

「太陽」の解明をめざして 宇宙への扉を開く「カギ」

あらゆる天体の中で、太陽ほど人間に関係の深いものはないでしょう。日本神話のアマテラスをはじめとして、古代、多くの民族にとって太陽は「神」でした。そして太陽が突然に欠け始める日食は、多くの文化で凶事の前触れとされ、はやくも日本書紀にはその記述がみられます。

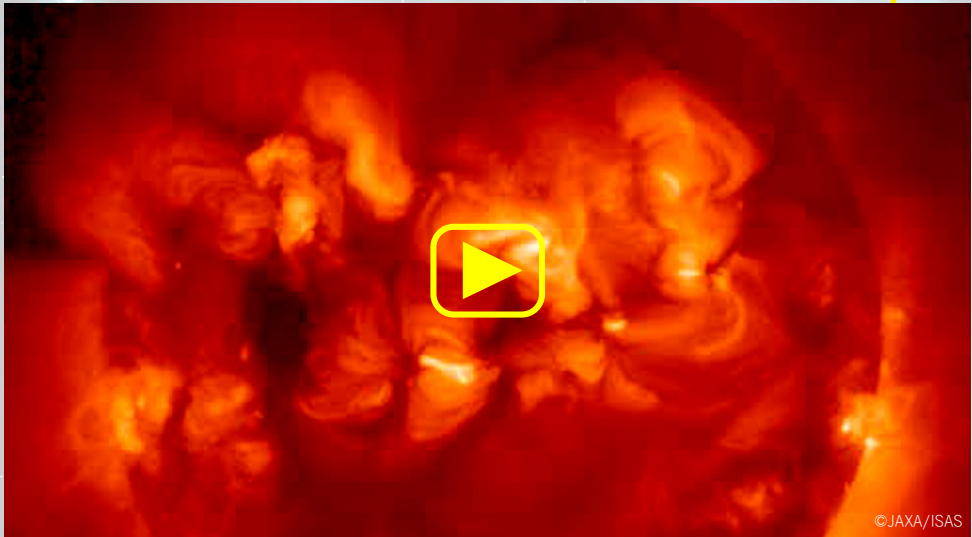
太陽は宇宙の中で見れば、ごくありふれた星のひとつです。そして、ありふれた平均的な星であるからこそ、その性質を解明すれば、他の多くの星の性質を知る手がかりを与えてくれるのです。その意味で太陽は、壮大な宇宙への扉を開くための「カギ」とも言えるのです。

また、太陽は地球の環境や生命にも関わりがあり、太陽の研究は私たちの過去、現在、未来についても多くのことを教えてくれます。

京都大学理学部では花山天文台や飛騨天文台、さらには人工衛星のデータを使って最先端の研究が行われています。

“活動的”な宇宙

爆発現象のメカニズムに迫る



©JAXA/ISAS

太陽の爆発現象

京大の伝統を踏まえて 太陽活動の研究へ

地球からおよそ約1億5000万km離れたところにある太陽は、今から約46億年前に誕生したといわれている。地球に光と熱をもたらし、地球上の生物の活動を支えている。かねてより多くの学者たちが、その構造や性質を解明することに力を注ぎ、研究を積み重ねてきた。京都大学では、天文学の普及に多大な貢献をした山本一清や、コロナの温度が100万度であることを世界で初めて立証した宮本正太郎ら、古くから優れた研究者を輩出

コロナ

太陽の周りに大気のように漂うプラズマの一種。太陽の表面にくらべて非常に温度が高い。



し、宇宙と太陽の研究を牽引してきた。

京都大学大学院理学研究科附属天文台長をつとめ、近年、太陽研究をリードしているのが、柴田一成教授だ。柴田教授は、太陽活動の究明に貢献したことにより、2009年に文部科学省科学技術政策研究所から「ナイスステップな研究者」に選ばれた。

