



第1章 基礎編

1.2 観測データと品質管理

数値予報で利用している観測



数値予報を行うには現実の大気状態を正しく捉えた、各種(気象)観測データが必要である(計盛ほか 2018)。スライドには数値予報で利用している各種観測測器や測器を搭載する衛星などを示している。観測は大きく分けて直接観測、リモートセンシング(遠隔観測)、疑似観測に分類できる。

直接観測では各地の気象台での観測や船舶・漂流ブイ、ラジオゾンデ、商用航空機等が用いられる。

リモートセンシングには地上に設置された測器による地上リモートセンシングと、人工衛星搭載の測器による衛星リモートセンシングがある。地上リモートセンシングではウィンドプロファイラや気象レーダー、GNSS受信機が用いられる。

衛星リモートセンシングに用いられる衛星は静止軌道衛星と低軌道衛星とに大きく分けられ、このうち低軌道衛星には気象機関などが運用する現業衛星のほか、宇宙機関が運用する衛星やGNSS掩蔽衛星がある。

疑似観測は、人間の手による主観解析の結果など、実際の観測で得られたものでない大気に関する情報をデータ同化で利用するために人工的に作成される観測を模したものである。現在、気象庁のデータ同化で疑似観測データとして利用されているのは、台風ポーガスのデータのみである。

直接観測

直接観測は、ある場所の大気状態を実際にその場で測る観測。

- 地上観測
 - 官署等、AMeDAS
- 海上観測
 - 船舶、係留ブイ、漂流ブイ
- 航空機観測
 - 民間航空機
- 高層観測
 - ラジオゾンデ
- 高層風観測
 - パイロットバルーン

地表上の観測



上層の観測



直接観測は、ある場所の大気状態を実際にその場で測る観測である。直接観測には各地の気象台などによる地上観測や船舶・漂流ブイによる海上観測、ラジオゾンデによる高層観測、商用航空機などによる航空機観測が含まれる。

地上リモートセンシング

リモートセンシングは離れた場所から電磁波などを用いて間接的に観測を行う手法。

- ウィンドプロファイラ

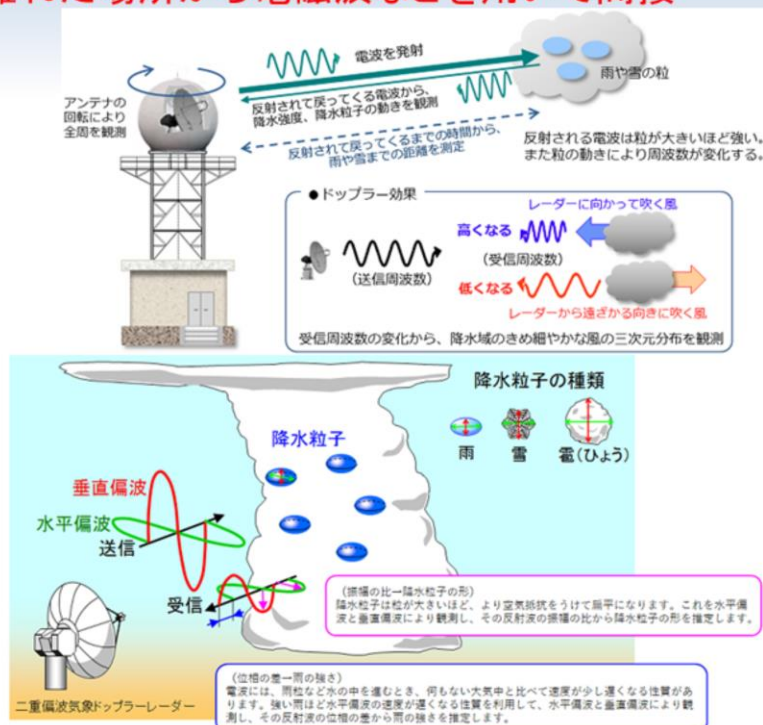
- 気象レーダー

- ドップラー速度
- 反射強度
- 解析雨量

注: 解析雨量作成では雨量計等の直接観測データによる補正が行われており、純粋なりモートセンシングではない。

- 地上(船舶)GNSS観測

- 天頂遅延量
- 可降水量



リモートセンシングは離れた場所から電磁波などを用いて、間接的に観測を行う手法である。リモートセンシングには地上に設置された測器による地上リモートセンシングと、人工衛星搭載の測器による衛星リモートセンシングがある。

