

磁場を伴ったフィラメント状分子雲の起源

永井 智哉

〈国立天文台理論天文学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: nagai@th.nao.ac.jp

磁場に貫かれた平板状分子雲の不安定性を線形解析を用いて調べることによって、重力不安定性における外圧や磁場の効果を示し、磁場に貫かれた平板状分子雲は、主に外圧の強さによって、磁場に垂直または平行なフィラメントに分裂することを明らかにしました。そして、分裂後形成される磁場に垂直または平行に貫かれたフィラメントのその後の収縮、さらなる分裂といった星形成に至る進化を予想することができたことを紹介します。

1. はじめに

星形成において、「生まれる星の質量がどのようにして決まるか」という問題は、銀河形成や惑星系形成とも関連し、大変重要であり、今だ解決されていない問題です。特に、星の質量が母天体である分子雲のおかれている環境にどのように依存しているかを明らかにしなければならないと考えて研究しています。

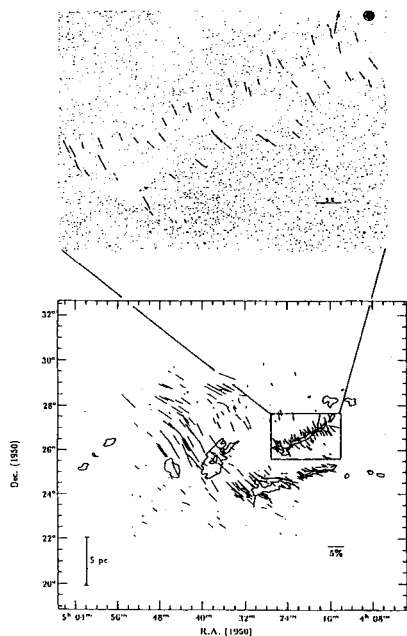
電波などで星形成領域が観測されており、一酸化炭素などで見られる分子雲は、多くの場合、細長い構造（フィラメント状）をなして存在しています。そして、その内部には大小さまざまなガスの塊が付随していることや、一部では形成途中の星や生まれたばかりの星が観測されていることはよく知られているとおりです。したがって星の形成過程を理解するためには、その母体となる星間ガス雲の構造と進化を調べることが不可欠であるといえます。また、星間ガス雲の背景にある星の光がガス雲を通ってくる時に受ける偏光を光や赤外線によって観測することによって、ガス雲には磁場が存在することが示唆されています。偏光の向きから磁場の方向がわかり、ガス雲を貫いている磁力線の方向は分子雲で見られる細長い構造の軸に対して垂直な場合（おうし座、おおかみ座、はえ座、

カメレオン座領域など）や平行な場合（へびつかい座、かんむり座、はくちょう座、オリオン座、おおいぬ座領域など）が多く存在することがわかっており（図1）¹⁾、分裂するか・収縮するかなど、星形成過程を考える上で垂直な場合、平行な場合、いずれの場合にしても磁場は重要な役割を持っていると考えられます。しかし、その成因はこれまで解明されていない問題でありました。そこで、このような観測事実がどのような物理機構によって特徴づけられ、説明されるかという点に着目して、磁場を伴った平板状分子雲の進化を、様々な物理条件のもとで線形解析を用いて調べました。

2. 垂直磁場と平行磁場を持つフィラメントの形成

星間ガス雲の構造と磁場の方向の関係を決定する要因として、ガス雲に働く外圧の効果を考えました。現実のガス雲の構造は、雲同士の衝突やOB型星周りの電離波面、超新星爆発の衝撃波によってガスが圧縮された系などで生じると考えられ、星形成を誘発しているとも思われています。よって外圧の効果は本来重要です。そして、星形成のシナリオとして図2のように我々は考えています。星間ガス雲が前に書いたような様々な外圧によって

■ 磁場に垂直な
フィラメント



■ 磁場に平行な
フィラメント

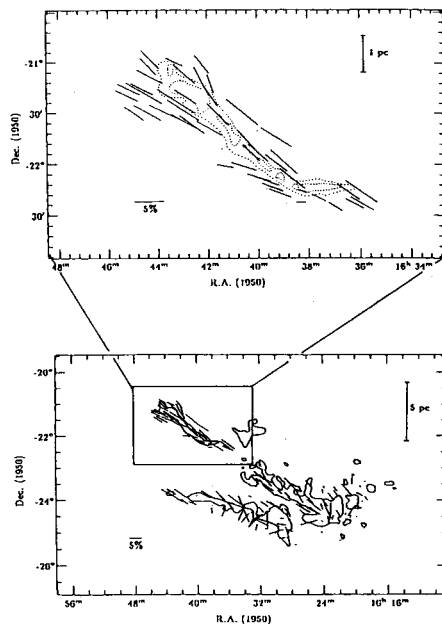


図1 磁場に垂直なフィラメントと平行なフィラメントの例。(左側がおうし座領域, 右側がへびつかい座領域。) 直線が磁場の向きを示し, コントアが分子雲を示している。左上図は点が星で, 星のないところが分子雲の形をあらわす。(Heiles et al. 1993: 文献 1) より)

