

気候工学 (ジオエンジニアリング) 国際会議*

杉 山 昌 広^{*1}・朝 山 慎一郎^{*2}・岩 崎 杉 紀^{*3}
小 杉 隆 信^{*4}・原 口 正 彦^{*5}・森 山 亮^{*6}

1. はじめに

2014年8月18日から21日まで、ドイツ・ベルリンの Scandic Hotel Potsdamer Platz にて “Climate Engineering Conference 2014: Critical Global Discussions” (CEC14, 気候工学 (ジオエンジニアリング) 国際会議) が開催された。気候工学に関する初の学際的 (transdisciplinary) な国際会議であり、開催国のドイツは勿論のこと、欧米やアジアのみならず中南米・アフリカ・島嶼諸国から300人以上の参加者が集まった (第1表)。分野横断的に気候工学の科学と社会的側面について議論したが、分科会としては社会科学が多かった (第2表)。研究者のみならず環境保護団体や途上国のステークホルダー (利害関係者) からの参加を歓迎していたこともあり、博士号を持たない参加者も多かった (博士号取得者または教授が167人に対し134人)。熱気につつまれた議論が朝9時から (レセプション付きではあるが) 夜10時まで続いていた。

本稿では、CEC14の内容を報告する。時系列的・網羅的に記述するのではなく、文献で補足しながら議論を要約して報告する。第2節ではCEC14の全体会合の議論に則して気候工学の研究の過去と今後の展望をまとめる。第3節ではCEC14における気候科学の内容について整理する (担当: 杉山, 岩崎)。第4節では経済的側面 (同, 小杉)、第5節では技術的側面 (同, 森山)、第6節ではガバナンス (同, 原口)、第7節では公衆理解・関与 (同, 朝山) について述べ、第8節でまとめる。

2. 気候工学研究の過去, 現在, 未来

2.1 気候工学の定義と分類

気候工学は「気候変動の影響を軽減する目的で意図的に気候システムを改変することを目指す手法や技術の総称」 (“a broad set of methods and technologies that aim to deliberately alter the climate system in order to alleviate the impacts of climate change”) と定義される (IPCC 2013)。英語ではIPCCのように geoengineering (気象庁訳では「ジオエンジニアリング」) を使う場合もあればCEC14のように climate engineering を使う場合もある。本稿では杉山ほか (2011)・杉山 (2011) にならい気候工学に統一する。

気候工学は様々な手法の総称であり、一般的には太陽放射管理 (solar radiation management, SRM) と二酸化炭素除去 (carbon dioxide removal, CDR) に分類される (Royal Society 2009)。しかし、新たに巻雲を光学的に薄くする手法 (Mitchell and Finnegan 2009) や大気からのメタンの回収 (Boucher and Folberth 2010) も提案されている。従って放射管理 (radiation management, RM) と

* Climate Engineering Conference 2014 (International conference on geoengineering).

^{*1} (連絡責任著者) Masahiro SUGIYAMA, 東京大学政策ビジョン研究センター, 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1. masahiro_sugiyama@alum.mit.edu

^{*2} Shinichiro ASAYAMA, 国立環境研究所社会環境システム研究センター。

^{*3} Suginori IWASAKI, 防衛大学校地球海洋学科。

^{*4} Takanobu KOSUGI, 立命館大学政策科学部。

^{*5} Masahiko HARAGUCHI, コロンビア大学地球環境工学部。

^{*6} Ryo MORIYAMA, (一財) エネルギー総合工学研究所。

© 2015 日本気象学会

第1表 参加者の統計. CEC14のパンフレットの参加者リストから作成. 国は参加者の国籍ではなく所属機関のそれに対応する（例えば第5著者は米国として数えられる）.

国	参加者数	参加者が2名の国
ドイツ	125	イタリア, オーストリア, ケニア, フィリピン, ブラジル
英国	42	
米国	41	
中国	10	
オランダ	10	
ノルウェー	9	参加者が1名の国 アイルランド, イスラエル, インド, エクアドル, エチオピア, ガーナ, コンゴ民主共和国, ネパール, パキスタン, フィジー, フィンランド, ベトナム, ベルギー, マリ, 南アフリカ, モルドバ, モロッコ, ロシア
オーストラリア	7	
カナダ	7	
日本	5	
スウェーデン	4	
スイス	4	
フランス	3	
ニュージーランド	3	
スペイン	3	
参加者総数	301	

第2表 CEC14のプログラムの構成. (自X, 社Y, 融Z) は自然科学・工学が主な分科会がX件, 社会科学が主な分科会がY件, 融合して分野横断的な分科会がZ件あったことを示す.

