

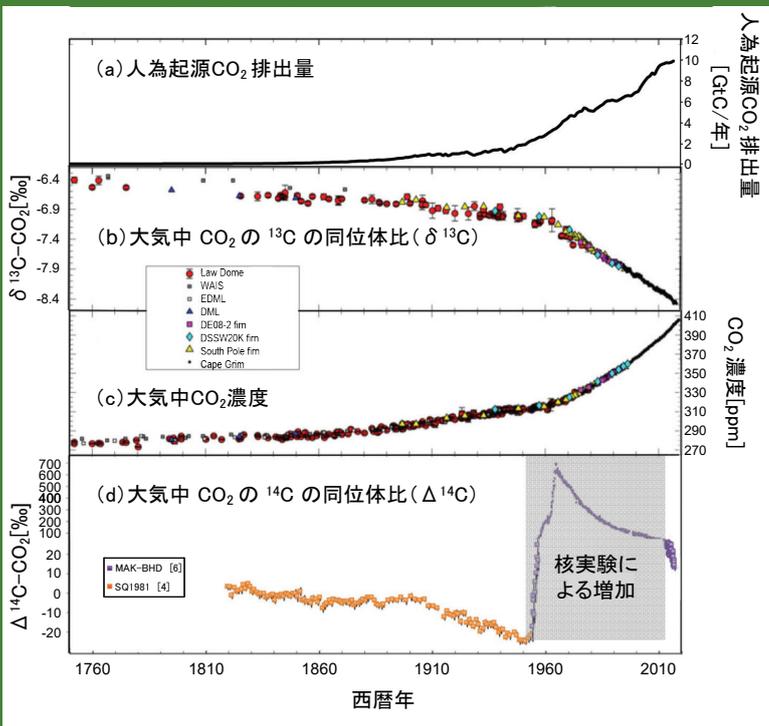


WMO 温室効果ガス年報

2018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15号 | 2019年11月25日

同位体により大気中二酸化炭素濃度増加の主要因が化石燃料燃焼であることが確認された



の結果、少量ではあるが検出可能な量の ^{14}C が大気中 CO_2 及び CO を元に生成された植物由来の物質に含まれる。化石燃料は数百万年～数億年もの昔に植物由来の物質から生成されたため、植物が生きていた時に取り込まれた ^{14}C は全て地殻に滞留している間に崩壊している。

^{13}C は安定同位体であり、化石燃料中の ^{13}C の含有量は時間経過による変化がない。しかしながら、化石燃料を形成する植物は ^{12}C を ^{13}C より優先的に取り込むため、化石燃料には現在の大気中 CO_2 よりも少ない ^{13}C しか含まれない。そのため、化石燃料燃焼は大気中 CO_2 の ^{13}C の含有量の減少をもたらす。

左図は、1760年からの CO_2 の排出量(a) [1, 2]、氷床コアに閉じ込められた空気及びオーストラリアのケープグリムで採取された空気の ^{13}C の同位体比(b)及び大気中濃度(c) [3]、樹木の年輪[4, 5]及びニュージーランドのウェリントンで採取された空気[6]による大気中 CO_2 の ^{14}C の同位体比(d)の経年変化を示す。人為的排出が増加した結果、大気中の CO_2 濃度も増加した。同時に、大気中 CO_2 の ^{13}C 及び ^{14}C の同位体比が減少しており、これは、大気に放出された化石燃料起源の CO_2 に ^{14}C が含まれないことと、 ^{13}C の同位体比が現在の大気に比べて小さいことによる。 CO_2 増加に伴う ^{13}C 及び ^{14}C の同位体比の同時減少は、化石燃料燃焼からの継続的な CO_2 放出でしか説明できない。

大気中の核実験により ^{14}C が生成されたことで、大気中の ^{14}C は1960年代初めには2倍近くまで増加し、大気中 CO_2 に含まれる ^{14}C の化石燃料のシグナルは埋もれてしまった(左図(d))。そのため、1950年代の初め以降、 ^{14}C は化石燃料の検出に利用できなくなった。しかしながら、この人為的な ^{14}C の急増は、現在では炭素循環の全体で概ね落ち着いてきている。1990年代以降は、 ^{14}C が再び化石燃料起源 CO_2 の検出に役立つようになり、現在では化石燃料起源 CO_2 の排出量を大気測定により評価する主要な方法となっている。例えば、植物由来の物質あるいは直接大気から得られた大気中 ^{14}C 測定を用いて、化石燃料起源 CO_2 の放出域の分布状況が、世界の広域にわたって得られている[7, 8]。

大気中の二酸化炭素(CO_2)に含まれる放射性炭素(^{14}C)の測定は、 CO_2 の放出源が化石燃料燃焼か自然起源のどちらであるかを区別する特有の方法である。 CO_2 と ^{14}C の同時観測は、化石燃料燃焼による大気への CO_2 放出によって、大気中 CO_2 の ^{14}C 含有量の減少がもたらされたことを明確に示している。この発見は、WMO 全球大気監視(GAW)計画に関わる大気組成の長期的観測が、温室効果ガスの放出起源識別の助けとなる点において重要であることを示す例となっている。

