



WMO
世界気象機関
天気・気候・水

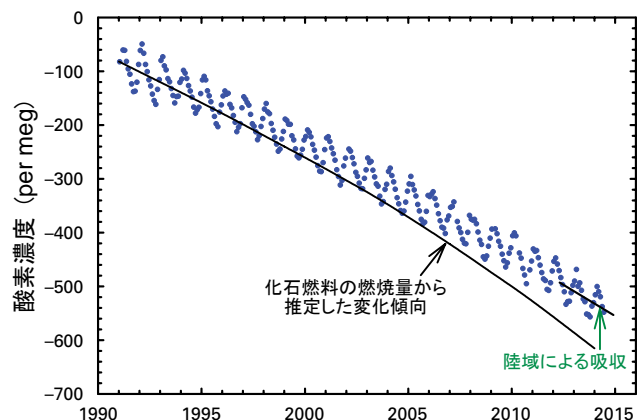
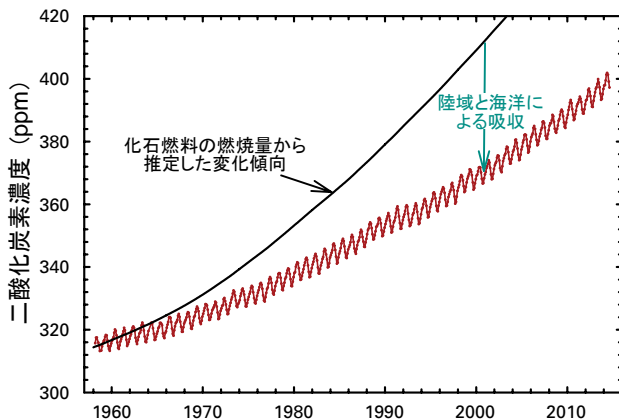


GAW
全球大気監視
計画

WMO (気象庁訳) 温室効果ガス年報

2013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10号 | 2014年11月6日



大気中の二酸化炭素 (CO₂) 及び酸素 (O₂) の観測データは、世界の炭素循環において人間がもたらしている変化を理解するための強力な手がかりを与え続けている。左図に示すとおり、大気中のCO₂濃度の上昇は、C. D. Keelingらがマウナロアで世界初の高精度観測を開始した1958年以降の記録により裏付けられている。この時に用いられた高品質な測定を保証する方法は、全球大気監視計画 (GAW) の参加機関による観測方法として採用された。このCO₂濃度の上昇は、化石燃料の燃焼により排出された全てのCO₂が大気中にとどまったとした場合の約半分の上昇でしかない。残りの半分は、陸域生物圏および海洋に吸収されている。しかし、吸収されるCO₂の陸域と海洋間の配分は、CO₂データだけでは容易に分からない。ここで、O₂観測が有用となる。

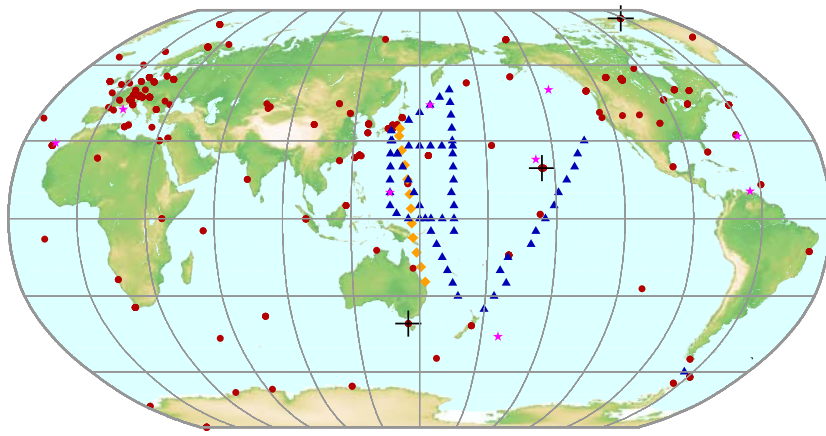
最も長期にわたるO₂観測点のうちの1つ、グリム岬 (タスマニア) でフラスコに採取し、スクリプス海洋研究所で解析したO₂濃度の時系列を右図に示す。O₂濃度は窒素 (N₂) 濃度と

の比 (O₂/N₂) による相対的な変動として報告されている。100 per meg^[1] (パーメグ) の減少は、大気中のO₂分子100万個当たり100個のO₂分子が失われることに相当する。大気中のO₂は、化石燃料の燃焼中に消費されることでごくわずかに減少してきた。観測されたO₂濃度の減少は、化石燃料の燃焼量から推定した量より小さい。これは、植物が光合成を通じてCO₂を吸収し、大気中にO₂が戻されるためである。したがって、化石燃料の燃焼量から推定したO₂濃度との残差から陸域によるCO₂の吸収量が分かる。海洋によるCO₂の吸収量についても、陸域と海洋を合計した吸収の総量が化石燃料の燃焼量から推定したCO₂濃度と観測されたCO₂濃度との差に一致するという前提に基づいて算出することができる。またO₂の観測データは、季節変動やその他の時間スケールでの変動も捉えていることから、CO₂の観測データを補完することで地球生物圏の大規模な役割についてさらなる情報を提供する。(掲載の図は米国スクリプス海洋研究所のR. Keeling氏の厚意による)

