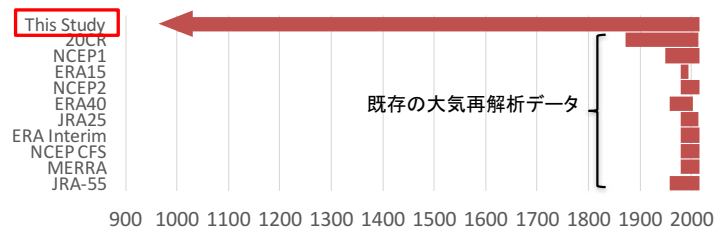


データ同化とは

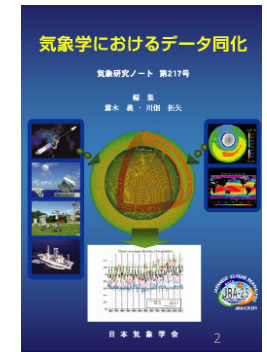
第6回CODHセミナー

ミレニアム大気再解析への挑戦 ～古日記に記載された天気情報のデータ同化～

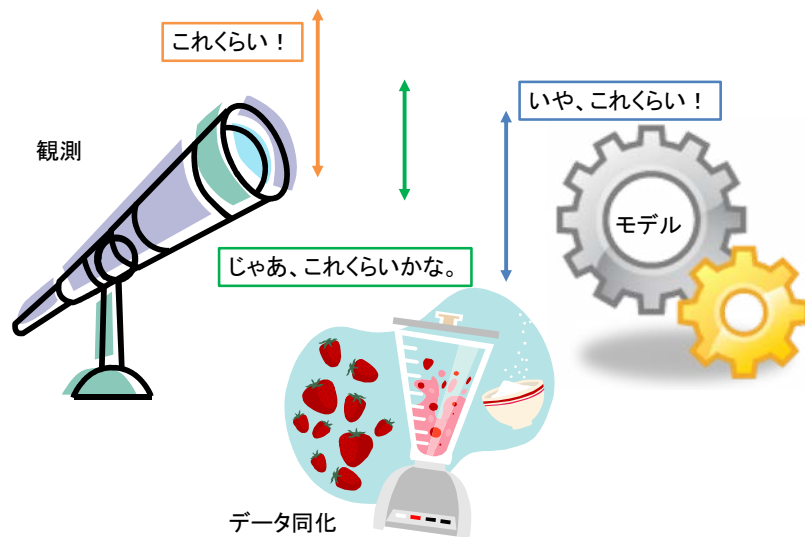
芳村圭(東京大学)



- 観測と数値モデルを組み合わせ、実際の状態を推定する方法。数学的には統計的推定論の応用と見なせる(淡路 ほか、2009)。



要するに



データ同化の基本形

モデル予測 $\mathbf{x}_i^f = M(\mathbf{x}_{i-1}^a)$

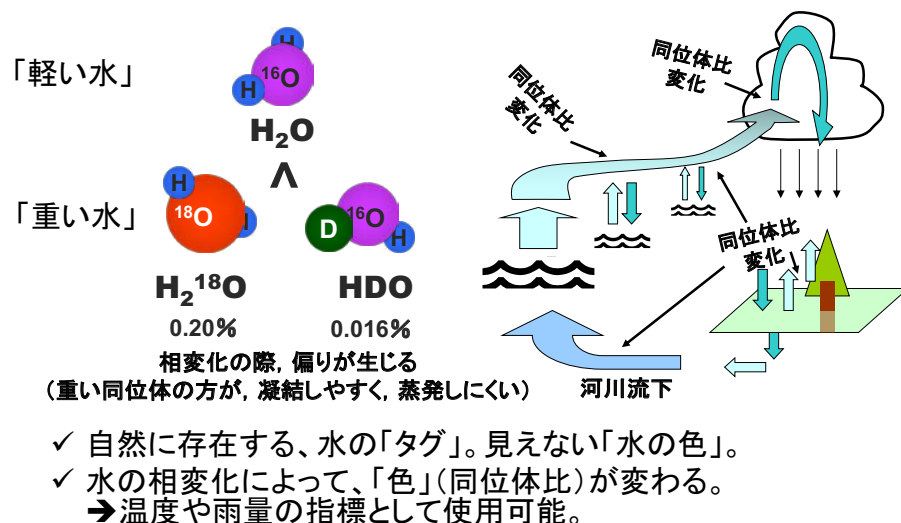
誤差共分散予測 $\mathbf{P}_i^f = \mathbf{M}\mathbf{P}_{i-1}^a\mathbf{M}^T$

解析値推定 $\mathbf{x}_i^a = \mathbf{x}_i^f + \mathbf{K}_i(\mathbf{y}_i^o - \mathbf{H}_i(\mathbf{x}_i^f))$

重み $\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_i^f \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i^f \mathbf{H}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1}$

