

階層的モデル実験による長期気候変化予測の不確実性定量化

河宮 未知生

海洋研究開発機構

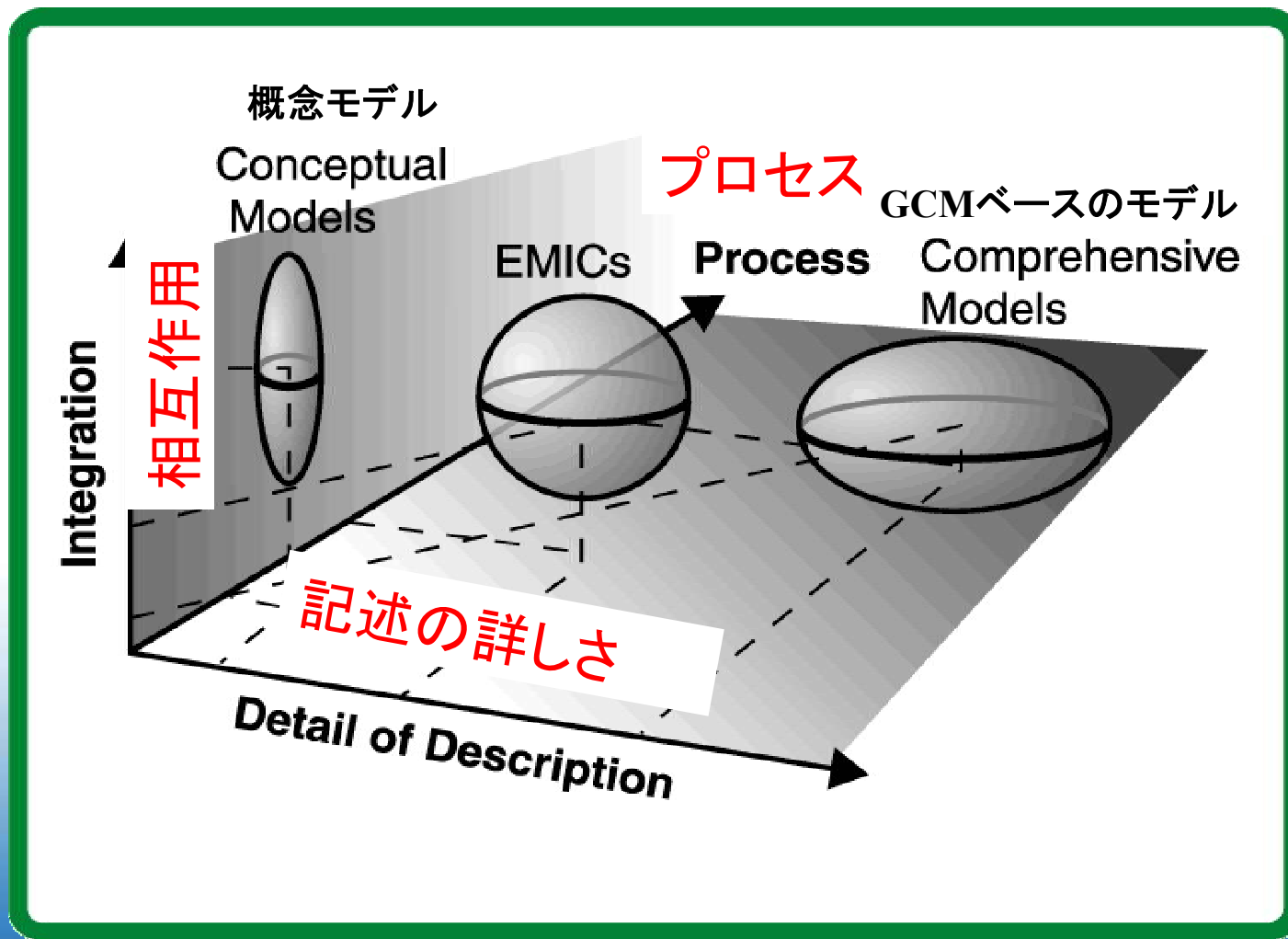
地球環境フロンティア研究センター



研究の目的、体制

- 300年程度のタイムスケールを対象とした地球温暖化予測実験の結果を用いて、予測に伴う不確実性を定量的に評価する。
- 研究体制
 - 簡略気候モデルを利用した不確実性評価
 - 地球システム統合モデルを利用した不確実性評価

Hierarchy of Earth System Models

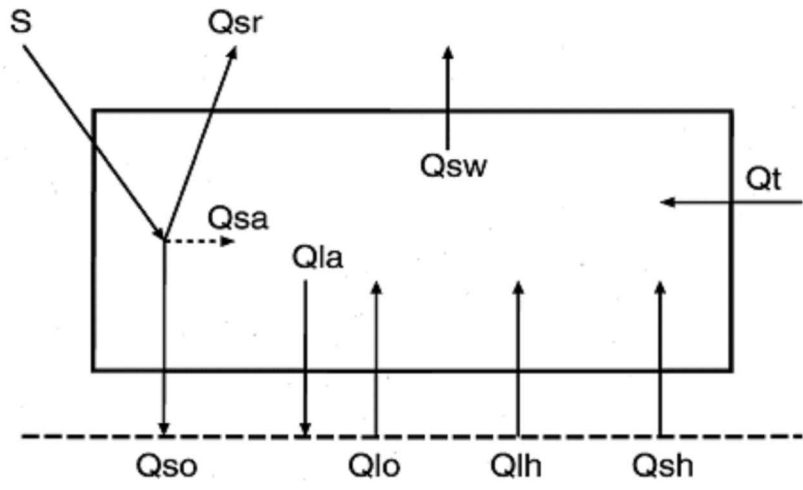


MIROC-Lite

標準的な海洋GCM

+

水平拡散でつながった「スラブ大気」
(エネルギーと水蒸気のバランスは考慮)

