

銀河系中心部分子雲ループの磁気流体シミュレーション



松元

松元 亮治

〈千葉大学大学院理学研究科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33〉

e-mail: matumoto@astro.s.chiba-u.ac.jp

野澤 恵

〈茨城大学大学院理工学研究科 〒310-8512 水戸市文京 2-1-1〉

高橋 邦生, 町田 真美

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

銀河系中心で発見された分子雲ループの形状とループに沿う速度分布は、分子雲ループが太陽表面の浮上磁気ループに類似した現象であることを強く示唆している。そこで、銀河系中心の重力ポテンシャルを与えて中心核ガス円盤から磁気ループが浮上する過程の磁気流体シミュレーションを行った。その結果、ループに沿って 50 km/s 以上の速度差ができること、浮上ループとともに持ち上げられた円盤ガスがループに沿って落下する際に衝撃波が形成され、円盤ガスを加熱することなどが示された。

1. はじめに

「なんてん」によって発見された銀河系中心部の分子ガスループ¹⁾は銀河面から 200 pc の高さに達している。ループに沿って単調に変化する速度分布と 50 km/s 以上の速度差はループの頂上から両端に向かって分子ガスが落下していると考えると自然に説明することができる。このループは太陽コロナで観測される磁気ループを想起させる。しかしながら分子ガスの温度は 100 K 程度、音速は 1 km/s 程度しかない。この分子ガスが音速の 20 倍以上もの速度で運動することは可能だろうか？

分子ガスの質量を 10^5 太陽質量とした場合、必要なエネルギーは 10^{51} erg である。銀河円盤内で発生した超新星爆発により分子ガスをシェル状に掃き集める場合、視線速度とともにループサイズ

が変化するはずであり、観測と一致しない。他方、 $30 \mu\text{G}$ 程度の磁場があれば 100 pc^3 中の磁気エネルギーで上記のエネルギーを賄うことができる。

われわれが銀河系中心分子ループ発見のニュースを聞いたとき、まず思い浮かべたのは図 1 のように太陽内部で強められた磁場が表面に浮上し、活動領域を形成する際に観測されるアーチフィラメントだった。浮上する磁気ループとともに持ち上げられた物質は、重力的作用によって磁力線に沿って落下し、アーチ状の流れを作る。これがアーチフィラメントである。銀河系中心分子ガスループは銀河スケールのアーチフィラメントではないだろうか。

図 1 右図のアーチフィラメントは真上から見ているためループの高さがわかりにくい。ループが縁にあるときの光学観測は地上望遠鏡では難しかった。これを可能にしたのが、2006 年 9 月に打

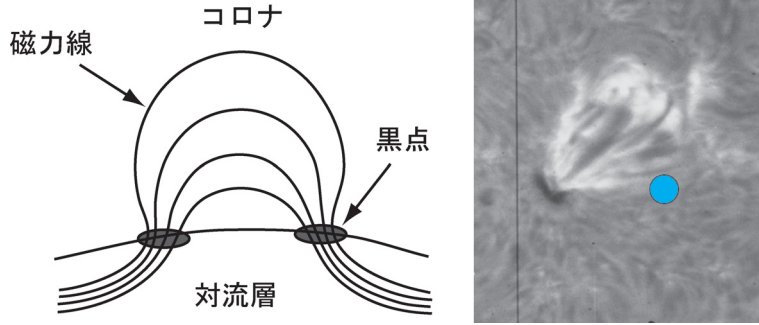


図1 (左図) 太陽浮上磁場の構造. 対流層からコロナにかけて磁気ループが浮上する. (右図) 京都大学飛騨天文台ドームレス望遠鏡で観測された浮上磁場領域のアーチフィラメント. 青色の円は地球の大きさを表す.

