SERC Discussion Paper: *SERC09018*

ジオエンジニアリング概説

杉山昌広
社会経済研究所

Abstract:

ジオエンジニアリングは地球温暖化対策として，気候システムに大規模・意図的な工学的介入を行うものである．地球温暖化政策がなかなか進まない中，急激に起きる気候のサプライズの可能性を踏まえて，昨今欧米の研究者の間で注目を浴びている．

数あるジオエンジニアリングで最も注目されているのは成層圏への反射性エアロゾルの散布である．ピナツボ火山の噴火のように，上空大気のエアロゾルが太陽光の反射を増すことで入射エネルギーを減らし，地球の温度を下げることができる．実際に温度が下がることは気候モデルのシミュレーションでも明らかにされている．

通常の緩和策と比べたとき，成層圏エアロゾル注入のようなジオエンジニアリングは次のような特徴をもつ：(1)コストが非常に安い，(2)緩和策より国際協調の枠組みがシンプルになる， (3)温度上昇を短期間で抑えることができ，しかも上昇を止めるだけでなく下げることもできる，(4)二酸化炭素を減らさないので海洋酸性化問題は解決しない，(5)降水が減る地域が出てくる恐れがある，(6)二酸化炭素の滞留時間である数百年から数千間継続する必要がある．急激な気候変動が起きた場合ジオエンジニアリングが実施される可能性はありうるが，海洋酸性化や長期継続性の問題などを考慮すれば，緩和策と組み合わせるのが望ましい．

ジオエンジニアリングの研究は未だ少なく，一層の研究が必要である．工学的な研究開発は言うまでもないが，気候科学側では統一したシナリオを用いた大規模モデル相互比較プロジェクトが，社会科学面では国際研究開発体制の吟味が重要だろう．

免責事項

本ディスカッション・ペーパー中，意見にかかる部分は筆者のものであり，（財）電力中央研究所又はその他機関の見解を示すものではない．

Disclaimer

The views expressed in this paper are solely those of the author(s), and do not necessarily reflect the views of CRIEPI or other organizations.

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

概要

ジオエンジニアリングは地球温暖化対策として，気候システムに大規模・意図的な工学的介入を行うものである．地球温暖化政策がなかなか進まない中，急激に起きる気候のサプライズの可能性を踏まえて，昨今欧米の研究者の間で注目を浴びている．

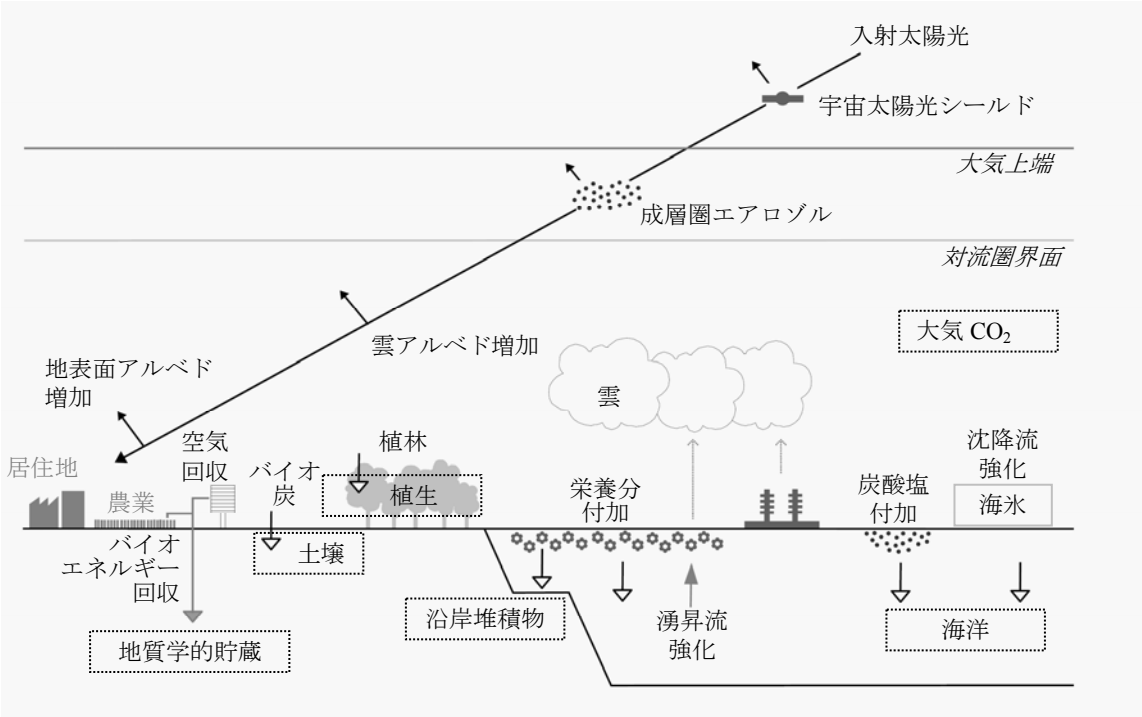
地球のエネルギー収支に関するジオエンジニアリングの手法は，大きく二つに分けることができる．一つは地球の反射率（アルベド）を増加させ，太陽入射光を減らすことで地球の温度を低下させるもの，もう一つは二酸化炭素を回収して地球温暖化の原因を除去する方法である．例としては，前者では海水を巻き上げることで雲凝結核となる海水塩分を増やし，雲の反射率を上げる手法が，後者では海洋に鉄を散布し光合成を促進させる手法が挙げられる（図）．

数あるジオエンジニアリングで最も注目されているのは成層圏への反射性エアロゾルの散布である．ピナツボ火山の噴火のように，上空大気のエアロゾルが太陽光の反射を増すことで入射エネルギーを減らし，地球の温度を下げることができる．実際に温度が下がることは気候モデルのシミュレーションでも明らかにされている．

通常の緩和策と比べたとき，ジオエンジニアリングは次のような特徴をもつ：(1)コストが非常に安い，(2)緩和策より国際協調の枠組みがシンプルになる．これに加え，入射光減少を進めるジオエンジニアリングには次のような特徴もある：(3)温度上昇を短期間で抑えることができ，しかも上昇を止めるだけでなく下げることもできる，(4)二酸化炭素を減らさないので海洋酸性化問題は解決しない，(5)降水が減る地域が出てくる恐れがある，(6)二酸化炭素の滞留時間である数百年から数千間継続する必要がある．急激な気候変動が起きた場合ジオエンジニアリングが実施される可能性はありうるが，海洋酸性化や長期継続性の問題などを考慮すれば，緩和策と組み合わせるのが望ましい．

ジオエンジニアリングの研究は未だ少なく，一層の研究が必要である．工学的な研究開発は言うまでもないが，気候科学側では統一したシナリオを用いた大規模モデル相互比較プロジェクトが，社会科学面では国際研究開発体制の吟味が重要だろう．

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.



ジオエンジニアリングの様々な手法．黒の矢印は反射された太陽光，白抜きの矢印は自然の炭素のフローを人工的に強化したものを示す．灰色の下向き矢印は工学的に回収された炭素を示し，海洋中の灰色矢印は改変された水の流れを，また雲の周りの上向き矢印は雲凝結核のソースを意味する．点線の長方形は炭素のストックである．Lenton and Vaughan (2009)の図1を邦訳．縮尺については原寸に比例していない(not to scale).

