

気候モデルによる将来予測： 気候感度の不確実性

横畠徳太

国立環境研究所

2009年3月12日 森羅万象セミナー

自己紹介

■ 地球温暖化予測に関する研究

2003年4月～ 国立環境研究所

2007年11月～2008年11月 英国気象局ハドレーセンター
(2009年4月～ 海洋研究開発機構 JAMSTEC)

自己紹介

■ 地球温暖化予測に関する研究

2003年4月～ 国立環境研究所

2007年11月～2008年11月 英国気象局ハドレーセンター
(2009年4月～ 海洋研究開発機構 JAMSTEC)

■ 火星気候変動に関する研究

1999年～2003年 北海道大学大学院理学研究科
学位論文『火星表層環境進化におけるCO₂凝結の役割』

指導教官: 倉本教授

自己紹介

■ 地球温暖化予測に関する研究

2003年4月～ 国立環境研究所

2007年11月～2008年11月 英国気象局ハドレーセンター
(2009年4月～ 海洋研究開発機構 JAMSTEC)

■ 火星気候変動に関する研究

1999年～2003年 北海道大学

学位論文『火星表層環境進化のモデリング』

指導教官：倉本教授



Contents (15枚)

- 話題：気候感度の不確実性
 - 気候感度 = CO₂増加に対する地表気温変化

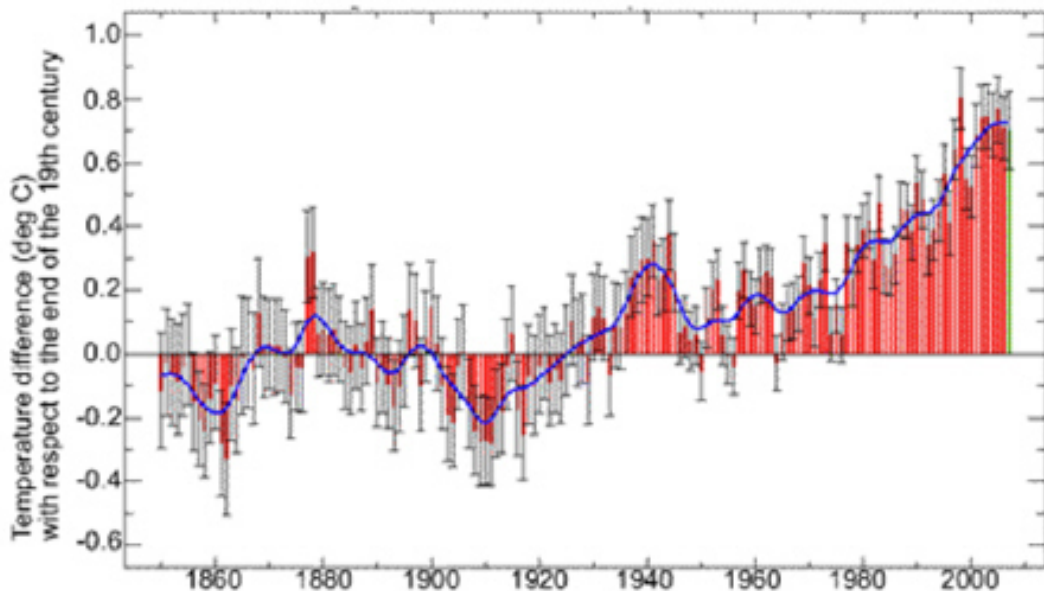
Contents (15枚)

- 話題：気候感度の不確実性
 - 気候感度 = CO₂増加に対する地表気温変化
- 「物理摂動アンサンブル」の解析
 - モデルパラメータ不確実性 → 予測のばらつき
 - 温暖化時の雲の応答
 - 現在気候と将来気候の関係

過去の地表気温の変化

Global temperature, 1850-2007

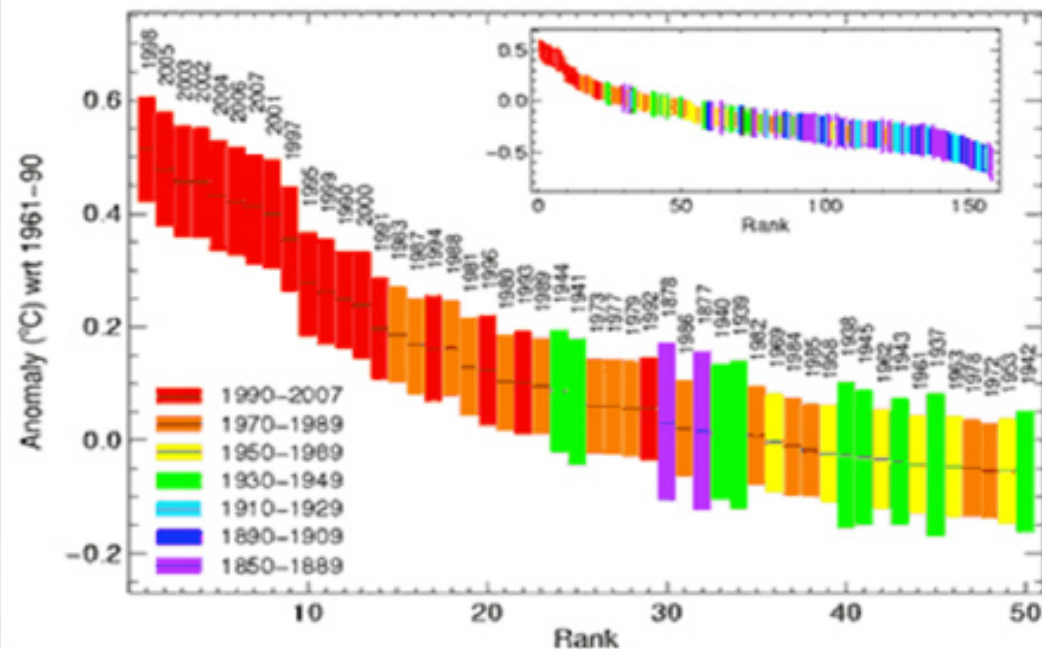
Met Office



上位17位の高温が過去20年に起こっている

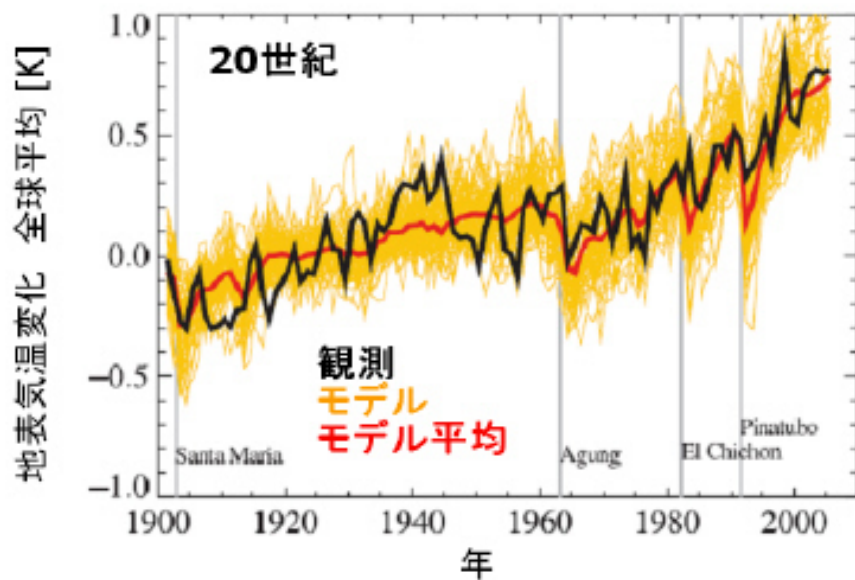
過去の地表気温の変化

Global temperature anomaly, 1850-2007



上位17位の高温が過去20年に起こっている

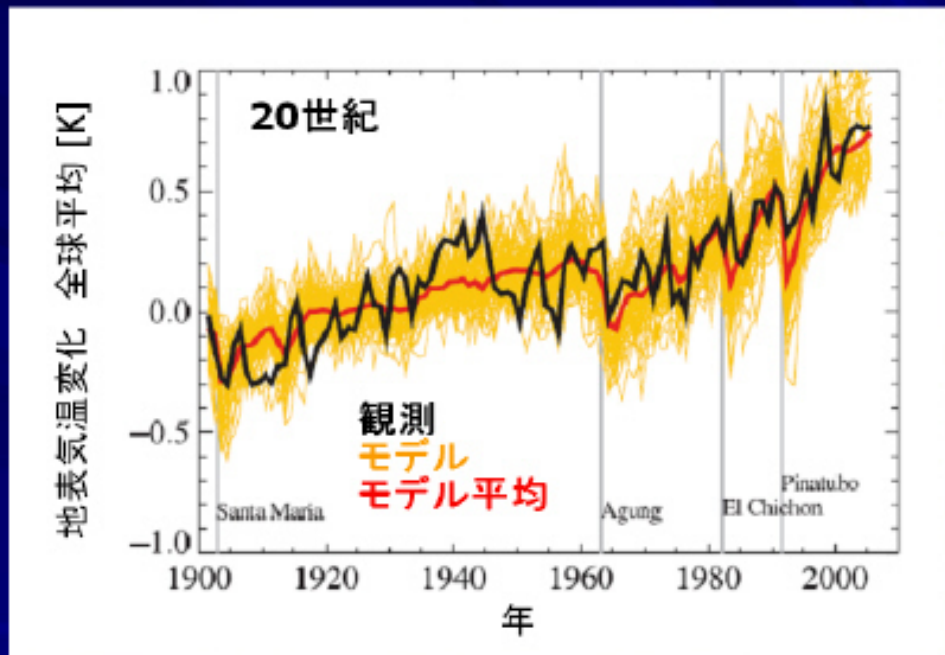
気候モデルによる過去再現実験



世界気候研究
機関の気候モデル
(~50アンサンブル、
全球大循環
大気海洋結合モデル)

