

地球システム統合モデルによる 長期気候変動予測実験

最長で300年先までの地球温暖化予測実験を行い、CO₂濃度安定化シナリオの下での、**長期的な地球環境の変化やシナリオ実現に要求される人為起源CO₂排出量を予測する。**

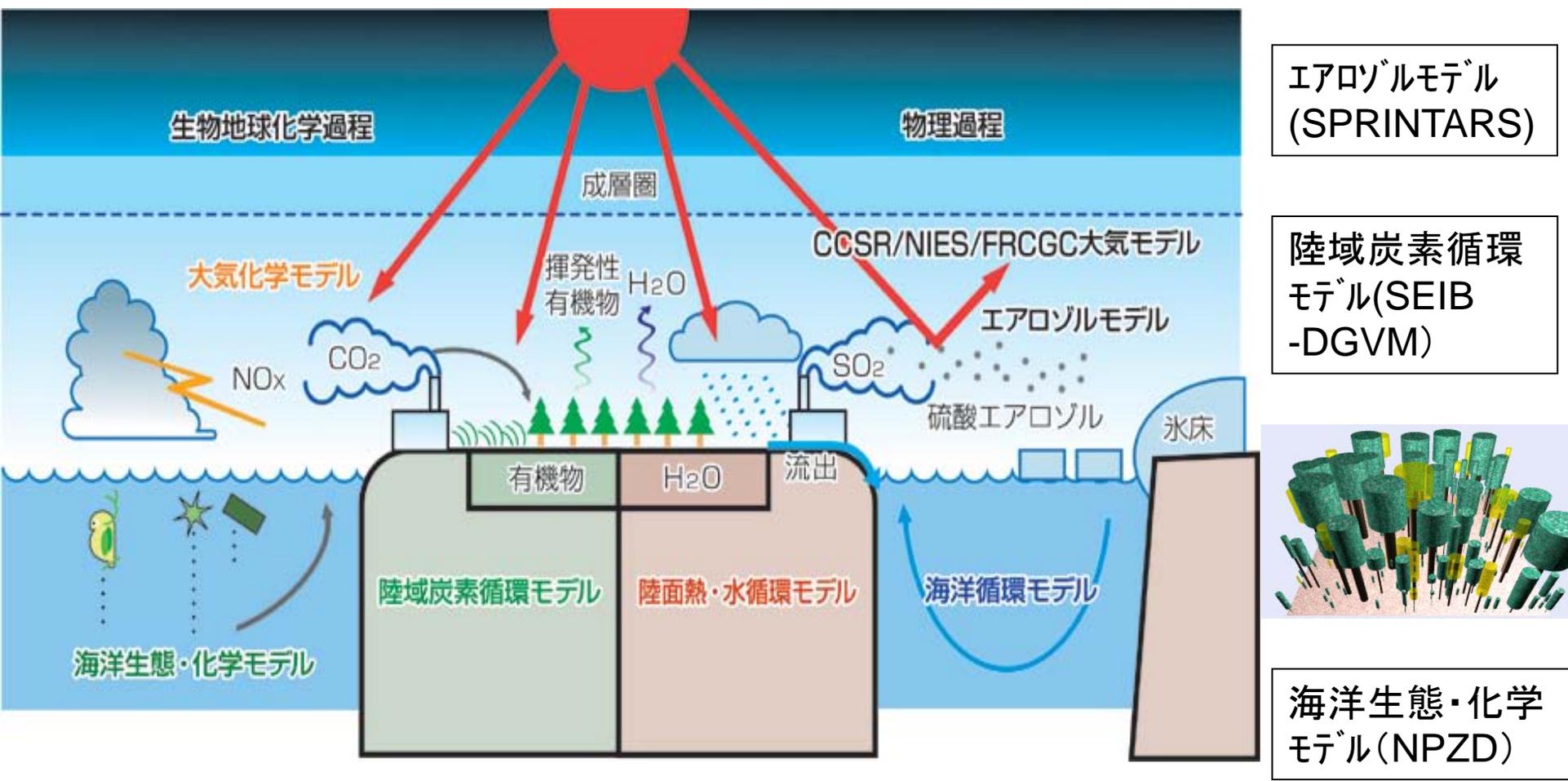
1. 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験
 - a. 20世紀気候変動再現実験
 - b. CMIP5に向けたシナリオ実験実施・解析
2. モデルアンサンブルによる地球システム統合モデルの不確実性定量化
〈MIROC-ESMとCESM1相互比較、他〉
3. モデル相互比較による不確実性評価
〈格子形状、結合方法を一般化したJ-cupの開発〉

MIROC-ESMの開発

MIROC-ESMの開発 (T42L80)

化学気候モデル (CHASER) : O_3 、 O 、 $O1D$ 、 N 、 N 、 O 、 NO_2 、 NO_3 、 N_2O_5 、 HNO_3 、 HNO_4 、 H_2O_2 、 CO 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_2H_4 、 C_3H_6 、 $ONMV$ 、 C_5H_8 、 $C_{10}H_{16}$ 、 CH_3COCH_3 、 CH_2O 、 CH_3CHO 、 CH_3OH 、 $NALD$ 、 $MGLY$ 、 $HACET$ 、 $MACR$ 、 PAN 、 $MPAN$ 、 $ISON$ 、 CH_3OOH 、 C_2H_5OOH 、 C_3H_7OOH 、 $ISOOH$ 、 $HOROOH$ 、 CH_3COOOH 、 $MACROOH$ 、 O_3S 、 $O1DS$ 、 $SPRSO_2$ 、 $SPRSO_4$ 、 OCS 、 CH_4 、 N_2O 、 Cl 、 ClO 、 $OCIO$ 、 $ClOOCl$ 、 $ClONO_2$ 、 $HOCl$ 、 HCl 、 Cl_2 、 CH_3Cl 、 CCl_4 、 CH_3CCl_3 、 $CFC11$ 、 $CFC12$ 、 $CFC113$ 、 $HCFC22$ 、 Br 、 BrO 、 $BrONO_2$ 、 $HOBr$ 、 HBr 、 CH_3Br 、 Br_2 、 $BrCl$ 、 $H1211$ 、 $H1301$ 、 $CHBr_3$ 、 H 、 OH 、 HO_2 、 CH_3O_2 、 $C_2H_5O_2$ 、 $C_3H_7O_2$ 、 CH_3COO_2 、 $CH_3COCH_2O_2$ 、 $HOC_2H_4O_2$ 、 $HOC_3H_6O_2$ 、 ISO_2 、 $MACRO2$ (84 spesies)

58 chem. tracers; 58 photo-dissociation reactions; 184 chem. reactions



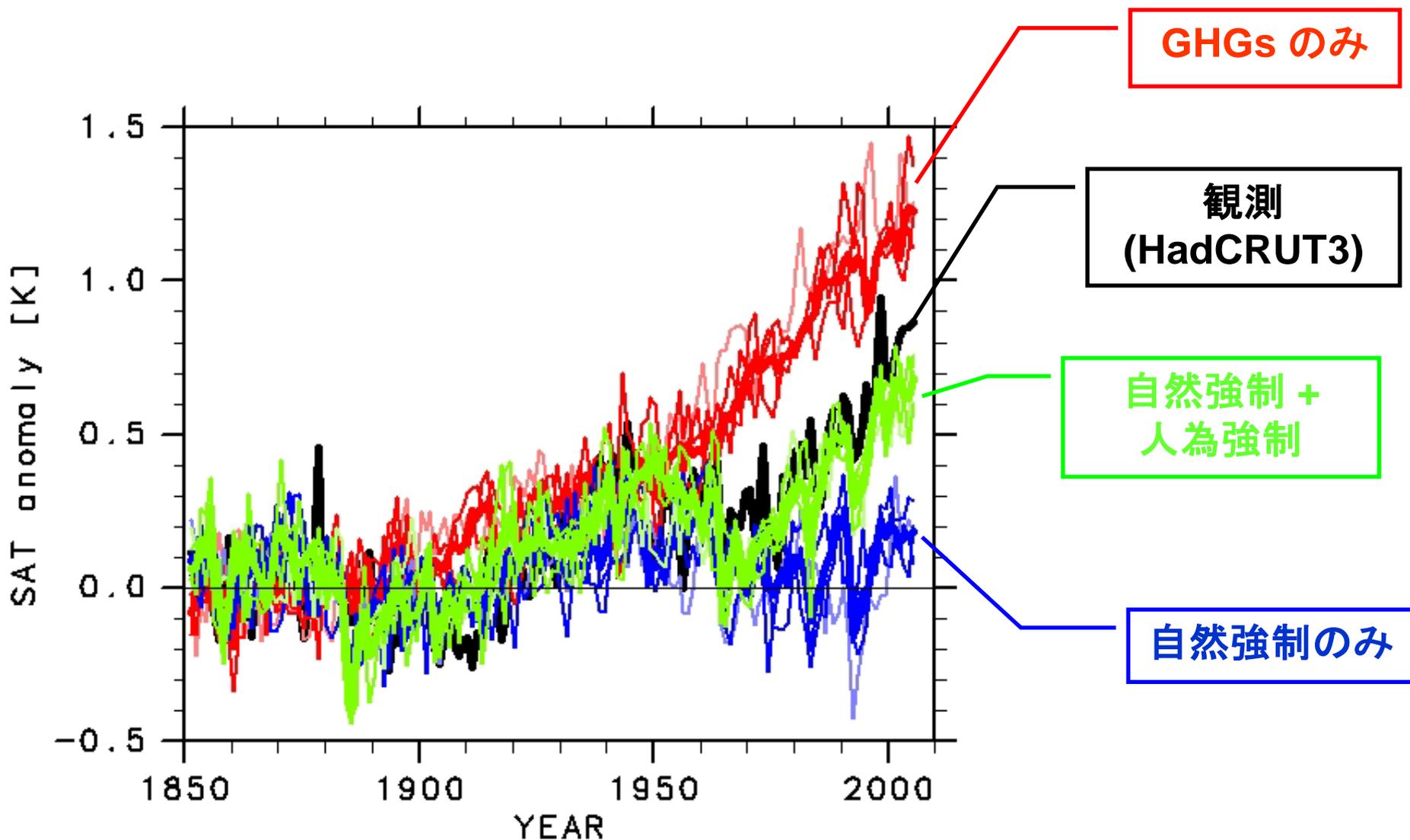
エアロゾルモデル (SPRINTARS)

陸域炭素循環モデル (SEIB-DGVM)

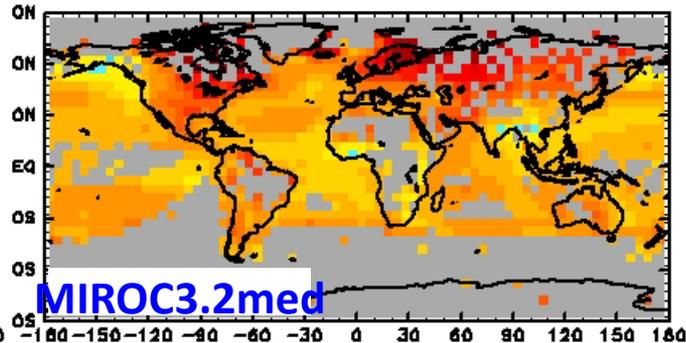
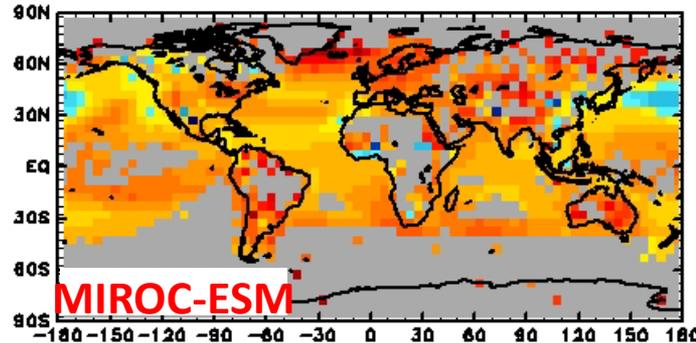
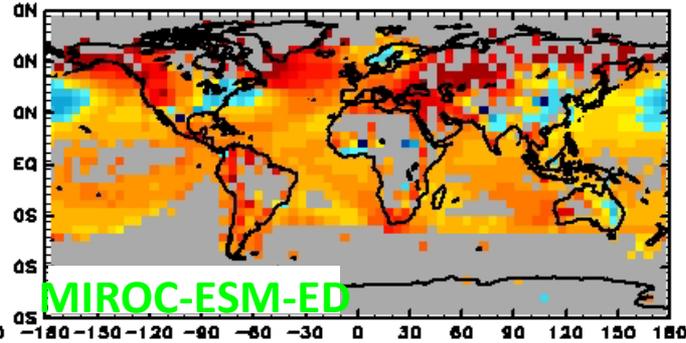
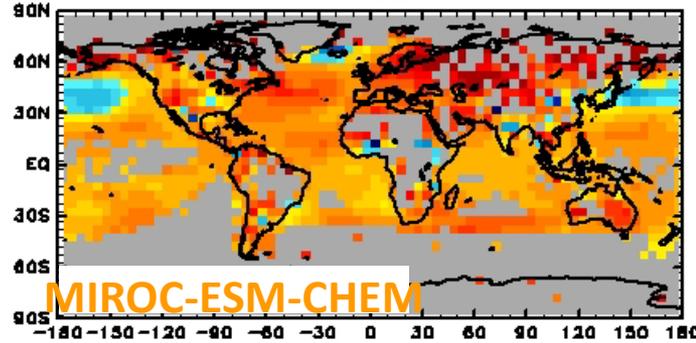
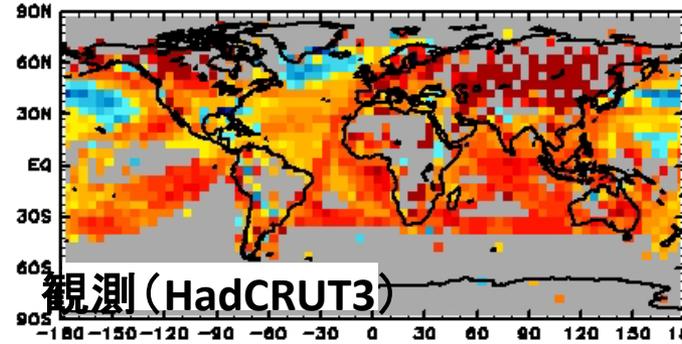
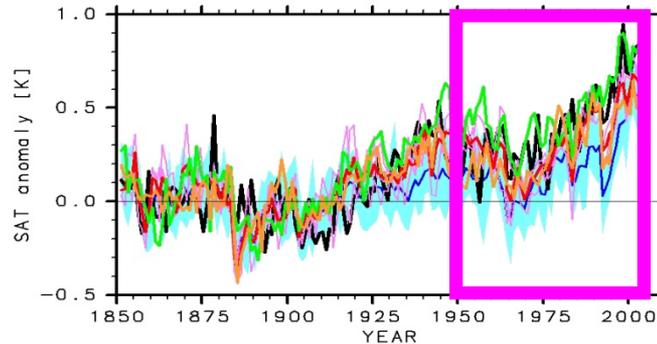
海洋生態・化学モデル (NPZD)

