

WMO 温室効果ガス年報

2020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17号 | 2021年10月25日

ISSN 2078-0796

人間活動によって排出された二酸化炭素(CO₂)の約半分は、現在大気中に残留している。残りは、海洋や陸域の生態系により吸収されている。大気中に残留する放出量の割合は、大気残留率(AF)と呼ばれ、放出源と吸収源のバランスを示す重要な指標である。AFは年々変動が大きく、年平均値は過去60年間で0.2(20%)から0.8(80%)の間で比較的大きく変動している。しかし、統計解析によると、AFの平均値は0.42で長期的(過去60年間程度)に有意な変化傾向は見られない(図1参照)。このことは、人為起源のCO₂排出量の42%しか大気中に残っていないことを意味する。陸域と海洋のCO₂吸収量は、排出量の増加に比例して増え続けている。吸収プロセスは気候変動や土地利用変化に敏感であるため、AFが将来どのように変化するかは不確かである。

AFの変化は、地球温暖化を2°Cより十分低く抑える、パリ協定の目標達成に大きな影響を与え、排出削減義務の時期及び/又は規模を調整する必要があるだろう。現在進行中の気候変動と、干ばつの頻発や森林火災の発生の増加及び激化などの関連するフィードバック[2]によって、陸域の生態系によるCO₂吸収が減少する可能性がある。海洋の吸収も、海面水温の上昇、CO₂吸収による水素イオン濃度指数(pH)の低下[3]及び氷の融解の増加による海洋の子午面循環の鈍化[4]などにより減少するかもしれない。AFの変動に関する時宜を得た正確な情報は、放出源と吸収源のバランスの将来変化を検知するために重要である。

幸運なことに、WMO 全球大気監視(GAW)計画とその協賛ネットワークが世界の主要地点で実施している大気中CO₂の観測から情報を得ることができる。これらの長期的かつ正確な観測結果は、本年報や前号までの年報で紹介したように、CO₂やその他の温室効果ガスの大気中濃度の変化傾向の見識を直接与える。これらのデータは、他の観測データ(例えば、安定同位体比や酸素/窒素(O₂/N₂)比など)や逆解析モデル(大気トレーサー輸送モデルの適用)と組み合わせることができ、世界の炭素循環における主要なCO₂吸収過程の強度に関する定量的な情報を導出するために役立つ。さらにこれらは、AFとその変動に寄与する要因を解析することにも役立つ[5]。

この直接観測の情報に基づいて、予期される排出シナリオに対するCO₂濃度のより良い予測を行うことができ、気候予測の改善が可能になる。図2は、呼吸と光合成ではCO₂とO₂が共変動するのに対し、海洋とのガス交換では共変動しない特性を利用して、化石燃料起源のCO₂排出量の陸域と海洋の吸収源への分配を、一つの観測所での長期観測によって明らかにした解析の一例である。なお、この解析は、図1とは異なる期間を対象としており、観測所の地域代表性や較正の不確実性など、全ての不確実性の要因を含んでいるわけではないことに留意されたい。

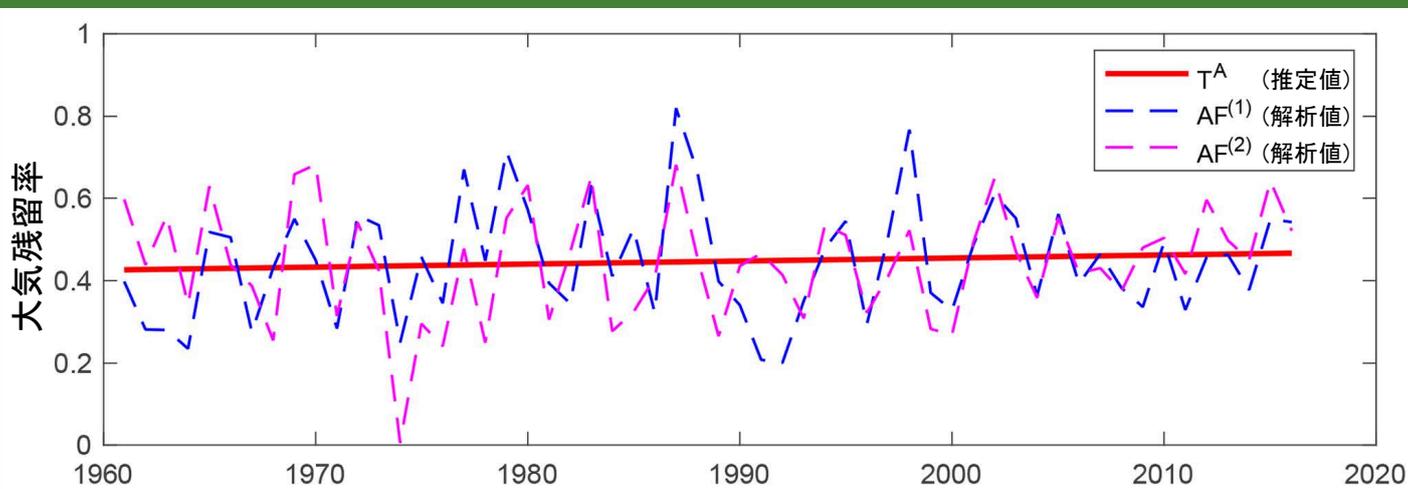


図1 1960年から2016年の期間における大気残留率(AF)の線形トレンド(T^A)の推定値[1]。年平均AFの個々の解析値は、炭素収支の不均衡がゼロ(AF⁽¹⁾)またはゼロではない(AF⁽²⁾)2つの手法を用いており、破線で描かれている。この期間におけるAFの変化傾向はわずかに上昇傾向が見られるが、統計的に有意とは認められない。

温室効果ガスの管理政策をより適切に支援するためには、自然起源の吸収量や化石燃料起源の排出量を解析し、地域や地方レベルまでに絞り込む必要があり、現在の現場観測ネットワークの持続性を高め、現場観測データを追加する必要がある。現場観測と同時に遠隔観測の能力を、特にアフリカやその他の熱帯地域など、現状十分な観測データが得られていない地域において向上させる必要がある。

