



FORCE MAJEURE

The Sun's Role in Climate Change

Henrik Svensmark

気候変動における太陽の役割

ヘンリック・スベンスマルク

監訳 キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹 杉山大志
訳 木村史子

The Global Warming Policy Foundation

GWPF Report 33

本稿は Henrik Svensmark, FORCE MAJEURE The Sun's Role in Climate Change
<https://www.thegwpf.org/content/uploads/2019/03/SvensmarkSolar2019-1.pdf>
を GWPF の許可を得て邦訳したものである。

目次

著者について

要旨

1 はじめに

2 時間の中の太陽

太陽活動

太陽による宇宙線の変調

全太陽放射照度の復元

3 地球における太陽活動と気候の相関

4 太陽活動と気候の関連性の定量化

5 太陽活動と気候の関連メカニズム

全太陽放射照度と気温

紫外線量の変化と気温

宇宙線、雲、そして気候

地球の電気回路の変化

6 今後の太陽活動

7 考察

太陽活動の影響

太陽紫外線メカニズム

宇宙線雲メカニズム

電場メカニズム

8 結論

9 付録 簡単な海洋モデルによる計算

参考文献

著者について

ヘンリック・スベンスマルク（1958 年生まれ）は物理学者で、デンマークのリュンビューにある国立宇宙研究所（DTU Space）天体物理学・大気物理学部門の主任研究員である。1987 年にデンマーク工科大学で博士号を取得し、その後、カリフォルニア大学バークレー校、北欧理論物理学研究所、ニールス・ボーア研究所で物理学の博士研究員を務めた。現

在は DTU Space の太陽・気候研究グループを率いている。

謝辞

本稿に有益なコメントを寄せてくれたラース・オックスフェルト・モーテンセン (Lars Oxfeldt Mortensen)、ニール・シャビブ (Nir Shaviv)、ヤコブ・スベンスマルク (Jacob Svensmark)、および 2 名の査読者に感謝する。

要旨

過去 20 年間で、気候に対する太陽の影響についての理解は大きく進んだ。特に、多くの科学研究により、太陽活動の変化が完新世（およそ過去 1 万年間）全体にわたって気候に影響を及ぼしてきたことが示されている。よく知られた例は、西暦 1000 年ごろの中世温暖期に太陽活動が活発であり、その後の小氷期（西暦 1300～1850 年）と呼ばれる寒冷期には太陽活動が低水準であったことである。重要な科学的課題は、気候に対する太陽の影響を定量化することである。11 年の太陽周期を通じて地球システムに流入するエネルギーは $1.0\sim 1.5\text{ W/m}^2$ 程度と判明している。これは太陽放射照度だけから予想される値よりほぼ 1 桁大きく、太陽活動が何らかの大気過程によって増幅されていることを示唆する。

太陽と気候の関連を説明するため、主に次の 3 つの理論が提案されている。

- 太陽紫外線の変化
- 雲量に対する大気電場の効果
- 太陽によって変調された銀河宇宙線（星間空間に起源をもち、地球大気に到達する高エネルギー粒子）がもたらす雲の変化

考えられるメカニズムの解明に多大な努力が払われてきた。現時点では、宇宙線による地球の雲量の変調は、太陽の影響の大きさを説明するうえでかなり有望に見える。この理論は、太陽活動が完新世の気候に大きな影響を及ぼしてきたことを示唆する。この理解は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の公式見解とは対照的である。IPCC は、1750～2011 年の太陽放射強制力の変化を約 0.05 W/m^2 と推定しており、約 2.3 W/m^2 と見積もられる温室効果ガスの影響に比べれば、まったく無視できる値としている。しかし、大気中に太陽増幅メカニズムが存在するならば、二酸化炭素に対する推定気候感度にも含意があり、その値が現在考えられているよりはるかに低いことを示唆する。

要するに、気候に対する太陽活動の影響は、公式コンセンサスが示唆するよりはるかに

大きい。したがって、これは科学界が取り組むべき重要な科学的問題である。

1. はじめに

太陽は、大気と海洋の力学、そして究極的には地球上の生命を支えるエネルギーのほぼすべてを供給している。しかし、観測される地球の気候変化に関して、太陽の役割について見解は一致していない。それにもかかわらず、気候科学では、太陽活動の影響は全太陽放射照度（TSI）の小さな変動に限られ、気候への影響は無視できるという公式コンセンサスが形成されている。これは気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第1作業部会の報告書に典型的に示されている。IPCCは、1750～2011年の太陽活動による気候への放射強制力を約 0.05 W/m^2 と見積もる。この値は、約 2.3 W/m^2 と推定される人為起源温室効果ガスの変化による強制力に比べれば、まったく無視できる。¹

本レポートの目的は、太陽活動が気候に及ぼす影響に関する研究を概観することである。

上記のコンセンサスとは対照的に、完新世に太陽が気候へ大きな影響を及ぼし、太陽活動が低い時期と高い時期の気温差が $1\sim 2 \text{ K}$ 程度であったことを示す実証的証拠が豊富にある。このような大きな気温変動は上記のコンセンサスと整合せず、太陽活動と地球の気候との間に現実の確かな結びつきがあることを示している。問題は、太陽と気候の関連を生み出すメカニズムは何か、ということである。示唆的な結果は、11年の太陽周期を通じて海洋に流入するエネルギーが約 $1.0\sim 1.5 \text{ W/m}^2$ で、対応する全太陽放射照度（TSI）の変動（約 0.2 W/m^2 ）よりほぼ1桁大きいことである。太陽活動は、TSI以外の何らかのメカニズムによって、TSI変動に対して増幅されている。

こうした変化を駆動し得る要因はほかにもある。太陽活動はTSI以外の成分にも現れる。例えば、太陽磁場の大きな相対変化、太陽風（磁場を運ぶ荷電粒子の流れ）の強さ、地球大気における宇宙線電離の変調、紫外線（UV）放射量などである。これらはいずれも「太陽活動」の一部であり、気候にも影響を及ぼす可能性が指摘されてきた。とりわけ、観測された気候変化を説明でき、理論・実験・観測によって支持されるメカニズムが特定されていることを本稿で示す。

本レポートは、地球の気候に対する太陽の影響に関するすべての発表論文を網羅するものではなく、太陽活動と気候の関連についての現在の知見を明確に示すことを目的とする。太陽が気候に及ぼす影響については包括的な総説が以前に公表されているが、すでに8年前のものであり、その後、太陽活動と気候を結びつけるメカニズムについて重要な進展があった。技術的詳細は扱わず、関心のある読者がさらに情報を得られるよう関連文献

を示す。²

2. 時間の中の太陽

太陽活動

太陽に関する科学的研究から得られる知見の一つは、太陽が非常に動的であり、数秒から数千年という時間スケールで変化を示すということである。太陽活動は、太陽の差動回転と太陽プラズマの対流によって生成される磁場により引き起こされる。太陽の赤道は極よりも速く回転しており、赤道の回転周期は約 25 日であるのに対し、極では約 38 日である。この差によって、磁気双極子場がねじれることになる。

磁力線同士の反発と磁力線部分の密度が低いことにより、磁力線は最終的に太陽表面（光球）を貫き、「黒点」として現れる。

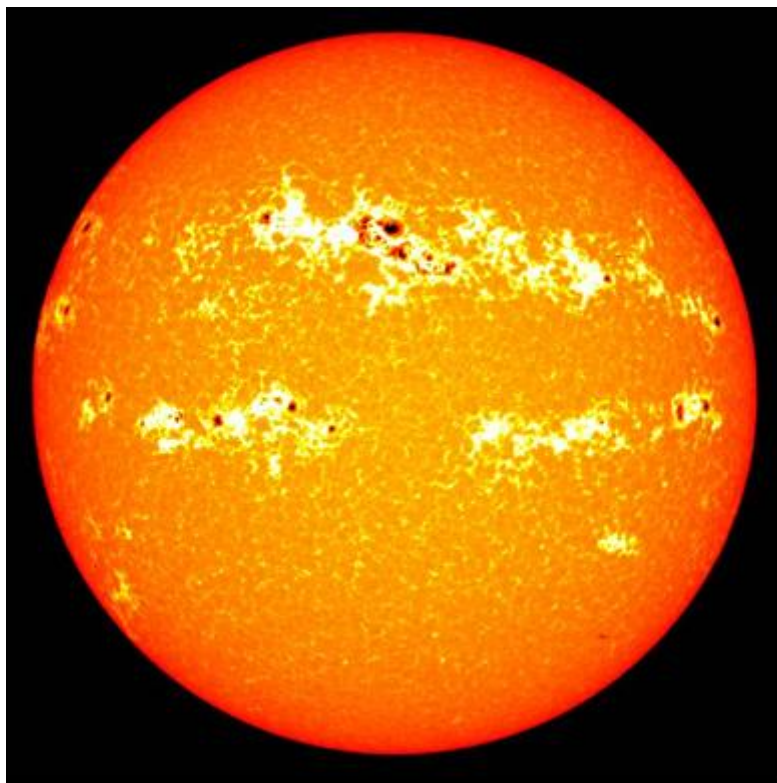


図 1：太陽活動が活発な時期の太陽。

太陽黒点（赤～黒色の領域）より高温のファキュラ（白色の領域）が目立つよう、色調を変更している。黒点に伴う暗い領域は地球に到達する太陽放射フラックスを減少させる一方、明るい領域は増加させる傾向がある。

出典：NASA／ゴダード宇宙飛行センター 科学可視化スタジオ。

これらの領域が暗く見えるのは、磁場が対流を抑えるため、周囲より温度が低いからである。黒点に加えて、「ファキュラ」と呼ばれる明るい領域もある。これは太陽表面の粒状構造で、周囲の光球よりわずかに高温である（図 1）。黒点の基本的な変動は約 11 年の活動周期で、太陽磁気双極子場の準周期的な極性反転から生じる。各太陽周期で黒点数は増えてピークに達し、これを「太陽活動極大期」という。その後、数年の高活動を経て、太陽は「太陽活動極小期」と呼ばれる低活動の期間に入る。

より長い時間スケール（数十年～数千年）では、太陽活動には不規則な変動があり、11 年の黒点周期を変調する。例えば、中世および 20 世紀後半には 11 年周期のピークが著しく強かった一方、図 2 に示すマウンダー極小期（1645～1715 年）やダルトン極小期（1796～1820 年）には低いか、ほとんど見られなかった。ここでの活動記録は望遠鏡による黒点観測に基づく。記録は 1610 年にガリレオ・ガリレイによって始められ、その後、多数の観測者によって続けられたため、400 年以上の連続記録となっている。

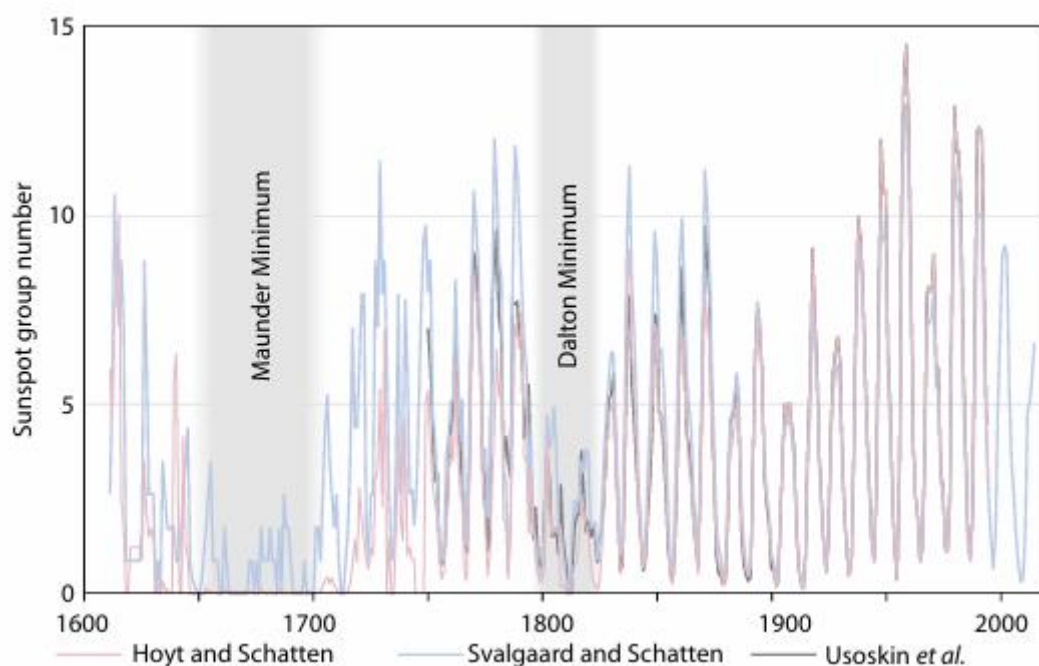


図 2：黒点群記録の 3 つの復元。

黒点群数とは、黒点の集合である「黒点群」の数である。個々の黒点を分解して観測する必要がないため、過去には黒点群の方が観測しやすかった。11 年の準周期が、より長い時間スケールで変調されていることに注目されたい。3 つの復元のうち 2 つは、マウンダー極小期以降に太陽活動が長期的に増加したことを示す。

