

# W40とSerpens Southの星形成

下井倉 ともみ

〈大妻女子大学社会情報学部 〒102-8357 東京都千代田区三番町 12〉

e-mail: ikura@otsuma.ac.jp



H II 領域 W40 とそれに隣接する暗黒星雲 Serpens South の周辺 1 平方度を、複数の分子輝線を用いて観測しました。C<sup>18</sup>O 分子輝線による速度構造の解析の結果、2 つの領域がつながっていることを示す 3 次元モデルを構築しました。また、H II 領域近傍からその外側に向かう膨張する分子雲シェルの存在を明らかにしました。Serpens South に付随する Serpens 星団の位置は分子雲シェルの一部と良く一致することから、その星団形成には分子雲シェルが関係している可能性が高いことを示しました。

## 1. はじめに：W40とSerpens South

大質量星である O 型星や B 型星は、星の母体となる分子ガスの塊＝分子雲の環境に大きな影響を与え、次世代の星の形成を引き起こします [1]。したがって、OB 型星を中心として形成される H II 領域の調査は、その影響によって星の形成がどのように起こり、どのように進化するのかを理解するために重要です。私たちのグループ「国立天文台野辺山宇宙電波観測所星形成レガシープロジェクト」は、これらの理解のためのターゲットとして H II 領域 W40 と隣接する赤外線暗黒星雲 Serpens South を選びました [2]。これら 2 つの領域は濃いガスとダストに覆われているため、赤外線望遠鏡等の活躍なくしてはその詳細な構造は不明なままでした。図 1 に、Spitzer 宇宙望遠鏡により観測された同領域の赤外線放射の様子を示します。

W40 は、複数の OB 型星によって励起され H II 領域を形成しています。励起星の集団を図の十印で示し、W40 星団と呼びます。図 1 では、W40 星団を中心とする北西-南東方向に広がった砂時計のような構造を確認できます。これは、恒星風

によってガスやダストが星間空間に向かって吹き飛ばされている様子を示しています。Shuping らは、IRS 1A South と呼ばれる O 型星が、この砂時計型構造を形作った恒星風の主な源である可能性が高いと結論付けています [3]。図 1 が示すように、H II 領域は恒星風により時間とともに拡大・膨張し、このことが分子雲を圧縮して次々と星形成を促しています。また、W40 の砂時計構造は、複数のフィラメント状のガスとダストから構成されています。これらのフィラメントに沿って数百の若い原始星候補天体が同定されており、活発な星形成の様子が明らかになってきました [4-7]。同定された原始星候補天体の年齢は  $1.0 \times 10^6$  年以下であると推定されています [4]。

天球上での W40 の西側には、黒くシルエットで浮き上がったように見える赤外線暗黒星雲 Serpens South が位置しています。Serpens South も複数のフィラメントから構成されています。フィラメントの交差したような中心部には年齢  $0.5 \times 10^6$  年程度と推定される若い星団が確認されており [8]、Serpens 星団と呼ばれています。Serpens 星団の形成の起源や歴史については次に示すいくつかの説が提案されています。構成するフィラメ

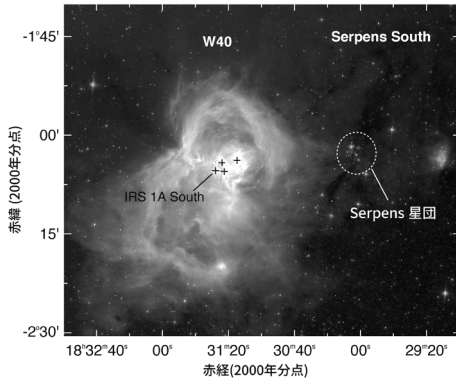


図1 Spitzer望遠鏡によるW40とSerpens Southの全体像。+印はW40の主な励起星(W40星団)。

ントが長く伸びた方向に速度勾配を示すことから、フィラメントの交差点に向かってガスが降着し星団形成が起きているのではないかという説[9]、また、この速度勾配は、速度の異なる複数のフィラメントを示すものであり、フィラメント同士による衝突が星団形成を引き起こしたという説[10]等です。さらに、フィラメントの垂直な方向にも速度勾配が観測されたことから、Serpens South外部からの大規模なガスの乱流運動が星団形成を誘発したのではないかとの報告もあります[11]。

