

## 4.4 古気候データにみる太陽活動の気候影響

宮原 ひろ子 (武蔵野美術大学)

(2019年12月6日受付、2021年5月31日公開)

過去の気候変動は、間接的な指標により復元される。例えば、比較的最近の2000年ほどの気温の復元には、年輪幅の解析が用いられることが多い。木の成長率が年輪の幅に反映されるため、多くの地域において成長率の変動は夏季の気温変動を最も強く反映する。樹木の生育環境によっては降水量等に敏感に応答することもあるため、あらかじめどの気象パラメーターに応答する地域であるのかを検証しておくことが必要である。過去の気温変動はほかに、掘削抗中の温度計測によっても復元することが可能である (Huang et al., 2000)。地球表層の温度変化が熱伝導によって時間とともに地中に伝わっていくことを利用したものである。加えて、グリーンランドの氷床中の温度計測から、過去1000年間の履歴が復元された例もある (Dahl-Jensen et al., 1998)。掘削抗の熱伝導計測による気温の復元値は時間分解能が低いが、より直接的に熱の履歴を反映したものであるため、絶対値の信頼性は高いと考えられる。

ほかに植物生理学に基づき過去の気温変化が調べられた例として、古典籍に残されたヤマザクラの満開の記録を利用した例がある (Aono and Kazui, 2008)。ヤマザクラの満開日は、3月の平均気温と高い相関があり、それに基づき、京都に残された9世紀以降の日記から、現代にかけての1200年間にわたる気温変動が復元された。ほかに、日記に残された日々の天候の記録から降水日数を割りだし、それと高い相関関係を示す夏季の気温変化を復元した例もある (Mikami, 2008)。ヨーロッパにおいては、ワインの醸造に用いるブドウの収穫日の記録が600年分残されており、やはり気温の復元に用いられた (I. García de Cortázar-Atauri et al., 2010)。

そのほか、サンゴ骨格中の Sr/Ca 比から数百年以上の期間にわたる海水温の変動が復元された例もある (Kawakubo et al., 2017)。

より長期的な気温変動は、例えば、湖底堆積物や海底堆積物の花粉の分析 (Nakagawa et al., 2003; Hayashi et al., 2010; Kitaba et al., 2013) や、海底堆積物に含まれる氷河性碎屑物などから復元される (Bond & Lotti, 1995)。氷床コアに含まれる酸素同位体比も、気候変化の指標として広く用いられている (Grootes et al., 1993)。

一方、過去の乾燥化/湿潤化の傾向は、鍾乳石に含まれる酸素同位体比などから復元される。降水量が増加すると降水に含まれる酸素の同位体比が低くなることから (Amount effect 効果)、降水量の復元が可能となる。ほかに、近年、樹木年輪の酸素同位体比などからも乾湿環境の復元が活発に行われてきている。樹木の酸素同位体比の場合には、葉の裏にある気孔の開閉の度合いが相対湿度に依存していることと、気孔の開閉により葉内への外気の取り込みが影響を受けることから、湿潤化が進むと酸素同位体比が低くなる傾向を示す (Yamaguchi et al., 2010)。

古気候と太陽活動との比較は古くからなされてきた。洪水、干ばつ、湖の水位など、数多くのデータの中に、太陽活動に特徴的な11年周期や約90年の周期性などが検出されてきた (Hoyt and Schatten, 1997)。

太陽活動と気候変動との対応が顕著な例として、小氷期が挙げられる。13世紀後半以降、太陽活動は、マウンダー極小期をはじめとする度重なる太陽活動の低下を起こしてきたが (図 1)、同期して地球では小氷期と呼ばれる寒冷な気候に見舞われていた。小氷期が発生する以前は、気候は数百年にわたって温暖な状態が続いていたが、それも太陽活動が活発であった時代と対応している。小氷期においては、北ヨーロッパを中心に氷河が拡大し、穀物の収穫量の低下、栄養失調による伝染病の蔓延、餓死や伝染病による死亡者数の大幅な増加が発生した。1815年のタンボラ山の大噴火をはじめとする火山噴火も、小氷期の気候の悪化を後押しした (Gao et al., 2008)。

