

IMPACTS OF SHORT-LIVED CLIMATE FORCERS ON ARCTIC CLIMATE, AIR QUALITY, AND HUMAN HEALTH

SUMMARY FOR POLICY-MAKERS
ARCTIC MONITORING & ASSESSMENT PROGRAMME

1. AMAP is the publisher the original English version
2. The Japanese translated version of the SPMs is made ArCS II.
3. In the Japanese translation, the meaning of each sentence has been emphasized rather than a literally translation.
4. If any inconsistency between the translated Japanese and the original English version, the English version holds the validity.
5. Views in the Japanese translation are not necessarily shared by AMAP
6. For further information on the project: www.amap.no or contact the AMAP Secretariat

ArCS II : Arctic Challenge for Sustainability II
<https://www.nipr.ac.jp/arcs2/e/>



短寿命気候強制力因子が 北極の気候、大気質、および人間の健康に及ぼす影響

政策決定者向けの要約
北極圏監視評価プログラム (AMAP)

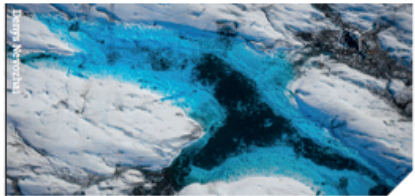
1. 本報告書の英語オリジナル版はAMAPより出版されました。
2. 本報告書の日本語翻訳版はArCS IIにより作成されました。
3. 日本語翻訳版では、表現をわかりやすくするために意識された箇所があります。
4. 日本語翻訳版と英語オリジナル版の間に不一致箇所がある場合は、英語オリジナル版が有効となります。
5. 日本語翻訳版に掲載されている見解は、必ずしもAMAPの見解ではありません。
6. 本プロジェクトに関する詳細については、AMAPウェブサイト (www.amap.no) をご覧いただくか、本レポートに記載された事務局連絡先までお問い合わせください。

ArCS II : 北極域研究加速プロジェクト <https://www.nipr.ac.jp/arcs2/>



KEY FINDINGS

This Summary for Policy-Makers is based on the *AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health*. The assessment focuses on emissions from Arctic Council Member and Observer countries and the impacts of black carbon, methane, ozone, and sulfate aerosols on air quality, health, and climate in the Arctic.



1 Reducing emissions of SLCFs will impact the Arctic climate in the short term, over the next 20-30 years. To limit Arctic long-term warming, steep and immediate reductions of carbon dioxide emissions globally are also necessary, including by Arctic Council Member and Observer countries.

Black carbon, ozone, and methane have contributed to Arctic warming. Sulfate aerosols from emissions of sulfur dioxide have a cooling impact on the climate and thereby mask some of the warming from carbon dioxide and warming SLCFs. However, declining global emissions of sulfur dioxide have unmasked some of the Arctic warming caused by carbon dioxide and warming SLCFs over the last few decades. In the period 1990-2015, the warming revealed by this unmasking effect from declining sulfur dioxide emissions is of similar magnitude to the Arctic warming caused by carbon dioxide emissions.

Health and environmental concerns nevertheless motivate further reductions in sulfur dioxide emissions. Immediate efforts to reduce emissions of black carbon, ozone precursors, and methane are especially important for ensuring both climate and health benefits from mitigation of SLCFs. Reducing emissions of SLCFs that contribute to warming can offset the warming unmasked by health- and ecosystem motivated measures to reduce air pollution.



2 Further reductions in SLCF emissions would significantly benefit human health, globally and in the Arctic.

Globally, air pollution is the top environmental health threat and a major cause of premature deaths. Reducing air pollution from particles and ozone would reduce adverse health impacts. In the Arctic, primarily local but also regional sources of SLCFs can contribute to local air pollution and associated human health effects. More ambitious efforts than current legislation could prevent hundreds of thousands of premature deaths in Arctic Council Member and Observer countries.

主要な研究結果

この政策決定者向けの要約は、AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health (AMAP評価2021: 短寿命気候強制力因子が北極の気候、大気質、および人間の健康に及ぼす影響)に基づいている。この評価報告書は、北極評議会のメンバーおよびオブザーバー諸国からの短寿命気候強制力因子の排出量と、北極の大気質、健康、および気候に対するブラックカーボン、メタン、オゾン、および硫酸塩エアロゾルの影響に焦点を当てている。

1 短寿命気候強制力因子（以下SLCFと記す）の排出量の削減は、今後20～30年の短期の北極の気候に影響を与える。北極の長期的な昇温を制限するためには、北極評議会のメンバーやオブザーバー諸国を含め、世界的な二酸化炭素排出量の即時かつ急速な削減が必要である。

ブラックカーボン、オゾン、メタンが北極の温暖化に寄与してきた。二酸化硫黄の排出による硫酸塩エアロゾルは、大気を冷却する効果があり、それによって二酸化炭素と昇温に寄与するSLCFによる温暖化の一部を覆い隠す効果がある。しかしながら、過去2-3十年にわたる北極の温暖化（二酸化炭素および昇温に寄与するSLCFにより引き起こされた）を覆い隠す作用のある硫酸塩エアロゾルの効果が、全球での二酸化硫黄の排出量の減少により弱められた。1990年から2015年の期間における、二酸化硫黄の排出量の減少により生じた温暖化は、二酸化炭素排出によって直接引き起こされてきた北極の温暖化と同程度の大きさである。

このような状況にもかかわらず、健康と環境への悪影響を軽減することが二酸化硫黄の排出のさらなる削減の動機付けとなっている。ブラックカーボン、オゾン前駆物質、およびメタンの排出を削減するための即時の取り組みは、SLCFの緩和により気候と健康の両方を良好な状態に保つために特に重要である。温暖化に寄与するSLCFの排出量を削減することで、健康と生態系の観点から為される大気汚染削減の対策によって生じる温暖化を相殺することができる。

2 SLCF排出量のさらなる削減は、世界的にも北極においても、人間の健康に大きな恩恵をもたらす。

世界的に、大気汚染は環境衛生上の最大の脅威であり、早死の主な原因である。粒子やオゾンによる大気汚染を減らすことで、健康への悪影響を減らすことができる。北極では、一次的には局地的な排出源が問題だが、地域的なSLCFの排出源も、局地的な大気汚染とそれに関連する人の健康への影響に寄与することがある。現行法規よりも野心的な取り組みにより、北極評議会のメンバーおよびオブザーバー諸国における数十万人の早死を防ぐことができる。



3 Policies and technologies to reduce emissions of air pollutants have led to cleaner air in the Arctic compared to the early 1990s. The trend of declining concentrations of sulfate aerosols continues, but recently only modest reductions of ozone and black carbon concentrations in the Arctic atmosphere have been observed.

The scenarios of future emissions used for this AMAP assessment indicate that the Arctic Council's collective voluntary commitment for reducing black carbon emissions of 25-33 percent below 2013 levels by 2025 can be nearly achieved by implementing current policies. Significant further emission reduction potential exists and could be achieved by using best available technologies.

Continued reduction of sulfur dioxide emissions is important for improving air quality and safeguarding human health.



5 Tundra, peatland, and forest fires are increasingly important sources of particles of black carbon and organic carbon emissions in the Arctic, where a warmer climate may lead to larger and more frequent fires.

Managing fire risks with locally appropriate measures (fuel management, ignition reduction, wildland fire response) will be critical for limiting local and regional emissions of particles that are damaging to human health and can contribute to further warming. Boreal forest fires will need to be managed differently than fires in Arctic landscapes. Indigenous fire management practices will need to be considered.



4 Global anthropogenic emissions of methane and levels of methane in the Arctic atmosphere continue to increase.

The Arctic Council's Framework for Action for Enhanced Black Carbon and Methane Emission Reductions includes a commitment from Arctic states to significantly reduce their overall methane emissions. Given that emissions are expected to continue to increase even if current legislation is implemented, meeting this commitment would demand applying best available technologies beyond that already required, especially in the oil and gas sector.

Emissions of methane from natural sources, such as wetlands, will likely be affected by further warming but estimates of future emissions from these sources are hampered by major uncertainties.

KEY TO SYMBOLS:

- OBSERVED
- PROJECTED
- NEW FINDING
- UPDATED FINDING
- KNOWLEDGE GAP
- REINFORCING MESSAGE

3 大気汚染物質の排出を削減するための政策と技術により、北極の空気は1990年代初頭に比べ清浄になった。北極の大気中では硫酸塩エアロゾルの濃度が低下する傾向は続いているが、オゾンとブラックカーボンの濃度の観測によれば最近の低下は大きなものではない。

このAMAP評価に使用されている将来の排出シナリオは、現在の政策を実施して、2025年までにブラックカーボン排出量を2013年のレベルより25~33%削減するという北極評議会の共同の自主的取り組みをほぼ達成できるであろうということに基づいている。さらなる大幅の排出削減を実施できる可能性はあるが、それは利用可能な最良の技術によって達成できる。

二酸化硫黄の排出量を継続的に削減することは、大気質を改善し、人間の健康を守るために重要である。

5 ツンドラ、泥炭地、および森林の火災は、北極におけるブラックカーボン・有機炭素粒子の放出源として増々重要になってきている。北極での温暖化がさらに進行すればより大規模でより頻繁な火災につながる可能性がある。

地域に適した対策（燃料管理、着火の削減、森林火災への対応）によって火災リスクを管理することは、人の健康に害を及ぼし、さらなる温暖化に寄与する可能性のあるエアロゾルの局所的・広域的な放出を抑制するために重要である。北方林の火災は、北極の陸域全般における火災とは異なる方法で管理する必要がある。先住民の火災管理の慣行を考慮する必要がある。

4 世界的なメタンの人為的排出と北極の大気中のメタンのレベルは増加し続けている。

北極評議会の2015年の「Framework for Action for Enhanced Black Carbon and Methane Emission Reductions（強化されたブラックカーボンとメタン排出削減のための行動の枠組み）」には、全体的なメタン排出を大幅に削減するという北極諸国の前向きな取り組みが含まれている。現行法規が実施されたとしても排出量は増加し続けると予想されることを考えると、この取り組みの要件を満たすには、特に石油およびガス部門で、すでに必要とされているものに加え、利用可能な最良の技術を適用する必要がある。

湿地などからの自然起源のメタンの放出は、さらなる昇温の影響を受ける可能性があるが、これらの放出源からの将来の放出量の推定は、多くの不確定要素により困難なものである。

記号の意味:

- 観測（観察）
- 予測
- 新たな研究結果
- 更新された研究結果
- 知識のギャップ
- 強化に関するメッセージ

INTRODUCTION AND BACKGROUND

Pollution from combustion of fossil fuels and biomass affects both air quality and climate. Poor air quality is directly detrimental to people’s health and a major cause of premature death. Many air pollutants also play an important role in climate change. While the long-term temperature increase is mainly driven by global carbon dioxide emissions, changes in current global emissions of short-lived climate forcers (SLCFs) play an important role in the rate of warming for the next 20-30 years.

Based on earlier AMAP assessments, the Arctic Council, in 2015, adopted a Framework for Action for Enhanced Black Carbon and Methane Emission Reductions¹. In addition to calling for improved emissions reporting and driving mitigation ambitions, it underscored the importance of continuing monitoring and research and called for a four-year cycle of scientific reporting, including assessment of the status and trends of SLCFs, with a focus on their impacts on Arctic climate and public health. The *AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health* is part of this effort and aims to inform further work under the Framework. It is also relevant for other important international fora for decisions related to SLCFs such as the Air Convention² and the Climate Convention³.

While earlier AMAP assessments of SLCFs have focused on the warming impacts of black carbon, methane, and tropospheric ozone, this assessment also includes extended analysis of precursors of other SLCFs emitted from the same sources, especially sulfur dioxide. An important aim of the 2021 AMAP SLCF Assessment is to use updated observations and new modelling efforts to better understand anthropogenic emission sources and their impacts on air quality and climate. It highlights how reducing SLCFs is important both for human health and for Arctic climate and identifies the actions that could most effectively reduce the health impacts of pollution and at the same time slow the rate of Arctic climate change. The 2021 AMAP SLCF assessment also provides a review of how fire risk may increase with climate change, which is an

emerging topic with major implications for future emission of SLCFs and consequent impacts on both climate and health.

WHY ARE SLCFS IMPORTANT?

Short-lived climate forcers include greenhouse gases, particles, and other air pollutants that strongly influence the climate but have a relatively short atmospheric lifetime compared to carbon dioxide. Reducing emissions of SLCFs is also important for protecting human and ecosystem health. Reducing emissions of SLCFs will impact the rate of Arctic warming in the coming decades. The Arctic Council Member⁴ and Observer⁵ countries account currently for about half of the global anthropogenic emissions of black carbon, sulfur dioxide, and methane. Actions taken by these countries can thus have a significant impact on global emissions and on climate and health impacts of SLCFs. The results from an extended analyses of the cooling impacts of sulfate in the AMAP 2021 SLCF assessment highlight how reduced air pollution in source regions in Arctic Council Member and Observer countries affect the Arctic climate and that an integrated understanding of climate and health impacts of SLCFs is needed.

SLCFs IN FOCUS

Methane is a powerful greenhouse gas, especially on decadal timeframes. While it is 28-36 times as potent as carbon dioxide over a 100-year timeframe, it has a warming potential 84 times that of carbon dioxide over a 20-year timeframe according to the IPCC Fifth Assessment Report. Methane also affects air quality due to its role in ozone formation.

Ozone is an air pollutant that forms in the lower atmosphere when sunlight interacts with precursor gases: nitrogen oxides, carbon monoxide, volatile organic compounds, and methane. It is also a greenhouse gas and can affect the atmospheric lifetime of methane. It is harmful to human health and vegetation.