地上リモートセンシングでは気象レーダーやウィンドプロファイラ、地上GNSSなどを用いて観測を行う。

気象レーダーはアンテナを回転させながら電波(マイクロ波)を放射し、半径数百kmの広範囲内に存在する雨や雪を観測するものである。放射した電波が戻ってくるまでの時間から雨や雪までの距離を測り、戻ってきた電波(レーダーエコー)の強さから雨や雪の強さを観測する。また、戻ってきた電波の周波数の差(ドップラー効果)を利用して、雨や雪の動きすなわち降水域の風を観測することができる。さらに、令和2年3月から二重偏波気象ドップラーレーダーの導入を開始した。二重偏波気象ドップラーレーダーは、水平方向と垂直方向に振動する電波(それぞれ水平偏波、垂直偏波という。)を用いることで、雲の中の降水粒子の種類判別や降水の強さをより正確に推定することが可能となった。この他、レーダーで観測された雨の強さをアメダスや他機関の雨量計による観測で補正したものとして解析雨量がある。ただし、解析雨量はその作成において雨量計等の直接観測データによる補正が行われているため、純粋なりモートセンシングによる観測データではない。

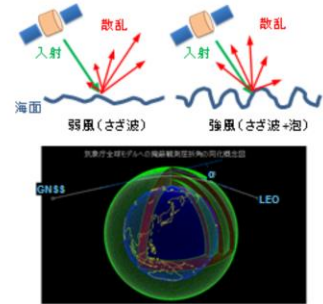
ウィンドプロファイラは地上から上空に電波を放射し、上層大気の屈折率の乱れによって生じる送信波と反射波の周波数の差を利用して、上空の風向・風速を観測する。

地上(船舶)GNSSは複数のGNSS衛星から発信された電波を地上または船舶上のGNSS受信機で受信した際の受信時間の遅れ(伝播遅延)を利用する。受信時間の遅れは主に電波が通過した大気中の水蒸気量に起因するため、複数のGNSS衛星を用いて受信機が設置された場所の天頂大気遅延量や鉛直積算水蒸気量(可降水量)を求めることができる。

衛星観測（衛星リモートセンシング）

※赤字は初期値・境界値作成で利用中のもの

- 地球からの電磁波（可視、赤外、マイクロ波）観測
 - イメージャ（輝度温度or反射率）
 - →（雲や大気パターンを追跡して）大気追跡風（AMV）
 - →水蒸気量、降水量、海面水温、土壤水分、積雪域、等
 - サウンダ（複数周波数の輝度温度）
 - →気温・水蒸気鉛直プロファイル
- 複数の角度からマイクロ波を発射、その後方散乱を観測
 - マイクロ波散乱計（散乱断面積）
 - →海上風、土壤水分
- GNSS衛星からの電磁波の大気による遅延
 - GNSS掩蔽観測（遅延量）
 - →屈折角、屈折率、気温・水蒸気プロファイル
- その他
 - 降水レーダー、雲レーダー、雲・エアロゾルライダー、など



衛星リモートセンシングでは地球（地表や雲）から射出され大気の影響を受けた放射を用いて、多種多様な観測が行われている。

イメージャやサウンダは地球からの電磁波を観測する。イメージャは高水平分解能で水平的なデータを得ることができる。輝度温度だけではなく、例えば雲パターンを追跡することで大気中の風も推定できる。サウンダはイメージャと比べて水平分解能は低いですが、複数周波数を利用することで鉛直的な情報を得ることができる。

マイクロ波散乱計は複数の角度からマイクロ波を発射し、その後方散乱を観測することで海上風等を観測する。

GNSS掩蔽観測ではGNSS衛星からの電波を低軌道衛星で受信することによって、気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を全球的に得ることができる。

