



WMO  
世界気象機関  
天気・気候・水



GAW  
全球大気監視  
計画

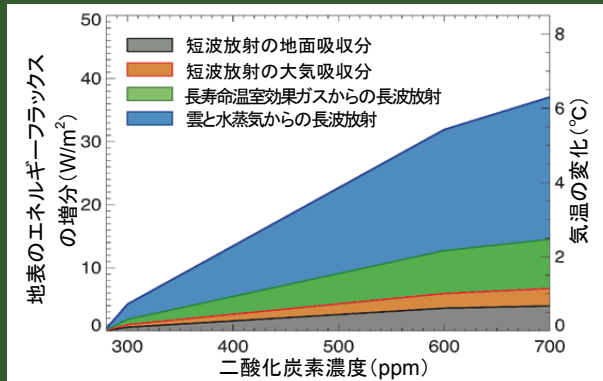
# WMO

(気象庁訳)

# 温室効果ガス年報

2014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11号 | 2015年11月9日



水蒸気と二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は、  
主要な温室効果ガス(GHG)であり、  
二酸化炭素は気候変動の主要な駆動要因である。

水蒸気の変化は、  
主に二酸化炭素の変化に応じて生じる。

水蒸気や二酸化炭素のような大気中に存在するある種のガスは、赤外エネルギーを吸収し、また大気から地表へ向けて再放射する。この過程は温室効果として知られ、ガスが無い場合に比べ地上の平均気温を約 33 度上昇させる。しかし、気候を変える働きに寄与しているのは、非凝結性の温室効果ガス(主には二酸化炭素であり、ほかにメタンや一酸化二窒素、フロン類)の存在である。水蒸気や雲は速応性のフィードバック作用を有し、水蒸気は蒸発、凝結、降水を通じて気温の変化に素早く応答する。全球大気監視(GAW)計画による観測は、これら温室効果ガスの働きを明らかにすることに貢献している。

地球に入射する短波の太陽放射は、大気上端でおよそ 340Wm<sup>-2</sup> の放射エネルギーを供給する。そのうち、30%は主に雲によって宇宙空間へと反射され、20%は大気に吸収され、50%は地表に吸収される。平衡状態では、大気上端で入ってくる短波放射フラックスと出て行く長波放射フラックスは釣り合う。工業化以前の大気の状態では、温室効果のためエ

ネルギーフラックスは地表の方が大気上端より 160Wm<sup>-2</sup> 大きかった。

図に、工業化以前の条件(CO<sub>2</sub> 濃度 280ppm を基点)に対し二酸化炭素の増加に伴う地表でのエネルギーバランスの変化を示す。右側の縦軸は、入射エネルギー(短波放射+長波放射)と放出エネルギー(長波放射)を釣り合わせるために必要な地上気温の上昇幅を示す。

図の緑の領域は、よく混合された長寿命の温室効果ガスの寄与による熱エネルギーの増加量を示しており、そのほとんどが二酸化炭素による。青の領域は、大気中の二酸化炭素濃度の増加に伴う雲と水蒸気によるフィードバックの寄与を示す。水蒸気の強いフィードバックがあるために、工業化以前の大気の状態に対し二酸化炭素濃度が 2 倍(およそ 280ppm から 560ppm<sup>[1])</sup>となるシナリオに対して、水蒸気と雲による地表面の熱エネルギーの増加量は、長寿命の温室効果ガスの寄与による増加量の約 3 倍となる(本節の図は、Lacis et al., (2013)に基づく)。

## 要旨

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、2014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)の世界平均濃度は、それぞれ、397.7±0.1 ppm、1833±1 ppb<sup>[2]</sup>、327.1±0.1 ppbとなり、これまで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143%、254%、121%である。大気中の二酸化炭素の2013年から2014年にかけての濃度増加量は過去10年間の平均増加量に近い。メタンと一酸化二窒素の2013年から2014年の濃度増加量は、2012年から2013年にかけての増加量や最近10年の平均増加量よりも大きい。米国海洋大気庁(NOAA)年次温室効果ガス指標(Annual Greenhouse Gas Index)によると、1990年から2014年までに、長寿命の温室効

果ガス(LLGHG)による放射強制力は36%増加しており、二酸化炭素がそのうちの約80%を占める。

## 概要

このWMO/GAWの温室効果ガス年報第11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、これら以外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>[3]</sup>をもたらしている(図1)。

