

# 分子雲の形成過程

小山 洋

〈国立天文台天文学データ解析計算センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: H.Koyama@nao.ac.jp

本稿では分子雲の形成過程の理論的な研究を紹介します。星間物質の熱的、力学的進化について線形解析や一次元、二次元の非線形計算を行ないました。その結果、衝撃波の後面に形成される薄い冷却層が分裂することを見つけました。星間“乱流”の起源はこのような微小雲複合体の運動であると考えられます。

## 1. はじめに

### 1.1 星形成と分子雲

星は宇宙の中で最も基本的な構成要素です。銀河は星の集合体で形作られていますし、宇宙にはその銀河が無数に存在しています。従って星がどのように生まれていくのか理解することは銀河の形成や進化、宇宙論に至るまであらゆる天文学の分野に関わる重要な問題です。星の形成過程は天文学の中でも古くから取り組まれている問題の一つです。それにもかかわらず星が生まれるときにどのくらいの質量の星がどのくらいの数だけ生まれるかといった基礎的な問題ですら未だに解明されていません。星は分子雲と呼ばれる高密度の分子ガスの塊から生まれていることは観測から分かっています。一方でフィラメント状の分子雲の重力収縮・分裂する現象は線形解析や数値シミュレーションによって詳しく調べられています<sup>1), 2)</sup>。これらの結論を使えば初期の揺らぎのスペクトルから分子雲コアと呼ばれる星になる直前のガスの塊がどのような質量の分布になるのか導くことも可能です<sup>3)</sup>。しかしながら、このシナリオも初期の揺らぎの条件が分からなければ先には進めません。そもそも観測されるような分子雲の持つ性質を理論的に理解するまでには至っていないのが現状です。ですから分子雲がどのような性質を持って生まれてきたのか知る

ことが星形成を理解する上で重要になります。

### 1.2 銀河内の物質の循環

前の節で宇宙の最も基本的な構成要素は星であると言いましたが、星に並んで宇宙に存在するものとしてガスという形態があります。特に銀河の中の星が密集した場所やその近くに漂っているガスのことを「星間ガス」と呼んでいます。この星間ガスから星が生まれて、やがて星の死によって星間ガスに戻っていく、物質の循環が宇宙で起きています。星は内部の核融合反応を終えてその一生に終止符を打つときに超新星爆発という華々しい一大イベントを遂げることがあります。この超新星爆発によって星を形作っていた物質は宇宙空間にばらまかれます。これがやがて新しく生まれる星の原材料になるわけです。

星間ガスのモデルは古くは70年代から研究されてきました。その中で弱電離状態の暖かいガス（絶対温度にして約一万度ケルビン）や冷たい中性水素ガス（絶対温度約50度ケルビン）を扱ったものは多いですが、分子雲を取り扱ったものはあまりありませんでした。分子雲を考慮しているモデルでも分子の形成反応をきちんと取り扱ったものはほとんどありませんでした。そこで私は銀河内の星間物質のモデルとしても分子雲を正しく取り扱うことが必要だと考えて分子雲の形成過程を考慮した

