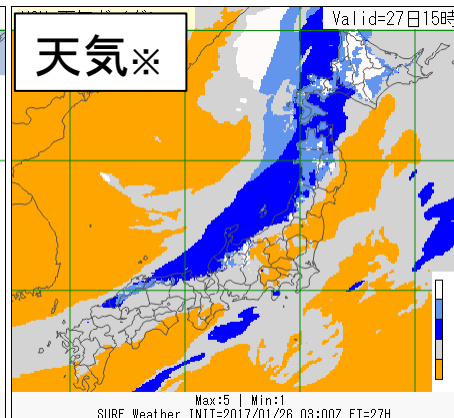
降水確率※



発雷確率※

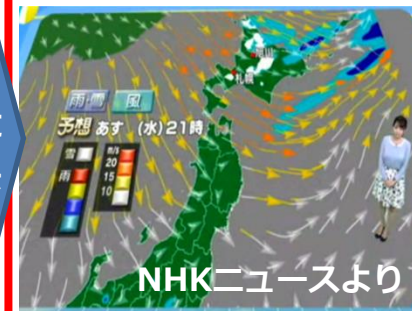


天気※



様々な社会経済  
活動における利用

提供



(例) マスメディアでの利用

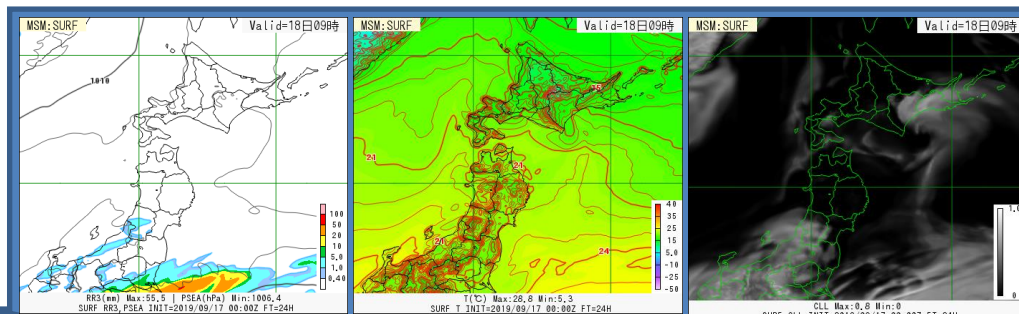
予報現場  
(予報官)





# ガイダンス

- 数値予報で出てくるのは格子上の気象要素の値
  - 必ずしも利用者がほしい情報ではありません
    - 利用者がほしい情報：ある場所の気温・風、天気など...
    - モデルの計算結果には「癖」があり、「癖」を修正すると使いやすい
  - AIによって、要素の翻訳や「癖」の修正をして、情報を得ます

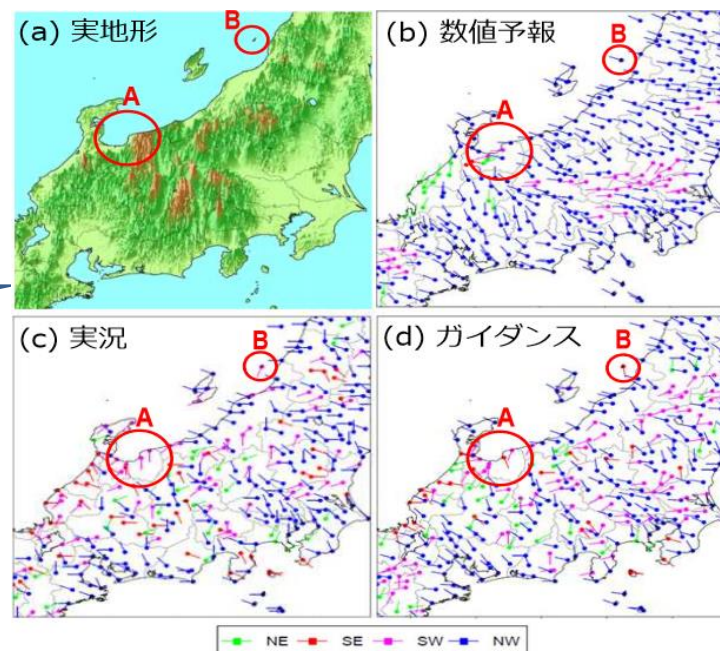
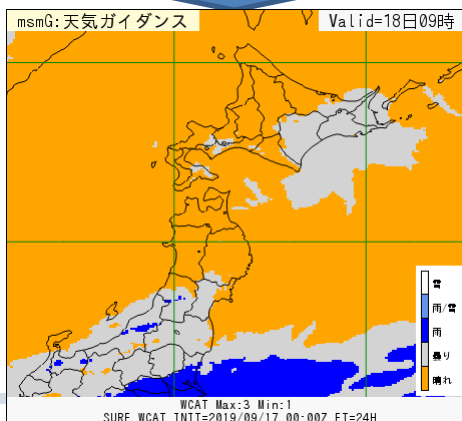


降水量予測

気温予測

雲量予測  
etc...

天気ガイダンス



風ガイダンス

数値予報課報告・別冊第64号より引用

# ここまでのまとめ

- 天気予報や防災気象情報は数値予報を元に作られています
- 数値予報では、スーパーコンピュータを用いて地球のミニチュアを作ります。そして、世界中から様々な観測データを集めて初期値を作り、物理法則に基づいてその時間変化を計算、対象となる時間の大気状態を予測します。
  - 計算結果の不確実性を考慮するため誤差を考慮した複数予報（アンサンブル予報）も実施しています。
  - それらの結果から天気予報や防災気象情報に必要な基礎資料（ガイダンス）を作成しています。

# 数値予報のこれから



# 頻発する自然災害

- 令和2年7月豪雨では特に顕著な大雨となった3日から8日にかけて、線状降水帯が九州で多数発生し、多くの人的被害
- 令和元年東日本台風では東日本の広い範囲における記録的な大雨により大河川を含む多数の河川氾濫等が発生し、甚大な災害
- 線状降水帯の発生・停滞等に伴う**集中豪雨の予測精度向上**と**台風の接近**や梅雨前線に伴う広域にわたって**記録的な大雨が発生するような現象に対する予測精度向上**は喫緊の課題となっています
- 防災気象情報の元となる数値予報の予測精度向上が必要です。



- 気象災害の防止・軽減、社会経済活動における生産性向上に資するよう、交通政策審議会気象分科会提言「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」に示された方向性に基づき、防災分野をはじめ社会における情報サービス基盤である数値予報の技術開発を強力かつ着実に推進していくため、「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」を策定する。

## 1. 気象業務を巡る環境認識

### ① 自然災害の変化

- 自然災害の激甚化、気候変動で深刻化のおそれ
- 平成29年7月九州北部豪雨、平成30年7月豪雨など、線状降水帯を伴う豪雨が頻発
- 伊勢湾・カスリーン級の台風が襲来した場合、長期間の都市機能のまひなど深刻な被害が想定される

### ② 社会情勢の急速な変化

- IoTやAIの社会実装が進展、ICT機器が急速に普及
- 少子高齢化社会の到来、それに伴う社会基盤の脆弱化
- 超スマート社会（Society 5.0）や生産性革命の実現に向けて、気象・気候予測へのニーズが増大

### ③ 科学技術の飛躍的發展

- 数値予報を支えるスーパーコンピュータとシミュレーション技術の飛躍的な発展
- 多種多様なセンサによる、地球の観測ビッグデータ時代の到来
- 各国も数値予報研究開発を強化、国際競争や連携が加速

## 2. 数値予報に関する気象庁のビジョン

### 国民一人一人の安全・安心を守り、活力ある社会を実現する数値予報イノベーション

気象・気候予測の根幹である数値予報は、安全・安心で豊かな生活に不可欠な社会基盤

その高度化・精度向上を強力に推し進めて、防災をはじめ社会の様々なサービスの充実・発展に直接・効果的に貢献し、国民共有の新たな財産に

## 3. 2030年における重点目標

自然災害や社会情勢の変化と科学技術の発展を踏まえ、ビジョンの実現に向けて重点目標を掲げる

### ① 豪雨防災

集中豪雨発生前に、明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現

### ② 台風防災

大規模災害に備えた広域避難・対応に資する数日先予測の高精度化

### ③ 社会経済活動への貢献

生産・流通計画の最適化等に資する高精度な気象・気候予測を実現

### ④ 温暖化への適応策

「わが町」の地球温暖化予測により、自治体等の適応策策定に貢献

## 4. 技術革新の推進

重点目標の達成に向け、鍵となる技術革新を重点的に推進

### ① 次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用

- 線状降水帯を生み出す湿った空気や、台風を取り巻く大気や海洋について、衛星等の観測ビッグデータを活用し、“地球の現在を的確に捉え”、高精度の予測を可能に

### ② 日本の気象現象を世界最高の精度と解像度でシミュレーション

- 最新のスーパーコンピュータとシミュレーション技術により、熱波・寒波など大規模現象から台風、線状降水帯を構成する積乱雲まで、詳細かつ高精度に“日本の気象現象を予測”

### ③ 確率予測とAI技術の融合による意思決定支援

- 集中豪雨時の避難から地球温暖化の適応策まで、その予測情報に加えて予測の不確実性を利用者に分かりやすく伝えて“意思決定に貢献”

## 5. 開発マネジメントの強化

技術革新の実現には開発マネジメントの強化が必須

### ① 幅広い連携を推進

- 産学官オールジャパンの連携を実現するとともに、国際的連携も強化し、数値予報に関する研究と開発を力強く推進

### ② 開発者の育成と確保

- 世界最先端の科学技術に基づいた開発を実現するため、多様な人材の活躍を推進し、高度専門家や開発リーダーを育成

### ③ 研究・開発の基盤を強化

- スーパーコンピュータ、AI等基盤ソフトウェアなどの研究・開発を支える最先端のハード・ソフトを重点的に強化

## 6. 開発計画

## 最先端の研究・開発基盤（スーパーコンピュータ、AI等ソフトウェア、衛星等の観測基盤、開発指針など）

## 開発指針

- ① プライオリタイゼーション
- ② 実証的根拠に基づく開発
- ③ 開発全体の最適化

目標達成に資する開発を重点化、開発や運用のコストを踏まえて優先順位を設定

実証的根拠と科学的議論を基本とし、共通の評価手法に基づいたシステムティックな開発を実施

基盤ソフトウェア整備や開発環境の確保等により開発全体を最適化・強化し、研究・開発を推進

## ① 豪雨防災

## ○現状と課題

- － 局地モデルでは、線状降水帯の現実的表現がある程度可能。しかし、半日前から時間と場所を絞った予測は困難、かつ不確実性も高い
- － 積乱雲の表現には解像度不足、また高解像度に適した物理過程が必要
- － 初期状態において、水蒸気量や細かい風の精度が不十分

## ⇒開発の方向性

- － キロメートル以下の高解像度局地モデル
- － 集中豪雨の不確実性を捕捉可能なアンサンブル予報システム
- － IoT機器含む、次世代観測による時間的、空間的、観測波長的に高密度な観測ビッグデータを、最新のAI等を活用した最先端の同化技術で活用
- － 集中豪雨のメカニズム研究等、最新の科学的知見の結集

## ③ 社会経済活動への貢献

## ○現状と課題

- － 生産・流通計画の最適化をはじめ、社会経済活動において、半年程度先までの予測を本格的に利用するには精度が不十分
- － 予測対象とする現象に応じて、効率的・効果的に予測する技術が必要

## ⇒開発の方向性

- － 熱波・寒波や海水温、日射量など、様々な気象現象・要素を高精度に予測し、かつ現業的に提供可能な、階層的な地球システムモデルを開発
- － 数か月先の予測に重要な海洋の渦を精緻に表現可能な高解像度海洋モデル
- － 陸面、海洋、海水、エアロゾルなど地球システムのデータ同化の高度化

