

GWP*文献

レビュー：

メタンなど
短寿命気候汚染物質に
提唱される
地球温暖化係数 GWP*の
推計手法

この文書は原文から一般社団法人Jミルクが作成した翻訳（仮訳）であり、仮訳の正確性、完全性等については保証をするものではありません。この翻訳はグローバル・デーリー・プラットフォーム（GDP）が作成したものではなく、GDPは翻訳の内容や正確さについて責任を負いません。原文の英語版（A Literature Review of GWP*: A proposed method for estimating global warming potential (GWP*) of short-lived climate pollutants like methane. Global Dairy Platform: Illinois, USA. 2020）を正式な版とします。



GLOBAL DAIRY PLATFORM

資金協力パートナー

アーラフーズ社
デリー・カンパニー・アソシエーション・オブ・ニュージーランド (DCANZ)
デリー・オーストラリア
US デリー・イノベーションセンター
マクドナルド社
グローバル・デリー・プラットフォーム
グローバル・ラウンドテーブル・フォー・サステナブル・ビーフ
ミート&ライブストック・オーストラリア

プロジェクトパートナーより	3
概要	4
はじめに	6
地球温暖化の物理学	8
温室効果ガスインベントリ (まとめ)	9
二酸化炭素	10
メタン	12
一酸化二窒素	15
地球温暖化係数 (GWP)	16
地球温暖化係数* (GWP*)	18
GWP*に対する批判および代替案	23
結論 (まとめ)	27
これからどうするか? GWP*採用の意味合いと影響	28
付属資料	29
参考文献	30
補足資料	33
略語	34
用語集	35



情報パートナー

国際酪農連盟
カリフォルニア大学デービス校 CLEAR センター
アーカンソー大学
ニュージーランド農業者連盟

寄稿者¹: ロジャー・A・キャディ博士 (Roger A. Cady, PhD)

キャディ農業持続可能性スペシャルティーズ (Cady Agricultural Sustainability Specialties) 代表

発行: 2020年11月

プロジェクト管理提供グローバル・デリー・プラットフォーム (GDP)

¹ 謝辞: カリフォルニア大学デービス校のシュレ・リユー博士 (Dr. Shule Liu) およびフランク・ミトロナー博士 (Dr. Frank Mitloehner) に対し、査読者のコメントに基づく提案と編集の提供における両氏の貴重なアドバイスと助力に深く感謝する。

プロジェクトパートナーより

この文献レビューは、グローバル・デーリー・プラットフォーム地球温暖化係数*（GWP*（ジー・ダブリュー・ピー・スター））研究プロジェクト運営グループの委託によるもので、同グループには世界中の酪農乳業・肉牛セクターから農業、学術および非政府組織（NGO）を代表する人々が参加している。

運営グループが目的とするのは、メタンガスが地球温暖化をもたらしていることを説明するために用いる推計手法について、理解を深めるプロセスを示すことで、家畜が気候に与える影響を低減するための政策決定が十分な情報に基づき行われることができるようにすることである。理解を深めるプロセスには数段階あり、最初の段階はメタンをテーマとした文献のレビューで、メタンが大気中でどのように働いているのか、温暖化の原因である他のガス、特に一酸化二窒素や二酸化炭素と比べる。本稿で行うレビューがその第1段階のプロセスである。第2段階以降には、シナリオモデルの作成と政策的意味合いが含まれる。

文献レビューの目的は何よりもまず、メタンに関連する堅牢で正確な科学的知識を提供することにより、家畜セクターの意思決定を支援することである。反すう家畜の業界の人々は、気候に与える影響の継続的な低減が急務であることを認識している。このことを達成する唯一の方法は、メタンの大気中の働きや生物学的過程を注意深く探るとともに、それをどのように、国連の温室効果ガス（GHG）報告プロセスや民間セクターの自主的な取り組みで採用している現行の方法論に関連づけるかを特定することである。本レビューでは、こうした科学と政策の関係を探るため、炭素循環、GHGに起因する地球温暖化、家畜セクターに関連するGHGの大気中での変わりやすい働き、およびGHG排出量を説明できる係数指標（メトリック）について詳細を明らかにする。GWP*のメトリックについて概説し、あわせて二酸化炭素や一酸化二窒素と比べ大気寿命が短いメタンの特性を理解する上でそのメトリックが持つ重要性についても探る。

レビューではメタンおよびGWP*のメトリックに焦点を合わせているが、どのメトリックが望ましいかについては触れていない。むしろ、GWP*が現行のメトリックであるGWP100と異なる政策上の疑問に答えているため、レビューでは複数のメトリックを相互に関連させ正當に評価することによっていかに政策立案を改善することができるかについて、新たな情報を生み出すために、さらなる取り組みの指針を示している。

メタンガスが地球温暖化をもたらしていることを説明するために用いる推計手法について理解を深めるには、次のようないくつかの不明点がある。カーボンフットプリントや排出濃度の計算にGWP*をどのように含めることができるか、またそれができない場合には、国連GHG報告プロセスがGWP*を採用することにより、家畜頭数の拡大または縮小が進行しているかどうかに応じ、どのように各国ごとに異なる影響を及ぼすことになるか、国連GHG報告プロセスがGWP*を採用することにより、どのように非家畜セクターに影響を与えることになるか、また、上述のように、複数のメトリック（特にGWP*とGWP100）を、持続可能な農業を促進するため、どのように組み合わせる用いることができるか、などである。シナリオモデルの作成と政策的意味合いが含まれる第2段階以降のプロセスでは、こうした不明点のいくつかを取り上げ、その中で、他のGHGの説明メトリックと比較したGWP*の客観性および科学的評価を高めることで、産業界および政府がGWP*メトリックを他のメトリックに加えて、あるいは他のメトリックと一緒に導入する政策的意味合いを提起する。



メタンは地球温暖化の主たる原因のうち第2位を占めるが、最も短寿命である。

概要

温室効果ガス（GHG）の上位3つである二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）および一酸化二窒素（N₂O）の大気中の濃度の高まりが、大気温上昇の原因の大半を占めている。

気候学の科学的知識から、CO₂、CH₄およびN₂Oには非常に異なる特徴があることが分かっている。CO₂は群を抜いて広く存在しているガスで、地球温暖化の主要原因である。他のすべてのGHGを比較する場合の基準となるガスである。メタンは地球温暖化の主たる原因のうち第2位を占めるが、最も短寿命である。一酸化二窒素は長寿命のGHGでもあるが、その濃度と排出割合は3つのガスのうち最も低い。

本報告書ではメタンが主題のGHGだが、その理由はメタンの最大の排出源が反すう家畜だからである。新たなメトリック（GWP*）が提案されたのは、温度変化へのメタンの実影響の評価方法が改善されて紹介されている科学文献であった。

大気環境は流動的で、地域で異なり常に変化している。GHGの効果は放射強制力（RF）と大気中の滞留時間によって決定されるが、この2つの変数はガスの固定的な特徴ではない。GHGは既存の大気の濃度、温度、湿度、季節性、エネルギー源および空気中のヒドロキシルラジカル（OH）の存在量によって影響を受ける可能性がある。

排出削減の目標設定および吸収源（シンク）の創出を効果的に行うには、排出源を正確に数値化する必要がある。

こうしたことはすべて、さまざまな文化のおよび社会経済的背景をもつ国際社会の中で達成されなければならない。カギとなる排出源を特定し、特に複数の異なる GHG を同時に放出する産業の商取引や文化の混乱を最小限にとどめた排出削減戦略を策定するには、異なる GHG ごとに気候に与える影響を評価する標準的な手法を開発する必要がある。しかし、GHG の重要な特徴は多様性であるため、これを困難なものにしている。

現在の標準的な評価手法は 1990 年に提案された地球温暖化係数（GWP : Global Warming Potential）だが、短寿命気候汚染物質（SLCPs : short-lived climate pollutants）に対する適用可能性は限定的である。このメトリックは 30 年近く用いられてきたが、幅広く受け入れられる結果にはならなかった。現在、多くの調査員、報告者、評価ツール開発者は、限定性を十分理解しないままこのメトリックを用いている。しかし、主たる SLCP であるメタンの重要性から、SLCPs の温暖化効果を評価するためのメトリック GWP に新たな関心が集まっている。

2 つの代替メトリック、地球温暖化係数 GWP* と地球温度変化係数（GTP : Global Temperature Change Potential）が、GWP に代わるものとして適切であるかを判定するために審査されている。GTP は、GHG を特定の期間における大気負荷と同一視する見方から、将来の一時点において対象となるガスの温度変化を推計する方法に焦点を移している。

GTP は、政策立案者には有用性が増し、一般の人々には理解しやすくなっているが、重大な欠点もいくつかある。第 1 に、追加データが必要となるためコンピュータによる計算がより複雑になることである。第 2 に、推計の不確実性（予測誤差）が、GWP₁₀₀ の ±40% に比べ GTP₁₀₀ は ±75% と非常に大きいことである（気候変動に関する政府間パネル [IPCC] 第 5 次評価報告書 [AR5] 第 8 章）。このため、このメトリックは GWP の補助メトリックとして一定の有用性があるものの、おそらく代わりに用いることはできないだろう。

第 2 の提案メトリックである GWP* は、現行の GWP が抱える最も重大な欠点に取り組んでおり、SLCPs を適切に取り扱っている。

GWP のこの欠点は、SLCP である CH₄ の評価に重大な影響をもたらすため、家畜業界に直接大きく関係する。CO₂ や N₂O のような長寿命気候汚染物質（LLCPs）、別名蓄積性汚染物質にとっては、GWP は十分な等価性を持つ。しかし、GWP の方法論は SLCPs と LLCP を同等に扱うため、緩和戦略の非常に限られた期間におさまらない推計の場合は誤差の原因になる。こうした誤差は大変深刻で、CH₄ の排出量が減少傾向にあり、実際には相対的な冷却効果がある場合ですら、GWP は温暖化効果が残っているという推計結果を出すだろう。

GWP* は GWP の代わりでも GWP から独立しているわけでもなく、むしろ GWP を強化するものである。

3 本の査読論文が CO₂ 温暖化等価（CO₂-we : CO₂-warming-equivalent）のメトリックを用い公表したエビデンスによれば、GWP* は将来の温度変化の予測においては GWP より優れたメトリックで、メタンのような SLCPs にとっては GWP の強化版と考えるのが妥当に見える。



はじめに

本レビューの意図するところは、GWP*と総称される新しい地球温暖化メトリックの効果をまとめることで、短寿命気候汚染物質（SLCP）であるメタンについて、現行のGWPメトリックを強化することである。

大気温度の上昇は複雑なプロセスで、多くの要因が関わり、その中には多数のガス、排出源、吸収源（シンク）、および動力学的な大気の物理特性が含まれている。

炭素¹循環

地球上の¹²C (6.6×10⁴ ギガトン [Gt]) の大半(約 80%) はリソスフェア(頁岩、石灰石、大理石、ドロマイト、炭酸塩、グラファイト、およびダイヤモンドなどの岩石で、最後の2つは純粋の炭素である) および化石燃料(例: 石炭、石油、および天然ガス [メタン]) の中に存在している。残りの 20% は海洋、大気圏、有機体、および表層土の中に存在している。

炭素はこれらのリザーバ(貯蔵庫)の間を系統的に移動しており、これを「炭素循環」と呼んでいる。1つのリザーバ(吸収源)から別のリザーバへと、炭素のバランスを移すあらゆるプロセスは、炭素循環を変えている。大気が炭素分子の増加を容容すると、温度が上昇する(Riebeek & Simmon, 2011)。



図 1. この図は陸域、大気圏および海洋間の炭素の移動を示している。

黄色の数字は自然の流れ、赤色は人間の寄与によるものである(単位: ギガトン炭素/年)。白抜き数字は蓄積【隔離】された炭素量を示す。本図は米国エネルギー省(DOE) 生物環境科学室(BER)の情報システムから編集したものである。

出典:
<https://public.ornl.gov/site/gallery/detail.cfm?id=445&topic=&citation=&general=carbon&rserestsection=BERPublic>

図 1 は、主に化石燃料の燃焼といった人間の活動による影響が、さまざまなリザーバにおける炭素のバランスをどのように変えるかを示している。この図解では、光合成の増加が人為的排出量の 3分の1 をオフセットし、海洋がさらに 22% を吸収した結果、大気圏内には炭素排出量の 45% が残る。

基本的に、人間の活動(採掘、化石燃料の燃焼によるエネルギー生産、セメント生産のような一定の製造プロセスなど)が、地球深部の吸収源に長年堆積した余剰炭素の残留から、炭素を大気中に移し、放出を加速させることで、地球温暖化を生み、海洋の pH を低下させている。さらに、世界的な森林破壊の純増が主要 GHG の排出源および吸収源のバランスをシフトさせている。

大気中の炭素の増加をオフセットするには、炭素化合物の環境への新規排出量を削減または除去するために、基本的に次の 2つの選択肢が存在する: 1) 化石燃料の採掘および利用を最小限にすること、2) 炭素の土壌、植物、海洋への隔離を増加させる手法を用いることのいずれか、あるいはその双方。

化石燃料から「新たに」放出される炭素の量は現在、吸収源としての海洋による自然の炭素吸収能力を大きく上回っている。このように、海洋による新規 CO₂ の吸収がしばしば「気候変動の邪悪な双子」と呼ばれているのは、追加された CO₂ が H₂O

と結合して炭酸を形成するにつれ、海洋の pH を低下させる(酸性度を高める)からである。海洋は、産業革命期の開始(1750 年ごろ)以降、476.3 ギガトンの CO₂ を吸収してきたと推計されており、これは毎年平均 20 トンを吸収してきたことになる。この結果、過去 200 年で海洋の酸性度は 30% 増加しており、これは過去 5 千万年で最高の増加量である。この影響により、甲殻海洋生物の殻の弱体化が進み、サンゴ礁を破壊している(The Ocean Portal Team, 2018)。

従って、植物及び土壌での炭素隔離は、大気圏および海洋を共に守るうえで一層緊急性と重要性が増している。

すべての GHG の排出量が増加ゼロになるまで削減された場合、言い替えれば、現在の排出レベルが維持された場合、炭素循環はバランスを取り戻し、大気圏は安定した新たな温度点に落ち着くだろう。しかし、このバランスに到達するまでには何世紀もかかるかもしれない。大気中の GHG は蓄積し続け、気候に及ぼす影響は依然として持続していくと思われるからである。

¹ 注: 「炭素」の用語は、炭素の元素を指すか、炭素を含む化合物群を指す。炭素の用語が用いられる文脈により、どちらの定義が適切が決まる。

地球温暖化の物理学

温室効果ガスは、太陽の放射を吸収し、それを赤外線スペクトルとして再放射することにより地球を暖める。温室効果ガスは熱赤外線放射を吸収し、その結果、毛布のように熱を閉じ込め、あるいは温室のガラスのように温室内を外気温よりはるかに暖かい温度に温めるため、「温室効果ガス（Greenhouse Gas : GHG）」と名付けられている。

大気中の温度が、人間が生存することができる温度まで温められ、地球上の生き物が生存できる。数十種類の GHG があり、地球温暖化への影響は幅広く、さまざまである。

GHG の 2 つの重要な特徴は、1) 放射強制力 (RF : 用語集の定義を参照) として知られるエネルギーを吸収し方向転換させる能力があること、および 2) 放出もしくは排出後、大気中で持続することである。

放射強制力は、主に GHG の分子構造に吸収された太陽放射によって決まる。適切な周波数によって GHG 分子内で原子間の化学結合が振動し回転し、その結果、太陽光からエネルギーを抜き取る時に吸収が起きる。

放射強制力、すなわちエネルギー吸収量は、1 平方メートル当たりのワット数 (W/m^2) で測られる。放射強制力 (RF) の能力は、通常質量 (例 : トン) ベースで報告される。従って、報告される RF は、大気中に存在する GHG ガスの既存の濃度に影響される。

そのため、GHG ガス間の RF を比較するときは注意する必要がある。分子量 (MW) が異なるため一定重量でも濃度はガスによりさまざまだからである。

例えば、 CO_2 の分子量は 44 だが、 CH_4 の分子量は 16 である。従って、 CH_4 の 1 トン当たりの分子数は CO_2 の約 2.75 倍になる。この差により、同質量の CO_2 と比較すると CH_4 の RF は増幅される。

GHG の持続性は、半減期、つまり排出量やパルス放出量の半分が、他のガスに分解するか吸収源に吸収されるのにかかる時間によって計測される。この排出量の半減によって、大気温度の上昇に影響を与える。GHG の減衰曲線は、半減期の間隔ごとに残存ガスのパルス放出量の半分が消滅する指数曲線になる (例 : 1/2、1/4、1/8 など)。

例えば、半減期が 1 年のガスのパルス放出量は完全に (0.1% 未満) 消滅するまで約 11 年かかることになる。図 5 はメタンと CO_2 の指数減衰曲線の比較である。





温室効果ガスインベントリ（まとめ）

表 1. 最も一般的な 3 種類の温室効果ガスの特徴

ガス	% (体積) ²	原子量または分子量	% (質量) ³	半減期 ¹	GHG	温室効果	2014 年排出量の% (質量) ⁴
二酸化炭素 (CO ₂)	0.04%	MW 44	0.12%	数千年 ¹	○	+	76%
メタン (CH ₄)	0.0002%	MW 16	0.0002%	8.6 年 ⁵	○	++	16%
一酸化二窒素 (N ₂ O)	0.00003%	MW 44	0.0001%	114~120 ⁵ 年 ⁶	○	+++	6%

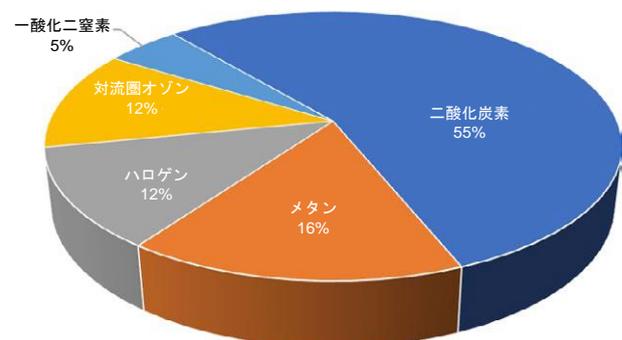
出典：¹ Wikipedia, 2019、² 計算結果、³ Hausfather, 2008、⁴ IPCC, 2014、⁵ Muller and Muller, 2017、⁶ Montzka, S.A. et al.