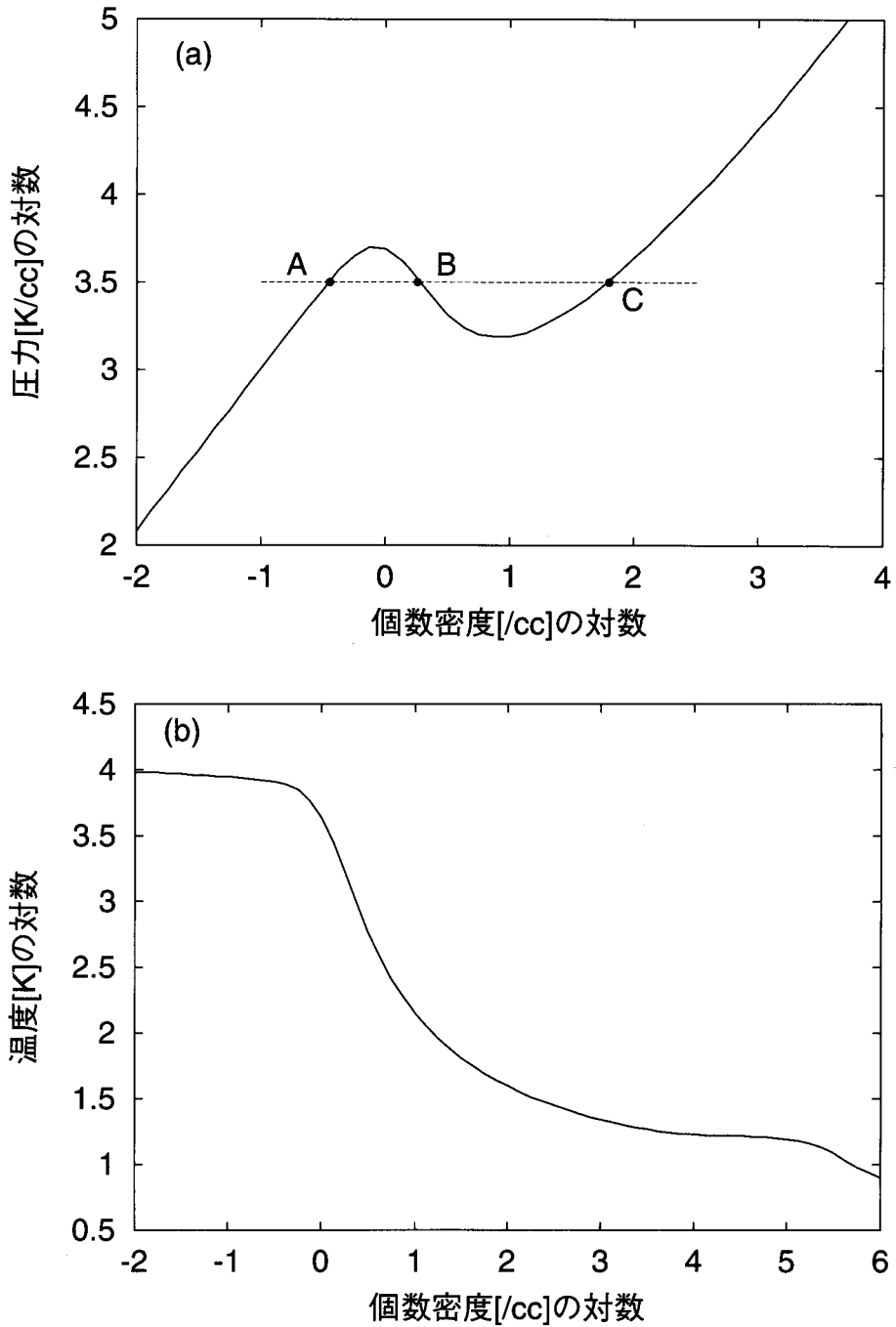


図1 星間ガスの加熱・冷却の釣り合う平衡状態。横軸を水素原子の個数密度に取って、縦軸に熱的な釣り合いの (a) 圧力 (b) 温度をプロットしたもの。

星間ガスのモデルの研究に取り組んでいます。

本稿では星間ガスの加熱・冷却過程や化学反応を取り入れたモデルについて紹介し、その中で、衝撃波による流体力学的な進化を遂げる場合の線形解析やスーパーコンピュータによる数値シミュレーションの結果などを紹介したいと思います。

## 2. 星間ガスの相（かお）

### 2.1 星間ガスの温度

一般にガスは光を発する性質をもっています。ここで言う光とは電波や赤外線、X線といった波長の電磁波のことで、通常は放射とか輻射と呼ばれています。これらの波長はガスの温度によって異なります。この輻射によってガスはエネルギーを失って冷えることができます。地球大気の放射冷却という言葉聞いたことがあると思いますが、良く晴れた夜に大気は赤外線を発して冷えることが出来ます。一方で昼間の大気は太陽の光によって暖められているので大気は一定の温度の範囲に保たれています。