最近の 2021 年全球気候観測システム (GCOS) 進捗報告書[6]では、GAW 温室効果ガスネットワークや衛星観測などにおける観測の可用性に関して最近の改善が認知されているが、依然として改善が必要な 4 つの主要分野も指摘されている。

- ・観測の持続可能性の確保
- ・観測網におけるギャップへの取組
- ・観測データの恒久的かつ無料で制限のないアクセスの確保
- ・国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) のパリ協定により推進される政策への支援拡大

最後の点では、地球全体でより多くの地域的な観測 (都市域及び統合的炭素循環観測システム (ICOS) のような貢献ネットワーク) が必要となるだろう。WMO GAW は、例えば、都市域の温室効果ガス監視の国際標準を策定している統合全球温室効果ガス情報システム (IG³IS) (<https://ig3is.wmo.int/>、温室効果ガス年報第 12 号も参照) イニシアティブなどを通じて、これに貢献している。

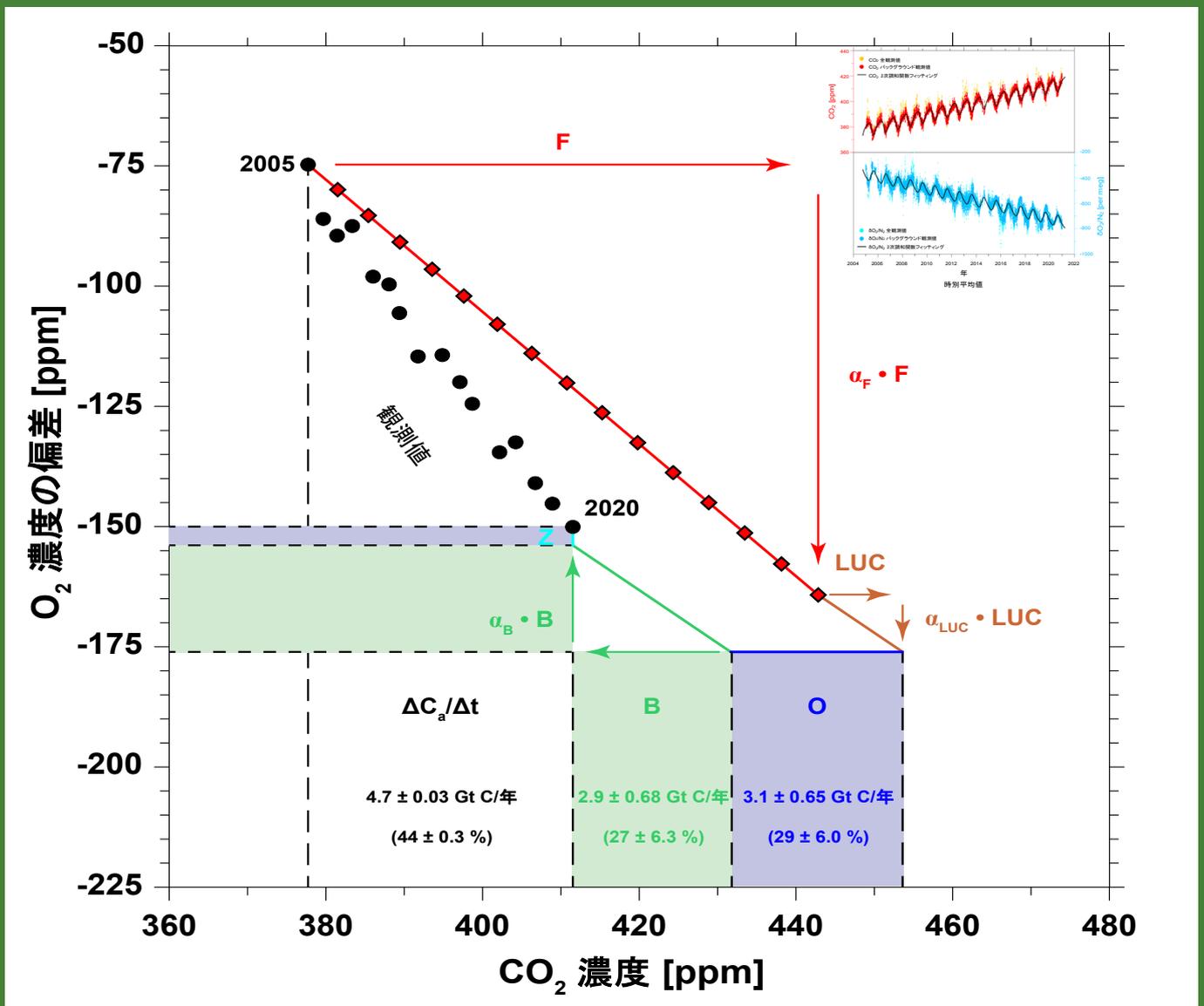


図 2 WMO GAW 全球観測所のユングフラウヨッホ観測所 (スイス連邦) における、CO₂ と O₂ の観測結果に基づく全球的な炭素収支の解析[7]。右上の挿入図は、基になる CO₂ と O₂/N₂ 比の 2005 年から 2021 年の時別時系列を示している。解析の結果、この 16 年間では、排出量のうち大気中に残留する割合は 44% ($\Delta C_a / \Delta t = 0.44$)、生物圏全体の吸収量 (B) は 27%、海洋全体の吸収量 (O) は 29% であることを示す。赤線は化石燃料排出から予想される変化 (F) 及び茶色線は土地利用変化に関連する排出 (LUC) に対応する CO₂ 及び O₂ 濃度の変化を示す。(Z) は海洋の熱による脱ガスの O₂ 濃度変化を示す。

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、2020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⁽¹⁾は、それぞれ、413.2±0.2 ppm⁽²⁾、1889±2 ppb⁽³⁾、333.2±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%、123%である。二酸化炭素の2019年から2020年までの濃度増加量は、2018年から2019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大きかった。これは、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の世界的流行に関連する規制により、2020年に化石燃料起源の排出量が約5.6%減少したにもかかわらずである。メタンの2019年から2020年までの濃度増加量は、2018年から2019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大きかった。一酸化二窒素の2019年から2020年までの濃度増加量は、2018年から2019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大きかった。米国海洋大気庁(NOAA)年次温室効果ガス指標(AGGI)[8]によると、1990年から2020年までに、長寿命の温室効果ガス(LLGHG)による放射強制力は47%増加しており、二酸化炭素がそのうちの約80%を占める。

