

はたして人類は気候危機問題を本当に解決できるのか

～「戦争」という やっかいで深刻な「気候オーバーシュート加速器」への向き合い方～

地球環境学者 古屋 力

「私たちの使命は、オーバーシュートをできるだけ小幅で、短期かつ安全なものに抑え、気温上昇を遅滞なく 1.5° C の軌道へと戻すことにあります。」² (アントニオ・グテーレス国連事務総長；ニューヨーク国連総会演説、2026 年 1 月 16 日)

1. 危険で深刻な「気候オーバーシュート」の現在地³

地球平均気温は急速にかつ確実に上昇している。

いまから 11 年前の 2015 年に「パリ協定 (Paris Agreement)」⁴は、「世界の平均気温の上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保ち、1.5°C に抑える」ことを目標に掲げたが、現段階の客観的な科学的データを観る限り、遅かれ早かれ、約束した「1.5 度」目標を超過する可能性がいよいよ高まってきている⁵。

こうした気候に関する指標がオーバーシュートしている状態を「気候オーバーシュート (Climate Overshoot)」⁶と呼ぶ。

¹ 東京大学 未来ビジョン研究センター 客員研究員。東洋学園大学グローバル・コミュニケーション学部 元教授 (気候変動・地球環境専攻)。国際通貨研究所 元シニアエコノミスト (国際金融・国際通貨専攻)。本稿記載内容は、すべて現時点の公開情報に基づくものであり、その見解は、所属組織を代表するものではなく、古屋力個人の意見である。

² António Guterres (2026) UN Secretary-General Guterres Addresses General Assembly on 2026 Agenda (NY)

³ 本稿は、2026 年 3 月 16 日 (月) に東京大学本郷キャンパス 山上会館大会議室で開催された、気候オーバーシュート (Climate Overshoot) の影響・社会・ガバナンスに関する国際シンポジウム「気候オーバーシュート、CDR および SRM に関する国際シンポジウム：影響・社会・ガバナンス」に参加した際に得た貴重な最新情報や示唆に富む様々な知見やヒントに基づいて、「人類は気候危機問題を本当に解決できるのか」という本源的な問いについて、その可能性と「解法」について論点整理をしたものである。主催は小職が所属している東京大学未来ビジョン研究センター (IFD) が様々な他機関と共催した。内容は、「気候オーバーシュートと対応オプション」(杉山昌広東京大学未来ビジョン研究センター教授)、「太陽光反射手法とそれらが気候システムに及ぼす影響：より堅牢な評価に向けたステップ」(ダニエレ・ヴィジョーニコネール大学教授)、「オーバーシュート・シナリオに対する地球システムの応答」(立入郁海洋研究開発機構)、「今は排出し後で緩和するのか？ CDR および SRM による『ピーク抑制』シミュレーションにおける地球システムの可逆性」(ヨルク・シュヴァインガー教授)等の最先端の講演と、パネルディスカッション (登壇者：朝山 慎一郎国立環境研究所研究員、西浦理国立環境研究所研究員、ダニエレ・ヴィジョーニコネール大学教授、立入郁 AMSTEC 研究員、ヨルク・シュヴァインガー NORCE 研究員等) から構成されていた。

⁴ 「パリ協定 (Paris Agreement)」は、第 21 回気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) が開催されたフランスのパリにて 2015 年 12 月 12 日に採択された気候変動抑制に関する多国間の国際的な協定 (合意) である。1997 年に採択された京都議定書以来 18 年ぶりとなる気候変動に関する国際的枠組みであり、気候変動枠組条約に加盟する全 196 カ国全てが参加する枠組みとしては史上初である。排出量削減目標の策定義務化や進捗の調査など一部は法的拘束力があるものの罰則規定は無い。2020 年以降の地球温暖化対策を定めている。気温上昇を 1.5°C 以内に抑えて「パリ協定」の目標を達成するためには、各国政府による気候政策の強化が重要とされているが、昨年 2025 年 1 月に大統領に復帰したトランプによって「パリ協定」からの再離脱が表明され、また、世界各地で戦争が勃発しており、今後はたして「パリ協定」で人類が約束した「1.5 度」気温目標達成が可能のうか否かは、樂觀できない状況にある。

⁵ 2024 年には世界気象機関の報告により、世界平均気温が一時的に産業革命前比で約 1.55°C に達した可能性が示されたが、これは短期的な変動であり長期的な平均ではないため、「1.5°C 未満に抑える」目標が直ちに破られたわけではない。World Meteorological Organization (2024) “State of the Global Climate 2024” <https://public.wmo.int/files/state-of-global-climate-2024>

⁶ 「気候オーバーシュート (Climate Overshoot)」とは、気候に関する指標がオーバーシュートしている状態を指す。パリ協定が「世界の平均気温の上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保ち、1.5°C に抑える」ことを目標に掲げていることから、一般的に「平均気温の 1.5°C 上昇」が指標として採用されている。1.5°C の閾値を超えると、北極圏の永久凍土融解や、熱帯サンゴ礁の死滅等、地球上に不可逆的な (元に戻ることができない) 影響を及ぼす可能性がある」と指摘されている。様々な国際機関や団体が 1200 を超える気候シナリオを公開しているが、そのうち 9 割以上のシナリオが今世紀中の気候オーバーシュートを前提としている。自社のトランジション計画やネットゼロ目標を策定・検証する際、用いるシナリオが気候オーバーシュートを前提としているかに留意が必要である。ちなみに、オーバーシュート (Overshoot) には、英語で「行き過ぎる・通り過ぎる」という意味があ