自然界には3種類の炭素同位体が知られており、 ^{12}C (全炭素のおよそ99%)、 ^{13}C (およそ1%)及び ^{14}C (およそ1兆分の1)がある。全ての炭素同位体は炭素循環のあらゆる場所に存在しているが、異なる炭素貯蔵庫に含まれる同位体の相対比は異なり、これが各貯蔵庫特有のいわば「指紋」となっている。それゆえ、大気中 CO_2 の同位体組成の測定は、放出源及び吸収源の識別や定量化をする助けとなる。

$^{14}\text{CO}_2$ は大気上層で宇宙線によりごく少量生成される。 ^{14}C は放射性同位体であり5,700年の半減期で徐々に崩壊する。そ

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、2018 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、407.8±0.1 ppm⁽²⁾、1869±2 ppb⁽³⁾、331.1±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 (1750 年) 以前の、それぞれ 147%、259%、123% である。二酸化炭素の 2017 年から 2018 年までの濃度増加量は、2016 年から 2017 年までの増加量に非常に近く、最近 10 年間の平均年増加量とほぼ同じだった。メタンの 2017 年から 2018 年までの濃度増加量は、2016 年から 2017 年までの増加量及び最近 10 年間の平均年増加量より大きかった。一酸化二窒素の 2017 年から 2018 年までの濃度増加量も、2016 年から 2017 年までの増加量及び最近 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) [9]によると、1990 年から 2018 年までに、長寿命の温室効果ガス (LLGHG) による放射強制力は 43% 増加しており、二酸化炭素がそのうちの約 81% を占める。

2018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15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%⁽⁴⁾ [9]を占める (図1)。

GAW計画 (<http://www.wmo.int/gaw/>) 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2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 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。

主な3種の長寿命温室効果ガスの2018年の大気中濃度の世界平均と、2017年から、及び1750年からの濃度変化を表1に示す。移動体観測によるデータ (図2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1の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

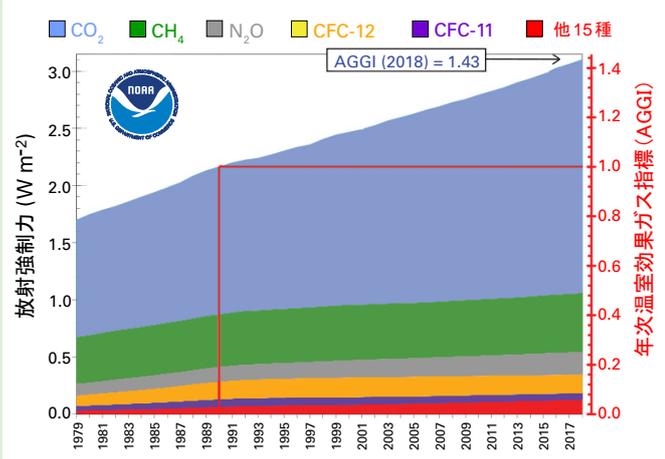


図1 長寿命の温室効果ガスによる放射強制力 (1750年を基準) の経年変化と2018年のNOAA年次温室効果ガス指標 (AGGI) [9]。

表1 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 (2018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 [12]。平均手法は、GAWレポートNo.184 [11] に記載している。本解析に使用した観測点数は、CO₂ (129地点)、CH₄ (127地点)、N₂O (96地点)。

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
世界平均濃度 (2018 年)	407.8±0.1 ppm	1869±2 ppb	331.1±0.1 ppb
1750 年と比較した存在比 *	147%	259%	123%
2017 年から 2018 年までの増加量	2.3 ppm	10 ppb	1.2 ppb
2017 年からの増加分の比率	0.57%	0.54%	0.36%
世界平均濃度の最近 10 年間の平均年増加量	2.26 ppm/年	7.1 ppb/年	0.95 ppb/年

* 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。

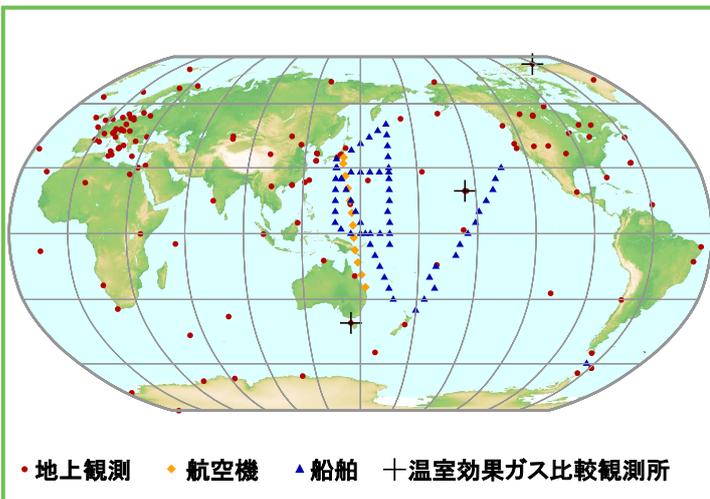


図2 GAW 観測ネットワークを構成する最近10年間の二酸化炭素観測地点。メタンの観測ネットワークもこれと同様である。

利用されている。WMO が推進する統合全球温室効果ガス情報システム (IG³IS, <https://ig3is.wmo.int/>) は、国や地方行政区レベルで温室効果ガスの放出源についての更なる見識を与える。

