

ホール効果によって引き起こされる 原始惑星系円盤の分化的進化



塚本 裕介

〈鹿児島大学 鹿児島大学理工学研究科物理・宇宙専攻 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40
理化学研究所 計算宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉
e-mail: tsukamoto@milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp

原始惑星系円盤は生まれたばかりの星の周囲に形成する遠心力で支えられた天体である。原始惑星系円盤は惑星形成の舞台であり、その形成進化過程はわれわれの太陽系を含む多様な惑星系がどのような環境下で形成したかを理解するうえで重要である。われわれの研究チームは、これまであまり注目されてこなかった非理想磁気流体力学過程の一つであるホール効果が円盤形成進化に大きな影響を与えることを発見した。具体的には原始惑星系円盤の母体となる分子雲コアの磁場と角運動量が平行か反平行かによって円盤のサイズが大きく異なるという興味深い結果を得た。また、反平行の場合、円盤回転と逆回転するエンベロープが円盤進化中に形成しうることもわかった。本稿では、これらの結果について説明する。

1. イントロダクション

1.1 はじめに：二つのシミュレーション結果

原始惑星系円盤とは生まれたばかりの星の周囲に形成する遠心力で支えられた天体である。原始惑星系円盤はわれわれが住む地球を含む惑星たちの形成母体であり、その形成進化過程は多様な惑星系の形成環境を理解するうえで重要である。筆者は大学院時代から一貫して原始星周囲の円盤の形成と進化過程について3次元シミュレーションを用いて研究してきた。

いきなりではあるが、図1にそのようなシミュレーションの例を示す。このシミュレーションでは、原始星と円盤の形成母体となる分子雲コアを初期条件として、その重力崩壊に伴い原始星が形成するまでを計算したものである。図は原始星形成直後の x - y 平面における密度分布を示している。分子雲コアの角運動量ベクトルの方向を z 軸と一致するようにとっているため、円盤は図に示

した x - y 平面上に形成する。

左の図に示したシミュレーションでは、数十AUサイズの円盤は存在しておらず、密度が高い領域 ($\rho > 10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$) は数AU程度の非常にコンパクトな構造をもっている。左上に中心領域を拡大した図を示しているが、拡大した中心領域では顕著に回転した構造が見える。これは遠心力で支えられた円盤であり、このシミュレーションでは中心1AU程度の原始星のごく近傍に円盤が形成していることがわかる。

一方で、右の図で示したシミュレーションでは20AU程度のスケールで顕著に回転した高密度構造が形成している。実際に $r \lesssim 20$ AUの領域でガスは遠心力で支えられており、このシミュレーションでは半径20AU程度の円盤が原始星形成直後に形成した。このように図1に示した二つのシミュレーション結果には円盤の半径が10倍以上異なるという顕著な違いが見取れる。

では、これら二つのシミュレーションの違いは

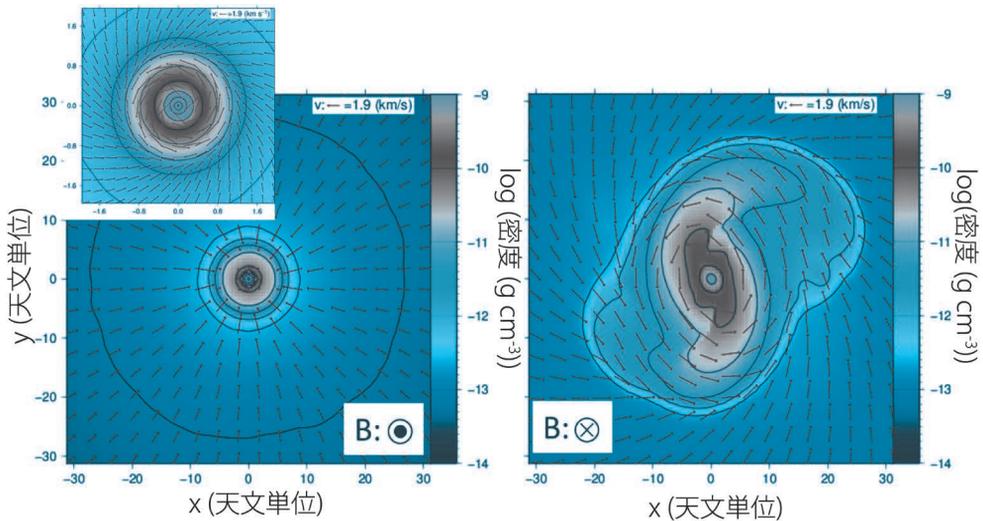


図1 中心領域のx-y平面上の密度マップ。矢印は速度場を表す。左図はorthoモデル、右図はparaモデルを表す。左図左上の図は中心1 AU程度の領域の拡大図。Tsukamoto¹⁾より転載。

