

# 成層圏SO<sub>2</sub>注入による気候工学の強制とフィードバック： GeoMIP G4実験の解析

発表者：櫛村 博基（神戸大学/CPS）

共同研究者：関谷 高志、阿部 学、渡辺真吾（JAMSTEC）

Duoying Ji, John C. Moore (北京師範大), Jason N. S. Cole (CCCma),  
Ben Kravitz (PNNL)

---

Shortwave radiative forcing and feedback to the surface by sulphate geoengineering: Analysis of the Geoengineering Model Intercomparison Project G4 scenario.

*Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2016-711. (改訂中)

**Acknowledgement:** We thank all participants of the Geoengineering Model Intercomparison Project and their model development teams, CLIVAR/WCRP Working Group on Coupled Modeling for endorsing GeoMIP, and the scientists managing the Earth System Grid data nodes who have assisted with making GeoMIP output available. We also thank Doctors Masahiro Sugiyama, Hideo Shiogama, and Seita Emori for useful comments. This study is supported by the SOUSEI Program, MEXT, Japan. Simulations of MIROC-based models were conducted using the Earth Simulator.

速い応答 (rapid response) と フィードバック (feedback)

# 成層圏SO<sub>2</sub>注入による気候工学の強制とフィードバック： GeoMIP G4実験の解析

発表者：檜村 博基（神戸大学/CPS）

共同研究者：関谷 高志、阿部 学、渡辺真吾（JAMSTEC）

Duoying Ji, John C. Moore (北京師範大), Jason N. S. Cole (CCCma),  
Ben Kravitz (PNNL)

Shortwave radiative forcing and feedback to the surface by sulphate geoengineering: Analysis of the Geoengineering Model Intercomparison Project G4 scenario.

*Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2016-711. (改訂中)

**Acknowledgement:** We thank all participants of the Geoengineering Model Intercomparison Project and their model development teams, CLIVAR/WCRP Working Group on Coupled Modeling for endorsing GeoMIP, and the scientists managing the Earth System Grid data nodes who have assisted with making GeoMIP output available. We also thank Doctors Masahiro Sugiyama, Hideo Shiogama, and Seita Emori for useful comments. This study is supported by the SOUSEI Program, MEXT, Japan. Simulations of MIROC-based models were conducted using the Earth Simulator.

