



数値天気予報における衛星データ利用の現状

Status of Satellite Data Utilization in Numerical Weather Prediction

竹内義明(気象庁)
Yoshiaki TAKEUCHI
(Japan Meteorological Agency)

*Courtesy of
Kozo OKAMOTO, Yoshiaki SATO (NPD/JMA), Takashi MAKI(AED/JMA)
and Taichu TANAKA (MRI/JMA)*

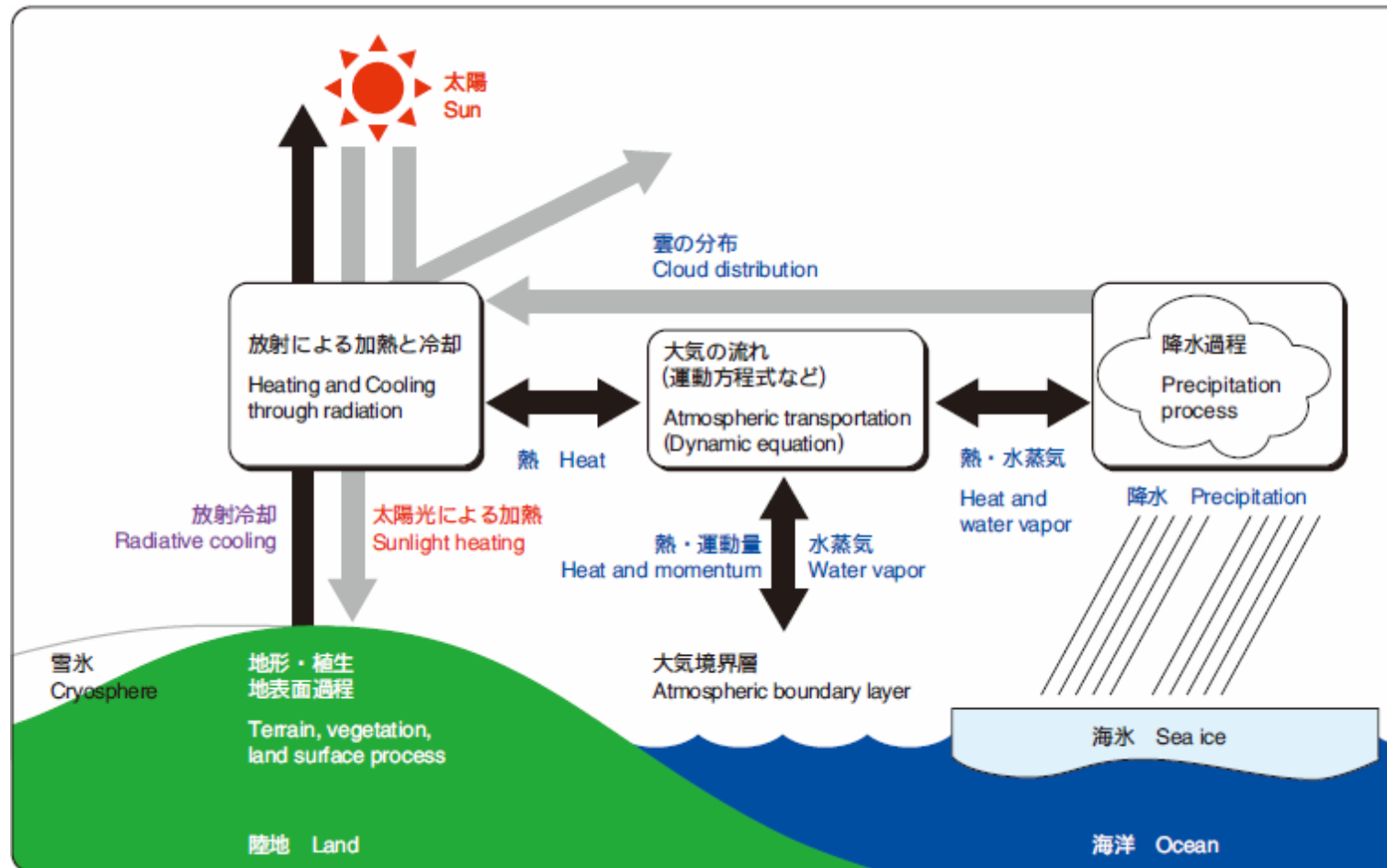
目次 Contents



1. 数値予報
Numerical Weather Prediction
 2. 初期値作成への利用
Satellite data for initial condition of NWP
 3. 境界値作成への利用
Satellite data for boudary condition of NWP
 4. 紫外線予測への利用
Satellite data for UV prediction
 5. 黄砂予報への利用
Satellite data for dust storm prediction
 6. まとめ
Summary
-

