

よくある質問と回答

FAQ 7.3 | ジオエンジニアリングは気候変動に対抗できるか？副作用はどのようなのか？

ジオエンジニアリング(気候工学とも呼ばれる)は、気候変動の影響を緩和するために気候システムを意図的に改変する幅広い手法や技術と定義されている。一般にジオエンジニアリング手法は2つのカテゴリーに分けて考えられる。「太陽放射管理」(SRM、第7.7節で評価)は地球の反射率を高めることで人為起源の温室効果ガスによる温暖化を相殺することを目指し、「二酸化炭素除去」(CDR、第6.5節で評価)は大気中二酸化炭素濃度の低減を目指している。この二つのカテゴリーは異なる物理的原理に基づき、異なる時間スケールで実施される。モデルでは、SRM手法が実現されれば、気温上昇の対策に効果があり、その他いくつかの気候変動の対策にも程度は下がるがなお効果的であることを示唆している。SRMは気候変動の全ての影響に対応するわけではないかも知れず、加えて提案されているジオエンジニアリング手法の全てにはリスクと副作用が伴う。SRMとCDRはともに科学的理解の水準が低いため、これ以上の結果はまだ予想できない。さらにまた、ジオエンジニアリングに関しては本報告書の範囲を超えた様々な(政治、倫理、実践上の)問題点もある。

二酸化炭素除去手法

CDR手法は、炭素循環過程を意図的に改変することによって、あるいは工業的(例えば化学的)手法によって、大気中から二酸化炭素を除去することを目指している。そして大気中から抜き出された炭素は、陸域、海洋、あるいは地質の貯蔵庫に貯留されるだろう。CDR手法の中には、大規模な植林/再植林、バイオ炭による土壌への炭素隔離、炭素回収・貯留を伴うバイオエネルギー(BECCS)、海洋肥沃化などの生物学的過程によるものもある。その他のCDRとしては、陸域や海洋におけるケイ酸塩と炭酸塩岩の風化の促進などのように、地質学的過程によるものもある(FAQ 7.3 図1を参照)。このようにして大気中から取り除かれた二酸化炭素は、陸域貯蔵庫に有機的形態で貯蔵されるか、海洋や地質の貯蔵庫に無機形態で貯蔵されるが、CDRが効果を発揮するためには、そこで少なくとも数百年間貯蔵されなければならないだろう。(次ページに続く)



FAQ 7.3 図1 | 提案されている主なジオエンジニアリング手法の概観。二酸化炭素除去手法(詳細は第6.5節を参照): (A) 栄養を海洋に追加すること(海洋肥沃化)によって、海洋表層における海洋生産性を高め、結果的に得られた生物起源炭素の一部を下方に運ぶ。(B) 土壌鉱物のアルカリ度を海洋に追加することによって、より多くの大気中二酸化炭素を海洋に溶解する。(C) ケイ酸塩岩の風化速度を促進し、溶存炭酸塩鉱物を海洋に運ぶ。(D) 大気中二酸化炭素を化学的に回収し、地下又は海洋のどちらかに貯留する。(E) バイオマスを発電所で燃焼して炭素を回収し、回収された二酸化炭素を地下又は海洋のどちらかに貯留する。(F) 新規植林及び再植林を通じて二酸化炭素を回収し、陸域生態系に貯留する。太陽放射管理手法(詳細は第7.7節を参照): (G) 太陽放射を反射するために宇宙空間に反射体を配置する。(H) エロゾルを成層圏に注入する。(I) 反射率を上げるために海上雲に凝結核をまく。(J) 海洋表層でマイクロバブルを生成し海面の反射率を上げる。(K) 反射率の高い作物をより多く栽培する。(L) 屋根などの建造物を白くする。

FAQ 7.3(続き)

CDR 手法は、大気中から二酸化炭素を取り除き、取り除いた炭素を大気から遠ざけておくことに有効な程度まで、二酸化炭素の放射強制力を削減するだろう。一部の手法は海洋酸性化も抑制する(FAQ 3.2 を参照)が、海洋貯蔵庫に関わるその他の手法として、炭素が溶存二酸化炭素として隔離される場合には海洋酸性化を増進する可能性もある。CDR 手法の有効性に関する主要な不確実性は、貯蔵容量と貯蔵炭素の永続性である。CDR による永続的な炭素の除去と貯蔵は、長期的には気候温暖化を低減するだろう。しかし、永続的ではない貯蔵戦略をとると、二酸化炭素は大気中に戻ることになるため、そこで再び温暖化に寄与することになるだろう。CDR 手法による意図的な二酸化炭素の除去は、大気中の二酸化炭素濃度が低下した場合、海洋・陸域の炭素貯蔵庫の応答によって部分的に相殺される。これは、一部の海洋・陸域炭素貯蔵庫が、以前に貯蔵されていた人為起源の二酸化炭素を大気中に放出するためである。したがって、過去の人為起源の二酸化炭素排出量を完全に相殺するためには、CDR 技術は工業化以前の時代以降に大気中に蓄積された二酸化炭素だけでなく、陸域生物圏と海洋によって既に取り込まれている人為起源の炭素も取り除く必要があるだろう。

