# 「かなた」望遠鏡を用いた モニター観測による 星形成星周円盤の降着現象の研究

保田 知則 広島大学大学院理学研究科博士課程前期 M061020 高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室 主査 大杉節 副査 両角卓也

2008年2月8日

我々の天の川銀河には星間物質が高密度に集まった分子雲と呼ばれる領域があり、その中の密度 ムラから自己重力によって星が生成されている。星形成時には中心星とそれを取り巻く星周円盤 という軸対称な構造をもち、物質降着とそれによる物質放出現象が起こっている。そのような若 い星の進化の後期の星をT Tauri型星と呼び、1.2-24日周期で1等程度の変光や、非周期的で突 発的な変光をする天体としてよく知られている。その変光の起源には中心星と降着円盤からの放 射の変動が考えられるが、その時間変動の原因についてはあまり分かっていない。中心星からの 放射は多くの可視光観測から理解が進められており、私は観測例の少ない降着円盤からの赤外放 射に着目した。

中心星表面の放射と降着円盤からの放射の時間変動の相関を探るために、若い星 37 天体につい て高頻度な可視、近赤外 3 波長領域での同時モニター観測を行った。若い星の高頻度の可視近赤 外同時モニター撮像観測は世界でも例が無く本観測が初である。降着円盤の放射が優位である近 赤外領域での時間変動を同時観測することで、降着円盤からの放射を分離し、降着円盤からの放 射の時間変動に着目した議論が可能となる。

多くの天体から可視光が減光すると、色指数 (V-J) は赤くなる傾向が見られたが (Fig 左)、V ー J と赤外超過 (J-Ks) との相関があまり見られなかった (Fig 右)。この赤外超過 (J-Ks) は降着円 盤からの放射を表していると考えられ、星の放射が主成分の V-J と相関があまり見られないこと は降着円盤起源を支持している。降着円盤成分の変動幅や時間スケールを求めることにより、降 着円盤成分の変光現象を分類した。

また可視近赤外同時の分光観測も低頻度であるが行っており、若い星のスペクトルには Hα、 Brγ等の中心星近傍からの輝線が検出されている。その輝線と降着円盤由来の放射の相関についても議論する。(左)若い星 18天体の可視色等級図、(右)可視色指数と近赤外色指数の相関図。



# 目 次

第1章 1.1 1.2	本研究の背景 宇宙星生成領域	2 2 3 3
第2章 2.1	<b>T Tauri 型星について</b> T Tauri <b>型星観測の歴史</b>	<b>5</b> 5
第 <b>3章</b> 3.1 3.2	観測装置 東広島天文台「かなた」望遠鏡	<b>10</b> 10 11
第4章 4.1 4.2 4.3	<ul> <li>観測とデータリダクション</li> <li>観測</li></ul>	<b>12</b> 12 15 16 17
第5章 5.1 5.2 5.3	観測結果 測光	<ul> <li>20</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>26</li> <li>28</li> <li>31</li> <li>35</li> </ul>
第6章	まとめ	43
付録A	分光スペクトルデータ	44
付録B	測光解析デ - タ	48
付録C	カラーカラー図を用いた星間減光の見積り	70

# 第1章 本研究の背景

# 1.1 宇宙星生成領域

宇宙には太陽のような恒星の総質量の 10%程度を占める希薄な星間物質が漂っている。我々の 天の川銀河系や他の渦巻銀河系内では高密度の分子雲 (暗黒星雲) があり、内部の密度ゆらぎに より小さなコアをもつ。コアは電波による観測から質量  $10^3 \sim 10^4$  倍  $M_{\odot}$ 、サイズ  $\sim 2 - 5$ pc、 水素分子密度  $n_{H_2} \sim 10^{2.5}$  cm<sup>-3</sup>、温度が  $T \sim 10$ K の塊であることが分かっている。牡牛座の 暗黒星雲がその例である。暗黒星雲の平均的なジーンズ質量<sup>1</sup>は数  $M_{\odot}$  であり、コアの質量  $M_{cl}$ よりはるかに小さい。その為、熱的な圧力はコア中心に働き、コア近傍の星間物質は磁場 (Chandrasekhar&Fermi,1953,Mestel,1965,Spitzer,1968,Mouschovias,1976)、回転 (Field,1978)、乱流 (Norman&Silk,1980,Larson,1981) の影響を受ける。



図 1.1: 星生成の4つの段階

分子雲に徐々に磁場や乱流による支持がなくなって来た領域では、自己重力降着が促進され、 様々な質量の星生成が行われる。星生成の過程は Fig1.1 の4 つの段階に分類される。

- 1. ゆっくり回転するコアが生成される。(Fig1.1a) 臨界前のコアはだんだんと乱流と磁気的なエ ネルギーを回転軸方向から拡散し、臨界点を越えると全体が収縮し、平らになっていく。中 心星を生成していく過程はゆっくり進み、理論的には単一の等温球になると考えられている。
- 2.2 段階では中心星の凝縮と周囲の星間物質の活発な収縮が起こる。この進化段階は中心の原 始星と降着円盤を持ち、深くダストとガスのエンベロープに覆われているのが特徴である。 (Fig1.1b)低質量原始星の放射の発生源は物質降着に伴う降着衝撃波である。
- 3.3段階は星風が回転軸方向にコリメートされ、双極アウトフローを発生する状態。(Fig1.1c)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>密度ゆらぎが自己重力によりそれに抗う圧力に対して収縮できる臨界長をジーンズ長 $\lambda_J$ といい、それを直径とするジーンズ質量  $M_J \equiv \frac{4\pi}{3} \rho(\frac{\lambda_J}{2})$ で表す

取り払われる。双極物質流により中心星周辺も掃き取られ、中心星とその星周円盤が姿を現 す (Fig1.1d)。中心星が低質量星である場合を最初にそのタイプの星と同定された牡牛座 T 星から T Tauri 型星と呼ぶ。星周円盤のダスト量は惑星系の起源に直結し、注目されている。

5. 降着円盤が完全に無くなってゆき、太陽のような水素核燃焼エネルギーを基にした放射が卓 越した星へと進化を遂げる。

# 1.2 T Tauri型星



図 1.2: T Tauri 型星 BF Ori のライトカーブ:縦軸は可視等級 [mag]、横軸は時間 [day]。激しい 時間変動を示している。

T Tauri 型星の可視光スペクトルはバルマー系列、FeII などの卓越した輝線があることが知られている。またその性質は光球温度は  $\leq$ 6000K で、典型的には  $\sim$ 4000K(Herbig,1967)、質量は 0.2-2M<sub>☉</sub>、年齢は  $\sim 2 \times 10^5 - 2 \times 10^7$ yr である。紫外輝線放射から激しい彩層活動が起こっていることが分かっており (Calvet et al.1984)、高い質量放出現象 (Kuhi,1964)、周期的な光度変化から「コールドスポット」と呼ばれる太陽の黒点のような低温領域、また物質降着に伴う衝撃波によって星表面が温められる「ホットスポット」があると考えられている。(Herbig&Soderblom,1980,Bertout et al.1987)

多くの可視観測により中心星に由来する物理について様々な理論が提唱されているが、T Taur 型星では降着円盤からの放射の寄与が大きく、赤外線領域で降着円盤は明るく輝く。そのため恒 星とは異なり、赤外線放射の超過成分がある。T Tauri 型星の光度変化は星表面のコールドスポッ トなどの自転周期と同期した周期的変動と星周物質が観測者との間を横切ることによって減光・赤 化を受ける非周期的な変動がある。その他に一部の天体については円盤内に存在する第2、第3の 伴星に降着円盤の物質が降着することによって、降着円盤からの中心星への物質降着量が変動す るというモデルが考えられている。また一例だけであるが降着円盤に盛り上がった厚さ方向の成 分が中心星を隠す「食」が観測されている天体もいる。

## 1.2.1 本研究の目的

我々は今回、広島大学「かなた」望遠鏡 TRISPEC 観測装置により、34 天体の測光観測と20 天体の分光観測を行った。TRISPEC 装置は可視・近赤外同時観測が可能なため、光度変化の情報やそのスペクトルを時間的なラグを作らず取得することができた。これによって星由来の成分と降着円盤由来の成分を分離した解析を行うことができる。またこれまで行われていない密な観測を

繰り返し観測されたデータを用いて、これまでの T Tauri 型星の降着現象に対する時間変動の解 釈が正しいのか、またはいくつかの分類が可能であり、異なる降着現象が基礎となっているのかを 探ることである。また AA Tau という天体の食という現象が特異なものであるのか、T Tauri 型星 の普遍的な現象であるのかを調べ、降着円盤の厚さ方向の構造を明らかにしたい。本論文では、2 章で T Tauri 型星の特徴について述べ、3 章では本研究で用いた「かなた」望遠鏡付設 TRISPEC 観測装置について述べ、4 章では観測と解析手法について説明している。5 章では結果について述 べ、6 章において今回の結果をまとめている。

# 第2章 T Tauri型星について

## 2.1 T Tauri 型星観測の歴史

T Tauri 型星は変光星の一種で、グループの星として初めて同定されて牡牛座 T 型星からそう 呼ばれている。典型的に質量は  $\sim 2M_{\odot}$  以下である。

さらに T Tauri 型星には 3 つの分類が成されている。

- ETTS: 早期型 T Tauri 型星。エンベロープが取り払われてきてすぐの特に若い T Tauri 型 星。長期的な増光が特徴。
- CTTS:古典T Tauri型星。エンベロープが散逸した後、降着円盤からの降着が起こっているフェイズ
- WTTS:後期型 T Tauri 型星。降着円盤からの降着が少なくなってくるフェイズ。T Tauri 型星特有の強い輝線が見えなくなることから weaked-line(necked) T Tauri 型と呼ばれる。

T Tauri 型星の放射は中心星の黒体放射と降着円盤の多温度黒体放射から構成される。(図 2.1) 多温度黒体放射とは、幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤が黒体放射するときの放射である。ビ リアル定理により、降着円盤は解放される重力エネルギーの半分をケプラー回転エネルギーに、も う半分が内部エネルギーに変え、その内部エネルギーは降着円盤の黒体放射により主に放出され る。降着円盤は半径によりその温度が異なるため、色々な温度での黒体放射の足し合わせになる。