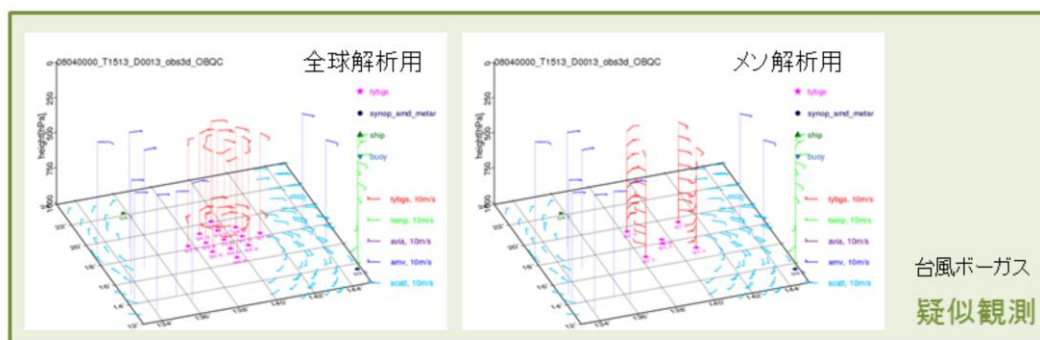
疑似観測

疑似観測は人工的に作成される疑似的な観測データ。

実際に観測で得られたものでない大気に関する情報をデータ同化で利用するために作成される。疑似観測は**ボーガスデータ**と呼ばれる。

bogus・・・偽の

- 台風ボーガス
 - 気象庁の現業作業により解析される台風に関する情報（中心位置(緯度・経度)、中心気圧、15m/s半径など)を基に作成する。
 - 非対象構造は第一推定値(1.3章参照)から抽出する。



疑似観測は人間の手による主観解析の結果など、実際に観測で得られたものでない大気に関する情報をデータ同化で利用するために、人工的に作成される観測を模したものである。現在、気象庁のデータ同化で疑似観測データとして利用されているのは、台風ボーガスのデータのみである。台風ボーガスは気象庁で解析される熱帯低気圧(TC)の情報(中心位置、中心気圧、強風半径)をデータ同化で利用するための手法(もしくはそのデータ)である。台風が多く発生する日本の南の海上では観測データが少ないため、台風ボーガスは利用されている。

ボーガスの作成は理想的な概念モデルに前述のTCに関する情報を適用して軸対称を仮定したTC構造を推定し、これに数値予報で得られる非軸対称構造の情報を加えて、TC周辺の気圧や風の3次元分布を算出する。この中からいくつかの地点のデータを抽出し、抽出データを観測データの形式に変換する。

各種観測データの長所・短所

直接観測

- 高品質のデータが得られる
- × 時間・空間分解能が限定的、分布に限りがある

地上リモートセンシング

- 時間分解能が高い、空間一様性が高い
- × 必要な物理量への変換に工夫が必要

衛星観測(衛星リモートセンシング)

- 広域に均質な観測データが周期的・定常的に得られる
- × 必要な物理量への変換、入電時間、衛星の寿命

疑似観測(台風ポーガス)

- 観測データの乏しい海洋上に存在する台風周辺域で利用可能
- × (典型的な台風構造を仮定しているため) 個々の台風に適していない場合がある

直接観測	地上観測
	地上自動観測
	海上観測
	航空機観測
	高層観測
地上リモートセンシング	ウインドプロファイラ
	ドップラーレーダー
	解析雨量
	地上GNSS
	船舶GNSS
疑似観測	台風ポーガス
静止軌道衛星	大気追跡風
	晴天放射輝度温度
低軌道衛星	極域大気追跡風
	マイクロ波サウンダ
	赤外放射計
	マイクロ波イメージャ
	マイクロ波散乱計
	GNSS掩蔽観測
	衛星搭載レーダー
合成衛星画像	LEO GEO大気追跡風