# はじめに

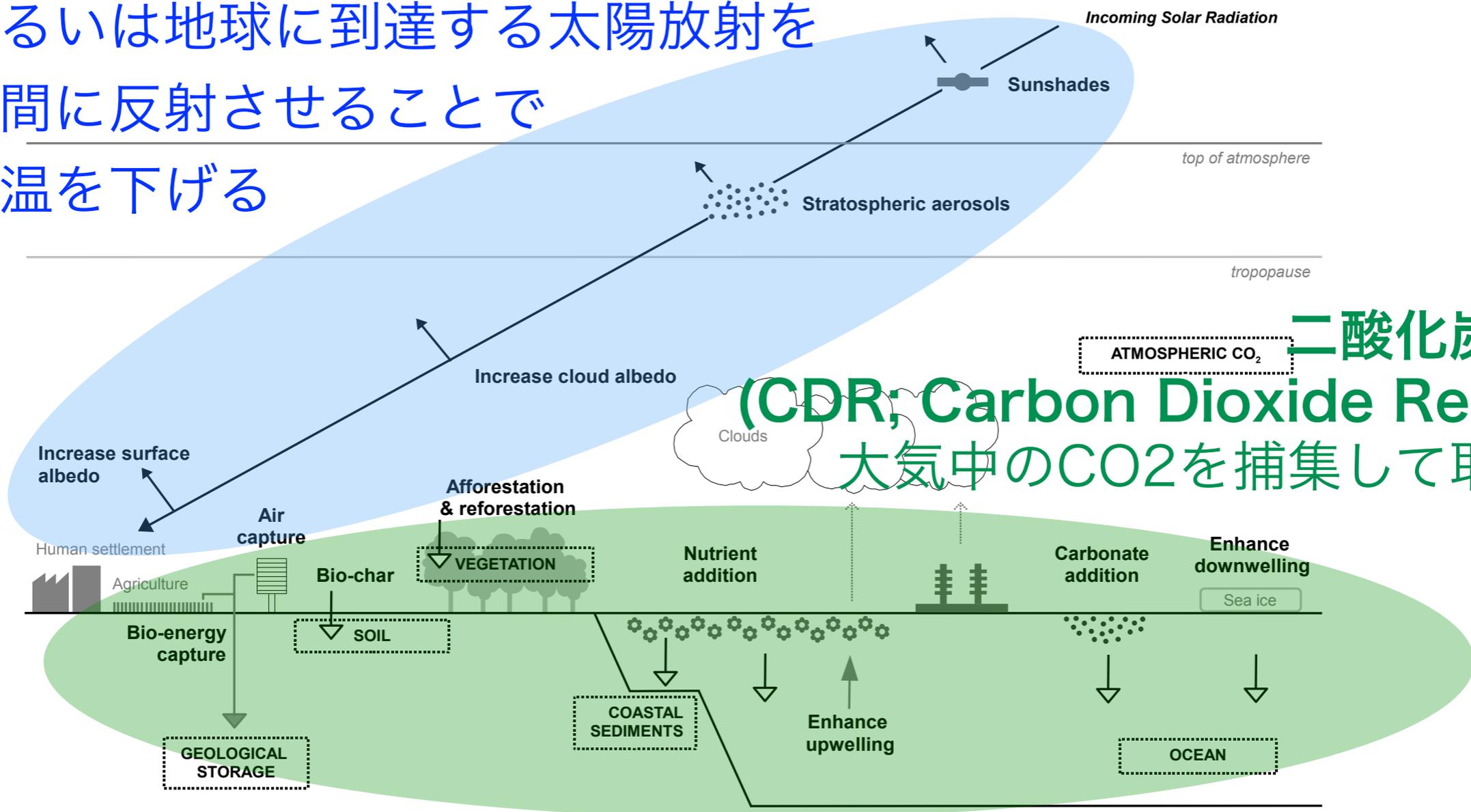
気候工学 (geoengineering) とは

「人為的な気候変動の対策として行う意図的な惑星規模の大規模改変」

- アプローチにより 2つ大別

## 太陽放射管理 (SRM; Solar Radiation Management)

地表あるいは地球に到達する太陽放射を  
宇宙空間に反射させることで  
地表気温を下げる



二酸化炭素除去  
(CDR; Carbon Dioxide Removal)  
大気中のCO<sub>2</sub>を捕集して取り除く

# はじめに

気候工学 (geoengineering) とは

「人為的な気候変動の対策として行う意図的な惑星規模の大規模改変」

- **太陽放射管理 (SRM)** の手法の中で実現可能性が高い方法が  
成層圏エアロゾル注入 ← 人工的な火山噴火

◆ 成層圏に  $\text{SO}_2$  を注入して、硫酸塩エアロゾルを増やして  
大気の太陽放射 (短波) 反射率を増加させる



地表に届く太陽放射 (短波) が減少



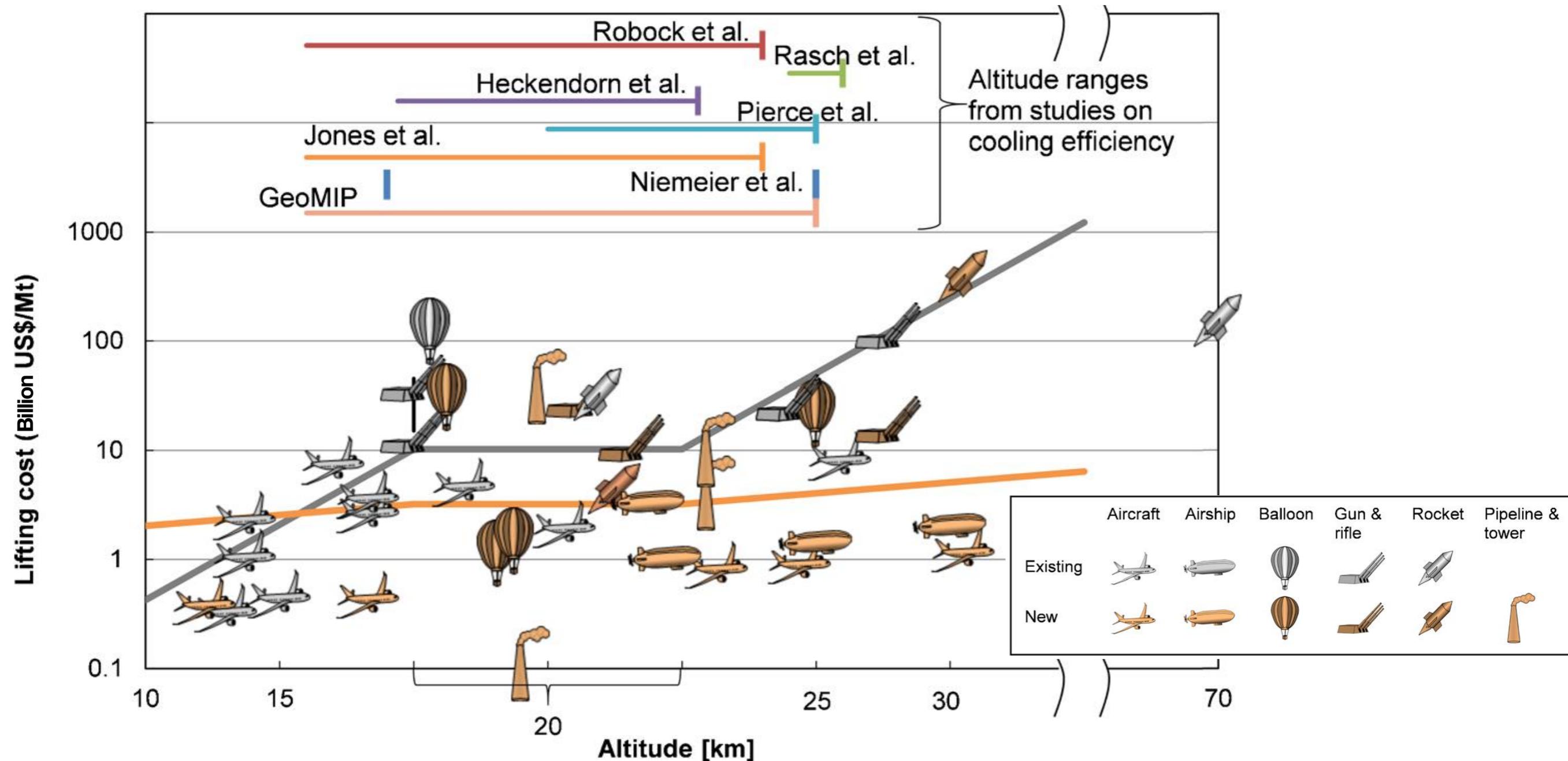
地表気温 低下



# 成層圏エアロゾル注入の利点・問題点

## ・ 利点

- 既存の技術で実行可能（と思われる）
- 比較的安価
- 火山噴火時の観測データで効果は実証(?)済



# 余談ですが...

## 企業収益ランキング (USA TODAY, 2015)

世界順位	名前	国籍	年間純利益 (10億\$)
1	アップル	アメリカ	39.5
2	エクソンモービル	アメリカ	33.6
3	サムスン電子	韓国	21.4
4	パークシャー・ハサウェイ	アメリカ	20.2
5	シェブロン	アメリカ	19.3
6	トヨタ自動車	日本	19.2
6	中国石油天然気	中国	19.2
8	中国移動通信	中国	17.6
9	ウォルマート	アメリカ	16.8
10	ジョンソン・エンド・ジョンソン	アメリカ	16.3

## フォーブス世界長者番付 2016年

世界順位	名前	名前(読み)	関連	国籍	年齢	資産 (10億\$)
1	Bill Gates	ビル・ゲイツ	マイクロソフト	アメリカ	60	75.0
2	Amancio Ortega	アマンシオ・オルテガ	ザラ	スペイン	79	67.0
3	Warren Buffett	ウォーレン・バフェット	パークシャー・ハサウェイ	アメリカ	85	60.8
4	Carlos Slim Helu	カルロス・スリム	テレフォノス・デ・メヒコ	メキシコ	76	50.0
5	Jeff Bezos	ジェフ・ベゾス	アマゾン	アメリカ	52	45.2
6	Mark Zuckerberg	マーク・ザッカーバーグ	フェイスブック	アメリカ	31	44.6
7	Larry Ellison	ラリー・エリソン	オラクル	アメリカ	71	43.6
8	Michael Bloomberg	マイケル・ブルームバーグ	ブルームバーグ	アメリカ	74	40.0
9	Charles Koch	チャールズ・コーク	コーク・インダストリーズ	アメリカ	80	39.6
9	David Koch	デイヴィッド・コーク	コーク・インダストリーズ	アメリカ	75	39.6

# 成層圏エアロゾル注入の利点・問題点

## ・ 利点

- 既存の技術で実行可能（と思われる）
- 比較的安価
- 火山噴火時の観測データで効果は実証(?)済

## ・ 問題点

### - 知見が不十分

- 量的な知見
- エアロゾル注入継続時の影響が不明
- フィールド実験はされてない
- 影響の地域差

### - 地球温暖化問題を根本的に解決しない（←SRM共通の問題）

- 海洋酸性化には無力
- やめると急激に気温上昇
- CO<sub>2</sub>排出削減努力が停滞

### - 地球規模の合意が必要（←気候工学共通の問題）

- 誰がやるの？
- 費用負担は？
- 副作用の責任・補償は？
- 人為的に気候を改変していいのかという倫理的反発

# 成層圏エアロゾル注入の研究

- **研究は必要**

- 知見を蓄積することは重要

- 将来、温暖化の影響が許容できないほど深刻化（都市の水没、自然災害の頻発）したら、実行するかもしれない。

- 特定の国家、集団、個人が不十分な知見を都合よく解釈して勝手に実施するかもしれない。

- **シミュレーション研究なら人や環境に迷惑をかけない**

- 2000年代から、大気モデル・地球システムモデルを用いたシミュレーション研究が行われてきた。

- ▶ 太陽定数を数%減らすという簡便な方法

- ▶ 硫酸塩エアロゾル層(光学的厚さ)を成層圏に与える方法

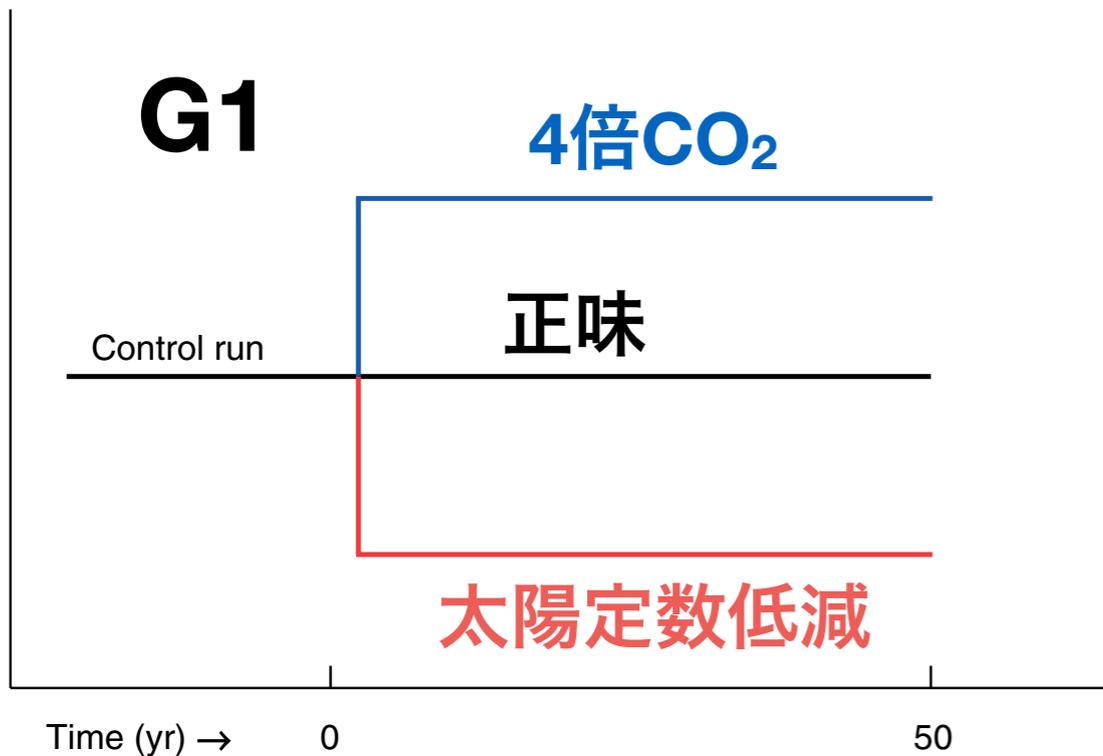
- ▶ SO<sub>2</sub>注入、エアロゾル生成・成長・輸送を陽に計算

- ➡モデル・手法・基準シナリオがバラバラで相互比較できない

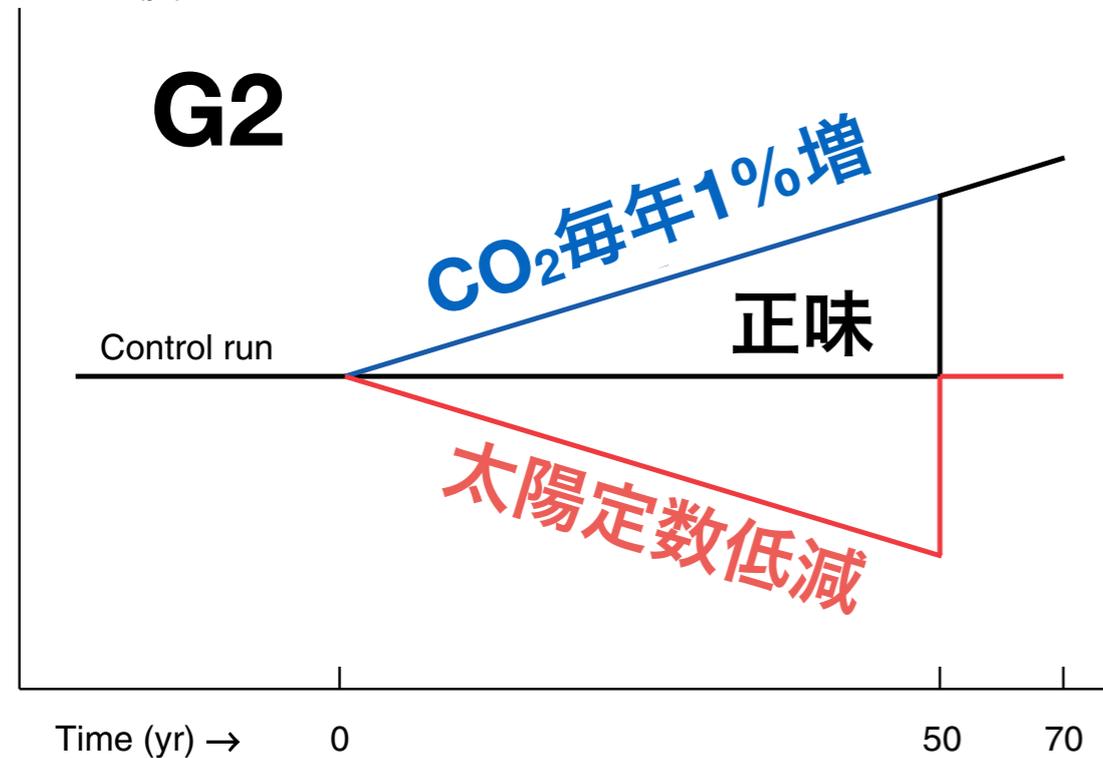
- ➡GeoMIP: Geoengineering Intercomparison Project