そんな柴田教授は子どもの頃、宇宙をテーマにしたマンガやSFが好きで、なかでも鉄腕アトムが大好きだったという。それで、自分も将来はお茶の水博士のような学者になりたいと思っていた。そんな宇宙に対する憧れや興味の源泉は、「どうして自分という人間がここにいるのか」、つまり宇宙の中の地球という星にいるのかという根源的な疑問だった。

学者を志して京大の理学部に入った柴田教授は、最初、銀河の中心で起こる大爆発やそれに伴うジェットの噴出などを理論的に解明しようとしたが、やがて関心は太陽に向きはじめた。なぜなら太陽表面も爆発に満ちていたからだ。遠い星の映像は美しいが静的で、爆発現象の詳細な観測もまだ難しかった。これに対して太陽の映像はダイナミックで、爆発の様子が手に取るようにわかる。太陽の爆発現象を解明すれば、それは何十億光年もはなれた銀河の爆発を解き明かすことにつながっていく。こうして柴田教授は、京大で長年にわたって積み上げられてきた太陽観測の蓄積を背景に、太陽の爆発現象の解明に取り組むことになる。

「磁力線のつながい」で 太陽の活発な動きを説明

太陽では、フレアという大爆発が起こる。その規模は水爆1億個にも相当することがある。このような大爆発は、どのようなメカニズムで起こるのだろうか？ その謎に挑んだ結果、できあがったのが「磁力線つながい



柴田一成 教授

profile

1954年大阪府生まれ。1983年京都大学理学博士。愛知教育大学教育学部助教授、テキサス大学客員研究員、国立天文台助教授などを経て、1999年より京都大学大学院理学研究科教授。附属天文台長も兼任。

フレア

太陽の表面（太陽の大気の中）で起こる爆発現象。その大きさは数万 km ほどで、太陽の表面が突然に光ったように見える。今では、フレアは太陽以外の星でも起こることが確認されている。フレアに伴い、X線、ガンマ線、高エネルギー荷電粒子が放出される。



え(磁気リコネクション)理論」だ。太陽には、強力な磁場がある。この磁場から出る磁力線は、たとえていえば弾力のあるゴムひものような性質を持つ。この磁力線のつながりかえが起こるとき、ちょうどゴムひもでできたパチンコが弾をはじき出すように付近の粒子にエネルギーを与えて加速させる。こうして加速された粒子が光や熱を出す。これがフレアの正体なのだ。また皆既日食のとき、黒くなった太陽の周囲にプロミネンス(紅炎)と呼ばれる炎の噴き出しが見える。これは太陽の彩層の一部が磁力線に沿って上層のコロナの中に突出したものが、いずれにしても太陽の映像は常にダイナミックで美しい。

宇宙の爆発現象に共通する「統一フレアモデル」の完成

冒頭でも述べたとおり、銀河の中心では大爆発の発生が確認されている。その他にも、広い宇宙空間ではさまざまな爆発現象が起こっている。生まれたばかりの星を原始星というが、この原始星はフレアやジェットを噴出している。また、近い距離にある2つの星が互いの周りを回っている「近接連星」でもジェットが発見されている。宇宙空間は一見すると真っ暗で、静穏なイメージを抱いてしまいかねないが、その実状は爆発だらけの活動的な姿なのである。

これらの爆発現象は規模も速度も異なっているものの、その形には類似性が見られる。それらを統一的に説明できる理論を見い出そうと研究が進められた。ジェットの発生の原動力は、やはり磁場の力ではないかと考えた柴田教授は、太陽で起こるフレアやジェットを手がかりに、数値シミュレーションによってその構造を明らかにしようとした。磁気力を考慮に入れた複雑な計算は困難をきわめたが、ついに、宇宙のさまざまな爆発現象

ジェット

プラズマのガスが一方向、または双方向に噴出する現象のこと。太陽の表面でも見られるが、原始星やブラックホールの近くでも発生している。

プロミネンス(紅炎)

