

第7章 雲とエアロゾル

概要

変化する地球のエネルギー収支の評価と解釈において、雲とエアロゾルは引き続き最大の不確実性の要因となっている。本章では、過程の理解に焦点を当て、観測、理論、モデルを考察して、雲とエアロゾルが気候変動にどのように寄与し、応答しているのかを評価する。以下の結論が導かれる。

理解の進展

気候モデルによって計算される温暖化した気候のもとの雲量と湿度の変化の多くは、今ではモデルのサブグリッドスケール^{〔訳注〕}の過程には強く依存しないと見られる大規模循環の変化に対する応答として理解されており、こうした変化についての信頼性は増している。例えば、現在では複数の証拠が、上層雲の高度と雲の緯度分布の両方において、循環に起因する変化から正のフィードバックの寄与があることを示している(中程度から高い確信度¹⁾)。とはいえ、雲の応答全体のうちの一部の側面ではモデル間でかなり違いが見られ、その違いは信頼性の低いサブグリッドスケールの過程に強く依存しているように見える。{7.2.4、7.2.5、7.2.6、図 7.11}

第4次評価報告書時点と比較して、気候関連のエアロゾル過程への理解は深まり、気候関連のエアロゾル特性に対する観測も向上している。しかし、関連する過程の表現は地球規模のエアロゾルモデルや気候モデルによって大きく異なっており、その気候への効果をモデル化するためにどの程度の精緻化が必要なのかについては不明なままである。地球全体では、エアロゾルの光学的厚さの20~40%(中程度の確信度)と雲凝結核濃度の4分の1~3分の2(低い確信度)が人為起源由来のものである。{7.3、図 7.12~7.15}

宇宙線は自由対流圏における新しい粒子の形成を強化するが、雲凝結核濃度に対する効果は非常に弱く、太陽活動周期又は過去1世紀の間に検出可能な気候影響はない(中程度の証拠、高い一貫度)。宇宙線と雲量の変化の間に明確な関連性は見いだされていない。そのような関連性が存在する場合には、それを説明するために、宇宙線による新しいエアロゾル粒子の核生成以外のメカニズムが必要となる。{7.4.6}

最近の研究により、強制力(放射収支における瞬間的変化)と迅速な調節メカニズム(大気及び地表面の急速な変化を通じて放射収支を間接的に変更する)をフィードバック(地上気温の変化を介して気候要素が変化することにより効果を及ぼす)と区別することの重要性が明らかになった。さらに、従来の放射強制力(RF)という考え

方と、比較的新しい、迅速な調節メカニズムも含む実効放射強制力(ERF)という考え方も区別することができる。エアロゾルについては、エアロゾル-放射相互作用(ari)とエアロゾル-雲相互作用(aci)から生じる強制過程をさらに区別することができる。{7.1、図 7.1~7.3}

モデルにおける雲と対流の効果の定量化と、エアロゾルと雲の相互作用の定量化は、引き続き難しい課題となっている。気候モデルは第4次評価報告書時点よりも多くの関連過程を組み込んでいるが、こうした過程の表現における信頼性は依然として低い。雲とエアロゾルの特性は、気候モデルの解像度よりも大幅に小さいスケールで変化し、そうしたスケールにおいて雲スケールの過程はエアロゾルに微妙な応答をする。雲及びエアロゾル-雲相互作用のサブグリッドスケールのパラメータ化によってこうした問題に対応できるようになるまでは、エアロゾル-雲相互作用及びその放射効果のモデルでの見積もりには、大きな不確実性が伴うだろう。衛星データによるエアロゾル-雲相互作用の見積もりには、雲に対する気象学的影响の取り扱いと、工業化以前の状況がどのような構成であったかという仮定に依然として敏感である。{7.3、7.4、7.5.3、7.5.4、7.6.4、図 7.8、図 7.12、図 7.16}

降水量と蒸発量は、気候が温暖化すれば平均的には増加することが見込まれるが、二酸化炭素(CO₂)及び温暖化への応答が異なるその他の強制力に対する地球規模・地域規模での調節も受ける。さらに、気候の温暖化に伴い、例えば日別時間スケールに対する極端な降水量が、(より長い)時間平均値よりも速く増加することへの確信度は高い。平均降水量の変化は、対流圏の気温だけでなく、温室効果ガス(GHGs)やエアロゾルの影響を受ける、対流圏における正味の冷却率の変化と整合した状態を保たなければならない。結果的に、地上気温の変化だけに起因する世界平均降水量の増加が気温上昇1°C当たり1.5~3.5%であるのに対し、二酸化炭素又は吸収性エアロゾルに起因する昇温では降水量への気候感度がより小さく、アルベドの増加で部分的に相殺される場合にはさらに小さくなる。海洋における大規模な応答には、「湿潤な場所はより湿潤に(wet-get-wetter)」及び「乾燥した場所はより乾燥する(dry-get-drier)」という部分があるのだが、地表面と大気過程の複雑さゆえに、降水量の変化についての地域的予測における信頼性には限界があり、特に陸域で顕著である。日別及び1日未満での時間スケールにおける局所的極端現象の変化は、下部対流圏の水蒸気濃度に強く影響を受け、平均で昇温1°C当たり約5~10%増加する(中程度の確信度)。エアロゾル-雲相互作用は、個々の低気圧の特性に影響を及ぼし得るが、低気圧や降水強度に対する系統的なエアロゾル効果に関する証拠はさらに限定され、曖昧である。{7.2.4、7.4、7.6、図 7.20、図 7.21}