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

1．はじめに

ジオエンジニアリング(geoengineering)という言葉を聞いたことがあるだろうか？直訳すれば地球工学になるが，「気候工学」(climate engineering)と理解するのが適切かもしれない．一例をあげよう．大気上空にエアロゾルを大量に注入し，太陽光を反射して地球温暖化で温度が上昇した分，地球を冷やすというものだ．壮大なスケールの工学プロジェクトであるが，最近欧米の科学者を中心に関心を呼んでいる．米国オバマ大統領の科学顧問のジョン・ホルドレン氏はインタビューで地球温暖化対策からジオエンジニアリングを除外すべきではないと語った(Guardian 2009)．アメリカ気象学会もジオエンジニアリングについてのポジションペーパーを発表し，慎重な態度をとりつつも研究は進めるべきだと述べている(American Meteorological Society 2009)．英国王立アカデミーは報告書を作成中であり[1]，全米科学アカデミーも2009年6月にジオエンジニアリングについての研究ワークショップを開催した[2]．また気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）の2012年程度に出る第5次評価報告書のスコーピング・ミーティングの各国提出の資料でも，ジオエンジニアリングというテーマが各所に出てきている[3]．

ジオエンジニアリングの研究が増えてきた背景には，地球温暖化問題の脅威を眼のあたりにしている科学者の焦りがあるといってもいいだろう．オゾン層破壊のメカニズムを解明してノーベル化学賞を受賞したクルッツェン氏は，2006年に *Climatic Change* にジオエンジニアリングについて書いた(Crutzen 2006)．IPCC 第3次評価報告書の予測を超える影響が出る可能性と，遅々として進まない地球温暖化対策を鑑みるに，成層圏にエアロゾルを注入するジオエンジニアリングも真剣に議論すべきだと主張した．

ジオエンジニアリングは初めて聞いた人には途方もない考えに聞こえ，ニューズウィーク誌は「トンデモ科学」と呼んだほどである (ニューズウィーク 2009)．しかしながらよく引用される成層圏へのエアロゾル注入は，自然におきる（大規模な）火山爆発によって地球の温度が低下するというよく知られた物理メカニズムを用いており，副作用はともかく効果は一定の信頼性がある．ジオエンジニアリングは，その工学的ではない側面の方が際立っているだろう．ジオエンジニアリングは地球温暖化対策としては非常にコストが安価である．またジオエンジニアリング発動には国際協調が不要であり，単独国家が実施することすら可能である．コペンハーゲンで開かれる COP15に向けて国際交渉は現在難航しているが，ジオエンジニアリングは気候変動枠組み条約や京都議定書などの旧来の国際条約とは全く異なる枠組みを必要とする．

本稿では我が国ではまだ活発に議論されていないジオエンジニアリングを紹介することを目的とする．本稿はディスカッション・ペーパーという性格もあり暫定的であり，より包括的なレビューは Keith (2000)や *Philosophical Transactions of the Royal Society* 特集号

[1] http://royalsociety.org/page.asp?id=2556
[2] http://www8.nationalacademies.org/cp/meetingview.aspx?MeetingID=3438&MeetingNo=8
[3] http://www.ipcc.ch/scoping_meeting_ar5/documents/inf1.pdf

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

（2008年11月）などを参照していただきたい.

2．ジオエンジニアリングとは

2.1 定義

Keith (2000)はジオエンジニアリングを「地球温暖化の対抗措置として取られる意図的で大規模な環境改変」[4]と定義する．全米科学アカデミーも同様な定義を与えている(NAS 1992)[5]．定義が抽象的だが，何がジオエンジニアリングでないかを考えると分かりやすくなる．ソビエト時代に行われた人工降雨などの気象改変プロジェクトは既にある問題への対処ではないため，ジオエンジニアリングではない．また化石燃料燃焼による地球温暖化は気候システムを大幅に変えつつあるが，意図的に行っていないためこの定義から排除される．

歴史を遡れば，ジオエンジニアリングという言葉は Marchetti (1977)が海洋炭素注入を説明するときに用いたのが最初とされるが，現在ではこれは炭素回収・貯留(carbon capture and storage, CCS)と呼ばれる．Keith (2000)は歴史的な観点から炭素回収・貯留とジオエンジニアリングの境界は緩いと指摘する．

語源としては，ジオエンジニアリングはギリシャ語で地球を意味する接頭辞 geo-に工学である engineering を足したものとなっている．しかしながら地球を大規模に改変する工学というと大規模土木工学なども指すことになるので，「気候工学」(climate engineering)と呼ぶ方が適切だろう．実際 climate engineering(例えば Caldeira and Wood 2008)と呼んだり，climate geoengineering (Lenton and Vaughan 2009)という呼び方をする研究者もいる．

2.2 歴史

まずジオエンジニアリングの歴史を概観する．Keith (2000)と Fleming (2004), Weart (2008)を基本に適宜補足していく（表1）．

ジオエンジニアリングは，そのルーツとしては米ソの気象改変研究や大規模土木工学がある(Keith 2000)．科学が万能と考えられた時代背景もあり，1960年代には気象改変研究は最盛期を迎え，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ており，軍によって多額の予算が投じられたのである(Fleming 2004)．1965年には米国政府の報告書で初めて地球温暖化を評価したものが発表されたが，こうした状況を受けてか地球温暖化対策で唯一言及されていたのはジオエンジニアリングである．

1970年代には社会運動の高まりもあり，気象改変の研究は徐々に静まって行く．特に象徴的なのは米軍の気象改変プロジェクト POPEYE である (Fleming 2004)．1962年から1972年にかけて南ベトナムなどで人口降雨を試みたこのプロジェクトは，極秘扱いされていた．「気象戦争のウォーターゲート」と呼ばれたこのプロジェクトが明るみになり，気象改変

[4] 英語での定義は “[countervailing] intentional large-scale manipulation of the environment” (p. 247) ．

[5] NAS (1992, p. 433)はジオエンジニアリングを“Large-scale engineering of our environment in order to combat or counteract the effects of changes in atmospheric chemistry”と定義している

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

が戦場で用いられたことが公開されると，急速に気象改変プロジェクトは下火になっていった．

なお研究の舞台からは離れていった気象改変であるが，アメリカの南西部では通常のビジネスとして定着している(Fleming 2004)．また最近では中国当局が2008年のオリンピックの開会式に合わせて雨を抑制すると発表したことは記憶に新しい．

気象・気候改変の研究予算の大幅の減少にも関わらず，地球温暖化の文脈においてジオエンジニアリングは忘れ去られることはなかった．例えば地球温暖化に関する全米科学アカデミーの報告書（1977年，1983年，1992年）では何回も扱われている．特に1992年のものはジオエンジニアリングについて一章を充てて，個々の選択肢を丁寧に解説するとともにコスト試算まで行っている．

ジオエンジニアリグが忘れられなかった理由の一つは，急激な気候変動(abrupt climate change)への対処の必要性である．急激な気候変動とは徐々に起こる温度上昇などではなく，急激な気候変動を意味し(Alley et al. 2003)，最近では急激な気候変動だけではなくゆっくりだが不可逆的な変化などもも取り込めるよう，ティッピング・エレメントという概念も提唱された(Lenton et al. 2008)．例としては南極の棚氷の崩壊による5m にも上る海面上昇や，インドの雨季の雨の突然の変化，アマゾンの熱帯雨林の減少などが挙げられる．

表1. ジオエンジニアリングに関連する研究の流れ. Keith (2000)をもとにまとめた.