MIROC-ESMによる20世紀気候変動 再現実験

MIROC-ESMによる20世紀気候変動再現実験 ＜全球平均地上気温＞

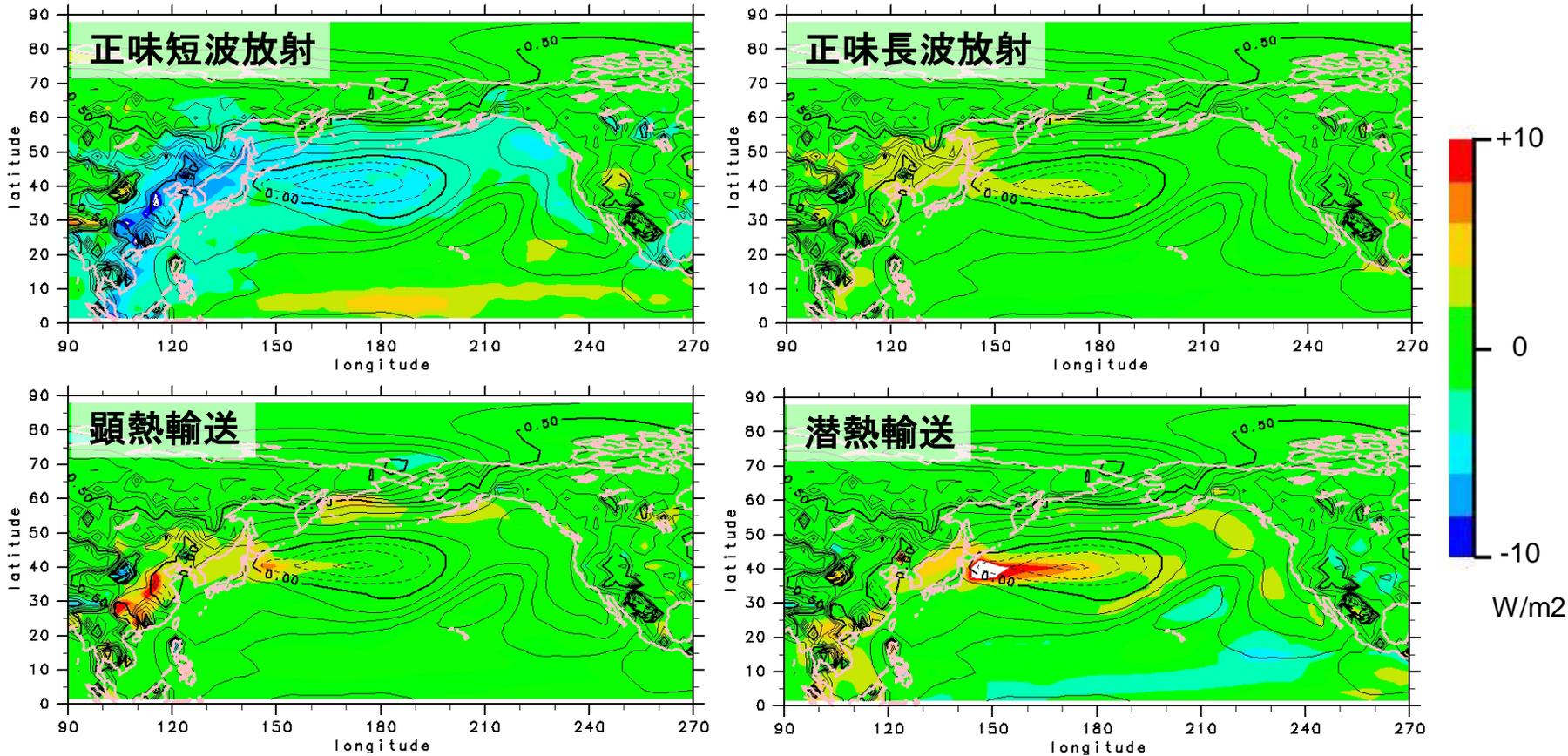


年平均地上気温の線形トレンド分布 (1951-2005年)



MIROC-ESMにおける20世紀後半の地上気温変化と地表面熱収支各項の変化との関係

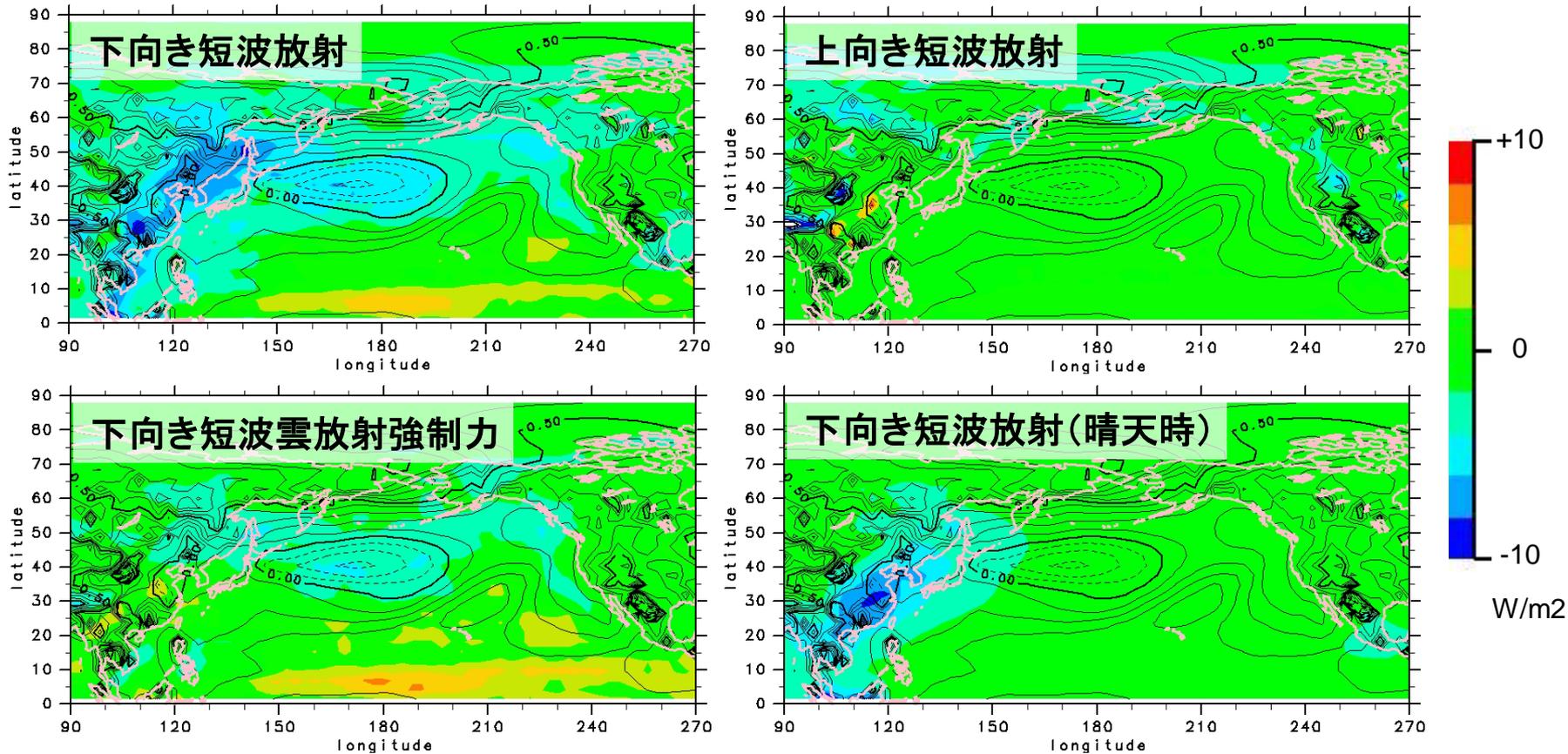
等値線: 地上気温変化(°C)、トーン: 地表面熱フラックス変化(W/m²)



20世紀後半の北太平洋の低温化には
正味短波放射の減少が関与

MIROC-ESMにおける20世紀後半の地上気温変化と地表面短波放射の変化との関係

等値線: 地上気温変化(°C)、トン: 短波放射フラックス変化(W/m²)

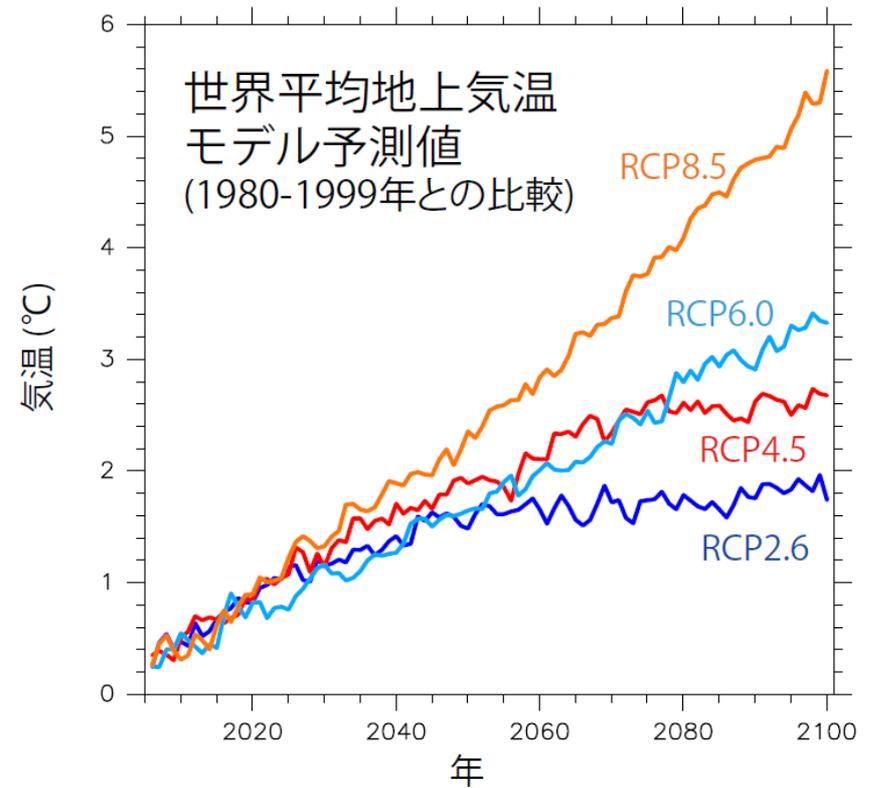
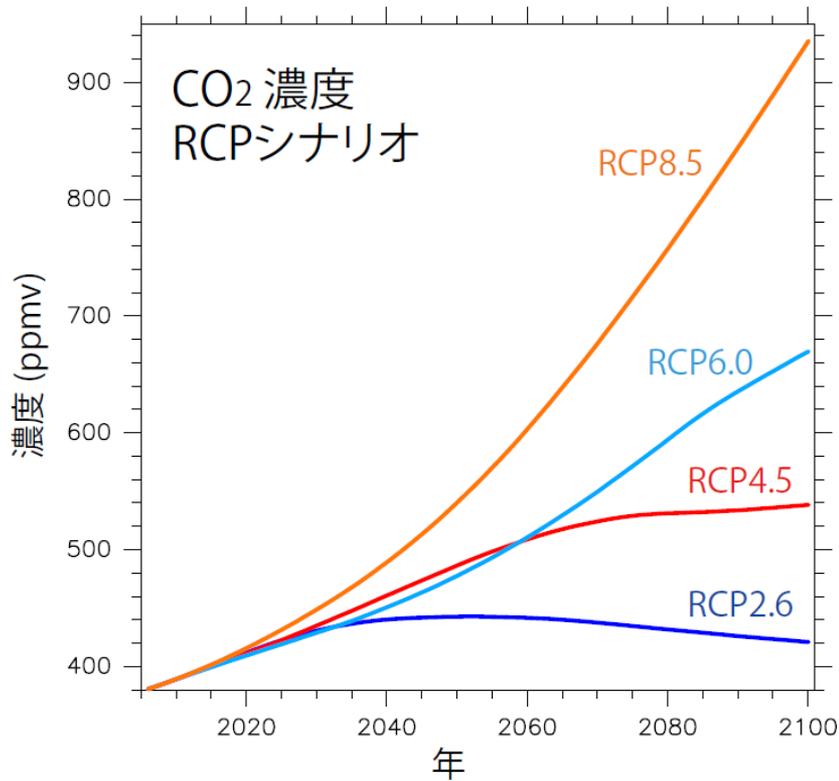


20世紀後半の北太平洋の低温化には
雲の変化に伴う下向き短波放射の減少が関与

RCPシナリオ実験

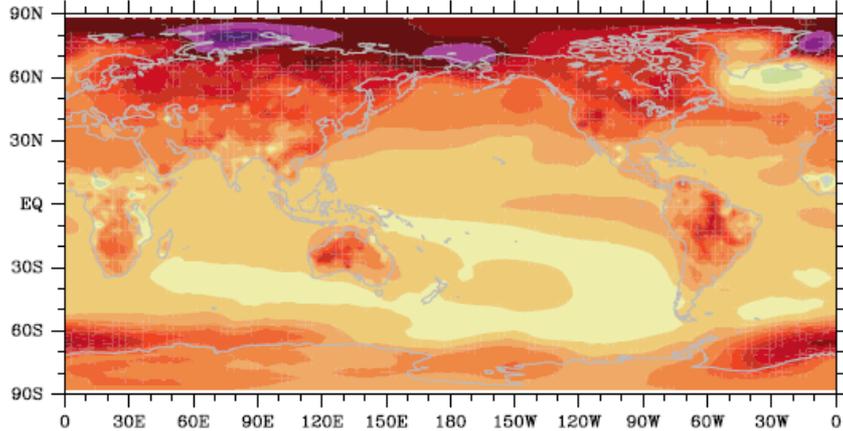
—2100年まで—

MIROC-ESMによる RCP濃度シナリオ実験と地上気温予測

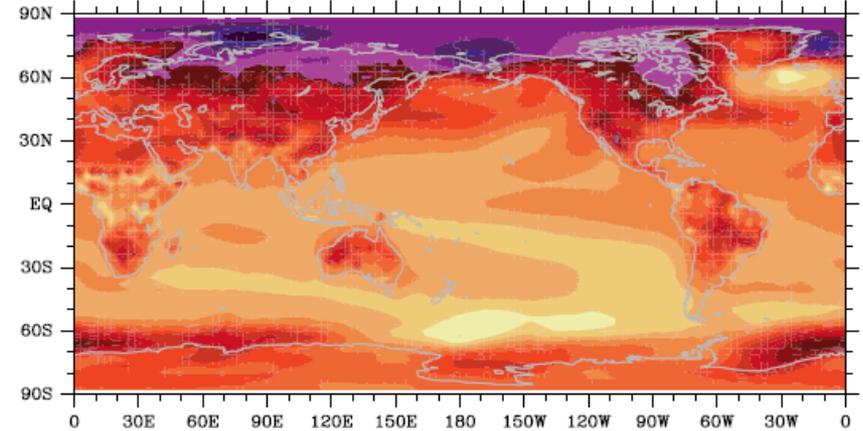


21世紀における地上気温上昇のモデル予測値 (2090年代と1980-1999年の差)

