



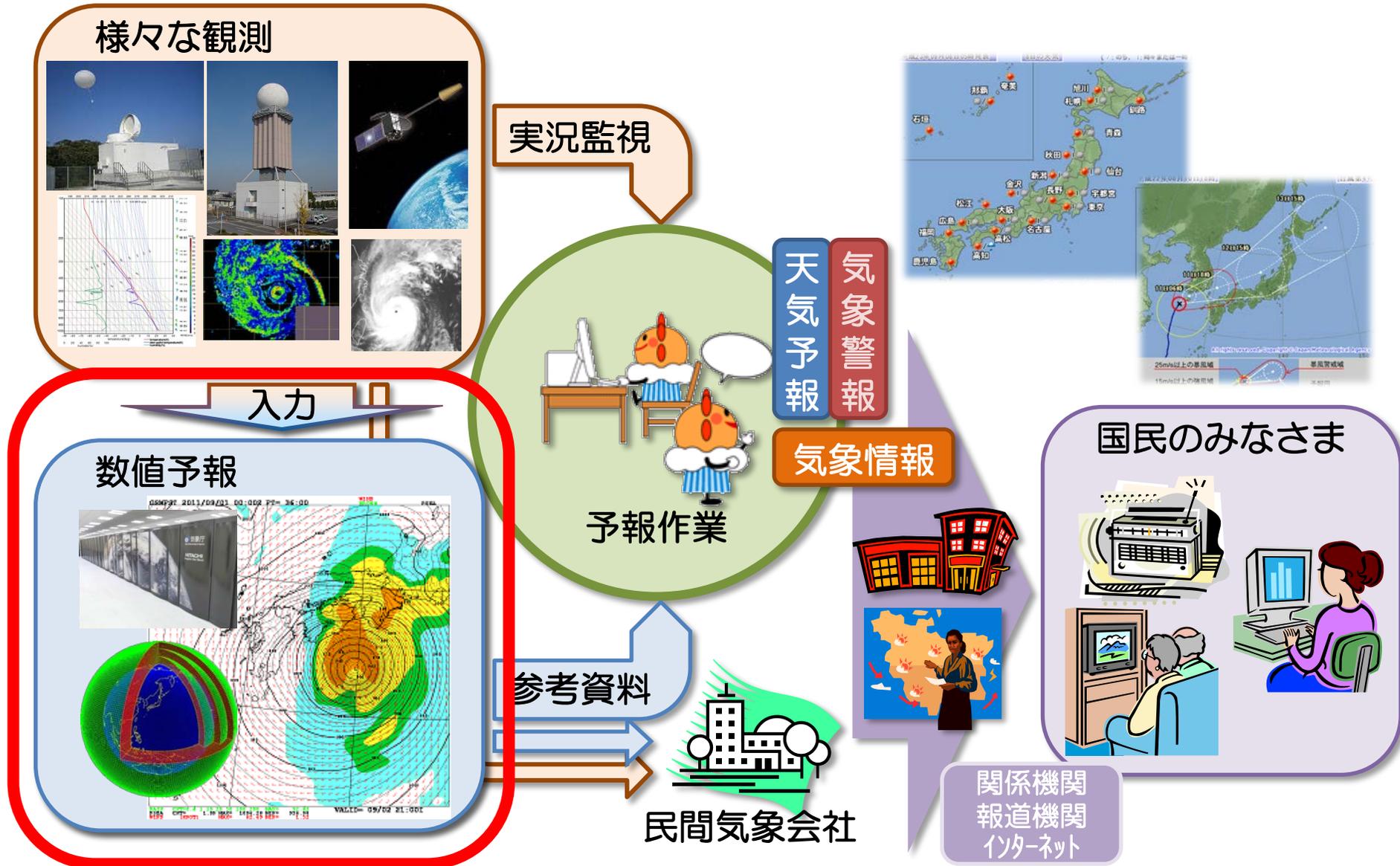
気象予報における衛星の役割

日々の数値気象予報に如何に衛星観測データが使われているか

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
計盛 正博

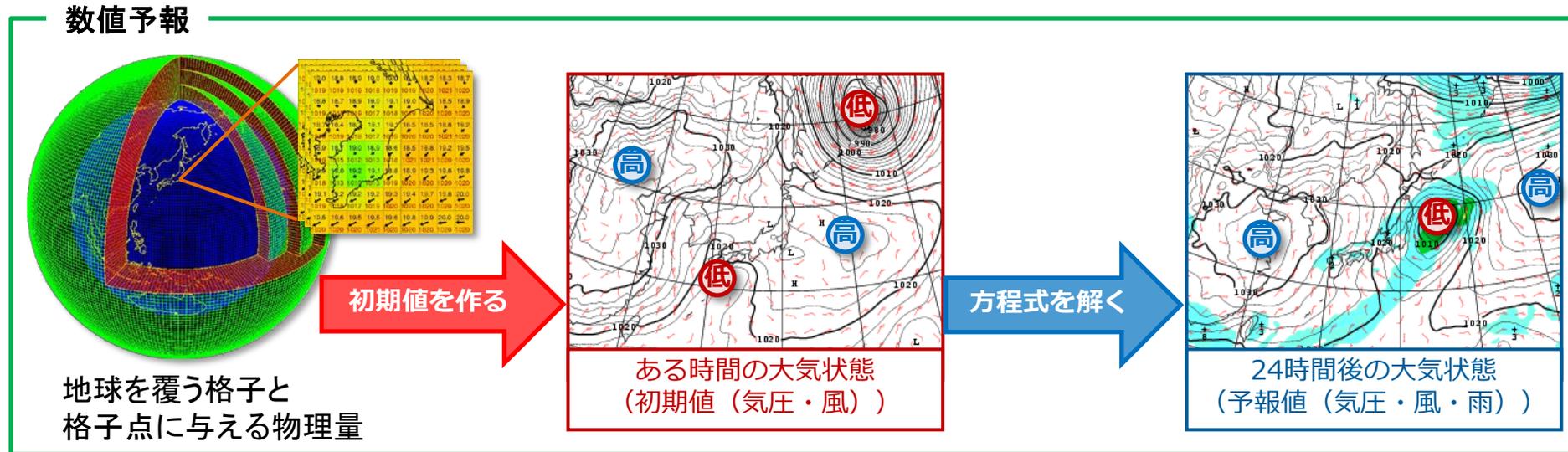
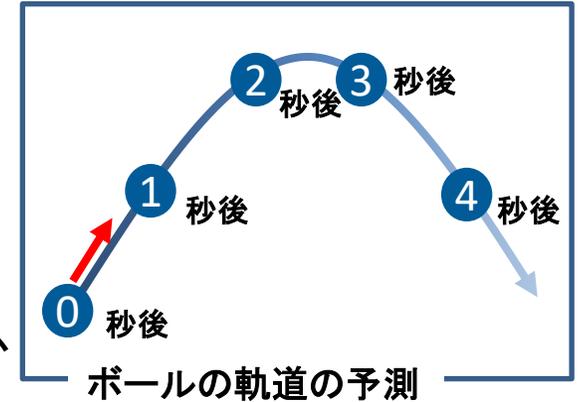
2024年10月23日 CONSEO気候変動シリーズ第4回

