

# アルマ望遠鏡データアーカイブから探る 大質量分子雲の構造と形成



樋口 あや

〈茨城大学理学部 〒310-0056 茨城県水戸市文京2-1-1〉

e-mail: ahiguchi@mx.ibaraki.ac.jp

アルマ望遠鏡は世界最高の電波望遠鏡であり今やそのアーカイブは宝の山である。しかし初期運用のアーカイブデータを用いた研究はほとんど見られない。今回はアルマのアーカイブデータを用いて私自身が取り組んだG0.253+0.016という大質量分子雲の構造と形成についての紹介を行いたい。初期運用の結果ではあるが、アルマ望遠鏡の高分解能を活かして、大規模なシェル構造や細かいフィラメント構造を明らかにすることができた。またこれらの構造を数値シミュレーションと比較をしたところ、大きさや重さの違う分子雲同士の衝突によって形成された可能性があることがわかってきた。すでに一般へ公開されたデータでこのような研究ができることをぜひ皆さんにも知ってもらいたいのと同時に、アーカイブデータを活用して新しい発見、素晴らしい成果を出してもらいたい。

## 1. はじめに

みなさんはアルマ望遠鏡についてどのような印象をお持ちでしょうか。プロポーザルの倍率が高い、電波天文学を専門としない研究者には敷居が高い、データが重くてダウンロードがたいへん、高速な解析環境が必要では？ などさまざまな印象をお持ちでしょう。確かに私も最初はそう思っていました。しかしその考えは、私自身が国立天文台チリ観測所から合同アルマ観測所へ赴任し、実際にデータ評価に関わったことで徐々に変わっていきました。合同アルマ観測所での仕事をしながら、公開データの中の自分の興味のある研究対象の結果をいくつか見てきて、実際に研究に使ってみて、これほど簡単で便利なアーカイブはこれまでにないと確信しました。今回はみなさんにもっとアルマ望遠鏡のアーカイブデータを活用して、新しい発見、素晴らしい成果を出していただきたいと思い、このような紹介をさせていただ

うと思います。

## 2. アルマ望遠鏡のアーカイブ

### 2.1 アーカイブの利用方法と注意点

アルマ望遠鏡のアーカイブデータの基本的な使い方は2014年の天文学会春季年会（国際基督教大学）にて、EA-ARC（東アジア・アルマ地域センター）アストロノマーのエリック・ミュラー氏が講演しましたので詳細は参考文献1)を参照してください。アーカイブデータはアルマのユーザーポータルからダウンロードして自由に使うことができます。そこで今回はせっかくのデータを有効に使うために、ちょっとしたコツをご紹介しますと思います。

まず環境構築です。アーカイブデータファイルを一括ダウンロードすると100 GB程度の容量を必要とします。ポータブルのハードディスクなどをぜひ用意してください。またネットワーク環境が充実してきた昨今でも、さすがに100 GBレベ



図1 アルマのハイサイトに66台目のアンテナが山頂に到着した様子. これによりようやくアルマ望遠鏡は最高性能を発揮することができる (credit: JAO/NAOJ).

ルのデータをダウンロードするのは大変です. そこでダウンロードを開始する前に, Japanese Virtual Observatory (JVO)<sup>2)</sup> という国立天文台内のアーカイブサービスを使って, データの内容や画像を簡単に確認してください. この時点で研究に使いそうでしたらダウンロードをするというプランをお勧めします.

次にデータの再評価です. すべてのアーカイブデータが, 基準どおりにキャリブレーションされているかどうかはわかりません. そもそも初期運用(サイクルゼロ)は「ベストエフォート」で開始されました. つまりアルマ望遠鏡にさまざまな問題があっても, ユーザーもアルマ側に協力して調査を行うことが推奨されておりました. この時期に取得されたデータは, 立ち上がりかけのアルマ望遠鏡で取られたデータですので, さまざまな問題がありました. またあまり知られていませんが, 各サイクル終了時には, 品質保証が完了されなかったデータも, ある程度使用可能であれば品質保証されなかったデータとしてユーザーに配布され, 配布の1年後にはアーカイブデータとして公開されます. 現状では以上の点に注意を払わなければいけません. これこそがアルマアーカイブのハードルを上げてしまっている一つの理由なのでしょう.