太陽から赤い光が立ち昇って見える現象で、彩層(太陽の表層)の一部が突出したものだ。その温度は1万度ほどで、意外にも、太陽で生じる現象としては温度が低いほうだという。



象に共通する「統一フレアモデル」の提唱に至った。身近な天体である太陽の現象は、宇宙全体の活動のメカニズムを知るための重要なヒントとなったのだ。



太陽はときに「災い」をもたらす

では、太陽の爆発現象とそのメカニズムの解明は、私たち人類に何を教えてくれるのだろうか？ 地球上の生物に必要な不可欠な太陽であるが、ときには危険をもたらすこともある。太陽で巨大フレアが発生すると、高速の電気を帯びた粒子(プラズマ)が放出される。このプラズマの放出を太陽風という。普段、地球の周りには磁場が存在し、太陽風が地球の大気に直接ぶつかることは避けられている。だが、太陽風の磁場が南向きの場合には、北を向いている地球の磁場とのリコネクションが発生し、プラズマが大気圏に侵入してくる。こうしてプラズマが地球に達すると、極地方で美しいオーロラを見せる一方で、非常に大きな電流が生じる。それが磁気嵐を引き起こし、電波通信を妨害することがある。また送電線に異常な高圧電流が流れ、変圧器が壊れてしまうこともある。

また、太陽フレアが起こるとX線や高エネルギー粒子線も放出される。宇宙で活動する人工衛星の機器や乗組員にとって、これは大きな脅威になる。宇宙飛行士が浴び

磁気嵐

普段は安定しているはずの地磁気に乱れが生じる現象。通常、数時間～1日ほどの間、地磁気が減少し、数日をかけて回復する。



ている放射線強度は、地球上に暮らす一般人が浴びる放射線強度の約100倍にもなるという。浴びてすぐに人体に直接的な影響が出るレベルではないのだが、これが長期にわたった場合、健康面での安全には疑問符が付く。だから、強い放射線が出た場合には、宇宙ステーションにいる飛行士たちはシェルターに避難するようにしているほどだ。

「宇宙天気予報」の重要性とその実用化に向けて

柴田教授の人生観を変えた出来事がある。1994年4月、鹿児島県内之浦の宇宙空間観測所で、太陽観測衛星「ようこう」の運行を見守っていた時、太陽で巨大なフレアが発生したことに気づいた。「大きな磁気嵐になるかもしれない」と考えた柴田教授は、アメリカの友人でもある研究者に連絡を取り、そこから情報はシカゴの電力会社に伝えられた。この会社は以前に磁気嵐の被害を受けたことがあったので、変圧器を外して待機した。すると2日後に、巨大な磁気嵐が地球を襲った。電力会社は数億円の被害をまぬがれ、柴田教授はアメリカ政府から非常に感謝された。この出来事から、太陽観測の大切さを再認識し、太陽活動を常に見張り、予報を出す「宇宙天気予報」に真剣に取り組む必要を痛感したという。

柴田教授は、2005年から、宇宙天気予報の基礎研究に取り組むプロジェクトのリーダーを務めている。宇宙天気予報の実用には、シミュレーションが重要になる。フレアやそれに伴う太陽風などの影響をコンピューターシミュレーションを用いてモデル化し、予報に活かすのだ。太陽フレアのシミュレーションと、地球