1950-1960	米ソの気象改変研究（人工降雨など） 1960年代後半には米の研究予算1000万ドル規模
1960	Rusin & Flit (ソ連）, *Man versus Climate* 北極海から川を引いて小麦畑を灌漑する提案など
1965	ジョンソン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，対策はジオエンジニアリングのみ言及
1970初頭	Budyko（ソ連），成層圏エアロゾルで太陽光反射を提案
1974	Kellog & Schneider（米国）, *Science* にジオエンジニアリングに否定的な論文を書く ベトナムでの米軍による気象改変プロジェクト POPEYE が明るみに出る
1977	Marchetti（オーストリア）が海洋炭素貯留の説明の際に，ジオエンジニアリングという言葉を使う
1978	U.N. Convention on the Prohibition of Military or any other Hostile Use of Environmental Modification Techniques
1992	全米科学アカデミーの温暖化レポート， 一章をジオエンジニアリングに充て包括的に扱う
2006	Crutzen, *Climatic Change* 誌にジオエンジニアリングについて論説を書き， これに呼応してかジオエンジニアリングの研究が盛んになる

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

全米科学アカデミーの報告書(NAS 1992)でジオエンジニアリングが包括的に扱われた背景にも，急激な気候変動の考え方があった．報告書委員会の委員の一人であった Schneider (2001)がそのいきさつを語っている．彼によれば，ロバート・フロッシュが「突然の気候変動が起きそうになったら実際にジオエンジリアリングしか選択肢がなくなる」といって，乗り気でない多数の委員を説得したとのことである．最近では，Victor et al. (2009)が *Foreign Affairs* 誌に書いた論文も，冒頭で「地球の気候が危険なティッピング・ポイントに辿りついてしまう可能性が高まってきている」という．

急激な気候変動の研究は着実に進んでいるが，いまだ多くの不確実性が残る．後段で詳述するが，実際に起きてしまったらジオエンジニアリングが発動される可能性も否定はできないかもしれない．

2.3 分類

地球の気候を改変するには地球のエネルギー収支を変化させる必要がある．地球の平均気温は太陽からの入射エネルギー（可視光，短波放射）と地球から出ていく放射エネルギー（赤外線，長波放射）とが釣り合うように決定されている．地球温暖化の対抗措置として地球の温度を下げるには(1)太陽からの入射エネルギーを減らすために地球の反射率（アルベド）を増加させる，または(2)地球温暖化の原因である温室効果ガスの代表格である二酸化炭素を(CO_2)何らかの方法で減少させる必要がある．また局地的な改変として気候シス

表2. ジオエンジニアリングの分類. Keith (2000)の図3を改変して表形式にまとめた.

仕組み	例
エネルギー収支	
太陽光からの入射エネルギー（短波）の反射率（アルベド）を変える	大気エアロゾルを増やす（成層圏に硫黄酸化物などを散布する） 宇宙（ラグランジュ点）に太陽光シールドを置く 地表面のアルベドを改変する（砂漠に反射性シートを敷く）
CO_2（赤外線（長波）の放射率）を変える	陸域生態系で炭素を吸収（植林など） 海洋（生態系）で炭素を吸収（鉄を海洋に散布して光合成を促進して吸着） 地球化学的吸収（マグネシウム，カルシウム−ケイ酸塩鉱物の化学反応） 空気から直接 CO_2を回収
エネルギー輸送（地球全体の温度制御は2次の効果になる）	
海洋のエネルギー輸送を変える	巨大ダムで海洋の流れを変える
大気・陸面を変化させる	蒸発量の制御

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

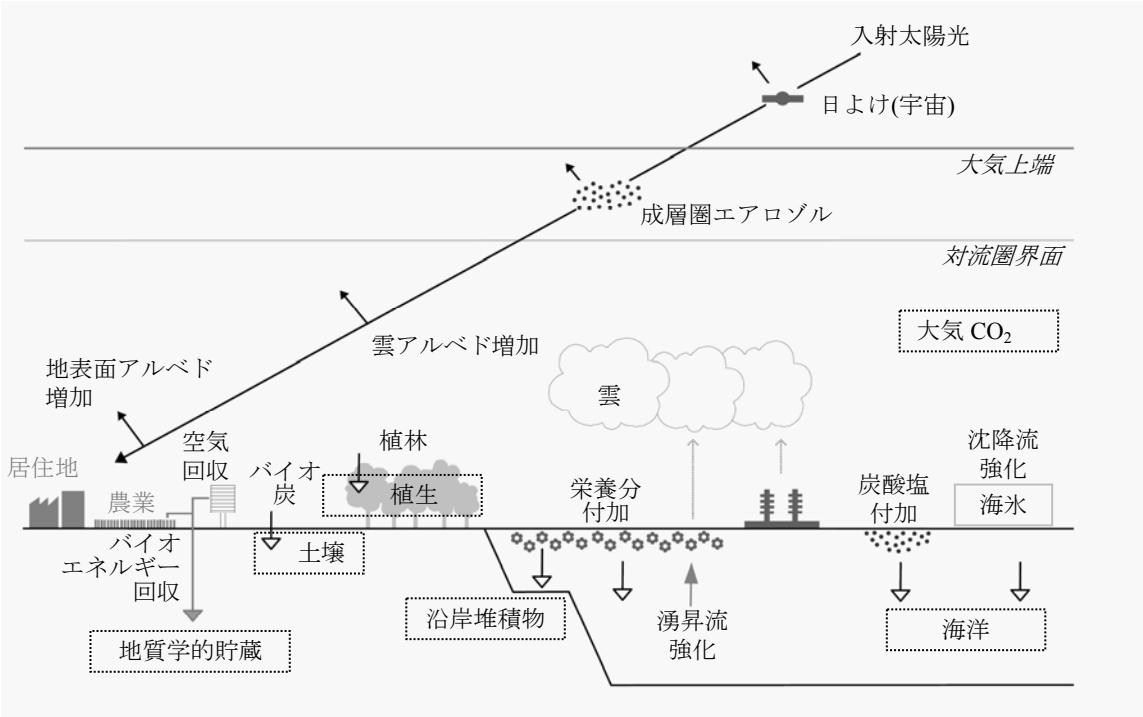


図1. ジオエンジニアリングの様々な選択肢. 黒の左上向き矢印は反射された太陽光, 白抜きの矢印は自然の炭素のフローを人工的に強化したものを示す. 灰色の下向き矢印は工学的に回収された炭素を示し, 海洋中の灰色矢印は改変された水の流れを, また雲の周りの上向き矢印は雲凝結核のソースを意味する. 点線の長方形は炭素のストックである. Lenton and Vaughan (2009)の図1を邦訳. 縮尺については原寸に比例していない(not to scale).

テムエネルギー輸送を変化させることも考えられる．以上の基本分類をもとに表2にジオエンジニアリングの分類を示した．またエネルギー収支に関するジオエンジニアリング手法を図1にまとめた．

技術的困難性やコストは手法間で大きく異なる．コストおよびポテンシャルについては後段で説明する．

2.4 太陽光の反射率（アルベド）の改変

太陽光の入射を減らすことで地球の温度を下げる方法は，反射率を改変する場所によって以下のように区別できる．

(1) 地表面のアルベドを改変する．例えば世界の砂漠を反射性物質で多い，アルベドを高める(Gaskill 2004)．他にも居住地の家屋の屋根を白くしたり農作物に手を加えて農地の反射率を高めることも提案されている．

(2) 大気下部の雲の反射率を高める．例えば船を利用して海水を巻き上げ，雲凝結核として機能する海塩粒子を増やす(Latham 1990, 2002, Latham et al. 2008)．雲の粒子数が増えると低層雲の反射率が高まったり（エアロゾル第1種間接効果），雲の寿命

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

が延びたりする（第2種間接効果）．Salter et al. (2008)によると CO_2倍増の放射強制力を打ち消すために世界全体で1500隻のローター船という種類の船舶が必要になる．

