

## 論文内容の要旨

# Statistical Study of Near Infrared Silhouette Envelopes and Characteristic Analysis of Optical Fiber for Laser Guide Star System

近赤外シルエットエンベロープの統計的研究およびレーザー  
ガイド星システムにおける光ファイバー伝送の特性

氏名 伊藤 周

原始星(YSO)の星周物質の空間構造は天体とその進化段階によって様々な形態を見せており、その形成過程を探る上で大変に興味深い。中でも比較的若い進化段階にある YSO は複雑な星周構造を持っている。光学的に厚いダストディスクの周囲にエンベロープが分布し、極方向のダストキャビティに沿ってアウトフローやジェットが吹き出す描像はよく知られている。しかし、このような複雑な構造がどのようにして形成されるのかという疑問に対して明確な答えは得られていない。これらの星形成過程の研究手段として、赤外線や電波による星周構造や分子雲コアの直接撮像観測は一般的である。この他に背景に明るい光源が存在する場合には、その背景光の吸収、減光を用いて有用な情報を得られる場合がある。この手法では、対象天体の温度構造や励起・分子ガスの組成などに影響されずに、ダスト成分の正確な柱密度を得ることが出来る。我々はこのような明るいネビュラを背景としたガス・ダスト成分をシルエットとして観測する手法を用いて、YSO の星周構造の解明に迫ろうとしている。

M17 は明るい巨大な HII 領域を伴った大質量星形成領域である(図 1)。また、その手前には分子雲が存在していることが電波の観測から明らかになっていることより、M17 星形成領域はシルエット観測に必要な明るい背景光を持つ星形成領域であると言える。1.5kpc 離れた M17 では YSO の典型的なエンベロープのサイズである 10000AU は 6.67arcsec であり、エンベロープの形状を議論するためにはなるべく分解能の小さな観測を行う必要がある。



図 1 : M17 星形成領域



図 2 : NGC7538 星形成領域

M17 と同様に NGC7538 もシルエット観測に適した星形成領域である(図 2)。NGC7538 は 2.8kpc の距離に位置する HII 領域の手前に分子雲領域が存在している。これらの領域には Class I/II 天体が数多く存在していることが過去の観測からわかっており、エンベロープを伴った若い YSO のシルエット観測には最適な星形成領域であるといえる。

我々は M17 星形成領域をすばる望遠鏡に搭載された赤外線撮像分光装置(IRCS)と補償光学系(AO)を用いて J、H、K' の 3 つのバンドで撮像観測した。また、それと重ならない領域を同じくすばる望遠鏡に搭載されたコロナグラフ撮像装置(CIAO)と AO を用いて J、H、K の 3 バンドで撮像観測を行った。我々が行った観測とは別に ESO の Very Large Telescope array(VLT)に搭載された Infrared Spectrometer And Array Camera (ISAAC)で行われた撮像のアーカイブデータを用いて M17 のほぼ全域にわたってシルエットとして見えるエンベロープを持った YSO の探査を行った。ISAAC のデータは J、H、Ks の 3 バンドで観測されている。NGC7538 星形成領域は CIAO と AO を用いて K バンドのみで観測を行った。我々が行った探査の結果、M17 には 204 個の明るいネビュラを背景としたシルエットを発見した。それらのサイズや YSO の付随という条件で選別した結果、そのうちの 67 個は YSO に付随したエンベロープであると同定することが出来た(図 3)。また、NGC7538 では全部で 18 個のシルエットを発見した。

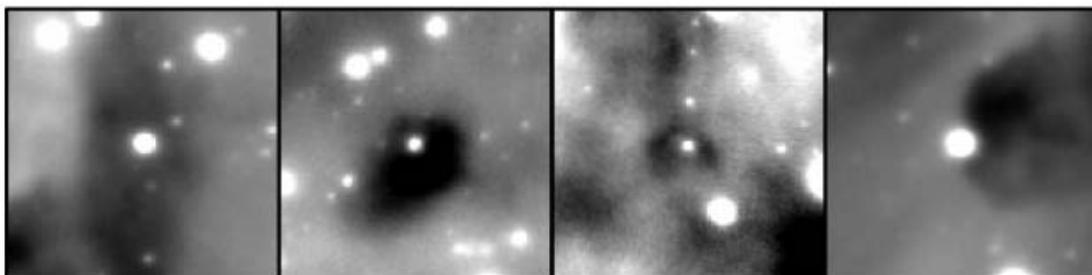


図 3 : YSO に付随しているシルエットエンベロープの一例

発見された全てのシルエットに関して、それぞれのサイズ、背景光が減光される量、質量を求めた。また、それぞれのシルエットの形状に関して原始星を中心として端がフレアした構造をしていればバタフライ型、楕円状をしていれば楕円型、それら軸対称の形状以外の形をしたシルエットを非対称型とした。また、シルエットの中に存在する原始星についてもそれらの等級から二色図、色等級図から赤外超過量、質量、減光量というパラメータを求めた。我々は求めた赤外超過量を、YSOの進化が進むほど赤外超過は減少し、主系列星では0となる特性に着目し、YSOの進化の指標として用いた。

