

太陽観測衛星 SOLAR-C から夜空の星について考える

JAXA 宇宙科学研究所 鳥海 森

2023 年 4 月 12 日



図 1. りゅうこつ座の散開星団 NGC 3293。星団の年齢は約 1,100 万年と見積もられ、前主系列星が多く存在する。クレジット：NASA/CXC/Penn State Univ./K. Getman et al.; Infrared: ESA/NASA JPL-Caltech/Herschel Space Observatory/JPL/IPAC; NASA JPL-Caltech/SSC/Spitzer Space Telescope; Optical: MPG/ESO/G. Beccari

1. 恐るべき赤ちゃん星の威力

2022 年 10 月、米国 NASA から興味深い研究成果がリリースされました¹。X 線天文衛星「チャンドラ」によって多くの赤ちゃん星（図 1）を観測し、それらの星の X 線の明るさと年齢との関係性を調べたところ、より若い星ほどより強力な X 線を放っていることが分かったのです。

私たちの太陽を含む多くの恒星は、その寿命のほとんどの期間を、核融合反応によってエネルギーを生み出すことで輝きます。このような星を「主系列星」と呼びます。太陽の寿命はおよそ 100 億年、現在の年齢は約 46 億年で、人間でたとえれば立派な成人と言えます。しかし、主系列星よりも前の段階である「前主系列星」は、まだガス雲から作られたばかりであり、自分自身の重さでどんどん縮みながら、その重力のエネルギーを解放することで輝いています。この「赤ちゃん星」の期間は、わずか数 100 万年から数 1,000 万年しかありま

¹ リリース記事：https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/images/chandra-sees-stellar-x-rays-exceeding-safety-limits.html

せん。星の生涯のうち、最初の1%にも満たないのです。夜空に輝く数多くの星の中から赤ちゃん星を観測しようとしても、そもそも見つけ出すのすら大変なことが分かります。

今回のチャンドラ衛星を使った研究では、図1のような若い星々の集まりである「散開星団」を10星団調査し、それらから6,000以上もの赤ちゃん星を観測することに成功しました。これらの星は、

- 林トラック：星内部のほぼ全体が対流状態になっている。日本の林忠四郎博士によって示されたため、このように呼ばれる。
- ヘニエイトラック：林トラックのあと、星の中心部が高温になることで、放射による熱輸送が始まった状態。質量が太陽の1.5倍以上の星では、全体が放射層となる状態を経て、中心に対流層が生まれる。
- 零歳主系列星：ヘニエイトラックのあと、星が主系列に達した段階。核融合によるエネルギー解放が始まっている。

に分類されます。いわゆるTタウリ型星は、質量が太陽程度の前主系列星（林トラックとヘニエイトラック）に相当します。

チャンドラ衛星は、林トラックの段階でのX線強度は、現在の太陽の数1,000倍も明るいことを示しました。X線は、ヘニエイトラックや零歳主系列星になるにつれて徐々に暗くなりますが、それでも太陽の数10倍もの明るさです。赤ちゃん星の周囲には降着円盤が回っており、そこから惑星が作られます。しかし、これほど強烈なX線が星から放たれると、せっかく惑星が生まれて大気を作られても、すぐにX線によって破壊されてしまうかもしれません。このことは、私たちの住む地球や、火星や金星などの惑星が、太陽がまだ若かった頃に、どのように大気を作り出したのだろうかという興味を抱かせます。

2. 太陽研究との深い関わり

太陽よりもはるかに若い赤ちゃん星の観測が、いまの太陽の研究とどのように結びつくのでしょうか？そのヒントは、星の作り出す「磁場」にあります。

太陽を含む主系列星や前主系列星がX線を放つのは、星の内部で磁場が作り出され、その磁場の働きによって、星の外側の大気（コロナ）が数100万度から数1,000万度という超高温に加熱されることによります。現在の太陽よりも前主系列星の方がX線で明るいということは、磁場を作るメカニズムが、太陽と比べてそれだけ強力に働いていることを示しています。では、これらの星ではどのように磁場が作られ、どのようにコロナが加熱されているのでしょうか？

