

# WMO 温室効果ガス年報

2023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20号 | 2024年10月28日

ISSN 2078-0796

WMO 全球大気監視(GAW)温室効果ガス(GHG)年報は 2006 年に刊行されてから、政策決定や一般への普及啓発向けに全球大気における温室効果ガスの組成の情報を提供してきた。第1号では2004年の大気中二酸化炭素濃度は 377.1 ppm<sup>(1)</sup>と報じたが、2023年には 420.0 ppmに達した。わずか20年の間に 42.9 ppm、すなわち 11.4%増加したことになる。

大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は、気候変動を引き起こす最も重要な人為起源の温室効果ガスである[1]。2022年から2023年にかけて、地表付近の大気中CO<sub>2</sub>の世界平均濃度は 2.3 ppm 増加した(図1)。濃度年増加量が 2 ppm を超えるのは 12年連続であり、すでに顕著な増加傾向が続いている。CO<sub>2</sub>の大気中への蓄積は、人類が生存しているいかなる時よりも現在が最も速く進行している。現在の大気中のCO<sub>2</sub>濃度はすでに工業化以前(1750年以前)を 51%上回っている。

年変動の詳細な解析(図2)によれば、2023年の年内の濃度増加量は 2.8 ppm であり[3]、1950年代に現代的なCO<sub>2</sub>観測が開始されて以降、4番目に大きい年内の濃度増加量である。

CO<sub>2</sub>の濃度増加量がこの10年大きい背景には、2010年代から2020年代にかけて化石燃料消費によるCO<sub>2</sub>排出が歴史的に大きかったことがある。世界の化石燃料消費による炭素排出量は1960年代の 3.0±0.2 Pg C/年 から大幅に増え、2023年には約 37 Pg CO<sub>2</sub>/年 に相

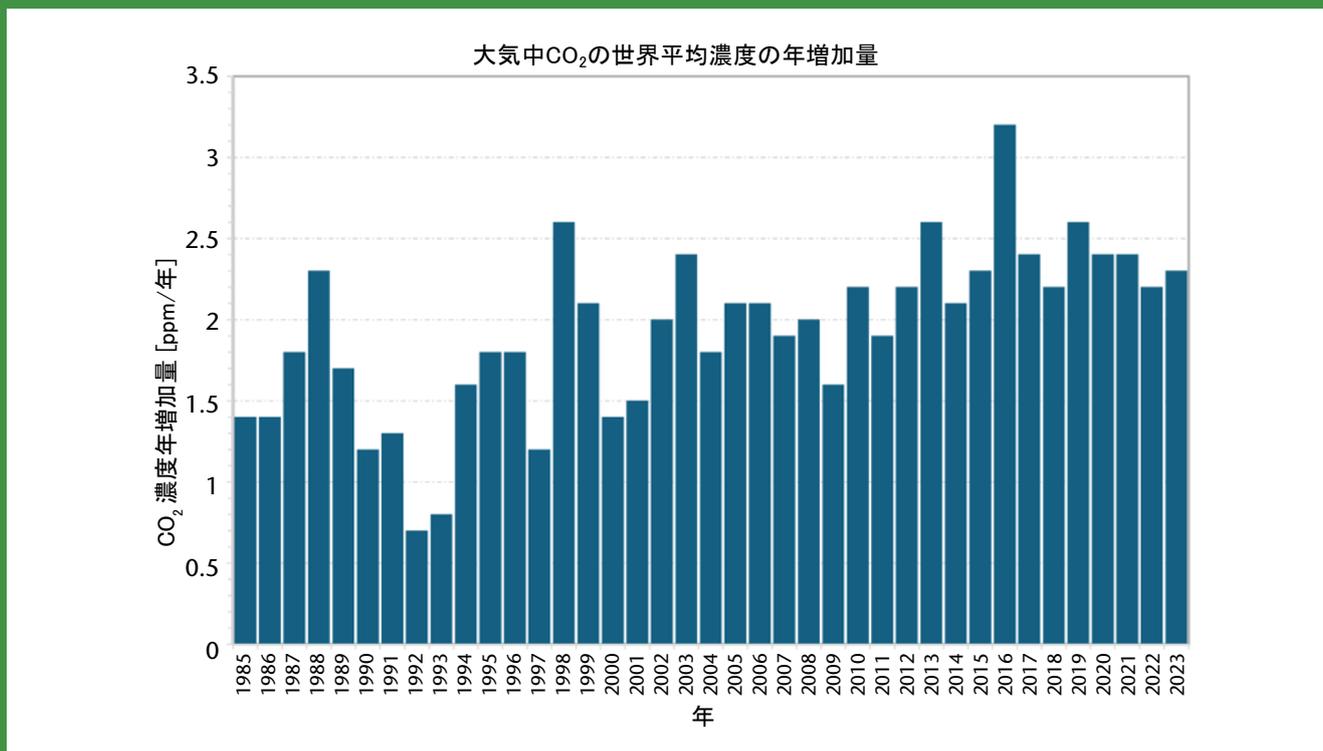


図1 WMO GAW ネットワークにより得られた観測データを[2]に記載された手法で解析した1985年から2023年の期間の大気中CO<sub>2</sub>の世界平均濃度の年増加量。

当する  $10.0 \pm 0.5 \text{ Pg C/年}$  と推定される[4]。大気中の  $\text{CO}_2$  増加は、炭素の総排出量が海洋と陸上生物圏の炭素の総吸収量を上回った正味の結果であるため、炭素排出量に直接関係している。最近 10 年間の化石燃料消費による炭素排出量の増加は、2000 年代と比べると緩やかではあるが、排出量は依然として多い。その結果、2014 年から 2023 年にかけての大気中  $\text{CO}_2$  の 10 年間の平均年増加量は  $2.4 \text{ ppm/年}$  と解析開始から最も高い水準となった。

