

東京大学未来ビジョン研究センター (IFI) SDGs 協創研究ユニット

科研費基盤 A プロジェクト

「気候変動と水資源をめぐる国際政治のネクサス」

2020 年度ワーキングペーパー・シリーズ No. 8

太陽放射改変は紛争を激化させるのか

Would solar radiation modification exacerbate conflict?

東京大学

杉山昌広

太陽放射改変 (SRM) または太陽ジオエンジニアリングとは、地球の放射収支に直接介入し、地表の温度を下げることにより、人為的気候変動によるリスクを軽減するために提案されている一連の技術を指す。しかし、SRM は、新たな環境的・社会的リスク、あるいは、リスクとリスクのトレードオフをもたらす可能性がある。最近の科学的理解の進歩により、SRM を適度に利用すれば、気候リスクがある程度軽減され、SRM を使わなかった場合と比べて、気候が産業革命以前の状態に近づくことが示唆されている。そうなれば、気候に起因する紛争のリスクが軽減される可能性がある。SRM 利用の背後に見え隠れする意図によっては、紛争の見通しがかえって複雑化する可能性はあるが、SRM が紛争削減に貢献できる可能性について、さらに検討していく必要がある。

キーワード

太陽放射改変 (Solar radiation modification, SRM)、太陽ジオエンジニアリング (solar geoengineering)、気候工学 (climate engineering)、気候変動 (climate change)、紛争 (conflict)

1. 序論

気候変動の影響は、世界各地でますます明白に表れてきている。例えば、異常熱波から、カリフォルニアやオーストラリアで繰り返す森林火災、グレート・バリア・リーフのサンゴの白化に至るまで、枚挙にいとまがない (World Meteorological Organization, 2020)。過去数年間、気候関連の問題は、毎年発行されている『グローバルリスク報告書 (Global Risks Report)』 (World Economic Forum, 2021) のグローバルリスク・リストの最上位を占めている。迫り来る気候危機への対応として、政策立案者や企業、その他の関係者は、地球温暖化に寄与している温室効果ガス (GHG) の排出量削減に向けた行動を加速している。例えば、本論文の執筆時点において、約 450 都市、23 地域、約 570 大学が何らかの形でのカー

ボンニュートラル達成を約束しており (UNFCCC, 2021)、その数は増加し続けている。

しかしながら、そうした野心的目標にも関わらず、世界が望む排出量と現実の排出量の間には大きな開きがあることが、科学的分析 (United Nations Environment Programme, 2020) によって明らかになっている。例えば、地球の平均表面温度 (GMST) の上昇を 2°C 未満に抑えるためには、経済効率的な排出経路を考えると、2030 年までに世界の年間排出量を二酸化炭素 (CO₂) 換算で 410 億トンに減らす必要があるとされる (評価シナリオの中央値)。それに対し、2015 年パリ協定参加国による「自国が決定する貢献案」(NDC) が完全に実現されたとしても、2030 年の年間排出量は 530 億トンに増加すると予想されている。この差は、より野心的な 1.5°C 目標などに照らせばさらに広がる。

このような状況を背景に、ジオエンジニアリング、気候工学、または気候介入などと呼ばれる新たな介入手法が注目を集めている。これらの介入策は、地球温暖化を抑制できるほどの大きな規模で、気候システムに直接介入を行うことを目的としたものである (Shepherd et al., 2009; National Research Council, 2015b, 2015a; IPCC, 2018; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021)。特に太陽放射改変 (SRM)、太陽放射管理、あるいは太陽ジオエンジニアリングと呼ばれる方法は、迅速に作用して地球の表面温度を比較的低い費用で下げることができる可能性があるが、短所がないわけではない (Keith et al., 2010)。SRM の使用は、排出量削減のための人々の努力を鈍らせてしまうという懸念から、SRM は長年にわたり科学者の間でタブー視されてきた。しかしながら、この様なタブーは、影響力の大きい学術論文や信頼性の高い報告書の公表に伴って、消えつつある (Crutzen, 2006; Wigley, 2006; Shepherd et al., 2009)。

人工知能や合成生物学など多くの先端技術と同様に、SRM についても賛否両論がある。SRM は、リスクとリスクのトレードオフをもたらす。すなわち、SRM によって気候リスクが低下したとしても、新規の環境・社会的リスクが持ち上がる可能性があるからである (Grieger et al., 2019)。SRM によって地球の平均表面温度は下がると考えられるが、人間や自然にとって重要なのは *地域的な気候の変化* である。SRM に関する最初のモデリング研究のひとつ (Robock et al., 2008) では、二酸化硫黄 (SO₂) の注入によって地球の平均表面温度は下がるが、それと同時に、アジアやアフリカのモンスーンが乱れ、何十億人もの人々のための食料生産に影響が生じる可能性があることが指摘された。他方、近年急増している気候と紛争に関する研究によると、気候の変更が、わずかながら複雑な経路を経て国内武力紛争 (内戦) を悪化させることが指摘されている (Koubi, 2019; Mach et al., 2019)。これが真実ならば、SRM は、紛争地域における武力紛争のリスクを高めてしまうことになる。

農業に影響を及ぼす可能性があることは、SRM に固有の性質ではない (Keith & MacMartin, 2015)。しかし、SRM を適度な規模で実施すれば、(ほぼ) 誰にも悪影響を及ぼすことなく、地域的な気候を *改善* できる可能性がある (Irvine et al., 2019) ことが、最近のいくつかの研究により示唆されている。それが本当ならば、SRM によって、気候関連の紛

争は改善されるのだろうか。本論文では、SRMによって紛争を減らすことができる可能性について論じる。本論の貢献は僅かなものではあるが、これまで文献で明示的に扱われてこなかった。

本ワーキングペーパーの構成は次の通りである。第2節では、気候変動緩和策およびSRMの現状について考察する。第3節では、気候に起因する紛争の軽減に対するSRMの貢献について考察する。最後の第4節では結論を提示するとともに、本研究の限界に言及する。

2. SRMについての考察

2.1. 気候変動に対する新たな対応の要請

気候変動緩和の取り組みは本格化しつつあるものの、現在のところはまだ、必要な速度や規模に達してはいない。これが、ジオエンジニアリングや気候工学などの新たな介入策の評価を行う動機である。

