

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03702

研究課題名(和文) 磁場に貫かれたフィラメント状分子雲の自己重力不安定性と星形成

研究課題名(英文) Self-gravitational instability and star formation in filamentary molecular clouds penetrated by magnetic fields

研究代表者

工藤 哲洋 (KUDOH, Takahiro)

長崎大学・教育学部・教授

研究者番号：60413952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：太陽のような星が誕生する初期の段階において、磁場がどのような役割を果たしているのかを理論的に研究した。星は分子雲と呼ばれる水素分子が主成分のガスの中で生まれる。分子雲の多くは細長いフィラメント状の構造をしており、その軸に垂直方向に磁場が貫いている。そこで、磁場に貫かれた細長い分子雲の自己重力不安定性を調べた。その結果、そのような構造は磁場の強さに関わらずいくつかのガスの塊に分裂することがわかった。さらに、磁場が弱い時や磁気拡散がある時は、そのガスの塊の中心部が収縮して星が形成されることを示した。また、そのようなフィラメント状分子雲の形成から星形成に至る道筋についても考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子雲は細長いフィラメント形状をしており、そのフィラメントの軸に対して磁場が垂直に貫いていることが観測から知られている。よって、そのような分子雲の分裂から星形成にいたる過程を理論的に明らかにすることは、太陽のような星の誕生過程を理解する上で重要である。本研究結果から、磁場に貫かれた細長い分子雲は、初期の平衡状態や、磁場の強さに関わらず、分子雲コアに分裂する蓋然性が高まった。特に、強い磁場を持つ分子雲コアが、自然に短い時間で形成されることがわかった。太陽のような連星でない単独星の形成には分子雲コアが強い磁場を持つ必要性が指摘されている。今後は、理論の結果と観測との整合性の検証が重要と考える。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically studied the role of magnetic fields in the early stages of the formation of stars such as the Sun. Stars are born in molecular clouds, which are composed mainly of molecular hydrogen gas. Most molecular clouds have an elongated filamentary structure, and a magnetic field penetrates perpendicular to their axis. We investigated the self-gravitational instability of long and thin molecular clouds penetrated by magnetic fields. We found that such a structure splits into several gas clumps regardless of the strength of the magnetic field. In addition, when the magnetic field is weak or there is magnetic diffusion, the central part of the gas clumps contracts and stars are formed. We also discuss the scenario from the formation of such filamentary molecular clouds to the star formation.

研究分野：天文学

キーワード：星形成 星間磁場 磁気流体力学

1. 研究開始当初の背景

太陽のような星は、水素分子を主成分とする分子雲と呼ばれるガスの中で誕生する。特に分子雲コアと呼ばれる密度の高い領域において、自らの重力(自己重力)でガスが収縮することで誕生する。また、分子雲には大スケールの磁場が存在し、磁場のエネルギーは重力エネルギーと同程度であると観測されている。よって、磁場は星の誕生に重要な影響を与えているはずである。そのため、磁場による星形成への影響が、理論的および観測的に様々な角度から研究されている。

磁場のある分子雲から、分子雲コアが形成する理論研究では、分子雲が磁力線に垂直方向に広がった平板状の場合についてはよく調べられていた。分子雲は磁力線に沿っては動きやすいが、磁力線に垂直方向には動きにくい。そのため、磁力線に垂直な方向に広がる平板状の構造になりやすいと考えられていた。この時、磁場が弱ければ、自己重力による不安定性が成長し、分子雲が分裂する。そして、分裂片は密度の高い塊、すなわち分子雲コアとなる。その一方、磁場がある値よりも強いと自己重力不安定性が安定化され、分子雲コアは形成されない。しかし、磁場が強くても、分子雲内で働く可能性がある磁場の拡散(両極性拡散)を含めると、両極性拡散の拡散時間で非常にゆっくりと自己重力不安定性が成長して、分子雲コアが形成される。以上のことが、平板状分子雲については知られていた。

