

将来予測のための 気候モデルの信頼性

横畠徳太 (国立環境研究所)

Collaborators:

J. D. Annan (JAMSTEC), M. Collins (Univ Exeter)

C. S. Jackson, M. Tobis (Univ Texas)

M. J. Webb (UK Met Office)

阿部学, 塩竈秀夫, 江守正多 (環境研)

渡部雅浩, 吉森正和, 木本昌秀 (東大・大気海洋研)

J. C. Hargreaves (JAMSTEC)



自己紹介

- 北海道大学理学研究科地球惑星科学専攻卒
 - 博士論文「火星表層環境における」
 - 指導教官：倉本圭教授
- 将来気候予測に関する研究
 - 国立環境研究所：2003～
 - イギリス気象局：2008～
 - 海洋研究開発機構：2009～
- 気候変動リスクに関する研究
 - 国立環境研究所：2010.10～



現在のテーマ：気候変動リスク評価に関する研究

気候データ(気温・降水・湿度・風速)

気候変動が人間社会にもたらす影響
リスク管理に必要な科学的知見

水資源

水資源モデルを用いて、人間活動(農業や工業)による水の利用を計算。
河川からの灌漑を考慮。
窒素負荷なども検討。

水の利用
(農業・工業・生活)

浸食

森林伐採

生態系

陸域生態系モデルを用いて大気-植物-土壌の間の物質(C, N)分配を計算。
温室効果ガス収支の変化などを求める。

農作物収量

肥料投入

森林火災によるCO2排出

土地利用によるCO2排出

温室効果ガス収支

農業

農作物生産モデルを用いて、穀物収穫量を計算。温暖化対策のためのエネルギー作物の栽培などを考慮。
温室効果ガス排出や環境窒素負荷なども求める。

土地利用

土地利用モデルを用いて、将来シナリオにもとづき土地利用変化(農地-森林)を計算。
貿易などの経済活動と傾斜などの自然条件を考慮する。

今日の話

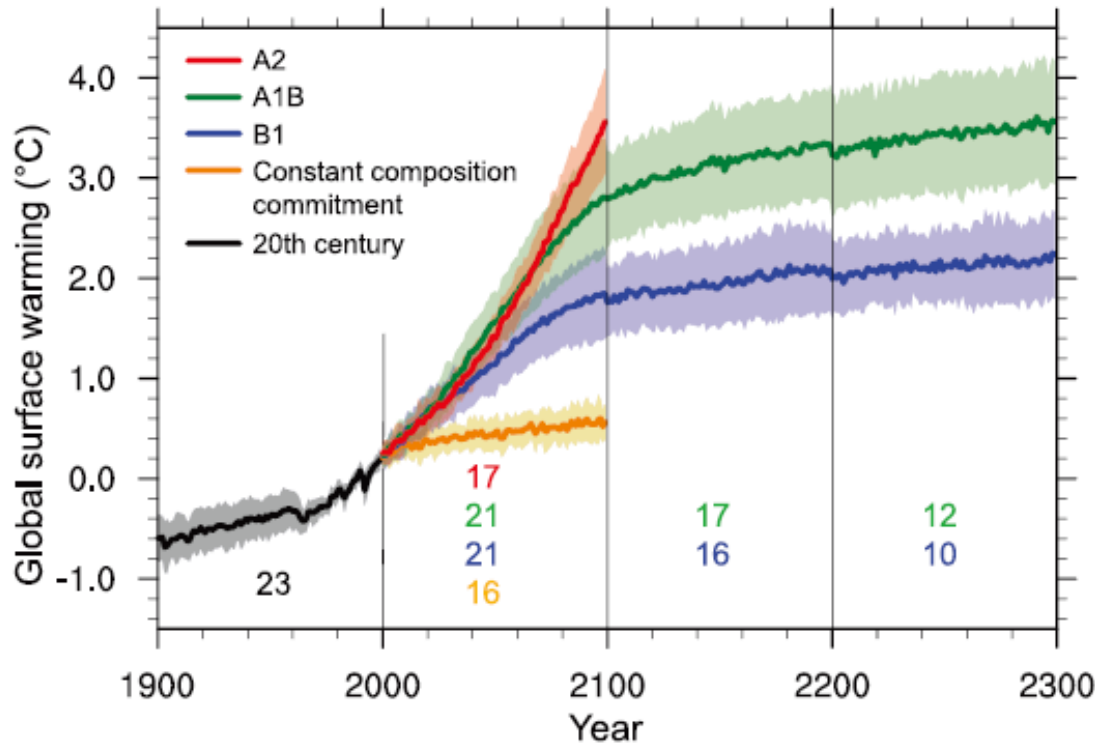
• 背景

- 気候変動将来予測の現状
- 気候モデルの不確実性
- 確率的予測の必要性：「アンサンブル」による
 - マルチモデルアンサンブル：モデル構造の不確実性
 - パラメータ摂動アンサンブル：モデルパラメータの不確実性

• 気候モデルの信頼性評価

- Rank Histogram手法＝モデルアンサンブルの中に真実（観測）がどのように含まれるかを評価
- モデルアンサンブルの「自由度」解析
- 最新の気候モデルsの信頼性は？

将来気候変動予測の現状



CMIP3 データ:ダウンロードが可能、誰でも利用可能

図中の数字:

世界の気候研究機関によって計算された気候モデルの数。

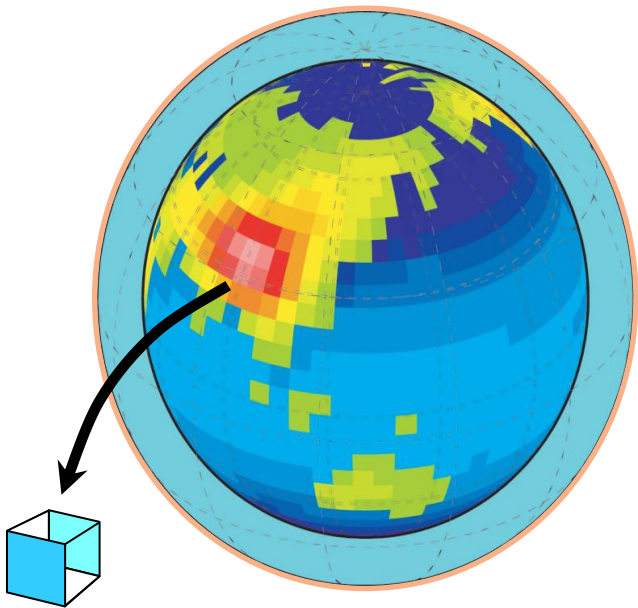
決められた境界条件を与えて計算されたもの。

Coupled Model
Intercomparison
Project Phase3
通称 “CMIP3”

- IPCC 第四次評価報告書(2007年)
- 第5次評価報告書(2013年)にむけて準備中
 - 各研究機関の最新モデルによる実験が終了(予定)

気候モデルとその不確実性

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...)



半経験的に表現
=パラメタリゼーション
モデルの不確実性の原因

パラメタリゼーション(例) 雲水・雲量予報スキーム

大規模凝結過程: Large-scale condensation

✓ グリッド以下の水蒸気分布を仮定

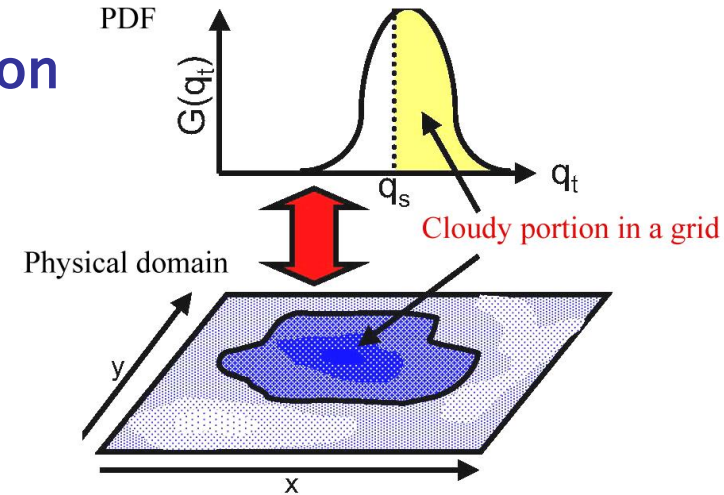
$$q_t' \text{ or } s = a_L(q_t' - \alpha_L T_l') ?$$

✓ 雲水と雲量を同時に予報

$$C = \int_{-Q_c}^{\infty} G(s) ds, \quad q_c = \int_{-Q_c}^{\infty} (Q_c + s) G(s) ds, \quad Q_c = a_l \{ \bar{q}_t - q_s(\bar{T}_l, \bar{p}) \}$$

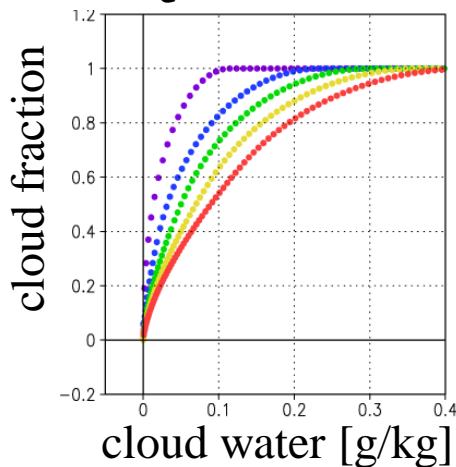
✓ PDF variance & skewness に関する予報方程式

✓ グリッド物理量と PDF の間の逆変換方程式を解く



Tompkins (2005)

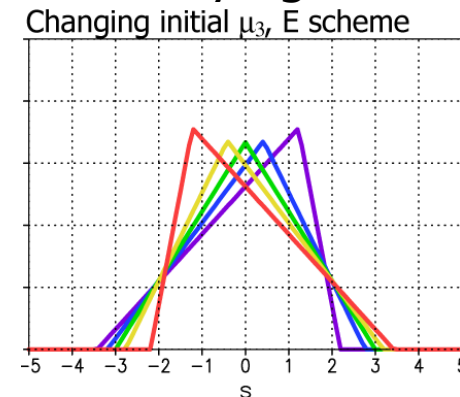
C - q_c relationship



$$C, q_c \longleftrightarrow \mathcal{V}, S$$

Similar approach:
Tompkins (2002, JAS)
Wilson & Gregory (2003, QJ)

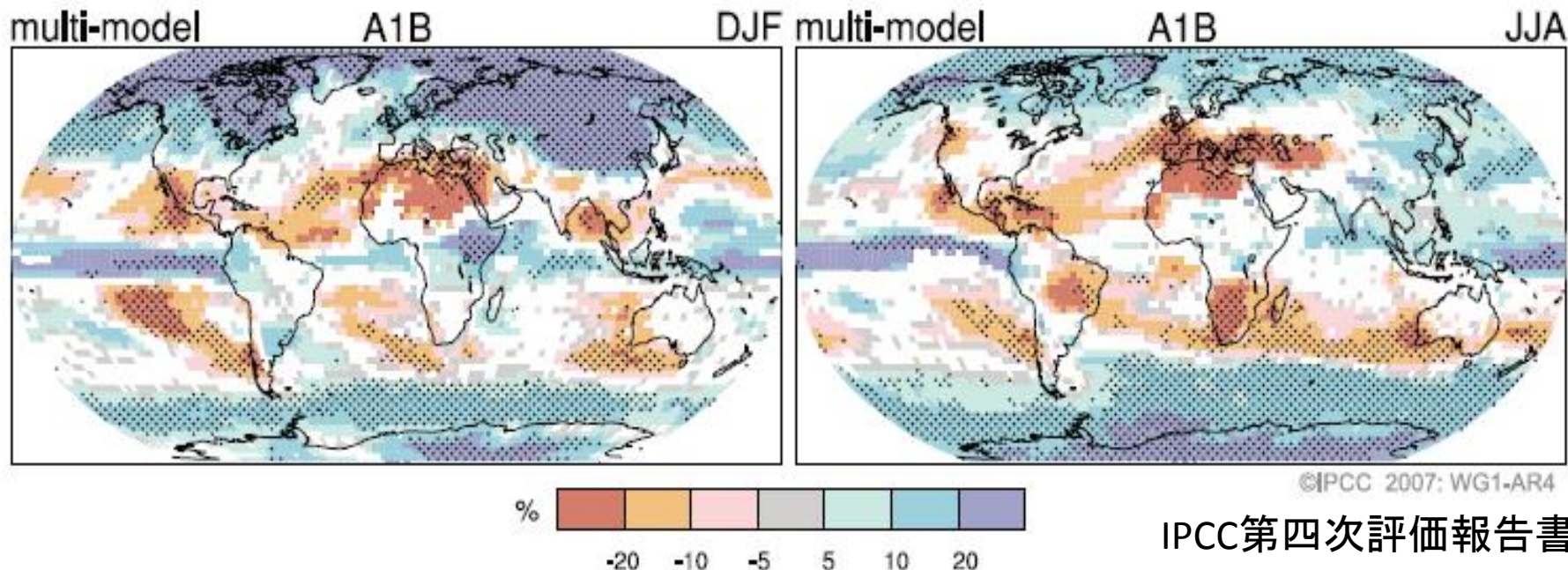
Basis PDF (varying skewness)



