

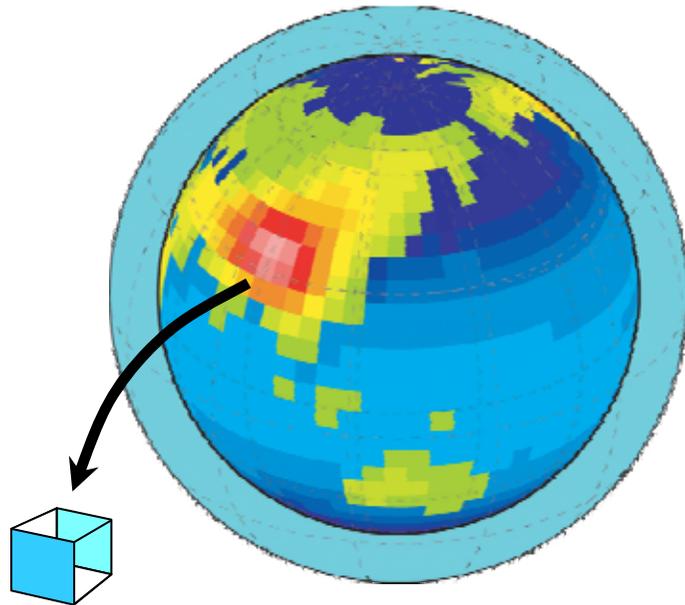
# 気候予測分野における 数理的アプローチの役割 と可能性

国立環境研究所  
地球環境研究センター  
気候変動リスク評価研究室長  
江守正多

# 気候予測研究

気候の数値シミュレーション＝「気候モデル」

大気・海洋を3次元の格子  
(数10～数100km)に分割



各格子に風(流速),  
温度等の物理量を定義

大気・海洋の変化を支配している  
物理法則の方程式を近似して解く

$$\frac{du}{dt} - \left( f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) v = -\frac{1}{\rho a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_{\lambda}$$

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

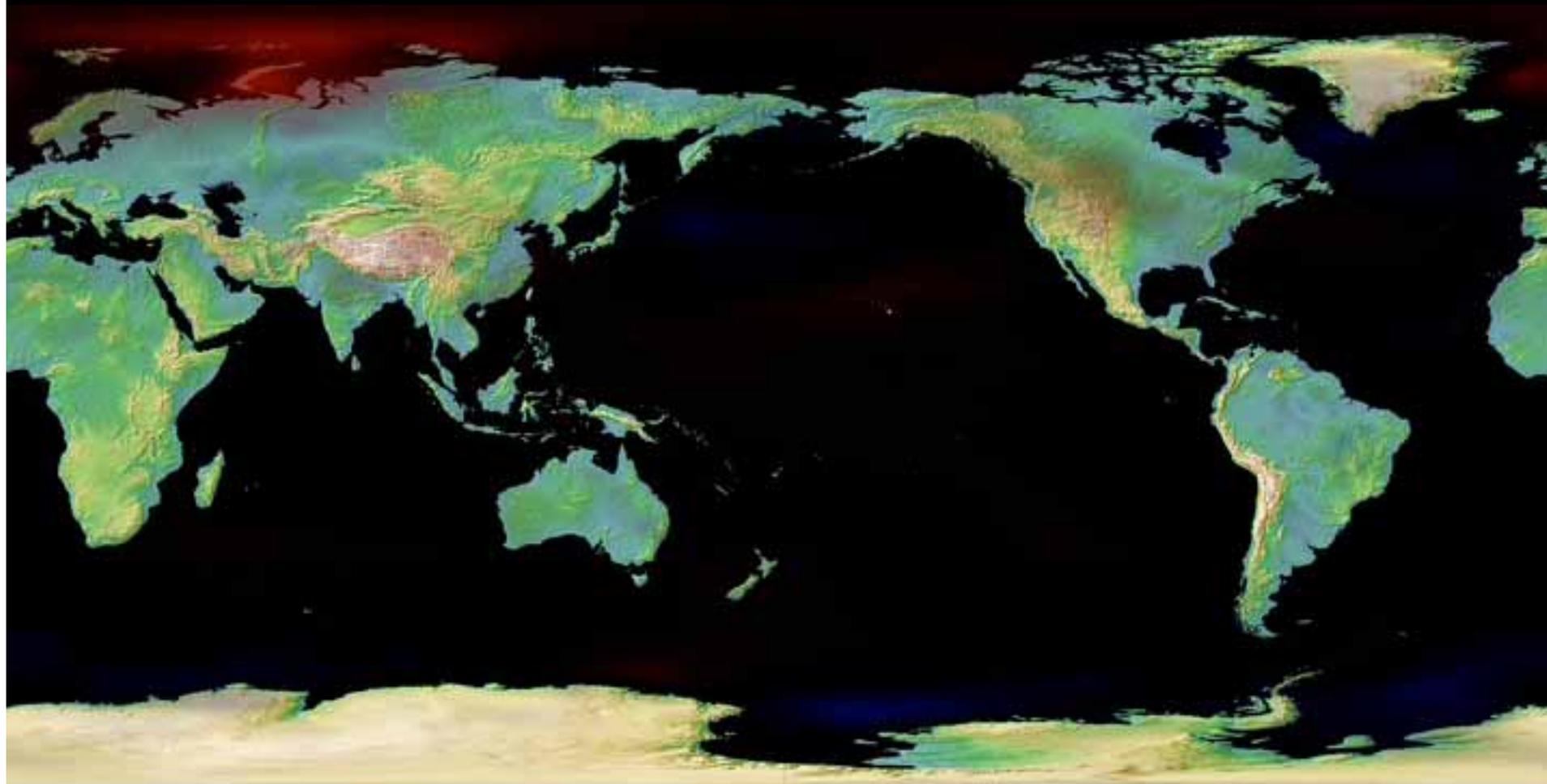
...

