

銀河系中心核近傍のガス運動と中心核活動

福井 康 雄*

1. はじめに

我が銀河系中心領域は、従来中性水素の21 cm線やOH吸収線などによって観測され、3 kpc 腕などの特異運動を示す星間雲が見出されてきた。最近になって各種のミリ波帯星間分子輝線(CO, HCN, HCO⁺等)による観測が可能になり、これまでは手の届かなかった高密度星間ガスの微細構造の解明が進んでいる。輝線観測は吸収線観測とは異なり、連続波源との前後関係に左右されないバイアスフリーな情報をもたらしてくれるので、大質量の高密度分子雲の真の姿が浮きぼりにされつつある。

東京天文台では6 m電波望遠鏡を使って、1975年秋以来、HCN, HCO⁺等の輝線による中心核近傍の観測が行なわれている。これまでの観測によって、中心核にする特異な大質量分子雲の存在が明らかになった。各種の検討を通じて、この分子雲が最近中心核から放出されたものであると考えられることが分かった。本稿では、観測結果のハイライトと、質量放出モデルによる解析結果を紹介し、他の最近のデータも参照して過去数百万年の中心核活動について考察したい。

詳細については、福井他(1977)(Publ. Astron. Soc. Japan, 29, 643)等を、また、銀河系中心領域全般については、オールト(1977)の秀逸なレビュー(Ann. Rev. Astron. Astrophys., 15, 295)を参照されたい。

2. 中心核周辺の分子雲の構造

1975年～1976年に得られたHCN(青酸)輝線(波長3.4 mm, 角分解能2分角)の強度分布を図1=表紙写真に太線で示した。▲印の位置に中心核(電波源 Sgr A)がある。従来の観測は、中心核の周囲約10分角四方の範囲しか含んでいない。Sgr A分子雲の全体像を明らかにしたのは、本観測が初めてである。現在なおこれに匹敵する高分解能観測は出ていない。分子雲はほぼ銀河面に沿って伸びており、銀河中心までの距離を10 kpcとすると、約60 pc × 20 pcの見かけの拡がりを持つ。分子線の衝突励起の条件から、平均的な粒子数密度は3000個 cm⁻³以上と推定される。従って、水素分子が殆んどを占める分子雲の総質量は3 × 10⁶ M_⊙以上となる。この質量は、銀河系内の代表的な分子雲の値より約100倍大きい。同程度の質量を持つ高密度分子雲は、中心核から約0.7度離れたSgr B2分子雲のみである。因みに、半径約750 pcの中性水素中心核円盤の総質量は約4 × 10⁶

M_⊙である。

図1に明らかなように、分子雲の分布は、連続波の分布とは全く対応していない。連続波源の大部分はH II領域である。一部分子雲に重なって見える連続波源も、水素再結合線・分子吸収線の観測結果と比べると、分子雲とは直接のつながりがなく、分離して別の運動をしていることが分かる。つまり、Sgr A分子雲は、H II領域が付随しない巨大な暗黒星雲なのである。通常の高密度大質量星間分子雲は例外なくH II領域を伴っていることを考えると、これは極めて特異な性質である。前出のSgr B2分子雲には、コンパクトH II領域が見出されており、H II領域と分子雲の相関が非常によいと対照的である。

等視線速度図等によって分子雲のみかけの運動を調べてみると、Sgr A分子雲が速度の違う2つの成分からなることが分かる。主成分は、 $l = -0^{\circ}06 \sim 0^{\circ}20$ に横たわる視線速度+50 km s⁻¹の成分である。この成分全体は、中心核を要(かなめ)とする扇状をなしており、その中の高密度部分は中心核に端を発する直線状に分布していることが注目される(図1=表紙写真参照)。

中心核周辺の物質の扇状分布は、最近遠赤外線(波長100 μm)でも見出された。100 μm放射は低温の星間塵からの熱放射と考えられるので、両者の一致は、分子雲中の星間塵からの寄与が効いているとしてよく説明できる。中心核での100 μmのピークは、中心核を取り囲む電離領域中の高温星間塵の寄与によるものだろう。この中には分子はほとんどないと思われる。

