

図5 3.8m望遠鏡の完成予想図。18枚の鏡から成る分割鏡でできている

たいと思う。

おわりに

上述したように、太陽型星で発見されたスーパーフレアは、最大の太陽フレアの100倍～1,000倍であり、頻度は数千年に1回である。数千年に1回のスーパーフレアは、現代文明には大災害をもたらすが、過去には電気文明はなかったため、記録に残るほどの災害や歴史的イベントは起きなかったと考えられる。増加した宇宙線により、せいぜい原因不明の病気が流行した程度であったろう。(しかしこれは神秘体験を増やしたかもしれない。紀元前5世紀頃に大宗教家が相次いで現れたのは、ひょっとしたらスーパーフレアのせいだったのかも!?)

今後、太陽で数千年に1回のスーパーフレアが起きて地球を直撃したら、未曾有の大災害となるだろう。この頻度は、2011年の東日本大震災

の大地震の頻度(1,000年に1回)と同程度だから、遠い未来の話と思って油断してはならない。地球の電力インフラや通信網が破壊され、電気や通信が使えない状態が数カ月、いや1年も続いたら、どんなに大変な事態になるだろうか? われわれは遠方の太陽型星を詳しく調べることにより、スーパーフレアのしくみや前兆を解明し、未来の大災害に備えなければならない。すでにわれわれは、放射線だらけの危険きわまりない宇宙空間に宇宙飛行士を送り込んでいる。彼らの生命を守り、一般市民が安心して宇宙に進出できるようにするためにも、太陽や恒星の研究、そして宇宙総合学の研究は不可欠である。

一方、もっと大きなスーパーフレア、最大の太陽フレアの1万倍以上のスーパーフレアが太陽で起きたら地球はどうなるか? ある種の生物の絶滅が起こるかもしれない。6500万年前の恐竜の絶滅は巨大隕石の衝

突説が有力だが、それ以前(5億4000万年前～6500万年前)に起きた4回の生命大絶滅の原因はまだ解明されていない。ひょっとしたら、特大のスーパーフレアが太陽で起きて生命大絶滅をもたらしたかもしれない。こわい話だが、生命大絶滅は生命進化の原動力でもあったのだ。恐竜が絶滅したおかげで哺乳類が繁栄することができ、人類が誕生した。われわれは生命大絶滅のおかげで進化し、ここまで到達したと言える。そう考えると、もし生命大絶滅にスーパーフレアがかかわっているならば、われわれはスーパーフレアのおかげで生まれた、と言えなくもない。ここに至って、「自分はなぜ存在するのだろうか?」という幼いころの疑問に、最新研究がつながってきて、わくわくしているこのごろである。

京大理学研究科の宇宙物理学教室と附属天文台は、天体爆発現象の観測や系外惑星探査を目的した東アジア最大の3.8m望遠鏡(図5)を建設しつつある。この望遠鏡は、まさに太陽型星のスーパーフレアを解明するのに世界でもっとも適した望遠鏡である。2015年完成・テスト観測開始を目指して建設中であるが、ドーム建設費や運用経費など予算がまだ足りない。基金集めのために、京大天文台基金¹⁾を立ち上げた。早く定常観測を開始してスーパーフレアの正体や前兆現象を解明し、未来の文明社会の大災害に備えたいと願っている。そして最終的には「自分はなぜ存在するのか?」という究極の謎にせまりたい。多くの皆さまのご支援をいただけたら幸いである。

注

1) 京大天文台基金:
<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/kikin/>

論考●特集・宇宙

太陽、この不思議なるもの

常田佐久 (宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所長)
Saku TSUNETTA



1954年生まれ。東京大学大学院理学系研究科天文学専門課程博士課程修了。理学博士。日本学術振興会研究員、東京大学東京天文台助手、東京大学理学部天文学教育研究センター助手・助教授を経て、1995年より国立天文台教授。SOLAR-B推進室長、ひので科学プロジェクト長、先端技術センター長、宇宙物理学委員長、JAXAひのでプロジェクト・マネージャーを務める。2013年よりJAXA宇宙科学研究所長。2010年林忠二郎賞受賞。著書に『太陽に何が起きているか』(文春新書)、共著に『NHKサイエンスZERO——太陽活動の謎』(NHK出版)ほか。

の関心からこの研究へ入ったわけではなかった。幼少のころより、電気工作を好んでいたこと、高校生・大学生となり湧き出た物理学への強い興味、その時々不思議を追って、現在の研究へと誘われた。

