

2019 年度日本天文学会林忠四郎賞

氏名：犬塚 修一郎 (いぬつか しゅういちろう)

現職：名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 教授

授賞対象となる研究：「分子雲の形成から原始星、原始惑星系円盤の形成に至るまでの星形成過程に対する理論的研究」

Theoretical Studies on the Star Formation Processes from the Birth of
Molecular Clouds to Formation of Protostars and Protoplanetary Disks

犬塚 修一郎氏は、星が生まれる現場である分子雲やその中の高密度領域である分子雲コアの形成、分子雲コアの重力崩壊による原始星の形成、そして原始惑星系円盤の形成に至るまでの、星形成に関する幅広い領域で多くのすぐれた研究成果をあげてきた。特に、分子雲の重力不安定性に対する解析的研究、磁気流体シミュレーションを用いた分子雲形成に対する研究、分子雲コアの重力崩壊による原始星、原始惑星系円盤の形成過程に関する研究は、世界的によく知られている。

数多い犬塚氏の業績の中から、以下、特に代表的な3つの研究業績について述べる。

(1) 分子雲形成から星形成への連続したシナリオ

銀河において希薄な星間ガスが何らかのプロセスによって濃集されることで分子雲が形成され、その分子雲の中で星が形成される。したがって星形成は分子雲形成からの一連のプロセスの結果である。

分子雲において超音速乱流が観測されていたが、その起源に対しては多くの議論があったものの十分には明らかになっていなかった。他方で、星間ガスの分子雲への分裂過程について、衝撃波圧縮を引き金とした暴走的輝線放射冷却・濃集（熱的不安定性）によって星間ガスの分子雲への分裂を伴う相転移的進化がおこるというアイデアがあったが、シンプルなモデルでの議論にとどまっていた。これらの問題に対して、犬塚氏は高精度な流体シミュレーションを行い、熱的不安定性の非線形進化に伴って超音速乱流が自然に発生することを示した(Koyama & Inutsuka 2002)。この結果により、より現実的な分子雲のシミュレーションを行うことで、分子雲進化、星形成を理解しようとする方向性が当該分野に生まれた。

犬塚氏は上記方向性のもと、磁場や化学反応の効果まで含めた分子雲形成シミュレーションによって分子雲の形成・進化時間が1千万年以上になることも示した(Inoue & Inutsuka 2008; 2012)。それまでは、分子雲の形成・進化時間（寿命と言ってもよい）に関しては、磁場を無視したシミュレーションや解析的議論により百万年程度とされていたが、日本のグループによる観測の結果、寿命は1千万年以上と示され(Fukui et al. 2008; Kawamura et al. 2009)、それまでの理論予測と矛盾した。この矛盾を Inoue & Inutsuka (2008; 2012) は解決した。

さらに犬塚氏は、一千万年程度の長時間をかけて徐々に分子雲が形成・進化するというモデルを使うと、観測されている分子雲の質量関数が見事に説明できることを示した (Inutsuka et al. 2015)。

これらの分子雲形成から星形成への連続的なシナリオは星形成分野において注目され、銀河進化論のような近接の他分野にも今後大きく波及していくことが期待される。

(2) 分子雲「コア」の形成と重力崩壊による原始星形成過程

上記の(1)の研究は分子雲の大域的な性質と星形成との関連に関する研究と言えるが、分子雲の内部での局所的な星形成プロセスに関しては、以前より分子雲にフィラメント構造があることが観測的に示されており、星形成プロセスとの関連が議論されていた。近年、ハーシェル宇宙望遠鏡の観測によって、分子雲フィラメントの重力不安定による分裂で星形成が始まるという極めてシンプルな描像が明らかになってきた (Andre et al. 2014)。この自己重力不安定に関しては、観測的に注目されるはるか以前から犬塚氏による先駆的な研究があった。Inutsuka & Miyama (1992) では分子雲フィラメントの自己重力不安定について線形解析の手法で詳しく調べており、さらに Inutsuka (2001) では分子雲フィラメントの分裂による分子雲コアの質量関数が星の初期質量関数と類似することを指摘した。これらの犬塚氏のシナリオは、ハーシェル宇宙望遠鏡によって明らかにされた星形成の描像と非常に近いことから、先見的な研究として再評価されている。