3. 分子雲と中心核の相対位置

Sgr A分子雲の運動を決めるためには、中心核からの距離と、前後関係を知ることが必要である。数年前までの議論では、約100 pc以上の距離が仮定される場合が多かった。しかし、1974年波長6 cmのH₂CO吸収線による高分解能観測の結果が発表されるに及んで、+50 km s⁻¹分子雲が中心核の背後に近接している可能性が一気に強くなった。高分解能吸収線の地図によれば、中心核自体の方向には吸収は全くなく、20秒角程度離れた二、三の弱い電波源の方向にのみ吸収が生じている。オールト(1974)とホワイトオーク達(1974)は、この結果をもとに、Sgr A分子雲が中心核の背後に近接しているのではないかと指摘した。

私達のHCNの観測結果も、近接背後説を支持する。中心核周辺約0°1以内の電離ガスから来る水素の再結合

* 東大理 Y. Fukui: Gas Motion near the Galactic Nucleus and the Nuclear Activity

線の数・線幅が、HCN 輝線とよく一致するのである。つまり、Sgr A 分子雲は、中心核を取り囲む半径約 15 pc の電離ガスと同じ運動をしているのである。また、HCN 輝線と H₂CO 吸収線の分布を比較することによって、分子雲全体が中心核の背後にあることが分かる。一方、分子雲の構造の点からも、近接説は有力である。扇状の +50 km s⁻¹ 雲の分布・直線状高密度成分の中心核との好対応は、100 pc 以上も離れたものが偶然重なっているため、とは考えにくいのである。

以上のようにして近接背後説はほぼ固まると言える。分子雲の +50 km s⁻¹ という視線速度を説明するには、回転運動か外向きの動径運動の可能性がある。HCN の結果は、+50 km s⁻¹ 雲中でほとんど速度勾配がない、仮にあって 5 km s⁻¹ 以下であることを示しているの、回転運動が主とは考えにくい。さらに、中心核自体の方向でも +100 km s⁻¹ に及ぶ幅広いプロフィールが検出されていることを考えると、外向きの動径運動が卓越している可能性が強い。動径速度 100 km s⁻¹ を仮定して分子雲全体の運動エネルギーをあたると、約 4×10⁶⁸ erg 以上となる。これだけのエネルギーはとても超新星爆発などでは説明できない。

そこで、+50 km s⁻¹ 雲が中心核からの質量放出によって形成されたものではないか、という考えが浮かぶ。こう考えれば、+50 km s⁻¹ 雲の扇状構造は、放射状に放出されたガスの軌跡として自然に理解できる。3×10⁶ M_⊙ 以上の質量を放出するに要した時間は 10⁶ 年以下と推定される。これが分子雲の年齢の上限になる。前述の H II 領域の欠如は、Sgr A 分子雲のこのような異例の若さを示しているのかも知れない。

HCN の観測から得られたこの質量放出仮説をうらづけるには、さらに観測データを蓄積する必要があると感じられた。そこで、一年後の 1977 年早春、やはり 3mm 帯の HCO⁺ (フォルミルイオン) 輝線による同領域の観測を試みた。

4. +50 km s⁻¹ 雲のモデル解析

図 2 に、HCO⁺ のプロフィールを示した。HCO⁺ 輝線

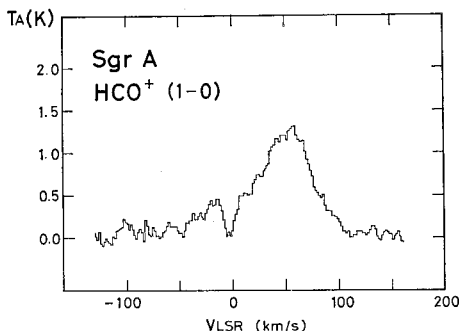


図 2 直線状高密度成分中の HCO⁺ プロフィール。

は、HCN 輝線に比べるとプロフィールの裾の部分 (“ウィング” と呼ぶ) が中央部 (“コア” と呼ぶ) に比べて強くなっている。これは HCO⁺ が “ウィング” では相対的に増加していることを示している。つまり、HCO⁺ 輝線では HCN 輝線では見えなかった低密度領域も観測にかかるのである。HCO⁺ 輝線には 0 km s⁻¹ に鋭い切れこみがある。これは手前の冷たい分子雲による吸収である。銀河中心のスペクトルは、これを埋めて考えればよい。HCO⁺ のプロフィールの特徴は、高速度側がつまった非対称性である。実は HCN のプロフィールにもわずかが同様の非対称性がうかがえる。HCO⁺ で非対称性が著しいのは、ウィングが存在するためである。

