

# 「富士山頂サブミリ波望遠鏡で探る星の誕生」

山本 智

〈東京大学大学院理学系研究科物理学教室・初期宇宙研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

星の誕生については、電波や赤外線などの観測によって、その進化が克明に明らかにされつつある。しかし、星の誕生の舞台である星間分子雲が形成されるプロセスについては、いまだに漠然とした理解にとどまっている。星間分子雲の形成現場をとらえるべく、動き出したのが「富士山頂サブミリ波望遠鏡プロジェクト」である。この記事は、4月2日に東京大学安田講堂で行われた日本天文学会2000年春季公開講演会の内容をまとめたものである。

## 1. はじめに

20世紀の100年、天文学は数々の発見によって大きく進歩し、私たちの宇宙に対する認識はものすごく深まりました。天の川銀河は宇宙にある無数の銀河の一つにすぎないこと、宇宙が膨張していること、宇宙にははじまりがあることなどです。そして、もう一つの大きな発見は、私たちが星とは何かを理解したことです。

なぜ太陽があれほど膨大なエネルギーによって輝き続けられるのか。20世紀初頭には、このことが大きな疑問でした。この疑問を解き明かしたのは、20世紀になって発展した原子核物理学です。星は、水素が融合してヘリウムになるという核融合反応のエネルギーによって輝いていたのです。

星はエネルギー源である水素を燃やし尽くしてしまうと、死を迎えます。20世紀の天文学は、超新星爆発や中性子星など星の死んでいく姿を明らかにしてきました。死ぬ星があれば生まれてくる星もあります。星の誕生については、1970年以降、電波や赤外線宇宙を詳細に観測することができるようになって、その理解が急速に深まりつつあります。

星は、「星間分子雲」と呼ばれるガスと塵からなる雲から誕生することがわかってきました。それで

は、星間分子雲はどのようにしてできるのか？この基本的かつ素朴な疑問は、実はまだ解決されていないのです。私たちは、その疑問に答えるべく、富士山の山頂にサブミリ波望遠鏡をつくり、星の誕生の舞台である星間分子雲を観測しています。

## 2. 見えない世界を電波で見る

サブミリ波は電波の一種です。星の誕生を調べるためには、なぜ電波で観測するのでしょうか。私たちの目に見える光は「可視光」といいます。波長 $0.7\ \mu\text{m}$ から $0.4\ \mu\text{m}$ の電磁波です。宇宙を可視光で見ると星がたくさん見えます。太陽のような星は表面温度が摂氏約5500度、絶対温度で約5800Kもあります。温度の高い物質は可視光を出しているのです。私たちの目で星が見えるのです。温度が下がってくると、物質は可視光を出さなくなります。例えば、私たちの体は暗闇では見えません。可視光を出していないからです。しかし赤外線カメラで見ると、暗闇でも姿が見えます。私たちの体の温度は摂氏約36度、絶対温度で約310Kです。このくらいの温度の物体は、可視光ではなく赤外線を出します。もっと温度が低い物体が出すのが電波です。

星が誕生する星間分子雲は、摂氏マイナス約263度、絶対温度約10Kくらいの極低温です。非

常に冷たい物体ですから、可視光を出さず、可視光で見ても何も見えません。非常に冷たい世界で起きている星の誕生を見るには、電波を使わなくてはならないのです。

電波を使うもう一つの理由は、電波が散乱されにくいからです。可視光はガスや塵で散乱されてしまい、遠くを見ることができません。しかし、波長が長い電波は、物質がたくさんあっても散乱されてしまうことなく、その先を見通すことができます。

電波の中には、ラジオ放送に使われる波長数百mの中波や、マイクロ波とも呼ばれる波長1cmほどのセンチ波、実用としてはあまり使われていませんが波長数mmほどのミリ波、そして私たちが観測に使っている波長1mm以下のサブミリ波などいろいろな種類があります。

星が生まれてくる星間分子雲には、いろいろな分子が含まれています。分子は、原子の「球」が化学結合という「棒」で結ばれた構造をしています。棒の上下でプラスとマイナスに分極している場合、分子が回転すると回転数と同じ周波数の電波を出します。出す電波の周波数は、分子ごとに決まっています。一般的に、原子数の多い分子は低い周波数の電波を出し、原子数の少ない分子は高い周波数の電波を出します。つまり、ある周波数の電波を観測すれば、その分子の存在や量を知ることができるのです。正しくは量子力学の原理に基づいて説明すべきですが、簡単に説明するとうなります。なお、周波数は波動が1秒間に向きをかえる回数であり、波長は波動の山と山あるいは谷と谷の間の距離です。