出典：Hoyt and Schatten（1610～1995 年）³、Svalgaard and Schatten（1610～2015 年）⁴、
Usoskin et al.（1749～1995 年）⁵。

もちろん、観測記録には観測機器や黒点計数法の変更に伴う観測バイアスが含まれ、とりわけ記録初期には不確実性がある。図 2 はこの問題を示す。黒点群数について 3 つの復元結果を示している。うち 2 つ（ピンクと灰色の曲線）は、20 世紀末に向けた太陽活動の長期的増加という見方を支持する。^{3,5,6} しかし 3 つ目（青色の曲線）は、18～19 世紀に一貫して著しく高く、他の 2 つから乖離している。⁴ この不一致は未解決だが、後述するように、宇宙線生成同位体の変化の記録も、20 世紀末まで太陽磁気活動が増加したという見方を支持する。

太陽による宇宙線の変調

太陽活動は、銀河宇宙線とも呼ばれる宇宙線を変調する。宇宙線は、星間物質、すなわち太陽系外に起源をもつ非常に高エネルギーの粒子である。これらの粒子は、超新星（激しい爆発を起こして生涯を終える恒星）の衝撃波面によって加速され、エネルギーを得る。宇宙線が太陽系に入るときには、太陽風が運ぶ太陽磁場に支配された宇宙空間であるヘリオスフィアを通過しなければならない。そこで宇宙線粒子は磁場のゆらぎによって散乱され、その結果、多くの粒子がヘリオスフィア内部への侵入を妨げられる。

宇宙線は主に陽子（90%）とアルファ粒子（9%）で構成され、さらに少量の重い成分を含む。エネルギーは数百万電子ボルト（eV）から 10^{20} eV までで、粒子のエネルギーが高いほど希少になる。宇宙線は地上の中性子モニターで観測でき、一次宇宙線スペクトルの低エネルギー側の変動を検出できる。大気上端に到達できる最小エネルギーは地磁気緯度に依存し、地磁気極付近の観測点で 0.01 GeV（1 GeV = 10^9 eV）、地磁気赤道付近で約 15 GeV まで変化する。

宇宙線の系統的な機器観測は、1950 年以降に中性子モニターを用いて始まった。図 3 は 1951～2006 年の正規化した宇宙線強度の変動と、同期間の黒点数の変動を示す。⁷ 宇宙線強度は黒点周期と明瞭に逆相関する。これは、太陽風が惑星間空間に形成する磁気構造による。太陽活動が活発な時期ほど宇宙線に対する遮蔽効果が強くなるためである。

ただし、中性子モニターが利用できる以前の宇宙線変動についても情報を得られる。高エネルギー宇宙線が大気中の原子と衝突すると、新たな同位体が生成される。これらは「宇宙線生成同位体（コスモジェニック同位体）」と呼ばれ、ベリリウム 10、炭素 14、塩素 36 などがある。宇宙線フラックスが高いと宇宙線生成同位体の生成量も多く、低いと

少ない。したがって、その量の変動から宇宙線フラックスの変動がわかる。例えば、ベリリウム 10 (^{10}Be) は宇宙線によって地球大気上層で生成される。 ^{10}Be 原子は微小なエアロゾル（空气中を浮遊する分子クラスター）に付着し、ときには雪の結晶に取り込まれる。これがグリーンランド氷床のように融けない場所へ降れば、氷床コアを採取し、年代のわかる各氷層に含まれる ^{10}Be 原子を測ることで、 ^{10}Be 生成量の記録、ひいては過去の宇宙線フラックスの間接測定値が得られる。

図 4 はそのような記録を示す。宇宙線を 1391 年まで遡って復元し、1951 年以降は機器観測記録を用いている。⁸ 図には 1610 年以降の黒点群数も示す。両者が重なる期間には、太陽活動と宇宙線の明瞭な逆相関がある。ただし微妙な違いもある。例えば、マウンダー極小期（1645～1715 年）には黒点が非常に少なかったが、その末期（1690～1715 年）の宇宙線フラックスは全期間中で最も高い。

宇宙線生成同位体を用いれば、最大 1 万年前まで宇宙線変動を復元できる。このような間接的復元は、宇宙線または太陽活動の「代理指標（プロキシ）」と呼ばれる。より長い時間スケールでは、地球磁場の変化を補正する必要がある場合もある。⁸

全太陽放射照度の復元

全太陽放射照度（TSI）は、太陽から地球大気上端に到達する放射を全波長にわたって積分した単位面積当たりの放射エネルギーフラックスで、地球が受け取るエネルギーのほぼすべてを表す。したがって、地球の気候にとって重要なパラメータである。1978 年以降、地球周回衛星によって TSI が直接観測されている。しかし、衛星搭載機器は劣化し、ときどき交換しなければならないため、連続した時系列を得るには各衛星の観測記録を相互較正する必要がある。⁹ データの欠測や測器の劣化があるため、必要な精密較正については見解が一致していない。⁹⁻¹¹

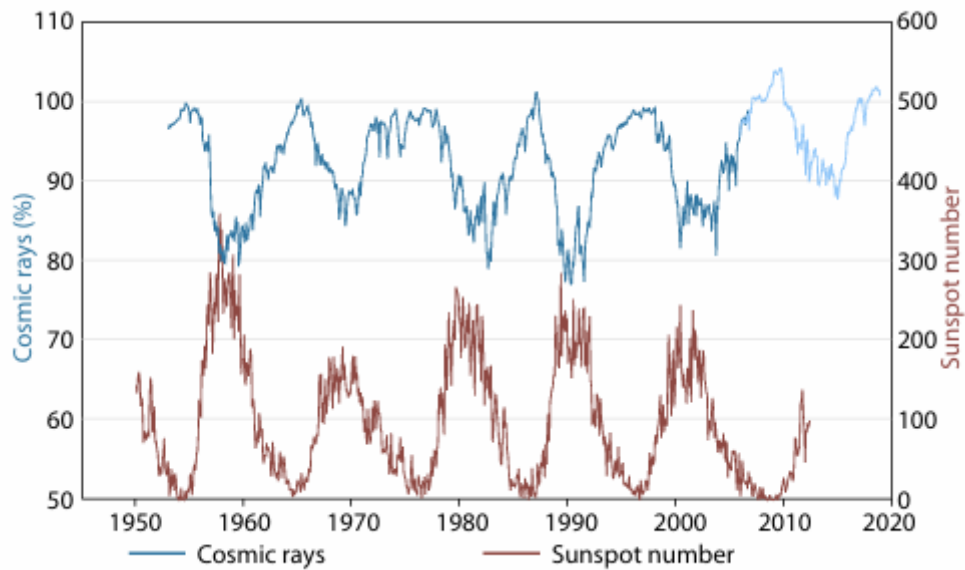


図 3：観測期間（1951 年～2018 年）における宇宙線と黒点の変動。

出典：宇宙線は McCracken and Beer⁸ および Climax 中性子モニター、黒点数は文献⁷による。

2006 年以降の宇宙線データは、著者が Oulu モニターのデータを用いて延長した。

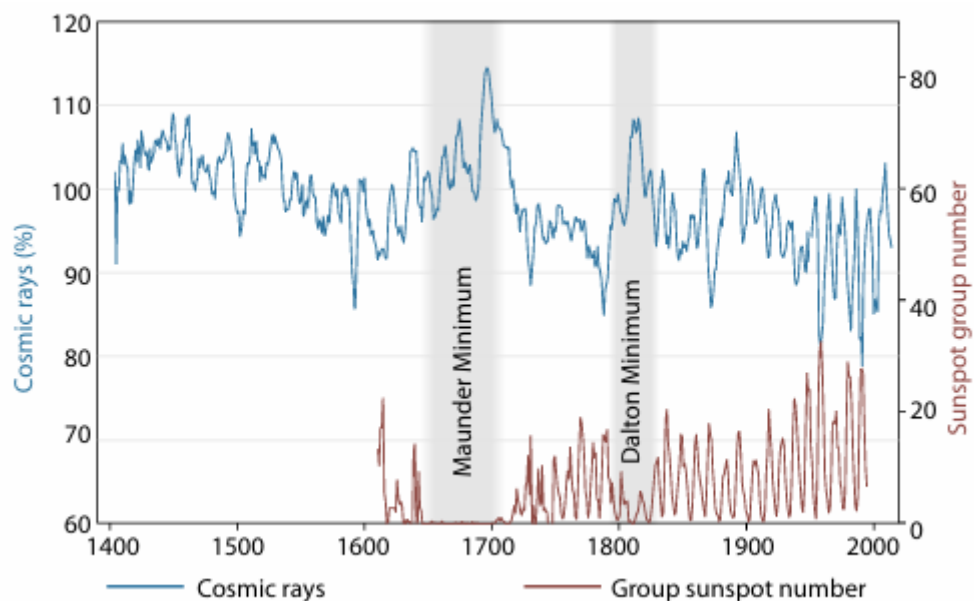


図 4： ^{10}Be による 1391 年以降の宇宙線変動の復元。

長期的には宇宙線強度が着実に低下しており、宇宙線を変調する太陽磁気活動の成分がこの期間に増大したことを示す。

出典：宇宙線は McCracken and Beer⁸、黒点群記録は Hoyt et al.^{3,6}。

重要な問題は、TSI データに 11 年周期を超える長期傾向があるかどうかである。これは長期的な TSI 変化の推定、ひいては気候への影響に関わる。衛星データによると、TSI は太陽周期を通じて最大 0.05~0.07% 変動する。⁹⁻¹¹ 大気上端では、これは約 1365 W/m² の太陽定数に対して約 1 W/m² に相当する。地球が球体であることによる幾何学的係数とアルベドを考慮すると、地表ではわずか 0.2 W/m² である。

より長い時間スケールでは、複数の太陽活動プロキシを用いて、衛星観測以前の TSI を復元する研究が行われてきた。通常、TSI は太陽の 3 種類の領域、すなわち明るいファキュラ、暗い黒点、そして「静穏太陽 (quiet Sun)」と呼ばれるその他の領域からの放射輝度の合計として表される。過去のファキュラと黒点の観測から最初の 2 成分は推定できるが、静穏太陽の過去の活動を推定する方法はないため、その放射照度は一定と仮定するのが一般的である。大半の復元では、太陽の長期的な総放射出力の変化は小さい。マウンダー極小期以降、TSI は約 1 W/m² 増加したと考えられ、地表では 0.18 W/m² に相当する。これは気候に影響を及ぼすには小さすぎる。^{12,13}

これに対して、少数の TSI 復元は、マウンダー極小期以降に TSI がはるかに大きく増加した (0.4%、約 6 W/m²) ことを示唆する。^{14,15} これらの復元は、静穏太陽の放射照度が時間とともに大きく変化したという仮説に基づく。その仮定は、静穏領域からの放射照度を、宇宙線を変調する太陽磁場によってパラメータ化でき、その結果 TSI に大きな変動が生じるというものである。しかし、静穏太陽の放射照度が大きく変動するという説には強い疑問が呈されている。^{16,17} 例えば、1914~1996 年の太陽円盤の Ca II K 線分光太陽像 (スペクトロヘリオグラム) を用いて、20 世紀の TSI 変動が検証された。これらの画像では、この期間の磁気ネットワークの変動はごく小さく、TSI の大きな変動とは整合しなかった。^{18,19}

今後数十年にわたり太陽活動が低下し続ければ、TSI の変動幅をより厳密に制約できる可能性がある。

3 地球における太陽活動と気候の相関

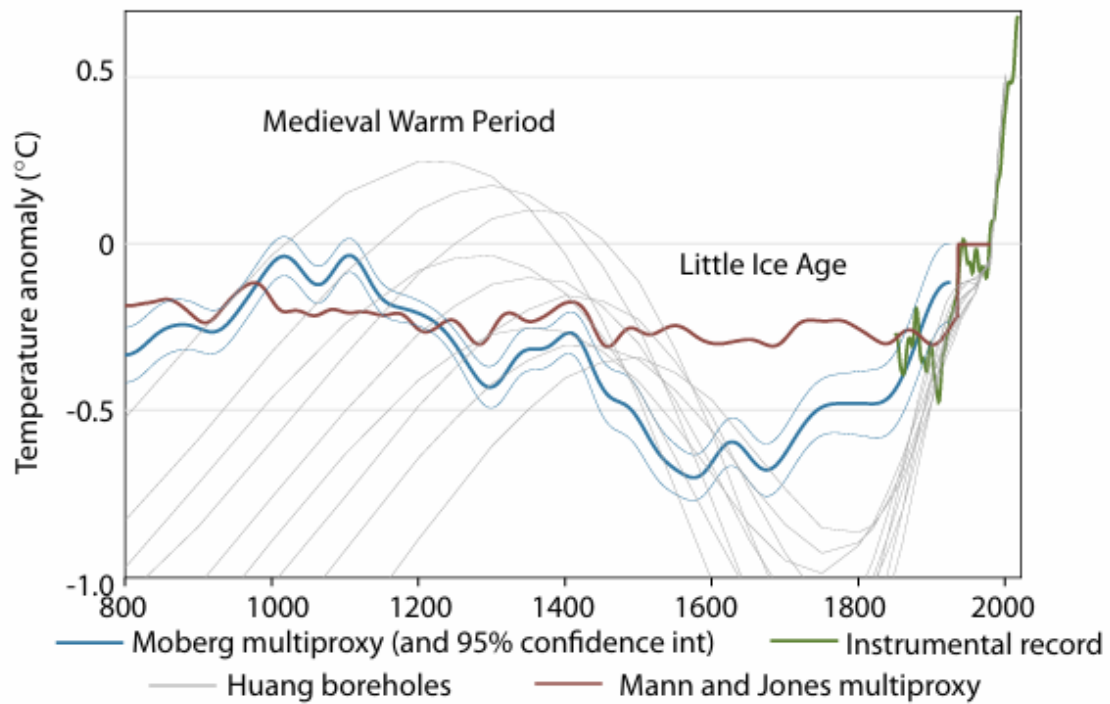
多くの実証研究により、数十年以上という時間スケールにおいて、気候のプロキシデータと太陽活動の間に明確な相関関係があることが示されている。1970 年代、ジョン・エディは、過去 1000 年間にわたる太陽活動とヨーロッパの気候との間に一定の相関関係があることに気がついた²⁰。例えば、小氷期 (西暦 1300~1850 年) は、太陽の活動が特に不活発だった時期に見られた寒冷期であった。一方で、中世温暖期 (西暦 1000~1200 年) は、太陽活動が活発であった時期に該当する。