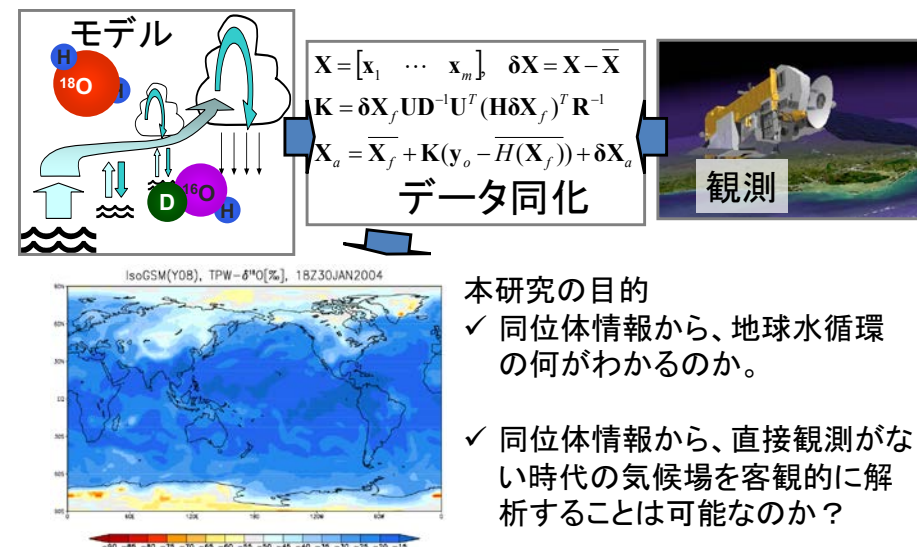
- 解析誤差共分散
- モデル(X)と観測(Y)は、必ずしも同じ事象を対象としていなくてもよく、お互いの関係(H)がわかっていればよい。
 - 観測した事象そのものにとどまらず、関係するすべてに影響が及ぶ。

私の専門: 水の同位体



5

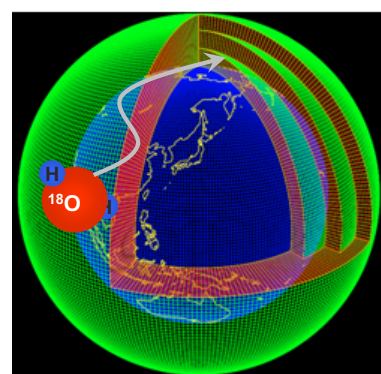
水同位体比データ同化



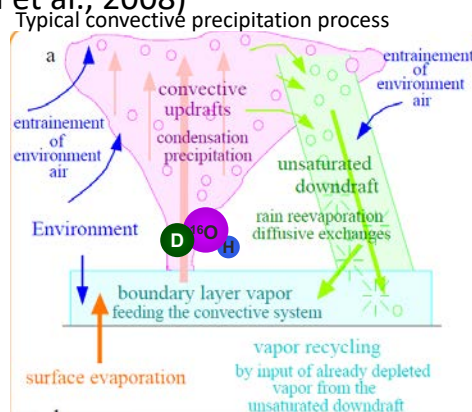
モデル

水同位体大循環モデルの構築

(Yoshimura et al., 2008)



Courtesy of JMA



Risi et al. 2008

- 相変化が起こる際の H_2^{18}O ・ HDO ・ H_2O それぞれ異なる挙動をシミュレートする。

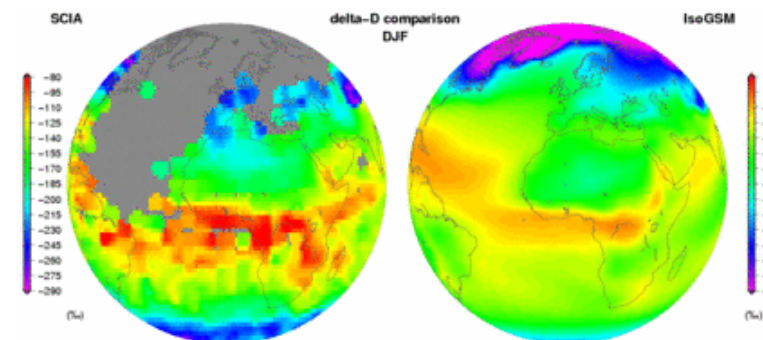
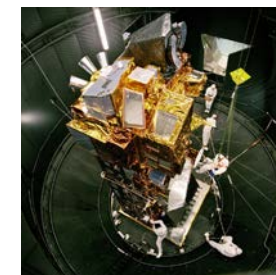
7

衛星観測

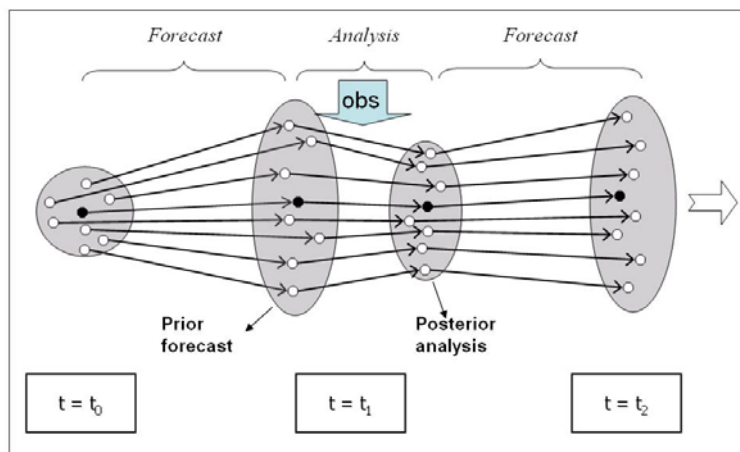
SCIAMACHY/Envisat:

空気柱の同位体比

(Frankenberg et al., 2009, Science)



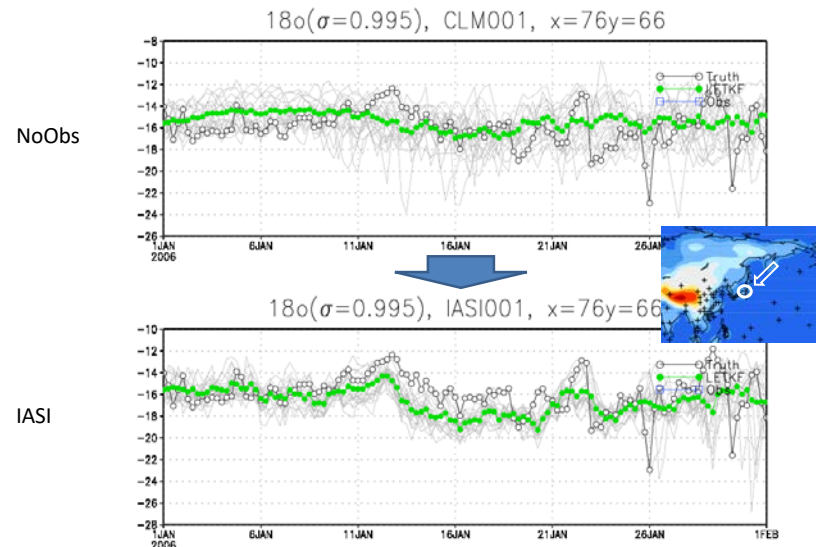
局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF; Miyoshi, 2011)



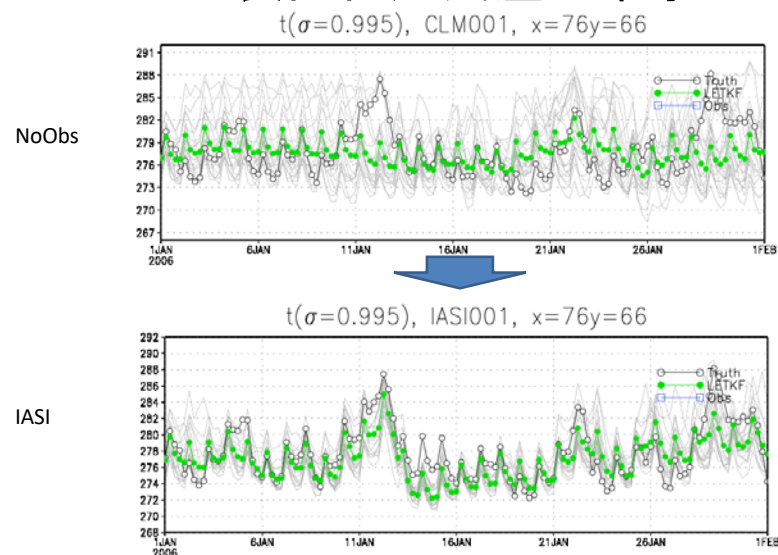
(Aksoy 2003)

- 予測変数マトリクス全体に影響が及ぶことが特徴。
→同化対象以外の変数も、同化後の結果と整合的になるように修正される

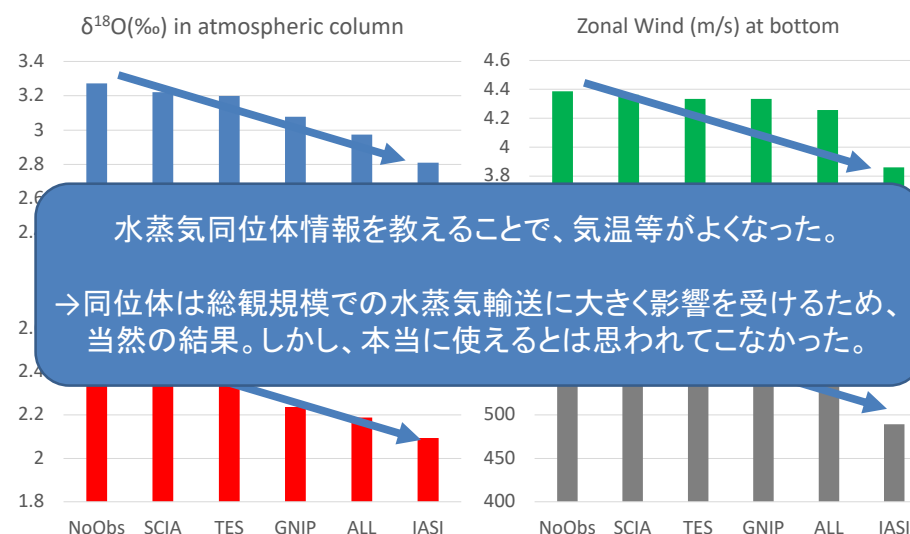
観測無し vs 観測あり: 地表面付近同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ @東京



