

# 地球温暖化と大気汚染

かしま ゆうじ  
鹿島 勇治

一般財団法人 日本環境衛生センター  
環境事業本部 環境事業第二部長

## 1. はじめに

地球温暖化物質には、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の他に、メタン、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O)、及び代替フロン類 (ハイドロフルオロカーボン) 等が知られており、これらの人為起源の温室効果ガスの総排出量は、CO<sub>2</sub>換算で全体の24%を占めています (図1)。表1に温室効果ガスの特徴を示します。

これらの物質は、現在の大気中濃度であればヒトへの直接的な健康影響はないことから、光化学オキシダントやPM<sub>2.5</sub>のような大気汚染物質とは区別されています。ちなみに、日本における「大気汚染物質」とは、これまでに大気汚染防止法で規制の対象とされてきた窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) などをはじめとする、大気中に存在する有害な物質及び物質群の総称です。

メタンや光化学オキシダントの主な成分であるオゾン (O<sub>3</sub>)、微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>)・浮遊粒子状物質 (SPM) に含まれる黒色炭素 (ブラックカーボン:BC) は、地球温暖化に影響を及ぼす因子として、短寿命気候強制因子 (Short-Lived Climate Forcers : SLCFs) として分類され、短寿命気候汚染物質 (Short-Lived Climate

Pollutants : SLCPs) と言われることもあります。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の『1.5℃特別報告書』によると、気候変動を1.5℃以下に抑えるためには、CO<sub>2</sub>の排出量を2030年までに45%、2050年までにほぼ「正味ゼロ」にする必要があり、SLCFsについてもBCを2030年までに35%、メタンを2030年までに37%、HFCを2050年までに70%から80%削減する必要があるとしています (CCAC, 2019)。

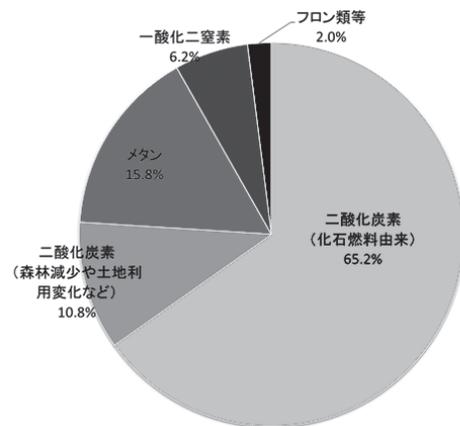


図1 人為起源の温室効果ガスの総排出量に占めるガスの種類別の割合 (2010年の二酸化炭素換算量での数値: IPCC第5次評価報告書より作図)  
出典: 気象庁 温暖化ガスの種類

表1 温室効果ガスの特徴

室効果ガス	地球温暖化係数(*)	性質	用途、排出源
二酸化炭素 (CO <sub>2</sub> )	1	代表的な温室効果ガス	化石燃料の燃焼など。
メタン (CH <sub>4</sub> )	25	天然ガスの主成分で、常温で気体。よく燃える。	稲作、家畜の腸内発酵、廃棄物の埋立てなど。
一酸化二窒素 (N <sub>2</sub> O)	298	数ある窒素酸化物の中で最も安定した物質。他の窒素酸化物(例えば二酸化窒素)などのような害はない。	燃料の燃焼、工業プロセスなど。
HFCs(ハイドロフルオロカーボン類)	1,430 など	塩素がなく、オゾン層を破壊しないフロン。強力な温室効果ガス。	スプレー、エアコンや冷蔵庫などの冷媒、化学物質の製造プロセスなど。
PFCs(パーフルオロカーボン類)	7,390 など	炭素とフッ素だけからなるフロン。強力な温室効果ガス。	半導体の製造プロセスなど。
SF <sub>6</sub> (六フッ化硫黄)	22,800	硫黄の六フッ化物。強力な温室効果ガス。	電気の絶縁体など。
NF <sub>3</sub> (三フッ化窒素)	17,200	窒素とフッ素からなる無機化合物。強力な温室効果ガス。	半導体の製造プロセスなど。

(\*) 地球温暖化係数とは、温室効果ガスそれぞれの温室効果の程度を示す値です。ガスそれぞれの寿命の長さが異なることから、温室効果を見積もる期間の長さによってこの係数は変化します。ここでの数値は、京都議定書第二約束期間における値になります。

