

# WMO 温室効果ガス年報

2022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

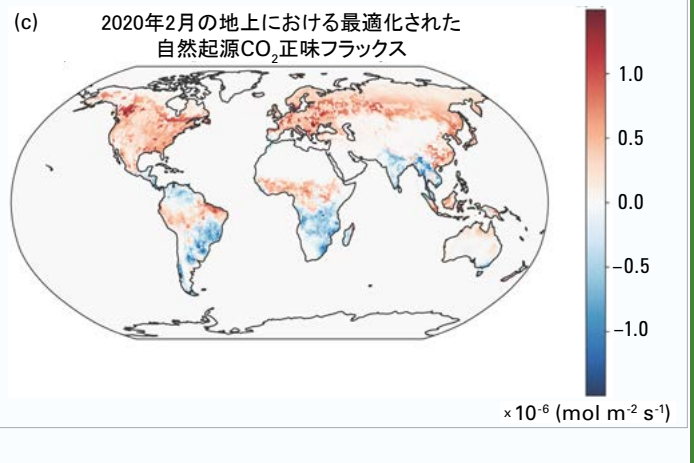
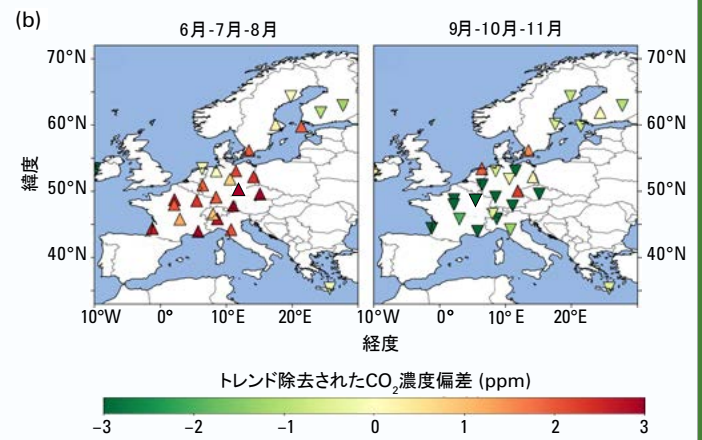
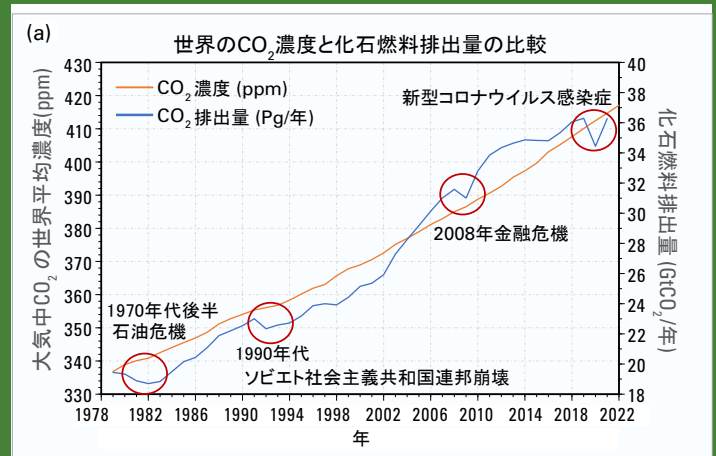
第19号 | 2023年11月15日

ISSN 2078-0796

正味ゼロ排出という目標を達成し、地球温暖化による気温の上昇を工業化以前の水準から2°Cより十分低く、1.5°Cに抑えることに特に重点を置くパリ協定の目標を達成するには、多くの不確実性を乗り越える必要がある。これらの不確実性は、地球規模の気候変動に関連する科学的、技術的、経済的、社会的、政治的な複雑さに起因している。気候変動の要因である温室効果ガス(GHG)に対処する上で、多くの文献で以下の課題が強調されている。

- **フィードバックメカニズム**: 2018年及び2022年のヨーロッパにおける干ばつに関する最近の Nature Communications の記事に示されているように、地球の気候システムには、気候変動による土壌からの炭素放出の増加や海洋及び森林による炭素吸収の減少を含む複数のフィードバックループがある(図1(b)を参照)[1]。
- **臨界点(ティッピングポイント)**: 気候システムは、ある程度の変化が自己加速的で潜在的に不可逆的な変化の連鎖を引き起こす重要な閾値である「臨界点(ティッピングポイント)」の寸前にある可能性がある。例として、アマゾンの熱帯雨林の急速な枯死の可能性、北大西洋循環の減衰及び大規模氷床の不安定化などが含まれる。
- **自然変動**: 3つの主要な温室効果ガス(GHG)である二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)及び一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)は、人為的シグナルに重ね合わされた自然現象(エルニーニョ現象など)に起因する大きな

図1 (a)1年以上の遅延で計算される、従来の年別世界平均値(グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)による排出量、及び温室効果ガス年報による濃度)[2, 3]。(b)数か月の遅延で作成される、現在の地域及び空間に明示的な解析値[1]。この図は、2022年と2019~2021年を比較した6~8月及び9~11月の大気中二酸化炭素濃度偏差を示す。赤い三角形は正偏差(吸収が少ない)、緑の三角形は負偏差(吸収が多い)を示す。(c)現在1年以上の遅延がある、米国海洋大気庁(NOAA) CarbonTracker[4]による全球高解像度の月別解析値。全球温室効果ガス監視(GGGW)の目標は、NOAAの解析のように国際的に調整された解析値を算出し、月別データを高い空間解像度と最小限の遅延で、地域及び国家の既存データとモデリング能力を結合して拡張することである。



変動性がある。この変動性は、短期間に観測される変動を増幅または減衰しうる。

- **非二酸化炭素温室効果ガス**: 気候変動は、二酸化炭素だけではなく、複数の温室効果ガスの存在によって引き起こされる。これらのガスは、独自の大気中の寿命をもち、地球温暖化係数(GWP)は二酸化炭素より大きく、将来の排出トレンドは不確実である。