2023 年の大気中  $\text{CO}_2$  の年内の濃度増加量は、最近 10 年間の平均年増加量より大きく、最近 10 年間では 2 番目に大きかった。これは、森林火災による放出の増加と正味の陸域の炭素吸収量の減少の結果と考えられる。化石燃料消費による長期的な  $\text{CO}_2$  増加が単調である一方で、 $\text{CO}_2$  の増加量は年々の変動があり(2014 年から 2023 年まででは  $2.1 \text{ ppm}$  から  $3.2 \text{ ppm}$  の範囲内(図 1))、この変動は大気中の  $\text{CO}_2$  の安定炭素同位体比  $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$  の測定によって確認されるように、ほとんどが大気と陸上生物圏との  $\text{CO}_2$  交換によって引き起こされる[5, 6]。エルニーニョ・南方振動(ENSO)が、主にこの年々変動を引き起こし[7, 8]、光合成による  $\text{CO}_2$  の吸収と植物の呼吸による放出、森林火災の発生に影響を与える。2023 年 5 月、地球は 3 年間続いたラニーニャ現象からエルニーニョ現象に、つまり ENSO の寒候期から暖候期へと移行し、その結果、世界平均気温も記録的な高温となった。

2023 年の  $\text{CO}_2$  の大幅な増加(図 2)と同時に、大気中の一酸化炭素(CO)が過去 20 年間で最も増加したことから[9]、森林火災による  $\text{CO}_2$  放出の増加が示唆された。一酸化炭素は不完全燃焼により生じ、交通及び工業排出域から離れたバックグランド観測点での CO 濃度の増加は、森林火災による

放出の良い指標となる。2023 年、カナダでは過去最悪の森林火災の時期を経験し、規模の大きな国家からの化石燃料消費による年間炭素排出量に匹敵する  $0.65 \text{ Pg C}$  が放出された[10]。8 月から 10 月にかけて、オーストラリアでは記録上最も乾燥した 3 か月間を経験し、深刻な森林火災が発生した[11]。2023 年から 2024 年の地球規模の森林火災季において、森林火災による炭素放出量は平均を 16%上回る  $2.4 \text{ Pg C}$  となり、これは 2003 年以降全ての森林火災季の中でも 7 番目に多い放出量となった[12]。大気中  $\text{CO}_2$  観測データを用いて  $\text{CO}_2$  フラックスを最適化する大気トレーサー輸送モデルによると、陸域  $\text{CO}_2$  フラックスのもう一つの重要な要素である、生態系による正味の炭素交換量の 2023 年の値は、2021 年から 2022 年の値に比べ約 28%減少したと推定されている[13]。2023 年は例外的に暖かく、陸域から海洋に渡る全球気温は 1850 年まで遡った記録の中で最高であった[11]。極端な暑さは、多くの陸域生態系にとってストレス要因であり、植物による炭素吸収の低下を引き起こす可能性がある。2023 年における  $\text{CO}_2$  の大幅な増加の正確な発生源と吸収源の帰属をより正確に推定するための研究は、いまなお進行中である。

近い将来、気候変動のフィードバックによって、生態系が温室効果ガスのより大きな発生源(例えば参考文献[14]を参照)または吸収源となる可能性がある。森林火災は大気中により大量の二酸化炭素を放出する可能性があり、高温化した海洋では二酸化炭素の吸収量が減る可能性がある。その結果、大気中の二酸化炭素濃度がより増加し、地球温暖化と海洋酸性化を加速させることになる。このような気候フィードバックは世界全体の社会にとって重大な懸念である。

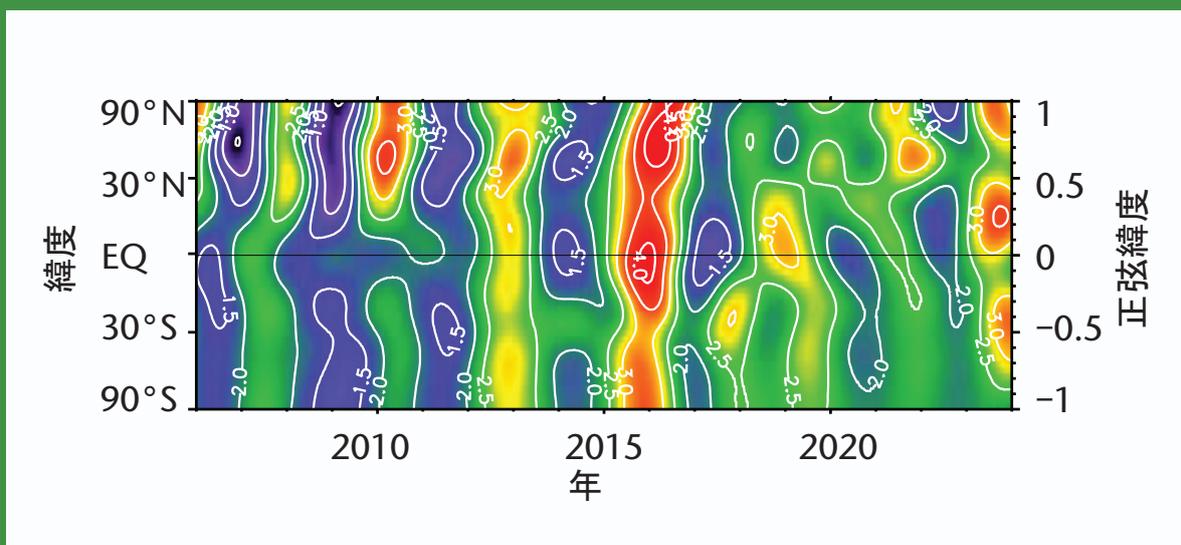


図 2 大気の大部分を代表する海洋境界層の観測地点における米国海洋大気庁(NOAA)全球監視研究所(GML)の観測から解析された大気中  $\text{CO}_2$  の増加量。等値線は  $\text{CO}_2$  の増加量を  $\text{ppm/年}$  の単位で示す。寒色は相対的に小さい(ただし歴史的には高い)増加量を、暖色は相対的に大きい増加量を示す。

## 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、2023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>(2)</sup>は、それぞれ、420.0±0.1 ppm、1934±2 ppb<sup>(3)</sup>、336.9±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151%、265%、125%にまで増加している。二酸化炭素の2022年から2023年までの濃度増加量は、2021年から2022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わずかに小さかった。この変動は、化石燃料による二酸化炭素排出量の増加が継続しているため、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2022年から2023年までの濃度増加量は、2021年から2022年までの増加量より小さく、最近10年間の平均年増加量よりやや大きかった。一酸化二窒素の2022年から2023年までの濃度増加量は、近年の記録の中で、最も大きかった2021年から2022年までの増加量より小さかった。米国海洋大気庁 (NOAA) 年次温室効果ガス指標 (AGGI) [15]によると、1990年から2023年までに、長寿命の温室効果ガス (LLGHGs) による放射強制力は51.5%増加しており、二酸化炭素がそのうちの約81%を占める。