## ② 台風防災

## ○現状と課題

- － 台風に伴う豪雨・高潮の3日より先の予測には、地球全体から日本周辺の詳細な予測まで幅広いスケールの現象を高精度に取り扱うことが必須
- － 全球モデルでは、特に台風進路の予測精度を飛躍的に向上することが必要
- － 台風周辺の気象場について、初期状態での精度が不十分

## ⇒開発の方向性

- － 全球・領域モデル、高潮等海関連モデル、及びアンサンブル予報等を組み合わせ、最適な階層的モデル・システムの開発
- － 台風の構造をより正確に表現可能な、高解像度全球モデルおよび領域モデル、また、10km以下の解像度により適した、新しい物理過程の開発
- － 衛星データ等の観測ビッグデータを、雲域を含む全ての天候において、かつ高解像度・高頻度に利用
- － モデル内パラメータ最適化、データ品質管理等、開発に最新AI技術を活用

## ④ 温暖化への適応策

## ○現状と課題

- － 国や自治体で必要となるきめ細かな温暖化予測情報の作成には、関係機関と連携し、日本付近の高精度かつ詳細な予測を可能とすることが必要
- － 詳細な予測の基本となる、地球規模の温暖化予測の精度向上が必要

## ⇒開発の方向性

- － 数十年及びそれより先の、温暖化に伴う台風・大雨等極端現象や海水温・海面水位等の変化を予測する大気や海洋の高解像度地域気候モデル
- － 地球規模の温暖化を予測する地球システムモデルの高精度化



# 重点計画実現に向けた重要課題

- 数値予報モデル高解像度化（全球、局地）
  - 数値予報モデルで、特定の現象を精度よく再現するためには、その現象を再現できる分解能が必要
    - ただし分解能を高めるとそれだけ計算量が増える
- 確率的予報（アンサンブル手法）の改善
  - 予測の確率表現を改善するため、初期値やモデルのアンサンブル摂動作成手法などの改善が必要。
- 観測データ利用高度化／同化システム高度化
  - 初期値の解析精度改善するため観測データ利用手法の高度化や、同化システム自体の高度化が必要
  - また新たな観測データの新規利用のための開発なども必要

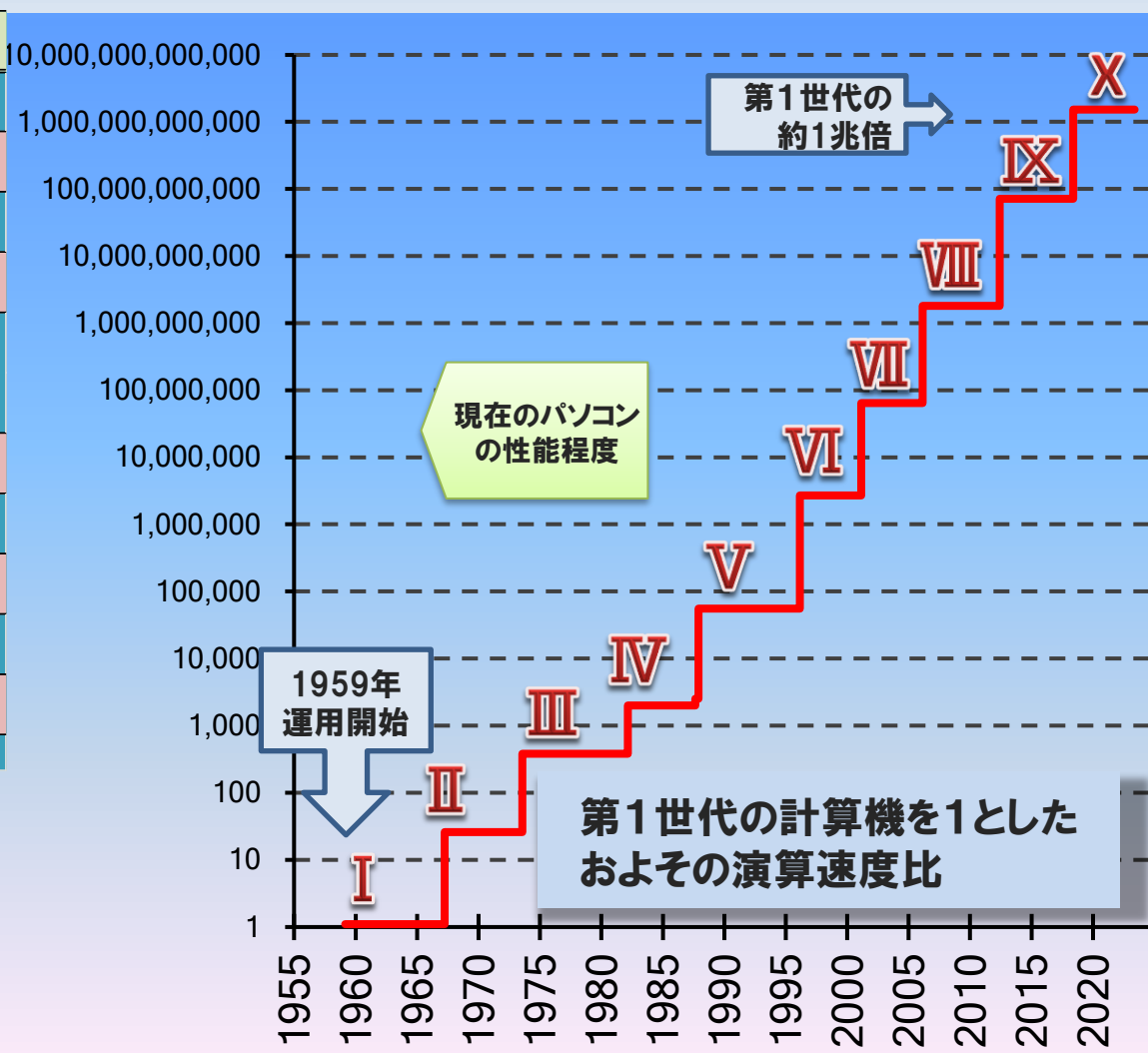
# 数値予報に用いる計算機の変遷

| 世代   | 運用開始年月  | 主計算機                   | 演算速度 (注1)       | 記憶装置 (注2)          | 備考           |
|------|---------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------|
| I    | 1959/3  | IBM 704                | 84 $\mu$ sec    | 8 KW (36bit)       | 運用開始 (本庁)    |
| II   | 1967/4  | HITAC 5020/5020F       | 3.25 $\mu$ sec  | 131 KW (32bit)     |              |
| III  | 1973/8  | HITAC 8700/8800        | 0.22 $\mu$ sec  | 2 MB               |              |
| IV   | 1982/3  | HITAC M-200H (2台)      | 0.084 $\mu$ sec | 16 MB              |              |
| V    | 1987/9  | HITAC M-680            | 30 MIPS         | 32 MB              | COSMETS パッチ系 |
|      | 1987/12 | HITAC S-810/20K        | 630 MFlops      | 64 MB + 512 MB(ES) |              |
| VI   | 1996/3  | HITAC S-3800/480       | 32 GFlops       | 2 GB + 12 GB(ES)   | 清瀬庁舎へ移転      |
| VII  | 2001/3  | HITACHI SR8000E1       | 768 GFlops      | 640 GB             |              |
| VIII | 2006/3  | HITACHI SR11000K1 (2台) | 21.5 TFlops     | 10 TB              |              |
| IX   | 2012/6  | HITACHI SR16000M1 (2台) | 847 TFlops      | 108 TB             |              |
| X    | 2018/6  | Cray XC50 (2台)         | 18PFlops        | 528 TB             |              |

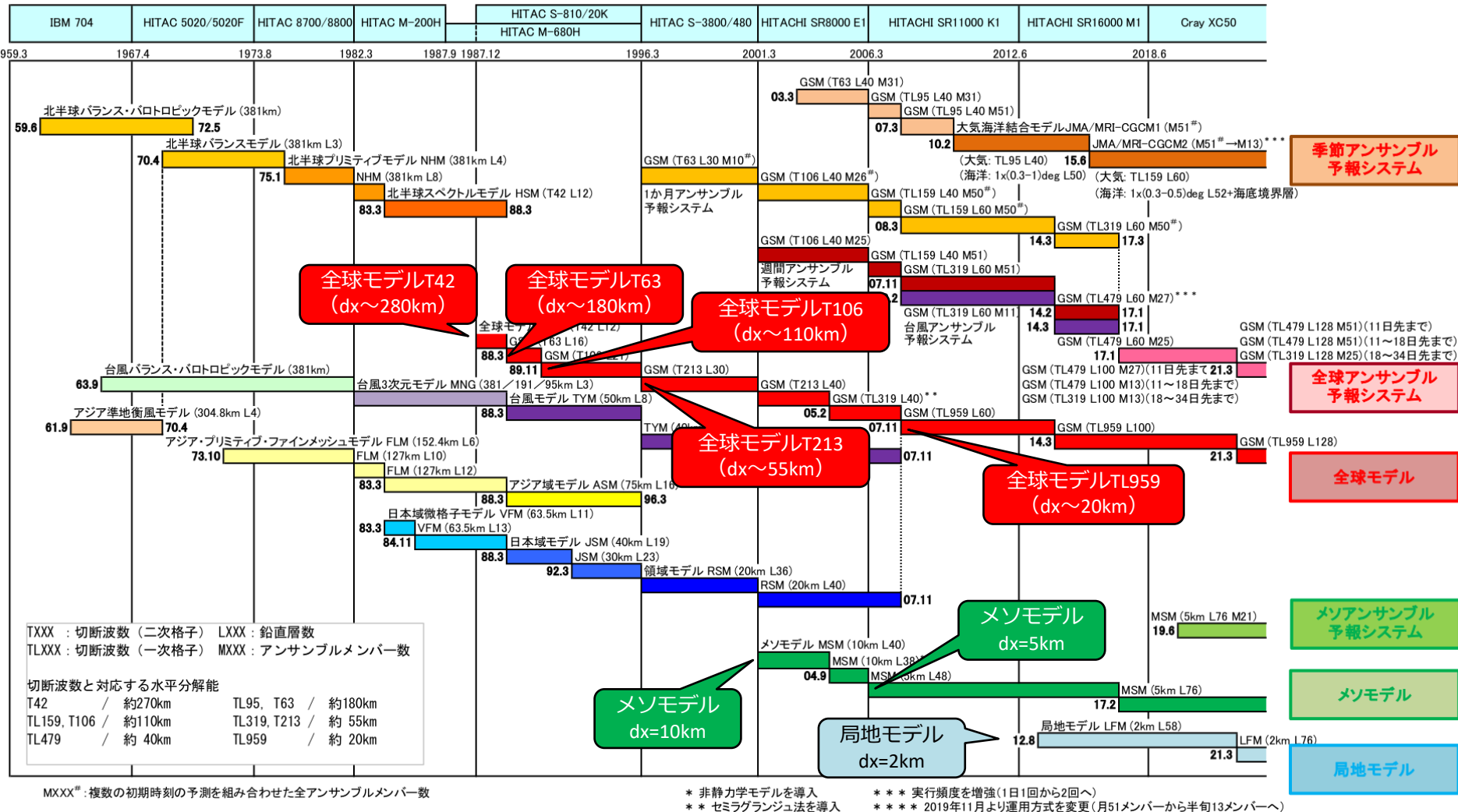
(注1) 演算速度の単位  $\mu$  sec: 加減算演算1回あたり時間、IPS: 1秒間の命令実行回数、Flops: 1秒間の浮動小数点演算回数



現在のスパコン(Cray XC50)