現在進行中の新型コロナウイルス（COVID-19）のパンデミックから得られた教訓のひとつは、温室効果ガス排出量の削減がいかに難しいかということである。COVID-19は、世界経済に大打撃を与えたにもかかわらず、排出量の削減はわずかであった。国際エネルギー機関（International Energy Agency）によると、世界のエネルギー起源のCO₂排出量は、新型コロナウイルスの蔓延に伴う都市封鎖や経済の縮小によって、前年よりも約5.8%減少した（IEA, 2021）。数パーセントというささやかな削減率は、各国政府が表明した野心的目標とは大きく乖離している。こうした進捗の遅さも、科学者や政策立案者が気候工学に一層注目し始めた理由のひとつである。

ジオエンジニアリング（Shepherd et al., 2009）、気候工学（Keith, 2013）、あるいは、気候介入（National Research Council, 2015a, 2015b）とは、太陽放射改変（SRM）や二酸化炭素除去（CDR）（IPCC, 2018）を包含した総称である。かつての研究ではこれらふたつのカテゴリーがひと括りにされることが多かった（Shepherd et al., 2009）が、この両者には、科学的メカニズムや社会的課題、環境リスクの面で大きな違いがある。そのため、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、ジオエンジニアリングという大まかな分類を避け、SRMとCDRを個別に扱うよう推奨している（IPCC, 2018）。

SRMとCDRは、緩和策（太陽光発電・風力発電などの導入や電気自動車の利用による温室効果ガスの排出削減など）や適応策（堤防建設による海水面の上昇への対応など）といった従来型の気候変動対応策とは対照的と考えられる（図1）。同様の分類体系は、既往研究（Keith, 2000; Caldeira et al., 2013）からも提案されている。しかし、SRMとCDRの区別は、あいまいな場合もある。植林や森林再生は、従来型の緩和手法とみなされ、気候変動とは関係の無い文脈においても、長年にわたって推進されてきた。IPCCの定義では、

CDR は、緩和策に含まれる。また、SRM は、GHG による放射バランスの変化に対する直接の対策ではないため、適応策とみなされることもある。図 1 では、地域的な気候介入策は、適応策とみなすこともできる。実際に、グレート・バリア・リーフへのダメージ軽減を目的とするオーストラリアの研究プログラムは「サンゴ礁修復適応プログラム (Reef Restoration and Adaptation Program)」(Brent et al., 2020) と呼ばれている。

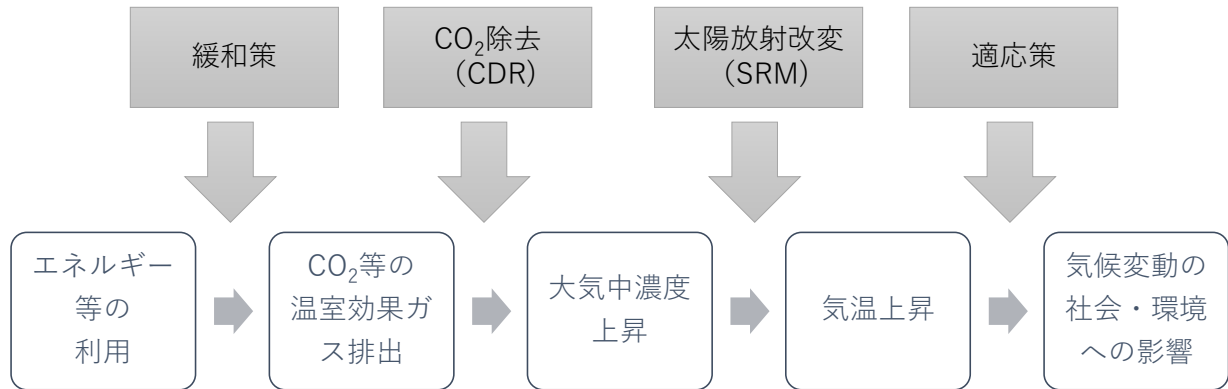


図 1 気候変動への人類の対応策の分類

SRM、CDR、気候変動への対応に関する諸研究が伝える確かなメッセージとして、これら対応策の選択肢は単独で考えるべきではなく、常に複数の選択肢のポートフォリオとして考えるべきだ (Long & Shepherd, 2014; MacMartin et al., 2018) という点があげられる。言い換えれば、SRM や CDR は、緩和策や適応策といった従来型手法を置き換えられるものではないし、置き換えるべきでもない。(また、そのポートフォリオに SRM が含まれない可能性もある。)

例として「世界が地球温暖化阻止のための措置を講じなければ、2100年には気温上昇幅が約 3.5°Cに達し、それ以降も上昇し続ける」というシナリオを考えよう。ポートフォリオの意義を理解できる。すでに各国は一定程度の気候政策を導入しているため、気温上昇を約 2.5°Cに抑制できる可能性がある。加えて、大量の CO₂が大気中から回収できるようになれば、気温上昇を約 2.0°C未満に抑制できるかもしれない。とはいえ、そうなるにしても、気温上昇は一時的に 1.5°Cを上回るであろう。そこで太陽放射改変という案が浮上するのである。SRMを利用すれば、パリ協定で合意した 1.5°C 目標の達成が可能になると考えられる。

ただし、これは理想的なシナリオである。各国は緩和に成功するかもしれないし、失敗するかもしれない。もし、ある選択肢が上手くいかなかった場合は、その分を別の選択肢で埋め合わせる必要が出てくるだろう。気候緩和の進捗速度が遅いことを考えると、CDR

や SRM の果たすべき役割は高まってきている。

2.2. SRM と成層圏エアロゾル注入 (SAI)

SRM の狙いは、太陽光の数パーセントを宇宙に反射することによって気候を寒冷化するというものである (Caldeira et al., 2013)。SRM は、太陽光をどこで反射するのか、その位置によって四つのサブカテゴリーに分類できる (Shepherd et al., 2009; National Research Council, 2015b; de Coninck et al., 2018) (表 1)。科学者たちによって提案された手法としては、宇宙で実施する方法 (Early, 1989; Angel, 2006)、成層圏エアロゾル注入 (Crutzen, 2006; Robock et al., 2008)、海洋上の雲の白色化 (Latham et al., 2008)、地表のアルベド (反射率) 増加 (以上、地表からの距離の遠い順) がある。また、関連の方法として、巻雲を光学的に薄くする手法 (Mitchell & Finnegan, 2009) が提案されているが、これは太陽放射ではなく赤外線放射を削減するものなので、厳密に言えば SRM ではない。これらの方法は全て、気候システムに入射する太陽光を阻止するという点で類似性があるが、基礎となる科学原理、工学的要件、有効性、副作用に大きな違いがある。

