

気候工学 (ジオエンジニアリング)

杉 山 昌 広^{*1}・西 岡 純^{*2}・藤 原 正 智^{*3}

要 旨

気候工学 (ジオエンジニアリング) は「人為的な気候変動の対策として行う意図的な惑星環境の大規模改変」である。緩和策・適応策の代替にはならないが、温室効果ガス排出削減がなかなか進まない中、地球温暖化が危険な水準に達してしまうリスクを踏まえ、昨今、気候工学は欧米を中心に注目を浴びている。IPCC の第 5 次評価報告書でもレビューの対象となった。

気候工学は、太陽放射管理 (SRM) と二酸化炭素除去 (CDR) の二つに大別される。SRM は太陽入射光を減らすことで気温を低下させる。CDR は二酸化炭素のシンクを促進するか工学的回収をして地球温暖化の原因を除去する。例えば海洋に鉄を散布し光合成を促進させる手法が提案されている。

数ある気候工学で最も注目されているのは SRM の一つである成層圏へのエアロゾル注入である。火山噴火後の気温低下が示すように物理的な裏づけがあるが、降水の地理的パターンを変えるなど副作用も懸念されている。成層圏エアロゾル注入を主な対象とする気候工学モデル相互比較実験 GeoMIP も立ち上がった。

地球温暖化対策とはいえ、気候を直接改変する考えには、さまざまな社会的な課題がある。気候工学は一国が実施すると地球全体の気候に影響がでるため、何らかの国際枠組を必要とする。短期的には自然環境での実験についてのガイドラインが不可欠であり、国際的な議論がはじまっている。

1. はじめに

地球温暖化を人為的に抑えようとするジオエンジニアリング geoengineering が世界で急速に関心を呼んでいる。今まで広く関心を集めることがなかったこの考えは、オゾン層に関する研究で1995年にノーベル化学賞を受賞した Paul Crutzen による成層圏エアロゾル注入の検討の提案 (Crutzen 2006) 以降、研究と政策の議論が盛んになってきている。

例えば、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 5 次評価報告書 (AR5) でも、気候工学はレ

ビューの対象となり、これに先立ち 3 作業部会合同の専門家会合が2011年 6 月にペルーで予定されている (IPCC 2010)。IPCC への貢献を目標に、気候工学の効果・影響を検討する気候工学モデル相互比較実験 (GeoMIP) も始まっている (Kravitz *et al.* 2011)。

Geoengineering は「人為的な気候変動の対策として行う意図的な惑星環境の大規模改変」(“deliberate large-scale manipulation of the planetary environment to counteract anthropogenic climate change”) と定義される (Royal Society 2009)。Geoengineering を直訳すると地球工学であるが、一般的に地球工学は土木工学や資源工学を指し、紛らわしい。英語で climate geoengineering や climate engineering という用法もあるため、気候工学という訳語を当てることにする (詳しくは第 5 節で論じる)。

気候工学は異なる多くの手法の総称であり、太陽放射管理 (solar radiation management, SRM) と二

^{*1} (財) 電力中央研究所社会経済研究所。

E-mail: s-masa@criepi.denken.or.jp

^{*2} 北海道大学低温科学研究所。

^{*3} 北海道大学大学院地球環境科学研究院。

—2011年 2 月 9 日受領—

—2011年 5 月17日受理—

酸化炭素除去 (carbon dioxide removal, CDR) に大別される (Royal Society 2009)。前者としては成層圏エアロゾル注入による地球の冷却が、後者としては海洋鉄散布による光合成促進・CO₂吸収がよく知られている。

気候工学の関心の高まりの裏には、今までの温暖化対策では「危険」な地球温暖化を回避できないかもしれないという認識がある。しかし、地球温暖化対策という名目でも自然を改変することで、予想外の影響が出て社会的な問題が起こる可能性があることは想像に難くない。このため、自然科学や技術面での評価と同時に、社会での管理の在り方についても議論がはじまっている。

すでに地球温暖化問題全般で起きていることだが、気象学・気候科学に携わる研究者は (直接研究に従事せずとも)、今後、気候工学について情報提供を求められることが多くなると思われる。したがって専門的な情報を整理する必要がある。英文ではまとまった情報源 (専門的には Royal Society 2009; Launder and Thompson 2009; Vaughan and Lenton 2011; SRM について NRC 2010, 15章 など。一般書として Kintisch 2010; Goodell 2010。歴史書として Fleming 2010) があるのに対し、邦文では杉山・杉山 (2010a) が指摘したように情報が断片的で限られており、全体像や最近の動向が捕捉できていない。本解説の第一の目的は我が国の気象・気候コミュニティに関連のある情報を分かりやすくまとめることである。

本稿の第二の目的は倫理的・哲学的な側面も含めて、気候工学についての賛成派・反対派両方の立場からの議論を概観し、研究活動や実施におけるガバナンス (統治) の取り組みを紹介して、日本の気象・気候コミュニティにおける議論を喚起することである。

本稿の構成は以下の通りである。第2節では歴史と最近の動向を扱い、第3・4節では気候工学の必要性和問題点を整理する。第5節では分類と特徴をまとめ、第6節から第9節で具体的な手法 (成層圏エアロゾル注入、低層雲アルベド増加、海洋鉄散布、CO₂直接空気回収) を解説する。第10節で社会として気候工学をどのように扱うべきかを論じ、第11節で気象・気候コミュニティの役割について整理する。第12節はまとめである。

執筆分担としては西岡が第8節、第10・11節は杉山・藤原が、残りは杉山が主に担当した。

2. 気候工学の歴史と最近の動向

気候工学の歴史と最近の動向について第1表にまとめた。

気候工学のルーツは、米ソの気象調節・気象改変研究や大規模土木工学である (Keith 2000)。科学が万能と考えられた時代背景もあり、1960年代に気象改変研究は最盛期を迎え、米国の年間研究予算が1000万ドル規模にものぼった。気象改変は戦争の兵器になりうると考えられ、軍によって多額の予算が投じられた (Fleming 2004)。しかし1970年代の社会運動の高まりを受け、気象改変研究は徐々に沈静化した。

気候工学の考え自体は古い。Geoengineering という言葉は、IIASA の Marchetti (1977) が海洋での二酸化炭素回収・貯留の文脈で用いたのが最初だとされる。成層圏エアロゾル注入は70年代にすでに Budyko などによって検討されていた (Budyko 1974)。

しかし、多くの科学者は気候工学を公の場で議論するのを避けていた。CO₂を減らすことなく温暖化を抑えることができる気候工学は、CO₂排出削減という温暖化対策から目をそらすことにつながるのではないかと懸念が根強くあった。IPCC でも第4次評価報告書までは簡単に言及される程度であった。

冒頭で述べたように、この状況を大きく変えたのが Crutzen (2006) の論文である。この後の動きは目覚ましい。例えば2009年には米国気象学会と米国地球物理学連合は気候工学に関する政策ステートメントを発表し、慎重ながらも気候工学の研究を支持した (AMS 2009; AGU 2009)。同年には英国王立協会が、気候工学に関する総合的な報告書を発表した (Royal Society 2009)。

また将来的な気候科学の研究構想も気候工学に言及している。WCRP, THORPEX, GEO, IGBP, ICSU を率いる研究者らは、今後の気候・気象研究の方向性として、必要な計算機資源や観測手段を確保し、モデル開発を促進すべきだとする地球システム予測構想 (Earth-System Prediction Initiative) をまとめた (Shapiro *et al.* 2010)。この構想の中で、Shapiro らは地球システム予測を用いて気候工学の提案を評価する数値実験を行うことを提案している。

3. なぜ検討が必要か

近年、気候工学への関心が高まってきた理由はなんだろうか。これを一言でまとめれば、数値モデルが示す温暖化予測には大きな不確実性が残っているた

第1表 気候工学の歴史と最近の動向. Keith (2000), Fleming (2004, 2007, 2010), Weart (2008), 山本 (2009), Willoughby *et al.* (1985) に基づく. 杉山・杉山 (2010a) の Table 1 を更新.

19世紀中頃	米政府最初の気象学者 Espy, 森林火災で人工降雨ができると提案
1932	ソ連, レニングラードに人工降雨研究所設立
1946	General Electric 社の Schaefer と Langmuir による人工降雨研究によって気象改変研究に火がつく
1950-1960	米ソにおける人工降雨などの気象改変研究が盛んになる (60年代後半の米研究予算は1000万ドル規模にも達した)
1960	Rusin & Flit (ソ連), Man versus Climate を著す 北極海から川を引いて小麦畑を灌漑する提案など
1962	台風を弱める米研究プロジェクト STORMFURY 開始 (1983終了)
1965	Johnson 米大統領の科学顧問委員会の環境問題報告書 初の政府温暖化評価, 温暖化対策として気候工学のみ記述があり, CO ₂ 排出削減策への言及はなかった
1970代	Budyko (ソ連), 成層圏エアロゾルで太陽光反射を提案
1974	Kellogg and Schneider (米国), Science で気候工学を否定的に書く ベトナム戦争での米軍気象改変プロジェクト POPEYE が明るみに出て 1978の ENMOD へつながる
1977	Marchetti (奥) が海洋炭素貯留の説明に geoengineering という言葉を使う
1978	国連環境改変技術敵対的使用禁止条約 (ENMOD) 発効
1990	IPCC 第1次報告書, CO ₂ 捕集, 森林吸収の強化にわずかに触れる
1992	全米科学アカデミー温暖化報告書, 一章を気候工学に充て包括的に扱う
1995	IPCC 第2次報告書で, 気候工学がわずかに否定的に扱われる
2006	1995年のノーベル化学賞受賞者 Crutzen (蘭) が Climatic Change 誌に, Wigley (米国) が Science に気候工学の論文を書く. 以後研究が盛んに.
2009/9	米国気象学会, 気候工学に関する立場を表明, 慎重ながらも研究自体は支持
2009/9	英国王立協会, 初の気候工学の総合的な報告書発表
2009/9	成層圏エアロゾル注入の, 実験を含む研究計画案, 発表
2010/3	英国議会下院科学技術委員会, 気候工学の規制・ガバナンスについての報告書を発表
2010/3	実験ガイドラインについて議論する気候工学に関するアシロマ国際会議, 米国カリフォルニア州にて開催
2010/10	アメリカ議会下院, 気候工学に関する初の報告書を発表
2011/3	英国王立協会, TWAS, Environmental Defense Fund による太陽放射管理ガバナンス (SRMGI) の会議 (イギリス)
2011/6	IPCC の気候工学に関する専門家会合 (ペルー) (予定)

め, 国際社会が回避しようとしている「危険な気候変動」が起こる可能性は除外できないこと, また気候システムには慣性があるため変化が見え始めた時に対策をとり始めたのでは遅すぎる可能性があること, したがって最悪の場合, 有効な対策は気候工学のみになる可能性がある, となるだろう.

地球温暖化予測には気候感度や海洋の熱吸収, エアロゾルの放射強制力, 炭素循環など様々な要因で不確

実性が生じる. IPCC の第4次評価報告書 (AR4) 後のレビューである Knutti *et al.* (2008) も指摘するように, 現在でも不確実性の幅は減少していない. 温度上昇の確率密度関数には長いテールがあるため, 温室効果ガス排出の大幅削減をしても高い温度上昇の可能性は残る.

Meinshausen *et al.* (2009) によれば2050年で世界の温室効果ガスの排出量を1990年水準に比べて半減しても, 温度上昇が2°Cを超える確率が約12~45%残る. 現在の緩和策の延長では温度上昇が国際目標である2°Cを超え, 4°Cに迫る場合も覚悟しなければいけないという意見も出てきている (Parry *et al.* 2009; New *et al.* 2011).