電波望遠鏡では、分子が出す電波をパラボラアンテナで集めて観測します。しかし、電波望遠鏡はカメラのように一度に画像が撮れるというものではありません。天球上のある一点に望遠鏡を向けて、目的の分子が発する特定の波長だけの電波(スペクトル線)を受信して、強度を測定します。次に別の点に向けてスペクトル線の強度を測定します。これを続けていくことにより、可視光では見

ることができない星間分子雲の分布や構造が明らかになります。またドップラー効果から、星間分子雲の運動速度を知ることができます。

### 3. 電波が明らかにした星誕生のシナリオ

星間空間には、ガスと塵からなる非常に希薄な「星間ガス」が漂っています。これらの星間ガスが集まって、「星間分子雲」が形成されます。星間分子雲の密度は、 $1\text{ cm}^3$  当たり100個から1万個の水素分子が含まれる程度です。地球の大気の密度は $1\text{ cm}^3$  当たり $10^{19}$  個くらいです。地球大気と比べると非常に希薄ですが、宇宙空間ではかなり濃い領域です。星間分子雲は、何百万年かの時をかけて自己重力によって収縮し、密度が高まっていきます。

やがて星間分子雲の中に、密度の高い小さな「分子雲コア」が形成されます。さらに収縮が進むと、分子雲コアの中で「原始星」が生まれます。原始星のまわりに形成されたガス円盤からは、中心の原始星に向かってどんどんガスが降り積もっていきます。原子星ではまだ核融合反応ははじまっていません。降り積もるガスの重力エネルギーで光っているのです。原始星は双極状に激しいジェット「双極分子流」を噴き出しています。ガス円盤のいちばん内側には、惑星系形成につながる円盤ができることもあります。やがてまわりのガスは全部なくなり、ジェットもやみます。一方、星の内部ではさらに収縮が進んで温度が上昇し、核融合反応がはじまり、一人前の星として可視光で輝きはじめるのです。これが、電波などの観測によって、現在までに明らかにされている星の誕生のおおよそのシナリオです。

### 4. 星間分子雲の研究は“暗黒領域”

星の数は、天の川銀河だけでも1000億を超えます。形態もいろいろあります。単独で生まれる場合、連星として生まれる場合、星団を形成する場合もあります。質量もさまざまで、あるものは太陽

の10倍以上もあり、あるものは10分の1くらいしかありません。

最近の観測から、大質量星は質量が10万太陽質量以上になる巨大分子雲から生まれてくるのがわかってきました。一方、太陽程度の中小質量星は、質量が1万太陽質量程度の「暗黒星雲」と呼ばれる比較的小さな分子雲からでもぼつぼつと生まれてきます。しかし、なぜそうなるのかはまだ解明されていません。たとえ大質量星が巨大分子雲で生まれるメカニズムが解明されたとしても、次は巨大分子雲、あるいは小さな分子雲がどうしてできるのかという問題に直面してしまいます。星間分子雲の形成は、星の誕生を支配すると考えられる重要なプロセスです

が、実はきちんとした研究が行われておらず、よくわかっていないのです。

星の質量は、その星の一生を左右します。軽い星は長生きしますが、重い星は進化が非常に速く、あっという間に水素を燃やし尽くして超新星爆発によって重元素をまき散らします。宇宙が誕生してから重い星がどのくらいの頻度で生まれるかは、銀河のそして宇宙の進化に直結する問題です。何が星の質量や形態を決める要因となっているかは、現在の天文学における重要な問題になっています。