観測無し vs 観測あり: 地表面付近気温@東京



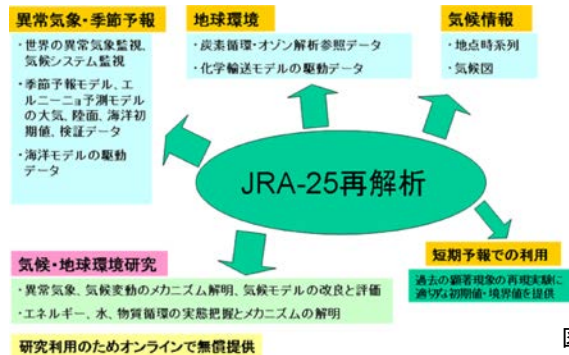
表層の同位体比・風速・気温・気圧の 全球RMSE



さて、大気再解析とは？

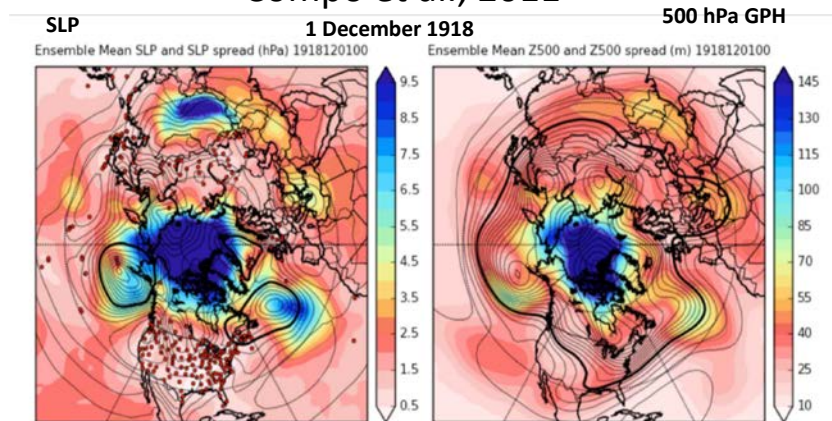
- 気温や風速・雨量等に代表される、大気や地表面の数100種類もの物理量の**4次元(3次元+時間)分布を、長期間(数十年)にわたって最適に推定したもの**。地球科学はもちろん、工学・農学・社会学等の様々な分野で重要な基礎データとして頻繁に用いられている。気候変動のメカニズム理解等において、その**長期化が強く求められている**。

* 日々の天気図(データ同化)解析に対し、リアルタイムに間に合わなかったデータも含め、過去に遡ってもう一度解析することから「再」解析と呼ばれる。転じて、実際には「再」でなくても、4次元データセットのこと自体を「再解析」と呼ぶことが多い。



図は気象庁HPより

これまでの最長再解析: 20世紀再解析 Compo et al., 2011



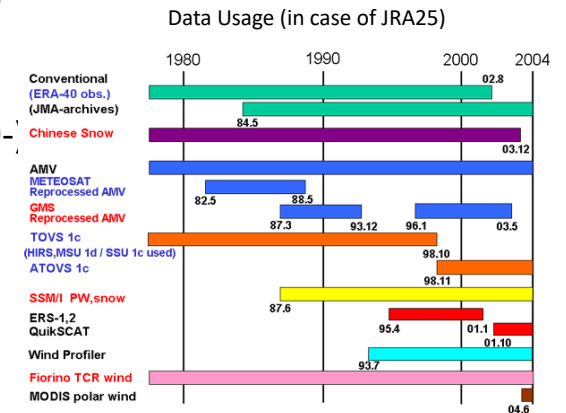
1870年代以降に商業船などによって観測された地表面気圧のみでデータ同化した再解析 (Whitaker et al. 2009)

→ 過去の気象データの存在の**少なさそのもの**に限界。
せいぜい19世紀までしか遡れない。

これまでの再解析プロダクト

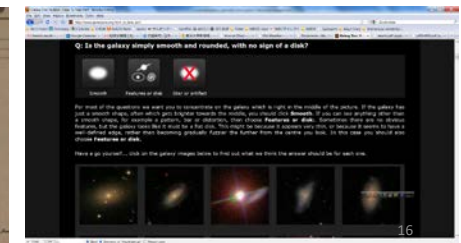
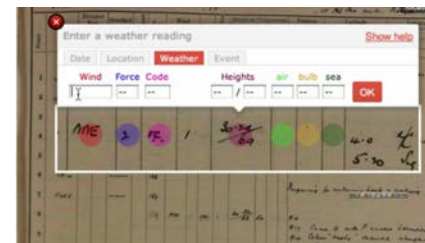
- NCEP/NCAR (1948-)
- ERA15 (1979-)
- NCEP/DOE (1979-)
- ERA40 (1957-)
- JRA25 (1979-)
- ERA-Interim (1979-)
- MERRA (1979-)
- CFSRR (1979-)
- 20CR (1871-)
- JRA55 (1958-)