気象業務における数値予報の位置付け



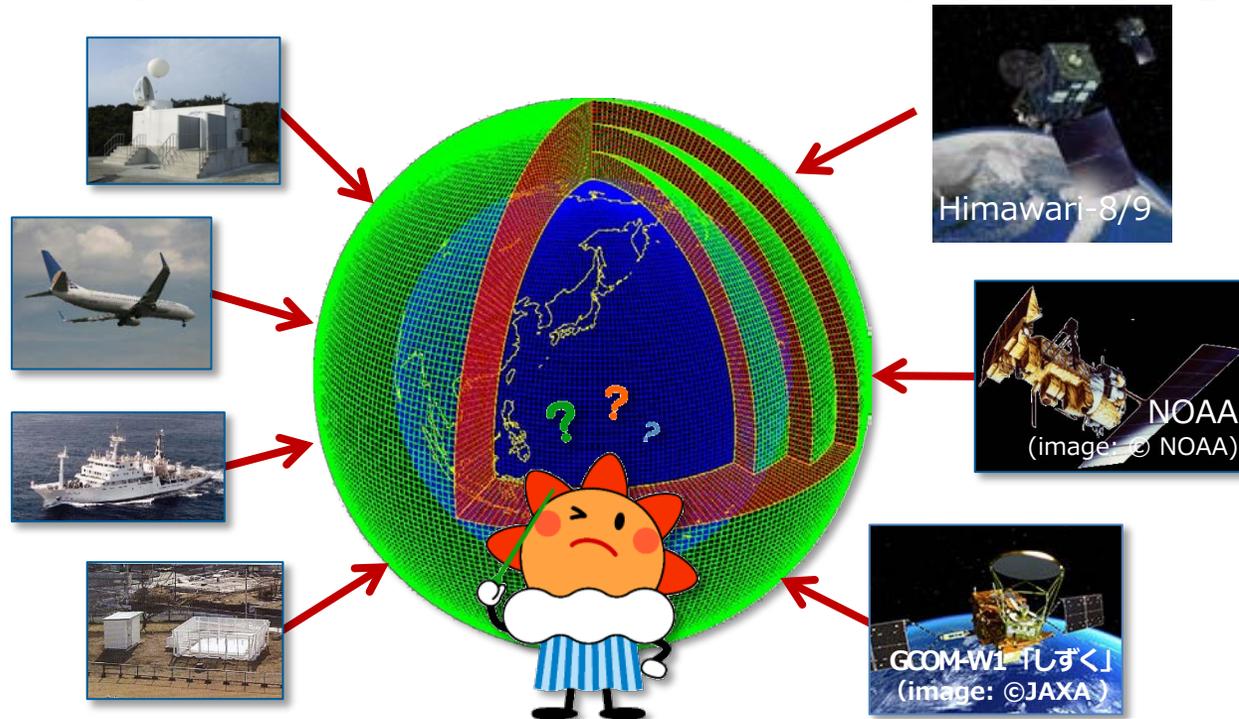
数値予報とは

- 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(初期値)**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。



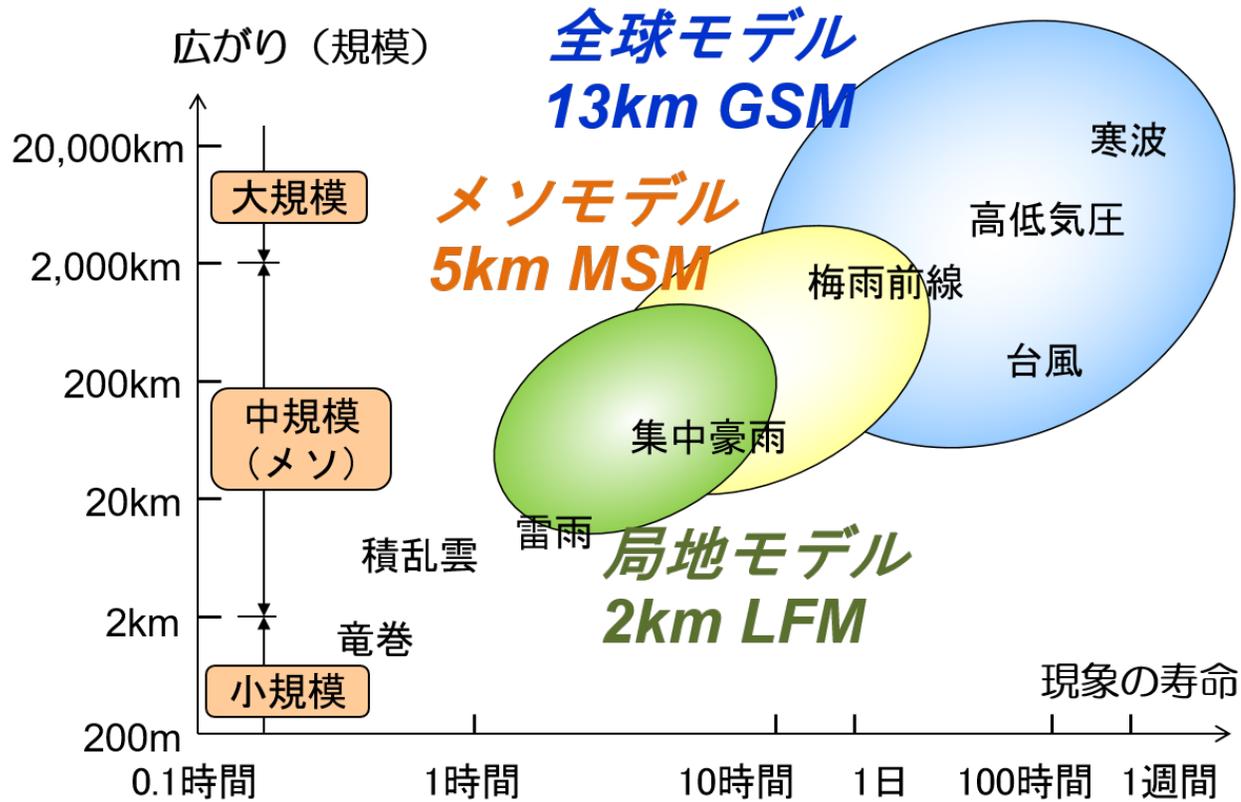
数値予報の初期値を作る

- できるだけ多くの種類の観測データをうまく利用し、**気圧、気温、湿度、風**などの気象要素の値を**各格子に正確に割り当て**、予測の**初期値**（予報の元となる**現在の状況**）を作成（データ同化）する。
- この初期値の精度が予測精度に大きく影響 → **様々な観測が必要**
特に**衛星からは、広範囲に大量の観測データ**が得られるため、**数値予報にとって重要**。