	8/18 (月)	8/19 (火)	8/20 (水)	8/21 (木)
午前		分科会 (自2, 社6, 融2)	分科会 (自3, 社6, 融1)	分科会 (自2, 社7, 融1)
午後	全体会合	分科会 (自0, 社2, 融1)	分科会 (自2, 社1, 融2)	全体会合
夜	全体会合	全体イベント	ポスター・セッション	一般公開パネル・ディスカッション

第3表 気候工学の分類. ここで挙げた代表的な手法は(メタン回収を除き) CEC14の分科会で何らかの形で議論の俎上にのぼったものである.

大分類	小分類	CEC14で議論の対象になった手法
RM	SRM	宇宙太陽光シールド 成層圏エアロゾル注入 (SAI) 海洋上の雲の白色化 (MCB) 海洋表面のアルベド増加
	長波への介入	巻雲を光学的に薄くする
GGR	CDR	CCS 付きバイオマス・エネルギー (BECCS) CO ₂ 直接空気回収 (DAC) 鉄散布による海洋肥沃化 鉱物の化学風化の促進(EMW)
	その他のGHGの除去	(メタン回収)

温室効果ガス除去 (greenhouse gas removal, GGR) に概念を拡張すべきとの指摘もある (Mitchell and Storelmo 2014; Boucher *et al.* 2014) (第3表). なお, IPCC の定義では緩和策に温室効果ガスのシンクの増強が含まれるため (IPCC 2013), CDR は緩和策に包含される.

2.2 今までの10年

CEC14の開催時期は英国王立協会の気候工学に関する包括的な報告書 (Royal Society 2009) が公表された2009年から数えて5年にあたる.

以前は気候工学の研究自体がタブーであったが, それをCrutzen (2006) が破ってから多くの動きがあった. 2011年に第1回のワークショップが開かれたGeoMIP (Geoengineering Model Intercomparison Project; ジオミップ

と読む, 3.1節で解説) は広い関心を集め, 多くの研究チームが参加している. IPCC 第5次評価報告書ではGeoMIPの結果も受け, 気候工学もレビューの対象となった. 2012年には英国の気候工学研究プロジェクトSPICE (Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering) の一部である, 気球で係留された高さ1 kmのパイプを作る実証実験が中止になった. 高層大気中に粒子状物質を注入するシステム構築の第一歩として位置づけられていたが, 特許の扱いでグレーな点が明らかになったため, 資金拠出機関・研究代表者が中止の決断を下したのである. 2013年には環境影響評価などを経て正当と見なされた科学研究を除き, 海洋における気候工学を禁止する合意がロンドン条約・議定書で合意された (第4表).

最初の全体会合ではLawrence (ドイツ IASS) がモデレーターを務め, 気候工学研究の過去10年を振り

第4表 近年の気候工学関連の動向.

2006	1995年のノーベル化学賞受賞者 Crutzen が Climatic Change 誌に論考を寄せる
2009	英国王立協会, 初の気候工学の総合的な報告書発表
2010	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 生物多様性条約第10回締約国会議にて気候工学の（法的拘束力なしの）研究を除いた使用を避ける趣旨の決定を採択（事実上のモラトリアムとされる）
2011	IPCC の気候工学に関する専門家会合（ペルー）
2012	夏にカナダ西岸沖で Russ George 氏らがサケを増やすことを目的に鉄を散布, カナダ政府が調査を継続中（本稿執筆時） 英国研究プロジェクト SPICE の 1 km のパイプを建造する実証実験中止の決定
2013	ロンドン条約・議定書にて海洋の気候工学については正当な科学研究以外は禁止する決定が採択 IPCC AR5 第1作業部会の貢献公表
2014	IPCC AR5 第2, 3作業部会の貢献公表 CEC14開催

返った。Caldeira（米国 Carnegie Institute for Science・スタンフォード大学）は、未だに多くの知見がごく僅かな理論研究などに基づいており、IPCC の結論と同様に、不確実性が大きいことを強調した。Robock（米国ラトガーズ大学）も同様の指摘をし、GeoMIP は気候工学の20種類の影響（Robock *et al.* 2009）の中で3項目しか分析できていないと述べた。Rayner（英国オックスフォード大学）はガバナンスではわずかではあるが進歩があり、自身が作成に強く関わったオックスフォード原則（Rayner *et al.* 2013）について言及した。Blackstock（英国 UCL）は気候工学の研究者は自己反省的（reflexive, 社会学などでは再帰的や内省的と訳される）で、研究開発の推進に没頭せず、自己の研究の社会的影響などについて常に考えていると指摘した。