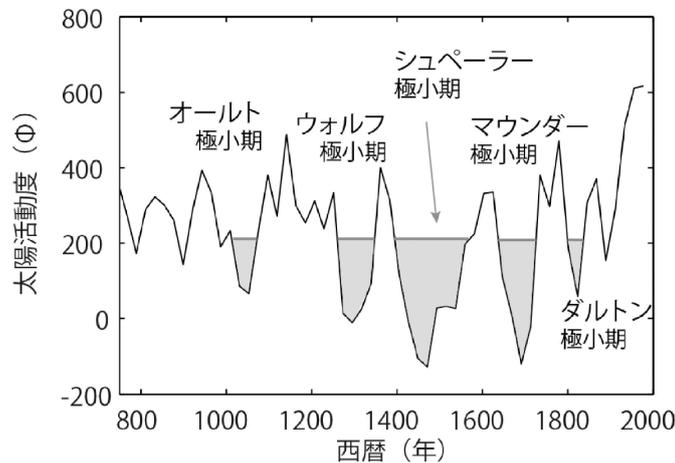


図 1. 過去 1000 年間に発生した太陽活動極小期

小氷期と太陽活動との関連性を決定付けたのは、北大西洋の海底コアに含まれる氷河性碎屑物に関する研究成果である (Bond et al., 2001)。氷河性碎屑物の増減からは、過去 1 万年間にわたって気候が太陽活動の 1000 年/2000 年周期に応答して寒冷化していたことが示された。具体的には、太陽活動が低下していた時代に、海底コア中の氷河性碎屑物の量が増加しており、寒冷化にともなって氷山の流出量が増加していたことや、海水温が低下していたことによって氷山の漂流の南限が低下していたことが示唆される。同様の 1000 年/2000 年スケールの太陽活動と気候変動の相関は、最終氷期の時代にも見つかっており (Obrochta et al., 2012)、太陽活動が長期間にわたって気候変動に顕著に影響を及ぼしてきたことが示唆される。

短い周期では、例えば 11 年のスケールで、太陽活動と気候変動に相関が見つかっているほか、近年では、太陽の自転周期が気象現象に影響を及ぼしているとみられる証拠も見つかってきている。十年以下の時間スケールにおいては、エルニーニョ・南方振動等ともなう気候変動が卓越するため、11 年周期の影響を検出することが難しくなるが、それらの影響を除去したデー

夕からは、地球表層の温度が太陽活動と非常によく同期しながら変動している様子が捉えられている (Tung and Camp, 2008)。さらに短い周期性として、太陽は約 1 か月の自転周期を持つが、地球は似たような周期性としてマッデン・ジュリアン振動と呼ばれる 30~60 日程度の変動を持っており、太陽の自転周期の影響を厳密に識別することが難しくなっている。しかしながら、雷によって励起される電波 (シューマン共鳴) の検出によってモニターされた全球の雷活動 (Sato et al., 2005) や、気象観測によって得られた日本やイギリスの雷活動などに約 27 日の周期性が見つかっているほか (Miyahara et al., 2017; Scott et al., 2014)、赤道域の雲活動からも約 27 日の周期性が見つかっている (Takahashi et al., 2010; Hong et al., 2011)。重要な点は、太陽活動の静穏期においてはそのような周期性はほとんど検出されず、太陽活動が活発な時期にだけ強く検出されるという点である。古典籍を用いて過去 150 年分の日々の雷活動を調べた例からは、太陽黒点数が多くなればなるほど、約 27 日の周期性が強く現れるということも確かめられた (Miyahara et al., 2018)。近年は、マッデン・ジュリアン振動の時間発展のフェーズと太陽自転周期との関連性をより直接的に検証するような研究も進められつつある (Hood, 2018; Hoffmann and Savigny, 2019)。