それでは、Serpens星団の形成には、W40のH II領域の影響はあるのでしょうか、それとも無関係なのでしょうか。W40とSerpens Southは、これまで個別に研究されており[3–12]、これらの関係は明らかにされていませんでした。そこで、私たちは、野辺山45 m鏡とFOREST受信機を用いて2領域を含む1平方度に及ぶマッピング観測を実行し、その内部のガスの空間構造や速度構造を調査しました[2, 13]。本稿では、100 GHz帯のC<sup>18</sup>O, <sup>13</sup>CO, <sup>12</sup>CO分子輝線による解析結果を紹介します。本観測の空間分解能は20秒角、速度分解能は0.1 km/sです。

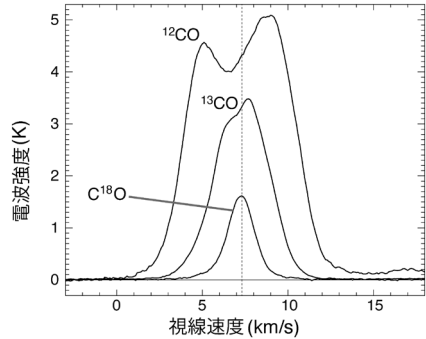


図2 <sup>12</sup>CO, <sup>13</sup>CO, C<sup>18</sup>Oそれぞれの分子輝線について観測領域全てのスペクトルを平均したもの。

## 2. 空間構造と速度構造

### 2.1 分子雲の空間構造

図2に、観測領域で得られた観測分子輝線のスペクトルを示します。この図から、C<sup>18</sup>O分子輝線は、2領域に渡って視線速度が約5 km/sから10 km/sの範囲で分布し、約7 km/sにピークをもつことが分かりました。一方、<sup>12</sup>COと<sup>13</sup>CO分子輝線は、7 km/s付近で輝度が低く、スペクトルの形状は谷になっています。これは、前景にある、より低温の分子雲により<sup>12</sup>COと<sup>13</sup>CO分子輝線が7 km/s付近で吸収を受けているためと考えられます[12]。またこのことは、2領域の系全体のガスが7 km/s付近の視線速度をもつということも示します。この7 km/sの速度をW40とSerpens Southの系速度と呼びます。

図3は、検出された速度範囲で速度軸に沿って積分した強度図です。C<sup>18</sup>O分子輝線の分布を示しています。背景にはHerschel望遠鏡による250 μmの赤外線放射の分布図を重ねています。図よりH II領域の周辺やSerpens South周囲に濃密な分子雲が存在していることが分かります。また、この分子雲は観測領域全体に連続的に分布していることも見て取れます。このことから、W40とSerpens Southは物理的に接続している同じ系の分子雲であることが分かりました。また、分子雲の分布は、Serpens South領域では赤外線

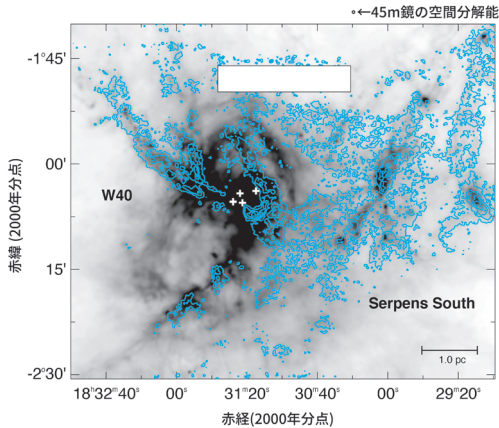


図3  $C^{18}O$ 分子輝線の分布図(等高線).背景はHerschel望遠鏡による赤外線放射分布図であり,ダストの分布を示します.右上に野辺山45 m鏡の空間分解能を示しています.中央上付近の長方形の空白部分は,残念ながら観測できなかった領域です.