2.3 気候工学研究の今後

最終日の全体会合では、Parker（米国ハーバード大学）が司会を務め、気候工学研究の今後に関する議論がなされた。Wibeck（スウェーデン・リンショープ大学）はここ数年の気候工学研究では、社会科学の急激な増加が目立つと指摘した。特に2013年は社会科学の論文が自然科学のそれを数で上回ったという。これを受けて、Lawrence は初日の全体会合の指摘と同様に、気候工学の研究は自己反省的（reflexive）であり続けるとした。

Schmidt（ドイツ MPI-M）は、近年の気温上昇の

停滞、ハイエイトス（渡部 2014）が続けば気候工学は研究者の好奇心の対象以上のものではないが、もし気温上昇が再び加速した場合、気候工学への関心は非常に高まるだろうとした。Nicholson（米国アメリカン大学）は米国の政治状況に言及し、温暖化の影響が顕在化した場合、米国の（茶会党などに代表される）政治右派が地球温暖化の対応策として気候工学に飛びつき、気候工学を取り巻く状況が一変する可能性も無視できないと述べた。

3. 気候科学と気候工学

3.1 GeoMIP

CEC14ではGeoMIPの分科会が1件開かれた。GeoMIPは気候工学に関する気候モデルの相互比較プロジェクトである。2011年に数値実験のプロトコル（Kravitz *et al.* 2011）が最初に公表され、成層圏エアロゾル注入（stratospheric aerosol injection, SAI）や太陽定数の減少（宇宙太陽光シールドまたはSAIの近似）については多くの分析がなされた。19本の論文が出版されており、そのうち15本がJournal of Geophysical Researchの特集号に収録されている。日本からは地球システム・モデルのMIROC-ESMおよびMIROC-ESM-CHEMが文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムの一環で参加している。

GeoMIPの基本的な結果はすでに報告されており（Kravitz *et al.* 2013）、SRMは地球温暖化による気温上昇を一定程度相殺することができる一方で、地域的な気温変化や降水パターンの変化を伴い、SRMによって気候が産業革命前に完全に戻るわけではないことがわかってきている。今回はより細かな側面の検討や新たな実験設定に関する研究報告がなされた。

Schmidt（MPI-M）は大規模火山噴火がSAIのアナログとして捉えられるかどうかを検討した。観測では火山噴火後に極渦が強化されるが、気候モデルではそれを再現できていないという根本的問題を指摘した。また成層圏への影響を比較したところ、同じ気温

低下では SAI の方が火山噴火より上層対流圏の応答が大きいことが明らかにされた。

Otterå (ノルウェー・ビャークネス・センター) は RCP (Representative Concentration Pathway; Moss *et al.* 2010) 4.5シナリオを基準に SAI によって放射強制力を2020年から2070年まで一定に保つ G3シナリオを用いて、海洋貯熱量 (Ocean Heat Content, OHC) と大西洋の深層循環への影響を調べた。SAI は700 m 以上の層の OHC を減少させて大西洋の深層循環が弱まるのを抑えることができる反面、深層循環については内部変動が大きく、強い結論は得られないと指摘していた。

Robock は GeoMIP6 のプロトコルの現在の状況について解説した。GeoMIP は CMIP6 (Climate Model Intercomparison Project phase 6) (Meehl *et al.* 2014) に承認を受けたモデル相互比較プロジェクト (endorsed MIP) として加わることを目指しており、現在検討中の新たな4つのコア実験は以下のとおりである (GeoMIP メーリングリストの最新情報を受けて CEC14 発表時の情報から更新しているが確定版ではない)。

G1ext : CO₂ 瞬時 4 倍増を太陽定数減少で打ち消す
G1実験を延長 (ext は extended の意味) し、100 年継続する。

G6sulfur : RCP8.5 を基準に2020年から SAI によって RCP4.5 水準まで放射強制力を下げ、これを100 年継続する (Keith (2013) が提案しているシナリオに近い)。

G6solar : G6sulfur と同様だが太陽定数減少によって行う。

G7cirrus : RCP8.5 を基準に2020年から100年間、巻雲を光学的に薄くする。具体的には今後用意されるパラメーター ϵ (< 1) を巻雲の光学的厚みに乗じて放射計算のコードに適用する。

なお、以前の G3・G4 シナリオは基準シナリオが RCP4.5 であったことに注意されたい。

また、GeoMIP6 のコア実験ではないが、化学気候モデル (chemistry climate model) 用に以前の G4 を参考に、SO₂ を注入するのではなく、硫酸エアロゾルを固定するシナリオ (G4 specified stratospheric aerosols; G4-SSA) も提案されている (Tilmes *et al.* 2014)。

