

氏名・(本籍)	きむらとしや 木村俊哉
学位の種類	理学博士
学位記番号	理博第 1062 号
学位授与年月日	昭和63年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)天文学専攻
学位論文題目	Formation of the Gas Condensation in the Shock-Compressed Region (衝撃波領域における高密度ガス塊の形成)
論文審査委員	(主査) 教授 須田和男 教授 高窪啓弥 教授 藤村忠雄

論 文 目 次

Acknowledgments

Summary

PART 1 Shock-Compressed Region of the Molecular Cloud

Chapter 1. The Observational Evidence for Compression of the Molecular Cloud and Star Formation

1.1. Introduction

1.2. The Shocked Region Associated With the Expansion of the H II Region

1.2.1. Orion

1.2.2. M17

1.2.3. W3/W4/W5

1.3. Interaction Between the Supernova Explosion and the Molecular Cloud

1.3.1. IC443

1.3.2. Other SNRs

1.4.	The Interface of the Cloud-Cloud Collision
1.4.1.	NGC1333
1.4.2.	W75-DR21
1.4.3.	S128
1.5.	Conclusion
Chapter 2.	Theory of Fragmentation of the Shock-Compressed Region
2.1.	Introduction
2.2.	Gravitational Instability for the Isothermal Layer
2.3.	Other Fragmentation Mechanisms for the Shocked Region
2.4.	Conclusion
PART 2	The Numerical Simulation for Formation of the Gas Condensation in the Perturbed Shock
Chapter 1.	Introduction
Chapter 2.	Formation Mechanism of the Gas Condensation
Chapter 3.	Numerical Technique
Chapter 4.	Model of the Perturbed Shock
4.1.	Basic Equations
4.2.	Initial Conditions
4.3.	Boundary Couditions
4.4.	Units
4.5.	Parameters
Chapter 5.	Calculated Results
5.1.	Introduction
5.2.	Isothermal Case (Model I1)
5.3.	Adiabatic Case (Model A1)
5.4.	Comparison Between Results for the Isothermal and the Adiabatic Shocks
Chapter 6.	Effects on Formation of Gas Condensations Due to Different Parameters
Chapter 7.	Discussion and Conclusion
7.1.	Summary of Our Simulations
7.2.	Stability of Shock Waves
7.3.	Gas Condensations in More Realistic Situation
7.4.	Conclusions and Extensions
References	

論文内容要旨

1. 序論

本論文では、2次元の流体力学シュミレーションの手法を用いて、摂動を受けた衝撃波に対するガス流の振舞いと衝撃波領域の時間進化を調べた。本研究の目的は、星間空間における高密度ガス雲(分子雲)の衝撃波圧縮領域において観測されるガス塊の形成をコンピューターシュミレーションによって再現し、その機構を明らかにすることである。

星間空間における星生成の機構については、確立された理論はこれまでのところ提唱されていない。しかしながら、HII領域や超新星残骸との相互作用、そして分子雲同志の衝突などによって生ずる衝撃波による分子雲の圧縮は、その有力な機構の1つとされている。

主に分子輝線の観測によると、分子雲の衝撃波圧縮領域は、一般に複雑な密度構造を示し、ガス塊に分裂した様子が見られる。さらに、星生成の徴候を示す現象も同時に観測されていることから、これらの星生成は、衝撃波領域がなんらかの機構により分裂した結果起こっているものと推測される。従って、分子雲の衝撃波領域におけるガス塊の形成の機構を解明することは、星生成の機構を研究する上で非常に重要な意味を持っている。

星間衝撃波は、その伝搬中に様々な不安定性や摂動を受ける。それらは衝撃波面の揺らぎを引き起こすと考えられる。衝撃波が摂動を受け衝撃波面が傾きを持つと、いわゆる斜め衝撃波の状態になると、ガスが衝撃波を通過するとき衝撃波に平行な速度成分は変化しないが、垂直な速度成分は強い減速を受ける。そのため、ガスは衝撃波を通過後屈折して方向を変え、その結果衝撃波背後にガスの流れを生じる。このガスの流れは衝撃波の trailing part にガスを集める傾向を持つ (Chevalier and Theys 1975)。

我々は、この様な斜め衝撃波の性質を考慮して、分子雲内を伝搬する衝撃波が揺らいだ時のガスの振舞いを調べ、衝撃波領域におけるガス塊の形成を2次元の流体力学シュミレーションによって示した。

