

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20244014

研究課題名（和文）銀河系中心部の磁気浮上ループの研究

研究課題名（英文）A study of the magnetic flotation loops in the Galactic centre

研究代表者

福井 康雄（FUKUI YASUO）

国立大学法人 名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30135298

研究成果の概要（和文）：

銀河系中心部の磁気浮上ループ 1、2 に対して、NANTEN2 望遠鏡、ASTE 望遠鏡を用いて CO の高励起輝線の観測を実施した。ループに付随する分子雲の温度・密度・運動状態を明らかにし、銀河系中心部の中性分子ガスの高温・高速度分散の起源の 1 つであることを示唆した。また大規模なループ探査を実施し、13 個の分子雲ループ候補を同定した。さらに大規模な数値シミュレーションにより、ループ形成の過程、及びその性質、分布を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Observations of high transition CO line have been carried out toward Galactic molecular loops 1 and 2 in the Galactic center with NANTEN2 and ASTE telescope. Physical parameters such as temperature, density and kinematics of molecular clouds associated to the loops are revealed. This indicates that foot points of the loops are possibly one of origins of high temperature and high velocity dispersion of the clouds in the Galactic center region. In addition, 13 loops candidates are identified by large scale search toward the Galactic center. Numerical simulation has revealed the process of formation, nature and distribution of the loops.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	15,600,000	4,680,000	20,280,000
2009 年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2010 年度	10,500,000	3,150,000	13,650,000
総計	37,800,000	11,340,000	49,140,000

研究分野：電波天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：電波天文台・星間分子雲・理論天文学・銀河中心・磁気浮上グループ

## 1. 研究開始当初の背景

銀河進化の解明は、天文学の重要な課題であり、星間分子雲中の星形成過程は銀河進化に決定的な影響を与える。電波、赤外線、可視光を中心とする近年の観測によって、銀河系円盤部における星形成の研究は近傍の小質量星形成を中心に大きく進展した。一方、

星の密度が高い中心部の数 100pc については、大質量のブラックホールや分子雲、高温ガス、いくつかの大星団の存在は知られているが星形成を含めた物理学的理解は進んでおらず、銀河全体の進化を解明する上で中心部の物理過程を解き明かすことは重要な研究課題であった。そこで我々は星形成に直結する分子雲の広範な観測を「なんてん」望遠鏡を

用いて行い、この課題に取り組んできた。

銀河系中心部は分子雲が強く集中しており、中心 300pc 以内の Central Molecular Zone=CMZ には総質量  $5 \times 10^7$  太陽質量もの分子ガスが集中的に分布している。この分子雲は速度分散が 30-50km/s、温度が 50-300K と通常の銀河系内の分子雲の速度分散 10km/s 以下、温度 10K 程度と比べ異様に高いことが知られていたが、その起源についてはこれまで理解されていなかった。また、銀河系中心部は分子雲内部の圧力、磁場強度が銀河面のそれらに比べて桁で大きい領域でもある。

名古屋大学の 4m 電波望遠鏡「なんてん」により、銀河系中心部 20 度  $\times$  10 度 (銀経  $\times$  銀緯) の領域を一酸化炭素分子の波長 2.6mm の回転輝線を用いて 4 分角間隔 (約 10pc 間隔) で観測し、史上最大規模の分子雲地図を作成した。特に従来に比べ銀緯方向に広く観測しているのが特徴である。銀緯方向に広く観測した結果、銀河面から顕著に立ち上がる 2 個の分子雲ループを発見した。50-100km/s と極めて大きな速度分散を持ち、高さが 220-300pc、全長 300-600pc、総質量  $2 \times 10^5$  太陽質量であり、単一の超新星残骸では説明できないエネルギーを有している。この分子雲ループを説明するモデルとしてパーカー不安定性を提案、エネルギー等分配を仮定してループの磁場強度を 150 マイクロガウスと見積もった。この結果は Fukui et al. (2006) として Science に掲載された。

## 2. 研究の目的

本研究は「1. 研究開始当初の背景」にある分子雲ループに対して、サブミリ波・ミリ波の詳細観測を行い、ループの根元の衝撃波面における速度・密度・温度分布を明らかにする。また理論計算との比較によって、分子雲ループの動力学と物理状態の詳細を明らかにすることを目的とする。分子雲ループの解釈を確立し、ループの物理的性質、特に衝撃波の詳細を明らかにし、銀河系中心部のガス運動の全体像を提示する。これらを達成するために以下の 4 点を明らかにする。

