

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740150

研究課題名（和文）全自動リアルタイムサーベイシステムの開発による突発増光天体の観測的研究

研究課題名（英文）Development of automated survey and real-time alert system for transient astronomical objects

研究代表者

前原 裕之 (MAEHARA HIROYUKI)

東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員

研究者番号：40456851

研究成果の概要（和文）：明るい恒星フレアや新星・矮新星の検出を目的として、市販の CCD カメラと写真用レンズを組み合わせた全自動広視野サーベイシステムを開発した。1 晩でおよそ 12000 平方度を撮像することができ、V バンドで 5 から 11 等の天体を 5% 以下の測光精度で観測することができる。また、ケプラー宇宙望遠鏡のデータを用いて、恒星フレアの発生頻度分布に関する研究を行い、この結果を基に開発したサーベイシステムで検出されうる恒星フレアの数を見積もった。検出可能なフレアは 1 イベント/年となり、実際の観測データから検出された恒星フレアの数と一致する結果を得た。

研究成果の概要（英文）：We developed automated survey system for transient objects (stellar flares, novae, dwarf novae etc.) using a CCD camera and telephoto lens. This system can cover a survey area of about 100 degrees x 120 degrees per night. We achieve a photometric precision of <5% for stars with a V magnitude of between 5 and 11. We also studied the occurrence frequency distribution of stellar flares using the data obtained by the Kepler space telescope. On the basis of the Kepler data, the number of detectable stellar flares in a year with our survey system is about 1, which is consistent with the detected number of stellar flares.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：光学赤外線天文学

1. 研究開始当初の背景

2010 年に、M 型星の 1 つである GJ581 の周りのハビタブルゾーン(恒星周辺の惑星上に液体の水が存在することができると考えられる範囲)に地球型の惑星が発見された (Vogt et al. 2010)。このような天体に生物が存在しうるかのカギを握る 1 つの要素は、惑星が安定して大気を保持できるか? ということである。M 型星は一般に活動性が高く、中には太陽フレアと比べて巨大なフレアが頻繁に発生する「フレア星」と呼ばれる天体も知られている。M 型星の周りのハビタブル

ゾーンは恒星の近いところ(0.1AU 程度)にあり、フレアが惑星大気に与える影響も大きい (Segura 2010)。また、太陽と似た恒星であっても、現在までに知られている太陽フレアの最大で 100 万倍のエネルギーのフレアが起こるとする研究結果があった (Schaefer et al. 2000)。もしこのようなフレアが太陽で起これば、現代文明に大きなダメージを与えると考えられる。このような「スーパーフレア」と呼ばれる超巨大フレアが、どのくらいの頻度で発生しうるのか? を観測的に明らかにすることは、(1)生命が発生しうる惑星

がどのくらいあるのか？(2)現代文明に重大なダメージを与えうるスーパーフレアが太陽で発生する可能性はあるのか？その頻度は？といったことを知る上で重要である。

前述のような恒星フレアの他、新星、矮新星といった突発的に大きな増光を示し、比較的短期間で暗くなってしまう天体(突発天体)を詳細に観測するためには、増光早期に検出し、その情報をもとにより大きな望遠鏡での詳細な観測を行う必要がある。このためには、広視野をモニターしつつ、突発天体の増光をリアルタイムに検出するシステムが必要である。さらに、全天を90分に1回の頻度でX線でサーベイするMAXI、3時間に1度の頻度でガンマ線でサーベイするFermi衛星といった装置が本格的に稼働を始め、X線やガンマ線では突発天体が数時間以内に空のどこで発生しても捉えられる体制ができており、可視光の広視野モニター+リアルタイム検出が実現すれば、突発天体の多波長でのデータが得られ、増光のメカニズムの解明に大きく役立つ。また、広視野サーベイを行うことで、膨大な量の測光データが得られることになる。こうしたデータをデータベースとして整備すれば、変光星の研究データとして非常に価値が高い。

2. 研究の目的

(1) 広視野全自動サーベイシステムの開発

恒星フレアや、新星、矮新星といった突発的に大きな増光を示し、比較的短期間で暗くなってしまう天体を増光早期に検出し、その情報を伝達する必要がある。突発天体は空のどこに出現するかわからないので、空の広い範囲を監視する必要がある。本研究ではそのためのプロトタイプとして、1台の市販のCCDカメラと写真用のカメラレンズを組み合わせ、あらかじめ決められた領域を全自動で撮影、データ解析、測光データのデータベースへの登録、および新天体の検出を行うシステムを開発することを第一の目的とした。