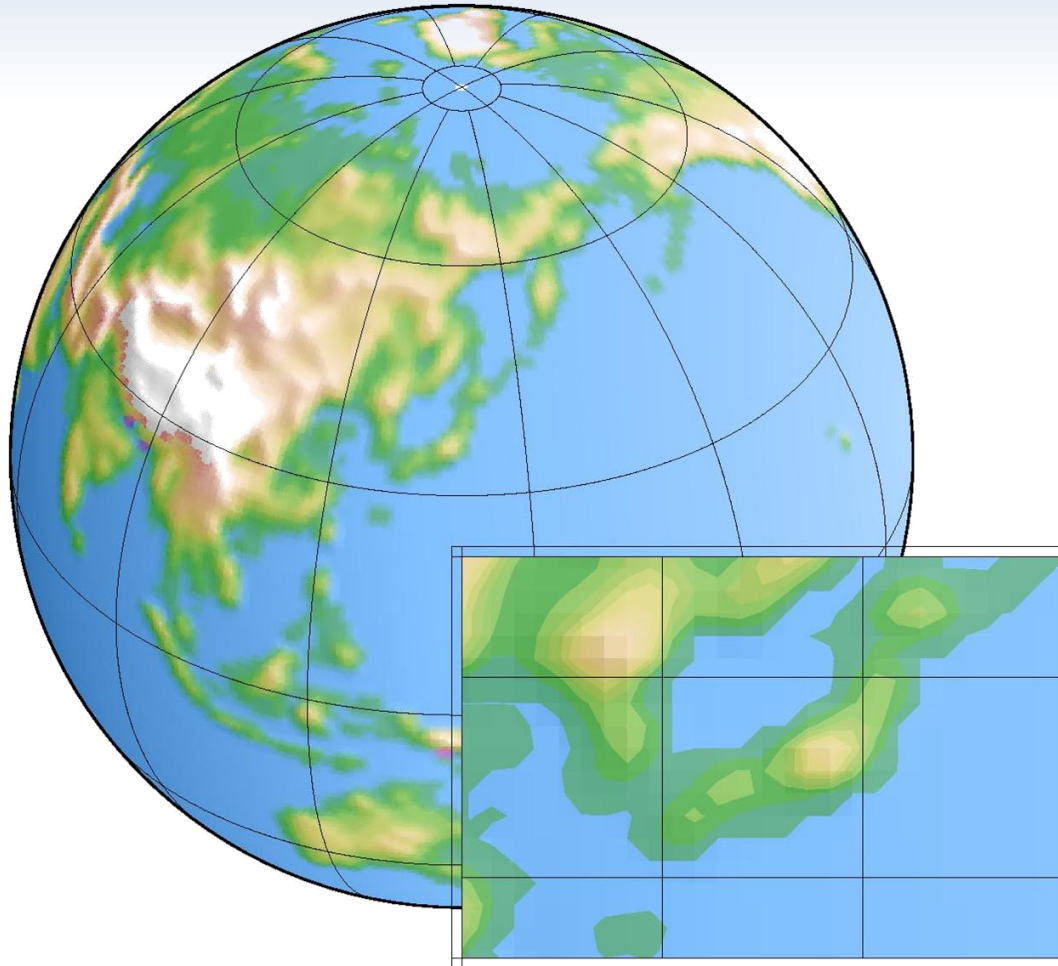
# 気象庁のスーパーコンピュータと 数値予報システムの歴史





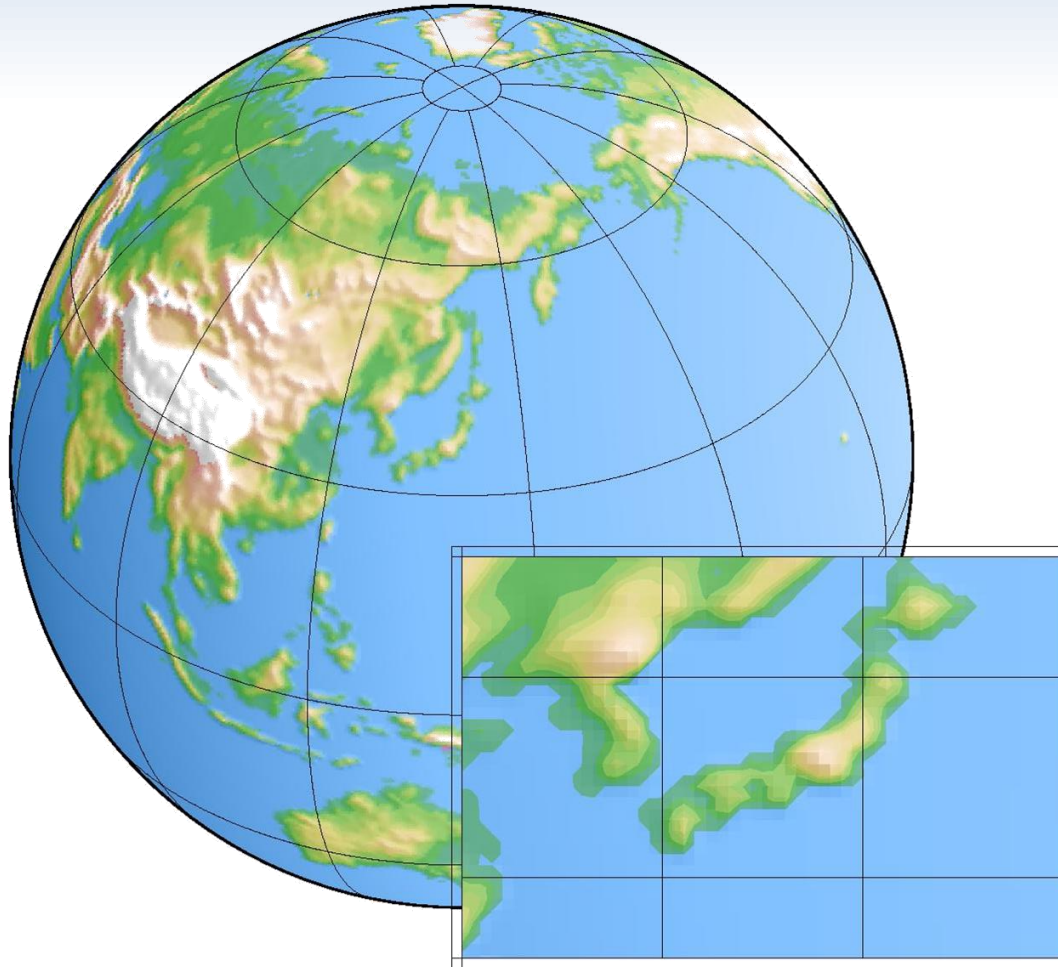
# 全球モデルの地形の変遷

1989-1996 (dx~110km)



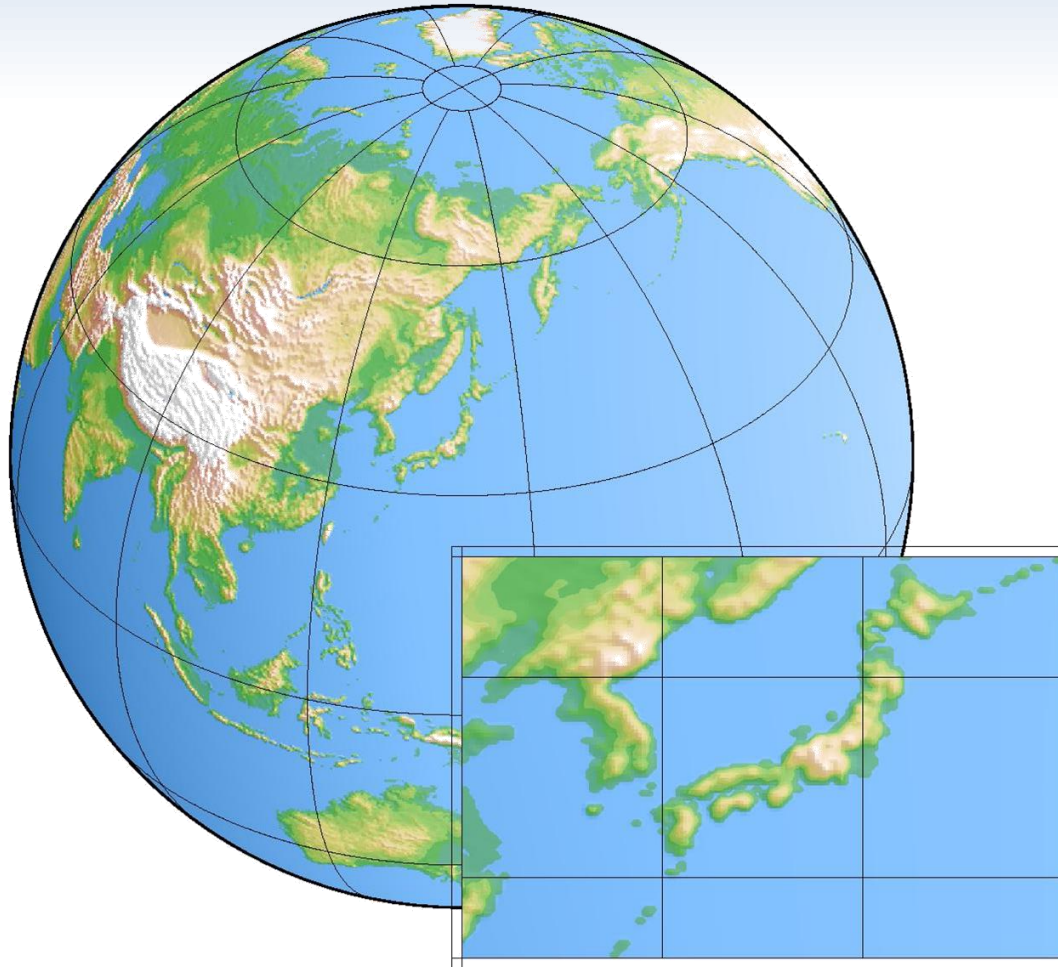
# 全球モデルの地形の変遷

1996-2007 (dx~55km)



# 全球モデルの地形の変遷

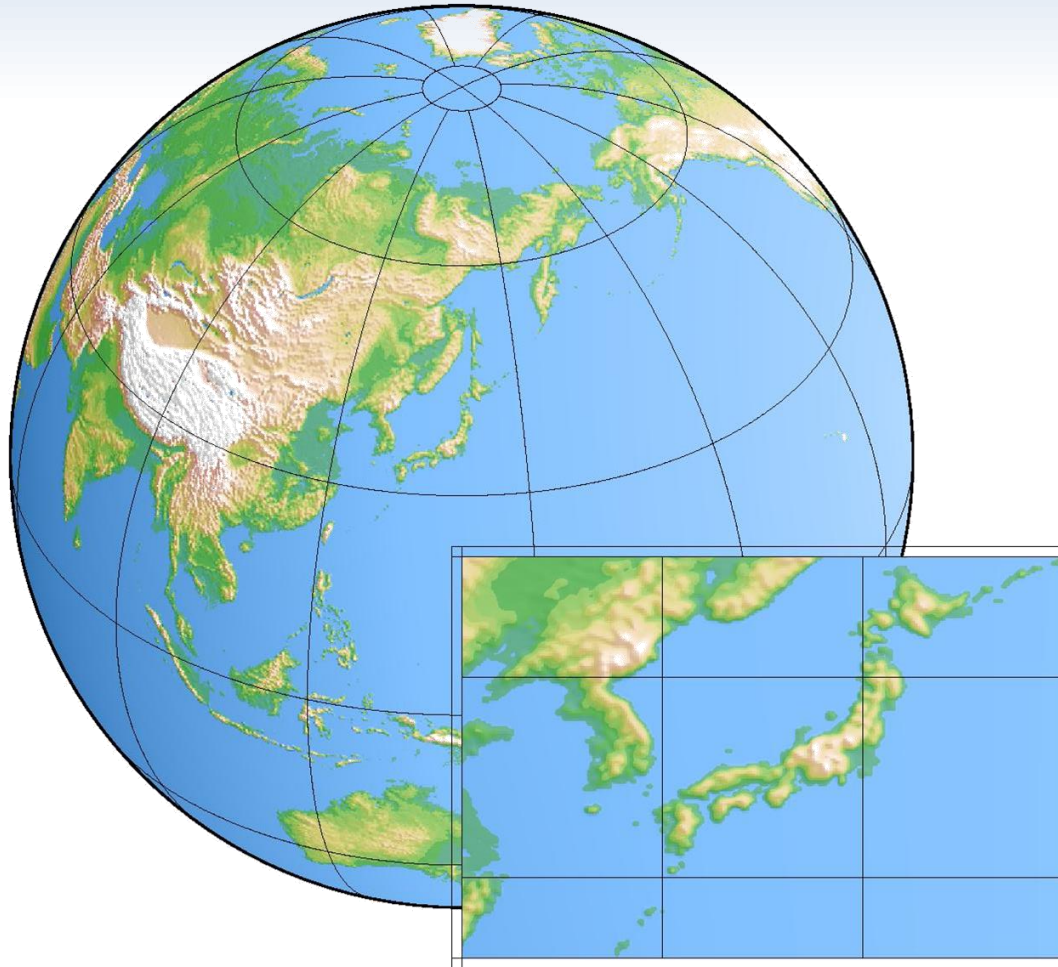
2007-現在 (dx~20km)





