

# 輝線星研究の最近の動向

## 6. 晩期型前主系列星 (T Tau 型星)



小 暮 智 一

〈〒614-8322 京都府八幡市橋本狩尾 1-10〉

e-mail: tkogure@pa2.so-net.ne.jp

おうし座 T 型星 (T Tau 型星, TTS) は晩期の前主系列星として赤外線星から主系列星への進化の途上にある星である。通常, TTS は古典的 (CTTS) から弱輝線 (WTTS) へ進化すると考えられているが, 最近, この進化過程に異論も出されている。TTS は顕著な X 線放射を示すが放射源についてコロナか降着流か, あるいは複合的か, 多様性も検討されている。プロトタイプの T Tau 星は赤外伴星を含む三重星で, 最近赤外伴星 (T Tau Sa, b) の色および明るさの変動が話題となっている。同じく CTTS で恒星風, 降着流に活動的な振舞いを示す TW Hya では巨大惑星が検出され, 円盤構造との関係が注目されている。FU Ori 型星 (FUor) は大幅な増光と緩やかな減光を示す星で, 前主系列星として CTTS の早期段階にあるとするのが通説であるが, これに対する反論も出され TTS から主系列星への進化過程の再検討も話題になっている。最後に星と降着円盤の進化に大きな影響を与える角運動量と磁場の形成について少し触れてみたい。

### 1. 分光特性から

#### (1) 古典的 TTS (CTTS) は弱輝線 TTS (WTTS) より若いか?

T Tauri 型星 (TTS) は G 型晩期から M 型にかけて分布する前主系列段階にある低質量星 ( $0.5\text{--}2.0 M_{\odot}$ ) であるが  $H\alpha$  輝線等価幅によって, CTTS (Classical) と WTTS (Weak-lined) の二つに分類されている。通常, CTTS は  $H\alpha$  線の等価幅は  $10 \text{ \AA}$  以上, WTTS はそれ以下と分類されているがこの境界の等価幅は分光型にも依存し, K 型の  $10 \text{ \AA}$  以下から M 型の  $10 \text{ \AA}$  以上と晩期ほど多少大きくなる傾向がある。TTS の  $H\alpha$  輝線は降着円盤の恒星近くの電離圏で形成され, 輝線強度の違いは降着円盤の発達具合によると考えられている。赤外線星から誕生した若い星は CTTS として現れ, 降着率が高く, 強い  $H\alpha$  輝線を示すが, 進化とともに降着率も下がって  $H\alpha$  輝線強度

を減少させながら WTTS を経て主系列星に移るとするのが伝統的な見方である。

前主系列の若い天体 (YSO: young stellar object) は通常, 赤外域エネルギースペクトル (SED) によってクラス I, II, III と分けられている。クラス I の SED は波長とともに増加傾向にあり, まだ赤外線星の段階にあると考えられている。クラス II はエネルギー曲線が平坦または緩やかに減少する, クラス III は全体として赤外超過が低い。Furlan ら<sup>1)</sup>は Spitzer 赤外衛星によっておうし座星形成域中のクラス II, III の星について分光観測 (波長  $5\text{--}36 \mu\text{m}$ ) を行った。クラス II 星の赤外超過は降着円盤起源であると見なされ, 観測された 85 個の中には 4 個の WTTS と 6 個の (C+W) 連星も含んでいるが, その大部分は CTTS である。また, クラス III は赤外超過が少なく, 円盤あるいはダスト域の消滅を示す。WTTS はすべてこのクラスに含まれている。この観測結

果は TTS の進化とともに降着流の減衰, 星の磁気圏活動の活発化と関係のあることを示し, CTTS から WTTS へ進化したとする従来の考え方を支持している.

一方, Gras-Velázquez and Ray<sup>2)</sup> は ISO 衛星 (Infrared Space Observatory) によってへびつかい座 (Oph), へび座 (Ser) などの星形成域から 12 個の WTTS, 6 個の CTTS を選んで赤外観測 (波長 4.8–100  $\mu\text{m}$ ) を行い, 赤外超過量を測定して, H $\alpha$  線等価幅と比べた. その結果, Classical, Weak どちらの TTS も顕著な赤外超過を示し, H $\alpha$  線強度との間には有意な相関は認められなかった. WTTS の半数は赤外超過量から円盤の存在が推測されて, その中には年齢 3 Myr 程度の若い星も含まれている. この結果から H $\alpha$  輝線強度による CTTS と WTTS の分類には進化的な意味はないと Gras-Velázquez らは主張し, 明らかに Furlan らの結論と異なっている. この結果について Gras-Velázquez らも多少の戸惑いを見せている. 彼らは一つの可能性として CTTS と WTTS は同じ時期に生まれ, 条件の違いによって進化に遅速があったのではないかなど推測している. しかし, 同じ中間赤外域で ISO 衛星と Spitzer 衛星の観測結果になぜこのような違いが現れたのであろうか. TTS の進化過程にはまだ多くの問題が残されている.