2. 数値シュミレーションモデル

揺らいだ衝撃波の進化を調べるために、非摂動状態として平面衝撃波を含むガスの流れを直交座標系 (X, Y, Z) において考える。衝撃波後方の圧縮されたガスが静止するような系を取り、衝撃波を Y 軸に平行におく。ガスは X 軸の正の方向に流れており、Z 方向には衝撃波が同様に広がっているとす (図1a)。この衝撃波面上に、初期に、ある振幅 A と波長 λ を持った揺らぎを与えて (図1c), その後の時間変化の様子を流体方程式を数値的に解くことによって調べる。

ガスの熱的性質としては、等温ガスを考える。その理由は、この論文では流体力学的振舞いを調べることが、主たる目的であることと、分子ガスでは冷却が良く効くために等温近似が良く成り立つからである。但し、比較の為に逆の極端な性質を持つ断熱ガスについても同様な計算を行った。

計算は100×100のグリッド数で行い、磁場やガスの自己重力、そして粘性などは考えていない。衝撃波のマッハ数と初期に衝撃波面に与える揺らぎの波長をパラメータとして与え、幾つかの場合のモデルを設定しそれぞれについて計算を行った(表1)。モデル I1 から I6 は等温ガスの場合、モデル A1 と A2 は断熱ガスの場合である。

全てのモデルにたいして、衝撃波に入射するガスの密度と圧力は等しいと仮定し、その大きさをそれぞれ1.0とする。また、等温ガスの音速を1.0、断熱ガスの断熱指数を5/3とする。衝撃波背後のガスの各物理量は与えたマッハ数に対し、衝撃波条件から求める。計算は全て無次元量で行う。従って、各物理単位を適当に設定することで、計算結果を様々な状況に応用することが出来る。

3. 計算結果

ガス流の一般的振舞いと衝撃波領域の進化

摂動により揺らいだ衝撃波にガスが入射すると、衝撃波背後の圧縮されたガスは衝撃波に平行な速度成分を持ち、衝撃波に沿ったガス流が生じる。このガス流は、進行方向に対してくぼんだ衝撃波のちょうど底の部分へ流れこむようになる。そのため、くぼみの底の部分でガスの密度が上昇しガス塊が形成される。この傾向は、衝撃波の揺らぎが保たれている限り続き、ガス塊は発達する。しかしながら、くぼみの底で密度が上がることによって圧力が増大する。この圧力の増加は、揺らぎによって遅れた部分を進行方向に押し戻すように働く。そのために、揺らぎは常に平面状態に戻ろうとする傾向を持つ。

従って、時間と共に衝撃波の揺らぎは小さく(浅く)なる。揺らぎが小さくなると、衝撃波の傾きは小さくなり、それに伴い衝撃波背後でのガスの流れ込みは弱くなる。ガス塊の形成は大ざっぱに言えば、流れ込んでくるガスの動圧に依るので、ガスの流れ込みが弱くなるとガス塊は自分の圧力で逆に膨張し始める。以上の事から衝撃波背後で形成したガス塊は、一旦成長した後は揺らぎの回復と共にしだいに消散し始める。十分時間が経つと、衝撃波は平面の平衡状態に戻り、ガス塊は消滅する。

以上のようなガス流の振舞いと衝撃波領域の進化の様子は、定量的な違いをのぞいて全てのモデルについて見られた。図2はモデル I2 の場合で、図2a は密度の等高線(実線)と速度場(小さい矢印)を表している。図2b は同じ時刻の密度分布を立体的に表している。図から分かるように揺らぎの谷の部分に明らかな密度の上昇(ガス塊)が見られる。

ガスの熱的性質による違い

本研究では、ガスの熱的性質として等温ガスを仮定しているが、一般的にガスの熱的性質は衝撃波でのガス流の振舞いに大きな影響を与えるので、等温ガスに対して逆の極端な性質を持つ断熱ガスについても計算を行った(モデル A1, A2)。

それによると、ガス流の振舞いと衝撃波の進化は、定性的には等温ガスの場合と同じである。しかしながら、等温ガスの場合に比べ異なる点は、ガス塊の発達が弱いことと、衝撃波の揺ら