気象庁の主な数値予報モデルと利用観測データ

気象庁の数値予報モデルが対象とする
気象現象の水平及び時間スケール



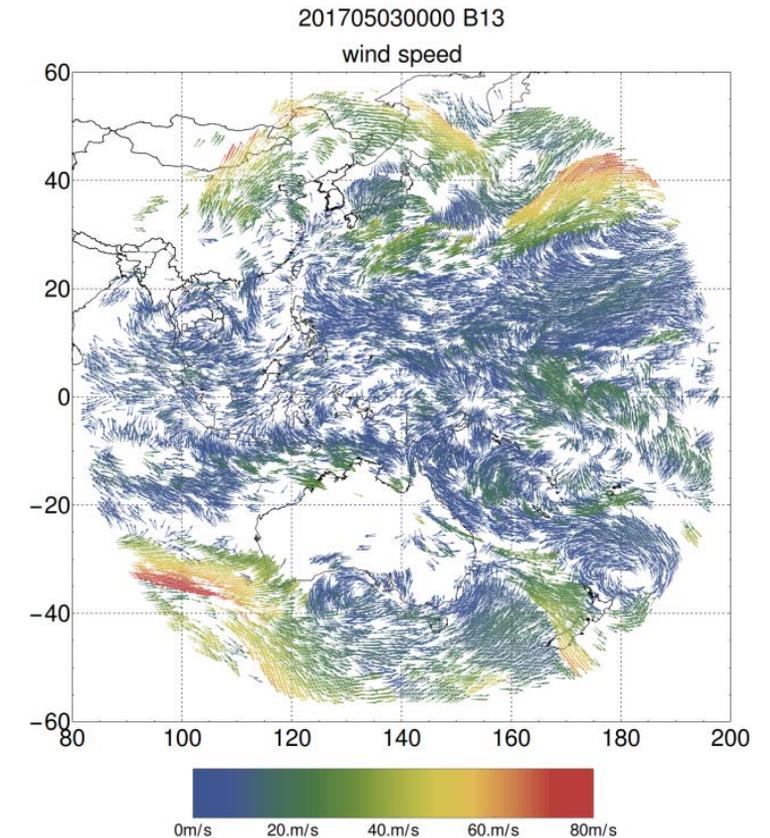
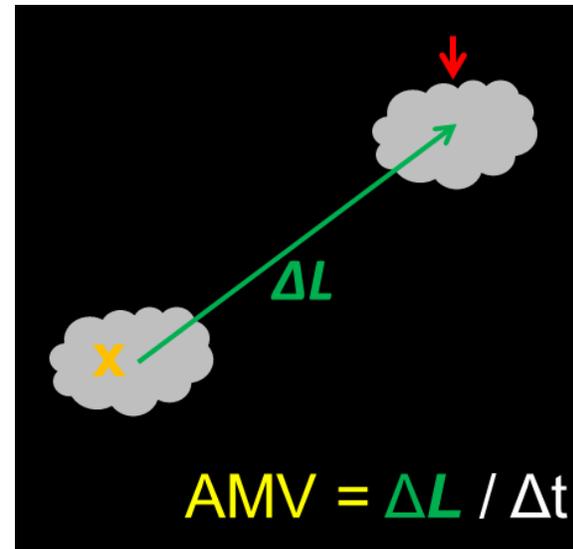
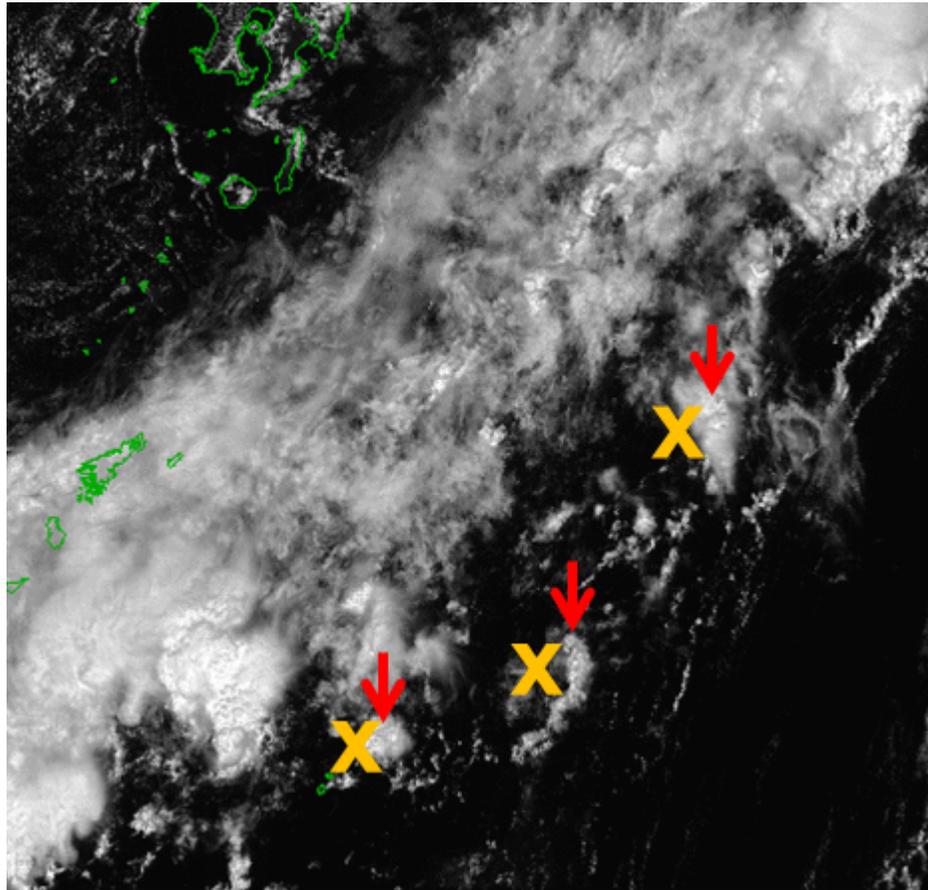
全球解析、メソ解析、局地解析、気候データ同化に使用するデータ一覧

	データの種類	解析に使用する観測要素	使用先			
			全球	メソ	局地	気候
直接観測	固定観測点の地上観測 (アメダスを除く)	気圧	○	○	○	○
		湿度	-	○	○	-
	船舶・ブイ	気圧	○	○	○	○
	ラジゾンデ・レーウィン	気温、風、湿度	○	○	○	○
	航空機	風	○	○	○	○
		気温	○	○	○	-
アメダス	降水量（解析雨量）	-	○	-	-	
	気温、風 湿度	-	○	○	-	
センシング	地上リモート	ウィンドプロファイラ	○	○	○	○
		気象レーダー	-	○	-	-
	地上GNSS観測	反射強度（解析雨量）	-	○	-	-
		反射強度から算出した相対湿度 ドップラー速度	-	○	○	-
	船舶GNSS観測	地上GNSS観測	○	-	-	○
		船舶GNSS観測	○	-	-	○
	地上設置型 マイクロ波放射計	大気遅延量から算出した可降水量 大気遅延量	-	○	○	-
衛星観測	可視・赤外イメージャ	大気遅延量から算出した可降水量	-	○	○	-
		輝度温度から算出した可降水量	-	○	○	-
	マイクロ波イメージャ	画像上の雲や水蒸気パターンから算出した風 輝度温度	○	○	○	○
		輝度温度から算出した降水強度	-	○	-	-
	赤外放射計	輝度温度	○	○	○	○
		輝度温度から算出した土壌水分量	-	-	○	-
	マイクロ波サウンダ	輝度温度	○	○	○	○
		輝度温度	○	○	○	○
マイクロ波散乱計	後方散乱断面から算出した海上風	○	○	○	○	
	後方散乱断面から算出した土壌水分量	-	-	○	-	
二周波降水レーダー	反射強度から算出した相対湿度	-	○	-	-	
	屈折率 屈折角	-	○	-	-	
GNSS掩蔽観測	海面気圧	○	○	-	○	
	風	○	○	-	○	
他	気象庁台風解析データ	海面気圧 風	○ ○	○ ○	- ○	