3.2 新しい SRM の手法

CEC14では “Novel SRM Techniques: Cirrus

Cloud Thinning and Marine Sky Brightening” という新たな SRM に関する分科会も開かれた。

巻雲は地球の赤外放射を宇宙に逃げにくくするため、RM では巻雲 (氷粒) を減らすことが主要な研究課題となる。ここではまず簡単に氷雲のでき方について解説する。氷粒は均質核形成 (液滴がそのまま凍ること) と不均質核形成 (液滴が固体粒子に触れて凍ること) の2通りで出来る。一般的に、前者で出来ると雲粒の数密度が多く粒径は小さくなり、後者で出来る氷雲はその逆となる。もし後者を卓越させることが出来れば、雲粒が大きいため終端速度が速く巻雲の寿命が短くなり、数密度と粒径の兼ね合いで温室効果が減少する。

Mitchell (米国 DRI) は、RM の研究以前に均質核形成と不均質核形成のどちらで氷雲が作られているのか、特に中高緯度において衛星データを使って雲粒の数密度を推定する研究の紹介をした。Storelvmo (米国イェール大学) と Muri (ノルウェー・オスロ大学) は数値計算によって巻雲の RM の効果について調べて、巻雲の RM が気温を下げるだけでなく降雨の変化もあまり伴わないことを確認し、副作用の少ない手法となる可能性があることを示した。ただし、そもそも巻雲の生成の仕方があまり分かっていないこと、結果はモデルに依存するということが同時に指摘した。

Mengis (ドイツ GEOMAR) は北極海の海に 1 μ m 程度の細かい泡を大量に撒いた場合の海水や永久凍土の時間変化の発表を行った。岩崎 (第3著者) は今後増えるであろう (船の摩擦抵抗を減少させるために気泡を用いる) 空気潤滑法の船による放射強制力の見積もりについて発表した。

ほとんどの発表では、それぞれの手法を実行する費用や具体的な方策は示されておらず、これらの研究がまだ始まったばかりであることが強く感じられた。

3.3 気候の緊急事態と気候工学

気候工学が議論の俎上に載った背景の一つに、破滅的な被害の顕在化という climate emergency (気候の緊急事態) の考えがある。Lenton (英国エクセター大学) は自身の研究や最近の論文 (Barrett *et al.* 2014) を踏まえ、気候工学が緊急事態に対応できる可能性は小さいと述べた。西南極氷床の崩壊やグリーンランド氷床の融解に代表される、カタストロフィック・非線形な影響を引き起こす可能性のある tipping element (Lenton *et al.* 2008) はヒステリシスを持つ

ことが多く、もし状態遷移が起き始めた場合、それを戻すには開始時点（すなわち産業革命前）より気温を下げる必要が生じる可能性がある。こうした場合、SAIは状態遷移を抑えることが難しいだろう。また、いつシステムに状態遷移が起きるのかを推測するのは簡単ではなく、理論・モデルの研究でも成功する場合と失敗する場合がある。

Lentonの視点は非常に重要ではあるが、残念ながら気候モデルによる分析事例は限定的で、今後の重要な研究課題であろう。

3.4 自然環境での実験

気象学・気候科学は歴史的に観測科学であり、研究対象である気象・気候現象に対して実験を行うことは少なかったが、歴史を振り返るといくつかの例が出てくる。60年代から開始した米国の台風の改変を目指したSTORMFURYプロジェクトは、当初の目的を達成できなかった一方で、海洋の生物地球化学循環の理解のための鉄散布による海洋肥沃化の実験を過去13回ほど行い、多くの論文を生み出し、鉄が海洋中の重要な微量栄養素であるという知見を確かなものにした（杉山ほか 2011, 第8節）。2011年にはエアロゾルと雲の相互作用について調べるE-PEACEというプロジェクトがカリフォルニア沖で実施されている（Russell *et al.* 2013）。

CEC14では2つほど丁寧な検討がなされている実験計画が発表された。Dykema（ハーバード大学）は同大学のKeithとAndersonのグループで進行中の成層圏におけるオゾン層破壊のメカニズムを調べる実験計画について解説した。地球温暖化によって成層圏の水蒸気量が増える中でSAIを実施すると、湿潤で不均一反応の場が増えるという今までに見られなかった状況が生じる。このときのオゾン層破壊の一連の化学反応を明らかにするために、気球で硫酸と観測機器を運び、成層圏で実際の反応を観測するというのが彼らの実験である。硫酸等の投入量はごくわずかであり、環境影響はほぼ無視できる。しかし、こうした実験をひとたび許容すると、徐々に規模が拡大していき、最終的に気候改変にいたるとの懸念もあり、社会的影響に関して批判的意見が出ている。