# 全球モデルの地形の変遷

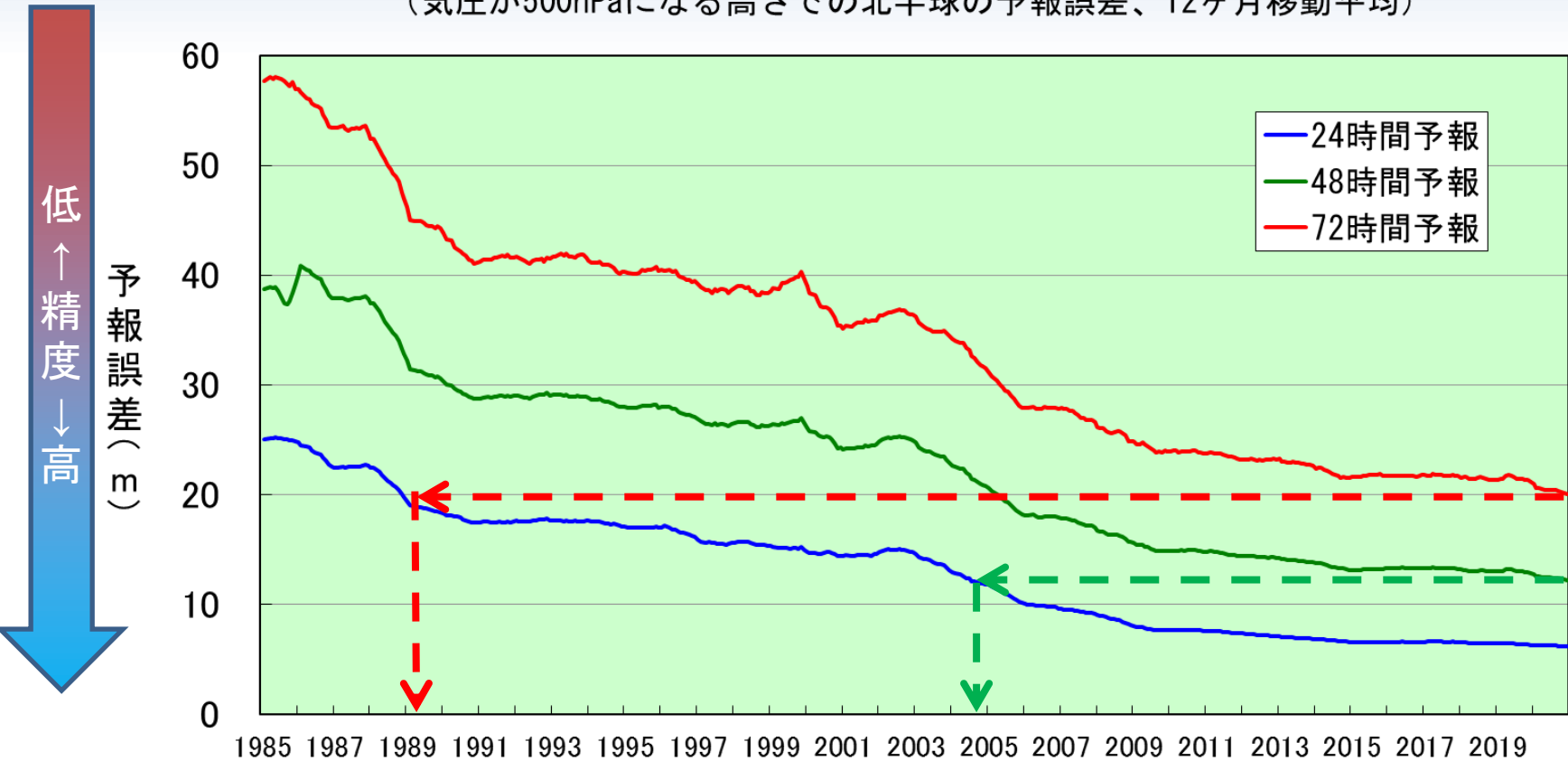
次期計画 (dx~13km)



# 数値予報の精度向上

## 全球モデルの精度

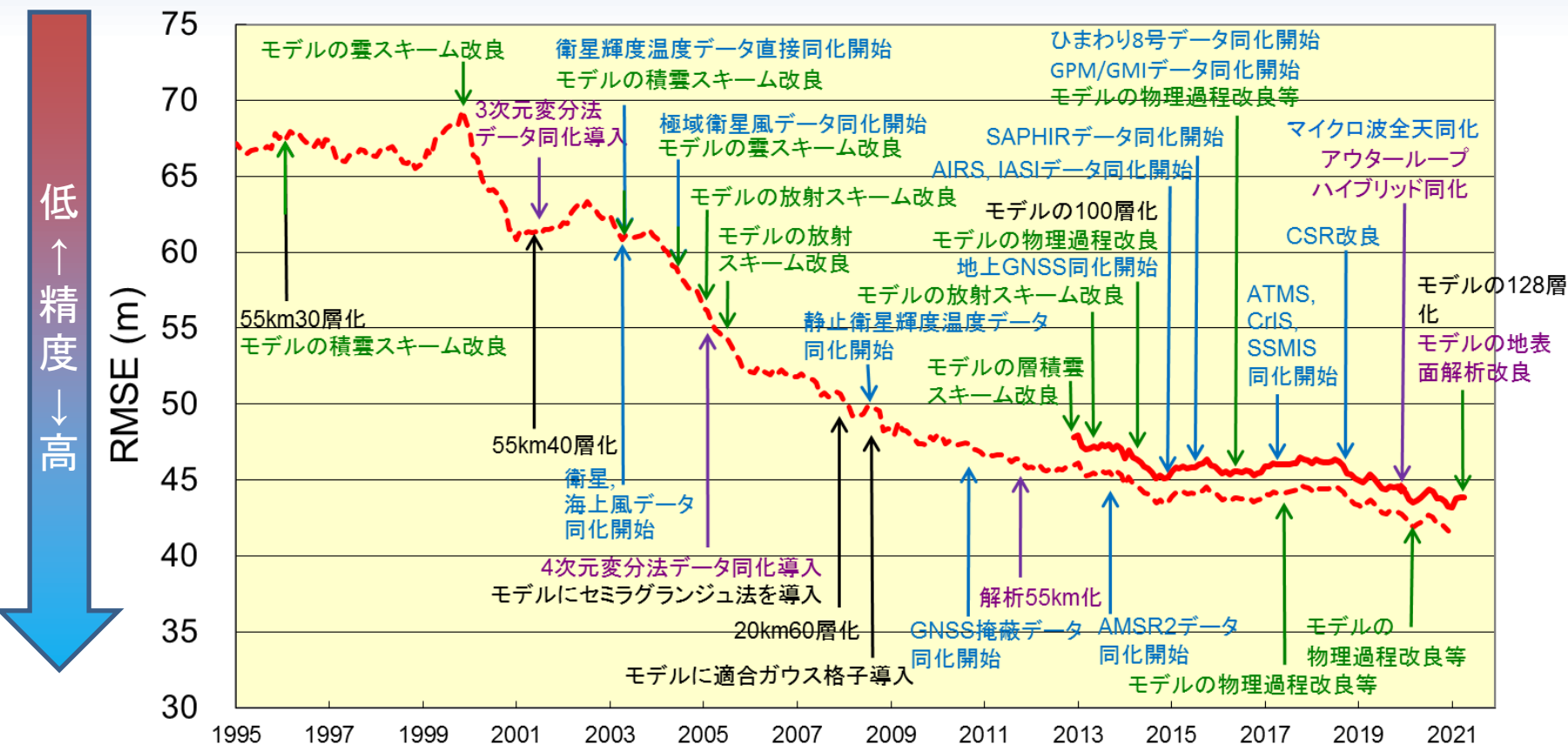
(気圧が500hPaになる高さでの北半球の予報誤差、12ヶ月移動平均)



今の2日予報の精度は2005年頃の明日予報の精度、  
今の3日予報の精度は1990年頃の明日予報の精度

# 数値予報の精度向上

北半球で気圧が500hPaとなる高さの5日予測における誤差の変化  
1995年1月～2021年5月、前12か月移動平均



# 事前質問

- Q: ここ15年ほど数値予報の精度向上ペースは鈍っていると思いますが、その原因をどのように考えているか、これを打破する方法は何かあるのかお聞きしたいです。
  - 前のスライドで示した通り、数値予報予測精度の改善ペースは15年ほど前に比べれば鈍っているがそれでも着実に改善をしており、ここ数年はまた改善傾向が大きくなってきている。
  - 15年ほど前の大幅な改善は、数値予報モデル改善のみならず、初期値作成手法の高精度化（3次元、4次元変分法の導入）と様々な新規衛星観測データの利活用促進が相俟って実現された。
  - 今後の改善についても、数値予報モデルの地道な改善に加えて、初期値の解析精度を改善のための新たな観測データの利活用等が必要と考えている。
    - 次期ひまわりに搭載が検討されている新規測器（赤外サウナ）などは、精度改善に大きな役割を果たしうるのではないかと大変期待している。



# 数値予報のこれから

- 数値予報は計算技術や観測技術の進歩とともに改良が続けられ、今日では予報作業の基礎資料としてなくてはならないものとなっている。
- しかしながら、線状降水帯や台風などの十分な対応準備期間を持った正確な予報にはまだまだ課題がある。また利用者から精度改善の要望も年ごとに高くなってきている。
- 今後は、大学や研究機関の研究者等との連携をさらに進め、計算技術の進歩や観測技術の進歩も踏まえつつ予報精度改善を加速していきたい。

# まとめ

- 数値予報開発センター

- 気象庁では、数値予報の開発を行う「数値予報開発センター」を令和2年10月につくば市に設置、開発を行っている

- 数値予報のしくみ

- 地球大気の状態を各種観測データを元にスパコンで再現、大気シミュレーションをリアルタイムで実施することで将来の大気状態を予測、天気予報の基礎資料に用いている。

- 数値予報のこれから

- 科学技術や計算技術の進展と共にこれまでも改良が続けられてきた。しかしながら、線状降水帯や台風などの十分な対応準備期間を持った正確な予測にはまだまだ課題がある。大学や研究機関の研究者等との連携を進め、精度改善を加速していきたい。