Watanabe et al. 2008, Climate Dynamics

気候モデルによる確率的予測(例)

PROJECTED PATTERNS OF PRECIPITATION CHANGES



- 将来2080-2099の降水量変化(相対変化)
- モデルの66%で符号が一致した領域だけ色付け
- モデルの90%で符号が一致した領域に●印

気候モデル「アンサンブル」とは

◆ 確率的予測 ← 複数シミュレーション＝「アンサンブル」

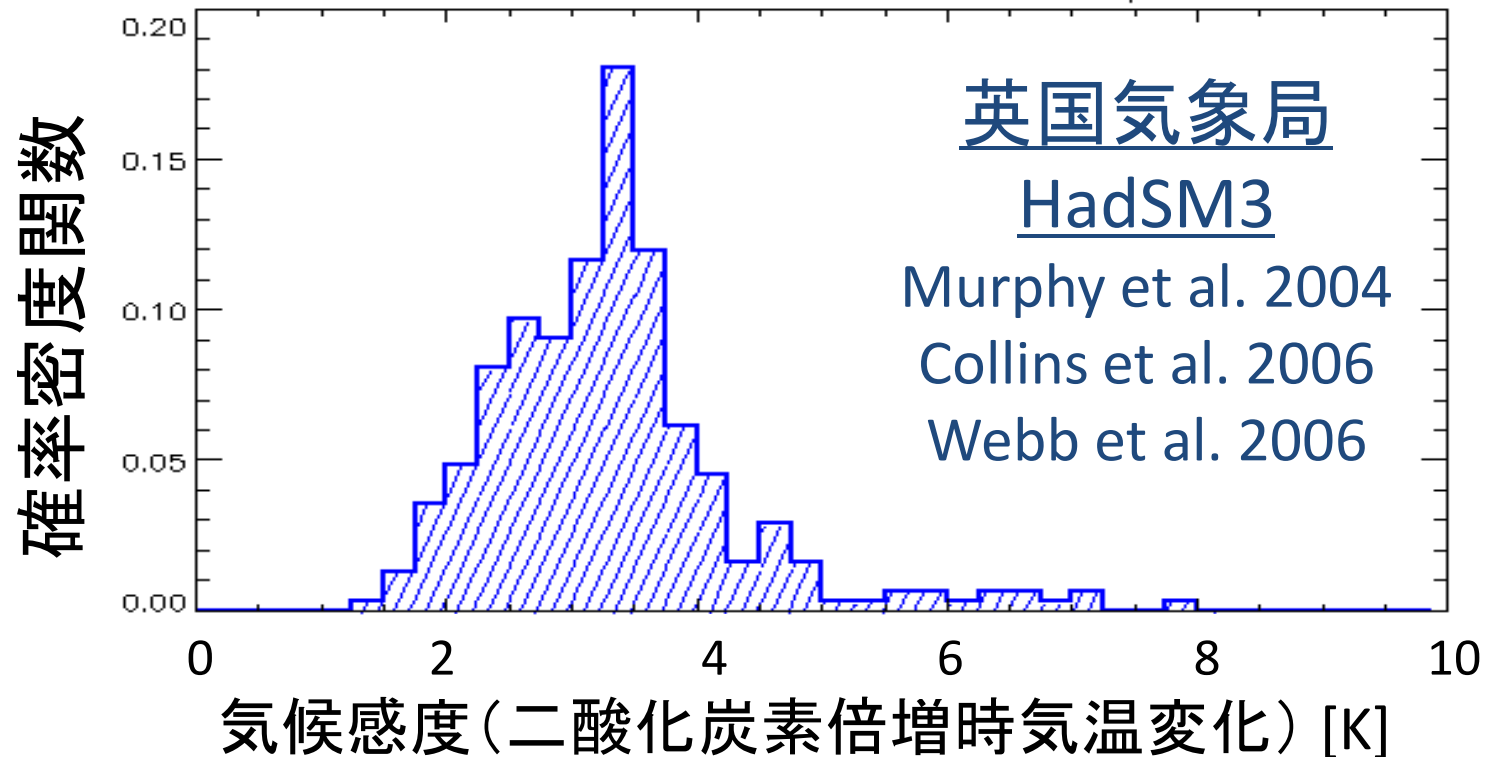
◆ マルチモデルアンサンブル (Multi-Model Ens.)

- 世界の気候研究機関によって開発された30程度のモデルによって構成
- モデル構造 (パラメタリゼーション/解像度 etc) 不確実性が反映
- しかし、それぞれは単一のパラメータセット
- 現在気候が観測に合うようにチューン: 偶然の集合体?

◆ パラメータ摂動アンサンブル (Perturbed Parameter Ens.)

- モデルパラメータを不確実性の範囲で変化させて作成
- 1つのモデルにおいてありえる予測を走査するように設計
- より幅広い可能性を網羅している?

モデルパラメータの不確実性を考慮 “パラメータ摂動アンサンブル(PPE)”



- AORI/NIES/JAMSTEC “MIROC” ensembles (Yokohata et al. 2010 etc), Climateprediction.net (Stainforth et al.2005 etc), NCAR-CAM (Jackson et al. 2009, Sanderson 2011 etc), ECHAM5 (Klocke et al. 2011), EGMAN (Niehooster et al. 2009)... いろいろある

研究の目的

• 気候モデルアンサンブルの信頼性評価

- アンサンブルばらつきの中に観測が含まれるか (rank histogram)
 - 観測の不確実性を考慮 (2つのデータセットを利用)
- アンサンブル自由度 (EOF analysis)

• マルチモデルアンサンブル (MME) と

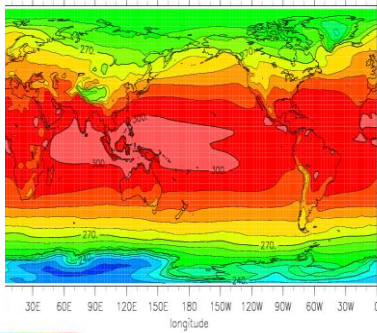
パラメータ擾動アンサンブル (PPE) の評価

- MME: CMIP3-AO (大気海洋, 16), CMIP3-AS (混合層海洋, 10)
- PPE: HadCM3-AO (17), HadSM3-AS (128),
MIROC3-AS (32), NCAR-A (大気, 100)
 - パラメータセットは、現在気候の再現性がいいものを選択

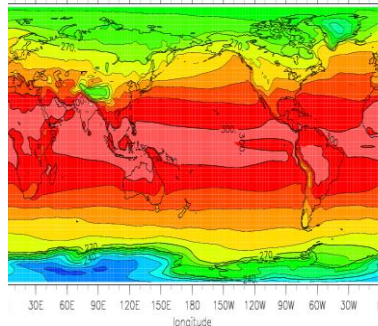
モデルによる現在気候シミュレーションの評価

モデルによる現在気候シミュレーションの評価

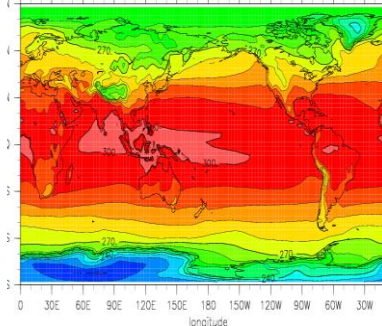
NCAR



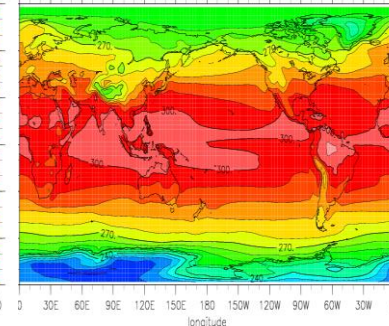
Norway



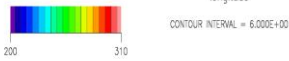
Goddard Ins



Canadian Cen

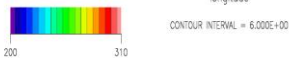
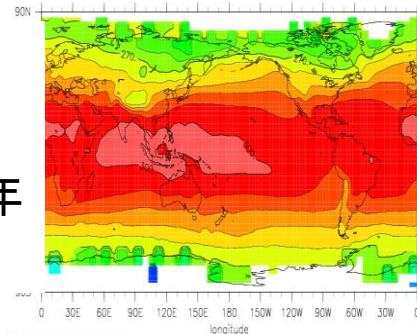


モデル
アンサンブル
地表気温
1980-1999年
平均値



観測

地表気温
1980-1999年
平均値



- ✓ モデルアンサンブルのメンバー数は10から100程度: パターンにばらつきあり
- ✓ 観測は独立な2つのデータセットの平均値と標準偏差を利用

- 過去の境界条件データをもとに、モデルにより現在気候をシミュレートする
- 各点での気温や降水量の計算値が、観測値にどれくらいあっているか？

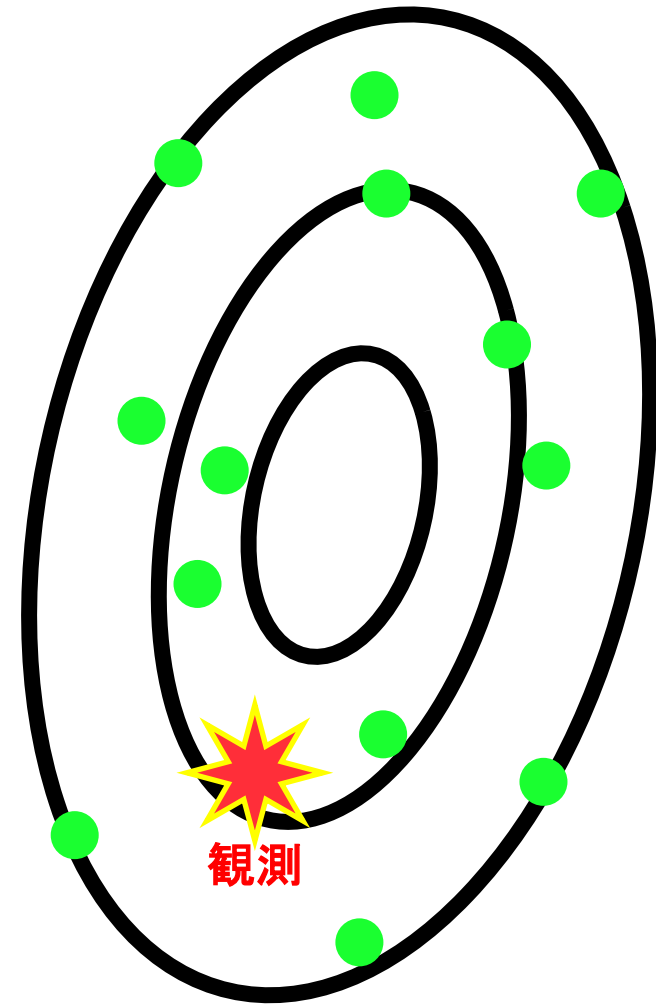
理想的なアンサンブルとは？

➤ 真実(観測)がそのアンサンブル の中に存在する

- ✓ 観測をアンサンブルの1メンバーとみなすことができればよい
- ✓ 観測とモデルが“統計的に識別不能: statistically indistinguishable”