図 2.1: T Tauri 型星のスペクトル

#### Spotted star(1)

周期的な変動の中で 0.2 等程度の可視光変動の理由として最も単純に考えられているのが、コー ルドスポット (黒点)を持つ主星の自転活動である (図 2.2(1))。WTTS の K0 型以降の低温の星で 多くそれによる変動が報告されている。(Vrba、Herbst&Bouchet(1988)、Walker(1990)等)。その 他に「ホットスポット」と呼ばれるものもある。降着円盤の物質が降着する際、中心星の磁場に 沿って降着する。その降着する点では降着ショックが発生し、他の領域よりも高温になる。DFTau という天体で初めて発見された (Grinin 1980)。黒体放射は式 2.1 で表される。スポットを持つ星



図 2.2: T Tauri 型星光度の時間変動のモデル:[top](1)2 種類のスポット。星の自転周期に依存した 変動をする。(2) 星周物質による減光・赤化。観測者の視線方向を星周物質が横ぎる。[center] 降着 円盤と中心星。下は断面図。可視、近赤外領域で明るい領域を図示してある。(3) 観測者の視線方 向を降着円盤の厚さ方向の成分が横切り、食される。[bottom](4) 降着円盤物質が中心星よりも小 型な伴星に降着することによって中心星への降着が変動する。 に一時的にシフトする。

黒体放射:

$$E(\lambda,T)d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda$$
(2.1)

#### 星周物質による減光・赤化(2)

T Tauri 型星では1等から2等程度の大きな振幅の変動も受かっている。特徴として可視光の減 光に対して、赤外線の減光量が少ない。この波長依存性のある大きな減光は星周物質により中心 星が隠された事によって減光・赤化が起こる現象である考えられている(図2.2(2))。中心星から の放射は一部遮られ、赤化が起こる。よってこの場合も星の黒体放射のスペクトルのピークがシ フトする結果になる。これがランダムな変動成分の原因であると考えられている。

#### 降着円盤の厚さ方向の成分による食.etc(3、4)

近年、唯一 AATau という天体で降着円盤に光学的に厚い、厚さ方向の成分があり星を隠してし まう「食」が起こっていることが確認されている(図 2.2(3))。この現象が AA Tau にのみ起こっ ている特異な現象なのかは分かっていない。また RWAur、DQTau という天体では星表面の物質 降着面近傍から出ていると考えられている HeI 輝線の変動から、第2、第3の伴星に降着円盤の物 質が降着してしまい、降着円盤に密度ムラが生まれ、その結果物質降着率が変動するというモデ ルも考えられているがよく分かってはいない(4, Petrov et al.2001)。

#### 中心星表面のスペクトル線

卓越した Hα 輝線 (6573Å) と HeI 輝線、CaII 3 重輝線 (8499,8534,8663Å) の一部は、このホットスポットでのショックによって放射されていると考えられている。また CaII 3 重輝線のほとん どの部分は T Tauri 型星では非常に活発な星表面の彩層による放射であると考えられている。そ の他に NaI、CaI、CO等の中心星の光球吸収線もある。

#### 降着物質によるスペクトル線

物質降着由来する  $Br\gamma$  輝線、 $H_2$  輝線もあり、これらは降着物質が磁場に沿って降着する際に断熱圧縮され、温度上昇する過程で放射されると考えられている。 $Br\gamma$  は降着物質の放射であるため、その強度を用いて降着物質の光度を計算することが可能である。 $Br\gamma$  輝線の等価幅 (EW)(等価幅の説明は APPENDEX へ譲る) から降着物質の光度  $L_{acc}$  は式 2.2 により与えられる。

$$L_{Br\gamma} = 4\pi d^2 F_{Br\gamma} : F_{Br\gamma} = F_{\lambda} \times EW$$

$$log(\frac{L_{acc}}{L_{\odot}}) = (1.26 \pm 0.19) log(\frac{L_{Br}}{L_{\odot}}) + (4.43 \pm 0.79)$$
(2.2)

(Muzerolle et al.2001)

また降着円盤の半径も見積もることができ、

$$R_{in} = \sqrt{(1+f)(\frac{L_* + L_{acc}}{4\pi\sigma T_{in}^4})}$$
(2.3)

Tin:内縁温度

#### アウトフローからのスペクトル線

[FeII][OI][SiII] といった禁制線と呼ばれる輝線も見えており、これは非常に希薄な領域から出ていることを示唆しており、星風、円盤風と呼ばれる中心星、降着円盤のマスロス成分からでていると考えられている。

#### 降着円盤に由来するスペクトル線

分子輝線は降着円盤から出ていると考えられており、CO分子輝線にはCO分子雲の密度、温度により振動準位の励起の仕方が異なる。CO[ $\nu$ =1-0]の基礎線は降着円盤内縁の磁場により降着円盤が切り取られた領域、もしくは降着円盤中で密度が希薄な領域からでていると考えられており、この輝線の準位と強度により降着円盤内縁の温度 T<sub>in</sub>を求める事ができる。CO[ $\nu$ =2-0]の倍音線はこれまでほとんど観測された例はない。この輝線が出る条件は高温 (1000-5000K) で高密度 ( $n_H \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ )であることであり、降着円盤が温度逆転層を持つか、光学的に薄い表層を持つ二層構造だった場合に放射される。これらの CO 輝線の特徴は降着円盤内縁の特徴を直接的に抽出することができる。

T Tauri 型星周辺構造のモデル

T Tauri 型星の構造をモデル化した図は図 2.3 のように表すことができる。S は中心星であり、 星表面には他の領域と温度が異なるスポットが存在する。可視波長で明るく輝く。中心星近傍か らはバルマー、ブラケット系列、Call 三重線、HeI、水素分子等の輝線がでる。A は降着円盤ダス ト成分。中心星から 0.1~1AU 程度の距離の内縁では近赤外波長で熱放射をする。CO 輝線がでる のもこの領域であると考えられている。B は円盤風、F は星風を表している。これらから禁制線は でると考えられている。C は降着円盤の厚さ方向の成分を表しており、これが部分的に星を観測 者から隠すことにより食を起こす。食の周期は降着円盤のケプラー回転に依存している。D は C やF に伴い、放出されるダスト。この成分により星が隠され、減光・赤化を受ける場合もあると考 えられている。これは特徴的な現象をピックアップしたモデルであり、T Tauri 型星はその他に多 重連星系の効果や、磁場による降着円盤の引きずられ現象等複雑な物理構造をしている。

低温のダストによって形成される降着円盤の物質は中心星の重力により降着する。その過程で粘性 により円盤内側ほど温度が高くなる。ある半径からガスとして存在するようになり(j0.1AU)、降 着円盤はある距離から中心星の磁場に沿って降着する。 図 2.3: T Tauri 型星のモデルイラスト



# 第3章 観測装置

# 3.1 東広島天文台「かなた」望遠鏡

かなた望遠鏡は 2006 年に国立天文台から広島大学宇宙科学センター東広島天文台へ移設された 口径 1.5m の可視近赤外望遠鏡である。国内に現存する望遠鏡では最大級であり、大学所有の望遠 鏡では最も大きい。2003 年に大学近郊において行われたシーイング調査により、典型的に 1.1 秒 角という全国的に見てトップクラスの観測環境を有した東広島市南部のサイトに移設された。



### 図 3.1: かなた望遠鏡

中央に見えるのが 1.5m の主鏡である。左右にある台がナスミス台。今回観測に用いた TRISPEC 観測装置はお尻の部分にあたるカセグレン焦点部分に取り付けられている。

## 表 3.1: かなた望遠鏡の仕様

項目	仕様			
光学系	リッチ・クレチアン光学系			
主鏡	有効径 1500mm/主鏡の F 比=2.0			
焦点モード	カセグレン焦点 (F/12.2)・ナスミス焦点 (F/12.2)			
焦点面スケール	<b>カセグレン</b> 11.25 秒角/mm ・ナスミス 11.25 秒角/mm			
焦点距離	焦点距離 18.300mm			
分解能	1 "FWHM			
視野	15			
架台	経緯台方式			

#### 

今回観測に用いた「かなた」望遠鏡カセグレン焦点部に設置されている名古屋大学 Z 研で開発された可視近赤外同時撮像分光装置 TRISPEC(Tripke Range Imager and SPECtrograph) は 0.46-2.5µm の可視域から近赤外域の広い波長域を同時に撮像または分光観測する目的の装置であり、世界的に見ても可視と近赤外域を同時に分光することが可能な唯一の装置である。可視近赤外域のスペクトルエネルギー分布を完全同期して取得可能である。

TRISPEC 装置は2枚のダイクロイックミラーを用いて、0.45-0.9µm(Optical channel)、0.9-1.85µm(IR1 channel)、1.85-2.5µm(IR2 channel) の3 波長に分割され、各チャンネルに、コリメータ系、フィルター、分散素子、カメラ系、2次元検出素子が配置され、それぞれ独立に動作可能な設計になっている。検出器には512×512 ピクセルの SITeCCD2 つ (うちーつは分光時スリットに星を導入する際に用いるスリットビューア用)、近赤外素子には256×256 ピクセルの SBRCInSb 検出器を2 つ用いている。現在、IR1 チャンネルのホイールモータの不具合により、分光観測は OPT、IR2 チャンネルだけで行われるが、撮像観測については3 チャンネル同時に用いることができる。本研究では3 チャンネルそれぞれ V、J、Ks バンドフィルターを用いて観測を行った。

	OPT	IR1	IR2
検出器	$CCD(512 \times 512)$	$\text{InSb}(256 \times 256)$	$\text{InSb}(256 \times 256)$
視野	$7.0' \times 7.0' \times 1$	$7.0' \times 7.0' \times 1$	$7.0' \times 7.0' \times 1$
ピクセルスケール	0.82''/pixel	1.65''/pixel	1.65/pixel
フィルター	B, V, R, I	J、 H	Ks, K, $H_2$
<b>限界等級</b> (*1)	18.5	16.8	15.1

表 3.2: TRISPEC 装置撮像モード

(\*1)10-min exposure,  $10\sigma$ 

表 3.3: TRISPEC 装置分光モード

	OPT	IR1	IR2
波長	$0.45\text{-}0.90\mu\mathrm{m}$	$0.90\text{-}1.85\mu\mathrm{m}$	$1.85\text{-}2.50\mu\mathrm{m}$
スリットサイズ	$6.6'' \times 7.0' \times 1$	$6.6^{\prime\prime} \times$ 7.0 $^\prime \times$ 1	$6.6^{\prime\prime} \times$ 7.0 $^\prime \times$ 1
分解能 (*2)	69	71	180
限界等級 (*3)	16.7	15.5	13.3

(\*2) 分解能 R= $\frac{I_{\lambda}}{\Delta_{\lambda}}$ ,(\*3)60-min exposure、 $10\sigma$ 