何だろうか？ 読者の中には、左のシミュレーションでは初期分子雲コアの角運動量が大きく、右のシミュレーションでは角運動量が小さいのではないかと推測されたかたもおられるかもしれない。あるいは、磁場による角運動量の抜き取りが円盤形成に重要な役割を果たすことをご存じの方は、左のシミュレーションでは磁場が強く、右のシミュレーションでは磁場が弱いと推測されたかもしれない。しかし、実はこの二つのシミュレーションでは、考慮している物理過程（非理想磁気流体力学（MHD）効果、輻射輸送、自己重力など）も初期分子雲コアの質量、角運動量そして磁場強度も全く同一である。

では、何が二つのシミュレーションの間で異なるのだろうか？ それは初期分子雲コアの磁場の方向である。図1のそれぞれのパネルの右下、左下に示したように、左のシミュレーションでは初期分子雲コアの磁場はz軸正の向き（あるいは初期の角運動量ベクトルと平行）、右のシミュレーションでは初期分子雲コアの磁場はz軸負の向き（あるいは初期の角運動量ベクトルと反平行）を向いていた。このような分子雲コア内の磁場の方

向が、原始星形成直後の円盤のサイズに大きな影響を与えていたのである。そして、このような違いをもたらす物理過程が今回のタイトルにもあるホール効果である。本稿ではなぜこのような違いが生じるのかを説明していく。

1.2 分子雲コア内磁場の役割

原始惑星系円盤は重力崩壊する分子雲コア内で原始星の周囲に形成する天体である。円盤は遠心力によって中心星重力と釣り合っていることから重力崩壊しているコア内におけるガスの角運動量の時間進化を調べることで円盤の形成を研究するうえで本質的である。そのためには分子雲コア内の磁場を考慮することが必要になる。磁場は高速回転している中心領域と比較的遅く回転している外縁領域をつなぎ中心領域から角運動量を抜き取る。この過程は磁気ブレーキと呼ばれ、80年代から研究されてきた^{2), 3)}。特に崩壊する分子雲コア内での磁気ブレーキに関する研究は2000年代初頭に精力的に行われてきており^{4), 5)} 理想MHD近似（電気伝導度が無限大とする近似）のもとでは磁気ブレーキは非常に強く、原始星形成初期には円盤の形成が強く抑制されることがわかった。すな

わち、降着ガスはほぼ直滑降で中心の原始星に落ち込み、その周囲には円盤が形成しないことがわかった。この現象は「Magnetic Braking Catastrophe」と呼ばれ⁶⁾、2000年代後半から最近まで円盤形成の理論上の大きな困難とみなされてきた。

しかしながら、2010年代に入るとALMA望遠鏡の観測によって最も若いClass 0と呼ばれる段階の原始星（以下Class 0原始星）にも実際にケプラー回転した円盤が発見されてきており⁷⁻⁹⁾、上記の円盤形成進化描像では、観測結果を十分に説明できないことが認識されてきた。そのため、より現実的なシミュレーションが求められてきた。

1.3 分子雲コアの電離度と非理想磁気流体力学過程

上述のシミュレーションを含む多くの先行研究では「理想MHD近似」が用いられてきた。これはコア内の電気伝導度が十分に高い（あるいはガスの電離度が十分に高い）と仮定することに対応する。しかしながら、分子雲コア内の電離度は一般には非常に低く、ガスのほとんどは中性の水素分子である。このため、理想MHD近似は一般には成り立たない。実際に先行研究において高密度領域では理想MHD近似が破れることが指摘されてきた¹⁰⁻¹²⁾。

