

第2章 大気成分と放射強制力の変化

概要

放射強制力¹は、気候変化を引き起こすさまざまな人為起源及び自然起源の因子の強度を、定量的に比較するための概念である。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第1作業部会による第3次評価報告書（IPCC,2001）（以下、「第3次評価報告書」という）以降の気候モデルによる研究では、ある放射強制力に対する平衡世界平均気温の応答が、ほとんどの気候変動の駆動源に対してほとんど同じ（25%以内）であることを中程度の信頼性で示している。

すべての人為起源の因子を合わせた放射強制力が得られたのは、これが初めてである。おのおのの物質の排出と関連付けた個別の放射強制力も初めて見積もられる。

人為起源の放射強制力は合計で $+1.6[-1.0,+0.8]^2$ W/m²と見積もられている。これは、1750年以降、人類が気候に対して、かなりの温暖化影響を及ぼしている可能性が極めて高い³ことを示している。人為起源の放射強制力についてのこの推定値は、太陽放射の変化によるものより、少なくとも5倍より大きい可能性が高い。1950～2005年の間、自然起源の放射強制力の合計（太陽放射と火山性エアロゾル）の温暖化への影響が、人為起源の放射強制力と同程度であることはほとんどあり得ない。

長寿命の温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ハロカーボン類及び六フッ化硫黄）濃度の増加による放射強制力は、全体で $+2.63[\pm 0.26]$ W/m²である。この放射強制力についての科学的理解度⁴は高い。第3次評価報告書に比べて放射強制力が9%増加して

¹ 放射強制力は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第1作業部会第3次評価報告書（IPCC,2001）で定義されているように、対流圏界面における、成層圏の調節を経た放射フラックスの変化量として定義されている。正の放射強制力は地球全体で平均して地表の温暖化を、負の放射強制力は地球全体で平均して地表の寒冷化をもたらす。しかしながら、放射強制力は、気候応答の詳細な側面の指標として企図されたものではない。ここでは、特記がない限り、放射強制力は地球全体で平均された値とする。放射強制力は、排出量の変化、濃度の変化、観測、気候変化の駆動要因に関するその他の知識から、因子ごとにさまざまな方法で計算される。本報告書では、特記がない限り、各因子による放射強制力を、現在（およそ2005年）と工業化時代の開始（およそ1750年）の差として記述しており、その単位はW/m²である。

² 信頼度90%の範囲を角括弧内に示している。信頼度90%の範囲が、最適な推定値から非対称であった場合、 $A[-X,+Y]$ と表記しており、これは範囲の下限が $(A-X)$ で、上限が $(A+Y)$ ということである。

³ 「可能性が極めて高い」という表現は、本文書で比較のため使用している表現の例で、信頼度が95%以上で使用している。他の例として「可能性が高い」（信頼度が66%）がある。

⁴ 放射強制力の見積りには、不確実性の範囲（量的不確実性）と科学的理解度の水準（構造的な不確実性）が伴う。量的不確実性は、過去に発表された研究を基に信頼度が5～95（90）%の範囲で表現されている。科学的理解度の水準は構造的な不確実性の主観的な尺度であり、関係する諸過程がどれだけ理解されているかを表現している。科学的理解度の水準が高い気候変化の因子は、放射強制力がそれぞれの不確実性の範囲内であると期待される（詳細については、2.9.1及びTS.1の不確実性に関する表を参照）。