序論と背景

化石燃料とバイオマスの燃焼による汚染は、大気質と気候に影響を及ぼす。大気質が悪いと、人々の健康に直接悪影響が生じ、早死の主な原因になる。また多くの大気汚染物質は気候変化に重要な役割を果たしている。長期的な温度上昇は、主として全球での二酸化炭素排出によって引き起こされるが、今後20～30年間については現在の短寿命気候強制力因子（SLCF）の全球での排出量の変化が重要な役割を果たす。

2015年に北極評議会は、以前のAMAP評価に基づいて、「Framework for Action for Enhanced Black Carbon and Methane Emission Reductions（強化されたブラックカーボンとメタン排出削減のための行動の枠組み）」を採択した¹。これは排出量の報告と野心的な削減推進に関する改善を求めたことに加えて、北極の気候と公衆衛生への影響の観点から監視と研究の継続の重要性を強調し、SLCFの状況と変化傾向の評価に関する4年毎の科学的報告を求めた。AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health（AMAP評価2021：短寿命気候強制力因子が北極の気候、大気質、および人間の健康に及ぼす影響、以下では「AMAP 2021 SLCF評価」と記す）は、この取り組みの一部であり、この枠組みの下でのさらなる作業について周知することを目的としている。またこの報告書は、大気条約²や気候条約³などSLCFの決定に関係した他の主要な国際フォーラムにも関係する。

SLCFに関する以前のAMAP評価は、ブラックカーボン、メタン、対流圏オゾンによる昇温の影響に焦点を当てていたが、今回の評価には、同じ排出源から排出される他のSLCFの前駆物質、特に二酸化硫黄に関する分析も含まれている。AMAP 2021 SLCF評価の重要な目的は、最新の観測と新たなモデル計算の結果を用いて、人為的排出源とその大気質と気候への影響をよりよく理解することである。SLCFの削減が人間の健康と北極の気候の両方にとっていかに重要であるかを強調

- 1 正式には、Enhanced Black Carbon and Methane Emissions Reductions: An Arctic Council Framework for Action（強化されたブラックカーボンとメタンの排出削減: 行動のための北極評議会の枠組み）
- 2 大気条約は、UN-ECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution（CLRTAP）（長距離越境大気汚染に関するUN-ECE条約（CLRTAP））としても知られている。
- 3 UN Framework Convention on Climate Change（気候変動枠組条約）
- 4 カナダ、フィンランド、アイスランド、デンマーク王国、ノルウェー、スウェーデン、ロシア連邦、および米国
- 5 フランス、ドイツ、イタリア共和国、日本、オランダ、中華人民共和国、ポーランド、インド共和国、韓国、シンガポール共和国、スペイン、スイス、英国
- 6 PM_{2.5}は、2.5マイクロメートル以下の微粒子を指す。

していて、汚染による健康への影響を最も効果的に削減し、同時に北極の気候変化の速度を遅らせる可能性のある行動を特定している。AMAP 2021 SLCF評価では、気候変化に伴って火災リスクがどのように増加するかに関するレビューも提供されている。これは、SLCFの将来の排出と、その結果としての気候と健康の状態の改善への重要な示唆を含む新たな課題である。

SLCFがなぜ重要か？

SLCFには、気候に強く影響するが二酸化炭素に比べ大気中の寿命が短い温室効果気体、エアロゾル、および他の大気汚染物質が含まれる。SLCFの排出量の削減は、人間と生態系の健康を保護するためにも重要である。SLCFの排出量の削減は、今後数十年の北極の温暖化の速度に影響を与える。北極評議会のメンバー国⁴およびオブザーバー諸国⁵での排出量が、現在、ブラックカーボン、二酸化硫黄、およびメタンの全球での人為的排出の約半分を占めている。したがって、これらの国々がとる行動は、世界の排出量とSLCFの気候と健康への影響に重要な影響を与える可能性がある。AMAP 2021 SLCF評価における硫酸塩エアロゾルの冷却影響に関する解析結果では、北極評議会のメンバーおよびオブザーバー諸国での排出源地域における大気汚染の減少が北極の気候にどのように影響するかという点とSLCFの気候と健康への影響の統合された理解が必要であることが強調されている。

SLCFについて

メタンは、特に数十年の時間スケールでは強力な温室効果気体である。「IPCC第5次評価報告書」によると、100年の時間スケールでは二酸化炭素の28～36倍の効果があるが、20年の時間スケールでは二酸化炭素の84倍の昇温効果がある。メタンはオゾンの生成にも関係しているため、大気質にも影響を及ぼす。

オゾンは、太陽光と前駆気体（窒素酸化物、一酸化炭素、揮発性有機化合物、メタン）との相互作用により下層大気で生成される大気汚染物質である。オゾンは、温室効果であり、またメタンの大気中の寿命に影響を与える可能性がある。またオゾンは人間の健康と植生に有害である。

¹ Formally, *Enhanced Black Carbon and Methane Emissions Reductions: An Arctic Council Framework for Action*

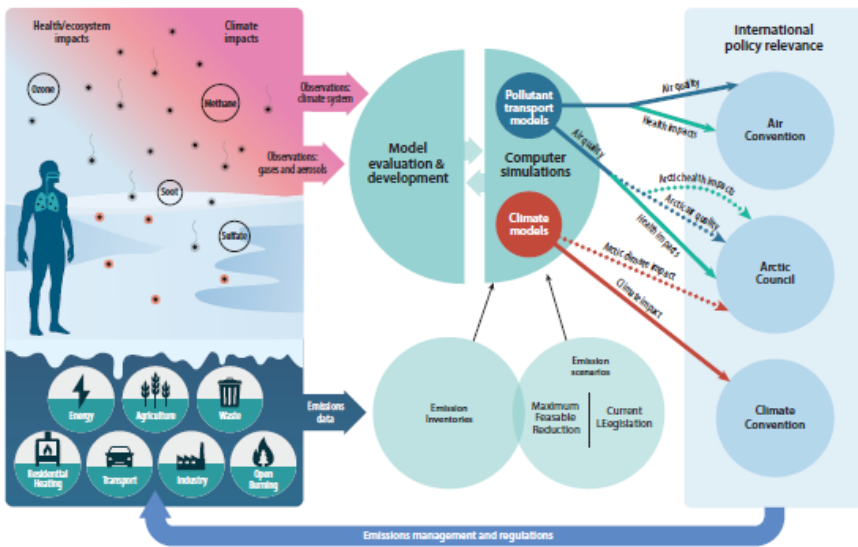
² The Air Convention is also known as the UN-ECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)

³ UN Framework Convention on Climate Change

⁴ Canada, Finland, Iceland, Kingdom of Denmark, Norway, Sweden, The Russian Federation, and The United States

⁵ France, Germany, Italian Republic, Japan, the Netherlands, People’s Republic of China, Poland, Republic of India, Republic of Korea, Republic of Singapore, Spain, Switzerland, and United Kingdom

⁶ PM_{2.5} refers to the particles that are 2.5 micrometers and smaller.



Simplified illustration of how the key finding and recommendations in the AMAP 2021 SLCF assessment are based on a combination of data from emissions and observations; scenarios of future emissions; and model simulations to estimate impacts on air quality and the climate, and how this information can feed into policy development.

Sulfate aerosols are formed from emission of sulfur compounds, such as sulfur dioxide. Sulfate aerosols make up a significant portion of the fine particulate matter in ambient PM_{2.5}, which is harmful to human health and covered by many air quality guidelines. Sulfate aerosols scatter sunlight efficiently and enhance the brightness of clouds. This causes a cooling of the climate, offsetting some of the warming impacts of greenhouse gases and other SLCFs. The climate impacts of clouds are a key uncertainty in climate modelling.

Black carbon (often referred to as soot) and **organic carbon** contribute to levels of ambient particles that degrade air quality and are harmful to human health. Black carbon absorbs sunlight and thereby contributes to climate warming, while organic carbon tends to reflect light. When deposited on snow, black carbon decreases the surface's ability to reflect sunlight, enhancing climate warming. The climate impact of organic carbon is small.

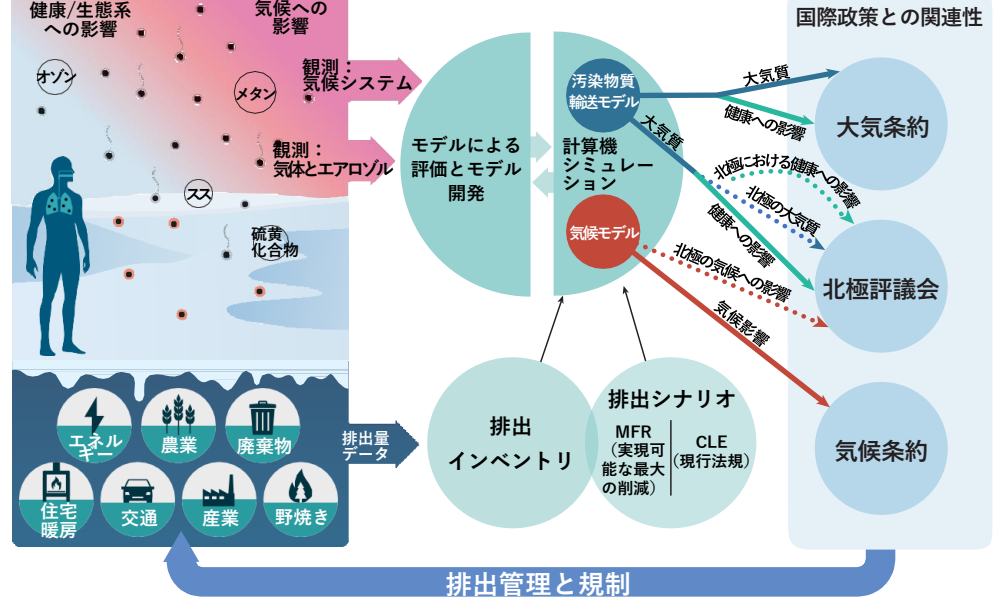
ASSESSING THE IMPACTS OF SLCFS

The AMAP assessment of the impacts of SLCFs relies on knowledge from a range of different sources that are mutually supportive:

- New inventories of anthropogenic emissions that include information both from country reports to international conventions and the Arctic Council's

Expert Group on Black Carbon and Methane and estimates constructed from international energy and industrial statistics and shipping data.

- Scenarios of future anthropogenic emissions under different assumptions, see below for details.
- Observations of SLCF concentrations in the Arctic atmosphere and snow.
- Atmospheric transport models for assessing how SLCFs affect air quality in the Arctic and in source regions outside the Arctic.
- Climate models, including Earth System Models and a climate and air quality emulator (i.e., a rapid assessment tool) that enables specific analysis of how changes in anthropogenic SLCF emissions affect climate change in the Arctic. Potential future changes in natural and fire emissions of SLCFs were not included in the simulations. Some of the natural emission sources could potentially act to accelerate the warming while others could have a cooling impact.
- Literature-based exposure-response relationships between air pollution concentrations and adverse health outcomes.



AMAP 2021 SLCF評価の主要な研究結果と推奨事項が、排出量と観測のデータ、将来の排出のシナリオ、大気質と気候への影響の数値モデルによるシミュレーションなどのデータの組合せに基づいてどのように導出されているか、そしてこの情報がどのように政策立案に反映されるかを記述した簡略図。

硫酸塩エアロゾルは、二酸化硫黄などの硫黄化合物の放出によって生成される。硫酸塩エアロゾルは、大気中のPM2.5⁶の微粒子のかなりの部分を占めている。PM2.5は、人の健康に有害であり、多くの大気質ガイドラインで言及されている。硫酸塩エアロゾルは太陽光を効率的に散乱し、雲の反射率を高める。これにより気候システムが冷却され、温室効果気体や他のSLCFの昇温効果の一部が相殺される。雲の気候への影響は、気候モデル計算における主要な不確定要因である。

ブラックカーボン（すすと呼ばれることが多い）と**有機炭素**は、大気質を悪化させ、人間の健康に有害な大気中の微粒子の一部である。ブラックカーボンは太陽光を吸収して温暖化に寄与するが、有機炭素は光を反射する傾向がある。ブラックカーボンは、雪の上に沈着すると表面の太陽光を反射する能力を低下させ、温暖化を促進する。有機炭素の気候への影響は小さい。

SLCFの影響評価

SLCFの影響に関するAMAPの評価は、お互い補完する以下の種々の情報源に基づく：

- 以下2つの情報を含む人為的排出に関する新しいインベントリ。1)国際コンベンションと北極評議会の「ブラックカーボン及びメタン専門家グループ」への国別報告書、2) 国際的なエネルギーと産業の統計データおよび海運データから作成された推定値。
- 種々の仮定の下での将来の人為的排出のシナリオ。詳細については以下参照。
- 北極の大気と雪の中のSLCF濃度の観測。
- SLCFが北極および北極外の発生源地域の大気質にどのように影響するかを評価するための大気輸送モデル。
- 気候モデル（地球システムモデルを含む）、および気候・大気質エミュレーター（迅速な評価ツール）。これらにより、人為起源のSLCF排出量の変化が北極の気候変化にどのように影響するかを具体的に解析できる。SLCFの自然および火災放出量に関する潜在的な将来の変化はこのシミュレーションには含まれていない。自然放出源の中には、温暖化を加速するように作用する可能性があるものもあれば、冷却に作用するものもある。
- 文献に基づく大気汚染濃度と健康への悪影響との関係（暴露と応答との関係）。

To estimate future impacts of SLCFs, emissions scenarios were developed based on different assumptions about demographic, economic, technological, and policy development. AMAP's 2021 SLCF assessment has both similarities and differences with the approach used for the forthcoming IPCC Sixth Assessment Report and AMAP's *Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts*. The scenarios used in this assessment are based on middle-of-the-road assumptions about global socio-economic development and carbon dioxide emission pathway, consistent with the SSP2-4.5 scenario¹ used also in the IPCC assessment. In this scenario, global carbon dioxide emissions are stabilized around 2050. The major difference is that AMAP's SLCF model results are based on updated inventory and assessment of emissions of air pollutants, specifically including recent decline in sulfur dioxide and black carbon emissions in East Asia that are not well captured in the SSP2-4.5 scenario. The analysis of co-benefits of air pollutant mitigation for health and climate in the AMAP SLCF assessment uses data from the same Earth System Models that are used for the forthcoming IPCC assessment and AMAP's *Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts*.

To estimate the implications of different actions, additional assumptions about policy implementation and the introduction of best available technologies were made, based on two key air pollutant and methane policy scenarios:

- **Current LEgislation (CLE):** This scenario assumes full implementation of current national and regional air pollution legislation as well as full implementation of commitments under Nationally Determined Contributions (as of 2018) towards the Paris Agreement.
- **Maximum technically Feasible Reduction (MFR):** This is an ambitious scenario where best available technologies are introduced globally for all air pollutants and methane without any constraints related to investment or implementation costs while taking into account the lifetime of currently installed equipment and the technical feasibility of implementing best available technologies. The MFR scenario differs from the assumptions made in AMAP's 2015 SLCF assessment by including the potential for further reduction of sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions along with targeted warming agents.

¹ Shared Socioeconomic Pathway 2 compatible with Representative Concentration Pathway 4.5.

RESULTS

CLIMATE IMPACTS OF REDUCING SLCFS

Emission of SLCFs have both regional and large-scale impacts on the climate. SLCFs emitted in or transported to the Arctic affect heat transport in the Arctic atmosphere and also lead to decreased albedo when dark particles, such as black carbon, land on snow and ice, which then absorb heat instead of reflecting it. Emissions that occur at high-latitudes have the strongest effect - on a per unit of emissions basis - on Arctic warming. However, because SLCF emissions, and thus concentrations at mid-latitudes, are much greater than concentrations in the Arctic, measures to reduce air pollution in mid-latitudes have the greatest potential to influence Arctic warming. However, per unit of emissions reduced, high-latitude measures still have the greatest effect.