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、2013年の二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O) の世界平均濃度は、それぞれ、396.0±0.1 ppm^[2]、1824±2 ppb^[3]、325.9±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 142%、253%、121%である。2012年から2013年にかけての二酸化炭素の濃度増加量は 2.9 ppmであり、1984年以降最も多い。一酸化二窒素の2012年から2013年の増加量は、2011年から2012年にかけての増加量より少ないが、最近10年の平均増加量にほぼ等しい。大気中のメ



● 地上観測 ◆ 航空機 ▲ 船舶 × 温室効果ガス比較観測所
★ 海洋時系列観測点

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。本年報で取り上げた、海水中の二酸化炭素観測を実施している地点についても示した。

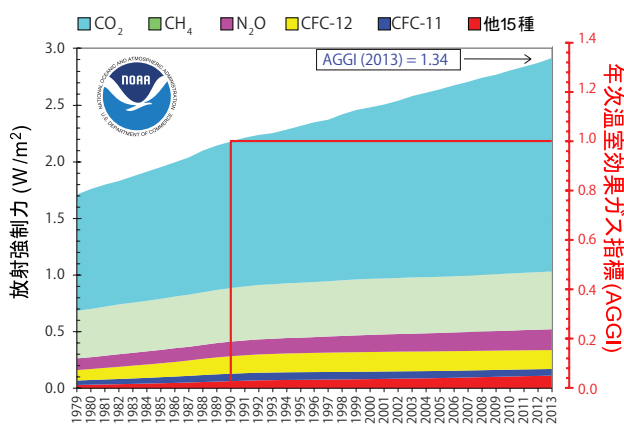


図1 長寿命の温室効果ガスによる放射強制力(1750年を基準)の経年変化と2013年のNOAA年次温室効果ガス指標(AGGI)。

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 ₂	CH ₄	N ₂ O
世界平均濃度(2013年) ^[4]	396.0±0.1 ppm	1824±2 ppb	325.9±0.1 ppb
1750年と比較した存在比 ^a	142%	253%	121%
2012年から2013年の増加量	2.9 ppm	6 ppb	0.8 ppb
2012年からの増加分の比率	0.74%	0.33%	0.25%
世界平均濃度の最近10年間の平均年増加量	2.07 ppm/年	3.8 ppb/年	0.82 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、次のとおり。CO₂(124地点)、CH₄(121地点)、N₂O(33地点)。(なお、メタンの工業化以前の濃度を前号の値から更新した。これにより、放射強制力及び1750年と比較したメタン濃度の増加分の比率は、わずかに小さくなるが、AGGIへの影響はない。)

タンは引き続き増加しており、最近5年間の平均増加率とほぼ同じである。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2013年までに、長寿命の温室効果ガスによる放射強制力は34%増加しており、二酸化炭素がそのうちの約80%を占める。

海洋による人為起源の二酸化炭素の吸収は、海水中の二酸化炭素濃度の増加や酸性度の増加を招いた。本年報でとりあげた海洋時系列観測点において、最近20年間で、pHは一年あたり、0.0011~0.0024低下し、海洋に溶け込んだCO₂量(pCO₂)は一年あたり1.2~2.8 μatm増加した。

概要

このWMO/GAWの温室効果ガス年報第10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(CO₂)、メタン(CH₄)及び一酸化二窒素(N₂O)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種類のガス並びにフロン12(CFC-12)及びフロン11(CFC-11)を合計した放射強制力は、長寿命の温室効果ガスによる放射強制力全体の約96%^[5]に相当する(図1)。本年報では、初めて海洋酸性化の項を設けた。これはユネスコ政府間海洋学委員会(IOC-UNESCO)の国際海洋炭素観測連携計画(IOCCP)と海洋研究科学委員会(SCOR)、国際原子力機関(IAEA)の海洋酸性化国際連携センター(OA-ICC)の協力によって作成されたものである。

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を含む大気組成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。この地図には、海洋中の二酸化炭素の観測を行っているいくつかの地点を示している。参加機関が報告した大気の観測データは、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2013年の大気中濃度の世界平均と、2012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

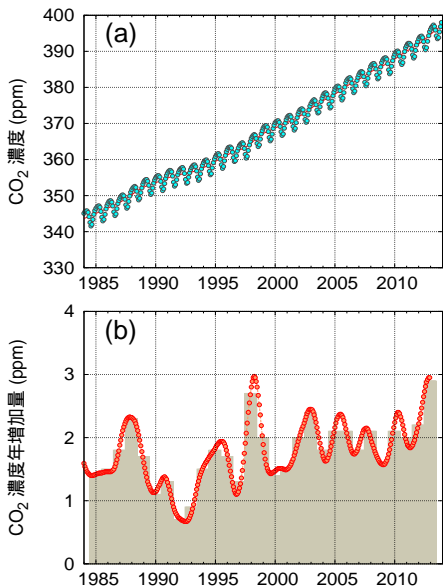


図3 二酸化炭素の1984年から2013年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)塗りつぶしの棒グラフは前年からの濃度差。

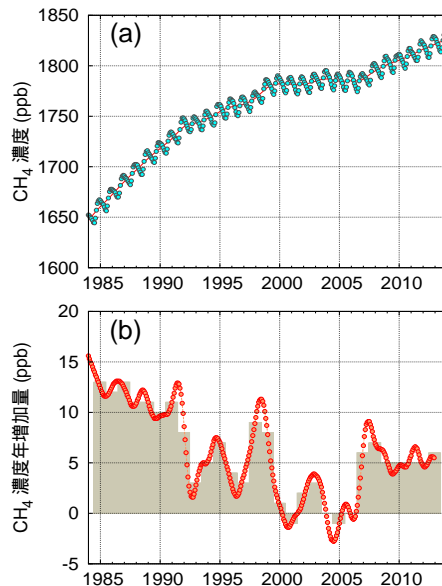


図4 メタンの1984年から2013年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)塗りつぶしの棒グラフは前年からの濃度差。