流体力学の方程式で表せない項  
(格子以下の現象, 雲, 雨...)



半経験的「パラメタリゼーション」  
(モデルの不確実性の原因)

# 20～21世紀の地表気温変化シミュレーション



1950

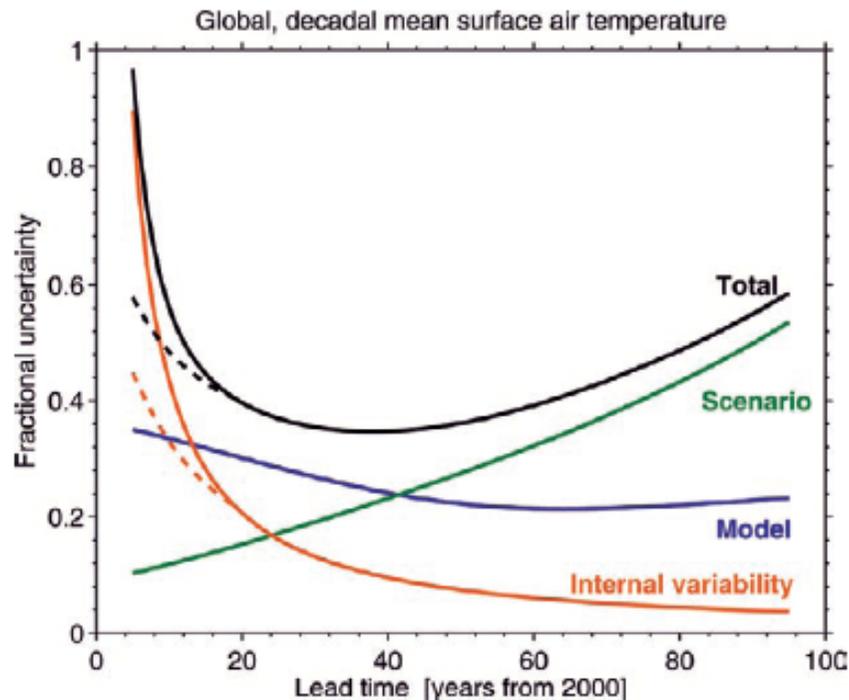


2m temperature change (A1B / MIROC-hi)  
(<http://www.team-6.jp/cc-sim/>)

CCSR/NIES/FRCGC  
MEXT RR2002

# 気候予測の不確実性

1. 内部変動の不確実性(～10年で重要)
2. シナリオの不確実性(100年～で重要)
3. 気候モデルの構造・パラメータの不確実性

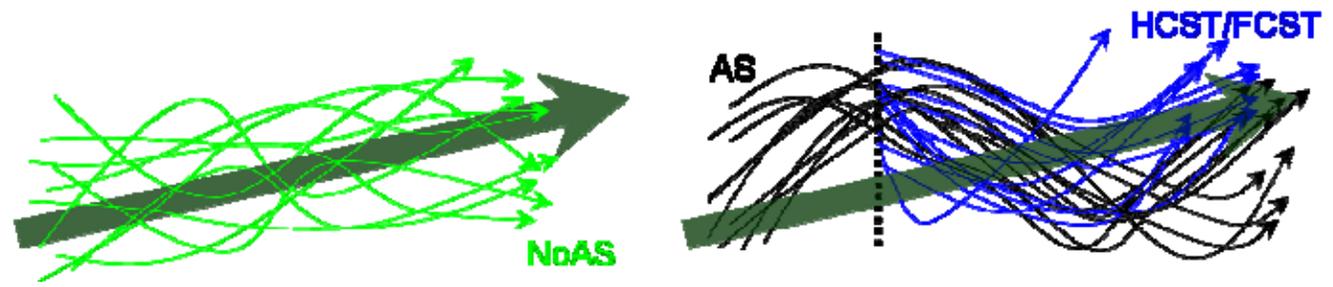
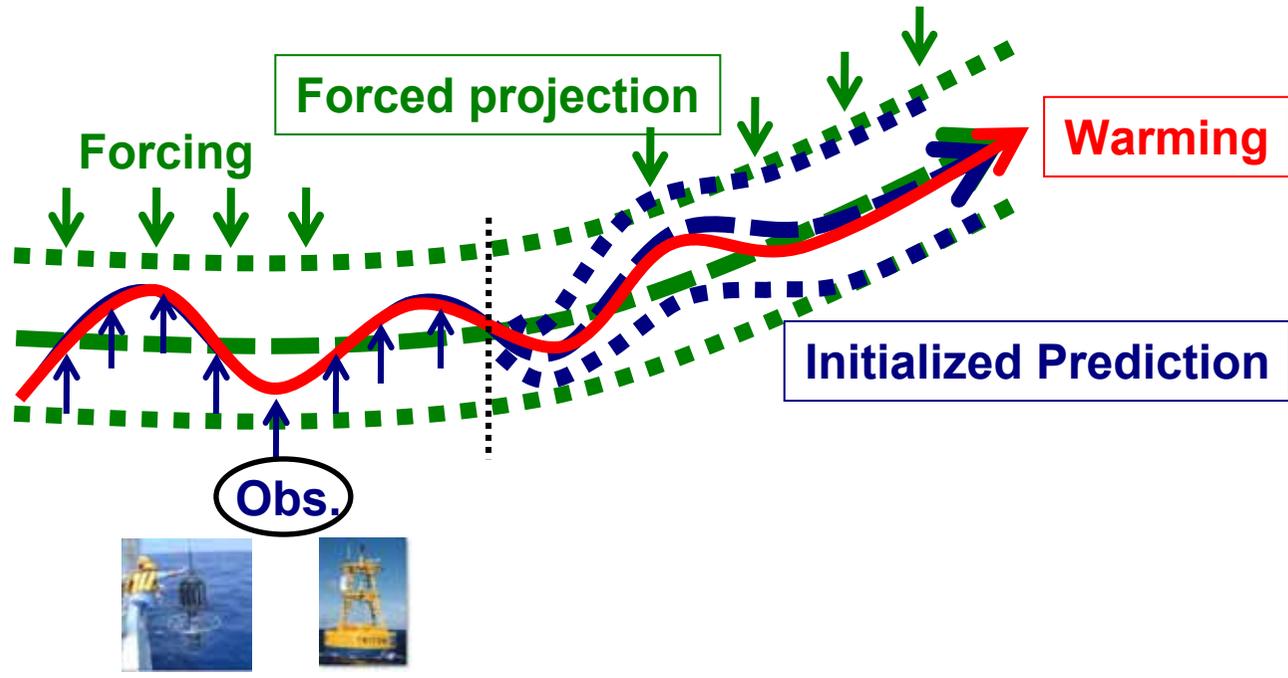


