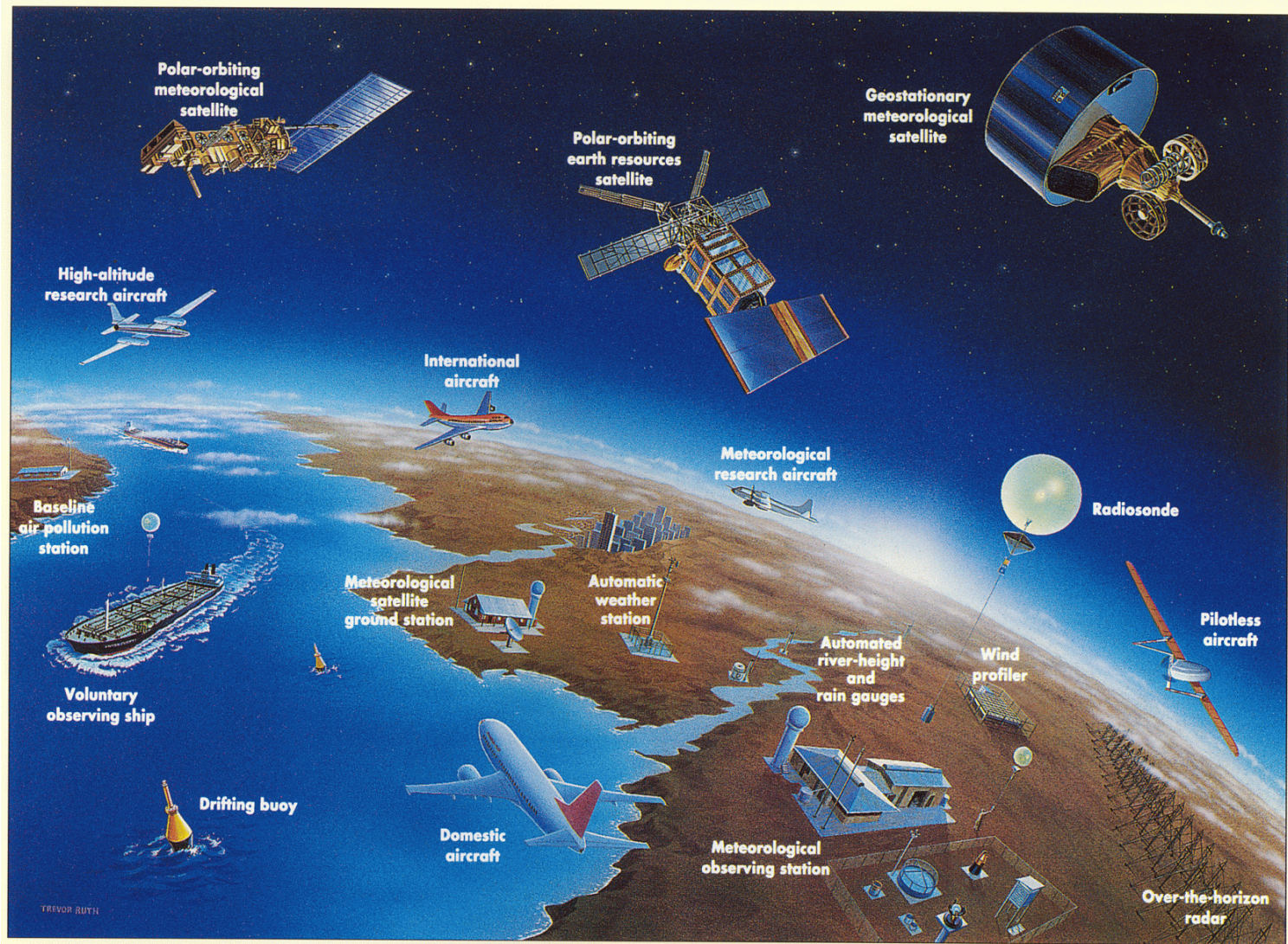


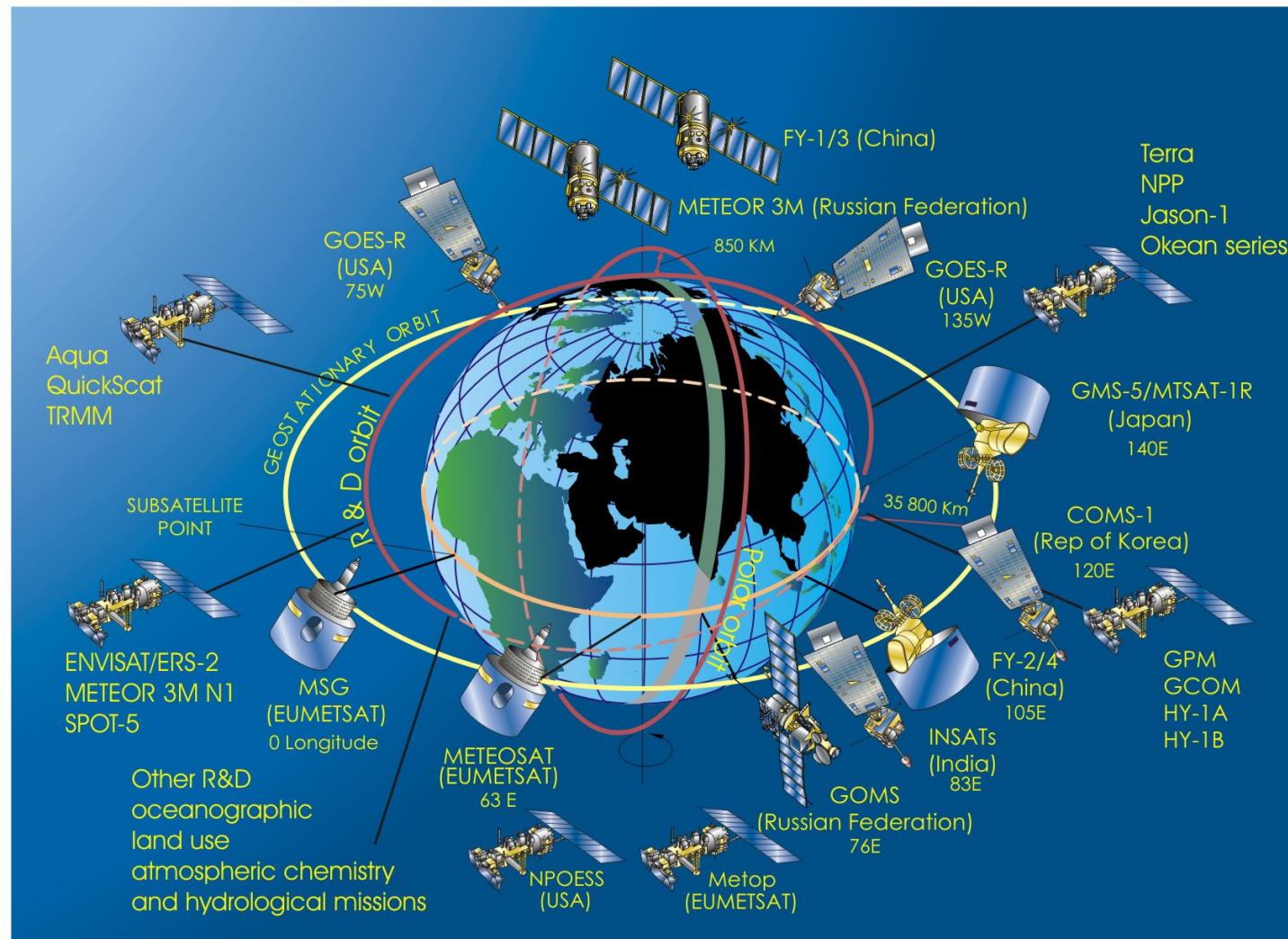
1. データ同化とは何か

気象観測システム



WMO（世界気象機関）の WWW（全球天候監視）のための主な気象観測システム。
Observing the weather and climate（オーストラリア気象局）より