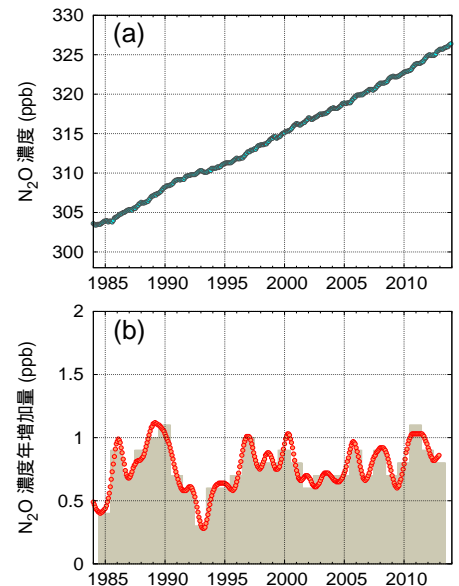


図5 一酸化二窒素の1984年から2013年までの(a)世界平均濃度と(b)その一年あたりの増加量。(b)塗りつぶしの棒グラフは前年からの濃度差。

されたデータセット(WMO, 2009)をもとにした解析によって得られた。移動観測によるデータは、太平洋を横断する船上採取による米国海洋大気庁(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にまとめられている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定量的理解が必要である。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ともに、温室効果ガスの排出インベントリ検証と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。2013年のNOAA年次温室効果ガス指標(AGGI)は1.34で、長寿命の温室効果ガスによる(1750年を基準とする)放射強制力の総計は、1990年以降2013年までに34%、2012年からは1.5%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、CO₂等価換算濃度(モル分率)で479 ppmに相当する(<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>)。

二酸化炭素(CO₂)

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%^[5]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84%、最近5年間で見ると約83%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、大気と海洋間(炭素換算で約800億トン/年)及び大気と陸上生物圏間(炭素換算で約1200億トン/年)の比較的大きな年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2013年に、工業化以前の142%に達した。これは、主として化石燃料の燃焼による放出

とセメント生産による(<http://www.globalcarbonproject.org/>によれば、2012年の二酸化炭素排出量は炭素換算で年に97±5億トン^[6])。この結論は、地表における二酸化炭素の空間分布と増加率、大気中の酸素濃度の減少、大気中の二酸化炭素の炭素同位体比¹³C/¹²Cの減少といったGAWの観測結果と整合している。陸上生物圏による炭素交換は正味では二酸化炭素を吸収するが、森林伐採とその他の土地利用変化(2012年に炭素換算で10±5億トン)は、わずかに二酸化炭素を増加させる。2003年から2013年にかけて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のうち平均して約45%に相当する。残りの約55%は海洋や陸上生物圏によって大気中から除去された。化石燃料の燃焼に由来する二酸化炭素の主な吸収源は海洋と陸上生物圏である。これら吸収源間の分配についての知見は、GAWの二酸化炭素と酸素の観測成果に基づいている。海洋による二酸化炭素の吸収は海洋の酸性化をもたらした(次頁参照)。

二酸化炭素の2013年の世界平均濃度は396.0±0.1 ppmである(図3(a))。2012年から2013年にかけての年平均増加量は2.9 ppmであり、これは2011年から2012年にかけての増加量や、1990年代の平均(約1.5 ppm/年)、最近10年間の平均年増加量(約2.1 ppm/年)よりも大きい。二酸化炭素濃度の年増加量の年々変動や、2012年から2013年にかけての年増加量が平均年増加量より大きいことについては、化石燃料の燃焼による二酸化炭素排出量の近年の増加(約2%/年または炭素換算で約2億トン/年)では説明できない。GAW参加機関による大気中の二酸化炭素中の炭素同位対比¹³C/¹²Cの観測成果は、二酸化炭素濃度の年増加量の変化が大気と陸上生物圏の間の炭素交換における小さな変化に起因することを示唆している。例年、大気と陸上生物圏の間では炭素換算で年間約1200億トンの炭素が交換されている。これが北半球の大気中の二酸化炭素濃度において観測される季節変



Ocean Acidification
International
Coordination Centre
OA-ICC



海洋酸性化

海洋は現在、人為起源の二酸化炭素(CO₂)排出量の4分の1を吸収しており、化石燃料の燃焼による大気中CO₂の増加を抑えている。海洋がCO₂を吸収すると、酸性度を左右する海水の炭酸システムが変化する。すなわち、CO₂は海水に溶けて、炭酸(H₂CO₃)を生じる。これは弱酸であり、さらに炭酸水素イオン(HCO₃⁻)と水素イオン(H⁺)に解離する。水素イオンの増加は、酸性度の増加(pHの低下)を意味する。一人一日あたりに換算して約4kgのCO₂を海洋が吸収し続けた結果、海洋の酸性化は既に測定可能なレベルになってきている。酸性化の進行は、炭酸イオン(CO₃²⁻)の存在により制限されている。これは炭酸イオンが、新たに生じた水素イオンの多くと結合して、炭酸水素イオンを生じるためである。しかし、この緩衝反応は炭酸イオンを消費し、海洋表層がCO₂を吸収できる化学的容量を減少させる。この容量は、現在では工業化が始まった頃の70%しかなく、おそらく21世紀末までにはわずか20%にまで減少するだろう。古気候学記録から復元したデータによると、現在の海洋の酸性化の進行は、少なくとも過去3億年にわたり前例のないものであることが分かっている。複数の地球システムモデルの予測によれば、少なくとも今世紀中頃まで酸性化は加速し続ける可能性がある。酸性化の進行は気候変動によってわずかに影響を受けるが、それらはCO₂が増加することにより生じる変化の10%未満にとどまる。それに対し、たとえば北極域の雪氷の融解の進行による海水の低塩分化は、酸性化をさらに加速させる可能性がある。

