

WMO 温室効果ガス年報

2021 年 12 月までの世界の観測結果に基づく
大気中の温室効果ガスの状況

第 18 号 | 2022 年 10 月 26 日

ISSN 2078-0796

2020 年及び 2021 年に、WMO 全球大気監視 (GAW) 計画の全球ネットワークは、1980 年代初頭に組織的観測を開始して以降、大気中メタン (CH₄) 濃度の最大の年間増加量⁽¹⁾ (15 ppb⁽²⁾ 及び 18 ppb) を観測した (図 1)。これらの特異な濃度増加の要因は、世界の温室効果ガス科学コミュニティにより現在も調査されている。大気中メタン濃度とその安定炭素同位体比 ¹³C/¹²C (δ¹³C(CH₄)) として報告) 観測の解析 (図 2) では、2007 年以降の大気中メタン濃度の増加が生物起源の過程に関連していることを示唆しているが、この増加量に対する人為起源及び自然起源の相対的な寄与は不明である。メタン排出量を削減するために考えられる全ての努力が実行されるべきであるが、これは数千

年にわたり気候へ影響を及ぼし続ける二酸化炭素 (CO₂) 排出の削減に取って代わるものではない。

大気中のメタンは気候変動に対し 2 番目に大きな寄与がある。その有効直接放射強制力 (EDRF)⁽³⁾ は 2021 年に 0.55 W m⁻² であり、過去 10 年間で、平均 0.003 W m⁻²/年の割合で増加している。さらに、メタンが崩壊することで対流圏オゾン及び成層圏水蒸気の形成につながるため、メタンは 2021 年に約 0.3 W m⁻² の間接放射強制力をもたらした。(比較として、二酸化炭素からの EDRF は 2021 年に 2.22 W m⁻²、過去 10 年間で、平均 0.03 W m⁻²/年の割合で増加している。) メタン収支は、放出源と吸収源の多様な組合せで構成されてお

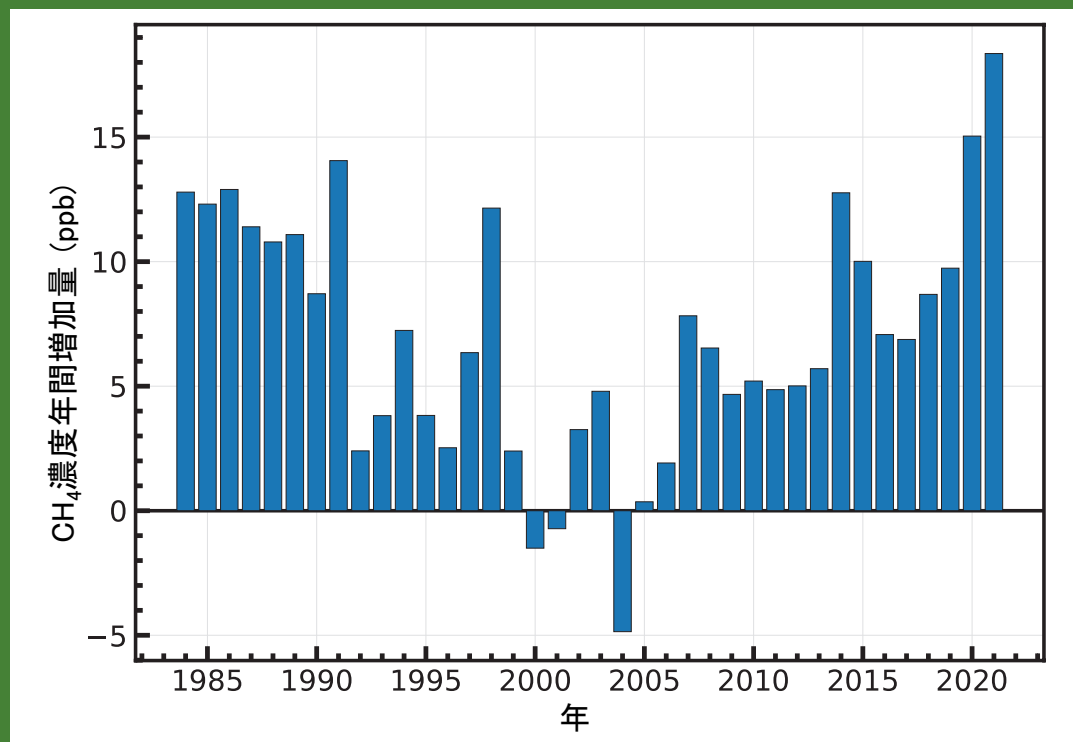


図 1 1983 年から 2021 年の期間における WMO GAW ネットワークにより観測された大気中メタンの世界平均濃度の年間増加量⁽¹⁾。

り、多くの放出源が地理的に重なっているため、放出源の種類ごとに放出量を定量化することは困難である。このため、メタンの濃度増加率の変動を特定の過程に帰することは課題である。大気中メタン収支に対する現在最良の制約条件は、WMO GAW コミュニティによる大気中メタン濃度及び安定炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ の長期間の高品質な地上観測による。これらの観測は明確に以下を示している。

- ・2007 年以降、大気中メタンの世界平均濃度は増加している。
- ・その濃度増加率は加速している。
- ・2020 年及び 2021 年の濃度年増加量は、1983 年に組織的観測が開始されて以降最大である。

同位体組成観測では、安定炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ の世界平均値は、約 200 年間増加した後、濃度増加率がほぼゼロであった時期を経て大気中メタン濃度が再増加し始めた時期とほぼ同時期に減少し始めたことを示している。2007 年に始まったこの新たなメタン濃度の増加を説明するために、放出源と吸収源の変化における多くのシナリオが提案されてきた一方で、GAW によるメタン濃度及び安定炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ の観測と整合

する最も可能性の高い説明は、主に生物起源の放出源からの放出量増加によるものである。これが部分的には気候フィードバックとして自然湿地からの放出量増加によるものであるかはまだ言及できない。2020 年及び 2021 年の記録的な濃度増加は、放出量の長期的な増加と年々変動が重なったことに起因している可能性がある。これらの変動を理解することは、科学コミュニティにとって依然として重要な課題である。

人為起源のメタン排出、とりわけメタンの大きな排出源である化石燃料部門(世界の総排出量の 20%以上)からの排出を削減しうる費用対効果の高い方策があり、これらの排出を削減することは、二酸化炭素排出量を削減するという追加の利点をもたらすだろう。これらの方策は精力的に推進すべきである。しかしながら、メタンの比較的短い寿命(約 9 年)のために大気中のメタン蓄積が可逆的である一方で、二酸化炭素排出量を削減する対策もまた講じなければならない。大気中の二酸化炭素蓄積は人間の時間スケールでは不可逆的であり、極域の氷の融解や海面水位上昇などの強力でゆっくりしたフィードバックを駆動することで、数千年間も気候に影響を与える。