2020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17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%

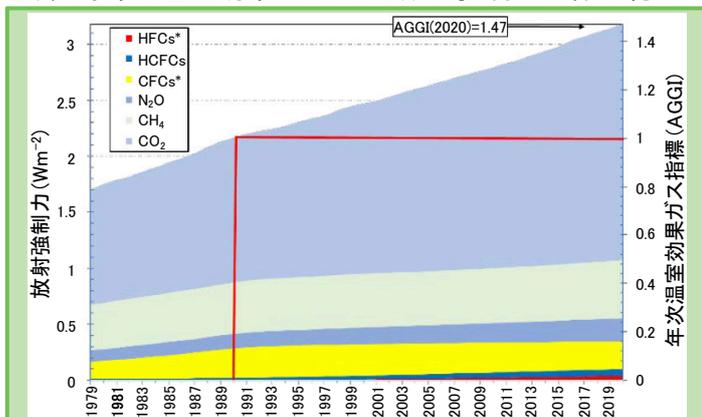


図3 長寿命の温室効果ガスによる放射強制力(1750年を基準)の経年変化と2020年のNOAA年次温室効果ガス指標(AGGI)[8]。なお、2021年の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第1作業部会報告書[9]で更新された計算は、この推定には含まれない。CFCs*群には、クロロフルオロカーボン(CFC)類ではない他の長寿命ガス(CCl₄、CH₃CCl₃及びハロン類など)が含まれるが、この放射強制力の大部分(2020年では95%)をクロロフルオロカーボン類が占める。HCFCs群には、最も濃度の高い3種類のハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)類(HCFC-22、HCFC-141b及びHCFC-142b)が含まれる。HFCs*群には、最も濃度の高いハイドロフルオロカーボン(HFC)類(HFC-134a、HFC-23、HFC-125、HFC-143a、HFC-32、HFC-152a、HFC-227ea及びHFC-365mfc)及び六フッ化硫黄(SF₆)を完全に含むが、2020年のこの群の放射強制力に占める六フッ化硫黄の割合はわずかである(13%)。

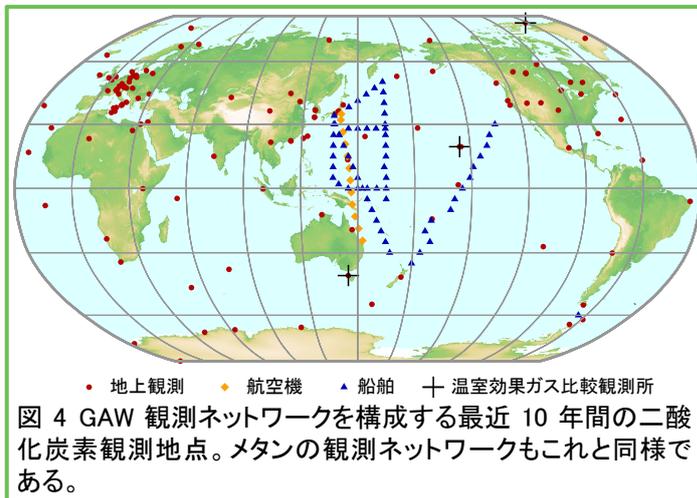


図4 GAW観測ネットワークを構成する最近10年間の二酸化炭素観測地点。メタンの観測ネットワークもこれと同様である。

⁽⁴⁾[8]を占める(図3)。

この年報では、放射強制力に対する寄与率はすべて参考文献[8]における手法で算出しており、基準として1750年を用い、長寿命の温室効果ガスのみを含む。

WMO GAW計画は、大気中の温室効果ガス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WMO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[10]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。WDCGGはGAWレポートNo.184[11]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CO₂の解析結果は、新しいCO₂較正スケールWMO CO₂X2019[12]を用いたデータが現在報告されているため、過去の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2020年の大気中濃度の世界平均と、2019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

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(2020年)と増加量。単位は乾燥空気のマール分率で誤差幅は68%の信頼限界による。平均手法は、GAWレポートNo.184[11]に記載している。

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
世界平均濃度(2020年)	413.2±0.2 ppm	1889±2 ppb	333.2±0.1 ppb
1750年と比較した存在比 ^a	149%	262%	123%
2019年から2020年までの増加量	2.5 ppm	11 ppb	1.2 ppb
2019年からの増加分の比率	0.61%	0.59%	0.36%
世界平均濃度の最近10年間の平均年増加量	2.40 ppm/年	8.0 ppb/年	0.99 ppb/年

^a 工業化以前の濃度を、二酸化炭素(CO₂)は278 ppm、メタン(CH₄)は722 ppb、一酸化二窒素(N₂O)は270 ppbと仮定した。本解析に使用した観測点数は、CO₂(139地点)、CH₄(138地点)、N₂O(105地点)。

ニュージーランド炭素監視: ニュージーランドの森林の炭素吸収を解明する大気中二酸化炭素の長期観測の利用

ニュージーランドでは、森林は温室効果ガス排出量の30%を埋め合わせているが、森林の炭素吸収量の推定値には大きな不確かさが残っている。国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) の下で排出目標に対する進捗状況を追跡しているニュージーランドの温室効果ガスインベントリ報告書 (NIR) では、森林の炭素吸収量を推定するために、全国的な観測所ネットワークにおける樹径と樹高の測定値を使用している[25]。この取組は、国際的に最良の手法とされる指針に従っているが [26]、全ての森林生態系の過程を適切に把握できていない可能性もある。

大気中の CO₂ 観測とモデリングから得られた独立した推定値によると、森林の炭素吸収量は、NIR と陸域生物圏モデリングの両方で大幅に過小評価されている可能性がある [27]。最新の結果は、追加の観測とモデリングを用いてこの吸収源を確認し、それが少なくとも 10 年間続いていることを示している (図 10)。