表 1 SRM の種類

太陽光の反射位置	方法
宇宙	宇宙に太陽光反射シールドを設置 (ラグランジュポイントまたは地球低軌道)
成層圏	成層圏エアロゾル注入
対流圏	海洋上の雲の白色化 (雲凝結核となる海塩を散布)
地表	屋根表面、草地、耕作地、砂漠のアルベド (反射率) を増加

最も議論されることが多い SRM 手法は、成層圏エアロゾル注入 (または、成層圏エアロゾル・ジオエンジニアリング) である。その科学原理は、火山の大規模噴火が気候に及ぼす影響に似ている。大規模な火山噴火が起こると、成層圏にエアロゾル層が形成され、気候システム全体を寒冷化させることは、良く知られている。例えば、1991 年にルソン島 (フィリピン) のピナツボ火山で発生した噴火では、約 2000 万トンの二酸化硫黄 (SO_2) が成層圏に注入された (Robock, 2000)。 SO_2 は酸化されて硫酸となり、その硫酸の雲が大気温を約 0.5°C 押し下げた (Soden et al., 2002)。SAI (成層圏エアロゾル注入) では、航空機等の技術を利用して、高度約 20 キロメートルにエアロゾルを注入する。注入物質はエアロゾルそのものではなく成層圏内でエアロゾル粒子になるエアロゾルの前駆体でもよい。

SRM に関する研究は、かつては少なかったが、過去 10 年の間に、自然科学分野だけでなく、社会科学・人文学分野においても、大幅に進展した。中でも大きな進歩が見られたのが、気候システム・地球システムのモデリングである。「ジオエンジニアリング・モデル相互比較プロジェクト (Geoengineering Model Intercomparison Project ; GeoMIP)」 (Kravitz

et al., 2015) は、現在、IPCC による気候科学の検討に大きく貢献している「結合モデル相互比較計画、フェーズ 6 (Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) Phase 6)」の一部として進められている。ハーバード大学の Keutsch、Keith 両教授は、Bill Gates などの慈善家からの資金供与を受け、「成層圏制御摂動実験 (Stratospheric Controlled Perturbation Experiment ; SCoPEX)」(Dykema et al., 2014; Shyur et al., 2019) と呼ばれる小規模な野外実験を計画しており、2021 年夏には、試験工学飛行を行う予定としていた (Greenfield, 2021)。ただ、2021 年 3 月にスウェーデンのステークホルダーからの反対を受けて中止になった (Swedish Space Corporation, 2021)。このように、SAI は、過去 10 年間に急速に進歩したが、利用にはまだほど遠い段階にある。

次の節では、主として、SAI に焦点を当てる。SAI は最も広く議論されている手法であると同時に、他の手法には問題があるからである。海洋上の雲の白色化は、雲に介入する手法であるが、雲は気候システムにおける最大の不確実性の要因である。また、地表のアルベド増加は、その効果が限定的であると同時に、コストが法外に高いと考えられている (Shepherd et al., 2009)。新世代の宇宙企業が宇宙旅行のコスト削減を着実に進めているものの、宇宙で行う SRM 手法は、当面は技術的に難しいと考えられる (Keith et al., 2020)。

2.3. SAI がもたらすリスク

モデル研究によって、SAI には、地球表面の平均気温を下げ、地球温暖化に伴う多くの気候リスクを軽減する可能性があることが実証されてきたが、一方で SAI は、幅広い環境的・社会的リスクを新たにもたらす懸念もある。数人の研究者が、SAI のリスクと便益を整理している (例えば、Robock et al. (2009) ; Robock (2016))。以下は 10 項目の重大な懸念事項を示したリストである (Grieger et al., 2019)、Olson が指摘したもの (Olson, 2011) をベースとしている。

1. 地球の複雑な地球物理システム・生態系に対する意図しない悪影響 (オゾン層の減少、地域的な干ばつ、降水パターンの変化、異常気象反応など)
2. 実施規模の有効性に関する情報の欠如のために、実際にはあまり効果がない可能性
3. 研究および政治的取り組みの方向転換を引き起こしてしまい、結果的に緩和の取り組みを損なうリスク
4. SAI を実施している間も GHG 濃度が上昇を続け、SAI を中止した場合に突然の壊滅的な温暖化が訪れるリスク
5. SAI の便益享受の不平等の結果、紛争が起こる可能性
6. 国際合意に至ることが、緩和策の場合よりも遥かに難しいこと
7. 過去には気候改変手法が軍事目的で利用されたことがあることから、SAI が武器化されてしまう可能性
8. 太陽放射の入射量の減少に伴う太陽エネルギー効率の低下

9. 企業利益が公共の利益よりも優先される危険性

10. 他の技術でも経験がある通り、研究によって不適切な実施が推進される危険性

上記リストは多岐にわたり、SRM を批判する研究者が指摘している要素もいくつか含まれている (Hamilton, 2013; Hulme, 2014) が、10 年前に作成されたものである。その後の研究の進展によって、各リスクの大きさやその前提条件が明らかになってきている。そうした新たな理解に照らすと、もはやさほど重大な懸念事項とは思われないものもある。