(2-1) 分子雲ループの詳細な高分解能観測をミリ波サブミリ波帯で行いループ根元の衝撃波面の詳細な密度・温度・速度の分布を明らかにする。

(2-2) 銀河系中心のループ候補ガス雲をリストアップ、カタログを作成し、磁気ループの全体像を提示する。

(2-3) ループの磁場の直接測定を行い、磁場強度を明らかにする。

(2-4) MHD 数値計算により、ループの形状等のバリエーションを明らかにする。同時に、

根元における速度場等を精密に再現し、ループの物理的性質を確立する。また、この結果を (2-1)、(2-2) にもフィードバックし、観測結果の解釈にも活用する。

本研究は太陽表面現象との比較により、磁気再結合等の現象を銀河規模でも特定する可能性があり、銀河系中心部を磁気流体力学の貴重な実験室として活用することができる。将来、ALMA 望遠鏡による超高空間分解能を生かして系外銀河中心部での磁気浮上ループ検出も具体的な課題であり、銀河一般への応用が期待される。

## 3. 研究の方法

「2. 研究の目的」の(2-1) - (2-4)を明らかにするために以下の作業を行う。

(3-1) 分子雲ループの詳細観測：一酸化炭素分子 (CO) 多輝線観測による物理量推定、衝撃波トレーサー一酸化珪素 (SiO) の検出

従来の「なんてん」の観測データよりも 5 倍程度高い、約 2pc の空間分解能でデータを取得する。この観測データを分子輝線の励起計算と比較し、温度・密度の空間分布を求め、衝撃波による加熱・圧縮を定量的に議論する。観測は一酸化炭素分子 CO のミリ波・サブミリ波の遷移であり、各遷移間の強度比を LVG (Large Velocity Gradient) 法を用いた計算結果と比較して、密度・温度の空間分布を明らかにする。また、衝撃波トレーサーと考えられる SiO 分子輝線の観測を行う。本研究で使用する望遠鏡は名古屋大学の NANTEN2 4m 鏡と国立天文台 ASTE 10m 鏡、及びオーストラリアの Mopra 22m 鏡である。

(3-2) 「なんてん」の一酸化炭素分子地図の全体解析 (半径 1.3kpc 以内)

パーカー不安定性は磁場と重力に支えられたガス層では普遍的に起きる現象であるため、ループ 1、2 以外にも多数のループが埋もれている可能性が高い。本研究では「なんてん」の一酸化炭素分子雲地図全体を用いて、銀河系中心から半径約 1.3kpc 以内の分子雲の解析を行い、ループの完全な検出、カタログ化を行う。解析手法はこれまで同様分子雲地図を速度方向に時間的に動く動画を作成することにより、ループに特徴的な速度勾配を持つ成分を抽出する。同時に各ループ根元に相当する速度幅の広い領域を抽出する。また、理論計算の結果をループ同定の情報として活用する。これらをリストアップし、カタログ化する。

(3-3) ゼーマン効果による磁場の測定

センチメートル波での OH 分子のゼーマン効果検出を試み、ループにおける磁場の測定を行う。本観測は M. Morris (カルフォルニア工科大学バークレー校)らとの共同観測として実施する。

(3-4) 理論計算の推進

すでに行われている簡単なモデルを用いた局所的、大局的な磁気流体力学数値シミュレーション(日本天文学会秋季年会 2006 で発表済み)のコードを改良し、より高解像度、精密化されたシミュレーションを行う。円盤の重力分布、ガス温度、ガス圧/磁気圧比等のパラメータについての依存性、初期条件におけるガスの密度・温度分布による違いなどを明らかにして、観測結果の解釈にフィードバックする。

2008 年度以降は(3-1) - (3-4)を継続し、後半期に成果を論文としてとりまとめる。また全年度を通して年数回の小研究会、ワークショップを開催し、情報交換・交流を進めて研究推進の円滑化を図る。