### 2.2 星間ガスの二相モデル

星間ガスも同様に加熱と冷却で温度が決まっています。分子ガスや原子ガスは輝線と呼ばれる特定の波長の光によってエネルギーを逃がして冷えることが出来ます。一方で星間ガスを暖めるのは主に星からの光です。低密度ガス雲における熱的収支の詳細な解析はWolfireらによって行われています<sup>4)</sup>。しかし彼らの解析には分子雲の反応を考慮していませんでした。そこで私は高密度分子雲まで発展した星間ガスの熱的な釣り合いのモデルを構築しました<sup>5)</sup>。具体的には、温度が1万度ケルビン、個数密度が0.01個毎立方センチメートルの電離ガスから温度10度ケルビン、個数密度100万個毎立方センチメートルの分子雲まで考慮して加熱と冷却の釣り合う条件を求めました。考慮した過程は重元素、水素分子、一酸化炭素分子およ

びダストによる冷却と、宇宙線、軟X線のイオン化に伴う加熱、及び紫外線によるダストの光電加熱および水素分子の形成解離に伴う加熱です。図1は横軸に水素原子の個数密度の対数をとって、加熱と冷却の釣り合う温度と圧力を縦軸に対数で記したものです。密度の低い状態（図中の左側）では一万度ケルビンのほぼ一定の温度、密度の高い状態（図中の右側）では数十度ケルビンになっていることが分かります。このように星間ガスは温度がほぼ等しい「等温ガス」という振る舞いをすることが分かります。このことから星間ガスを等温ガスとして扱った研究がこれまで数多く行われてきました。しかし、二つの温度の中間段階に温度が急激に減少していることにお気づきになったと思います。実はこの性質がガスの進化に重大な影響を及ぼすことをこれから紹介します。圧力の曲線を見ると山と谷がありますね。ちょうどこの山と谷の間程度の圧力では一つの圧力の値に対して三つの異なる密度の状態が存在することが分かります。圧力が異なるもの同士が隣り合った場合、高い圧力側が低い圧力側を押しつぶしてしまっていますが、等しい圧力であれば何も変化することなく共存することが出来ます。Fieldらは高温低密度な弱電離ガス（状態A）と低温高密度の中性水素ガス（状態C）の二相が圧力平衡で共存するモデルを提唱しました<sup>6)</sup>。図をみるともう一つ等しい圧力（状態B）が存在することが分かります。この状態は他の二つと比べて圧力の曲線の傾きが逆になっています。この状態は熱的に不安定な平衡状態で、長い時間安定に留まることは出来ません。

### 2.3 熱的不安定性

今図1(a)中の状態Bにあるガスの塊の一部がほんのわずかに濃い密度になったとしましょう。この濃い部分の熱的平衡圧力はBの状態から右下に位置します。この圧力は周りに比べて低くなっているため、周りから圧縮されてますます高密度になります。逆に低密度だった場合も周りより高い圧力