To estimate the impact of different emission trajectories on the Arctic climate, the 2021 AMAP assessment used five Earth System Models together with a multi-model emulator to simulate Arctic temperature changes. In this Summary, best estimates of changes in historical and future Arctic warming due to changes in SLCFs and carbon dioxide are provided based on a combination of these models.

シナリオ

SLCFの将来の影響を推定するために、人口統計学的、経済的、技術的、および政策面での進展に関するさまざまな仮定に基づいて排出シナリオが作成された。AMAP 2021 SLCF評価は、近日公開予定の「IPCC第6次評価報告書」およびAMAPの「Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts (AMAP北極気候変化のアップデート2021:主要な変化傾向と影響)」に用いられているアプローチと類似・相違する点がある。このシナリオは、世界の社会経済開発と二酸化炭素排出経路に関しては中層的な仮定に基づいているが、IPCC評価でも使用されるSSP2-4.5シナリオ¹とは一致していて、世界の二酸化炭素排出量は2050年頃に安定することになっている。これらとの主要な違いは、AMAPのSLCFモデルの結果が、最新のインベントリと大気汚染物質の排出量の評価に基づいていることであり、特に、SSP2-4.5シナリオでは十分に把握されていない東アジアの二酸化硫黄とブラックカーボンの最近の排出量の減少を含んでいる点が異なる。AMAP SLCF評価での健康と気候に対する大気汚染物質削減のコベネフィット分析では、次の「IPCC第6次評価報告書」と「AMAP's Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts」に使用されているのと同じ地球システムモデルから得られたデータが使用されている。

異なる取り組みがもたらす影響を推定するために、政策の実施と利用可能な最良の技術の導入に関する追加的仮定をした。この仮定は以下の2つの主要な大気汚染物質とメタンの政策シナリオに基づいている。

- **現行法規 (CLE) :** このシナリオは、現在の各国および地域の大气汚染に関する法規の完全な実施と、パリ協定に向けて決定された各国貢献 (2018年現在) に基づく取り組みの完全な実施を前提としている。
- **技術的実現可能な最大の削減 (MFR) :** これは、現在設置されている設備の寿命と利用可能な最高の技術を実装した技術的な実現可能性を考慮しながら、投資や実施コストに関する制約なしに、すべての大気汚染物質とメタンに対して利用可能な最良の技術が世界的に導入されるという前提に立った野心的なシナリオである。MFRシナリオは、AMAP 2015 SLCF評価で行われた仮定とは異なり、対象となる温暖化原因物質とともに二酸化硫黄と窒素酸化物の排出をさらに削減する可能性を考慮している。

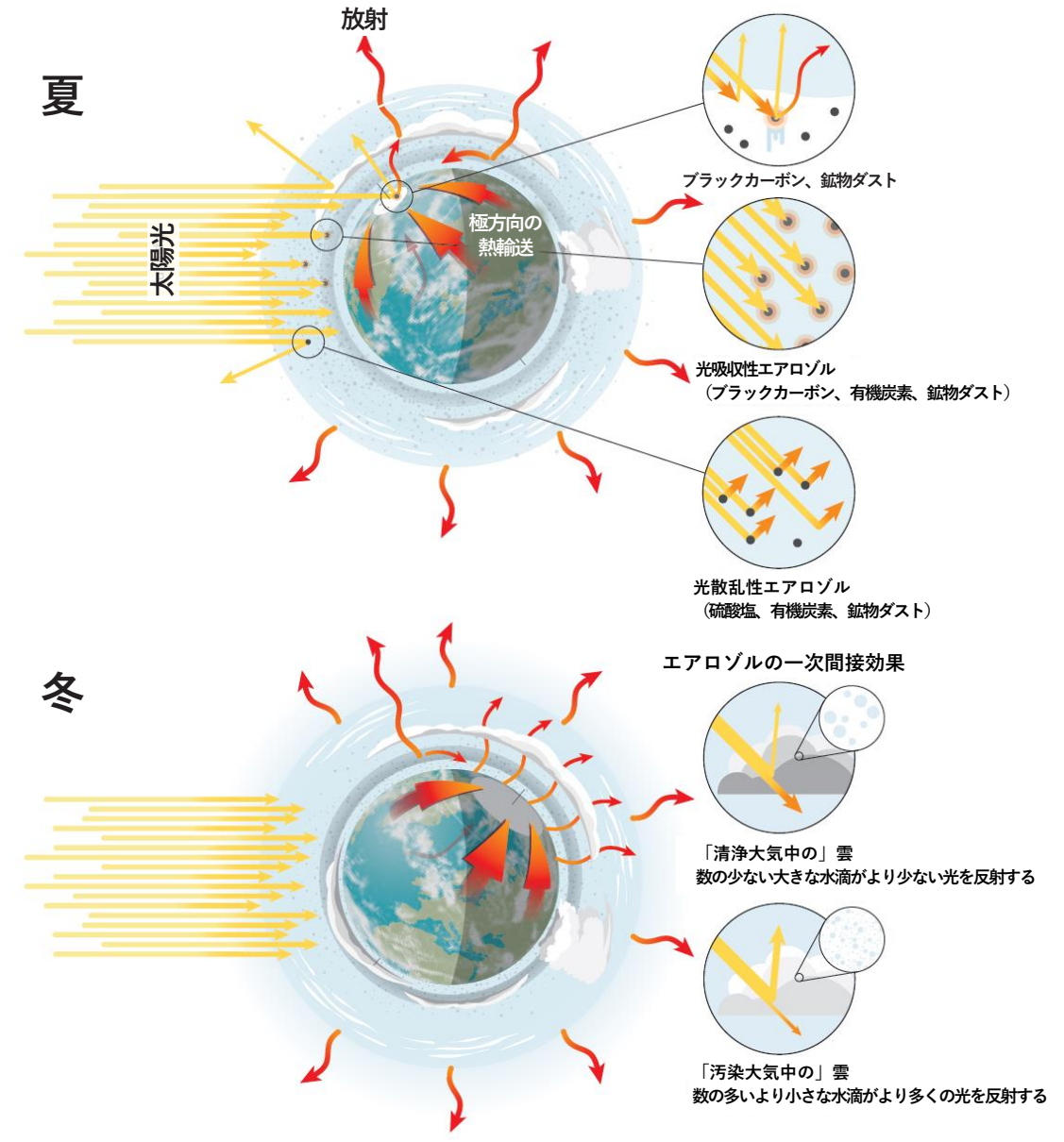
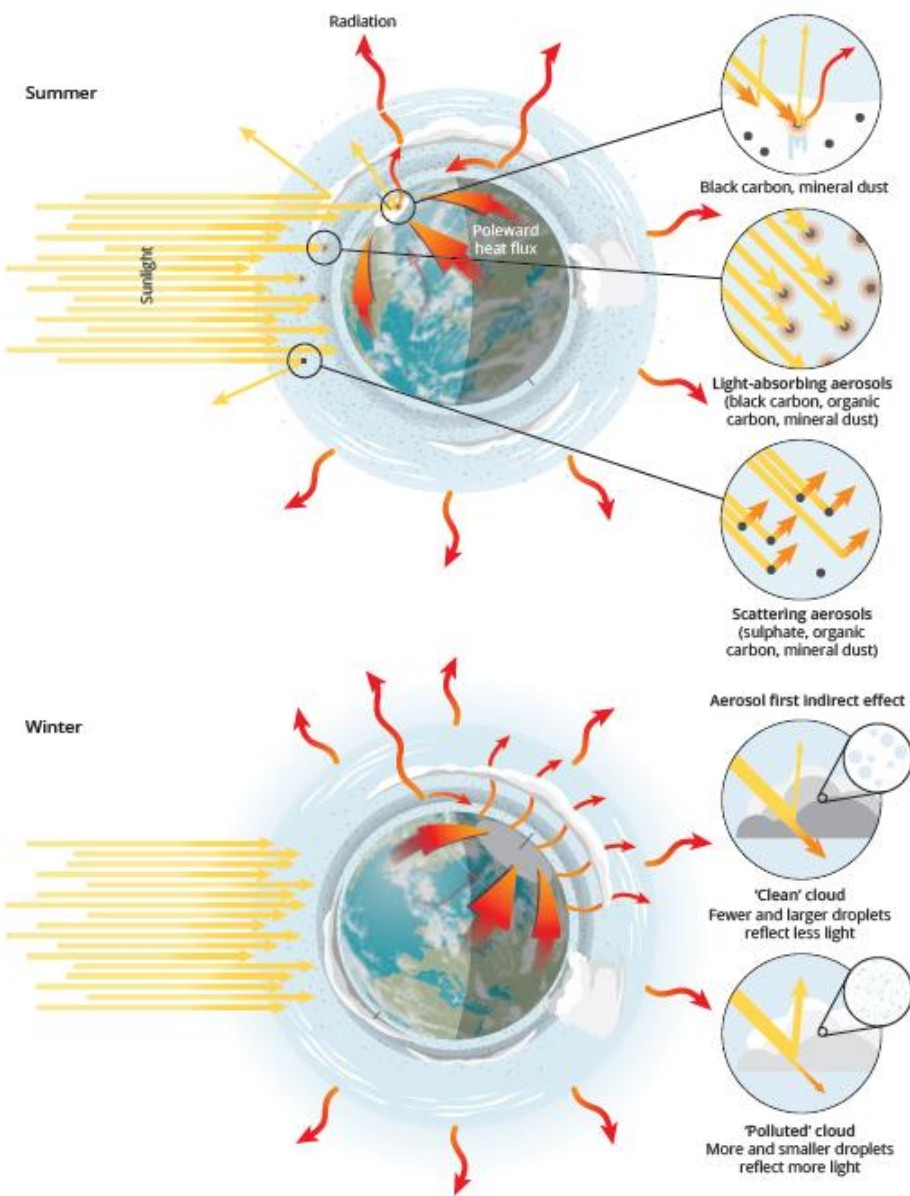
1 代表濃度径路(RCP)4.5と統合的な社会経済経路(SSP)2。

結果

SLCF削減の気候への影響

SLCFの排出は、地域・広領域での気候に影響を及ぼす。北極で排出または北極に輸送されてきたSLCFは、北極の大気中の熱輸送に影響を与えるとともに、ブラックカーボンなどの黒色粒子が雪や氷に付着すると、アルベドが低下し、太陽光を反射せずに熱を吸収する。単位排出量当たりの効果としては、高緯度での排出が北極温暖化に最も強い影響を及ぼす。ただし、中緯度でのSLCFの濃度 (排出量) は北極での値よりもはるかに大きいため、北極温暖化に対し、中緯度での大気汚染を減らす対策が効果的ではある。ただし、単位削減量当たりの効果を考えると、高緯度での対策は最大の効果がある。

北極の気候に対するさまざまな排出量の変動の影響を推定するために、2021年AMAP評価では、5つの地球システムモデルとマルチモデルエミュレーターを使用して、北極の温度変化をシミュレートした。本要約では、これらのモデル結果を組み合わせることにより、SLCFと二酸化炭素の変化に起因する、過去ー現在および将来の北極温暖化が高精度で推定された。



Mechanisms by which SLCFs can influence Arctic climate. They include the impacts on the region's heat balance as aerosols absorb or scatter the sun's energy in the atmosphere, as greenhouse gases absorb heat, and as particles darken light surfaces, such as snow and ice, making them less effective in reflecting the sun's energy. Aerosols also affect the properties of clouds and their ability to reflect light. In addition to impacts in the Arctic, the impacts of SLCFs on the heat balance at mid- and lower latitudes affect the amount of heat that is transported to the Arctic.

SLCFが北極の気候に影響を与える仕組みの図。これには、大気中のエアロゾルが太陽エネルギーを吸収または散乱すること、温室効果気体が熱を吸収すること、粒子が雪や氷などの光の表面を暗くして太陽エネルギーの反射効果を低下させることなどによって地域の熱収支に影響を受けることが含まれている。エアロゾルは、雲の特性とその光反射率にも影響を与える。北極内での加熱効果に加えて、SLCFが中緯度および低緯度での熱収支に影響し、北極に輸送される熱で北極が影響を受ける効果がある。

SLCF CONTRIBUTION TO PAST CHANGES

The model simulations for the period 1990 to 2015 show considerable reductions in sulfur emissions from fossil and biofuel sources among Arctic Council Members and the Rest of Europe while changes in emissions from Asian Observers and Rest of the World were small in this time period. Sulfate aerosols cool the atmosphere and have offset some of the warming caused by carbon dioxide and warming SLCFs. With declining levels of sulfate aerosol at mid- to low latitudes (improved air quality), the cooling or masking effect of sulfate aerosols has decreased. For these 25 years, the contribution to Arctic warming from global carbon dioxide emissions and unmasked warming (weakened cooling) from reduced sulfur emissions at mid-to lower latitudes appear as nearly equal in magnitude. Contributions of non-sulfur SLCFs to Arctic temperature trends from 1990 to 2015 were very small, largely due to the relatively small changes in the global emissions of these compounds over this time period. The simulated net Arctic warming over 1990-2015 from changing interactions of the SLCFs from global anthropogenic sources with radiation, clouds, and surface albedo is 0.275 °C per decade (see Figure on page 9). Declining interactions of sulfate with clouds likely had a net warming impact on the Arctic. The simulated magnitude of this warming is large but very uncertain. In detail, reductions in global sulfur emissions may have produced an Arctic warming impact of 0.290 °C per decade from diminishing interactions of sulfate aerosols with radiation, clouds, and surface albedo. Therefore, changes in global sulfur dioxide emissions dominated the impact of all SLCFs on Arctic climate. Furthermore, the model simulations conducted for the report provide evidence that global anthropogenic emissions of carbon dioxide and diminishing global anthropogenic emissions of sulfur contributed strongly and about equally to the net rate of Arctic warming from 1990 to 2015 (0.285 °C per decade for carbon dioxide). Model simulations for 1990 to 2015 provide evidence that the declining global anthropogenic black carbon emissions during this time period caused a cooling impact on recent Arctic warming (-0.053 °C per decade). At the same time, global anthropogenic methane emissions produced a relatively small warming impact (0.038 °C per decade).