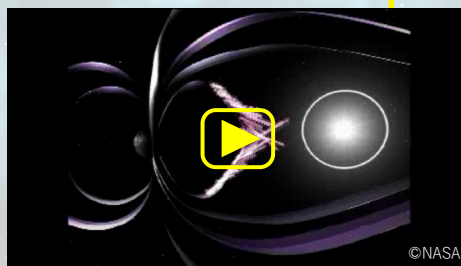
宇宙天気予報

太陽フレアや磁気嵐などを観測し、その発生とそれに伴う影響を予測する試み。

人工衛星や送電線への被害や、宇宙飛行士の放射線被曝などの悪影響が生じるため、これらを未然に防ぐことが望まれる。

下記のサイトで「週間宇宙天気ニュース」が配信されている。

NICT 情報通信研究機構 宇宙
天気情報センター
<http://swc.nict.go.jp/contents/>



フレアの影響と宇宙天気予報

©NASA



に磁気嵐が生じたときの電位分布のシミュレーションをうまく組み合わせれば、地球上のどの地域で大きな被害が出るかを予測できるようにもなるという。

夢は地球外生命の発見！？ 好奇心は止まらない

最近、柴田教授は宇宙の生命に関心を深めている。もともと宇宙人やUFOに興味があったということもあり、子どもの頃から、広い宇宙のどこかには人類以外の生命体がいるのではないかと、との夢を抱いてきた。その背後には「なぜ自分はここに存在するのか」という根源的な問いがある。

宇宙の生命というのも、今ではまったくの夢物語ではない。すでに太陽系外で木星ほどの質量を持つ惑星が400個以上も見つかっており、地球のような惑星も、そのうち発見されるかもしれない。

宇宙天気予報の研究は、つまるところ太陽が地球環境におよぼす影響＝恒星が惑星の環境におよぼす影響を調べることであり、これを太陽系外にも応用できれば、恒星が惑星の形成にどうかかわっているかといった、宇宙の営みが明らかになるだろう。宇宙における生命の起源にも迫るこのような領域を宇宙生物学といい、現代の天文学はこんなところまで手を届かせようとしている。実用的な宇宙天気予報から、ロマンの領域を含んだ宇宙人探しまで、柴田教授の好奇心はとどまることがない。



身近に宇宙を体験してみよう ：花山天文台



花山天文台の施設紹介

名勝東山連峰のそばに 伝統を受け継いできた天文台

京都市の東になだらかな山並みが横たわっている。歴史にもよく登場する東山連峰だ。京大のキャンパスは連峰の西に位置する吉田山のふもとにあるが、連峰を少し南へたどると花山山がある。花山は「かざん」とも「かさん」とも読む。標高221メートルのこの山に花山天文台が開設されたのは、1929年10月のことだ。

天文台というとすぐに思い浮かぶ円形天井（ドーム）の



ある本館には、京大の吉田キャンパスから口径30センチの屈折望遠鏡(後に45センチのレンズに換装)などが移設され、以後長期にわたって観測の主力として活躍を続けた。直径3メートルの小型ドームを持つ別館には、1910年にハレー彗星観測のために購入された口径18センチの屈折式天体望遠鏡がある。ハレー彗星は約76年の周期で太陽に接近するが、1986年の接近の時にもこの望遠鏡で観測が行われた、京大が所有するなかで最も寿命が長い現役の望遠鏡である。また天文観測には正確な時刻が不可欠だが、天文台の時計を精密に補正する装置をおさめた子午線館も造られた。この木造の建物は当時の建築様式を伝える貴重な施設として改修され、今は歴史館として使われている。



アマチュア天文学の聖地

こうして設立以来、日本の天文学の発展に大きな力を発揮してきた花山天文台だが、周囲の市街地が明るくなるにつれて観測環境が悪化した。このためより良い環境を求めて、1968年、京都大学大学院理学研究科附属のもうひとつの天文台として、岐阜県に新しく飛騨天文台が開設された。標高約1300メートルの大雨見山にあるこの天文台は、周囲に観測を妨害する明かりもなく空気の透明度も高い。そこに最新の観測装置が設置され、太陽と星の観測を行っている。

最新の設備では飛騨天文台に一步をゆずる形になった花



花山天文台 一般公開の様子(2010年10月24日)



山天文台だが、身近な天文台という大きな利点を持っている。京大の吉田キャンパスに近いので、学部の学生や大学院生の教育には最適である。また京都の市街地からも近いので、市民も簡単に訪れることができる。開設当初からオープンな運営をめざし、「アマチュア天文学の聖地」といわれた伝統を受け継ぎ、いまでも市民参加の天文観測会が頻繁に開かれ、地元の高校生の観測実習などが積極的に実施されている。2007年には花山天文台の運営を支援するNPO法人「星空ネットワーク」ができて法人・個人の会員を募集し、市民への公開が一層進んでいる。