# GeoMIP 気候工学シミュレーションのモデル間比較のための 実験デザインを提案

放射強制力

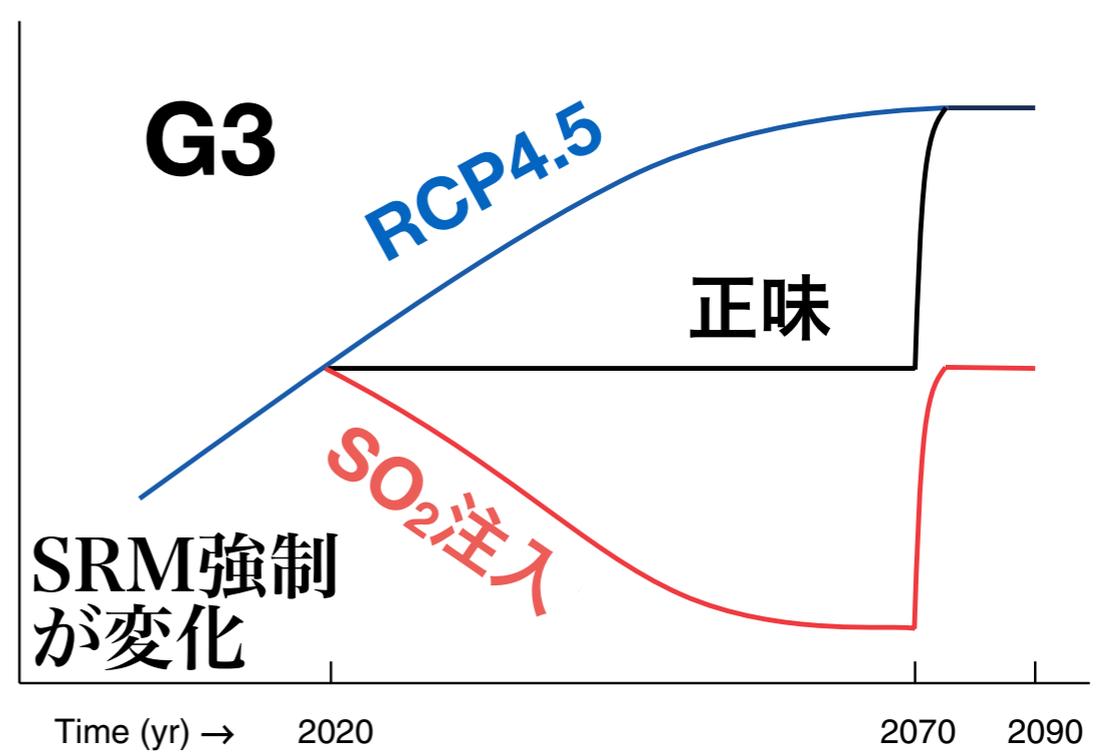


放射強制力

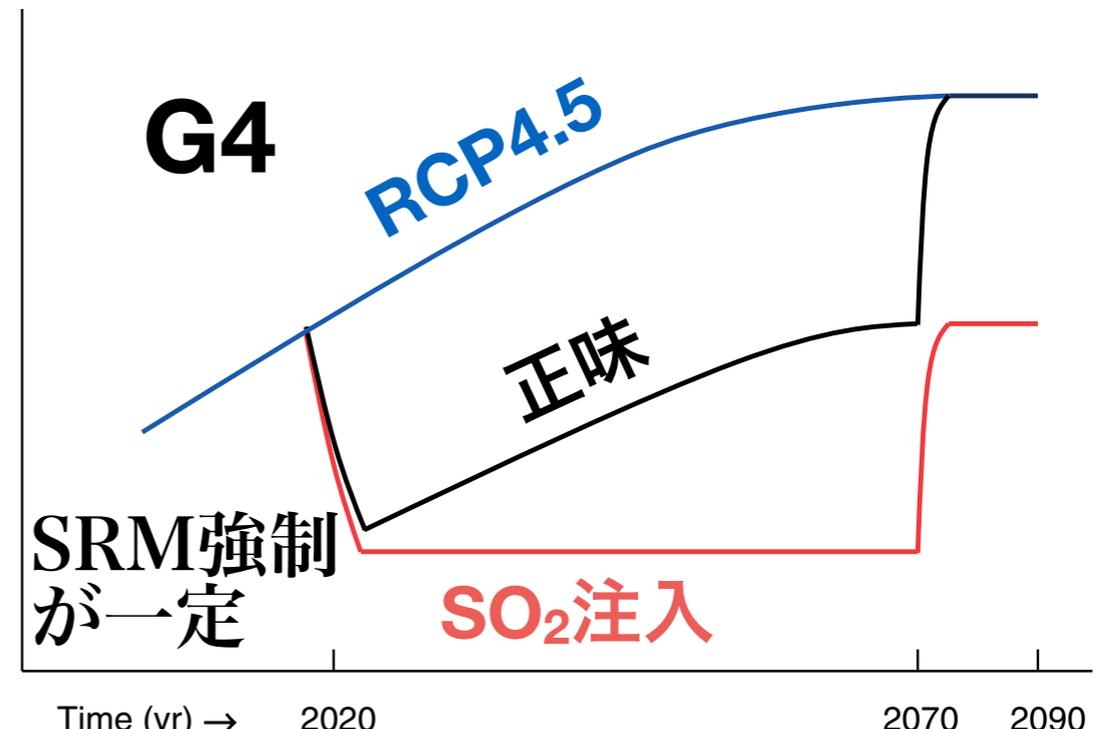


理想実験 | 太陽定数低減

放射強制力



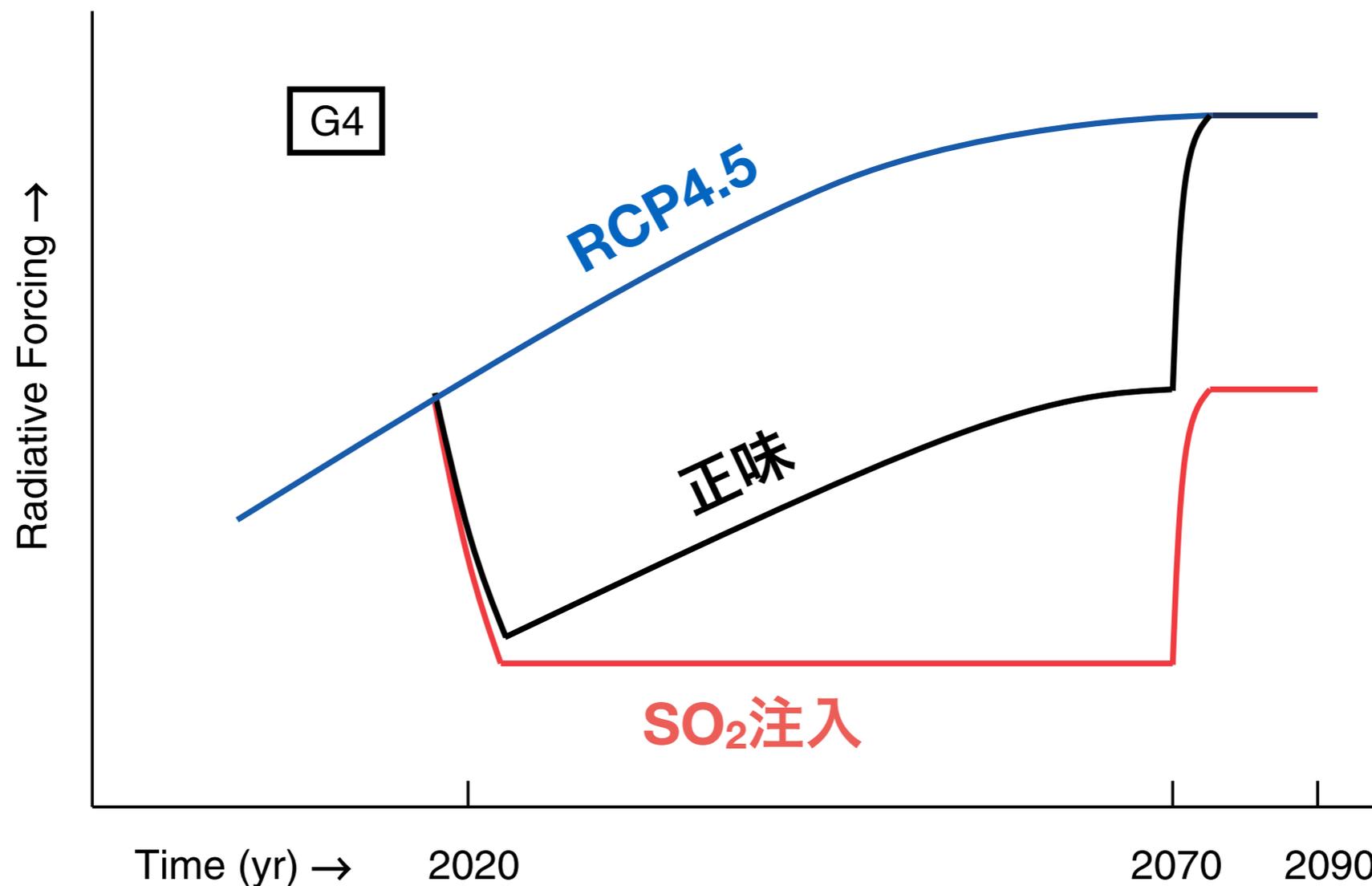
放射強制力



やや現実的 | SO<sub>2</sub>注入

# GeoMIP-G4 実験

- RCP4.5温暖化シナリオを基準実験とする。
- 成層圏 SO<sub>2</sub> 注入による気候工学（太陽放射管理：SRM）
  - 2020年から2070年まで、毎年 5 Tg の SO<sub>2</sub>（～1/4 ピナツボ噴火）を熱帯下部成層圏に注入。



