

最新の太陽像と宇宙天気予報

柴田一成（京都大学大学院理学研究科附属天文台、宇宙総合学研究ユニット）

本稿は、2010年5月2日、京大花山天文台で開催されたジャパン・スケプティックス総会の際に行われた講演をまとめたものである。講演にご招待いただいたことに謝意を表したい。なお、本講演のかなりの部分をカバーする詳しい解説が、拙著「太陽の科学」（2010年）¹⁾にあるので、興味ある方はそちらもお読みいただければ幸いである。

1. はじめに

最近私は、人間の社会や文明は太陽活動によってコントロールされているかもしれませぬ、と市民向け講演会など色んなところで「大胆に」話をするが、意外なほど共感されて驚くことがよくある。太陽はわれわれ生命や地球のエネルギーの源だから、ある意味では一般の人にとっては当たり前なのかもしれないが、科学者（太陽・宇宙プラズマ物理学者）の私にとっては、これまでの研究生活 30 年間、太陽が人間や生命に影響を与えるという発想は、「トンデモ科学」の一つだった。最近ようやくそのような分野にも目がとどくようになり、「目からうろこ」の日々が続いている。

太陽が地球や人間に影響があるのは抽象的には理解できるが、いざ話が具体的になると、実証するのが難しくなるので、とたんに「トンデモ科学」になる（と思う）のである。例えば、「黒点数が経済に影響する」とか、「太陽で爆発が起きると交通事故が増える」などである。これらは通常の太陽物理学者は「トンデモ科学」と思ってしまう。「黒点数が気候変動に関係する」はどうだろうか？ さすがにこれは真剣に考えないといけない時期に来ている。私が大学院に入ったころ(1977年)は、ちょうど Eddy のマウンダー極小期再発見の論文(1976)²⁾が出てすぐのところで、黒点数が気候変動に関係があることがわかったとして、センセーショナルなニュースになっていた。ちなみに、Eddy はこの仕事の原因で米国で職を失ったという (H.スベンスマルク・N.コールドー著「不機嫌な太陽」³⁾のまえがき (E. N. Parker) より)。地球温暖化 CO2 説の主流と衝突したからだろうか？

本稿と共通の内容（とくに地球温暖化に関する内容）は、2年前のジャーナルに私自身短いエッセイ⁴⁾を書いているし、また会長の松田卓也氏が後で述べる Svensmark 説について大変分かり易い興味深い内容の解説⁵⁾を書いているので、解説原稿の執筆に躊躇したが、「書く人が変われば視点もおのずから変わるので、よろしく」とのことだったので、解説を引き受けることにした。

ただ、ジャパン・スケプティックスのジャーナルということなので、ただの解説ではなく、できるだけ懐疑論争の俎上にのりそうな興味深い話題や、他のところで書いてない新

しい話題をとりあげたい。原稿が遅くなったことを深くお詫びしたい。

2. 太陽と黒点

太陽で何といっても重要なのは黒点である。紀元前より人類は黒点を見ていた。その証拠に日という漢字の元は象形文字☉であり、この中の点は黒点を表しているとの説が有力である。(この点は通常はカラスを表しているとされているが、なぜ古代中国人は太陽にカラスがいると思ったかという、それは巨大黒点—ちょっとカラスに似ている—を夕日の中に見たから、という解釈である。) 400 年前のガリレオ以後、望遠鏡を用いた黒点の詳しい観測が始まった。その結果、黒点の典型的な大きさは太陽半径の 100 分の 1 程度 (~1 万km)、太陽は自転していること、黒点の数は増えたり減ったりすること、黒点がたくさん出現すると太陽で爆発(フレア)が頻繁に発生すること、その結果、地球にも影響があること、などがわかってきた。

黒点の正体は何か? それは磁場である。20 世紀の初頭、パロマ山の 5 m 望遠鏡を作ったアメリカの天文学者ヘールは、黒点が強磁場を持っていることを発見した。地球の磁場(0.5 ガウス程度)の数千倍(1000~3000 ガウス)もの強い磁場である。実際、黒点は二つのペアで現れ、それぞれ N 極と S 極に対応する。水素原子が出すスペクトル線($H\alpha$ 線)だけを透過する特殊なフィルターを用いて太陽を観測すると、彩層と呼ばれる太陽大気の上層部が見えるが、黒点の周辺はいつも明るく光っている。黒点周辺に蓄えられた磁場のエネルギーが解放されている証拠である。ときおり黒点周辺がひととき明るく輝くことがある。それがフレアと呼ばれる太陽面爆発である。フレアは太陽系最大の爆発現象であり、地球磁気圏や電離層に大きな影響を与える。のみならず、恒星フレアや天体爆発現象のプロトタイプとしても重要である。

皆既日食のときに太陽の周りに真珠色に輝くコロナが見える。このコロナの正体は、100 万度の超高温プラズマであることが 20 世紀半ばにわかった。実はこのコロナの温度を世界で最初に正確に導出したのは、わが国の宮本正太郎(1943 年)であったことは、あまり知られていない。(宮本正太郎は花山天文台の第 3 代台長であった。ちなみに私は第 9 代台長である。) さて、このコロナの超高温の加熱メカニズムはいまなお未解決である。コロナは太陽だけでなく、夜空の星々(恒星)のほとんどにあることが最近の天文観測からわかってきたので、太陽コロナ問題というのは、恒星の基本問題、天文学の基本問題と言って良い。ただし近年の観測の発展によって、コロナ加熱のメカニズムも、黒点やフレアと同じく、磁場が重要であることがわかってきた。磁場があると、なぜ爆発(フレア)や加熱(コロナ)が発生するのだろうか?