科学コミュニティは気候変動とその影響について幅広い理解を持っているが、微妙な差異や不確実性は根強く残っている。これらの不確実性が行動を阻止してはならない。むしろ、これらの不確実性は、正味ゼロ排出とパリ協定の目標の実現の過程で、柔軟で適応的な戦略の必要性とリスク管理の重要性を強調している。このためには、温室効果ガスのフラックスに関する正確かつ即時的で実用的なデータを提供することが不可欠である。野心的な気候目標を支援するには、多数の観測とモデリングを活用した定常的かつ持続的な地球全体の温室効果ガス監視システムが必要である。この新しい運用システムは、既存の観測とモデリングの取組の精度、持続可能性、及び空間範囲を強化し、温室効果ガスの濃度とフラックスに関する準リアルタイムの一貫したデータを提供する。この温室効果ガス年報で示されている世界平均と地域的な濃度、及びグローバル・カーボン・プロジェクトの解析によって推定されている温室効果ガス収支をはるかに超える詳細な情報が提供されることになる。

温室効果ガス監視の運用的な枠組みの中で、温室効果ガス観測によって温室効果ガスの収支を正確に表現することは、技術的、方法論的、及び協力的なアプローチの組合せを必要とする多面的な課題である。2023年6月、世界気象会議は第19回会合にて全球温室効果ガス監視(GGGW)を採択した(詳細は本年報の中央の挿入記事を参照)。その目標は、2028年までに、世界全体の1度×1度の格子点で月別の正味の温室効果ガスフラックス情報を最小限の遅延で定常的に提供することである。

現在の調整の努力により、図1(a)に示すように、二酸化炭素の世界平均濃度を算出することができる。大気中の二酸化炭素の寿命が長いため、この世界平均濃度値は地球全体の排出量変化に対する影響は最小限である。図1(b)は、地域監視インフラストラクチャ(統合的炭素循環観測システム(ICOS))によって開発され、数か月遅れで作成された現在の地域及び空間解析を示している。これらの解析により、自然及び人為的要因に応じた大気中の二酸化炭素変動に関するより詳細な情報が得られる。図1(c)は、国家機関(米国海洋大気庁(NOAA))によって開発された月別の二酸化炭素フラックスの世界全体の解析を示している。GGGWは、国際的に調整された温室効果ガス監視システムを確立するため、図1(b)及び1(c)に示されているような地域的及び国家的な解析を基礎とする。

## 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、2022年の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)の現場観測ネットワークによる地上での世界平均濃度<sup>(1)</sup>は、それぞれ、417.9±0.2 ppm<sup>(2)</sup>、1923±2 ppb<sup>(3)</sup>、335.8±0.1 ppbとなり、解析開始以来の最高値を更新した。これらの値は増加しており、工業化以前(1750年以前)と比較して、それぞれ150%、264%、124%である。二酸化炭素の2021年から2022年までの濃度増加量は、2020年から2021年までの増加量よりわずかに小さく、最近10年間の平均年増加量よりわずかに小さかったが、二酸化炭素排出量が増加し続けているため、部分的に自然変動によって引き起こされていた可能性が非常に高い。メタンの2021年から2022年までの濃度増加量は、2020年から2021年までの増加量よりわずかに小さく、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2021年から2022年までの濃度増加量は、近年の記録の中で、過去に観測されたとの時期よりも大きかった。米国海洋大気庁(NOAA)年次温室効果ガス指標(AGGI)<sup>[5]</sup>によると、1990年から2022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78%を占める。

## 2022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19号は、長寿命の温室効果ガス(LLGHGs)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(GHGs)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%<sup>(4)</sup><sup>[5]</sup>を占める(図2)。

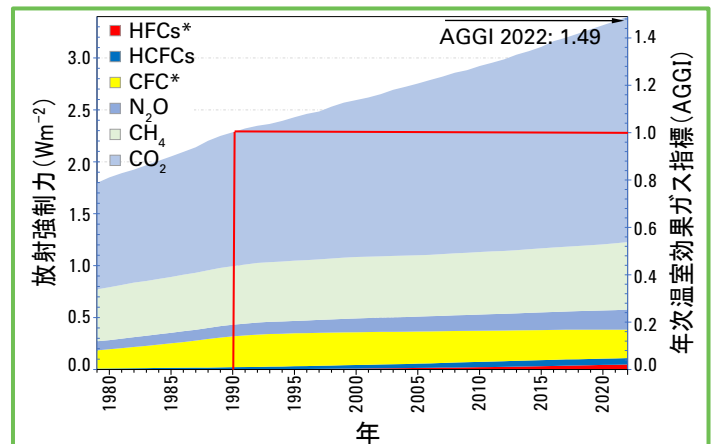


図2 長寿命の温室効果ガスによる放射強制力(1750年を基準)の経年変化と2022年のNOAA年次温室効果ガス指標(AGGI)<sup>[5]</sup>。( \* 詳細については、[NOAA年次温室効果ガス指標\(AGGI\)](#)の同図の注釈も参照のこと)

**WMO GAW 計画**は、大気中の温室効果ガス(GHG)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 3 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[6]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[7]及び参考文献[2]に記載されている手法で解析を行っている。この年報で報告されている二酸化炭素の解析結果は、新しい WMO CO<sub>2</sub> X2019 較正スケール[8]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 2022 年の大気中濃度の世界平均と、2021 年から、及び 1750 年からの濃度変化を表に示す。

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ともに、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(IG<sup>3</sup>IS)**は、国や地方行政区、特に都市の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なる見識を与える。

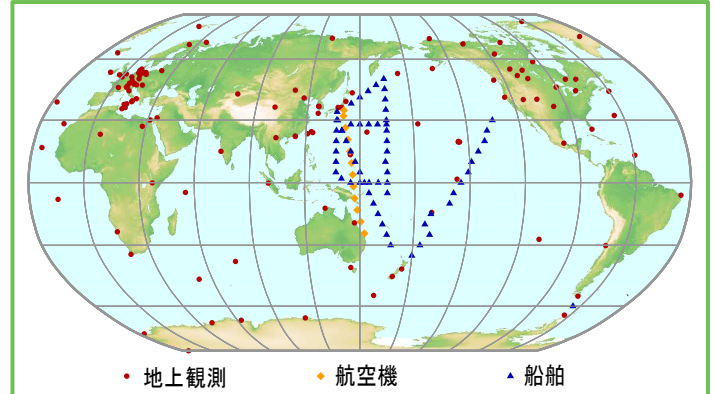


図 3 GAW 観測ネットワークを構成する最近 10 年間の二酸化炭素観測地点。メタンの観測ネットワークもこれと同様である。一酸化二窒素及び他の長寿命温室効果ガスの現場観測ネットワークは、はるかに密度が小さい。