## 5. 炭素の化学変化で形成過程を探る

私たちは、星間分子雲がどのように生まれるのかを、ぜひ観測的にとらえてみたいと考えています。そこで注目したのが、星間分子雲に含まれている物質の状態変化です。

太陽からは強力な紫外線が地球へ降り注いでいます。紫外線は皮膚の分子を壊し、化学変化を起

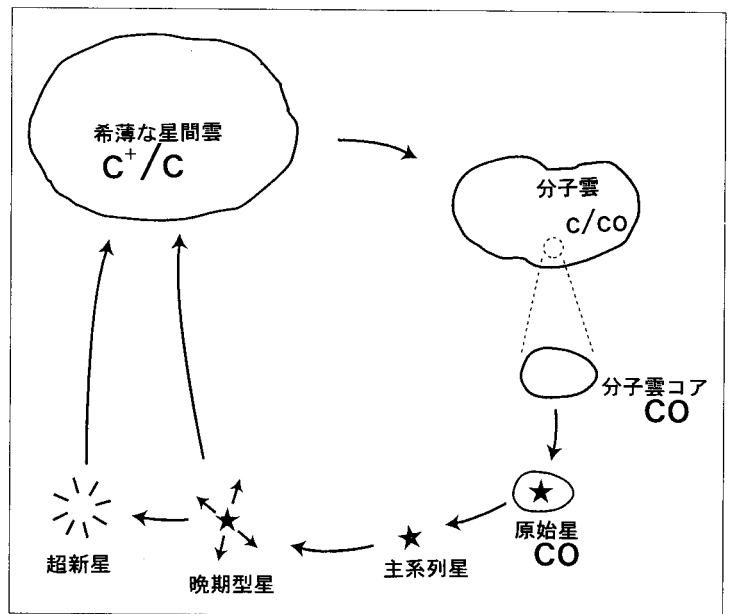


図1 星間分子の循環と星間分子雲における炭素の化学変化

こしてシミなどをつくります。いわゆる日焼けです。宇宙空間には、星でつくられたたくさんの紫外線が飛び交っています。紫外線は、非常に希薄な星間ガスの中に散乱されることなく、どんどん入っていきます。紫外線が星間ガスの中に入ると、皮膚の分子を壊すのと同じように星間ガスに含まれる分子を壊します。例えば、星間ガスに含まれる炭素原子は、紫外線によって炭素イオン ( $C^+$ ) から中性炭素原子 ( $C$ ) の状態になります。

星間ガスの密度が上がると、波長の短い紫外線は散乱されてしまい、中に入りにくくなっていきます。さらに密度が上がってきて星間分子雲を形成するようになってくると、紫外線が入ることができなくなってしまいます。すると、中性炭素原子は安定なものではないので、まわりにある酸素などと反応して安定な一酸化炭素分子 ( $CO$ ) にしだいに変わってしまうのです。

希薄な星間ガスが、星を形成する星間分子雲となる過程で、炭素は炭素イオンから中性炭素原子

に変わって、さらに一酸化炭素分子になるという、一つの流れがあるということがわかります (図1)。

星間分子雲から原始星ができるまでの過程を連続的に観測できれば良いのですが、実際には100万年から1000万年という長い時間がかかるので、とてもわれわれの人生の中で結論を出すことができません。そこで、私たちは物質の化学変化が進む様子からいわば時間軸をつけようと考えました。一酸化炭素分子と中性炭素原子がそれぞれどのように分布しているかを調べて比較すれば、星間分子雲の形成過程がわかるのではないかというのが、基本的なアイデアです。

## 6. 富士山頂にサブミリ波望遠鏡を

多くの電波天文学者が星の形成を研究するために観測している電波は、一酸化炭素分子が出す波長2.6 mmから2.8 mmのミリ波です。すでに一酸化炭素分子が出す電波については詳しく調べられており、星間分子雲の分布や構造を知ることができます。しかし残念ながら、星間分子雲がどのようにして形成されるか容易にはわかりません。

一方、星間分子雲の形成過程解明の鍵となる中性炭素原子の分布は、ほとんど調べられていません。中性炭素原子が発する電波は弱く、しかも波長0.6 mm、周波数にして492 GHzというサブミリ波の領域にあるためです。サブミリ波は、電波の中で最も波長が短いために、観測が非常に難しいのです。

10年くらい前、星間分子雲の形成過程を解明するために、サブミリ波を観測できる望遠鏡をつくってみたいと思うようになりました。日本初となるサブミリ波の観測計画を考えはじめた当時、私は名古屋大学に勤務していました。名古屋地方気象台に行き、日本国内にサブミリ波を観測できる場所はないかと、各地の気象データをつぶさに調べました。中性炭素原子が出すサブミリ波は、大気に含まれる水蒸気に吸収されてしまうので、空気が薄くて湿度が低い所に行かなければ観測できません。