(2) 測光データベースの構築

本研究の第二の目的は、自動サーベイシステムで得られた星の明るさの時間変動のデータを利用しやすい形でデータベースとして整備することである。サーベイで得られたデータは恒星フレアなどの突発天体の研究に用いる以外にも、星の明るさの時間変動を記録したデータベースとして整備することで、変光星の研究に用いることができる。フレアを起こす星の中には、星の表面に大きな黒点があることで、星の明るさ自体が変化する天体(BY Dra型変光星とよばれる)もあり、フレアを起こす天体が見つかった場合には、星の明るさの変動周期から自転周期を求めることに用いることもできるなど、突発的な増光を起こす天体が、どのような性質の天体

であるのかを解明する手掛かりを与える。また、広視野を継続的にモニターすることで、増光以前の状態を知るもできる。これは、増光が起きてから行う観測では不可能であり、継続してサーベイを行うもっとも重要な意義でもある。

(3) スーパーフレア発生頻度の見積もり

最終的に得られた観測データから、太陽と同じようなG型主系列星および、より温度の低いK、M型星でのスーパーフレアの発生頻度を見積もる。このようなイベントの発生頻度は極めて低いと思われるが、上限値の見積もりを行う。

(4) 突発天体の検出と追跡観測

本研究で作成したプロトタイプで、突発天体が発見されれば、その天体の追跡観測を他の研究機関と協力して行う。

3. 研究の方法

(1) 自動撮像システム

市販のCCDカメラおよび一眼レフカメラ用の望遠レンズ、およびPCから制御可能な赤道儀を組み合わせ、自動的に決められた領域を撮像するシステムを構築する。最終的に遠隔地からの操作も考慮に入れて、Linux上で動作するものを制作する。CCDカメラ用の制御ソフトウェアはすでにLinux対応のものがあるため、本研究ではそれを利用する。

(2) 自動解析パイプライン

PyRAF、WCSToolsおよびSExtractorを用いて、得られた画像の一次処理、および天体の検出、測光を行うパイプラインを作成する。これらのソフトウェアは素手の他のサーベイ等で利用実績があり、広く使われている。

(3) 測光データベースの構築

オープンソースのデータベースソフトの1つであるMySQLを利用し、撮影画像情報、検出天体情報、各種天体カタログなどを格納したデータベースを構築する。観測データはこのデータベースに随時追加してゆく。突発天体の検出は、このデータベースに格納された、過去の観測データをもとに行う。またこのデータベースに格納された天体の明るさの時系列観測データを、インターネットを通じて利用できるようなユーザーインターフェースを作成する。

(4) 突発天体・変光星の検出・研究への利用

(3)で得られたデータを基に、実際の突発天体の検出を行う。また、実際に検出できた場合には、VSNET等を通じて観測を呼び掛け、追跡観測を行う。

4. 研究成果

(1) 広視野自動サーベイシステムの開発

自動撮像システムとして最終的に以下のハードウェア/ソフトウェアの組み合わせを用いた。赤道儀制御部分は適当なものがなか

ったため、python 言語を用いて新規に作成した。また、あらかじめ設定した視野のうち、月からの角距離が 20 度以上離れた視野を順に撮像するよう、撮像システム用の設定ファイルを自動生成するプログラムを python 言語を用いて作成した。

- 赤道儀：Vixen SXW
- CCD：SBIG ST-8XME
- レンズ：105mm F/2.0
- CCD 制御ソフト：NightView
- 赤道儀制御：python 言語で自作

このシステムでは 1 回の露出で撮ることができる視野の広さは 5 度×7.5 度であり、1 晩 8 時間の観測では、およそ 12000 平方度の領域を観測することができる。

解析パイプラインは、画像の一次処理を行う部分と WCS の書き込みを行う部分、および天体検出と測光を行う部分の 3 段階に分けられる。一次処理部は Pyraf を用いて作成し、WCS 書き込みには WCSTools と SCAMP、天体検出と測光には SExtractor を用いて作成した。

測定結果のデータベースへの登録および、検出天体の同定などの解析部分は Python 言語および SQL を用いて開発した。大まかな処理の流れとしては以下のとおりである。