以降のスライドで数値予報で利用中の代表的な衛星観測データを紹介

大気追跡風 AMV: Atmospheric Motion Vector

「ひまわり」等で観測した連続画像から雲や水蒸気の動きを捉え「大気追跡風」として風向や風速を1時間毎に算出。特に海洋上は他の観測が少なく「ひまわり」で得られた大気追跡風は世界中の気象機関で利用。数値予報の初期値作成においても利用。



輝度温度（放射輝度）の観測データ

● 衛星観測による輝度温度

- 地球（地表や雲）から射出され、**大気の影響**を受けた**放射**
- **放射輝度**（Radiance）を、等価黒体温度に変換した**輝度温度**（Brightness Temperature）で扱うことが多い。

● 大気の影響

- 様々な**気体分子**による**吸収**（ H_2O , CO_2 , O_2 , O_3 , ...）
- **雲粒**や**雨粒**等による**吸収・散乱**

● 大気の影響の程度から、**大気の状態**を知ることができる。

- 大気の状態：気温、水蒸気量、雲水量、降水量など
- ただし、これらの物理量を直接観測しているわけではない。

● 数値予報における輝度温度データの同化利用では、主に**気温**、**水蒸気量**の情報を取り出している。

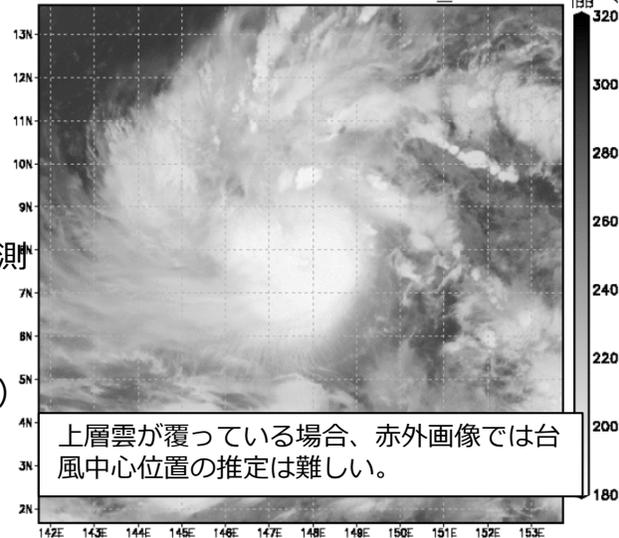
- 良く混ざっている気体（ CO_2 , O_2 ）による吸収：気温の情報
- 分布のばらつきが大きい水蒸気（ H_2O ）による吸収：水蒸気量（と気温）の情報

※放射輝度の単位： $[W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot (\mu m)^{-1}]$ など
輝度温度の単位：[K]

ひまわり/AHI

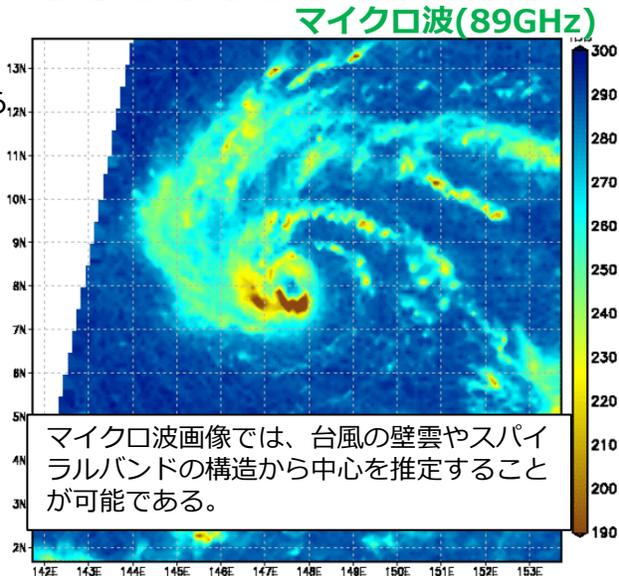
静止軌道
赤道上空から観測
（約36,000km）
日本付近を定期的に観測
可視・近赤外・赤外
雲の影響を強く受ける
（雲の下は見えない）

令和5年台風第2号 赤外（ $10.4\mu m$ ）



GCOM-W/AMSR2

極軌道
南から北へ移動しながら
観測（約700km）
日本付近は1日2回観測
（日中、夜間）
マイクロ波
薄い雲などを透過
雲や雨、氷粒子など
水物質の様子がわかる



マイクロ波散乱計による観測

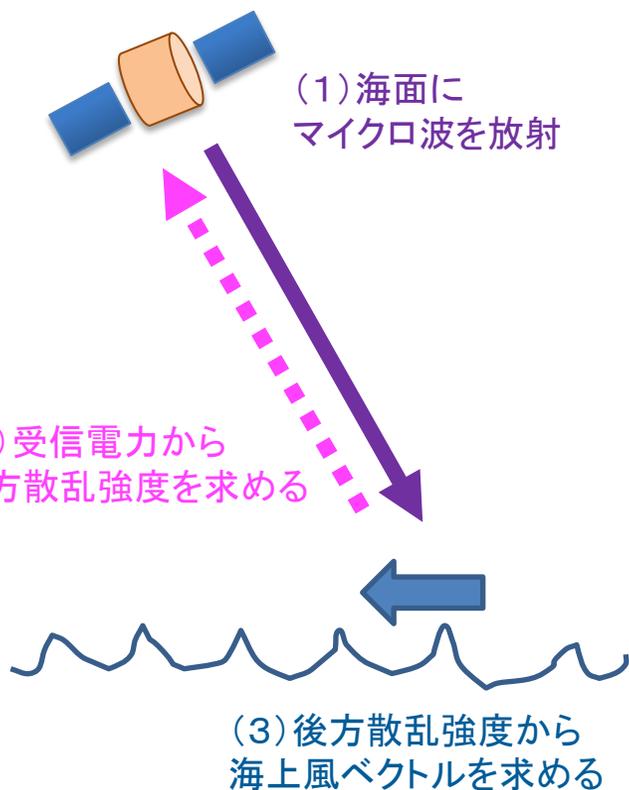
数GHz～数十GHzのマイクロ波を人工衛星から地球に向かって放射し、後方散乱強度を測定する**能動型**の測器