「1.5°C」の閾値を超えて「オーバーシュート (Overshoot)」すると、北極圏の永久凍土融解や、熱帯サンゴ礁の死滅等、地球上に不可逆的な、元に戻ることができない影響を及ぼす可能性がある。

はたして、「気候オーバーシュート」によって、どのような物理的・社会的影響が予想されるのか。

まず、気候オーバーシュートによる物理的影響としては、以下の4点を挙げることができる。

<気候オーバーシュートによる物理的影響>

1. 不可逆的な変化 (tipping point) ⁷

一定の温度を超えると、深刻な元に戻せない不可逆的な変化が起きる可能性がある。主な懸念点としては、グリーンランドの氷床の融解が加速し海面上昇が数メートル規模になる「グリーンランド氷床融解 (Greenland Ice Sheet collapse)」問題、やアマゾンの森林がサバンナ化し CO₂吸収源が消失する「アマゾン熱帯雨林消滅 (Amazon rainforest dieback)」問題、欧州の寒冷化や気候パターンの激変する「大西洋子午面循環 (Atlantic Meridional Overturning Circulation : AMOC)」問題等がある。これらは、いずれも、一度発動すると、もはや温度を下げても止まらないリスクがある。

2. 極端現象の増加

オーバーシュート期間中は異常気象が激化する。人が生存できないレベルの高温となる熱波問題や、豪雨・洪水の頻発問題、干ばつの長期化問題、強力な台風・ハリケーン問題等が起こり、単なる「頻度増加」に留まらず、強度も増すことが懸念される。

3. 海面上昇の加速

氷床融解+海水膨張により海面が数十年～数世紀にわたり上昇する懸念がある。この現象は、一度始まると数百年止まらない。

4. 生態系の崩壊

サンゴ礁が大規模白化しほぼ消滅する可能性があり、種の絶滅率が急増し、生態系サービス（食料・水・気候調整）の喪失が懸念される。

次に、気候オーバーシュートによる社会的影響としては、以下の5点を挙げるができる。

<気候オーバーシュートによる社会的影響>

る。例えば、暖房器具を使って室内の気温を短時間で上昇させようとした場合、目標温度に達した段階で瞬時に変化を止めることができないため、一時的に閾値を超過してしまう状態などが該当する。株価、感染者数、飛行機の着陸時の停止位置など、様々な場面で使われる一般的な用語でもある。

⁷ 「ティッピングポイント (tipping point)」は、「不可逆的な変化」を意味し、物事がある一定の条件を超えると一気に広がる現象をさし「転換点」と訳されている。気候変動問題については、この転換点を過ぎると、気候変動が一気に進む恐れがあることが指摘されている。ただし、この転換点はひとつのものではなく、氷河の崩壊や融解、森林火災や永久凍土の融解などによる二酸化炭素の放出、海洋の酸性化による海洋生態系の崩壊など複数の現象に関連し、それらの相互作用により気候変動が加速するとされている。ティッピングポイントがいつ到来するかについては、必ずしも科学的に一致した見解はないが、IPCCが警告する、産業革命以降の地球温度の1.5度Cの上昇を超えるとその可能性が高いと言われている。ただし、一部の現象については、すでにこの転換点を超えているとの見方もある。過去数年間、気候関連の問題は、毎年発行されている『グローバルリスク報告書 (Global Risks Report)』(World Economic Forum, 2021)のグローバルリスク・リストの最上位を占めている。

1. 食料・水資源の不安定化

特に熱帯・乾燥地域での作物収量減少や、水不足の深刻化、食料価格の高騰等が懸念される。その結果、社会不安が惹起されるリスクがある。

2. 健康被害

熱中症・死亡率の増加や、気候帯の変化による感染症の拡大や、大気汚染の悪化等が懸念される。

3. 移住・難民問題

海面上昇や干ばつによる居住不能地域の拡大や、数億人規模の気候移民の可能性等が懸念される。

4. 経済・インフラへの打撃

海面上昇による沿岸都市の浸水や、電力・交通等のインフラの破壊、保険・金融システムの不安定化等が懸念される。

5. 社会・政治の不安定化

特に水・食料等の資源争いや、国家間・地域間の対立、ガバナンスの崩壊リスク等が懸念される。

以上掲げたような多様なリスクを念頭に、様々な国際機関や団体が1200を超える気候シナリオを公開しているが、その内の9割以上のシナリオが今世紀中の「気候オーバーシュート」を前提としている。

このままの大幅なオーバーシュートを想定すると、「パリ協定」の温室効果ガス（greenhouse gas; 以下 GHG と略）⁸削減長期目標達成のために各国が提示している国別目標（Nationally Determined Contribution; 以下 NDC と略）をすべて達成した場合でも、今世紀末の気温上昇は+2.4~2.7°Cとなってしまう、まだ0.9~1.2°C分のギャップがあり、「パリ協定」の「1.5°C目標」達成に届かないのが厳しい実情である。事態はまったく楽観できない状況にあるのである。

