

テーマB: 安定化目標値設定に 資する気候変動予測

海洋研究開発機構

気候変動リスク情報創生PT

河宮未知生

テーマB研究体制

テーマB「安定化目標値設定に資する気候変動予測」領域代表者：河宮未知生

主管機関：海洋研究開発機構

i-b 課題代表者
(社会経済シナリオ検討)
筒井純一

参画機関：
電力中央研究所

i-a 課題代表者
(地球システムモデルの開発)
渡辺真吾

参画者
松本健一

参画機関：
滋賀県立大学

i-b 課題代表者
(社会経済シナリオ検討)
立入郁

参画者
小倉知夫

参画機関：
国立環境研

ii-a 課題代表者
(ティッピングエレメント, 不可逆性)
河宮未知生

参画者
木本昌秀

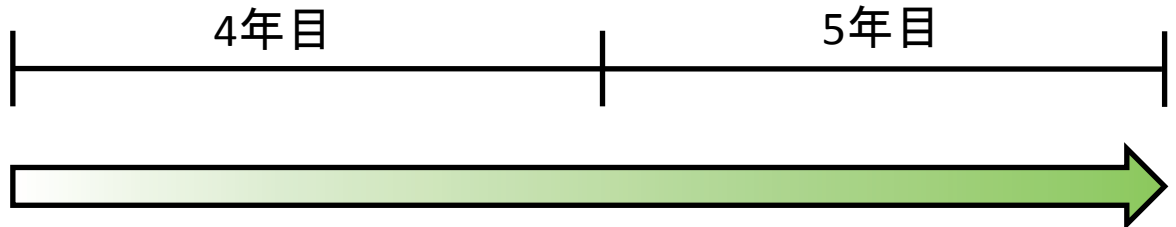
参画機関：
東大AORI

ii-b 課題代表者
(ジオエンジニアリング)
河宮未知生

3年目, 5年目の目標



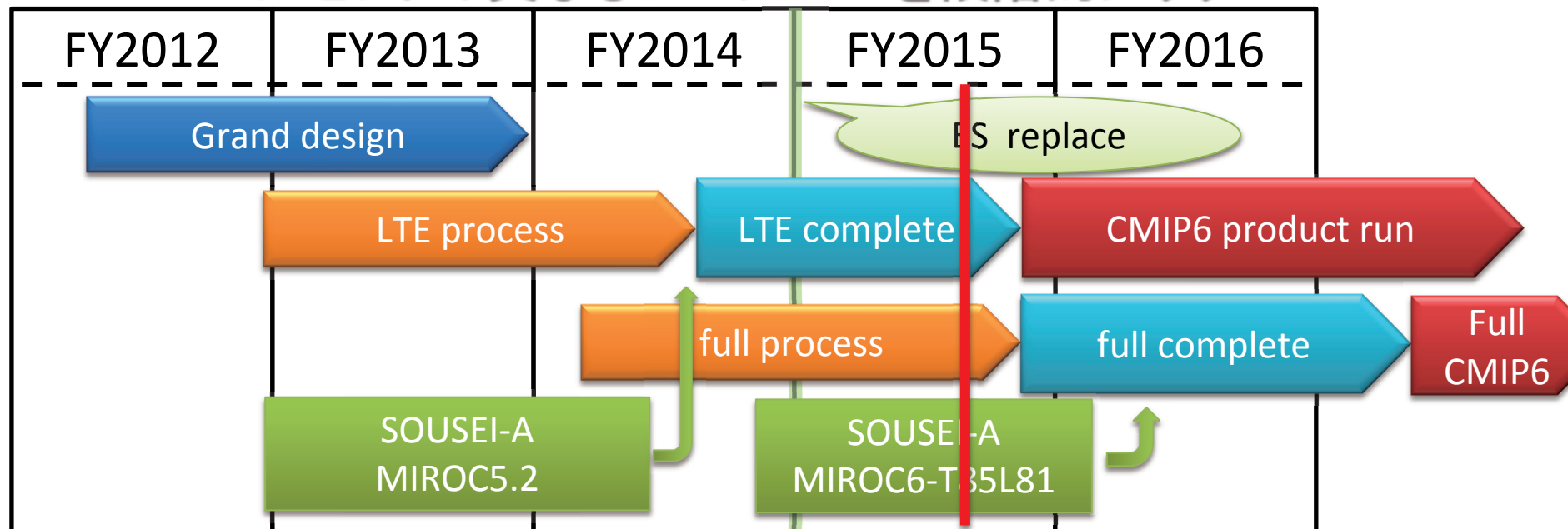
- 新・地球システム統合モデルの全体設計
- ティッピングエレメント, ジオエンジニアリングを念頭に置いた要素モデルの開発
- 気候安定化シナリオ暫定版開発



- 新・地球システム統合モデルリリース
- NonCO₂-GHGs も含めた気候安定化シナリオの開発
- ティッピングエレメント, ジオエンジニアリングESM実験

新ESM開発タイムライン (最新版)

コンセプトの異なる2つのESMを段階的にリリース



- LTE (MIROC-ESM2 @ CMIP6)
 - 炭素＋窒素循環を含む、数千年規模の長期変動(Long Term Evolution)を対象とし得る「高速」ESM
 - 2013-2014年度 要素モデル開発(物理モデル開発@創生A)
 - 2015年度前半 組み上げて調整開始
 - 2015年度後半 調整見切り? Fullの開発を射程に。



SOUSEI

Program for Risk Information
on Climate Change

気候変動リスク情報創生プログラム

今年度目標概要

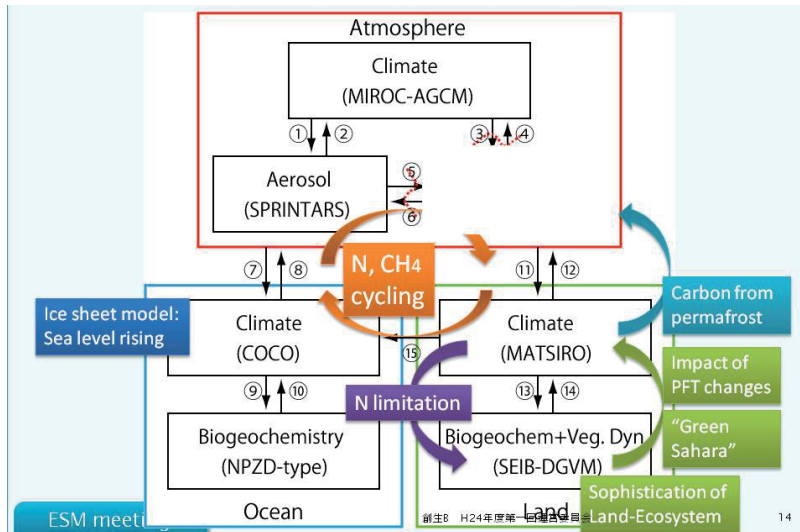
- モデル開発：個々に整備を進めてきた要素モデルを結合した新しい地球システムモデルの原型（プロトタイプ）を用いた予備実験を実施する。
- シナリオ開発：
 - CO₂以外の温室効果ガスやエアロゾルを含む気候安定化シナリオの作成とその社会経済シナリオとの対応検討を行う。
 - ゼロ排出に向けたCO₂排出削減パスを多面的に分析する。解析に際し社会経済分野の知見を取り入れるため、当該分野の専門家との交流を推進する。
- ティッピングエレメント：氷床・棚氷モデルの改良を継続する。
- ジオエンジニアリング：成層圏へのエアロゾル散布に関し詳細な過程を組み込んだモデルによる実験を行う。

課題(i) 多様なシナリオを踏まえた 長期的な地球環境変動の予測

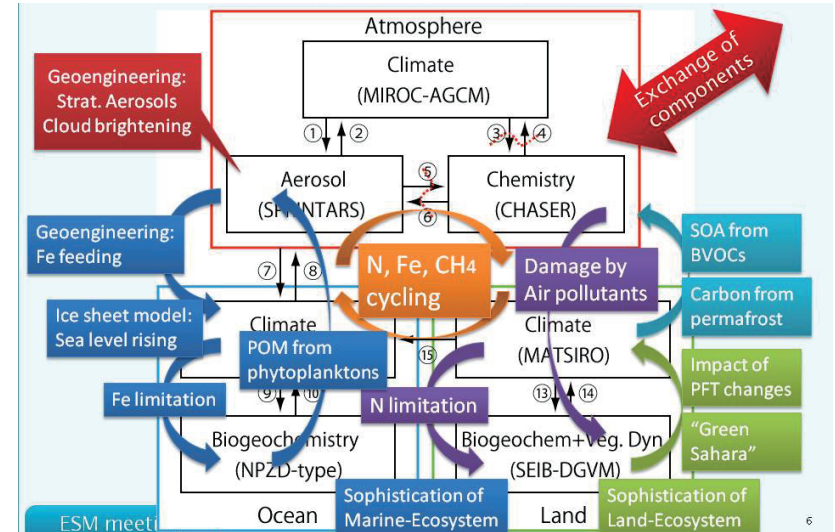
- サブ課題a: 温室効果気体濃度変動や土地利用変化等を取り扱う地球システムモデルの開発
 - プロトタイプ・モデルのチューニング、予備実験
 - 要素モデル高度化、新モデルへの結合作業

ESM-LTE / ESM-full

MIROC-ESM-LTE



MIROC-ESM-FULL

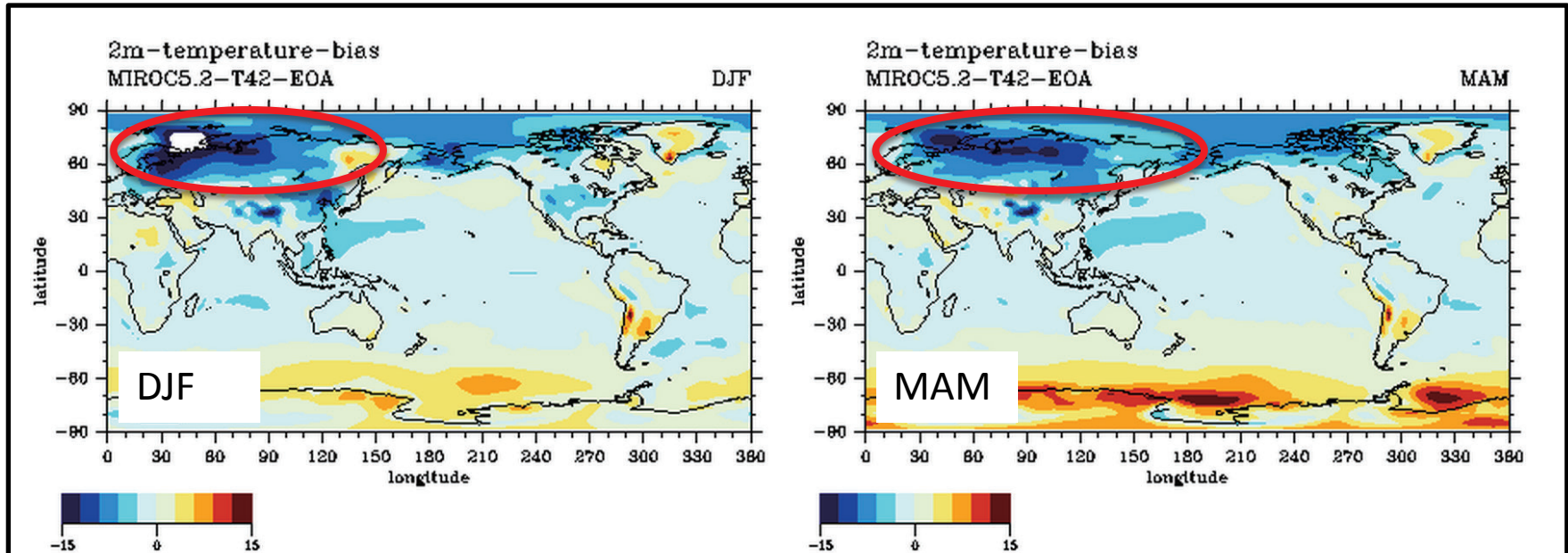


- 「Long-Term-Evolution」→ 約 25 [年/日]
- 中程度の解像度 (T42L40)
- MIROC5.2
- 大気化学過程 無し
- 陸面2モザイク、陸生態系5モザイク予定
- 新ESMの根幹＝窒素循環を含む

- 「全部盛り」
- 高解像度 (T85L81)
- MIROC6.0
- 大気化学過程 有り
- 陸域生態系プロセスの高度化
(例 DGVM機能の導入, BVOC放出の反映, 対流圏オゾンの影響 etc)
- 陸面6モザイク、陸生態系Xモザイク予定

陸域：雪-LAI フィードバック改善

生態系モデルのLAIをフィードバックさせると、雪が溶けず、葉が開きにくいのでこれを改善。



- MIROC5.2での北半球高緯度域での低温バイアス
- 生態系モデル結合
 - 低温バイアスにより葉が開かない
 - 融雪が進まない・高アルベド維持
 - 低温バイアス強化
 - "ダスト沈着に対するアルベド低下・融雪促進"その他調整を実施