Ackerman（米国ワシントン大学）も同様の小規模な自然環境での実験を提案した。海洋上の雲の白色化のメカニズムを理解するために、海風が吹くカリフォルニアのMoss Landingで実際に海塩などの雲凝結核を散布するという実験である。これも環境影響は極め

て限定的であり、社会的な影響が議論的になる。

自然環境での実験は現在のガバナンス研究の中心的な関心事である。こうした実験の科学的な必要性や、その他の手法の可能性は十分に検討されるべきであり、そもそも科学的な貢献が小さいのであれば、納税者の貴重な税金を使って実験を進める意味は薄いといえるだろう。

4. 気候工学の経済評価

気候工学の経済評価では、単にその実施に掛かる直接的なコストだけでなく気候変動の抑制効果と副作用についても考慮した上で、気候工学をどの程度導入するのが望ましいのか、また、気候工学を利用できない場合と比較して経済的にどれだけ有利となるのか、について評価することが求められる。そのためには、経済と気候変動との関わりを統合的に評価できる「統合評価モデル」を利用することが役立つ。

気候変動の抑制をあまり行わない場合、気候変動が進行することで経済活動に悪影響が生じて、得られる効用は小さくなる。一方、気候変動の抑制を過度に行ってしまうと、抑制技術の導入に伴う費用がかさむため、やはり効用が小さくなる。統合評価モデルでは、これら費用と効用のバランスを考慮して、現在から将来に至るまでの効用が最大になるような気候変動抑制の実施規模を計算する。

Bauer（ドイツ・ポツダム気候影響研究所）は、CDR技術の一種であるバイオエネルギー炭素回収貯留（Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS）について評価を行った。規模が大きいほど費用が安くなるとともに効率も良くなるというBECCSの技術的特性を考慮し、温室効果ガスの累積排出量の制約が厳しいほどBECCSの存在価値が高まると同時に、BECCSが利用可能であるシナリオでは、そうでないシナリオと比べて、温室効果ガス排出の増加が当面許容されうるといった分析結果を示した。

また、Held（ドイツ・ハンブルク大学）はSRMの一種である硫酸エアロゾルを用いたSAIが利用可能な場合の経済的に望ましい気候変動緩和技術オプションの組合せに関する評価結果について発表した。この評価では、世界各地の将来の気温や降水パターンの変化の計算モデルを含む詳細な統合評価モデルを用いていた。SAIの実施時に懸念される降水パターンの変化を一定の許容範囲に収め、かつ、SAIがいつ

中断されても地上平均気温上昇を 2°C 以内に抑える、という制約条件の下で経済的に望ましいSAIの実施量を導出した。このとき、気候変動の抑制に掛かる費用は、SAIがまったく利用されない場合と比べて約3分の2に低減できることが示された。

森山（第6著者）は、SAIの実施コストの再評価を行い、一般的に数十億ドルと言われている実施コスト（McClellan *et al.* 2012）が約2桁上昇する可能性を示した。会場からは、健康影響や保険などの副的なコストを考慮するとよりコストが上昇するだろうといった意見が述べられた。

5. 気候工学の技術面

CEC14では、社会科学に関する分科会が多かったが、気候工学の技術に特化した分科会も多数行われた。SRMでは海洋上の雲の白色化（marine cloud brightening, MCB）と海洋表面のアルベド増加やモデリングに関する分科会が、CDRでは（緩和技術に分類されることも多い）植林やバイオチャーなどの植物による間接的な CO_2 の回収と CO_2 直接空気回収（DAC）に関する分科会が行われた。また、各種気候工学技術の機器開発に関する分科会も行われた。

空気からの CO_2 回収に関する分科会では、Brandani（英国エディンバラ大学）が、ゼオライトを CO_2 の吸着剤として使用し、濃縮工程を複数台並べたDACパイロットプラントについて概説した。DACは火力発電所の CO_2 回収に比べて10倍のコスト、および2-3倍のエネルギーが必要となることが指摘された。

鉱物の化学風化の促進（enhanced mineral weathering, EMW）に関する分科会では、Moosdorf（ハンブルク大学）が、風化による CO_2 吸収量とEMWの実施に伴う CO_2 排出量の差を CO_2 吸収効果と表して、鉱物種によって吸収量に違いがあることや粉碎工程における排出量が吸収効果に大きく影響することを示した。また、Amann（ハンブルク大学）がEMWの副作用について発表し、農地への鉱物散布は土壌の酸性化に対してpH調整を行う機能がある一方で、CrおよびNiの重金属の放出が副作用として考えられることを示した。

