



TITLE:

Observational Studies of Extreme Stellar
Magnetic Activities: Spots, Flares, and Mass
Ejections(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Namekata, Kousuke

CITATION:

Namekata, Kousuke. Observational Studies of Extreme Stellar Magnetic Activities: Spots, Flares, and Mass Ejections. 京都大学, 2021, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2021-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k23012>

RIGHT:

許諾条件により本文は2022-03-01に公開

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	行方 宏介
論文題目	Observational Studies of Extreme Stellar Magnetic Activities: Spots, Flares, and Mass Ejections (高い磁気活動を示す恒星の観測的研究: 巨大黒点・スーパーフレア・ 質量噴出)		
(論文内容の要旨)			
<p>太陽/恒星フレアとは、太陽/恒星表面の黒点に蓄えられた磁気エネルギーを解放して発生する突発的な爆発・増光現象である。太陽の大フレアの場合、発生した X 線・紫外線や放射線粒子、質量放出現象が時に地球環境に大きな影響を及ぼすことが知られている。太陽以外の恒星では、太陽での現象より大規模な「スーパーフレア」や「巨大黒点」が観測されており、その発生機構の物理は未解明な点が多い。近年、太陽以外の恒星周りで系外惑星が多く発見されてきたことを受け、主星での磁気活動現象が生命誕生・維持に与える影響が注目されている。また、太陽によく似た星(以下、太陽型星)においてもスーパーフレア・巨大黒点が観測されていることから、これらの大規模現象は太陽でも発生する可能性があり、地球環境・人類文明に多大な影響を与える可能性がある。このような観点から、近年恒星での大規模な磁気活動現象の物理的理解に注目が集まっている。しかし、恒星の大規模な磁気活動性が太陽の小規模現象と同様に説明できるか、どのような性質を持つかという疑問の多くには未だに答えられていない。これまでの研究では、スナップショット観測や単色での観測は多かったが、物理的理解に必須である時間発展の研究や多波長観測は多くない。この学位論文では、恒星の大規模な磁気活動現象を物理的に理解することを目的に、大規模な磁気活動現象を引き起こす太陽型星・低温度 M 型星の観測的研究を行なった。</p> <p>まず、Kepler衛星の高精度測光観測データを利用し、太陽型星の巨大黒点(最大級の太陽黒点の約10倍の面積)の生成・消滅過程を調べた。ここでは、従来とは異なる黒点の面積の時間変化率に注目する独自のアプローチを行なった。この初のアプローチにより、太陽型星の巨大黒点の生成・消滅過程の物理が太陽黒点と同様である可能性を初めて観測的に示した。これは恒星のあらゆる磁気活動性のエネルギー源である巨大黒点の根本的な由来が太陽と同様であることを示唆している。また、太陽型星の巨大黒点の寿命を測定し、太陽型星としては最長である1年ほどの寿命を持つ黒点が存在することを示し、系外惑星が恒星の磁気活動性の影響を受ける継続時間に観測的制限を与えた。</p> <p>次に、太陽型星のスーパーフレアと太陽フレアを、初めて同条件(白色光での増光)で比較する研究を行い、そのタイムスケールがどのような物理機構で説明できるかを調べた。その結果、両者共に太陽フレアのエネルギー解放機構(磁気リコネクション)で説明できることを示した。また、これにより太陽型星のスーパーフレアの長さスケールと磁場の強度を推定することに初めて成功し、これらの値が太陽の値よりも非常に大きいことを示した。これらから、太陽型星でのスーパーフレア発生が、太陽での現象をスケール倍した描像と相違ないことを明らかにした。</p> <p>京都大学せいめい望遠鏡の初期観測により、M型星AD Leoで発生したスーパーフレ</p>			

アを非常に高精度・高時間分解能で検出することに成功した。これにより、 $H\alpha$ 線プロファイル幅の大きな変化をこれまでにない高時間分解能で捉えた。一次元輻射輸送流体計算との比較により、この観測成果を説明するには、スーパーフレアに伴って(太陽フレアに比べて)大量の非熱的・高エネルギー電子が発生しており、恒星大気を加熱している描像がもっともらしいと判明した。また、その加熱機構が時間とともに大きく減衰していることを初めて示した。このことから、スーパーフレアは基本的には太陽フレアと同じ枠組みで説明できるものの、高エネルギー粒子が非常に効率よく生成されていることを示唆している。これは、同時に極めて高いX線・紫外線を放射していることを示唆しており、惑星環境への影響が甚大である可能性がある。

最後に、京都大学せいめい望遠鏡とTESS衛星の観測により、若い太陽型星EK Draにおいてスーパーフレアに伴って巨大な質量噴出現象が発生していることを初めて発見した。質量噴出現象は、惑星大気に直接的に影響を及ぼしていることが期待されていたものの、その観測的な性質はほとんど知られていなかった。今回、太陽観測との比較から、太陽フレアに伴う質量噴出現象を拡大した描像と対応することを示すことができた。また、噴出速度は510km/sと非常に高速で、噴出質量は太陽での噴出現象の10倍以上であることがわかった。この研究は、惑星だけでなく星の質量進化に影響を与える恒星の質量噴出現象の確たる検出を行ったという意味で、恒星物理学だけでなく天文学的に意義がある。