## (2) X 線放射源はコロナか降着流かジェット流か

TTS からの X 線放射は 1981 年に Einstein 衛星によって発見されて以来, 太陽と同じようなコロナからの放射であろうと考えられていた. しかし, 太陽に比べると X 線光度は  $10^3$  倍程度, プラズマ温度も数倍以上と高い. このため太陽や主系列星のコロナとは異なった起源が予想されていたが, これまでの X 線衛星では角分解能や波長分解能の不足などからコロナの構造の解明まで進んでいなかった. 2000 年代になって XMM-Newton や Chandra 衛星などによって X 線観測は高分

散, 高解像度によって新しい時代を迎えた. オリオン星形成領域に対する COUP (Chandra Orion Ultradeep Project) (Preibisch ら<sup>3)</sup>) やおうし座分子雲に対する XEST (XMM-Newton Extended Survey of the Taurus Molecular Cloud) (Güdel ら<sup>4)</sup>, Telleschi ら<sup>5)</sup>) などの大きなプロジェクトも動き始めている. それによってコロナ起源のほか降着流や恒星風起源も分解されるようになり, X 線放射域の構造に新しい論争が始まっている.

Preibisch ら<sup>3)</sup> の COUP 観測は TTS の X 線放射が基本的にはコロナ起源であることを示している. COUP は 1 秒角の分解能をもち, エネルギー範囲 0.5–8 keV でオリオン中心星団 (Orion Nebula Cluster) に約 600 個の TTS を検出した. これらの TTS について近傍の晩期主系列星 (MS 星) と比較すると, X 線光度 ( $L_x \text{ erg s}^{-1}$ ) は MS, TTS ともに星の質量とともに増加するが, MS 星の  $L_x \sim 10^{26}$ – $10^{28}$  に対し TTS では  $L_x \sim 10^{29}$ – $10^{31}$  と著しく大きい. X 線源のプラズマ温度も主系列星の 1–10 MK に対し, TTS は 8–50 MK とやはり著しく高い値を示す. また, TTS の X 線スペクトルは一般に高温と低温の 2 成分で近似できるが, 高温成分は  $T=10$ –50 MK, 低温成分は  $T=8$ –10 MK に集中する. 高温成分の温度は X 線強度とともに上昇する傾向にある. これについて Preibisch らは, 低温成分は主系列星と類似のコロナ起源のプラズマを表し, 高温成分は大規模なフレア活動によると推測している.

Telleschi ら<sup>5)</sup> はおうし座分子雲に対する XEST を用いて CTTS と WTTS の X 線光度の比較を行い, WTTS は CTTS より 2 倍ほど大きい光度をもつという従来の観測を裏づけているが, どちらも X 線強度が星の質量および全放射光度と良い相関にあることを示し, X 線放射がコロナ起源であることを裏づけている. また, Güdel ら<sup>4)</sup> は XEST サーベイから CTTS (88 星), WTTS (73 星) について X 線光度, プラズマ温度および星の基礎量をカタログにまとめ, HR 図上における分布を導

いている。ここで印象的なのはこの HR 図上で CTTS と WTTS の分布に相違が見られない点である。これは上述した Gras-Velázquez ら<sup>2)</sup>の赤外超過では CTTS と WTTS には区別がないという観測と符合するところがあり、CTTS から WTTS へという従来の進化論とは異なった一面を示しているように思われる。

Telleschi ら<sup>6)</sup>はまた、XEST サーベイの中から選ばれた TTS (CTTS 4 星, WTTS 4 星) に対し XMM-Newton 衛星による高分散分光 (エネルギー範囲 0.2–10 keV) を行っている。この X 線域には O(VII, VIII), Fe(XVII, XXV), Ne(X), Mg (XIII, XIV) など多数の金属輝線が現れており、これらは X 線源の比較的低温度領域で形成されると考えられている。Telleschi らはこれらの輝線を用いて降着星 (CTTS) と非降着星 (WTTS) の比較、および化学組成の相違などを考察している。OVII の三重線 ( $\lambda\lambda 21.6, 21.8, 22.1 \text{ \AA}$ ) と OVIII の共鳴線 ( $\lambda 18.97 \text{ \AA}$ ) の光度比  $L(\text{OVII})/L(\text{OVIII})$  から電子温度を導くと降着星は低温 (2.5–3 MK), 非降着星は高温 (3–5 MK) と導かれるが、彼らは降着星のソフト成分は電離度の低い降着流起源と見なしている。一方、化学組成では G 型星が Fe リッチに対し、K-M 型星では Ne リッチであるなど、降着星か、非降着星かよりも分光型に依存することを示した。Telleschi らは TTS の進化までは触れていないが、降着星と非降着星で降着流に差があるという従来の説に従う結果を導いている。

降着流起源の X 線について、Kastner ら<sup>7)</sup>は活動的な CTTS の TW Hydrae (後述) を例にして Chandra 衛星の高分散分光を行っている。この星は Telleschi らの観測と同様に 1.2 keV ( $\sim 10 \text{ \AA}$ ) 以下の波長帯に多数の金属輝線を示している。これらの輝線は主系列星のコロナと多少異なった組成比を示すが、ほぼコロナ起源と見なされる。他方、X 線強度はプラズマ温度 3 MK 付近に鋭いピークを示し、主系列星の 2–20 MK にかけての

緩やかなエネルギー分布と対照的である。Kastner らはこのピーク温度が H $\alpha$  輝線幅から推測される自由落下速度 150–300 km s<sup>-1</sup> のガスによる断熱衝撃波の温度と同程度であることから、この X 線は降着流が星表面に落下するときに放射されたものと考えている。また、X 線域の輝線強度比などから推定される体積充満率がコロナ起源に比較して極度に小さいことから X 線放射域は降着流が星に衝突する「ホットスポット」ではないかとも示唆している。

