

## 特集 太陽活動の謎と発見

## 太陽活動と宇宙線、そして気候変動

宮原ひろ子

みやはら ひろこ (東京大学宇宙線研究所)

400年前にガリレオが太陽の黒点を観測しはじめたからほどなくして、現在でも太陽物理学における最大の難問の1つとされる出来事が起きた。西暦1645年から実に70年間にわたって、黒点がぱったりと姿を消してしまったのである。当時は、まだ黒点の11年周期も発見されておらず、科学者のあいだでもそれが特に異常な事態であるというような認識はなかったようだが、時おり“珍しく”姿をあらわす太陽黒点に科学雑誌がにぎわうほどであった<sup>(1)</sup>。この70年にわたる黒点の消失はマウンダー極小期と呼ばれている。もし黒点の観測の開始がもう少し遅れていて、マウンダー極小期という観測事実がなかったなら、太陽活動の長期変動に関するわれわれの認識はもう少し違ったものになっていたかもしれない。当時の太陽に何が起こっていたのか、なぜそのような出来事が起こったのか、また地球に何らかの影響があったのか、消えた黒点の謎を明らかにするため太陽活動を反映する代替指標をもちいた研究が進められている。

## 木々の年輪の中に残された太陽の歴史

黒点にかわる太陽活動の代替指標として広く用いられているのが、樹木年輪に含まれる炭素の同位体・炭素14である。炭素14は、宇宙線(宇宙を飛び交う高エネルギーの放射線)と地球大気との相互作用によって作られる放射性的同位体である。太陽の磁場は、太陽と地球の距離のおよそ100倍の遠方まで広がっており、宇宙線から地球を守る役割を果たしている。ところが、太陽活動

が弱くなるとそのバリア機能は低下し、地球に飛来する宇宙線が増える。すると、大気中でたくさんの炭素14が作られ、その結果、光合成によって樹木が年輪に取り込む炭素14の量も増加する。逆に、太陽活動が活発になると年輪に取り込まれる炭素14の量は減少する。したがって、屋久杉などの樹齢の長い木や、地中に埋もれた大昔の木の年輪に含まれる炭素14の量を測定してその増減を調べると、過去の太陽活動の推移を知ることができる。

アメリカのスタイバー博士のグループが、世界で最も長生きするといわれるブリッスルコーンパインの年輪を10枚ごとに剥がし、炭素14の量を測定して過去1万年間の太陽活動の変動を調べたところ、マウンダー極小期と同じように炭素14が増加していた時期、つまり太陽活動が低下し黒点が消えていた時代が過去に何度もあったことがわかった<sup>(2)</sup>。また、そういった黒点の消失がおおよそ100~300年に一度発生していることも明らかになった。つまり、“異常”のように見えた黒点の消失も、それ自体、太陽のもつ長いリズムの1つであるということの意味している。それは同時に、今後もそのような長期にわたる黒点の消失が発生する可能性があるということの意味している。

数十年にわたって黒点が消えている間、太陽には何が起きているのだろうか。屋久杉を用いた研究によってその手がかりが得られつつある。マウンダー極小期の70年間に形成された年輪を1枚ごとに丁寧に剥がして太陽活動の変動をたどってみると、黒点が消え11年周期が失われたかの

ように見えるマウンダー極小期においても太陽活動の周期的な変動が続いていたことを示す結果が得られた。しかも興味深いことに、通常は約11年の周期で増減する太陽活動が、11年よりも少し長い約14年の周期で増減していたことがわかってきた。つまり、黒点が消えたマウンダー極小期では、太陽の基本周期ともいえる11年周期のリズムが崩れていたことになる。このリズムの遅れが、物理的に何を意味しているのかはまだよくわかっていない。現在、観測と理論の両面から研究が続けられている。

### 太陽活動、宇宙線、気候変動はつながるか

マウンダー極小期は地球の気候に何らかの影響を与えたのだろうか。過去の太陽活動と気候の関係性を調べていくと、いくつかの共通性があることに気づく。たとえば、10～12世紀頃は太陽活動が非常に活発であった時期として知られているが、その頃は「中世の温暖期」と呼ばれるように気候が比較的温暖であったことが知られている。また、13世紀以降、太陽はマウンダー極小期に代表される3つの大きな極小期を経験しているが、その頃は小氷期と呼ばれる寒冷な時期に対応している。そのほかにも、太陽活動と気候の一致は、十年から数千年の幅広い時間スケールにおいて報告されている<sup>(3)</sup>。しかし、太陽活動と気候の変動に見られる共通性が偶然によるものなのか必然なのかはよくわかっていない。というのも、太陽活動の変化にともなう日射量の増減は0.1%程度と非常にわずかで、地球の温暖化や寒冷化を説明できるほどの変化ではない。

そこで、太陽に関連する他の因子が気候に与える影響に注目が集まっている。その1つが宇宙線である。地球に飛んでくる宇宙線の量は、前述のように、太陽活動が活発になれば減少し、静穏になれば増加する。この太陽活動に応じて増減する宇宙線が、大気のエロージョンを変化させ雲の量を増減させているという説がデンマークのスベンスマルク博士らのグループによって提唱された<sup>(4)</sup>。雲