別館の18cm屈折望遠鏡。
太陽を観測するためのリ
オフィルター、CCDカメラ
が取り付けられている。



ガリレオから衛星観測へ 太陽研究はダイナミックに 発展を続けている

新しい太陽像を求めて、 理論と観測の相互作用で説明が進む

物理学の発展には、理論と観測がうまくかみあってゆくことがとても重要だ。高性能の観測機器が新しい現象を発見する。それを説明しようと理論家が解析し、きっとこういう現象も起こっているはずだと予測を立てる。すると新たな観測計画が立てられ、予測を検証する。こうして物理学は発展していく。柴田一成教授が主に理論面から太陽の謎に迫っているとすれば、一本潔教授は観測を通じて太陽を解き明かそうとしている。

一本教授の仕事の大きな柱のひとつが、最新の機器を使っての太陽の観測だ。400年前、ガリレオは初歩的な望遠鏡を通して太陽を見た。そして、大きな光球の表面にシミのように貼りついた黒点を発見した。それは可視光線による太陽の像だったが、20世紀になるとX線による観測が可能になった。そこに現れたのは大規模な爆発を繰り返すきわめてダイナミックな太陽だった。さらにいまは人工衛星による太陽観測が可能になっている。

衛星観測で日本は太陽研究の 最先端を走っている

1981年に最初の太陽観測衛星が打ち上げられ、手塚治



一本 潔 教授

profile

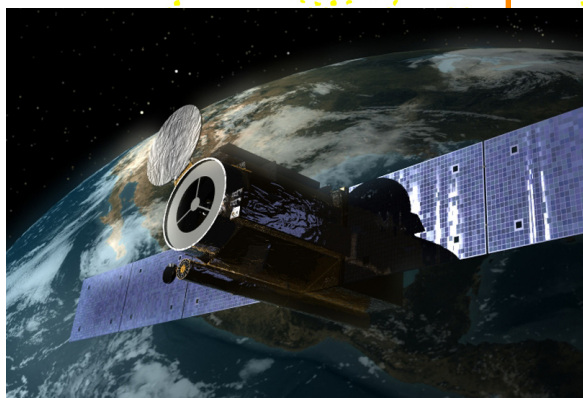
1957年大阪府生まれ。1987年京都大学理学博士。現在、京都大学大学院理学研究科教授。飛騨天文台勤務。専門は太陽観測とその現象の説明。



虫の長編マンガにちなんで「ひのとり」と名づけられた。1991年には2代目の「ようこう」、2006年には3代目の「ひので」が打ち上げられ、これが現在も観測を続けている。地上からの観測だと、地球の大気のゆらぎのために鮮明な像が見られないことがある。しかし、大気圏外を回る衛星は大気の影響を受けないから、非常に鮮明な太陽像が得られる。

かつてガリレオが見た黒点は光球表面に貼りつく小さなシミにすぎなかったが、衛星画像では黒点内部の微細な構造まで見えるのだ。これらの衛星による太陽観測で日本は世界の最先端をゆき、爆発現象に富む太陽の姿を詳細に明らかにしてきたのである。