モデルは観測された温度変化をよく再現する

気候モデルによる過去再現実験



世界気候研究
機関の気候モデル
(~50アンサンブル、
全球大循環
大気海洋結合モデル)

モデルは観測された温度変化をよく再現する

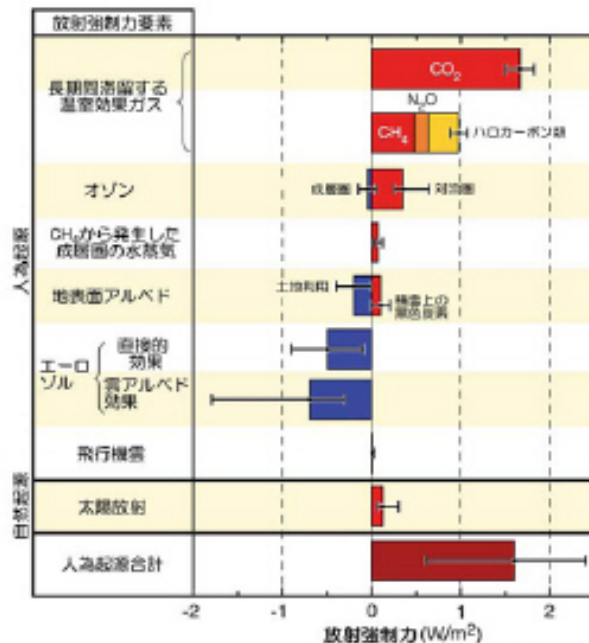
様々な不確実要素: 気候変化を完全に理解したとはいえない

気候モデルによる過去再現実験

放射強制の不確実性

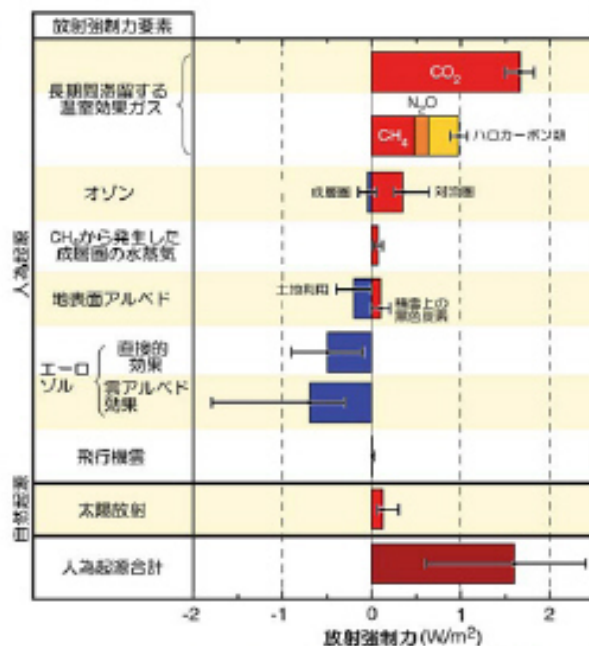
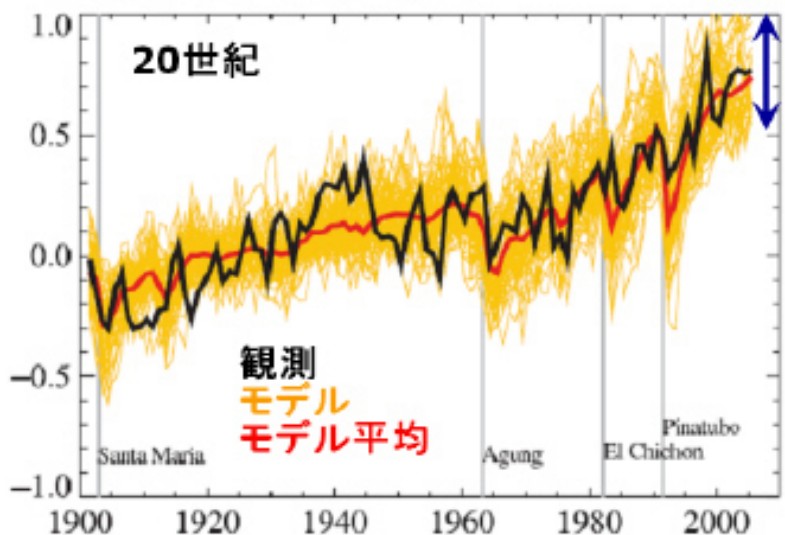
気候システムに対する外的強制

- 温室効果ガス増加による加熱
- エアロゾル増加による冷却



気候モデルによる過去再現実験

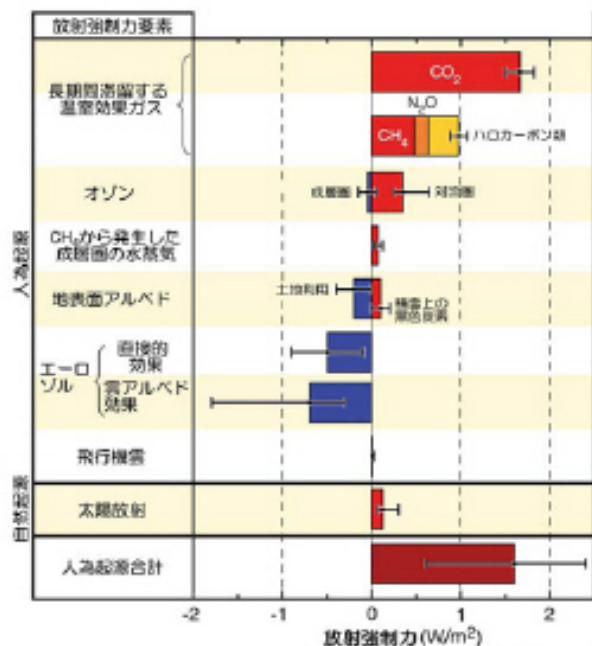
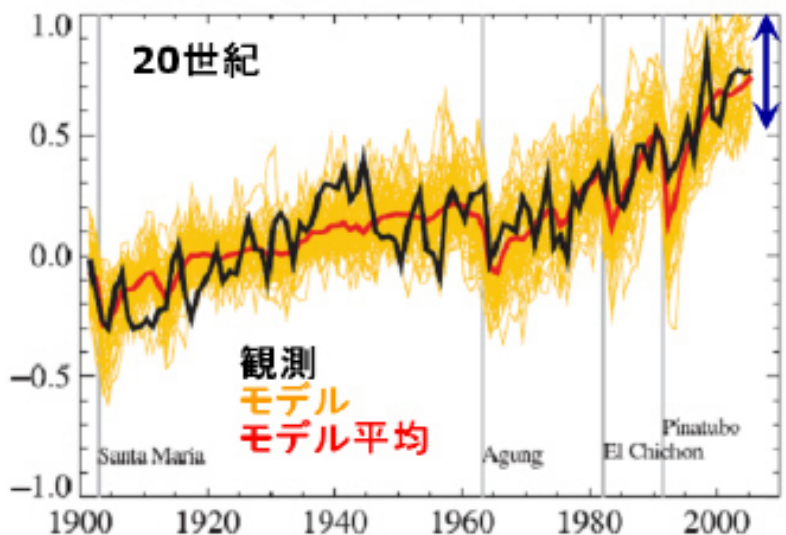
地表気温変化 全球平均 [K]



- 過去再現実験: モデルは観測を再現するように(ある程度)調整

気候モデルによる過去再現実験

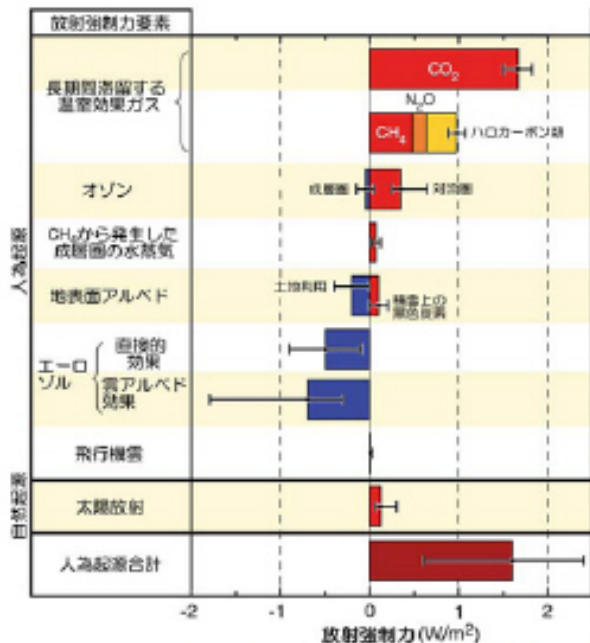
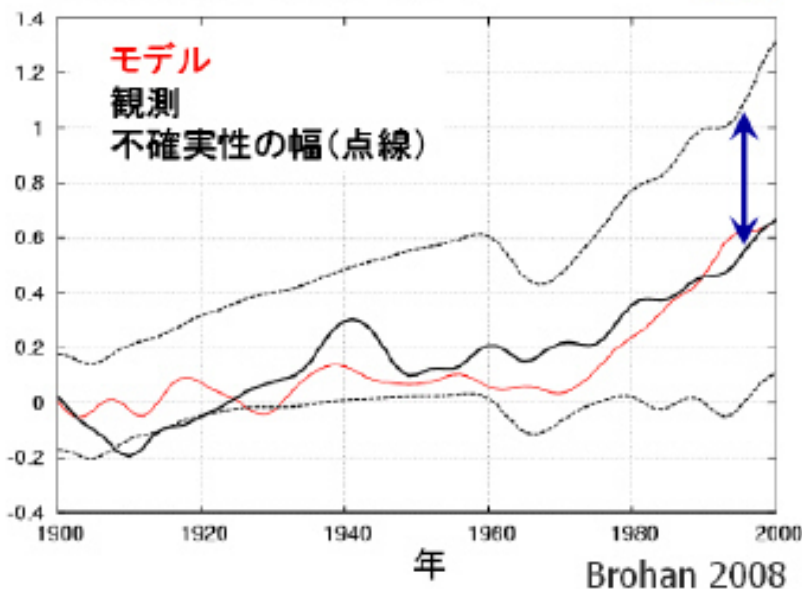
地表気温変化 全球平均 [K]