Most data has >100km horizontal scale in >6-hourly



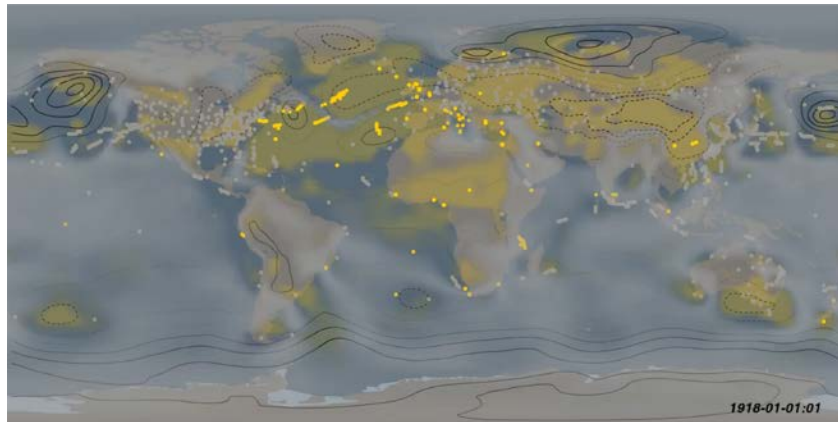
20世紀再解析で用いられた観測データ

- ACRE (Atmospheric Circulation Reconstructions over the Earth)
 - 航海日誌の収集・デジタル化
- Oldweather.org; 市民参加型での航海日誌解読サイト
 - 参加者は一人のクルーとなり、航海日誌を読み直してゆく。
 - cf 銀河の形状分類(<http://www.galaxyzoo.org>)
- 利用先: 20th Reanalysis (20世紀再解析)
 - 気象予報・気候研究の最新技術とのコラボ
 - アンサンブルカルマンフィルターデータ同化
 - 数値予報モデル



→過去の気象データの存在の少なさにそのものに限界。どうすれば良い？

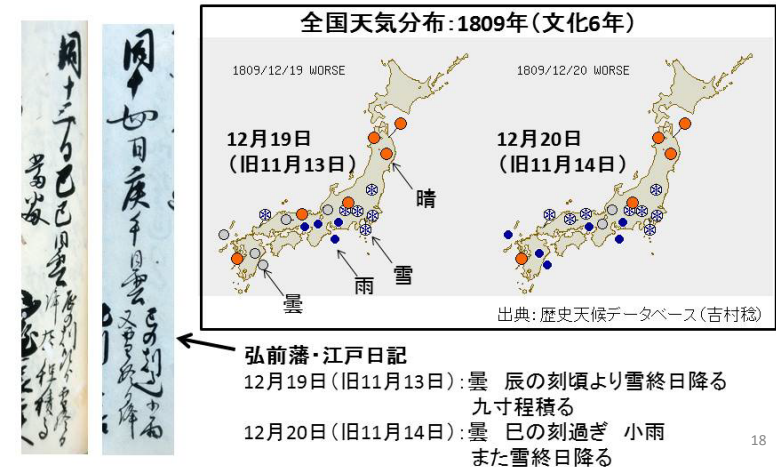
データ同化による影響の可視化



G. Compo博士提供

歴史天候データベース(吉村ら、2007)
1600年代まですでにデジタル化・アーカイブ

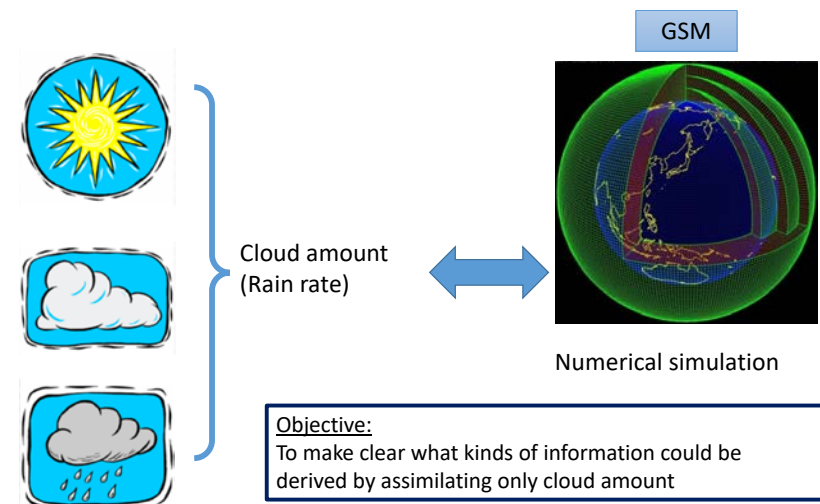
• <https://tk2-202-10627.vs.sakura.ne.jp/>



古天気情報のデータ同化による 解析期間の大幅延長

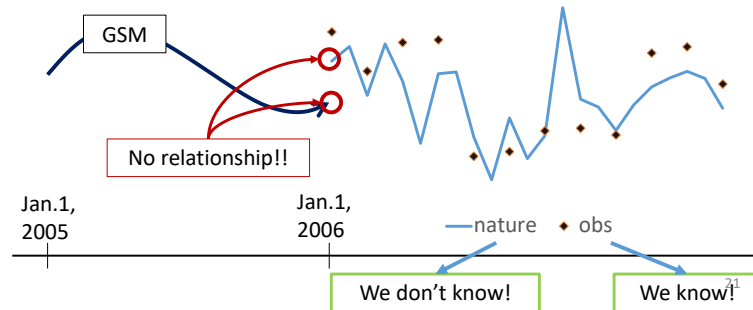
- メリット:
 - (自然のプロキシと比較して)データの時間解像度が
高く(日単位、時間単位)、正確
 - データの空間解像度が高い(日本国内十数か所)
 - 現在のデータ同化技術がほぼそのまま用いられる
- デメリット:
 - アナログ情報のため、定量化しにくい
 - 空間分布に偏りがある
 - データの精度が良くわからない