しかし、赤外線観測から、分子雲はより小さなスケールに至るまで、平板というよりは、細長いフィラメント形状をしていることがわかってきた。そして、磁場は、フィラメントの軸に対して垂直に貫いていることもわかってきた。そこで、磁場に貫かれた細長いフィラメント状の分子雲が、どのように自己重力で分裂し、その後、分裂片から生じた分子雲コアの中でどのように星が誕生するのかという研究が必要になっていた(図1)。そこで、研究代表者は、研究協力者とともに、細長いフィラメント状の分子雲に磁場が貫いている状況設定のもと線形解析を行った。すると、平板状の分子雲とは異なり、どんなに磁場が強い場合でも、フィラメント状分子雲は自己重力不安定性により分裂して分子雲コアを形成するという結果を得た。本研究は、それを発展させたものである。

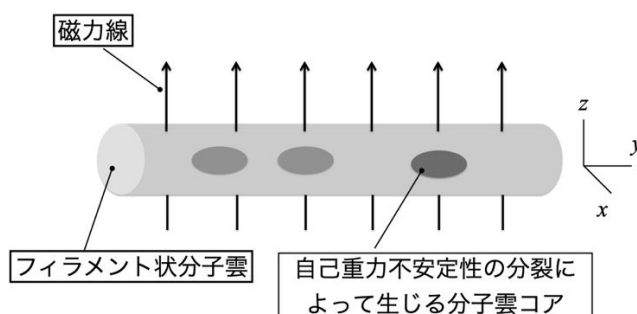


図1: 細長いフィラメント状の分子雲の概念図。フィラメントの軸に対して磁場は垂直に貫いている。このような分子雲が、自己重力不安定性により分裂し、分子雲コアや星が形成される過程を調べる。

2. 研究の目的

磁場に貫かれたフィラメント状分子雲の場合も、磁場に貫かれた平板状分子雲の場合と同様に、磁場がある程度強ければ分裂しない、と以前には単純に予想されていた。しかし、上記のように、磁場の強さに関わらずに分裂する結果が線形解析から得られた。はたして、この結果が、より一般的な場合でも成り立つのか。また、フィラメントの分裂片から形成された分子雲コアが非線形に発展した場合に、分子雲コアの中で星が誕生するのかを調べるのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 線形不安定性の解明

上記で示した線形解析の結果は、初期のフィラメント状分子雲が、等温な力学平衡状態にあることを仮定して行われた。そこで、より現実的なフィラメント状分子雲に近づけるため、実効的な乱流がある場合の分子雲を考える。そして、その状況でも同じように、磁場の強さに関わらずに自己重力で分裂するかどうかを調べる。

(2)非線形不安定性の解明

線形解析と同じ状況のもとで、時間発展の数値シミュレーションを行う。まず振幅が小さい時に線形不安定性と同じ結果になるかどうかを調べる。そして、振幅が大きくなった非線形段階において、分子雲コアが形成し、その中で星形成につながる重力収縮が起こるかどうかを調べる。

(3)両極性拡散の効果の解明

両極性拡散とは、分子雲の主成分である中性ガスの運動が、磁場と結合している電離ガスからずれる現象である。分子雲の長時間にわたる進化には両極性拡散を無視できない。そこで、上記と同じような設定のもと、両極性拡散の効果を含めた数値シミュレーションを行い、フィラメントの分裂、分子雲コアの形成、および星の形成における両極性拡散の影響を調べる。

(4)フィラメント状分子雲の形成過程を含めた数値シミュレーション

フィラメント状分子雲は、磁場に貫かれた分子雲が大スケールの乱流で強く圧縮されることでも生じる。そのようなダイナミックな状況で生じたフィラメント状分子雲の安定性について調べる。フィラメント状分子雲の形成から、分裂、そして、分子雲コアの形成と星の誕生までの道筋を探る。

4. 研究成果

(1)線形不安定性の解明

実効的な乱流がある場合の線形解析を行った。その結果、実効的な乱流を含めた場合においても、磁場の強さに関わらずに自己重力不安定性によりフィラメント状分子雲は分裂することを確認できた。乱流を含めなかった以前の結果と異なり、分裂だけでなく、フィラメント全体が自己重力で収縮する不安定性も確認できた。しかし、以前と同様に、遠方で自由な境界条件（現実に近いと考えられる境界条件）を課す場合は、磁場が極端に強い場合でも不安定性が成長し、成長率は以前の結果とおおよそ同じであった。このことから、磁場に貫かれたフィラメント状分子雲は、初期の平衡状態にはあまり大きく依存せず、磁場の強さに関わらずに自己重力不安定性で分裂する蓋然性が高まった。