また、TTS には星の極軸方向に流出するジェット流を X 線源とする星も存在する。Güdel ら<sup>8)</sup>は Chandra 衛星による分光撮像観測によって活動的な CTTS の DG Tau (K5 型) に顕著な X 線ジェットの存在を検出した。ジェットは東北と南西の両側に 5 秒角ほど伸びており、プラズマ温度 3.4 MK, X 線光度 10<sup>28</sup> erg s<sup>-1</sup> を示している。X 線はジェット中心部のほかジェット基底部、観測者と反対側のジェット起源も分解されている。一方、星本体の X 線は硬軟 2 成分に分解されるが、軟成分はコロナ起源、硬成分はコロナのフレア活動に起因すると彼らは推測している。

## 2. 代表的な TTS: T Tau 星と TW Hya 星

### 2.1 T Tau 星系

T Tau 星 (K7V) は 1852 年に J. R. Hind によって発見された不規則変光星で付近に Hind 変光星雲と呼ばれる反射星雲を伴っている。変光には数年規模の比較的小規模の変動と、数日から数カ月規模の短期的変動がある。Ismailov ら<sup>9)</sup>は Shamakha 天文台における低分散分光観測 (1971–1979) の資料を解析し、H $\beta$  輝線等価幅は星が明るいときには 2–5 倍ほど大きくなる傾向を指摘した。また、星が明るい期間には等価幅が数時間規模で増加することもあり、この突発的な輝線増幅は円盤からの降着流が星表面に衝突する際のホットスポットに起因するのではないかと示唆している。

1982年になってこの星の南側に赤外線星が発見され、T Tau 本体を T Tau N, 赤外線星を T Tau S と呼ぶようになった。最近では T Tau S に赤外観測が進んでいるのでその話題を取り上げてみよう。

T Tau S はさらに二つの星からなり、明るいほうを T Tau Sa, 暗いほうを Sb と呼んでいる。この2星は連星系で Johnston ら<sup>10)</sup>の電波観測によるとその軌道と星の質量は次のとおりである。

軌道長半径 88 ミリ秒角 (mas) ( $a=18.8$  AU),

軌道周期  $P=31.5$  年,

離心率  $e=0.59$ , 軌道傾斜角  $i=32^\circ$ ,

質量  $M_*(Sa)=3.2 M_\odot$ ,  $M_*(Sb)=0.7 M_\odot$

T Tau 星系の赤外線像を図1に示そう。これは Duchêne ら<sup>11)</sup>によって Keck II 望遠鏡で撮影された図である。図の左は2002年12月、右は2003年12月の撮影で各パネルは異なった赤外バンドで撮影された。この図では Tau Sa と Sb の明るさの違いが注目される。Sa 星は2002年12月には Sb 星より著しく赤く、2003年12月には H バンドで検出されていない。Mayama ら<sup>12)</sup>はすばる望遠鏡

の近赤外コロナグラフ (CIAO) によって周辺のダスト領域の撮像を行うとともに、Duchêne らの資料を加えて K バンドにおける光度曲線 (1998–2005) を示している。それによると2001年以前は Tau Sa 星が Sb 星より2等級ほど明るかったのに対し、2002年以降は Sa 星が大きく減光し、明るさの逆転が生じている。

Duchêne ら<sup>11)</sup>の赤外域分光によると水素輝線 ( $P\alpha$ ,  $Br\gamma$ ) は T Tau Sa, Sb とともにシングルピークではほぼ対称的な輪郭を示す。幅広いのが特徴的で裾野の幅は  $300\text{--}500 \text{ km s}^{-1}$  に達する。シングルピークは CTTS に一般的に見られる輪郭で、水素輝線は水素ガスの星表面への降着流で形成されると見なされている。V バンドの減光量がわかると  $Br\gamma$  線光度と K バンド強度から降着率が推算できるので、Sb 星では減光量15等級として降着率  $9.2 \times 10^{-8} \text{ Myr}^{-1}$  が得られている。Sa 星では減光量が不明で降着率は求められていないが、Sb とほぼ同程度と推定された。

また、Duchêne らの CO 吸収線の解析によると T Tau Sa の円盤は横から見る “edge-on” タイプ

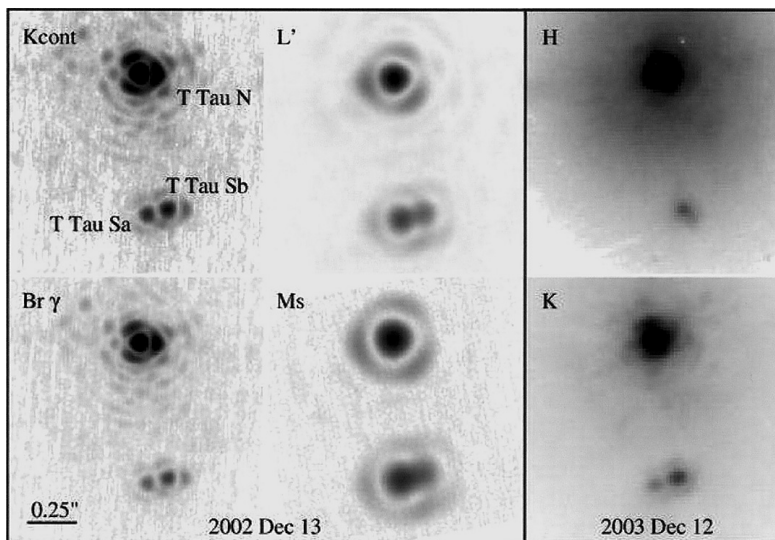


図1 T Tau 星全域の赤外線像。T Tau Sa は赤化が著しく Sb に比較して L, M バンドで明るい H バンドでは検出されていない。0.25 秒角は約 53 AU。(上が北、左が東) (Duchêne ら<sup>11)</sup>より転載)

