

GEO-5 地球環境概観 第5次報告書 上

—— 私達が望む未来の環境 ——

前付け

第1章 駆動要因

第2章 大気

第3章 陸

第4章 水

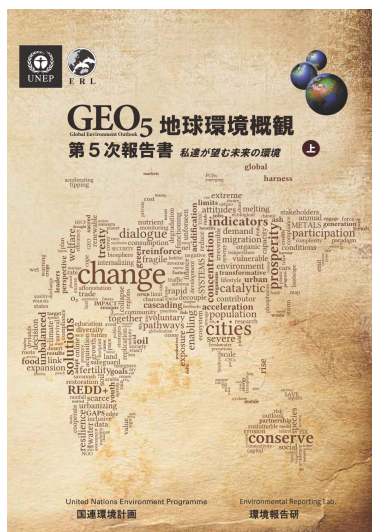
第5章 生物多様性

第6章 化学物質と廃棄物

第7章 地球システムの全体像

第8章 必要なデータの見直し

後付け



ここをクリックすると本の全体
を読むためのページが開きます。

2015年 10月 1日 発行

編 UNEP（国連環境計画）

発行所 一般社団法人 環境報告研
<https://www.hokokuken.com>

印刷者 大日本印刷株式会社

ISBN 978-4-9907-839-0-7

大氣



© Volker Mithner

統括執筆責任者: Johan C.I. Kuylenstierna and May Antoniette Ajero

執筆責任者: Drew Shindell, Eric Zusman, Frank Murray, Geir Braathen, Kevin Hicks, Linn Persson, Lisa Emberson, Martha Barata, Sara Feresu, Sara Terry, T.S. Panwar, Yousef Meslmani and Nguyen Thi Kim Oanh

執筆協力者: Luis Abdón Cifuentes, Msafiri Jackson, Nicholas Muller, Paulo Artaxo, Seydi Ababacar Ndiaye, Susan Casper Anenberg and Emily Nyaboke (GEO Fellow)

主科学査読者: Evgeny Gordov

章編集者: Volodymyr Demkine

主要メッセージ

地球の大気は、特に気候変動に関して危機的な段階にある。人の健康と生態系を守ることができるであろう原因と解決策について、相当な科学的根拠を基に有効な行動がとられた結果、いくつかの国際的に合意された目標が達成された。比較的単純でコスト効率の良い解決策が実施されて、ガソリンに含まれていた鉛、そしてオゾン破壊物質の段階的廃止が実現した。そのことは、主要な利害関係者のほとんどが同意すれば、著しい進展が起り得ることを示すものである。

粒子状物質（PM）と対流圏オゾンに対する環境目標の達成については、それらの影響に対する懸念が高まっているにもかかわらず、解決策が複雑で多額のコストがかかる可能性があり、進展が見られたものとそうでないものが混成している。先進国の多くは、屋内外のPM濃度、硫黄や窒素化合物の濃度を、世界保健機構のガイドラインに近い水準か、ガイドライン以内にまで削減することに成功した。しかし為されるべき多くのことがまだ残っている。アフリカ、アジア、中南米において、高い懸念があり、それらの多くの都市のPM水準が、ガイドラインをはるかに超過した状態のままである。既存の解決策は比較的成本が高く、ガイドラインやターゲット濃度が達成されるまでに要する期間は、その問題に向けられる優先度に左右されることになるだろう。また対流圏オゾン問題は、厳しい状況のまま、ヨーロッパと北アメリカでのピーク濃度については、ある程度の進展はあったけれども、対策が難しいことが判明しつつある。

気候変動は、最も重大な大気の問題である。この複雑な問題について深刻な懸念が示されているが、その進展については、モチベーションの高さが異なるためと、解決策であるいくつかの低炭素技術が高価であると考えられているために、遅れている。多くの国々で低炭素経済を開発しようとする試みが為されているが、温室効果ガスの大気濃度は、国際的に合意された産業革命以前の平均気温から2℃という上昇限界を超えて、地球の温度を押し上げそうな水準へと増大し続けている。現在の低

炭素技術や既存の政策オプションを適用することで、気候変動によってもたらされる危険性は減るだろうけれども、現在誓約されている排出削減量と、気候ターゲットを達成するために必要な削減量との間には、二酸化炭素（CO₂）換算で数十億トンもの隔りがある。

黒色炭素、メタン、対流圏オゾンといった短寿命気候強制力因子（SLCF）に対処する補完的戦略が、もし広く実施されれば、短期間で、温度上昇の速度を著しく下げることができる上に、人の健康と食糧安全保障に対して実質的なコベネフィットがもたらされるだろう。政策手段と技術的な解決策が既に存在していると仮定すれば、SLCF削減は、迅速な進展を見せるだろう。しかしこれは、2℃限界を越えることから地球を守るために必要な、人為起源CO₂排出量の削減に向けた補完的戦略と見なされなければならない。

気候変動、大気質、成層圏オゾン層破壊は、ますます密接に関連する問題であると見なされているのに、各国政府はそれらに対して一体的な対処をしていない。大気保護に向けた統合的アプローチが為されることで、経済発展が支えられ、また政策決定者が、鍵となる部門に対処することで、複数の目標を達成できるだろう。汚染の発生源に対処することによって、そこから放出される様々なガスや粒子状物質に影響を及ぼし、複数の気候や大気質に恩恵をもたらすことが可能である。課題は、その利益を最大限にし、かつ広範囲での実現へと結び付けるような解決策を見つけることである。

大気の目標を達成することへの投資は、高い費用対効果を期待できる。これらの政策がもたらす恩恵には、人為起源の放射強制力を減少させ、何百万もの命を救い、著しく生活の質を向上させることなどがある。このような恩恵と、気候や大気質の目標を達成するには、現在利用可能な技術、実績のある政策を広範囲にわたって実施することが必要である。しかし同時に、排出の主要な駆動要因に影響を与える大変革も必要であると思われる。

序文

人類の活動の結果として大気に放出される物質は、環境と発展の両方に立ちはだかる難題である。そのために、毎年、何百万もの人々が、屋内と屋外の空気汚染のために天寿をまっとうせずに死んでいる。またオゾン破壊物質(ODS)が、オゾン層を薄くし、極地域上空の成層圏オゾン層に季節的な穴を作り出している。また気候変動が進行中で、気候に影響を与える温室効果ガスやその他の物質の大気中濃度が増加し続けている。中でも気候変動は、食糧安全保障と生物多様性を脅かし、地球のあらゆるところに、嵐による被害を増大させるだろう。開発途上の地域の多くの人々が特に脆弱である。

これらの大気の問題への対処は、アジェンダ 21(UNCED 1992)、ヨハネスブルグ実施計画(WSSD 2002)などのいくつかの世界的合意と地域協定によって進められている。国際的な目標が合意され、いくつかのケースで、ターゲットが設定された。さらに人の健康と生態系に関するいくつかの国際的に合意されたガイドラインがあり、大気の問題を取り扱う際の進展をモニターするために使用されている。

本章では、鍵となる指標を用いて、大気問題の地球および大陸域レベルで設定された目標の進展状況を評価する。その進展が、既存の政策や手段を用いてこれらの目標を達成し得る軌道にあるか否か、人類の幸福と発展にとって重要な鍵となる問題に取り組む上でこれらの目標が十分か否かが検討される。そして様々な問題に対する展望と何がもっと行われる必要があるかが検討される。既存の政策が不十分な場合には、第 16 章

で展開する概念である、より大きな変革の必要性が示される。

大気汚染対策を進展させるための科学的基盤が非常に向上し、大気問題の社会的側面についての理解が進みつつある(Stern 2007)。昨今、科学は、短期気候変動や短寿命気候強制力因子(SLCFs) (Shindell *et al.* 2012; UNEP and WMO 2011)のような新しい課題に注目し、また閾値とティッピングポイントについての知見が向上した(Lenton *et al.* 2008)。

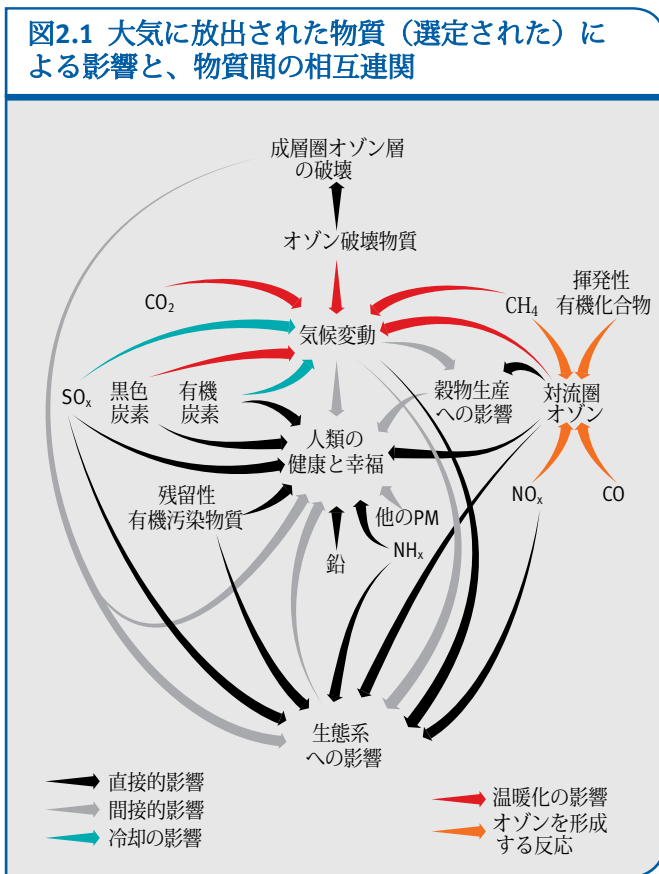
気候変動、大気質、成層圏オゾン層破壊は密接に関連している、それらの個々の汚染物質は、すべてが人の幸福に影響を与えるポテンシャルを持つ、健康、作物収穫量、生態系、大気の冷却加熱、成層圏オゾン層破壊に複合的な影響を及ぼしていると言える(図 2.1)。また多くの排出源が、大気質に影響を与え、かつ気候変動をも引き起こす多様な汚染物質を放出している。しかしこうしてこれらが相互に関連しているにもかかわらず、ほとんどの政府がこれらの問題を別々に取り扱っている。その理由の一つは、目標が上記のように 20 年前に設定されたためである。かといって、どの対策が実施されるかで、コベネフィットになったり、その反対の結果になることも起こり得る。また、より統合的なアプローチが開発されなければ、様々な大気政策が互いにマイナスに働くことも起こり得る危険性がある。

国際的な目標とターゲット

環境と人の幸福を、大気に放出された物質の影響から守るための主要な目標は、アジェンダ 21(UNCED 1992)とヨハネスブルグ実施計画(WSSD 2002)で設定された。これらは、「気候システムおよび環境に対して危険な人為的介入」を引き起こしている汚染物質と温室効果ガスのそれぞれの閾値のレベルを特定する必要性を強く打ち出した(アジェンダ 21 の第 9 章)。またこれらは 1985 年のオゾン層保護のためのウィーン条約(UNEP 1985)と、1987 年の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(UNEP 1987)で定義されたように、クロロフルオロカーボン(CFC)とその他のオゾン破壊物質を段階的に無くすという目的の達成が不可欠であると判断した。またこれらは、1979 年の長距離越境大気汚染条約(CLRAP)とその条約の地域大気汚染を削減するための議定書の重要性を認め、これらのプログラムが継続され増強されるよう、またその経験が他の地域で共有されるよう勧告した。

ヨハネスブルグ実施計画は、政策の策定に統合的なアプローチを採用するよう推進し、大気質を全体的な展開の中での重要な部分と見なしてきた。そして女性と子どもに特別な注意を払って、大気汚染に起因する呼吸器疾患とその他の健康影響を減らす必要性を強調した。またガソリンに含まれる鉛を段階的に無くすこと、子どもの鉛への暴露を防ぐ手段、鉛中毒のモニタリング、監視、取扱を強化する努力を支援した。もう一つ重視したことは、特に料理や暖房を従来型の燃料に依存するのを減らすために、農村集落に手頃なエネルギーを供給できるよう開発途上国を支援することであった。

図2.1 大気に放出された物質（選定された）による影響と、物質間の相互連関





南アフリカのダーバンでの2011年国連気候変動会議の代表者たち © UNFCCC/Jan Golinski

表 2.1 に示されるように、大気の問題は、ミレニアム開発目標(MDG)(UN 2000)と密接に関連している。1992 年の生物多様性保全条約(CBD)のような大気関連でない他の条約も、大気汚染の影響と結び付いている。生物多様性の愛知ターゲット(CBD 2010a)は、次の 2 つの大気関連のターゲットを含む。

- ターゲット 8： 2020 年までに、富栄養化などによる汚染が、生態系機能と生物多様性に有害とならない水準にまで抑えられる。
- ターゲット 10： 2015 年までに、気候変動または海洋酸性化により影響を受けるサンゴ礁その他の脆弱な生態系に及ぶ複合的な人為的圧力が最小化され、その生態系の健全性と機能が維持される。

大気の目標とターゲットは、法的拘束力のあるものと無いものの両方の環境協定(表 2.2)によってサポートされていて、

その環境協定のほとんどが、世界的に合意された量的ターゲットと実行スケジュールを含み、それらが各国の国内規制の制定と実施を促進する。目標やターゲットは、次のような制御に関する様々な側面について述べたものである。

- 駆動要因の制御、例えば、オゾン破壊物質の生産と消費の完全禁止(一部の例外を除く)、ならびに加鉛ガソリンの段階的廃止。
- 圧力の低減、例えば、二酸化炭素(CO₂)や他の温室効果ガスの排出量削減。
- 濃度に関するターゲット、例えば、粒子状物質(PM)やCO₂

屋外と屋内の空気汚染については、そういった地球規模のターゲットは無いが、世界保健機関(WHO)が、科学的調査に基づいて、大気汚染(WHO 2006)からのリスク低減の進展を評

表 2.1 ミレニアム開発目標の達成に影響する大気の問題

目標	ターゲット	影響
極度の貧困と飢餓の撲滅	1990年から2015年までに、飢えに苦しむ人々の割合を半減させる。	気候の変異と変動(傾向と極致)が作物生産に影響する。対流圏のオゾンは直に作物収穫量に影響する。
普遍的初等教育の達成	2015年までに、すべての子どもたちが、男女の区別なく、初等教育の全課程を修了できるようにする。	鉛への暴露は、幼児の認知発達と機能に影響する。
幼児死亡率の削減	1990年から2015年までに、5歳未満の幼児死亡率を3分の2まで引き下げる。	子供は、大気汚染と鉛中毒による健康への影響に最も敏感である。過度に生物燃料を用いて調理することによって発生する屋内の空気汚染が、女性と小さな子供に影響を与える。
環境の持続可能性の確保	2010年までに、損失率の大幅な引き下げを達成して、生物多様性の損失を抑える。	気候変動は生物多様性にとって最も大きな脅威のうちの一つである。窒素沈着からもたらされる富栄養化は、陸性植物の多様性に影響する。対流圏オゾンは、敏感な生態系での植生構成に影響する。海洋の酸性化と温暖化が、海洋生物多様性に影響する。

出典: (goals and targets) UN 2000

備するために、大気質ガイドラインを設定した。今世紀末の世界の温度上昇の限界（2℃限界が合意）についての設定は、潜在的な影響に関する科学的な議論だけでなく、政治情勢や達成される見込みに基づいてなされた(Hare et al. 2011)。各国は、それぞれの国際的な義務、開発途上国が先進国かといった立ち位置、組織能力、に応じて、国家としての大気質基準と、温室効果ガスについての公約やターゲットを設定した。コペンハーゲン協定(UNFCCC 2009)は、先進国に対して2020年の経済全体の排出量削減ターゲットを提出するよう要請し、開発途上

国に対しては国としての適切な緩和行動(NAMA)を提出するよう要請した。カンクン合意(UNFCCC 2010)は、これらの誓約されたターゲットと緩和行動を、国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)に公式に固定させ、法的に確認した。越境大気汚染に関しては、いまだに CLRTAP だけが、様々な汚染物質のターゲットを設定している唯一の地域合意である。いくつかの大陸域とサブ大陸域（アフリカ、アジア、南アメリカ）には、排出量を削減する趣旨を示す協力協定があるが、これらは拘束力を持たず、一部では人手と財源不足により実施されていない。

表 2.2 大気の問題に関して国際的に合意された目標とテーマ（選定されたもの）

国際的に合意された目標の中の主なテーマ		数値目標（ターゲット）	範囲
成層圏オゾン層の破壊			
オゾン層の保護のためのウィーン条約(UNEP 1985)	オゾン層の保護		グローバル
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(UNEP 1987)	オゾン破壊物質の除去	定められた例外を除いて、オゾン破壊物質の生産と消費の全廃。	グローバル
気候変動			
国連気候変動枠組み条約(UNFCCC 1992)	気候システムに対して危険な人為的干渉を及ぼすこととしない水準に、大気中の温室効果ガス濃度を安定させる。		グローバル
UNFCCCに関連する京都議定書(UNFCCC 1998)	工業先進国からの温室効果ガス排出の削減。	1990年と比較して2012年までに添付1の（先進）国からの排出量を少なくとも5%削減。特定の国による削減の誓約。	議定書添付1の国々
カンクン合意(UNFCCC 2010)	世界の平均気温の上昇を産業化前の水準から2℃までに制限するために、世界の排出量を削減	添付1の参加国による2020年に向けた経済全体の排出量についての数量的な誓約と、添付1でない参加国（開発途上国）による適切な緩和行動についての誓約。	グローバル
EUの20-20-20ターゲット(EEA 2009)	2020年までにEUの国々からの温室効果ガス排出の削減。	1990年の水準から排出量を20%削減。エネルギー消費の20%を再生可能エネルギーで賄う。一次エネルギー使用量を予測値より20%削減する。	EU加盟国
鉛汚染			
アジェンダ21(UNCED 1992) ヨハネスブルグ実施計画(WSSD 2002)	鉛暴露を防ぐ。	輸送機関からの鉛の排出をゼロにする。	グローバル
健康と生態系のための大気質			
WHO ガイドライン(WHO 2006)	大気汚染による健康影響を削減	PM _{2.5} 、PM ₁₀ 、SO ₂ 、NO ₂ 、Pb、CO、O ₃ に対して設定されたガイドラインで、例えば PM _{2.5} は年平均 10 µg per m ³ 、PM ₁₀ は年平均 20 µg per m ³ 。CLRTAP で設定されたように、臨界値と臨界負荷量に基づいて設定された生態系のためのWHOのガイドライン。	世界的に推奨
大気汚染			
大気質、乗り物、固定発生源、国の排出量に対するEU指令(EC 2008)	2020年までに人の健康と環境の質を増進する。	PM _{2.5} 、PM ₁₀ 、SO ₂ 、NO ₂ 、Pb、CO、O ₃ に対して設定されたガイドラインで、例えば PM _{2.5} は年平均25µg per m ³ 、PM ₁₀ は年平均40µg per m ³ 。生態系のために設定された臨界負荷量と値。SO ₂ 、NO _x 、VOC、NH ₃ に対する各EU国のために設定された国の排出量の上限。	EU加盟国
国境を越える大気汚染			
長距離越境大気汚染条約(CLRTP)(UNECE 1979)	条約の議定書で設定された目的によって実施され、大気汚染から人と環境を保護する。	イェーテボリ議定書(UNECE 2005)は、すべての参加国に対して削減を設定するもので、1990年との比較で2010年に達成されるべき排出量削減目標を備えた、複数の汚染物質に関する、複数の効果を持つ議定書である（達成年度は2020年に変更された）。特定の国の排出量上限については議定書の添付2を参照のこと。	ヨーロッパの国連欧州経済委員会の国々、中央アジア、北アメリカ
アセアン煙霧協定(ASEAN 2002)	泥炭地火災および(または)森林火災の結果、国境を越える煙霧汚染を、モニターして防ぐ。	火災をゼロにする政策を採択することに合意した。	東南アジアのアセアン諸国

大気目標達成の進展度

この節では、アジェンダ 21(UNCED 1992)が、鍵となる優先事項を定めて以降の 20 年ほどの間の、大気に関する懸念への取り組みの進展について考察する。多くの大気問題に対する、世界や大陸域に設定された目標とターゲットを現状と比較し、それらが達成されているかどうかを調べ、目標とターゲットの、現状との隔たりの大きさを明らかにする。

進展については、大気問題を次の大きく 3 つに分けて検討し、鍵となる指標に対して記述される。

- ターゲットが達成されておらず、その現状が全く持続可能な状況でない例。
- いくつかの大陸域がターゲットを達成し、他の大陸域がターゲットからほど遠い状況である、混成した進展の例。
- ターゲットが設定され、大部分が達成されているよい進展の例。

気候変動：目標達成にほど遠い

CO₂やその他の温室効果ガスの人為起源による排出が、現代の気候変動の主要原因であることは、幅広く科学的に合意されている(IPCC 2007)。独立した 4 つの解析によっても、増大し続ける CO₂の大気濃度によって、2000 年～2009 年が、記録上、最も暖かい 10 年間であったことが示されている(図 2.2)。地域の気温変化を見ると、過去 1 世紀にわたって最も大きく温暖化されたのは、高緯度の地域であることが分かる(図 2.3)。

気候変動は、熱波や猛烈な嵐の発生頻度を高め、降雨量パターンを変化させ、海面を上昇させ、多くの点で人類の幸福を脅かす(IPCC 2007)。熱帯低気圧の発生頻度の変化は不明確であるが、それらの強度は、温度の上昇につれて増大するだろう(IPCC 2011)。

人類は、例えば淡水供給の変化、農業の生産性や健康への変化を通して直接的影響を受け、次に生物多様性や生態系サービスの喪失による社会経済的影響によって、間接的影響を受ける。したがって、気候変動は、人類が直面している大気変化に關