1610年冬、ガリレオ・ガリレイは、自ら製作した望遠鏡により月や星雲、そして太陽を観測した。新世界の驚きを伝えるガリレオ著『星界の報告』は、今日でも読み継がれている¹⁾。続いて出版された『太陽黒点にかんする第2書簡』では、「黒点が太陽に付着していること」をあざやかに論証している。一様な明るさと思われていた太陽に黒点があることは、当時の人々にとって驚き以外の何物でもなかっただろう。

それから400年あまりたった今、軌道には太陽を観測する人工衛星が飛び交い、天文学者は太陽の研究を続け、われわれの太陽の物理学的理解は大いに進展した。これには日本の貢献も大きい。日本は人工衛星による太陽観測の先進国であり、過去30年にわたり「ひのとり」、「ようこう」、「ひので」と3機のすぐれた観測衛星を開発し、打ち上げてきた。

太陽観測衛星「ひので」

1981年には、小田稔博士の発明した「すだれコーリメーター」を搭載した「ひのとり」衛星を打ち上げ、エネルギーの高いX線(硬X線)で太陽面爆発現象(太陽フレアと呼ばれる巨大な爆発現象)の撮像に世界で初めて成功した。1991年に

は、より性能の高い硬X線望遠鏡と軟X線望遠鏡を搭載した「ようこう」衛星を打ち上げた。「ようこう」は、10年の長きにわたって太陽の観測をし続け、太陽フレアが磁気リコネクションと呼ばれる磁場の持つエネルギーの消滅と関係していることを突き止めるなど大きな成果を上げた。

2006年9月23日に打ち上げられた「ひので」は、わが国3機目の太陽観測衛星で、現在も順調に観測を続けている。「ひので」は、可視光、X線、紫外線を観測する3つの望遠鏡を持つ。このうち、可視光望遠鏡は、世界最大の太陽観測専用軌道望遠鏡で、高分解能・高精度で磁場の観測を行っている。

太陽を地上から観測しても鮮明な画像はなかなか得られない。大気の影響や、太陽光で温められた望遠鏡から立ち上がるかげろうの影響により、像がぼやけてしまうためだ。一方、高度630kmの大気圏外から観測する「ひので」ではその心配がなく、1日24時間連続した高分解能観測が可能である。可視光望遠

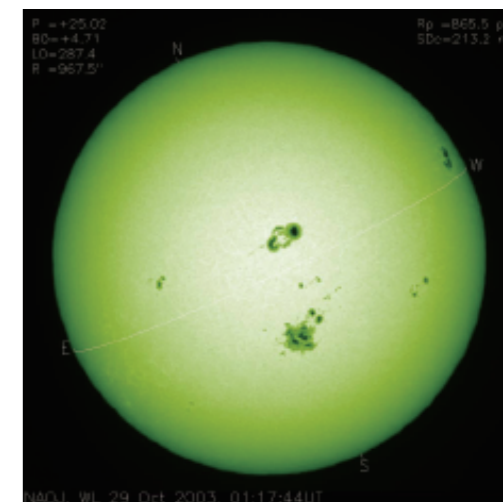


図1 第23太陽周期で最大級の黒点(2003年)

はじめに

私たちの住む地球は、太陽なくしては現在の姿にはなりえない。そして今もその恩恵を受け続けている。古来より太陽は世界各地で崇敬の的であったという。やがて天体への関心から近代科学が発展した。ただし、私自身は、もともとは太陽や天体へ



図2 「ひので」衛星外観。中央にあるのが、可視光望遠鏡

鏡は、今まで人類が目にしたことのないようなきわめて鮮明な太陽の画像を送り続けており、太陽を調べるための「顕微鏡」と言う人もいる。その鮮明なデータによって、黒点と異なった新しいタイプの磁場、エ

ネルギーを伝える磁場の波動、太陽の極域に黒点並みの強磁場があることなど、太陽の研究の根幹にかかわる発見を続々と行った。また、ジェット（ガスの噴出）などダイナミックな現象にあふれる彩層の姿を世界

で初めて明らかにしたことも特筆される。さらに、黒点の構造の解明、太陽風のみなもとの同定など、「ひので」により太陽の研究は大きく飛躍した。「ひので」は、世界の科学衛星でもっとも成功した衛星の1つと言っても過言ではない。