アナログ情報からデジタル情報へ



古天気データ同化の実験設定

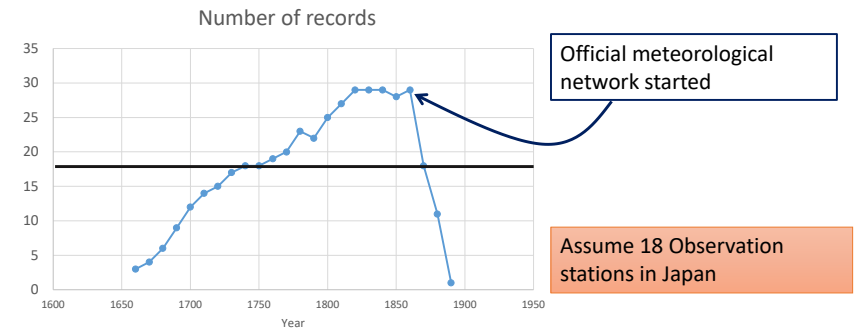
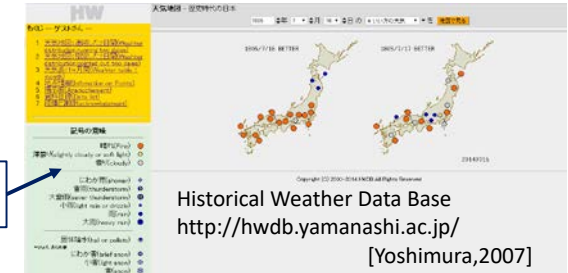
- ✓ フリーラン: 2005/1/1~2006/1/20まで(単純AMIPラン)
- ✓ 2006/1/1~20までを2006/1/1の初期値として20メンバーを用意
- ✓ NCEP(ないし気象庁観測値)の全雲量を同化(1日1データ*日本域18か所)
- ✓ 観測誤差は30%
- ✓ 同じ初期値の20メンバーによる観測なし実験と比較
- ✓ 同化手法はLETKF(Miyoshi, 2012)



古天気データ同化

観測地点の設定

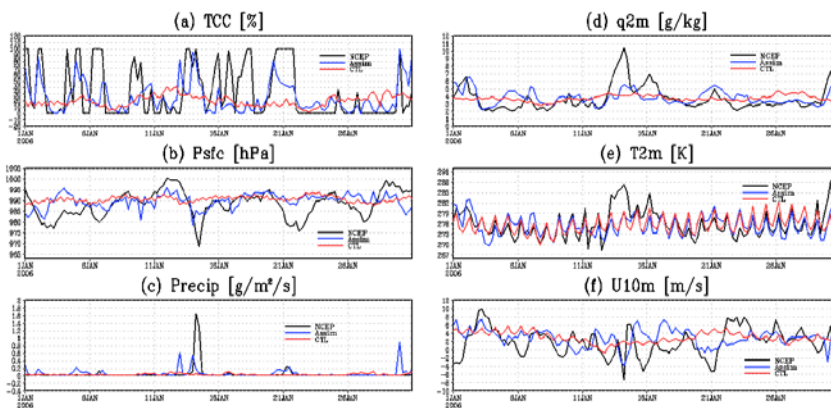
The historical records are available on this website



古天気データ同化

Time series @ observation station

Blue: cloud assim
Red: No obs
Black: Truth

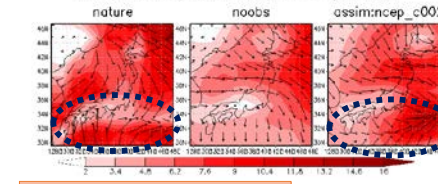


Results improved by assimilating cloud!!

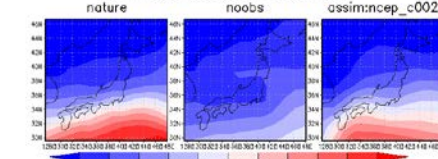
古天気データ同化

Distribution

Wind (Surface)

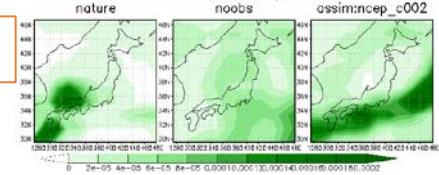


Precipitable water

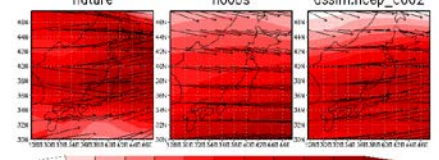


Most of other variables clearly improved!