参考文献：3R・低炭素社会検定公式テキスト第2版、温室効果ガスインベントリオフィス  
 出典：全国地球温暖化防止活動推進センター

本稿においては、地球温暖化に寄与するSLCFsとN<sub>2</sub>Oについて最近の知見について概説します。

## 2. 短寿命気候強制因子 (SLCFs)

### 2.1 メタン

メタンは、CO<sub>2</sub>に次いで地球温暖化に及ぼす影響が大きな温室効果ガスであり、湿地や水田から、あるいは家畜及び天然ガスの生産やバイオマス燃焼、廃棄物の埋立てなど、その放出源は多岐にわたります。メタンは、主に大気中のOHラジカルと反応し、消失します。

メタンは、すべての温室効果ガスが地球温暖化に与える影響の23%分(間接的な効果を含めると34%、図2参照)を担っており、大気中での平均寿命が約10年とCO<sub>2</sub>よりも短いにもかかわらず、100年間で比較したときの温暖化係数(GWP-100)では28倍、20年間では(GWP-20)約84倍となっ

ています。そのため、今後メタンの放出量を削減することは、効果的に地球温暖化を緩和するためにも極めて重要であると考えられています(Jackson *et al.*, 2020)。

温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)が解析した2019年の世界の平均濃度は、前年と比べて8ppb増えて1,877ppbで、工業化(1750年)以前の平均的な値とされる722ppbと比べて、160%増加しています(WMO, 2020)。

グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)<sup>\*1</sup>の『世界メタン収支2000-2017』によれば、メタンの総放出量に対する人為起源の割合は約60%と半分以上を占めており、近年の放出量の増加は、人為起源放出(主に化石燃料、農業活動や廃棄物部門からの放出)の増加によるもので、自然発生源から放出されるメタンの放出量はほとんど変化していないことが報告されています(Saunio *et al.*, 2020)。気候変動の緩和には、化石燃料、農業活動や廃棄物部門のメタン放出量を減らすことが必要であること

を今回の結果は示しています。

近年、メタンが樹木の樹幹部でも細菌や紫外線照射で生成されているという報告が話題となりました (Covey & Megonigal, 2108)。乾燥した高地の森林では、メタンを消費する土壌細菌の活動によって、大気からメタンを吸収していると考えられてきましたが、木から放出されるメタンの量が、吸収される量と同等かそれを上回っている可能性も指摘され、GCPがまとめた『世界メタン収支2000-2017』においても、主な発生源のひとつに樹木を含められています。森林の保全是、CO<sub>2</sub>吸収・固定する機能を果たす一方で、地球温暖化物質であるメタンの発生源でもあるとすると、植物起源の温室効果ガスの収支について、今後一層の調査、研究が必要となるかもしれません。

※1 2001年に発足した国際研究計画で、持続可能な地球社会の実現をめざす国際協働研究プラットフォーム「フューチャー・アース」のコアプロジェクト。

## 2.2 対流圏オゾン

光化学オキシダントであるオゾンは、NO<sub>x</sub>や揮発性有機化合物 (VOCs) が光化学反応で生成する物質で、日本では近年NO<sub>x</sub>や人為起源のVOCsが減少しているにもかかわらず光化学オキシダントの環境基準達成率は0.1%以下と著しく低く、その対策が重要な課題となっています (環境省, 2021)。対流圏オゾンは地球温暖化物質でもあり、モデルで再現したオゾン変化から推算した放射強制力は0.40 W/m<sup>2</sup>で、CO<sub>2</sub>、メタン、BCに次いで大きい物質で