SLCF CONTRIBUTION TO FUTURE CLIMATE CHANGE

All scenarios of anthropogenic emissions of SLCFs and all models used for AMAP's 2021 SLCF assessment show that the Arctic will continue to warm at a rapid rate, as future emissions of both long-lived and short-lived climate forcers will lead to an increase in global mean temperature with an amplified response in the Arctic. The projected increase in carbon dioxide abundance and reduction of global sulfur emissions will continue to have a notable warming impact on the Arctic. Depending on how SLCF emissions develop, continuing reductions in global anthropogenic sulfur dioxide emissions will produce a warming impact on Arctic temperature from 2015-2030 which could be between 69% (with the Current Legislation scenario) and 103% (with the Maximum Feasible Reductions scenario) of the warming impact of carbon dioxide. Model results also show that maximum feasible reductions of black carbon and methane can nearly offset the warming impact of the additional reduction in sulfur emission. Specifically, maximum feasible reductions in global emissions of methane from all anthropogenic combustion sources could lead to a reduction in the Arctic warming rate of 0.047 °C per decade from 2015 to 2050, relative to only implementing current legislation. Reduced interactions of black carbon with radiation, clouds, and surface albedos could reduce the Arctic warming rate by 0.074 °C per decade from 2015 to 2050 in the Maximum Feasible Reduction scenario, relative to the Current Legislation scenario. Health concerns are the key driver for addressing air pollution, including emissions of sulfur dioxide. Health concerns will (and should) continue to motivate reduced emissions of sulfur dioxide into the future, despite the consequence of unmasking warming. This emphasizes the need to strongly reduce emissions of both carbon dioxide and SLCFs that contribute to warming, as such actions will slow the rate of warming compared to current emissions trajectories. The reduction of SLCFs is especially important for the rate of warming in the next few decades. To slow Arctic warming, it will be especially important to achieve maximum feasible reductions of global black carbon emissions from gas flaring, land-based transportation, and residential combustion. Reduced deposition of black carbon on snow and ice would increase the reflectivity of these surfaces and thereby cool the Arctic. Reducing emission of black carbon from the Arctic Council countries is particularly effective as these emissions occur in or close to the Arctic. Maximum feasible reduction of methane emissions from the oil and gas sector in Arctic Council countries is also critically important for offsetting the projected warming.

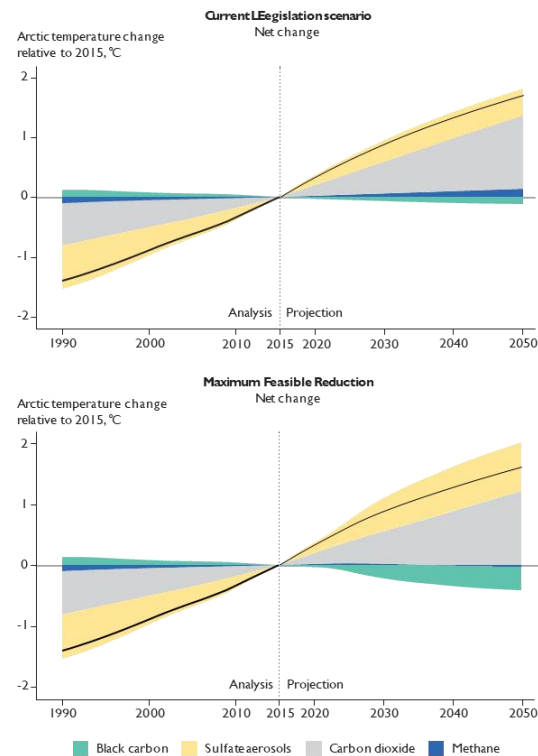
過去の変化に対するSLCFの寄与

1990年から2015年までの期間の数値モデルによるシミュレーションでは、北極評議会のメンバー国とその他のヨーロッパ諸国での化石燃料とバイオ燃料起源の硫黄排出量が大幅に減少したが、この期間におけるアジアのオブザーバー国とその他の地域の排出量の変化はわずかであった。硫酸塩エアロゾルは大気を冷却し、二酸化炭素と加熱に働くSLCFによって引き起こされる温暖化の一部を相殺した。中低緯度での硫酸エアロゾルの濃度の低下（大気質の改善）に伴い、硫酸エアロゾルによる冷却（マスキング効果とも呼ばれる）は減少した。この25年間、地球規模の二酸化炭素排出がもたらした北極温暖化の効果は、中・低緯度での硫黄排出の減少による冷却の減少から生じた温暖化効果とは、ほぼ同じ程度である。1990年から2015年までの北極の気温変化傾向に対する硫黄以外のSLCFの寄与は非常に小さかったが、これは主に、この期間におけるこれらの成分の世界的な排出量変化が比較的小さかったためである。全球での人為的発生源からのSLCFと放射、雲、および表面アルベドとの相互作用の変化を考慮し計算された1990～2015年の正味の北極温暖化は、10年あたり0.275 °Cであった（9ページの図（上のグラフ）を参照）。硫酸塩と雲との相互作用の低下が北極の正味の温暖化に影響を及ぼしたと考えられる。計算された昇温は大きい、不確実さも大きい。詳しく記すと、全球での硫黄排出量の削減が、硫酸塩エアロゾルと放射・雲・地表面アルベドとの相互作用の減少により10年あたり0.290 °Cの北極温暖化を生じさせた可能性がある。したがって、北極の気候に関しては、全球での二酸化硫黄排出量の変化がすべてのSLCFの影響の中で支配的であった。さらに、報告書のために実施された数値モデルによるシミュレーションは、全球での二酸化炭素の人為的排出と全球での硫黄の人為的排出の減少が、1990年から2015年までの正味の北極温暖化に同程度寄与したということを示している（二酸化炭素については10年あたり0.285 °Cである）。数値モデルによるシミュレーションによれば、1990年から2015年の間での全球での人為的ブラックカーボン排出量の減少が最近の北極温暖化においては、冷却効果があったことが示された（10年あたり-0.053 °C）。同時期における全球での人為的メタンの排出による温暖化効果は比較的小さい（10年あたり0.038 °C）。

SLCFの将来の気候変化への寄与

SLCFの人為的排出に関する全てのシナリオとAMAP 2021 SLCF評価に使用された全てのモデルによれば、北極は急速に昇温し続けることが示されている。それは、気候強制力をもつ長寿命と短寿命の物質の排出が将来世界的に増加する結果、全球平均気温が上昇し、そして北極では応答が増幅されることによる。予測される二酸化炭素の存在量の増加と全球での硫黄排出量の減少は、北極に対して顕著な温暖化効果を及ぼし続けるであろう。SLCF排出量がどのように進展するかによるが、全球での人為的二酸化硫黄排出量の継続的な削減は、2015年から2030年にかけて北極の昇温をもたらし、それは二酸化炭素による温暖化効果の69%（CLEシナリオの場合）と103%（MFRシナリオの場合）の間の大きさとなると考えられる。モデルの結果はまた、ブラックカーボンとメタンの実現可能な最大の削減（MFRシナリオ）によって、硫黄排出量の追加削減による温暖化効果の影響をほぼ相殺できることも示している。特に、世界ですべての人為的燃焼源から排出されるメタンの実現可能な最大の削減の場合は、CLEの実施のみと比較して、2015年から2050年までの北極温暖化率を10年あたり0.047 °Cの低下につなげられる可能性がある。ブラックカーボンと放射・雲・地表面アルベドとの相互作用が減少すると、MFRシナリオでは、CLEシナリオと比べ、2015年から2050年までの北極温暖化率を10年あたり0.074 °C低下させることができる可能性がある。

健康への悪影響を軽減することが二酸化硫黄の排出を含む大気汚染に対処する時の主要な動機である。二酸化硫黄の排出削減については、その結果温暖化が促進されるということと関係なく、健康への悪影響の軽減が将来にわたっての動機付けとなっている（そしてそうあるべきである）。このことにより、二酸化炭素と温暖化効果のあるSLCFの両方の排出量を大幅に削減する必要性が強まる。そのような施策の実施により、現在の排出量の状況と比べて温暖化の速度を遅くすることになる。SLCFの削減は、今後数十年の温暖化速度にとって特に重要である。北極温暖化を遅らせるには、世界におけるガスフレア、陸上輸送、住宅での燃焼によるブラックカーボン排出量を実現可能な範囲で最大限削減を達成することが特に重要になる。雪や氷表面へのブラックカーボンの沈着が減少すると、これらの表面の反射率が高まり、それによって北極が冷却される。北極評議会メンバー国のブラックカーボン排出は北極内または北極の近くで発生するため、それらの国の削減は特に効果的である。北極評議会メンバー国が石油およびガス分野でのメタン排出量を最大限に削減することも、予測されている温暖化を相殺するために非常に重要である。



Arctic temperature change in two different scenarios of SLCF emissions: Current Legislation and Maximum Feasible Reductions.

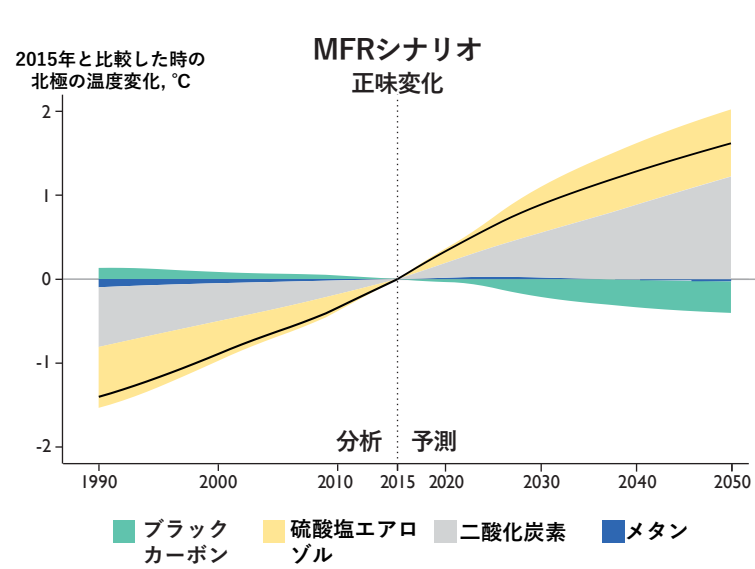
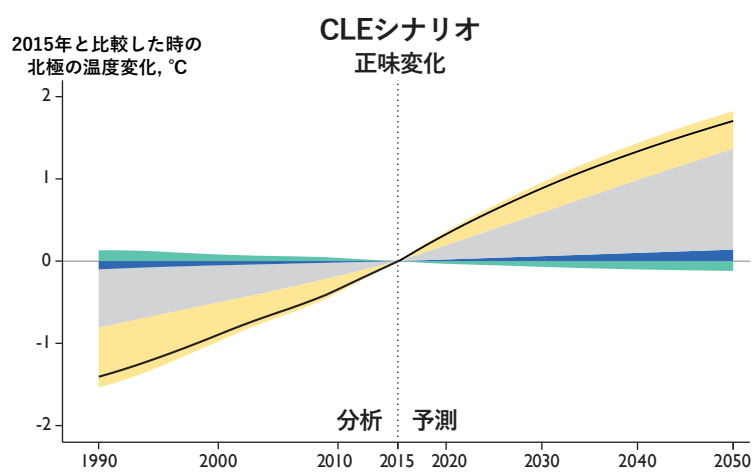
The solid line shows the net Arctic temperature change from combined changes in all emissions (black carbon, carbon dioxide, sulfur dioxide, methane). The shaded areas indicate how observed and projected changes in emission of SLCFs since 1990 contribute to net changes in Arctic temperature relative to 2015. Note that declining emissions of warming agents like black carbon manifest as cooling during this period. The Arctic is here defined as the area north of 60° N. The emission changes that have been used in modelling the two different scenarios are illustrated in the figure on page 14.

The take-home message is that past and projected future emissions of carbon dioxide (grey shaded area) play a dominant role for Arctic warming and will continue to do so.

For sulfate aerosols (yellow), a net decrease in emissions since 1990 has contributed to recent Arctic warming. The magnitude of this contribution is similar to that of carbon dioxide. Expected further reductions in sulfate aerosols will continue to contribute to Arctic warming in the next 20-30 years. This warming impact from declining concentrations is especially pronounced in the Maximum Feasible Reduction scenario.

Black carbon (green) contributes to warming, but decreases in emission of black carbon since 1990 have decreased its relative warming impact. Further net reductions in black carbon emissions would continue to decrease its warming impact and counteract some of the future warming from carbon dioxide and reductions in sulfate aerosols, more so in the Maximum Feasible Reduction scenario than in the Current Legislation scenario.

Methane (blue) contributes to Arctic warming and an increase in methane emissions has accelerated methane's contribution to warming since 1990. It will continue to do so in the Current Legislation scenario. In the Maximum Feasible Reduction scenario, there will only be slight net changes in methane emissions, and the contribution to future Arctic temperature changes is therefore minimal. In absolute numbers, methane will still contribute to Arctic warming, though this is barely discernible in the figure.



SLCF排出に関する2つの異なるシナリオの下での北極の温度変化：CLEとMFR

実線は、すべての排出量（ブラックカーボン、二酸化炭素、二酸化硫黄、メタン）の変化を組み込んだ場合の北極の正味の温度変化を示している。影付きの領域は、1990年以降に観測および予測されたSLCFの排出量の変化が、2015年と比較して北極の気温の正味の変化にどのように寄与しているかを示している。北極は、ここでは北緯60度以北の領域として定義されている。2つの異なるシナリオのモデル化に使用された排出量の変化は、14ページの図に示されている。

この図の主なメッセージは、二酸化炭素の過去および予測される将来の排出量（灰色の網掛け部分）が北極の温暖化に支配的な役割を果たして、今後もそうなり続けるということである。

硫酸塩エアロゾル（黄色）については、1990年以降の排出量の正味の減少が、最近の北極の温暖化の一因となっていることがわかる。この寄与の大きさは二酸化炭素増加の効果と同程度である。硫酸塩エアロゾルはさらなる減少が予想されるため、今後20～30年の北極の温暖化を促進し続ける。硫酸塩エアロゾルの濃度低下による温暖化への影響は、MFRシナリオの方で特に顕著である。

ブラックカーボン（緑）は温暖化に寄与するが、1990年以降のブラックカーボンの排出量の減少により、温暖化への効果が相対的に減少する。ブラックカーボン排出量のさらなる正味の削減は、その温暖化効果を減らし続け、二酸化炭素と硫酸塩エアロゾルの削減による将来の温暖化の一部を打ち消す。その場合、CLEシナリオに比べ、MFRシナリオの方が効果は大きい。

メタン（青）は北極温暖化に寄与し、メタン排出量の増加は1990年以降、メタンの温暖化への寄与を加速させている。CLEシナリオでは、2015年以降も引き続き加速する。MFRシナリオでは、メタン排出量の正味の変化はわずかであるため、将来の北極の気温変化への寄与はわずかである。数字を見るかぎりメタンは依然として北極温暖化に寄与するが、そのことは図ではほとんど識別できない。



COMPARING 2015 AND 2021 METHODS FOR ASSESSING CLIMATE IMPACTS OF SLCFS

The AMAP 2015 SLCF assessments separately modelled each SLCF to estimate the potential of changes in methane and black carbon emissions to affect Arctic climate and to compare impacts of different regional emission sources. AMAP's 2021 SLCF assessment uses a greater number of models that incorporates improved knowledge of regional climate sensitivities and more detailed representation of the processes that alter climate. It is furthermore based on updated emissions inventories and projections and includes more attention to changes in emission of, in particular, sulfur dioxide. As a result, it has been possible to provide a more nuanced picture of how the integrated effect of SLCFs change over time and to accurately place the impact of reducing SLCFs into context of the impact of reducing emission of carbon dioxide. The simulated reduction in Arctic warming impact in 2050 from the implementation of maximum feasible SLCF emission reductions in the current assessment (0.16 °C per decade from methane and 0.26 °C per decade from black carbon radiative forcings) are comparable to temperature impacts estimated in AMAP's 2015 SLCF assessments.