2018 年の NOAA 年次温室効果ガス指標 (AGGI) [9] は 1.43 で、長寿命温室効果ガスによる放射強制力の合計は、1990 年以降 2018 年までに 43%⁽⁴⁾、2017 年からは 1.8% 増加した (図 1)。2018 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 (3.1 W m⁻²) は、二酸化炭素等価換算濃度で 496 ppm に相当する [9]。

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全体 (3.1 W m⁻²) 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 年間では約 81% 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 2018 年の世界平均濃度は 407.8 ± 0.1 ppm となった (図 3)。2017 年から 2018 年までの年平均値の増加量 (2.3 ppm) は、2016 年から 2017 年までの増加量に非常に近く、最近 10 年間の平均年増加量 (2.26 ppm/年) とほぼ同じだった。

大気中の二酸化炭素濃度は、2018 年に工業化以前の 147% 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 (2018 年の化石燃料による二酸化炭素排出量の予測は 36.6 ± 1.8 GtCO₂⁽⁵⁾ [13]) 及び森林伐採とその他の土地利用変化

(2009 年から 2018 年までの平均で 1 年あたり 5.5 GtCO₂) からの放出による結果である。2009 年から 2018 年の期間の人間活動による放出のうち、約 44% が大気、23% が海洋、29% が陸上に蓄積され、4% は蓄積先が特定されなかった残差である [13]。化石燃料の燃焼により放出され大気中に残留する二酸化炭素の比率 (大気残留比) 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。

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 17%⁽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 (畜牛、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 [14]。現場観測によるメタンの 2018 年の世界平均濃度は、解析開始以来の最高値を更新する 1869 ± 2 ppb であり、前年から 10 ppb 増加した (図 4)。この増加は 2016 年から 2017 年までの増加量 (7 ppb/年) 及び最近 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、大気中のメタン濃度は増加しており、人為的な放出増加を反映して工業化以前 (約 722 ppb) の 259% 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 (放出源推定に役立つ同位体を用いた研究については次ページを参照のこと)。

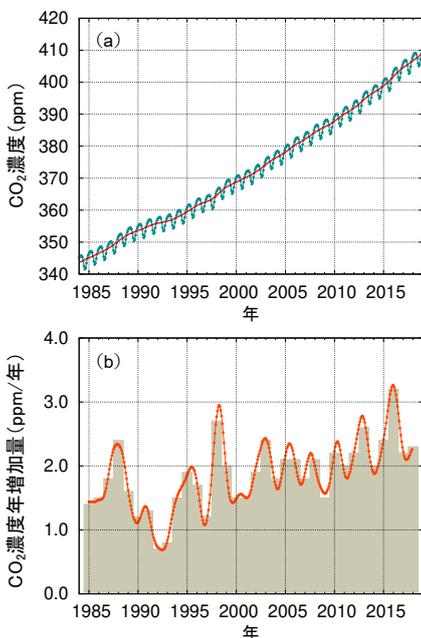


図3 二酸化炭素の1984年から2018年までの (a) 世界平均濃度と (b) その一年あたりの増加量。(b) の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a) の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は129地点。

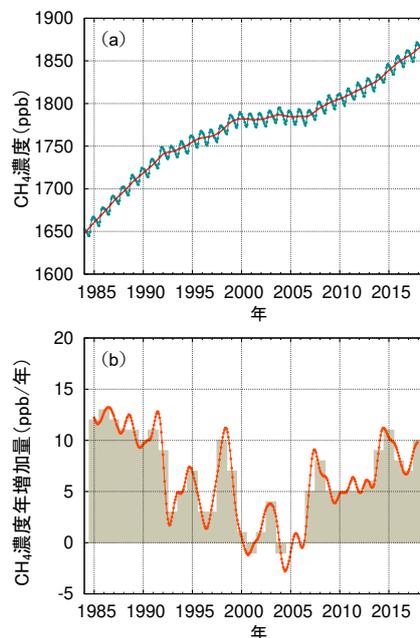


図4 メタンの1984年から2018年までの (a) 世界平均濃度と (b) その一年あたりの増加量。(b) の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a) の赤線は季節変動を除いた月平均値、線で結んだ青点は月平均値を表す。この解析に使用した観測点は127地点。