海洋酸性化の化学については観測とモデルによって一般的にはよく理解されているものの、海洋酸性化が海洋生物にもたらす潜在的な影響は本来もっと複雑である。主要な関心事のひとつにサンゴやサンゴモ、軟体動物、一部のプランクトンのような炭酸カルシウムの殻・骨格をもつ生物(石灰化生物)がどうなるかということがある。なぜなら、これらの生物が殻や骨格の材料を石灰化によって作り出す能力は、炭酸イオンの濃度に依存するからである。多くの生物において、酸性化が進むにつれて石灰化能力は弱くなる。海洋生物相に対する酸性化のその他の影響としては、生存率、発達率、成長速度の低下、生理的機能の変化や生物多様性の低下がある。

海洋による人為起源の炭素吸収を原因とした海洋表面のpHの低下と海面の二酸化炭素分圧(pCO₂)の増加は、既に検出可能なレベルに達している。これらの変化傾向は、持続的な海洋時系列観測によって評価され定量的に調べられている。こうした観測により、海洋の生物地球化学と生態系の変化を特徴づけるために必要とされる、長期間かつ時間解像度のあるデータセットが得られる。このような時系列の例を図6と表2に示し

た。全ての地点(観測期間が10年より長い)で、海面付近の海水のpCO₂は、人為起源のCO₂増加のため時間と共に増加し、相応の海洋酸性化が起こっている。これらの時系列の観測点は、おおむね亜寒帯(MUNIDA、観測点P及びKNOT/K2)から亜熱帯(BATS、HOT、ESTOC、DYFAMED)、熱帯(CARIACO、東経137度定線)までの大きな領域を代表している。これらの海面時系列観測データから季節的な変動成分を除いたものを使用して、観測期間を通じた線形トレンドを計算し、これらの観測点で比較可能な10年あたりの変化率を得た。季節・年々の変動はあるが、海面のpCO₂は1.2~2.8 μatm/年(大気の濃度の増加率は過去10年間の平均で約2.1 ppm/年)の割合で増加しており、海面付近の海水のpHは、場所によって観測期間の平均で年間-0.0011~-0.0024の割合で低下した。これらの変化の割合は、化学的性質だけではなく、それぞれの地域に特有なその他の要素にも依存している。海面のpCO₂の増加率はESTOC、HOTとBATSでは、大気中のCO₂増加率に一致した。同様にpHの低下は定常的であり、大気との平衡から予想される酸性化の進行の度合いと整合していた。東経137度線の北緯10度では、海面のpCO₂の増加とpHの低下はやや小さく、これは亜熱帯循環における変化と関連している可能性がある。DYFAMEDの時系列では、線形トレンドに大きな誤差幅を与える強い季節変化のシグナルに加えて循環の変化が認められた。CARIACOでは、特にCO₂が豊富な海水が湧昇する時期に、海面のpCO₂がもっとも高い値を示した。この期間を通じての大きなpCO₂の増加とpHの低下は、湧昇の減少に関係した表面海水の温暖化に起因すると考えられ、生物生産力の減少にもつながる。亜寒帯の時系列は最も高い値を示しており、原因の一部は水温と生物生産の大きな季節変動によるものである。MUNIDAでは海面のpCO₂の増加率は低く、KNOT/K2では、pCO₂の増加が大気中の上昇と類似していた。しかし、KNOT/K2でのpHの低下は最大のものの一つだった。観測点Pでの観測は定期的ではないが、pHの低下とpCO₂の増加については他の観測点と同様の傾向を示した。

ここでは海面付近の海水の観測に焦点を置いているが、海洋内部のかなりの部分が人為起源の炭素吸収とそれに伴う海洋化学的な変化による影響を受け続けている。しかし、残念ながらCO₂測定を行う時系列観測点は現在のところごく限られている。このことは海洋酸性化と炭酸の化学の変化傾向を定量的に調べようとする際に重大な障害となる。時系列観測点におけるCO₂観測は、船舶による海面及び海洋内部の観測とともに今後も継続、かつ拡大されていく必要がある。

