

## 論文審査の結果の要旨

宇宙は多数の銀河によって構成される。銀河の構造と進化を解明することは、現代天文学の重要な課題である。銀河を構成する星間物質は、星の形成を通して銀河の進化に大きな影響を与える。近年、多くの観測的研究が星間物質の物理的・化学的性質の解明に注がれている。

8太陽質量をこえる大質量星に起因する星風や超新星爆発は、星間物質の分布と運動に大きな力学的影響を与えることが知られる。大質量星の集団が引き起こす最も顕著な現象として、周囲の星間物質を圧縮して球殻状のガス分布をつくる「スーパーシェル」がある。スーパーシェルにおいては、星間原子ガス (HI) が圧縮されて星間分子ガス ( $H_2$ ) が形成され、星形成に至る可能性が理論的に議論されてきたが、観測的な検証は十分になされていなかった。申請者は、スーパーシェルにおける中性ガスの性質と分子雲の成因を解明するために、銀河系内の2個のスーパーシェル方向の中性ガスの観測研究を行った。これらのスーパーシェルは、りゅうこつ座のカリーナ・フレア GSH287+04-17 (Fukui et al. 1999) とGSH277+00+36 (McClure-Griffiths et al. 2000) である。

申請者はまず、南米チリ共和国に設置された電波望遠鏡「なんてん」によって取得された、星間一酸化炭素分子 (CO) の回転量子数 $J=1-0$ 遷移 (波長2.6mm) の観測結果を解析し、両スーパーシェルに附随する分子ガスを探査し、分子雲のカタログを作製した。特に、カリーナ・フレアは、10万太陽質量の分子ガスを含む顕著な分子雲シェルであることを確認した。ついで、オーストラリア国立電波天文台の干渉計ATCAを用いてHIガス (波長21cm) の詳細観測を行い、分子雲と同等の角度分解能でシェル状の中性原子ガスの分布と運動を明らかにした。

次に申請者は、速度軸を含む3次元空間において原子ガスと分子ガスとの相関関係を調べ、分子ガスが粒状に分布し、空間的に広がった原子ガスの内側に分布する傾向を明らかにした。分子ガスの密度はおおむね $1000\text{cm}^{-3}$ であるのに対して、原子ガスの密度は $1-100\text{cm}^{-3}$ に分布し、分子ガスの占める体積は原子ガスの100分の1程度である。また、分子雲方向の原子ガスが $100\text{cm}^{-3}$ という高い密度をもち、分子雲を形成するに十分な質量を含むことを導いた。

申請者は、以上の解析結果から、各シェルについて分子/原子の質量比が3程度であることを導き、分子の量がシェル内で有意に増加していることを示した。また、中性ガスの減光等を求めて紫外線による解離の影響等を推定し、分子雲の形成と消滅過程を定量的に論じた。以上の検討から申請者は、分子雲の多くがシェルと無関係に存在したものではなく、シェルの圧縮によって形成されたことを指摘した。また、分子雲の一部は星形成を起こしており、シェルの影響で星形成が誘発されたことも示した。

これらの成果は、スーパーシェルの観測的研究において、シェルの圧縮による分子雲形成を初めて検証したものであり、高く評価される。また、形成された分子雲と原子ガスの位置と速度の相対関係を詳しく明らかにし、今後の理論的研究に多くの示唆を与えた点でも評価される。参考論文は、いずれも星間分子雲の先端的な観測的研究であり、価値あるものである。以上の理由により、申請者は博士 (理学) の学位を与えられるに相応しいと認められる。

## 論文審査の結果の要旨

宇宙はその創成以来、千億個を超える銀河を形成し、現在に至っている。これらの銀河の進化を理解することは、天体物理学の重要な課題である。銀河進化を理解するうえで、恒星を形成する星間分子雲の物理状態の解明は、特に重要である。我が銀河系を含む渦状銀河は中心部と円盤部とからなり、銀河の主要な割合を占める。銀河系円盤部については、近年詳細な観測研究が進み、分子雲の進化の概要が理解された。一方、銀河系の中心部には恒星と星間物質が強く集中し、円盤部とは異なる特異な物理状態を持つ領域として注目される。しかし、銀河系の中心部では、分子雲を含めて各種天体の分布が複雑であり、物理状態の解明が立ち遅れていた。

福井他(2006)・藤下他(2009)は、名古屋大学が南米チリ共和国に設置した電波望遠鏡「なんてん」を用いて、銀河系中心部をCO分子の回転量子数 $J=1-0$ の遷移によって広範に観測し、3個の巨大な分子雲ループを発見した。福井らは、これらのループがE. N. パーカー(1966)が理論的に提案した磁気浮上ループであることを指摘した。さらに、観測されたループの根元に分子ガスが集中していることを示し、磁気浮上に伴う落下ガスであると論じた。また、磁場の強さが100マイクロガウス程度と、円盤部の平均値である1マイクロガウスよりも二桁程度大きいことを推定し、中心部の強い重力場によって磁場が増幅されている可能性を示唆した。

申請者は上の発見を受けて、これら3個のループを、CO分子のより高い励起状態からの回転遷移( $J=2-1$ 、 $J=3-2$ )で広範に観測した。観測には、チリのアタカマ高地(標高5000m)に設置されたサブミリ波望遠鏡NANTEN2およびASTEが用いられた。その結果、分子ガスの励起状態の指標である2遷移の強度比、すなわち $J=2-1$ 遷移に対する $J=3-2$ 遷移の比は、分子雲ループ内では平均値が0.43であり、円盤部の平均値0.25に比べて有意に高いことを示し、分子雲ループは円盤部の分子雲よりも高い励起状態にあることを明らかにした。さらに、ループの一部について同位体 $^{13}\text{CO}$ の $J=2-1$ 遷移をあわせて観測し、3つの遷移の強度比を理論計算と比較して、分子ガスの温度が20-100 K以上であり、密度が $10^3 \text{ cm}^{-3}$ 程度であることを導いた。この温度は、円盤部の分子雲の典型的な値10-20 Kに比べて有意に高く、恒星からの放射以外の加熱機構が必要である。申請者は、特に高い励起状態が、ループの根元のほか、ループの内側と上部にも見られることを指摘し、磁気浮上運動に伴う数種の異なる加熱機構が働いている可能性を論じた。これらの加熱機構として、「ループ根元で形成される衝撃波」、「磁気浮上に伴うループ全体におよぶ衝撃波」、「ループ根元等での磁気再結合」などを検討し、関係するエネルギーの比較から、これらの機構が十分に加熱源として可能であることを論じた。

申請者は次に、ループの根元4個に共通する特徴として、2つの速度成分が底部で結ばれたU字型を示すことを明らかにし、磁気浮上ループの根元で期待される速度分布によって、統一的に説明できることを示した。併せて、U字型分布中には、空間的に局在した速度分散の大きな成分があることも指摘し、磁気再結合によって加速された成分である可能性を提案し、100マイクロガウス程度の磁場によって加速がエネルギー的に可能であることを示した。

以上の知見は、銀河系中心部の分子雲ループ全体の高い励起状態を初めて観測的に示し、分子雲ループの特異な物理状態を定量的に解明した研究として、高く評価される。また、参考論文は、分子雲ループの観測的・理論的研究であり、いずれも価値あるものである。よって申請者は、博士(理学)を授与されるに相応しいと認められる。