## 2023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 20 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%<sup>(4)</sup> [15] 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

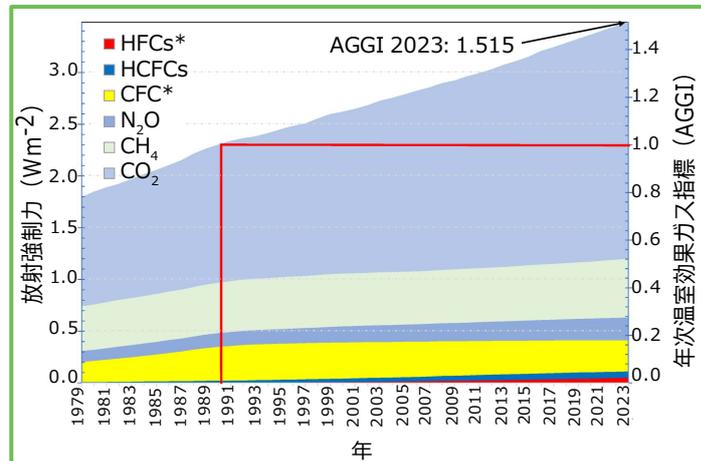


図 3 長寿命の温室効果ガスによる放射強制力の経年変化と 1990 年を基準とした指標である 2023 年の NOAA 年次温室効果ガス指標 (AGGI) [15]。「CFC\*」群には、CFC 類以外の長寿命ガス (CCl<sub>4</sub>、CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>、ハロンなど) も含まれるが、この放射強制力の大部分 (2023 年には 95%) を CFC 類が占める。「HCFCs」群には、これらの物質の中で最も濃度が高い 3 種類 (HCFC-22、HCFC-141b、HCFC-142b) が含まれる。「HFCs\*」群には、最も濃度の高い HFC 類 (HFC-134a、HFC-23、HFC-125、HFC-143a、HFC-365mfc、HFC-227ea、HFC-152a) と、完全を期するため SF<sub>6</sub> を含むが、この群の放射強制力に占める 2023 年の SF<sub>6</sub> の割合はわずか (13%) である。

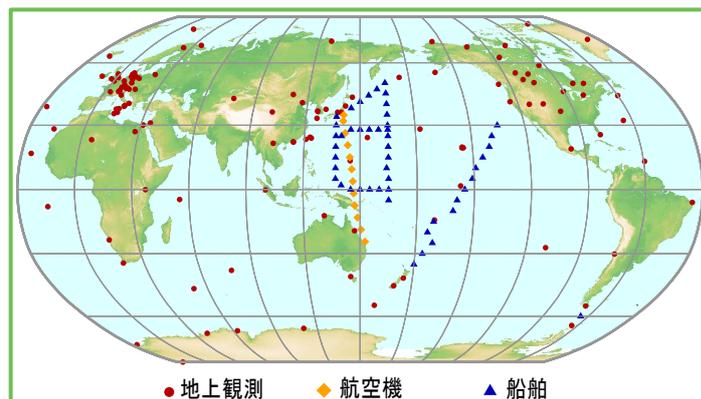


図 4 GAW 観測ネットワークを構成する最近 10 年間の二酸化炭素観測地点。メタンの観測ネットワークもこれと同様である。一酸化二窒素及び他の長寿命温室効果ガスの現場観測ネットワークは、はるかに密度が小さい。

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 (2023年) と増加量。単位は乾燥空気中の濃度で誤差幅は68%の信頼限界による。平均手法は、GAWレポートNo.184[2]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 (2023 年)	420.0±0.1 ppm	1934±2 ppb	336.9±0.1 ppb
1750 年と比較した存在比 <sup>a</sup>	151%	265%	125%
2022 年から 2023 年までの増加量	2.3 ppm	11 ppb	1.1 ppb
2022 年からの増加分の比率	0.55%	0.57%	0.33%
世界平均濃度の最近 10 年間の平均年増加量	2.4 ppm/年	10.7 ppb/年	1.07 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> (153地点)、N<sub>2</sub>O (112地点)。

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 [3] 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 [2] に記載されている手法で解析を行っている。

主な 3 種の長寿命温室効果ガスの 2023 年の大気中濃度の世界平均と、2022 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

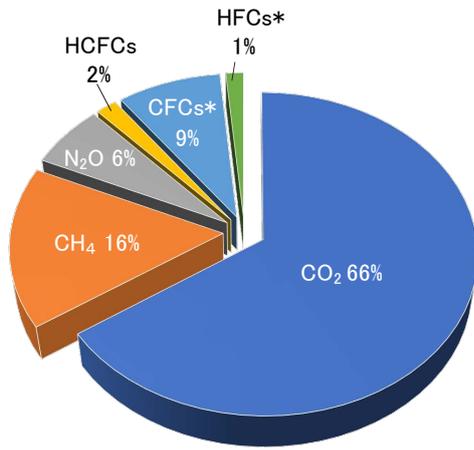


図5 工業化以前から2023年までの世界全体の放射強制力の増加量に対する主要な長寿命温室効果ガスの寄与[15]。

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。

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[15]。AGGIは2023年には1.51となり、放射強制力<sup>(4)</sup>の合計は、1990年以降2023年までに51.5%、2022年からは1.6%増加した(図3)。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(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66%<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の約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2023年の世界平均濃度は420.0±0.1 ppmとなった(図6(a))。2022年から2023年までの年平均値の増加量(2.3 ppm)は、2021年から2022年までの増加量(2.2 ppm)よりわずかに大きく、最近10年間の平均年増加量(2.4 ppm/年)よりわずかに小さかった。濃度増加量のわずかな減少は、本年報の表紙特集記事で論じられているように化石燃料排出量が減少していることを示しているわけではなく、むしろ自然変動に関係している。観測された濃度増加量は、2023年は化石燃料排出量が継続して多かったこと、森林火災による放出量が増加したこと、そして恐らく陸域の吸収量が減少したことによる結