3. 太陽面爆発(フレア)

図 1 をご覧いただきたい。これは、飛騨天文台で観測された典型的な太陽フレア(2001 年 4 月 10 日)の $H\alpha$ 像である。拡大図中の二つの黒い点は、黒点であり、それぞれ N 極、

S 極に対応する。H α 像中、明るく光っているところがフレアである。フレアは二つの黒点の間の N 極と S 極の境界線（磁気中性線）に平行に発達する。このフレアの場合、リボンが二つ並んでいるように見えるので、ツーリボン（フレア）と呼ばれることもある。この図ではわからないが、フレア開始直前に磁気中性線に沿って存在していたダーク・フィラメントと呼ばれる構造が上方に噴出すると、フレアが始まる。この例では、フィラメントの長さは 10 万 km 程度なので、フレアの空間スケールも 10 万 km 程度に達する。ツーリボンは、時間とともに磁気中性線から離れる方向に広がっていく。離れる（見かけの）速度はおよそ 10 km/s、フレアの時間スケールは 1 時間程度である。また、解放された全エネルギーは、この例では 10^{30} — 10^{31} erg 程度（水爆 100 万-1000 万個程度）と推定されている。2 か所の明るいフレア領域は、磁場の N 極、S 極に対応している。このようなフレアの時間発展は、オーロラの時間発展とも良く似ている。（オーロラは北極と南極で同時に起こる。）

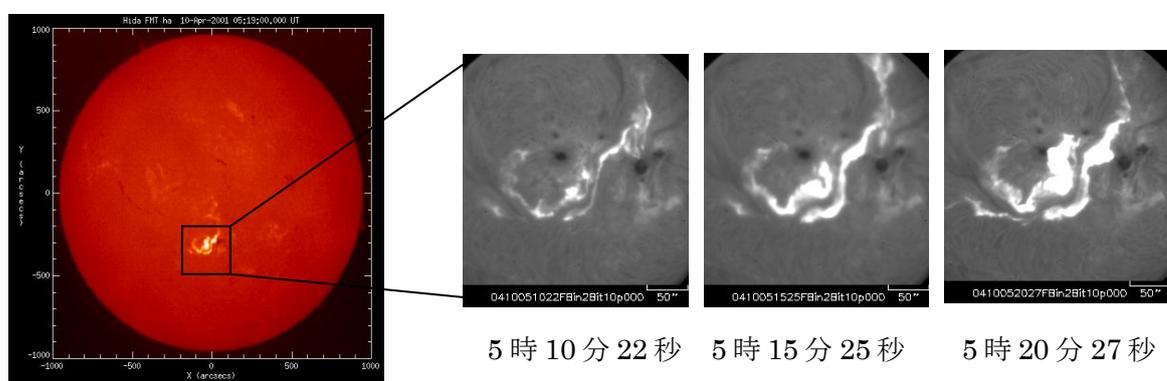


図 1 2001 年 4 月 10 日のフレアの H α 単色像、
（京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡による）

以上のような H α 線観測や電波観測から、フレアのエネルギーの源は、H α 線で見えている彩層よりずっと上空のコロナにあるのではないかと考えられるようになった。電波はコロナから放射されているからである。H α 像で 2 か所が光っているのは、これらが磁力線でつながっていて、その磁力線に沿ってコロナから彩層にエネルギーが伝えられたのではないかと、という仮説である。コロナ中で逆向きの磁力線が突然つながかわると、ゴムひもみたいな磁力線の張力によって、プラズマが突然加速され、加熱されるという説である。その仮説のことを、「磁気リコネクション説」という（図 2 参照）。磁気リコネクション説は、早くも 1940 年代に R. G. Giovanelli や F. Holye（宇宙論や SF でも有名なホイル）によってフレアを説明するために提唱され、1950 年代後半に P. A. Sweet と E. N. Parker（太陽風などの宇宙電磁流体力学研究で京都賞受賞）らによって電磁流体力学理論の基礎が築かれた。ただ、肝心のエネルギー解放領域のコロナの観測が難しいため、磁気リコネクシ

さて話を元に戻そう。Alfvén はアンチ・リコネクション派だったと書いたが、では彼はフレアをどう説明したのか。彼は磁気ループに沿って強い電流が流れ、その電流が突然ショートしてエネルギーを解放するという電流崩壊説を提唱した(1967年)。1970年~80年頃に始まったフレアの X 線観測は、フレアがループ形状を示すという結果を示しており、私が大学院に入った頃(1977年)は、Alfvén の説を支持するという論文が多数出版された。でもそれは本当か? 電流崩壊説では、上記の $H\alpha$ 観測を説明するのは容易ではない。一方、磁気リコネクション説も、理論的問題が残っているし、観測的証拠も少ない。果たして、フレアのエネルギー解放機構は、「磁気リコネクション説」なのか「電流崩壊説」なのか? 始まったばかりの X 線観測は分解能が悪かったので、精度の良い高分解能の観測が必要である。そのために打ち上げられたのが、わが国の「ようこう」衛星であった。