- FITS ファイルの情報(ファイル名、ヘッダ情報など)データベースに登録
- SExtractor で検出したすべての天体の測光結果をデータベースに登録
- 検出天体のデータと Hipparcos カタログのデータをマッチングし、各画像の等級ゼロ点を計算
- 画像から検出されたすべての天体について、過去の観測データを検索する。過去の観測データから、明るさが過去の観測値の範囲を大きく超えている天体および過去の観測では検出されていない天体があれば、突発天体および変光星としてリストアップする。

制作したシステムの各処理段階における処理時間は表 1 のようになった。視野中心座標および視野内の天体数に依存するがおよそ 5-10 分程度ですべての処理が完了する。

表 1. 処理時間

視野中心座標	14h48m, +16°	16h12m, +12°	17h30m, -19°
検出天体数	2588	3520	4871
一次処理+WCS	6.4 [sec]	7.6 [sec]	8.7 [sec]

データベース登録	3.3 [sec]	3.8 [sec]	4.3 [sec]
等級ゼロ点決定	1.5 [sec]	1.8 [sec]	2.2 [sec]
新天体・変光星検出	397 [sec]	541 [sec]	776 [sec]

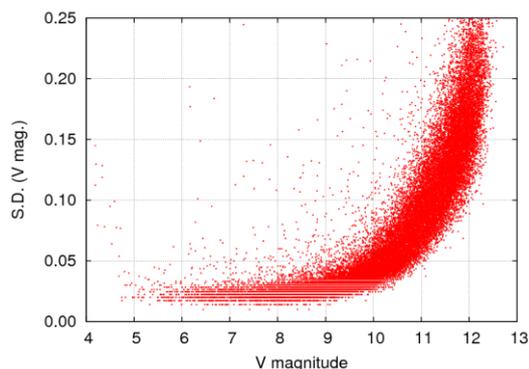


図 1. 天体の明るさと測光精度(@京都)

本研究において開発システムでは、比較的明るい天体をターゲットにしており、1 枚当たりの露出時間は 15 秒である。実際の観測で得られた測光精度は、5 等から 10 等までの星に対して、5%以下の測光精度が達成できた(図 1)。また、東京大学木曾観測所への異動に伴い、サーベイシステムを花山天文台から木曾観測所に移したことで、5%以下の測光精度が達成できる天体の明るさが 11 等まで伸びた(図 2)。

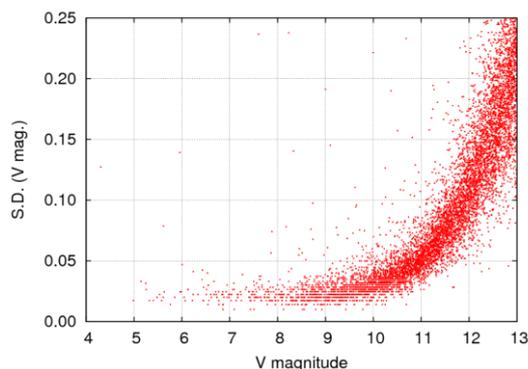


図 2. 天体の明るさと測光精度(@木曾)

観測データの公開のため、天体名ないし、天体の座標を入力することで、過去に取得したデータを検索および光度曲線の作成がで

きる Web ベースのツール(図 3)を開発し、下記の URL で公開している。
<http://kws.cetus-net.org/~maehara/VSDat a.py>