果である。大気中の二酸化炭素濃度増加量の変動(図6(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、2023年に工業化以前の151%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、2023年の化石燃料による二酸化炭素排出量は二酸化炭素換算で37.4 Gt(Pg) CO<sub>2</sub><sup>(5)</sup>であり、2022年の37 Gt CO<sub>2</sub>から1.1%増加した[16]。グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)の2023年の解析によると、森林減少とその他の土地利用変化は、2013年から2022年までの期間の平均で4.7(±2.6) Gt CO<sub>2</sub>/年の排出に寄与した。2013年から2022年の期間の人間活動による排出のうち、約43%が大気、26%が海洋、31%が陸上に蓄積され、蓄積先が特定されなかった残差は1%未満であった[4]。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)の表紙特集記事も参照)。

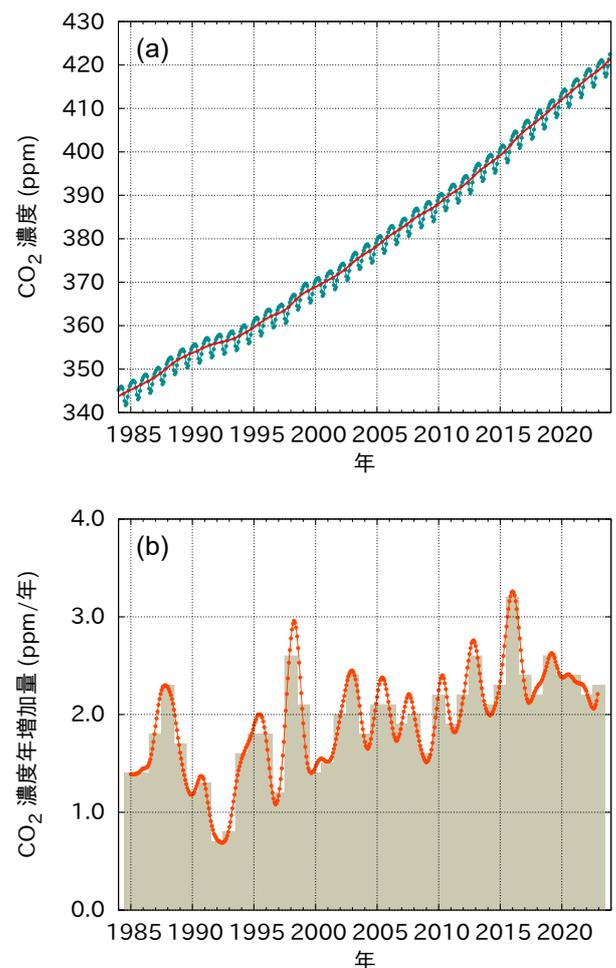


図6 二酸化炭素の1984年から2023年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は146地点。

# 2020 年から 2022 年にかけての大気中メタンの急速な増加と $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ の減少は、微生物による放出量増加が支配的であることを示唆

気候フィードバックへの懸念は二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )に限ったものではない。2020 年から 2022 年にかけて、大気中メタン( $\text{CH}_4$ )濃度の増加量は、1980 年代に組織的な全球メタン観測が始まって以来、3 年間の平均年増加量が 15.4 ppb/年 と最大を記録した。観測とモデルシミュレーションによると 2020 年から 2022 年まで続いたラニーニャ現象発生期間の気温上昇と陸域が特に湿潤状態となったことに反応して、自然湿地からのメタン放出が大幅に増加したことを示している。

大気中メタンは気候強制力を増加させる 2 番目に大きな要因である。化石燃料の採掘、家畜、廃棄物、埋立地、稲作などの人為的な排出源や、湿地や浅い湖のような自然発生源から放出される。大気中のメタンは、大気中に存在する様々な酸化性物質との反応によって除去され、土壌微生物によって消費される。異なる発生源から放出されたメタンは、その安定炭素同位体比  $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  と表記)に明確な特徴を持ち、これがメタン放出の固有の特徴として機能する(WMO 温室効果ガス年報 第 15 号(気象庁訳)参照)。異なるメタン除去メカニズムも大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  に影響を与える。大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  測定は、異なる発生源分野からのメタン放出をさらに理解するために使用される(詳細な手法は図 10 を参照)。

大気中メタン濃度は、工業化が始まって以来、工業化以前の  $729 \pm 9$  ppb[20]から、増加が一時的に停滞した 1999 年から 2006 年の期間の  $1774 \pm 2$  ppb まで、著しく増加してきた。1800 年から 2000 年代初頭まで、大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  もまた著しく増加し[21]、このことは  $^{13}\text{C}$ に富んだ化石燃料からの排出により長期的にメタン増加が起こったことを示している。大気中メタン濃度は 2007 年に再び増加し始め、この増加は 2014 年に加速し、2020 年にはさらに加速した。2007 年のメタン濃度増加が始まったと同時に、大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  は減少し始めた。2020 年から 2022 年にかけての大気中メタン濃度の記録的な上昇は、大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  の大幅な減少を伴っていた(図 11)。微生物により放出されたメタンの  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  は、一般的に大気中の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  よりも低いことから(図 10)、この大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  の予期せぬ変化は、メタン増加の支配的な要因が化石燃料から微生物起源の放出へ移行したことで最もよく説明がつく。2007 年以降の化石燃料分野からの放出量の増加は、全球的なメタン放出量増加の約 15%と寄与の割合は小さかった[22]。大気中メタン濃度や  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  の測定値を同化した複数の全球メタン輸送モデルは、一貫して、微生物による放出の増加が最近の大気中メタン濃度の増加の主な要因であると同等している。メタン増加の地理的分布と、2020 年から 2022