理想MHD近似が破れることによって現れる効果が非理想MHD効果であり、オーム散逸、ホール効果、両極性散逸の三つからなる。非理想MHD効果はイオンや電子の慣性が無視できる場合、磁場の誘導方程式（とエネルギー方程式）に現れる。非理想MHD効果を考慮した誘導方程式は

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times \{ \eta_o (\nabla \times \mathbf{B}) + \eta_H (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}} - \eta_A ((\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}}) \times \hat{\mathbf{B}} \} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、第一項が通常理想MHD項、それに続く三つの項が非理想MHD効

果でそれぞれオーム散逸、ホール効果、両極性散逸である。 η_o, η_H, η_A はそれぞれの非理想MHD効果に対応する磁気抵抗率、 $\hat{\mathbf{B}}$ は磁場方向の単位ベクトルを表す。

オーム散逸は微視的には水素分子とイオン、電子の衝突が頻繁に起こり、荷電粒子と磁場の結合が失われることによって磁場が散逸する過程である。一方で両極性散逸は水素分子と荷電粒子の衝突の頻度が低くなり荷電粒子は磁場と結合しているが、質量の大部分を担う水素分子は磁場をすり抜けてしまうために巨視的には磁場が散逸しているように見える現象である。言い換えれば、荷電粒子と中性粒子の「衝突が十分起こらない」ために生じる磁気散逸過程である。

これらの磁気散逸過程は分子雲コア内では円盤の前駆天体である第一コアの密度領域程度 ($\rho \geq 10^{-14} - 10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$) で重要となり、磁気ブレーキの効果を第一コア内で抑制する。これによって円盤は原始星の形成に付随して形成することが近年の3次元シミュレーションによって明らかになった¹³⁻¹⁵⁾。すなわち、磁気散逸を考慮することが円盤形成を理解する上で本質的に重要だったのである。

2. ホール効果

では、残されたもう一つの非理想MHD効果であるホール効果は円盤形成にどのような役割を果たすのだろうか？これが本稿の主題である。実はホール効果は他の二つの非理想MHD効果とは大きく異なる性質をもち、円盤進化過程の描像を大きく変える可能性がある。この点を理解するために以下ではホール効果の性質とその分子雲コア内での役割について説明する。

2.1 ホール効果の性質

ホール効果はオーム散逸と両極性散逸の中間的な状況下、すなわち、微視的には衝突断面積の大きい荷電粒子（例えばイオン）が衝突によって水素分子と共に運動し、衝突断面積の小さい荷電粒

子（例えば電子）は磁場と結合しているような状況で重要となる。このことからホール効果はごく限られた密度領域で働くことが想像される。実際にホール効果は分子雲コア内では $\rho \sim 10^{-16} - 10^{-14} \text{ g cm}^{-3}$ といった比較的限られた密度領域で効果を発揮する。このような限られた密度領域でしか働かない点とそのシミュレーションの難しさから、上記を含めほとんどすべての先行研究ではホール効果は無視されてきた。

しかしながら、ホール効果には電流の方向に磁場を誘導し、自発的な回転を誘起するという、他の二つの非理想MHD効果にはない特別な性質があり、特に降着ガスの角運動量の進化を考えるうえで重要な役割を果たしうる。この性質を理解するために数式を使って説明させていただくことをご容赦いただきたい。ホール効果が他の二つの非理想MHD効果より大きい場合、他の二つの項を無視して磁場の誘導方程式は

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta_H (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}}) \quad (2)$$

のようになる。ここで

$$\mathbf{v}_{\text{Hall}} = -\eta_H \frac{(\nabla \times \mathbf{B})}{|\mathbf{B}|} = -\eta_H \frac{c\mathbf{J}}{4\pi|\mathbf{B}|} \quad (3)$$

によってホールドリフト速度 \mathbf{v}_{Hall} (c, \mathbf{J} はそれぞれ光速、電流密度) を定義すると、誘導方程式は

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \{(\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{Hall}}) \times \mathbf{B}\} \quad (4)$$

と書き直すことができる。このように非理想MHD効果の項を速度の形に書き直すことは、非理想MHD効果による磁場の時間発展を理想MHD項の直感を援用して理解するうえで有用である。

