

3. 太陽活動と地球環境変動

3. Solar Activity and Terrestrial Environmental Change

3.3 太陽活動に伴う宇宙線変動と気候変動

3.3 Solar Activity, Cosmic Ray Variations, and their Impacts on Climate Change

宮原ひろ子^{1,2)}

MIYAHARA Hiroko ¹⁾武蔵野美術大学教養文化研究室,²⁾独立行政法人海洋研究開発機構システム地球ラボ (原稿受付:2013年8月30日)

銀河系から地球に飛来する宇宙線は、太陽圏を満たす太陽の磁場によって遮蔽を受け減衰される.したがっ て、宇宙線の地球への飛来量は、基本的には太陽活動の強度と反相関の関係にある.しかし、宇宙線は太陽圏内 にスパイラル状に広がる太陽磁場の構造に依存して複雑な伝搬経路を取るため、太陽磁場の強度の増減だけでは なく太陽圏磁場の大規模構造の変動も、地球における宇宙線の時間変動特性を決定づける重要な要因となってい る.したがって、太陽圏全体の磁場構造が太陽活動の変動に伴ってどのように変化するのか、また、荷電粒子が その構造中をどのように伝搬するのか、といったことを知ることが、地球における宇宙線量の変動特性を理解し 気候への波及を調べる上で重要となってくる.本節では、17世紀に発生した数十年にわたる太陽活動の低下期 (マウンダー極小期)を例に、太陽圏の変動と宇宙線変動との関係性を議論する.

Keywords:

solar activity, heliospheric environment, galactic cosmic rays (GCRs), climate variation, cosmoclimatology

3.3.1 はじめに

2章で述べられているように、太陽活動は様々な経路で 地球表層環境に作用し得る.太陽放射量そのものの変動の 影響,あるいは紫外線などの太陽放射の高エネルギー成分 が大気中で起こる化学反応を促進することによる影響,そ のほか,太陽風粒子の降り込みが同じく大気化学に与える 影響などが考えられる.それに加えて,銀河系から飛来す る宇宙線が地球大気に作用する効果も考えられる.この場 合,太陽活動の変動に応じて太陽風磁場が変動し、それが 銀河系からの宇宙線の遮蔽率を変えることにより,間接的 に太陽活動の影響をもたらす.詳細なメカニズムは4章や 5章で述べられているが,大気電気や雲核生成への作用を 通じて気候に影響している可能性が示唆されている.

2章の図3に示すように、太陽活動に伴う日射量,紫外 線,宇宙線などの変動は、いずれも太陽表面の磁場活動に 起因するものであるため、非常に似かよった時間変動パ ターンを有する.そのため、各々の影響を分離することは 容易ではない.銀河宇宙線が気候に及ぼす影響を抽出する には、いくつかの方策が考えられる.1つは、宇宙現象に 着目する方法である.例えば、銀河宇宙線を発生させてい る超新星残骸の密集域、すなわち天の川銀河の腕に対する 太陽系の位置の変化による気候への影響をみるなどの方法

が可能である.これについては, Shaviv[1]や, Svensmark [2]などにより、影響を示唆するデータが示されている. そ の他,太陽活動とは独立に宇宙線を遮蔽する地磁気の効果 を見る方法がある。例えば、地磁気エクスカーションや地 磁気反転期など,双極子成分が弱くなり相対的に4重極成 分が卓越する地磁気イベントにおいては、特に中低緯度域 で宇宙線降下量の大幅な増加が予想される. 地磁気イベン トの影響に関しては、大阪湾の海底から掘削された地層に 含まれる花粉の分析に基づいて復元された周辺地域の樹種 の時間的推移から、地磁気反転期において寒冷な気候が発 生していたことが示されており,やはり宇宙線の影響の存 在を示唆している[3]. あるいは,太陽フレアに伴って発生 する数日スケールの宇宙線量の減少(フォーブッシュ減 少,図1)を手がかりとすることもできる.太陽フレアは 活動的な黒点において発生するため、日射や紫外線の変動 もともなうが、それらの変動と宇宙線の減少はタイミング がずれるため、原理的には影響の分離が可能である.間接 的に放射線の気候への影響を探る手法として、大気圏核実 験や原発事故などを手がかりとすることも可能である.