圧縮され, 分裂しフィラメント状分子雲を形成し, さらに分裂して, 星のもととなるガスの塊になります。これらガスの塊が収縮, 進化して原始星が生まれるのです。

磁場がある場合を考えると, 星形成に至るシナリオは図3のようになります。磁気圧よりラム圧が大きいと図のように磁場に平行に貫かれた平板が形成され, それらが分裂した結果として, 磁場に垂直または平行に貫かれたフィラメントが形成されると, 形状から予想できます。そこで, 磁場を伴った星間ガス雲が圧縮されたような系の理想化として, 磁場に平行に貫かれて平板状になったガス雲の分裂過程を線形解析を用いて調べました。形状は図3の平板のように考え, 平板の面内にxy面をとってx方向が磁場に平行な方向, 平板の垂直

星形成に至るシナリオ

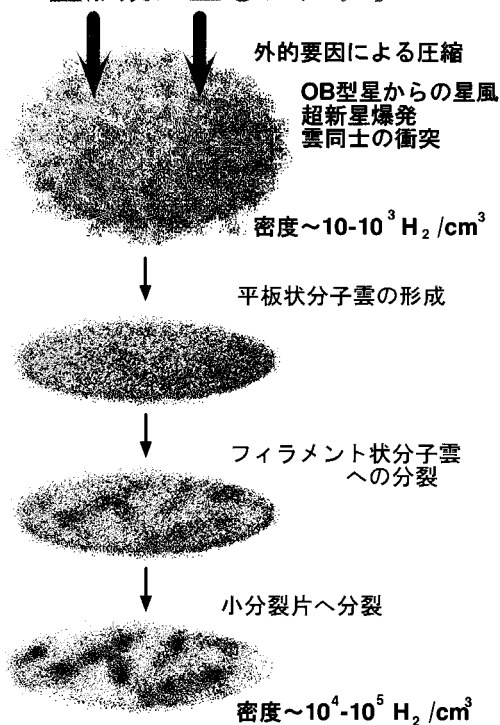


図2 星形成に至るシナリオ

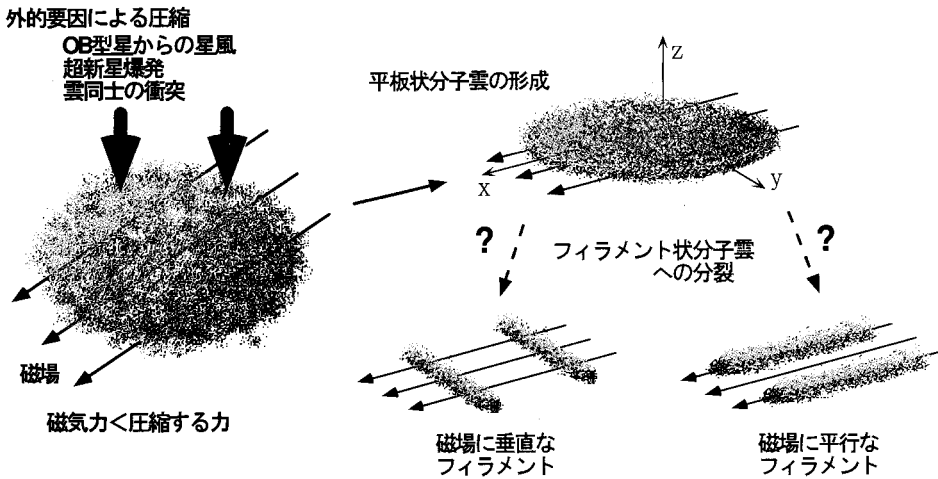


図3 磁場を考慮した星形成に至るシナリオ

方向を z 軸にとっています。そして、自己重力、一様な磁場を含んだ等温・平衡な平板状ガス雲を初期状態として、様々な外圧そして磁場の大きさのもとで、摂動を与えて分散関係 (図4) を求めています。