さて、式(4)からわかるように、磁場はガスの運動によって引きずられるだけではなく、たとえばガスが止まっても、あたかも \mathbf{v}_{Hall} の速度でガスが動いているかのように時間発展する。 \mathbf{v}_{Hall} の著しい特徴は式(3)からわかるようにその方向が電流と平行である点である。他の二つの非理

想MHD効果による磁場の進化では電流と平行な方向には磁場を誘導できない。

2.2 ホール効果が分子雲コアの重力崩壊中に果たす役割

「 \mathbf{v}_{Hall} が電流と平行である」あるいは「ホール効果によって磁場が電流の方向に引きずられる」という性質は崩壊する分子雲コア内でのガスの角運動量進化、そして円盤形成に興味深い影響を与える。崩壊する分子雲コア内では、(通常のガスの運動によって) 磁場は中心方向に引きずられるため砂時計型の磁場配位が実現する。同時に磁場が増幅され、ローレンツ力が強くなることによってガスは磁場に沿って落下するようになる。その結果、分子雲コアの中心領域には pseudo-disk と呼ばれる扁平な構造が形成し、その中央面はちょうど砂時計配位の「首」の部分に一致する。(図2に概念図を示す)。さて、電流密度が $\mathbf{J} \propto \nabla \times \mathbf{B}$ であることからわかるように砂時計型配位では磁場が大きく曲がる pseudo-disk の中央面に電流シートが形成する。するとこの電流の方向(紙面に垂直な方向)に(トロイダル)磁場が誘導され、磁気張力によってトロイダル方向のガスの運動、すなわち回転運動が引き起こされることがわかる。これによってホール効果は直接的にガスの回転運動に影響を与える。

このように、ホール効果は定性的には面白い性質があるが、定量的にホール効果がガスの回転を顕著に変えるほどの強度をもつかを調べる必要がある。そこで、実際ホール効果によってどれくら

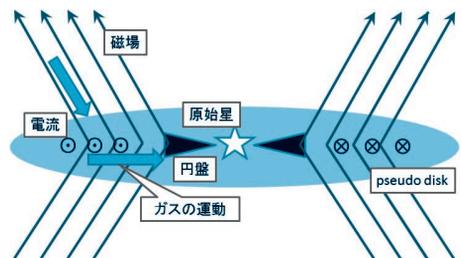


図2 重力崩壊する分子雲コア内部の構造の概念図。

いの強さの回転が誘起されうるかを見積もってみる。簡単のため初期に回転していないような分子雲コアの重力崩壊を考える。その場合、崩壊中にトロイダル磁場が誘導され、ガスに磁気トルクがかかることでガスが回転を始める。回転速度 v_ϕ が $-v_{\text{Hall},\phi}$ に等しくなったとき、式(4) からガスの回転によるトロイダル磁場の誘導とホール効果による誘導が打ち消し合う。したがってホール効果が十分に働く場合、回転速度は $v_{\text{Hall},\phi}$ に収束すると予想できる。実際、先行研究ではこのような収束が起こることが確認されている¹⁶⁾。以上から、pseudo-disk内でのホール速度を見積もれば、ホール効果によって誘起される典型的な回転速度を見積もれるはずである。具体的に数値を見積もると（導出の詳細は文献18参照）、 $v_\phi \sim v_{\text{Hall},\phi} \sim 1.0 \times 10^4 \text{ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ となる。ここから pseudo-diskのサイズスケールである100 AUでの比角運動量は $j = r \times v_\phi \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ 程度と計算できる。これを用いて、1太陽質量の星が形成する間にホール効果によってどの程度の角運動量が誘起されうるかを計算すると、

$$J_{\text{disk,Hall}} = M^* j \sim 3.1 \times 10^{52} \text{ (g cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

という値が得られる。一方で半径100 AU、中心星、円盤の質量がそれぞれ $1 M_\odot$, $0.01 M_\odot$ であるようなケプラー円盤の角運動量は $J_{\text{disk,Kep}} \sim 5 \times 10^{51} \text{ (g cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ 程度であり、 $J_{\text{disk,Hall}}$ より1桁ほど小さい。したがってホール効果が誘起しうる回転の強度は観測されている円盤を十分説明できるほど大きいことがわかる。以上の議論から、ホール効果は円盤形成進化において大きな影響を与えることが予想される。