ここでは各種観測データの長所と短所を見ていく。

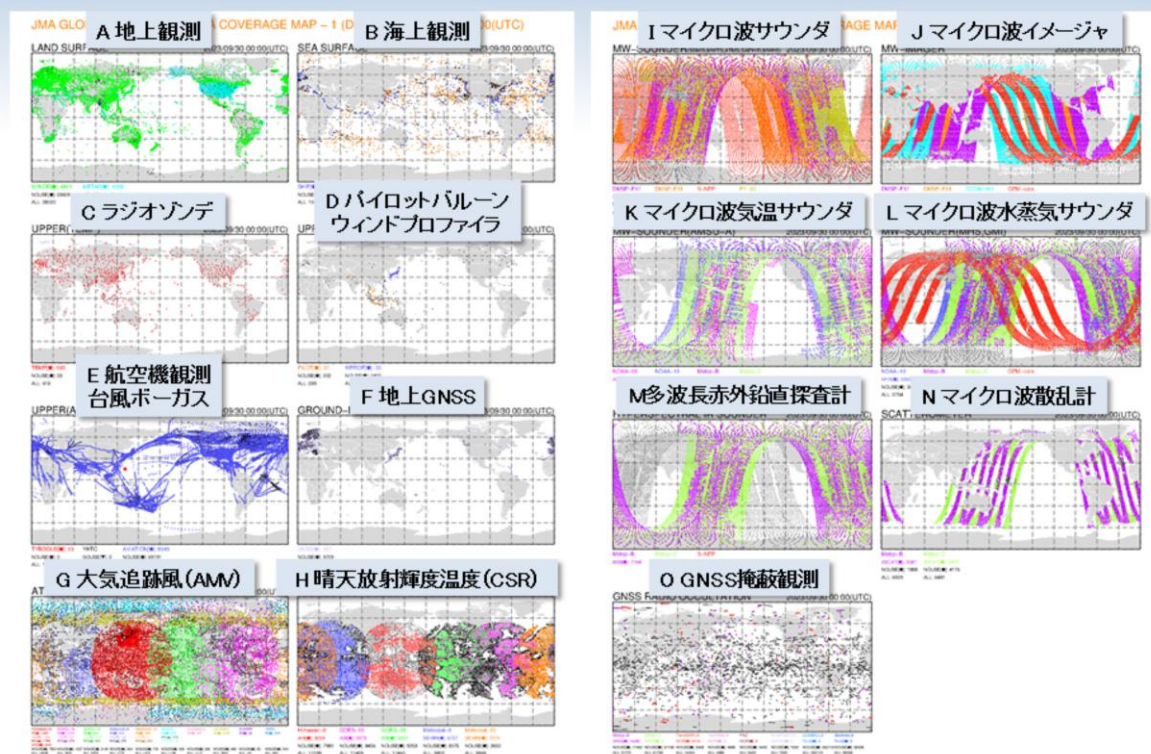
直接観測データは一般に空間分解能に限られ、時間分解能に制約があるものもあるが、高品質でリモートセンシングデータの校正に使われるなど観測データとして貴重である。

地上リモートセンシングは必要な物理量への変換に工夫が必要だが、時間分解能が高く空間一様性が高いという利点がある。

衛星リモートセンシングには地上リモートセンシングの欠点に加え、後述するようにデータの入電に時間がかかるという欠点があるが、時間・空間分解能が高いという利点がある。

疑似観測(台風ポーガス)は典型的な台風構造を仮定しているため個々の台風に適していない場合があるが、観測データの乏しい海洋上に存在する台風周辺域で利用ができるという利点がある。

観測データの水平分布



スライドには2023年9月30日00UTCの前後3時間に観測された観測データの水平分布を示している。それぞれの図でカラーで表示されたデータは実際に全球サイクル解析で利用されたデータを示し、黒は利用されなかったデータを示している。

A)は地上観測で、陸上に密に分布しているが、砂漠や高緯度の雪氷域などでは観測密度が低い。B)は海上観測で、海洋上に広く分布しており、特に北大西洋で観測密度が高い。C)はラジオゾンデによる高層観測で、上空の気温、風、湿度データが得られるが、ほとんどが陸上に分布している。またアフリカでは非常に数が少ない。なお、海洋上では気象観測船や洋上プラットフォームなどによって観測が実施されている。D)はパイロットバルーン(測風気球、橙)やウィンドプロファイラ(青)で得られる上空の風観測である。E)は航空機による観測(青)や台風ポーガス(赤)の分布を示している。航空機観測は全世界から広く得られる。ただし、観測高度は限定的であり、その多くは航空機の巡航高度である10,000 m付近の観測である。F)は地上GNSSデータで、陸上に分布している。

G)～O)は衛星リモートセンシングデータで、色によりその測器を搭載する衛星を区別している。G)～O)の衛星リモートセンシングデータはA)～F)の直接観測や地上リモートセンシングデータと比べて面的にデータが分布しており、さらに水平分解能も高いことが見てとれる。O)はGNSS掩蔽観測で、まばらだが全球に比較的均質にデータが分布している。

G)は大気追跡風(AMV)のデータ分布。H)は静止軌道衛星による晴天放射輝度温度(CSR)のデータ分布で、上空の晴天域のみにデータは限られる。I)はマイクロ波サウンダのデータ分布。J)はマイクロ波イメージャのデータ分布で、海洋上でのみデータを利用している。K)はマイクロ波気温サウンダのデータ分布。L)はマイクロ波水蒸気サウンダのデータ分布。M)は多波長赤外鉛直探査計のデータ分布。N)はマイクロ波散乱計による観測のデータ分布で、衛星軌道の左右両側の海上で風向風速のデータが得られる。