複数の方向から測定された後方散乱強度から経験則的な“モデル関数”を利用して**海上風ベクトル**を算出可能（広範囲かつ密）

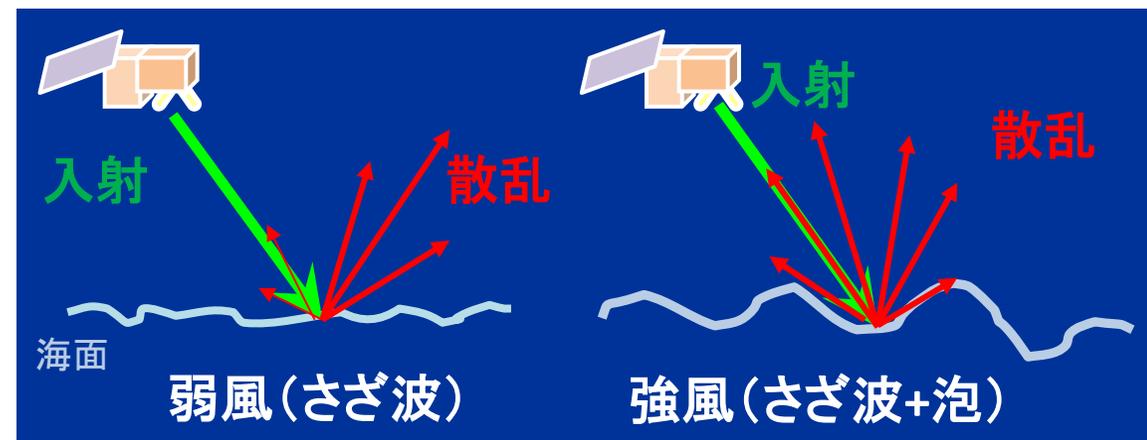
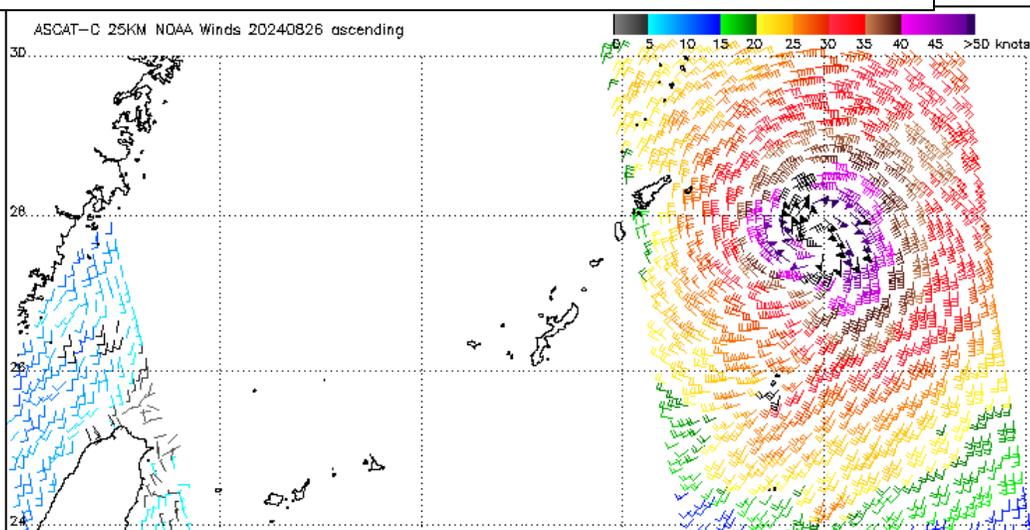
極軌道の人工衛星に搭載され、観測手法が限られる海上では重要なデータ
雲の上からでも観測できる（強い雨が降っていると品質低下）

データ同化利用により期待される効果

下層の風や温度場の改善、下層の収束の情報から水蒸気場の改善など

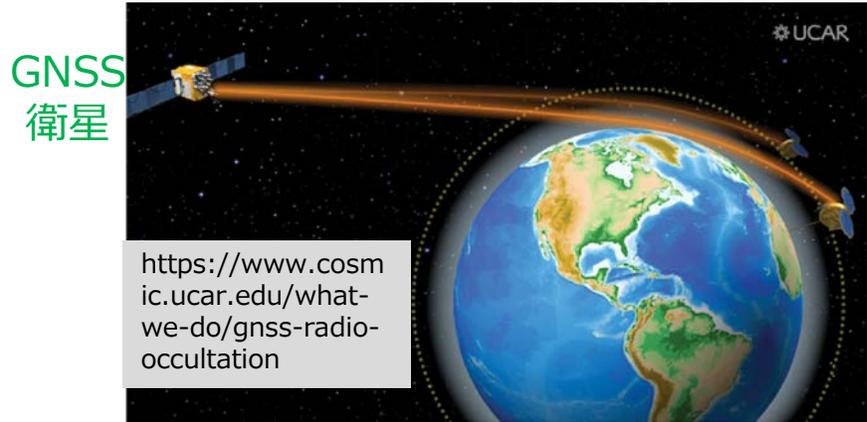


マイクロ波散乱計ASCATの観測データの例（NOAAのサイトより引用）
<https://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/ASCATCDData.php>



GNSS(GPS)掩蔽法による観測

- GNSS (Global Navigation Satellite Systems、全球測位システム) 衛星は高度約2万Kmを飛行しながら、Lバンドの電波を送信している。GNSS : GPS (米国) , GALILEO (欧州) , GLONASS (ロシア) 等の総称
- GNSS掩蔽法 (GNSS-RO: Radio Occultation)**
 - GNSS衛星が発信する電波を高度数百kmを飛行する低軌道衛星で連続的に受信することで、大気の鉛直プロファイルを高解像度 (数百m程度) に観測する。 (水平解像度は数百Km)
 - 電波は大気中で屈折**するため、電波の到達時間は、直進する場合よりも遅くなる (遅延量)。遅延量から大気による屈折角を算出する。
- GNSS-ROデータは、電波遅延量 (原子時計) の観測であり、輝度温度のような放射観測よりも精度が高く、バイアス誤差のないデータとして、数値予報における初期値作成 (データ同化) ではアンカーの役目を持つ。
- 電波の屈折は伝搬経路の大気状態による。
 - 電波は屈折率の異なる媒質を進む時に屈折し、その程度は屈折率の鉛直勾配による。大気の屈折率 (密度) は気温・水蒸気等による。
 - 数値予報では、観測された**屈折角**と数値予報モデルが表現する大気状態から計算した屈折角を比較し、大気状態 (GPV)を修正しており、特に対流圏上部・成層圏の解析・予測にインパクトがある。