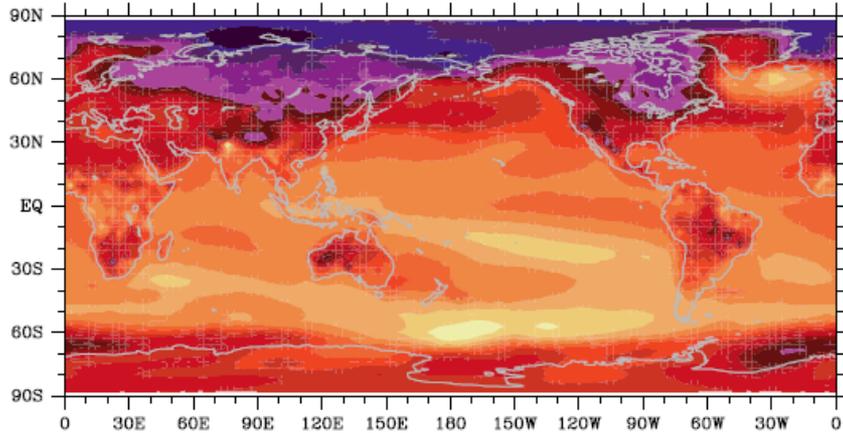
RCP2.6 シナリオ



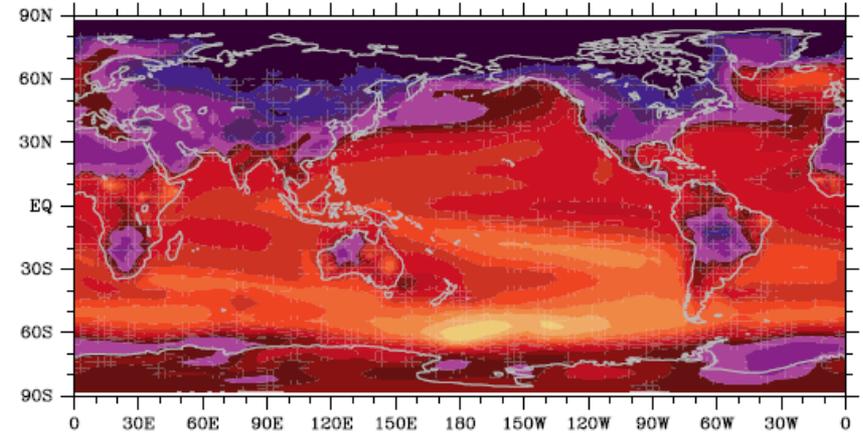
RCP4.5 シナリオ



RCP6.0 シナリオ

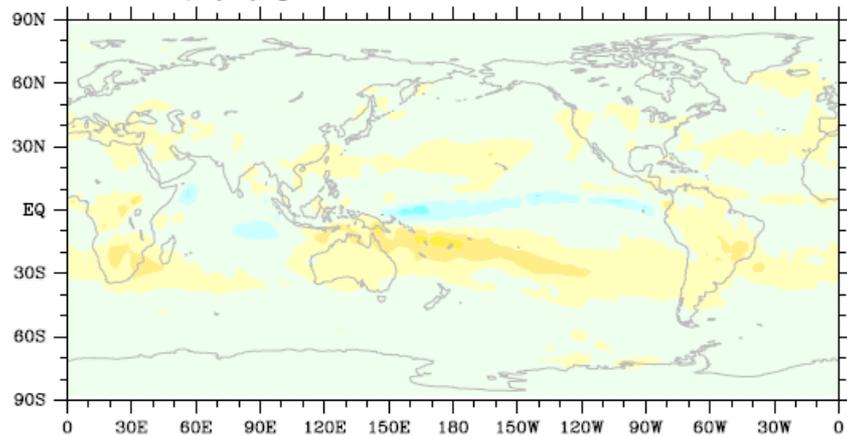


RCP8.5 シナリオ

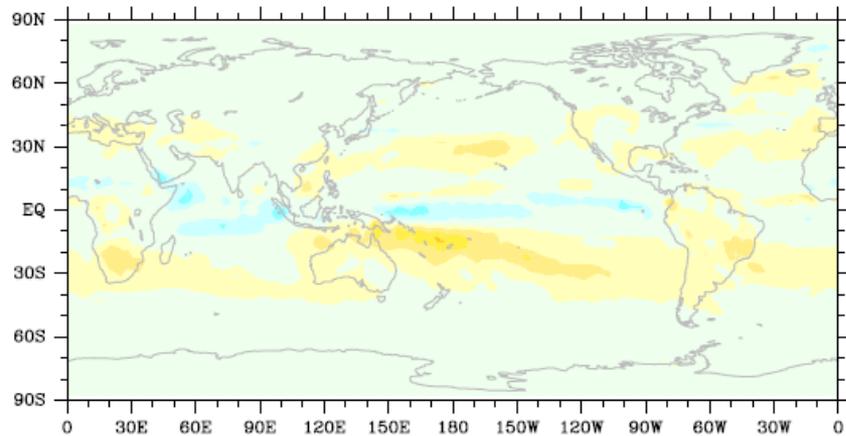


21世紀における降水量変化のモデル予測値 (2090年代と1980-1999年の差)