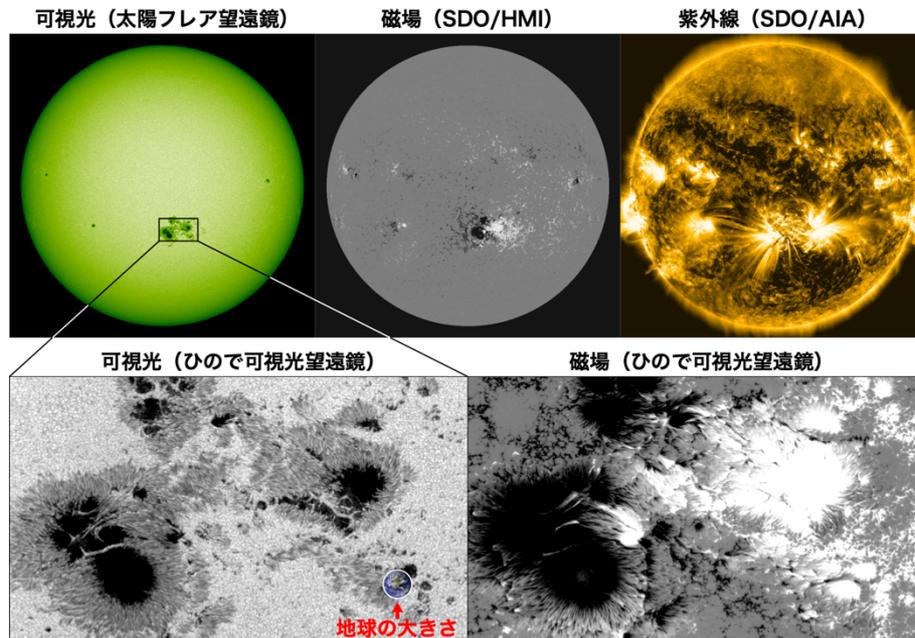


図2. 2014年10月に出現した巨大な太陽黒点。Xクラスを含む強力な太陽フレアを繰り返し生じた。Toriumi & Wang (2019)より引用。

そのことを知るために、星表面の磁場やコロナを空間的に分解して詳しく観測し、どのようなメカニズムが働いているのかを理解できるのは、太陽しかありません。図2は、太陽に出現した巨大な黒点と、上空のコロナを示した様子です。黒点の上空が明るく輝いている（すなわち強く加熱されている）こと、黒点は非常に細かい磁場が密集して作られていることが見て取れます。太陽を詳しく観測することで、磁場がどのようにエネルギーを上空に伝え、大気を超高温に加熱するのかを理解することが可能になるのです。

3. SOLAR-C で挑む太陽の謎

ここで登場するのが、JAXAの次期太陽観測衛星「SOLAR-C」(図3)です。正式名称は高感度太陽紫外線分光観測衛星。2020年代後半の打ち上げを目指し、日本では「ひのとり」「ようこう」「ひので」に続く4番目の太陽観測衛星となります。

太陽や恒星の大気は、その温度によって、約1万度の彩層、急激に温度の上昇する遷移層、そして100万度を超えるコロナに分かれます。さらに、巨大な爆発現象である太陽フレアが生じると、大気は数1,000万度にまで加熱されます。これに対して、SOLAR-Cは、

