

Title	気候工学の超学際シナリオ研究の意義と課題
Author(s)	杉山, 昌広; 朝山, 慎一郎; 小杉, 隆信; 石井, 敦
Citation	年次学術大会講演要旨集, 32: 651-655
Issue Date	2017-10-28
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/14894">http://hdl.handle.net/10119/14894</a>
Rights	本著作物は研究・イノベーション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 Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

## 気候工学の超学際シナリオ研究の意義と課題

○杉山昌広（東京大学），朝山慎一郎（早稲田大学），小杉隆信（立命館大学），石井敦（東北大学）

### 1. 気候工学とパリ協定

2015年12月に合意され2016年11月に発効したパリ協定によって、国際社会の地球温暖化対策は新たな段階に入った。パリ協定では長期的に全球平均気温上昇を2度より十分低い水準に抑え、1.5度に抑える努力をすることが盛り込まれた。気候変動対策は待ったなしの状態であるが、パリ協定の下で各国が提出している自国の気候変動対策(Nationally Determined Contributions)を積み上げると、2030年の温室効果ガス排出量は現状から減少するどころか若干増加傾向にあり、またその延長線上では2100年の気温上昇は2.9-3.4度だと推測されている(UNEP, 2016)。現状の努力水準と長期目標からの乖離が激しいのである。

こうした状況を見るに、劇薬とも捉えられる新たな地球温暖化対策に関心が高まってきている。気候工学(またはジオエンジニアリング)(climate engineering / geoengineering)は人工的に大規模に地球システムに介入して地球温暖化対策とするものである。大まかに分類すれば、大気から二酸化炭素を回収する二酸化炭素除去(carbon dioxide removal, CDR)と、太陽からの入射エネルギーを減らして地球の温度上昇を抑える太陽放射管理(solar radiation management, SRM)がある。気候工学は様々な研究によって一定の効果が確かめられているが、副作用や政治的・倫理的課題など様々な問題が提示されている。(なお著者らは推進的な立場を取らず、中立的な観点から研究を進めている。)

気候工学の中でも特に関心と呼んでいるのが太陽放射管理、中でも成層圏エアロゾル注入(stratospheric aerosol injection, SAI)である。SAIは比較的实施コストが低く、即効性があるが、一方でガバナンスや倫理的側面など、政治的・社会的な問題は枚挙にいとまがない(以下、本稿では太陽放射管理に限って議論し、気候工学と太陽放射管理を区別せずに使う)。表1に気候工学の便益とリスクをまとめる。

気候工学は科学的な裏付けがあるものの研究開発の段階としては上流の段階にあり、萌芽技術の一つとして考えられる。世界経済フォーラムの2017年のグローバル・リスク・レポートによれば、気候工学は人工知能やゲノム編集等と同様リスクが高い技術と位置づけられている(World Economic Forum, 2017)。ただ他の萌芽技術に比べるとローテクなのが特徴である。

### 2. 責任あるイノベーションと気候工学

過去の科学技術関連の問題の教訓を踏まえて、欧米では先端技術の研究開発の上流段階から一般市民やステークホルダーの希望・懸念を反映して技術開発を方向付けていくことが望ましいとされている。こうした考えを責任あるイノベーション(responsible innovation)という言葉でまとめることができる(邦文の解説として平川, 2014)。Stilgoe et al. (2013)は責任あるイノベーションを“taking care of the future through collective stewardship of science and innovation in the present”と定義する。欧州連合の2014年から2020年の研究開発枠組み Horizon 2020においても政策の支柱の一つとして盛り込まれている(Owen et al., 2012)。

科学と社会の関係については、最近では遺伝子組み換え食品などについて多大な議論があった。日本でも311に以降顕在化した、社会における原子力発電技術の役割は多くのところで議論されている。しかし、こうした技術はすでに開発が完了しており、技術とそれを取り巻く社会的制度・アクターは強固にできあがっている。そこには明確な利害があり、技術のあり方を変えることは直接的に政治に繋がっていく。

上流段階の技術はアクターも利害も固定化されておらず、技術自体様々な可能性を有する。上流段階でも技術を方向付けることは政治的な行為であることは間違いないが、利害関係は弱く、広く討論を行うことで望ましい技術のあり方を模索することは可能かもしれない。

表 1. 成層圏エアロゾル注入のリスクと便益 (Robock et al. 2009 の表 1 の暫定訳に加筆).