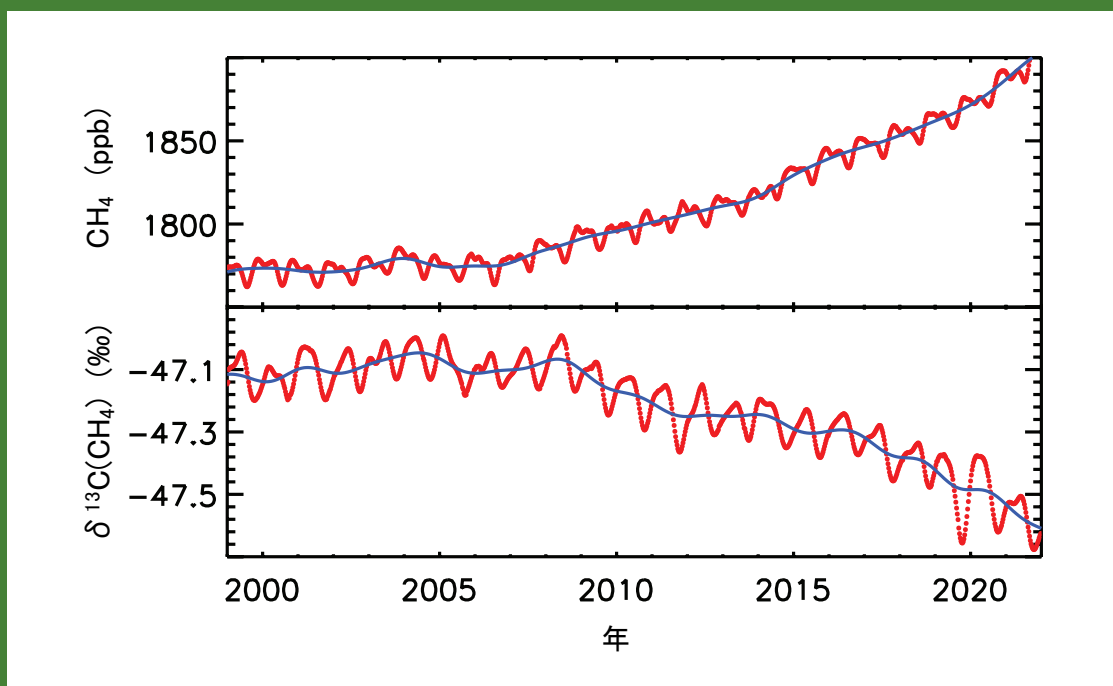


図 2 WMO GAW 全球ネットワークにより観測された大気中メタンの世界平均濃度及び安定炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ の平滑値(赤線)及び季節変動を除いた成分(青線)。

要約

WMO全球大気監視(GAW)計画から得られた観測成果の最新の解析によると、2021年の二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)の現場観測ネットワークによる地上での世界平均濃度⁽⁴⁾は、それぞれ、415.7±0.2 ppm⁽⁵⁾、1908±2 ppb、334.5±0.1 ppbとなり、解析開始以来の最高値を更新した。これらの値は、工業化以前(1750年以前)の、それぞれ149%、262%、124%である。二酸化炭素の2020年から2021年までの濃度増加量は、2019年から2020年までの増加量と等しく、最近10年間の平均年増加量より大きかった。メタンの2020年から2021年までの濃度増加量は、2019年から2020年までの増加量より大きく、最近10年間の平均年増加量よりかなり大きかった。一酸化二窒素の2020年から2021年までの濃度増加量は、2019年から2020年までの増加量よりわずかに大きく、最近10年間の平均年増加量より大きかった。米国海洋大気庁(NOAA)年次温室効果ガス指標(AGGI)[1]によると、1990年から2021年までに、長寿命の温室効果ガス(LLGHGs)による放射強制力は49%増加しており、二酸化炭素がそのうちの約80%を占める。

2021年のGAW現場観測ネットワークの概要

このWMO温室効果ガス年報第18号は、長寿命の温室効果ガスの中で最も影響の大きい、二酸化炭素、メタン及び一酸化二窒素の大気中の濃度と変化を報告するとともに、その他の温室効果ガスの概要も示す。上記の3種類のガスとフロン12(CFC-12)及びフロン11(CFC-11)を合わせると、長寿命の温室効果ガスによる放射強制力全体の約96%⁽⁶⁾[1]を占める(図3)。

WMO GAW 計画は、大気中の温室効果ガス(GHGs)及びその他の微量成分の組織的観測及び解析をとりまとめている。最近10年間の温室効果ガス観測地点を図4に示す。参加国が報告した観測データは、気象庁にある温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)が保管・配布している。

この年報でWMO WDCGGが報告する世界平均濃度及び増加量とNOAAが発表した結果[2]及び本年報の表紙の特集記事を参照)は、同じ年であっても値が若干異なる。これは解析に使用される観測地点の違い、平均値算出手法の違い、及び値が代表する期間の若干の違いによる。WMO WDCGGはGAWレポートNo.184[3]に記載されている

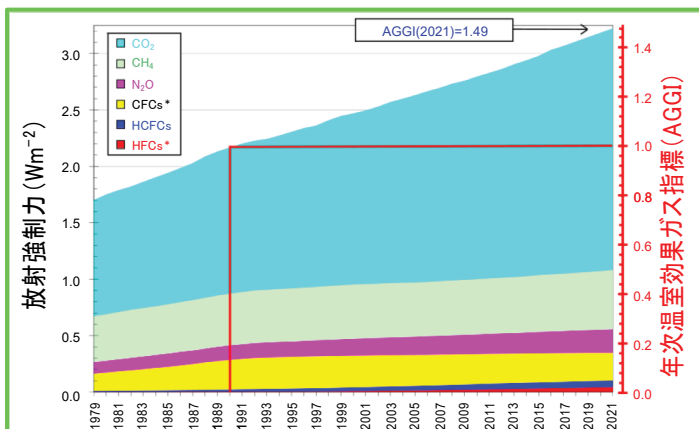


図3 長寿命の温室効果ガスによる放射強制力(1750年を基準)の経年変化と2021年のNOAA年次温室効果ガス指標(AGGI)[1]。(＊詳細については、前号の同図の注釈も参照のこと)