スタンフォード大学のアラン・タイトル教授は、「『ひので』の可視光望遠鏡が太陽物理学に与えたインパクトは、ハッブル宇宙望遠鏡が光学天文学に与えたインパクトに匹敵する」と語っている。「ひので」のもたらした新たな発見は、さらに大きな疑問を提起している。太陽はいまだに不明な点が多く、今後も魅力的な研究対象であり続けるであろう。

「ひので」の威力はスナップショットもさることながら、動画にするによりよくわかる。興味のある読者は、自然科学研究機構・国立天文台のホームページ<http://hinode.nao.ac.jp/index.shtml>を参照されたい。「ひので」の観測データは、即時無償公開

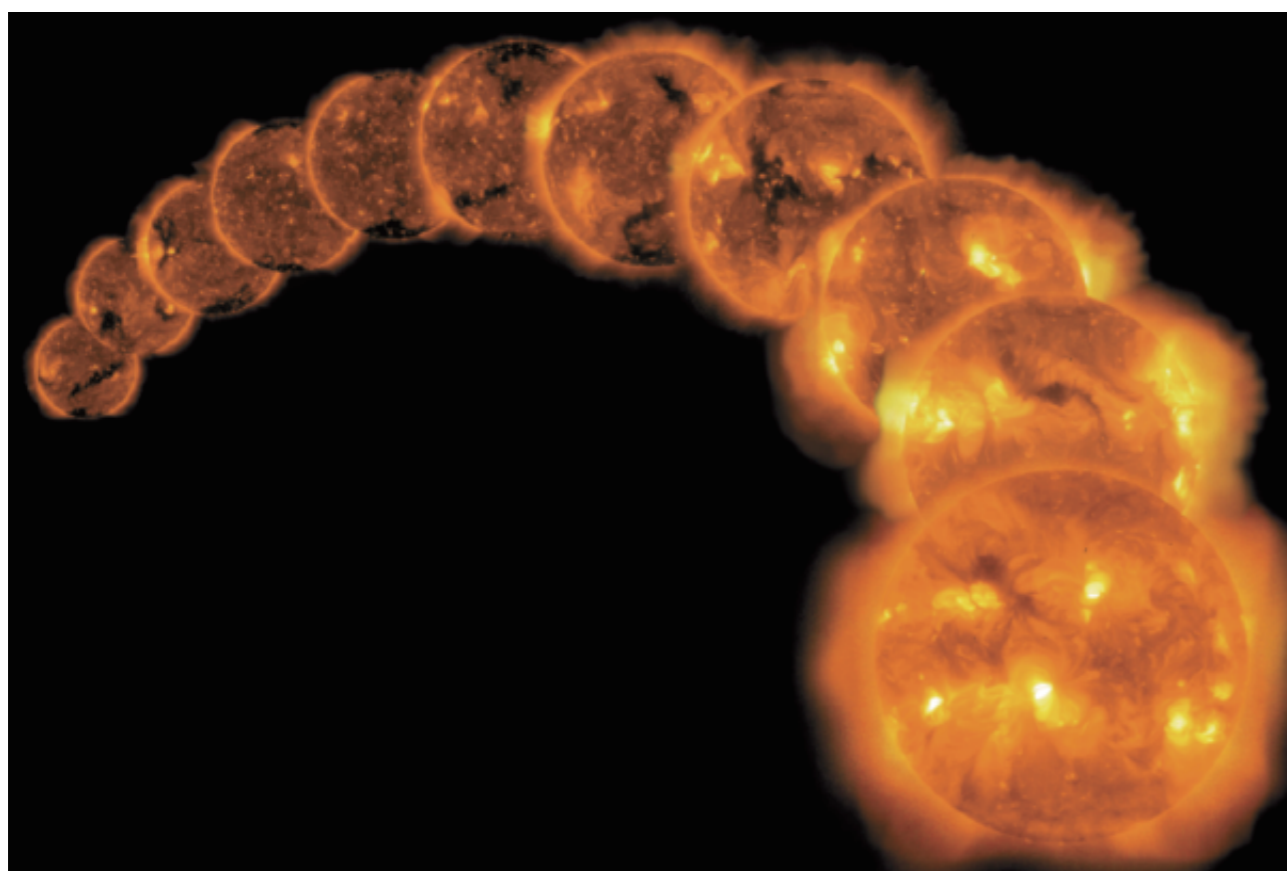


図3 「ひので」X線望遠鏡で観測した太陽コロナの変遷(左端:2007年、右端:2012年)。太陽活動極小期から極大期にかけてコロナの変化がよくわかる

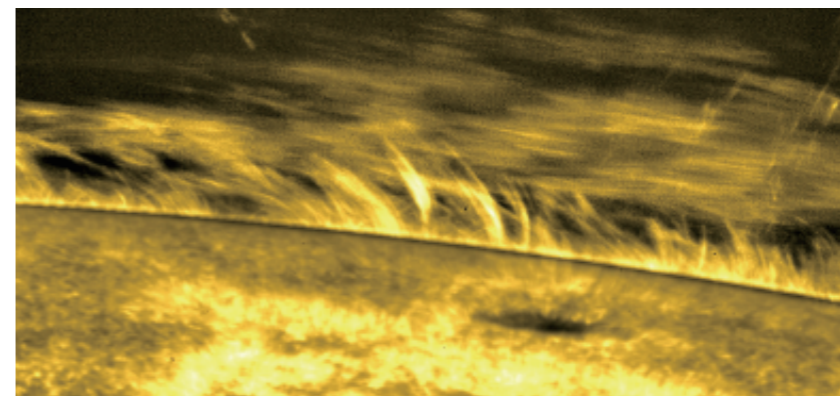


図4 黒点周囲のダイナミックな噴出現象(彩層)

され、世界中の研究者に使用されている。

光を分析する

「ひので」は太陽からくる光（電磁波）を観測する。それから、どのようにして太陽について知るのだろうか。天文学者は、太陽からの光を分析することによって、多くの情報を得てきた。実際、光は太陽の謎を解く信じがたいほど多くの情報を含んでいる。たとえば、光の“色”は、光の波長に対応し、星の表面温度と関係する。黄色っぽい太陽からの光を分析すれば、太陽の表面が約6,000℃であることがわかる。さらに太陽は可視光よりも波長が200倍ほど短い軟X線も出していることから、温度数百万℃のコロナがあることもわかる。さらに、太陽フレアが発生すると、X線よりも波長の短いガンマ線が観測されることから、電子が光の速度近くまで加速されていることもわかるという具合だ。