陸域: 雪-LAI フィードバック改善

生態系モデルのLAIをフィードバックさせると、雪が溶けず、葉が開きにくいのでこれを改善。

Winter

Spring

Summer

期待する状態

Snow

Leaf

Snow

Leaf

Snow

Leaf

・融雪と展葉は互いに依存

MIROC5.2: LAIはフォーシングデータ

Snow

Leaf

Snow

Leaf

Snow

Leaf

・北半球の高緯度で寒冷バイアス

・積雪被覆率がやや過大評価傾向

・フォーシングで与えられているLAIによってなんとか融雪が進んでいた可能性

ESM (MIROCESM-LTE): LAIは生態系モデルによる予報

Snow

Snow

Leaf

Snow

Leaf

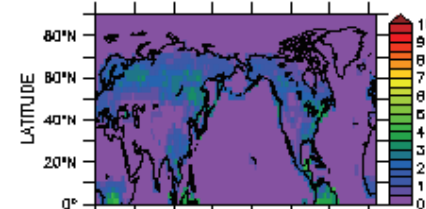
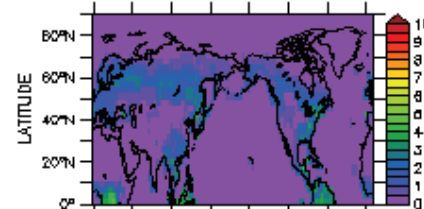
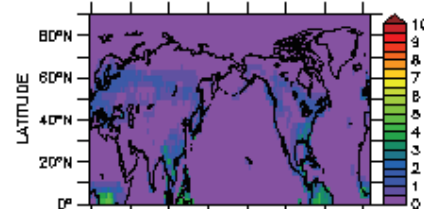
・ESMでは気温に依存して展葉開始が決まる

・融雪が自律的に進まないと、いつまでたっても葉を展開できない

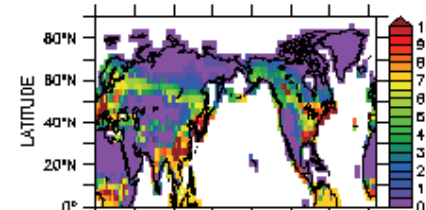
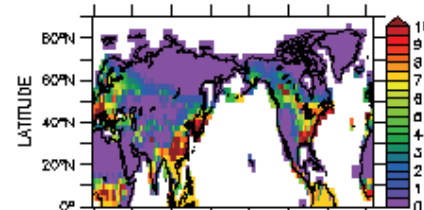
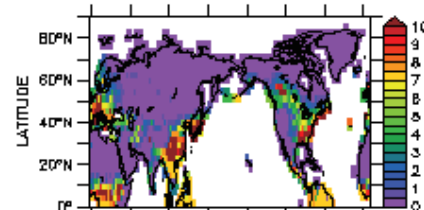
・葉が展開しないので、雪もなかなか溶けない(LAI-snow feedback)



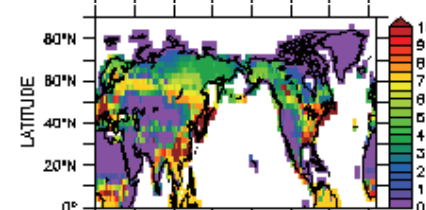
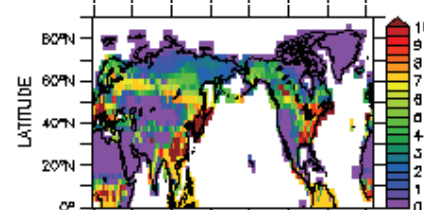
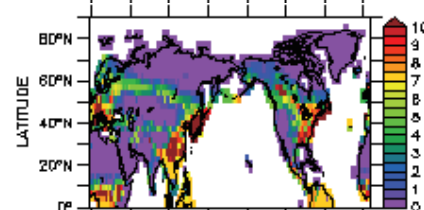
LAI (観測)



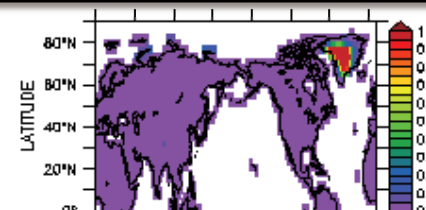
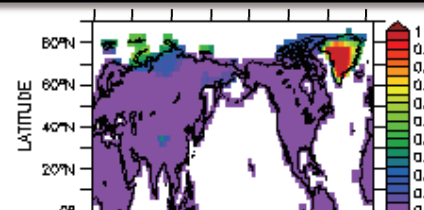
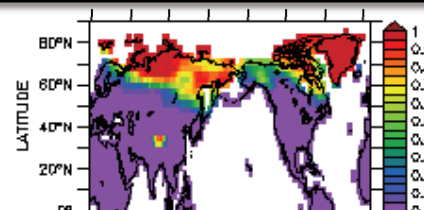
LAI (対策前)



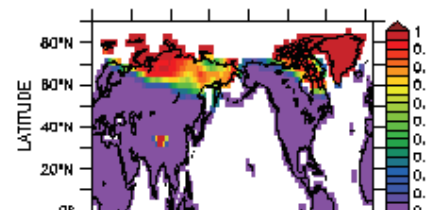
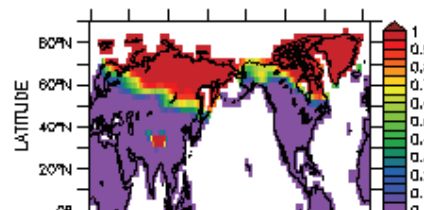
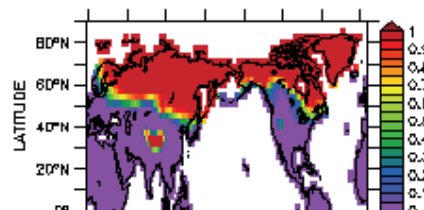
LAI (対策後)



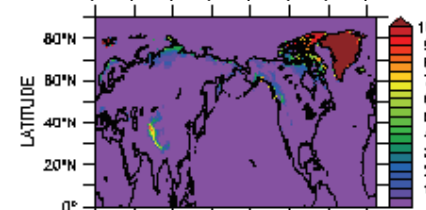
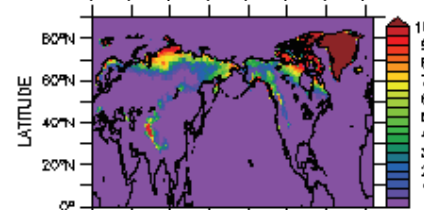
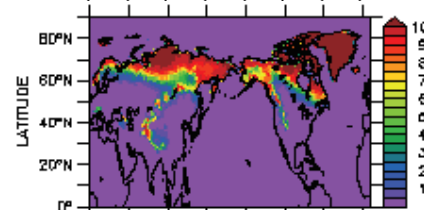
雪被覆率 (観測)



雪被覆率 (対策前)



雪被覆率 (対策後)



MAY

JUN

JUL



海洋生態系

新規プロセス(リン・酸素・鉄循環導入＋窒素循環を開放)を導入→調整(中)

CMIP5 ver.

Tentative ver. :

海洋窒素循環は閉鎖系

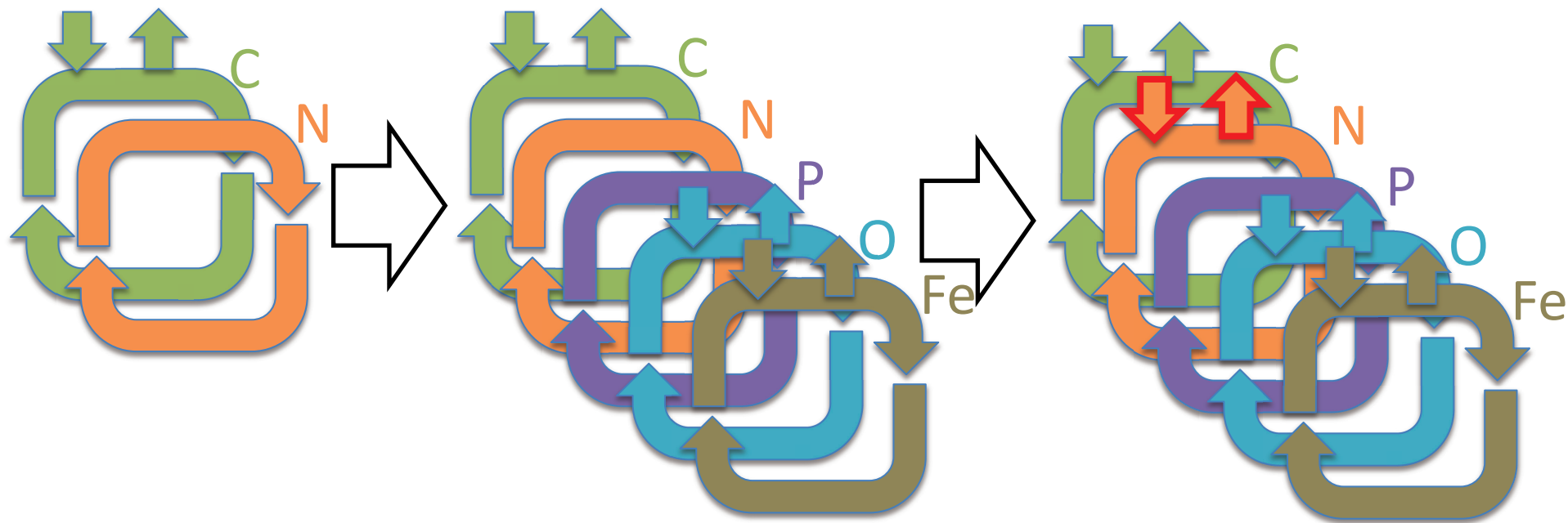
→オフラインチューニング等に使用

Final ver. :

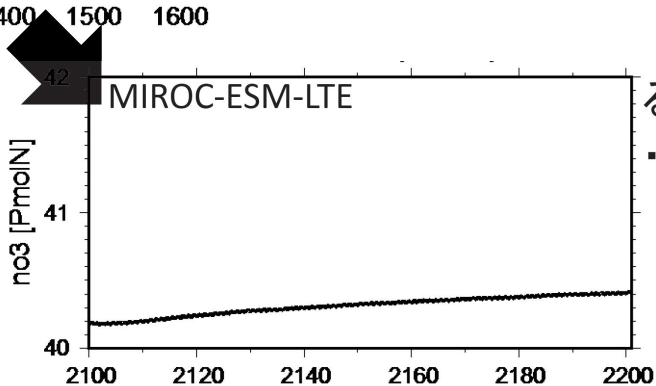
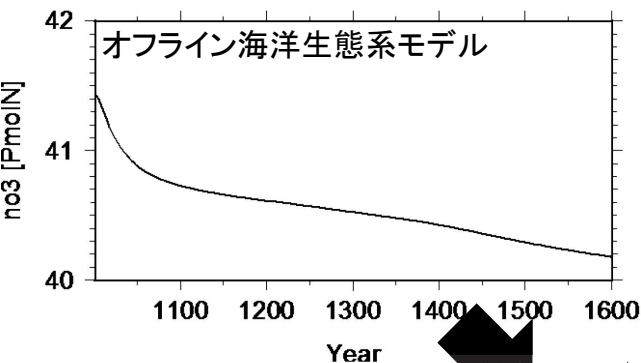
窒素を解放系に

IN : 河川、沈着、窒素固定

OUT : 脱窒



海洋生態系: NO₃ (全球積算値 [Pmol N])



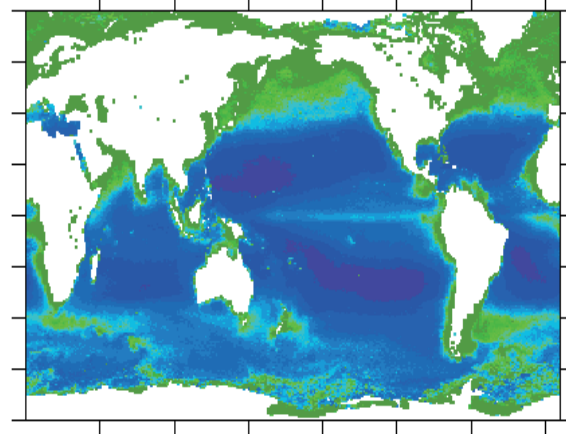
・オフラインモデルとESMの組み合わせにより、海洋生態系スピンアップ・調整を実施:
{オフラインモデル600年}+{ESM100年}

・河川からの窒素流入により、沿岸部(インド洋)や北大西洋全域のクロロフィル(植物プランクトン)の再現性の向上が見られる

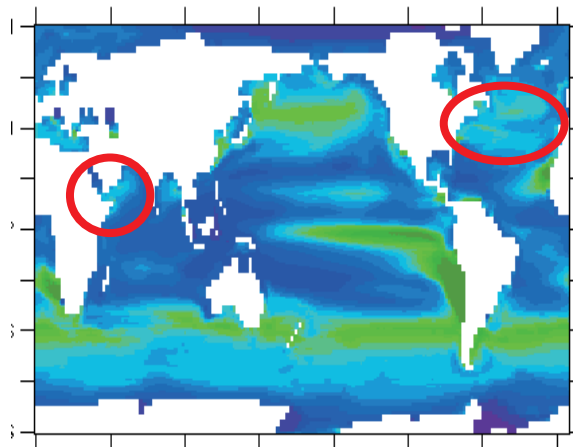
・太平洋赤道部のクロロフィル過大評価は鉄制限に関するパラメータで調整中

海洋生態系: クロロフィル量 [mg m⁻³]