生物学的 CDR 手法とほとんどの化学的風化を用いる CDR 手法は無限に拡大することはできず、競合する土地需要などの様々な物理的・環境的制約によって制限されざるを得ない。CDR 手法を組み合わせた最大 CDR 隔離率を 1 世紀当たり 200 PgC^[註]と仮定すると、過去 50 年間に排出された二酸化炭素の除去に約 1 世紀半を要し、一連の相加的 CDR 手法であっても気候変動を迅速に緩和することは困難である。原理的に、直接空気回収法はより迅速に多くの二酸化炭素を除去できるが、エネルギー利用や環境的制約を含めて、大規模な実施は制限されるだろう。

CDR は気候及び環境面での副作用も生じかねない。例えば、植物の生産性を強化すれば二酸化炭素よりも強力な温室効果ガスである一酸化二窒素排出量が増加する恐れがある。例えば、植生面積が新規植林やエネルギー作物栽培によって大規模に増加すれば、地表面反射率や乱流フラックスなどの地表面特性を改変しかねない。いくつかのモデリング研究は、熱帯での新規植林は地球温暖化の抑制にはより効果的かもしれないが、季節的に雪で覆われた寒帯地域での新規植林は実は地球温暖化を促進する可能性があることを示している。生物学的生産(海洋肥沃化など)による海洋 CDR 手法は、海洋生態系や海洋の酸性度に非常に多くの副作用をもたらし、二酸化炭素以外の温室効果ガスを排出するおそれもある。

太陽放射管理手法

地球の世界平均地上気温は、地球を暖める効果を持つ大気と地表面によって吸収される太陽光の量と、温室効果ガスと雲が最終的なエネルギーの宇宙空間への放出に対して影響する過程である温室効果に大きく影響を受ける。温室効果が強まると、新たな平衡に達するまで地上気温が上昇していくことになる。地球の反射率が高められたために入射太陽光の吸収が少なくなったり、温室効果が弱まったためにエネルギーがより効率的に宇宙空間に放射できるようになったりすれば、地球の世界平均地上気温は低下するだろう。

提案されている、地球に出入りするエネルギーの流れを管理することを目的としたジオエンジニアリング手法は、この根本的な物理的原理に基づいている。これらの手法のほとんどは、地球に到達する太陽光を減らすか、大気、雲、地表面の輝度を高めることによって地球の反射率を増やすかのいずれかを提案している(FAQ 7.3 図 1 を参照)。又は、強力な温室効果を持つ巻雲と呼ばれる上層雲を抑制することを提案している手法もある。基礎物理に則って考えれば、これらの手法のどれかが期待通りにエネルギーの流れを変えたとすれば、地球の温度は下がるだろう。ところが実際には、エネルギーの流れ、大気循環、気象、及びその結果生まれる気候の間の相互作用を支配する多くの複雑な物理過程があるため、その状況は入り組んでいる。

世界平均地上温度は、地表面に到達する太陽光の量の変化や、温室効果の変化に応答するが、どこか任意の場所や時間における気温はその他多くの要因に影響されるため、一般には SRM による冷却量が温室効果ガスで生じた昇温の量と等しくなることはない。例えば、SRM が加熱率を変えられるのは日中だけだが、増加する温室効果ガスは昼も夜も温度を変えることができる。このような相殺がぴったり一致しない状況が、平均地上気温は変化しなかったとしても、地上気温の日周期に影響することがあり得る。また別の例として、モデルの計算によれば地表面に到達する太陽光が均一に減少することで、二酸化炭素に起因する世界平均気温の上昇は相殺されるかもしれないが、他の地域ほど気温が下がらない地域も出るだろう。モデルによれば、人為起源の地球温暖化が成層圏エアロゾルによって完全に相殺された場合、極域にはわずかな昇温が残存する一方で、熱帯域は工業化以前の時代よりも少し気温が下がることが示唆されている。(次ページに続く)

FAQ 7.3(続き)

理論の上では、SRM は人為起源の気候変動を速やかに抑制でき、10~20 年以内に工業化以前の水準まで地球を寒冷化する。このことは気候モデルによって知られているだけでなく、大規模な火山噴火に関する気候の記録からもわかっている。十分な観測が行われている 1991 年のピナトゥボ山の噴火は、成層圏エアロゾルの一時的増加と、地上気温の急速な低下(約 0.5°C)をもたらした。