最後に分子雲コアの初期回転とホール効果が誘導する回転の方向の関係について説明する。ホール効果が誘起する回転の方向は分子雲コア内の典型的な密度では大局的な磁場の方向に対して左ネジの方向である（ここで $\eta_{\text{H}} < 0$ と仮定した。この仮定は本稿で議論する密度範囲で正しい）。した

がって、分子雲コアの角運動量ベクトルと磁場が平行の場合ホール効果が誘起する回転の方向は、初期の回転と逆方向である。そのためホール効果は磁気ブレーキの効果を強める。一方で初期分子雲コアの角運動量ベクトルと磁場が反平行の場合、ホール効果が誘起する回転は初期の回転と同じ方向であり、全体として磁気ブレーキの効果を弱める。このようにして、ホール効果によって大局的な磁場の方向という今まで重要視されてこなかった要素がガスの角運動量進化の違いをもたらすのである。

3. 3次元シミュレーション結果

3.1 円盤サイズの分化的進化

以上の理論的な準備のもと、再び図1に示したシミュレーション結果を見直してみたい。左のパネルに示した磁場と角運動量が平行な分子雲コア内では原始星形成直後に半径1 AU程度の円盤が形成した（以下このモデルを *ortho* モデルと呼ぶ）。一方で磁場と角運動量が反平行な分子雲コアでは半径20 AU程度の円盤が形成している（以下このモデルを *para* モデルと呼ぶ）。*para* モデルの円盤に現れた非軸対称の構造は円盤の自己重力不安定性による渦状腕である。実際この円盤のToomreのQ値（自己重力不安定の度合いを表すパラメータで小さいほど不安定）は1程度である。この渦状腕は円盤の初期進化における角運動量輸送を担うと考えられる。

ここで降着ガスの速度の違いについて注目する ($r > 20 \text{ AU}$ の領域)。矢印で示したのはガスの速度場である。*ortho* モデルと *para* モデルの速度場を比べると、円盤の外側ですでに速度構造が大きく異なることに気づく。*ortho* モデルでは円盤の外側のガスは回転成分をほとんどもたずに中心に向かってほぼ直滑降で降着しているのがわかる。一方で、*para* モデルでは降着ガスは降着速度と同程度の回転速度をもっている。これは、ガスの角運動量が円盤に降着する前にすでに pseudo-

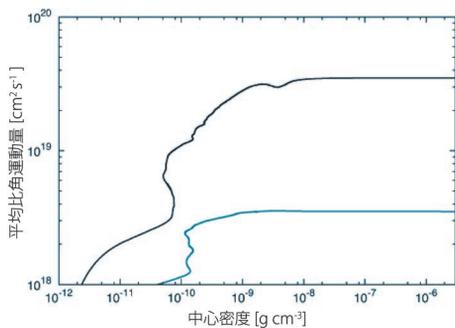


図3 比角運動量の中心密度に対する進化. 横軸はシミュレーションの中心密度, 縦軸は密度が $\rho > 10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$ を満たす領域の平均の比角運動量. 黒線, 青線, はそれぞれ *para* モデル, *ortho* モデルの結果を表す.

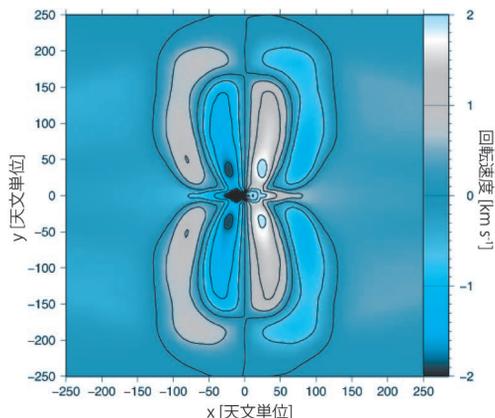


図4 *para* モデルの x - z 平面における回転速度マップ. Tsukamoto¹⁶⁾ より転載.

disk内 ($r \sim 100 \text{ AU}$ 程度) で大きく変化していることを示している. このことはホール効果が $\rho \sim 10^{-16} - 10^{-14} \text{ g cm}^{-3}$ 程度の密度で効果を発揮するという点と整合的である. 一方, 形成した円盤の中では密度が十分高く磁気散逸過程が優勢であり, ホール効果による角運動量変化は無視できるほど小さい.