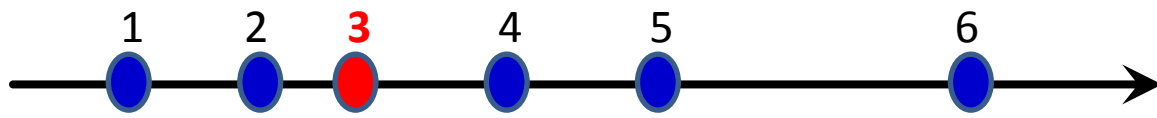
➤ 従来の研究

- ✓ 「モデルアンサンブルメンバーが観測にどれだけ近いか？」を評価
- ✓ “真実が中心にあるべき”



1つのモデルアンサンブルメンバーが計算するある変数(気温降水など)を、1つの点で表現

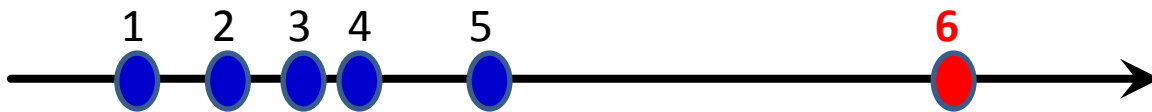
“Rank Histogram (順位頻度分布)”



ある気候変数
(例: 地表気温)
ある地点での値

Observation Model Ensembles

アンサンブルのばらつきの中に観測がある(信頼性がある)場合、
観測の順位は最上位～最下位のどの順位にもなりうる
(頻度分布が一様分布になる: Reliable)



Model Ensembles

Observation

アンサンブル全体に観測が離れている(信頼性がない)場合、
観測の順位は最上位あるいは最下位に偏る
(頻度分布は最下位あるいは最上位にピークあり: Not Reliable)

定義：“信頼性がある”とは

- モデルアンサンブルは“信頼性がある (Reliable)” : Rank histogram が「一様分布と有意に違う」と判断されないとき

– 一様分布の適合度検定: ある分布が一様分布とみなせるかどうか = 以下の χ^2 値を計算することによる

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$$

p_i : probability of assumed distribution (uniform),

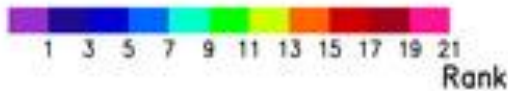
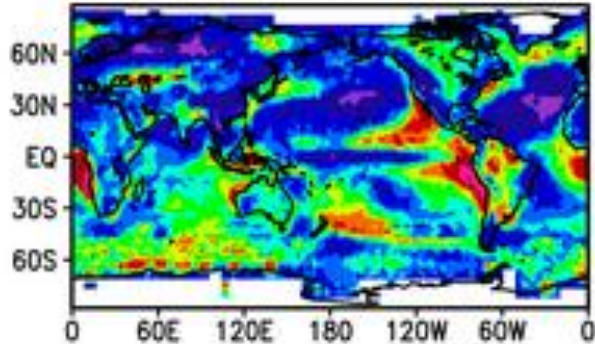
f_i : observation, n: number of observation (dof about 10)

- χ^2 値はU-型, L-型などの要素に分解することが可能: Rank histogram がU型である (最下位と最上位の両方にピーク) あるいはL型 (最下位か最上位のどちらかにピーク) であるために、一様分布と有意に異なる (=信頼性がない: Not Reliable)

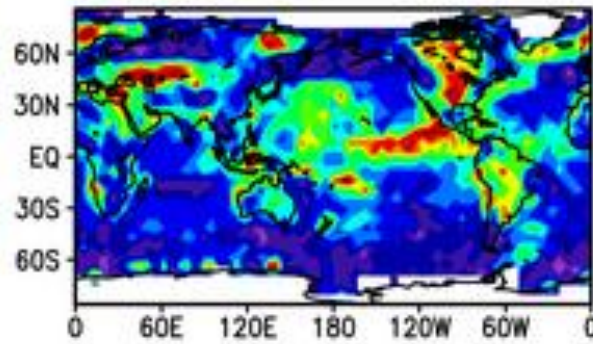
アンサンブルにおける観測の順位: 地表気温

最高順位の値 = アンサンブルメンバー数 + 1

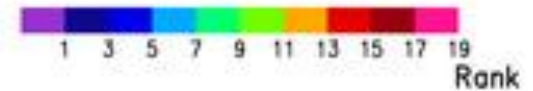
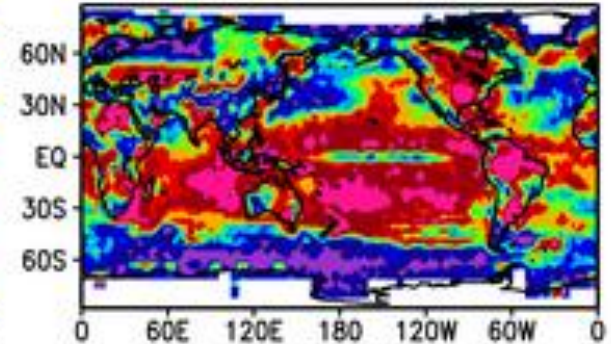
(a) CMIP3-AO, SAT



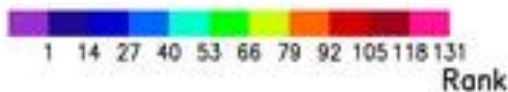
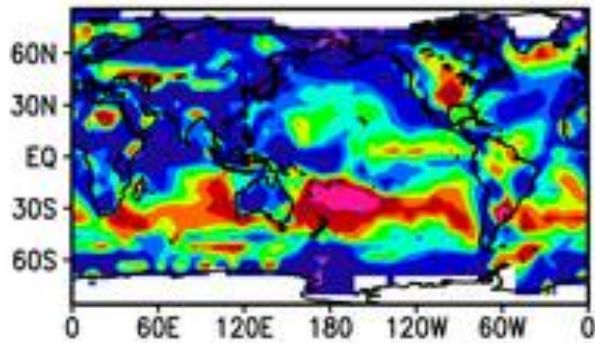
(b) CMIP3-AS



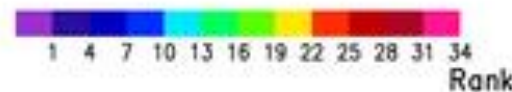
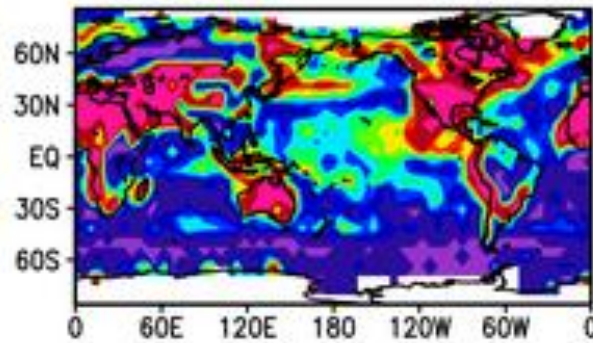
(c) HadCM3-AO



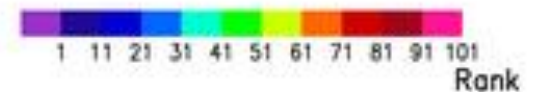
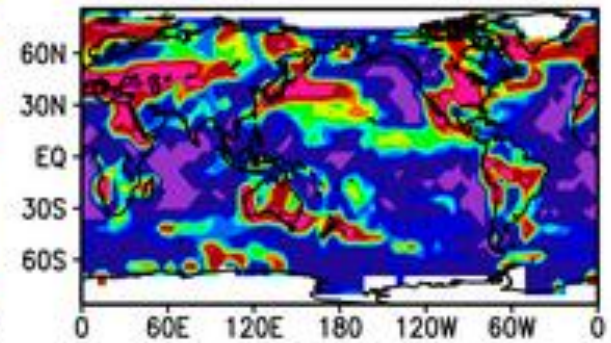
(d) HadSM3-AS



(e) MIROC3-AS



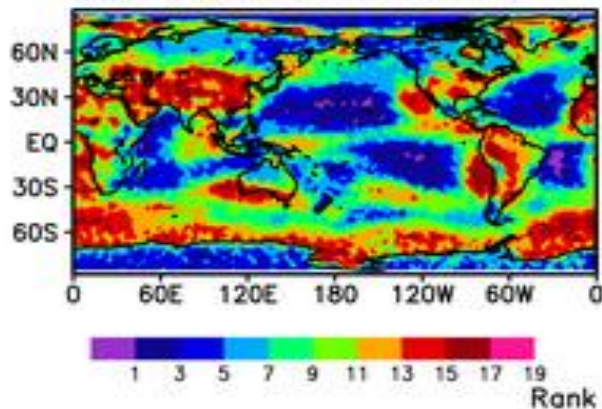
(f) NCAR-A



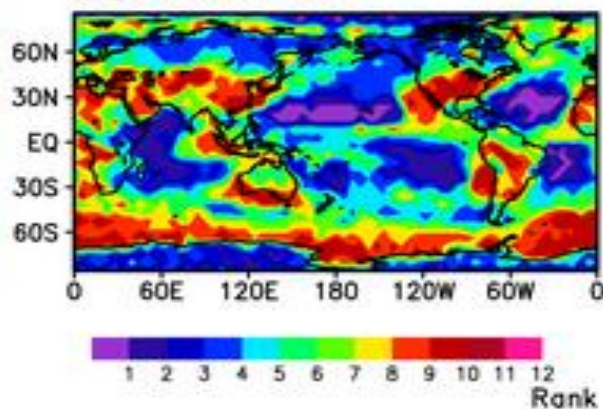
各点においてアンサンブルメンバーと観測値を比較、順位を計算面積の重みを考慮して、順位の頻度分布を作成

アンサンブルメンバーの中での観測の順位： 雲放射強制力(加熱-冷却効果)