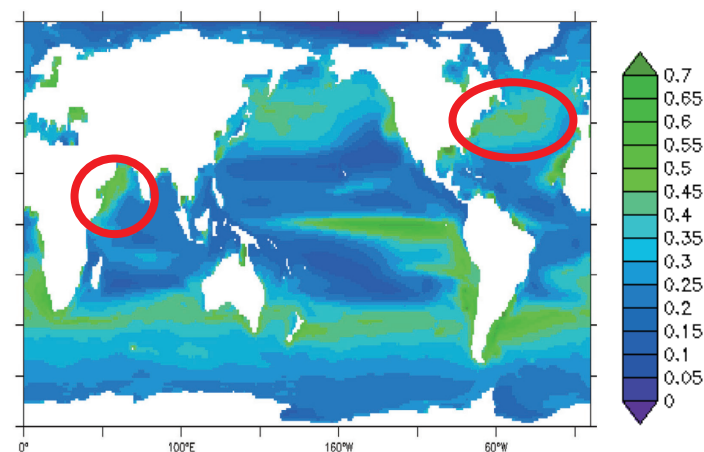
SeaWiFS (衛星観測)



CMIP5版ESM



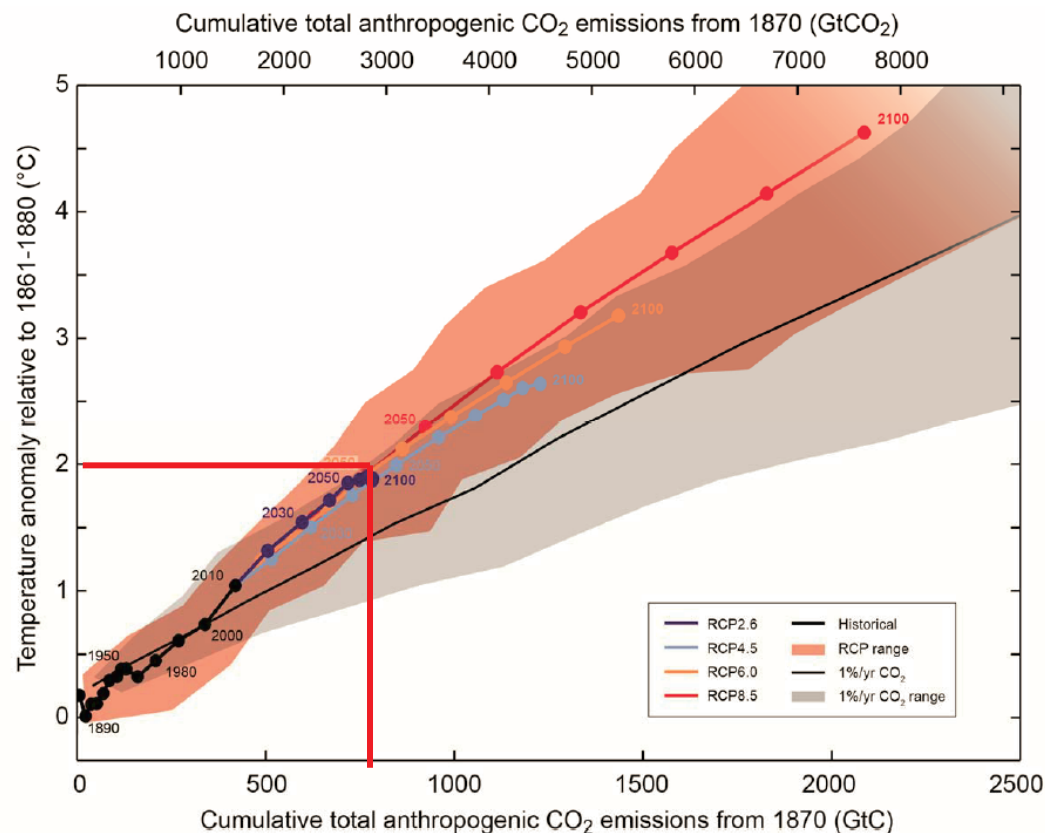
MIROC-ESM-LTE



課題(i) 多様なシナリオを踏まえた 長期的な地球環境変動の予測

- サブ課題b: 安定化目標値設定に向けた社会
経済シナリオに関する検討・情報収集
 - 気候安定化実験の結果解析
 - Non-CO₂ GHGs, エアロゾル等に関する情報収集
 - 気候影響、排出量との関係
 - Non-CO₂ GHGsやエアロゾルを含む気候安定化シ
ナリオの作成、社会経済シナリオとの対応検討

累積炭素排出量と昇温との比例関係 (TCRE)



IPCC (WG1) AR5 より

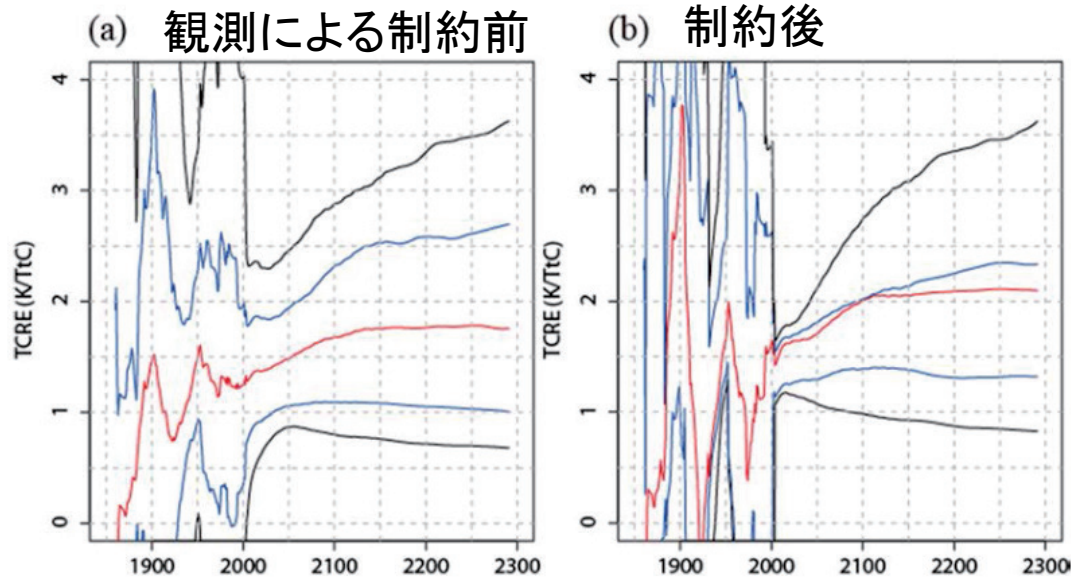
- ・累積排出量と昇温量とは、比較的きれいな比例関係にあることを指摘

- ・AR5 SPMの中では最も目新しい図

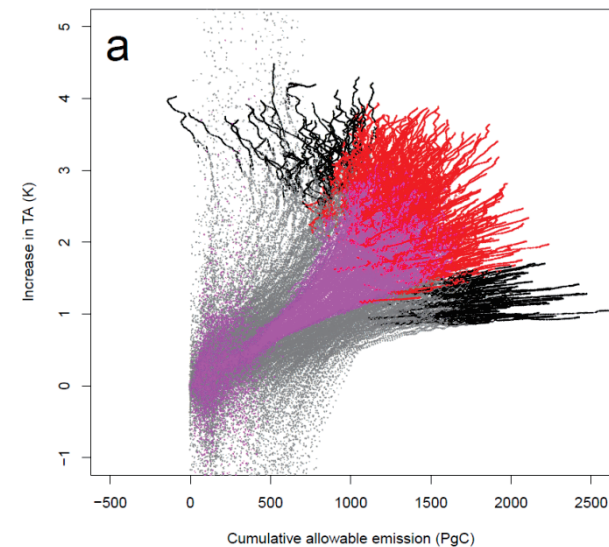
- ・2°C以内に温暖化を抑えらるゝとしたら、累積排出量を800PgC程度以内に抑える必要

- ・そのうち半分以上はすでに排出されている

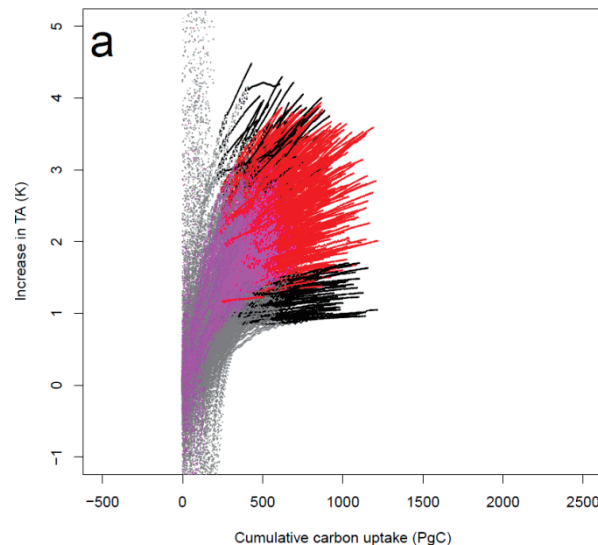
ESM/EMICの解析



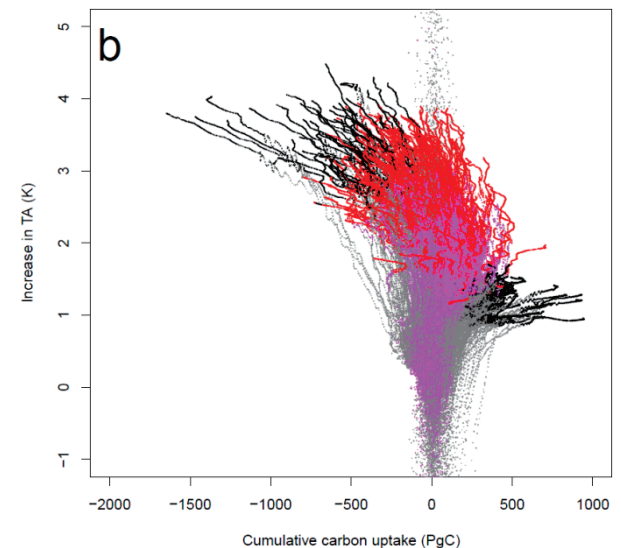
- CO₂ induced, LUE考慮。
- 0.3–2.4 K/TtC (a)
- 1.1–1.7 K/TtC (b)



ΔT vs. Cum. C emission



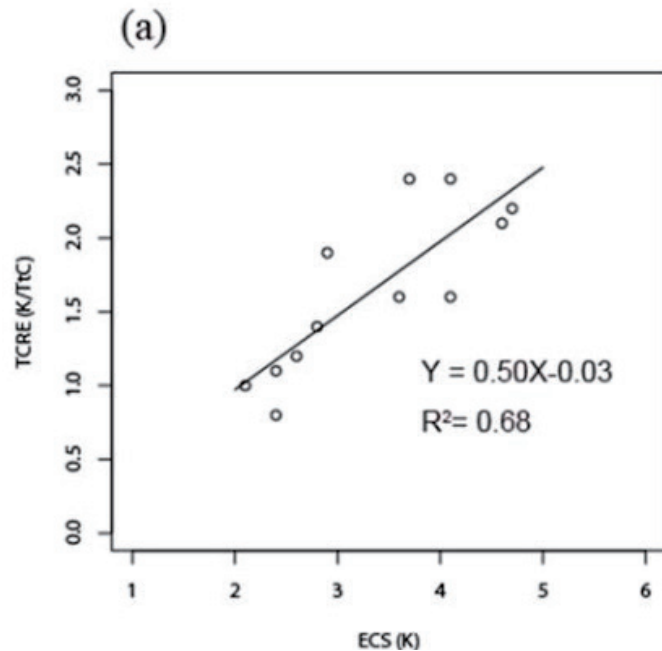
ΔT vs. Δ 海洋炭素量



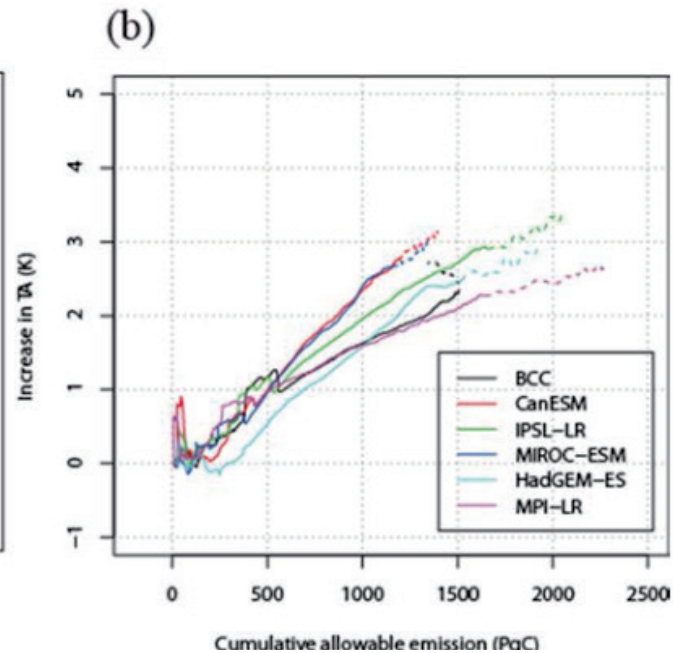
ΔT vs. Δ 陸域炭素量 15

ESMの結果

(a): TCRE vs. 平衡気候感度



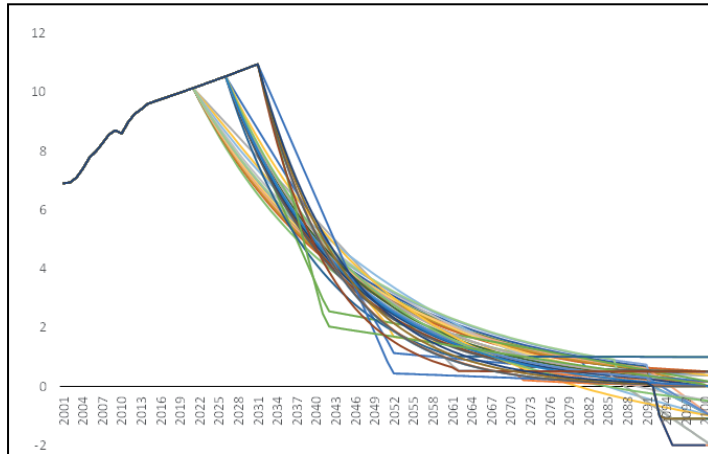
(b): ΔT vs. Cum. C. emission (CMIP5/RCP4.5ex)