図2 口径1.2 mサブミリ波望遠鏡パラボナアンテナ

その条件を満たすのは、標高が高く、乾燥している所です。「すばる望遠鏡」があるハワイのマウナケア山頂は非常に良い場所です。私たちが日本国内で目つけたのが、富士山です。

水蒸気の高さ分布は、標高が高くなるほど減っていきます。ちょうど3000 mを超える所で大きく下がって、それからほぼ一定になります。また冬の富士山頂における水蒸気分圧を調べると、非常に数値が低く、乾燥した日が続いていました。富士山頂であれば、結構良い観測ができるのではないかとということがわかってきました。

国立天文台野辺山観測所には、口径45 mの電波望遠鏡があります。野辺山観測所は標高1350 mにあり、ミリ波の観測には非常に適しています。しかし、サブミリ波は大気に含まれる水蒸気によって吸収されてしまい、大気透過度はゼロに近づいています。野辺山観測所ではとてもサブミリ波を観測することはできないのです。一方、標高3776 mの富士山頂ではサブミリ波の半分ぐらいは大気を

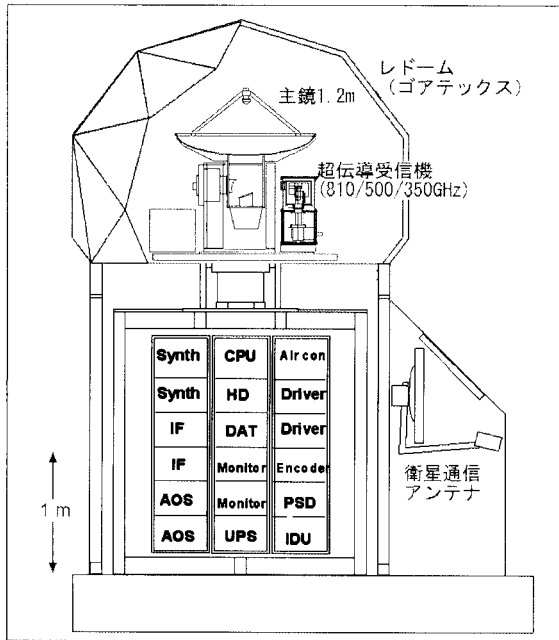


図3 富士山頂サブミリ波望遠鏡の概略図

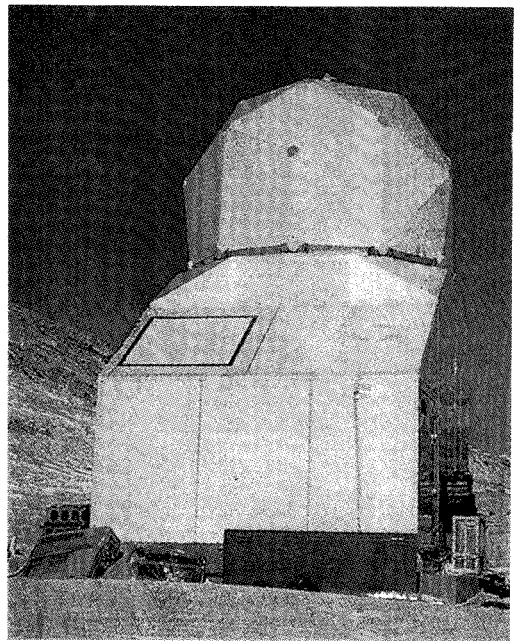


図4 富士山頂に設置されたサブミリ波望遠鏡

透過してきます。実際に富士山頂で大気透過度を測定した結果、冬季の45%の時間、とくに1月は60%の時間でサブミリ波の観測が可能になることがわかりました。ハワイのマウナケアでは昼間はサブミリ波の観測ができないのに対し、富士山頂では昼夜の連続観測が可能であることもわかりました。富士山頂は世界的にも優れたサブミリ波の観測サイトということになります。

