

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：62616

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20377

研究課題名（和文）恒星進化・星形成シミュレーションのシナジーで迫る恒星の自転運動の起源

研究課題名（英文）The Origin of Stellar Rotation Unraveled by the Synergy of Stellar Evolution and Star Formation Simulations

研究代表者

高橋 亘 (Takahashi, Koh)

国立天文台・科学研究部・助教

研究者番号：20963987

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：恒星進化において角運動量は重要な要素であるが、その初期条件を与える星形成過程において角運動量がどのように持ち込まれているかは未解明である。本研究の目的はこの角運動量持ち込みメカニズムを明らかにすることである。原始星の成長過程ではガス降着による角運動量持ち込みに抗う角運動量引き抜きのプロセスが必要である。これまでの成果として磁気的角運動量引き抜きを考慮したモデルの開発が行われ、原始星降着進化の角運動量時間発展を解明した。また、原始星-境界層-円盤の三領域構造を解くモデルも開発され、角運動量引き抜きの効率や時間発展を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

恒星という宇宙の構成要素を理解する上でそれがどうできたのかを理解することには大きな意義がある。本研究では恒星を特徴づける量のなかから角運動量に注目し、星がどのような過程で角運動量を獲得したのかの解明に取り組んだ。今回開発した理論手法は今後拡張することが可能で、その他の特徴量である磁場強度や、連星・多重星形成過程を調査するのに用いることを企図している。星形成、とくに大質量星の形成過程は観測的な検証の進んでいない分野であり、理解を進めるうえで理論研究の果たす役割は大きい。また今後 ngVLA をはじめとした新しい観測手段が出現することが予測でき、将来に備え理論モデルの整備を行う点でも意義深い。

研究成果の概要（英文）：Although angular momentum is a crucial factor in stellar evolution, the process in which angular momentum is introduced into the central star, which provides the initial conditions, remains unclear. Therefore, the aim of this study is to elucidate the mechanism by which angular momentum is introduced. During the growth phase of protostars, a process of angular momentum extraction, which counteracts angular momentum insertion due to gas accretion, is indispensable. I developed a model that considers magnetic angular momentum extraction and elucidated the temporal evolution of angular momentum during the accretion phase of protostellar evolution. Additionally, models have been developed to resolve the three-region structure of protostar-boundary layer-disk, allowing for the evaluation of the efficiency and evolution of angular momentum extraction due to viscosity.

研究分野：恒星物理学

キーワード：恒星進化 星形成 角運動量輸送 磁気圏 境界層

1. 研究開始当初の背景

本研究のテーマは「星形成過程における原始星への角運動量持ち込みメカニズムの解明」である。

恒星進化において自転速度とそれを決める角運動量は恒星の進化を決定づける重要なパラメータである。角運動量は保存量であることから、その値は恒星の形成時に決定されると考えられる。しかし、恒星形成時に角運動量がどのように持ち込まれるのか、そのメカニズムは明らかにされていなかった。

原始星が周囲のガス雲からガスを受け取る際、そのガスとともに角運動量を同時に受け取る。ガスがもともと持っている角運動量は非常に大きいため、角運動量保存だけに基づく従来の単純なモデルによると、原始星はすぐ限界自転速度に達してしまいその後の質量降着が阻害されるという問題が生じていた。このシナリオは大質量星が実在するという観測事実と明らかに矛盾しており、解決案が必要とされていた。

そこで本研究では原始星形成時に角運動量を引き抜く2つのプロセスに焦点を当てる。1つ目は原始星周囲に形成される磁気圏を介した磁氣的角運動量引き抜きであり、もう一つは原始星に直接接する降着円盤を介した粘性による引き抜きである。これらのプロセスが質量降着中の角運動量持ち込みに抗することで、大質量星の形成を説明できるはずだと考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は2つの角運動量引き抜きプロセスの理解をすすめる、そしてどちらのプロセスが現実においてより支配的なのかを解明することである。より具体的には、形成中の恒星を特徴づける質量、角運動量、磁束の時間発展を、星形成ガス雲のパラメータの関数として定量的に記述できるモデルを構築すること、そしてそのモデルを観測的統計量と比較し検証することである。

3. 研究の方法

まずは理論モデルの開発を行う。このモデルは磁氣的および粘性角運動量引き抜きの効果を取り入れた一次元の現象論的モデルであり、数百万年のタイムスケールを持つ原始星降着進化における長期の角運動量時間発展を追うことができる。

理論モデルの中核には恒星進化コード **HOSHI** を用いる。**HOSHI** は大局的恒星磁場を独立変数として取り扱うことのできる世界で唯一の恒星進化コードであり、磁気圏と降着流との相互作用を扱う本研究でその特徴を十分に活かすことができる。さらに降着流が周星円盤を形成し、粘性による角運動量輸送によって時間発展する様子を捉える一次元モデルをあらたに作成し、**HOSHI** コードと結合して用いる。これにより降着進化における粘性による角運動量引き抜きを整合的に扱うことができる。