放射分布と空間的に良い一致があります.一方で, W40ではH II領域の輪郭に沿って分子雲の空洞部分が確認でき, H II領域の拡大するイオン化ガスの前面が分子ガスとの境界を明確に描いていることが分かります.これは, W40とSerpens Southの分子雲がH II領域の影響を受けていることを示唆しています.

## 2.2 分子雲の速度構造: 4つの速度成分

$C^{18}O$ 分子輝線のデータを速度範囲を細かく区切って積分した強度図により, 観測領域の分子ガスの運動を追跡しました. その結果, 分子ガスの空間分布は4つの速度成分に分類できることが分かりました. 分類した4成分の分布図を図4に示します. それぞれを5, 6, 7, および8 km/s成分と呼びます. 以下に, 各成分の特徴を述べます.

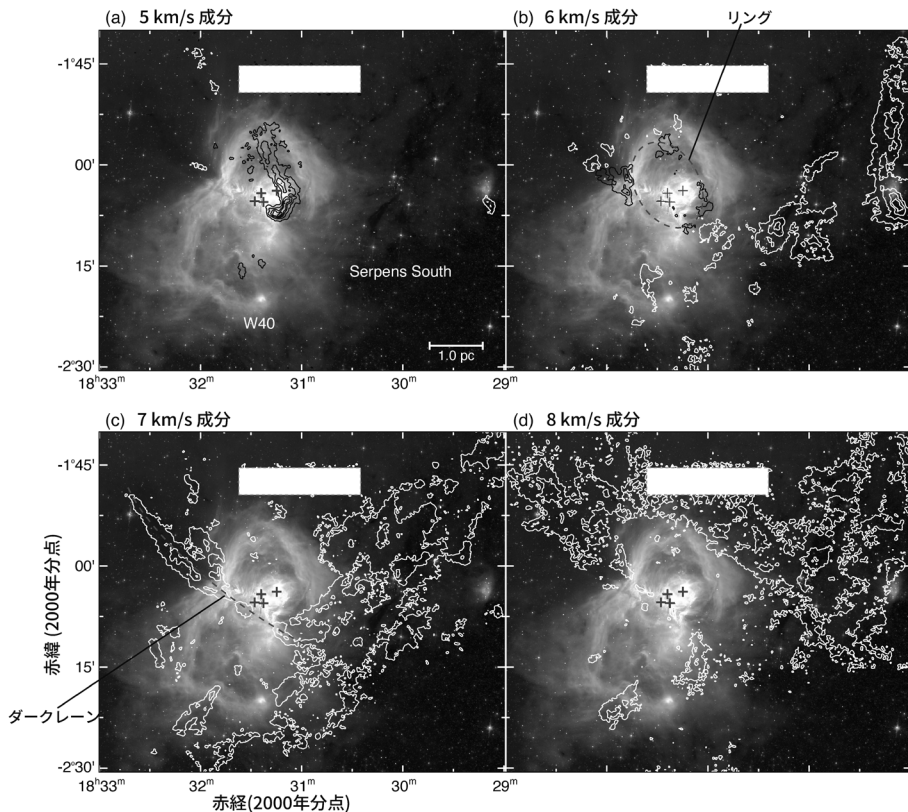


図4 4つの速度成分の $C^{18}O$ 強度分布(等高線).背景画像は図1と同じです.  
(a) 5 km/s成分, (b) 6 km/s成分, (c) 7 km/s成分, (d) 8 km/s成分.