Hawkins and Sutton  
(2009, BAMS)

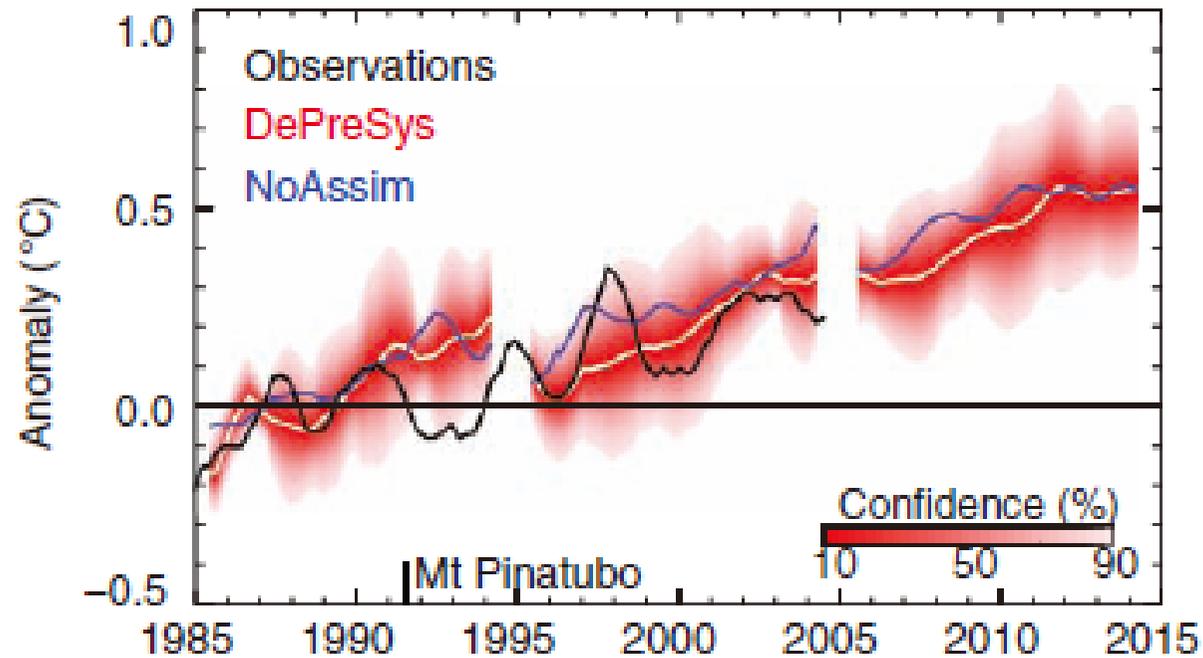
# 内部変動の不確実性

- 主に近未来予測(～10年)で重要(気象予報～季節予報と同様)
- 解の振る舞いがカオス的
  - ⇒データ同化による初期値の最適化
  - ⇒予測可能性評価
- 過去の変動の予測実験(hindcast)を行うことによって、系の予測可能性、予測システムの性能を評価することが可能