¹ 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)。

水蒸気、雲、エアロゾルのフィードバック

従来の定義による水蒸気と気温減率の変化を複合した正味のフィードバックは、正である(地球全体の気候変動を増幅する)可能性が極めて高い²。全ての種類の雲に起因する正味の放射フィードバックの符号は、確実性は低くなるが正である可能性が高い。雲フィードバックの符号と大きさについての不確実性は、主に下層雲に対する温暖化の影響に引き続き不確実性があることに起因する。水蒸気フィードバックと気温減率フィードバック³の合計は、昇温 1°C 当たり +1.1 [+0.9~+1.3] Wm⁻²、全ての種類の雲からの雲フィードバックは昇温 1°C 当たり +0.6 [-0.2~+2.0] Wm⁻² と見積もられる。この見積もりの範囲については、気候モデルでは考慮されなかったかもしれない過程に関連する不確実性を追加して考慮しているため、気候モデルで得られる範囲よりも広がっている。気候モデルで得られる平均値と範囲は第4次評価報告書から基本的には変わっていないが、現在ではより強力な間接的観測の証拠と、過程への理解の向上による裏付けがあり、特に水蒸気についてはそうである。下層雲はほとんどのモデルにおいて正のフィードバックに寄与しているが、その挙動はよく理解されておらず、観測によって効果的に制約されてもいないため、我々は現実的であるとの確信をもっていない。{7.2.4、7.2.5、7.2.6、図 7.9~7.11}

エアロゾル-気候フィードバックは、主に自然起源エアロゾルの放出強度の変化や、自然及び人為起源エアロゾルの沈着効率の変化を通じて現れる。数少ないモデル研究の結果では、低い確信度でフィードバック・パラメータはまとめて 1°C 当たり ±0.2 Wm⁻² の範囲内であるとしている。硫化ジメチル排出量の変化に対する雲凝結核数の感度は弱いため、硫化ジメチル-雲凝結核-雲アルベド・フィードバックが弱いことについての確信度は中程度である。{7.3.5}

エアロゾルと雲に起因する気候強制力⁴の定量化

迅速な調節メカニズムを考慮に入れた「エアロゾル-放射相互作用に起因する実効放射強制力」(ERFari)は、-0.45 [-0.95~+0.05] Wm⁻² であると評価されている。それとは別に、雪氷における吸収性エアロゾルによる放射強制力は+0.04 [+0.02~+0.09] Wm⁻² であると評価されている。調節メカニズムを考慮しない「エアロゾル-放射相互作用に起因する放射強制力」(RFari)は-0.35 [-0.85~+0.15] Wm⁻² であると評価される。RFari に対する評価は、エアロゾルによる吸収の効果の再評価したため、第4次評価報告書で報告されたものより負の程度は少ない。モデル、遠隔測定データ、地

上観測から得た複数の証拠に基づくと、不確実性の推定の幅は広がるが、より確実になっている。化石燃料とバイオ燃料からの排出⁵[正誤表参照]は、硫酸塩エアロゾル(-0.4 [-0.6~-0.2] Wm⁻²)、黒色炭素(BC)エアロゾル(+0.4 [+0.05~+0.8] Wm⁻²)、一次及び二次有機エアロゾル(-0.12 [-0.4~+0.1] Wm⁻²)を介して RFari に寄与する。さらに、バイオマス燃焼による排出^[正誤表参照](+0.0 [-0.2~+0.2] Wm⁻²)、硝酸塩エアロゾル(-0.11 [-0.3~-0.03] Wm⁻²)、及び、完全に人為起源ではないかもしれないが鉱物粒子(-0.1 [-0.3~+0.1] Wm⁻²)を介した RFari への寄与も生じる。エアロゾルによる吸収の効果にตอบสนองする雲の迅速な調節メカニズムの存在については確実な証拠があるが、こうした効果は複数あり、気候モデルにおいてうまく表現されていないため、大きな不確実性をもたらしている。前回の IPCC 評価報告書とは異なり、雪氷上の黒色炭素による放射強制力には、海氷上の黒色炭素による効果が含まれたり、より多くの物理的過程が考慮されたり、あるいは、モデルと観測の両方から得られた証拠が組み込まれたりしている。この放射強制力による単位強制力当たりの世界平均地上気温の変化は、二酸化炭素の場合の変化に比べて 2~4 倍大きい。{7.3.4、7.5.2、図 7.17、図 7.18}

