

第 8 章 人為起源及び自然起源の放射強制力

概要

よく混合された温室効果ガス(WMGHGs)^[脚注 1]の人為起源による増加が温室効果を大幅に強化し、その結果生じる放射強制力も増加し続けていることは疑う余地がない。エーロゾルはよく混合された温室効果ガスの放射強制力を部分的に相殺し、また気候変動の人為的要因全体に関する不確実性に強く影響している。

第 5 次評価報告書では、前回までの IPCC 評価報告書と同様に放射強制力¹(RF)という概念を用いているが、同時に実効放射強制力²(ERF)という考え方も導入した。放射強制力の概念は長年用いられており、以前の IPCC 評価報告書においても、地球の放射収支に影響を与え、それによって引き起こされる気候変動の様々なメカニズムの強さを評価・比較するのに利用されている。放射強制力の概念では地上及び対流圏の条件は全て固定されているが、今回提示する実効放射強制力の計算では、海洋と海氷に関するものを除いた全ての物理変数が摂動に応答することを許容している。こうした調節を組み込むことで、実効放射強制力は最終的な温度応答のより良い指標となる。人為起源エーロゾルに対する実効放射強制力と放射強制力の数値は大きく異なるが、これは人為起源エーロゾルが雲と積雪に影響を与えるためである。こうした雲の変化は迅速な調節メカニズムであり、放射強制力に対する海洋の応答(表層に限ってさえ)よりはるかに短い時間スケールで生じる。他の期間が特に明記されていない場合、放射強制力と実効放射強制力は、1750 年から 2011 年の間の工業化時代にわたる推定がなされている。{8.1、Box 8.1、図 8.1}

工業化時代の人為起源放射強制力

工業化時代にわたる人為起源実効放射強制力の合計は、**2.3 [1.1~3.3] Wm⁻²**である³。人為起源実効放射強制力の合計が正であることは確実である。人為起源実効放射強制力の合計は、1970 年以降はそれ以前の数十年間よりも急速に増加した。2011 年の人為起源実効放射強制力の合計は、第 4 次評価報告書での 2005 年の放射強制力の推定値より 43%高い。その理由はエーロゾルによる放射強制力の推定値が減少したことに加え、温室効果ガスによる放射強制力が増加し続けたことにもある。{8.5.1、図 8.15、図 8.16}

濃度の増加により、よく混合された温室効果ガスの放射強制力は、第 4 次評価報告書の 2005 年についての推定値から **0.20 [0.18~0.22] Wm⁻²(8%)**増加した。よく混合された温室効果ガスの放射強制力は 2.83 [2.54~3.12] Wm⁻²となっている。この第 4 次評価報告

書からの変化の大部分は二酸化炭素(CO₂)の放射強制力が 10%近く増加したためである。工業化時代における二酸化炭素単独の放射強制力は 1.82 [1.63~2.01] Wm⁻²であり、構成要素のうち二酸化炭素の世界平均放射強制力は最大となっている。最近の 10 年間では、二酸化炭素の放射強制力の平均増加率は 10 年当たり 0.27 [0.24~0.30] Wm⁻²だった。二酸化炭素の排出は、1960 年代以降の全ての 10 年間において、人為起源放射強制力の増加に最大の寄与をしてきた。よく混合された温室効果ガスの実効放射強制力に対する最良推定値は放射強制力と同じだが、不確実性はより大きい(±20%)。{8.3.2、8.5.2、図 8.6、図 8.18}