以上の手段に加えて、比較的時間スケールが短くデータ が収集しやすいのが、宇宙線の22年変動の影響をトレース する方法である.太陽活動の11年変動に伴い、宇宙線は概

¹⁾Musashino Art University. Kodaira, TOKYO 187-8505 Japan

²⁾ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Laboratory for Earth Systems Science author's e-mail: miyahara@musabi.ac.jp



図1 オウル大学(フィンランド)に設置された中性子モニター で観測された宇宙線強度の日日変動、数十日おきにみられ る宇宙線フラックスの低下は太陽フレアに伴うコロナ質量 放出に起因する。

ね反相関で増減する.太陽活動が活発化すると地球への宇 宙線の飛来量は減少し,逆に太陽活動が静穏になると宇宙 線量は増加する.しかし,それに加えて22年の変動成分が みられる.これは,11年ごとに太陽の極磁場が反転する影 響によるもので[4],荷電粒子である宇宙線に特有の変動 である.しかも興味深いことに,この22年変動成分は太陽 活動の数百年スケールの長期的な変動に伴って,プロファ イルが大きく変化する可能性があることも明らかになりつ つある[5,6].22年変動に着目することで,宇宙線が気候に 与える影響を明確に分離できる可能があるのである.

銀河宇宙線のデータは、1960年代以降に関しては中性子 モニタによる連続観測データが存在するが、その時期に関 しては宇宙線の22年変動はそれほど明確ではない.一方、 第3項にて述べるように、太陽活動が極端に活発化した り、あるいは静穏になったりした場合には、22年変動の振 幅が増幅し得る[7].したがって、それらの時期について、 古気候学的手法によって復元された気候変動データと宇宙 線変動のデータを比較することが有効な手段である.

以下,まず古気候復元について簡単に述べたあと,宇宙 線変動の復元と,その変動の特性の時間変化について述べ る.

3.3.2 古気候復元

3.3.1節でも述べたように、宇宙線の気候への影響を調 べる際に有力な手段となるのは、古気候学的手法によって 得られた気候復元データと宇宙線データとの比較である. 特に、宇宙線が特徴的な変動を有していた時代に遡ること で、有意な信号を検出しやすくなる.過去の気候変動は、 年輪幅の分析による気温の復元のほか、年輪あるいは氷床 の年層に含まれる安定同位体の分析、湖沼堆積物や海洋堆 積物の含有物分析が広く用いられている.そのほか、古日 記に残された気象記録、樹木の開花や紅葉の変化から気温 の変化を追うという研究も進められている.また、本節で は詳しく述べないが、掘削孔(ボアホール)中の深度方向 の温度プロファイルには、地表温度の時間変化の情報が反 映される.数百メートルの深度にわたって温度プロファイ ルを測定することで、過去数百年程度にわたる温度の変動 が復元可能である[8]. 地表の熱が内部に伝導することに よる直接的な温度の情報であるため,正確な絶対値が得ら れるという利点があるが,一方で数十年単位の変動は復元 しにくい.

以上に述べた手法のうち,比較的手法が簡便で広く行われているのは年輪幅の解析である.主に気温の指標として 用いられることが多いが,地域によっては降水を反映して 年輪幅が増減する場合もあり[9],気象観測データが存在 する現代におけるキャリブレーションを行ったのち,古気 候データを取得する.

安定同位体の分析には2種類あり,炭素同位体,酸素同 位体がある.樹木の葉には,光合成や蒸散によって濃縮さ れた炭素13と酸素18が含まれているが,それが相対湿度の 変化に応じて希釈されるため,同位体比の分析から気候が 復元できる[10].また,糖の合成速度が気温や日照量の影 響を受けるため,それらの復元も可能な場合がある.サン ゴの年輪の安定同位体分析や微量元素も気候復元に用いら れる.いずれの場合も,地域によって同位体が強く反映す る気候パラメータが異なるため,こちらも予め現代におけ る気象データとの比較によるキャリブレーションが必要と なる.

湖沼堆積物や海洋堆積物を用いる場合は,花粉などの分 析から気温の復元が可能である.3.3.1節で述べた,地磁気 への気候応答を検出したデータ[3]は,海洋堆積物の花粉 分析による.そのほか,海洋堆積物の場合は,氷河性砕屑 物などの分析から,海洋表層の温度などの復元が可能であ る[11].以下に述べるが,海洋堆積物のデータからは,太 陽活動への長期的な応答の変化について興味深い結果が示 されている.