一般に全球の気温上昇が大きくなるにつれて沿岸域, 健康, 水資源, 食糧, 生態系への影響は大きくなる (IPCC 2007a). 同時に, 突然の気候変化 (abrupt climate change) (Alley *et al.* 2003) や tipping elements (Lenton *et al.* 2008) の変化といった, カタストロフィック・非線形な現象が生じるリスクも

高まっていく. Tipping elements は, 地球システムのサブシステムで, ある閾値に迫ると温度などの外部要因のわずかな変化で, 人類に対する大きな影響を起こすものを指す. 時間はかかるが影響の大きい現象も定義に含むため, 突然の気候変化の拡張概念といえる. 例として, 大規模に溶け出すことで海面が大幅に上昇するグリーンランド氷床が挙げられる.

仮に気温上昇が, 社会が想定していた温度上昇より

高いと分かり、甚大な被害が起き始めたでしょう。極端なシナリオだが、人類が温暖化対策に真剣に乗り出し、CO₂の排出量がゼロになったでしょう。しかし残念ながら、炭素循環には複数の異なるプロセスが関わるため、CO₂は単一の時定数で減衰せず、千年以上のオーダーでも一定の割合が大気に残存する (Archer and Brovkin 2008)。さらに海洋の熱慣性もあるため、CO₂の排出をゼロにしても、全球平均気温は長期に渡り殆ど下がらない (Solomon *et al.* 2009)。

被害を抑えるために気温を下げるためには、短期的には入射太陽光を減少させるという気候工学が必要になり、長期的には大気から CO₂を回収する技術が必要になるだろう。

確かに気候工学を実施しなくても、エアロゾルの冷却効果を保ちながら大気滞留時間が短い温室効果ガスの排出を減少させれば、地球をある程度冷却できる可能性はある。しかしエアロゾルの負の放射強制力を保つことは、対流圏で SRM を行っているようなものである。

地球温暖化のカタストロフィックな被害は、確率は低いに影響は甚大というものである。気候工学はこのリスクへの「保険」として考えられる。カタストロフィックな影響について分析した Weitzman (2009) は、気候工学の研究を進め、万が一のときの保険として成立するのか、例えば副作用が大き過ぎて利用できないかどうか、こうしたことを科学的に検討すべきだと述べている。

無論、気候工学は万能ではない。効果がないかもしれないし、むしろ多大な副作用があるかもしれない。人間が気候システムを都合のよいように変えることの是非について倫理的問題もあるし、技術開発が進めば単独国家が実施してしまう恐れもでてくるので、新たな国際摩擦も生まれかねない。「実施」はともかく、こうした様々な社会的問題も含めて、少なくとも気候工学の「研究」は真剣に進める必要があるというのが、気候工学の研究を進め始めている研究者たちの考え方である。

4. どのような問題があるか

気候工学の重要性を認識している科学者の殆どが支持しているのは「研究」であって「実施」ではない。現状の科学的知見では効果や副作用などについて未解明な点が多数あり、不確実性が大きすぎるからである。

研究を支持する研究者の間でも、意見の違いがある。気候モデルを使った研究を進める必要性については異論はそれほどないが、自然環境での実験については激しい議論が交わされている (Keith *et al.* 2010; Robock *et al.* 2010)。実験といっても成層圏エアロゾル注入のような手法は、地球が一つしかないため大規模環境実験は小規模実施と同等であり、実施のリスクを事前に評価するのは原理的に不可能という怖れがあるからである (Robock *et al.* 2010など)。

Robock の立場は特筆に値する。実施と環境実験について強く反対する彼は、気候工学の問題点を20ほど列挙する論文も書いたほどである (Robock 2008)。しかし、批判も科学的に裏付けられるべきという考え方なのか、シミュレーション研究の重要性を強く認識しており、GeoMIP を先導している。

他にも気候工学を批判する理由にはいろいろあるが、社会的な側面に触れたものも多く、これについては後段のガバナンスの節で取り上げる。

5. 用語・分類・特徴

5.1 用語と定義

冒頭で気候工学という訳語を提案したが、その根拠について詳しく論じたい。

ジオエンジニアリング *geoengineering* は直訳すれば「地球工学」になる。室田ほかによるノードハウスの著作の翻訳 (ノードハウス 2002)、IPCC AR4の経済産業省訳 (IPCC 2007 b) や環境省の環境基本計画見直し (環境省中央環境審議会 2010) でもこの訳語が使われている。しかし英語圏でも *geoengineering* は分かりにくいとして、*climate geoengineering* や *geoengineering the climate* (*geoengineer* は動詞) と気候という修飾語を足す場合もあれば、*climate engineering* という言葉が用いられることもある (Hegerl and Solomon 2009; ASOC 2010)。本稿でも *geoengineering* の一語ではなく *climate geoengineering* または *climate engineering* を想定して、気候工学と呼ぶこととする。なお SRM の代わりに *climate intervention technology* (気候介入技術)、CDR の代わりに *climate remediation technology* (気候修復技術) という言葉も聞かれる (ASOC 2010)。英語圏でもこれらの用語は確定しているわけではない。また *geo-engineering* というハイフン付きの用法も見られるが、用例としては少なく、また系統だった使い分けは見られない。

気候工学は、現在の地球温暖化対策における、緩和策（温室効果ガス排出削減）、適応策（防災など温暖化影響の軽減策）とは異なる、第三の方策と見ることができる（Keith 2000）。

歴史的には、二酸化炭素回収・貯留（CCS）や植林など、現在では通常の温暖化対策として考えられているものも気候工学に分類されたこともある。CCSと植林は広義の気候工学に含まれるといえる。しかし最近では気候工学といえば植林やCCSは除外するのが普通である。本稿では、以下、断りがない限り気候工学といえばIPCCなどで緩和策と認識されるものを除外したものを指すこととする。CO₂直接空気回収も緩和策に近い技術であるが、Royal Society（2009）などにならって気候工学に含めることにする。

5.2 分類と特徴

前述したように気候工学にはSRMとCDRがある。第2表でSRMとCDRの特徴をまとめ、第3表に提案されている様々な手法を一覧にした。SRMは一般的に（副作用を除いて実施のコストだけに限れば）コストが低く、全球平均気温を低減することができ、速効性もある。そのかわり地域的な降水変化など、副作用があることも認識されている。例として、成層圏エアロゾル注入、海塩吹き上げによる低層雲のアルベド増加がある。

SRMはCO₂排出削減にはつながらないため海洋酸性化を解決しない。現在人為起源のCO₂の約4分の1は海洋に吸収されている。CO₂は海水に溶けると弱酸となるため、CO₂濃度が高まると海洋の酸性化が進む。酸性化によってカルシウムでできた骨格が溶け出し、サンゴやプランクトンなど殻を作る生物が被害を受けるとされている（Doney *et al.* 2009）。海洋酸性化の問題や副作用のために、SRMは緩和策の代替策にはならない。

CDRは地球温暖化の主要な原因であるCO₂を除

去する点がSRMと異なる。しかし、大量のCO₂を吸収・固定するには時間がかかるため、効果が出るまでに時間がかかる。例としては海洋鉄散布、CO₂直接空気回収などがある。CDRは自然のプロセスを活用するものと、工学的な手法に分けられる。前者の一つである海洋鉄散布は生態系への副作用が非常に憂慮される。後者に属する大気からのCO₂回収は、（プラントの設置に必要な土地の確保といった問題を除けば）回収時の生態系への影響は限定されると考えられる。

SRM・CDR以外にも、局地的な変化として気候システムのエネルギー輸送を変化させることも考えられる。Kellogg and Schneider（1974）とKeith（2000）は巨大ダムで海洋の流れを変えて海洋のエネルギー輸送に影響を与える方法や、陸面を変化させ蒸発量を制御する手法もレビューしている。地域的な気候改変は全球の現象である地球温暖化の抑制にはならないので本稿では扱わない。

他にも海洋にパイプを建設して下向き熱輸送を増やし、海洋熱吸収を促進することもできるだろう（AMS 2009）。しかし文献に限られるため、これについても本稿では詳しく扱わない。

CDRの延長としてCO₂以外のメタンなどの温室効

第2表 SRMとCDRの一般的な特徴。

*：海洋鉄散布は海洋表層の酸性化を抑えるが、その代わり深海に輸送された炭素が溶融し、酸性化が進むという指摘もある（Cao and Caldeira 2010）。杉山・杉山（2010a）のTable 2に補筆。

種類	二酸化炭素除去 (carbon dioxide removal, CDR) CO ₂ を大気から取り除く	太陽放射管理 (solar radiation management, SRM) 太陽入射光を減少させ、温度上昇を抑える
利点	- 地球温暖化の原因を直接除去する - 温暖化のみならず海洋酸性化を抑えることができる*	- 概ね安価である - 温度上昇を抑えるのに速効性がある
欠点	- 温室効果ガス削減（緩和）策と同等かそれ以上に費用がかかる - 効果が出るまで数十年要し速効性はない	- 海洋酸性化の解決にはつながらず、また降水への影響という副作用もある - 二酸化炭素の滞留時間である数百年から数千年間継続する必要がある、停止すると急激な気温上昇が生じる可能性がある
主な規制の論点	- 既存の枠組みの延長で対応可能か？（商業的な海洋鉄散布はロンドン条約・議定書や生物多様性条約で既に禁止、科学実験の影響評価の枠組みも整備） - 商業活動をどこまで認めるか？	- 国際的枠組みをどのように構築するか？最初から国連ベースか？最初は少数の国で研究を始めるか？ - 大規模環境実験が小規模実施と同等となるので実施のガバナンスの枠組みを厳しく検討しなければならない

第3表 様々な気候工学の手法. Royal Society (2009) や Lenton and Vaughan (2009) など参考文献を著者が作成.

*1: 数十万~数百万年以上の地質学的時間スケールでは、大気中のCO₂は火成活動(火山活動等)と、風化反応で主に決まっている(田近 1996). 風化の促進は、非常に長い時間スケールで機能しているシンクのプロセスを速めることに相当する.

*2: 植林と CCS は古い文献では気候工学に分類されるが、最近では緩和策に分類されている.