いるのは、1998年以降の濃度変化の結果である。

- 2005年の世界平均の二酸化炭素濃度は379ppmであり、その放射強制力は $+1.66[\pm 0.17]$ W/m²であった。現在の放射強制力の約4分の3が過去の化石燃料やセメント生産に起因する排出が原因で、残りの4分の1が土地利用の変化が原因である可能性が高い。1995～2005年の10年間の大気中二酸化炭素濃度の年増加率は1.9ppmであり、二酸化炭素による放射強制力は20%増加した。これは少なくとも過去200年間のどの10年間で観測もしくは推測された中で、最も大きな変化である。1999～2005年で、化石燃料及びセメント生産からの世界的な排出は、およそ年3%の割合で増加している。
- 2005年の世界平均のメタン濃度は1774ppbであり、その放射強制力は $+0.48[\pm 0.05]$ W/m²であった。過去20年間にわたって大気中メタン濃度の増加率は、総じて減少している。この理由はよく理解されていないが、このメタン増加率が減少していることとメタンの主な消滅源(OH)に長期変動がほとんどないことは、メタンの総排出量が増加していないことを示唆している。
- モントリール議定書で規制されているガス(CFC類、HCFC類及びクロロカーボン類)による2005年の放射強制力は全体で $+0.32[\pm 0.03]$ W/m²であった。これらによる放射強制力は2003年が極大で、現在は減少し始めている。
- 一酸化二窒素(N₂O)濃度はほぼ直線的に増加し続けている(0.26%/年)。2005年の世界平均濃度は319ppbであり、その放射強制力は $+0.16[\pm 0.02]$ W/m²であった。最近の研究は、観測された空間的な濃度勾配に熱帯域からの排出が大きな役割を果たしていることを裏付けている。
- 京都議定書で削減対象となっているフッ素含有ガス(ハイドロフルオロカーボン類、パーフルオロカーボン類、六フッ化硫黄)の多くは、1998～2005年の間に高い割合(1.3～4.3倍)で濃度が増加した。2005年のこれらによる放射強制力の合計は $+0.017[\pm 0.002]$ W/m²であり、およそ年10%の割合で急速に増加している。
- 反応ガスであるOHは、メタン、HFC類、HCFC類及びオゾンの寿命や放射強制力に影響する主要な化学種である。OHはまた、硫酸塩、硝酸塩やその他の有機エアロゾルの形成についても、重要な役割を果たしている。世界平均OH濃度の推定によると、1979～2004年の間に正味の変化は検出されていない。

第3次評価報告書のときに利用できたモデルより、新しく、改良された化学輸送モデルによると、対流圏オゾンの増加による放射強制力は $+0.35[-0.1,+0.3]$ W/m²と見積もられており、その科学的理解度は中程度である。低緯度では対流圏オゾンの有意な増加傾向が現れている。

1980年代から1990年代にかけて観測された、成層圏オゾンの極めて大きな減少はもはや起こっていない。しかしながら、最近の変化がオゾンの回復の兆しかどうかは、まだはっきりしない。放射強制力は、モントリオール議定書で規制されたガスによる成層圏オゾンの破壊が主要因であり、 $-0.05[\pm 0.10]$ W/m²と再評価された。その科学的理解度は中程度である。

化学輸送モデルを用いた研究によると、メタンの酸化から生じる成層圏水蒸気の増加による放射強制力は、 $+0.07[\pm 0.05]$ W/m²と見積もられているが、その科学的理解度は低い。放射強制力に影響する水蒸気量の増加を引き起こす恐れのあるその他の人為的要因については、よく分かっていない。

モデルや観測から得られた、エアロゾルの直接効果による放射強制力の合計は $-0.5[\pm 0.4]$ W/m²と見積もられているが、その科学的理解度はやや低い。水雲の中の雲のアルベド効果（エアロゾルの第一間接効果またはTwomey効果とも呼ばれている）による放射強制力は $-0.7[-1.1,+0.4]$ W/m²と見積もられているが、その科学的理解度は低い。