こうした不可避的で深刻な「気候オーバーシュート」の事情に鑑み、日本はじめ先進国を中心に、世界各国は、従来型の再生可能エネルギーの主力電源化等によるエネルギーシフトと軸とした「脱炭素化」の一刻も早い実現を目指し、オーバーシュートを避けた野心的な目標を掲げて国際協力を通じてさらなる削減に向け一層の加速をしていくことが期待されている。そして、国家や自治体、企業等各主体が、トランジション計画やネットゼロ目標を策定・検証する際に用いるシナリオ設定に際しては、こうした「気候オーバーシュート」を織り込むことが、もはや不可避な深刻な事態にまで来てしまっている。

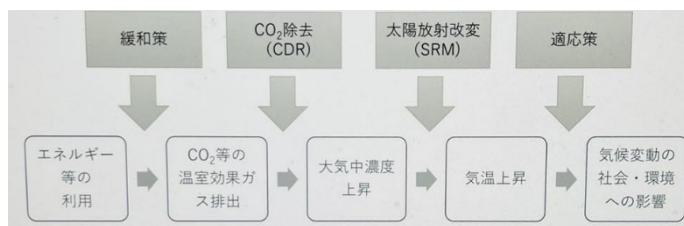
2. 「気候オーバーシュート」への対応策

それでは、私たちは「気候オーバーシュート」に対して、どのような対応をすべきなのか。

⁸ 温室効果ガス（greenhouse gas; 以下 GHG と略称）とは、大気中の、太陽光の熱をとどめて温室効果をもたらす気体のこと。二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、亜酸化窒素（N₂O、一酸化二窒素）、ハイドロフルオロカーボン類（HFCs）、パーフルオロカーボン類（PFCs）、六フッ化硫黄（SF₆）の6種類がある。

気候変動への対応策は、以下の【図1】のように分類・整理できる。

【図1】気候変動への対応策の分類



(出所) 杉山昌広 (2021)「太陽放射改変は紛争を激化させるのか (Would solar radiation modification exacerbate conflict?)」
(2021年3月東京大学「気候変動と水資源をめぐる国際政治のネクサス」2020年度ワーキングペーパー・シリーズ No. 8)

この図の通り、まず世界中が真っ先に最優先で取り組んでいるのが、地球温暖化の原因物質である GHG 排出量を削減し、植林等によって吸収量を増加させる「緩和策 (mitigation)」⁹である。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change；国連気候変動に関する政府間パネル)¹⁰は、「パリ協定」で合意した目標を達成するには、世界各国が協働して、2030年までに排出量を40～60%削減する必要がある¹¹としている。

しかし、「緩和策」にも限界がある。特に「気候オーバーシュート」が起こること等を想定すると、グローバルな経済活動による排出量の90%を削減しても「緩和策」には限界がある。どうしても残りの10%は削減されないまま大気中に残ってしまう残余排出 (residual emissions) がある。

この10%の残余排出部分は、なかば力業で、大気中のCO₂を積極的に回収・削減し、永続的に貯留することでCO₂の総量をマイナスにする「ネガティブ・エミッション (Negative emission)」¹²によって削減しなければならない。気候危機解決の重要な鍵の1つは、排出量削減してもまだ残ってしまうこの10%部分の大気中のCO₂を、いかにして回収し永続的に貯留することができるかにある。もはや、「ネガティブ・エミッション」なくして、気候危機問題は解決できないのである。

今世紀後半を通して、グローバルな排出量を排出されたCO₂よりも除去されたCO₂の方が多い状態の「ネットマイナス」に維持するために、こうした「ネガティブ・エミッション」によって毎年100億トン (ギガトン換算で10Gt) のCO₂を大気から除去しなければならない。

⁹ 「緩和策 (mitigation)」は、地球温暖化対策として、その原因物質である温室効果ガスの排出量を削減したりまたは植林などによって吸収量を増加させる対策である。ちなみに、気候変化に対して自然生態系や社会・経済システムを調整することにより温暖化の悪影響を軽減する対策を「適応策 (adaptation)」と呼んでいる。

¹⁰ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change；国連気候変動に関する政府間パネル) は、気候変動を評価する主要な機関である。国連環境計画 (UNEP) と世界気象機関 (WMO) によって設立され、気候変動の状態とそれが経済社会に及ぼす影響について明確な科学的見解を提供し、気候変動の理解に関連する世界の科学的、技術的、経済社会的情報を検討し評価している。

¹¹ IPCC は、1.5°C目標のための残り予算は非常に小さく、現状の排出ペースだと10年前後で使い切ると予想しており、「早く・大きく減らさないと間に合わない」と警告している。IPCC Sixth Assessment Report では、「1.5°C目標 (オーバーシュート最小)」の達成のためには、4年後の2030年までに2010年比で約45%削減、「2°C目標」の達成のためには、2030年までに約25%削減の必要があるとしている。しかし、不確実性や、国ごとの差等を勘案、また、歴史的排出が多い先進国は早く・大きく削減すべきで50～70%以上の削減が必要で、方や発展途上国は開発余地に鑑み やや緩やかにすべきといった公平性の諸点も考慮すると、政策的には「40～60%削減」の必要があるとしている。IPCC (2021) "IPCC Sixth Assessment Report"(October 2015 to July 2023)