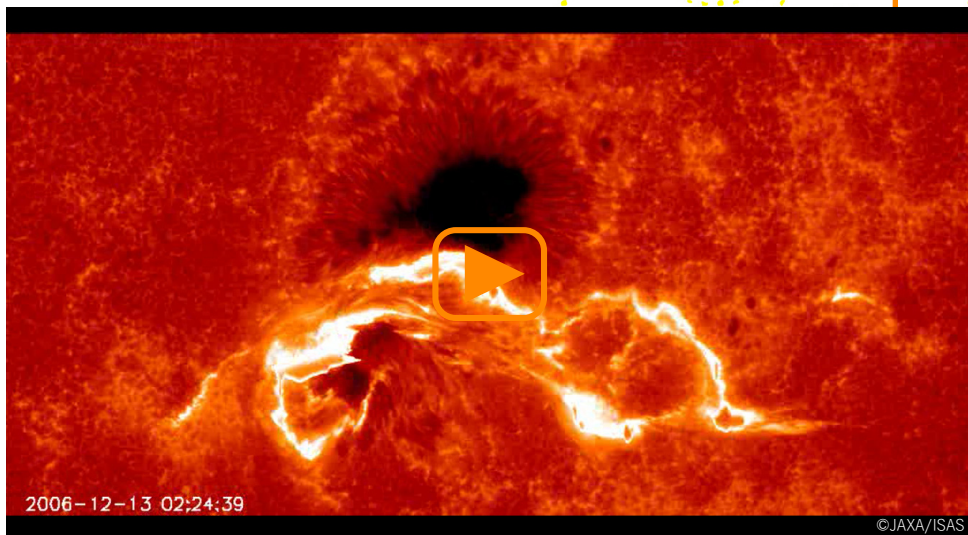
一本教授は「ひので」にのせる望遠鏡の製作にたずさわったが、どのような望遠鏡にするのかを決めるまでが大変だったという。衛星に望遠鏡をのせるには、莫大な費用がかかる。その費用にみあうだけの成果が見込める装置にしなければならない。各方面にその装置の価値を伝えることはもちろん、一本教授自身も納得のいく装置にするために試行錯誤が繰り返された。その結果、口径50cmの可視光望遠鏡を作ることになり、数年をかけて製作した。そして2006年9月、一本教授は衛星の発射を鹿児島県内之浦で見守ったが、一番どきどきしたのは打ち上げの時ではなく、最初の観測写真が送られてきた時だったという。期待通りの映像を見た時には、胸をなでおろしたようだ。



©NASA

黒点

太陽の表面（光球表面）に見られるシミのような部分。実際は光を放っているが、周囲よりも光が弱いために黒く見える。その温度は約4000度で、周囲の部分（約6000度）よりも低い。磁場が原因で発生しているといわれる。



太陽黒点の様子

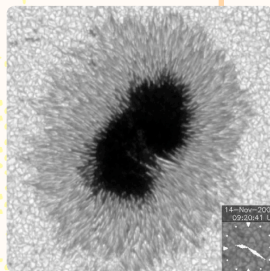
観測で明らかになる黒点の姿と、 その不思議な現象

太陽の観測での重要なポイントとして、黒点が挙げられる。黒点には強い磁場が集まっており、その意味で、巨大な磁石ともたとえられる。また、フレアや強い紫外線の発生源でもあり、太陽の現象を知るためのヒントに満ちているのだ。黒点の衛星画像を見ると中央暗部の周囲に灰色の半暗部があり、その中には細い筋が多数集まったような細かな構造が見える。ここにはおよそ100年も前に発見され長い間大きな謎とされてきたエバーシェッドフローという現象がある。一本教授は、24時間太陽を観測できる「ひので」からの映像を解析して、この現象の微細な構造を明らかにした。エバーシェッドフローは音速に近い速さで光球の深部から流れ出す激しい流れであることも明らかになった。

黒点は太陽表面で生まれては成長し、やがて衰えて消えてゆく。そんな黒点の一生にはいまだに解決をみない問

エバーシェッドフロー

黒点の周りには、放射状の細かい筋構造がみられ、その内部には、外側へ向かって毎秒約5kmで流れるガスの運動があり、エバーシェッドフローと呼ばれている。最新の観測によって、この流れが生じている原因が磁場とガスの相互作用が生み出す複雑な対流現象であるということがようやくわかってきた。