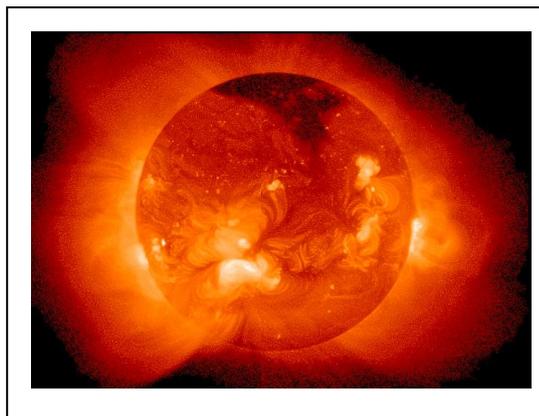
「ようこう」衛星は、史上最高性能の軟 X 線望遠鏡、硬 X 線望遠鏡など搭載して、1991年に打ち上げられた。2001年に観測を終了するまでの間、1000個以上のフレアを観測し、数多くの磁気リコネクションの証拠を発見した。代表的なものをあげると、カスプ型磁気ループ構造 (Tsuneta et al. 1992) ⁶⁾、ループトップ硬 X 線源 (Masuda et al. 1994) ⁷⁾、X 線ジェット・X 線プラズモイド噴出 (Shibata et al. 1992, 1995) ⁸⁾ などである。これらの観測により、フレアのエネルギー解放のメカニズムは「磁気リコネクション」によることがついに確立した。これは単に太陽物理学にとどまる成果ではない。上述のオーロラなどの磁気圏爆発現象のメカニズムや、核融合磁気閉じ込め実験で起こる爆発(閉じ込め失敗)の原因に関連する成果であり、さらには、天体フレアの発生機構の解明のヒントにもなる重要な成果であった。

「ようこう」衛星のもう一つの重要な成果は、「コロナは爆発だらけ」、すなわち、「コロナは誰が想像していたよりもダイナミックであり、常に大小無数の爆発やプラズマ噴出を起こしている」、ということを発見したことである。図3を見られたい。「ようこう」衛星軟 X 線望遠鏡で見た太陽コロナの X 線像である。良く見るとコロナには無数の筋模様がある。これらはすべて磁力線を表している。筋模様の多くはループ状をしており、そこに数100万度~数千万度の超高温プラズマが閉じ込められている。動画で見ると、至るところで、磁気ループが突然光り出しているのがわかる。これらはすべて爆発(フレア)である。以下のアドレスにこの動画がアップされているので、ぜひご覧いただきたい。

http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/~shibata/movie/1_sxt_920217_920227_b.mpeg

巨大フレアが発生すると、強い X 線、紫外線、ガンマ線が放出され、同時に大量のプラズマが惑星間空間に噴出する。さらに、大量の高エネルギー粒子(放射線粒子または太陽宇宙線)が発生する。後で述べるように、これらの電磁波、高速磁気プラズマ雲、放射線粒子が、地球に到達すると、地球環境や生命に甚大な影響を与える。

図3 「ようこう」衛星がとらえた
太陽コロナの X 線像 (JAXA/ISAS)



さて、以上のような観測から、コロナの構造を支配しているのは磁場であること、さらに、コロナが百万度もの超高温状態に加熱されているのは、磁場の働きによることが確かとなった。ただ、その詳細なメカニズムが解明されていない。それを解明するために、新たな太陽観測衛星が 2006 年に打ち上げられた。それが「ひので」衛星である。

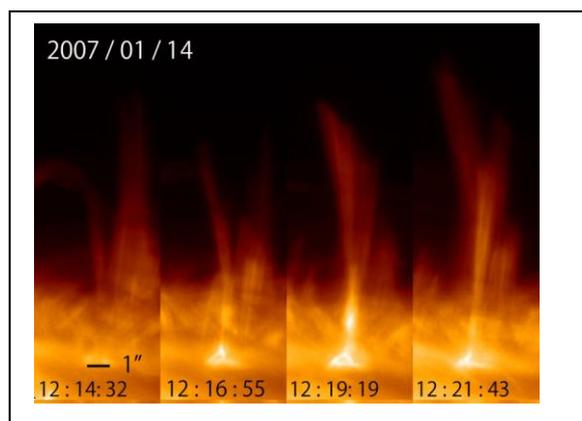
「ひので」衛星は、コロナ加熱メカニズムや、フレア発生（磁気リコネクション）のトリガー（引き金）機構などを解明するために、口径 50cm の可視光磁場望遠鏡（太陽望遠鏡としては最大の宇宙望遠鏡）、「ようこう」より格段に精度の良い X 線望遠鏡、および、速度が測れる極紫外線撮像分光望遠鏡を搭載した。ここにその素晴らしい動画をお見せできないのが、残念であるが、以下の「ひので」チームの HP を参照されたい。

<http://solar-b.nao.ac.jp/Movies/>

「ひので」観測の結果、次のようなことがわかった。

- (1) 太陽大気（光球、彩層）が、誰が想像していたよりも激しく活動していることが明らかになった。とくに彩層は小さな爆発（ナノフレア）だらけであることが判明した。これは、「ようこう」の発見をさらに、下層大気（光球、彩層）に拡張したものになっている。実は天体现象も同じ傾向にある。すなわち、観測の空間分解能や時間分解能が良くなるにつれ、これまでよりも激しいダイナミックな現象が発見される、という傾向である。これは自由エネルギーをもつ磁気プラズマの普遍的性質であると、私は思っている。（だから宇宙は爆発だらけ宇宙線だらけなのである。）
- (2) いたるところにアルベン波（磁力線の波）とジェット（磁気リコネクションによる；例えば Shibata et al. 2007、図 4 参照）⁹⁾ が発見された。これまで、コロナの加熱説として、アルベン波説とナノフレア（リコネクション）説が対立する説として提唱されていたが、この「ひので」観測から、両者は対立する説ではなく、むしろ統一すべき説ではないか、という統一説を私は提唱している。
- (3) 黒点、プロミネンスでは、謎の微細構造、謎の動的現象が、続々と発見された。