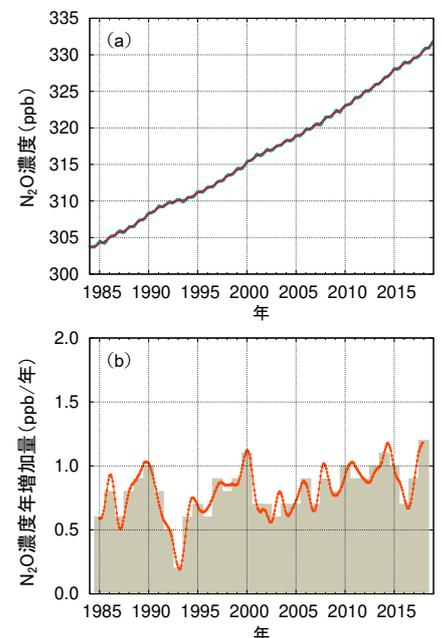


図5 一酸化二窒素の1984年から2018年までの (a) 世界平均濃度と (b) その一年あたりの増加量。(b) の塗りつぶし棒グラフは前年からの濃度差。(a) の赤線は季節変動を除いた月平均値で、この図では月平均値を表す青点と重なっている。この解析に使用した観測点は96地点。

全球メタン濃度変動の解明に向けた安定同位体の利用

大気中メタンは、第二の重要な人為起源温室効果ガスである。図6に示したように、メタンは長寿命温室効果ガスによる工業化以降の放射強制力全体の約17%を占めている。

Dlugokencky 他[18]の報告のように、大気中メタンの放出源はその種類によって炭素及び水素の同位体(それぞれ ^{13}C 、重水素(D))が周囲の空気より多い場合と少ない場合があり、同位体測定はメタン放出源に関する有用な情報をもたらす(図7)。高温下(燃焼)で生成されたメタンはより重い同位体を多く含み、生物起源のメタンでは少ない。湿地のような生物起源の放出源では、 ^{13}C の同位体比($\delta^{13}\text{C}$)は北半球高緯度で $-70\sim-60\%$ 、熱帯域で $-60\sim-50\%$ である。C3植物とC4植物^(訳注1)では、光合成過程の違いにより大きく異なる有機炭素の同位体特性を持ち、これらが燃焼または消化された際に放出されるメタンは異なる同位体比を持つ。それゆえ、サバンナのC4植物の草原火災は $\delta^{13}\text{C}$ が $-20\sim-15\%$ のメタンを放出し、一方で寒帯の森林火災は $-30\sim-25\%$ のメタンを放出する。同様に、C4植物を消化する反芻動物が $-55\sim-50\%$ のメタンを放出する一方で、C3植物を食する反芻動物は $-65\sim-60\%$ のメタンを放出する。天然ガス産業は、天然ガスが形成された温度(生物分解起源または熱分解起源)に依存して、さまざまな同位体比をもったメタンを生産する。その結果、ガス供給網ごとの同位体比は、ロシアのパイプラインでおよそ -50% 、北海でおよそ -35% と異なり、 -25% となるものもある。

同位体測定は、2007年以降のメタン濃度の再増加について有益な洞察を与える。図8は、近年の全球メタン濃度及び $\delta^{13}\text{C}$ の変化を詳細に示している。2007年以降の大気中メタンの炭素同位体比の変化は、放出源と吸収源の収支に重要な変化があったことを示唆している。1980年代に、実際は過去200年間にわたってもそうであるが、メタンの $\delta^{13}\text{C}$ は増加方向(相対的に ^{13}C が増加)に継続的な変化をしており、これはガスの

漏出と石炭起源の放出を示している[20]。その一方で、2007年以降の大気中メタンの増加では、 $\delta^{13}\text{C}$ は減少(相対的に ^{12}C が増加)している[21]。

Nisbet 他[22]によると複数の仮説が提唱されているが、最も有力な仮説は、 ^{13}C が相対的に少ない生物起源の放出源(湿地、反芻動物、廃棄物)のいくつかまたは全てからの放出が増加し、全球放出量に対する微生物起源の放出量の割合が増加したことが、メタン濃度の増加及び $\delta^{13}\text{C}$ の変化の両方をもたらしたかもしれないというものである。

他の可能な説明は、天然ガス及び石油の採掘からの排出が増加したというものである。この仮説は、次の(a)~(c)のいずれかを満足する場合のみ、観測された同位体比の変化と矛盾しない。(a)既知の値と比べて著しく小さな $\delta^{13}\text{C}$ を持つ新たな化石燃料起源の放出があった場合、(b)化石燃料起源よりも大きな $\delta^{13}\text{C}$ を持つ他の放出源(例えばバイオマス燃焼)からの放出減少が同時に起きた場合、(c)両者が発生した場合である。この仮説を証明するにはより複合的な研究を必要とする。