まず、いくつかの環境リスクについて述べるが、SAI に固有の特性はほとんどない。気候リスクも便益も、どのような方法で、いつ、どこで、どのような種類の SAI を実施するかに左右されるからである。また、どの程度の温度低下を目指すのか、注入する物質の種類、注入する緯度や高度まで、技術とその使い方の選択肢も幅広い。これまでの研究では、SAI の展開によって地球温暖化を 100% 相殺するという、理想的なシナリオを想定してきた。そうした単純化されたシナリオのモデルでは、地球温暖化を SAI によって完全に相殺した場合、平均降水量が減少することが示された。また、熱帯地方では、過剰に温度が下がりにすぎってしまう可能性が高いことも分かった (Kravitz et al., 2013)。さらに、SRM を突然中止すると、それまで SRM の効果によって打ち消されていた温暖化効果が突然顕在化して、地球の平均表面温度が急激に上昇する。こうした影響は、終端ショック (termination shock)、または、終端効果 (termination effect) と呼ばれている (Matthews & Caldeira, 2007)。それ以外の副作用としては、例えば、成層圏オゾン層の消失、直達日射の減少、散乱日射の増加があげられる。

しかし、最近の研究によると、地球温暖化を完全に打ち消すほど SRM を導入する必要はなく、より控えめな実施戦略を採用することにより気候リスクを軽減しつつ、副作用を抑制できることが明らかになってきた (Keith & MacMartin, 2015)。例えば、終端効果は、SRM による温度低下の大きさに比例するが、適度に実施すれば、SRM を「フェイルセーフ」にできるかもしれない (Kosugi, 2013)。硫酸エアロゾル粒子を選ぶと成層圏オゾン層が破壊されるが、炭酸カルシウム粒子を散布すれば、成層圏オゾン層は減少するどころか、むしろ増加する (Keith et al., 2016)。特に、地球温暖化を半減する程度に SAI を利用する戦略は、これまでに特定されているリスクの多くを軽減するように思われる (Irvine et al., 2019) (下記参照)。

第二に、社会的リスクに関しても、一部は誇張されてきた節がある。上記リストには、考えうるリスクとして SAI の武器化があげられているが、最近の論文 (Smith & Henly, 2021) では、そうした懸念は否定されている。SAI を利用して気候に影響をもたらすほどの作戦を実行しようとするれば、何千機とはいかないにしても何百機もの航空機が必要で、著しく目立つために、簡単に相手に検知されてしまう (Moriyama et al., 2017; Smith, 2020)。つまり、秘密作戦は不可能であることが、工学的研究によって明らかにされている。目立ちやすさに加えて、SAI は正確なターゲット設定ができない。モデリング研究 (Dai et al., 2018)

によると、特定の緯度において SAI を実施すると、注入した緯度から極地方向の地域に影響が及ぶことが明らかになっている。また、成層圏では東西風が卓越するため、その影響を経度方向に限定することができない。このように技術的に不正確であるため、SAI の武器としての利用は難しい。

だからといって、SAI に関する全ての懸念が払拭される訳ではないので注意が必要である。上述の研究 (Smith & Henly, 2021) は、モラルハザードが生じる、すなわち (SAI によって軽減策を行うモチベーションが下がり) 緩和策が停滞する、SAI 複合体に化石燃料関連の権益が侵入する、政治的な行為として一国だけで小規模に実施する、各国の選好がバラバラである、紛争が起こるといった懸念を裏付ける知見を提供している。

2.4. SRM に関するガバナンスの現状

SRM のリスクは高いにも関わらず、それに特化した法的枠組みは存在しない (Biniaz & Bodansky, 2020; Reynolds, 2019)。国連気候変動枠組条約、オゾン層の保護に関するウィーン条約、オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書、環境改変技術敵対的使用禁止条約 (ENMOD)、宇宙条約、国連安全保障理事会など、SRM に関連する条約や議論の場は多数存在する。しかしながら、これらはいずれも、SRM を直接規制するものではない。

その代わりに「オックスフォード原則 (Oxford Principles)」(Rayner et al., 2013) や「責任あるジオエンジニアリング関連科学研究のための行動規範 (Code of Conduct for Responsible Scientific Research involving Geoengineering)」(Hubert & Reichwein, 2015) など、数々のボトムアップの動きが見られる。加えて、多くの社会学者が議論に参加するようになり、責任あるイノベーション (Stilgoe et al., 2013) の精神に則った学際的研究 (Kreuter et al., 2020) や超学際的研究 (Sugiyama et al., 2017) が見られるようになった。

各国政府は、徐々に気候工学について真剣に考慮するようになってきた。ケニア・ナイロビで 2019 年 3 月に開かれた第 4 回国連環境総会でも、議題として取り上げられた。同会合では、スイスを中心とする 12 か国によって決議案が提案され、国連環境総会事務局に対して、科学とガバナンスの現状についてレビューを行うよう要請した。しかしながら、決議案は、米国やサウジアラビア等の国々の反対により、残念ながら合意には至らなかった (Jinnah & Nicholson, 2019)。とはいえ、この提案は、この先国際社会がもっと真剣に気候工学に注目するようになる前兆と見ることができる。

3. SRM と内戦

3.1. 気候変動と紛争

これまでの考察により、SRMが、気候への影響をいくぶん軽減できる可能性があることを示した。それが事実ならば、SRMは、気候関連の紛争の削減にも役立つのだろうか。

気候変動と紛争の関係をとり上げた論文は増え続けており (Ide, 2017; Koubi, 2019)、気候と紛争の関係は、学界以外でも認知されるようになってきた。バラク・オバマ大統領や潘基文国連事務総長などの高官も、気候変動と紛争とを関連付けている。しかし、文献は多様で相反する見解を示しており、強い関係があると主張する研究者もいれば、そうした関係に全面的に疑念を抱く研究者もいる。

しかしながら、紛争の大もとの原因は不明確であったとしても、気候が紛争の脅威を何倍にも増す機能を果たす可能性があり、その程度は小さいにしろ、実際に紛争に影響を与えているという理解は深まっている。最近発表された専門家による構造的な聞き取り調査 (Mach et al., 2019) では、11人の幅広い研究分野のトップクラスの研究者が、国内武力紛争に果たす気候の役割を論じている (この著者には、Marshall Burke や Halvard Buhaug など、反対の見解を持つ研究者が含まれていたことが注目される)。同論文集から、気候は国内武力紛争に、不確実ながら何がしかの役割を果たすという点で、また、温暖化がさらに進めば、気候関連の紛争のリスクが高まる可能性が高いという点で、専門家の意見が一致していることが明らかになった。つまり、現在の理解によれば、気候変動は紛争に影響を及ぼしているが、社会経済的発達の遅れや国力の低さといった、他の要因の方がより重要ということになる。