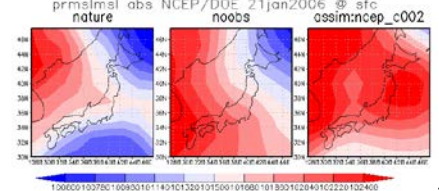
Precipitation



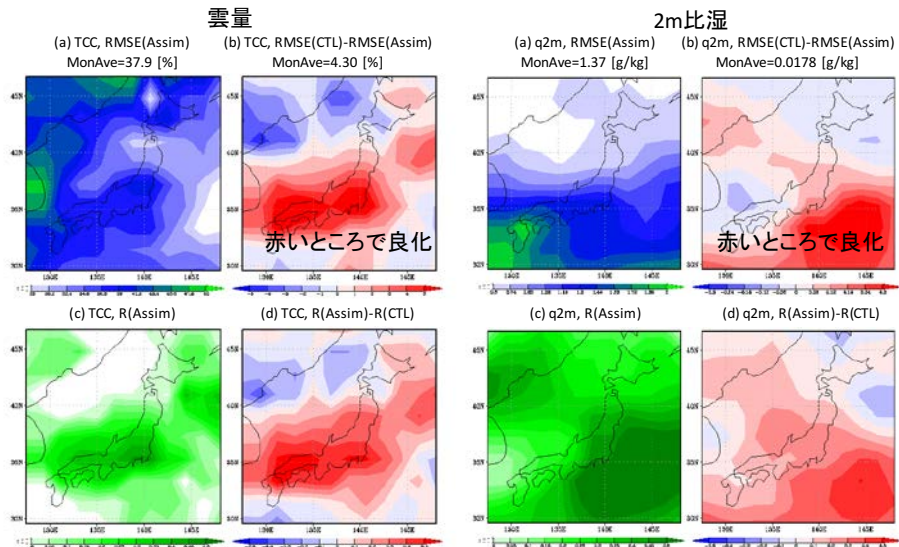
Wind (500hPa)



Surface Pressure



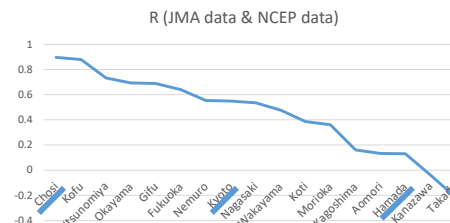
天候情報をデータ同化することで、
気象場が拘束される！ (Toride et al., 2017, MWR)



25

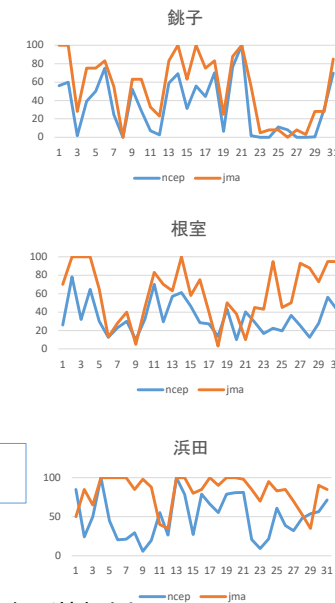
とはいえ、課題はたくさん。

たとえば、観測された天気とモデルの天気の合致度は、サイトによって異なる。



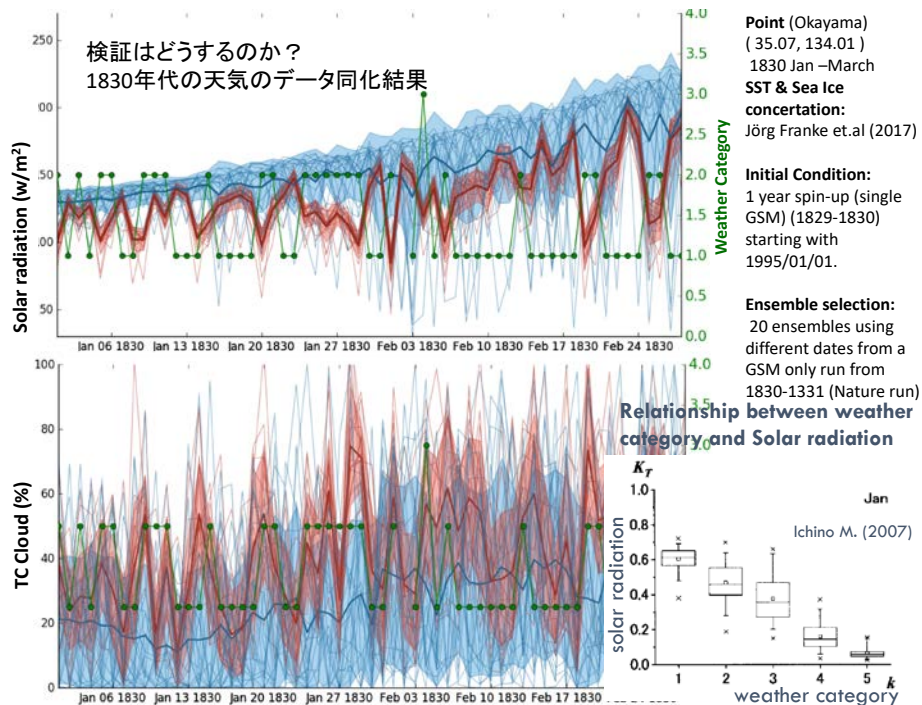
Based on visual observation or
equipment on ground