図 5a は、過去 1000 年間の気温変動について最近の復元結果を示す。1961～1990 年平均に対する次の気温記録を比較している。

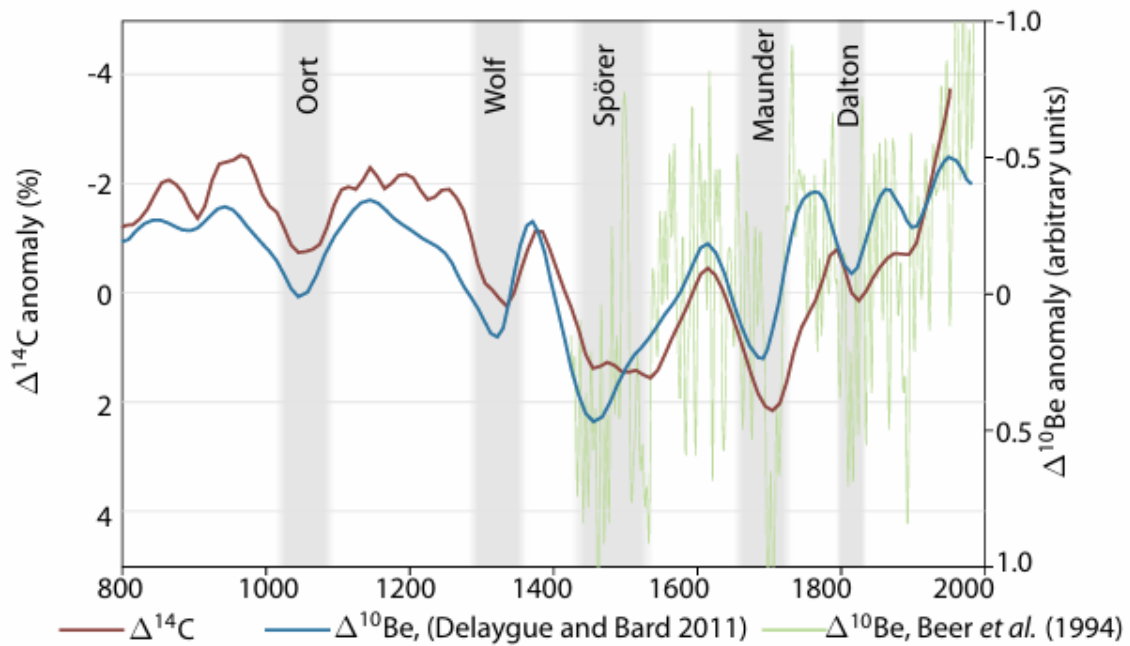
- 北半球気温の 2 つのマルチプロキシ復元^{21,22}
- ボアホール温度に基づく全球気温の復元²³
- 過去 150 年間の機器観測記録²⁴

図 5b は、次のデータに基づく宇宙線フラックスの復元結果を示す。

- 年輪中の ^{14}C 測定値¹
- 南極の氷床コア²⁵ およびグリーンランドの氷床コア²⁶ に含まれる ^{10}Be 濃度



(a) 1961～1990 年の平均値に対する気温の偏差。



(b) 銀河宇宙線（逆スケール；太陽活動極小期は灰色で表示）

図 5：過去 1000 年間の気温と宇宙線フラックスの変動。

下段のグラフでは縦軸が反転している点に留意されたい。

宇宙線フラックスが高いほど気温は低い。出典は本文参照。

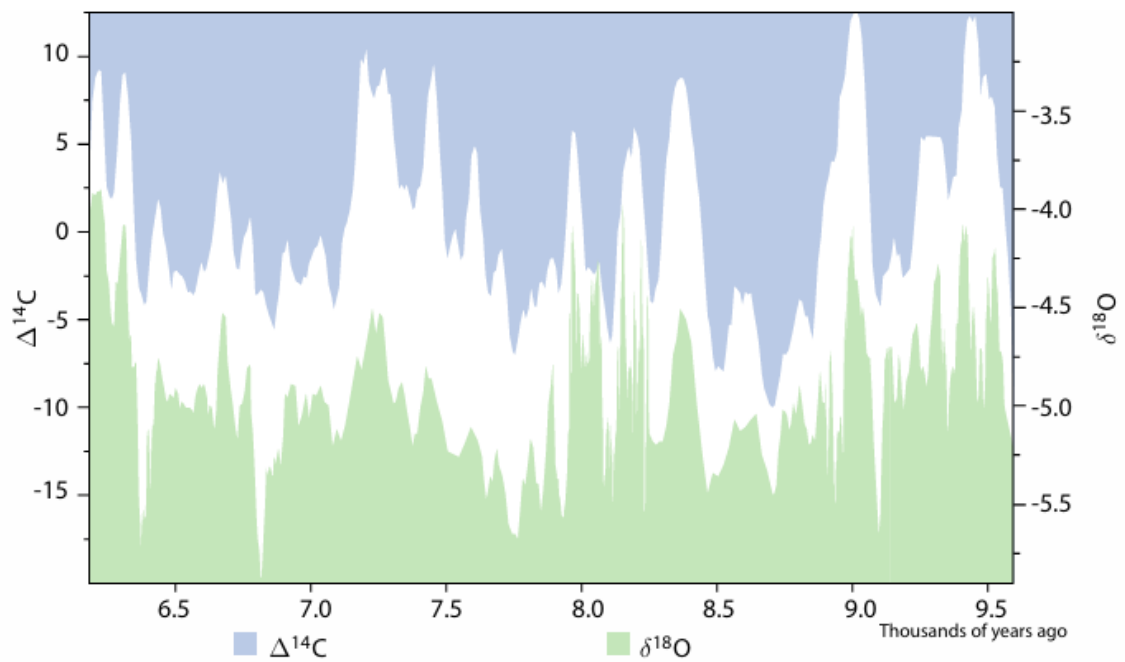


図 6：気温のプロキシと太陽活動のプロキシとの間に見られる顕著な相関関係。

オマーンの洞窟の石筍に含まれる $\delta^{18}\text{O}$ に基づく気温データ。これはモンスーン降水を反映する。太陽活動データは $\delta^{14}\text{C}$ に基づく。

出典：Neff et al.²⁷

図の 2 系列から、気温の変化と、太陽活動に起因する宇宙線フラックスの変化との間に顕著な相関があることがわかる。実際、すべての太陽活動極小期が気温曲線に現れている。宇宙線のグラフは縦軸を反転しており、宇宙線フラックスが高いほど気温が低く、低いほど気温が高くなるよう表示されている。

太陽活動と気候の関連が世界的に見られることを示す一つの方法は、世界各地のボアホールデータに基づく気温復元を見ることである（図 5a、灰色の曲線）。熱は地中へゆっくり拡散するため、ボアホールの深さ方向の温度分布には、過去の地表温度の情報が含まれる。²³ これらのデータによれば、中世温暖期の最高気温は 1960～1990 年の基準値と同程度か、わずかに低く、小氷期の最低気温は基準値より約 1 K 低かった。

宇宙線フラックスの変化と気候との密接な相関は、過去 1000 年間だけに限られず、数千年規模の記録にも見られる。図 6 は、現在から 6200～9600 年前の期間を対象とする次の記録を示す。

- オマーンの洞窟の石筍に含まれる ^{18}O 濃度の変化。熱帯循環とモンスーン降水量の変動を示す代理指標である。
- 太陽活動の代理指標である宇宙線生成 ^{14}C の変化²⁷

この 2 つの系列の相関関係は顕著である。オマーンや中国の洞窟から採取された他の石筍に関する研究によると、アジアのモンスーンは完新世の全期間を通じて太陽活動と相関関係にあることが示されている²⁸⁻³⁰。

また、太陽活動が気候に及ぼす影響は社会にも及ぶ。その一例が、中国の洞窟から得られた 1810 年間のモンスーン記録である。これは太陽活動を示す ^{14}C 記録と密接に相関し、³¹ モンスーンが弱かった時期、すなわち小氷期や唐・元・明の各王朝の末期には、民衆の動乱が特徴的だったことを示す。対照的に、モンスーンが強い時期には食糧生産と人口が増加した。南米のマヤ文明の崩壊は、太陽活動の変化に伴う干ばつによって引き起こされたと考えられている。^{32,33} ヨーロッパでも、中世温暖期と小氷期は人口に深刻な影響を及ぼした。^{34,35}

北大西洋の完新世気候に関するもう一つの注目すべき結果は、Bond et al.³⁶ による研究である。彼らは、いわゆる「氷山漂流堆積物 (ice-rafted debris; IRD)」に記録された気候

と太陽活動を比較した。北大西洋を漂流する氷が融けると、微細な岩屑粒子が海底に沈む。海底から採取したコア試料で、こうした粒子の数を時間の関数として測れば、氷の漂流、ひいては気候の変化を把握できる。図7は、過去1万2000年間の氷山漂流堆積物の変動と、宇宙線の太陽変調の変動を示す代理指標である宇宙線生成 ^{14}C の変化を示す。ここでも両者に密接な相関が見られる。

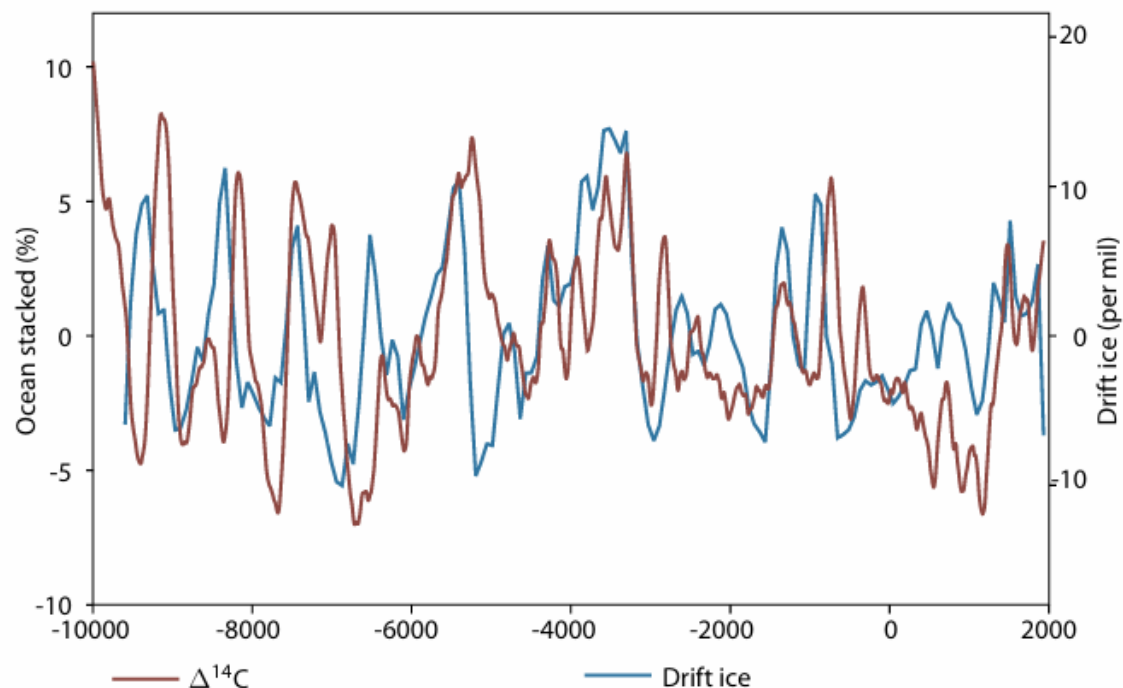


図7：北大西洋の気候変動（紀元前1万年～西暦2000年）。

粒径 63~150 μm の岩質粒子に占める氷山漂流堆積物（IRD）の割合。 ^{14}C は年輪に基づく。Bond et al.³⁶より改変。

太陽活動と気候の間に密接な相関関係があるという上記の知見は、他の多くの研究によっても裏付けられている。したがって、完新世（おおむね過去1万年間）における太陽活動が、気候に重大な影響を与えてきたことはほぼ確実である。