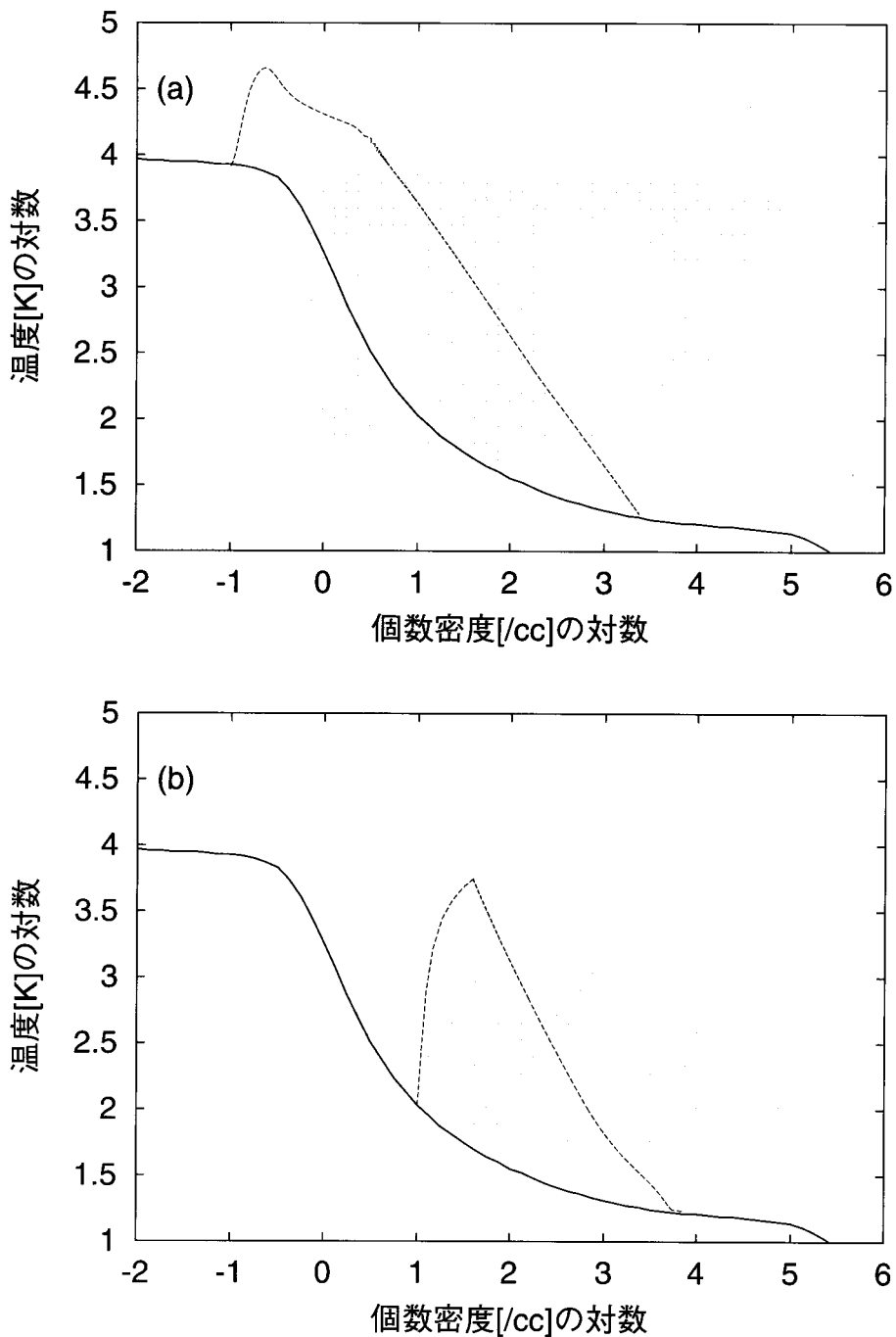


図2. 衝撃波圧縮層の密度-温度平面上の進化トラック。(a)弱電離の暖かいガスを圧縮した場合。(b)中性水素の冷たいガスを圧縮した場合。実線は加熱と冷却の釣り合う状態。破線は一次元のシミュレーションによって得られた非平衡進化の様子を表す。網掛けの領域は線形解析による不安定領域。

になって膨張しさらに低い密度へと進みます。このように僅かの変化に対して元の状態からかけ離れていく性質がある時を不安定と呼び、この不安定状態にあるガスはやがては安定な状態を求めて進化していきます。この現象を定量的に取り扱う為には流体力学の方程式を用いなければなりません。しかし、流体力学の方程式は非線形方程式なので解析的に解くことは困難です。そこで変化量の小さい場合に限って方程式を線形化する線形解析という手法がしばしば用いられます。熱的不安定性の線形解析は古くはFieldによって行われています<sup>7)</sup>。彼は熱的収支の釣り合った一様ガスの場合を解析しましたが、私はこれを拡張して非平衡の場合の解析を行ないました<sup>5)</sup>。詳しい数式の解説は以上の参考文献に譲ることにして、結果だけ紹介すると不安定性で成長する最も小さなスケールは数十天文単位になりました。最近の観測による中性水素雲や分子雲の中に数十天文単位の構造があることが報告されていますが<sup>9)</sup>、熱的不安定性による分裂はこのような微小構造や広い輝線幅の観測を説明するモデルとして有効です。しかし線形解析の結果だけでは傾向をつかむことはできるものの具体的にどのような非線形の構造が形成されるかはわかりません。そこで数値的に流体力学の方程式を解くことにします。