ぎの回復が大変早いことである。そのために、明らかなガス塊の形成が見られない(モデル A1)、もしくは一旦形成されたガス塊もすぐに消散してしまう(モデル A2)。これは断熱ガスの方が密度の上昇に対して圧力の増加がより強いことによる。

衝撃波のマッハ数による違い

衝撃波の力学に最も大きな影響を与えるのは衝撃波のマッハ数である。そこで、衝撃波のマッハ数を1.5, 2.0, 3.0, 4.0の4通りに変えて(それぞれモデル I4, I2, I5, I6に対応)、ガス塊の形成の様子を調べた。マッハ数をこの程度としたのは、分子雲内を伝搬する衝撃波のマッハ数が一般に1のオーダー程度であると推測されるからである。

マッハ数が大きくなると、等温ガスの場合ガスの圧縮はマッハ数の2乗に比例するので、形成されるガス塊の密度の絶対値は当然大きくなる。そこで、初期の衝撃波背後のガスの密度に対してガス塊の最大密度がどれくらいの比(コントラスト)を示すかによって、ガス塊の発達程度を比較した。結果は、モデル I2 と I5,そして I4 と I6 がそれぞれ同程度のガス塊の発達を示し、モデル I2 と I5の方が I4, I6の場合より強い発達を示した。

この結果解釈として以下の事が考えられる。衝撃波のマッハ数が大きいほど、衝撃波背後におけるガスの速度は大きくなる。従って、マッハ数が大きいほど、谷の底へのガスの流れ込みは強くなりより発達したガス塊の形成が期待される。しかしながら、衝撃波に垂直な速度成分は小さくなるので、入射したガスはより衝撃波面に近い領域に留まることになり、これは揺らぎのより早い回復の原因となる。これは数値計算の結果においても示されている。揺らぎの早い回復はガス塊の発達を妨げる効果を持つので、結果的にマッハ数の最も小さい場合と、最も大きな場合においてガス塊が十分発達できなかったと考えられる。

衝撃波面の摂動の波長による違い

摂動の与え方による違いを見るために、一定の揺らぎの振幅0.1に対して波長を1.0, 0.5, 0.33の3通り(それぞれモデル I1, I2, I3)を仮定して計算した。結果は I2 の場合が最も発達したガス塊の成長を示した。その理由は次のように考えられる。揺らぎの波長が小さい程、揺らぎによる衝撃波面の傾きは大きくなる。入射するガスの垂直な速度成分が超音速である限り、衝撃波面の傾きが大きいほど衝撃波背後でのガスの速度は大きくなる。それ故、より発達したガス塊の形成が期待される。しかしながら、衝撃波背後のガスの密度は、衝撃波が入射ガスに垂直な状態での圧力平衡から求められているので、傾きが余り大きくなると衝撃波前後での圧力の不釣り合いが、圧縮されたガスの上流へのより強い膨張を引き起こす。これは揺らぎの早い回復の原因となり、ガス塊の発達を妨げる効果を持つ。

4. 議 論

我々のモデルで仮定したような、衝撃波面の揺らぎに対する平面衝撃波の安定性が、線型安定性解析によって調べられている(Swan and Fowles 1975, 等)。

それらの解析は、平面衝撃波は一般に衝撃波面の揺らぎに対して安定である事を示している。

このことは我々の数値計算においても示されている。どのモデルにおいても衝撃波面の揺らぎは時間と共に小さくなり、遅かれ早かれもとの平面状態に戻る。従って、我々の計算で示されているガス塊の形成は安定な現象の過程で起こる出来事であり、衝撃波領域の分裂の機構を不安定性を用いて説明しているこれまでの多くの研究とは対照的である。

星間衝撃波は常に様々な摂動や不安定性を受けており、衝撃波面が揺らぐ要因は常に考えられる。従って、モデル計算で示したような衝撃波面の揺らぎによるガス塊の形成は、観測される衝撃波領域のガス塊を十分説明していると思われる。また、衝撃波が何等かの曲率を持って収縮している場合、衝撃波面の揺らぎは逆に大きくなる傾向を持つ (Whitham 1974)。この場合には、形成されるガス塊は消散する事なく、より発達すると考えられる。