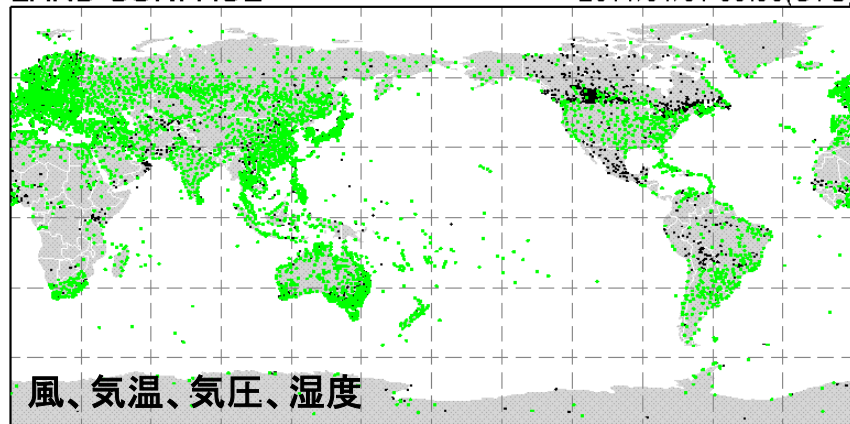
気象衛星・地球観測衛星



現在運用中および計画中の衛星観測網(世界気象機関のホームページ
<http://www.wmo.int/web/sat/sbgos.html>より)。

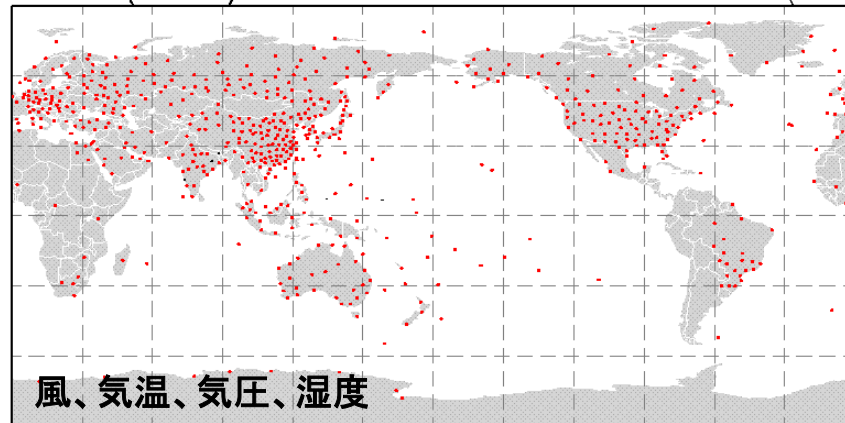
気象庁全球解析用の観測データ(1)

LAND SURFACE 2011/01/01 00:00(UTC)



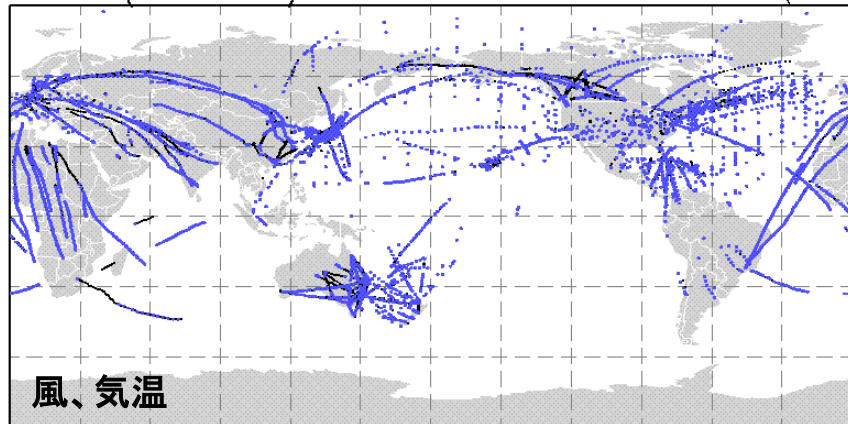
SYNOP[●]: 3923 METAR
 NOUSE[●]: 11247 NOUSE[●]: 3749
 ALL: 15170 ALL: 3749

UPPER(TEMP) 2011/01/01 00:00(UTC)



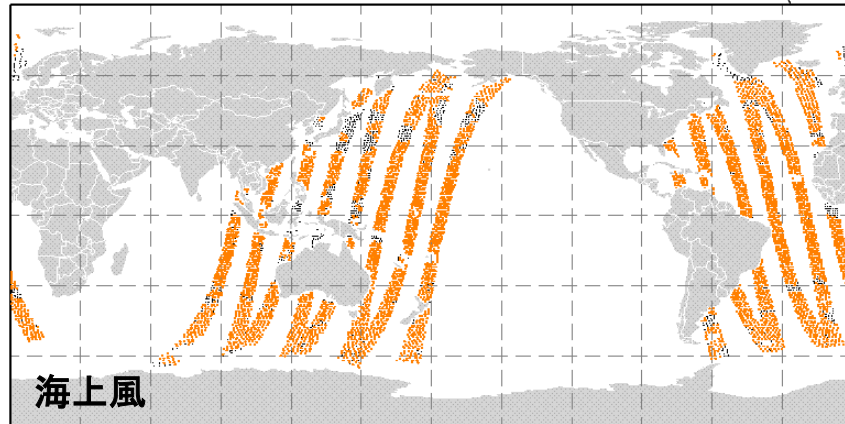
TEMP[●]: 628
 NOUSE[●]: 6
 ALL: 634

UPPER(AVIATION)/BOGUS 2011/01/01 00:00(UTC)



TYBOGUS[●]: 0 YHTC AVIATION[●]: 3939
 NOUSE[●]: 0 NOUSE[▼]: 0 NOUSE[●]: 15427
 ALL: 0 ALL: 0 ALL: 19366

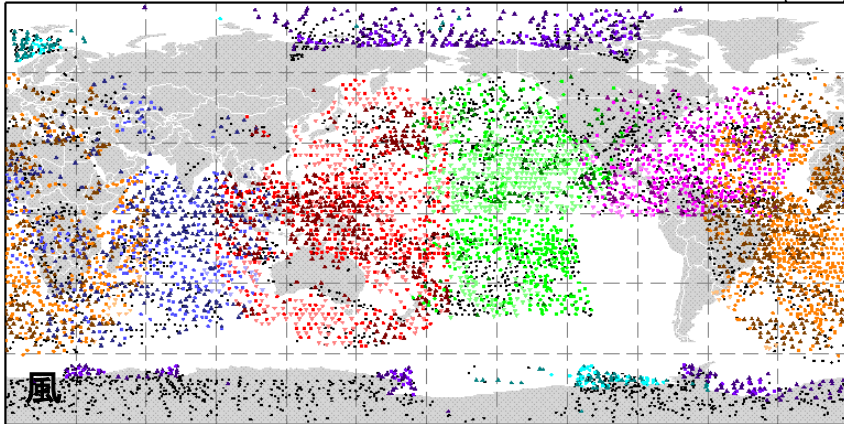
SCATTEROMETER 2011/01/01 00:00(UTC)