二酸化炭素以外のよく混合された温室効果ガスによる正味の放射強制力は、**2005 年についての第 4 次評価報告書での推定以降わずかに増加している**。わずかなメタン濃度の上昇により、その放射強制力は 2%増加して、第 5 次評価報告書における数値は 0.48 [0.43~0.53] Wm⁻²となった。一酸化二窒素(N₂O)の放射強制力は第 4 次評価報告書から 6%増え、現在は 0.17 [0.14~0.20] Wm⁻²となっている。一酸化二窒素濃度が上昇を続ける一方、よく混合された温室効果ガスの中で数十年にわたり放射強制力への寄与度が 3 番目に大きかったジクロロジフルオロメタン(CFC-12)の濃度は、モントリオール議定書とその改正に基づく段階的廃止措置の影響で減少している。2011 年以降、一酸化二窒素はよく混合された温室効果ガスの中で放射強制力への寄与が 3 番目に大きいものとなっている。全てのハロカーボン類による放射強制力(0.36 Wm⁻²)は第 4 次評価報告書の数値とほぼ同程度となっており、クロロフルオロカーボン類(CFCs)の放射強制力は減少したものの、その代替物の多くが増加している。ハロカーボン類のうち 4 つの化合物(トリクロロフルオロメタン(CFC-11)、ジクロロジフルオロメタン、トリクロロトリフルオロエタン(CFC-113)、クロロジフルオロメタン(HCFC-22))がハロカーボンによる放射強制力の合計のうち約 85%を占める。このうち最初の 3 つは最近 5 年間で放射強制力を低下させているが、合計した減少分はクロロジフルオロメタンの放射強制力の増加分によって相殺されている。第 4 次評価報告書以降、全てのハイドロフルオロカーボンによる放射強制力の合計はほぼ 2 倍になったが、それでもまだ 0.02 Wm⁻²にすぎない。全てがよく混合された温室効果ガスによる放射強制力の最近 10 年間の全体的増加率は、二酸化炭素以外による放射強制力の増加率が減少したために、1970 年代及び 1980 年代よりも小さくなっていること**の確信度は高い**⁴。{8.3.2; 図 8.6}

¹ 対流圏界面における正味の downward 放射フラックスの変化。放射平衡に対して再調節する成層圏温度は考慮した上で、地上及び対流圏の温度と状態変数は変化を受けていない数値で固定している。

² 大気の上端(TOA)における正味の downward 放射フラックスの変化。大気温度、水蒸気、雲、陸域アルベドは考慮し調節するが、世界平均地上気温又は海洋及び海氷条件は調節せずに計算する(本章で示す計算は海況固定法(fixed ocean conditions method)を用いている)。

³ 不確実性は強制力の最良推定値に関連して計算されている。不確実性の値は 5~95%(90%)の信頼区間を表している。

オゾンと成層圏水蒸気は、放射強制力にかなり寄与している。モデルで再現したオゾン変化から推算した放射強制力の合計は $0.35 [0.15 \sim 0.55] \text{ Wm}^{-2}$ で、そのうち対流圏オゾンの変化による放射強制力は $0.40 [0.20 \sim 0.60] \text{ Wm}^{-2}$ 、成層圏オゾンの変化によるものは $-0.05 [-0.15 \sim +0.05] \text{ Wm}^{-2}$ となっている。オゾンは直接大気中に排出されるのではなく、光化学反応によって形成される。対流圏オゾン放射強制力は、大部分が人為起源によるメタン (CH_4)、窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、非メタン揮発性有機化合物 (NMVOCs) の排出に起因するが、成層圏オゾン放射強制力は、主としてハロカーボン類によるオゾンの破壊に起因する。排出成分ごとの放射強制力も推定されている。オゾン破壊物質 (ODS) によるオゾン放射強制力は $-0.15 [-0.30 \sim 0.0] \text{ Wm}^{-2}$ であり、その一部は対流圏におけるものである。対流圏オゾン前駆物質によるオゾン放射強制力は $0.50 [0.30 \sim 0.70] \text{ Wm}^{-2}$ で、その一部は成層圏で生じている。この数値は第 4 次評価報告書のものよりも大きい。対流圏オゾンは植物生理に有害な影響を与え、したがって植物の二酸化炭素取り込みにも悪影響を与えることについては **確実な証拠**があるが、この間接的効果による放射強制力の定量的推定についての **確信度は低い**。メタンの酸化によって発生する成層圏水蒸気の放射強制力は $0.07 [0.02 \sim 0.12] \text{ Wm}^{-2}$ である。オゾンと成層圏水蒸気に対する放射強制力の最良推定値はともに、第 4 次評価報告書における範囲と同一であるか、又は整合している。{8.2、8.3.3、図 8.7}