(3) 成層圏にエアロゾルを注入する．注入するものとしては硫酸エアロゾル(Budyko 1977, NAS 1992, Crutzen 2006, Rasch et al. 2008)，ダスト(NAS 1992)，アルミ酸化物(Teller et al. 1999)などがある[6]．自然の火山噴火で成層圏（高度12km 程度以上）に舞い上がった硫酸エアロゾルは太陽光を反射して地球の温度を低下させることが知られていて，成層圏エアロゾル注入は自然現象を真似ることになる．

(4) 宇宙に太陽を遮る装置を設置する(Early 1989, Angel 2006)．Angel (2006)は1m 程度の円盤型シールドを80万枚重ねて宇宙に打ち上げ，地球と太陽の中間のラグランジュ点（L1）に太陽光シールドを設置することを提案している．

以上のうち最も注目を浴びているのが成層圏へのエアロゾル注入であり，これについては4節で効果およびその限界について検討する．

2.5 二酸化炭素濃度を下げる

大気科学的に説明すれば，CO_2濃度を減らすと大気の放射率が減少し，地表面からの正味赤外放射が増え，温度が減少する[7]．したがって CO_2を減らすことは放射エネルギーの増加に対応し，エネルギー収支においてはアルベド増加の反対にあたる．

CO_2吸収・回収についても以下のように手法で分類することができる．

(1) 陸域生態系で炭素を吸収する．例としては大規模な植林があるが，すでに通常の緩和策として認識されているといえよう．炭素貯留と同様，ジオエンジニアリングには定義があいまいな部類が存在する一例である．生産したバイオマスを加工して炭(biochar)にして固定したり(Lehmann 2007)，バイオマス発電に炭素貯留設備を組み合わせる(Mathews 2008)こともこの範疇に分類できる[8]．

(2) 海洋（生態系）で炭素を吸収する．例えば，海洋生態系の光合成の制限要因である鉄を海洋に散布すれば光合成を促進して吸着することができる．鉄散布については海洋での実験が多数行われているが，この結果をまとめた Boyd et al. (2007)によれば，鉄散布による光合成促進は観測されているが，定量的にどれほどの炭素が固定されるかは不確実である．興味深いのはこの手法に私企業で取り組んでいる会社がある．Planktos のように環境保護団体のキャンペーンで資金が得られなく破産する企業もあれば(New York Times 2008)，Climos[9]のように活動中の会社もある．他にも栄養分が多く含まれる海水の湧昇流を促進したり(Lovelock and Rapley 2007)，炭酸塩の散布な

---

[6] Crutzen (2006)は成層圏へ注入する物質として硫酸エアロゾルに加えてススも提案した．この場合入射太陽光は成層圏で吸収されるため，地球のアルベドは減少するが地表面に到達する入射光が減るため地球温暖化を抑えることができる．

[7] 単純化のため一層大気モデルのアナノジーで説明している．

[8] バイオマス発電自体は緩和策と考えられるので，バイオマス発電と炭素貯留の組み合わせは緩和策でもあると同時に，ジオエンジニアリングであると考えられる．したがってそのポテンシャルを計算するときには留意が必要である(Lenton and Vaugh 2009).

[9] http://www.climos.com/

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

どが提案されている．また生態系に依存するのではなく，北大西洋の海洋深層水形成を促進して，冷たい海水に多く溶けている CO_2を深層に運び込む手法も提案されている（溶解ポンプの促進）(Zhou and Flynn 2005).

(3) 地球化学的手法で CO_2を吸収する．長期的に見れば地球の CO_2濃度は岩石のマグネシウム・カルシウムのケイ酸塩鉱物が風化し，河・海を流れ海底に沈着することで吸収されている．この過程を応用すれば CO_2を大気から除去することは可能であるが，他の手法と異なり吸収する炭素と（モル比で）同量のマグネシウムなどが必要になるため，高価になりがちである(Keith 2000).

(4) 空気から直接 CO_2を回収する(空気回収，air capture)．高濃度の CO_2を排気ガスから回収する方法は炭素回収・貯留でも使われるが，そうしたものとは違い，通常の空気からの CO_2回収が提案されている．物理的には可能であり，問題は費用である．コストを下げるためにヴァージン・グループが2500万ドルの懸賞金をだしている[10]．元米国副大統領のゴア氏や地球温暖化に警鐘をならしつづけている NASA の一研究所の所長であるハンセン氏が審査委員をつとめている．また海洋への鉄散布と同様，米国では Global Research Technologies や Global Thermostat (コロンビア大の教授による会社）などといった会社が技術開発を行っており，キース氏も会社の立ち上げを計画中である(Nature 2008).

2.6 エネルギー輸送

巨大ダムで海洋の流れを変えたり，蒸発量の制御をすることで局所的なエネルギー収支を変え，大気のエネルギー輸送に影響を与えることで地域的な気候を改変する．例えば1950年代ではソ連ではベーリング海峡にダムを作り，北極海から太平洋にポンプで水を流すことが検討された(Weart 2008)[11]．大西洋からの暖かい水を北極に流し，北極に氷が張らないようにして航海を可能にするという意図であった．一般的にエネルギー輸送に介入した場合，地球全体のエネルギー収支は2次の効果となり，温度制御という観点からはその効果は明確ではないが，ベーリング海峡のダムが実施に移されていたら北極海のアルベドを変えることで地球全体の温度にも影響を及ぼしていたかもしれない.

3．ポテンシャル

ジオエンジニアリングは多くの手法が提案されているが，一体どれほどの効果があるのだろうか？ジオエンジニアリングを選択していく際には費用・リスクや倫理的問題など，様々な側面を検討しなければならないが，そもそも地球温暖化を抑える効果がない手法は検討する必要がなくなるため，効果は重要な評価基準である.

Lenton and Vaughan (2009)は図1に示したジオエンジニアリングの手法を検討し，地球温暖化の抑制ポテンシャルを算出した．彼らの主要な結果を図2に示す．ここでポテンシャル

[10] http://www.virgin.com/subsites/virginearth/

[11] Kellog and Schneider (1974)にはこのような改変の提案がいくつかリストされている.

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

は CO_2倍増に対応する放射強制力の百分率で示している．単独で CO2倍増の効果を打ち消すことができる（100%）ものは，宇宙での太陽光シールド，成層圏エアロゾル注入，低層雲の反射率増加（機械的手法）に限られる．ただ低層雲の反射率増加は，低層雲のある場所に放射強制力が集中するため，局地的な変動も引き起こすことが予想される．CO_2吸収源促進や回収は，空気回収を除いて基本的に効果が小さいことが分かる．

現時点ではこのような横断的な評価は少ない．Lenton and Vaughan 自身が認める通り，このポテンシャル評価は絶対的なものではなく，新たな試算によって変化がある可能性がある．しかしながら個々の手法のおおよその効果をつかむには有用な情報である．