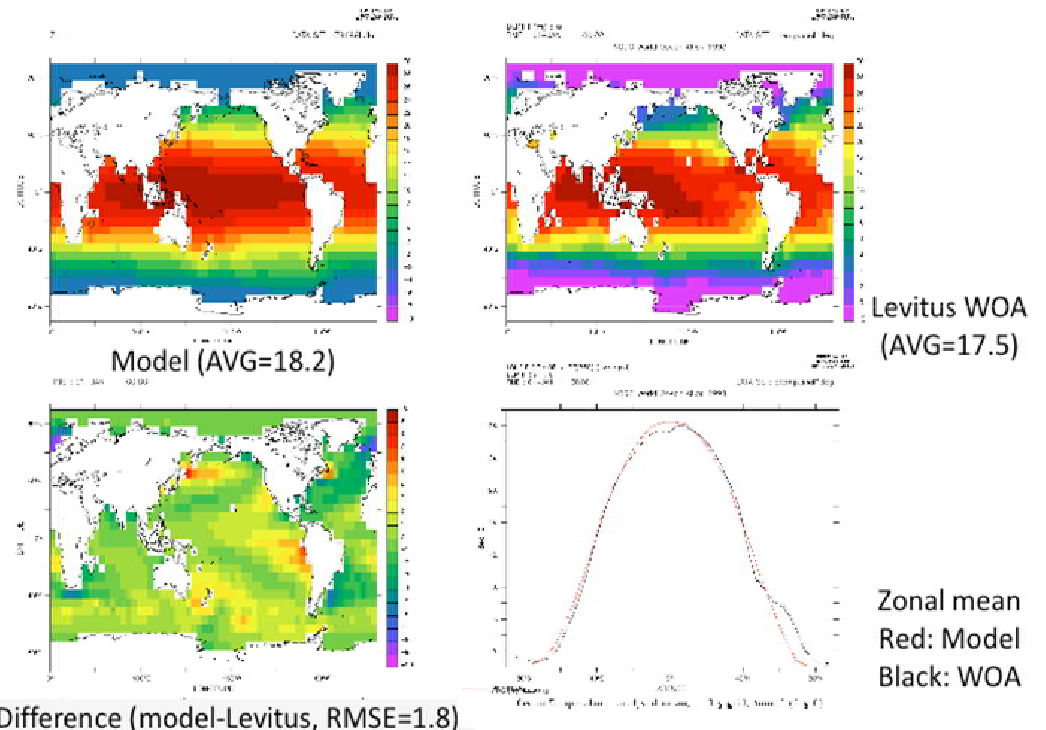


海洋GCM

MIROC-liteで使われている海洋GCMは地球システム統合モデルで使われているものと同じものであり、両者の親和性は高い。

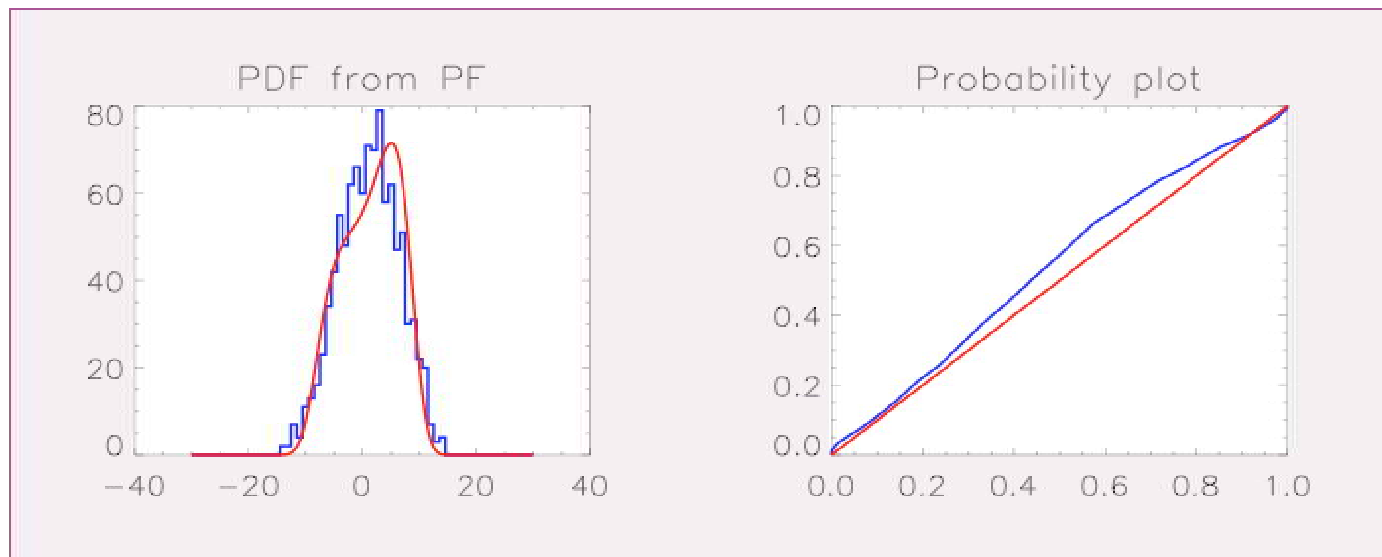
観測との比較

Output (SST) unit-Celsius

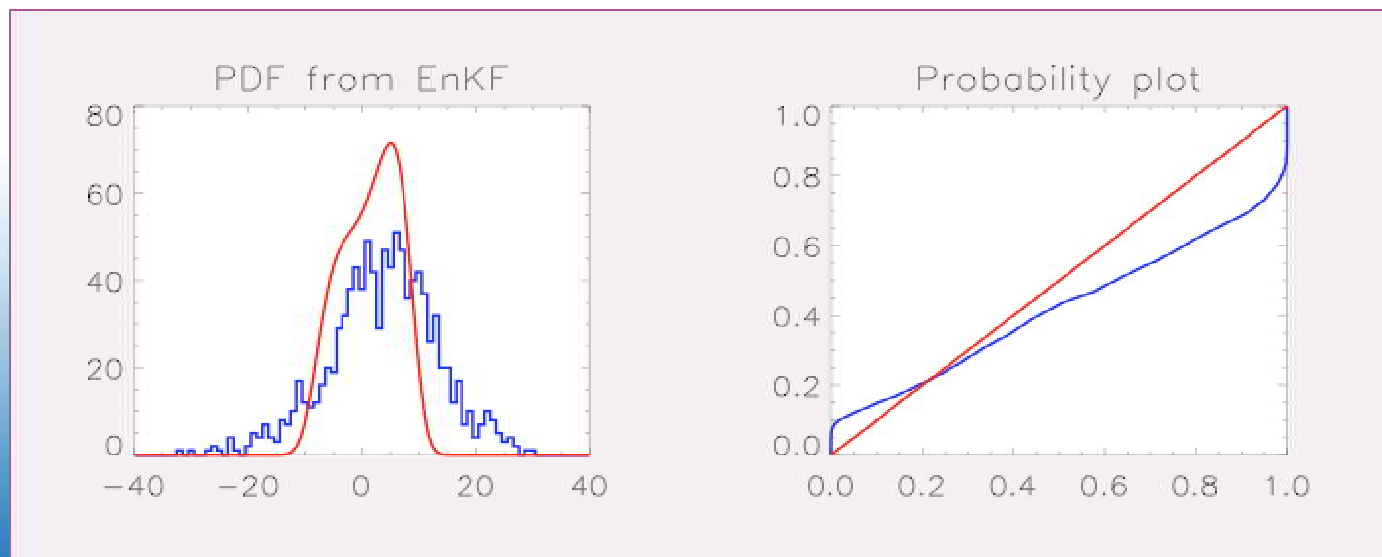


統計手法の改良

Particle
Filter



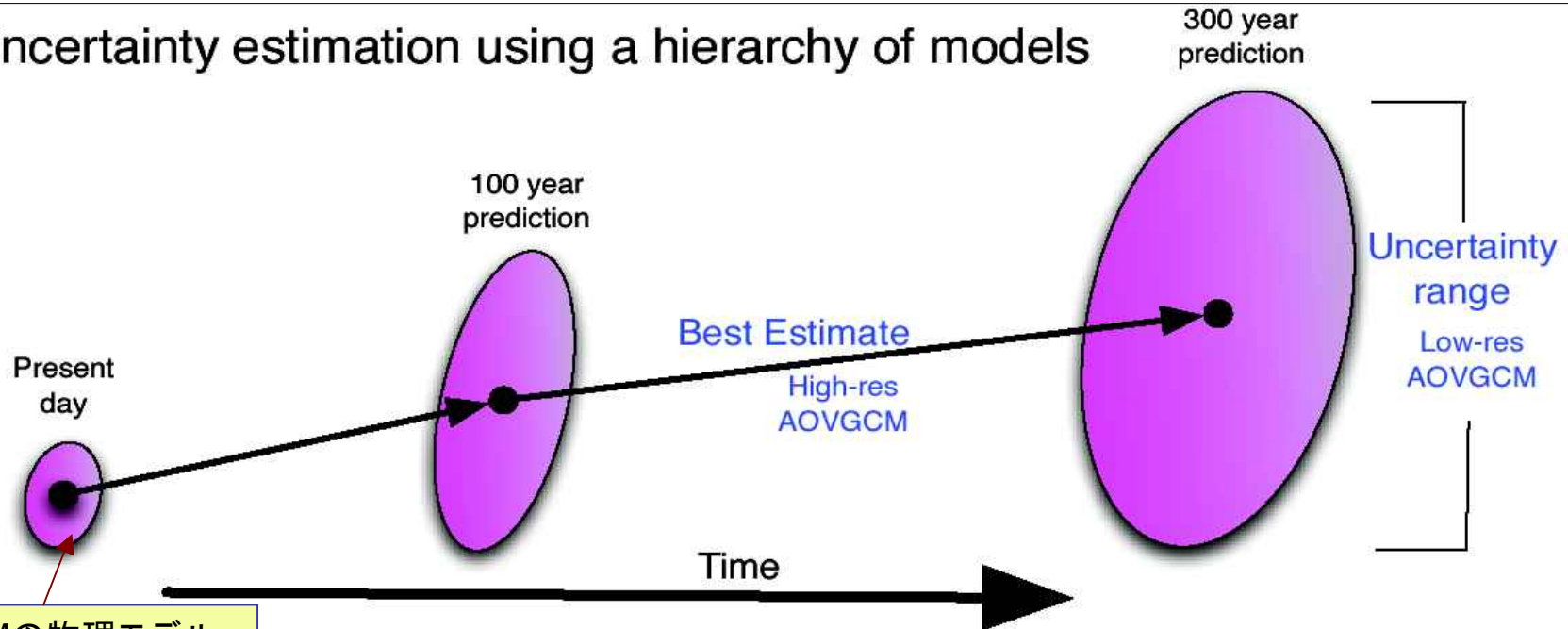
Ensemble
Karman
Filter



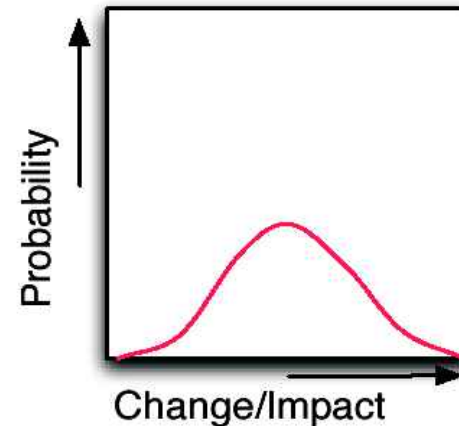
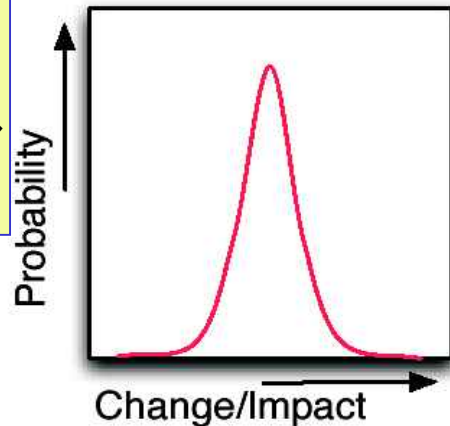
(赤:解析解、黒:推定値)

