

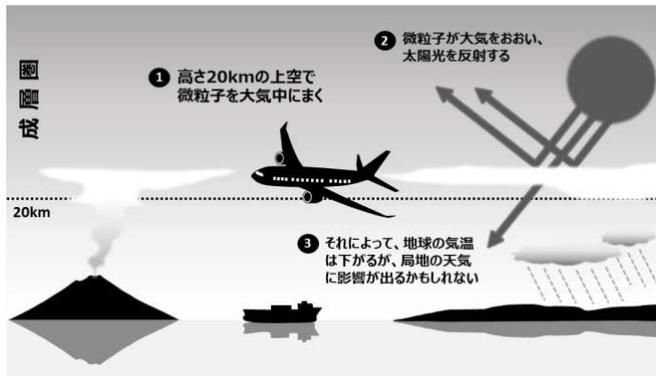
◆気候工学(ジオエンジニアリング)とは何か◆

地球の気候は太陽から受ける光のエネルギーと宇宙空間へ放出する光のエネルギーとのバランスで決まっています。地球温暖化は、人間が石炭や石油、天然ガスなどの化石燃料を使って出した二酸化炭素(CO₂)が大気中で増えることで宇宙空間へ放出するエネルギーが少なくなるために生じています。地球温暖化を抑えるためには、化石燃料の使用を減らして、CO₂の排出を減らす必要があります。

最近、地球温暖化対策として、「気候工学(ジオエンジニアリング)」と呼ばれる人工的に地球を冷やす方法が科学者の間で注目を集めています。気候工学とは、地球の気候を意図的に改変しようとする技術です。「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」の最新の報告書でも、気候工学の効果や副作用について触れられています。

気候工学の技術にはいろいろな種類がありますが、もっとも有望視されているのが、飛行機などを使い、太陽光を反射する微粒子を大気上空にまく技術「成層圏エアロゾル注入(SAI)」です。

◆成層圏エアロゾル注入(SAI)とは何か◆



成層圏エアロゾル注入(SAI)の概念図

高さ20キロメートルの上空(成層圏)でこの微粒子をまくと、これが太陽の光をさえぎり、地上に届く光が減るため、地球の気温を下げることができます。実際、1991年にフィリピンで起きた大きな火山噴火では、噴火で散った灰の細かな粒子が地球をおおい、約1年間にわたって気温が約0.5度下がりました。この方法を継続的に使えば、大気中のCO₂が増えた状態でも地球温暖化を抑えることができ、CO₂を減らすのに比べて直接的なコストが安くすむと主張する人もいます。

しかし、SAIを使った場合、それによる環境への副作用の心配が指摘されています。例えば、アジアやアフリカなどの一部の国では、雨が減るおそれがあると言われていました。雨季の雨が減って農作物の収量に大きな打撃が出ると、国際的な食料供給の問題が生じるかもしれません。さらに、現時点では予測できていない負の影響が、将来顕在化するかもしれません。対策であるはずのSAIがさらなる問題を生まないように、SAIを使う前に副作用を事前に調べ、抑えることが重要です。

そのために、科学者の中には、実際の自然環境でSAIの効果と副作用を調べる「屋外実験」をすることを提案する人がいます。非常に小規模な実験のため、環境への影響はほとんど無視できる、と彼らは主張しています。一方で、屋外実験そのものに反対する科学者もあり、科学者の間で論争になっています。

屋外実験に賛成する科学者は、将来の地球温暖化の危機的な影響に備えるためには、今から実験を進める必要がある、と言っています。また、実験はあくまで「研究」であって、今すぐにSAIを使うわけではない、と主張しています。

一方、屋外実験に反対する科学者は、いったん実験をはじめてしまったら、途中でやめられなくなり、結果的に実施することと同じになってしまうことを心配しています。また、SAIに関心が集まることで、人びとがCO₂の排出を減らす努力を怠ってしまうことになる、とも批判しています。そもそも人間の都合で意図的に地球の気候を改変すること自体が、倫理的にまちがっていると主張する人もいます。

◆SAIをとりまくさまざまな論点◆

① 気象学・自然科学:効果と副作用

気候科学の分野では、日本の研究チームも参加している国際的な気候モデル研究プロジェクトGeoMIP(ジオエンジニアリング・モデル相互比較プロジェクト)が進行中です。初期段階の研究で、SAIは地球全体を冷やすことが可能であるが、世界の雨の降り方を変化させてしまうことや、オゾン層を破壊することなどもモデル研究で確かめられています。