<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

¹² 「ネガティブ・エミッション (Negative emission)」とは、大気中のCO₂を積極的に回収・削減することで、CO₂の総量をマイナス (ネガティブ) にする取り組みである。

大気中の CO₂ を積極的に回収・削減することで、CO₂ の総量をマイナスにする「ネガティブ・エミッション」が必要な理由として、以下の 3 つがある。

<「ネガティブ・エミッション」が必要な理由>

- ① 現状の「緩和策」だけでは脱炭素が困難な残り 10% の排出量に対処するため
- ② 地球温暖化によって悪化したフィードバックループ（森林火災など）に起因する自然発生的な追加排出量を削減するため
- ③ これまでに蓄積された排出量を削減するため

この「ネガティブ・エミッション」の主な取り組みとしては、以下の 2 つのアプローチがある。

<「ネガティブ・エミッション」の主な取り組み>

- ① 「二酸化炭素除去(Carbon Dioxide Removal；以下 CDR と略)」¹³
- ② 「太陽放射改変(Solar radiation modification；以下 SRM と略)」¹⁴

こうした CDR や SRM という具体的な対応策は、実際、どのようなものなのか。そして、その効果はどの程度のもので、その現在地はどうか。直面している課題と展望はどうかであろうか。

まず、大気中の CO₂ を除去する手法である CDR について、その概要と現在地を観てみたい。

CDR の主な手法には、以下の 4 種類がある。

¹³ 「二酸化炭素除去(Carbon Dioxide Removal；以下 CDR と略)」は、大気中の CO₂ を除去することを意味する。「パリ協定」で合意した目標を達成するには、2030 年までに排出量を 40～60%削減する必要があるにもかかわらず、2022 年、世界の CO₂ 排出量は、2015 年より 20 億トン (5%) 増加した。サイエンス・ベースド・ターゲット・イニシアチブ (SBTi) によると、グローバルな経済活動による排出量の 90% を削減することが最優先となる。残りの 10% は、大気中の CO₂ を回収し、永続的に貯留する「ネガティブ・エミッション」、つまり「二酸化炭素除去 (CDR)」のアプローチに頼らざるを得ない。CDR が必要な理由は 3 つある。1) 脱炭素が困難な残り 10% の排出量に対処するため、2) 地球温暖化によって悪化したフィードバックループ（森林火災など）に起因する自然発生的な排出量を削減するため、そして 3) これまでに蓄積された排出量を削減するためである。これは、毎年 100 億トン (ギガトン換算で 10Gt) の CO₂ を大気から除去することを意味する。今世紀後半を通して、グローバルな排出量を、排出された CO₂ よりも除去された CO₂ の方が多い状態の「ネットマイナス」に維持しなければならない。

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/cdr.html>,

https://www3.weforum.org/docs/WEF_Carbon_Dioxide_Removal_Best_Practice_Guidelines_JP_2023.pdf

¹⁴ 「太陽放射改変(Solar radiation modification；以下 SRM と略)」とは、地球の放射収支に直接介入し、地表の温度を下げることで、人為的気候変動によるリスクを軽減するために提案されている技術である。この SRM には、他に、「気候工学 (climate engineering)」「太陽ジオエンジニアリング (solar geoengineering)」「太陽放射管理 (solar radiation management, SRM)」「気候介入 (climate intervention)」など様々な呼称がある。この SRM の狙いは、太陽光の数パーセントを宇宙に反射することによって気候を寒冷化することにある (Caldeira et al., 2013)。SRM は、太陽光をどこで反射するのか、その位置によって 4 つのサブカテゴリーに分類できる (Shepherd et al., 2009; National Research Council, 2015b; de Coninck et al., 2018)。科学者たちによって提案された手法としては、地表からの距離の遠い順に挙げると、①「宇宙で実施する方法」(Early, 1989; Angel, 2006)、②「成層圏エアロゾル注入」(Crutzen, 2006; Robock et al., 2008)、③「海洋上の雲の白色化」(Latham et al., 2008)、④「地表のアルベド (反射率) 増加」(以上、)がある。ちなみに、「ジオエンジニアリング」(Shepherd et al., 2009)、「気候工学」(Keith, 2013)、あるいは、「気候介入」(National Research Council, 2015a, 2015b)とは、「太陽放射改変 (SRM)」や「二酸化炭素除去 (CDR)」(IPCC, 2018) を包含した総称である。かつての研究ではこれらふたつのカテゴリーがひと括りにされることが多かった (Shepherd et al., 2009) が、この両者には、科学的メカニズムや社会的課題、環境リスクの面で大きな違いがある。そのため、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、「ジオエンジニアリング」という大まかな分類を避け、「SRM」と「CDR」を個別に扱うよう推奨している (IPCC, 2018)。

<CDR の主な手法>

① バイオ炭法 (Biochar)

燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下で バイオマスを加熱することで炭を生成し、バイオマス中の炭素を固定する。他の技術系 CDR よりも経済的だが、持続可能なバイオマスを大量に入手しにくいという制約がある。

② 炭素回収・貯留を伴うバイオマス発電法 (Bioenergy with Carbon Capture and Storage ;BECCS)