### 3. 衝撃波による星間ガスの進化

#### 3.1 銀河内の超新星爆発率

ところで星間ガスの置かれている状況を考えると決して穏やかではないことが以下のようにわかります。私たちの銀河系の中では超新星爆発がおおよそ百年に一度の割合で起きています。この爆発は周囲の星間物質を圧縮し、はき集めて膨張します。この爆発はおおよそ百万年続いて約百光年の大きさまで広がります。今この体積を数えると

百分の一×百万年×(百光年×百光年×百光年) = 百億立方光年

となります。ところで銀河円盤は半径約一万光年で円盤の厚みはおおよそ百光年です。そうするとこの体積も

一万光年×一万光年×百光年 = 百億立方光年  
 となります。つまり超新星爆発は銀河中の至る所にある星間ガスも頻りに圧縮しているわけです。ですから星間ガスのモデルを考える上でこのような圧縮の効果を考えなければなりません。超新星爆発の効果の重要性を初めて示したのはCoxとSmithでした<sup>9)</sup>。その後McKeeとOstrikerはこのモデルを発展させて、先に説明した二相に加えて百万度という高温ガスの成分を加えた三相モデルを提唱しました<sup>10)</sup>。しかし彼らのモデルにも分子雲は考慮されていませんでしたので私は分子の形成反応を考慮したモデル作りに取り組みことにしました。

超新星爆発による進化を知るには星間ガス中を伝播する衝撃波を調べることでわかります。そこで私は衝撃波による星間ガスの動的進化を詳しく解析しました。

#### 3.2 衝撃波による分子雲の形成

まず衝撃波による進化を調べるために一次元の数値シミュレーションを行ないました<sup>5)</sup>。計算には2章で説明した加熱・冷却過程や熱伝導の効果を取り入れています。図2は(a)暖かい弱電離ガスを圧縮した場合と(b)冷たい中性水素ガスを圧縮した場合の結果です。実線は2章で説明した加熱と冷却の釣り合った平衡状態です。破線がシミュレーションによって得られた進化の様子を表しています。超新星爆発のような強い衝撃波ではこのように平衡の曲線から離れて進化することがわかりました。進化の落ち着く先は安定な平衡状態です。しかし圧縮によって高い圧力が実現されている為に高密度のガス雲が形成されていることがわかります。実際に高密度の領域ではたくさんの分子が形成されていることがこの計算からわかりました。従ってこのような強い衝撃波によって分子雲は作られるのです。

このような衝撃波によって高密度の分子雲が作られる際にガスは不安定な状態を通過します。不安定性は線形解析によって詳しく調べることが出来ます。私は非平衡の場合の線形解析をして、その不安定の領域を図2中に網がけで記しました。これを見れば進化の際に必ず不安定領域を通過していることがわかります。従って高密度のガス雲が出来る際には熱的不安定性によって分裂すると予想されます。この分裂現象や分裂片のその後の進化を追うために二次元のシミュレーションを行いました。

### 3.3 圧縮層分裂の二次元シミュレーション

計算は二次元の箱の中に一方から秒速 28 キロメートル毎秒の風を当ててあげました。これは超新星爆発などによって広がるガスの運動の一部分を切り出したことに相当します。計算には国立天文台天文学データ解析計算センターのスーパーコンピュータ VPP300/16R を用いました。図3はその計算結果の 180 万年後の様子を表したものです。計算の結果は線形解析の予想通り、分裂片が多数作られることがわかりました。分裂片は周りの暖かいガスから降り積もるガスによってより大きな雲へと成長します。また分裂片同士は熱伝導によって引き寄せ合って合体してより大きな雲へと進化していきました。