便益	リスク	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地球の冷却</li> <li>2. 氷床融解の阻止</li> <li>3. 海面上昇の阻止</li> <li>4. 植物生産量の増進</li> <li>5. 効果に即効性がある</li> <li>6. CO<sub>2</sub> 吸収源 (森林など) の増大</li> <li>7. 直接の実施費用が安価で済む可能性が非常に大きい</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. アフリカとアジアにおける早魃の増加</li> <li>2. オゾン層破壊の進行</li> <li>3. 青い空が見られなくなる</li> <li>4. 太陽熱・集光型太陽光発電量の減少</li> <li>5. 海洋酸性化の進行は止められない</li> <li>6. 実施による直接的な環境影響 CO<sub>2</sub> 排出の増大; 大気中の酸性化物質を増大させ、大気汚染被害が拡大する恐れがある。</li> <li>7. 止めた場合に急激に温暖化してしまう 終端問題と呼ばれる問題であり、いったん SAI を実施した場合、それを止めてしまうと、急激な温暖化が起きることを指す。</li> <li>8. 人為的ミスの危険性</li> <li>9. 予知できない悪影響</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>10. 商業的コントロールにさらされる危険性</li> <li>11. 軍事技術に転用される危険性</li> <li>12. 既存の国際法への抵触 「環境変更技術の軍事的使用またはその他の敵対的使用の禁止に関する条約」などに抵触する可能性がある。</li> <li>13. 最適温度に関する国際合意は得られるのか</li> <li>14. モラルハザード SAI の実現可能性や実際に実施されることによって、根本的な解決法である温室効果ガスの削減意欲が削がれることをいう。</li> <li>15. 地上からの天体観測ができなくなる</li> <li>16. そもそも人間の都合で地球を改変することが倫理的にどの程度まで許されるのか</li> </ol>

もちろん将来の技術は非常に予測が難しいため、社会的に技術をコントロールすることは、コリングリッジのジレンマ (技術を社会的に制御できる早い段階では技術自体の影響が分からず、技術の影響が顕在化するときには技術が固定化されていて変更が難しい) を避けることはできない。したがって、責任あるイノベーションは理念としては望ましいものの、実践上の多くの課題がある。

### 3. 気候工学のアセスメントとシナリオ研究

具体的に気候工学の社会選択を考えるには、社会の選択とそれに伴う便益リスクの総合的な評価、アセスメントが必要になる。地球温暖化問題では長年にわたって (多くの場合定量的なモデルを用いた) シナリオ研究がアセスメントの際に中心的な役割を果たしてきた (Moss et al. 2010)。

表 1 にまとめた便益とリスクの多くもシナリオ研究によって分析されてきた。特に有用な知見をもたらしたのが気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) とも関連し進められた気候モデル・地球システムモデルの国際モデル研究プロジェクト, GeoMIP (Geoengineering Model Intercomparison Project) である (Kravitz et al., 2013)。世界から多くの研究機関が参加し、理想化された設定に基づき、気候工学を実施したときの気候の変化、大気・海洋の変化などをモデルによって計算した。一連の研究によって以下のことなどが分かった。

1. 気候工学は地球全体の平均気温の上昇を抑えることは可能であり、熱波や豪雨などの発生頻度も抑制できる。
2. しかしながら地球温暖化を完全に相殺することはできず、降水量の地域分布が変わったりする。
3. 太陽放射管理は二酸化炭素の濃度をそもそも減らさないため、二酸化炭素の直接的な影響 (例えば海洋酸性化) などを止めることはできない。
4. 太陽放射管理を突然停止した場合は、それまで相殺されていた温室効果が突如現れることになり、気温が非常に速いスピードで上昇する (終端問題)。

なお、2021 年から 2022 年にかけて報告される IPCC 第 6 次評価報告書に向けて、新たな GeoMIP プロジェクトが現在進行中である。

しかしながら、GeoMIP は自然科学的な目的が重要視され、その知見は必ずしも直接的に政策論議に利用できない。後述するように GeoMIP では終端問題の影響が過大評価されている可能性がある。