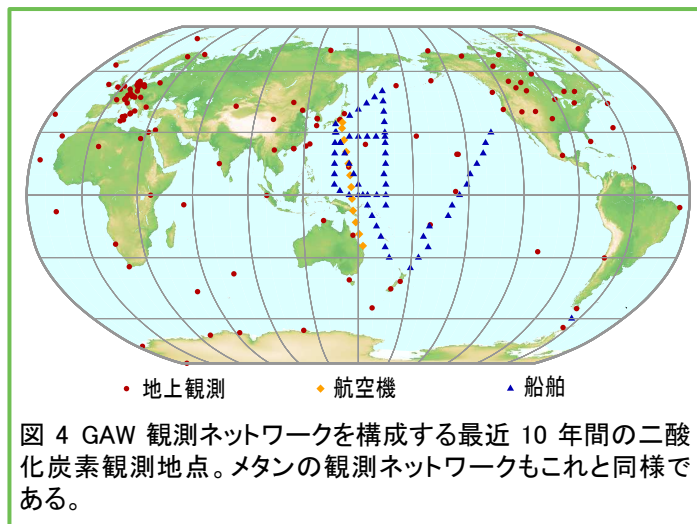


図4 GAW観測ネットワークを構成する最近10年間の二酸化炭素観測地点。メタンの観測ネットワークもこれと同様である。

手法で解析を行っている。この年報で報告されているCO₂の解析結果は、新しいWMO CO₂ X2019 較正スケール[4]を用いたデータが現在報告されているため、2020年以前に発行された温室効果ガス年報の解析結果とはわずかに(約0.2 ppm)異なる。報告された変化傾向に一貫性をもたせるため、過去データを新しいスケールに変換している。

主な3種の長寿命温室効果ガスの2021年の大気中濃度の世界平均と、2020年から、及び1750年からの濃度変化を表に示す。移動体観測によるデータ(図4の青の三角と橙の菱形)は、NOAAによる太平洋東部の観測を除き、この解析には使っていない。

表に示されている3種の温室効果ガスは人間活動と密接に結びついており、生物圏や海洋とも強い相互作用がある。大気中の温室効果ガスの将来変化を予測するには、その様々な放出源や吸収源、大気中の化学反応についての定量的な理解が必要である。GAW計画に基づく観測成果は、これらのガス及び他の長寿命温室効果ガスの収支を解明するための貴重な手掛かりを与えると同時に、温室効果ガスの排出量推定の改善や衛星から求めた長寿命温室効果ガスの気柱平均データの評価に利用されている。統合全球温室効果ガス情報システム(IG³IS)は、国や地方行政区レベルで温室効果ガスの放出源及び吸収源についての更

表 GAW 温室効果ガス観測ネットワークによる主な温室効果ガスの地上の世界平均濃度(2021年)と増加量。単位は乾燥空気のモル分率で誤差幅は68%の信頼限界による。平均手法は、GAWレポートNo.184 [3]に記載している。

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
世界平均濃度(2021年)	415.7±0.2 ppm	1908±2 ppb	334.5±0.1 ppb
1750年と比較した存在比 ^a	149%	262%	124%
2020年から2021年までの増加量	2.5 ppm	18 ppb	1.3 ppb
2020年からの増加分の比率	0.61%	0.95%	0.39%
世界平均濃度の最近10年間の平均年増加量	2.46 ppm/年	9.2 ppb/年	1.01 ppb/年

^a 工業化以前の濃度を、二酸化炭素(CO₂)は278.3 ppm、メタン(CH₄)は729.2 ppb、一酸化二窒素(N₂O)は270.1 ppbと仮定した。本解析に使用した観測点数は、CO₂(147地点)、CH₄(149地点)、N₂O(108地点)。

将来の地球温暖化抑止の一例：モントリオール議定書とそのキガリ改正

Guus Velders, Alex Vermeulen and Ray Weiss

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とその改正及び調整は、地球を保護している成層圏のオゾン層の破壊に触媒として働く、ハロカーボン類を主とするオゾン層破壊物質(ODSs)の広範囲の工業生産と消費を規制する。1987年に議定書は採択され、オゾン層破壊物質の排出減少において大成功を収めた。その理由の一つは、実際の排出を規制するよりも生産と消費を規制する方が容易だったためである。オゾン層破壊への影響以外に、オゾン層破壊物質は強力な温室効果ガスでもあり、オゾン層を保護する有効な規制は、これまでのいかなる温室効果ガス排出削減よりも将来の地球温暖化の抑止に寄与してきた。

塩素や臭素を含まないハロカーボン類は成層圏オゾン層を破壊しないことから、モントリオール議定書を遵守するために、最初のうちは多くのオゾン層破壊物質がハイドロフルオロカーボン類(HFCs)に置き換えられたが、HFCsは強力な温室効果ガスである。HFC排出は過去20年間で劇的に増加し、規制のなかった2015年には、HFCの使用と排出の大幅な増加は、2100年までに地上の昇温に潜在的に追加で0.5°C上昇することにつながると見積もられた。2019年には、世界的にHFCsの使用を制限することを目的としたモントリオール議定書のキガリ改正が発効した。現在、HFCs使用制限の規制は幾つかの国々で有効である(アメリカ合衆国はこの改正を2022年9月に批准した)。

本年報の他章で掲載されている NOAA の AGGI 指標によると、ハロカーボン類は現在、1750年以降の世界全体の放射強制力の増加の11%を占めるとされている(1750年基準と比較して、現在の1.3°Cの地上の昇温のうち0.13°Cがこれに該当する)。HFC消費を規制する追加措置がない場合のHFCsによる2100年までの世界平均地上気温の昇温への寄与は、0.28~0.44°Cと推定されている。

WMO GAW 温室効果ガス全球観測に貢献する AGAGE 大気監視ネットワークや他のネットワークで最近検出された HFC 排出の削減により、この増加は 2100 年までに 0.14~0.31°Cの間に抑えられる。キガリ改正による追加の規制に伴う削減により更に 0.04°Cに抑えられる。現在は達成が難しいが、2023年までの HFC消費の全面禁止は、2100年までに事実上追加の昇温をゼロとすることに寄与するだろう[13]。このことは図10で詳細に描画されており、2000~2100年の期間で異なる仮説の下でのハロカーボン類による追加の昇温の見積りを示している。

これらは、観測が政策決定者に環境破壊への措置を講じるための情報を与え、排出削減目標に到達するための進捗情報を与える好例である。このことは、今度は政策決定者に望ましい目標到達のための更なる規制の修正を可能にする。