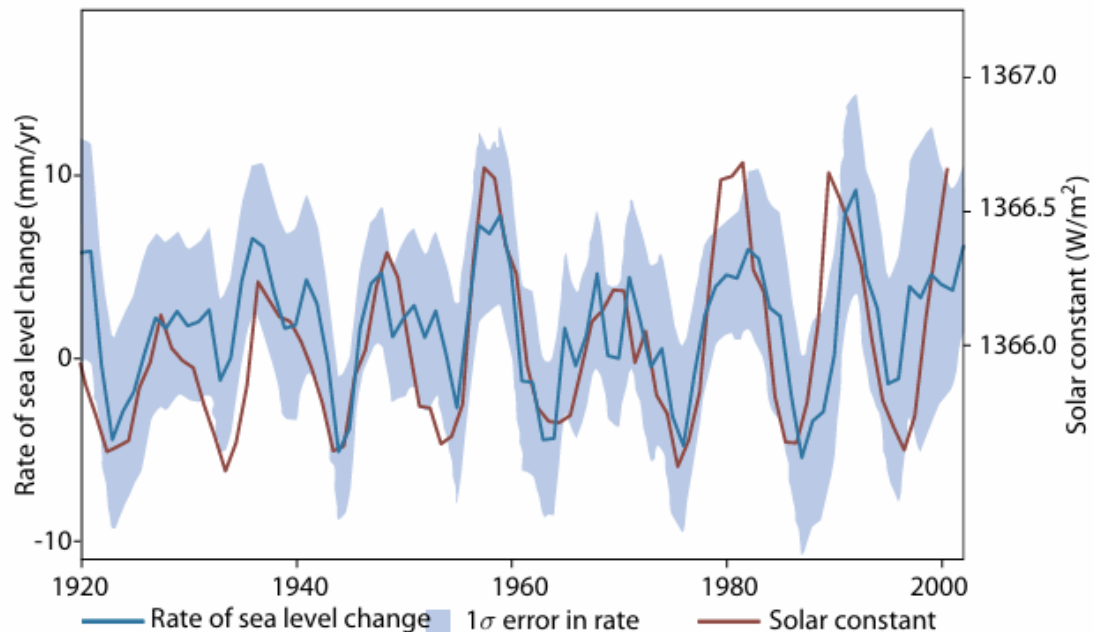


図 8：海面水位と太陽活動。

潮位計データに基づく海面水位。短い時間スケールでは、海面水位の変化率は、熱膨張を通じて海洋熱含量の変化を反映する。したがって、太陽周期を通じて海洋熱含量に大きな変化があると結論できる。この熱量測定を用いて太陽放射強制力を定量化できる。³⁸

結論として言うと、太陽活動と気候との相関関係が観察されているのは、完新世に限ったことではない。時間軸を最終氷期最盛期（2 万年前）まで遡ると、別の明らかな相関関係が浮かび上がるのである³⁷。したがって、あらゆる時間スケールにおいて相関関係が存在すると推測する十分な根拠があると言える。

4 太陽活動と気候の関連の定量化

ここまで、太陽活動と気候には長い時間スケール（数百年～数千年）で強い相関があることを示した。しかし、これだけでは、その効果がどのように生じ、どの程度の大きさかはわからない。幸い、11 年の太陽周期を通じて海洋に流入するエネルギーを推定すれば、太陽変動の効果を定量化できる。このエネルギーは海水に小さな温度変化をもたらし、膨張させる。したがって、潮位計による海面水位記録は太陽変動の記録となる。³⁸

図 8 は、1920～2000 年の海面水位の変化率と太陽放射照度の復元値を示す。2 つの曲線には密接な相関があり、エネルギーが 11 年の太陽周期とほぼ同位相で海洋に流入することを示唆する。観測された海洋の膨張は、太陽周期を通じて海洋に流入する約 1.5 W/m^2

のピーク強制力に相当する。

以下の独立したデータセットも、この結果を裏付けている³⁹：

- 海洋熱量の測定値
- 海面水温の測定値
- 衛星観測による海面水位の変化

これらのデータセットを示したものが図9である。

11年周期にわたり、これらのデータが示す太陽強制力も $1.0 \sim 1.5 \text{ W/m}^2$ 程度である。この強制力は太陽周期に伴う太陽放射照度の変化で説明できるかもしれない。しかし図9のとおり、TSIの変化は約 0.2 W/m^2 にすぎず、観測を説明するにはほぼ1桁小さい。したがって、何らかの増幅メカニズムが働いていなければならない。³⁸ 増幅が必要となることの簡単な導出は付録に示す。

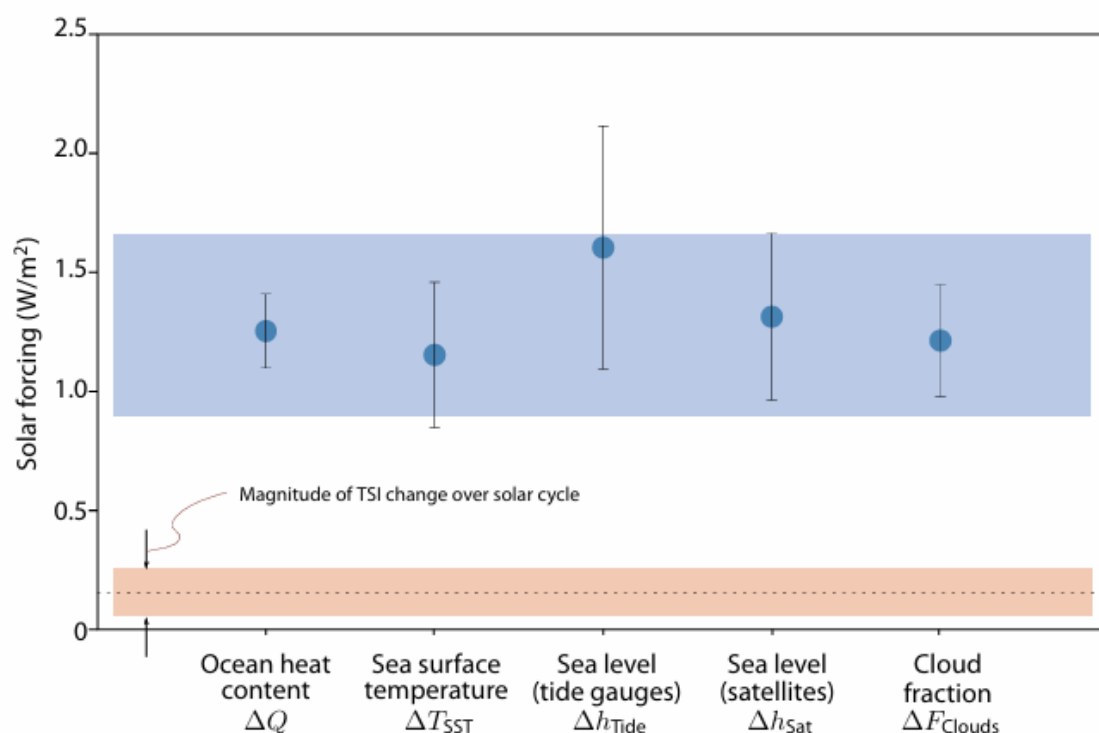


図9：太陽活動周期における海洋へのエネルギー供給量の推定値。

TSI（全太陽放射照度）は、観測された強制力を説明するにはほぼ1桁小さすぎる。出典： Δh_{Sat} は Howard et al.³⁹、雲量は Svensmark（1998）⁴⁰。

図は Shaviv（2008）³⁸ より改変。

したがって、太陽は太陽周期の時間スケールで大きな影響を及ぼすと結論できる。実

際、その影響は太陽放射照度の変化だけから予想される値の約 5～7 倍である。

5 太陽活動と気候を結びつける可能性のあるメカニズム

太陽と気候の関連の大きさを説明するため、これまでに多くの説が提案されてきた。ここでは、そのうち特に重要なものを取り上げる。

全太陽放射照度と気温

最も単純な説明は、TSI の変動が気候変動を説明できるほど大きい、というものである。しかし前節で示したように、TSI の変化は、太陽周期を通じて地球システムに流入するエネルギーを説明するには小さすぎる。

もちろん、より長い時間スケールでは、さらに大きな TSI 変動が存在する可能性はある。マウンダー極小期以降の全球平均強制力の変化を 1 W/m^2 とし、幾何学的係数とアルベドを考慮すると、全球平均気温の変化は 0.1 K 程度となるはずである。² この期間の実際の気温変化の最良の推定はボアホール測定による（図 5）。²³ これは約 1 K の変化を示唆し、グリーンランドの気温復元（図示せず）も支持する。⁴¹ 一方、TSI が約 0.4% 変動したと仮定すれば、地球平均化とアルベドを考慮した強制力は約 1 W/m^2 となり、気温変化は約 0.7 K となる。しかし、第 2 節の「全太陽放射照度の復元」で論じたように、これほど大きな TSI 変動は考えにくい。

太陽周期を通じて観測される $1.0\sim 1.5 \text{ W/m}^2$ の強制力（第 4 節）に戻ると、太陽活動を増幅する間接的なメカニズムが存在しなければならないことは明らかである。

紫外線量の変化と気温

太陽周期を通じた全太陽放射照度（TSI）の変動は 0.1% 程度と小さいが、紫外線スペクトルには大きな相対変動が生じることがある。

以下に例をあげる。

- 波長範囲 $120\sim 121 \text{ nm}$ では、変化率は約 40% 。
- 波長範囲 $250\sim 300 \text{ nm}$ では、変化率は約 1% 。
- 波長範囲 $600\sim 700 \text{ nm}$ では、変化率は約 0.1% ⁴²。

この変動する紫外線エネルギーは成層圏で吸収され、加熱を生じる。これにより大気循環が変化し、その影響が対流圏を通して地表まで下方へ伝わる可能性が指摘されている。

⁴³ しかし全球循環モデルによれば、地表温度への正味の影響は TSI 変化による影響より小さく、^{44,45} 多くの場合、対流圏の応答は無視できるようである。⁴⁶ したがって、このメカニズムだけでは、太陽周期を通じて海洋へ流入するエネルギーが 1 W/m^2 変化するという観測（第 4 節）を説明しにくい。

宇宙線、雲、そして気候

もう一つの可能なメカニズムは、太陽による宇宙線の変調と、それが雲量に及ぼす影響である。^{40,50-52}

雲は地球のエネルギー収支に大きな影響を及ぼす（正味では地球を約 $20 \sim 30 \text{ W/m}^2$ 冷却する）ため、雲の系統的な変化は地球のエネルギー収支、ひいては気候に重大な影響を及ぼす。

1996 年、地球大気に入射する銀河宇宙線の強度が全球雲量の変動と密接に相関することが発表された。この関連が、太陽活動の変動と気候との間に観測される相関の原因となり得ることが示唆された。図 10 は、衛星観測による宇宙線と低層雲の相関を示す。11 年周期の雲量変動に伴うエネルギー収支の変化は $1.1 \pm 0.3 \text{ W/m}^2$ と推定され、⁵³ 対応する TSI 変動より 1 桁大きい。³⁸

宇宙線と雲の関連が実在するなら、地球大気における宇宙線電離と雲形成を結ぶ微物理メカニズムが存在しなければならない。提案されている考えはエアロゾルの形成に係る。³ エアロゾルの大部分は、大気中で微量気体から直接形成される。これらは気体の凝縮と衝突を繰り返して成長し、 $50 \sim 100 \text{ nm}$ に達すると「雲凝結核 (CCN)」と呼ばれる。CCN サイズのエアロゾルは雲形成に重要である。地球大気で雲滴を形成するには、水蒸気が凝結する表面が必要であり、CCN がその表面を提供するためである。

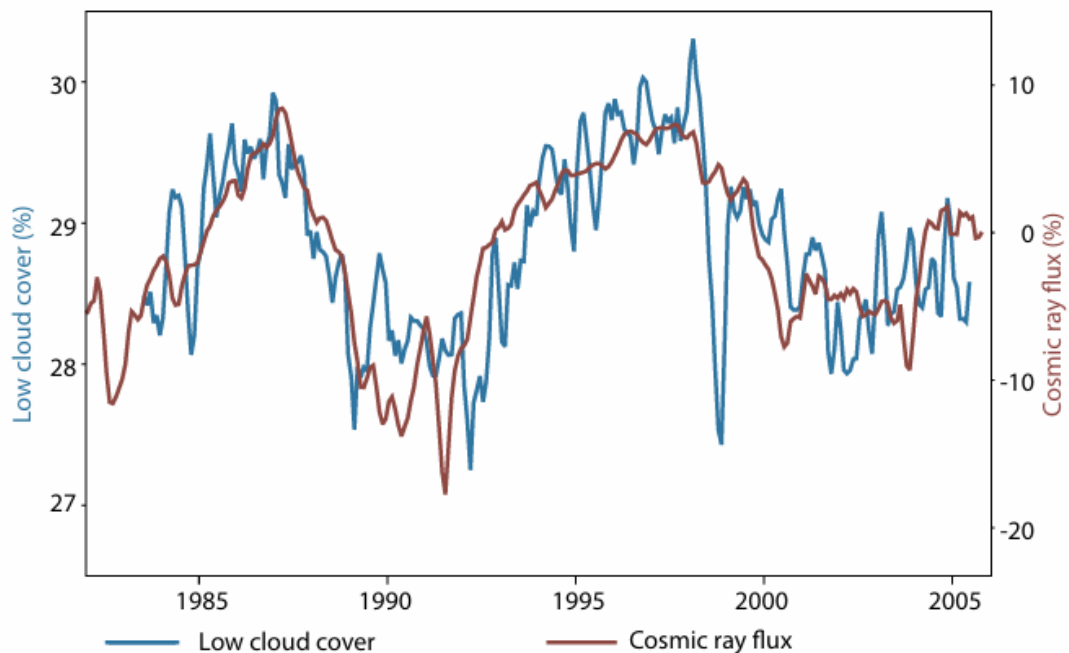


図 10：低層雲量と地球に到達する宇宙線フラックスとの相関⁴⁷。

固有の較正問題があるため、複数年にわたって雲量を測定するのは難しい。この図のデータは 1994 年の問題を受けてすでに再較正されているが、⁴⁸ このデータセットにはなお問題があり、長期傾向はもはや信頼できないと考えられる。⁴⁹