METOP-2
 ASCAT[●]: 4987
 NOUSE[●]: 992
 ALL: 5979

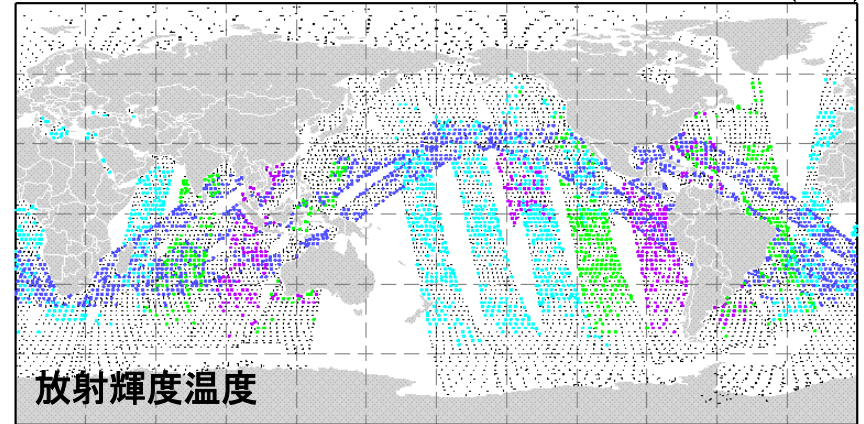
気象庁全球解析用の観測データ(2)

ATMOSPHERIC MOTION VECTOR 2011/01/01 00:00(UTC)



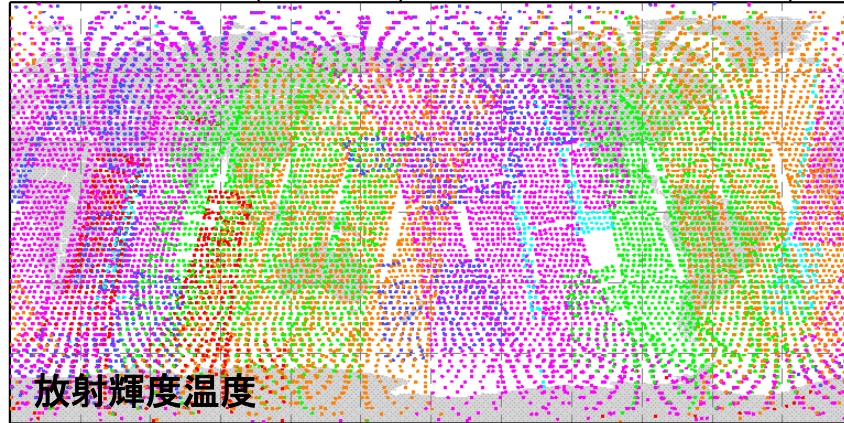
MTSAT-2 IR[●]: 446 VS[▽]: 262 WV[▲]: 417 NOUSE[●]: 274 ALL: 1399	GOES-11 IR[●]: 447 VS[▽]: 421 WV[▲]: 133 NOUSE[●]: 709 ALL: 1710	GOES-13 IR[●]: 342 VS[▽]: 28 WV[▲]: 137 NOUSE[●]: 429 ALL: 936	Meteosat-7 IR[●]: 252 VS[▽]: 17 WV[▲]: 330 NOUSE[●]: 252 ALL: 851	Meteosat-9 IR[●]: 794 VS[▽]: 36 WV[▲]: 703 NOUSE[●]: 648 ALL: 2181	Terra IR[●]: 144 WV[▲]: 311 CW[◇]: 0 NOUSE[●]: 826 ALL: 1281	Aqua IR[●]: 63 WV[▲]: 92 CW[◇]: 0 NOUSE[●]: 280 ALL: 435
---	---	---	--	---	---	---

MW-IMAGER 2011/01/01 00:00(UTC)



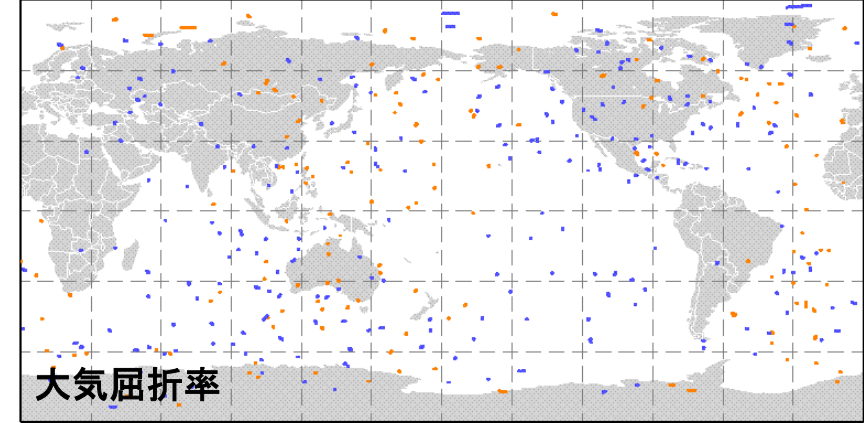
DMSP-F16 SSMIS[●]: 574 NOUSE[●]: 1930 ALL: 2504	DMSP-F17 SSMIS[●]: 412 NOUSE[●]: 1092 ALL: 1504	TRMM TM[●]: 1311 NOUSE[●]: 1757 ALL: 3068	Aqua AMSR-E[●]: 1056 NOUSE[●]: 3282 ALL: 4338
--	--	--	--

MW-SOUNDER(AMSU-A) 2011/01/01 00:00(UTC)



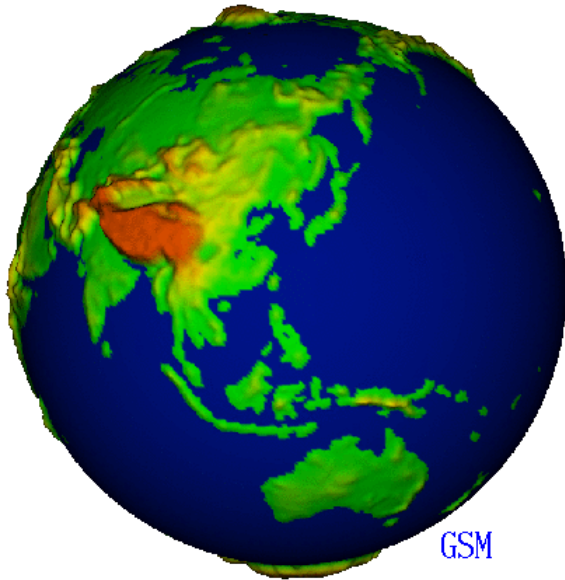
NOAA-15 AMSU-A[●]: 861	NOAA-16 AMSU-A[●]: 4178	NOAA-18 AMSU-A[●]: 5479	NOAA-19 AMSU-A[●]: 2057	Aqua AMSU-A[●]: 391	METOP-2 AMSU-A[●]: 4799
---------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	------------------------	----------------------------

GNSS RADIO OCCULTATION 2011/01/01 00:00(UTC)