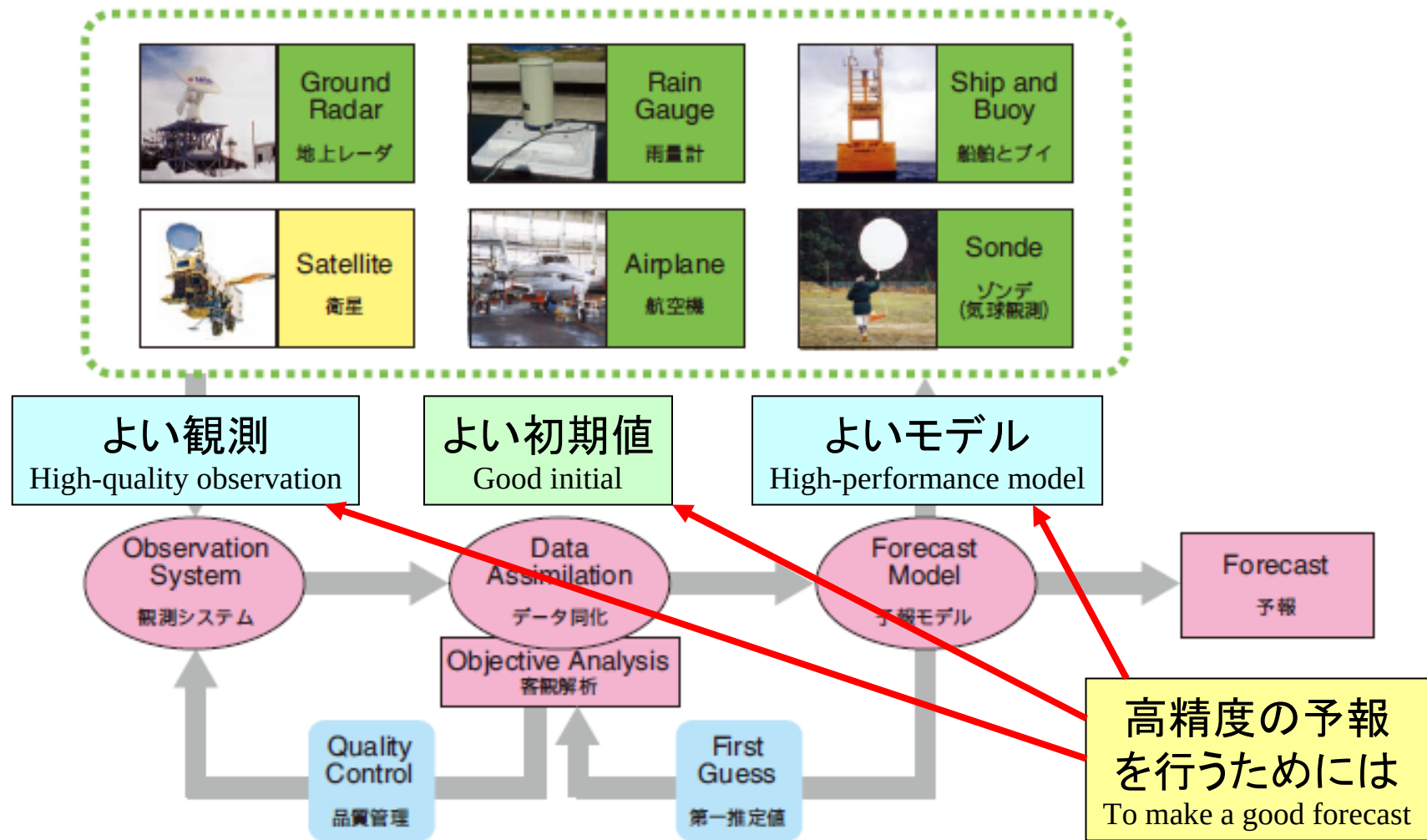
1. 数値予報

Numerical Weather Prediction



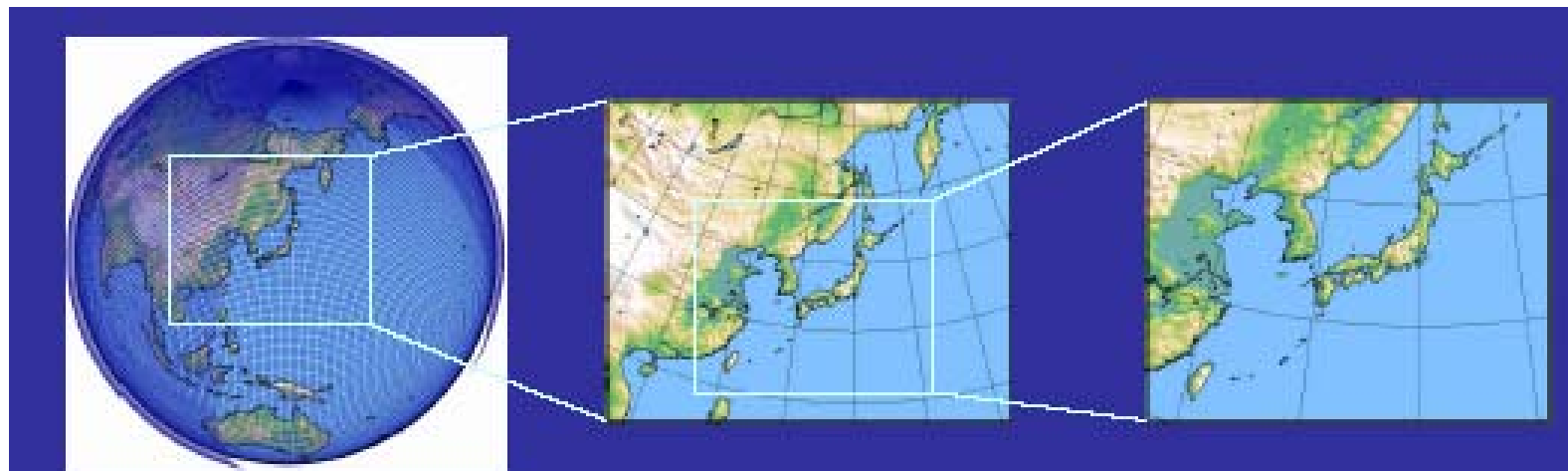
数値予報のしくみ

Structure of NWP



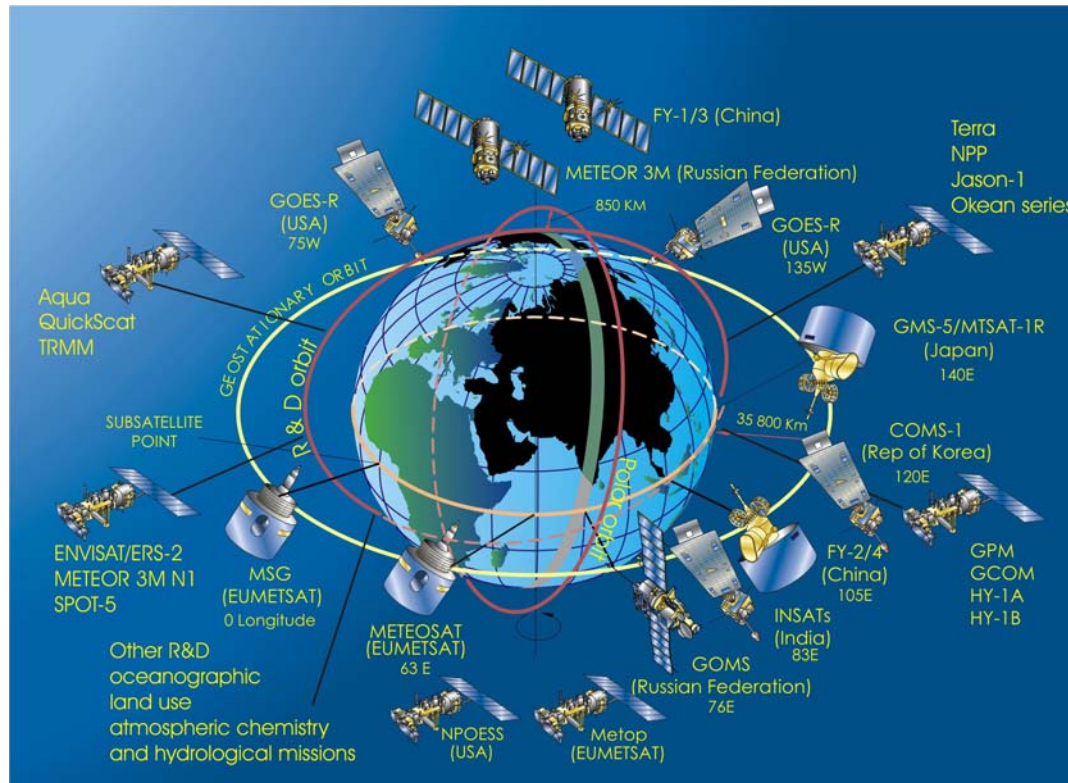
気象庁現業数値予報モデル

Operational NWP Models at JMA



名称	全球モデル	領域モデル	メソ数値予報モデル
Model	Global Spectral Model	Regional Spectral Model	Meso-Scale Model
解像度 Resolution	60km	20km	5km
予報時間 Forecast time	90hrs (00UTC) 216hrs(12UTC) 36hrs (06,18UTC)	51hrs (00, 12UTC)	15hrs (00,03,06,09, 12,15,18,21UTC)
利用目的 Objectives	週間予報、短期予報、 航空予報 One-week forecast, Short-range forecast, Aviation weather services	短期予報、量的予報、 航空予報 Short-range forecast, 24-hour quantitative forecast, Aviation weather services	防災気象情報、 航空予報 Disaster Prevention, Aviation weather services

衛星による全球観測システム Space component of GOS



静止気象衛星

MTSAT-1R, GOES,
METEOSAT他

極軌道気象衛星

NOAA, DMSP, Metop他

地球観測衛星

Aqua, QuikSat, TRMM他

【調整機関】

気象衛星調整会議(CGMS)

JMA, NOAA, ROSHYDROMET,
WMO, IMD, EUMETSAT,
CMA, IOC/UNESCO, ESA,
JAXA, NASA, ROSCOSMOS,
CNES, KMA

【数値予報等データ要求とりまとめ】

北米欧州データ交換会議(NEDEX)

アジア太平洋衛星データ利用交換会議 (APSDEU)

出典: WMOホームページ<<http://www.wmo.int/web/sat/sbgos.html>>

2. 初期値作成への利用

Satellite data for initial cond. of NWP



- 大気追跡風(AMV: Atmospheric Motion Wind)
 - 静止衛星風 **G/R/M**
 - MTSAT(ひまわり), GOES, METEOSAT
 - MODIS極域風 **G**
 - Aqua/MODIS, Terra/MODIS
- 散乱計による海上風 **G/M**
 - QuikSCAT/SeaWinds
- 鉛直探査計(サウンダー)
 - NOAA/AMSU-A&-B, Aqua/AMSU-A
 - 輝度温度 **G**
 - リトリーブ気温 **M**
 - リトリーブ気温・相対湿度 **R**
- マイクロ波放射計(マイクロ波イメージャー)
 - DMSP/SSMI, TRMM/TMI, **Aqua/AMSR-E**
 - 可降水量・降水量 **M**
 - 輝度温度 **G**

衛星名／センサー名

G: 全球解析
R: 領域解析
M: メソ解析

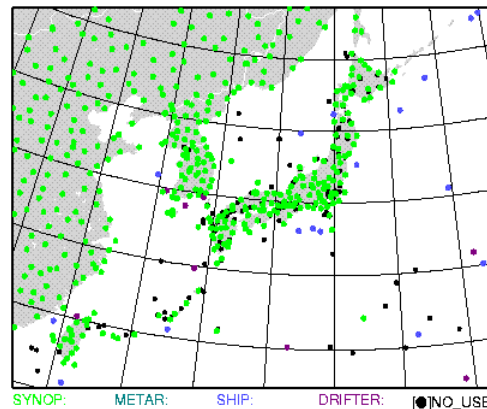
メソ解析データ (12UTC)

Data coverage in meso-analysis

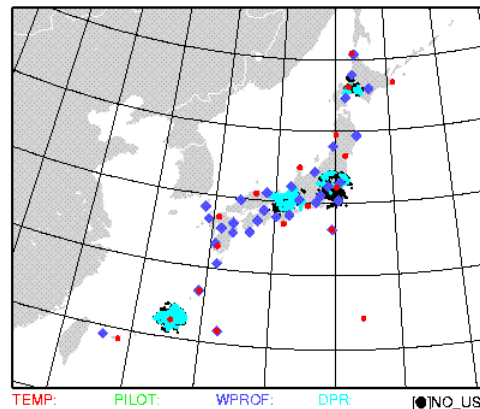
- 衛星データは主に海上で広く使われている
- SeaWindsの海上風データは船舶の海上風データに比べてはるかに多い

JMA MESO ANALYSIS – DATA COVERAGE MAP (Ma12ps): 2007/01/18 12:00(UTC)

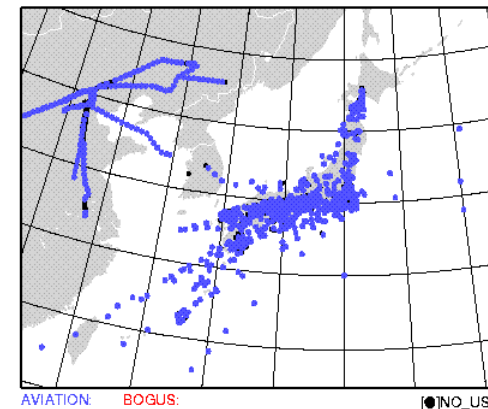
CONVENTIONAL SURF



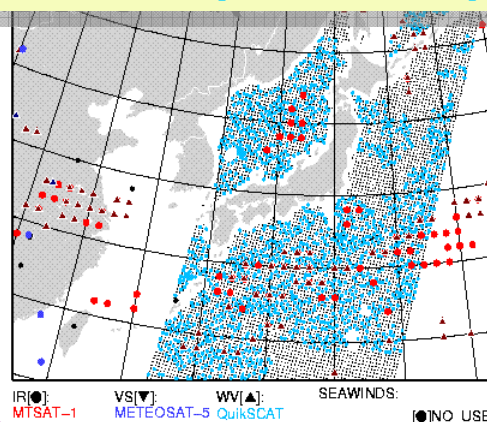
CONVENTIONAL UPPER



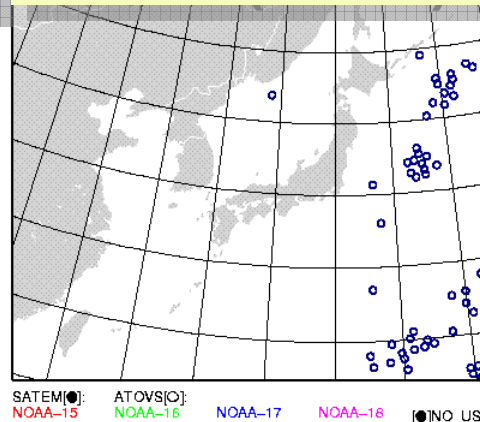
CONVENTIONAL OTHERS



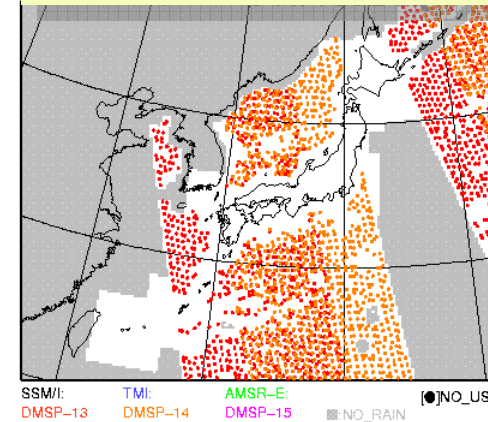
静止衛星風、
散乱計海上風(SeaWinds)



サウнда(ATOVS)



マイクロ波放射計(SSM/I)



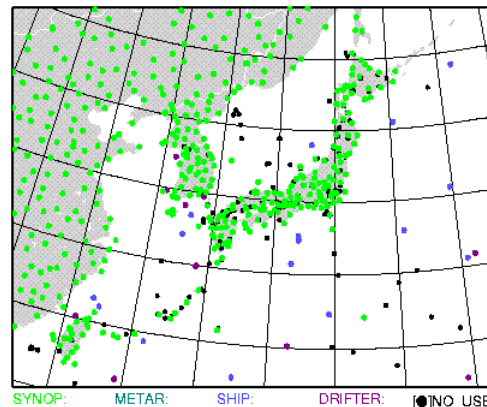
メソ解析データ (18UTC)

Data coverage in meso-analysis

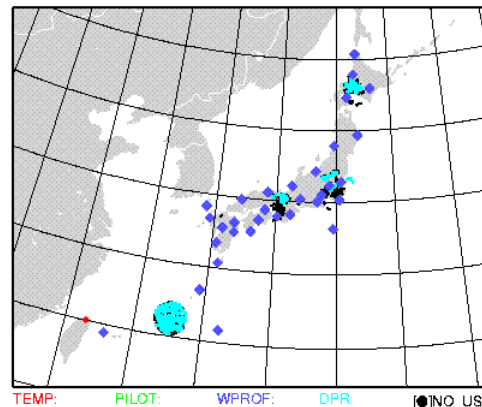
- SSM/Iの観測がない解析時刻でもAMSR-E,TMIの観測データが十分に使われている。

JMA MESO ANALYSIS – DATA COVERAGE MAP (Ma18ps): 2007/01/18 18:00(UTC)

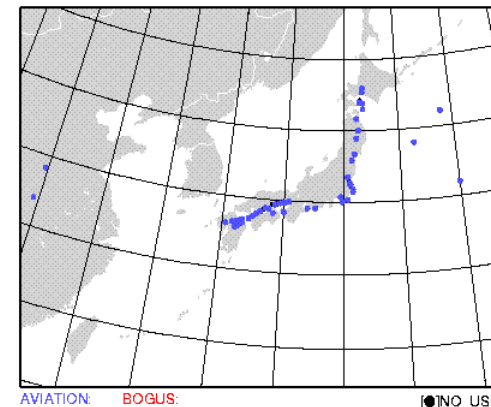
CONVENTIONAL SURF



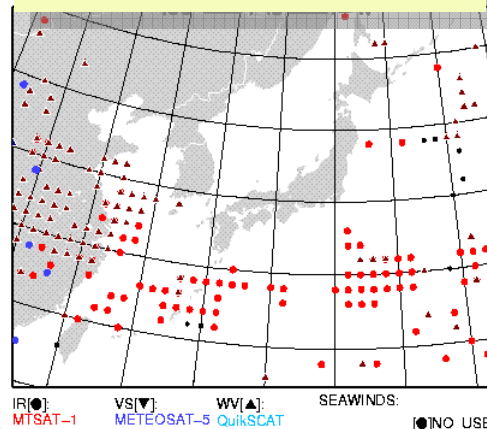
CONVENTIONAL UPPER



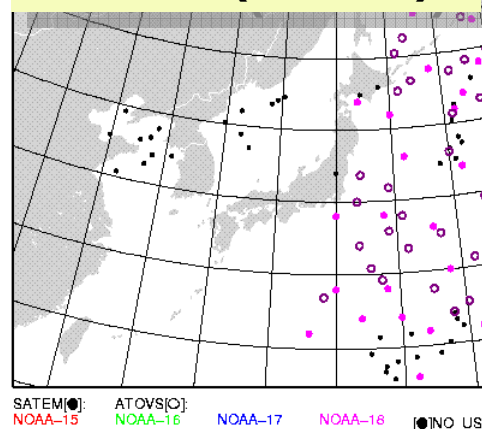
CONVENTIONAL OTHERS



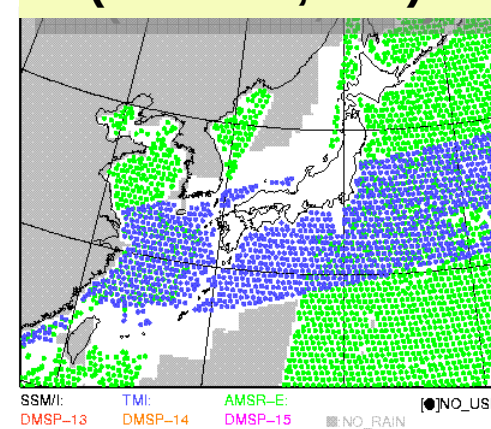
静止衛星風



サウンダ(ATOVS)