約6,000℃の太陽の表面には、数百万℃の熱い淡いコロナがまわりついている。そして時折、太陽フレアやコロナ質量損失など荒々しい現象を生み出す。コロナの加熱や太陽フレアのメカニズムはよくわかっておらず、この問題は、サイエンス誌の「天文学に残された8つの大疑問」の1つに挙げられている²⁾。コロナの加熱は、火のついていないコンロに置いたやかんが沸騰しているような

シュールな現象である。コロナや太陽フレアは、「磁場の持つエネルギー」をプラズマの加熱や粒子の加速のエネルギーに転換することにより起きている。つまり、コロナや太陽フレアを理解するためには、太陽表面の磁場について知らなければならぬ。

実は、磁場の大きさや方向の情報も、太陽からの光に巧妙に埋め込まれている。磁場があると光が偏光するので、逆に偏光の情報を使って磁場の強さや向きがわかるのだ。ちなみに、偏光の情報から磁場の強さや向きを導く計算式を世界で初めて導いたのは、海野和一郎博士である。「ひので」の可視光望遠鏡は、光の持つ偏光を精度よく観測している。もちろん、世界中で行われているそのデータの解析には、「海野の方程式」が使われている。

太陽黒点

黒点は不思議な現象だ。黒点が見えるのは強い磁場により、太陽の中から来るエネルギーの流れが抑圧されているためである。黒点に強い磁場があることがジョージ・ヘールにより発見されたのはわりと最近であり、1908年であった。ガリレオの観測以降の記録を調べると、太陽黒点の数は11年の周期で増減していることがわかる。フレアが数多く発生し太陽活動が活発なときは、黒点数が多い。「ひので」衛星により黒点の理解も大きく進んだが、太陽がどうして強い磁場をもつのか、それがどうして11年周期で増減するのか、あまりわかっていない。

ところで、過去の記録から、極端に黒点数が少ない時期があったことがわかっている。19世紀の終わり、英国の天文学者エドワード・マウンダーは、黒点の観測記録を分析し、1645年から1715年の70年間は黒点がほとんど見られず、太陽活動が停止していたことを発見した。また、この時期、欧州や日本が寒かったことがわかっている。同じようなことは、望遠鏡が発明される前にも起こっていたのだろうか？