- ・ 大気モデルは向上しており、現在では多くのモデルがすべての主なエアロゾルを取り扱っている。現場観測、衛星観測、地上観測が改善されたことによって全球エアロゾルモデルの検証が可能になった。エアロゾル直接効果の放射強制力の合計の、最良の推定と不確かさの幅は、モデル研究と観測を合わせた結果に基づいている。
- ・ 個々のエアロゾル種による直接の放射強制力は、エアロゾルによる直接効果の放射強制力の合計ほどはよく分かっていない。硫酸塩は $-0.4[\pm 0.2]$ W/m²、化石燃料起源の有機炭素は $-0.05[\pm 0.05]$ W/m²、化石燃料起源の黒色炭素は $+0.2[\pm 0.15]$ W/m²、バイオマス燃焼は $+0.03[\pm 0.12]$ W/m²、硝酸塩は $-0.1[\pm 0.1]$ W/m²、鉱物粒子は $-0.1[\pm 0.2]$ W/m²と見積もられている。バイオマス燃焼に関する推定値は、エアロゾルを覆う雲の影響を強く受ける。硝酸塩と鉱物粒子に最良の推定値が与えられたのはこれが初めてである。
- ・ より多くのエアロゾル種の導入とエアロゾル - 雲相互作用の扱いの改善により、雲

アルベド効果の最良の推定が可能となっている。しかしながら、まだ大きな不確実性が残っている。より多種のエロゾルを取り扱っているモデルや、衛星観測データによって束縛されたモデルは、比較的小さい放射強制力を算出する傾向にある。また、エロゾル-雲相互作用に関する他の効果（例えば、雲の寿命、準直接効果）は放射強制力として考慮されていない（第7章参照）。

主に正味の森林破壊による土地被覆の変化は、地表アルベドの上昇により、 $-0.2[\pm 0.2]$ W/m^2 の放射強制力をもたらした。その科学的理解度はやや低い。雪に付着した黒色炭素エロゾルは地表アルベドを減少させ、 $+0.1[\pm 0.1]$ W/m^2 の放射強制力をもたらしたが、その科学的理解度は低い。その他の地表特性の変化も、放射強制力による定量化ができないようなさまざまな過程を通して気候へ影響を与えるが、それらの科学的理解度は非常に低い。

持続する線状の飛行機雲による放射強制力は $+0.01[-0.007, +0.02]$ W/m^2 であるが、その科学的理解度は低い。最良の推定は第3次評価報告書の値よりも小さくなっている。広がった飛行機雲からの正味の放射強制力やそれらの飛行機雲が巻雲の雲量に与える影響の最良の推定値はない。

1750年以降の太陽放射の増加による直接的な放射強制力は $+0.12[-0.06, +0.18]$ W/m^2 と見積もられているが、その科学的理解度は低い。この値は第3次評価報告書の値の半分以下である。

- 放射強制力がこのように小さくなったのは、太陽放射の長期変動を再評価したことによる。つまり、マウンダー極小期から現在までの太陽放射の増加量が従来の推定よりも小さくなった。しかしながら、放射強制力の不確実性は大きいままである。過去30年間の宇宙からの観測によって、太陽放射の総量が、極小値の有意な変化傾向なしに0.08%の幅（周期の最小値から最大値までの値）で変動していることが明らかになった。
- 11年周期で変化する紫外域日射による世界平均のオゾン全量の変化（数%程度）の理解は進んでいるが、オゾンの鉛直分布の変化はそれに比べてよく分かっていない。宇宙線による大気のイオン化の太陽活動による変動と、世界平均雲量の低下の間の経験的な関係についてはあいまいなままである。

2005年の世界全体の成層圏エロゾル濃度は、1980年前後に始まった衛星による観測開始以来最も低かった。これは、1991年のピナトゥボ火山の噴火以降、大きな火山の爆発

的噴火がないためと考えられる。このような突発的な火山活動から発生したエアロゾルは、一時的に負の放射強制力をもたらすが、ピナトゥボ火山以前の火山噴火による放射強制力に関する知識は限られている。

比較的信頼性が高い長寿命の温室効果ガスと比べて、それ以外のオゾン、エアロゾルの直接効果、雲のアルベド効果及び土地利用の変化による放射強制力の空間分布にはかなりの不確実性がある。南半球の正味の放射強制力はエアロゾルの寄与が小さいため、北半球より大きい可能性が非常に高い。放射強制力の空間分布は、気候応答の分布を示しているわけではない。

世界平均の地表面強制力⁵の合計は負である可能性が非常に高い。成層圏及び対流圏エアロゾルの増加は、地表面での短波放射フラックスを減少させることにより、地表面強制力に対して主に負の効果を与える。これは、正の人為起源の放射強制力に主に寄与する長寿命の温室効果ガスの増加と対照的である。

よくある質問と回答

FAQ2.1: 人間活動はどのように気候変化に寄与するのか、またそれをどのように自然の影響と比較するのか?