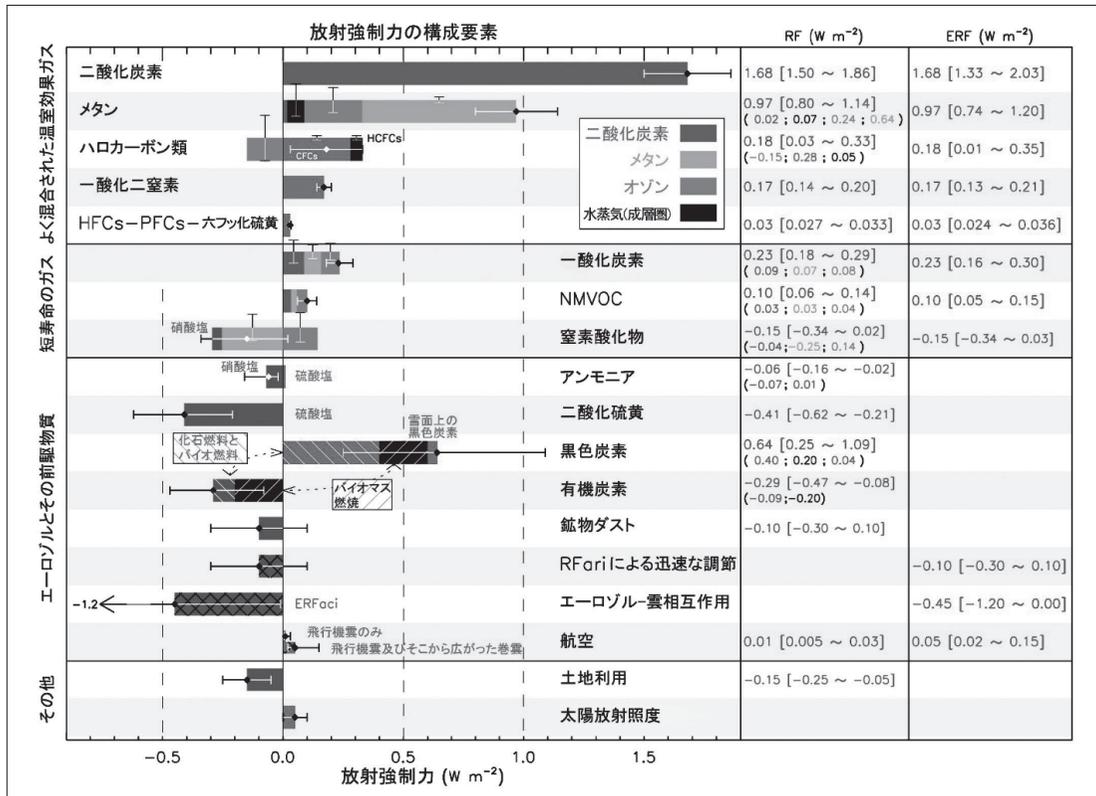


図2 1750年から2011年にかけて排出された成分ごとに示した、工業化時代における気候変動の放射強制力 (RF)

出典：IPCC第5次評価報告書 第1作業部会報告書 技術要約 気象庁訳

す（図2参照）。

これまでの研究結果からオゾン生成には、人為起源のVOCだけではなく、植物が放出するイソプレンやモノテルペン類等の植物起源VOC（BVOC）が関与していることがわかっています。BVOCの放出量は、光強度や温度に依存し、植物種によっても異なることが知られていますが、VOCを放出する種においても放出量と環境要因との関係は十分に明らかにされていません。イソプレンなどのBVOC放出量は日射量に左右されるため、気温上昇により短期的にBVOC放出量が増えることにより、オゾンとメタンを増加させて、温暖化を加速させる可能性があることが指摘されています（NIES, 2017）。このように、オゾンの生成メカニズムは大変複雑です。

環境省では、平成29年5月よりVOC成分の自動測定機を全国5カ所に設置し、イソプレン等BVOCを含む54物質について1日2回（2時と14時）のモニタリングを行っています。また東京都等では、樹木からのBVOC放出量の調査が進められています（國分ら, 2020）。

オゾンは植物の気孔から吸収され、植物の光合成能力や成長速度、CO<sub>2</sub>吸収・固定能力にも悪影響を及ぼすことが知られていますが（Kitao *et al.*, 2016；Tobita *et al.*, 2019）、オゾンの長期高濃度暴露によりBVOCの放出量が減少するという研究結果もあり（谷, 2018）、オゾンによる植物への影響も複雑です。

以上のように、放射強制力の大きいオゾンの生成を抑制するためには、BVOCの放出量やオゾンに対する植物種の感受性の違い等についても今後一層の調査・研究が必要と思われます。