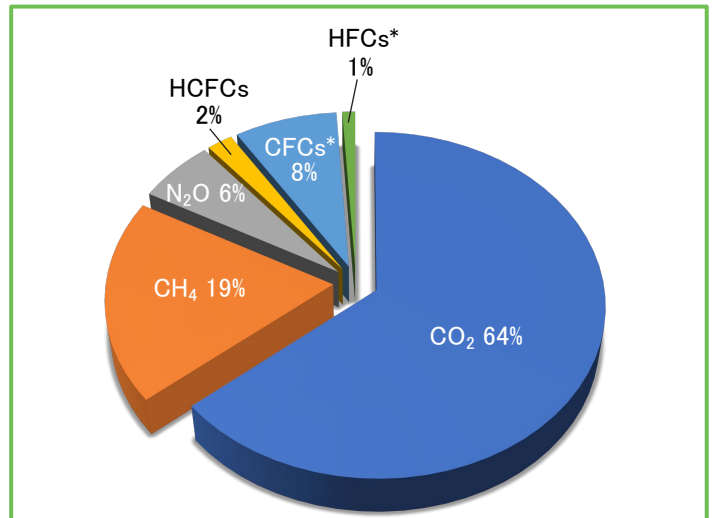


図 4 工業化以前から 2022 年までの世界全体の放射強制力の増加量に対する主要な長寿命温室効果ガスの寄与[5]。

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(2022年)と増加量。単位は濃度で誤差幅は68%の信頼限界による。平均手法は、GAWレポートNo.184[7]に記載している。

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
世界平均濃度(2022年)	417.9±0.2 ppm	1923±2 ppb	335.8±0.1 ppb
1750年と比較した存在比 <sup>a</sup>	150%	264%	124%
2021年から2022年までの増加量	2.2 ppm	16 ppb	1.4 ppb
2021年からの増加分の比率	0.53%	0.84%	0.42%
世界平均濃度の最近10年間の平均年増加量	2.46 ppm/年	10.2 ppb/年	1.05 ppb/年

<sup>a</sup> 工業化以前の濃度を、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は278.3 ppm、メタン(CH<sub>4</sub>)は729.2 ppb、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)は270.1 ppbと仮定した。本解析に使用した観測点数は、CO<sub>2</sub>(146地点)、CH<sub>4</sub>(151地点)、N<sub>2</sub>O(109地点)。

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[5]。AGGI は 2022 年には 1.49 となり、放射強制力の合計は、1990 年以降 2022 年までに 49%、2021 年からは 1.8%増加した(図 2)。2022 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(3.398 Wm<sup>-2</sup>)は、二酸化炭素等価換算濃度で 523 ppm に相当する[5]。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 4 に示す。

## 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)

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 64%<sup>(4)</sup>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約79%<sup>(4)</sup>、最近5年間では約77%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2022年の世界平均濃度は417.9±0.2 ppmとなった(図5)。2021年から2022年までの年平均値の増加量(2.2 ppm)は、2020年から2021年までの増加量(2.5 ppm)よりわずかに小さく、最近10年間の平均年増加量(2.46 ppm/年)よりわずかに小さかった。

化石燃料排出量の減少により濃度増加量が鈍化したという兆候はなく、むしろ最も可能性の高い理由は、ラニーニャ現象であった数年間のために、陸域生態系及び海洋による大気中二酸化炭素の吸収が増加したことである(WMO温室効果ガス年報第12号(気象庁訳)を参照)。大気中の二酸化炭素濃度増加量の変動(図5(b))は、主に陸域生態系による正味の二酸化炭素吸収の変動に起因することが科学的見解である。

大気中の二酸化炭素濃度は、2022年に工業化以前の150%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、2022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36.8 Gt(Pg) CO<sub>2</sub><sup>(5)</sup>であり、2021年の36.5 Gt CO<sub>2</sub>から0.8%増加した[9]。グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)の2022年の解析によると、森林減少とその他の土地利用変化は、2012年から2021年までの期間で平均して、4.5 (±2.6) Gt CO<sub>2</sub>/年の排出に寄与した。2012年から2021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[3]。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(AF))は、(主に陸域の)二酸化炭素吸収源の大きな自然変動によって年々変動するが、大気残留率の長期的な変化傾向を示す証拠はほとんどない(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(CH<sub>4</sub>)

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19%<sup>(4)</sup>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[10]。現場観測によるメタンの2022年の世界平均濃度は、解析開始以来の最高値を更新する1923 ±2 ppbであり、前年から16 ppb増加した(図6)。この増加は2020年から2021年までの増加量(17 ppb)よりわずかに小さく、最近10年間の平均年増加量(10.2 ppb)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再増加している。人為的な排出要因により、大気中メタン濃度は2022年に工業化以前(729.2 ppb)の264%に達した。二酸化炭素とは異なり、メタンの人為的発生源は化石燃料関連の排出が大半を占めているわけではないが、農業による発生源も重要な役割を果たしていることに留意する必要がある。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(WMO温室効果ガス年報第18号(気象庁訳)を参照)。

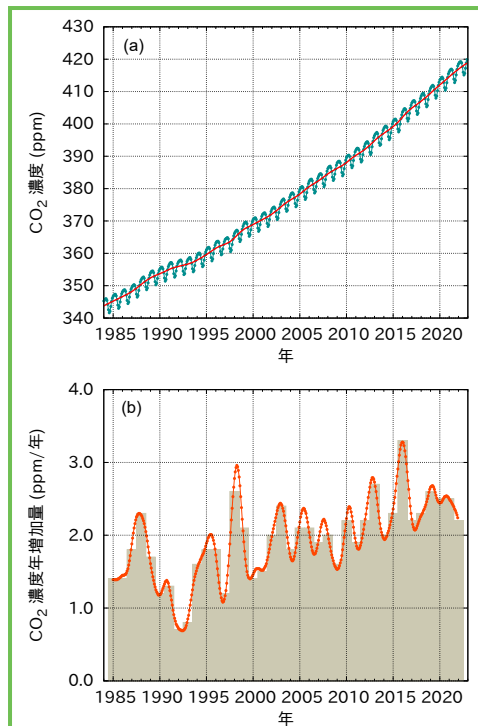


図5 二酸化炭素の1984年から2022年までの(a)世界平均濃度<sup>(1)</sup>と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は146地点。

