

特集 太陽放射改変と大気からの二酸化炭素除去：展望と課題

太陽放射改変の科学的理解の現状と課題

Current Status and Issues in Scientific Understanding of Solar Radiation Modification

渡 辺 真 吾*

Shingo Watanabe

1. まえがき

気候変動は人類社会や生態系に深刻な脅威を与えている。温室効果ガスの排出削減や大気中からの除去をより効果的に進めることや、温暖化の効果を相殺したり助長したりするエアロゾルや対流圏オゾン等の短寿命気候強制因子を、温暖化をなるべく悪化させないやり方で削減するなど、温暖化緩和策の取り組みを加速する必要がある。

「それでもどうにもならないときにはどうするのか？」温室効果ガスの増加によって崩れた地球の放射収支を、人工的に太陽放射を減らすことによって相殺する「太陽放射改変 (Solar Radiation Modification: SRM)」という手法が、COP (Conference of the Parties) のような国際政治の場や、米英を中心とした科学コミュニティで注目を集めているが、日本における認知度や関心は海外に比べて格段に低い。

本稿は、代表的な SRM 手法の概要を解説するとともに、それを用いた場合の地球システムの応答や人類社会への影響等に関する科学的理解の現状と課題について概観する。

2. 地球システムモデルを用いた SRM 研究

地球システムモデルとは、大気、海洋、海水の運動や海面や陸面を通じたエネルギーのやり取り等を取り扱う気候モデルに、海陸の生態系ならびに土地利用や施肥や大気汚染といった人間活動の影響を含む生物地球化学・物質循環プロセスを統合した大規模なコンピューター・プログラムである。過去に観測された気候変動のメカニズム解明や将来の地球温暖化予測、近年ではパリ協定で定められた温暖化目標を達成するための残余カーボン・バジェットを推定するためのツールとしても用いられている¹⁾。なお、本節では地球システムモデルを用いて何らかの想定に基づいてスーパー・コンピュータの中の仮想地球に変化をもたらすような実験を行うことをシミュレーションもしくは単に実験と呼ぶ。多くの場合には、「何らかの想定」を加えない対照実験を同時に行い、双方の振る舞いの違いを評価するこ

とによって、SRM に対する地球システムの応答を評価する。

地球システムモデルを用いて、SRM を実施したときの効果・副作用やその不確実性を定量的に評価する国際的な枠組みである GeoMIP (Geoengineering Model Intercomparison Project)²⁾ は、2010 年に始まり、その評価結果は IPCC の第 5 次³⁾・第 6 次評価報告書⁴⁾ や、最新の WMO オゾン層レポート⁵⁾ の関連各章において中心的な役割を果たした。筆者は GeoMIP 創設当初からその活動に参加し、地球システムモデルを用いたシミュレーションを実施してその結果を参加者間で共有するとともに、運営委員として結果の分析や新しい実験設定の議論に参加してきた。以下で紹介する GeoMIP の成果については、最新の文献⁶⁾ を参照されたい。

2.1 宇宙太陽光シールド

現在までに提案された SRM の手法の中で、実現可能性は低い反面シンプルで分かりやすいものは、太陽と地球の間の宇宙空間に太陽放射の一部を遮蔽するシールドを置く方法 (Space Sun Shield: SSS) である (図 1)。GeoMIP においては、「大気中の CO₂ 濃度を瞬時に 4 倍増させて増やした温室効果を、地球大気上端から入射する太陽放射を一

