

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*

杉山 昌広^{*1}・河宮 未知生^{*2}

1. はじめに

2011年2月10日朝から12日昼過ぎに、米国ニュー・ジャージー州のラトガーズ大学で気候工学モデル相互比較実験 GeoMIP (Geoengineering Model Inter-comparison Project) の第1回ワークショップが開かれた。主催者はラトガーズ大学の Alan Robock と英国気象局 Hadley Centre の Olivier Boucher, またラトガーズ大学の大学院生, Ben Kravitz であった。ワークショップは英国在米大使館の資金的援助を受けていた。日本からの参加者は本稿の筆者である杉山と河宮の2名であった。

気候工学 (ジオエンジニアリング) は地球温暖化対策として地球を人工的に冷やす方法である。今までの温暖化対策だけでは地球温暖化が人類社会に甚大な影響を与える危険な水準に達するリスクがあるため、新たな対策が必要という理由で注目を浴びている。IPCC AR5でもレビューの対象となっている。

GeoMIP は気候工学の中でも成層圏へのエアロゾル注入に着目している。ワークショップの結果は Robock らによって米国地球物理学連合 (AGU) の機関紙 EOS で報告される予定だが、気候工学についての文献はわが国では限られるため、本稿では日本語で GeoMIP の最初のワークショップについて報告する。

なお、気候工学については様々な社会的な問題が懸念されている。温暖化対策とはいえ自然を改変するこ

とは許されるかという倫理的な問題や、実施コストが低い手法を国際社会の了承なしに単独国家が行うという国際政治上の潜在的な問題もある。このため、気候工学には、適切な科学技術ガバナンスが必要である。ワークショップ参加者の中にはガバナンスの会議等にも参加している人もいるが、今回の会議は基本的に科学的な議論に焦点を合わせていた。気候工学全般の最近の動向や概観、また社会的・国際政治的な問題の導入については杉山ほか (2011) や Royal Society (2009) を参照されたい。

2. 気候工学と GeoMIP

気候工学 (ジオエンジニアリング) は太陽光の反射量を増やして気候を冷却化させる手法 (SRM) と CO₂を大気から吸収して固定する手法 (CDR) に分類される。

GeoMIP は SRM の分析を目的としており、現在は成層圏への硫酸エアロゾル注入を対象にしている (今後雲の白色化などその他の気候工学を対象にする可能性もある)。大規模火山噴火によって成層圏に注入されるエアロゾルは太陽入射光を減らすことで気温を低下させると同時に、水循環も変える。成層圏エアロゾル注入はもっとも関心が高い気候工学の手法の一つである。英国では Hadley Centre も参加する2010年から2014年まで約2億円規模 (1ポンド=130円で換算) の研究プロジェクト SPICE が動き始めており、Max Planck Institute などドイツ・ノルウェー・フランスの6機関においてもヨーロッパ科学財団の予算を受けて IMPLICC という研究プロジェクトが動いている。

気候工学は関心の高まりとは対照的に体系的な研究がなされてこなかった。気候モデルを利用した研究でも単一のモデルによる異なるシナリオを用いた数値実験が殆どである。モデルの設定条件が違うため、モデ

* GeoMIP Stratospheric Aerosol Geoengineering Workshop.

^{*1} Masahiro SUGIYAMA, (財) 電力中央研究所社会経済研究所。

^{*2} Michio KAWAMIYA, (独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域。

© 2011 日本気象学会

ル間の比較が非常に困難である。例えば気候工学によってアジア・モンスーンの降水量が変化することが指摘されているが (Robock *et al.* 2008 ; Rasch *et al.* 2008 ; Jones *et al.* 2010), 結果はモデルによって異なっている。しかしシナリオや実験設定が統一されていないため結果の堅牢性や違いの原因を理解するのが難しい。統一されたシナリオに基づいた CMIP3 のマルチモデルアンサンブルによる分析が主流になっている地球温暖化の分析と対照的である。

