

機関番号：15401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740104

研究課題名 (和文) 矮新星の降着円盤最外縁における角運動量輸送過程の観測的研究

研究課題名 (英文) Observational Study of the Process of the Angular Momentum Transfer in the Outermost Region of Accretion Disks in Dwarf Novae

研究代表者

植村 誠 (UEMURA MAKOTO)

広島大学・宇宙科学センター・助教

研究者番号：50403514

研究成果の概要 (和文) : 矮新星のアウトバーストを可視光と近赤外線と同時に観測することによって、降着円盤の最外縁に起因する変動現象の機構を研究した。その結果、アウトバースト極大時に最外縁の低温部分が一部、縦方向に膨張し、非軸対称な形状に変化することがわかった。この変形は、おそらく伴星からの強い潮汐効果が原因と考えられる。また、アウトバースト終了後、円盤は即座には静穏状態に戻らず、中間的な状態が存在することも判明した。

研究成果の概要 (英文) : Simultaneous optical and near-infrared observations were performed during outbursts of dwarf novae in order to investigate the temporal variations which originate in the outermost region of accretion disks. The observation revealed that a part of the outermost region of the disks expands vertically, and thereby the disk becomes a non-axisymmetric form. This deformation is probably due to the strong tidal effect to the disk from the secondary star. In addition, after outbursts, the disk returned to a quiescent state not promptly, but gradually through an intermediate state, which was discovered in this study for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	480,000	2,980,000

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、変光星、激変星、矮新星、突発天体现象、降着円盤

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 矮新星と降着円盤

矮新星は数日から数年に一度の頻度で突発的な増光 (アウトバースト) をおこす天体である。矮新星は白色矮星 (主星) と通常の星 (伴星) からなる連星系で、伴星表面のガスが溢れ出し、白色矮星の周りに降着円盤を形成している。降着円盤は原始星から銀河まで、様々なスケールで存在する宇宙の基本構成

要素の1つである。矮新星が降着円盤の研究にとって重要である理由は、その時間変動現象から降着過程の物理を調べることができるためである。

1980年代後半から1990年代半ばまでの研究によって、矮新星のアウトバーストは降着円盤の熱的不安定性が原因だと考えられるようになった。伴星による潮汐効果も加えた「円盤不安定理論」は、矮新星を含む激変星

全体の分類をよく説明し、矮新星の観測的特徴をよく再現した。一方、1990年代後半になると観測技術の発達と観測数の増加によって、特に進化が進んだ矮新星においては従来の理論では説明できない現象が知られるようになってきた。

## (2) 特異な矮新星「WZ Sge 型」

WZ Sge 型と呼ばれる矮新星はアウトバーストの間隔が十年程度と非常に長いことが特徴である。そのため観測機会が少なかったが、1990年代後半から急速に理解が進んだ。その結果、WZ Sge 型のアウトバーストでは他の天体では見られない短時間周期変動が初期に観測されることがわかった。この現象は「早期スーパーハンプ」と呼ばれ、その機構は未だに理解されていない。また、アウトバーストが一旦終了した後に再び明るくなる「再増光現象」も WZ Sge 型ではよく観測される。従来の理論によると、降着円盤にはアウトバースト状態と静穏状態の2つしか安定状態が存在できず、アウトバーストによって円盤内のガスが降着してしまうと、即座に静穏状態に戻り、再増光はおこらないはずである。このように、WZ Sge 型では理解されていない現象が多く、注目を集めるようになった。