## 2.2 ちょっとひと工夫

前述のように現状ではアルマのアーカイブデータは再評価が必要な場合もあります. すべてのアーカイブデータにはデータ評価についてのレポートが付随しています. まずそれらを確認し, S/N(シグナルとノイズの比)や画像の質を確認してください. 私自身が興味をもってダウンロードしたデータの中にも, キャリブレーションから再解析が必要なものがいくつかありました.

次にキャリブレーションに問題がないことが確認されたら, 配布されているデータを使って画像処理をしてみることをお勧めします. 実は配布されているデータの速度分解能は, アルマの最高分解能ではない場合があります. 実際に最高速度分解能にして再解析すると, 配布された画像よりもより詳細な速度構造が見えてきたりします. また配布された画像はアルマ側が設けるチェック項目をすべてクリアしたデータセットを用いて機械的に画像処理したものです. これらを自分の手で緻密に画像処理を行うとよりいっそうS/Nが高い画像が得られます. 実は以上の作業によってこれまで見えなかった空間構造, 速度構造が明らかになることもあります. これこそがアルマデータの醍醐味なのです.

電波観測になじみのない方々もいらっしゃると思うので, ぜひチリ観測所が行っているタウンミーティングなどに参加してみてください. またアルマのヘルプデスクに個人指導の申込みなどを行うことも可能かと思しますのでぜひ活用していただければと思います.

## 3. 大質量分子雲の構造と形成

それでは今回の研究のお話に入っていきます. 私たちの銀河系に存在する星たちは, ほとんどが星団と呼ばれる星の集団で生まれます<sup>3)</sup>. 特に大質量星と言われる太陽の8倍以上の質量をもつ星は, 必ず星団として生まれると言われてます<sup>3)</sup>. これまでの電波望遠鏡を使った観測で, こ

のような星団は分子雲と呼ばれるガスのかたまりの中で生まれることがわかってきました<sup>4)-6)</sup>。しかし、そもそも星団の母体となる分子雲がどうやって生まれるのかという形成メカニズムはまだよくわかっていません。

### 3.1 大質量分子雲: G0.253+0.016

今回紹介するのはG0.253+0.016という天体です。通称Brick Cloud (ブリッククラウド: 以後ブリックと表記する) と呼ばれていて、銀河中心に分布する大質量分子雲 (およそ100,000太陽質量) です<sup>7)-10)</sup>。この分子雲は、かの有名なオリオン座分子雲よりも重く、密度も高いのに<sup>10)</sup>、オリオン座に見られるような明るい星団が生まれていないのです。このような理由で世界中の研究者がブリックが星団形成の初期状態を保っているのではないかと注目して研究してきました。しかし銀河中心という、私たちから遠く離れた場所に分布する天体のため、あまり解像度の良い観測がされておらず、分子雲内の細かい構造が分解できませんでした。アルマ望遠鏡が動き出して初期運用で観測され、やっとこそさまざまな分子輝線による詳細な画像が得られました (図2)。今回私たちはSOという分子輝線の結果に注目しました。

### 3.2 アルマ望遠鏡が得意なこと, 苦手なこと

アルマ望遠鏡のような干渉計が得意なことは、観測対象に対して、高い分解能でピーキーな構造を検出することです。しかしその一方で、もちろん苦手な部分もあり、それは広がった構造を観測しても、結果的にこれらの成分を落としてしまうことです。言葉で表現するとなかなか難しいので直感的に見ていきましょう。図3はカシオペアAという超新星残骸の画像です。それぞれ上方左から1) 12 m アンテナの干渉計観測により得られた画像, 2) 日本が担当している7 m-ACA アンテナによる干渉計観測によって得られた画像, そして3) 12 m アンテナの単一鏡観測によって得られた画像です。これらを像合成した後のカシオペアAの画像が下の画像です (黒野泰隆一博士論文<sup>11)</sup>)。