この状況を改善するために、GeoMIP が提案された (Kravitz *et al.* 2011)。それは CMIP5 の数値実験を対照実験として、成層圏エアロゾル注入の効果と副作用を検討するものである。提案書の著者は Kravitz, Robock, Boucher, Schmidt (MPI-M), Taylor (PCMDI), Stenchikov (KAUST), Schulz (LSCE), であり、幅広いグループが既に計画段階から関わっていることが見て取れる。気候工学は IPCC AR5 でレビューの対象となっており、GeoMIP も AR5 への貢献も視野に入れている。

実験としては第 1 表の 4 つが提案されている。2011 年 3 月現在、各国の研究機関は CMIP5 の数値実験に精力を注いでいるため、実験は簡単なものに限られており、成層圏エアロゾルを注入する代わりに太陽定数を減らす実験も 2 つ含まれている。データは PCMDI でアーカイブされる予定である。なお PCMDI の Karl Taylor は GeoMIP の提案がある前に気候工学について論文を発表しており (Bala *et al.* 2008), 以前から興味があったようである。

CMIP5 関連の計算で各国研究機関が多忙を極める

第 1 表 GeoMIP で提案されている 4 つのシナリオ。数字の順番とは違いますが、G4 より G3 の方がエアロゾル注入量の調整が必要で難しいため G4 を先に配置した。Kravitz *et al.* (2011) の Table 1 に基づく。G1 を除くシナリオでは気候工学的介入開始から 50 年後に介入を突然止めた後、20 年間さらに計算する。これは急激な放射強制力の変化の影響を検討するためである。実験の詳細は GeoMIP ホームページを参照。

	内容	CMIP5 における 対照実験番号
G1	CO ₂ 濃度を突然 4 倍増したときの放射強制力を太陽定数の減少で相殺する。	Exp. 6.3
G2	CO ₂ 年率 1 % 増加の放射強制力を太陽定数の減少で打ち消す。	Exp. 6.1
G4	RCP4.5 シナリオにおいて、2020 年から年間 5 Mt-SO ₂ の硫酸エアロゾルを下部成層圏に注入する。	Exp. 4.1
G3	RCP4.5 の放射強制力を 2020 年から硫酸エアロゾル注入で相殺し、2020 年以降の温度上昇を抑える。	Exp. 4.1

状況で提案されたのにも関わらず、ワークショップでは関心の高さが明らかになった。13 のグループが GeoMIP への参加を決定、もしくは参加への興味を示している (第 2 表) (ただ 1 つは GCM ではなく EMIC である)。また詳しくは後述するが SPARC の CCMVal も何らかの形で GeoMIP に貢献する予定である。

今後の予定を第 3 表に示す。IPCC AR5 へ成果が反映されるように、来年 1 月までにはすべての計算に目処をつけることになっている。結果は Journal of Geophysical Research の特集号で発表することが検討されている。気温の変化などの概要に加え、気候システムの「速い応答と遅い応答 (fast and slow responses)」, 降水と水循環, 成層圏の化学と力学的応答, 海水や氷圏の応答, 地域的な変化など、様々なテーマにそって結果が分析される予定である。

3. 試算結果と研究発表

ワークショップの初日と 2 日目は口頭発表にあてられ、29 件の発表があった。いくつかの研究グループは既に第 1 表で提案されている GeoMIP の計算を行っており、HadGEM2 や CESM1, ECHAM6 の暫定的な結果が発表された。また気候工学に関連あるトピックとして、火山噴火による成層圏エアロゾルの気候モデルにおける再現性なども発表された。

Boucher は HadGEM2-ES による G1-G4 の結果を発表した。HadGEM2-ES は CMIP5 に参加している地球システムモデルである。気温上昇については、既往研究と整合的に、全てのシナリオで抑制されること

が分かった。しかし G1 と G2 は放射強制力がバランスしているのにも関わらず若干温度のドリフトが見られた。議論の中で、太陽定数の減少量を決めるときに、TOA の正味放射をゼロにするように減少量を見積もるのか、モデルから診断する放射強制力を用いて減少量を見積もるかで結果が変わる可能性が指摘された。G3 での北極海の海水面積を見たところ、慣性のため、気候工学的手法によ