表 1 は地球の低層大気（対流圏）の中で最も一般的な GHG のまとめである。農業にとって重要な三大地球温暖化ガスは、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、および一酸化二窒素 (N₂O) である。GHG の効果は、その放射強制力、大気中の濃度、および大気中の滞留時間、つまり寿命によって決まる。

図 2 は主な GHG の大気温度上昇に対する寄与度を概略で示しているが、水蒸気は含まれていない。水蒸気は重要なフィードバックメカニズムだが、温暖化に直接寄与していない。ハロゲンおよび対流圏オゾンは農業には適用されない。

次に CO₂ と CH₄ の議論に移る。この 2 つを合わせると、人為起源の GHG による温暖化係数の 71% を占めており（図 2）、CH₄ の地球温暖化係数 (GWP) の推計について CO₂ との比較を中心に考察する。

図 2. 人為起源の GHG による地球温暖化への寄与



出典：Acconia, 2019

注：%は、合計が100%になるように端数調整している



二酸化炭素

二酸化炭素（CO₂）は、他のすべての GHG の気候への効果を比較するときの標準であり、基準となるガスである。

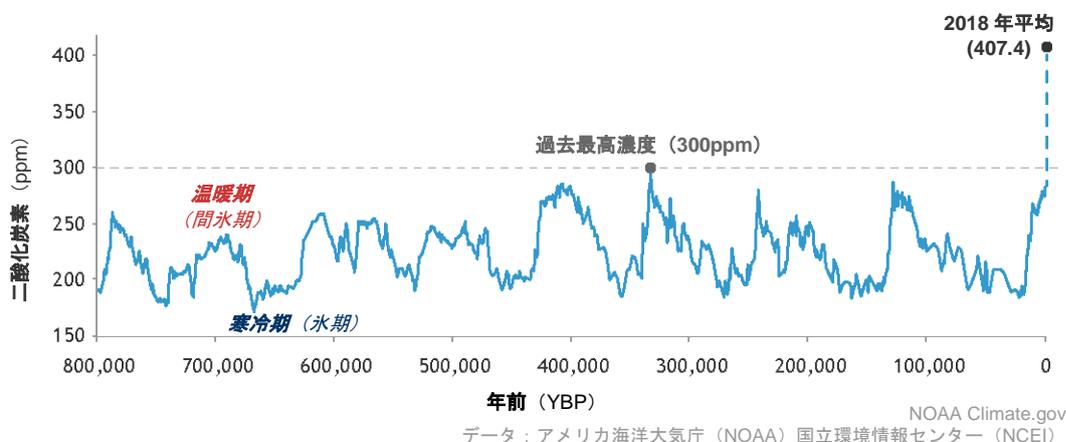
CO₂は大気中で極めて長く持続することから、地球温暖化に及ぼす影響力は圧倒的であり、そのため、その大気中の濃度により決定される地球の大気温度の「温度調節弁」と呼ばれることがよくある。N₂OとCH₄は1分子当たりのエネルギー吸収量がCO₂より大きい一方、CO₂は他の2つのガスよりはるかに量が多く、長く持続する（表1）。

さらに、大気中のCO₂の増加により、海洋のCO₂吸収量が増えて酸性度が高まる。産業革命期の開始以降、海洋のpHは8.2から8.1に低下し、酸性度は30%増加と、対数目盛で計られるpHの数字よりもはるかに大きい増加である（Lindsey, 2018）。

大気中のCO₂の除去（隔離）には3つのプロセスがある。海洋による吸収、光合成、および土壌による隔離である。これらのプロセスのスピードはさまざまだが、一般に生物起源および自然から放出されるCO₂を除去する能力がある。従って、人為起源のCO₂は、自然の吸収能力をはるかに上回る傾向にある。このように、人為起源のCO₂は、通常CO₂の半減期と考えられている何千年もの間、残留する。

図3. 過去80万年の
寒冷期および温暖期
におけるCO₂

出典：Lindsey, 2018



大気中の CO₂ 濃度は、有史以前の氷床コアサンプルと過去 2 世紀の直接観測が示すとおり、過去 80 万年にわたり大きく変動してきた (図 3)。経年の変動に、春夏に放出量が低下する季節変動も加わる。これは、植物や樹木には光合成による CO₂ の吸収量を増加させる季節による真盛りがあるからである

(Lindsey, 2018)。CO₂ 濃度は現在、過去 300 万年で最高レベルにある (Ritchie & Roser, 2018)。

大気中の CO₂ 濃度は、図 3 に見られるように、過去 80 万年にわたり、およそ 10 万年の平均周期で概ね 175ppm から 275ppm の範囲内におさまっていた。濃度が低い期間は氷期と一致し、高い期間は間氷期と一致していた。この傾向は産業革命期の開始まで続いたが、それ以後、CO₂ 濃度は着実に伸び続け、2017 年までには大気中の CO₂ 濃度が 405ppm までになった。

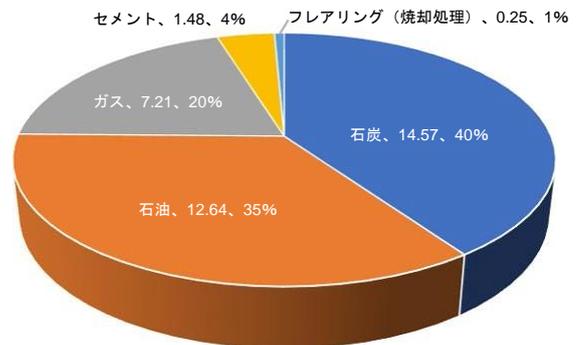
産業革命期の開始時には 9.35 メガトン (Mt) だったと推定されている人為起源の CO₂ 年間排出量は、1900 年から 2017 年の間、年間 2.0 ギガトン² (Gt) から 36.2Gt を超えるまでに増加した (Ritchie & Roser, 2019)。現在、大気中の CO₂ 増加量は、11,000~17,000 年前の前氷河期最後の期間に起きた自然増の約 100 倍である (Lindsey, 2018)。

CO₂ の大部分は生き物の呼吸から排出され、生物起源の排出源といわれているが、呼吸は地球温暖化に影響を及ぼしているとは考えられていない。

例えば、人間は活動レベルによるが、1 日平均 1 キログラム強の CO₂ を吐き出している。1 年に換算すると、人類は 2.8Gt の CO₂ を吐き出していることになるが、これはすべての生物起源の排出源のうちのごく一部である (Palmer, 2009)。

自然から放出される CO₂ は人為起源の排出源をはるかに上回る量だが、地球温暖化に影響しているのは後者である。自然の放出量は自然の吸収源 (主に海洋、光合成、および土中の有機物) によりオフセットされるからである。人為起源の排出源の量は、図 1 で示されている排出と吸収の自然循環をはるかに上回っているため、CO₂ の大気負荷を増やし、次に大気温度を上げているのである。

図 4. 世界の人為起源の CO₂ 排出源 (2017 年)



出典: Ritchie & Roser, 2019 注: 小数の単位は 10 億トン (bt)

図 4 のとおり、化石燃料の燃焼が人為起源の CO₂ 負荷を生む最大の原因者であることは間違いなく、95% が石炭、石油、そして天然ガスの燃焼によるものである (土地利用、土地の用途変更および森林放出はここでは考慮していない)。こうした化石燃料による寄与の歴史的な変遷を調べると、産業革命開始時には石炭が圧倒的に主たる原因で、他にはほとんど競合するものがないことが分かる。時間が経つにつれ、まず石油の排出割合が増加し始め、天然ガスがそれに続く。過去 10 年で、セメントの生産も目に見える割合を占め始めるようになった。



² メガトン (Mt) は 100 万トンと同等である。一貫性を保つため、10 億トンは 1 ギガトン (Gt) と呼ばれている。一部では省略記号 bt が好まれて用いられたが、これは Gt に変換されている。

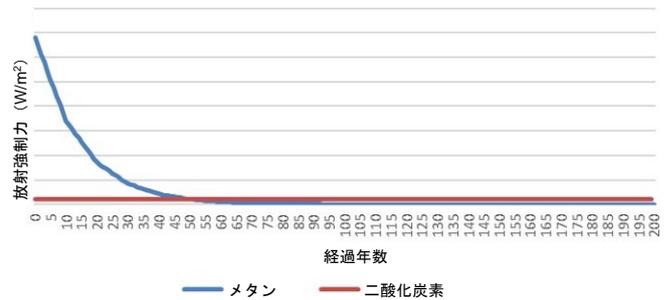
メタン

メタン (CH₄) は2番目に重要な温室効果ガスである。メタンは動物に関わる農業にとって決定的に重要である。それは、メタンの排出源のかなりの部分が、人為起源とレッテルを貼られた食料生産、それも特に反すう動物に由来しているからである。

CH₄が短寿命気候汚染物質 (SLCP) であるという事実もメタンに対する関心を高めている。CH₄の半減期は8.6年である (表1)。このように、CH₄は質量ベースでより強い温暖化効果がある一方で、その影響が大気中で続く時間はCO₂よりもはるかに短い (図5)。結果として、CH₄のパルス放出量は60年でほぼなくなる (1%未満) が、人為起源のCO₂の大部分は残る。

これが、CO₂が大気温度を制御している最重要のガスである理由である。CH₄の排出削減に非常に大きな重点が置かれている理由もある。大気中のCO₂濃度よりもCH₄濃度の低下の方が進捗を早めることができるため、地球の温度上昇のスピードを鈍化させるには、より手取り早い方法だからである (Allen, 2015, Haines et al., 2017)。しかし、SLCPを規制しても地球温暖化を十分に削減するという目標の達成にはならない。2050年までに地球温暖化の上限目標1.5°Cを達成するつもりならば、すべてのGHGの削減を目標にする必要がある。この難局打開への科学的議論が続いている (Bowerman et al., 2013, Pierrehumbert, 2014)。

図5. メタンおよび二酸化炭素の質量等価パルス放出量に対する温暖化係数の経年変化図



メタンの吸収源はCO₂の吸収源と異なるため、吸収源による除去で、メタンとCO₂は競合していない。

大気中のメタンの除去は次の3つの場所、対流圏 (84%~88%)、成層圏 (7%~8%)、および土壌 (残りの5%) で起こる。

(Env.Change Inst., 2005 および Lynch, 2019)

メタンの第一の吸収源は酸化によるものである。酸化が最も起こる対流圏では、メタンがヒドロキシルラジカル (OH) と化合し、その結果CO₂の1分子とH₂Oの2分子が生成される。ヒドロキシルラジカルは大気の「洗剤」あるいは「クレンザー」と言われている。この酸化のプロセスでは、CO₂とH₂O以外にもオゾン (O₃) のような中間化合物が生成される。オゾンは植物の成長を遅らせ、GHGとして作用する対流圏の汚染物質である。

ヒドロキシルラジカルは、水蒸気中のO₃に太陽の紫外線が当たるときに形成される。O₃が光分解されると、放出された酸素原子がH₂O分子から水素原子を盗み、ヒドロキシルラジカル (OH) の2分子が生まれる。

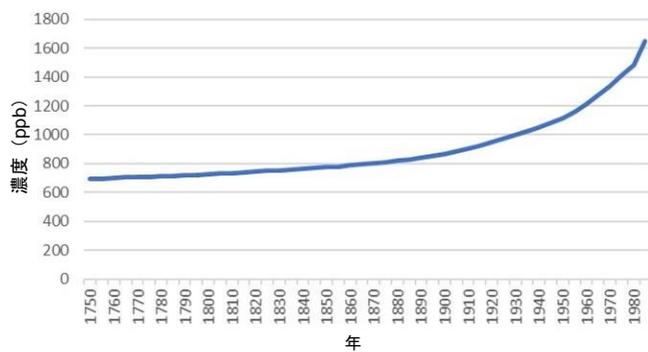
OHの生成はどちらかといえば毎年一定しているが、温度と湿度により変動する。湿度や温度が最も高い地域や季節にOHの濃度が最高となる。例えば、熱帯地域、および温帯地域の夏期などが当てはまる (Riedel & Lassey, 2008)。この結果、大気中のメタン濃度に±10ppbの季節変動が生まれ、メタンのレベルは夏に最も低く、冬に最も高くなる (2nd Degree Institute, 2020)。



メタン濃度上昇の複雑さは、OH への需要増大とその結果の枯渇により半減期が伸び、それがメタンの放射強制力を強化するところにある。ヒドロキシルラジカルの枯渇は、メタンが一酸化炭素 (CO) や二酸化窒素 (NO₂)、さまざまな炭化水素のような他の汚染物質と OH の獲得をめくり競っていることから深刻化している (Env.Change Inst., 2005、Riedel & Lassey, 2008)。

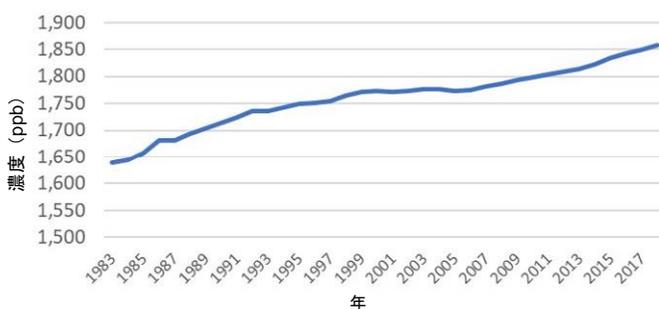
メタンの中には対流圏での酸化を逃れて成層圏に上昇し、そこで酸化が起こるものもある。そこでは対流圏と同じようにヒドロキシルラジカルで酸化されるものもあるが、塩化ラジカルとの相互作用を通して行われる酸化もある。最後に、残りの5%のCH₄は土壤中に定住しているメタン資化性細菌がメタンを酸化してCO₂にすることで除去する (Env.Change Inst., 2005)。成層圏におけるメタンの崩壊が、大気中の水蒸気の約50%を生んでいる。