SRM	都市・住宅のアルベド改変 草地や穀物のアルベド改変 砂漠アルベド改変 雲のアルベド改変 (DMS 発生などの生物的手法) 成層圏へのエアロゾルの散布 宇宙における太陽光シールド
CDR (自然のプロセスを利用)	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 湧昇流・沈降流の促進 風化反応の促進 (土壌へのケイ酸塩の散布, 海洋への石灰石・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) (*1) バイオ炭
CDR (工学的手法)	CO ₂ 直接空気回収
CDR (緩和策との差が不明確なもの)	バイオエネルギー・二酸化炭素回収貯留 (BECS) 植林・土地利用改善と二酸化炭素回収貯留 (CCS) (*2)

果ガスを吸収することも原理上考えられるが、殆ど研究がない。

以下、気象学・気候科学に関連が深く、最近よく議論されている3つの方法、成層圏エアロゾル注入、低層雲アルベド増加、海洋鉄散布について詳しく述べる。また気象学・気候科学には直接の関連はないが、関心が高い技術ということでCO₂直接空気回収についても簡単に触れる。

6. 成層圏エアロゾル注入

成層圏エアロゾル注入 (レビューとして Rasch *et al.* 2008) は現在最も有望な気候工学として考えられている。英国では Hadley Centre も参加する研究プロジェクト SPICE (4年間で約2億円の規模、1ポンド130円で換算) が動き始めており、ドイツ・フランス・ノルウェーでもヨーロッパ科学財団の予算により IMPLICC という成層圏エアロゾル注入を中心とし

た SRM 研究プロジェクトが動いている。

6.1 概要

成層圏エアロゾル注入は、大規模火山噴火後の全球の気温低下と同様な原理に基づく。大規模な火山噴火があると、硫黄ガスが成層圏に吹き上げられる。ガスの化学反応により太陽光を反射する硫酸エアロゾルが形成され、短期的に全球平均気温が下がることはよく知られている。最近では1991年のフィリピンのピナツポ火山が噴火して、ピーク時には全球平均気温が約0.5°C低下している。

気候工学として行うには、火山噴火と違い、時間的にはパルス状ではなく連続的・断続的に注入する (Wigley 2006)。また空間的にも1か所に集中するのではなく、最適な場所を探して注入することになる。

人為的に注入する粒子としては硫酸エアロゾル (H₂S, SO₂, または H₂SO₄ の形として; Budyko 1974 など), スス (Crutzen 2006), ダスト (NRC 1992), アルミ酸化物 (Teller *et al.* 1997) などが考えられる。粒子の空間的分布や大気滞留時間などを制御することを意図して、人工的なエアロゾルも提案されており、例えば光泳動エアロゾル (Keith 2010) がある。光泳動 (photophoresis) とは光の非均一加熱で (周囲の非均一ブラウン運動を通じて) 粒子が動くことを意味する。

当然ながら成層圏に注入する物質やその粒径によって、粒子の反射効率と滞留時間は大きく変わり、したがって必要な注入量も大きく異なる (Rasch *et al.* 2008)。火山噴火後の硫酸エアロゾルは有効半径が~0.4 μm であるが、これより小さな粒径が効率的である。硫酸エアロゾルについては、前駆体の H₂S や SO₂ のガスを注入すると凝集によってエアロゾル粒径が大きくなり効率が悪く (Heckendorn *et al.* 2009), H₂SO₄ を直接注入した方が効率がよいとされている (Pierce *et al.* 2010)。

CO₂倍増の放射強制力3.7 W/m²を相殺するためには、注入量として5-10 Mt/年のオーダーの硫黄が必要とされる (Pierce *et al.* 2010)。この値は、大気汚染物質として対流圏に現在排出されている量、年間約50 Mtの硫黄 (Stern 2005) の、10から5分の1程度にあたる。注入方法としては、飛行船や飛行機、非常に長いホース、銃砲などが議論されている。

6.2 効果と副作用

成層圏エアロゾル注入の効果・影響は主に大循環モデル (GCM) を使って評価されてきた。また自然の

火山噴火事例を解析して、アナロジーとして議論した例もある。

初期のモデル研究ではエアロゾルを注入するのではなく、太陽定数を減少させる簡便な方法がとられてきた。こうした方法でも効果について大まかな傾向は分かる。最近では化学・気候モデルを用いてエアロゾルを陽に計算するようになってきた。以下ではエアロゾルの性質が明確に重要な場合以外は、モデル研究の細かな手法を区別しない。

6.2.1 気温

成層圏エアロゾル注入は全球平均気温を下げるができるが (Govindasamy and Caldeira 2000 など多数)、気候変動を完全には打ち消せない。熱帯は若干冷却化し、極域は暖まる傾向が見られる (Matthews and Caldeira 2007 など)。CO₂の放射強制力はほぼ空間的に一様であるのに対し、太陽光入射は熱帯域で強く極域で弱いからである。(産業革命前からの) 気温変化の絶対値は、気候工学を実施したシナリオの方が、地球温暖化するシナリオに比べて、小さくなる傾向がある。

6.2.2 降水

成層圏エアロゾル注入によって温暖化を相殺すると、地表面での短波放射の減少がCO₂放射強制力に比べて大きいので、地表面の正味放射が減少する。これに応じて地表面からの潜熱・顕熱フラックスも減少する。潜熱の変化が卓越するため、成層圏エアロゾル注入は全球の水循環を弱める方向に働く (Bala *et al.* 2008)。水循環の変化も均一ではなく、特に陸域でより大きな減少傾向が見られる (Trenberth and Dai 2007; Hegerl and Solomon 2009 など)。アフリカやアジアのモンスーン領域における降水減少の可能性も指摘されている (Robock *et al.* 2008)。

6.2.3 オゾン層

硫酸エアロゾル量が増えると不均一反応の場が増えるため、成層圏のオゾン層破壊が促進される (Heckendorn *et al.* 2009; WMO/UNEP 2010)。Tilmes *et al.* (2008) による試算ではオゾン層の回復が30-70年遅れる。また、注入する粒子の粒径が小さい方がオゾン層への影響が大きいことが示されている。

6.2.4 海水・氷床

成層圏エアロゾル注入は気温上昇を抑制できるため、北極圏海水の減少を止めることや (Robock *et al.* 2008)、グリーンランド氷床の大規模溶解を抑えることができる (Irvine *et al.* 2009) とする研究もある。

しかし海水や氷床についての詳しい検討は限られており、今後の課題である。

6.2.5 その他の影響

Robock *et al.* (2009) は成層圏エアロゾル注入の便益と副作用・問題点をまとめている。上述したものを除いて、気象学的な問題点は以下のものがある。

- ① 気候工学を止めると、CO₂濃度が下がっていない場合、急激に温度が上昇する (終端問題)。
- ② 散乱光が増えるため空が白っぽくなる。
- ③ 直達光が減るので、太陽光を集光する発電技術 (集光型太陽電池や太陽熱発電) の出力が減る。
- ④ 実施をした場合、多数の飛行機が成層圏を飛行するなどといった注入作業により環境影響が出る懸念がある。
- ⑤ 海洋酸性化の問題は解決されない。

(①と⑤)は成層圏エアロゾル注入に限らずSRMに共通な問題である)

特に重大なのが「終端問題 (termination problem)」という課題である。温室効果ガス濃度が下がっていない状態でSRMを急に停止すると、放射強制力が突然大きな正の値となり、温度が急激に上昇する (Matthews and Caldeira 2007 など)。言い換えれば、SRMだけに頼って温暖化対策を進めた場合、CO₂の滞留時間である数百年・数千年という時間、SRMを続ける必要が生じる。SRMを平和的に続けるには国際社会・政治体制が安定していることが必要だが、20世紀というたった100年の間に二つの世界大戦があったことを思い起こすと、非常に困難であると思われる。

問題の中には、モデル研究によって影響が小さいことが判明したものもある。成層圏硫酸エアロゾル注入は硫酸投入量が小さく、また投入されたエアロゾルは拡散されるため、酸性雨、および酸性降下物による追加的な海洋酸性化の問題は起きないとされている (Kravitz *et al.* 2009)。

便益については、地球温暖化とその被害を抑えることに加え、生物の生産性を高めることが挙げられる。植物の光合成では散乱光の方がより効率的に利用されるため、散乱光の量が増加すればCO₂のシンクが増強されるかもしれない。

6.3 研究の課題

ほとんどの既往研究が単独モデルを用い、研究ごとで違うシナリオ設定を用いており、前提条件が揃っていないため、結果の違いやロバスト性を検討できない。

い、昨今の地球温暖化の予測・影響評価では統一したシナリオを用いたマルチ・モデル・アンサンブルによる研究が主流となっていることを考えると、気候工学のモデル研究はまだ萌芽期にあると言える。

この状況を踏まえ、Kravitz *et al.* (2011) は気候工学モデル相互比較実験 GeoMIP を提案した。CMIP5 (Taylor *et al.* 2009) のシナリオに対する SRM の効果を調べることが目的である。具体的には以下のシナリオが提案されている。

G1: CO₂濃度 4 倍増の放射強制力を太陽定数の減少でバランスさせる。

G2: CO₂年率 1%増加の放射強制力を太陽定数の減少でバランスさせる。

G3: 代表的濃度経路 RCP の一つである RCP4.5の放射強制力を硫酸エアロゾル注入でバランスさせる。

G4: RCP4.5シナリオにおいて年間 5 Mt-SO₂の硫酸エアロゾルを注入する。

ここで RCP とは CMIP5 で使われる温室効果ガス等の濃度シナリオ群である (Moss *et al.* 2010)。RCP4.5 は中程度の緩和シナリオで、2100 年で約 4.5 W/m² の放射強制力を持つ。G1 を除くシナリオでは気候工学の介入開始から 50 年後に介入を突然止め、20 年間さらに計算する。急激な放射強制力の変化の影響を検討するためである。

世界のモデル研究グループが IPCC AR5 への準備で忙しい中、遅れて提案された GeoMIP であったが、2011 年 2 月に米国ニュージャージー州で第 1 回のワークショップが開かれた。既に一部の研究グループでは GeoMIP の実験設定にしたがった試算を行っていた。ワークショップの報告は杉山・河宮 (2011) を参照いただきたい。

モデル研究のその他の課題としては、例えばダウンスケーリングを用いた地域的な影響を見た研究は見られない。また今までに調べられた変数は基本的に年平均値に限られ、気候工学が ENSO や北極振動といった自然変動や豪雨や台風などの極端現象に及ぼす影響については殆ど検討がなされていない。

数値実験によりある程度の見通しがついてくれば、当然次は実大気中における実験を、という機運が高まることが予想される。自然環境での実験については、非常に小規模であるが Izrael *et al.* (2009) が対流圏下層を対象にエアロゾル散布実験を行っている。軍のヘリコプターとトラックを利用した数 km² の実験であった。雲があったため効果の計測は困難であった

が、10%ほどの太陽放射の減少が観測されたとされている。

6.4 コスト

成層圏エアロゾル注入のコストは昔から非常に安いと見られている (NRC 1992)。最近の見積もりでは技術によるコストの違いが指摘されているが、非常に安い技術があるという結論は変わらない (Robock *et al.* 2009; McClellan *et al.* 2010)。

Royal Society (2009) は CO₂濃度を 450 ppm または 550 ppm に安定化させるときの排出削減策のコストと比べると、オーダーで 3 桁ほど安価であるとした。少し古くなるが、NRC (1992) は成層圏エアロゾル注入の費用として CO₂ 1 トンあたり 0.3~100 円という数字を掲げている (1 ドル 100 円換算、以下ドルは全て同様に換算)。他方、ヨーロッパの排出枠取引市場の炭素価格はオーダーとして CO₂ 1 トンあたり 1000 円であり (1 ユーロ 100 円換算)、IPCC AR4 で評価されている多くの CO₂ 排出削減策のコストは CO₂ 1 トンあたり 2000 円~1 万円 (IPCC 2007 b) 程度あるから、非常に安いことが分かる。詳しくは後述するが、このコストの低さのため、成層圏エアロゾル注入は単独実施が可能であり、国際政治的な議論が避けられない。

7. 低層雲アルベド増加

亜熱帯太平洋東部・大西洋東部などで広大に広がる層積雲は、負の放射強制力を持つ。これを強めることで全球平均気温を下げるという提案がなされている (Latham 1990, 2002; Latham *et al.* 2008)。海水を特殊船舶で巻き上げ、雲凝結核 (CCN) として機能する海塩粒子を増やし、種まき (シーディング) をすることで、低層雲のアルベドが高まると考えられる (エアロゾル第一種間接効果)。さらに雲の寿命が延びる可能性もある (第二種間接効果)。飛行機などで CCN を直接散布する方法も考えられる。

