



Shock waves in star- and planet-forming regions

青田, 拓大

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2014-03-25

(Date of Publication)

2015-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6126号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006126>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 青田 拓大

専 攻 地球惑星科学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Shock waves in star- and planet-forming regions

(星・惑星形成領域における衝撃波)

指導教員 相川 祐理

<要旨>

<研究全体の概要>

星間空間では、超新星爆発など、超音速の流体の流れを起こす大規模な現象が起こる。その結果、衝撃波が発生して、ガスが圧縮、巨視的な運動エネルギーが熱的な運動エネルギーに変換されることでガスの温度が増加する。例えば分子雲は数 km/s の超音速乱流であることが観測より知られているが [1]、それらの超音速ガスが衝撃波より、結果として温度が 1000K 以上になることが予想される。ガスが高温になると、低温の分子雲(10K)では不活性であった化学反応が活性化する。結果、ガスの化学組成が大きく変化させる。そのため、衝撃波の研究は星間ガスの構造、分子組成を詳細に理解するためには必要不可欠である。

衝撃波は流体の圧縮が伝搬していくマクロな現象である。しかし、星間ガスは原子・分子の輻射により冷却される。結果、ガスの温度、密度などの物理量に影響を及ぼす。その原子・分子の冷却率は分子の存在度が決定するが、それらの存在度はガスの温度、密度に大きく依存する。そのため衝撃波の影響を考慮するときは流体力学的なマクロな過程と同時に、原子・分子の冷却、化学反応による組成変化のような原子スケールのミクロな過程も同時に考慮しなければならない。例えば先行研究より、高温の衝撃波領域で形成された水分子が衝撃波ガスの主要な冷却源となることが知られている [2]。これらミクロな過程も考慮することで、初めて星間空間で発生している衝撃波について理解することができる。

星間衝撃波の先行研究では、衝撃波が通過した後の星間ガスの様々な原子・分子の存在量を求めている。それは、圧縮されたガス、および後面の冷却中のガスが放射する輝線が、衝撃波の主要な観測指標となるためである。例えば数値シミュレーションより、水分子、水素分子、SiO などの分子が衝撃波領域で強度の高い輝線を発することが示されており [2,3,4]、観測でもこれらの分子が衝撃波領域の指標として使用されている [5]。そのため、化学反応の計算は衝撃波による星間物質の構造、組成変化を解明するときに重要な役割を果たす。

衝撃波の研究は大きく分けて(1) 温度、密度、磁場などの物理的な構造を調べる研究と(2) ガスの化学組成を調べる研究の 2 種類に分類できる。(1)のタイプの研究は特に磁場が衝撃波の構造に与える影響を調べたものが多数存在する。例えば先行研究より、磁気音波が衝撃波面の前面に伝搬して、物理量(温度、密度)が連続的に分布する衝撃波構造が形成されることが知られている [6]。(2)のタイプの研究は水素分子の解離をはじめとする星間ガスに存在する分子の解離条件を調べた研究を初め [7]、化学反応ネットワークを使用した多種多様な分子の生成、破壊を調べた研究が多数存在する [4,8]。例えば先行研究より、高温な衝撃波領域で水分子、OH、SO などの分子が生成されることが知られている [4,8]。

< 1; Thermal Instability behind a Shock Wave in HI and Molecular Clouds >

熱的不安定は星間空間の構造に深く関係する物理過程である。例えば、水素原子ガス(HIガス)は高温低密度ガス(WNM)と低温高密度ガス(CNM)に分類できるが、それは WNM と CNM の間の密度領域が熱的に不安定な領域であるためと考えられている [9]。もう一つの例は水素原子ガス、分子雲中で観測された 100~1000 AU サイズの微小構造が挙げられる [10,11]。この微小構造は、衝撃波を受けたガスが熱的不安定性によるガス分裂を経て形成されると考えられている [12]。上記から、熱的不安定性が星間ガスの構造に深く関係することがわかるが、先行研究では衝撃波を受けた CNM や、特に分子雲中での熱的不安定性について調べたものはほとんど存在しない。本研究では、低温の水素原子ガス(CNM)と分子雲中で発生する衝撃波を受けたガスが熱的に不安定であるかどうかを 1 次元磁気流体力学コードを用いて調べた。その結果、CNM、分子雲共に衝撃波を受けたガスは熱的に不安定な状態を経験することが分かった。 [13]

< 2; Phosphorous chemistry in the shocked region L1157 B1 >

リン(phosphorus)を含む星間分子は、現在までに 6 種類だけ検出されている(PN, CP, PO, HCP, CCP, PH₃)。しかしその大半は進化した恒星で観測されており、低質量星形成領域では観測されてなかったが、最近、野辺山 45m 電波望遠鏡の観測により低質量原始星周辺の衝撃波領域で初めて PN が観測された [14]。先行研究では衝撃波による P 関連の分子の生成については調べられていなかった。そこで本研究では P を含む分子の衝撃波における組成進化を数値計算によって調べた。その結果、衝撃波領域で観測された PN の存在度は pre-shock ガス中に窒素原子が十分多く存在する時のみ再現することができた。 [15]

< 3; Evaporation of grain-surface species by shock waves in proto-planetary disk >

本研究では原始惑星系円盤へのガス降着に発生する衝撃波に注目し、衝撃波に伴う sputtering、ダスト温度の蒸発に伴う熱蒸発 による星間塵(ダスト)表面の分子の蒸発量を計算した。計算結果、降着ガス程度の数密度の場合(10^{19} cm^{-3})、sputtering よりもダスト温度の上昇に伴う熱蒸発の方が効率的に分子を蒸発させることができることが分かった。さらに、メタン(CH₄)のような揮発性の高い分子は降着時に発生する衝撃波により熱蒸発することが分かった [16]。