(2)非線形不安定性の解明

等温な力学平衡状態にあるフィラメント状分子雲が一樣磁場中に存在する状況のもと、時間発展の磁気流体力学数値シミュレーションを行った。ランダムな揺らぎから出発した結果、時間発展の最初の段階において、線形解析と同じ最大成長波長のモードが同じ成長率で成長することを確認できた（図2）。その後、分裂が進み、分裂片の密度が高くなった非線形段階においては、磁場の強さによってその時間発展に変化が見られた。磁場がある値よりも弱い場合は、密度の成長が加速度的に進み、分裂片の中心へと暴走的に収縮していく兆候が見られた。一方、磁場がある値よりも強い場合は、密度の成長があるところで止まり、他の分裂片と合体するようにフィラメントに沿って運動を始めた。最終的に、他の分裂片と合体した後も、密度は成長せず、磁場によって支えられた星形成の起こらない分子雲コアが形成された。

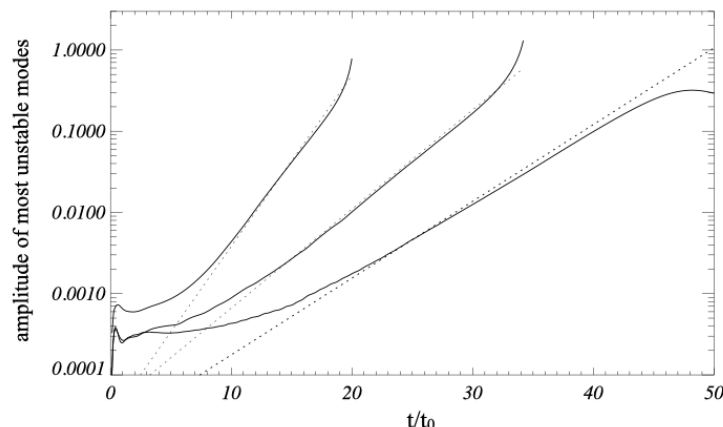


図2：縦軸は、フィラメントの軸に沿った方向に、密度の初期の値からのずれをフーリエ展開した時の最も成長率が高いモードの振幅。横軸は時間（おおよそ音速が横断する時間で無次元化している）。点線は線形解析から得られる成長率の傾きを持つ直線。実線は数値シミュレーションの結果。左端の線は磁場がない場合。真ん中の線は比較的磁場が弱い場合。右端の線は比較的磁場が強い場合。線形解析と数値シミュレーションの成長率は、振幅が小さいときにはほぼ一致している。ただし、振幅が1に近づく（非線形になると）、磁場がない場合と磁場が比較的弱い場合は急激に密度が増大するのに対して、磁場が比較的強い場合は密度の増大が終了している。