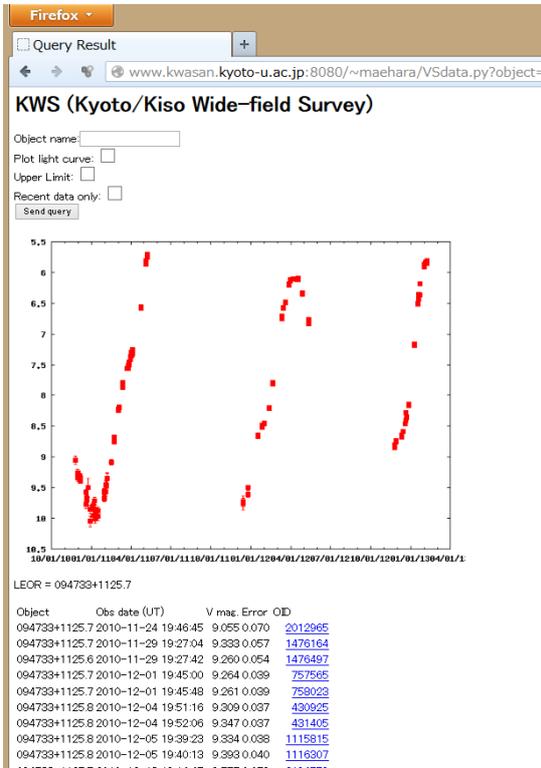


図 3. データ検索・グラフ作成ツール
 (2) 突発天体・変光星の検出

本研究で作成したサーベイシステムでは、残念ながら新天体の発見はできなかった。しかし、発見された後での調査で、新天体が発見前にすでに増光していることが確認できた例が古典新星で 1 例(Nova Cep 2013; 図 4)、矮新星で 1 例あった。

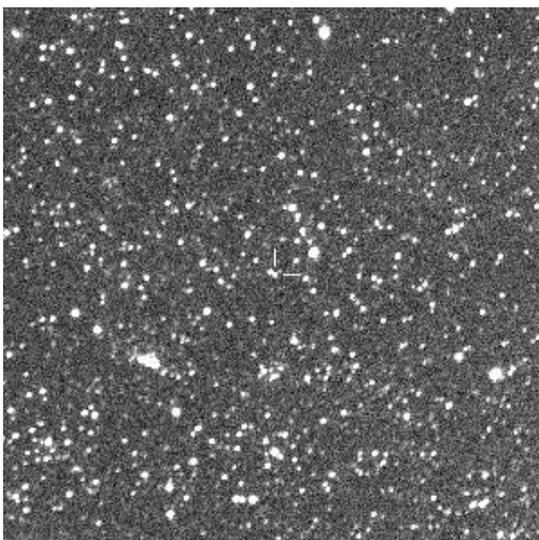


図 4. Nova Cep 2013(発見前日)

また、本システムではこれまで変光星とし

ては知られていなかった天体を 109 天体検出した。このうち 98 天体は脈動変光星と考えられ、残りの 11 例は食連星と考えられる。図 5 にその 1 例として、脈動変光星 J235339+5335.3 の光度曲線を示す。

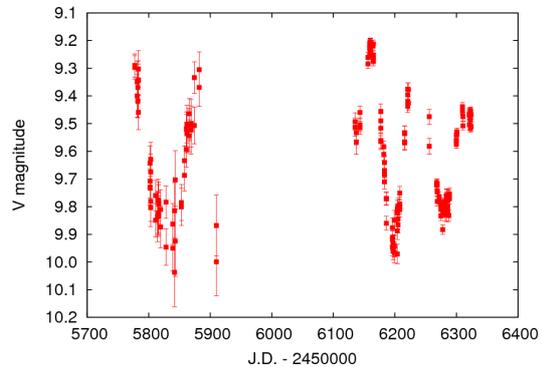


図 5. J235339+5335.3 の光度曲線

(3) スーパーフレアの発生頻度

本研究で作成したシステムでけんしゅつできるスーパーフレアの数を見積もるため、ケプラー宇宙望遠鏡の観測データを用いたスーパーフレアの発生頻度の研究を行った。その結果、太陽と同じ G 型主系列星約 83000 個を 120 日間観測したデータから、146 星で 365 例のスーパーフレアを検出した(図 6 に太陽型星のスーパーフレアの光度曲線を示す)。

また、検出したスーパーフレアのデータから、フレアのエネルギーごとの発生頻度分布を調べたところ、図 7 のようなべき型の分布をしていた。これは太陽フレアの発生頻度分布と非常によく似ていることが分かった。さらに、太陽とよく似た性質の星での発生頻度を見積もると、最大級の太陽フレアの 100 倍のエネルギーのフレアで約 800 年に 1 回、1000 倍のエネルギーのフレアで約 5000 年に 1 回となった。