4. 研究成果

(4-1) 研究方法(3-1)に関する成果

分子雲ループの根元に対して Mopra 望遠鏡による  $^{12}\text{CO}$  (J=1-0)、 $^{13}\text{CO}$  (J=1-0)、 $\text{C}^{18}\text{O}$  (J=1-0) 輝線、ASTE 望遠鏡にて  $^{12}\text{CO}$  (J=3-2) 輝線、NANTEN2 望遠鏡にて  $^{12}\text{CO}$  (4-3, 7-6) 輝線の観測を実施し(図 1)、LVG モデル計算により根元における分子雲の温度・密度がそれぞれ 30 - 100K、 $10^3 - 10^4 \text{cm}^{-3}$ であることを明らかにした。根元では激しいショックが起きており、分子雲が高温である原因は C 型のショックによるものだというを示唆した。さらに分子雲ループ 1、2 全体に対し、NANTEN2 望遠鏡を用いて  $^{12}\text{CO}$  (J=2-1) 輝線、ASTE 望遠鏡を用いて  $^{12}\text{CO}$  (J=3-2) 輝線の観測を行い、付随する高励起の CO の分布をループ全体にわたり

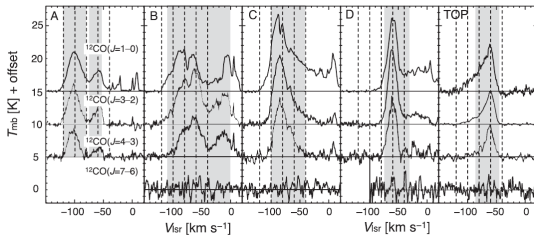


図 1 ループ根元方向で検出した  $^{12}\text{CO}$  (J=1-0, 3-2, 4-3, 7-6) 輝線。

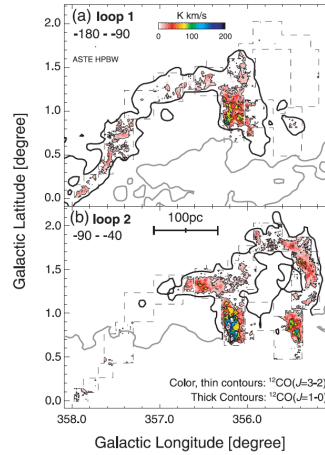


図 2  $^{12}\text{CO}$  (J=3-2) 輝線の積分強度図(カラー)。

分子雲の温度は 15 - 100K、密度は  $10^{2.2} - 10^{4.7} \text{cm}^{-3}$  であることを明らかにした。特にループの根元では比が 2.5 と高く数十 pc の範囲にわたって非常に強力なショックが発生しており、分子雲を有意に加熱していることを明らかにした。 $\text{CO}$  (J=4-3, 7-6) 輝線を用いた際の結果と同様の結果を得た。またループの根元は位置速度図において U、または L の形を持つことを明らかにし、これは単純な運動力学モデルにより特徴を説明できることを示した。

(4-2) 研究方法(3-2)に関する成果

分子雲ループ 1、2 の特徴を詳細に調査し、  
 ・両端の大きな速度分散  
 ・両端を結ぶ速度勾配を持った構造  
 をループの基本的な特徴として、他のループ候補を探した。その結果ループ 1、2 を含め、13 個のループ候補を発見した(ループ 3 の例、図 3 参照)。ループは銀経負方向に 3 個、CMZ に 4 個、銀経正方向に 6 個同定した。特に CMZ のループはどれも高さが低い。これは CMZ は星密度が高いため、外側の領域よりも重力が強く働くためにループのスケールハイトが低くなるというのと矛盾しない。また、銀経

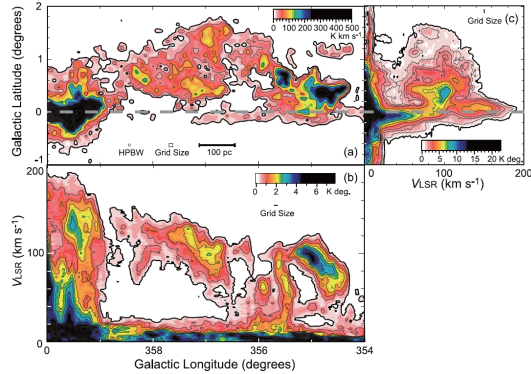


図 3 「なんてん」で取得した  $^{12}\text{CO}$  (J=1-0) 輝線のループ 3 方向の積分強度図と位置速度図。

正方向ではこれまで銀経 1.3 度と 5.5 度に非常に狭い領域(数十 pc)に非常に大きな速度分散(100km/s 以上)をもつ領域が知られていたが、これらが複数のループの根元である可能性を指摘した。