望遠鏡発明前の太陽活動を知る

樹木や南極で採取された氷床コア

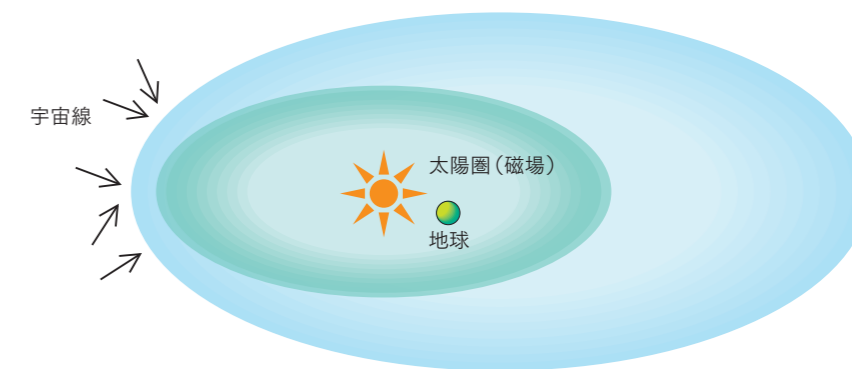


図5 地球は太陽の磁場の衣で銀河宇宙線から守られている(模式図)

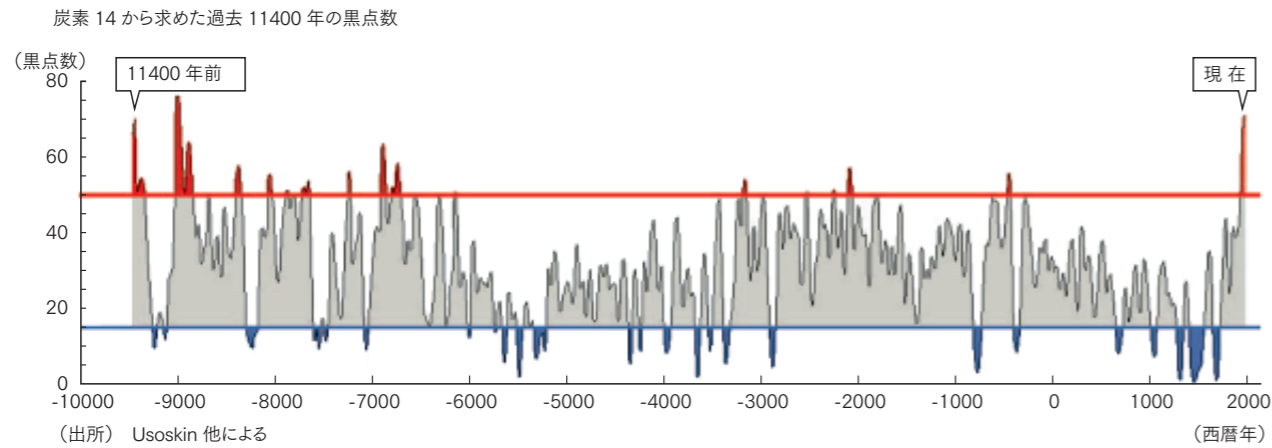


図6 過去約1万年の太陽活動。マウンダー極小期のような無黒点期が何度も発生していることがわかる

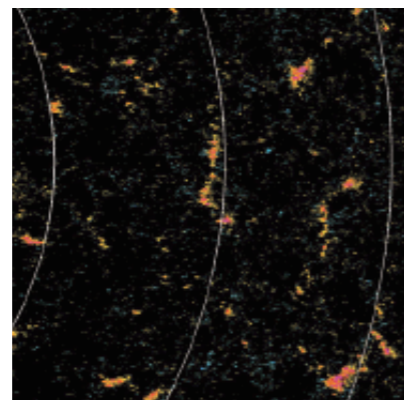
に太陽黒点に関する情報が隠されている。太陽圏の磁場は、銀河系空間からの宇宙線を遮る役割をはたしている。太陽の磁場が強い（黒点数が多い）と地球に降り注ぐ宇宙線の量は減るし、太陽の磁場が弱くなれば、宇宙線の量は増える。銀河系空間から地球大気に降り注ぐ宇宙線は、大気中の核反応により炭素14（地球にもともと存在する炭素の原子数は12）などの放射性同位体をつくりだす。今日、天文学者は、木の年輪や南極の氷柱に残された炭素14やベリリウム10といったラジオアイソトープの量から、過去1万年にわたる太陽黒点数をみごとに導き出している。それによると、マウンダー極小期のような無黒点期は過去1万年に何度も発生していた。太陽黒点の11年周期が謎なら、黒点が突然なくなる時期の発生はより大きな謎だ。