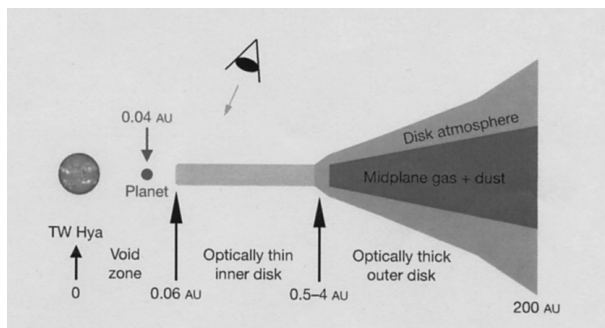


図2 TW Hya に検出された惑星と円盤模式図. 星の近傍は空隙帯で惑星が存在し、中間帯は光学的に薄い内部円盤、その外側に光学的に厚い外部円盤が広がる。(Setiawan<sup>14</sup>)より転載)

であり、その半径は 2-3 AU まで広がっている。この半径は Sb 星の近星点距離に近いことから Sa 円盤は Sb 星によって外縁が切り取られたと推測している。また、Sa 星は 1999 年に K バンドで T Tau N 星に 0.5 等級差まで明るくなったことから、減光量の大きさを考えると、Sa 星はこの時期におうし座星形成領域でも最も明るい Herbig Be 星 AB Aur に次ぐ明るさで輝いていたと想定している。

T Tau 星に対し Herbst ら<sup>13</sup>)は ESO (Paranal) の 8.2 m VLT 望遠鏡による近赤外域 (J, H, Ks) の高解像度撮像、分光観測を行い、3 星 (T Tau N, Sa, Sb) すべてに水素分子 (2 $\mu\text{m}$  帯) による円弧状に広がる顕著な流出構造を検出している。そのなかには線中心に対し 900 km s<sup>-1</sup> の高速流出を示すものあり、円弧の尖端は Herbig-Haro 天体に見られるような頭部衝撃波となっている。これらのジェット状流出は Herbig Ae/Be 星を含めた前主系列星に広く見られ、磁場と結びついた活動性のあらわれと見なされている。

## 2.2 TW Hya

### (1) 前主系列星に巨大惑星を検出

うみへび座 TW 星 (TW Hya, K7V) は太陽に最も近い CTTS (距離 56 pc) としてよく観測された星の一つで、年齢は 8-10 Myr と見積もられている。この若い星に Setiawan ら<sup>14</sup>)は巨大惑星を発

見した。惑星は木星の 9.8 倍の質量をもち、星から 0.04 AU の距離を周期 3.56 日で公転している。惑星付近ではすでにダストは晴れ上がっているが、外側には発達した円盤が広がっている。Setiawan らの描いた模式図を図 2 に示そう。

これまでの惑星探査は安定した太陽型の星に集中している。若い星は活動性が高く、精密な視線速度の測定に困難が伴っていたためである。Setiawan らは ESO 2.2 m 望遠鏡 (La Silla) でこの星の観測に取り組み振幅 200 m s<sup>-1</sup> の速度曲線を得た。この惑星は年齢 100 Myr より若い星としては初めての検出であり、惑星が前主系列の 10 Myr 以下の初期段階ですでに形成を終えていることを示す貴重な例となった。

### (2) 恒星風と質量放出率

TW Hya は顕著な恒星風と降着円盤を示す星として知られている。自転軸傾斜は 10° 程度と小さいが、星周辺の 3 次元構造を観測するにはまづまづの角度である。

発達した恒星風の存在は P Cyg 型の線輪郭が示している。Dupree ら<sup>15</sup>)は Keck 10 m 望遠鏡による近赤外線 He I  $\lambda$ 10830 Å と FUSE 紫外衛星による紫外線  $\lambda$  CIII 977 Å, OVI  $\lambda$ 1032 Å などの P Cyg 輪郭を球対称加速的星風で形成されるとし、Sobolev 脱出確率法によるモデル計算を行って高速 ( $V_{\infty} \sim 400$  km s<sup>-1</sup>), 高温 ( $T \sim 30$  万度) と

いう結果を導いている。このモデルによると質量放出率は  $10^{-11} \sim 10^{-12} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  程度と CTTS としては意外に小さい値である。Dupree ら<sup>16)</sup>は続いて Magellan 8.2 m 望遠鏡によって  $H\alpha$ , He I  $\lambda 10830 \text{ \AA}$  線の分光観測を行った。  $H\alpha$  線はダブルピークの輝線で青側のピークに周期 2.8 日の視線速度と輝線強度の変動が見られ、彼らはそれを自転周期と見なしている。これらの 2 線について NLTE (非局所熱力学的平衡) 解析を行い、光球、彩層、コロナをつなぐモデル計算から、温度、ガス密度、流出速度の動径変化を導いている。その結果、恒星風の最終速度は  $450 \text{ km s}^{-1}$  と紫外域輝線解析の結果に近いが、質量放出率は  $5 \times 10^{-10} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  と大きな値になる。これは TTS としては平均的な放出率である。Dupree らの二つのモデルを比較すると P Cyg 型輪郭の解析もモデルに大きく依存することを示しており、解析法の検討も課題として残っている。