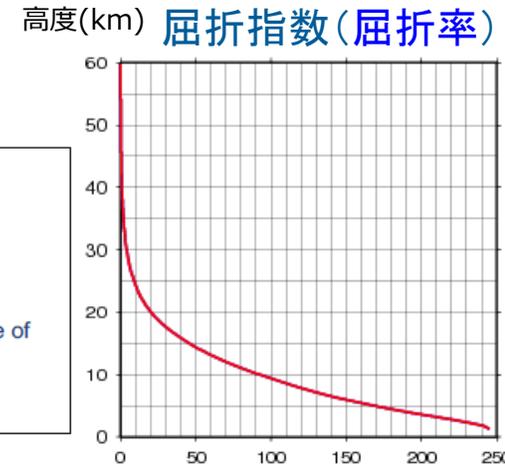
屈折率と気圧、気温、水蒸気圧の関係式

$$N = 10^6 (n - 1)$$

$$= \frac{c_1 P}{T} + \frac{c_2 P_w}{T^2} \quad N \approx \frac{c_1 P}{T} = c_1 R \rho$$

水蒸気の寄与が無視できる場合、**屈折率**と**密度**は比例

N= refractivity
n= refractive index
c1,c2 refractivity constants
P= pressure
T= Temperature
Pw= partial pressure of water vapour
ρ= density
R= gas constant

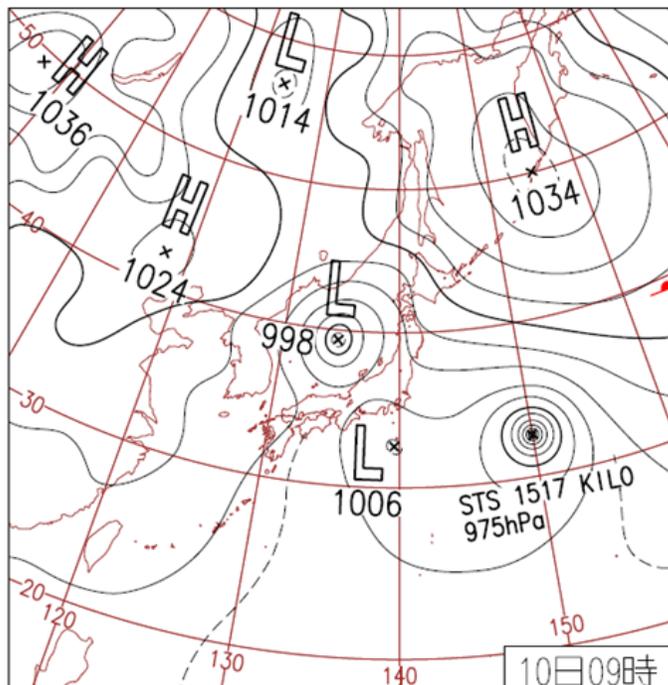


衛星観測データ利用による数値予報への影響

メソモデル初期値作成にひまわり8号の
晴天輝度温度 (CSR) データを利用

2015/09/09 12Z初期値からの3時間先の
降水量予測

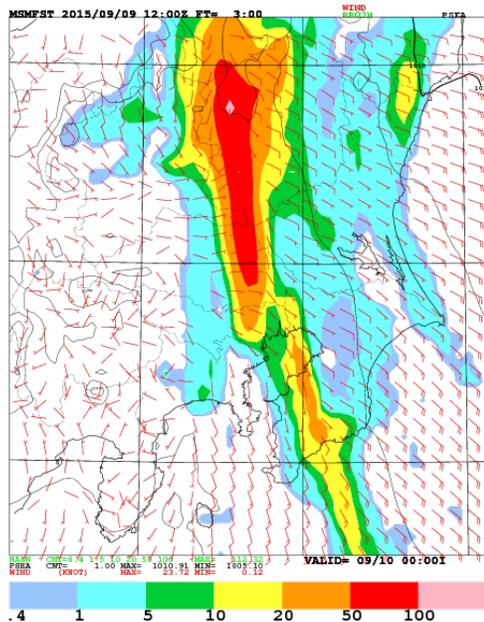
平成27年9月関東・東北豪雨



10日(木)栃木・茨城に特別警報

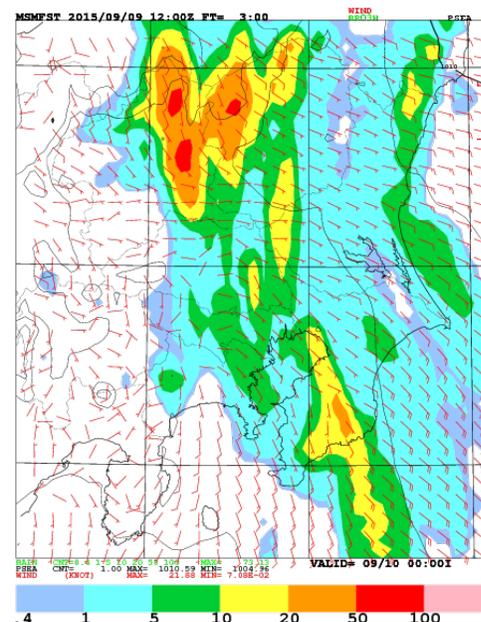
日本海の低気圧と台風第17号の影響で、
関東・東北南部で大雨続き、栃木県五十
里では9日～10日の降水量602mm。栃木
県と茨城県に大雨特別警報を発表。鬼怒
川ではん濫。

CSRあり



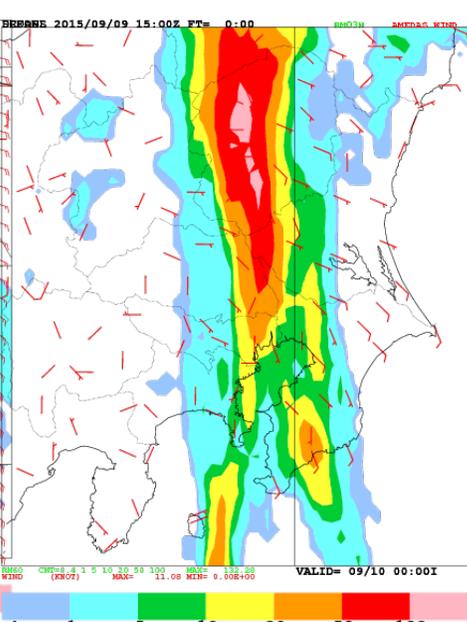
CSRあり : 50 mm/3hrの領域の広さが現実に近い。

CSRなし



CSRなし : 降水の集中が弱い。

解析雨量



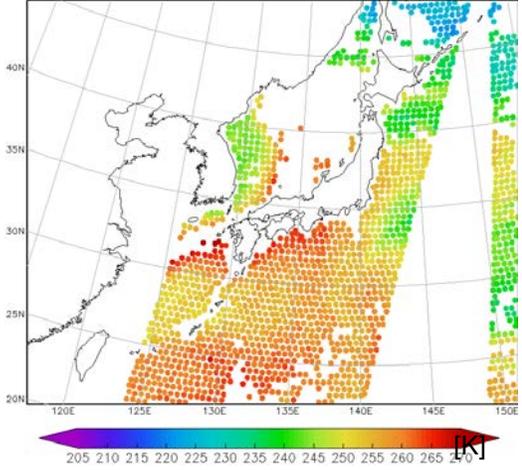
初期値における乾燥域と湿潤域のコントラストが、CSRの利用により
現実に近く表現され、降水予測の改善につながった