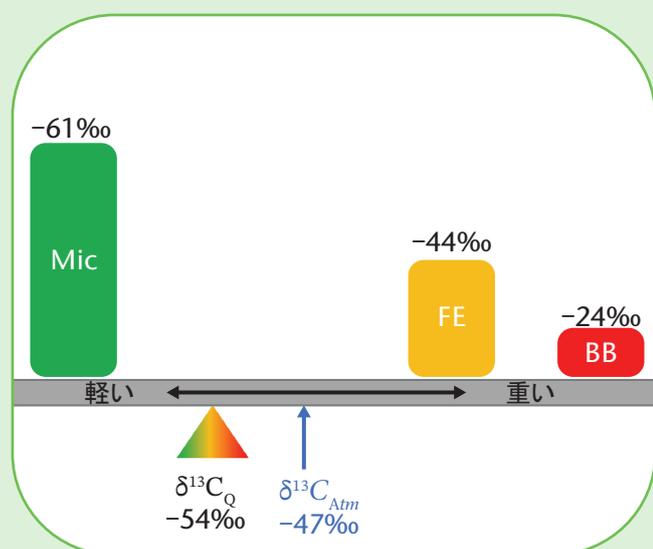


図 10 発生源区分による  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  質量バランス制約のシーソー図(左が  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  が小さく、右が大きい)。総発生源安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}_Q$ ) は、微生物 (Mic)、化石燃料 (FE)、バイオマス・バイオ燃料燃焼 (BB) 発生源からの異なるメタン放出によるつり合いにより決まり、それらの全球平均の安定同位体比  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  は ‰ の単位で表される。湿地、家畜、廃棄物、水田などの微生物起源は一般的に最も軽く ( $\delta^{13}\text{C}$  が最も低い)、森林火災やバイオ燃料などの発熱性の発生源は一般に最も重く ( $\delta^{13}\text{C}$  が最も高い)、化石燃料起源はその間にある。総発生源安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}_Q$ ) と大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  の差が総消失源安定同位体比である。もし総消失源安定同位体比がわかっているならば、大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  を使って総発生源安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}_Q$ ) のシーソー上の水平位置を求めることができる。各区分の放出量の大きさはシーソーが均衡をとるようにしなければならない。なお、この図では概算値を示している。

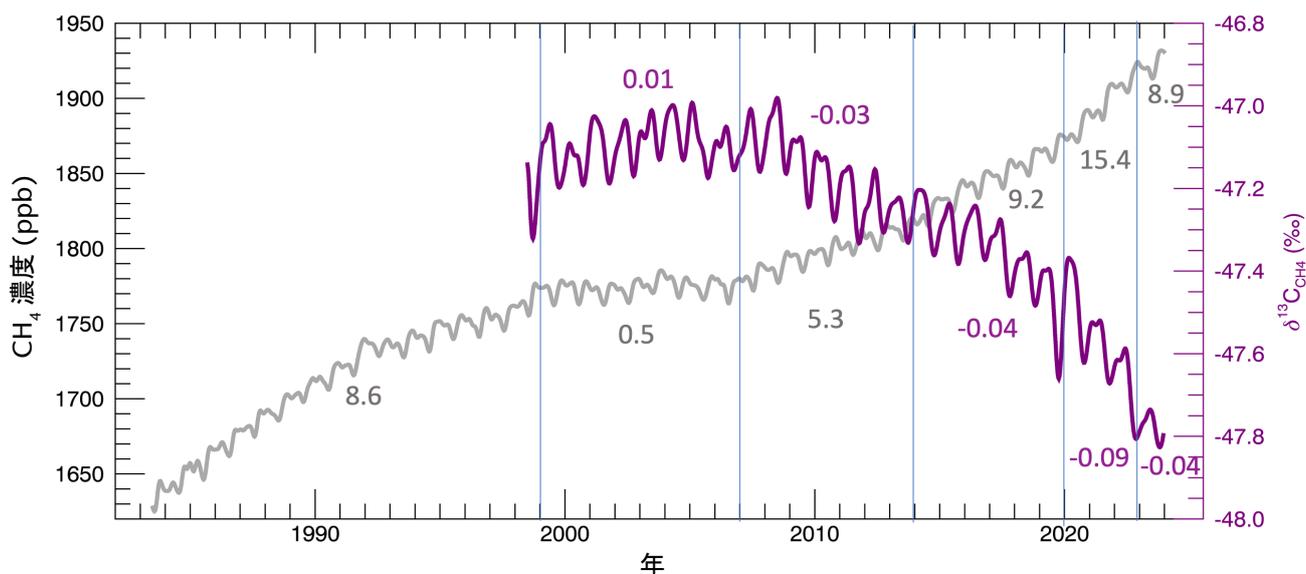


図 11 NOAA 全球監視研究所と極地高山研究所による全球平均メタン濃度(灰色)と  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ (紫色)。1983-1998 年、1999-2006 年、2008-2013 年、2014-2019 年、2020-2022 年、2023 年の期間におけるメタン濃度と  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  の平均増加率(それぞれ ppb/年 と ‰/年 )を図中に数字で示す。

年にかけての大気中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  の急激な低下は、同位体的に軽い(生物起源の)放出の大幅な増加を示唆しており、他の研究[23, 24, 25, 26]と組み合わせて、メタン放出に関する正の気候フィードバックを示している可能性がある。2023 年には、世界の気候はエルニーニョ現象の発生期に移行し、2020 年から 2022 年の期間と比較して、世界の大気中メタン濃度の増加の鈍化が観測され、年内の増加量は 8.9 ppb/年 となり、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  の低下も鈍化した。これらの変化はバイオマス燃焼による放出の増加( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  が大きい)と、2023 年の温暖で乾燥した条件により、湿地からのメタン放出が減少した結果と考えられる。

もう一つの潜在的な気候フィードバックは北極圏の永久凍土の融解であり、これにより有機炭素が放出され、微生物がそれを二酸化炭素とメタンに変換する。しかし、北極からの炭素放出の大幅な増加は(まだ)検出されていない。比較的少量の永久凍土からのメタン放出が、最近の北極の微生物によるメタン放出量のわずかな増加に寄与している可能性がある[27]。北極圏の大

地は、永久凍土の最上部 3 メートルに、1000 Pg C という膨大な量の炭素を蓄えている[28]。これと比較して、現在の大気はメタンとして 4 Pg C を保持している。このような気候フィードバックは、制御するのが非常に困難である。