ち上げられた太陽観測衛星「ひので」である。「ひので」衛星に搭載された可視光望遠鏡は1万度程度のプラズマの分布と運動を観測することができる。「ひので」Web ページ²⁾で公開された画像には、ループに沿うプラズマの落下運動や、プラズマが上空に噴き上げられる様子などが鮮明にとらえられている。これらの現象と同様な、磁場にガイドされた激しい低温ガスの運動が銀河スケールでも生じているはずである。

2. 銀河円盤におけるパーカー不安定性

銀河重力によって成層化されたガス円盤では磁場がアーチ状に浮上する磁気不安定性 (パーカー不安定性) が成長する³⁾。Parker は、磁力線に沿って落下する星間ガスが集まる領域に星間雲が形成されると考えた。磁気ループの上昇は磁気浮力によって駆動される。図2のように水平方向の磁力線の一部を持ち上げると、磁気ループに沿って物質が落下してループ頂上付近は低密度になる。この領域に働く浮力が磁気張力より大きい場合、ループの上昇が続き、磁力線の谷に物質が集められる。これがパーカー不安定性である。

パーカー不安定性は磁力線方向の十分長い波長の揺らぎに対して成長する。最も成長しやすい波長は円盤ガスの厚さ (スケールハイト) の10倍程

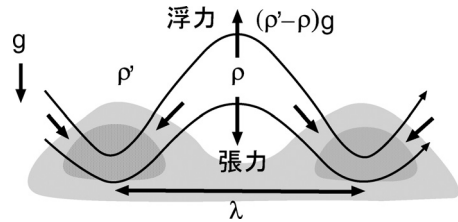


図2 パーカー不安定性の概念図. 磁力線に沿ってガスが落下して軽くなった部分に働く浮力が磁気張力より大きい場合に、不安定性が成長する。

度であり、銀河系中心核ガス円盤の温度が1万度の場合、1 kpc 程度の長さのループが成長する。成長時間はスケールハイトをアルフベン波が横切る時間の5倍程度、銀河系中心核円盤では数百万年程度である。磁力線に沿う落下速度はアルフベン速度程度になる。磁束密度が $50 \mu\text{G}$ 、個数密度が 10 個/cc のガス円盤ではアルフベン速度は 30 km/s 程度になる。分子ガスがこの速度で落下すれば、観測されたループに沿う速度差を説明することができる。