持続可能なバイオマスを燃焼させて電力や熱を発生させる、または処理する。その過程で発生する CO₂ は排ガスから除去し、圧縮して永続的に貯留する。炭素は植物の光合成によって回収される。

③ 炭素貯留を伴う直接空気回収法 (Direct Air Capture with Carbon Storage ;DACCS)

フィルターを使用して CO₂ を回収し、圧縮して地中に貯留する。必要な土地の面積が小さく、永続的な地中貯留が可能なのがメリットだが、クリーンエネルギーを利用しなければならないため、現時点ではコストが非常に高額 (1 トン当たり 600 ~ 1,000 米ドル) となるのが難点である。この CO₂ 分離回収技術については、日本の技術は世界トップレベルにあるが、一方で活発な先行投資による海外での大規模実証・実装が先行しているのが現状である。

④ 岩石風化促進法 (Enhanced Rock Weathering ;ERW)

森林の土壌や農地、海岸に、水に溶けて CO₂ を吸収する岩石を散布し、数百年にわたって CO₂ を結合させる。コスト、副次的影響、永続性、拡張性についてはまだ不確かな面がある。

次に、SRM について、その概要と現在地を観てみたい。

SRM は、太陽光の反射率 (albedo) を高めて、地表に到達するエネルギー量を制限することによって、地球の放射収支に直接介入し、地表の温度を下げることにより、人為的気候変動によるリスクを軽減するための手法である。ただし、SRM は、「熱を下げるだけの対症療法」にすぎず、大気中の GHG 濃度を直接的に低減させるものではないため「緩和」とは異なるものである。

SRM の狙いは、太陽光の一部を宇宙に反射することによって気候を寒冷化することにある¹⁵。SRM は、太陽光をどこで反射するのか、その位置によって、以下の【図 2】の通り、4つのサブカテゴリーに分類できる¹⁶。

【図 2】「太陽放射改変(Solar radiation modification ; SRM)」の種類

¹⁵ ちなみに、地球が宇宙から受け取るエネルギーと地球から宇宙へ放出するエネルギーの量が均衡していて地球の平均気温が変動しない状態を「放射平衡 (Radiative Balance)」と呼ぶ。

¹⁶ Shepherd, J., Caldeira, K., Cox, P., Haigh, J., Keith, D., Launder, B., Mace, G., MacKerron, G., Pyle, J., Rayner, S., Redgwell, C., & Watson, A. (2009). Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty. The Royal Society.

太陽光の反射位置	方法
宇宙	宇宙に太陽光反射シールドを設置（ラグランジュポイントまたは地球低軌道）
成層圏	成層圏エアロゾル注入
対流圏	海洋上の雲の白色化（雲凝結核となる海塩を散布）
地表	屋根表面、草地、耕作地、砂漠のアルベド（反射率）を増加

（出所） 杉山昌広（2021）「太陽放射改変は紛争を激化させるのか（Would solar radiation modification exacerbate conflict?）」

（2021年3月東京大学「気候変動と水資源をめぐる国際政治のネクサス」2020年度ワーキングペーパー・シリーズ No. 8）

SRM の手法のそれぞれの概要は、以下である。

<SRM の主な手法>（地表からの距離の遠い順）

①「宇宙で実施する方法」¹⁷（宇宙）

地球に届く前の太陽光を宇宙空間で減らす方法。例えば、宇宙に巨大な反射板や遮光シールドを配置して太陽光の一部をブロックする方法がある。効果は広範囲であるが、宇宙空間での設置が必要なため、技術的・コスト的に非常にハードルが高いと言われている。

②「成層圏エアロゾル注入」¹⁸（成層圏）

地上から約 10～50km の成層圏に硫酸の微粒子等のエアロゾル（aerosol）¹⁹をまく方法。火山噴火の後に気温が下がる現象をヒントにしている²⁰。降水パターンの変化等副作用の懸念もあり、また、エアロゾル注入を数千年にも渡って実行しなければならず、現実的な対策とは言えないとした否定的なシミュレーション研究結果も出されている²¹。

③「海洋上の雲の白色化」²²（対流圏）

海の上の雲に細かい海水粒子を吹きつけて、雲をより白く・明るくする方法。白い雲は太陽光をよく反射するため地表に届く熱が減る効果がある。局所的に調整できる可能性があるが、気象への影響は不確実である。

④「地表の反射率（albedo）増加」（地表）

地面や都市の表面をより明るくして、太陽光を反射させる方法。白い屋根、反射性の高い舗装、

¹⁷ Early, James, T. (1989). Space-based solar shield to offset greenhouse effect. *Journal of British Interplanetary Society*.

¹⁸ Crutzen, P. J. (2006). Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Climatic Change*, 77(3-4), 211-220.