大気測定はこの複雑な問題を解くための重要な情報を与える。しかし、それぞれの放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の値には幅があり、異なる放出源で値が重なることがあるため(図7)、科学研究の最重要課題は残されたままである。メタンの同位体測定は、観測地点が少なく、小さなシグナルの検出に多大な労力を要する。メタンの $\delta^{13}\text{C}$ 測定の国際比較を推進する新たな取り組みが最近始まっているものの、近年のメタン濃度増加の要因を完全に理解するためには、さらに高密度なメタン同位体の観測網が必要である。WMO加盟国の同位体組成測定技術力向上のため、WMOは国際原子力機関との共同技術事業である「大気中温室効果ガスの起源探求のための安定同位体技術の幅広利用への能力開発」を進めている。

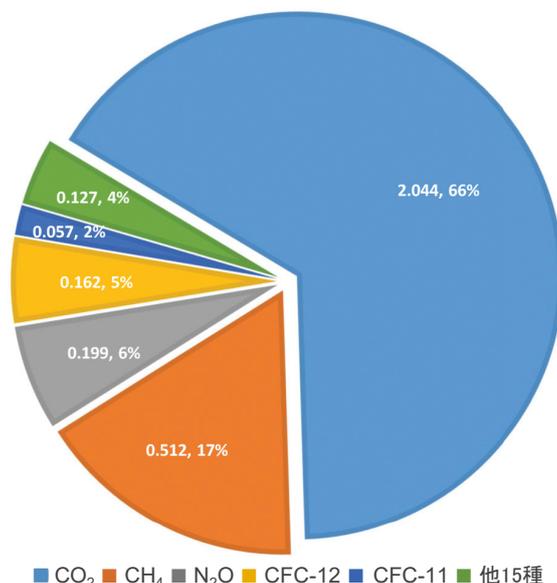


図6 主要な長寿命温室効果ガスの大気中濃度の増加による工業化前から2018年までの全球の放射強制力(単位は W m^{-2})。全ての温室効果ガスによる放射強制力の合計(3.1 W m^{-2})に対する割合も示している[9]。