METOP-2 GRAS[●]: 2365	COSMIC IGOR[●]: 3706
--------------------------	-------------------------

気象庁の主な数値予報モデル



全球モデル

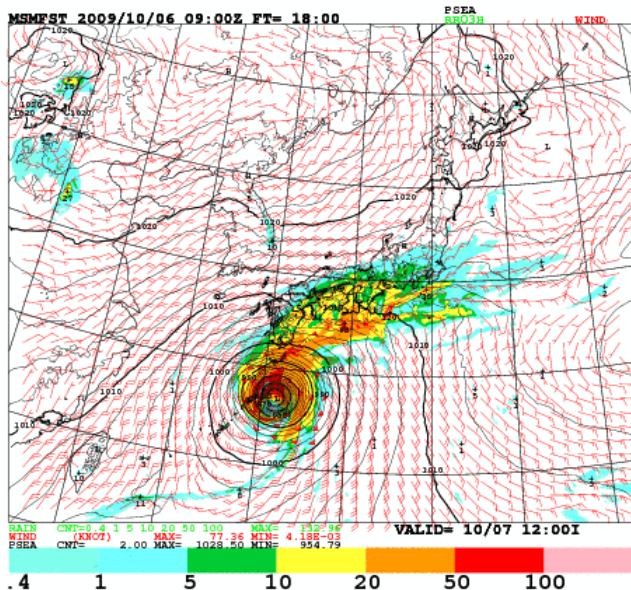
水平20 km 鉛直60層
9日予報
天気予報、週間予報など



側面境界条件

メソモデル

水平5 km 鉛直50層
33時間予報
防災気象情報、航空予報など

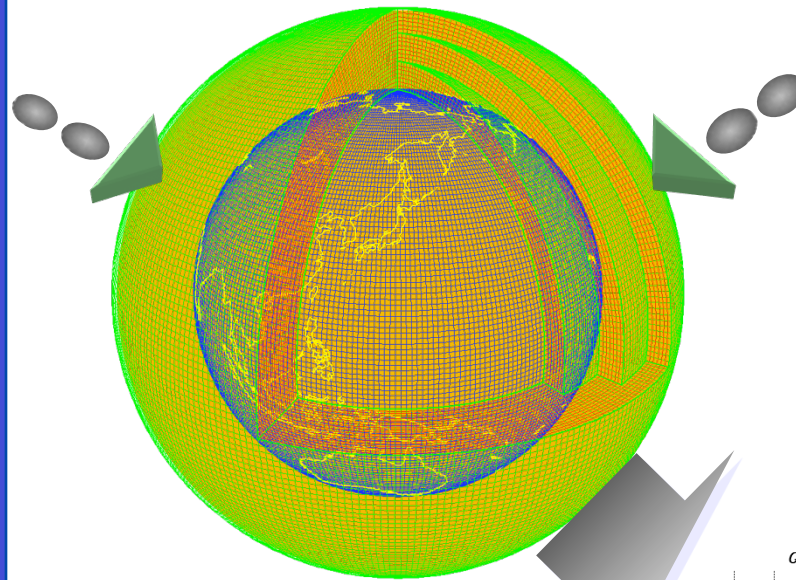


データ同化はいずれも4次元変分法(4DVar)

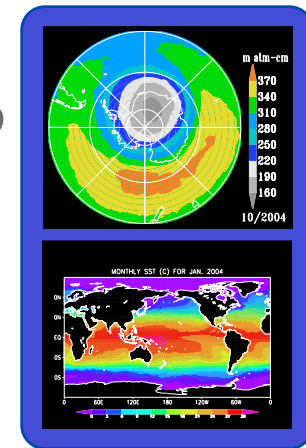
データ同化とは

数値シミュレーションに観測データを取り込むことによる逆解析

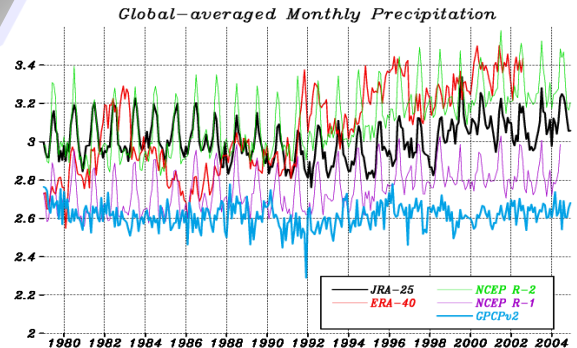
観測データ



境界条件

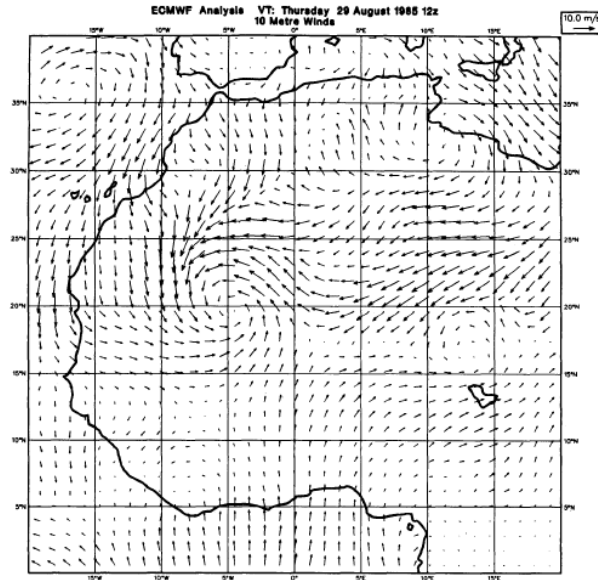
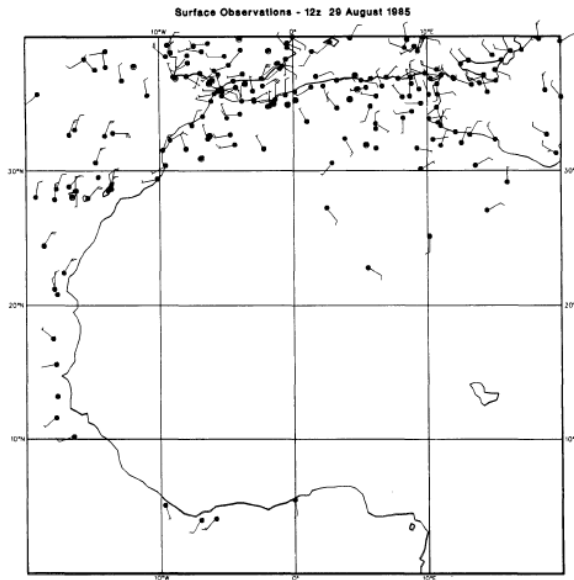


数値モデル
(物理法則の離散近似)