分子雲コアの重力収縮によりガスが光学的に厚くなると、その収縮がいったん止まり、第一コアと呼ばれる短寿命天体になることは、簡単な1次元モデルによって理論的に予測されていた (Larson 1969)。犬塚氏は、この過程に対して、輻射過程を考慮した詳細な自己重力流体シミュレーションを行い、観測と比較検討できるレベルの定量的な第一コアの物理パラメータの導出をし (Masunaga & Inutsuka 2000)、この理論予測にもとづいて、第一コアの観測サーベイが行われるようになった。

この第一コアが収縮することで原始星形成に至るのだが、原始星形成時にアウトフローやジェットが放出されていることが観測的に明らかになった。磁場を起原とした遠心力アウトフローの理論計算もされていたが、この問題に対して犬塚氏らは一貫した単一の高精度磁気流体シミュレーションにより普遍的に観測されている低速アウトフローと高速ジェットの発生を再現した (Machida, Inutsuka & Matsumoto 2008)。

これらが示すように、それまでばらばらに議論されていた分子雲フィラメントの重力不安定から原始星形成に至るプロセスについて、犬塚氏は一貫したシナリオでつなぐとともに、各段階の天体に対して観測と比較検討可能なレベルの理論予測を行った。

(3) 原始惑星系円盤から惑星形成へ

上記の星形成過程のシミュレーションでは、惑星形成の現場となる原始惑星系円盤が自然に形成される。これまでは、惑星形成は、星形成とは独立に原始惑星系円盤を設定して議論されてきたが、本来的には惑星形成は星形成から一貫した連続的なプロセスとして考えなければならない。

犬塚氏は、星形成初期には中心星が軽いいため円盤が重力不安定になり分裂することが予測されることから、巨大ガス惑星形成に対する林忠四郎らの京都モデルに代表される標準的なコア集積モデルと円盤自己重力不安定モデルのハイブリッドモデル (Inutsuka et al. 2010) を提唱したり、原始惑星系円盤の永年自己重力不安定を起源としたリング形成モデル (Takahashi & Inutsuka 2014) を提唱したりするなど、星形成からの帰結としての惑星形成というアプローチで惑星形成分野にも進出して顕著な成果を挙げはじめている。

犬塚氏は、分子雲形成から星形成までのプロセスをつないだ一貫したシナリオを構築し、幅広く星形成に関する理論研究を世界的に率いてきたリーダーのうちの一人であると考えられる。さらには星形成に引き続く惑星形成まで連続的につなげようとしており、今後にも期待できる。以上の理由によって、犬塚氏に対して、2019年度林忠四郎賞を授与することとした。

文献（本文中引用したもの）

- André, P. Di Francesco, J., Ward-Thompson, D., Inutsuka, S., Pudritz, R. E., Pineda, J. E., 2014, in Protostars and Planets VI, Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, and Thomas Henning eds., Univ. Arizona Press, Tucson, pp. 27-51
- Fukui, Y. et al. 2008, ApJ, 178, 56
- Kawamura, A. et al. 2009, ApJ. Suppl. 184, 1
- Inoue, T., & Inutsuka, S. 2012, ApJ, 759, 35
- Inoue, T., & Inutsuka, S. 2008, ApJ, 687, 303
- Inutsuka, S., & Miyama, S. M. 1992, ApJ, 388, 392
- Inutsuka, S. 2001, ApJ, 559, L149
- Inutsuka, S., Machida, M. N., Matsumoto, T., 2010, ApJ, 718, L518
- Inutsuka, S., Inoue, T., Iwasaki, K., et al. 2015, A&A, 580, A49
- Koyama, H. & Inutsuka, S. 2002, ApJ, 564, L97
- Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2008, ApJ, 676, 1088
- Masunaga, H. & Inutsuka, S., 2000, ApJ, 531, 350
- Takahashi, S. Z. & Inutsuka, S., 2014, ApJ, 794, 55