図4 「ひので」衛星がとらえた
太陽彩層ジェット
(JAXA/ISAS, Shibata et al. 2007) ⁹⁾



4. 太陽活動の地球への影響と宇宙天気予報

以上の最新太陽観測から、太陽の外層大気（光球、彩層、コロナ）は、我々が想像していた以上に激しくダイナミックに活動していることが判明した。それは太陽の地球に対する影響が想像以上であることを意味する。

「ようこう」衛星の時代、太陽活動の地球への影響を身をもって体験したことがある。それは1994年4月14日のことだった。当時、私は鹿児島県の内之浦にある宇宙空間観測所で「ようこう」の運用当番をやっていた。運用当番の仕事の一つに太陽で異常現象が起きたら、全世界の太陽研究所に電子メールで知らせるというものがある。その日の最初に「ようこう」から送られてきたX線太陽像を見たら、巨大なカスプ型コロナ・ループが見えていた。X線強度はきわめて弱いので、普通のフレアには分類されないが、サイズは大きい。私は当時、理論家の立場から「リコネクション説」を提唱していたので、カスプ構造を見た瞬間に、これはリコネクションが起こったに違いない、その結果、大量のプラズマが惑星間空間に向けて放出されたのに違いないと確信した。それを電子メールに書いて世界中の太陽研究所に送信した。すると、米国コロラド州の研究所にいた私の友人の Alan McAllister 君が、それを見てすぐにシカゴの電力会社に電話した。磁気嵐が起こるかもしれないから注意した方が良く、という知らせである。電力会社はその1か月前に磁気嵐で被害を受けていたので、今回は一つ数億円する変圧器をはずして待つことにしたらしい。そしたら、2日後、本当に巨大な磁気嵐が起きたのだ。変圧器ははずされていたので、壊れずに済み、電力会社は米国政府に大層感謝したのだという。その後、米国政府はNASAに感謝し、NASAは「ようこう」チームの米国のリーダーの L. Acton 博士に感謝し、最後に私が Acton さんからほめられることになった：“Congratulations ! Shibata-san. Thank you very much for your excellent job !” という顛末である。それまで、全くの基礎科学を推進しているつもりで色々な仕事や研究をしていたのが、実は太陽研究は社会と直接的につながっていることがその時わかり、たいそう驚くと共にカルチャーショックを受けた。そしてそのとき以来、太陽の爆発現象が地球におよぼす影響の予報（これを「宇宙天気予報」という）についても責任を感じるようになった。そんなわけで、2004年からは、宇宙

天気予報の国際共同研究プロジェクト（CAWSES）の責任者の一人を務めている。

太陽の爆発現象が地球に影響（被害）を及ぼした有名な例としては、1989年にカナダのケベック州で起きた大停電がある。数百万人が停電の被害を受け、発電所の損害だけで被害額は700億円にのぼったそうである（名古屋大学太陽地球環境研ニュースレター2002年4月号、p. 3）。このときは全米を覆うほどの大オーロラが発生し、フロリダでもオーロラが見えたという。また電波通信の途絶もよくある。有名な例は、リレハンメルオリンピック(1994年)のNHKの中継が突然途絶えたケースである。このときは太陽フレアが磁気嵐を起こし、その結果、放射線帯の高エネルギー粒子の数が増大して放送衛星を故障させたと考えられている。我々天文学者にとって残念な被害もある。それはX線天文衛星「あすか」の故障である。2000年7月14日に太陽で大フレアが発生した（フランス革命の日に起きたので、バスターユデー・フレアと呼ばれる）。そのフレアにともなって発生した巨大磁気嵐が「あすか」衛星の飛行する高度の超高層大気を突然加熱し大気が膨張したため、衛星周辺の密度が増大して、衛星が突然ブレーキを受け、姿勢が傾き、そのために太陽電池が太陽方向からはずれて、エネルギーが供給できなくなったのだ。しかも空気抵抗が増したので、衛星本体そのものも予定より数年早く、わずか数カ月後に大気圏に突入した。

以上のように太陽フレアの影響、その結果としての磁気嵐による被害は甚大なものがある。さらに、私は宇宙飛行士の被ばくが何よりも心配である。宇宙飛行士が船外活動をしているときに10年に一度の巨大フレアが発生したら、宇宙飛行士の命にもかかわる被ばくの恐れがあるのだ。宇宙天気予報の確立が緊急の課題である。現在、ひので衛星による太陽表面の磁場観測に基づいて、フレアの現実的な3次元電磁流体シミュレーションがようやくできるようになりつつある。フレア領域から噴出したコロナ質量放出の惑星間空間への運動や地球への伝播なども、基礎過程のシミュレーションができるようになってきた。まだ完全ではないが、上述のようにフレアやコロナの物理学がかなりわかってきたから、このような研究も可能になったのである。名古屋大学太陽地球環境研究所の草野完也博士を中心に日本の研究グループで基礎研究が進んでおり、今後5年のタイムスケールで、実際の太陽観測データに基づいた太陽-地球間現象の3次元電磁流体シミュレーションができるようになると期待されている。興味ある方は以下のHPをご覧ください。