	TCRE2115	TCRE2295	ECRE	rTCRE	rdT	rCE
ECS	0.504***	0.678***	0.835***	0.768***	0.761***	-0.512***
AHV	-0.107**	-0.042	-0.066	-0.026	0.133***	0.029
AHI	0.017	0.016	-0.030	0.032	0.009	-0.011
AHG	0.073	0.110**	0.074	-0.001	-0.028	-0.055

以上、Tachiiri et al. (2016, ERL)

累積排出量一定



CO₂累積排出量は一定に保って排出削減パスを変化させ、パスの違いが社会経済に与える影響を評価

Matsumoto et al. (in prep.)

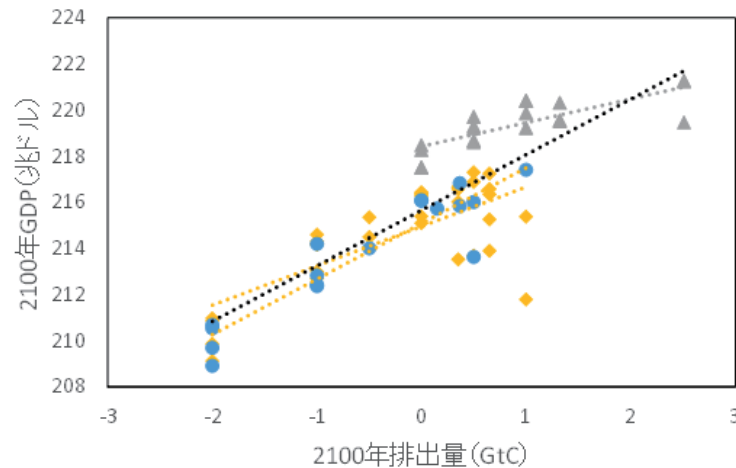
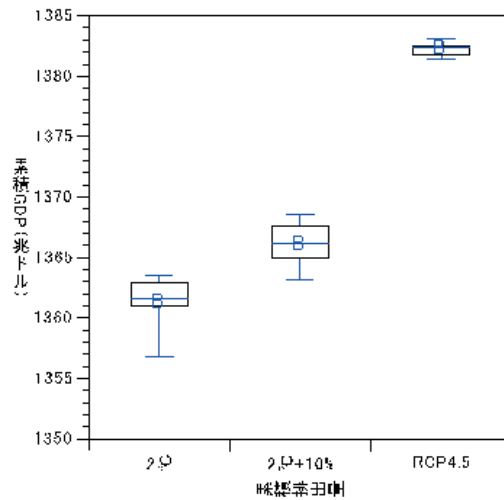


図2: 分析結果(a: ケースごとの累積 GDP(2010～2100 年・割引率 5%); b: 2100 年排出量と GDP の関係(青: 2°C ケース、オレンジ: 2°C+10%、グレー: RCP4.5。点線は回帰直線で、黒線は全データによる回帰を示す))。

考慮するNon-CO₂ emission

- well-mixed GHGs: CH₄, N₂O
- その他: CO, NMVOC, NO_x, SO₂, BC, OC, NH₃
- ハロカーボン(フロン類含む)は簡単に扱う



情報収集

AVOID2

Can we avoid dangerous climate change?

The contribution of non-CO₂ greenhouse gas mitigation to achieving long-term temperature goals

November 2015

<http://www.avoid.uk.net/2015/11/>

- 2010でNon-CO₂は28% (GWP100ベース)
- 削減なしだと、2100年まで全体の約1/3の寄与。
- Non-CO₂ GHG削減により、コスト65%減。

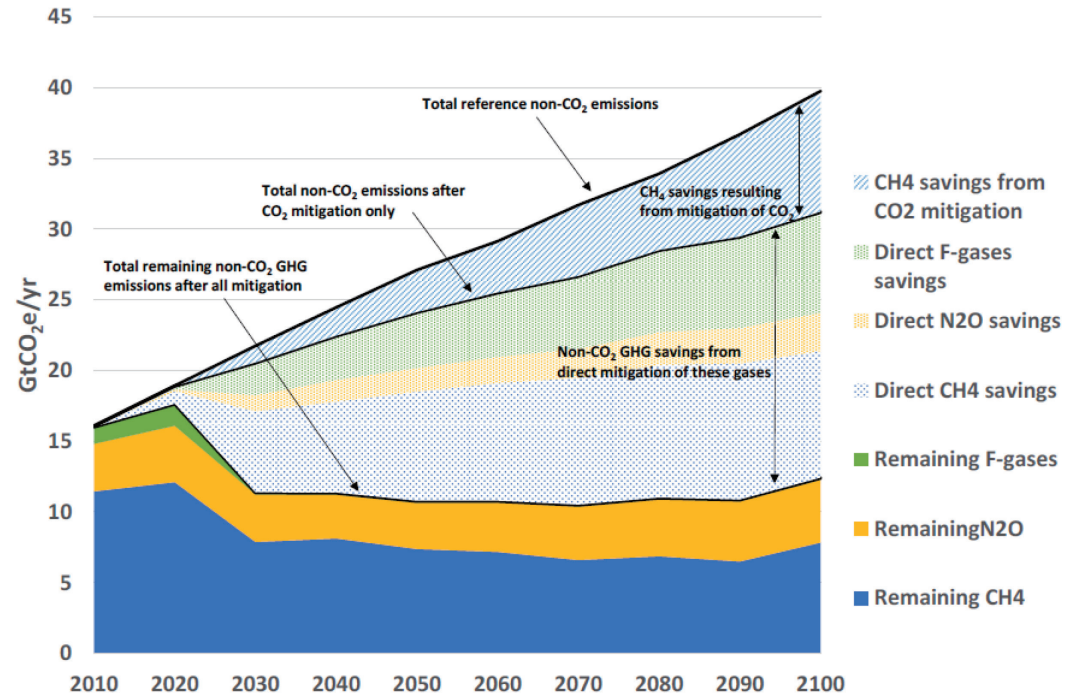


図: 2度目標達成時のnon-CO₂の削減(CO₂と同等の価格を適用した場合)
(Grambhiri et al., 2015)

Scenario settings

Socio-economics:

- Shared socioeconomic pathways.

SSP2: middle of the road": intermediate challenges for mitigation/adaptation

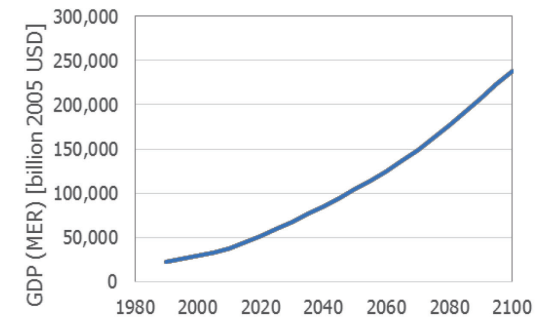
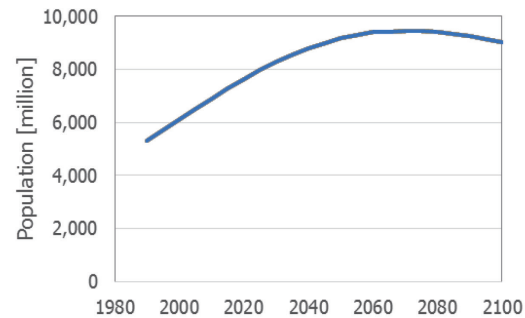
Reference scenario ("Ref")

- No mitigation policy

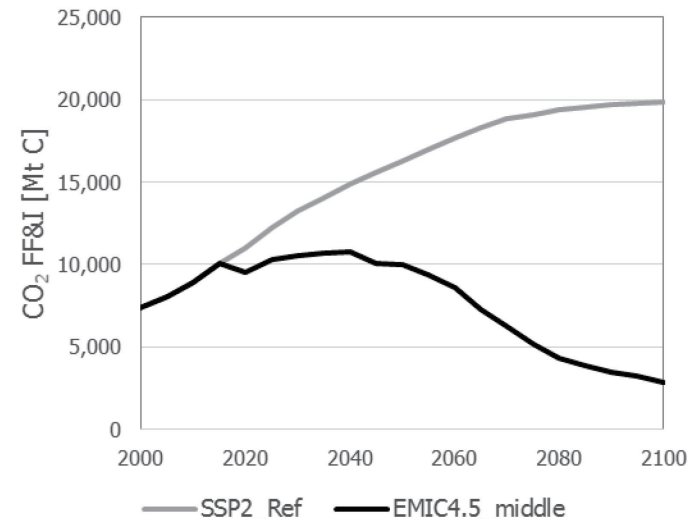
Benchmark scenario

("EMIC4.5_CO2only")

- Allowable carbon (CO₂) emissions for representative concentration pathway (RCP) from EMIC ensemble (by Tachiiri et al., Tellus B, 2013).
- Consistent with RCP4.5: radiative forcing $\sim 4.5\text{W/m}^2$ by 2100.

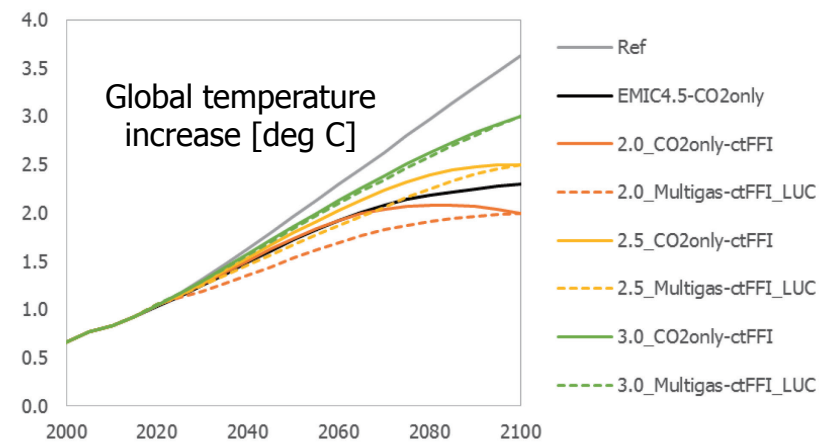
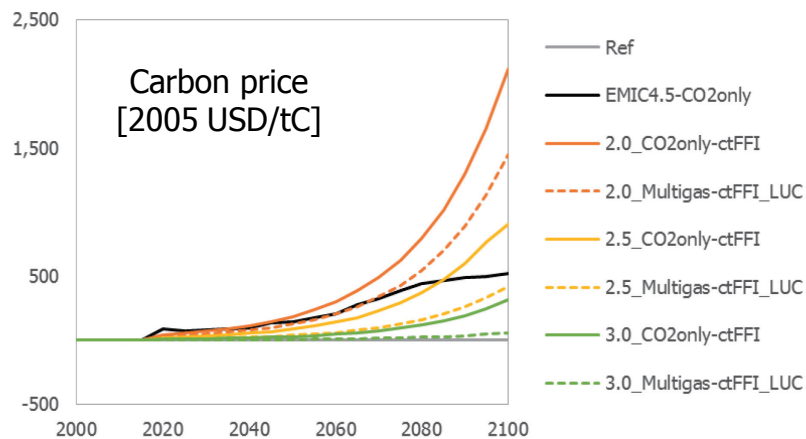


Socio-economic assumptions
SSP2 scenario



CO₂ emissions paths

- Effect of pricing all Kyoto GHGs including LUC emissions



- Price becomes cheaper (effect of pricing LUC is small compared to multigas price (not shown))
- Temperature path effect increases with target stringency.