この追加的な炭素吸収は、ニュージーランド南島の南西部、つまり成熟した天然林に支配されている地域という、最も可能性が低いと考えられていた場所で起きている (図 11)。ニュージーランドの天然林は、成長の早い外来種の樹木を中心としたプランテーション林と比較して、炭素吸収量が少ないと長年考えられてきた。これらの結果は、多くの環境の共便益を伴う炭素吸収のための国の森林管理に、より持続可能な新しい道筋を拓く可能性がある[27]。

ニュージーランドの気候変動委員会は、プランテーション林に依存するのではなく、炭素吸収に資する在来種の植林に移行するよう最近勧告した。しかし、ニュージーランド固有の天然林の将来の気候変動に対する感度については、ほとんど知られていない。現在行われている観測は、気候

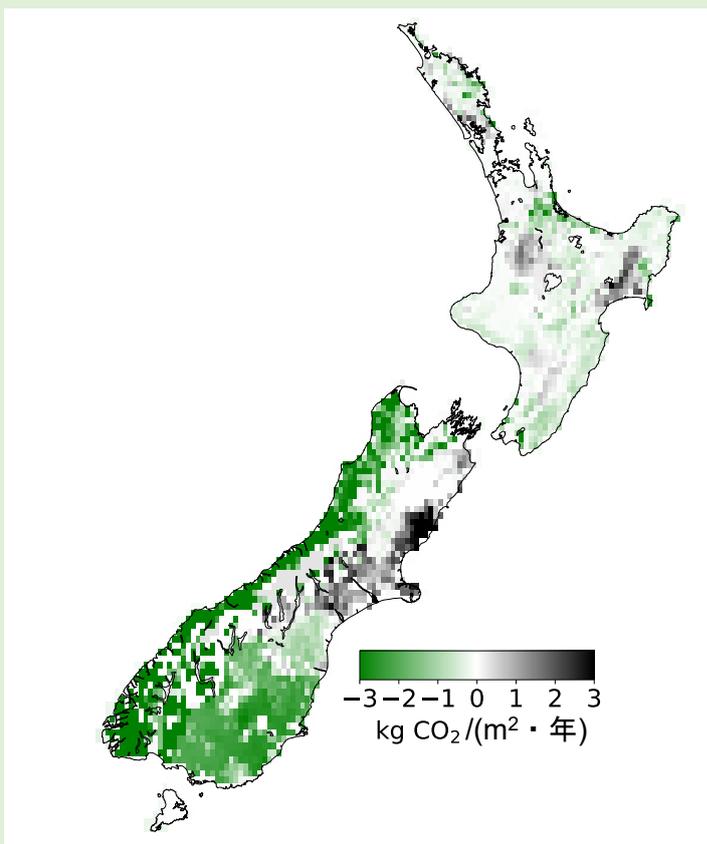


図 11 大気観測とモデリングから推定された 2011 年から 2020 年までのニュージーランドの陸域生物圏の平均吸収量。

変動に対するこれらの森林の感度を理解し、変化する世界に対して森林の炭素吸収がどのように応答するかを理解する手助けになるだろう。

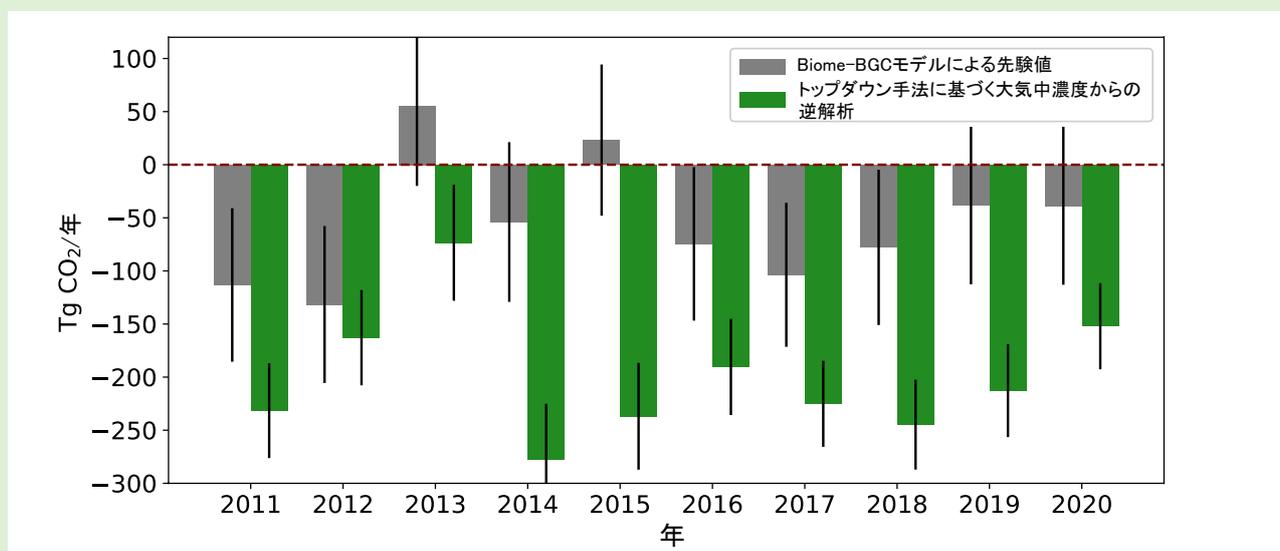


図 10 Biome-BGC モデル (灰色) と大気中の CO₂ 観測及びモデリング (緑色) から推定されたニュージーランドの陸域生物圏からの年平均炭素フラックス [27]。