機械的ではなく生物学的に、植物プランクトン起源の CCN 前駆物質である硫化ジメチル (DMS) を増やす方法も考えられる。(CO₂吸収を目的とせず) 海洋鉄散布を行い、南極海における光合成を促進することで、植物プランクトンによる DMS の生成量を増やす手法も提案されている (Wingenter *et al.* 2007)。しかし南極海の夏季という地理的・季節的制限があり、効果は小さいとされる (Lenton and Vaughan 2009)。(CO₂吸収を目的とする海洋鉄散布は次節参

照)。

低層雲に対する種まきの効果を評価する GCM 研究は、成層圏エアロゾル注入に関するものと比べると少ない。Latham *et al.* (2008) や Jones *et al.* (2009) によれば、実際にアルベドが上がり、地球温暖化をある程度打ち消せるという結果が得られている。しかし成層圏エアロゾルと違って放射強制力が地域的にかたよるため、地域によって非均一な影響が出ると考えられる。例えば Jones *et al.* (2009) の計算結果はアマゾン域の降水と純一次生産 (NPP) の減少を示している。

GCM を用いた評価は重要であるが、GCM において雲の表現は非常に難しいことはよく知られている。雲のフィードバックは気候感度の不確実性の大きな割合を占めており、特に低層雲の寄与は大きい (Randall *et al.* 2007)。またエアロゾルの間接効果も未だに不確実性が大きい (Denman *et al.* 2007)。したがって低層雲のアルベド改変技術の数値モデルによる評価は、現時点では不確実性が大きく、評価の向上にはモデル自体の改良を待たなければならないだろう。

8. 海洋鉄散布

海洋学は(現代的な意味における)気候工学においては気象学の先輩格であり、海洋鉄散布の経緯が示唆することは多い。

海洋で光合成を促進させるために栄養塩を撒く手法を海洋肥沃化という(レビューとして Wallace *et al.* 2010 など)。撒く物質としては窒素やリンや鉄などがあるが、この中で鉄がもっともよく研究されてきた。

研究の手法としては、モデル計算や室内実験などに加えて、実際に海洋に鉄を散布し、変化を観測する実験が多数行われてきた。こうした実験は正確には *in situ iron enrichment experiment* と呼ぶべきであり、「鉄肥沃化実験」という訳語の方が正確である。しかし一般的な使い方にならない、本稿では「海洋鉄散布」とする。

8.1 科学実験としての海洋鉄散布

世界で最初に「海洋鉄散布」が行われたのは今から15年以上前の1993年の事で、場所は東部太平洋赤道域のガラパゴス諸島近海であった (Martin *et al.* 1994)。この「海洋鉄散布」が実施されるに至った経緯には、気候工学的な考えは大きな位置を占めていなかった。また1993年以降、このような現実海洋における実験が十数年に渡って実施される上で、海洋科学者

のモチベーションを支えていたのはあくまでも科学的興味であった。気候工学的な関心は副次的なものであり、だからこそこれだけ多くの実験が可能であったと言える。

海洋科学者にとっての「海洋鉄散布」の位置付けは、マニピュレーション (manipulation) 実験と呼ぶ一つの「実験ツール」であり、1991年にイギリスのプリマス海洋研究所に所属していた Watson 博士らによって提案されたものである (Watson *et al.* 1991)。

「海洋鉄散布」の実施を支えていた科学的興味とは、当時海洋学に突き付けられていた一つの謎を解明する事であった。その謎とは、「南極海、北部北太平洋、東部太平洋赤道域は、窒素、リン、ケイ素などの主要な栄養塩が十分存在しているにもかかわらず、植物プランクトンの増殖が低いレベルにあること」であった。これらの海域では、植物プランクトンの増殖が栄養分を使い尽くす前に止まってしまうことが知られていたが、その理由が良く分らなかったのである。

鉄が海洋の生物にとって不足し易い元素であることについては、1930年代から指摘されていたが、海洋における鉄分の正確な濃度の分析は極めて困難であったので、1980年代後半までは栄養素としての鉄分の重要性は定量的には議論されてこなかった。1980年代に海水中の超微量な鉄の分析技術が開発されると、アメリカ・モスランディング海洋研究所の John H. Martin 博士(故人)は、これを栄養塩の残存する海域で応用し、海洋表層の鉄濃度が極低濃度である事を明らかにした。Martin らは「海洋は鉄不足であり、だから植物プランクトン増殖が抑制され栄養塩が残存しているのだ」と提案した。彼らはさらに「過去の気候(大気中の CO₂)を制御していたのも、ダストによる南極海への鉄供給量であろう」という仮説も提唱し、両者を合わせて「鉄仮説」と命名した (Martin 1990)。この時期に Martin 博士は、南極海に鉄を散布することで海洋生物生産を増大させ、海洋に炭素を固定するアイデアについて、ジョーク交じりに “Give me a half-tanker of iron and I'll give you an ice age” (「タンカー半分の鉄をもらえらば、地球を氷河期にしてあげよう」) と述べている (Chisholm 1992)。ここに彼の海洋気候工学的発想を窺うことができる。1990年代前半、この「鉄仮説」は、「海洋生態系にとって鉄は本当に重要な^{うかが}のか？」という点で大きな議論となった。

「鉄仮説」を検証するためには、鉄添加に対する海洋生態系の全体の応答を明らかにする必要があり、「海洋鉄散布」が必要不可欠であった。このような経緯を経て Martin 博士を中心としたグループは、先に述べたガラパゴス諸島付近で世界初の「海洋鉄散布」を実施した (Martin 博士自身はこの鉄散布実験の3カ月前に亡くなった)。その後2009年までに、日本も含め世界中の海洋科学者によって、13回の小規模な (散布領域数百 km²スケールの)「海洋鉄散布」が実施されている (Boyd *et al.* 2007)。

これらの実験を実施する上で、主に二つの目的が掲げられて研究資金が用意されている。一つは海洋科学に大きなブレイクスルーとなる「鉄仮説」に基づいて、海洋における鉄分の重要性に関する科学的な情報を集める事である。もう一つの目的として掲げられたのが気候工学である。ただし、気候工学手法そのものの開発ではなく、「地球温暖化対策としての海洋鉄散布という気候工学のアプローチに対して、科学的な情報を集めて方向性を探る」というのが海洋科学者たちの認識であった。しかし、先にも記したように、実験を実施する上で海洋科学者達の主なモチベーションはあくまで「純粋な科学的興味」にあった。実験実施に際し、海洋科学者の初期のとらえ方が気候工学ではなかった点は重要であると考えられる。このために、世界中の海洋科学者達からの理解が得られ、(最新のものの以外は) 市民からも特段の批判が出ることなく世界の各海域で13回もの実験を実施することにつながった、と言えるからである。日本の研究グループも、北部北太平洋の海洋生態系における鉄の役割を明らかにする為に、環境省、文部科学省、電力会社関係などから研究資金を得て、「海洋鉄散布」を2度実施している (Tsuda *et al.* 2003, 2007)。

8.2 気候工学予備実験としての鉄散布

13回の実験のうち回数を重ねた後半の実験では、「いかに炭素固定量の増加を観測で直接捉えられるか？」という点に主眼が置かれ、気候工学的な要素が大きくなっていった。2009年に南極で行われた Lo-haFex 実験は、気候工学的要素が表立って報道され、気候工学予備実験と社会に捉えられた最初の実験であった (Schiermeier 2009a)。この実験以降、「海洋鉄散布」の社会的捉え方が、これまでの「科学者の海洋学的興味で使用した実験ツール」から、純粋な科学的興味だけでは実施できない「気候工学の予備実験」に代わっていった。

実施された「海洋鉄散布」は、どの実験においても海洋学的には鉄の役割に関する重要な知見を数多くもたらすという点で大成功であった (de Baar *et al.* 2005; Boyd *et al.* 2007)。また、鉄の人為的供給は海洋表層の生態系の生物種を大きく遷移させるなど (de Baar *et al.* 2005)、環境に極めて大きな影響を与えることも明らかとなった。

「海洋鉄散布」による炭素の固定に関しては、海洋表層下への有機炭素の輸送量の増大がいくつかの実験で確認されたものの (Boyd *et al.* 2004; Coale *et al.* 2004)、深海への炭素隔離にどの程度つながるのかについては十分な情報が得られていない。モデルによるシミュレーション (例えば Zeebe and Archer 2005; Denman 2008) や自然界で起こる鉄供給過程 (Blain *et al.* 2007; Pollard *et al.* 2009) なども参考にして、実験の結果を炭素固定の面で評価した場合、「海洋鉄散布」による炭素固定量の増加は当初の見込みよりずいぶん小さいというのが科学者達が現在達している認識である (Schiermeier 2009b)。

鉄散布実験の結果だけ見ても、鉄散布量あたりの炭素固定量は、当初想定された実験室の見積もりよりオーダーにして2桁から3桁少ない場合もあることが分かってきている (Boyd *et al.* 2004)。気候工学として「海洋鉄散布」を実施する場合、鉄の投入量分に応じてコストが膨らむ。当初予想されていた CO₂ 1トンあたり60円 (Markels and Barber 2001) というコストは過小評価であり、800円~8000円になるという試算結果もでている (Boyd 2008)。

8.3 海洋鉄散布の今後

科学者の手によって実験としての「海洋鉄散布」が実施されているのと同じ期間に、非科学者団体・営利目的のベンチャー企業 (Planktos や Climos など) による、「海洋鉄散布」の炭素固定への有用性をカーボン・オフセットに利用しようという動きが活発になっていった。カーボン・オフセットは経済活動などで排出された CO₂ を、別の場所で排出削減または吸収し、相殺する考えである。さらにそれに対して、環境保護団体が活発な妨害活動をおこなうようになってきた (Goodell 2010, 7章; Kintisch 2010, 7章)。

このような動きが顕在化してきたことや、鉄散布が海洋環境に与える影響が定量的に評価できないことを理由に、2008年にロンドン条約及びロンドン条約96年議定書 (以下ロンドン条約・議定書) に基づき、科学実験以外の (鉄散布以外の手法も含む) 海洋肥沃化の

禁止が、法的拘束力の無い形で決議された。2010年には科学的実験に関しても、環境影響評価の枠組みによる規制監視を行う事が同条約・議定書によって採択されている。

これらの国際政治上の動きにより、現在は、科学的研究が目的であっても事実上は自由に「海洋鉄散布」ができない状況を作り出している。「海洋鉄散布」を実施してきた一部の科学者は、『海洋鉄散布』がもたらすリスクと利益を、科学的根拠をもって評価できるようになるまでは、この方策をカーボン・オフセットに利用するのは時期尚早である」と考えている。しかし一部の科学者の間では、気候工学としての「海洋鉄散布」の有用性を、科学的根拠をもって評価するために、さらなる大規模スケールの実験が必要であるとの意見も出ており、今なお議論は続いている (Bueseler *et al.* 2008 ; Strong *et al.* 2009)。

9. CO₂直接空気回収

CO₂を直接空気から回収する技術も開発されている (Keith 2009)。工学プラントで大気から直接回収し、濃縮した後に、発電所などで想定されている CCS と同様に地下の帯水層などに貯留する方法である。

具体的な技術としては、水に溶けると弱酸性を示す CO₂をアルカリ性の液体で吸収する技術や、特異的に CO₂と反応する物質で吸着する技術がある。前者として水酸化ナトリウムを使う技術 (Keith *et al.* 2006) があり、後者の例としてイオン交換樹脂を用いた技術 (Lackner 2009) がある。この分野は民間企業の投資もあり、Keith も Lackner もベンチャー会社を設立している。なお地球化学者であり海洋コンベア・ベルト (深層循環) の提唱で有名な Broecker は空気回収に関心を寄せており、Broecker が Lackner を投資家に引き合わせたことで彼の会社が設立されたという経緯がある (Broecker and Kunzig 2008)。