図4は、ある磁場の大きさに対する分散関係を3通りの厚みの平板に対して示しています。x軸、y軸はそれぞれ、x方向、y方向の波数を示し、z軸は不安定な成長率を表します。x方向は磁場に平行な方向です。外圧の大きさを大きくすることは平板の厚みを薄くすることに対応しており、外圧が小さいときというのは(a)の場合に対応し、外圧が大きな場合というのは(c)に対応します。この図から、(a)外圧が小さい場合はx方向に最も不安定な波数が存在し、x方向に分裂しやすいことがわかります。逆に、(b)外圧が大きい場合はy方向に最も不安定な波数が存在して、y方向に分裂しやすいこととなります。

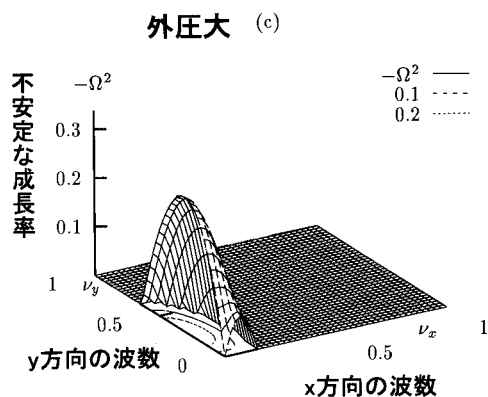
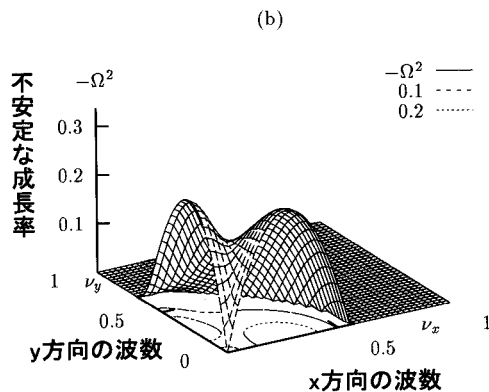
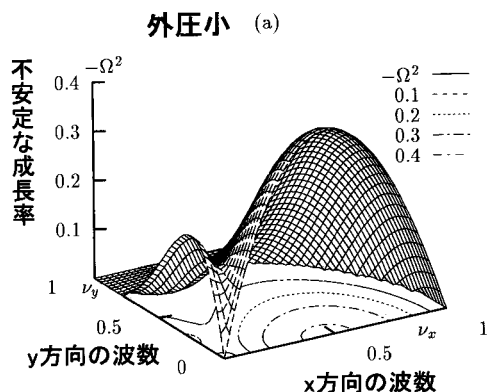
様々な外圧・磁場の大きさのもとで図4のような分散関係を求めることによって、それぞれの外圧、磁場の大きさのときの最も不安定となる方向を明らかにしています。その結果、一様磁場が平板に平行に貫いていると、磁場の大きさには関係なく、

外圧の大きさが中心圧力の0.63倍よりも小さい場合には、x方向に最も不安定になり、逆に大きい場合には、y方向に最も不安定になることが示されました。つまり、中心圧力の0.63倍よりも小さな外圧のときは、磁場に沿ってガスが収縮して磁場に垂直なフィラメントが形成され、0.63倍より大きな外圧のときには、磁場に平行なフィラメントが形成されやすいこととなります。

3. 2つの不安定モードとフィラメント形成の物理過程

次に、なぜ、磁場に垂直または平行な方向に不安定となるかを考えてみます。最も不安定となっているモードの固有関数を調べることにより、どのような物理機構によって不安定になっているかを知ることができ、図5、6にそれぞれ、外圧が小さい場合と大きい場合の最も不安定な成長率をもつ固有関数を平板の断面図として示しています。

外圧が小さい場合は、重力不安定性は収縮により不安定となる「圧縮モード」の方が卓越していることが固有関数からわかります(図5)。そこに磁場が入ると、磁力線に垂直な摂動は収縮による



↑ ↓
← → 図4 磁場を伴った平板状分子雲における重力不安定性の分散関係. 平板の厚みがスケールハイトの (a) 5倍, (b) $1/\sqrt{2}$, (c) 0.1倍の場合

磁気圧によって安定化されますが、磁力線に平行な摂動は、収縮しても磁力線を曲げないことから、ほとんど磁場の影響を受けません。よって、磁力線に平行方向に不安定になりやすく、磁力線に沿って収縮・分裂することから、磁場に対して垂直なフィラメントができます。