熱帯域の炭素循環を明らかにする観測：正味の二酸化炭素放出域としてのアマゾン

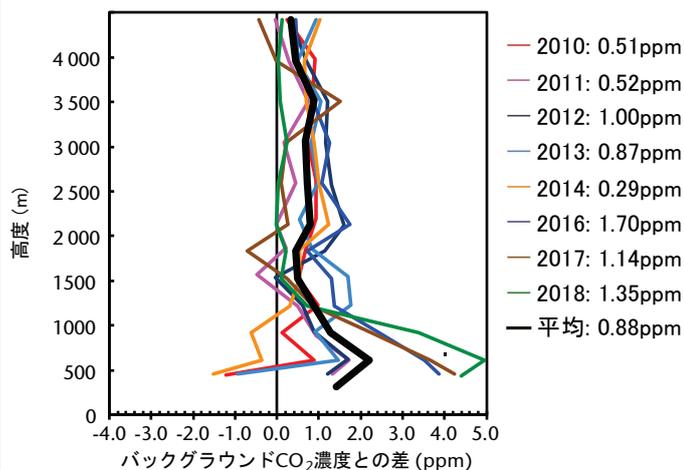


図 12 ブラジル連邦共和国の ALF 航空機観測点における年平均鉛直分布[28]。

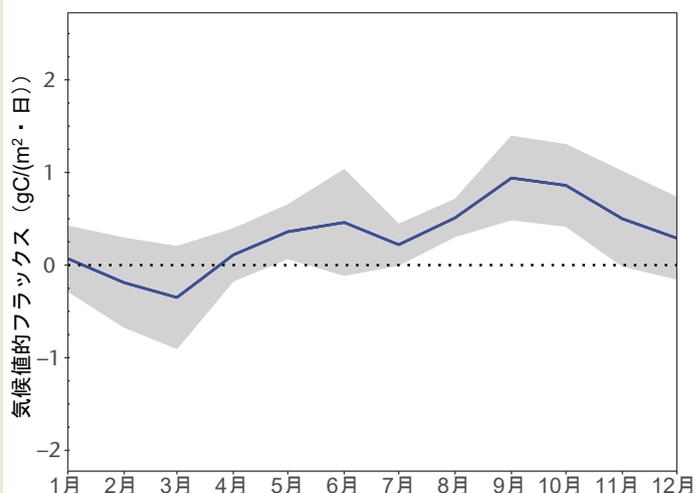


図 14 ALF 航空機観測点における 2010 年から 2018 年間の月平均炭素フラックスの平均値。灰色の帯は月平均値の標準偏差を示し、実線はアマゾン南東部の 9 年間平均の気候値的炭素フラックスを示す[28]。

アマゾンのような熱帯域は、地球全体の炭素バランスにおいて重要な役割を果たしている。アマゾンは地球最大の熱帯林を有しているが、他の熱帯域と同様に、広範囲の炭素フラックスを決定するために必要な現場観測地点はわずかである。地球全体の炭素収支に対するアマゾンの寄与の推定を向上させるために、2010 年にこの地域の 4 つの異なる場所(アルタ・フロresta(ALF)、リオ・ブランコ(RBA)、サンタレン(SAN)及びタバチンガ/テフェー(TAB/TEF))で航空機による観測プログラムが開始された。鉛直分布観測は地表近くから海拔約 4.5 km まで及び、収集したデータはアマゾンの大部分(南米

アマゾンの約 80%)の地表面フラックスのバランスを捉えている。2010 年から 2018 年にかけて、全体で 600 の CO₂と CO の航空機による鉛直分布が収集された[28]。

年平均の鉛直分布が図 12 に示されている。大気中への CO₂ 放出量は、ALF 航空機観測点(南緯 8.80 度、西経 56.75 度:図 13 参照)で観測された南東部が最も多く(図 14)、次いで北東部となった。一方、西部の航空機観測点の鉛直勾配(ここでは示さない)は、ほぼ中立な炭素バランスまたは炭素吸収を示している。これらの航空機観測点の年平均鉛直分布の CO₂ 勾配と推定された炭素フラックスは、土地利用と被覆の変化の影響をより受けている地域で、大気中への炭素放出量がより多いことを示している。アマゾン東部の地域では、過去 40 年間に、乾季の気温上昇と降水量減少及び歴史的に大規模な森林破壊が起きたが、西部の地域では人間活動の干渉は比較的少なく、乾季の気候の変化傾向は比較的弱い。

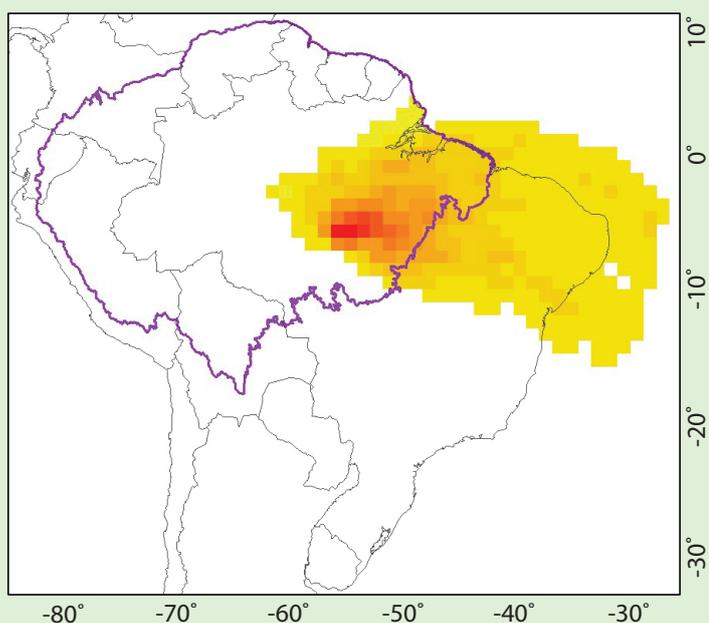


図 13 ALF 航空機観測点のフットプリント(影響する領域の 2010 年から 2018 年間の年平均)。

の解析には使っていない。

この3種の温室効果ガス(表参照)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[8]。AGGIは2020年には1.47となり、放射強制力の合計は、1990年以降2020年までに47%⁽⁴⁾、2019年からは1.8%増加した(図3)。2020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(3.18 Wm⁻²)は、二酸化炭素等価換算濃度で504 ppmに相当する[8]。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。

