

## マウンダー極小期

太陽黒点は太陽表面に現れる暗い領域で、局所的に強い磁場を持ち、太陽活動の活発さの指標とされている。17世紀初頭からの400年間の黒点数のデータは、太陽活動が約11年の周期で増減を繰り返してきたこと、またその変動振幅が数十年以上の時間スケールでゆるやかに変化し続けてきたことを示している（第1図 a）。その中でも西暦1645～1715年の70年間は、明確な11年周期が失われるほどに黒点数が減少した（Eddy 1976）。この時期はマウンダー極小期と呼ばれており、このような数十年間にわたる太陽活動低下のメカニズムの解明が、太陽物理学における重要な課題の1つとなっている。西暦1800～1824年頃にも、黒点数が2つの活動周期にわたって少なくなっていた時期があり、ダルトン極小期と呼ばれている。太陽活動の代替指標となる樹木年輪中の宇宙線生成核種の過去1万年間のデータは、このような数十年間にわたる太陽活動の低下がおよそ200年に1度発生してきたことを示している（Stuiver and Braziunas 1989）。ただし、規模や継続時間は極小期ごとに異なり、また発生のタイミングも不規則で、千年以上にわたって発生しないこともある。マウンダー極小期の1つ前に起こったシュベラー極小期（西暦1416～1534年）は極小期の中でも継続時間が最も長いタイプで、約120年にわたって黒点が消失していたと考えられている。

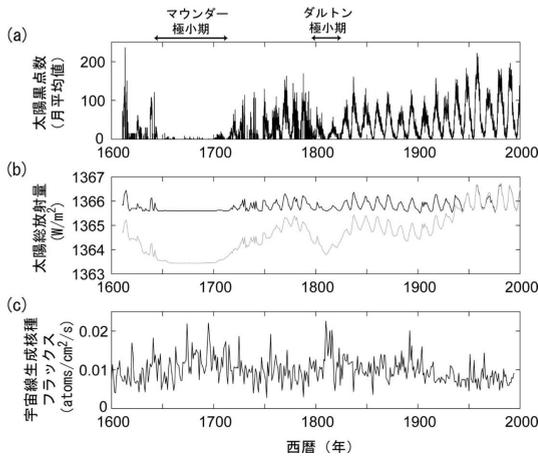
黒点数の変動からはマウンダー極小期における11年周期の継続性は確認できないが、樹木年輪中の宇宙線生成核種・炭素14の濃度変化から、いわゆる11年周期が継続していたことがわかってきた（Miyahara *et al.* 2008）。ただし、その周期は11年ではなく、それよりも数年長い14年であった。太陽の対流層（ $>0.7$ 太陽半径）には、10年スケールで子午面方向に循環するプラズマの流れがある。また、約27日の周期で自転しており、赤道に近いほど速い速度で回転している（差動回転）。太陽黒点は、この子午面循環と差動回転の相互作用によって生じると考えられている。上述の活

動周期の伸びは、子午面循環に何らかの異常が生じていた可能性があることを示唆している。

現段階では、極小期の発生はおろか次の11年周期の振幅すら予測が困難であるが、1996年5月に開始した11年周期の終了が2008年12月にずれこんだことから、2013年頃に訪れるとされる次の周期のピークは小さくなるだろうとする予測が一般的である。実は、11年周期の長さは、厳密には1つ後の周期の振幅と逆相関の関係を示す。実際、マウンダー極小期でも、極小期の間だけでなく1～2サイクル前から周期が伸び始めていた（Miyahara *et al.* 2010）。太陽磁場の直接観測でも、次の周期の黒点数と相関のある極磁場の強さが過去のサイクルと比べて半分程度になっており（Svalgaard *et al.* 2005）、2013年ごろの黒点数のピークが半減する可能性があることを示唆している。

マウンダー極小期やダルトン極小期はヨーロッパにおける氷河の拡大に象徴される小氷期の一因となったとされる。マウンダー極小期における日射の減少量は確定されておらず復元値によって最大2～3 W/m<sup>2</sup>もの開きがあるが、最大でも0.3%程度の減少量であったと考えられている（第1図 b）。日射量の変化量は通常0.1%程度でそれだけでは観測されている気温の変化や氷河の拡大を説明できないため、それ以外の太陽活動の影響に関して理解を深める必要がある。太陽活動が地球の気候に影響するメカニズムとしては、日射量の変化によるもののほか、紫外線や宇宙線などを介したものなどが提唱されている。紫外線は大気中の光化学反応を促進することにより主に成層圏を暖める。一方、宇宙線は下層雲の被覆率と良い相関を示すことが指摘されている。宇宙線は太陽磁場による減衰を受けた後に地球に到達するため、太陽活動に応じて量が変化する。宇宙線が対流圏の気温にどの程度影響しうるのかはまだ全く解明されていない。