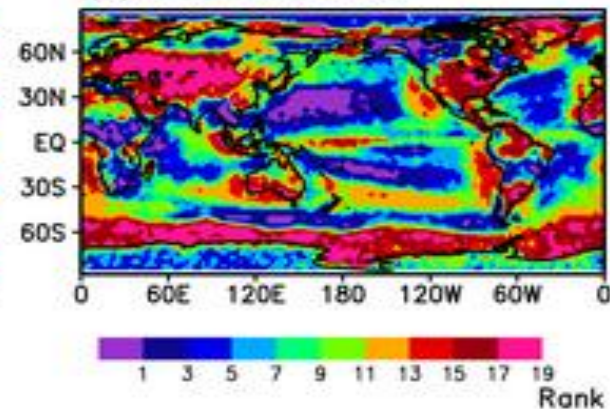
(a) CMIP3-AO, SW CRF



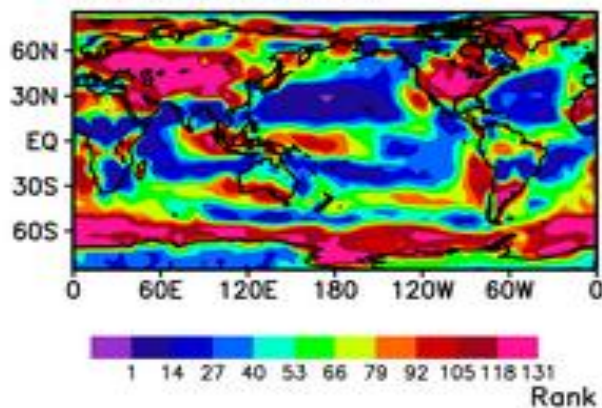
(b) CMIP3-AS



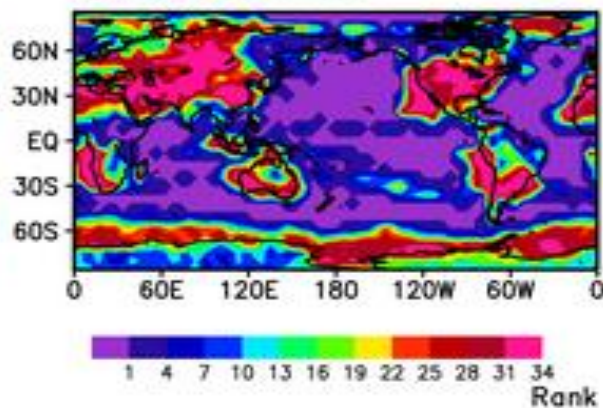
(c) HadCM3-AO



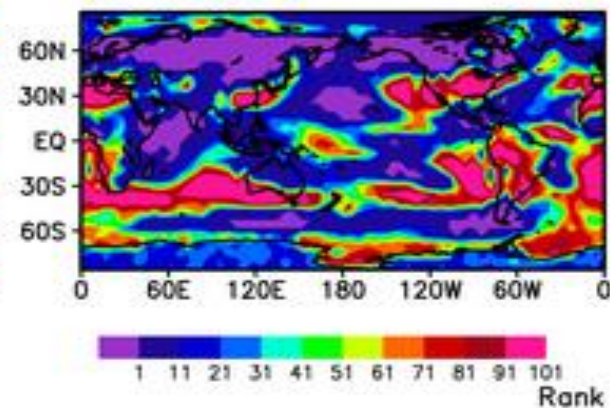
(d) HadSM3-AS



(e) MIROC3-AS



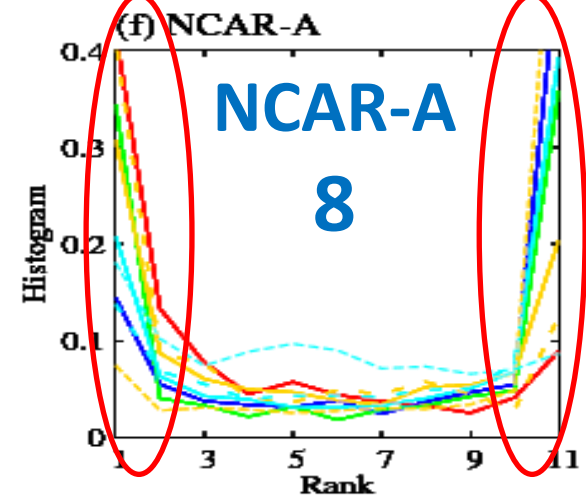
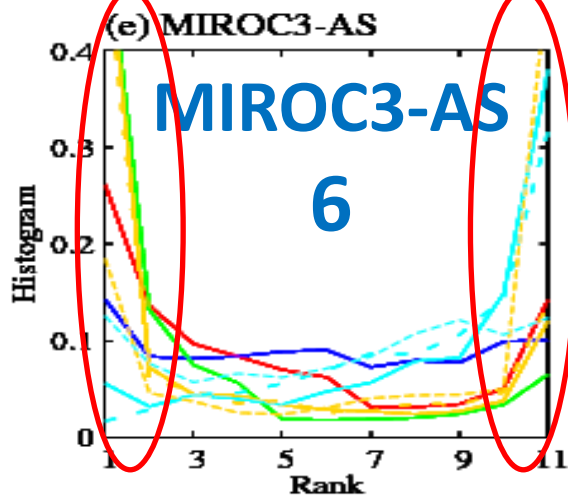
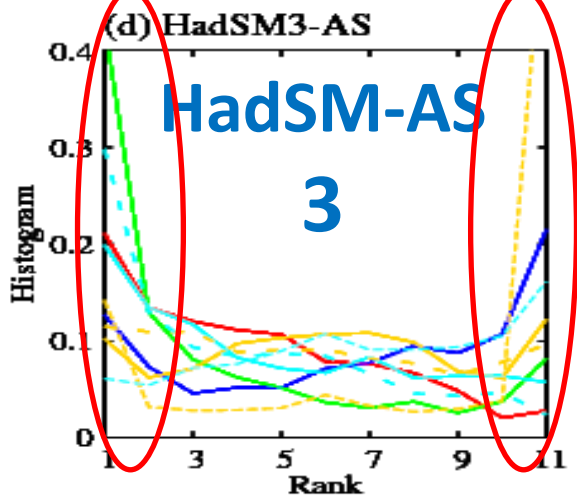
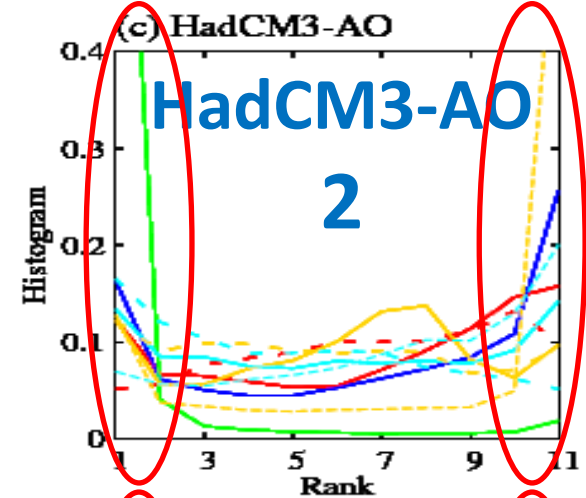
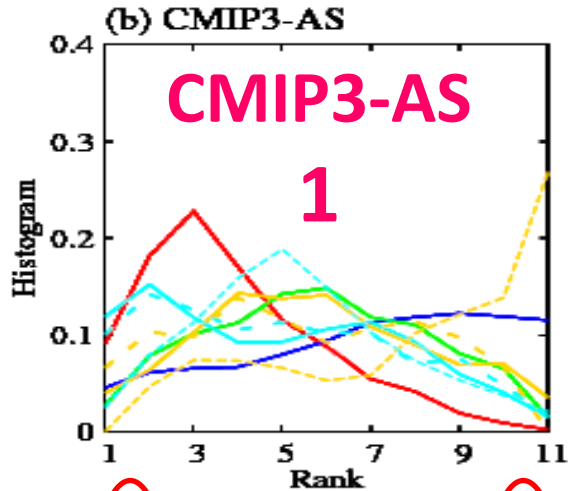
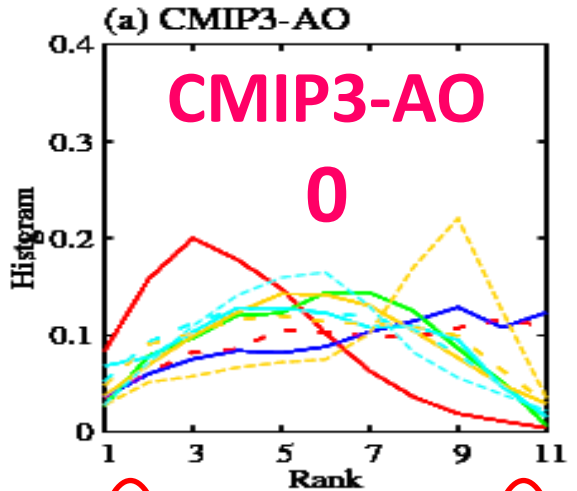
(f) NCAR-A



PPE: 幅広い領域にわたり全メンバー過小(紫)過大(ピンク)評価
共通のパターン: 異なるアンサンブルにおける共通のバイアス

順位頻度分布 (10 の気候変数)

Multi-Model E
Purturbed Param. E



SAT (Solid) SAT Trend (Dotted) SW Net (Solid) SW CRF (Dotted) SW CLR (Dashed)
 Rain SLP LW Net (Solid) LW CRF (Dotted) LW CLR (Dashed)

マルチモデルアンサンブルではほとんどの変数で信頼性がある
 パラメータ擾動アンサンブルでは信頼性は変数による

気候モデルアンサンブルの自由度

- 気候モデルアンサンブルメンバー間のばらつきを調べるために、現在気候シミュレーション(1980–1999年平均値)のモデルアンサンブルのパターン_sに対して、主成分分析を行う
 - アンサンブルメンバー間のばらつき(分散)を説明するパターンと、その寄与率が計算できる
- 有効自由度: 分散に対する EOF k の寄与率 f_k の二乗和逆数

$$N_{ef}^* = \left(\sum_{k=1}^N f_k^2 \right)^{-1} \quad (\text{Bretherton et al. 1999})$$

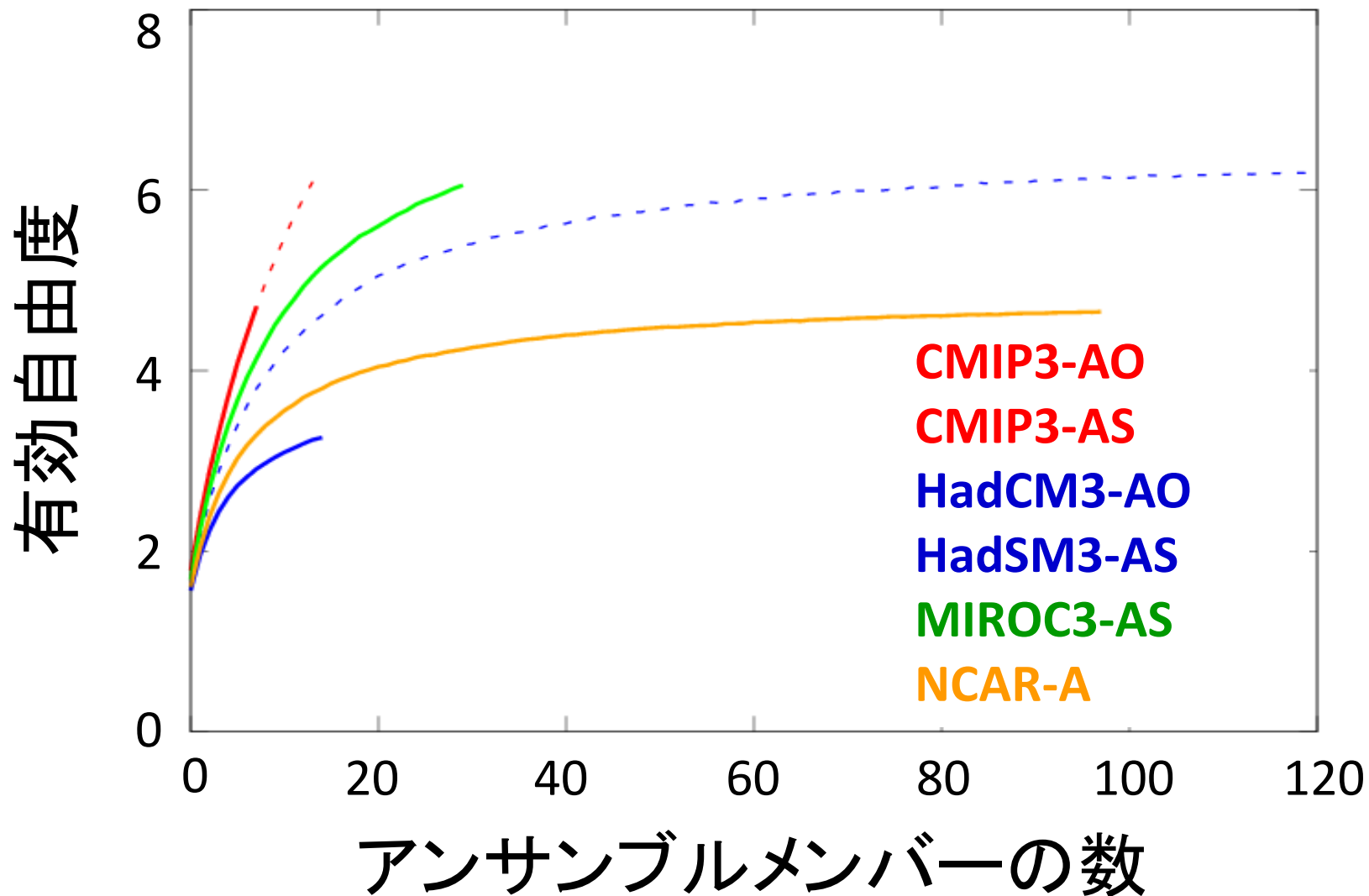
N_{ef}^* : 有効自由度

f_k : EOF k の分散に対する寄与率

- 小さな k の寄与率が大きいと、自由度は小さくなる
(小さな k でばらつきが説明できる)

気候モデルアンサンブルの自由度

(SAT, PRCP, SLP + 6 Radiations : 9の気候変数の平均)



Summary

Yokohata et al. 2011, Climate Dynamics, in press

- 1つのモデルよりも、様々な研究機関で開発された構造の異なる複数のモデルを利用した方が、信頼性が高い＝真実が含まれる可能性が高い
 - モデルは観測をうまく再現できない(モデルエラー)
 - パラメータを変化させてもモデルエラーの影響が残り、アンサンブルに真実が含まれない可能性が高い
 - 最新のマルチモデル(IPCC 第四次評価報告書で用いられた CMIP3 ensemble)は「信頼性がある」
- パラメータ摂動アンサンブルは「モデルの可能な応答」を理解する上で重要

Thank you for your attention.