- I. 太陽の大気がどのように超高温に加熱されているのか？
- II. 太陽の大気がどのように不安定になり、フレア爆発を起こすのか？

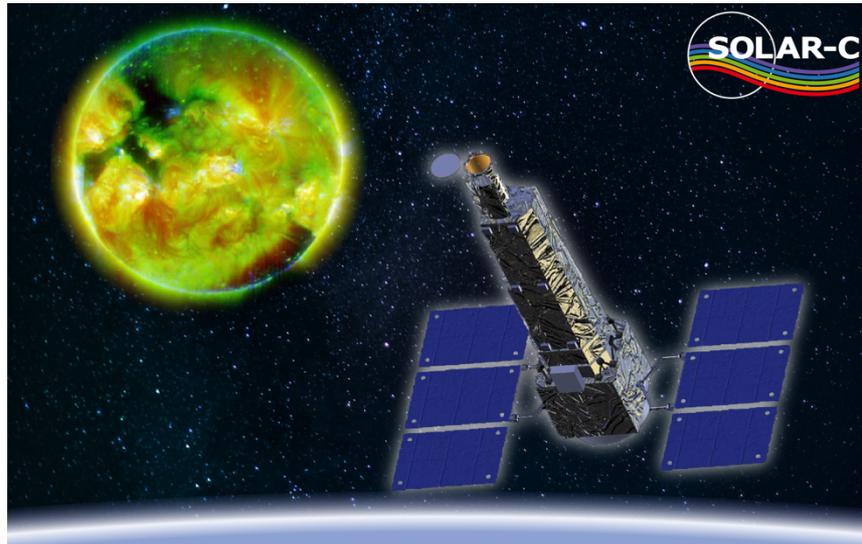


図3. 次期太陽観測衛星「SOLAR-C」。紫外線によって太陽の様々な温度の大気を詳細に観測する。

という2つの大問題に挑みます。ここまで示された通り、これらは太陽だけの問題ではなく、林トラックのような前主系列星から現在の太陽のような主系列星に至るまで、あらゆる恒星に共通する問題と言えるのです。

そして、SOLAR-Cは以上の謎に、

- A. 彩層からコロナに渡る太陽大気的全温度層を同時に切れ目なく観測する
- B. 太陽大気の微細な構造やその変化を高空間・高時間分解能で追跡する
- C. 太陽大気で起きている現象の分光情報を紫外線で獲得する

というアプローチで迫ります。太陽から届く紫外線を使うことで、太陽の様々な温度の大気について情報を得ることができるのです。

SOLAR-Cは、JAXAと国立天文台が開発を主導し、名古屋大学をはじめとする全国の大学・研究機関の協力によって推進される計画です。また、国際ミッションとして欧米各国の宇宙機関が参加し、今まさに検討開発を進めている状況です。

4. シミュレーションから観測へ

さて、私は大学院生の頃から、太陽黒点の形成過程、特にフレア爆発を起こす黒点がどのように作られるのかに興味を持ち、研究を続けてきました。黒点は強力な磁場のかたまりですが、その磁場は太陽の奥深くから浮上することで作られます。すなわち、私たちが光（電磁波）によって見通すことのできない、星内部の状態を調べることが必要となります。

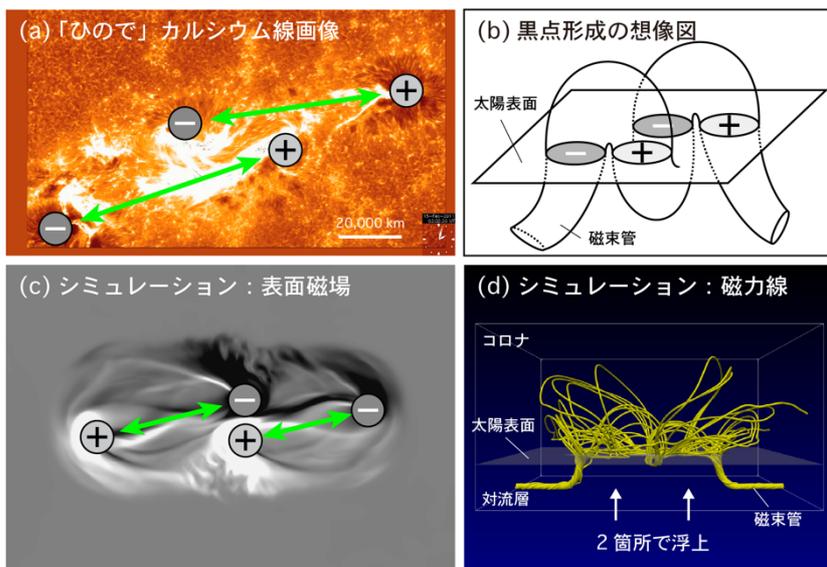


図4. 「ひので」衛星による太陽フレアの観測と、数値シミュレーションによるフレア黒点の再現。(c)(d)は Toriumi & Takasao (2017)より引用。