そのほか, Aono 2008[12]らは, 古日記に残されたサクラ の開花日の記録から, 植物生理学に基づいて春先の気温を 復元することに成功している. 年単位で約1200年前までの 復元が試みられている[13]. 年輪幅や安定同位体のよう に, 樹木の樹齢に依存して成長率が変わったり, 幼樹期に 同位体比が高くなる「幼樹効果」などの影響がないため, 比較的長期的なトレンドも正確に検出できるという利点が ある.

3.3.3 宇宙線変動の復元

過去の宇宙線の変動は、樹木年輪や氷床の年層の分析から復元することができる。それらの年層には、炭素14やベリリウム10など、宇宙線が大気との相互作用によって作り出す放射性同位元素が含まれている。炭素14は、宇宙線の二次中性子と窒素原子核との相互作用によって作り出され、二酸化炭素の形で大気中あるいは海洋を循環する。そして、光合成によって樹木に取り込まれる。一方ベリリウム10は、大気中の窒素などの原子核を宇宙線が破砕するスパレーションによって生成される。生成されたベリリウム10は降雪や降雨によって地表に降下する。南極やグリーンランドなど、降雪が万年雪として層状に堆積している場所においては、圧縮された氷の掘削によって、年層の連続堆積物を採取することが可能であり、その年層ごとのベリリ

ウム10の分析により宇宙線量の時系列が復元できる.

氷の年層の場合,1年ごとの層を厳密に単離することが 困難であったり,年代の決定に誤差が生じたりするため, 正確な年代軸に基づく宇宙線周期の議論が難しいが,シグ ナルがそれほど減衰されないため,比較的クリアなシグナ ルが得られやすい.一方,炭素14の方は,炭素循環を経て 樹木に取り込まれるため,シグナルが大きく減衰する.た とえば,宇宙線は,通常11年間で約20~25%程度変動する が,樹木年輪中の炭素14の濃度変動は0.3%程度に減衰す る.したがって,2章の図4にあるような宇宙線変動が もってタイムプロファイルの詳細な形状の情報は消失しや すい.

3.3.4 マウンダー極小期における宇宙線変動と 太陽圏環境

マウンダー極小期(図2上)は17世紀に発生した長期的 な黒点消失期である[14].この発生の物理メカニズムを解 明し発生の予測を行うことが太陽物理学の重要な課題の一 つとなっている。約11年毎にアップダウンを繰り返す黒点 数のピーク値の推移として80年周期や200年周期が存在す ることが知られている[15].また,過去1万間にさかのぼ る宇宙線生成核種のデータからは、太陽活動に1000年周期 や2000年周期といったさらに長周期のアップダウンがある ことも判明している[11].

中世に太陽活動が長期的な活発化をみせたのち、14世紀 以降連続してウォルフ極小期、シュペーラー極小期、マウ ンダー極小期、ダルトン極小期と黒点消失期が発生してお り、中世以降の長期的な寒冷化をもたらした一因と考えら れている[14].太陽活動と気候変動との関連性を議論する 上で頻繁に取り上げられるマウンダー極小期であるが、宇 宙線影響の観点からも非常に重要である可能性が最近判明 しつつある[6.16]. 2009年にグリーンランドにおいて掘削 された氷床の年層から得られた単年分解能のベリリウム10 データ[17] から,黒点が70年間にわたって消失していた 当時、宇宙線の変動が特異になっていたことが発見された のである (図2下) [6,18]. マウンダー極小期においては、 黒点数が極端に減少しているため,黒点数自身に明確な周 期的変動はみられない.しかし、樹木年輪の炭素14濃度の 分析から、当時11年周期は継続しており、ただし周期長が 伸びて14年周期になっていたことがわかっている[19]. ベ リリウム10のデータが示していたのは、宇宙線が約14年の 周期で変動しているほかに、非常に強い28年の変動成分を もっていたということである.

図2下を見ると、マウンダー極小期とダルトン極小期に 相当する年代に、全体的な線量の増加がみられる.加えて、 マウンダー極小期においては短期的に宇宙線が急増するイ ベントが周期的に訪れているのがわかる.

マウンダー極小期について,炭素14の14年周期に基づき ベリリウム10の変動を重ね合わせたものが図3である.太 陽双極子場が正極性に相当する年代と,負極性に相当する 年代,すなわちいわゆる22年周期に該当するスパンでデー タの重ね合わせを行っている.2章の図5にみられるよう





図3 ベリリウム10濃度の22年変動[18].図2下のマウンダー極 小期周辺における変動を太陽双極子磁場の極性ごとに重ね 合わせたもの.西暦1636-1669年(破線)、1669-1691年(実 線)、1691-1719年(点線)、1719-1739年(灰線)のデータ を、太陽活動極大期(宇宙線強度の極小)を起点/終点と して重ね合わせた.