22,000軒を超える家が、オーストラリア史上最悪であった2011年の悲惨なブリスベン洪水で浸水した。© On-Air/iStock

Box 2.1 気候変動

関連する目標

気候システムに対して危険な人為的介入を及ぼすことにならないようにする(UNFCCC)。

指標

温度傾向、降雨量変化、海氷範囲、CO₂濃度、温室効果ガス排出。

世界の傾向

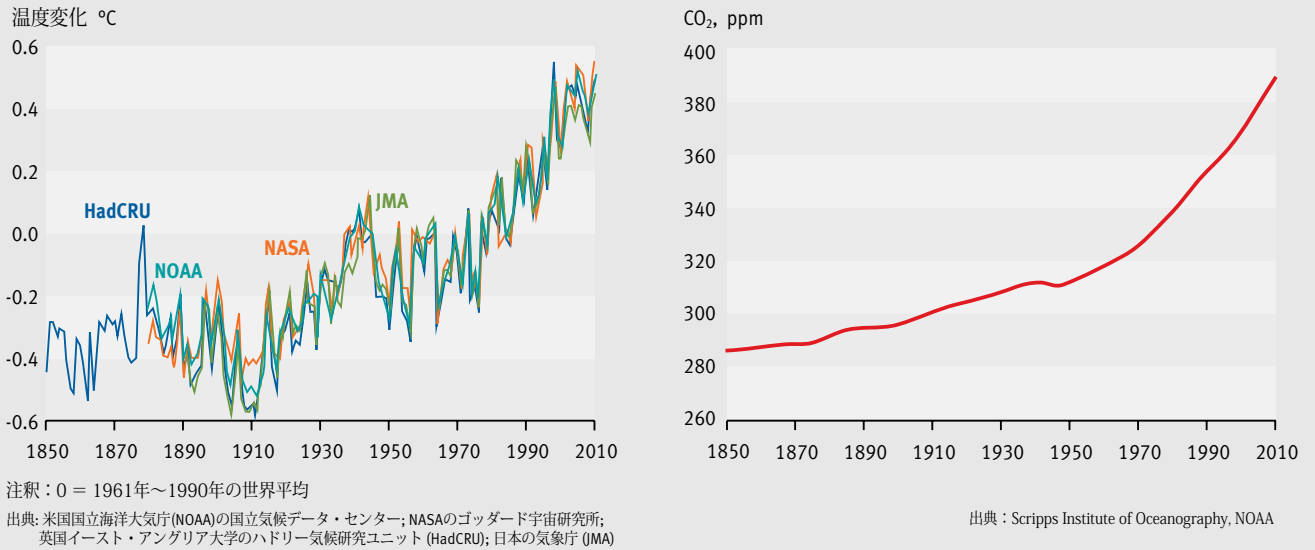
進展が遅い。UNFCCCが合意した2°Cの温度上昇限界を超えないようにするための軌道に乗っていない。

る最も重大な問題であると考えられる。経済面から捉えた文献を調査すると、温度が産業化前の水準より 2.5°C 上昇する場合、気候影響による損害が 2100 年までに、毎年、世界の国内総生産(GDP)の 1~2% になる可能性が示唆されている。これらの損害推定額は、4°C 上昇ならば、世界の GDP の 2~4% に増大する(Aldy et al. 2010)。極端な温暖化による損害額を推定したいくつかの研究によれば、世界の GDP 換算で 2100 年までの毎年の損失額が、6°C 温度上昇の場合の 10.2% から(Nordhaus and Boyer 2000)、7.4°C 温度上昇の場合の 11.3% まで(Stern 2007)、変動する可能性のあることが分かった。損害の評価は、割引率や破滅的な影響に関して、その基になる仮定に大きく左右されやすいが、気候変動による社会経済的影響が非常に大きくなるであろうことは明らかである。

影響は恐らく、温暖化が最も大きくなるだろう北極地方において特に深刻になるだろう。北極地方の大部分は、1890~1910 年と比べて、2°C を越える温度上昇を経験してきており(図 2.3)、北極を覆う海水が、秋と冬のいずれにおいても縮小する劇的な減少を呈している(図 2.4)。グリーンランドと南極の氷床のいずれも、融ける速度が急速に増大し、グリーンランドの融解面積が著しく拡大した(Rignot et al. 2011)。その他の地域で、かなり大きな気候変動の影響が予測されるのは、乾燥地の拡大が予想される亜熱帯地方や、海面上昇によって最も損害を受けるであろう低平地などである。このような変化への適応能力に限界がある低開発国は、対策目標を達成できない危機に置かれている。

地域的熱波や、降雨が極端に多いか少なくなるなどの異常気象が、気候の温暖化と共により一般的になり、その頻度や強度が変化すると予想される(IPCC 2007)。ヨーロッパは 2003 年と 2010 年に、非常に暑い夏を 2 度経験したが、研究によれば、巨大熱波を含む極端に暑い夏の来る可能性が、次の 40 年以内に 5~10 倍に増加するとの予測が示されている(Barriopedro et al. 2011)。豪雨の発生頻度が、世界の陸地部分(第 4 章)のほとんどで増加し、より激しいより長期にわたる干ばつが、1970 年代以降、特に熱帯地方と亜熱帯地方(IPCC 2007)で観察された。長期傾向では、サヘルやインド北部が、より乾燥した状況へと向かう傾向にあることが示されている(図 2.5)。

図 2.2 1850年から2010年までの温度変化と大気のCO₂濃度の傾向



人類の時間尺度で見ても不可逆的となる変化、いわゆるティッピングポイントと呼ばれるものが、不実行によってもたらされるだろうという懸念が高まっている。CO₂またはメタンとして、永久凍土層に格納されていた炭素の放出が増加し、それがさら

に温度を上昇させ、そのためにさらに温室効果ガスが放出されるというサイクルを引き起こしかねないといった変化が、その一例である (Schaefer *et al.* 2011; Lawrence and Slater 2005)。

図 2.3 20世紀を通しての温度変化

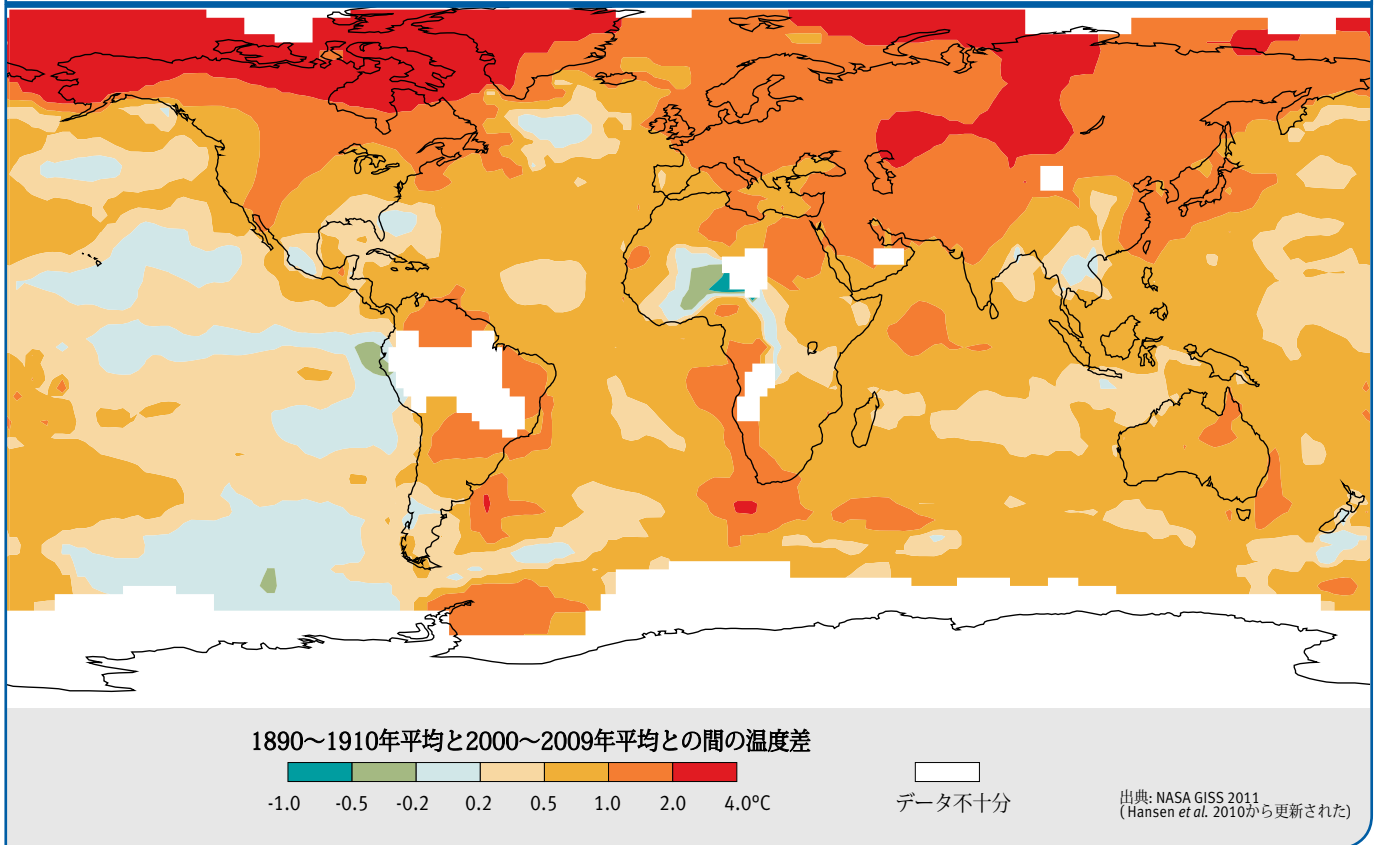
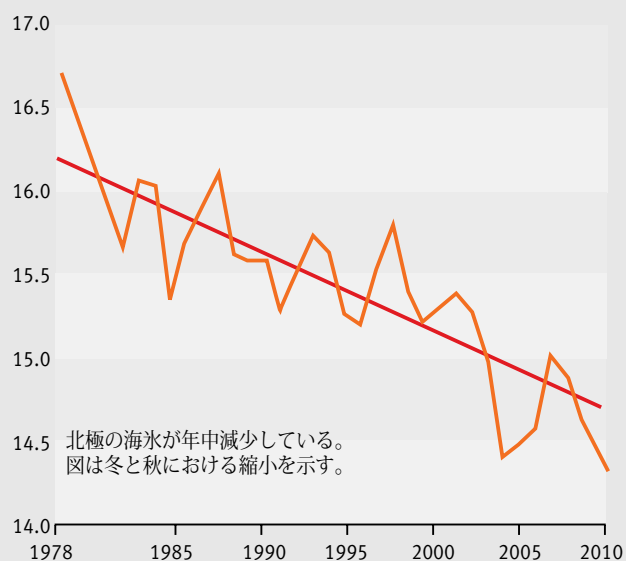
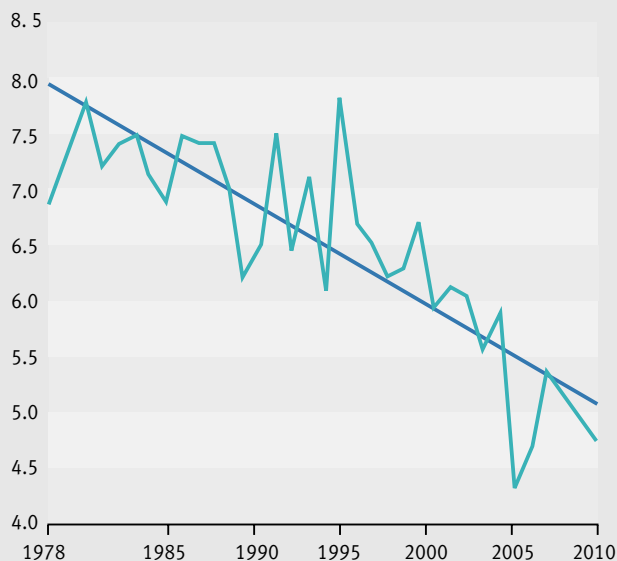


図 2.4 冬と秋の北極の海氷範囲の傾向、1979～2010年

2月の平均、100万km²



9月の平均、100万km²



出典：NSIDC 2011

ほとんどの人為起源の温室効果ガスの濃度と発生量が、近年、増加し続けている(表 2.3 と図 2.6)。増加速度では、いくつかのハイドロフルオロカーボン (HFC) の濃度が、特に高くなっている。一方、化石燃料消費からくる CO₂ 排出は、2009 年に景気後退によって世界の排出量が短期下降したにもかかわらず(図 2.6)、気候変動に関する政府間パネルによる排出シナ

リオ特別レポート(SRES)(IPCC 2000)で広く用いられる予測の中のより悲観的なシナリオをこの 10 年間たどっている。また CO₂ 濃度の急速な増大は、同じように急速に進行している海洋の酸性化(4 章)と関連している。

IPCC は、2°Cの温度上昇限界内でとどまるために必要とされる、CO₂ 換算で 450ppm 大気濃度を超過しないようにするために、先進国が 2020 年までに排出量を 1990 年の水準より 25～40%削減する必要があると結論し(IPCC 2007)、さらに、専門家によって検証された文献によると、開発途上国が 2020 年までに現状と比較して 15～30%まで排出量を削減する必要

図 2.5 アフリカと南アジアと西アジアの降雨の傾向、1960～1998年の5月から9月

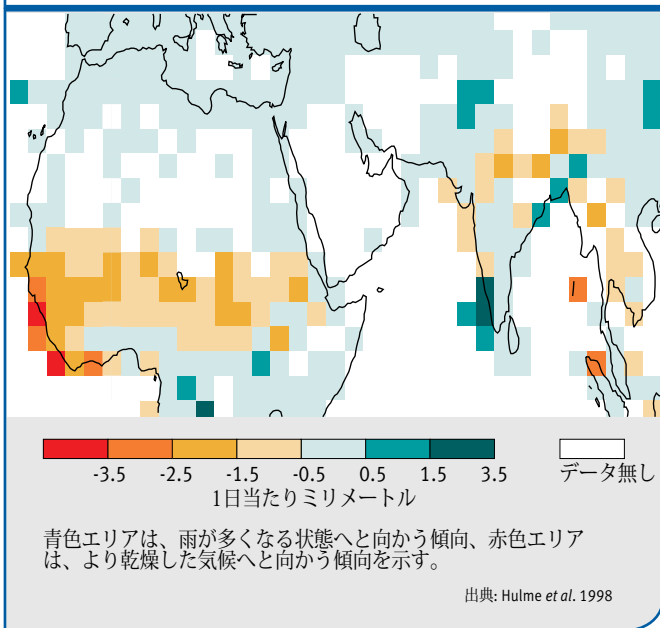
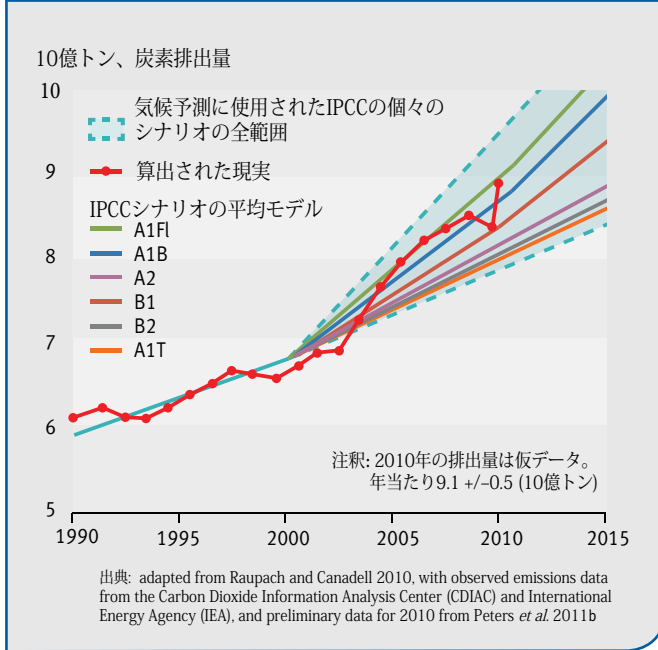


表 2.3 温室効果ガスの濃度、2005年、2009年および2010年

	2005	2009	2010
CO ₂ (ppm)	378.7	386.3	388.5
CH ₄ (ppb)	1 774.5	1 794.2	1 799.1
N ₂ O (ppb)	319.2	322.5	323.1
CFC-11 (ppt)	251.5	243.1	240.5
CFC-12 (ppt)	541.5	532.6	530.8
HCFC-22 (ppt)	168.3	198.4	206.2
HFC-134a (ppt)	34.4	52.4	57.8

出典：NOAA GMD 2011a

図 2.6 化石燃料排出量における傾向、算出された現実とIPCCシナリオ、1990～2015年



があると結論した(den Elzen and Hohne 2010, 2008)。またターゲットを達成するには、2020年より先に、さらなる削減が必要とされている。京都議定書が2005年に施行されて

以来、いくつかの国々は CO₂ 排出量を削減したが、多くの国が京都ターゲットを達成しそうにない。その上、削減を報告しているその同じ国々の多くが、炭素集約的な製品の輸入を増加させている。いわゆる炭素リーケージである。輸入製品内に埋め込まれた他国の CO₂ 排出を計算に入れると、多くの先進国における排出量は、事実上増大していて、国内排出量に上記埋め込まれたものを加えた純排出量は、京都ターゲットよりはるかに大きくなる(Peters *et al.* 2011a)。

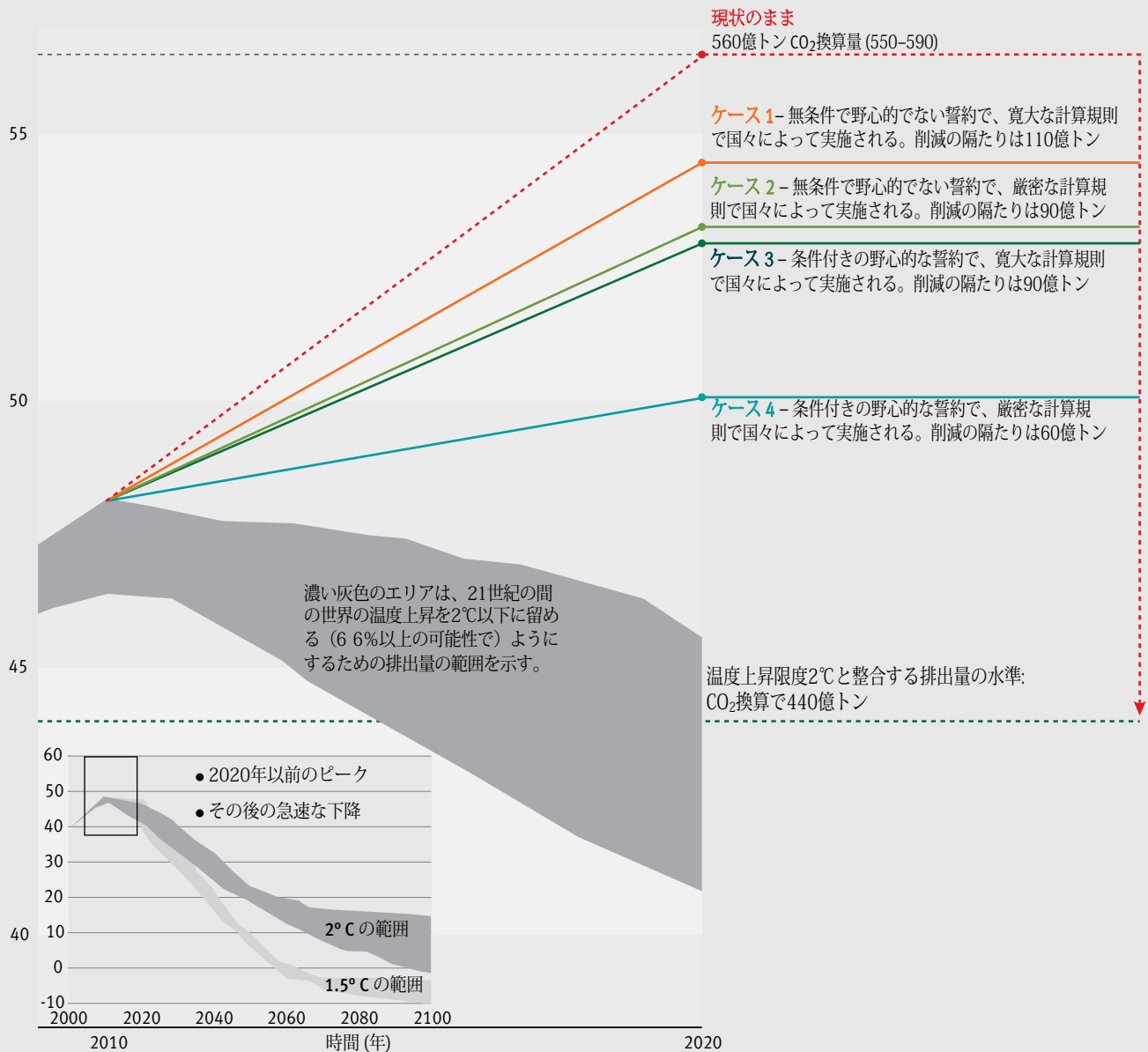
バリ行動計画(the Bali Action Plan)(UNFCCC 2008)以降これまでに、42の先進国が、2020年までの数量化された経済全体の排出量ターゲットを誓約(プレッジ)し、さらに44の開発途上国が、国の適切な緩和行動を誓約してきた。それにもかかわらず、これらの誓約の総計は、図2.7に示されるように、安全な限界内に気温を維持するであろう水準に達しておらず、CO₂換算で約60億トン不足している。この図は、86か国から出された緩和行動の誓約から4つの可能な解釈により導かれる2020年の予想排出量と、参加国が合意した2℃の温度上昇限界内に留まる可能性が66%以上になる排出量範囲とを比較したものである。予想排出量と、合意されたUNFCCC 2℃限界内に留まるための排出量の間には、CO₂換算で60億トンから110億トンの隔りがある。その隔りの大きさは、誓約が実行される範囲と、いかに誓約が適用されるかに左右される(UNEP 2011a)。