次に開発したモデルによる理論計算結果を観測的統計量と比較し、モデルの検証を行う。統計量の例として、**AB**型星(太陽と比べて質量が1.5-15倍程度大きな恒星)で観測された自転速度分布を用いる。この自転速度分布は恒星が表面磁場を持つかどうかによって異なる特徴的な形状をしている。すなわち、表面磁場を持つ**AB**型星は典型的に約3日に一回転の自転周期を持つ遅い自転星がほとんどなのに対して、検出可能な表面磁場を持たない**AB**星では約3日に一回転の遅い自転周期を持つ一群とともに約0.6日に一回転する高速自転星の一群もつ二峰性の自転速度分布を持っている。

- ・出来上がった恒星が表面磁場をもつかどうかに応じて自転速度分布に差が生じるか
 - ・磁気星の典型的自転周期を再現できるか
 - ・非磁気星の高速自転周期を再現できるか
- の3条件をモデルの検証に用いる。

4. 研究成果

(1) 1つ目の研究として、磁氣的角運動量引き抜きを取り入れた原始星降着進化モデルを開発した。このモデルではガス降着の際の磁気圏と降着流との結合定数をパラメータとして扱い、降着流が星に落下しながらも角運動量を失う過程を取り入れた。

図1に結果の一例を示す。角運動量引き抜きを考慮しないモデルでは質量降着に伴って角運動量は単調に増えてしまい、原始星表面はいずれ限界速度で自転するようになってしまう。一方磁氣的角運動量引き抜きを取り入れた本モデルによって、角運動

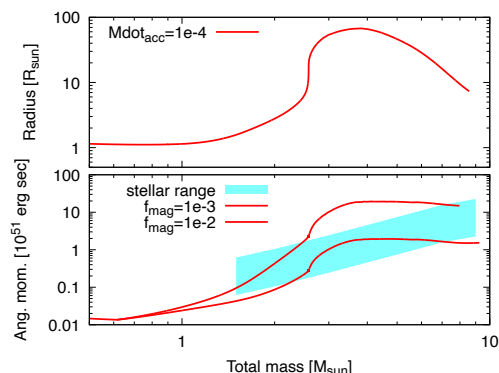


図1: 磁氣的角運動量引き抜きを取り入れた原始星進化モデルの半径(上)および総角運動量(下)時間発展の様子。

量持ち込みには上限値が存在することが明らかになった。この上限値の存在はパラメータの取り方によらず確認できる。さらにパラメータを適切に選ぶことで、単一のパラメータのもとで広範な質量領域で観測が示す典型的自転速度（約 0.6-3 日に一回の自転）を再現できることも明らかになった。以上は、原始星質量降着において磁氣的角運動量引き抜きが有効に働くことを示唆する重要な結果である。

以上をまとめた論文を現在執筆中である。

(2) 2つ目の研究として、降着円盤と接触した原始星降着進化モデルの開発を開始した。圧力勾配によって重力に抗う系である原始星と遠心力によって抗う円盤との間には、両者をつなぐ「境界層」が形成する。まず原始星-境界層-円盤が時間的に定常であるという過程のもとで三領域の構造を解くモデルを開発した。このモデルは境界層を通じた粘性角運動量引き抜きの効率を決定するために利用することができる。角運動量引き抜きの効率が原始星の自転速度と一対一で対応しており、また限界自転速度の 0.55 倍の自転速度を境として、原始星から角運動量を引き抜く解が存在することを確認した。

一方、同時に行った円盤の時間発展を追うモデル開発の結果から、三領域モデルを作成する上で重要な仮定としていた時間定常の仮定が、実はあまり現実的でないことも判明した。時間定常の三領域モデルには他にも

- ・原始星自身の質量、角運動量変化を取り入れづらい
- ・境界層内に不自然な衝撃波が生成する

などの解釈しにくさを含んでいる。

これらの問題を解決するため、現在、時間定常な三領域モデルを時間非定常な場合に拡張したモデルを構築中である。

(3) 恒星進化コード HOSHI に搭載している大局的磁場を扱うモジュールについても重要な進展があった。

AB 型星の一部は恒星表面に大スケールの磁場を持つことが観測的に知られているが、これらの磁場が星内部までどのように侵入しているかはこれまで全く知られていない。その一方、もし大局的磁場が星内部まで浸透している場合、磁場を伝う磁氣的な波によって角運動量輸送が進む結果、恒星の自転進化が大きく影響を受ける可能性が理論的に指摘されている。

そこで現実の磁気星で観測されている自転周期変動という現象に着目し、大局的磁場が星内部にまで浸透しているかどうかを検証する研究を行った。自転周期変動とは、約 3 日に一回転程度という磁気星の自転周期が、およそ百年程度の長いタイムスケールの期間に加速や減速、またはその両方を示すという現象である。HOSHI を用いた磁気波のモデル化を行い、この自転変動を磁気波の定在波として再現できるかどうかを調査した。