4.1 モデル解析

まず、質量放出仮説から期待される *l*-*V* 図を HCO⁺ の *l*-*V* 図と比較してみよう。図 3 に、モデルの平面図と、期待される *l*-*V* 図を示した。外向きの動径速度 *V*₀ は一様としてある。速度の射影効果によって、高速度側のつまった非対称性が出ている。また扇形が有限なために、高速度側の終端速度は中心核から離れるにつれて減少する。このために、非対称性は一層強調されることになる。パラメータ *V*₀ を適当にとりてモデルの *l*-*V* 図を HCO⁺ の *l*-*V* 図に重ねたのが図 4 である。上の二

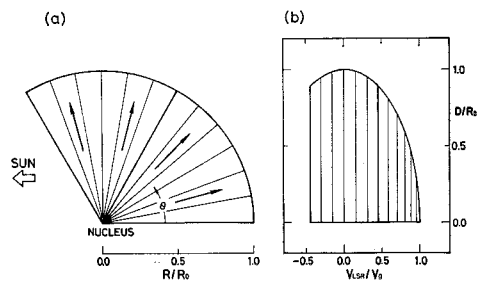


図 3 (a) +50 km s⁻¹ 雲の質量放出モデルの平面図。
(b) 同モデルから期待される *l*-*V* 図。

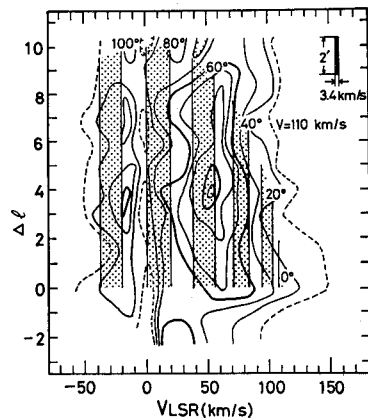


図 4 HCO⁺ の *l*-*V* 図に、質量放出モデルの *l*-*V* 図を重ねたもの。Δ*l* は中心核を原点にとった銀径で、単位は約 1.3 分角 (=4 pc)。

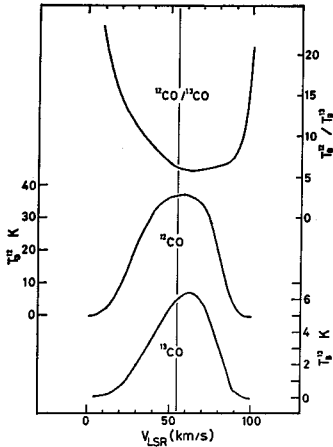


図 5 質量放出モデルから期待される CO 輝線プロフィール。同位体 (^{12}C と ^{13}C) による相違が特徴的である。

つの特徴 (非対称性と、終端速度の減少) は、観測結果とよく一致している。

そこで、もっと詳しくパラメータを決めるために、観測された非対称性を見かけ上の効果であると仮定して、空間的に対称な輝度分布を得ることを試みた。こうすれば、動径速度、放出角などを決定することができる。詳しいことは略すが、この解析の結果は大変よく、 $V_0=110 \text{ km s}^{-1}$ の時に対称な輝度分布が得られた。視線と扇の中心線とのなす角度 (θ_0)、扇の頂角 ($\Delta\theta$) は各々 60° 、約 100° と求められる。これらの値を使うと、 $+50 \text{ km s}^{-1}$ 雲の放出開始時刻は 4×10^5 年前である。

一方、モデルの特徴は光学的深さによる分子線輪郭の変化として現われることが期待される。視線に対して角度 θ をなす方向に運動する成分の光学的深さは、 $1/\sin^2 \theta$ に比例し、 θ の減少に伴って急激に増加する。これは、いわゆる混み合い効果 (crowding effect) の一種であり、射影効果によって単位視線速度幅中に入る物質の量が増えることの現われである。光学的深さが 1 より小さい場合に、この効果は顕著になることが予想される。波長 2.6 mm の CO 輝線についての計算例を図 5 に示した。特に、 $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比の振る舞いに注目しよう。高速度側 ($+50 \sim +80 \text{ km s}^{-1}$) では同比はほぼ一定であるのに対して、低速度側 ($+40 \text{ km s}^{-1}$ 以下) では急激に増加していく。光学的厚みの小さい ^{13}CO 輝線では、混み合い効果によって $+60 \sim +80 \text{ km s}^{-1}$ では $\tau > 1$ となり、光学的に厚い ^{12}CO 輝線と同じ形になるが、混み合い効果の効かない低速度側では ^{13}CO は $\tau < 1$ となり、 ^{12}CO よりもはるかにすみやかに輝度が減少してしまうのである。観測された $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比は、この予想とよく一致する。