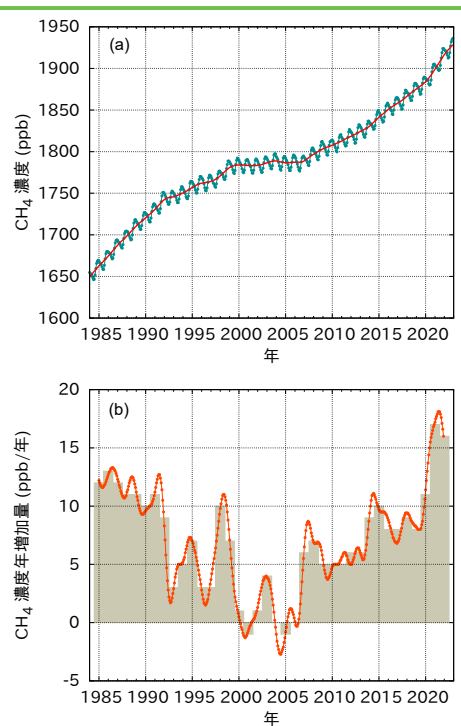


図6 メタンの1984年から2022年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は151地点。

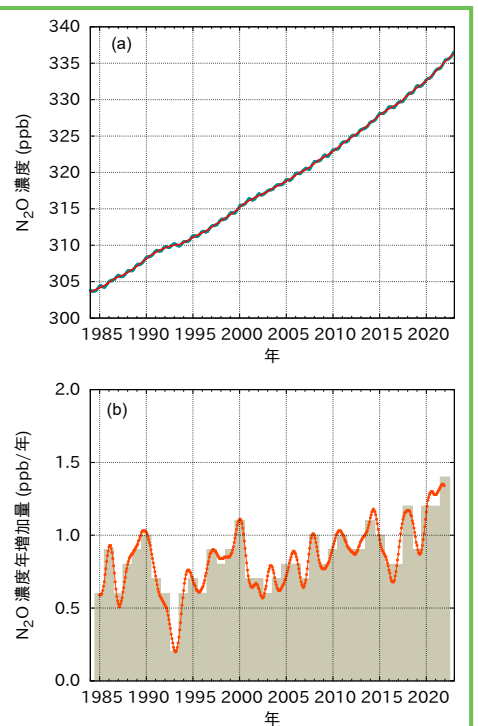


図7 一酸化二窒素の1984年から2022年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値で、この図では月平均値を表す青点と重なっている。この解析に使用した観測点は109地点。

# 全球温室効果ガス監視

表紙の特集記事に示されているように、温室効果ガスに関する継続的かつ最新のデータの必要性はますます高まっている。2022年の国連気候変動枠組条約第27回締約国会議において、締約国は「系統的な観測コミュニティによる活動の調整、及び、緩和、適応、早期警報システムのために有用で実用的な気候情報を提供する能力を強化する必要性」を強調した。

この必要性に応えるため、WMOはWMO GAW 温室効果ガスコミュニティによって開発された確立された方法論と標準化されたプロトコルに基づき、全球温室効果ガス監視(GGGW) (<https://www.gggw.earth>を参照)の推進を開始した。GGGWは、既存の観測及びモデリング能力を統合し、必要に応じてこれらの能力を拡張することで、地球規模の温室効果ガスの正味のフラックス総量の推定値をこれまでになく高い水平及び時間解像度で提供する。この初期出力には、1度×1度の水平解像度で最大1か月の遅延で配信される二酸化炭素及びメタンの地表一大気間の月別正味フラックス、及び、1時間の時間解像度で数日程度の遅延で配信される二酸化炭素及びメタンの3次元濃度場が含まれる。このことは、フラックスに関する理解を深め、長期的な将来の気候の道筋の追跡と予測を可能にし、必要な緩和活動や適応策の立案に大きな影響を与えうる。GGGWの開発目標は、2028年にGGGWの一部である個々のモデリングシステムが共通の標準形式で上記の出力を提供することである。

初期構成では、GGGWは人為的な地球温暖化に寄与する3つの主要な温室効果ガスである、二酸化炭素、メタン及び一酸化二窒素に焦点を当てる。これは4つの主要要素で構成される。

- 二酸化炭素、メタン及び一酸化二窒素の濃度、気柱全量、気柱部分量、鉛直分布、フラックスに関する地上及び衛星観測<sup>1</sup>に基づいた包括的で持続的な全球観測データセット、及び、それらを支援する気象、海洋、陸上の変数。情報は、最小限の遅延でオープンかつ透明性のある方法で交換される。

- 活動量データとプロセスベースのモデルに基づく温室効果ガス発生源と吸収源の先験推定。
- 温室効果ガス循環を表現する一連の全球高解像度地球システムモデル。
- より高精度のプロダクトを生成するために観測値と大気輸送モデルの計算を最適に組み合わせたデータ同化システム。

これらの正味フラックスを発生源別の排出量に更に分類する機能を開発するための取組が進行中であり、将来的には追加の運用プロダクトに繋がるだろう。観測とモデリング能力の両方が向上するにつれて、性能の向上が期待される。このためには、モデルにおける大気輸送(水平・鉛直の両方)の表現、先験情報の質、全球観測システムの制約に関連するものなど、多くの不確実性の要因を克服する必要がある。

必要な観測精度や地上観測地点の空間的密度などのGGGWの観測システムに関する要求の定義に関しては活発な議論が行われており、フラックス計算で用いられる大気輸送モデルが何を表現できるかに依存している。現在の全球(逆解析)モデル、例えばグローバル・カーボン・プロジェクトで使用されているモデルの一部は、GGGWの目標よりも低解像度である。

大気の逆解析は最適化されたフラックスを提供し、観測からの情報を含めることによって、これらのフラックスの想定される不確実性がどの程度低減したかについての情報を提供することができる。これは通常、元の想定した不確実性に対する比率で表現される。不確実性の低減が例えば1~2%と小さい場合、十分な観測がない、観測地点が離れすぎている、(WMO GAWの地上観測の適合目標の仕様[13]に対して)観測精度が不十分であるといった理由により情報が欠落しており、輸送や先験値が不完全な場合は、矛盾した情報を提供する可能性があることを示唆している。不確実性の低減は、可能な限り100%に近いことが理想である。初期フラックス推定値の不確かさは、寄与する要因の多くがよく分かっていないため、定量化することは容易ではない。