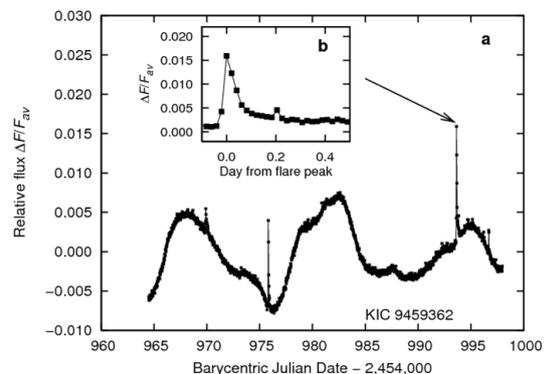


図 6. ケプラー宇宙望遠鏡のデータから見つかった、太陽型星でのスーパーフレアの光度曲線。(a) 約 30 日の長期間の光度曲線 (b) 光度曲線。

フレアの部分の拡大図

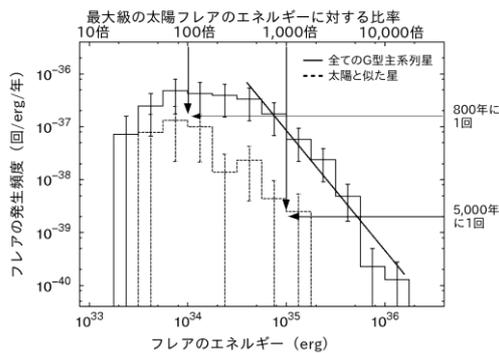


図 7. 太陽型星におけるスーパーフレアの発生頻度分布

さらに、ケプラーのデータから M 型、K 型、G 型星のフレアのうち、本研究で開発したシステムで検出可能な振幅を持つスーパーフレアの発生頻度を調べ、M 型星まですべて含めると、1 年に 100 夜の観測を行って 1 イベント程度との結果を得た。約 1 年半のサーベイのデータから実際に検出された恒星フレアのイベントは、既知のフレア星である EV Lac のフレア 1 例であり、ケプラーのデータから見積もった発生頻度とおおむね一致することが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) Maehara, Hiroyuki; Shibayama, Takuya; Notsu, Shota; Notsu, Yuta; Nagao, Takashi; Kusaba, Satoshi; Honda, Satoshi; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari, “Superflares on solar-type stars”, *Nature*, 査読有, Volume 485, 2012, pp. 478-481
DOI: 10.1038/nature11063

[学会発表] (計 8 件)

- (1) 前原裕之、「晩期型星におけるスーパーフレア発生頻度」、日本天文学会 2013 年春季年会、2013 年 3 月 20 日から 2013 年 3 月 23 日、埼玉大学
- (2) 前原裕之、「小型望遠鏡を用いた突発天体の自動広視野サーベイ」、宇宙科学情報解析シンポジウム、2013 年 2 月 15 日、JAXA 相模原キャンパス 宇宙科学研究所
- (3) 前原裕之、「スーパーフレアを起こす晩期型星の性質」、日本天文学会 2012 年秋季年会、2012 年 09 月 19 日～2012 年 09 月 21 日、大分大学

- (4) 前原裕之、「カメラレンズと CCD カメラを用いた自動広角サーベイシステムの構築と運用」、日本天文学会 2012 年秋季年会、2012 年 09 月 19 日～2012 年 09 月 21 日、大分大学
- (5) Hiroyuki Maehara, “Superflares on solar-type stars”, XXVIIIth IAU General Assembly, 2012 年 8 月 27 日～2012 年 8 月 31 日, Beijing, China
- (6) Hiroyuki Maehara, “Superflares on late-type stars”, XXVIIIth IAU General Assembly, 2012 年 8 月 27 日～2012 年 8 月 31 日, Beijing, China
- (7) 前原裕之、「晩期型星におけるスーパーフレアの発生頻度の統計解析」、日本天文学会 2012 年春季年会、2012 年 3 月 19 日～3 月 22 日、龍谷大学
- (8) 前原裕之、「太陽型恒星におけるスーパーフレアの発見 II 発生頻度の統計解析」、日本天文学会 2011 年秋季年会、2011 年 9 月 19 日～9 月 22 日、鹿児島大学

[その他]

解説記事

- ・前原裕之、太陽型星のスーパーフレア、*パリティ*、第 28 巻 1 号、2013、pp. 48-50
- ホームページ等
- ・プレスリリース：太陽型星におけるスーパーフレア

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2012/120517_1.htm

- ・サーベイデータ公開ページ

<http://kws.cetus-net.org/~maehara/VSDat a.py>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前原 裕之 (MAEHARA HIROYUKI)
東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員
研究者番号：40456851