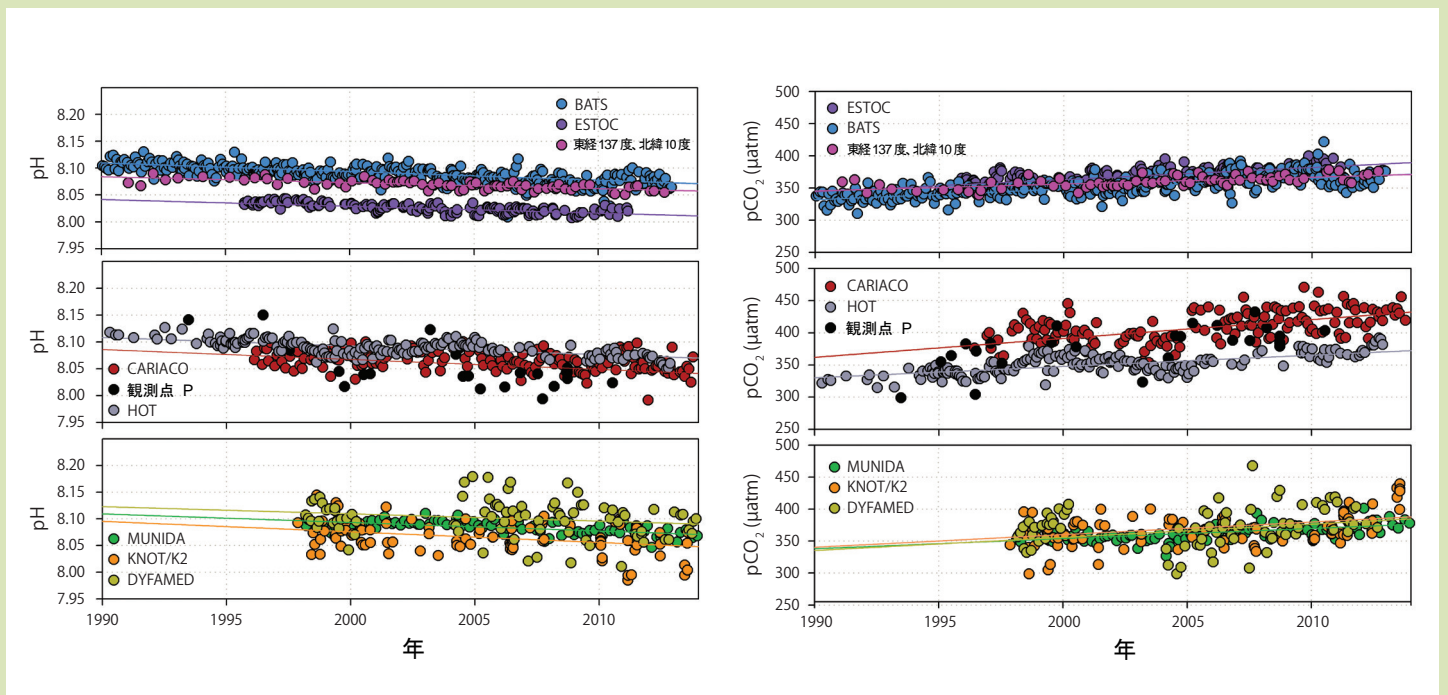


図6 表面海水のpHの時系列およびトレンド(左)と、表面海水の $p\text{CO}_2$ (μatm)の時系列とトレンド(右)。大西洋バミューダ沖時系列観測点[BATS; 青]、カナリア諸島近海欧州時系列観測点[ESTOC; 紫]、ハワイ時系列観測点[HOT; 灰色]、CARIACO [赤]、観測点 P [黒]、MUNIDA [緑];北太平洋時系列観測点[KNOT; オレンジ]、地中海大気フラックス観測点[DYFAMED; 黄]、気象庁東経137度定線における北緯10度[東経137度、北緯10度; ピンク]。各時系列観測点の位置を図2に示す。サンプリング時間間隔は毎月から年ごとまで幅がある。

表2 9つの海洋の時系列観測点における海面 pH^{a} と $p\text{CO}_2$ の線形トレンドと標準誤差。

	$\text{pH}(\text{/年})$	$p\text{CO}_2(\mu\text{atm}/\text{年})$	参考文献
BATS ^b	-0.0017 ± 0.0001	1.75 ± 0.08	Bates et al., 2014
ESTOC ^b	-0.0014 ± 0.0001	1.78 ± 0.15	Bates et al., 2014 González-Dávila et al., 2010
HOT ^b	-0.0017 ± 0.0001	1.89 ± 0.15	Bates et al., 2014 Dore et al., 2009
CARIACO ^b	-0.0024 ± 0.0003	2.79 ± 0.37	Bates et al., 2014 Astor et al., 2013
DYFAMED ^b	-0.0019 ± 0.0009	2.56 ± 0.85	Touratier and Goyet, 2011
MUNIDA ^b	-0.0016 ± 0.0003	1.55 ± 0.24	Bates et al., 2014 Currie et al., 2011
KNOT/K2 ^b	-0.0024 ± 0.0007	2.22 ± 0.67	Wakita et al., 2013
観測点 P ^c	c	c	Wong et al., 2010
東経137度定線、北緯10度 ^d	-0.0011 ± 0.0001	1.15 ± 0.06	Midorikawa et al., 2010

^a pHは現場水温での水素イオン濃度指数の値

^b pHと $p\text{CO}_2$ は、pHの直接測定が入手できる場合を除いて、全炭酸、アルカリ度、水温と塩分(珪酸塩とリン酸塩はゼロと仮定)から算出。季節変化を除いたデータと線形トレンドは、GAWレポートNo.184に沿って算出した

^c 観測点Pはデータが少ないため線形トレンドの算出ができない

^d pHは、 $p\text{CO}_2$ と全炭酸、水温および塩分の観測結果から算出

動の主な原因である。これらの炭素交換における小さな年変動(1-2%)は、光合成と呼吸の間のバランスの変化あるいはバイオマスの燃焼量の変化に由来するが、二酸化炭素の年増加量(炭素換算で約40億トン/年)に大きな影響を及ぼす。2012年から2013年の年増加量が平均年増加量よりも大きなものだった要因が何であるかを述べるのは早計だが、この活発な研究分野は、GAW参加機関による観測成果に立脚している。