用いる統計手法の概念図

Uncertainty estimation using a hierarchy of models

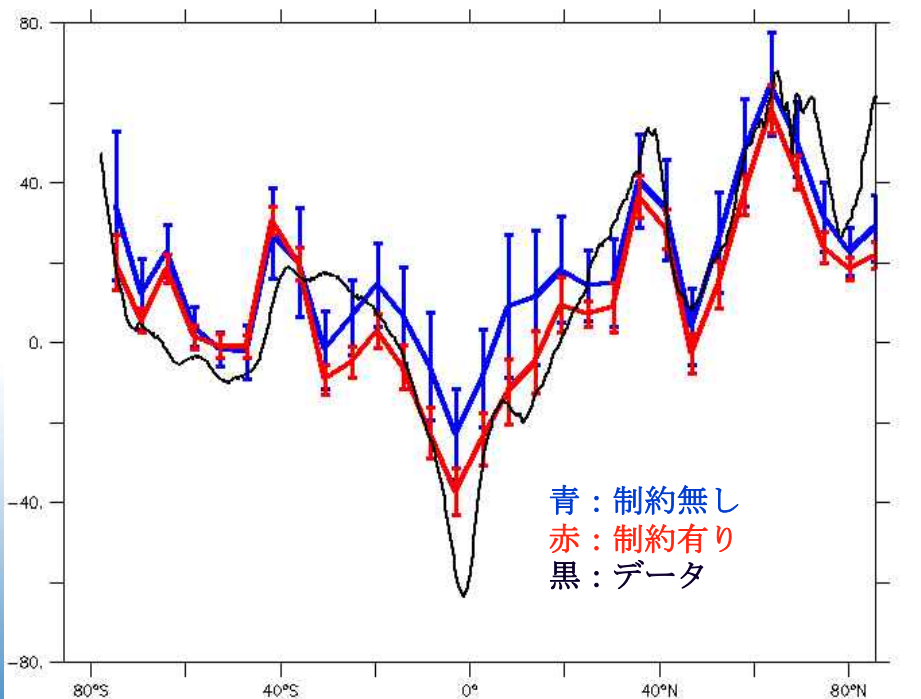


ESMの物理モデル部分、及び生物・地球化学モデル部分の不確実性を考慮し、そこから生ずる予測の不確実性を評価

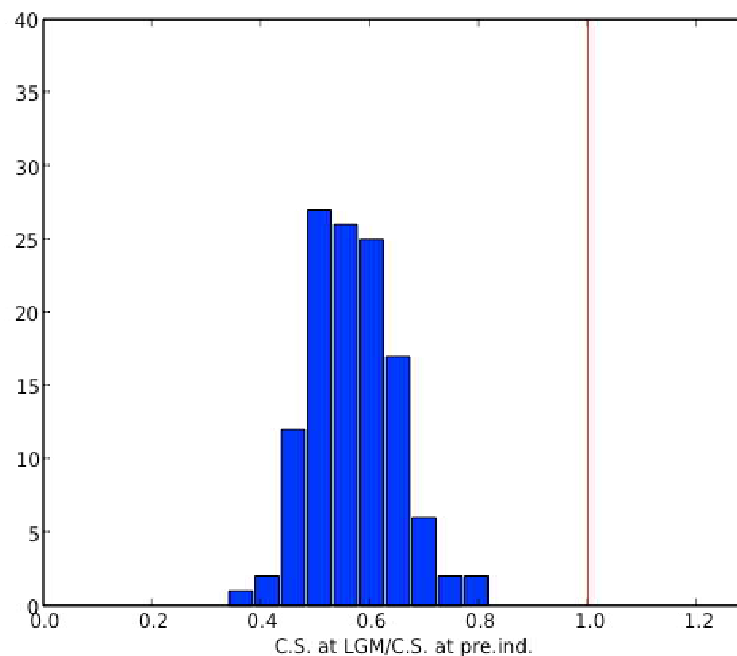


MIROC3.2T21AGCM+slab oceanの改良

上のモデルが再現する東西平均大気海洋熱交換
（全球平均大気海洋熱交換がゼロという制約条件の有無による違い）

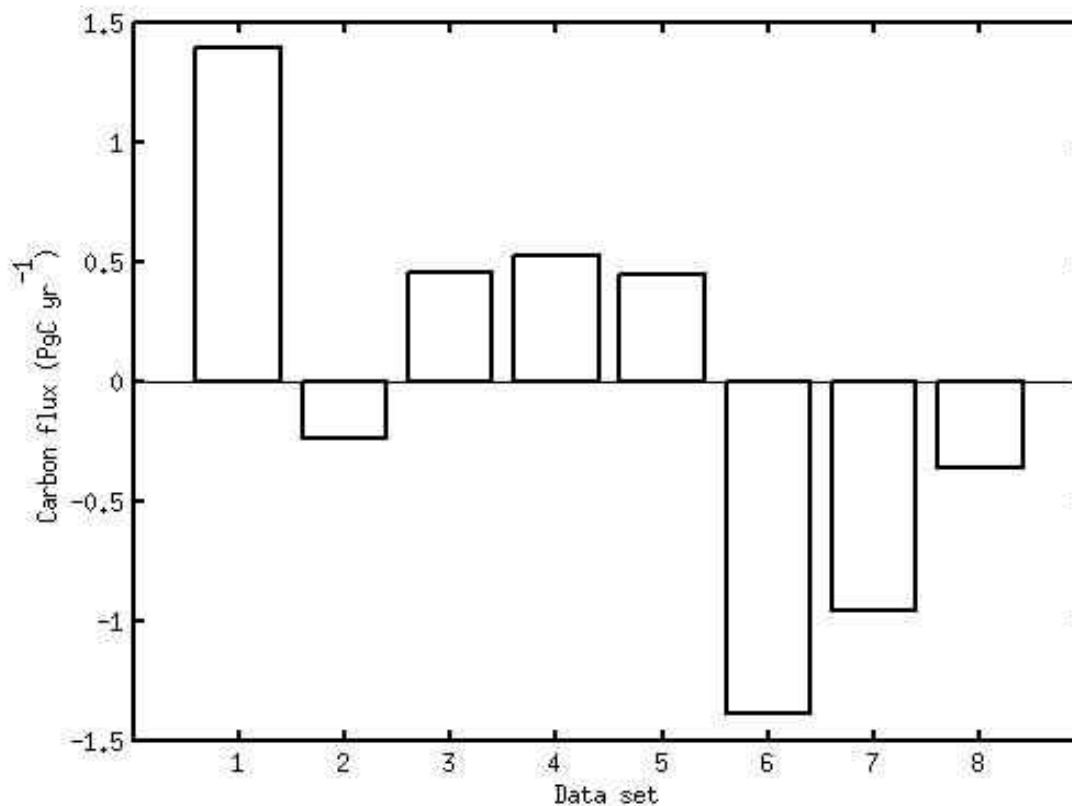


最終氷期と現在(産業革命前)の
状態での気候感度の比較
:予備的結果



→slab ocean実験でも、正味の大気海洋熱交換が
ほぼ0になるようなパラメータセットを得ることができた

地球システムモデルの出力と比較されるデータセットの不確実性評価



1990年代における陸域生態系の正味の炭素吸収量の、データセットによる違い→国際プロジェクトMATCHへの貢献

まとめ

- EMICを用いた不確実性評価実験
 - パラメータ調整完了
 - 統計手法の改良
 - 中程度の非線形のケースで、EnKFに対するParticle Filter の優位性確認→EMICへの適用へ
- GCMを用いた不確実性評価実験