以上の解析を通じて、扇状質量放出モデルは、① l - V 図でのパターン、② プロフィールの非対称性、③ 混み合

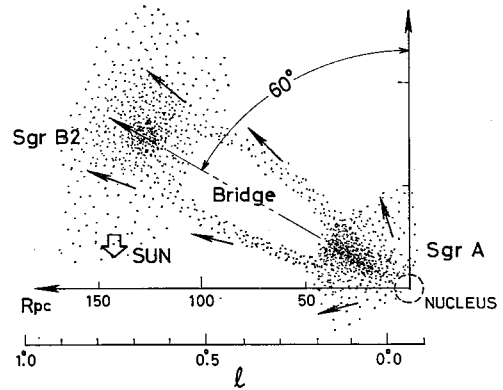


図 6 中心核から 200 pc 以内の分子雲の分布と運動。

い効果 (あるいは、同位体効果) の三点で観測事実とよく一致することが分かった。

4.2 回転運動説の欠陥

一方、Sgr A 分子雲の運動を回転運動で説明しようという試みは従来少なくない。ここで、回転運動説の主な欠陥を指摘しよう。

分子雲が中心核の背後にあるので、回転モデルと放出モデルとは、高速度成分と低速度成分の前後関係が正反対になる。中心核近傍の H_2CO 吸収線プロフィールを輝線プロフィールと比較すると、輝線で見える $+80 \sim +100 \text{ km s}^{-1}$ の高速度成分は吸収線では見えない。つまり、高速度成分は詳細の如何にかかわらず低速度成分の背後にあると結論される。これは、動径運動でなくては説明できない。回転モデルに対する強い反証である。

あるいは、隠れたバーの存在を仮定して分子雲の生成と運動を説明できないか、という考えも浮かぶ。この場合の困難は、分子雲の著しい非対称性である。高密度分子雲は $l > 0$ に集中している。また、バーによって発生する衝撃波で回転は減速され、中心核への質量流入の起ることが期待されるが、これは観測と矛盾する。

以上のように、回転運動モデルによる $+50 \text{ km s}^{-1}$ 雲の理解は困難である。それにひきかえて、質量放出モデルは観測事実をよく説明し、今のところ矛盾する観測データはない。

5. その他の特異成分

Sgr A 分子雲に匹敵する高密度分子雲 Sgr B2 は、中心核から見て Sgr A 分子雲の延長上 $l=0.7$ に位置している。両分子雲はブリッジと呼ばれる比較的低密度の分子雲によって連結していることが知られている。Sgr A 分子雲が中心核から放出されたものとする、Sgr B2 分子雲もまた、同様の放出の結果生じた可能性が高い。Sgr B2 の視線速度は約 $+60 \text{ km s}^{-1}$ で Sgr A とそう違わない。Sgr A と同様にして、Sgr B2 の年齢は 1.5×10^6 年と見積られる。Sgr B2 分子雲がコンパクト H II 領域

と多数の H_2O メーザ源を含む星生成の舞台であることは、暗黒星雲 Sgr A とは好対照であり、 10^6 年以上の両者間の年齢差を反映していると考えられる。

その他の主な成分として、 -135 km s^{-1} 腕、 $+165 \text{ km s}^{-1}$ 腕、 $l > 1^\circ$ の $+100 \text{ km s}^{-1}$ 雲などがある。これらは、Sgr A, Sgr B2 に比べると密度が小さい。これら全体は、 $l > 0$ の側に集中し、低密度の雲で互いに連結しており、共通した放出起源と考えられる。詳しい観測のある 200 pc 以内の分子雲の配置と運動を図 6 に示した。