に、太陽双極子磁場の極性の影響は、現代においてはわず かな変動プロファイルの差としてしかみられないが、マウ ンダー極小期には明らかな線量の差として表れているのが わかる.負極性の活動極小期において、正極性と負極性で 約40%もの線量の差がみられる.

この差は、太陽圏内に広がるスパイラル構造をもって磁場において宇宙線が子午面方向にドリフトを受けることの影響によるものと考えられる[4].約27日の周期で太陽が自転しているため、太陽から伸びる磁力線は、図4のようなスパイラル構造を有する。そのため、太陽の磁軸に沿って太陽圏を垂直に切った断面を見ると、磁力線はその断面に対して垂直な方向に走ることになる。その影響で、荷電粒子は磁気中性面付近において、負極性時には太陽圏中心方向へ、正極性時には太陽圏の外縁方向へ力を受け、蛇行しながら進む(メアンダリング).太陽圏の南北両極方向においては、宇宙線は負極性時には極方向へ、また正極性

Special Topic Article



図4 太陽圏における磁気中性面の構造の断面図.磁力線方向と 宇宙線(GCRs)の軌跡は、太陽双極子磁場が負極性時のも ので、正極性時には向きが逆転する.負極性時においては、 宇宙線は太陽圏の外縁から太陽方向に向けて伝搬し、その 後、太陽圏の南北両極方向へ移動する.

時には磁気中性面方向へと力を受ける.そのため,太陽双 極子磁場の極性に応じて,宇宙線の軌道が変わり,遮蔽率 が変わるのである.Kota & Jokipii[4]は,数値シミュレー ションにより,太陽双極子磁場に依存して地球に飛来する 宇宙線量がどの程度変化するかについて計算を行っている (図5).その結果,線量は双極子磁場に依存して明らかに 異なること,またその依存性は,太陽圏磁場のチルト角に 応じて変化することが示された.チルト角とは,磁気中性 面の法線が太陽の自転軸となす角度のことである.黒点活 動が静穏になると太陽磁場の双極子成分が卓越し,チルト 角は減少し,すなわち太陽圏磁場のスパイラル構造は平坦 になる(図6).一方で,黒点活動が活発化すると,4重極 成分が卓越し,チルト角は増加する.通常,11年周期の極 小においてはチルト角は5~10°程度に減少し,極大にお いては75°程度に増加する.

図5に照らしあわせて,現代の50年間における宇宙線変動を構築すると,観測データを非常によく再現する(図7 (b)).この図を基に,先ほどのマウンダー極小期の宇宙線 変動プロファイルを再現できる太陽圏モデルを構築する (図7(a))と,マウンダー極小期においては黒点数が非常 に減少していたにもかかわらず,極大期において極性が反 転していたことと,極小期において通常よりも構造が平坦 になっていたことが示唆される.これは,マウンダー極小 期で太陽表面における黒点活動が減少しチルト角が小さく なっていたであろうことと整合的である.

図7に基づく復元(図8)によれば、チルト角がゼロ度 になった場合の、正極性と負極性の宇宙線量の差 ΔFは、 十数%である.図3のベリリウム10の濃度差の半分程度で ある.この点については、太陽圏内における宇宙線のドリ フトに加えて、太陽圏の外縁にあるヘリオシースの影響の 可能性がある.ヘリオシースとは、太陽風が星間物質との 衝突により減速し、磁気中性面の畳み込みが強くなってい る箇所であり、荷電粒子は直進する形で太陽圏内に浸入し ている可能性がある(図9)[20].マウンダー極小期にお



図5 数値シミュレーションによる宇宙線飛来量の太陽双極子磁場極性に対する依存性[4].上の4つの図は、それぞれのチルト角に対応する太陽圏の磁気中性面の構造を表している。図4に示したように、正極性時と負極性時において、宇宙線の伝搬経路が違うために、遮蔽の度合い、すなわち地球への宇宙線飛来量が異なることを示している。



図6 太陽活動の11年変動に伴う、太陽圏の磁気中性面(カレン トシート)のチルト角の変動[21].太陽活動の増大にとも なってチルト角も増大する.

いては、磁場構造の変化だけでなく磁場強度も低下していた可能性があるため、荷電粒子のサイクロトロン半径が増加し、より侵入しやすくなっていた可能性がある.この両者を合わせて吟味すると最大で40%程度の増加が可能になる(図9)[18].