¹⁹ エアロゾル（aerosol）とは、空気中に浮遊する直径が 0.001 μm から 100 μm の粒子。一般に直径 5 μm 以上の大きさと定義される「飛沫」よりも細かいものを指す。

²⁰ 大規模な火山噴火があると、硫黄ガスが成層圏に吹き上げられる。ガスの化学反応により太陽光を反射する硫酸エアロゾルが形成され、短期的に全球平均気温が下がることはよく知られている。

²¹ ベルン大学の Johannes Sutter 氏などの研究チームは、地球温暖化対策のひとつとして日射量を減らすために考案されている「成層圏へ人為的にエアロゾルを注入する」手法がどの程度有効なのかをシミュレーションした。その結果、エアロゾルの注入が今すぐ実行されるという非現実的なシナリオ以外では、西南極氷床の崩壊を最終的に防ぐことはできないとする結果をまとめた。仮に即時実行されたとしても、エアロゾル注入を数千年にも渡って実行しなければならず、その悪影響も不明であることから、現実的な対策とは言えないとしている。

²² Latham, J., Rasch, P., Chen, C.-C., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K., & Choulaton, T. (2008). Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), 3969-3987.

明るい農地など多様な方法がある。小規模でも実施可能だが、地球全体への影響は比較的限定的である。

なお、この SRM は、「地球の気候を誰が操作してよいのか」というガバナンス（統治）の問題もからむ倫理問題もあることは留意したい。

ちなみに、「ジオエンジニアリング（geoengineering）」²³、「気候工学（climate engineering）」²⁴、あるいは、「気候介入（climate intervention）」²⁵とは、上述の SRM や CDR を包含した総称である。

かつての研究ではこれらふたつのカテゴリーがひと括りにされることが多かった²⁶が、この両者には、科学的メカニズムや社会的課題、環境リスクの面で大きな違いがある。そのため、IPCC は、「ジオエンジニアリング」という大まかな分類を避け、SRM と CDR を個別に扱っている²⁷。こうした SRM、CDR 等の対応策の選択肢は単独で考えるべきではなく、常に複数の選択肢のポートフォリオとして考えるべきであろう。

はたして、こういった CDR や SRM 等の「ネガティブ・エミッション」は、オーバーシュートリスクの抑制やその管理においてどのような役割を果たし得るのか。

同時に、これらの選択肢は、社会はリスクと便益をどのように評価すべきか、CDR や SRM を用いるか否か、またどのように用いるかを誰が決定するのか、国内および国際レベルで、どのようなガバナンス枠組みが必要か。さらには、「ネガティブ・エミッション」があるためにむしろ GHG 排出を加速してしまうモラルハザードが起きてしまう弊害をどう考えるべきなのか等、社会的・倫理的・ガバナンス上の課題もある²⁸。

「ネガティブ・エミッション」は、これなくして気候危機問題は解決できない「鍵」であると同時に、「最後の砦」でもある。

そして、なかなか、一朝一石に明快な「解」を出せないやっかいな課題でもある。だからこそ、いま、世界中の気候科学者や気候エンジニアたちが心血注いで取り組んでいるわけである。

3. 「戦争」という「気候オーバーシュート」加速器への対応策

²³ 「ジオエンジニアリング（geoengineering）」は、「気候工学（climate engineering）」とも呼ばれるが、人為的な気候変動の対策として行う意図的な惑星環境の大規模改変である。緩和策・適応策の代替にはならないが、温室効果ガス（Greenhouse Gas；以下 GHG と略）排出削減がなかなか進まない中、地球温暖化が危険な水準に達してしまうリスクを踏まえ、昨今、気候工学は欧米を中心に注目を浴びている。

²⁴ Keith, D. W. (2013). A case for climate engineering. The MIT Press.

²⁵ National Research Council. (2015a). Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration (p. 18805).

National Academies Press. - (2015b). Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth (p.18988). National Academies Press.

²⁶ Shepherd, J., Caldeira, K., Cox, P., Haigh, J., Keith, D., Launder, B., Mace, G., MacKerron, G., Pyle, J., Rayner, S., Redgwell, C., & Watson, A. (2009). Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty. The Royal Society.

²⁷ IPCC. (2018). Summary for Policymakers. 2018

²⁸ 「ジオエンジニアリング」は、気候を操作する技術が「地政学的な武器」になりうるリスクにも留意が必要である。気候の操作が潜在的な紛争要因となる懸念から、実際、気象操作に関する議論は「環境改変兵器禁止条約」にもつながっている。

以上、現下の危険で深刻な「気候オーバーシュート」の現在地と、それへの対応策としてのCDRやSRM等の「ネガティブ・エミッション」の手法について、検証を試みたが、ここで、さらに重要なことについて1つ言及しておきたい。

それは、これ以上、「気候オーバーシュート」を加速させないことである。

目下、こうしたネガティブ・エミッション等の努力を台無しにして水泡に帰すような、最も深刻で一番懸念される「気候オーバーシュート」加速器が、いまだに手つかずに放置されている。

それは、「戦争」である。いままで、「戦争」によるGHG排出削減の議論は「聖域」であった。

実は、これが、いままで誰も触れてこなかった最も深刻な未解決な課題なのである。

「戦争」が「オーバーシュート加速器」になる例には、枚挙に暇はない。代表例としてロシアのウクライナ侵攻やイスラエルによるガザ戦争、さらには現下の米国・イスラエルによるイラン戦争等がある。

「戦争」は、軍事行動に不可避免的に化石燃料依存を伴う。その結果、石炭・LNGの増加、インフラ破壊に伴う復興での大量のCO₂排出、軍事活動そのものの巨大排出、国際協調の分断による気候交渉の停滞等、脱炭素の「スピード」と「協力」の両方が崩れる。その意味で、「オーバーシュート加速器」そのものである。「百害あって一利なし」なのである。