そのような場所では、正しい観測情報を与えても、モデルが間違っ**て**解釈してしまう。



17

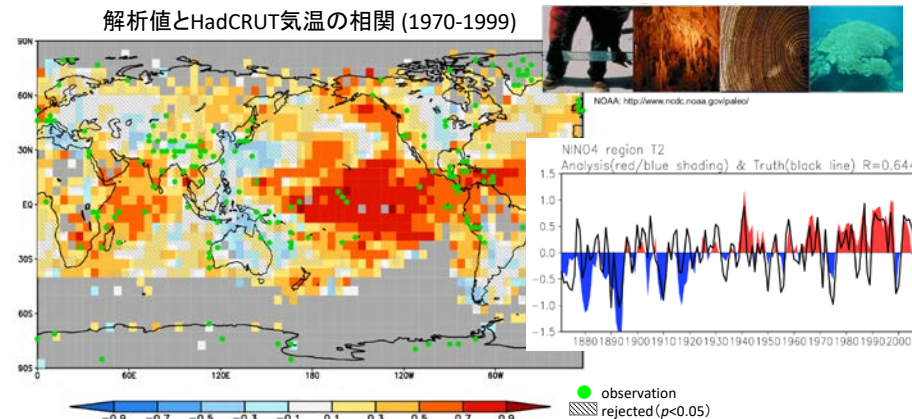
検証はどのようにするのか？ 1830年代の天気の詳細データ同化結果



気候スケールの長周期情報(海面水温等)はどうするのか？
→プロキシ同位体比と同位体GCMのデータ同化が使える。

- ✓ 観測変数: アイスコア, サンゴ, 樹木セルロース同位体比 (最大129地点)
- ✓ 第一推定値, 重み関数はモデルSSTを与えたシミュレーションをもとに作成
⇒ 古気候データ同化の条件とほぼ同じ

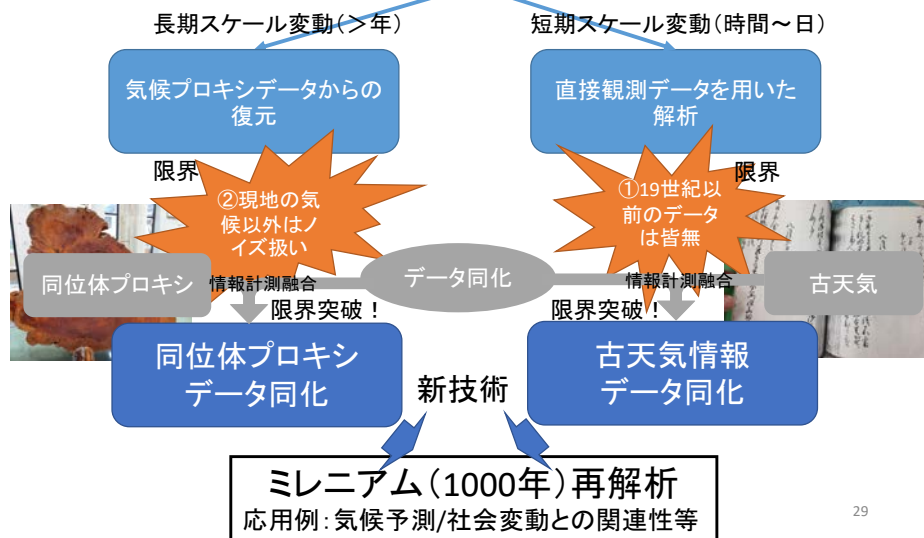
解析値とHadCRUT気温の相関 (1970-1999)



- 現在のプロキシネットワークでも、ENSOの復元は十分に可能
- 今後プロキシ観測を拡充することで、様々な現象が復元されることが期待できる²⁸
(Okazaki and Yoshimura, 2017, Clim. Past)

ミレニアム大気再解析への挑戦

過去長期間の気候・天候の変動の推計



29

まとめ

- データ同化とは、観測とモデルを、融合させるための手段。(=モデルを拘束できる)
- 天気情報をデータ同化することで、気温、気圧、風速、雲量、降水量といった気象場が拘束される。
- 歴史天候データベースの分布(日本域10数点)は、日本の総観規模の気象場を拘束する力がある。
- この技術を使って、過去1000年の大気状態の復元を試みている。

30

議論

- 私のような古文書と縁のなかったナイーブな人間が、古文書データを使いたがる時代
- 翻刻はもちろん、よりプロセスしたデータをどんどん出してほしい。
 - しかし、タダ乗り問題は、重大な懸念と認識。
- データ同化技術の本質は、観測情報(とモデル)の不確実性を考慮すること。最近のデータ同化では、データ毎に一つ一つ異なる不確実性を定義できる。
 - c.f., 不確実性の高い観測データは、軽視される。
- ですので、歴史ビッグデータには、信頼性情報を付けて提供してほしい。
- 「ミレニアム再解析」も、歴史ビッグデータの一部とみなせる。他分野による活用が重要。

31