3. パーカー不安定性の局所シミュレーション

パーカー不安定性が成長すると磁力線に沿うガスの運動は超音速になり、非線形効果が重要になる。松元ら⁴⁾は2次元磁気流体コードを用いて銀

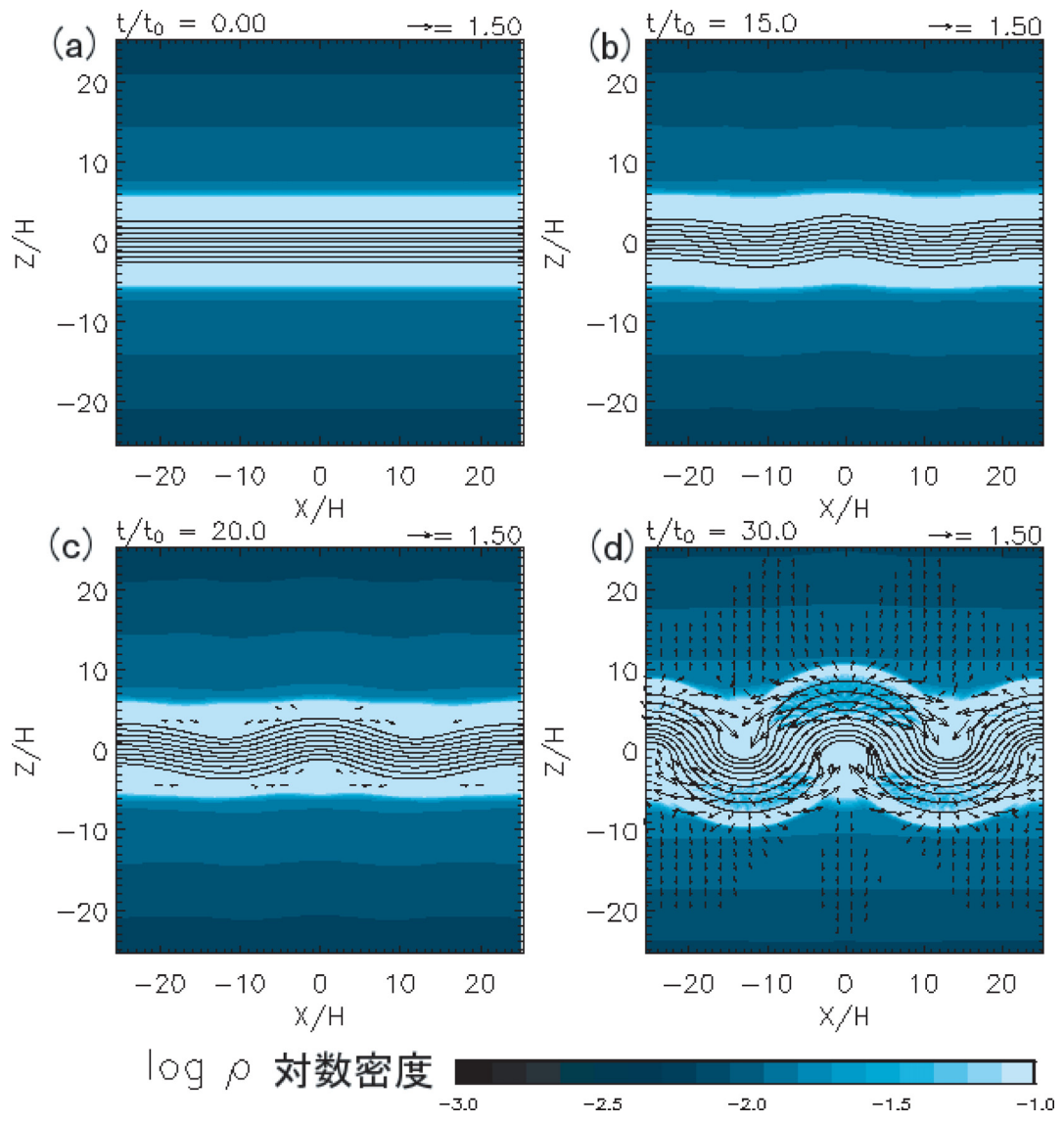


図3 局所シミュレーション結果. 黒い実線は磁力線. 矢印は速度, 濃淡は密度分布.

河円盤, 降着円盤におけるパーカー不安定性の非線形時間発展のシミュレーションを行い, 落下するガスが円盤ガスと衝突する領域に衝撃波が発生することなどを示した. 今回はこのモデルを銀河系中心に適用し, 銀河円盤の一部を取り出した局所シミュレーションを実施した.

以下を仮定する. (1) カートesian座標系 (x, y, z) を用い, y 方向は一様とする. (2) 速度場, 磁

場の y 成分はゼロとする. (3) 重力は外力として与え, 自己重力は無視する. 重力加速度は z 成分のみをもち赤道面に関して反対称とする. (4) 回転の効果 (遠心力, コリオリ力) は無視する. (5) 星間ガスの多相性は考慮せず, 1成分プラズマとする. (6) 断熱変化を仮定し, 加熱・冷却機構は考えない.

初期条件として x 軸方向の磁場に支えられて

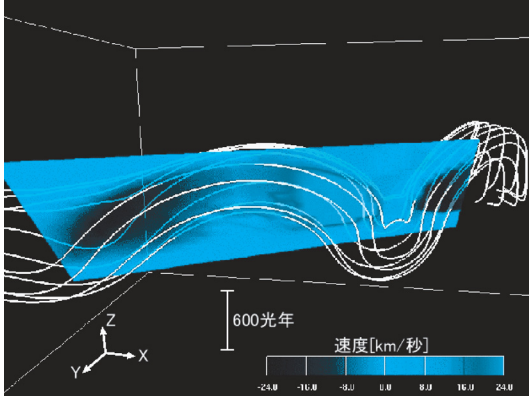


図4 計算結果を3次元に投影した図。白線は磁力線。濃淡は磁気ループに沿う速度を表す。

磁気静水圧平衡が成り立つような密度、圧力分布を与え、宇宙磁気流体シミュレーションコードCANSを用いて時間発展を調べた。x方向には周期境界条件を課した。初期のガス圧と磁気圧の比(プラズマ β の値)を0.2とすると数密度が10個/cc、温度が1万度の初期ガス円盤の磁場強度は50 μ G、アルフベン速度は30 km/sになる。

図3(a)に初期状態、(b)–(d)にx軸方向に2波長の摂動を与えて時間発展を計算した結果を示す。パーカー不安定性が成長して磁気ループが形成された。浮上する磁気ループと周辺プラズマの境界面でガスが圧縮され、ループ状の高密度領域が形成されている。磁力線が銀河面を貫いているのは、磁力線が銀河面に対称な場合よりもこの場合の成長率のほうが高いためである⁹⁾。磁気ループの浮上により持ち上げられた物質が磁力線に沿って落下するため、ループに沿った下降流が生じる。この速度はアルフベン速度程度になり、音速を超える。このため、ループの根元では衝撃波が発生し、円盤表面が加熱される。この加熱機構により、銀河系中心核円盤における分子ガス温度が100 K以上と通常より高い温度になっている理由を説明することができる。