人類にとって最善の取り組みは、温室効果ガス、特に二酸化炭素の現在の排出を削減することで、重大な気候フィードバックを将来の気候シナリオに供給するのを止めることである[29]。効果的な排出削減策を支援するために、温室効果ガスは、客観的で信頼性の高い吸排出量の定量値を与えられるような観測方法で監視される必要がある。これらの観測は、排出量に関する情報が、共通のグローバルバックグラウンドに対してわずかな時空間的勾配の中から得られるため、正確かつ適切に較正されなければならない。また、気候変動対策の進捗状況を把握するためには、数十年にわたって監視を継続する必要がある。衛星による推定は、特に正確で適切に較正された温室効果ガスの観測が困難な地域では、この努力を補うことができる。

## 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16%<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、廃水、バイオマス燃焼など)によるものは約60%である[17]。現場観測によるメタンの2023年の世界平均濃度は、解析開始以来の最高値を更新する1934±2 ppbであり、前年から11 ppb増加した(図7(a))。この増加は2021年から2022年までの増加量(16 ppb)より小さく、最近10年間の平均年増加量(10.7 ppb)よりわずかに大きい。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(図7(b))。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2023年に工業化以前(729.2 ppb)の265%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(挿入記事参照)。

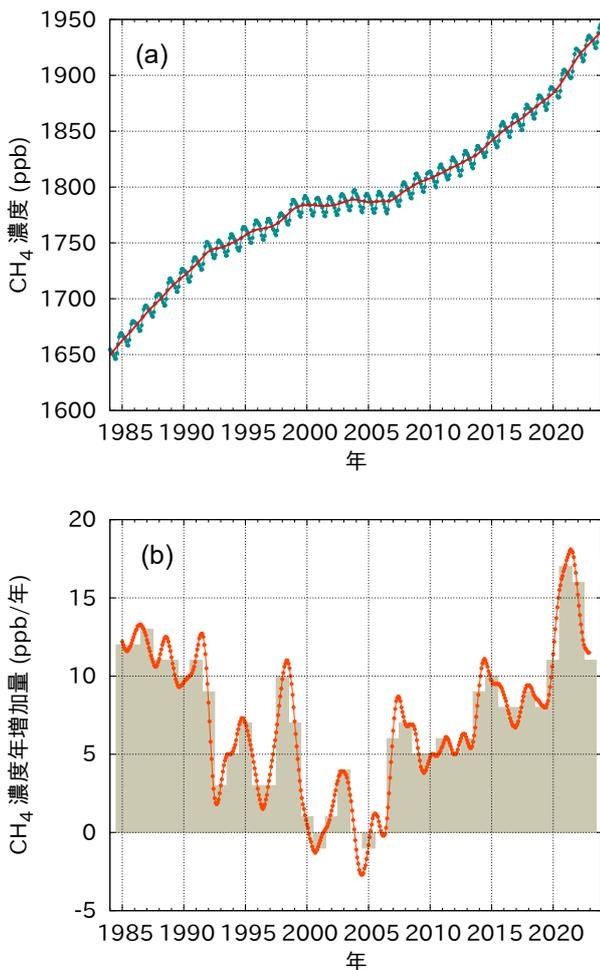


図7 メタンの1984年から2023年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は153地点。

## 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2023年の世界平均濃度は336.9±0.1 ppbであり、前年から1.1 ppb増加して(図8(a)、図8(b))、工業化以前(270.1 ppb)の125%となった。2022年から2023年までの増加量は、2021年から2022年までの増加量より小さく、最近10年間の平均年増加量(1.07 ppb/年)よりわずかに大きかった。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[18]。

### 他の温室効果ガス

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、他のハロゲン化合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12%<sup>(4)</sup>を占める。大気中のクロロフル

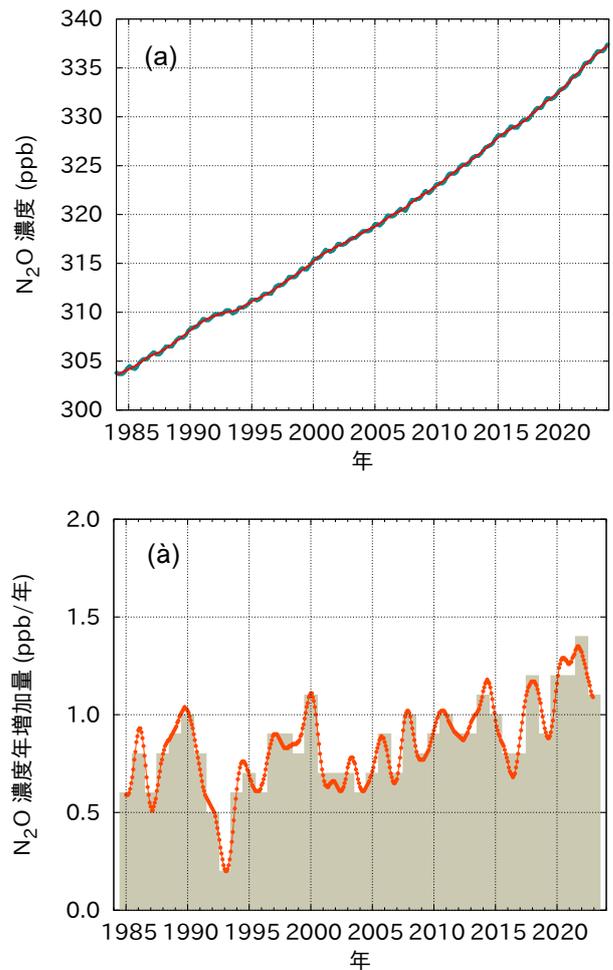


図8 一酸化二窒素の1984年から2023年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値で、この図では月平均値を表す青点と重なっている。この解析に使用した観測点は112地点。

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9(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、ハロカーボン類に匹敵する放射強制力を持ち[19]、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4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。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。

## 謝辞とリンク

WMO加盟国のうちの55カ国がGAW WDCGGI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。WDCGGIに提供されている観測データの約46%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。GAW温室効果ガスネットワークや観測手法に関する情報は、[GAW Report No. 292](#)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、[WDCGGI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, Xin Lan, Oksana Tarasova, Kazuhiro Tsuboi

## 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)

Christoph Gerbig (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany)

Armin Jordan (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany)

Xin Lan (NOAA Global Monitoring Laboratory and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, USA)

Zoë Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia)