©JAXA/ISAS



題がたくさん残っている。まず、黒点は11年という一定の周期で数が増えたり減ったりしている。そして、太陽そのものの明るさの変化も、同じ11年周期である。黒点が多いときには太陽は明るく、少ないときには暗くなっている。一見、逆のほうが自然なようにも思える不思議な現象で、そのメカニズムは明らかにされていない。先述のとおり黒点は磁場を持ち、磁石のようにN極とS極が存在している。その両極をつなぐ磁力線の向きは、太陽の北半球と南半球で逆さまになっている。この状態で常にほぼ一定を保つのだが、これもちょうど11年周期でN極とS極が逆転することがわかっている。なぜ、どんな仕組みでそのように逆転するのか、確定的な説はまだ存在しない。

太陽の半球

太陽も、地球のように、北半球・南半球に分けて考えることができる。太陽を構成しているのは水素やヘリウムなどの気体であり、地球のように固体ではない。そのため、自転の速さは部分によって異なり、赤道付近が最も速い。

地上観測と衛星観測の両輪で、 観測技術は進歩する

一番身近な恒星である太陽だが、黒点の不思議な現象をはじめ、その実態はまだまだ謎に満ちている。それを前向きにとらえるならば、研究者が腕をふるう余地は存分に残っているといえる。

一本教授は、将来的には次なる衛星の打ち上げを実現したいと希望を語る。「宇宙からの観測と地上からの観測では、できることに違いがあります。微細な構造を見るにはやはり衛星観測が適していますが、太陽の光を詳しく分析するには地上観測のほうが良い場合もある。今後、さらに大きな望遠鏡を衛星にのせて飛ばしたいと思っています。それによって、地上での観測のやり方にも新しいアイデアが生まれるでしょう。衛星と地上それぞれの観測が補いあって両輪のように機能する——そんなふうに、観測を次のステップへ進めていきたいと思っています」。



新たな発見をめざして

太陽から宇宙、そして地球へ、 研究の幅は広がる

太陽は、私たちの住む地球の環境にも関わっている。地球の気温が寒冷な時代では太陽の黒点の数が少なく、温暖な時代では黒点の数が多いうことが、黒点観察の記録から明らかになっている。17世紀に黒点がほとんど見られない時期があり、その時期は、ヨーロッパが非常に寒冷であった小氷期と一致している。当時、ロンドンのテムズ川が凍結したともいわれている。ただ、黒点の数が気温に与える具体的なメカニズムはまだ解明されておらず、とくに近年の地球温暖化に黒点に関わっているかという点については否定的な見解もあり、研究者の間でも意見が分かれている。ただ、少なくとも、太陽の活動と地球の気温の変化に何らかの関係がある点は確かであり、興味深い事実だといえる。

また、太陽フレアの発生頻度の統計をもとに1億年に1回という超巨大フレアを想定すれば、強い放射線などの影響で、地球の生命にも直接的な被害が出るほどの規模になるという。もしかしたら、地球上の生物の大量絶滅には、太陽フレアが関わっていたのかもしれない。

さらに、フレアに伴う強力な磁場は、惑星そのものの形成に影響を与える可能性すらある。噴出されたフレアやジェットは周囲に擾乱を起し、衝撃波が伝わると星間



ガスが圧縮される。そして星間物質の密度が増し、星の形成が促進されるということも考えられるのだ。

このように、太陽は惑星の誕生や、私たち人類に至るまでの地球の生命の進化にも少なからず影響を与えている可能性があり、太陽研究の裾野は非常に大きな広がりを見せている。

スーパーフレアはあるか？

フレアは、太陽以外の恒星でも起こることがすでにわかっている。太陽フレアをはるかに上回る規模の爆発（スーパーフレア）も、数百年単位の間隔で起こっているという。恒星でフレアが起こると、その周りの惑星はどのような影響を受けるのか？ それを調べるには、やはり太陽フレアの研究が入口となる。太陽はごくありふれた恒星のひとつだから、他の恒星について知るには格好の素材である。そして、恒星と惑星の関係を知るには、宇宙環境の把握につながる「宇宙天気予報」の手法を活かすことができる。