- 過去再現実験: モデルは観測を再現するように(ある程度)調整
- 放射強制の不確実性
 - 気候感度(CO₂増加に対する地表気温変化)の不確実性

気候モデルによる過去再現実験

地表気温変化 全球平均 [K]



- 過去再現実験: モデルは観測を再現するように(ある程度)調整
- 放射強制の不確実性
 - 気候感度(CO₂増加に対する地表気温変化)の不確実性

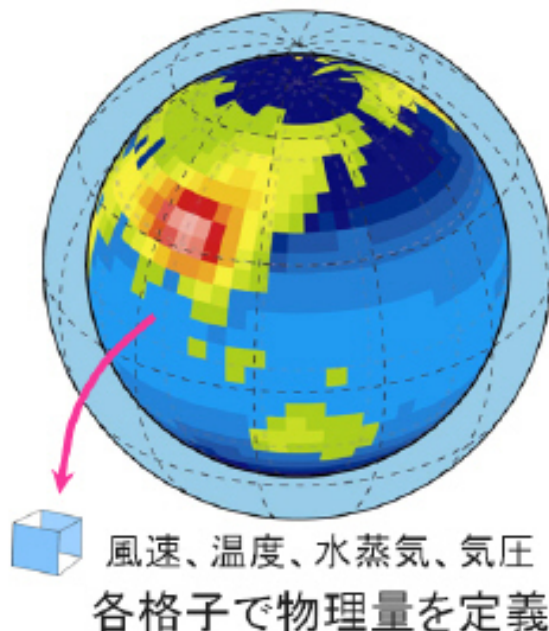
気候感度の不確実性 ← パラメタリゼーション

■ 気候モデルの有限性

- 計算格子間隔
~ 100 - 300 km
- 流体方程式を離散化して解く
- 計算格子点以下の現象は
半経験式を利用 (パラメタリ
ゼーション)
 - 対流・拡散
 - 相変化 (雲・雨・雪・氷)

気候モデル 概念図

大気・海洋・陸面を3次元の
格子に切る (離散化)



気候感度の不確実性を幅広く調べる

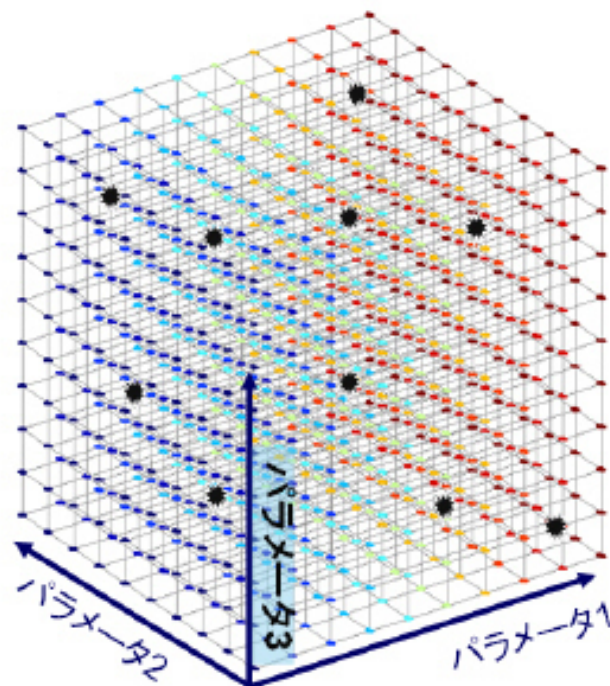
■ 物理摂動アンサンブル

- モデルパラメータの不確実性が将来気候予測に与える影響を系統的に調べる
- モデルパラメータを不確実性の範囲で変化させアンサンブル作成

気候感度の不確実性を幅広く調べる

■ 物理摂動アンサンブル

- モデルパラメータの不確実性が将来気候予測に与える影響を系統的に調べる
- モデルパラメータを不確実性の範囲で変化させアンサンブル作成

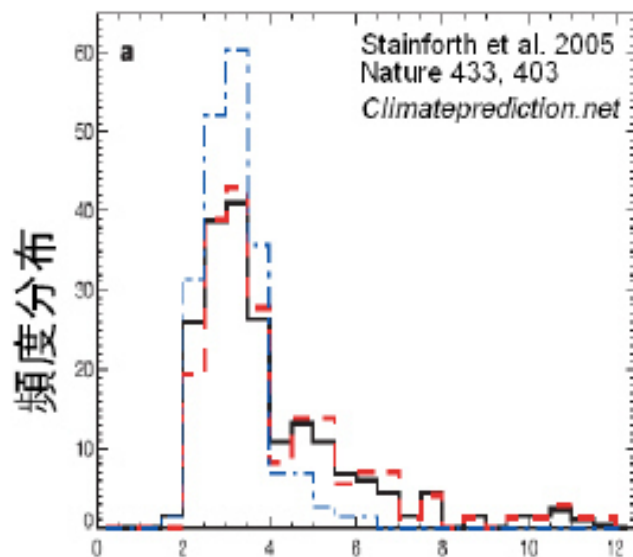


Collins (2000)

気候感度の不確実性を幅広く調べる

■ 物理摂動アンサンブル

- モデルパラメータの不確実性が将来気候予測に与える影響を系統的に調べる
- モデルパラメータを不確実性の範囲で変化させアンサンブル作成



気候感度
CO₂倍増時の地表気温変化
の全球年平均値

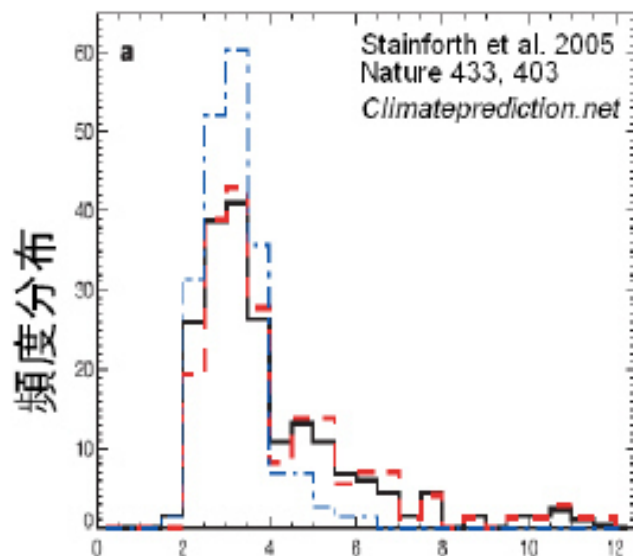
気候感度の不確実性を幅広く調べる

■ 物理摂動アンサンブル

- モデルパラメータの不確実性が将来気候予測に与える影響を系統的に調べる
- モデルパラメータを不確実性の範囲で変化させアンサンブル作成

■ 結果がモデル構造に依存

- 異なるモデルによる物理摂動アンサンブル比較が重要
- 比較研究は行われていない



日英気候モデルによる物理摂動アンサンブル比較

現在気候実験・CO₂倍増実験の解析 (Yokohata et al. 2009)

日英気候モデルによる物理摂動アンサンブル比較

現在気候実験・CO₂倍増実験の解析 (Yokohata et al. 2009)

■ CCSR/NIES/FRCGC MIROC3.2 (k-1 model developers 2004)

- 5.6° x 5.6° 20 層 + 50m 海洋混合層モデル
- 13 パラメータを変化
- Ensemble Kalman Filter を用いて観測の再現性のよいパラメータセットを選択 (Annan et al. 2005)
- メンバー数=32 (温暖化ドリフトのあるモデルを除く)

日英気候モデルによる物理摂動アンサンブル比較

現在気候実験・CO₂倍増実験の解析 (Yokohata et al. 2009)

■ CCSR/NIES/FRCGC MIROC3.2 (k-1 model developers 2004)

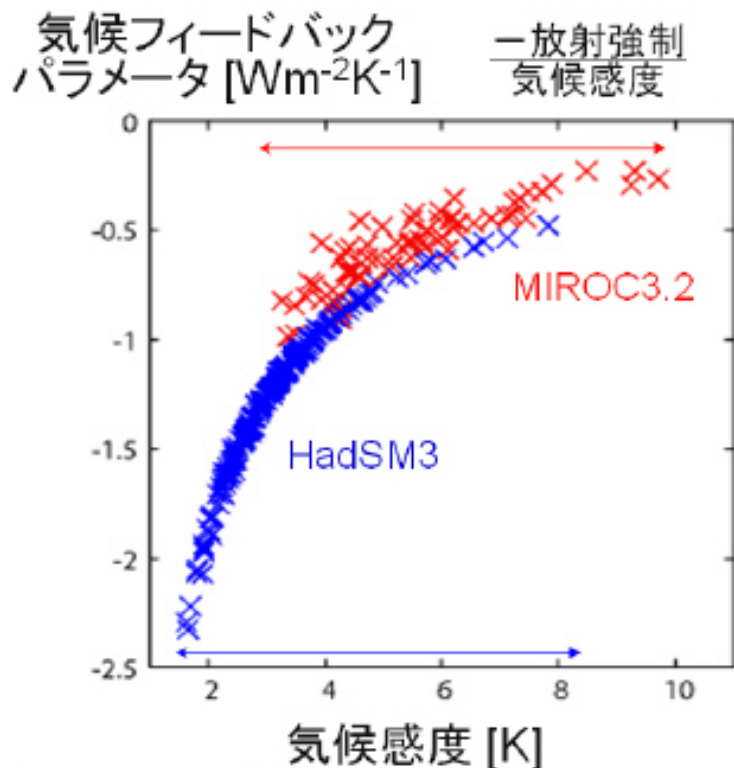
- 5.6° x 5.6° 20 層 + 50m 海洋混合層モデル
- 13 パラメータを変化
- Ensemble Kalman Filter を用いて観測の再現性のよいパラメータセットを選択 (Annan et al. 2005)
- メンバー数=32 (温暖化ドリフトのあるモデルを除く)