観測された分子雲ループとシミュレーション結果を比較するため、図4では、今回観測された二

つのループを模して2次元の計算結果を3次元的に投影した¹⁾。ここで紹介した計算は、低温成分である分子ガスを含めていない場合の結果ではあるが、観測されるループの構造と速度分布をよく再現できている。

4. 銀河系中心部ガス円盤における磁気ループ形成の大局的シミュレーション

前章で紹介した局所シミュレーションではガス円盤の回転を無視していた。円盤の回転はパーカー不安定性の成長率を下げる。さらに、半径とともに回転角速度が減少する差動回転のため、ガス円盤内で磁気回転不安定性⁶⁾が成長し、円盤は磁気乱流状態になる。この乱流磁場のマクスウェルストレスにより、角運動量が外向きに輸送され、円盤ガスは銀河系中心に向けて降着する。銀河系中心部で観測された磁気ループは長さが数百pcある。中心から半径約1 kpcに磁気ループの両端がアンカーされていると考えると磁気ループの両端は円周上で約60度隔たっている。ループ両端がアンカーされている半径が異なる場合には根元の回転角速度の差により、ループ両端の角度の隔たりは時間とともに増え、局所近似では扱えなくなる。そこで、円盤一周全体を計算領域に含めた大局的シミュレーションを行った。

シミュレーションには、これまで降着円盤の大局的3次元シミュレーション⁷⁾、銀河ダイナモの大局的シミュレーション⁸⁾に用いてきた円筒座標系の3次元磁気流体コードを用いた。銀河重力場としては銀河系バルジと円盤領域の星が作る重力ポテンシャルを擬似的に取り入れた宮本・永井ポテンシャル⁹⁾を用いた。計算領域は動径方向4 kpc、鉛直方向に ± 10 kpcを取った。初期条件には、方位角方向磁場をもつ回転平衡解を採用している。観測される磁気ループ構造は数百pcスケールなので、ループ構造を決めるのは高温ガス成分と考えられる。そこで、初期円盤音速

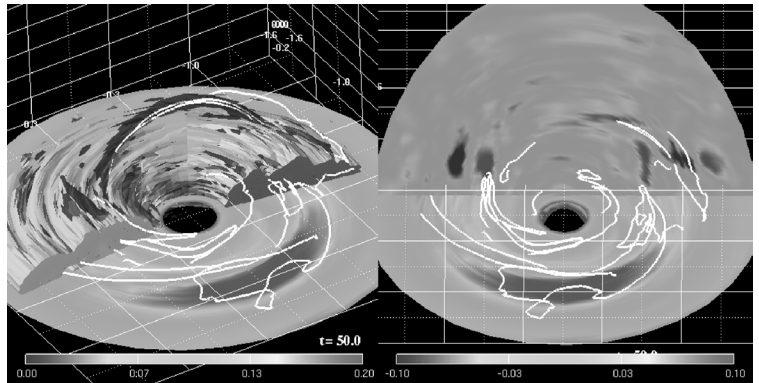


図5 (左)赤道面密度の断面図とガス密度一定 ($\rho=0.1$) の等値面. 白線は磁力線, 円盤から浮き上がった黒い部分は磁場強度一定の面を示している. (右) 赤道面密度の断面図と鉛直方向速度分布.

$c_s=0.14 v_0$ と仮定している. ここで, $v_0=211 \text{ km/s}$ は半径 1 kpc でのケプラー回転速度である. ガス円盤は平均するとガス圧優勢であると考えられるので, 初期のガス圧と磁気圧の比 $\beta=100$ とした. 本計算ではガスの自己重力, CO などの低温ガス成分は無視している.