図 11 は北太平洋の衛星画像で、低層雲が広がる様子を示す。白い筋は船舶航跡雲で、船のエンジン排気が追加の雲凝結核（CCN）を大気中へ放出することで生じる。追加された CCN は雲の微物理を変え、雲滴数濃度を増加させる（雲をより白くする）ため、より多くの太陽光が宇宙へ反射される。船舶航跡雲は宇宙線によるものではないが、この画像は、CCN の系統的な変化が地球のエネルギー収支に重要であることを示している。

宇宙線が CCN の数にどう影響し得るかを説明するには、メカニズムが必要である。図 12 にその概要を示す。まず、太陽変動は太陽磁場を運ぶ太陽風の変化として現れる。太陽風は宇宙線フラックスを変調し、宇宙線は大気を電離して正負のイオンを生じさせる。これらの荷電粒子は、大気中の微量気体から新しい微小エアロゾルが形成され、安定化するのを助ける。最も重要な微量気体の一つが硫酸で、光化学反応によって大気中で自然に生成される。

2006 年、宇宙線が微小エアロゾル（1～2 nm）の初期形成（「核生成」）を促進することが実験的に示され、電離を強めると核生成したエアロゾルの数濃度も増加することが明らかになった。⁵⁴ この結果は後に、ジュネーブの CERN で行われた CLOUD 共同実験によ

って確認された。⁵⁵



図 11：北太平洋上空の低層海洋性層雲。

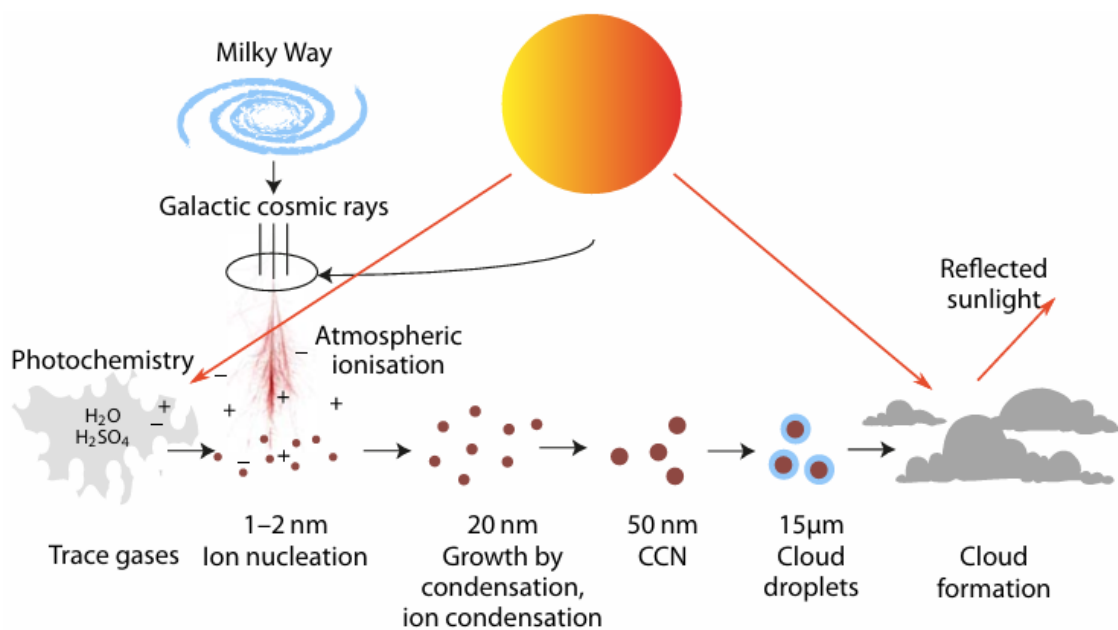


図 12：太陽活動の変動と気候変動を結びつける物理的メカニズム。

要約すると、この連鎖は次のとおりである。

- (a) 太陽活動の活発化、(b) 太陽風の強化、(c) 宇宙線の減少、
- (d) 大気電離の減少、(e) 核生成の減少と成長の鈍化、

- (f) 雲凝結核 (CCN) の減少、(g) 雲滴の減少、(h) 反射率の低下、
(i) 太陽光の反射減少と地球の温暖化。

一時期、微小エアロゾル（粒径約 3 nm）が増えれば、自動的に雲凝結核（CCN、50～100 nm）の数も増えると考えられていた。しかし、最新鋭のエアロゾル・シミュレーションによる数値計算は、そうではないことを示した。⁵⁶ エアロゾルの核生成（1～2 nm）が大きく変化しても、CCN 数は増えないように見えたのである。この否定的な結果は、エアロゾルが増えると利用可能な気体をめぐる「競合」が強まり、成長が遅くなって、小さなエアロゾルが CCN サイズに達する前に大きなエアロゾルへ取り込まれる確率が高まるため、と説明された。

この数値結果は、その後、実験で検証された。⁵⁷ まず、イオンが存在しない条件の大気を模擬した。図 13a は、分子クラスターが十分に成長せず、直径 50 nm を超える CCN を有意な数だけ生成できない様子を示す。

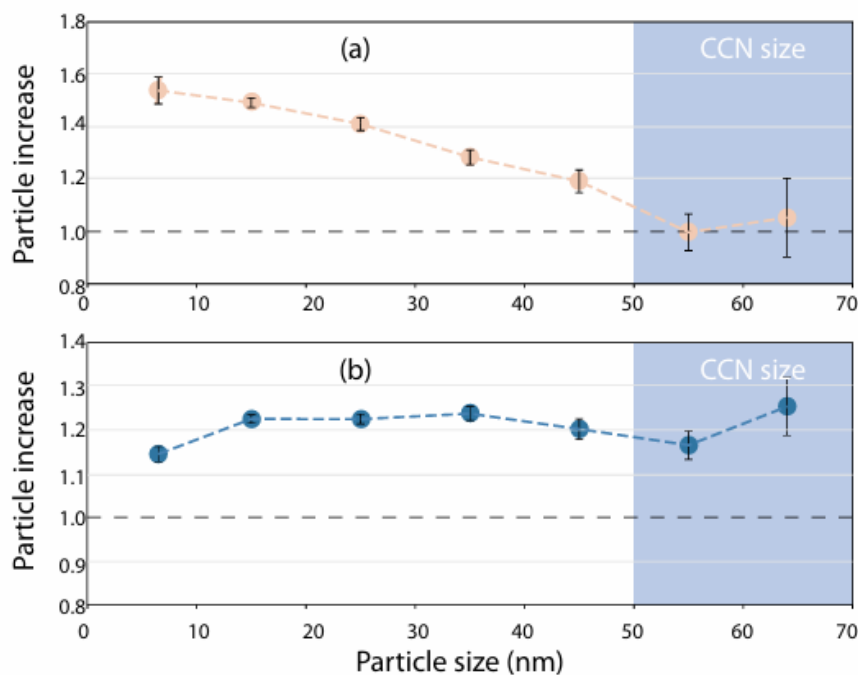


図 13：エアロゾルが CCN サイズまで成長する過程の実験的検証。

(a) 電離なし、(b) 電離あり。Svensmark (2012) ⁵⁷ より改変。

これは既存理論の予測である。しかし、宇宙線の効果を模擬するためチャンバー内の空気を電離放射線にさらすと（図 13b）、クラスターは、水滴形成と雲生成を助ける大きさまで、はるかに速く成長する。この結果は数値モデルの結果と矛盾し、イオン機構の重要な

部分が理論から欠けていることを示す。

イオンがエアロゾルを CCN サイズまで成長させるのを助ける証拠はある。では、どのように作用するのか。答えはごく最近、理論と実験の両面から明らかになった。解決策は、これまで無視されてきたエアロゾル成長への寄与、すなわちイオン自身の質量による寄与を組み込むことである。大気中のイオンは比較的少ないが、イオンとエアロゾルの電磁相互作用がその少なさを補い、両者の融合をはるかに起こりやすくする。電離度が低い場合でも、エアロゾル成長速度の約 5% はイオンによる。近傍で超新星が起きた場合には電離をはるかに強くなり、イオン効果が成長速度の 50% 超を担う可能性がある。これは雲と地球の気温に甚大な影響を及ぼす。⁵⁸

これらの結果は観測からも支持される。まれに太陽で「コロナ質量放出」と呼ばれる爆発が起こると、プラズマ雲が地球を通過し、1~2 週間続く宇宙線フラックスの急減を引き起こすことがある。こうした現象は「フォーブッシュ減少」と呼ばれ、宇宙線と雲の関連を検証するのに適している。最も強いフォーブッシュ減少を選び、独立した 3 つの雲衛星データセットと 1 つのエアロゾルデータセットで解析すると、雲とエアロゾルに明瞭な応答が見られた。図 14 は、宇宙線強度が最小となる前後の日々について、最も強い 5 つのフォーブッシュ減少を合成した結果（赤線）と、雲に観測された各種の信号（青線）を示す。2 つの曲線の極小の位置がずれるのは、エアロゾルが CCN へ成長するのに時間を要するためである。これらの結果は、太陽活動から宇宙線、エアロゾル (CCN)、雲へ至る一連の連鎖が地球大気中で機能していることを示唆する。^{59,60} さらに、宇宙線と雲の関連は、太陽周期で観測される約 1 W/m^2 の強制力の大きさを説明し得る。

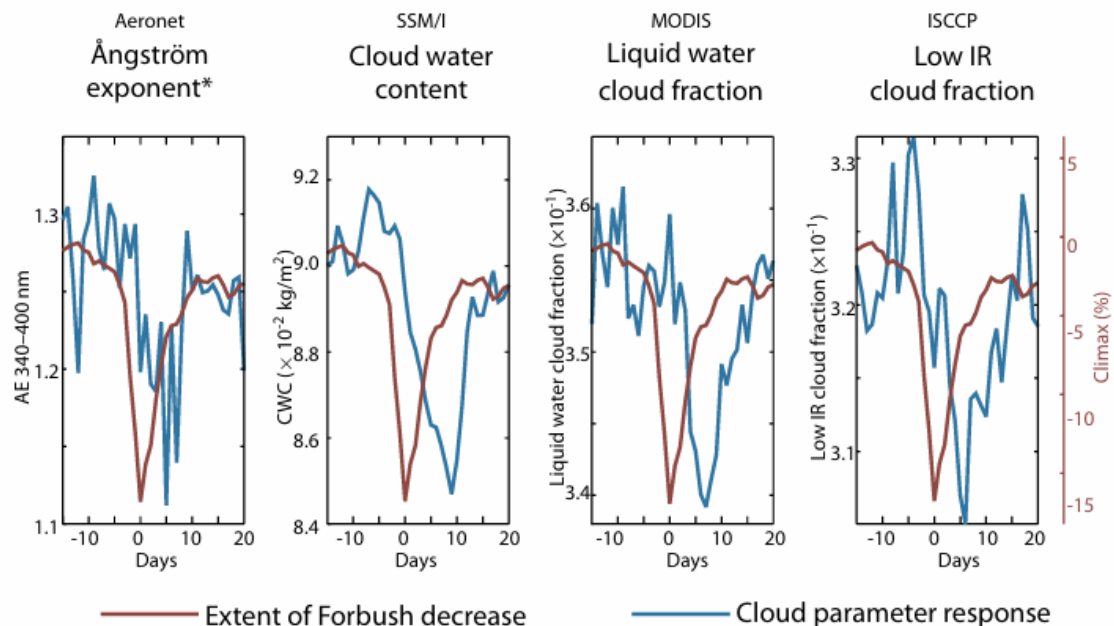


図 14：フォーブッシュ減少の前後における雲のパラメータの変化。

1990～2005 年の最も強い 5 事象について平均した日平均値の変化。⁵⁹

このデータは、宇宙線フラックスの減少が雲の性質の変化に結びつくことを示している。

*オングストローム指数は、大気中のエアロゾル濃度を表す指標である。

地球の電気回路の変化

太陽と気候の関連性を説明するために、他にもいくつかの説が提唱されている。その一つは、電離圏と地表の電位差によって生じる地球の電場に関するものである。この電位差は雷雨によって維持され、電位差を放電する大気イオンの晴天時電流を生じる。大気イオンは主に宇宙線によって生成されるが、この電気回路は太陽風の変化にも応答する。電流の変化が、例えば雲滴の凍結温度に影響することにより、雲の微物理に作用するという説が提案されている。⁶¹ ただし、電場が雲の性質に影響することを支持する観測例はいくつかある。Harrison and Ambaum⁶² は、英国のある地点で大気電位の変化を調べ、その観測を下向き長波放射および散乱短波フラックスと相互相関した。データは相互相関に 2 分の時間遅れを示し、彼らはこれを電場が雲の性質に影響する証拠と解釈した。