CO₂直接空気回収のコストについては論争が続いている。発電所の排ガスにおける CO₂濃度は10%程度であるのに対し、大気中の濃度は0.04%程度と非常に低いので効率が極めて悪く、エネルギー・コストだけで膨大になるという指摘もある (Ranjan 2010)。しかし分離のためのエネルギーは濃度の対数に比例するので、濃度比ほどにはコストはかからないという主張もある (Keith 2009)。

10. ガバナンス

10.1 ガバナンスの必要性

気候工学は社会的影響が極めて大きい技術である。そのような性格を持つ科学技術を社会的にどのように扱うか、社会的判断の仕組みと具体的な制度設計 (研究者が従うべき原則、各国の安全・環境規制、国際条約など) が必要であり、これを科学技術ガバナンスと呼ぶ (文部科学省 2004 ; 城山 2007)。

「統治」ではなくガバナンスという片仮名を用いる理由は、統治機構を意味するガバメントと対比するためである (城山 2007)。科学技術政策を政府や専門家が決める仕組みであるガバメントに対して、市民や民間、国家や国際機関など多様な主体の意見を政策形成の過程で取り入れていくことを指してガバナンスという言葉を用いる。遺伝子組換え技術やナノテクノロジーなどで議論が先行している。

気候工学においてガバナンスが扱うべき倫理的・社会的な課題は多数あるが、代表的な論点は以下のものになるだろう (Robock 2008 ; Bunzl 2009 ; NRC 2010, 15章 ; Fleming 2010)。

- ① 気候工学の考えが広まると緩和策 (CO₂排出削減など) への動機が薄れ、温暖化対策が後退する恐れがある (この問題は経済学的には正確ではないが比喩として「モラル・ハザード」と呼ばれる)。
- ② 気候工学のような大規模科学技術研究プログラムは既得権益の発生につながり「社会的慣性」を持つ。一度研究が本格化すると、効果が不確実で副作用があっても、プロジェクトが自己目的化して続いてしまう怖れがある。
- ③ 歴史的には失敗に終わった気象改変プロジェクトは多数あり、歴史的に気象改変と関連のある気候工学も失敗のリスクが高いという見方もある。
- ④ 気候工学について公平性を確保できるか、疑問がある。地球温暖化問題の被害を受けるのは主に発展途上国である。地球の気候を制御する権利が先進国を中心とした一部の国に集中すれば、気候工学の利用が発展途上国の被害の影響を低減するために行われない可能性がある。
- ⑤ 地域によって異なるはずである「最適な気候」を誰がどのようにして決めるのか不明である。
- ⑥ 地球温暖化問題の対策であるとはいえ、神のように地球環境の基礎である気候システムを意図的に改変することは倫理的に許されない。
- ⑦ 一部の技術は非常にコストが安いので、「ならずも

の国家」など一部の国家や主体が実施できてしまうおそれがある。

こうした問題点について専門家や一般市民が意見を交換し、ときには対立しながらも合意点を見つけ、気候工学を社会としてどう扱うか、決めていく必要性がある。これが気候工学に関するガバナンスである。

10.2 ガバナンスの現状

ガバナンスは「研究」に関するものと「実施」に関するものに分けられるだろう。短期的には研究、特に自然環境での大規模実験が大きな課題になる。ガバナンスの議論は国際的な議論がはじまっており、特に英国・米国を中心に、様々な分野の専門家が関わって議論が進んでいる。大きな動きとして以下のものが挙げられる。

- ・英国議会下院科学技術委員会の報告書「気候工学の規制」が発表された (UK House of Commons Science and Technology Committee 2010)。
- ・気候工学に関するアシロマ国際会議 (以下アシロマ会議) (ASOC 2010) が開かれ、研究ガイドラインについて検討した。
- ・英国王立協会、TWAS、環境防衛基金 (EDF) が共同で行っている SRMGI は SRM のガバナンスを検討している (Royal Society *et al.* 2010)。日本からは東京大学サステイナビリティ学連携研究機構 (IR3S) の住明正教授がワーキング・グループの一員として参加している。
- ・前述のようにロンドン条約・議定書では海洋肥沃化についての枠組みが作られつつある。
- ・生物多様性条約においては、2008年に沿岸域の小規模実験を除いて海洋肥沃化を禁止するという法的拘束力のない決定が採択された。さらに2010年の名古屋での第10回締約国会議において気候工学について慎重な対応を求める法的拘束力のない決定が採択された (杉山・杉山 2010b)。

これらの中でも気候工学に関するアシロマ会議は専門家以外の多様な意見を取り入れた初の国際会議であり、重要であった。2010年3月に米国カリフォルニア州で開かれたこの会議は、遺伝子組換え実験の研究ガイドラインを検討しその後の研究活動等に多大な影響を与えた1975年のアシロマ会議にならって、同じ会議場で開かれた。

参加者は自然科学・工学・社会科学・人文科学・法律の専門家と多岐にわたり、メディア関係者や市民団

体も参加した。第一著者も日本からの唯一の参加者として参加した (杉山 2010)。様々な意見があったため会議参加者の合意は得られなかったが、初めて国際的に気候工学の研究ガイドラインを議論する場を設けたことは意義が大きかった。今後の議論に続く重要な1ステップであったといえよう。

10.3 研究のガバナンス

アシロマ会議など一連の流れの中で気候工学研究の原則がまとまりつつある。また小規模実験の枠組みも、海洋肥沃化をはじめとして議論が進んでいる。

10.3.1 原則

気象学者・気候科学者にはなじみが薄いが、社会的な論争を呼ぶ科学研究には行動指針や原則が重要である。例えば医学・生命科学分野では、1979年に発表された米国のペルモント報告書 (NCPHSBBR 1979) で臨床実験に関する倫理原則が発表された。被験者保護のためにインフォームド・コンセント等について望ましい原則を打ち出した。こうした原則は具体的な規制の方向性を決める。

気候工学研究の原則として、よく知られているものが二つある。前述の英国の議会報告書作成のために開かれた議会公聴会ではオックスフォード大学の学者らが集まり、気候工学研究に関する五原則を提案した。またアシロマ会議科学組織委員会の報告書も、同様な原則を発表した。アシロマ会議は英国議会報告書より影響を受けており両者は似ている。

アシロマ会議科学組織委員会が発表した原則 (“Principles for Responsible Conduct of Climate Engineering Research”) (ASOC 2010) を、簡単な解説とともに示す。

- ① Promoting collective benefit (気候工学研究の目的は、地球温暖化の社会・環境への影響を抑制し、人類の共通な利益に資することである)
- ② Establishing responsibility and liability (研究の監督機構を作り、責任を明確化する)
- ③ Open and cooperative research (データなどを公開し、国際協力のもとに研究を進める)
- ④ Iterative evaluation and assessment (独立した主体による効果・副作用の評価を繰り返す)
- ⑤ Public involvement and consent (市民が研究の方向性付けや監督、影響評価に関わる)

この原則は10.1節で述べたような問題点を直接解決するものではない。むしろ、今後こうした問題を議論するガバナンスの枠組みを形成していくための原則と

して理解すべきである。

10.3.2 研究の枠組み

原則の発表と平行して、ロンドン条約・議定書や生物多様性条約の決議などで徐々に研究の枠組みがまとまりつつある。大まかな方向性としては、大規模環境実験または商業的なプロジェクトは実施しないよう求める一方で、(全球的な気候システムから見た時の)小規模な科学実験は十分な環境影響評価を前提に認める方向になりつつある。8.3節で触れたようにロンドン条約・議定書が最も進んでおり、海洋肥沃化に関する環境影響評価の枠組みも決まりつつある。

研究の枠組みにおいては各技術の特性を考慮する必要がある、画一的な対応はできない。例えば、CO₂空気回収は環境影響という側面で見れば、発電所からのCO₂を回収するCCSとほとんど違いはない。影響も基本的には一国の範囲にとどまり、実験として自然からCO₂を回収しても悪影響は殆どないと考えられ、恐らく現在の環境安全規制で対応できるだろう。

これに比べ海洋鉄散布は生態系への影響や国境を越えた広域的な影響の恐れがあり、新たな対応が必要であろう。また成層圏エアロゾル注入も、全球的な影響がでるため、国際的なガバナンスの議論は必須である。海洋肥沃化についてはロンドン条約・議定書が、SRMについてはSRMGIが動き出しているのにも、こうした理由があるだろう。

10.3.3 大規模環境実験

小規模実験は条件付きで認められることになってきたが、大規模環境実験はどうであろうか？

大規模環境実験の議論は既に始まっている。Blackstock *et al.* (2009) は10年間に渡る成層圏エアロゾル注入の研究計画案を発表した。著者にはワシントン大学の気候科学者 David Battisti やハーバード大学の地球化学者 Daniel Schrag が名を連ねる。GCM研究や専用航空機等を含む注入技術の開発、観測技術の開発も含み、シミュレーション、小規模実験、自然環境での大規模実験と段階的に拡大していく計画案である。

大規模環境実験は実験とはいうが、事実上の小規模実験とも言える。Blackstock *et al.* (2009) や Keith *et al.* (2010) は全球平均気温を、わずかが観測できる程度に低下させる実験も想定している。このような実験は、実施に準じたガバナンスが必要であろう。Keith *et al.* (2010) は国際的なガバナンスの枠組みをボトムアップで今からすぐに始める必要性を指摘し

ている。なお、どこまでが小規模実験で、どこからが自然環境に無視できない影響を与える大規模環境実験なのか、その線引きは難しい。現在、SRMGIがこの問題を重要検討課題の一つとしている。

10.4 実施のガバナンス

現時点においては、気候工学の「実施」が真剣に検討されているわけではない。しかし実施のガバナンスの議論は徐々に進めていくべきだろう。コストが低く技術的要件も低い手法には、単独主体による実施可能性があるが (Victor *et al.* 2009)、現時点ではこれを防ぐ有効な国際枠組みが存在しないからである。

粗い計算ではあるが、年額で1000億円あればCO₂濃度が750 ppmになったときの温室効果をほぼ打ち消すことができるとされる (Royal Society 2009)。この金額では国家どころか個人でも、一定期間実施できる資産を持つ人がいる。たとえばマイクロソフト社のビル・ゲイツ氏や世界の著名投資家であるウォーレン・バフェット氏の資産は5兆円のオーダーである (Forbes 2010)。

また、成層圏に飛行機を飛ばしてエアロゾルを散布するためには高度な技術は必要とされないため、先進国のみならず新興国でも行うこともできる。

加えて、効果がきちんと検証されていなくても、技術が利用される危険性すらある。人工降雨の効果については科学的に理解が不足しており、不確実性が大変大きい (AMS 2010) が、世界では人工降雨が実施されている国は30以上ある (UK House of Commons Science and Technology Committee 2010)。歴史的にみても科学的な根拠がないまま多くの気象変化が試みられてきた (Fleming 2010)。

日本では、気象庁気象研究所の村上正隆氏が長年、人工降雨・降雪の研究をしてきており (村上 1995, 2009)、最近では2006年度から2010年度まで科学技術振興調整費のプロジェクト「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」を進めている。このように科学的に厳密に人工降雨を検証する試みは、少数である。