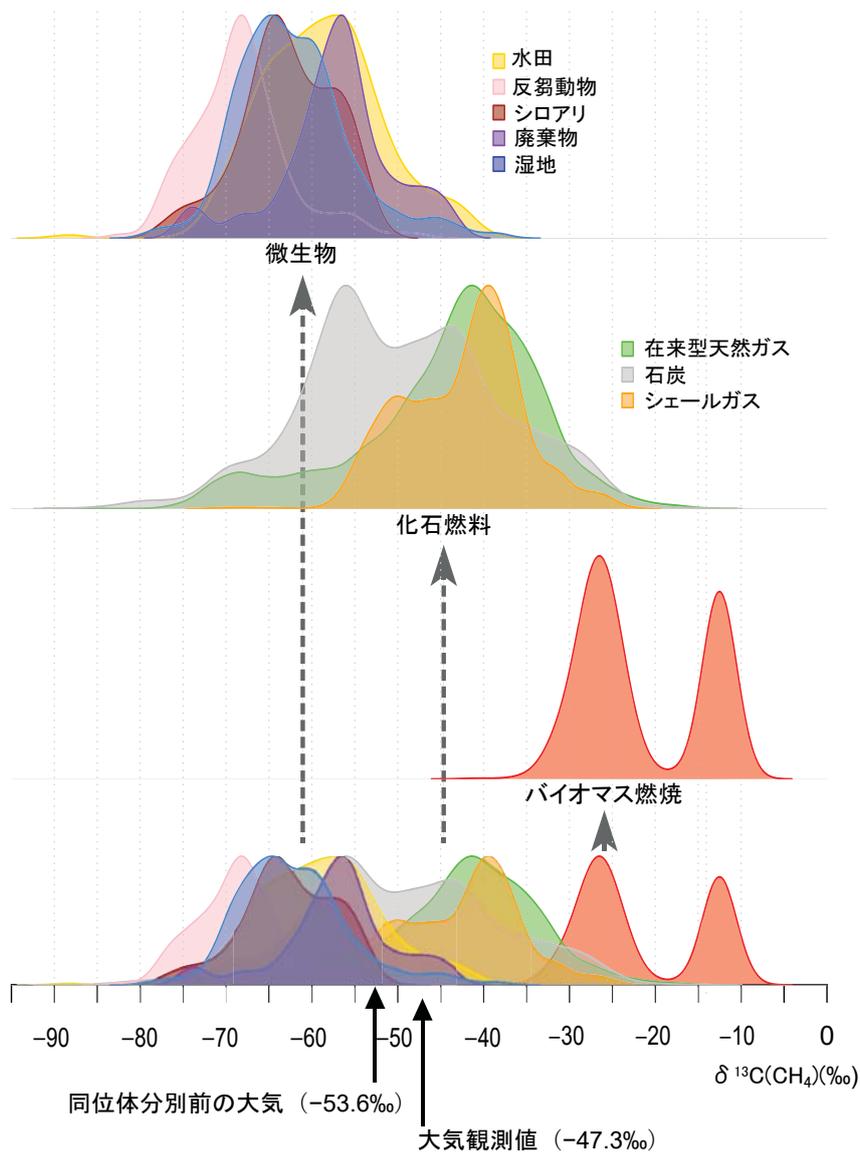


図 7 放出源ごと(微生物起源、化石燃料起源、バイオマス燃焼起源)のメタンの同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ の規格化された確率密度分布。全放出源のフラックスの重み付き平均は、大気中 $\delta^{13}\text{C}$ の測定値と光化学過程によるメタン消滅の際に生じる同位体分別効果から推測した同位体分別前の大気中メタンの $\delta^{13}\text{C}$ の平均値 -53.6‰ で与えられる[19]。

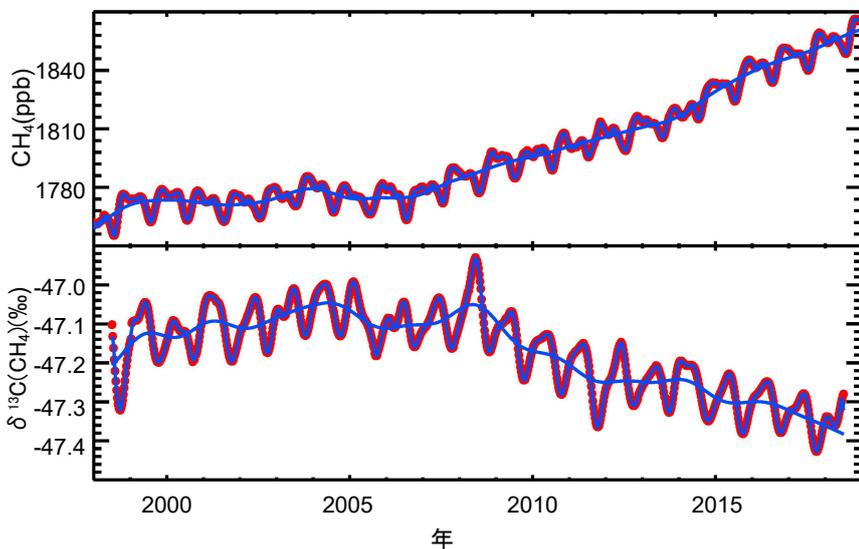


図 8 放出源から離れた海洋性の対流圏大気中のメタンの地表面における観測値 (Nisbet 他, 2019 [22]による)。上図及び下図は、それぞれ大気中メタンの地表面における全球平均の濃度及び $\delta^{13}\text{C}$ を示す。重なった赤と青の線は週ごとの観測値、単独の青線は季節変動を除いた成分を表す。NOAA 観測ネットワークのデータによる。

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6%⁽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2018年の世界平均濃度は331.1±0.1 ppbであり、前年から1.2 ppb増加して(図5)、工業化以前(270 ppb)の123%となった。2017年から2018年までの増加量は、2016年から2017年までの増加量及び最近10年間の平均年増加量(0.95 ppb/年)より大きかった。大気中の一酸化二窒素濃度の増加は、農業における肥料の使用の増加と、大気汚染物質由来の大気中窒素が過剰に沈着することにより、土壌からの一酸化二窒素放出が増加したことが原因である可能性が高い[15]。

他の温室効果ガス

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CFC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(ppt⁽⁶⁾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))。

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[16]。その他多くの汚染物質(一酸化炭素、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。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。

謝辞とリンク

WMO加盟国のうちの54か国が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41%がNOAA地球システム調査研究所(ESRL)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.242[17]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観測所は、図2に示すとともに、WDCGGウェブサイト(<http://gaw.kishou.go.jp/>)の一覧表に掲げる。また、スイス気象局によって運営されるGAW観測所情報システム(GAWSIS, <https://gawsis.meteoswiss.ch/GAWSIS/>)にも掲載されている。

参考文献

- [1] Boden, T.A., R.J. Andres et al., 2017: Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions (1751–2014) (V. 2017). Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, https://doi.org/10.3334/CDIAC/00001_V2017.
- [2] BP, 2019: BP Statistical Review of World Energy, 2019, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- [3] Rubino, M., D.M. Etheridge et al., 2019: Revised records of atmospheric trace gases CO₂, CH₄, N₂O, and δ¹³C-CO₂ over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. *Earth System Science Data*, 11(2), 473–492, <https://doi.org/10.5194/essd-11-473-2019>.
- [4] Stuiver, M. and P.D. Quay, 1981: Atmospheric ¹⁴C changes resulting from fossil fuel CO₂ release and cosmic ray flux variability. *Earth and Planetary Science Letters*, 53, 349–362.
- [5] Levin, I. and V. Heshshaimer, 2000: Radiocarbon: a unique tracer of global carbon cycle dynamics. *Radiocarbon*, 42(1), 69–80, <https://doi.org/10.1017/S0033822200053066>.
- [6] Turnbull, J.C., S.E. Mikaloff Fletcher et al., 2017: Sixty years