# GeoMIP-G4 実験

- RCP4.5温暖化シナリオを基準実験とする。
- 成層圏 SO<sub>2</sub> 注入による気候工学（太陽放射管理：SRM）
  - 2020年から2070年まで、毎年 5 Tg の SO<sub>2</sub>（～1/4 ピナツボ噴火）を熱帯下部成層圏に注入。
- ただし、SO<sub>2</sub>注入効果の導入方法は不統一。
  - SO<sub>2</sub>から硫酸塩エアロゾルの生成、成長、拡散を陽に計算するモデル
    - ▶ HadGEM2-ES (3), MIROC-ESM-CHEM-AMP (1)
  - 1991年ピナツボ山噴火後の成層圏エアロゾル光学的深さ（AOD）をもとに作成されたAODを与えるモデル
    - ▶ BNU-ESM (1), MIROC-ESM (1), MIROC-ESM-CHEM (9)
  - 水平一様なAODを与えるモデル
    - ▶ CanESM2 (3)

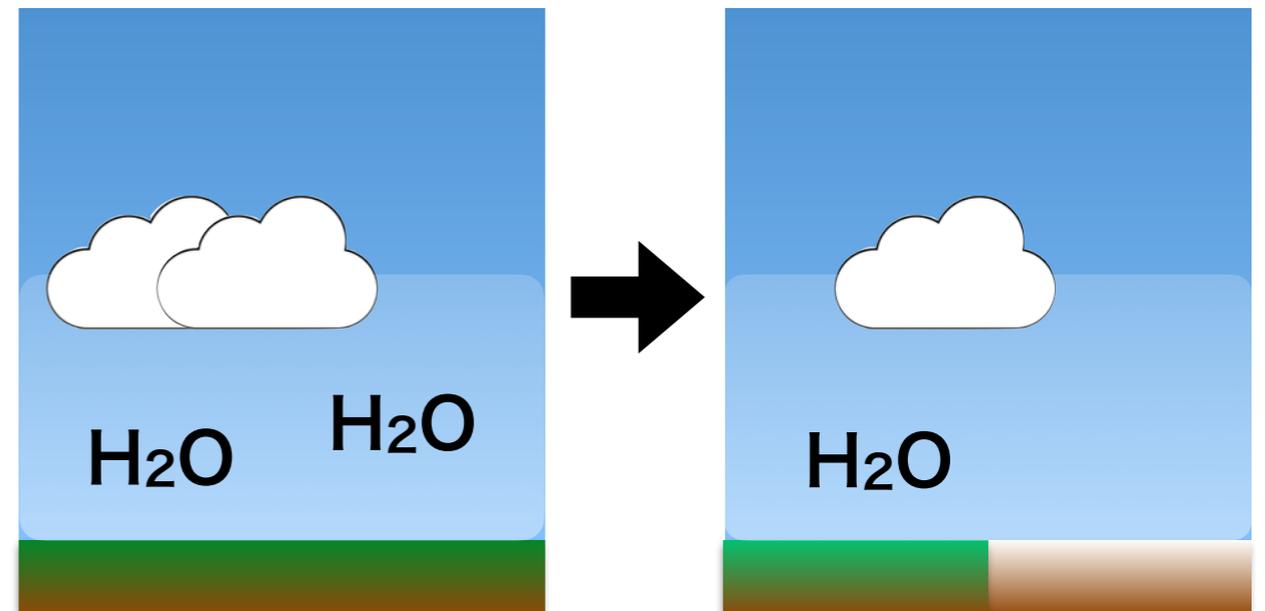
\* 括弧内の数字はアンサンブル数

# 動機と目的

- SO<sub>2</sub>注入効果の計算方法が異なる → SRMによる強制の強さも異なる。  
➔ 地表に対する短波の「SRM強制」を各モデルで評価したい。  
ここでSRM強制は、正味地表短波放射に対する直接的な強制のこと。

- また、短波に関わる応答・フィードバックも評価したい。
  - SRMによって（地表気温が下がれば）少なくとも次の量が変わる。

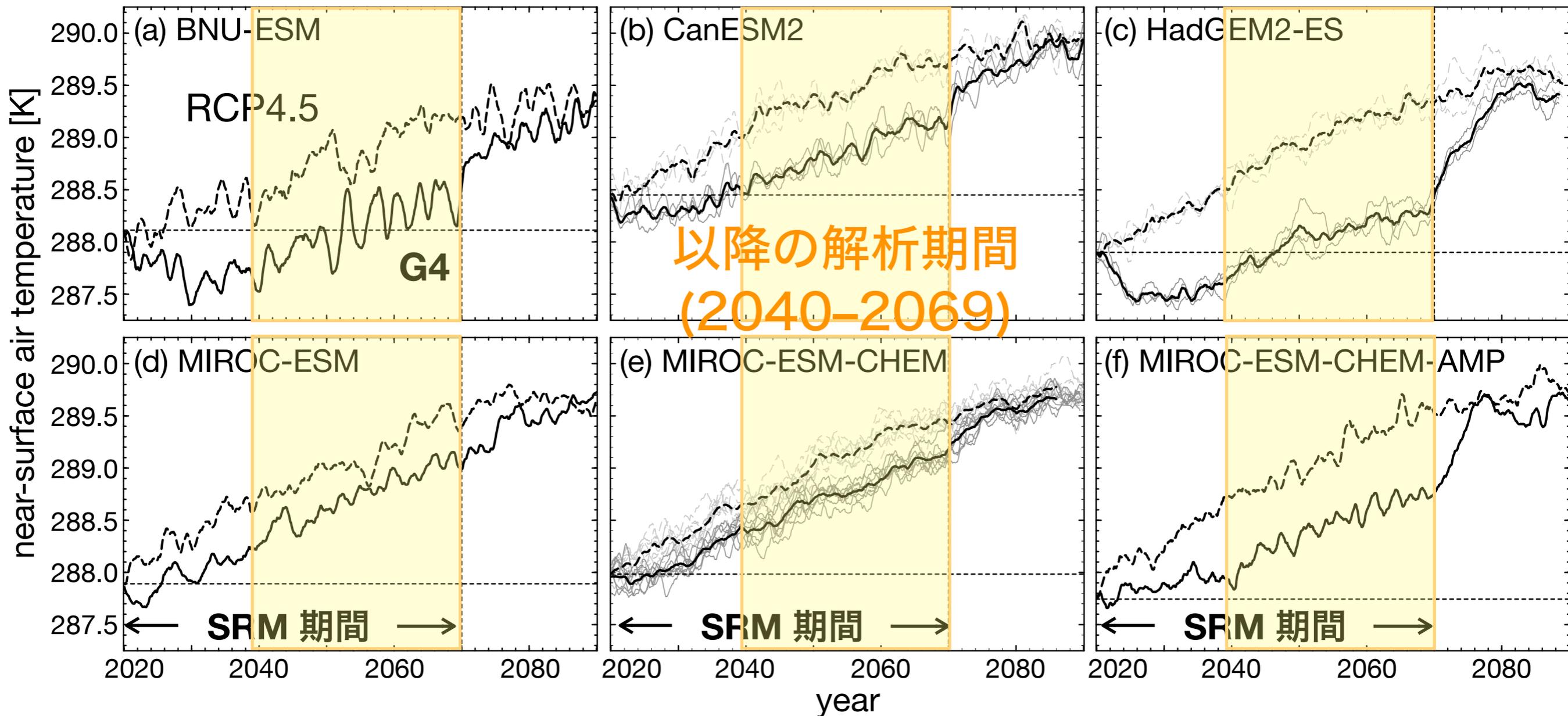
- ▶ 雲量
- ▶ 水蒸気量
- ▶ 地表アルベド



- これらの量の変化は 正味地表短波放射 に影響する。
- それによって、SRMの効果が弱められたり、強められたりする。

# 地表 2m 気温 T の時系列

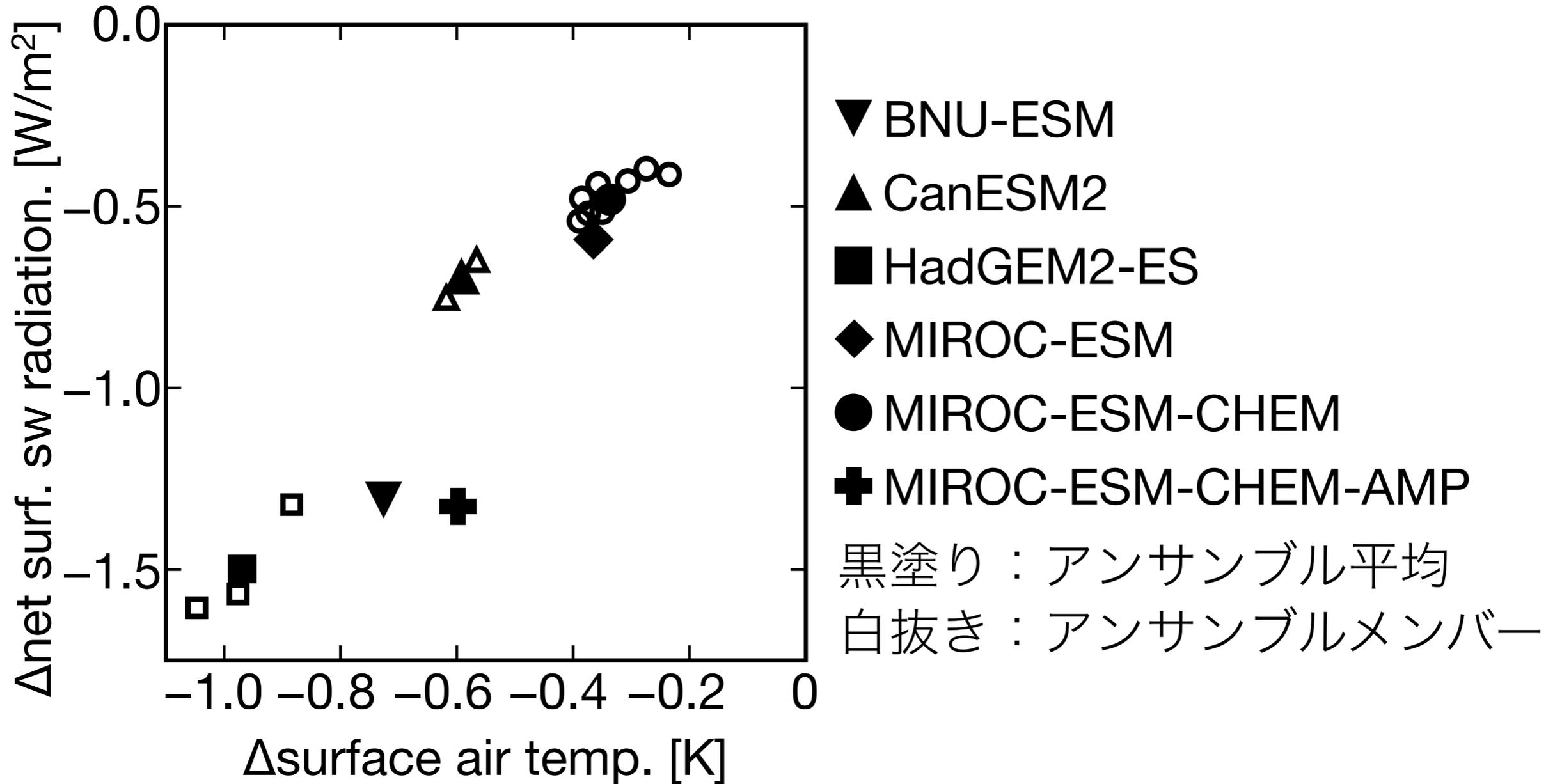
(全球平均・12か月移動平均)