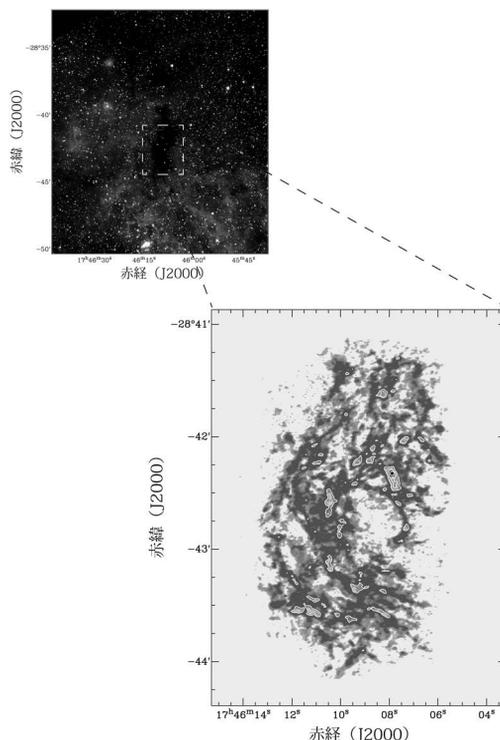


図2 左上: 広域赤外線探査衛星ワイズ (WISE: Wide-field Infrared Survey Explorer) による3.4, 4.6, 22  $\mu\text{m}$  の3色合成図。右下: アルマ望遠鏡によって観測されたG0.253+0.016 (Brick Cloud) のSO分子輝線で得られた画像。

もちろん像合成を行えば、細かい構造も広がった成分もきちんと再現することができますが、これらはサイクルゼロシーズンではサポートされておらず、サイクル1以降に取得されたデータのみサポート対象になっています。そのためブリックは12 m アンテナの干渉計データしかなく像合成は行えません。個々の画像を見ていくと、単一鏡の画像は分解能は悪いもののカシオペアAの全体構造をおさえているのに対し、干渉計による画像は細かい構造を選択的に検出していることがわかります。今回のブリックの観測のように、12 m アンテナのみを用いた干渉計観測では、今まで見えなかった細かい構造を明らかにできますが、広がった成分を落としてしまうため、いわゆるミッシングフラックスが大きくなってしまいます。