汚濁源に対処することは、気候と大気質の両方に恩恵をもたらすことができる。© Morten Madsen/iStock

図 2.7 排出量の隔たり

10億トン、CO₂換算の年間排出量



カンクンで国々が提示し正式に承認された誓約に従った場合に2020年に予想される排出量と、UNFCCCで合意された2°C限界内に温度上昇を制限するための排出量の範囲、との間の隔たりを比較したものの。

出典: UNEP 2011a

気候変動の速度は歴史的に過小評価されてきた傾向があるため、推定される範囲の上限では、非線形な変化や物的損失が起こることもあり得る (Smith et al. 2009; Stern 2007)。全体として、国際レベルと国家レベルの両方において明白な進展がない場合、長期的に見た気候変動に対する前途は暗い。

たとえ国際レベルでの交渉が予想より長くかかっても、国の行動は前進し続けるべきである。発展しつつある多数の低炭素

研究によれば、英国 (Strachan *et al.* 2008) や日本 (Fujino *et al.* 2008 年)、そしてタイ (Shrestha *et al.* 2008) などの国々では、2050年までに排出を半分にすることが経済的技術的に実現可能であるだろうことを示した。これらの研究成果は、例えば排出権取引の仕組みを通して、炭素に値段をつけることによって成り立っている。しかし、排出権取引の仕組み、あるいはクリーン開発メカニズム (CDM) のような市場ベースの手段が、すべての状況で機能するとは限らないし、すべての大陸



世界貿易の大発展によって、国際間の海運業から、CO₂の著しい排出、そしてSO₂、NO_x、黒色炭素を含む主要汚染物質の著しい排出がもたらされた。 © Mark Wragg/iStock

域に等しく恩恵をもたらすとも限らないことに注意することが重要である。例えば、CDM 市場では、中南米とアジア太平洋地域が全事業の 87%以上を占め、一方で、アフリカは 3% 未満である(UNFCCC 2012)。

他の研究では、特に排出枠のために開発を制約している開発途上国にとっては、気候変動を既存の開発計画の中心に位置付けることが、市場ベースの手段より、有望な選択肢となり得ることが示唆されている(Shukla *et al.* 2008)。このことは、次のような研究によってさらに裏付けられる。地方の大気質が改善されるといったコベネフィットが比較的大きな価値をもたらすために、低所得国では、開発の優先事項をかなえる形で、温室効果ガスを緩和することによって最大の利得を得ることが示されている(Nemet *et al.* 2010)。これらのコベネフィットを獲得するには、政策決定者が気候変動を開発計画の中心に位置付けることに精通するようになることと、気候変動とその他の大気問題との間の相乗作用をはっきりと認識する意思決定の枠組みが必要となる。そういった統合的アプローチは、相当量の気候緩和や大気質の制御を既に実施したことがある地方や都市レベルであれば、即座に導入可能である。

進展が混成している例

いくつかの地域で向上している一方で、他の多くの地域では大きな障害が残っていて、地球規模での目標達成にはほど遠い例がある。硫黄、窒素、小さな粒子状物質（通常、PM₁₀ および PM_{2.5} と呼ばれる）、および対流圏オゾンという、大気的主要な 4 つの問題を以下に述べる。

硫黄汚染

火力発電、工業、輸送、による化石燃料の使用から主として排出される二酸化硫黄 (SO₂) は、PM_{2.5} の一因となることによって、人の健康に有害な影響をもたらす。また二酸化硫黄は、酸性化によって陸域生態系や淡水生態系に有害な影響をもたらす(Rodhe *et al.* 1995)、腐食によって人工材料や文化遺産に(Kucera *et al.* 2007)、そして生物多様性(Bobbink *et al.* 1998)や林業(Menz and Seip 2004)にも有害な影響をもたらす。また硫酸塩エアロゾルは、大気を冷却するが、それゆえに、温暖化ガス削減戦略の全体的な恩恵を評価するには、それらを追跡することが重要になる。

越境大気汚染の問題がアジェンダ 21(UNCED 1992)で強調されて以来、ヨーロッパと北アメリカにおいて二酸化硫黄排

Box 2.2 硫黄汚染

関連する目標

長距離越境大気汚染条約 (CLRTAP)、EU指令、人類の健康と生態系のためのWHOのガイドライン。

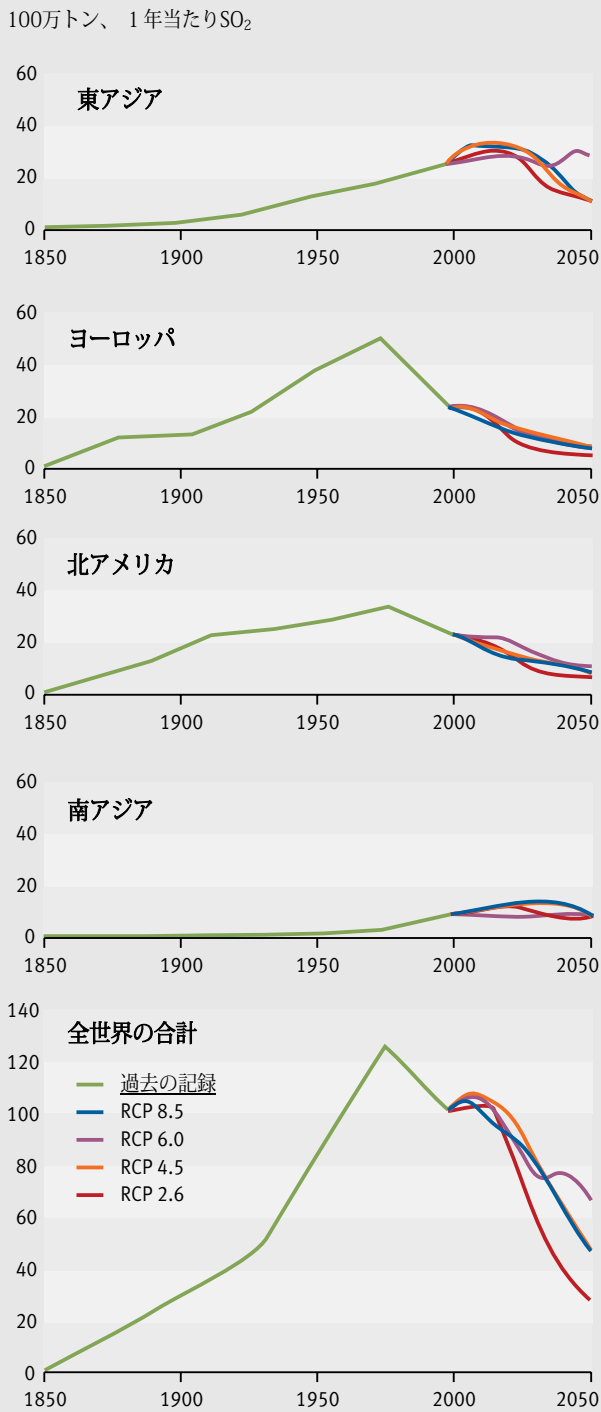
指標

硫黄の排出量。 臨界の負荷量またはレベル（それ以上になると弊害が観測される閾値）の超過。

世界的な傾向

地域の進展が混成している。

図 2.8 二酸化硫黄排出量の地域傾向、1850～2050年



1850～2000年までの排出量傾向と、IPCCC第5次評価に寄与するよう開発された4つの代表的濃度経路（RCP）シナリオの2000～2050年までが、大気汚染の半球輸送（HTAP）の多種モデル実験に基づいて、4つの発源地域と、世界全体に対して示される。

出典: HTAP 2010

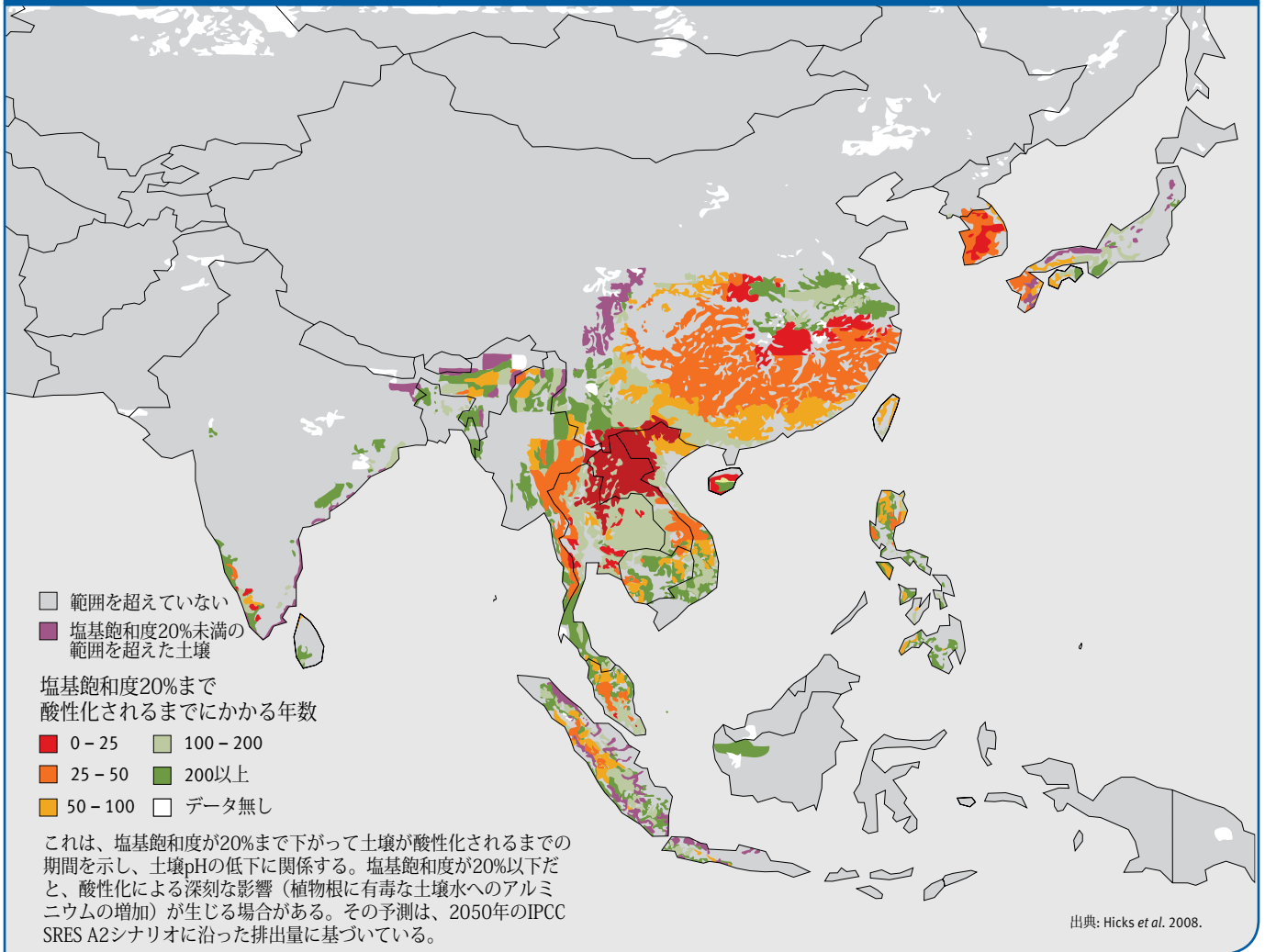
出量が、かなり削減され、CLRTAP 議定書、欧州連合（EU）の国家排出上限指令（NEC）、カナダとアメリカの大気清浄化法の、それぞれのターゲットが達成された(図 2.8)。ヨーロッパにおける各国のターゲットが進展した秘訣は、臨界負荷（それ以上に蓄積されると有害な影響が観察される閾値）を使用したことであった(Nilsson and Grennfelt 1988)。法令施行の好結果により、1980年から2000年の間に、世界の排出量の約20%が低下した。東アジアの排出量が優勢になり始めた2000年頃までは、ヨーロッパと北アメリカからの排出量が支配的であった。代表的濃度経路（RCP）のシナリオ(図 2.8)に従って、世界の二酸化硫黄排出量を予測すると、2005年以降着実に減少し、2050年までに、2000年より30%か、50%か、70%低くなる。この一組の新しい4つの経路は、短期と長期のモデリング実験のためのベースとして、気候モデリングを行う団体向けに開発された(van Vuuren *et al.* 2011; Moss *et al.* 2010)。

まだいくつかの地域で臨界負荷の超過が見られるが、硫黄の集積がヨーロッパと北アメリカで減少するにつれ、酸性化も縮小し、いくつかの淡水の生態系が回復した(Wright *et al.* 2005; Stoddard *et al.* 1999)。一方、アジアでは排出量が増加して、敏感に反応しやすい生態系を土壤酸性化の影響を受ける危険にさらしている(図 2.9)。しかし、ヨーロッパや北アメリカで経験された湖の大規模な酸性化は、観測されておらず、地域の土壌や地質により、アジアでは起こりそうもない(Hicks *et al.* 2008)。2005年に、中国の国土の28%、主として東部と中南部で、硫黄の集積によって土壌の臨界負荷が超過状態になっていることが推測された。超過している地域は、現在の排出量削減計画が実施され、2020年には20%まで減少すると予測されている(Zhao *et al.* 2009)。

硫黄排出におけるさらなる処置が、イェーテボリ議定書の改訂を通してヨーロッパで講じられている。またアジアでは、エネルギー使用の効率を改善し、二酸化硫黄排出量を削減するための措置が講じられている。例えば、中国は、その五か年計画の一部として、2005年から2010年の間に、二酸化硫黄排出量を10%削減する国家目標を達成する方策として、排煙脱硫と、発電部門の小さくて非能率的なユニットの段階的廃止を実施した(Zhang 2010)。

輸送や海運業などの主要部門からの硫黄排出量を削減する世界的な取り組みもなされている。直径2.5マイクロメートル以下の粒子状物質（PM_{2.5}）による人への健康影響については、ディーゼル燃料の硫黄分を低下させることにより取り組まれている。例えば、UNEPのクリーン燃料と自動車のパートナーシップ（PCFV）は、世界的に、乗り物の燃料中の硫黄を50ppm未満まで削減するよう働きかけている(UNEP 2012)。海運業からの硫黄排出量が、ヨーロッパで重要な政策問題になり、「船舶による汚染防止のための国際条約」(MARPOL)で、

図 2.9 アジアにおいて酸性化被害の危険性のあるエリアと酸性化に至るまでの期間



硫酸化合物、窒素化合物、粒子状物質の排出量を世界的に漸減させていくことが表明された(MARPOL 2011 Annex VI)。

窒素化合物

人類の活動は、エネルギー消費や食糧生産と結び付いており、過去一世紀の間に(ENA 2011)、環境の中を循環する反応性窒素の量を2倍以上にした(ENA 2011)。この反応性窒素は、主として輸送部門と工業部門から窒素化合物(NO_x)として、また主として農業部門からアンモニア(NH_3)と亜酸化窒素(N_2O)として大気に放出されている。それらは、大気、陸域生態系、淡水システム、海洋システム、そして人の健康に対して、窒素カスケードとして知られる現象であり、様々な影響を与えている(Galloway et al. 2003)。窒素化合物は、人の健康に影響を及ぼす大気 $\text{PM}_{2.5}$ の前駆物質であり、一方、窒素化合物は対流圏オゾンの前駆物質であり、その対流圏オゾンは健康、作物収穫量、生態系、気候に影響を及ぼす。また亜酸化窒素と対流圏オゾンは、有力な温室効果ガスでもある。窒素沈着は、陸域生態系と水界生態系における富栄養化と酸性化を通して、生物多

様性の喪失を引き起こす(Bobbink et al. 1998)。しかし、それは収穫量にとっては有益で、また森林の成長も活性化させて炭素固定も増加させることになる(ENA 2011)。

Box 2.3 大気の窒素汚染

関連する目標

CBD、CLRTAP、EU指令、人の健康と生態系のためのWHOのガイドライン

指標

窒素化合物とアンモニアの排出量。窒素沈着。臨界の負荷量またはレベル（それを超えると有害な影響が観測される閾値）の超過。

世界の傾向

進展が混成しており、いくつかの大陸域で窒素化合物が削減され、すべての大陸域でアンモニアの排出量が増加に向っている。



農業、輸送、工業からくる反応性窒素化合物の沈着は、亜酸化窒素 (N_2O) の排出量を増加させ、森林のような生態系から生物多様性を喪失させることがある。 © Orchidpoet/iStock

世界の窒素酸化物排出量の合計は、2000年頃まで増加したが、その後、アジアと他のすべての大陸域での排出量の増大を補うヨーロッパと北アメリカでの削減で、ほぼ一定のままであると予想された(図 2.10)。道路輸送による排出量が2005年に40%を占めていたヨーロッパで、規制措置が講じられ、1990年から2005年の間に、窒素酸化物の排出量合計を32%削減することに成功し(Vestreng *et al.* 2009)、さらにアメリカでの措置によって、1990年から2008年の間に排出量が36%削減された(IJC 2010)。アジアでは、排出量が過去20年間にわたり増加し続け、その間の成長速度も加速している(図 2.10)。国際間の船舶輸送による二酸化窒素(NO_2)の排出量は、2000年の1,600万トンから、2007年の2,000万トンまで上昇したと推測される(IMO 2009)。

世界のアンモニア排出量は、大部分が農業部門からで、前世紀の中頃以降、5倍に増加している。ヨーロッパは、例外として、わずかに減少しており、安定するかもしれないが、他のすべての大陸域で上昇し続けると予測される(図 2.10)(EEA 2009)。しかし、ヨーロッパには、このアンモニア問題についての関心の欠如と焦点にずれがあり、多くの場合、大改革に対して農業団体から抵抗がなされている。その他のほとんどの大陸域では、アンモニアは、主要な排出規制法の下での規制が行われていない。しかし、CLRTAPのイェーテボリ議定書は、より厳格なターゲットを持つよう改訂されつつあり、ヨーロッパでの排出量は一層削減されることになるだろう。

このように改善したけれども、農業、工業、市街地での交通、から発生する窒素に起因する大気汚染が、二次的な硝酸塩やアンモニウムの粒子状物質として、 $PM_{2.5}$ 濃度に著しく寄与し、それが中央ヨーロッパの多くに及んで、人々の平均寿命を数か月減少させている(ENA 2011)。

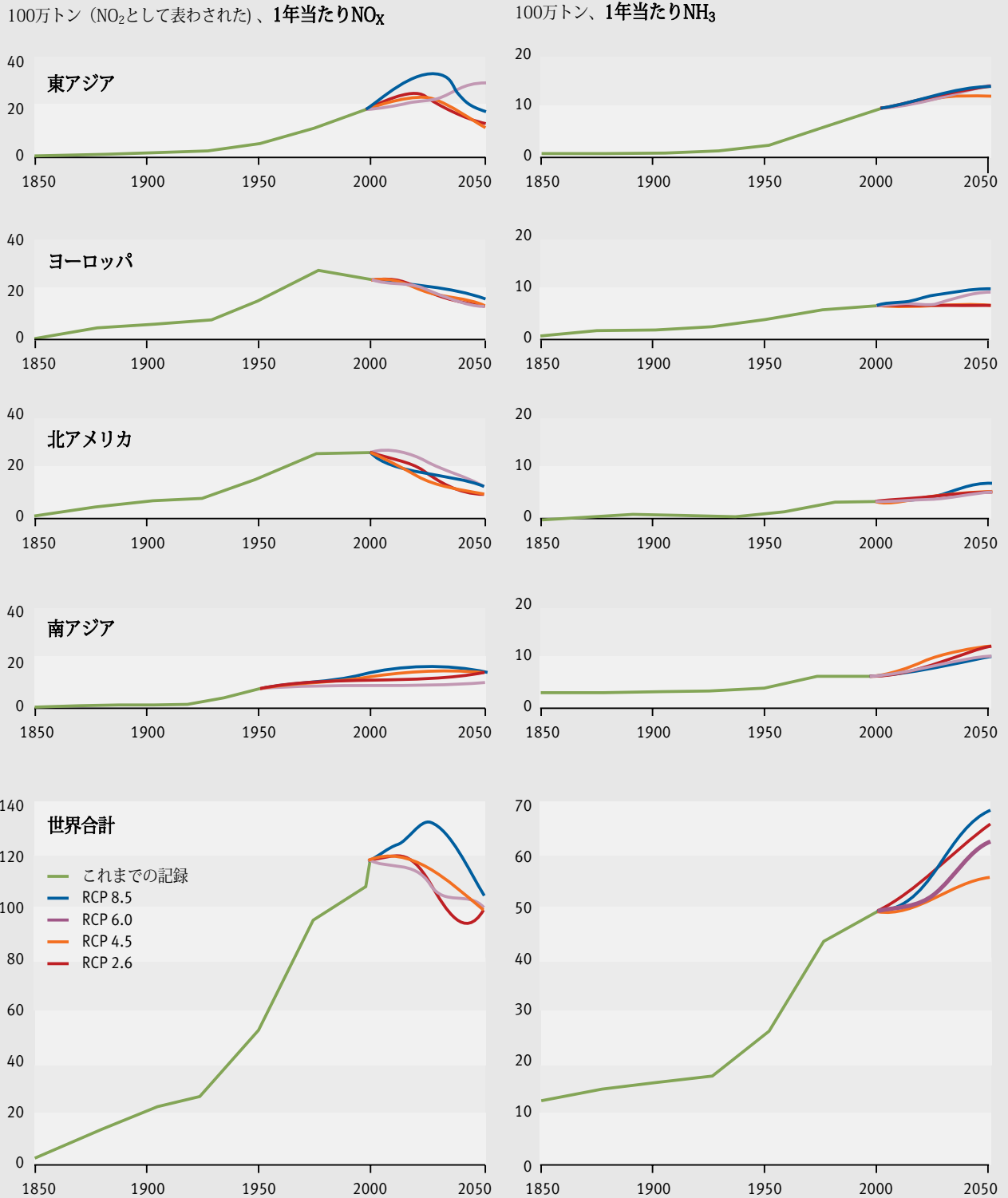
窒素排出量の規制がさほど優先されていないアフリカ、アジア、中南米では、窒素酸化物とアンモニアのいずれの排出量も増加すると予想されている(図 2.10)。いくつかの大陸域、特にアフリカでは、モニタリング能力の不足が、大きな問題である。これに対処するため、これらの大陸域では、食糧生産に利用できる適切な窒素肥料を確保する一方で、これらの物質の、特に農業、エネルギー、産業、輸送部門からの排出に関する政策をより重視することが必要になるだろう。