マウンダー極小期における宇宙線の増加量の詳細は、宇宙線生成核種であるベリリウム10の濃度の変動として南極やグリーンランドの氷床に記録されている。宇宙線生成核種は太陽活動の代替指標として用い



第1図 過去400年間における、(a) 望遠鏡観測による太陽黒点数の変化 (Hoyt and Schatten 1998), (b) 黒点数にもとづく太陽総放射量の復元値 (Lean, 2000 (黒線); Wang *et al.* 2005 (灰線)), (c) グリーンランド氷床コア中のベリリウム10にもとづく宇宙線生成核種フラックスの変化 (Berggren *et al.* 2009).

られているが、直接的には太陽磁場の増減に応じて減衰を受ける宇宙線の変化を反映している。マウンダー極小期では、黒点数から周期的な変動が失われ、日射量の変動の振幅も減少していたと考えられるが、ベリリウム10から復元される宇宙線の変動の振幅はむしろ増幅していた (第1図c)。現代と比較して平均的に10~20%程フラックスが高かっただけでなく、14年スケールの変動の振幅が、1つおきのサイクルで増幅しており、約28年おきに最大で30~50%ほどフラックスが増加している。1つおきのサイクルでの振幅の増加には、太陽の双極子磁場の向きが影響していると考えられる。太陽の双極子磁場は1サイクルごとに活動の極大で反転する。宇宙線は荷電粒子であるため、太陽双極子磁場の向きが変化すると、太陽磁場から受ける減衰の度合いが変化する。宇宙線への磁場反転の影響は現在でもわずかに観測されているが、マウンダー極小期の太陽磁場の特異な構造が、その影響を増幅していた可能性がある。マウンダー極小期においては、平均気温が0.6度ほど下がっていたとされているが、それに加えて太陽の磁場の反転に同調した約28年スケールの気温変化が観測されている (Miyahara *et al.* 2008; Yamaguchi *et al.* 2010)。この磁場反転と気候

変動の相関は、宇宙線が気候変動に少なからず影響していることを示唆している。マウンダー極小期では、日射量や宇宙線変動がそれぞれ独自の特徴的な振る舞いを示す。太陽活動に関連した気候駆動要因の役割を識別する際に、マウンダー極小期は重要な手がかりを与えるだろう。

#### 参考文献

- Berggren, A., J. Beer, G. Possnert, A. Aldahan, P. Kubik, M. Christl, S. J. Johnsen, J. Abreu and B. M. Vinther, 2009: A 600-year annual  $^{10}\text{Be}$  record from the NGRIP ice core, Greenland. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11801, doi: 10.1029/2009 GL038004.
- Eddy, J. A., 1976: The Maunder Minimum. *Science*, 192, 1189-1202.
- Hoyt, D. V. and K. H. Schatten, 1998: Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction. *Sol. Phys.*, 181, 491-512.
- Lean, J., 2000: Evolution of the Sun's spectral irradiance since the Maunder Minimum. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2425-2428.
- Miyahara, H., Y. Yokoyama and K. Masuda, 2008: Possible link between multi-decadal climate cycles and periodic reversals of solar magnetic field polarity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 272, 290-295.
- Miyahara, H., K. Kitazawa, K. Nagaya, Y. Yokoyama, H. Matsuzaki, K. Masuda, T. Nakamura and Y. Muraki, 2010: Is the Sun heading for another Maunder Minimum? -Precursors of the grand solar minima. *J. Cosmol.*, 8, 1970-1982.
- Stuiver, M. and T. F. Braziunas, 1989: Atmospheric  $^{14}\text{C}$  and century-scale solar oscillations. *Nature*, 338, 405-408.
- Svalgaard, L., E. W. Cliver and Y. Kamide, 2005: Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01104, doi: 10.1029/2004 GL021664.
- Wang, Y. M., J. L. Lean and N. R. Sheeley, 2005: Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713. *Astrophys. J.*, 625, 522-538.
- Yamaguchi, Y. T., Y. Yokoyama, H. Miyahara, K. Sho and T. Nakatsuka, 2010: Synchronized Northern Hemisphere climate change and solar magnetic cycles during the Maunder Minimum. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 107, 20697-20702.

(東京大学宇宙線研究所 宮原ひろ子)