SLCFの気候影響の評価方法に関する2015年と2021年の比較

AMAP 2015 SLCF評価では、各SLCFを個別にモデル化して、北極気候に影響を与えるメタンとブラックカーボンの排出量の変化の可能性を推定し、さまざまな地域の排出源の影響を比較した。それに対しAMAP 2021 SLCF評価では、地域の気候感度に関する新たな知識と、気候を変化させるプロセスのより詳細な表現を組み込んでより多数のモデルを使用している。さらに、最新の排出インベントリと改良された予測に基づいて、二酸化硫黄の排出量の変化に特に注意を払っている。その結果、SLCFの総合的效果が時間とともにどのように変化するかについて、より詳細に描像することができ、二酸化炭素排出削減の影響の議論にSLCF削減の影響を正確に組み込むことができた。2050年時点の北極温暖化への影響についてシミュレーションを行ったところ、MFRシナリオを用いた場合のSLCFによる温暖化低減効果（メタンにより10年あたり 0.16 °C、ブラックカーボン放射強制力により10年あたり0.26 °C）は、AMAP 2015 SLCF評価で推定した気温への効果に匹敵している。

AIR POLLUTION AND HEALTH

Ambient air pollution is among the 10 leading risk factors for premature death in Arctic Council Member and Observer countries. There are well established relationships between fine particles (PM_{2.5}) and cardiovascular and respiratory diseases, as well as premature death. There is also growing evidence that air pollution increases the risk for diabetes, premature births, and low birth weight. Ozone has been associated with increased risk for respiratory disease that leads to premature death and may be associated with increased risk for other adverse health outcomes (e.g., metabolic effects).

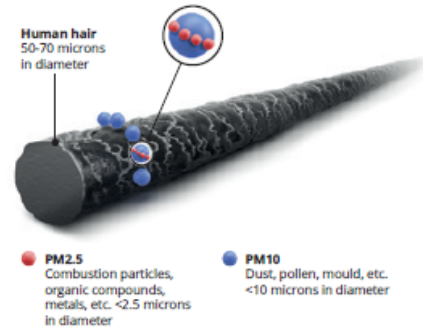
HEALTH IMPACTS IN THE ARCTIC

There are only a limited number of studies of the impact of air pollution on people living in the Arctic. Those that do exist for Alaska show that exposure to PM_{2.5} is an important health concern. While estimating the contribution of air pollution to disease among people who live in the Arctic is a challenging task, current understanding of the cause-effect relationships indicates that most efforts to reduce emissions would have health benefits. Local sources are important and measures to reduce emissions from residential heating, waste burning, diesel generators, and surface transport would have local health benefits. Ensuring that increased marine shipping does not lead to local air pollution is also important. Another concern is the risk for more wildland fires in the Arctic and the associated health impacts of increased smoke emissions.

AIR QUALITY AND HEALTH IMPACTS IN ARCTIC COUNCIL MEMBER AND OBSERVER COUNTRIES

New studies conducted for AMAP's 2021 SLCF assessment have used estimates of future emissions to assess air quality and health, with a focus on the impacts of fine particles (PM_{2.5}) and ozone on premature death.

In places where air pollution levels are high, such as in many Asian Observer countries, implementing current legislation would lead to improved local air quality. In the Current Legislation scenario, most of these reductions are projected to occur between 2020 and 2025. Applying best available technologies globally for all air pollutants and methane would improve air quality further, especially in regions that currently have high emissions. The potential for reducing concentrations of ozone in areas with high levels of air



pollution is mainly linked to the reductions in methane emissions (methane is a precursor for ozone).

AMAP's 2021 SLCF assessment has also estimated the number of avoided premature deaths due to air pollution reductions under different emission scenarios using literature-based relationships between air pollution concentrations and adverse health outcomes. The take-home message is that fully implementing current legislation could reduce global premature mortality attributable to PM_{2.5} by 24% in 2030 compared with 2015. The more ambitious Maximum Feasible Reduction scenario would result in further reductions of premature deaths related to air pollution, an additional 22% compared to the Current Legislation scenario.

In the Current Legislation scenario, ozone concentrations globally remain steady but the number of people dying prematurely from exposure to ozone is nevertheless estimated to increase due

大気汚染と健康

大気汚染は、北極評議会のメンバーおよびオブザーバー諸国での早死に関する10の主要な危険因子のひとつである。微粒子（PM2.5）と心血管疾患、呼吸器疾患、および早死の間には十分に確立された関係がある。空気汚染は、糖尿病、早産、低出生体重のリスクを高める。オゾンは、早死につながる呼吸器疾患のリスクの増加と関連していて、他の健康への悪影響（代謝効果など）のリスクの増加とも関連している可能性がある。

北極における健康への影響

北極に住む人々に対する大気汚染の影響に関する研究は限られている。アラスカでの研究では、PM2.5への曝露が重要な健康上の懸念事項であることを示している。北極に住む人々の病気に対する大気汚染の寄与を推定することは困難な作業であるが、原因と結果の関係についての現在の理解は、排出量削減の対策はほぼ全て健康上有益であることを示している。身近にある排出源は重要であるため、住宅の暖房、廃棄物の燃焼、ディーゼル発電機、および地上輸送からの排出を削減するための対策は、地域の人々の健康上有益である。海上交通の増加が地域の大気汚染につながるようにすることも重要である。もうひとつの懸念は、北極で増えている森林火災と、それに伴う煙の排出量の増加による健康への影響のリスクである。

北極評議会のメンバー国とオブザーバー国の大気質と健康への影響

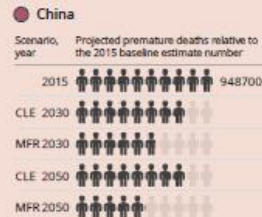
AMAP 2021 SLCF評価のために実施された新しい研究では、早死に対する微粒子（PM2.5）とオゾンの影響に焦点を当てたが、その際、大気質と健康を評価するために将来の排出量の推定値を使用した。

多くのアジアのオブザーバー国のように大気汚染レベルが高い地域では、現行法規を実施することで、地域の大気質が改善される。CLEシナリオでは、これらの削減のほとんどは2020年から2025年の間に行われると予測されている。すべての大気汚染物質とメタンに対して利用可能な最良の技術を世界的に適用することで、特に現在排出量が多い地域で、大気質がさらに改善される。大気汚染のレベルが高い地域でオゾン濃度を下げる可能性は、主にメタン排出の削減に関連している（メタンはオゾンの前駆物質である）。

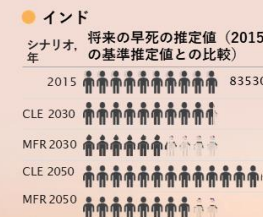
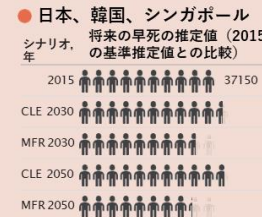
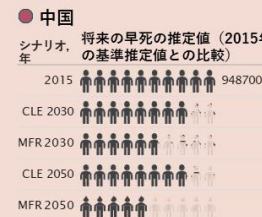
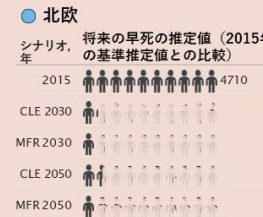
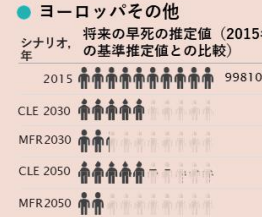
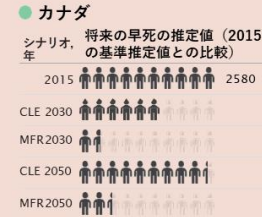
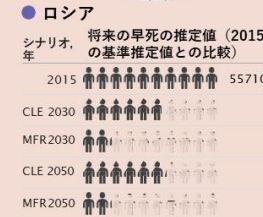
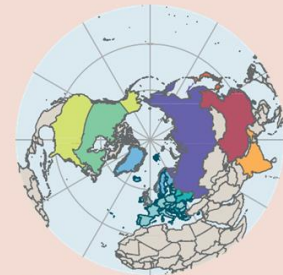


AMAP 2021 SLCF評価では、大気汚染濃度と健康への悪影響について文献から得られた関係を使用して、さまざまな排出シナリオでの大気汚染削減による早死の回避数も推定されている。大事なメッセージは、現行法規を完全に実施することで、PM2.5に起因する世界の早期死亡率を2015年と比較して2030年に24%減少できるということである。より野心的なMFRシナリオのもとでは、大気汚染に関連する早死の減少が、CLEシナリオと比較してさらに22%増える。

CLEシナリオでは、オゾン濃度は世界的に安定しているが、オゾンへの暴露により早死する人々の数は、人口の増加に伴い増加すると推定されている。より野心的なMFRシナリオでは、世界のオゾン関連の死亡率は現在のレベルと比較して減少すると予測されている。



Changes in premature death from PM_{2.5} in Arctic Council and Observer regions in 2030 and 2050 compared to 2015 if emissions are reduced by implementing current legislation (CLE scenario) and by applying maximum feasible reduction in emissions (MFR scenario).



現行法規を実施した場合 (CLEシナリオ)、実行可能な最大の排出削減を適用することによって排出量を削減した場合 (MFRシナリオ) の2ケースに関し、2015年と比較した2030年および2050年の北極評議会メンバー国およびオブザーバー諸国のPM_{2.5}による早期死亡の変化。



Michael Bergner / Army Stock Photo

to a growing population being exposed. Conversely, in the more ambitious Maximum Feasible Reduction scenario, global ozone-related mortality is projected to decrease compared with the present-day levels.

For Arctic Council Member countries, adhering to current legislation in order to reduce PM_{2.5} and ozone would avoid an estimated 66,000 premature deaths in 2030 compared to 2015. In the more ambitious

Maximum Feasible Reduction scenario, an estimated 97,000 premature deaths would be avoided in 2030. For Observer countries, maximum feasible emission reductions would avoid an estimated 880,000 premature deaths in 2030 compared to 2015. Only implementing current legislation would avoid 540,000 premature deaths in 2030 compared to 2015.

CONFIDENCE IN MODEL RESULTS

Individual models vary in how well they represent SLCFs compared to historical observations, but the multi-model average provides results that are close to or within the uncertainty range of observed levels of black carbon, ozone, and methane in the atmosphere. When modelling the climate impact of SLCF emissions, the confidence is high in the direction of change, but medium regarding the magnitude of change. A major uncertainty is in future emission trajectories, due to uncertainty in socioeconomic development paths. A critical uncertainty regarding climate impacts of emissions relates to changes in clouds and associated climate forcing. An evaluation of the implications of model uncertainties for the projections of near-term climate and health impacts show that:

- Confidence in the warming from methane is high both globally and in the Arctic.
- The warming due to black carbon may be underestimated in the Arctic and is uncertain due to high variability across models.
- Cooling from sulfate aerosols in the Arctic may be underestimated. It is uncertain primarily

owing to lack of observations throughout the atmospheric column and high degree of variability across model estimates.

- Confidence in the warming impact from ozone is fairly high globally and in the Arctic, but uncertainties exist in model simulations of ozone and its precursors.
- The climate impacts due to changing cloud properties are highly uncertain due to the large range in both modelled and measured clouds.
- Ozone-attributable respiratory mortality could be overestimated due to overestimation of ozone concentrations. The overall impact of ozone on health may be underestimated because other detrimental health outcomes were not included in the assessment for which the scientific evidence is building (e.g. metabolic outcomes).
- The health impacts due to PM_{2.5} exposure may be underestimated due to underestimation of concentrations, particularly in Asia and near population-centers, and because some detrimental health outcomes were not included in the assessment for which the scientific evidence is building (e.g. adverse birth outcomes, cognitive effects).

北極評議会メンバー国の場合、PM_{2.5}とオゾン削減のための現行法規（CLEシナリオ）を順守することで、2030年には2015年と比較して推定66,000人の早死を回避できる。より野心的なMFRシナリオでは、2030年に推定97,000人の早死が回避できる。オブ

ザーバー諸国の場合、MFRシナリオでは、2030年には2015年と比較して推定88万人の早死を回避できる。またCLEシナリオを実施するだけでも、2030年には2015年と比較して54万人の早期死亡を回避できる。

モデル結果の信頼性

過去の観測と比較した場合、個々のモデルがSLCFをどの程度適切に表現しているかはモデルによって異なるが、マルチモデル平均は、大気中のブラックカーボン、オゾン、およびメタンの観測レベルについて不確実性範囲に近いが、その範囲内の結果を示している。SLCF排出の気候への影響をモデル化した場合、変化の方向については信頼性が高いが、変化の大きさに関する信頼性は中程度である。主要な不確実性は、社会経済的発展のたどる経路の不確実性のために生じる将来の排出量の状況に起因する。排出量の気候への影響に関する主要な不確実性は、雲の変化とそれに関連する気候強制力に関連している。短期的な気候と健康への影響の予測に関連したモデルの不確実性を評価した結果、次のことが示された。

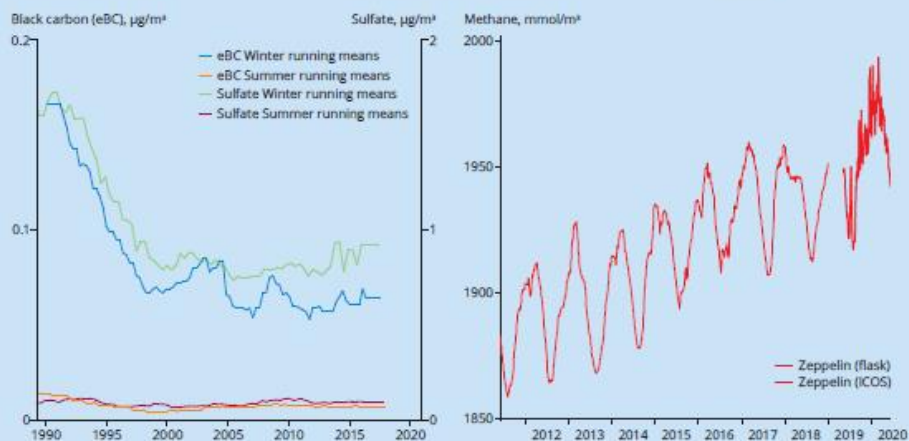
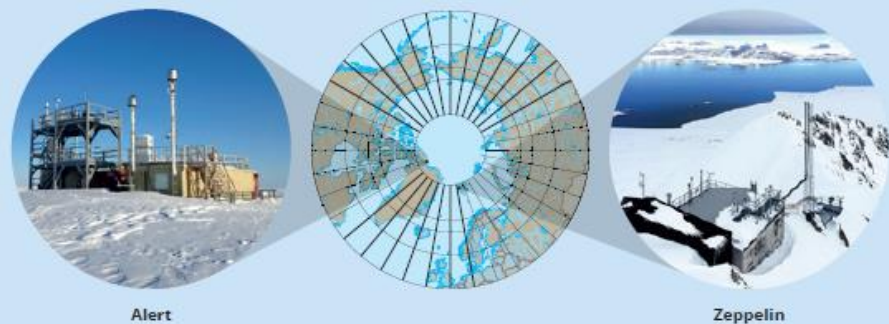
- メタンによる昇温については、全球規模でも北極でも信頼性が高い。
- 北極ではブラックカーボンによる温暖化が過小評価されている可能性があり、モデル間のばらつきが大きいことため不確実である。
- 北極の硫酸塩エアロゾルによる冷却効果は過小評価されている可能性がある。この不確実性は主に、高度方向の積分量の観測の欠如とモデル推定全体でのばらつきに起因する。
- オゾンによる温暖化効果について、全球的にも北極でもかなり信頼度が高いが、オゾンとその前駆物質の数値モデルによるシミュレーションには不確実性が存在する。
- モデル計算された雲と観測された雲の両方で大きなばらつきがあるため、雲の特性変化による気候への影響については非常に不確実である。
- オゾン濃度の過大評価により、オゾンに起因する呼吸器死亡率が過大評価される可能性がある。科学的証拠を基に作成された評価には他の有害な健康アウトカム（代謝アウトカムなど）が含まれていなかったため、オゾンが健康に及ぼす全体的な影響は過小評価されている可能性がある。
- PM_{2.5}曝露による健康への影響は、特にアジアや人口密集地の近くの濃度が過小評価されていることと、また科学的証拠が集積されている評価に一部の有害な健康アウトカム（例：有害出生のアウトカム、認知効果）が含まれていないことのために、過小評価されている可能性がある。

OBSERVATIONS AND TRENDS

Changes over time in the levels of SLCFs in the Arctic atmosphere show the impacts of air pollution policies and changes in industrial activity.

