

## FAQ 5.1 | 太陽は最近の気候変動の主な駆動要因なのか？

全太陽放射照度(TSI、第8章)は、大気の上端で太陽から受け取る全エネルギーの尺度である。その値は数十億年からわずか数日まで極めて広範囲に及ぶ時間スケールによって様々に変動するが、過去140年間の変動は比較的小さい。太陽放射照度の変化は、火山からの放出や人為起源の要因と並んで気候変動の重要な駆動要因である(第1章; 図1.1)。したがって全太陽放射照度の変化は、測器時代(FAQ 5.1 図1; 第10章)及び過去1000年間に観測されている世界平均地上気温の変化を説明する上で役に立つ。太陽変動は、20世紀初頭における世界平均地上気温の変化に識別可能な寄与をしたかもしれないが、1970年代末に衛星による全太陽放射照度の直接測定が開始された以降について観測されている気温上昇は太陽変動では説明できない(第8、10章)。

太陽の核は水素をヘリウムに変換する巨大な核融合炉である。この過程が、電磁放射として太陽系全体に放射するエネルギーを生み出す。地球の大気の上端に突き当たるエネルギーの総量は、太陽による電磁エネルギーの生成及び射出と、太陽を回る地球の公転軌道とによって変動する。

1978年以降、衛星を利用した測器が全太陽放射照度を直接測定しており、平均で約 $1361 \text{ Wm}^{-2}$ が地球の大気の上端に到達していることを示している。地球表面の一部や大気中の汚染や雲は鏡の役割を果たし、このエネルギーの約30%を反射して宇宙空間に戻している。太陽がより活発なときは、より高い水準の全太陽放射照度が記録されている。放射照度は、約11年の黒点周期に沿って変動する。前回の周期では、太陽放射照度の数値は平均で約0.1%変動した。

衛星観測以前の時代については、全太陽放射照度の変動は黒点数(1610年まで遡る)や、大気中で形成され、極氷や木の年輪に記録された放射性同位体から推定しなければならない。1645年と1715年間のマウンダー極小期のように、太陽活動が明らかに弱い50年から100年の期間は、一般に太陽活動極小期と呼ばれている。マウンダー極小期から今日までの間における全太陽放射照度の変化の推定値は、ほとんどが0.1%程度であり、11年周期の変動の振幅に近い。

太陽変動は、1870年まで遡って観測されている世界平均地上気温の記録をどのように説明できるのだろうか。この問いに答えるには、他の気候駆動要因も関与していて、それぞれが特徴的な地域の気候応答パターンを生み出していることを理解することが重要である。とはいえ、観測される気候変動を引き起こすのはそれら全ての組み合わせである。太陽変動と火山噴火は自然起源の要因である。他方、人為起源の要因には、温室効果ガス濃度の変化、目に見える大気汚染物質(エアロゾル)やその他の人間活動に由来する物質の排出が含まれる。「内部変動」とは、気候システム内での変動を指しており、例えば気象変動やエルニーニョ・南方振動などの現象に起因している。

こうした自然及び人為起源の要因の相対的な寄与度は時間とともに変化する。FAQ 5.1 図1は、ごく簡単な計算に基づいた寄与度を示している。図に示された世界平均地上気温の変動は、太陽、火山、人為起源の強制力、内部変動と線形に関連した4つの構成要素の合計を表している。世界地上気温は1870年から2010年にかけて約 $0.8^{\circ}\text{C}$ 上昇した(FAQ 5.1 図1a)。もっとも、上昇の仕方は一様ではなかった。時には、地球表面を冷やす要因(すなわち、火山の爆発、太陽活動の減退、人為起源のエアロゾル排出の大半)が、温室効果ガスのような地球表面を温める要因を上回ることもあり、また、気候システム内で生み出された変動は外部の影響力とは無関係な更なる変動を引き起こしている。

世界地上気温の変化に対する太陽の寄与は、11年の太陽周期に支配され、これにより、極小期と極大期の間の最大約 $0.1^{\circ}\text{C}$ の世界気温変動を説明できる(FAQ 5.1 図1b)。20世紀初頭における太陽活動の長期的増加傾向は、内部変動、温室効果ガスの増加、火山活動の休止とともに、この期間に記録された温暖化を増加させた可能性がある。もっとも、1970年代後半以降に観測されている気温上昇は説明できない。また、1986年から2008年にかけては、全太陽放射照度のわずかな減少トレンドすらあった(第8章、第10章)。

火山噴火は、地球の表面を冷やすエアロゾルを一時的に大気に注入することによって世界平均地上気温の変化に寄与する(FAQ 5.1 図1c)。1991年のピナトゥボ火山の噴火のような大きな火山噴火は、最大3年間にわたり地表を約 $0.1^{\circ}\text{C}$ から $0.3^{\circ}\text{C}$ 冷却し得る。(次ページに続く)

FAQ 5.1 (続き)