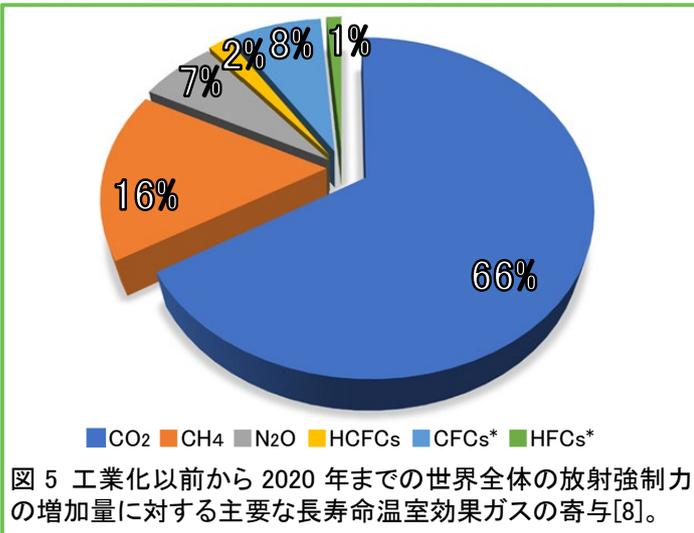


図5 工業化以前から2020年までの世界全体の放射強制力の増加量に対する主要な長寿命温室効果ガスの寄与[8]。

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%⁽⁴⁾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82%⁽⁴⁾、最近5年間でも約82%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約278 ppmであった。二酸化炭素の2020年の世界平均濃度は413.2±0.2 ppmとなった(図6)。2019年から2020年までの年平均値の増加量(2.5 ppm)は、2018年から2019年までの増加量よりわずかに小さかったが、最近10年間の平均年増加量(2.40 ppm/年)よりわずかに大きかった。これは、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の世界的流行に関連する規制により、2020年に化石燃料起源の排出量が約5.6%減少したにもかかわらずである[13]。なお、温室効果ガス年報第16号で報告された二酸化炭素の2019年の世界平均濃度は、全ての報告された解析値を新しいCO₂X2019校正スケールに更新したことで、410.5 ppmから410.7

ppmに調整された[12]。

大気中の二酸化炭素濃度は、2020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、2020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31.5 GtCO₂⁽⁵⁾となり、2019年の33.4 GtCO₂から減少した[14]。グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)の2020年の解析によると、森林伐採とその他の土地利用変化は、5.7 GtCO₂/年(2010年から2019年までの平均)の排出に寄与した。2010年から2019年の期間の人間活動による排出のうち、約46%が大気、23%が海洋、31%が陸上に蓄積され、0.4%は蓄積先が特定されなかった残差である[15]。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(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%⁽⁴⁾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[16]。現場観測によるメタンの2020年の世界平均濃度は、解析開始以来の最高値を更新する1889±2 ppbであり、前年から11 ppb増加した(図7)。この増加は2018年から2019年までの増加量(8 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2020年に工業化以前(約722 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。

最近の研究では、メタンの排出を緩和することによる短期的な気候変動への便益と費用対効果が指摘されている[17]。国連環境計画(UNEP)のメタン・アセスメントでは、いくつかの緩和策が提示されている[18]。

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%⁽⁴⁾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60%)と人間活動(約40%)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2020年の世界平均濃度は333.2±0.1 ppbであり、前年から1.2 ppb増加して(図8)、工業化以前(270 ppb)の123%となった。2019年から2020年までの増加量は、2018年から2019年までの増加量より大きく、最近10年間の平均年増加量(0.99 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⁽⁶⁾/年となった。農業は、窒素肥料の使用により、すべての人為起源の一酸化二窒素排出量の70%を占める。この増加が、主に大気蓄積の増加の原因である[19]。

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(CFC)類は、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%⁽⁴⁾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(HCFC)類やハイドロフルオロカーボン(HFC)類のいくつかは、今のところ量は少ないものの(ppm⁽⁷⁾の水準)、比較的急速に増加している。現在のフロン類の観測ネットワークは、即時的な方法

で重要な排出源を決定するには不十分である[20]。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。現在の大气中の濃度は1990年代半ばに比べて2倍以上に増加している(図9(a))。

この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[21]。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[9]。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

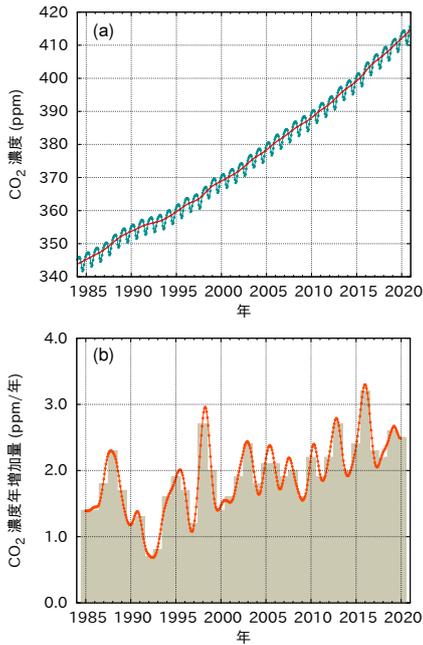


図6 二酸化炭素の1984年から2020年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は139地点。

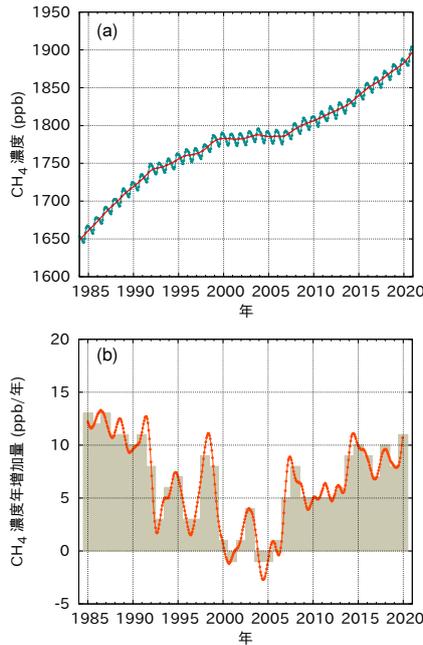


図7 メタンの1984年から2020年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は138地点。

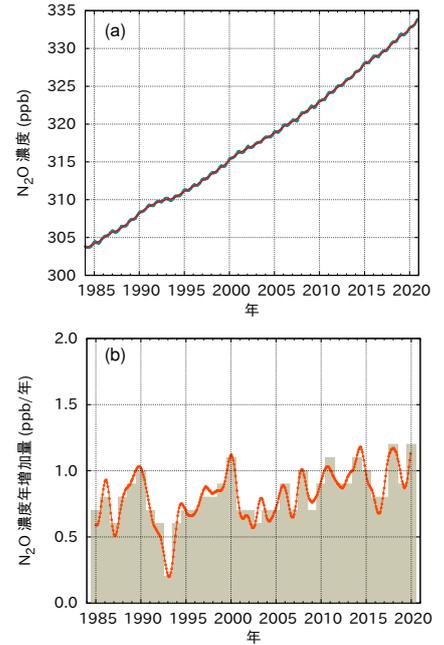


図8 一酸化二窒素の1984年から2020年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a)の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す青点と重なっている。この解析に使用した観測点は105地点。