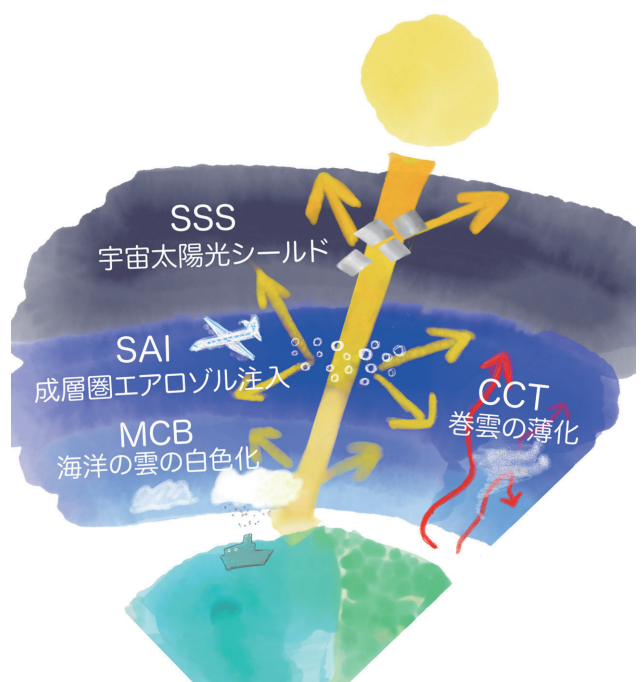


図 1 SSS, SAI, MCB, CCT の概念図

* 国立研究開発法人海洋研究開発機構地球環境部門環境変動予測研究センター

〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25

E-mail: wnabe@jamstec.go.jp

定割合（数％）減らすことによって相殺する」という想定
のシミュレーションが行われ、アカデミックな見地から様々
な分析が行われた⁷⁾。以下に、得られた知見を概観する。

最初に強調しておくべき点として、この手法に限った話
ではないが、SRMは世界各地で生じる地球温暖化の影響
を完全にキャンセルすることはできない。宇宙太陽光シ
ールドによって地球大気上端から入射する太陽放射を一定割
合減じた場合、もともと日射量の豊富な低緯度では削減量
が多く、日射量の乏しい高緯度では削減量が少なくなる。
このため、低緯度はより大きく冷える一方で高緯度は冷え
にくい。次に、低緯度は日射量の減少で対流が抑制されて
降水量が減る効果が働くのに加えて、高CO₂濃度環境下で
は植物の気孔を通じた蒸散が抑制される効果が加わるた
め、乾燥化が生じる。このように、全球的なSRMに対す
る地球システムの応答には地域による違いが生じるため、
地球温暖化問題に加えてSRMによる受益者・被害者の格
差が新たに生まれる。これはSRMの潜在的なリスクとし
て研究者間で広く認識された。

もう1点、この手法に限った話ではないが、GeoMIP開
始前から広く認識されていたSRMのリスクとして「終端
問題」と呼ばれる問題がある。仮に人類社会が温暖化対
策としてSRMに頼り切ってしまい、温室効果ガスの排出
削減に後ろ向きになったならば、大気中の温室効果ガス
の濃度は増え続け、その温室効果を相殺するために必要
なSRMの実施規模も右肩上がりになってしまう。そうし
た状態のもとで、大規模な自然災害や戦争などによって
SRMを中止したらどうなるだろうか？ GeoMIPによれば、
大気中のCO₂濃度が増加した状態でSRMを突然中止した
場合、そのCO₂濃度に応じた地球温暖化が急速にもたらさ
れる⁸⁾。その温暖化の大きさや速さは、SRMを中止した
時点でSRMが相殺していた温室効果の大きさによる（仮
に現在に比べて2℃の温暖化が5～10年の間に生じたと
するならば、雪氷圏や生態系等の地球システムや人類社会
に壊滅的・不可逆的な変化をもたらす可能性がある）。

2.2 成層圏エアロゾル注入：SAI

最もよく研究されており実施への技術的ハードルが相対
的に低いと言われているのは、航空機を用いて成層圏に硫
酸エアロゾル等の微粒子を注入する方法（Stratospheric
Aerosol Injection：SAI）である⁹⁾。SAIは、大規模な火
山噴火が引き起こす成層圏硫酸エアロゾルの増加と、それ
が太陽放射の一部を宇宙へ反射することで生じる地表面の
冷却という自然現象を模倣するアイデアである（図1）。