4．成層圏へのエアロゾル注入：効果と限界

数あるジオエンジニアリングの選択肢のうち，最も関心を呼んでいるのが成層圏のエアロゾル注入である．この手法は，効果がある程度確実視されている．前節で見たように，

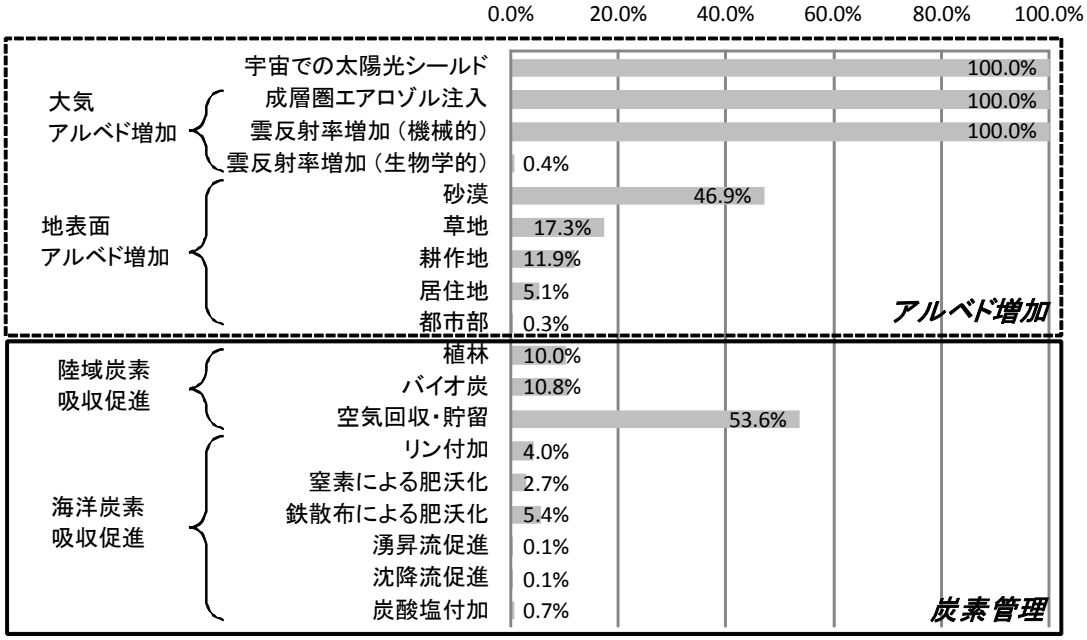


図2. Lenton and Vaughan (2009)が推計した，ジオエンジニアリングのポテンンシャル（最大の温室効果抑制可能性）. Lenton and Vaughan の表1,2をもとに作成. 二酸化炭素倍増のときの放射強制力(3.71W/m^2)に対する100分率で表示（冷却効果のため，ジオエンジニアリングの放射強制力は負値を取る）. 炭素管理の各手法は排出シナリオを仮定の上，簡単な解析的なモデルを用いて2100年の CO_2濃度低下分を放射強制力に換算している. ここで示されているものは基本的にポテンシャルであるが，宇宙での太陽光シールド，成層圏エアロゾルや空気回収・貯留などはここで示した値より拡張することは可能であるとされている. また全球平均の放射強制力に換算して示しているが，雲反射率増加など地域的に効果が集中するものもある. ここで示したポテンシャルは線形に加算することができないものも含まれるので注意されたい.

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

成層圏エアロゾル注入は CO_2倍増の放射強制力を打ち消すだけのポテンシャルをもつ数ある少ない方法である．

成層圏への硫酸エアロゾル注入の効果は自然の火山噴火が実証している[12]．1991年のフィリピンのピナツボ火山噴火は，10TgS ものエアロゾルを成層圏に注入した．半年経過したころ，6TgS のエアロゾルが残存しており，4.5W/m^{2}の負の放射強制力があったとされる．その結果平均で0.5度地表面気温が減少した．成層圏エアロゾルの滞留時間は1-2年であり，ピナツボの冷却効果は速やかに薄れていった．

以上の数字を踏まえると，線形性の仮定のもとで硫酸エアロゾルは0.75 W/m^2/TgS の放射強制力を持つ．したがって二酸化炭素倍増の約4W/m^{2}の放射強制力を打ち消すには約5.3TgS の硫黄を成層圏に注入しなければならない．Rasch et al. (2008b)によればエアロゾルの粒径を小さくすることで注入する量を1.5TgS まで減らせるとしている．

興味深いのは，人類が大気汚染として排出している対流圏のエアロゾルも地球を冷却する効果がある点である．実際 IPCC によれば，温室効果ガスとエアロゾルを入れた人為的放射強制力の総計は1.6W/m^{2}で済んでいるが，この理由はエアロゾルの冷却効果が-1.2W/m^{2}あったからである(IPCC 2007).

以上は概算であるが，実際のジオエンジニアリングの効果となるといくつも疑問点が出てくる．CO_2は地球全体で均質な放射強制力を持つが，エアロゾルによる放射光減少は太陽入射エネルギーを遮るため地理的・季節的分布を持つ．Govindasamy and Caldeira (2000)はジオエンジニアリングについて本格的な気候研究を行った最初の論文の一つで，NCAR (National Center for Atmospheric Research)大気大循環モデルを利用してジオエンジニアリングに相当する太陽入射光減少の効果を検証した．放射強制力の異なる分布にも関わらず産業革命前に比べて CO_2倍増による温度上昇化をほぼ打ち消すことが示された．

ただ相殺は完全ではないことが新たな研究で判明してきた．Matthews and Caldeira (2007)は EMIC（Earth System Model of Intermediate Complexity，中程度の複雑さをもった地球システムモデル）を利用して同様な計算をしたが，温室効果ガスに IPCC SRES (Special Report on Emissions Scenario) A2シナリオを仮定した場合，温度の完全な相殺が難しく，ジオエンジニアリングを行うことで熱帯域が若干冷却し，極域が温まることが分かった．大気海洋結合大循環モデルを用いて産業革命前に比べ4倍の濃度の CO_2をジオエンジニアリングで相殺したシミュレーションを検討した Lunt et al. (2008)も同様な傾向を明らかにした[13].

CO_2の増加は温度上昇以外にも様々な影響を及ぼす．現在人為起源の CO_2の約4分の1は海洋に吸収されているが，CO_2は海水に溶けると弱酸性を示すため，海洋の酸性化が進む(芳村・津旨 2007; Doney et al. 2009)．産業革命前は8.21であった pH が現在では8.1程度まで下がってきており，地球温暖化が進むと7.8まで下がるというモデル計算もある．海洋酸

[12] 数多くの論文があるが，ここでの議論は Crutzen (2006)のまとめに従う．

[13] 温暖化とジオエンジニアリングを組み合わせた放射強制力の地理的パターンが特徴的な温度パターンを引き起こしているのであれば，線形性が成り立つ範囲では CO_2の放射強制力に比例して影響が見られるはずである．したがって論文の比較の際には CO_2濃度も考慮する必要がある．

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

性化は二酸化炭素濃度上昇の直接的な帰結であり，「もう一つの CO2問題」と呼ばれる(Doney et al. 2009). 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．IPCC IS92a シナリオを用いた13の海洋炭素循環モデルの計算結果によれば，2050年ごろの南極海では貝類や動物プランクトンの殻の成分であるアラレ石（アラゴナイト）が溶け出す可能性があり，2100年では溶解が起きうる場所が北極近海にも広がるという(Orr et al. 2005).