For example, long-term atmospheric measurements show that Arctic air quality improved after 1990 in response to air pollution policies put in place in Europe and North America and after a sharp decline in the Soviet Union economy. However, around this time emissions from China and the rest of Asia started to increase, to stagnate and slightly decline since the early 2010s. In the Arctic atmosphere, levels of black carbon decreased between 1990 and 2010, but this decline has stagnated in the past 10 years. For sulfates, continued decline in atmospheric concentrations is apparent at some Arctic monitoring stations, while other stations show the decline levelling off or a slight increase.

Methane levels in the Arctic atmosphere reflect global concentrations and have more than doubled since the pre-Industrial Era according to records of atmospheric methane levels from ice cores. From approximately 2000 to 2005 there was no increase but from about 2007, levels have increased again with an even more rapid growth from 2015. Long-range transport contributed to increasing levels in the Arctic atmosphere, but hot spots of Arctic anthropogenic emissions have potentially added to this growing trend.



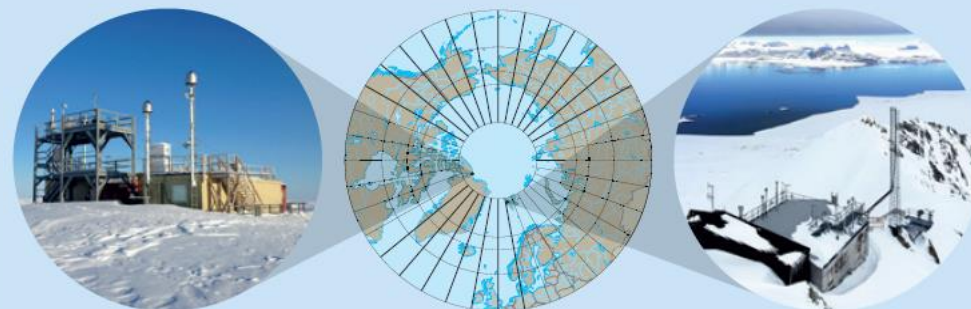
Monitoring data from Alert, Canada showing the historic decline in black carbon (top) and sulfate aerosols (bottom).

Trends in methane at Zeppelin (Svalbard).

観測と変化傾向

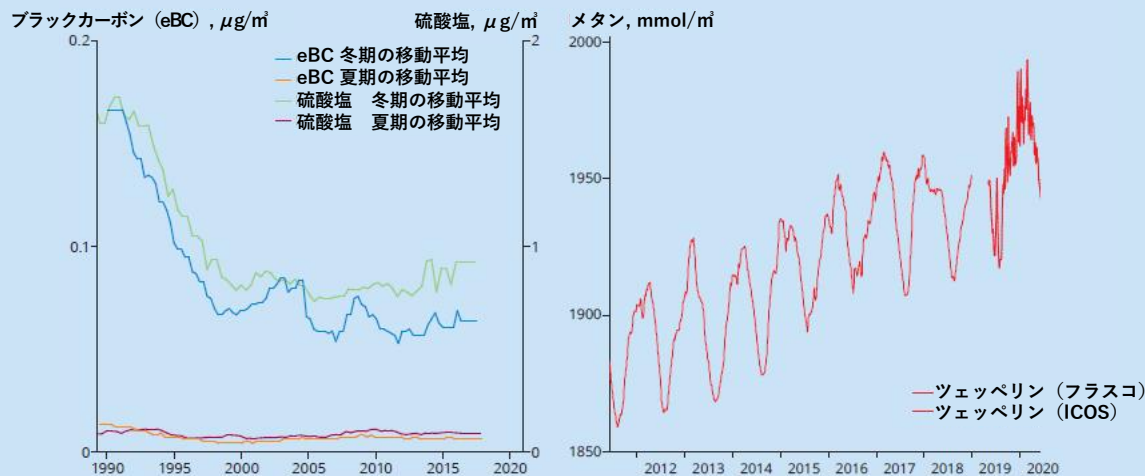
北極の大気中のSLCFのレベルの経時変化は、大気汚染対策の効果と産業活動の変化を示している。

たとえば、長期の大気測定では、1990年以降、ヨーロッパと北アメリカで実施された大気汚染対策が実施されたことと、ソビエト連邦経済が急激に落ち込んだことにより、北極の大気質が改善したことが示されている。しかし、この頃、中国やその他のアジアからの排出量は増加し始め、停滞し、2010年代初頭からわずかに減少した。北極の大気では、1990年から2010年の間にブラックカーボンの濃度が低下したが、この低下は過去10年間停滞している。硫酸塩の場合、一部の北極の監視基地では大気中濃度の継続的な低下が見られるが、他の基地では低下が横ばいまたはわずかに増加している。北極の大気中のメタン濃度は地球規模の濃度を反映していて、氷床コアからの大気中のメタン濃度の記録によると、産業革命以前に比べ2倍以上になっている。およそ2000年から2005年まで増加はなかったが、2007年頃から濃度は再び増加し、2015年からさらに急速に増加した。長距離輸送が北極の大気中の濃度の増加に寄与したが、この増加傾向に、北極のホットスポットからの人為的排出が加わった可能性がある。



アラート

ツェッペリン



カナダのアラートのモニタリングデータは、ブラックカーボン(上)と硫酸塩エアロゾル(下)の歴史的な減少を示している。

ツェッペリン(スバルバル)でのメタンの変化傾向



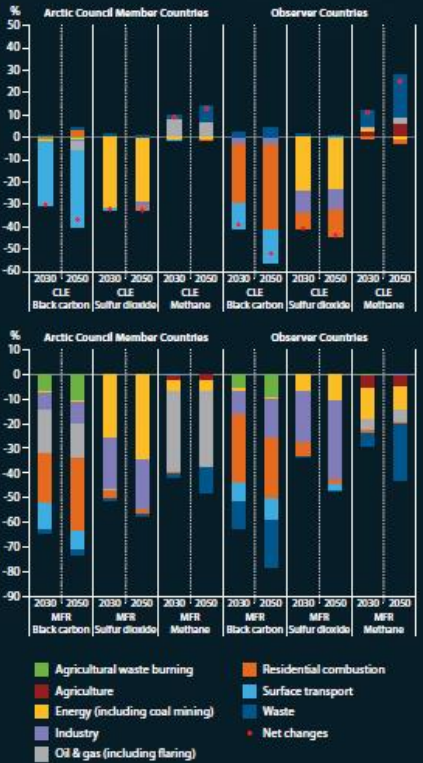
net/consult

EMISSION SOURCES

Arctic Council Member and Observer countries together account for about half of the current global anthropogenic emissions of black carbon, sulfur dioxide and methane. While there are differences between the available estimates of SLCF emissions, especially at the sectoral level, the relative contribution of different sources appears robust. Based on the emission inventories developed for this assessment, Arctic Council Member countries accounted for 8% of global anthropogenic black carbon emissions in 2015, with land-based transportation as the most important source, followed by residential combustion and gas flaring in the oil and gas sector. Observer countries accounted for 40% of global anthropogenic emission of black carbon in 2015, dominated by emissions from China and India and with residential combustion as the major source followed by land-based transportation. Arctic shipping is currently only a minor source of black carbon emissions overall.

For sulfur dioxide, Arctic Council Member countries accounted for 13% of global emissions in 2015 and Observer countries accounted for 30%. The energy sector and industry are the most important sources in both Arctic Council Member and Observer countries.

For methane, Arctic Council Member countries accounted for 20% of global anthropogenic emissions in 2015, mainly from the energy sector, especially oil and gas exploration and distribution, with substantial contributions also from waste and from agriculture. Observer countries account for 30% of global methane emissions. While emissions from agriculture currently account for nearly 50%, future growth is dominated by increase of emissions from waste management.



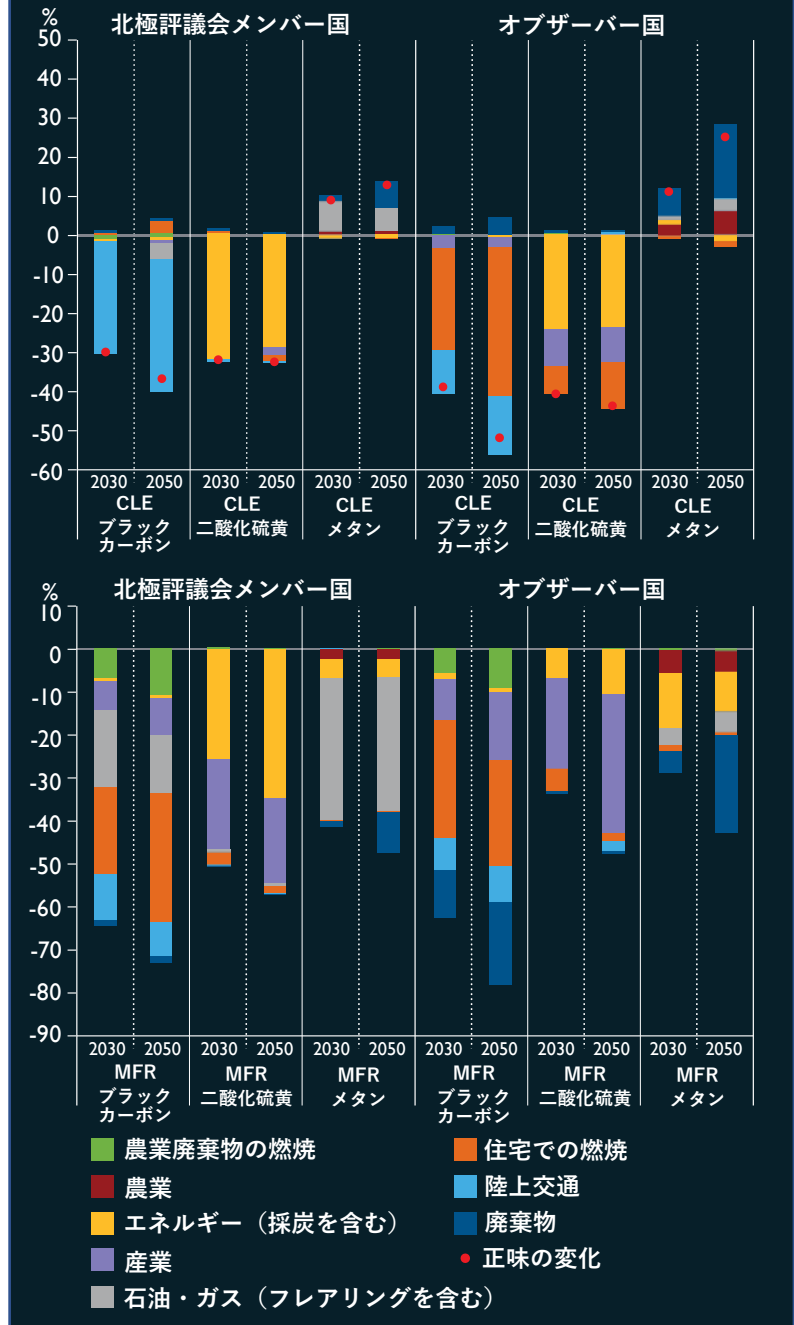
Relative changes in emissions under the Current Legislation (CLE) scenario in 2030 and 2050 compared to 2015, and further reduction potential under the Maximum Feasible Reduction (MFR) scenario compared to the CLE scenario in 2030 and 2050.

発生源

北極評議会のメンバー国とオブザーバー諸国からの、ブラックカーボン、二酸化硫黄、メタンの人為的排出量は現在の全球での排出量の約半分を占めている。SLCF排出量に関する利用可能な推定値には、特に部門間で差異があるが、さまざまな発生源の相対的な寄与は確実であると考えられている。この評価のために作成された排出インベントリに基づく、2015年には世界の人為的なブラックカーボン排出量の8%を北極評議会メンバー国が占め、その中で陸上輸送が最も重要な排出源であり、家庭での燃焼と石油とガスのガスフレアがそれに続いている。オブザーバー諸国は、2015年のブラックカーボンの全球的な人為的排出量の40%を占めているが、その中で中国とインドの排出量が大半を占め、排出源としては住宅での燃焼が主であり、陸上交通がそれに続く。北極海運は現在、全体としてブラックカーボンのごくわずかな排出源にすぎない。

二酸化硫黄については、2015年に世界の排出量の13%を北極評議会メンバー国が占め、オブザーバー国が30%を占めていた。北極評議会のメンバーとオブザーバーの国の両方で、エネルギーと産業部門が最も重要な排出源である。

メタンについては、北極評議会メンバー国が2015年に世界の人為的排出量の20%を占め、それは主にエネルギー部門、特に石油とガスの採掘・輸送に関係したものであるが、廃棄物と農業からかなりの寄与がある。オブザーバー国は世界のメタン排出量の30%を占めている。現在、農業からの排出量はほぼ50%を占めているが、将来的には廃棄物処理による排出が増加し支配的になる。



CLEシナリオでの各排出量について、2015年と比較した時の2030年と2050年時点の相対的な変化、および2030年と2050年時点のMFRシナリオの可能なさらなる削減量をCLEシナリオと比較した図。

FUTURE ANTHROPOGENIC EMISSIONS

Fully implementing current legislation would lead to lower emissions of SLCFs in both Arctic Council Member and Observer countries. For black carbon, a decline of 37% in Arctic Council countries and 52% in Observer countries is estimated by 2050 compared to 2015. The scenarios of future emissions used for this AMAP assessment indicate that the Arctic Council's collective voluntary commitment for reducing black carbon emissions of 25-33 percent below 2013 levels by 2025 can almost be achieved by implementing current policies, which are estimated to result in reductions of 22% by 2025¹. Significant further emission reduction potential exists and could be achieved with best available technologies.