観測データの鉛直分布

	種別	地表	全層積算	対流圏下層	対流圏上層	成層圏	中間圏
直接観測	地上・海上	○					
	航空機観測	○		○	○		
	高層観測	○		○	○	○	
地上リモートセンシング	ウインドプロファイラ			○	○		
	気象レーダー			○			
	解析雨量	○					
	地上・船舶GNSS		○				
疑似観測	台風ボーガス	○		○	○		
静止衛星	可視・赤外イメージャ (AMV, CSR)	○		○	○		
	可視・赤外イメージャ (AMV)	○		○	○		
低軌道衛星	マイクロ波サウンダ	○		○	○	○	○
	赤外放射計	○		○	○	○	○
	マイクロ波イメージャ	○		○			
	マイクロ波散乱計	○					
	二周波降水レーダー			○	○		
	GNSS掩蔽観測			○	○	○	○

中間圏で観測データが得られるのは衛星搭載サウンダやGNSS掩蔽観測のみ。

衛星データは対流圏下層から対流圏上層(一部中間圏)まで観測データを得られるが、大気下層の観測情報を分離することは難しい。

スライドには各観測の観測対象となる高度を示している。

地上(船舶)GNSSにより鉛直方向に全層積算した水蒸気量が得られるが、水蒸気の分布が対流圏下層が多いため、対流圏下層の影響が大きい。また、晴天放射輝度温度は全層積算量に相当する観測データであるが、ここでは観測波長の特性により感度があるとされる高度を示している。現状、中間圏で観測データが得られるのはマイクロ波サウンダと赤外放射計、GNSS掩蔽観測のみである。一方、衛星観測により陸上における大気下層の情報を得るには地表面状態を正確に把握する必要があるため、衛星観測で大気下層の観測情報を分離して得ることは難しい。

数値予報で利用している観測要素

		全球解析	メソ解析	局地解析	毎時大気解析	
直接観測	地上気象観測	気圧(地上解析のみで利用:気温、風、湿度)	気圧、湿度(地上解析のみで利用:気温、風)	気圧、気温、風、湿度		
	地域気象観測システム(アメダス)		湿度	気温、風、湿度	気温、風	
	海上観測	気圧(地上解析のみで利用:気温、風、湿度)		気圧		
	航空機観測	気温、風				
	高層観測	気圧、気温、風、湿度				
地上リモートセンシング	ウインドプロファイラ	風				
	ドップラーレーダー	ドップラー速度				
	解析雨量	反射強度(※1)				
	地上GNSS(※2)	降水量				
	船舶GNSS(※2)	遅延量	可降水量			
疑似観測	台風ボーガス	気圧、風				
静止衛星	大気追跡風	風				
	晴天放射輝度温度	放射輝度				
低軌道衛星	極域大気追跡風	風				
	マイクロ波サウンダ	放射輝度				
	赤外放射計	放射輝度				
	マイクロ波イメージャ	放射輝度	放射輝度、降水量	放射輝度		
					土壌水分量	
	マイクロ波散乱計	風				
					土壌水分量	
	GNSS掩蔽観測	屈折角	屈折率			
衛星搭載レーダー	反射強度(※1)					
合成衛星画像	LEO GEO(※3)大気追跡風	風				

(※1)湿度を推定して同化 (※2)GNSSは全球測位システム (※3) LEOGEOは低軌道衛星(LEO)と静止衛星(GEO)の合成プロダクト

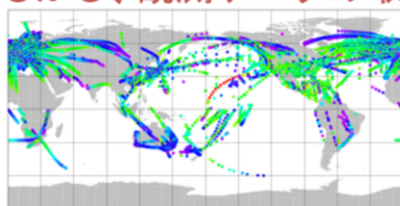
2023年9月現在

スライドでは数値予報で利用している観測要素を示している。

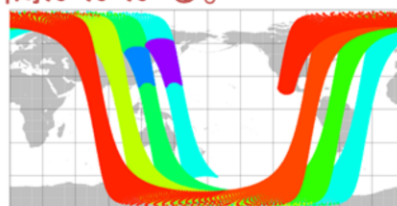
地上観測や海上観測等の直接観測は、気圧、気温、風、湿度など数値予報モデルの予報変数を直接観測するものが多く、地上(船舶)GNSSや衛星観測等のリモートセンシングでは、放射輝度やドップラー速度、反射強度、屈折率など、予報変数ではない物理量を観測するものが多い。

データ打ち切り時間

- 現業数値解析は、リアルタイムシステムである
 - 観測データが増えれば増えるほど、解析精度が向上することが期待できる。
 - **しかし、観測データの取得には時間がかかる。**



同化対象データ(航空機観測)の
解析時刻に対する入電時間分布例



ある衛星の同化対象データの
解析時刻に対する入電時間分布例
(Kjara/AMS-E, 2011/03/01 00JTC)