他にも、『*Annual Review of Political Science*』に発表されたある論文 (Koubi, 2019) は、先行研究の結果を整理し、取りまとめているが、Mach et al.の研究成果と概ね一致している。先行研究には、紛争が始まる際に気候がどう関係しているのかは明らかにされていないが、天水農業に依存している地域など、紛争が起こりやすい地域においては、一定の条件のもとで、気候が紛争に寄与していると指摘している。

Ide (2017) および Koubi (2019) によると、これらの研究の多くは、多数のサンプルを扱う large-*N* の統計分析を用いている。これらの研究では、紛争を、基本的に気温や降水量の所定の気候条件からの偏差の関数と捉えている。例えば、準乾燥地においては、気候が変化すると、地域の気温が高くなるとともに、降水量が減少する可能性が高い。それによって農業生産量が減少し、結果として、紛争発生の可能性が高まる。

3.2. 気候変動を軽減すれば国内紛争も軽減されるのか

気候と経済的被害に関する文献と、気候変動と紛争に関する文献の類似性を調べると有益である。

気候と紛争の関連性に関する文献と同様に、計量経済学モデルを開発し、気候が経済に及ぼす影響の分析が行われている。2018年ノーベル経済学賞受賞者、William Nordhausに

よる先駆的な研究 (Nordhaus, 1991) 以来、研究者は、気候変動がもたらす被害を、異常気温やその他の気候変数 (降水量など) の関数と定義してきた。最近の研究では、これまでにない大きなデータセットを利用して、気温上昇と様々なセクターに対する経済的被害との間に強い関係があることが明らかにされている (米国の状況に関しては Hsiang et al. (2017) を参照)。言い換えれば、気候を産業革命以前のレベルに近づければ、気候変動がもたらす被害を減らすことができる。ただし、産業革命以前の気候が最適だったわけではない地域もあり、そうした地域では、適度な地球温暖化が一般市民のウェルビーイング (幸福など) を高める可能性があることにも留意したい。例えば、適度な地球温暖化は、ロシアの人々の効用を高める可能性がある。

気候変動がもたらす被害が、もともとの気候条件からの偏差の増加関数で表せるとすれば、SRM は、気候と経済にどのような影響を及ぼすのか。この問題を研究するため、Harding et al. (2020) は、最先端のマクロ経済モデルを用い、地球温暖化を SRM によって相殺するというシナリオに適用した。4°C という著しい温暖化を SRM によって阻止した場合、温暖化のみのシナリオに比べると、(国ごとの) 経済見通しの偏りが大幅に是正され平等になる¹。つまり、SRM の使用は、どちらかというところ先進国よりも発展途上国における一般市民のウェルビーイングを向上させることにつながる。

ただし、上記分析結果 (Harding et al., 2020) は、SRM を大規模展開して、地球温暖化を完全に打ち消して、一切の温暖化を阻止するというシナリオに基づくものであるため、注意が必要である。論文を著した研究者は、様々な統計モデルの定式化に照らして検討してみても、結果は確かなものであったとしているが、気温や降水量以外の要因が顕著になった場合には、分析結果とは異なる可能性がある。

同研究 (Harding et al., 2020) では、SRM の大規模展開を前提としているが、SRM の実施には沢山の方法がある。また、前述の通り、SRM を大規模実施した場合、終端問題のリスクがある (これに対する対策も沢山あるが)。Keith と Irvine (Keith & Irvine, 2016) は、地球温暖化の半分に対処すれば、気候リスクは大幅に軽減できるという仮説を立てている。Irvine et al. は、高解像度気候モデルと一連の GeoMIP 参加モデル (Irvine et al., 2019) を用いて、大気中 CO₂ 濃度の倍加がもたらす温暖化の半分以上を SRM で相殺した場合の気候への影響を検討した。それらのモデルでは、CO₂ による放射強制力の増加を相殺するため、太陽光を人工的にわずかに減らしている。

また、Irvine et al. (2019) は、SRM による温暖化阻止によって、気候変数 (気温、年最高気温、降水量-蒸発量、年最高 5 日降水量) にどのような影響が出るかを調べている。気候が産業革命以前のレベルに近づくことを「改善」と定義すれば、SRM によって、気候条

¹ 専門的に言えば、同研究では、代表的濃度経路 (Representative Concentration Pathway ; RCP) 8.5 を用いている。このシナリオは、2100 年の放射強制力が 8.5 W/m² になることを意味しており、2100 年の温度上昇で言えば約 4°C に相当する。

件は大幅に改善される。より重要なのは、気候条件が悪化する地域が少ないことである。高解像度モデルにおいては、水利用可能性および極値降水量が悪化したのは、世界の地表面積（グリーンランドと南極大陸を除く）の0.4%のみであった。解像度がより低い GeoMIP モデルでは一部の地域で悪化することが明らかになったが、モデル間の中央値からは、水文学的变化による悪化が見られる地表の割合が1.9%と0.8%であることが示された。加えて、同研究は、高解像度気候モデルを用いて、半分の SRM 量で、熱帯低気圧強度（power dissipation index（PDI）で測定）の増大の大部分を相殺できることを明らかにした。

同研究では SRM を理想型（太陽の調光など）で表しているが、別のフォローアップ研究（Irvine & Keith, 2020）では、成層圏エアロゾル注入を明示的にモデル化した「ジオエンジニアリング・ラージ・アンサンブル（geoengineering large ensemble ; GLENS）」プロジェクト（Tilmes et al., 2018）の結果を利用し、SRM シナリオと地球温暖化シナリオ（気温上昇が4°C近く）とを線形的に組み合わせることによって、SRM によって温暖化を半分だけ相殺した場合の気候影響を推定している。結論は、それまでの分析と概ね一致していて、半分だけ SRM を実施した場合の気候変動の軽減可能性を特定している。

これらの研究では、温暖化を50%相殺すると仮定しているが、50%という数字に特別な意味はない。加えて、SRM を調整するにあたって沢山のパラメーターを選択できる（Ban-Weiss & Caldeira, 2010; Kravitz et al., 2016; Tilmes et al., 2018）。