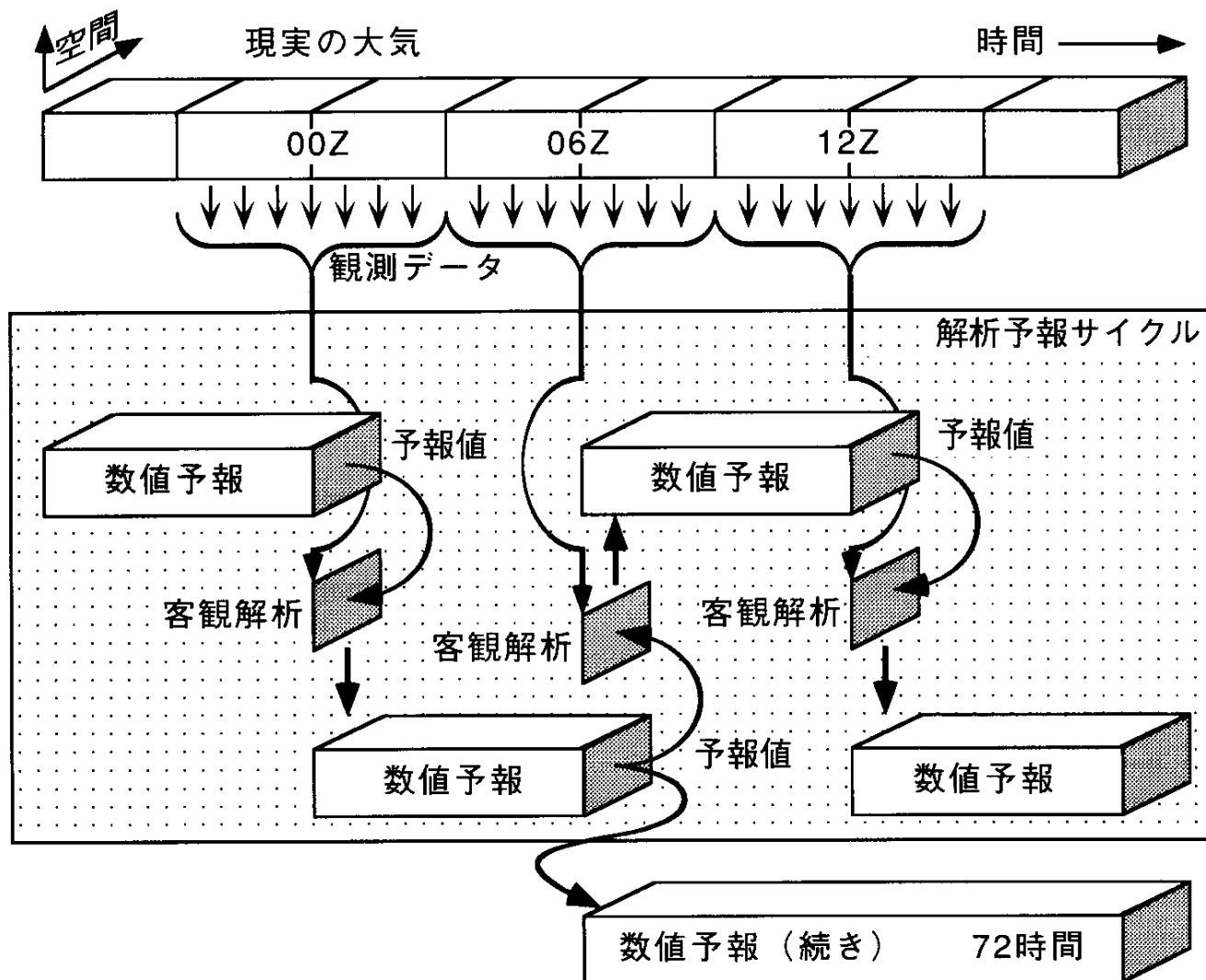
解析値

データ同化の実例



1985年8月29日12UTCにおける地上風の観測データ(左), ECMWFによるモデル最下層の風の解析値(中), 29日1155UTCにおける静止気象衛星METEOSATによる赤外画像(右)。(Bengtsson and Shukla, 1988)

データ同化サイクルの模式図



簡単な例題(1)

仮定

- ・ 予測値と観測値にはバイアス(系統的誤差)がない。
- ・ 予測値と観測値の間には誤差相関がない。
- ・ 解析値は予測値と観測値の線形結合で表される。

x^f : 予測値 x^o : 観測値 x^a : 解析値
 $\sigma^f, \sigma^o, \sigma^a$: それぞれの誤差標準偏差

数値モデルの格子点と観測点が一致する場合

仮定より、 α と β をある係数として

$$x^a = \alpha x^f + \beta x^o, \quad \alpha + \beta = 1$$

$$(\sigma^a)^2 = \alpha^2 (\sigma^f)^2 + \beta^2 (\sigma^o)^2$$

解析誤差標準偏差 σ^a が最小になるように係数を決めると

$$x^a = \frac{(\sigma^o)^2 x^f + (\sigma^f)^2 x^o}{(\sigma^f)^2 + (\sigma^o)^2} = x^f + \frac{(\sigma^f)^2}{(\sigma^f)^2 + (\sigma^o)^2} (x^o - x^f)$$

$$\sigma^a = \frac{\sigma^f \sigma^o}{\sqrt{(\sigma^f)^2 + (\sigma^o)^2}}$$

簡単な例題(2)

数値モデルの2つの格子点の間に観測点がある場合

2つの格子点の予測値の誤差標準偏差は等しいとし、それらの誤差の間の誤差相関係数を r とする。

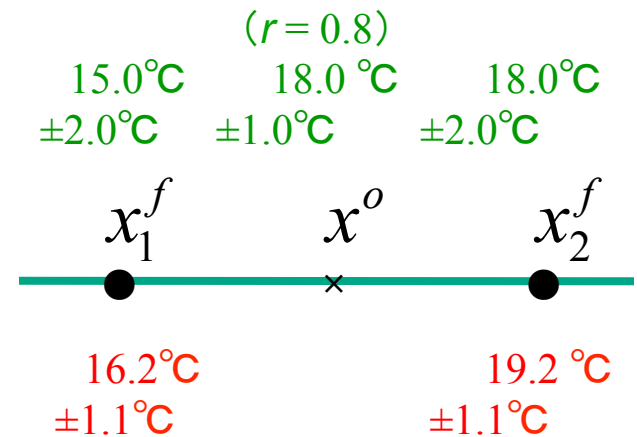
$$\begin{pmatrix} x_1^a \\ x_2^a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^f \\ x_2^f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix} \left(x^o - \frac{x_1^f + x_2^f}{2} \right)$$

$$(\sigma_i^a)^2 = \left[\left(1 - \frac{\beta_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_i}{2}\right)^2 - \left(1 - \frac{\beta_i}{2}\right)\beta_i r \right] (\sigma^f)^2 + \beta_i^2 (\sigma^o)^2 \quad (i=1,2)$$

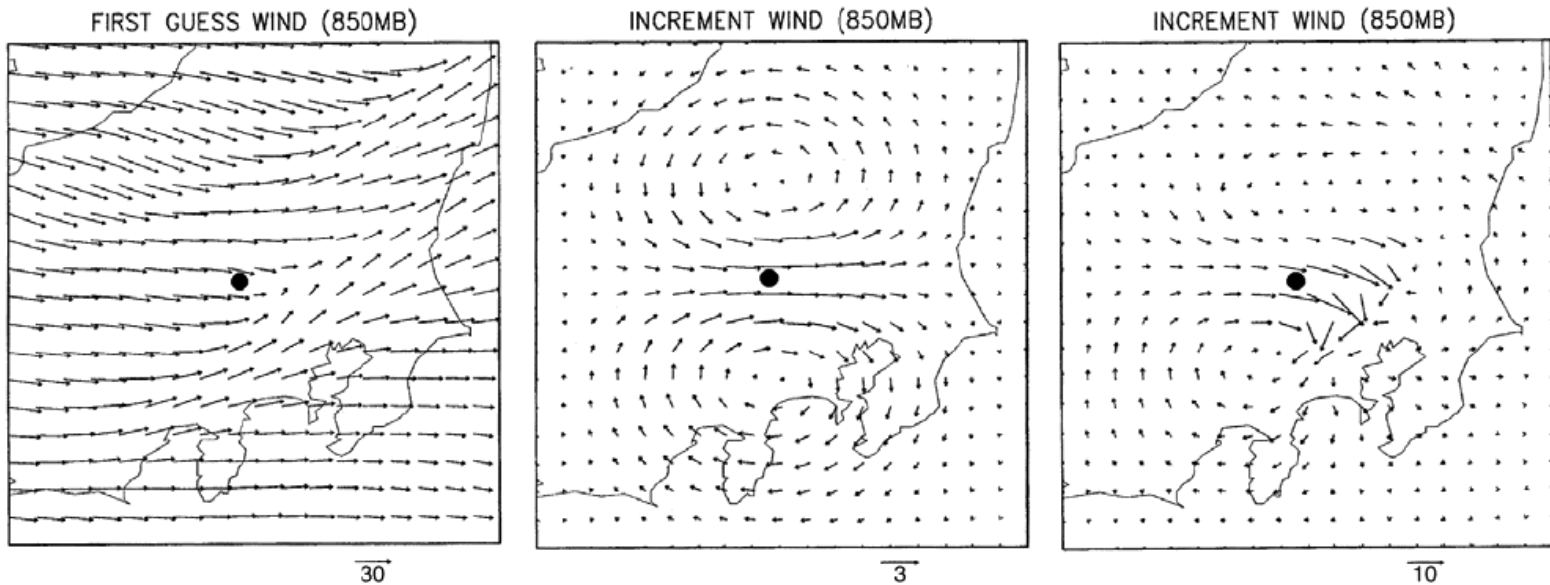
σ_1^a, σ_2^a が最小になる条件から

$$\beta_1 = \beta_2 = \frac{(1+r)(\sigma^f)^2}{(1+r)(\sigma^f)^2 + 2(\sigma^o)^2}$$

$$\sigma_1^a = \sigma_2^a = \sqrt{\frac{(1-r^2)(\sigma^f)^2 + 4(\sigma^o)^2}{2[(1+r)(\sigma^f)^2 + 2(\sigma^o)^2]}} \sigma^f$$