気候工学に関する機器開発の分科会では、海洋表面のアルベド増加、MCB、SAIなどに関する機器開発状況が報告された。Ackerman（ワシントン大学）によるMCBに関する噴霧器の開発や、Evans（UCL）

による海面への泡の発生方法などの発表があった。

Hunt（英国ケンブリッジ大学）はSAIのために成層圏にエアロゾルを運搬するシステムについて報告した。この研究はSPICEプロジェクトの一環である（実証実験は中止となったが、その他の研究は影響を受けなかった）。高度20 kmにエアロゾル物質をポンプ輸送することを想定し、気圧、流体密度、パイプの張力などから実現可能性を検討した結果、ポンプ輸送が非常に困難であると述べた。

LockleyはSAIのエアロゾル運搬方法として旧来コストが高いと考えられている銃砲（gun）の低コスト化技術について報告した。主に、燃料を火薬から天然ガスに変えることおよび薬包（shell）をカーボンファイバー製にして回収することで、コストが10分の1程度まで低減できると指摘した。

なお、どの手法も分析数が少なく、全体的にコストなどは不確実性が大きいという印象があった。

6. 気候工学のガバナンス

ガバナンス研究の分野では、国際的枠組みや地域レベルでのガバナンス、国際法的な側面、公平性や（途上国などの）人権との関連について、複数の分科会が開催された。

ガバナンスとは統治と訳されることがある。本稿で言えば、気候工学の研究と開発を社会で管理するための国際・国内法の制定、研究者の倫理規範、大学・研究機関の規則といったもの全てを包括して指す概念である。政府の役割（法の制定・施行）以外も含めた幅広い仕組みを議論するために使われる用語である。

国連気候変動枠組条約が気候工学のガバナンスとして機能するのかについての分科会では、長年気候変動の国際交渉に携わってきた経験豊かな発表者が報告を行った。例えば、Bodansky（米国アリゾナ州立大学）は、気候工学の使用に関して多国間枠組を利用する利点と欠点について報告した。他にも、市民参加、合意形成や政策インセンティブなどが議題として挙げられた。

ガバナンスに関連する事項として、RaynerらがCEC14の会議初日に草案を提示し、分科会中や休憩時間中に話題にのぼったベルリン宣言がある。この宣言文は、SRMの小規模な自然環境での実験の論争的な側面に触れながら、環境的・社会的責任を求めるものであった。既に公表されている気候工学の研究原則であるオックスフォード原則（Rayner *et al.* 2013）

やアシロマ原則にならない、政府機関、研究助成機関、科学的組織や専門家集団がSRMの実験を実施する際には、公開性・透明性のある評価プロセスを通じて社会的認可を事前に得ることを要請する、という内容であった。特に、研究計画を事前に開示する際には、評価プロセスの健全性や独立性を確保し、公衆参加が認められるべきであると述べた。

参加者からはこの宣言文の内容に賛同する意見があった一方で、CEC14に関連した声明として採択されることに異論が相次ぎ、宣言文の内容だけでなくそもそもなぜこうした宣言文をRaynerらが発案したのか、その意図を問題視する意見も出され、大論争となった。会期中に急きょタウンホール・ミーティングが開かれ、激しいやり取りがあったものの、Raynerらは草案を取り下げ別の方法を模索することとなった。この草案をめぐる一件は、CEC14の自己反省的な点を反映する出来事といえるであろう。

7. 公衆理解・関与

気候工学のような萌芽的技術（emerging technology）では、今後の研究開発や実施を進めていく上で、公衆関与（public engagement）をより早い段階で促進することの必要性が指摘されている（Corner *et al.* 2012）。CEC14においても公衆理解・関与に関する分科会が複数行われた。公衆理解・関与分野の研究者によるパネル・ディスカッションでは、今後の同分野の研究の方向性についての議論が交わされ、これまでの欧米圏のみの事例を非欧米圏や先住民のような多様な主体を包含した事例に拡大することの必要性が複数指摘された。研究手法としては、Pidgeon（英国カーディフ大学）が世論調査のような定量的手法とフォーカスグループインタビューのような定性的手法を組み合わせた手法を提案した。また、分科会の参加者からは、技術に関する理解・受容は社会的文脈と切り離すことができないため、社会的・文化的な背景を考慮した研究デザインの必要性が指摘された。