逆に、太陽に良く似た恒星を詳しく調べることにより、私たちの太陽の未来に関するヒントも得ることができる。柴田一成教授は、爆発現象を手がかりに太陽型恒星

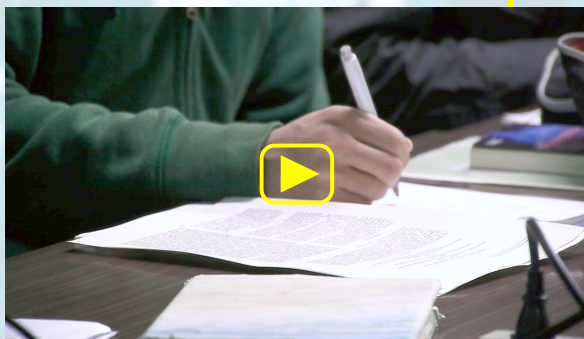
における「スーパーフレア」を見つけようと、新しいゼミを開いている。見つければ、私たちの太陽で「スーパーフレア」がどのくらいの頻度で起こるのか、起きると地球はどうなるのか、多くのヒントが得られる。オンラインで公開されている衛星の観測データをもとに、太陽型恒星における「スーパーフレア」を探

星間ガス

宇宙空間に漂う水素やヘリウムなどの気体。その密度が高くなると、恒星が生まれる母胎になることもある。

星間物質

上記の星間ガスや、ケイ素、炭素などの固体も含んだ、宇宙空間に分布する物質の総称。密度にはかなりのばらつきがあり、平均するときわめて希薄だが、凝集すると星雲を形成する。大量の星間物質が凝縮すると、星を構成する材料にもなる。



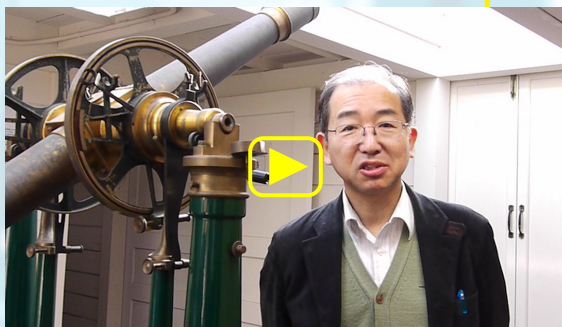
スーパーフレアを探すゼミの風景



す「アストロバイオロジー(宇宙生物学)ゼミ」だ。スーパーフレアが生命の絶滅や進化にどんな影響を与えたのか、太陽に似た恒星系を調べることで解明しようとしている。柴田教授が行うゼミは誰が参加してもよい自由なスタイルで、ときには他の研究室の学生ばかりになることもあるという。「この雰囲気京大らしさなんです。学生には、好奇心を追求して、自由な時間を有意義に使ってほしいと思います」と柴田教授。観測データは膨大な量なので、難しい試みではあるが、もし第2の地球が発見できれば、そこには生命がいるかもしれない。そしてもし第2の地球の中心星でスーパーフレアが発見されれば第2の地球上での生命の絶滅や進化の法則の一端が見えてくるかもしれない。それはまた、私たち人類が地球や太陽系空間で生存するための条件を解明する上でも重要なヒントを与えてくれるだろう。

宇宙の研究はさらなるステップへ

太陽系の長い歴史のなかで、地球は太陽からどのような影響を受けてきて、今後どう変化していくのか。また、太陽系の外の宇宙はどのように活動しているのか――。現在の太陽の研究は、地球と人類の未来につながっている。そして、そのことが、研究者たちのモチベーションをより高めているに違いない。太陽の研究で大きな成果を上げてきた柴田一成教授、一本潔教授をはじめ、多くの優秀な教授たちと、自由な気風のもとで研究に励む学生や院生たち。彼らを擁する京大理学部は、これからも太陽研究の最先端を走り続けることだろう。



柴田一成教授から未来の研究者へ