5 km/s成分: 主にW40星団周辺に位置しています。 $^{12}\text{CO}$ 分子輝線データから測定したこの成分の温度(=励起温度)は周囲に比べて高く50 K以上ありました。このことは、この成分はW40星団の近くにあり、それらからの放射に

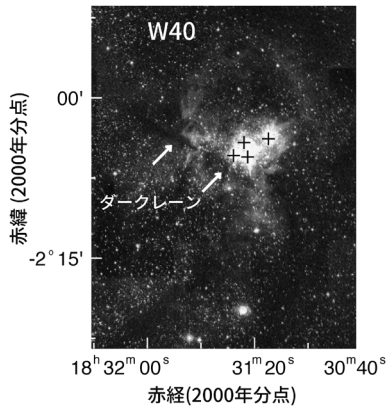


図5 W40の近赤外線放射図。これは、Spitzer望遠鏡(8  $\mu\text{m}$ )と2MASSというサーベイ観測のKsバンドおよびHバンドによる3色合成図です。矢印が「ダークレーン」を示します。

よって温められていることを示唆しています。

6 km/s成分: H II領域周辺とSerpens Southの本体の南側の部分を形作っています。また、H II領域の周囲では、リング状の構造が見られます。

7 km/s成分: 主にSerpens South領域とH II領域の周辺に見られます。また、砂時計構造の「腰」部分に付随する成分は、近赤外線の観測で暗く見える、図5に示した「ダークレーン」と一致しています。この成分は、破線で示したようにSerpens SouthからW40までつながって分布しています。

8 km/s成分: 主にH II領域の北西側に位置し、H II領域の境界に分布しています。

以上をまとめると、4成分の分布は、H II領域と周囲の分子ガスとの相互作用を示していることが分かりました。系速度より低速度側の成分はW40星団周辺でのみ分布し、高速度側の成分はH II領域の境界に位置しています。これらは低速度から高速度側へ、また、H II領域の内側から外側へと分子ガスが移動していることを示します。

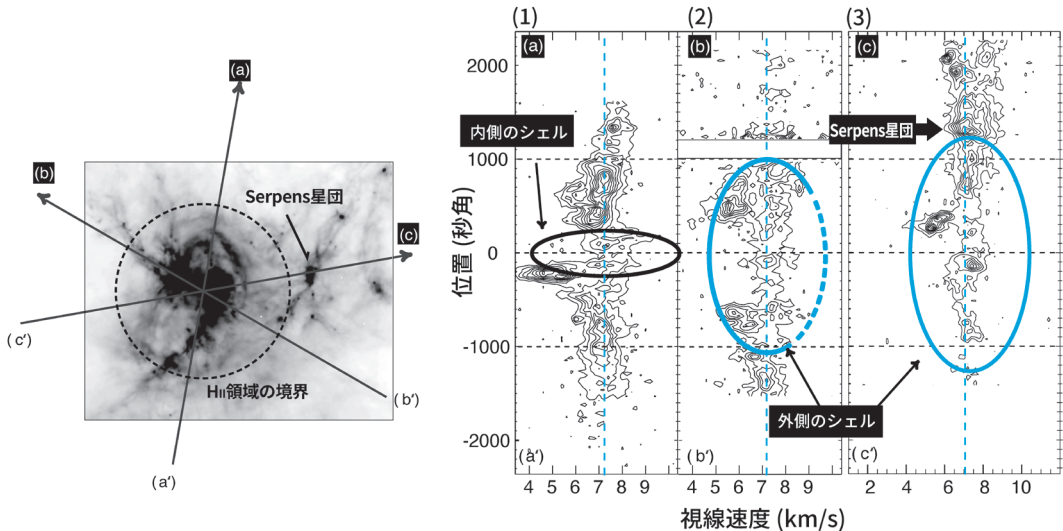


図6 パネル(1)-(3): 観測領域(左端の図)のa'-a, b'-b, c'-cに沿った位置を縦軸、視線速度を横軸にして、 $\text{C}^{18}\text{O}$ 分子輝線の強度をプロットした位置-速度図。IRS 1A Southの位置(=0秒角)とそこから $\pm 1000$ 秒角離れたH II領域の境界に対応する位置を横の点線で示しています。また、縦の点線は系速度です。