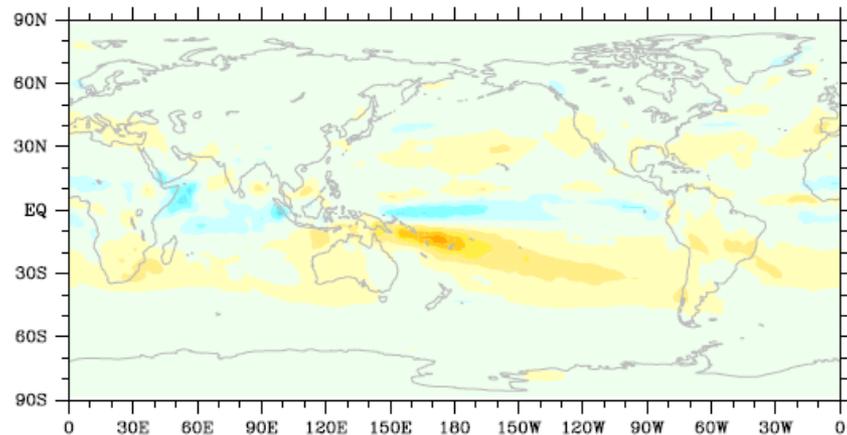
RCP2.6 シナリオ



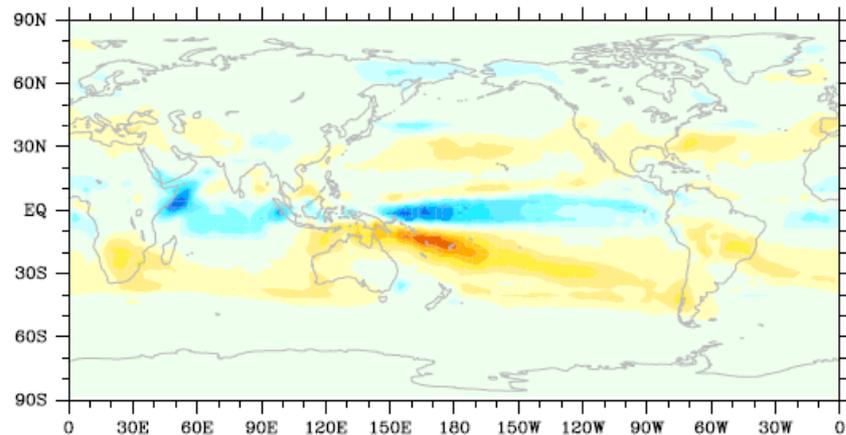
RCP4.5 シナリオ



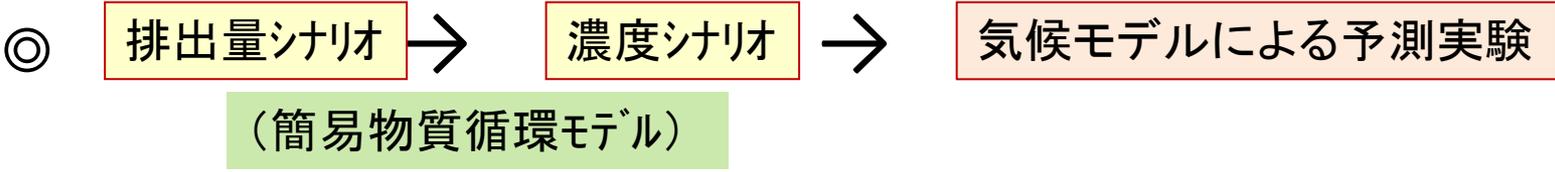
RCP6.0 シナリオ



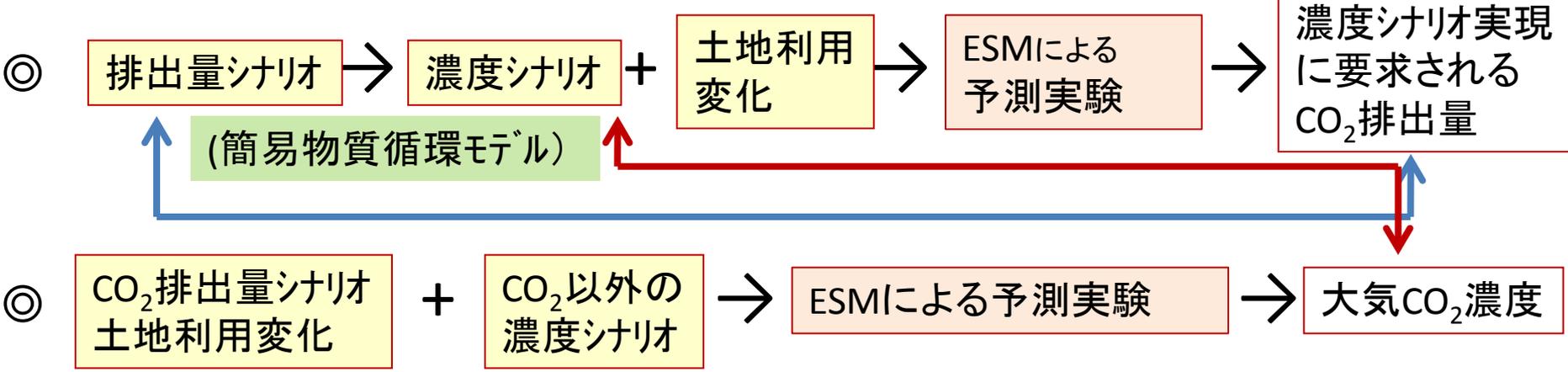
RCP8.5 シナリオ



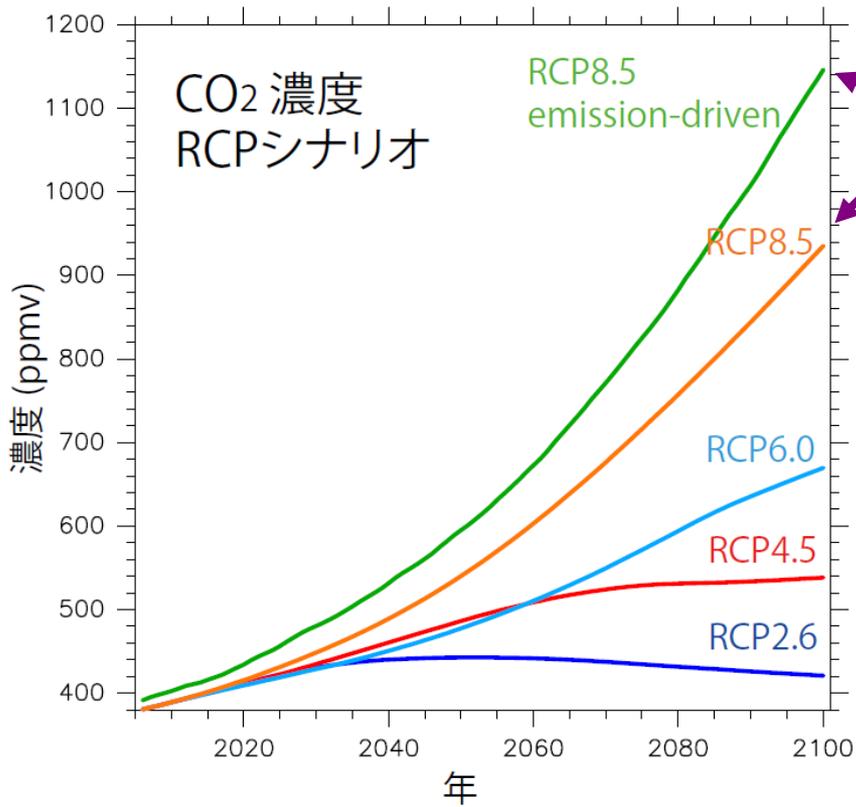
これまでのシナリオ実験



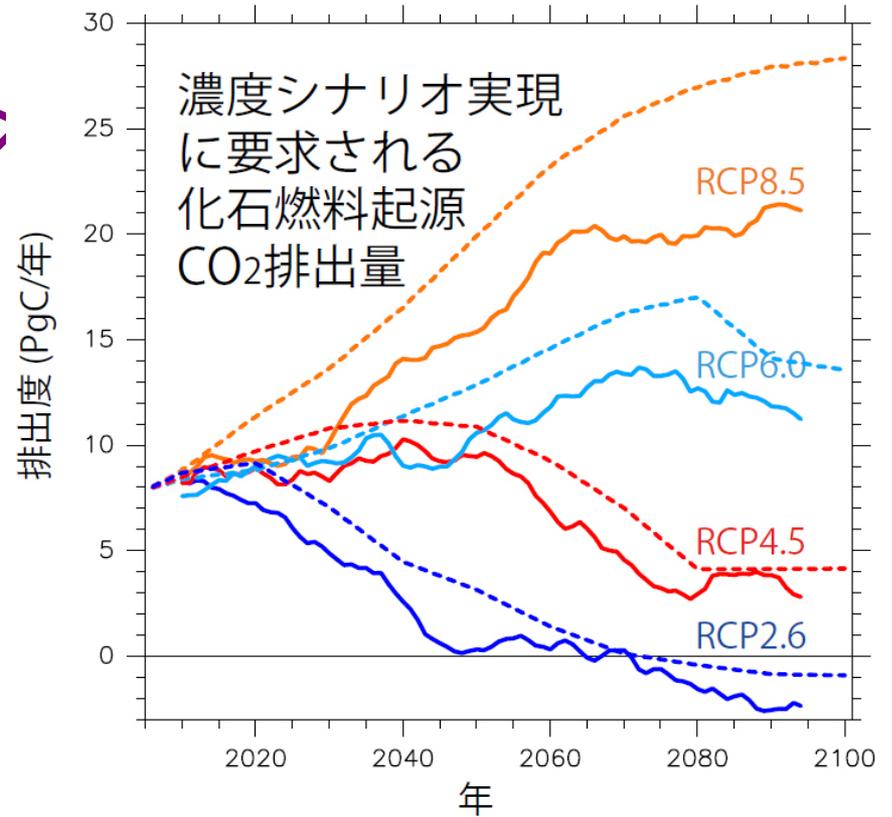
今回のシナリオ実験



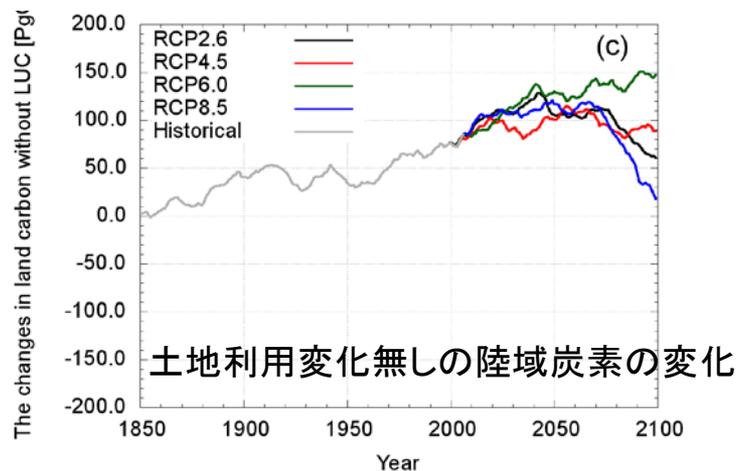
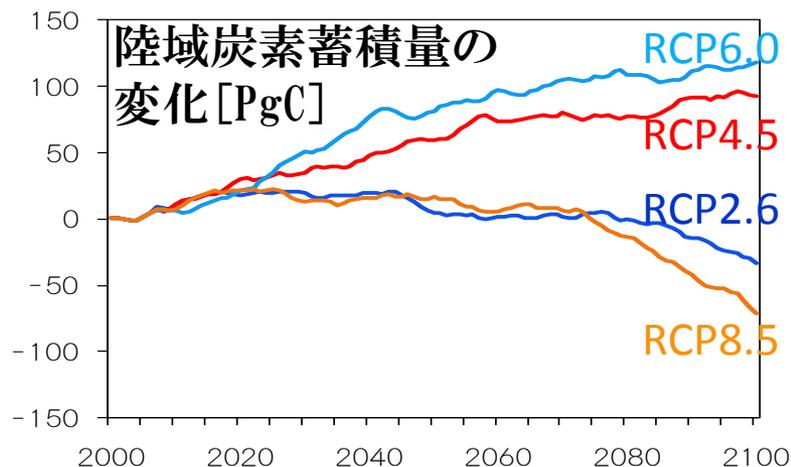
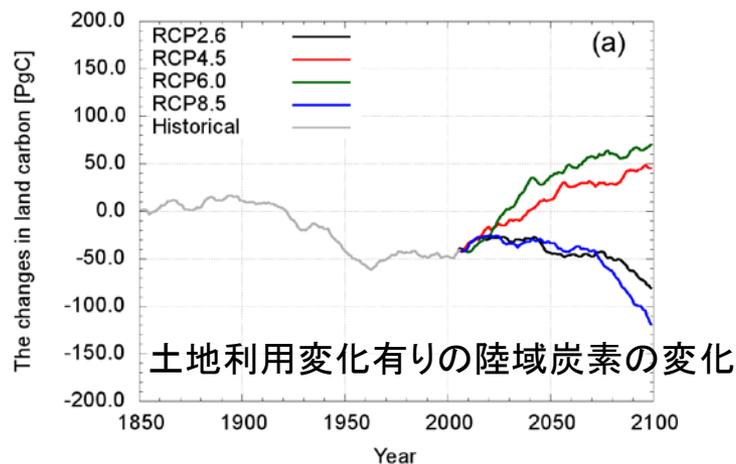
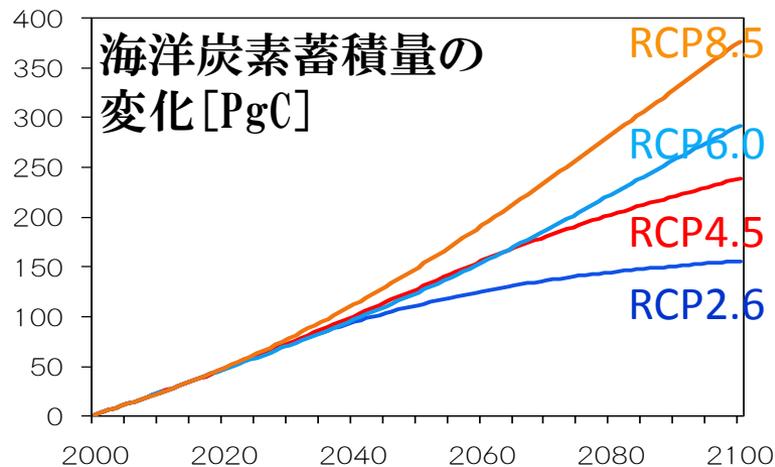
RCP8.5濃度シナリオのCO₂濃度と、同排出量シナリオに基づいてESMで計算したCO₂濃度の違い



RCP濃度シナリオの実現に要求される化石燃料起源CO₂排出量(実線)と、RCP排出量シナリオでのCO₂排出量(破線)の違い



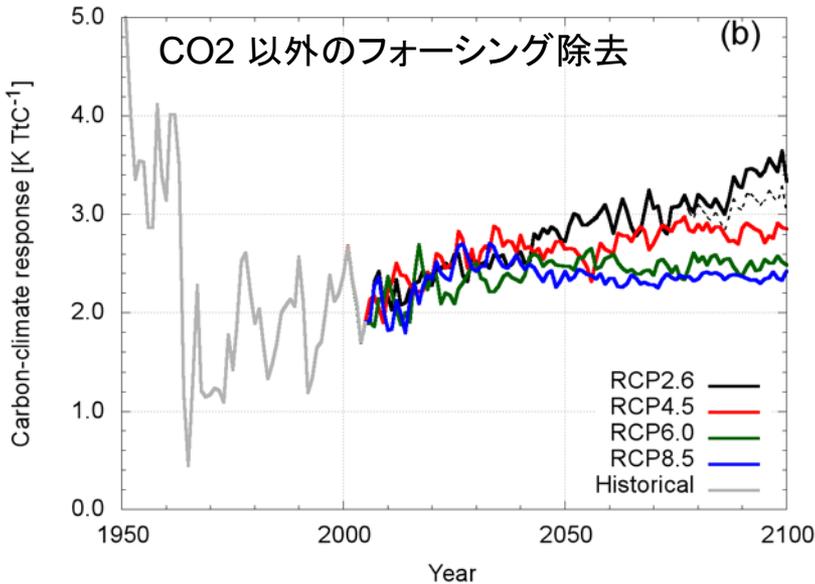
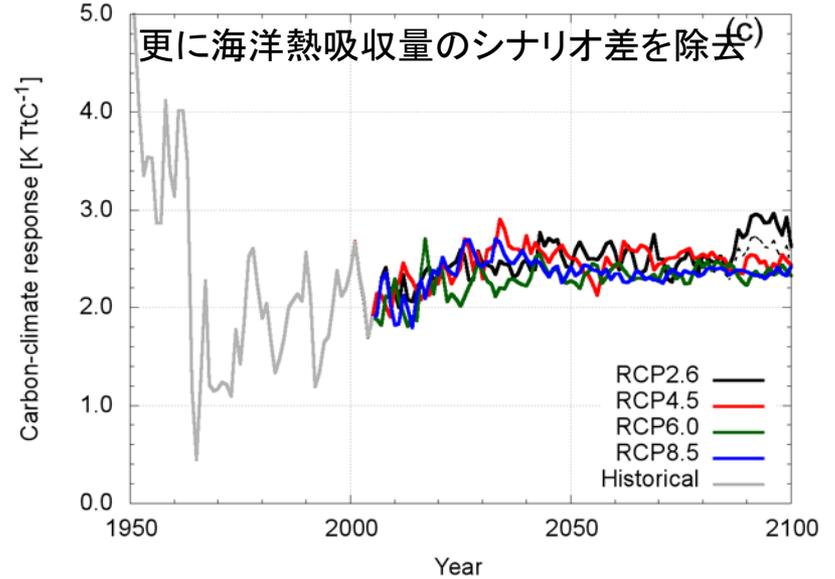
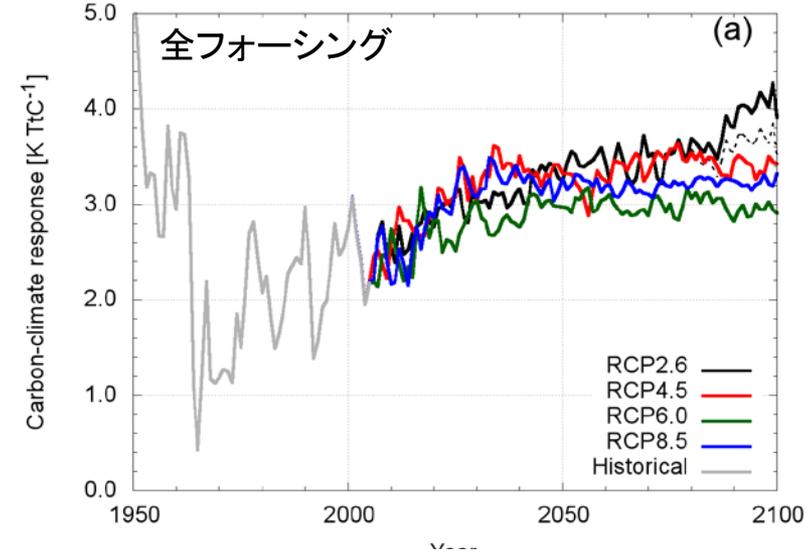
シナリオによる海・陸炭素蓄積量の違い



土地利用シナリオの違いは人為的CO₂排出量に匹敵する程度の影響を陸域炭素循環に及ぼす

シナリオの違いが気候システムに及ぼす違い

地球システムの感度 = $\frac{\text{気温変化}}{\text{累積炭素排出量}}$



人為的CO₂排出速度の違いが地球システムの感度の違いを生じさせており、それは海洋の熱吸収量(下向きフラックス)の違いによってもたらされている

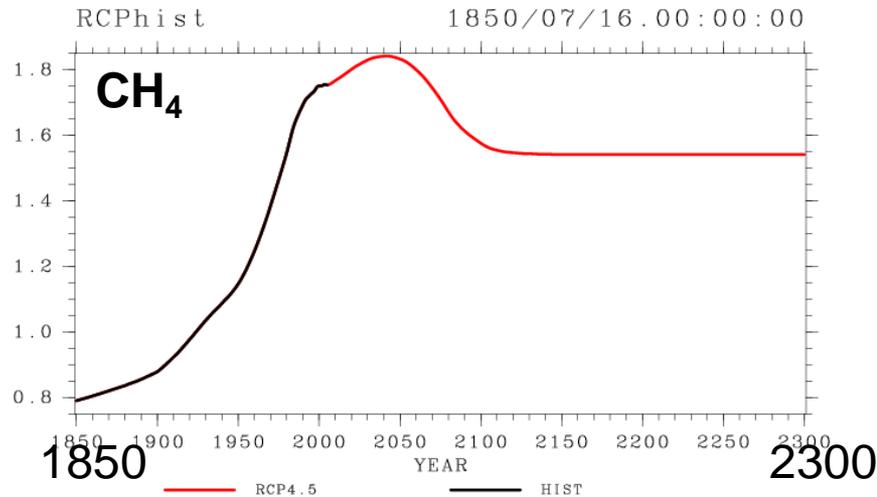
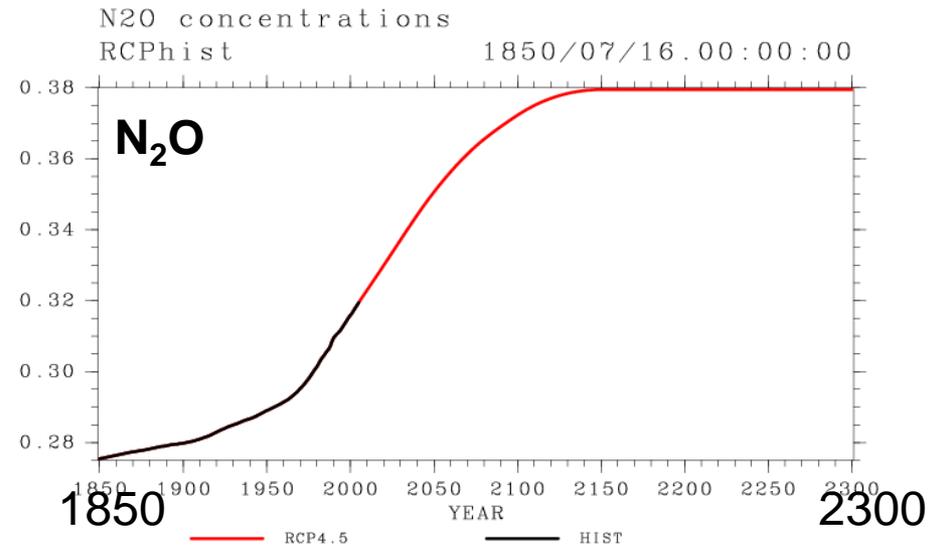
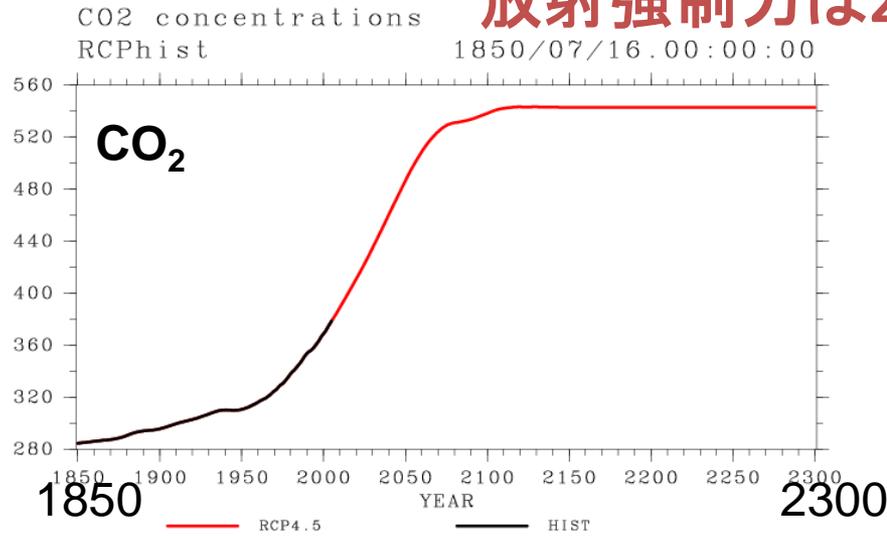
CO₂ 排出速度が遅いほど地球システムの感度は高い