<sup>1</sup> WMOの標準用語に従って、「地上観測システム」(またはネットワーク)という用語は、宇宙空間に配備されていないあらゆるシステムを指す。地球システム領域(大気、海洋、陸域、雪氷圏など)の任意の場所及び各領域内の任意の高度に属する、現場またはリモートセンシング観測を含む。

図 9 及び図 10 は、一方は衛星(地表面から反射される太陽光を必要とする OCO-2)、もう一方は地上観測を用いて得られた 2 つの観測データセットの同化に基づいた、先進的な全球逆解析システムの 1 つである欧州コペルニクス CAMS システム(解像度 1.2 度×2.5 度)[14]による、最適化された陸域生態系のフラックスと最適化された大気-海洋間のフラックスを示している。上段の図は衛星観測データを使用した逆解析から得られたフラックス、下段の図は地上観測から得られたフラックスを示している。2022 年 1 月及び 7 月の結果が示されている。対応する不確実性の低減が右側の図に示されている。1 月は、衛星観測による誤差の低減が北半球では相対的に小さいが、南半球の大陸上では相対的に大きい。対照的に、地上観測による誤差の低減は、北半球の陸上と北極海の一部で相対的に大きいが、少ないながらも GAW のバックグラウンド観測所がデータを提供している南

極海を除き、(地上観測が著しく不足している)南半球ではより小さい。一般的に、衛星及び地上の現場観測データ両方の逆解析において、不確実性の低減はデータ密度に左右される。2022 年 7 月は、衛星の情報による不確実性の低減は、北アフリカを除くほとんどの大陸上で相対的に大きい。地上観測による不確実性の低減は、一般的に 1 月と比較して 7 月の方が大きい、7 月の南半球における低減は、特に海洋上でより小さい。

これらの結果から、地上及び衛星観測データは補完的な情報を提供することが明白である。観測が欠落している場合、地域における逆解析はより不確実となる。(水平に 2 度×3 度、もしくは更に粗い)現在の逆解析結果は、地上及び衛星観測のどこを強化すべきか明確に示している。異なる観測地点データ、逆解析手法、輸送モデルと初期フラックス推定値を使用した異なる逆解析システムを比較することによって、地球の温室効果ガス収支の状態を

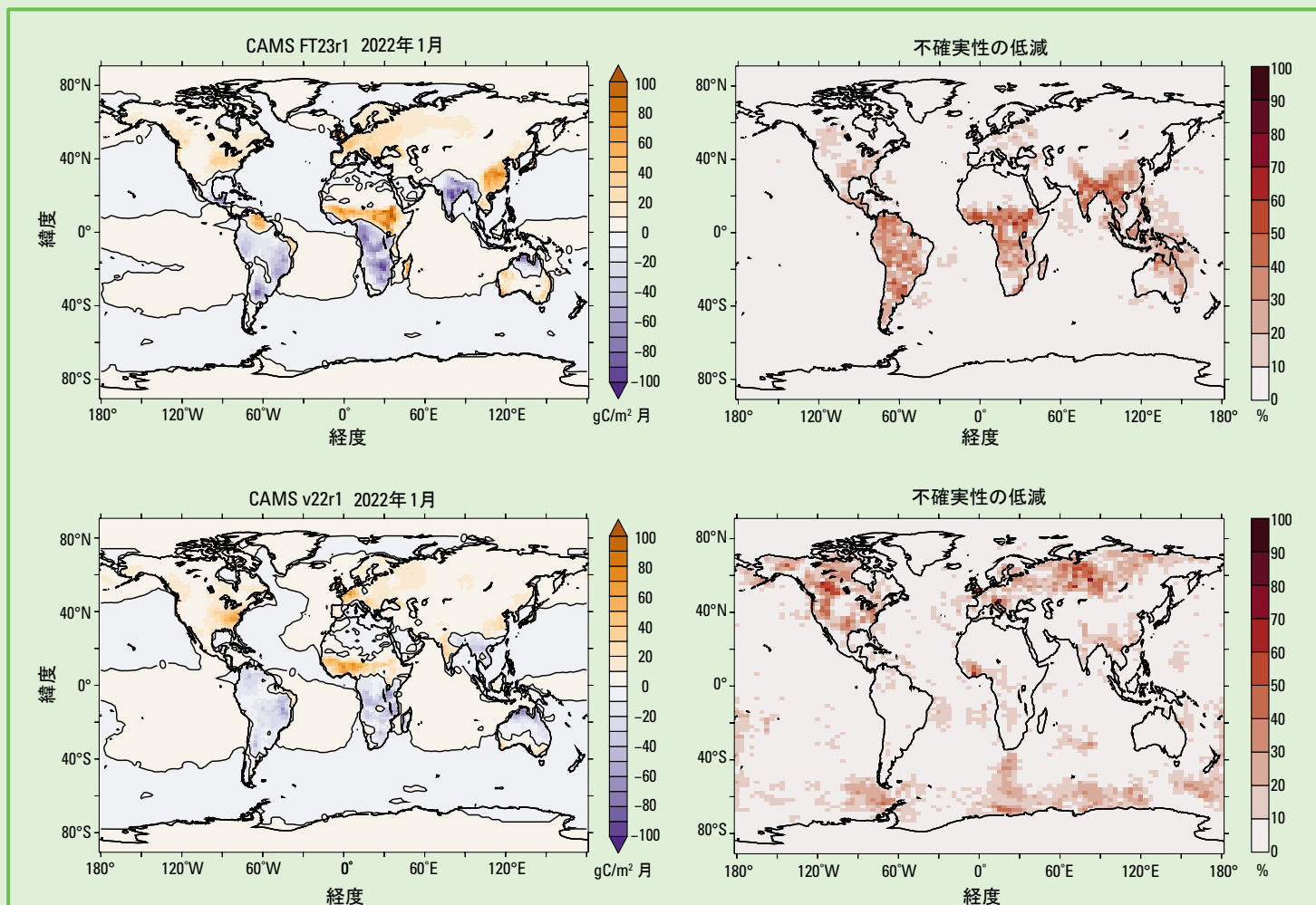


図 9 2023 年のグローバル・カーボン・プロジェクトで使用された 14 の大気逆解析システムの 1 つである、コペルニクス大気監視サービス(CAMS)逆解析システム[14]から得られた 2022 年 1 月の月別フラックスの結果例。上段の図は OCO-2 衛星の情報のみを使用した逆解析の結果を示す。下段の図は地上観測のみを使用した結果を示す。左側の描画は、陸域生態系と海洋に対する最適化された二酸化炭素フラックスである。右側の描画は、観測値を使用することにより、それぞれの逆解析におけるフラックスの初期推定された不確実性と比較した場合の不確実性の低減である。