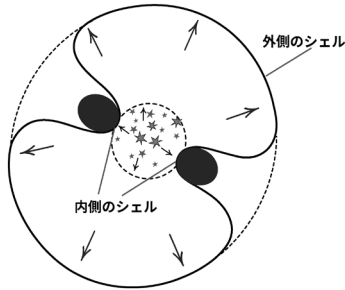


図7 2つのシェルがH II領域の膨張によって形成されたことを説明するW40の概略図。内側のシェルはH II領域の近くにあり、外側のシェルはH II領域の境界に対応します。

つまり、4成分は、H II領域の膨張によってはき寄せられたガスであることが示唆されます。

### 3. 2つの膨張シェルの発見

さらに速度構造を調査しました。図6のパネル(1)–(3)は、IRS 1A Southの位置を通り、いくつかの方向に沿って作成した位置-速度図です。位置-速度図を調査することで、指定した線に沿って分子ガスがどのような速度変化をしているのかを探ることができます。様々な方向で位置-速度図を作成した結果、IRS 1A Southを中心とする楕円状の構造が見つかりました。この構造は、H II領域の膨張運動を反映した分子ガスのシェルを表していると思われます。また、このシェルは2つあることがわかりました。1つはパネル(1)の楕円で示されるIRS 1A South近傍の「内側のシェル」、もう1つはパネル(2)の楕円で示されるH II領域の境界に対応する「外側のシェル」です。また、位置-速度図より、内側のシェルと外側のシェルの半径はそれぞれ約0.5 pcと約2.5 pcであり、膨張速度は約3 km/sと測定できます。このことから、シェルが膨張する時間スケールは、内側のシェルが $1.6 \times 10^5$ 年、外側のシェルが $8.1 \times 10^5$ 年と推定できます。これらの値は、過去の研究にて電波連続波観測により見積もられたW40のH II領域の力学的年齢[6]と同程度である

ことがわかりました。

2つのシェルは何を表すのでしょうか。これらは、H II領域周辺の分子ガスの密度分布が均一ではないために形成されたのではないかと考えられます。図4の各パネルを見ると、IRS 1A southおよびW40星団の周囲には、細かなガスの塊が分散しています。H II領域の膨張は、このような塊によって減速またはブロックされ、それらの塊に面する膨張シェルの一部が内側のシェルとして、残りのシェルが外側シェルとして見えているのではないかと考えられます。さらに、これがまさにW40の砂時計型構造を形作る機構かもしれません。以上の説明を図7に示します。

### 4. Serpens Southの星団形成

次に、H II領域がSerpens星団の形成に影響しているのかどうかを調査しました。図6のパネル(3)は、Serpens星団の位置を横切る軸c'-cに沿って測定したC<sup>18</sup>O分子輝線の位置-速度図です。この図を見ると、星団に付随する分子ガスは、外側のシェルの表面に位置する可能性が非常に高いことがわかります。このことは、星団の母体分子雲がシェルの影響を受けている可能性があることを示しています。また、パネル(3)から測定されるC<sup>18</sup>O分子ガスの速度は、Serpens星団の位置で2 km/s程度と急激に増大しています。この星団では、それらに属する原始星からの双極分子流が観測されています[10]。このことから、速度増大の原因には、分子流等の現象が関係しているかもしれません。しかしパネル(3)で明らかになった位置関係の一致を考慮すると、この増大は、Serpens星団に付随する分子雲と外側のシェルとの相互作用を示している可能性も考えられます。外側のシェルがSerpens星団の形成を誘発したのではないのでしょうか。