# 第4章 観測とデータリダクション

# 4.1 観測

私は 2007 年 10 月に 1 度、11 月 29 日–2008 年 1 月まで 2ヶ月にわたりぎょしゃ座、おうし座、 オリオン座の冬の星座に付随する星生成領域の T Tauri 型星をターゲットに観測を行った。デー 夕較正に必要な分光標準星は各観測日毎に較正観測を行い、測光標準星は快晴であった 2008 年 1 月 9 日に較正観測を行った。検出器の感度補正に必要なフラット画像作成は広島大学の観測メン バーに協力していただいた。それぞれの観測ターゲット天体の情報、観測ログを撮像、分光モー ドそれぞれ表 4.1、4.2、4.3 にまとめている。T Tauri 型星は近赤外線で明るいため、総積分時間 は可視光チャンネルの積分時間を記載している。

観測天体	(赤経、赤緯)	$\operatorname{SpT}$	傾斜角	Prot(*1)	Ncomp(*2)
	$h m s, \circ \prime \prime \prime $		[°]	[day]	(s=single)
AA Tau	$04^h 34^m 55.4^s, +24^\circ 28' 53''$	K7	75	8.22	S
BP Tau	$04^{h}19^{m}15.8^{s}, +29^{\circ}06'26''$	K7	32	8.19	S
CO Ori	$05^h 37^m 38.4^s, +11^\circ 25' 38''$	G5V	-	-	-
CW Tau	$04^{h}14^{m}17.0^{s}, +28^{\circ}10'57''$	K3	-	-	S
DF Tau	$04^{h}27^{m}02.7^{s}, +25^{\circ}42'22''$	M0	50	8.5	1
DG Tau	$04^{h}27^{m}04.7^{s}, +26^{\circ}06'15''$	K6	58	6.2	S
DK Tau	$04^{h}30^{m}44.3^{s},+26^{\circ}01'29''$	M0	44	8.33	1
DO Tau	$04^{h}38^{m}28.6^{s}, +26^{\circ}10'48''$	M0	42	-	s
DQT au	$04^{h}46^{m}53.0^{s},+17^{\circ}00'00''$	M0	-	-	1
DR Tau	$04^{h}46^{m}53.0^{s},+17^{\circ}00'00''$	K7	67	-	s
EH Cep	$21^{h}03^{m}24.4^{s},+68^{\circ}00'26''$	K2	-	-	-
EZ Ori	$05^h 34^m 18.4^s, -05^\circ 04' 47''$	G5	-	-	s
FQ Tau	$04^{h}19^{m}12.8^{s}, +28^{\circ}29'33''$	M2	-	-	-
FR Tau	$04^{h}19^{m}12.8^{s}, +28^{\circ}29'33''$	-	-	-	-
FV Tau	$04^{h}27^{m}04.7^{s}, +26^{\circ}06'15''$	M3	-	-	3
GG Tau	$04^{h}32^{m}30.0^{s},+17^{\circ}31'40''$	M0	56	10.3	1
GI Tau	$04^{h}33^{m}34.5^{s},+24^{\circ}21'05''$	K6	-	7.24	-
GK Tau	$04^h 33^m 34.5^s, +24^\circ 21' 05''$	$\mathbf{K7}$	46	4.63	-
GM Tau	$04^h 38^m 28.6^s, +26^\circ 10' 49''$	M6.5	-	-	-
GW Ori	$05^{h}29^{m}08.3^{s},+11^{\circ}52'12''$	G5	-	-	-
HI Ori	$05^{h}31^{m}23.4^{s},+12^{\circ}09'41''$	G2.5	-	-	S
HK Ori	$05^{h}31^{m}23.4^{s},+12^{\circ}09'41''$	A4	-	-	S
HL Tau	$04^h 31^m 38.4^s, +18^\circ 13' 58''$	K7	89	-	-
HV Tau	$04^{h}38^{m}28.6^{s}, +26^{\circ}10'49''$	K7	84	3.55	-
IQ Tau	$04^{h}29^{m}51.7^{s}, +26^{\circ}06'44''$	M0.5	75	-	S

表 4.1: 撮像観測天体リスト

itw nui	04 41 02.0 , 10 00 42	111	51	2.1121	2
V1331 Cyg	$21^{h}01^{m}09.2^{s}, +50^{\circ}21'44''$	G5	-	-	-
V1001 Tau	$04^{h}46^{m}53.0^{s},+17^{\circ}00'00''$	K6	-	-	-
V1219 Tau	$05^h 34^m 18.4^s, -05^\circ 04' 47''$	-	-	-	-
V733 Tau	$04^{h}14^{m}17.0^{s},+28^{\circ}10'57''$	K2	-	-	-
V440 Ori	$05^h 34^m 18.4^s, -05^\circ 04' 47''$	M5	-	-	-
V819 Tau	$04^{h}19^{m}12.8^{s}, +28^{\circ}29'33''$	K7	-	-	-
UZ Tau	$04^h 32^m 43.0^s, +25^\circ 52' 31''$	M2	-	-	2
XZ Tau	$04^h 31^m 38.4^s, +18^\circ 13' 58''$	M3	90	-	1

(\*1) 観測から求められた変動周期(\*2) 近接連星系である場合の伴星の数

リファレンス:49

# 表 4.2: 撮像観測ログ

観測天体	JST	JD-2400000	$\Delta Vobs$	
			[mag]	
AATau	2007 Dec 29–2008 Jan 25	54456 - 54482	12.0 - 13.9	
BPTau	2007 Dec 4–2008 Jan 14	54431 - 54471	12.5 - 12.8	
COOri	2008 Jan 4–2008 Jan 26	54461 - 54483	13.8 - 14.5	
CWTau	2007 Dec 4–2007 Dec 29	54431 - 54456	13.1 - 14.4	
DFTau	2007 Dec 4–2008 Jan 9	54431 - 54465	11.7 - 12.3	
DGTau	2007 Nov 30–2008 Jan 25	54426 - 54482	13.2 - 13.6	
DKTau	2007 Dec 20–2008 Jan 25	54447 - 54471	12.5 - 13.8	
DOTau	2007 Dec 20–2008 Jan 14	54447 - 54471	13.2 - 14.4	
DQTau	2007 Nov 30–2008 Jan 9	54426 - 54470	12.7 - 13.5	
DRTau	2007 Nov 30–2008 Jan 9	54426 - 54470	10.0 - 10.9	
EHCep	2007 Dec 29–2008 Jan 14	54456 - 54471	16.7 - 17.0	
EZOri	2008 Jan 4–2008 Jan 14	54461 - 54471	11.5 - 11.7	
FQTau	2007 Dec 15–2008 Jan 25	54442 - 54482	17.0 - 18.3	
FRTau	2007 Dec 15–2008 Jan 25	54442 - 54482	18.3 - 18.5	
FVTau	2007 Nov 30–2008 Jan 25	54426 - 54482	16.5 - 16.9	
GGTau	2007 Dec 5–2008 Jan 25	54432 - 54482	12.1 - 12.3	
GITau	2007 Nov 30–2008 Jan 25	54426 - 54482	12.4 - 13.4	
GKTau	2007 Nov 30–2008 Jan 25	54426 - 54482	12.3 - 13.0	
GMTau	2007 Dec 20–2008 Jan 14	54447 - 54471	18.4 - 19.4	
GWOri	2007 Nov 30–2008 Jan 17	54426 - 54471	12.2 - 12.4	
HIOri	2008 Jan 4–2008 Jan 14	54461 - 54471	13.4 - 13.7	
HKOri	2008 Jan 4–2008 Jan 14	54461 - 54471	11.1 - 11.2	
HLTau	2007 Dec 8–2008 Jan 14	54435 - 54471	16.5 - 17.4	
HVTau	2007 Dec 20–2008 Jan 14	54447 - 54471	15.3 - 15.4	
IQTau	2007 Nov 30–2008 Jan 25	54426 - 54482	14.1 - 16.5	
RWAur	2007 Nov 30–2008 Feb $1$	54427 - 54487	10.1 - 11.1	
V1331Cyg	2008 Dec 8–2008 Jan 14	$5\overline{4434}$ - $54471$	10.9 - 11.2	
V1001Tau	2007 Nov 30–2008 Jan 9	$5\overline{4426}-54470$	12.8 - 13.9	
V1219Tau	2008 Jan 4–2008 Jan 14	$5\overline{4461}-54471$	15.6 - 15.7	
V733Tau	2007 Dec 4–2007 Dec 29	54431 - 54456	10.2 - 11.7	

111011	2000 Jan 4 2000 Jan 14	11440 10440	10.0 10.1
V819Tau	2007 Dec 15–2008 Jan 25	54442 - 54482	12.9 - 13.4
UZTau	2007 Dec 4–2007 Dec 18	54464 - 54474	12.4 - 12.7
XZTau	2007 Dec 8–2008 Jan 14	54435 - 54471	12.1 - 13.3

表 4.3: 分光観測

観測天体	赤経 (J2000)、赤緯 (J2000)	JST	JD-2400000	総積分時間	S/N(*1)
	h m s , 0 / 11			[sec]	
AATau	$04^{h}34^{m}55.4^{s}, +24^{\circ}28'53''$	2008 Jan 4	54461	1964	200
		2008Jan $7$	54464	1470	150
		2008 Jan 9	54466	2514	260
		2008 Jan 12	54469	1716	175
		2008 Jan 14	54471	1620	170
BPTau	$04^{h}19^{m}15.8^{s}, +29^{\circ}06'26''$	2007 Dec 5	54432	1206	190
CWTau	$04^{h}14^{m}17.0^{s}, +28^{\circ}10'57''$	2007 Nov 29	54426	962	340
CYTau	$04^{h}17^{m}33.7^{s}, +28^{\circ}20'46''$	2007 Nov 29	54426	1510	330
DFTau	$04^{h}27^{m}02.7^{s}, +25^{\circ}42'22''$	2007 Nov 29	54426	674	308
DGTau	$04^{h}27^{m}04.7^{s}, +26^{\circ}06'15''$	2007 Oct 27	54392	1200	250
		$2007 \ \mathrm{Dec} \ 15$	54442	1348	334
		2008 Jan 6	54463	264	190
		2008 Jan 7	54464	744	346
		2008 Jan 9	54466	594	245
		2008 Jan 12	54469	915	245
DQTau	$04^{h}46^{m}53.0^{s}, +17^{\circ}00'00''$	2007 Nov 30	54427	1548	200
GGTau	$04^{h}32^{m}30.0^{s}, +17^{\circ}31'40''$	2008 Jan 7	54464	1039	258
GKTau	$04^{h}33^{m}34.5^{s}, +24^{\circ}21'05''$	2007 Nov 30	54427	1005	310
GWOri	$05^{h}29^{m}08.3^{s}, +11^{\circ}52'12''$	2007 Nov 30	54427	495	350
DQTau	$04^{h}46^{m}53.0^{s}, +17^{\circ}00'00''$	2007 Nov 30	54427	1548	200
GGTau	$04^{h}32^{m}30.0^{s}, +17^{\circ}31'40''$	2008 Jan 7	54464	1039	258
GKTau	$04^h 33^m 34.5^s, +24^\circ 21' 05''$	2007 Nov 30	54427	1005	310
GWOri	$05^{h}29^{m}08.3^{s}, +11^{\circ}52'12''$	2007 Nov 30	54427	495	350
HLTau	$04^{h}31^{m}38.4^{s}, +18^{\circ}13'58''$	2007 Oct 27	54392	1150	150
		2008 Jan 7	54464	580	176
		2008 Jan 12	54469	900	134
		2008 Jan 14	54471	580	107
IQTau	$04^{h}29^{m}51.7^{s}, +26^{\circ}06'44''$	2008 Jan 5	54462	1470	205
		2008 Jan 7	54464	1676	224
		2008 Jan 12	54469	1854	249