方位角速度に微小なゆらぎを与えて時間発展を解いた結果, 初期に弱い ($\beta=100$) 磁場は, 磁気回転不安定性によって増幅され, 平均すると $\beta=10$ 程度で飽和することがわかった. 1 kpc 付近は磁気回転不安定性に対して安定な角速度分布をもつため中心への質量降着率が低いと周囲の不安定領域で駆動される渦運動により円盤内部は乱流状態が保たれることがわかった. 図5左図は半径 1 kpc で約8回転した時刻の密度等値面, 赤道面の密度分布(濃淡)と強磁場領域の等値面を示している. 白線は磁力線を表している. この結果からわかるようにガス円盤はスケールハイトが 100 pc 程度の密度分布をしている. また, 局所的に磁場が強い領域が形成されている. 磁力線がこの磁気フィラメントに沿っていることから磁気ループが形成されていることがわかる. この磁気フィラメントはプラズマ β が1程度の磁束管になっており, ループの大きさは高さ 200 pc , 長さは 600 pc 程度である. また, 中心に近い場所には, この磁

束管よりも小さな磁気ループが形成されていることも見て取れる.

図5右図は浮上磁気フィラメントを含む面の鉛直方向速度分布を示している. 白線は磁力線を表す. 磁気ループ上部が約 20 km/s の速度で浮上している一方で, ループ根元部分は -20 km/s で落下していることがわかる. また, 同様の断面で密度・圧力分布を見ると, ループ内部は低密度・低ガス圧になっており, パーカー不安定性の生じる条件を満たしていることがわかる. さらに温度構造をみると, ループ根元ではループ上部よりも1桁温度が上昇しており, ショックが形成されているようである. これらの解析から, この磁気ループはパーカー不安定性によって形成されたものと推測される.

5. まとめと今後の展望

以上のように, 2次元, 3次元の磁気流体シミュレーションにより, 銀河系ガス円盤から磁気ループが浮上して長さ 600 pc , 高さ 200 pc 程度のループ構造を形成することを示すことができた. 磁気浮上を通して, 磁気エネルギーが磁力線に沿って落下するガスの運動エネルギーに変換され, さらに衝撃波の発生を通して銀河系中心ガス円盤を加熱する. 磁気ループの根元では磁力線が鉛直方向

を向き、黒点に似た構造ができるだろう。この領域では集められた **HI** ガスが衝撃波で圧縮されて分子ガスに相転移し、分子雲が形成されると考えられる。銀河系中心で観測される、鉛直磁場と相互作用しているように見える分子雲はこのようにして形成されたのかもしれない。今回紹介した磁気流体シミュレーションでは、星間ガスの加熱、冷却を無視していた。現在、これらの過程を考慮し、1万度の温度のガスと100 K以下の温度の分子ガスの2相からなる銀河ガス円盤の時間発展を調べている。この研究を通して、どのようにして分子ガスのループが形成されたのかという疑問に答えることができると期待している。その結果については機会を改めて紹介したい。

謝 辞

ここで紹介した銀河円盤の大局的3次元磁気流体シミュレーションには国立天文台のスーパーコンピューター **VPP5000** を使用した。

参 考 文 献

- 1) Fukui Y., et al., 2006, *Science* 314, 106
- 2) <http://hinode.nao.ac.jp/>
- 3) Parker E. N., 1966, *ApJ* 145, 811
- 4) Matsumoto R., et al., 1988, *PASJ* 40, 171
- 5) Horiuchi T., et al., 1988, *PASJ* 40, 147
- 6) Balbus S. A., Hawley J. F., 1991, *ApJ* 376, 214
- 7) Machida M., Hayashi M. R., Matsumoto R., 2000, *ApJ* 532, L67

- 8) Nishikori H., Machida M., Matsumoto R., 2006, *ApJ* 641, 862
- 9) Miyamoto M., Nagai R., 1975, *PASJ* 27, 533

Magnetohydrodynamic Simulations of Molecular Loops in the Galactic Center

Ryoji MATSUMOTO

Department of Physics, Faculty of Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

Satoshi NOZAWA

Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito 310-8512, Japan

Kunio TAKAHASHI and Mami MACHIDA

National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Observations of galactic center molecular gas loops found by NANTEN indicate that the loops are buoyantly rising magnetic loops similar to those in the solar atmosphere. We carried out magnetohydrodynamic simulations of the formation of magnetic loops emerging from the gas disk. Numerical simulations reproduced velocity difference as large as 50 km/s along a loop. Shock waves are formed near the footpoints of the magnetic loops where the supersonically infalling gas hits the dense disk gas. The shock heating explains why the molecular gas in the galactic center is hotter than that in the outer disk.