現在の技術は、窒素酸化物の排出量を著しく削減させることができるが、ある部門の成長、特に輸送部門の成長が、規制措置を打ち消してしまうことがある。アンモニア排出量を削減するためには、経営慣行を変えることが必要となるだろうし、また大きな削減を達成しようとする場合には、肉や乳製品の消費パターンの変更に加えて、農業政策や農業運営についてのより抜本的な検討が必要となる。

大気からの窒素沈着の増大は、植物多様性への影響を含めて、窒素カスケードによる環境影響を引き起こすだろう (Galloway *et al.* 2003)。生物多様性保全条約は、窒素沈着を生物多様性への脅威の指標であると認め、1ヘクタール当たり年間10kg以上の全窒素沈着を受けている繊細な生態系にとっては特にそうである(CBD 2010b)(図 2.11)。しかしヨーロッパと北アメリカ以外での生物多様性への影響の定量化はほとんど行われていないので、十分に影響を評価することは難しい。

作物収穫量や炭素の隔離を増やすという窒素沈着の肯定的な影響と、生物多様性の喪失や温室効果ガス排出の増大というマイナスの影響とのバランスのとれた有効な政策を策定するには、環境中の窒素を管理するための真に統合されたアプローチがまさに必要である。

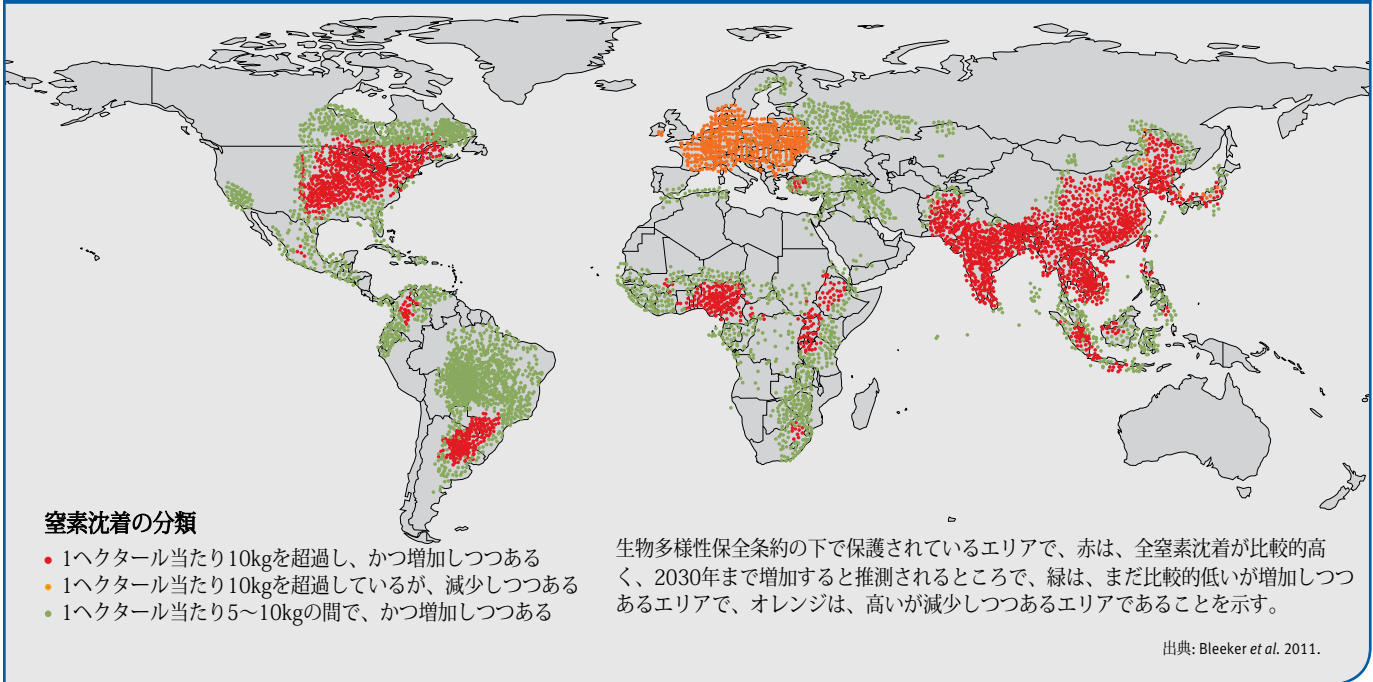
図 2.10 窒素酸化物とアンモニアの排出量の地域傾向、1850～2050年



1850～2000年までの排出量傾向と、IPCCC第5次評価に寄与するよう開発された4つのRCPシナリオの2000～2050年までが、HTAP多種モデル実験に基づいて、4つの地域と世界全体に対して示される。全窒素酸化物の排出量（左）は、世界規模では、ほぼ一定のままであるが、世界のアンモニア排出量（右）は、ほとんどのシナリオで増加すると予測されている。

出典: HTAP 2010

図 2.11 保護地域への窒素沈着の傾向、2000~2030年



粒子状物質

粒子状物質の制御について達成された進展は、世界的に見た場合、混成している。ヨーロッパや北アメリカの他に、中南米やアジアのいくつかの都市でも、PM₁₀（直径10マイクロメートル以下の粒子状物質）の排出量は、削減されたが、アジアや中南米の多くの都市では、主要な汚染物質のままである。アフリカでは、全くわずかの都市しか、大気汚染物質をモニターしていないが、モニターしている数少ない都市の多くで、PM₁₀濃度がWHOのガイドラインを超えていることが示されている(WHO 2012)。高所得国での屋外の濃度は、WHOのPM₁₀ガイドラインである1 m³当たり20マイクログラムに接近している(図 2.13)。アフリカで最も広範囲におよぶ問題は、屋内の粒子レベルである。これらの汚染物質を規制することは、そ

れらが最初の排出物である一次放出と、それが大気中で変質する二次汚染物質とが絡み合っているために複雑である。都市にとって、粒子のホットスポット（高い地点）を消失させることは、さらに難題である。

粒子状物質、特に、より細かいPM_{2.5}は、人の健康に被害をもたらす最も重大な大気汚染物質である(WHO 2011; Carnelley and Le 2001)。粒子状物質の主要な発生源は、エネルギー部門、輸送部門、工業部門に関係するが、固形廃棄物や作物残渣を野焼きすることも、有力な発生源である。世界中の健康に関する研究によって、粒子状物質への暴露に対する安全な閾値は存在しない、つまり非常に低レベルでも健康被害を引き起こすことが指摘された。健康への影響は、圧倒的に呼吸と心血管の病気に関係するが、影響の範囲は、急性と慢性暴露の両方に及ぶ。2004年の粒子状物質への暴露に基づいて、WHOは、世界中での年間の早死の5.3%、約310万人の死亡が（屋外の都市汚染2%、屋内の汚染3.3%）、その大気汚染に起因していると判断した。これは他のすべての環境リスクを集結したものを上回る数字である(表 2.4)(WHO 2009)。しかし、より最近の研究では、屋外の人為起源のPM_{2.5}だけによる早死が370万人と推定された。ただしそれは、農村地域での暴露を含め、低濃度の閾値を設けず、最新の濃度-反応関係を使用する特別な手法を用いて推定されている(Annenberg et al. 2010)。固形燃料とその使用方法に起因する世界全体の障害調整生命年(DALY：本来健康であるはずの人生のうち病気により失われた年数の合計)は、おおよそ4,100万で、その全体の44%に当たる1800万が、サハラ以南のアフリカで生じている(UNDP and WHO 2009)。料理や暖房用に従来の燃料や手法を用いることへの依存を減らすように、家庭に対して

Box 2.4 粒子状物質

関連する目標

人の健康の保護。

指標

PMの濃度

世界の傾向

WHOのガイドラインに関して混成した進展が見られる。EUと北アメリカ、そしていくつかの中南米とアジアの都市で著しく削減されたが、アジアと中南米の都市部ではほとんど高濃度のままである。アフリカのデータは不十分であるが、いくつかの都市でPM濃度が高い。

表 2.4 粒子状物質の大気汚染による世界疾病負担

大気汚染のタイプ	早死	障害調整生命年 (DALY)
都市の屋外	115万人 = 世界中の死の2.0% 61万人の男性と54万人の女性肺癌死の8% 心肺死の5% 呼吸器系の感染死の3%	870万 DALY
屋内	197万人 = 世界中の死の3.3% 89万人の男性と108万人の女性 下気道感染症による死の21% 慢性的閉塞性の肺臓死の35% 肺癌死の3% 5才以下の子供の肺炎死 90万人	4,100万 DALY
大気汚染の合計	312万人 = 世界中の死の5.3%	4,970万 DALY

注釈：障害調整生命年 (DALY)：本来健康であるはずの人生のうち病気により失われた年数の合計

出典: WHO 2009

エネルギー介入することは、明らかに、健康を増進させ、かつミレニアム開発目標の達成を促進するポテンシャルがある。英国のような高所得国でさえ、PM_{2.5}は、濃度の低減に相当な進展が見られたにもかかわらず、2008年に29,000人の早死と340,000生命年の喪失をもたらしたと推定されている(COMEAP 2010)。

大気汚染の長距離に及ぶ移送についての最近の評価報告によると、粒子状物質の大陸間の移送が、公衆衛生基準や視程基準を超える大気汚染をもたらしていることが示されている。粒子が長距離に移送されていることが、世界で380,000人が早死している原因である可能性があり、その75%は、PM_{2.5}という鉱物粉塵に起因している(HTAP 2010)。自然を発生源とする大気汚染の影響は、対応を要する新たに発生している大気問題で、大気ガバナンスの節で議論される。

自動車への技術的改善、輸送やエネルギー効率の向上、よりクリーンな燃料やフィルター、といった様々な手法が先進国において成果をあげ、開発途上国でもある程度まで成功している。しかし、後者が、よりクリーンな技術の使用で追いつく間に、そういった効率の向上は、排出発生源の急速な増加、例えばエネルギーや輸送のための燃料使用の急増によって、帳消しにされつつある。屋内の粒子が関係するところでは、グローバル・パートナーシップによって、よりクリーンなエネルギーと、改善された料理用かまどの普及が促進されている。

先進国と開発途上国の大部分が、環境大気質基準を採用したが(図 2.12)、ほとんどの都市の粒子の濃度は、人の健康と生態系を保護するためのWHOの環境大気質ガイドラインによって推奨された水準を超えている(図 2.13)。大抵の開発途上国のPM₁₀基準は、大気汚染の漸進的な削減を促すためのWHOによって設定された暫定ターゲットほど厳格なものではない。WHOはさらにPM_{2.5}ガイドラインを推奨したが、多くの国々がまだ、基準もモニタリングの履行も導入していない。2010年においてアジアでは、例えば、22か国のうちの4か国だけ

が、モニタリングによってサポートされているPM_{2.5}の基準を持っている。後記の「新たに発生している問題」の節で述べるように、マイクロメートルおよびサブマイクロメートルの粒子状物質による健康への影響に関心が高まりつつある。

ヨーロッパでは、2020年までにPM_{2.5}の排出量を20%削減する計画によって、PM_{2.5}による損失生命年数を、2000年と比較して40%低下させることが期待されている。それでも、まだPM_{2.5}大気汚染が、統計平均寿命を4.6か月短くすると予想されている(Amann *et al.* 2011)。しかし、ヨーロッパで新しい国家排出上限指令が実施される場合、その恩恵は、評価方法にもよるが、コストの12~37倍上回るだろう(AEA 2010)。また、対策の構成によっては、PM排出量を、35~50%削減することができるかもしれない。また一方、米国環境保護庁は、米国大気汚染防止法によって、環境のPM_{2.5}とオゾン水準を低下させることで、2010年に1兆2000億USドル、2020年に1兆8000億USドルに相当する、多数の死者による損失を回避する計画であると報告している(2006 dollars)。これらの計画され実現される恩恵の90%以上が、粒子状物質への暴露を減らすことによってもたらされる(USEPA 2010)。



燃料としてバイオマスを用いる従来の調理法を使用すると、深刻な屋内での粒子汚染が引き起こされ、また屋外での黒色炭素や他の粒子状物質の濃度を著しく高める。© Stillpictures/nbsp

図 2.12 PM₁₀に対する各国の環境大気質基準とWHOのガイドライン

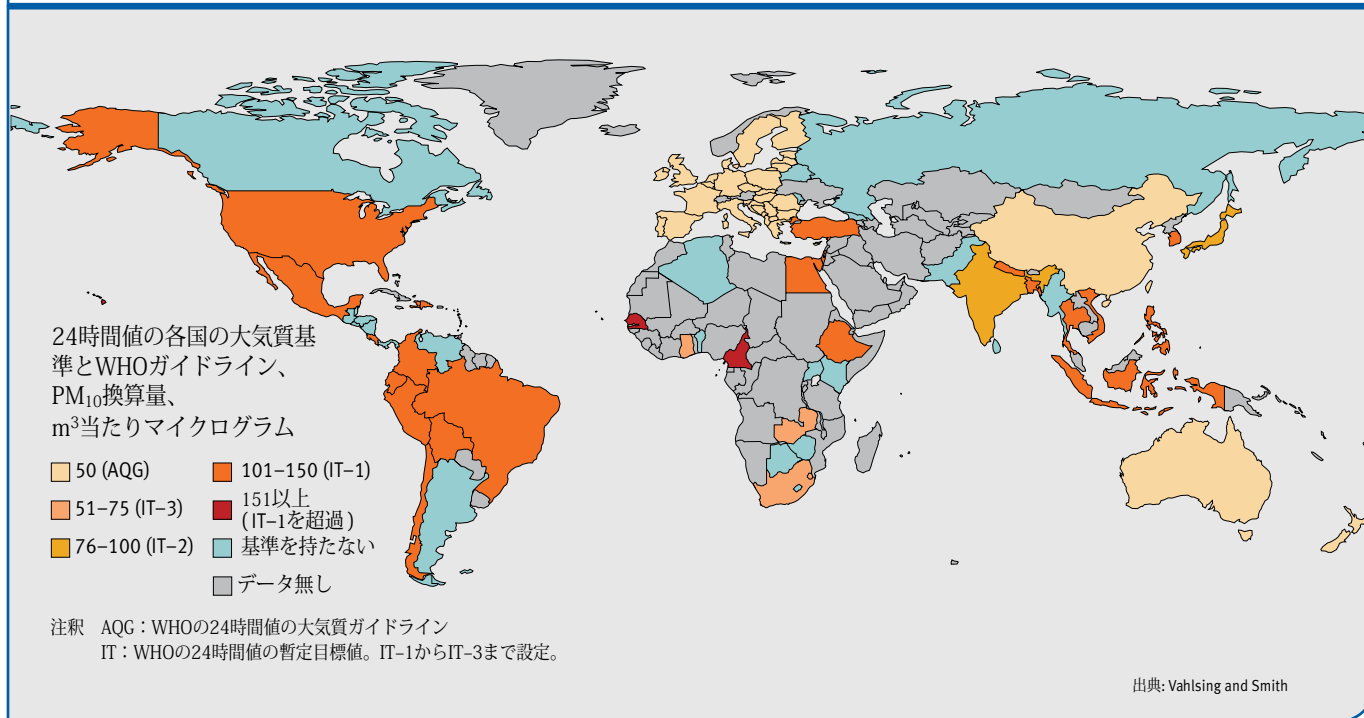
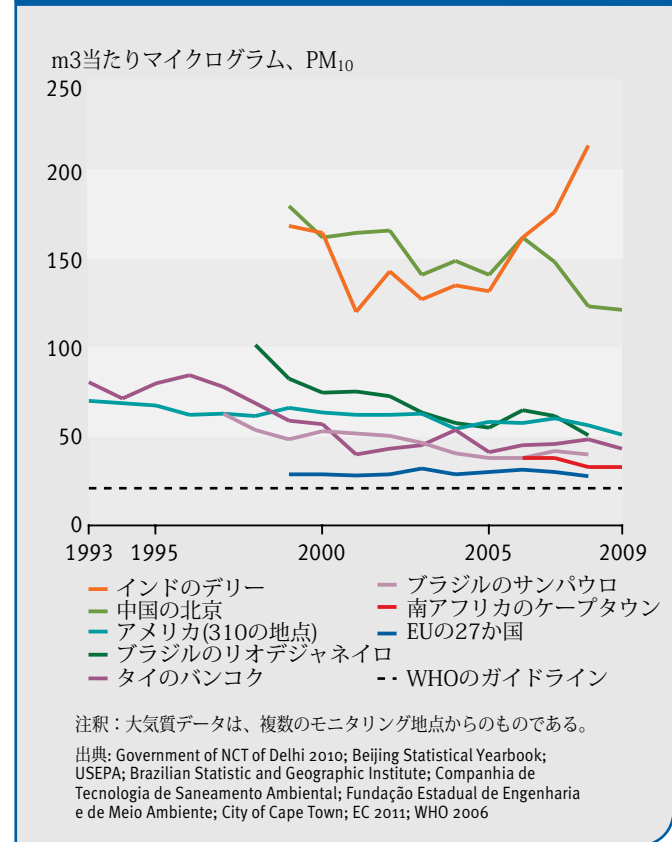


図 2.13 選定された地域や都市における都市のPM₁₀の傾向、1993~2009年



粒子状物質と健康のための政策立案により良い情報を提供するには、解明されなければならないいくつかの不明な要素がある。それは、粒子の大きさ別の濃度と影響、様々な場所での一次 PM 汚染と二次 PM 汚染の性質についてであり、モニタリング、排出インベントリ、モデリングを通して理解すると共に、発生源の寄与率を把握したり、健康への影響を経済的価値で計ることを通して、より理解を深めることが必要である。環境大気質基準と能力の向上とを調和させる取り組みによって、ヨーロッパや北アメリカ、またアジアや南米のいくつかの都市において適用して成功した政策や技術を拡大させていくなから、開発途上国の PM を迅速に削減できる可能性がある。

対流圏オゾンと地表オゾン

対流圏オゾン (O₃) は、地表上空 0~10km から 20km までの下層大気中のオゾンで、温暖化の原因になっている。地上または地表オゾンは、地表におけるオゾン濃度で表現され、人間の健康と生態系の両方に悪影響を及ぼす。対流圏オゾンの制御については、進展した部分とそうでない部分が混成している。つまり、ピーク濃度がヨーロッパと北アメリカで減少した一方で、バックグラウンド濃度は増加している。急速に産業化している地域においては、バックグラウンド濃度とピーク濃度の両方が、着実に上昇し続けている (Royal Society 2008)。

オゾンは主に 3つの点で害をもたらす。第 1 に、地表オゾンは人の健康を害し、その影響は粒子状物質に次いで第 2 位であると考えられている。それが世界で毎年、推定 70 万人の呼吸器関連の死をもたらしており、その 75%以上がアジアにおい

Box 2.5 対流圏オゾン

関連する目標

人の健康、作物収穫量、生態系、気候の保護

指標

前駆物質排出量、オゾン濃度

世界の傾向

CLRTAPターゲットに関して混成した進展。EUと北アメリカで幾分かの削減が見られ、アジアのほとんどで濃度が増加している。アフリカはデータが不十分である。

てである。さらにオゾンは、生涯続く肺損傷に至る慢性的な健康影響をもたらす(Royal Society 2008)。

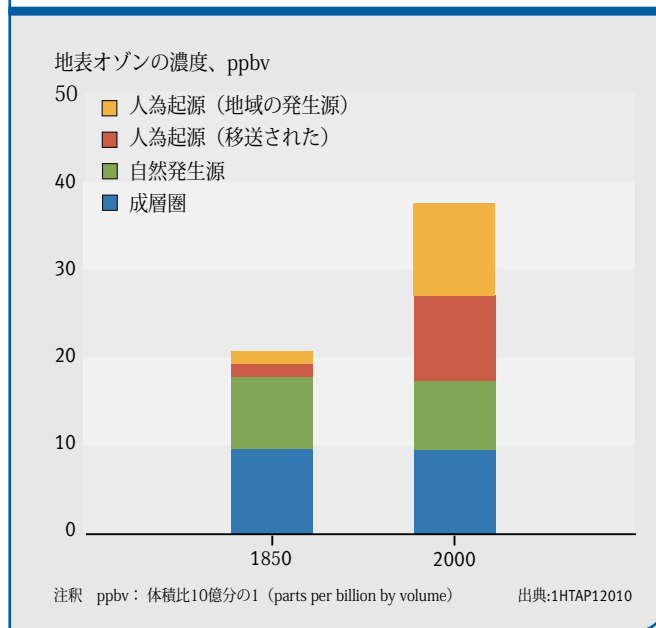
第2に、地表オゾンは、植生に最も重大な被害をもたらす大気汚染物質であり(Emberson *et al.* 2009; Ashmore 2005)、作物収穫量や森林の生産力を縮小させ、純一次生産力を変化させる。例えば、オゾンによって引き起こされる収穫の損失は、推定でトウモロコシ、小麦、大豆、米といった4つの主要生産物の3~16%に及び、それを経済的損失に換算すると、世界で毎年140億から260億USドルに相当する(HTAP 2010)。