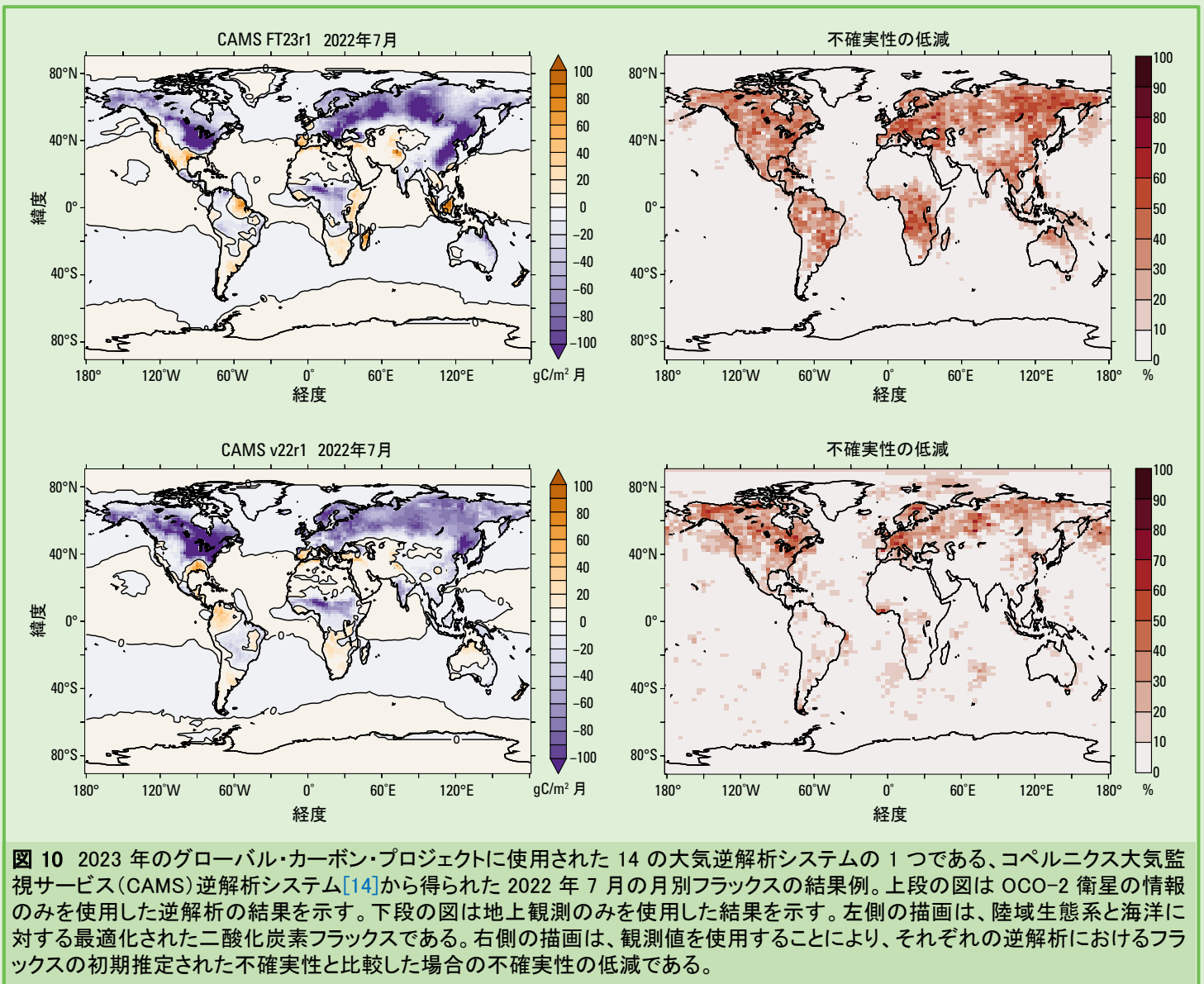


図 10 2023 年のグローバル・カーボン・プロジェクトに使用された 14 の大気逆解析システムの一つである、コペルニクス大気監視サービス (CAMS) 逆解析システム[14]から得られた 2022 年 7 月の月別フラックスの結果例。上段の図は OCO-2 衛星の情報のみを使用した逆解析の結果を示す。下段の図は地上観測のみを使用した結果を示す。左側の描画は、陸域生態系と海洋に対する最適化された二酸化炭素フラックスである。右側の描画は、観測値を使用することにより、それぞれの逆解析におけるフラックスの初期推定された不確実性と比較した場合の不確実性の低減である。

知るために、どこをどのように改善することが必要かを指摘することができる。

GGGW では、アフリカ、南アメリカ、北極や海洋などのサンプリングが不十分な地域において、十分な精度を備えて戦略的に配置された追加的な観測とともに、データを処理、解析するための複数の調整されたデータセンター、及び、全てのデータと手法に対してオープンで透明性のあるデータ共有メカニズムを必要としている。WMO GAW ネットワーク、及び、GAW ネットワークや Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE)、統合的炭素循環観測システム (ICOS)、NOAA などの貢献ネットワークで適用される品質保証や管理のための数十年にわたる指針や方法論の開発は、GGGW の中心となる持続的で長期間にわたり運用可能な観測ネットワーク拡張のための強固な基盤を形成する。逆解析モデリングによ

る地表面フラックス計算における最近の発展は、最小限の遅延で温室効果ガスの変動解析を可能にする[15]。

大気中の濃度観測、温室効果ガスの同位体組成、及び硫化カルボニル (COS) や大気中酸素 ( $O_2$ ) などの補助的で有用なトレーサーに加えて、海洋、陸域生態系、及び都市域からの温室効果ガス交換量を決定するためには、追加の衛星及び地上観測の広範な観測セットが必要となる。さらに、GGGW は、相互検証用に逆解析モデリング過程への使用を留保した十分に較正された温室効果ガス観測セットを識別し、開発する必要がある。逆解析モデルがこれらの独立したデータをどの程度表現できるかを解析することは、逆解析モデルシステム内のランダム誤差及び系統誤差を定量化、理解し、最終的に最小化することに役立つ。