そもそも気候工学の社会選択とはどのようなものだろうか? 一つの試案として 4 段階に分けて考える。

- 1 段階: 気候リスク管理と持続可能な開発

- 気候リスクとその他の持続可能な開発目標とのバランス
- 2段階：気候工学の選択肢
  - 成層圏エアロゾル注入なのか、海洋上の雲の白色化なのか、その組み合わせか
- 3段階：気候工学の利用方法
  - 大規模に使うか、小規模に使うか
  - 緊急時のみ使うのか、徐々に使うのか
  - 短期的に使うのか（温度上昇のスピード抑制に使う）
  - 長期的に使うのか（温度自体の長期に渡る抑制に使うのか）
- 4段階：詳細な技術的選択
  - 散布物質として硫酸塩エアロゾルを使うのか、酸化チタンなどを使うのか

GeoMIPは気候モデルにおけるS/N比(signal-to-noise ratio)を上げるために大きな放射強制力を利用した。この場合、気候工学自体の便益（温度低下）も大きくなるが、副作用も大きくなる。終端問題の温度上昇も単純に比例して大きくなると考えられる(Sugiyama et al., 2017a)。

しかし、社会選択の第1段階を見ると、各国政府はパリ協定に合意し、その取り組みは不十分とはいえず対策は行われている。また低炭素技術のコスト低下は目覚ましく、太陽光発電など今までの温暖化対策シナリオ研究を超えるスピードで社会的に普及し始めている技術もある(Creutzig et al., 2017)。したがって今までのGeoMIPのように気温上昇を大幅に抑えるといったシナリオは現実性が薄れつつある。

実際、いくつかの研究では気温低下を限定的に行うことで気候工学の副作用を抑えるといったシナリオも提案されている(Kosugi, 2013; Keith & MacMartin, 2015; Arino et al., 2016)。

#### 4. 超学際シナリオ研究の必要性

地球温暖化問題においては過去同様、今後もシナリオ研究の重要性が低下することはないだろう。そしてこれは気候工学にも当てはまると考えられる。違ってシナリオ研究はより社会選択を助ける方向に拡張されていくべきであろう。

一つの可能性は超学際的なシナリオ研究である。持続可能性の科学(sustainability science)と科学技術社会論(science, technology, and society, STS)の交点において、最近、超学際研究(transdisciplinary research)の必要性が叫ばれている。超学際研究は、学術研究自体が学際的に行われ、これと同時並行で、一般市民やステークホルダーの関心や懸念・知識を研究に取り込んでいくものと理解できる(Lang et al., 2012)。シナリオ研究を超学際的に行うことでより多くの分野の知見を反映し、同時に一般市民やステークホルダーの意見を取り込むことができると考えられる。気候工学は科学的な不確実性が高く社会への影響も大きいため、超学際研究が求められる(Sugiyama et al., 2017b)。

前節で限定的に気候工学を用いるシナリオについて言及したが、この導入方法を適用すれば終端問題のリスクが抑えられることは確かであるが、今までと違うバナンスの問題が出てくると考えられる。そもそも大規模技術を導入すると既得権益集団が生まれ、拡大を一般的に目指すものである。大規模技術である気候工学を抑制的に実施することはそもそも可能なのであろうか。もし可能であれば、それはどのようなガバナンスの枠組みに基づくのであろうか。こうした問いに対してはシナリオ研究とガバナンス研究を同時並行で行うことで、以前の研究に比べてより本質的な知見を得ることができると考えられる。

またシナリオ研究と一般市民へのアンケート調査やステークホルダーとの対話を組み合わせることで、技術の社会選択とそれに伴う影響評価が統合的に分析できると考えられる。以前の一般市民に対するアンケート調査やインタビュー調査では、多くの回答者が温室効果ガス削減策(緩和策)が最重要であると指摘し気候工学が緩和策の動機を削いでしまうのではないかという懸念が示されている。しかし、パリ協定の下で温暖化対策が進み、緊急時対応として限定的に導入されると言う場合は、一般市民はどのように反応するであろうか。倫理的な観点から強く反対するかもしれないし、緊急時対応として許容するかもしれない。いずれにせよ、実際の社会の進展に即した社会調査は僅少である(例外として政策論議が盛んに行われている自然環境での屋外実験に関するフォーカス・グループ・インタビュー(Asayama et al., 2017)や同じく屋外実験に関連した行われた研究(Pidgeon et al., 2013)などがある)。

参加型シナリオ研究は地域の環境計画などの文脈で既に多数行われている(Kowalski et al., 2009; Voinov et al., 2016)。地球規模の課題である気候工学は、気候変動の影響を最も受けやすい発展途上