そこで外側のシェルの影響を調査するため、図8に、Serpens Southのフィラメントの長軸に沿った位置-速度図を示します。Serpens星団を中心

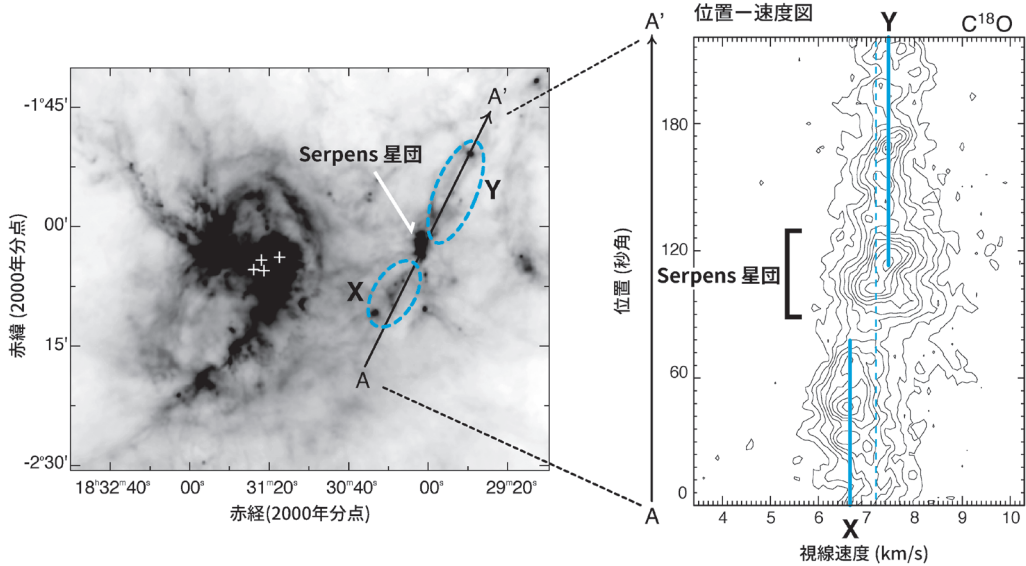


図8 左図: Serpens South星団から南東側に伸びたフィラメントをX, 北西側に伸びたフィラメントをYとします。右図: X, Yに沿った位置A-A'を縦軸, 視線速度を横軸にC<sup>18</sup>O分子輝線の強度をプロットした位置-速度図。縦の点線は系速度。

として南東方向と北西方向に伸びるフィラメント(図8の左図に楕円で囲んでいます)にそれぞれ「X」と「Y」とラベル付けし, XとYに付随するガスの運動を調べました。その結果, Xに付随するガスの速度は系速度より低く, XとY間で1 km/s程度速度差が検出されました。

Serpens星団は明らかにXとYの交差点に位置し, また, XYとも外側のシェルの表面の周りに分布しています。これらの空間分布の一致と速度差の検出から, 外側のシェルの膨張によってXが加速されYに衝突した結果, その交差点で星団形成が誘発されたシナリオが浮かびます。

過去の研究では, 異なる速度をもつ複数のフィラメント同士の衝突がSerpens星団形成の引き金となった可能性があることが示唆されていました[9, 10]。私たちは, この衝突の可能性に加えて, W40のH II領域による外側のシェルがフィラメントXの加速に重要な役割を果たしたのではないかと考えています。つまり, Serpens星団の母体分子雲に外側のシェルが影響を及ぼした結果, フィラメントの衝突が起こり, 星団の形成が誘発

されたというシナリオを提唱します。

## 5. 3次元モデル

最後に, 系速度に対する4成分の速度差とH II領域の膨張運動を考慮することで各成分の位置関係を明らかにし, W40とSerpens Southに付随する分子雲の3次元モデル構築に挑戦します。

視線速度の方向で考えると, H II領域を含む系速度は7 km/sですから, それよりも低速度の5 km/sと6 km/s成分はH II領域の手前側, 一方で高速度の8 km/s成分はH II領域の向こう側に位置しているはずですが。

5 km/s成分は, 温度が高くH II領域の近くにあり, W40星団の恒星風に吹き飛ばされ, 観測者側に向かって移動するガスです。この成分は, おそらく内側のシェルに位置します。Serpens Southの周囲の6 km/sと7 km/s成分の一部は, 図1の赤外線画像では暗黒星雲として見えます。これは, W40星団が光源となり, それらに背後から照らされることで影絵のように見えているのです。よって暗黒星雲に付随する成分は観測者が