人間活動は、温室効果ガス、エアロゾル（微粒子）や雲の量の変化を通じて大気を変化させることにより、気候変化に寄与する。最も良く知られている寄与は、大気中に二酸化炭素を排出する、化石燃料の燃焼である。温室効果ガスやエアロゾルは、地球のエネルギーバランスの一部を担っている、入射する太陽放射と外向きの赤外（熱）放射を変えることで気候に影響を及ぼす。これらの気体や微粒子の大気中の量や性質が変わることにより、気候システムは温暖化したり寒冷化したりし得る。工業化時代の開始（1750年頃）以来、人間活動が気候に及ぼした総合的な効果は温暖化の方向に効いている。この期間の気候に関する人類の影響は、太陽放射の変化や火山噴火のような自然な過程による変化として知られているものをはるかに超えている。

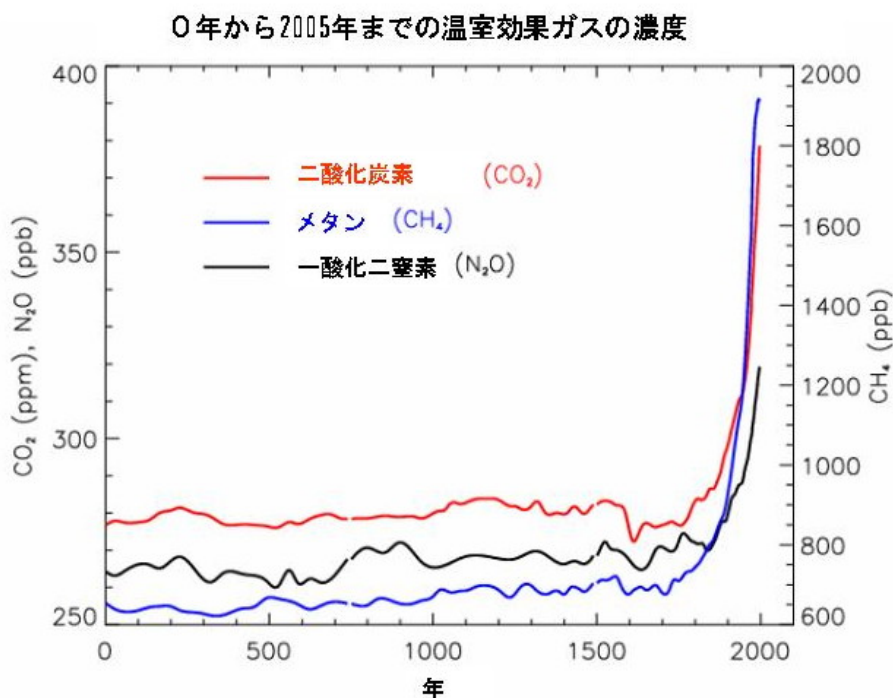
温室効果ガス

人間活動の結果として、四つの主要な温室効果ガス：二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ハロカーボン類（フッ素、塩素、臭素を含む気体のグループ）が排出されている。これらの気体は大気中に蓄積し、時が経つにつれて濃度が増加している。これらの気体はど

⁵ 地表面強制力は地表面における瞬間的な放射フラックスの変化量であり、熱と水分の地表面での収支の変化を診断する便利な手段である。しかしながら、放射強制力とは異なり、地表面強制力では、平衡世界平均地上気温の変化をもたらすさまざまな因子の効果の定量的な比較はできない。