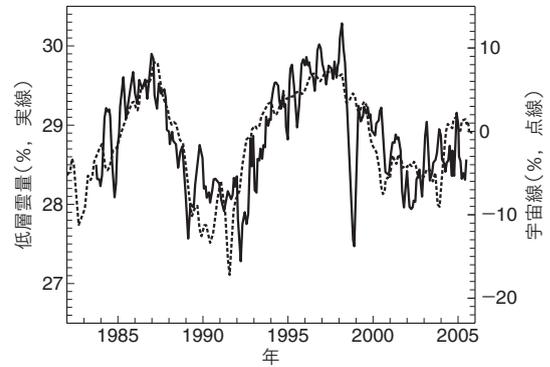
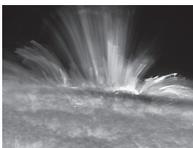


図1——衛星観測による低層雲の変動と、中性子モニターによる宇宙線量の変動。文献(4)より。

の量と温暖化・寒冷化との関係は未解明の問題であるが、衛星観測によって調べられている全球の雲の面積と、地上の中性子モニターによって常時観測されている宇宙線量の変動には、確かによい相関がある(図1)。

宇宙線の変動パターンは、日射量とは少しだけ異なる。それは、変動に22年周期の成分があるという点である。太陽活動は、通常11年の周期で増減する。この影響は、日射量、紫外線など太陽に関連するあらゆる因子に見られる。一方、11年ごとに太陽の活動が最大に達すると、太陽の双極子磁場の向きが反転することが知られている。太陽の北側がN極、南側がS極という状態が11年間続き、再び太陽の活動が最大に達すると、今度は北側がS極、南側がN極という状態が11年間続く。この磁場の極性の反転がもつ22年周期は、日射量のような太陽の放射には影響しないが、宇宙線だけが顕著にその影響を受ける。宇宙線のほとんどは、陽子つまり正に帯電した粒子である。そのため、太陽の磁場の向きが反転すると、陽子に対する太陽圏のバリア効果がわずかに変化するのである。その結果、図2に示すように、地球に到来する宇宙線の量の変動パターンは太陽の磁場の向きによってわずかに変わる。

年輪の成長率の増減などを指標として復元された気温のデータから、マウンダー極小期や中世の活発期における太陽と気候の関係性を見てみると、宇宙線がもつ22年周期の変動成分、さらには伸び縮みする太陽周期が、気候変動の複雑なパター



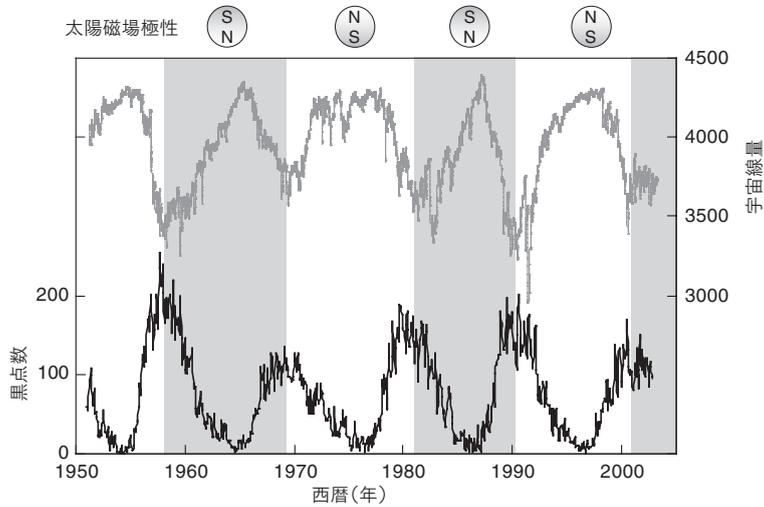


図2——黒点数(黒)および宇宙線量(灰)の変動。影をつけた時期は太陽磁場の極性が負の時期に対応する。宇宙線量は、極性が負のときは鋭いピークをもつが、極性が正のときは、比較的なだらかなピークを示す。

ンを生み出している可能性があることがわかってくる。マウンダー極小期で太陽の11年周期が14年周期に伸びていたのは前述のとおりだが、炭素14の分析によると中世の活発期では9年という短い周期に変化していた。この太陽活動の周期の伸縮にともなって、気候変動の周期性も～14年や～9年に伸び縮みしている。気候変動にはもともと10年程度の周期性があるとされてきたが、そのリズムはやはり太陽活動の影響を受けているようだ。興味深いのは、宇宙線がもつ“22年”周期のシグナルが、11年周期の伸び縮みにともなって伸縮し、マウンダー極小期では、28年周期

として、中世の活発期では18年周期として気温の変動にあらわれている点である<sup>(5)</sup>。数十年スケールの気候変動の起源ははまだ理解されていないが、太陽磁場の変動を理解することが解明への鍵になりそうだ。

#### 文献

- (1) J. A. Eddy: *Science*, **192**, 1189(1976)
- (2) M. Stuiver & T. F. Braziunas: *Nature*, **338**, 405(1989)
- (3) D. V. Hoyt & K. H. Schatten: *The Role of the Sun in Climate Change*, Oxford University Press(1997)
- (4) H. Svensmark: *Astron. Geophys.*, **48**, 118(2007)
- (5) H. Miyahara et al.: *Earth and Planetary Science Letters*, **272**, 290(2008)