## 7. プロジェクト始動

構想から数年かかりましたが、「富士山頂サブミリ波望遠鏡プロジェクト」は、平成7年度から平成11年度まで5年計画で実施されることになりました。文部省科学研究費補助金 COE 形成プログラム「初期宇宙の探求」が、佐藤勝彦教授を代表として採択され、その一つのプロジェクトとして、サブミリ波望遠鏡を富士山頂に設置することが決まったのです。最初の2年間で望遠鏡をつくり、平成9年度に野辺山観測所の構内でテストを行い、

その後富士山頂に移設し、10年度と11年度で観測して成果を出すという計画でした。現在、平成13年度までの延長が採択されています。

プロジェクトが始動するとすぐに、国立天文台野辺山観測所や岡崎国立共同研究機構分子科学研究所のグループと共同で望遠鏡の建設にとりかかりました。望遠鏡の口径は1.2m、分解能は2分です(図2)。天体の細かい構造を見るのには向きませんが、広い範囲をすばやく調べるにはたいへん適しています。野辺山観測所の口径45mが森の1本1本の木を見る望遠鏡だとしたら、私たちの口径1.2mは森全体を見るのにちょうど良いサイズです。

ナスミス焦点に電波望遠鏡の心臓部であるサブミリ波受信器を置いてあります。微弱なサブミリ波を検出するために、受信機には野辺山観測所から提供していただいた超伝導素子を使用しています。受信機の下には電波分光計やいろいろな制御用機器が並んでいます(図3)。

富士山頂はすばらしい観測サイトですが、危険

## 8. 遠隔操作による観測で効率アップ

調整などを経て1998年11月より本格的な運用を開始しました。望遠鏡は、衛星通信の回線を使って遠隔操作でコントロールしています。望遠鏡の遠隔操作は、計画を進める上で最も大きなハードルでした。そのためにいろいろなシステムを開発しなければなりませんでしたが、いったんでき上がってしまうと、遠隔操作は強力なメリットに転じました。高い山に登らなくてもサブミリ波望遠鏡を操作できるのです。大学のキャンパスから、あるいは必要なら世界中どこにいても望遠鏡を動かすことができます。

標高の高い所に滞在しての観測は、肉体的にも精神的にもつらいものです。高山病になることもあります。ましてや冬に富士山に容易に登ることはできません。それが遠隔操作できると、冬の間毎日24時間観測することができるのです。

富士山の恵まれた観測条件と、遠隔制御のおかげで、時間を少しも無駄にすることなく2年間観測することができました。非常に高い観測効率のおかげで、とてもおもしろい成果がたくさん出ています。

## 9. 分子雲ができる現場をとらえた

最初にサブミリ波望遠鏡を向けた天体は、おうし座にある分子雲です。おうし座分子雲は、私たちの近傍にある典型的な分子雲で、およそ500光年の距離にあります。可視光で見ると黒いシミのように見えます。おうし座分子雲のHCL2と呼ばれる領域について中性炭素原子の分布を観測しました。そして、野辺山宇宙電波観測所の砂田和良氏たちが口径45m電波望遠鏡で観測した一酸化炭素分子の分布と比較しました。すると、中性炭素原子の分布と一酸化炭素分子の分布が、明らかに違っていることがわかりました(図5)。一酸化炭素分子が多い所には、中性炭素原子は少ない。反対に、中性炭素原子の多い所には、一酸化

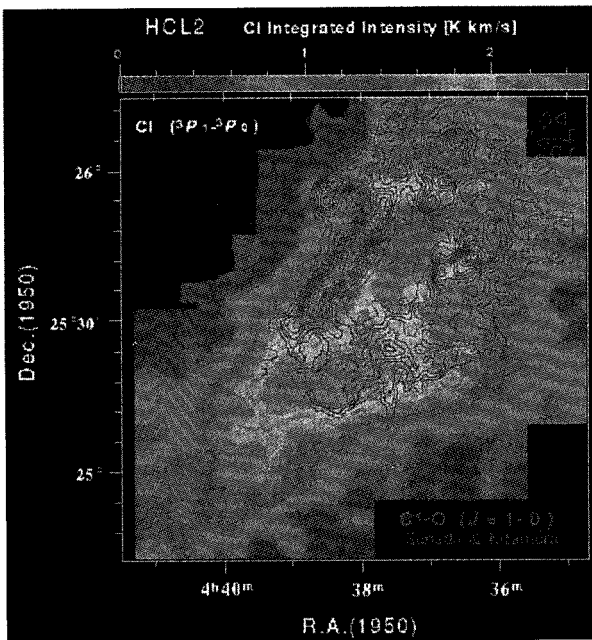


図5 おうし座分子雲 HCL2 における中性炭素原子の分布。暗い所が強く、明るい所が弱い。等高線は一酸化炭素分子の分布。北から南に向かって分子雲の形成が進んでいることが示された。