ここで、火山噴火が成層圏硫酸エアロゾルの増加を引き
起こすメカニズムとその行く末について解説しておく必要
がある。1991年6月に噴火したフィリピンのピナツボ火
山は、噴煙物質と一緒に水蒸気や亜硫酸ガスといった大量

の火山性ガスを成層圏に注入した。亜硫酸ガスは、周囲の
オゾン等の物質による化学反応で酸化されて硫酸ガスにな
り、周囲の水蒸気と結合しつつ凝結することによって硫酸
水溶液の微粒子が生成される。これを成層圏硫酸エアロゾ
ルと呼ぶ。そのサイズは、周囲の硫酸ガスが水蒸気ととも
に微粒子の表面に凝結する効果や、微粒子同士が凝集する
効果によって成長して行く。高濃度の火山性ガスの周囲で
起こるこうした化学反応や微物理学的プロセスは成層圏の
局所的な乱流混合の影響を受けるが、ピナツボ噴火後に観
測された成層圏硫酸エアロゾルの代表的な半径はおよそ
0.5 μm と報告されている。成層圏硫酸エアロゾルは成層
圏の大規模な循環により輸送・混合され、数ヶ月～数年を
経て次第に対流圏に下りていくほか、サイズが大きいもの
は重力によって速やかに対流圏へと落下し、雲や降水に取
り込まれたり地表面に衝突したりして大気中から除去され
る（なお、火山以外を起源とする成層圏硫酸エアロゾルも
地球の気候形成に一定の役割を果たしているが、ここでは
省略する）。

また、成層圏硫酸エアロゾルが太陽光を反射し、赤外放
射を吸収する性質についても解説しておく必要がある。そ
れらは無色透明の球状の液滴であり、より強く太陽光を反
射するためには、微粒子のサイズが小さくて数が多いこと
が望ましい。これは、見慣れた雲にも通じることであるが、
小さな粒子が多数ある方が、大きな粒子が少数ある場合よ
りも効率よく太陽光を反射することに加えて、粒子同士の
凝集によるサイズ成長が起きにくく、重力落下が起きにく
いという利点も働くためである（こうした観点から、SAI
を行う場合には、亜硫酸ガスを大量に注入すると微粒子の
成長が急速に進んでしまうため、硫酸水溶液を微細なスブ
レー等で噴霧する方がよいことが示唆されており、後者
の優位性はGeoMIPの先行試験シミュレーションでも実証
された）。一方、成層圏硫酸エアロゾルは、地表面や対流
圏の大気や雲が上向きに放射する赤外線を吸収すること
によって、成層圏の大気を加熱する効果を併せ持つ。熱せら
れた大気は上昇するため、そうして生じる大気の循環は成
層圏オゾン等の大気成分の輸送にも影響を及ぼす。

地球システムモデルを用いたSAIシミュレーションの話
に進もう。これまでに行われたGeoMIPを含むSAIシミュ
レーションのほとんどでは、下部成層圏に亜硫酸ガスを注
入する想定で実験が行われ、危惧される副作用であるオゾ
ン層の破壊の程度や、極端現象を含む気候システムの応答
とその不確実性が評価された（ただし、GeoMIPに参加し
た地球システムモデルの全てが、先に述べた成層圏硫酸エ
アロゾルの生成やサイズ成長にかかわる化学反応および微
物理学的プロセスを精緻に取り扱っているわけではなく、
いわば2～3の精緻なモデルの先頭集団と、上記のプロセ

スを簡略化もしくは省略した第2, 第3集団から構成されていた。このため、それらのシミュレーション結果の相互比較を行う際には細心の注意を必要としたし、先進的な研究成果が少数のモデルのみで代表されていることは科学的な評価結果に偏りが生じるリスクがある。今後の改善が期待される点である。