図 6a. 地球大気中のメタン濃度 (1750~1985 年)



出典 : 2 Degrees Institute, 2019

図 6b. 地球大気中の年間メタン濃度 (1983~2018 年)



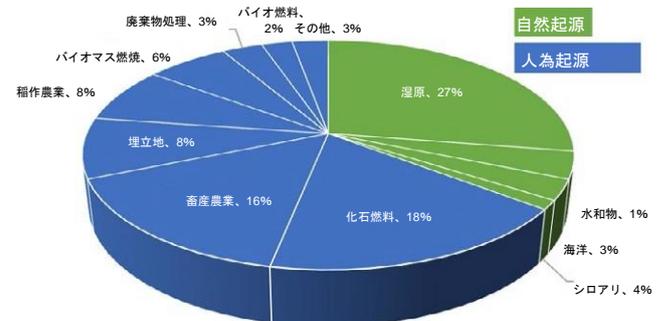
出典 : 2 Degrees Institute, 2019

2019 年 6 月現在、大気中のメタン濃度は 1,860.2ppb (2 Deg.Inst., 2019)、1ppb が 2.78 メガトン (Mt) に等しい (Env.Change Inst., 2005) と仮定すると、総負荷は 5,160Mt になる。この水準は、AD1000 年から産業革命期の始まる 1750 年まで約 680ppb で安定していた大部分の前千年期の 2.7 倍である。このようにメタン濃度が過去 2 世紀で 3 倍近くなったのに対し、同じ期間に CO₂ 濃度は 50% 増加している。

図 6a は、産業革命開始期からなだらかに増加していた大気中のメタン濃度が、20 世紀初頭から急速に増加し始めたことを示している。図 6b からは、メタン濃度が 1997 年から 2006 年までの 10 年間、ほとんど 1,770ppb のレベルで推移するなど、増加速度が 1990 年代に鈍化していることが分かる。

メタン濃度は 2006 年以降、年 6.9ppb のペースで再び上昇しており、これは年に 19.2Mt の CH₄ による大気負荷が増していることを意味している。

図 7a. 世界のメタン排出源 (2001~2006 年)



出典 : Env.Change Inst., 2005 と Bousquet, P. et al.2006 の平均値

メタンの主要排出源は特定されたように思われていたが、それぞれの排出源による寄与を数値化することはなかなか難しいことが分かってきた。排出源の多くは場所および季節により可変的である。いくつかの研究でそれぞれの排出源による寄与を数値化しようとしてきたが、それぞれの排出源の定義がさまざまであり、推計にも幅がある (Env.Change Inst., 2005)。このオックスフォードレビューでは 6 つの研究からのデータをまとめている。これらの研究およびその後のレポート (Bousquet et al., 2006) の結果を平均し、図 7a のグラフを作成した。

図 7a の排出源は自然起源のものと同様に人為起源のものに分けられる。湿原から放出されるメタンは、有機物の嫌気性消費が唯一で最大の放出源であり、メタンによる大気負荷の 27% を占めている。水と物は、極地の永久凍土層や海洋底および長期間凍結した池や湖の氷の中で結晶化し、氷結したメタンを指す。自然起源の排出源として特定されたものをすべて合わせると 35% と推計され、残りの 65% が人為起源の排出源と定義される。

化石燃料の抽出に伴い発生するメタンには、石炭の採掘および石油・ガスの掘削、汲上、保管、輸送によるパイプライン、タンク、石炭層その他のプロセスから一時的に放出されるものが含まれる。これらは年間総排出量の 18%、人為起源の排出量の 27% に当たる。農業全体の寄与率は 24% で、家畜によるものは 16% と、2013 年に家畜による人為的 CH₄ 排出量の推計値として公表された 14.5% よりも高くなっている (Garnett et al., 2017)。

これらの推計値は2001年から2006年の間のもので、この期間は図6bの説明で記載のとおり、目立ったメタンの排出が見られなかった時期である。その傾向が維持されていたら、吸収源が排出源に追いつき、メタンは大気の温暖化にそれ以上寄与しなくなったと言われていただろう。しかし、実際には前述のとおり、メタンの排出は2006年に再び上昇を始めている。

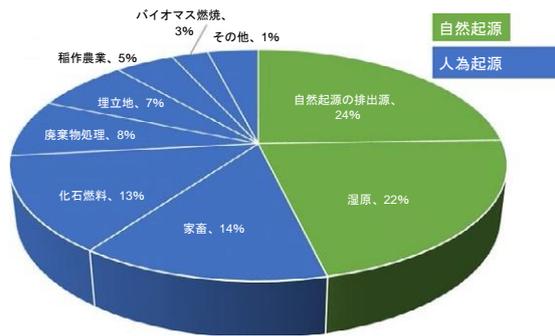
研究者が再上昇の考えられる原因を調査した結果、当初の報告書では、世界の開発途上地域の家族が貧困を脱したことで、家畜の放牧や作物生産のためのスペースをつくるため熱帯雨林や森林を新たに燃焼し、畜牛を増加させたことのせいになっていた (Voiland et al., 2018 および Pearce, 2016)。

Howarth (2019) のより最近の研究では、結論は異なる。Howarth は ^{12}C と ^{13}C の比率に関する初期の研究を是正した後、次のように結論付けた。「北米における過去10年のシェールガスの生産は、世界全体の化石燃料による排出量増加全体の半分以上、そして過去10年の全世界の排出源による排出増全体の約3分の1に寄与していた可能性がある。」この結論が裏付けられれば、図7aの推計は訂正される。Nisbet et al.

(2020) のまとめによれば、2006年以降の CH_4 の急上昇には、生物起源の排出増、大気中の OH および Cl による化学的な CH_4 吸収の変化、バイオマス燃焼の減少に連動した化石燃料の排出増、森林の土壌消失増、およびこれらの影響の組み合わせ

が含まれている可能性がある。

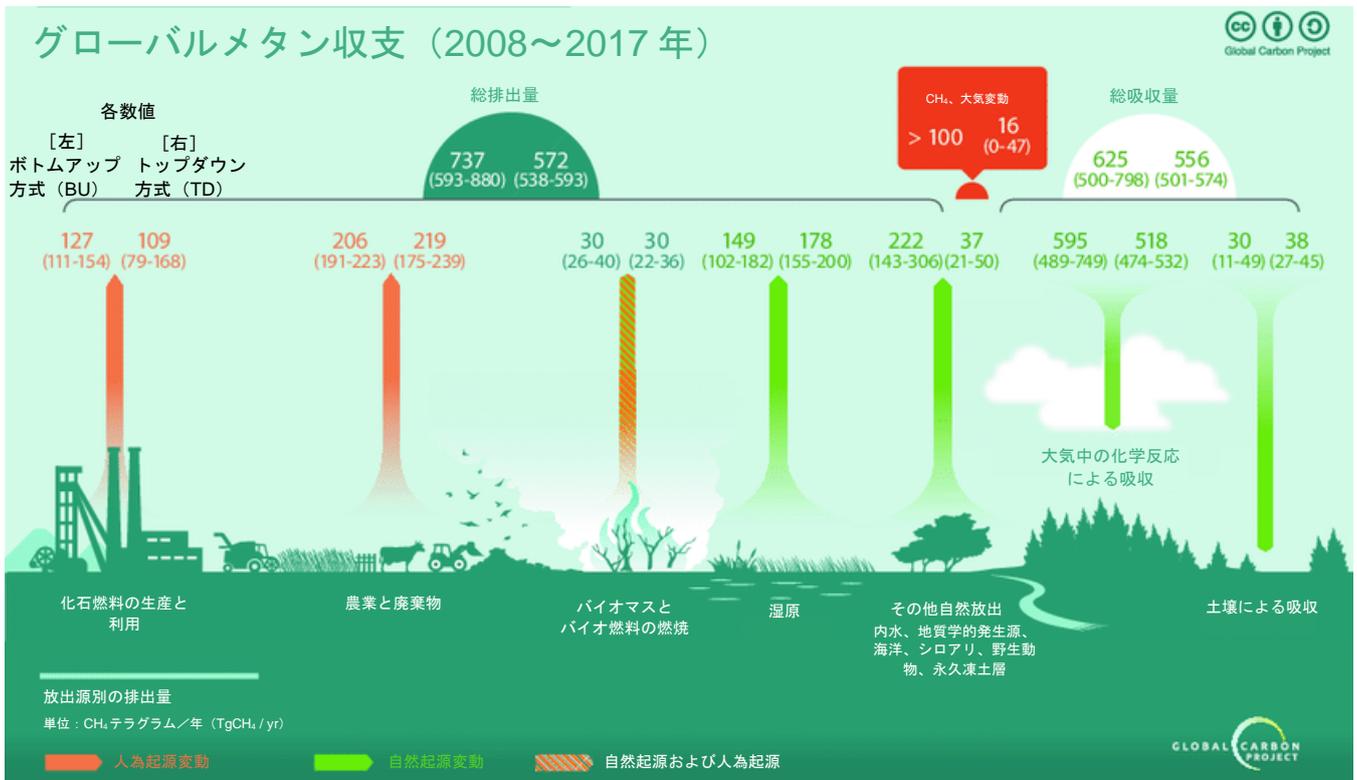
図7b. 世界のメタン排出源 (2002~2012年)



出典: Fairlie, S., 2018 と Turner et al., 2015 の平均値

メタン排出源の最新の推計値は図7bに示されている。図7bの多くの推計値は図7aの推計値と一致しているが、例外は、湿原を含む自然起源の放出源からの総排出量が図7bでは46%と大きく増えていることである。ただし、「自然起源の排出量」は、Fairlie (2018) のデータでは他の排出源リストにあるほど突発的に発生したわけではない。

グローバルメタン収支



出典: Saunio, M., 2020

グローバル・カーボン・プロジェクト (Saunois et al.2020) が公表した最新のグローバルメタン収支によれば、2008～2017年の10年間の平均CH₄排出量は572 (538～593) Mt/年³で、自然起源の排出源によるものが215 (176～248) Mt/年、人為起源の排出源によるものが357 (334～375) Mt/年と推計されている。

計算システムは、CH₄の放出源の増加についてオープンにしなければならない。最近になり、以前は判明していなかった炭化水素の大きな排出源が発見された。世界の1地域に過ぎない紅海の海底は、世界の石油・ガス埋蔵量の半分以上を占めている (Galey, 2020)。さらに、地球温暖化が続くに伴い、極地の氷床と永久凍土層が以前の予測よりはるかに速いペースで融解しており、人為起源のあらゆる排出源を上回る可能性がある (Env.Change Inst., 2005、Welch & Orlinsky, 2019)。

Zimov (2005) などの科学者は、融解している氷床からは過去に隔離され貯留されていたメタンが放出されることになるとかなり前から警告してきた。氷や永久凍土が融解して露出した排出源は、氷結していた有機物を放出すると、新たな湿原に生まれ変わる。アラスカの池で既に存在する事例では、大きく広がった氷の穴を通してCH₄が放出されている (Welch & Orlinsky, 2019)。このように隔離されたメタンの巨大な貯留分が放出され、大気に戻された場合、排出源の加速を無効にしてきた吸収源は破壊され、温暖化が暴走する可能性があるという大きな懸念がある。それを証明するものとして、IPCCではGHGインベントリの方法論を検証し、更新するよう推奨している (IPCC, 2019)。しかし、メタンの新しいインベントリの更新がどのくらいすぐに行われるのか、またメタンの排出源の分類カテゴリや捕捉メトリックの簡単な修正方法に一貫性があるのかどうかは、はっきりしていない。

一酸化二窒素

一酸化二窒素 (N₂O) は、農業の3つのGHGの中で、質量ベースで群を抜いて最高の放射強制力 (RF) を持ち、比較的長寿命である。

ただし、N₂Oはその濃度変化が少ないため、大気温度上昇のわずかに5%を占めているにすぎない。農業に関しては、有機 (たい肥) か無機 (商業生産物) にかかわらず、施肥期間中およびたい肥の処理中に主に排出される。114年～120年と、比較的長寿命のGHGである (表1)。

そのため、N₂O排出の削減やオフセットの取り組みが必要である。しかし、N₂Oは長寿命気候汚染物質 (LLCP) であるため、本レビューではN₂Oに関する議論はここで終わりにする。N₂Oは短寿命気候汚染物質 (SLCP) ではないため、N₂Oの地球温暖化係数 (GWP) はCO₂と比較した際に、提案されている修正推計値GWP*に大きく影響を受けないように思われるからである。GWP*の主な目的は、LLCPのCO₂との比較で、地球温暖化におけるSLCPの効果の違いに対処することである。



³ Saunois et al., 2020の著者らはテラグラム (Tg) の用語を使用していたが、本書では一貫性を保つためメガトン (Mt) に変換している。1テラグラムは1メガトンと等しい。



地球温暖化係数（GWP）

「地球温暖化係数（GWP）」は、ライフサイクルアセスメント（LCA）カーボンフットプリント法の標準化されたメトリックとして、国際的な気候政策のため京都議定書およびパリ協定草案で正式に定められた（Lynch et al., 2020 および ISO14044、UNFCCC, 1998 および 2015）。その目的は、すべてのGHGの効果をまとめた1つの簡単なメトリックを用いて、政策立案者が地球温暖化の緩和に向けてすぐに実施できる目標を立てるのを手助けすることであった。

残念なことに、前述のとおり、放射強制力の能力および大気中の持続性は、双方とも濃度と放出速度に影響され、GHGの温暖化係数に寄与するが、ガスにより大きく異なる。そのため、それぞれのガスの滞留時間、RF、および放出速度に関して、ガスそれぞれ1対1ベースで、さまざまなガスの相対効果を相互に比較することは困難である。しかし、GWPは過去30年の間、すべてのGHGによる効果を組み合わせて1つの数値メトリックを定め、用いてきた。

「温室効果ガスのGWPは、基準となるガス1キログラムと比べたときの微量物質1キログラムの瞬間放出（パルス）による放射強制力の累積値と定義され」（IPCC, 1990）、次の式を用いて推計される。

$$GWP_i \equiv \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_r(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_i(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [C_r(t)] dt}$$

（等式1）出典：IPCC, 1990

等式中、分子は対象となるガス（i）の放射強制力（RF）の曲線下の面積（例：図5のメタン）、および分母は基準となるガス（r）の曲線下の面積（例：図5のCO₂）を指しており、これは質量でパルス放出量（0）の同等時間から一定の対象時間（TH）を対象としている。基準となるガスは事実上常にCO₂であるため、CO₂は1単位のGWPを有していると定義されている。最も一般的に用いられている期間は20年（GWP₂₀）か100年（GWP₁₀₀）のいずれかで、100年はIPCCのコミュニケーションを含むGHG総排出量の報告に用いられている基準である。留意すべき重要なことは、基準として用いられるのは所定の質量（重量）であり体積（濃度）ではないことである。

別の言い方をすれば、問題となるGHGのGWPは、一定の期間（通常は20年か100年）の当該GHGによる温暖化累積効果を積分したものが占める、同じ期間に同時に起きているCO₂による温暖化累積効果を積分したものに対する比率である（等式1）。GHGの濃度が増すにつれ、1単位面積当たりの温暖化

効果 (W/m^2) は上昇する。従って、問題となる GHG の温暖化効果か CO_2 の温暖化効果のいずれかが変動すれば、問題となる当該ガスの GWP も変わることになる。RF の変化を引き起こす第 3 の要因はフィードバックメカニズムの追加で、これは GHG の RF が原因で表面温度の変化を引き起こす役割を果たす。フィードバックメカニズムによっては、RF を減衰させることもあり、強度を増すこともある。

IPCC が 1990 年に定めたメタンの GWP_{100} は、間接的な強制力、フィードバックメカニズム、および CH_4 の寿命などの推計に修正があったため、上昇した。IPCC 第 1 次評価報告書

(AR₁) に記載のとおり、最初に設定された 1 トンの CH_4 に対する GWP_{100} は、20 トンの CO_2 と同等であった。それ以後に続く AR の報告では、20 (AR₁) から 23 (AR₂)、25