仮想的な観測データによる計算例



850hPaの風の第一推定値(予測値:左)と、●における仮想的な風の観測データによる3次元変分法(中)と4次元変分法(右)の解析インクリメント(予測値の修正量)。観測値は第一推定値より強い西風とし、風ベクトルのスケールを各図の下に示す(単位:m/s)。(Tsuyuki et al., 2002)

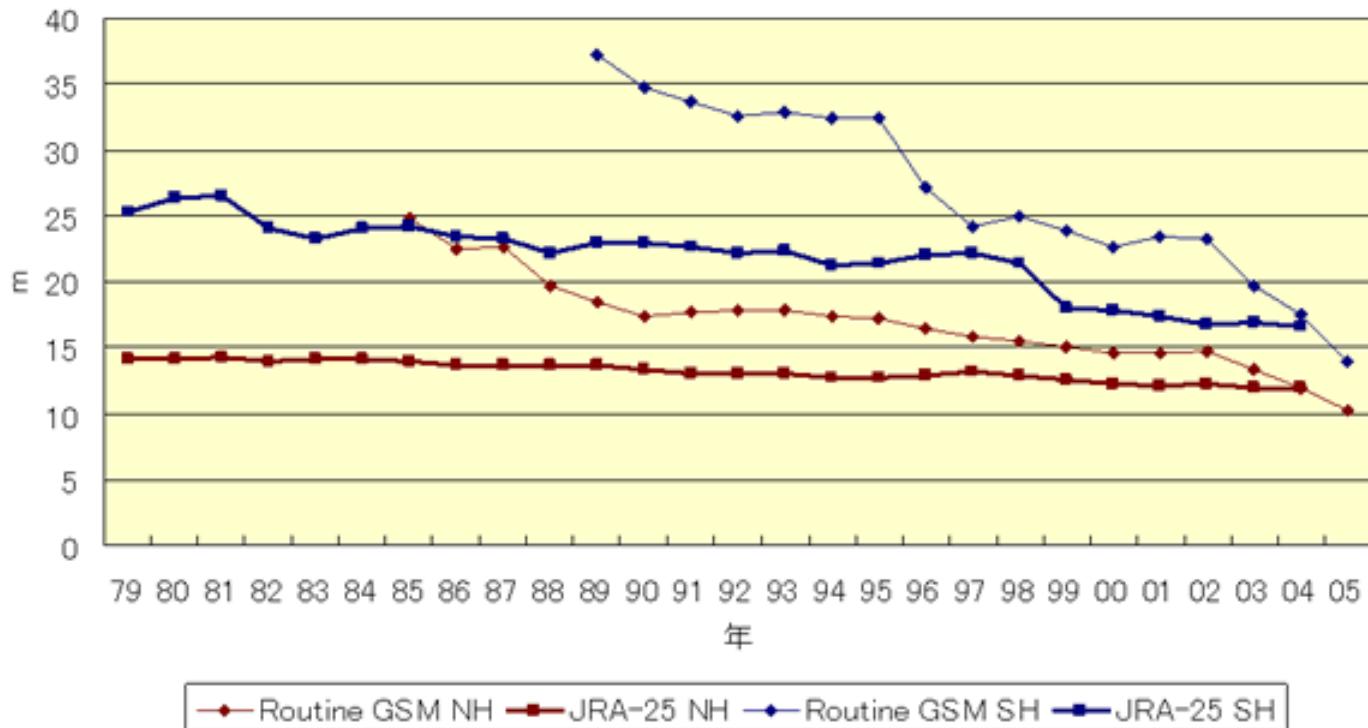
データ同化の用途

- 数値モデルの初期値の推定
 - 未来予測(天気予報、季節予報、海況予報、・・・)
 - 数値シミュレーションによるメカニズム解明
- 包括的な4次元データセットの作成
 - 長期再解析(調査・研究の基盤的データ)
- 数値モデルのパラメータや境界条件の推定
 - 物理過程のパラメタリゼーションの経験的定数など
 - 数値モデルのバイアス
 - 微量成分の発生・吸収源
- 観測システムの評価・設計
 - 観測シミュレーション実験(OSE)
 - 観測システム・シミュレーション実験(OSSE)

長期再解析

数値予報センターの数値モデルとデータ同化法は年々改良されるので、解析値の品質が長期的に変化する。その影響を避けるために、過去の観測データをまとめて最新のデータ同化システムで処理する。

JRA-25を初期値とする24時間予報のスコア(500hPa高度)



全球大気長期再解析(1)

再解析名称	実施機関	期間	解像度	データ同化法	備考
JRA-25	JMA/CRIEPI	1979-2004	T106L40	3DVar	JCDASで継続中
ERA-15	ECMWF	1979-1993	T106 L31	最適内挿法	
ERA-40	ECMWF	1958-2001	TL159 L60	3DVar	
NCEP-NCAR	NCEP-NCAR	1948-現在	T62 L28	3DVar	
NCEP-DOE AMIP-II	NCEP-DOE	1979-現在	T62 L28	3DVar	

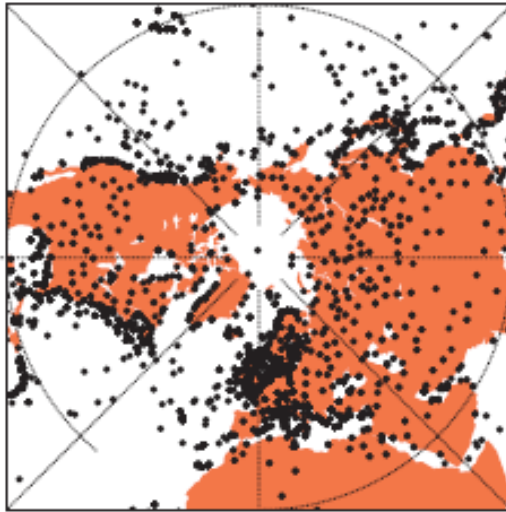
全球大気長期再解析(2)

再解析名称	実施機関	期間	解像度	データ同化法	備考
ERA-Interim	ECMWF	1979-現在	T _L 255L60	4DVar	
ERA-20C	ECMWF	1900-	T _L 159L91	4DVar 10 members	計画中 地上気圧のみ
ERA-SAT	ECMWF	1979-	T _L 511L91	弱拘束 4DVar	計画中
CFSR	NCEP	1979-2009	T382L64	3DVar (GSI)	全球海洋、陸面なども含む
20 th Century Reanalysis	NOAA-CIRES	1871-2008	T62 L28	EnSRF	地上気圧のみ
MERRA	NASA	1979-現在	1/2 x 2/3 deg L72	3DVar (GSI)	
JRA-55	気象庁	1958-2012	T _L 319L60	4DVar	実施中