一方、外圧が大きくなると「圧縮モード」は抑

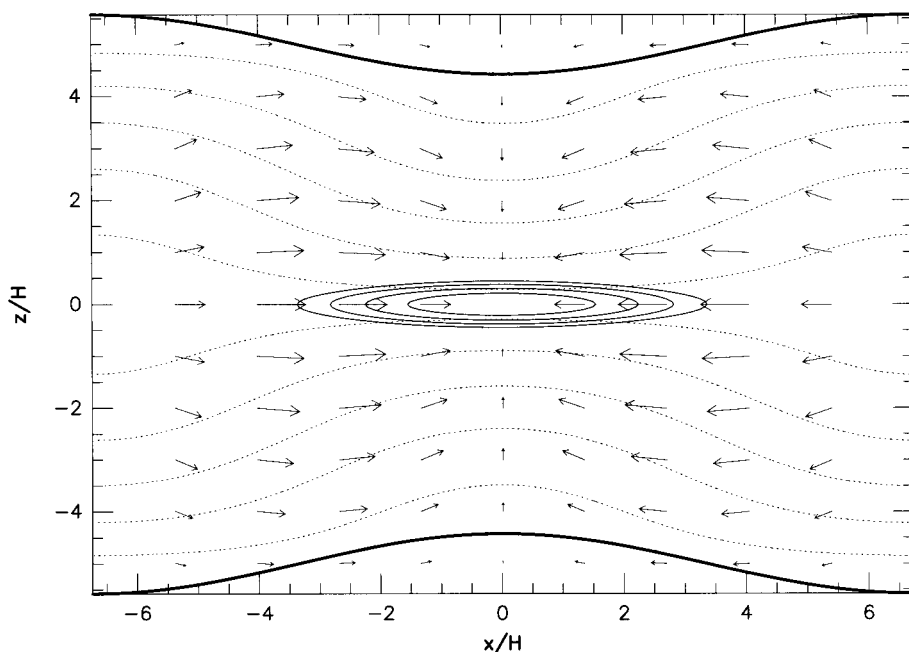


図5 最も不安定な成長率をもつ固有関数を表わした平板の断面図 (外圧が小さい場合). コントアが密度分布, 点線が磁力線, 矢印が速度分布, 太線が境界面を示す。

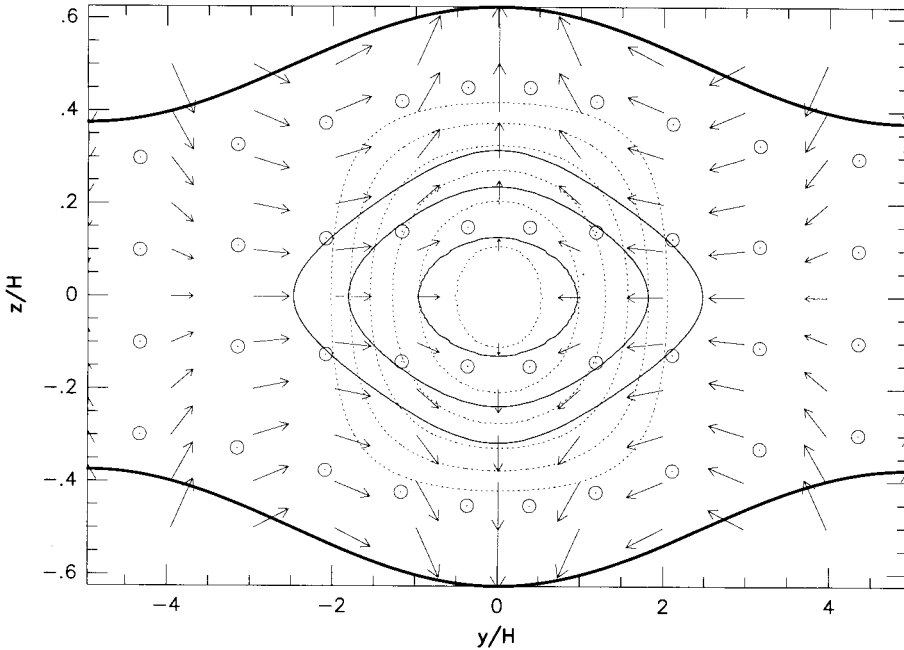
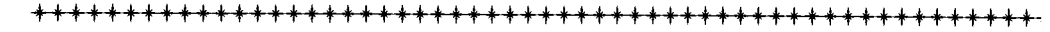


図6 最も不安定な成長率をもつ固有関数を表わした平板の断面図（外圧が大きい場合）. 実線コントアが密度分布, 点線コントアが磁力線密度, 点線が磁力線, 矢印が速度分布, 太線が境界面を示す.