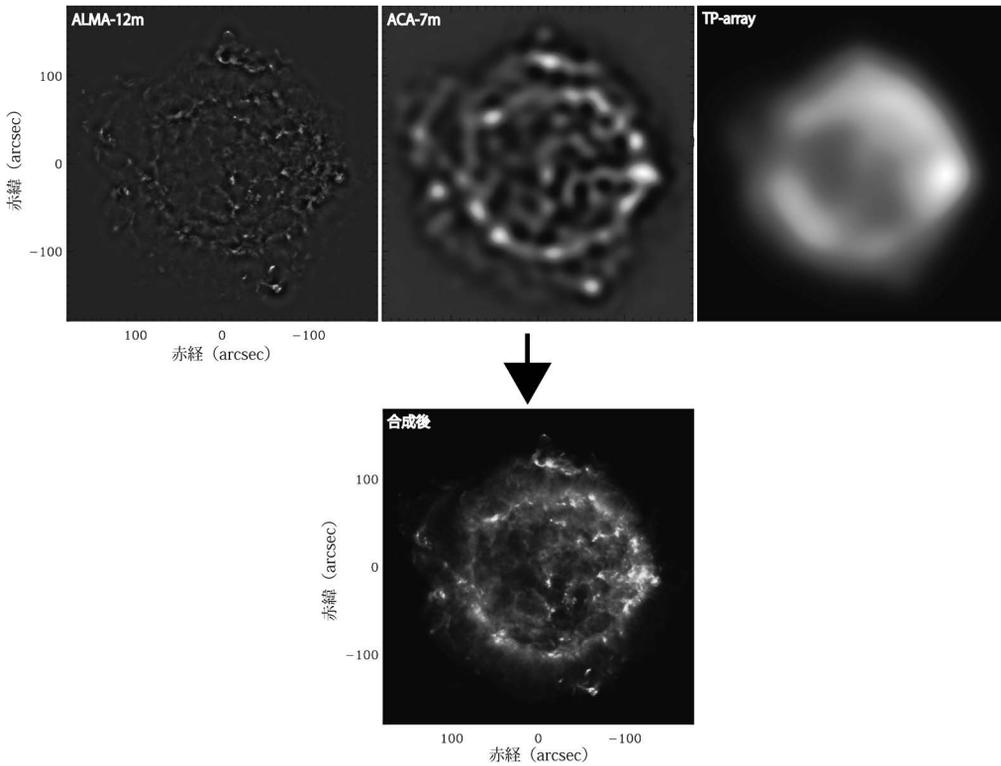


図3 左上：12 m アンテナの干渉計観測により得られた画像．中央：日本が担当している7 m-ACA アンテナによる干渉計観測によって得られた画像．右上：12 m アンテナの単一鏡観測によって得られた画像．下：これらを像合成した後のカシオペア A の画像．すべて黒野氏の博士論文<sup>11)</sup> から引用

ミッシングフラックスが大きいと、分子雲や分子雲コア（分子雲に存在する、よりいっそう密度が高い領域、1個の分子雲コアが1個、もしくは2個の星の母体だと考えられている）の物理量を出すというような作業は難しくなってしまいます。そこで今回私たちは、分子雲の構造のみに着目し、議論を進めていくことにしました。

### 3.3 シェル構造と大質量星の元の発見

これまでの単一鏡を用いた研究から、ブリックが弓状の構造をしていることはわかっていました<sup>10)</sup>。しかしアルマ望遠鏡で観測したところ、分子雲の内部にシェル構造が見られることがわかってきました。先ほども言いましたが、この領域には星団形成や大質量星は存在していないと報告されています。もし星団や大質量星が存在すれば、星風や放射圧などでこのようなシェル構造を形成する可

能性がありますが、ブリックはそのような可能性が低いことが報告されてきました。しかもSO分子は何らかの衝撃を受けたような、活発な領域で検出されると言われています<sup>11)</sup>。このようなシェルはどのようにして生まれてきたのでしょうか？

また図4にブリックの中心速度の図(左)と速度分散の図(右)を示しました。中心速度の図を見ると、同じ分子雲内で100 km/s程度の速度差が見られます。ある程度の速度勾配はさまざまな領域で観測されていますが、同じ分子雲内で100 km/s程度の速度差は初めて同定されました。また右図を見ると、速度分散が30-40 km/sという分子雲コアが見られます。また速度分散が大きな場所ほど、分子雲内での運動が激しいことを示しています。これまでの理論計算に基づいて、こ