(AR₃)、28 (AR₄) と連続して上昇していった。ごく最近になり、メタンのいくつかのフィードバックメカニズム、特に CH_4 崩壊の最終生成物 (CO_2 と成層圏の H_2O) および中間生成物 (O_3) に関する改良の結果、現在では 34 (AR₅) になっている。この 3 つの生成物はすべて GHG そのものであり、そのためメタンの RF を強化する作用がある。政策立案者は、2015 年パリ協定の目標を意義あるものにするため、GWP の継続的な修正に対処する取り組みを行っている。

現在の気候メトリックの「基準」である GWP_{100} は、GHG を CO_2 等価 (CO_2-e) に変換し、国際炭素取引に定量的な基礎を提供することで、異なる GHG ごとの気候に与える影響を比較することができる。しかし、このメトリックに関しては古くは 2000 年に遡るもの (O'Neil, B.C., 2000) やその他 (Shine et al., 2007) の長く続く批判があり、その中には IPCC (IPCC, 2013) も含まれ、そこでは「さまざまな GHG の排出によるすべての結果を単一のメトリックで正確に比較することはできず、すべてのメトリックには限界と不確実性がある。」と述べている。その記事では、IPCC が 1990 年に作成した最初の主要報告書から引用し、地球温暖化係数 (GWP) は「コンセプトに内在する難しさを説明するための...簡単な手法」として導入されたと説明している。「コンセプトを展開する難しさは人々がそのコンセプトを用いるところにある。もっと悪いことは、人々がそのコンセプトを用いながら、その展開に伴う警告をすべて無視することである」 (Frame et al., 2018)。

この通りのことが起こり、その結果、 GWP_{100} は硬直的になり、それ故、問題に対応することが難しくなった (Fairlie, 2019)。

大きな問題は、GWP が短寿命と長寿命の気候汚染物質を同様に扱っているため、両者の振る舞いの対照的な違いを捕えることができないことである。

具体的には、 GWP_{100} を用いると、メタンは CO_2 のような長寿命気候汚染物質 (LLCP) 扱いを受ける。Lynch (2019) は、違いを分かりやすく説明している。LLCP を「ストック (蓄積性) 汚染物質」として説明する別の方法がある。ストック汚染物質はその長寿命故に、放出速度が非常に低くても、時間をかけて増大する。それは、倉庫の中の箱を動かさずに保管し続けるようなものである。Lynch (2019) は、排水口を塞いだバスタブの比喩を用いている。バスタブに入る水の流入速度にかかわらず、1 滴の水滴でさえ、バスタブを満たし続ける。

他方、短寿命気候汚染物質 (SLCP) は「フロー (流動性) 汚染物質」と呼ばれている。この場合、バスタブの排水口は開いており、流入量が流出量より少ないか流出量に見合っているとき、バスタブの水量は一定か、なくなる。流入量が増え、流出量を上回るときに初めて、バスタブの水はたまり始める。この違いがあるため、SLCP が地球の温度変化に与える影響を LLCP と同じように説明することはほぼ不可能である。そのためこの点に、現行の GWP の表示に重要な警告があるのである。さらに、フロー汚染物質 (SLCP) とストック汚染物質 (LLCP) に同時に取り組まなければならないときに、両者を同じように扱うことにより、SLCP に主な重点を置くことで「時間稼ぎ」をして LLCP に取り組むという言い訳をする傾向がある。

SLCP を LLCP として扱う基本的な結果として、現在のメトリック GWP は排出量減少シナリオのもとで流入速度がゼロに向かうまで大気温の上昇継続を示すが、実際には、フロー汚染物質の放出速度が吸収速度以下に下落すれば、フロー汚染物質の大気中の濃度は低下し、その分、温暖化は現在のレベル以下に鈍化することになる。 CO_2 がストック汚染物質であるのに対し、メタンはフロー汚染物質であることから、2050 年までに地球温暖化を上限 $1.5^\circ C$ までに抑える目標を達成する

(IPCC $1.5^\circ C$ 目標) ためには、メタンの人為起源排出量削減目標は 2010 年レベルに対し 44% から 67% の範囲内であるのに対し、 CO_2 の人為起源排出量削減目標はより 100% に近いものである。





GWP*

このように現行の GWP 算定や上述の基本的結果に対する批判が続いているのに対応し、オックスフォード大学の環境変動研究所と食料気候研究ネットワークの科学者たちが、GWP*と呼ばれる新しいメトリックを提案した。この提案では CO₂ 等価 (CO₂-e) の代わりに CO₂ 等価* (CO₂-e*) を用いていたが (Allen et al., 2018a)、これは最終的に再度 CO₂ 温暖化等価 (CO₂-we) に置き換わった (Cain et al., 2019a)。GWP*は GWP の代わりでも GWP から独立しているわけでもなく、むしろ GWP の新しい用い方であり、SLCP の気候に対する寄与を評価するものである。「GWP*では、SLCP のパルスに対し同じ質量の CO₂ のパルス放出を測定するのではなく、CO₂ の放出パルスを SLCP の放出速度の上昇 (または低下) と比較する」 (Fairlie, 2019)。このためには、現在および過去の一定期間 (Δt) の放出速度が必要とされる。

Lynch et al., 2020 は次のとおり説明している。「GWP*と GWP₁₀₀ などの静的メトリックとは次のような大きな違いがある。静的メトリックでは、1 回の放出はそのまま所定の時間におけるまたは時間を通した 1 回限りの特定の効果を表す 1 価と同等であるが、異なるガスによる効果の時間差を十分に捕捉することはできない。それに対し、GWP*では、どのような時間枠であってもその時の対象ガスの動的な応答を説明するため、等価 CO₂ の値にはばらつきがある。」さらに、次のように述べている。「……この問題はあらゆる静的な等価コンセプトについて起きるため、代替りのメトリックを用いても別の時間を対象にしても問題を克服することはできない……20 年地球温暖化係数 (GWP₂₀) および 100 年地球温度変化係数 (GTP₁₀₀) についても同様の限界があることが分かっている。」

今日まで、GWP*の使用について紹介し、文書化し、検証し、説明した 4 本の査読文献が公表されている (Allen, 2015, Allen et al., 2018a, Cain et al., 2019a、および Lynch et al., 2020)。GWP*による重要な改良点は、SLCP の持続的な放出が温度に与える影響を CO₂ のパルス放出に結びつけているところにあり、これにより SLCP を累積排出量の枠組みの中で考察することができる。GWP*という用語はまだ提案されていなかったが、最初の論文は GWP*がどのように導き出されたかを説明することで、GWP*の土台を築いている (Allen, 2015)。2 番目の論文は、GWP*の信頼性に焦点を当て、GWP*が GWP に比べ誤差による差異が少なくより正常に作用するメトリックであること、また SLCP による将来の大気負荷予測についても、特にいくつかのメタン排出軽減戦略が対象としている長期予測の場合には、GWP に比べより正確であることを実証している。他にも自費出版の解説書が数冊あり、GWP*への切り替えの基本を平易な言葉で説明している (Lynch, 2019, Cain, 2019b, Fairlie, 2019, Frame et al., 2018, Allen et al., 2018b)。Lynch et al. (2020) の論文にも、現時点および過去または将来の時間間隔における既知の SLCP 放出速度のみを必要とする簡易な式がある。

CO₂-e*を推定するための 2 つの同等の手法があり、1 つは SLCP の放出速度に基づき、もう 1 つは SLCP の放射強制力に基づいている。この 2 つの手法は GWP*を提案している 2 番目の論文で提示されている (Allen, M.R. et al., 2018a)。両方の式とも、積分法の GWP (等式 1) による。

GWPは所与の気候強制因子〔GHG〕の絶対GWP（AGWP）（対象時間Hを通じた当該強制因子のパルス放出の積分による放射強制力）をCO₂のAGWPで除したものと定義される。従来のSLCPのCO₂-e放出量は単に放出質量にGWPを乗じたものとして次のとおり定義される。

$$E_{CO_2-e} = E \times GWP_H$$

(等式2)

ここで：EはGHGの放出質量に等しく、Hは将来の対象時間（秒数）、そしてGWP_Hは対象時間Hを通じたIPCC（1990）による推計GWPである（Allen, M.R. et al., 2018a および Lynch et al., 2020）。

GWP*は、SLCPの時間間隔を通して積分するのではなく、SLCP放出の変化速度を時間積分したものである。SLCP放出速度の変化に基づき改定された式は次のとおりである。

$$E_{CO_2-e^*} = (\Delta E_{SLCP}/\Delta t) \times GWP_H \times H$$

(等式3)

ここで：ΔE_{SLCP}は時間間隔Δtを通じたSLCP放出速度の変化に等しく、GWP_HはSLCPのGWP、そしてHは将来の対象時間である（Allen, M.R. et al., 2018a）。

放出速度の変化の代わりにSLCPの放射強制力を用いた同等の等式は、次のとおりである。

$$E_{CO_2-e^*} = (\Delta F/\Delta t) \times (H/AGWP_{H(CO_2)})$$

(等式4)

ここで：ΔFはSLCP放射強制力の変化、そしてAGWP_{H(CO₂)}は将来の対象時間HにおけるCO₂の絶対GWPである（Allen, M.R. et al., 2018a）。

3番目に公表されたCain et al. (2019a)による論文および自費出版された2冊のフォローアップ報告書（Cain et al., 2019b, Allen et al., 2018b）は、Allen et al. (2018a)で説明した最初のGWP*手法のいくつかの限界に取り組んでいる。最初のGWP*手法はSLCPの影響をいくぶん過少評価したところがあった。それは気候が放射強制力の変化にすぐには応答しないことによる。

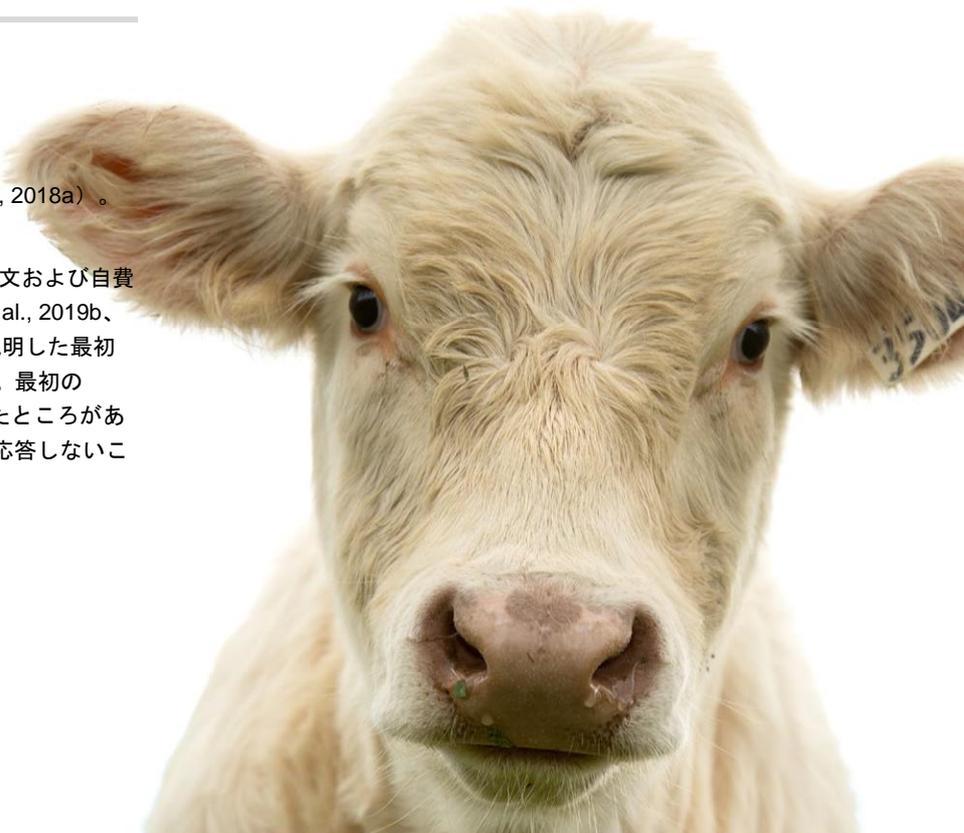
この問題に取り組んだ改定手法では、改定メトリックで報告された放出量から直接CO₂温暖化等価を推計し、改定されたGWP*メトリックでは、CO₂等価*（CO₂-e*）からCO₂温暖化等価（CO₂-we）に置き換わった。「この結果、SLCPは炭素収支に直接組み入れられ、長期的な温度目標と一致させることができる。CO₂-weのすべての放出単位はSLCPであれLLCPであれ、ほぼ同一の温暖化量だからである。従来のCO₂-eではこのようなことはあてはまらない」（Cain, M. et al., 2019a）。この改定は、研究者、報告書の著者およびツール開発者によるGWP*採用の鍵となっている。

改定GWP*は、次の等式により推計されたCO₂温暖化等価（CO₂-we）を用いている。

$$E_{CO_2-we} = GWP_H \times \{ [r \times (\Delta E_{SLCP}/\Delta t) \times H] + [s \times E_{SLCP}] \}$$

(等式5)

ここで：「E_{CO₂-we}はCO₂-weの推計値、GWP_Hは対象時間Hを通じた所与のSLCPに関する従来の地球温暖化係数、ΔE_{SLCP}は先行するΔt年を通じたSLCP放出速度の変化、E_{SLCP}は当該年におけるSLCPの放出量、そしてrはSLCP放出速度を変化させるインパクトに、sは現在の放出速度のインパクトにそれぞれ与えられる重み付け係数である」（Cain, M. et al., 2019a, Lynch et al., 2020）。



等式5と等式3の違いは、等式3では $r=1$ および $s=0$ であるのに対し、等式5では SLCP (E_{SLCP}) の現在の年の放出量を消去していることである。推奨される Δt は、SLCP 放出量の年ごとの変動をならすため 20 年とされ、その結果、温度応答との一致の問題が改善されている (Allen, M.R. et al., 2018a)。 r および s の値は第三者のユーザーが判断するシナリオによる。また、 r および s の値は $s+r=1$ の制約を受けざるを得ない点に注意が必要である (Allen et al., 2018a)。 r および s の効果ならびにそれが $\text{CO}_2\text{-we}$ の推計値および $\text{CO}_2\text{-e}^*$ との関係に与える影響に関するより詳細な説明は、Cain, M. et al. (2019a) と Lynch et al. (2020) に記載されている。残念ながら、 r および s の数値を決める手法は、AR₅ のデータベースのデータを用いた複数の線形回帰を含む複雑なものである。しかし、平均値である $r=0.75$ および $s=0.25$ の値は、一般にメタンの3つの放出シナリオ (Cain, M. et al., 2019a) に基づき安定した適合性を提供する。このシナリオは Lynch et al. (2020) によっても支持されている。

Lynch et al. (2020) はその報告書の多くのページを割き、CH₄ の放出速度および排出削減戦略に関するさまざまなシナリオによる大気温の上昇効果を推計する中で、GWP と比較した GWP* の有用性と利点を実証している。事例で示された図形による対比には説得力がある。Lynch は続けて次のように述べている。

「メタンの GWP₁₀₀ 値は再計算されたものが用いられているため、当該 GWP* は国連気候変動枠組条約カトヴィツェ会議 (COP24) で合意されたパリルールブックに基づく排出量報告方法に適合する。そこでは、短寿命汚染物質の累積値は別々に報告されたものが集計され、国別に寄与が判定される。」

さらに、「当事者間のすべてのコミュニケーションにおける、短寿命汚染物質の累積値のそれぞれの集計と報告について、また気候変動に関する国際連合枠組条約 (UNFCCC) について、UNFCCC プロセスの透明性を十分高めることで、気候上重要な情報が失われないようにする意向である。」こうしたことは、GWP* が UNFCCC の方針を順守する有意義なメトリックとして受容される重要な点である。

$\Delta E_{\text{SLCP}} = E_{\text{SLCP}(t)} - E_{\text{SLCP}(t-\Delta t)}$ では、(t) は現在の放出時を、そして ($t - \Delta t$) は最初の放出時を表している。この式は等式5を代数計算により簡素化し、さらには次の式に導いている。

$$E_{\text{CO}_2\text{-we}} = [(((H \times r)/\Delta t) + s) \times E_{\text{SLCP}(t)}] - [(((H \times r)/\Delta t) \times E_{\text{SLCP}(t-\Delta t)})] \times \text{GWP}_H$$