最後に、オゾンは、CO₂とメタンに次ぐ3番目に大きな影響を持つ温室効果ガスであるが(IPCC 2007)、~~たが数日~~数週間という大気中での滞留時間のために、短寿命気候強制力因子に分類されている。人為起源による放射強制力は、全て合計すると1m²当たり+1.6(-1.0, +0.8)ワットであるが、そのうち、対流圏オゾンがもたらした産業革命以降の放射強制力の変化は、1m²当たり+0.35(-0.1, +0.3)ワットであると推定されている(IPCC 2007)。オゾンが引き起こした変化は、産業革命以前の時代からの世界的な温度変化の5~16%に相当すると考えられている(Forster *et al.* 2007)。さらにオゾンによって引き起こされたバイオマスの減少は、陸域生態系内に隔離して貯留される炭素量に影響を及ぼしている。この効果は、大気中の対流圏オゾンの直接放射効果による温暖化を上回る、追加の放射強制力が生み出されるほどの、大気CO₂濃度の増加をもたらしていると推定されている(Sitch *et al.* 2007)。

オゾンは、大気に直接放出されるのではなく、むしろ、前駆汚染物質(窒素酸化物、メタンを含む揮発性有機化合物、および一酸化炭素)が、日光の存在下で反応する時に形成される。そのため、オゾン濃度が、前駆汚染源の風下の何十キロから何千キロメートル離れたところで高くなる傾向があり、地方、大陸域、半球の規模でオゾン汚染が引き起こされる。

対流圏中のオゾンのおよそ90%が光化学反応によるもので、残り10%は成層圏から直接移送される。対流圏オゾンの約

図 2.14 北半球の汚染地域を覆うオゾンの発生源、1850年と2000年



30%は、人為起源の排出が原因で、そのうち、産業革命以前の時代からの世界のオゾン負荷の変化の40%がメタンの増加によるもので、残りは、窒素酸化物、一酸化炭素、メタン以外の揮発性有機化合物の排出増加によるものである(HTAP 2010)。地上または地表オゾンは、北半球の汚染地域を覆い、人の健康と生態系に影響を及ぼすが、その起原は、成層圏からのものが20~25%で、自然発生のメタンの酸化と、雷光と、土壌や植生や火災からの放出など、自然の前駆発生源によるものが、成層圏からのものと同様の割合を占める。したがって、これらの地域では、人為起源によるものが、通常、50%以上を占める(図2.14)。



地表オゾンは、食用作物に対して他の大気汚染物質より、より多くの被害を与える。© Evgeny Kuklev/iStock



地表オゾンは、都市スモッグの主要原因の一つである。© T. Kimura

オゾン濃度の上昇は、太陽放射が高くなる季節に関係すると共に、産業や都市中心部から放出される野放しの高レベルの諸排出にさらされる地域に関連して起こる傾向がある。このことが、世界的に、そして季節的に高い濃度変動が引き起こされる原因である。北アメリカ、ヨーロッパ、アジアの地域には、高い人為起源のオゾン負荷があることが確認された（図 2.15）。

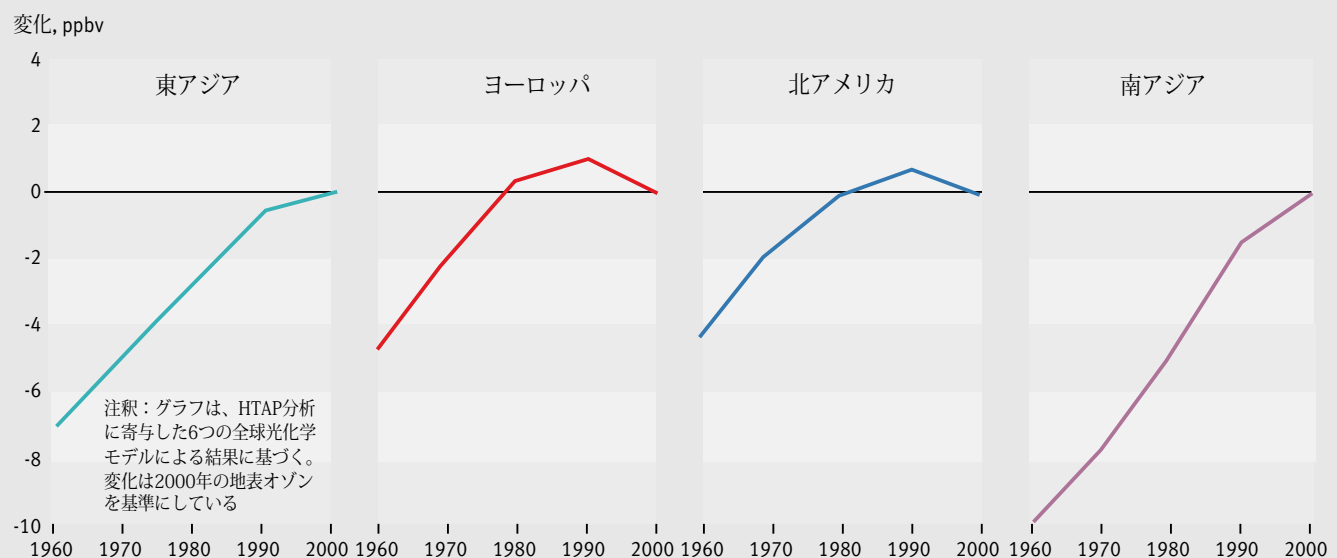
国連欧州経済委員会（UNECE）において規定された対流圏オゾンのターゲットを、現在、多くの地点のオゾン濃度が上回りつつある。しかし、ヨーロッパでの協調的行動によって、窒素酸化物と揮発性有機化合物の排出量を 1990 年比で 30%と 35%低減させたので、短期ピーク・オゾン濃度として空気 1 m³ 当たり 1 日のピーク値を約 60 マイクログラムにまで削減する

に至った。それとは対照的に、多くの地点での平均オゾン濃度は、様々な異なった要因により増加している。例えば、地域での窒素酸化物の排出量の削減と、それによる一酸化窒素の削減は、オゾン破壊の主要なメカニズムを取り除くことになり、市街地でのオゾン濃度を増加させる結果になることがある（Royal Society 2008）。さらに 1970 年代以降、気候変動の影響を受けて、成層圏オゾンの流入、半球規模での移送、そして気候変動によるオゾン生成の変化によって、バックグラウンドオゾン濃度が、10 年当たり、空気 1 m³ 当たり 10 マイクログラムまで増加していることが証明されている。これは平均濃度と、ピーク・オゾン濃度の両方を増加させるだろう。

HTAP(2010)評価のために行なわれた全球光化学モデリング研究によって、現在最も高い濃度を示している地域に対して、地表オゾン濃度の変化していく予測値が提供されている。これらのデータは、最近、北アメリカとヨーロッパで地表オゾンが減少したことを示している。このことは、米国大気汚染浄化法、ヨーロッパにおける CLRTAP と EU ターゲットに応じて、過去 20 年間にわたって、窒素酸化物と揮発性有機化合物が効果的に規制されたことによるだろう。対照的に、アジアにおける傾向は、地域において継続する迅速な産業化によって上昇し続けている（図 2.15）。しかし、これらの地域の傾向には、大きな地域変動が隠されているかもしれない。

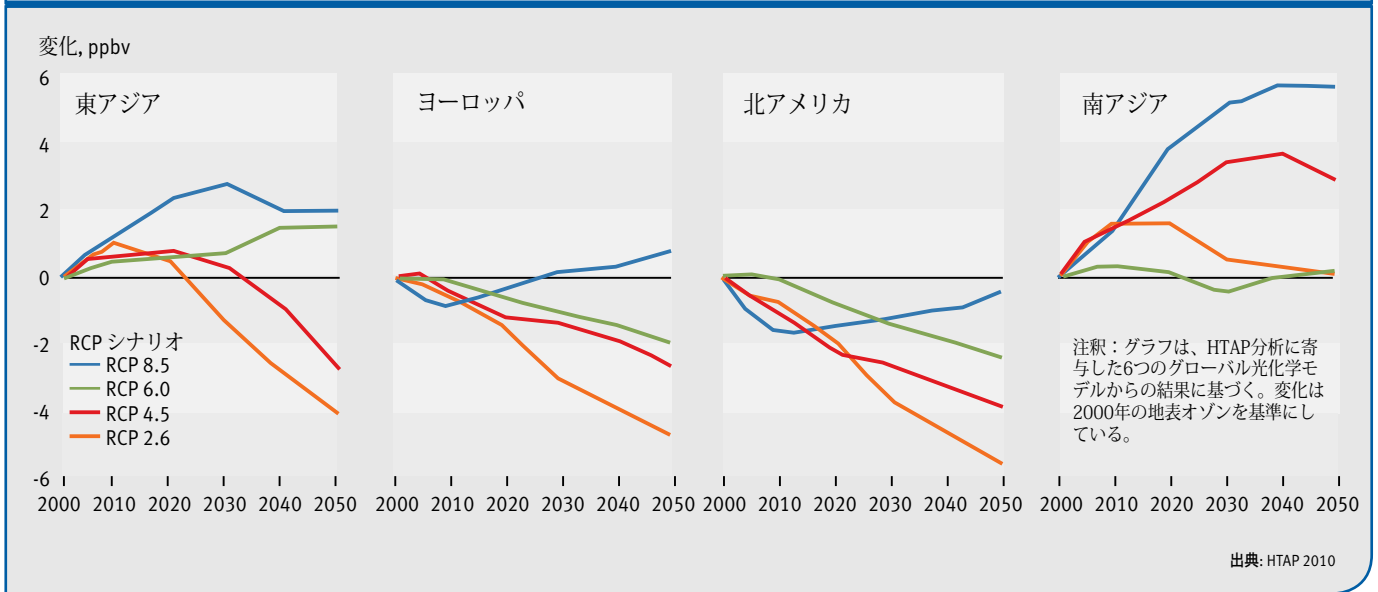
対流圏オゾン濃度の将来の変化については、様々な排出シナリオに対して、異なった多くの全球光化学モデルを用いて調査され、変化しやすい結果が提供されている（図 2.16）。HTAP(2010) 評価では、RCP 排出シナリオに従って 2000 年～2050 年間の排出量変化の予想される結果を算定するため

図 2.15 地表オゾン濃度の地域変化、1960～2000年



出典：HTAP 2010

図 2.16 北半球の汚染地域における地表オゾン濃度の変化の予想、2000～2050年



に、6つの全球モデルの平均値が使用された。オゾン濃度の見直しは、世界と地域の排出経路に極度に依存する。

オゾンを抑制するために導入される政策の有効性を評価するには、都市も田舎もカバーする広く行き渡った世界規模の監視ネットワークが必要である。さらに、オゾンによる人の健康と生態系への影響、気候変動がどのようにオゾン生成に影響するのか、そして地球温暖化や過度の窒素沈着のような他のストレス要因と結合してオゾンがどのように作用するのか、といったことについての理解を高めることも重要である。短寿命気候強制力因子としてのオゾンに対する関心が増大していることと、オゾンの削減によって、関連する人の健康や農耕や生態系に恩恵がもたらされるかもしれないために(UNEP/WMO 2011)、オゾンは、政策介入する上で、特に興味をそそられる汚染物質となっている。

国際的に合意された目標が進展した例

問題の解決と、ターゲットの達成において、具体的に進展した2つの例がある。成層圏オゾン層の保護と、ガソリンからの鉛の除去である。

成層圏オゾン層

成層圏のオゾン層破壊に対処する世界の制度には、1985年のオゾン層の保護に関するウィーン条約と、1987年の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がある。最新の科学的評価は、オゾン破壊物質の消費を排除するために、モントリオール議定書の下で講じられた処置が成功したことを確認している(図 2.17)(WMO 2011; UNEP 2010)。

Box 2.6 成層圏オゾン

関連する目標

成層圏オゾン層の保護

指標

オゾン破壊物質の消費量。大気への負荷。南極のオゾンホール。毎年の広がり。

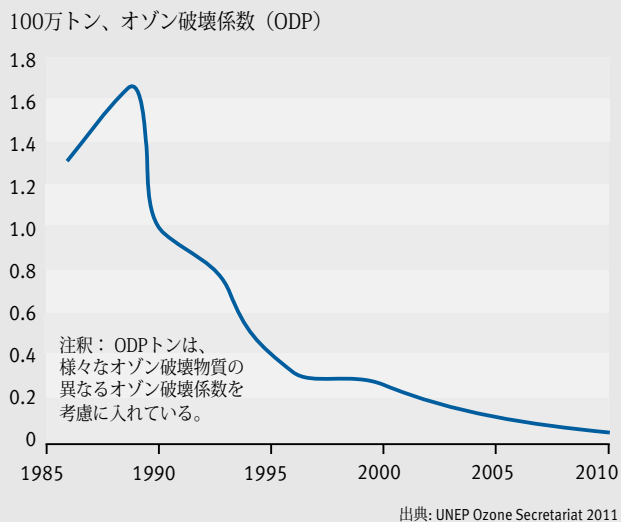
世界の傾向

著しい進展

成層圏オゾンは、太陽からの紫外線B波(UV-B)という放射線を吸収するので、人や他の生物を保護している。人にとって、UV-B放射線への高度な暴露は、皮膚癌、白内障、免疫機能抑制といったリスクを増大させる。さらに過度のUV-B暴露は、陸上植物の生命、単細胞生物、水界生態系を損なう場合がある。1970年代中頃に、成層圏オゾン層の希薄化が、大気中のクロロフルオロカーボン(CFC)(冷凍や空調機器、発泡剤や産業用洗浄に使用される)の着実な増加と関係していることが発見された。

最も深刻で驚くべきオゾンの損失(オゾンホールとして知られるようになった)が、南極地域上空で、春季に繰り返されていることが発見された。オゾン層の希薄化は、北極地域(Manne *et al.* 2011)と、南北の中緯度地方のような他の地域の上空にも観察された。

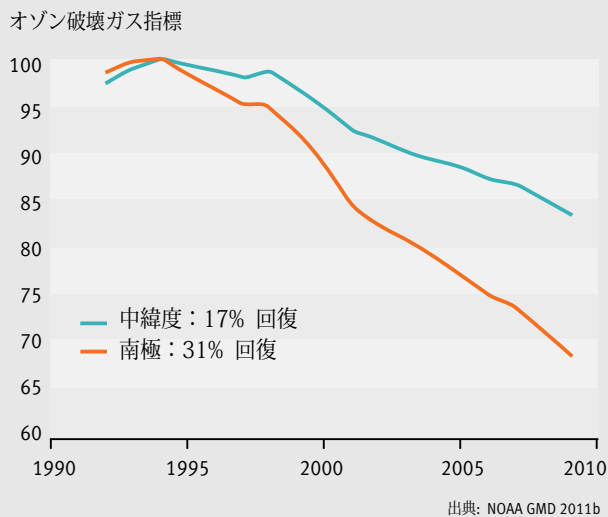
図 2.17 オゾン破壊物質の消費量、1986～2009年



オゾン破壊物質の消費は劇的に削減されたけれども(図 2.17)、それらの大気寿命が長いので、成層圏での濃度は、オゾン破壊ガス指標(ODGI)で示されるように高いままである(図 2.18)。図 2.18 は、その指標が中緯度で 1994 年のピークから 17%回復したことを示し、南極地域で 31%回復したことを示す。

南極のオゾン層のホールは、オゾン破壊物質の影響が最も明瞭に現れたものである。南極地域で春季に全オゾン量が減少するという現象が、気象条件による影響を受けて、毎年、発生し続けている。図 2.19 は、最近 30 年間にわたって、毎年 7 月

図 2.18 成層圏におけるオゾン破壊物質の削減、1994-2009年



19 日から 12 月 1 日まで測定された南極のオゾン層破壊の進行を示す。記録における最大のオゾンホールは、2006 年に生じた(WMO 2011)。

「世界が回避した」シナリオ、つまりモントリオール議定書が制定されずにオゾン層が破壊された場合のシナリオのモデル・シミュレーションによると、1980 年の水準と比較して 2065 年までに、中緯度以北の地域の紫外線が 300%増加していたか、あるいは中緯度での紫外線が 550%増加していたであろう(図 2.20)(Newman and McKenzie 2011)。紫外線のそのような劇的な増加は、人の健康と環境の両方に、重大な結果を

図 2.19 南極のオゾンホールの広がり、1980～2010年

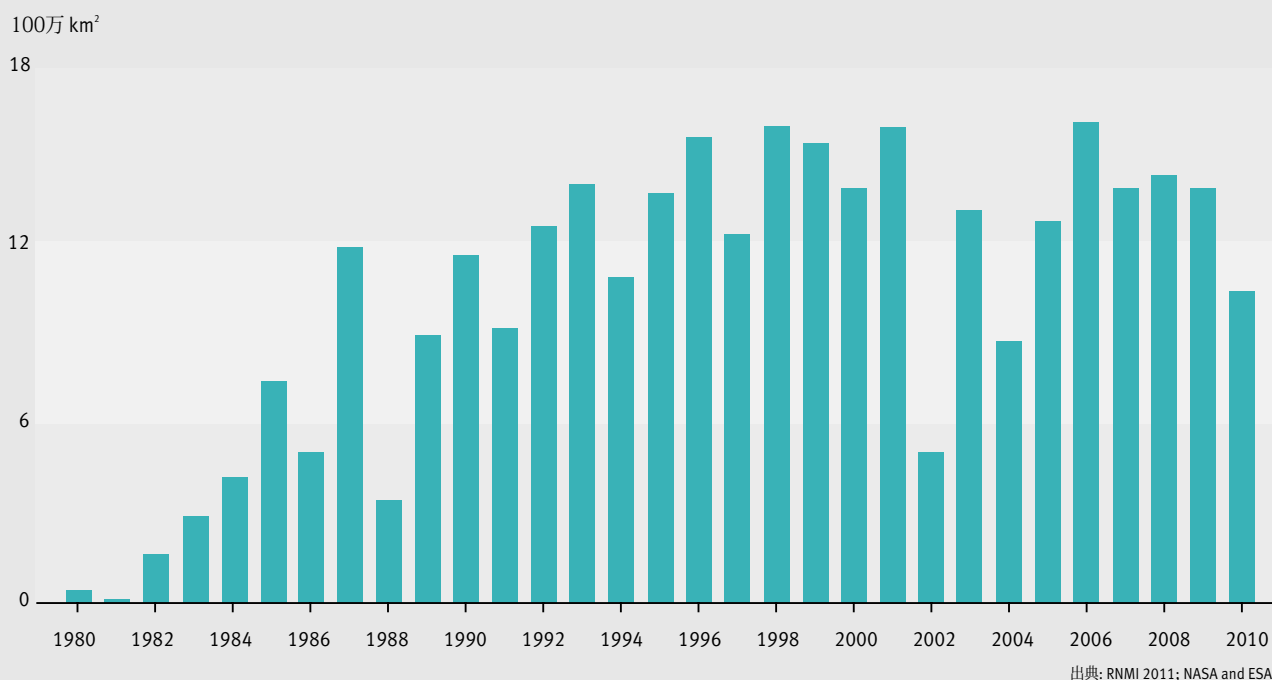
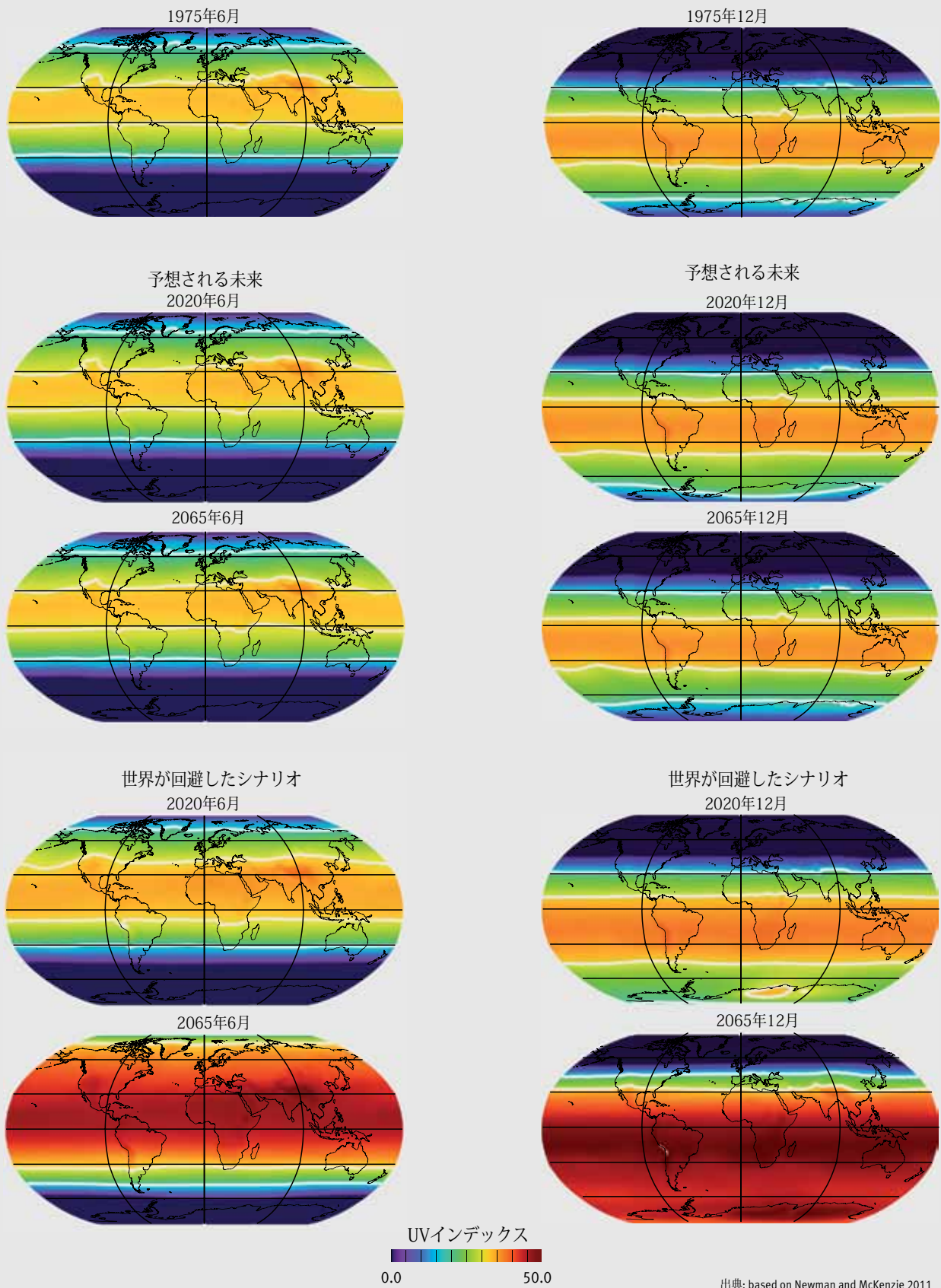