定数でなかった「太陽定数」

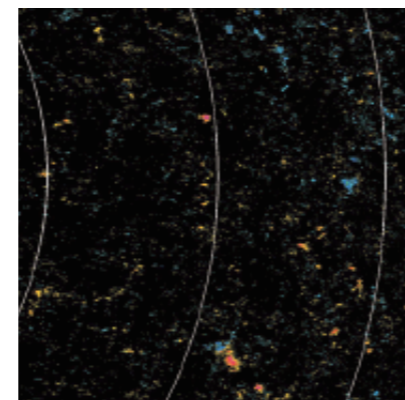
黒点のほかにも、11年周期で変動する量がある。宇宙空間で1㎡の面積が毎秒受ける太陽からの放射エネルギーの総量を「太陽定数」と呼んでいる。一定不変であるはずの太陽定数が11年周期で0.15%ほど変動しているという驚愕する事実は、1970年以降、宇宙からの太陽の観測が本格化して初めて明らかとなった。常識

に反するようだが、太陽は、黒点の数の多い極大期では少し明るく、黒点の少ない極小期には少し暗い。この太陽総放射量の変動は、暗い黒点とそれに寄り添うような白斑と呼ばれる明るい領域の微妙なバランスによっており、全体として白斑の影響

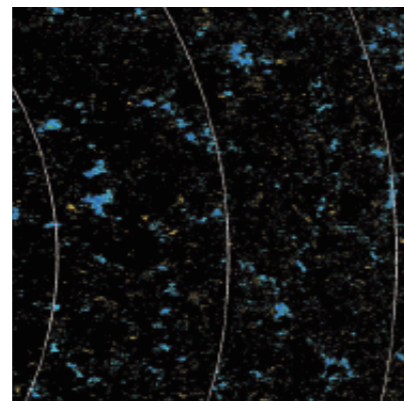
が勝つため、黒点が多い時期は太陽が少し明るくなる。白斑の形成にも磁場が深く関係している。この変動は、地球環境にどのような影響を与えているのだろうか？



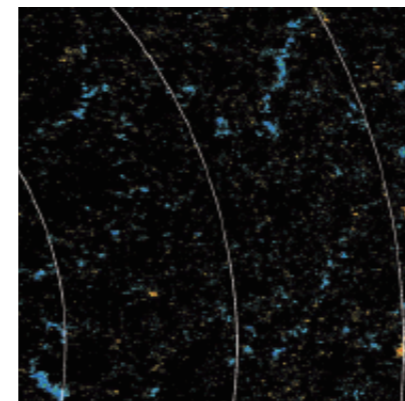
北極域：2008年（極小期）



北極域：2011年（反転しつつある）



南極域：2009年（極小期）



南極域：2012年（北極は反転しつつある）

図7 「ひので」が世界で初めて観測に成功した太陽の極域の磁場の分布。オレンジ色はN極(+)性、青色はS極(-)性の磁場を示す。白線は5度ごとの緯度線

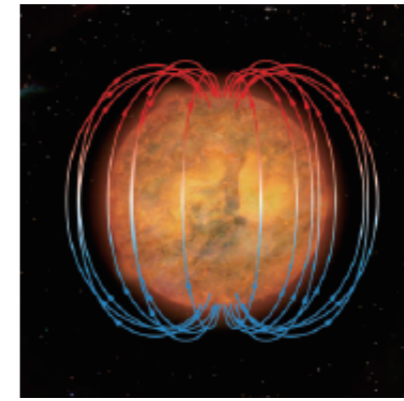
「ひので」と太陽の異変？

多数の「ひので」による成果のなかでも、特筆すべきは太陽極域の観測結果である。「ひので」は太陽の極域について、集中的に観測を続けてきた。黒点のもととなる磁場は太陽の内部でつくられるが、太陽の北極・南極には、次の11年周期で黒点となる磁場の種があるためである。太陽の極域を詳しく調べるには、非常に高い空間分解能が必要である。（斜めから文庫本を読む状況を想像してもらえばいい。）そのため、太陽極域の観測は「ひので」の独壇場である。

