

第3章 地球環境の変動

3.1 温室効果ガスの変動³⁹

- 二酸化炭素の濃度は、大気、海洋ともに長期的に増加している。
- 大気中のメタンの濃度は、ほぼ横ばいだった 1999～2006 年を除き、長期的に増加傾向にある。
- 大気中の一酸化二窒素の濃度は、長期的に増加している。

気象庁では世界気象機関（WMO）／全球大気監視（GAW）計画に基づき、温室効果ガスの変動を把握するため、世界の監視ネットワークの一翼として温室効果ガスの観測を行うとともに、温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）⁴⁰を運営し、世界各国の温室効果ガスのデータを収集・管理し、国内外へのデータの提供を行っている。WDCGG に報告されたデータをもとにした解析によると、地球温暖化に及ぼす影響の大きい代表的な温室効果ガスの世界平均濃度は引き続き増加している（表 3.1-1）。

気象庁では国内 3 地点（綾里（岩手県大船渡市）、南鳥島（東京都小笠原村）、与那国島（沖縄県与那国町））において、地上付近の温室効果ガス濃度を観測している。また、海洋気象観測船によって、日本周辺海域及び北西太平洋における洋上大気及び海水中の二酸化炭素等の観測を実施している。さらに、2011 年からは北西太平洋において航空機による上空の温室効果ガス観測を行っている（図 3.1-1）。

表 3.1-1 代表的な温室効果ガスの世界平均濃度（2017 年）⁴¹

温室効果ガスの種類	大気中の濃度			前年との差	前年から の増加率	参考数値 寿命 (年)
	工業化以前 (1750 年)	2017 年平均濃度	工業化以降 の増加率			
二酸化炭素	約 278 ppm	405.5 ppm	+ 46%	+2.2 ppm	+0.55%	不定
メタン	約 722 ppb	1859 ppb	+157%	+7 ppb	+0.38%	12.4
一酸化二窒素	約 270 ppb	329.9 ppb	+ 22%	+0.9 ppb	+0.27%	121

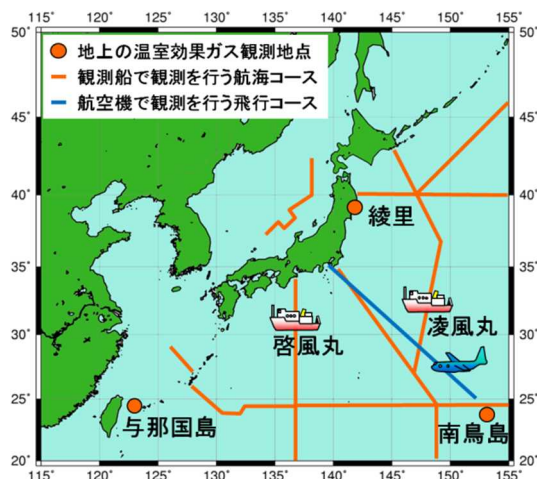


図 3.1-1 気象庁における温室効果ガスの観測網

気象庁では、綾里、南鳥島及び与那国島の 3 地点で連続観測を実施しているほか、2 隻の海洋気象観測船（凌風丸、啓風丸）により洋上大気及び海水中の、航空機により上空の温室効果ガス観測を定期的の実施している。

³⁹ 気象庁ホームページでは、温室効果ガス等の監視成果を公表している。

https://www.data.jma.go.jp/ghg/info_ghg.html （大気中の温室効果ガス）

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index_co2.html （海洋の温室効果ガスと海洋酸性化）

<https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/data/report/data/> （大気・海洋環境観測年報）

⁴⁰ WDCGG の詳細についてはホームページを参照のこと。

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

⁴¹ 2017 年平均濃度、前年との差及び前年からの増加率は WMO（2018b）を、工業化以前の濃度及び寿命については IPCC（2013）を参照した。また、工業化以降の増加率については、工業化以前の濃度と 2017 年平均濃度の差から算出した。なお、寿命は IPCC（2013）にある応答時間（一時的な濃度増加の影響が小さくなるまでの時間）を採用した。

3.1.1 世界と日本における二酸化炭素

(1) 世界における二酸化炭素濃度

大気中の二酸化炭素濃度は季節変動を伴いながら経年増加している（図 3.1-2 (a)）。この経年増加は、化石燃料の消費、森林破壊等の土地利用変化といった人間活動により二酸化炭素が大気中に放出され、一部は陸上生物圏や海洋に吸収されるものの、残りが大気中に蓄積されることによってもたらされる。二酸化炭素の放出源が北半球に多く存在するため、相対的に北半球の中・高緯度帯で濃度が高く、南半球で低い（図 3.1-3）。また、季節変動は主に陸上生物圏の活動によるものであり、夏季に植物の光合成が活発化することで濃度が減少し、冬季には植物の呼吸や土壌有機物の分解活動が優勢となって濃度が上昇する。濃度が極大となるのは、北半球で 3～4 月頃、南半球で 9～10 月頃である。季節変動の振幅は北半球の中・高緯度ほど大きく、陸域の面積の少ない南半球では小さい（図 3.1-3）。そのため、世界平均濃度は北半球の季節変動を反映して 4 月頃に極大となる。WDCGG の解析によると 2017 年の世界平均濃度は 405.5 ppm であり、前年からの増加量は 2.2 ppm であった（表 3.1-1）。この増加量は、最近 10 年間の平均年増加量（約 2.2 ppm）とほぼ同じであり、1990 年代の平均年増加量（約 1.5 ppm）より大きい。

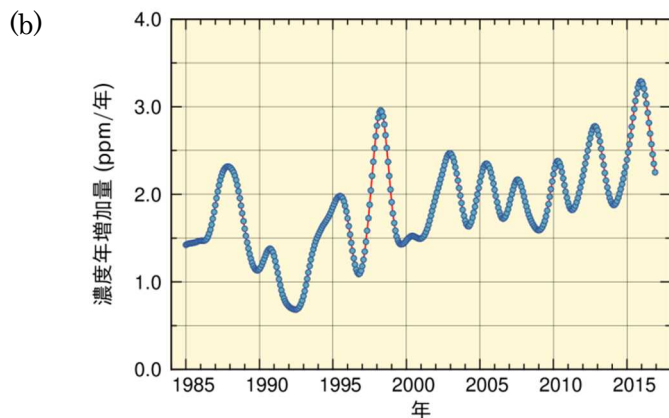
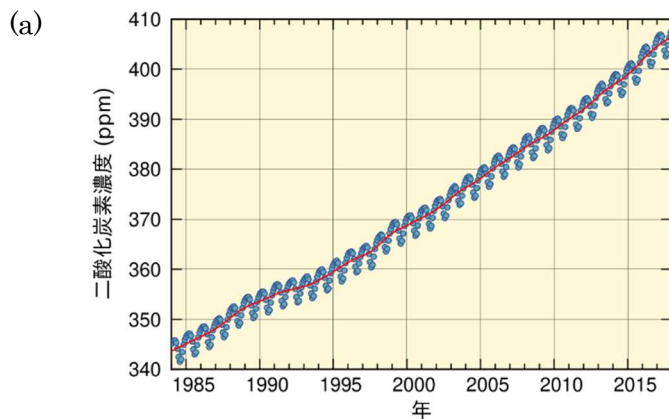


図 3.1-2 大気中の二酸化炭素の世界平均濃度 (a) と濃度年増加量 (b)

温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）が収集した観測データから作成した大気中の二酸化炭素の月別の世界平均濃度（青丸）と、季節変動成分を除いた濃度（赤線）を示す（WMO, 2018b）。濃度年増加量は、季節変動成分を除いた月別値から、各月の増加量を 1 年あたりに換算して求めている。算出方法は WMO（2009）による。解析に使用したデータの提供元は WMO（2019）に掲載されている。

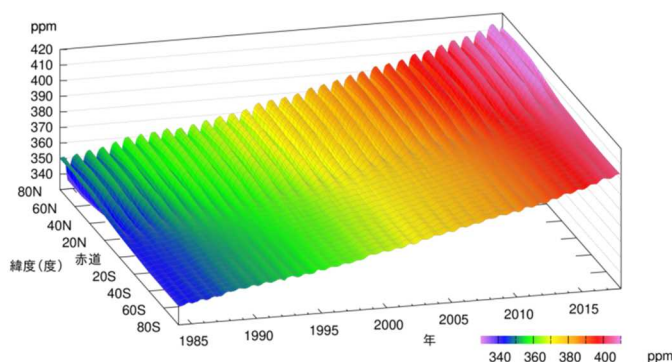


図 3.1-3 緯度帯別の大気中の二酸化炭素濃度の経年変化

WDCGG が収集した観測データから作成した緯度帯別に平均した大気中の二酸化炭素月平均濃度の経年変化を示す。算出方法は WMO（2009）による。解析に使用したデータの提供元は WMO（2019）に掲載されている。

二酸化炭素濃度の年増加量は一定ではなく年々変動がみられる⁴² (図 3.1-2 (b))。年増加量が大きくなる時期はエルニーニョ現象の発生時期におおむね対応しており、エルニーニョ現象がもたらす熱帯域を中心とした高温と少雨により植物の呼吸や土壌有機物分解作用の強化及び光合成活動の抑制が生じ、陸上生物圏から大気への二酸化炭素放出が強まることが知られている (Keeling et al., 1995; Dettinger and Ghil, 1998)。図 3.1-4 は、人為起源放出量から大気中の増加量及び海洋による吸収量を差し引く方法 (Le Quéré et al., 2016) により推定した陸上生物圏による二酸化炭素の正味の吸収量である。例えば 2015～2016 年には、2014 年夏から 2016 年春にかけて発生したエルニーニョ現象に呼応するように陸上生物圏による吸収量が減少した (WMO, 2018b)。2015 年及び 2016 年の吸収量はそれぞれ年間 21 ± 10 億トン炭素、年間 18 ± 11 億トン炭素で、これはその前の 10 年間 (2006～2015 年) の平均 (34 ± 10 億トン炭素) よりも小さい。同様に 1997～1998 年や 2002～2003 年に発生したエルニーニョ現象に対応して陸上生物圏による吸収量が減少している。特に 1998 年は、陸上生物圏による正味の吸収量が 1990 年以降で最も小さく、ほぼゼロであった。例外的に、1991～1992 年はエルニーニョ現象が発生したにも関わらず、濃度年増加量が小さかった。これは、1991 年 6 月のピナトゥボ火山の噴火が世界規模で異常低温をもたらし、土壌有機物の分解による放出が抑制されたためと考えられている (Keeling et al., 1996; Rayner et al., 1999)。

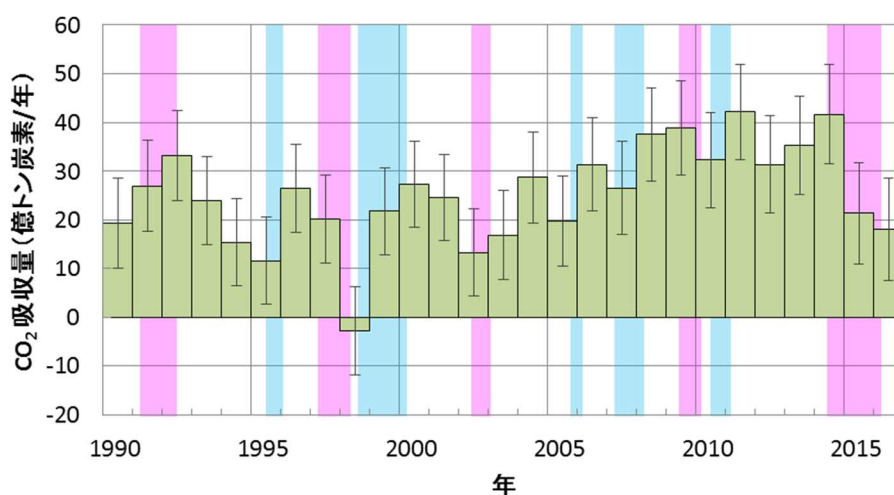


図 3.1-4 陸上生物圏による二酸化炭素の正味の吸収量の経年変化

人為起源の放出量 (化石燃料の消費、セメント生産及び土地利用変化による放出量 (Le Quéré et al., 2018) の合計) から、大気中増加量 (図 3.1-2 (b) を年平均したもの) と海洋による吸収量 (気象庁が解析した海洋による吸収量 (Iida et al., 2015; 3.1.1 (3) 節も参照) に河川からの流入を含む自然の炭素循環による 7 億トン炭素/年 (IPCC, 2013) を考慮したもの) を差し引くことによって推定した。正の値が陸上生物圏による吸収、負の値が放出を示す。エラーバーは、推定値の不確かさ (信頼区間 68% の範囲) である。桃色の背景色はエルニーニョ現象の発生期間、水色の背景色はラニーニャ現象の発生期間を表す。

