

ジオエンジニアリング：新しい温暖化対策？

藤原 正智

1. はじめに

ジオエンジニアリング (geoengineering、または、気候工学 climate engineering) とは、意図的に気候を改変し、温暖化を軽減しようとして提案されている様々な手法の総称です。国際的な温室効果ガス削減の取り組みは思うように進んでいないため、今後温暖化が予想以上に急激に進行して生態系や社会経済に大きな悪影響をおよぼす可能性があります。そこで、気候を制御できるかもしれないいくつかの手法について、その実効性と副作用についての「研究」だけは進めておいたほうがよい、という考えが気候科学コミュニティーの中に芽生えてきています。現状では、自信を持って「実施」を提案できる手法はないのですが、それでも、気候科学の研究者の責務として研究だけは進めておくべきであるという考え方なのです。気候を人間が意図的に制御しようとするには、科学的、技術的問題だけでなく、倫理的、社会的、法律的にも問題があると認識されており、さまざまな分野で議論が始まっています。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) でも、2013～2014 の第 5 次評価報告書ではじめてジオエンジニアリングに関する評価がなされました。

2. 温暖化とその対策

地球の気候システムは、太陽から短波放射の形でエネルギーを受け取り、長波放射の形で同量のエネルギーを宇宙空間へ捨てることでエネルギー収支のつり合いをとっています。このエネルギー収支において二酸化炭素や水蒸気などの大気微量成分は本質的な役割を果たしています。気候システムはさまざまな時間スケール、さまざまな要因で変動します。その中で温暖化は、18 世紀後半の産業革命以降の数 100 年スケールの現象であり、その主な原因は人間活動、主に化石燃料の燃焼と森林破壊により大気中に加えられた二酸化炭素などの温室効果ガスです。つまり、温暖化は人間による「意図しなかった」気候の改変であるといえます。

温暖化が今後さらに進むことにより、水、生態系、食料、沿岸域、健康にさまざまな影響が出てくると考えられています。温暖化に対する有効な対策を可能なかぎり早めに進めておく必要があると認識されています。その対策には 2 種類あります。現代社会のさまざまなシステムを変化させ、さらなる温暖化に適応するためのさまざまな「適応策」と、温室効果ガス削減に大きな可能性のある技術を導入するさまざまな「緩和策」です。しかし、ジオエンジニアリングは、これらとは異なる第 3 の対策と言えます。

3. ジオエンジニアリング

現在、国際社会の温室効果ガス削減に関する協議はうまく進んでいるとはいえません。また、いったん大気中に排出された二酸化炭素は海洋プロセスも絡んで数 1000 年のスケールで大気中に残存し放射強制力を与え続けます。そもそも地球の気候システムには激変を始めるポイント (tipping point、臨界点) というものが内在している可能性があり、もしかしたらすでにそれを超えてしまっているかもしれません。従来議論されてきたような適応策や緩和策では現代社会を維持することが難しくなる可能性がないとはいえません。そこで、積極的な気候の制御法、地球の冷却法について、「実施するかどうかはともかくとして、研究だけでも進めておくべきではないか」、「緩和策を有効に働かせるために時間を稼ぐための手法として、あるいは、最終手段として、検討だけでもしておくことは必要ではないか」といったような動機から、ジオエンジニアリングという考え方が気候科学の表舞台に出てきたのです。

直接のきっかけとなったのは、オゾン層の研究でノーベル化学賞を受賞したこともあるポール・クルツェンによる 2006 年のエッセイ¹です。1991 年にフィリピンのピナツボ火山が大噴火を起こし、成層圏に大量の硫黄物質が注入され、それがエアロゾル粒子となって滞留し、この粒子が太陽エネルギーを宇宙へ通常より強く反射してしまい、翌年の全球平均気温が 0.5°C ほど下がったということがありました。クルツェンはこの事象を念頭に、「成層圏に人工的にエアロゾル粒子を注入することで大気の反射率 (アルベド) を増大させ、地球を人工的に冷やす」というアイデアを、真剣に検討してもよいのではないかと提案しました。

クルツェンが提案したジオエンジニアリング手法はのちに「ピナツボ・オプション」と呼ばれるようになりました。同様に、地球が受け取る太陽放射エネルギーを反射・散乱により軽減しようとする手法としては、海洋上の低層雲の雲粒子数を増加させてアルベドをあげたり、宇宙空間に太陽光反射物を浮かべたり、屋根を白く塗る、海洋を泡だてて白くする、遺伝子技術により葉のてかりの強い植物を作るなど、地表面のアルベドを増加させたりすることなどが提案されています。最近では、この種のジオエンジニアリング手法をまとめて、太陽放射管理 (Solar Radiation Management、SRM) と呼びます。いっぽう、温暖化の根本原因である二酸化炭素の増加分を大気から何らかの方法で積極的に取り除くのが正攻法でしょう。そのような、二酸化炭素を大気から人為的に積極的に取り除こうという手法をまとめて、二酸化炭素除去 (Carbon Dioxide Removal、CDR) と呼びます。その代表例には、鉄散布による海洋肥沃化、大気中あるいは火力発電所などの排ガス中からの二酸化炭素の工学的な回収などがあります。また、植林は現在では緩和策に分類されていますが、これも大気

¹ Crutzen, P. J., **Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma?**, *Climatic Change*, 77(3–4), 211–220, 2006. < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-006-9101-y> >

中の二酸化炭素を意図的に固定しようとするものですから CDR の一種ともみなせません。表 1 に SRM と CDR の主なものをまとめます。

表 1. さまざまなジオエンジニアリング手法の例（杉山ほか 2011²、第 3 表より。一部改変）

SRM	<ul style="list-style-type: none"> ・都市・住宅のアルベド（太陽光の反射率）の改変 ・草地や穀物のアルベド改変 ・砂漠のアルベド改変 ・雲のアルベド改変（有機硫黄化合物（DMS）発生などの生物的手法、海塩巻上げといった機械的手法） ・成層圏へのエアロゾルの散布（“ピナツボ・オプション”） ・宇宙における太陽光シールド
CDR（自然のプロセスを利用するもの）	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄散布による海洋肥沃化（海洋鉄散布） ・リン・窒素による海洋肥沃化 ・海洋の湧昇流・沈降流の促進 ・風化反応の促進（土壌へのアルカリ物質の散布、海洋へのアルカリ物質（石灰石・ケイ酸塩・水酸化カルシウム）の散布、地中でのケイ酸塩の炭酸化） ・バイオ炭
CDR（工学的手法）	<ul style="list-style-type: none"> ・二酸化炭素の直接空気回収
CDR（緩和策との違いが不明確なもの）	<ul style="list-style-type: none"> ・バイオエネルギー・炭素回収貯留（BECS） ・植林・土地利用改善と炭素回収貯留（CCS）

4. ジオエンジニアリングの評価

IPCCの第1作業部会（気候変化の科学的根拠、全球・地域別の気候変化予測を担当）では、2013年の第5次報告書ではじめてジオエンジニアリングに関する評価をおこないました。報告書では、「証拠が限られているためSRM、CDRともに総合的かつ定量的な評価は不可能であるが、いずれも全球規模で副作用や長期的な影響をもたらす」と述べられています。また、「いくつかのSRM手法は全球の気温上昇をかなりの程度相殺する可能性があるが、同時にそれらは全球の水循環を変化させ、また海洋酸性化は抑制できず、かつ、もしもSRM手法が何らかの理由で終了した場合には全球気温が非常に急速に上昇する」と指摘されています。

²杉山昌広, 西岡純, 藤原正智, 気候工学（ジオエンジニアリング）, 天気, 58, 577-598, 2011. < http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2011/2011_07_0003.pdf >

5. さいごに

ここでは、クルツェンが 2006 年のエッセイの最後に記したことの概要を書いておきましょう。

「現在の重大な政策ジレンマ（大気汚染を軽減すると温暖化がさらに進んでしまう）を念頭に置くと、成層圏エアロゾル注入のようなジオエンジニアリング手法の実効性と副作用に関する研究をタブー視してはいけない。科学的研究はおおいに進めておくべきである。まず数値気候モデルによる研究を進め、その結果次第では、小規模な現実大気中での実験をおこなっていくのがよいであろう。さらに、ジオエンジニアリングには科学的、技術的問題だけでなく、法律的、倫理的、社会的問題もある。科学者と一般社会との信頼関係の構築こそが重要である。もちろん、温室効果ガスの排出削減が十分に行われジオエンジニアリングのようなものが不要となるのが最も望ましいことではあるが、しかし現状ではそれは実現しそうにない願望にすぎないように見える。」