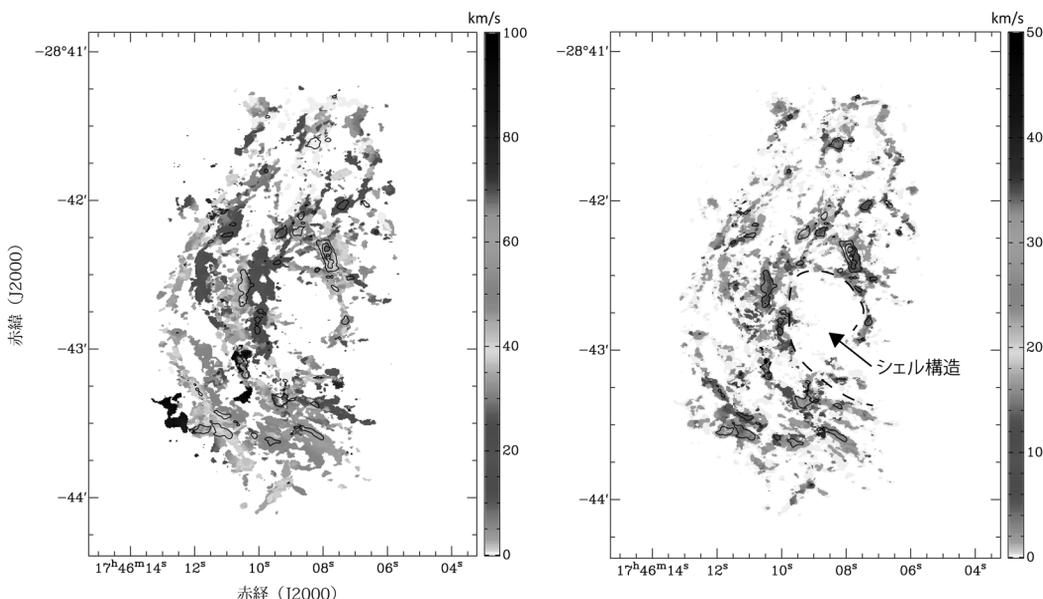


図4 左図：中心速度の図（等高線は分子ガスの分布を示したもの）. 右図：速度分散の図（等高線は左図と同じ），点線はシェル構造を示している.

のような分子雲コアが1-2個の星に進化するならば、おそらくオリオン座にあるような大質量星が生まれるでしょう<sup>13)</sup>. アルマ望遠鏡はこれまでの私たちの予想をはるかに超えるブリックの構造を明らかにしたのです.

### 3.4 数値シミュレーションとの比較

私たちは前述のようなシェル構造や速度構造がどのように形成されたのか興味をもち、北海道大学の羽部朝男さんに相談をもちかけました. その当時、羽部さんとその学生であった高平 謙さんが、大きさや重さの違う分子雲のかたまりを衝突させると、衝突の影響でシェル構造やフィラメント構造が形成され、周辺では大質量星を生む分子雲コアを形成する可能性があるという説を提案しているところでした<sup>14),15)</sup>. 私たちは、アルマ望遠鏡で得られたブリックの画像をいくつか羽部さんのグループの元へ送り、このような描像がシミュレーション（図5）で再現できるか検討していただきました. その結果、空間構造はシミュレーションの結果と似ており、またブリックの質

量や速度勾配は、二つの違う速度で衝突した分子雲の結果と一致することがわかりました. もちろんブリックでは図3のような像合成の処理はしていないため、広がった成分は検出されておらず不定性は大きいことが考えられますが、このような比較ができたことが大きな進歩でした. また空間構造、速度構造の比較だけでなく、大質量星が生まれるような分子雲コアがいくつか見つかったことも、数値シミュレーションとも合っているため、ブリックはサイズの違う分子雲が衝突して形成されたのではという説を提案しました.

## 4. おわりに

今回示した結果はアルマ望遠鏡のアーカイブデータ使った一例に過ぎません. 今まさにアルマサイトではサイクル2の観測が行われており、今後アーカイブには、12 mアンテナの干渉計データだけでなく、7 mアンテナによる干渉計データや単一鏡のデータも公開されていくでしょう. そして、これらのデータが像合成された結果もどん

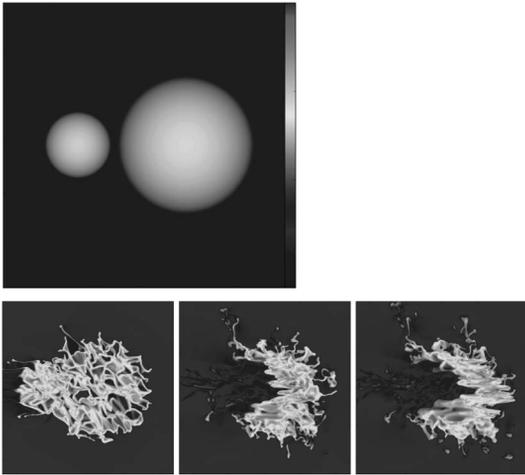


図5 上図: 高平氏らによる数値シミュレーションの初期状態. 大きさ, 重さが違う分子雲の衝突させる状態を示す. 下図: 二つの分子雲を速度差 10 km/s で衝突させて時間進化を追った図. 共に Takahira et al., 2014 より引用.