- ・ RCP4.5では上昇し続けるのに対して、G4では下降あるいは2020年の水準を数十年程度保っている。
- ・  $\Delta T$  (G4 - RCP4.5) は2040年以降はおおよそ一定になる。

# $\Delta T$ vs $\Delta$ 正味地表短波放射 ( $\Delta F^{\text{net}}_{\text{SURF}}$ )

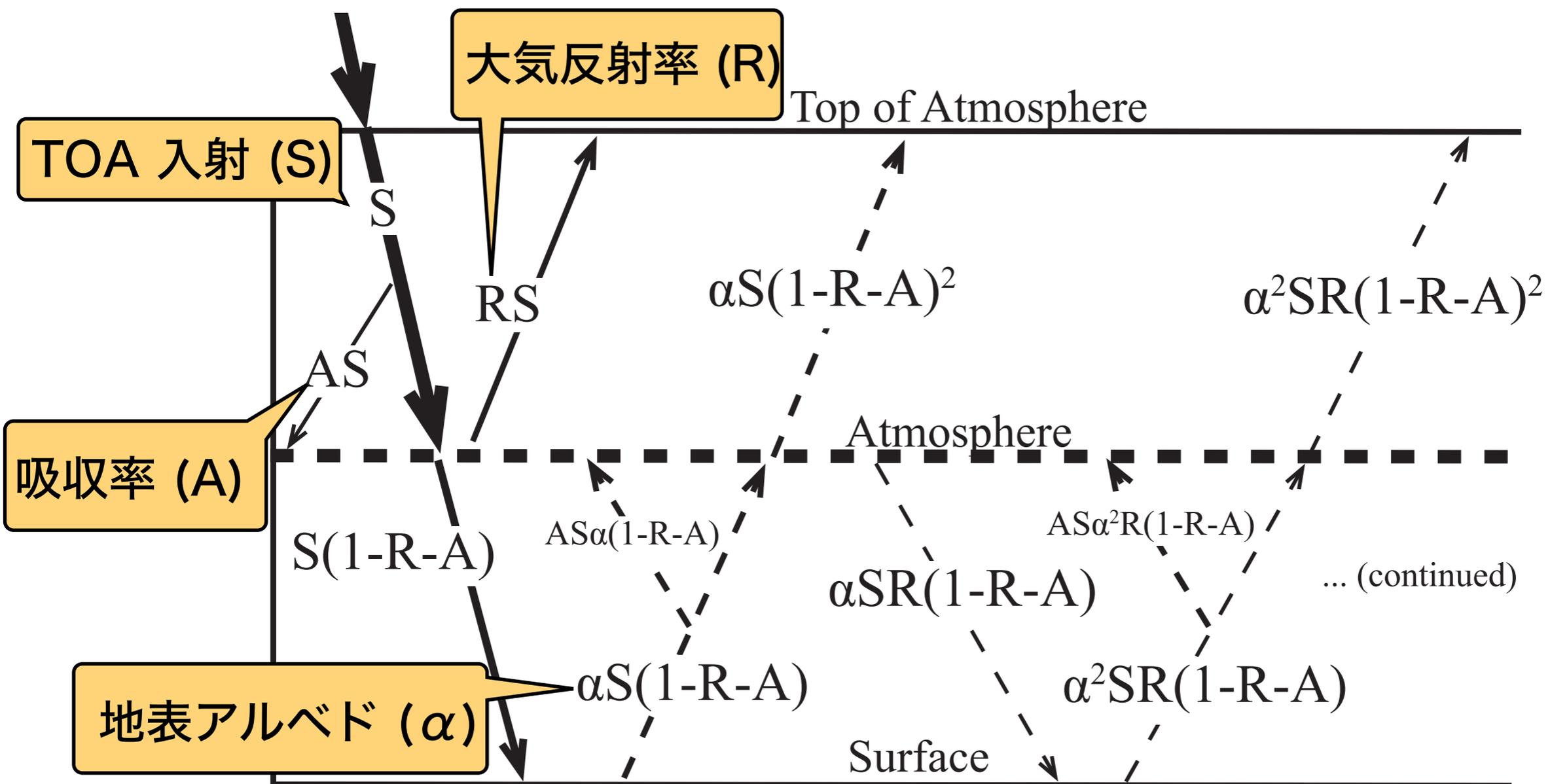
(全球平均・2040-2069平均)



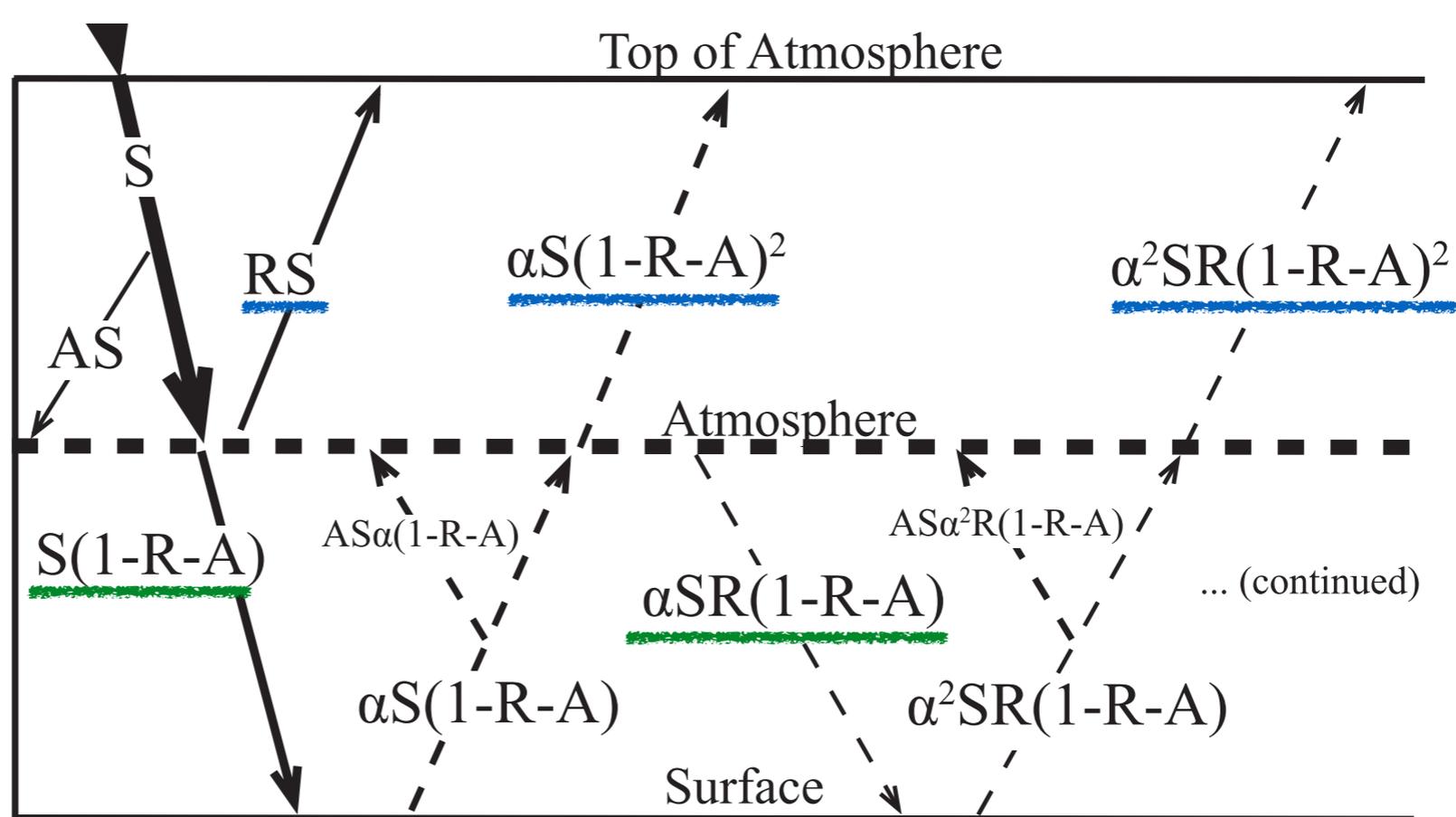
- ・ 良い相関がある。(R = 0.88)
- ・ 以後  $\Delta F^{\text{net}}_{\text{SURF}}$  をSRM強制と応答・フィードバックの大きさを測る指標とする。