環境 NGO の ETC（Erosion, Technology and Concentration）Group が市民社会のステークホルダーを集めて企画した分科会では、そもそも誰が誰の意見を聞こうとしているのか、なぜ公衆関与を実施するのかといった根本的な問いが提起された。Smolker（Biofuelwatch、バイオ燃料やバイオマス・エネルギーが生態系、食糧安全保障、気候変化、などに与える負の影響について啓発する環境団体のひとつ）は、

公衆関与において実際には市民の意見を聞く意図がないにもかかわらず意見を聞いたように偽装する「consultation-wash」の問題を指摘した。

また、別の分科会では、Bellamy（オックスフォード大学）が気候工学の技術評価に市民の意見を反映させる手法として、専門家・ステークホルダーと一般市民による2つの評価を組み合わせて比較する新しい枠組みを提示していた。

8. 結語

8.1 研究の短期的展望

CEC14の熱気ある議論からも明らかなように、気候工学への研究関心は非常に高い。とりわけドイツでは、16の大学・研究機関に関わり9の研究プロジェクトが2013年から始まっている（German Research Foundation 2013）。米国では2014年中に全米科学アカデミーの報告書が公表される予定である。2015年末にフランス・パリで開催される国連気候変動枠組条約第21回締約国会議の結果次第によっては、米国での研究が今後本格化する可能性もある。自然科学・社会科学の両面で気候工学の研究は今後ますます盛んになるだろう。

これを受けてか、米国地球物理学連合（AGU）、米国気象学会（AMS）での年次総会においても気候工学のセッションが設けられる予定である。また第2回目のCECも2017年頃に再びドイツで開催される予定である。

8.2 日本の研究と議論のあり方

わが国においても、社会科学の研究が少ないという問題はあがあるが、徐々に自然科学を中心に気候工学の研究が立ち上がり、欧米にキャッチアップしつつあるといえる。

しかし、依然として欧米と日本の差は大きいと言わざるを得ない。特に際立つのは、日本では専門家やステークホルダーの間で気候工学に関する議論が殆どないことである。CEC14では価値観の違いも含めて気候工学の研究・実施の是非について延々と議論が繰り広げられた。そこには社会学者のみならず自然科学者も積極的に関わっていた。

日本の研究者の間においても気候工学についての潜在的な意見対立は存在する（高橋ほか 2014）。また、日本は生物多様性条約と海洋投棄に関するロンドン条約・議定書の締約国であり、既に萌芽的な国際ガバナンスに関わっているともいえる。今後こうした場で日

本が意義ある参加をするためには、専門家やステークホルダー同士での議論を通じ、気候工学に関する日本としての立場を形作っていくが必要になる。気候科学や地球温暖化研究者コミュニティはその出発点として積極的に議論を行っていく重要な責務があるといえるであろう。

謝 辞

本研究活動の一部は、環境省の環境研究総合推進費【S-10】（杉山・森山担当分）、同推進費【課題番号1-1406】および科学研究費補助金【基盤研究C、課題番号：25340136】（朝山担当分）、立命館大学研究推進プログラム（小杉担当分）により実施された。

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
AR5 : Fifth Assessment Report (IPCC の) 第 5 次評
価報告書
BECCS : Bioenergy with Carbon Capture and Storage
二酸化炭素回収貯留付きバイオマス・エネルギー
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
CMIP6 : Coupled Model Intercomparison Project
Phase6 第 6 期結合モデル相互比較実験
DAC : Direct Air Capture CO₂直接空気回収
DRI : Desert Research Institute 砂漠研究所 (米国)
EMW : Enhanced Mineral Weathering 鉱物の化学風化
の促進
E-PEACE : Eastern Pacific Emitted Aerosol Cloud
Experiment
GEOMAR : Research Center for Marine Geosciences
(ドイツ)
GeoMIP : Geoengineering Model Intercomparison Proj-
ect 気候工学モデル相互比較実験
GGR : Greenhouse Gas Removal 温室効果ガス除去
IASS : Institute for Advanced Sustainability Studies
(ドイツ)
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
気候変動に関する政府間パネル
MCB : Marine Cloud Brightening 海洋上の雲の白色化
MIROC-ESM : Model for Interdisciplinary Research on
Climate-based Earth System Model
MPI-M : Max Planck Institute for Meteorology マッ

クス・プランク気象研究所 (ドイツ)