### 2.3 黒色炭素（ブラックカーボン：BC）<sup>\*2</sup>

BCは太陽の光を吸収してそれを含む気層を暖め、地表に届く太陽光を減らす一方、

雪氷のような明るい地表面に沈着すると、その光吸収性により、氷や雪の融解を加速したり、地表を暗くすることにより、気候に影響を与えることが知られています。北極や南極をはじめとして、世界各国で観測される氷河や氷山の減少や消失は、こうしたBCによる気象変動への影響が顕在化した例と言われています。ヒマラヤ山脈を含むチベット高原では、1960年代と比べて氷河が約20%縮小しており、この現象は、世界全体の地球温暖化より5倍以上速いペースで進んでいるという研究結果も発表されています（NASA, 2009）。

IPCC第5次評価報告書によれば、地球温暖化全体に占める影響のうちBCの割合は23%で、CO<sub>2</sub>（59%）、メタン（23%）に次いで影響が大きいことが報告されています（図2参照）。

BCの発生源はディーゼルエンジンの排気ガス、石炭の燃焼、森林火災、薪等の燃料やバイオマス燃料の燃焼など、炭素を主成分とする燃料が燃焼した際に主に発生すると言われています。ただし、BCの排出量は、社会経済的な統計情報に基づいて推計されているため、その不確かさの幅は中央値の1/2～2倍と広く、また世界の30%にも上るとされる中国からの排出量についてその状況について把握されていませんでした。

しかしながら、最近の海洋研究開発機構、神戸大学、及び国立環境研究所の共同研究により、信頼度の高い2種の計測機による測定値と数値シミュレーションを併用して解析した結果、中国からのBC排出量が不確かさ±27%で、最近10年で4割も減少していることが見いだされています（Kanaya *et al.*, 2020）。この減少傾向の理由は、中国でのPM<sub>2.5</sub>削減政策に伴いその一成分であるBC排出も抑制されたためと考えられています。IPCC第6次評価報告書では、中国からのBC排出量は2014年まで増加し

たものとしてその気候影響が評価されていますが、この結果は、BCによる温暖化影響が、今後報告されるIPCC第6次評価報告書での評価より、実際は低く抑えられていることを意味します。

日本では、最初に工業起源のBC排出量の削減が進み、1990年ごろからディーゼル車規制の効果が現れ、2014年における総排出量の削減率は約9割に達しています（大原・黒川、2018）。また民生部門では、天然ガスやLPGなどクリーンな燃料への転換が進んだ結果、同部門からのBC排出量は非常に少ないことが報告されています。また、2019年度に環境省が実施したPM<sub>2.5</sub>のインベントリ調査では、総排出量（12万t）の約5割（5.6万t）が船舶からの排出ガスで最も多く、次いで、巻き上げ・タイヤ（1.3万t）、野焼き（1.1万t）、自動車排出ガス（1.1万t）となっており、固定発生源や自動車排出ガスの寄与が小さくなり、BCの一層の削減には、船舶の排出ガス対策が重要となっています。

※2 「ブラックカーボン（BC）」が使われるようになったのは比較的最近のことで、すすや元素状炭素（EC）と類似した意味で用いられています。計測手法や専門分野により使用する用語、呼称が異なり、例えば、「EC」はエアロゾルの成分として分析される場合に、また「BC」は光吸収性に注目した研究で使用されたりしています。

## 2.4 HFC（ハイドロフルオロカーボン）

HFCは、オゾン層破壊物質であるフロン類の代替物質（代替フロン）として使用されるようになった冷媒で、オゾン層破壊係数（ODP：Ozone-Depleting Potential）<sup>※3</sup>はゼロですが、GWPが非常に大きい温室効果ガスです（表1参照）。HFCの使用増加に伴い、近年、大気中の濃度が増加して

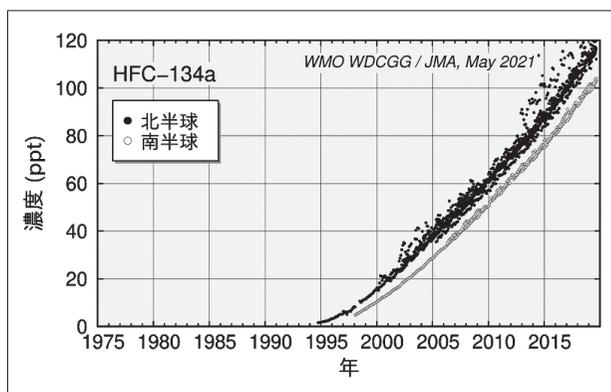


図3 HFC-134aの経年変化

出典：気象庁 ハロカーボン類（フロン類）

います（図3）。弊センターでは、環境省の委託業務でオゾン層破壊物質のモニタリングを長年実施しており、HFCについては、2000年からモニタリングを開始しています。図3と同様に、北海道（バックグラウンド地点）のHFC-134a（GWP 1,430）濃度は増加し続けています（環境省、2019）。