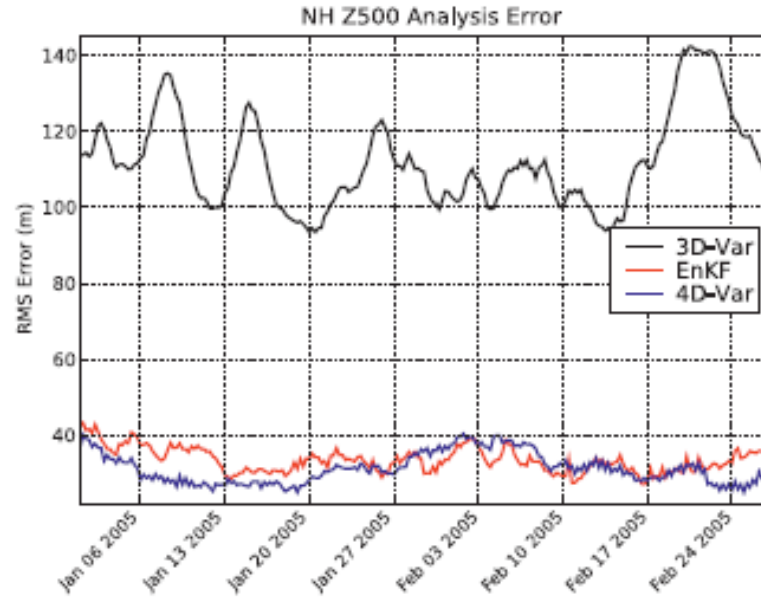
20世紀再解析

1930年代
相当の地
上観測点

(B) Thinned Surface Pressure Network



地上気圧データのみ同化

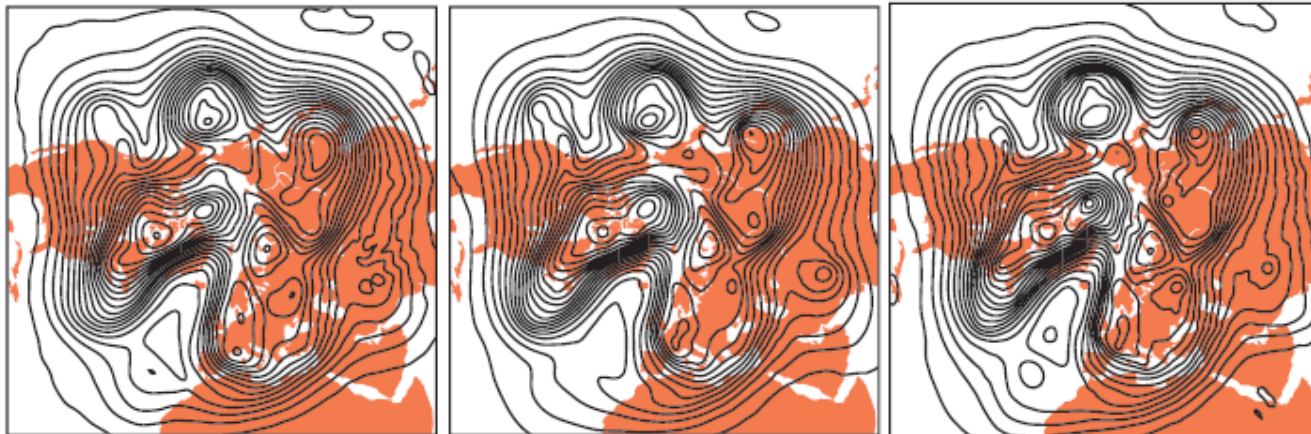


EnsDA (RMS Error = 31 m)

4D-Var (RMS Error = 31 m)

NCEP Operational

500hPa
高度



伊勢湾台風再現実験

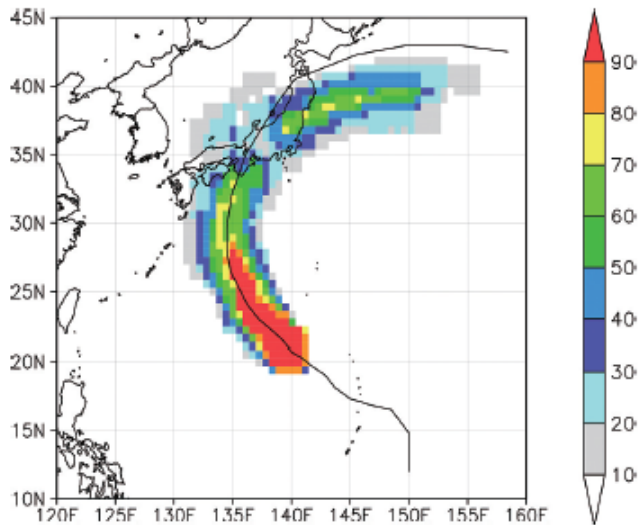
伊勢湾台風 (Vera)

1959年9月26日に紀伊半島に上陸(中心気圧929hPa)。

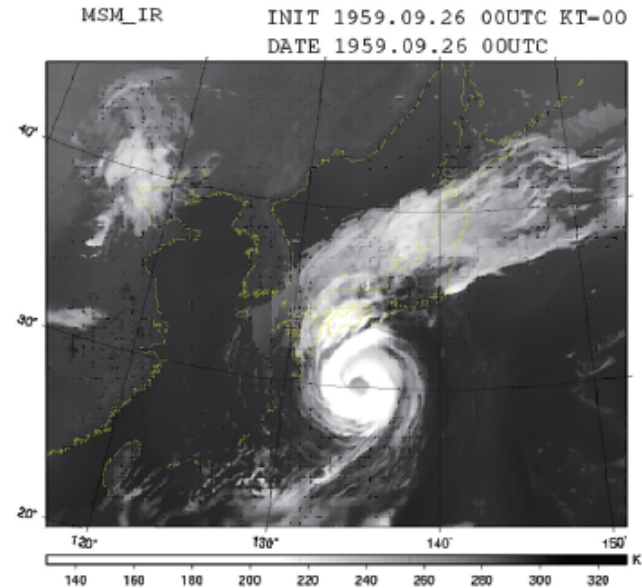
伊勢湾の高潮などにより死者・行方不明者5,089名。

当時は気象レーダーや気象衛星による観測はなかった。

2009年の気象庁のデータ同化システムによってVeraの再現を試みた。



第3図 アンサンブル予報を利用した24日09時から4日以内に台風中心が120km以内に接近する確率(%). 黒線はベストトラック.



第7図 9月26日09時における地上天気図(上: 実況)と疑似衛星赤外面像(下: 予測).

数値モデルのパラメータなどの推定

数値モデル(\mathbf{x} : 状態変数、 $\boldsymbol{\alpha}$: パラメータ)

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha})$$

次のようにパラメータも状態変数とみなせば、データ同化によって観測データからパラメータも推定できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}) \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$$

数値モデルに与える境界条件についても、その時間変換がゆっくりしているのであれば、同様の方法によって推定できる。特に重要な分野は、大気微量成分などの地表面フラックスの推定である。

衛星エアロゾル・データの同化

- CALIPSO衛星による2007年5月のダスト、硫酸塩、海塩エアロゾルデータを利用
- 4次元アンサンブルカルマンフィルタによって、物質化学輸送モデルMASINGARに同化