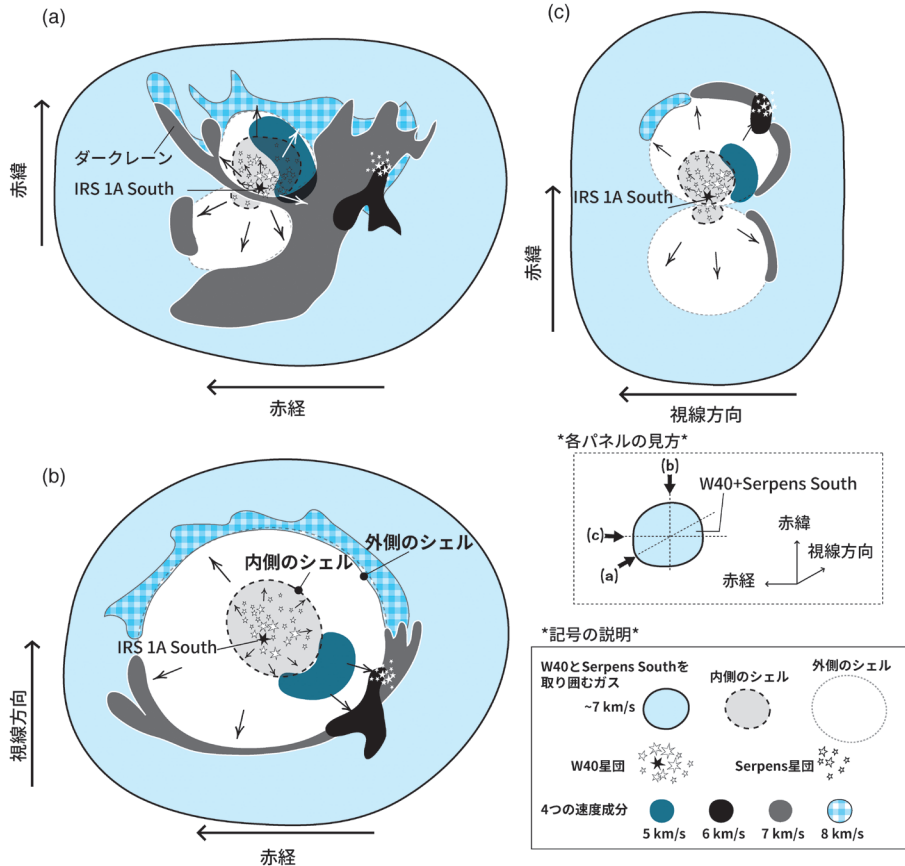


図9 W40およびSerpens Southの3次元構造の概略図。(a)は天海上、(b)は赤緯-視線方向、(c)は赤経-視線方向、の投影図をそれぞれ示しています。W40とSerpens Southは7 km/sの速度をもつガスに囲まれています。またこのモデルでは、H II領域によって形成された2つの膨張する分子雲シェルが存在します。6 km/sと7 km/s成分は外側のシェルの表面の周りに位置します。Serpens星団に付随する成分は、外側のシェルと相互作用している可能性があります。

ら見てH II領域の前景にあるはずですが、図5に示したW40のダークレーンに付随する7 km/s成分も同様です。最後に、8 km/s成分はW40星団の恒星風に吹き飛ばされ、観測者の反対側に向かって移動するガスです。赤外線画像で暗く見えていけませんのでH II領域の背後にあることが示唆されます。

以上をまとめたW40とSerpens Southの3次元モデルの概略図を図9に示します。

前進するイオン化ガスの前面が分子雲を包むと、その圧力が重力崩壊と星形成を引き起こしま

す[1]。2つの分子雲シェルは、明らかにH II領域によって作られたものであり、本研究の結果は、W40とSerpens SouthでのH II領域の膨張による連続した星形成現場の様子を示しています。

## 6. 終わりに：観測よもやま話

私たちは1平方度及び広大な領域について、空間分解能20秒角、速度分解能0.1 km/sという高分解能観測を実行し、上述の結果を得ました。図3の右上に野辺山45 m鏡の空間分解能を示しています。観測領域と比較してみてください。