エアロゾルによる放射強制力の大きさは第 4 次評価報告書に比べて減少している。エアロゾル放射相互作用 (エアロゾル直接効果と呼ばれるときもある) に起因する放射強制力の最良推定値は $-0.35 [-0.85 \sim +0.15] \text{ Wm}^{-2}$ 、雪氷上に沈着する黒色炭素 (BC) による放射強制力は $0.04 [0.02 \sim 0.09] \text{ Wm}^{-2}$ となっている。エアロゾル放射相互作用に起因する実効放射強制力は $-0.45 [-0.95 \sim +0.05] \text{ Wm}^{-2}$ である。エアロゾル雲相互作用⁵の合計は、実効放射強制力の概念で定量化され、 $-0.45 [-1.2 \sim 0.0] \text{ Wm}^{-2}$ の推定値となっている。エアロゾル効果の合計 (雪氷上に沈着した黒色炭素を除く) の実効放射強制力は $-0.9 [-1.9 \sim -0.1] \text{ Wm}^{-2}$ と推定されている。エアロゾルの実効放射強制力における大きな不確実性は、工業化時代を通じた正味放射強制力の不確実性の主要な原因となっている。第 4 次評価報告書以降、より多くのエアロゾル過程がモデルに組み込まれるようになっているが、モデルと観測結果の差異は引き

続きなくなっていないため、エアロゾル放射強制力における不確実性は第 4 次評価報告書と同程度になっている。不確実性の幅が大きいにもかかわらず、よく混合された温室効果ガスの世界平均放射強制力の相当な部分をエアロゾルが相殺したことの **確信度は高い**。{8.3.4、8.5.1、図 8.15、図 8.16}

人為起源の土地利用の変化が地表面アルベドを増加させ、 $-0.15 \pm 0.10 \text{ Wm}^{-2}$ の放射強制力をもたらしたことについて **確実な証拠**がある。自然及び人工的な地表面のアルベドや、1750 年以前の土地利用の変化の割合について異なる仮定が用いられているため、推定値にはまだ大きな幅がある。土地利用の変化は、放射過程以外に、特に水循環を通じて地上気温に影響を及ぼす変化をもたらす。これらはより不確実性が高く定量化が難しいが、アルベドの変化の影響を相殺する傾向がある。結果として、土地利用の変化に起因する世界平均地上気温の正味の変化の符号については、**見解の一致度は低い**。{8.3.5}

放射強制力を排出量で評価することで、人間活動をより直接的に放射強制力に結びつけることができる。メタン排出に起因する放射強制力 (およそ 1.0 Wm^{-2}) は、メタン濃度の増加に起因する放射強制力 (およそ 0.5 Wm^{-2}) よりもはるかに大きい **可能性が非常に高い**⁶。というのは、濃度変化が、複数の物質の排出とその後の化学反応による影響を部分的に相殺した結果であるためである。加えて、一酸化炭素の排出が正の放射強制力を持っていたことは **ほぼ確実**である一方、窒素酸化物の排出は地球規模では正味で負の放射強制力を持っていた **可能性が高い**。オゾン層を破壊するハロカーボン類の排出は、それによって誘発した成層圏オゾン破壊による負の放射強制力よりも、ハロカーボン類自体の正の放射強制力のほうが上回るため、正味の正の放射強制力を生じた **可能性が非常に高い**。{8.3.3、8.5.1、図 8.17、FAQ 8.2}

エアロゾル、オゾン、陸域アルベドの変化のような強制力因子は、空間的及び時間的に非常に不均一である。これらの因子の分布は一般に経済発展に追従する。20 世紀初頭の北アメリカ東部とヨーロッパでは強い負のエアロゾル放射強制力が現れ、1980 年までにはそれがアジア、南アメリカ、中央アフリカに拡大した。その後は各種の排出規制によって北アメリカとヨーロッパのエアロゾル汚染は低減したが、アジアの大部分では功を奏していない。オゾンの放射強制力は 20 世紀を通じて増加し続け、その度合いは対流圏の汚染のため北緯 15 度から北