Uncertainties in observation

- Using two independent observations for all variables (e.g. HadCRU and ERA40 for SAT)
- Mean of two observations is used for the calculation of rank histogram
- Uncertainties in observation is randomly added to model ensembles

$$X'_{\text{model}} = X_{\text{model}} + \sigma_{\text{obs}} Z$$

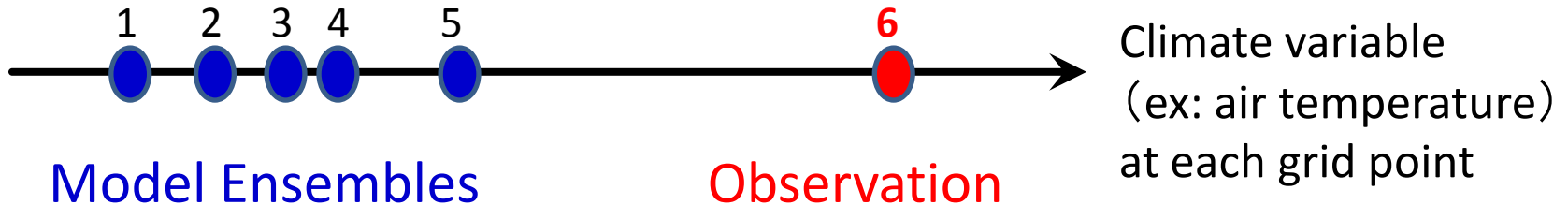
X_{model} : Output of model ensemble, σ_{obs} : Standard deviation of two observation,
Z: random sampling from normalized Gaussian deviate

Rank Histogram Approach (Jolliffe and Primo 2008)

Case 2. When all ensemble members are far away from observation

Rank of observation is often highest or lowest

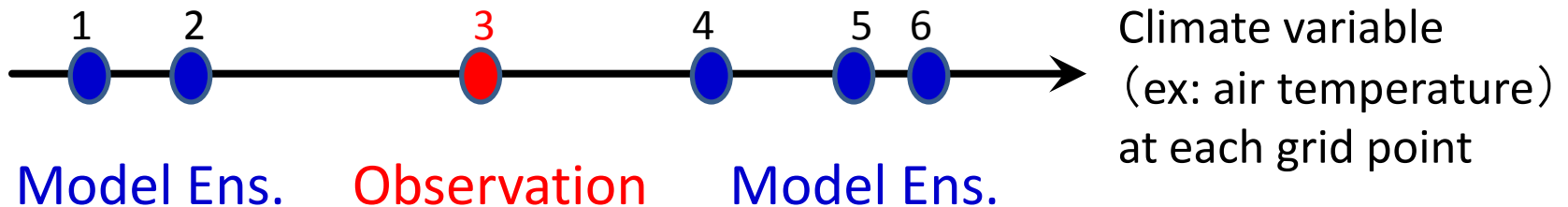
(Histogram is U- or L-shape, peak at highest and/or lowest rank)



Case 3. When spread of ensemble is large compared to observation

Rank of observation is often a particular value

(Histogram is dome-shape, peak at a particular rank)



Rank Histogram Approach (Jolliffe and Primo 2008)

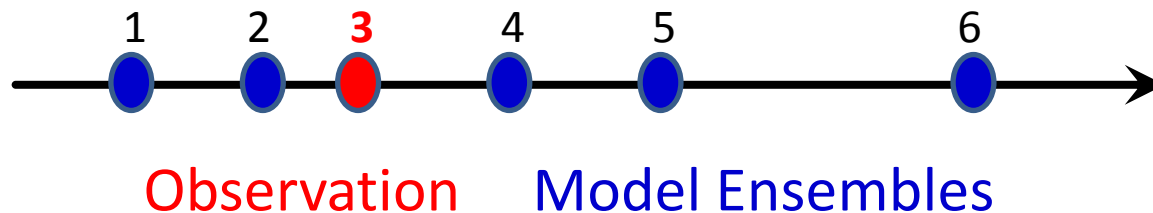
Relationship between model spread and observation

Case 1. When observation is within a range of ensemble spread,

Rank of observation is anywhere from lowest to highest

(Histogram is uniform)

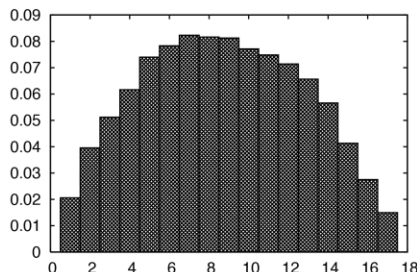
We call this case as “reliable”



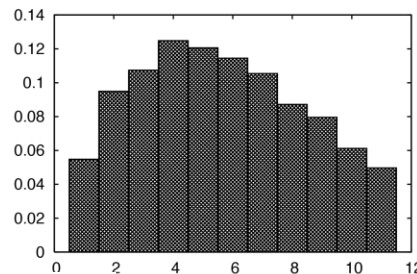
Climate variable
(ex: air temperature)
at each grid point

Rank histogram (SAT, PRCP, SLP + 6 Radiations)

CMIP3-AO



CMIP3-AS



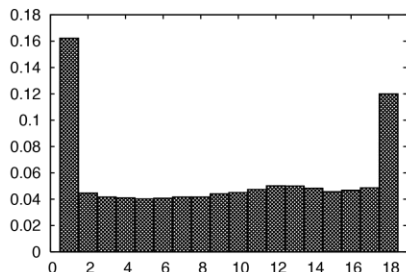
✓ Various rank = ensemble and observation is “statistically indistinguishable”

✓ Ensemble is regarded as “reliable” if the rank histogram is not different from uniform distribution (by statistical test)

➤ **Multi-model ensemble (CMIP3) is more “reliable” than single model ensembles**

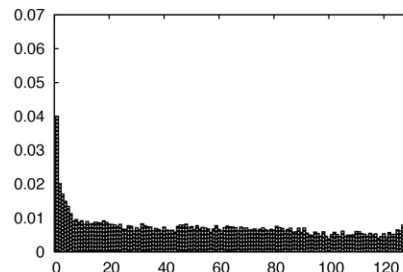
Underestimate Rank Overestimate Rank

HadCM3-AO



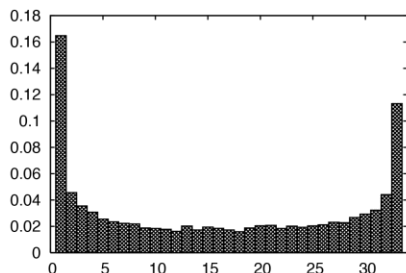
Rank

HadSM3-AS



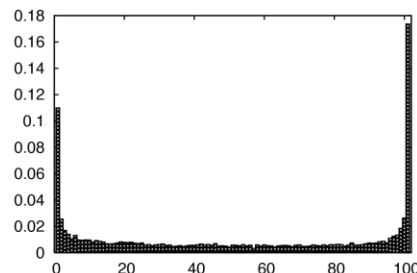
Rank

MIROC-AS



Rank

NCAR-A

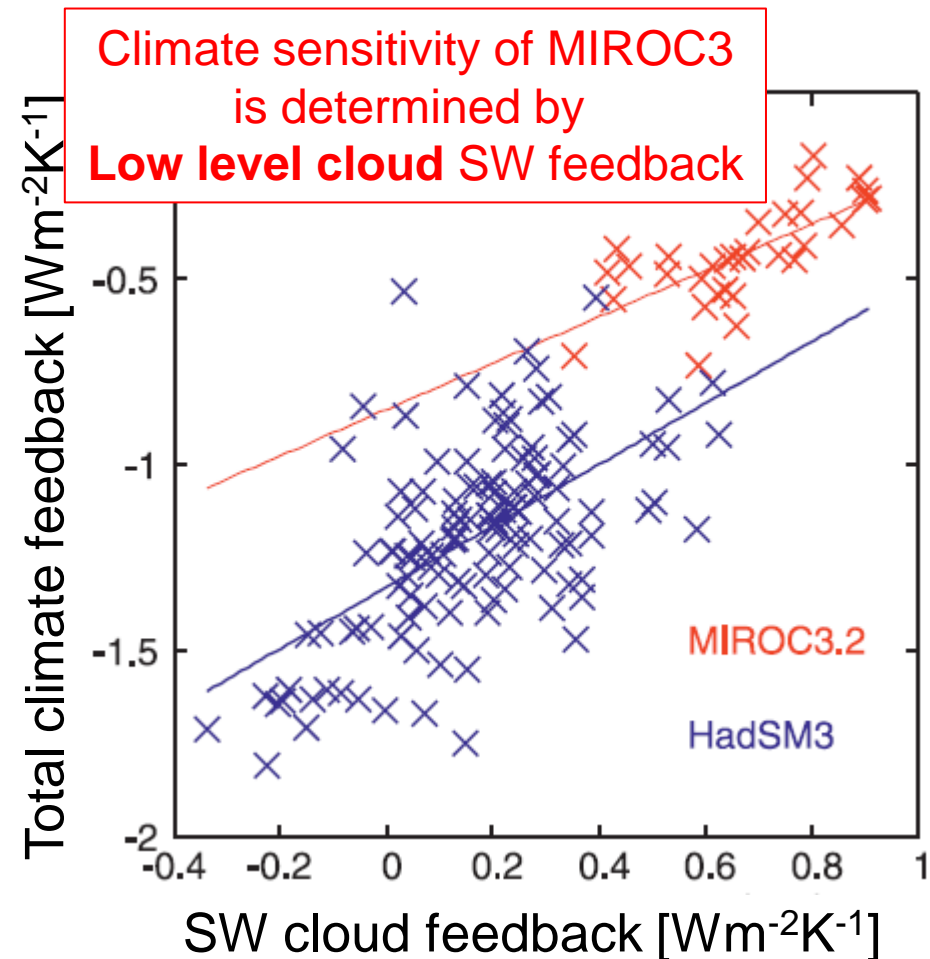
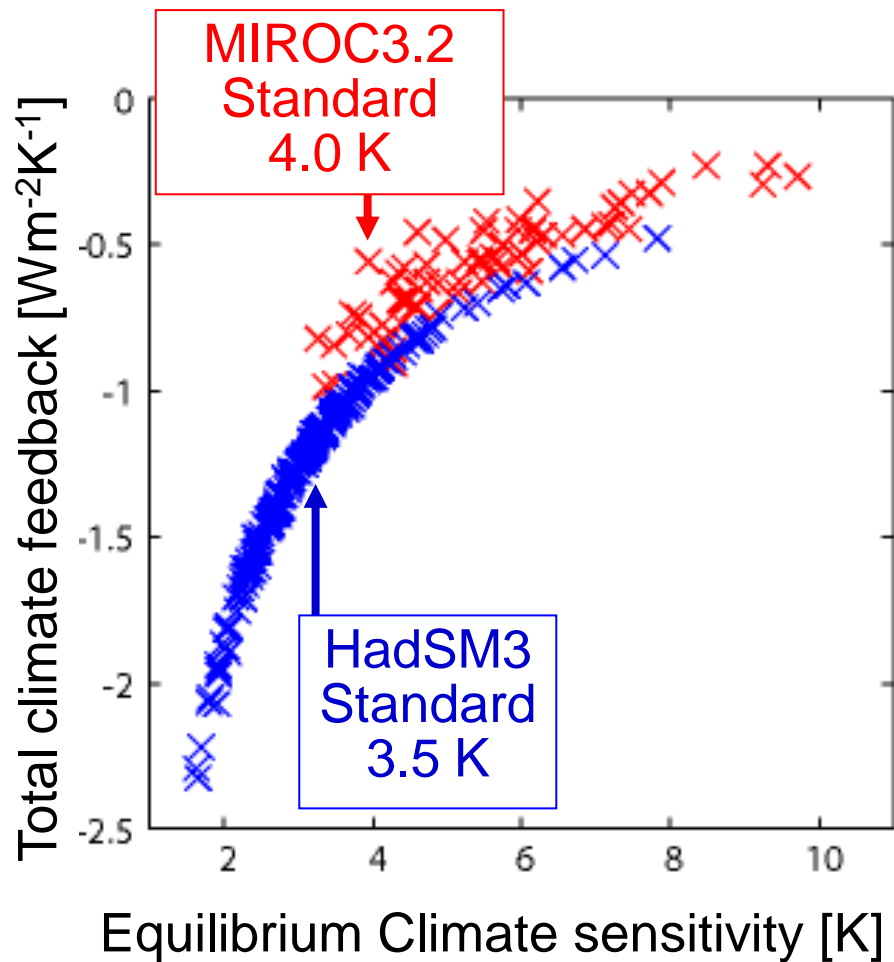


