

# オリオンKL 領域における 衝撃波水素分子輝線の空間・速度構造

—近赤外イメージング・ファブリペロで探るアウトフロー—

菅 井 肇

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

ほとんど全ての星がその誕生の際に伴うと考えられているアウトフロー（中心星付近からのガスの外向きの流れ）。その多くは双極構造を持つ。アウトフローの源と、その絞り込みのメカニズム、及び周囲に与える影響はまだ明らかにされていない。いろいろな波長で最もよく調べられてきたにもかかわらず未知の部分が多かったオリオンKL 領域のアウトフローに、今回我々の開発した近赤外イメージング・ファブリペロを武器に迫る。

## 0. アウトフロー

ある程度の質量を持った星は、超新星爆発という派手な現象と共に一生を終える。では生まれる時はどうか。星は静かにこの世に現れてくるのか、それとも何か我々に見える形での自己主張をしながら誕生するのだろうか。答えは後者だ。星が誕生する際には、アウトフローとよばれる現象、つまり中心星付近からのガスの外向きの流れが存在することが知られている。アウトフローは双極構造を持つことが多い。全エネルギーで言うと典型的に $\sim 10^{45}$ erg と、人生の最後を飾る超新星爆発と比べると5桁ほど小さい現象だ。しかし、このアウトフローは、中心星（原始星）の周りの殻を破ったり、他の原始星達のアウトフローとで産みの親である分子ガス雲全体にまで影響を与えたりと、星の誕生時において大きな役割を担う可能性が指摘されている。

アウトフローが星自身や分子雲の進化に対してこのような重要な意味を持つにもかかわらず、その源や、双極構造の原因、また、周囲に与える影

響等基本的なことでまだ明らかにされていない点が多い。今回、アウトフローに関するこれらの問題の解決の糸口をつかもうというのだ。

## 1. アウトフローの研究におけるオリオンKL 領域の位置付け —大質量星のアウトフロー—

電波を中心とした観測により、ほとんど全ての星は、誕生の際にアウトフローを伴うことが明らかになってきた<sup>1),2)</sup>。現在、アウトフローを伴うことが知られている中心星光度の分布範囲は、太陽光度の $10^0 \sim 10^5$ 倍と5桁にもわたる。では、これだけ広い範囲にわたるアウトフローの生成メカニズムは全て共通なのだろうか。図1は横軸に中心星光度をとり、縦軸にアウトフローの運動エネルギーをフローの年齢で割った量(力学的光度という)をとったものである<sup>3)</sup>。中心星光度とアウトフローの力学的光度はおおざっぱに言って比例関係にあることがわかる。この比例関係は、中心星光度(またはそれに比例する何らかの量)から、アウトフローの運動エネルギーへの変換効率が、中心星光度に依らないということを示唆し、アウトフローのメカニズムの共通性を期待させる。ただし、

Hajime Sugai: Fabry-Perot Observations of Molecular Hydrogen Emission in Orion KL Region

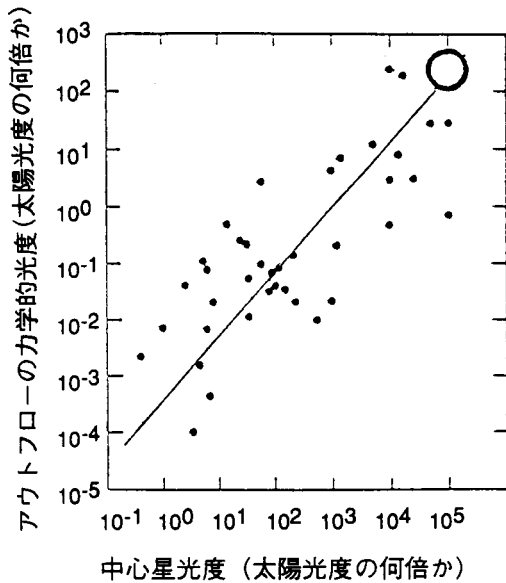


図1 中心星光度と、アウトフローの力学的光度（運動エネルギーをフローの年齢で割った量）の関係。Snell (1987) より、オリオンKL領域（白丸）は、中心星光度が太陽の $10^5$ 倍、力学的光度が230倍と大きい。