# $\Delta F^{\text{net}}_{\text{SURF}}$ から SRM強制 と 反応(速い応答+フィードバック) を分離するには?

- Donohoe and Battisti (2011) が用いた 1 層大気 の短波放射伝達モデル を利用する. (同様の方法は Rasool & Schneider 1971 でも用いられていた.)
  - 短波の大気層による吸収と、地上と大気層との間の反射を無限回、考慮する。(無限級数の公式を利用)



以下のモデル出力変数を S, R, A, α で表すことができる。



TOA 上向き短波

$$F_{\uparrow \text{TOA}} = S[R + \alpha(1-R-A)^2 + \alpha^2 R(1-R-A)^2 + \alpha^3 R^2(1-R-A)^2 \dots]$$

$$= SR + S\alpha(1-R-A)^2 [1 + (\alpha R) + (\alpha R)^2 \dots] = SR + S\alpha \frac{(1-R-A)^2}{1-\alpha R},$$

地表 下向き短波

$$F_{\downarrow \text{SURF}} = S[(1-R-A) + \alpha R(1-R-A) + \alpha^2 R^2(1-R-A) + \dots]$$

$$= S(1-R-A) [1 + \alpha R + (\alpha R)^2 + \dots] = S \frac{(1-R-A)}{1-\alpha R}$$

地表 上向き短波

$$F_{\uparrow \text{SURF}} = \alpha S \frac{(1-R-A)}{1-\alpha R} = \alpha F_{\downarrow \text{SURF}}$$

$$1 + x + x^2 + x^3 + \dots = \frac{1}{1-x} \quad (x < 1)$$

$$F_{\text{TOA}}^{\downarrow} = S \quad F_{\text{TOA}}^{\uparrow} = SR + S\alpha \frac{(1-R-A)^2}{1-\alpha R} \quad (1)$$

$$F_{\text{SURF}}^{\downarrow} = S \frac{(1-R-A)}{1-\alpha R} \quad (2) \quad F_{\text{SURF}}^{\uparrow} = \alpha S \frac{(1-R-A)}{1-\alpha R} = \alpha F_{\text{SURF}}^{\downarrow} \quad (3)$$

$$S = F_{\text{TOA}}^{\downarrow}$$

$$\alpha = \frac{F_{\text{SURF}}^{\uparrow}}{F_{\text{SURF}}^{\downarrow}} \quad (4)$$



(2)×(3) して (1) へ代入して、Aを消すと

$$F_{\text{TOA}}^{\uparrow} = SR + \frac{(1-\alpha R)}{S} F_{\text{SURF}}^{\downarrow} F_{\text{SURF}}^{\uparrow} \quad \rightarrow \quad SF_{\text{TOA}}^{\uparrow} - F_{\text{SURF}}^{\downarrow} F_{\text{SURF}}^{\uparrow} = R(S^2 - \alpha F_{\text{SURF}}^{\downarrow} F_{\text{SURF}}^{\uparrow})$$

$$R = \frac{SF_{\text{TOA}}^{\uparrow} - F_{\text{SURF}}^{\downarrow} F_{\text{SURF}}^{\uparrow}}{S^2 - F_{\text{SURF}}^{\uparrow 2}} \quad (5)$$

(2)式より

$$A = (1-R) - \frac{F_{\text{SURF}}^{\downarrow}}{S} (1-\alpha R) \quad (6)$$

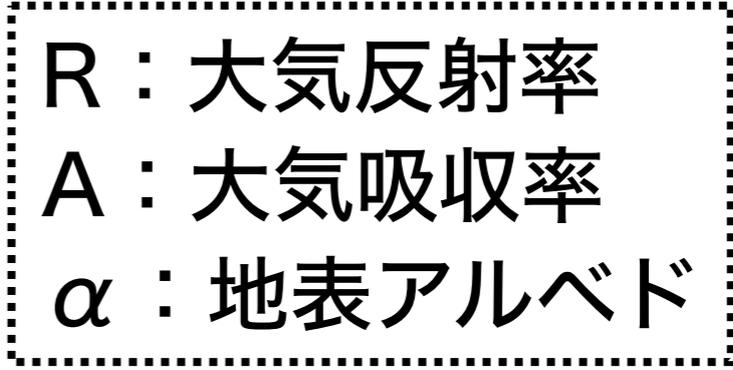
そして、 $\alpha$ と $R$ の値を用いてAお計算することができる。

正味地表短波放射は $S, A, R, \alpha$ を用いて次のように書ける。

$$F_{\text{SURF}}^{\downarrow} - F_{\text{SURF}}^{\uparrow} = (1-\alpha)S \frac{(1-R-A)}{1-\alpha R} \equiv F_{\text{SURF}}^{\text{net}}(S, A, R, \alpha)$$

# 解析方法

## モデル出力



上記の出力には 全天値 と 晴天値 があるので、

- 雲効果を“晴天値” - “全天値”として定義。
- 逆に“全天値” = “晴天値” + “雲効果”とみなせる。
- i.e.)  $R^{\text{as}} = R^{\text{cs}} + R^{\text{cl}}$ ,  $A^{\text{as}} = A^{\text{cs}} + A^{\text{cl}}$  ( $\alpha^{\text{as}} = \alpha^{\text{cs}}$ を仮定)

正味地表短波放射は以下のように書ける：

$$F^{\downarrow}_{\text{SURF}} - F^{\uparrow}_{\text{SURF}} = F^{\text{net}}_{\text{SURF}}(S, R^{\text{cs}}, R^{\text{cl}}, A^{\text{cs}}, A^{\text{cl}}, \alpha)$$
$$= (1 - \alpha)S \frac{[1 - (R^{\text{cs}} + R^{\text{cl}}) - (A^{\text{cs}} + A^{\text{cl}})]}{1 - \alpha(R^{\text{cs}} + R^{\text{cl}})}$$

R : 大気反射率  
A : 大気吸収率  
 $\alpha$  : 地表アルベド

×

cs : 晴天値  
cl : 雲効果

×

G4  
RCP4.5

【仮定】 注入した硫酸塩エアロゾルは晴天大気の反射率を増加させる。  
吸収率への影響は無視できる。

→  $R^{cs}$  のみを G4 の値に変えた時の  $F^{net}_{SURF}$  (地表正味短波放射) の変化量を SRM強制 ( $\equiv F_{SRM}$ ) と定義する。

【仮定】 水蒸気量の変化は晴天大気の吸収率を変化させる。  
反射率への影響は無視できる。

→  $A^{cs}$  のみを G4 の値に変えた時の  $F^{net}_{SURF}$  (地表正味短波放射) の変化量を 水蒸気量変化による反応 ( $\equiv E_{wv}$ ) と定義する。

→  $\alpha$  のみを G4 の値に変えた時の  $F^{net}_{SURF}$  (地表正味短波放射) の変化量を 地表アルベドの変化による反応 ( $\equiv E_{SA}$ ) と定義する。

→  $R^{cl}$  と  $A^{cl}$  のみを G4 の値に変えた時の  $F^{net}_{SURF}$  の変化量を 雲量変化による反応 ( $\equiv E_c$ ) と定義する。