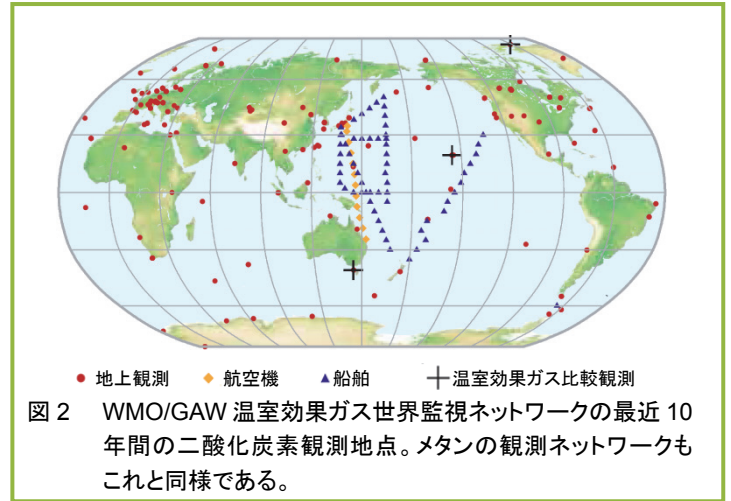
WMO/GAW計画(<http://www.wmo.int/gaw>)は、温室効果ガス及びその他の微量成分の組織的観測及び解析をとりまとめ

ている。過去 10 年間の温室効果ガス監視地点を図 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。

主な 3 種の長寿命温室効果ガスの 2014 年の大気中濃度の世界平均と、2013 年及び 1750 年からの濃度変化を表 1 に示す。この結果は、WMO 世界標準に準拠して観測されたデータセットをもとにした解析(WMO,2009)により得られた。移動観測によるデータは、図 2 で太平洋に青い三角で示す米国海洋大気庁(NOAA)の観測によるものを除き、この解析に使っていない。

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変化を予測するには、その様々な発生源や吸収源、大気中の化学反応についての理解が必要である。GAW の観測成果はこれらのガス及び他の長寿命の温室効果ガスの収支に関して貴重な解明への手掛かりを与えると同時に、温室効果ガスの排出インベントリーの検証と衛星から求めた長寿命の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。

2014 年の NOAA 年次温室効果ガス指標は 1.36 で、長寿命の温室効果ガスによる放射強制力の総計は、1990 年以降 2014 年までに 36%、2013 年からは 1.2%増加した(図 1)。全ての長寿命温室効果ガスによる放射強制力の合計は、CO<sub>2</sub> 等価換算濃度(モル分率)で 481 ppm に相当する(<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi>)。



● 地上観測 ● 航空機 ▲ 船舶 × 温室効果ガス比較観測  
 図 2 WMO/GAW 温室効果ガス世界監視ネットワークの最近 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。

## 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)

二酸化炭素は、大気中で人間活動から排出されるガスの中で最も影響が大きく、長寿命の温室効果ガスによる放射強制力全体の約 65%<sup>[3]</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 83%、最近 5 年間で見ると 82%が二酸化炭素の効果による。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。大気中の二酸化炭素は 2014 年に、産業革命以前の 143%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(<http://www.globalcarbonproject.org>によれば、2013年のこの二つの二酸化炭素排出量はあわせて炭素換算で 99±5 億トン<sup>[5]</sup>)及び森林伐採とその他の土地利用変化(2013年に 9±5 億トン)からの放出によるものである。最近 10 年の大気中の二酸化炭素の増加量は、人間活動によって放出された二酸化炭素量のうち平均して約 44%に相当し、残りの約 56%は海洋や陸上生物圏によって除去された。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自然の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。二酸化炭素の 2014 年の世界平均濃度は 397.7±0.1ppm である(図 3)。2013 年から 2014 年にかけての年平均増加量は 1.9ppm であり、これは 2012 年から 2013 年にかけての増加量や、最近 10 年の平均増加量(約 2.06 ppm/年)よりも小さいが、1990 年代の平均(約 1.5ppm/年)よりも大きい。2014 年の年平均増加量がそれ以前に比べて小さくなったのは、熱帯および亜熱帯地域の陸上生物圏による CO<sub>2</sub> の年吸収量が比較的大きかったためである可能性が非常に高い。

## 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 17%<sup>[3]</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、人間活動(反芻動物、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。人為的な排出が増加した結果、大気中のメタンの濃度は工業化以前の約 722ppb の 254%に達した。2014 年の世界平均濃度は過去最高値を更新する 1833±1ppb であり、前年から 9ppb 増加した(図 4)。年増加量は、1980 年代はじめの約 13ppb/年から減少し、1999 年から 2006 年の間はほぼゼロだった。2007 年以降は熱帯と北半球中緯度からの排出増加