http://www.jamstec.go.jp/ifree/space_earth/jswm/ja/

4. 太陽活動の生物や人間への影響

数年前、米国コロラド州のNOAA（米国海洋大気庁）を訪問する機会があった。ここには世界の宇宙天気予報の中心とも言える宇宙天気予報センターがあり、少し見学させてもらったところ、面白いものを見つけた。宇宙天気被害を受ける機械類などを説明した展示棚に、なんと伝書バトの模型が置いてあったのだ。説明を聞くと、伝書バトは地磁気を感じて正しい方向を知るのだという。フレアが起こって磁気嵐が起きると地磁気の方が変動するため、伝書バトが迷ってしまう、のだそうだ。伝書バトに限らず、渡り鳥や回遊

魚が地磁気を感知して方向を正しく認識している、という話があるが(前田坦 1985)¹⁰⁾ それと同じことらしい。

そういえば、数年前の中国雲南で開催された国際天文学連合のアジアオセアニア会議の太陽セッションで私が司会をしていたとき、ロシアの学者が、「太陽フレアが起きると交通事故が増える、病院の患者の容態が悪くなる」という話をしだしたので、耳を疑ったことがある。その学者はまじめな顔をして、**heliobiology** (太陽生物学)の始まりである、などとしゃべっている。講演直後、司会だったので、すぐにこのことについて、「どう解釈するのか？」と質問したら、「原因はまだわかっていないが、一つの可能性としては血液中のヘモグロビンの鉄分に地磁気が作用して、血圧を変動させているのではないか」という。血圧が高くなれば運転手はいらいらして交通事故は増えるし、病気の患者の容態も悪くなる、ということらしい。

こういう話を 2009 年 2 月に開かれた京大医学部の先生の定年退官記念講演会で、太陽の話に関する講演の際に紹介したことがある。「皆さんの中で太陽フレアと病人の関係などの話をご存じの方がおられましたら、お教えいただけませんか？」と呼びかけたら、しばらくたって、生物と地磁気の関係の研究されておられる京大医学部名誉教授の福島雅典博士(現在は神戸の臨床研究情報センター長)に出会うことになった。福島博士によると、こういうことを研究することになった、そもそものきっかけは、有名な気功師の人が、博士の研究室に、「私のパワーを調べてほしい」と訪ねて来られたことだったという。福島博士は、いかがわしい話を否定するのに、ちょうど良い機会なので、精密に調べようと思った、のだそうだ。ところが調べて行くと、気功師の手の指の先から微弱な振動する磁場が出ていることがわかったのだという(Fukushima et al. 2001)¹¹⁾。磁場の強さは 10 ミリガウス程度で振動数は 10 Hz くらい。磁場強度は、おもしろいことに、ちょうど巨大磁気嵐の変動磁場の大きさくらいである。では 10Hz は何か意味があるのか？ これはどうも電磁波の地球大気共鳴振動数(シューマン共振=電磁波が 1 秒間に地球の周りを 7 周半回ることによって決まる振動数、7.5Hz)と大体同じである。そういう指の先から出る振動磁場を人間の体におよぼすと、人は健康になるらしい。それがどうも気功師のパワーの理由らしい。実際に生きている細胞に同じ強さの振動磁場を与えてみたら、ある種の酵素が活性化した(Fukushima et al. 2002)¹²⁾。さらに今度は二つの水槽に金魚を用意し、一方の水槽には同じ強さの振動磁場をかけ、片方の水槽には何もしないで、1 か月放置したら、一か月後、磁場をかけた方の金魚は 1 割以上体が大きくなった、という。この実験にヒントを得て、福島大学院生の西村勉氏は恐竜が大きくなったのは地磁気変動が原因かもしれない、という論文を書いた(Nishimura et al. 2009)¹³⁾。一方で、このような低振動磁場は高血圧症の治療にも有効という¹⁴⁾。これは前述の磁気嵐が起きると病人の容態が悪くなる、という話と逆の結果であるが、化学薬品でも適量だと薬になるが、多すぎると毒になる、ということと同じことなのだろう。以上の話は、携帯の電波は人体に有害か？ という問題と密接につながっている(京大基礎物理学研究所の村瀬雅俊博士による)¹⁵⁾

6. 黒点と気候変動

先に書いたように、黒点が多いときに地球は温暖化し、少ないときに寒冷化する、という経験的な関係が Eddy (1976) ²⁾ によって報告され、大きな驚きを呼び起こした。黒点は約 11 年の周期で増えたり減ったりするが、さらにそれだけでなく、数 100 年というタイムスケールでの長期の変動も示す。図 5 はガリレオ以後の黒点数の増減を示す。これを見ると、1640 年～1710 年ころに黒点数が非常に少ないときがある。これは、マウンダー極小期と呼ばれている。この時代の地球は寒冷化していたことが知られており、いわゆる小氷河期にあった (Eddy, 1976)。例えば、ロンドンのテムズ川は現在は決して凍らないが、当時の写生画を見ると凍ったテムズ川が描かれている。また、当時、ヨーロッパでペストが流行したり、清教徒革命 (1649 年) が起きたりした。また、1800 年から 30 年間ほどの期間も黒点数が少し少ない時期となっており、ダルトン極小期と呼ばれている。このときも少し地球が寒冷化していたことが知られている。ナポレオンのロシア遠征失敗はその寒冷化による冬将軍のためであった。