えられて、変形により不安定となる「非圧縮モード」の方が卓越することが固有関数によってわかります（図6）。この時、磁力線に平行な摂動は変形によって磁気張力が働くので安定化しますが、磁力線に垂直な摂動は密度変化をせずに変形できるので、磁気圧は変わらず、磁場の影響を受けません。だから、磁場に沿ったフィラメントが形成されるのです。

これら、2つの重力不安定性のモード（圧縮モードと非圧縮モード）の違いによって、不安定とな

る方向の物理的意味を明快に説明することができました（表1）。そして、このような物理過程によって、これまで理論的に説明することができなかった、観測で見られる磁場に平行なフィラメントの形成機構が、外圧の効果が強ような状況で起こることが、本研究において初めて説明できたことになります。

表1 重力不安定性における2つのモードと磁場に対する不安定な方向の関係.

	磁場に平行な摂動	磁場に垂直な摂動
外圧小 圧縮モード	不安定	磁気圧により 安定化
外圧大 非圧縮モード	磁気張力により 安定化	不安定

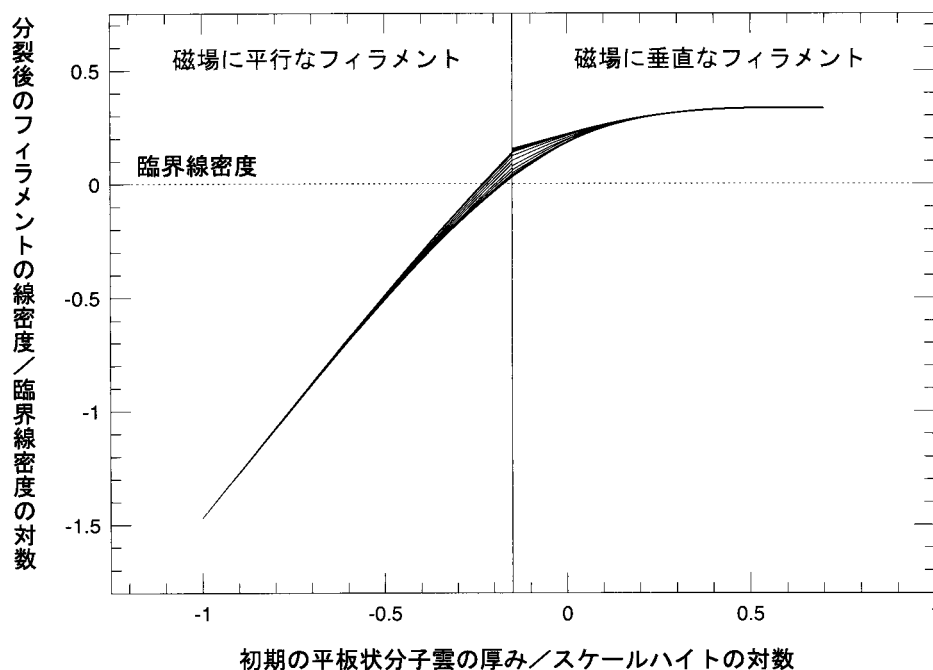


図7 様々な厚み（外圧の大きさ）の平板が分裂してできるフィラメントの線密度（線の違いは磁場の大きさの違いを表す）。実線の左側では磁場に平行なフィラメントに分裂し、右側では垂直なフィラメントに分裂する。

4. 分裂後の進化

外圧の違いによって、磁場に垂直または平行なフィラメントが形成されることが示されましたが、これらのフィラメントがその後、どのような運命をたどるのかを考えてみます。フィラメントに分裂後の星形成に至る進化を考えるために、平板が最も不安定な成長率をもつ波長で分裂したとして、分裂後のフィラメントの進化を考察します。

図7は分裂後のフィラメントの線密度を初期の平板の厚み（外圧の大きさ）に対して示しています。外圧が小さい場合は、磁力線の方向に対して垂直な軸を持つフィラメントを形成し、その場合の線密度は軸方向に収縮できるかどうかの臨界線密度 m_{crit} より大きくなります。垂直磁場は軸方向の収縮を止められないので、垂直磁場に貫かれたフィラメントは軸方向に収縮し続けることが予想できます。その先は状態方程式が断熱的になった