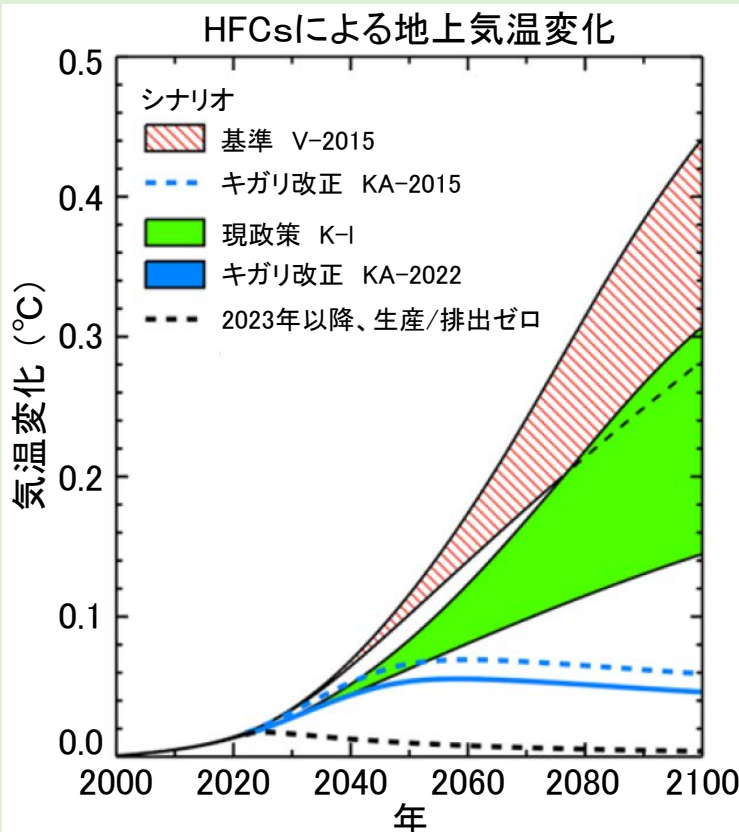


図 10 HFCs 消費に影響を及ぼす対策を実施しない V-2015 基準シナリオ及びキガリ改正と独立した(K-I)現政策シナリオによる HFCs の世界平均地上気温の昇温への寄与。色付き範囲はこれらのシナリオの上端と下端の範囲を意味する。キガリ改正(KA-2022)の規制に伴う HFCs の段階的な縮小への影響及び世界全体の HFC 排出が 2023 年に終わるとする仮説シナリオもまた示される。キガリ改正シナリオの上端と下端の範囲は実質的に一致するため示されない。地上気温変化は MAGICC6 モデルを使用して計算された。曲線は HFC-23 を除く全ての HFCs の寄与を含む(参考文献[13]参照)。

観測されたメタン濃度増加率の変動を解釈する課題

Sander Houweling and Ed Dlugokencky

GAW 温室効果ガス監視ネットワークは、本年報の表紙の特集記事に記載されているように、世界のメタン濃度増加率を正確に定量化している。しかし、観測された増加率の変動を地理的起源及び主要な放出プロセスの観点から説明することは、はるかに困難である。そのためには、新しい放出がネットワーク内の観測点に到達する前に大量の空気の中で速やかに拡散される大気力学を解く必要がある。これは、大気レーザー輸送モデルを用いて行われる。これらのモデルは、世界全体の気象を詳細に表現し、ガスの輸送への影響を計算する。大気観測から放出量を推定するために、モデルは監視している地表面放出量の格子点図における各放出源に対する各観測値の感度を計算する。モデルが観測値と最適に一致するような放出配置を導き出すために数学的最適化法が利用される。

このいわゆる大気逆解析モデリングを用いたコンピュータコードは、スーパーコンピュータで十分な空間的及び時間的解像度で実行する必要がある。これは、例えば、欧州コペルニクス大気監視サービス(CAMS)によって行われ、観測に基づいた1990年以降の排出量の再解析値を毎年更新して提供している[14]。図11は、最新のCAM5再解析により、世界全体のメタン放出量が時間の経過とともにどのように変化してきたかを示している。逆解析モデリング計算では、化石燃料利用、農業、廃棄物処理などからの放出インベントリを開始点または第一推定値として使用する。第一推定値による(演繹的な)放出量と逆解析による(帰納的な)放出量の違いは、観測値が提供する新しい情報を反映している。

大気観測から推定される放出量の精度は、部分的には地上ネットワークの地理的分布に依存する(本年報の図4を参照)。熱帯域やアジア大陸の内陸など、観測が疎な地域では、放出量の推定の不確かさが最も大きくなる。観測された増加率の変動の大部分は、地球上の異なる観測点でほぼ同期しており(図12を参照)、逆解析モデルでは、主に熱帯地方に起因する放出量の変化として解釈される。ただし、熱帯域での利用可能な観測は限定されているため、推定放出量の不確かさは依然として大きい。熱帯域は、不確かさの大きい自然の湿地からの放出源だけでなく、大気中ヒドロキシル(OH)ラジカルによる最大のメタン消失源としても知られている。地表観測では、いずれも大気中のメタン濃度の増加を説明しうる地表放出量の増加と大気中消失量の減少を区別するための情報は限定される。

GOSAT や TROPOMI などのメタン観測衛星は、熱帯域に貴重な追加の観測範囲を提供する。ただし、雲の存在下で衛星がメタンを検出することは難しいため、熱帯林の観測範囲は依然として不十分である。最近の最適ネットワーク設計研究[15]で示されているように、アフリカの熱帯域など観測点がほとんどない熱帯域で現場ネットワークが拡大することは、メタン放出に関する知識を大幅に向上させる。

安定同位体比の観測は、本年報の表紙の特集記事で説明されているように、地球規模の変動傾向の起源に関する強力な追加の制約条件を提供し、最近のメタン濃度の増加における微生物起源の放出の支配的な寄与を強く示唆している(例えば、参考文献[16]を参照)。これは、逆解析が示唆する熱帯起源と組み合わせて、熱帯域湿地からのメタン放出量が過去数年間で増加した可能性があることを示唆している。熱帯域湿地における微生物によるメタン生成は、気温と降水パターンの変化に敏感であり、潜在的に正の気候フィードバックをもたらす(これは、近年実施された研究で更なる科学的な注目を集めているプロセスである(例えば、参考文献[17]と[18]を参照))。熱帯域湿地からのメタン放出は、エルニーニョ・南方振動(ENSO)の影響を受けやすいことも知られている。ENSOは気温と降水パターンに影響を与え、参考文献[19]では、2011年の強いラニーニャ現象の期間に熱帯のメタン放出の増加が報告されている。2020年に始まり、現在も進行中のラニーニャ現象は、最近の記録的なメタンの世界的な濃度増加率の上昇に寄与している可能性がある。

観測されたメタン濃度増加率の変動を解釈する上での主要な課題は、想定されるいくつかのシナリオのうち、どれが実際に起こったのかを証明することである。例えば、2020年の濃度増加率の増加の場合、大気化学及びヒドロキシル(OH)ラジカルによるメタン消失に対する新型コロナウイルス感染症(COVID-19)による都市封鎖の影響も要因となりうるだろう[20]。しかし、2021年に観測されたメタン濃度の年増加量の大幅な増加を大気の消失源で説明できる可能性は低い。グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)の世界的なメタン収支イニシアティブは、放出インベントリ、プロセスベースのモデル、及び逆解析モデルを統合することに重要な役割を果たしている。このイニシアティブでは、モデルの不確かさを評価するために、モデルのアンサンブルを利用している。これは数年かかるプロセスであるが、現時点では、大気中のメタン濃度の加速的な増加について最も可能性の高い説明を決定するために十分な情報を収集する唯一の手法である。