⁴ 本報告書では、利用できる証拠を記述するために、「限られた」、「中程度の」、「確実な」を、見解の一致度を記述するために、「低い」、「中程度の」、「高い」といった用語を用いる。確信度は、「非常に低い」、「低い」、「中程度の」、「高い」、「非常に高い」の 5 段階の表現を用い、「確信度が中程度」のように斜体字で記述する。ある一つの証拠と見解の一致度に対して、異なる確信度が割り当てられることがあるが、証拠と見解の一致度の増加は確信度の増加と相関している (詳細は 1.4 節及び Box TS.1 を参照)。

⁵ エアロゾル雲相互作用は、エアロゾル雲相互作用によって引き起こされたエアロゾルへの迅速な調節メカニズムの部分を表し、ここでは合計エアロゾル実効放射強制力から、エアロゾル放射相互作用起因の実効放射強制力を差し引いたものと定義されている (後者はエアロゾル放射相互作用の放射強制力に対する雲の応答を含む)。

⁶ 本報告書では、成果あるいは結果の可能性の評価を示すために、次の用語が用いられる。「ほぼ確実」: 発生確率が 99~100%、「可能性が非常に高い」: 発生確率が 90~100%、「可能性が高い」: 発生確率が 66~100%、「どちらも同程度」: 発生確率が 33~66%、「可能性が低い」: 発生確率が 0~33%、「可能性が非常に低い」: 発生確率が 0~10%、「ほぼあり得ない」: 発生確率が 0~1%。適切な場合には追加で以下の用語を用いることがある。「可能性が極めて高い」: 発生確率が 95~100%、「どちらかと言えば」: 発生確率が >50~100%、「可能性が極めて低い」: 発生確率が 0~5%。可能性の評価結果は、「可能性が非常に高い」のように斜体字で記述する (詳細は 1.4 節及び Box TS.1 を参照)。

緯 30 度の辺りで最も大きかったが、南極域では 20 世紀後半に成層圏オゾンの損失があったため減少となっている。放射強制力のパターンと空間的勾配は、水循環など気候応答の他の側面と同様に、世界的及び地域的な温度応答に影響を与える。{8.6.2、図 8.25}

自然起源の放射強制力

1978 年から 2011 年にかけての全太陽放射照度(TSI)の変化に関する衛星観測結果は、最近の太陽活動周期の極小値がその前 2 回の太陽活動周期極小値よりも低かったことを示している。このことが、1986 年から 2008 年までの間の小さな負の放射強制力 -0.04 [$-0.08 \sim 0.00$] Wm^{-2} をもたらした **可能性が非常に高い**。1750 年から 2011 年までの期間に対する全太陽放射照度の変化に起因する放射強制力の最良推定値は、 0.05 [~ 0.10] Wm^{-2} である。これは第 4 次評価報告書の推定値よりも相当小さいが、その理由は最近の太陽活動周期を加えたこと、以前の IPCC 評価報告書における太陽放射強制力の推定方法との不一致にある。将来の太陽放射強制力の推定に関する **確信度は非常に低い**が、全太陽放射照度の放射強制力変動は、今後数十年間に予測されている温室効果ガスによる放射強制力の増加よりもはるかに小さくなることの **確信度は高い**。{8.4.1、図 8.10、図 8.11}

火山性エアロゾルの放射強制力はよく理解されており、火山噴火に続く短い期間(およそ 2 年間)に最大になる。1991 年のピナトゥボ山以降に大規模火山噴火は起きていないが、いくつかの小規模な噴火は、2008~2011 年について、1750 年と比べて -0.11 [$-0.15 \sim -0.08$] Wm^{-2} 、1999~2002 年と比べて -0.06 [$-0.08 \sim -0.04$] Wm^{-2} の放射強制力をもたらした。1750 年以降の火山噴火による二酸化炭素放出量は、人為起源の排出量より少なくとも 100 倍少ない。{8.4.2、8.5.2、図 8.12、図 8.13、図 8.18}