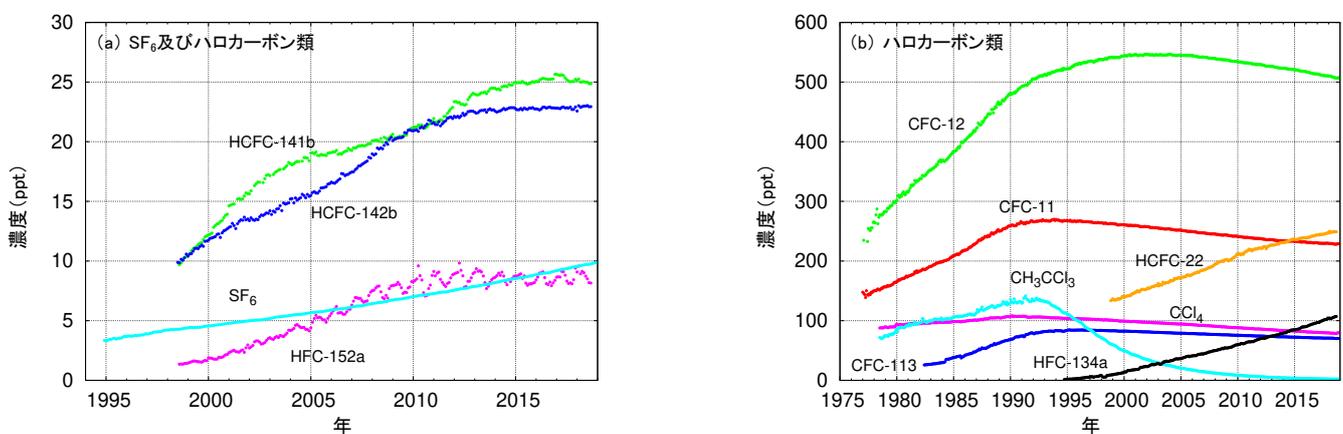


図9 六フッ化硫黄(SF₆)及び主要なハロカーボン類の月平均濃度。(a)六フッ化硫黄及び低濃度のハロカーボン類、(b)高濃度のハロカーボン類。解析に使用した地点数は、SF₆(85)、CFC-11(23)、CFC-12(25)、CFC-113(21)、CCl₄(22)、CH₃CCl₃(24)、HCFC-141b(9)、HCFC-142b(14)、HCFC-22(13)、HFC-134a(10)、HFC-152a(9)。

- of radiocarbon dioxide measurements at Wellington, New Zealand: 1954–2014. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(23), 14771–14784, <https://doi.org/10.5194/acp-17-14771-2017>.
- [7] Shibata, S., E. Kawano and T. Nakabayashi, 2005: Atmospheric [¹⁴C]CO₂ variations in Japan during 1982–1999 based on ¹⁴C measurements of rice grains. *Applied Radiation and Isotopes*, 63(2), 285–290, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096980430500117X>.
- [8] Hsueh, D.Y., N.Y. Krakauer et al., 2007: Regional patterns of radiocarbon and fossil fuel-derived CO₂ in surface air across North America. *Geophysical Research Letters*, 34(2), L02816, <https://doi.org/10.1029/2006GL027032>.
- [9] Butler, J.H. and S.A. Montzka, 2019: The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI), <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [10] National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, 2019: Trends in atmospheric carbon dioxide, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [11] World Meteorological Organization, 2009: Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Center for Greenhouse Gases (Y. Tsutsumi, K. Mori, T. Hirahara, M. Ikegami and T.J. Conway). GAW Report No. 184 (WMO/TD-No. 1473), Geneva, https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/TD_1473_GAW184_web.pdf.
- [12] Conway, T.J., P.P. Tans et al., 1994: Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network. *Journal of Geophysical Research*, 99:22831–22855, <https://doi.org/10.1029/94JD01951>.
- [13] Friedlingstein, P., M.W. Jones et al., 2019: Global Carbon Budget 2019, *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-2019-183>.
- [14] Saunio, M., A.R. Stavert, B. Poulter et al., 2019: The Global Methane Budget 2000–2017, *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-2019-128>.
- [15] Sutton, M.A., A. Bleeker, C.M. Howard et al., 2013: Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh, UK, Centre for Ecology and Hydrology, <http://www.inms.international/sites/inms.international/files/ONW.pdf>.
- [16] World Meteorological Organization, 2018: WMO Reactive Gases Bulletin: Highlights from the Global Atmosphere Watch Programme, No. 2, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5244.
- [17] World Meteorological Organization, 2018: 19th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2017). GAW Report No. 242, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5456.
- [18] Dlugokencky, E.J., E.G. Nisbet et al., 2011: Global atmospheric methane in 2010: Budget, changes and dangers. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 369, 2058–2072. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0341>.
- [19] Sherwood, O.A., S. Schwietzke et al., 2017: Global Inventory of Gas Geochemistry Data from Fossil Fuel, Microbial and Burning Sources, version 2017. *Earth System Science Data*, 9, 639–656, <https://doi.org/10.5194/essd-9-639-2017>.
- [20] Rice, A.L., C.L. Butenhoff et al., 2016: Atmospheric methane isotopic record favors fossil sources flat in 1980s and 1990s with recent increase. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 113, 10791–10796, <https://doi.org/10.1073/pnas.1522923113>.
- [21] Nisbet, E.G., E.J. Dlugokencky et al., 2016: Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 1356–1370, <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>.
- [22] Nisbet, E.G., M.R. Manning et al., 2019: Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement. *Global Biogeochemical Cycles*, 33, 318–342, <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.