6 今後の太陽活動

太陽活動の変化を予測することは現在の能力を超えている。次の太陽周期の規模を予測することさえ非常に不確実である。例として、当時進行中だった 11 年周期の第 24 太陽周期について、黒点数の最大値を予測する 105 件の予測が行われた。予測は統計モデルまた

は物理的ダイナモモデルに基づき、ほぼ正規分布をなし、平均値 106、ばらつき ± 31 であった。⁶³ しかし実際に観測された第 24 周期の最大値は約 82 と小さかった。この失敗は、太陽活動を予測しようとする際の問題を端的に示している。

第 24 太陽周期の年平均黒点数の最大値は 82 にとどまり、本稿執筆時点の太陽活動は過去 1 世紀で最低の水準にある。対照的に、1950～1995 年は、おそらく過去 1000 年で最も太陽活動が活発だった。これは驚くべきことではない。黒点数と宇宙線生成同位体のいずれも、太陽活動が大きく変動し得ることを示すからである。重要な問いは、将来の太陽活動がどこまで低下するかである。すでに、太陽活動がマウンダー極小期のような「グランド・ミニマム」、またはダルトン極小期のようなそれほど深刻でない極小期へ向かっているとの指摘がある（図 2）。グランド・ミニマムは珍しくなく、完新世に 7～9 回起きた可能性が高い（例えば図 7）。したがって、太陽が現在、新たなグランド・ミニマムへ向かっているのか、単に低活動期へ入っているのかを検討し、地球の気候への影響を考えることには意味がある。当然ながら、これは太陽活動と気候を結ぶ実際の物理メカニズムに左右される。

太陽活動の将来的影響を予測するため、多くのモデル研究が行われている。TSI 変動を小さいと仮定すれば、予測される影響も当然小さく、無視できる。⁶⁴ TSI が 0.25% 低下すると仮定したモデルでは、2100 年の予測気温は 0.2～0.3 K しか低下しない。^{65,66} 一方、単純なエネルギー収支計算に基づく少なくとも一つの予測は、気温が約 1 K 低下し、新たな小氷期に至る可能性を示す。この計算は TSI が 0.5% 変化するという大きな変動を前提とする。⁶⁷ (TSI 変動については第 2 節を参照。) 想定されるグランド・ミニマムの影響は、IPCC の人為起源温室効果ガス排出シナリオとの関係でも研究されている。

7 考察

太陽活動と気候の密接な相関を示す多数の研究に基づけば、太陽活動が気候変動性にとって重要であることはほぼ確かである（第 3 節）。特に、完新世（過去 1 万年間）を調べた多くの研究は、図 6、図 7 に示すように、太陽変動と気候の顕著な一致を示している。したがって、今日の主要な科学的課題は、気候に対する太陽の影響を定量化し、その仕組みを理解することである。

数百年から数千年の時間スケールで観測される気候変動は、大気中の二酸化炭素濃度には反映されていない。氷床コアによれば、この期間の濃度は比較的一定だった。⁶⁸ したがって、これらの時間スケールの気候変動に二酸化炭素濃度の変動が影響した可能性は低い。

太陽活動の影響

TSI が約 0.1% しか変化しないことだけを考慮する気候モデルでは、気候変動性に対する太陽の影響は小さく、近年および将来の気候変化の主因は人為起源温室効果ガス、エアロゾル、火山活動とされる。Michael Mann らによるもの^{22,69}など、過去 1000 年の気温復元や同期間の気候モデル・シミュレーションには、小氷期の影響がほとんど、またはまったく現れない (図 5)。したがって、これらが TSI による太陽強制力は小さいという見方と整合するのは当然である。しかし、中世温暖期と小氷期の差をわずか 0.1~0.2 K とする気温復元は、ほかの多数の気候復元と整合しない。^{23,34,41,70-76} 例えば、ボアホールによる気温復元は地表の気温変化を直接反映する物理記録であり、利用可能な古気候指標の中でも最も信頼性の高いものの一つである。Huang らの研究は、南極を除く全大陸の数百本のボアホールに基づき、中世温暖期と小氷期の間に 1.0~1.5 K の気温差があったことを強く示す (図 5)。²³ また、Mann の気温復元^{22,69}には重大な疑問が呈されている。⁷⁷⁻⁸¹ 完新世を通じて繰り返し観察されるように (図 7)、太陽活動の高い時期と低い時期の間で約 1.0~1.5 K の気温変動があったとする方が、上記の復元が示す小さな変化よりはるかに妥当と考えられる。

これは、長期的には TSI 変動がより大きいのか、大気中で間接的な太陽メカニズムが働いているのか、またはその両方であることを示唆する。TSI 変動のコンセンサス値である約 0.1% は小さく、これが正しいければ、TSI 変動だけでは観測された気候変化を説明できない。¹⁶ 一方、約 0.4% というのはるかに大きな変動を示す TSI 復元もあり、正しいければ気候にとって重要な意味をもつ。^{14,15} 第 2 節で論じたように、この大きな変動の根拠は、静穏太陽の放射照度が時間とともに大きく変化する得るという考えにある。しかし現時点では、これは観測的裏付けのない仮説である。将来の観測によって TSI の変動幅が明らかになることが期待される。

太陽活動が過去の気候に大きな影響を及ぼしてきた以上、20 世紀の太陽活動の増加も観測された気温上昇に影響したと考えることは、それほど論争的でないはずである。太陽が 20 世紀の気温上昇に大きく寄与したなら、気候感度は低めでなければならない。Ziskin and Shaviv⁸² は、観測気温に適合するよう制約し、人為起源要因 (温室効果ガスとエアロゾル) と太陽寄与を含めた単純なモデルで、20 世紀の関連する強制力を推定した。その結果、20 世紀の太陽強制力は $0.8 \pm 0.4 \text{ W/m}^2$ 、気候感度は $0.25 \pm 0.09 \text{ K/(W/m}^2\text{)}$ となった。これを、IPCC が推定する 1750~2011 年の太陽活動による放射強制力約 0.05 W/m^2 と、気候感度 $0.9 \pm 0.3 \text{ K/(W/m}^2\text{)}$ と比較すべきである。¹ したがって、太陽の役割がより大きければ、将来の気候変化への含意も重大となる。このような結果は、気候に対する

太陽の影響をさらに研究する必要性を示す。

1978 年以降の現代観測期間は、衛星による TSI 測定によって太陽周期に伴う 0.1% の変化が確実に観測されており、制約がより強い。太陽周期を通じて海洋に流入するエネルギーは、TSI の 0.1% 変化から見積もられる値の 5~7 倍である。³⁸ これは次の 2 点を意味する。

- 海洋に流入するエネルギーのうち太陽活動に起因する成分は、TSI だけから見積もられる値よりほぼ 1 桁大きい。^{38,83}
- 太陽活動を増幅できるメカニズムが存在しなければならない（第 4 節）。

これまでに、いくつかの増幅メカニズムが考えられている。

太陽紫外線メカニズム

その一つは、太陽スペクトルの紫外線（UV）領域の変化に基づく。太陽活動極大期には、紫外線スペクトルのエネルギーが極小期より数% 高くなることがある。増加した紫外線は成層圏に吸収され、成層圏を温める。これにより成層圏の力学的循環が変化し、エネルギーが対流圏へ下方輸送され、地表温度に影響する可能性がある。⁴³ 紫外線メカニズムは広範な数値モデルで検証されているが、^{44,45} 対流圏への影響は、太陽周期にわたる全球放射収支に観測される変化を説明するには弱すぎるようである。紫外線メカニズムは、物理が理解され、全球循環モデルで検証されているという意味で、太陽増幅を説明するために提案された理論の中で最も成熟している。

宇宙線雲メカニズム

もう一つの可能なメカニズムは、太陽による宇宙線の変調に伴う地球の雲量の変化である。⁵⁰⁻⁵² 1996 年、衛星観測により、太陽周期を通じて地球の雲量が宇宙線の変化と同位相で約 2% 変化することが示された。この変動は約 1 W/m^2 の放射強制力変化に相当し、海洋へ流入するエネルギーの観測変化と一致する（図 9）。基本的な考えは、宇宙線による大気の電離が、微小エアロゾルの形成^{54,55} と CCN への成長に重要であり、CCN は雲滴、ひいては雲の形成に必要なということである。⁵⁸ CCN の数濃度が変わると雲の微物理が変化し、その結果、雲の放射特性と寿命の両方が変化する（図 12）。

現在では、宇宙線と雲の関連を支持する理論的・実験的・観測的証拠がある。^{57,58} ただし、11 年周期の雲変化に関する衛星観測は、固有の較正問題のため、完全に信頼できるわ

けではない。もっとも、この理論を支持するように、太陽活動→宇宙線による電離→エアロゾル→雲という連鎖全体が、約 1 週間の時間スケールのフォーブッシュ減少に伴って観測されている。^{59,60} 強いフォーブッシュ減少に伴う宇宙線変動は 11 年の太陽周期で見られる変動と同程度で、雲量を約 2% 変化させる。⁶⁰

雲の変動は気候システムで最も理解が難しく、不確実な要素の一つである。したがって、宇宙線とその雲への影響は、この分野に重要な新しい理解を加える可能性がある。大規模な数値モデルに、電離が微小エアロゾルの核生成へ及ぼす影響を組み込む試みはあるが、^{56,84,85} 重要な物理過程が欠けている。⁵⁸

上記の観測にはいずれも不確実性があるが、全体としては一貫した像を示し、電離が地球の雲量に影響し、それを通じて気候と地球の気温に強く影響し得ることを示唆する。とはいえ、宇宙線と気候の関連という考えには疑問も呈されており、⁸⁶⁻⁸⁹ 今なお議論を呼ぶ。しかし観測・実験データが増えるにつれ、その関連を支持する根拠は強まってきた。例えば、宇宙線と気候の関連が実在するなら、太陽活動と無関係なものを含め、宇宙線フラックスのどのような変動も気候変化に反映されるはずである。地質学的時間スケールでは、宇宙線フラックスの大きな変動は太陽系を取り巻く銀河環境の変化から生じる。こうした長期スケールの宇宙線フラックスと気候の復元値を比較すると、過去 5 億年間に 6 回の氷河時代が、理論の予測どおり宇宙線フラックスの高い時期に生じたことが示される。⁹⁰⁻⁹³ 太陽系が銀河面を出入りする運動さえ、気候記録に見いだせる。^{94,95}

電場メカニズム

地球の電気回路が気候に及ぼす影響も、気候を駆動する候補として提案されている。全球大気電気回路と雲の微物理（したがって宇宙線効果）との相互作用は、気候科学の興味深い研究領域であるが、その重要性を評価するには観測と実験が必要である。^{61,96,97}

8 結論

過去 20 年間で、太陽が地球の気候に果たす役割についての理解は大きく進んだ。特に、過去 1 万年間における太陽活動の低い状態と高い状態の頻繁な交替は、実証的な気候記録に明瞭に現れている。こうした気候変化のうち最もよく知られるのは、中世温暖期（西暦 950～1250 年）と小氷期（西暦 1300～1850 年）で、それぞれ太陽活動の高い状態と低い状態に対応する。両期間の気温差は 1.0～1.5 K 程度である。これは太陽活動が気候に大きな影響を及ぼしてきたことを示す。これに対し IPCC は、20 世紀の太陽強制力をわずか 0.05 W/m² と見積もり、気候に影響するには小さすぎるとしている。すると、中世温

暖期と小氷期の気候差を説明できないという難題が残る。しかし、この結果は、太陽活動を全太陽放射照度のごく小さな変化だけに限定して得られたものである。

太陽活動が気候に影響するメカニズムはほかにもある。一つは太陽紫外線放射の変化に基づく。しかし、紫外線変化の影響は、太陽周期を通じて海洋へ流入するエネルギーを説明するには弱すぎるようである。これに対し、雲量へ影響する宇宙線電離によって太陽活動が増幅されるメカニズムは、観測された変化を説明し得る。このメカニズムは現在、理論、実験、観測によって支持されている。フォーブッシュ減少に伴う宇宙線フラックスの急変により、太陽活動から電離の変化、エアロゾル、雲の変化へ至る理論の連鎖の各段階を観察できる。