RCP4.5シナリオ実験

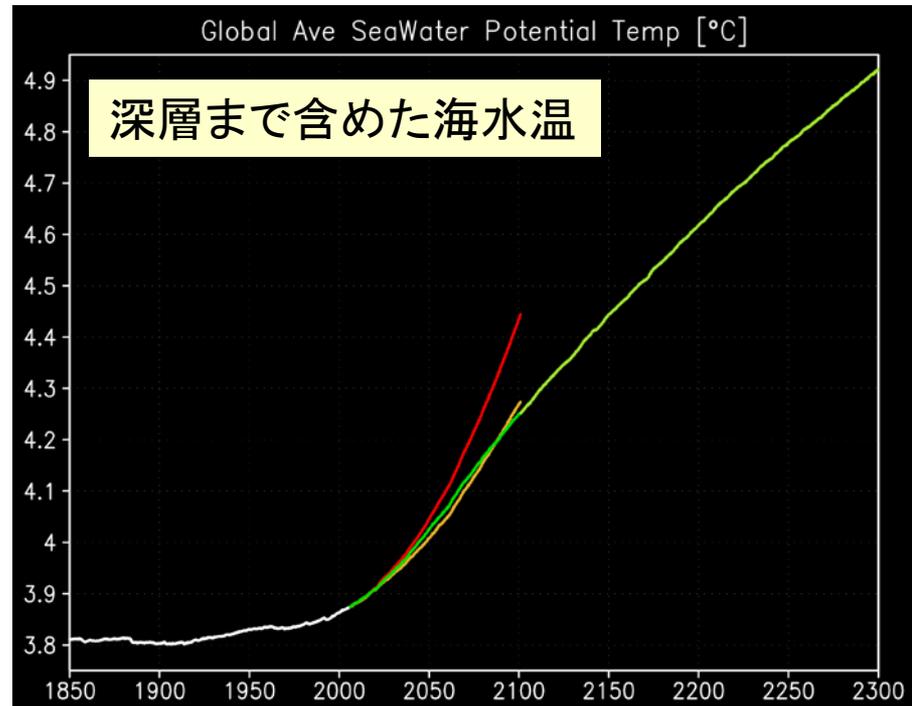
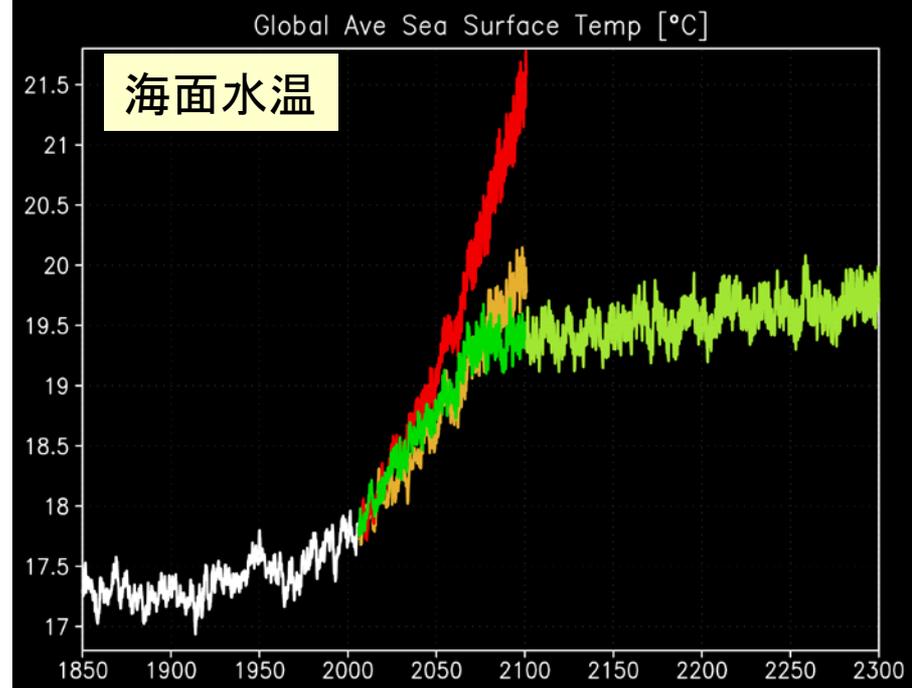
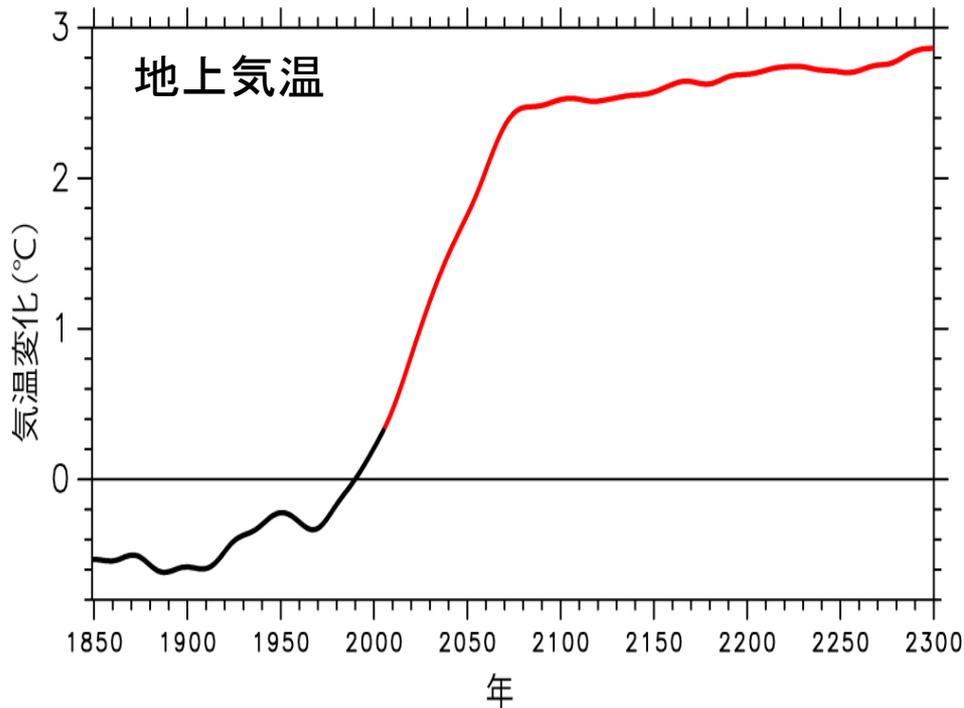
—2300年まで—

RCP4.5 濃度シナリオによる2300年までの予測

RCP4.5: CO₂, CH₄, N₂O濃度は2100年以後ほぼ一定
放射強制力は2070年以後ほぼ一定

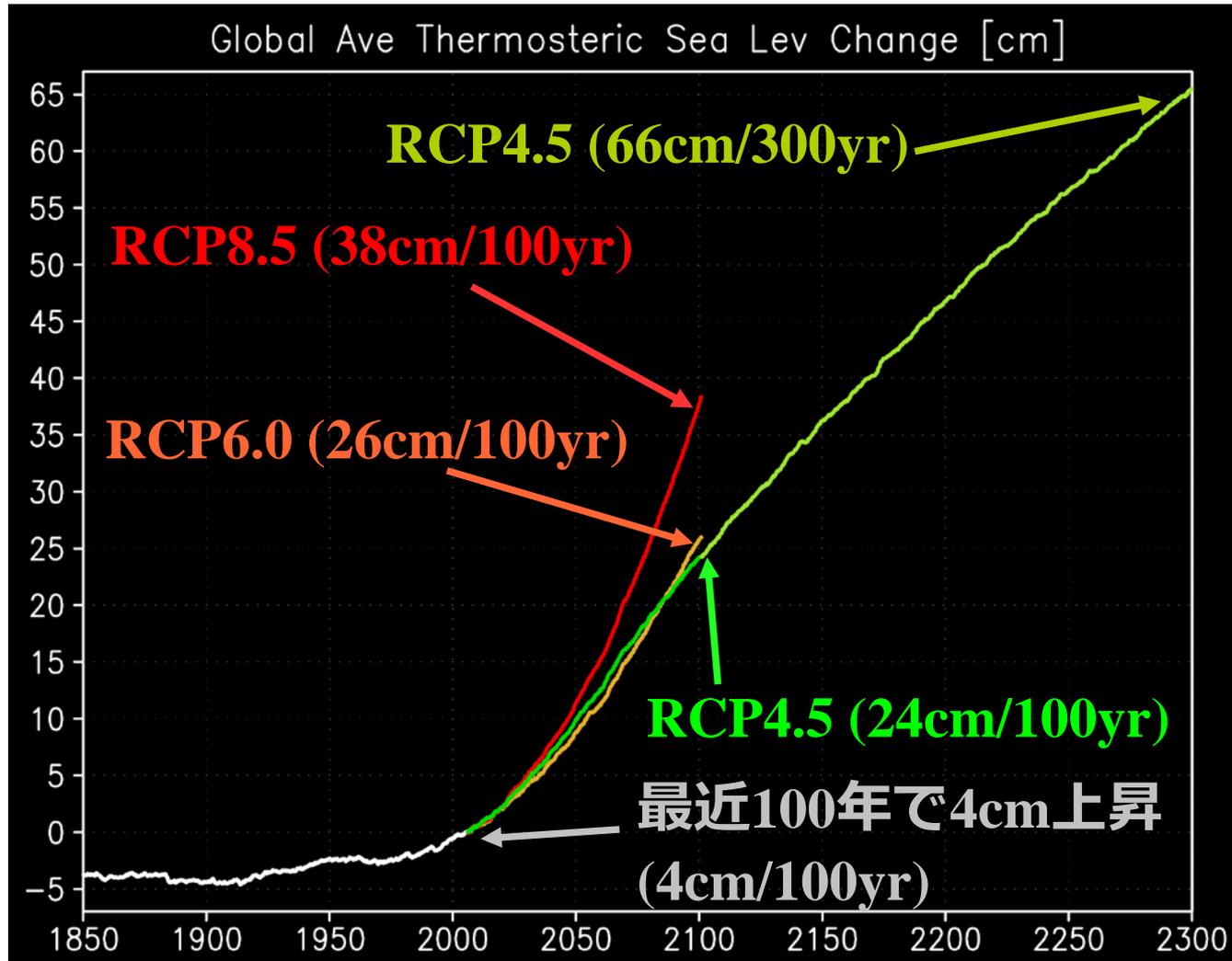


地上気温、海面水温、 深層まで含めた海水温 の全球平均変化予測 (RCP4.5)



海面水位変化

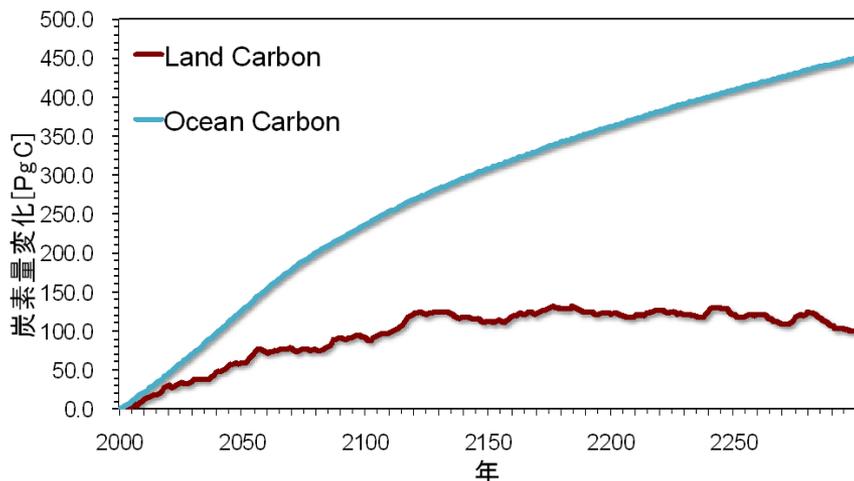
水位変化 = 海水熱膨張 (+山岳氷河融解 + 海流変化 + 氷床融解)