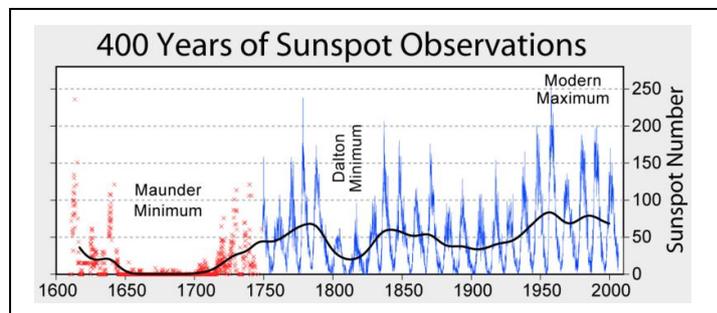


図 5 黒点数の 400 年間の変動

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sunspot_Numbers.png

望遠鏡による観測は 400 年の歴史しかないが、それ以前の黒点活動も、木の年輪に含まれている炭素の放射性同位体 (^{14}C) の量を測ることによって推定できる。というのは、 ^{14}C は宇宙線が大気中の窒素 (^{14}N) に衝突することによって形成されるのだが、宇宙線の量が黒点数とともに増減するからである。黒点数が多いと太陽風中の磁気擾乱が強くなり宇宙線を跳ねとばしてしまうので、地球に届く宇宙線量が減るのである。1600 年以後の木の年輪から得られた推定黒点数は望遠鏡観測による結果と傾向が良く一致している。

図 6 にはそのようにして得られた黒点数の 5000 年間の変動を示す。図を見ると、1600 年以前にも黒点数が少ない時期がある。例えば 1400 年から 100 年間くらいの期間である。これはシュペラー極小期と呼ばれている。逆に、1100 年～1300 年ころは黒点が多い時期となっていた。(このような 100 年のタイムスケールで黒点が多くなる時期をグランド・マキシマム、黒点が少なくなる時期をグランド・ミニマムと呼ぶ。) 図 6 より、黒点数、氷河の発達、気温変動などが良く相関していることがわかる。1100 年～1300 年ころのグラン

ド・マキシマムは中世温暖期に対応し、1400年～1700年のグランド・ミニマム（シュペーラー極小期とマウンダー極小期）は小氷河期に対応している。

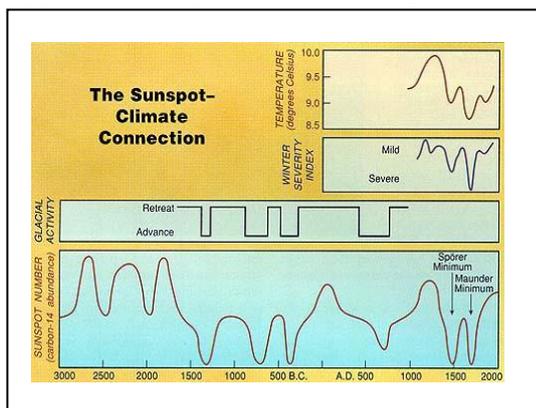


図6 上から、地球の平均気温変化、冬のきびしさ、氷河の発達（下向きが氷河が多い）、（木の年輪の中の放射性同位体から推定した）黒点数の変化を示す。

http://www2.sunysuffolk.edu/mandias/ia/possible_causes.htm

図7にもっと詳細なデータを示す。左図は木の年輪中の放射性同位元素量に基づいて推定された1000年間の黒点数変動、右図は地球の様々な場所での気温変動である。これを見るとマウンダー極小期のころ、地球の平均気温は約0.6度下がっていることがわかる。また、ダルトン極小期に対応する気温低下（～0.3度くらい）も見てとれる。最近100年間の黒点数の増大と気温の増大が似ているのは印象的である。ちなみに図7の黒点数の論文はNatureに出版されているが、著者（Solanki et al. 2004）¹⁶⁾は「最近の温暖化は太陽黒点では説明できない」とわざわざ要旨の最後に書いている。その意味はもちろんIPCCと同じで、黒点変動にともなう太陽光度変動（0.1%）だけでは温暖化は説明できない、という意味である。銀河宇宙線による雲生成などを介した黒点の影響（Svensmark説）まで否定しているわけではない。

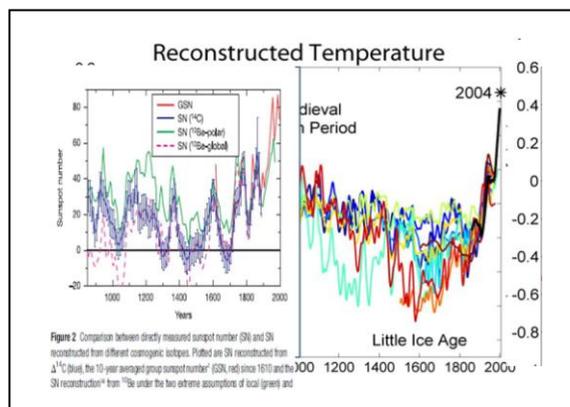


図7 黒点数と気温の1000年間の変動の比較。黒点数はSolanki et al. (2004)¹⁶⁾より、気温はhttp://en.wikipedia.org/wiki/File:2000_Year_Temperature_Comparison.png