メカニズムそのものがわからないうちに、この比例関係のみを唯一の根拠として共通性を結論としてしまうのは早すぎるであろう。期待を持ちつつも、現在の段階では、まず個々のアウトフローに対するメカニズムを把握していくという方向で、より確実な理解を積み重ねていくべきだと考える。我々は、今回、比較のためのデータが豊富であるという観点から、オリオンKL領域のアウトフローを研究対象として選んだ。このアウトフローは、上述の中心星光度とアウトフローの力学的光度の比例関係の上にある。そのうちの光度の非常に大きい（太陽の $\sim 10^5$ 倍<sup>4)</sup>）、つまり大質量の中心星の例である。また、アウトフローの年齢は1500年程度と若い<sup>5)</sup>。

## 2. 水素分子振動輝線と近赤外イメージング・ファブリペロ

### —衝撃波現象—

オリオンKL領域のアウトフローを理解するため、我々は近赤外領域にある水素分子振動輝線観

測を選んだ。水素分子振動線は、アウトフローを伴う原始星のほか、惑星状星雲、超新星残骸等の天体で観測され、これらの天体においては主に衝撃波の現象を示す輝線である。近赤外線は可視光に比べ減光がずっと小さく、星生成領域のような減光の大きい領域をなるべく奥まで見通すのには欠かせない。近赤外2次元検出器を利用して、アウトフロー周辺を水素分子輝線で撮像すれば、アウトフローと周囲の物質との相互作用を知ることができ、中心付近でのアウトフローの絞り込みのメカニズムも明らかになるのではない。

我々が製作した近赤外イメージング・ファブリペロ（図2）<sup>6)</sup>を用いて、東京都小金井市の郵政省通信総合研究所の1.5m望遠鏡+HgCdTeのカメラ（128×128 pixel）で観測を行った<sup>7)</sup>。イメージング・ファブリペロは、2枚の平行反射板間の干渉を利用した分光撮像器である。我々の製作した近赤外イメージング・ファブリペロの特徴は、4分角という他に類を見ない広視野にあり、この広視野が今回の観測にも活かされている。

## 3. 円盤方向へのアウトフロー成分

### —もともと等方的なアウトフローを示唆—

図3（表紙写真）は、連続光を差し引くことによって得られた水素分子振動線  $H_2v=1-0 S(1)$  ( $2.122 \mu m$ ) での輝線像及びその等高線表示である（通常の狭帯域フィルタによる撮像では、波長分解能が悪く、連続光の差し引きは無理であることに注意）。等高線は  $2.5 \times 10^{-21} W cm^{-2} arcsec^{-2}$  から始まって、間隔は  $8.2 \times 10^{-22} W cm^{-2} arcsec^{-2}$  である。我々は、以下の話の便宜上図3を2つの領域に分ける。 $5.7 \times 10^{-21} W cm^{-2} arcsec^{-2}$ （下から5番目の等高線）より強度の大きい領域を中心領域、それより強度の小さい、外側に広がる領域をフィンガー領域<sup>8)</sup>とよぶことにしよう。フィンガー領域とよぶのは、後述するように、水素分子輝線がこの領域では手のひらを広げたように