工業化時代の自然起源の放射強制力は、大規模な火山噴火に続く短期間を除き、同時期の人為起源の放射強制力に比べて非常に小さいことの確信度は非常に高い。特に、1980 年から 2011 年にかけて人為起源の実効放射強制力は 1.0 [$0.7 \sim 1.3$] Wm^{-2} 増加したのに対し、太陽放射照度と火山性エアロゾルに関する衛星観測から得た **確実な証拠**によれば、自然起源の放射強制力の変化はゼロに近い($-0.1 \sim +0.1$ Wm^{-2})ことが示されている。最近 15 年間の自然起源の放射強制力は、人為起源の放射強制力のかなりの部分(少なくとも 30%)を相殺した **可能性が高い**。{8.5.2; 図 8.18、図 8.19、図 8.20}

将来の人為起源の放射強制力と排出指標

本報告書において考慮している排出シナリオ⁷間における放射強制力の差は、**2030 年においては比較的小さいが、2100 年になると差が大きくなり、それは主に二酸化炭素の違いによる。**シナリオでは、負の合計エアロゾル実効放射強制力が相当低下することを示している。この減少の例外の 1 つが硝酸塩エアロゾルであり、相当な増加を示しており、これらのシナリオに利用可能な数少ないモデルの中で明確な特徴となっている。ただし、この評価報告書で重視しているシナリオは、特に短寿命気候強制因子について、文献における将来の排出量の範囲全てにわたったものではない。{8.2.2、8.5.3、図 8.2、図 8.21、図 8.22}

地球温暖化係数(GWP)や世界気温変化係数(GTP)^[訳注 2]などの排出指標は、様々な物質の排出や、様々な地域/国あるいは発生源/部門からの排出が気候変動に相対的及び絶対的にどう寄与しているのかを定量化して伝えるために利用できる。政策に用いられてきた指標は GWP で、これは二酸化炭素の放射強制力を基準として、一定の対象期間について、ある物質の放射強制力を積算した値である。GTP は、対象となる物質がある時点の世界平均地上気温に与える変化と二酸化炭素の場合との比である。GWP と GTP の両方とも大きな不確実性があり、相対的には GTP の不確実性のほうが大きい。また、間接的な効果やフィードバックの取り扱いについても制約や不一致がある。これらの数値は指標のタイプや対象期間に強く依存する。どの指標や対象期間を選ぶかは、個々の用途や、所与の状況下で気候変動のどの側面が関連すると考えるかによって決まる。指標は政策や目標を定義するのではなく、特定の目標の達成に役立てるために、多数の要素を含む政策の評価と実施を容易にするためのものである。指標の選択は全て、検討対象の効果の種類や、時間に対する効果の重み付けなど、暗黙の価値判断を含んでいる。この評価報告書では、多くの組成に対して GWP 及び GTP の両方について最新値を提供している。{8.7.1、8.7.2、表 8.7、表 8.A.1、補足資料 表 8.SM.16}

放射強制力と温度応答は、社会経済の部門ごとでもその寄与を評価できる。この観点に立って GTP 指標を用いると、エネルギー及び工業部門による現在の 1 年分の世界排出量は、今後約 50 年から 100 年にわたる世界平均地上気温の上昇の最大の寄与因子となる。家庭における化石燃料やバイオ燃料、バイオマスの燃焼、道路交通も、上記の時間スケールにおける温暖化に比較的大きく寄与する一方で、より短期の対象期間(最大 20 年)については、大量のメタンを排出する部門(畜産、廃棄物/埋立て処分、農業)からの現在の排出量も重要である。{8.7.2、図 8.34}

⁷ 本報告書で主に考察しているシナリオは RCP シナリオであり、第 1 章で説明している。

[訳注 1] 本体報告書の表 2.1 に示された温室効果ガスで、京都議定書の削減対象である二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ハロカーボン類及びオゾン層破壊物質であるクロロフルオロカーボン類、ハイドロクロロフルオロカーボン類等を指す。「長寿命の温室効果ガス」とほぼ同義である。

[訳注 2] 原文では“Global Temperature Change Potential”と記されている。二酸化炭素以外の温室効果ガスの排出量を同等な効果をもつ二酸化炭素の排出量に換算する係数の一種で、地上気温の上昇量に基づいて定義される。なお、翻訳時点ではまだ定着した訳語は無い。