 - 「気候感度」の妥当性評価
 - 氷期の状態と現在の状態で気候感度に違いがあることを指摘
 - 単純な海洋混合層モデルを使用した場合と、海洋大循環モデルを使用した場合との比較実験準備完了
 - 地球システム統合モデルの出力と比較されるデータセット（土地利用変化）の不確実性評価
 - 90年代の陸域の収支は、データセットにより符号にさえ違い
 - 国際プロジェクトMATCHへの貢献

来年度計画

- EMICへの炭素循環モデル導入
- 観測との比較による、気候－炭素循環結合モデルの妥当性評価
- 大気－海洋混合層結合モデルによるLGMの「低気候感度」の要因調査など

モデルアンサンブルによる ESMの不確実性定量化

仲敷(CRIEPI)

- 全体計画

生物化学過程の取り扱いや計算結果について、モデル間の比較検討を行い、ESMの精度向上に資する。種々のエネルギーシナリオに基づく予測計算を行う。

- H19年度計画

- 海洋炭素循環モデルOCMIP'による検討

- OCMIP': PO₄、Feを予報
- 海洋モデルPOP、結合モデルCCSM3への組み込み
- スピンアップ計算、CO₂感度実験

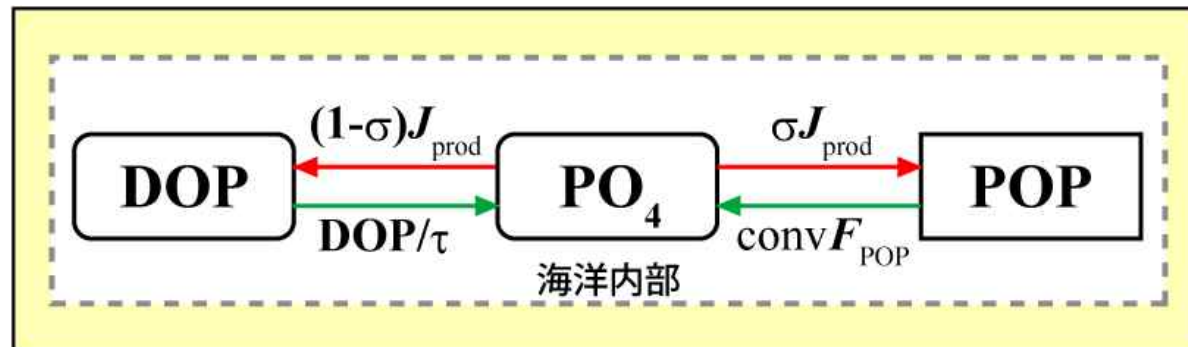
- 動的全球植生モデルCLM-DGVMによる検討

- 工業化前植生分布の再現計算を実施

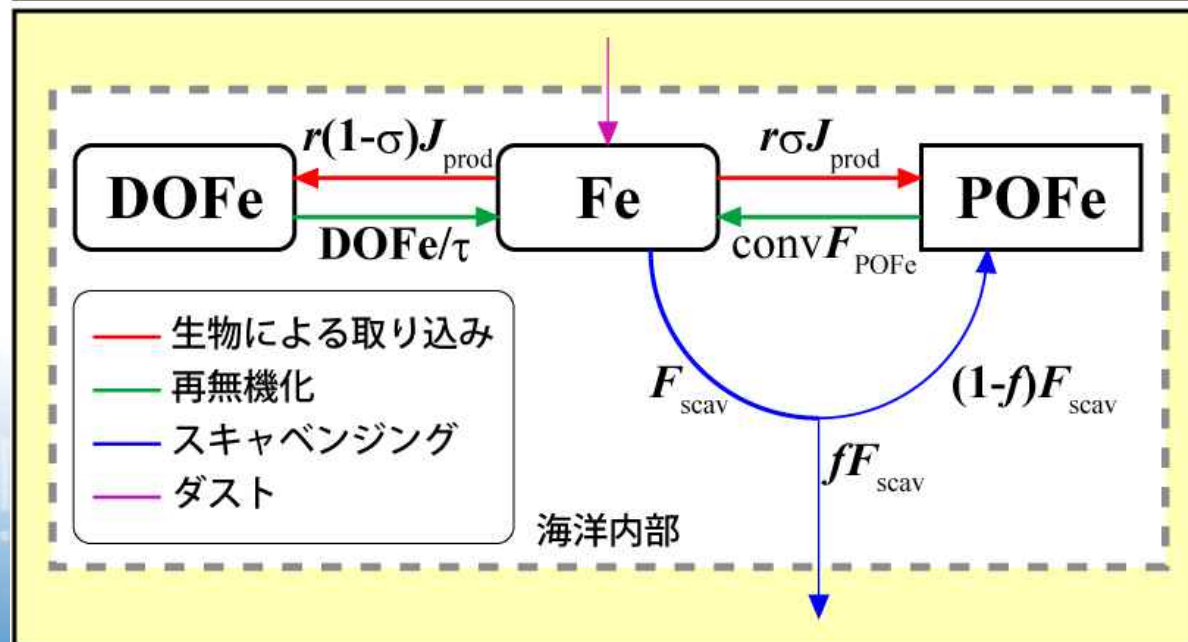


海洋炭素循環モデルOCMIP'