## 一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)

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6%<sup>(4)</sup>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。一酸化二窒素の2022年の世界平均濃度は335.8±0.1 ppbであり、前年から1.4 ppb増加して(図7)、工業化以前(270.1 ppb)の124%となった。2021年から2022年までの増加量は、2020年から2021年までの増加量より大きく、最近10年間の平均年増加量(1.05 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) Tg N<sup>(6)</sup>/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<sup>[11]</sup>。2020~2022年の期間にかけて継続したラニーニャ現象が、一酸化二窒素濃度増加量の上昇に寄与した可能性がある。

## 他の温室効果ガス

例えば図8に示されているような、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%<sup>(4)</sup>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<sup>(7)</sup>の水準)、比較的急速に増加している。六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)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。その大気中の濃度は極めて一定の割合で増加しており、現在では1990年代半ばに比べて2倍以上である(図8(a))。

本年報は主に長寿命温室効果ガスを取り扱う。比較的短

寿命の対流圏オゾンは、ハロカーボン類に匹敵する放射強制力を持ち<sup>[12]</sup>、短寿命のために水平及び鉛直方向の変動が非常に大きく、図3に示すような観測ネットワークでは世界平均濃度が十分に特徴付けられない。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<sup>[16]</sup>。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。

### (注釈)

- (1) 二酸化炭素や他の(温室効果)ガスのような化合物の大気中の存在量に使用される科学的により正確な用語は、乾燥空気1モルあたりの該当ガスのモル数として表現されるモル分率であり、多くの場合ppm<sup>(2)</sup>又はppb<sup>(3)</sup>の単位で表現される。ただし、温室効果ガス年報では、一般に起こり得る混乱を避けるため、より一般的な用語である濃度を使用する。
- (2) ppmは乾燥空気分子100万個中の当該ガスの分子数。
- (3) ppbは乾燥空気分子10億個中の当該ガスの分子数。
- (4) 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。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。
- (5) 1 Gt CO<sub>2</sub>は10億トン(10<sup>15</sup> g)の二酸化炭素量を示す。なお、3.664 Gt CO<sub>2</sub>は、1 Gt C(炭素換算で10億トン)に相当する。
- (6) 1 Tg Nは窒素換算で100万トン(10<sup>12</sup> g)の窒素量を示す。なお、1.57 Tg N<sub>2</sub>Oの一酸化二窒素量は、窒素換算で1 Tg Nに相当する。
- (7) pptは乾燥空気分子1兆個中の当該ガスの分子数。

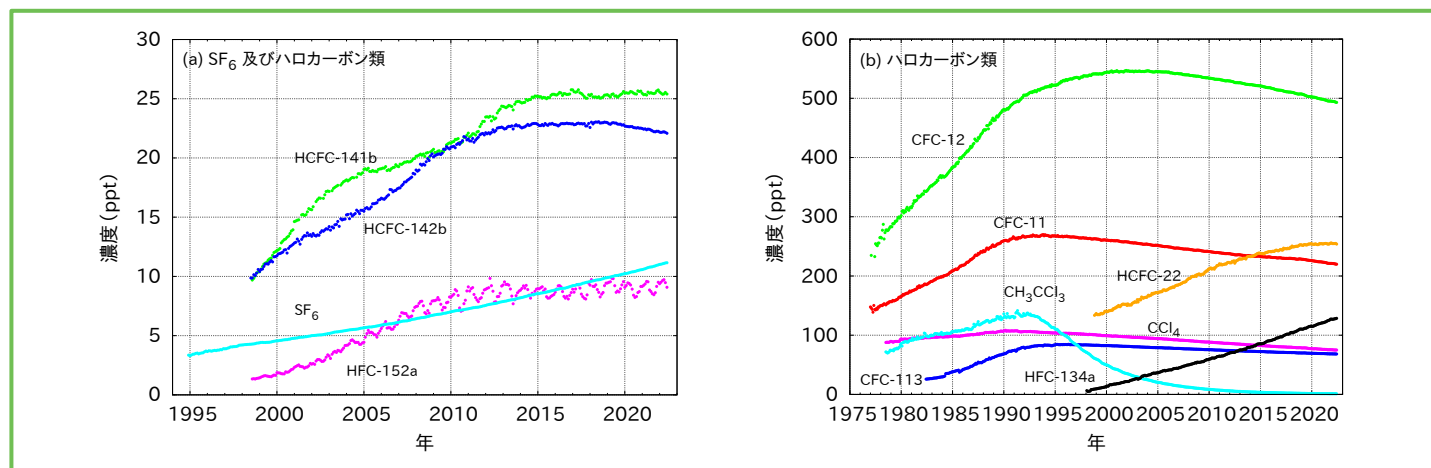


図8 六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)及び主要なハロカーボン類の月平均濃度 (a)六フッ化硫黄及び低濃度のハロカーボン類、(b)高濃度のハロカーボン類。解析に使用した地点数は、SF<sub>6</sub>(88)、CFC-11(24)、CFC-12(26)、CFC-113(22)、CCl<sub>4</sub>(23)、CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>(25)、HCFC-141b(11)、HCFC-142b(15)、HCFC-22(15)、HFC-134a(12)、HFC-152a(11)。



## 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た。WDCGGに提供されている観測データの約47%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[13]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3参照)は、[WDCGGウェブページ](#)の一覧表に掲げる。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), Oksana Tarasova (WMO), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, WDCGG, Japan)

## 著者(アルファベット順)

Frederic Chevallier (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Paris, France), Andrew Crotwell (NOAA Global Monitoring Laboratory and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, United States of America), Christoph Gerbig (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Armin Jordan (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Xin Lan (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Zoë Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Ingrid Luijckx (Wageningen University and Research, Netherlands), John Miller (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, WDCGG, Japan), Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (ICOS ERIC/Lund University, Sweden), Ray Weiss (Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA), Thorsten Warneke (University Bremen, Germany), Camille Yver (LSCE, Paris, France)

## 参考文献

- [1] van der Woude, A. M.; Peters, W.; Joetzjer, E. et al. Temperature Extremes of 2022 Reduced Carbon Uptake by Forests in Europe. *Nature Communications* **2023**, *14* (1), 6218.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-41851-0>.
- [2] Wu, Z.; Vermeulen, A.; Sawa, Y. et al. Investigating the Differences in Calculating Global Mean Surface CO<sub>2</sub> Abundance: The Impact of Analysis Methodologies and Site Selection. *EGUsphere* **2023** [preprint].  
<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1173>.
- [3] Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* **2022**, *14* (11), 4811–4900.  
<https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- [4] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory. *CarbonTracker CT2022*.  
<https://gml.noaa.gov/ccgg/carbontracker/>.
- [5] Montzka, S. A. *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory, 2023.  
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [6] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. 2023.  
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [7] 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.
- [8] Hall, B. D.; Crotwell, A. M.; Kitzis, D. R. et al., Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) CO<sub>2</sub> Calibration Scale. *Atmospheric Measurement Techniques* **2021**, *14* (4), 3015–3032.  
<https://doi.org/10.5194/amt-14-3015-2021>.
- [9] International Energy Agency (IEA). *CO<sub>2</sub> Emissions in 2022*; IEA: Paris, 2023.  
<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [10] 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>.
- [11] 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>.
- [12] World Meteorological Organization (WMO). *WMO Reactive Gases Bulletin, No. 2: Highlights from the Global Atmosphere Watch Programme*; WMO: Geneva, 2018.