(2) 日本における二酸化炭素濃度

国内観測点における二酸化炭素濃度は、植物や土壌微生物の活動の影響による季節変動を繰り返しながら増加し続けている (図 3.1-5(a))。観測点の中で最も高緯度に位置する綾里では (図 3.1-1)、季節変動が最も大きくなっている。これは、北半球では、中高緯度域の陸上生物圏の活動の季節変動が大きいことを反映して、高緯度ほど濃度の季節変動が大きくなる傾向があるためである。また、与那国島と南鳥島はほぼ同じ緯度帯にあるものの与那国島の濃度が高く、季節変動の振幅も大きい。これは、与那国島がアジア大陸に近く、秋から春にかけて人間活動や植物及び土壌微生物の活動に

⁴² 二酸化炭素濃度の年々変動とその要因については気象庁ホームページも参照のこと。

https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/tour/tour_c1.html

より二酸化炭素濃度が高くなった大陸の大気の影響を強く受けるためである。2018年の年平均濃度は、綾里で412.0 ppm、南鳥島で409.4 ppm、与那国島では411.7 ppmで、前年に比べていずれも増加し観測開始以来の最高値となった（いずれも速報値）。

国内観測点においても二酸化炭素濃度の年増加量が大きくなる時期は主にエルニーニョ現象に対応している。最近では2014年夏～2016年春にかけて発生したエルニーニョ現象を追うように、二酸化炭素濃度が大きく増加した（図3.1-5 (b)）。

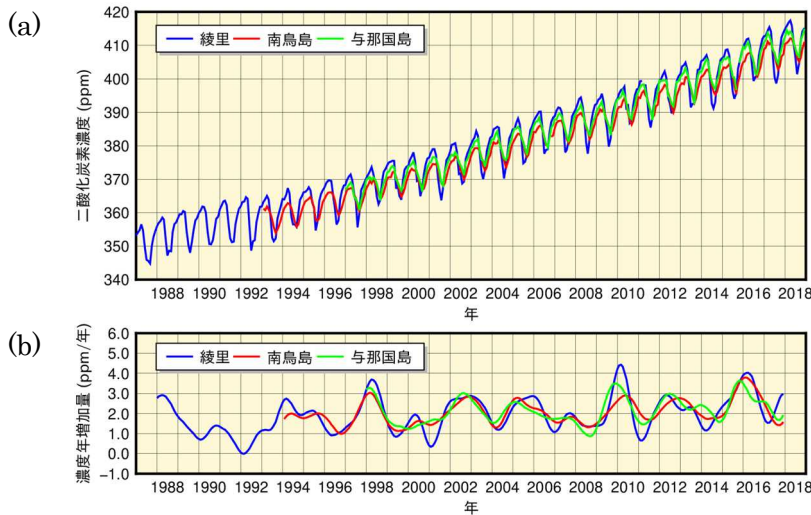


図 3.1-5 綾里、南鳥島及び与那国島における大気中の二酸化炭素月平均濃度 (a) と濃度年増加量 (b) の経年変化

濃度年増加量は、季節変動成分を除いた月別値から、各月の増加量を1年あたりに換算して求めている。算出方法はWMO (2009) による。

(3) 海洋の二酸化炭素

気象庁の海洋気象観測船によって観測された、北西太平洋（東経137度線上の北緯3～34度及び東経165度線上の南緯5～北緯35度）の表面海水中及び大気中の二酸化炭素分圧は、全ての海域において増加し続けている（図3.1-6、図3.1-7）。東経137度線では、1985年から2018年までの約30年間で表面海水中の二酸化炭素分圧は平均 $1.7\mu\text{atm}/\text{年}$ （ $1.4 \sim 2.1\mu\text{atm}/\text{年}$ ）の割合で、また、大気中の二酸化炭素分圧は平均 $1.8\mu\text{atm}/\text{年}$ （ $1.7 \sim 1.9\mu\text{atm}/\text{年}$ ）の割合で増加している。東経165度線では、1996年から2018年までの約20年間で表面海水中の二酸化炭素分圧は平均 $2.1\mu\text{atm}/\text{年}$ （ $1.6 \sim 3.0\mu\text{atm}/\text{年}$ ）の割合で、また、大気中の二酸化炭素分圧は平均 $2.0\mu\text{atm}/\text{年}$ （ $1.8 \sim 2.1\mu\text{atm}/\text{年}$ ）の割合で増加している。表面海水中の二酸化炭素分圧は、海面水温が高くなる夏季に高く、海面水温が低くなる冬季に低いという季節変動をしており、その変動幅は東経137度線、東経165度線ともに緯度が高いほど大くなるという特徴がある。それに対して大気中の二酸化炭素分圧の季節変動は小さく、夏季以外には表面海水中の二酸化炭素分圧が大気中の二酸化炭素分圧を下回るため、一年を通じて平均すると海洋が大気中の二酸化炭素を吸収している。一方熱帯域においては、ほぼ一年を通じて表面海水中の二酸化炭素分圧が大気中の二酸化炭素分圧を上回るため、海洋が大気中に二酸化炭素を放出している。

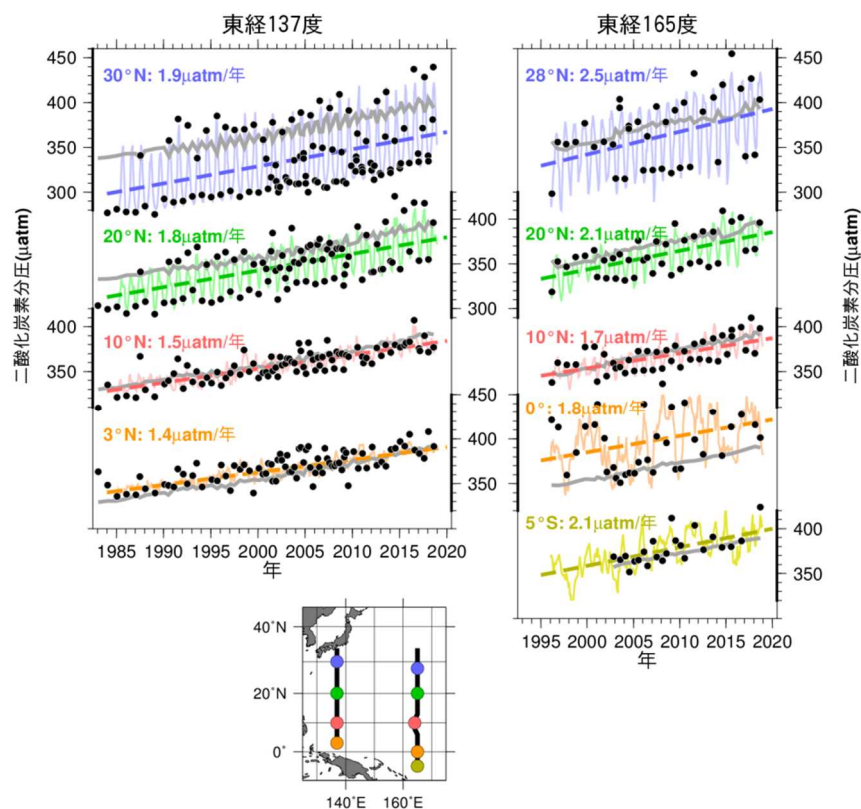


図 3.1-6 東経 137 度線（左図）及び東経 165 度線（右図）における表面海水中と大気中の二酸化炭素分圧の長期変化⁴³

図は、表面海水中の二酸化炭素分圧の観測値（●）および解析によって得られた推定値（細線）と長期変化傾向（破線）並びに大気中の二酸化炭素分圧（灰色の実線）を示している。

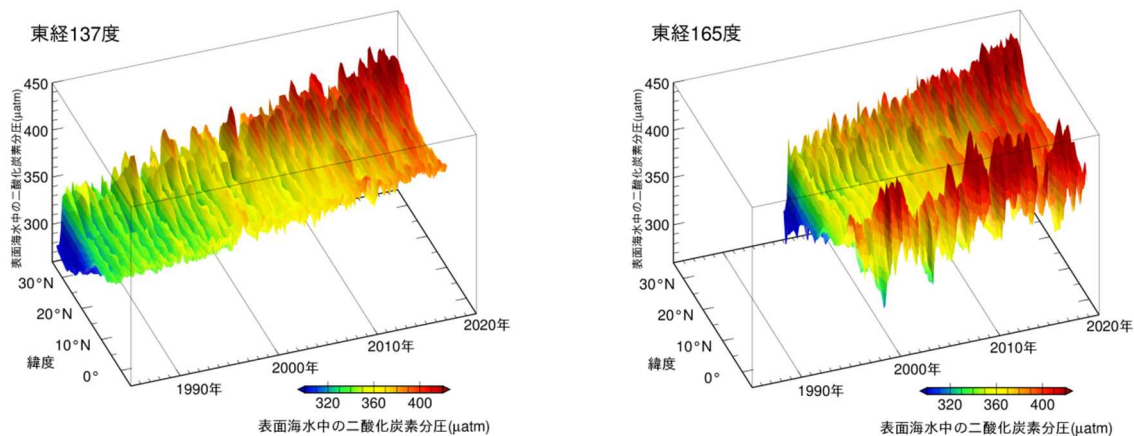


図 3.1-7 緯度ごとの表面海水中の二酸化炭素分圧の経年変化⁴³

図は東経 137 度線の北緯 3 度～北緯 34 度（左）、東経 165 度線の南緯 5 度～北緯 35 度（右）における緯度ごとの表面海水中の二酸化炭素分圧の経年変化を示している。

これまで蓄積された国内外の海洋観測データから、表面海水中の二酸化炭素濃度と水温・塩分・クロロフィル濃度との間には、海域や季節によってそれぞれ特徴の異なる相関関係があることがわかっている。この相関関係を利用して、水温と塩分の解析データや衛星によるクロロフィル濃度の観測データから、全海洋の表面海水中の二酸化炭素濃度を推定し、二酸化炭素の吸収・放出を解析した (Iida et al., 2015 : 図 3.1-8)。

⁴³ 気象庁ホームページでは、海洋による二酸化炭素の吸収（北西太平洋）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_2/co2_trend/co2_trend.html

図 3.1-8 左図は、二酸化炭素の吸収・放出の分布を示している。赤道付近やインド洋北部では、二酸化炭素を多く含む海水が下層から湧き上がり、表面海水中の二酸化炭素濃度が大気中よりも高い海域となっているため、海洋から大気中に二酸化炭素が放出（赤色域）されている。それ以外の広い海域では表面海水より大気中の二酸化炭素濃度が高くなっているため、海洋が大気から二酸化炭素を吸収（青色域）している。特に中緯度から高緯度にかけては、冬季における海面水温の低下や、春から秋にかけての生物活動による二酸化炭素の消費に伴い、表面海水中の二酸化炭素濃度が低下するため、二酸化炭素の吸収が大きくなっている。図 3.1-8 右図は、二酸化炭素吸収量の月ごと及び年間の積算値を示している。海洋全体では、1990～2017 年の平均で年間に 18 億トン炭素（炭素の重量に換算した年間吸収量）の二酸化炭素を吸収している。河川からの流入を含む自然の炭素循環による 7 億トン炭素（IPCC, 2013）を考慮すると、海洋が蓄積する二酸化炭素の量は、化石燃料の燃焼や土地利用の変化といった人間の活動によって放出された二酸化炭素（2000 年代において 1 年あたりおよそ 90 億トン炭素（IPCC, 2013））の約 3 割に相当する。また、海洋の二酸化炭素吸収量は 2000 年以降増加傾向にある。