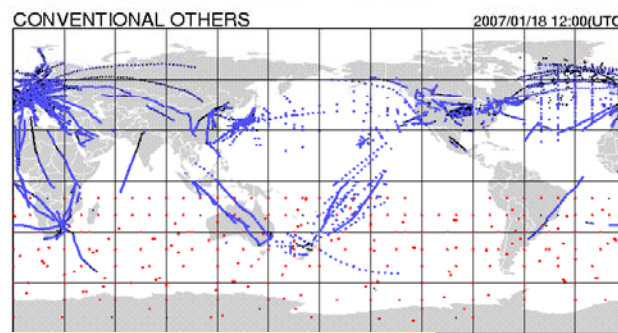
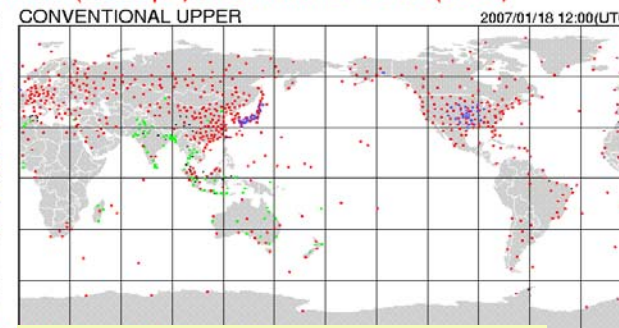
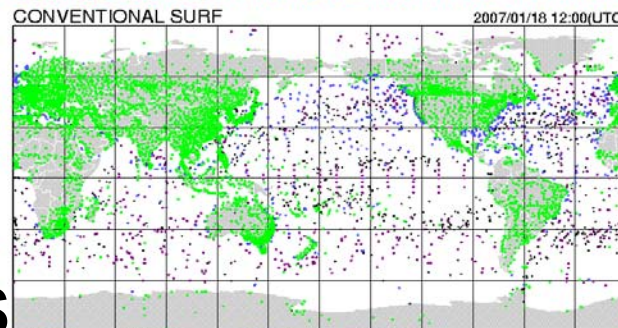


マイクロ波放射計
(AMSR-E,TMI)

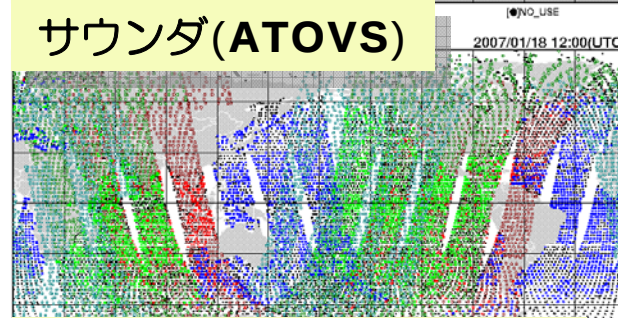


全球解析 データ Data coverage in global analysis

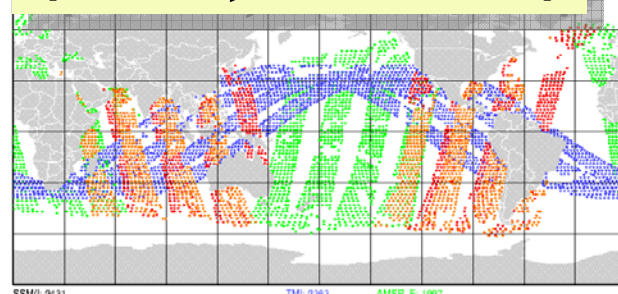
JMA GLOBAL ANALYSIS – DATA COVERAGE MAP (Ca12ps): 2007/01/18 12:00(UTC)



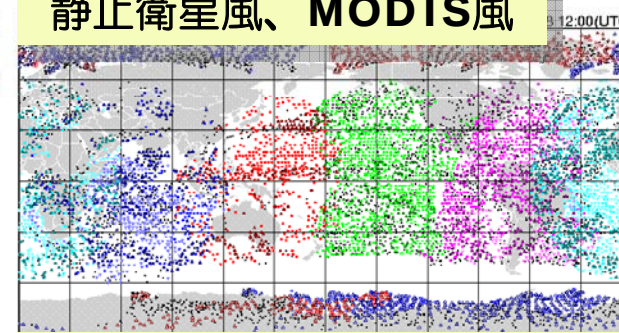
サウンダ(ATOVs)



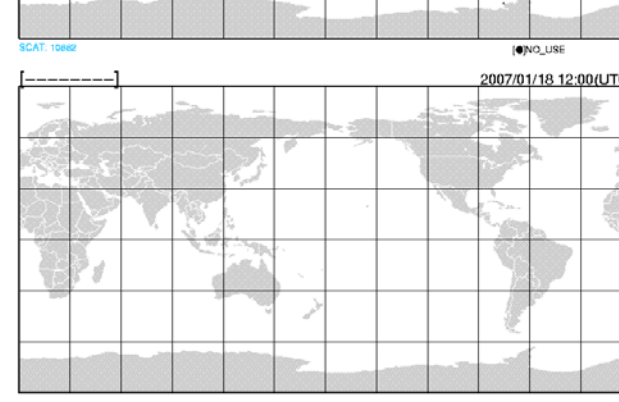
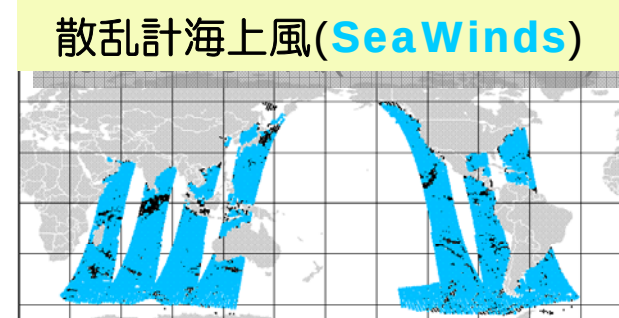
マイクロ波放射計
(SSM/I, AMSR-E, TMI)



静止衛星風、MODIS風



散乱計海上風(SeaWinds)



2.1 風データの利用

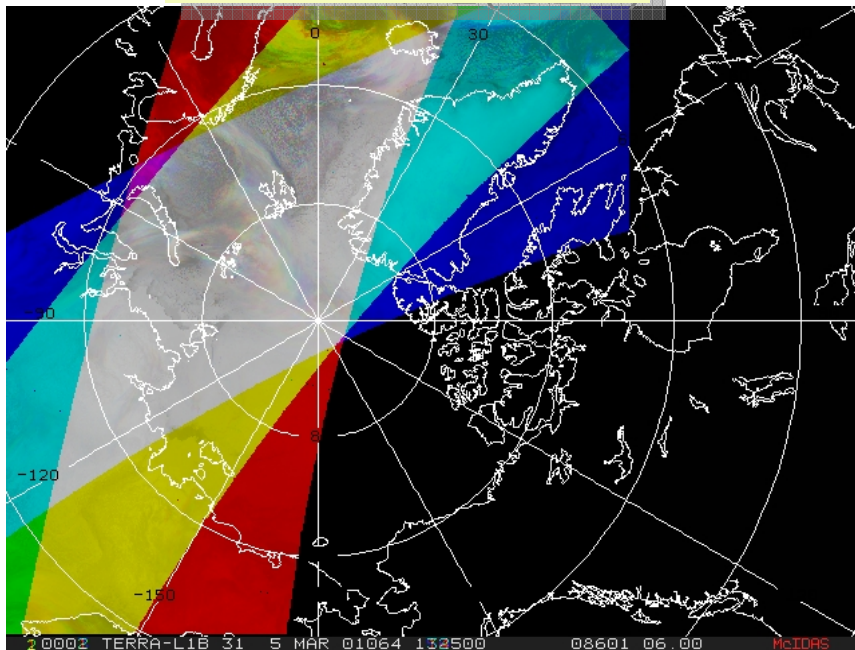
Use of wind (surface & upper)

- 雲や水蒸気を追跡して推定した風を利用
 - 静止気象衛星(中・低緯度域) 1979.3～
 - 極軌道衛星(高緯度域) 2004.5～
 - 海面によるマイクロ波の散乱から推定した海上風を利用
 - マイクロ波散乱計 1998.7～
 - ドップラーライダーで観測した風を利用予定
 - ADM-Aeolus 2008打ち上げ予定
-

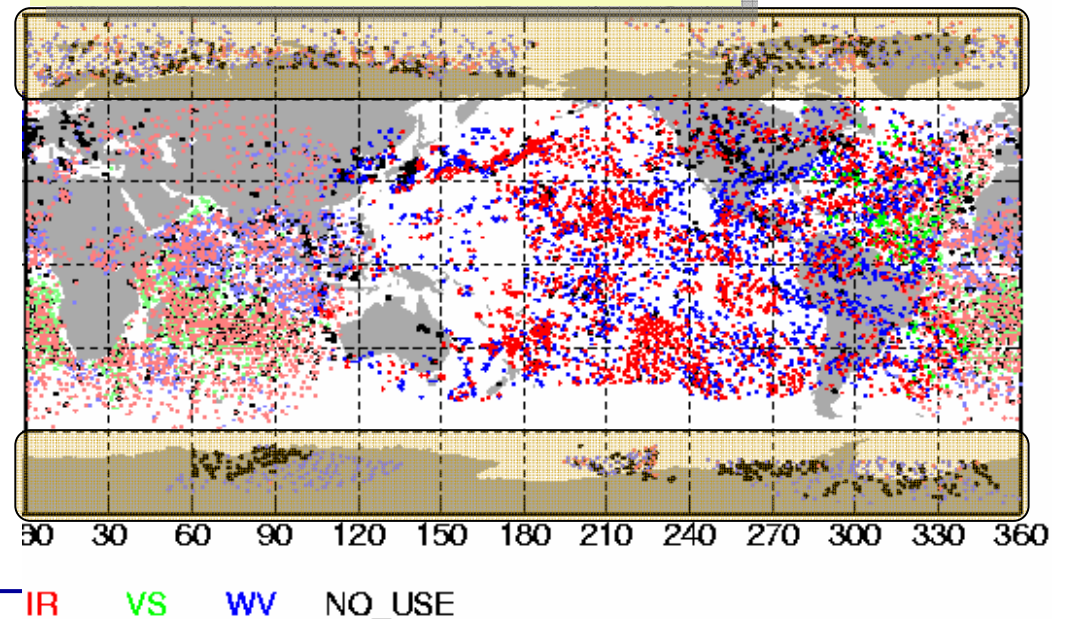
2.1.1 大気追跡風：静止衛星風とMODIS極域風 Air Motion Vectors: GEO wind and Polar wind