Ingrid Lujckx (Wageningen University and Research, Netherlands (Kingdom of the))

John Miller (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA)

Oksana Tarasova (WMO)

Kazuhiro Tsuboi (Japan Meteorological Agency, WDCGG, Japan)

Alex Vermeulen (Integrated Carbon Observation System – European Research Infrastructure Consortium (ICOS ERIC)/Lund University, Sweden)

Ray Weiss (Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA)

Thorsten Warneke (University Bremen, Germany)

Camille Yver (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France)

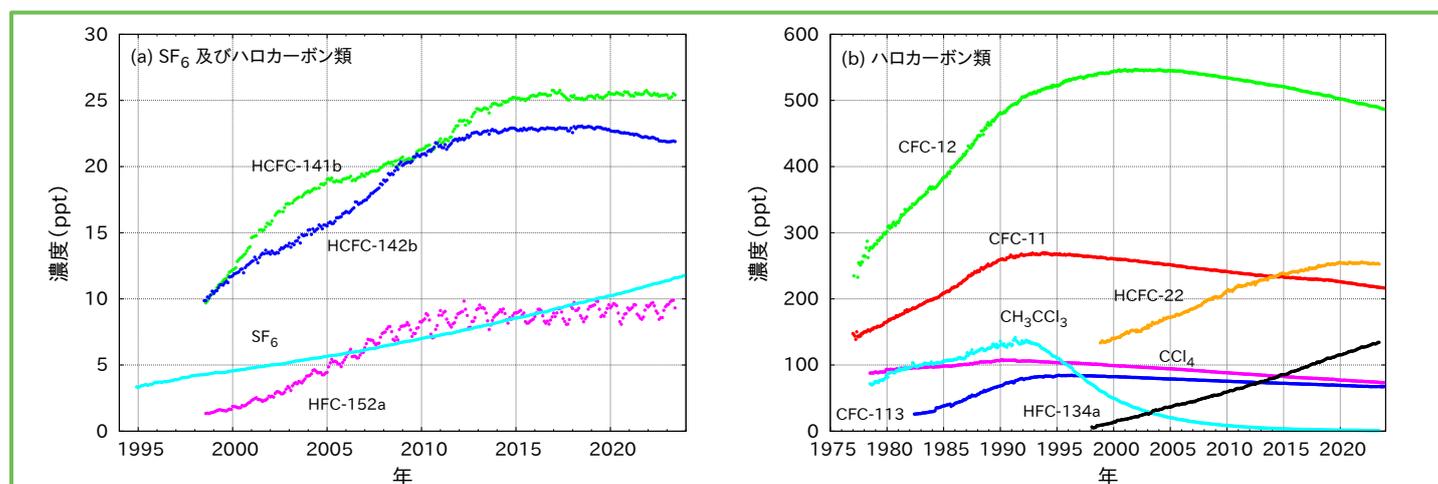


図9 六フッ化硫黄 (SF<sub>6</sub>) 及び主要なハロカーボン類の月平均濃度 (a) 六フッ化硫黄及び低濃度のハロカーボン類、(b) 高濃度のハロカーボン類。解析に使用した地点数は、SF<sub>6</sub> (91)、CFC-11 (26)、CFC-12 (28)、CFC-113 (23)、CCl<sub>4</sub> (24)、CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> (26)、HCFC-141b (12)、HCFC-142b (16)、HCFC-22 (16)、HFC-134a (12)、HFC-152a (12)。

## 参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- [2] 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.
- [3] Lan, X.; Tans, P.; Thoning, K. W.: Trends in Globally-averaged CO<sub>2</sub> Determined from NOAA Global Monitoring Laboratory Measurements. Version 2024-10. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Global Monitoring Laboratory, 2024. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>.
- [4] Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data* **2023**, *15* (12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>.
- [5] Alden, C. B.; Miller, J. B.; White, J. W. C. Can Bottom-up Ocean CO<sub>2</sub> Fluxes Be Reconciled with Atmospheric <sup>13</sup>C Observations? *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* **2010**, *62* (5). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00481.x>.
- [6] Keeling, C. D.; Revelle, R. Effects of El Niño/Southern Oscillation on the Atmospheric Content of Carbon Dioxide. *Meteoritics* **1985**, *20*, 437–450.
- [7] Betts, R. A.; Jones, C. D.; Knight, J. R. et al. El Niño and a Record CO<sub>2</sub> Rise. *Nature Climate Change* **2016**, *6* (9), 806–810. <https://doi.org/10.1038/nclimate3063>.
- [8] Liu, J.; Bowman, K. W.; Schimel, D. S. et al. Contrasting Carbon Cycle Responses of the Tropical Continents to the 2015–2016 El Niño. *Science* **2017**, *358* (6360), eaam5690. <https://doi.org/10.1126/science.aam5690>.
- [9] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Global Monitoring Laboratory, *GGGRN Data – CO<sub>2</sub>* 2024. <https://gml.noaa.gov/ccgg/data/getdata.php?gas=co2>, accessed on 16 October 2024.
- [10] Byrne, B.; Liu, J.; Bowman, K. W. et al. Carbon Emissions from the 2023 Canadian Wildfires. *Nature* **2024**, *633* (8031), 835–839. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07878-z>.
- [11] Blunden, J. and T. Boyer, Eds.: “State of the Climate in 2023”. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2024**, *105* (8) [special supplement]. <https://doi.org/10.1175/2024BAMSStateoftheClimate.1>.
- [12] Jones, M. W.; Kelley, D. I.; Burton, C. A. et al. State of Wildfires 2023–2024. *Earth System Science Data* **2024**, *16* (8), 3601–3685. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3601-2024>.
- [13] Jacobson, A. R., Schuldt, K. N., Tans, P. et al. *CarbonTracker CT2022*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Global Monitoring Laboratory, 2023. <https://doi.org/10.25925/Z1GJ-3254>.
- [14] Gatti, L. V.; Basso, L. S.; Miller, J. B. et al. Amazonia as a Carbon Source Linked to Deforestation and Climate Change. *Nature* **2021**, *595* (7867), 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.
- [15] Montzka, S. A. *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory, 2024. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [16] International Energy Agency (IEA). *CO<sub>2</sub> Emissions in 2023*; IEA: Paris, 2024. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>.
- [17] 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>.
- [18] 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>.
- [19] Forster, P.; Storelvmo, T.; Armour, K. et al. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. 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\\_Chapter07.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf).
- [20] Mitchell, L.; Brook, E.; Lee, J. E. et al. Constraints on the Late Holocene Anthropogenic Contribution to the Atmospheric Methane Budget. *Science* **2013**, *342* (6161), 964–966. <https://doi.org/10.1126/science.1238920>.
- [21] Ferretti, D. F.; Miller, J. B.; White, J. W. C. et al. Unexpected Changes to the Global Methane Budget over the Past 2000 Years. *Science* **2005**, *309* (5741), 1714–1717. <https://doi.org/10.1126/science.1115193>.
- [22] Basu, S.; Lan, X.; Dlugokencky, E. et al. Estimating Emissions of Methane Consistent with Atmospheric Measurements of Methane and δ<sup>13</sup>C of Methane. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2022**, *22* (23), 15351–15377. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15351-2022>.
- [23] Michel, S. E.; Lan, X.; Miller, J. et al. Rapid Shift in Methane Carbon Isotopes Suggests Microbial Emissions Drove Record High Atmospheric Methane Growth in 2020–2022. *Proceedings of the National Academy of Sciences*