次に、モデル計算を実際の星間空間に適用してみた。その際、モデル I2 を用いて、時間と距離の単位をそれぞれ 10^6 と 1 pc に取り分子雲の密度を 10^3 cm^{-3} とした。モデルにおいて形成されるガス塊の最大質量は約 5 太陽質量、そのときのサイズは約 0.2 pc となる。観測されるガス塊の典型的なスケールはだいたい質量が 0.1 太陽質量から数 10 太陽質量程度、サイズは 0.01 pc から 1 pc 程度である。従って、このモデルは実際の衝撃波領域に観測される構造 (ガス塊) を十分再現することができる。

結 論

シュミレーションから得られた結果をまとめると、

- (1) 衝撃波面が揺らぐことによって、衝撃波領域に容易にガス塊の形成が引き起こされる。(2) 形成するガス塊の密度は、最大で衝撃波背後の圧縮されたガスのさらに 2 倍程度にまでなる。
- (3) この様なガス塊の形成は衝撃波のマッハ数や摂動の波長に拘らず起こる。(4) 観測されるガス塊の形成をモデルによって自然に再現できる。

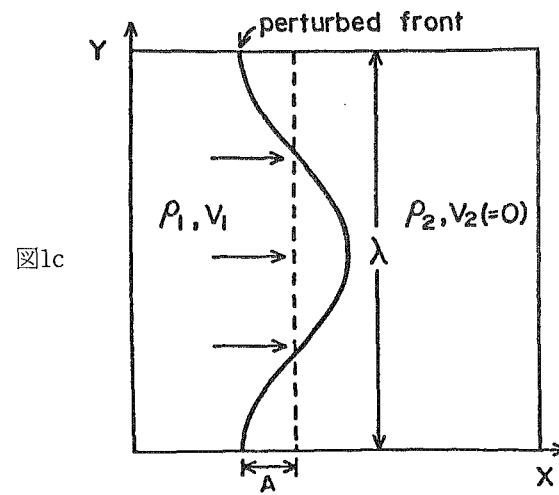
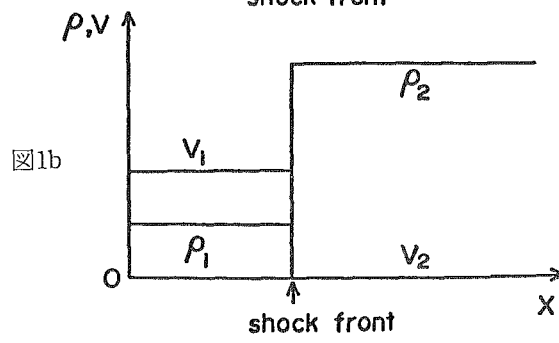
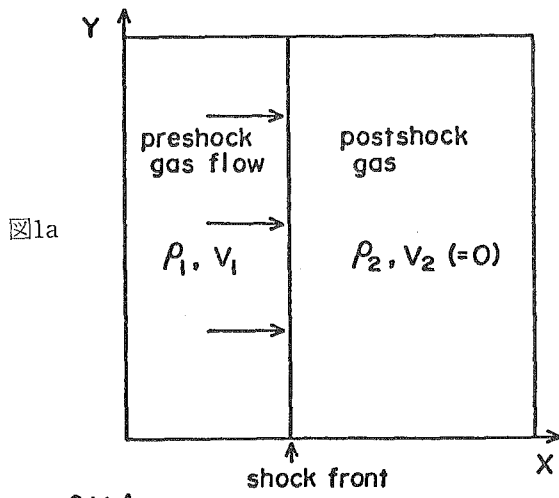
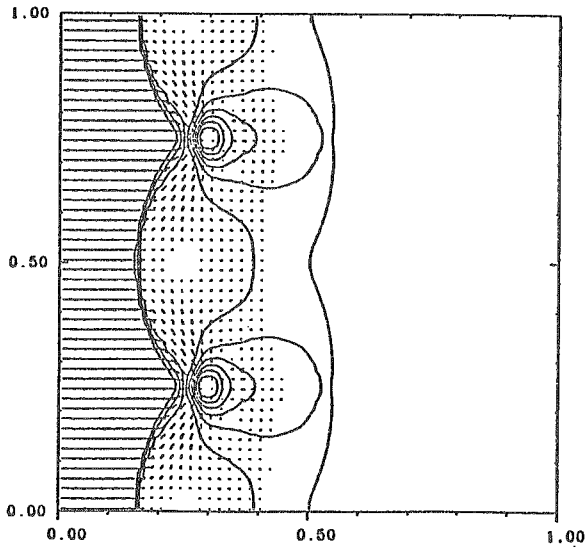