さらに、放射収支に対する宇宙線の影響は、TSI 変動より 1 桁大きいことがわかっている。宇宙線と気候の関連を支持する別の根拠は、数百万年、さらには数十億年の時間スケールで見られる顕著な一致である。この期間の宇宙線フラックスは太陽系の恒星環境の変化に支配され、太陽活動とは独立している。したがって、宇宙線と雲を含む微物理メカニズムが地球大気中で働いており、太陽活動に関連する観測された気候変動性のかなりの部分を説明し得る、との結論に至る。

全太陽放射照度の長期変化がどの程度になり得るかは未解決である。現在の推定は 0.1% から、外れ値である 0.5% まで幅があり、後者なら気候変動性にとって重要である。一方、TSI 変動が小さければ、TSI は気候変動性の原因ではないことになる。将来の観測によって TSI 変動をより厳密に制約できるかもしれない。

現在、気候科学全般は高度に政治化され、多くの利害が関わっている。したがって、気候における太陽の役割に関する上の結論が強く争われているのも不思議ではない。核心的な問題は、太陽が完新世を通じて大きな影響を及ぼしてきたなら、20 世紀の温暖化にも相当な影響を及ぼしたはずであり、その帰結として二酸化炭素に対する気候感度は低めになる、ということである。その場合、観測されている太陽活動の低下は、近年観測された温暖化の鈍化にも寄与していることになる。

言うまでもなく、太陽活動と気候を結びつける物理メカニズムについて、さらに研究する必要がある。太陽の影響という問題が解決済みであるかのように装っても意味はない。自然起源または人為起源の変化に対する気候感度を定めるうえで最大の不確実性は雲の影響であり、気候に対する太陽の影響の研究は、この分野の理解を大きく進める。このような研究は、これが真に重要な科学的問題であると認識し、その解明に十分な研究資金を配分して初めて可能になる。

9 付録：簡単な海洋モデルによる計算

以下の簡単な計算から、TSI の変動だけでは、11 年周期で観測される海面水温の変動を説明するには小さすぎるのがわかる。詳しくは Shaviv (2008) ³⁸ を参照されたい。

地球大気上端における太陽定数の測定値は次のとおりである。

$$S_0 = 1365 \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

このエネルギーを地球表面全体で平均すると、次のようになる。

$$S = S_0 \frac{\pi r^2}{4\pi r^2} (1 - \alpha) = \frac{S_0}{4} 0.7 \approx 239 \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

ここで、 $\alpha \approx 0.3$ は、氷、雲、陸地、海洋を含む地球の平均アルベドである。太陽周期を通じて太陽放射照度は約 0.1% 変化し、これは 1.4 W/m^2 に相当する。

同じ幾何学的係数とアルベドを適用すると、地表での変化は次のようになる。

$$\Delta S = \frac{\Delta S_0}{4} 0.7 \approx 0.24 \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

これは極大値と極小値の差（ピーク間変化）である。したがって、太陽周期に伴う変動の振幅は次のようになる。

$$\Delta S_A \approx 0.1 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

以上から、TSI の変動によって太陽周期を通じて海洋に供給される平均エネルギーの変化が得られた。次に単純なモデル ⁸³ を用い、11 年周期の太陽放射照度変動が引き起こす温度変化 ΔT を予測する。

$$\frac{d\Delta T}{dt} + K \Delta T = \frac{\Delta S_A}{\rho H C_P} \cos(\omega t) \quad (5)$$

ここで、 ΔT は温度変化、 K は深海と大気へのエネルギー損失を表す散逸率（緩和時間の逆数）、 H は海洋混合層の平均厚さ、 C_P は定圧における水の比熱容量、 ρ は水の密度である（図 15）。この仮定では混合層内の水は十分に混合され、温度は単一の値 ΔT で表せる。

フーリエ変換を用いて上の方程式を解く。 $\Delta T = \Delta T \omega \exp(i\omega t)$ を代入すると、次式を得る。

$$\Delta T = \frac{\Delta S_A}{\rho H C_P (\omega^2 + K^2)^{1/2}} \cos(\omega t + \theta) \quad (6)$$

上式は、太陽周期に伴う太陽放射照度の変動に対する温度応答の振幅を表す。位相差 θ は、散逸率 K および ω と次の関係にある。

$$\tan \theta = \omega / K \quad (7)$$

したがって、位相差を観測すれば散逸率 K を求められる。用いる定数は次のとおりである。

$$\begin{aligned} K &= 1 \text{ year}^{-1} = 3.1 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} \\ H &= 50 \text{ m} \\ C_P &= 4.2 \cdot 10^3 \text{ W s K}^{-1} / \text{kg} \\ \rho &= 1.0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \\ \omega &= 2\pi / 11.0 \text{ years}^{-1} = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

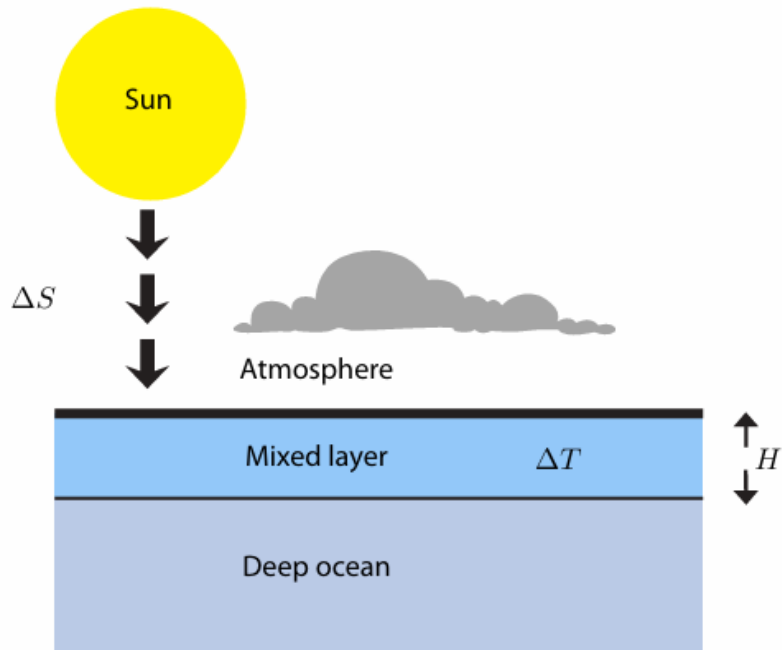


図 15：海洋の混合層の模式図。

ΔS は、海洋に供給されるエネルギーフラックスの変動量である。

H は混合層の厚さで、ここでは 50 m とする。

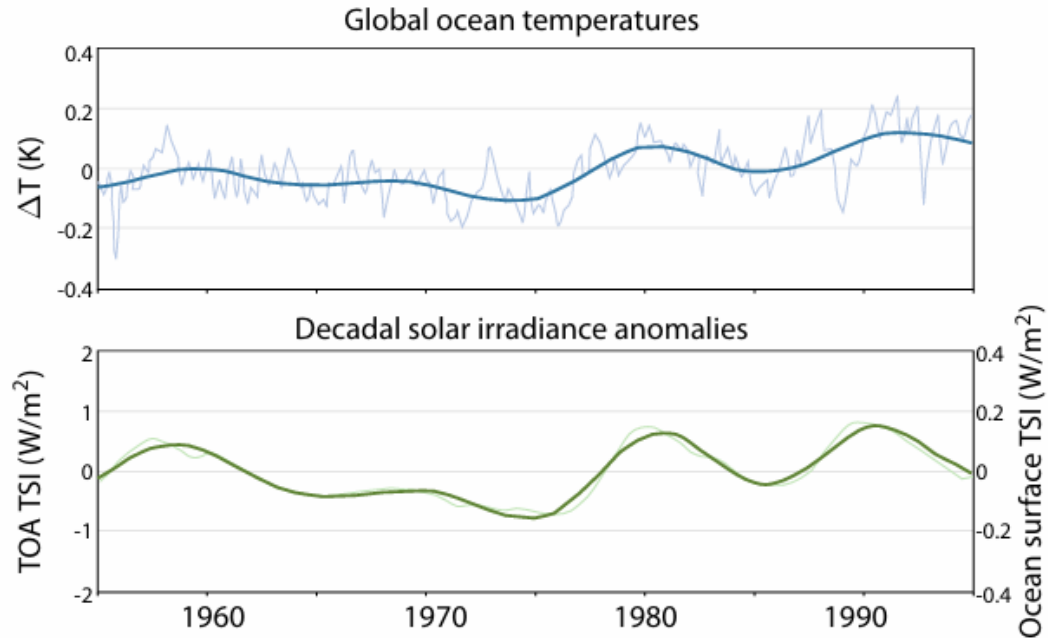


図 16：気温と全太陽放射照度（TSI）の相関。

上段：40 年間にわたる気温変動の観測データ。

太陽信号の振幅が 0.05～0.08 K 程度であることに注目されたい。

下段：全太陽放射照度（TSI）の復元値。

左軸は大気上端での変化、右軸は海面でのエネルギー変化を示す。

振幅が約 0.1 W/m²であることに注目されたい。White et al.⁸³より改変。

これらの値を数式(6)に代入すると、振幅は以下ようになる。

$$\Delta T_{\omega} \approx 0.01 \text{ K} \quad (9)$$

太陽シグナルと温度応答との位相差は、およそ 30° である。

しかし観測によると、太陽周期に伴う温度変化の振幅は 0.05～0.08 K である（図 16）。したがって、検出された太陽シグナルは、太陽放射照度の変化だけから予想される値の約 5～7 倍である。そこで根本的な疑問は、何が太陽シグナルを増幅しているのか、というこ

とである。

参考文献

1. G Myhre, D Shindell, FM Bréon et al., 'Anthropogenic and natural radiative forcing,' in Climate Change2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T Stocker, D Qin, GK Plattner et al., (eds). Cambridge University Press, 2013.
2. LJ Gray, J Beer, M Geller et al., 'Solar influences on climate,' Reviews of Geophysics, 2010, vol. 48.
3. DV Hoyt and KH Schatten, 'Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction,' Solar Physics, 1998, vol. 179, pp. 189–219. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1005007527816>
4. L Svalgaard and KH Schatten, 'Reconstruction of the sunspot group number: The backbone method,' Solar Physics, 2016, vol. 291, pp. 2653–2684. URL: <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0815-8>
5. IG Usoskin, GA Kovaltsov, M Lockwood et al., 'A new calibrated sunspot group series since 1749: Statistics of active day fractions,' Solar Physics, 2016, vol. 291. URL: <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0838-1>
6. DV Hoyt and KH Schatten, 'Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction,' Solar Physics, 1998, vol. 181, p. 491. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1005056326158>
7. F Clette, L Svalgaard, JM Vaquero et al., 'Revisiting the sunspot number. a 400-year perspective on the solar cycle,' Space Science Reviews, 2014, vol. 186, pp. 35–103.
8. KG McCracken and J Beer, 'The annual cosmic-radiation intensities 1391–2014; the annual heliospheric magnetic field strengths 1391–1983, and identification of solar cosmic-ray events in the cosmogenic record 1800–1983,' Solar Physics, 2015, vol. 290, pp. 3051–3069.
9. C Fröhlich, 'Solar irradiance variability since 1978,' Space Science Reviews, 2006, vol. 125, pp. 53–65. URL: <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9046-5>
10. RC Willson and AV Mordvinov, 'Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21–23,' Geophysical Research Letters, 2002, vol. 30. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002GL016038>
11. N Scafetta and RC Willson, 'ACRIM-gap and TSI trend issue resolved using a surface magnetic flux TSI proxy model,' Geophysical Research Letters, 2008, vol. 36. URL:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008GL036307>

12. O Coddington, JL Lean, P Pilewskie et al., 'A solar irradiance climate data record,' *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, vol. 97, pp. 1265–1282. URL: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00265.1>
13. G Kopp, N Krivova, CJ Wu et al., 'The impact of the revised sunspot record on solar irradiance reconstructions,' *Solar Physics*, 2016, vol. 291, pp. 2951–2965.
14. AI Shapiro, W Schmutz, E Rozanov et al., 'A new approach to the long-term reconstruction of the solar irradiance leads to large historical solar forcing,' *Astronomy & Astrophysics*, 2011, vol. 529, p. A67. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016173>
15. T Egorova, W Schmutz, E Rozanov et al., 'Revised historical solar irradiance forcing,' *Astronomy & Astrophysics*, 2018, vol. 615, p. A85.
16. CJ Schrijver, WC Livingston, TN Woods et al., 'The minimal solar activity in 2008–2009 and its implications for long-term climate modeling,' *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011GL046658>
17. PG Judge, GW Lockwood, RR Radick et al., 'Confronting a solar irradiance reconstruction with solar and stellar data,' *Astronomy & Astrophysics*, 2012, vol. 544, p. A88.
18. P Foukal and L Milano, 'A measurement of the quiet network contribution to solar irradiance variation,' *Geophysical Research Letters*, 2001, vol. 28, pp. 883–886. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000GL012072>
19. P Foukal, 'A new look at solar irradiance variation,' *Solar Physics*, 2012, vol. 279, pp. 365–381. URL: <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0017-6>
20. JA Eddy, 'The Maunder Minimum,' *Science*, 1976, vol. 192, pp. 1189–1202.
21. A Moberg, DM Sonechkin, K Holmgren et al., 'Highly variable northern hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data,' *Nature*, 2005, vol. 433, p. 613. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature03265>
22. ME Mann and PD Jones, 'Global surface temperatures over the past two millennia,' *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003GL017814>
23. SP Huang, HN Pollack, and PY Shen, 'A late quaternary climate reconstruction based on borehole heat flux data, borehole temperature data, and the instrumental record,' *Geophysical Research Letters*, 2008, vol. 35.
24. CP Morice, JJ Kennedy, NA Rayner et al., 'Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set,' *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, vol. 117. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JD017187>
25. G Delaygue and E Bard, 'An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the