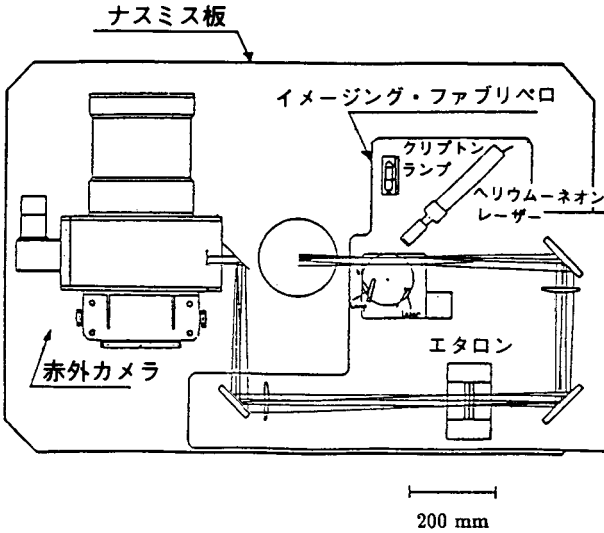


図2 郵政省通信総合研究所の1.5m望遠鏡のナスミス板(垂直に立っている)に取り付けられたイメージング・ファブリペロと赤外線カメラ。図中央で反射された赤外線がイメージング・ファブリペロを通してカメラに達する。5nmの反射板平行度を実現するためのHe-Neレーザーや波長較正用Krランプを、回転パルスステージによって挿入できる。

もと絞り込まれたアウトフローが、外からのガス供給を源に生成されるとするものである<sup>13),14)</sup>。これら2つの説を軸として、アウトフローの源や絞り込みという最も根本的な問題がいまだに未解決のまま、大論争的となっ

放射状に広がって分布しているからだ。

さて図3を見ると、中心領域では、最も強い2つのピーク(ピーク1, 2)が、中心星IRc2をはさんで双極状に分布している。図4は、この2つのピークを橋のようにつなぎ、しかも、CS(1-0)で観測される円盤構造<sup>9),10)</sup>の内側でこの円盤にくい込むように存在する水素分子輝線分布を示す。CS(1-0)は、 $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 程度の高密度物質の指標である。橋状構造に沿って円盤内に水素分子輝線の3つのピークが存在し、そのうちの1つはCS(1-0)強度の最大のところに一致している。

中心星に近いこの橋状構造が何を意味するのかを考えるために、ここで、アウトフローの生成源や絞り込みを説明するための現在の考え方に大きく2つの流れがあることを述べておく。ひとつは、星風などを源とし、アウトフローがもともとは等方的に吹き出しており、それを中心星を囲むガスと塵の円盤構造が絞り込むとする説だ。ガスが収縮して原始星が作られる際にガスはまず円盤状になるがこのなごりが中心星周辺に残っているだろう。ものが少ない、円盤に垂直な方向にはアウトフローはぬけていきやすく、その結果双極構造が作られるとする<sup>11),12)</sup>。もうひとつの説は、双極方向に沿った磁場がねじれを持つことによって、もと

ているのである。

ここで我々の観測結果に立ち戻って考えてみると、橋状構造の存在は、もともと等方的なアウトフローが円盤によって絞りこまれて双極構造を形成するという前者のモデルを支持すると言えるのではないか。なぜなら、等方的なアウトフローのうち円盤方向に放出されたものが、円盤にくい込んでいところで進行を妨げられて、そこで衝撃

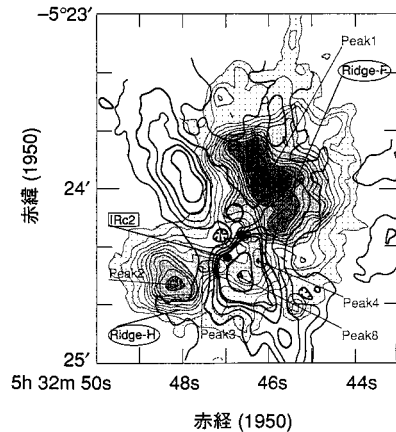


図4 オリオンKL領域中心付近の水素分子輝線の空間分布(青)。空間分解能は $5''.3$ 。CS(1-0)で観測される円盤構造(Murata 1991:全体として北東から南西へのびており、ほぼ横から見た状態になっている)と重ねて示した。橋状構造はピーク3, 4, 8を含む。中心星はIRc2。

波を生じ水素分子輝線を励起しているとする観測結果が説明できるからだ。円盤に垂直な方向に進行してきた流れがぬけ出て双極構造をつくるものと考えられる。ピーク1からピーク2までをきれいに結ぶ橋状構造の連続性は、アウトフローが、円盤方向成分、垂直方向成分という極端な成分のみを持つのではなく、それらを含む等方的な流れであることのあらわれであろう。(円盤内での水素分子輝線が弱いのは、近赤外と言えども減光を受けているためであろう。特に北東側の円盤の内側で橋状構造が見られないのは、こちら側はIRc 2からの距離が大きく影響が南西側より小さいからと考えられる。)一方、アウトフローが、放出されるときに既に双極構造を持っているとするモデルでは円盤にくい込んだ水素分子輝線構造を説明することはできない。これで我々は、オリオンKL領域のアウトフローに関しては、大論争に終止符を打ってしまったわけである。