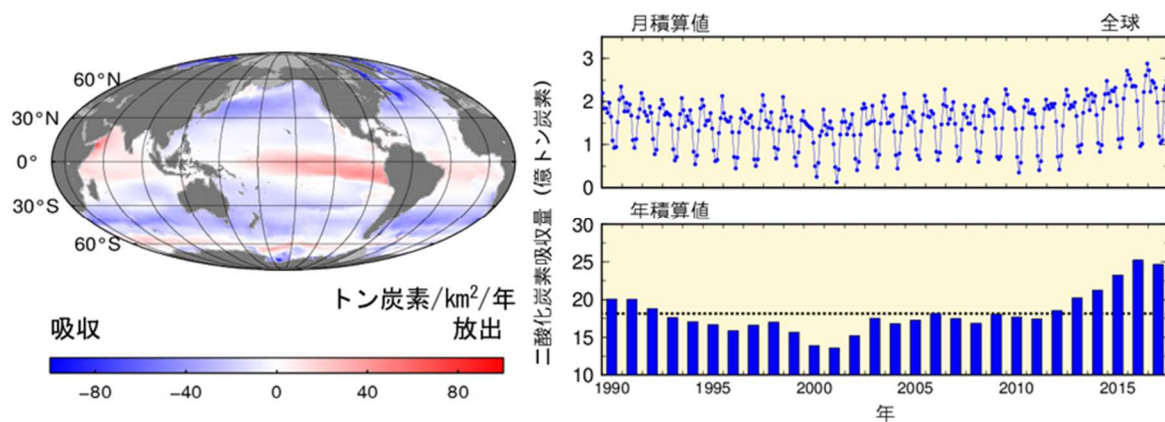


図 3.1-8 全海洋における二酸化炭素の吸収・放出の 2017 年の分布（左図）及び二酸化炭素吸収量の月ごと及び年間の積算値（1990～2017 年）（右図）⁴⁴

左図は 2017 年の全海洋における二酸化炭素の吸収・放出の分布を表したもので、赤で着色した海域は海洋から大気へ二酸化炭素が放出されていることを、青で着色した海域は大気中の二酸化炭素が海洋に吸収されていることを、灰色の領域は解析対象範囲外であることを示す。右図は月積算値及び年積算値を示したもので、年積算値の図の点線は 1990～2017 年の平均 18 億トン炭素を表す。単位は、炭素の重量に換算した値を用い、分布図では 1 年あたり単位面積あたりの「トン炭素/km²/年」、積算値では「億トン炭素」を用いている。

1990 年代以降の海洋内部の二酸化炭素の長期時系列観測データを利用して、東経 137 度に沿った北緯 10～30 度と東経 165 度に沿った北緯 10～35 度の海域に蓄積された二酸化炭素量を見積もった（図 3.1-9）。1990 年代以降、海面から深さ約 1200～1400 m までの海洋中に蓄積した二酸化炭素量は、東経 137 度及び東経 165 度で 3～12 トン炭素/km²/年（単位面積 1 年あたりに蓄積した炭素の重量に換算）であった。特に北緯 20～30 度付近で二酸化炭素の蓄積量が多い。東経 137 度と東経 165 度のこれらの海域では、大量の二酸化炭素が溶け込んだ海水が北太平洋亜熱帯モード水や北太平洋中層水と呼ばれる水塊によって海洋内部に輸送され、より深くまで分布しているため、北緯 10 度や北緯 35 度に比べて二酸化炭素蓄積量が多くなっていると考えられる。

⁴⁴ 気象庁ホームページでは、海洋による二酸化炭素吸収量について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_2/co2_flux_glob/co2_flux_glob.html

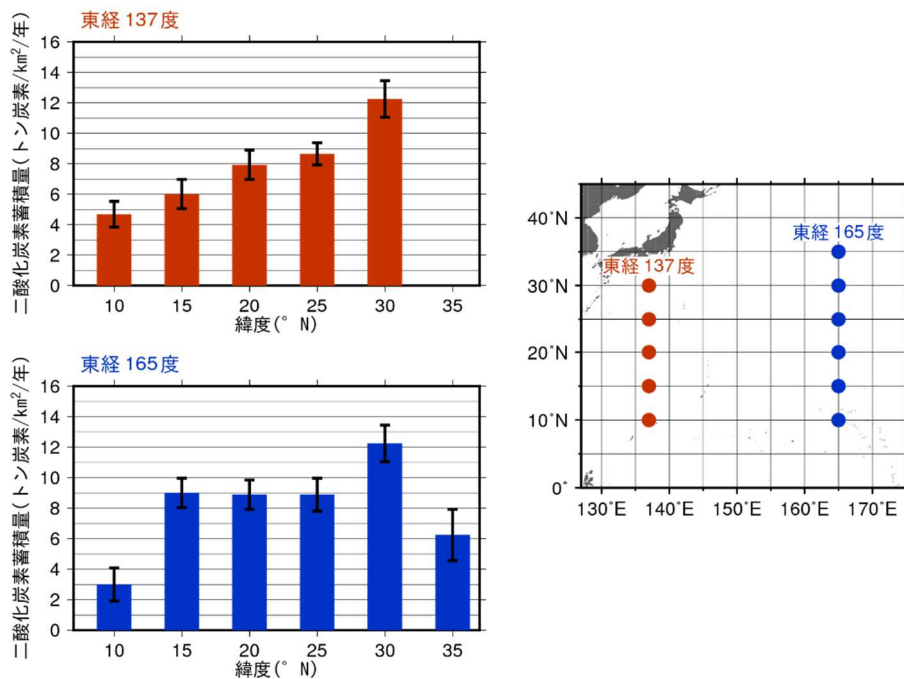


図 3.1-9 東経 137 度及び東経 165 度における緯度ごとの 1 年あたりの二酸化炭素蓄積量(左図)と解析対象とした海域(右図)⁴⁵
左図中のエラーバーは、信頼区間 95% の範囲を示す。解析期間は、東経 137 度が 1994 年～2018 年、東経 165 度が 1992 年～2018 年。

(4) 海洋酸性化

海洋は人間活動によって排出された二酸化炭素の大きな吸収源であり、海洋が二酸化炭素を吸収し内部に蓄積することで大気中の二酸化炭素増加を緩和する反面、海水の化学的性質に変化が生じている。特に、“海洋酸性化”として知られている海水の水素イオン濃度指数 (pH) の低下は、海洋による大気中の二酸化炭素の吸収能力を低下させて地球温暖化を加速させたり (Raven et al., 2005)、プランクトンの成長を阻害して海洋の生態系に影響を与えたりするなど、懸念すべき問題となっている。IPCC 第 5 次評価報告書 (IPCC, 2013) では、産業革命以降 (1750 年以降) の人間活動で排出された大気中の二酸化炭素を海洋が吸収することにより、現在までに全球平均の海洋表面 pH は 0.1 低下したと見積もられており、今世紀末までには更に 0.065～0.31 低下すると予測している。また、海洋に吸収された二酸化炭素は、海洋の循環や生物活動により海洋内部に運ばれ蓄積し、海洋内部での酸性化も指摘されている (Doney et al., 2009)。

海洋酸性化の現状を把握するため、二酸化炭素濃度等のデータを用いて、北西太平洋 (東経 137 度及び 165 度線) の表面海水中及び海洋内部の pH を見積もった (図 3.1-10、図 3.1-11、図 3.1-12)。その結果、表面海水中の pH は全ての緯度で明らかに低下しており、その低下率は、東経 137 度線では 1985 年から 2018 年までの約 30 年間で 10 年あたり平均 0.018 (0.013～0.021)、東経 165 度線では 1996 年から 2018 年までの約 20 年間で 10 年あたり平均 0.020 (0.014～0.031) であった。大気中及び海水中の二酸化炭素が年々増加しているために表面海水中の pH が低下していると考えられる。深さ約 150～800m における海洋内部の pH については、1990 年代以降、10 年あたり 0.011～0.035 低下していた。亜熱帯北部のほうが南部よりも低下率が大きい傾向がみられ、これは亜熱帯北部ほど二酸化炭素蓄積量が多いことと整合している。

⁴⁵ 気象庁ホームページでは、海洋中の二酸化炭素蓄積量に関する情報を公表している。
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_2/co2_inventory/inventory.html