Dupree らは恒星風の平均ガス温度として 30 万度という高温の結果を導いているが、これには強い反論があり、Johns-Krull ら<sup>17)</sup>は HST 紫外スペクトルに現れた低励起の CII, H2 ( $\lambda 1547 \text{ \AA}$ ) 線の解析から恒星風の温度は 10 万度を超えず、おそらく 1-3 万度程度であろうと示唆している。

### (3) 降着流と降着円盤

TW Hya の円盤構造は赤外観測から導かれる。Ratzka ら<sup>18)</sup>は Spitzer 衛星による赤外分光 ( $10 \mu\text{m}$  バンド) によって水素輝線 (遷移  $6 \rightarrow 5, 7 \rightarrow 6$ ) と禁制線 [NII] の相対強度からダストとガスの組成と分布を解析し、さらに、VLTI (ESO) の N バンド (MIDI) 干渉計観測から円盤の構造を描き出している。その結果によると、円盤は星の赤道から順に空隙部 (半径  $0.06 \text{ AU}$  まで)、内部円盤 (半径  $0.06\text{--}0.5$ )、垂直方向への広がりの始まる遷移帯 ( $0.5\text{--}0.8 \text{ AU}$ )、およびその外側におよそ  $70 \text{ AU}$  まで広がる外部円盤に分けられる。また、最内部の空隙帯の存在が惑星形成に起因するとすれば、惑星は星から  $0.3 \text{ AU}$  以内に存在するだろう

と予測している。これらの構造はほぼ、図 2 に示したスケッチを裏づけたものとなっている。なお、Ratzka らは TW Hya の年齢を  $10 \text{ Myr}$  とし、この星が CTTS 段階の最終期にある特徴をすべて備えていると指摘している。その特徴とは (1) ダストグレインの結晶化、(2) ダスト粒子の成長、(3) 円盤の散逸の始まり、(4) 惑星の形成である。そのなかでとくに最終期になってもなお円盤の散逸が終了しないこと、惑星形成の可能性の大きいことに注目している。最後の点は上述した Setiawan らによる惑星の発見につながっている。

### (4) 奇妙な磁場

Yang ら<sup>19)</sup>はスペクトル線に対し、右回り円偏光と左回り円偏光成分の波長差から磁場の経度成分  $B_z$  を導いているが、測定に用いたスペクトル線、および光球と輝線形成域とによって異なる値が得られている。

光球磁場は赤外域吸収線 (Ti I,  $2.2 \mu\text{m}$  帯に 4 本) による測定から  $B_z = 2.6 \pm 0.2 \text{ kG}$  を導いたが、可視域吸収線 (Fe I, Ca I, Al I,  $6,000\text{--}9,000 \text{ \AA}$ ) を用いた 6 日間の観測では、最初の 5 日間は弱い磁場、6 日目に顕著な磁場  $B_z = 149 \pm 33 \text{ G}$  を検出した。6 日間の磁場を平均すると  $90 \pm 17 \text{ G}$  となる。

一方、輝線形成域の磁場は He I ( $\lambda 5876 \text{ \AA}$ )、Ca II ( $\lambda 8498 \text{ \AA}$ ) から推定される。しかし、He I 磁場では  $B_z = -1.67 \text{ kG}$ 、Ca II 磁場では  $-276 \text{ G}$  と測定値は両方で大きく離れている。He I は彩層起源と考えられているが、Yang らは Ca II 磁場には彩層のほかに降着流起源が混在するのではないかと示唆している。この星の自転軸傾斜角  $10^\circ$  程度で、光球磁場を双極磁場と仮定してみる。さらに赤外 Ti 線の値  $2.6 \text{ kG}$  を磁極磁場とし、可視域の弱い磁場は磁極軸が自転軸と大きく傾いているためと想定すると可視域の  $149 \text{ G}$  を説明するには傾斜角として  $83.5^\circ$  という大きな値が必要となる。しかし、この方向に磁極を置くと今度は He I の磁極磁場が  $5 \text{ kG}$  という CTTS としては大きすぎる値になる。こうした測定値の非整合性から

Yang らは TW Hya の磁場は典型的な双極磁場ではなく、星表面の局所的な磁場と混在しているのではないかと推測している。しかし、その場合でも双極磁場の星外方への減衰は局所磁場より緩やかなので、降着流は双極磁場で制御されていると見なすことができるという。

### (5) TWA アソシエーションと惑星探査

TW Hya は銀河赤道から離れているが TWA (TW Hydrae Association) と呼ばれるアソシエーションの主星となっている。TWA は 1997 年に Kastner らによって発見された若い集団で (年齢 8–10 Myr), 25 星以上がメンバーと同定されている。近傍 (50 pc) にあるので低光度の晩期矮星から褐色矮星まで発見され、その多くが TTS 段階にある。Riaz ら<sup>20)</sup>は TWA 内の 2 個の褐色矮星について Spitzer 衛星による赤外線観測と H $\alpha$  線強度を比較し、1 星は CTTS, 他の 1 星は WTTS であることを見いだした。これは質量 0.5  $M_{\odot}$  以下の褐色矮星に TTS 進化段階の存在を示す貴重な例である。