6. 中心核活動

6.1 質量放出の描像

観測された分子雲の形状・分布を基にして、質量放出のプロセスを想い浮かべてみることにしよう。

「約 3×10^6 年前、 10^4 K の高温・高密の電離ガスが中心核から吹き出した。磁場を伴うほぼ球対称なガス流は、星の重力場によって銀河面に徐々に引き寄せられ、軸対称なガス流となる。磁化したプラズマに特有の不安定性によって軸対称性はくずれ、現在見る $l > 0$ ($\theta = 60^\circ$) の方向にガス流は集中するようになる。このガス流の中では、磁力線のチューブが中心核から動径方向に引き伸ばされ、後続として放出されるガスはこのチューブに沿って流出することになる。プラズマは、中心核あるいはその近くの OB 型星の紫外輻射によって電離しているので、10 pc も離れると再結合して中性水素ガスになる。同時に星間塵が形成され、塵の表面での反応でまず水素分子が形成され、イオン分子反応などによって CO, HCN, HCO^+ などの分子が形成されていく。1.7 $\times 10^6$ 年前から 1.3 $\times 10^6$ 年前と、4 $\times 10^5$ 年前から 1 $\times 10^4$ 年前は特に質量放出率が大きく、各々、Sgr B2・Sgr A 分子雲を形成した。」

過去 3 $\times 10^6$ 年間の平均的な質量放出率は、3 M_\odot/yr 以上、代表的な動径速度は 110 km s^{-1} ~ 160 km s^{-1} 程度である。中性水素中心核円盤の回転運動によって分子雲が押し流されるのではないかと考えられる方がいるかも知れないが、それは次の理由で問題にならない。中性水素の密度は小さく、濃い所でも 5 cm^{-3} 程度であり、分子雲の千分の一以下である。最も効率よく中性ガスの運動量が分子雲に伝達したとしても、少なくとも 10^7 年以上かからないと分子雲の運動に有意な影響を及ぼさない。

6.2 連続的加速の必要性

4.1 の解析でも分かったように、Sgr A 分子雲中の動径速度はほとんど変化していない。Sgr B2 などその他の成分についても、中心核からの距離が違っているにもかかわらず、その速度はあまり変わらない。このことは、中心核周辺の重力場を考えると驚くべきことである。恒星密度が太陽近傍の一万倍以上あり、中心集中度も高い

この領域から脱出するには、100 km s^{-1} では全く足りない。このことは、ガスが単にある初速度で放出されただけでなく、連続的に外向き加速度を受けてきたことを示唆する。それでは、加速機構としてどのようなものが可能だろうか。

星間塵を多量に含んだ低温 ($\leq 50 \text{ K}$) の高密度ガスを加速するのは並大抵ではない。10²³ cm^{-2} 以上の柱密度の中性ガスを透過して運動量を運ばなくてはならないのである。この条件を満たすのは、高エネルギー宇宙線である。数 GeV の宇宙線は、ある程度の電離度があれば、二流不安定性によって MHD 波を励起し、それを通じて運動量を中性ガスに伝達することが知られている。粗い評価によれば、通常の S 型銀河で 1~10 M_\odot/yr の質量放出が可能であるという。今後の詳しい検討が待たれる。

6.3 質量供給

もう一つの問題は、 $\geq 3 \text{M}_\odot/\text{yr}$ の質量をガスの形でどう供給するかということである。現在観測されている中心核周辺の晩期型星から期待される放出ガスは、必要量の千分の一位にしかならない。コンパクトな大質量天体の潮汐力による恒星の破壊などが可能性として考えられるが、 $\geq 3 \text{M}_\odot/\text{yr}$ を満たすのはかなり困難のように思われる。因みに、現在の中心核の質量の上限は 4 $\times 10^6 \text{ M}_\odot$ (直径 1.6 pc 以内) であり、放出されたと考えられる分子雲の質量は 10^7 M_\odot 以上と見積られる。