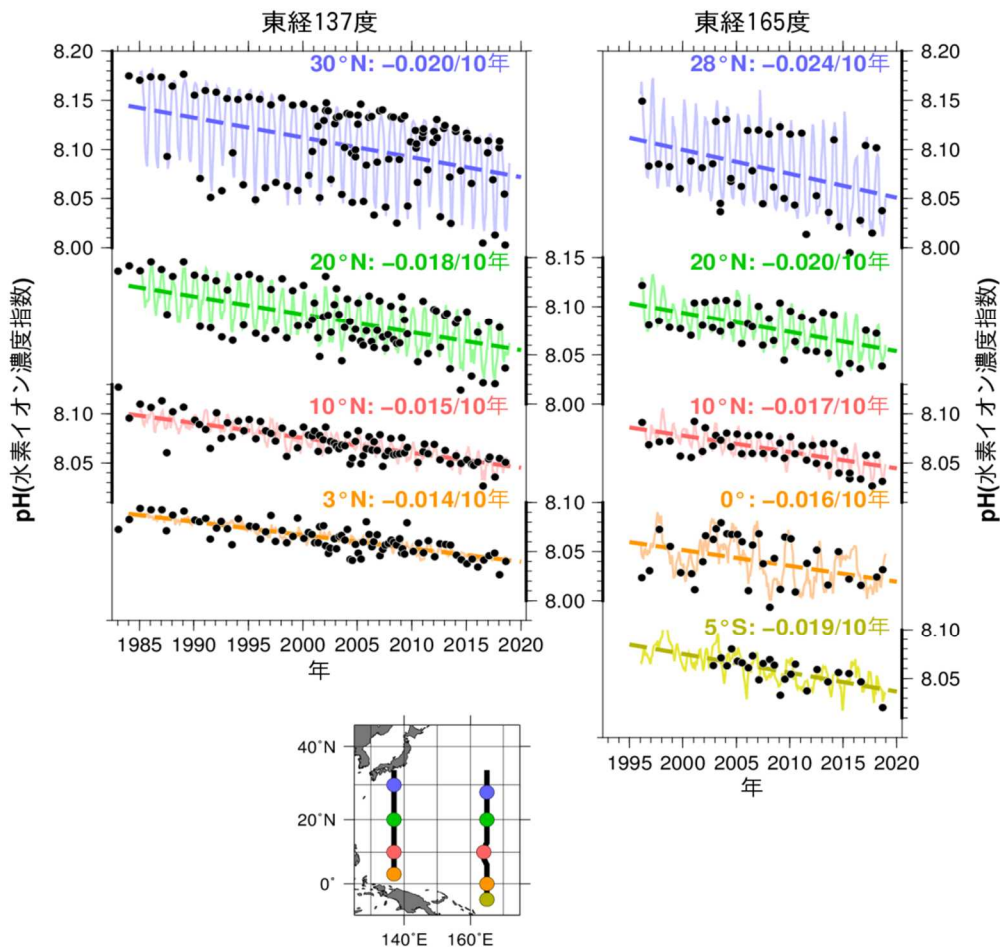


図 3.1-10 東経 137 度線（左上図）、東経 165 度線（右上図）の各緯度における表面海水中的の水素イオン濃度指数（pH）の長期変化⁴⁶

●黒丸は表面海水中の pH の観測値、実線細線は解析値、破線は長期変化傾向を示し、右上の数字は 10 年当りの変化率を示す。

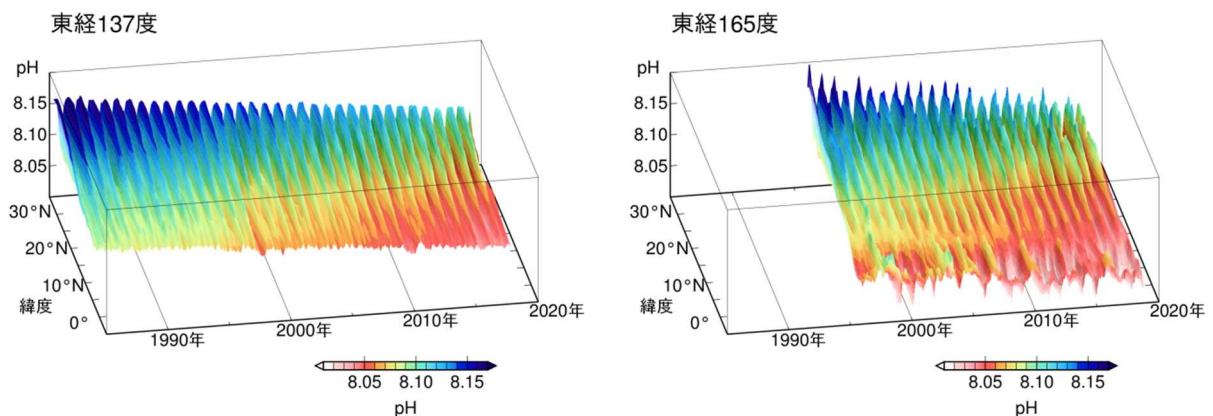


図 3.1-11 東経 137 度線（左図）、東経 165 度線（右図）における表面海水中的の水素イオン濃度指数（pH）の変化⁴⁷

⁴⁶ 気象庁ホームページでは、表面海水中の pH の長期変化傾向（北西太平洋）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_3/pHtrend/pH-trend.html

⁴⁷ 気象庁ホームページでは、表面海水中の pH の長期変化傾向（北西太平洋）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_3/pHtrend/pH-trend.html

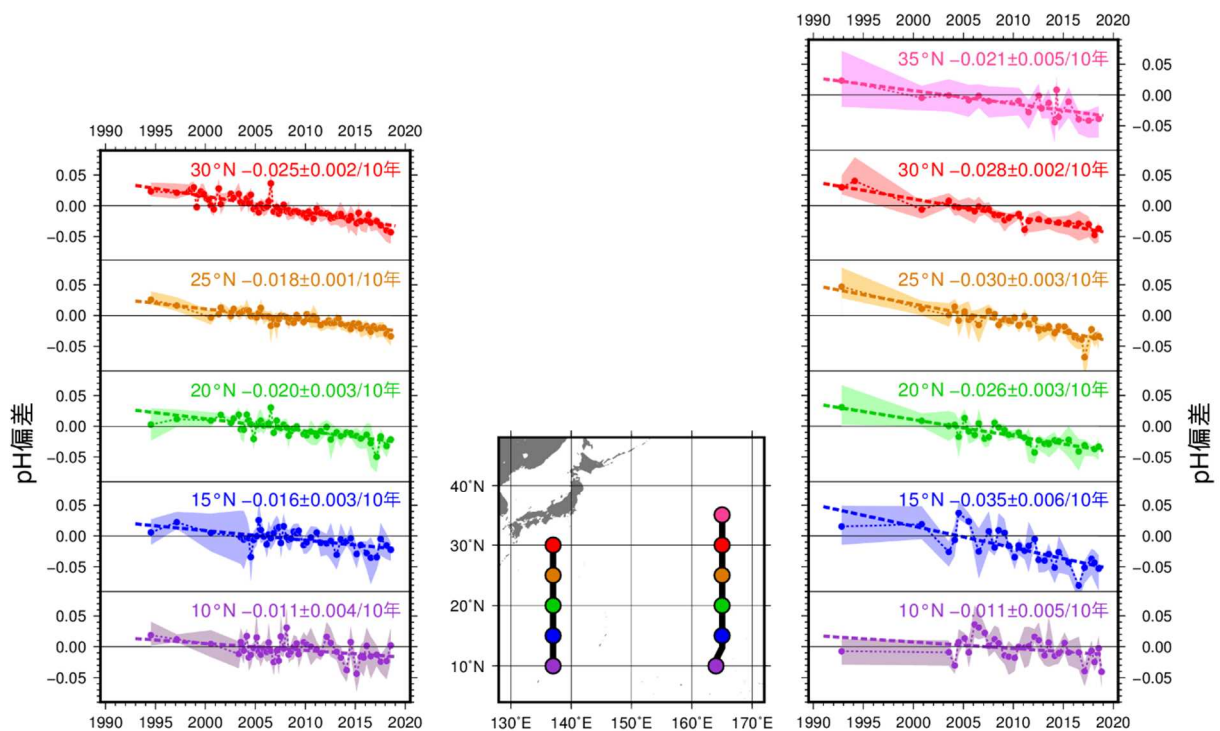


図 3.1-12 東経 137 度及び東経 165 度の各緯度における海洋内部での水素イオン濃度指数偏差の長期変化⁴⁸

東経 137 度及び東経 165 度の各緯度における深さ約 150m から 800m の海洋内部での pH の平均年偏差時系列を示す。年偏差は 1991 年から 2010 年までの平均である。塗りつぶしは標準偏差、破線は長期変化傾向を示し、右上の数字は 10 年当たりの変化率（減少率）を示す。

(5) 上空の二酸化炭素濃度

気象庁は防衛省の協力の下、2011 年から厚木航空基地（神奈川県綾瀬市）－南鳥島間の輸送機において、北緯約 34～25 度の航路上で水平飛行中の上空約 6km 及び南鳥島に降下中の異なる高度で二酸化炭素濃度の観測を行っている（Tsuboi et al., 2013; Niwa et al., 2014）。

図 3-1.13 に、水平飛行時に採取した大気中の二酸化炭素濃度（黒点）及びその平均値（青点）、また、南鳥島の地上で観測した濃度の月平均値（赤点）を示す。図中の破線は青点及び赤点の時系列データから、季節変動を取り除いた成分を示す。図が示すように、上空の二酸化炭素濃度は、地上における観測値と同様に年々増加している。ただし、破線が示すように、平均的には上空の濃度が地上の濃度よりも低い傾向にある。

南鳥島の地上観測では、冬から春にかけて濃度が高くなり、夏から秋にかけて濃度が低くなる。上空においても地上と同様の季節変動がみられるが、この地域においては冬から春にかけて、上空の濃度が地上の濃度よりも特に低くなる傾向がみられる。結果として、上空の濃度の季節変動の振幅は地上のものよりも小さくなっている。図 3-1.14 は、地上観測及び水平飛行時のデータに加えて、輸送機が南鳥島に降下する際に採取した大気中の濃度を用いて、観測開始以降の期間の平均的な季節変動を高度別に示したものである。冬から春にかけて、上空に向かうほど濃度が低くなっていることがわかる。

図 3-1.15 は、2 月と 8 月に実施された観測のうち、南鳥島降下中に採取した大気中の濃度から、観測当日の地上における濃度の日平均値を差し引いたものであり、鉛直方向の濃度変化を示している。

⁴⁸ 気象庁ホームページでは、海洋内部の pH の長期変化傾向（北西太平洋）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_3/pHin/pH-in.html

2月には上空に向かうほど濃度が低くなっているのに対し、8月は地上と上空の濃度値に大きな変化がみられない。

以上の結果は、大陸域において陸上生物圏の影響を受けた地表付近の大気が南鳥島の地上や上空まで輸送されていること、また、その輸送の様相が季節や高度により差異があることを示唆している。南鳥島付近でみられるような、冬から春にかけて上空の濃度が低くなり、夏に鉛直方向の濃度勾配が緩やかになる傾向は、アジアや北米においても航空機観測によって確認されている (Sweeney et al., 2015; Umezawa et al., 2018)。

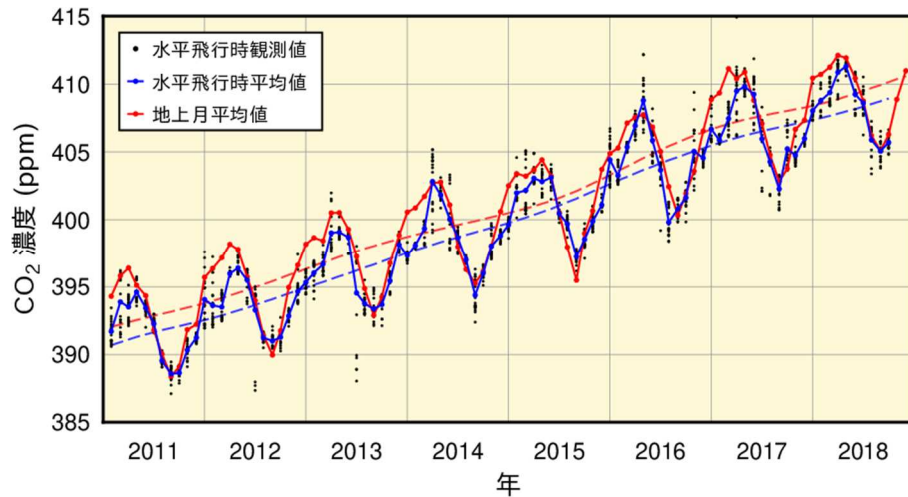


図 3.1-13 厚木航空基地－南鳥島間の航空機観測による水平飛行時（高度約 6km）に採取した大気中の二酸化炭素濃度（黒点）とその平均値（青点）及び南鳥島の地上における月平均二酸化炭素濃度（赤点）

青破線及び赤破線は、上空及び地上の各平均値からそれぞれの季節変動を取り除いた成分。算出方法は WMO (2009) による。

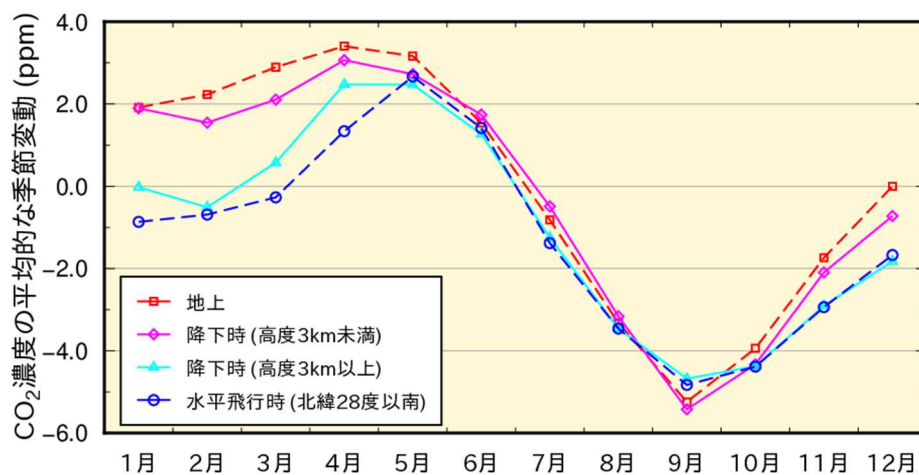


図 3.1-14 南鳥島付近における高度別の二酸化炭素濃度の平均的な季節変動

地上での月平均濃度（赤色）、北緯 28 度以南を水平飛行中に採取した大気中の濃度の平均値（青色）、降下時に採取した大気中の濃度のうち高度 3km 未満（桃色）と 3km 以上（水色）それぞれに対する平均値。地上での月平均濃度について季節変動を取り除いた成分を求め、それを各濃度時系列から差し引き、各月について平均したものを示している。