Rank

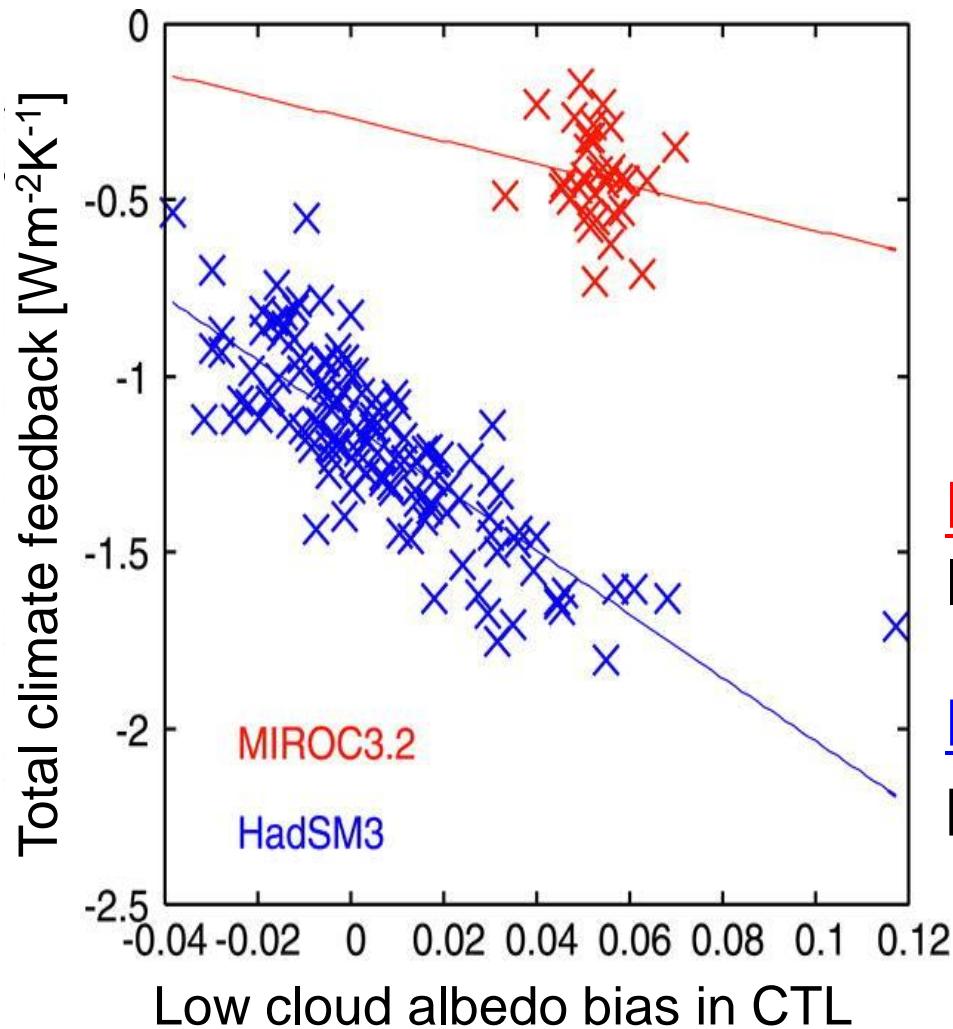
Comparison of Perturbed Parameter Ensembles (Yokohata et al. 2010, J. Climate)

HadSM3 PPE: Spread in Climate Sensitivity + Good performance

MIROC3 PPE: Parameters chosen by EnKF (Annan et al. 2005)



Comparison of Perturbed Parameter Ensembles (Yokohata et al. 2010, J. Climate)



Relationship between
Model bias in present climate
and
Climate feedback

MIROC3: Less spread and large climate feedback

HadSM3: Enough spread in present climate and feedback

MIROC Ensembles: "JUMP"



"MIROC3" PPE (Annan et al. 2005, Yokohata et al. 2010)

Atm-Slab Ocean GCM

Parameter sets by

Ensemble KalmanFilter

"MIROC5" PPE (Shiogama et

Atm-Ocean GCM without fl

Parameter sets by

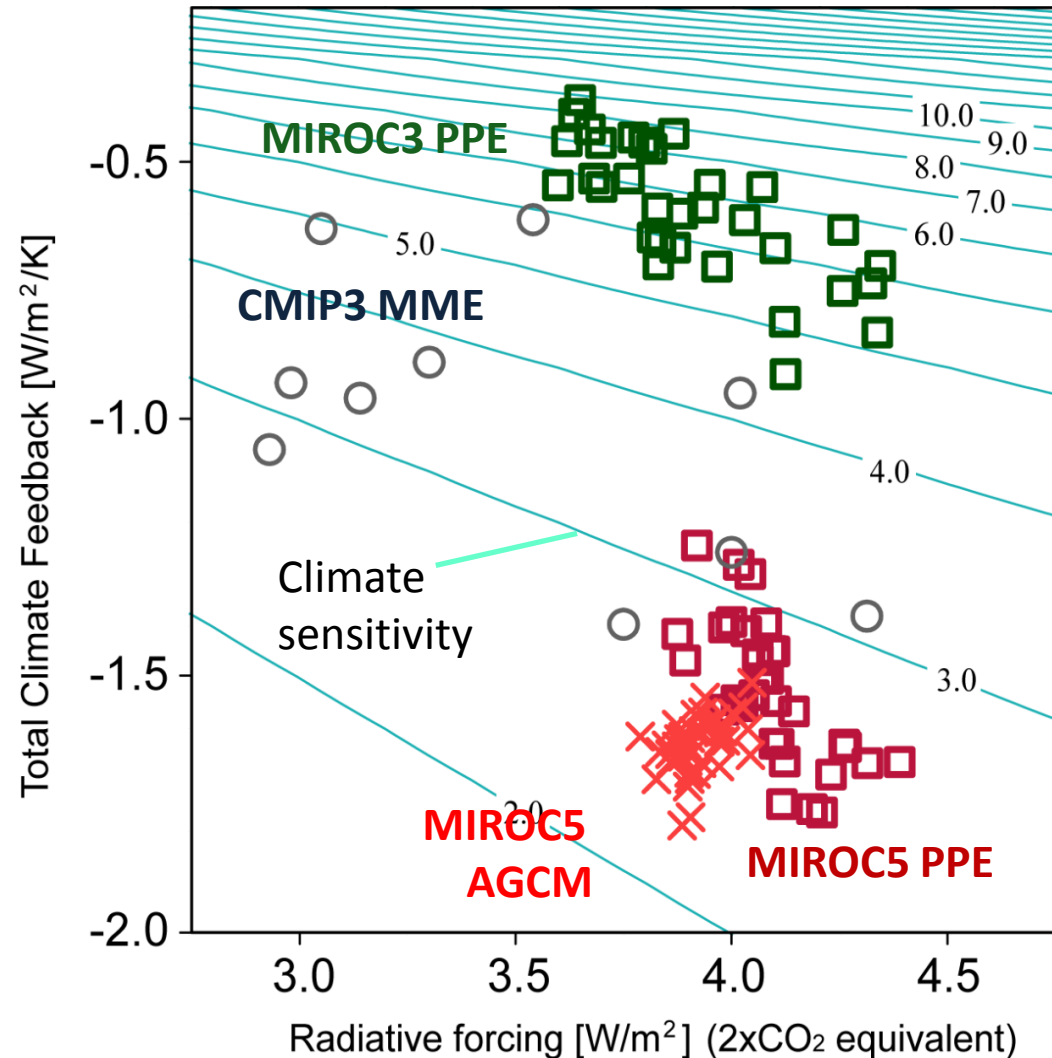
Atm-GCM + Emulator

MIROC "Multi-Physics" Ense

Atm GCM

Physics schemes are
switched one by one

CLD, CUM, VDF + combin



MIROC Ensembles: "JUMP"



"MIROC3" PPE (Annan et al. 2005, Yokohata et al. 2010)