#### (4-3) 研究方法(3-3)に関する成果

2009 年 8 月に、アメリカ国立天文台(NRAO) 所有の口径 100m の Green Bank Telescope (GBT) を用いて銀河系中心部広域 ( $11^\circ \times 2^\circ$ ) の OH 分子吸収線スペクトル観測を実施した。過去この方向に行われた最高分解能の観測である(結果は図 4 参照)。この観測結果を用いてゼーマン効果の測定に適した、速度分散が小さく、強度が強く、形状がシンプルなスペクトルを選定し、これを元に NRAO 所有の EVLA 干渉計に対し、銀河系中心部のゼーマン効果測定計画の観測提案を行った。2011 年度に観測計画は受理されたものの、EVLA の偏光観測装置のトラブルにより、このシーズンの全ての偏光観測が実施不可能となった。今後、さらに観測計画を改善し、改めて観測提案を行う予定である。

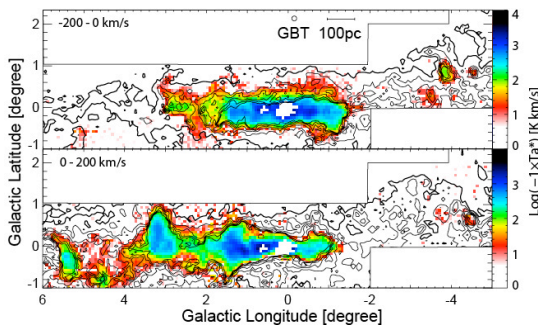


図 4 OH 分子輝線の積分強度図(カラー)。コントアは「なんてん」で取得した  $^{12}\text{CO}$  (J=1-0) 輝線の積分強度。

#### (4-4) 研究方法(3-4)に関する成果

銀河円盤全体を計算領域に含む大局的な 3 次元磁気流体数値実験を行った結果、銀河ガス円盤表面には、約 180 個の磁気ループ構造が形成された。銀河系中心部の半径およそ 1 kpc 以内において、磁気浮上ループは普遍的に存在するが、分布には偏りがあることが明らかになった(図 5)。典型的な長さ及び高さはそれぞれ 1kpc と 200pc 程度であることが明らかになった。また、視線方向上の速度はループに沿って線形に変化し、根元では速度分散が大きくなることを示した。観測結果は数値計算の結果とよく一致し、分子雲ループ構造が、磁気浮上モデルで説明できることがより強力に示された。

局所的な数値計算により、低温ガス層で形成された磁気ループが、高温層では観測される大きさまで膨張すること、低温ガス層の高

密度ガスが浮上ループトップに持ち上げられること等を明らかにした(図 6)。また、局所的な磁気ループの数値計算を精密化し、ループの発生過程を解明し、観測結果の解釈に多くの示唆を与えた。

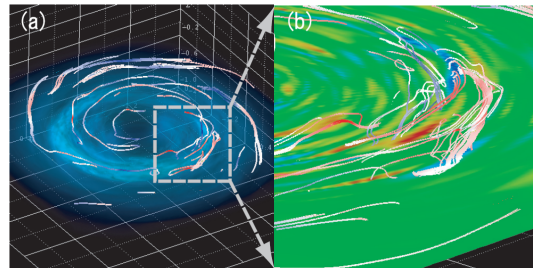


図 5 大局的な 3 次元磁気流体数値実験結果。(a) 密度分布(青)と磁気ループ(白か青、赤のライン)。ループの色は浮上速度を示す( $-0.05 < V_z < 0.05$  が青-白-赤に対応)。(b) (a)の一部の拡大図。イメージは鉛直方向のループの磁場強度を示す。