れも、工業化時代に入ってから著しく増加した（FAQ2.1 図1 参照）。これら増加のすべては人間活動に原因を求めることができる。

- 二酸化炭素は、運輸、建物の冷暖房、セメント等の製造における化石燃料使用により増加してきた。森林破壊は二酸化炭素を排出し、植物による二酸化炭素吸収を減らした。二酸化炭素は植物の腐敗などの自然の過程でも排出される。
- メタンは、農業、天然ガスの輸送、ごみの埋め立てに関連した人間活動の結果として増加してきた。また、メタンは、例えば湿地において起こるような自然の過程でも排出される。メタン濃度は、この20年間にわたり濃度増加率が減少したので、現在は増加していない。
- 一酸化二窒素もまた、肥料の使用や化石燃料燃焼のような人間活動により排出される。土壌と海洋における自然の過程もまた一酸化二窒素を排出する。



FAQ2.1 図1 過去2000年間の重要な長寿命温室効果ガスの大気中濃度。1750年頃からの増加は工業化時代の人間活動に起因する。濃度の単位は100万分の1 (ppm) あるいは10億分の1 (ppb) で、大気分子それぞれ百万個あるいは十億個中の温室効果ガスの分子数を表す。(データは本報告書の6章と2章から結合され簡略化されている)。

- ・ ハロカーボンガスの濃度は主に人間活動が原因で増加してきた。小さいながら自然起源の排出源もある。主要なハロカーボンにはクロロフルオロカーボン（例えば CFC-11、CFC-12）が含まれる。クロロフルオロカーボンは、大気中にあることで、成層圏オゾン破壊の原因となることが明らかになる以前は、冷媒として、また他の工業過程において広く使われた。オゾン層保護を目指した国際規制の結果、クロロフルオロカーボンガスの量は減少しつつある。
- ・ オゾンは大気中の化学反応により連続的に生成、破壊される温室効果ガスである。対流圏では、化学反応によりオゾンを生成する、一酸化炭素、炭化水素、窒素酸化物のような気体の排出を通じて、人間活動はオゾンを増加させてきた。前述の通り、人間活動により排出されたハロカーボンは、成層圏においてオゾンを破壊し、南極上空でオゾンホールを引き起こしている。
- ・ 水蒸気は大気中で最も量が多く重要な温室効果ガスである。しかしながら、人間活動は、大気中の水蒸気量に対して、わずかな直接的影響を持つに過ぎない。間接的には、人類は、気候を変化させることにより、水蒸気に大きな影響を及ぼす可能性がある。例えば、暖かい大気はより多くの水蒸気を含む。また、メタンは成層圏において化学反応で消滅し少量の水蒸気を生成するため、人間活動はメタン排出を通じて水蒸気に影響を及ぼす。
- ・ エ어로ゾルは、大きさ、濃度、化学成分ともさまざまな大気中の微粒子である。エアロゾルには、直接大気に排出されるものと、排出された化合物から生成されるものがある。エアロゾルは自然起源の化合物と人間活動の結果として排出された化合物の両方を含む。化石燃料燃焼やバイオマス燃焼は、硫黄化合物や有機化合物、黒色炭素（すす）を含むエアロゾルを増加させてきた。露天掘りや工業過程のような人間活動は大気中のダストを増加させてきた。自然起源エアロゾルには、地表面から排出される鉱物ダスト、海塩エアロゾル、陸地や海洋から排出される生物起源のもの、火山噴火による硫酸塩やダストエアロゾルを含む。

人間活動により影響を受けた要因の放射強制力

人間活動により影響を受けた幾つかの要因の放射強制力の寄与を **FAQ2.1 図 2** に示す。値は工業化時代の開始（1750 年頃）に対する強制力の合計を反映している。すべての温室効果ガス増加による強制力は、人間活動に起因する強制力の中で最もよく理解されており、この放射強制力は、個々の気体は大気中の外向き赤外放射を吸収するため、正の値をとる。温室効果ガスの中で、二酸化炭素の増加は、この期間の最も大きい強制力を引き起こしてきた。対流圏オゾン増加もまた温暖化に寄与してきたが、成層圏オゾンの減少は、寒冷化