2000年代に入ると自動観測システムの発達によって、WZ Sge 型の発見頻度が高くなった。しかし、矮新星のような突発天体現象では小口径の望遠鏡による単純な撮像観測しか行われなことが多く、それによって時間変動の様子は詳細に記録されるようになったものの、降着円盤の温度や構造の変化を知るには観測情報が不足していた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、矮新星降着円盤の最外縁でどのように角運動量が失われ、観測されるような変動現象が発生するのかを解明することである。WZ Sge 型は矮新星のなかでも円盤にガスが多く蓄積され、アウトバースト時には円盤が強い潮汐効果を受けるほどに大きく膨張する。このことが、WZ Sge 型のみ観測される変動現象が存在する要因であると考えられる。したがって、WZ Sge 型矮新星で観測される変動現象の機構を理解することが、降着円盤の最外縁における物理状態を知ることにつながる。本研究では特に早期スーパーハンプと再増光現象の機構の解明を具体的な目的とする。そのために、アウトバースト中の降着円盤の温度や構造を観測から明らかにする。

## 3. 研究の方法

降着円盤の温度や構造の情報を得るためには、従来行われてきた単純な光度変動だけ

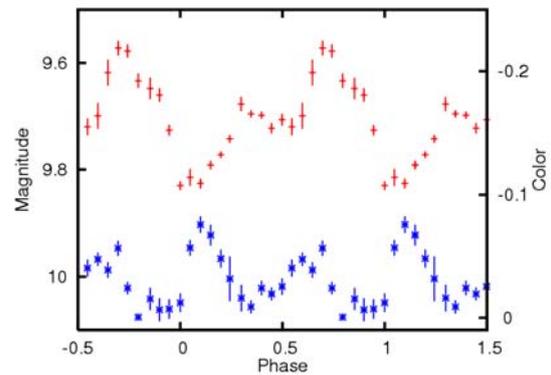


図1：WZ Sge 型矮新星 V455 And で観測された早期スーパーハンプの光度（赤）と色（青）の時間変化。

ではなく、色の時間変化を知る必要がある。そのため、複数の波長帯で同時に観測を行う。観測には可視光と近赤外線を同時に観測できる広島大学「かなた」望遠鏡を主に使用した。さらに、天体によっては岡山天体物理観測所の「MITSuME」望遠鏡も使用することで、可視域から近赤外線域で合計6バンド同時に観測した。

幸いなことに、研究期間中にはいくつかの観測に適した WZ Sge 型矮新星のアウトバーストが発生した。本研究ではそれらのアウトバースト発見が伝えられると即座に複数バンドでの観測を開始し、それぞれアウトバーストが終了する約1カ月の間、観測を続けた。矮新星アウトバーストの研究で、初期から後期までの長い期間、広い波長域で複数の波長帯を同時に観測した研究は前例がない。

## 4. 研究成果

### (1) 早期スーパーハンプの機構

本研究期間中に早期スーパーハンプの観測は V455 And と HV Vir の2天体で成功した。図1は V455 And の早期スーパーハンプの光度変化と色変化を表わしている。この結果から、ハンプの底（最も暗い状態）で色が最も青く、ハンプの成分は色が赤いことが明らかになった。HV Vir のアウトバーストで観測された早期スーパーハンプでも同様の挙動が確認された。早期スーパーハンプの色変化が観測されたのは V455 And の観測が世界で初めてである。

この観測事実から早期スーパーハンプの機構について重要な示唆が得られる。ハンプ、つまり天体が明るくなる現象は、多くの場合、新たなエネルギー解放に伴って天体の温度が上昇し、その結果、色は青く変化する。早期スーパーハンプの成分が赤いという事実は、この現象が何かしらのエネルギー解放で発生したものではないことを意味する。色が赤い、つまり温度が低い状態で明るくなるた

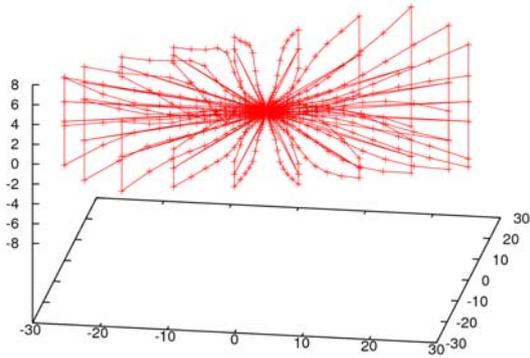


図2：V455 And の早期スーパーハンプから再構成された降着円盤。

めには、放射領域が大きくなる必要がある。降着円盤では外側ほど温度が低いことと合わせて考えると、この観測事実は、円盤最外縁の低温領域が一部分、縦方向に膨張し、それが回転することによって早期スーパーハンプが観測されることを示唆する。