また、Low ら<sup>21)</sup>は同じ Spitzer 衛星によって TWA 中に地球型惑星の探査に乗り出し、メンバー 24 星の赤外測光 (24, 70, 160  $\mu\text{m}$ ) を行った。観測星は 24  $\mu\text{m}$  帯での赤外超過の有無によって 2 分されるが、赤外超過を示す星のうち、TWA 7 星 (M1 型) は 24, 70  $\mu\text{m}$  に顕著な超過を示し、70  $\mu\text{m}$  ではこの波長での光球光の 40 倍の明るさに達するなど、惑星の存在に有望な低温の円盤が検出された。この星に対し、Matthews ら<sup>22)</sup>はマウナケア山頂の JCMT サブミリメートル望遠鏡による測光観測 (850, 450  $\mu\text{m}$ ) を行い、地球質量 0.2 倍の質量、温度 45 K の冷たいダスト円盤破片の存在を認めたが、惑星の可能性の検証までには達しなかった。Matthew らは TW Hya, TWA 7 以外にも TWA の 3 星に冷たい円盤破片を検出しているがその質量は月と地球の間位で、星周辺に小型惑星が存在するかどうかはまだ明らかにされていない。

なお、de la Reza ら<sup>23)</sup>はメンバー星 5 個の連星に対する軌道解析から TWA アソシエーションの力学的進化を考察し、星団の年齢を  $8.3 \pm 0.8$  Myr と推定した。これは主星である TW Hya のこれまでの推定年齢 (8–10 Myr) を裏づける結果となっている。TWA は若い星団として注目されており、小型惑星の探査もまだ始まったばかりである。

## 3. FU Ori 型星

### 3.1 FU Ori に惑星は存在するか?

FU Ori 型星 (FUor と略称されている) は CTTS の中でも大幅で長期的な光度変化を示す一群である。代表的な星 FU Ori は 1938 に 1 年間で 6 等級増光したあと緩やかな減光を続け、現在でも極大光度から 1 等級の減光にとどまっている。同じように V1057 Cyg も 1969 年に 6 等級増光したが、1980 年には 3 等級減光し、その後 1995 年までほぼ平坦な明るさを保っている。それに対し V1515 Cyg は増光に 1943 年から 1963 年まで 20 年を要し、その後、短期の変光を示しながら準安定の状態にある。Vittore and Errico<sup>24)</sup>はこれら 3 星について分光観測を実施し、弱い輝線と発達した吸収成分をもつ H $\alpha$  線の P Cyg 型輪郭の時間変化を追跡している。FU Ori では輝線成分と吸収線成分の輪郭変化には相関が見られないが、輝線成分に 6.70 日の周期性を検出している。

FU Ori 星が惑星を伴うかどうかについて、Malbet ら<sup>25)</sup>による近赤外と Quanz ら<sup>26)</sup>による中間赤外の間大きな論争がある。

Malbet らは PTI (Palomar Testbed Interferometer), IOTA (Infrared Optical Telescope Array, Mt. Hopkins Observatory) などの干渉計で H, K バンドにおける AU サイズの構造解析を行っている。それによると円盤 (リング) は内半径 5.5  $R_{*}$  から外半径 100 AU と大きく広がる。平均の温度 745 K, 円盤傾斜角  $55^{\circ}$ , 降着率  $6.3 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  などの物理量を導いているが、Malbet らが注目しているのはスポットと呼ぶ明るい点源で

ある。星から 10 AU の距離にあり、星に対し  $1.2 \text{ AU yr}^{-1}$  の割合で移動している。この点源はたしかに存在し、木星の 15 倍の質量をもった惑星であるとの可能性を推測している。さらに、この惑星によって円盤不安定が生じ、FU Ori の 1938 年の突然の増光をひき起こしたのではないかと推測している。

しかし、Quanz ら<sup>26)</sup>は VLTI (ESO, Chili) を用いた中間赤外観測 ( $\lambda 8\text{--}13 \mu\text{m}$ ) を行い、この波長帯では円盤スポットは検出できず、したがって、惑星のような第 2 天体が存在するかどうか確認できないと反論している。果たして円盤スポットは惑星なのか、近赤外域の点源に過ぎないのか、追跡観測が期待される。

Quanz らは、また、同じ VLTI による分光撮像観測によってダスト成分の動径変化とエネルギースペクトルを導き、その結果として、FU Ori は若くないのではないかと推論している。その理由はダストの組成が星間ダストと異なること、ダスト粒子が大きく成長しており、この状態に達するには長い時間が必要であるということである。これまで FU Ori は古典的 TTS より若い段階にあると考えられてきているが、Quanz らは FU Ori は CTTS と同程度の年齢であり、それより若いわけではないと主張して従来の描像に一石を投じている。

### 3.2 何が FU Ori 現象を起こしたのか？

FU Ori 現象は降着率の爆発的増大による急激な増光に始まり、降着率の緩やかな減少によって減光するという、Hartman and Kenyon<sup>27)</sup> の古典的説明が広く知られている。この説は、増光期以前の星のスペクトルが観測されている V1057 Cyg が典型的な T Tau 星型であること、増光後のエネルギースペクトルが降着円盤起源としてよく説明できることなどで裏づけられている。しかし、それでは何が降着率を増大させたのであろうか。それに対してはさまざまな説が提唱されており、まだ、決着はついていない。主な誘引機構として考