■ UK Met Office HadSM3 (Pope et al. 2001)

- 2.5° x 3.7° 19 層 + 50m 海洋混合層モデル
- 31 パラメータを変化 (Latin hyper cube)
- 観測の再現性がよく、気候感度が十分な幅を持ってばらつくようにパラメータセットを選択 (Webb et al. 2006)
- メンバー数=218 (寒冷化ドリフトのあるモデルを除く)

気候感度

CO₂倍増時の地表気温変化の全球年平均値

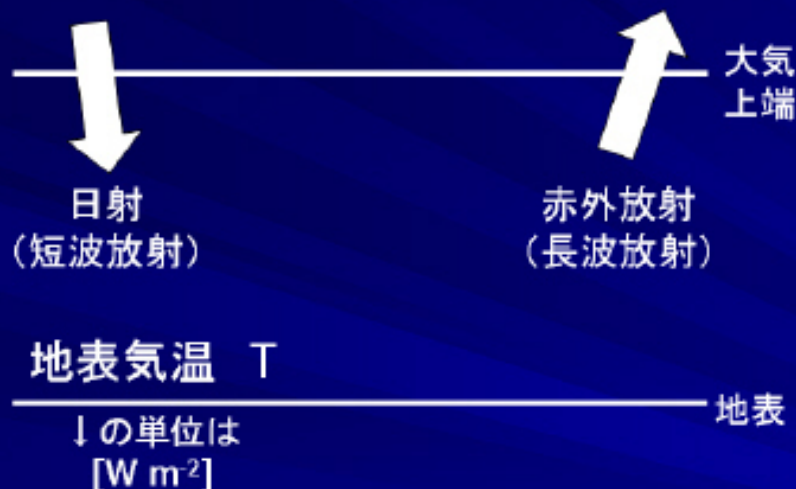


MIROC は
HadSM3 に比べて
気候感度が大きい

ばらつきの幅は
同程度

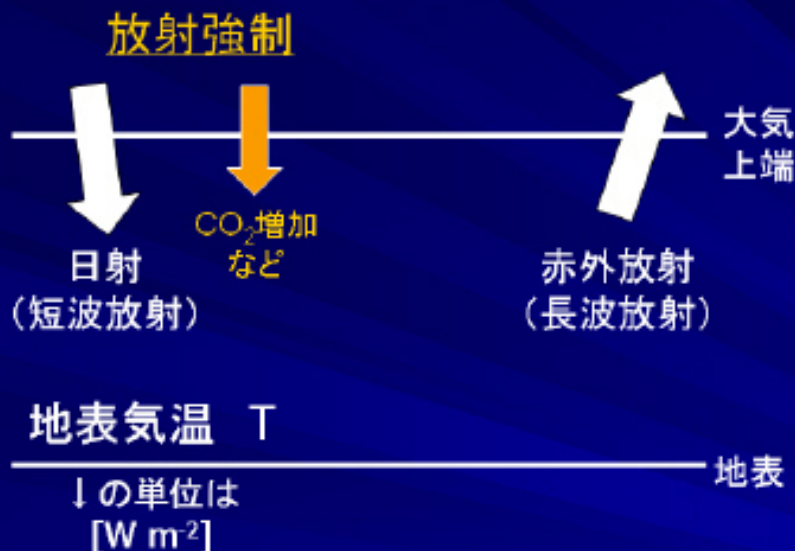
ばらつく理由：
気候フィードバックが
異なるため

気候フィードバック過程



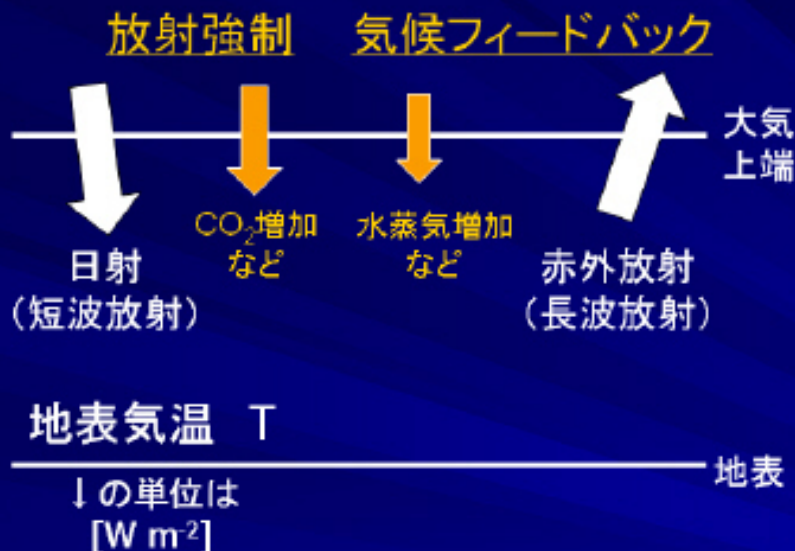
地表気温変化を
決めるメカニズム
「気候フィードバック」
＝放射強制に対する
大気・地表の変化
→変化を促進/抑制

気候フィードバック過程



地表気温変化を
決めるメカニズム
「気候フィードバック」
＝放射強制に対する
大気・地表の変化
→変化を促進/抑制

気候フィードバック過程



地表気温変化を
決めるメカニズム
「気候フィードバック」
＝放射強制に対する
大気・地表の変化
→変化を促進/抑制

気候フィードバック過程



地表気温変化を
決めるメカニズム
「気候フィードバック」
＝放射強制に対する
大気・地表の変化
→変化を促進/抑制

気候フィードバック過程



地表気温変化を
決めるメカニズム
「気候フィードバック」
＝放射強制に対する
大気・地表の変化
→変化を促進/抑制

気候フィードバック過程

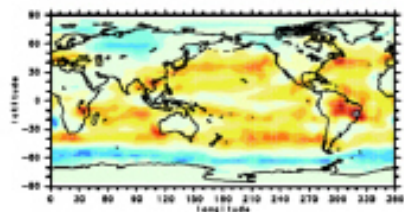


地表気温変化を
決めるメカニズム
「気候フィードバック」
＝放射強制に対する
大気・地表の変化
→変化を促進/抑制

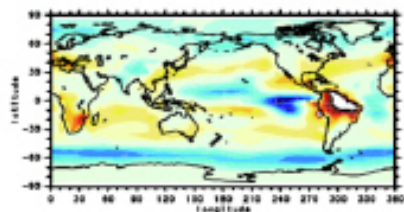
- 気候フィードバックをモデル出力から診断 (Yokohata et al. 2005)
 - － 雲フィードバック: 雲による日射反射/赤外吸収射出が変化
 - － 水蒸気フィードバック: 水蒸気による日射吸収/赤外吸収が変化
 - － 氷アルベドフィードバック: 雪氷による日射反射が変化