2024, 121 (44), e2411212121.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2411212121>.

[24] Zhang, Z.; Poulter, B.; Feldman, A. F. et al. Recent Intensification of Wetland Methane Feedback. *Nature Climate Change* **2023**, 13 (5), 430–433. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01629-0>.

[25] 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>.

[26] Peng, S.; Lin, X.; Thompson, R. L. et al. Wetland Emission and Atmospheric Sink Changes Explain Methane Growth in 2020. *Nature* **2022**, 612 (7940), 477–482.

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-05447-w>.

[27] Oh, Y., Bruhwiler, L., Lan, X. et al. *CarbonTracker-CH<sub>4</sub> 2023*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Global Monitoring Laboratory, 2023. <https://doi.org/10.25925/40JT-QD67>.

[28] Miner, K. R.; Turetsky, M. R.; Malina, E. et al. Permafrost Carbon Emissions in a Changing Arctic. *Nature Reviews Earth and Environment* **2022**, 3 (1), 55–67.

<https://doi.org/10.1038/s43017-021-00230-3>.

[29] Riishojgaard, L. P.; Tarasova, O. Reducing Methane Emissions—the “Easy” Way to Keep 1.5 Alive? *Frontiers in Science* **2024**, 2. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1462219>.

## (注釈)

- (1) ppmは乾燥空気分子100万個中の当該ガスの分子数。
- (2) 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モルあたりの当該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又はppb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。
- (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。

## 日本語訳について

このWMO 温室効果ガス年報第20号(気象庁訳)は、WMOが2024年10月28日に発行したWMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20を気象庁が翻訳したものである。

発行 2025年2月6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](mailto: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/>

## 今回紹介する温室効果ガス観測所

### ブキトコタババン観測所(インドネシア共和国)

ブキトコタババン GAW 全球観測所はスマトラ島に位置し、ブキティンギ市(人口:85,000 人)の北約 17km、西スマトラ州の州都パダン市の北約 120 km にある。ブキトコタババン(「空飛ぶ街の丘」の意)は赤道直下の高原の尾根に位置し、標高は 864.5 m、西海岸線から 40 km 離れている。敷地内の施設は大きな平屋の建物で、執務室、会議室、研究室がある。300 m<sup>2</sup>の平らな屋根の上には、大気採取口と日射・赤外放射と気象の測器が設置されている。この観測所での温室効果ガスのフラスコ・サン

プリング・プログラムは 2004 年に開始された。観測所は、西側にあるパダンとメダンを結ぶ幹線道路(適度な交通量)から数キロ離れており、一般には閉鎖された小さなアクセス道路を通して行く。観測所への小さなアクセス道路があることで、農民たちがこの地域を開発することを可能にしている。観測所の管理者は、周辺環境の改変に対する懸念に対処するため、西スマトラ州当局に支援を要請している。



ブキトコタババン観測所  
写真: 気象気候地球物理庁 (BMKG)



**所在**  
所属国: インドネシア共和国  
南緯: 0.20194 °  
東経: 100.31806 °  
標高: 864.5 m  
標準時間帯: 協定世界時 +7 時間  
WIGOS ID : 0-20008-0-BKT  
GAW ID: BKT

### ベアリングヘッド観測所(ニュージーランド、マオリ語名アオテアロア)

GAW 地域観測所であるベアリングヘッド(BHD)大気観測所は、ニュージーランド(マオリ語名アオテアロア)国立大気水圏研究所(NIWA)によって運営されている。ベアリングヘッド観測所は、ウェリントン(人口 440,000 人)の南東 10 km、北島の南端にある高さ 85 m の崖の上に位置している。周辺の土地は疎らな畜産に利用されている。この観測所は、少なくとも 5 日間は陸地と接触していない強い南風に頻繁にさらされ、南氷洋の基準となる大気組成を監視するために使用される。ベアリングヘッド観測所での大気中の二酸化炭素の高精度観測は 1972 年に開始された。この観測所の二酸化炭素の現場観測記録は、南半球で最長であり、世界でも最長記

録の一つである。ベアリングヘッド観測所での温室効果ガス観測には、二酸化炭素、メタン、一酸化炭素、一酸化二窒素の濃度、二酸化炭素、メタン、一酸化炭素の放射性同位体及び安定同位体が含まれる。ラドンや硫化カルボニルのような他の成分を測定するために、新しい技術が使用されている。二酸化炭素とメタンの濃度の観測は、逆解析法を利用したトップダウン手法により、国別排出量の定量化にますます利用されるようになっている。NIWA は、米国海洋大気庁(NOAA)の全球監視部門(GMD)及びスクリップス海洋研究所(SIO)と協力している。



ベアリングヘッド観測所  
写真: Dave Allen (NIWA)



**所在**  
所属国: ニュージーランド  
南緯: 41.40819 °  
東経: 174.87080 °  
標高: 85 m  
標準時間帯: 協定世界時 +12 時間  
WIGOS ID : 0-20008-0-BHD  
GAW ID: BHD