る介入を行っても年平均、及び9月の年極小値ともに減少傾向が2050年頃まで続くことが示された。

Tilmes (NCAR) は CESM1-CAM4 を用いた G1 と G2 の結果を示した。CESM1 も CMIP5 に参加している地球システムモデルである。G1 の結果では冬季 (12月 - 2月) の極域の温度上昇が気候工学的介入をしてもかなり残ることが示された。北半球の冬季ではもともと太陽入射光が殆どないためであり、太陽光反射による冷却効果がないからである。また G1 と G2 では CO₂ 濃度が減らされないため、CO₂ の冷却効果によって成層圏の温度減少が大きいことも示した。成層圏循環への影響が示唆される。

Tilmes はまた G3 を改変し、エアロゾル注入ではなく太陽定数減少を用いる G3 solar を提案した。G2 に似た形の実験ではあるが、G2 はコントロールに産業

革命以前の気候を用いるのに対し G3 ではコントロールが21世紀の気候であるため、気候や化学の現実的な影響が検討できるという利点がある。NCAR では今後 G3, G4 の数値実験も行う予定である。

Robock は SPARC CCMVal における GeoMIP への貢献について解説した。CCMVal は成層圏のプロセス解明に力点を置いた化学気候モデルの検証プロジェクトである。WMO/UNEP のオゾンアセスメントレポートのオゾン層将来予測も CCMVal における議論に基づいている。CCMVal は第2フェーズを終えたところである。第3フェーズでは何らかの形で GeoMIP に関連のある実験を行うことを検討しており、多くの研究グループが関心を示している。日本では国立環境研究所の秋吉英治らのグループが参加の意思を示している。詳しい条件設定は今後の課題である。

第2表 会議中で明らかになった GeoMIP に参加予定または検討中の13のモデル (アルファベット順)。モデルごとの細かな説明は省略する。*1: 通常の GCM 計算ではなく perturbed physics ensemble (PPE) を予定。*2: GCM ではなく EMIC。

モデル	研究グループ (国)	補足
CMIP5に参加しているモデル		
CESM-CAM4	NCAR (米)	
CESM-CAM5	PNNL (米)	
CESM-WACCM4	NCAR (米)	
GISS ModelE	NASA GISS/Rutgers Univ. (米)	
HadGEM2-ES	Hadley Centre (英)	
IPSL-CM5A	IPSL (仏)	
MIROC-ESM	東京大学・国立環境研究所・JAMSTEC	参加検討中
MPI-ESM (ECHAM6)	MPI-M (独)	
NorESM	Univ. Oslo (ノルウェー)	
CMIP5に参加していないモデル		
EMAC (ECHAM5)	MPI-C	参加検討中
HadCM3	Univ. Bristol (英)	PPE (*1)
IAPRASC	A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics (露)	参加検討中, EMIC (*2)
UMUKCA	Univ. Cambridge (英)	参加検討中

第3表 GeoMIP 関連の予定。

2011年2月	第1回 GeoMIP ワークショップ (米国ニュージャージー州ラトガーズ大学)
2011年10月	G1, G2の計算の完了
2012年1月	G3, G4の計算の完了
2012年2月	第2回 GeoMIP ワークショップ (英国エクセター, 予定)
2012年7月	IPCC AR5でレビューの対象となる論文の投稿締切

河宮 (第2著者) は G1 と G2 とは異なるが CO₂ 倍増あるいは4倍増に対し太陽定数を減少させて打ち消す MIROC の予備的な数値実験の結果を発表した。気温、降水などに加えて、太陽定数減少への大西洋の深層循環の応答も示した。地球温暖化が進むと大西洋深層循環は弱まるが、太陽定数が減少すると逆に強まる。海洋循環への影響に触れた発表は他に Stenchi-kov (KAUST) による報告があったものの、比較的少なかったためか、多くの質問があった。