- **→目的に応じて観測データの待ち受け時間を設定**
 - 速やかな予報のため短い待ち受け時間で解析実行(メソ/局地/全球速報)
 - 精度のよい解析のため待ち受け時間を長く確保して解析実行(気候/全球サイクル)

各種観測データをデータ同化で利用するためには、解析処理開始までにそれらのデータを取得する必要がある。このため、観測データの取得に要する時間は数値予報の運用にとって極めて重要である。スライドには航空機観測と衛星観測の同化対象データの解析時刻に対する入電時間分布を示している。

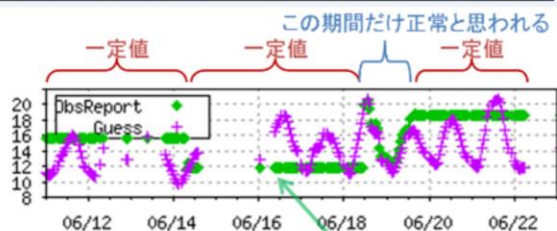
航空機観測は観測時刻が連続的に分布しており、観測後30分以内に多くのデータが入電する。データの入電も連続的にあり、解析時刻の4時間後までには、解析時刻前後3時間のデータのほとんどが入電する。

衛星データについては観測自体は連続的に行われるものの、一定量(例えば地球半周分)のデータを宇宙機関(衛星運用機関)などから一度に取得するため、データ取得分布は連続的にならない。データの取得に要する時間は、一般的には観測後1~3時間程度、遅いものでは5時間程度である。従って、配信の最も遅い解析時刻の3時間後の観測データは解析時刻の8時間後によろやく取得できることになる。このような遅延を補うため、衛星データの中には気象衛星センターに代表される衛星受信局で直接衛星から受信されるデータもある。こうした観測データは、観測後30分以内にはおおむね取得できる。ただし、このようにして衛星から直接得られるのは、受信局周辺の観測データのみに限られる。このため、より迅速に全球的なデータを取得するため、各国の受信局で得られた直接受信データを相互に交換する枠組みがWMOの下で構築されている。

以上の例のように、観測データには取得するのに時間がかかるものがある。観測データが増えれば増えるほど、解析精度が向上することが期待できるが、現業数値予報解析はリアルタイムシステムであるため、迅速性も求められる。そのため、気象庁では速やかな予報のために短いデータ待ち受け時間で行う解析と、精度のよい解析のためデータ待ち受け時間を長く確保して行う解析がある。(詳細は1.3データ同化を参照。)

品質管理(QC)の重要性

誤データの例 船舶からの気温データ



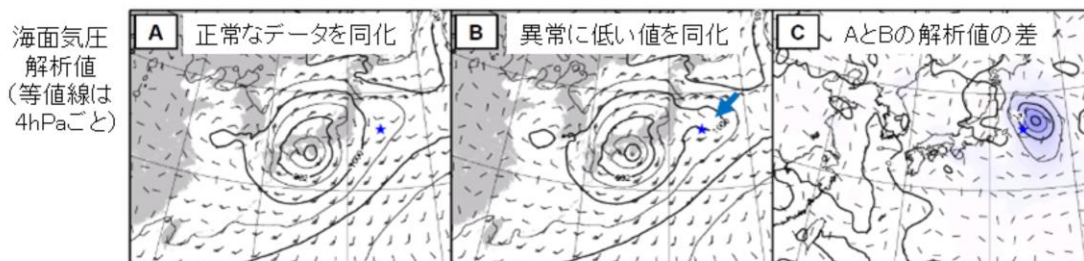
観測データには、誤差が含まれる。測定誤差、代表性誤差、変換誤差など。

誤データの混入は、

- ・予測精度の低下
- ・データ同化処理の異常終了の原因となりうる。

日変化が現れておらず、一定値の通報が続く。

正常な観測データと異常な観測データが同化された時の違いの例



観測データには誤差が含まれる。データ同化で扱う観測誤差として、測定誤差、代表性誤差、変換誤差がある。測定誤差は測器等による誤差で、観測そのものの誤差である(一般に観測誤差と呼ばれるもの)。代表性誤差とは第一推定値の空間的な離散化による誤差である。変換誤差とは格子点値を観測相当量に変換する際に生じる誤差である。これら以外に、人為的なミスや観測測器の故障等、様々な原因により誤データの混入があり得る。そのような異常値データは修正あるいは棄却する必要がある。