(等式6)

パラメータの指定: H , t , Δt , r , および s は、手元にあるシナリオの一部として定義されたものが、特定のシナリオの定数となる。Lynch et al. (2020) は、彼らの等式3を事例に取り上げた中で $H=100$, $\Delta t=20$ 年, $r=0.75$, $s=0.25$ とし、そこで等式6を次の式に短くする方法を示している。

$$E_{\text{CO}_2\text{-we}} (\text{SLCP}) = (4 \times E_{\text{SLCP}(t)} - 3.75 \times E_{\text{SLCP}(t-20)}) \times \text{GWP}_{100}$$

(Lynch et al., 2020 の等式3) (等式7)

この事例は、 $E_{\text{CO}_2\text{-we}} (\text{SLCP})$ が既知の放出パルスおよび従来の定義による GWP からいかに簡単に推計することができるかを示している。留意しなければならないことは、等式7は、Lynch et al. (2020) によりパラメータが定義されたごく限定的な事例に固有のものであるということである。しかし、 $E_{\text{SLCP}(t)}$ および $E_{\text{SLCP}(t-\Delta t)}$ の乗法因子 (等式7ではそれぞれ4および3.75) は多くのシナリオのために先験的に定義し、一覧にすることが可能である。そうすれば、シナリオのたびにいちいち再計算する必要はなく、参照表を情報源にすることができる (付属資料を参照)。ここで、 $E_{\text{SLCP}(t)}$ の係数を $C_{(t)}$ とし $E_{\text{SLCP}(t-\Delta t)}$ の係数を $P_{(t-\Delta t)}$ とすると、次の式になる。

$$C_{(t)} = (((H \times r)/\Delta t) + s) \times \text{GWP}_H$$

(等式8)

$$P_{(t-\Delta t)} = ((H \times r)/\Delta t) \times \text{GWP}_H$$

(等式9)

以上から、等式6は再度次のとおり簡素化することができる。

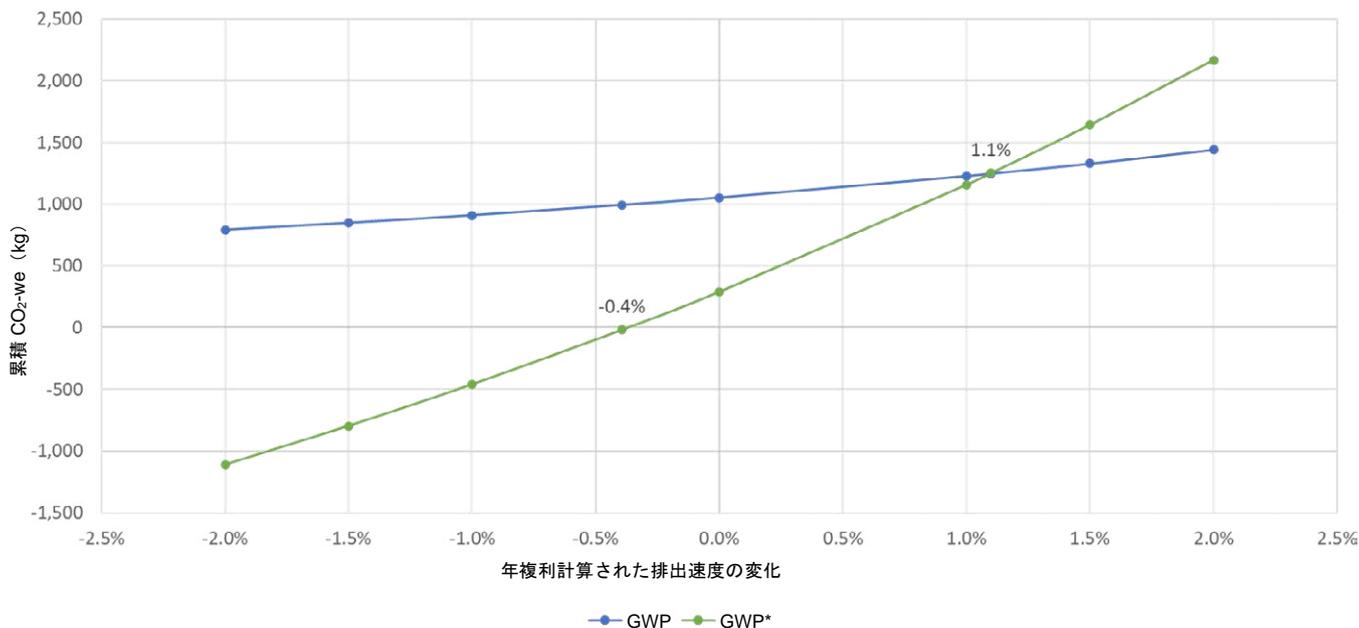
$$E_{\text{CO}_2\text{-we}} (\text{SLCP}) = (C_{(t)} \times E_{\text{SLCP}(t)}) - (P_{(t-\Delta t)} \times E_{\text{SLCP}(t-\Delta t)})$$

(等式10)

重要なことは、等式10が $E_{\text{CO}_2\text{-we}} (\text{SLCP})$ の一点推定を表していることである。従って、 $\text{CO}_2\text{-e}$ が1回の放出パルスの一点推定を必要としたのとは異なり、GWP* は $\text{CO}_2\text{-we}$ の推計に必要な放出速度の変化を説明するため、異なる時間点における少なくとも2回の放出パルスの推定が必要である。そのため、既知の放出パルスが1回のみの場合、 $\text{CO}_2\text{-we}$ は GWP_{100} による $\text{CO}_2\text{-e}$ と同等になる。

図8のグラフは、Cain, et al. (2019b) の演算の公表後に描かれ、CH₄ 放出速度における年変化のさまざまなシナリオのもとで、GWP₁₀₀ および GWP* の温暖化30年累積推計値の違いを対比させたものである。各ケースとも、最初の年の放出パルスは CH₄ 1 キログラムである。30年にわたる複利計算による年率変化には独立したシナリオが9つ用意された (-2.0%、-1.5%、-1.0%、-0.4%、変化なし(0%)、+1.0%、+1.1%、+1.5%、および+2.0%)。

図 8. 30 年累積推計値によるメタン温暖化の GWP₁₀₀ および GWP* のパターン比較#



注：ゼロ年における最初の放出パルスは1 キログラム、 $r = 0.75$ 、 $s = 0.25$

ここで留意すべきは、放出速度がさまざまに変化しても、排出量減少シナリオのもとであっても、累積 CO₂-e の GWP 推計値（青色の線）は常にプラス（温暖化の持続）になることである。GWP は、SLCP の累積温暖化効果の評価に用いるには大きな欠点があり、すべての CH₄ の放出が止むまで CO₂-e の累積値がゼロになることはない。このため、GWP は SLCP の短寿命特性を説明することができない。しかし、最も注目する観察は、排出量の減少から増加までのシナリオのもとで GWP および GWP* の推計値の挙動パターン（傾き）に違いがあることである。CH₄ 放出速度のさまざまな変化が大気中の累積の上昇に持つ意味に関しては、GWP よりはるかに大きい影響力がある。

動物に関わる農業内の初期の一般的な議論では GWP* 線（緑色の線）の左側に焦点が当てられ、GWP* をメタン排出削減による累積温暖化効果の推定に用いる場合の「相対冷却」の可能性が脚光を浴びた。しかし、挙動パターンをさらに注意深く調べると、他にも留意しなければならない特性がいくつかある。第一に、メタン排出量を年率 0.4% より大きく削減することが可能な場合、相対冷却効果は確かに存在する。

この効果により同じ期間中の他の GHG 排出量の増加をオフセットすることができる。CH₄ 排出量の減少が年率 0.4% と変化なし（0%）の間にある場合、実際のところ温暖化効果がある。これは、放出速度の変化に対する気候の応答に時間差があるからである。Allen, et al (2018a) によれば、気候応答の遅れについて、「SLCP の放出速度の変化とそれに関連する CO₂-e* の放出速度の変化の間には平均 10 年の遅れがあるが、CO₂-e* の累積排出量に影響はない。」

GWP* 線の右側に移り、年率約 1.1% の排出増のシナリオでは、GWP は GWP* と同等の累積温暖化効果の推計値を提供している。しかし、年率排出増が 1.1% より大きくなると、GWP* の推計値は GWP の推計値より大きくなる。このように、GWP は CH₄ の放出変化による効果を常に過大評価していると思いつくと誤解することになる。これは、GWP は年排出量が減少しているときに温暖化（冷却化）速度を予測するのに不十分だけでなく、（非常に狭い範囲の変化を除き）年排出量が増加しているときに温暖化速度を予測するのに不十分であることを示している。こうした結果は Lynch et al. (2020) の同様の結論とも合致している。





特に GWP*が開発途上国に不公平な負荷を与えることになると議論する人々に対して、最後に指摘する必要がある。それは、シナリオの速度変化が 0%から 1.1%の範囲で、GWP*は GWP より低い温暖化の累積推計値を提供しているため、進捗を評価する場合、開発途上国に優位に働くということである。実際のところ、GWP*により累積温暖化を評価すると、地球温暖化に負荷を与えるメタン放出源のより多くが農業部門からエネルギー生産部門に移り得る。

SLCP に対する CO₂-we の導入により、複数の異なる GHG を排出する産業や事業の CO₂-we 総負荷の推計を妨げることはない。CO₂に対する CO₂-we は排出された CO₂の質量そのままである。CO₂は基準となるガスのため CO₂-we は常に単位 (1) と等しいからである。LLCP の CO₂-we 推計値は GWP の CO₂-e 推計値からそれることはないため、N₂O に対する CO₂-we はおおよそ CO₂-e に等しい。従って、CO₂-we の総累積排出量は GHG それぞれに適切な CO₂-we の合計で (Cain, M., 2020)、次の等式になる。

$$\text{総 } E(\text{CO}_2\text{-we}) = E(\text{CO}_2) + E(\text{CO}_2\text{-we (SLCP)}) + E(\text{CO}_2\text{-e (LLCP)})$$

(等式 11)

GWP*は GWP の別の限界も克服している。GWP₁₀₀ は直接温度応答に関係しておらず、そのことが、排出削減目標を設定するときの弱点になる。しかし、TCRE (Transient Climate Response to cumulative carbon Emissions : 累積炭素排出量に対する過渡的気候応答) として知られる簡単な係数と累積 CO₂-we の積によって、CO₂-we 変化の経験による温度変化の概算推計値を得ることができる。この計算が可能となるのは、累積 CO₂ 排出と温度変化の間には近似的線形関係が存在するからである。CO₂に対する TCRE 係数は、0.4 ケルビン度 (K°) / Tt CO₂ である (Lynch, et al, 2020 の図 3C を参照)。

TCRE と CO₂-we 累積排出量との積は見込まれる温度変化より多少過小評価 (控え目) であることに留意する必要がある。しかし、Lynch et al. (2020) は、続けて「より複雑な手法が望ましい場合もまだあるだろうが、GWP*の計算の容易さによって、多くの目的にとって大きな利点があることが分かるようになると思う。」と述べている。GWP*と TCRE を用いて温度変化を推計する場合、地球温度変化係数 (GTP) の不確実性を増大させるパラメータは、GWP*に比例する温度変化の不確実性も増大させ、その幅は 0.8~2.5°C/Tt CO₂程度になることに留意する必要がある (IPCC, 2013)。

メトリックの考案者によって GWP*の理解と受容を促進する取り組みが続けられている。現在、4 本の査読文献 (Allen, 2015 と 2018a, Cain, M. et al., 2019a、および Lynch et al., 2020) で詳細に GWP の問題が説明され、将来の地球温度変動を予測するうえで GWP*の優位性を実証するため、エビデンスの改善が提案されている。

文献のエビデンスは現在、IPCC がパネルの報告書に記載するため、GWP*の適合性を判定しているところである。GWP*に関する 4 本目の査読文献は第三者のユーザーがその手順を行う能力を大いに高める一方で、FCRN チームでは他の研究者、調査員、およびツール開発者が CO₂-we の適切な評価に用いることができるよう、方法論に関する教材を広める取り組みを行っているところである。



GWP*に対する批判および代替案

GWP*は、GWPに対してより適切な地球温暖化係数を推計するうえで、批判や競合する代替案が全くないわけではない。

Schleussner et al. (2019) は、GWP*を用いてパリ協定の目標を解釈すると、基準となるメトリック GWP と大きく異なる協定の緩和構造に矛盾をもたらす可能性があるとして報告している。

GWP*が提供する情報を緩和政策の形成プロセスに組み入れるには、さらなる模索が必要である。

Cain, M. et al. (2019a) の文献公表の直後に、Rogelj, J. et al. (2019) の査読論文では「GWP*メトリックに基づく非 CO₂ GHG の比較因子については過去の排出量に依存しているため、地球規模のレベル以外に適用する場合は等価性と公平性に疑問が生じる。」と論評している。Rogelj, J. et al. は、「GWP*の採用によって開発途上国は不利な立場に置かれるだろう……」と指摘している。「公平性」が物理学の世界にどのように入ってくるか、これについてはいささか不可解なものがある。著者らの議論では、GWP*メトリックは地球規模のスケールであれば信頼に足るものの国毎のスケールではそうでないとされている。

この点は事実上、全世界の排出量が円グラフに各国の排出量の合計として示されるならば、円全体の縮小は容認しても、その1つひとつの国の縮小については、小さい国は大きい国より縮小幅(%)を大きくしなければならなくなることを理由に、容認しないとやっているのと同じである。著者らはGWP*の4つの代替案を提示しているが、そのすべてが1人当たりに基づいている(一定の排出量/人、一定の温暖化/人、メタン温暖化最小量/人、およびゼロ基準/人)。著者らは続けて各提案の特性とその論理的根拠を説明している。

そこに確実にあるものは、排出削減に対する各国間の不均衡な責任であり、開発途上国にとっては不利になることが多くなる。特にメタンに関しては家畜が開発途上国の主要な排出源であるからである。GWPを1人当たりで算定し推計すると、世界経済のグローバルな性質も、大気温度の上昇が排出源の場所にかかわらず地球全体の現象であるという事実も無視することになる。世界的な貿易取引は、その扱う製品および取引それ自体が大きなカーボンフットプリント(二酸化炭素排出量)を持っている。先進国は食料を含む大量の最終製品を開発途上国に輸出している。例えば乳の場合、EU、米国、オーストラリアおよびニュージーランドのような酪農乳業の大きな輸出地域について1人当たりGWPを評価すると、開発途上国に対する酪農乳業輸出額が大きい場合、開発途上国は不利な立場に置かれる。実際のところ、炭素の排出負荷は化石燃料と同様に消費地に課されるべきものだからである。

持続可能性は確かに、経済の活力、環境に対する責任、および社会の健全性に依存している。しかし、政策戦略を物理学の気候メトリックに取り込むことは遅れている。メトリックが政策に影響をあたえるべきであるが、それは方向が逆である。開発途上国に対する「不公平さ」はGWP*のアルゴリズム内で自明の理ではないが、世界貿易に起因する対比は簡単に行うことができる。

別の流れで、GWPを地球温度変化係数（GTP）と呼ばれるメトリックに置き換える提案が以前になされた（Shine et al., 2005）。GWPもGWP*も所与のGHGのCO₂等価質量を推計するのに対し、GTPは将来の選定年における世界の平均温度の変化を推計する。「言い換えれば、……一定のGHG排出量の放射強制力にตอบสนองする将来のX年における温度変化がどうなるかというものである。」（CORE, 2011）。少なくとも4本の論文がGTPを論評しており、GTPに想定される利点と欠点について合意を形成している（CORE, 2011、Wang, C-K. et al., 2013、Makhnatch, P. et al., 2014、およびEFCTC, 2016）。最も魅力的な点は、GTPは実際の温度もしくは温度変化のメトリックを提供し、その意味合いは一般の人々や政策立案者にCO₂等価の負荷よりもっと直感的に理解されることが確実な点である。とは言え、温度変化の推計値は累積GWP*のCO₂-weメトリックにTCRE係数を乗じて得ることができるもので、気候感度システムには非常に大きな不確実性があることを常に認識する必要がある。さらに、GTPによる手法にはいくつかの欠点がある。