# 予測の初期値化



# Data assimilation and near term prediction



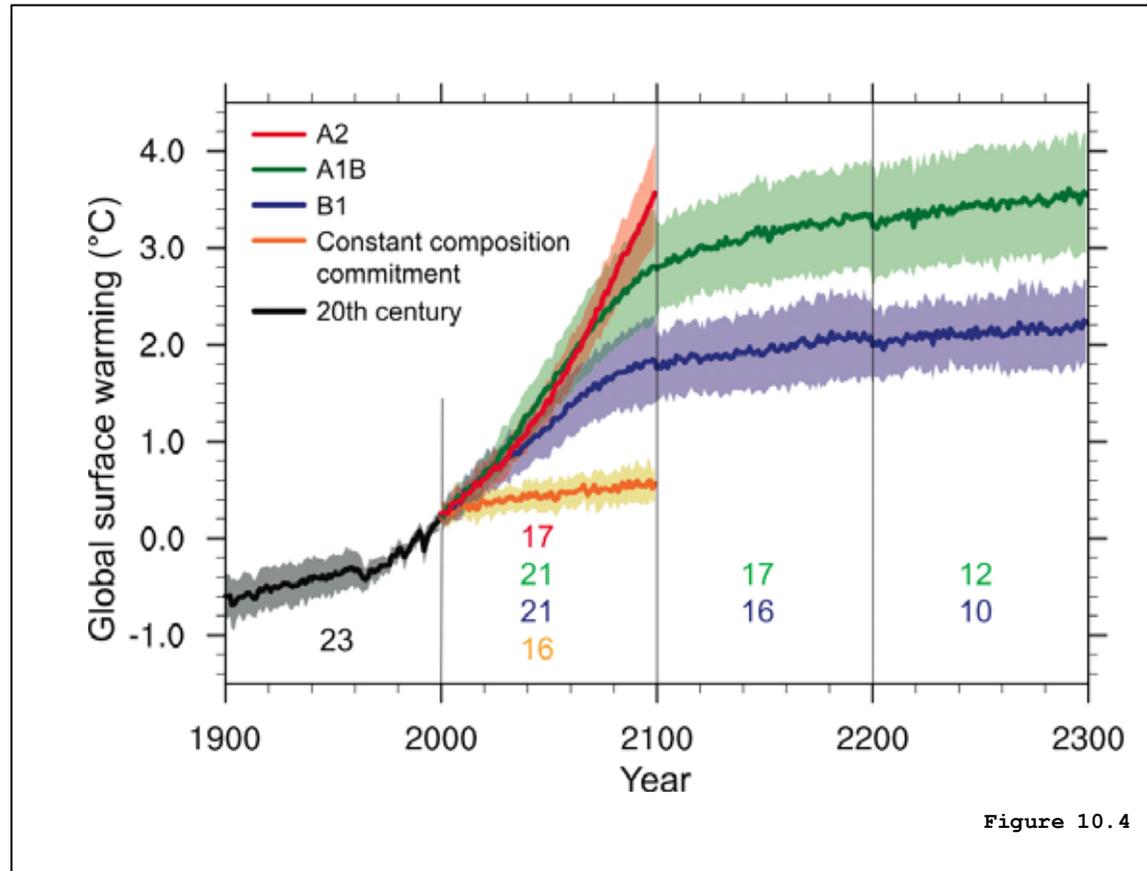
アンサンブルカルマンフィルターなど

Smith et al. (2007, Science)

# 気候モデルの不確実性

- モデルは半経験的仮定(parameterization)を含み、モデルによって結果が少しずつ違う
- 予測性能の事後的な評価が難しい
- 「モデルアンサンブル」による確率的予測へ
- アンサンブルをどう作るか
  - 複数のグループが作ったモデルを集める
  - 一つのモデルのパラメータを系統的に振る
- 各モデルの良し悪し(各モデルと現実との「距離」)をどう測るか
- 確率分布をどう作るか