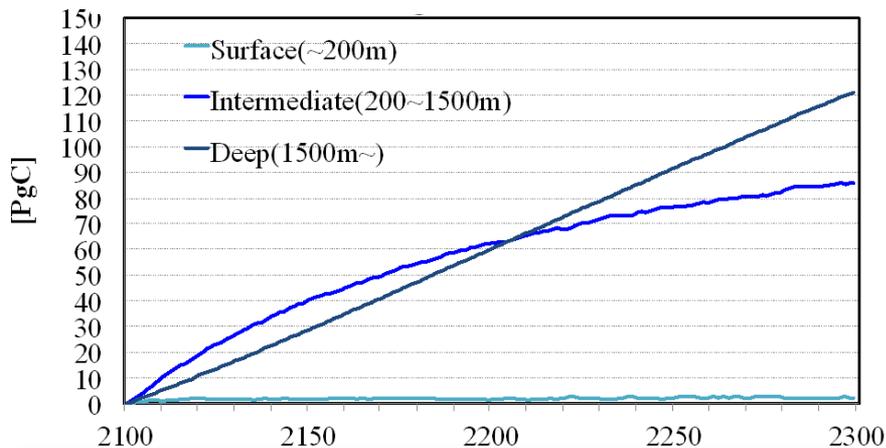
熱膨張の勢いは2100年以降も殆ど衰えない

RCP4.5実験における炭素循環の変化

陸域・海洋中の蓄積炭素量変化



海洋表層・中層・深層における蓄積量



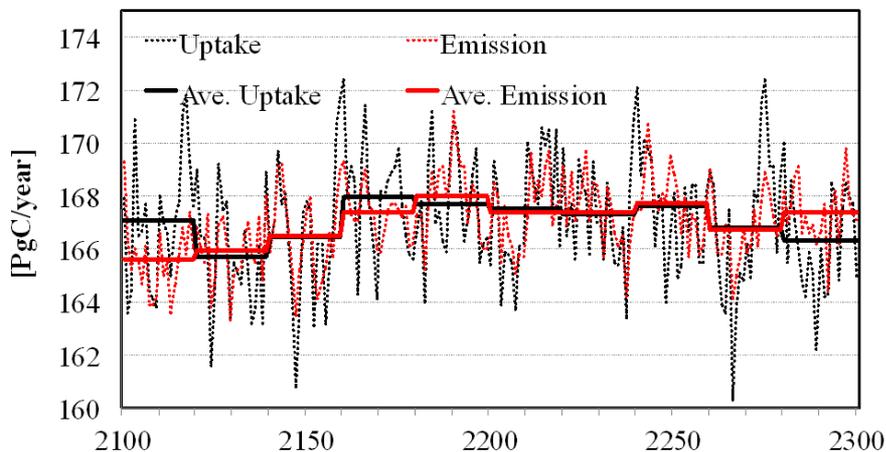
海洋炭素の変化

- ・ 表層(200m深まで)は2100年時点ですでに飽和
- ・ 200m以深では未飽和のため、大気から海へのCO₂フラックスが生じている

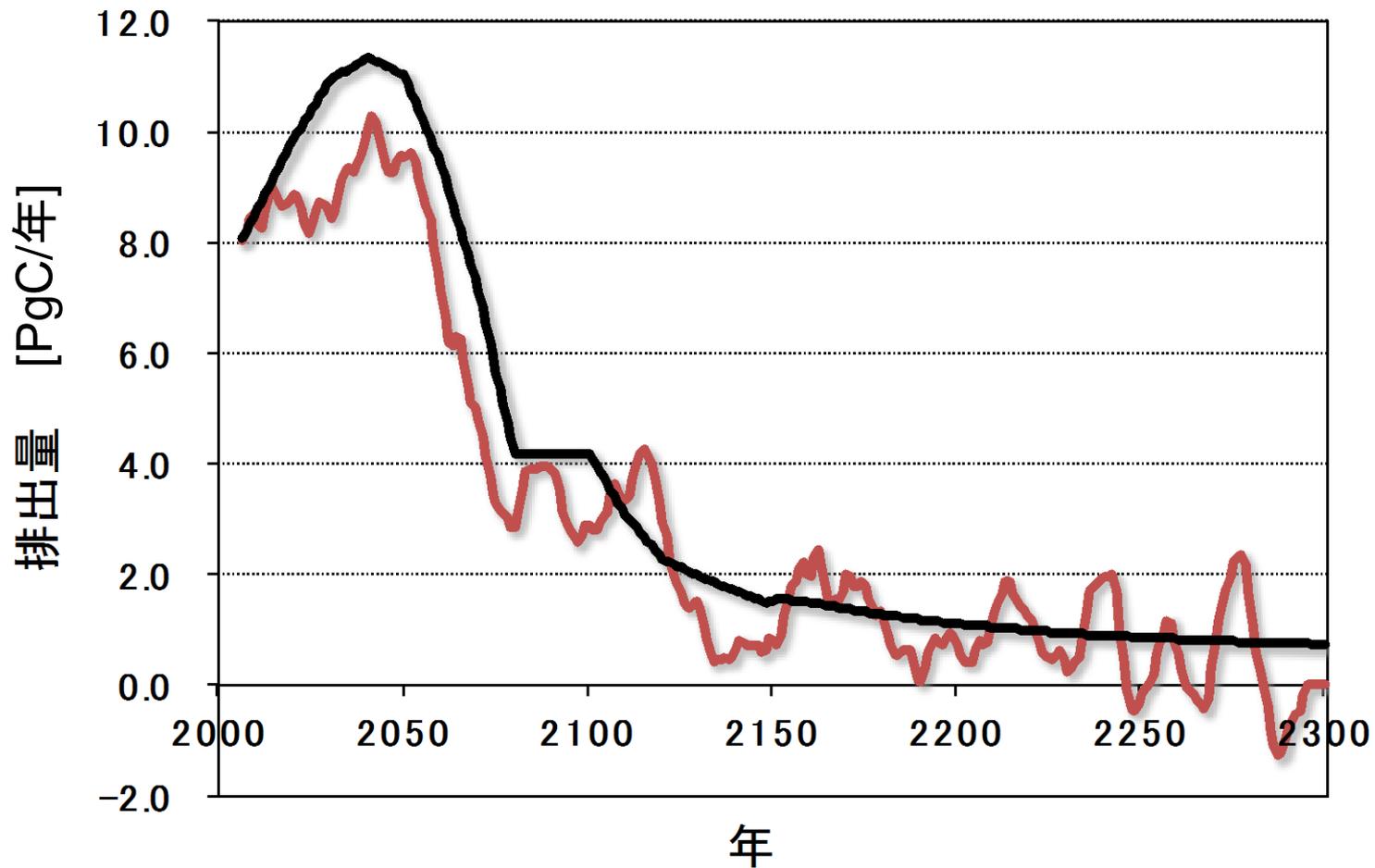
陸炭素の変化

- ・ 総下向きフラックス(総光合成速度；黒線)は2200年には飽和し、以後低下
- ・ 一方、Grossの上向きフラックス(生態系呼吸等；赤線)は序々に上昇し2300年頃には総光合成速度を上回る

Land carbon flux in RCP4.5 (2100-2300)



→陸域では、大気CO₂濃度が安定化する一方、気温上昇に伴う呼吸速度が増加する効果も加わり陸域の炭素蓄積が停止し、放出となる



RCP4.5濃度シナリオを実現させるために要求される化石燃料起源の炭素排出量

黒線：Emissionシナリオの値

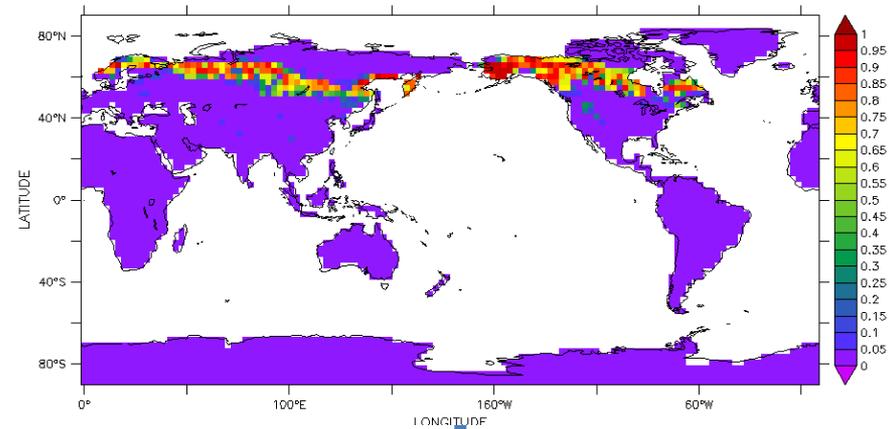
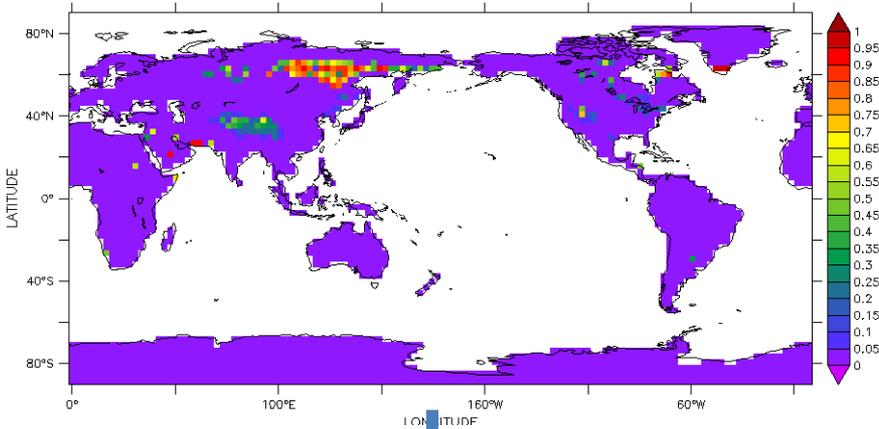
赤線：MIROC-ESM逆推定計算による許容排出量
(10年移動平均)

RCP4.5実験における北方樹林の変化予測

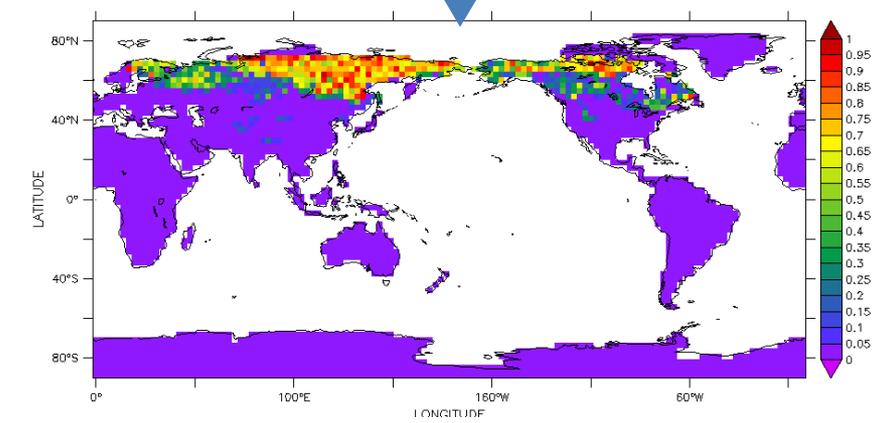
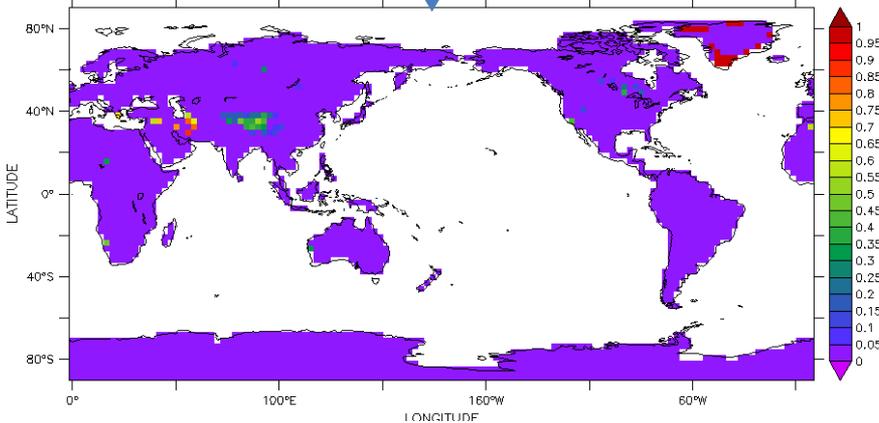
北方落葉樹林
カラマツなど

北方常緑樹林
モミ、トウヒ、マツ、ツガなど

2007



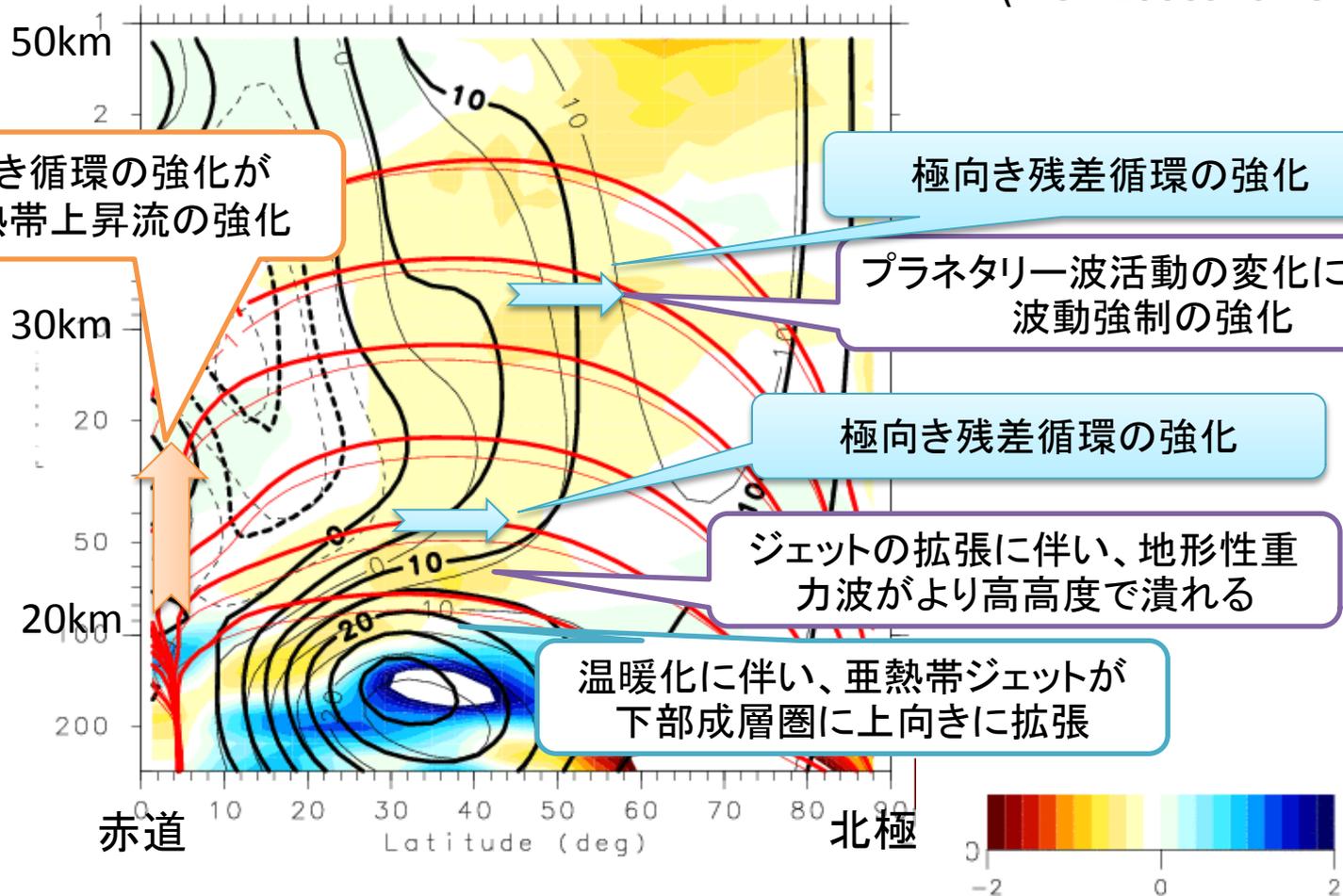
2300



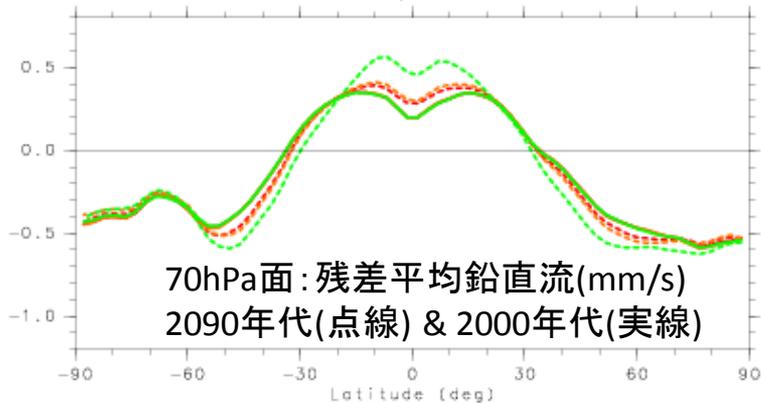
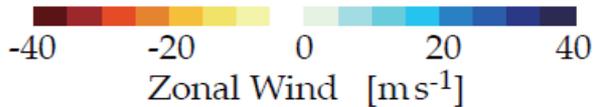
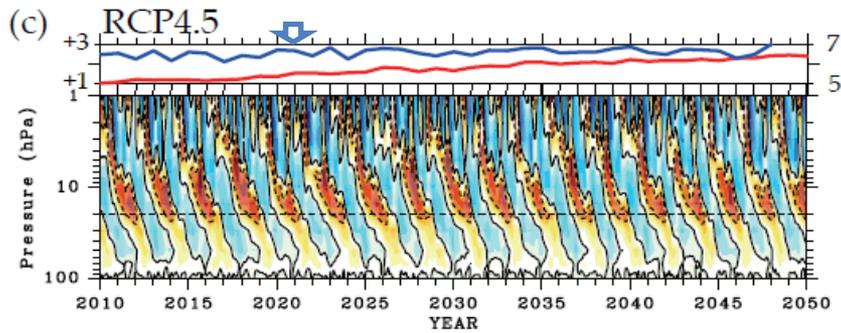
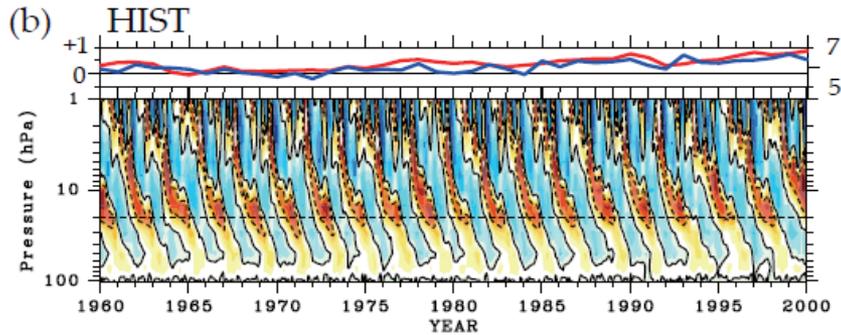
MIROC-ESMによる成層圏循環、QBO、
オゾン量、地上紫外線量変化予測