安定化シナリオ開発：まとめ

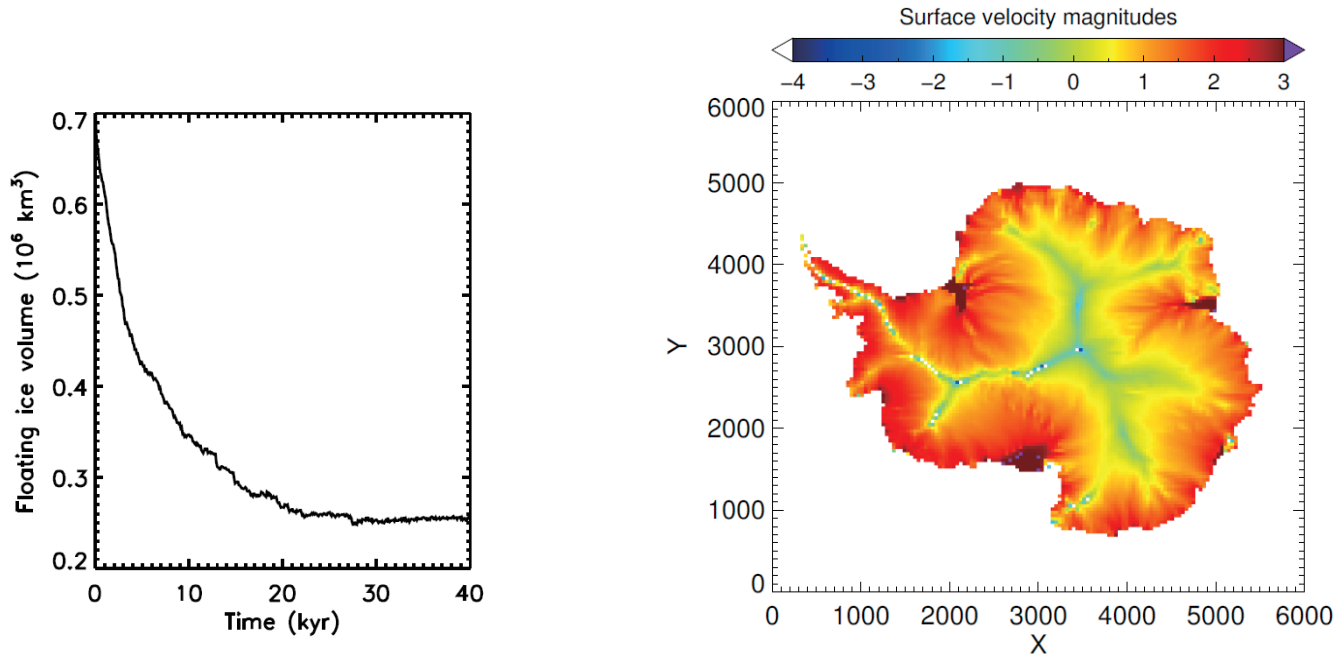
- Non-CO₂ GHGも考慮に入れた排出量シナリオを、複数の温度目標(2100年時点)について作成した。
- 炭素価格の適用対象の違いにより、(炭素税額、各GHGの排出量、土地利用の点で)異なるシナリオが得られ、厳しい温度目標の場合は温度経路も影響を受ける。
- 課題：
 - 2100年以降の気候安定化についての検討(外挿 or IAMの利用)。
 - 気候感度や気候-炭素循環フィードバックの不確実性の考慮。

課題(ii)大規模な気候変動・改変に関する 科学的知見の創出

- サブ課題a: ティッピング・エレメントや環境変化の不可逆性(極域氷床の崩壊等)に関する数値実験技術の開発
 - 氷床・棚氷モデルの改良と、現実的な南極氷床への適用を通じた氷床崩壊の感度実験
 - 陸域の北半球高緯度地域における土壌物理/物質循環過程の数値計算結果解析

氷床棚氷モデル開発課題

- 南極氷床の Tipping point を考える上で、棚氷-接地線の変動の再現が重要である
- グリーンランド氷床の Tipping point を考える上では温暖化など気候変動に対する氷床応答の不確定性の評価が重要である。



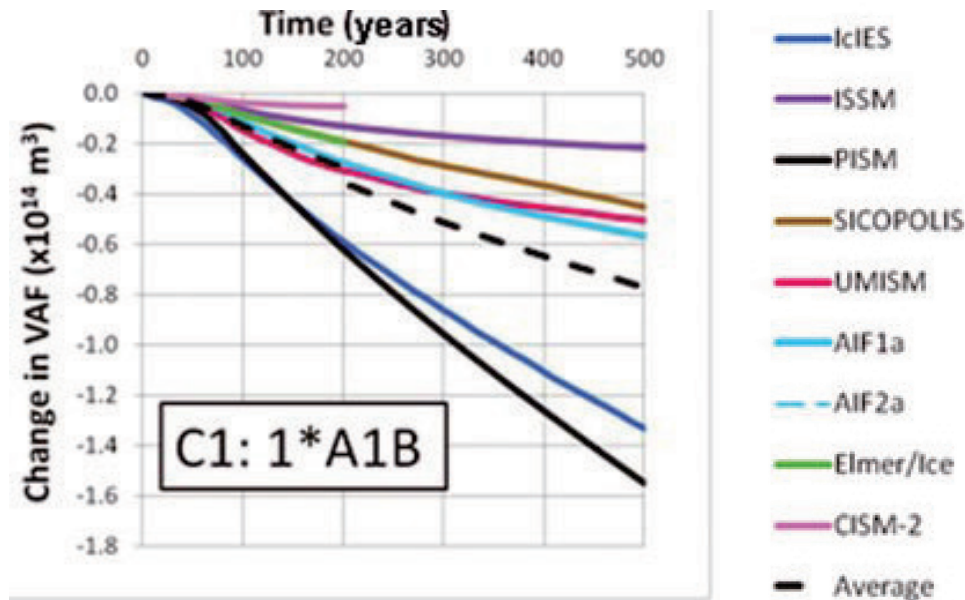
40000 年の長期積分が可能になったが、若干の問題点が残っており、今後解決が必要である。

- 棚氷起源の数値的な不安定→棚氷端の境界条件の改良
- Grounding line parameterization の導入でさらに不安定になりやすい。
→ パラメタの調整などを通じて安定化が必要

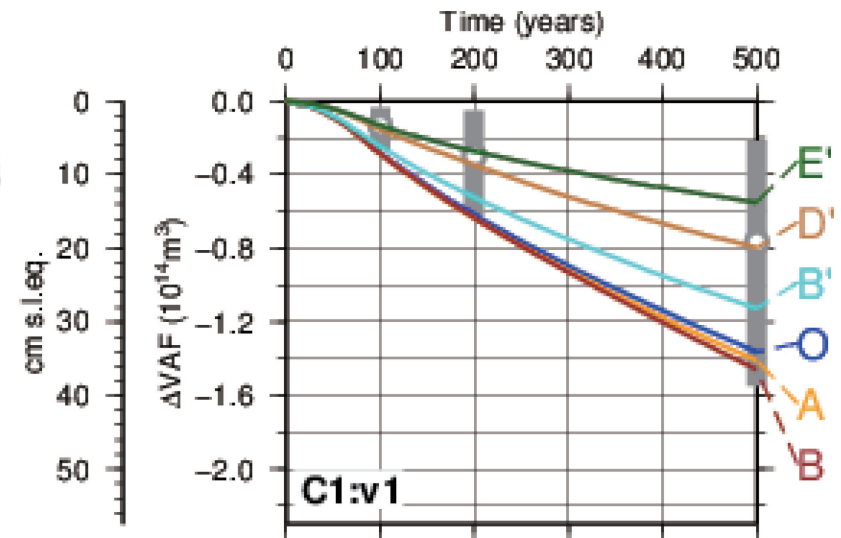


グリーンランド氷床の温暖化実験に関する不確定性の評価

氷床比較プロジェクト SeaRISE (Bindschadler et al. 2013) のグリーンランド氷床温暖化実験
各モデルの構造の違いが結果のばらつきにあたえる影響を定量的に評価



Bindschadler et al. 2013



Saito et al. (The Cryosphere, 投稿済み)

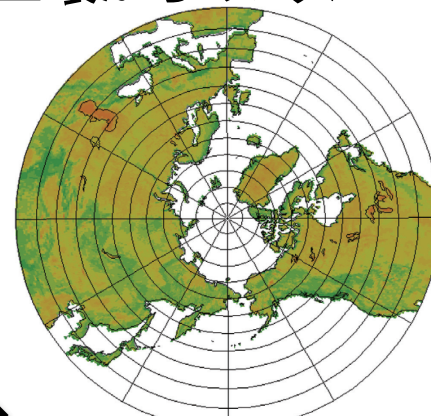
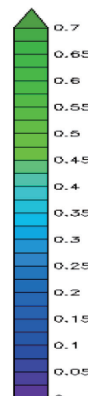
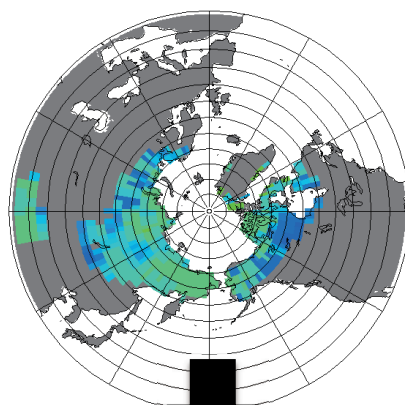
A1B シナリオに対するグリーンランド氷床の応答(500年)。

それぞれのモデルで採用されている手法をIcIESに導入し、結果への影響を調べた。

SeaRISE の感度のばらつきが、現在氷床の表面質量収支の計算手法や現在氷床の再現手法の違いに大きく依存することが明らかになった。

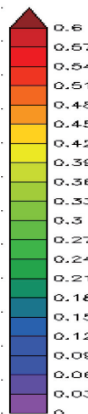
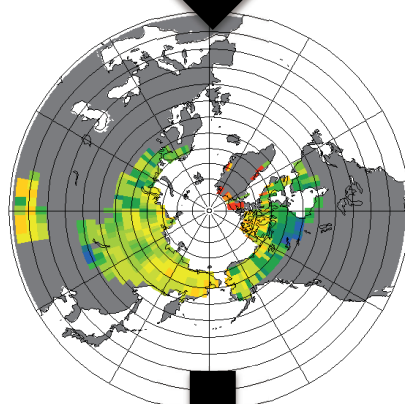
気候モデル出力値からの湿地(冠水)面積の診断と 生態系モデルによる土壌からのメタンエミッション推定

気候モデルによる
土壌含水率[m/m]

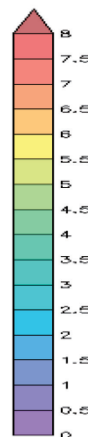
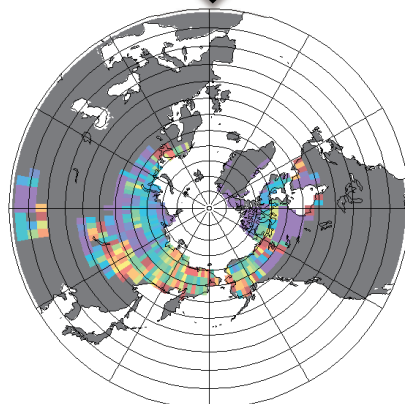


サブグリッドスケールでの地形情報 [-]
(Compound topographic index)

湿地(冠水)
面積割合 [-]