どん世の中に出てくるはずで。そうなるデータ量は膨大になり、観測提案をした研究者でさえもデータを消化しきれなくなるはずで。現在私が所属している茨城大学理学部でも、博士課程の学生にはアルマのアーカイブデータを解析してもらい博士論文を書いてもらう予定です。このように研究所や大学の研究室にいながら、世界最高の観測データを使って研究ができるという今の環境をうれしく思いつつ、今後もさまざまな面白い結果が出てくることを楽しみに、アルマデータの解析ソフトウェア, CASA (カサ)<sup>16)</sup> の画面とにらめっこをしている毎日です。

### 謝 辞

共著者の James Chibueze 氏には VLA や SMA の経験そして ARC アストロノマーの観点から、また 高野秀路氏には化学的観点からの助言をいただきました。羽部朝男氏、高平 謙氏には数値シミュレーションを担当していただきたいへん有用な議論をすることができました。編集を担当してくださった平松正顕氏にはチリ観測所の広報とし

てアドバイスをいただきました。この場を借りて感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 日本天文学会春季年会 (2014年) 講演集
- 2) JVO web page (<http://jvo.nao.ac.jp/index-e.html>)
- 3) Lada C. J., Lada, E. A., 2003, ARA&A 41, 57
- 4) Higuchi A. E., Kurono Y., Saito M., Kawabe R., 2009, ApJ 705, 468
- 5) Higuchi A. E., Kurono Y., Saito M., Kawabe R., 2010, ApJ 719, 1813
- 6) Higuchi A. E., Kurono Y., Naoi T., et al., 2013, ApJ 765, 101
- 7) Lis D. C., Menten K. M., Serabyn E., Zylka R., 1994, ApJL 423, L39
- 8) Lis D. C., Menten K. M., 1998, ApJ 507, 794
- 9) Lis D. C., Serabyn E., Zylka R., Li Y., 2001, ApJ 550, 761
- 10) Longmore S. N., Rathborne J., Bastian N., et al., 2012, ApJ 746, 117
- 11) Takano S., Nakai N., Kawaguchi K., 1995, PASJ 47, 801
- 12) 黒野泰隆, 2009, 博士論文 (東京大学)
- 13) McKee C. F., Tan J. C., 2003, ApJ 585, 850
- 14) Habe A., Ohta K., 1992, PASJ 44, 203
- 15) Takahira K., Tasker E. J., Habe, A., 2014, ApJ, 792, 63
- 16) Common Astronomy Software Applications package (<http://casa.nrao.edu>)

### A Study of Massive Cloud Formation with ALMA Archive

Aya HIGUCHI

College of Science, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito 310-8512, Japan

Abstract: The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) is the most powerful radio telescope in the world. In addition, most of Cycle 0 data are publically available now. However, Cycle 0 archival papers are rarely published yet. We present our results of the sulfur monoxide, SO, line emission observations of G0.253+0.016 with the ALMA. The dense and massive molecular cloud of G0.253+0.016 is highly sub-structured, yet it shows no obvious signs of cluster formation. We found three outstanding features of the cloud from the SO emission, namely, shell structure, large velocity gradients of 20 km/s/pc with the cloud, and cores with large velocity dispersions (30-40 km/s) around the shell structure. In an attempt to explore the formation scenario of the dense cloud, we compared our results with numerical simulations; therefore, we propose that G0.253+0.016 may have formed due to a cloud-cloud collision process.