スライド左上には船舶からの気温通報値(緑)と、対応する地点における数値予報モデルによる第一推定値(紫)を例として示している。第一推定値が明瞭な日変動を示しているのに対し、通報値はときどき変動がみられるものの一定値が連続しており、明らかに挙動が不自然である。

スライド下部には異常なデータが数値予報のデータ同化に利用された場合の例を示している。(A)は正常な観測データを用いた場合の解析場、(B)は日本の東海上に異常なデータが混入した場合の解析場、(C)は(A)と(B)の差を示している。(B)では日本の東海上に偽の低気圧(矢印)が解析されている様子が見える。この例のように、異常データの混入は予測精度の低下につながる。また、それだけでなく場合によっては、データ同化の処理が異常終了する原因となり得る。このため、異常データはできる限り適切に排除する必要がある。この処理などを実施するのが品質管理(QC: Quality Control)である。

QCにはデータ同化のための前処理として自動的に実施されるリアルタイムQCと、ある一定期間の観測値の振る舞いを監視し、観測データの統計的な問題点などを把握するための非リアルタイムQCの2種類がある。

リアルタイムQC(内的QC)

リアルタイムQCは、データ同化に入力するための観測データの妥当性を判定する前処理で実施される。

リアルタイムQC

内的QC・・・観測データが持つ情報のみを使って行う

外的QC・・・第一推定値や周囲の観測等と比較して行う

チェック種別	チェック内容
ブラックリストチェック	ブラックリストに基づいて、低品質と認識されたデータを棄却
気候学的チェック	気候学的な不自然さについてのチェック
航路チェック	船舶等のデータで不自然な挙動等
要素間整合性チェック	例えば気温と露点温度の関係
鉛直整合性チェック	気温減率の妥当性等

リアルタイムQCはデータ同化に入力するための観測データの妥当性を判定する前処理で実施される。前処理は観測の種類に応じて様々な手法で行われる。このうち直接観測やAMVなどのQCは、以下に述べる内的QCと外的QCの処理が実施される。

内的QCは観測データが持つ情報のみを使って行うQCであり、以下のような項目がある。

- ・ブラックリストチェック: 後述する非リアルタイムQCの結果に基づいて、品質が悪いと事前に判明しているデータを予め登録したブラックリストに基づいて除去する。
- ・気候学的チェック: 気候学的に妥当な値が報じられているか確認する。値の基準はWMO(1993)に基づいている。
- ・航路チェック: 船舶や航空機などの移動体からの観測通報が適切か確認する。移動速度や角度の確認のほか、船舶では通報位置が海上かどうかも確認する。
- ・要素間整合性チェック: 同時に測定した異なる観測要素間で整合が取れているか確認する。例えば、気温と露点温度が逆転していないか、などである。
- ・鉛直整合性チェック: 高層観測を対象として、鉛直方向にある一連のデータが気象学的に整合しているか確認する。例えば、観測値が一定ではないか(測器が氷結していないか)、気温減率は妥当か、などである。

リアルタイムQC(外的QC)