温暖化に伴う 東西風と波動強制の 変化を通じた 成層圏残差循環の強化

(HIST-2000s vs RCP8.5-2090s)



QBOの変化予測

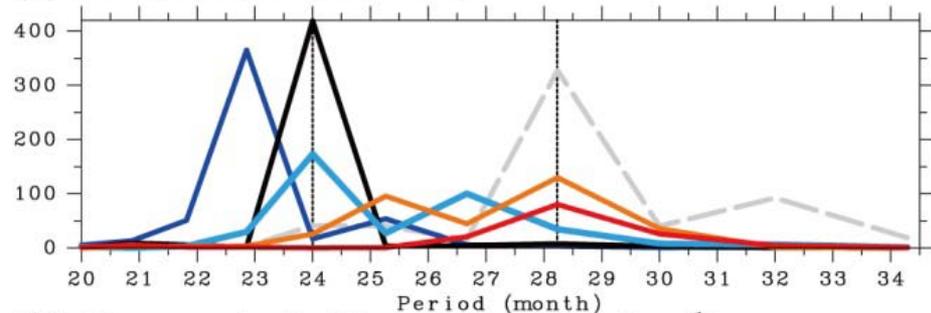


#QBOはCO₂濃度が高いほど周期が長くなり、振幅は小さくなる傾向。

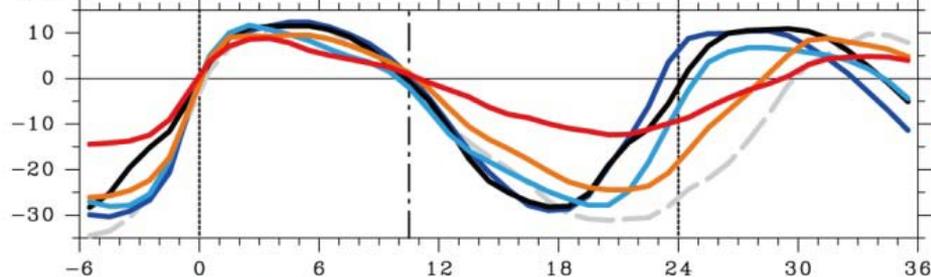
#強化された成層圏子午面循環の上昇流によって東風の強化が阻害されるとともに東風が長期化する。

#ただし、モデル中では、温暖化が進んだとしても(4xCO₂)、観測されるよりも長周期のQBOは現れない。(振幅は小さくなる。)

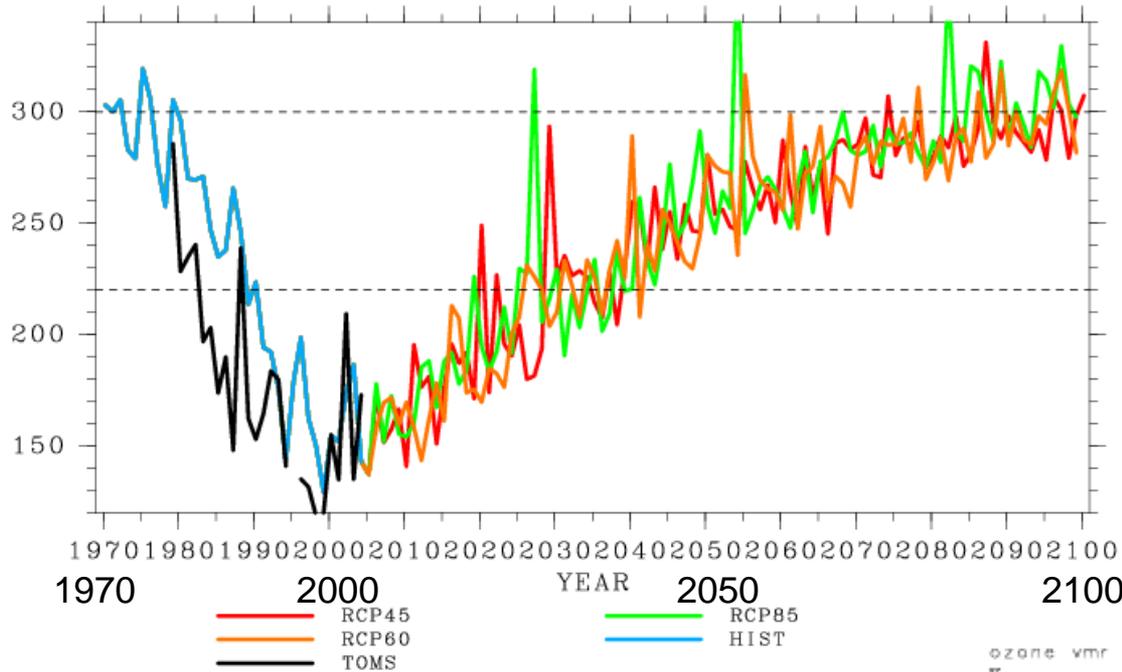
(a) PWR(U) at 20 hPa [m²s⁻²]



(b) U composite for W onset at 20 hPa [ms⁻¹]



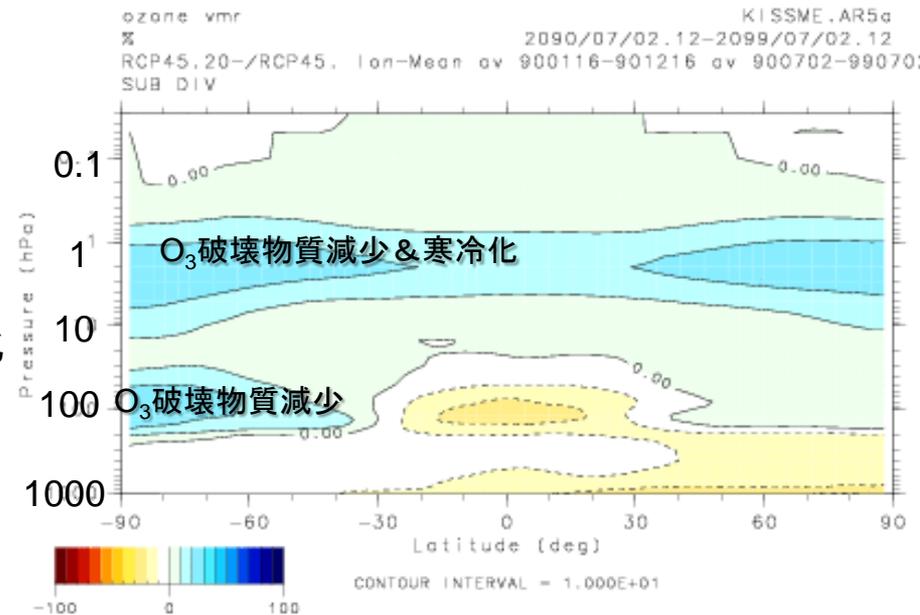
オゾン量変化予測



南極10月における
オゾン全量(ドブソン単位)

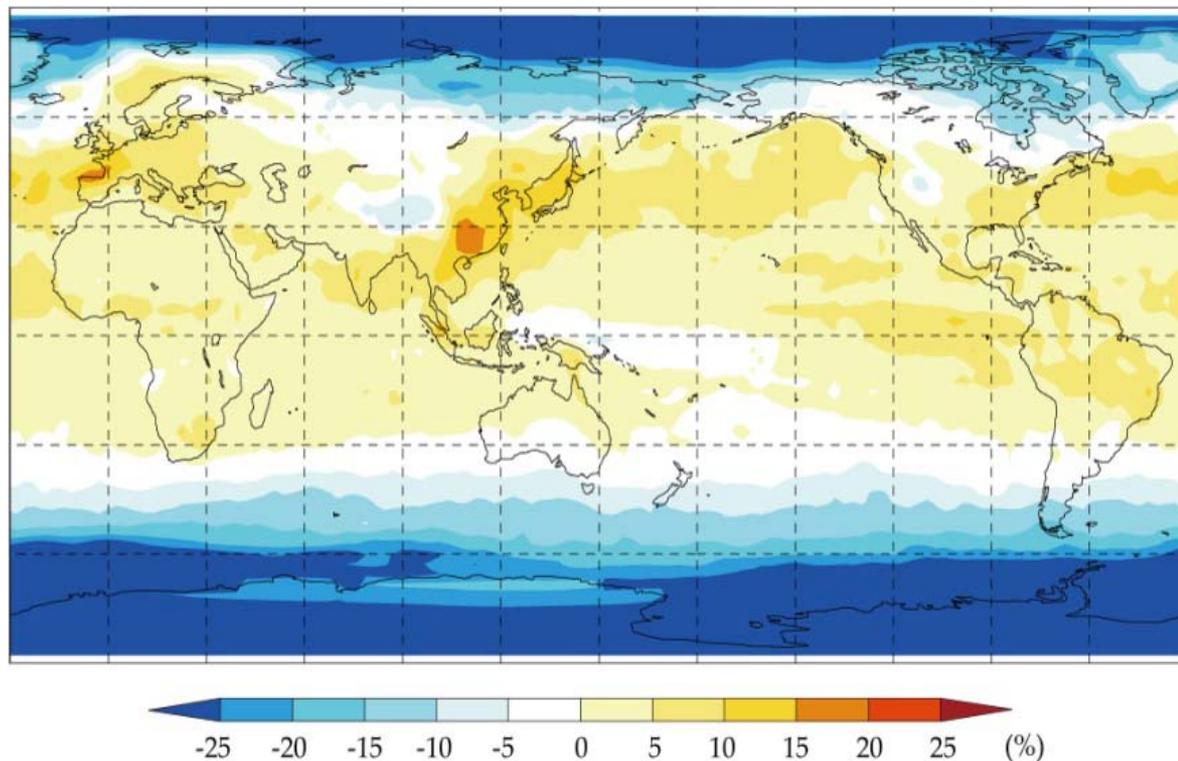
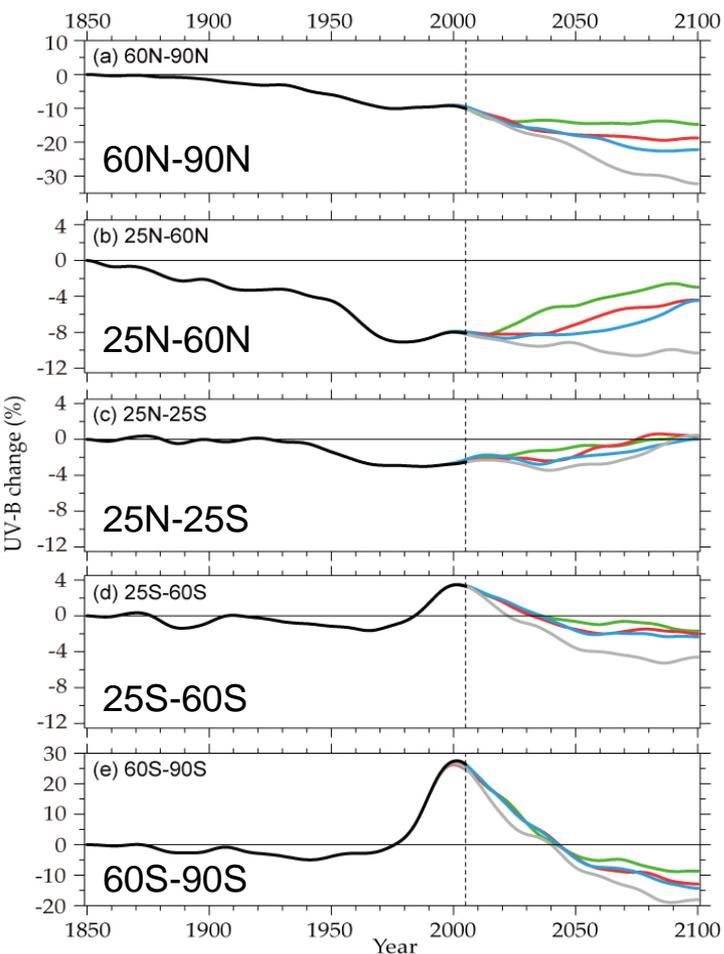
シナリオによる違いは少ない

RCP4.5:
オゾン年平均混合比変化
(2090s-2000s)



地上紫外線量変化予測

各緯度帯における時間変化



今世紀末 (2090~2099年平均) の今世紀初 (2000~2009年平均) に対する有害紫外線量増減の割合

南半球中・高緯度は主にオゾン層回復のため、北欧を除く北極域は雪氷の減少と雲・エアロゾルの増加のため、それぞれ紫外線が減少する。

これに対し、5%以上の紫外線増加が予測された地域は、現在の工業地域や森林伐採地域の周辺とその風下に分布している。

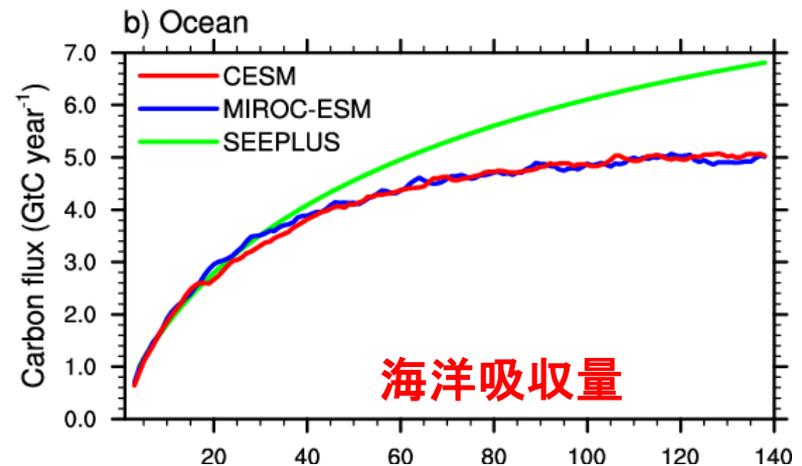
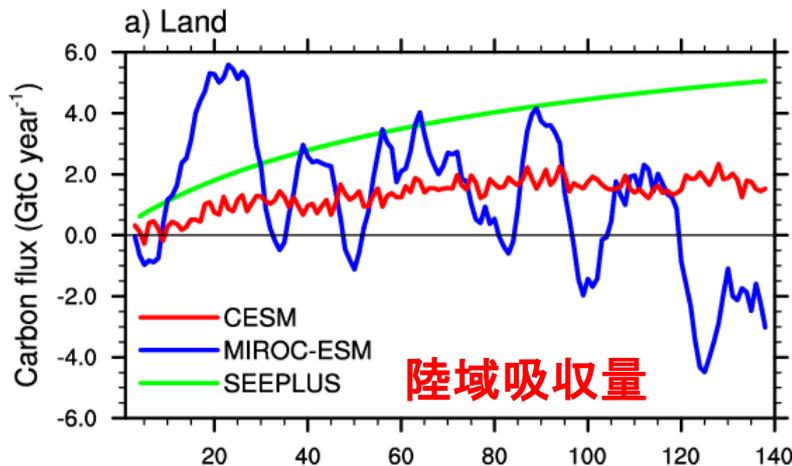
モデルアンサンブルによる地球システムモデルの不確実性定量化