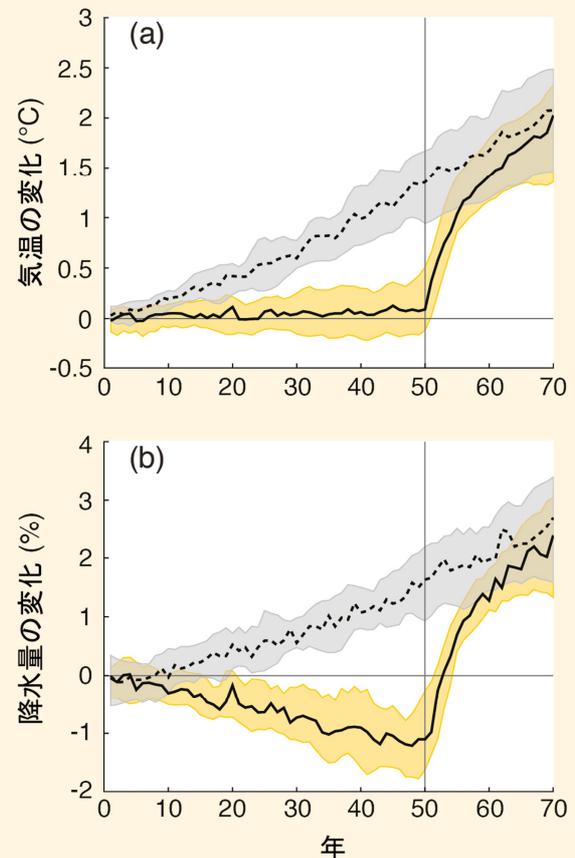
気候には地上気温以外にも様々な要素がある。降雨、土壌水分、河川流量、積雪、海水など、その他の気候の特徴や、生態系への影響も重要であろう。モデルと理論はともに、増大した温室効果を SRM で相殺して地上気温を安定化させた場合、世界平均降水量が多少減少し (FAQ 7.3 図 2 の理想モデルの結果を参照)、地域的な変化も起こり得ることを示している。このように地域と世界全体とで気候パターンにおける相殺が不明確なことから、SRM が生み出す将来気候が今日経験している気候、あるいは過去に経験した気候と「そっくり」ということはありそうもない。とはいえ、利用可能な気候モデルによれば、高い大気中二酸化炭素濃度に SRM を用いてジオエンジニアリングを行った気候は、高い二酸化炭素濃度と SRM なしの将来の気候よりも、総じて 20 世紀の気候に近いことが示されている。

SRM 技術には、おそらく他にも副作用があるだろう。例えば、理論、観測、モデルの示唆するところでは、火山噴火と自然放出による成層圏硫酸塩エアロゾルは成層圏オゾン破壊し、特にクロロフルオロカーボンの排出に由来する塩素が大気中に残留する間は特にそうである。SRM のために導入する成層圏エアロゾルは、これと同じ効果をもつと予測されている。オゾン破壊は、地表面に到達して陸域・海洋生態系に害を与える紫外線の量を増やすだろう。成層圏エアロゾルはまた、地表面に到達する散乱太陽光に対する直達太陽光の比率を高め、このことは一般に植物生産性を高める。さらに、硫酸塩エアロゾル SRM は酸性雨を増やす可能性があるという懸念もあるが、モデル研究によれば、成層圏エアロゾル SRM が生み出す酸性雨の量は現時点で汚染源によって生み出されている量よりもはるかに少ないため、酸性雨はおそらく大きな懸念材料にはならないとされている。SRM は大気中の二酸化炭素濃度の増加に伴う海洋酸性化とそれが海洋生態系に与える影響についても対応しないだろう。

従来の緩和努力や考え得る CDR 手法を行わなければ、人為起源の排出による高い二酸化炭素濃度は 1000 年も大気中に留まり続け、二酸化炭素濃度が高い限り SRM を維持しなければならないだろう。二酸化炭素濃度がまだ高いうちに SRM を止めると、10~20 年で非常に急速な温暖化をもたらされ (FAQ 7.3 図 2 を参照)、生態系と人間の適応にひどいストレスをかけることになるだろう。

二酸化炭素濃度の増加がもたらす影響を多少でも回避するために SRM を利用する場合、それに伴うリスク、副作用、欠点は SRM の増加規模に応じて明らかに増加するだろう。積極的な二酸化炭素濃度削減戦略と併せて SRM を時限付き規模で利用することによって、通常の方法では避けられない気候のしきい値、あるいは転換点と呼ばれる値を超えることを避けるためのアプローチが提案されているが、そのようなアプローチには、本報告書の対象範囲をはるかに超える非常に慎重なリスク便益分析が必要になるだろう。

【訳注】 1 PgC = 1 GtC(炭素換算で 1 ギガトン=10 億トン=1000 兆グラム)。二酸化炭素換算では 36 億 6700 万トンに相当する。



FAQ 7.3 図 2 | 2 つの理想実験における(a)地上気温(°C)と(b)降水量(%)の世界平均値の変化。実線は太陽放射管理(SRM)を用いたシミュレーションで、二酸化炭素濃度の1年当たり1%増加に対し50年間SRMでバランスをとり、その後はSRMの利用を止めた場合。破線は、二酸化炭素濃度1年当たり1%増加に対し、SRMを利用しない場合。黄色と灰色の領域は、8種類のモデルの25~75パーセントイル範囲を示す。