そのような非軸対称な降着円盤の構造は、おそらく伴星からの潮汐効果が原因だと考えられる。早期スーパーハンプに関する理論研究では、降着円盤半径が2：1共鳴半径に達することで大きな角運動の抜き取りが円盤最外縁で起こるとされている。また、潮汐効果によって渦状の温度構造が円盤上に現れるとする予測もある。大きく膨張した円盤に強い潮汐トルクが働き、最外縁部分で渦状の非軸対称な盛り上がり形成されるのかもしれない。

今回の研究によって新たな発展的課題も生まれた。早期スーパーハンプが円盤の回転効果、すなわち幾何的な効果による変動であるなら、観測データを用いて、円盤の構造をトモグラフィック技術で再構成できる可能性がある。この手法は現在開発中で、図2はV455 And のデータから試験的に再構成した円盤の構造である。降着円盤の縦方向の構造が観測から再構成できれば、理論予測とも比較がしやすくなり、理論面での研究も発展することが期待される。以上の成果は下記「主な発表論文等」の④、[4]、[13]で発表した。

## (2) 再増光現象の機構

再増光現象については、主に3つの天体(J1021+234, GW Lib, V455 And)の観測から重要な知見を得ることができた。このうち、J1021+234では実際に再増光期の観測に成功した。図3はその際に得られた可視光と近赤外線の短時間変動を表わしている。可視光でも近赤外線でも変動が見られるが、注目すべきは近赤外線の方が可視光よりも大きく変動していることである。これはハンプ成分の色が赤いことを意味する。前述の早期スーパ

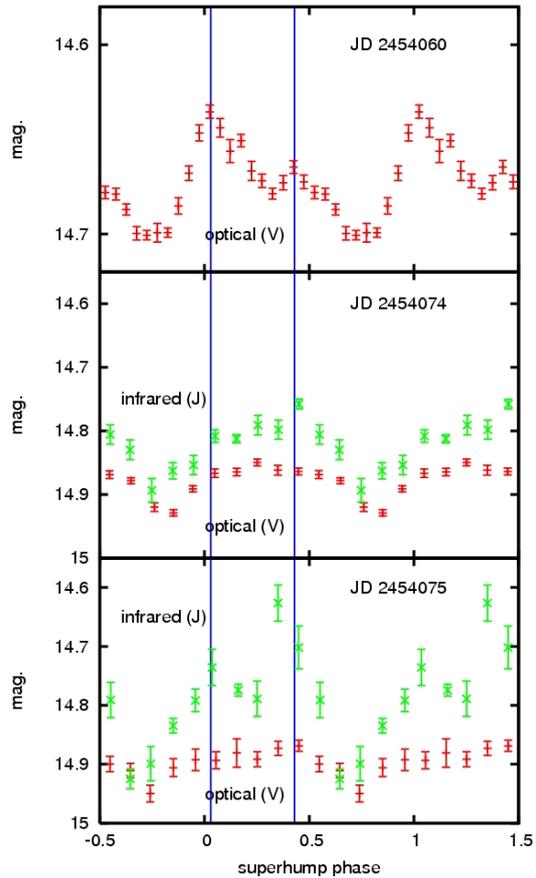


図3：WZ Sge 型矮新星 J1021+234 の再増光期に観測されたスーパーハンプ。赤が可視光、緑が近赤外線の結果を表わす。

ーハンプとは異なり、ここで観測されている現象は通常の矮新星でもよく知られるスーパーハンプと呼ばれる現象である。だが通常、ハンプ成分の色はこれほど赤くない。観測結果から、ハンプ以外の降着円盤は温度9000K、それに対してハンプ成分は5000-6000Kであることがわかった。この観測事実は、再増光期の降着円盤の状態が、通常のアウトバースト中の状態とは異なり、小さな高温円盤の周りに、大きな低温領域が存在することを示唆する。高温と低温の領域が共存することは、円盤不安定理論では難しいとされていた。