図1に示したように円盤サイズは顕著に異なることがわかったが, 定量的にはガスの比角運動量はどの程度異なるだろうか? その点を示したのが図3である. 横軸はシミュレーションの中心密度, 縦軸は密度が $\rho > 10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$ である領域の平均の比角運動量である. 中心密度は経過時間の増加関数であるため, この図は中心領域の比角運動量の時間発展とみなすことができる. 黒線, 青線はそれぞれ *ortho* モデル, *para* モデルの比角運動量の時間進化を表す. ホール効果による回転の抑制, 促進の効果によって, 原始星が形成したとき ($(\text{中心密度}) > 10^{-6} \text{ g cm}^{-3}$), *ortho* モデル, *para* モデルの間で比角運動量は1桁も異なることがわかる. 中心密度が $10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ 程度で比角運動量が急激に増大するのは, 第一コア形成に伴い, 重力崩壊が一時的に止まり, 中心密度の上昇の速度が遅くなるためである. 本シミュレーションでは原始星形成直後で計算を終了しているが,

比角運動量の違いは降着ガスの回転速度の違いに起因していることから, 原始星形成後のより長期の進化においても, 円盤サイズの違いは維持されると期待できる. したがって, 分子雲コア磁場の角運動量に対する平行/反平行性は原始星形成後の円盤進化に対しても大きな影響を与えることが予想される.

3.2 逆回転エンベロープの形成

上記のようにホール効果は分子雲コア内でポロイダル磁場からトロイダル磁場を誘導し, 磁気張力によってガスの回転を誘起する. このとき, 角運動量が保存するため, 誘起した回転の角運動量と同量の負の角運動量をどこかに捨てる必要がある. 砂時計型磁場配位の場合, 中央面で誘起した回転に伴う負の角運動量フラックスは磁力線を伝わって上空に輸送される. このため, pseudo-disk 上空のエンベロープの回転は遅くなり, 十分ホール効果が効く場合, 円盤の回転に対して逆回転を始める.

このような逆回転するエンベロープの様子を示したのが図4である. この図は *para* モデルの x - z 平面における回転速度のマップを示したものである. ちょうど図1の右図に示した円盤を横から見ている場合に対応する. 円盤の回転方向は $x > 0$ では読者から紙面に向かう方向, $x < 0$ では紙面

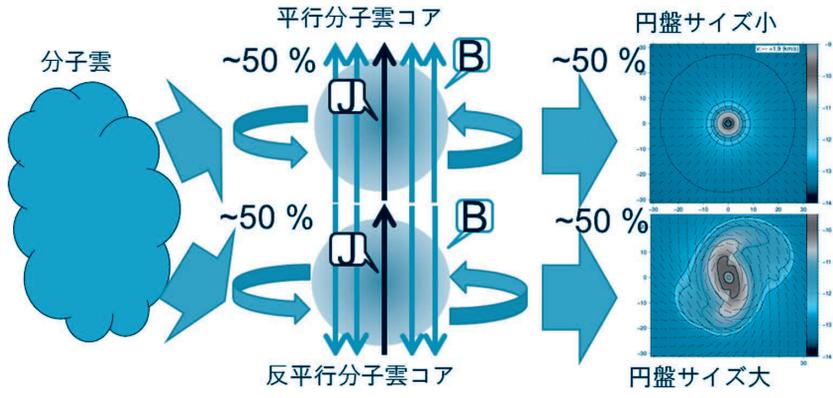


図5 原始惑星系円盤の分化的進化の概念図。

から読者に向かう方向である。円盤の回転によって磁場が引きずられることによって円盤の上空も円盤と同様の方向に回転していることがわかる。この上空の「順回転領域」を取り囲むようにそれと逆方向に回転している領域を見て取ることができる。これが、逆回転するエンベロップである。そのサイズはシミュレーションの終了時点で200 AU程度である。この逆回転構造は時間が進むにつれて膨張しており、より後期のClass 0/I原始星段階ではより大きなスケールまで拡がると予想される。円盤に対して逆回転しているエンベロップ構造は非常に特徴的であり、もしこれが将来の観測で発見されれば、ホール効果や他の非理想MHD効果が実際の円盤形成進化過程で重要になっていることの直接的な証拠になると考えられる。