Matthews et al. (2009)はカナダ・ヴィクトリア大学で開発された EMIC を用いてジオエンジニアリングを行ったときの海洋酸性化について検討した．ジオエンジニアリングによって温度上昇が抑えられると，温度上昇によって陸域の光合成が低減するはずだった分が影響を受けなくなり，その分 CO_2濃度は低くなる．しかしながらこの変化は人為的排出量を抑えるほど大きい効果がなく，酸性化は遅れるにとどまる．また温度の低下によってアラレ石（アラゴナイト）の飽和度は低下し，酸性化低減の効果をほぼ打ち消してしまう．海洋酸性化の問題を鑑みて，Wigley (2006)は CO_2排出量削減とジオエンジニアリングを組み合わせた戦略を提案している．

降水については，ジオエンジニアリングによって変化が起きる可能性が指摘されている．降水は蒸発した水蒸気が凝結して地表面に戻る過程であるが，ジオエンジニアリングは地表面に届く太陽光を減らすことで降水を変化させる．太陽光が減り，これに呼応して蒸発量が減れば降水量も減ることが期待される(Trenberth and Dai 2007). モデル分析(Matthews and Caldeira 2007; Robock et al 2008; Lunt et al. 2008)や火山の後の観測分析(Treberth and Dai 2007)も概ねこの仮説を確かめている．Hegerl and Solomon (2009)は気候モデルが入射太陽光減少に応じた降水の変化を過小評価していると指摘し，ジオエンジニアリングと降水の関係は更なる研究が必要だと述べている．

硫酸エアロゾルはオゾン層への影響も問題である．1991年のピナツボ噴火の後はかなりオゾンが破壊された．Tilmes et al (2008)はオゾン破壊と硫酸エアロゾル量などの経験的な関係を利用して，ジオエンジニアリングを行った場合のオゾン層の振る舞いを計算したが，ジオエンジニアリングを行うことは南極上空のオゾン層が回復するのが30年から70年ほど遅れることになることが分かった．

問題が小さいと見られている側面もある．対流圏（地表から高度約12km 以下）に排出される硫酸エアロゾルは酸性雨の原因であるが，ジオエンジニアリングのために成層圏に散布される量は人工的に対流圏に排出されている量に比べてとても少ない．Kravitz et al. (2009)は気候モデル（大循環モデル，General Circulation Model, GCM）を用いて3-5TgS の硫酸エアロゾルが成層圏に注入されるシナリオを検討した．モデル結果によればエアロゾルの沈着量は全球的に増加するが，増加量の絶対値が小さいので殆どの生態系に対して影響を与える可能性がないという．

その他の効果としては，硫酸エアロゾルは宇宙に太陽光を反射するだけではなく拡散するので，ジオエンジニアリングを行うと空が白くなると予想され，空の青さの価値が問われることになる(Keith 2000, Crutzen 2006).

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

ジオエンジニアリングの効果や影響の研究は，ようやく出発したところである．ジオエンジニアリングを実施するためには総合的なリスク分析が必要だが，情報はまだかなり限られる．9年前に Keith (2000)はジオエンジニアリングのリスクは，科学の不確実性が高く定量的なリスク評価は無理だと指摘した．定性的な議論は進みつつあるが，リスクの定量化については今日でも課題は大きいといえる．

5．政治経済的含意

4.1 費用

総じてジオエンジニアリングのコストは低い．NAS (1992)の報告書は結びの段落で「おそらく本分析の一つの驚くべき結果は，いくつかのジオエンジニアリングの選択肢は比較的低い費用で実施できるという点だろう」といい，また Barrett (2008)はその経済性を「信じ難い」(incredible)と呼んだ．

古い見積りになるが表3に全米科学アカデミーが概算したコストを示す(NAS 1992)[14]．ヨーロッパの排出権市場である EU ETS の価格が15ユーロ/tCO_2程度で推移していることを考えると格段にやすいことが分かる．

もちろん高コストであるジオエンジニアリングも存在する．空気からの CO_2直接回収はその一例である．ただ高いといっても伝統的な緩和策と比較した場合，さほど高くない．Pielke (2009)は文献を参考の上，コストを3通り（\$136/tCO_2, \$98/tCO_2, \$27/tCO_2）考慮して計算したが，そのコストはスターン・レビュー(Stern 2007)で報告されている伝統的な緩和策とも同等だと指摘している．

既存の試算の問題点は，NAS (1992)も Peilke (2009)も概算であるとういことである．今後精緻な見積もりが望まれる．

4.2 政治的意義

科学的研究も浅くリスクも不明であるが，ジオエンジニアリングにはそれ以上大きい課題が存在する．伝統的な緩和策と比べてジオエンジニアリングは全く新しい国際統治の問題をつきつけるのである．統治が問題なのは科学者も認めるところである(Schneider 2001).

CO_2に関する伝統的な緩和策（省エネルギー，原子力・再生可能エネルギーの導入，燃

表3. ジオエンジニアリングのコスト. NAS(1992)の表29.4より作成.

種類	コスト[米ドル/tCO_2]
宇宙に太陽光シールドを設置する	0.1-15
成層圏にダストを軍隊の銃砲で打ち込む	0.03-1.0
成層圏にダストを飛行機で注入する	0.003-1
成層圏にススを注入する	0.003-0.3
低層雲の雲凝結核を船で供給する	0.03-1
鉄を散布し海洋肥沃化する	0.1-15

[14] 以前の表3には一部誤りがあったため，修正した(2010年1月29日).

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

料転換など）[15]とジオエンジニアリングで大きく異なる点は，実施に限れば国際協調が必要とされない点である(Virgoe 2008; Victor et al. 2009)．技術的にいえば，中国が石炭火力発電で CO_2を排出しつづけても米国一国が単独でジオエンジニアリングを行い地球の温度を下げることが可能である．もちろん技術的に達成できてもコストが非常に高ければ単独行動は事実上不可能だが，前節でみたように多くの選択肢においてコストが低い．

単独行動の可能性は全く新しい政治的課題を作りだす．Victor et al. (2009)は，ジオエンジニアリングは先進国でなくとも中国・インドなど航空宇宙技術を持っている国ならば実施可能であり，極端な場合，個人や企業が実施する可能性すらあるという．海洋肥沃化やCO_2空気回収にむけて開発を進めている企業があることは前述した通りである．ただ実際発動するためにはジオエンジニアリングの効果を把握するための正確な気候予測が必要なので，やはり大国に限られる可能性が大きい．現時点の中国・インドなどの気候科学は未成熟といえるが，今後彼らが宇宙技術と同時に気候科学の能力を蓄積していく可能性は高いだろう．

単独でできるとなると新たな国際枠組みが必要になる．地球温暖化問題の基本的な国際的な枠組みは気候変動に関する枠組み条約(FCCC, Framework Convention on Climate Change)であるが，FCCC にはジオエンジニアリングについての記述がない．そもそも FCCC の目標は気候システムに人為的な危険な干渉を与えない水準での温室効果ガスの濃度を安定化することであり，温室効果ガスの濃度が上昇し続ける中，気候システムを制御しようとするジオエンジニアリングは，現在の FCCC の範疇に収まらないだろう．究極目標とは違うが，すでに FCCC は適応についても言及している．同様にジオエンジニアリングについても言及する必要がある(Barrett 2009, personal communication).

個々のジオエンジニアリングは現存の国際条約の対象になる可能性がある．Keith (2000)は関連する可能性のある法律を列挙している．海洋肥沃化は海洋法・南極条約，宇宙に太陽光シールドを設置する場合は宇宙条約，成層圏エアロゾルは Environment Modification Convention[16]などに関連するという．Virgoe (2008)は更に踏み込んでここで列挙されたような条約とジオエンジニアリングの関係について検討しているが，直接ジオエンジニアリングを法律的に禁止するようなものはないと結論している．

ジオエンジニアリングを実行に移すためにはまず実験を行わなければならない．科学者はここでも意見が分かれる．理論研究・コンピュータによる数値シミュレーションは問題がないが，実験的小規模なジオエンジニアリングを行うことは倫理的・社会的に問題はないのだろうか？キースのように早めに硫酸エアロゾルの成層圏注入のようなジオエンジニアリングの実験を開始すべきと言う科学者もいる一方，否定的な人もいる(National Public Radio 2009).