図5からさらに示唆されることは、太陽活動が逆に活発 化した場合にも宇宙線の22年変動周期が増幅されうるとい う点である[7].例えば、11年変動の極小においても太陽 表面の磁場活動が静穏にならずチルト角が十分に小さくな らない場合は、図7(c)のような時間プロファイルが予想 される.興味深いことに、11年変動成分は極端に小さくな り、正極性において全体的にフラックスが高い時期が続



図7 図5から推定される宇宙線の11年/22年変動プロファイル [7].太陽活動の11年周期での変動(破線)にともなってチ ルト角が(a)0-75°の範囲で変化した場合、(b)5-75°の範囲 で変化した場合、(c)30-75°の範囲で変化した場合の宇宙 線の変動プロファイルを実線で示す.灰色で示す11年間 が、太陽双極子磁場が正極性のフェーズに対応する.



図8 図7において復元されたマウンダー極小期(黒線)と通常 期(灰線)の宇宙線プロファイルの比較[18].太陽双極子 磁場が負極性のフェーズにおいてのみ、宇宙線強度に差異 (△F)がみられる.



図9 ヘリオシースにおける磁気中性面の畳み込みが宇宙線の伝 搬に与える影響の模式図[18].図5のシミュレーションに よれば、太陽圏磁場のチルト角がゼロになることによる負 極性時と正極性時の宇宙線強度の差異ΔFは、15~20%程度 にとどまるが、ヘリオシースにおける磁場強度の低下に よって宇宙線のサイクロトロン半径が増加することによっ て、さらに15~20%程度の宇宙線強度の増加が負極性時に 見込まれる.

き,その後の負極性の11年間においてはフラックスがほぼ 横ばいになるというプロファイルになっている.太陽活動 が活発化すると,太陽周期は8~9年周期に短くなること が示唆されており[16],宇宙線の22年変動成分は16~20年 周期として現れるはずである.活発期における宇宙線変動 プロファイルについては,今後,中世などの太陽活動活発 期におけるベリリウム10などの分析から,その検証が必要 である.

3.3.5 宇宙線変動と地球気候変動

太陽活動と地球気候には多くの相関関係が指摘されており、その時間スケールは多岐にわたる.古気候データがまだそれほど充実していなかった1997年の Hoyt&Schattenらの著書[22]において既に、太陽活動と気候変動の周期性が、27日周期や、11年周期、80年周期など数多くの共通性をもつことが指摘されている.特質すべきは、22年周期で、気温や降水などの数多くのパラメータにその周期性がみられることが指摘されている.

この22年周期変動が宇宙線に起因するものであるかどう かは、上述のマウンダー極小期の特異な宇宙線変動に対す る気候応答が一つの手がかりを与えている.Yamaguchi ら[6]は、17世紀の樹木年輪の安定同位体分析から、中部日 本の相対湿度を復元し、上述の宇宙線の28年変動に非常に よく合致したシグナルが検出されることを指摘した.28年 ごとに1年程度宇宙線が増加することに対応し、中部日本 では1年スケールの急激な相対湿度の増加が観測されてい る.すなわち、気候変動に太陽双極子磁場への強い依存性 がみられるのである.これは日射量変動や紫外線などの影 響では説明できない.また、1年間だけ突出した変化がみ られる点で、太陽風の影響とも考えにくい.

マウンダー極小期におけるこの1年スケールの宇宙線の 増加は、宇宙線に対する気候システム応答をトレースする 貴重なイベントとなっている。宇宙線に対する雲活動の応 答は、全球一様ではない[23].地球上で特に応答しやすい 地域があり、その変化が大気循環を経て全球に波及してい ると考えられる。その際に、どのような変化が発生してい たのかについて,全球の気候,とくに降水の変化が貴重な 情報を与える可能性がある. Mann[24]によれば,小氷期 における気候応答には地域差があり,日本は特に影響を受 けやすい地域であったことがわかっている.モンスーン活 動や前線活動などに宇宙線がどのような複雑な影響を与え 得るのかを明らかにするのが今後の課題である.