一方、GW Lib と V455 And では再増光は発生しなかったが、アウトバースト終了直後1週間、すなわち他のWZ Sge型では再増光が観測される期間に特異な挙動が見つかった。図4はV455 Andの観測結果から推定した円盤の温度と大きさの推移を表している。アウトバースト中は円盤の温度が高く、静穏期は円盤が小さくなり代わりに高温の白色矮星が卓越する。注目すべきはアウトバースト終了直後で、一時的に静穏期よりも温度が低い状態が存在することである。この期間、円盤

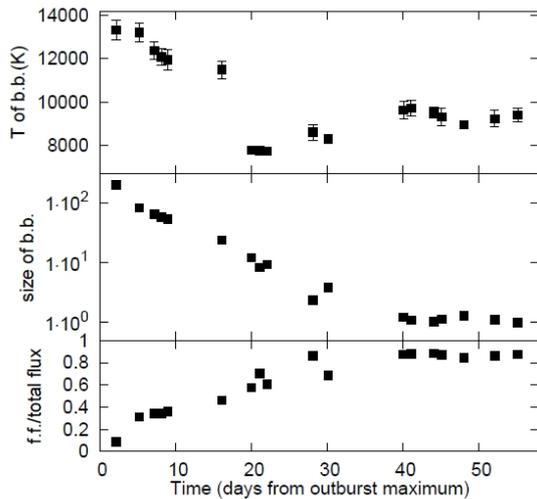


図4：WZ Sge 型矮新星 V455 And のアウトバースト中の円盤温度（上）、円盤の大きさ（中）、及び、円盤の制動放射温度（下）。

の大きさは静穏期よりは依然大きい状態であり、すなわち、白色矮星よりも明るい、広い低温円盤の存在を示唆している。GW Lib ではアウトバースト直後に明確に色が赤くなることがわかり、同様の結果を示した。

上記いずれの観測結果も、アウトバースト終了後に低温だが大きく明るい円盤が存在することを示している。低温とはいえ V455 And の場合は 8000K 程度の温度で、このような温度で明るく輝くためには、アウトバースト終了後でも降着円盤に十分なガスが残っている必要がある。これらの観測事実から得られる再増光に関する描像を図5にまとめた。アウトバースト終了直後、円盤外縁部にはガスが残っており、これが「質量溜め」となって弱く輝きながら、次第に降着していく。その結果、円盤の内側部分で熱的不安定性のため臨界密度を一時的に超えれば、再増光が発生するのかもしれない。GW Lib や V455 And では外側の質量溜めの量が少なく、再増光に至らなかったのかもしれない。その場合は、アウトバースト直後の円盤状態と再増光の有無について関連があるかもしれない。その研究は今後の課題である。以上の成果は下記「主な発表論文等」の⑤, [2], [4], [13]で発表した。

### (3) その他の成果

以上が本研究の本旨にあたる成果であるが、矮新星の長期にわたる近赤外線観測はこれまで前例がなかったため、本旨からはやや逸れるものの、副次的な成果も多数得られた。それらの中から特に重要なものを以下に列挙する。各項目の最後に付記する番号は、下記「主な発表論文等」の文献番号に対応する。