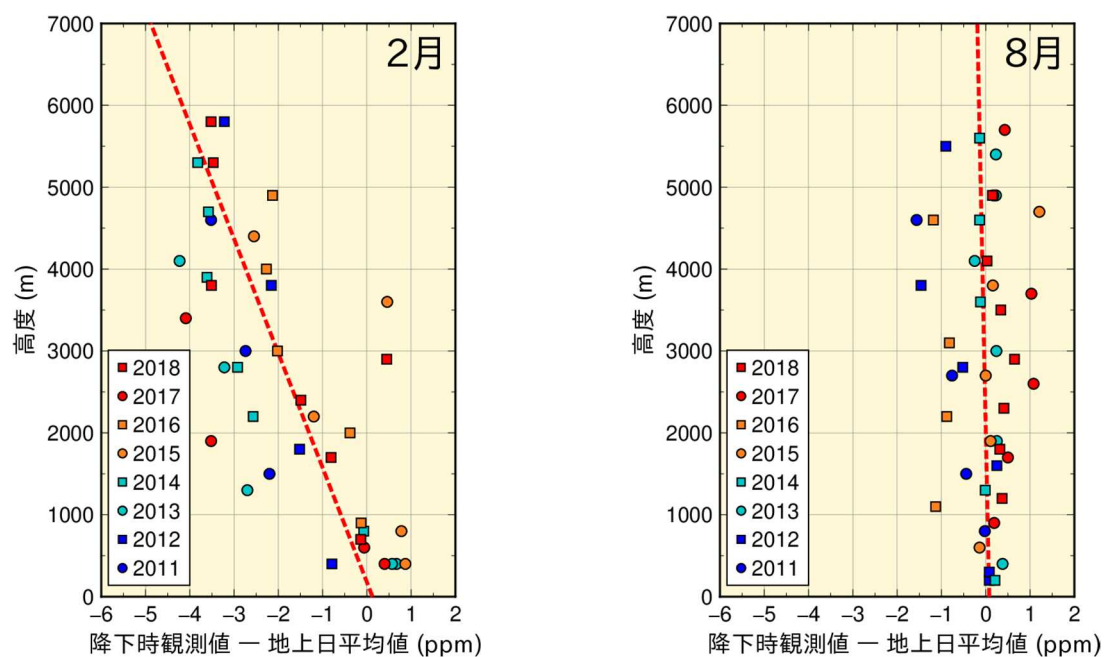


図 3.1-15 南鳥島付近における大気中の二酸化炭素濃度の鉛直分布

各年の 2 月（左）と 8 月（右）に実施された航空機観測のデータのうち、南鳥島へ降下中に採取した大気中の二酸化炭素濃度から、観測当日における南鳥島の地上の日平均値を差し引いたものを丸及び四角の印で示している（観測年によって印の色や形を変えている）。赤色の破線は、これらの印から最小二乗法によって求めた鉛直方向の濃度勾配を表す。

3.1.2 世界と日本におけるメタン

(1) 世界におけるメタン濃度

大気中のメタン濃度を図 3.1-16 に示す。WDCGG において世界的な濃度の把握が可能となった 1980 年代半ば以来上昇を続けてきたが、1999～2006 年にかけてはその増加がほぼ止まった。しかし、2007 年以降は再び増加している。増加が止まった原因については、IPCC (2013) 等でいくつかの可能性が指摘されているが、まだ特定されていない。一方、2007 年以降の増加については、熱帯の湿地及び北半球中緯度での人為起源による排出が寄与しているという見解が示されている (WMO, 2018b)。WDCGG の解析では 2017 年の世界平均濃度は 1859 ppb で、1984 年以降で最高値となった (表 3.1-1)。

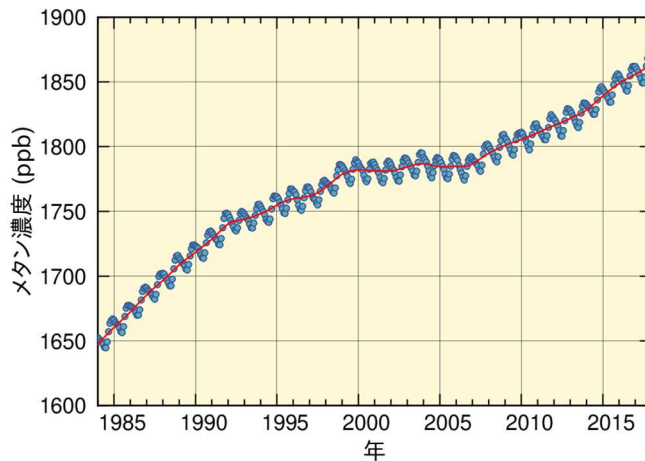


図 3.1-16 大気中のメタンの世界平均濃度

WDCGG が収集した観測データから作成した大気中のメタンの月別の世界平均濃度 (青丸) と、季節変動成分を除いた濃度 (赤線) を示す (WMO, 2018b)。算出方法は WMO (2009) による。解析に使用したデータの提供元は WMO (2019) に掲載されている。

メタンの濃度は北半球の中・高緯度帯から熱帯域にかけて大きく減少している。これはメタンの主な放出源が北半球陸域に多く、かつ南半球に向かうにつれて熱帯海洋上の豊富な OH ラジカル⁴⁹と反応し消滅するためである。また、夏季には紫外線が強くなることにより OH ラジカルが増加し、これと反応することでメタンが消滅するため、夏季にメタン濃度が減少し冬季に増加する季節変動を繰り返している様子がみられる (図 3.1-17)。

大気中のメタン濃度の増加は、工業化時代以降に著しく (157%増)、二酸化炭素の増加率 (46%増) をはるかに上回っている (表 3.1-1)。これは、自然界での放出に対して、人間活動による排出が相対的に大きいためと考えられる。一方で、その変動の要因については、人間活動に伴う排出や陸域の湿地等からの自然起源の放出、大気中での化学反応等が複合しており、定量的に未解明な部分が残されている。今後、世界規模での観測の充実が期待されている。

⁴⁹ OH ラジカルとは、オゾンに紫外線が作用し光分解することによって生じる酸素原子と、大気中の水蒸気が反応して生成する、極めて不安定で反応性が高い物質。紫外線と水蒸気が豊富な低緯度で多い。

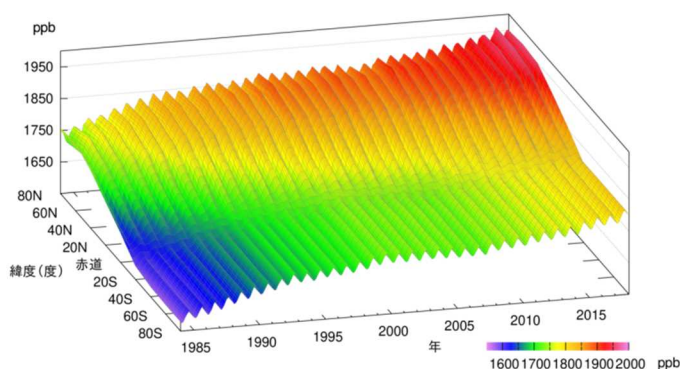


図 3.1-17 緯度帯別の大気中のメタン濃度の経年変化

WDCGG が収集した観測データから作成した緯度帯別に平均した大気中のメタン月平均濃度の経年変化を示す。算出方法は WMO (2009) による。解析に使用したデータの提供元は WMO (2019) に掲載されている。

(2) 日本におけるメタン濃度

国内のメタン濃度は、世界での傾向と同様に、高緯度ほど濃度が高く、夏季に濃度が減少し冬季に増加する季節変動を伴いながら増加している（図 3.1-18 (a)）。高緯度に位置する綾里は OH ラジカルとの反応による消滅が少なく、また放出源が多く存在する大陸に近いので、3 つの観測地点の中で最も濃度が高い。ほぼ同じ緯度帯にある与那国島と南鳥島は、夏季は同程度の濃度だが、冬季は与那国島の方が高濃度である。これは、夏季の与那国島と南鳥島が OH ラジカルの豊富な低緯度帯の海洋性気団とともに覆われる一方、冬季は大陸性の気団の張り出しにより、与那国島の方が大陸の放出源の影響を受けやすいためである。与那国島では、2010 年以降、冬季の濃度が綾里と同程度となることもあった。2018 年の年平均濃度は、綾里で 1941 ppb、南鳥島で 1893 ppb、与那国島では 1915 ppb で、前年に比べて増加し、観測開始以来の最高値となった（いずれも速報値）。

大気中のメタンの濃度年増加量の経年変化（図 3.1-18 (b)）には年々変動があり、観測所によって濃度年増加量が大きく異なる年が見られる。

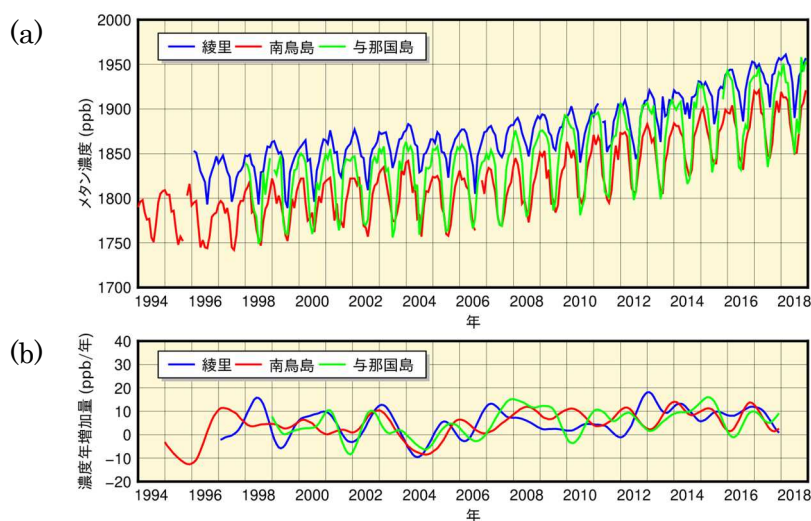


図 3.1-18 綾里、南鳥島及び与那国島における大気中のメタン月平均濃度 (a) と濃度年増加量 (b) の経年変化

濃度年増加量は、季節変動成分を除いた月別値から、各月の増加量を 1 年あたりに換算して求めている。算出方法は WMO (2009) による。

3.1.3 世界と日本における一酸化二窒素

大気中の一酸化二窒素濃度を図 3.1-19 に示す。地球規模で増加を続けており、WDCGG の解析によると 2017 年の世界平均濃度は 329.9 ppb であった。これは、工業化以前（1750 年当初）の平均的な値とされる 270 ppb と比べ 22% の増加である（表 3.1-1）。一酸化二窒素の季節変動は、二酸化炭素やメタンほど顕著には見られない。また、季節変動を除いた北半球と南半球の濃度の差も二酸化炭素やメタンほど顕著には見られないが、人為起源及び土壌の影響がより大きいと考えられる北半球が、南半球よりも 1 ppb 程度高い（図 3.1-20）。

綾里における一酸化二窒素濃度の経年変化を見ると、明瞭な季節変動は認められないが、年々増加している（図 3.1-21）。2018 年の年平均濃度は 332.7 ppb（速報値）であった。