ところ ($10^{-16} \sim 10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$) で収縮が止まって分裂し²⁾、その際、分裂片の質量は0.1太陽質量程度になると予想されています。

一方、外圧が大きい場合は、磁力線の方向に対して平行な軸を持つフィラメントを形成し、その場合の線密度は軸方向に収縮できるかどうかの臨界線密度より小さくなります。よって、平行磁場に貫かれたフィラメントは軸方向には潰れず、軸方向には安定なフィラメントを形成します。このフィラメントは長さ方向には不安定となって分裂することができますが³⁾、この場合の成長時間は自由落下時間に比べて長いので、平行磁場に貫かれたフィラメントにおいては、より星形成が起こりにくいことが結論できました。図8は、以上のような考察にもとづき、フィラメントがさらに分裂してできた分裂片質量を初期の平板の厚み（外圧の大きさ）に対して示しています。

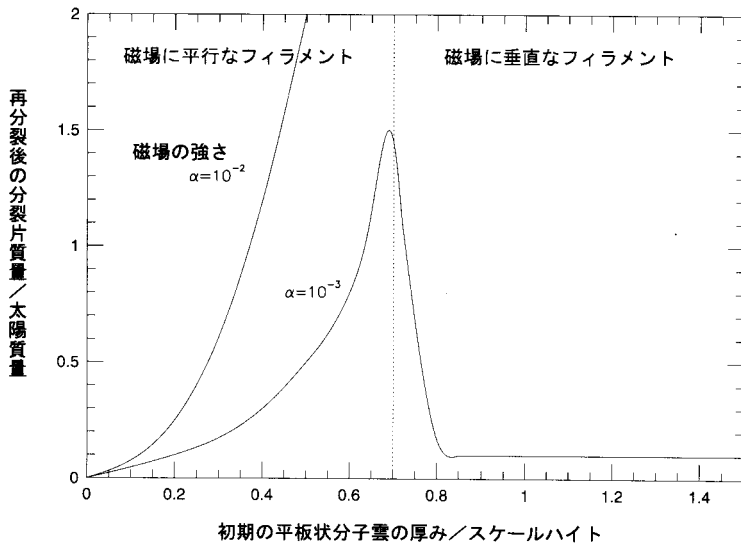


図8 平板が分裂してできるフィラメントが再分裂してできる分裂片質量. α は磁場の大きさを表わす. 点線の左側では磁場に平行なフィラメントから, 右側では磁場に垂直なフィラメントから分裂する.

5. まとめ

この研究により, 星間磁場の方向とフィラメントの軸の方向についての統一的な形成理論がはじめて示されることになります. その後の進化についても予想することができて, 星形成に対する環境効果の1つを明らかにできたことにもなりました(詳しくは論文参照⁴⁾). また, 非一様磁場に貫かれている場合や, 外的要因によって圧縮されている系のように平板が加速度を持っている場合についても同様に解析を行って, 外圧が大きいような状況で磁場に平行なフィラメントが形成されることは, 定性的には変わりがないことをこれまでに示しています.

さらに, 観測では磁場の大きさを測ることは難しく, 方向は天球に投影された成分を見ていますが, 観測される分子雲の形状と磁場の方向との関係, そして星形成の様子を統計的に議論することで, この理論を実際の観測で実証することができると考えられます.

本研究を進めるにあたり, 指導教官の観山正見教授, 犬塚修一郎博士をはじめとする多くの方々のご指導, ご協力をいただきました. 深く感謝致します.

参考文献

- 1) Heiles C., Goodman A. A., McKee C.F., Zweibel E. G., 1993, *Protostars and Planets III*, 279
- 2) Inutsuka S., Miyama S. M., 1997, *ApJ* 480, 681
- 3) Nagasawa M., 1987, *Prog. Theor. Phys.* 77, 635
- 4) Nagai T., Inutsuka S., Miyama S. M., 1998, *ApJ* 506, 306

An Origin of Filamentary Structure with magnetic fields in Molecular Clouds

Tomoya NAGAI

National Astronomical Observatory, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: The gravitational instability of a pressure-confined isothermal gas layer with uniform magnetic fields is investigated in the linear regime. We solve the eigenvalue problem for the growth rate of linear perturbations and obtain the dispersion relation and eigenfunctions. If the effect of external pressure is large, the layer with magnetic field forms filamentary structure parallel to magnetic fields. If the effect of external pressure is small, the layer forms filamentary structure perpendicular to magnetic fields. Fate of unstable layer is expected.