- 静止衛星風 1979年3月より現業利用
 - 雲や水蒸気を画像から判別・追跡して推定した風データ
 - 風の高度は輝度温度を使って推定
- MODIS極域風 2004年5月より現業利用
 - 極軌道衛星Aqua, Terra搭載のMODISイメージャーが極域を高頻度に観測することから、静止衛星風と同じ原理で推定した風データ

MODISの軌道(北極域)

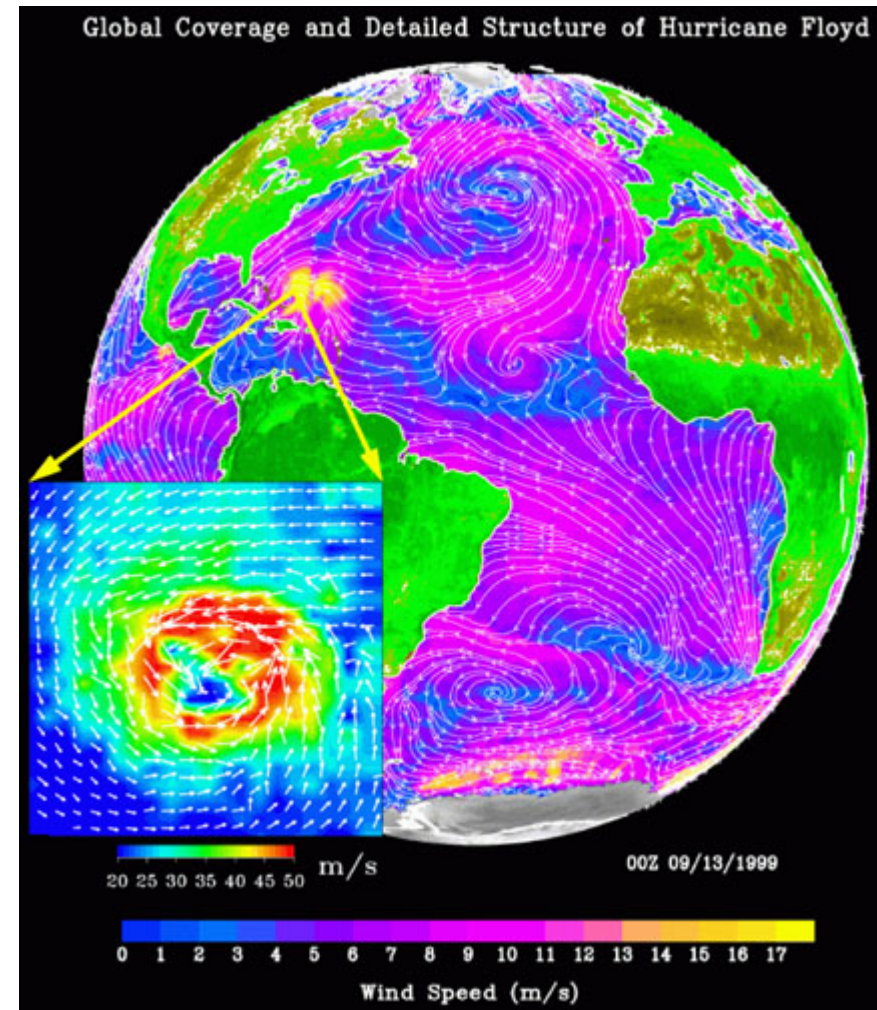


静止衛星風とMODIS極域風の分布



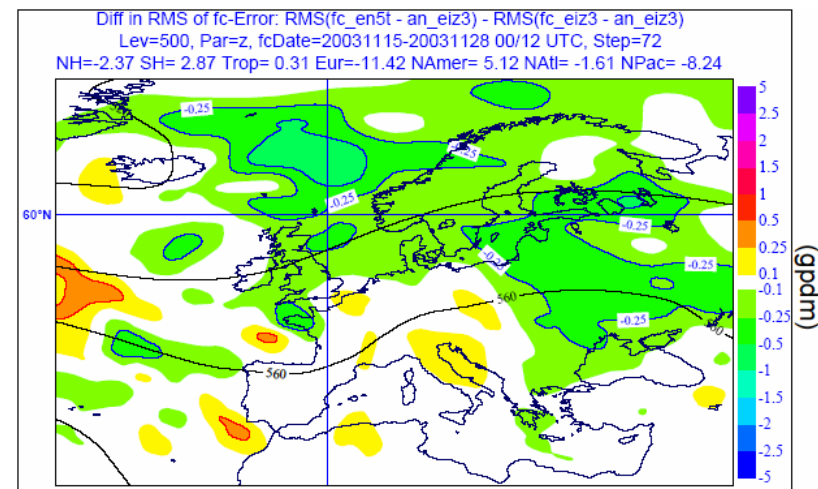
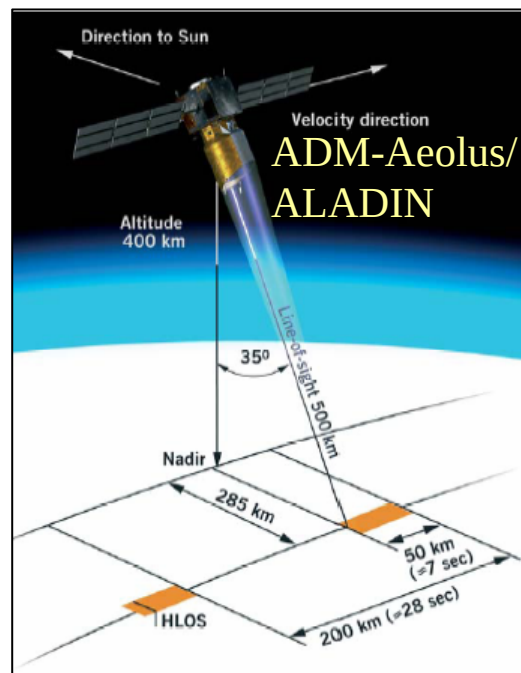
2.1.2 マイクロ波散乱計海上風(QuikSCAT/SeaWinds等) Sea surface wind

- 海上の風浪によって生じる反射強度(散乱断面積 σ)から推定した高精度の海上風データ
 - 1998年7月より全球解析で現業利用
 - 2004年7月よりメソ解析で現業利用
- 複数衛星による高頻度観測に期待
 - METOP/ASCAT (2006)
 - GCOM-W2/SeaWinds2 (2015) ??



2.1.3 ドップラーライダー(ADM-Aeolus/ALADIN) Doppler Lidar

- ❑ 衛星から発射したレーザー光の大気の流れやエアロゾルによる散乱信号のドップラー変位から推定した視線方向の風速の鉛直プロファイルデータ
 - ❑ 観測範囲: 地上~30km、分解能: 水平50km, 鉛直1km、精度: 1~2m/s
 - ❑ 2008年打ち上げ予定
 - ❑ 航空機搭載型ドップラーライダーによる観測実験では数値予報の精度向上が確認された(Weissmann et al. 2006)



大西洋上で観測されたドップラーライダーデータを同化した場合の500hPa高度の3日予報の改善(緑色が予報改善を表す)(Weissmann et al. 2006)

2.2 気温・水蒸気データの利用

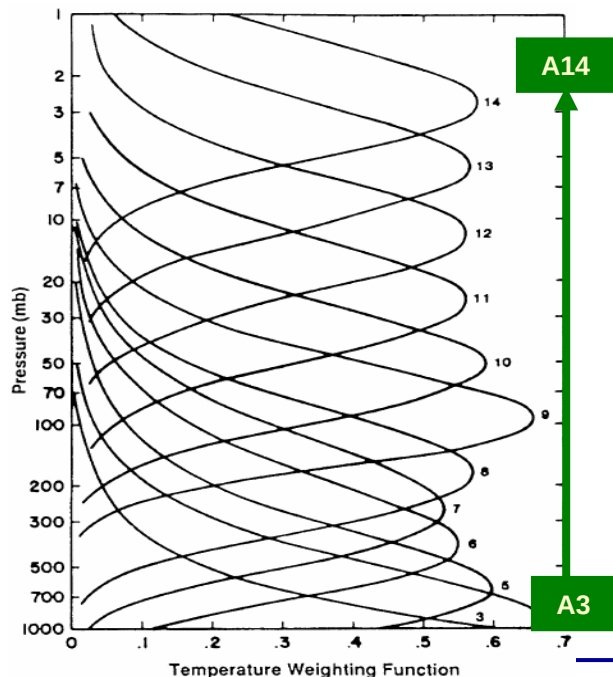
Use of temperature & water vapor (upper)

- 大気の高層から射出される赤外放射から推定した気温を利用
 - 赤外サウンダ 1982.3～
 - ハイパースペクトル赤外サウンダ 利用予定
- 大気の高層から射出されるマイクロ波放射から推定した気温を利用
 - マイクロ波サウンダ 1982.3～

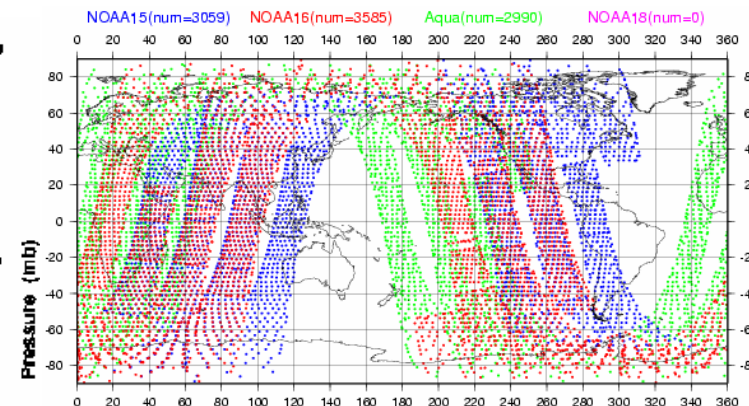
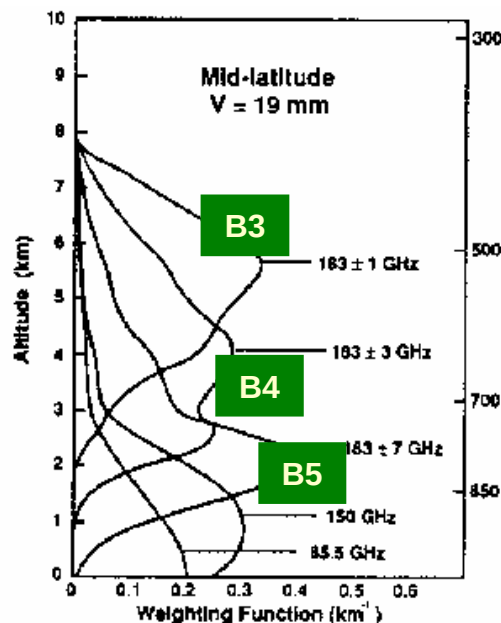
2.2.1 サウンダ Sounder

- 大気中の二酸化炭素、酸素、水蒸気から射出される赤外・マイクロ波放射を観測して気温、水蒸気などの鉛直分布を観測。
NOAA/AMSU-A,B,MHS,HIRS, METOP/AMSU-A,MHS,HIRS, Aqua/AMSU-A,HSB
- 水平分解能: 15km~50km、鉛直分解能: 2~3km
- 全球解析では輝度温度を直接同化 2003年5月~
- 領域・メソ解析ではリトリーブされた気温(・相対湿度)を同化 1982年3月~

AMSU-Aの荷重関数



AMSU-Bの荷重関数



気象庁の全球解析に使われた
AMSU-Aの6時間分のデータ分
布(間引き後)(岡本 2007)

2.2.2 近い将来利用を開始する予定のデータ Coming soon

□ GPS

□ 掩蔽データ(Occultation)

- 大気の屈折を利用して推定された高い鉛直分解能の気温・水蒸気データ 利用予定

□ 地上データ(ground based)