つまり、「戦争」をなくすことこそが最善の気候危機対策に他ならない。

世界のCO₂排出量を考える際に、誰もが見て見ぬふりをしている要素が1つある。それが各国の軍隊の戦争等の軍事行動から発生するCO₂排出量である。

専門家らの見積もりによると、軍隊は世界最大級の燃料消費セクターであり、地球の温室効果ガス排出量の5.5%を占めるとも言われている。ところが軍隊は、排出量の適切な報告や削減を義務付けた国際的な取り決めに拘束されていない。一部の国の軍隊が公表しているデータも信頼できないか、精一杯評価しても不完全な内容というのが関の山だと科学者や学術関係者は話す²⁹。

地球の平均気温が最高記録を更新する中で、科学者や環境団体などは、長年、国連に対して全てのCO₂排出量を開示するよう世界の各国軍隊に働きかけてきた。とともに、国際的な排出量削減目標

²⁹ 米・英・独・仏・カナダ・オーストラリアなど主要先進国は、国連への報告+国内報告の両方ある程度は実施している。ただし内容は限定的で部分的報告に留まっている。兵器製造やサプライチェーン（実は最大の排出源）はほぼ含まれおらず、軍事基地のエネルギー使用、軍用機・艦船の燃料消費など直接排出（Scope1）中心に偏っているのが実態である。実態のごく一部しか反映しておらず、多くの軍隊は実際の排出の10%未満しか報告していないとされている。気候危機に一番積極的なEUですら軍事排出の把握は不完全である。2021年の軍事排出は約690万トンCO₂と報告されたが、これも実態よりかなり過小だとされている。ちなみに、ごくわずかであるが、軍としてのネットゼロ目標を明確に掲げた数少ない取り組み例として、オーストリアとスロベニアがあるが、定義が曖昧でその実現は極めて困難と指摘されている。

から長らく軍隊を除外してきた方針を撤廃するよう迫ってきたが、いまだ、実現していない。

そもそも軍用機の飛行から艦艇の航行、演習に至るまでさまざまな面で温室効果ガスを排出する軍隊だが、国際的な排出量削減目標から排出源として軍隊を除外してきた歴史は古い。すでに1997年の京都議定書や2015年のパリ協定で排出量削減の対象外に置かれ続けた。

エネルギー使用に関するデータを公表すれば、国家安全保障が損なわれかねない等の政治・制度・安全保障上の事情に拠るとされている。その理由を論点整理すると、以下の5点となる。

<軍隊が温室効果ガス排出が国際的な削減義務や厳格な報告義務に十分拘束されていない理由>

① 国家安全保障の優先

軍事活動の燃料使用量、作戦行動、装備の稼働状況など詳細は機密情報と密接に関わる。排出量を正確に報告すると、軍の規模・作戦能力・活動範囲が推測される可能性があるため、多くの国が情報公開に慎重である。

② 国際交渉での「例外扱い」

29年前の「京都議定書」の交渉の場では、特に米国などが強く主張し、海外軍事行動など一部の軍事排出が報告義務から除外された。その後の2015年の「パリ協定」では、軍事排出の扱いは各国の裁量（任意報告）に委ねられ、明確な義務規定は設けられていない。

③ 主権の問題

軍隊は国家主権の核心部分であり、他国や国際機関からの介入を強く嫌う分野である。そのため、排出削減のような分野でも拘束力のある国際ルールを適用することに各国が消極的である。

④ 測定・分類の難しさ

軍事排出は、平時と戦時で大きく変動、同盟国との共同作戦で排出の帰属が不明確、民間委託（軍需産業）との境界が曖昧等の事情で複雑である。このため、統一的な算定基準を作るのが難しいという実務的な問題もある。

⑤ 政治的優先順位の低さ

気候変動対策の国際交渉では、エネルギー・産業・交通など民生部門が優先され、軍事分野は後回しにされがちである。また、安全保障上の緊張が高まると、各国はむしろ軍事力強化を優先し、排出削減の議論が進みにくくなる事情もある。

「戦争」がなかりせば、罪もない無辜の市民が大勢死傷したり、家族が崩壊したり、難民となって故郷を離れるような不条理な悲劇もなくなるし、同時に、無意味な大量のGHGを排出するミサイルや戦車・軍用機・軍艦等の兵器も不要となり、脱炭素等の気候危機対策にも大いに貢献する。

そんな話は「理想論」だとか、お花畑の「机上の空論」だとか、「非戦論」「反戦論」を一蹴する方もおられるかもしれないが、ここまで、支離滅裂な「力による政治」が跋扈し、「化石燃料回帰」の空気を纏った「反・脱炭素」の言動が起りつつあるミゼラブルな世界情勢の中では、あえて、もう一度、この本質的な「問い」に向き合うことは、いまこそ重要であると考えられる。

逆に言えば、どんなに国連を中心に「緩和策」や「適応策」を積極的に推進し、「ネガティブ・エミッション」等の努力に注力しても、方や、「戦争」が放置されたままであるならば、まったくの台無