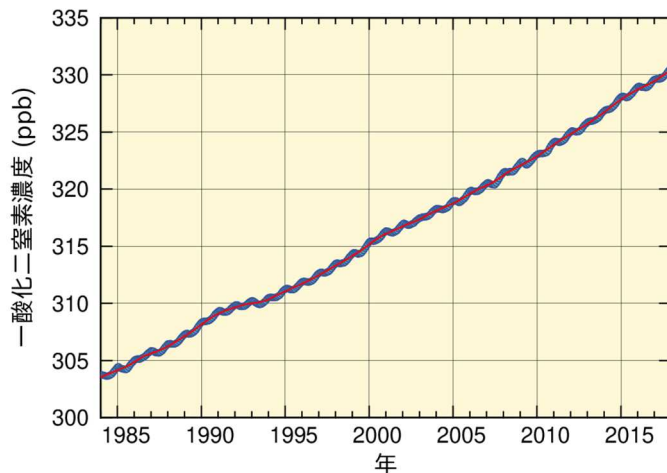


図 3.1-19 大気中の一酸化二窒素の世界平均濃度

WDCGG が収集した観測データから作成した大気中の一酸化二窒素の月別の世界平均濃度（青丸）と、季節変動成分を除いた濃度（赤線）を示す（WMO, 2018b）。算出方法は WMO（2009）による。解析に使用したデータの提供元は WMO（2019）に掲載されている。

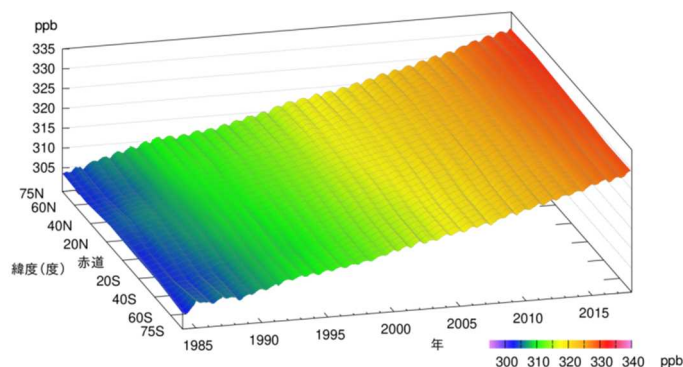


図 3.1-20 緯度帯別の大気中の一酸化二窒素濃度の経年変化

WDCGG が収集した観測データから作成した緯度帯別に平均した大気中の一酸化二窒素月平均濃度の経年変化を示す。算出方法は WMO（2009）による。解析に使用したデータの提供元は WMO（2019）に掲載されている。

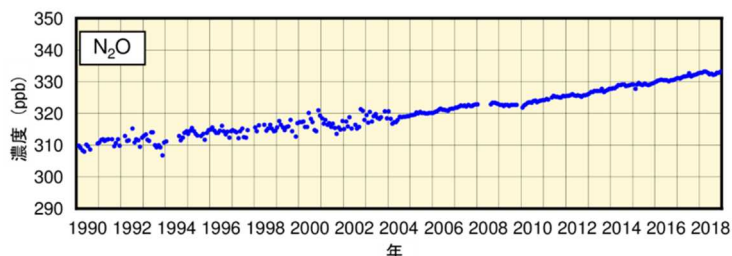


図 3.1-21 綾里における大気中の一酸化二窒素月平均濃度の経年変化

2004 年初めに観測装置を更新したため観測精度が向上し、観測値の変動が小さくなっている。

3.2 オゾン層と紫外線の変動⁵⁰

- オゾン全量は、1980 年代から 1990 年代前半にかけて大きく減少し、その後はわずかに増加傾向となっているものの、現在も少ない状態が続いている。
- 南極のオゾンホール⁵¹の年最大面積は、1980 年代から 1990 年代半ばにかけて急激に拡大したが、それ以降、拡大傾向はみられず、2000 年以降では統計的に有意な縮小傾向を示している。
- 国内 3 地点（札幌、つくば、那覇）全てで、観測を開始した 1990 年代前半にくらべ、近年の紅斑紫外線量は増加している。つくばでは、観測を開始した 1990 年から 10 年あたり 4.5% 増加した。
- オゾン層破壊物質であるクロロフルオロカーボン類（CFC 類）の大気中濃度は、減少傾向にある。

気象庁では、「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律」第二十二条第一項⁵¹に基づき、国内 3 地点（札幌、つくば、那覇）及び南極昭和基地においてオゾン層観測を実施し、つくば、南極昭和基地において、紫外域日射観測（紫外線観測）を実施している（図 3.2-1）。

また、綾里においてオゾン層破壊物質であるクロロフルオロカーボン類の大気中濃度を観測している。

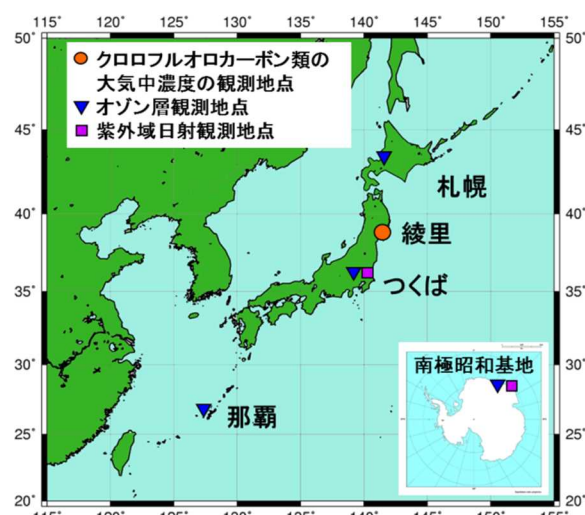


図 3.2-1 気象庁におけるオゾン層・紫外線の観測網（2018 年 12 月 31 日現在）

3.2.1 世界と日本におけるオゾン層

(1) 世界全体のオゾン層

世界のオゾン全量は、1980 年代から 1990 年代前半にかけて大きく減少した。その後、1990 年代半ば以降はほぼ変化がないかわずかに増加傾向となっているものの、現在も少ない状態が続いている（図 3.2-2）。地上観測データの全球解析が可能な最近 5 年間（2013～2017 年）の平均値は、1994～2008 年（世界平均のオゾン量の減少傾向がとまり、少ない状態で安定していた期間）と比較すると僅かに増加がみられるが、オゾン層破壊が進む前の値（1970～1980 年平均）と比較すると、まだ 3% ほど低い。

オゾン層破壊の原因となる成層圏の塩素量は、1980 年代に急速に増加した後、1990 年代半ば以降はほとんど変化していないか緩やかに減少している（3.2.3 節参照）。世界気象機関（WMO）と

⁵⁰ 気象庁ホームページでは、気象庁で実施した観測データ等を用いたオゾン層及び紫外線に関する解析結果を「オゾン層・紫外線の年のまとめ」として、毎年公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/diag_o3uv.html

⁵¹ 「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律」（昭和六十三年法律第五十三号）

第二十二条 気象庁長官は、オゾン層の状況並びに大気中における特定物質の濃度の状況を観測し、その成果を公表するものとする。

国連環境計画 (UNEP) による「オゾン層破壊の科学アセスメント：2018」(WMO, 2018a) では、モントリオール議定書の下に実施された施策により大気中のオゾン層破壊物質が減少し、2000 年以降、成層圏上部ではオゾン層の回復が始まっていると評価されている。



図 3.2-2 世界のオゾン全量の偏差 (%) の経年変化

実線 (緑) は世界の地上観測による月平均オゾン全量の偏差 (%) で、実線 (赤) はその 1970～1980 年の平均値、参照値期間 (1994～2008 年) の平均値、及び全球解析が可能な最近 5 年間 (2013～2017 年) の平均値。●印は衛星観測データ (北緯 70 度～南緯 70 度) の月平均オゾン全量偏差 (%)。地上観測及び衛星観測データは共に季節変動成分を除去している。使用した地上観測点数は 114 地点 (北半球 91 地点、南半球 23 地点)、偏差の基準は 1970～1980 年の平均値で衛星観測も地上観測の基準に合わせて補正している。

(2) 南極域上空のオゾンホール⁵²

2018 年のオゾンホールの年最大面積は、成層圏気温が例年より低かったため、最近 10 年間の平均よりも大きくなったが、1990 年代後半から 2000 年前半の顕著に大きかった期間ほどの規模には拡大しなかった (図 3.2-3 及び図 3.2-4)。オゾンホールの年最大面積は、1980 年代から 1990 年代半ばにかけて急激に拡大したが、それ以降では拡大傾向はみられなくなり、さらに 2000 年以降では、統計的に有意な縮小傾向を示している (詳細は、トピックス II 「南極オゾンホールの回復傾向」を参照)。

年毎の南極オゾンホールの規模は、気象状況により変動するが、長期的には成層圏のオゾン層破壊物質の総量に従って変化する。「オゾン層破壊の科学アセスメント：2018」(WMO, 2018a) では、今後、南極オゾンホールは次第に縮小し、(南極オゾンホールが発生する) 春季の南極域のオゾン全量が 1980 年の量まで回復するのは、2060 年代になると予測している。

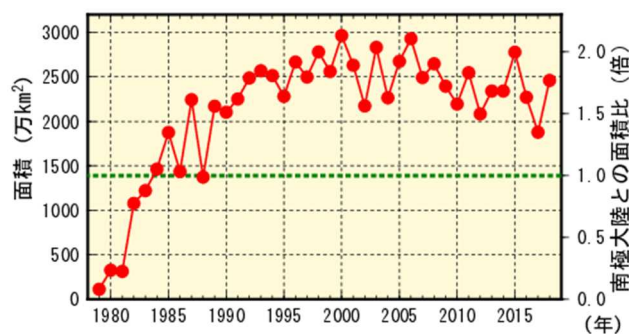


図 3.2-3 南極オゾンホールの面積の経年変化

南極オゾンホールの面積 (南緯 45 度以南のオゾン全量が 220 m atm-cm 以下の領域の面積) の推移。1979 年以降の年最大値の経年変化。なお、南極大陸の面積 (1390 万 km²) を緑点線で示す。米国航空宇宙局 (NASA) 提供の衛星データを基に作成。

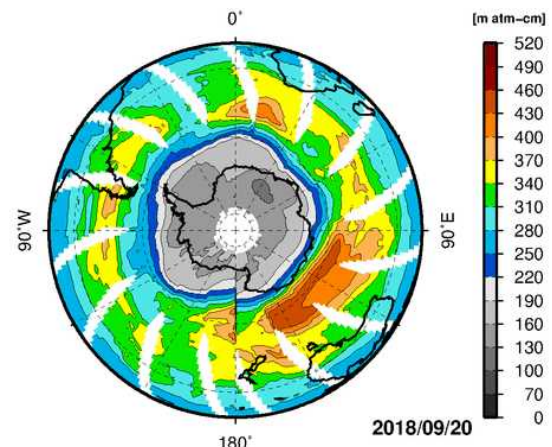


図 3.2-4 オゾンホール面積が年最大を記録した 2018 年 9 月 20 日のオゾン全量の南半球分布

中央の灰色の部分、オゾンホールの目安となる 220 m atm-cm 以下の領域。白色の部分は観測値が得られなかった領域。米国航空宇宙局 (NASA) 提供の衛星データを基に作成。

⁵² 「オゾンホール」については巻末の用語一覧を参照。

(3) 日本上空のオゾン層

国内のオゾン全量は、札幌とつくばでは1980年代から1990年代初めまで減少した後、緩やかな増加傾向がみられる(図3.2-5)。また、那覇のオゾン全量は、1990年代半ば以降緩やかな増加傾向がみられるが、近年はやや少なくなっている。

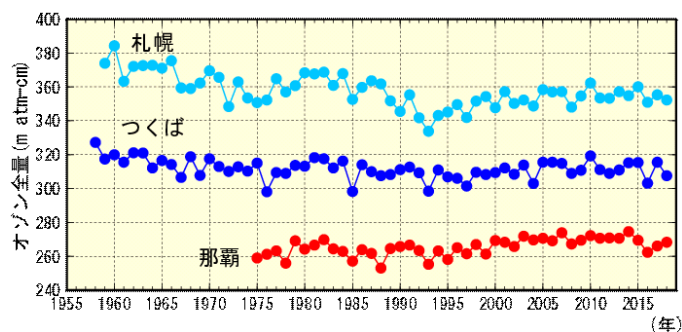


図 3.2-5 日本上空のオゾン全量の年平均値の経年変化

札幌、つくば、那覇、南鳥島におけるオゾン全量の観測開始からの年平均値の経年変化。気象庁におけるオゾン観測は、1957年につくばで開始し、現在は国内3地点(札幌、つくば、那覇)及び南極昭和基地でオゾン全量とオゾン鉛直分布の観測を実施している。