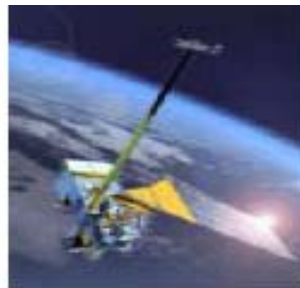
- 大気の屈折を利用して推定された可降水量データ 利用予定

□ ハイパースペクトル赤外サウンダ

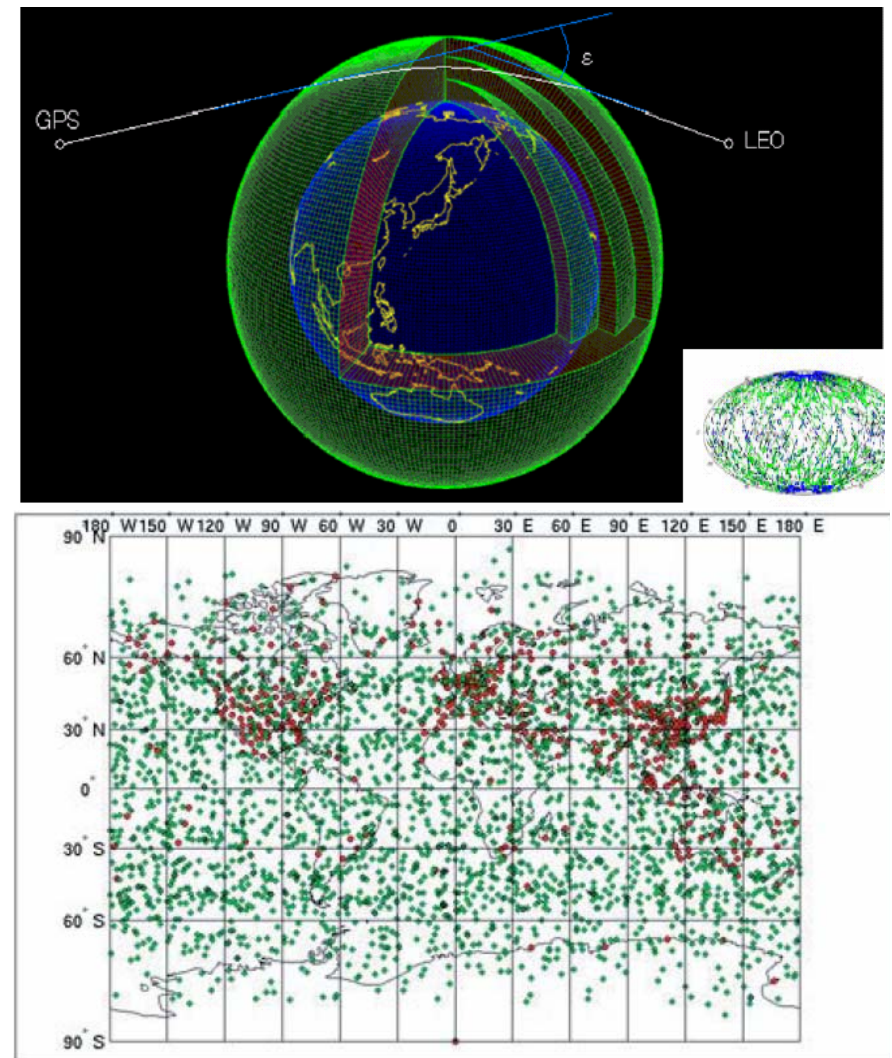
- 鉛直分解能が約1kmの赤外サウンダ 利用予定



METOP/IASI
8461チャンネル



NPP/CrIS
1305チャンネル



COSMIC衛星網のデータ分布(緑色)の例。赤はラジオゾンデ観測分布(COSMIC資料より)。

2.3 水蒸気・降水データの利用

Use of water vapor and rain data

- JAXA/EORCからAMSR-E輝度温度データを取得
 - 気象庁数値予報課で他のマイクロ波放射計(DMSP/SSM/I, TRMM/TMI)と合わせて、可降水量と降水強度を算出
 - 気象庁数値予報課で他のデータと合わせて気温・風・水蒸気量・海面気圧を解析
 - 上層水蒸気量: 衛星搭載探査計(AMSU-B)
 - 水蒸気量鉛直分布: ラジオゾンデ
 - 降水量: レーダー、アメダス
 - 2003.10～ SSM/I, TMIデータをメソ数値予報モデルで利用
 - 2004.11～ AMSR-Eデータをメソ数値予報モデルで利用
 - 2006.5～ SSM/I, TMI, AMSR-E輝度温度データを全球数値予報モデルで利用
-

2.3.1 マイクロ波放射計可降水量・降水量 Microwave Radiometer (TPW, RR)

- 大気や地表から射出されるマイクロ波放射から推定した可降水量・降水量データ
 - 2003年10月よりメソ解析で現業利用 (DMSP/SSMI, TRMM/TMI)
 - 2004年7月より Aqua/AMSR-Eを追加

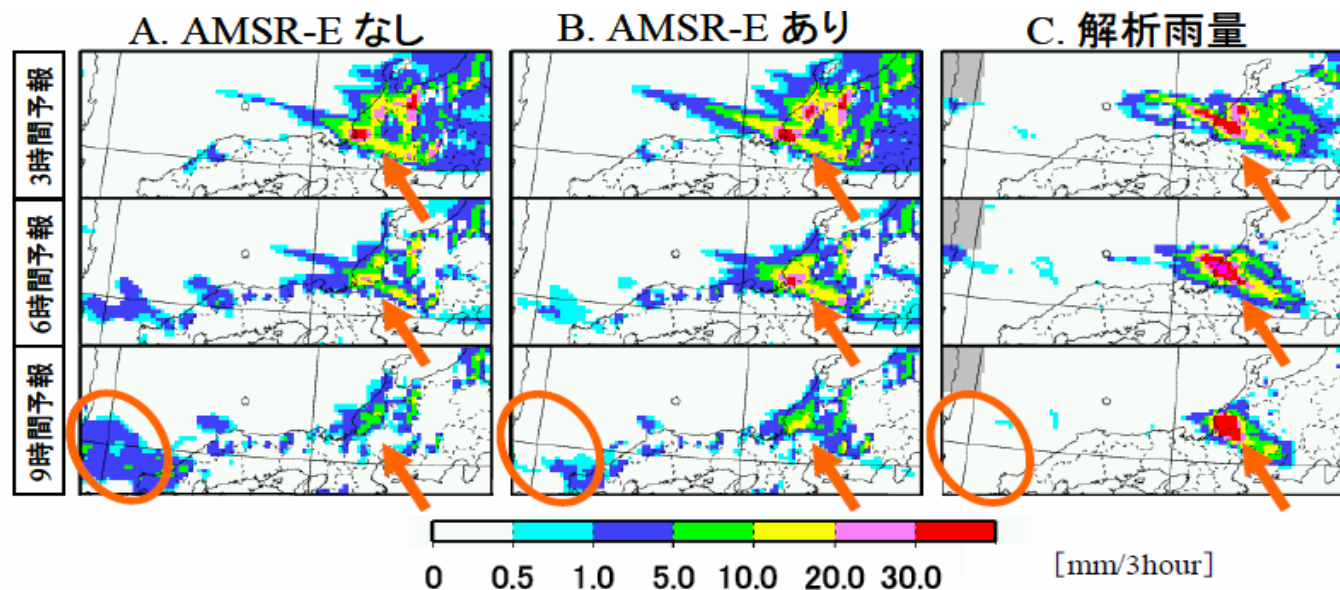
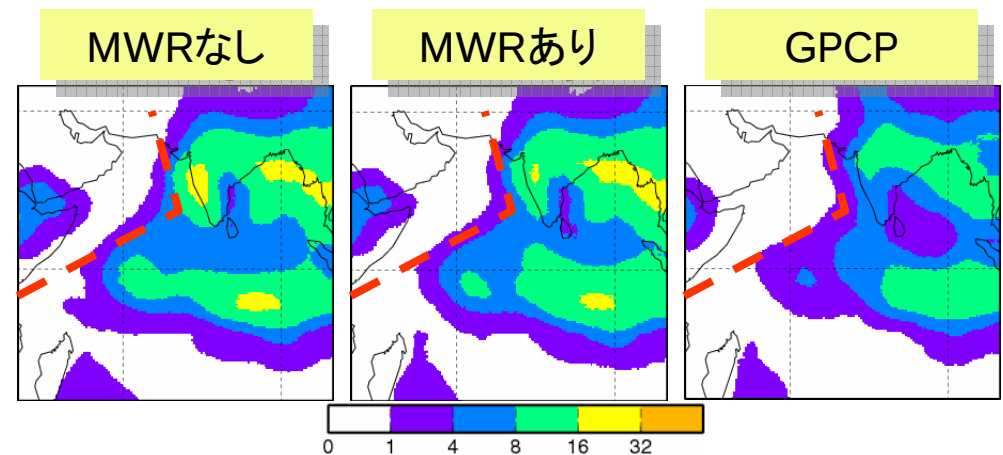
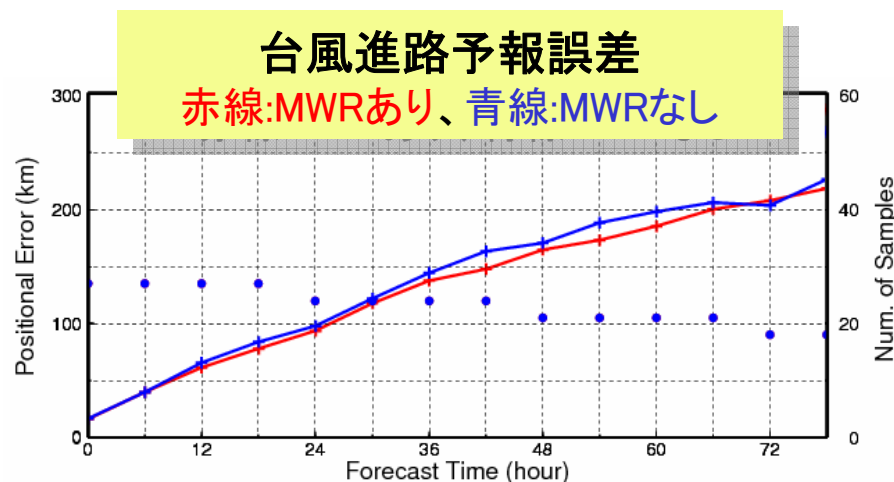


図5 平成16年7月17日18UTC初期値のMSMの各予報時刻における前3時間降水量(A),(B)とそれに対応する解析雨量(C)。上から3時間、6時間、9時間予報値。

降水分布、降雨強度の精度向上(福井豪雨の例)

2.3.2 マイクロ波放射計 輝度温度 Microwave Radiometer (TBB)

- 晴天・海上のマイクロ波放射計の輝度温度データに含まれる水蒸気情報をデータ同化を通してモデルに取り込む
 - サウンダーによる観測やモデルとのバイアスを動的に補正して利用
 - 下層の水蒸気場の解析精度が向上し、台風の進路予報や降水予報の精度が向上
- 2006年5月より全球解析で現業利用 (DMSP/SSMI, TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E)



降水予報の精度向上(インド洋)