この計算結果を実際の星間雲を観測するように見ることも出来ます。図4は微小雲が一酸化炭素の分子輝線で見えるとして位置-速度図 (P-V 図) を書いたものです。これよりこれらの微小雲が数キ

$$t = 1.808 \text{ Myr}$$

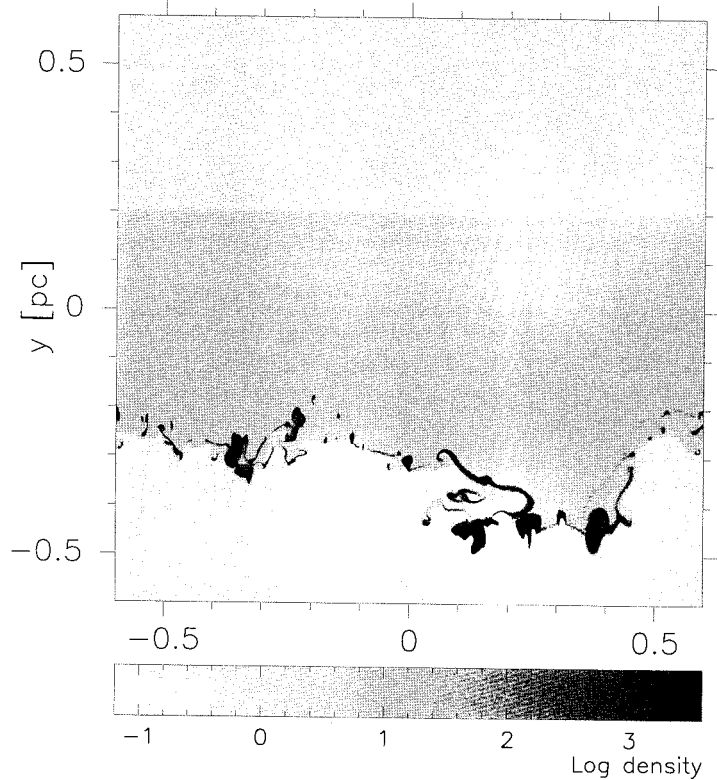


図3. 衝撃波圧縮層の密度分布。上側から圧縮風が吹いている計算で、下側に密度の濃い細かな雲の集団が形成されている。計算領域の一辺の長さは 3.9 光年。

ロメートル毎秒の速度分散を伴っていることがわかります。これは実際の観測による大きな輝線幅を思い起こさせます。しかし、実際の分子輝線の観測では空間分解能に限界があるので、空間方向を押しつぶしたのっぺりとした広がりのある分布をしています。このことは逆に現実の星間雲にもシミュレーションで出来るような微小雲が存在していることを示唆しているのです。

### 3.4 星間“乱流”の起源

星間ガス雲や分子雲には音速に比べて大きな速度があることが電波などで観測されていて、「星間

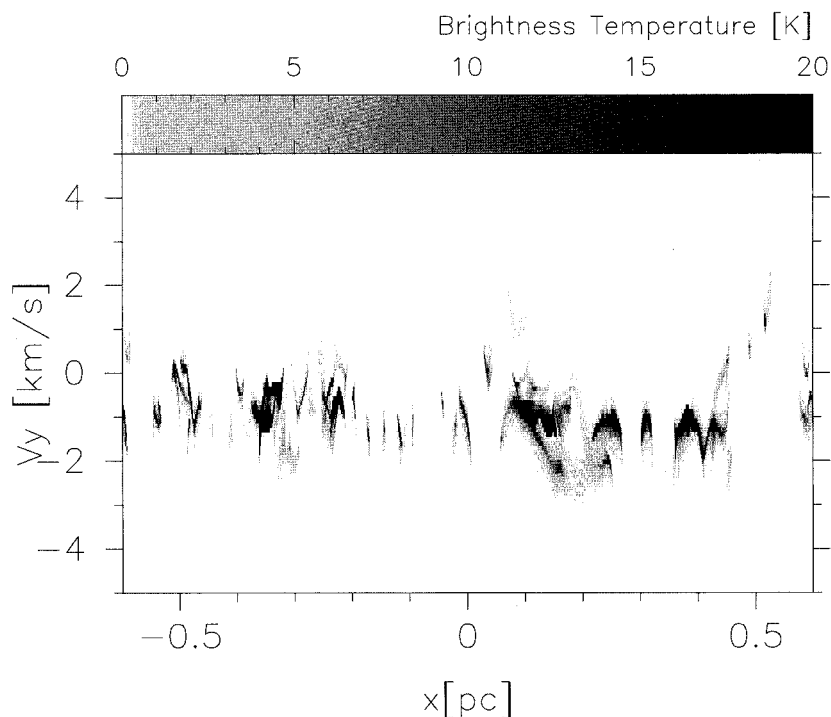


図4.  $^{12}\text{CO } J=1-0$  輝線の P-V 図. 図3の横軸を見て縦方向の速度の分布から輝線の輝度温度を計算した. 但し 5.8% の炭素が CO であると仮定した.