「エアロゾルに起因する合計実効放射強制力」(ERFari+aci、雪氷上の吸収性エアロゾルの効果を除く)は、中程度の確信度により-0.9 [-1.9~-0.1] Wm⁻² であると評価されている。ERFari+aci の推定には、雲寿命の変化や混合相雲、氷雲、対流雲へのエアロゾル微物理効果などの迅速な調節メカニズムを含んでいる。この推定値の範囲は、水雲に加えて混合相雲と対流雲に対するエアロゾル効果を含んだ気候モデル、衛星を用いた研究、及び雲規模での応答を許容したモデルを参考にした専門家の判断により得られたものである。この強制力は、地域的にははるかに大きくなり得るが、世界平均値としては、エアロゾル-雲相互作用に起因する実効放射強制力の推定値が第4次評価報告書のものよりも負の程度が少ないことを示唆する新たな複数の証拠と整合している。{7.4、7.5.3、7.5.4、図 7.19}

2011 年において、持続性の飛行機雲が寄与した放射強制力は+0.01 [+0.005~+0.03] Wm⁻²、飛行機雲と飛行機雲から広がった巻雲を合わせた実効放射強制力は+0.05 [+0.02~+0.15] Wm⁻² であると評価されている。地域的にはこの強制力の値よりもはるかに大きくなり得るが、この強制力により地上気温の平均値及び日較差において観測可能な地域的影響は生じていないことについて、今では中程度の確信度がある。{7.2.7}

² 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)。

³ 特に明記しない限り、これ以降この形式で示す範囲は 90%の不確実性の範囲である。

⁴ 特に明記しない限り、全ての気候強制力(放射強制力及び実効放射強制力)は人為起源であり、1750~2010 年に関するものである。

⁵ バイオマス燃焼からの排出による RFari は、黒色炭素による正の RFari と、有機炭素による負の RFari で構成されている。【正誤表参照】

太陽放射管理手法を用いたジオエンジニアリング

理論上やモデル研究、観測結果によれば、もし実現可能であれば、太陽放射管理(SRM)手法は世界全体の気温上昇をかなりの程度相殺し、地球温暖化のその他の影響を部分的に相殺することが示唆されるが、温室効果ガスによって引き起こされる気候変動を補正するかどうかは不明確である(高い確信度)。SRM 手法は実施も試験も行われていない。SRM は強制力に対するより一般的な気候の応答の仕方についての理解を利用するが、SRM に関する研究はまだ初期の段階にある。多くの SRM 戦略の有効性について評価が行われており、成層圏エアロゾル SRM は温室効果ガスの増加による放射強制力に対して少なくとも約 4 Wm^{-2} まで相殺するよう大きさを変えられることの確信度は中程度だが、エアロゾル前駆物質の必要注入量は非常に不確実なままである。雲増光による SRM から同様に大きな放射強制力が得られるかどうかについては、エアロゾル-雲相互作用の理解と表現における不確実性のせいで合意は得られていない。陸域アルベドを変化させる SRM が、大きな放射強制力を生み出せるとは思われない。他の SRM 手法については文献が限られているため、評価は行われていない。モデルの結果は一貫して、温室効果ガス濃度が上昇してなおかつ SRM を利用しない世界に比べて、SRM を利用すれば気候の変化を概して低減することを示唆しているが、温室効果ガスの上昇がない場合の気候に比べると、気候における地域差が残存する(気温や降雨など)ことも示唆している。{7.4.3、7.7}

SRM については多数の副作用、リスク、欠点が見出されている。複数の証拠によれば、世界地上気温が維持された場合には、SRM は世界平均降水量に対して、小さいが有意な減少をもたらす(地域規模では差は大きくなる)ことが示されている。いくつかの副作用も特定されている。比較的良好特徴付けられている副作用は、成層圏エアロゾル SRM に関連して軽度な極成層圏オゾンの破壊が生じる可能性である。この他にもまだ予見されていない影響が起こる可能性もある。温室効果ガス濃度が増加し続ける限り、SRM も相応の増加が必要となり、副作用を悪化させることになる。さらに、SRM をかなりの水準までスケールアップすると、SRM が何らかの理由で終了になった場合に、地上気温が温室効果ガス強制力と整合する数値まで急上昇(10年から20年以内に)する確信度は高く、気候変動速度に敏感なシステムにストレスを与えることになるというリスクが伴う。最後に、SRM は二酸化炭素の増加による海洋酸性化は相殺しない。{7.6.3、7.7、図 7.22~7.24}

【訳注】サブグリッドスケール: モデルで使用する格子間隔よりも小さなスケールのこと。