リンの循環



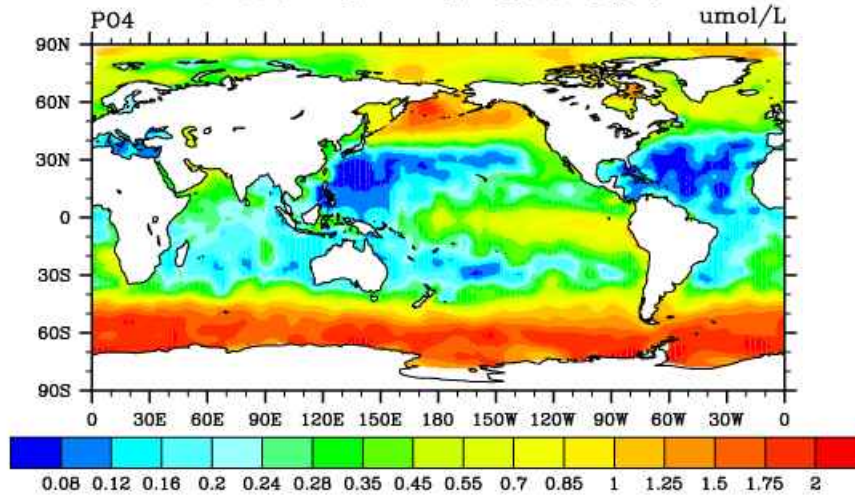
鉄の循環



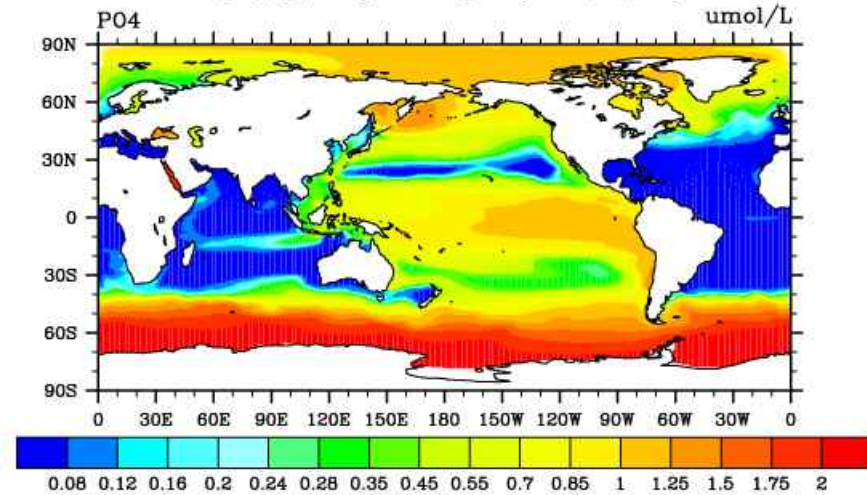
海洋モデルPOP (解像度0.3~1度x1度)、結合モデルCCSM3に組み込み。

海洋モデル+OCMIP'の結果

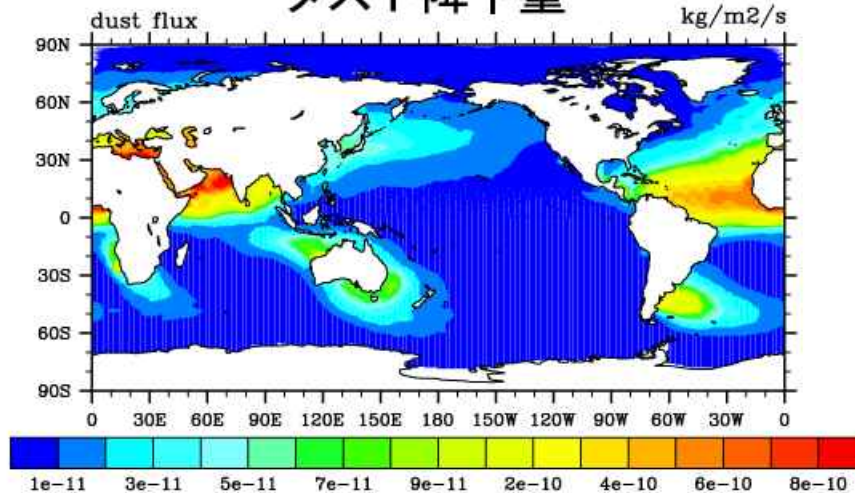
表層の[PO₄] (観測値)



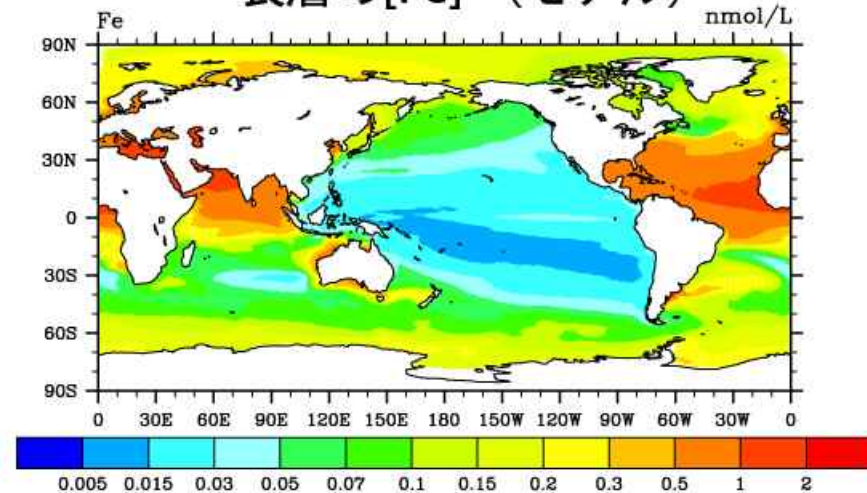
表層の[PO₄] (モデル)