もありますし、気象条件も非常に厳しい所です。観測シーズンである冬季の平均最低気温が摂氏マイナス20度、ときには零下マイナス30度にもなります。レドームへの着氷や着雪をどう防ぐかという問題もありました。レドームに付着した氷や雪はサブミリ波を吸収し、観測に支障が出てしまいます。結局、テフロン製レドームを採用し、さらに表面を暖めることにより、着氷や着雪を防ぎました。

実際に製作したサブミリ波望遠鏡は、まず野辺山観測所の構内に設置しました。1997年6月のことです。富士山に持って行ってから「動きません」では取り返しがつきませんので、比較的低い周波数345 GHzで調整と試験観測を1年間行いました。その後、1998年6月にいったん解体し、7月にヘリコプターで釣り上げて富士山頂に移設しました。気象庁富士山測候所の建物から少し火口側に降りた比較的平らな所に望遠鏡を設置しました(図4)。

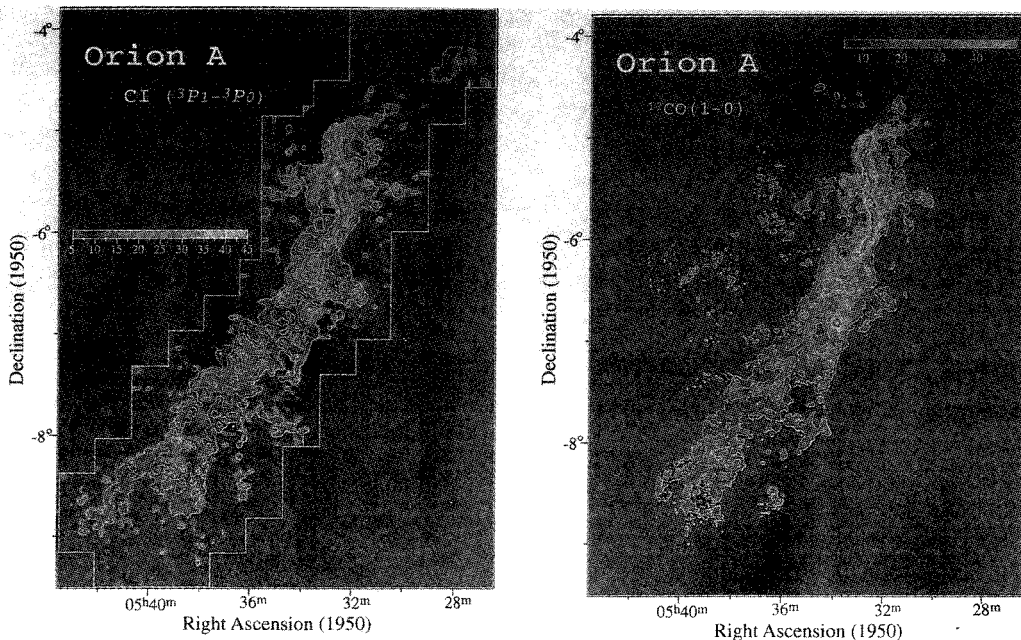


図6 オリオン A における中性炭素原子の分布 (左) と一酸化炭素分子の分布 (右). 従来の 10 ~ 100 もの広範囲の観測が可能になった. 明るい所が強く, 暗い所が弱い. 中性炭素原子と一酸化炭素分子に極端な分布の違いはなく, すでに形成された分子雲であると考えられる.

炭素分子はあまりありません. これは予想通りの結果でした.

星間分子雲では, 中性炭素原子は一酸化炭素分子に変わってしまうので, 中性炭素原子はあまり多くなりません. 一方, 一酸化炭素分子はまだできていないが, 中性炭素原子は非常に強い所があります. これは比較的若い, 今まさに星間分子雲が形成されている所で, 中性炭素原子がまだ一酸化炭素分子に十分に変わりきっていないのだと理解されます.