現在、SRMの気候工学の実施を直接的に規制する国際条約はない (Virgoe 2009; Royal Society 2009)。環境変化技術敵対的使用禁止条約や宇宙条約など関連するものはあるものの、どれも不十分といえる。この状況を改善するために、実施のガバナンスの議論は徐々に進める必要がある。

10.5 ガバナンスに関わる主体の意見

ガバナンスに関与する主体は様々であり、各々異なる意見を持っている。本節の残りでは、Kintisch (2010) と Goodell (2010) を参考にしながら、気候工学についての多様な見方を紹介して、議論の喚起を促したい。

米国共和党系シンクタンク American Enterprise Institute (Lane 2010) や “Skeptical Environmentalist” (邦訳「環境危機をあおってはいけない」) (Lomborg 2001) で有名な Bjorn Lomborg (2010) は気候工学を推進している。CO₂排出削減策に消極的な彼らが気候工学に積極的なものを見ると、温暖化対策の言い逃れに見えるかもしれない。また「水爆の父」として知られる物理学者の故 Edward Teller (Teller *et al.* 1997) らのように、冷戦時代から続く技術楽観主義にのっとりた科学者達も気候工学に興味を持っている。

営利企業・民間も興味を持っていることは忘れてはならない。海洋鉄散布では Planktos や Climos といったベンチャー企業が鉄散布によるカーボン・クレジットを構想したため、それらの動きを抑えるためにロンドン条約・議定書などで決議があったことは上述した。SRM についても米 Intellectual Ventures 社が研究を進めており、特許取得も進めている (Levitt and Dubner 2009)。ビル・ゲイツ氏も様々な気候工学関連研究に今までで総額約 4 億 6 千万円の研究資金を拠出している (<http://people.ucalgary.ca/~keith/FICER.html>, 2011年2月4日閲覧)。こうした状況を見ると研究が進むと既得権益ができ、実施につながりかねないという危惧が生じる。

一方で、長年地球温暖化問題や環境問題に取り組んできた研究者や環境保護団体には、気候工学について、悩みを持ちながらも一定の必要性を感じている人々も多い。

ノーベル化学賞受賞者の Paul Crutzen は様々な環境研究を行ってきた。核戦争の後の気候の冷却 (いわゆる「核の冬」)、オゾン層破壊のメカニズムがその例である。しかし、現在の気候工学研究の火付け役は彼だと言ってよいだろう (Crutzen 2006)。“Climate Warrior” (「気候の戦士」) と呼ばれた故 Stephen Schneider は熱心に温暖化対策の重要性を説いていたが (Revkin 2010)、慎重ながらも気候工学についても長年考えてきた (Kellogg and Schneider 1974; Schneider 1996, 2001, 2008)。

日本では地球環境問題を長年に渡って訴えてきた研究者である山本良一氏が最近、気候工学について言及し始めている (山本 2009)。

環境保護団体の中でも Environmental Defense Fund, Pew Center on Global Climate Change は SRMGI やアシロマ会議の組織委員会に関わっている。環境団体は実施には反対だが、「危険な気候変動」の可能性を考えて、研究は行う必要があるというスタンスのようである。もちろん反対論も根強い。NGO の ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration) は積極的に反対キャンペーンを行っている (ETC Group 2010)。

一般市民の意識・認識はどうであろうか？現時点では意識調査やフォーカス・グループ (少人数のグループ・インタビュー) などの結果報告がイギリスで 2 例ある (Royal Society 2009; NERC 2010)。またアメリカの温暖化の意識調査の中で気候工学について質問した研究が 1 例ある (Leiserowitz *et al.* 2010)。

まず第一に、市民は気候工学について殆ど知識を持っていないことが分かった。これは報道が非常に限られているからである。

第二に、今までの調査では市民の間では「モラル・ハザード」は見出されていない。ただし、上述したように地球温暖化対策に懐疑的であった人々が気候工学を支持している傾向があるので、政治的にはモラル・ハザードの様子がある程度見られるといえよう。

最後に、英国では、自然に介入することへの倫理的な問題を多くの市民が指摘している。西洋人と違って自然との調和を尊ぶ日本人には気候工学は受け入れがたいという見方もあるが、同様な考え方は日本人に限られたものではないことを指摘しておきたい。

11. 気象・気候コミュニティに求められることは何か

気候工学の議論が国際的に進行する中、日本の気象学会や気象・気候コミュニティに求められるものは何であろうか？

第一には、情報の整理であろう。気候工学は科学的に複雑なものが多く、極端な主張も少なくはないため、市民は混乱しやすい。英国王立協会フェローで Royal Society (2009) の議長を務めた John Shepherd は、報告書の大きな目的の一つは情報の混乱を収めるためだと述べている。

情報の混乱を防ぐには、政策ステートメントを発表

し、学会やコミュニティとしての考えを発信するというとも考えられる。既述のように、米国気象学会と米国地球物理学連合は昨年政策ステートメントを発表している (AMS 2009; AGU 2009)。このステートメントでは、気候工学は地球温暖化対策の最終手段 (“the last resort”) として、少なくとも科学的に検討する必要はあるとし、現時点では科学的理解が極めて限られているため、今後詳しい研究が必要であるとしている。その上で、気象・気候科学の研究に加えて、社会科学的な研究や政策についての調査検討が必要であるとまとめている。無論、気候工学は緩和策や適応策の代替にはならないことを強調している。

第二は国際的な要請に応えることである。IPCC も AR5 で気候工学をレビューすることになっており、また今後 GeoMIP のようなモデル研究プロジェクトも重要度を増していくだろう。こうした国際プロジェクトに日本の研究者も積極的に関わっていく必要があるだろう。

第三には、国際的な気候工学のガバナンスの議論に日本の専門家集団として貢献することである。我が国が国際会合で意見を発信するとき、気象・気候コミュニティには科学的な知見が期待されるだろう。さらに国際貢献の観点から考えれば、我が国のみならず、アジア域での効果・副作用についても専門的意見が求められるだろう。

12. おわりに

地球温暖化対策として、唯一の地球の気候と天気を人為的に改変する。この考えには様々な批判があり、哲学的・思想的な反論も多い。人類が神になりかわろうとする究極の傲慢という意見もあるだろうし、嫌悪感を抱く人も多いだろう。人間が自然環境に介入して、大失敗をした例は枚挙にいとまがない。どんなに副作用を丁寧に調べても、常に「想定を超えた不確実性」 (“unknown unknowns”) は存在する。そもそも地球温暖化自体が意図しない多大な副作用をもたらした気候工学の一種だったと言ってもいいわけであるから、失敗の上塗りしようという人類の滑稽な活動と言えるかもしれない。

厳しい意見が数多くあるのは、気候工学は人間と自然の付き合いに対して、根源的な問いを投げかけるからだろう。今まで気候というのは、神話や物語やサイエンス・フィクションを除いて制御の対象ではなかったのだ。それが気候工学という概念の誕生と発展

によって変わりつつある。気候工学は危険な地球温暖化への対策として考えられてきたが、同時に単独国家が世界の気候を変えてしまう恐れすらでてきた。人類はあらたなパンドラの箱を開けてしまったのかもしれない。

気候工学の研究とその国際的なガバナンスの議論は既に始まっている。日本として主体的に議論に関与するためには、情報の整理に加え、日本独自の研究も必要になるだろう。気象・気候コミュニティは、日本国民やアジアの市民が議論を始めるとき、適切な情報を提供していくという重要な役割を担うことになる。

謝 辞

増田耕一氏には執筆段階で全般的なコメントをいただきました。地球システム予測構想の位置づけについては榎本 剛氏、中澤哲夫氏にコメントをいただきました。

第3著者藤原は、北海道大学のサバティカル研修制度を利用して滞在していた米国 NCAR にて、Eli Kintisch 氏の気候工学に関するセミナーに出席する機会を得、彼の著作 (Kintisch 2010) を読み、江守正多氏から紹介を受けた第1著者杉山と北大の同僚である第2著者西岡とともに本原稿を執筆することを計画しました。北海道大学地球環境科学研究所および NCAR の関係諸氏 (特に、NCAR での藤原の受け入れ担当であり気候工学の諸問題にも造詣の深い Andrew Gettelman 氏) に感謝します。

略語一覧

- AGU: American Geophysical Union 米国地球物理学連合
- AMS: American Meteorological Society 米国気象学会
- AR4: Fourth Assessment Report (IPCC の) 第4次評価報告書
- AR5: Fifth Assessment Report (IPCC の) 第5次評価報告書
- ASOC: Asilomar Scientific Organizing Committee アシロマ科学組織委員会
- CCN: Cloud Condensation Nuclei 雲凝結核
- CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage 二酸化炭素回収・貯留
- CDR: Carbon Dioxide Removal 二酸化炭素除去
- CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 第5期結合モデル相互比較実験

- DMS : Dimethyl sulfide 硫化ジメチル
- EDF : Environmental Defense Fund 環境防衛基金
- ENSO : El Nino-Southern Oscillation エルニーニョ・南方振動
- GCM : General Circulation Model 大循環モデル
- GEO : Group on Earth Observations 地球観測に関する政府間会合
- GeoMIP : Geoengineering Model Intercomparison Project 気候工学モデル相互比較実験
- ICSU : International Council for Science 国際科学会議
- IGBP : International Geosphere-Biosphere Programme 地球圏-生物圏国際共同研究計画
- IIASA : International Institute for Applied Systems Analysis 国際応用システム分析研究所
- IMPLICC : Implications and Risks of Novel Options to Limit Climate Change
- IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
- IR3S : Integrated Research System for Sustainability Science サステイナビリティ学連携研究機構
- NCAR : National Center for Atmospheric Research 全米大気研究センター
- NCPHSBBR : National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research
- NGO : Non-Governmental Organization 非政府組織
- NPP : Net Primary Production 純一次生産
- NRC : National Research Council 全米研究評議会
- RCP : Representative Concentration Pathway 代表的濃度経路
- SPICE : Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering
- SRM : Solar Radiation Management 太陽放射管理
- SRMGI : Solar Radiation Management Governance Initiative 太陽放射管理ガバナンス・イニシアチブ
- THORPEX : The Observing System Research and Predictability Experiment 観測システム研究・予測可能性実験計画
- TWAS : The Academy of Sciences for the Developing World 第三世界科学アカデミー
- UNEP : United Nations Environment Programme 国際連合環境計画
- WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画
- WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関
- Alley, R. B., J. Marotzke, W. D. Nordhaus, J. T. Overpeck, D. M. Peteet, R. A. Pielke Jr., R. T. Pierrehumbert, P. B. Rhines, T. F. Stocker, L. D. Talley and J. M. Wallace, 2003 : Abrupt climate change. *Science*, **299**, 2005-2010.
- American Geophysical Union (AGU), 2009 : AGU Position Statement : Geoengineering the climate system. http://www.agu.org/sci_pol/positions/geoengineering.shtml (2011.2.6閲覧).
- American Meteorological Society (AMS), 2009 : Geoengineering the climate system : A policy statement of the American Meteorological Society. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1369-1370, http://www.ametsoc.org/POLICY/2009geoengineeringclimate_ams_statement.html (2009.8.3閲覧).
- American Meteorological Society (AMS), 2010 : Planned weather modification through cloud seeding : An information statement of the American Meteorological Society. http://www.ametsoc.org/policy/2010plannedweathermod_cloudseeding_ams_statement.html (2011.2.6閲覧).
- Archer, D. and V. Brovkin, 2008 : The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO₂. *Clim. Change*, **90**, 283-297.
- Asilomar Scientific Organizing Committee (ASOC), 2010 : The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques. Climate Institute, Washington D.C. <http://www.climate.org/PDF/AsilomarConferenceReport.pdf> (2011.2.6閲覧).
- Bala, G., P. B. Duffy and K. E. Taylor, 2008 : Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **105**, 7664-7669.
- Blackstock, J. J., D. S. Battisti, K. Caldeira, D. M. Eardley, J. I. Katz, D. W. Keith, A. A. N. Patrinos, D. P. Schrag, R. H. Socolow and S. E. Koonin, 2009 : Climate engineering responses to climate emergencies. *Novim*. <http://arxiv.org/pdf/0907.5140> (2009.11.2閲覧).
- Blain, S. *et al.*, 2007 : Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature*, **446**, 1070-1074.
- Boyd, P. W., 2008 : Implications of large-scale iron fertilization of the oceans : Introduction and synthesis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **364**, 213-218.
- Boyd, P. W. *et al.*, 2004 : The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom. *Nature*, **428**, 549-553.
- Boyd, P. W., *et al.*, 2007 : Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005 : Synthesis and future direc-