図 2.20 世界が回避したモデル計算によるUVインデックス、1975年、2020年、2065年





鉛が含まれていると警告する掲示を付けた古いガソリンポンプの側面 © Tim Messick

もたらしていただろう。モントリオール議定書の成果として、アメリカ単独で、1985年から2100年の間に生まれる人々に対して、2165年までに2200万人の白内障の発症が回避され、630万人の皮膚癌による死亡が回避されることになるだろう(USEPA 2010)。

2007年に行われたモントリオール議定書の最新の改正によって、地球温暖化係数(GWP)のCO₂換算で約180億トンの排出量削減に貢献することになるハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)の段階的廃止が加速された。

オゾン破壊物質の現在の段階的廃止が、様々な地域で、それぞれの時期に、オゾン層の回復につながると期待されている(WMO 2011)。世界全体として、全オゾン量の年間平均が、2025年から2040年の間に、1980年の水準に戻ると予測されている。しかし、これは南極地域においては世紀半ばまでかかり、小さな一時的な南極のオゾンホールが、21世紀の終わりになっても存続しているであろう(WMO 2011)。全オゾン量の年間平均は、北半球の中緯度において、2015年から2030年の間に1980年の値に戻ると予測され、一方、南半球の中緯度では、2030年から2040年の間に回復すると予測される。

Box 2.7 ガソリン中の鉛

関連する目標

鉛暴露の防止

指標

加鉛ガソリンを持つ国々の数

世界の傾向

世界的に6か国を除いて段階的に廃止された。

確かにモントリオール議定書の条項が成功裏に実施されたけれども、古い設備の中に捕獲されたままになっているオゾン破壊物質や、収集されたり備蓄された器具が破壊されることに関するいくつかの問題が残っている。

ガソリンからの鉛の除去

鉛への暴露を削減するヨハネスブルグ実施計画の目標は、ほとんどの国々が2002年以降、ガソリン中の鉛を段階的に無くしたことで、大部分は達成されたが、少なくとも6か国では、加鉛ガソリンがまだ販売されている形跡がある(図2.21)。

鉛中毒は、あらゆるレベルの暴露でも、人の健康に対して有害であり、多くの場合、特に子供の場合に、不可逆的な影響を引き起こし、世界疾病負荷のうちのほぼ0.6%の約900万DALYを占めている(WHO 2009)。高レベルで急性の鉛暴露は、脳と中枢神経系に影響し、その結果、昏睡、痙攣、さらに死さえも引き起こす。また鉛は、比較的低レベルであっても、免疫、生殖、心臓血管系に悪影響を及ぼすことがある(WHO 2010)。鉛暴露には、それ以下なら悪影響が検知されないという閾値は存在しない(Lanphear *et al.* 2005; Schneider *et al.* 2003; Lovei 1998; Schwartz 1994)。

鉛暴露と鉛中毒は、絵の具や色素、電子廃棄物、化粧品や玩具、伝統薬、食糧への混入、飲料水システムといった、様々な発生源や製品が原因である可能性があるが、世界の鉛環境汚染の最大の原因は、ガソリン中の鉛である(WHO 2010)。

米国環境保護庁が、鉛の排出によって、特に子供の神経系への深刻な被害と、健康への重大な影響がもたらされることを結論付けた後の1973年に、アメリカで、ガソリンから鉛を取り除くための健康に基づく規制が作られた(Bridbord and Hanson 2009)。日本でも同様の結論が出され、日本は、鉛が添加されていないガソリンを販売する最初の国となり、1981年には、販売されていたガソリンのうち有鉛ガソリンは3%未満にまで減っていた(Wilson and Horrocks 2008)。

1976~1980年の期間から1999~2002年の期間までに、アメリカは、1~5歳の子供について、血液1デシリットル当たり10マイクログラム以上のレベルの鉛を持つ子供の割合を98%減らした(CDC 2005)。その他の世界中の研究で、ガソリン中の鉛の使用が減少すると、血液中の鉛が減少するという強い相関が示された(図2.22と2.23)(Thomas *et al.* 1999)。

鉛中毒を防ぐための介入が、非常に大きな経済的恩恵となることが示された。アメリカにおける子供の鉛中毒に関連する、直接的な医療コストと、間接的な社会コストが分析され、当時の比較的低レベルの鉛暴露であっても、それらのコストが毎年430億USドルになることが分かった(Landrigan *et al.* 2002)。人々の一生涯の生産性を見た場合の別の経済分析では、ガソリ

ンから鉛を除去することに起因する、子供の知能の増加と、それによる彼等の一生涯における経済生産性が、アメリカでの各出生コホートにおいて、1,100 億から 3,190 億 US ドルの恩恵を生み出すと推定された(Grosse et al. 2002)。

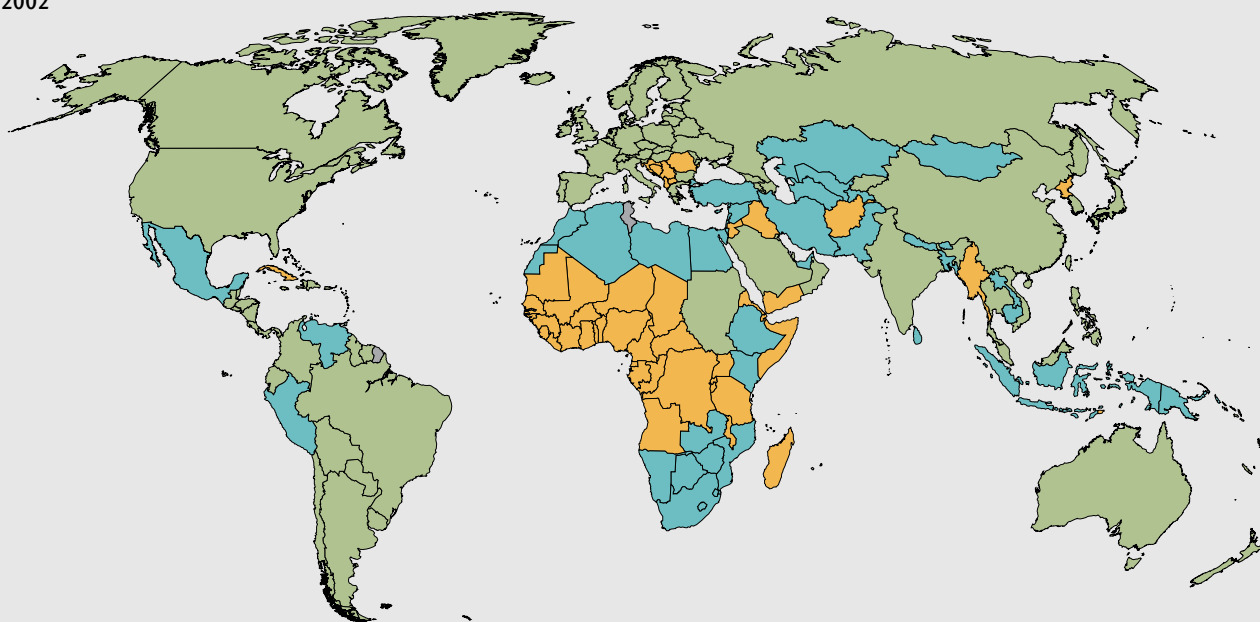
グールド(Gould 2009)によれば、鉛による危険を削減するために費やされた 1 US ドル当たり、17~220 US ドルの恩恵があり、ワクチン剤に費やされるより費用便益比がよい。それは、単一で最も費用対効果のある医学的介入または公衆衛生介入として、永く評されてきた。文献に公表された、GDP の既知の事実から推定する別の方法論によれば、ガソリン中の鉛の

段階的廃止によってもたらされる世界の恩恵が、毎年 1~6 兆 US ドルになり、その最良推定値が 2 兆 4500 億 US ドルで、世界の GDP のおよそ 4%になることが示された (Tsai and Hatfield 2011)。

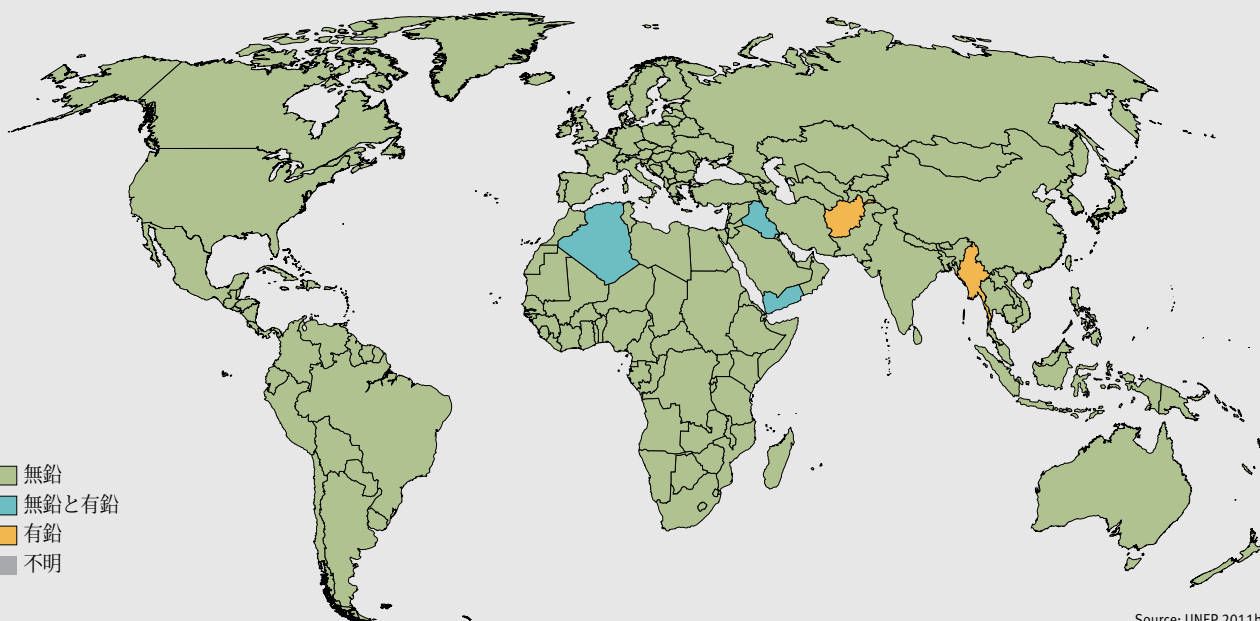
健康への影響に関する根拠となる最近のデータを基にして、米国環境保護庁は、鉛に対する 3 か月移動平均の大気質基準を、空気 1 m³ 当たり 1978 年の 1.5 マイクログラムから、2008 年の 0.15 マイクログラムまで強化させた(USEPA 2008)。WHO の鉛に対する年間の環境大気ガイドラインは、空気 1 m³ 当たり 0.5 マイクログラムのままである(WHO 2000)。

図 2.21 加鉛ガソリンの段階的廃止、2002年と2011年

2002



2011



- 無鉛
- 無鉛と有鉛
- 有鉛
- 不明

Source: UNEP 2011b

図 2.22 ガソリン中の鉛の段階的廃止に追隨するスウェーデンのガソリンと血液の鉛濃度、1976～2004年

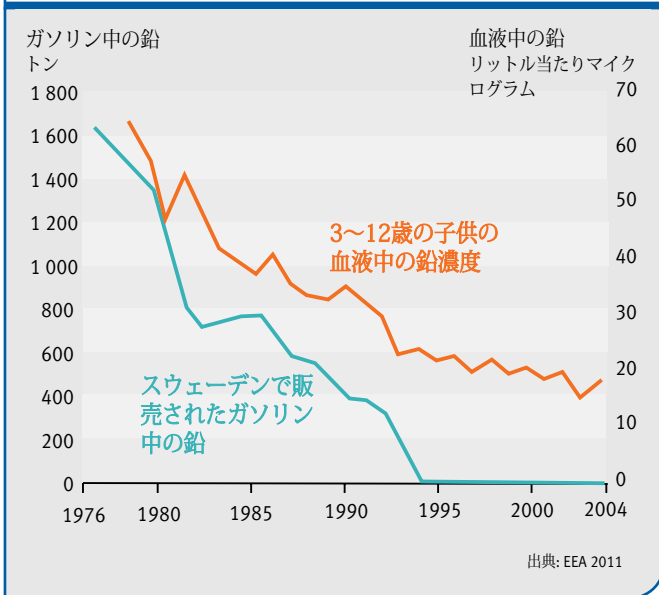
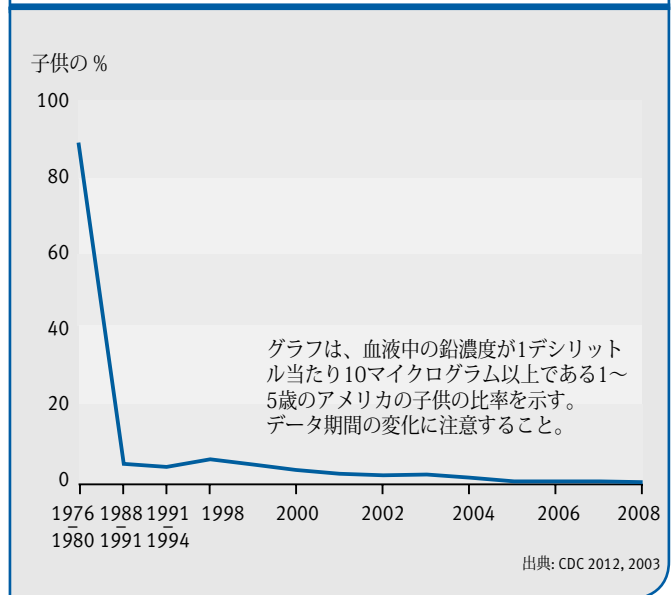


図 2.23 ガソリン中の鉛の段階的廃止に追隨するアメリカでの血液中の鉛濃度、1976～2008年



ガソリンから鉛を除去し、その結果として健康リスクが減少したことによって、数年の内に世界のガソリン中の鉛を期待通りに完全に消失させることになったのであり、これは地球規模で際立った成功物語である。

新たに発生している問題

大気環境に関する研究で最も重大な新しい問題は、短寿命気候強制力因子、特にメタン、対流圏オゾン、黒色炭素(UNEP/WMO 2011)が及ぼす作用である。一部のハイドロフルオロカーボン (HFC) もまた、重大な短寿命気候強制力因子である(UNEP 2011c)。

大気中の黒色炭素粒子状物質は、人の健康だけでなく、気候にも著しい影響を及ぼす。それらは雪や氷の表面を暗くし、アルベドを低下させて、日光の吸収を増加させる。そのため、大気の加熱に加えて、北極地方、ヒマラヤ山脈、他の氷河や雪で覆われた地域など、世界中の融雪と融氷を激化させる。このことは、水循環に影響し、洪水の危険性を増大させる可能性がある。メタンは、強力な温室効果ガスであり、かつオゾンを生成させる重大な前駆物質である。メタン、黒色炭素、対流圏オゾンは、大気での寿命が比較的短いので、より長寿命の温室効果ガスとは基本的に異なるが、今、黒色炭素とメタンの排出量を削減することで、今世紀前半の気候変動の速度を遅らせることができるだろう (Shindell et al. 2012; UNEP/WMO 2011)。



ヒマラヤ山脈の雪と氷の覆いは黒色炭素を含むエアロゾルによって影響される。© Arsgera



伝統的な窯でのレンガの生産が南アジアにおける黒色炭素の局所的で重大な発生源になっている。 © Alexander Kataytsev/iStock

二つ目に重大な新たな問題は、自然起原の微粒子による健康影響である。毎年、非常に大量の、土壌から派生するほこりや、野火からもたらされる粒子状物質が、主要な人口集中地域を飲み込んでいる。これらには、中国の海岸都市に堆積させられている乾燥地帯からの土壌粒子、アフリカや地中海の都市に到達するサハラのはこり、アメリカやオーストラリアの都市に堆積させられている、干ばつの影響を受けた内陸地方からのほこりなどがある。さらに、野火からの煙が、一般に、アフリカ、シベリア、地中海、アメリカ、南東アジア、オーストラリアにおける粒子の濃度を上げる。これらの粒子状物質は、人の健康に大きな影響を及ぼす力を持っており、最近の研究では、年間にほとんど 300,000 人以上が、その自然起原の微粒子が要因で死亡している可能性があることが示唆されている(Liu et al. 2009a, 2009b)。しかし、その発生源を少なくとも部分的に抑制することは可能である(第3章)。劣化した地形を再緑化する大規模な介入が、いくつかの国々で継続されており、国境を越える煙霧汚染に関する 2003 年の ASEAN 煙霧協定は、森林火災から生成された粒子状物質が国を超えて運ばれることへの対処を目指した国際協定の例である。

粒径と微粒子数と健康影響との間の関係についての理解が向上するにつれ、微粒子(直径 2.5 マイクロメートル未満)および超微粒子(1 マイクロメートルおよびサブマイクロメートルの大きさ)が、呼吸器系や心血管の健康に及ぼす影響についての懸念が高まってきた(Schmid et al. 2009; Valavanidis et al. 2008)。その証拠量が急速に増えつつあり、次の数年で、超微粒子への暴露を抑制することで健康を保護する、大気保全の基準やガイドラインが開発され、大気質の政策、監視、管理の焦点になるだろう。

気候変動の諸課題に取り組む、炭素の捕獲と貯蔵、地球工学などの多くの新しい手法が提案されている(IPCC 2005; Rasch et al. 2008)。

大気ガバナンスと対処への統合的アプローチ

この節では、大気問題のガバナンスについて評価するが、そ

の分析には、様々な課題への懸念の度合い、問題の解決に要する相対的成本、大気の問題に対処する際の複雑度、に基づく枠組みが用いられる。それは、ほとんどの大気問題には一つですべてを解決する方策が無いことを示唆している(Levy et al. 1993)。つまり成層圏オゾン層の破壊への対処に有効だったターゲットや工程表が用いられると、気候変動の交渉を遅らせることになるかもしれない(Sunstein 2007)。また二酸化硫黄の削減のために、いくつかの先進国で有効に働いた排出権取引の仕組みが、開発途上国では他の手段で補完される必要があるかもしれない(Chang and Wang 2010)。さらに多くの排出源が、温室効果ガスと大気汚染物質の両方を放出していて、その大気汚染物質のいくつかは気候にも追加的影響を及ぼしているため、オゾン破壊物質の消費を押さえれば、気候への影響も押さえられる。そういった大気を持つ統合的な性質をはっきりと認識した上で為される意思決定の枠組みや、そういった性質を認識し得る状況にすることの必要性が高まりつつある。

ガソリンからの鉛の除去は、政治家やその他利害関係者に伝え易いと判明したコスト効率の良い選択肢を用いて、よりたやすく達成された。UNEP によるクリーン燃料や自動車パートナーシップのような国際的な取り組みの時宜にかなった支援で、各国が次々に無鉛の燃料を導入した(Hilton 2006)。

ガソリンからの鉛の段階的廃止については、国際的に拘束力のある協定は無かったが、コスト効率の良い解決策があり、高いレベルの懸念が抱かれ、比較的扱いやすい問題であったという点で、オゾン破壊物質の段階的廃止と似ているところがある。オゾン層を傷つける物質を除去するために、諸政府は、最終的にモントリオール議定書となった、国際交渉のプロセスを發動するウィーン条約に同意した。その議定書は、先進国におけるオゾン破壊物質を廃絶するための一連のターゲットと工程表を求め、また CFC を製造し始めている開発途上国のための代替技術に対して融資する多国間基金の創設を求めた。それは、他の国際協定のためのモデルになった(Benedick 1998)。この合意に至ったプロセスは、懸念を提起し、コストを低下させ、複雑さを明確にするための手助けとなった。

他の汚染物質についての進展は、それほど平坦ではなかった。例えば二酸化硫黄の場合には、既存の技術、手頃なコスト削減、高まりつつあった理解が、多くの先進国においてその問題を次第に扱いやすいものにした。ところが、ターゲットを設定することや排煙脱硫を設置することは、常識になったけれども、石炭火力発電所の数が増大し、排出量を削減する努力を圧倒した。従って、東アジアの酸性降水物は、高水準のままである。

粒子状物質については、健康に影響が及ぶので、規制することが最優先事項になる。しかしその対策は、開発途上国では特に、数え切れないほどの産業、輸送、エネルギー、商業、家庭といった国内の発生源と、自然の発生源があるために、高価で



都市での使用を目的としたコンパクトな電気自動車は、特別な充電ステーションでバッテリーを充電する。 © iStock/code6d

複雑になり得る。車両の技術的改善、エンジン効率の向上、よりクリーンな燃料、粒子フィルタといった対策が、様々な都市で適用され成功した。先進国では、都市における粒子状物質のレベルが、1950年代と1960年代に急激に落ち始めた。開発途上国では、クリーンテクノロジーが、排出量削減を幾分か成功させたが、モータリゼーション、エネルギー、工業製品に対する高い需要のために総排出量を増加させながら急速に発展する都市においては、それは持続しなかった。問題の複雑さと、コストの両方が進展を妨げた。屋内の粒子状物質への暴露の削減に関しては、農村開発とエネルギーを含める国の政策が、総合的な開発政策の中心に位置付けられることが必要である。