衛星観測データ利用による数値予報への影響

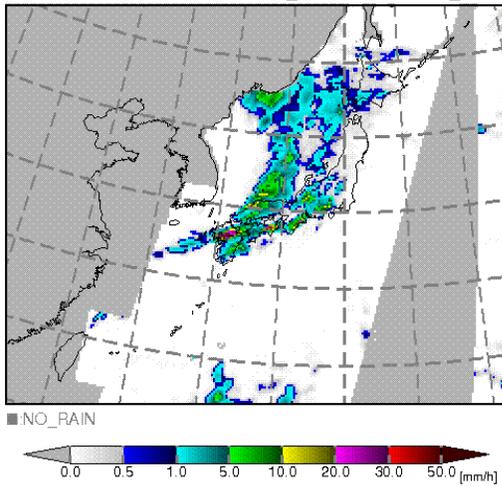
メソモデルの初期値解析にAMSR2データを利用
平成24年7月九州北部豪雨の事例

2012年7月11日18時 (UTC) AMSR2利用開始 (2013年5月) の際の調査

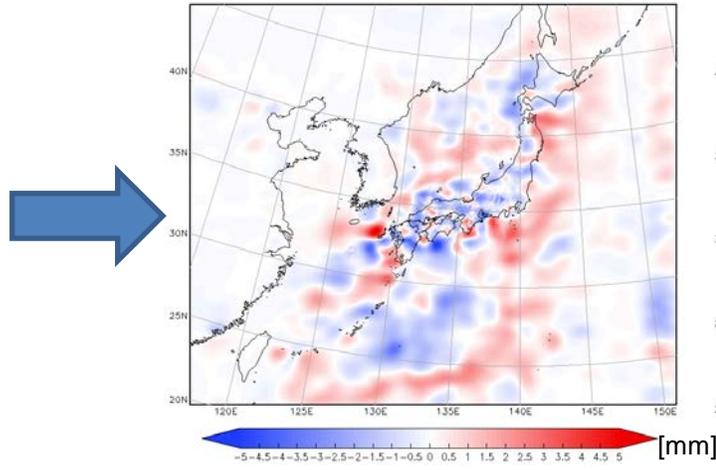
輝度温度23GHz (垂直偏波)



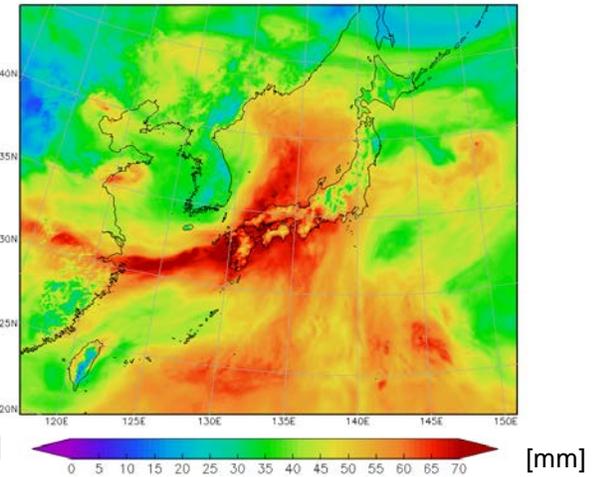
降水強度 [mm/時]



水蒸気場の修正量 (可降水量)

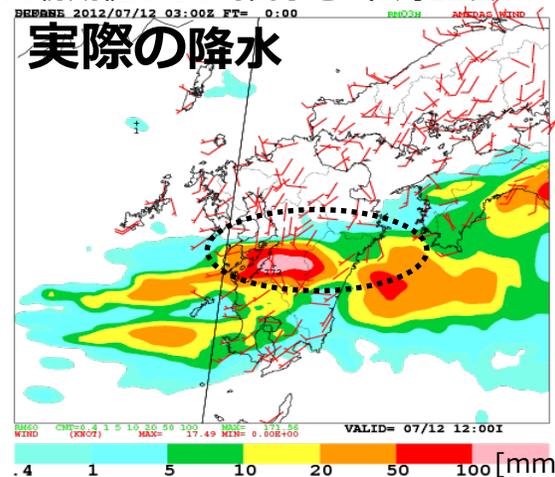
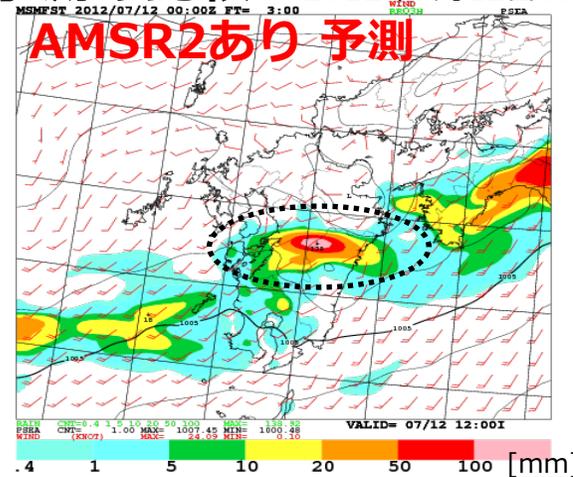
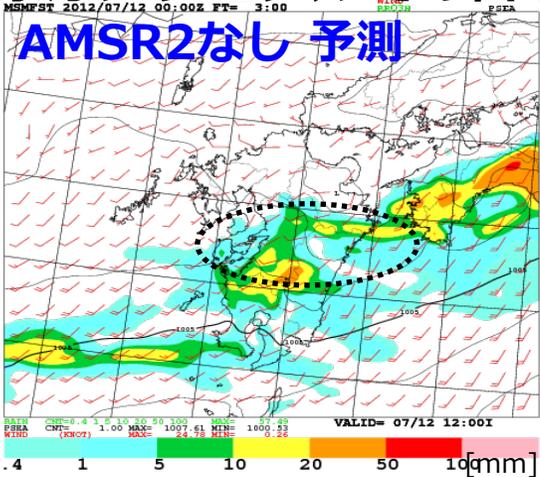


解析された可降水量の場



気象庁メソモデルでの降水予測の比較

2012年7月12日00UTC初期値から3時間予想 (7月12日の00-03UTCの降水量)