novinui	04 41 02.0 , 10 00 42	2001 Dec 10	01112	1102	010
		$2007 \ \mathrm{Dec} \ 29$	54456	931	315
		2008 Jan 4	54461	694	268
		$2008 \ \mathrm{Jan} \ 7$	54464	883	324
		2008 Jan 9	54466	1108	332
		$2008 \ Jan \ 10$	54467	884	276
		$2008 \ Jan \ 12$	54469	1084	310
UZTau	$04^h 32^m 43.0^s, +25^\circ 52' 31''$	$2007 \ \mathrm{Dec}\ 7$	54434	1050	310
V1331Cyg	$21^{h}01^{m}09.2^{s}, +50^{\circ}21'44''$	2007 Dec 5	54432	1903	173
		$2007 \ \mathrm{Dec} \ 8$	54435	2823	285
		$2007 \ \mathrm{Dec} \ 26$	54453	603	77
		$2008 \ Jan \ 4$	54461	2166	204
		2008 Jan 5	54462	1964	310
		2008 Jan 6	54463	1964	268
		$2008 \ Jan \ 10$	54464	1264	239
		$2008 \ Jan \ 14$	54471	1964	220
XZTau	$04^h 31^m 38.4^s, +18^{\circ} 13' 58''$	2007 Oct 27	54392	1150	300
		$2008 \ \mathrm{Jan} \ 7$	54464	580	214
		$2008 \ Jan \ 12$	54469	900	268
		$2008 \ Jan \ 14$	54471	580	214

(\*2) 分解能 R= $\frac{I_{\lambda}}{\Delta_{\lambda}}$ ,(\*3)60-min exposure、 $10\sigma$ 

# 4.2 撮像データリダクション

データリダクションは IRAF と呼ばれるソフトウェアを用いて行った。このソフトウェアは可 視地上望遠鏡観測ではよく用いられるものである。

リダクションは撮像観測では、データの整理、ダークやバイアスの差し引き、ピクセル感度む ら補正、スカイ差し引きを行う。

ダークの平均化と差し引き

ダークは前章で少しふれたが、検出器の暗電流の事であり望遠鏡の主鏡を閉じた状態で撮像す ることによって取得することができる。ダークを平均化することによって S/N をあげ、ランダム に入射する宇宙線を除去することができる。天体のデータから同じ積分時間のダークを差し引く。

ピクセル感度ムラ補正

CCD のピクセルはそれぞれ固有の感度を持つ。天文台ドーム内のスクリーンに白熱灯をあて、 人工的に一様な光源を作り出し、それを望遠鏡で撮像することで、検出器の各ピクセルの感度ムラ を抽出することができる。その作成されたフラットフレームによって天体のデータを割ることで 一様な感度に補正することができる。またこの段階で名古屋大学の TRISPEC 開発チームが、以 前岡山天体物理観測所にて試験観測を行った際に作成したピクセル異常のフォーマットを用いて、 不良なピクセルの値をその周りのピクセルから内挿する補正を行う。



スカイ差し引き

「スカイ」とは前章でも少し述べたが、街灯り等の大気による散乱のような星以外の明るさの 成分である。観測時にディザリングと呼ばれる星の位置をスリット上で動かして観測する手法を とり、1フレーム毎に差し引きすることで、スカイ成分を差し引きすることができる。本観測では 移動量 10 ピクセルで 5 点ディザリングを行った。(図 4.1) つまり各セット 5 枚で構成される。今 回スカイ差し引きのために 5 枚のうち 4 枚を平均し、それを残り一枚に対してスカイ成分として 差し引く処理を行った。



4.2.1 相対測光

観測天体の等級を求めるために同視野に入っている星の中で文献により光度が調べられている 星 (以後、比較星)を用いて、相対的に等級を求めた。これによりスカイのゆらぎや、急な曇天に よる影響等を差し引くことができる。観測天体の等級  $Mag_{obj}$ は、今回の観測により求められた等 級  $Mag_{obj/obs}$ 、 $Mag_{ccmp/obs}$ 、比較星の等級の文献値 Cmagを用いて、  $Mag_{obj} = Mag_{obj/obs} - Mag_{ccmp/obs} + Cmag$ 

#### -----

ー日の観測の誤差は5点1セットでの比較星との相対測光値の分散を誤差にしている。空が急に曇ると相対測光値が平均値から1等ほどずれる。このような点は分散を計算する前に除いている。この等級の求め方では比較星自体が変動していると、正しい等級が求められない。本論文では別の比較星を用いて比較星の等級を求め、変動を調べた。本論文では比較性の分散 $\sigma_{comp}$ 、天体の誤差 $\sigma_{obj}$ を用いて、全体の誤差 $\sigma_{obs}$ は $\sigma_{obs} = \sqrt{\sigma_{obj}^2 + \sigma_{comp}^2}$ と計算している。標準星という光度が正確に求められている星を用いて比較星の明るさも正確に求めた。今回、ハワイのマウナケア山にあるイギリスのUKIRT望遠鏡により作られた標準星カタログを用いて、天体と標準星を交互に観測した。この際重要であることは大気吸収を考慮して、ほぼ同光度(高度差 10° 以内)にあるものを選び、用いた。天体と標準星のフラックス $f_o, f_s$ をそれぞれ求め、標準星の等級Smagを用いて

 $\operatorname{Mag}_{comp} = -2.5\log(f_o/f_s) + \operatorname{Smag}$ 

標準星の等級は精度よく求められているため、2の手法は1に比べ精度よく求まる。これにより比 較星の光度を全て求めた。

# 4.3 分光データリダクション

データリダクションは同様に IRAF を用いて行った。

リダクションは撮像観測では、データの整理、ダークやバイアスの差し引き、ピクセル感度む ら補正、スカイ差し引き、トリミング、画像変換、波長較正、ケラレ補正、ビンニング等が行わ れる。

#### データの整理

データは観測日、同天体、積分時間毎に分けられる。一つのデータは基本的に天体フレーム、 ダークフレームから成る。ダークフレームにはバイアス情報も含まれる。同じグループ内の天体 のデータは、S/N を稼ぐために平均化する。短時間変動する天体であるため、平均化する際には フラックスが一番高いデータに合わせてから平均化する。

ダークの平均化と差し引き

ダークは前章で少しふれたが、検出器の暗電流の事であり望遠鏡の主鏡を閉じた状態で撮像す ることによって取得することができる。ダークを平均化することによって S/N をあげ、ランダム に入射する宇宙線を除去することができる。天体のデータから同じ積分時間のダークを差し引く。

#### ピクセル感度ムラ補正

CCD のピクセルはそれぞれ固有の感度を持つ。天文台ドーム内のスクリーンに白熱灯をあて、 人工的に一様な光源を作り出し、それを望遠鏡で撮像することで、検出器の各ピクセルの感度ムラ を抽出することができる。その作成されたフラットフレームによって天体のデータを割ることで 一様な感度に補正することができる。またこの段階で名古屋大学の TRISPEC 開発チームが、以 前岡山天体物理観測所にて試験観測を行った際に作成したピクセル異常のフォーマットを用いて、 不良なピクセルの値をその周りのピクセルから内挿する補正を行う。

CCD 上で光が来ていない部分をカットする操作であり、また同時に画像に対してスペクトルを 平行に向きを合わせる。これを行うことでリダクションを簡潔にすることができる。 個々の観測フレームは望遠鏡の追尾の誤差によって、星の位置のずれが含まれ、波長に誤差が生 まれる。波長較正によりそれを補正する。画像変換とは、画像のX軸とY軸をそれぞれ波長分散 方向とスリット長方向と対応づけるように画像をスケーリングすることである。これによって像 が歪みなく波長方向をほぼ完全に重なるように補正することができる。

#### ケラレ補正

感度落ちはスリットの中心あたりよりも端の方が大きい(ケラレやすい)。それを補正するため に、スリット中心をピークとしてスリットの端に向かって感度むらだけを抽出したフラット画像 を作成しする。それで天体のデータを割ることで一様な感度に補正することができる。

#### スカイ差し引き

「スカイ」とは前章でも少し述べたが、街灯り等の大気による散乱のような星以外の明るさの 成分である。観測時にディザリングと呼ばれる星の位置をスリット上で動かして観測する手法を とり、1フレーム毎に差し引きすることで、スカイ成分を差し引きすることができる。複数の星を 同時に分光した場合には、全てのフレームを中央値により平均化し、空の光成分だけを抽出した スカイフラットを作成する。それで全てのフレームを割ることによってスカイ成分を差し引くこ とができる。

ビンニング

実質的な波長分解能はシーイングサイズ等で決まり、S/N が低い場合は必要に応じてビンニン グを行った。ビンニングの仕方をテーブル化しておけばそれに伴ってビンニングを行うプログラ ムを独自に作り、それを用いた。

#### 標準星較正

分光観測を行った前後に観測したスペクトルタイプが A0 型の標準星を用いて、大気の吸収、検 出器固有のノイズを補正する。



# 第5章 観測結果

### 5.1 測光

### 5.1.1 ライトカ-ブ

今回、私は T Tauri 型星 34 天体を高頻度の可視 · 近赤外同時観測を行った。主な天体のライト カーブを載せる。他の天体については APPENDIX B を参照していただきたい。縦軸は等級であり、 横軸は Julian Day<sup>1</sup>-2440000 である。DGTau(図 5.2)、RWAur(図 5.3)、GITau(5.10)、HLTau(図 5.8)、GKTau(図 5.9) のように短期変動で 0.2 等程度の変動と 1 等ほどの大きな変動がある。食 による減光が受かっている AA Tau(図 5.1) や IQTau(図 5.4)、CO Ori(図 5.5)、XZTau(図 5.6)、 DKTau(5.7) という天体は変動の少ない平坦な時期と大きな振幅で周期的で急な減光があるものが ある。