Emissions of methane are expected to increase by 13% by 2050 in Arctic Council Member countries and 25% in Observer countries even if current legislation is implemented. The estimated future emissions trend, considering implementation of current legislation, is not consistent with the commitment in the Arctic Council's Framework for Action for Enhanced Black Carbon and Methane Emission Reductions "...to significantly reduce our overall methane emissions".

For sulfur dioxide, the Current Legislation scenarios indicate a strong decline in emissions of about 33% for Member Countries and 45% for Observer countries by 2050. Current clean air policies could reduce emissions of black carbon from the residential and transport sectors and to some extent from industry. Considerable additional emission reductions could be achieved by applying best available technologies. This is especially notable for black carbon from residential combustion (heating and cooking) and industrial oil and gas production, sulfur dioxide emission from energy production and industry, and methane emissions from oil and gas production, and improved management of municipal and industrial waste.



NATURAL EMISSIONS OF METHANE AND PARTICLES

Natural emissions of methane are important in the Arctic, in fact they are the dominant source due to the region's many wetlands. Nevertheless, these emissions are about 2.5 times smaller than global anthropogenic emissions of methane from fossil fuels. Future natural emissions are uncertain but increases in Arctic methane from natural sources under a range of anthropogenic climate warming scenarios are projected to be smaller than the potential reductions in global anthropogenic methane emissions. Potential future changes in natural emissions, e.g. due to warming leading to degrading permafrost or to a wetter environment, were not included in the modelling of climate impacts of SLCFs, due to large uncertainties in projections of future emission.

Emissions from the Arctic Ocean, i.e. of sea spray and marine biogenic gases that form particulate matter, will change with climate change thereby influencing Arctic climate. There is not yet sufficient understanding to quantitatively estimate these effects.

¹ The Arctic Council's EGBCM utilizes nationally reported emissions and projections as a basis for evaluating the progress towards meeting the objectives of the Arctic Council's Framework for Action for Enhanced on Black Carbon and Methane Emission Reductions. For details of the information used in the AMAP assessment process see 'Assessing the Impacts of SLCFs'.

将来の人為的排出

現行法規を完全に実施することで、北極評議会のメンバーとオブザーバーの国の両方でSLCFの排出量を減らすことができる。ブラックカーボンについては、2015年と比較して2050年までに北極評議会諸国で37%、オブザーバー諸国で52%の減少が見込まれている。今回のAMAP評価に使用される将来の排出シナリオは、ブラックカーボン排出を削減するための北極評議会全体での自主的な取り組みの結果を示しているが、現在の政策を実施することでブラックカーボンを2025年までに2013年のレベルより25~33%下回らせることがほぼ達成でき、その結果2025年までに22%の削減になると算出されていることに基づいている¹。さらに大幅な排出削減の可能性があり、それは利用可能な最良の技術で達成できる。

現行法規が実施されたとしても、メタンの排出量は、北極評議会メンバー国では2050年までに13%増加し、オブザーバー国では25%増加すると予想されている。現行法規の実施を考慮に入れた将来の推定排出量の傾向は、「...全体的なメタン排出量を大幅に削減する」という北極評議会の「Framework for Action for Enhanced Black Carbon and Methane Emission Reductions」の前向きな取り組みと必ずしも整合していない。

二酸化硫黄について、CLEシナリオは、2050年までにメンバー国で約33%、オブザーバー国で45%の排出量の大幅な減少を示している。現在のクリーンエア政策は、住宅および運輸部門、そしてある程度産業部門のブラックカーボンの排出量を削減させることができる。利用可能な最良の技術を適用することにより、かなりの追加排出削減を達成することができる。これに該当するものとしては、住宅における燃焼（暖房と調理）と産業用の石油とガスの生産からのブラックカーボン、エネルギーの生産と産業からの二酸化硫黄の排出、石油とガスの生産からのメタンの排出、および都市廃棄物と産業廃棄物の管理の改善などが特に注目される。

メタンと粒子状物質の自然放出

北極では、メタンの自然放出が重要である。実際、この地域には多くの湿地があるため、メタンの主要な放出源となっている。それにもかかわらず、これらの放出量は、世界における化石燃料からのメタンの人為的排出量の約2.5分の1である。将来の自然からの放出は不確実であるが、さまざまな人為的な気候温暖化シナリオの下での自然起源の北極メタンの増加は、全球的な人為的メタン放出の潜在的な減少よりも小さいと予測されている。自然放出量の将来の潜在的な変化として、例えば温暖化によって永久凍土の劣化またはより湿った環境によるものは、将来の放出量の予測に大きな不確実性があるため、SLCFの気候影響のモデル計算には含めなかった。

北極海からの放出、すなわち粒子状物質を形成する波飛沫と海洋生物起源ガスの放出は、気候変化とともに変化し、それが北極海の気候に影響を及ぼす。これらの影響を定量的に推定するための十分な理解は得られていない。

- 1 北極評議会のEGBCM（ブラックカーボン及びメタン専門家グループ）は、ブラックカーボンとメタンの排出削減を強化するために作成された北極評議会の「Framework for Action for Enhanced on Black Carbon and Methane Emission Reductions」に示されている目標達成に向けた進捗状況を評価するため、各国で報告された排出量と予測を利用している。AMAP評価の過程で使用された情報の詳細については、「SLCFの影響評価」（5ページ）を参照のこと。



An important source of black carbon and organic carbon to the atmosphere is wildland fires and intentional burning of agricultural fields, grasslands, and forests. Current estimates indicate that 12–15% of total deposition of black carbon in the Arctic originate from boreal forest fires in Siberia, Canada, and Alaska when compared to global anthropogenic and biomass burning emissions from all types of fires. The contributions of SLCFs to atmospheric concentration may change as the climate changes. Timing of fire emissions relative to extent of snow and ice is an important factor in relation to their Arctic climate impact. Altered seasonality and location of fires could lead to more soot deposition (earlier, northern fire regimes combined with open agricultural burning), or less soot deposition (summer to fall fires in boreal and temperate landscapes) on Arctic snow and sea ice. For the AMAP 2021 SLCF assessment, a literature review and comparison of published fire emission models, augmented by an AMAP-specific fire model, provide insight on current emissions and the future fire regimes and emissions.

While fires are a natural part of some Arctic ecosystems, climate change is expected to further increase the length of the fire season, possibly create drier conditions, and increase the risk that lightning will start fires due to a potential increase in lightning events. Other factors also play a role, including increased human activity in wildland areas, and high fuel load from earlier fire suppression and from pest damage. Global fire emission databases indicate a larger increasing trend in fires north of 60° from 2005 to 2018, more so than fire activity between 50° and 60°N, which has estimates of declining fire emissions in one model. A custom-made emissions model of current fire activity developed for AMAP's 2021 SLCF assessment indicates that most fire activity and emissions from fires occur between 50° and 60°N, corresponding to the southern extent of the

boreal region. For the same period, very few open biomass burning emissions were observed between 70° and 80°N. Above 80°N latitude, no fires were observed due to limitations on satellite coverage.

There is increasing evidence that climate change has played a role in large, uncontrollable early season fires in remote boreal forests. It has also driven an early start to the fire season in the Arctic tundra, with extreme wildfires in more populated areas. Fires in western Greenland in the late summer of 2017 and 2019 after periods of warm, dry, and sunny weather are a new phenomenon. While still relatively small on a global scale, future warming of the Arctic could lead to more and larger fires in landscapes where wildfires have previously been uncommon.

FUTURE OUTLOOK

Further climate change will affect future fire risks. In some cases, the fire could be become severe enough to cause shifts in ecosystems in ways that increase the likelihood of future fires. In addition to the potential for more ignitions from lightning and a longer fire season, permafrost degradation can increase the amount of dry vegetation and high carbon peat fuels. Peat fires can smolder for a long time, leading to large emissions of smoke. These fires are also extremely hard to extinguish, and can burn under the surface throughout the winter, and re-emerge in the spring. These have sometimes been called zombie or holdover fires. The total size of emissions from peat fires is difficult to estimate and predict. For example, thawing of discontinuous permafrost can increase the amount of peat fuel available to feed fires but may also rewet soils, limiting fire ignition and spread. Peat in the boreal and Arctic is a massive natural carbon sink, and peatland fires can release far more carbon dioxide than a typical wildland fire per unit of burned area, in addition to SLCFs.

火災と気候変化

大気へのブラックカーボンと有機炭素の重要な発生源は、荒野の火災と農地・草地・森林の意図的な燃焼である。現在の推定によると、全球でのあらゆる種類の火災からの人為的およびバイオマス燃焼の排出を含めたものを考慮した場合、北極でのブラックカーボンの沈着量の12～15%をシベリア、カナダ、アラスカの北方林火災が占めることが示されている。気候変化に伴い、大気中濃度に対するSLCFの寄与が変化する可能性がある。雪と氷の分布状態と火災による放出のタイミングは、北極の気候への影響に関連する重要な要素である。火災の発生時期と発生場所の変化が、北極の雪と海氷へのススの沈着の増加（北部での早い時期の火災と野焼きの組み合わせ）、またはススの沈着の減少（夏から秋にかけての北極と温帯の陸地での火災）につながる可能性がある。AMAP 2021 SLCF評価では、文献レビューによる公開された火災排出モデルの比較と、AMAP固有の火災モデルによって補強された結果により、現在の排出量と将来の火災状況と排出量に関する見通しに関する新たな知見が得られた。

火災は北極の生態系の自然現象の一つであるが、気候変化は、火災シーズンの期間をさらに長くし、より乾燥した状態を作り出す可能性があり、落雷の潜在的な増加により落雷による発火リスクを高めると予想される。荒野での人間活動の増加、早期の消火や害虫の被害など他の要因も関係して来る。全球での火災による排出量データベースは、2005年から2018年にかけて北緯60度以北の火災が50度から60度の間火災よりも大きい増加傾向を示している一方、ひとつのモデルでは火災による排出量が減少すると推定されている。AMAP 2021 SLCF評価のために特別に開発された現在の火災による放出のモデルによれば、火災からの放出の大部分は北方森林地域の南部に対応する北緯50度から60度の間で発生している。同じ期間に、北緯70度から80度の間で大気中のバイオマス燃焼放出はほとんど見られなかった。北緯80

度を超えると、衛星の観測範囲外のため、火災は測定不可能であった。

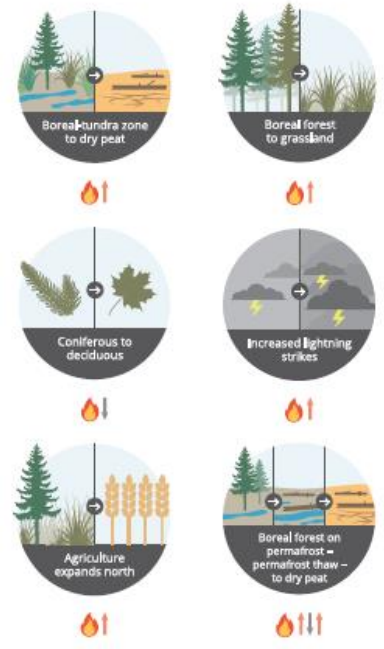
気候変化が、遠隔地の北方林において、早い季節の大規模で制御不能な火災をもたらしているという証拠が増えている。また気候変化は、北極ツンドラでの火災シーズンの早期開始をもたらし、また人口の多い地域で大規模な野火を発生させている。グリーンランド西部で、2017年と2019年の暖かく、乾燥し、晴れた天候の後の夏の終わりに発生した火災は、新しい現象である。地球規模では野火の増加は比較的小さいが、北極では将来の温暖化により、以前は野火が稀であった陸域でますます大きな火災が引き起こされる可能性がある。

将来の展望

さらなる気候変化は、将来の火災リスクに影響を及ぼす。場合によっては、火災が深刻になり、将来の火災の可能性を高めるような形の生態系の変化が引き起こされる可能性がある。落雷による着火の可能性と火災期間の長期化に加えて、永久凍土層の衰退により、乾燥した植生と炭素を多く含む泥炭燃料の量が増加する可能性がある。泥炭の火は長時間くすぶり、大量の煙を放出する可能性がある。これらの火はまた、消火するのが非常に難しく、冬の間は地表下で燃え続け、春には再び地上に現れる可能性がある。これらは、ゾンビまたは越年火災 (holdover fire) と呼ばれることがある。泥炭火災からの排出物の総量を推定および予測することは困難である。たとえば、不連続永久凍土帯での融解は、火を持続させるために利用できる泥炭燃料の量を増やす可能性や、土壌を再び湿潤化させて、火の着火と延焼を制限する可能性もある。北方地域と北極の泥炭は、大規模な天然の炭素吸収源であるため、泥炭地で発生する火災は、典型的な荒野の火災と比べ単位面積あたりはるかに多くの二酸化炭素を放出する可能性がある (SLCFの放出に加えて)。

Change in human activity is another factor, including increased tourism activity, increased logging, and the potential for agriculture further north. A northward movement of agriculture and its associated burning practices can also lead to increased emissions in or near the Arctic. Human activity remains the leading ignition source, even for the Arctic.

Climate change will affect forests and forestry with direct impacts on forest growth and changes in insect and weather-related damage. The overall assessment in the 2021 AMAP SLCF assessment is that future climate conditions are favorable for forest fires in the boreal zone, even for highly managed forests. High intensity fires that are difficult to control will become more likely, including intense megafires. Future fires in the Arctic Council region will continue to be Arctic and near-Arctic sources of black carbon, methane, and carbon dioxide and are projected to increase.



Changes in fire risk due to expected changes in ecosystems and weather patterns by mid- and late 21st century due to climate change; 'up arrows' indicate increase in fire risk and 'down arrows' indicate a decrease in fire risk. In transitions for boreal forest on permafrost, fire risks can first increase, then decline, and then increase again as the ecosystem changes, with soil moisture being a main driver of ground-level peat fires in the Arctic as well as boreal systems. Most studies of changes in fire risk are based on high emission scenarios.