$$\Delta F^{net}_{SURF} \approx F_{SRM} + E_c + E_{wv} + E_{SA}$$

# 速い応答とフィードバック

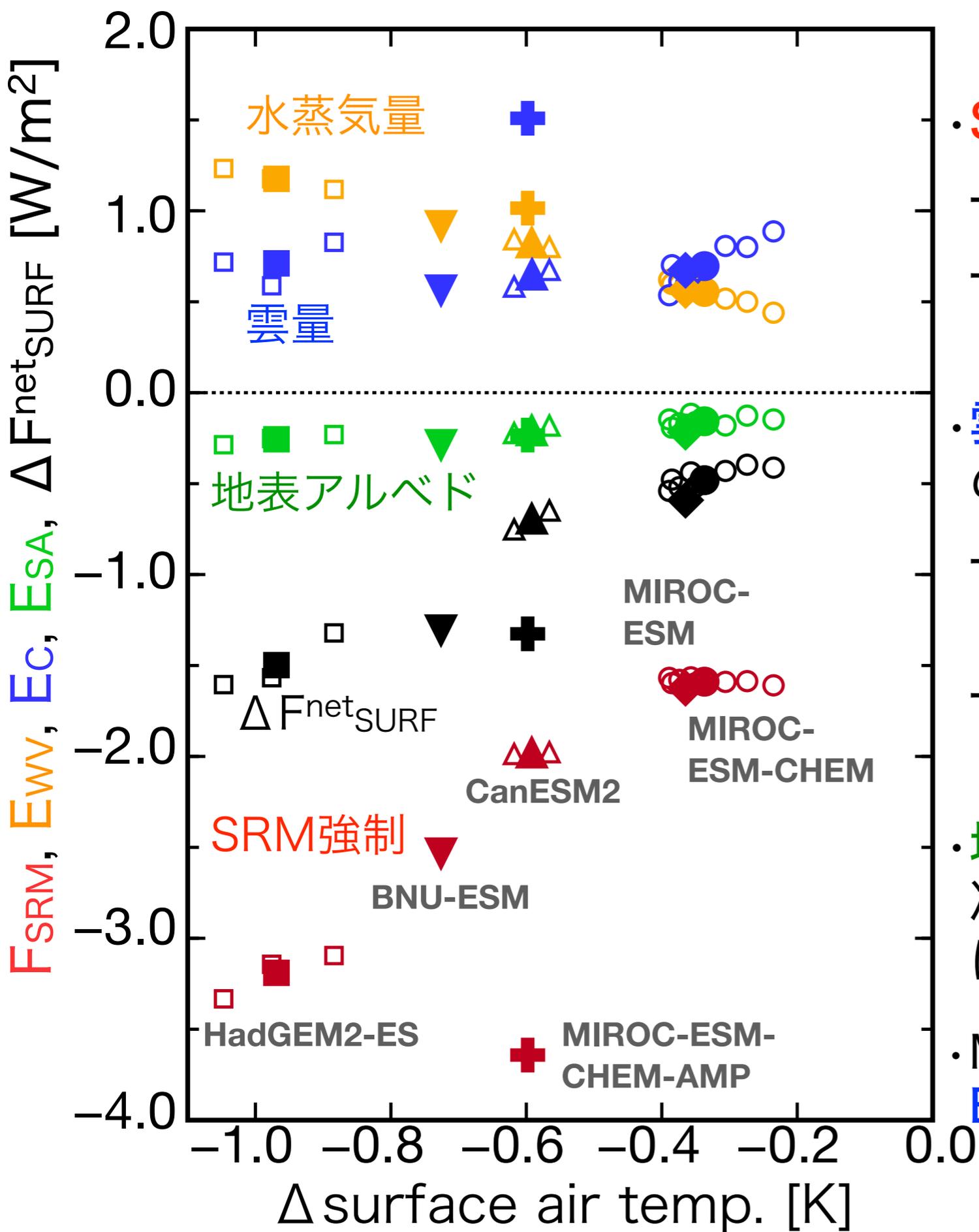
- 気候研究業界では、ある強制に対する反応を以下のように書く。

$$E = Q - P\Delta T$$

- $\Delta T$ は全球平均地表2m気温の（ある基準状態からの）変化
- $P$ がフィードバックパラメータ
- $Q$ が速い応答（調節）と呼ばれる

- 前頁の方法で求められるのは速い応答  $Q$  とフィードバック  $-P\Delta T$  の和  $E$ 。

( $E$  を  $Q$  と  $-P\Delta T$  に分離する方法は後述)



## 結果：

- **SRM強制**は
  - バラツキが大きい ( $-3.6 \sim -1.6 \text{ W/m}^2$ )
  - 硫酸塩エアロゾルを計算するモデル (HadGEM & MIROC-AMP) で大きい。
- **雲量**と**水蒸気量変化**の反応は同程度の加熱効果 ( $\sim 1 \text{ W/m}^2$ )。
  - $E_{wv}$  は  $\Delta T$  に大体比例するが、 $E_c$  はしない。
  - アンサンブルメンバー間の  $\Delta F_{\text{net SURF}}$  の差異は  $E_c$  による。
- **地表アルベド変化**のフィードバックは冷却効果だが、全球平均値への影響は小さい。
- MIROC-AMP は  $F_{\text{SRM}}$  が最も強いが、 $E_c$  も最大なので、 $\Delta F_{\text{net SURF}}$  は中程度。

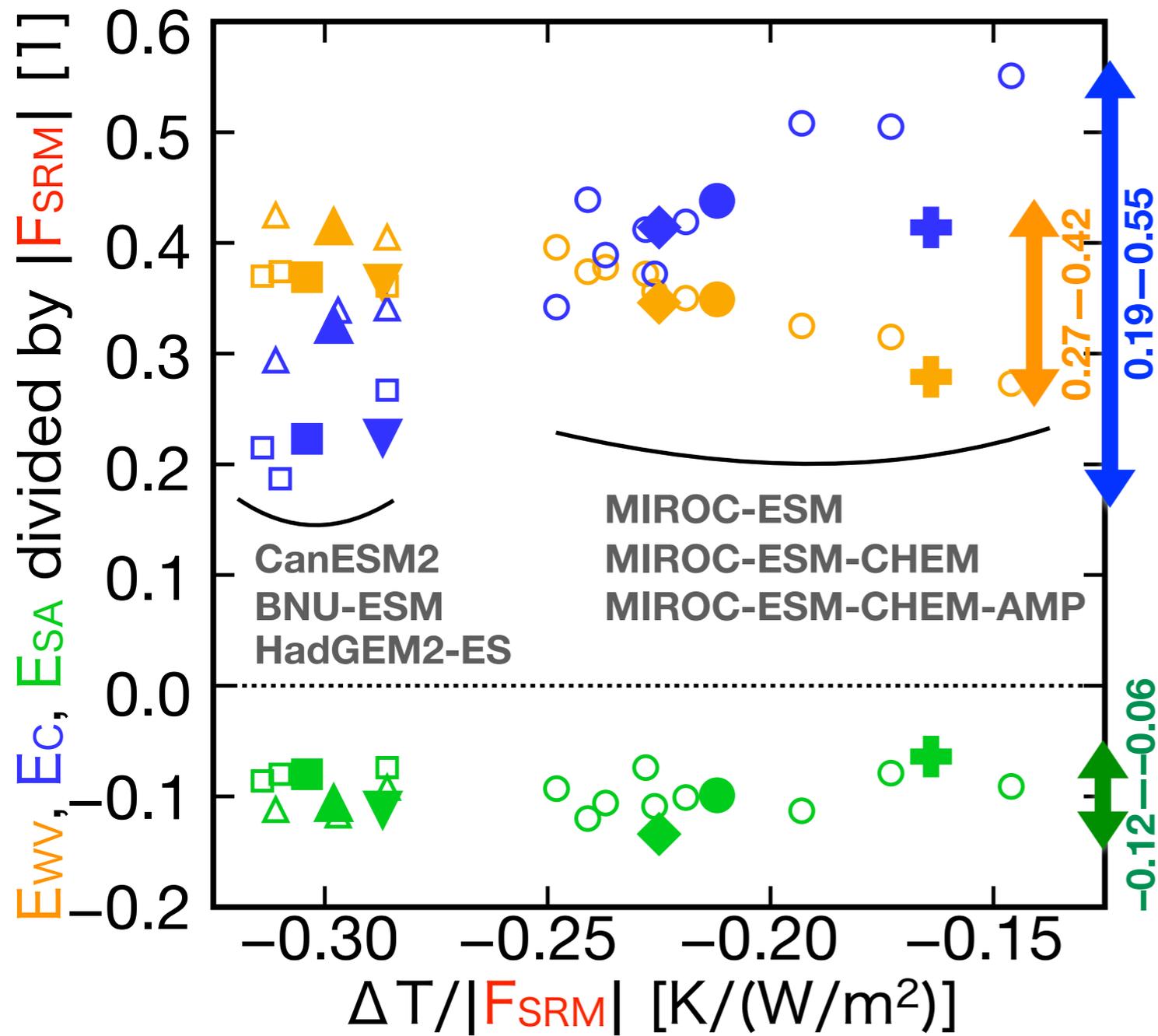
## 結果：

- **SRM強制**は
  - バラツキが大きい ( $-3.6 \sim -1.6 \text{ W/m}^2$ )
  - 硫酸塩エアロゾルを計算するモデル (HadGEM & MIROC-AMP) で大きい。
- **雲量**と**水蒸気量変化**の反応は同程度の加熱効果 ( $\sim 1 \text{ W/m}^2$ )。
  - $E_{wv}$  は  $\Delta T$  に大体比例するが、 $E_c$  はしない。
  - アンサンブルメンバー間の  $\Delta F^{\text{net}}_{\text{SURF}}$  の差異は  $E_c$  による。
- **地表アルベド変化**のフィードバックは冷却効果だが、全球平均値への影響は小さい。
- MIROC-AMP は  $F_{\text{SRM}}$  が最も強いが、 $E_c$  も最大なので、 $\Delta F^{\text{net}}_{\text{SURF}}$  は中程度。

## 示唆されること：

- ✓ SRM強制の不確実性は大きい。
- ✓ 与えた AOD ( $\sim 1/4$  ピナツボ噴火) は毎年 5 Tg の  $\text{SO}_2$  注入としては過少評価だった。
  - ➔  $\text{SO}_2$  注入による SRM のシミュレーションには、硫酸塩エアロゾルを陽に計算することが重要。
- ✓ SRM強制は雲量と水蒸気量の変化に伴う反応によって半分程度に弱められる。
- ✓ 雲過程の改良も重要。