🗵 5.1: AATau



🛛 5.2: DGTau



図 5.3: RWAur



 $<sup>^{1}</sup>$ JD(ユリウス日) : Julian day は紀元前 4713 年 1 月 1 日をゼロ点に定められた連続した通し日であり、単位は [日] である。



🗵 5.5: COOri



🗵 5.7: DKTau

GKTau Light curve

V-4 J-2

Ks

7.2

7.4

7.6

7.8 Dew

8.2

8.4



🗵 5.8: HLTau

🗷 5.6: XZTau



🛛 5.9: GKTau

8.6 54420 54430 54440 54450 54460 54470 5480 54490 54500 54510 JD-2400000

🕱 5.10: GITau

Name	$\Delta V_{mag}$	$\Delta J_{mag}$	$\Delta K s_{mag}$
AATau	1.2	0.7	0.5
DGTau	0.4	0.2	0.2
RWAur	1.2	0.4	0.2
IQTau	2.5	1.6	0.7
COOri	1.6	1.1	0.5
XZTau	1.0	0.4	0.3
DKTau	1.3	0.3	0.2
HLTau	0.8	0.4	0.4
GKTau	0.7	0.3	0.2
GITau	1.0	0.4	0.4

表 5.1: 各バンドでの変動幅

色指数の変動

3 波長領域での光度変化の様子を分かりやすく考えるために、3 つの波長領域の等級の引き算で ある色指数 V-J、V-Ks、J-Ks を用いる。色指数 V-J は可視光で明るい中心星からの放射成分が優 位であり、また J-Ks は赤外線で明るい降着円盤からの放射成分が優位である。これによって星成 分と降着円盤成分に分離して考えることができる。また V-Ks は可視等級の変動に対して近赤外等 級の変動が大きいかどうかの指標と考えることができる。主な天体の色指数の時間変動の図を載 せる。横軸は JD-2400000、縦軸は等級である。他の天体については APPENDIX B を参照してい ただきたい。



🗵 5.11: AATau



🕱 5.12: DGTau



### 🗷 5.13: RWAur







🗵 5.17: DKTau



🗵 5.19: GKTau



🕱 5.14: IQTau



🕱 5.16: XZTau



🗵 5.18: HLTau



🕱 5.20: GITau

Name	$\Delta$ V-J	$\sigma_{V-J}$	$\Delta$ V-Ks	$\sigma_{V-Ks}$	$\Delta$ J-Ks	$\sigma_{J-Ks}$
AATau	0.66	0.038	0.95	0.052	0.31	0.040
DGTau	0.28	0.017	0.36	0.020	0.17	0.009
RWAur	0.81	0.039	1.15	0.051	0.34	0.016
IQTau	1.28	0.064	2.09	0.099	1.10	0.043
COOri	0.73	0.047	1.40	0.093	0.70	0.048
XZTau	0.73	0.043	0.85	0.056	0.45	0.040
DKTau	0.96	0.057	1.12	0.072	0.30	0.022
HLTau	0.49	0.024	0.54	0.033	0.31	0.021
GKTau	0.45	0.036	0.60	0.043	0.25	0.019
GITau	0.78	0.064	0.74	0.064	0.16	0.012

表 5.2: 色指数 (V-J)(J-Ks)(V-Ks) の変動幅

カラ-カラ-図を用いた星間減光と赤外超過成分の見積もり

カラ - カラ-図 (ColorColor-Diagram : CC-D) は独立な色指数 V-J と J-Ks の相関図である。CC-D 上である観測点での星周物質による減光 · 赤化量 (Inter stellar extinction:ISE) と、赤外超過量 (infrared excess:IREx) を求めることができる。その概略図は図 5.21 である。まず星のスペクトル 型によって星の黒体放射のスペクトルが決まり、CC-D 上のある点に一意に決まる。(J.Koornneef et al 1983)

ISE の変化は、CC-D上では平均的にある基ベクトルで表される。減光の波長依存の比率  $A(\lambda)/A(J)$ が求まっており、CC-D 図の傾きは [A(V)-A(J)]/[A(J)-A(Ks)]=2.06/0.618=3.33である。(John.S.Mathis et al. 1990.) 単一の恒星ならばそのベクトルに沿った減光をするはずであるが、T Tauri 型星は降着円盤の赤外線放射成分があるため、基ベクトルからはずれる。ISE は近似的に中心星の減光 · 赤化、また IREx を降着円盤の放射量と考えることができる。これによって星の成分と降着円盤成分それぞれの変動を見ることができる。



色指数J-Ks:降着円盤成分が優位

図 5.21: CC-D 上での ISE、IREx の見積もりの概略図



🕱 5.28: DKTau

🗵 5.29: HLTau



🗷 5.30: GKTau

🗵 5.31: GITau

星成分と降着円盤成分の変動幅を表 5.3 にまとめた。

Name	ISĒ	$\Delta$ ISE	$\sigma_{ISE}$	IRĒx	$\Delta$ IREx	$\sigma_{IREx}$
AATau	0.56	0.67	0.04	0.28	0.24	0.04
DGTau	2.47	0.29	0.03	0.20	0.46	0.05
RWAur	0.91	0.85	0.03	0.36	0.27	0.03
IQTau	2.46	1.42	0.04	0.28	0.88	0.04
COOri	2.05	0.99	0.03	0.99	0.53	0.03
XZTau	2.61	0.38	0.07	0.15	0.47	0.04
DKTau	1.91	0.93	0.03	0.39	0.23	0.03
HLTau	2.78	0.41	0.08	1.50	0.32	0.04
GKTau	2.25	0.23	0.06	2.31	0.27	0.03
GITau	2.08	0.24	0.05	2.12	0.28	0.03

表 5.3: ISE と IREx の変動幅

# 5.2 考察: 測光

DGTau(図 5.2) は 0.4 等程度の変動をしている。このような微小変動は星表面のコールドスポットによる周期的変動であると考えられる。また他の天体でも 0.2 等程度の光度変化が検出されており、星表面のスポットによる変動は観測天体全てに見ることができた。

ライトカーブの V 等級の変動幅を横軸変動幅、縦軸天体数でプロットした図が図 5.32 である。 図のように  $\Delta Mag < 0.8$ 、 $\Delta mag \le 0.8$  で分けることができる。可視で ~0.8 等以上の変動をして いる天体は中心星が星周物質に遮られ、減光 · 赤化を受けるモデル、または降着円盤の厚さ方向 の成分による食が起こっていると考えられる。変動の少ない時期と周期的な急減光な時期がある AATau、COOri、DKTau、IQTau(図 5.1,5.5,5.7,5.4) は  $\Delta mag \le 0.8$  である。

AATau タイプの減光は光学的に厚い厚さ方向の成分によって星のフラックスが大きく下る。(図 5.33) また降着円盤のケプラー回転によって厚さ方向の成分が観測者に対し星の正面以外にいる場合には食に比べ減光は小さい。

減光の2つのモデルについて SED(Spectral Energy Distribution) は図5.34 のように変化する。左 が中心星の黒体放射と降着円盤の多温度黒体放射の足し合わせであるスペクトルの図。青破線は 食モデルでの星成分、黄緑破線は ISE モデルでの星成分である。右は SED(減光前、ISE による減





光、食による減光(黒、黄緑、青))の変化の図。食では星成分のフラックスが大きく下るため、赤 外領域でも減光が大きい。対して、ISEによる減光では少しの減光と赤化が起こるため、減光し 黒体放射のピ-クが赤い方へシフトする。今回の観測天体の中でIQ Tau、CO Ori、XZTau とい う3天体は同様の減光の少ない時期と赤外でも大きな減光をしていることを発見した。このうち IQTauとDKTauでは、時間分解能が1日であるため、減光の変動幅を正しく求めることが困難で あるが、周期的な減光が見えている。このうち1天体とAA Tauは共に edge-on に近い天体であ るということが分かっている。これらの星を Type1天体とこれから呼ぶ。また DKTau、DOTau という天体は平らな時期と急減光時期があるが、データが少なく食モデルと断定することは難し い。また HLTau、GITau という天体は赤外でも大きな減光が起こっているが、平らな時期が見つ かっていない。この4天体は Type1 候補天体と呼び、前者を Type1b、後者を Type1c と呼ぶ。

- Type1: 食モデル天体。ライトカ ブに変動の少ない平らな時期と赤外でも大きな減光時期 がある。
- Type1b: 食モデル候補天体。ライトカ ブに変動の少ない平らな時期と急減光の時期とが あるが、赤外での減光が小さい。
- Type1c: 食モデル候補天体。赤外でも大きな減光をするが、ライトカ ブに平らな時期や 急減光の時期が見付かっていない。
- Type2 : 星周物質による減光 (ISE) モデル天体:可視で大きな減光、赤外減光は小さい。

たった一例 AA Tau という天体のみ報告されている降着円盤の厚さ方向の成分による食という現 象は T Tauri 型星には普遍的な現象であり、edge-on に近い天体では観測される可能性が高いと考 えられる。





左が中心星の黒体放射と降着円盤の多温度黒体放射の足し合わせであるスペクトルの図。青破線は食モデルでの星成分、黄緑破線はISEモデルでの星成分である。右はSED(減光前、ISEによる減光、食による減光(黒、黄緑、青))の変化の図。食では星成分のフラックスが大きく下るため、赤外領域でも減光が大きい。対して、ISEによる減光では少しの減光と赤化が起こるため、減光し黒体放射のピ-クが赤い方へシフトする。

### 5.2.1 分類ごとの色指数の変動

可視等級に対する色指数 V-J、V-Ks の図 5.35、5.37 では、可視光が暗くなると色指数が赤くな るという相関が全天体に出ている。つまり減光する時、コールドスポットモデルでは星表面にコー ルドスポットが見える時、近似的に中心星表面が低温になったように見える。(図 5.34: ISE によ る減光と同様。しかし、減光量は ISE より小さい。) ホットスポットでは近似的に高温に見える。 また星周物質による減光の場合も赤化により観測結果と同様になる。(図 5.34ISE による減光) ま た食の場合は中心星成分が主に減光する。よって可視領域のフラックスが大きく下る。(図 5.34: 食による減光) これらのモデルで説明が可能である。色指数 V – Ks は可視減光に対する赤外減光 量を表しているので、ISE モデルならば大きく、食モデルの場合には小さくなる。可視等級に対す る色指数 J-Ks の相関図は可視減光によって赤外放射 (主に円盤放射成分) がどう変動するかを示 した図である。