上記ふたつの研究の結果（Harding et al., 2020; Irvine et al., 2019）を組み合わせれば、SRM の適度な実施によって、物理的な気候影響や気候変動に起因する経済的被害を軽減できると推定できる。ひいては、適度な実施によって、国内武力紛争の悪化の可能性を低減できるといえる。

SRM は、人為的な地球温暖化と同じ影響がある訳ではない。成層圏オゾン層の破壊による紫外線照射の増加や、直達日射と散乱日射の比など、他にも重要な変数がある。大気中 CO₂ 濃度は高いままで、海洋の酸性化も軽減されない。それでもなお、SRM の規模を抑制することによって、これらの影響も小さく抑えられる限りにおいては、これらの経路を通じた影響は、懸念するには当たらないかもしれない。

4. 結論および考察

本ワーキングペーパーでは、SRM は国内武力紛争のリスクを軽減しうると論じた。気候と紛争の間には弱い複雑な関連がある（紛争の引き金としてではなく、深刻度や期間を増す等）とする文献は増えつつあり、その大部分は large-*N* の統計分析に基づいている。また、それらの研究では、紛争リスクは、所定の気候条件からの気候関連変数の偏差の関数としてモデル化されている。このような気候の偏差が SRM によって改善できるのであれば、紛争リスクも軽減されることになる。

この主張には様々な限界がある。第一は、この主張が、定量的に実証されていないことである。この点に関しては、今後の研究が待たれる。第二は、より重大な問題であるが、SRMは一部の国々が行う政治的行為であり、自然現象ではないという点が考慮されていないことである。ある地域の気候条件が改善されるか、されないかに関わらず、SRMによる気候変化の影響を受ける人々は、SRMに着手したのが誰であるのかを簡単に特定できる訳だが、そうした認識が紛争の可能性に影響を及ぼしうる。この点については、気候と紛争の関連性について研究した文献（Ide, 2017）において既に指摘されている。その問題の改善策としては、パラメトリック保険（parametric insurance）（Horton & Keith, 2019）などが考えられるが、こうした手法については今後さらに研究する必要がある。

また、本論文では、SRMに関連する大国間の紛争の可能性については触れていない。この点については、文献（Schelling, 1996; Bodansky, 2013; Flegal et al., 2019）で幅広く取り上げられている。これらの文献では、問題は一国の行為に関連する問題として特徴づけられていることが多い。というのも、SRMの実施に当たり各国が同盟を形成する可能性もある（Ricke et al., 2013）ものの、SRMが比較的低コストであることから、フリーライダーならぬフリードライバーとして一国が勝手に実施して（経済学でいう）外部性を発生させる可能性があるからである（Weitzman, 2015）。このテーマについては、より掘り下げた検討が必要であることは明らかである。これら既存の文献で取り上げられていないことのひとつに、様々な問題の間の相互連結性があげられる。研究モデルにおける標準的な設定では、利得関数は、気候の関数として表わされている。しかし、現実には、各国は複数の問題に同時に直面している。現在、米中の緊張関係は、新たなレベルに達しているが、新バイデン政権においては、気候変動は協力分野とみなされている。これらの国々の決定が、他分野の考慮事項によって影響を受けるのは、間違いないだろう。

【参考文献】

- Angel, R. (2006). Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(46), 17184–17189. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608163103>
- Ban-Weiss, G. A., & Caldeira, K. (2010). Geoengineering as an optimization problem. *Environmental Research Letters*, 5(3), 034009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/3/034009>
- Biniarz, S., & Bodansky, D. (2020). *SOLAR CLIMATE INTERVENTION: OPTIONS FOR INTERNATIONAL ASSESSMENT AND DECISION-MAKING*. Center for Climate and Energy Solutions (C2ES) & SilverLining. <https://www.c2es.org/document/solar-climate-intervention-options-for-international->

assessment-and-decision-making/

- Bodansky, D. (2013). The who, what, and wherefore of geoengineering governance. *Climatic Change*, 121(3), 539–551. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0759-7>
- Brent, K., McGee, J., McDonald, J., & Simon, M. (2020, May 13). *Putting the Great Barrier Reef marine cloud brightening experiment into context*. Carnegie Climate Governance Initiative. <https://www.c2g2.net/putting-the-great-barrier-reef-marine-cloud-brightening-experiment-into-context/>
- Caldeira, K., Bala, G., & Cao, L. (2013). The Science of Geoengineering. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1), 231–256. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105548>
- Crutzen, P. J. (2006). Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Climatic Change*, 77(3–4), 211–220. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9101-y>
- Dai, Z., Weisenstein, D. K., & Keith, D. W. (2018). Tailoring Meridional and Seasonal Radiative Forcing by Sulfate Aerosol Solar Geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 45(2), 1030–1039. <https://doi.org/10.1002/2017GL076472>
- de Coninck, H., Revi, A., Babiker, M., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., Dong, W., Ford, J., Fuss, S., Hourcade, J.C., Ley, D., Mechler, R., Newman, P., Revokatova, A., Schultz, S., Steg, L., & Sugiyama, T. (2018). Strengthening and implementing the global response. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Dykema, J. A., Keith, D. W., Anderson, J. G., & Weisenstein, D. (2014). Stratospheric controlled perturbation experiment: A small-scale experiment to improve understanding of the risks of solar geoengineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2031), 20140059. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0059>
- Early, James. T. (1989). Space-based solar shield to offset greenhouse effect. *Journal of British Interplanetary Society*, 42, 567–569.
- Flegal, J. A., Hubert, A.-M., Morrow, D. R., & Moreno-Cruz, J. B. (2019). Solar Geoengineering:

- Social Science, Legal, Ethical, and Economic Frameworks. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(1), 399–423. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030032>
- Greenfield, P. (2021, February 8). Balloon test flight plan under fire over solar geoengineering fears. *The Guardian*.
<https://www.theguardian.com/environment/2021/feb/08/solar-geoengineering-test-flight-plan-under-fire-over-environmental-concerns-aoe>
- Grieger, K. D., Felgenhauer, T., Renn, O., Wiener, J., & Borsuk, M. (2019). Emerging risk governance for stratospheric aerosol injection as a climate management technology. *Environment Systems and Decisions*, 39(4), 371–382.
<https://doi.org/10.1007/s10669-019-09730-6>
- Hamilton, C. (2013). *Earthmasters: Playing God with the climate*. Allen & Unwin.
- Harding, A. R., Ricke, K., Heyen, D., MacMartin, D. G., & Moreno-Cruz, J. (2020). Climate econometric models indicate solar geoengineering would reduce inter-country income inequality. *Nature Communications*, 11(1), 227
. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13957-x>
- Horton, J. B., & Keith, D. W. (2019). Multilateral parametric climate risk insurance: A tool to facilitate agreement about deployment of solar geoengineering? *Climate Policy*, 19(7), 820–826. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1607716>
- Hsiang, S., Kopp, R., Jina, A., Rising, J., Delgado, M., Mohan, S., Rasmussen, D. J., Muir-Wood, R., Wilson, P., Oppenheimer, M., Larsen, K., & Houser, T. (2017). Estimating economic damage from climate change in the United States. *Science*, 356(6345), 1362–1369.
<https://doi.org/10.1126/science.aal4369>
- Hubert, A.-M., & Reichwein, D. (2015). *An Exploration of a Code of Conduct for Responsible Scientific Research involving Geoengineering* [IASS Working Paper]. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS).
https://www.insis.ox.ac.uk/sites/default/files/insis/documents/media/an_exploration_of_a_code_of_conduct.pdf
- Hulme, M. (2014). *Can science fix climate change? A case against climate engineering*. Polity Press.
- Ide, T. (2017). Research methods for exploring the links between climate change and conflict: Research methods for exploring the links between climate change and conflict. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(3), e456. <https://doi.org/10.1002/wcc.456>
- IEA. (2021). *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020*. International Energy Agency.
<https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D.

- Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 32). World Meteorological Organization.
- Irvine, P., Emanuel, K., He, J., Horowitz, L. W., Vecchi, G., & Keith, D. (2019). Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards. *Nature Climate Change*, 9(4), 295–299. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0398-8>
- Irvine, P. J., & Keith, D. W. (2020). Halving warming with stratospheric aerosol geoengineering moderates policy-relevant climate hazards. *Environmental Research Letters*, 15(4), 044011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab76de>
- Jinnah, S., & Nicholson, S. (2019). The hidden politics of climate engineering. *Nature Geoscience*, 12(11), 876–879. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0483-7>
- Keith, D. W. (2000). Geoengineering the Climate: History and Prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 245–284. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.245>
- Keith, D. W. (2013). *A case for climate engineering*. The MIT Press.
- Keith, D. W., & Irvine, P. J. (2016). Solar geoengineering could substantially reduce climate risks-A research hypothesis for the next decade: SOLAR GEOENGINEERING COULD REDUCE RISK. *Earth's Future*, 4(11), 549–559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000465>
- Keith, D. W., & MacMartin, D. G. (2015). A temporary, moderate and responsive scenario for solar geoengineering. *Nature Climate Change*, 5(3), 201–206. <https://doi.org/10.1038/nclimate2493>
- Keith, D. W., Morton, O., Shyur, Y., Worden, P., & Wordsworth, R. (2020, March 17). Reflections on a meeting about space-based solar geoengineering. *Harvard's Solar Geoengineering Research Program*. <https://geoengineering.environment.harvard.edu/blog/reflections-meeting-about-space-based-solar-geoengineering>
- Keith, D. W., Parson, E., & Morgan, M. G. (2010). Research on global sun block needed now. *Nature*, 463(7280), 426–427. <https://doi.org/10.1038/463426a>
- Keith, D. W., Weisenstein, D. K., Dykema, J. A., & Keutsch, F. N. (2016). Stratospheric solar geoengineering without ozone loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(52), 14910–14914. <https://doi.org/10.1073/pnas.1615572113>
- Kosugi, T. (2013). Fail-safe solar radiation management geoengineering. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(8), 1141–1166.

- <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9414-2>
- Koubi, V. (2019). Climate Change and Conflict. *Annual Review of Political Science*, 22(1), 343–360. <https://doi.org/10.1146/annurev-polisci-050317-070830>
- Kravitz, B., Caldeira, K., Boucher, O., Robock, A., Rasch, P. J., Alterskjær, K., Karam, D. B., Cole, J. N. S., Curry, C. L., Haywood, J. M., Irvine, P. J., Ji, D., Jones, A., Kristjánsson, J. E., Lunt, D. J., Moore, J. C., Niemeier, U., Schmidt, H., Schulz, M., ... Yoon, J.-H. (2013). Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15), 8320–8332. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50646>
- Kravitz, B., MacMartin, D. G., Wang, H., & Rasch, P. J. (2016). Geoengineering as a design problem. *Earth System Dynamics*, 7(2), 469–497. <https://doi.org/10.5194/esd-7-469-2016>
- Kravitz, B., Robock, A., Tilmes, S., Boucher, O., English, J. M., Irvine, P. J., Jones, A., Lawrence, M. G., MacCracken, M., Muri, H., Moore, J. C., Niemeier, U., Phipps, S. J., Sillmann, J., Storelvmo, T., Wang, H., & Watanabe, S. (2015). The Geoengineering Model Intercomparison Project Phase 6 (GeoMIP6): Simulation design and preliminary results. *Geoscientific Model Development*, 8(10), 3379–3392. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3379-2015>
- Kreuter, J., Matzner, N., Baatz, C., Keller, D. P., Markus, T., Wittstock, F., Bernitt, U., & Mengis, N. (2020). Unveiling assumptions through interdisciplinary scrutiny: Observations from the German Priority Program on Climate Engineering (SPP 1689). *Climatic Change*, 162(1), 57–66. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02777-4>
- Latham, J., Rasch, P., Chen, C.-C., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K., & Choulaton, T. (2008). Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), 3969–3987. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0137>
- Long, J. C. S., & Shepherd, J. G. (2014). The Strategic Value of Geoengineering Research. In B. Freedman (Ed.), *Global Environmental Change* (pp. 757–770). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4_24
- Mach, K. J., Kraan, C. M., Adger, W. N., Buhaug, H., Burke, M., Fearon, J. D., Field, C. B., Hendrix, C. S., Maystadt, J.-F., O’Loughlin, J., Roessler, P., Scheffran, J., Schultz, K. A., & von Uexkull, N. (2019). Climate as a risk factor for armed conflict. *Nature*, 571(7764), 193–197. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1300-6>
- MacMartin, D. G., Ricke, K. L., & Keith, D. W. (2018). Solar geoengineering as part of an overall strategy for meeting the 1.5°C Paris target. *Philosophical Transactions of the Royal*

- Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119), 20160454.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0454>
- Matthews, H. D., & Caldeira, K. (2007). Transient climate carbon simulations of planetary geoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(24), 9949–9954.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0700419104>
- Mitchell, D. L., & Finnegan, W. (2009). Modification of cirrus clouds to reduce global warming. *Environmental Research Letters*, 4(4), 045102. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045102>
- Moriyama, R., Sugiyama, M., Kurosawa, A., Masuda, K., Tsuzuki, K., & Ishimoto, Y. (2017). The cost of stratospheric climate engineering revisited. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22(8), 1207–1228. <https://doi.org/10.1007/s11027-016-9723-y>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance* (p. 25762). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25762>
- National Research Council. (2015a). *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration* (p. 18805). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18805>
- National Research Council. (2015b). *Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth* (p. 18988). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18988>
- Nordhaus, W. D. (1991). To Slow or Not to Slow: The Economics of The Greenhouse Effect. *The Economic Journal*, 101(407), 920. <https://doi.org/10.2307/2233864>
- Olson, R. L. (2011). *Geoengineering for decision makers*. Science and Technology Innovation Program, Woodrow Wilson International Center for Scholars.
- Rayner, S., Heyward, C., Kruger, T., Pidgeon, N., Redgwell, C., & Savulescu, J. (2013). The Oxford Principles. *Climatic Change*, 121(3), 499–512. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0675-2>
- Reynolds, J. L. (2019). *The governance of solar geoengineering: Managing climate change in the Anthropocene*. Cambridge University Press.
- Ricke, K. L., Moreno-Cruz, J. B., & Caldeira, K. (2013). Strategic incentives for climate geoengineering coalitions to exclude broad participation. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014021>
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2), 191–219.
<https://doi.org/10.1029/1998RG000054>
- Robock, A. (2016). Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: More research needed. *Earth's Future*, 4(12), 644–648. <https://doi.org/10.1002/2016EF000407>
- Robock, A., Marquardt, A., Kravitz, B., & Stenchikov, G. (2009). Benefits, risks, and costs of

- stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 36(19), L19703.
<https://doi.org/10.1029/2009GL039209>
- Robock, A., Oman, L., & Stenchikov, G. L. (2008). Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections. *Journal of Geophysical Research*, 113(D16), D16101. <https://doi.org/10.1029/2008JD010050>
- Schelling, T. C. (1996). The economic diplomacy of geoengineering. *Climatic Change*, 33(3), 303–307. <https://doi.org/10.1007/BF00142578>
- Shepherd, J., Caldeira, K., Cox, P., Haigh, J., Keith, D., Launder, B., Mace, G., MacKerron, G., Pyle, J., Rayner, S., Redgwell, C., & Watson, A. (2009). *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*. The Royal Society.
- Shyur, Y., Dykema, J. A., Keith, D., & Keutsch, F. N. (2019). An Overview of the Stratospheric Controlled Perturbation Experiment (SCoPEX) Concept of Operations. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 33. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFMGC33G1408S>
- Smith, W. (2020). The cost of stratospheric aerosol injection through 2100. *Environmental Research Letters*, 15(11), 114004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba7e7>
- Smith, W., & Henly, C. (2021). Updated and outdated reservations about research into stratospheric aerosol injection. *Climatic Change*, 164(3–4), 39.
<https://doi.org/10.1007/s10584-021-03017-z>
- Soden, B. J., Wetherland, R. T., Stenchikov, G. L., & Robock, A. (2002). Global Cooling After the Eruption of Mount Pinatubo: A Test of Climate Feedback by Water Vapor. *Science*, 296(5568), 727–730. <https://doi.org/10.1126/science.296.5568.727>
- Stilgoe, J., Owen, R., & Macnaghten, P. (2013). Developing a framework for responsible innovation. *Research Policy*, 42(9), 1568–1580.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>
- Sugiyama, M., Asayama, S., Kosugi, T., Ishii, A., Emori, S., Adachi, J., Akimoto, K., Fujiwara, M., Hasegawa, T., Hibi, Y., Hirata, K., Ishii, T., Kaburagi, T., Kita, Y., Kobayashi, S., Kurosawa, A., Kuwata, M., Masuda, K., Mitsui, M., ... Yoshizawa, G. (2017). Transdisciplinary co-design of scientific research agendas: 40 research questions for socially relevant climate engineering research. *Sustainability Science*, 12(1), 31–44.
<https://doi.org/10.1007/s11625-016-0376-2>
- Swedish Space Corporation. (2021, March 31). *No technical test flight for SCoPEX from Esrange*. <https://sscspace.com/news-activities/no-technical-test-flight-for-scopex-from-esrange/>
- Tilmes, S., Richter, J. H., Kravitz, B., MacMartin, D. G., Mills, M. J., Simpson, I. R., Glanville, A. S., Fasullo, J. T., Phillips, A. S., Lamarque, J.-F., Tribbia, J., Edwards, J., Mickelson, S., & Ghosh, S. (2018). CESM1(WACCM) Stratospheric Aerosol Geoengineering Large

- Ensemble Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(11), 2361–2371.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0267.1>
- UNFCCC. (2021). *Race To Zero Campaign*. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/climate-action/race-to-zero-campaign>
- United Nations Environment Programme. (2020). *The emissions gap report 2020*.
<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>
- Weitzman, M. L. (2015). A Voting Architecture for the Governance of Free-Driver Externalities, with Application to Geoengineering. *The Scandinavian Journal of Economics*, 117(4), 1049–1068. <https://doi.org/10.1111/sjoe.12120>
- Wigley, T. M. L. (2006). A Combined Mitigation/Geoengineering Approach to Climate Stabilization. *Science*, 314(5798), 452–454. <https://doi.org/10.1126/science.1131728>
- World Economic Forum. (2021). *Global Risks Report 2021, 16th Edition*.
- World Meteorological Organization. (2020). *State of the Global Climate 2020: Provisional Report*.