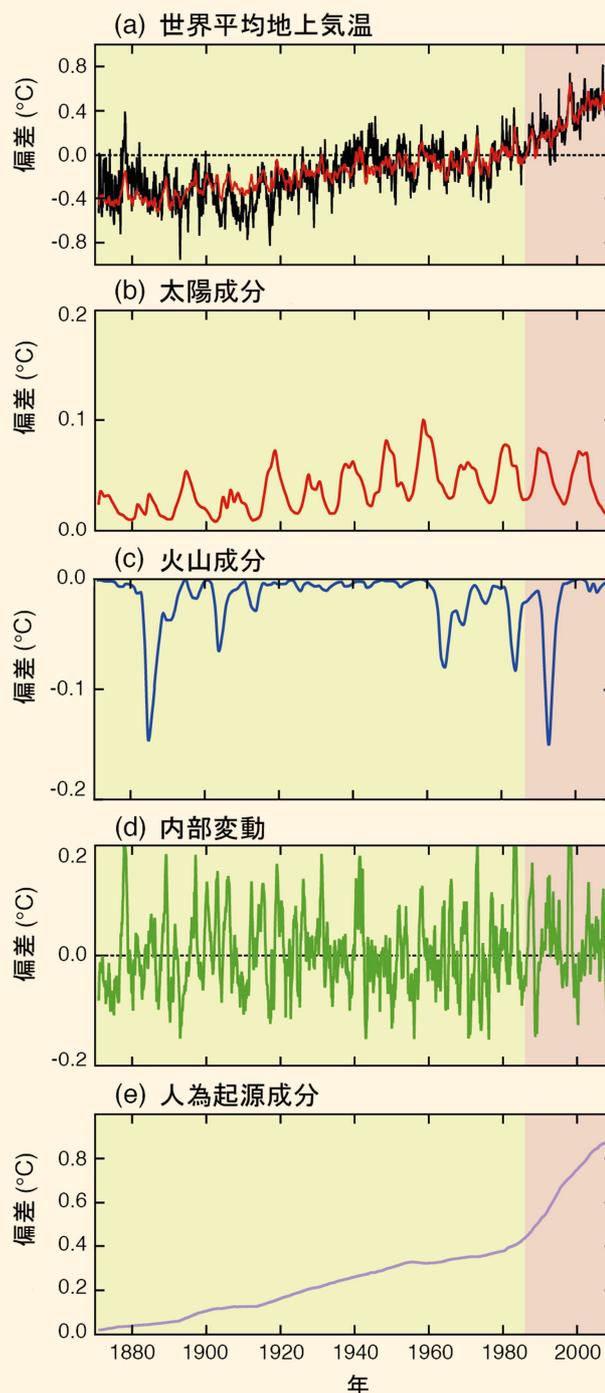
気候の内部変動性の最も重要な構成要素は、熱帯及び世界平均地上気温の年々の変動性に大きな影響を及ぼすエルニーニョ・南方振動である (FAQ 5.1 図 1d)。1997~1998 年のようなエルニーニョ現象の期間には、比較的高い年平均気温となった。

1870 年から 2010 年にかけて観測された世界平均地上気温の変動性は (FAQ 5.1 図 1a<sup>[正誤表参照]</sup>)、自然 (太陽、火山、内部; FAQ 5.1 図 1b~d) 要因の複合した影響を反映したものを、人為起源の要因による数十年規模の温暖化トレンド (FAQ 5.1 図 1e) に重ね合わせたものである。

温室効果ガスやエアロゾルの人為的排出がより少なかった 1870 年以前は、太陽及び火山の活動の変化と内部変動がより重要な役割を担っていた。ただし、これら個々の要因による世界平均地上気温への個別の寄与は、あまり明確ではない。数十年間継続する太陽活動の極小期は、寒冷状況と関連することが多かった。しかし、これらの期間は火山噴火にも影響されることが多いため、太陽の寄与を定量化することを難しくする。

地域規模では、太陽活動の変化はインド太平洋域、北アジア域、北大西洋域における地上気候や大気循環の変化と関係している。およそ 11 年の太陽周期における比較的小さな全太陽放射照度の変動の地域的効果を増幅するメカニズムは、上層大気と下層大気、あるいは海面水温と大気との力学的相互作用が関わっており、世界平均地上気温にはほとんど効果を及ぼさない (Box 10.2 参照)。

最後に、数年前の太陽極小期における太陽活動の低下は (FAQ 5.1 図 1b)、気候に対する将来の影響について疑問を投げかけている。将来の太陽活動における不確実性にもかかわらず、太陽活動極大期と極小期の範囲内での太陽活動の効果が、人為起源の効果に起因する変化よりもはるかに小さいことについては高い確信度がある。



**FAQ 5.1 図 1** | 1870~2010 年からの世界平均地上気温の偏差と、それに影響を与える自然要因 (太陽、火山、内部) と人為的要因。(a) 世界平均地上気温の 1961~1990 年平均に対する世界平均地上気温の記録 (1870~2010 年) (黒線)。自然要因 (b、c、d) と人為的要因 (e) が気温に与える影響の合計を用いて作成した世界地上気温の変化のモデル (a: 赤線)。(b) 太陽の強制力に対する推定気温応答。(c) 火山噴火に対する推定気温応答。(d) 内部変動 (ここではエルニーニョ・南方振動に起因する推定気温変動)。(e) 人為起源の強制力 (温室効果ガスによる昇温要素、大半のエロゾルからの降温要素で構成) への推定気温応答。