全体の様子を見ると HCL2 は, 北側は星間分子雲ができてすでに分子雲コアが形成されているが, 南側は比較的若いきたばかりの分子雲であることがわかります. ということは, 最初に重力収縮を起こしたのは北側で, 北から南に向かって星間分子雲の形成が進んでいることが見てとれます. 星間分子雲が形成される現場を実際に示した, 世界で初めての例です.

HCL2 の電波分布をよく見ると左の方にも何か続いているようなので, 今年からさらに左の方に観測を伸ばしてきました. すると, 希薄な星間ガスが HCL2 の左側につながって存在していることがわかりました. 希薄な星間ガスから星間分子雲ができてしまった星間分子雲が, 空間的に並んでいるのです. つまり重力収縮は北から南へ向かって進んできている様子がとらえられたのです.

どこの分子雲でも, HCL2 で観測されたように分子雲が形成されていく様子が見えるかということ, 実はそうではありませんでした.

別な暗黒星雲である Lynds 134N を観測しました. これも比較的近傍の星間分子雲です. Lynds 134N の場合は中性炭素原子だけがたくさんある領域というのはなく, 中性炭素原子と一酸化炭素分子の分布はだいたい一致しています. 進化が十分に進み, 星間分子雲がすでにできしまっている状態だ

と考えられます。中性炭素原子の出す電波が観測されるのは、星間分子雲の表面のガスだけが紫外線によって解離されて、中性炭素原子になっているからです。

## 10. 従来の10倍近い規模の広域観測

Orion Aはオリオン大星雲M42の背後に横たわる、地球から最も近い典型的な巨大分子雲です。全体として質量は10万太陽質量ほどもある非常に大きな雲です。私たちは、Orion Aの全領域における中性炭素原子の分布を初めて描き出しました(図6)。これほど広い領域で中性炭素原子の分布を観測した例はありません。せいぜいこの10分の1以下の領域です。これほどの広域観測が可能になったのは、富士山の観測条件の良さと遠隔制御のおかげです。

観測の結果、極端な南北の勾配は見られませんでした。分子雲の端で中性炭素原子がたくさん分布していますが、これは主に紫外線による解離と思われまます。現在までの観測では、Orion Aにおける大規模な分子雲形成の様子は見えません。ですが、もう少し細かく見ていくと、個々の場所で分子雲形成の様子が見えてくるかもしれません。今後、さらに詳しい観測を行って明らかにすべきことの一つだと思えます。

## 11. 星形成のストーリー完成に向けて

HCL2とLynds134Nの例から考えると分子雲の形成というのは、必ずしも一通りではないようです。HCL2の場合には分子雲形成が連続的に起きているように見えますが、一方でLynds134Nのように

すでにもう形成されてしまった星間分子雲としてぼつんと観測されることもあります。星間分子雲がつくられる、つくられかたに多様性があるように思われます。

ではその多様性はどのような物理的な原因によって支配されているのか、という点に非常に興味があります。私たちが得ている中性炭素原子の分布の観測例はまだ多くありません。観測を数年間継続することによって観測例数が増えてくれば、分子雲形成の多様性と、それを支配する物理要因をあぶり出していく大きな手がかりとなるでしょう。それにより、星形成のストーリーを完結させることができると考えています。

この研究は多くの大学院生を含む、共同研究者の努力の成果です。私たちの観測装置は小さいですが、富士山という日本一の山に登ってサイエンスを展開しようという、一つのスピリッツを感じていただければと思います。

富士山頂におけるサブミリ波望遠鏡による観測・研究は、多方面からの御支援によって成り立っているものです。気象庁、東京管区気象台富士山測候所、資材の輸送を行っていただいた富士山輸送組合、土地を貸していただいた浅間大社の皆さんにはたいへんお世話になりました。この場を借りまして感謝の意を示したいと思います。この研究は、同じ研究室の岡朋治氏、国立天文台野辺山観測所の関本裕太郎氏、立松健一氏、野口卓氏、宇宙開発事業団の尾関博之氏、稲谷順司氏、福井大学の斎藤修二氏、国立天文台の大石雅寿氏らとの共同研究です。また望遠鏡の開発と運用では多くの大学院生が活躍しています。