また、本稿では述べませんでしたが、観測で得た  $C^{18}O$  のデータと近赤外線偏光観測の結果を用いることにより、Serpens South のフィラメントに対して垂直に貫く磁場の存在を明らかにし、磁場がフィラメントの形成や進化に重要な役割をしていることも明らかにしました [14]。これらの結果は、野辺山 45 m 鏡とそれに搭載された高感度で多輝線同時観測が可能な FOREST 受信機を用いたからこそ得られたものです。

観測は、決して順調ではありませんでした。ターゲット領域は銀河中心方向にあり、電波強度の絶対値を知るために必要な「電波放射の無い場所」が、天球上でターゲット領域から 6 度角以上離れている大変遠い場所にしか見つかりませんでした。このことは観測実行を非常に非効率にし、多大な時間のロスとなりました。また、人気領域である銀河中心付近の観測時間獲得は熾烈を極め、ターゲット領域が天頂を迎えた後が主な観測時間でした。データを得るために、仰角 20 度以下の天体が沈む直前まで粘って観測しました。さらに、45 m 鏡の副鏡が故障し、観測途中でプロジェクトが終了となりました。図 3 の分布図を始めとして結果の一部に空白部分があるのはそのためです。思い返すと、プロジェクトが動き出した 2014 年には、記録的な大雪に見舞われたために観測棟に閉じ込められ、十分な食べ物もなく観測棟で 2 日間過ごしたこともありました。2 日後に本館から 500 m の雪道を手動で雪かきをして助け出してくれた観測所の N さんには本当に感謝しています。全て良い思い出です。

## 謝 辞

本稿で紹介した内容は、土橋一仁氏、中村文隆氏、島尻芳人氏、杉谷光司氏とともにレガシー特集号に発表した査読論文に基づいています [13]。観測には、プロジェクトのメンバーをはじめ、その他のレガシープロジェクトの皆様および野辺山観測所の皆様等、多くの方々にご協力をいただき

ました。また、東京学芸大学の秦野義子さん、廣瀬亜紗さんとは多くの観測時間を一緒に過ごしました。皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Elmegreen, B. G., & Lada, C. J., 1977, ApJ, 214, 725
- [2] Nakamura, F., et al., 2019, PASJ, 71, S3
- [3] Shuping, R. Y., et al., 2012, AJ, 144, 116
- [4] Kuhn, M. A., et al., 2010, ApJ, 725, 2485
- [5] Bontemps, S., et al., 2010, A&A, 518, L85
- [6] Maury, A. J., et al., 2011, A&A, 535, A77
- [7] Mallick, K. K., et al., 2013, ApJ, 779, 113
- [8] Gutermuth, R. A., et al., 2008, ApJ, 673, L151
- [9] Kirk, H., et al., 2013, ApJ, 766, 115
- [10] Nakamura, F., et al., 2014, ApJ, 791, L23
- [11] Fernández-López, M., et al., 2014, ApJ, 790, L19
- [12] Shimoikura, T., et al., 2015, ApJ, 806, 201
- [13] Shimoikura, T., et al., 2019, PASJ, 71, S4
- [14] Kusune, T., et al., 2019, PASJ, 71, S5

## Star Formation in W40 and Serpens South

Tomomi SHIMOIKURA

Otsuma Women's University, 12 Sanban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8357, Japan

We present the results of mapping observations covering a large area of 1 square degree around W40 and Serpens South carried out in the  $^{12}CO$  ( $J=1-0$ ),  $^{13}CO$  ( $J=1-0$ ), and  $C^{18}O$  ( $J=1-0$ ) emission lines with the 45 m Nobeyama Radio Telescope. Based on the  $C^{18}O$  observations, we found the emission is distributed smoothly throughout the W40 and Serpens South regions, and that the two regions seem to be physically connected. We found elliptical structures in the position-velocity diagrams, which can be explained as part of expanding shells. Dense gas associated with a young cluster of Serpens South is likely to be located at the surface of one of the shells, indicating that the natal clump of the young cluster is interacting with the shell being compressed by the expansion of the shell. We further propose a three-dimensional model of the W40 and Serpens South complex.