6.4 中心核自体

最近の VLBI (超長基線電波干渉計) 観測によって、中心核に 10 AU 以下のコンパクトな電波源の存在することが分かった。輝度温度が 10^9 K 以上なので非熱的電波源であることはまちがいないが、実体は明らかでない。電波領域の総放射量は 5 $\times 10^{38}$ erg/s である。これはカニパルサーの約 100 倍にあたる。やや乱暴だが、仮に全エネルギー放出率もカニパルサーの 100 倍だとすると 3 $\times 10^{40}$ erg s^{-1} 程度が何らかの形で放出されていることになる。加速に必要なエネルギーと同程度か、あるいはやや足りない位である。放出された質量 ($\geq 10^7 \text{ M}_\odot$) の大きさを考えると、 $\sim 10^6$ yr のタイムスケールで中心核の活動度が低下しつつある可能性もある。過去 10^4 年の質量放出率がそれ以前の百分の一以下であることを考えると、この活動度の低下の可能性も捨てたものではない。

数年前までの議論は、中心核に関する基本的な物理量が知られていなかったためあって、法外なエネルギーの爆発的解放を想定した例が多い。そのような描像に比べると、現在考えられる中心核活動は、大変穏やかなものであると言える。

7. おわりに

これまでの観測にもとづいて、中心核からの質量放出活動についてのアウトラインは明らかになった。しかし、

銀経で5度以上に及ぶ銀河系中心領域の全貌を語るには、まだまだ観測データは足りない。今後、CO輝線などによって、更に観測を充実させていきたいと考えている。

本稿の基になった観測は東京天文台宇宙電波部の方々の御協力なくしてはありえなかった。特に、宮地竹史氏には、一方ならぬ御援助をいただいていた。ここに深く感謝の意を表したい。

学会だより

山田科学振興財団研究援助候補推薦について

山田科学振興財団より学会あてに、下記内容の53年度分研究援助候補の推薦依頼がありましたのでお知らせ致します。

記(推薦要領抜萃)

1. 援助の対象: 自然科学の基礎的分野における重要かつ独創的な研究, 特に学際的色彩を持つ研究に従事する個人又はグループ。
2. 援助の金額: 総額1億2千万円。1件につき1千万円前後2千万円以内の援助(A)及び1件につき3百万円前後, 5百万円以内の援助(B)を併せて10数件。
3. 援助の期間: 原則として1年。
4. 推薦件数: 1推薦者ごとに(A), (B)おのおの1~2件。

申請用紙を御入用な方は、学会庶務理事までお申し出下さい。申請書は、昭和53年10月10日までに学会あて提出して下さい。

松永賞受賞候補者推薦について

松永記念科学振興財団より、下記要項にしたがって、松永賞受賞候補者を推薦されたい旨の依頼が学会あてにありました。適当な方がありましたら、6月20日までに学会庶務理事あてに御連絡下さい。

記

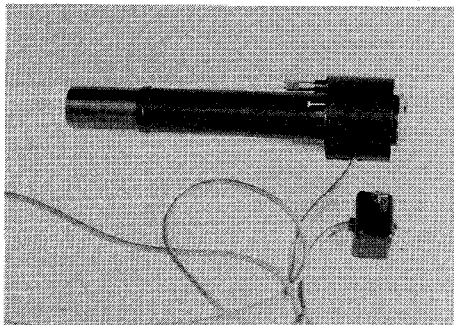
(昭和53年度松永賞贈呈実施要項抜萃)

1. 本年度の当財団の科学研究に対する褒賞「松永賞」は、社会科学および自然科学系統の基礎的研究で、学術上の業績が特に顕著であると認められるものを対象とする。個人研究でも共同研究でもさしつかえない。
2. 「松永賞」の受贈者は大学に在職し、昭和8年12月1日以後出生の少壮有為な科学者中から求める。
3. 「松永賞」は1口150万円として本年度は社会科学部門1名自然科学部門3名を予定する。

Day Star社のソーラーフィルターを日本で発売



フィルター



写真撮影装置

◎H α フィルター(ファブリペロータイプ)

透過半波長幅 0.60Å~1.20Å 6種類

透過光線 F30以上

フィルター径 ϕ 32mm 重量 460g

6562.8Å波長 電気ヒーターコントロール式

ヒーターコントロール トライアック式 100V~110V 50~60Hz

価格 ¥285,000~

◎フィルター用写真撮影装置

波長位置 移動マイクロメーター付

フィルター透過主光線は平行光線

望遠鏡はF15用 ¥78,000

◎H α 以外のフィルターも製作しています

3700Å~2.5 μ m 波長幅 0.4~100Å

(株)西村製作所

〒606 京都市左京区吉田二本松町27

TEL (075)691-9589