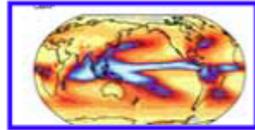
# 気温上昇量予測の不確実性



社会の発展のシナリオに依存  
+モデルの不確実性

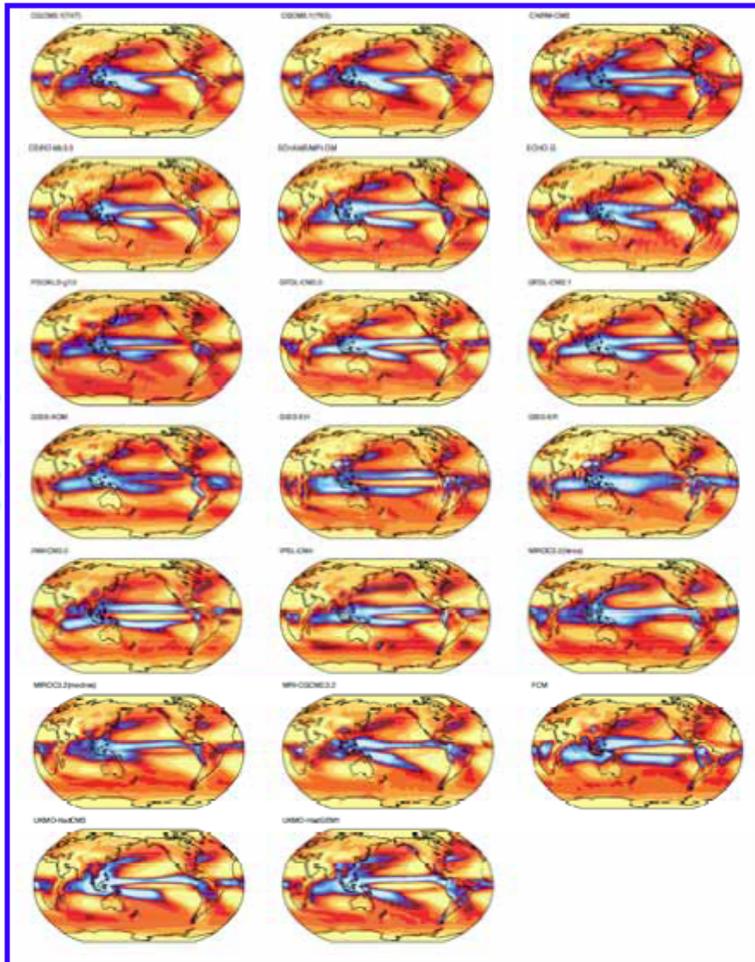
# 20C Reproduction

# 21C Projection

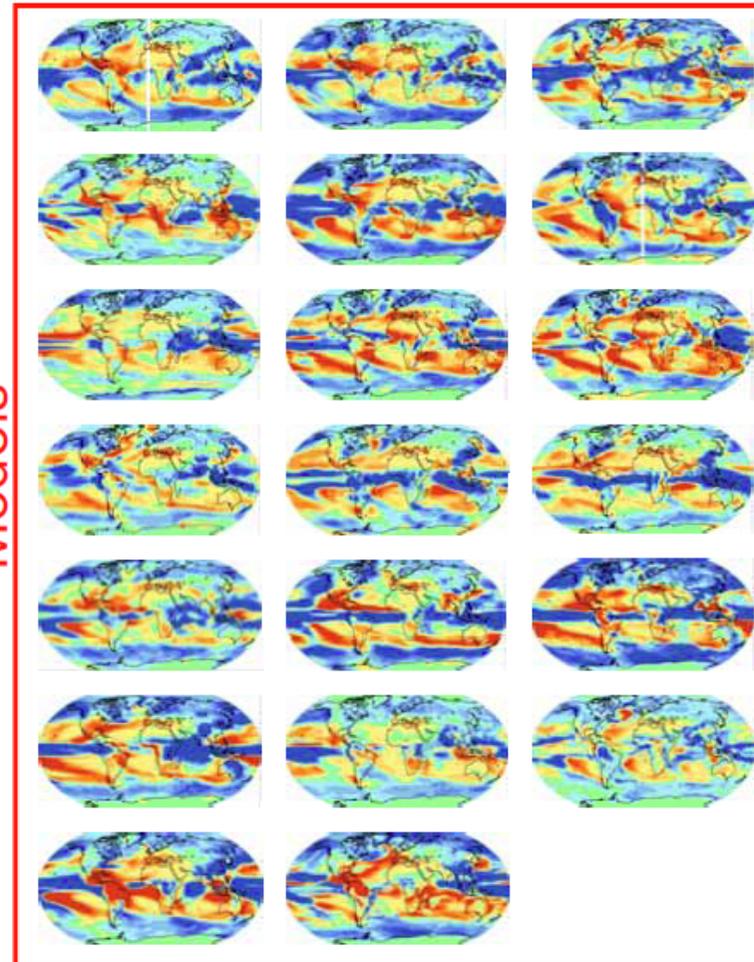


Observed  
Data

Models

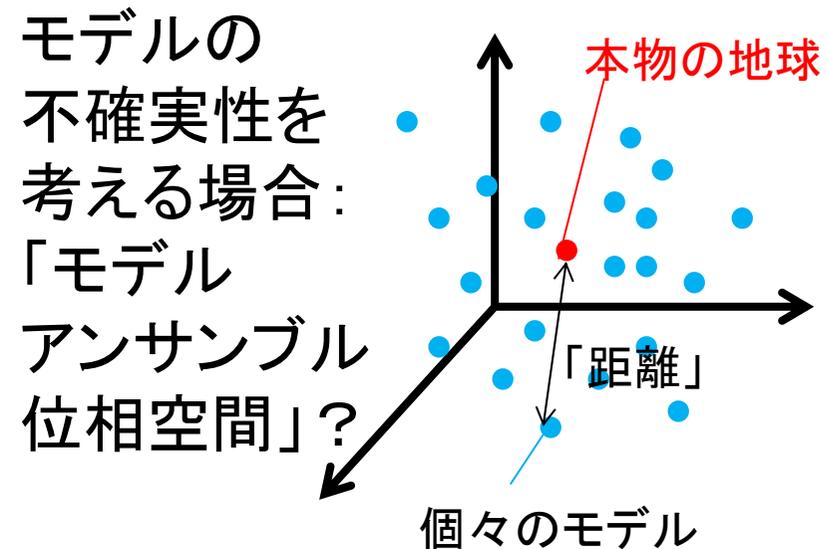
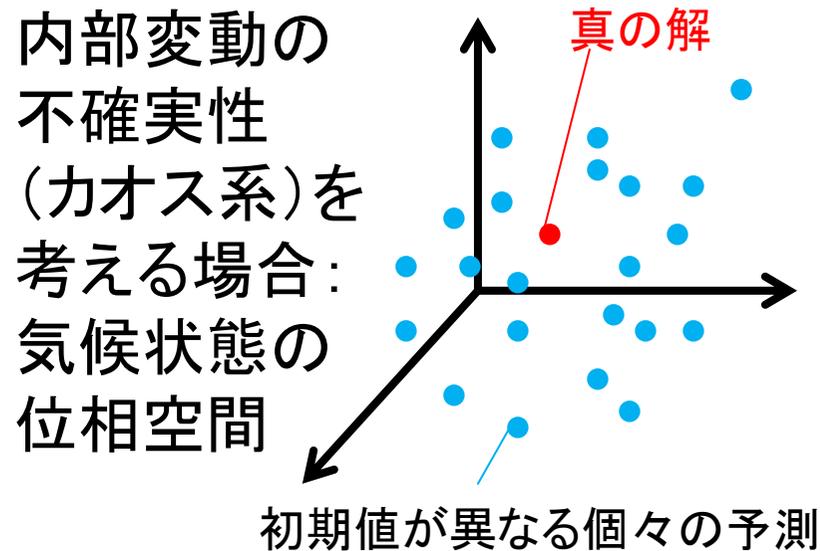