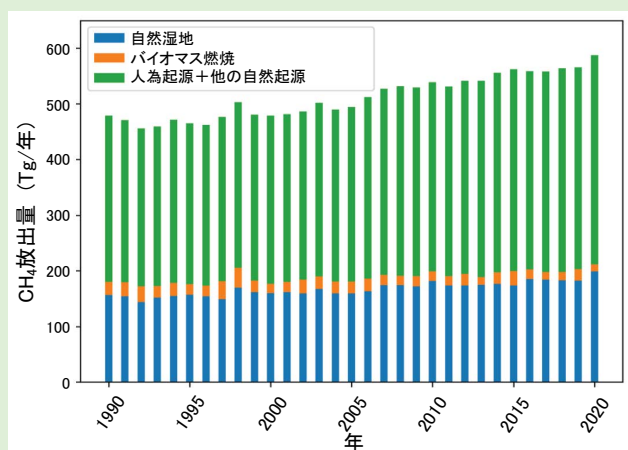


図11 CAM5 逆解析モデリングの再解析 v20r1 によるメタン放出量。「他の自然起源」の区分には土壌によるメタン吸収を含む。

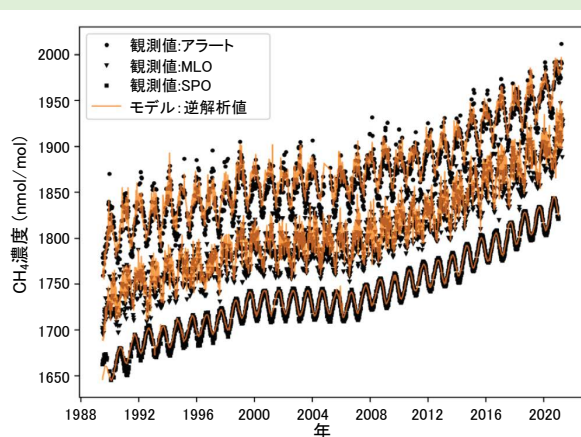


図12 選択した観測点の観測値に対する CAM5 メタン逆解析モデルによるフィッティング曲線(MLO: マウナロア観測所、SPO: 南極点観測所)。

なる見識を与える(<https://ig3is.wmo.int>)。

気候変動の駆動要因としての温室効果ガスの役割に対する注目が集まっていること、及び、気候緩和の取組に関する意思決定のため温室効果ガス情報の基盤を強化する必要性に鑑み、WMO は持続的で国際的に調整された地球規模の温室効果ガス監視の枠組(<https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/greenhouse-gases/global-greenhouse-gas-monitoring-infrastructure>を参照)の発展のために、より広範な温室効果ガスコミュニティと協力している。第75回WMO執行理事会の決議に従って、専門の検討部会は現在、観測ネットワーク設計、観測結果の取得、国際交換及び利用のための国際的に調整された手法を確立する温室効果ガス監視インフラストラクチャ構想の発展に取り組んでいる。このインフラストラクチャの枠組の中で、特に陸域と海洋の観測及びモデリングに関して、WMO は温室効果ガス監視活動に関与するより広い科学コミュニティ、及び、他の国連機関と国際調整機関の双方に関与し、緊密に連携している。

NOAA 年次温室効果ガス指標(AGGI)では、1990年以降全ての長寿命温室効果ガスによる放射強制力の合計の増加を評価している[1]。AGGIは2021年には1.49となり、放射強制力の合計は、1990年以降2021年までに49%⁽⁶⁾、2020年からは1.2%増加した(図3)。2021年の全ての長寿命温室効果ガスによる放射強制力の合計(3.22 Wm⁻²)は、二酸化炭素等価換算濃度で508 ppmに相当する[1]。工業化以前からの世界全体の放射強制力の増加量に対する主要な長寿命温室効果ガスの相対的な寄与を図5に示す。

二酸化炭素(CO₂)

二酸化炭素は、最も重要な大気中の人為起源温室効果ガスであり、長寿命の温室効果ガスによる放射強制力の約66%⁽⁶⁾を占めている。また最近10年間の放射強制力の増加のうちの約81%⁽⁶⁾、最近5年間では約80%が二酸化炭素によるものである。工業化以前の大気中の二酸化炭素濃度は、大気、海洋及び陸上生物圏の間の炭素交換のバランスを反映して278.3 ppmであった。二酸化炭素の2021年の世界平均濃度は415.7±0.2 ppmとなった(図6)。2020年から2021年までの年平均値の増加量(2.5 ppm)は、2019年から2020

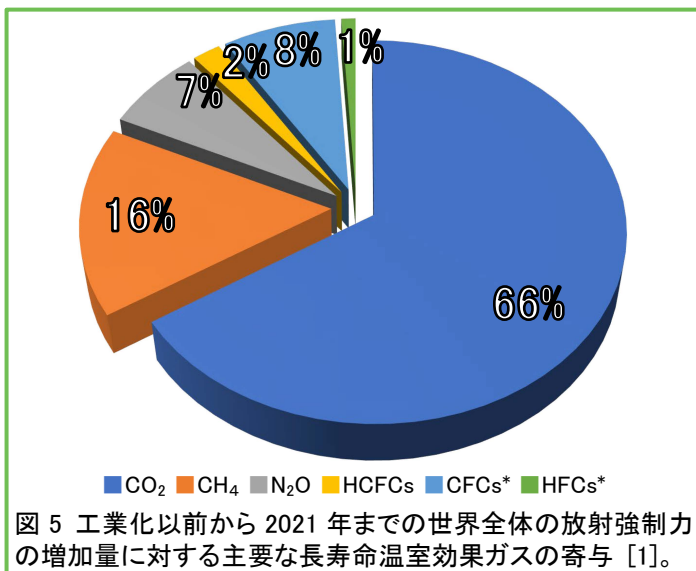


図5 工業化以前から2021年までの世界全体の放射強制力の増加量に対する主要な長寿命温室効果ガスの寄与 [1]。

年までの増加量と等しかったが、最近10年間の平均年増加量(2.46 ppm/年)よりわずかに大きかった。

大気中の二酸化炭素濃度は、2021年に工業化以前の149%に達した。これは、主として化石燃料の燃焼とセメント生産からの排出による結果である。国際エネルギー機関(IEA)によると、2021年のエネルギー燃焼及び工業過程からの二酸化炭素排出量は二酸化炭素換算で36.3 GtCO₂⁽⁷⁾であり、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)に関連する規制により、排出量が前年の水準に対して減少した2020年の34.2 GtCO₂から6%増加した[5, 6]。グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)[7]の2021年の解析によると、森林減少とその他の土地利用変化は、2011年から2020年までの期間で平均して、4.1(±2.6) GtCO₂/年の排出に寄与した。2011年から2020年の期間の人間活動による排出のうち、約48%が大気、26%が海洋、29%が陸上に蓄積され、3%は蓄積先が特定されなかった残差である[7]。化石燃料の燃焼により排出され大気中に残留する二酸化炭素の比率(大気残留率)は、二酸化炭素吸収源の大きな自然変動によって年々変動し、世界全体での変化傾向は確認されていない(WMO温室効果ガス年報第17号(気象庁訳)の表紙の特集記事も参照)。

メタン(CH₄)

