原始惑星系円盤の大域的非理想磁気流体シミュレーション

Global Simulations of Protoplanetary Disks with Non-Ideal Magnetohydrodynamic Effects

代表者氏名　富田 賢吾
所属 大阪大学

１．研究目的

原始惑星系円盤は惑星形成の現場であると同時に，円盤を通したガス降着によって原始星の進化を左右する重要な天体である。これまでの研究により原始惑星系円盤内ではいわゆる磁気回転不安定性(Magneto-Rotational Instability, MRI)によって乱流が駆動され，これが実効的な粘性として輸送過程を担い円盤を進化させる。一方原始惑星系円盤は低温かつ高密度であるため電離度が低く非理想磁気流体効果が強く働きMRI が抑制される領域(デッドゾーン)が存在する。これまでの研究の多くは局所的な計算に基づくものであり，円盤内でデッドゾーンがどのように分布し各領域内及び領域の境界においてどのような現象が発生するか，その結果どのような円盤構造が実現されるかは未だ十分に明らかになっていない。特にデッドゾーンと MRI が活発なアクティブゾーンの境界では角運動量・物質輸送効率の違いからガスが滞留し惑星形成に影響する可能性がある。また先駆的な大域的シミュレーションによって MRI 乱流のみならず円盤表面から大域的磁場によって駆動されるアウトフローが円盤進化に重要な役割を果たすこともわかっている。これらすべてを整合的に扱うためには MRI によって駆動される乱流を分解する非理想 MHD 効果を取り入れた大局的高解像度磁気流体シミュレーションが必要である。本研究では，Athena++コードを用いた大規模計算によりこの問題に真正面から取り組み，大域的非理想磁気流体計算によって原始惑星系円盤の現実的構造を明らかにする。

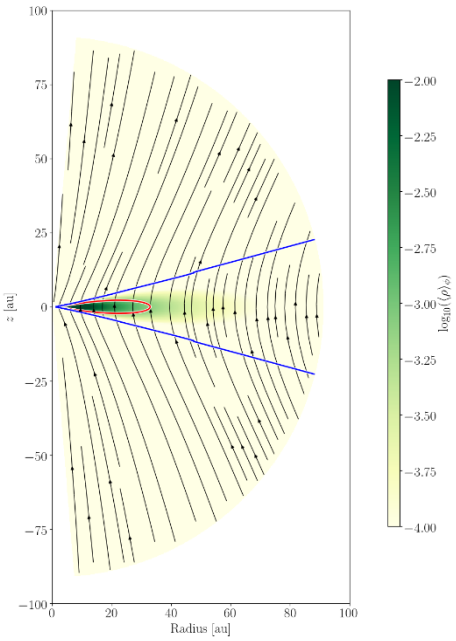

図１初期条件の密度分布
黒線は磁力線を表す

２．研究成果の内容

本研究では太陽質量の星の周囲の原始惑星系円盤の外側(１AU から 100ＡＵ)に着目して，オーム散逸と両極性拡散を考慮した大域シミュレーションをおこなった。図１は初期条件を表している。円盤の内側では密度が高いためオーム散逸(赤線の内

側：オーム散逸によるデッドゾーン)が効き，外側では両極性拡散(青線の内側：両極性拡散によるデッドゾーン)が効く。円盤部のほぼ全域でデッドゾーンとなることを示している。

図２は，円盤内縁(1AU)が約 200 周回転したあとの密度分布を表している。10 AU より内側で，磁場形状が円盤赤道面に対して上下非対称になっており，デッドゾーン内のポロイダル磁場が傾いていることが分かる。デッドゾーンの外ではガスは磁場に結合しているため，磁場がデッドゾーンの上と下でねじられトロイダル磁場が増幅することがわかった。デッドゾーン内部のガスは増幅された磁場により，デッドゾーンであるにも関わらず，強い磁気トルクを受けるという興味深い現象を発見し，新しい角運動量メカニズムになる可能性がある。また，デッドゾーン上空のガス運動にも上下非対称性がみられる。デッドゾーンの上では磁気トルクによりガスが落下する一方で，下では磁気遠心力風により外向きのガス流が駆動されることがわかった。これらの現象は，非理想効果を考慮した円盤の大域計算をおこなったことで見えてきたと考えている。我々はこれらの上下非対称性は自発的に発達することを予想しており，現在その解析をおこなっている。

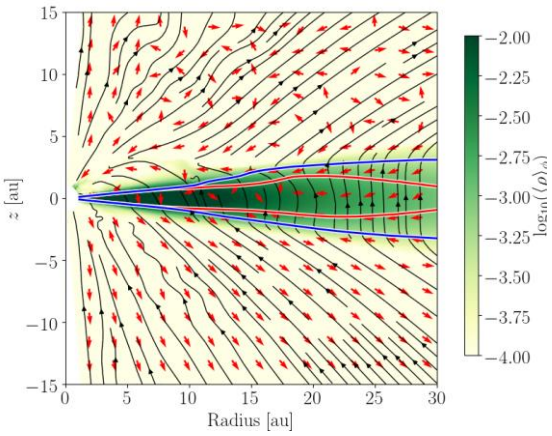

図２　約 200 周後の密度分布。
黒線はポロイダル磁場を表す。
赤矢印は速度の方向を表す。

３．学際共同利用として実施した意義

本研究は現実的な円盤構造(アスペクト比～0.03)を分解した，２桁に及ぶダイナミックレンジをもつ高解像度大域計算であり，その実現には大規模並列計算が可能な学際共同利用計算機を用いて初めて可能であった。大域構造を解いた本研究により初めて上下非対称性といった新しい現象も見え始めている。

４．今後の展望

申請時には時間幅を円盤内縁の回転速度から見積もっていたが，非理想 MHD 効果によって時間幅が一桁以上制限されることがわかり，当初の見積もりより大幅に計算時間がかかることが判明した。それに加え，計算待ち時間が予想以上に長かったため，安定な計算には成功したものの，計算領域内縁において約 200 周までの計算にとどまった。円盤の外側が十分進化するためにはさらなる長時間の計算(～1000 周)を必要とするため，時間幅を大きくとる工夫(例えば super-time stepping)などを取りながら，長時間計算を実現しつつ，円盤大域の磁気流体力学の解析を進める必要がある。

５．成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

・富田賢吾、Athena++: a New MHD Simulation Code with Adaptive Mesh, Refinement, The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, 2018, 10/22-26, 成功大学、台南、中華民国

・富田賢吾、MHD Simulations with Athena++: from Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Max Planck Princeton Center Workshop 2019, 2019, 2/18-21, 東京大学

・富田賢吾、Inside Athena++, Athena++ Workshop 2019, 2019, 3/18-22, University of Nevada, Las Vegas, USA

・岩崎一成、Global Non-ideal MHD Simulations of Protoplanetary Disks: Inner Dead Zone Boundaries, Athena++ Workshop 2019, 2019, 3/18-22, University of Nevada, Las Vegas, USA

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
COMA			
Oakforest-PACS	○	291,600	
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			