GTPメトリックの計算は他のあらゆるGWPより難しいものである。さらに、その推計結果は対象時間の累積とは対照的に単一の時間点に基づいているため、GWP*を使った場合と異なりSLCPの変化速度をいっさい説明しない。このように、2種類の汚染物質の排出が将来の所与の時点で同じ温度変化を生むとしても、その時点に到達するまでにたどる軌道は大きく異なり、その間にはまだ分かっていない影響が出ているかもしれない（CORE, 2011）。これは重要な違いである。有害な軌道を取り未知の中間効果によって予期しない深刻な影響を強いられることがあり、終点温度を疑わしくする可能性があるからである。さらに、未知の変数はすべて推計値であるため、誤差分散として知られる推計値に固有の不確実性がある。CO₂の絶対GWP₁₀₀に関する不確実性は±26%と推計されており（EFCTC, 2016）、これはCO₂を基準として用いているあらゆるガスのすべてのGWPおよびGTPにも同様に影響する。GTPに関しては、GWPには寄与しないパラメータによる追加の寄与もあり、これには海洋熱の吸収や気候感度が含まれる。こうした追加パラメータはGTPの不確実性を増大させ、GTPを極めて不正確なメトリックにする。GTPがGWP₁₀₀の不確実性に比べ進歩したとみなされるには、不確定値が±25%より低くなる必要があると、そうすればずっと多く受け容れられるようになるだろう。

予測不確実性が大きく、また将来推計値の軌道が終点以外追跡できないとなると、GTPはGWPの代わりとしてもGWP*の代わりとしても適しているとは言えないように思われる。しかし、誤差の範囲が適切であれば、おそらく補助メトリックとして役立つことはできるだろう。実際のところ、以前、他にGWP₁₀₀に代わるものがなかったとき、ブラジルではSLCPに関するGWP₁₀₀の弱点を考慮して事実上GTPを好ましいメトリックとして採用し、国連気候変動枠組条約（COP24, Brazil）の目標を達成する意思を宣言した。



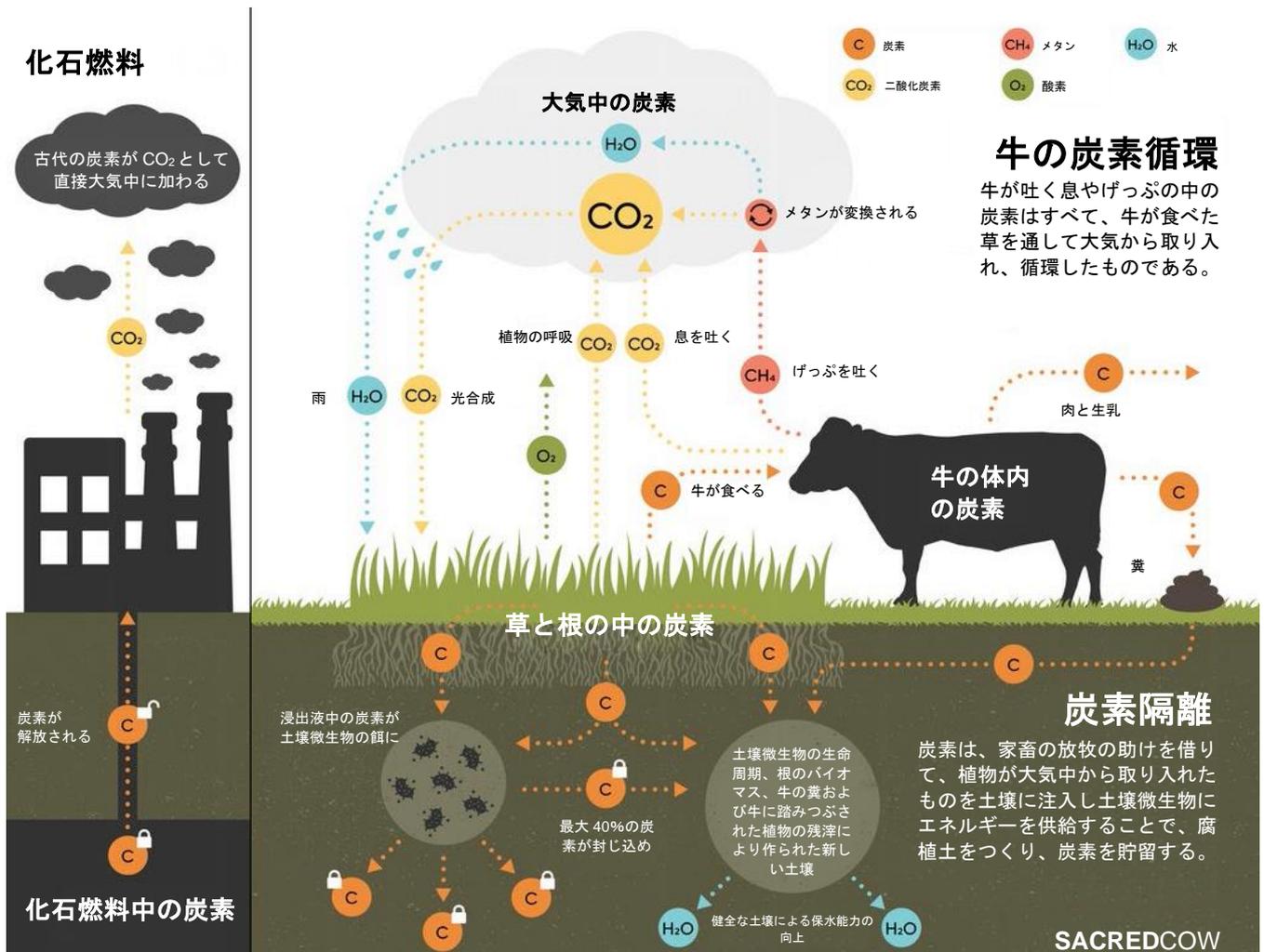
さらに、すべてのGWP推計に不足しているものがもう一つある。それは、メタン負荷の計算では、生き物からのメタン放出という生物起源の特性が考慮されていないことである。

生物起源のCO₂は大気中のCO₂負荷に算入されていないにもかかわらず、埋立地のガス(CH₄)はカーボンニュートラルであるべきという議論がされている(Env.Change Inst., 2005)。

反すう動物は何百万年もの間大量に生息してきた。中新世初期の1,600万年前から1,400万年前にイベリア半島で最初の反すう動物が出現した(DeMiguel et al., 2008)。

このように、反すう動物は、牛やヤギ、羊がそれぞれ約1万年前に家畜化されるはるか前から自然の生態系の一部であり(Bollongino et al., 2012, Hirst, 2018, Hirst, 2019)、何百万年もの間、大気中のメタン負荷に自然に寄与してきている。反すう動物の腸内メタンによる炭素は生物起源のものであり、ルーメン(第一胃)内に生息するメタン生成細菌およびプロトゾア(絨毛虫)が反すう動物の食べた植物のセルロース(繊維)を消化するときに発生する。こうした微生物は、発酵を通して宿主が消化した植物のセルロース(複雑な炭素分子)を揮発性脂肪酸に変換し、それが肝臓の新陳代謝の働きで宿主の主なエネルギー源であるグルコース(ブドウ糖)に変わる。メタンは、ルーメン内の消化発酵プロセスの副産物である。こうした適応により、反すう動物は人や他の単胃動物には栄養価のない植物の消化を通して生存することができる。さらに、糞便中の有機物などの炭素は土壌に戻されることで、消費された炭素の一部が隔離されることになる(図9)。

図9. 畜牛の炭素循環 VS 化石燃料



Rogers, D., 2019

家畜の頭数を減らしたとしても、ある提唱者が言うように（Ripple et al., 2014）、必ずしも放牧地の動物の頭数が減るわけではなく、従って反すう動物によるメタンも減るわけではない。野生動物は機を見るに敏で、家畜が適切な生態系を空け渡したときには、野生の反すう動物が再び放牧地だった場所に住みつく可能性がある。この例がタンザニアのセレンゲティ国立公園で、1960年代初頭に25万頭だったヌーの群れが、2004年までには150万頭に膨れ上がったことがある（Fairlie, 2018）。野生の反すう動物が、今日家畜が繁殖しているのと同程度には置き換わらないとしても、置き換わる意義はまだ十分高いはずである（Manzano and White, 2019）。推計値を歴史的に見ると、産業革命前の野生の反すう動物のCH₄放出量は北米平原のアメリカバイソン絶滅前とほぼ同じ量で、バイソンを5千万頭と仮定すると、野生の反すう動物のCH₄放出量は今日の米国の家畜排出量の86%であった。これは極めて控えめな数字である可能性がある。Smith et al. (2016)の推計によれば、1800年から1850年に世界の野生動物から放出されたCH₄（138.5メガトン（Mt）／年）⁴は、今日の近代的な家畜の排出量（147.5Mt／年）に近似で、近代CH₄排出量の94%である。このように、GWPメトリック（GWP₁₀₀、GWP*またはGTP）のいずれもが生物起源のCH₄の特性をCO₂の場合と同じようには考慮していないことに留意すべきである。これは研究されることが必要な矛盾であり、家畜から排出されるメタンを人為起源と定義したことや、こうした生物起源のCH₄放出源を地球温暖化係数のシナリオの中でどのように考慮すべきかを決めたことである。

ニュージーランドの最近の発表によれば、同国の主要なGHG排出源が農業である事実を踏まえ、環境政策において生物起源のメタンの効果を、他のGHGガス（人為起源のCH₄を含む）とは異なる方法でこれから検討するとのことである（NZMFE, 2019 および Wamsley, L., 2019）。これはメタン排出に対するこれまでにないタイプの政策アプローチを示しており、新しいメトリックを必要としている。

*GWP*は新しい方向に向かう第一歩になるだろうが、GWP*はCH₄の生物起源の特性を説明しておらず、ただCH₄が短寿命気候汚染物質（SLCP）であるという事実を説明しているだけである。*

この政策は、より正確かつ一貫性がある、あるいは基準となるメタンインベントリ作成プロセスが必要であるという見解の支えにもなっている。



⁴ Smith et al., 2016の著者らはテラグラム（Tg）の用語を用いているが、本書との一貫性を保つため、メガトン（Mt）に変換している。1テラグラムは1メガトンと等しい。

結論（まとめ）

地球温暖化の評価に関して、2050年までに大気温上昇の1.5°C上限を達成するため、すぐに実施できる目標を定めるには、政策立案者は多くのGHGの複雑な性質を理解するための簡単なメトリックを必要としている。

GWPは、多くのGHGについてそれぞれのRFおよび大気中の滞留時間に基づく異なる温暖化係数を用いて複数のGHG効果を集計した簡単なメトリックとして作成されたが、その欠点について多くの警告や注意事項がある。

GWPは過去30年を経て、欠点はありつつも標準的なメトリックになっている。GWPの主な欠点は、短寿命気候汚染物質（SLCP）が実際に気候に与える影響を正確に反映するには限界があることである。GWPはSLCPの放出速度が減少している場合に温暖化効果の変動を過大評価し、実際には冷却効果が起きているときでも温暖化効果を示している。SLCPの増加が1%を大きく超える場合は、GWPは温暖化効果の上昇を過小評価する。主要なSLCPであるメタンは地球温暖化の主たる原因の第2位を占めるため、GWPメトリックのこの弱点は家畜（反すう動物）農業にとって特に重大である。SLCPのGWPについては信頼性に懸念が持たれ、実際のところ3カ国（ブラジル、ウルグアイおよびニュージーランド）では、SLCPの効果を表す代わりにメトリックを用いる模索をしている。

科学者たちはGWP*の方法論を用い、GWPメトリックの改訂版、CO₂-weを作成した。この方法論は、推計値の算定にSLCP放出量の変化速度を含めることによりSLCP放出量をCO₂-weに変換しようとするものである。4本の査読文献はGWP*メトリックの信頼性、有効性および妥当性について立証し、文書化している。GWP*メトリックは、SLCP1単位の追加放出速度の仕様およびCO₂-eからCO₂-weを推計するための1回の追加ステップの計算を必要とするだけである。少なくとも時間間隔をあけた2回目の放出量の収集は、排出削減目標に向けた進捗を明らかにするため日常的にメタン放出のモニタリングをしているどの組織や国にとっても負担ではないはずである。

*GWP*方法論は、GWP方法論を強化するものであり、それに代わるものではない。各GHGそれぞれの寄与が別々に報告されることが重要である。*

SLCPのCO₂-weと同様、気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）のルールを順守するため、コミュニケーションを高め、重要な気候情報を保存することである。

最後に、TCRE係数を活用することにより、CO₂-weはCO₂負荷の変化と関連している温度変化の概算推計値に変換することができる。これはGWP（CO₂-e）の推計値ではできない。SLCPの緩和に関するGWP*の情報を現在の緩和政策形成プロセスに組み込むにはさらなる調査が必要である。

家畜に関しては、GWP*メトリックの予期しない結果が広がっている。GWP*メトリックを地域別評価に組み込んだときに、反すう動物の頭数減少および生産効率の増加またはそのどちらかが起きている地域では、放出減少がすでに相対的な冷却効果を引き起こしていた可能性があることが明らかになるかもしれない。

*GWP*メトリックはTCREとの組み合わせにより、大気温度に及ぼす効果を推計できるシナリオを作成することが可能である。*

しかし、残念なことに、メタンインベントリの計算方法には依然として欠点があり、家畜、特に反すう動物が環境に及ぼす効果の推計に影響している。この中には、メタン放出源の一貫性のない分類、新しいメタン放出源の見落とし、隔離炭素の解放に関する説明責任、家畜による排出に関する生物起源の特性の完全無視、および現在・過去の野生反すう動物頭数の説明欠落が含まれる。

これからどうするか？ GWP*採用の意味合いと影響

変更に対してよくある質問は、「それは正しい判断か？」である。第一の理解は、大気中の GHG の中には生命が存在するために十分な温暖化をもたらすものが必要ということである。第二の理解は、GHG は炭素循環の一部として存在するもので、炭素の排出源と吸収源のバランスが崩れるときに初めて温暖化か冷却化に移行するということである。

特定の GHG の温暖化係数はその放射強制力 (RF) および大気中の持続性に起因するもので、GHG の間には両者の特徴に関する大きな違いがある。二酸化炭素が最も多く見られる GHG であることは間違いなく、数千年間大気中に残存する。大気温度の上昇にずば抜けて大きな効果を及ぼし、他のすべての GHG による温暖化効果を比較するための基準として機能する。GHG の大気中の滞留時間に CO₂ と比較し大きな時間差がある場合、この比較をすることが難しくなる。メタンの場合がこれにあてはまり、何千年もの半減期をもつ CO₂ に比べ、メタンの半減期は 8.6 年である。

GHG の温暖化効果を CO₂ に等式化する GWP 変換が「簡単な」方法として開発されたため、政策立案者、発電所の運営担当者、調査員などは GHG の排出効果を CO₂ と比較する形に言い換えることができた。これは、GWP がメタンのような短寿命気候汚染物質に対する警告や弱点を持っていることを十分に把握し、行われた。しかし、GWP の問題は、GWP が GHG の単一パルスによる温暖化効果に対し一時点の推計値を提供しているところにあり、SLCP および CO₂ の双方について RF の積分を考慮しているだけである。このように、GWP は N₂O のような長寿命気候汚染物質については適切な CO₂-e 変換を提供しているが、SLCP については違う。その結果、SLCP の排出負荷と温度変化を結びつけるために用いることができず、この点からも GWP の能力が否定されている。GWP のこの欠点に対処し強化するため、GWP*が導入されている。実際のところ、GWP*は GWP の方法論に根差している。これは、利用可能な排出推計値がただ一つの場合、GWP*の公式は CO₂-we に関する GWP 推計値に戻るからである。

改良が加えられているにしても、GWP*の採用には変更を必要とする。多くの場合、変更は勝者と敗者のある問題として見られるが、実際のところ、その変更がすべてに大きな利益をもたらすとしたら、以前の環境は本質的に欠点があったことになる。こうした欠点から利益を得るものは本当にわずかであり、その他には過度な負担をかけていたはずである。メタン排出に関しては、GWP 方法論に基づく場合、メタン排出の削減効果を正しく反映することができず、大気温の上昇を緩和する役に立っている事実もいまだに認識されていない。その対極にあって、紅海のように以前は判明していなかった自然排出源など、メタン排出源の増加、北極圏の永久凍土層の融解など新たに発生する自然排出源、あるいはシェールオイルの回収など比較的新しい人為起源の排出源、これらはまだメタンによる温暖化効果の一翼を担っていない。