メタンによる放射強制力は、長寿命の温室効果ガス全体の約16%⁽⁶⁾を占める。大気中に放出されるメタンの約40%は自然起源(湿地やシロアリなど)であり、人為起源(畜産、稲作、化石燃料採掘、埋め立て、バイオマス燃焼など)によるものは約60%である[8]。現場観測によるメタンの2021年の世界平均濃度は、解析開始以来の最高値を更新する1908±2 ppbであり、前年から18 ppb増加した(図7)。この増加は2019年から2020年までの増加量(11 ppb)より大きく、最近10年間の平均年増加量より大きい。年増加量は、1980年代後半の約12 ppb/年から減少し、1999年から2006年の間はほぼゼロとなった。2007年以降、大気中メタン濃度は増加しており、人為的な排出増加を反映して2021年に工業化以前(729.2 ppb)の262%に達した。GAWのメタン観測結果を用いた研究によれば、熱帯の湿地と北半球中緯度での人為排出源からのメタンの放出増加が近年の増加の原因である可能性が高い。詳細については、本号の表紙の特集記事及び挿入記事を参照されたい。

一酸化二窒素(N₂O)

一酸化二窒素の放射強制力は、長寿命の温室効果ガス全体の約7%⁽⁶⁾を占め、それらのうちで3番目に大きな寄与がある。一酸化二窒素は、自然起源(約57%)と人間活動(約43%)の両方から放出され、それらは海洋、土壌、バイオマスの燃焼、施肥及び各種工業過程を含んでいる[9]。一酸化二窒素の2021年の世界平均濃度は334.5±0.1 ppbであり、前年から1.3 ppb増加して(図8)、工業化以前(270.1 ppb)の124%となった。2020年から2021年までの増加量は、2019年から2020年までの増加量より大きく、最近10年間の平均年増加量(1.01 ppb/年)より大きかった。農地への窒素添加が主な原因である全世界の一酸化二窒素の人為的排出量は、過去40年間で30%増加し年間の窒素量で7.3(4.2~11.4) TgN⁽⁸⁾/年となった。この増加が、主に大気蓄積の増加の原因である[9]。

他の温室効果ガス

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で規制されている、オゾン層破壊物質であるクロロフルオロカーボン類(CFCs)は、他のハロゲン化物と合わせた合計で、長寿命の温室効果ガスによる放射強制力全体の約11%⁽⁶⁾を占める。大気中のクロロフルオロカーボン類とほとんどのハロン類は減少している一方で、同じく強力な温室効果ガスであるハイドロクロロフルオロカーボン類(HCFCs)やハイドロフルオロカーボン類(HFCs)のいくつかは、今のところ量は少ないものの(ppt⁽⁹⁾)の水準)、比較的急速に増加している。六フッ化硫黄(SF₆)も同様に量は少ないが非常に強力な長寿命の温室効果ガスであり、化学工業生産されて主

に配電設備の電気絶縁体として使われている。現在の大気中の濃度は1990年代半ばに比べて2倍以上に増加している(図9(a))。

本年報は主に長寿命温室効果ガスを取り扱う。対流圏のオゾンはこれらに比べて短寿命だが、ハロカーボン類に匹敵する放射強制力を持つ[10]。その他多くの汚染物質(一酸化炭素(CO)、窒素酸化物、揮発性有機化合物など)は、温室効果ガスとは呼ばれないが、放射強制力に直接的あるいは間接的な影響をわずかに及ぼす。エアロゾル(浮遊粒子状物質)も、放射収支に影響する短寿命の物質である。本年報で述べた全てのガス及びエアロゾルは、WMO加盟国や協賛ネットワークから支援を受けてGAW計画により監視されている[11]。

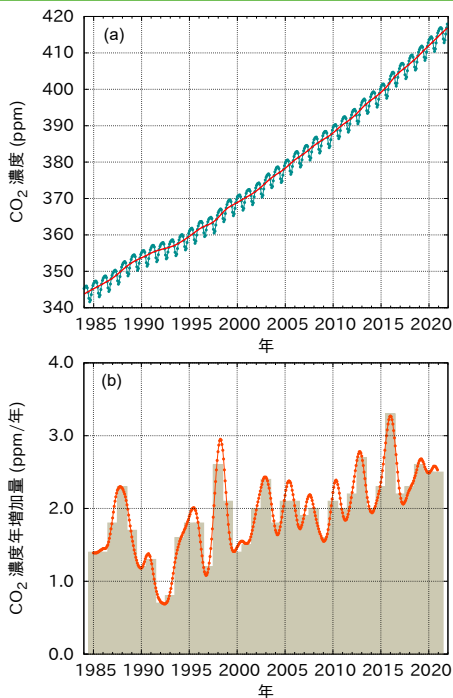


図6 二酸化炭素の1984年から2021年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は147地点。

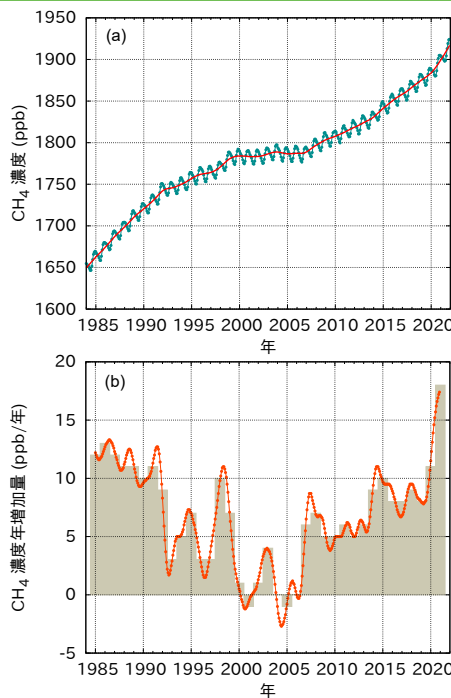


図7 メタンの1984年から2021年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は149地点。

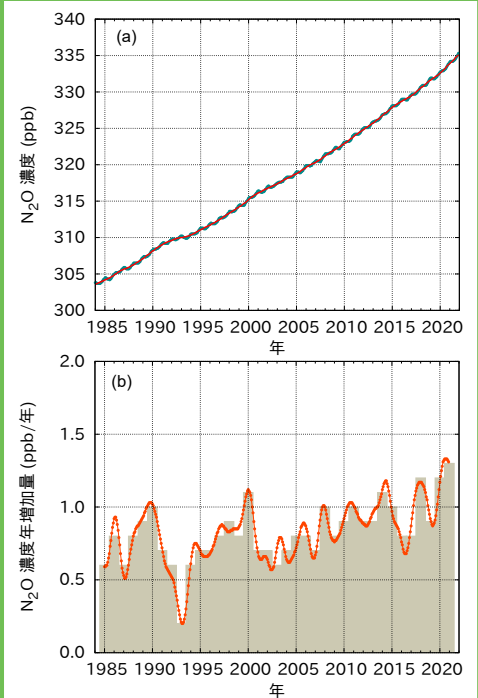


図8 一酸化二窒素の1984年から2021年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値で、この図では月平均値を表す青点と重なっている。この解析に使用した観測点は108地点。