杉山 (第1著者) は、気候工学に関するガバナンス研究の立場から、意識調査の結果などを発表した。調査の結果、気候工学への認識は必ずしも市民に広がっていないことが分かった。また気候工学は (副作用があるものの) CO₂ 排出を減らすことなく温暖化が抑制

できるため、この考えが広がると CO₂削減対策への関心を減らすという懸念があるが、気候工学の手法を説明したところ、市民の CO₂削減対策への関心が減らないことが分かった。聴衆からは、対策の間が抽象的であったので炭素税など具体的な例を提示し、問題設定を厳密にする必要性の指摘があり、活発な質疑応答となった。

4. GeoMIP の課題：実験設定方法

3 日目はディスカッションに当てられ、活発な議論があった。特に議論されたのは GeoMIP の数値実験の設定方法の詳細とモデルの出力変数である。

実験設定は議論を経て改訂が行われるが、GeoMIP のホームページ (http://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/docs/specificationsG1_G4.pdf) で最新版を閲覧することができる。例えばワークショップ前の 2010 年 9 月 20 日版 (2011 年 2 月 18 日閲覧) では、細かな設定が与えられたが、実際に計算をした研究グループの実験では様々な微調整が見られた。G1 と G2 については温度のドリフトと、それを抑えるための放射強制力の設定方法が問題になった。放射強制力がバランスしても温度のドリフトが見られた数値実験もあったからである。議論の結果、ワークショップ後の 2011 年 3 月 6 日版 (2011 年 3 月 8 日閲覧) では、以下の点が改訂されることとなった。

G1：実験の最初から 10 年間、TOA の正味放射の残差が 0.1 W/m^2 以下に抑制されるように太陽定数を減少させる。その後の小さなドリフトは許容する。

G2：G1 の結果をもとに、CO₂ 年率 1 % 増加に整合するように太陽定数減少量をスケールさせる。実験の最初から 10 年間の TOA の正味放射の残差が 0.1 W/m^2 以上の場合、実験をやり直し太陽定数減少率を調整する。

G4 と G3 におけるエアロゾルの設定には様々なアイデアが出たが、エアロゾルの扱いがモデルによって異なることを踏まえ、統一かつ簡便にできるよう、次の方法で指定することとなった。

G4：放射強制力は火山噴火時の調節と同様に指定することとする。ピナツボ火山の 1/4 に相当する量 ($\sim 5 \text{ Mt-SO}_2$) を、パルスではなく連続的に注入する。

G3：G4 の放射強制力をスケールして注入量を調整する。ただし G3 の設定は非常に難しく、今後も検討すべき課題である。

また Tilmes の発表で提起された G3 Solar もオプションであるが、GeoMIP に盛り込むこととなった。

GeoMIP のアウトプットについては、基本的に CMIP5 で規定されているアウトプットの提出が要請される。しかし気候工学を評価するためには CMIP5 でカバーされる変数では十分でないため、エアロゾル (3 次元の表面積密度分布、成層圏光学的厚み)、CH₄ や O₃、OH、NO_x、ClO_x などの化学物質の濃度、放射に関するパラメーター (UVB、直達光・拡散光、PAR) など GeoMIP のアウトプットに加えられることになった。

実験設定の詳細や出力変数は GeoMIP のホームページ (<http://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/index.html> (2011 年 3 月 8 日閲覧)) で更新される予定である。

5. 終わりに

GeoMIP を先導している Robock は気候工学の自然環境での実験や実施については否定的な論文を書いており (Robock 2008; Robock *et al.* 2010)、決して気候工学を肯定しているわけではない。多くの科学者は気候工学を利用することには否定的であろう。

しかし多くのグループの参加から、気候工学を科学的に吟味することに対して関心の高まりを見ることができた。気候工学を批判するにも、きちんと科学的なプロセスを踏むという精神の現われといえるかもしれない。

休憩時間などでは日本のグループの参加に関する質問も多く、わが国への期待も感じられた。第 2 回の GeoMIP 会合は 2012 年 2 月に英国エクセターで開催される予定である。