Svensmark 説というのは、銀河宇宙線がたくさん地球大気に届くと雲がたくさんでき、それが太陽光をさえぎるので、地球は寒冷化する、という説である (Svensmark and Friis-Christensen 1997, Marsh and Svensmark 2001) ^{17,18)}。つまり、黒点が少ないと銀河宇宙線がたくさん地球に来るので雲がたくさんできて、地球は寒くなる、という説である。霧箱の原理を考えると宇宙線が雲の原因になりそうなのは、よくわかる。Svensmark らは、人工衛星によって観測された雲量と宇宙線強度に良い相関があることを発見して、一躍有名になった。(ただし、「有名」の中身には、地球温暖化 CO2 説の正統派からのひどい批判とか、研究費への圧力とかいうのもあるらしい。) 最近、一般向けの解説の翻訳本⁵⁾が出たので、ぜひお読みいただきたい。大変おもしろい本である。特に私は、宇宙電磁流体力学的世界的権威のパーカー博士の温かい推薦文にいたく感動した。それを読んだだけでも Svensmark がどんなに困難な立場にあるか良くわかった。

Svensmark 説については、最近のデータでは雲量と宇宙線強度は相関がないという論文も出ており *controvertial* である、というのが正しい現状評価であろう。雲量は宇宙線以外の影響も受けるので、相関の良し悪しは地球の場所にもよる。例えば Svensmark 自身の解析でも海洋で相関が良く、大陸で悪いことがわかっている。一方で、雲の形成の物理はまだ良くわかっていない。また、雲の観測自身にも問題がある。この雲の観測の現状については、つい 1 か月前(2010 年 11 月 15 日)に名古屋大学太陽地球環境研究所で開かれた研究会で気象学の権威である松野太郎博士から聞いた。こんな基礎的な雲のデータもきちんと取れていないのが、気象学の現状であるらしい。当の研究会の主題は「太陽活動と気候変動の関係」というもので、気候変動の紫外線説と宇宙線説 (Svensmark 説)を太陽物理学者、宇宙線物理学者、高層大気物理学者だけでなく、気象学者も交えてオープンに議論するという日本では珍しい学際的な研究会であった。(日本では気象学者がこういう会に参加するのは珍しいらしい。そのことも実は大きな問題である。) なお、紫外線説というのは、黒点周辺の活動領域から強い紫外線が放射されるので、黒点がたくさん出ると太陽全体の紫外線も強くなり、それが地球の成層圏を強く加熱することによって、最終的に対流圏(地上大気)の気温上昇をもたらしている、という説である。ただし、成層圏は希薄なので対流圏への影響は弱く、気候変動への影響の程度を正確に評価することは難しい。雲の研究や宇宙線説の検証と共に、紫外線説の検証も重要な将来の研究課題である。(なお日本では、東大宇宙線研の宮原ひろ子博士が、宇宙線説に関して大変興味深い研究をしている。宮原博士によると、マウンダー極小期の気温変動の特徴は宇宙線説の予言と良く合っているという。¹⁹⁾)

さて、本来ならば 2008 年に増え出すはずだった黒点が 2 年間ほどなかなか増えず、ようやく、最近増え出したところである。黒点数がゼロの日数という点では、この 2 年間は 100 年ぶりの少なさであった。また、極小期における太陽の極磁場と、次のサイクルの極大期における黒点数には良い相関があることが知られており、その経験則を用いると、この極

小期の極磁場の強さから次のサイクルの黒点数が予想できる。(黒点数の定義は、 $k(10g+f)$ 、ここで、 k は観測機器に依存する 1 のオーダーの係数、 g は黒点群の数、 f は黒点総数。) de Jager and Duhau (2009)²⁰⁾ の推定によれば、次期サイクルの最大黒点数は 70 前後だという。ちなみに前サイクルの最大黒点数は 130 くらいであった。この 70 という数字は 200 年前のダルトン極小期の黒点数 (50~60) にせまるものである。これから de Jager and Duhau (2009) はダルトン極小期の再来の可能性があると結論している。一方、Lockwood (2010)²¹⁾ は、今後 50 年間にマウンダー極小期が再来する可能性が 8%ほどであると述べている。これらの可能性はあくまで可能性にしか過ぎない(メカニズムがわかっていないので誰も確かなことは言えない)が、もしダルトン極小期が再来して過去と同じような気候変動が起こるならば 0.3 度くらい寒くなり、マウンダー極小期が再来するなら 0.6 度くらい寒くなると予想される。地球温暖化の気温上昇が 100 年間で 0.6 度の上昇であるから、黒点減少による寒冷化がいかに速いか理解できよう。

6. おわりに

本稿では、最近詳しくわかってきた太陽面爆発(フレア)のメカニズムや、コロナ加熱機構の最新研究の詳細を詳しく述べるよりは、むしろ、太陽活動の地球への影響、とくに、まだ学問的に確立していないが、他分野への影響という点で重要な話題、宇宙天気予報、太陽活動の生物への影響、黒点と気候変動など、興味深い話題を選んで詳しく紹介した。多くは現在のところ「風が吹けば桶屋がもうかる」式の話であるが、将来、ある程度物理的に解明できる可能性のある話である。もちろん問題は数学的に高度に非線形の複雑系の問題なので、理論的にきちんと解くのは困難きわまりないが、観測・実験の発展が期待できるので、観測・実験と理論・シミュレーションをうまくバランスとして発展させれば、着実な進展が望める分野であると思う。あるいは、進展させなければならない重要な分野であると思う。