- past millennium,' *Climate Dynamics*, 2011, vol. 36, pp. 2201–2218.
26. J Beer, ST Baumgartner, B Dittrich-Hannen et al., 'Solar variability traced by cosmogenic isotopes,' *International Astronomical Union Colloquium*, 1994, vol. 143, pp. 291–300.
27. U Neff, SJ Burns, A Mangini et al., 'Strong coherence between solar variability and the Monsoonin Oman between 9 and 6 kyr ago,' *Nature*,2001,vol. 411, pp. 290–293.
28. D Fleitmann, SJ Burns, M Mudelsee et al., 'Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman,' *Science*, 2003, vol. 300, pp. 1737–1739. URL: <http://science.sciencemag.org/content/300/5626/1737>
29. Y Wang, H Cheng, RL Edwards et al., 'The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate,' *Science*, 2005, vol. 308, pp. 854–857. URL: <http://science.sciencemag.org/content/308/5723/854>
30. F Duan, Y Wang,CC Shen et al., 'Evidence for solar cycles in a late Holocene speleothem record from Dongge Cave, China,' *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, pp. 5159 EP–. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/srep05159>
31. P Zhang, H Cheng, RL Edwards et al., 'A test of climate, sun, and culture relationships from an1810-year Chinese cave record,' *Science*, 2008, vol. 322, pp. 940–942.
32. DA Hodell, M Brenner, JH Curtis et al., 'Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands,' *Science*, 2001, vol. 292, pp. 1367–1370. URL: <http://science.sciencemag.org/content/292/5520/1367>
33. GH Haug, D Günther, LC Peterson et al., 'Climate and the collapse of Maya civilization,' *Science*, 2003, vol. 299, pp. 1731–1735. URL: <http://science.sciencemag.org/content/299/5613/1731>
34. HH Lamb, 'The early medieval warm epoch and its sequel,' *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1965, vol. 1, pp. 13–37.
35. BM Fagan, *The Little Ice Age: HowClimateMadeHistory,1300–1850*. Basic Books, 2000.
36. G Bond, B Kromer, J Beer et al., 'Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene,' *Science*, 2001, vol. 294, pp. 2130–2136.
37. F Adolphi, R Muscheler, A Svensson et al., 'Persistent link between solar activity and Greenland climate during the last glacial maximum,' *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, p. 662. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2225>
38. NJ Shaviv, 'Using the oceans as a calorimeter to quantify the solar radiative forcing,' *Journal of Geophysical Research*, 2008, vol. 113.
39. D Howard, NJ Shaviv, and H Svensmark, 'The solar and Southern Oscillation components in the satellite altimetry data,' *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2015, vol.120, pp. 3297–3306.

40. H Svensmark, 'Influence of cosmic rays on Earth's climate,' *Physical Review Letters*, 1998, vol. 81, pp. 5027–5030.
41. D Dahl-Jensen, K Mosegaard, N Gundestrup et al., 'Past temperatures directly from the Greenland ice sheet,' *Science*, 1998, vol. 282, p. 268.
42. JL Lean and MT DeLand, 'How does the sun's spectrum vary?' *Journal of Climate*, 2012, vol. 25, pp. 2555–2560. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00571.1>
43. JD Haigh, 'The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate,' *Nature*, 1994, vol. 370, p. 544.
44. H Lee and AK Smith, 'Simulation of the combined effects of solar cycle, quasi-biennial oscillation, and volcanic forcing on stratospheric ozone changes in recent decades,' *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2003, vol. 108, p. 4049.
45. JD Haigh, M Blackburn, and R Day, 'The response of tropospheric circulation to perturbations in lower-stratospheric temperature,' *Journal of Climate*, 2005, vol. 18, pp. 3672–3685.
46. D Rind, J Lean, J Lerner et al., 'Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing,' *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, vol. 113. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008JD010114>
47. H Svensmark, 'Cosmoclimatology : a new theory emerges,' *Astronomy and Geophysics*, 2007, vol. 48, pp. 010000–1.
48. N Marsh and H Svensmark, 'Galactic cosmic ray and ElNiño-Southern Oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology Project D2 low-cloud properties,' *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2003, vol. 108, p. 4195.
49. AT Evan, AK Heidinger, and DJ Vimont, 'Arguments against a physical long-term trend in global ISCCP cloud amounts,' *Geophysical Research Letters*, 2007, vol. 34. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL028083>
50. ER Ney, 'Cosmic radiation and the weather,' *Nature*, 1959, vol. 183, p. 451.
51. RE Dickinson, 'Solar variability and the lower atmosphere.' *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1975, vol. 56, pp. 1240–1248.
52. H Svensmark and E Friis -Christensen, 'Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships.' *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 1997, vol. 59, pp. 1225–1232.
53. N Marsh and H Svensmark, 'Cosmic rays, clouds, and climate,' *Space Science Reviews*, 2000, vol. 94, pp. 215–230.
54. H Svensmark, JOP Pedersen, ND Marsh et al., 'Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions,' *Royal Society of London Proceedings Series A*, 2007, vol. 463, pp. 385–396.

55. J Kirkby, J Curtius, J Almeida et al., 'Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation,' *Nature*, 2011, vol. 476, pp. 429–433.
56. J Pierce and P Adams, 'Can cosmic rays affect cloud condensation nuclei by altering new particle formation rates?' *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, p. L09820.
57. H Svensmark, MB Enghoff, and JOP Pedersen, 'Response of cloud condensation nuclei to changes in ion-nucleation,' *Physics Letters A*, 2013, vol. 377, pp. 2343–2347. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375960113006294>
58. H Svensmark, MB Enghoff, NJ Shaviv et al., 'Increased ionization supports growth of aerosols into cloud condensation nuclei,' *Nature Communications*, 2017, vol. 8, p. 2199. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02082-2>
59. H Svensmark, T Bondo, and J Svensmark, 'Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds,' *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, p. 15101.
60. J Svensmark, MB Enghoff, NJ Shaviv et al., 'The response of clouds and aerosols to cosmic ray decreases,' *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, vol. 121, pp. 8152–8181. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/2016JA022689>
61. BA Tinsley, G Burns, and L Zhou, 'The role of the global electric circuit in solar and Internal forcing of clouds and climate,' *Advances in Space Research*, 2007, vol. 40, pp. 1126–1139. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117707001135>
62. RG Harrison and MHPA Ambaum, 'Observed atmospheric electricity effect on clouds,' *Environmental Research Letters*, 2009, vol. 4, p. 014003. URL: <http://stacks.iop.org/1748-9326/4/i=1/a=014003>
63. WD Pesnell, 'Predictions of solar cycle 24: How are we doing?' *Space Weather*, 2016, vol. 14, pp. 10–21. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015SW001304>
64. JL Lean and DH Rind, 'How will Earth's surface temperature change in future decades?' *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009GL038932>
65. G Feulner and S Rahmstorf, 'On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth,' *Geophysical Research Letters*, 2010, vol. 37. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010GL042710>
66. GA Meehl, JM Arblaster, and DR Marsh, 'Could a future 'Grand Solar Minimum' like the Maunder Minimum stop global warming?' *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, pp. 1789–1793.
67. H Abdussamatov, 'Grand minimum of the total solar irradiance leads to the little ice age,' *Journal of Geology & Geosciences*, 2013, vol. 113.
68. A Indermühle, TF Stocker, F Joos et al., 'Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂

- trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica,' *Nature*, 1999, vol. 398, pp. 121–126.
69. ME Mann, RS Bradley, and MK Hughes, 'Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations,' *Geophys. Res. Lett.*, 1999, vol. 26, pp. 759–762.
70. S Huang, H Pollack, and P Shen, 'Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures,' *Nature*, 2000, vol. 403, p. 756.
71. WS Broecker, 'Was the Medieval Warm Period global?' *Science*, 2001, vol. 291, pp. 1497–1499. URL: <http://science.sciencemag.org/content/291/5508/1497>
72. W Soon and S Baliunas, 'Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years,' *Climate Research*, 2003, vol. 23, pp. 89–110.
73. DW Oppo, Y Rosenthal, and BK Linsley, '2,000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool,' *Nature*, 2009, vol. 460, p. 1113. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature08233>
74. B Christiansen, 'Reconstructing the NH mean temperature: Can underestimation of trends and variability be avoided?' *Journal of Climate*, 2011, vol. 24, pp. 674–692. URL: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3646.1>
75. B Christiansen and FC Ljungqvist, 'Reconstruction of the extratropical nh mean temperature over the last millennium with a method that preserves low-frequency variability,' *Journal of Climate*, 2011, vol. 24, pp. 6013–6034. URL: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4145.1>
76. S Lüning, M Galka, and F Vahrenholt, 'Warming and cooling: The Medieval Climate Anomaly in Africa and Arabia,' *Paleoceanography*, 2017, vol. 32, pp. 1219–1235. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017PA003237>
77. S McIntyre and R McKittrick, 'Corrections to the Mann et. al. (1998) proxy data base and Northern Hemispheric average temperature series,' *Energy & Environment*, 2003, vol. 14, pp. 751–771. URL: <https://doi.org/10.1260/095830503322793632>
78. H von Storch, E Zorita, JM Jones et al., 'Reconstructing past climate from noisy data,' *Science*, 2004, vol. 306, pp. 679–682. URL: <http://science.sciencemag.org/content/306/5696/679>
79. S McIntyre and R McKittrick, 'Hockey sticks, principal components, and spurious significance,' *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004GL021750>
80. S McIntyre and R McKittrick, 'The M&M critique of the MBH98 Northern Hemisphere climate index: Update and implications,' *Energy & Environment*, 2005, vol. 16, pp. 69–100. URL: <https://doi.org/10.1260/0958305053516226>
81. H von Storch and E Zorita, 'Comment on 'hockey sticks, principal components, and

- Spurious significance' by S. McIntyre and R. McKittrick,' *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2005GL022753>
82. S Ziskin and N Shaviv, 'Quantifying the role of solar radiative forcing over the 20th century,' *Advances in Space Research*, 2011.
83. B White, J Lean, DR Cayan et al., 'Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance,' *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, vol. 102, pp. 3255–3266. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JC03549>
84. J Kazil, ER Lovejoy, MC Barth et al., 'Aerosol nucleation over oceans and the role of galactic cosmic rays,' *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, vol. 6, pp. 4905–4924.
85. E Snow-Kropla, J Pierce, D Westervelt et al., 'Cosmic rays, aerosol formation and cloud condensation nuclei: sensitivities to model uncertainties,' *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol. 11, pp. 4001–4013.
86. JE Kristjánsson, CW Stjern, F Stordal et al., 'Cosmic rays, cloud condensation nuclei and clouds-a reassessment using MODIS data,' *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2008, vol. 8, pp. 7373–7387.
87. T Sloan and AW Wolfendale, 'Testing the proposed causal link between cosmic rays and cloud cover,' *Environmental Research Letters*, 2008, vol. 3, p. 044001.
88. J Calogovic, CA Ibert, F Arnold et al., 'Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover,' *Geophysical Research Letters*, 2010, vol. 37, p. 3802.
89. B Laken, D Kniveton, and A Wolfendale, 'Forbush decreases, solar irradiance variations, and anomalous cloud changes,' *Journal of Geophysical Research*, 2011, vol. 116, p. D09201.
90. NJ Shaviv, 'Cosmic ray diffusion from the galactic spiral arms, iron meteorites, and a possible climatic connection,' *Physics Review Letters*, 2002, vol. 89, p. 051102.
91. NJ Shaviv, 'The spiral structure of the Milky Way, cosmic rays, and ice age epochs on Earth,' *New Astronomy*, 2003, vol. 8, pp. 39–77.
92. NJ Shaviv and J Veizer, 'A celestial driver of Phanerozoic climate?' *GSA Today*, 2003, pp. 4–11.
93. H Svensmark, 'Evidence of nearby supernovae affecting life on earth,' *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, vol. 423, pp. 1234–1253. URL: <http://mnras.oxfordjournals.org/content/423/2/1234.abstract>
94. H Svensmark, 'Imprint of Galactic dynamics on Earth's climate,' *Astronomische Nachrichten*, 2006, vol. 327, p. 866.
95. NJ Shaviv, A Prokoph, and J Veizer, 'Is the solar system's galactic motion imprinted in the Phanerozoic climate?' *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, p. 6150. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/srep06150>

96. BA Tinsley and RA Heelis, 'Correlations of atmospheric dynamics with solar activity evidence for a connection via the solar wind, atmospheric electricity, and cloud microphysics,' *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, vol. 98, pp. 10375-10384. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/93JD00627>
97. RG Harrison, 'The global atmospheric electrical circuit and climate,' *Surveys in Geophysics*, 2004, vol. 25, pp. 441–484.