しかし、アウトフローの源と絞り込みは、非常に根本的で、かつ長い間論争にあった問題だけに、1個の天体に関してとは言え、結論を出すには慎重にならざるを得ない。我々の考え方に危険な箇所があるとすれば、アウトフローを伴う原始星についての水素分子輝線の励起機構は衝撃波によるものであるという“常識”を使っている点だ。もしオリオンKL領域の橋状構造が“常識”とは異なって紫外線による励起で光っているとすると、水素分子輝線とアウトフローとを関連づけて考えることはできなくなってしまう。我々がこのような恐れをいだくのは、GL 2591のNIRS 1のように、進化のすすんだ中心星のなかには、中心星に近いところで紫外線による水素分子励起が効いている<sup>16)</sup>ものがあるからだ。オリオンKL領域に関しては、主にピーク1付近の10点ほどの分光観測結果により、この観測点付近に限っていえば水素分子輝線は衝撃波によって励起されていることが既に知られている<sup>15)</sup>。しかし、橋状構造がアウトフローと円盤の相互作用によって生じた衝撃波によ

るものであると言い切るためには、この橋状構造での励起機構を決定づけなければならない。このため我々は、もう1本の水素分子振動線  $H_2 v=2-1 S(1)$  ( $2.248 \mu\text{m}$ ) の輝線撮像を行い、 $H_2 v=1-0 S(1)$  との強度比分布を得た。強度比が十分なS/N比で得られた中心領域では、橋状構造を含め、いたるところで、水素分子輝線放射は純粋な衝撃波励起によることが明らかとなった。このことにより、橋状構造がアウトフローと円盤の相互作用によって生じた衝撃波によるものであるという考えはほぼ疑いないものとなった。

ここまでの話は、速度の情報の無い輝線撮像をもとにしたが、イメージング・ファブリペロにより速度の情報を得ることも可能である。図5は、速度分解能  $24 \text{ km s}^{-1}$  で水素分子輝線を観測した結果だ。図5aには、速度ごとに切った強度分布の例として、 $v_{\text{LSR}} = -30, 0, +30 \text{ km s}^{-1}$  の場合を示した。図5bにはピーク速度の空間分布を示した。IRc 2 (正確には多少BNよりだが)に近いほど、こちらに向かってくる速さが大きくなっており、このことは水素分子輝線を放射している領域が膨張しつつあることを示唆する。詳しく調べた結果、この傾向は、最も強度の大きいピーク1とピーク2のあたりまで広がっていることがわかった。このアウトフローが天球からかなり傾いた軸を持っているにもかかわらず、ピーク1とピーク2のあたりで、視線速度がともに、分子雲の視線速度に近くなるのは、これらの場所では、膨張している水素分子輝線放射領域を、接する方向から見ているからであろう。

以上、橋状構造はアウトフローの絞り込みの場であることが明らかにされた。それと同時に、この橋状構造は、アウトフローが円盤を晴れ上がらせる途中の段階を見ているということが、膨張を示唆する速度場から推測できる。図4におけるピーク1、2に関しても、円盤からのびている尾根構造(リッジF、H)に形態的に対応しており、これらの尾根構造は、IRc 2からのアウトフローが