[13] 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.

[14] Chevallier, F.; Lloret, Z.; Cozic, A. et al. Toward High-Resolution Global Atmospheric Inverse Modeling Using Graphics Accelerators. *Geophysical Research Letters* **2023**, 50 (5), e2022GL102135.

<https://doi.org/10.1029/2022GL102135>.

[15] van der Woude, A. M.; de Kok, R.; Smith, N. et al. Near-Real-Time CO<sub>2</sub> Fluxes from CarbonTracker Europe for High-Resolution Atmospheric Modeling. *Earth System Science Data* **2023**, 15 (2), 579–605.

<https://doi.org/10.5194/essd-15-579-2023>.

[16] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al. Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021.

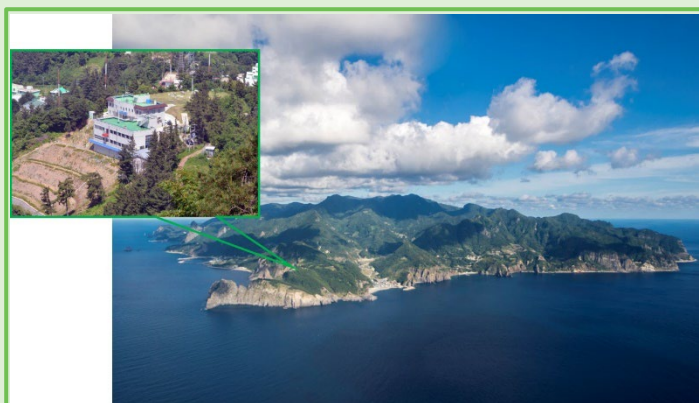
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf).

## 今回紹介する温室効果ガス観測所

### ウルルン島(鬱陵島)(ULD)観測所(大韓民国)

2014年から大韓民国気象局の国立気象科学院(NIMS)によって運用されているウルルン島(ULD)観測所は、2023年9月にGAW地域観測所になった。ウルルン島観測所は、朝鮮半島の東約155kmのウルルン島の北緯37.48度、東経130.90度に位置している。標高は220.9m、ウルルン島の面積は72.86km<sup>2</sup>である。ウルルン島観測所の観測プログラムには、二酸化炭素、メタン、

一酸化二窒素、六フッ化硫黄などの温室効果ガスのほか、一酸化炭素などの反応性ガス、エアロゾル、紫外線、湿性沈着の観測が含まれる。この観測所は、重要な観測地点として中心的な役割を果たしており、東アジア全域を起源とする空気から包括的なデータ収集を促進している。



ウルルン島観測所の外観  
写真: 大韓民国気象局



所在  
所属国: 大韓民国  
北緯: 37.4800°  
東経: 130.9000°  
標高: 220.9 m  
標準時間帯: 現地時間=協定世界時+9時間  
WMO 統合全球観測システム(WIGOS) ID: 0-410-0-ULD  
GAW ID: ULD

## 今回紹介する温室効果ガス観測所

### マウナロア観測所(MLO)最新情報

NOAA のマウナロア観測所(MLO)は、ハワイ島のマウナロア火山の北側、標高 3397 m に位置している。1958 年に、スクリプス海洋研究所(SIO)の地球科学者 Charles David Keeling によって、現代的な適切に校正された大気中の二酸化炭素観測がこの場所で開始された。2022 年 11 月 29 日、マウナロア火山の噴火により、溶岩流がアクセス道路を横切り、施設への送電線が破壊され、マウナロア観測所の運用が停止された。10 日間の観測中断の後、NOAA はマウナロア火山の北約 33 km に位置する休火山であるマウナケア火山の頂上近くに位置する臨時観測所で温室効果ガス観測を開始した。SIO は、その 1 週間後にマウナケア観測所(MKO)で大気サンプリングを開始し、2023 年 3 月にマウナロア観測所で二酸化炭素のサンプリングを再開した。NOAA は、2022 年 12 月 21 日にヘリコプターを介してマウナロア観測所でのフラスコによる大気中の温室効果ガスのサンプリングを再開する一方、現地の二酸化炭素分析装置は 2023 年 7 月にサンプリングを再開した。2023 年 10 月現在、この観測所は依然として通行車両ではアクセスできない。電力は現地の電力会社からは入手でき

ず、観測所は限られた量の太陽光発電により稼働している。

マウナロア観測所の二酸化炭素の記録は、大気中の二酸化炭素の平均的な状態を監視することに有用である一方、地域的な二酸化炭素放出と、地域及び地球規模の変化を引き起こす陸域及び海洋のプロセスを理解するためには、二酸化炭素観測のネットワークが必要である。十分に大規模な観測ネットワークはまた、予期せぬ観測中断が発生した場合でも継続性を保証する。



マウナロア観測所の外観  
写真: Brian Vasel



2022 年のマウナロア火山噴火時に、米国海洋大気庁 (NOAA) マウナロア基準観測所へのアクセス道路を覆った溶岩  
写真: NOAA



**所在**  
所属国: アメリカ合衆国  
北緯: 19.53623°  
西経: 155.57616°  
標高: 3397 m  
標準時間帯: 現地時間=協定世界時-10 時間  
WIGOS ID : 0-20008-0-MLO  
GAW ID : MLO

### 日本語訳について

この WMO 温室効果ガス年報第19号(気象庁訳)は、WMO が 2023年11月15日に発行した WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 19を気象庁が翻訳したものである。

発行 2023年12月19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

### 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](mailto: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](mailto:wdcgg@met.kishou.go.jp)

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