このように、様々な時間スケールで太陽活動と気候あるいは気象現象とに相関関係が見つかる一方で、両者をつなぐメカニズムは未だ解明されていない。太陽活動が気候変動に影響する経路はいくつか考えられる (図 2)。まず 1 つ目は、太陽総放射量の変動であるが、それだけでは観測されている気候変動を充分には説明できない。1970 年代の終わり頃から開始した太陽総放射量の観測によれば、11 年周期の極大と極小では  $1\text{W}/\text{m}^2$  程度の差異しか認められていない。そのため、太陽紫外線が成層圏温度場に与える影響や、太陽風粒子の大気化学反応への影響、銀河宇宙線が雲核の形成や雲粒の成長に与える影響、あるいは降水粒子が全球グローバルサーキットに与える影響などについて研究が進められている。

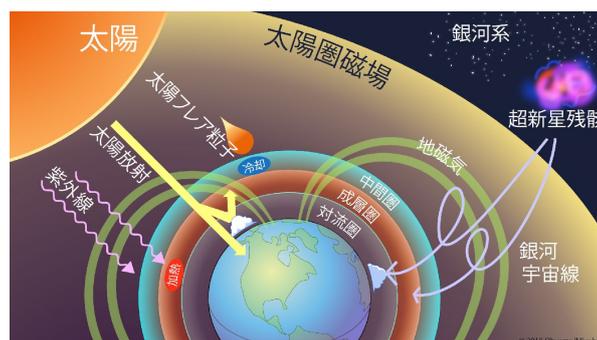


図 2. 太陽活動が気候システムに影響する経路の概略図

これらの要因がそれぞれ地球にどのような影響を及ぼすのか、それを識別する方法はいくつか考えられる。例えば、22 年周期は、太陽の放射量にはほとんど見られないが、4.3-3 で述べたように銀河宇宙線の変動には顕著に見られる変動であるため、銀河宇宙線の影響を識別できる可能性がある (Miyahara et al., 2008; Yamaguchi et al., 2010)。太陽放射と銀河宇宙線の変動は、太

陽自転周期のスケールでも、変動パターンに差異が見られる。自転にともなう太陽放射の変動は、主に黒点の数やサイズと、そして自転にともなうそれらの移動によって特徴付けられる。一方で、銀河宇宙線の変動は、地球側でコロナ質量放出が発生し、銀河宇宙線が強く遮蔽された場合に減少する。このように、太陽放射と銀河宇宙線とで時系列プロファイルに差異が見られるスケールについての研究から、今後多くの情報が得られてくると考えられる。

太陽活動が気候システムに作用する具体的なプロセスを気候モデル等も用いながら検証していくにあたって、太陽活動の変動に対する気候応答の地域差を明らかにすることも重要になってくる。小氷期における気候の研究からは、太陽活動が低下した際に、全球の平均気温としては  $0.6^{\circ}\text{C}$  程度の低下であった一方で、地域によっては最大  $2.5^{\circ}\text{C}$  もの気温の低下が起こっていたことが示された (Mann et al., 2009)。日本も影響が大きかった地域の 1 つであったと見られる。

降水についても顕著な地域差が見られ、例えば南シナ海周辺では小氷期に夏季の降水量の増加が見られた一方で、中国北部地域では乾燥化が進んでいた (Yan, et al., 2015)。これは、太陽活動が低下した際の大気循環の変化を反映しているものと考えられる。日本においては、気温の応答から少し遅れるかたちで小氷期の特に末期において降水量が増加していたことが樹木の酸素同位体比の分析から発見された (Sakashita et al., 2017)。

古気候学的な研究により気候応答の地域差を明らかにし、気候モデル実験の結果との対比を進めていくことが、太陽活動が気候システムに与える影響を明らかにする上でも重要である。

## 参考文献

- Yamaguchi, T., Yokoyama, Y., Miyahara, H., Sho, K., Nakatsuka, T.: Synchronized Northern Hemisphere climate change and solar magnetic cycles during the Maunder Minimum, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 20697-20702 (2010)
- Huang, S., Pollack, H. N., Shen, P.-Y.: Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures, *Nature* 403, 756-758 (2000)
- Dahl-Jensen, D., et al.: Past temperatures directly from the Greenland ice sheet, *Science* 282, 268-271 (1998)
- Aono, Y., Kazui, K.: Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century, *Int. J. Climatol.* 28, 905-914 (2008)
- Mikami, T.: Climatic variations in Japan reconstructed from historical documents, *Royal Met. Society* 63, 190-193 (2008)
- García de Cortázar-Atauri, I., et al.: Climate reconstructions from grape harvest dates: Methodology and uncertainties, *Holocene* 20, 599-608 (2010)
- Kawakubo, Y., Alibert, C., Yokoyama, Y.: A Reconstruction of subtropical western North Pacific SST variability back to 1578, Based on a *Porites* coral Sr/Ca record from the northern Ryukyus, Japan, *Paleoceanography* 32, 1352-1370 (2017)

- Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K., Sawai, Y., Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the Last Termination, *Science* 299, 688–691 (2003)
- Hayashi, R., Takahara, H., Hayashida, A., Takemura, K., Millennial-scale vegetation changes during the last 40,000 yr based on a pollen record from Lake Biwa, Japan, *Quaternary Research* 74, 91099 (2010)
- Kitaba, I. et al., Midlatitude cooling caused by geomagnetic field minimum during polarity reversal, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 1215-1220 (2013)
- Bond, G. C., Lotti, R., Iceberg discharges into the north atlantic on millennial time scales during the last glaciation, *Science* 267, 1005-1010 (1995)
- Grootes, P. M. et al., Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature* 366, 552-554 (1993)
- Hoyt, D., Shatten, K. H. (ed.): *The Role of the Sun in Climate Change*. Oxford University Press, New York (1997)
- Gao, C., Robock, A., Ammann, C.: Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models, *J. Geophys. Res.* 113, D23111 (2008)
- Bond, G., et al: Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene, *Science* 294, 2130-2136 (2001)
- Obrochta, S. P., Miyahara, H., Yokoyama, Y., Crowley, T. J.: A re-examination of evidence for the North Atlantic “1500-year cycle” at Site 609, *Quat. Sci. Rev.* 55, 23-33 (2012)
- Tung, K. K., Camp, C. D.: Solar cycle warming at the Earth’s surface in NCEP and ERA-40 data: A linear discriminant analysis, *J. Geophys. Res.* 113, D05114 (2008)
- Sato, M., Fukunishi, H.: New evidence for a link between lightning activity and tropical upper cloud coverage, *Geophys. Res. Lett.* 32, L12807 (2005)
- Miyahara, H., et al.: Solar 27-day rotational period detected in a wide-area lightning activity in Japan, *ANGEО Communicates* 35, 583-588 (2017)
- Scott, C. J., et al.: Evidence for solar wind modulation of lightning, *Environ. Res. Lett.* 9, 055004 (2014)
- Takahashi, Y., et al.: 27-day variation in cloud amount and relationship to the solar cycle, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 1577-1584 (2010)
- Hong, P. K., et al.: Implications for the low latitude cloud formations from solar activity and the Quasi-Biennial Oscillation, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 587-591 (2011)
- Miyahara, H., et al.: Solar Rotational Cycle in Lightning Activity in Japan during the 18–19th Centuries, *ANGEО Communicates*, 36, 633-640 (2018)
- Hood, L. L.: Short-Term Solar Modulation of the Madden Julian Climate Oscillation, *J. Atmos. Sci.* 75, 857–873 (2018)
- Hoffmann, C. G., von Savigny, C.: Indications for a potential synchronization between the phase evolution of the Madden–Julian oscillation and the solar 27-day cycle, *Atmos. Chem. Phys.* 19, 4235-4256 (2019)
- Miyahara, H., Yokoyama, Y., Masuda, K.: Possible link between multi-decadal climate cycles and periodic reversals of solar magnetic field polarity, *Earth Planet. Sci. Lett.* 272, 290-295 (2008)
- Mann, M. E., et al.: Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly, *Science* 326, 1256-1260 (2009)

Yan, H.: Dynamics of the intertropical convergence zone over the western Pacific during the Little Ice Age, *Nat. Geo.* 8, 315-320 (2015)

Sakashita, W., et al.: Hydroclimate reconstruction in central Japan over the past four centuries from tree-ring cellulose  $\delta^{18}O$ , *Quat. International* 455, 1-7 (2017)