国や貧しい人々も対話すべきであり、さらに多くの異なる文化や価値観を前提に進めなければならない。学術的に非常に難しいことは勿論であるが、気候工学の責任あるイノベーションを進めるためには、こうした研究の拡充は不可欠であろう。

## 5. 参考文献

- Arino, Y., Akimoto, K., Sano, F., Homma, T., Oda, J., & Tomoda, T. (2016). Estimating option values of solar radiation management assuming that climate sensitivity is uncertain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(21), 5886-5891. <http://doi.org/10.1073/pnas.1520795113>
- Creutzig, F., Agoston, P., Goldschmidt, J. C., Luderer, G., Nemet, G., & Pietzcker, R. C. (2017). The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. *Nature Energy*, 2(9), 17140. <http://doi.org/10.1038/nenergy.2017.140>
- Keith, D. W., & MacMartin, D. G. (2015). A temporary, moderate and responsive scenario for solar geoengineering. *Nature Climate Change*, 5(3), 201-206. <http://doi.org/10.1038/nclimate2493>
- Kosugi, T. (2013). Fail-safe solar radiation management geoengineering. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18, 1141-1166. <http://doi.org/10.1007/s11027-012-9414-2>
- Kowalski, K., Stagl, S., Madlener, R., & Omann, I. (2009). Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis. *European Journal of Operational Research*, 197(3), 1063-1074. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.049>
- Kravitz, B., Robock, A., Forster, P. M., Haywood, J. M., Lawrence, M. G., & Schmidt, H. (2013). An overview of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(23), 13,103-13,107. <http://doi.org/10.1002/2013JD020569>
- Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., ... Thomas, C. J. (2012). Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability Science*, 7(S1), 25-43. <http://doi.org/10.1007/s11625-011-0149-x>
- Moss, R. H., et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-56. <http://doi.org/10.1038/nature08823>
- Owen, R., Macnaghten, P., & Stilgoe, J. (2012). Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. *Science and Public Policy*, 39(6), 751-760.
- Pidgeon, N., Parkhill, K., Corner, A., & Vaughan, N. (2013). Deliberating stratospheric aerosols for climate geoengineering and the SPICE project. *Nature Climate Change*, 3(5), 451-457. <http://doi.org/10.1038/nclimate1807>
- Robock, A., Marquardt, A., Kravitz, B., & Stenchikov, G. (2009). Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 36(19), L19703. <http://doi.org/10.1029/2009GL039209>
- Stilgoe, J., Owen, R., & Macnaghten, P. (2013). Developing a framework for responsible innovation. *Research Policy*, 42(9), 1568-1580. <http://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>
- Sugiyama, M., Arino, Y., Kosugi, T., Kurosawa, A., & Watanabe, S. (2017a). Next steps in geoengineering scenario research: limited deployment scenarios and beyond. *Climate Policy*, 1-9. <http://doi.org/10.1080/14693062.2017.1323721>
- Sugiyama, M., Asayama, S., Kosugi, T., Ishii, A., Emori, S., Adachi, J., ... Yoshizawa, G. (2017b). Transdisciplinary co-design of scientific research agendas: 40 research questions for socially relevant climate engineering research. *Sustainability Science*, 12(1), 31-44. <http://doi.org/10.1007/s11625-016-0376-2>

- United Nations Environment Programme (2016). The Emissions Gap Report 2016. UNEP: Nairobi, Kenya, 61 pp. [http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/10016/emission\\_gap\\_report\\_2016.pdf](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/10016/emission_gap_report_2016.pdf)
- Voinov, A., Kolagani, N., McCall, M. K., Glynn, P. D., Kragt, M. E., Ostermann, F. O., ... Ramu, P. (2016). Modelling with stakeholders - Next generation. *Environmental Modelling & Software*, 77, 196-220. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.016>
- World Economic Forum. (2017). *The Global Risks Report 2017*. Geneva. Retrieved from [http://www3.weforum.org/docs/GRR17\\_Report\\_web.pdf](http://www3.weforum.org/docs/GRR17_Report_web.pdf)
- 平川秀幸 (2014). 科学的助言のパラダイム・シフト : 責任あるイノベーション, ポスト・ノーマルサイエンス, エコシステム. *科学*, 84, 195-201, <http://ci.nii.ac.jp/naid/40019949077>