ガスは「乱流」状態にある」と呼ばれています。しかしなぜこのような超音速の状態にあるのかその理由はわかっておらず、未だに多くの研究者の頭を悩ませています。このような速度の構造に対して従来は磁気乱流によるモデルが提唱されていました。しかし最近の研究によると乱流は散逸してしまうことがシミュレーションによって確かめられています<sup>11)</sup>。これら多くの計算ではガスはすべて冷たい温度の分子雲として扱われているので至る所で激しいガスの衝突のため運動エネルギーは熱となって逃げてしまいます。

しかし私の計算のように現実的な温度の振る舞いを正しく計算した場合はどうでしょうか？冷たい雲の周りには希薄で暖かいガスが取り巻いて

います。この暖かなガスの海でぶかぶかと泳ぐ冷たい雲は自由に動き回ることが出来ます。この暖かな海のさざなみのスピードは最大で約十キロメートル毎秒なので冷たい雲だけを観測すると大きな速度場となったわけです。

## 4. おわりに

### 4.1 分子雲の形成過程

銀河内の星間ガスは超新星爆発や星風、銀河の渦状腕衝撃波、星間雲同士の衝突などによって圧縮されています。私はこのような圧縮によって生じた衝撃波の熱的力学的進化を詳しく調べました。その結論は大きな速度分散を持った微小分子雲の

集団が作られるというものでした。現実の星間ガス雲がこのような衝撃波によって形成されたとすれば、微小な分子雲がたくさん含まれているはずで、中性水素の 21 センチメートル輝線による銀河円盤の観測を見ると、たくさんの殻状フィラメント状の構造が見て取れます。もしこれらの構造が超新星残骸などの衝撃波によって作られたとすれば、微小な分子雲が埋め尽くされていることを本研究は予言します。フィラメント同士が衝突すればより大きな分子雲へと成長するでしょう。

勿論このシナリオでは小さな分子雲を作ることには出来ても、巨大な分子雲がどうやって出来たのかといった質問には残念ながらまだ答えられていません。しかし、この微小分子雲の形成は星間ガスの進化として基本的な性質なのでこれを基により大きな雲へと成長する様子を調べるのが今後必要になっていくことでしょう。

本稿は、私の博士学位論文の内容に基づくものです。私のような出来の悪い学生の面倒を見て下さった元国立天文台の犬塚修一郎助手に深く感謝します。また同台理論天文学研究系には大学院時代の五年間大変お世話になりました。最後に委託院生として受け入れて下さった国立天文台の観山正見教授にこの場を借りて御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Inutsuka S., Miyama S.M., 1992, ApJ 388, 392
- 2) Inutsuka S., Miyama S.M., 1997, ApJ 480, 681
- 3) Inutsuka S., 2001, ApJ, submitted
- 4) Wolfire M. G., et al., 1995, ApJ 443, 152
- 5) Koyama H., Inutsuka S., 2000, ApJ 532, 980
- 6) Field G.B., et al., 1969, ApJ 155, L149
- 7) Field G.B., 1965, ApJ 142, 531
- 8) Heiles C., 1997, ApJ 481, 193
- 9) Cox D. P., Smith B. W., 1974, ApJ 189, L105
- 10) McKee C.F. Ostriker J. P., 1977, ApJ 218, 148
- 11) 例えば Ostriker E. C., et al. 1999, ApJ 513, 259

## Formation of Molecular Clouds

**Hiroshi KOYAMA**

*Astronomical Data Analysis Center, National Astronomical Observatory, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588*

Abstract: In this article we introduce a theoretical study on the formation of molecular clouds. We have examined the thermal and dynamical evolution of the interstellar medium using linear stability analysis and one and two-dimensional nonlinear calculations. We find that geometrically thin cooling layer behind the shock front fragments into small cloudlets. We propose that an origin of "Turbulence" in the interstellar medium is the motion of small cloudlets complex.