図 5.35: 可視等級に対する色指数 V-J の相関図



図 5.37: 可視等級に対する色指数 V-Ksの相関図

図 5.35、5.37、5.36 では Type1 天体を中央上に、Type1b 天体を左に、Type1c 天体を右に、Type2 を中央下に同時表示している。







図 5.38: 色指数 V-J に対する色指数 J-Ksの相関図

V 等級に対する色指数の変動は一次関数 (y=a\*x+b) で表されると仮定し、フィッティングする とその傾きは全天体で図 5.39 のように分布した。縦軸が天体数、横軸が一次関数の傾きでビンは 誤差の平均値である 0.1 ずつにしている。Type1、1b、1c 天体を各天体色別で示している。残り は Type2 天体である。Type1 天体と同様な色変化をする V1331Cyg、BPTau 等を同じ図に示して





図 5.39: 一次関数の傾きのヒストグラム

Type1 天体は図??,??では傾きが小さい。これは可視減光に対して、赤外減光も比較的大きいというモデルによく合う。図??はType1 天体は傾きが 0.2 より大きく、Type2 天体は-0.1±0.1 ビンではほぼゼロ付近に値が分布している。GITau だけは色指数 J-Ks が変動しない結果が出た。この傾向から HLTau は Type1 天体である可能性が高く、V1331Cyg、BPTau はライトカ-ブからは食が見えていないが、Type1 天体として発見することができた。しかし傾向として似た天体も多く、変動の少ない天体では傾きの誤差も大きくなるため線引きが困難である。

### 5.2.2 SED による議論

食モデルは AATau の周期的で 1.2 等程度と大きく、変動の小さい時期と急減光時期があり、赤 外でも大きな減光を示すというライトカーブの変動を説明付けるために J.Bouvier et al.(1999) に よって提唱されたモデルである。本観測での AA Tau の SED(Spectral Energy Distribution) は図 5.40 左のように変動する。可視の大きな変動に対し、赤外の変動は小さく、傾きがフラットに変 わっている点があるのが特徴である。



図 5.40: AA Tau の SED(左)、AA Tau SED by Bouvier et al. 1999(右)

左:3バンドの観測点から得られる SED の日毎の変動。右:食でない時と食中の SED。波線部は星のフラックス。スペクトル型から求められる。

AA Tau のスペクトル型 K7型のスペクトルの形を保ったまま減光する。つまり星成分はスペク トル型と可視等級から見積もることができ、SED の超過した成分は降着円盤成分であると考えら れる。Type1 天体 AATau、IQTau、COOri、DKTau の最も光度の増光した時の観測と中間、最 も減光している観測での SED を書いた。(図 5.41) 横軸波長 [µm]、縦軸フラックス [ergs/cm<sup>2</sup>/sec] である。観測 SED、星成分、降着円盤成分 (赤、緑、青) である。Av はそれぞれ 0.8,1.25,2.4,0.35 を用いた。(Eisner et al.2003) ライトカ-ブと近赤外の円盤放射成分を同時にプロットした図が図 5.42 である。縦軸がフラックス。横軸は JD-2440000 である。これを見るとライトカ - ブの変動に 対し、円盤放射成分はほとんど変動しないが、ライトカーブと正の相関もしくは反相関をもって いることがわかる。



図 5.41: SED:左上から右に、AATau、COOri、DKTau、IQTau



図 5.42: 降着円盤成分とライトカ - ブの時間変動

GITau はこの SED のモデルに一致しなかった。GITau の色指数は DFTau と同様の変化をして いる。DFTau はホットスポットでの変動であると確認されている天体である。(Grinin et al.1980) 可能性がある。この赤外超過成分の変動を分かりやすく見るために、横軸に超過成分のフラックス、縦軸に V バンドフラックスをとったグラフは図 5.43 である。



図 5.43: Type1 候補天体: V バンドフラックス vs 降着円盤成分のフラックス

これを見るとほぼ星成分である V バンドフラックスに対してしているのに対し、AA Tau や DK Tau は超過成分が変動せず、COOri、IQTau は正の相関を示していることを表している。AATau について考えられているモデルでは星の 50%ほどが降着円盤の厚さ方向の成分によって隠される。 つまり降着円盤放射フラックはほぼ変動せず、星の放射フラックスが大きく変わる。図 5.43 の AATau,DKTau はモデルを支持する結果が得られた。AATau は図 5.42,5.43 から星が減光すると、 降着円盤放射成分が増光するように見える。図 5.43 の COOri、IQTau は星が減光すると、降着円 盤放射も減光する。これは降着円盤の厚さ方向の構造が降着円盤上で中心星からの距離がどれだ け離れているかに依存する結果であると考えられる。





図 5.44 が降着円盤の厚さ方向の構造の描像で、中心星、降着円盤 (近赤外で明るい領域、それ以上の長波長で明るい領域:紫、水色)で示している。AATau や DKTau は変動周期が 8.3、8.4 日
成分の中心星からの距離を求めると、半径の10倍~0.1AU 程度であることが分かった。近赤外放 射領域であり、相関がやや反相関を示していた理由が降着円盤の厚さ方向の構造が星の裏側に回っ た際に逆に隠される現象が起こっていると考えることができる。また IQTau や COORi は変動周 期が30日程度の食であるとすると、半径の約30倍、近赤外放射領域よりも外側に厚さ方向の構 造があり、近赤外放射領域と中心星がその構造に共に隠されるという現象が起こっている可能性 があることが分かった。

### 5.3 分光

分光観測は15天体について行った。うち6天体についてはモニター観測を行っており、光度、 色変化に伴う各輝線とそれらの放射機構の時間変動に対して考察を行った。

各天体と検出できた主な輝線、吸収線の一覧を図 5.4,5.6 にまとめている。輝線が検出されている場合は"√",吸収線の場合には "abs" と記入している。それぞれのスペクトルは付録に載せている。

#### AATau

この天体の各輝線の変動は図 5.45 にまとめている。この天体は AATau 型の天体で傾斜角 67° で edge-on に近い。観測期間中に減光し、1 周期 (8.2<sup>d</sup>) を終え、明るい状態に戻った。

Hα 輝線、NaI、Ca の光球吸収線のフラックスはライトカーブに正の相関を示している。吸収線や Hα 輝線は星表面から出ているものであるため、測光から得られたライトカーブの変動が降着円盤 の食によって起こされたものであることを支持している。AATau からは [OI][SiII] という禁制線が 2008 年1月14日の観測で見えている。この事から微弱ながら星風、円盤風といった質量放出をし ている天体であることを示唆している。



図 5.45: AATau のスペクトル線の時間変動

 $sgn[-1]H\alpha \times V$  band flux×10<sup>13</sup>、 NaI 吸収線×2,Ca 吸収線、  $CO[\Delta \nu=2-0]$  吸収線×2、 V バンドライトカーブ、Ks バンドライトカーブ+3 (赤、黄緑、藍、水色、黒)

Name	UT Date	$H\alpha$	HeI	[OI]	[OI]	Call triplet
		$(6562 \text{\AA})$	$(5875 \text{\AA})$	$(6300 \text{\AA})$	$(7773 \text{\AA})$	$(8499, 8543, 8663 \text{\AA})$
AATau	2008 Jan 4	$\checkmark$	-	-	-	-
	2008Jan $7$	$\checkmark$	-	-	-	-
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 9$	$\checkmark$	-	-	-	-
	2008Jan $12$	$\checkmark$	-	-	-	-
	2008 Jan 14	$\checkmark$	-	-	-	-
BPTau	$2007 \ \mathrm{Dec} \ 5$	$\checkmark$	-	-	-	-
CWTau	2007 Nov 29	$\checkmark$	-	-	-	$\checkmark$
CYTau	2007 Nov 29	$\checkmark$	-	-	-	-
DFTau	2007 Nov 29	$\checkmark$	-	-	-	-
DGTau	2007 Dec 15	$\checkmark$	-	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
	2008Jan $6$	$\checkmark$	$\checkmark$		$\checkmark$	$\checkmark$
	2008Jan $7$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 9$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
	2008 Jan 12	$\checkmark$	-	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
DQTau	2007 Nov 30	$\checkmark$	-	-	-	-
GGTau	2008Jan $7$	$\checkmark$	-	-	$\checkmark$	-
GKTau	2007 Nov 30	$\checkmark$	-	-	$\checkmark$	$\checkmark$
GWOri	2007 Nov 30	$\checkmark$	-	-	-	$\checkmark$
HLTau	2008 Jan 7		-	-	$\checkmark$	$\checkmark$
	2008Jan $12$	$\checkmark$	-	-	$\checkmark$	$\checkmark$
	2008 Jan 14	$\checkmark$	-	$\checkmark$	-	$\checkmark$
IQTau	2008Jan $5$	$\checkmark$	-	-	-	-
	2008Jan $7$	$\checkmark$	-	-	-	-
	2008Jan $12$	$\checkmark$	-	-	-	
RWAur	2007 Dec 15	$\checkmark$	-	-	abs	$\checkmark$
	$2007 \ \mathrm{Dec}\ 29$	$\checkmark$	-	-	$\checkmark$	$\checkmark$
	2008Jan $4$	$\checkmark$	-	-	$\checkmark$	$\checkmark$
	2008Jan $7$	$\checkmark$	-	-	$\checkmark$	$\checkmark$
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 9$	$\checkmark$	-	-	abs	$\checkmark$
	2008 Jan 10	$\checkmark$	-	-	$\checkmark$	$\checkmark$
	2008 Jan 12	$\checkmark$	-	-	-	$\checkmark$
UZTau	2007 Dec 7	$\checkmark$	$\checkmark$	-	_	$\checkmark$

表 5.4: Optical lines(0.4-0.9µm)

Name	UT Date	$H\alpha$	HeI	OI	OI	CaII triplet
		$(6562 \mathring{A})$	$(5875 \mathring{A})$	$(6300 \text{\AA})$	$(7773 \text{\AA})$	$(8499, 8543, 8663 \mathring{A})$
V1331Cyg	$2007 \ \mathrm{Dec} \ 5$	$\checkmark$	-	-	-	$\checkmark$
	$2007 \ \mathrm{Dec} \ 8$	$\checkmark$	-	-	-	
	$2007 \ \mathrm{Dec}\ 26$	$\checkmark$	-	-	-	$\checkmark$
	2008Jan $4$	$\checkmark$	-	-	abs	$\checkmark$
	2008Jan $5$	$\checkmark$	-	$\checkmark$	-	
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 6$	$\checkmark$	-	$\checkmark$	-	$\checkmark$
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 10$	$\checkmark$	-	$\checkmark$	-	$\checkmark$
	2008 Jan 14	$\checkmark$	-	$\checkmark$	-	$\checkmark$
XZTau	$2008~{\rm Jan}~7$	$\checkmark$	-	-	-	$\checkmark$
	2008 Jan 12	$\checkmark$	-	-	-	$\checkmark$
	2008 Jan 14	$\checkmark$	-	$\checkmark$	-	$\checkmark$