結論としては、測定の「精度を増す」ことが正しいかどうか述べるのは困難である。どちらが十分な情報に基づいた決定であるかを判断するためのより良い情報を提供するだけである。人類を月に送ることができるのは正確な計算があってこそであった。同様に、私たちすべてに影響する、そして私たちの子どもや孫の世代にはなおさら影響する地球温暖化を緩和するには、温暖化効果を削減する重要な機会を特定し、地球温度変動を予測し、効果的な目標を設定し、またそうした目標に向けた進捗を監視するため、正確な情報が必要である。率直に言えば、GWP*は SLCP の排出量に関して GWP より正確な情報を提供する。最後に、GWP*はより正確な情報に改善する一部にすぎない。メタンインベントリ作成プロセスと測定の改良も必要不可欠である。これには、以前は判明していなかったメタン排出源、新たな排出源、および野生と家畜双方の反すう動物に対する統計調査データの情報改善が含まれている。

付属資料

GWP*_H係数表 (C_(t) および P_(t-Δt)) : Δt = 0~50

Δt (年)	GWP* ₂₀ H = 20、GWP _H = 86、r = 0.75、s = 0.25		GWP* ₁₀₀ H = 100、GWP _H = 34、r = 0.75、s = 0.25	
	C _(t)	P _(t-Δt)	C _(t)	P _(t-Δt)
0	86.00	0.00	34.00	0.00
1	1,311.50	1290.00	2,558.50	2,550.00
2	666.50	645.00	1,283.50	1,275.00
3	451.50	430.00	858.50	850.00
4	344.00	322.50	646.00	637.50
5	279.50	258.00	518.50	510.00
6	236.50	215.00	433.50	425.00
7	205.79	184.29	372.79	364.29
8	182.75	161.25	327.25	318.75
9	164.83	143.33	291.83	283.33
10	150.50	129.00	263.50	255.00
11	138.77	117.27	240.32	231.82
12	129.00	107.50	221.00	212.50
13	120.73	99.23	204.65	196.15
14	113.64	92.14	190.64	182.14
15	107.50	86.00	178.50	170.00
16	102.13	80.63	167.88	159.38
17	97.38	75.88	158.50	150.00
18	93.17	71.67	150.17	141.67
19	89.39	67.89	142.71	134.21
20	86.00	64.50	136.00	127.50
21	82.93	61.43	129.93	121.43
22	80.14	58.64	124.41	115.91
23	77.59	56.09	119.37	110.87
24	75.25	53.75	114.75	106.25
25	73.10	51.60	110.50	102.00
26	71.12	49.62	106.58	98.08
27	69.28	47.78	102.94	94.44
28	67.57	46.07	99.57	91.07
29	65.98	44.48	96.43	87.93
30	64.50	43.00	93.50	85.00
31	63.11	41.61	90.76	82.26
32	61.81	40.31	88.19	79.69
33	60.59	39.09	85.77	77.27
34	59.44	37.94	83.50	75.00
35	58.36	36.86	81.36	72.86
36	57.33	35.83	79.33	70.83
37	56.36	34.86	77.42	68.92
38	55.45	33.95	75.61	67.11
39	54.58	33.08	73.88	65.38
40	53.75	32.25	72.25	63.75
41	52.96	31.46	70.70	62.20
42	52.21	30.71	69.21	60.71
43	51.50	30.00	67.80	59.30
44	50.82	29.32	66.45	57.95
45	50.17	28.67	65.17	56.67
46	49.54	28.04	63.93	55.43
47	48.95	27.45	62.76	54.26
48	48.38	26.88	61.63	53.13
49	47.83	26.33	60.54	52.04
50	47.30	25.80	59.50	51.00



参考文献

2 Degrees Institute, 2019, <https://www.methanelevels.org/>, accessed 18Oct2019

Acconia, 2019. How Do Greenhouse Gases Contribute to Global Warming. <https://www.activesustainability.com/climate-change/how-greenhouse-gases-contribute-global-warming/>, accessed 22Oct2019

Allen, M.R., 2015. Short-lived promise? The science and policy of cumulative and short-lived climate pollutants. Oxford Martin Policy Paper. 1–15. http://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/briefings/Short_Lived_Promise.pdf.

Allen, M.R., K.P. Shine, J.S. Fuglestedt, R.J. Millar, M. Cain, D.J. Frame, & A.H. Macey. 2018a. A Solution to the Misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *npj Climate and Atmospheric Science*. 1:16; doi:10.1038/s41612-018-0026-8

Allen, M.R., M. Cain, J. Lynch, D.J. Frame, 2018b. **Climate Metrics for Ruminant Livestock**. *Programme Briefing*. Oxford Martin School. <https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/publications/2601> accessed 25Sep2019

Bollongino, R., J. Burger, A. Powell, M. Mashkour, J.-D. Vigne, M. G. Thomas, 2012. Modern Taurine Cattle descended from small number of Near-Eastern founders. *Molecular Biology and Evolution*, DOI: 10.1093/molbev/mss092, accessed 29Oct2019

Bousquet, P., S. C. Tyler, P. Peylin, G. R. Van Der Werf, C. Prigent, D. A. Hauglustaine, E. J. Dlugokencky, J. B. Miller, P. Ciais, J. White, L. P. Steele, M. Schmidt, M. Ramonet, F. Papa, J. Lathière, R. L. Langenfelds, C. Carouge, and E.-G. Brunke. “Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability.” *Nature* 443, no. 7110 (2006): 439-443.

Brazil. (). Federative Republic of Brazil Intended Nationally Determined Contribution Towards Achieving the Objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change inclusive of Additional Information on the INDC for Clarification Purposes Only

Cain, M., 2018. Guest post: A new way to assess ‘global warming potential’ of short-lived pollutants. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-a-new-way-to-assess-global-warming-potential-of-short-lived-pollutants>, accessed 25Oct2019

Cain, M., J. Lynch, M.R. Allen, J.S. Fuglestedt, D.J. Frame, & A.H. Macey, 2019a. **Improved Calculation of Warming-equivalent emissions for short lived climate pollutants**. *npj Climate and Atmospheric Science* 2:29, <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0086-4>

Cain, M., M.R. Allen, J. Lynch, 2019b. **Net Zero for Agriculture**. *Oxford Martin Programme on Climate Pollutants*. https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/201908_ClimatePollutants.pdf, accessed 27Oct2019

Cain, M., 2020, Personal communication, 31Jan2020

- Carbon Offset Research & Education (CORE)**, 2011. Global Temperature Change Potential. *Stockholm Environmental Institute & Greenhouse Gas Management Institute*. <https://www.co2offsetresearch.org/aviation/GTP.html>, accessed 31Oct2019
- DeMiguel, D., M. Fortelius, B. Azanza, and J. Morales**, 2008. Ancestral feeding state of ruminants reconsidered: earliest grazing adaptation claims a mixed condition for Cervidae. *BMC Evolutionary Biology*. pp 8-13
- Environmental Change Institute**, 2005, **Chapter 2: Climate Science of Methane**, *Oxford University*, <https://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/downloads/methaneuk/chapter02.pdf>, accessed 21Oct2019
- European Fluorocarbons Technical Committee (EFCTC)**, 2016. Global Temperature change Potential Compared to Global Warming Potential. *European Chemical Industry Council (CEFIC)*. https://www.fluorocarbons.org/wp-content/uploads/2016/09/EFCTC_Learn_about_GTP_versus_GWP.pdf, accessed 31Oct2019
- Fairlie, S.**, 2018. Is Grass-fed Guilt-free. *The Land* 22. <http://www.thelandmagazine.org.uk/sites/default/files/Is%20Grass-fed%20Guilt-free%20web.pdf>, accessed 05Oct19
- Fairlie, S.**, 2019. A Convenient Untruth. *The Land* 24. http://www.thelandmagazine.org.uk/sites/default/files/A%20Convenient%20Untruth%20-%20Fairlie%20-%20Extract%20from%20The%20Land%2024_1.pdf, accessed 15Sep2019
- Frame, D., A.H. Macey, and M. Allen**, 2018. Why Methane Should be Treated Differently Compared to Long Lived Greenhouse Gases. *The Conversation*. <http://theconversation.com/why-methane-should-be-treated-differently-compared-to-long-lived-greenhouse-gases-97845>, Accessed 25Sep2019
- Galey, P.**, 2020. Scientists just found an unexpectedly large source of natural greenhouse gases. Science alert. *Agence France-Presse*. <https://www.sciencealert.com/scientists-just-found-an-unexpectedly-large-natural-source-of-greenhouse-gases>, accessed 23Feb2020
- Garnett, T., C. Godde, A. Muller, E. Röös, P. Smith, I. de Boer, E. Ermgassen, M. Herrero, C. van Middelaar, C. Schader, H. van Zanten**, 2017. **Grazed and Confused**. *Food Climate Research Network (FCRN)*, University of Oxford
- Hausfather, Z.**, 2008. The Water Vapor Feedback. *Yale Climate Connections*. <https://www.yaleclimateconnections.org/2008/02/common-climate-misconceptions-the-water-vapor-feedback-2/>, accessed 28Sep2019
- Haines, A., M. Amann, N. Borgford-Parnell, S. Leonard, J. Kuylenstierna, D. Shindell**, 2017. Short-lived climate pollutant mitigation and the Sustainable Development Goals. *Nat. Clim. Chang.* 7, 863–869. <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-017-0012-x>.
- Hirst, K.K.**, 2018. The Domestication of Goats. *ThoughtCo*. <https://www.thoughtco.com/the-domestication-history-of-goats-170661>, accessed 29Oct2019
- Hirst, K.K.**, 2019. The History of the Domestication of Sheep. *ThoughtCo*. <https://www.thoughtco.com/when-sheep-were-first-domesticated-172635>, accessed 29Oct19
- Howarth, R.W.**, 2019. Ideas and perspectives: Is Shale Gas a Major Driver of Recent Increase in Global Atmospheric Methane? *Biogeosciences*. v.16:3033-3046
- Hristov, A.N.**, 2012. Historic, pre-European Settlement, and Present-day Contribution of Wild Ruminants to Enteric Methane Emissions in the United States. *J. Anim. Sci.* 90:1371-1375
- IPCC**, 1990. Climate Change: The Intergovernmental Panel on Climate Change Scientific Assessment [Houghton, J.T., G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 364 pp.
- IPCC**, 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. SPM D.2 p.15
- IPCC**, 2014. As reported by EPA. Global Greenhouse Gas Emissions Data. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>, accessed 28Sep2019
- IPCC**, 2019. IPCC Updates Methodology for Greenhouse Gas Inventories, <https://www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/>, accessed 04Dec2019
- ISO**, 2018. ISO-14044: Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines.
- Lindsey, R.**, 2018. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. NOAA. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>, accessed 17Aug19
- Lynch, J.**, 2019. **Agricultural Methane and its Role as a Greenhouse Gas**. *Food Climate Change Network (FCRN)*, University of Oxford
- Lynch, J.M., M. Cain, R. Pierrehumbert, and M. Allen**, 2020. **Demonstrating GWP*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants**. In press. *Environ. Res. Lett.* doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7e
- MAGICC**, 2019. MAGICC – The Climate System in a Nutshell. <http://www.magicc.org/>, accessed 29Oct19

- Makhnatch, P., R. Khodabandeh, and B. Palm**, 2014. Can Global Temperature Change Potential [GTP] Replace GWP in Upcoming Regulations. *Dept. of Energy Technology, KTH Vetenskap Och Konst*. <https://www.kth.se/en/itm/inst/energiteknik/forskning/ett/projekt/koldmedier-med-lag-gwp/low-gwp-news/vilket-matt-ska-vi-anvanda-for-koldmediernas-klimatpaverkan-1.473500>, accessed 31Oct2019
- Manzano, P., S.R. White**, 2019. Intensifying pastoralism may not reduce greenhouse gas emissions: Wildlife-dominated landscape scenarios as a baseline in life-cycle analysis. *Clim. Res.* 77(2), 91–97. <http://dx.doi.org/10.3354/cr01555>.
- Montzka, S. A., E. J. Dlugokencky and J. H. Butler**, 2011. Non- CO₂ Greenhouse Gases and Climate Change. *Science*. Vol 476. pp. 43-50
- Muller, R. A., E.A. Muller**, 2017. Fugitive methane and the role of atmospheric half-life. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*. 5(2): 5-11.
- Nisbet, E.G., R.E. Fisher, D. Lowry, J.L. France, G. Allen, S. Bakkaloglu, T.J. Broderick, M. Cain, M. Coleman, J. Fernandez, G. Forster, P.T. Griffiths, C.P. Iverach, B.F.J. Kelly, M.R. Manning, P.B.R. Nisbet-Jones, J.A. Pyle, A. Townsend- Small, A. al-Shalaan, N. Warwick, G. Zazzeri**, 2020. Methane Mitigation: Methods to Reduce Emissions, on the Path to the Paris Agreement. *Rev. Geophys.* 58(1), 1–51. <http://dx.doi.org/10.1029/2019RG000675>.
- NZMFE (Ministry for the Environment)**, 2019. New Zealand's Greenhouse Gas Emissions Reduction Targets. <https://www.mfe.govt.nz/climate-change/climate-change-and-government/emissions-reduction-targets>, accessed 03Dec19
- O'Neil, B.C.**, 2000. The Jury Is Still Out on Global Warming Potential. *Climate Change*. 44:427-443
- Palmer, B.**, 2009. 7 Billion Carbon Sinks. *Slate - The Explainer*. <https://slate.com/news-and-politics/2009/08/are-you-heating-the-planet-when-you-breathe.html>, accessed 17Oct2019
- Pearce, F.**, 2016. What is Causing the Recent Rise in Methane Emissions? *Yale Environment 360*. Yale School of Forestry & Environmental Studies. https://e360.yale.edu/features/methane_riddle_what_is_causing_the_rise_in_emissions, accessed 05Aug2019
- Riebeek, H. and R. Simmon**, 2011. The Carbon Cycle. *NASA*. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>, accessed 14Sep2019
- Riedel, K. and K. Lassey**, 2008. Detergent of the Atmosphere. *Water & Atmosphere* 16(1). *NIWA Taihoro Nukurangi*. <https://niwa.co.nz/publications/wa/vol16-no1-march-2008/detergent-of-the-atmosphere>, accessed 22Oct2019
- Ripple, W.J., P. Smith, H. Haberl, S.A. Montzka, C. McAlpine, and D.H. Boucher**, 2014. Ruminants, Climate Change, and Climate Policy. *Nature Climate Change*. 4:2-5, https://www.researchgate.net/profile/Doug_Boucher/publication/259466565_COMMENTARY_Ruminants_climate_change_and_climate_policy/links/0046352bdd7554fcd000000.pdf, accessed 05Oct2019
- Ritchie, H. and M. Roser**, 2019. **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data. A historical compilation IPCC and other data.** <https://ourworldindata.org/CO2-and-other-greenhouse-gas-emissions>, accessed 28Sep2019
- Rogelj, J. and C-F. Schleussner**, 2019. (In press) Unintentional Unfairness When Applying New Greenhouse Gas Emissions Metrics at the Country Level. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4928>, accessed 15Oct2019
- Rogers, D.**, 2019. <https://www.sacredcow.info/articles-1>, accessed 13Nov19
- Saunio, M., A.R. Stavert, B. Poulter, P. Bousquet, J.G. Canadell, R.B. Jackson, P.A. Raymond, E.J. Dlugokencky, S. Houweling, P.K. Patra, Philippe Ciais, V.K. Arora, D. Bastviken, P. Bergamaschi, D.R. Blake, G. Brailsford, L. Bruhwiler, K.M. Carlson, M. Carrol, S. Castaldi, N. Chandra, C. Crevoisier, P.M. Crill, K. Covey, C.L. Curry, G. Etiope, C.Frankenberg, N. Gedney, M.I. Hegglin, L. Höglund-Isaksson, G. Hugelius, M. Ishizawa, A. Ito, G. Janssens-Maenhout, K.M. Jensen, F. Joos, T. Kleinen, P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, G.G. Laruelle, L. Liu, T. Machida, S. Maksyutov, K.C. McDonald, J. McNorton, P.A. Miller, J.R. Melton, I. Morino, J. Müller, F. Murguía-Flores, V. Naik, Y. Niwa, S. Noce, S. O'Doherty, R.J. Parker, C. Peng, S. Peng, G.P. Peters, C. Prigent, R. Prinn, M. Ramonet, P. Regnier, W.J. Riley, J.A. Rosentreter, A.M. Segers, I.J. Simpson, H. Shi, S.J. Smith, L.P. Steele, B.F. Thornton, H. Tian, Y. Tohjima, F.N. Tubiello, A. Tsuruta, N. Viovy, A. Voulgarakis, T.S. Weber, M. van Weele, G.R. van der Werf, R.F. Weiss, D. Worthy, D. Wunch, Y. Yin, Y. Yoshida, W. Zhang, Z. Zhang, Y. Zhao, B. Zheng, Qing Zhu, Qian Zhu, Q. Zhuang**, 2020, The Global Methane Budget 2000-2017, *Earth System Science Data*, 12, 1-63, 2020, DOI:10.5194/essd-12-1561-2020
- Shine K.P., J.S. Fuglestedt, K. Hailemariam, N. Stuber**, 2005: Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. *Climatic Change* 68:281-302 doi:10.1007/s10584-005-1146-9
- Shine, K.P., T.K. Berntsen, J.S. Fuglestedt, J.S., Skeie, R.B. & N. Stuber**, 2007. Comparing the climatic effects of emissions of short- and long-lived climate agents. *Philos. Trans. R. Soc. A.*, v365:1903-1914
- Smith, F.A., J.I. Hammond, M.A. Balk, S.M. Elliott, S.K. Lyons, M.I. Pardi, C.P. Tomé, P.J. Wagner, & M.L. Westover**, 2016. Exploring the Influence of Ancient and Historic Magaherbivore Extirpations on the Global Methane Budget. *Proc. Nat. Academy of Sciences*. 113(4):874-879