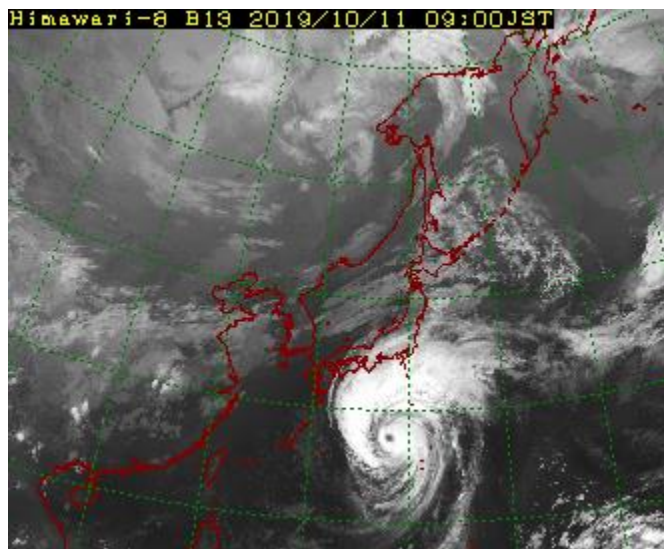


おわり

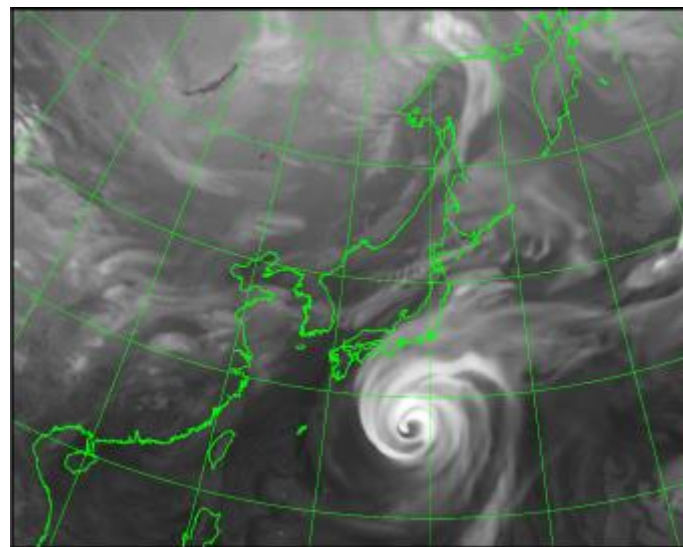
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#1/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月11日09JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値



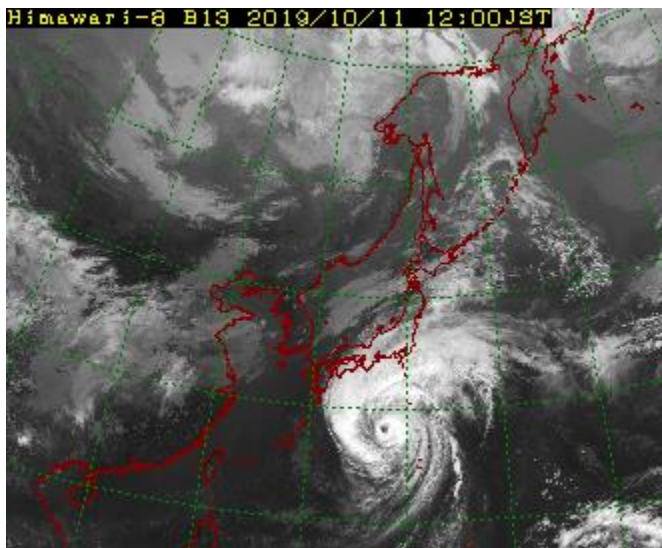
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における初期値解析の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。大きな目で見れば、台風やカムチャツカの西側、中国から延びてくる雲など、実際の分布とよく対応している様子がわかるかと思います。



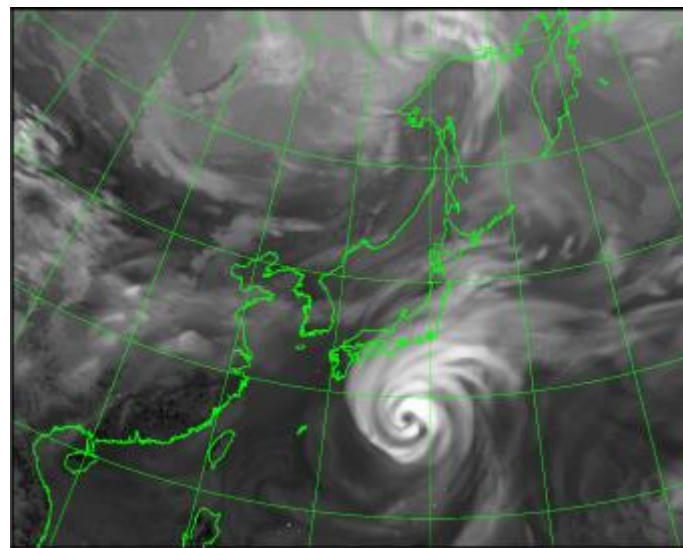
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#2/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月11日12JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
03時間予報

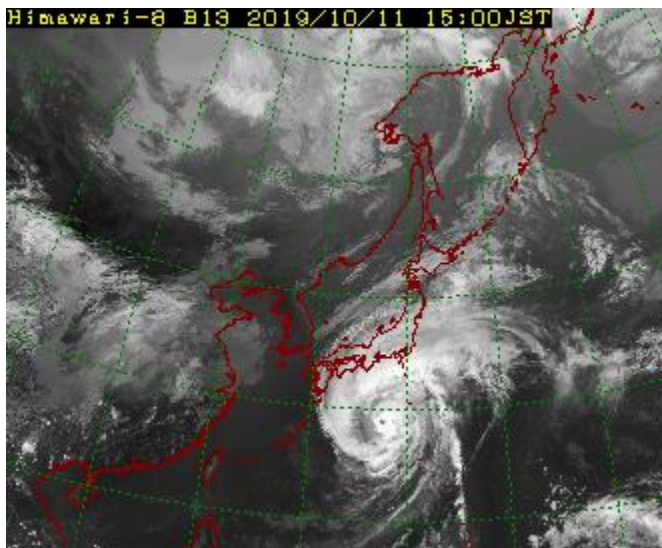


これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における3時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。

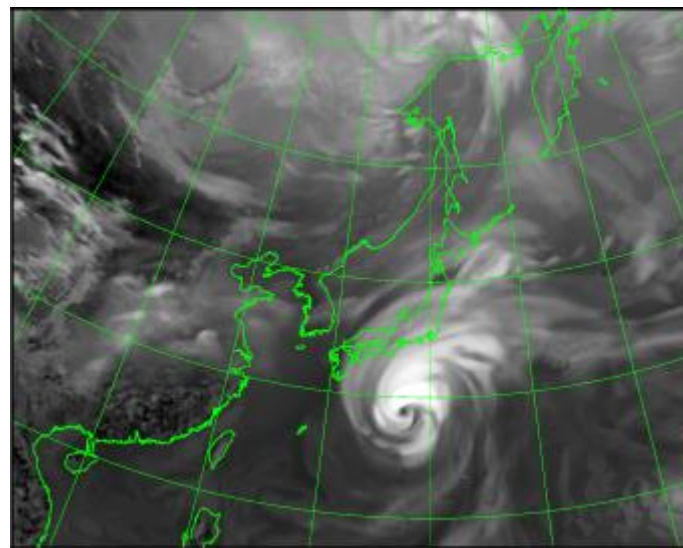
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#3/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月11日15JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
06時間予報

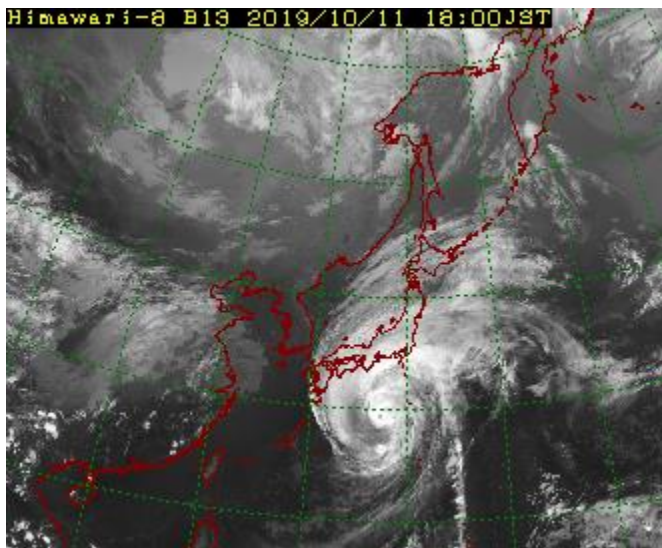


これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における6時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。

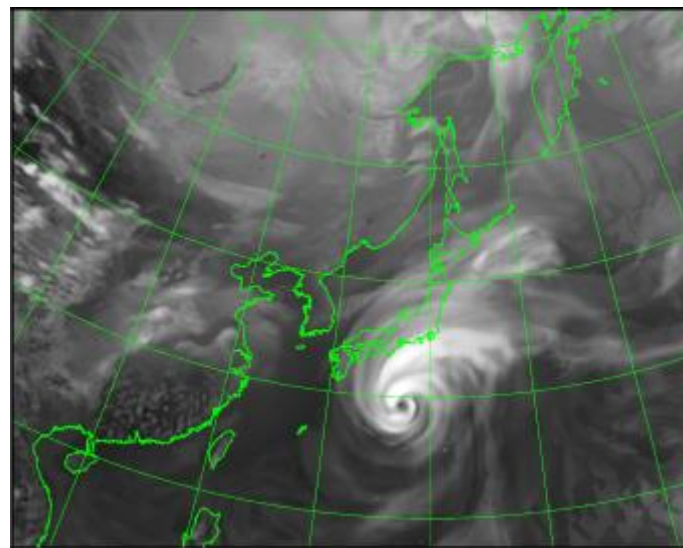
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#4/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月11日18JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
09時間予報



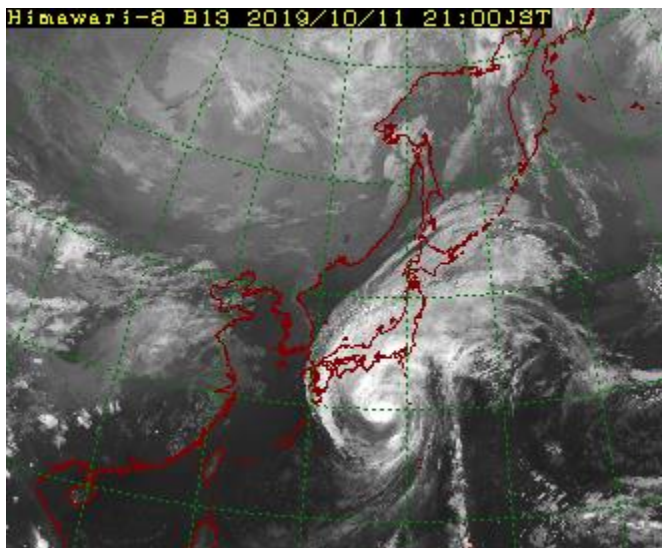
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における9時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。