- [1] Heiles, C., & Troland, T. H. 2003, ApJ, 586, 1067
- [2] Draine, B. T., Roberge, W. G., & Dalgarno, A. 1983, ApJ, 246, 485
- [3] Neufeld, D.A., & Hollenbach, D. J. 1994, ApJ, 428, 170
- [4] Neufeld, D. A., & Dalgarno, A. 1989, ApJ, 340, 869
- [5] Sugimura, M., Yamaguchi, T., Sakai, T., et al. 2011, PASJ, 63, 459
- [6] Draine, B.T. 1980 ApJ, 241, 1021
- [7] Hollenbach, D., McKee, C. F. 1980, ApJ, 241, 47
- [8] Hollenbach, D., & McKee, C.F. 1989, ApJ, 342, 306
- [9] Wolfire, M.G., Hollenbach, D., McKee, C.F., Tielens, A.G.G.M. & Bakes, E.L.O. 1995, ApJ, 443, 152
- [10] Heiles, C. 1997, ApJ, 481, 193
- [11] Sakamoto, S., & Sunada, K. 2003, ApJ, 594, 340
- [12] Koyama, H. & Inutsuka, S. 2002, ApJ, 564, L97
- [13] Aota, T., Inoue, T., & Aikawa, Y. 2013, ApJ, 775, 26
- [14] Yamaguchi, T., Takano, S., Sakai, N. et al. 2011, PASJ, 63, 37
- [15] Aota, T., & Aikawa, Y. 2012, ApJ, 761, 74
- [16] Aota, T., Inoue, T., & Aikawa, Y. in preparation

氏名	青田拓大		
論文 題目	Shock waves in star- and planet-forming regions (星・惑星形成領域における衝撃波)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	准教授	相川祐理
	副 査	教授	中川義次
	副 査	教授	林祥介
	副 査	教授	山本智
	副 査		

要 旨

星形成領域には星間乱流、アウトフローなど超音速の流れが存在し、そのガスが減速される際に衝撃波が発生する。衝撃波はガスの運動エネルギーを熱に変換することでガスを加熱し、星間ガスの物理構造や化学組成に大きな影響を与える。本研究では、星形成過程での様々な段階における衝撃波によるガスの進化を数値計算を用いて調べた。

第1章は、星間衝撃波の基礎過程および先行研究を概観している。

第2章では、星間ガスの熱的不安定性について調べた。星形成の舞台である星間分子雲は、希薄な星間ガスが衝突した際、衝撃波後面でガスが冷却されることで形成されと考えられている。その際、熱的不安定性が重要な役割を果たす。すなわち、熱的不安定性によって形成される低温高密度なガス塊が分子雲の始まりであり、ガス塊の相対運動が分子雲で観測される大きな速度分散の原因となる。従来の研究では、希薄な高温ガス(Warm Neutral Medium)の衝突での熱的不安定性は良く調べられていたが、低温の水素原子ガス(Cold Neutral Medium)やすでに分子になったガスの熱的不安定性については、ほとんど研究されていない。そこで本研究では、CNMと分子ガスの熱的不安定性を1次元磁気流体力学コードを用いて調べた。その結果、CNM、分子ガス共に衝撃波を受けたガスは熱的に不安定な状態を経験することが分かった。熱不安定による擾乱の成長率は、衝撃波通過前のガス密度が低く、速度が速いほど大きく、分子ガスでは初期に与えた擾乱が数倍程度にしか成長しないことを示した。

第3章では、原始星からのアウトフローによる衝撃波におけるリン化合物の進化を調べた。リンを含む星間分子は、現在までに6種類だけ検出されている(PN, CP, PO, HCP, CCP, PH₃)。その大半は進化した恒星の星周で観測されており、低質量星形成領域では観測されてなかったが、最近、野辺山45m電波望遠鏡の観測により低質量原始星からのアウトフローによる衝撃波領域で初めてPNが観測された。そこで本研究ではリンを含む分子の衝撃波における組成進化を数値計算によって調べた。その結果、衝撃波領域で観測されたPNの存在度は衝撃波通過前のガス中に窒素原子が十分多く存在する時のみ再現することができた。また、リンの元素存在度のほとんどは分子雲中で固体に取り込まれている。観測で検出されたPNの存在度を再現するには、元素存在度の1%程度のPが昇華して気相反応するだけでよい、言い換えれば、アウトフローによる衝撃波を通過してもほとんどのリンは固体に取り込まれたままであることが本研究から示唆された。

第4章では、原始惑星系円盤へのガス降着に発生する衝撃波において、H₂O, SO, CO₂, CH₄などの揮発性分子がどれくらい昇華するかを調べた。衝撃波に伴う非熱的脱離(sputtering)、ダストの昇温に伴う熱的昇華を計算した。その結果、円盤形成時のガス密度の場合(10⁻⁹cm⁻³)、sputteringよりも昇華の方が効率的であることが分かった。H₂O, SO, CO₂, CH₄それぞれについて完全に昇華されるための臨界ガス密度、臨界速度を求めた。さらにSOの昇華条件および昇華で生じる蒸気量を計算すると、最近、ALMAで観測された形成中の円盤からのSO放射を衝撃波による昇華、加熱で説明できることが分かった。

以上のように本研究は、星・惑星系形成過程の3つの進化段階において、衝撃波がガスの物理構造や化学組成に与える影響を詳細に明らかにしたものである。これらはいずれも、星・惑星系形成において重要な基礎過程であり、今後の研究の発展にも大きく寄与しうる重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の青田拓大は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。