気候変動に関するガバナンスの問題には、高レベルの複雑さ、懸念の度合いが混成すること、行動してから恩恵を得るまでに長いリードタイムがあり多くの場合に行政的な時間尺度を越えてしまうことなどが挙げられる。気候変動のためのガバナンスのアプローチは、多くの点で、オゾン層のそれとよく似たアプローチになるが、問題の性質が異なるために結果は異なる。懸念が増大したために、国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) という地球規模の合意がなされ、京都議定書の交渉が可能になった。この条約は、人為起源の温室効果ガス排出の削減プロセスを開始することを目的としたが、それが完全に遂行されたとしても、UNFCCCの合意である2°Cの温度上昇の限界内にとどまるために決して十分となるように計画されていなかった。

国際的な枠組みの中で、各国に拘束力のあるターゲットを展開させるアプローチは、これまでのところ、気候ターゲットや国際的に合意された目標を達成するための排出量の削減を遂行できていない。やや長い目を見た有望なアプローチとしては、各国なりの緩和行動で削減に寄与できるようにするための、「開発途上国による適切な緩和行動」(NAMAs)を発展させていくことであるように思われる。

地球規模で気候目標を達成するには、おそらく、電気を生成

する方法、エネルギーと資源の使用効率、陸域生態系の管理(第3章と12章)、といった排出の主要な駆動要因に対処する変革(第16章)が必要とされるだろう。消費水準と生産工程に対しては、循環経済のようなアプローチの導入が必要となるかもしれない。つまり、原材料の流れが生物圏に再投入されるようデザインされた、原材料が生物栄養素で構成される循環経済か、あるいは原材料が生物圏に入ることなく循環するようデザインされた循環経済である(Braungart et al. 2007)。しかしそのように変化するまでには時間がかかるので、短期的には、設定された気候目標の達成に向かう進路上に世界を置く、早期の排出量削減を達成できるよう、できるだけ早く費用効率の良い既存の選択肢を展開していく必要がある。

北極圏のような脆弱な生態系への被害、干ばつや洪水の傾向がある地域の脆弱な社会への被害を防ぐには、次の20~40年間にわたり経験されるだろう温暖化による短期気候変動を緩和することが重要である。しかしCO₂への対処だけでは、一つにはCO₂が長命であるので、20~40年という時間尺度で温暖化を緩和するには十分ではないだろう。幸運にも、短期の温暖化は、黒色炭素、メタン、対流圏オゾンなどの短寿命気候強制力因子の濃度を削減する相補的な政策措置によって対処できる(Box 2.8)(Shindell et al. 2012; UNEP/WMO 2011)。これら短命な物質への措置は、大気ガバナンスへの統合的アプローチの一例であり、費用効率の良い方法で政策を展開し、複数の目標を達成する機会を提供する。大気の色雲(Box 2.9)への認識が高まり、様々な大気の問題を統合することが重要視されている。また南極のオゾンホールが南半球の表層の気候に影響していることが一層明らかになってきており(Polvani et al. 2011)、さらにオゾン破壊物質の多くが非常に強い温室効果ガスでもあり、気候変動とオゾン破壊物質は互いに関連している。CFCの排出を回避できたことが、実際に気候変動の緩和に著しく貢献している(Velders et al. 2007)。

このように様々な大気の諸問題が相互作用し関連していることは、国際的に設定された目標を達成する上で、政策矛盾を回避して恩恵を最大限にし、その進展を好転させるきっかけを提供する。飛躍的な進展をもたらすには、政策決定者が問題の複雑さと共に、科学的知見をもっと効果的に扱うことができるよう、その知見が適切に提示される必要がある。選択肢が分析され、費用対効果が評価され、証拠に基づく政策が展開されるには大幅な改善が求められる。それには科学と政策関係者の間のより密接な意思疎通、利害関係者の参加の増加、能力の増強、技術移転が必要となるだろう。

結論と欠落点と展望

地球規模、大陸域規模、国の規模での大気問題に対する影響への懸念から、国際的に合意された目標やターゲットの達成に、排出量を抑制する相当な努力が為された。いくつかの問題は有効に対処された。その他の問題は、いくつかの地域で改善が見られたが、他に問題が残っており部分的に成功しただけである。

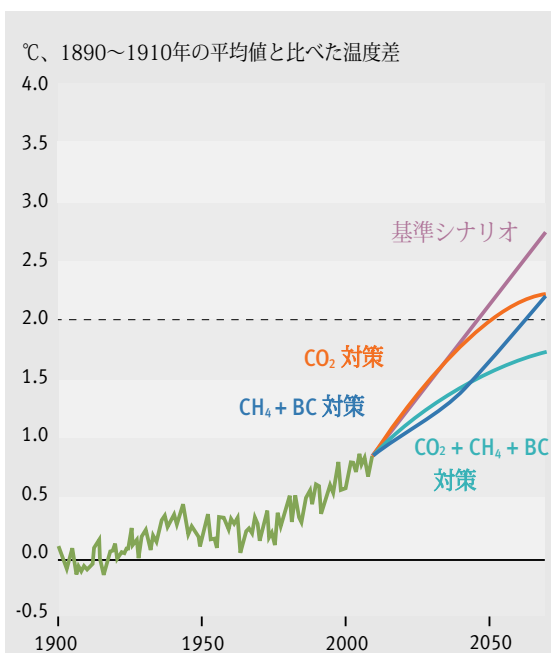
Box 2.8 短期の気候変動を限定的にし大気質を向上させるための相補的な活動

黒色炭素、対流圏オゾン、メタンを対象とする限られた数の対策を実行することで、2050年に向けて予想される世界の温度上昇を0.5°C減少させる可能性があり、それは参照シナリオ中の温暖化のおよそ半分に相当し(図2.24)、次の数十年間の世界の温暖化の速度を大幅に下げる。この減少のうちおよそ半分はメタン排出の削減により、残り半分は、不完全燃焼に対処して黒色炭素の排出削減をターゲットとする対策による。この調査により北極圏で予測される2050年における温暖化の低減幅は、参照シナリオより低い約0.7°Cであり、世界で見られる低減幅より大きくなりそうである(UNEP/WMO 2011)。アジアモンスーンに関するいくつかの詳細な研究によれば、日光を吸収する粒子による地域の放射強制力が降雨パターンを大幅に変化させると示唆されており、地域の気候にとってさらなる

恩恵もたらされる(UNEP/WMO 2011)。黒色炭素の排出削減による大気の放射強制力の減少は、インド亜大陸およびアジアのその他の地域において最大となるので、排出削減がアジアモンスーンにかなりの影響を及ぼし、降雨パターンの崩壊を緩和するかもしれない。

特定された対策を十分に実施することで、大気質が大幅に改善され、屋内および室外の大気汚染が著しく低減されるために早死が世界的に減少し、作物収穫量が向上するだろう。対策を実施することでもたらされるPM2.5と対流圏オゾン濃度の低減によって、2030年までに、240万人の早死(70万~460万人の範囲の死)と、世界で毎年5,200万トンまたは1~4%のトウモロコシ、米、大豆、小麦の生産損失(3,000~14,000万トンの範囲)を回避できるだろう(UNEP/WMO 2011)。

図 2.24 基準シナリオに対して、CO₂、メタン、黒色炭素の排出量を削減する対策を加えた場合に予想される効果



UNEPとWMOが作成した黒色炭素と対流圏オゾンの総合アセスメントにおいて特定された、黒色炭素(BC)とメタン(CH₄)についての対策を、CO₂排出量を削減する対策と一緒に、今開始して2030年まで実施すれば、地球の温度上昇を産業革命前の水準と比べて2°C未満に維持できる可能性が高まるだろう。メタンと黒色炭素についての対策効果の大部分は、2040年までに実現される。グラフの右側の複数の線は、推定値の不確定さを表す。1890~1910年の平均値を基準にして、そこから2010年まで観察された温度差に上記予測が加えられている。

出典: UNEP/WMO 2011

大気汚染から地球の大気を保護するターゲットについては、成層圏オゾン層の破壊とガソリン中の鉛に対するターゲットが達成されつつある。しかし、世界の大半は、政策の実行が不十分であるために、ほとんどの大気質ガイドラインが達成されていない。その間にも、重要な生態系が、臨界閾値を超えた汚染負荷に見舞われつつある。粒子状物質やその他の汚染物質などの大気の問題は、近いうちに、適切な誓約と援助をもって、既存の政策や技術がより広く実行されることによって、効果的に対処されることだろう。

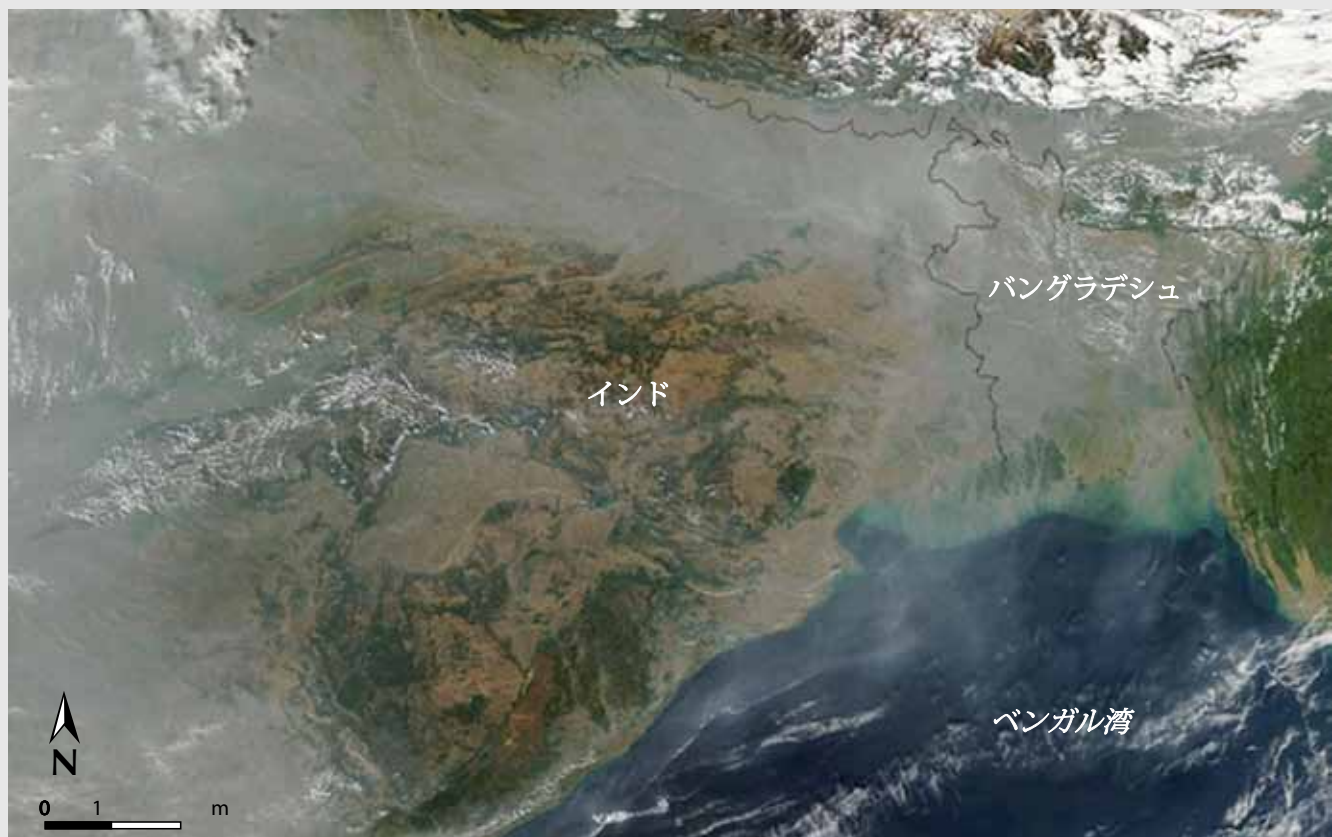
国際的なガバナンスの既存モデルに基づけば、現在の発展軌道は、恐らく国際的に合意された大気目標を達成しそうにない。特に気候変動の緩和、汚染物質による健康影響の削減目標は達成されそうにない。今後短期間にターゲットを達成できる見込みが増大するよう世界的に協働することによって、国や大陸域の規模での注意深く選択されたアプローチが奨励され促進される必要がある。

Box 2.9 大気の色雲

大気の色雲とは、特に南アジアで、褐色を帯びた煙霧が広範囲の層として観察されるもので(図 2.25)、主としてエアロゾルとオゾンを生産する黒色炭素や前駆体ガスから成る大気汚染物質による地域規模の煙霧である。これらの雲は、地域の気候、水の循環、氷河の融解に著しく影響する。その汚染物質は、平原から山に向かう風のシステムが、気団を高地

へと長距離にわたって移送する地域の現象によって、この煙霧はヒマラヤ山脈の尾根に向かって運ばれる傾向がある(Bonasoni et al. 2010)。大気の色雲の広範に広がる性質、それらをもたらす多様な有害な影響についての発見がなされたことによって、統合的な枠組みの中で、科学、対処能力、排出量削減対策、を向上させる必要性が増大した。

図 2.25 南アジアの一部を覆う大気の色雲



出典: NASA-MODIS

気候変動は、国際社会に対して、対策の目標を達成すべき最も難しい課題の一つを提示している。気候変動によってもたらされる深刻な影響は、おそらく現在の排出量削減の誓約に基づいても、回避されることはないだろう。中期的には、進展が得られるかもしれないが、個々の国の状況を考慮に入れながら、国々の誓約をさらに促進させ、現在の技術的かつ政策的なアプローチを広く適用する必要がある。

短寿命気候強制力因子の排出量を削減する対策が、近いうちに温度上昇を低減することに寄与できるかもしれないが、究極的には、消費や生産パターンのシフトと、技術革新への投資に

加えて、エネルギーが提供される仕組みの変革と、電気やその他資源の使用効率の変革が、長期的な気候目標を達成するために必要となるだろう。そのような変革は、他の大気の問題にも影響を与えるだろう。しかし、変革を起こす一方で、現時点で利用可能な対策でもって、直ちに行動を開始すべきである。特に大気の問題と、必要とされる政策が、統合的手法で検討されるならば、そのような行動が著しい恩恵をもたらすことだろう。

表 2.5 は、鍵となる大気の問題に関して、それらの目標とターゲットについての進展の要約と、発展に向けた予測を提供する。

表 2.5 目標に向けた進展 (表2.2を参照)

A: 著しい進展 B: ある程度の進展		C: ほとんど進展はない D: 悪化している		X: 進展を評価するには早すぎ ?: データ不十分	
鍵となる問題と目標	現状と傾向	展望	欠落している点		
1.気候システムに対して危険な人為的介入を及ぼすこととならない水準に、大気温室効果ガス濃度を安定化させる。					
気候変動 地球の平均気温の上昇を産業革命前を基準に2℃未満に制限する。	C CO ₂ とその他の温室効果ガス排出の増大、また濃度の増加。SLCF濃度は高いままで、そのうちいくつかは増加している。温度上昇が、最近の数十年間にわたって世界的、地域的に観察された。	京都ターゲットを達成するための、効率の向上と、ある程度の進展。さらなる誓約や行動が無い場合には2℃限界は破られそうである。	誓約された行動についてのモニタリングと報告を向上させること。開発途上国への財政と技術サポート。気候変動とその他の大気の問題の政策統合。		
2.オゾン破壊物質 (ODS) を廃絶する究極の目的と共に、それらの世界での生産と消費の総計を公平に規制する予防措置をとることにより、オゾン層を保護する。					
成層圏オゾン層の破壊 オゾン破壊物質の消費をゼロにする	A モントリオール議定書の対象にされた物質の生産と消費の削減を約98%達成 (2009年に)。大気濃度は減少しつつある。南極のオゾンホールは安定化。	オゾン破壊物質の大気濃度の継続的な減少。世紀半ばまでにオゾン層の回復。	大気はまだ放出されていない設備、化学的備蓄、ウレタン、その他製品、からのオゾン破壊物質の回収と破壊。		
3.女性と子供に重点を置いて、大気汚染に起因する呼吸器疾患とその他の健康影響を削減する。					
粒子状物質 (都市と屋外) WHOのガイドラインと各国のターゲット	B ヨーロッパと北アメリカの大部分の国々における粒子状物質の屋外濃度は、WHOおよびEUのガイドラインの範囲内にあるか、あるいは接近している。アフリカとアジアの濃度は高いままである。	アフリカとアジアの開発途上国においては、どんなに効率が上昇しても、消費や活動水準の増大によって相殺されるので、進展が遅い。	主として開発途上国のモニタリングと、いくつかの開発途上国においては、粒子状物質に対する基準と、政治的な意志と、問題の認識。		
粒子状物質 (屋内) バイオマスを使用する家庭用料理	C 世界の貧しい農村地域、例えばアフリカとアジアの一部において、より無公害な料理用かまどや燃料を入手できる機会がほとんど無く、屋内の粒子状物質濃度が非常に高い。特に女性と子供に著しい健康影響が及んでいる。	継続的な貧困とその他の障壁が、近代的な燃料に移行することも、改良された炊事設備を使用することも妨げている。	開発途上国におけるモニタリングと、関連する技術。効率の材料用かまどの購入を可能にするメカニズム、制度上での強化、その問題に対処しようという政治的意志。		
対流圏オゾン 健康のためのWHOガイドライン	B 対流圏のピークオゾン濃度は、オゾンのホットスポットを除いて、ヨーロッパと北アメリカにおいて減少している。	ヨーロッパと北アメリカにおけるさらなる削減が、オゾン減少させるだろうが、他の大陸域では前駆物質とオゾンが増大するだろう。	開発途上国におけるオゾンと前駆物質のモニタリングをより多くする。その問題に対する認識。		
4. 国境を越えた大気汚染と酸性降下物を含む大気汚染を軽減化するための、国際レベル、大陸域レベル、国レベルでの協力の強化。					
対流圏オゾン CLRTAP目標	B オゾンのホットスポットを除いて、ヨーロッパと北アメリカで、前駆物質 (窒素酸化物、揮発性有機化合物、メタン、一酸化炭素) の排出量の縮小によりオゾンのピーク濃度が減少している。その他ではピーク濃度が増加している。バックグラウンド濃度は増加している。	いくつかの大陸域における改善が、バックグラウンド・オゾンの増加によって相殺されるであろう。	オゾン前駆物質の排出量を最小化する技術。農村の環境でのモニタリング。様々な前駆物質の排出に対しての様々な部門での政策の実施。地域と異地域間の協力。		
二酸化硫黄 WHOガイドライン CLRTAP排出量ターゲット	B 二酸化硫黄の排出量と濃度は、ヨーロッパと北アメリカで著しく減少した。	全体的な二酸化硫黄排出量は、世界規模での脱硫により減少するだろうが、アジアのいくつかの急速に発展しつつある国で排出量が増加するだろう。	特にアジアでの、さらなる二酸化硫黄排出量の削減。		
窒素 WHOガイドライン CLRTAP排出量ターゲット	B 北アメリカとヨーロッパによる削減が、アフリカ、アジア、中南米でのわずかな増加と相殺されて、二酸化窒素濃度は、地球規模では一定のままであった。	窒素排出が最優先の問題になっていないアフリカ、アジア、中南米では、特に農業と車社会化からくる窒素酸化物とアンモニアの両方の排出量の増加が予想される。	問題の認識と政策的注目。窒素の排出量を最小化する技術改良。すべてからくる窒素の長距離移送とその影響についての理解が為されること。		
5.子供の鉛暴露の防止					
鉛 ガソリン中の鉛の廃絶。	A 6か国を除いて、世界規模でガソリン中の鉛を段階的に無くした。子供における鉛の血中濃度が下がった。	塗料のような他の発生源の鉛に、世界で取り組まなければならない	開発途上国からもたらされる塗料中の鉛に対する政策と研究。		