3.2.2 日本における紫外線

国内の紅斑紫外線量⁵³年積算値をみると、国内3地点(札幌、つくば、那覇)全てで、観測を開始した1990年代前半にくらべ、近年の紅斑紫外線量は増加している(図3.2-6)。つくばでは、観測を開始した1990年から10年あたり4.5%増加した。増加の特徴として、札幌では、1990年代半ばから2000年代に顕著な増加がみられ、つくばでは1990年代に顕著な増加がみられる。那覇では1990年代は増加傾向がみられたが、2000年代は変化傾向がみられなかった。

国内3地点における紅斑紫外線量の増加はオゾン全量の状況(図3.2-5)から説明することができず、雲量の減少など天候の変化やエアロゾル量の減少が増加の要因として考えられる(UNEP, 2015; 気象庁, 2011)。

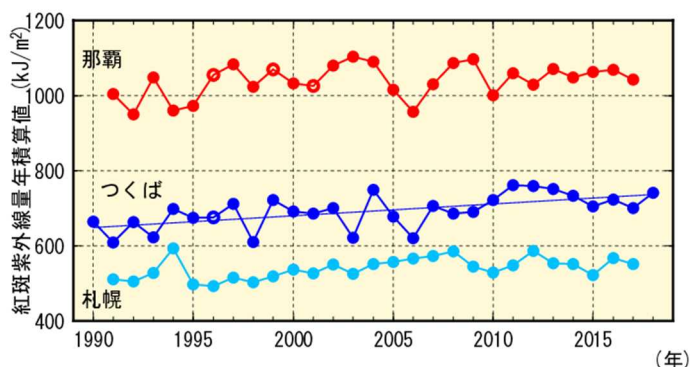


図 3.2-6 紅斑紫外線量年積算値の経年変化

札幌、つくば、那覇における紅斑紫外線量年積算値の観測開始からの経年変化。年積算値(●及び○印)は、月平均値に月日数をかけて12か月分を積算して算出する。○印は、月平均値が資料不足値(1か月の日別観測数が20日未満)となる月が含まれることを示す。つくばの直線は年積算値の回帰直線であり、統計的に有意な増加傾向を示す。※札幌、那覇は2018年1月をもって、紫外線観測を終了した。

3.2.3 世界と日本におけるオゾン層破壊物質

クロロフルオロカーボン類(CFC-11、CFC-12、CFC-113など、塩素等ハロゲン元素を含んだ炭素化合物であるハロカーボンの一種。以下CFC類と表記。)は成層圏オゾン層を破壊する物質であり、1987年に採択され、1989年に発効した「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」によりその生産等が規制されている。

また、ハロカーボン類は温室効果ガスであり、その大気中濃度は二酸化炭素の100万分の1程度であるが、単位質量あたりの温室効果は二酸化炭素の数千倍を超えるものもある。

(1) 世界のオゾン層破壊物質

世界の大気中のCFC類の濃度は、1980年代までは急速に増加したが、1990年代以降はモントリオール議定書による規制の効果により減少傾向が見られる(図3.2-7)。要素別にみると、CFC-11

⁵³ 「紅斑紫外線量」については巻末の用語一覧を参照。

は1992～1994年頃を境に減少傾向に転じている。CFC-12は2003年頃まで増加しその後減少傾向に転じている。CFC-113は北半球で1993年頃を境に、南半球では1996年頃を境としてゆるやかな減少傾向に転じている。また、CFC類の排出源が多く存在する北半球と排出源が少ない南半球の濃度を比較すると、1980年代よりも1990年代以降の方が差が小さくなっており、このことから、CFC類の排出を抑制した効果が大気中のCFC類の濃度に現れていることが分かる。

一方で、近年、大気中CFC-11濃度の減少速度が鈍化していることが報告されている。2012年以降のCFC-11全球濃度の減少速度は、2002～2012年の減少速度のおよそ3分の2に低下していることが観測から分かっているが、その要因として、CFC-11の全球排出量が増加していることが数値モデルの結果から推定されており、東アジアからの寄与が示唆されている(WMO, 2018a; WMO, 2018b; Montzka et al., 2018)。

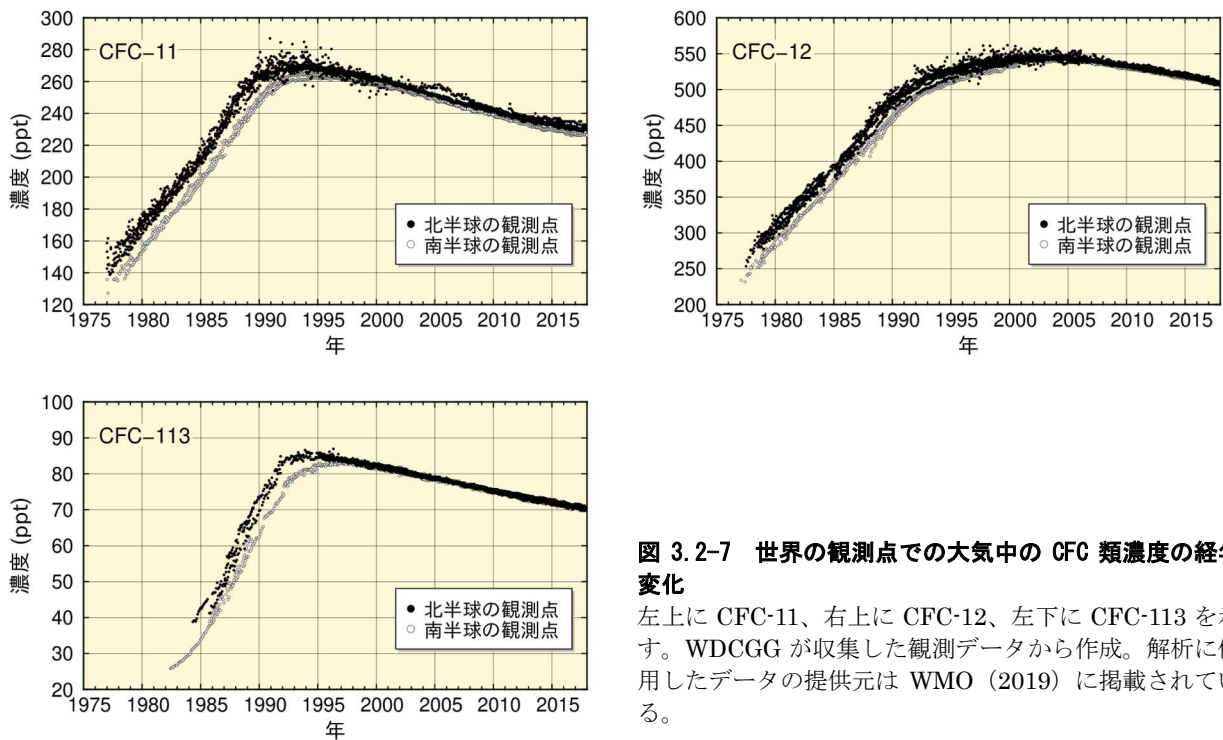


図 3.2-7 世界の観測点での大気中の CFC 類濃度の経年変化

左上に CFC-11、右上に CFC-12、左下に CFC-113 を示す。WDCGG が収集した観測データから作成。解析に使用したデータの提供元は WMO (2019) に掲載されている。

(2) 日本のオゾン層破壊物質

綾里における CFC 類の観測結果においても大気中濃度の減少傾向がみられる (図 3.2-8)。要素別にみると、CFC-11 は世界的傾向と同様に 1993～1994 年の約 270 ppt をピークとして減少している。2011 年の夏季に CFC-11 の排出が明瞭な極大を示しているが、これは、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災と津波に関係して損傷したポリウレタン発泡断熱材から夏期間の高温で漏れ出した結果かもしれないとされている (Saito et al., 2015)。CFC-12 はその増加が 1995 年頃から緩やかになり 2005 年頃をピークに減少している。また、CFC-113 は 2001 年頃まで傾向がはっきりしないが、その後減少傾向がみられる。

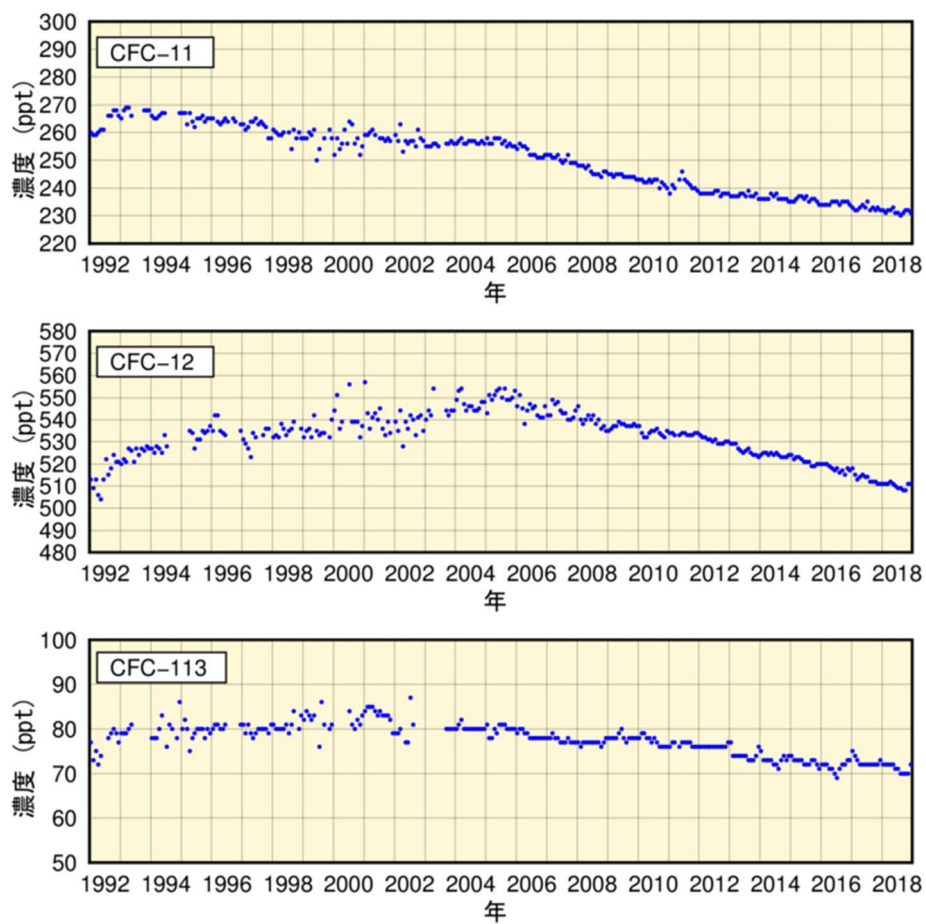


図 3.2-8 綾里における大気中の CFC 類濃度の経年変化

上から順に CFC-11、CFC-12、CFC-113 を示す。なお、2003 年 9 月に観測装置を更新したことにより観測精度が向上し、観測値の変動が小さくなっている。

3.3 日本におけるエアロゾル⁵⁴と地上放射の変動

- 地球規模で大きな影響を与えるような大規模な火山噴火は、1991年のピナトゥボ火山噴火以降は発生していないため、日本におけるエアロゾル等による大気混濁係数のバックグランド値は1963年のアグン火山噴火以前のレベルに戻っている。
- 2018年の黄砂観測日数は11日、黄砂観測のべ日数は104日だった。