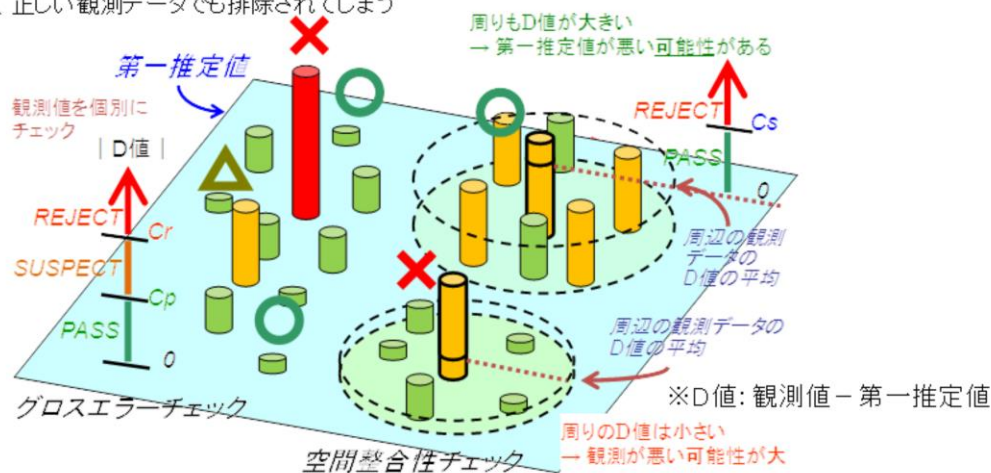
グロスエラーチェック

- ・第一推定値と観測値を比較
- ・著しく差がある場合は除去
- ・それほど大きくない場合は一度保留

※グロスエラーチェック時、第一推定値の品質が特に悪い場合には、正しい観測データでも排除される可能性有

空間整合性チェック

- (特にSUSPECTのデータについて)
- ・周囲との比較で最終的に採用・棄却を決定



外的QCは第一推定値や周囲の観測等と比較して観測データの妥当性を確認する。外的QCは以下によって行われる。なお、これらの処理の模式図をスライドに示している。

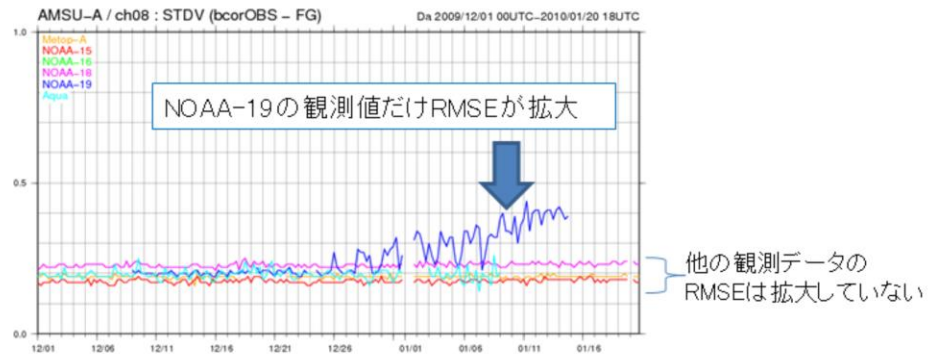
- ・グロスエラーチェック: 観測値と第一推定値の差(D値)により、そのデータが妥当か判定する。ただし、第一推定値自体が妥当かどうか必ずしも明確でない(予報精度が悪い可能性がある)ので、本判定ではD値の大きさに応じて、PASS(通過)/SUSPECT(保留)/REJECT(排除)の3種類に判定し、SUSPECTデータは後続の空間整合性チェックで改めて判定する。なお、第一推定値の品質が特に悪い場合には、正しいデータであっても、本チェックで排除されてしまう可能性があるため注意が必要である。
- ・空間整合性チェック: D値を周囲の観測データと比較し、周囲の観測データも似たようなD値だった場合、観測は正しいと判断してPASSとする。逆に周囲と異なる場合には、観測値の信頼性が低いとみなしてREJECTとする。

リモートセンシング観測のためのQCは、それぞれの特性に応じて様々な処理が施されている。例えば、グロスエラーチェックのほか、衛星データに関しては、観測位置整合性チェックなどが行われる。

非リアルタイムQC

- 一定期間の観測値の振る舞いなどを監視
観測データの統計的な問題などを把握
- 必要と判断した場合、リアルタイムQCで用いるブラックリスト上での該当データの登録・解除

例：複数の同種の衛星観測データの
第一推定値に対する二乗平均平方根誤差時系列



➡ 第一推定値ではなく、NOAA-19の観測データの精度が悪化したと判断



非リアルタイムQCは一定期間の観測値の振る舞いなどを監視し、観測データの統計的な問題などを把握するために行われており、この結果に基づきリアルタイムQCで用いるブラックリスト(品質が悪いデータのリスト)の登録・解除などを行っている。アジア地域の地上気象観測データの情報については、モニタリングレポートとしてとりまとめ、観測実施当局である外国気象機関やWMOに周知すると共に、外国数値予報センターとも情報交換し、観測の問題の把握に努めている。なお、このモニタリングレポートは、ウェブ(<http://qc.kishou.go.jp/>)により公開されている。

数値予報課では統計処理や観測値と第一推定値の比較の時系列図などで各種観測データの監視を行っている。また、衛星データに関しては別々の衛星の同様の周波数帯(チャンネル)の輝度温度観測データについて、第一推定値に対する二乗平均平方根誤差(RMSE)やバイアス、入電数の時系列を描画することにより監視を行っている。例として、スライドには複数の同種の衛星観測データの第一推定値に対するRMSE時系列のグラフを載せている。スライドの図を見ると、NOAA-19以外の衛星のデータは一定の範囲内で変動しているが、NOAA-19だけRMSEが拡大している。これから、第一推定値ではなく、NOAA-19の観測データの精度が悪化したと判断できる。

参考文献

- 計盛正博、本田有機、佐藤芳昭、2018: 観測データと品質管理 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72-82.
- WMO, 1993: Guide on the Global Data-Processing System, WMO No.305.