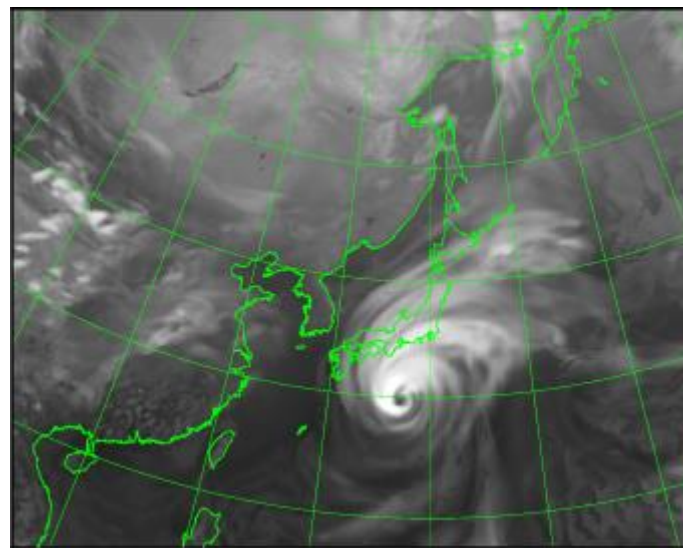
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#5/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月11日21JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
12時間予報



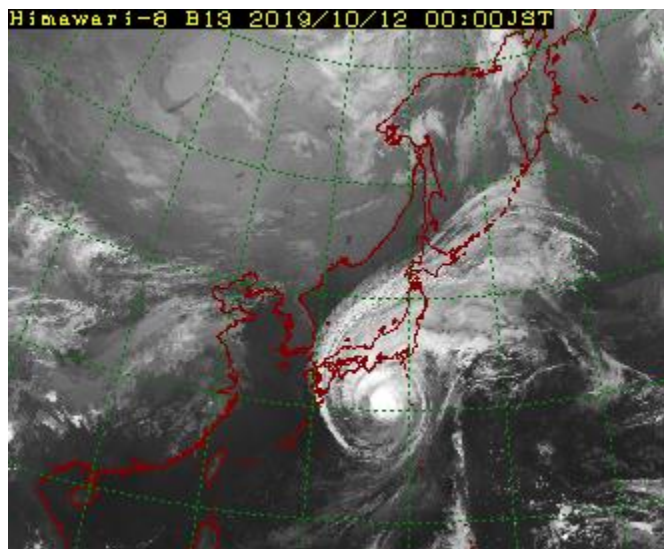
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における12時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。



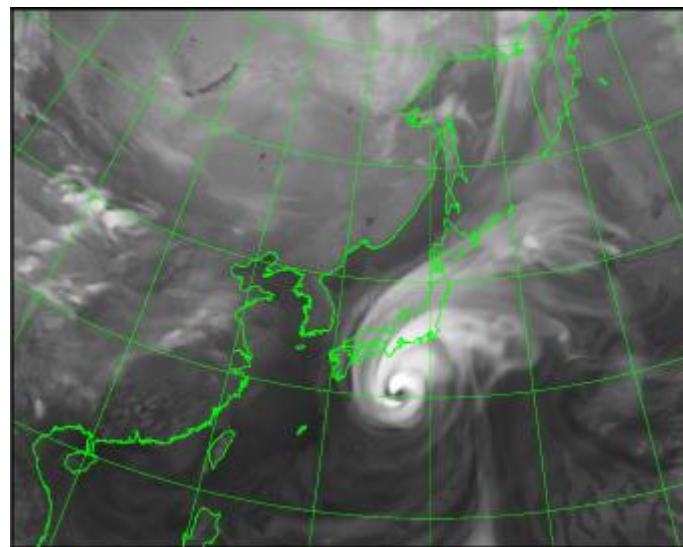
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#6/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月12日00JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
15時間予報

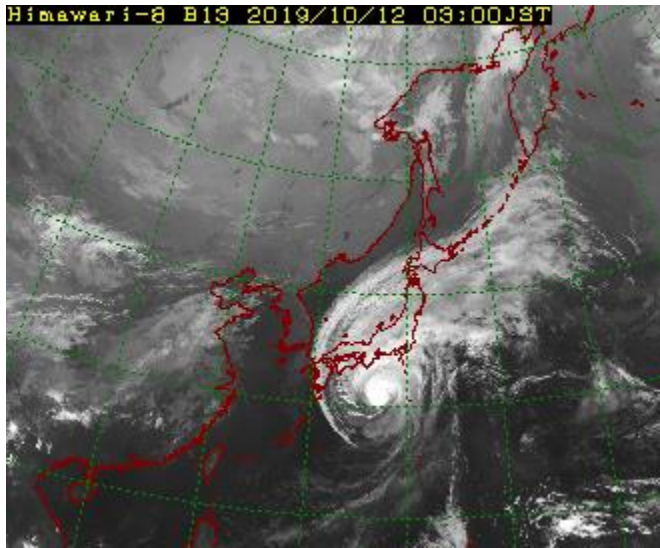


これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における15時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。

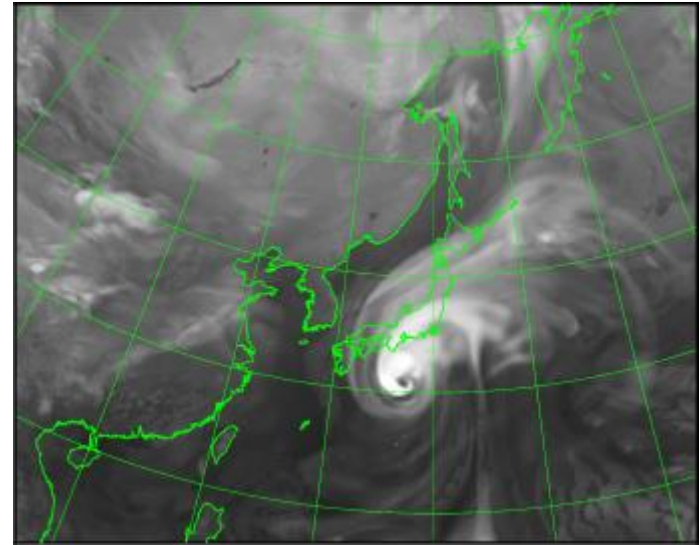
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#7/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月12日03JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
18時間予報

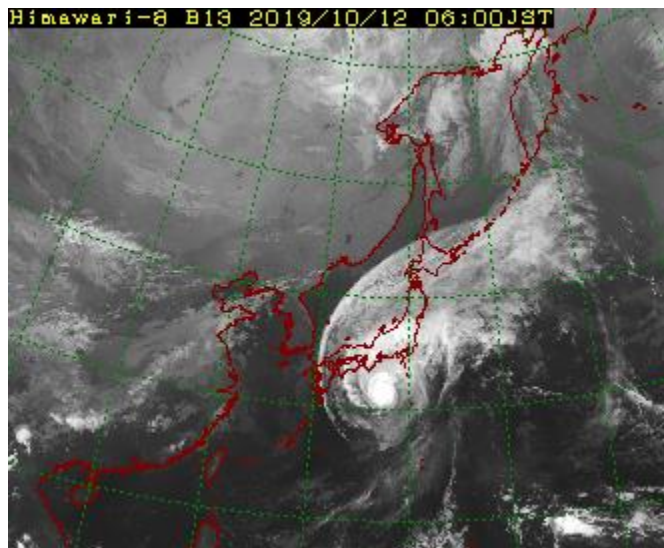


これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における18時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。

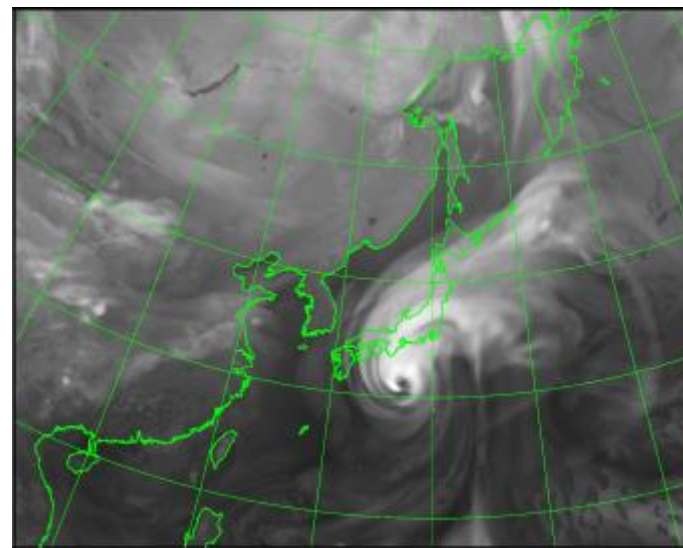
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#8/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月12日06JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
21時間予報



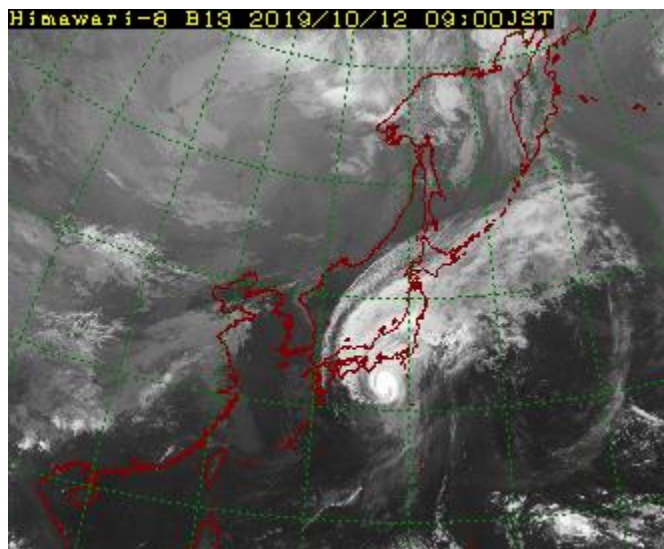
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における21時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。



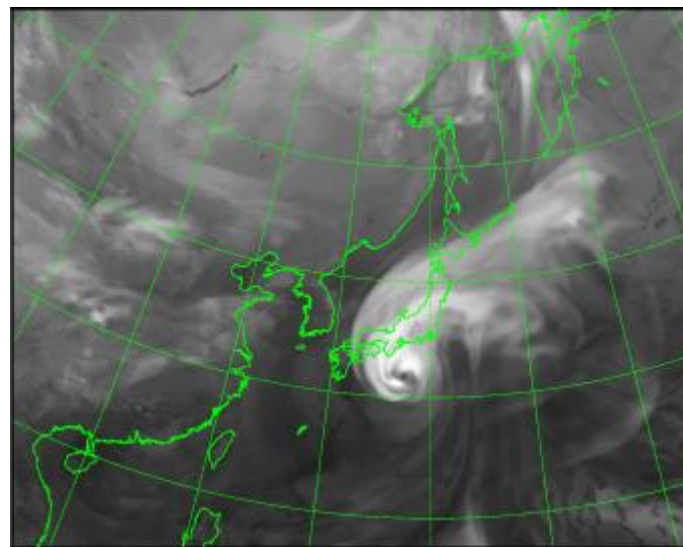
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#9/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月12日09JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
24時間予報



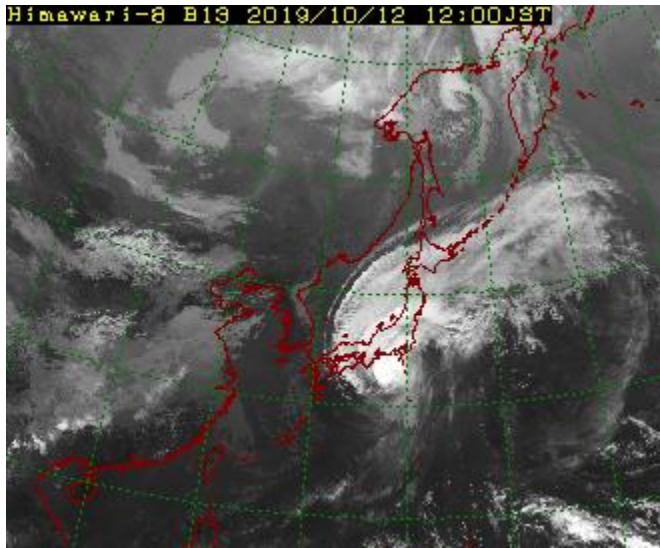
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における24時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。