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%^[6]を占める。大気中に放出されるメタンのおよそ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)によるものはおよそ60%である。人為的な排出が増加した結果、2013年の大気中のメタンの濃度は、工業化以前の約722 ppbの253%に達した。大気中のメタン濃度は、1980年代初期の約1650 ppbから2013年に過去最高値の1824±2 ppbまで増加した(図4(a))。年増加量(図4(b))は、1980年代前半の約13 ppb/年から減少し、1999年から2006年の間はほぼゼロだった。増加量の長期変化には大きな年々変動が含まれており、年々変動の研究はメタンの排出と消失に影響を及ぼす過程の理解に役立つ。2007年以降は再びメタン濃度が増加しており、世界年平均は2012年から2013年までに6 ppb増加した。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的排出源からのメタンの排出がその原因と見られる。WMO温室効果ガス年報第9号で示したように、2007年以降増加し続けている大気中のメタン濃度に、北極域からの排出量増加の影響はみられない。

一酸化二窒素(N₂O)

一酸化二窒素による放射強制力は、長寿命の温室効果ガス全体の約6%^[5]を占め、それらのうちで3番目に大きな寄与がある。そして一酸化二窒素は、オゾン層破壊係数で重み付けした場合、成層圏のオゾン層破壊物質の最大の発生源となる。工業化以前、大気中の一酸化二窒素の量は、土壌と海洋からの放出と成層圏での化学的消失のバランスを反映していた。工業化時代に入ると、合成窒素肥料(農地からの直接的排出と農業排水に影響された水路からの間接的排出)、化石燃料の燃焼、バイオマスの燃焼と他の小規模なプロセスからの付加的な人為的排出が加わった。現在、人為的排出は全排出量の約40%を占める。全排出量は、GAWによる一酸化二窒素の世界平均濃度(図5(a))と近年の年増加量(図5(b))の観測成果から決定されており、窒素換算で約1600万トン/年^[7]である。工業化以前から増加には合成窒素肥料の影響が最も大きい。一酸化二窒素の2013年の世界平均濃度(モル分率)は325.9±0.1 ppbであり、前年から0.8 ppb増加して、工業化以前(270 ppb)の121%である。2012年から2013年にかけての年平均濃度の増加は、最近10年間を平均した年増加量0.82ppb/年と同程度である。

GAWによる一酸化二窒素の観測成果は、大気化学輸送モデルを用いた地域スケールから大陸スケールまでの排出量

推定に利用されている。最近の研究から、熱帯と亜熱帯の陸域が最大の排出域であること(Thompson et al., 2014)、アジアからの排出に顕著なトレンドがあること(Saikawa et al., 2014)が明らかになった。一酸化二窒素収支の理解においてはこのような進展があるものの、GAW参加機関による観測ネットワーク間の互換性の改善が必要である。なぜなら、大気中の一酸化二窒素は長寿命(130年)であり、その分布の空間的勾配が小さいことから、輸送モデルを使ってデータから排出量を推定するためには、各観測計画間でのバイアスは0.1 ppbより小さくなければならないからである。この目標値は、通常用いられる測定技術では達成が難しい。