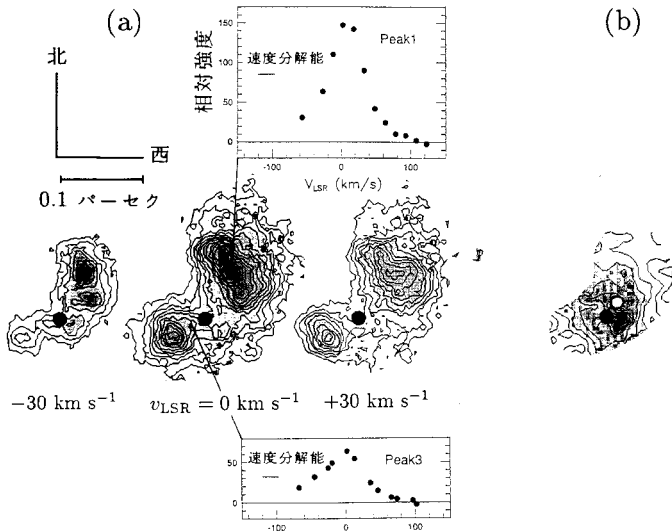


図5 (a)速度分解能 $24\text{ km s}^{-1}$ 、スキャン間隔 $15\text{ km s}^{-1}$ で水素分子輝線観測した結果。速度ごとに切った強度分布の例として、 $v_{\text{LSR}} = -30, 0, +30\text{ km s}^{-1}$ の場合を示した。黒丸はIRC2の位置。また、空間ごとの輝線プロファイルの例として、2か所におけるプロファイルも示した。(b)ピーク速度の空間分布。黒い方がこちらに向かってくる速さがより大きいことを意味する。ピーク速度は $v_{\text{LSR}} = -15$ から $+15\text{ km s}^{-1}$ 程度まで空間変化している。黒丸はIRC2、白丸はBNの位置。

IRC 2 周辺の物質に衝突し、水素分子輝線を励起しながら物質をふきあげてできた構造と考えられる。

#### 4. フィンガー領域 —アウトフローの広がりと状態—

中心領域に関して、水素分子輝線観測により、アウトフローの源や絞り込みのメカニズムが明らかになった。また、アウトフローが円盤を晴れ上がらせる役割も担っているらしいことがわかった。

では次に、さらに外側でのアウトフローの影響を調べてみよう。水素分子輝線の最も強い2つのピークの位置、つまり円盤からのびている尾根構造のところアウトフローは完全に止められてしまうのだろうか。それともピークを越えた領域にもアウトフローの影響は届いているのだろうか。届いているとすれば、それはどのような影響なのか。図3を見ると、中心領域を越えた外側の領域で放射状に広がった水素分子輝線が確認された。特に、北側での放射状構造は Taylor et al.<sup>9)</sup>によって発見され、フィンガー構造と名付けられた。現在まで見つかった他のアウトフローには見られない特殊な構造だ。また、この領域は、高速のCO分

子流<sup>17),18)</sup>の領域を越えたところにあるという点で、DR 21 や NGC 2071 等の明るい中心星に付随するアウトフローと異なる。フィンガー構造の特殊性と、それが高速分子流の領域を越えて存在するという事実は、IRC 2 のアウトフローの年齢が1500年程度と非常に若いことによるのかもしれない。つまり、この領域は、CO分子流が到達してしまう前の状況を見ている幸運な例なのかもしれない。そうだとすると、この領域の研究は、アウトフローの非常に若い時期にのみ観測可能な新しい事実を教えてくれる可能性がある。

ところが、フィンガー構造は発見されて久しいにもかかわらず、この水素分子輝線の放射機構は、反射かどうかすらも明らかにされていなかった。これを明らかにすることが、フィンガー領域で何が起きているかを理解する鍵を握ると我々は考え、今回得た水素分子輝線撮像のデータに基づきこの放射機構を明らかにした。

図6は、“アンシャープ・マスキング”という空間高周波成分を強調するための手法を用いてフィンガー構造を浮きだたせたものである。これにより、43個の水素分子輝線クランプが見いだされた。図7は、これらのクランプをCS (1-0) の速度ごとにきった強度図(速度チャンネル図)<sup>9)</sup>と比較