気候フィードバック解析 (1) 全球分布

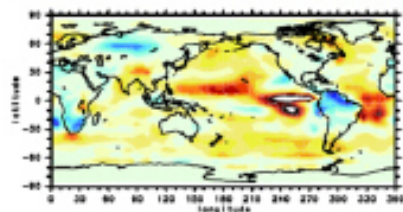
短波雲フィードバック MIROC



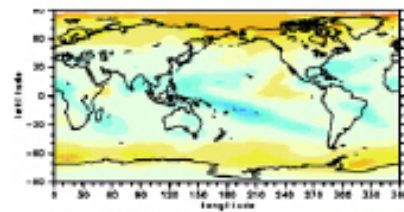
短波雲フィードバック HadSM3



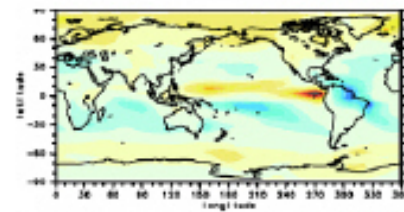
短波雲フィードバック MIROC-HadSM3



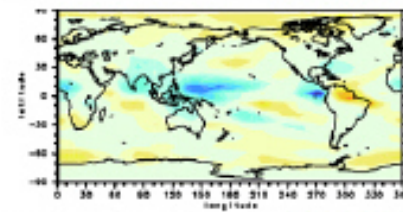
長波雲フィードバック MIROC



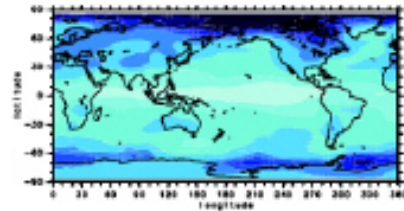
長波雲フィードバック HadSM3



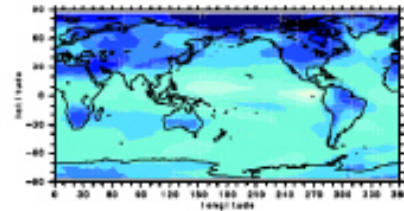
長波雲フィードバック MIROC-HadSM3



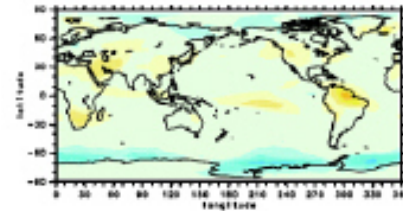
長波晴天フィードバック MIROC



長波晴天フィードバック HadSM3

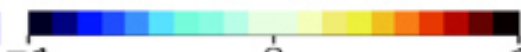


長波晴天フィードバック MIROC-HadSM3



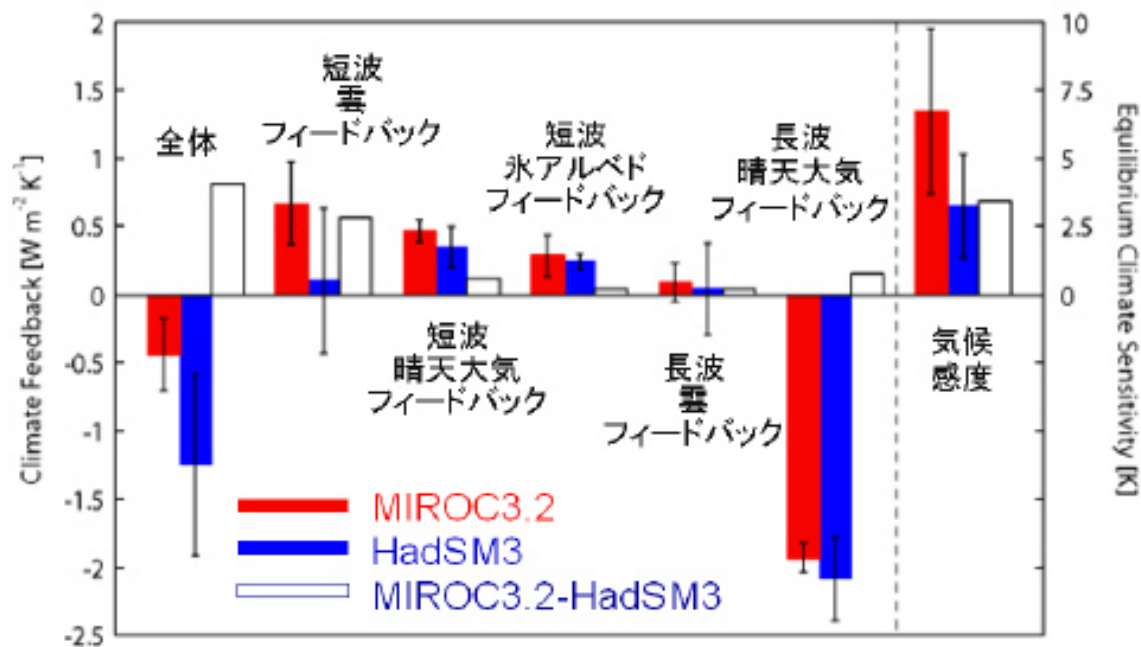
単位 [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

加熱を抑制

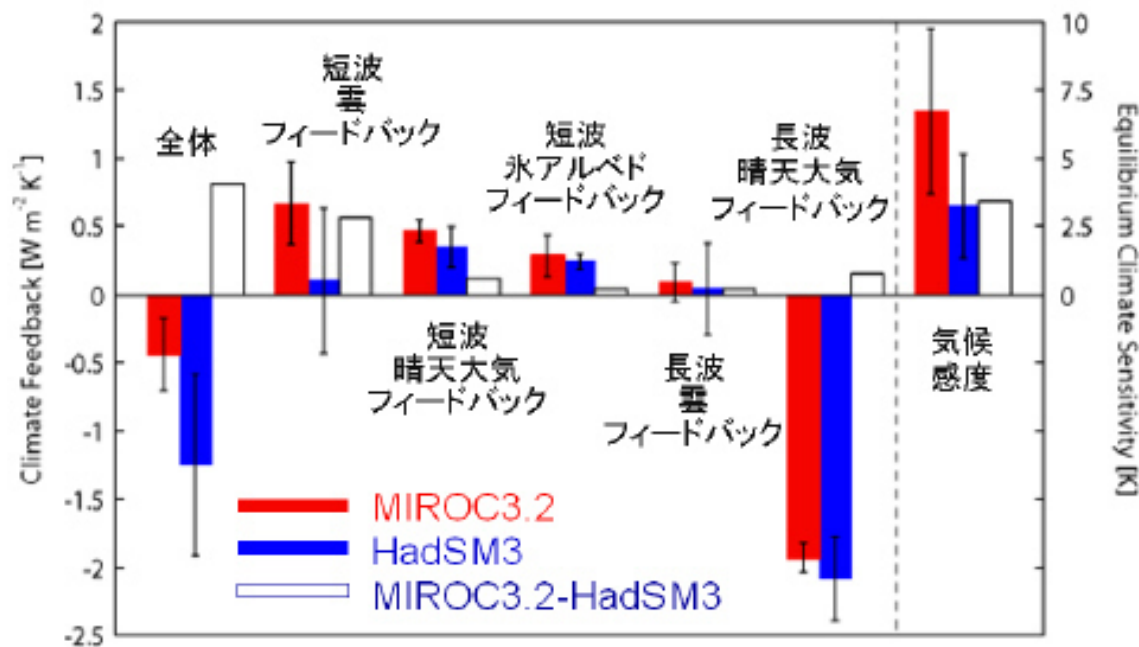


加熱を促進

気候フィードバック解析 (2) 全球平均



気候フィードバック解析 (2) 全球平均



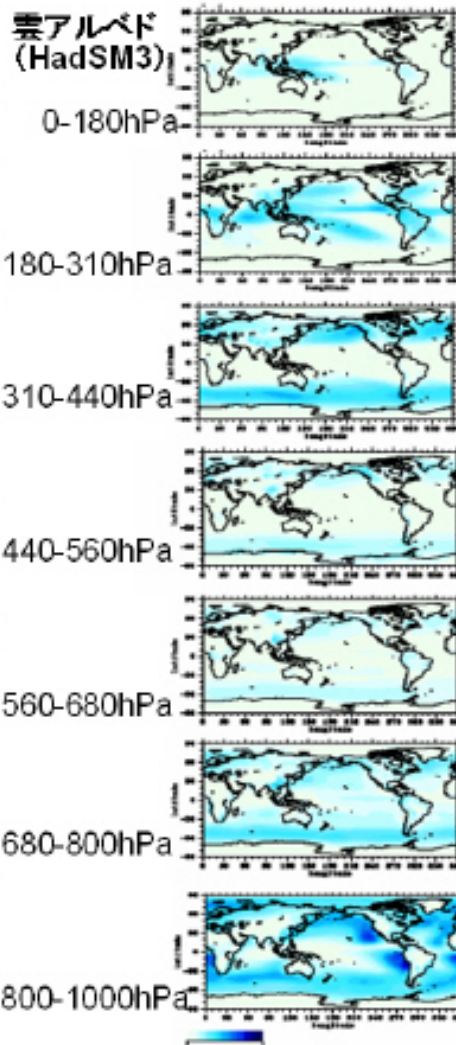
MIROC-HadSM3 のアンサンブル平均の違いは短波雲フィードバックによる

MIROC HadSM3 アンサンブル内のばらつきは短波雲フィードバックによる

短波雲フィードバック:

異なる高度の雲の寄与を定量化

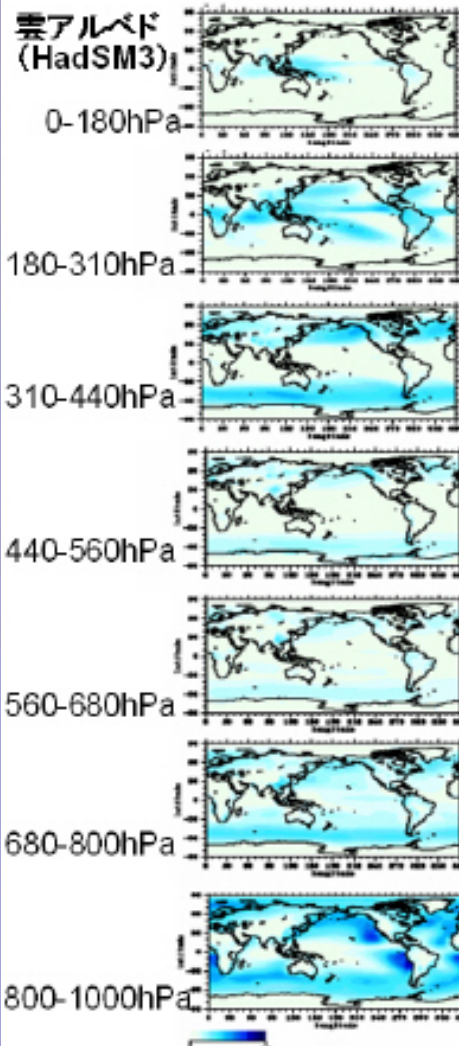
- 気候モデルにおいて衛星観測と比較可能な形で雲量・雲アルベドを出力
 - ISCCP simulator (Webb et al. 2001)
 - 異なる雲頂高度をもつ雲量・雲アルベド



短波雲フィードバック:

異なる高度の雲の寄与を定量化

- 気候モデルにおいて衛星観測と比較可能な形で雲量・雲アルベドを出力
 - ISCCP simulator (Webb et al. 2001)
 - 異なる雲頂高度をもつ雲量・雲アルベド
- 現在気候実験・CO₂倍増実験の間での各高度の雲量・雲アルベドの変化
 - 短波雲フィードバックに対する上層雲・中層雲・下層雲の寄与を定量化



短波雲フィードバック: アンサンブル平均

MIROC3.2

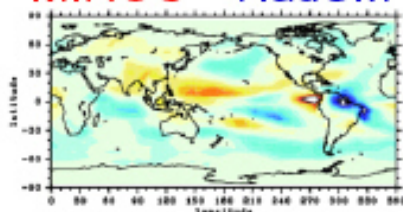
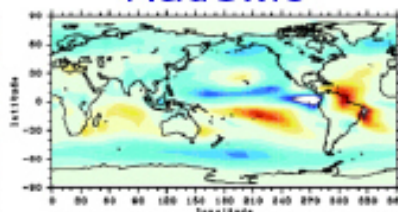
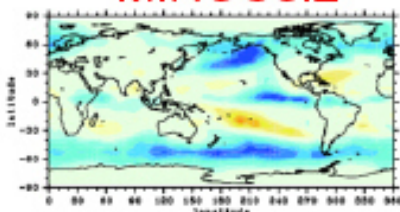
HadSM3