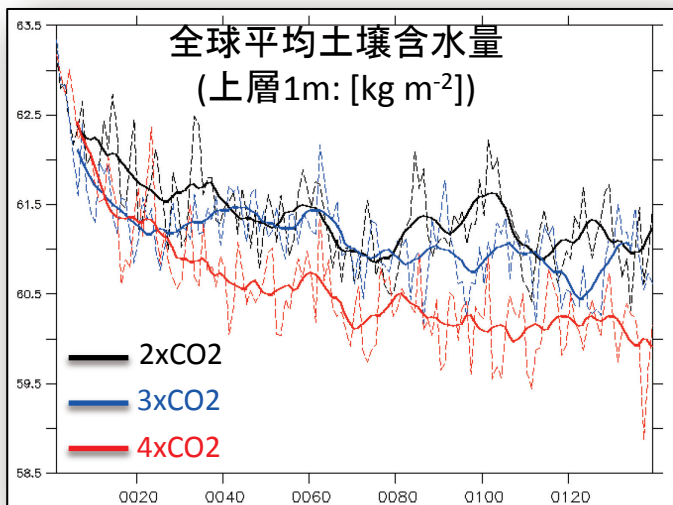
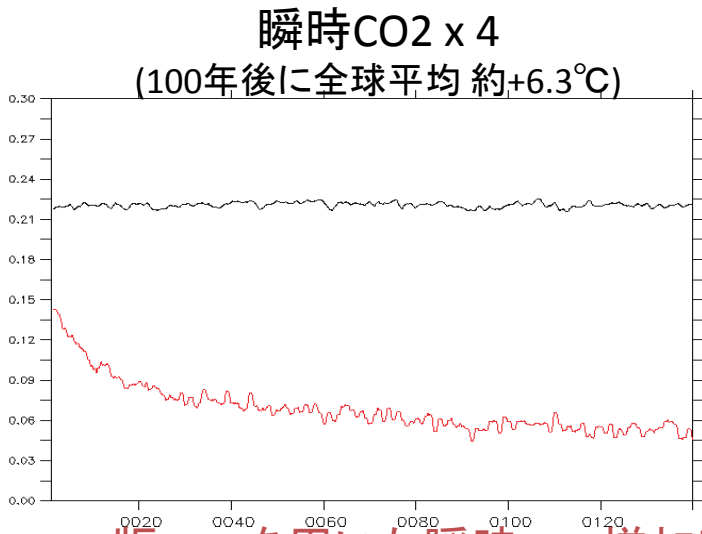
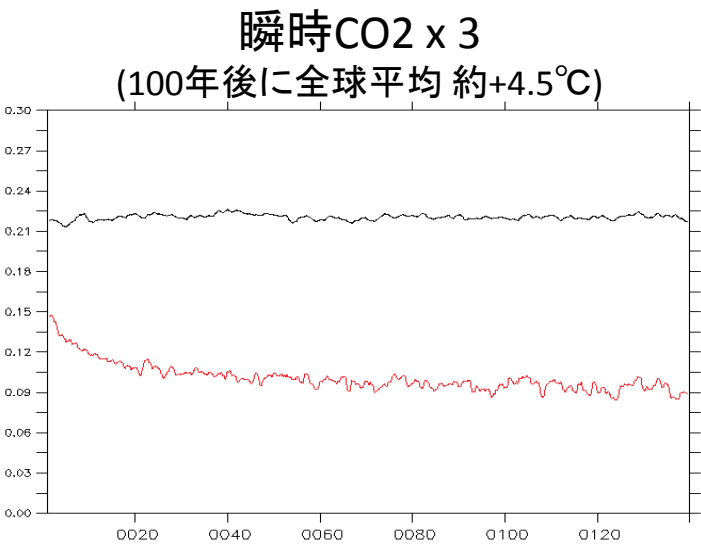
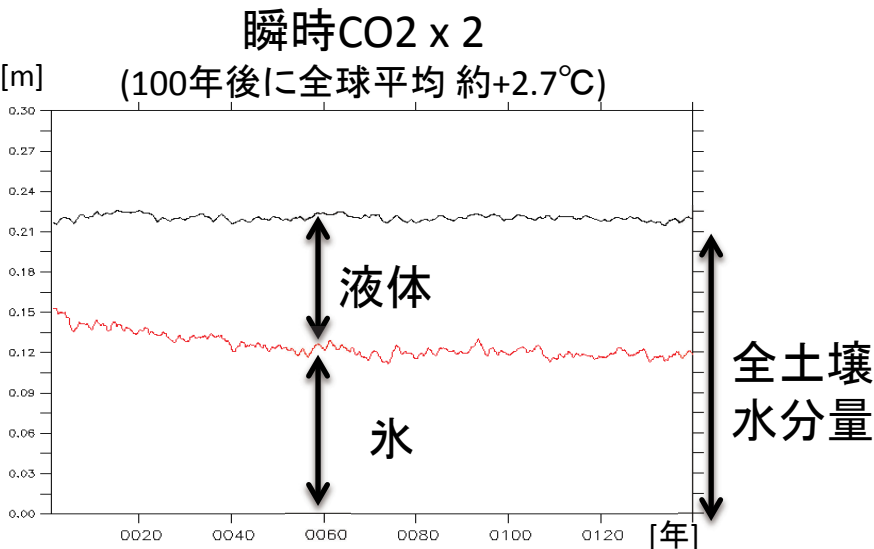


生態系モデルから
診断される土壌からの
メタンエミッション
[gCH m-2 yr-1]



- ・将来の永久凍土地帯におけるメタンエミッションの変化を調べるため、GCMから出力される土壌環境の情報と地形情報から、永久凍土地帯における湿地(冠水)面積割合を診断、生態系モデルによりメタン発生速度を算出
- ・現在は診断スキームの調整・改良を実施中

CMIP5版ESMによる永久凍土地帯における土壌水分の変化 (上層1m)



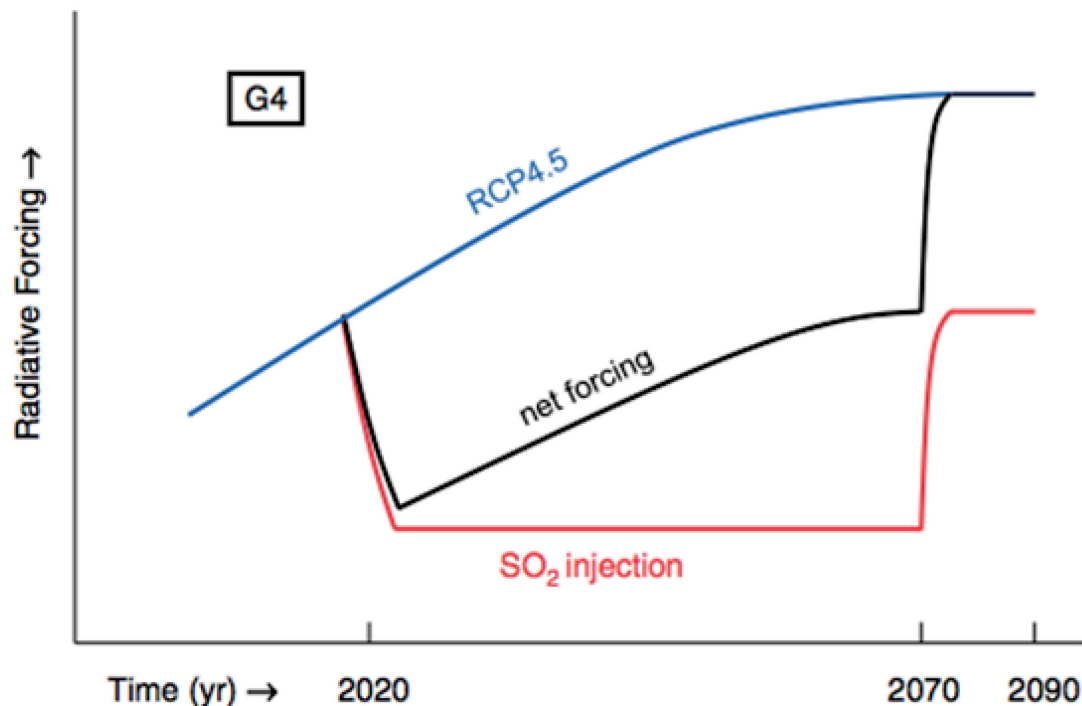
- ・CMIP5版ESMを用いた瞬時CO2増加実験 (2x, 3x, 4x)を実施
- ・全球平均では土壌乾燥化の傾向があるが(図右下)、永久凍土地帯に注目すると湿潤化傾向
- ・今後は前スライドのメタンエミッションスキームと組み合わせて解析

課題(ii)大規模な気候変動・改変に関する 科学的知見の創出

- サブ課題b: ジオエンジニアリング(成層圏エアロゾル注入等)に関する数値実験技術の開発
 - 成層圏エアロゾル散布に関し、
 - エアロゾル粒子の生成と成長過程を取り扱う微物理スキーム導入
 - GeoMIPで提案された成層圏亜硫酸ガス注入実験の実施に着手

GeoMIP-G4 実験

- RCP4.5シナリオ実験を基準（比較対象）とする
- 想定 • 太陽放射管理 (**Solar Radiation Management**) として、熱帯下部成層圏に SO₂ を注入
 - 2020年から2070年まで
 - 毎年 5 Tg (ピナツボ噴火の1/4に相当)

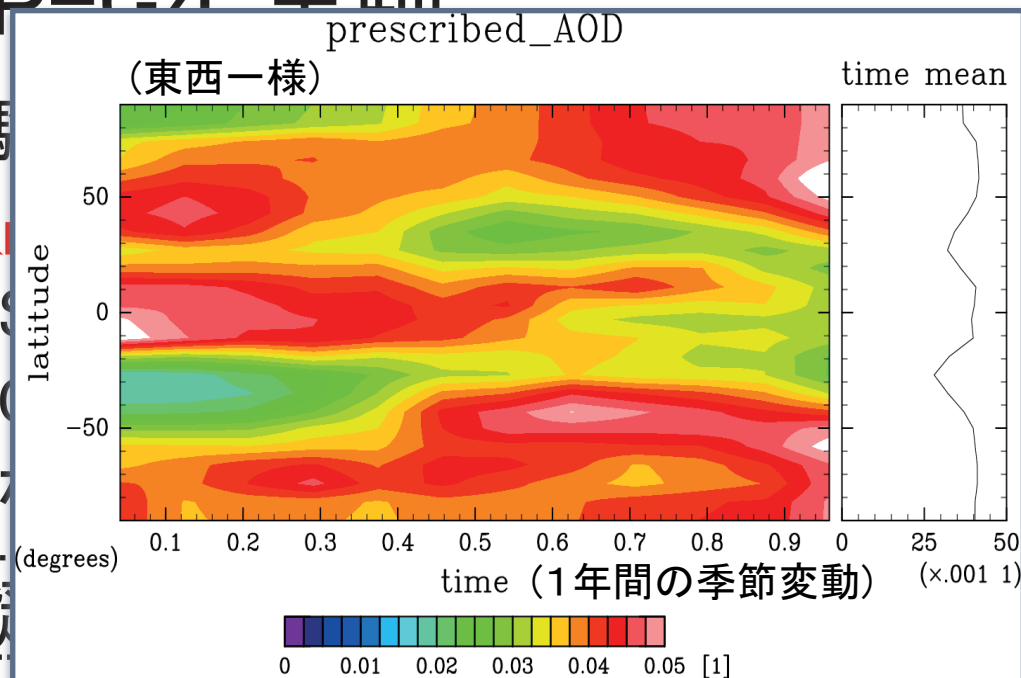


GeoMIP-C4 実験

- RCP4.5シナリオ実現
- 太陽放射管理 (Solar Radiation Management) 熱帯下部成層圏に SO₂ 注入
 - 2020年から2070年
 - 毎年 5 Tg (ピナツカ)

想定

SO₂注入効果の再現/模擬



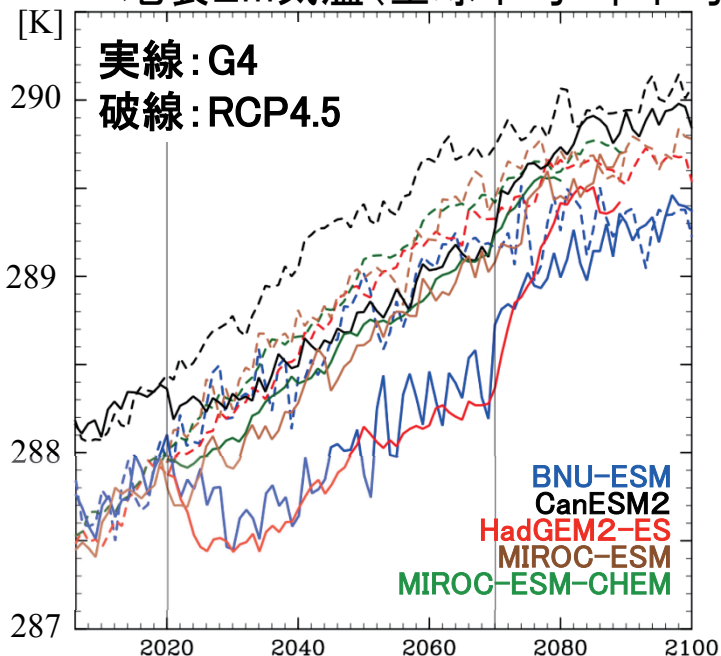
- SO₂の輸送、化学などをモデル内部で計算 (HadGEM2-ES)
- GeoMIP提供のエアロゾル光学的深さ(AOD)を与える (BNU-ESM, CanESM2, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM)
- ~~太陽定数を減らす~~

【以下のモデルデータは除外】

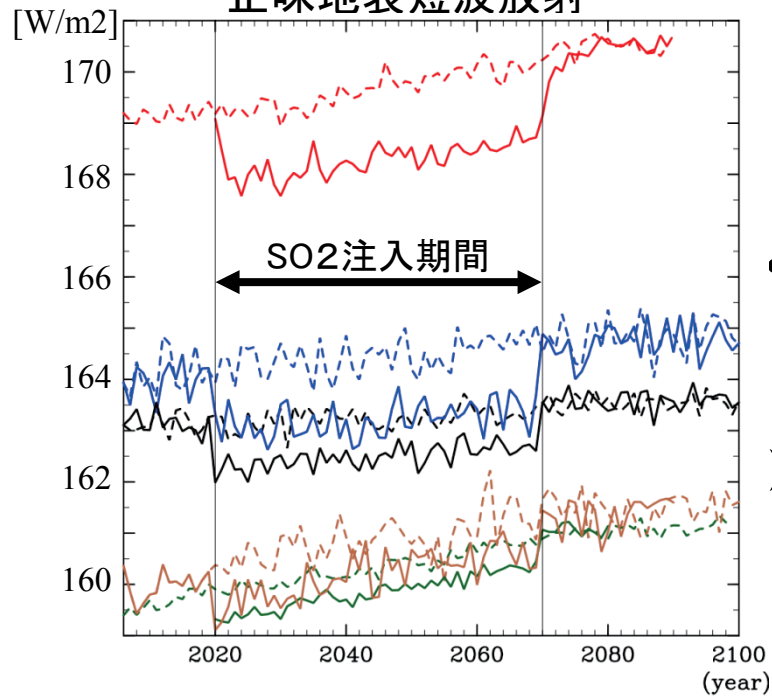
- CSIRO-MK3L (太陽定数を減らす方法)
- GEOSCCM (SST固定で海なし計算)
- GISS-E2-R (晴天放射量に不備あり)