2.3.3 マイクロ波放射計観測の将来計画

Future plans on MWR data use

□ GPM

- 降雨レーダー(DPR) 降水データの校正用
- マイクロ波放射計(MWR) 3時間毎の降水データ ➡ 初期値作成に利用予定

□ GCOM-W/AMSR-2

- 水蒸気・降水量 ➡ 初期値作成に利用予定
- 海面水温・海氷・積雪・土壌水分
➡ 境界値作成に利用予定



2.4 水蒸気・雲データの利用

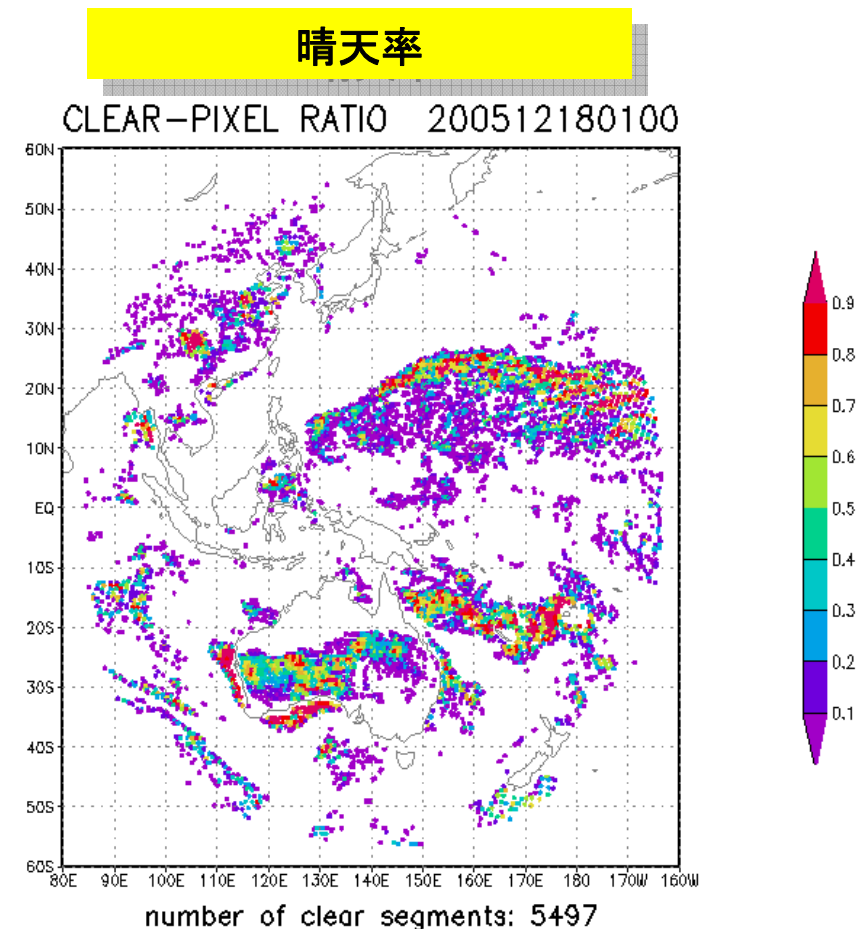
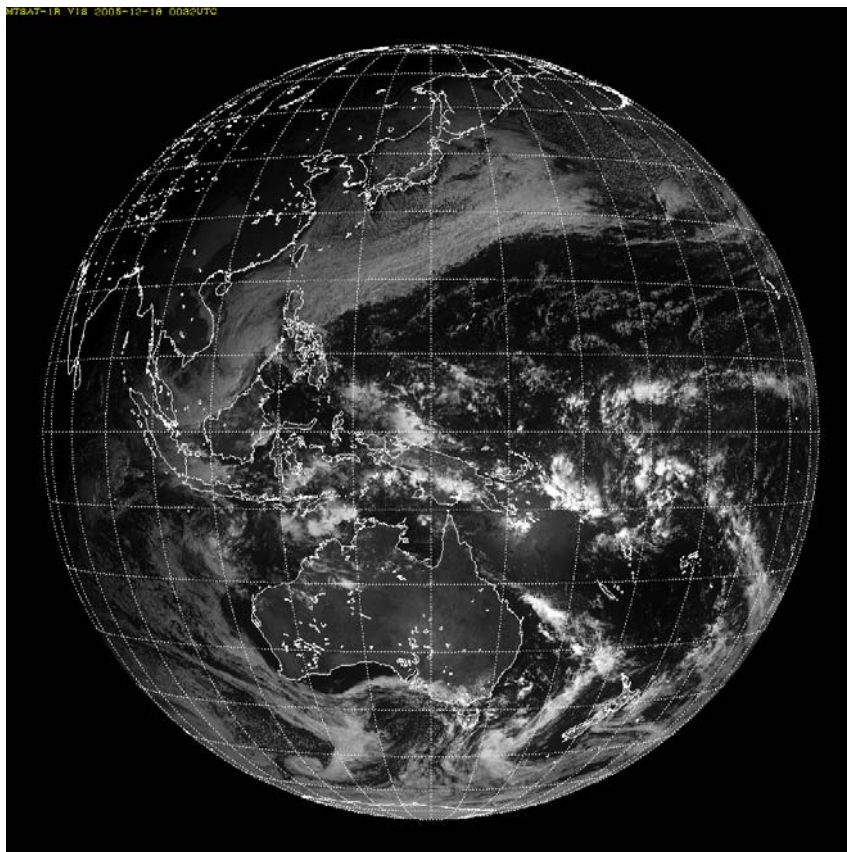
Use of water vapor and cloud data

- 雲データの同化は困難な課題の一つ
- 静止気象衛星の水蒸気チャンネル輝度温度の全球解析への利用開発を進めている
- 雲レーダーをはじめとするデータが得られつつあり、検証への利用が期待される

2.4.1 静止衛星水蒸気チャネルの輝度温度直接同化

Direct assimilation of TBB from GEO water vapor ch.

- 上層水蒸気情報を同化
 - 高頻度(毎時)の水蒸気情報を、4DVarで同化することにより、風の情報も間接的に得られる可能性がある



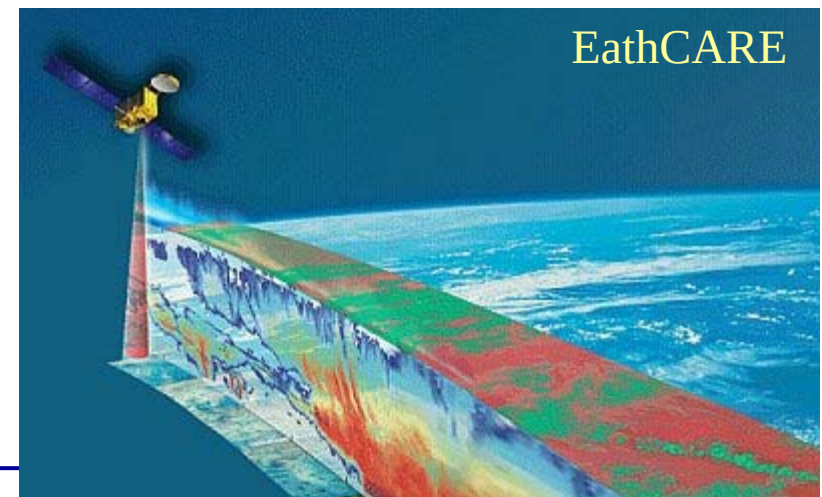
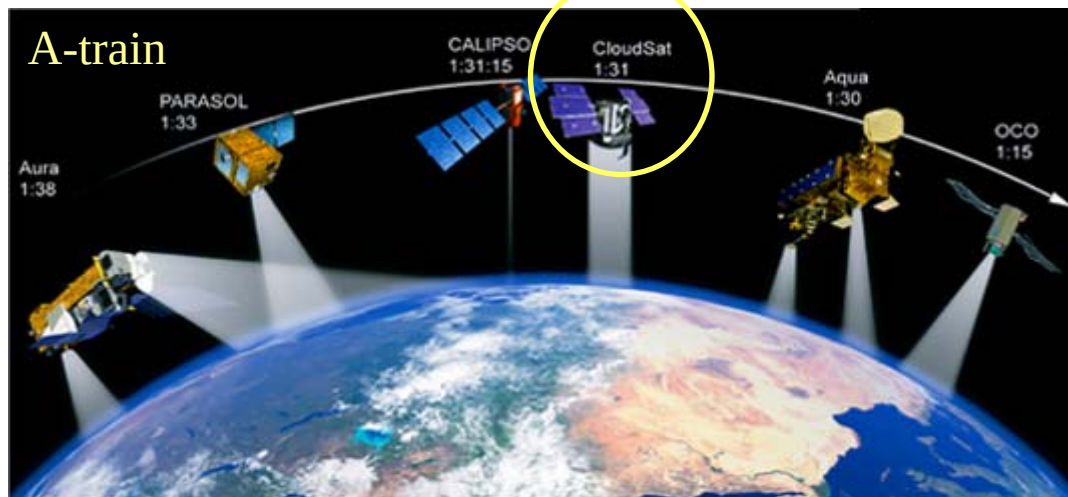
2.4.2 雲レーダーなど Cloud Radar etc.

❑ CloudSat/CPR by NASA

- ❑ 雲レーダーCPR(94GHz)で、雲の鉛直プロファイルを観測
 - ❑ 分解能: 鉛直500m／水平1.2X2.0km、感度-26dBZ
- ❑ A-Train 6機の異なる衛星に搭載された、CPR・マイクロ波放射計・ライダー・赤外分光計など様々なセンサーを用いて雲・エアロゾル・大気微量物質・水などを、数分の時間差で測定

❑ EarthCARE/CPR by JAXA

- ❑ 雲レーダーCPR(94GHz)で、雲の鉛直プロファイルを観測
 - ❑ 分解能: 鉛直400m／水平750m、感度-36dBZ
- ❑ 同時に搭載されるエアロゾルライダーATLID、放射計BBR、可視赤外イメージャMSIを用いて、雲・エアロゾル・放射の総合的な観測を計画
- ❑ 2012年打ち上げ予定。 CPRはJAXA、他はESAが開発。



3. 境界値作成への利用

Satellite data for boundary cond. of NWP



3.1 地表状態データの利用

Surface data (Sea surface temperature, Sea ice, Land use, Snow, Soil moisture)

- ❑ 海面の赤外放射から推定した海面水温を利用
 - ❑ AVHRR 1991.3～
- ❑ 海面のマイクロ波放射から推定した海面水温を利用
 - ❑ AMSR-E 2006.3～
- ❑ さまざまな衛星から推定された海氷分布を利用
 - ❑ SSM/I, AVHRR, MTSAT 1982.3～
- ❑ 可視・赤外イメージャから推定された土地被覆データを利用
 - ❑ AVHRR
- ❑ マイクロ波イメージャや可視イメージャから推定した積雪被覆率や雪氷域を利用
 - ❑ SSM/I, MTSAT-1R
- ❑ マイクロ波イメージャから推定した土壌水分の利用を計画(東京大学との共同研究により開発中)
 - ❑ AMSR-E

3.2 エーロゾル・大気微量成分データの利用

Aerosol & trace gas data

- 可視・近赤外イメージャから推定したエーロゾル(海洋性・大陸性)の濃度と光学的特性を利用
 - 季節変化、地理的分布の考慮なし
- TOMS, SBUVの観測を化学輸送モデルに同化して作成したオゾンの月平均気候値を全球モデルの放射計算に利用
 - 年々変動は考慮していない
- UARS/HALOE, MLSの観測に基づく成層圏水蒸気の解析値(Randel et al. 1998)を全球モデルの放射計算に利用