MIROC - HadSM

上層

0-440

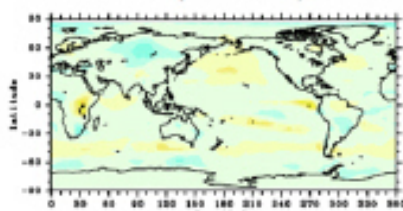
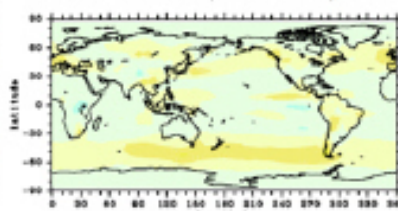
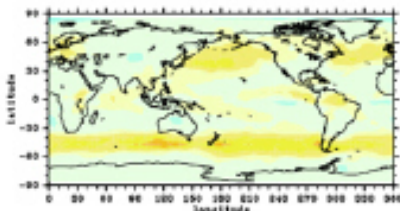
hPa



中層

440-680

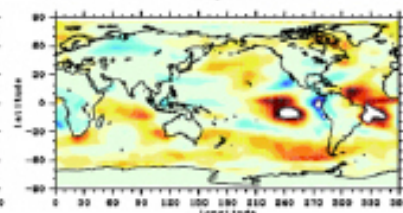
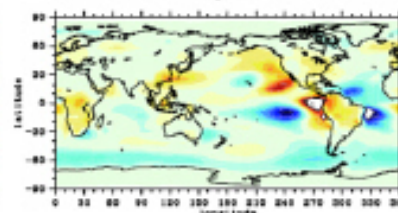
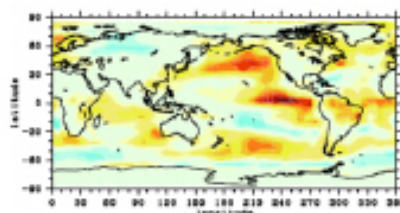
hPa



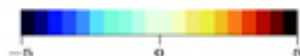
下層

680-1000

hPa



温暖化を抑制

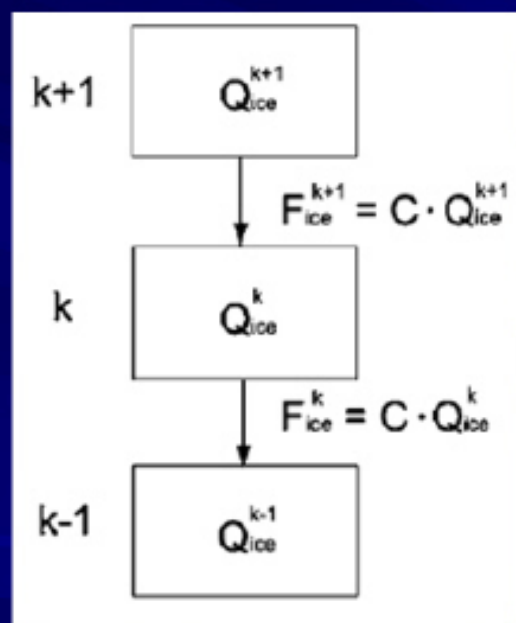


温暖化を促進

雲フィードバックのアンサンブル平均、下層雲の違いが重要

モデルによる下層雲応答の違い
雲水収支にもとづく解釈 (Ogura et al. 2008)

モデルによる下層雲応答の違い 雲水収支にもとづく解釈 (Ogura et al. 2008)

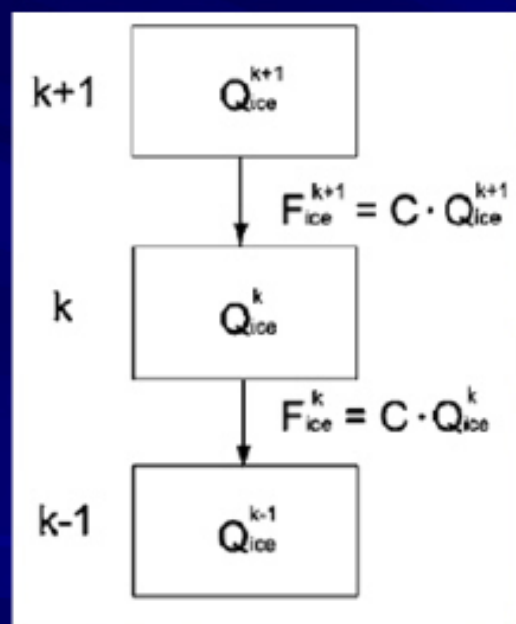


k 層での雲氷収支

上から入ってくるフラックス = $C \cdot Q_{ice}^{k+1}$

下へ落ちていくフラックス = $-C \cdot Q_{ice}^k$

モデルによる下層雲応答の違い 雲氷収支にもとづく解釈 (Ogura et al. 2008)



k 層での雲氷収支

上から入ってくるフラックス = $C \cdot Q_{ice}^{k+1}$

下へ落ちていくフラックス = $-C \cdot Q_{ice}^k$

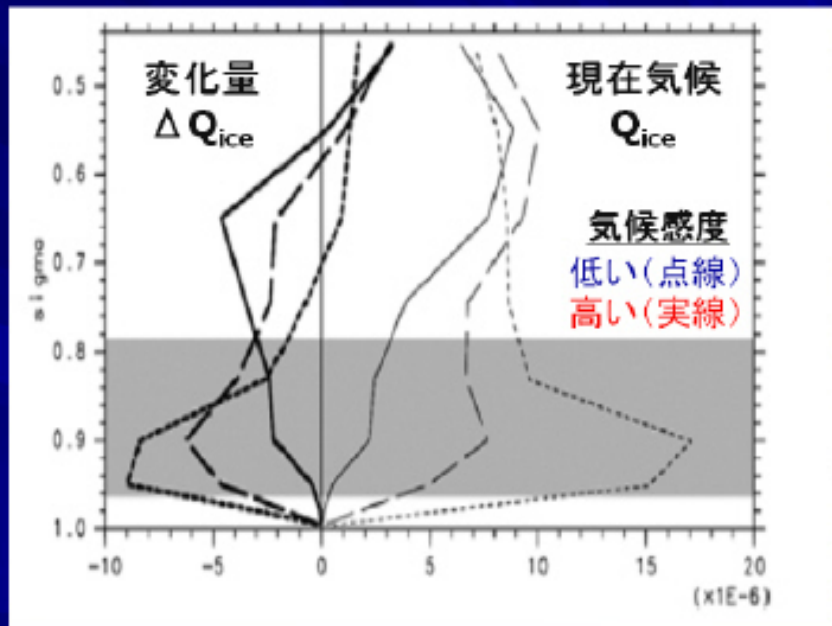
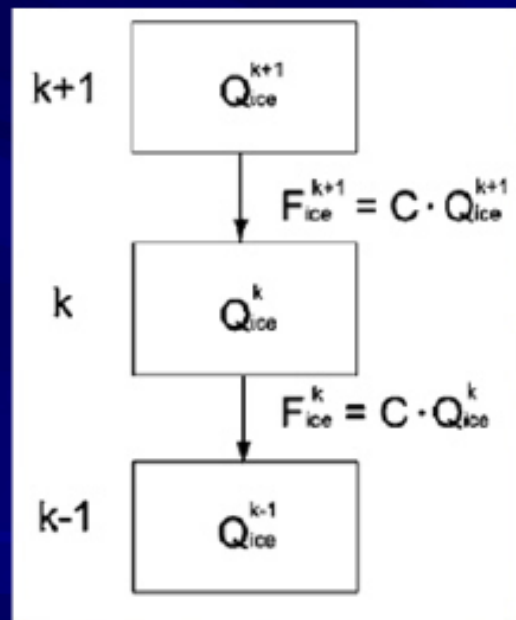
上からのフラックスが増える = 雲氷増

下へのフラックスが減る = 雲氷増

k 層での雲氷収束量変化

$$\Delta Q_{ice}^{k+1} - \Delta Q_{ice}^k$$

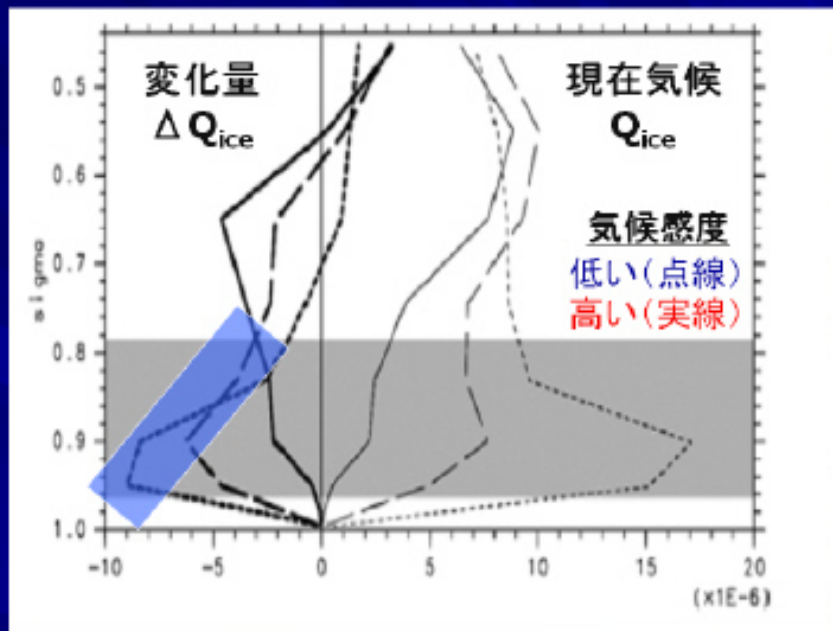
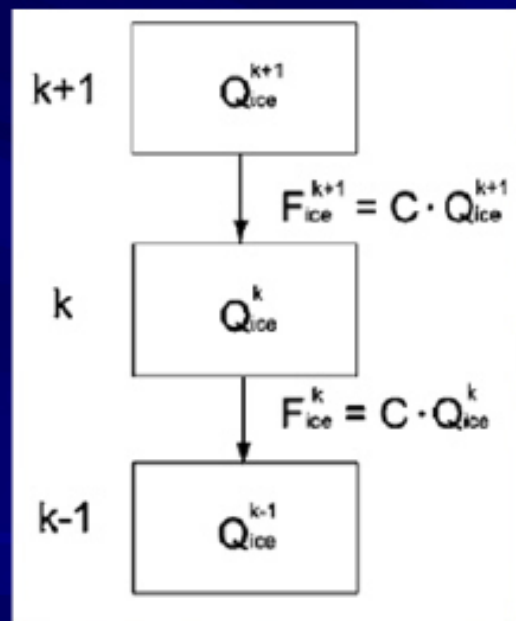
モデルによる下層雲応答の違い 雲氷収支にもとづく解釈 (Ogura et al. 2008)