地表2m気温(全球平均・年平均)

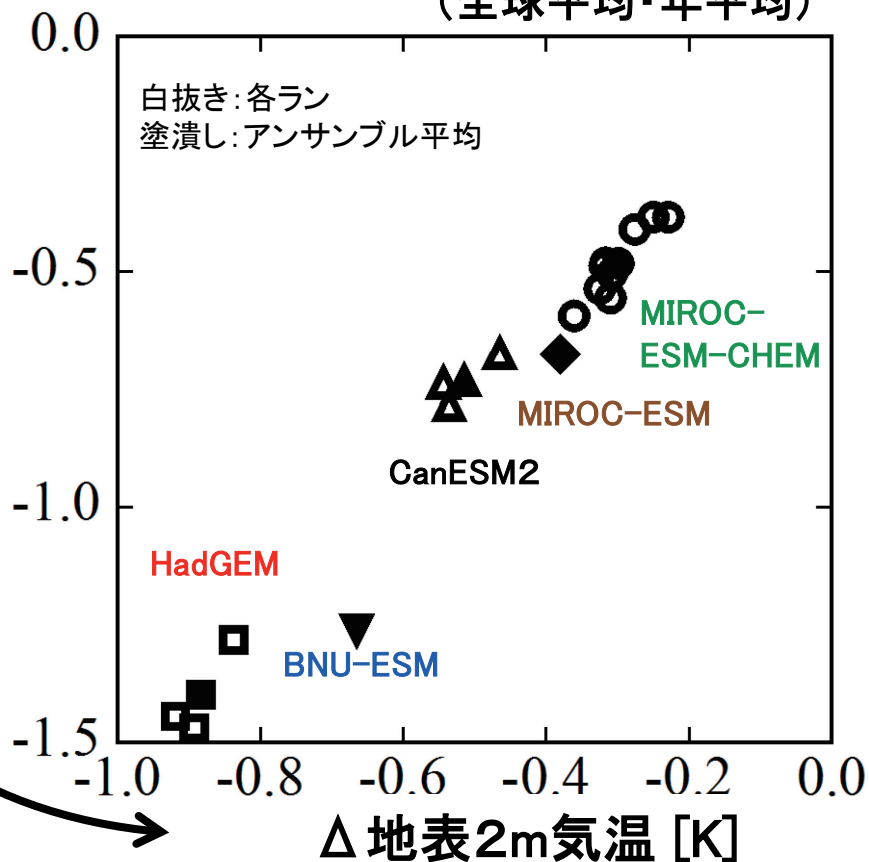


正味地表短波放射



(全球平均・年平均)

Δ 正味地表短波放射 W/m^2



• 地表気温の低下量と、正味地表短波放射の減少量には、良い相関がある

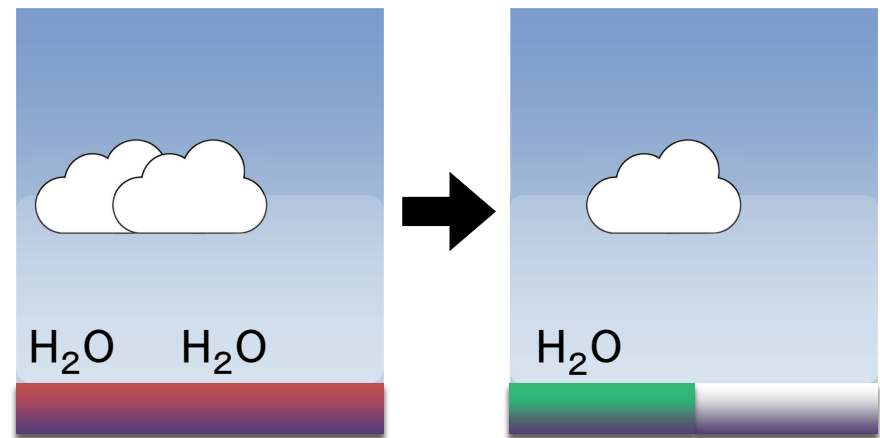
➤ 正味地表短波放射の変化量に対する、**SRM強制**と、**雲量・水蒸気量・地表アルベド**の変化に伴うフィードバック効果を調べる

動機・目的

- 毎年 5 Tg の SO_2 注入を想定してるが、再現/模擬の方法は異なる
 - 各モデル内での地表に対する **SRM強制** の大きさを評価したい
- SRMによって地表（対流圏）の気温が低下すれば、



が変化するので



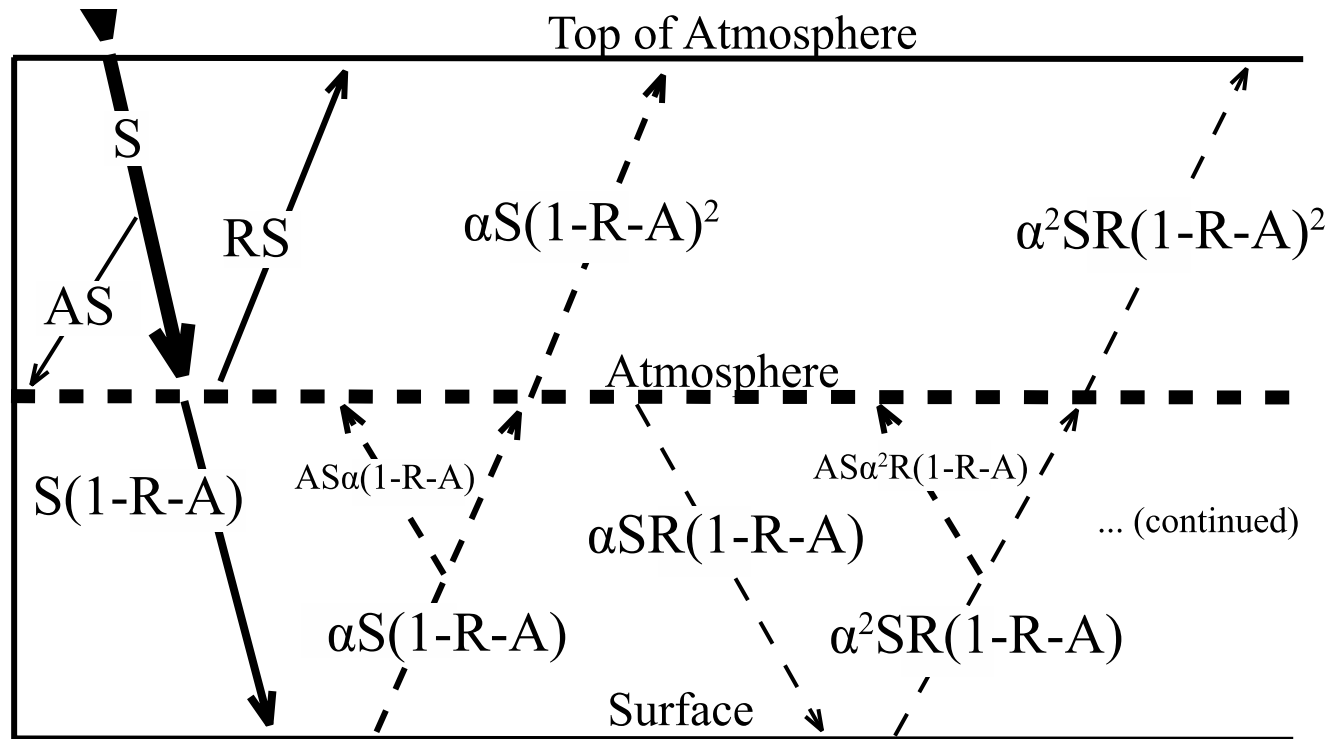
地表が受ける短波放射も変化し、SRM効果に影響を与える

→ これらの要素の変化が与える影響をそれぞれ評価したい



解析方法

- Donohoe & Battisti (2011) の1層大気モデル
 - 短波の大気による吸収と反射を無限回考える



モデル出力変数

S	$F_{\uparrow}^{\square_{TOA}}$
$F_{\downarrow}^{\square_{SURF}}$	$F_{\uparrow}^{\square_{SURF}}$

計算可能

R : 大気の短波反射率
 A : 大気の短波吸収率
 α : 地表アルベド

解析方法



【SRM強制(硫酸塩エアロゾル)】

- 晴天大気の反射率を増加させる。吸収率への影響は無視
- Δ 正味地表短波放射への Δ 晴天大気短波反射率 の寄与

【水蒸気量変化のフィードバック効果】

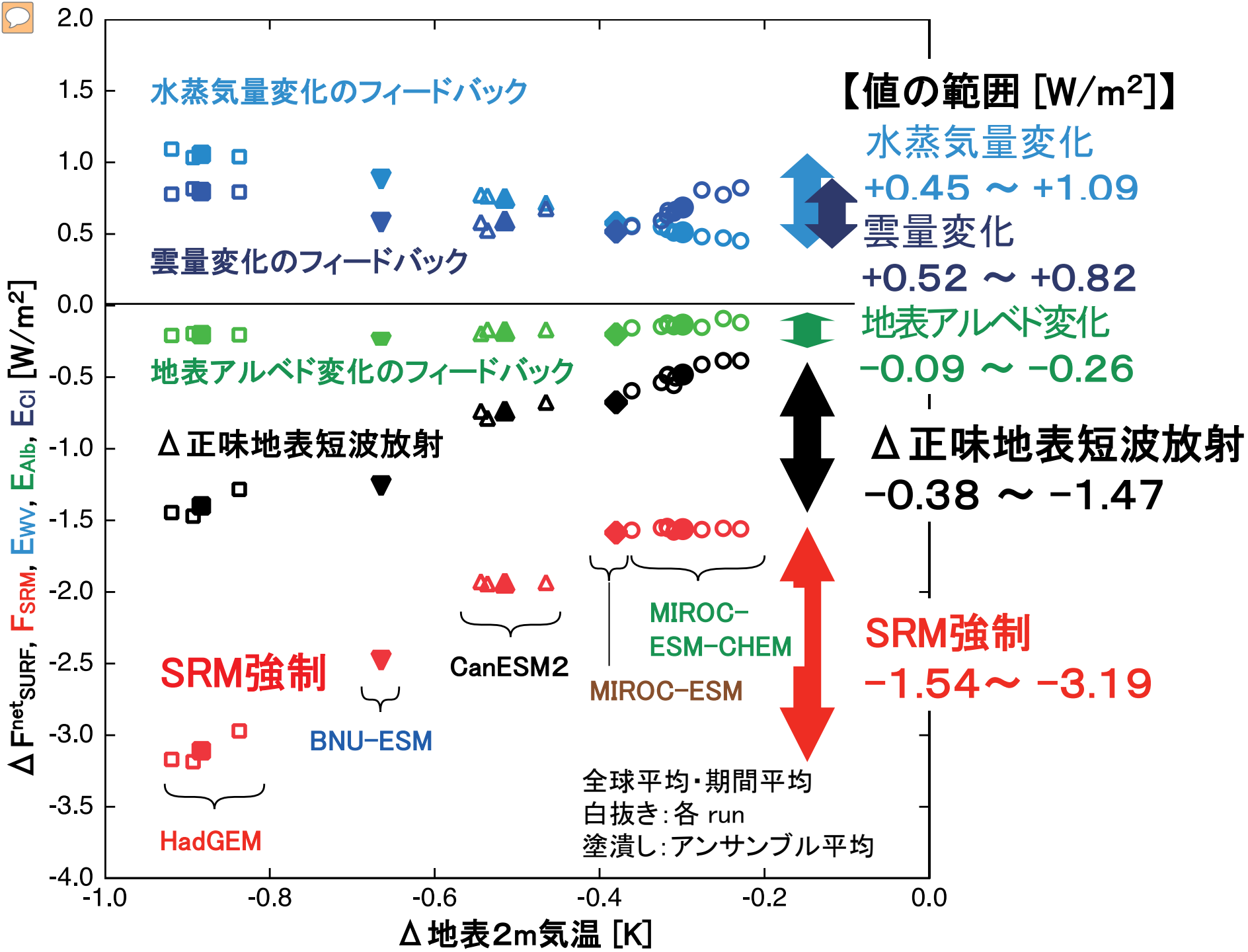
- 晴天大気の吸収率を変化させる。反射率への影響は無視
- Δ 正味地表短波放射への Δ 晴天大気短波吸収率 の寄与