航空機を用いてSAIを行う緯度や高度については、航空機の到達可能高度等の技術的な制限や空港整備や離発着サイクル等の運用コストの条件等を別途考慮しなくてはならないが、GeoMIPは赤道下部成層圏を選んだ。これは、そこでSAIを行えば、あとは下部成層圏の大気の循環によって、南北両半球に成層圏エアロゾルが運ばれていくことが、過去の火山噴火の際の実例や、地球システムモデルを用いたシミュレーション結果によって分かっていたためだ。ここで注意が必要なのは、ピナツボ火山の噴煙が成層圏まで噴き上がった期間は1週間未満であり、その成層圏硫酸エアロゾルは数年で無くなったのに対して、SRMを目的としたSAIを行う場合には、成層圏硫酸エアロゾルの濃度が低下しないように、繰り返し継ぎ足しながらSAIを実施し続ける必要があることだ。

以下では各々の地球システムモデルの実験設定の詳細には踏み込まず、GeoMIPのSAIシミュレーションから得られた知見を概観する。

まず、SAIシミュレーションで得られた成層圏硫酸エアロゾルの分布についての評価結果について述べる。先に述べたように赤道下部成層圏に亜硫酸ガスを注入すれば、成層圏硫酸エアロゾルが生成され、下部成層圏の循環によって（亜硫酸ガス、硫酸エアロゾルともども）南北両半球へと広がっていくのであるが、赤道下部成層圏に継続的に注入する関係で、赤道周辺が最も高濃度になることが直観的に予想される。ところが、赤道下部成層圏から中・高緯度への輸送のされやすさは各々の地球システムモデルによって大きく異なり、あるモデルの成層圏硫酸エアロゾルは、長期間赤道周辺に留まるため赤道上で高濃度になったのに対して、別のモデルでは素早く中・高緯度へと運び出されてしまい、むしろ中・高緯度の方が高濃度になるというように評価結果が分かれてしまった¹⁰⁾。こうした結果の不一致は、各々の地球システムモデルがシミュレートする成層圏循環の不完全さ（観測事実と比べたときの振る舞いの違い）ならびに成層圏硫酸エアロゾルの生成やサイズ成長にかかわる化学反応および微物理学的プロセスの取り扱い方の違いに起因すると考えられており、地球システムモデルを用いたSAIに関する評価の信頼性が現状不十分と見なされる点である¹¹⁾。

SAIシミュレーションにおける成層圏硫酸エアロゾルの分布に大きな不確実性が認められた一方で、成層圏オゾン

への影響のように、定性的なコンセンサスが得られた評価項目も存在する¹⁰⁾。例えば、南極春季成層圏では、SAIの硫酸エアロゾルの影響で増加する極成層圏雲の表面で生じる不均一化学反応が増す効果によって、オゾン破壊が促進される。モントリオール議定書以後のフロンガス等の排出規制によって南極オゾンホールが回復し始めてきたのを逆行させてしまうことが懸念される。中・低緯度の成層圏では、下部成層圏の成層圏硫酸エアロゾルが太陽紫外線を上向きに反射する効果によって中部成層圏の窒素酸化物の濃度が減少し、その触媒反応によるオゾン破壊が低減される結果、オゾン濃度が増える。一方、下部成層圏では成層圏硫酸エアロゾルが赤外放射を吸収して大気を加熱する効果で低濃度のオゾンが下から持ち上げられるため、正味でオゾンの総量を増やす効果と減らす効果が概ね拮抗する。

また、SAIは地球温暖化による影響の全てを完全にキャンセルすることはできないにせよ、地上気温を冷却する効果はSAIを実施して数ヶ月～1年のうちに現れ、グリーンランド氷床の表面融解、北極海の海水の減少、北極圏の永久凍土の融解、大西洋のハリケーンの強化、洪水の高頻度化、農作物の減収、生態系への悪影響などといった、地球温暖化の影響をある程度低減、もしくは影響の現れるタイミングを遅らせられるポテンシャルがあることが示された。

