

京都大学	博士 (理学)	氏名	幾田 佳
論文題目	Exploring stellar magnetic activities with Bayesian inference (ベイズ推論による恒星磁気活動の探究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>恒星黒点は星表面の磁力線が密集している温度が低く可視光で暗い領域であり、星の磁気活動の一つの指標である。黒点はM, K, G, F型の主系列星やRS CVn型の近接連星などに普遍的に存在し、蓄えられた磁気エネルギーを開放することで恒星フレアと呼ばれる爆発現象を引き起こすと考えられている。ケプラー宇宙望遠鏡による高精度の長期モニター測光観測データから、多数の太陽型星(G型主系列星)においてこれまでに観測された最大級のエネルギーの太陽フレアの十倍以上の巨大フレア(スーパーフレア)が報告されている。これは太陽でもスーパーフレアが起り地球環境へ重大な影響を及ぼす可能性を示唆している。</p> <p>そのような恒星の磁気活動を解明するには、星やその黒点の特性を理解することが不可欠である。具体的には、星がどの程度の差動回転を持っていて、黒点がどのような位置でどれくらいの時間で生成消滅しているのかを推定する必要がある。そのため、測光観測データから星や黒点のパラメータを推定する手法が研究されてきた。しかしながら、そのパラメータが多いことから、従来の研究では非常に単純化したモデルが用いられており、精密な推定が困難であった。近年、天文学分野へのデータ科学的手法の導入や計算機の性能の発展に伴い、非常に多くのパラメータを用いるような高度な手法を用いることが可能になった。そのため、本研究では測光観測データから精密な黒点マッピングを行い、星の磁気活動を詳細に解明することを目指した。</p> <p>2章では、ベイズ推論に基づいて黒点マッピングを行うコードを開発したことを報告した。このコードは、局所的に最大尤度を持つ値付近から抜け出せなくなるのを防ぐために、パラレルテンパリングと呼ばれる手法を用いて数十個のパラメータを同時に推定することを実現した。また、重点サンプリング法を用いて、仮定したモデルの尤もらしさの指標であるモデルエビデンスを厳密に計算することで、黒点の個数の決定(モデルの選択)を可能にしている。このコードの能力の検証のために、ケプラー宇宙望遠鏡で観測された太陽型星の光度曲線を模して3個の黒点を配置した人工的な光度曲線を作成し、これを2, 3, 4個の黒点を持つとして試験的なパラメータ推定を行なった。その結果、黒点2個、または3個の場合はパラメータが一意(unimodal)に推定され、特に3個の場合は光度曲線を生成したパラメータに一致した。黒点4個の場合は解が多数ある(multimodal)ことが分かった。また、黒点3個の場合のモデルエビデンスは2個または4個の場合よりも大きく、黒点の数を3個と正確に決めることができた。さらに、光度曲線からパラメータを推定する際のパラメータ間の縮退も議論した。これより、実装したコードの性能と妥当性を示し、ケプラー宇宙望遠鏡などで得られた光度曲線に対して適用すれば、星や黒点の特性へ詳細に迫れることを立証した。</p> <p>3章では、2章で実装したコードをトランジット系外惑星探査衛星(TESS)で観測された明るいM型フレア星3天体、けんびきょう座AU星(AU Microscopii)、とかげ座EV星(EV Lacertae)、こいぬ座YZ星(YZ Canis Minoris)の光度曲線に適用し、黒点の緯度分布や大きさを推定した。この結果は独立した手法である偏光分光観測を用いるZeeman Doppler Imagingにより得られた結果と整合していることを確認した。これにより、黒点とフレアの関係にも迫れるようになった。</p>			

以上の研究によって、測光観測データから星の磁気活動を詳細に調べることが可能になった。そのため、ケプラー宇宙望遠鏡やTESSで観測された太陽型星の測光観測データに適用することで、星や黒点の特性とスーパーフレアとの関連性にも迫ることができる。また、本研究はデータ科学で研究された高度な手法を天文学のデータに世界で初めて適用して成功し、今後の天文学の様々な分野でも同手法を応用してデータの持つより多様な情報を引き出せる可能性を示した重要な研究と言える。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

太陽や恒星では黒点付近に蓄えられた磁気エネルギーが一気に解放されることでフレアが引き起こされる。太陽でのフレアに伴ってX線や紫外線、そして高速の粒子などが放射され、それらが地球に到達すると、時に大規模な通信障害や停電など社会インフラが大きな被害を受けることが判明している。また、最大級の太陽フレアの10倍以上のエネルギーを持つスーパーフレアが太陽型星で多数報告されており、それらの太陽型星は磁気活動性が高く、巨大な黒点を持っていることがわかっている。そのため、太陽型星の観測的研究をもとに、太陽がスーパーフレアを引き起こす可能性について近年盛んに議論されてきた。そして太陽型星の巨大な黒点や星そのものの特徴を詳細に調べ、太陽黒点や太陽そのものとの共通点と相違点を明らかにすることは喫緊の課題となっている。自転による黒点の見え隠れによって明るさの変化が観測されるので、観測された光度曲線から逆問題を解き、黒点の位置、大きさ、明るさなどのパラメータを求める手法はこれまでにも開発されてきた。しかしながら、求めるべきパラメータが非常に多く、最小二乗法や最大エントロピー法を使用する従来の手法ではその推定自体も、そして初期値に依存した局所解に落ち込んでいる可能性を排除することも非常に難しかった。

そこで申請者は、ベイズ統計に基づいて提案されたパラメータ推定の高度な手法をデータ解析に取り入れ、大型計算機上で動くコードを1からほぼ独力で開発した。また、このコードを用いて光度曲線からパラメータ推定した結果の妥当性を詳細に検討した。その結果、光度曲線をもとに恒星黒点の多数のパラメータを求める手法を、効率と信頼性の面で格段に向上させた。

その上で、そのコードをトランジット系外惑星探査衛星TESSで観測された明るいM型フレア星のモニター測光観測データに適用し、黒点パラメータの推定を行なった。適用された3天体は現在京都大学3.8mせいめい望遠鏡などで分光観測が行われており、申請者の研究は相補的に恒星の活動性を調査する研究となっている。また、ケプラー宇宙望遠鏡やTESS、今後のPLATOによるモニター測光観測データへの適用も即座に可能であり、今後の研究の進展が大いに期待できる。

申請者の研究は、近年の一連の宇宙望遠鏡による高精度なモニター測光観測のデータが持つ情報を効率的に、かつ高い信頼性で引き出し、恒星の磁気活動を探ることを可能にしたものである。せいめい望遠鏡などを使用した分光観測や、X線観測などと組み合わせて、恒星での巨大黒点とスーパーフレアの関係や惑星への影響をより詳しく調べる基礎となりうる。また、天文学分野ではデータ科学的手法が広く導入されつつあるが、本研究は現時点では最も高度な手法の導入に成功しており、今後他の天文学分野への寄与も期待される。よって、本申請論文は理学博士の学位論文として十分に価値のあるものと認める。なお、主論文で報告されている研究業績を中心として、関連した研究分野について令和3年1月14日に口頭試問を行った。その結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降