# 結果(2)：|F<sub>SRM</sub>|で正規化

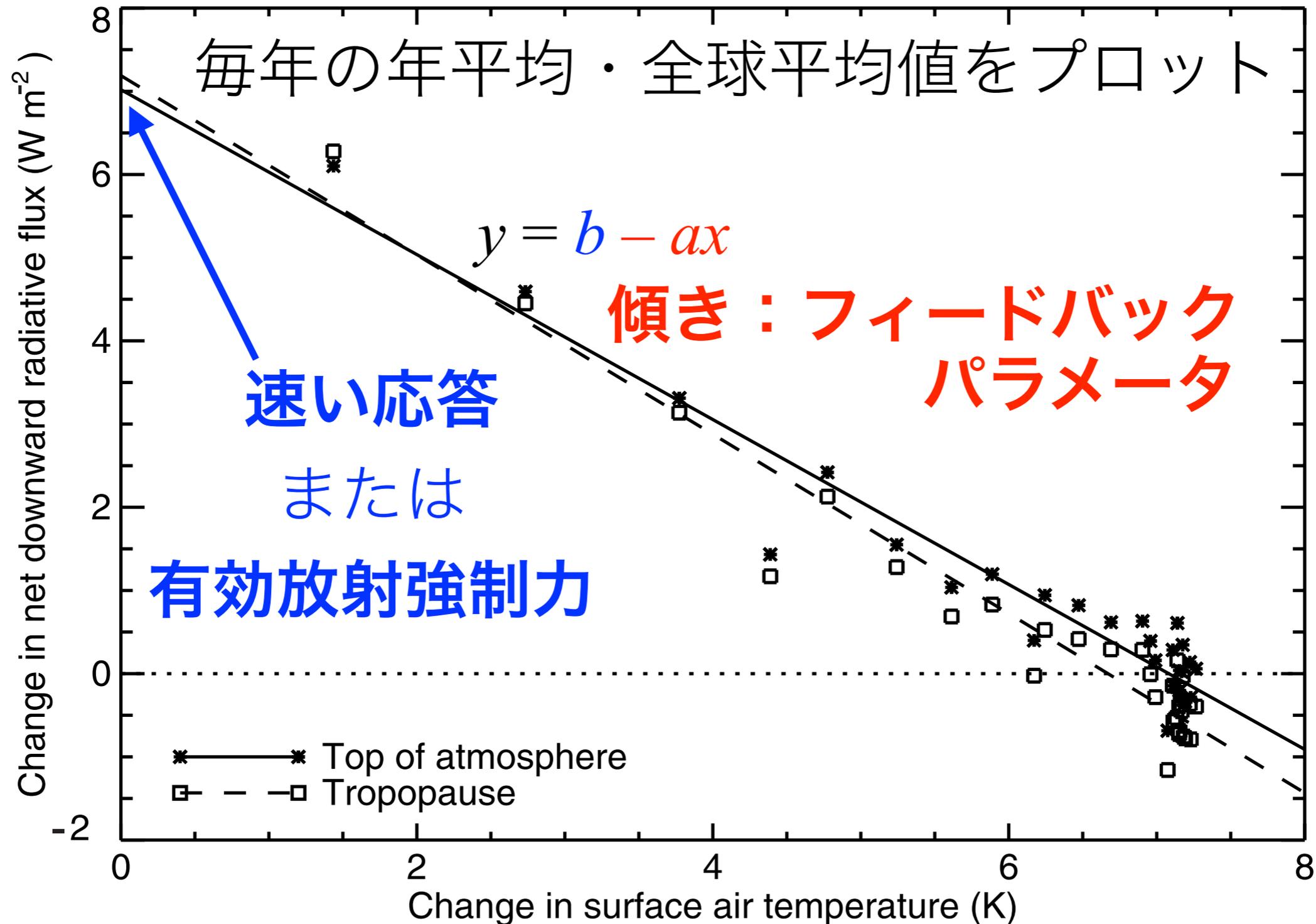


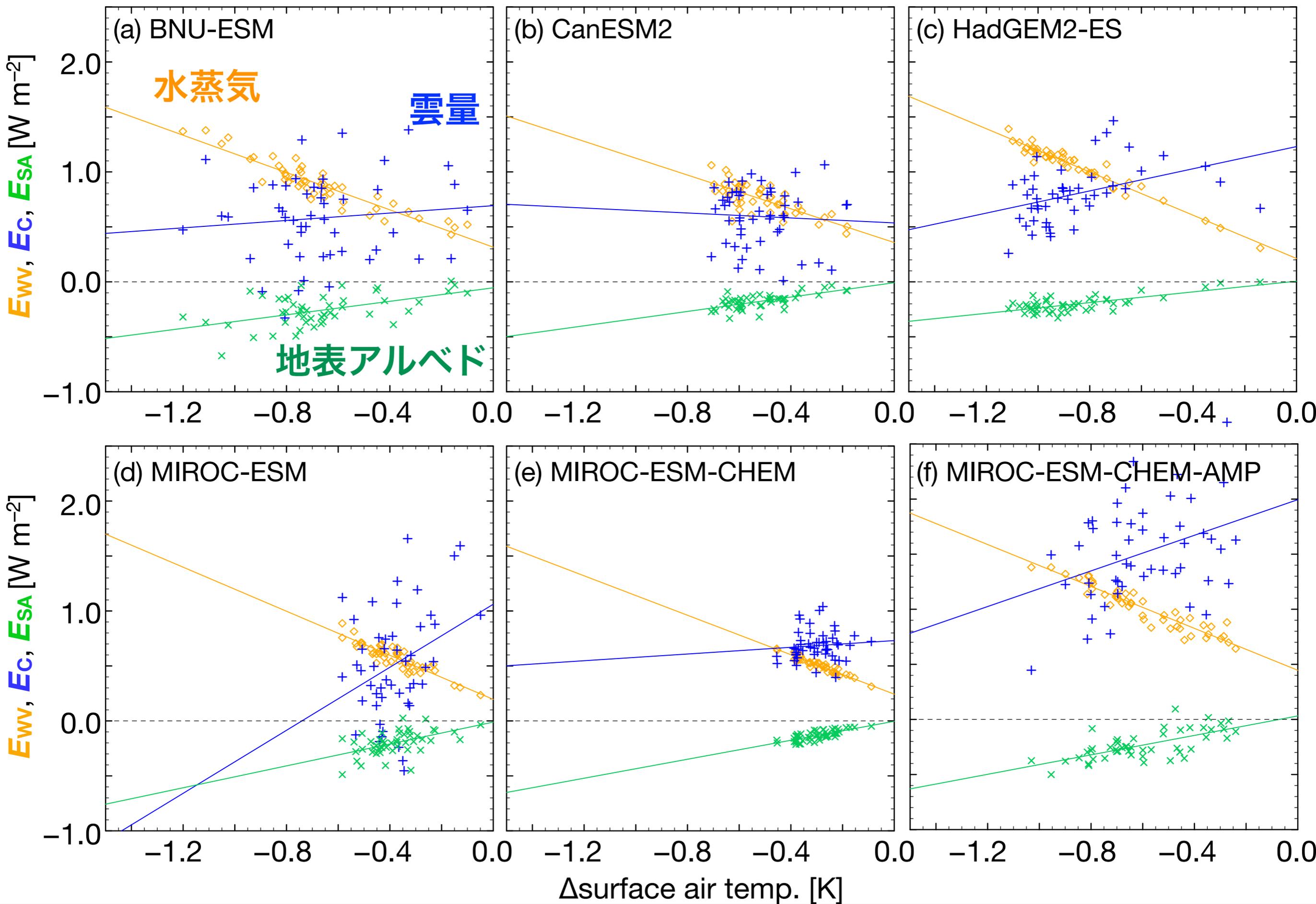
- 単位強制に対する各反応の近似的な感度を表す。
- $E_C$  のバラツキは  $E_{WW}$  や  $E_{SA}$  のそれよりも大きい。
  - $E_C$  について

- MIROCシリーズは他のモデルよりも大きな値。
  - ▶ これが MIROC-ESM-CHEM-AMP で  $E_C$  が大きかった理由。
- アンサンブルメンバー間のバラツキが、モデル間のバラツキと同程度。
  - ▶ SRMの冷却効果は  $E_C$  の影響で、初期値依存性も高い。

# 速い応答とフィードバックの分離

- Gregory et al. (2004) で提案された方法





# 速い応答とフィードバックの分離

フィードバックパラメータ

速い応答 (水蒸気) 相関係数 (雲量) 地表アルベド

Models	$Q_{wv}$	$-P_{wv}$	$R_{wv}$	$Q_c$	$-P_c$	$R_c$	$Q_{SA}$	$-P_{SA}$	$R_{SA}$
BNU-ESM	0.32	-0.85	-0.93	0.69	0.17	0.11	$-5.4 \times 10^{-2}$	0.31	0.52
CanESM2	0.36	-0.77	-0.74	0.54	-0.11	-0.06	$-7.9 \times 10^{-3}$	0.33	0.66
HadGEM2-ES	0.21	-0.99	-0.97	1.23	0.50	0.41	$6.0 \times 10^{-3}$	0.24	0.71
MIROC-ESM	0.20	-1.00	-0.90	1.06	1.43	0.33	$-1.1 \times 10^{-2}$	0.50	0.52
MIROC-ESM-CHEM	0.24	-0.90	-0.95	0.73	0.15	0.09	$-3.5 \times 10^{-3}$	0.43	0.75
MIROC-ESM-CHEM-AMP	0.45	-0.95	-0.94	2.00	0.81	0.36	$3.1 \times 10^{-2}$	0.44	0.68
Multi-model mean	0.30	-0.91	-0.91	1.04	0.49	0.21	$-6.5 \times 10^{-3}$	0.38	0.64

- **水蒸気**：よく分離された。速い応答が  $0.3 \text{ W/m}^2$  程度。
- **雲量**： $\Delta T$ との相関が低い。速い応答の寄与がほとんど？  
基準状態もシナリオに沿って時間変化するから速い応答も変化する。
- **地表アルベド**：速い応答はほとんどなし。ほぼ $\Delta T$ に比例。

# まとめ

- RCP4.5シナリオに毎年 5 Tg の SO<sub>2</sub> 注入によるジオエンジニアリング (太陽放射管理：SRM) を行う GeoMIP-G4 実験を解析した。
  - G4 では SRM によって全球平均地表気温 (T) が 0.2~1 K 下がった。また、 $\Delta T$  は正味地表短波放射の変化量 ( $\Delta F^{\text{net}}_{\text{SURF}}$ ) と良い相関がある。
  - Donohoe and Battisti (2011) の 1 層大気短波放射伝達モデルを応用して **SRM強制** と **雲量**・**水蒸気量**・**地表アルベド** の変化に伴う反応 (= 速い応答 + フィードバック) を見積もった。
  - 結果：
    - **SRM強制** には大きなバラツキ ( $-3.6 \sim -1.6 \text{ W/m}^2$ ) があった。
    - 内部で硫酸塩エアロゾルを計算するモデルの方が、SRM強制は強い。
      - ▶ 1/4 ピナツボは 毎年 5 Tg の SO<sub>2</sub> 注入を過少評価している。
    - **雲量** と **水蒸気量** 変化は約  $1 \text{ W/m}^2$  の加熱効果をもたらす。
      - ▶ 地表への短波強制を半減させる。
    - $\Delta T$  には初期値依存性も重要。 (: 雲量変化のメンバー間のバラツキ 大)
- ➔ SO<sub>2</sub> 注入の SRM シミュレーションには硫酸塩エアロゾルと雲に関連するプロセスのさらなる改良が重要である。