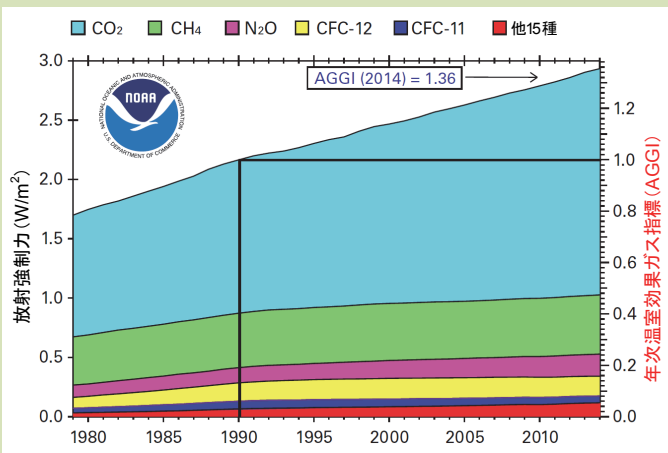


図 1 長寿命の温室効果ガスによる放射強制力(1750 年を基準)の経年変化と 2014 年の NOAA 年次温室効果ガス指標(AGGI)。

表 1 WMO/GAW 世界温室効果ガス監視網による主な温室効果ガスの世界平均濃度と増加量。単位は乾燥空気中のモル分率で誤差幅は 68% の信頼限界による。

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
世界平均濃度(2014 年) <sup>[4]</sup>	397.7±0.1 ppm	1833±1 ppb	327.1±0.1 ppb
1750 年と比較した存在比*	143%	254%	121%
2013 年から 2014 年の増加量	1.9 ppm	9 ppb	1.1 ppb
2013 年からの増加分の比率	0.48%	0.49%	0.34%
世界平均濃度の最近 10 年間の平均年増加量	2.06 ppm/年	4.7 ppb/年	0.87 ppb/年

\* 工業化以前の濃度を、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は 278ppm、メタン(CH<sub>4</sub>)は 722ppb、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)は 270ppb と仮定した。本解析に使用した観測地点数は、次のとおり。CO<sub>2</sub>(122 地点)、CH<sub>4</sub>(123 地点)、N<sub>2</sub>O(33 地点)。



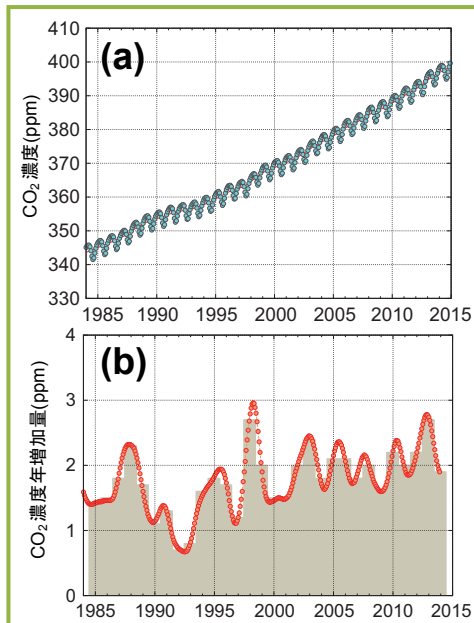


図3 二酸化炭素の1984年から2014年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶしの棒グラフは前年からの濃度差。

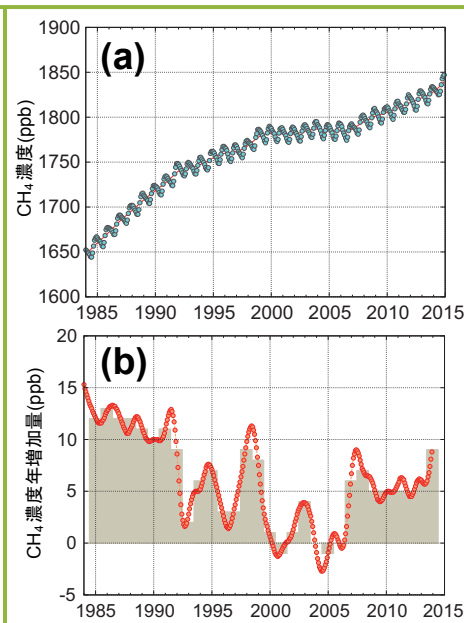


図4 メタンの1984年から2014年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶしの棒グラフは前年からの濃度差。