表 5.5: Optical lines(0.4-0.9µm):continue

表 5.6: Near infrared lines (1.8-2.5Å)

Name	UT Date	$H_2$	${ m Br}\gamma$	NaI	Ca	$CO[\Delta \nu = 2-0]$
		$(21200 \text{\AA})$	$(21653 \text{\AA})$	$(22047 \text{\AA})$	$(22657 \text{\AA})$	$(22947 \text{\AA})(*1))$
AATau	2008 Jan 4	-	-	-	_	abs
	2008Jan $7$	-	-	abs	abs	abs
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 9$	-	-	abs	abs	abs
	2008 Jan $12$	-	-	-	abs	abs
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 14$	-	-	abs	-	abs
BPTau	$2007 \ \mathrm{Dec} \ 5$	-	$\checkmark$	abs	abs	abs
CWTau	2007 Nov 29	-		abs	-	-
CYTau	2007 Nov 29	-	-	abs	abs	abs
DFTau	2007 Nov 29	-		abs	abs	abs
DGTau	2007 Oct 27	-		abs	abs	-
	$2007 \ \mathrm{Dec} \ 15$	-		-	abs	-
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 6$	-		-	-	-
	2008Jan $7$	-		-	abs	-
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 9$	$\checkmark$		-	abs	abs
	2008Jan $12$	-		abs	abs	abs
DQTau	2007 Nov 30	-	-	-	-	-
GGTau	2008Jan $7$	-		abs	abs	abs
GKTau	2007 Nov 30	-	$\checkmark$	-	-	abs
GWOri	2007 Nov 30	-	-	-	-	-
HLTau	2007 Oct 27	-		-	-	-
	2008Jan $7$	-		-	-	$\checkmark$
	2008 Jan $12$	-		-	-	-
	2008 Jan 14	-			-	-

Name	UT Date	$H_2$	${ m Br}\gamma$	NaI	Ca	$CO[\Delta \nu = 2-0]$
		$(21200 \text{\AA})$	$(21653 \text{\AA})$	$(22047\mathring{A})$	$(22657 \text{\AA})$	$(22947 \mathring{A})(*1))$
IQTau	2008Jan $5$	-	-	-	-	abs
	2008Jan $7$	-	abs	-	abs	abs
	2008Jan $12$	-	abs	-	abs	abs
RWAur	2007 Dec 15	-		-	abs	abs
	$2007 \ \mathrm{Dec}\ 29$	-		-	abs	-
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 4$	-		-	abs	-
	2008Jan $7$	-		-	abs	-
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 9$			-	abs	$\checkmark$
	2008 Jan 10	-		-	abs	abs
	2008Jan $12$	-	$\checkmark$	-	abs	abs
UZTau	$2007 \ \mathrm{Dec}\ 7$	-	$\checkmark$	abs	abs	$\sqrt{+abs?}$
V1331Cyg	$2007 \ \mathrm{Dec} \ 5$	-			-	$\checkmark$
	$2007 \ \mathrm{Dec} \ 8$	-			-	$\checkmark$
	$2007 \ \mathrm{Dec}\ 26$	-			-	$\checkmark$
	2008Jan $4$	-	$\checkmark$	$\checkmark$	-	$\checkmark$
	$2008 {\rm \ Jan\ 5}$				-	$\checkmark$
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 6$				-	$\checkmark$
	2008 Jan 10	-			-	$\checkmark$
	2008 Jan 14	-	$\checkmark$	$\checkmark$	-	$\checkmark$
XZTau	2007 Oct 27	-	-	abs	abs	abs
	2008Jan $7$		-	abs	abs	abs
	$2008 \ \mathrm{Jan} \ 12$	-	-	abs	abs	abs
	2008 Jan 14	-	-	abs	abs	-

表 5.7: Near infrared lines (1.8-2.5Å):continue

(\*1)CO overtune band head

この天体の各輝線の変動は図 5.46,5.47 にまとめている。この天体は XZTau 型であり、傾斜角 58°、回転周期 6.3 日で自転している。激しい物質放出をしていることも特徴である。(Appenzeller et al.2005)

Hα,HeI,CaII triplet という輝線はライトカーブと正の相関を示している。これは光度の時間変動 がホットスポットの降着衝撃波による放射、活発な彩層活動によるもので食によるものでは無いこ とを示している。[SiII][FeII][OI] という禁制線が見えており、活発な星風放出が起こっている。ま た降着物質の放射である H<sub>2</sub>、Brγ 輝線も検出されている。



図 5.46: DGTau の輝線の時間変動

 $sgn[-1]H\alpha \times V$  band flux×10<sup>13</sup>、 $sgn[-1]Br\gamma \times Ks$  band flux×10<sup>2</sup>、  $sgn[-1][OI] \times V$  band flux×10、 $sgn[-1][OI](7773Å) \times V$  band flux、  $sign[-1]HeI \times V$  band flux×10、V バンドライトカーブ、Ks バンドライトカーブ+6 (赤、黄緑、藍、ピンク、水色、水色、黒)





sgn[-1]CaII 三重線 ×V band flux×3×10<sup>2</sup>、NaI 吸収線×6、 Ca 吸収線×5、CO[ $\Delta \nu$ =2-0] 吸収線、V バンドライトカーブ、Ks バンドライトカーブ (赤、黄緑、藍、ピンク、水色、黒)



図 5.48: HLTau のスペクトル線の時間変動

この天体の各輝線の変動は図 5.48 にまとめている。この天体は XZTau 型であり、ほとんど edge-on である。 $H\alpha$ ,CaII triplet,Br $\gamma$  輝線がライトカーブと正の相関を示している。

#### RWAur

この天体の各輝線の変動は図??,5.50 にまとめている。この天体は RWAur 型であり、傾斜角 32° で face-on に近い。3 重星であり、物質降着の際に伴星に

 $H\alpha$ ,CaII triplet,Br $\gamma$  輝線、[OI] 輝線が可視光のライトカーブと正の相関をしており、Br $\gamma$  の等価幅が-0.8~-12(Å) の変動がある。物質降着の変動が激しい特異な天体である。また Br $\gamma$  輝線のフラックスが 1/10 以下に落ちた時に CO[ $\Delta \nu$ =2-0] の輝線を出していた。物質降着と CO 分子輝線が相関をもつことを示唆していると考えられる。



図 5.49: RWAur のスペクトル線の時間変動 (a)

sgn[-1]H $\alpha$ ×V band flux,sgn[-1]CaII triplet×V band flux、sgn[-1][OI]×V band flux、sgn[-1]Br $\gamma$ ×Ks band flux×10、V バンドライトカーブ、Ks バンドライトカーブ (赤、黄緑、藍、ピンク、水色、黒)



図 5.50: RWAur のスペクトル線の時間変動 (b)

(右)Ca吸収線、CO[△=2-0]吸収線、[OI]吸収線、Vバンドライトカーブ、Ksバンドライトカーブ
 (赤、黄緑、藍、水色、黒)

V1331Cyg

この天体の各輝線の変動は図 5.51 にまとめている。この天体は AATau 型であり、edge-on に近い。ETTS であり、物質降着が盛んな天体である。

 $H\alpha$ ,CaII triplet,Br $\gamma$  輝線、[OI] 輝線、 $CO[\Delta \nu = 2-0]$  の輝線、NaI 輝線が検出できた。 $H\alpha$ ,CaII triplet はライトカーブと正の相関をしており、NaI は円盤風の輝線であるが、これは逆相関をしている。 つまり、円盤風が光学的に厚くなるか、無くなってしまうと中心星周囲の輝線のフラックスが大 きく検出される傾向にある。また  $Br\gamma$ ,CO $[\Delta \nu = 2-0]$  輝線はほとんど相関なく変動している。降着 率と輝線のフラックスの関係があると考えることもできる。



図 5.51: V1331Cygniのスペクトル線の時間変動

 $sgn[-1]H\alpha \times V$  band flux、 $sgn[-1]CaII = 重線 \times V$  band flux、  $sgn[-1]Br\gamma \times Ks$  band flux、sgn[-1]NaI 輝線 ×Ks band flux×10、  $sgn[-1]CO[\Delta\nu=2-0]$  輝線 ×Ks band flux、 $sgn[-1][OI] \times V$  band flux×10、 V バンドライトカープ、Ks バンドライトカープ+2.5 (赤、黄緑、藍、水色、橙、水色、黒) この天体の各輝線の変動は図 5.52 にまとめている。この天体は XZTau 型であり、edge-on に近 い。この天体は 2008 年 1 月 8 日頃に増光状態から 1 等の急減光をした。その時期に合わせて分光 観測を行うことができた。この天体は H $\alpha$ ,CaII triplet 輝線と、NaI、Ca、CO[ $\Delta \nu$ =2-0] の光球吸 収線が検出されている。そして、他の天体同様に 2 本の輝線はライトカーブと比例関係にあり、吸 収線は反比例する。これは輝線に降着円盤の連続成分が暗くなり全体のフラックスが小さくなる ことで、本来の中心星の輝線幅に近付くことが原因、または最も減光している時に水素分子輝線 を出していることから、大規模な物質放出が急に起こり、中心星を隠してしまったのではないか と考えることができる。