連絡先

世界気象機関 研究部大気環境研究課(ジュネーブ)

E-mail: gaw@wmo.int

Website: <http://www.wmo.int/gaw>

気象庁 温室効果ガス世界資料センター(東京)

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

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

- (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)の二酸化炭素量を表す。なお、3.667 GtCO₂は、1 GtC(炭素換算で10億トン)に相当する。
- (6) 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。

(訳注)

- (1) 光合成の過程において、CO₂が固定されてできる最初の生成物がC3化合物(炭素を3つ含む化合物)の植物をC3植物という。一方、最初の生成物がC4化合物(炭素を4つ含む化合物)の植物をC4植物といい、一部の草本植物が該当し、これらは高い光合成効率を持つ。
- (2) テレビ放送局「PBS Wisconsin」の送信所の一つの「WLEF-TV」のこと。

日本語訳について

このWMO 温室効果ガス年報第15号(気象庁訳)は、WMO が2019年11月25日に発行したWMO Greenhouse Gas Bulletin No. 15を気象庁が翻訳したものである。

発行 2019年12月23日

気象庁 地球環境・海洋部 環境気象管理官

温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)

〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

電話: 03-3212-8341(代表)

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



今回紹介する温室効果ガス観測所

ウィスコンシン州パークフォールズ観測所(LEF)



この大気観測所は米国ウィスコンシン州パークフォールズにある LEF TV^(訳注 2)の電波塔(北緯 45.9451 度、西経 90.2732 度、海拔 472 m)にある。ここはウィスコンシン州教育放送委員会、米国地質調査所及びウィスコンシン大学との共同研究の下、NOAAによって運用されている。高さ 447 mの電波塔は 1994 年 10 月から 25 年間にわたって基準品質となる大気中二酸化炭素を測定するプラットフォームとして役割を果たしており、現在はメタンと一酸化炭素の現場観測、ボルダーにある NOAA の中央施設で 50 種類以上の化合物について分析するための日別の大気試料採取や、地球大気中の二酸化炭素カラム量観測といった、一連の相補的な測定も実施している。LEF のような高層タワーは、大陸で温室効果ガスを監視するための理想的な測定プラットフォームである。タワーには複数の採取口(LEF の場合は地上高 30、122、396 m)があり、境界層の二酸化炭素鉛

直勾配を観測できるため、放出源や吸収源が現地にあるのか遠方にあるのかを区別するのに利用し得る。最上部の採取口は、北アメリカ大陸の広い地域を代表する空気を観測し、大陸地点での局所的過程についての情報を提供し続けている。これらの測定値は、全球モデルにおける局所的過程にとって貴重な情報を提供する。

アマゾン航空機観測プログラム



サン・ジョゼ・ドス・カンポスにあるブラジル国立宇宙研究所(INPE)の地球システム科学センターは、2004 年からブラジルのアマゾン上空で二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、六フッ化硫黄、一酸化炭素の鉛直プロファイル測定を行っている。ブラジルでの鉛直プロファイル観測網は、小型の民間航空機を使用して隔週から月 1 回の間隔で、ブラジル内の観測点上空で複数の高度(0.3~7 km)ごとに大気試料を収集する。観測点は、アマゾンを大気が通過する際の温室効果ガス量の変化を監視し、アマゾンにおける炭素収支の研究を行うために選定されている。現在、サンタレン(南緯 2.86 度、西経 54.95 度)、マナウス(南緯 2.60 度、西経 60.21 度)、リオブランコ(南緯 9.38 度、西経 67.62 度)、アルタフロresta(南緯 8.80 度、西経 56.75 度)、テフェー(南緯 3.39 度、西経 65.6 度)及びパンタナル(南緯 19.49 度、西経 56.38 度)の 6 つの観測点がある。これまで、860

を超える鉛直プロファイルが採取されている。採取されたプロファイルは、気候変動に対するアマゾンの応答に関する重要な情報源となり、熱帯地域での衛星解析値の重要な検証用データとしても利用される。