参考文献

- tions. *Science*, **315**, 612-617.
- Broecker, W. S. and R. Kunzig, 2008 : *Fixing Climate : What Past Climate Changes Reveal About the Current Threat—and How to Counter It*. Hill and Wang, 272pp. [ウォレス・S・ブロッカー, ロバート・クンジグ, 2009 : CO₂と温暖化の正体. 内田昌男監訳, 河出書房新社, 350pp.]
- Budyko, M. I., 1974 : *Izmeniya Klimata*. Leningrad, Gidrometeoizdat. [日本語版 : 内嶋善兵衛, 岩切 敏訳, 1976 : 気候の変化. 日本イリゲーションクラブ. 英語版 : 1977 : *Climatic Changes*. American Geophysical Union.]
- Buesseler, K. O. *et al.*, 2008 : Ocean iron fertilization—Moving forward in a sea of uncertainty. *Science*, **319**, 162.
- Bunzl, M., 2009 : Researching geoengineering : should not or could not? *Environ. Res. Lett.*, **4**, 045104, doi : 10.1088/1748-9326/4/4/045104.
- Cao, L. and K. Caldeira, 2010 : Can ocean iron fertilization mitigate ocean acidification? *Clim. Change*, **99**, 303-311.
- Chisholm, S. W., 1992 : What limits phytoplankton growth? *Oceanus*, **35** (3), 36-46.
- Coale, K. H. *et al.*, 2004 : Southern Ocean Iron Enrichment Experiment : Carbon cycling in high- and low-Si waters. *Science*, **304**, 408-414.
- Crutzen, P. J., 2006 : Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections : A contribution to resolve a policy dilemma? *Clim. Change*, **77**, 211-219.
- de Baar, H. J. W. *et al.*, 2005 : Synthesis of iron fertilization experiments : From the iron age in the age of enlightenment. *J. Geophys. Res.*, **110**, C09S16, doi : 10.1029/2004JC002601.
- Denman, K. L., 2008 : Climate change, ocean processes and ocean iron fertilization. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **364**, 219-225.
- Denman, K. L. *et al.* 2007 : Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely and J. A. Kleypas, 2009 : Ocean acidification : The other CO₂ problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **1**, 169-192.
- ETC Group, 2010 : *Geopiracy : The case against geoengineering*. <http://www.etcgroup.org/en/node/5217> (2010.10.20閲覧).
- Fleming, J. R., 2004 : *Fixing the weather and climate : Military and civilian schemes for cloud seeding and climate engineering*. In : *The Technological Fix : How People Use Technology to Create and Solve Problems*, ed. by L. Rosner, Routledge, New York, 175-200.
- Fleming, J. R., 2007 : The climate engineers. *The Wilson Quarterly*, Spring 2007, http://www.wilsoncenter.org/index.cfm?fuseaction=wq.essay&essay_id=231274. (2009.12.11閲覧)
- Fleming, J. R., 2010 : *Fixing the Sky : The Checkered History of Weather and Climate Control*. Columbia University Press, 344pp.
- Forbes, 2010 : The Forbes 400 : The richest people in America. <http://www.forbes.com/wealth/forbes-400> (2011.1.18閲覧).
- Goodell, J., 2010 : *How to Cool the Planet : Geoengineering and the Audacious Quest to Fix Earth's Climate*. Houghton Mifflin Harcourt, 272pp.
- Govindasamy, B. and K. Caldeira, 2000 : Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO₂-induced climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2141-2144.
- Heckendorn, P., D. Weisenstein, S. Fueglistaler, B. P. Luo, E. Rozanov, M. Schraner, L. W. Thomason and T. Peter, 2009 : The impact of geoengineering aerosols on stratospheric temperature and ozone. *Environ. Res. Lett.*, **4**, 045108, doi : 10.1088/1748-9326/4/4/045108.
- Hegerl, G. C. and S. Solomon, 2009 : Risks of climate engineering. *Science*, **325**, 955-956.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007a : *Summary for Policymakers*. In : *Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007b : *Summary for Policymakers*. In : *Climate Change 2007 : Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. by Metz, B., O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave and L. A. Meyer [経済産業省訳, http://www.meti.go.jp/policy/global_environment/pdf/WG3_SPM.pdf (2010.1.7閲覧)], Cambridge University Press, Cam

- bridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2010. Proposal for an IPCC Expert Meeting on Geoengineering. IPCC-XXXII/Doc. 5 (3.IX.2010). http://www.ipcc-wg2.gov/meetings/EMs/doc05_p32_proposal_EM_on_geoengineering.pdf (2011.2.7閲覧).
- Irvine, P. J., D. J. Lunt, E. J. Stone and A. Ridgwell, 2009 : The fate of the Greenland Ice Sheet in a geoengineered, high CO₂ world. *Environ. Res. Lett.*, **4**, 045109, doi : 10.1088/1748-9326/4/4/045109.
- Izrael, Y. A., V. M. Zakharov, N. N. Petrov, A. G. Ryaboshapko, V. N. Ivanov, A. V. Savchenko, Y. V. Andreev, Y. A. Puzov, B. G. Danelyan and V. P. Kulyapin, 2009 : Field experiment on studying solar radiation passing through aerosol layers. *Russ. Meteor. Hydrol.*, **34**, 265-273.
- Jones, A., J. Haywood and O. Boucher, 2009 : Climate impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds. *J. Geophys. Res.*, **114**, D10106, doi : 10.1029/2008JD011450.
- 環境省中央環境審議会, 2010 : 第三次環境基本計画の進捗状況・今後の政策に向けた提言について. http://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/check/04/attach/suggestion.pdf (2011.3.15閲覧).
- Keith, D. W., 2000 : Geoengineering the climate : History and prospect. *Annu. Rev. Energy Environ.*, **25**, 245-284.
- Keith, D. W., 2009 : Why capture CO₂ from the atmosphere? *Science*, **325**, 1654-1655.
- Keith, D. W., 2010 : Photophoretic levitation of engineered aerosols for geoengineering. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **107**, 16428-16431.
- Keith, D. W., M. Ha-Duong and J. K. Stolaroff, 2006 : Climate strategy with CO₂ capture from the air. *Clim. Change*, **74**, 17-45.
- Keith, D. W., E. Parson and M. G. Morgan, 2010 : Research on global sun block needed now. *Nature*, **463**, 426-427.
- Kellogg, W. W. and S. H. Schneider, 1974 : Climate stabilization : For better or for worse? *Science*, **186**, 1163-1172.
- Kintisch, E., 2010 : Hack the Planet : Science's Best Hope — or Worst Nightmare — for Averting Climate Catastrophe. Wiley, 288pp.
- Knutti, R. *et al.*, 2008 : A review of uncertainties in global temperature projections over the twenty-first century. *J. Climate*, **21**, 2651-2663.
- Kravitz, B., A. Robock, L. Oman, G. Stenchikov and A. B. Marquardt, 2009 : Sulfuric acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols. *J. Geophys. Res.*, **114**, D14109, doi : 10.1029/2009JD011918.
- Kravitz, B., A. Robock, O. Boucher, H. Schmidt, K. E. Taylor, G. Stenchikov and M. Schulz, 2011 : The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Atmos. Sci. Lett.*, **12**, 162-167.
- Lackner, K. S., 2009 : Capture of carbon dioxide from ambient air. *Eur. Phys. J. Spe. Top.*, **176**, 93-106.
- Lane, L., 2010 : Plan B : Climate engineering to cope with global warming. *Milken Inst. Rev.*, Third Quarter 2010, 45-53.
- Latham, J., 1990 : Control of global warming? *Nature*, **347**, 339-340.
- Latham, J., 2002 : Amelioration of global warming by controlled enhancement of the albedo and longevity of low-level maritime clouds. *Atmos. Sci. Lett.*, **3**, 52-58.
- Latham, J., P. Rasch, C.-C. Chen, L. Kettles, A. Gadian, A. Gettelman, H. Morrison, K. Bower and T. Choulaton, 2008 : Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **366**, 3969-3987.
- Lauder, B. and J. M. T. Thompson (eds.), 2009 : Geo-Engineering Climate Change : Environmental Necessity or Pandora's Box? Cambridge University Press, 332pp.
- Leiserowitz, A., N. Smith and J. R. Marlon, 2010 : Americans' Knowledge of Climate Change. Yale University. New Haven, CT : Yale Project on Climate Change Communication. <http://environment.yale.edu/climate/files/ClimateChangeKnowledge2010.pdf> (2011.2.7閲覧).
- Lenton, T. M. and N. E. Vaughan, 2009 : The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 5539-5561.
- Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf and H. J. Schellnhuber, 2008 : Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **105**, 1786-1793.
- Levitt, S. D. and S. J. Dubner, 2009 : SuperFreakonomics : Global Cooling, Patriotic Prostitutes, and Why Suicide Bombers Should Buy Life Insurance. William Morrow, 288pp.
- Lomborg, B., 2001 : The Skeptical Environmentalist : Measuring the Real State of the World. Cambridge University Press, 540pp. [日本語版 : ビョルン・ロンボルグ (著), 山形浩生 (訳), 2003 : 環境危機をあおってはいけない : 地球環境のホントの実態. 文藝春秋,