図 5.52: XZTau のスペクトル線の時間変動

私は今回「かなた」望遠鏡 TRISPEC 観測装置を用いて、T Tauri 型星 34 天体について可視・ 近赤外同時測光観測と、20天体について分光観測を行った。測光観測において降着円盤からの放 射に着目し、変動のスケールにより天体を食モデル候補天体とそれ以外に分類した。食モデル候 補天体の特徴はライトカーブが平らで変動が少ない時期があり、急減光、概ね赤外でも大きな減 光をする変動が周期的に繰り返される。そのような天体を今回新たに3天体と候補天体4天体を 発見した。このうち2天体は edge-on に近い天体であり、edge-on に近ければT Tauri 型星ではこ の食現象は普遍的に起こっている可能性が高いことが分かった。星成分と降着円盤成分を分離し、 降着円盤放射の変動からその厚さ方向の構造の位置を推定することで中心星に厚さ方向の構造が 逆に隠される現象や、半径の30倍以上の距離に厚さ方向の構造がある可能性の高い天体の存在を 発見した。降着円盤また中心星の放射が有意な色指数 V – J と降着円盤からの放射が有意な色指 数 J-Ks にの相関を調べた。可視・近赤外同時で色指数について複数の天体について検証した例は これまでない。色指数 V-Jと V バンドの等級は暗くなると、赤くなると言う相関があるが、星周 物質による減光・が起こっている天体と食モデル候補天体を色指数から分離することはできなかっ た。また分光の解析ではほとんどの天体で  $H\alpha$  輝線、Call 三重輝線、[OI], [SiII] のような禁制線、 Brγ 輝線が見付かった。それぞれが物質降着や中心星の彩層活動、星風など T Tauri 型星では全 般的にダイナミックな物質降着の機構があることが発見できた。またライトカーブとホットスポッ トや彩層活動、円盤風など中心星近傍のダイナミックな物理機構が正の相関があった。これはラ イトカーブの変動は中心星の活動起源が中心ではなく、降着円盤に付随する成分による食による 寄与が大きいことを示している。

## 付録A 分光スペクトルデータ

天体毎のスペクトル。左が近赤外 Ks バンド (2.1–2.32 $\mu$ m)。右が可視 V バンド (0.5–0.9 $\mu$ m) である。









### 付 録 B 測光解析デ - タ

各天体の測光観測の結果を載せる。それぞれ (a) ライトカーブ。縦軸等級、横軸 JD-240000[day] で ある。比較星の表示幅は天体と同じ。(V、J、Ks、比較星 V、J、Ks[black,red,green,blue,pink,light blue])(b) 色指数の時間変動。縦軸等級、横軸 JD-240000[day] である。(V-J、J-Ks、比較星 V-J、 J-Ks[black,red,green,blue])。(c) 可視等級に対する色指数の変動。縦軸 V 等級、左から色指数 V-J、 V-Ks、J-Ks である。(d) 近赤外 Ks 等級に対する色指数の変動。縦軸 Ks 等級、左から色指数 V-J、 V-Ks、J-Ks である。(e) 色指数 V-J に対する色指数 J-Ks の図。Color-Color diagram(CCD) と呼 ぶ。天体、比較星 [black,red] で表示している。(f) V 等級に対する Ks 等級。天体、比較星 [black,red] で表示している。

Data:AA Tau







🗷 B.2: a



🗷 B.8: a



🗷 B.14: a



🗷 B.20: a



🗷 B.26: a



🗷 B.32: a



🗷 B.38: a





🗷 B.44: a





図 B.50: a



🗷 B.56: a



🕱 B.62: a



⊠ B.68: a



⊠ B.74: a





🗷 B.80: a



🗷 B.86: a





🕱 B.92: a



🗷 B.98: a



🗷 B.104: a



🗷 B.110: a



🗷 B.116: a



🗷 B.122: a

# 付 録 C カラーカラー図を用いた星間減光の見 積り

この付録3にはスペクトル型が決まっている天体のライトカーブ、色指数の変動、そして星の星 間吸収量、降着円盤による赤外超過成分量を描いている。比較星の光度変化による誤差はそれぞ れの誤差に含んでいる。




🗷 C.2: DOTau



🗷 C.10: V440Ori



🗷 C.18: HIOri

まず初めに本論文を書くあたり、私事や杜撰な体調管理で常に切迫した状況を作り、指導教官 の山下先生、大杉先生、深澤先生、川端先生、植村先生、PDのひろたかさん、同研究室のみなさ ま、特に天文台にて観測補助、代行などをしていただいた新井さん、笹田くん、同期の M2のみ なさまには御迷惑と心配をおかけしたことをお詫び申し上げます。またみなさまのサポートに対 し、心からお礼を申し上げます。

今回過密なスケジュールで研究を押し進め、拙い技術で暗中模索している私に、一から研究指導 し、深夜の観測や、急な相談に多々つき合っていただいた山下先生、川端先生に深くお礼を申し上 げます。大杉先生、深澤先生、ひろたかさんには研究面、生活面において多くのアドバイス、御指 摘をいただきました。そして、植村先生、新井さん、笹田くん、宮本くんには観測所への送り迎 え、忙しい観測所での生活面、私の観測への多くの配慮等、東広島天文台での生活の多くを助け ていただきました。同期の山崎くん、竹本くん、田中くん、白井くん、そして中本くんとは忙し い時間の中で支えあい、お互いを啓発しあい、とても大事な時間を共に過ごすことができました。 みなさんと同じ学年、同じ研究室でよかったと心から思っています。M1、4年生のみなさまには 差し入れや、息抜きなど研究室の中をとても明るく、居心地の良い、頑張れる場所にしていただ きました。みなさま本当にありがとうございました。ありがとうございます。最後に、どん なに苦しい状況でもくじけることなく、前向きに頑張ることができたのは両親の支えがあったか らだと思います。軽率で無鉄砲な私を温かく見守り、後押ししていだたき本当に感謝しています。

74

## 参考文献

- [1] Shu,1987,AnnRevA&Ap,25,23-81
- [2] V.P.Grinin,2000ASPC..219..216G
- [3] Cohen et al.1984PhR...116...173C
- [4] Koornneef et al.AA,128,84-93,1983
- [5] 渡邊 誠 修士論文 (名古屋大学) 2003
- [6] 永江 修 修士論文 (広島大学) 2005
- [7] 千代延 真吾 修士論文 (広島大学) 2005
- [8] 今西昌俊、IRCS グリズム分光データ解析ガイド (第一版)(国立天文台, 光赤外研究部)、2007
- [9] Dejan et al., ApJ, 658, 462-479, 2007
- [10] Lucas et al., ApJ, 635, 422-441, 2005
- [11] T.P.Ray,IAU,243.2007
- [12] T.P.Ray and R.Mundt, RevMexAA, 13, 83-89, 2002
- [13] P.P.Petrov, A&A, 369, 993-1008, 2001
- [14] E.Gullbring et al.AAp,287,131-144,1994
- [15] M.Fernandez, Protostars and Planets V 2005
- [16] John R.Percy, Wojciech K.Gryc, and Janice C-Y.Wong, AsP, 118, 1390-1395, 2006
- [17] Thomas P.Greene, Charles J.Lada, AnJ, 114, 5, 1997
- [18] Ryuichi Kurosawa, Tim J.Harris and Neil H.Symington, MNRAS, 370, 580-596, 2006
- [19] R.Schulte-Ladbeck, AAp, 120, 203-214, 1983
- [20] J.Bouvier, A Chelli, S.Allain, L.Carrasco, I.Cruz-Gonzalez, C.Dougados, M.Fernández, E.L.Marín, F.Ménard, C.Mennessier, R.Mujica, E.Recillas, L.Salas, G.Schmidt, and R.Wichmann, AAp, 349, 619-635, 1999
- [21] Suzan Edwards, Stephen E. Strom, Patrick Hartigan, Karen M. Strom, and Lynne A. Hillenbrand, AnJ, 106, 1
- [22] Tania A. López-Chico and Luis Salas, RMxAA, 43, 155-171
- [23] Ana M.Biscaya, G.H.Rieke, Gopal NArayanan, K.L.Luhman and E.T.Young, ApJ, 491, 359-365, 1997
- [24] Tracy L.Beck, G.H.Schaefer, M.Simon, L.Prato, J.A.Stoesz, and R.R.Howell, ApJ, 614, 235-251, 2004

- [26] Nuria Calvet, Alberto Patiño, Gladis Magris C, and Paola D'Alessio, ApJ, 380, 617-630, 1991
- [27] James Muzerolle, Nuria Calvet, Lee Hartmann, and Paola D'Alessio, ApJ, 597, L149-L152, 2003
- [28] C.Bertout and F.Genova, A&A, 460, 499-518, 2006
- [29] Stuart McMuldroch, Anneila I.Sargent, Geoffrey A.Blake, AnJ, 106, 6
- [30] Tae-Soo Pyo,Naoto Kobayashi,Masahiko Hayashi,Hiroshi Terada, Miwa Goto,Hideki Takami,Naruhisa Takato,Wolfgang Gaessler.Tomonori Usuda, and Takuya yamashita,Alan T.Tokunaga,Yutaka hayano,Yokiko Kamata, and Masanori Iye and Yusuke Minowa,ApJ,599,340-347,2003
- [31] John S.Carr, Robert D.Mathieu, and Joan R.Najita, ApJ, 551, 454-460, 2001
- [32] John S.Carr, ApJ, 345, 522-535, 1989
- [33] T.R.Geballe and S.E.Persson, ApJ, 312, 297-302, 1987
- [34] Kenneth A.Marsh and Michael J.Mahoney, ApJ, 395, L115-L118, 1992
- [35] C.J.Chandler, J.E.Carlstrom, and N.Z.Scoville, 446, 793-800, 1995
- [36] A.Lenorzer, A.Bik, A.de Koter, S.E.Kurtz, L.B.F.M.Waters, L.Kaper, C.E.Jones, and T.R.Geballe, A&A, 414, 245-259, 2004
- [37] S.H.P.Alencar, G.Basri, L.Hartmann, and N.Calvet, A&A, 440, 595-608, 2005
- [38] W.R.F.Dent and T.R.Gaballe, ApJ, 412, L71-L74, 1993
- [39] Terrence Rettig, Sean Brittain, Theodore Simon, Erika Gibb, Dinshaw S.Balsara, David A.Tilley, and Crang Kulesa, ApJ, 646, 342-350, 2006
- [40] Joan Najita, John Carr, Alfred E.Glassgold, Frank H.Shu, and Alan T.Tokunaga, ApJ, 462, 919-936, 1996
- [41] Yoshimi Kitamura, Rhohei Kawabe, and Masao Saito, ApJ, 457, 277-286, 1996
- [42] Silvia H.P.Alencar, Christopher M.Johns-Krull, and Gibor Basri, ApJ, 122, 3335-3360, 2001
- [43] Frederic V.Hessman and Eike W.Guenther, AApys, 321, 497-512, 1997
- [44] Martin Cohen, Mon, Not. R. astr. Soc, 173, 279-293, 1975
- [45] Steven V.W.Beckwith, and Anneila I.Sargent, ApJ, 402, 280-291, 1993
- [46] N.Kobayashi and M.Tamura, ASP, 97, 1996
- [47] Sean D.Brittain, Terrence W.Retig, Theodore Simon, and Craig Kulesa, ApJ, 626, 283-291, 2005
- [48] http://www.jach.hawaii.edu/UKIRT/
- [49] Appenzeller, C.Bertour, and O.Stahl, A&A, 434, 1005-1019, 2005