観光活動の増加、伐採の増加、より北方での農業の可能性などの人間活動の変化は、もうひとつの要因となる。農業の北方への移動とそれに関連する燃焼の行為も、北極またはその近隣での排出量の増加につながる可能性がある。北極でさえ、依然として人間活動が主要な発火原因である。

気候変化は、森林の成長、昆虫の変化や天候関連の被害の変化などの直接的な作用を通じて、森林や林業に影響を及ぼす。AMAP 2021 SLCF評価では、高度に管理された森林であっても、将来の気候条件では北方林の森林火災が全体として起きやすくなると評価されている。極端なメガファイアを含む、制御が難しい激しい火災が発生する可能性が高くなる。北極評議会メンバー国の地域での将来の火災は、北極及び北極近辺のブラックカーボン、メタン、二酸化炭素の発生源であり続け、増加すると予測されている。



気候変化によって21世紀半ばから後半に起こると予想されている生態系と気象パターンの様々な変化とそれぞれについての火災リスクの変化。「上向き矢印」は火災リスクの増加を示し、「下向き矢印」は火災リスクの減少を示す。永久凍土上に生育する北方林の推移について（右下に対応）は、火災リスクは最初に増加し、次に減少し、生態系の変化に応じて再び増加する可能性がある。その際、土壌水分が北方森林帯とともに北極の地表付近の泥炭火災の主な制御要因である。火災リスクの変化に関するほとんどの研究は、高排出シナリオに基づいている。

RECOMMENDATIONS

On the basis of its 2021 assessment of short-lived climate forcers (SLCFs) and their impacts on air quality, human health and climate in the Arctic, the AMAP Working Group recommends that:

1 CURRENT LEGISLATION SHOULD BE EFFECTIVELY IMPLEMENTED AND THAT THE TIMELY AND EFFECTIVE IMPLEMENTATION OF BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES BEYOND CURRENT LEGISLATION TO REDUCE SLCF EMISSIONS FURTHER SHOULD BE STRONGLY SUPPORTED

- Effective implementation of current national legislation and international agreements to reduce air pollution will have substantial health benefits in Arctic Council Member and Observer countries. Additional health benefits, along with climate benefits, can be achieved by increasing the use of best available technologies for reducing emissions, especially in Arctic Council Observer countries.
- Full implementation of best available technologies for reducing emission of black carbon and methane will be required to compensate for the additional Arctic warming caused by reducing sulfur dioxide emissions in a scenario of maximum feasible reductions. Reducing sulfur emissions is well motivated by air quality and health concerns. Reducing black carbon and methane is especially important for reducing warming in the short term. To limit Arctic long-term warming, sharp and immediate reductions of carbon dioxide emissions by all countries remain critical.
- Projections of future methane emissions indicate that current legislation is insufficient to realize the commitment in the Arctic Council's Framework for Action for Enhanced Black Carbon and Methane Emission Reductions "...to significantly reduce our overall methane emissions." There is thus a need to strengthen ambitions for methane emission reductions, especially by preventing leaks of methane in oil and gas production (in the Arctic and elsewhere).
- To further reduce emissions of black carbon from Arctic Council Members, it will be especially important to target emissions from diesel engines, gas flaring, and residential combustion (including wood-burning stoves).

2 ARCTIC COUNCIL MEMBER AND OBSERVER COUNTRIES SHOULD SUSTAIN AND ENHANCE EMISSIONS REPORTING AND MONITORING TO EVALUATE PROGRESS IN REDUCING SLCF EMISSIONS

- Country reports of SLCF emissions to relevant international bodies support development of reliable emission and mitigation scenarios, emphasizing the importance of ensuring that timely, transparent and comprehensive information about SLCF emissions is shared in relevant international fora, even when reporting is not obligatory.
- There is an urgent need to continue and improve black carbon emissions reporting and projections through advancement of the science to support development of common methodologies, thus contributing to improved national inventories reporting as guided by the Air Convention and the Intergovernmental Panel on Climate Change.



ADDRESSING
NEW
FINDING



REINFORCING
MESSAGE



ADDRESSING
KNOWLEDGE
GAPS

推奨事項

2021年の短寿命気候強制力因子（SLCF）と、北極の大気質、人間の健康、気候への影響に関する評価に基づいて、AMAPワーキンググループは次のことを推奨する。

1 現行法規は効果的に実施されるべきであり、SLCF排出量をさらに削減するために、現行法規を超えて、利用可能な最良の技術をタイムリーで効果的に実施することが強く支持されるべきである。

- 大気汚染を削減するための現行の国内法および国際協定の効果的な実施は、北極評議会のメンバーおよびオブザーバー諸国において健康上の実質的な利益をもたらす。特に北極評議会オブザーバー諸国では、排出量を削減するために利用可能な最良の技術の使用を増やすことが、気候にとって有益であり、健康に関する付随した利益も得られる。
- 二酸化硫黄の排出削減が原因となる北極温暖化の加速を低減するために、ブラックカーボンとメタンの排出削減については、実現可能な最大の削減シナリオに基づき、利用可能な最善の技術を完全に実施することが必要となる。硫黄排出量の削減は、大気質と健康への強い関心によって十分に動機付けられている。ブラックカーボンとメタンを減らすことは、短期的に温暖化を低減するために特に重要である。北極の長期的な温

暖化を抑制するためには、すべての国による二酸化炭素排出量の即時かつ急速な削減が依然として重要である。

- 将来のメタン排出量の予測は、北極評議会のFramework for Action for Enhanced Black Carbon and Methane Emission Reductionsの「メタン排出量全体を大幅に削減する」という取り組みを実現するには現行法規では不十分であることを示している。したがって、特に石油やガスの生産（北極やその他の場所）におけるメタン漏出の防止によってメタン排出削減をこれまで以上に強化する必要がある。
- 北極評議会メンバー国のブラックカーボン排出をさらに削減するには、ディーゼルエンジン、ガスフレア、および住宅での燃焼（薪ストーブを含む）などを対象にすることが特に重要になる。

2 北極評議会のメンバーとオブザーバーの国は、SLCF排出量削減の進捗状況を評価するために、排出量の報告と監視を引き続き行うとともに強化する

- 関連国際機関への各国のSLCF排出量の報告が、信頼できる排出量と緩和シナリオの作成を支えるものであり、報告が義務付けられていない場合でも、SLCF排出量に関するタイムリーで透明性のある包括的な情報が関連する国際フォーラムで共有される保証が重要であると強調する。
- 共通の方法論の開発を支える科学の進歩を通じて、ブラックカーボン排出量の報告と予測を継続し改善することが直ちに必要であり、それによって、「大気条約 (air convention)」および「気候変動に関する政府間パネル」で指針が示されている各国のインベントリ報告が改善できる。



新たな研究に
関する取り組み



強化に関する
メッセージ



知識のギャップに
関する取り組み

3 LOCAL ARCTIC EMISSION SOURCES OF BLACK CARBON SHOULD BE BETTER IDENTIFIED AND QUANTIFIED IN ORDER TO SUPPORT IMPLEMENTATION OF EFFECTIVE MEASURES TO REDUCE LOCAL AIR POLLUTION IN ARCTIC COMMUNITIES

- The use of best available technologies and operational practices could reduce local emissions of SLCFs from residential heating, burning of waste, and the use of diesel generators, and thereby reduce health impacts from poor air quality.

4 EFFECTIVE STRATEGIES TO LIMIT AGRICULTURAL BURNING AND WILDFIRES SHOULD BE IMPLEMENTED IN ORDER TO REDUCE FIRE EMISSIONS AND RELATED AIR POLLUTION AND CLIMATE WARMING

- Wildland fires and intentional burning within and in vicinity of the Arctic are a growing source of black carbon in the Arctic, with negative impacts on both health and climate. Climate change will likely increase the risk for larger and more frequent wildland fires.
- Human activity and communities in the Arctic will need to adapt to increasing fire risk. Understanding if or how much fire management techniques can reduce black carbon emissions needs to be better understood to support development of fire management strategies with broad buy-in from Arctic Indigenous and local communities.

5 THE KNOWLEDGE BASE FOR ASSESSING HEALTH AND CLIMATE IMPACTS OF EMISSIONS AND MITIGATION EFFORTS SHOULD BE SUSTAINED AND IMPROVED, IN PARTICULAR WITH RESPECT TO:

- Monitoring: It is imperative that observational systems are maintained and expanded in order to provide data for evaluation of emission policy effectiveness modelling of climate and health impacts of SLCF emissions and for environmental and public health surveillance, where the latter is especially important in populated regions of the Arctic. Furthermore, satellite monitoring and mapping of fires is an essential complement to official reporting of SLCF emissions from fires.
- Research: Further research is needed on the impacts of climate change on emissions of SLCFs from natural sources, such as methane from wetlands and thawing permafrost and sulfate aerosols from sea spray.
- Health impacts: While the scientific understanding of the health impacts of air pollution is robust, more studies are needed to quantify local emissions and their associated health risks in Arctic communities and to distinguish between the impacts of emissions from local and regional pollution sources that affect local air quality. More research is also needed to better understand exposure levels and associated health effects from residential solid fuel combustion, such as for home heating.
- Modelling: For robust estimates of impacts on both climate and air quality, the global climate models and atmospheric dispersion models need to be better integrated.
- Cost-benefit analyses: Building on the work undertaken by the OECD, there is need for further analyses of the economic costs and benefits of specific measures for reducing emissions of SLCFs.

3 北極社会における局地的な大気汚染を減らすための効果的な対策の実施のために、北極でのブラックカーボンの局地的な排出源をよりの確に特定し、定量的に把握する必要がある。

- 利用可能な最良の技術と運用方法を用いて、住宅の暖房、廃棄物の燃焼、ディーゼル発電機の使用によるSLCFの局地的排出を削減し、それによって大気質の悪化による健康への影響を減らす。

4 火災からの放出とそれによる大気汚染および気候温暖化を低減するために、農業での燃焼と野火を制限するための4つの効果的な戦略を実施に移す必要がある。

- 北極内およびその周辺での森林火災と意図的な燃焼は、北極で増加しているブラックカーボンの発生源であり、健康と気候の両方に悪影響を及ぼす。気候変化は、より大規模で、より頻繁な森林火災のリスクを高める可能性がある。
- 北極の人間活動と地域社会は、増加する火災リスクに対応する必要がある。北極の先住民や地域社会からの幅広い賛同を得た火災管理戦略を開発するには、火災管理技術がブラックカーボン排出量を削減できるかどうか、またはどれだけ削減できるかを理解する必要がある。

5 健康と気候に対して及ぼすSLCFの排出と緩和の施策の影響を評価するための知的基盤が維持され、改善されるべきである。重要な点を以下に述べる。

- 監視：SLCF排出の気候と健康への影響に関する排出施策の有効性に関するモデル計算を評価し、北極の人口密集地域で特に重要となる環境と公衆衛生の監視データを提供するために、観測システムを維持および拡張することが不可欠である。さらに、火災の衛星監視と分布の把握は、火災による SLCF 排出量の公的な報告を補完するために不可欠である。
- 研究：湿地や融解している永久凍土からのメタンや、波飛沫からの硫酸エアロゾルなど、自然発生源からの SLCF 放出の気候変化に対する影響のさらなる研究が必要である。
- 健康への影響：大気汚染の健康への影響に関する科学的理解はしっかりしているが、北極の地域社会における局所的排出とその健康リスクについて定量化することと、局地的な大気質に影響する局地的な排出源と広域的な排出源とを区別するために、より多くの研究が必要である。家庭用暖房に用いられる住宅用固形燃料の燃焼による曝露レベルとそれに関連する健康への影響をよりよく理解するには、さらなる研究が必要である。
- モデル計算：気候と大気質の両方への影響を確実に推定するには、全球気候モデルと大気拡散モデルをより適切に統合する必要がある。
- 費用便益分析：OECDが実施した作業に基づいて、SLCFの排出量を削減するための特定の措置について経済的費用と便益をさらに分析する必要がある。

AMAP, established in 1991 under the eight-country Arctic Environmental Protection Strategy, monitors and assesses the status of the Arctic region with respect to pollution and climate change. AMAP produces science-based policy-relevant assessments and public outreach products to inform policy and decision-making processes. Since 1996, AMAP has served as one of the Arctic Council's six working groups.

This document was prepared by the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) and does not necessarily represent the views of the Arctic Council, its members or its observers.

The AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health is one of several reports and assessments published by AMAP in 2021. Readers are encouraged to review this, and the reports below, for more in-depth information on climate and pollution issues:

- AMAP Assessment 2020: POPs and Chemicals of Emerging Arctic Concern: Influence of Climate Change
- AMAP Assessment 2021: Mercury in the Arctic
- AMAP Assessment 2021: Human Health in the Arctic
- AMAP Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts

AMAP Secretariat

The Fram Centre,
Box 6606 Langnes,
9296 Tromsø, Norway

Tel. +47 21 08 04 80
Fax +47 21 08 04 85

amap@amap.no
www.amap.no

AMAP
Arctic Monitoring and
Assessment Programme

Over Arktis Engangstidspunkt / Along Stock Photo

AMAPは、1991年に8カ国の北極環境保護戦略に基づいて設立され、汚染と気候変化に関する北極地域の状況について監視し評価を行っている。AMAPは、政策と意思決定プロセスに情報を提供するために、科学に基づいた政策関連の評価文書と一般向けのアウトリーチ成果物を作成している。1996年以来、AMAPは北極評議会の6つのワーキンググループのひとつとして活動している。

この文書は、北極監視評価プログラム（AMAP）によって作成されたものであり、必ずしも北極評議会のメンバーやオブザーバー諸国の見解を表すものではない。

AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health (AMAP評価2021: 短寿命気候強制力因子が北極の気候、大気質、および人間の健康に及ぼす影響) は、2021年にAMAPによって発行された数種の報告書および評価書のひとつである。気候と汚染の問題に関する詳細情報については、これと以下の報告書を確認することを勧める。

- AMAP Assessment 2020: POPs and Chemicals of Emerging Arctic Concern: Influence of Climate Change
(AMAP評価2020: POPsと北極で新たに懸念されている化学物質: 気候変化の影響)
- AMAP Assessment 2021: Mercury in the Arctic
(AMAP評価2021: 北極の水銀)
- AMAP Assessment 2021: Human Health in the Arctic
(AMAP評価2021: 北極の人々の健康)
- AMAP Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts
(AMAP北極気候変化のアップデート2021: 主な変化傾向と影響)

AMAP事務局

フラムセンター、
ボックス6606ラングネス、
9296トロムソ、ノルウェー
電話 +47 21 08 04 80
ファックス+4721 08 04 85
amap@amap.no
www.amap.no

日本語訳: ArCS II事務局

国立極地研究所 国際北極環境研究センター内
arcs2_nipr@nipr.ac.jp

2021年9月作成