ダスト降下量



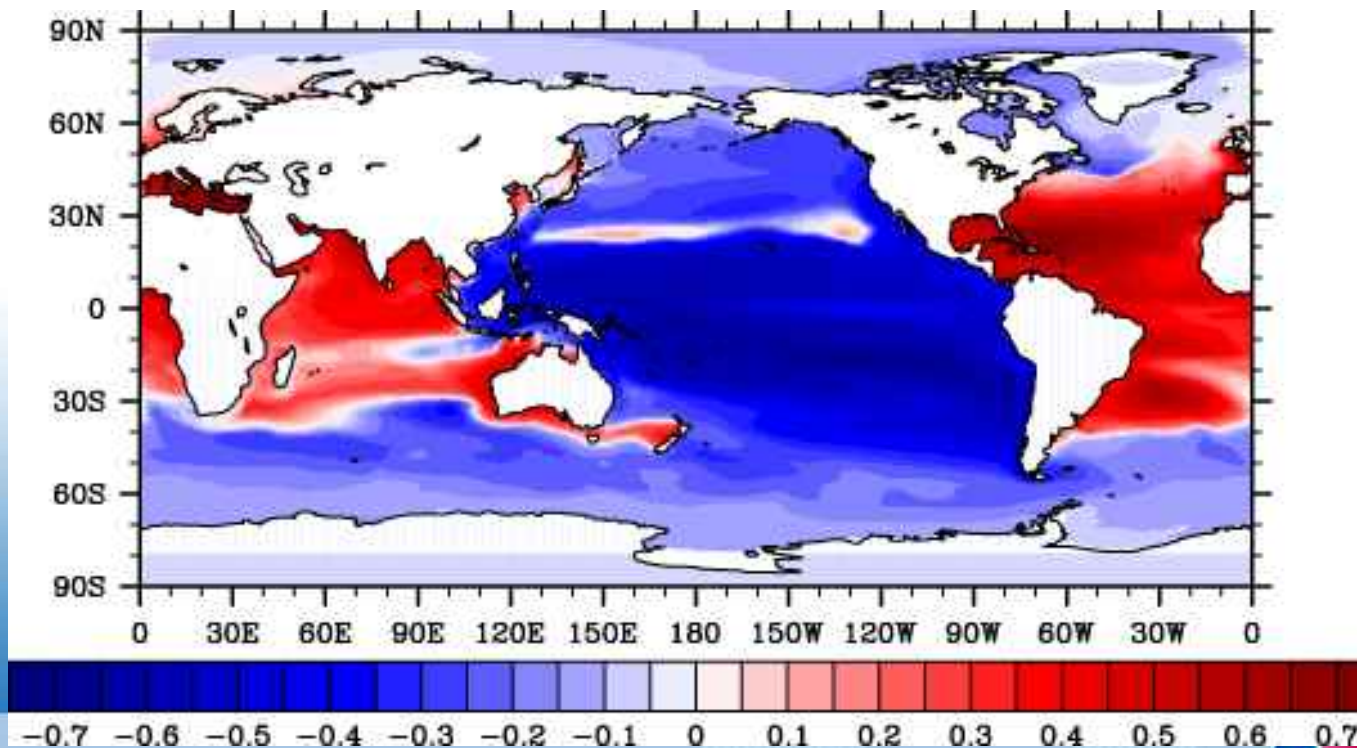
表層の[Fe] (モデル)



生物生産の制限要因

$$F_N = \min \left\{ \frac{[\text{PO}_4]}{[\text{PO}_4] + \kappa_{\text{PO}_4}}, \frac{[\text{Fe}]}{[\text{Fe}] + \kappa_{\text{Fe}}} \right\}$$

$$g([\text{Fe}], [\text{PO}_4]) = \frac{[\text{Fe}]}{[\text{Fe}] + \kappa_{\text{Fe}}} - \frac{[\text{PO}_4]}{[\text{PO}_4] + \kappa_{\text{PO}_4}}$$



鉄制限

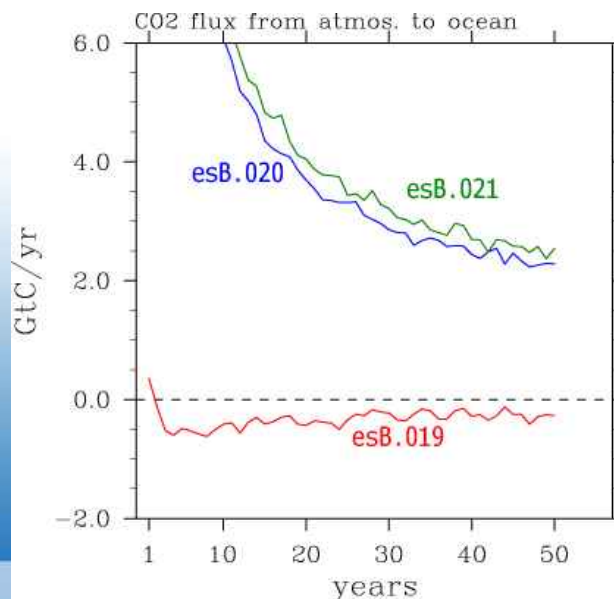
栄養塩制限

KAKUSHIN

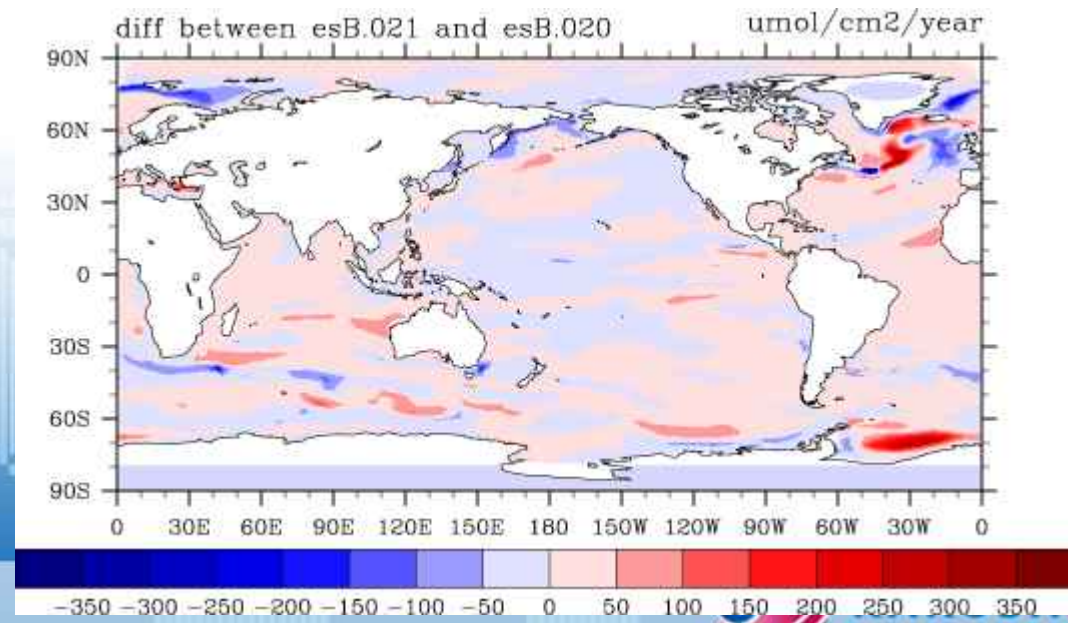
結合モデルの結果

ケース名	大気CO ₂	海洋CO ₂
esB.019	280 ppm	280 ppm
esB.020	560 ppm	560 ppm
esB.021	280 ppm	560 ppm