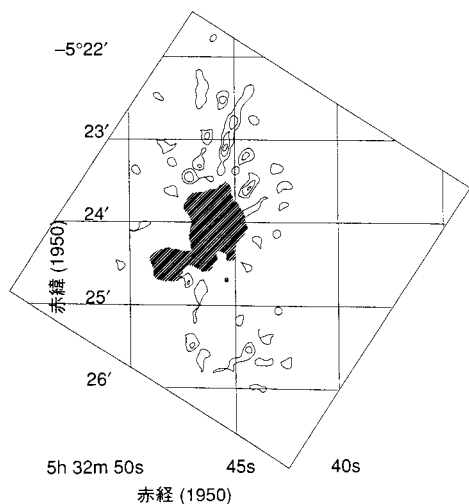


図6 フィンガー領域で見いだされた水素分子輝線クランプ。ハッチを入れたのは中心領域。南側に位置するクランプのうち、南側から数えて7個目までは、CS3/FIR4という別の星形成領域のアウトフローによる影響を受けている可能性が高い。

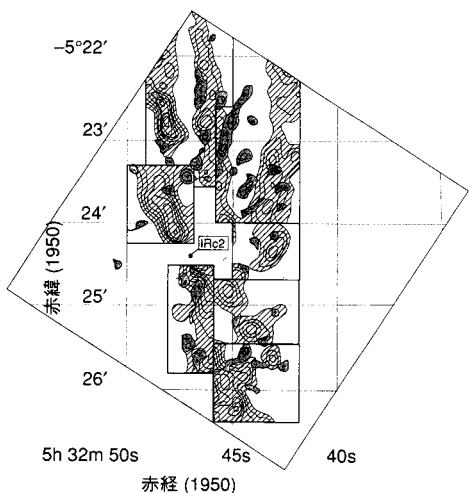


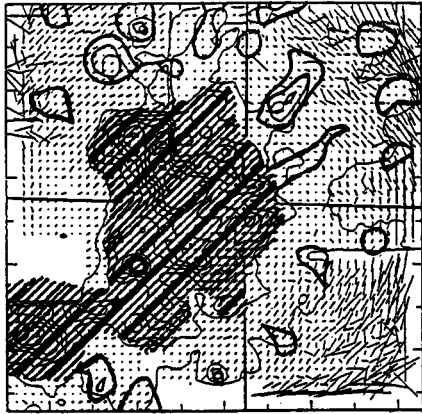
図7 フィンガー領域の水素分子輝線クランプを、CS (1-0) の速度ごとにくிட்ட強度図 (Murata 1991) と比較したもの。

したものである。フィンガー領域を7つの部分に分け、各部分について最大の強度を持つ速度チャンネル図を取り出して比較したのである。水素分子輝線は、CS (1-0) に沿って、しかしCS (1-0)

のピークは避けて分布する傾向にあることがわかる。このことから、我々は、水素分子輝線はCS (1-0) で観測される分子雲の表面から放射されると結論づけた。これは、IRc 2からのアウトフローが(分子以外のかたちで<sup>19)</sup>この領域にも存在し、そのアウトフローが高密度分子ガスのフィラメントに衝突し、表面で衝撃波水素分子輝線を励起することを示すものであると考えられる。水素分子輝線強度から見積もられる励起水素分子の柱密度と典型的な体積密度とから推測される幾何学的な厚さが、クランプの大きさに比べて非常に小さいことも、表面が光っているとする上述の説明を支持する。水素分子輝線と分子雲の良い対応から判断して、フィンガー領域でのアウトフローは、一樣か、またはもしビーム状だったとしても本数の多いかなり密なものであろう。

水素分子輝線のクランプが反射によるものという可能性に関しては、我々は、クランプのマップと Burton et al.<sup>20)</sup>の水素分子輝線についての偏光マップとの比較により否定している(図8)。IRc 2を中心とした対称的な偏光角の分布から反射が支配的であると Burton et al.が結論づけたフィンガー領域においても、我々の発見したクランプのところでは、偏光の度合が小さくなる傾向にあることがわかる。これは、輝線のクランプのところでは、放射が反射ではなく、その場から放射されているものであることを示している。

以上、高速分子流を越えたこのフィンガー領域に存在する水素分子輝線は、なんらかの流れと周囲の高密度分子ガスとの衝突によって励起されていることがわかった。この流れとは、恐らく原子かイオンの状態でのアウトフローであろう。一言でアウトフローといっても、2つの成分が存在するのだ。今後は、フィンガー領域のアウトフローが、中心領域で高速のCO分子流として直接観測されているアウトフローとどういう関係にあるか(つまり、極端な高速成分が、CS (1-0) で観測される尾根構造を突き破ってきたのかとか、各々の