Atm-Slab Ocean GCM

Parameter sets by

Ensemble KalmanFilter

"MIROC5" PPE (Shiogama et

Atm-Ocean GCM without fl

Parameter sets by

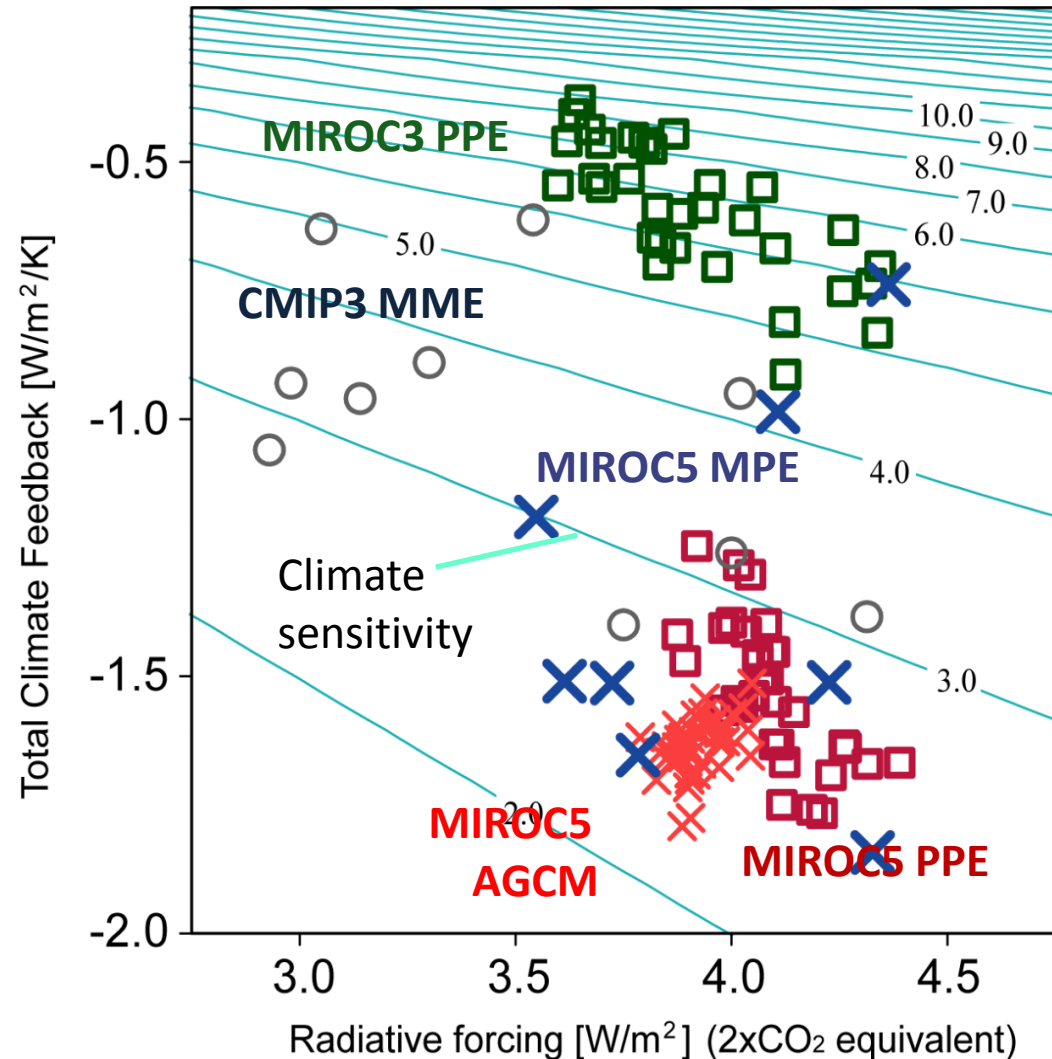
Atm-GCM + Emulator

MIROC "Multi-Physics" Ense

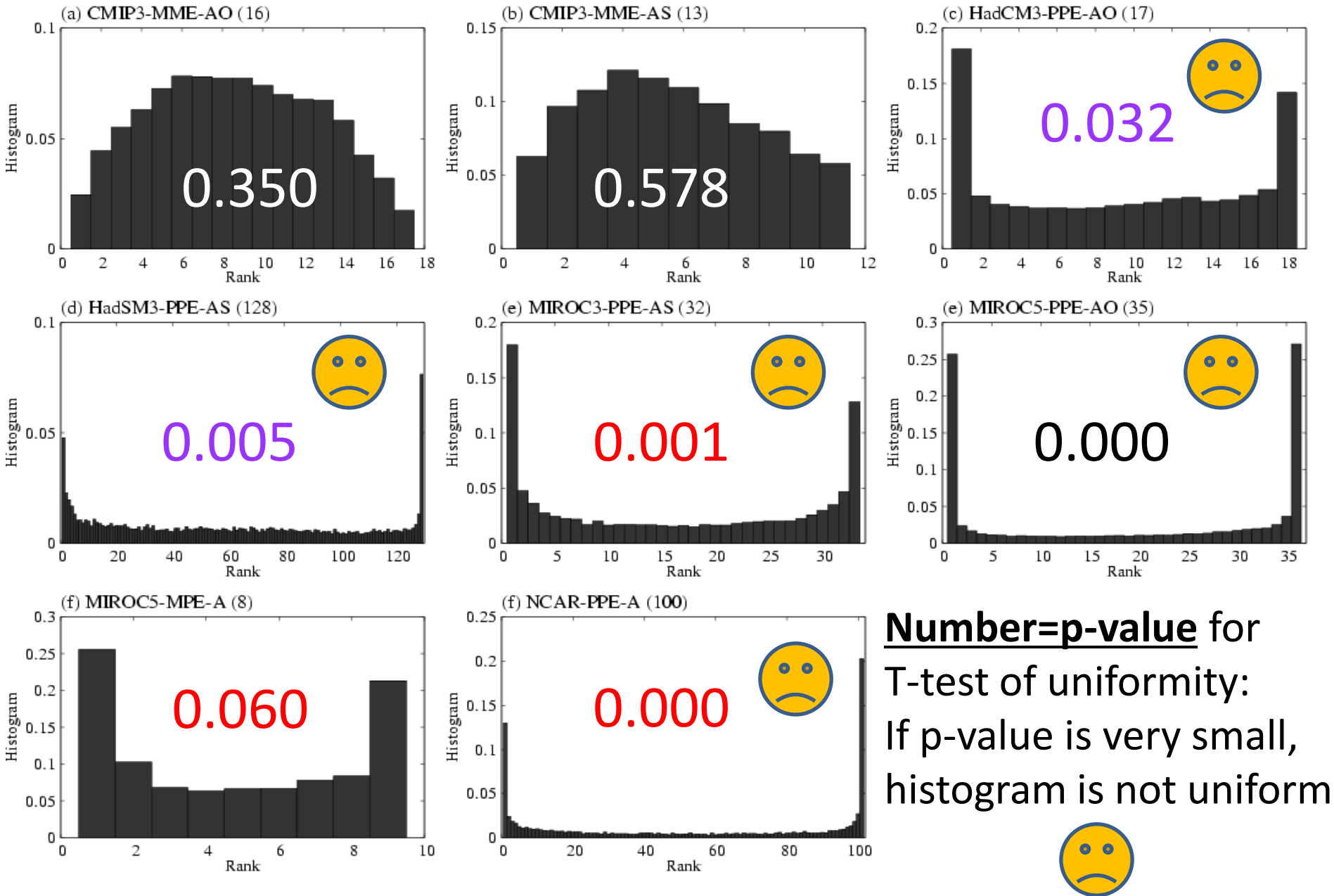
Atm GCM

Physics schemes are
switched one by one

CLD, CUM, VDF + combin

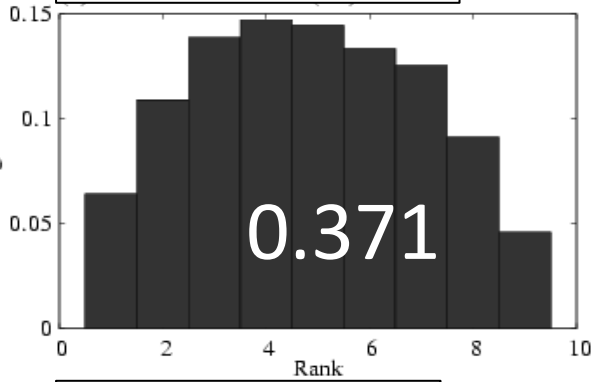


Rank Histogram (SAT,PRCP,SLP,Radiations)

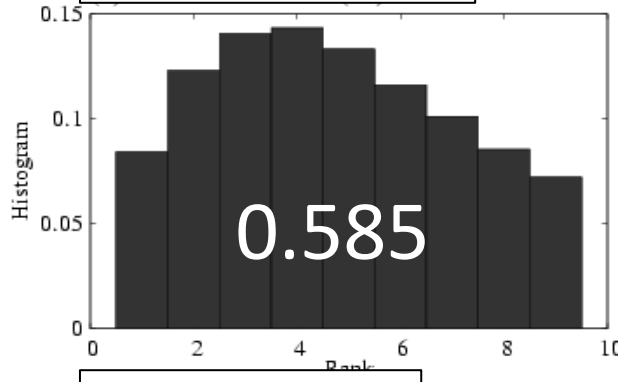


Rank Histogram (Overall, re-binned to 9)

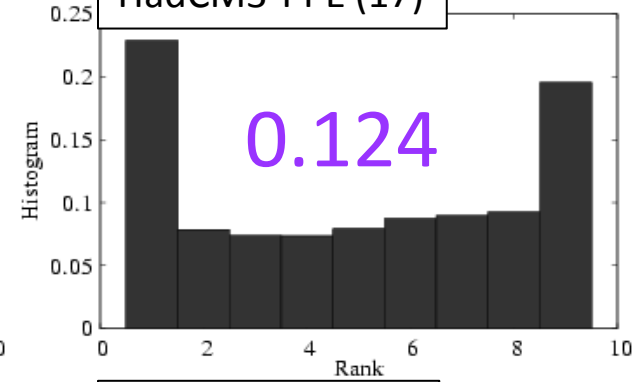
CMIP3-AO MME (10)



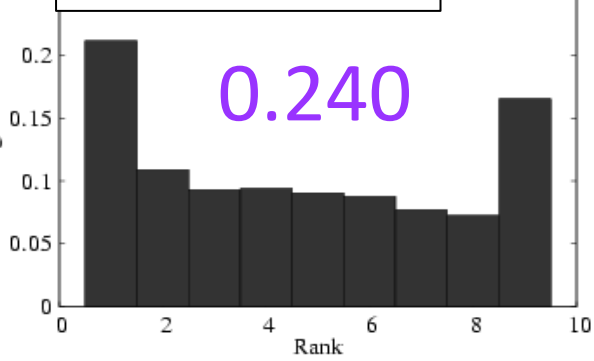
CMIP3-AS MME (13)



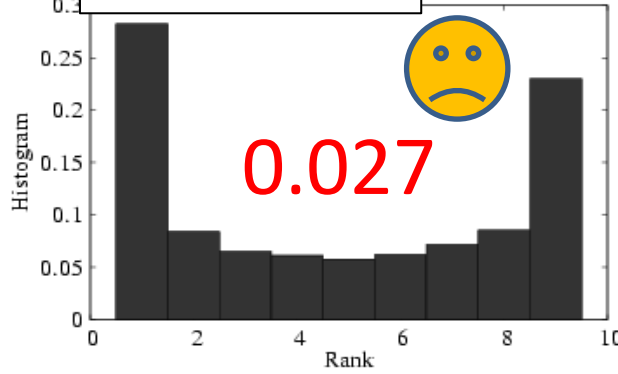
HadCM3-PPE (17)



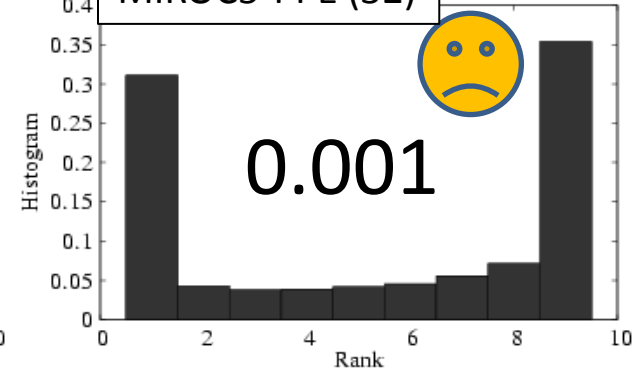
HadSM MME (128)



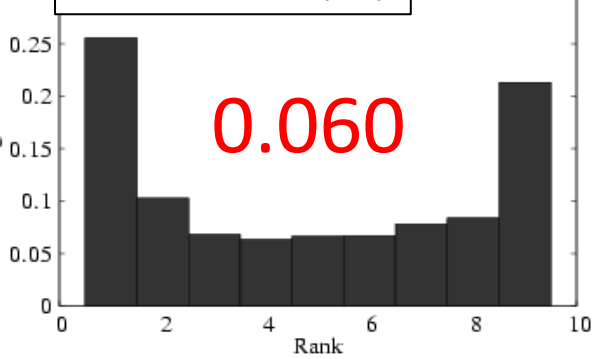
MIROC3-PPE (32)



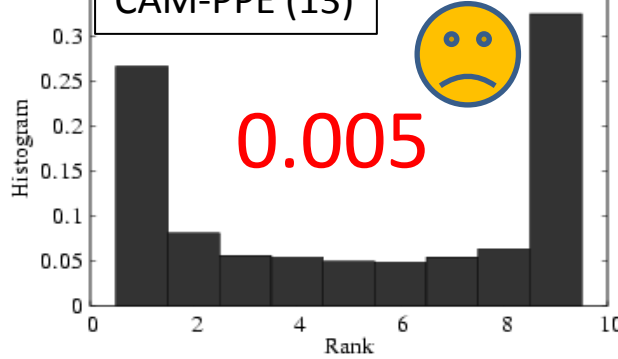
MIROC5-PPE (32)



MIROC5-MPE (10)