- Schleussner, C.F., A. Nauels, M. Schaeffer, W. Hare, J. Rogeli**, 2019. Inconsistencies when applying novel metrics for emissions accounting for the Paris agreement. *Environ. Res. Lett.* 14(12). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab56e7>
- The Ocean Portal Team**, 2018. Ocean Acidification. *Smithsonian*. <https://ocean.si.edu/ocean-life/invertebrates/ocean-acidification>, 36 pages, accessed 15Sep2019
- UNFCCC, 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.** <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, accessed 29Oct2019
- UNFCCC**, 2015. Paris Agreement. https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- Voiland, A., C. Rasmussen, and J. Stevens**, 2018. What Is Behind Rising Levels of Methane in the Atmosphere? *NASA Earth Observatory*, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/91564/what-is-behind-rising-levels-of-methane-in-the-atmosphere>, accessed 21Oct2019
- Wamsley, L.**, 2019. New Zealand Commits to Being Carbon Neutral by 2050 – With One Big Loophole. NPR. <https://www.npr.org/2019/11/07/777259573/new-zealand-commits-to-being-carbon-neutral-by-2050-with-a-big-loophole>, accessed 03Dec2019
- Wang, C.-K., X.-Z. Luo, and H. Zhang**, 2013: Shares differences of greenhouse gas emissions calculated with GTP and GWP for major countries. *Adv. Clim. Change Res.*, 4(2), doi: 10.3724/SP.J.1248.2013.127.
- Welch, C. and K. Orlinsky**, 2019. The Threat Below. *National Geographic*. Special Issue. Sept. 2019. pp. 74-103
- Wikipedia**, 2019. Atmosphere of the Earth. https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth, accessed 28Sep2019
- Zimov, S.A.**, 2005. Pleistocene Park: Return of the Mammoth's Ecosystem. *Science*. 308:796-798

補足資料

- _____, 2019. Farms, Forests and Fossil Fuels: The Next Great Landscape Transformation? *Parliamentary Commissioner for the Environment*. 181 pp. <https://www.pce.parliament.nz/publications/farms-forests-and-fossil-fuels-the-next-great-landscape-transformation>
- Etminan, M., G. Myhre, E. J. Highwood, and K. P. Shine**, 2016. Radiative Forcing of Carbon Dioxide, Methane, and Nitrous Oxide: A Significant Revision of the Methane Radiative Forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 12,614–12,623, doi:10.1002/2016GL071930.
- Gabriel Yvon-Durocher, A., P. Allen, D. Bastviken, R. Conrad, C. Gudasz, A. St-Pierre, N. Thanh-Duc, P.A. del Giorgio**, 2014. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 507 (7493): 488 DOI:10.1038/nature13164
- Gregg, J.S., R.J. Andes, G. Marland**, 2008. China: Emissions Pattern of the World Leader in CO₂ Emissions from Fossil Fuel Consumption and Cement Production. *Geophysical Research Letters*. 35:1-5, L09906, doi:1029/2007GL032998
- IPCC**, 2013. Technical Summary. *Coor. Auth. Stocker, T.F., Dahe, Q., Plattner, G-K.* Figure TS.7, p. 57
- IPCC**, 2018. Global Warming of 1.5°C: Summary for Policy Makers, 32 pp. https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf, accessed 01Nov2019
- IPCC website**, 2019. <https://www.ipcc.ch/>
- Leach, N.**, 2017. Global Methane Emissions Pathway Consistent with 1.5°C Warming. *University of Oxford*
- NZMFE (Ministry for the Environment) website**, 2019. <https://www.mfe.govt.nz/climate-change/why-climate-change-matters>
- Montzka, S.A., E.J. Dlugokencky, and J.H. Butler**, 2011. Non- CO₂ Greenhouse Gases and Climate Change. *Nature*. 476:43- 51, doi:10.1038/nature10322
- Myhre, G., and D. Shindell**, 2013. Chapter 8 of Climate Change 2013, The Physical Science Basis. Working Group 1 Contribution to the Fifth Assessment Report [AR5] of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 82 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/chapter-8sm-anthropogenic-and-natural-radiative-forcing-supplementary-material/>
- Stocker, T.F., Q. Dahe, G-K. Plattner**, 2013. IPCC AR5 Technical Summary. 80 pp., <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/technical-summary/>

略語

ARn	IPCC 評価報告書で n は順序数 1~5 を表し AR5 が最新	K°	ケルビン度（絶対温度の単位）。1 ケルビン度は 1 セルシウス度と等しい。
AW	原子量	Kg	1 キログラム（1,000 グラムと等しい）
C	炭素	LLCP	長寿命気候汚染物質
CFC	クロロフルオロカーボン（フロンガス）	LCA	ライフサイクルアセスメント
CH₄	メタン	Mt	1 メガトン（100 万トンと等しい）
CO₂	二酸化炭素	N₂	窒素
CO₂-e	二酸化炭素と等価。さまざまな GHG を二酸化炭素と質量等価で表すために一般に用いられている方法。通常、IPCC により定義された 100 年間の地球温暖化係数をいうが、さまざまな GHG の効果について全く異なる説明が可能な他の手法も提案されている。	N₂O	一酸化二窒素
CO₂-e*	最初の手法により判定された二酸化炭素等価で、GWP*の推計に用いられる	O₂	酸素
CO₂-we	GWP*の推計を目的とした改定手法により推計された二酸化炭素温暖化等価	O₃	オゾン
EPA	米国環境保護庁	OH	ヒドロキシルラジカル
FAO	国連食糧農業機関	pH	酸性（度）の尺度で、7 を中性とし、7 より高い数値がアルカリ性、7 より低い数値が酸性を示す
g	1 グラム	ppb	10 億分の 1
GHG	温室効果ガス	ppm	100 万分の 1
GWP_n	地球温暖化係数。n は年数で表した対象時間で、通常は 20 年、50 年または 100 年。GWP ₁₀₀ は IPCC により公表され、現在、基準として考えられている	RE	放射効率
GWP*	地球温暖化係数の応用オプションで、短寿命 GHG と長寿命 GHG 双方の排出量間の直接等価ではなく、主にメタンなど短寿命 GHG の放出速度の変化を一定量の CO ₂ に関連付ける二酸化炭素等価を導き出すためのもの。	RF	放射強制力
Gt	1 ギガトン（10 億トンと等しい）	SLCP	短寿命気候汚染物質
GTP	地球温度変動	t	1 トン（1,000 キログラムまたは 100 万グラムと等しい）
H₂O	水	Tg	1 テラグラム（1 兆グラムまたは 100 万トンと等しい）
IPCC	気候変動に関する政府間パネルは、気候変動に関する科学を評価するための国連機関	TCRE	累積炭素排出量に対する過渡的気候応答
		Tt	1 テラトン（1 兆トンと等しい）
		UNFCCC	気候変動に関する国際連合枠組条約（COPxx（第〇〇回締約国会議）の枠組み）
		W/m²	1 平方メートル当たりのワット数



用語集

アルベド (Albedo) 太陽光または放射線が天体表面で反射される割合

嫌気性 (Anaerobic) 無酸素状態が必要な活動またはプロセス

人為起源 (Anthropogenic) 人間の活動から生じるもの

好気性 (Aerobic) 酸素が必要な活動またはプロセス

原子量 (Atomic Weight) 特定元素の単一原子の質量で、原子の最も安定した（静止時の）形で主に陽子および中性子の数に関係する。

生物起源 (Biogenic) 生体内の作用から生じるもの

バイオマス (Biomass) 植物由来の素材の乾燥重量で、区域内の土地で収穫または利用可能なもの。通常は、食物や繊維の用途ではなく、燃焼によるエネルギーの捕捉を目的とした植物の利用をいう。

炭素 (Carbon) (C または ^{12}C) 一般に質量 12（6 陽子に各電子および 6 中性子）の基本的な元素。炭素にはそれぞれ 7 中性子または 8 中性子をもつ ^{13}C や ^{14}C の形もある。こうした別の形の炭素は既知の比率で C^{12} に分解する。

デ・ミニミス (De Minimis) 小さすぎるので検討対象外

二量体 (Dimer) 同一 2 原子または結合分子により構成される 1 分子または分子複合体

腸内 (Enteric) 消化系に関連または由来。腸内発酵は反すう動物の消化プロセスの一部で自然な作用

絶滅 (Extirpation) ある地域内または一定の範囲内での種の消滅

フロー汚染物質 (Flow pollutant) 大気中の寿命が比較的短いガスで、別名短寿命気候汚染物質 (SLCP)（例：メタン）

地球温暖化係数 (GWP) さまざまな温室効果ガス (GHG) の排出の強さを二酸化炭素と比較し数値化する、一般的に用いられている方法。既定の時間枠（通常は 100 年）で、GHG のパルス放出の結果、大気エネルギーのバランスに生じる総変化量を CO_2 と比較し導き出したもの。

温室効果ガス (Greenhouse gas : GHG) 太陽光の熱を捕捉し保持することができ、その結果、大気温を上昇させるガス

半減期 (Half-life) 物質の半分が消失するのに要する時間

ハロゲン (Halogens) フッ素化分子および塩素化（ハロゲン化）分子で、製造業、電気設備、冷却・空調、薬、冶金で、またエアゾール噴射剤として使用される。化合物には CHC 、 HCFC 、 HFC 、 PFC 、 SF_6 および NF_3 が含まれる。

水和物 (Hydrate) 水が別の元素または化合物と結合し固形化した結晶組織。本書の場合、「水和物」はメタン水和物を指す

水素 (Hydrogen : H) 通常は 1 陽子と 1 電子からなる、1 原子量の最も基本的な元素

ヒドロキシルラジカル (Hydroxyl radical : OH) 反応性の高い分子で、大気中のほとんどのメタンを初動対応で破壊に導く役割を担い、大気中の他の多くの汚染物質を除去するために重要である。ラジカルは不対電子の分子または原子で、このため通常非常によく反応する。

気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC) 国連の政府間組織で、気候変動の客観的、科学的見解、気候変動が自然、政治、経済に与えるインパクトおよびリスク、ならびに可能な対応オプションを世界に提供する専門機関。IPCCの母体は世界気象機関である。

同位体 (Isotope) 原子核内の中性子数の違いによる元素の別の形

寿命 (Lifetime) パルスまたはその一部が大気中で持続する時間の長さ

リソスフェア (Lithosphere) 地殻の岩石

メタン (Methane : CH₄) 2番目に多く見られる温室効果ガスで、1炭素原子と4水素原子からなる質量16の分子

メタン生成 (Methanogenic) メタンを生成するプロセスまたは有機体

メタン資化性 (Methanotrophic) メタンを消費するプロセスまたは有機体

分子量 (Molecular weight : MW) 分子を構成するすべての原子の原子量の総和

窒素 (Nitrogen : N) 自然の状態では7陽子と7中性子からなる最も多く見られる原子量14の元素

一酸化二窒素 (N₂O) 2窒素原子と1酸素原子からなる分子量44の化合物

酸素 (Oxygen : O) 自然の状態では8陽子と8中性子からなる最も多く見られる原子量16の元素

オゾン (Ozone : O₃) 3酸素原子からなる大気中の化合物で、地球の上空(成層圏)で太陽の紫外線から地球を守るが、対流圏ではGHG効果のある汚染物質で、人間の健康に有害なものと考えられている。

光分解 (Photolysis) 光の作用による分子の分解または解離

放射効率 (Radiative efficiency : RE) さまざまな温室効果ガスの温室効果の強さを測る尺度で、大気中のガス濃度の変化当たりの放射強制力の変化として定義される

放射強制力 (Radiative forcing : RF) さまざまな因子(温室効果ガスを含む)による大気中の出入エネルギーバランスの変化を測定する尺度。所与の時間枠の単位面積当たりのエネルギーバランスの変化(W/m²)で表され、通常は現代の状況を産業革命前の状況と比較する。もっと簡単に言えば、地球に吸収される日射量(太陽光)と宇宙に放射されるエネルギーとの差。

減衰率 (Rate of decay) 物質が消滅または構成成分に分解される速さで、普通は半減期を用いて表される

滞留時間 (Residence time) GHGのパルス放出が自然のプロセスにより大気中から除去されるために必要な時間

反すう動物 (Ruminant) 4つの部屋からなる胃をもつ哺乳動物。一番目の部屋はルーメンとして知られる臓器で、単胃動物では通常は消化されない植物飼料が細菌やプロトゾア(絨毛虫)によってタンパク質と糖に分解され、発酵を通して副産物のメタンが発生する。反すう動物の例:牛、羊、ヤギ、ラマ、水牛、ラクダなどに代表される在来種、およびバイソン、鹿、エルク、ムース、カリブー、シロイワヤギ、オオツノヒツジ、キリン、ヤク、水牛、ガゼル、インパラ、ジャコウウシ、ウィルドビーストなどに代表される野生種

隔離 (Sequester) 循環内に隠すか、循環から外し、吸収源(シンク)に堆積されること

吸収源またはシンク (Sink) 大気圏外の貯蔵所または崩壊の方法

成層圏 (Stratosphere) 地表面から10~50キロメートル上空に広がる大気圏の第2層。成層圏は保護オゾン層が存在する場所、地上を太陽の放射線から守り、民間航空機が飛行する。

蓄積性汚染物質 (Stock pollutant) 大気中の寿命が長いガスで、別名長寿命気候汚染物質(LLCP)(例:二酸化炭素)

トン (Tonne) メートル法のトンで、1,000キログラムまたは2,204.6ポンドに等しい

対流圏 (Troposphere) 大気圏の最下層にあって大半の生物が生きる場所で、地表から6~10キロメートル上空の成層圏と呼ばれる第2層との境界まで広がる。

グローバル・デリー・プラットフォーム

10255 W. Higgins Road, Suite 820

Rosemont, Illinois, 60018-5616

米国

電話 : +1 847 627 3388

ファックス : +1 847 627 3380

Info@GlobalDairyPlatform.com

GlobalDairyPlatform.com



GLOBAL DAIRY PLATFORM