一連の研究を通して、本論文で観測された上記の恒星の大規模な磁気活動現象は太陽の現象と同様の物理機構で説明できることを提案した。これは、太陽観測で培った磁気流体理論が、他の恒星の大規模現象にも適用可能であることを支持する結果である。また、磁気活動性の高い恒星の現象が惑星に与える影響を理解する上で不可欠な情報である黒点の継続時間、フレアのエネルギー解放率、質量噴出の有無を新たに示した。また、質量噴出の有無の確認により、星の質量進化に影響を与えている可能性も示唆された。このように、太陽・恒星の磁気活動性の統一的理解だけでなく、惑星物理や恒星進化論に関する幅広い示唆を与えた。

(論文審査の結果の要旨)

太陽や恒星の磁気活動性の理解は、基礎的な天体プラズマ物理学だけではなく星や惑星の進化を解明するための足がかりになる。近年、太陽によく似た星(以下「太陽型星」)や低温度星(M型星)において、太陽より大規模な磁気活動現象の証である巨大黒点やスーパーフレア(最大級の太陽フレアの10倍以上の爆発)が発生していることが発見されてきた。これらの現象がなぜ、そしてどのように発生するのかを理解し、(地球も含めた)周囲の環境に与える影響を明らかにすることが、近年の本分野の主要な目的になっている。例えば、恒星でのスーパーフレアによる高いX線・紫外線照射や大質量放出が系外惑星の大気や星の質量進化に与える影響は、世界中の研究者から注目されている。

申請者は、これまであまり行われてこなかった恒星の磁気活動現象の時間発展の解析や多波長観測に注目し、太陽での観測と比較することで、その発生機構の統一的理解への糸口となる観測成果を多く挙げた。これまで観測や解析の難しさから行われていなかった時間発展や多波長観測に対して真っ向から取り組む野心的な研究である点が高く評価できる。

まず、本学位申請論文第2・3章では、これまでスナップショット的な観測が多かった太陽型星の巨大黒点(最大級の太陽黒点以上の面積の黒点)の「時間変化率」に着目した。この独自の着眼点により、巨大黒点の生成・消滅過程を初めて切り分け、また、太陽黒点と直接比較できるようになった。この試みにより、太陽型星の巨大黒点の発生原因は太陽黒点と同様であることを示した。また、このことは太陽でも同様の物理機構で未だ観測されたことのない巨大黒点を生成しうることも示唆しており、宇宙に進出しつつある人類文明にとっても重要な発見である。この研究は、着眼点や手法に多くの新規性を含み非常に高度な内容であると評価できる。

さらに、学位論文第4・5章では、恒星(太陽型星・M型星)のスーパーフレアの発生機構に関して調査をしている。まず、申請者は第4章で、太陽の小規模フレアと太陽型星のスーパーフレアの時間変化を同条件で比較する研究を初めて行なった。この同条件での比較により、太陽型星のスーパーフレアが「磁気リコネクション」という物理機構を介していることが示唆された。第5章では、京大せいめい望遠鏡を用い、M型星のスーパーフレアの分光観測データをこれまでになく高精度かつ高時間分解能で入手し、大量の非熱的な高エネルギー粒子の生成が示唆された。これまで、恒星フレアにおける磁気リコネクションと非熱的加速粒子の観測的な証拠はほとんどない。本研究では、空間分解して観測し得ない「太陽以外の恒星」において、これらの難題への手がかりを掴んだという点で意義深い。

本学位申請論文第6章においては、京大せいめい望遠鏡の潤沢な観測期間を生かして若い太陽型星を観測し、発生頻度が低い太陽型星のスーパーフレアの分光観測データを世界で初めて入手した。これにより、スーパーフレアに伴う質量噴出現象を、 $H\alpha$ 線で太陽型星において初めて検出することに成功した。この現象は、惑星大

気にダイレクトに影響を及ぼす可能性があるだけでなく、恒星の質量進化にも影響している可能性が指摘されている。本研究では、これらに対する影響を評価するために欠けていたピースを埋めたという新規性・重要性があり、恒星物理学だけでなく他の天文学分野においても極めて重要な成果である。このような極めて稀な現象を初観測できたのは、申請者の類い稀なる発想と不断の努力の結晶であると言える。

以上、本学位申請論文は、これまで発生原因が特定されていなかった恒星の大規模な磁気活動現象の多くの問題に、独自のアイデアを持って観測的に取り組むことで、その多くを太陽プラズマ物理の拡張により統一的に説明することに成功した点が秀逸である。また、これまで観測が限られていた、あるいは存在しなかった恒星の磁気活動現象の希少な観測例を報告し、惑星大気や星の質量進化に与える影響を評価するための基礎的物理量を明らかにした。以上の結果や手法は、今後恒星分野と他分野の連携を大きく促すものであり、天文学の進歩に重要な寄与をした意義のある研究と判断できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年1月15日、主論文の内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降