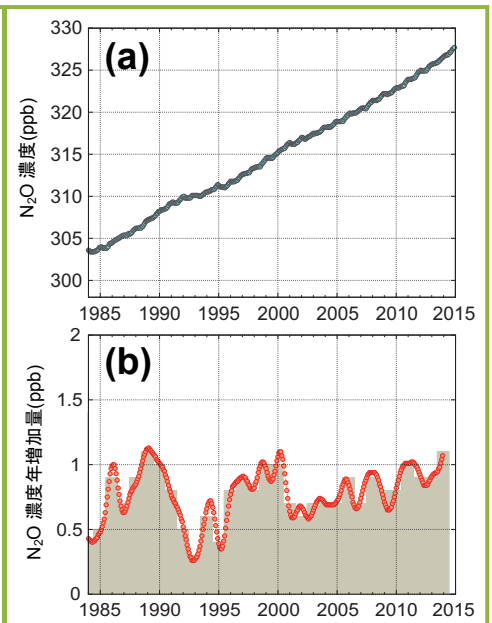


図5 一酸化二窒素の1984年から2014年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)の塗りつぶしの棒グラフは前年からの濃度差。

によって再び大気中のメタン濃度が増加している。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排出増加がその原因である可能性が高い。

## 一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)

一酸化二窒素の濃度増加による放射強制力は、長寿命の温室効果ガス全体の約6%<sup>[3]</sup>を占め、それらの中で3番目に大きな寄与がある。一酸化二窒素は、海洋、土壌、バイオマスの燃焼、施肥及び各種工業過程などを含む、自然起源(約60%)と人間活動(約40%)の両方から放出される。一酸化二窒素の2014年の世界平均濃度(モル分率)は327.1±0.1ppbであり、前年から1.1ppb増加して(図5)、工業化以前(270ppb)の121%である。2013年から2014年にかけての増加量は、最近10年間を平均した年増加量0.87ppb/年よりも大きい。

## 他の温室効果ガス

六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)は、長寿命の強力な温室効果ガスであり、化学工業生産されて主に配電器具の電気絶縁体として使われている。大気中の濃度は1990年代半ばに比べて倍増した(図6(a))。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>[3]</sup>をもたらしている。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)類は、今のところ量は少ない

ものの比較的急速に増加している(ppb<sup>[6]</sup>の水準、図6(a)、(b))。

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(O<sub>3</sub>)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。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、わずかに直接的、あるいは間接的に放射強制力に影響する。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。このようなガス及びエアロゾルも、WMO加盟の各国や協力する観測網から支援を受けて、GAW計画に基づいて観測されている。

## 年報の配布

温室効果ガス年報は、気象庁が運営する温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)とGAW温室効果ガス科学諮問部会の協力のもと、NOAA地球システム研究所(NOAA/ESRL)の支援を得て、世界気象機関(WMO)事務局が作成・配布している。過去に発行されたものも含め、次のページに記載したGAW計画、WDCGGのウェブサイトから取得可能である。

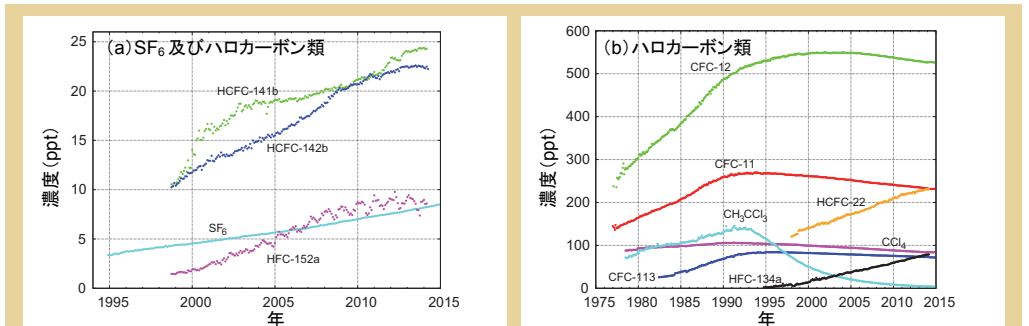


図6 六フッ化硫黄を含むハロゲン化合物類の月平均濃度 (a)六フッ化硫黄及び低濃度のハロカーボン類、(b)高濃度のハロカーボン類 全球解析に使用した地点数は次のとおり。SF<sub>6</sub>(23)、CFC-11(24)、CFC-12(24)、CFC-113(23)、CCl<sub>4</sub>(21)、CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>(23)、HCFC-141b(9)、HCFC-142b(13)、HCFC-22(13)、HFC-134a(9)、HFC-152a(8)。