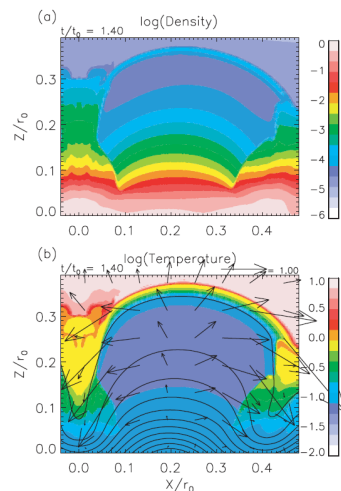


図 6 局所的な 2 次元数値実験結果。ある状態でのループの密度 (a) と温度 (b) を示している。(b) 中の矢印は速度場、コントアは磁力線を示している。

#### (総括)

上記 3 年間の研究成果より、観測的、理論的に CMZ のみならず広く銀河系中心方向にわたって分子雲ループが分布することを明らかにした。また、理論的には磁場の強い中心部では普遍的に起こる現象であること、観測的には個々のループの詳細を明らかにした。特にループ 1、2 については多数の輝線による観測を実施でき、ガスの詳細な物理状態を明らかにすることができた。これにより当初問題点に上げていた銀河系中心部の分子雲の高温・高速度分散の起源の 1 つとして分子雲ループが大きく寄与していることを明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 35 件)

Amano, T., Torii, K., Hayakawa, T., Fukui, Y., Stochastic Acceleration of Cosmic Rays in the Central Molecular Zone of the Galaxy, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2011, 査読有, Vol.63, 2011, pp.L63--L66

Kudo, N. (1番目), Torii, K. (2番目), Machida, M. (3番目), Kawamura, A. (10番目), Nozawa, S. (19番目), Matsumoto, R. (20番目), Fukui, Y. (21番目), 総著者数=21名, High Excitation Molecular Gas in the Galactic Center Loops;  $^{12}\text{CO}$  ( $J = 2-1$  and  $J = 3-2$ ) Observations, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, vol.63, 2011, pp171--197

Dawson, J. R., McClure-Griffiths, N. M., Kawamura, A., Mizuno, N., Onishi, T., Mizuno, A., Fukui, Y., Supershells as Molecular Cloud Factories: Parsec Resolution Observations of H I and  $^{12}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ) in GSH 287+04-17 and GSH 277+00+36, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.728, 2011, Id.127

Torii, K. (1番目), Kawamura, A. (6番目), Machida, M. (10番目), Nozawa, S. (12番目), Matsumoto, R. (13番目), Fukui, Y. (14番目), 総著者数=14名, A Detailed Observational Study of Molecular Loops 1 and 2 in the Galactic Center, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.62, 2010, pp.1307--1332

Fukui, Y., Kawamura, A., Molecular Clouds in Nearby Galaxies, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 査読有, vol.48, 2010, pp.547--580

Torii, K. (1番目), Kawamura, A. (7番目), Machida, M. (10番目), Nozawa, S. (12番目), Matsumoto, R. (13番目), Fukui, Y. (25番目), 総著者数=25名, Temperature and Density in the Foot Points of the Molecular Loops in the Galactic Center; Analysis of Multi-J Transitions of  $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ,  $3-2$ ,  $4-3$ ,  $7-6$ ),  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) and  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ ), Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.62, 2010, pp.675--695

Fukui, Y. (1番目), Kawamura, A. (2番目), 総著者数=13名, Molecular and Atomic Gas in

the Large Magellanic Cloud. II. Three-dimensional correlation Between CO and HI, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.705, 2009, pp.144--155

Kawamura, A., Mizuno, Y., Minamidani, T., Filipović, M. D., Staveley-Smith, L., Kim, S., Mizuno, N., Onishi, T., Mizuno, A., Fukui, Y., The Second Survey of the Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud by NANTEN. II. Star Formation, The Astrophysical Journal Supplement, 査読有, Vol.184, 2009, pp.1--17

Fukui, Y. (1番目), Kawamura, A. (11番目), 総著者数=15名, A Peculiar Jet and Arc of Molecular Gas toward the Rich and Young Stellar Cluster Westerlund 2 and a TeV Gamma Ray Source, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.61, 2009, pp.L23--L27

Fujishita, M. (1番目), Torii, K. (2番目), Kawamura, A. (6番目), Machida, M. (10番目), Nozawa, S. (12番目), Matsumoto, R. (13番目), Fukui, Y. (14番目), 総著者数=14名, Discovery of Molecular Loop 3 in the Galactic Center: Evidence for a Positive-Velocity Magnetically Floated Loop towards  $L=355^\circ - 359^\circ$ , Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.61, 2009, pp.1039--1053