同定された67個の天体には赤外超過量が減少するにつれてエンベロープの質量とそのサイズが減少するという明らかな傾向が見られた。このことはこれまでのYSOの進化の過程と矛盾しない。しかし、我々の結果では進化段階がClass IIであると思われる天体についても、シルエットエンベロープが存在しているという結果であった。これはClass I天体からClass II天体に移行する際に、エンベロープの一部は降着、あるいは散逸することなく原始星の周囲に残っている天体もあることを示している。このClass II天体にもエンベロープが存在するという結果はこれまでではあまり得られておらず、我々は初めてその形状、質量などを求めることができた。

M17星形成領域においては上記の議論では同定されなかった天体の中でも、YSOの周囲の一部にシルエットが付随している天体、サイズが通常エンベロープよりも大きな(>10000AU)天体が発見された。一部にシルエットが付随している天体はYSOの赤外超過量の値が小さく、より進化していると考えられるため、アウトフローやジェットによってエンベロープの一部が吹き飛んだ状態であると解釈できる。また、シルエットが大きな天体は中心のYSOの質量も比較的大きいことから、より多くの星周物質が付随したYSOだと考えることが出来る。しかし、これは分子雲から原始星コアが生成される過程で生じるガスのフィラメント構造の名残であるとも考えられる。

NGC7538で観測されたシルエットはサイズがより大きいという点を除けば、形状、質量などの点でM17にあるシルエット天体と大きな差は見られなかった。この研究ではKバンドでしか観測できなかったが、M17と同様のシルエット天体がNGC7538にも存在すると考えられる。しかし、NGC7538ではAOを用いるのに必要なガイド星が少なく、非常に限られた領域しか観測することが出来なかった。NGC7538やその他の星形成領域を広く観測するためにはレーザーガイド星補償光学系(LGSAO)が必要となる。

我々はすばる望遠鏡に搭載するLGSAOの開発を行っている。我々のLGSAOの特徴は188素子の波面センサーと可変形鏡で高次の大気の揺らぎを補正できる点と、レーザーガイド星(LGS)を生成させることで、AOを用いて観測できる領域を格段に増やすことが出来る点

である。特に LGS 生成システムにおいては、光源として全固体モードロック和周波レーザーを使用している点、レーザー光の伝送に鏡ではなくシングルモードの光ファイバーを用いている点が他の大型望遠鏡の AO と異なっている。この論文では高出力のレーザー光の伝送においても光ファイバーは使用に耐え得るか、また、光ファイバーから出射される光の偏光状態の制御が可能であるか、また、可能であれば、LGS の明るさにどのように影響するかについて議論を行った。

光ファイバーに高出力レーザーを通す際に問題となるのが、誘導ラマン散乱(SRS)と誘導ブリュアン散乱(SBS)である。これらの非線形散乱が起こると、光ファイバーの伝送効率が著しく悪化するため、これらを回避しなければならない。光ファイバーのモードフィールド径(MFD)の 2 乗に比例してこれらの非線形散乱の閾値は上昇するので、より大きな MFD を持つ光ファイバーを使用することが非線形散乱を起こさないためには重要である。そこで、我々は一般的に使用されるステップインデックス型ファイバー(SIF)の他に MFD をより大きくできるフォトニック結晶ファイバー(PCF)に注目した。SIF の MFD が $\sim 5\mu\text{m}$  であるのに対し、PCF では $\sim 15\mu\text{m}$  ほどのものが製作されている。我々は非線形散乱の閾値を知るために、より起こりやすい条件の(MFD が小さく、長い)SIF と PCF に高出力のレーザーを入射した。その結果、MFD $11\mu\text{m}$ 、200m の PCF では非線形散乱は起こらなかったが、MFD $5\mu\text{m}$ 、200m の SIF では 2W のレーザーを入射すると SRS が起こった。このことから、実際に使用する 35m という長さでは SRS の閾値は SIF で 10W、PCF で下限値が 39W であることがわかった。計算による結果では PCF における SRS の閾値は 106W となり、SIF と比べても格段と高いことがわかった。従って、我々は PCF を伝送用光ファイバーとして選択した。

打ち上げるレーザーの偏光状態によって LGS の明るさが変化することが知られている。円偏光のビームの方が直線偏光に比べて生成される LGS が明るくなるため、高効率で LGS を明るくするためには光ファイバーから出る偏光状態の制御を行う必要がある。我々の選択した PCF は偏波面を保持しないため、出射光の偏光状態をモニタしながら入射光の偏光状態を変化させる実験を行った。その結果、入射光の偏光状態とともに、出射光の偏光状態が大きく変わり、かつ出射光が円偏光となるように入射光の偏光状態を調整することが可能であるとわかった。これを利用して、実際の夜空にレーザーを出射し、生成された LGS の明るさの測定を行った。しかし、結果的に偏光状態を変えても生成された LGS の明るさには変化が見られなかった。これはナトリウム層にある原子を飽和させるのに必要な出力に達していなかったためだと考えられる。計算では打ち上げるレーザーの出力が約 10W のとき、LGS の明るさの偏光特性が現れるという結果が得られており、将来的にレーザーの出力が向上した場合、この現象を観測できる可能性がある。