3.3.1 エアロゾル

国内の直達日射量⁵⁵観測により得られる大気混濁係数⁵⁶から対流圏の変動を除いたバックグランド値の経年変化を見ると、火山噴火による成層圏エアロゾルの影響が明瞭に確認できる(図3.3-1)。1963年から数年継続しているやや高い値、1982～1983年と1991～1993年にみられる極大は、それぞれ1963年2～5月のアグン火山噴火(インドネシア)、1982年3～4月のエルチチョン火山噴火(メキシコ)、1991年6月のピナトゥボ火山噴火(フィリピン)によって火山ガスが成層圏に大量に注入され、成層圏が長期間にわたって混濁した結果である。ピナトゥボ火山噴火以降は大規模な火山噴火が発生していないため、日本における大気混濁係数はアグン火山噴火前のレベルまで戻っている。

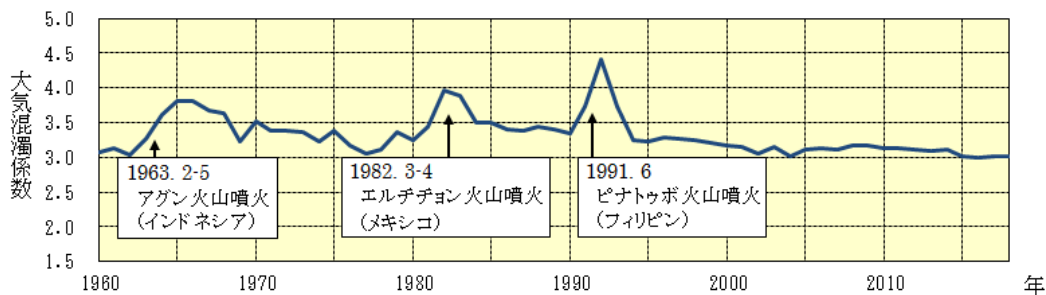


図 3.3-1 バックグランド大気混濁係数の経年変化 (1960～2018 年)

大気混濁係数に含まれる水蒸気や黄砂、大気汚染エアロゾル等対流圏の変動による影響を除くため、大気混濁係数の月最小値を用いて国内5地点(札幌、つくば、福岡、石垣島、南鳥島)の平均値を求め、年平均値を算出している。

3.3.2 黄砂

大陸より日本へ飛来する黄砂もエアロゾルの一種である。気象庁では、国内59地点(2018年12月31日現在)の気象台や測候所で、職員が目視により大気中に黄砂粒子が浮遊していると判断した場合に「黄砂」として記録している。2018年の黄砂観測日数(国内の気象官署のいずれかで黄砂現象を観測した日数。同じ日に何地点で観測しても1日として数える。)は11日(図3.3-2)、黄砂観測のべ日数(国内のそれぞれの気象官署で黄砂現象を観測した日数の合計。同じ日に例えば5地点で黄砂が観測された場合には5日として数える。)は104日(図3.3-3)であった。

1967～2018年の統計期間では、黄砂観測日数には変化傾向が見られないが、黄砂観測のべ日数には増加傾向がみられる。年々の変動が大きく、変化傾向を確実に捉えるためには今後のデータの

⁵⁴ 「エアロゾル」については巻末の用語一覧を参照。

気象庁ホームページでは、エアロゾルや黄砂に関する情報を公表している。

<https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/kosahp/aerosol.html> (黄砂・エアロゾル)

<https://www.jma.go.jp/jp/kosa/> (黄砂情報(実況図))

<https://www.jma.go.jp/jp/kosafcst/index.html> (黄砂情報(予測図))

⁵⁵ 直達日射量とは、太陽から地表面に直接入射するエネルギーである。直達日射量からは大気の濁り具合に関する指標であるホイースナー・デュボアの混濁係数(大気混濁係数)を算出することができる。

⁵⁶ 大気混濁係数は、エアロゾルのほか、水蒸気、オゾン、二酸化炭素等の日射の散乱・吸収に寄与する種々の物質を含む現実の大気の光学的厚さ(日射に対する大気の不透明さ、濁り具合)が、酸素や窒素などの空気分子以外の物質が存在しないと仮定した大気的光学的厚さの何倍であるかを表し、値が大きいくほど大気を濁す物質が多いことを示す。

蓄積が必要である。

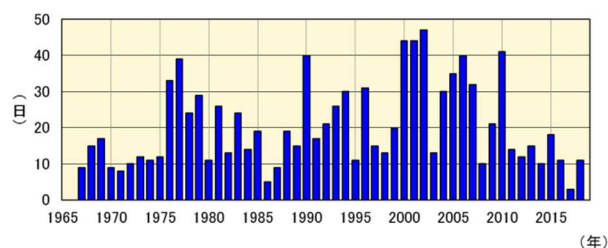


図 3.3-2 日本における年別の黄砂観測日数(1967～2018 年、同期間観測を継続している国内 59 地点)

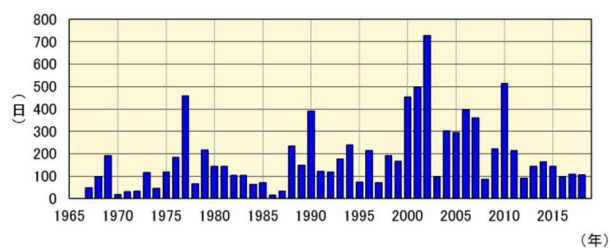


図 3.3-3 日本における年別の黄砂観測のべ日数(1967～2018 年、同期間観測を継続している国内 59 地点)

3.3.3 日射と赤外放射

地球における放射収支の変化は気候変動をもたらすため、その変化を監視することは重要である。気象庁では、直達日射、散乱日射及び下向き赤外放射⁵⁷を国内 5 地点（札幌・つくば・福岡・石垣島・南鳥島）で行っている（図 3.3-4）。

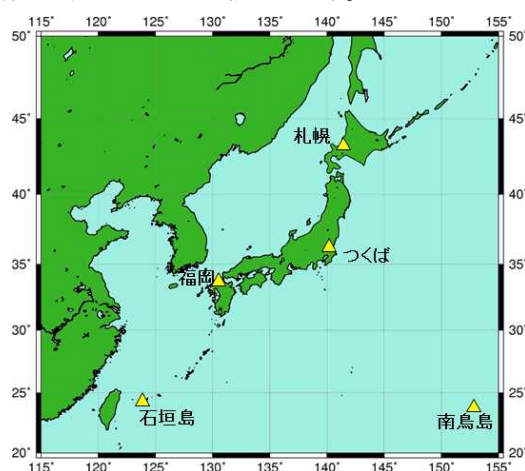


図 3.3-4 国内における日射及び赤外放射の観測地点

日本国内では札幌、つくば、福岡、石垣島、南鳥島の 5 地点で直達日射、散乱日射及び下向き赤外放射の観測を行っている。

(1) 全天日射量

世界の多くの地域における全天日射量は、1960 年頃から 1980 年代後半まで減少し、1980 年代後半から 2000 年頃まで急速に増加し、その後は大きな変化が見られないという傾向が報告されている (Ohmura, 2009)。日本における変化傾向（国内 5 地点平均）によると、1970 年代後半から 1990 年頃にかけて急激に減少し、1990 年頃から 2000 年代初めにかけて急激に増加し、その後は大きな変化は見られない。これは、前述の世界的な傾向とほぼ整合している（図 3.3-5）。

全天日射量の長期変化の原因としては、大気中の人為起源エアロゾルの変化による影響が大きく、その他、雲量や雲の特性の変化も影響を与えていると考えられている (Wild, 2009)。日本の 1990 年頃から 2000 年代初めにかけての急激な増加の原因についても、その 2/3 が人為起源エアロゾルの減少によるもので、残りの 1/3 が雲量の減少によるものと評価されており (Norris and Wild, 2009)、人為起源エアロゾルが全天日射量の変化に対して非常に大きな影響を与えていることが示されている。また、エアロゾルは種類によって光学特性が異なる。先述の日本における急激な増加には、大気中に含まれる人為起源エアロゾル総量の減少のみならず、その構成の変化による平均的な光学的特性の変化が影響を及ぼしていることが解析により示されている (Kudo et al., 2012)。

⁵⁷ 下向き赤外放射とは、天空の全方向から地表面に入射する赤外放射（赤外線）である。下向き赤外放射は、大気中の雲・水蒸気・炭酸ガス等からその絶対温度の 4 乗に比例して放射されるので、地球温暖化の監視に利用できる。

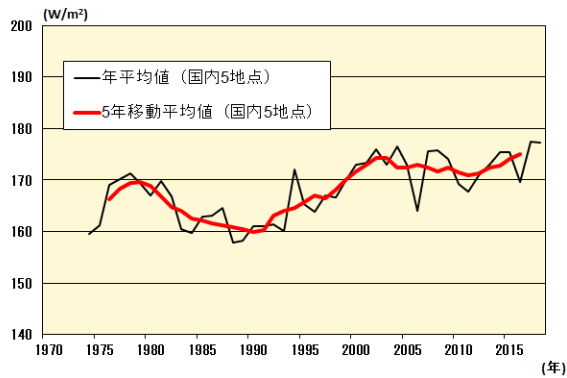


図 3.3-5 全日射量の年平均値及び 5 年移動平均値の経年変化

国内 5 地点（札幌、つくば、福岡、石垣島、南鳥島）の平均を示す。2010 年に各地点で順次観測装置を更新し、より高精度な観測データが得られるようになった。

(2) 下向き赤外放射量

地球温暖化の原因物質である二酸化炭素を始めとする大気中の温室効果ガスは、人間活動により年々増加を続けている。温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化のシグナルは、地上気温の上昇よりも下向き赤外放射量の増加に明瞭に表れるため、下向き赤外放射量は地球温暖化の検出に有効な観測要素である。数値モデル実験の結果によれば、個々の観測地点における 20 年間の観測データを解析すれば、95%水準で統計的に有意な増加が検出可能であると示唆され、約 10 年間の実際の観測データによる解析では増加の兆候が明瞭に示されている (Wild and Ohmura, 2004)。

日本における下向き赤外放射量については、1990 年代初めからつくばにおいて研究観測が行われている。この観測データを用いて長期変化傾向を解析すると、1993～2018 年の期間に 1 年あたり約 0.3 W/m^2 の割合で増加している (図 3.3-6)。これは、全世界の基準地上放射観測網 (BSRN) 20 観測地点の解析結果 (1992～2009 年において、年 0.3 W/m^2 の割合で増加) と整合している (WCRP, 2010)。

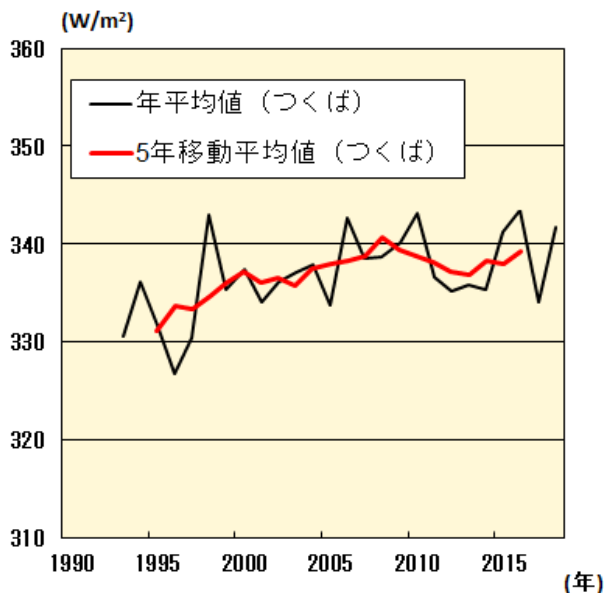


図 3.3-6 下向き赤外放射量の年平均値及び 5 年移動平均値の経年変化（つくば）