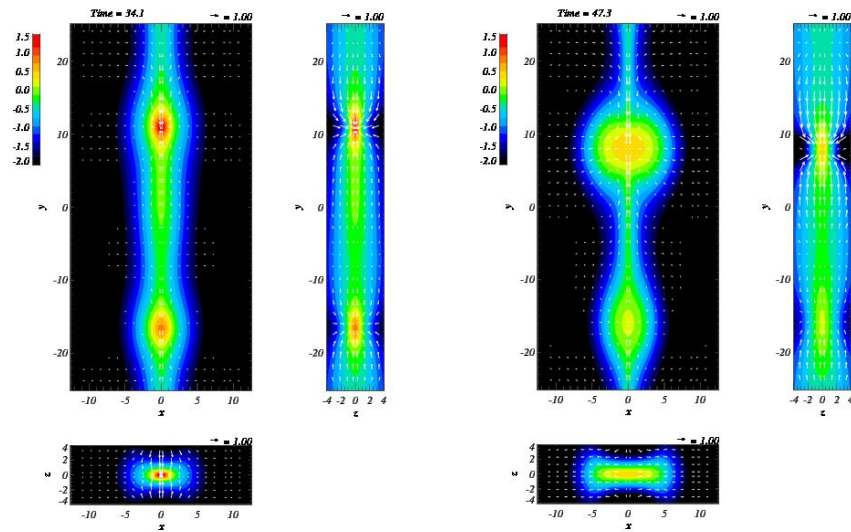


図3：細長いフィラメント状分子雲で分子雲コアができた時に、密度の最大値を含むそれぞれの方向から切り取った断面図。初期の磁場は図のz方向に一樣に存在していた。色は、初期のフィラメントの軸上の密度に対する相対値で表され、その対数が表示されている。矢印は速度（音速で無次元化）。左の3枚の図は磁場が比較的弱い場合。右の3枚の図は磁場が比較的強い場合。磁場が比較的弱い場合は、分裂片の中心付近で暴走的な収縮の兆候がみられ、密度が高くなっている。一方、磁場が比較的強い場合は、分裂片の中心付近の密度の上昇が止まっている。この後、分裂片同士が合体する方向への運動が見られる。

(3) 両極性拡散の効果の解明

(2)と同じ状況設定のもと、分子雲で考えられている典型的な大きさの両極性拡散の効果を含めて数値シミュレーションを行った。その結果、時間発展の最初の段階においては、両極性拡散を含めない線形解析と同じ最大成長波長のモードが同じ成長率で成長することを確認できた。フィラメントの分裂にかかる時間はほぼ重力の時間スケールである。それに対して、両極性拡散の拡散時間は、典型的には、重力の時間スケールにくらべると少し長い。その結果、分裂片の線形成長には両極性拡散の効果があまり効かなかったと考えられる。その一方、分裂が進み、分裂片の密度が高くなると両極性拡散の影響が見られた。まず、磁場がある値よりも弱い場合は、両極性拡散がない場合とほぼ同じように、密度の成長が加速的に進み、分裂片の中心へと暴走的に収縮していく兆候が見られた。一方、磁場がある値よりも強い場合は、両極性拡散のため分裂片の中心付近でゆっくりと密度の上昇がおり、最終的には暴走的に収縮していく兆候が見られた。ここで生じた暴走的収縮に至るまでの時間は、基本的に初期のフィラメントにおける重力の時間スケールで起きており、初期のフィラメントにおける両極性拡散の拡散時間よりも短かった。ただし、磁場が弱い場合と比べると、収縮速度は小さかった。また、このとき、フィラメントに沿った方向とフィラメントと磁場の両方に垂直な方向とで落下速度に空間的非対称性が見られた。磁場が強くなるにつれ、フィラメントと磁場の両方に垂直な方向の落下速度は小さくなり、速度の非対称性が大きくなった。しかし、その時の分子雲コアを貫く磁力線の構造には大きな非対称性は見られなかった。このような特徴が観測されれば、磁場の影響の強いフィラメント状分子雲から分子雲コアが形成されている証拠となるかもしれない。

(4) フィラメント状分子雲の形成過程を含めた数値シミュレーション

磁場に貫かれた平板状分子雲を大スケールの乱流で強く圧縮することでフィラメント状の構造をダイナミックに形成し、そこで形成されたフィラメント状構造が分裂するかどうかを調べた。磁場が強く、両極性拡散がフィラメント形成に必要な場合に、両極性拡散の大きさを変化させて計算した。その結果、両極性拡散の値によらず、形成されたフィラメントが分裂している様子が確認できた（図4）。また、この場合は、フィラメント全体が自己重力で収縮しながら分裂する結果となり、(1)で計算した結果と類似した結果が得られた。フィラメントの軸に沿った密度変化の各モードで成長率を調べた結果、フィラメント全体が収縮する成長率よりも、分裂する成長率の方が大きいことが確認できた。これらの結果は、両極性拡散の値が現実的な分子雲の値よりも小さい場合は常に確認できた。