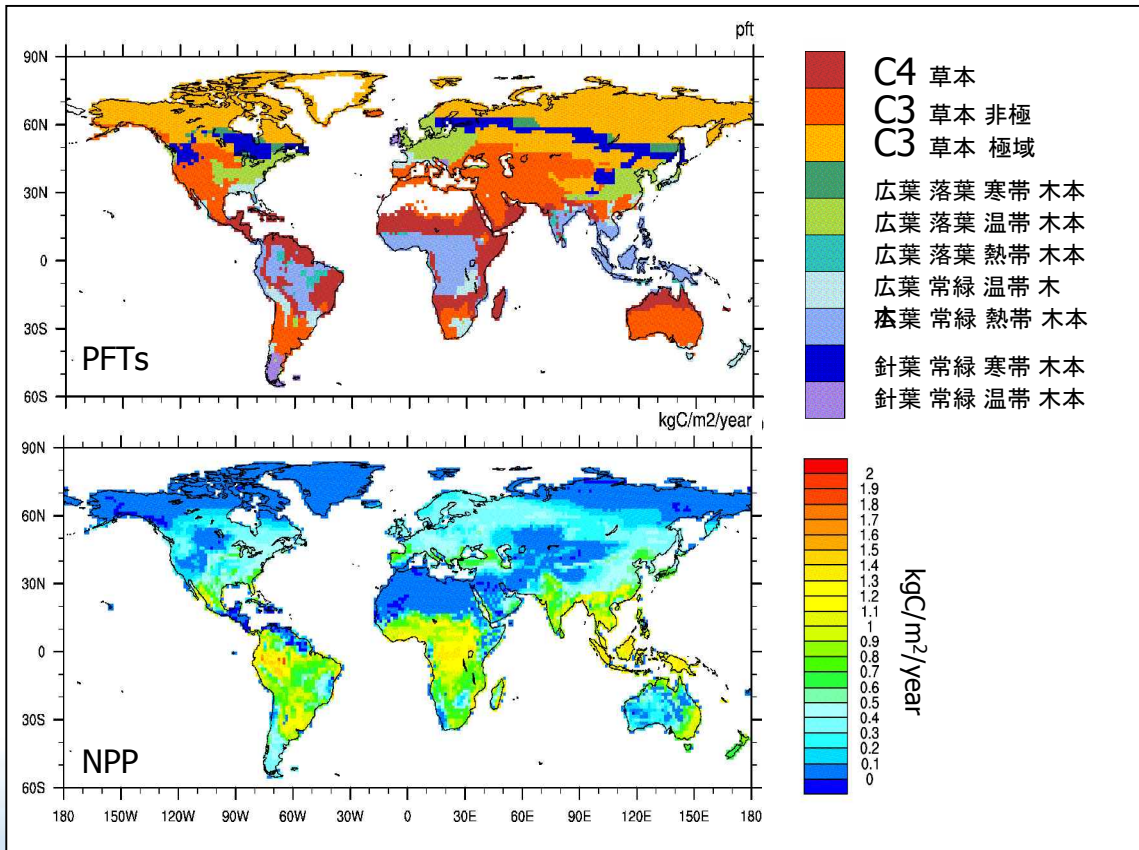
大気から海洋へのCO₂フラックス



esB.021とesB.020の差(最後の10年平均)



高解像度DGVMによる産業革命前コントロール実験



- アマゾン, アメリカ東海岸,
シベリアの木本を再現
- 更なる時間積分が必要

低解像度DGVMによるCO2濃度感度実験

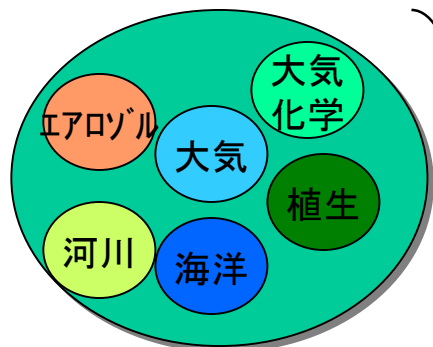
- 全球平均気温, 降水量, 植生分布の大きな変動は見られない
- 熱帯雨林では高CO2濃度の影響によるNPPの増加

カップラーの開発

荒川(RIST)

研究の背景と目的

地球システムモデル



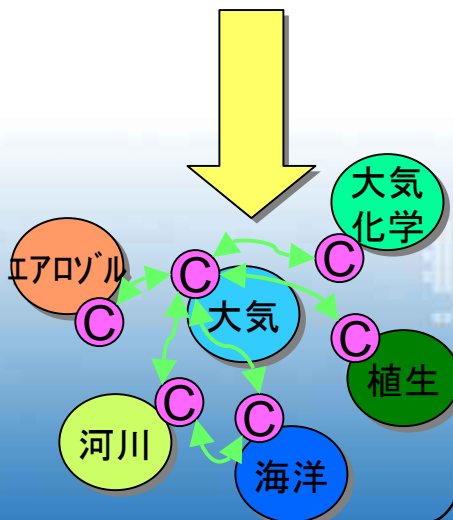
複数のモデル(要素モデル)が相互作用しつつ
気象・気候をシミュレート

Multi scale, Multi physics

高い再現性・
表現能力

不確実性の特定・
評価が困難

密結合のモデル構造



不確実性の評価には要素
モデルを分離しサブシステムを
交換する手法が有効

粗結合のモデル構造

地球システムモデルの不確実性を定量化し
温暖化予測の不確実性低減に資する
ためのソフトウェア基盤としての
カップラーを開発する

研究の概要

- 対象モデル
 - MIROC(をベースとした)地球システムモデル
 - MRI/JMA地球システムモデル
 - その他のモデル
- 到達目標
 - 汎用的カップラーを設計・作成し実モデルに適用、有効性を評価する
- 参画機関
 - FRCGC, MRI, CCSR, RIST