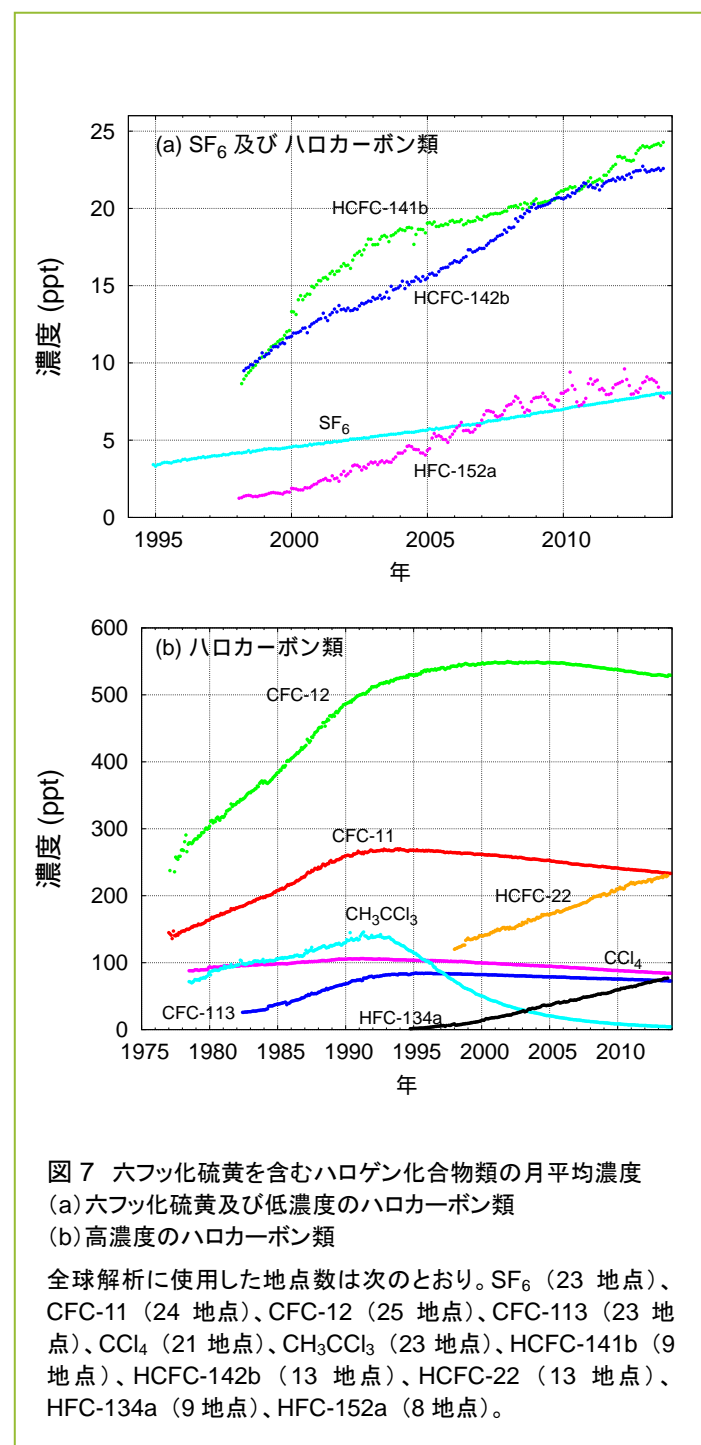


図7 六フッ化硫黄を含むハロゲン化合物類の月平均濃度
(a)六フッ化硫黄及び低濃度のハロカーボン類
(b)高濃度のハロカーボン類

全球解析に使用した地点数は次のとおり。SF₆ (23 地点)、CFC-11 (24 地点)、CFC-12 (25 地点)、CFC-113 (23 地点)、CCl₄ (21 地点)、CH₃CCl₃ (23 地点)、HCFC-141b (9 地点)、HCFC-142b (13 地点)、HCFC-22 (13 地点)、HFC-134a (9 地点)、HFC-152a (8 地点)。

他の温室効果ガス

六フッ化硫黄(SF₆)は、長寿命の強力な温室効果ガスであり、その排出はほぼ全てが人為起源で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7(a))。大気中のSF₆は寿命が3200年と非常に長いため、排出されるとそのまま大気中に蓄積され、その量はGAW参加機関が観測した増加率から決定することができる。観測成果に係るある解析によれば、気候変動枠組条約(UNFCCC)に報告された排出量は過小評価されており観測結果と一致しないという、観測に基づく分析もある(Levin et al., 2010)。GAWによるSF₆の観測成果にはもう一つ重要な用途として、一酸化二窒素と同様に、化学輸送モデルでの大気混合過程の検証という重要な用途がある。

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、他のハロゲン化合物と合わせた合計で、放射強制力全体の約12%^[5]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急速に増加している(ppm^[8]の程度、図7(a)、7(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(O₃)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、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、以下に記載したGAW計画、WDCGGのウェブサイトから取得可能である。

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、GAWレポートNo.206(<http://www.wmo.int/gaw> から入手可)を参照されたい。GAWに協力する観測ネットワークであるAdvanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE)も本年報に観測データを提供している。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://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdogg/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。

海洋酸性化と海洋のpCO₂のトレンドについてのこの概説は、ユネスコ政府間海洋学委員会(IOC-UNESCO)の国際海洋炭素観測連携計画(IOCCP)と海洋研究科学委員会(SCOR)、国際原子力機関(IAEA)の海洋酸性化国際連携センター(OA-ICC)が協力して、WMOの支援のもとに作成した。時系列データの提供と解釈に関しては、特にY. Astor、N. Bates、M. Church、L. Coppola、K. Currie、M. González-Dávila、L. Miller、中野俊也と脇田昌英に感謝する。

参考文献

- Astor, Y.M., L. Lorenzoni, R. Thunell, R. Varela, F. Muller-Karger, L. Troccoli, G.T. Taylor, M.I. Scranton, E. Tappa and D. Rueda, 2013: Interannual variability in sea surface temperature and fCO₂ changes in the Cariaco Basin. *Deep-Sea Res. II*, 93:33–43, doi:10.1016/j.dsr2.2013.01.002.
- Bates, N.R., Y.M. Astor, M.J. Church, K. Currie, J.E. Dore, M. González-Dávila, L. Lorenzoni, F. Muller-Karger, J. Olafsson and J.M. Santana-Casiano, 2014: A timeseries view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO₂ and ocean acidification. *Oceanography*, 27(1):126–141, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.16>.
- Conway, T.J., P.P. Tans, L.S. Waterman, K.W. Thoning, D.R. Kitzis, K.A. Masarie and Ni 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(D11):22831–22855.
- Currie, K.I., M.R. Reid and K.A. Hunter, 2011: Interannual variability of carbon dioxide drawdown by subantarctic surface water near New Zealand. *Biogeochemistry*, 104(1–3):23–34, doi:10.1007/s10533-009-9355-3.
- Dore, J.E., R. Lukas, D.W. Sadler, M.J. Church and D.M. Karl, 2009: Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *PNAS*, 106(30):12235–12240, doi:10.1073/pnas.0906044106.
- González-Dávila, M., J.M. Santana-Casiano, M.J. Rueda and O. Llinás, 2010: The water column distribution of carbonate system variables at the ESTOC site from 1995 to 2004. *Biogeosciences*, 7:3067–3081, doi:10.5194/bg-7-3067-2010.
- Levin, I., T. Naegler, R. Heinz, D. Osusko, E. Cuevas, A. Engel, J. Illmerger, R.L. Langenfelds, B. Neininger, C. v. Rohden, L.P. Steele, R. Weller, D.E. Worthy, and S.A. Zimov, 2010: The global SF₆ source inferred from longterm high precision atmospheric measurements and its comparison with emission inventories. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(6):2655–2662, doi:10.5194/acp-10-2655-2010.
- Midorikawa, T., M.A. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Nemoto and H.Y. Inoue, 2010: Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific. *Tellus B*, 62:649–659. Updated based on: http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/co2_trend/co2_trend_en.html; http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/oa/oceanacidification_en.html.
- Montzka, S.A., E.J. Dlugokencky and J.H. Butler, 2011: Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476:43–50, doi:10.1038/nature10322.
- Saikawa, E., R.G. Prinn, E. Dlugokencky, K. Ishijima, G.S. Dutton, B.D. Hall, R. Langenfelds, Y. Tohjima, T. Machida, M. Manizza, M. Rigby, S. O'Doherty, P.K. Patra, C.M. Harth, R.F. Weiss, P.B. Krummel, M. van der Schoot, P.J. Fraser, L.P. Steele, S. Aoki, T. Nakazawa, and J.W. Elkins, 2014: Global and regional emissions estimates for N₂O. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(9):4617–4641, doi:10.5194/acp-14-4617-2014.
- Thompson, R.L., F. Chevallier, A.M. Crowell, G. Dutton, R.L. Langenfelds, R.G. Prinn, R.F. Weiss, Y. Tohjima, T. Nakazawa, P.B. Krummel, L.P. Steele, P. Fraser, S. O'Doherty, K. Ishijima and S. Aoki, 2014: Nitrous oxide emissions 1999 to 2009 from a global atmospheric inversion. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(4):1801–1817, doi:10.5194/acp-14-1801-2014.