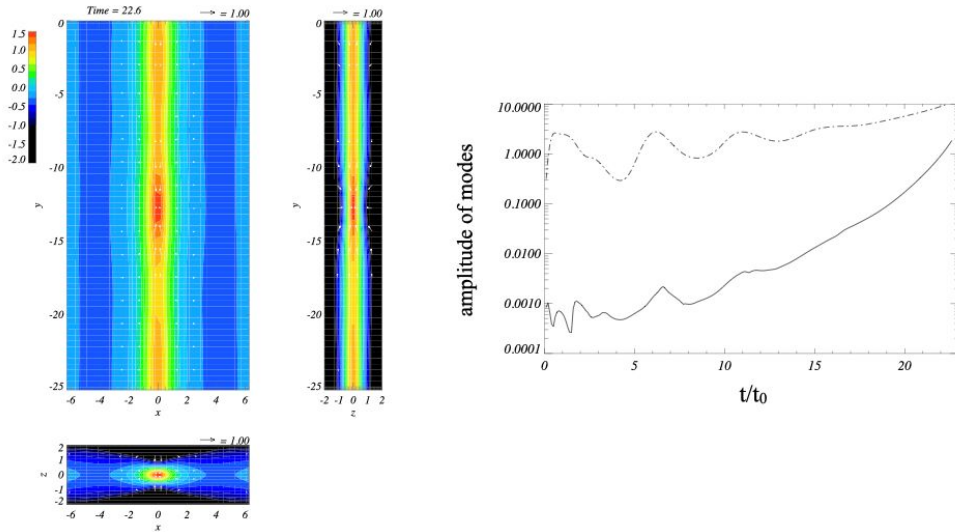


図4：[左図] 磁場に貫かれた平板状分子雲が，強い圧縮（図で x 方向に， $x=0$ 付近で圧縮）を受け，細長いフィラメント状分子雲が形成された結果の例．初期の磁場は図の z 方向に一樣に存在している．色や矢印は図3と同じ．細長いフィラメント状分子雲が形成されながら，フィラメント状構造が分裂している．[右図] 左図の場合について，フィラメントの軸に沿った方向に，密度の初期の値からのずれをフーリエ展開した時の，各モードの振幅の時間変化（横軸が時間）をプロットしたもの．一点波線はフィラメント全体のモード，実線はフィラメントの分裂に関するモードに対応する．図の直線の傾きがそれぞれの成長率を表す．フィラメント全体が収縮する成長率よりも，分裂する成長率の方が大きい．

<まとめ>

細長いフィラメント状分子雲の軸に垂直に磁場が貫いている場合は，どんなに磁場が強い場合でも，自己重力不安定性により分裂する．その結果が，より一般的に成り立つことを，(1)と(4)の結果から示すことができた．また，(2)と(3)の結果より，フィラメント状分子雲における，分裂から分裂片の成長（分子雲コアの形成）とそこでの暴走的な収縮（星の形成）へと至る非線形発展の特徴を理論的に示すできた．今後は，この理論的な成果を観測結果と比較して実際の分子雲コアや星形成の理解につなげたい．また，(4)の計算をより性能の高い計算機で空間分解能を上げて計算し，フィラメント状分子雲の形成から，分裂，分子雲コアの形成と星の誕生までの道筋を追求して，分子雲から星形成に至る初期段階のストーリーを明らかにしたい．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hanawa Tomoyuki, Kudoh Takahiro, Tomisaka Kohji	4. 巻 881
2. 論文標題 Fragmentation of a Filamentary Cloud Permeated by a Perpendicular Magnetic Field. II. Dependence on the Initial Density Profile	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 97 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2d26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hanawa Tomoyuki, Kudoh Takahiro, Tomisaka Kohji	4. 巻 14
2. 論文標題 Fragmentation of a Filamentary Cloud Threaded by Perpendicular Magnetic Field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 105 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921319003600	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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 0件）

1. 発表者名 工藤哲洋, 花輪知幸, 富阪幸治
2. 発表標題 磁場に貫かれたフィラメント状分子雲でのコア形成：両極性拡散の効果
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤哲洋, 花輪知幸, 富阪幸治
2. 発表標題 磁場に貫かれたフィラメント状分子雲でのコア形成：落下速度の非等方性
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 工藤哲洋, 花輪知幸, 富阪幸治
2. 発表標題 磁場が強い分子雲におけるフィラメントの形成と分裂
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018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
研究協力者	花輪 知幸 (HANAWA Tomoyuki)		
研究協力者	富阪 幸治 (TOMISAKA Kouji)		

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
---------	---------