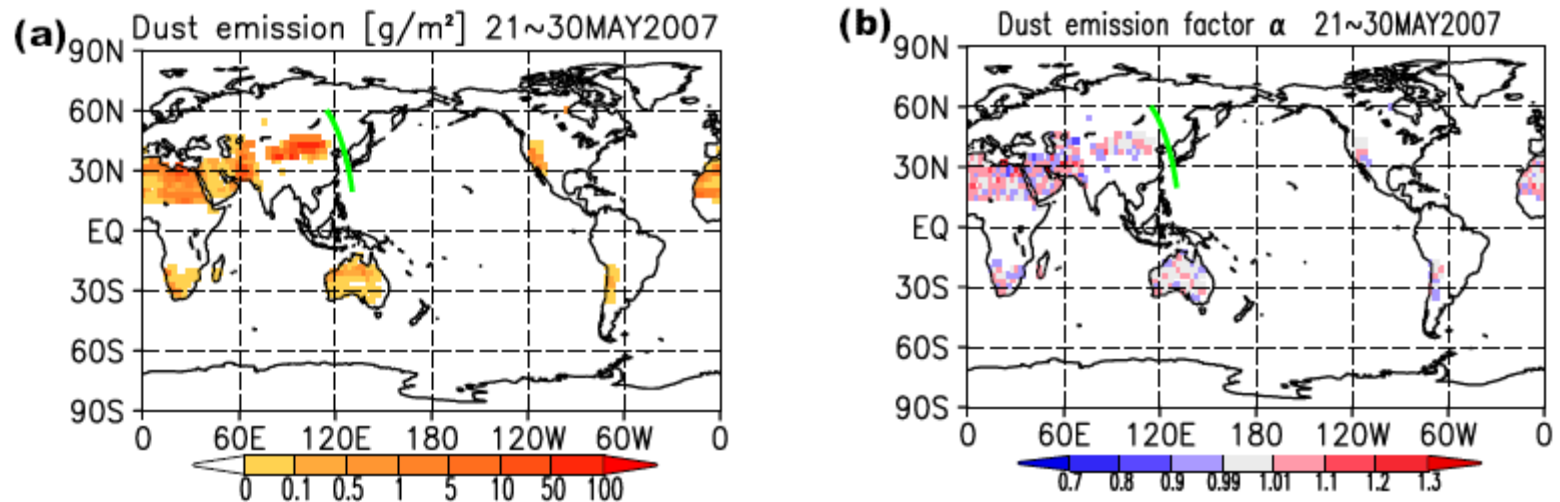
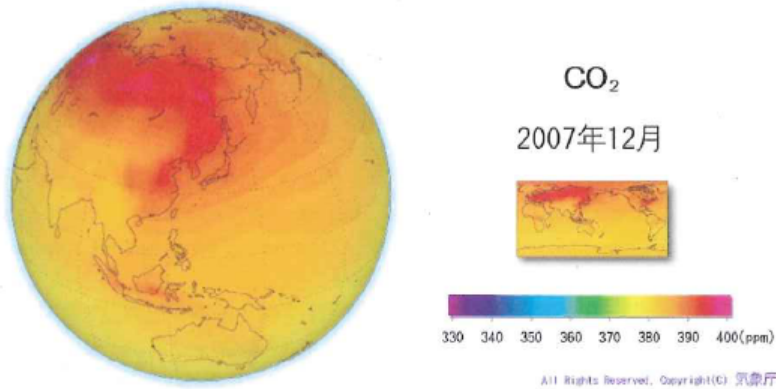
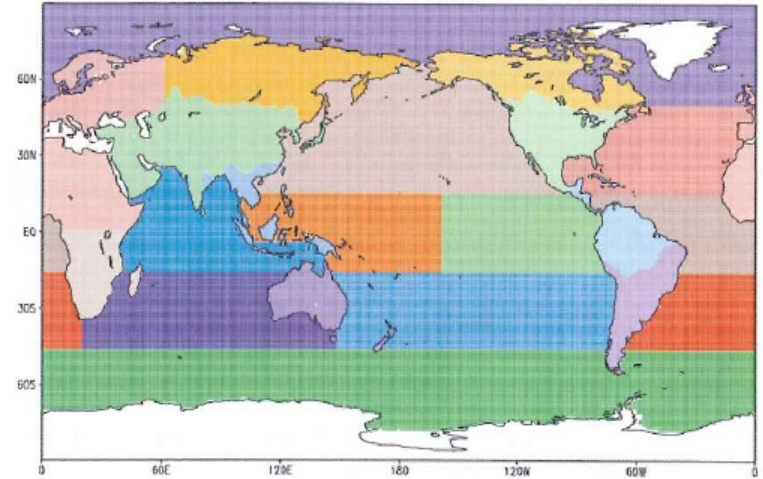
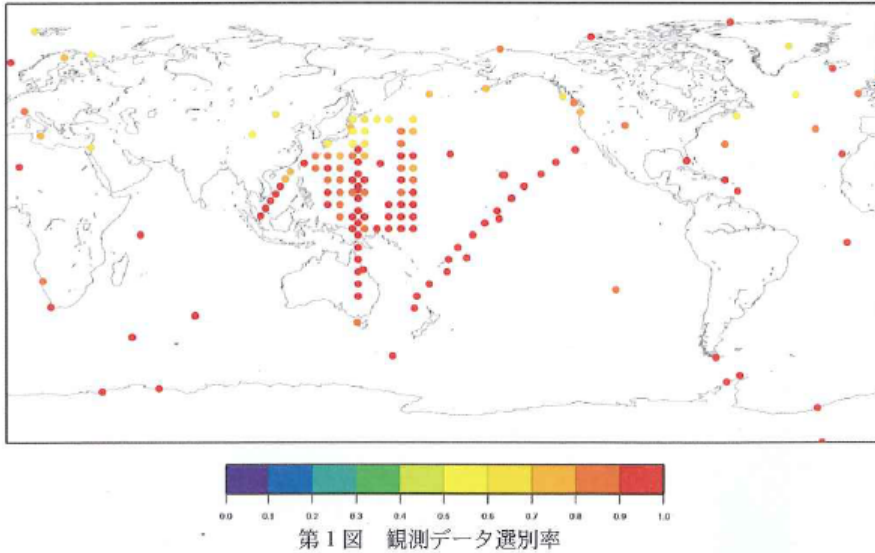


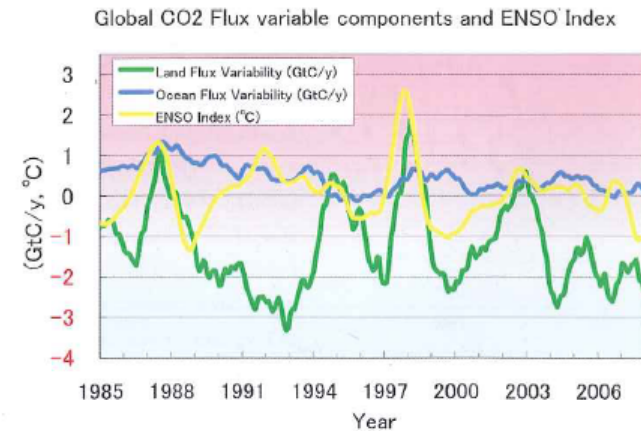
Fig. 2. (a) Simulated dust emission intensity in MASINGAR without assimilation from 21 to 30 May 2007; all 10 size bins are accumulated. Red indicates relatively high values, and yellow indicates relatively low values of the intensity. (b) Dust emission factor α for each grid point estimated by 4D-LETKF assimilation; averaged from 21 to 30 May 2007 across all 10 size bins. Red indicates relatively high values, and blue indicates relatively low values of the dust emission factor. A green line over East Asia indicates the CALIPSO orbit path shown in Fig. 1.

(Sekiyama et al, 2010)

Bayes統合逆解析(1)



第3図 二酸化炭素濃度図 (2007年12月)



4図 月平均の陸域、海洋二酸化炭素フラックスとエルニーニョ監視指数との関係
フラックスについては、既知のフラックスを除いた変動成分を示している。

(気象庁環境気象管理官ほか, 2009)

Bayes統合逆解析(2)

- \mathbf{x} : 各期間・各領域における地表面フラックスからなるベクトル
- \mathbf{y} : 各期間・各観測点における微量成分濃度の観測データからなるベクトル(解析期間以前からある微量成分の寄与を除いたもの)
- \mathbf{z} : 解析期間の初めにおける微量成分濃度からなるベクトル
- \mathbf{A} : 濃度とフラックスの線形関係 $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ を与える行列(行列の各成分は物質輸送モデルに単位地表面フラックスを与えて算出する)

次の評価関数の最小点から地表面フラックスの推定値を得る。

$$J(\mathbf{x}, \mathbf{z}) := \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_p)^T \mathbf{C}_x^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) + \frac{1}{2} (\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y})^T \mathbf{C}_y^{-1} (\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}) \\ + \frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{z}_p)^T \mathbf{C}_z^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{z}_p)$$

$\mathbf{x}_p, \mathbf{z}_p$: それぞれの量の第一推定値
 $\mathbf{C}_x, \mathbf{C}_y, \mathbf{C}_z$: それぞれの量の誤差共分散行列

解析期間を延ばしたり、観測地点を増やしたり、フラックスの時空間解像度を上げたりすると、 \mathbf{A} が大規模な行列になるため計算が容易でなくなる。