えられているのは連星潮汐作用、重力不安定、熱的不安定である。

このうち連星効果については FU Ori に連星系と確認されていない星も多く、また、連星でも主星、伴星間の距離が多様であることなど、その効果は存在しても限られたものであろう。また、重力不安定は惑星形成にも一役買っているため、質量の大きい円盤内でその可能性が指摘されたこともあったが、FU Ori の急激な増光を説明するには時間スケールが長すぎる点 (1 万年程度) に難点がある。

最近、検討の進んでいるのは熱的不安定である。熱的不安定は加熱と冷却のバランスの崩れによって収縮または膨張の進む不安定で、惑星状星雲や H II 領域に見られる小型の団塊模様などの成因と考えられている。Clarke ら<sup>28)</sup>は熱的不安定による FU Ori 現象の測光モデルに基づいて V-(B-V) 図上における変動経路を計算し、FU Ori, V1057 Cyg, V1515 Cyg の観測と比較している。変動経路は円盤内に巨大惑星のような軌道天体が存在するか否かによって異なり、軌道天体による不安定性の有無を比較している。その結果 Clarke らはこれら 3 星について次のような異なった描像を得ている。

V1057 Cyg の 1 年間で増光し、約 10 年で減光した経路は軌道不安定によってひき起こされた熱的不安定の計算例と良い一致を示し、他方、1515 Cyg の 20 年にわたるゆっくりした増光はそうした誘引のない計算例で説明できる。それに対し、FU Ori のように短期間の増光の後、60 年を経てまだ 1 等級の減光にとどまっている変動はそれほどどの長期間にわたってエネルギー供給が維持できないという理由で熱的不安定は採用できないという。Clarke らの計算は熱的不安定起源の可能性とともにその限界も示している。何が FU Ori 現象を惹き起こすのか、各種不安定性の検討が課題として残されている。





## 4. T Tau 型星の活動と進化

赤外線星から誕生した低質量星は一般には CTTS から WTTS を経て主系列星へと進化する。その多くは降着円盤を伴い、ダストや輝線、分子線などで活動的現象が観測される。この時期に星と円盤の進化過程に大きな影響を与えるのは、星の自転速度と磁場である。

Scholz ら<sup>29)</sup>は年齢の異なる四つのアソシエーションについて活動度 ( $H\alpha$  線等価幅)、自転速度 ( $V \sin i$ ) の統計的傾向を解析し、角運動量と星磁場の面から星と円盤構造の進化過程の考察を行っている。対象となったアソシエーションは  $\eta$  Cha (年齢  $\sim 6$  Myr), TWA (TW Hya,  $\sim 8$  Myr), BPMG ( $\beta$  Pic Moving Group,  $\sim 12$  Myr), TH (Tucana-Horologium,  $\sim 30$  Myr) である。星が誕生するとき、星間媒質から星に角運動量と磁場が持ち込まれる。角運動量は星の周辺に降着円盤を作り、さらに星への降着によって星の自転を加速する。降着流が続く間は自転の加速も続く。四つのアソシエーションの  $V \sin i$  の測定にこの年齢効果が見られる。自転傾斜角  $i$  の散らばりによって  $V \sin i$  も散らばるが、その最大値は  $20 \text{ km s}^{-1}$  ( $\eta$  Cha),  $30 \text{ km s}^{-1}$  (TWA),  $80 \text{ km s}^{-1}$  (BPMG),  $150 \text{ km s}^{-1}$  (TH) と年齢とともに増加する。これは星が誕生時に与えられた角運動量を保存しながら重力収縮したとする場合よりもはるかに大きな自転で、角運動量の継続的供与のあったことを示している。一方、年齢  $125 \text{ Myr}$  のプレアデス星団では自転速度は十数  $\text{km s}^{-1}$  と小さく、円盤が散逸した後に星はコロナ型の恒星風によって角運動量を喪失する様子を示している。

星と円盤との関係について Kundurthy ら<sup>30)</sup>は  $3.8 \text{ m}$  赤外望遠鏡 (UKIRT) による中間赤外測光を行って TTS を円盤のある星とない星に分け、円盤の有無と自転周期との関係を考察した。その結果、円盤のない星に自転の早い星が多く、自転速度が円盤の存在と関係することを見いだした。

これは円盤のない星では星間媒質の角運動量が直接星に与えられ、星の自転を加速するためと考えられる。この関係は X 線光度にも現れている。Briggs ら<sup>31)</sup>は Tau-Aur 領域の TTS に対し、XMM-Newton 望遠鏡による X 線観測を行い、X 線光度と星の自転周期の関係を導いた。それによると両者はほぼ反比例の関係にあり、高速自転の(降着流の見られない)星は低速自転の(降着流をもつ)星に比較して平均で 2 倍の高い X 線光度を示す。Briggs らは降着流のない高速自転星では星内部で自転に起因する何らかのダイナモ機構が働き、磁気的コロナを形成するのに対し、低速度星では星と降着流の結びつきによってそれが妨げられているからではないかと推測している。

しかし、磁場の起源については、未解決の点が多い。TTS には早期型前主系列星 (HES) と同様に TW Hya のようにキロガウス級の磁場をもつ星がある一方、T Tau 星のように磁場の検出されない星も多い。星の強磁場はおそらく化石起源と見なされるが、弱磁場は自転によって引き起こされた星内部のダイナモ作用による可能性がある。太陽型ダイナモが働くには星の内部に放射核の存在が必要であるが Scholz ら<sup>29)</sup>によると上記四つのアソシエーションのうち、年齢の若い  $\eta$  Cha と TWA では全対流内部構造の星が多く、BPMG から TH にかけて放射核の発達が見られるという。放射核の形成は星の質量にも大きく依存するが、太陽型ダイナモと異なった何らかのダイナモ作用があるのではないかと彼らは示唆している。