日本では、フロン類の製造から廃棄までのライフサイクル全般で包括的な対策を実施するため、フロン回収・破壊法を改正し、平成27年4月に『フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律』（フロン排出抑制法）が施行されました。この改正により、冷凍空調機器からの使用時漏えい防止や回収率向上等を図り、HFCを含むフロン類の排出抑制対策が強化されています。機器からの漏洩の管理手法等を定めた日本のフロン排出抑制対策は、途上国でも活用できる対策であり、途上国のフロン対策支援を通じて、東アジア地域等のフロン類の削減の貢献が期待できます。

2016年10月のモントリオール議定書改正（キガリ改正）により、新たに温室効果の高いHFCの生産・消費量の削減義務が課され、先進国は、HFCを2029年までに70%、2036年までに85%削減する必要があります。この削減義務を達成するためには、エアコンやショーケース等で用いられてい

るHFC冷媒を、エネルギー効率を確保しつつ、より温室効果の低い物質に転換（ノンフロン・低GWP化）していく必要に迫られています。

これまでは燃焼性があったり、機器のコストアップにつながったりと、容易に転換できない状況が続いていましたが、近年の技術開発により、温室効果が極めて小さい自然冷媒（アンモニア、CO<sub>2</sub>、空気、水等）を使用し、かつエネルギー効率の高い機器（省エネ型自然冷媒機器）が開発され、このような先端性の高い技術を使用した省エネ型自然冷媒の冷凍冷蔵機器を市場で普及させることが必要となっています。環境省では、このような「省エネ型自然冷媒機器」を導入する事業者に対する費用補助等も行い、普及を推進しています。

※3 オゾン層破壊の強度を比較する係数で、CFC-11のオゾン層破壊係数を「1」として他の物質の強度を相対的に示すもので、各化合物の1kgあたりの総オゾン破壊量をCFC-11の1kgあたりの総オゾン破壊量でわったもの。

### 3. 一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O)

N<sub>2</sub>Oは、CO<sub>2</sub>やメタンといった他の温室効果ガスと比べて大気中の濃度は低いものの、GWPが高く、大気中の寿命が121年と長い気体で、メタンに次いで、人為起源の温室効果ガスの総排出量が多い物質です（図1参照）。海洋や土壌から、あるいは窒素肥料の使用や工業活動に伴って放出され、成層圏で主に紫外線により分解されて消滅するオゾン層破壊物質でもあります。

温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）の解析による2019年の世界の平均濃度は、前年と比べて0.9ppb増えて332.0ppbとなっていて、工業化（1750年）以前の平均的な値とされる270ppbに比べ、23%増加しています。しかしながら、世界のN<sub>2</sub>O排出の全体像を明らかにした研究

は、これまで十分ではありませんでした。

グローバル・カーボン・プロジェクト（GCP）の研究者らは、過去数十年間にわたり全球のN<sub>2</sub>O放出量が増加し続けていることを報告しています（Tian *et al.*, 2020）。また、『世界のN<sub>2</sub>O収支2020年版』を公表しています（GCP, 2020）。

これらの報告によれば、N<sub>2</sub>O増加の主な原因は、人間の活動による放出が30%程度増えたためであり、窒素肥料の使用や家畜排せつ物からの堆肥製造といった農業活動の増加に起因しています。近年のN<sub>2</sub>O排出の増加は、ブラジル、中国、インドで顕著であり、今後、食料生産システムや、廃棄物や産業活動による排出が増えることで、2050年までに総排出量は倍増する可能性も指摘されています。これらの知見は、N<sub>2</sub>O排出を削減することが喫緊の課題であることを強く示しています。

我々の食生活を今すぐにビーガンや昆虫食に切り替えることは難しいため、食料生産過程におけるN<sub>2</sub>Oの排出抑制対策が重要となります。日本では、養豚においてアミノ酸添加低タンパク質飼料を給与することで、生産量を落とすことなく、排泄物処理時のN<sub>2</sub>O放出を削減する技術（Ogino *et al.*, 2013）やN<sub>2</sub>O還元酵素活性を強化したダイズ根粒菌を圃場に用いることでN<sub>2</sub>Oを削減する技術（Itakura *et al.*, 2013）等、食料生産過程におけるN<sub>2</sub>O削減技術の開発が進められています。

近年、火力発電所等の燃料として、CO<sub>2</sub>を排出する石炭等の化石燃料からカーボンフリーの水素燃料やアンモニア燃料にシフトする検討が進められています。N<sub>2</sub>Oは、化石燃料の燃焼やバイオマス燃焼からも排出されることが知られており、アンモニア燃料による燃焼では、N<sub>2</sub>Oを含む排出抑制が重要です。

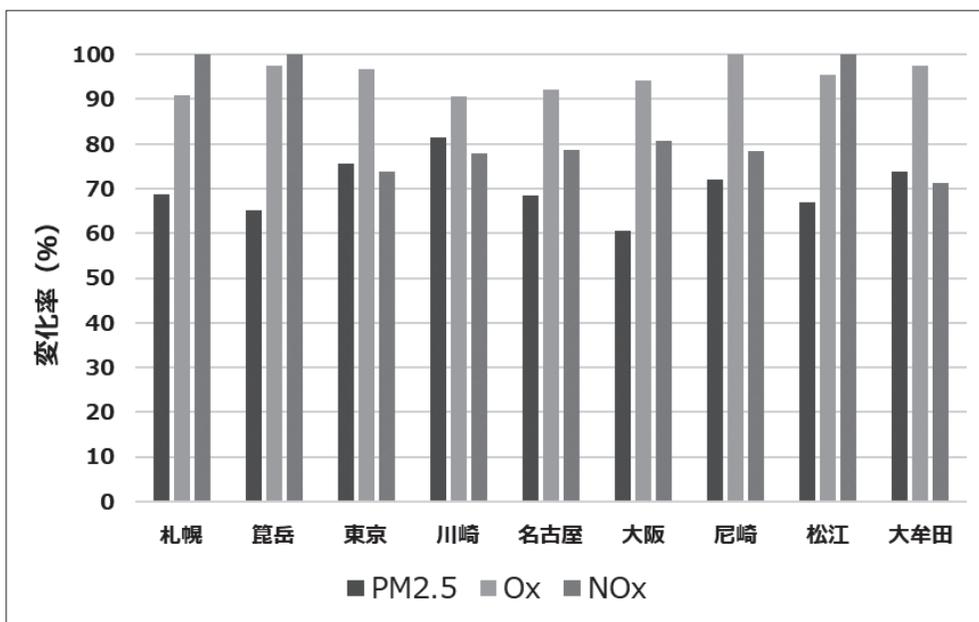


図4 各国設大気測定局における1月～6月の濃度平均値の変化  
(変化率：2020年/2011～2019年の平均値×100)

出典：環境省(2020)微小粒子状物質等専門委員会(第12回)(令和2年6月26日)配布資料3「新型コロナウイルス感染症緊急事態宣言等の影響による大気汚染状況の変化」の表4のデータから図を作成

#### 4. 新型コロナウイルス感染症流行と大気汚染

新型コロナウイルス感染症流行による世界各国の行動制限の影響により、CO<sub>2</sub>等の温室効果ガスや人為起源エアロゾルの排出量は顕著な減少をみせ、CO<sub>2</sub>については、世界全体で年平均7%ほどの排出量減少につながっていると報告されています(Friedlingstein *et al.*, 2020)。日本においても、2020年の大気汚染物質濃度と過年度(2011年～2019年の平均値)の濃度を比較した結果(図4)、PM<sub>2.5</sub>とNO<sub>x</sub>については、大きな濃度減少が見られたことから、緊急事態措置による社会経済活動の変化が一定程度、大気濃度の減少に寄与することが示唆されています(環境省, 2020)。

しかしながら、世界16カ国の気候モデル研究者を含む国際研究チームが世界各国の最新の気候モデルを用い、新型コロナウイ

ルス感染症の流行による温室効果ガスや人為起源エアロゾル等の排出量減少が地球温暖化の進行に与える影響を評価した報告によれば、2020～2021年の2年間のみ温室効果ガスや人為起源エアロゾル等の排出量が減少しても、2020～2024年の地上気温や降水量にはほとんど影響しないことがわかりました(Jones *et al.*, 2021)。この結果は、一時的な排出量減少が地球温暖化に与える影響は限定的であることを示しています。コロナ過の行動制限の経験が、人々の意識・行動を変え、種々の地球温暖化対策の促進につながることを期待します。