全体計画

19年度	20年度	21年度	22年度	23年度
カップラー設計	実装と性能評価			
	大気・海洋 陸面・河川	他モデル 化学・エアロゾル	とりまとめ	

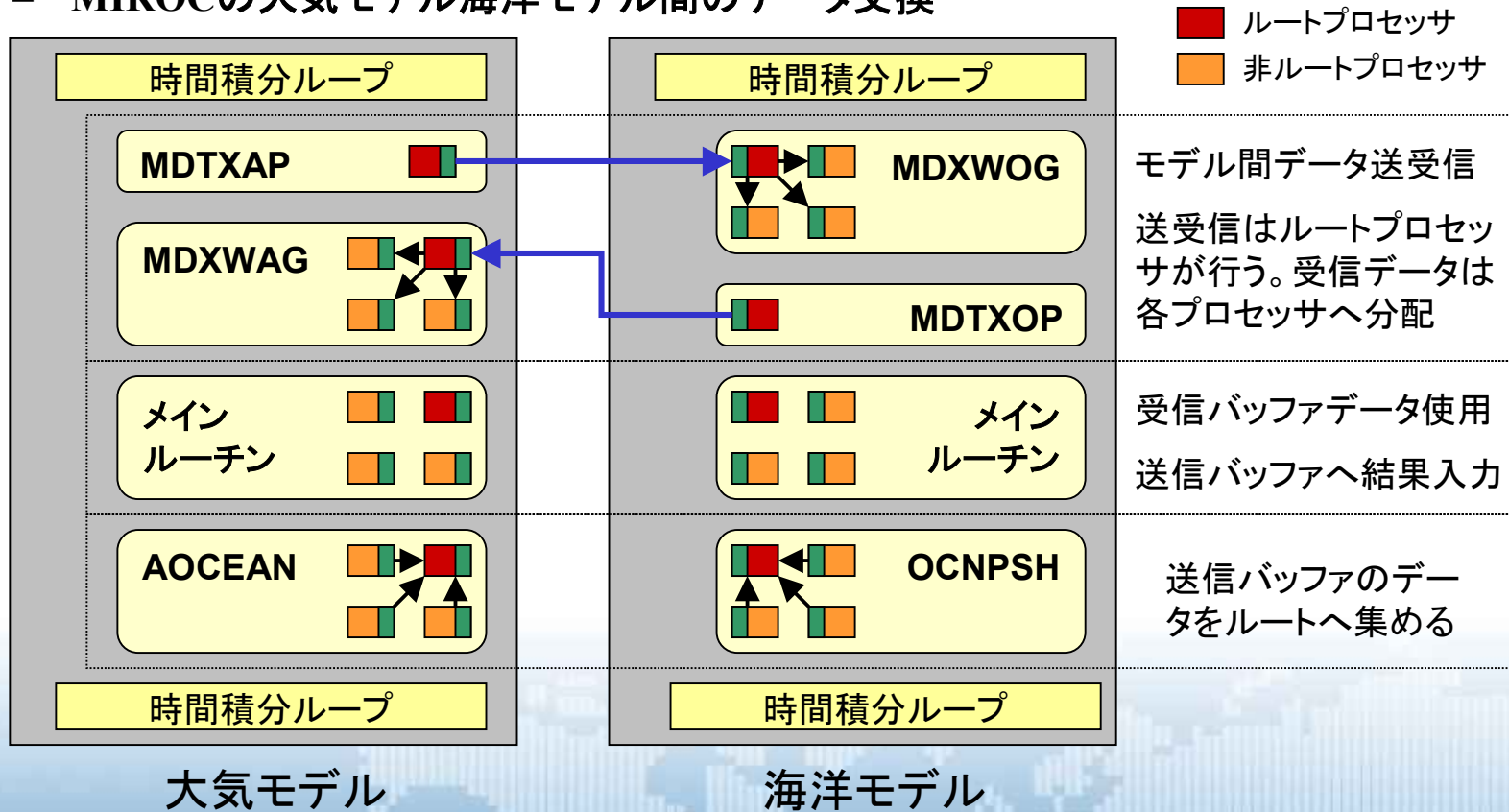
平成19年度計画

- 要素モデル特性調査
 - 制御構造
 - データ構造
- カップラー設計
 - 概念設計
 - プロトタイピング

要素モデル特性調査

- 制御構造

- MIROCの大気モデル海洋モデル間のデータ交換



- データ構造

- 大気モデル、海洋モデルとも空間次元を圧縮

- GDT (IJDIM, KMAX) : 大気 (水平面を圧縮)
 - TA(NXYZDM, NTDIM) : 海洋 (空間次元を圧縮、NTDIMは時間次元)

カップラー設計(概念設計)

- 概念設計

- 使用言語・並列ライブラリ

- Fortran90(以上)

- F90のポインタ・構造体はカップラーコードに不可欠。C言語の併用はコンパイル・リンクに問題を生じる可能性がある

- MPI- I

- MPI- II のリモートメモリアクセス機能はデータ交換の柔軟性を確保する上で重要な機能であるが、現時点では実効性能や汎用性の面で不安

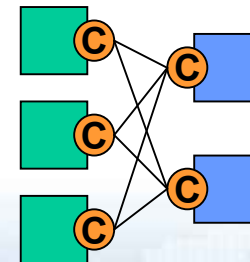
- データ交換

- スケーラビリティの確保: 将来的には数万~十万プロセッサ

- 各モデルの個々のプロセッサ同士が直接通信

- 自由度の確保

- プログラムの任意の箇所(時間積分前など)でデータ交換可能



- 物理量の変換

- 柔軟性の確保: 多様な変換アルゴリズムに対応

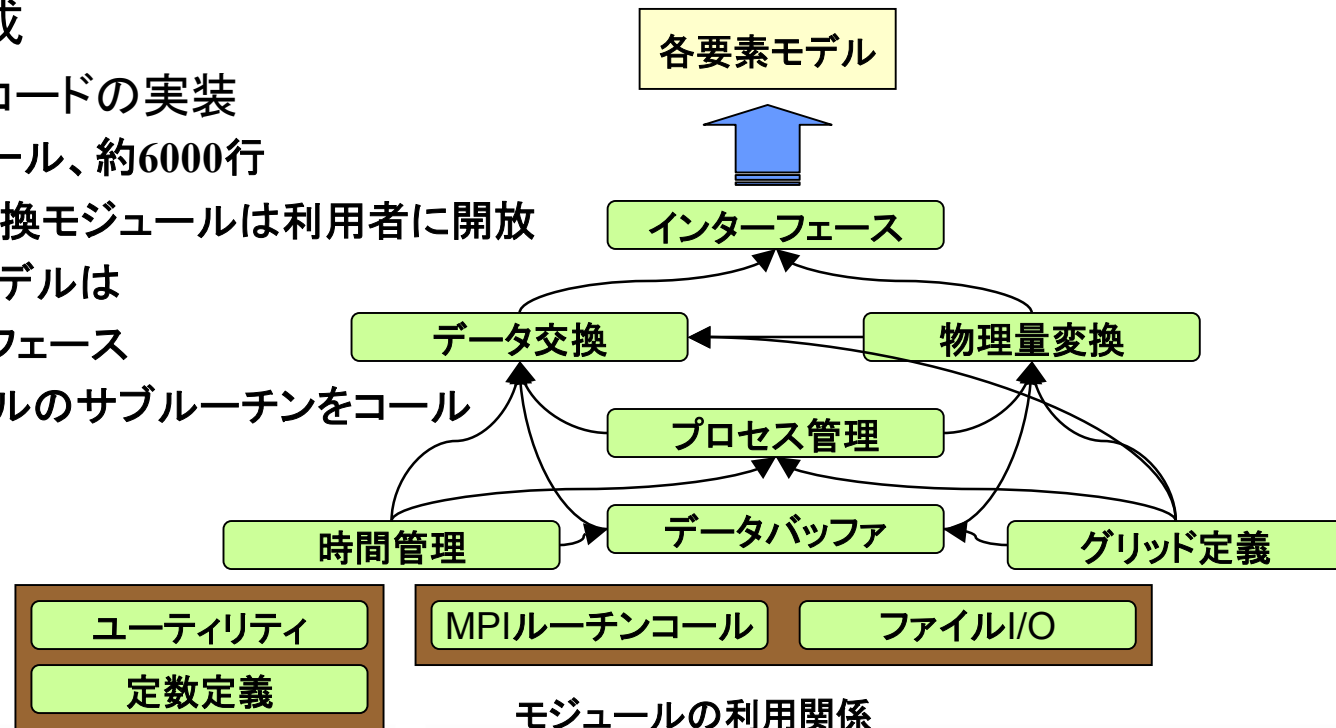
- データ交換に伴う物理量の変換(補間等)はカップラーが行うべき

- しかし、考え得る全ての変換をカップラーに実装することは非現実的

- 物理量変換コードはカップラーと切り離し、状況に応じて実装できるよう設計する

カップラー設計(プロトタイプ)

- プロトタイプ作成
 - プロトタイプコードの実装
 - 11モジュール、約6000行
 - 物理量変換モジュールは利用者に開放
 - 各要素モデルは
インターフェース
モジュールのサブルーチンをコール



モジュールの利用関係

茶色枠内のモジュールは特定の継承関係はなく、多くのモジュールで使用される

- テスト用モデルによる結合試験
 - 互いに座標系の異なる5つのモデルを並列に結合
 - Linuxクラスタでの小規模試験(~32PE)完了
 - ESでの大規模試験を予定