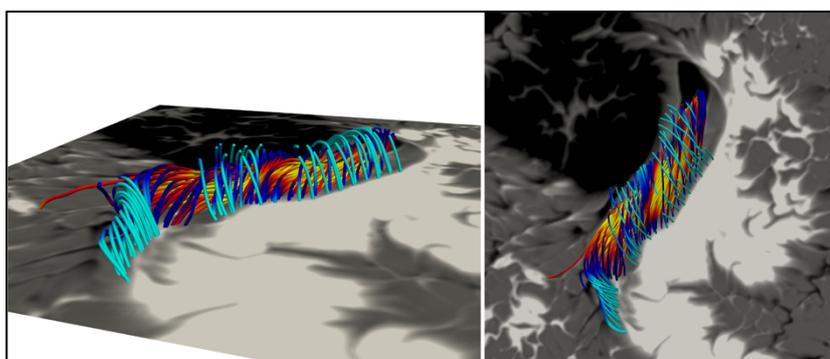


図5. 熱対流を組み込んだフレア黒点シミュレーション。黒点上空には強くねじれた磁力線が形成された。この磁力線はフレアが生じると宇宙空間へ放出される。Toriumi & Hotta (2019)より引用。

それを実現するのが、スーパーコンピュータの上で太陽を再現する「数値シミュレーション」です。図4は、大型フレアを生じた実際の太陽黒点 (a) について、磁場を太陽内部から浮上させることで再現したシミュレーション (c および d) です。これまでの観測から、フレアを生じる黒点は、形状が複雑であることが経験的に知られていました。そこで、磁場の浮上の仕方を変えたり、ねじれを加えたりすることで、実際に太陽に出現したのと同じような黒点を再現することに成功したのです。

計算技術の進歩によって、現在ではさらに現実的なフレア黒点の数値シミュレーションも行えるようになってきました。図5の例では、太陽深部から表面までの熱対流を一貫して解くことで、太陽内部の磁場が表面に浮上し、フレア黒点を自発的に形成する過程を初めて計算することに成功しました。

このようなシミュレーションを使った研究を、観測研究と対比させて、理論研究と呼びます。私はもともと理論寄りの研究を行っていましたが、一方で、それらは実際の太陽でどのように見られるのだろうかということにも興味を持つようになりました。

私が SOLAR-C に中心メンバーとして関わる動機の一つは、理論と観測を融合させた研究を行いたいというところにあります。SOLAR-C を使えば、太陽フレアを今まで誰もなし得なかった精度で詳細に観測することができるでしょう。そうすれば、世界中の研究者が取り組むフレアのシミュレーションのうち、どのモデルが正しいのか（もしくはどれも正しくないのか）に答えを与えることができるかもしれません。