気象庁の数値天気予報モデルでは、いまのところ、オゾン、エーロゾルは別のモデルで予測

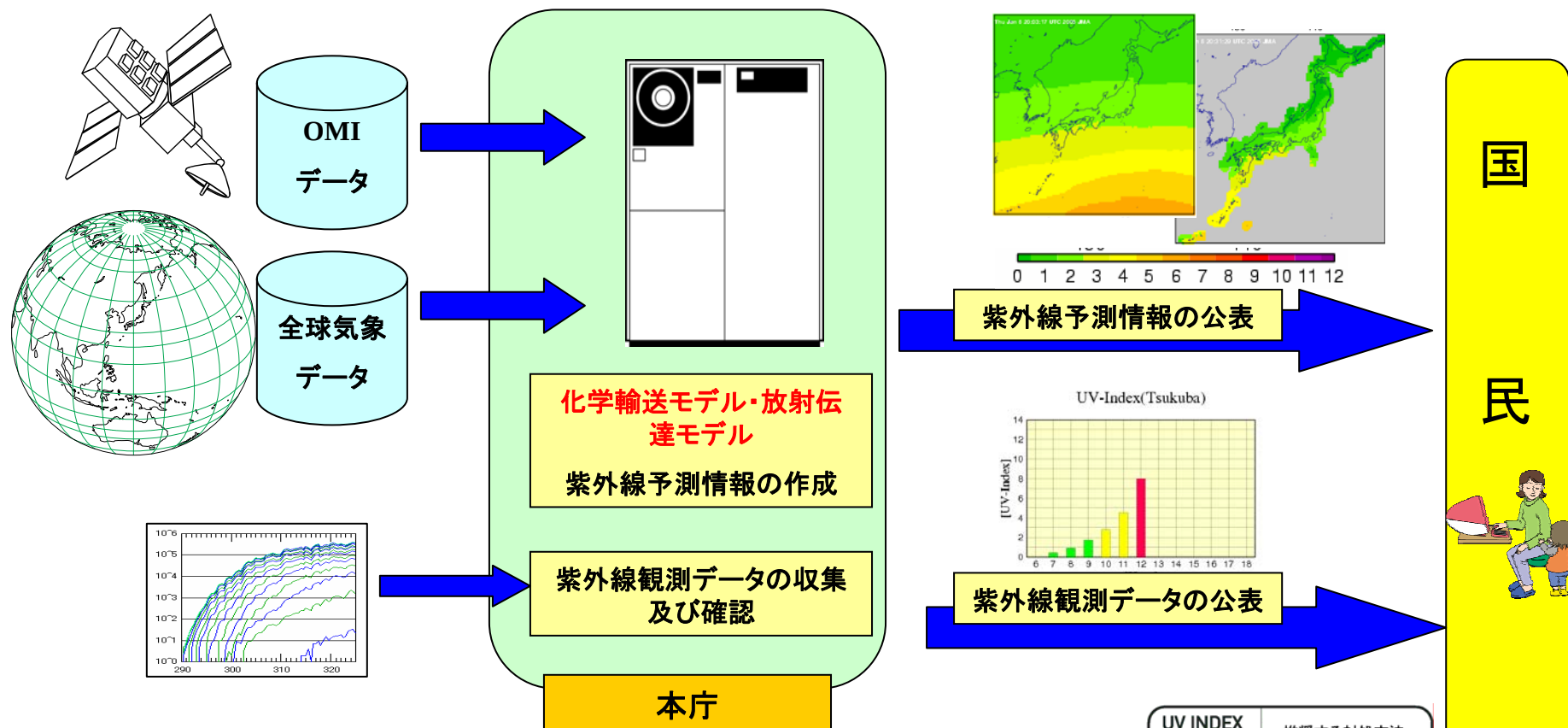
4. 紫外線予測への利用

Satellite data for UV prediction



4.1 UVインデックス予報

UV index information (May 2005 -)



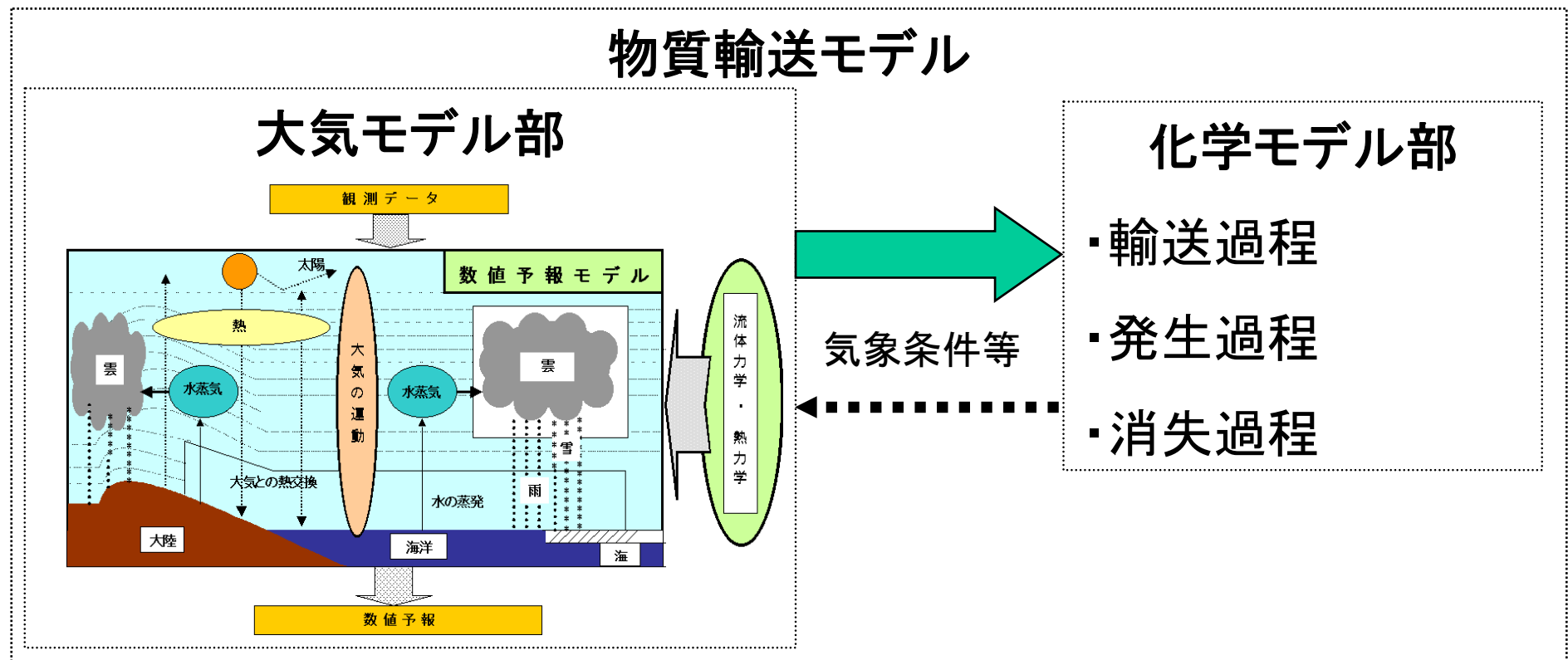
紫外線情報は、国民が紫外線対策に有効的に利用できる
ようにUVインデックスを用いる。

UVインデックス:WMO、WHO、環境省等推奨の指数。

UV INDEX (UV指数)	推奨する対処方法
< 2	
3 - 7	
8 >	

物質輸送モデル Chemical Transport Model (CTM)

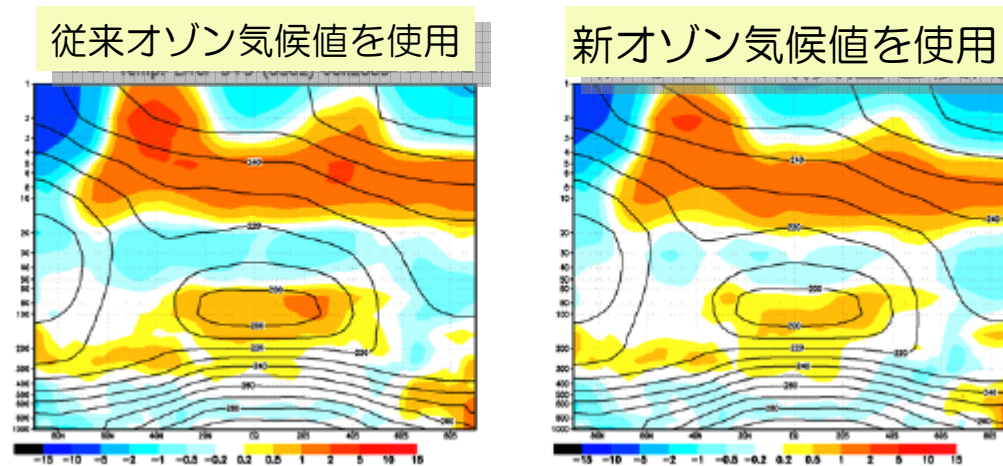
- 大気モデルから得られた気象条件を利用して、対象となる物質の輸送・変化過程をシミュレートする
- 対象物質は気象庁では現在**黄砂、オゾン、二酸化炭素**



4.2 オゾンデータの利用—数値天気予報等—

Indirect use of ozone data for NWP etc.

- ❑ 化学輸送モデル(CTM)と衛星観測データ、気象データを用いて1979～2004年までのオゾン3次元分布を作成し、気象庁・電力中央研究所が実施中の長期再解析(JRA-25)で利用
- ❑ CTMと衛星観測データ(TOMS, SBUV)、気象データ(気象庁全球解析)を用いて、オゾン3次元気候値を作成し、全球モデルで利用



全球数値予報モデル5日予報の気温の平方根
平均自乗誤差(横軸:緯度、縦軸:高度)

オゾン3次元気候値の導入
により成層圏の気温予測
精度が向上

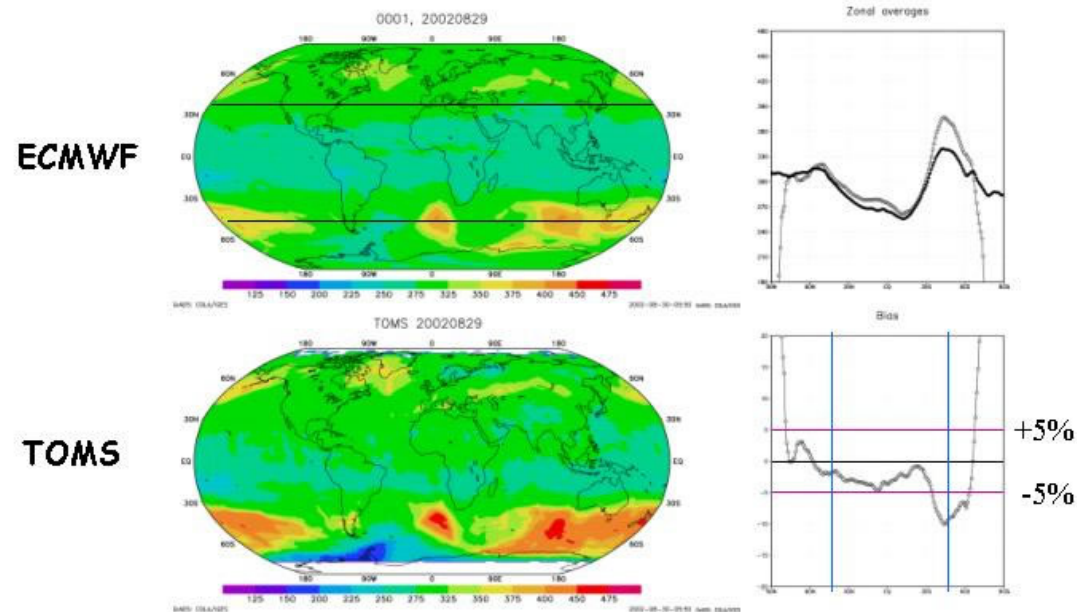
- ❑ 気候同化で、CTMから作成した準リアルタイムオゾン3次元分布を利用
- ❑ 今後、衛星観測データ同化を強化し、監視・予測精度の向上を図る

4.3 オゾンデータの数値天気予報への直接利用

Direct use of ozone data in NWP

- ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)では、オゾンも予報変数として取り扱い、衛星観測データを同化
- オゾントレーサーとして利用することにより、成層圏の風と気温場の予測精度向上に寄与