こうしたGeoMIPのSAI実験の評価結果は、後続する関連研究に大きな影響を与えている。以下に述べる内容については文献^{5), 6)}を参照されたい。

SAIシミュレーションで成層圏硫酸エアロゾルの分布の評価結果が分かれてしまった点については、ピナツボ噴火に代表される過去の大規模火山噴火による成層圏硫酸エアロゾルの分布をよりよく再現できるように地球システムモデルの相互比較実験を行って改良を目指すプロジェクトが進められている¹²⁾。また、仮に赤道成層圏付近の取り扱いが難しいならば、他の緯度・高度でSAIを行うといった工夫によって問題を迂回・克服できる可能性がある。GeoMIPの活動の傍らで米国大気研究センターが行った大アンサンブルSAI実験（Geoengineering Large Ensemble Project: GLENS）を含む後続研究では、SAIを行う高度や緯度や季節等を戦略的にデザインすることによってSAIの副作用を低減しながら、SAIに対する気候システムのフィードバックを測定・制御しつつ目標とした温暖化レベルを維持する、あるいは狙った地域の温暖化を低減する、という離れ業のようなことも、シミュレーションの上では可能だと報告されている。

SAIの成層圏硫酸エアロゾルによるオゾン破壊に関しては、より化学的に安定な酸化チタンや炭酸カルシウム等の物質を注入することによって克服できる可能性が示唆されている。ただし、火山噴火によって形成された実績のある

成層圏硫酸エアロゾルと異なって、自然界に前例がないため、その効果や副作用の評価は難しい（ちなみに、成層圏まで煙が注入されるような大規模な森林火災を模倣して、黒色炭素のススを成層圏に注入した場合には、地表は冷却されるが、成層圏の温度場や循環に与える副作用が非常に大きいことが地球システムモデルを用いたシミュレーションによって示されている。もとよりSAI物質の選択肢としては現実的ではないであろう）。

2.3 海洋の雲の白色化：MCB

SAIに次いで多くの研究者が取り組んでいるのは、層積雲と呼ばれる下層雲がしやすい海洋境界層に海塩粒子等の微粒子を散布して、雲を明るくする方法（Marine Cloud Brightening：MCB）である（図1）。これは船舶から排出される煤煙等の微粒子が凝結核となって航跡雲ができることを模倣するアイデアである。海塩粒子というのは、海の波が砕けて泡だった状態の海面から泡沫が飛散してはじけたのちに、微少な海水の液滴や個体の塩からなる微粒子が生成されて海洋境界層内を漂うものである。海塩粒子は吸湿性を持つため、そのサイズの変化には周囲の空気の湿度が大きく影響する。

この手法は、地球温暖化に対して雲が増えるか減るかという問題や、雲とエアロゾルの相互作用の問題に大きな不確実性が残されている点において、効果の不確実性が大きいと見なされている反面、雲やエアロゾルの研究者が自身の研究の延長として取り組んでいるためか、雲やエアロゾルの微物理学や雲形成における乱流の役割などに注目したプロセス研究の層が厚く、2番目にメジャーなSRM手法になっている。とはいえ、どんな工学的手法を用いてどんなサイズの海塩粒子をどこにどれだけ注入すれば地球温暖化を低減できるのか、また実現可能なシナリオが描けるのかについて、いまだ科学的な調査が始められておらず、SAIに比べると地球システムモデルを用いたシミュレーション研究は初歩的な段階に留まっている。

GeoMIPでは、まず、海上の下層雲の雲粒数濃度を仮想的に50%増やす実験が行われた¹³⁾（この実験では、どうやってそれを実現するかという技術的な問題は問わない）。その結果、海上だけでなく陸上も含めて地上気温は低下し、全球平均で見ると1℃程度気温が下がり、2%程度降水量が減少した。海上では雲の反射率が増えて海面水温が下がり、大気下層の安定度が増す効果と雲粒数濃度が増えて雲から降水への変換が遅くなる効果によって降水量が減る。一方、特に低緯度の大陸上では、周囲の海上が冷えて下降流が強まる効果を補償するように上昇流が強まるといった大気循環の変化が生じるため、雲量が増えるとともに地上気温の低下や降水量の増加がもたらされた。ただし、地上気温や降水量の変化の分布のパターンや大きさは、各々の