Models



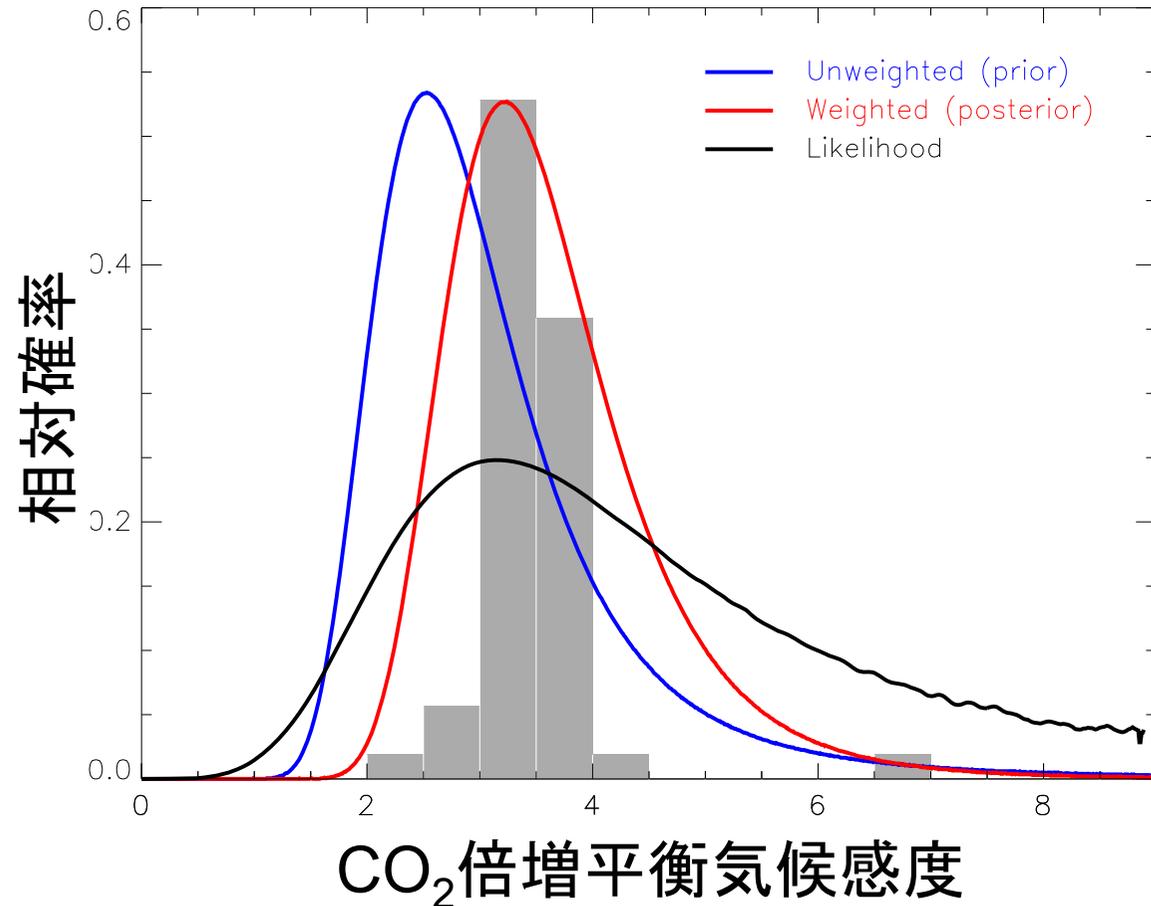
# 数理的手法の役割

1. 初期値やモデルパラメータを、過去の観測データと解が整合するように(不確実性の幅を持って)最適化する
2. 不確実性の大きさを定量化する(解のばらつき方を把握する、解と現実の距離を定量化する)



# モデルアンサンブルによる 確率的予測

1. 一つの気候モデルの不確実なパラメータを様々に変えて実験を繰り返す(物理アンサンブル=棒グラフ)
2. 膨大なパラメータの組合せについての結果を、実際に行った実験の結果から推定(青線)
3. 現在の気候再現性能が良いほど予測値の信頼性が高いという重み(黒線)を掛け合わせる(赤線)