宇宙線に対する気候応答を古気候学的に探る上で、氷期 における両者の関係性を探ることも、メカニズムに迫る一 つの手がかりとなる. Tinsley[25]によれば、氷期において は大気中の氷結核が増加していたことが予想されるため, 宇宙線に対する気候システム応答の感度が増加していたと 予想されている.実際,氷期においては太陽 - 気候変動の 相関が強くなっており、気候応答の振幅が大幅に増幅して いたことが示唆されている[26]. Bond ら[11]によって, 間氷期の1万年間を通じて太陽活動の1000年/2000年周期 が気候変動を駆動していたことが示され、太陽活動と気候 変動の強い結びつきを示す重要なデータとなっているが, Obrachta ら[26]は、そのデータを氷期に延長し、両者の関 係性を議論した.具体的には、北大西洋における海底の土 壌の地層に残された氷河性砕石物の時系列データから,海 水温の変動やローレンタイド氷床の拡大の指標を得てい る. 氷期においては間氷期よりも振幅の大きい原因不明の 千年スケールの大きなアップダウンがあることが知られて きたが、それらの原因がやはり太陽活動にあることを示し た.残念ながら1000年、2000年スケールにおいては、宇宙 線の影響を分離することは不可能であるが、今後さらにそ のデータを延長し、地磁気強度が低下する時代における気 候変動の1000年,2000年周期変動の振幅を調べることで, 重要な知見が得られると考えられる.地磁気は、太陽モ ジュレーションが特に強く影響する数 GeV 程度のエネル ギーの宇宙線を強く遮蔽しているため、地磁気強度が低下 すると地球に浸入する宇宙線の1000年,2000年周期変動成 分が数倍程度に増幅する.気候変動に同様の振幅の増加が みられれば、宇宙線の影響が示唆される.

3.3.6 おわりに

宇宙線が大気動態に影響する具体的な素過程は研究途上 であるが、古気候学的な研究からは、宇宙線が気候変動に 重要な影響を与えていることを支持するデータが数多く得 られつつある.気候システムを太陽圏システムという括り で捉えその変動物理を包括的に明らかにすることが、地球 環境の変動を理解し、さらには将来予測の確度を向上させ る上で重要となってくると考えられる.

謝 辞

本節は、東京大学大気海洋研究所の横山祐典准教授、坂 下渉日本学術振興会研究員、スティーブン・オブラクタ研 究員、カリフォルニア州立大学の山口保彦研究員、国立極 地研究所の片岡龍峰准教授、弘前大学の堀内一穂助教らと 進めてきた共同研究を中心に現状をまとめたものである。 本研究は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)の補助 を受けている.

参考文献

- [1] N. Shaviv, New Astronomy 8, 39 (2003).
- [2] H. Svensmark, Astron. Nachrichten 327, 866 (2006).
- [3] I. Kitaba *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. doi: 10.1073/ pnas.1213389110 (2013).
- [4] J. Kota and R. Jokipii, Adv. Space Res. 27, 529 (2001).
- [5] H. Miyahara *et al.*, Proc. IAU XXVII General Assembly (2009).
- [6] Y.T. Yamaguchi *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. 107, 20697 (2010).
- [7] 宮原ひろ子:地学雑誌 119,510 (2010).
- [8] S. Huang *et al.*, Nature 403, 756 (2000).
- [9] M.S. Morales, Clim. Past 8, 653 (2012).
- [10] 中塚 武:低温科学 65,49 (2007).
- [11] G. Bond et al., Science 294, 2130 (2001).
- [12] Y. Aono and K. Kazui, Int. J. Climatol. 28, 905 (2008).
- [13] Y. Aono and S. Saito, Int. J. Biometeorol. 54, 211 (2010).
- [14] J. Eddy, Science 192, 1189 (1976).
- [15] M. Stuiver and T.F. Braziunas, Nature 338, 406 (1989).
- [16] H. Miyahara et al., Earth Planet. Sci. Lett. 272, 290 (2008).
- [17] A.-M. Berggren *et al.*, Geophys. Res. Lett. **36**, L11801 (2009).
- [18] R. Kataoka et al., Space Weather 10, S11001 (2012).
- [19] H. Miyahara et al., Sol. Phys. 224, 317 (2004).
- [20] V. Florinski, Adv. Space Res. 48, 308 (2011).
- [21] J.T. Hoeksema, Space Science Rev. 72, 137 (1995).
- [22] D. Hoyt and K. Schatten, *The Role of the Sun in Climate Change* (Oxford Univ. Press, 1997).
- [23] N. Marsh and H. Svensmark, J. Geophys. Res. 108, 4195 (2003).
- [24] M. E. Mann et al., Science 326, 1256 (2009).
- [25] B. Tinsley, EOS 90, 397 (2009).
- [26] S.P. Obrochta, Quaternary Sci. Rev. 55, 23 (2012).