100% Vector

図8 我々の定義した水素分子輝線クランプのマップと Burton et al. (1991) の水素分子輝線についての偏光マップとの比較。ハッチを入れたのは中心領域。

アウトフローが放出される時期にずれがあったのかどうかなど) という疑問を解明し、アウトフローの理解をさらに進めていきたいものである。

## 5. 今後の課題

以上、我々は、大質量の中心星を持つオリオン KL 領域のアウトフローに関して、星風が源となっており、円盤がアウトフローを絞っている」と結論づけた。さらに、高速分子流の領域の外側の広い領域に渡って、それとは異なるもう一つのアウトフロー成分の存在をほぼ確実にした。ここで確立された手法を用いて、これらの性質が大質量の中心星を持つアウトフローに対してどれだけ共通点となっているのか調べたい。また、もっと質量の小さい中心星に伴うアウトフローに対してはどうだろうか。星風の役割に関しては、最初に述べた、中心星光度とアウトフローとの力学的光度の比例関係から、他のアウトフローに対しても大きいと期待する。星風説に対する問題点として、アウトフローの運動量が、中心星の輻射によってはまかないにくいという点が指摘されていることは頭に入れておく必要がある。ただし、この問題点を解決するために光子の多重散乱や星風の時間

変動<sup>21)</sup>などが提案されていることも事実である。

現在、日本を含め各地で、感度の非常に良い赤外線検出器が使用されるようになりつつある。これにより、多くのそして様々なアウトフローに対して分光・撮像が可能となるだろう。その際には、今回紹介させていただいたように、イメージング・ファブリペロが有効な武器となる。

最後に、指導教官・共同研究者の田中(培)、指導教官の家、共同研究者の片坐、井上、白田、川端、廣本、高見、青木の各氏に感謝したい。

## 参考文献

- 1) Margulis, M. et al. 1988, *Astrophys. J.*, **333**, 316.
- 2) Fukui, Y. et al. 1989, *Nature*, **342**, 161.
- 3) Snell, R. L. 1987, in *IAU Symp. 115, Star Forming Regions*, ed. M. Peimbert & J. Jugaku (Dordrecht: Reidel), p. 213.
- 4) Wynn-Williams, C. G. et al. 1984, *Astrophys. J.*, **281**, 172.
- 5) Snell, R. L. 1984, *Astrophys. J.*, **284**, 176.
- 6) Sugai, H. et al. 1993, submitted to *Astrophys. J.*
- 7) Sugai, H. et al. 1993, submitted to *Astrophys. J.*
- 8) Taylor, K. N. R. et al. 1984, *Nature*, **311**, 236.
- 9) Murata, Y. 1991, *PhD thesis*.
- 10) 村田泰宏 1992, 天文月報, **85**, 434.
- 11) Sakashita, S. et al. 1985, *Astrophys. Space Sci.*, **111**, 213.
- 12) Okuda, T. & Ikeuchi, S. 1986, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **38**, 199.
- 13) Uchida, Y. & Shibata, K. 1985, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **37**, 515.
- 14) Pudritz, R. E. & Norman, C. A. 1986, *Astrophys. J.*, **301**, 571.
- 15) Scoville, N. Z. et al. 1982, *Astrophys. J.*, **253**, 136.
- 16) Tamura, M. & Yamashita, T. 1992, *Astrophys. J.*, **391**, 710.
- 17) Hasegawa, T. 1986, *Astrophys. Space Sci.*, **118**, 421.
- 18) Masson, C. R. et al. 1987, *Astrophys. J.*, **319**, 446.
- 19) Hasegawa, T. 1987, in *IAU Symp. 115, Star Forming Regions*, ed. M. Peimbert & J. Jugaku (Dordrecht: Reidel), p. 123.
- 20) Burton, M. G. et al. 1991, *Astrophys. J.*, **375**, 611.
- 21) Kenyon, S. J. et al. 1993, *Astron. J.*, **105**, 1505.