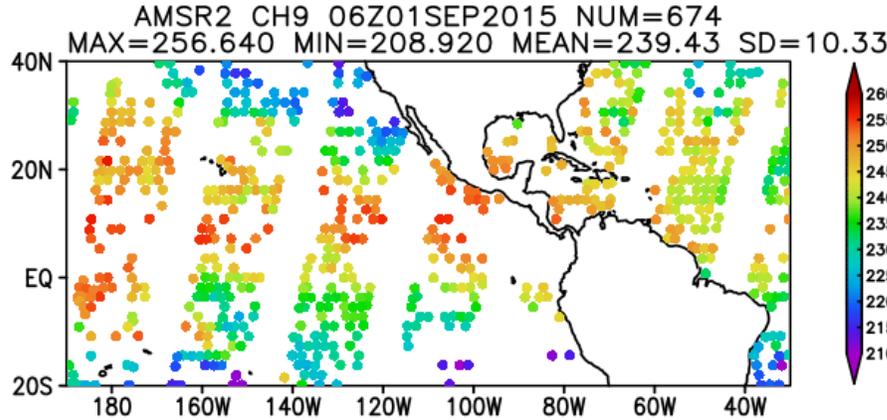


AMSR2データの同化により降水の短時間予想 (降水強度と予測位置) の改善が見られた。

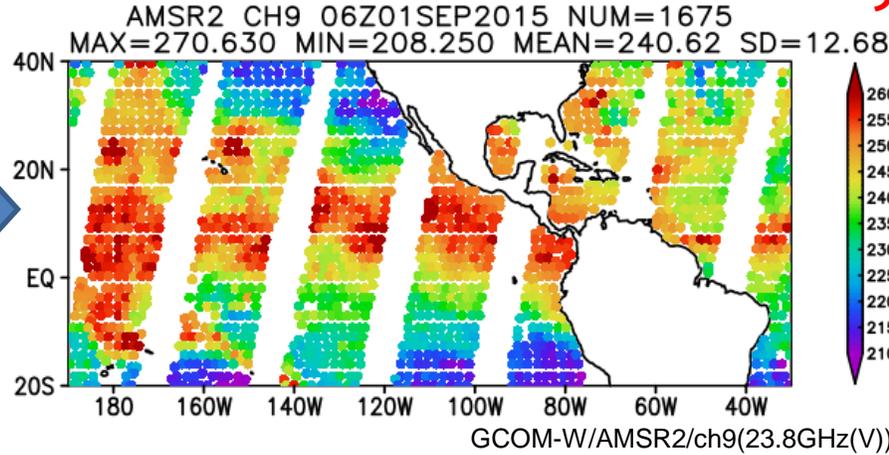
初期場における九州の上流 (西海上) の水蒸気場の改善により降水予測の改善がもたらされた。

衛星観測データ利用高度化による予測精度向上

晴天輝度温度同化



雲・降水域輝度温度同化

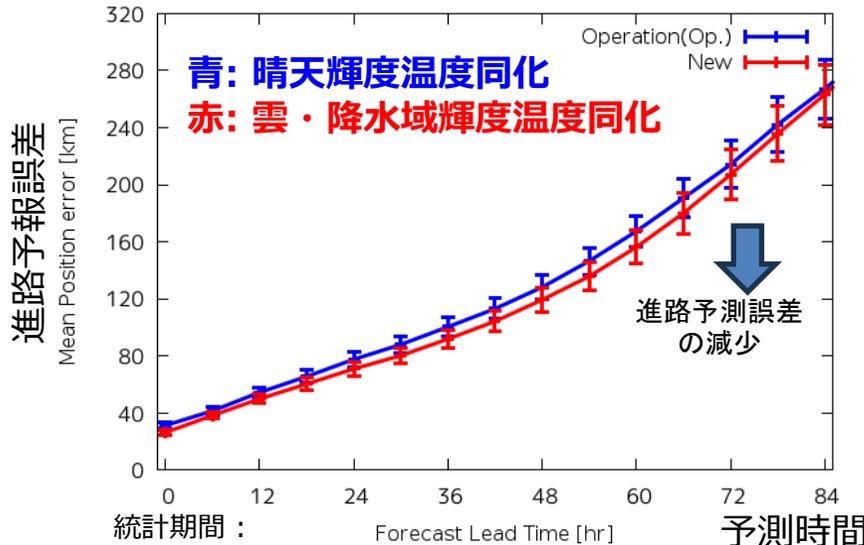


全天候下マイクロ波輝度温度データ同化に移行 (2019年12月)

全球解析では、マイクロ波イメージャやマイクロ波サウンダで、晴天域だけでなく、雲・降水域も含めた全天候での輝度温度データの利用(全天同化)に移行した(2019年12月以降)。それまでは、データ同化での雲・降水の扱いに難点があった。モデル内の雲水量、雲氷量、雲量なども考慮することで、**利用できるデータ数が大幅に増加**。水蒸気の情報だけでなく、雲・降水の情報も利用して初期値作成が可能となった。

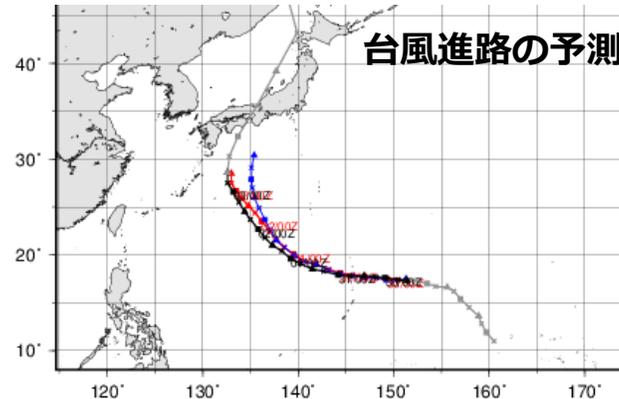
雲・降水域のマイクロ波輝度温度データの利用による台風予測の改善

Mean Position error of TC (Operation(Op.) vs New)

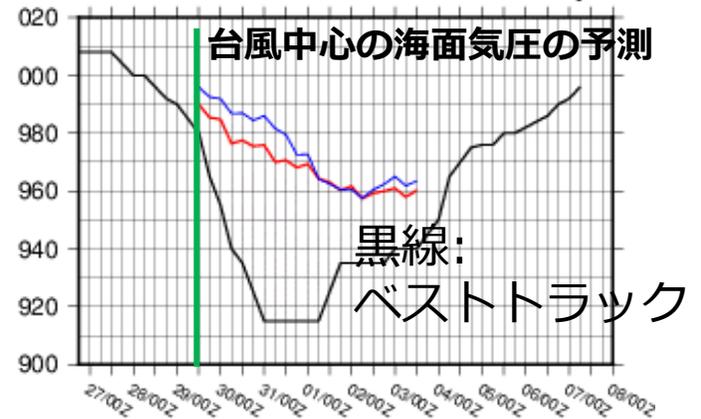


マイクロ波イメージャ (AMSR2, GMI, SSMIS, MWRI, WindSat) とマイクロ波水蒸気サウンダ (GMI, MHS) の雲・降水域データの同化による効果

Typhoon Jebi (2018)



(hPa) T1821 Central Pressure Forecast-Analysis



熱帯低気圧発生初期の発達予測、進路予測が改善する事例を確認

まとめ

- 気象庁が行う**気象予報**では、**数値予報**が**大きな役割**を果たしている。
- 数値予報の予測精度向上には、**数値計算の初期値の精度向上**が必要であり、**衛星から得られる地球の大気や地表面の観測情報は、初期値作成で利用される重要なもの**となっている。
- 現業静止気象衛星「ひまわり」やJAXA,NASA等による様々な地球観測衛星による観測データを数値予報で利用中。
- 今後打上げが予定されている**新規衛星の観測データの利用**とともに、既存の**衛星観測データの利用高度化**を進め、数値予報の更なる精度向上を目指している。

おわり