その結果、

- ・観測されている自転変動の長タイムスケールが、磁気定在波モデルでよく再現できること
- ・自転変動の周期に基づいて星内部の大局的磁場の半径分布が推定できること
- ・現在見つかった自転変動はどれも、表面集中する磁場構造を示唆することを発見した。

これらの結果は恒星内部磁場の存在を強く示唆しており、恒星進化における磁場の影響力の大きさを示すものである。星形成過程において目指すべき恒星内部の磁場分布を与える点でも意義深い。

以上をまとめた論文を執筆中である。また成果の一部を 2023 年度日本天文学会春季年会および国立天文台三鷹キャンパスで開催された国際会議で発表した。

(4) 大質量星進化に関するサブ研究においても進展が得られた。

大質量星は進化の末期に重力崩壊を起こし、そのある部分は超新星爆発に至り、のこりの部分は爆発を起こさずブラックホールを形成すると考えられている。先行研究により爆発するかどうかの条件が大質量星進化末期のコア構造と密接に関連していることが示されていたが、そのコア構造が恒星進化の過程でどのように決定されるのかの理解は不十分であった。

そこで HOSHI コードを用いた系統的進化計算を行い、その結果一見ランダムに見えていたコ

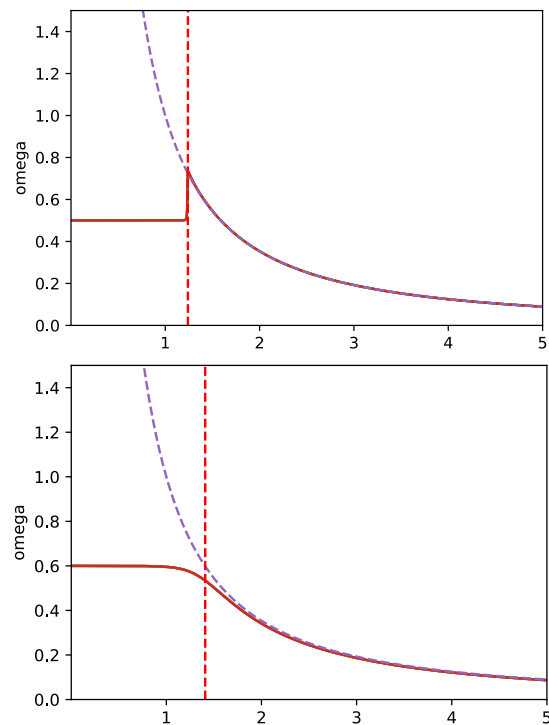


図 2: 原始星-境界層-降着円盤の定常構造モデル。自転角速度の半径分布を示している。上図が角運動量引き抜きが非効率的な場合の構造、下図が効率的な場合の構造。

ア構造に 1 パラメータのラベル付けが可能な単調性が隠されていたことを発見した。重力崩壊に続いておきる超新星爆発はニュートリノ輸送や乱流など複数の非線形な効果の結果生じる現象であるが、初期条件のもつ単調性が爆発の性質の中にも現れるかもしれない。多数の超新星爆発の統計的性質からそのような単純なルールを見つけ出す試みが、今後理論・観測問わず重要になるだろうと考えている。

この成果は査読論文 Takahashi, Takiwaki, & Yoshida, 2023, *The Astrophysical Journal*, 945:19 として出版された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Crosato Menegazzi Ludovica, Fujibayashi Sho, Takahashi Koh, Ishii Ayako	4. 巻 529
2. 論文標題 Variety of disc wind-driven explosions in massive rotating stars	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 178 ~ 195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stae544	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Ayako T., Takei Yuki, Tsuna Daichi, Shigeyama Toshikazu, Takahashi Koh	4. 巻 961
2. 論文標題 Diagnosis of Circumstellar Matter Structure in Interaction-powered Supernovae with Hydrogen Line Features	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 47 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad072b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagele Chris, Umeda Hideyuki, Takahashi Koh	4. 巻 523
2. 論文標題 Evolution and explosions of metal-enriched supermassive stars: proton rich general relativistic instability supernovae	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1629 ~ 1640
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad1522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Koh, Takiwaki Tomoya, Yoshida Takashi	4. 巻 945
2. 論文標題 Monotonicity of the Cores of Massive Stars	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 19 ~ 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb8b3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Koh Takahashi; Norbert Langer
2. 発表標題 Inferring the inner structure of a stellar magnetic field via rotational modulations
3. 学会等名 Magnetic fields from clouds to stars 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高橋 亘
2. 発表標題 恒星進化コード HOSHI の開発
3. 学会等名 東北大理論研究室 10周年記念研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 亘
2. 発表標題 磁気回転星進化理論の構築2. ねじれアルフベン波による自転加速現象の再現
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ドイツ	ボン大学	マックスプランク電波天文学研究所	