(Murphy et al., 2004)

# モデル結果の「エミュレータ」 パラメータ値からモデル結果を推定

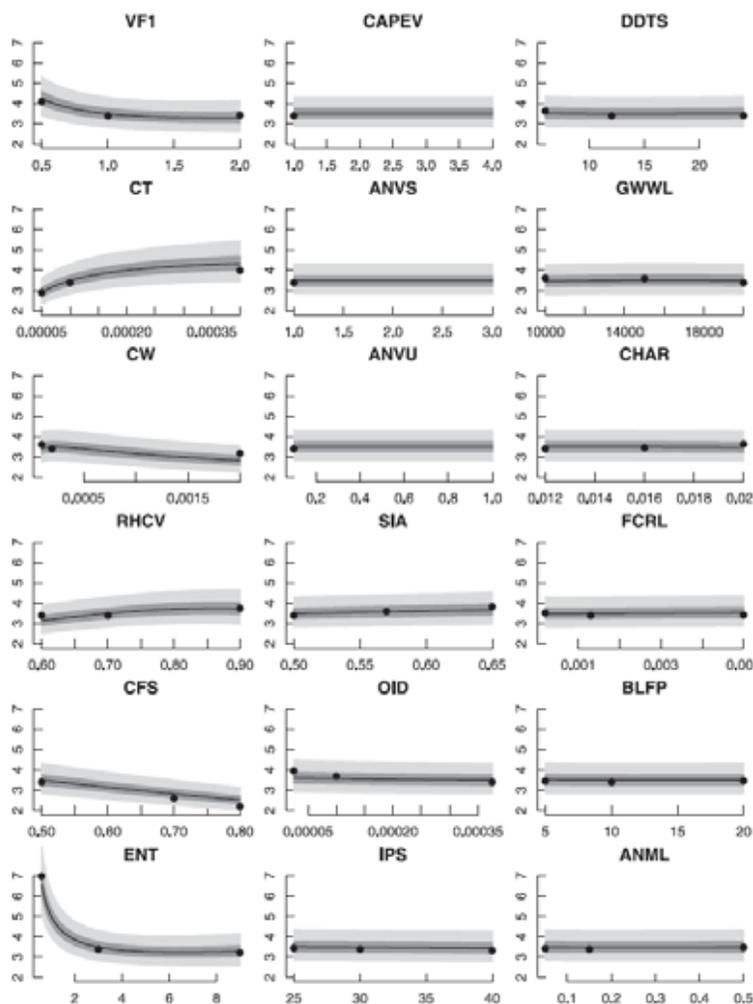


FIG. 6. The effect on climate sensitivity of each of the continuous variables. All other variables are set to their standard values. The line shows the median, the two envelopes show the pointwise 50% and 95% credible intervals. The dots show actual values from the initial stage (single-parameter perturbations) of the QUMP experiment.

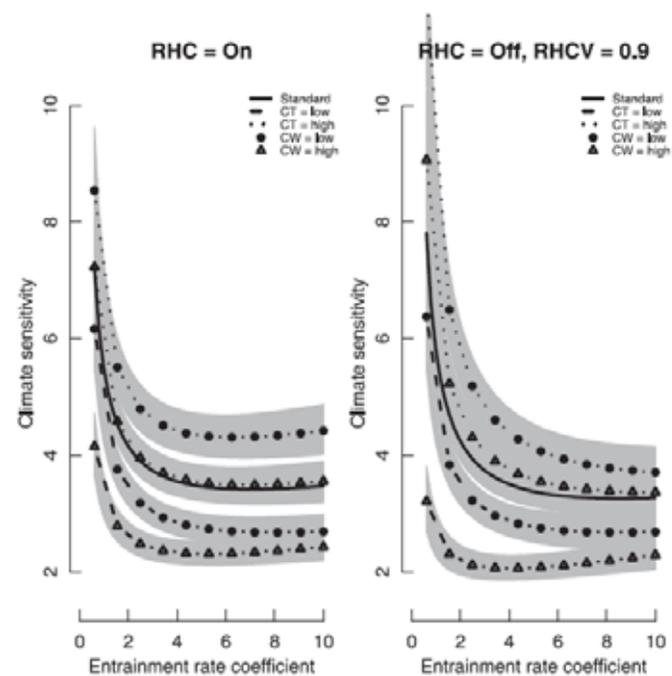


FIG. 8. Interaction between the entrainment rate (ENT) and three large-scale-cloud variables. Each line shows the median response of climate sensitivity to ENT. For the black line, the variables CT and CW are at their standard settings; (left) the black line is identical to the ENT line in Fig. 6. Four other lines are shown: line styles indicate values of CT and symbols indicate values of CW. The shaded envelope indicates the pointwise 50% CI for each line (note that it is 50%, not 95%). (left) RHC is on; (right) RHC is off and RHCV = 0.9.