k 層での雲氷収束量変化

$$\Delta Q_{ice}^{k+1} - \Delta Q_{ice}^k$$

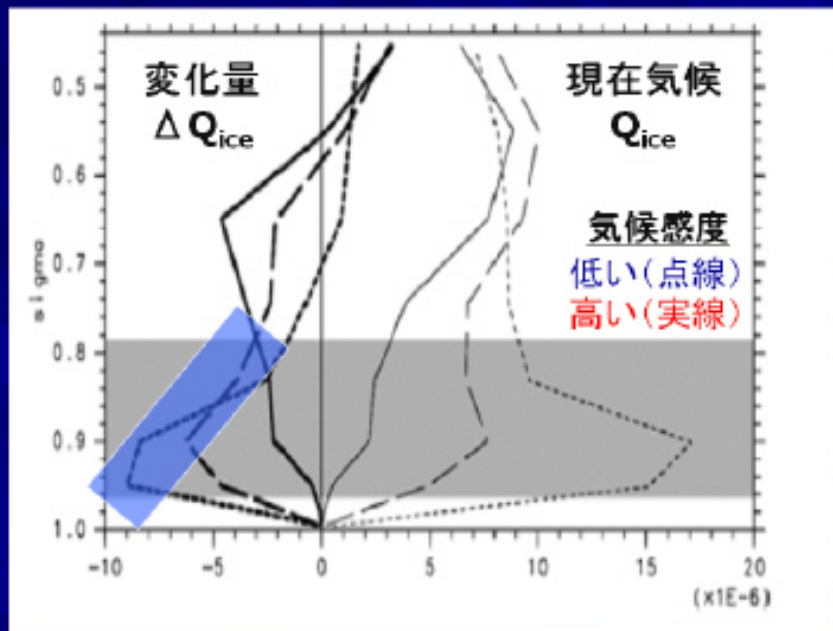
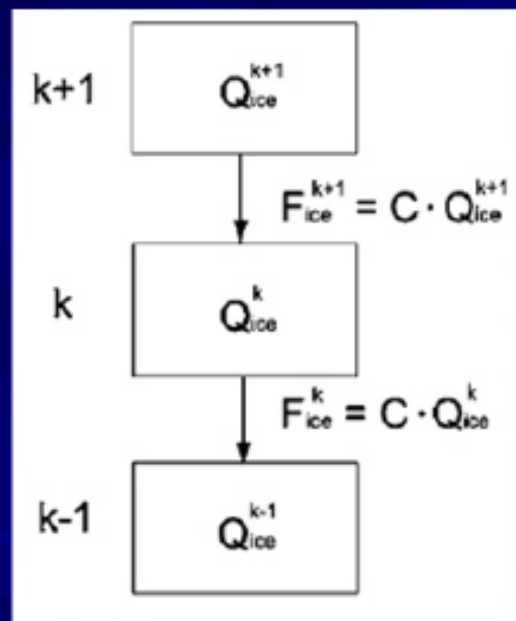
モデルによる下層雲応答の違い 雲氷収支にもとづく解釈 (Ogura et al. 2008)



k 層での雲氷収束量変化

$$\Delta Q_{ice}^{k+1} - \Delta Q_{ice}^k$$

モデルによる下層雲応答の違い 雲氷収支にもとづく解釈 (Ogura et al. 2008)



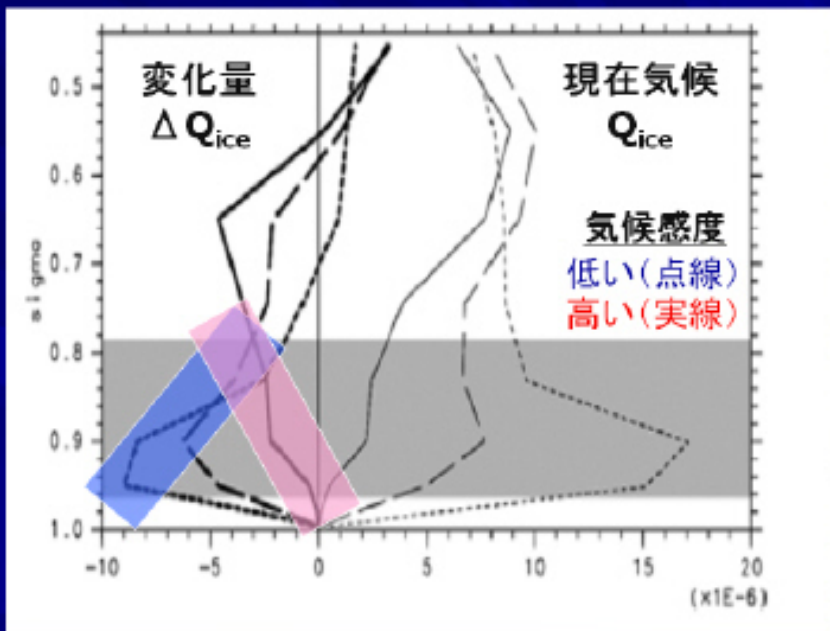
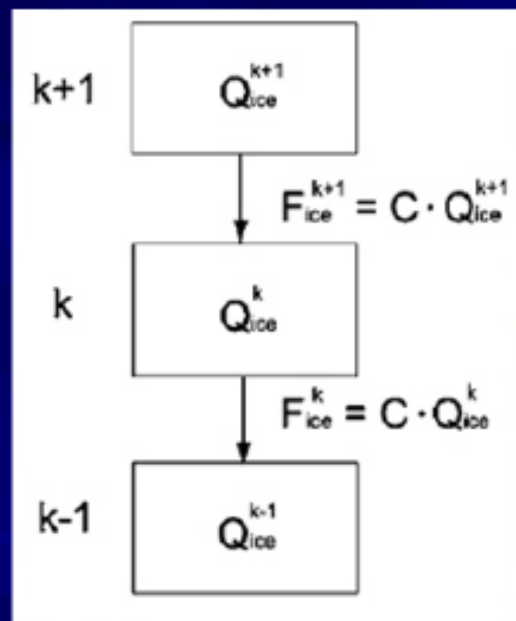
k 層での雲氷収束量変化

$$\Delta Q_{ice}^{k+1} - \Delta Q_{ice}^k$$

気候感度が低いモデル(点線+青)

下層ほど減り大、正の収束=雲氷増加

モデルによる下層雲応答の違い 雲氷収支にもとづく解釈 (Ogura et al. 2008)



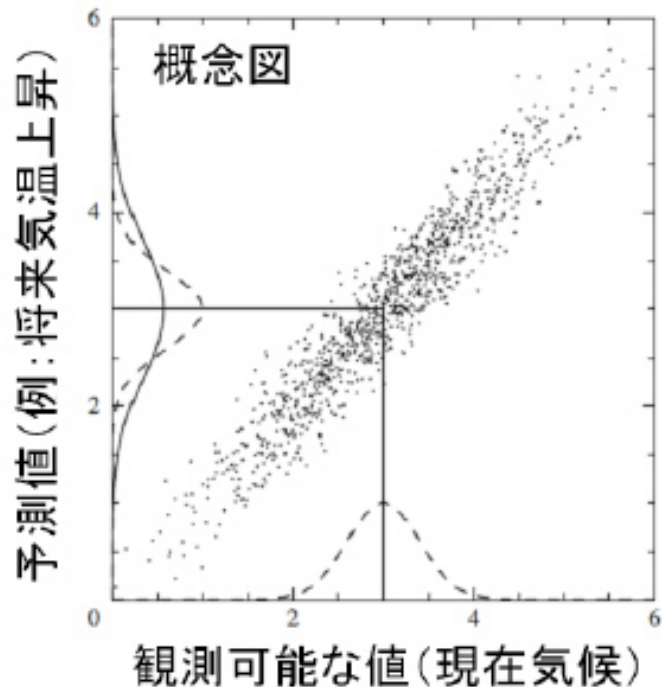
k 層での雲氷収束量変化

$$\Delta Q_{ice}^{k+1} - \Delta Q_{ice}^k$$

気候感度が低いモデル(点線+青)