Table 1. Model Parameters

Model	Preshock Gas			Postshock Gas			Perturbation	
	Density	Velocity	Mach n.	Density	Pressure	Wavelength	Amplitude	
11	1.0	1.5	2.0	4.0	4.0	1.0	0.1	
12	1.0	1.5	2.0	4.0	4.0	0.5	0.1	
13	1.0	1.5	2.0	4.0	4.0	0.33	0.1	
14	1.0	0.667	1.5	2.25	2.25	0.5	0.1	
15	1.0	2.667	3.0	9.0	9.0	0.5	0.1	
16	1.0	3.75	4.0	16.0	16.0	0.5	0.1	
A1	1.0	1.4524	2.0	2.286	4.75	1.0	0.1	
A2	1.0	1.4524	2.0	2.286	4.75	0.5	0.1	

Isothermal cases: 11 - 16
 Adiabatic cases : A1,A2

表 1

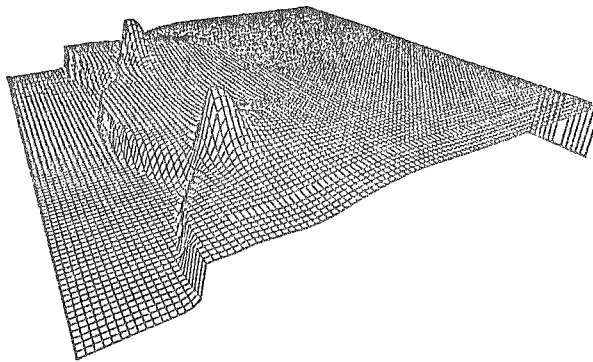


DENSITY CONTOUR

MAX. = 6.9373
 MIN. = 0.9901
 INT. = 0.5947
 TIME = 0.1576
 STEP = 100

☒2a

DENSITY



TIME=0.1576
 STEP=100

☒2b

論文審査の結果の要旨

分子雲の衝撃波圧縮領域は、一般に、複雑な密度構造を示し、ガス塊に分裂した様子や、さらには、星生成の徴候を示す現象も同時に観測されている。本論文は、このような事情に関連して、摂動を受けた衝撃波に対する衝撃波領域のガス流の振舞いと密度構造の時間進化について2次元の流体力学シミュレーションを行い、衝撃波領域でのガス塊形成の機構の解明を試みたものである。まず、非摂動状態として、平面衝撃波を含むガス流を設定し、衝撃波面に振幅と波長をパラメータとする揺らぎを与え、その後の時間変化の様子を追跡した。分子ガスの冷却が非常に有効であることを考慮して、熱的には主として等温ガスの場合を考え、衝撃波のマッハ数、摂動の振幅と波長の異なった組み合わせからなる6箇のモデルと、熱的性質の極端に異なる場合として断熱ガスの場合についても2例のモデルについて計算を行った。用いた定式は全て無次元量で記述され、各物理量の単位を設定することで、結果を様々な状況に応用できるよう工夫がなされている。全体的傾向として、摂動を受けた後の衝撃波背後のガスは衝撃波面に平行な速度成分を持ち、波面の進行方向に対して凹んだ波面の深部へ流れ込むようになり、その部分でガスの密度が上昇しガス塊が形成され成長していくことが示された。この傾向は衝撃波面の変形が存続する限り継続する。しかし、ガス塊が成長すると、圧力の増加が衝撃波面を進行方向に押し戻し、原則的には十分な時間経過により衝撃波面は平面状態に復元し、ガス塊は消滅する。このことは、平面衝撃波が波面の揺らぎに対して基本的には安定であることを示している。モデルの時間経過に及ぼす諸因子の影響も克明に調べられ、観測されるサイズと質量のガス塊の形成が十分再現可能であることが示された。また断熱ガスの場合には、ガス塊の発達も弱く、衝撃波面の揺らぎの回復も大変速くて、ガス塊形成の観点からは有効でないことも示された。

このように、本論文は、分子雲での星形成にかかわるガス塊形成の可能な機構として、衝撃波面の揺らぎの現象を提示し、それによる波面背後のガス流の時間変化とガス塊形成の過程を詳細に論述して興味ある新知見を示したもので、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって木村俊哉提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。