に寄与してきた。

エアロゾル粒子は、大気中の太陽放射と赤外放射の反射と吸収を通じて、直接的に放射強制力に影響する。エアロゾルによっては正の強制力をもたらすものも、負の強制力をもたらすものもある。すべての種類のエアロゾルの直接的な放射強制力を合わせると負の値となる。エアロゾルはまた、雲の特性を変化させて、間接的に負の放射強制力を引き起こす。

== 【FAQ2.1、BOX1】 ==

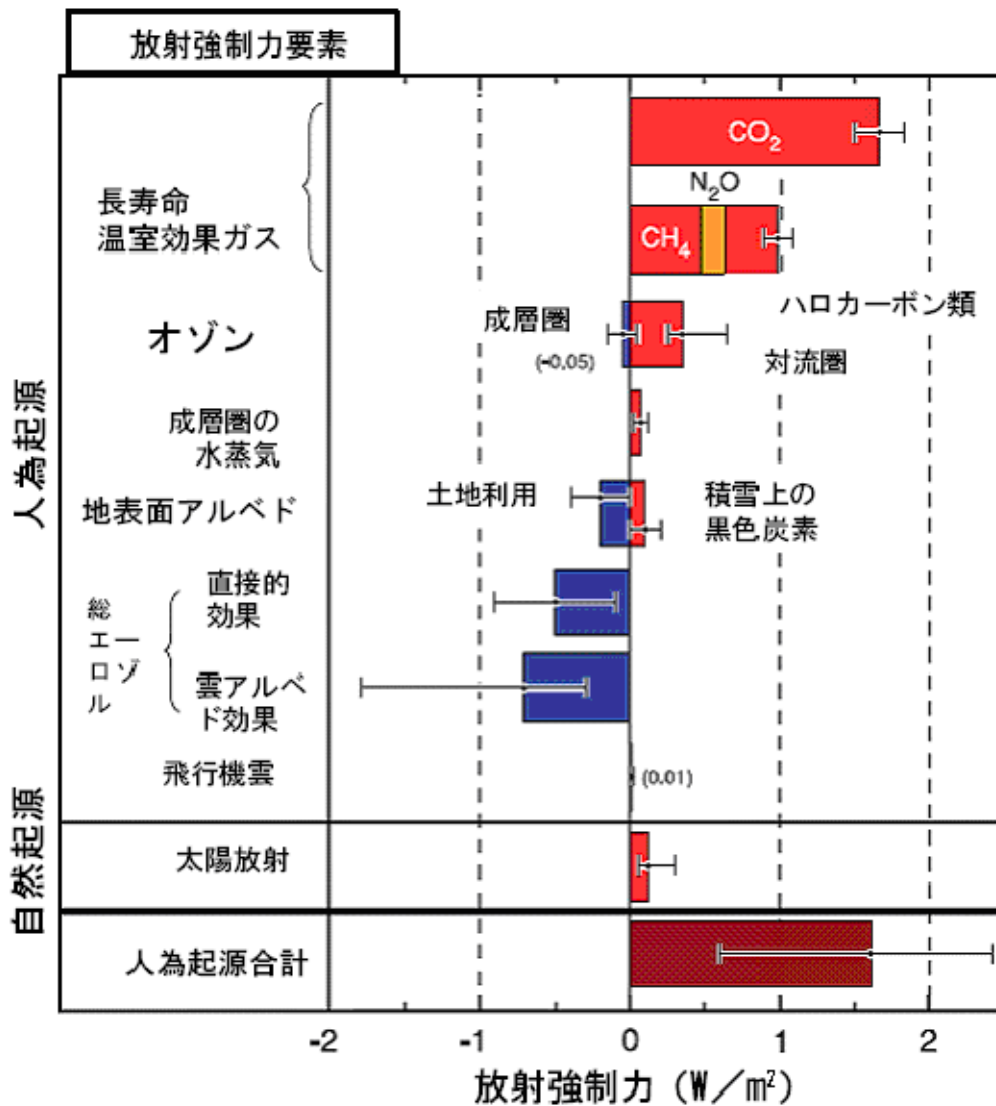
放射強制力とは？

温室効果ガスのような気候変化を引き起こす要因の影響は、しばしばその放射強制力として評価される。放射強制力とは、気候に影響を及ぼす要因が変化したときに、地球-大気システムのエネルギーバランスがどのように影響を受けるかを測る尺度である。「放射」という語が入るのは、これらの要因が、入射する太陽放射と、地球大気内の外向き赤外放射の間のバランスを変化させるからである。この放射バランスが地球の地上気温を制御する。