Takahashi, K., Nozawa, S., Matsumoto, R., Machida, M., Fukui, Y., Kudo, N., Torii, K., Yamamoto, H., Fujishita, M., Similarity between the Molecular Loops in the Galactic Center and the Solar Chromospheric Arch Filaments, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.61, 2009, pp.957--969

Machida, M., Matsumoto, R., Nozawa, S., Takahashi, K., Fukui, Y., Kudo, N., Torii, K., Yamamoto, H., Fujishita, N., Tomisaka, K., Formation of Galactic Center Magnetic Loops, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.61, 2009, pp.411--420

[学会発表] (計 23 件)

鈴木宏聡, 星間ガスの加熱・冷却を考慮した分子雲ループ形成シミュレーション, 日本天文学会 2011 年春季年会, 2011.3.18, 筑波

大学

Fukui, Y., Molecular loops in the Galactic Center, Star formation under extreme conditions; the Galactic center, 2010. 12. 7, Besançon Observatory

鈴木宏聡, 星間ガスの加熱・冷却を考慮した Parker 不安定性による分子雲ループ形成シミュレーション, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010. 9. 22, 金沢大学

Fukui, Y., Large molecular loops in the Galactic center; Evidence for Parker instability, The 5<sup>th</sup> Zermatt ISM-Symposium Conditions and Impact of Star Formation; New results with Herchel and beyond, 2010. 9. 21, Grand Hotel Zermatterhof

Fukui, Y., 分子雲による粒子加速機構の追求: 銀河系中心部とガンマ線 SNR GCOE 研究会「粒子加速研究会」, 2010. 6. 18, 名古屋大学

Fukui, Y., 「なんてん」による分子雲観測と Fermi ガンマ線源, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010. 3. 25, 広島大学

Fukui, Y., Molecular clouds and SNRs, Exploring Supernova Remnants and Pulsar Wind Nebulae in X-rays: before and after ASTRO-H, 2010. 2. 19, 宇宙科学研究所 (相模原)

Fukui, Y., Molecular loops in the Galactic center, The Galactic Center: A Window to the Nuclear Environment of disk Galaxies, Oct. 19-23. 2009, Shanghai

Torii, K., Molecular Loops in the Galactic Center: Detailed Observations of the Footpoint of the Loops, The Galactic Center: A Window to the Nuclear Environment of disk Galaxies, Oct. 19-23. 2009, Shanghai

Kudo, N., Molecular Loops in the Galactic Center - The Physical Condition in the Whole Loops, The Galactic Center: A Window to the Nuclear Environment of disk Galaxies, Oct. 19-23. 2009, Shanghai

Machida, M., Three-Dimensional Global MHD Simulations of the Magnetic Loop Structures in our Galactic Center, The Galactic Center: A Window to the Nuclear

Environment of disk Galaxies, Oct. 19-23. 2009, Shanghai

鳥居和史, 銀河系中心部磁気浮上ループ-CO 高励起線を用いた詳細観測-, 日本天文学会 2009 年秋季年会, 2009. 9. 14, 山口大学

町田真美, 冷却を考慮した銀河ガス円盤の 3 次元磁気流体数値実験, 日本天文学会 2009 年秋季年会, 2009, 9, 14, 山口大学

Fukui, Y., Molecular gas and dust in high mass star forming regions, Dust grains and gas: from the ISM to the Solar system, 2009. 7. 10, soul

Fukui, Y., Correlation between high energy objects and molecular clouds in the Galaxy, The Energetic Cosmos: from Suzaku to ASTRO-H, 2009. 7. 1, 小樽

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福井 康雄 (FUKUI YASUO)  
名古屋大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 30135298

### (2) 研究分担者

松元 亮治 (MATSUMOTO RYOJI)  
千葉大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 00209660

野澤 恵 (NOZAWA SATOSHI)  
茨城大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号: 10261736

河村 晶子 (KAWAMURA AKIKO)  
名古屋大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 30377931

水野 範和 (MIZUNO NORIKAZU)  
名古屋大学・理学研究科・助教  
研究者番号: 20372526  
(平成 20 年 11 月 7 日辞退)

### (3) 連携研究者

町田 真美 (MACHIDA MAMI)  
九州大学・理学研究院・助教  
研究者番号: 50455200

鳥居和史 (TORII KAZUFUMI)  
名古屋大学・大学院理学研究科・研究員  
研究者番号: 20444383