## 謝辞とリンク

WMO加盟の50カ国がGAWのWDCGG に二酸化炭素の観測データを提供している。GAWに提供されている観測データの約46%がNOAAの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、WMO/IAEA第18回温室効果ガスとその測定に関する会合(GGMT-2011)(GAWレポートNo.206 <http://www.wmo.int/gaw> から入手可)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 観測所について、図2に示すとともに、WDCGGのウェブサイト(<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/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(<http://gaw.empa.ch/gawsis>)にも掲載されている。

## 参考文献

- Lacis, A.A., J.E. Hansen, G.L. Russell, V. Oinas, and J. Jonas, 2013: The role of long-lived greenhouse gases as principal LW control knob that governs the global surface temperature for past and future climate change. *Tellus B*, 65, 19734, doi:10.3402/tellusb.v65i0.19734.
- Conway, T.J., P.P. Tans, L.S. Waterman, K.W. Thoning, D.R. Kitzis, K.A. Masarie and N. Zhang, 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, *J. Geophys. Res.*, 99:22831-22855.
- WMO, 2009: *Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases* (Y. Tsutsumi, K. Mori, T. Hirahara, M. Ikegami and T.J. Conway). GAW Report No. 184 (WMO/TD No. 1473), Geneva, 29 pp.

## 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: AREP-MAIL@wmo.int

Web site: <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

Web site: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/jp>

- [1] ppmは乾燥した空気分子100万個中の当該ガスの分子数
- [2] ppbは乾燥した空気分子10億個中の当該ガスの分子数
- [3] ここでいう比率は、1750年以前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
- [4] 表示された誤差幅はConway et al.(1994)にならってブートストラップ法で計算され、標準偏差の幅に相当する68%の信頼限界を持つ。
- [5] 炭素換算で10億トン( $10^{15}$ g)は1 PgC(ペタグラムカーボン)とも表記される。
- [6] pptは乾燥した空気分子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 平方メートルあたりのワット数( $W/m^2$ )で表す。

## 日本語訳について

このWMO温室効果ガス年報第11号(気象庁訳)は、WMOが2015年11月9日に発行したWMO Greenhouse Gas Bulletin No. 11を気象庁が翻訳したものである。

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 GAW 温室効果ガス観測所



イザーニャ観測所  
(28.31°N, 16.50°W,  
海拔2373 m

<http://izana.aemet.es>)  
は、テネリフェ島(スペインのカナリア諸島)の山頂に位置し、亜熱帯の強い温度逆転層より十分高い場所にある。この施設は、スペイン気象庁(AEMET)のイザーニャ大気研究センター(IARC)によって運営されている。イザーニャにおける温室効果ガスの現地観測(二酸化炭素とメタン)は1984年に開始され、その後、2007年に一酸化二窒素とSF<sub>6</sub>が開始された。イザーニャの観測計画に関する詳細は、イザーニャ大気研究センター活動報告2012-2014年(GAW Report No. 219, 2015)に掲載されている。

韓国気象庁によって運営されているアンミョンド観測所(36.54°N, 126.33°E, 海拔46 m)

は、朝鮮半島の西岸に位置し、冬から春にかけて大陸性気団の影響を受け、夏には北太平洋からの海洋性気団の影響を受ける。1999年以降、二酸化炭素とメタンの計測についてはキャビティリングダウン分光計により実施され、一酸化二窒素、CFC類、SF<sub>6</sub>については電子捕獲型検出器ガスクロマトグラフィーにより実施されている。また、米国海洋大気庁(NOAA)の協力によるフラスコ収集ネットワークの一環として、アンミョンド観測所では二酸化炭素同位体組成データの収集も行っている。



ピュイ・ド・ドーム観測所(45.77°N, 2.97°E, 海拔1465 m)は、フランス国立科学研究中心(CNRS)とブレイズ・パスカル大学([www.opgc.fr/SO/mesures/index.php](http://www.opgc.fr/SO/mesures/index.php))によって運営されている。周辺の大気は地域のバックグラウンドを示す総観規模の大気組成を

代表している。ピュイ・ド・ドーム観測所では2000年以降大気中の二酸化炭素濃度を継続して観測している。当初使われた非分散型赤外線分析計からキャビティリングダウン分光計に更新された2011年以降は、二酸化炭素とメタンの両方を測定している(<https://icos-atc.lscce.ipsl.fr/PUY>)。二酸化炭素とメタン、一酸化二窒素、SF<sub>6</sub>については、2010年からガスクロマトグラフィーを使用した計測も行っている。今後もヨーロッパ研究基盤の統合的炭素循環観測システム(ICOS)の一環として、ピュイ・ド・ドーム山頂での温室効果ガスの監視は継続される計画で、2016年にはWMOとICOSにより観測体制の総合点検が予定されている。