しかし、こうした効果や副作用は定量的に大きな不確実性があり、生態系や社会への影響はほとんど定量化できてい

成層圏エアロゾル注入(SAI)の便益とリスク

便益	リスク
<ol style="list-style-type: none"> 1. 地球の冷却 2. 氷床融解の阻止 3. 海面上昇の阻止 4. 植物生産量の増進 5. 効果に即効性がある 6. CO₂ 吸収源(森林など)の増大 7. 直接の実施費用が安価で済む可能性が非常に大きい 	<ol style="list-style-type: none"> 1. アフリカとアジアにおける旱魃の増加 2. オゾン層破壊の進行 3. 青い空が見られなくなる 4. 太陽熱・集光型太陽光発電量の減少 5. 海洋酸性化の進行は止められない 6. 実施による直接的な環境影響 <ul style="list-style-type: none"> ● CO₂ 排出の増大; 大気中の酸性化物質を増大させ、大気汚染被害が拡大する恐れがある。 7. 止めた場合に急激に温暖化してしまう <ul style="list-style-type: none"> ● 終端問題と呼ばれる問題であり、いったん SAI を実施した場合、それを止めてしまうと、急激な温暖化が起きることを指す。 8. 人為的ミスの危険性 9. 予知できない悪影響 10. 商業的コントロールにさらされる危険性 11. 軍事技術に転用される危険性 12. 既存の国際法への抵触 <ul style="list-style-type: none"> ● 「環境変更技術の軍事的使用またはその他の敵対的使用の禁止に関する条約」などに抵触する可能性がある。 13. 最適な温度に関する国際合意は得られるのか 14. モラルハザード <ul style="list-style-type: none"> ● SAI の実現可能性や実際に実施されることによって、根本的な解決法である温室効果ガスの削減意欲が削がれることをいう。 15. 地上からの天体観測ができなくなる 16. そもそも人間の都合で地球を改変することが倫理的にどの程度まで許されるのか

(Robock et al. 2009 の表 1 の暫定訳に加筆)

せん。また硫酸以外の物質の効果と副作用に関する知見は極めて限定的にしか分かっていません。気候のティッピング・ポイントの抑制に効果があるのかについても、研究はほとんどなされていません。

② 経済・工学

SAIにはさまざまな技術が提案されています。注入物質としては硫酸エアロゾルが有望視されていますが、他の物質（ブラックカーボン、酸化チタンなど）についても研究されています。成層圏への微粒子の運搬技術としては飛行機のほか、飛行船、パイプなどが考案されています。注入場所としては、地球全体の温暖化抑制の観点からは赤道上空付近が効率的とされますが、気温上昇が大きくなると懸念される極地付近などに重点的に注入する可能性も検討されています。

温暖化の抑制にかかる実施コストは、概して、緩和策（温室効果ガス排出削減）よりも低く済むと見積もられています。しかし、副作用のコスト（外部費用）については定量化がほとんどなされていません。

③ 社会・文化・倫理

人文・社会科学分野では、SAIの公衆理解や、今後の研究開発・実施に公衆の意見をどう組み込むのか、といった公衆関与についての研究がいくつかあります。研究開発のより早い段階からの公衆関与の促進が重要であると指摘される一方で、公衆の意見を研究開発や政策の意思決定に反映させる方法はまだ開発されていません。また、SAIの正当性を倫理的に問う、規範的な研究の試みもあります。より甚大な気候変動の影響を回避するためにはSAIは正当化されうるとす

る功利主義的な立場がある一方で、気候の人為的な改変そのものに倫理的な問いが投げかけられることもあります。さらに、民主主義や人間社会の在り方に照らして、何を持って自然な状態とするのか、といった人間と自然の関係を問い直すようなSAIについての社会学的な研究があげられます。しかし、いずれの研究もまだ緒に就いたばかりで、研究事例は限られています。

④ ガバナンス

SAIの屋外実験に関する議論はすでに紹介しました。では、実際に研究する場合、何らかの規範と研究の透明性が必要である、という点で既存研究は概ね一致しています。具体的にどのような制度やプロセスでそれらを担保するのかは、意見が割れています。研究に関する評価を行う国際科学アセスメントが必要である、という研究者もいます。

SAIを実施すれば、その影響が世界中の国々に及ぶので、実施のための国際協力の枠組みが必要だと主張する研究者がいます。また、SAIを禁止する場合でも、特定の国が単独で実施出来てしまう可能性があるため、何らかの国際的な枠組みが必要になってくる可能性が大きいです。

その国際的枠組みとしては、既存の国際制度で対処できそうだという研究もあれば、SAIに関する新たな国際条約が必要だとする研究もあります。

この資料は、科学技術振興機構社会技術開発センターの支援による「気候工学（ジオエンジニアリング）のガバナンス構築に向けた総合研究の可能性調査」（研究代表者：東京大学 杉山昌広）の一環で作成されたもので、石井敦、朝山慎一郎、杉山昌広、小杉隆信によって執筆されました。

参考文献：Robock, A. et al. (2009) Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19703.
 杉山昌広(2011)『気候工学入門—新たな温暖化対策ジオエンジニアリング』日刊工業新聞社。
 The Royal Society (2009) *Geoengineering the Climate: Science, Governance, and Uncertainty*. London.
 National Research Council (2015) *Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth*. Washington, D.C.