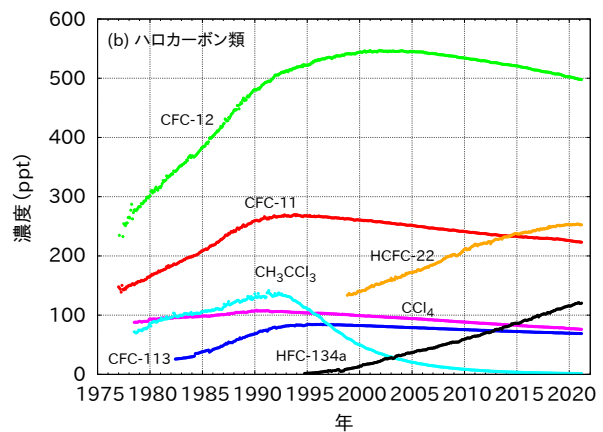
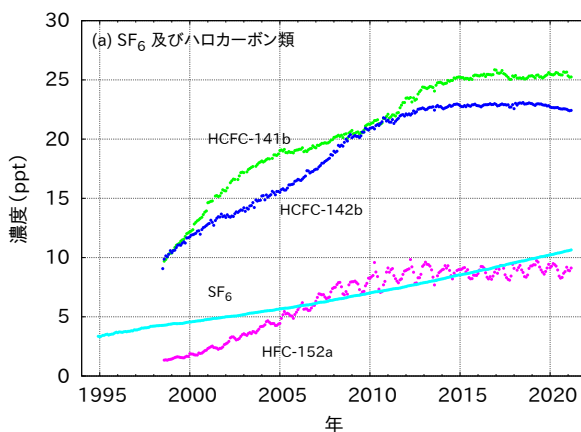


図9 六フッ化硫黄(SF₆)及び主要なハロカーボン類の月平均濃度 (a)六フッ化硫黄及び低濃度のハロカーボン類、(b)高濃度のハロカーボン類。解析に使用した地点数は、SF₆(88)、CFC-11(23)、CFC-12(25)、CFC-113(22)、CCl₄(22)、CH₃CCl₃(25)、HCFC-141b(11)、HCFC-142b(15)、HCFC-22(14)、HFC-134a(12)、HFC-152a(11)。

謝辞とリンク

WMO加盟国のうちの55カ国がGAW WDCGGに二酸化炭素及び他の温室効果ガスの観測データを提供している。WDCGGに提供されている観測データの約39%がNOAA全球監視研究所(GML)と協力する観測ネットワークで得られたものである。その他のネットワークや観測所は、参考文献[12]を参照されたい。[Advanced Global Atmospheric Gases Experiment \(AGAGE\)](#)も本年報に観測データを提供している。さらに、本年報に用いたデータを提供したGAW観測所(図4参照)は、[WDCGGウェブページ](#)の一覧表に掲載する。また、スイス気象局(スイス連邦)によって運営されるGAW観測所情報システム(GAWSIS)にも掲載されている。本年報は、GAW温室効果ガスに関する科学諮問部会の監修のもと作成されている。

編集部

Alex Vermeulen (Integrated Carbon Observation System – European Research Infrastructure Consortium (ICOS ERIC)/Lund University, Sweden), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, WDCGG, Japan), Oksana Tarasova (WMO)

著者(アルファベット順)

Andrew Crotwell (NOAA Global Monitoring Laboratory and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, United States of America), Ed Dlugokencky (NOAA Global Monitoring Laboratory), Christoph Gerbig (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), David Griffith (University of Wollongong, Australia), Bradley Hall (NOAA Global Monitoring Laboratory, United States of America), Sander Houweling (Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands), Armin Jordan (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Paul Krummel (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Haeyoung Lee (Korea Meteorological Administration, National Institute of Meteorological Sciences, Republic of Korea), Zoë Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, WDCGG, Japan), Oksana Tarasova (WMO), Jocelyn Turnbull (GNS Science, New Zealand/Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, United States of America), Guus Velders (National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands), Alex Vermeulen (ICOS ERIC/Lund University, Sweden), Ray Weiss (Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, United States of America)

参考文献

- [1] Montzka, S. A. *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory, 2022. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [2] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*, 2022. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [3] Tsutsumi, Y.; Mori, K.; Hirahara, T. et al. *Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Center for Greenhouse Gases* (WMO/TD-No. 1473). GAW Report No. 184. World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2009.
- [4] Hall, B. D.; Crotwell, A. M.; Kitzis, D. R. et al. Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) CO₂ Calibration Scale. *Atmospheric Measurement Techniques* **2021**, 14 (4), 3015–3032. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3015-2021>.
- [5] Le Quére, C.; Jackson, R. B.; Jones, M. W. et al. Temporary Reduction in Daily Global CO₂ Emissions during the COVID-19 Forced Confinement. *Nat. Clim. Chang.* **2020**, 10 (7), 647–653. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.
- [6] International Energy Agency (IEA). *Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021*; IEA: Paris, 2022. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>.
- [7] Friedlingstein, P.; Jones, M. W.; O’Sullivan, M. et al. Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data* **2022**, 14 (4), 1917–2005. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.
- [8] Saunio, M.; Stavert, A. R.; Poulter, B. et al., The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data* **2020**, 12 (3), 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
- [9] Tian, H.; Xu, R.; Canadell, J. G. et al. A Comprehensive Quantification of Global Nitrous Oxide Sources and Sinks. *Nature* **2020**, 586 (7828), 248–256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>.
- [10] World Meteorological Organization (WMO). *WMO Reactive Gases Bulletin: Highlights from the Global Atmosphere Watch Programme, No. 2*; WMO: Geneva, 2018.
- [11] World Meteorological Organization (WMO). *WMO Air Quality and Climate Bulletin, No. 2*; WMO: Geneva, 2022.
- [12] World Meteorological Organization (WMO). *20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2019)*. GAW Report No. 255; WMO: Geneva, 2020.
- [13] Velders, G. J. M.; Daniel, J. S.; Montzka, S. A. et al. Projections of Hydrofluorocarbon (HFC) Emissions and the Resulting Global Warming Based on Recent Trends in Observed Abundances and Current Policies. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2022**, 22 (9), 6087–6101,

<https://doi.org/10.5194/acp-22-6087-2022>.

[14] Segers, A. J.; Tokaya, J.; Houweling, S. *Description of the CH₄ Inversion Production Chain*; Copernicus Atmosphere Monitoring Service, 2020.

https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/CAMS73_2018SC3_D73.5.2.2-2020_202012_production_chain_Ver1.pdf.

[15] Nickless, A.; Scholes, R. J.; Vermeulen, A. et al. Greenhouse Gas Observation Network Design for Africa. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* **2020**, 72 (1), 1824486. <https://doi.org/10.1080/16000889.2020.1824486>.