しになってしまい、人類がいままでコツコツと地道に進めてきた「脱炭素」への努力が水泡に帰してしまうのである。まさに「画竜点睛を欠く」ことになるからである。

それでは、はたして、この「戦争の GHG 排出削減」という、実にやっかいな難問に対応策はあるのであろうか？

いま考えられうる現実的な打開策としては、以下の4つの「工夫」が考えられよう。

<戦争の GHG 排出削減のための現実的な打開策>

① 気候を安全保障に組み込む工夫

NATO（North Atlantic Treaty Organization；北大西洋条約機構）などで議論が進行しているが、軍の排出削減・再エネ化、「エネルギー依存＝安全保障リスク」という認識の共有が必須不可欠である。戦争の原因でもある資源争いを減らす方向である。

② 化石燃料依存そのものを減らす工夫

軍事活動においても再生可能エネルギーの拡大によって化石燃料依存そのものを減らすことは「気候対策」とすると同時に「地政学リスク低減」にも資する。特に欧州はウクライナ侵攻後に実際に兵器の「脱炭素」が加速している。戦争による排出増を構造的に防ぐ方法である。

③ 「戦争排出」を可視化・制度化する工夫

現状、軍事に伴う GHG 排出は国際的に報告義務がない。その改善案としては、「パリ協定」の枠内で軍事排出の報告を強化する制度化が検討させるべきであろう。そして、戦争・紛争時の GHG 排出を国際的に監視するシステム構築が急務である。いままで黙認され放置されてきた軍事分野における「見えない GHG 排出」を減らす圧力となろう。

④ 紛争時でも国際間の気候協力を止めずに継続する工夫

過去には冷戦下でも科学協力は継続してきた実績がある。米ソ冷戦時代に締結された「モントリオール議定書（Montreal Protocol）」³⁰はその証左である。紛争時でも国際間の気候協力を止めずに継続することは可能である。かような「気候だけは例外的に協力する」枠組みが必要となろう。つまり、技術・資金のデカップリングをすることで、紛争時でも気候協力を止めずに継続する仕組みをつくり、戦争＝即気候崩壊というジレンマを防ぐ工夫である。

むろん、こうした対応策には限界もあることは百も承知である。どうしても、戦争は、安全保障という短期的合理性が最優先するのに対して、気候危機問題は長期問題であり、後回しにされやすい

³⁰ 「モントリオール議定書（Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer）」は、米ソ冷戦下に締結されたいわゆる「ウィーン条約」（「オゾン層の保護のためのウィーン条約」）に基づき、オゾン層を破壊するおそれのある物質を指定し、これらの物質の製造、消費および貿易を規制することを目的とし、米ソ冷戦下の1987年にカナダで採択された議定書。正式名は「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」。事務局はケニアのナイロビにある国連環境計画（UNEP）。

事情がある。そして、いまや「気候変動が紛争を引き起こす」「紛争が気候対策を破壊する」といった相互強化ループ (mutually reinforcing loop) が最大の問題となってしまうている。

戦争そのものを止めない限り気候危機の完全な解決はないことも自明であるが、しかし、「それは人間の業なのだから致し方ない」と開き直って、不毛な言い訳ばかりしていてもすまされない。

このまま「戦争」と「気候危機」の2つの「元凶」がある限り、人類の未来はないのである。

いかに「エネルギー転換」+「国際協調」+「安全保障の再設計」の三位一体を実現させてゆくかが、人類にとって、持続可能な真の幸福を担保する命題であろう。これは喫緊の課題であり急務である。

今年 2026 年 1 月 16 日のニューヨーク国連総会演説で、アントニオ・グテーレス国連事務総長「私たちの使命は、気候オーバーシュートをできるだけ小幅で、短期かつ安全なものに抑え、気温上昇を遅滞なく 1.5° C の軌道へと戻すことにあります。」と述べられた。まさに正鵠を射た発言だと痛く共感したが、しかし、一方で、本来、人類が制御すべきものは、「気候」の「オーバーシュート」対策ももちろん大事ではあるが、「戦争」という「怪物」を有史来、性懲りもなく生み出してしまってきた人間の「欲望」と「猜疑心」の「オーバーシュート」そのものに違いないとも思った。

このあたりの本質的な問題の究極の根源には、人類に内在している「情報の非対称性 (Information asymmetry) 問題」³¹があると考えている。当方も、一介の地球環境学者の端くれとして、目下、大学でこのあたりの「解法」について研究しているところである。

人類の未来の帰趨は、まさに、このやっかいな宿痾をいかに制御するかに掛かっているのである。

まだ、来年 2027 年の年初には誕生するとも言われている汎用人工知能 (Artificial General Intelligence ; AGI) やその先の人工超知能 (Artificial Superintelligence : ASI) に任せるのは、未知数な部分があり、一抹の不安もあって躊躇するのだが、「戦争」と「気候危機」という2つの「元凶」に対する「最適解」に貢献する可能性はどうなんだろうか。

誰か猫の首に鈴をつける人はいないのであろうか。

(end of documents)

³¹ 「情報の非対称性 (Information asymmetry) 問題」は、当事者がもう一方よりも多くのまたは優れた情報を持っている状態のことをいう。「情報の非対称性」は取引における力関係の不均衡を生み出し、時には取引の非効率性を引き起こし、最悪の場合は市場の失敗を招く。この問題の例としては「逆選抜」「モラルハザード」「知識独占」などがあるが、その典型的な証左が「気候危機」であり「戦争」である。