【雲量変化のフィードバック効果】

- Δ 正味地表短波放射への Δ 雲影響(反射・吸収) の寄与

【地表アルベド変化のフィードバック効果】

- Δ 正味地表短波放射への Δ 地表アルベド の寄与



まとめ

・ 毎年 5 Tg の SO₂ 注入により(モデル平均・全球平均・期間平均):

Δ 地表2m気温は -0.55 K ・ Δ 正味地表短波放射は -0.91 W/m²
(両者は良い相関)

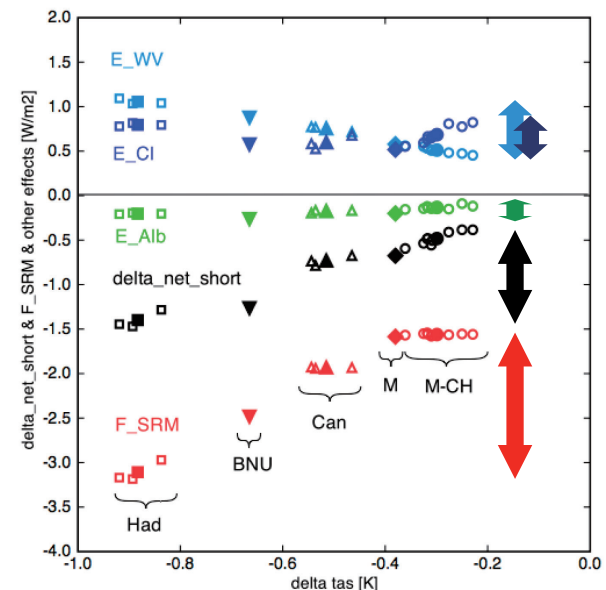
・ SRM強制(～晴天大気の反射率変化の効果)は -2.13 W/m² で、それは

- ✓ 地表アルベド変化の効果により -0.19 W/m² (約 9%強化↑)
- ✓ 水蒸気量減少効果により +0.76 W/m² (約 35%弱まる↓)
- ✓ 雲量減少効果により +0.64 W/m² (約 30%弱まる↓)

→ Δ 正味地表短波放射 は SRM強制 の 約 43%に減る

・ ただし、SRM強制のバラツキが大きい
(-1.54 ~ -3.19 W/m²)

→ SO₂注入による気候工学の
シミュレーションには、SRM強制
～晴天大気の反射率変化の効果の
見積もりが重要



成層圏エアロゾル微物理過程

- 基本モデル: MIROC-CHASER/SPRINTARS (ESM ver.)
- 2-モーメント・モーダルモデル(エアロゾル微物理)

CHASER(ガス)

エミッション

- ・人為起源
- ・火山噴火など

SO_2

酸化

H_2SO_4

SPRINTARS(エアロゾル)

硫酸エアロゾル

核形成モード
(半径 < 5 nm)

エイトケンモード
(5 nm < 半径 < 50 nm)

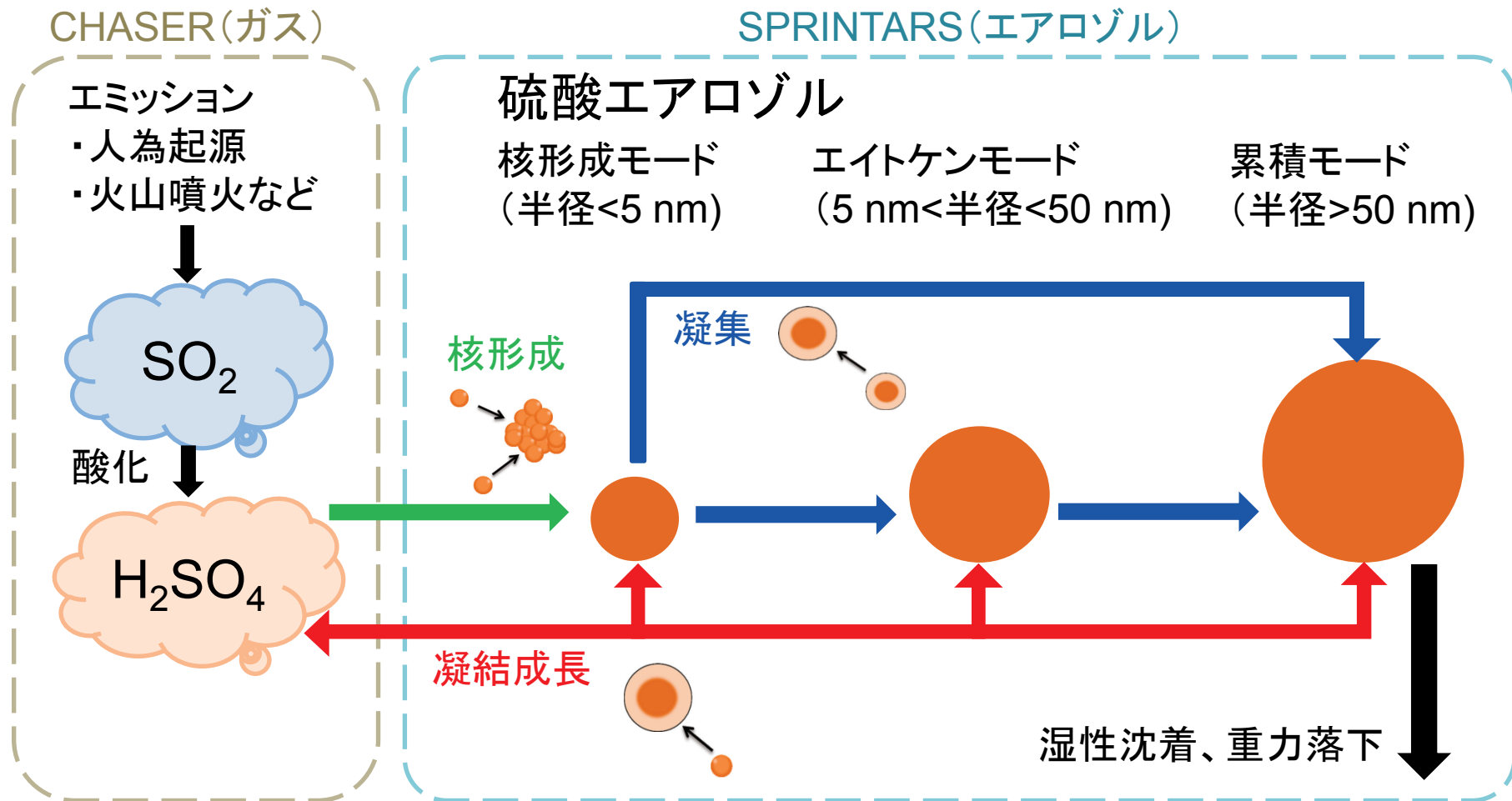
累積モード
(半径 > 50 nm)

核形成

凝集

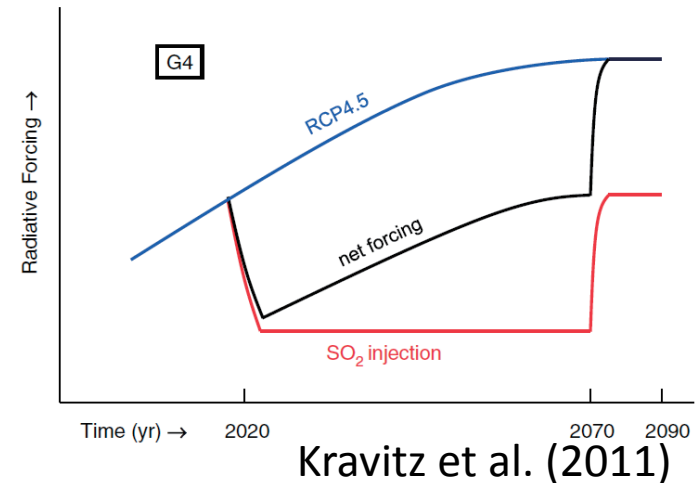
凝結成長

湿性沈着、重力落下



成層圏エアロゾル注入実験

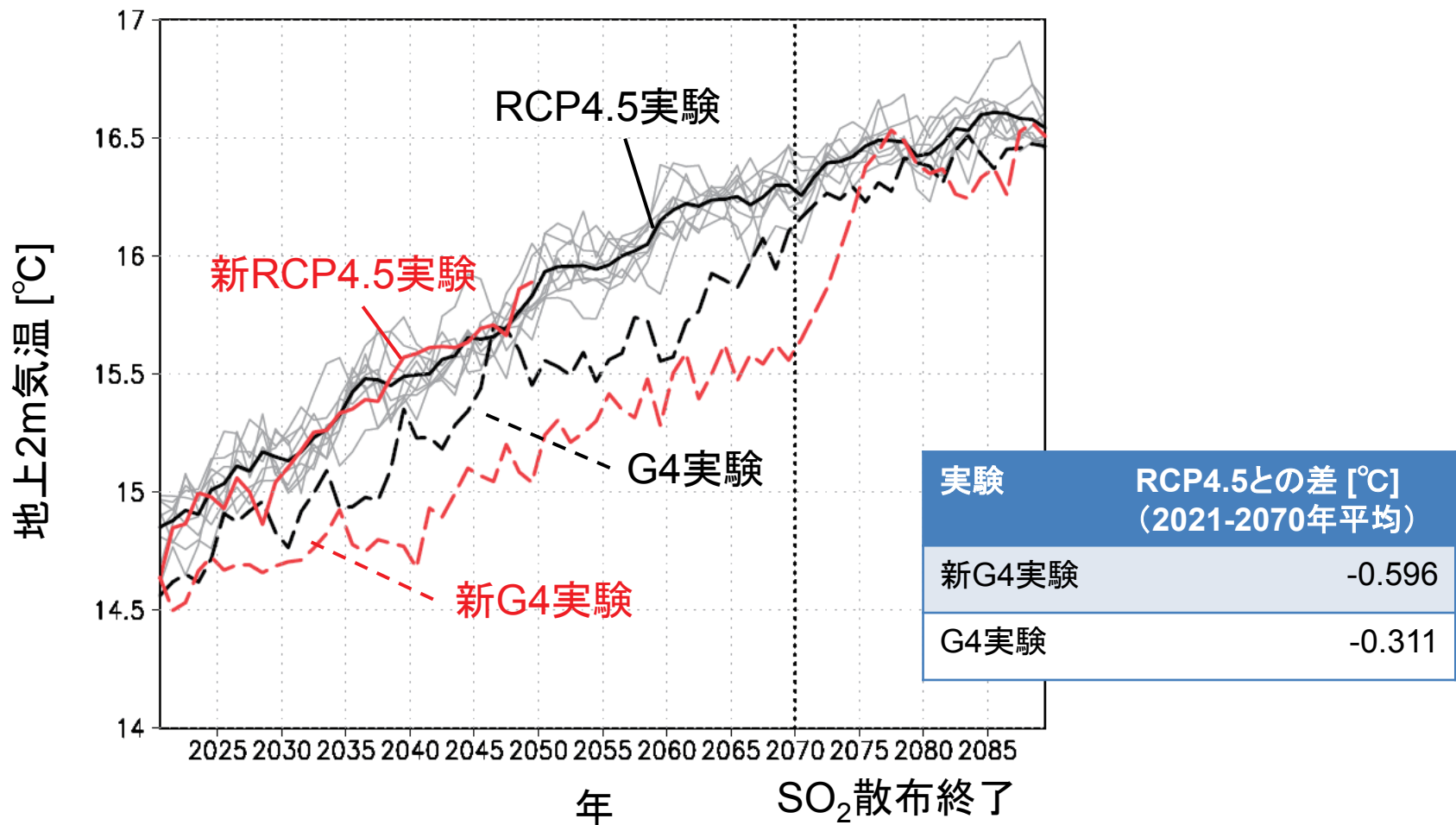
- RCP4.5シナリオを基準に成層圏エアロゾル注入の影響を評価した。
- 成層圏硫酸エアロゾルの詳細モデルによる成層圏エアロゾル注入の影響評価を新たに行った。



	G4実験	新G4実験
温室効果気体の濃度シナリオ	RCP4.5	
成層圏へのSO ₂ 注入量	5 TgSO ₂ /yr	
成層圏エアロゾルの表現方法	ピナツボ火山噴火を基に推定された成層圏エアロゾル光学的深さを与える。	SO ₂ 、硫酸ガス、硫酸エアロゾルとその粒径分布を直接計算する。 (※成層圏のみ)

地上気温

- 全球平均・年平均の時間変化



進捗状況

- i-a: モデル開発
 - プロトタイプ・モデルのチューニング、予備実験 ✓済
 - 要素モデル高度化、新モデルへの結合作業 ✓済
- i-b: 社会経済シナリオ
 - 気候安定化実験の結果解析 ✓済
 - Non-CO₂ GHGs, エアロゾル等に関する情報収集 ✓済
 - 気候安定化シナリオ作成、社会経済シナリオとの対応検討 ✓済
- li-a: ティッピング・エレメント、不可逆性
 - 氷床・棚氷モデル改良、氷床崩壊の感度実験 75%
 - 土壌物理/物質循環過程の数値計算結果解析 ✓済
- li-b: ジオエンジニアリング
 - エアロゾル粒子の生成成長過程の微物理スキーム導入 ✓済
 - 成層圏亜硫酸ガス注入実験の実施 ✓済