Cicerone (2006)や Victor et al. (2009)は，遺伝子組み換え技術の研究が参考になるという．

---

[15] CO_2以外の温室効果ガスはこの議論から除く

[16] 1977 UN Convention on the Prohibition of Military or any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

1970年代半ば，科学者は，議論を呼ぶ遺伝子組み換え技術について実験のモラトリアムに合意し，倫理的ガイドラインを作成していった．規制の中で研究を進める体制を作っていった．ジエンジニアリングも同様にモラトリアムを宣言し，倫理的なガイドラインを打ち立てることが必要かもしれない．

実験を超えて実際にジオエンジニアリングが発動されるとしたらどうなるのであろうか？[17]Bengtsson (2006)と Brovkin et al. (2009)は CO_2の大気滞留時間が数百年から数千年であることを見ると，ジオエンジニアリングは数千年程度続けなければならないと述べている．文明は誕生してから数千年であり，数百年なら可能でも数千年間ジオエンジニアリングを続けるというのは社会的に難しいというのは全うな批判であろう．したがって（海洋酸性化問題を除いても）ジオエンジニアリングが発動された後でも Wigley (2006)のいうように CO_2削減策は続けなければならない可能性が大きい．逆の見方をすれば，長期的問題を解決する唯一のジオエンジニアリングは，大気から CO_2を回収することだろう(Archer and Brovkin 2008).

６．結語

関心が高まりつつも総じてジオエンジニアリングの研究は少なく，その効果やリスクについて定量的な評価は非常に難しい．

例えば気候科学についていえば，IPCC の地球温暖化予測に用いられているような大規模な大気海洋結合モデルを用いた計算は少なく，簡易なモデルや中規模なモデルを使った研究が多い．大気海洋大循環モデルを利用したのは Lunt et al. (2008)と Robock et al. (2008)が最初といっていいだろう．またほとんどの研究は平衡状態の結果しかみていない(Robock et al. 2008)．もう一つの問題点は研究によってジオエンジニアリングのシナリオ設定が大きく異なることである．太陽光入射を減らすジオエンジニアリングを行うと熱帯で温度・降水が減るが，研究によって与えている強制力が違うために効果を定量的に比較することは難しい．IPCC の地球温暖化予測は共通の温室効果ガス排出シナリオを用いて計算を行っているが，モデルの相互比較のためにはジオエンジニアリングについても共通なシナリオが必要だろう．

社会科学面では，数あるジオエンジニアリングの選択肢を整理していくことがより重要になる．Boyd (2008)は効果，コスト，安全性，速効性などの側面で評価し，意義のあるジオエンジニアリング手法を絞り込む必要があることを指摘した．本稿の図2などで引用した Lenton and Vaughan (2009)はこうした研究の第一歩と言えよう．緩和策では費用曲線（コスト・カーブ）がよく議論の引き合いに出されるが，ジオエンジニアリングについても同様なことを描くこともできよう[18].

---

[17] 発動するかどうかについてもシナリオ分析が必要かもしれない．Schwartz and Randall(2003)は米国国防総省向けに急激な気候変動の安全保障上の意義を明らかにするシナリオを作成したが，これが参考になるかもしれない．

[18] NAS (1992)は多くの技術選択肢についてコスト及び効果の両方とも概算しているが，再計算が必要だと思われる．

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

また実験面にフォーカスを当てた分析も重要だろう[19]．Crutzen (2006)の論文からジオエンジニアリングの理論・モデル研究は増えてきているが，問題は実験をどのように行うかである．遺伝子組み換え技術の例が参考になるかもしれない(Cicerone 2006)．1970年代半ばに，生物学者は議論を重ね，ある種の遺伝子を他の種に持ち込むという実験についてモラトラリアムに合意した．様々な場で行われた議論が倫理的なガイドラインや研究室での実験の制限を生み出していった．こうした場では遺伝子組み換え技術の賛成者だけでなく反対者も含めて議論を進めていった．ジオエンジニアリングでも各国政府・研究機関が実験のモラトリアムを実施し，まずは科学アカデミーレベルでガイドラインを整理することなどが必要かもしれない．

実験については GCM の研究の必要性もある．成層圏エアロゾル注入を例にとれば，観測誤差や自然変動を超えて検出するためにはどこにどれだけのエアロゾルを注入すればいいか検討する必要がある．またあくまでも実験であるため，可能な限り影響が小さい方が望ましく，こうした条件を踏まえて注入量を定量的に見積もる必要がある．

科学コミュニティーの中でも，ジオエンジニアリングを緩和策の言い逃れと見て，議論を避ける人々もいる．例えば何度も本稿で引用した Crutzen (2006)だが，この論文が投稿されたとき彼は多くの批判を受けたが，その全てが純粋に科学的なものではなかった(Cicerone 2006)．環境保護団体は勿論，科学者でも反対意見は根強い(Robock 2008)．実際，ジオエンジニアリングの技術ができると伝統的な緩和策へのインセンティブが，わずかかも知れないが減るのは事実であろう．これは Schelling (1996), Victor et al. (2009)が認めるところである．

しかしながら緩和策の重要性はジオエンジニアリングによって低減しないことは最近の研究が徐々に明らかにしていると思われる．CO_2の滞留時間が数百年・数千年単位であるのに対し，人類の歴史が数千年であることを考えるに，超長期的にジオエンジニアリングを続けることができる可能性は保証されない．ジオエンジニアリングを一度初めて CO_2濃度が高くなった後に中止した場合，地球は急激な温度上昇を経験することになる(Matthews and Caldeira 2007)．太陽入射エネルギーを制御するジオエンジニアリングでは海洋酸性化問題を解決できないのは言うまでもない．緩和策との併用を前提としてジオエンジニアリング研究を進めることが重要であろう．

参考引用文献

1. 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, J. M. Wallace, 2003: Abrupt climate change. *Science*, **299**, pp. 2005-2010, doi:10.1126/science.1081056.
2. American Meteorological Society, 2009: *Geoengineering the climate system: A Policy Statement*

[19] 鉄散布による海洋肥沃化は小規模であるが既に実験が多数行われている．ここで議論しているのは全球の CO_2濃度への影響を調査するようなものである．

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

of the American Meteorological Society, <http://www.ametsoc.org/policy/2009geoengineeringclimate_amsstatement.html>, accessed on August 3, 2009.

3. 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 of the United States of America*, **103**, pp. 17184-17189, doi:10.1073/pnas.0608163103.
4. Barrett, S., 2008: The incredible economics of geoengineering. *Environmental and Resource Economics*, **39**, pp. 45-54, doi:10.1007/s10640-007-9174-8.
5. Bengtsson, L., 2006: Geo-engineering to confine climate change: Is it at all feasible? *Climatic Change*, **77**, pp. 229-234, doi:10.1007/s10584-006-9133-3.
6. Boyd, P. W., and coauthors, 2007: Mesoscale iron enrichment experiments 1993–2005: Synthesis and future directions. *Science*, **315**, pp. 612-617, doi:10.1126/science.1131669.
7. Brovkin, V., V. Petoukhov, M. Claussen, E. Bauer, D. Archer, C. Jaegeer, 2009: Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure. *Climatic Change*, **92**, pp. 243-259, doi:10.1007/s10584-008-9490-1
8. Budyko, M. I., 1977: *Climatic Changes*, American Geophysical Union, Washington, D. C., 261 pp.
9. Caldeira, K., and L. Wood, 2008: Global and Arctic climate engineering: numerical model studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **366**, pp. 4039-4056, doi:10.1098/rsta.2008.0132.
10. Cicerone, R. J., 2006: Geoengineering: Encouraging research and overseeing implementation. *Climatic Change*, **77**, pp. 221-226, doi:10.1007/s10584-006-9102-x
11. Crutzen, P., 2006: Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?, *Climatic Change*, **77**, pp. 211–219, doi:10.1007/s10584-006-9101-y.
12. Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely, and J. A. Kleypas, 2009: Ocean acidification: The other CO_2 problem. *Annual Review of Marine Science*, **1**, pp. 169–92, doi:10.1146/annurev.marine.010908.163834.
13. Early J. T., 1989: Space-based solar shield to offset greenhouse effect. *Journal of the British Interplanetary Society*, **42**, pp. 567-569.
14. 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*, edited by L. Rosner, pp. 175– 200, Routledge, New York.
15. Gaskill, A., 2004: Summary of Meeting with US DOE to discuss Geoengineering options to prevent abrupt and long-term climate change, <http://www.global-warming-geo-engineering.org/DOE-Meeting/DOE-Geoengineering-Climate-Change-Meeting/ag1.html>, accessed August 3, 2009.
16. Govindasamy, B. and Caldeira, K., 2000: Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

CO_2-induced climate change. *Geophysical Research Letters*, **27**, pp. 2141–2144, doi:10.1029/1999GL006086.