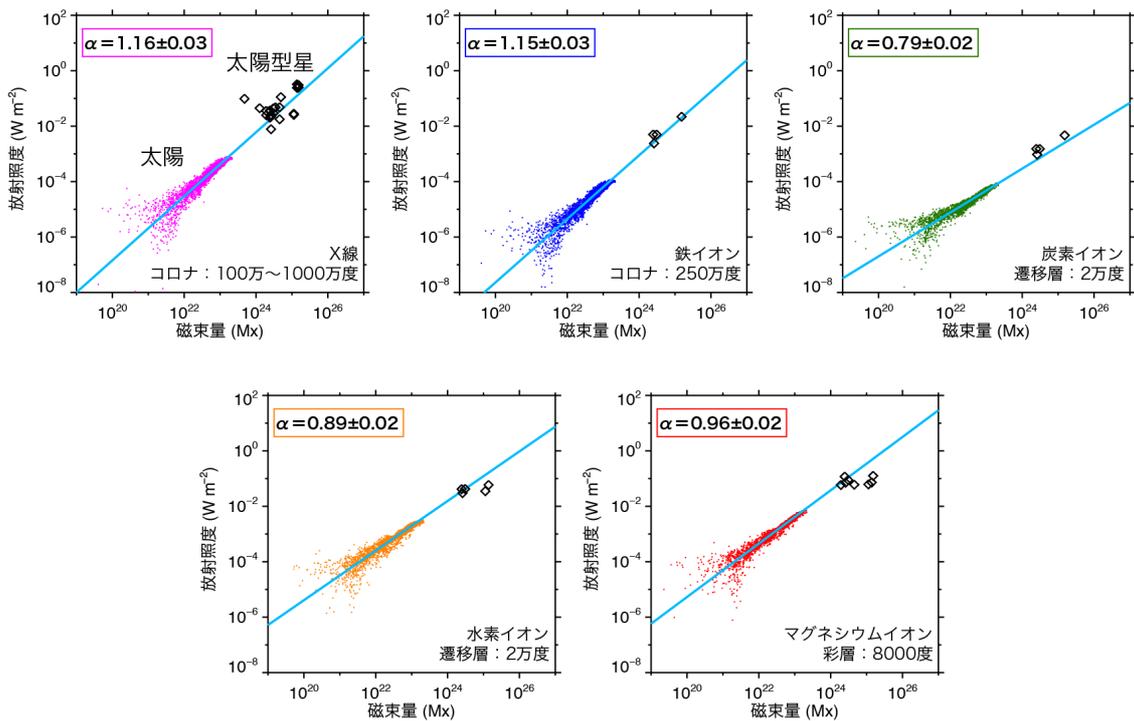


図6. 太陽の10年間にわたる長期間の観測データから、磁束量と様々な波長帯（様々な温度に対応する）の光の強さとの関係性を調べた（色付きのドットおよび水色の直線）。このとき、様々な年齢（約5,000万年から45億年）や活動度の太陽型星（◇）は、どの波長帯（温度）においても太陽の関係性の延長線上に存在する。この結果は、太陽や太陽型星において、普遍的な大気加熱メカニズムが存在することを示している。Toriumi & Airapetian (2022)より引用。

5. 太陽と恒星をつなぐ

SOLAR-C に関わるもう一つの動機は、太陽を手掛かりにして、恒星についても理解したいという興味です。冒頭で紹介したように、若い恒星は非常に活発な磁気活動を示すことが知られています。これらの星は、どのように大気を加熱させているのでしょうか？

ここで取るべき戦略は、太陽観測によって大気加熱の法則性を調べておき、それを恒星と比較することで、太陽と恒星の共通性を理解するというものです。太陽の豊富な観測データを基に、できるだけシンプルな法則を見つけることができれば、そのぶんデータの少ない恒

星との比較がしやすくなります。そのような観点で研究を行ったところ、実は、太陽も様々な年齢・活動度の恒星も、どうやら同じ物理メカニズムで大気を加熱しているらしいということが分かってきました²。

図6は、太陽と太陽型星について、星表面全体の磁束量（磁場の総量）と様々な波長の光の強さを表したグラフです。星が放つ光は、波長ごとに、その波長に対応する温度が決まっています。大気加熱は磁場の効果で生じると考えられるわけですから、磁束量と様々な波長（温度）の光の強さには何らかの対応関係があるはずだと考え、このようなグラフを作ったのです。また、太陽以外の恒星では、詳細な磁場構造までを空間分解して観測することはできませんが、星全体の磁束量であれば、その星から届く光（偏光データ）を使って求めることができます。

その結果、この図の示す通り、太陽で得られた磁束量と光の強さの関係性は、どの波長帯においても、様々な年齢・活動度の太陽型星とびつたりと一致することが発見されました。このことは、太陽や太陽型星の大気加熱が、星の年齢や活動度によらない共通のメカニズムで起きていることを表しているのです。

この結果は、SOLAR-Cによる太陽研究にとって非常に重要な意味を持ちます。すなわち、太陽でどのように大気加熱が起きているのかを SOLAR-C で解明できれば、そのメカニズムは、文字通り「星の数ほどある」夜空の恒星にも応用できる可能性があるのです。

数値シミュレーション（理論）と SOLAR-C（観測）を組み合わせると太陽の謎を解明し、その知識を様々な恒星にも応用することで、より普遍的な理解を得る。そんな時代がもうそこまで来ているのです。

引用文献

- ✓ Toriumi & Takasao 2017, "Numerical Simulations of Flare-productive Active Regions: δ -sunspots, Sheared Polarity Inversion Lines, Energy Storage, and Predictions," *The Astrophysical Journal*, 850, 39, doi: 10.3847/1538-4357/aa95c2
- ✓ Toriumi & Wang 2019, "Flare-productive active regions," *Living Reviews in Solar Physics*, 16, 3, doi: 10.1007/s41116-019-0019-7
- ✓ Toriumi & Hotta 2019, "Spontaneous Generation of δ -sunspots in Convective Magnetohydrodynamic Simulation of Magnetic Flux Emergence," *The Astrophysical Journal Letters*, 886, L21, doi: 10.3847/2041-8213/ab55e7
- ✓ Toriumi & Airapetian 2022, "Universal Scaling Laws for Solar and Stellar Atmospheric Heating," *The Astrophysical Journal*, 927, 179, doi: 10.3847/1538-4357/ac5179

²リリース記事：<https://www.isas.jaxa.jp/topics/002978.html>