下層ほど減り大、正の収束=雲氷増加

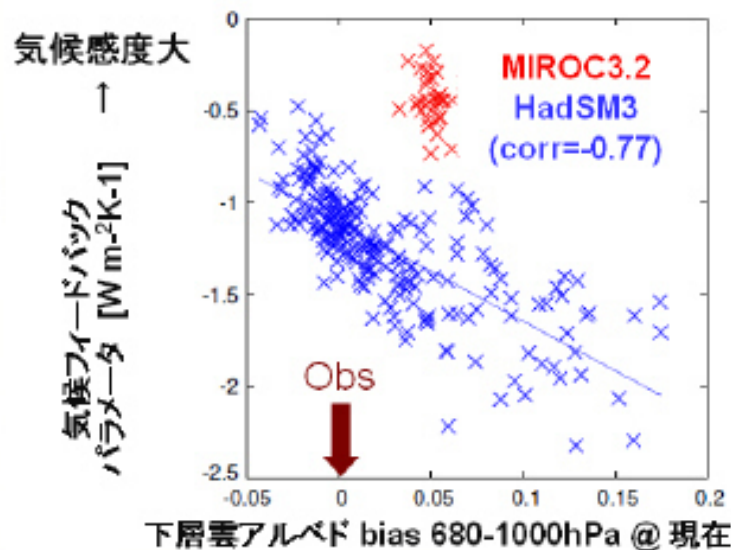
将来予測の不確実性定量化に向けて 現在気候と将来気候の関係



Collins et al. 2007

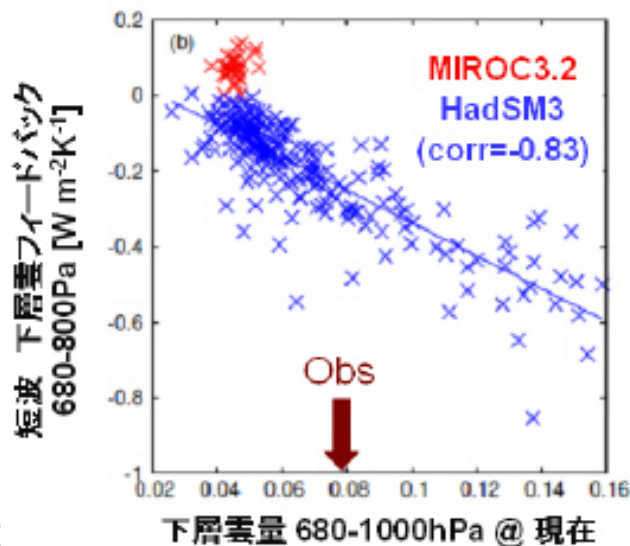
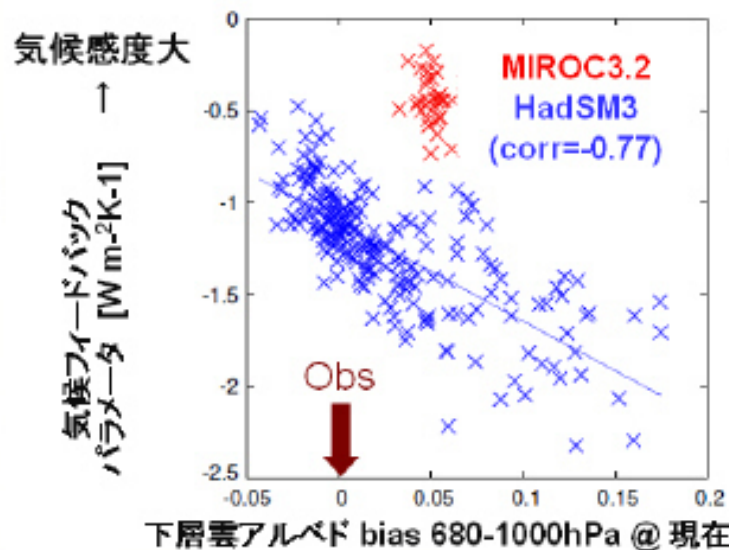
- 「観測可能な値」と「予測値」(例: 将来気温上昇)との間に相関がある場合
 - 「観測可能な値」の観測値 (点線)を考慮することにより、「予測値」に制約を与えることができる (実線)

現在気候と将来気候の関係



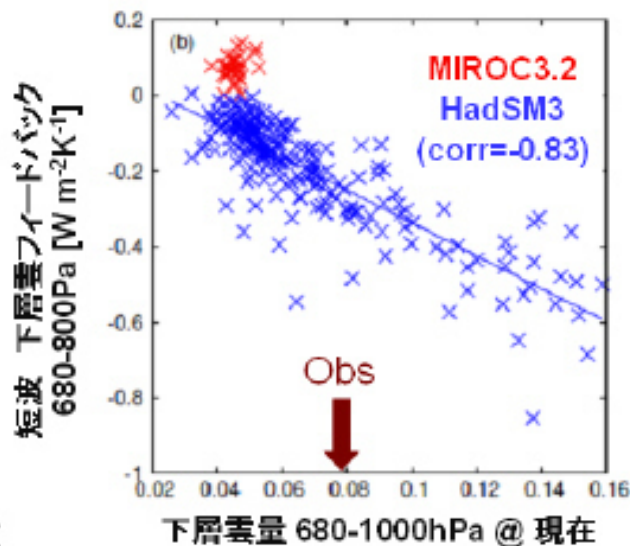
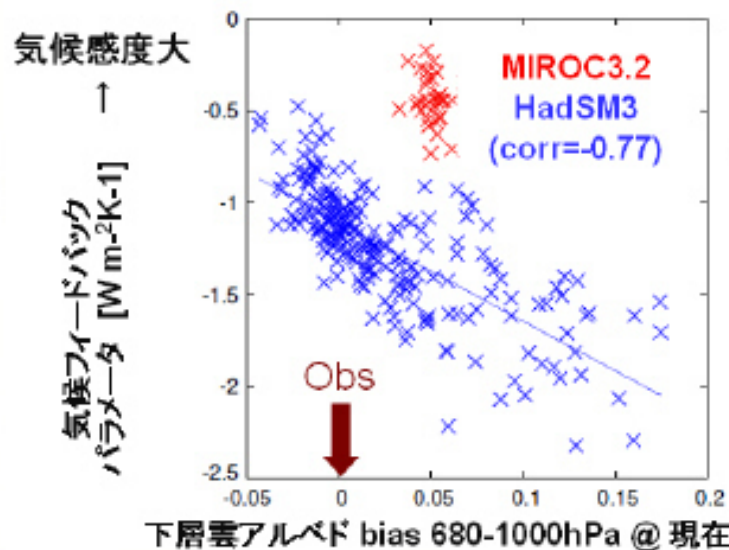
- MIROC, 気候感度は現在気候の下層雲量によらない
- HadSM3, 現在気候で下層雲アルベド大→気候感度小さい

現在気候と将来気候の関係



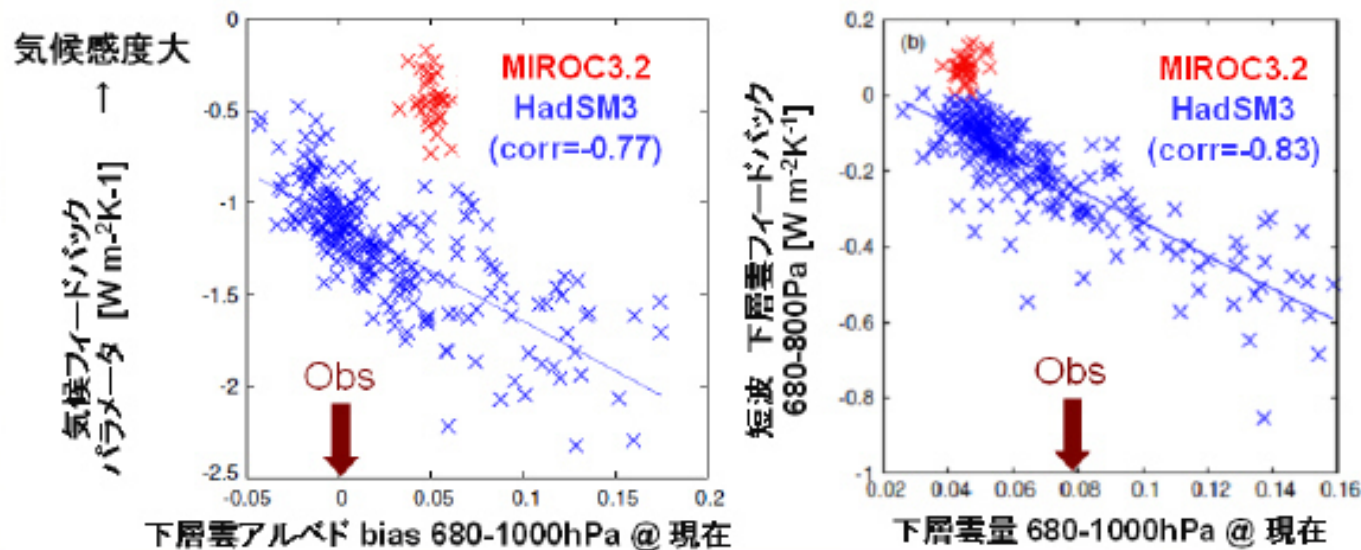
- MIROC, 気候感度は現在気候の下層雲量によらない
- HadSM3, 現在気候で下層雲アルベド大→気候感度小さい

現在気候と将来気候の関係



- MIROC, 気候感度は現在気候の下層雲量によらない
- HadSM3, 現在気候で下層雲アルベド大→気候感度小さい
 - 下層雲量が大きい→光学的厚さ増加→下層雲による負のフィードバック

現在気候と将来気候の関係



- MIROC, 気候感度は現在気候の下層雲量によらない
- HadSM3, 現在気候で下層雲アルベド大→気候感度小さい
 - 下層雲量が大きい→光学的厚さ増加→下層雲による負のフィードバック
 - 「観測可能な値」と「予測値」の関係: 「予測値」の観測的制約に有効

まとめ

- 気候感度 (CO₂増加に対する地表気温変化)には大きな不確実性がある
 - 20世紀の気候変化から制約を与えることは難しい

まとめ

- 気候感度 (CO_2 増加に対する地表気温変化) には大きな不確実性がある
 - 20世紀の気候変化から制約を与えることは難しい
- モデルパラメータの不確実性を系統的に調べる手法「物理摂動アンサンブル」研究が近年活発に行われる
 - 異なるモデルによる物理アンサンブルの比較が重要
 - 温暖化時の雲の応答が鍵をにぎる
 - 現在気候と将来気候の関係 → 予測不確実性に制約