財団法人 電力中央研究所

研究代表 仲敷憲和

- ① 複数のモデルと比較により、地球システムモデルの物理気候過程や炭素循環過程の特性と不確実性を明らかにする。
- ② NCARの地球システムモデルCESM1を用いて、ゼロ排出シナリオに基づく温暖化予測実験を実施する。

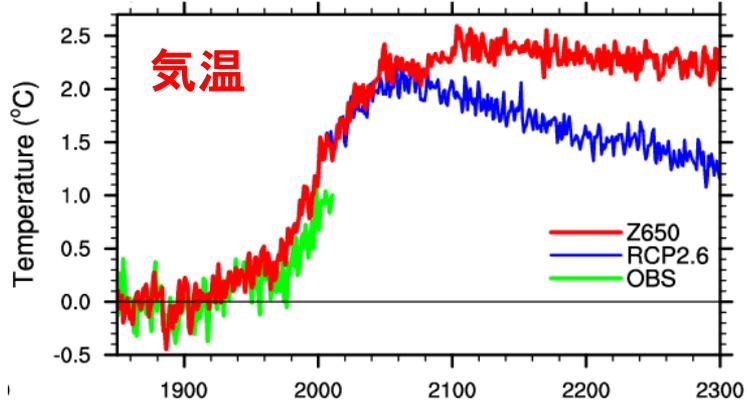
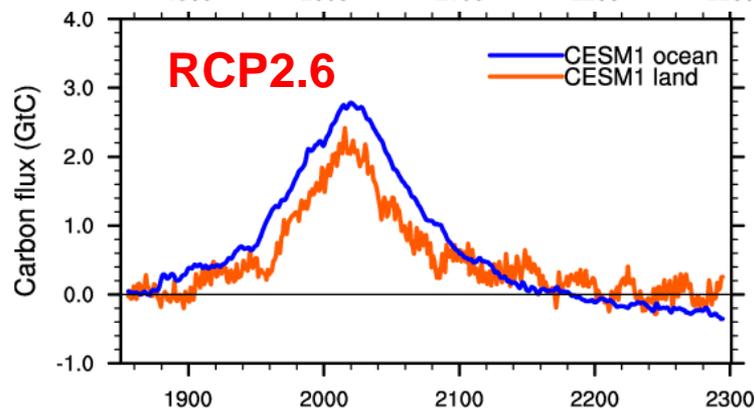
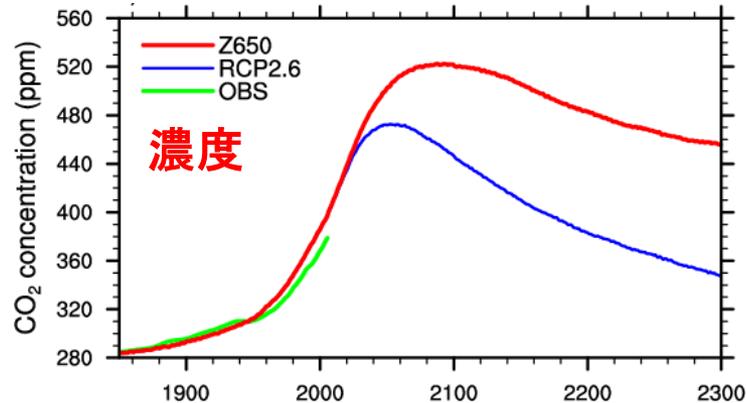
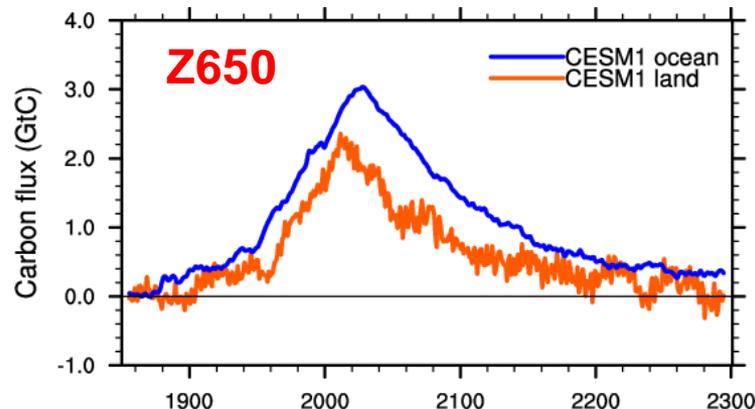
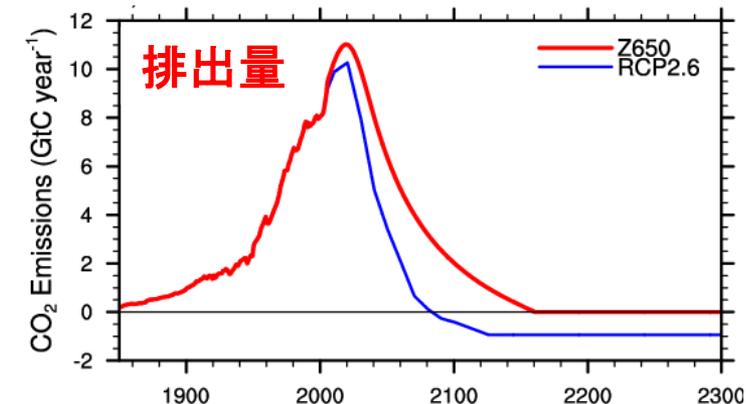
① CESM1, MIROC-ESM, SEEPLUSの相互比較(1%漸増実験)



⇒ CESM1とMIROC-ESMの海洋吸収量はほぼ一致、陸域に顕著な差

② ゼロ排出シナリオZ650に基づく長期気候安定化予測

陸域・海洋の吸収量



Z650の予測結果:

- 21C後半から大気中濃度は低下
- 気温や海水面積等も長期的に回復傾向
- 陸域の炭素収支は均衡、海洋は吸収を持続

⇒ Z650による長期安定化は成立し得る

モデル相互比較による温暖化予測 不確実性の評価研究

計画の概要

- 目標
 - 地球システムモデルを主対象とした日本標準カップラー(Jcup)の作成・実用化・公開
- スケジュール
 - 初年度はデザインフェーズ
 - 2年度:大気海洋結合
 - 3年度:大気エアロゾル結合
 - 4年度:インターフェースの改良、マルチコンポーネントカップリング
 - 今年度:カップラー完成(格子形状の一般化、結合方法の一般化)

今年度の進捗

- 格子形状の一般化
- 結合方法の一般化
- 結合試験

2007	2008	2009	2010	2011
Code Design	Implementation and evaluation Atmosphere/ocean land/river chemistry aerosol			Sum up

全体の成果

- 今年度の改良を経て、当初の設計を満たすカップラーが**完成した**
→Webにて公開

格子形状の一般化

昨年度までの格子情報の与え方

水平2次元分割を前提として、
I方向、J方向の始点と終点をJcupに与える

Call jcup_def_grid(is, ie, js, je) →

今年度の改良

各プロセッサの格子番号を
1次元配列で与える

Call jcup_def_grid(grid_index_array)

構造格子だけでなく準構造格子(NICAMなど)や非構造格子のモデルも結合可能に

結合方法の一般化

昨年度までの結合方法

各要素モデルは、一つの実行モジュール中で
全てのプロセッサを使用

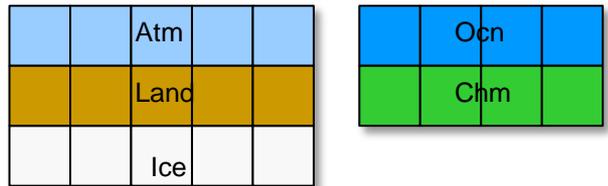


図1 改良前の結合方法
各要素モデルは実行モジュール中の全プロセッサを使用

今年度の改良

一つの実行モジュール中で、要素モデルを自由に組み合わせ可能



図2 改良後の結合方法
各要素モデルは自由にプロセッサを割り当てられる

結合試験

• 簡易モデルでの結合テスト

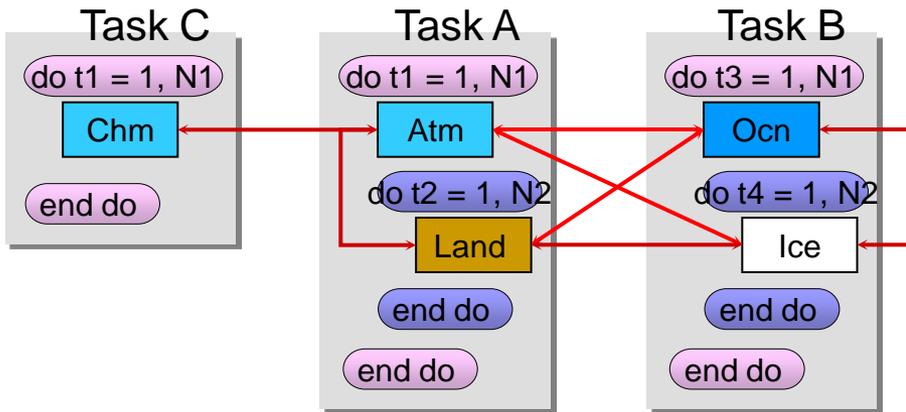


図3 結合テストに用いたモデルの組み合わせ
A, B, Cの3つのタスクで、AtmとLand、OcnとIce、Chmの5要素モデルが実行され、各々矢印で示すデータ交換を行う

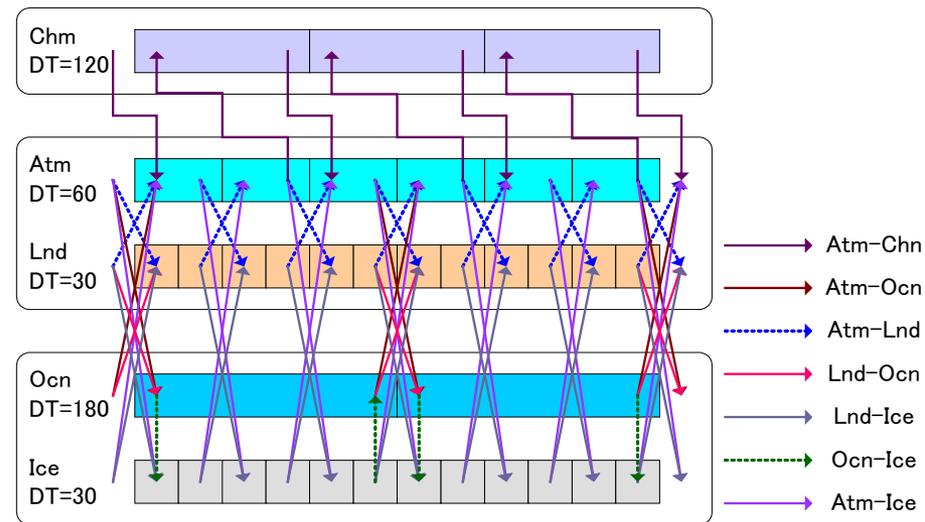


図4 結合テストでのデータ交換ダイヤグラム
図のような複雑なデータ交換も問題なく実行された

☆3タスク、5要素モデル間での複雑なデータ交換を実行

- MIROC5の大気とTripolar海洋モデルの結合試験を実施
☆1年間の長期積分も問題なく実行

Jcupの公開

- 完成したJcupをバージョン1.0としてWeb上で公開

成果-1

地球システム統合モデル(MIROC-ESM)の開発

・ 気候と炭素循環(生態系)との相互作用、及びエアロゾルを取り込む。オゾンホール、QBOを再現でき、中層大気変動を議論できる。

MIROC-ESMによる20世紀再現実験

・ 全球平均地上気温の過去150年間にわたる大局的変動の再現に成功。20世紀後半にみられる北部北太平洋域の降温傾向の再現に成功。(エアロゾルの間接効果などによる) 雲量の増加が主因。

MIROC-ESMによるRCPシナリオ実験

・ CO₂排出量強度により地球システムの感度が異なる。大きい(CO₂排出量が多い)と感度は低下。感度は海洋中・深層への熱輸送量により制御されている。

・ RCP2.6シナリオの実現には今世紀半ばから負のCO₂排出が求められる。

・ RCPシナリオにおいて、土地利用変化は人為的CO₂排出量に匹敵する程度の影響を陸域炭素循環に及ぼす。

(続く)

成果-2

- ・オゾン層の回復に関し、MIROC-ESMによる予測においても、これまで化学気候モデルにより推定されていた予測を裏書する結果を得た（今世紀半ば頃までにほぼ回復）。
- ・地上に到達する紫外線量変化に関し、成層圏オゾンの回復、人為的対流圏エアロゾルの減少などを総合した結果、北半球においては5%以上の紫外線増加が予測される地域は、現在の工業地域や森林伐採地域の周辺とその風下域で生ずることを予測。
- ・成層圏循環の温暖化時の変化を解析。熱帯で上昇して極に向かう循環が強化する結果、QBOは振幅が弱まると共に周期が長くなり、下部成層圏に下降しにくくなる。
- ・RCP4.5シナリオ（大気中のCO₂などの温室効果気体濃度は2100年以降ほぼ一定）による2300年までの予測実験より、2100年から2300年間の間に全球平均地上気温（海面水温）は約0.4℃上昇、海水温上昇による全球平均海面水位に関しては約42cm増加、という予測結果を得た。
- ・陸域生態系に関し、2300年頃までに、特に変動の顕著なシベリア域においては北方落葉樹林は衰退し、北方常緑樹林が広がることを予測。
- ・その他、海洋酸性化、炭素循環の年々変動、オゾンホール回復の大気・海洋循環および海洋生態系への影響などの解析。

成果-3

地球システムモデルの不確実性の評価

・ MIROC-ESM、CESM1、SEEPLUSの相互比較を実施。前2者の比較から、陸域炭素循環に差異が見られ、この部分が予測の不確実性を生み出す一要因となっていることを確認。

MIROC-ESM、CESM1、SEEPLUSによるゼロ排出シナリオ実験

・ Z650シナリオに基づくモデル実験を実施。2100年以降、長期的な気候回復傾向（大気中CO₂濃度 \approx -30ppm/100年、全球平均気温 \approx -0.1度/100年）を確認。但し、南大洋における昇温持続には注意を要する。

ESMなどの標準化に向けたカプラーの開発他

・ 格子形状及び結合方法を一般化したJcupを完成させ、webで公開。
・ Jcupを用いてMIROCの大気-海洋モデル結合および大気-エアロゾルモデル結合を実施。海洋モデルは従来型のモデルに加えTri-polar格子モデルも結合した。