- 671pp.]
- Lomborg, B., 2010 : Geoengineering : A quick, clean fix ? TIME, November 14, 2010. <http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,2030804,00.html> (2011.2.7閲覧).
- Marchetti, C., 1977 : On geoengineering and the CO₂ problem. *Clim. Change*, 1, 59-68.
- Markels, M. Jr. and R. T. Barber, 2001 : Sequestration of CO₂ by ocean fertilization. Paper presented at the 1st Natl. Conf. on Carbon Sequestration, Natl. Energy Technol. Lab., Washington, DC, May 14-17, 2001.
- Martin, J. H., 1990 : Glacial-interglacial CO₂ change : The iron hypothesis. *Paleoceanography*, 5, 1-13.
- Martin, J. H. *et al.*, 1994 : Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 371, 123-129.
- Matthews, H. D. and K. Caldeira, 2007 : Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 9949-9954.
- McClellan, J., J. Sisco, B. Suarez and G. Keogh, 2010 : Geoengineering Cost Analysis : Final Report. Prepared under contract to the University of Calgary. AR10-182. Aurora Flight Sciences Corporation, Cambridge, Massachusetts, USA, 86pp. <http://people.ucalgary.ca/~keith/Misc/AuroraGeoReport.pdf> (2011.2.7閲覧).
- Meinshausen, M., N. Meinshausen, W. Hare, S. C. B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D. J. Frame and M. R. Allen, 2009 : Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature*, 458, 1158-1162.
- 文部科学省, 2004. 平成16年版科学技術白書. 国立印刷局, 435pp.
- Moss, R. H. *et al.*, 2010 : The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.
- 村上正隆, 1995 : 気象調節. 空気調和・衛生工学, 69, 733-737.
- 村上正隆, 2009 : 気象調節—人工降雨・降雪による渇水対策—. 化学工学, 73, 574-577.
- National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research (NCPHSBBR), 1979 : The Belmont Report : Ethical principles and guidelines for the protection of human subjects of research. <http://ohsr.od.nih.gov/guidelines/belmont.html> (2010.4.9閲覧).
- National Environment Research Council (NERC), 2010 : Experiment earth? Report on a public dialogue on geoengineering. <http://www.nerc.ac.uk/about/consult/geoengineering-dialogue-final-report.pdf> (2011.2.7閲覧).
- National Research Council (NRC), 1992 : Policy Implications of Greenhouse Warming : Mitigation, Adaptation, and the Science Base. The National Academies Press, 918pp.
- National Research Council (NRC), 2010 : Advancing the Science of Climate Change. The National Academies Press, 528pp.
- New, M., D. Liverman, H. Schroder and K. Anderson, 2011 : Four degrees and beyond : the potential for a global temperature increase of four degrees and its implications. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 369, 6-19.
- ノードハウス, W. D., 2002 : 地球温暖化の経済学 [室田泰弘, 山下ゆかり, 高瀬香絵訳], 東洋経済新報社, 222 pp.
- Parry, M., J. Lowe and C. Hanson, 2009 : Overshoot, adapt, and recover. *Nature*, 458, 1102-1103.
- Pierce, J. R., D. K. Weisenstein, P. Heckendorn, T. Peter and D. W. Keith, 2010 : Efficient formation of stratospheric aerosol for climate engineering by emission of condensable vapor from aircraft. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L18805, doi : 10.1029/2010GL043975.
- Pollard, R. T. *et al.*, 2009 : Southern ocean deep-water carbon export enhanced by natural iron fertilization. *Nature*, 457, 577-580.
- Randall, D. A. *et al.*, 2007 : Climate models and their evaluation. In : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ranjan, M., 2010 : Feasibility of air capture. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology. <http://hdl.handle.net/1721.1/59782> (2011.2.7閲覧).
- Rasch, P. J., S. Tilmes, R. P. Turco, A. Robock, L. Oman, C.-C. Chen, G. L. Stenchikov and R. R. Garcia, 2008 : An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 366, 4007-4037.
- Revkin, A. C., 2010 : The passing of a climate warrior. The New York Times, 2010/7/19. <http://dotearth.blogs.nytimes.com/2010/07/19/the-passing-of-a-climate-warrior/> (2011.2.7閲覧).
- Robock, A., 2008 : 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. *Bull. At. Sci.*, 64, 14-18.

- Robock, A., L. Oman and G. L. Stenchikov, 2008 : Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections. *J. Geophys. Res.*, **113**, D16101, doi : 10.1029/2008JD010050.
- Robock, A., A. Marquardt, B. Kravitz and G. Stenchikov, 2009 : Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19703, doi : 10.1029/2009GL039209.
- Robock, A., M. Bunzl, B. Kravitz and G. L. Stenchikov, 2010 : A test for geoengineering? *Science*, **327**, 530-531.
- Royal Society, 2009 : Geoengineering the climate : Science, governance and uncertainty. Royal Society, London. <http://royalsociety.org/geoengineering-the-climate/> (2011.2.7閲覧).
- Royal Society, TWAS (the Academy of Sciences for the Developing World), Environmental Defense Fund, 2010 : The Solar Radiation Management Governance Initiative (SRMGI) : Advancing the international governance of geoengineering. <http://www.srmgi.org/files/2010/10/SRMGI-project-description.pdf> (2011.2.7閲覧).
- Schiermeier, Q., 2009a : Ocean study draws ire. *Nature*, **457**, 243.
- Schiermeier, Q., 2009b : Ocean fertilization : dead in the water? *Nature*, **457**, 520-521.
- Schneider, S. H., 1996 : Geoengineering : Could — or should — we do it? *Clim. Change* **33**, 291-302.
- Schneider, S. H., 2001 : Earth systems engineering and management. *Nature*, **409**, 417-421.
- Schneider, S. H., 2008 : Geoengineering : could we or should we make it work? *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **366**, 3834-3862.
- Shapiro, M. *et al.*, 2010 : An Earth-system Prediction Initiative for the twenty-first century. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1377-1388.
- 城山英明 (編), 2007 : 科学技術ガバナンス. 東信堂, 210 pp.
- Solomon, S., G.-K. Plattner, R. Knutti and P. Friedlingstein, 2009 : Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **106**, 1704-1709.
- Stern, D. I., 2005 : Global sulfur emissions from 1850 to 2000. *Chemosphere*, **58**, 163-175.
- Strong, A., S. Chisholm, C. Miller and J. Cullen, 2009 : Ocean fertilization : time to move on. *Nature*, **461**, 347-348.
- 杉山昌広, 2010 : 気候工学 (ジオエンジニアリング) に関するアシロマ国際会議報告. 電力中央研究所 SERC Discussion Paper 10001.
- 杉山昌広, 河宮未知生, 2011 : GeoMIP 成層圏エアロゾル・ジオエンジニアリング・ワークショップ. 天気, 投稿中.
- 杉山昌広, 杉山大志, 2010a : 気候工学 (ジオエンジニアリング) のレビュー. *Eco-Engineering*, **22**, 155-165.
- 杉山昌広, 杉山大志, 2010b : 生物多様性条約 COP10 における気候工学 (ジオエンジニアリング) に関する交渉のポイント. 電力中央研究所 SERC Discussion Paper 10008.
- 田近英一, 1996 : 第2章 地球システムにおける物質循環. 岩波講座地球惑星科学第2巻「地球システム科学」(鳥海光弘ほか編), 岩波書店, 220pp, 21-53.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer and G. A. Meehl, 2009 : A summary of the CMIP5 experiment design. http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf (2011.2.7閲覧).
- Teller, E., L. Wood and R. Hyde, 1997 : Global warming and ice ages : I. Prospects for physics based modulation of global change. Lawrence Livermore National Laboratory, California, USA. Preprint UCRL-JC-128715, 18pp.
- Tilmes, S., R. Müller and R. Salawitch, 2008 : The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes. *Science*, **320**, 1201-1204.
- Trenberth, K. E. and A. Dai, 2007 : Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L15702, doi : 10.1029/2007GL030524.
- Tsuda, A. *et al.*, 2003 : A mesoscale iron enrichment in the western subarctic Pacific induces a large centric diatom bloom. *Science*, **300**, 958-961.
- Tsuda, A. *et al.*, 2007 : Evidence for the grazing hypothesis : Grazing reduces phytoplankton responses of the HNLC ecosystem to iron enrichment in the western subarctic Pacific (SEEDS II). *J. Oceanogr.*, **63**, 983-994.
- United Kingdom (UK) House of Commons Science and Technology Committee, 2010 : The regulation of geoengineering. Fifth report of session 2009-10, HC221. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200910/cmselect/cmsctech/221/221.pdf> (2011.2.7閲覧).
- Vaughan, N. E. and T. M. Lenton, 2011 : A review of climate geoengineering proposals. *Clim. Change*, Online First, doi : 10.1007/s10584-011-0027-7.
- Victor, D. G., M. G. Morgan, J. Apt, J. Steinbruner and K. Ricke, 2009 : The geoengineering option : A last resort against global warming? *Foreign Aff.*, **88** (2),

- 64-76.
- Virgoe, J., 2009 : International governance of a possible geoengineering intervention to combat climate change. *Clim. Change* **95**, 103-119.
- Wallace, D. W. R., C. S. Law, P. W. Boyd, Y. Collos, P. Croot, K. Denman, P. J. Lam, U. Riebesell, S. Takeda and P. Williamson, 2010 : Ocean fertilization. A scientific summary for policy makers. IOC/UNESCO, Paris (IOC/BRO/2010/2). <http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001906/190674e.pdf> (2011.2.7閲覧).
- Watson, A., P. Liss, R. Duce, 1991 : Design of a small-scale in situ iron fertilization experiment. *Limnol. Oceanogr.*, **36**, 1960-1965.
- Weart, S., 2008 : Climate modification schemes. <http://www.physicists.net/history/climate/RainMake.htm> (2009.8.3閲覧).
- Weitzman, M. L., 2009 : On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change. *Rev. Econ. Stat.*, **91**, 1-19.
- Wigley, T. M. L., 2006 : A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization. *Science*, **314**, 452-454.
- Willoughby, H. E., D. P. Jorgensen, R. A. Black and S. L. Rosenthal, 1985 : Project STORMFURY : A scientific chronicle 1962-1983. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **66**, 505-514.
- Wingenter, O. W., S. M. Elliot and D. R. Blake, 2007 : New directions : Enhancing the natural sulfur cycle to slow global warming. *Atmos. Environ.*, **41**, 7373-7375.
- World Meteorological Organization (WMO)/United Nations Environment Programme (UNEP), 2010 : Scientific Assessment of Ozone Depletion : 2010, Executive Summary. http://www.unep.org/PDF/PressReleases/898_ExecutiveSummary_EMB.pdf (2011.3.15閲覧).
- 山本良一, 2009 : 残された時間 : 温暖化地獄は回避できるか? ダイアモンド社, 310pp.
- Zeebe, R. E. and D. Archer, 2005 : Feasibility of ocean fertilization and its impact on future atmospheric CO₂ levels. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L09703, doi : 10.1029/2005GL022449.

Climate Geoengineering

Masahiro SUGIYAMA^{*1}, Jun NISHIOKA^{*2} and Masatomo FUJIWARA^{*3}

^{*1} (*Corresponding author*) *Socio-Economic Research Center, Central Research Institute of Electric Power Industry, Ohtemachi Bldg., 1-6-1 Ohtemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8126, Japan.*

^{*2} *Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.*

^{*3} *Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University.*

(Received 9 February 2011 ; Accepted 17 May 2011)

Abstract

Climate geoengineering is defined as “deliberate large-scale manipulation of the planetary environment to counteract anthropogenic climate change.” The slow progress of greenhouse gas emissions reduction and a heightened recognition of the risk of dangerous global warming have led to increasing attention to this novel approach, although it cannot substitute for mitigation nor adaptation. The IPCC will review geoengineering as part of its fifth assessment report.

There are two main categories of climate engineering options : carbon dioxide removal (CDR), which reduces the concentration of the atmospheric carbon dioxide, a primary cause of global warming ; and solar radiation management (SRM) that reduces the incoming solar radiation, thereby cooling the earth system. An example of the CDR approach is to add iron to the ocean to increase photosynthesis.

Amongst many proposed approaches, the most promising is arguably the stratospheric aerosol injection,

an SRM option. Its physics is similar to that of global cooling following volcanic eruptions. Research has shown that it would be accompanied with undesired effects such as changes in precipitation patterns. The GeoMIP, an international effort to climate model intercomparison on this approach, has recently been launched.

Though intended as a cure of global warming, climate geoengineering confronts the human society with a number of problems. It would require an international framework since, if conducted unilaterally, it would affect the global climate as a whole. In the short run, guidelines for experiments in the natural environment would be crucial, on which international discussions just commenced.