Touratier, F. and C. Goyet, 2011: Impact of the Eastern Mediterranean Transient on the distribution of anthropogenic CO₂ and first estimate of acidification of the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research I*, 58(1):1–15, doi: 10.1016/j.dsr.2010.10.002.

Wakita, M., S. Watanabe, M. Honda, A. Nagano, K. Kimoto, K. Matsumoto, M. Kitamura, K. Sasaki, H. Kawakami, T. Fujiki, K. Sasaoka, Y. Nakano and A. Murata, 2013: Ocean acidification from 1997 to 2011 in the subarctic western North Pacific Ocean. *Biogeosciences*, 10:7817–7827, doi:10.5194/bg-10-7817-2013.

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.

Wong, C.S., J.R. Christian, S.-K. Emmy Wong, J. Page, Liusen Xie and S. Johannessen, 2010: Carbon dioxide in surface seawater of the eastern North Pacific Ocean (Line P), 1973–2005. *Deep-Sea Res. I*, 57(5):687–695, doi:10.1016/j.dsr.2010.02.003.

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] 1 per meg は大気中の窒素に対する酸素の濃度比(O₂/N₂)について基準となるガスと比較した0.0001%の変化

^[2] ppmは乾燥した空気分子100万個中の当該ガスの分子数

^[3] ppblは乾燥した空気分子10億個中の当該ガスの分子数

^[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] ここでいう比率は、1750年以来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

^[6] PgC = 炭素換算で10億トンの単位

^[7] TgN = 窒素換算で100万トンの単位

^[8] 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/m²)で表す。

排出インベントリ: 大気中に排出される人為起源及び自然起源の大気微量成分の量を推計しデータベース化したもの

pCO₂: 二酸化炭素分圧: 海水中の二酸化炭素濃度を、これと平衡になる大気中の二酸化炭素の圧力(単位 μatm: 100 万分の 1 気圧)に換算したもの

日本語訳について

このWMO温室効果ガス年報第10号(気象庁訳)は、WMOが2014年11月6日に発行したWMO Greenhouse Gas Bulletin No. 10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

今回紹介する温室効果ガス観測所



オーストラリアのガンポイント熱帯大気研究観測所(ATARS: 12.25°S 131.05°E, 海拔25m)は、北部準州のダーウィンの近くにある。この観測所は2010年に設立され、2012年にはGAW地域観測所となった。オーストラリア気象局(BoM)の研究用レーダー観測所と同じ場所にあり、運用は同局とオーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)の双方が担当している。ガンポイントは、アジア・オーストラリアの熱帯地域で拡大する大気観測網を補い、全球的には観測が不足する熱帯地域への重要な追加観測点となっている。現在の観測種目は、主な温室効果ガスと関連する微量気体(二酸化炭素、メタン及びバロンの連続観測、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、一酸化炭素、水素、¹³CO₂及び¹⁸OCOのフラスコ採取観測)、エアロゾル散乱係数、黒色炭素、オゾン、NO_x、水銀蒸気、熱帯の沿岸海洋を起源とする短寿命ハロカーボン類を含む。近い将来には、一酸化二窒素と一酸化炭素、エアロゾル粒子数、揮発性有機化合物の連続観測が追加される。



ファディン観測所(21.57°N 103.52°E, 海拔1466m)は、最近GAW地域観測所に指定された。ベトナムの北西部の高地で周辺の森林より高くなった場所にある。施設はベトナム国家水文気象局が運営している。この場所は2011年から気象観測所となり、このときに将来の気象レーダー収容のため

にタワーが建てられた。観測所の建物には、空調設備のある研究区域と、観測員や訪問研究者のための簡素な宿泊施設がある。温室効果ガスとエアロゾルの光学特性の連続観測のための設備は、気候観測システムのための能力開発と連携(CATCOS)計画を通じて二つのスイスの研究所(スイス連邦材料試験研究所とポール・シェラー研究所)の支援を受け、ベトナム国家水文気象局により2014年はじめに作られた。CATCOS計画は、スイス開発協力庁の出資のもとスイス気象局により進められている。二酸化炭素、メタン、一酸化炭素はキャビティ増強吸収分光法を用いて測定される。ファディン観測所は、ベトナムの僻地に置かれて温室効果ガス、地上オゾン、エアロゾルの特性を記録する観測所として初めてのものである。