## 多変量解析

Rougier et al. (2009, J Climate)

# モデルアンサンブルの重みづけ

- モデルの性能による重み付けはベイズ推定に相当

$$P(S|data) \propto P(data|S) P(S)$$

$P(S)$ : 先験確率 (全てのパラメータの組合せ  
一つ一つが等確率と仮定)

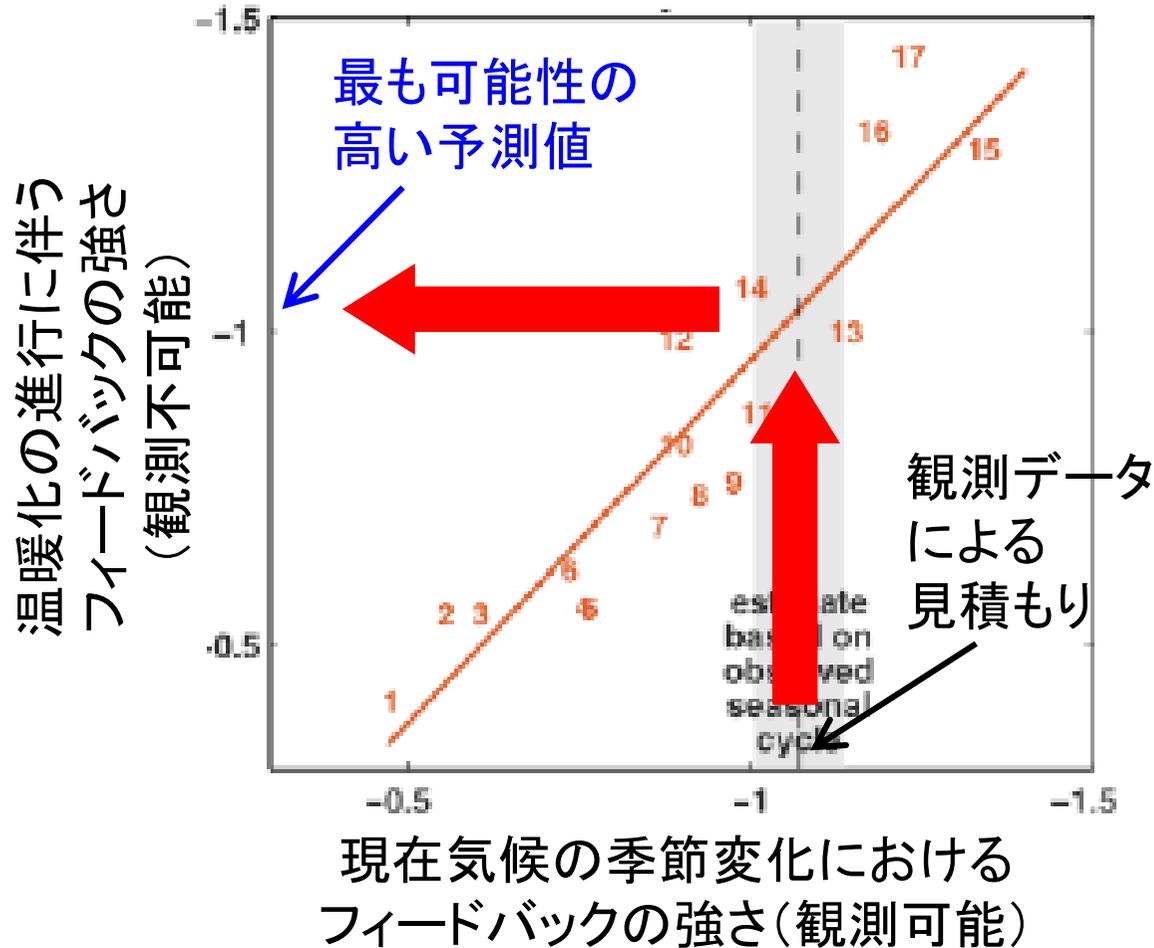
$P(data|S)$ : 重み (気候感度  $S$  のモデルが  $data$  を  
どの程度説明できるか)

$P(S|data)$ : 事後確率 ( $data$  を制約条件としたとき、  
気候感度が  $S$  である確率)

- 先験確率の決め方に依存
- モデルの構造 (解像度、パラメタリゼーション等) の決め方に依存
- モデル性能の定義 ( $data$ ) に依存

# 性能評価指標と将来予測

積雪-アルベド(反射率)  
フィードバックの強さ



Hall and Qu (2006)

現在／過去の気候を再現する性能が良いモデルほど将来予測も正しいと一般には言えない  
⇒モデルアンサンブル空間内で、将来予測と相関の高い性能評価指標を探す

# 数理的アプローチ適用の現状

- 気候予測の不確実性を抽象的なモデルアンサンブル空間で表し、そこに数理的手法を適用する試みが進んできている。
- 旧来からあるカオスの初期値依存に対する数理的手法の適用も依然重要。
- 気候科学者が必要な数学を勉強してなんとかしている場合が多い。
- 「数学に強い気候科学者の育成」か「数学者の気候科学への参入」か？

# 数理的アプローチ適用の現状

- 個別の数理的な手法、テクニックの適用よりも、数理的な「考え方」において、数学のプロに相談したいと思うことが多い。
- 数学的(統計学的?)センスがないと正確に考えるのが難しい事柄
  - ある系の不確実性をどう定義すべきか?
  - ある系の自由度をどう見積もるべきか?
  - 不確実性を制約するデータがダブルカウンティングになっていないか?
  - ...