参考文献

- AEA (2010). *Cost Benefit Analysis for the Revision of the National Emission Ceilings Directive*. http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/pdf/neced_cba.pdf
- Aldy, J.E., Krupnick, A.J., Newell, R.G., Parry, I.W.H. and Pizer, W.A. (2010). Designing Climate Mitigation Policy. *Journal of Economic Literature* 48(4), 903–934
- Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Klimont, Z., Nguyen, B., Posch, M., Rafaj, P., Sandler, R., Schöpp, W., Wagner, F. and Winiwarter, W. (2011). Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: modeling and policy applications. *Environmental Modelling and Software* (in press). doi:10.1016/j.envsoft.2011.07.012
- Anenberg, S.C., Horowitz, L.W., Tong, D.Q. and West, J.J. (2010). An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environmental Health Perspectives* 118(9), 1189–1195
- ASEAN (2002). *ASEAN Agreement on Transboundary Haze Pollution*. http://www.aseansec.org/pdf/agr_haze.pdf
- Ashmore, M.R. (2005). Assessing the future global impact of ozone on vegetation. *Plant, Cell and Environment* 28, 949–964
- Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M. and García-Herrera, R. (2011). The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science* 332(6026), 220–4
- Benedick, R.E. (1998). *Ozone Diplomacy: New Directions in Safeguarding the Planet*. Harvard University Press, Cambridge, MA
- Bleeker, A., Hicks, W.K., Dentener, F., Galloway, J. and Erisman, J.W. (2011). Nitrogen deposition as a threat to the world's protected areas under the Convention on Biological Diversity. *Environmental Pollution* 159, 2280–2288
- Bobbink, R., Hornung, M. and Roelofs, J.G.M. (1998). The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. *Journal of Ecology* 86, 738
- Bonasoni, P., Laj, P., Marinoni, A., Sprenger, M., Angelini, F., Arduini, J., Bonafè, U., Calzolari, F., Colombo, T., Decesari, S., Di Biagio, C., di Sarra, A.G., Evangelisti, F., Duchi, R., Facchini, M.C., Fuzzi, S., Gobbi, G.P., Maione, M., Panday, A., Roccatto, F., Sellegri, K., Venzac, H., Verza, G.P., Villani, P., Vuillemoz, E. and Cristofanelli, P. (2010). Atmospheric brown clouds in the Himalayas: first two years of continuous observations at the Nepal Climate Observatory-Pyramid (5079 m). *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 7515–7531
- Braungart, M., McDonough, W. and Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production* 15(13–14), 1337–1348
- Bridbord, K. and Hanson, D. (2009). A personal perspective on the initial federal health based regulation to remove lead from gasoline. *Environmental Health Perspectives* 117(8), 1195–1201
- Camelley, T. and Le, X.C. (2001). *Correlation Between Chemical Characteristics and Biological Reactivity of Particulate Matter in Ambient Air*. Alberta. <http://environment.gov.ab.ca/info/library/6646.pdf>
- CBD (2010a). *Aichi Biodiversity Targets*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. <http://www.cbd.int/sp/targets/>
- CBD (2010b). *Global Biodiversity Outlook 3*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. <http://www.cbd.int/gbo3/ebook/>
- CDC (2012). *CDC's National Surveillance Data (1997–2009)*. US Centers for Disease Control and Prevention. <http://www.cdc.gov/nceh/lead/data/national.htm>
- CDC (2005). Blood lead levels: United States 1999–2002. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 54(20), 513–516
- CDC (2003). Blood lead levels: United States 1999–2002. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 52(SS-10)
- CDIAC (2010). Carbon Dioxide Information Analysis Center. <http://cdiac.ornl.gov/>
- Chang, Y.-C. and Wang, N. (2010). Environmental regulations and emissions trading in China. *Energy Policy* 38(7), 3356–3364
- COMEAP (2010). *The Mortality Effects of Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution in the United Kingdom*. Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. Health Protection Agency, United Kingdom
- Den Elzen, M. and Höhne, N. (2010). Sharing the reduction effort to limit global warming to 2° C. *Climate Policy* 10, 247–260
- Den Elzen, M. and Höhne, N. (2008). Reductions of greenhouse gas emissions in Annex I and non-Annex I countries for meeting concentration stabilisation targets. *Climatic Change* 91, 249–274
- EC (2011). Eurostat. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tsien110>
- EC (2008). *Directive 2008/50/EC on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe*. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:EN:PDF>
- EEA (2009). *NEC Directive Status Report of 2008*. EEA technical report 11/2009. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/>
- Emberson, L.D., Bükler, P., Ashmore, M.R., Mills, G., Jackson, L., Agrawal, M., Atikuzzaman, M.D., Cinderyb, S., Engardt, M., Jamir, C., Kobayashi, K., Oanh, K., Quadir, Q.F. and Wahid, A. (2009). A comparison of North American and Asian exposure-response data for ozone effects on crop yields. *Atmospheric Environment* 43(12), 1945–1953. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.01.005
- ENA (2011). *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives* (eds. Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., Van Grinsven, H. and Grizzetti, B.). Cambridge University Press. <http://www.nine-esf.org/ENA-Book>
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M. and Van Dorland, R. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L.). Cambridge University Press, Cambridge, and New York
- Fujino, J., Hibino, G., Ehara, T., Matsuoka, Y., Masui, T. and Kainuma, M. (2008). Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050. *Climate Policy* 8, S108–S124
- Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B. and Cosby, B.J. (2003). The nitrogen cascade. *BioScience* 53(4), 341–356
- Gould, E. (2009). Childhood lead poisoning: conservative estimates of the social and economic benefits of lead hazard control. *Environmental Health Perspectives* 117, 1162–1167
- Government of NCT of Delhi (2010). *State of the Environment Report for Delhi, 2010*. <http://www.delhi.gov.in/wps/wcm/connect/9e24b08042c37602aaafaa6c8168d2a2/SoE+Delhi+2010.pdf?MOD=AJPERES&Imod=301990690&CACHEID=9e24b08042c37602aaafaa6c8168d2a2>
- Grosse, S.D., Matte, T.D., Schwartz, J. and Jackson, R.J. (2002). Economic gains resulting from the reduction in children's exposure to lead in the United States. *Environmental Health Perspectives* 110(6), 563–569
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. and Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics* 48, RG4004. doi:10.1029/2010RG000345
- Hare, W.L., Cramer, W., Schaeffer, M., Battaglini, A. and Jaeger, C.C. (2011). Climate hotspots: key vulnerable regions, climate change and limits to warming. *Regional Environmental Change* 11, S1–S13. doi:10.1007/s10113-010-0195-4
- Hicks, W.K., Kuylenstierna, J.C.I., Owen, A., Dentener, F., Seip, H.M. and Rodhe, H. (2008). Soil sensitivity to acidification in Asia: status and prospects. *Ambio* 37, 295–303
- Hilton, F.G. (2006). Poverty and pollution abatement: evidence from lead phase-out. *Ecological Economics* 56(1), 125–131
- HTAP (2010). *Hemispheric Transport of Air Pollution, 2010. Part A: Ozone and Particulate Matter*. Air Pollution Studies No. 17. (eds. Dentener, F., Keating T. and Akimoto, H. Prepared by the Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution (HTAP) acting within the framework of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP) of the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). United Nations, New York and Geneva
- Hulme, M., Osborn, T.J. and Johns, T.C. (1998). Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophysical Research Letters* 25, 3379–3382
- IJC (2010). *US and Canada Air Quality Agreement Progress Report*. International Joint Commission. www.ijc.org
- IMO (2009). *Second IMO GHG Study 2009* (eds. Buhaug, Ø., Corbett, J.J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lee, D., Lindstad, H., Markowska, A.Z., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J., Pålsson, C., Winebrake, J.J., Wu, W., Yoshida, K.). International Maritime Organization, London
- IPCC (2011). Summary for Policymakers. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (eds. Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D., Ebi, K.L., Mastrandrea, M. D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M. and P.M. Midgley). Cambridge University Press, Cambridge and New York
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva
- IPCC (2005). *Carbon Dioxide Capture and Storage* (eds. Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M. and Meyer, L.). IPCC Special Report. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC (2000). Summary for Policymakers: Emissions Scenarios. Special Report of IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>
- Kucera, V., Tidblad, J., Kreislova, K., Knotkova, D., Faller, M., Reiss, D., Snethlage, R., Yates, T., Henriksen, J., Schreiner, M., Melcher, M., Ferm, M., Lefèvre, R.-A. and Kobus J. (2007). UN/ECE ICP materials dose-response functions for the multi-pollutant situation. *Water, Air and Soil Pollution Focus* 7, 249–258. doi:10.1007/s11267-006-9080-z
- Landrigan, P.J., Schechter, C.B., Lipton, J.M., Fahs, M.C. and Schwartz, J. (2002). Environmental pollutants and disease in American children: estimates of morbidity, mortality, and costs

- for lead poisoning, asthma, cancer, and developmental disabilities. *Environmental Health Perspectives* 110(7), 721–728
- Lanphear B.P., Hornung R., Khoury J., Yolton, K., Baghurst, P., Bellinger, D.C., Canfield, R.L., Dietrich, K.N., Bornschein, R., Greene, T., Rothenberg, S.J., Needleman, H.L., Schnaas, L., Wasserman, G., Graziano, J. and Roberts, R. (2005). Low-level environmental lead exposure and children's intellectual function: an international pooled analysis. *Environmental Health Perspectives* 113(7), 894–899
- Lawrence, D.M. and Slater, A.G. (2005). A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophysical Research Letters* 32, L24401. doi:10.1029/2005GL025080
- Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S. and Schellnhuber, H.J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(6), 1786–1793. doi:10.1073/pnas.0705414105
- Levy, M.A., Haas, P.M. and Keohane, R.O. (1993). Improving the effectiveness of international environmental institutions. In *Institutions for the Earth: Sources of Effective International Environmental Protection* (eds. Haas, P.M., Keohane, R.O. and Levy, M.A.). MIT Press, Cambridge, MA
- Liu, J., Mauzerall, D.L., Horowitz, L.W., Ginoux, P. and Fiore, A.M. (2009a). Evaluating intercontinental transport of fine aerosols: (1) Methodology, global aerosol distribution and optical depth. *Atmospheric Environment*. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.03.054
- Liu, J., Mauzerall, D.L. and Horowitz, L.W. (2009b). Evaluating inter-continental transport of fine aerosols: (2) Global health impacts. *Atmospheric Environment*. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.05.032
- Lovei, M. (1998). *Phasing out Lead from Gasoline: Worldwide Experience and Policy Implications*. World Bank, Washington, DC
- Manney, G.L., Santee, M.L., Rex, M., Livesey, N.J., Pitts, M.C., Veefkind, P., Nash, E.R., Wohltmann, I., Lehmann, R., Froidevaux, L., Poole, L.R., Schoeberl, M.R., Haffner, D.P., Davies, J., Dorokhov, V., Gernandt, H., Johnson, B., Kivi, R., Kyrö, E., Larsen, N., Levelt, P.F., Makshtas, A., McElroy, C.T., Nakajima, H., Parrondo, M.C., Tarasick, D.W., von der Gathen, P., Walker, K.A. and Zinoviev, N.S. (2011). Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature* 478, 469–475. doi:10.1038/nature10556
- MARPOL (2011). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. <http://www.imo.org/about/conventions/listofconventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-%28marpol%29.aspx>
- Menz, F.C. and Seip, H.-M. (2004). Acid rain in Europe and the United States: an update. *Environmental Science and Policy* 7(4), 253–265
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. and Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282), 747–756. doi:10.1038/nature08823
- NASA GISS (2011). *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- Nemet, G.F., Holloway, T., and Meier, P. (2010). Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking. *Environmental Research Letters* 5, 014007. doi:10.1088/1748-9326/5/1/014007
- Newman P.A. and McKenzie, R. (2011). UV impacts avoided by the Montreal Protocol. *Photochemical and Photobiological Sciences* 10, 1152–1160, doi:10.1039/c0pp00387e
- Nilsson, J. and Grennfelt, P. (1988). *Critical Loads for Sulphur and Nitrogen*. Nordic Council of Ministers, Copenhagen
- NOAA GMD (2011a). Carbon Cycle Greenhouse Gases Group (CCGG). National Oceanic and Atmospheric Administration Global Monitoring Division (GMD). www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg
- NOAA GMD (2011b). NOAA Ozone Depleting Gas Index. National Oceanic and Atmospheric Administration Global Monitoring Division (GMD). <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/odgi/>
- Nordhaus, W.D. and Boyer, J. (2000). *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. MIT Press
- NSIDC (2011). *NSIDC News*. National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder. <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>
- Peters, G.P., Minx, J.C., Weber, C.L. and Edenhofer, O. (2011a). Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108(21), 8903–8908
- Peters, G.L., Marland, G., Le Quéré, C., Boden, T., Canadell, J.G. and Raupach, M.R. (2011b). Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008–2009 global financial crisis. *Opinion and Comment, Nature Climate Change* 2, 2–4
- Polvani, L.M., Waugh, D.W., Correa, G.J.P. and Son, S.-W. (2011). Stratospheric ozone depletion: the main driver of 20th century atmospheric circulation changes in the southern hemisphere. *Journal of Climate* 24, 795–812
- Rasch, P.J., Crutzen, P.J. and Coleman, D.B. (2008). Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: the role of particle size. *Geophysical Research Letters* 35, L02809
- Raupach, M.R. and Canadell, J.G. (2010). Carbon and the Anthropocene. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2, 210–218
- Raupach, M.R., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J.G., Klepper, G. and Field, C.B. (2007). Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(24), 10288–10293
- Rignot, E.I., Velicogna, M.R., van den Broeke, A., Monaghan, A. and Lenaerts, J. (2011). Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 38, L05503. doi:10.1029/2011GL046583
- RNMI (2010). *Monitoring Atmospheric Composition and Climate – Interim Implementation*. Royal Netherlands Meteorological Institute. http://www.temis.nl/macc/index.php?link=03_msr_intro.html
- Rodhe, H., Langner, J., Gallardo, L. and Kjellstrom, E. (1995). Global scale transport of acidifying pollutants. *Water, Air, Soil Pollution* 85(1), 37–50
- Royal Society (2008). *Ground-level Ozone in the 21st Century: Future Trends, Impacts and Policy Implications*. Science Policy Report. <http://royalsociety.org>
- Schaefer, K., Zhang, T., Bruhwiler, L. and Barrett, A.P. (2011). Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming. *Tellus B* 63(2), 165–180
- Schmid, O., Möller, W., Semmler-Behnke, M., Ferron, G.A., Karg, E., Lipka, J., Schulz, H., Kreyling, W.G., Stoeger, T. (2009). Dosimetry and toxicology of inhaled ultrafine particles. *Biomarkers* 14 Suppl 1:67-73. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19604063>
- Schneider, J.S., Huang, F.N., Vemuri, M.C. (2003). Effects of low-level lead exposure on cell survival and neurite length in primary mesencephalic cultures. *Neurotoxicology and Teratology* 25, 555–555
- Schwartz, J. (1994). Low-level lead exposure and children's IQ: a meta-analysis and search for a threshold. *Environmental Research* 65, 42–55
- Shindell, D., Kuylenstierna, J.C.I., Vignati, E., Van Dingenen, R., Amann, M., Klimont, Z., Anenberg, S.C., Müller, N., Janssens-Maenhout, G., Raes, F., Schwartz, J., Faluvegi, G., Pozzoli, L., Kupiainen, K., Höglund-Isaksson, L., Emberson, L., Streets, D., Ramanathan, V., Hicks, K., Oanh, K., Milly, G., Williams, M., Demkine, V. and Fowler, D. (2012). Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science* 335(6065), 183–189. doi:10.1126/science.1210026
- Shrestha, R.M., Pradhan S. and Liyanage, M. (2008). Effects of a carbon tax on greenhouse gas mitigation in Thailand. *Climate Policy* 8, S140–S155
- Shukla, P.R., Dhar, S. and Diptiranjana, M. (2008). Low-carbon society scenarios for India. *Climate Policy* 8, S156–S176
- Sitch, S., Cox, P.M., Collins, W.J. and Huntingford, C. (2007). Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land carbon sink. *Nature* 448(16), 791–795
- Smith, J.B., Schneider, S.H., Oppenheimer, M., Yohe, G.W., Hare, W., Mastrandrea, M.D., Patwardhan, A., Burton, I., Corfee-Morlot, J., Magaña, C.H.D., Fussler, H.-M., Pittcock, A.B., Rahman, A., Suarez, A. and van Ypersele, J.-P. (2009). Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "reasons for concern". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 4133–4137
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, Cambridge and New York
- Stoddard, J.L., Jeffries, D.S., Lukewille, A., Clair, T.A., Dillon, P.J., Driscoll, C.T., Forsius, M., Johannessen, M., Kahl, J.S., Kellogg, J.H., Kemp, A., Mannio, J., Monteith, D.T., Murdoch, P.S., Patrick, S., Rebsdorf, A., Skjelkvale, B.L., Stainton, M.P., Traaen, T., van Dam, H., Webster, K.E., Wieting, J. and Wilander, A. (1999). Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe. *Nature* 401(6753), 575–578
- Strachan, N., Foxon, T. and Fujino, J. (2008). Policy implications from the Low-Carbon Society (LCS) modelling project. *Climate Policy* 8, S17–S29
- Sunstein, C. (2007). Of Montreal and Kyoto: a tale of two protocols. *Harvard Environmental Law Review* 31(1), 1–66
- Thomas, V.M., Robert, H.S., James, J. and Thomas, G. (1999). Effects of reducing lead in gasoline: an analysis of the international experience. *Environmental Science and Technology* 33(22), 3942–3948
- Tsai, P.L. and Hatfield, T.H. (2011). Global benefits from the phaseout of leaded fuel – going unleaded. *Journal of Environmental Health* 74(5), 8–14
- UN (2000). *Millennium Development Goals*. <http://www.un.org/millenniumgoals/>
- UNCED (1992). *Agenda 21*. <http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/Agenda21.pdf>
- UNDP/WHO (2009). *The Energy Access Situation in Developing Countries: A Review Focusing on the Least Developed Countries (LDCs) and Sub-Saharan Africa (SSA)*. UNDP, New York. http://content.unep.org/go/cms-service/stream/asset/?asset_id=2205620
- UNECE (2005). *The 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone*. Amended 2005. United Nations Economic Commission for Europe. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/full%20text/1999%20Multi.E.Amended.2005.pdf>

- UNECE (1979). *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)*. <http://www.unep.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/full%20text/1979.CLRTAP.e.pdf>
- UNEP (2012). *Reduction in Sulphur in Fuels. Partnership for Clean Fuels and Vehicles*. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://www.unep.org/transport/pcfvc/corecampaigns/campaigns.asp#sulphur> (accessed 23 March 2012)
- UNEP (2011a). *Bridging the Emissions Gap*. United Nations Environment Programme, Nairobi
- UNEP (2011b). *Global Status of Leaded Petrol Phase-Out*. United Nations Environment Programme, Nairobi. http://www.unep.org/transport/PCFV/PDF/MapWorldLead_January2011.pdf and <http://unep.org/transport/pcfvc/PDF/leadprogress.pdf> (accessed 26 May 2011)
- UNEP (2011c). *HFCs: A Critical Link in Protecting Climate and the Ozone Layer*. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://www.unep.org/climatechange/Publications/Publication/tabid/429/language/en-US/Default.aspx?ID=6224>
- UNEP (2010). *Environmental Effects of Ozone Depletion: 2010 Assessment*. United Nations Environment Programme, Nairobi
- UNEP (1987). *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Ozone Secretariat, United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://ozone.unep.org/pdfs/Montreal-Protocol2000.pdf>
- UNEP (1985). *Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer*. Ozone Secretariat, United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://ozone.unep.org/pdfs/viennaconvention2002.pdf>
- UNEP Ozone Secretariat (2011). Data Access Centre. http://ozone.unep.org/new_site/en/ozone_data_tools_access.php
- UNEP/WMO (2011). *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: Summary for Decision Makers*. UNON/Publishing Services Section/Nairobi, ISO 14001:2004. http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/BlackCarbon_SDM.pdf
- UNFCCC (2012) *CDM in Numbers: Registration*. United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://cdm.unfccc.int/Statistics/Registration/RegisteredProjByRegionPieChart.html>
- UNFCCC (2010). *Cancun Agreements*. <http://cancun.unfccc.int>
- UNFCCC (2009). *The Copenhagen Accord*. <http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/l07.pdf>
- UNFCCC (2008). *The Bali Action Plan*. <http://unfccc.int/resource/docs/2007/cop13/eng/06a01.pdf>
- UNFCCC (1998). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- UNFCCC (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62220 (E) 200705. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- USEPA (2010). *Protecting the Ozone Layer Protects Eyesights: A Report on Cataract Incidence in the United States Using the Atmospheric and Health Effects Framework Model*. US Environmental Protection Agency, Washington, DC. <http://www.epa.gov/ozone/science/effects/AHEFCataractReport.pdf>
- USEPA (2008). *National Ambient Air Quality Standards for Lead (Final Rule)*. US Environmental Protection Agency, Washington, DC. <http://www.epa.gov/oaqps001/lead/fr/20081112.pdf>
- Vahlsing, C. and Smith, K.R. (2010). Global review of national ambient air quality standards for PM₁₀ and SO₂ (24h). *Air Quality Atmosphere and Health*. doi:10.1007/s11869-010-0131-2
- Valavanidis, A., Fiotakis, K., Vlachogianni, T. (2008) Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. *J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol Rev* 26(4):339-62 <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19034792>
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C. Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. and Rose, S.K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5–31
- Velders, G.J.M., Andersen, S.O., Daniel, J.S., Fahey, D.W. and McFarland, M. (2007). The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(12), 4814–4819
- Vestreng, V., Ntziachristos, L, Semb, A., Reis, S., Isaksen, I.S.A., and Tarrason, L. (2009). Evolution of NOx emissions in Europe with focus on road transport control measures. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 1503–1520
- WHO (2012). Database: outdoor air pollution in cities. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/en/index.html
- WHO (2011). *Health in the Green Economy: Health Co-benefits of Climate Change Mitigation – Housing Sector*. World Health Organization, Geneva
- WHO (2010). *Childhood Lead Poisoning*. World Health Organization, Geneva. <http://www.who.int/ceh/publications/leadguidance.pdf>
- WHO (2009). *Global Health Risks: Mortality and Burden of Disease Attributable to Selected Major Risks*. World Health Organization, Geneva. http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241563871_eng.pdf
- WHO (2006). *WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide: Global Update 2005*. World Health Organization, Geneva
- WHO (2000). *Air Quality Guidelines for Europe*. Second Edition. WHO Regional Publications European Series No. 91. World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen
- WHO (1999). *Air Quality Guidelines*. World Health Organization, Geneva
- Wilson, N. and Horrocks, J. (2008). Lessons from the removal of lead from gasoline for controlling other environmental pollutants: a case study from New Zealand. *Environmental Health* 7, 1. doi:10.1186/1476-069X-7-1
- WMO (2011). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010*. World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 52. World Meteorological Organization, Geneva
- Wright, R.F., Larssen, T., Camarero, L., Cosby, B.J., Ferrier, R.C., Helliwell, R., Forsius, M., Jenkins, A., Kopacek, J., Majer, V., Moldan, F., Posch, M., Rogora, M. and Schopp, W. (2005). Recovery of acidified European surface waters. *Environmental Science & Technology* 39(3), 64A–72A
- WSSD (2002). *Johannesburg Plan of Implementation*. http://www.un.org/esa/sustdev/documents/WSSD_POI_PD/English/POIToc.htm
- Zhang, Z.X. (2010). *China in the Transition to a Low Carbon Economy*. East-West Centre Working Papers. Economics Series 109
- Zhao, Y., Duan, L., Xing, J., Larssen, T., Nielsen, C.P. and Hao, J.M. (2009). Soil acidification in China: is controlling SO₂ emissions enough? *Environmental Science & Technology* 43(21), 8021–8026