#### 5. おわりに

令和3年6月9日の国・地方脱炭素実現会議(第3回)で公表された『脱炭素ロードマップ(案)』には、「新型コロナウイルス感染症流行からの経済復興においても、

欧米をはじめとする多くの国や地域で、持続可能で脱炭素な方向の復興（グリーンリカバリー）が重視され、例えば、電動車への急速な転換など脱炭素への移行が加速している。環境対策はもはや経済成長の源泉でもあり、世界の潮流に乗り遅れば、「国内産業や国力の衰退にもつながりかねない」と記載されています。大気汚染対策分野においても、日本のこれまでの対策技術や研究成果が、国内だけではなく、東アジア諸国をはじめとする海外の地球温暖化防止に貢献することが期待されます。

CO<sub>2</sub>排出抑制の成果が出はじめるのは2050年以降とも言われており、2050年までの地球温暖化対策としてSLCF<sub>S</sub>やN<sub>2</sub>Oの対策が重要であることを支持する研究成果が近年蓄積してきています。弊センターにおいてもPM<sub>2.5</sub>や光化学オキシダント、HFC類の調査等を通じて、引き続き地球温暖化防止に貢献して行きたいと考えています。

#### 参考文献

- 1) 気象庁ホームページ  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki\\_ondanka/p04.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p04.html)
- 2) 全国地球温暖化防止活動推進センター (JCCCA) ホームページ  
<https://www.jccca.org/download/13266>
- 3) CCAC (2019)  
<https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/climate-and-clean-air-coalition-leaders-we-must-significantly-reduce>
- 4) 気象庁ホームページ  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc\\_ar5\\_wg1\\_ts\\_jpn.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf)
- 5) Jackson R.B. *et al.* (2020) *Environ. Res. Lett.* 15: 071002
- 6) WMO (2020) 温室効果ガス年報 第16号(2020年11月23日) (気象庁訳)
- 7) Saunio M. *et al.* (2020) *Earth Syst. Sci. Data* 12: 1561-1623
- 8) Covey K. & Megonigal P. (2018) *New Phytologist* 222: 35-51
- 9) 環境省 (2021)  
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/115998.pdf>
- 10) NIES (2011)  
<https://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/40/40.pdf>
- 11) 國分ら (2020) 東京都環境科学研究所年報 2020 : 42-43
- 12) Kitao M. *et al.* (2016) *Scientific Reports* 6: 32549
- 13) Tobita H. *et al.* (2019) *Climate* 7: 117
- 14) 谷 (2018) 生物と気象18 : 111-114
- 15) NASA (2009)  
<https://www.nasa.gov/topics/earth/features/himalayan-warming.html>
- 16) Kanaya Y. *et al.*, (2020) *Atmos. Chem. Phys.* 20: 6339-6356
- 17) 大原・黒川 (2018) エアロゾル研究 33: 95-101
- 18) 気象庁ホームページ  
[https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/cfcs\\_trend.html](https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/cfcs_trend.html)
- 19) 環境省 (2019) 令和元年度オゾン層等の監視結果に関する年次報告書 (令和元年8月)
- 20) Tian H. *et al.* (2020) *Nature* 586: 248-256
- 21) Global Carbon Project (GCP) (2020) Global Nitrous Oxide Budget 2020  
<https://www.globalcarbonproject.org/nitrousoxidebudget/index.htm>
- 22) Ogino A. *et al.* (2013) *Soil Science and Plant Nutrition* 59: 107-111
- 23) Itakura M. *et al.* (2013) *Nature Climate Change* 3: 208-212
- 24) Friedlingstein P. *et al.* (2020) *Earth Syst. Sci. Data* 12: 3269-3340
- 25) 環境省 (2020)  
<https://www.env.go.jp/council/07air-noise/y078-12/mat1203.pdf>
- 26) Jones C. D. *et al.* (2021) *Geophysical Research Letters* 48: e2020GL091883. <https://doi.org/10.1029/2020GL091883>
- 27) 内閣官房ホームページ  
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/dai3/siryoul-1.pdf>