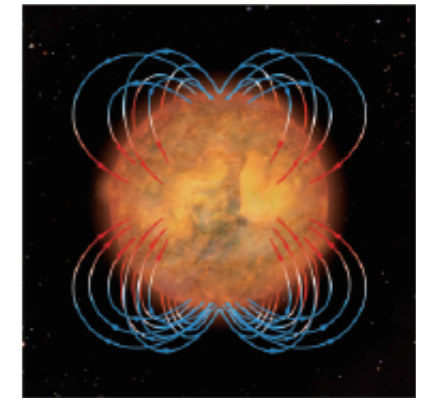
太陽は全体として棒磁石のようになっており、極域の磁場は11年周期でN極からS極へ、S極からN極へと反転する。黒点数は磁場が反転するタイミングでピークとなる。「ひので」の観測結果は、北極域は2007年春のS極が優った状態から2012年にはN極とS極がせめぎ合った状態になり、現在では完全にN極となっている。一方、南極域はN極が強いままで、2014年夏現在、まだ反転の兆しが見られない。このため、南北両極ともN極となる4極構造という不思議な状態になっている。

実はこのほかにも、以前のサイクルに比べて黒点の数が少ない、黒点数増減の11年周期が12.6年に伸びているなど、太陽の挙動がこれまでとずれていることを示す観測結果がある。これらは、ここ数百年間にはなかった現象であり、今から約400年前に起きたマウンダー極小期には、現在起こっている現象の少なくともいくつか起きていたと考えられている。

20世紀後半は黒点数が非常に多く、太陽のダイナモ活動が活発な時期にあたっていた。現在、太陽全体の磁場の量が急速に減少しており、その減少レートは過去1万年で最大であるとの英国の研究者の報告もあ



太陽の大規模磁場の想像図(2008年極小期)



太陽の大規模磁場の想像図(2012~2014年)

図8 2重極から4重極への遷移(模式図)

る。このため、現時点では、今後数十年のうちにマウンダー極小期に突入する可能性を否定できない。「ひので」と現在計画中的の新太陽観測衛星SOLAR-Cが極域の観測を継続することにより、マウンダー極小期への突入を早期に予想できるだろう。

星と生命と文明と

直射日光を受けると、とても暑く感じる。これは太陽からの光が強烈なエネルギーを運んでいることの証左である。文字どおり、太陽は地球上のあらゆる生命のみなもとだ。この太陽の輝きは、毎秒約100万トンの水素がヘリウムになる核融合反応により維持されている。太陽の年齢は46億歳。太陽は今後数十億年にわたって、水素がなくなるとヘリウムの核融合反応というように、次々とより重い元素をつくりだす核融合反応により輝き続けることができる。そして、今から数十億年後に、惑星状星雲となって、その一生を終える。ビッグバン宇宙の最初には、水素とヘリウムしかなかったもので、われわれのからだをつくる炭素やカルシウムといった元素はすべて、太陽のような星の中でつくられた。われわれは、二重の意味で星の子だ。

太陽活動の極大期では、フレアが頻発し、GPSの異常、送電システムの異常電流による停止、気象衛星や通信衛星の誤動作、そして宇宙飛行

士の被ばくなど、高度に発達した文明は思わぬ被害を受ける。このため、太陽フレアの発生を事前に察知する宇宙天気予報に日本を含む各国が力を入れている。一方、より長期的な時間スケールで見ると、黒点の増減で代表される太陽活動が、地球の気候に顕著な影響を与えていることがわかってきた。太陽活動が高度に発達した文明にどのような脅威をもたらすか、そして、太陽が地球気候に及ぼす長期的影響の観点からも、この魅力的な星・太陽の基礎研究の進展に注目していく必要がある。

太陽を研究することは、地球全体にかかわることでもある。巨大プロジェクトである観測衛星の開発、そして論文に至る生みの苦しみの過程で、多くの人々が集い協力することは美しい。これまでの経験を通して言えることは、いまこのとき、それぞれの持ち場で、全力で仕事に向き合うことが成功の秘訣であるということである。

注

- 1) ガリレオ・ガリレイ『星界の報告』山田慶児・谷泰訳、岩波文庫。『太陽黒点にかんする第二書簡』も収録。
- 2) <http://www.sciencemag.org/site/special/astro2012/index.xhtml>

参考文献

常田佐久『太陽に何が起きているか』文春新書