地球システムモデルが持っている雲の分布の違いを反映するため、モデル間の評価結果の不確実性が大きい。

GeoMIPでは、次に、低緯度の海洋上に膨大な量の海塩粒子を注入する実験も行われた¹⁴⁾。この実験で得られた新しい科学的知見としては、従来MCBは海洋境界層の雲の白色化を意図して海塩粒子の注入を行うことを想定していたが、雲が無い領域においても、海塩粒子そのものによる太陽光の反射効果による地上気温の低下が生じるため、その効果も一緒に評価する必要があること、であった（なお、海水を人工的に噴霧する場合には、海塩以外の微粒子の元になる有機物も一緒に含まれることや、もともと海洋境界層には海塩粒子が多い海域と、鉱物や有機物や硫酸や硝酸などの別種の微粒子が多い海域があるため、どこの海域で実施するかによって、海塩粒子や別種の微粒子のサイズ分布に影響し、得られる効果や副作用が異なる可能性など、科学的理解が不十分な問題が多数あることも示唆されている）。

なお、MCBの実現可能性に関して、オーストラリアのグレート・バリア・リーフで、海水温の温暖化で白化現象が進んでいる珊瑚礁の保全を目的として、人工的に、海水をポンプと専用のターボ・ファンなどを用いてミスト状に噴霧することによって太陽光を反射して海面水温を下げる試みが行われているが、多大な電力を使用するためにコストが大きく、十分な効果が得られるくらいに実用化できる目処は立っていないとのことである。

3. SRMの科学的理解の現状と課題

SAIとMCBに共通する科学的な課題の最たるものは、観測されたことのある現象を模倣するアイデアではあるものの、成層圏にせよ、海洋境界層にせよ、微粒子あるいはその前駆気体をどのような形態でどこにどれだけ注入したら、どのような振る舞いをするのか、微物理や乱流スケールのプロセスの実環境における観測的・実験的な理解が不十分な点だ。その点が明らかにならないと、地球システムモデルが取り扱うプロセスにどのような改良を施せばよいか分からないし、どのような実施シナリオをデザインして、それを想定した評価を行えばよいかを議論することも困難なままである。

SAIに関しては、成層圏に噴煙が及ぶような大規模な火山噴火がいわば天然の実験であるが、頻繁に生じるものではなく、何より予兆は得られるものの噴火の正確な時期を事前に察知できない例が多いため微粒子観測のための特殊な気球や航空機等を用いた現場観測をスタンバイしておくことは困難である。人工衛星による成層圏の気温の変化やエアロゾルによる太陽光の消散や亜硫酸ガスなどの気体成分濃度のリモート観測が、最も成層圏硫酸エアロゾルの生成現場に近いデータを与えてくれるが、衛星軌道やセン

サーの視野の関係で必ずしも十分ではない。

航空機等を用いて人工的にSAIを行う場合には、1回のフライト当りに直すと大規模な火山噴火に比べると桁違いに小さな量を航空機等の周辺に散布することになるが、そうした際に何が起こるかを調査するためには、微量のエアロゾルと一緒に細かなスケールの風や温度等の分布を高精度に測定可能な現場観測とセットにした小規模なSAI実験を行うことが必須になる。こうした科学的理解のギャップを埋めて、大規模展開の実現可能性を探るためのステップとして、成層圏でバルーンから吊るしたゴンドラから微量の水や炭酸カルシウムを散布して、その後の振る舞いを観測する計画（Stratospheric Controlled Perturbation Experiment：SCoPEX）が米国ハーバード大学によって進められ、様々な準備や議論が行われてきたが、実験自体は実現していない。