4. 考察：円盤進化過程の分化

本稿ではホール効果が原始惑星系円盤の進化過程に与える影響を説明した。ホール効果を考慮することによって、円盤のサイズは初期分子雲コアの角運動量ベクトルと磁場が平行か反平行かによって大きく異なることがわかった。すなわち平行のコアでは、ホール効果はガスの回転を強く抑制し、円盤サイズは小さくなり、反平行のコアでは、ホール効果が回転を促進することで円盤のサ

イズは大きくなる。

このことは、若い円盤のサイズ分布が2峰性を持つ可能性を示唆する。分子雲コアの形成の際には角運動量ベクトルと磁場が平行／反平行の分子雲コアがそれぞれおよそ半分ずつできることが予想される。なぜならば、分子雲コアの密度範囲では、ホール効果は無視しうると考えられており、磁場の平行／反平行によってガスの力学進化は影響を受けないためである。しかしながら、本稿で見たように、この平行／反平行の違いは円盤形成段階で円盤サイズに大きな影響を与える。したがっておよそ半分の若い原始星（Class 0原始星）は比較的大きな円盤、もう半分は比較的小きな円盤をもつことが予想される。このようにして円盤は分子雲コアの磁場と角運動量の平行、反平行性に応じて分化的に進化し、若い円盤のサイズ分布は2峰性をもつことが期待される（図5に概念図を示す）。

現在までの観測でも、Class 0原始星には数十AUほどの比較的大きな円盤が存在するもの（例えばVLA1623A, L1527^{17), 18)}）と円盤が存在しないか、存在しても数AU以下のサイズしかもたないもの（B335¹⁹⁾）が見つかっている。今後Class 0原始星周囲の円盤が多数観測され、そのサイズ分布を調べられることでわれわれが提案する円盤サイズの2峰性が検証されることを期待している。

謝 辞

本稿の内容は、2015年に発表した論文に基づいている¹⁾。この研究を遂行するにあたって、多くのかたにご助言、励ましをいただいた。この場を借りて御礼を申し上げたい。特に、大学院時代からお世話になった町田正博氏と名古屋大学でのポストク時代の受け入れ教官である犬塚修一郎氏に感謝したい。

参考文献

- 1) Tsukamoto Y., et al., 2015, ApJL 810, 26
- 2) Mouschovias T. C., 1985, A&A 142, 41
- 3) Nakano T., 1989, MNRAS 241, 495
- 4) Tomisaka K., 2000, ApJL 528, 41
- 5) Allen A., et al., 2003, ApJ 599, 363
- 6) Mellon R. R., et al., 2008, ApJ 681, 1356
- 7) Murillo N. M., et al., 2013, A&A 560, 103
- 8) Ohashi N., et al., 2014, ApJ 796, 1310
- 9) Sakai N., et al., 2014, Nature 507, 78
- 10) Nakano T., et al., 1986, MNRAS 221, 319
- 11) Umebayashi T., et al., 1990, MNRAS 243, 103
- 12) Nishi R., et al., 1991, ApJ 368, 181
- 13) Machida M. N., et al., 2011, MNRAS 413, 2767
- 14) Tomida K., et al., 2015, ApJ 801, 117
- 15) Tsukamoto Y., et al., 2015, MNRAS 452, 278
- 16) Krasnopolsky R., et al., 2011, ApJ 733, 54
- 17) Ohashi, N., et al, 2014, ApJ, 796, 131
- 18) Sakai, N., et al, 2014, Nature, 507, 78
- 19) Yen H.-W., et al., 2015, ApJ 812, 129

Bimodality of Disk Evolution Induced by Hall Effect**Yusuke TSUKAMOTO**

Department of Physics and Astronomy, Graduate School of Science and Engineering Kagoshima University

Computational Astrophysics Lab., RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Protoplanetary disks are astronomical objects around protostars that are mainly supported by the centrifugal force. They are birth place of planets and their formation and evolution process provide the information about the environment of the planet formation. We investigate the influence of the Hall effect during the formation process of the protoplanetary disk and found that the size of the disk is significantly affected by a simple difference whether the rotation vector and the magnetic field are parallel or anti-parallel. We also found that the counter-rotating envelopes against the disk rotation appear.