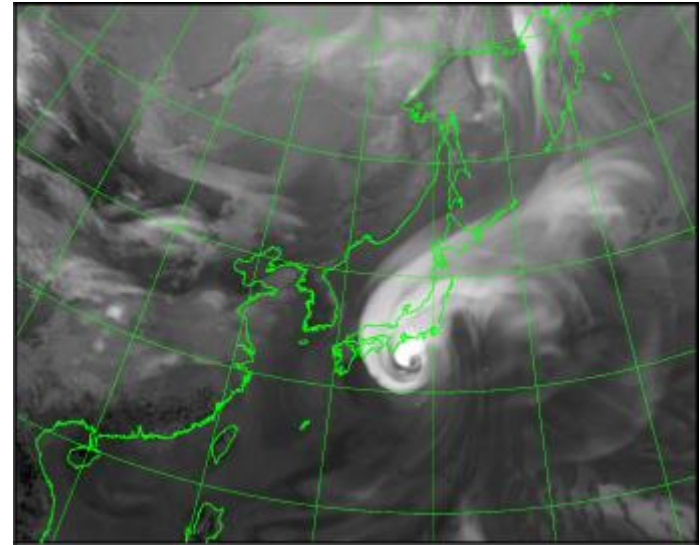
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#10/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月12日12JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
27時間予報

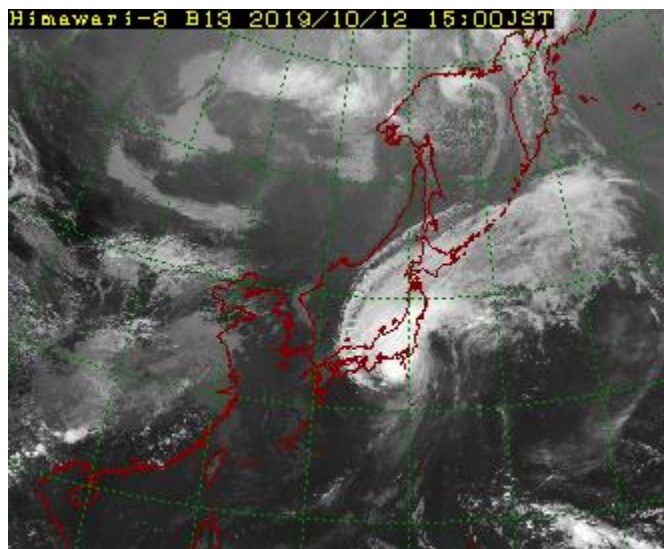


これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における27時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。

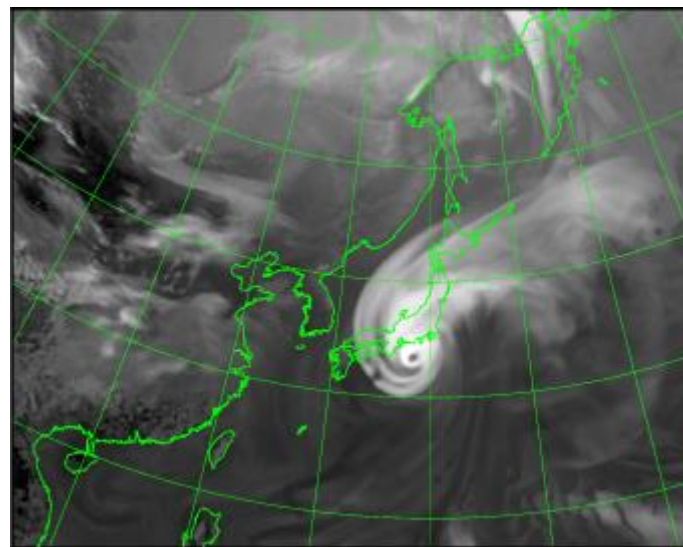
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#11/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月12日15JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
30時間予報

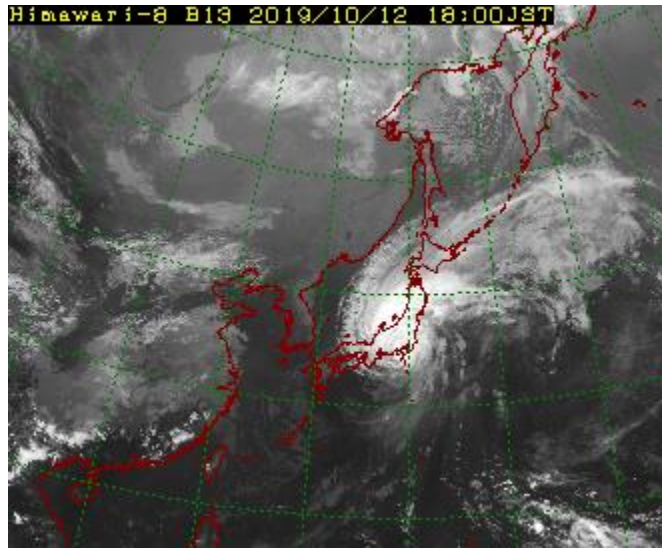


これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における30時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。

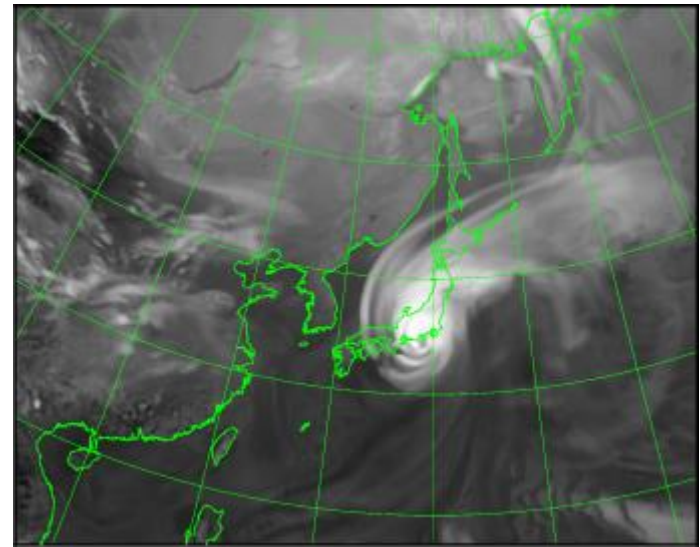
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#12/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月12日18JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
33時間予報



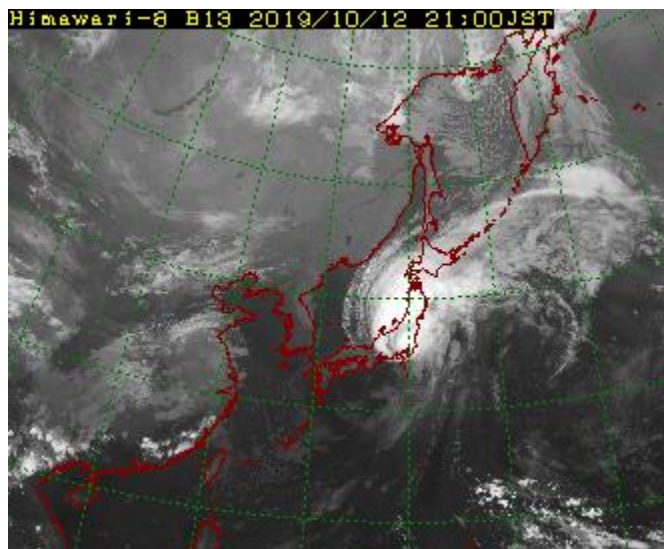
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における33時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。



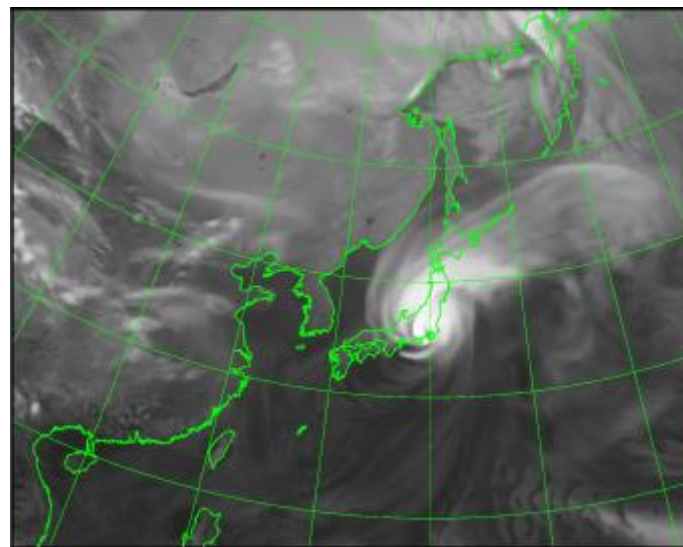
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#13/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月12日21JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
36時間予報



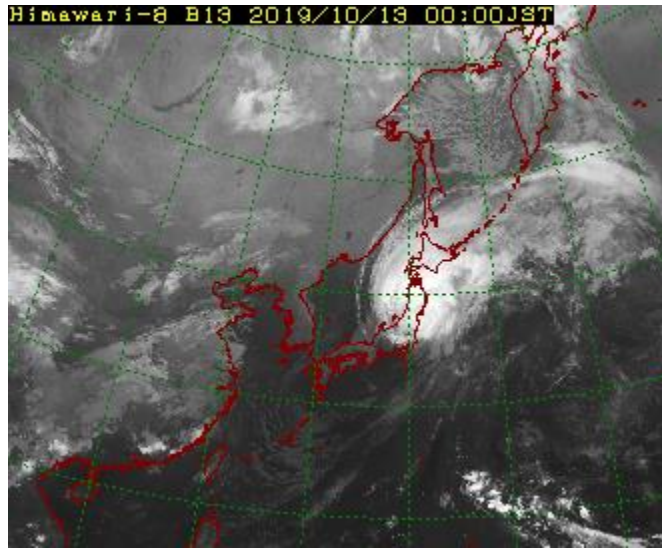
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における36時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。



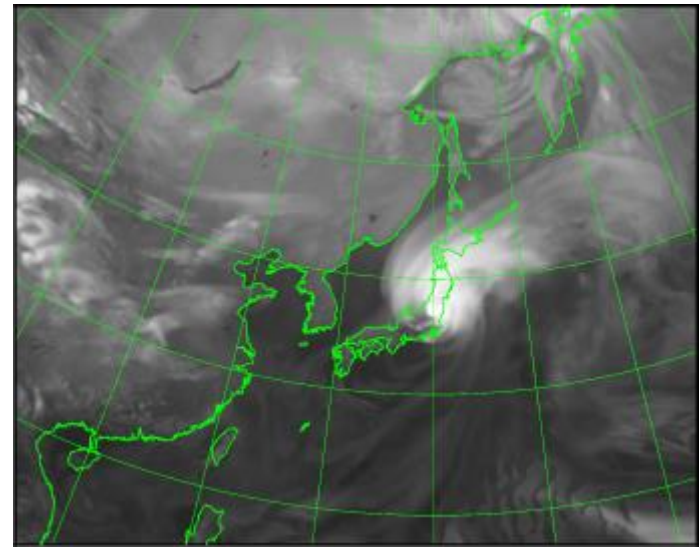
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#14/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月13日00JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
39時間予報