略語一覧

AGU: American Geophysical Union 米国地球物理学連合
AR5: Fifth Assessment Report (IPCC の) 第 5 次評価報告書
CAM4: Community Atmosphere Model version 4
CAM5: Community Atmosphere Model version 5
CCMVal: Chemistry-Climate Model Validation Activity 化学・気候モデル検証
CDR: Carbon Dioxide Removal 二酸化炭素除去
CESM: Community Earth System Model
CMIP3: Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 第 3 期結合モデル相互比較実験

CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 第5期結合モデル相互比較実験
 ECHAM5 : European Center/Hamburg model version 5
 ECHAM6 : European Center/Hamburg model version 6
 EMAC : ECHAM/MESSy Atmospheric Chemistry
 EMIC : Earth system Model of Intermediate Complexity 中程度に複雑な地球システムモデル
 GCM : General Circulation Model 大循環モデル
 GeoMIP : Geoengineering Model Intercomparison Project 気候工学モデル相互比較実験
 GISS : Goddard Institute for Space Studies ゴダード宇宙科学研究所
 HadCM3 : Hadley Centre Coupled Model version 3
 HadGEM2-ES : Hadley Centre Global Environmental Model, version 2, with an added Earth-system component
 IAP RAS CM : Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences climate model
 IMPLICC : Implications and Risks of Novel Options to Limit Climate Change 気候変動を制限するための新規手法の影響とリスク (SRMを広く対象にしており, 成層圏エアロゾル注入は一つの研究課題である.)
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
 IPSL : Institut Pierre Simon Laplace ピエール・シモン・ラプラス研究所
 IPSL-CM5A : IPSL climate model version 5A
 JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 海洋研究開発機構
 KAUST : King Abdullah University of Science and Technology サウジアラビア・アブドラ王立科学技術大学
 LSCE : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement 気候環境科学研究所
 MIROC-ESM : Model for Interdisciplinary Research on Climate-based Earth System Model
 MPI-C : Max Planck Institute for Chemistry マックス・プランク化学研究所
 MPI-ESM : MPI Earth System Model
 MPI-M : Max Planck Institute for Meteorology マックス・プランク気象研究所
 NASA : National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国国立大気研究センター
 NCAS : National Centre for Atmospheric Science 英国国立大気科学センター
 NORESM : Norwegian Earth System Model
 PAR : Photosynthetically Active Radiation 光合成有

効放射量

PCMDI : Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison 気候モデル診断・相互比較プログラム
 PNNL : Pacific Northwest National Laboratory パシフィック・ノースウエスト国立研究所
 PPE : Perturbed Physics Ensemble 摂動物理アンサンブル
 RCP : Representative Concentration Pathway 代表的濃度経路
 SPARC : Stratospheric Processes And their Role in Climate 成層圏過程・気候影響研究計画
 SPICE : Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering 成層圏粒子注入気候工学プロジェクト (2010-2014)
 SRM : Solar Radiation Management 太陽放射管理
 SST : Sea Surface Temperature 海面水温
 TOA : Top of the Atmosphere 大気上端
 UMUKCA : Unified Model UK chemistry and aerosol
 UNEP : United Nations Environment Programme 国際連合環境計画
 UVB : Ultraviolet B 紫外線 B 波
 WACCM4 : Whole Atmosphere Community Climate Model version 4
 WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関

参考文献

- Bala, G., P. B. Duffy and K. E. Taylor, 2008 : Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **105**, 7664-7669.
- Jones, A., J. Haywood, O. Boucher, B. Kravitz and A. Robock, 2010 : Geoengineering by stratospheric SO₂ injection : results from the Met Office HadGEM2 climate model and comparison with the Goddard Institute for Space Studies ModelE. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 5999-6006.
- 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.*, Early View, doi : 10.1002/asl.316.
- 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.
- Robock, A., 2008 : 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. *Bull. At. Sci.*, **64** (2), 14-18, 59.

- 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., 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. <http://royalsociety.org/geoengineering-the-climate/> (2011/2/7閲覧).
- 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, 投稿中.
-