- WZ Sge 型と同様に軌道周期が非常に短

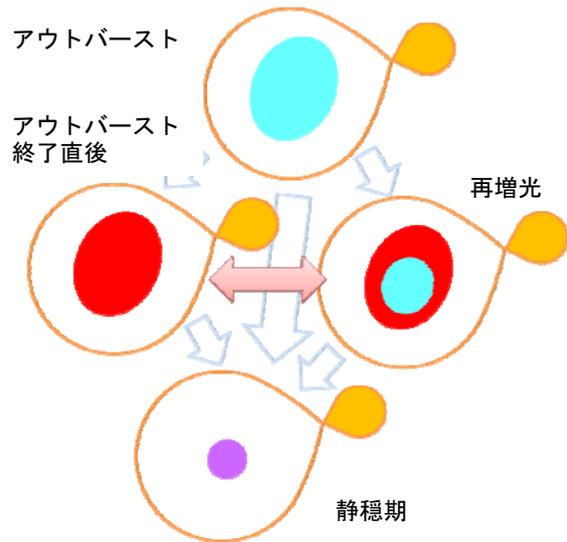


図5：矮新星降着円盤のイメージ。アウトバースト中（上）は高温の円盤が形成され、静穏期（下）の円盤は低温で暗い。アウトバースト終了直後には低温で大きな円盤が存在し（左）、そのガスが降着することにより再増光が起こる（右）。

いが、爆発頻度が高い特異な矮新星 J0557+683 を発見した。この天体の正体を特定するため、クラスター分析によって矮新星の新しい分類を提示した。

(②, [6])

- 爆発頻度を考慮し、ベイズ統計的な手法を応用することによって、矮新星の軌道周期分布を推測した。その結果、連星進化理論が予言する数多くの短周期激変星は、実際は未発見の WZ Sge 型であることを提案した。(①, [6])
- WZ Sge 型矮新星 J0232-37 の再増光が前例のない2種類の光度変動を示したことを明らかにし、再増光の持続期間と光度変動のパターンが、円盤外縁部の残存ガス量に依存することを提案した。([14])
- WZ Sge 型矮新星 AL Com の観測を行い、その再増光の光度変動のパターンが以前に観測されたものと異なることを明らかにした。これは、再増光の挙動が残存ガス量のわずかな違いに大きく依存することを示唆する。(⑥, [14])
- 長周期の矮新星 GK Per のアウトバーストを観測し、3つの極大をもつ特異な光度曲線の形状を明らかにした。特に色の变化から、3つのアウトバーストはそれぞれ通常の矮新星アウトバーストと同様の高温円盤 (10000K 程度) に状態遷移していたことがわかった。([17])

## 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 2 2 件)

- ① Uemura, M., Kato, T., Nogami, D., Ohsugi, T., “Dwarf Novae in the Shortest Orbital Period Regime: II. WZ Sge Stars as the Missing Population near the Period Minimum”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り、Vol.62, 2010, pp613-620
- ② Uemura, M., Arai, A., Kato, T., 他 20 名, ” Dwarf Novae in the Shortest Orbital Period Regime. I A New Short Superhump Period Dwarf Nova, OT J055717+683226”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り、Vol.62, 2010, p.187-199
- ③ Kato, T., Imada, A., Uemura, M., 他 135 名, “Survey of Period Variations of Superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り、Vol.61, 2009, p.S395-S616
- ④ Matsui, R., Uemura, M., Arai, A., 他 17 名, ” Optical and Near-Infrared Photometric Observation during the Superoutburst of the WZ Sge-Type Dwarf Nova, V455 Andromedae”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り、Vol.61, 2009, p.1081-1092
- ⑤ Uemura, M., Arai, A., Krajci, T., 他 26 名, ” Discovery of a WZ Sge-Type Dwarf Nova, SDSS J102146.44+234926.3: Unprecedented Infrared Activity during a Rebrightening Phase”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り、Vol.60, 2008, p.227-236
- ⑥ Uemura, M., Arai, A., Sasada, M., 他 8 名, ” Outburst of a WZ Sge-type Dwarf Nova, AL Com in 2007”, Information Bulletin on Variable Stars, 査読有り、Vol. 5815, 2008, p.1-4

[学会発表] (計 6 1 件)