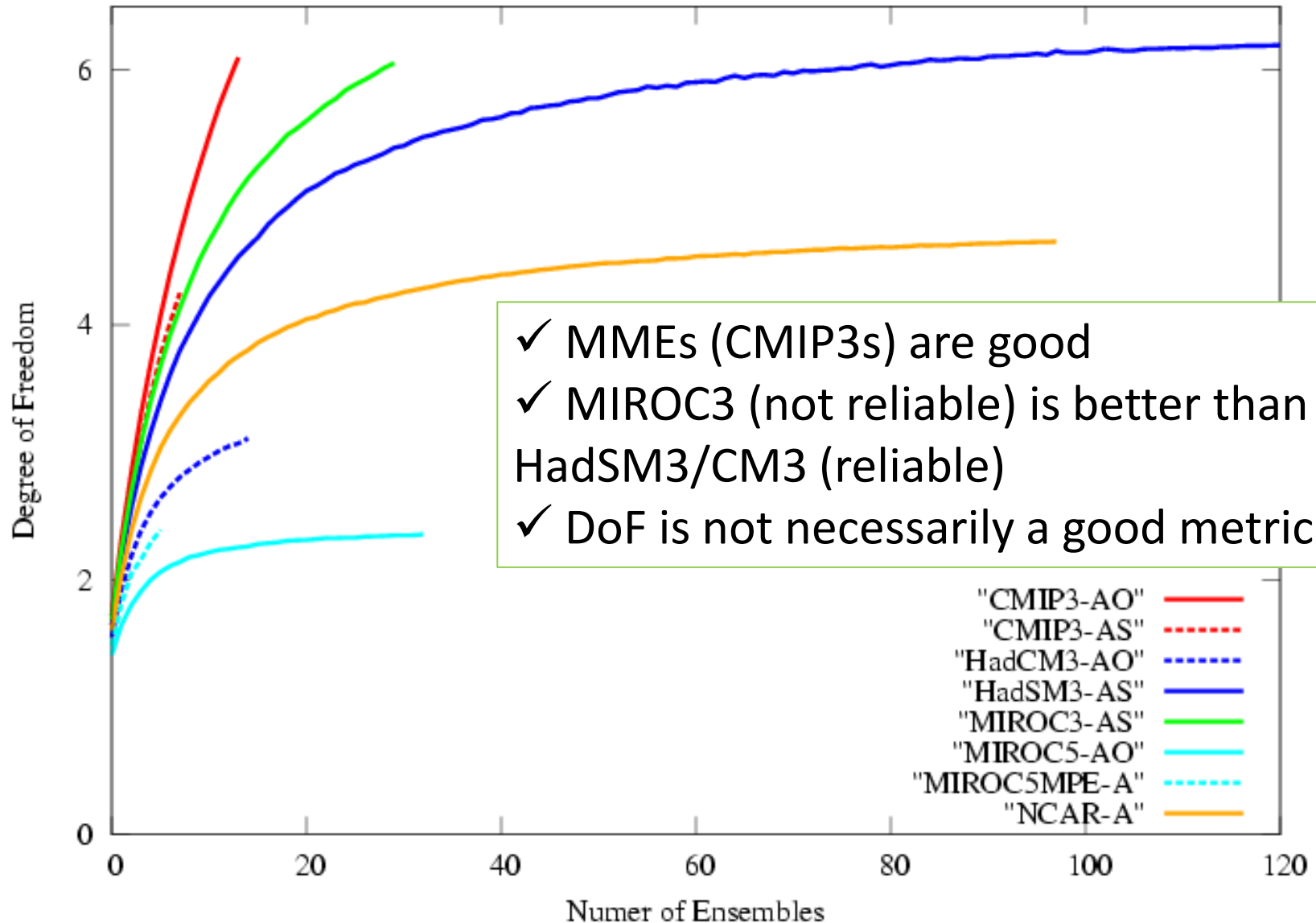
CAM-PPE (13)



Number=p-value for
T-test of uniformity:
If p-value is very small,
histogram is not uniform



Degree of Freedom of ensembles



- ✓ MMEs (CMIP3s) are good
- ✓ MIROC3 (not reliable) is better than HadSM3/CM3 (reliable)
- ✓ DoF is not necessarily a good metrics

New Physics in “MIROC5”: 新旧スキーム比較

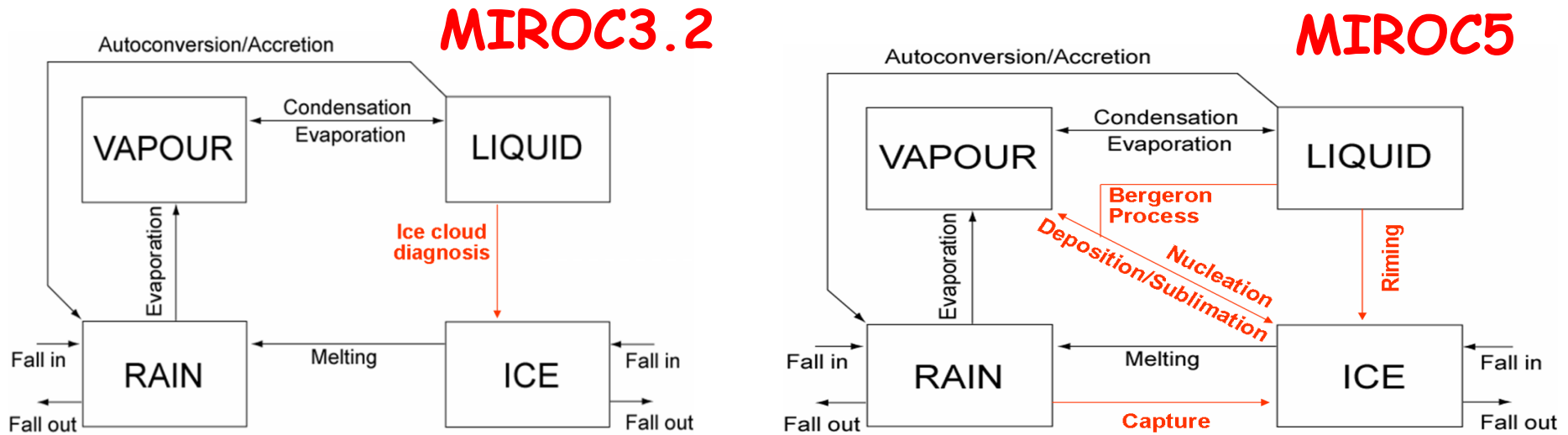
MIROC3 (for AR4)

MIROC5 (for AR5)

	MIROC3 (for AR4)	MIROC5 (for AR5)
	解像度 水平 T42 (~300km) 鉛直 20層	水平 T85 (~150 km) 鉛直 40層
大気上端	鉛直座標 Sigma	Eta (hybrid sigma-p)
放射強制力	放射 2方向 DOM 37ch (Nakajima et al. 1986)	2方向 DOM 111ch (Sekiguchi et al. 2008)
中層雲 境界層雲 雲応答 気候感度 ENSO	雲 診断的 (LeTreut & Li 1991) + 簡易水/氷分配	予報的 PDF (Watanabe et al. 2009) + 氷微物理 (Wilson & Ballard 1999)
	乱流 M-Y Level 2.0 (Mellor & Yamada 1982)	MYNN Level 2.5 (Nakanishi & Niino 2004)
	積雲対流 予報的 A-S + 臨界相対湿度 (Pan & Randall 1998, Emori et al. 2001)	予報的 AS-type + オリジナルスキーム (Chikira & Sugiyama 2010)
放射強制力	エアロゾル 簡易 SPRINTARS (Takemura et al. 2002)	SPRINTARS + 雲核予報 (Takemura et al. 2009)
土地利用	陸面 MATSIRO+固定河川流量	new MATSIRO+可変河川流量
海水準 海氷	海洋 COCO3.4	COCO4.5
	海氷 2カテゴリー - EVP	マルチカテゴリー - EVP

雲氷微物理スキーム

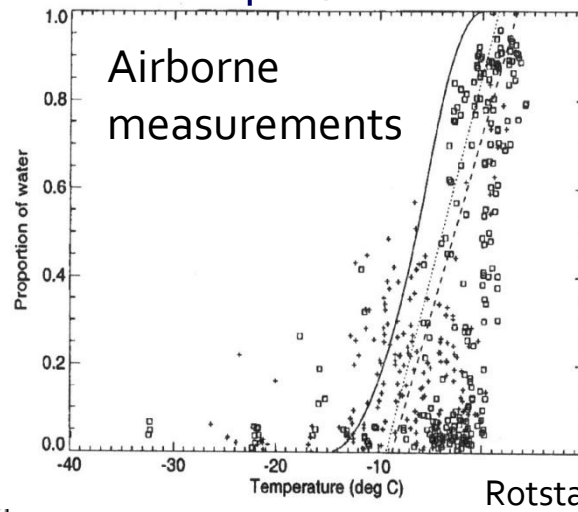
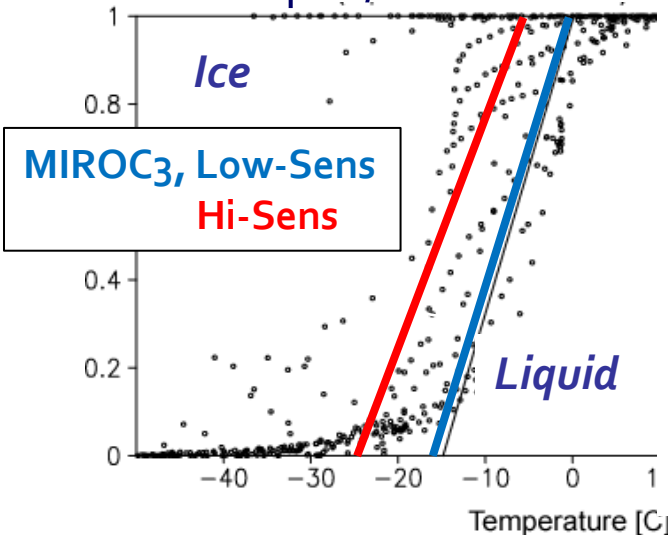
Work done by Ogura, Watanabe and Emori



Wilson and Ballard (1999)

Cloud liquid/ice fraction

Cloud liquid/ice fraction



Rotstayn et al. (2000)

- ✓ MIROC3.2では、経験関数を用いて雲水/雲氷分配を診断
- ✓ 気候感度が分配関数に依存
- モデル内で予報

積雲対流スキーム

Chikira and Sugiyama 2010, Chikira 2010, J. Atmos. Sci.

Entrainment rate (ε)

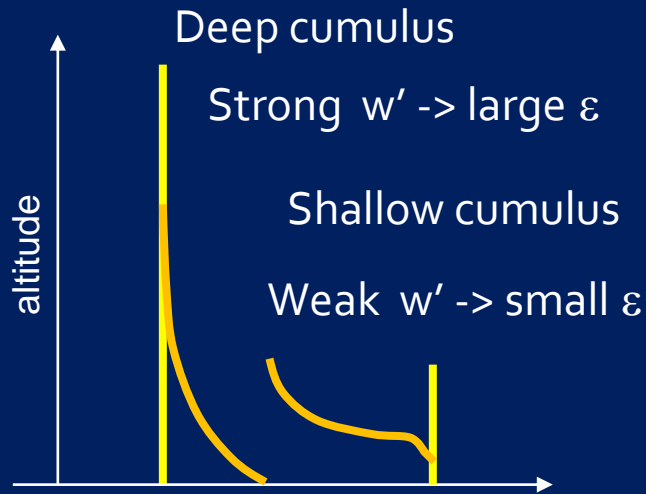
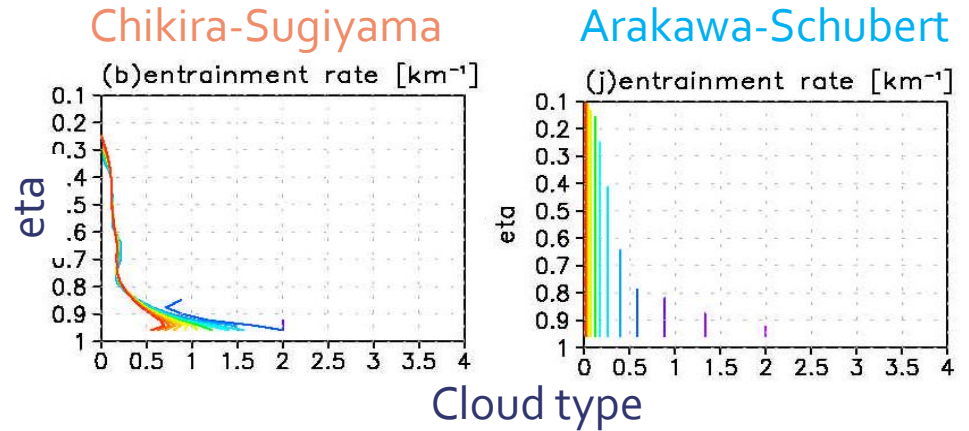
● Arakawa-Schubert scheme:

鉛直分布なしの一定値

● Chikira-Sugiyama scheme:

浮力および雲底質量
フラックスに依存する

Vertical profiles of ε in a single column model



What's the consequence?

- ✓ A-S スキームでは過小評価されていた 中層の積雲を増加させる
- ✓ 経験的な "cumulus triggering function" を使う必要がない