## 5. おわりに

輝線星の話題はアルゴール連星、激変星などまだまだ続くが、このシリーズはこれで終わりにしたい。紹介したのは文献のほんの一部であったが、多少でも輝線星の世界に興味をもっていただければ幸甚である。なお、物理過程の基礎的な部分や輝線星全般については拙著<sup>32)</sup>を参照されたい。ここでは文献サーチに当たり ADS (Smith-

sonian/NASA Astrophysics Data Service) を大いに利用したことに触れておきたい。とくにプレプリントにアクセス可能になったこと(2006年)の意義が大きい。これによって書齋にいながらかなり広く最近の文献に接することできるようになった。2007年6月に国立天文台(三鷹)で開かれた国連宇宙局のワークショップ「基礎宇宙科学」ではハーバード・スミスソニアン研究所 G. Eichorn 氏から「文献とオンラインデータの連携」という報告があったが、ADS 発信側からの現況報告として情報の量と質の高さに大きい感銘を受けた。

シリーズの終わりにあたり、長期間、紙面を提供して下さった天文月報編集委員会に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) Furlan E., Hartmann L., et al., 2006, ApJS 165, 568
- 2) Gras-Velázquez A., Ray T. P., 2005, A&A 443, 541
- 3) Preibisch Th., 2007, Mem. Soc. Ast. Italiano 78, 332; Preibisch Th., et al., 2005, ApJS 160, 401
- 4) Güdel M., et al., 2007, A&A 468, 353
- 5) Telleschi A., et al., 2007, A&A 468, 425
- 6) Telleschi A., et al., 2007, A&A 468, 443
- 7) Kastner J. H., et al., 2002, ApJ 567, 434
- 8) Güdel M., et al., 2007, IAUS, 243, 155; Güdel M., et al., 2008, A&A 478, 797
- 9) Ismailov N. Z., et al., 2006, Variable Stars 26, No. 5
- 10) Johnston K. J., et al., 2004, ApJ 604, L65
- 11) Duchêne G., 2005, ApJ 628, 832
- 12) Mayama S., Tamura M., et al., 2006, PASJ 58, 375
- 13) Herbst T. M., 2007, AJ 134, 359
- 14) Setiawan J., Henning Th., et al., 2008, Nature 451, 38
- 15) Dupree A. K., et al., 2005, ApJ 625, L131
- 16) Dupree A. K., Avrett E. H., et al., 2007, ASP Conf. Ser. in press
- 17) Johns-Krull C. M., et al., 2007, ApJ 655, 345
- 18) Ratzka Th., et al., 2007, A&A 471, 173
- 19) Yang H., Johns-Krull C. M., et al., 2005, ApJ 635, 466; Yang H., Johns-Krull C. M., et al., 2007, AJ 133, 73
- 20) Riaz B., et al., 2006, ApJ 639, L79
- 21) Low F. J., et al., 2005, ApJ 631, 1170
- 22) Matthews B., et al., 2007, ApJ 663, 1103
- 23) de la Reza R., et al., 2006, AJ 131, 2609
- 24) Vittone A. A., Errico L., 2005, Mem. Soc. Ast. Italiana 76, 320
- 25) Malbet E., et al., 2005, A&A 437, 627
- 26) Quanz S. P., Henning Th., et al., 2006, ApJ 648, 472
- 27) Hartmann L., Kenyon S. J., 1985, ApJ 299, 462
- 28) Clarke C., Lodato G., et al., 2005, MNRAS 361, 942
- 29) Scholz A., et al., 2007, ApJ 662, 1254
- 30) Kundurthy P., et al., 2006, AJ 132, 2469
- 31) Briggs K. R., et al., 2007, A&A 468, 413
- 32) Kogure T., Leung K. C., 2007, The Astrophysics of Emission Line Stars, Springer; 小暮智一, 2002, 輝線星概論, ごとう書房

## Recent Developments in the Studies of Emission-Line Stars

### 6. Late-type Pre-Main Sequence Stars (TTS)

Tomokazu KOGURE

1-10 Togano, Hashimoto, Yawata, Kyoto 614-8322, Japan

Abstract: T Tau stars (TTS) are low-mass pre-main sequence stars in the evolutionary state from infrared stellar objects to main-sequence stars. It has been generally accepted that the classical TTSs with strong  $H\alpha$  emission are younger part of TTS evolution than the weak-lined TTS with weak  $H\alpha$  emission. Recent infrared observations opened a debate on whether CTTSs are really younger than WTTS or not. Similar debate is also seen in the origin of X-ray emission from CTTS and WTTS. Infrared companions of T Tau (T Tau Sa, b) revealed remarkable light and color variations along with some jet-like activity around these stars. In another typical CTTS, TW Hya, a giant planet is discovered as the first planet associated with pre-main sequence stars younger than 10 million years. FU Ori stars (FUors) are characterized by large-amplitude brightening and slow declining of light. Thermal instability inside an accretion disk is a candidate of the origin of FUor phenomena, but yet debatable. Finally, the roles of angular momentum transfer and magnetism in the evolution of pre-main sequence stars and accretion disks are briefly reviewed.