17. Guardian, 2009: Obama climate adviser open to geo-engineering to tackle global warming, April 8, 2009, <http://www.guardian.co.uk/environment/2009/apr/08/geo-engineering-john-holdren>, accessed August 3, 2009.
18. Hegerl, G. C., and Susan, S., 2009: Risks of climate engineering. *Science*, **325**, pp. 955-956, doi: 10.1126/science.1178530.
19. IPCC, 2007: Summary for Policymakers. 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* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
20. Keith, D. W. 2000: Geoengineering the climate: History and prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*, **25**, pp. 245-284, doi:10.1146/annurev.energy.25.1.245.
21. Latham, J., Rasch, P., Chen, C.-C., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K., and Choularton, T., 2008: Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **366**, pp. 3969-3987, doi:10.1098/rsta.2008.0137. .
22. Latham, J., 2002: Amelioration of global warming by controlled enhancement of the albedo and longevity of low-level maritime clouds. *Atmospheric Science Letters*, **3**, pp. 52–58, doi: 10.1006/asle.2002.0099.
23. Latham, J., 1990: Control of global warming? *Nature*, **347**, pp. 339–340.
24. Lehmann, J., 2007: A handful of carbon. *Nature*, **447**, pp. 143–144, doi:10.1038/447143a.
25. Lenton, T. M., and N. E. Vaughan, 2009: The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **9**, pp. 2559-2608, http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/9/2559/2009/.
26. Lovelock, J. E. and Rapley, C. G., 2007: Ocean pipes could help the earth to cure itself. *Nature*, **449**, p. 403, doi:10.1038/449403a.
27. Lunt, D. J., A. Ridgwell, P. J. Valdes, and A. Seale, 2008: "Sunshade world": A fully coupled GCM evaluation of the climatic impacts of geoengineering. *Geophysical Research Letters*, **35**, L12710, doi:10.1029/2008GL033674.
28. Marchetti C., 1977. On geoengineering and the CO_2 problem. *Climatic Change*, **1**, pp. 59-68, doi: 10.1007/BF00162777.
29. Mathews, J. A., 2008: Carbon-negative biofuels. *Energy Policy*, **36**, pp. 940-945, doi:10.1016/j.enpol.2007.11.029.
30. Matthews, H. D., and K. Caldeira, 2007: Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of*

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

America, **104**, pp. 9949– 9954, doi:10.1073/pnas.0700419104.

31. Matthews, H. D., L. Cao, and K. Caldeira, 2009: Sensitivity of ocean acidification to geoengineered climate stabilization. *Geophysical Research Letters*, **36**, L10706, doi:10.1029/2009GL037488.
32. National Public Radio, 2009: Scientists debate shading earth as climate fix, June 16, 2009, <http://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=105483423>, accessed August 3, 2009.
33. Nature, 2008: Sucking carbon out of the air. December 17, 2008, <http://www.nature.com/news/2008/081217/full/news.2008.1319.html>, doi: 10.1038/news.2008.1319.
34. New York Times, 2008: Venture to use sea to fight warming runs out of cash, February 14, 2008, <http://www.nytimes.com/2008/02/14/technology/14planktos.html>, accessed August 3, 2009.
35. Orr J.C., and coauthors, 2005: Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* **437**, pp. 681–86, doi: 10.1038/nature04095.
36. NAS, 1992: Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base, National Academy Press, Washington, D. C., 918 pp.
37. Pielke, Jr., R. A., 2009: An idealized assessment of the economics of air capture of carbon dioxide in mitigation policy. *Environmental Science and Policy*, **12**, pp. 216–225, doi:10.1016/j.envsci.2009.01.002.
38. Rasch, P. J., Crutzen, P. J., and Coleman, D. B., 2008: Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size. *Geophysical Research Letters*, **35**, L02809, doi:10.1029/2007GL032179.
39. 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. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **366**, pp. 4007-4037, doi:10.1098/rsta.2008.0131.
40. Robock, A., Oman, L., and Stenchikov, G. L., 2008: Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO_2 injections, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**, D16101, doi:10.1029/2008JD010050.
41. Salter, S., G. Sortino, and J. Latham, 2008: Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **366**, pp. 3989-4006, doi:10.1098/rsta.2008.0136.
42. Schelling, T. C., 1996: The economic diplomacy of geoengineering. *Climatic Change*, **33**, pp. 303-307, doi:10.1007/BF00142578.
43. Schneider, S. H., 2001: Earth systems: Engineering and management. *Nature*, **409**, pp. 417–419, 421, doi:10.1038/35053203.
44. Schwartz, P., and D. Randall, 2003: An abrupt climate change scenario and its implication for United States national security.

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.

<http://www.gbn.com/articles/pdfs/Abrupt%20Climate%20Change%20February%202004.pdf>, accessed August 17, 2009.

45. Stern, N., 2007: *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 712 pp.
46. Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, H. J. Schellnhuber, 2008: Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**, pp. 1786-1793, doi:10.1073/pnas.0705414105.
47. Teller, E., K. Caldeira, G. Canavan, B. Govindasamy, A. Grossman, R. Hyde, M. Ishikawa, A. Bedebuhr, C. Leith, C. Molenkamp, J. Nuckolls, and L. Wood, 1999: Long-range weather prediction and prevention of climate catastrophes: A status report. Lawrence Livermore National Laboratory (LLN), CA (USA), Preprint UCRL-JC-135414, 44 pp.
48. Tilmes, S., R. Müller, and R. Salawitch, 2008: The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes. *Science*, **320**, pp. 1201– 1204, doi:10.1126/science.1153966.
49. Victor, D. G. , M. G. Morgan, J. Apt, J. Steinbruner, K. Ricke, 2009: The geoengineering option: A last resort against global warming? *Foreign Affairs*, March/April, pp. 64-76.
50. Virgoe, J., 2008: International governance of a possible geoengineering intervention to combat climate change. *Climatic Change*, **95**, 103-119, doi:10.1007/s10584-008-9523-9.
51. Weart, S., 2008: Climate modification schemes, <http://www.physicists.net/history/climate/RainMake.htm>, accessed August 3, 2009.
52. Wigley, T. M. L., 2006: A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization, *Science*, **314**, pp. 452–454, doi:10.1126/science.1131728.
53. ニューズウィーク日本版, 2009: トンデモ科学が地球を救う？ 2009年7月15日（英語版 <http://www.newsweek.com/id/194610>）
54. 芳村・津旨, 2007: 大気中 CO2濃度の増加がもたらす海洋酸性化ー海洋プランクトンを通じて CO2吸収に与える影響に関する文献調査ー，電力中央研究所報告, V06019.

Copyright 2009 CRIEPI. All rights reserved.