[16] Lan, X.; Basu, S.; Schwietzke, S. et al. Improved Constraints on Global Methane Emissions and Sinks Using $\delta^{13}\text{C-CH}_4$. *Global Biogeochemical Cycles* **2021**, 35 (6), e2021GB007000. <https://doi.org/10.1029/2021GB007000>.

[17] Lunt, M. F.; Palmer, P. I.; Feng, L. et al. An Increase in Methane Emissions from Tropical Africa between 2010 and 2016 Inferred from Satellite Data. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2019**, 19 (23), 14721–14740. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14721-2019>.

[18] Feng, L.; Palmer, P. I.; Zhu, S. et al. Tropical Methane Emissions Explain Large Fraction of Recent Changes in Global Atmospheric Methane Growth Rate. *Nature Communications* **2022**, 13 (1), 1378. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28989-z>.

[19] Pandey, S.; Houweling, S.; Krol, M. et al. Enhanced Methane Emissions from Tropical Wetlands during the 2011 La Niña. *Scientific Reports* **2017**, 7 (1), 45759. <https://doi.org/10.1038/srep45759>.

[20] Gkatzelis, G. I.; Gilman, J. B.; Brown, S. S. et al. The Global Impacts of COVID-19 Lockdowns on Urban Air Pollution: A Critical Review and Recommendations. *Elementa: Science of the Anthropocene* **2021**, 9 (1), 00176. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00176>.

連絡先

世界気象機関 科学開発部大気環境研究課
(スイス、ジュネーブ)

E-mail: gaw@wmo.int

Website: <https://community.wmo.int/activity-areas/gaw>

気象庁 温室効果ガス世界資料センター
(日本、東京)

E-mail: wdcgg@met.kishou.go.jp

Website: <https://gaw.kishou.go.jp/>

(注釈)

- (1) 大気中メタン濃度の年間増加量は、[NOAA のメタン濃度の長期変動傾向のウェブページ](#)で報告されているデータに従って、季節変動成分を除いた当年1月1日から翌年1月1日の長期変動成分の増加量として計算される。
- (2) ppb は乾燥空気分子 10 億個中の当該ガスの分子数。
- (3) 放射強制力とは、成層圏の温度を急速に調整した後、工業化以前(1750 年)からの温室効果ガス総量増加の結果として生じる、地球のエネルギー収支に対する摂動である。「有効」放射強制力には、対流圏の急速な調整も含まれる。[IPCC 第6次評価報告書第1作業部会報告書](#)で使用されている排出量に基づいた強制力には、他の大気組成に影響を与えるメタンの大気化学により推定された間接的な強制力が含まれるのに対し、ここに示されている数値は、メタンと二酸化炭素の直接的な放射強制力のみを考慮していることに注意されたい。
- (4) モル分率で表した濃度:モル分率は混合ガスまたは流体の濃度を表すのに用いられる。大気化学分野では濃度を乾燥空気分子に対する着目する成分の分子の存在比率(モル数の比)で表す。
- (5) ppm は乾燥空気分子 100 万個中の当該ガスの分子数。
- (6) ここでいう比率は、1750 年以降の全ての長寿命の温室効果ガスによる世界全体の放射強制力の増加量に対して、それぞれのガスが寄与する相対的な割合のこと。
- (7) 1 GtCO₂ は 10 億トン(10¹⁵ g)の二酸化炭素量を示す。なお、3.664 GtCO₂ は、1 GtC(炭素換算で 10 億トン)に相当する。
- (8) 1 TgNは窒素換算で100万トン(10¹² g)の窒素量を示す。なお、1.57 TgN₂Oの一酸化二窒素量は、窒素換算で1 TgNに相当する。
- (9) pptは乾燥空気分子1兆個中の当該ガスの分子数。

日本語訳について

この WMO 温室効果ガス年報第18号(気象庁訳)は、WMO が 2022年10月26日に発行した WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 18を気象庁が翻訳したものである。

発行 2022年12月12日



気象庁 大気海洋部 環境・海洋気象課
温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)
〒105-8431 東京都港区虎ノ門 3-6-9
電話: 03-6758-3900(代表)
E-mail: wdcgg@met.kishou.go.jp

今回紹介する温室効果ガス観測所

ソダンキュラ/パラス(SDK/PAL)



ソダンキュラ観測所

ソダンキュラ/パラス観測所は、ソダンキュラにおける北極宇宙センター及びパラスにおける清浄大気研究所で構成されている。これら2地点の観測所間の距離は125 kmである。いずれもフィンランド気象研究所が管理・所有している。

ソダンキュラ観測所(SDK)は1949年に設立されたが、同観測所の継続的で均質化された総観気象データの記録は1908年から存在している。施設は現在1500 m²あり、複数の建物や森林及び沼地のフィールドにおける支柱、複数の大気観測キャンプがある。

この観測所は、フィンランドのGAW観測点の上層大気部を構成し、気象とオゾンの鉛直観測データ、及び、成層圏の粒子に関するデータを提供する。この観測所は、北極圏の北のラップランド中央に位置する。ソダンキュラ観測所はGAW 全球観測所であり、リモートセンシングネットワークである大気成分長期変動検出ネットワーク(NDACC)、全量炭素カラム観測ネットワーク(TCCON)及び Aerosol Robotic Network (AERONET)の一部である。



パラス観測所

パラス観測所(PAL)は1994年から運用されている。この観測所は、温室効果ガスのGAW 全球観測所であり、統合的炭素循環観測システム(ICOS)、エアロゾル、雲及び微量気体研究インフラストラクチャ(ACTRIS)及び統合欧州長期生態系、クリティカルゾーン及び社会生態学研究(eLTER)ネットワークの一部である。

所在

所属国:フィンランド共和国
北緯:67.364°
東経:26.63°
標高:180 m
標準時間帯:
現地時間=協定世界時+2 時間



チェジュ(済州)コサン(高山)GAW 地域観測所(GSN)



コサン GAW 地域観測所

大韓民国のチェジュ島にあるコサン GAW 観測所は、東シナ海の北部、朝鮮半島の南約100 km、中華人民共和国の上海の北東500 km、日本の九州の西250 kmに位置している。コサン観測所は、島の西端、東シナ海に面した高さ72 mの絶壁の上に位置している。チェジュ島は大韓民国で最も清浄な地域の1つとされている。この観測所は、温室効果ガス、エアロゾル、反応性ガスなど、22を超えるGAWの大気成分を監視している。1990年代以降、この観測所はAdvanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE)だけでなく、Aerosol Characterization Experiment (ACE)-Asia や Atmospheric Brown Cloud キャンペーンなどの国際キャンペーンでも利用されている。また、GAW ネットワークの観測所の一部であることに加えて、Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-Net) 及びその他の国際ネットワークの一部でもある。

所在

所属国:大韓民国
北緯:33.294°
東経:126.163°
標高:71 m
標準時間帯:
現地時間=協定世界時+9 時間