RCP : Representative Concentration Pathway 代表的
濃度経路

RM : Radiation Management 放射管理

SAI : Stratospheric Aerosol Injection 成層圏エアロゾ
ル注入

SPICE : Stratospheric Particle Injection for Climate
Engineering

SRM : Solar Radiation Management 太陽放射管理

UCL : University College London (英国)

参 考 文 献

- Barrett, S. *et al.*, 2014: Climate engineering reconsid-
ered. *Nature Clim. Change*, 4, 527-529.
Boucher, O. and G. A. Folberth, 2010: New directions:
Atmospheric methane removal as a way to mitigate
climate change? *Atmos. Environ.*, 44, 3343-3345.
Boucher, O., P. M. Forster, N. Gruber, M. Ha-Duong, M.
G. Lawrence, T. M. Lenton, A. Maas and N. E. Vaugh-
an, 2014: Rethinking climate engineering categoriza-
tion in the context of climate change mitigation and
adaptation. *WIREs Clim. Change*, 5, 23-35.
Corner, A., N. Pidgeon and K. Parkhill, 2012: Percep-
tions of geoengineering: public attitudes, stakeholder
perspectives, and the challenge of “upstream”
engagement. *WIREs Clim. Change*, 3, 451-466.
Crutzen, P. J., 2006: Albedo enhancement by strato-
spheric sulfur injections: A contribution to resolve a
policy dilemma? *Clim. Change*, 77, 211-219.
German Research Foundation, 2013: Research to evalu-
ate climate engineering: Risks, challenges, opportu-
nities?
[http://www.spp-climate-engineering.de/focus-pro-
gram.html?file=tl_files/ce-projekt/media/download
_PDFs/spp_folder_e_web.pdf](http://www.spp-climate-engineering.de/focus-program.html?file=tl_files/ce-projekt/media/download_PDFs/spp_folder_e_web.pdf) (2014.9.18閲覧).
IPCC, 2013: Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In:
Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
Contribution of Working Group I to the Fifth Assess-
ment Report of the Intergovernmental Panel on Cli-
mate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner,
M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.
Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge
University Press, Cambridge, United Kingdom and
New York, NY, USA.
Keith, D., 2013: A Case for Climate Engineering. A
Boston Review Book, MIT Press, Cambridge, MA,
USA, 194pp.
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.
- Kravitz, B. *et al.*, 2013: Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 8320-8332.
- 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.
- McClellan, J., D. W. Keith and J. Apt, 2012: Cost analysis of stratospheric albedo modification delivery systems. *Environ. Res. Lett.*, 7, 034019, doi:10.1088/1748-9326/7/3/034019.
- Meehl, G. A., R. Moss, K. E. Taylor, V. Eyring, R. J. Stouffer, S. Bony and B. Stevens, 2014: Climate model intercomparisons: Preparing for the next phase. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 95, 77-78.
- Mitchell, D. L. and W. Finnegan, 2009: Modification of cirrus clouds to reduce global warming. *Environ. Res. Lett.*, 4, 045102, doi:10.1088/1748-9326/4/4/045102.
- Mitchell, D. and T. Storelvmo, 2014: Session description on "Human Alternation of Climate: Engineering, Ethics, and Politics". http://www.ce-conference.org/sites/default/files/wysiwyg/files/ams_2015_mtg_ce_session_announcement_rev.pdf (2014.9.18閲覧).
- Moss, R. H. *et al.*, 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.
- Rayner, S., C. Heyward, T. Kruger, N. Pidgeon, C. Redgwell and J. Savulescu, 2013: The Oxford Principles. *Clim. Change*, 121, 499-512.
- 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.
- Royal Society, 2009: Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty. Royal Society, London, 82pp.
- Russell, L. M. *et al.*, 2013: Eastern Pacific Emitted Aerosol Cloud Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 709-729.
- 杉山昌広, 2011: 気候工学入門—新たな温暖化対策ジオエンジニアリング—. 日刊工業新聞社, 198pp.
- 杉山昌広, 西岡 純, 藤原正智, 2011: 気候工学（ジオエンジニアリング）. *天気*, 58, 577-598.
- 高橋優人, 広瀬章博, 川村亮真, 金子遥洵, 杉山昌広, 2014: 気候工学（ジオエンジニアリング）のテクノロジー・アセスメントに資する専門家への聞き取り調査とその分析. 研究 技術 計画, (採択済).
- Tilmes, S., M. J. Mills, U. Niemeier, H. Schmidt, A. Robock, B. Kravitz, J.-F. Lamarque, G. Pitari and J. M. English, 2014: A new Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) experiment designed for climate and chemistry models. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 7, 5447-5464.
- 渡部雅浩, 2014: ハイエイタス. *天気*, 61, 277-279.