- [1] 植村誠, 「ヘリウム矮新星 CR Boo の可視光一近赤外線同時観測」、日本天文学会 2010 年春季年会、2010 年 3 月 26 日、東広島市
- [2] 松井理紗子, 「Optical and infrared photometric observation of WZ Sge-type dwarf nova, V455 And」、Wild Stars in the Old West II, 2009 年 3 月 15 日、ツーソン (アメリカ)
- [3] 植村誠, 「かなた望遠鏡による WZ Sge 型矮新星 OT 074727.6+065050 の可視一近赤外線測光観測」、日本天文学会 2009 年春季年会、

2008 年 3 月 25 日、大阪市

- [4] 松井理紗子, 「WZ Sge 型矮新星 V455 And の可視近赤外線同時撮像観測」、日本天文学会 2009 年春季年会、2008 年 3 月 25 日、大阪市
- [5] 植村誠, 「広島大学東広島天文台での突発現象観測」、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008 年 9 月 12 日、岡山市
- [6] 植村誠, 「最短軌道周期付近の矮新星の分類と分布」、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008 年 9 月 12 日、岡山市
- [7] 植村誠, 「A New Era of Transient Object Astronomy with Small Telescopes: Cataclysmic Variables, X-Ray Binaries, and Gamma-Ray Bursts」、10th Asian-Pacific Regional IAU Meeting、2008 年 8 月 5 日、昆明 (中国)
- [8] 植村誠, 「Optical-Infrared Observation of Astronomical Transients with the 'KANATA' 1.5-m Telescope」、Astrophysics with All-Sky X-Ray Observations、2008 年 6 月 11 日、和光市
- [9] 植村誠, 「New Aspects of WZ Sge-Type Dwarf Nova through Simultaneous Optical-Infrared Observations during Superoutbursts」、The 8th Pacific-Rim Conference on Stellar Astrophysics', 2008 年 5 月 7 日、プーケット (タイ)
- [10] 植村誠, 「"KANATA": 1.5-m Optical-Infrared Telescope Dedicated for Astronomical Transient Phenomena」、The 8th Pacific-Rim Conference on Stellar Astrophysics', 2008 年 5 月 7 日、プーケット (タイ)
- [11] 新井彰, 「Rebrightening events of two WZ Sge-type dwarf novae AL Com and 1RXS J023238.8-371812」、The 8th Pacific-Rim Conference on Stellar Astrophysics', 2008 年 5 月 7 日、プーケット (タイ)
- [12] 植村誠, 「かなた望遠鏡と岡山 MITSuME 望遠鏡による矮新星 GW Lib の多色観測」、日本天文学会 2008 年春季年会、2008 年 3 月 25 日、東京都
- [13] 松井理紗子, 「WZ Sge 型矮新星 V455 And の可視近赤外線同時測光観測」、日本天文学会 2008 年春季年会、2008 年 3 月 25 日、東京都
- [14] 新井彰, 「2 つの WZ Sge 型矮新星 AL Com と 1RXS J023238.8-371812 の再増光現象」、日本天文学会 2008 年春季年会、2008 年 3 月 25 日、東京都
- [15] 植村誠, 「激変星の中で最短の連星周期をもつ天体 OT J055718+683226 の観測」、日本天文学会 2007 年秋季年会、2007 年 9 月 27 日、岐阜市
- [16] 植村誠, 「近赤外線観測から探る典型的な SU UMa 型矮新星降着円盤の最外縁」、日本天文学会 2007 年秋季年会、2007 年 9 月 27 日、岐阜市

[17] 植村誠、「特異な矮新星 GK Per の 2007 年アウトバースト」、日本天文学会 2007 年秋季年会、2007 年 9 月 27 日、岐阜市

[18] 植村誠、「岡山 MITSuME 望遠鏡による ER UMa 型矮新星の長期同時多色観測」、日本天文学会 2007 年秋季年会、2007 年 9 月 27 日、岐阜市

〔その他〕

ホームページ等

宇宙科学センターホームページ

<http://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/>

かなた望遠鏡 観測速報ページ

<http://kanatatmp.g.hatena.ne.jp/kanataobslog/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

植村誠 (UEMURA MAKOTO)

広島大学・宇宙科学センター・助教

研究者番号：50403514

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし