

Title	気候工学：研究の国際動向とステークホルダーとの協働によるわが国の研究アジェンダ創出の試み
Author(s)	杉山, 昌広; 石井, 敦; 小杉, 隆信; 朝山, 慎一郎; 江守, 正多
Citation	年次学術大会講演要旨集, 30: 590-593
Issue Date	2015-10-10
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/13347
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般講演要旨

2 D 2 1

気候工学：研究の国際動向とステークホルダーとの協働による わが国の研究アジェンダ創出の試み

○杉山昌広（東京大学）、石井敦（東北大学）、小杉隆信（立命館大学）、
朝山慎一郎、江守正多（国立環境研究所）

はじめに

気候工学（ジオエンジニアリング）（英語では geoengineering または climate engineering）は人工的に気候システムに介入して地球温暖化の影響を抑える新たな対策である（杉山ほか 2011）。気候工学は様々な手法の総称で、入射太陽光を反射・散乱して気候システムに入るエネルギーを減少させる太陽放射管理（Solar Radiation Management, SRM）と、大気から二酸化炭素（CO₂）を取り除く CO₂除去（Carbon Dioxide Removal, CDR）に大別される（Royal Society 2009; National Research Council 2015）。気候工学の中でも最も注目されているのが SRM の一種である成層圏エアロゾル注入（Stratospheric Aerosol Injection, SAI）である。大規模火山噴火後の冷却を真似るメカニズムを用い、人工的に粒子状物質を成層圏に散布して地球全体の反射率を高める方法である。

今年の 11 月～12 月にフランス・パリで開催される国連気候変動会議、気候変動に関する枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）に向けて国際交渉が加速しているが、各国から提出されている温室効果ガス削減目標を積み上げて、地球温暖化対策として十分なものにならないという認識は広く共有されている（IEA 2015）。こうした地球温暖化対策の遅れに危機を覚えている一部の科学者を中心に気候工学の潜在的な重要性が喚起され、これに呼応して推進・批判の双方の観点から議論が続いている。このため、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第 5 次評価報告書でも全ての作業部会の報告書および統合評価報告書で扱われており、生物多様性条約（CBD）でも情報のとりまとめが進められている。

国際的に関心が高まる一方、日本での取り組みは欧米のそれに比べて十分ではない。批判的な立場に立っても推進の立場に立ったとしても、学術的研究も公共の場での議論も十分とは言いがたい。

気候工学は仮に実施されると全世界の気候を変化させ、全ての国に影響の及ぶ技術である。技術的にはローテクなものが多く、実施の際の技術的困難は限定的と考えられているが、実際に進むとすれば一か国ではできないだろう。したがって仮に日本が気候工学について反対の立場をとることになっても推進の立場になっても、国際的なガバナンスの場での発言や議論への参画はもちろんのこと、IPCC のようなアセスメントや長期的には技術の研究・開発への要請が来る可能性も否定できない。日本でも人文・社会科学や自然科学分野で研究を進め、一定の知見を蓄積していくが必要であろう。

気候工学は議論の絶えない技術である。したがって研究を進めるにあたっては、一般市民やステークホルダーなど多様な主体の考えや意見を取り入れ、研究開発の方向性を定めていくことが望ましい。環境科学や sustainability science では分野横断型であると同時に市民・ステークホルダーの関与を含む研究を transdisciplinary 型研究と呼ぶが、まさに気候工学の研究を進めるにあたっては、そうしたアプローチが望まれる。しかも技術開発の経路依存性を踏まえると、こうしたアプローチは技術が未熟で開発途上にある現時点から採用すべきである。まさに責任のあるイノベーション（responsible innovation）が気候工学に求められているのである（Stilgoe 2015）。

本報告では米国、英国、ドイツや中国などの各国の研究動向をまとめ、その傾向を明らかにし、日本の今後の研究に関して示唆を得る。その後、日本の研究課題を考えるためのステークホルダーとの協働ワークショップの試みについて述べる。

主要国の研究動向

各国の研究動向については、2011 年までの情報については杉山（2012）にまとめられている。今回の報告はそのアップデートになる。

文献調査や専門家へのインタビューをもとに（1）米国、（2）英国、（3）ドイツ、（4）中国の研

究動向をまとめた。また日本の現状についても簡単に記述した。

(1) 米国

気候工学の研究を世界的にリードしてきた二人はどちらも米国人である。David Keith 博士は Harvard 大学の教授であり、もう一人の Ken Caldeira 博士は Stanford 大学/Carnegie Institution for Science の教授である。また最近では地球温暖化予測に用いられるような気候モデルや地球システム・モデルを活用して気候工学の効果や副作用を検証するための国際プロジェクト、Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP)を推進しているニュージャージー州立大学 Rutgers University の Alan Robock 教授も米国人である。古くから米国は気候工学研究の中心である。

しかし、こうした研究は個人ベースの研究であって、政府機関が優先的に研究資金を割り当てる戦略的研究ではなかった。一部の科学者の間では戦略的研究を開始すべきという意見は以前からある (Caldeira and Keith 2010)。最近では全米科学アカデミーが包括的な報告書をまとめ、研究の重要性を訴えている (NRC 2015)。この報告書は衛星観測の強化といった従来型の気候科学にも気候工学研究のどちらにも利用可能できる研究プロジェクトのみならず、気候工学の屋外実験の重要性（と並行するガバナンス枠組みの構築）を示唆している。

気候工学は、温暖化対策の選択肢の中では極端なものであり、世界中が COP21 に向けて地球温暖化問題に取り組んでいる今日、米国がすぐに気候工学の戦略研究を打ち出す可能性は極めて低いといえよう。ただ、多くの専門家が COP21 後に新たな動きが出てくることは否定していない。

(2) 英国

英国は科学アカデミーである王立協会が発表した影響力のある報告書 (Royal Society 2009) 以来、気候工学について戦略的に研究を進めてきた。研究といっても単純な推進ではなく、人文・社会科学と自然科学を組み合わせた研究が打ち出されている。

昨年 2014 年まで Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE), Integrated Assessment of Geoengineering Proposals (IAGP), Climate Geoengineering Governance (CGG) という 3 つの大型プロジェクトが走っていた。どれも 100 万ポンド台 (=~2 億円) のオーダーの研究資金である。

中でも大きな論議を巻き起こしたのが SPICE プロジェクトである。SPICE プロジェクトは気候モデル研究に加え、成層圏にエアロゾルを注入する気球とパイプ技術の実証実験を計画していた。実施の際は高度 20km まで硫酸などを運び散布するが、実証実験では高度 1km まで無害な水を持ち上げ散布することが計画されていた。SPICE は IAGP と共同で一般市民を対象にワークショップを実施したが、一般市民は透明性の確保などの条件付きで研究推進を承認する態度であった。一方、一部のステークホルダーからは強固な反対意見が表明されていた。議論が紛糾しはじめたところ、SPICE に関わっていた研究者の特許について、利益相反の申告がなかったことが明らかになった。それを受けて、実証実験については中止の判断がなされた (Cressey 2012)。

SPICE では研究開発の段階ごとにプロジェクトの枠組みとしてステージゲート（関門が）設けられていた。結果として様々な議論を喚起したプロジェクトだったが、ステージゲートは機能した例といえる。なお、SPICE は複数の要素から構成されており、実証実験以外の気候モデル研究などは無事終了した。

(3) 独国

米国・英国がどちらかといえば（厳しい批判もありながら平均的にみると）推進に傾きがちなところ、原子力同様、気候工学についても比較的否定的な立場をとっているのが独国である (Huttunen et al. 2014)。ドイツはこうした立場に自覚的なのか、早くからテクノロジー・アセスメントを進め (TAB 2014)、今後の国際規制策定の際のドイツの役割も踏まえて議論が始まっている。

ドイツの大型・戦略的気候工学研究プロジェクトは SPP1689 (Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities) である。気候学的、生態学的、社会的リスクと影響の調査、政治的、法的、倫理的側面を含む評価、また科学者と市民の意識の評価を行うために、9 つのサブプロジェクト（および統括プロジェクトを）が行われ、現在まとめに入っている。気候モデル研究のみならず倫理や社会科学も多く含まれる。2016 年からは第 2 フェーズが開始すること予定になっている。

ドイツは研究のみならずフォーラム形成にも熱心である。2014 年夏には気候工学に特化した初の国際会議、Climate Engineering Conference 2014 (CEC14) を開催している (杉山ほか 2015)。この会議は

分野横断型・参加型である transdisciplinary 会議を標榜していた。また 2015 年の夏は専門家により対象を絞った Climate Engineering Research: Current State and Future Perspectives を開催している。

なお、欧州連合 (EU) としての研究プロジェクト, European Trans-disciplinary Assessment of Climate Engineering (EuTRACE) も行われていたが、これはドイツの研究機関 IASS が主幹事として研究を進めていた。

(4) 中国

気候工学の研究は欧米でほとんどが占められているが、こうした中、2015 年夏から中国にて気候工学の研究プロジェクトが進んでいる。北京師範大学の John Moore 教授が代表者であり、気候モデル研究に加えて中国社会科学院の人も参加するガバナンスのサブプロジェクトもある。

プロジェクトの自然科学の構成を見る限り、このプロジェクトは特に実施へバイアスがかかっているわけではない。

(5) 日本

日本でもいくつか萌芽的な研究は見られる。気候モデル研究では日本の研究グループも GeoMIP へ参加している。また現在進行中の研究としては様々な機関でアンケート調査、フォーカス・グループ・インタビュー、コスト評価、倫理的分析などが行われている。

しかしながら国際貢献や国際的プレゼンスを考えると課題は大きい。例えば Royal Society (2009), NRC (2015) に引用された文献で日本人が第一著者のものは皆無であった。

日本における研究課題創出のためのステークホルダーとの協働ワークショップ

気候工学については上流からの関与、また責任のあるイノベーションから叫ばれている。また分野横断型研究、参加型研究も活発になってきている。しかし、既存の研究プロジェクトを振り返ると、研究課題自体は研究者が考案し、あとでステークホルダーが参加するような形態が多い。そこで、今後の日本の研究課題を考える際に、ステークホルダーとの協働を通じて行うようにした。

手法としては専門家とステークホルダーが協働して研究課題案 research questions を創出するワークショップ (Sutherland et al. 2006, 2011, 2012, 2013 など) についてレビューをし、そこで用いられている手法を採用することとした。もともとは evidence-based policy の文脈で開発された手法であるが、われわれの目的にも十分応用できる可能性が明らかになった。

ワークショップは本年 7 月 26 日に東京大学本郷キャンパスで実施した。(Future Earth Strategic Research Agenda に関する取り組みを除けば) 本邦初の取り組みであるため、事前に考案者であるケンブリッジ大学の William Sutherland 教授に 2 回電話会議を行い、方法論についてアドバイスを受けた。また 5 月 12 日に試行を行った。

7 月 26 日のワークショップには、20 名弱の専門家、20 名弱のステークホルダー (政府関係者、産業界、環境 NGO、メディア、他) を招待した。参画者・協力者のネットワークを駆使し、広義の気候ガバナンスに関連する国内の主要なステークホルダーは殆どカバーできたと思われる。この参加者に研究課題案のブレインストーミングを依頼し、約 600 弱を集めることができた。事前整理を経て、7 月 26 日のワークショップで 40 個の研究課題まで絞り込んだ。絞り込みの過程では似通った研究課題の統合、投票による選別を行った。

ワークショップの成果として得られた 40 の研究課題は大まかに (1) 自然科学や影響に関するもの、(2) 工学や経済性に関するもの、(3) ガバナンスに関するもの、(4) 倫理や公衆理解・認知に関するものに分類される。サザランド方式ワークショップの特色の一つは、創出された研究課題一覧について論文として取りまとめる点であるが、論文は現在執筆中である。

参考文献

- Caldeira, K., & Keith, D. W. (2010). The Need for Climate Engineering Research. *Issues in Science and Technology*, Fall 2010, 57-62.
- Cressey, D. (2012). "Geoengineering experiment cancelled amid patent row." *Nature*. May 12, 2012. doi:10.1038/nature.2012.10645
- Huttunen, S., Skyten, E., & Hilden, M. (2014). Emerging policy perspectives on geoengineering:

- An international comparison. *The Anthropocene Review*, **2**(1), 14-32. doi:10.1177/2053019614557958
- IEA (International Energy Agency). (2015). *Energy and Climate Change. World Energy Outlook Special Report*. Paris, France: OECD/IEA.
- NRC (National Research Council). (2015). *Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth*. The National Academies Press.
- Office of Technology Assessment at the German Bundestag (TAB). (2014). Climate Engineering. TAB-FOKUS NO. 3 REGARDING REPORT NO. 159. <https://www.tab-beim-bundestag.de/en/pdf/publications/tab-fokus/TAB-Fokus-003.pdf> (accessed August 29, 2015)
- Royal Society. (2009). *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*. London: Royal Society.
- Stilgoe, J. (2015). *Experiment Earth: Responsible Innovation in Geoengineering*. Routledge.
- 杉山昌広. (2011). 気候工学 (ジオエンジニアリング). 天気 [日本気象学会機関紙], **58**,
- 杉山昌広. (2012). 気候工学 (ジオエンジニアリング) の研究開発とガバナンスに関する海外動向の分析. 電力中央研究所報告 Y11008.
- 杉山昌広・朝山慎一郎・岩崎杉紀・小杉隆信・原口正彦・森山亮 (2015) 気候工学 (ジオエンジニアリング) 国際会議. 天気 [日本気象学会機関誌], **62**, 35-41.
- Sutherland, W. J., and coauthors (2006). The identification of 100 ecological questions of high policy relevance in the UK. *Journal of Applied Ecology*, **43**(4), 617-627. doi:10.1111/j.1365-2664.2006.01188.x
- Sutherland, W. J., Fleishman, E., Mascia, M. B., Pretty, J., & Rudd, M. a. (2011). Methods for collaboratively identifying research priorities and emerging issues in science and policy. *Methods in Ecology and Evolution*, **2**(3), 238-247. doi:10.1111/j.2041-210X.2010.00083.x
- Sutherland, W. J., and coauthors. (2012). A collaboratively-derived science-policy research agenda. *PLoS ONE*, **7**(3), 3-7. doi:10.1371/journal.pone.0031824
- Sutherland, W. J., and coauthors. (2013). 100 Questions: identifying research priorities for poverty prevention and reduction. *Journal of Poverty and Social Justice*, **21**(3), 189-205.

謝辞

本研究は (国研) 科学技術振興機構フューチャー・アース構想の推進による研究成果の一部である。