最後に一言強調しておきたい。ここで述べた、太陽と地球や生命の関係について得られた知見は、太陽系外の恒星とその周りの惑星や生命を研究するために大変役に立つ。現在の天文学は太陽系外に第 2 の地球を見つけるのが最大の課題である。おそらく 10 年以内に見つかるであろう。その次は、その惑星上に生命がいるかどうか、である。果たして惑星上は生命生存に適した環境となっているか? この問題は、現在および過去の太陽と地球・生命の関係の理解なくして、答えは得られない。ここまで来れば、いわゆる宇宙人問題まで後一步である。ここでスケプティックスのテーマにつながってくるのがおもしろい。何年先になるかわからないが、おそらく天文学の発展はこの方向に進むであろう。このような分野を宇宙生物学あるいはアストロバイオロジーとよぶ。昨年出席した国際天文学連合の総会では、世界の天文学者の半数くらいがアストロバイオロジー分野に足を踏み入れようとしている印象を持った。だれも皆、「自分の起源」の問題には興味があるのだ。私自身も宇宙天気予報研究の自然な発展として、超巨大フレア(スーパーフレア)の地球や生

物に対する影響を調べようと思っている。スーパーフレアは起きれば被害甚大なので応用上重要という反面、生命大絶滅や生命進化の原動力になっている可能性もある。太陽と地球・生命の関係の問題はきわめて実用的な側面を持つ反面、実は、究極の基礎科学たる天文学のフロンティアの宇宙生物学の基礎になっているのである。

参考文献

- 1) 柴田一成、「太陽の科学」、NHK 出版 (NHK ブックス)、2010 年
- 2) Eddy, J., The Maunder Minimum, *Science*, 1976, vol. 192, 1189-1202.
- 3) H.スベンスマルク・N.コールダー「不機嫌な太陽」、恒星社厚生閣、2010 年
- 4) 柴田一成、「地球温暖化と太陽活動」、*Journal of JAPAN SKEPTICS*, 2009, vol. 18, No. 3, pp. 2-3
- 5) 松田卓也、「地球温暖化のエセ科学」、*Journal of JAPAN SKEPTICS*, 2008, vol. 17, No. 1, pp. 4-9 ; 松田卓也、「地球温暖化太陽起源説」, *Journal of JAPAN SKEPTICS*, 2009, vol. 18
- 6) Tsuneta, S. et al., Observation of a solar flare at the limb with the YOHKOH Soft X-ray Telescope, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1992, 44, L63-L69
- 7) Masuda, S. et al., A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection, *Nature*, 1994, 371, 495-497.
- 8) Shibata, K. et al., Observations of X-ray jets with the YOHKOH Soft X-ray Telescope, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1992, 44, L173-L179.; Shibata, K. et al., Hot-Plasma Ejections Associated with Compact-Loop Solar Flares, *ApJ Let.*, 1995, 451, L83-L86.
- 9) Shibata, K. et al., Chromospheric Anemone Jets as Evidence of Ubiquitous Reconnection, *Science*, 2007, 318, 1951-1954
- 10) 前田坦、「生物は磁気を感じるか」、講談社 (ブルーバックス)、1985 年
- 11) Masanori Fukushima, Takuji Kataoka, Chikuma Hamada, Mippo Matsumoto. Evidence of Qi-gong energy and its biological effect on the enhancement of the phagocytic activity of human polymorphonuclear leukocytes, *Am J Chin Med.*, 2001, 29(1), 1-16.
- 12) Fukushima M, Mohri K, Kataoka T, Matsumoto M. Milli gauss pulsed magnetic field applied phosphate buffered saline solution elevates intracellular Ca²⁺ level and stimulates phagocytic activity of human neutrophils, *Transactions of the Magnetics Society of Japan*, 2002, 2, 15-18.
- 13) Nishimura T, Mohri K, Fukushima M. The mystery of the dinosaurs: the earth's

electromagnetic field may explain their gigantism and extinction, *Viva Origino*, 2009, 37, 7-9.

1 4) Nishimura T, Mohri K, Tada H, Yamada J, Suzumura M, Fukushima M. Microtesla extremely low frequency magnetic fields may ameliorate hypertension, *Georgian Med News*, 2007, 9, 30-34.

1 5) Murase, M., Environmental pollution and health : an interdisciplinary study of the bioeffects of electromagnetic fields, *SANSAI : An Environmental Journal for the Global Community*, 2008, vol. 3, pp. 1-35,

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/49793>

1 6) Solanki, S., Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years, *Nature*, 2004, vol. 431, 1084-1087.

1 7) Svensmark, H. and Friis-Christensen, E., Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationship, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, Vol. 59, No. 11, 1225-1232.

1 8) Marsh, N. D. and Svensmark, H., Low Cloud Properties Influenced by Cosmic Rays, *Phys. Rev. Lett.*, 85, 5004-5007.

1 9) Miyahara, H. et al., Possible link between multi-decadal climate cycles and periodic reversals of solar magnetic field polarity, *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, vol. 272, 290-295.

2 0) de Jager, C. and Duhau, S., Forecasting the parameter of sunspot cycle 24 and beyond, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, vol. 71, 239-245.

2 1) Lockwood, M., Solar change and climate: an update in the light of the current exceptional solar minimum, *Proc. R. Soc.* 2010, A 466 303–329