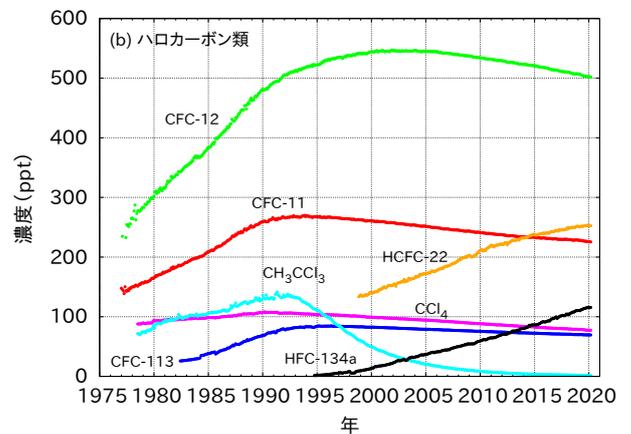
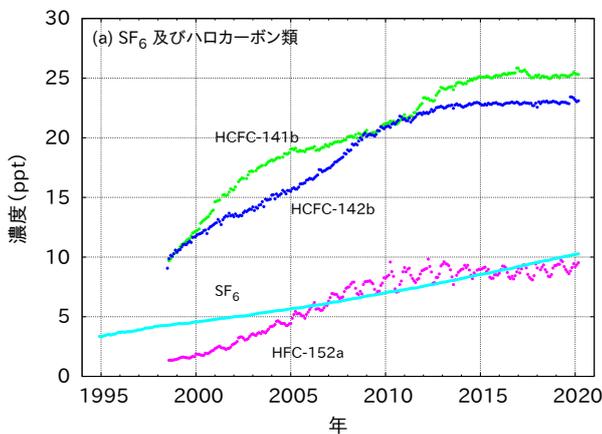


図9 六フッ化硫黄(SF₆)及び主要なハロカーボン類の月平均濃度 (a)六フッ化硫黄及び低濃度のハロカーボン類、(b)高濃度のハロカーボン類。解析に使用した地点数は、SF₆(88)、CFC-11(23)、CFC-12(25)、CFC-113(22)、CCl₄(22)、CH₃CCl₃(25)、HCFC-141b(10)、HCFC-142b(15)、HCFC-22(14)、HFC-134a(11)、HFC-152a(10)。

である。ここ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[22]。

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40%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、GAWレポートNo.255 [23] 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(<https://gaw.kishou.go.jp/>)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, <https://gawsis.meteoswiss.ch/>)にも掲載されている。この年報は、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)

Luana Basso (National Institute for Space Research, Brazil), Andy Croftwell (NOAA Global Monitoring Laboratory and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, United States of America), Han Dolman (Vrije Universiteit Amsterdam, Netherlands), Luciana Gatti (National Institute for Space Research, Brazil), Christoph Gerbig (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), David Griffith (University of Wollongong, Australia), Bradley Hall (NOAA Global Monitoring Laboratory, United States of America), Armin Jordan (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Paul Krummel (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Markus Leuenberger (University of Bern, Switzerland), Zoë Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Sara Mikaloff-Fletcher (GNS Science, Manaaki Whenua – Landcare Research, and University of Waikato, New Zealand), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, WDCGG, Japan), Michael Schibig (University of Bern, Switzerland), Oksana Tarasova (WMO), Jocelyn Turnbull (GNS Science, New Zealand/Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, United States of America), Alex Vermeulen (ICOS ERIC/Lund University, Sweden).

参考文献

- [1] Bennesen, M., E. Hillebrand and S.J. Koopman, 2019: Trend analysis of the airborne fraction and sink rate of anthropogenically released CO₂. *Biogeosciences*, 16: 3651-3663, <https://doi.org/10.5194/bg-16-3651-2019>.
- [2] Ciavarella, A. et al., 2021: Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Climatic Change*, 166: 9, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>.
- [3] Jiang, L.Q., et al., 2019. Surface ocean pH and buffer capacity: past, present and future. *Scientific Reports*, 9:18624, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55039-4>.
- [4] Caesar, L. et al., 2021: Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14: 118-120, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>.
- [5] Manning, A. and R.F. Keeling, 2006: Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 58(2): 95-116, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00175.x>.
- [6] GCOS, 2021: The Status of the Global Climate Observing System 2021: *The GCOS Status Report*, (GCOS-240), WMO, Geneva.
- [7] Schibig, M.F., 2015: Carbon and oxygen cycle related atmospheric measurements at the terrestrial background station Jungfraujoch. PhD thesis, University of Bern.
- [8] Butler, J.H. and S.A. Montzka, 2020: The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). NOAA, Earth System Research Laboratories, Global Monitoring Laboratory, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [9] IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte et al., eds.). Cambridge University Press, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- [10] NOAA, Earth System Research Laboratories, Global Monitoring Laboratory, 2020: Trends in atmospheric carbon dioxide, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [11] Tsutsumi, Y. et al., 2009: *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. Geneva, WMO, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12631.
- [12] Hall, B.D. et al., 2021: Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) CO₂ calibration scale. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14: 3015-3032, <https://doi.org/10.5194/amt-14-3015-2021>.
- [13] Le Quéré, C. et al., 2020: Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, 10: 647-653, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.

[14] International Energy Agency, 2021: Global energy review: CO₂ emissions in 2020, <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>.

[15] Friedlingstein, P. et al., 2020: Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4): 3269-3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.

[16] Saunio, M. et al., 2020: The Global Methane Budget 2000-2017. *Earth System Science Data*, 12(3): 1561-1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.

[17] Nisbet, E.G. et al., 2020: Methane mitigation: methods to reduce emissions, on the path to the Paris Agreement. *Reviews of Geophysics*, 58(1): e2019RG000675, <https://doi.org/10.1029/2019RG000675>.

[18] UNEP and Climate and Clean Air Coalition, 2021: *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Nairobi, UNEP, <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>.

[19] Tian, H. et al., 2020: A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586: 248-256, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>.

[20] Weiss, R.F., A.R. Ravishankara and P.A. Newman, 2021: Huge gaps in detection networks plague emissions monitoring. *Nature*, 595: 491-493, <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01967-z>.

[21] WMO, 2018: *WMO Reactive Gases Bulletin: Highlights from the Global Atmosphere Watch Programme*, No. 2, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20667#_YWcnpbj0njZ.

[22] WMO, 2021: *WMO Air Quality and Climate Bulletin*, No. 1, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21942.

[23] WMO, 2020: *20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques* (GGMT-2019). GAW Report No. 255. Geneva, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10353.

[24] Henne, S. et al., 2008: Mount Kenya Global Atmosphere Watch station (MKN): installation and meteorological characterization. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11): 2946-2962, <https://doi.org/10.1175/2008jamc1834.1>.

[25] New Zealand Ministry for the Environment, 2021: *New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990-2019* Wellington, <https://environment.govt.nz/publications/new-zealands-greenhouse-gas-inventory-1990-2019/>.

[26] IPCC, 2019: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.

[27] Steinkamp, K. et al., 2017: Atmospheric CO₂ observations and models suggest strong carbon uptake by forests in New Zealand. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(1): 47-76, <https://acp.copernicus.org/articles/17/47/2017/>.

[28] Gatti, L.V. et al., 2021: Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595: 388-393, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

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) 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。
- (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。
- (5) 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。
- (6) 1 TgNI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 TgNI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。

(付録)年報中の主な用語

放射強制力: 地球・大気システムに出入りするエネルギーのバランスを変化させる影響力の尺度で、気候を変化させる能力の大きさを示す。1平方メートル当たりのワット数(W m⁻²)で表す。

日本語訳について

このWMO温室効果ガス年報第17号(気象庁訳)は、WMOが2021年10月25日に発行したWMO Greenhouse Gas Bulletin No. 17を気象庁が翻訳したものである。

発行 2021年12月2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

ケニア山観測所(MKN)

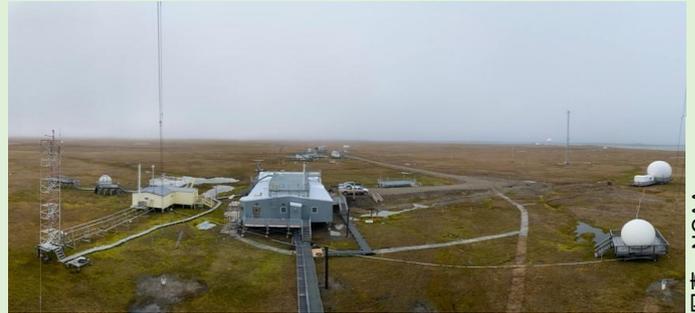


写真：WMO

GAW ケニア山観測所(観測所識別子:MKN)は、シリモンルートに近いケニア山の北西斜面に位置し、ティマウヒルから南西に約 5 km、200 m 下にある[24]。この観測所は、ケニア気象庁(ナイロビ)により運用されている。この観測所の目的は、アフリカの赤道域における温室効果ガスとエアロゾルの長期的な観測を行うこと、及び、農業による焼畑や森林伐採の活動が地域的なオゾンの増加に与える影響を評価することである。ケニア山は、火山起源の孤立したほぼ円錐形の山で、周囲の前地(海拔 1800~2000 m)から海拔約 4300 m まで緩やかに上昇している。この地域は、1949 年からケニア山国立公園の一部として保護されており、1997 年には世界遺産に指定された。

この観測所は、移動式の 2 つのコンテナの建物として設計されており、ドイツ連邦共和国のカルスルーエ研究センター(FZK)気象気候研究所大気環境研究部により準備され、ユニット全体としてケニア共和国に輸送され、稼働が開始された。この観測所は 1999 年 10 月に正式に発足した。CO、CO₂、N₂O、CH₄、H₂、SF₆ 及び水素と酸素の同位体を分析するため、NOAA 全球監視研究所(GML)と協同でフラスコサンプリングが開始された。機器の較正は、スイス連邦材料試験研究所(EMPA)によって 2 年に 1 度行われる。観測所への電力供給は、熱帯雨林を通して設置された 26 km の送電線によって行われている。

バロー大気基準観測所(BRW)



写真：NOAA

1973 年に正式に設立されたバロー大気基準観測所(BRW)は、NOAA の最北端に位置する観測所であり、北極圏で最も長く継続して運用されている大気気候観測所である。アラスカ州ウトキアグヴィク市(旧バロー市)の北東 8 km に位置するバロー大気基準観測所は、地域的な大気汚染源の影響を受けていない大気を観測することができる人里離れた地域に、意図的に人間の居住地の風上側に設置されている。

当初の 74 m² の観測棟は 1973 年に建設され、設置期間中に数多くの気候関連の長期観測やキャンペーン形式の実験が行われてきた。47 年後、この建造物は研究者のニーズを満たさなくなり、2020 年に 273 m² の新しい本館と補助棟に置き換えられた。新施設には、ルーフデッキ、30 m の観測塔、6 m の金属製輸送コンテナ 2 式を収納できる大きさのキャンペーン用科学プラットフォーム、2020 年後半に新棟に移設された、アメリカ合衆国本土の機器への高速光ファイバー接続などが含まれている。現在、バロー大気基準観測所は、大気組成、気候、太陽放射、エアロゾル及び成層圏オゾンなどの研究を可能にする 200 以上の観測を支援している。



所在

所属国:ケニア共和国

南緯:0.0622°

東経:37.2922°

標高:3644 m

標準時間帯:

現地時間=協定世界時+3 時間



所在

所属国:アメリカ合衆国

北緯:71.323°

西経:156.611°

標高:11 m

標準時間帯:

現地時間=協定世界時-9 時間