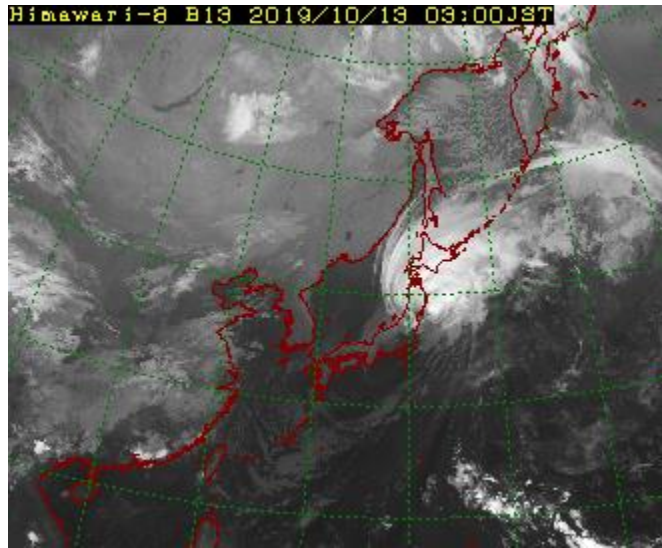


これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における39時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。

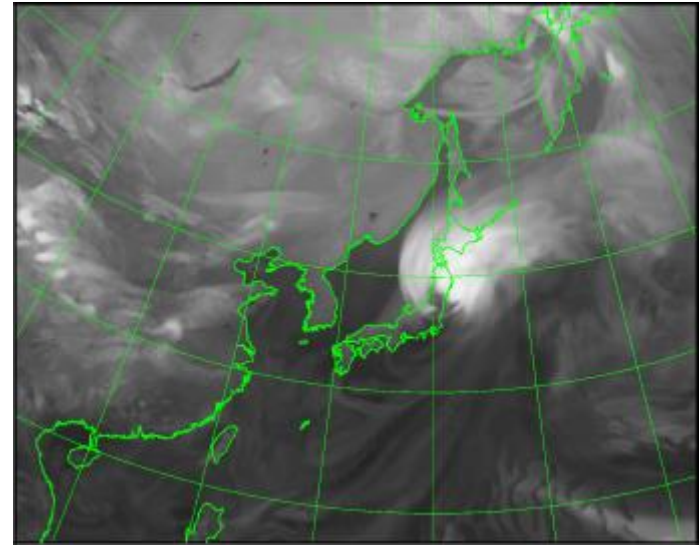
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#15/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月13日03JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
42時間予報

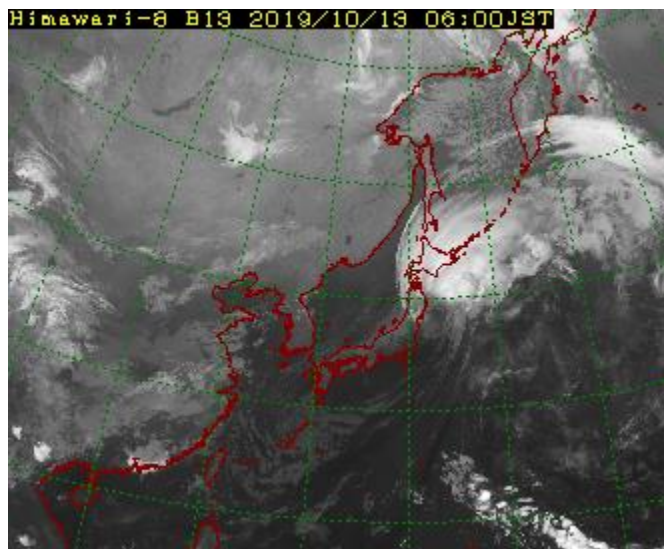


これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における42時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。

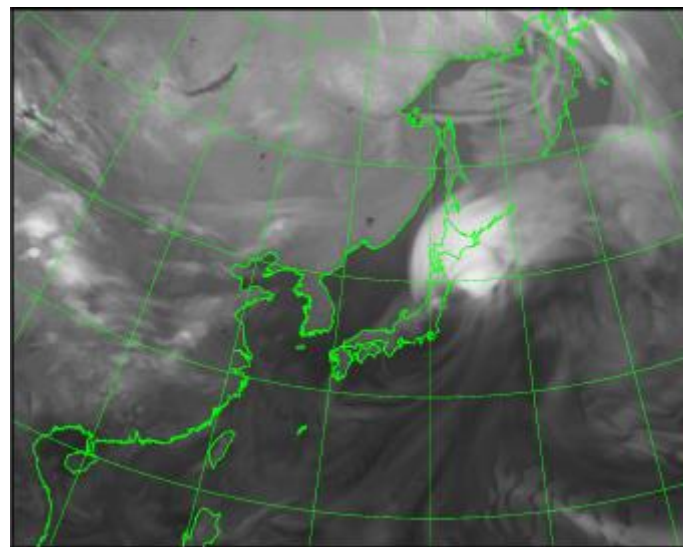
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#16/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月13日06JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
45時間予報



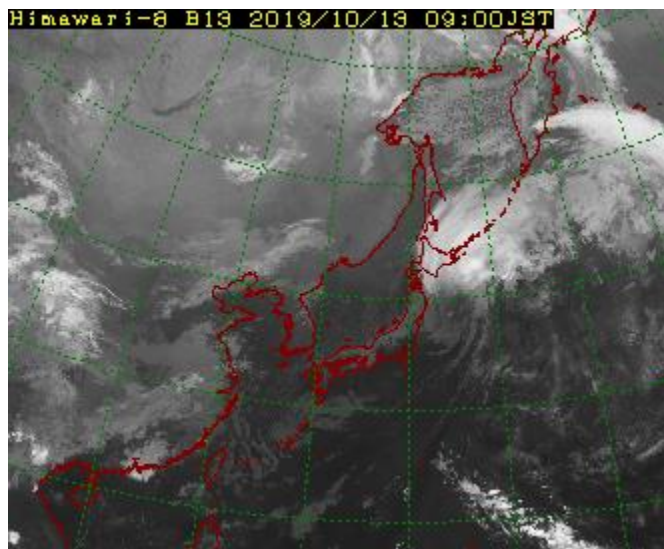
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における45時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。



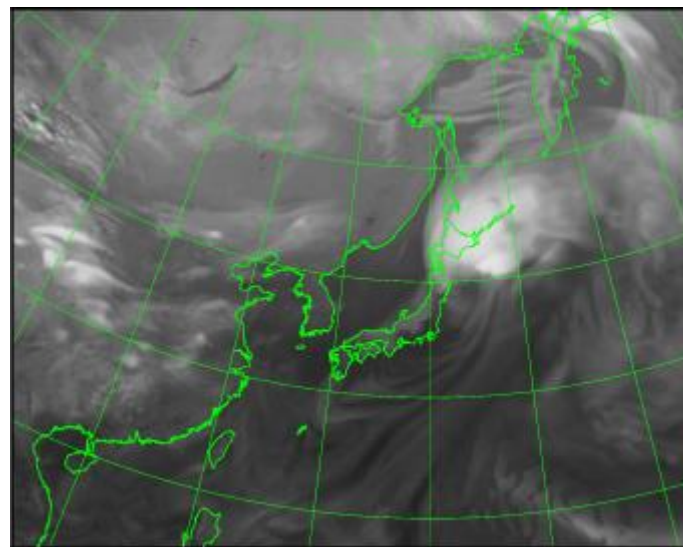
# 令和元年東日本台風

## 衛星画像とシミュレーション (#17/17)

ひまわり8号赤外画像  
2019年10月13日09JST



全球モデル予想衛星画像  
2019年10月11日09JST初期値  
48時間予報



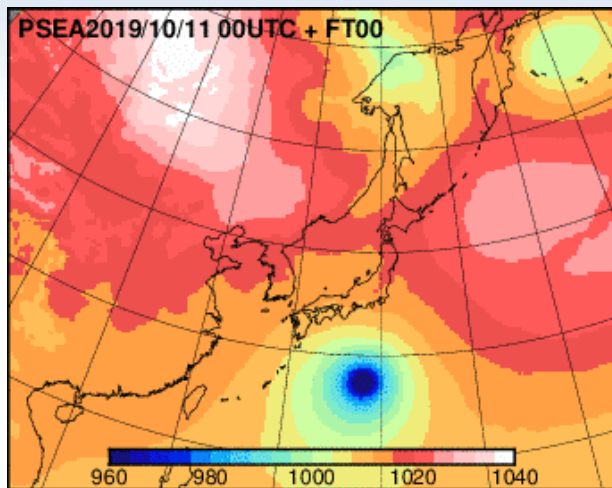
これは、実際にひまわりで観測された衛星観測雲画像と、数値予報における48時間予測の結果をもとに衛星観測をシミュレーションした画像の比較です。2日後の予報でも、台風のみならずカムチャツカ付近や中国の雲が精度よく再現できていることがわかんと思います。



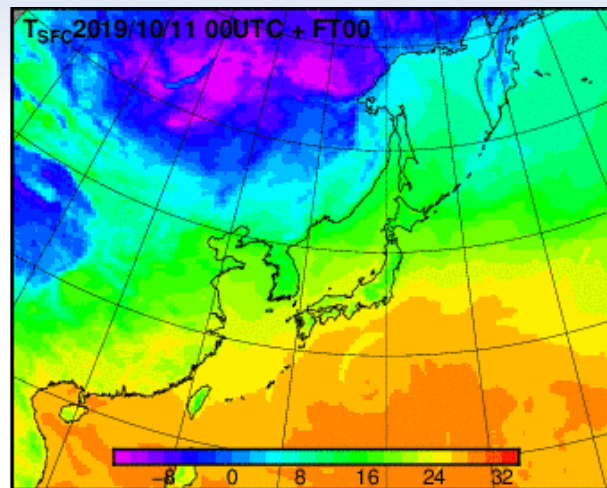
# 令和元年東日本台風

全球モデル地上各種物理量予報 2019年10月11日09JST初期値(～48時間予報動画)

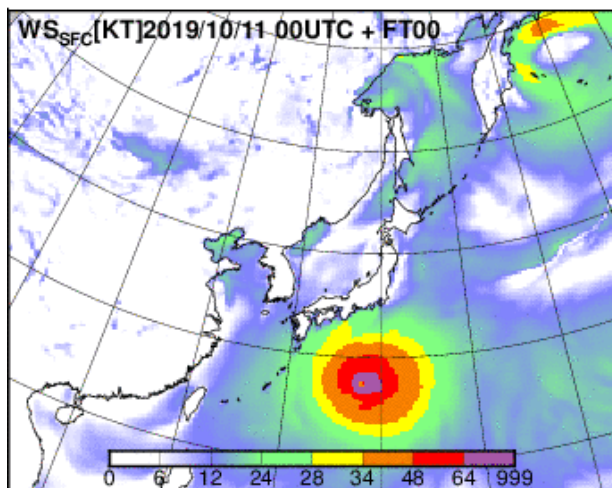
気圧



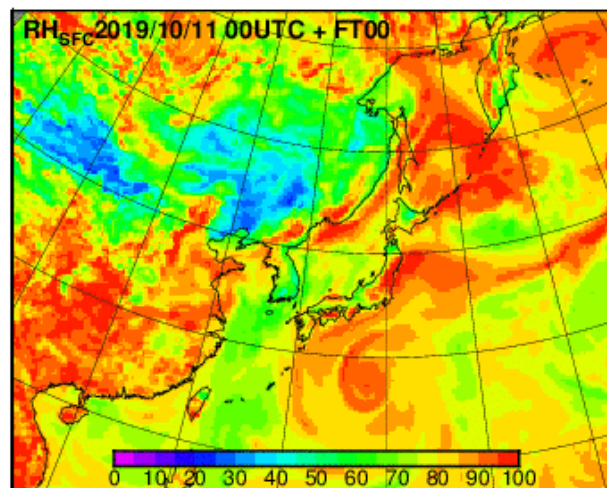
気温



風速



湿度



ニュース等ではなかなかご覧にならないかもしれませんが、数値予報では計算に必要な気圧、気温、風、水蒸気量なども計算しており、可視化することも可能です(地上だけでなく(全球モデルでは)上空およそ80kmまで計算しています)。