MCBに関しては、米国ワシントン大学等の研究者たちが雲やエアロゾルの微物理学や雲形成における乱流の役割などをシミュレートできる高解像度の気象モデル（Large Eddy Simulation）を開発したり、衛星観測を詳細に分析して航跡雲の特徴を調べたり、海洋上の境界層内に雲の凝結核になり得る物質を散布する実験を計画したりしているが、実験については実現していない。先に述べたグレート・バリア・リーフでの海水噴霧の実施例があるものの、そこらは科学的な実験を計画したものではなく、研究者による詳細な観測や分析が行われているか不明である。

なお、地表に到達する太陽放射を減じる以外に、地表から宇宙に向かう赤外線が対流圏上層の巻雲によって吸収され上下に射出されることによって生じる温室効果を減らす、巻雲の薄化（Cirrus Cloud Thinning：CCT）手法も提案されている（図1）。これは、巻雲が生じているところに人工的にエアロゾルを散布して、巻雲のサイズ成長と落下を促すアイデアだが、巻雲がどういう要因で作られているか（非常に清浄な大気の場合と、エアロゾルが多い大気の場合とででき方が異なる）によって、エアロゾルを散布したときの振る舞いが異なるなど、不確実性が大きく、GeoMIPによる評価も未だ発表できる段階に達していない。

謝辞

本稿は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金21H03668の助成を受けた研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 河宮未知生；シミュレート・ジ・アース—未来を予測する地球科学，ベレ出版，(2018)，<https://www.beret.co.jp/book/45625>
- 2) GeoMIP homepage, <http://climate.envsci.rutgers.edu/geomip/>
- 3) IPCC (2013), Climate Change 2013: The Physical Science

Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

- 4) IPCC (2021), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- 5) World Meteorological Organization (WMO) (2022), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No 278, 509pp., <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/>
- 6) Visioni, D., et al. (2022), Opinion: The Scientific and Community-Building Roles of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) - Past, Present, and Future, Atmos. Chem. Phys. Discuss., <https://doi.org/10.5194/acp-2022-766>
- 7) Kravitz, B., et al. (2013), Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), J. Geophys. Res. Atmos., 118, 8320-8332, doi:10.1002/jgrd.50646
- 8) Jones, A., et al. (2013), The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), Journal of Geophysical Research, 118 (17), 9743-9752, doi:10.1002/jgrd.50762
- 9) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, (2021) Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25762>
- 10) Pitari, G., et al., (2014), Stratospheric ozone response to sulfate geoengineering: Results from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), J. Geophys. Res.-Atmos., 119, 2629-2653, <https://doi.org/10.1002/2013JD020566>
- 11) Visioni, D., et al., (2021), Identifying the sources of uncertainty in climate model simulations of solar radiation modification with the G6sulfur and G6solar Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) simulations, Atmos. Chem. Phys., 21, 10039-10063, <https://doi.org/10.5194/acp-21-10039-2021>
- 12) Quaglia, I., et al., (2023), Interactive stratospheric aerosol models' response to different amounts and altitudes of SO₂ injections during the 1991 Pinatubo eruption, Atmos. Chem. Phys., 23, 921-948, <https://doi.org/10.5194/acp-23-921-2023>
- 13) Stjern, C.W., et al., (2018), Response to marine cloud brightening in a multi-model ensemble, Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 621-634, <https://doi.org/10.5194/acp-18-621-2018>
- 14) Ahlm, L., et al., (2017), Marine cloud brightening - as effective without clouds, Atmos. Chem. Phys., 17, 13071-13087, <https://doi.org/10.5194/acp-17-13071-2017>

<著者紹介>



渡辺 真吾（わたなべ しんご）

九州大学理学部地球惑星科学科卒業。同大学院博士課程修了。博士（理学）。国立研究開発法人海洋研究開発機構に所属。現在、地球環境部門環境変動予測研究センター センター長代理 首席研究員。地球システムモデルおよび高解像度全中性大気大循環モデルの開発・応用に関する研究開発に従事。