「強制力」という語は、地球の放射バランスがこれにより通常からずれた状態に押しやられていることを示すために用いられる。

放射強制力は通常、「大気上端で測った地球の単位面積当たりのエネルギー変化率」として定量化され、「W/m²」で表される（FAQ2.1 図2 参照）。ある要因や要因グループの放射強制力が正と評価されたならば、地球-大気システムのエネルギーは最終的に増加し、このシステムの温暖化をもたらす。対照的に、負の放射強制力は最終的にエネルギーを減少させ、システムの寒冷化をもたらす。気候研究者にとって重要な課題は、気候に影響を及ぼすすべての要因と強制力として働くメカニズムを明確にし、各要因の放射強制力を定量化し、要因グループからの総放射強制力を評価することである。

1750年から2005年にかけての気候の放射強制力



FAQ2.1 図2 気候変動の放射強制力の主要要素。文中に示すように、これらの放射強制力はすべて人間活動または自然要因に伴う気候に影響を及ぼす一つまたは複数の因子の結果である。これらの値は、工業化時代の始まり（1750年頃）を基準とした、2005年の強制力を示している。人間活動は、長寿命ガス、オゾン、水蒸気、地上アルベド、エアロゾル及び飛行機雲にかなりの変化をもたらす。1750年から2005年にかけての自然起源の強制力で増加したのは、太陽放射だけである。正（負）の強制力は気候を温暖化（寒冷化）させる。おのおのの色つきの棒グラフについての細い黒線は、個々の値の不確実性の範囲を示す（本報告書図2.20を転載）

工業化時代以降の人間活動は、主に耕作地、牧場、森林の変化を通して、地球上の土地被覆の性質を変えてきた。また人間活動は、雪氷の反射特性も変えてきた。全体として、人間活動の結果、現在では、より多くの太陽放射が地球表面から反射されている *可能性が高い*。この変化は負の放射強制力となる。

航空機は十分低温で高湿度の領域で、持続する線状の凝結の軌跡（飛行機雲）を生成する。飛行機雲は、太陽放射を反射し赤外放射を吸収する巻雲の一つの形状である。全世界の航空機の運航による線状の飛行機雲は、地球の雲量を増加させており、小さい正の放射強制力を引き起こすと推定されている。

自然変化による放射強制力

自然の強制力は、太陽の変化と爆発的な火山噴火により生起する。太陽放射量は、工業化時代に徐々に増加し、小さい正の放射強制力を引き起こした（FAQ2.1 図 2 参照）。これは、太陽放射の 11 年周期の変化に追加されるものである。太陽エネルギーは、気候システムを直接加熱するばかりでなく、成層圏オゾンのような幾つかの大気中の温室効果ガスの量に影響を及ぼすことができる。爆発的な火山噴火は、成層圏中の硫酸塩エアロゾルの一時的な増加を通して、短期間（2～3 年）の負の強制力をもたらすことがある。最後の大きな噴火は 1991 年（ピナトゥポ火山）であり、それ以来今まで成層圏は、火山噴火の影響を受けていない。

太陽放射変化と火山に対して見積もられた放射強制力の、今日と工業化時代の初期の間の差は、人間活動から見積もられた放射強制力の差と比べて、どちらも非常に小さい。従って、今日の大気では、現在と将来の気候変化に対する人間活動に伴う放射強制力は、自然過程による変化に起因すると見積もられる放射強制力よりずっと重要である。