Example - Total column ozone 29/8/2002



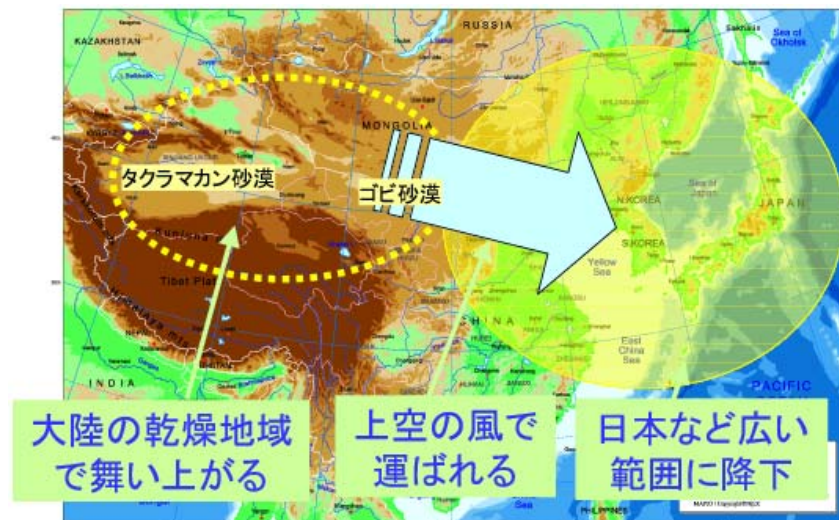
5. 黄砂予報への利用

Satellite data for dust storm prediction

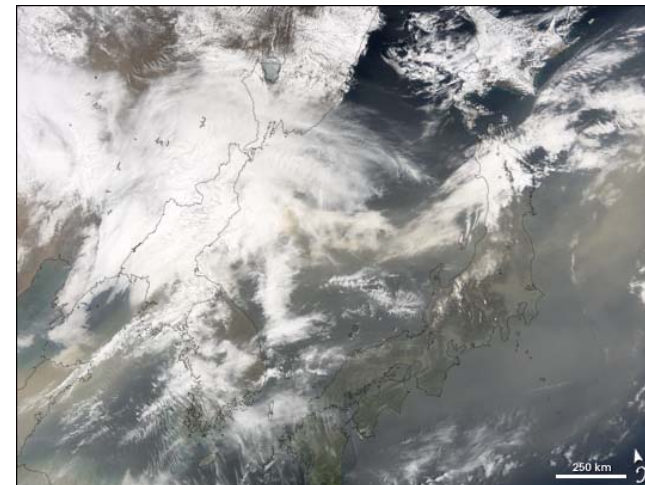


5.1 エーロゾルデータの黄砂予測への利用

Dust storm (Kosa) prediction

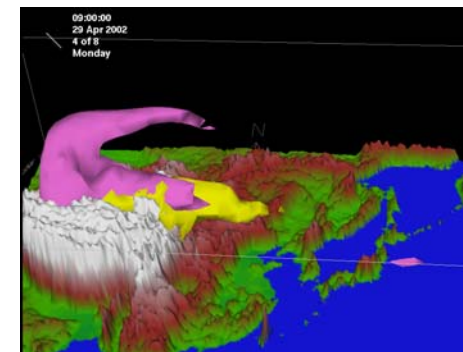
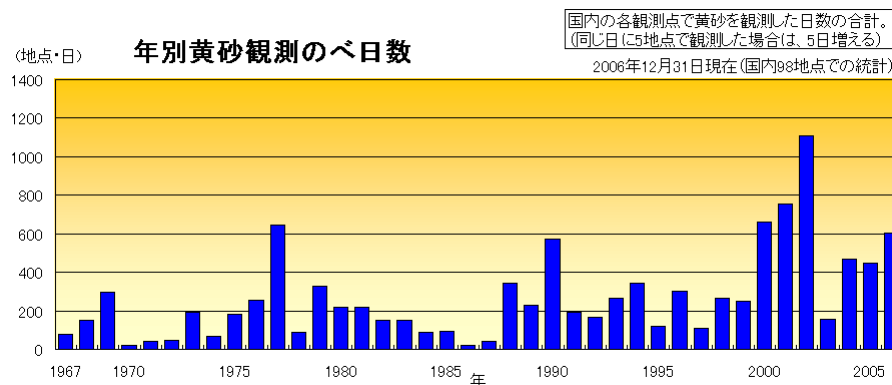


黄砂現象とは: 東アジアの乾燥地帯から大気中に舞い上がった風送塵が浮遊しつつ降下する現象



衛星による観測の例(MODIS, 2006年4月18日)

<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/>

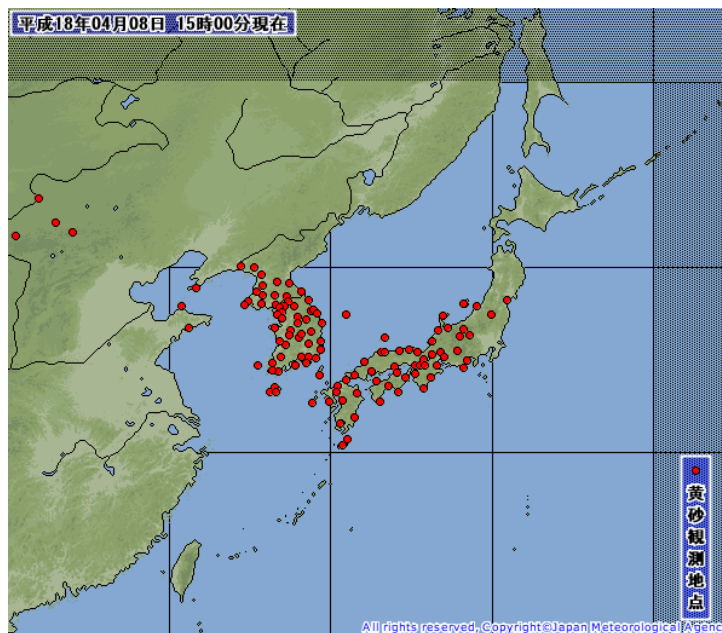


モデルによる黄砂予測の例(2002年4月29日)黄: ゴビ砂漠起源、ピンク: タクラマカン砂漠起源

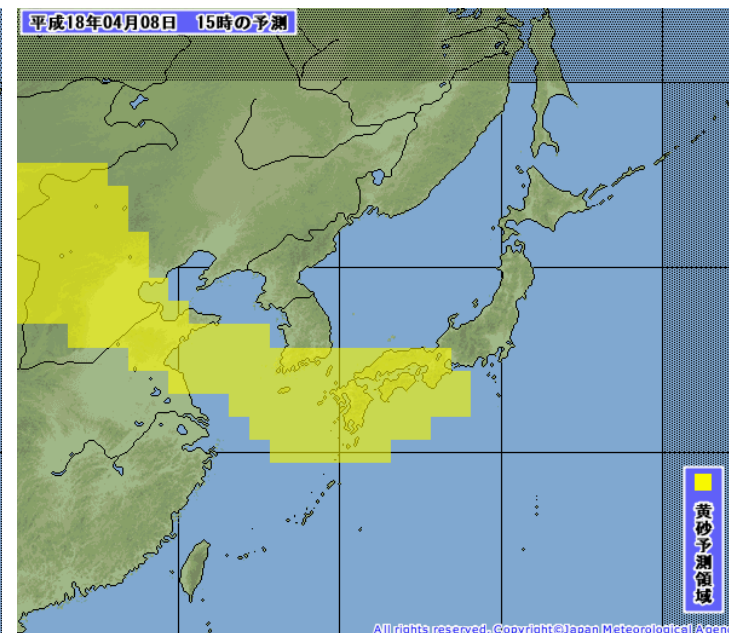
5.1 エーロゾルデータの黄砂予測への利用

Satellite data in the Kosa prediction

- AVHRRやMODISなどの観測データから作られた植生分布、SSM/Iの観測データから作られた積雪分布などを使って黄砂の放出過程を黄砂予測モデルの中で計算
 - 地上気象観測結果と全球黄砂予測モデルによる予測結果を公開
 - 黄砂予測モデルの結果は気象業務支援センター経由で民間に提供
 - 顕著な黄砂現象が観測(予測)される場合は気象情報を発表



地上観測(SYNOP)による黄砂実況

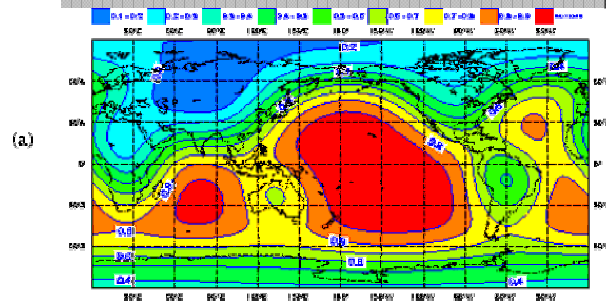


モデルによる黄砂予測

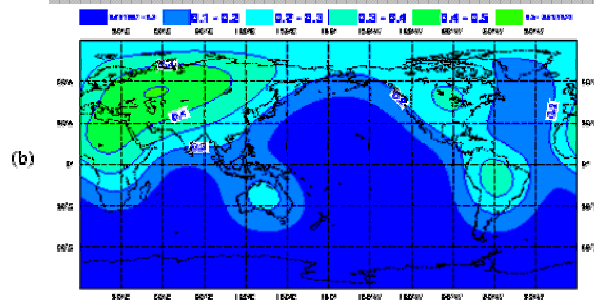
5.2 エーロゾルデータの数値天気予報への利用 Aerosol data use for NWP etc.

□ECMWFでは、海洋性、大陸性、砂塵、都市エーロゾルの効果を考慮した気候値分布(左図)を与え、予測精度の向上(右図)を実現。

海洋性エーロゾルの気候値

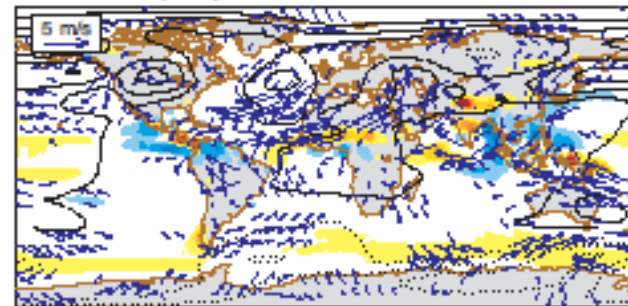


大陸性エーロゾルの気候値



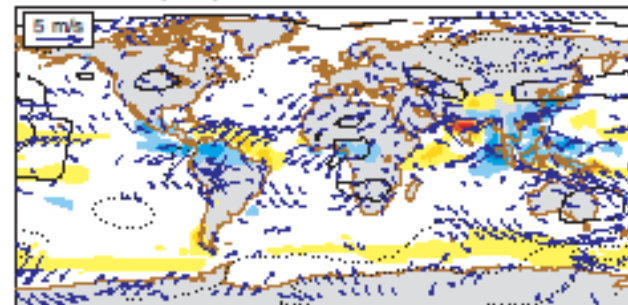
エーロゾル気候値の変更により、下層風・500hPa高度の予報精度が向上(Jung et al. 2004)

b 28x1 - OBS (CI=2)



従来気候値
による予報
誤差

d 28x3 - OBS (CI=2)



新気候値に
よる予報誤
差

□気象庁の全球数値予報モデルでは現在海陸のみのエーロゾル効果を考慮

□衛星観測データを基にしたエーロゾル気候値を全球数値予報モデルに導入予定

6. まとめ Summary



- 衛星データは数値天気予報の初期値や境界値を作成するために広く使われている。
- 風、気温、水蒸気、降水量のデータが初期値作成に使われている。
- 雲のデータは検証以外にはあまり使われていない。
- 海氷分布、積雪被覆のリアルタイムデータが境界値作成に使われている。
- 衛星データに基づく土地被覆、エアロゾル、オゾンの気候値データが境界値として使われている。
- 紫外線予報、黄砂予報用のモデルにも衛星データが使われている。
- 今後、GPS掩蔽による気温・水蒸気観測やドップラーライダーの風観測の利用が期待される。
- **GPM**による**降水**観測、複数衛星の**散乱計**による**海上風**観測による高頻度観測も重要である。
- **可視・赤外イメージャ**による**土地被覆**や**エアロゾル**の観測、**マイクロ波放射計**による**土壌水分**データの利用も重要な課題である。