

星間衝撃波の物理とその天文学的応用

井上 剛志

〈国立天文台理論研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: tsuyoshi.inoue@nao.ac.jp



衝撃波というと皆さんは何を思い浮かべるでしょうか？ 超音速旅客機や戦闘機が飛行する際に発生する波動のようなものが一般的なイメージではないでしょうか。星々の間に広がる星間空間でも超新星爆発などにより衝撃波は発生し、その衝撃波のダイナミクスが星間雲や星の形成から高エネルギー宇宙線の加速に至るまで重要な役割を演じています。本稿では筆者がこれまで行ってきた星間衝撃波に関する研究の概観を紹介します。また、最後に特に若いポスドクや研究者を目指す学生に向けて、どの程度のペースで研究を行えば最終的に就職先を見つけられる可能性が高いかについての一つの指標を紹介します。

1. はじめに

このたびは日本天文学会研究奨励賞という荣誉ある賞をいただき、ありがとうございます。受賞理由となった星間媒質の進化論やダイナミクスに関する研究成果は決して筆者一人の力では得られないものでした。特に京都大学で修士、博士と指導をしていただき、また現在も共同研究者として日頃から議論をしていただいている犬塚修一郎教授や、星間媒質論の高エネルギー天文学分野への応用という境界領域の開拓を全面的にサポートしてくださった山崎了准教授、観測という現実を突きつけることで常に筆者を刺激してくださった福井康雄教授の御三方にはたいへんにお世話になりました。そのほかにも、分子雲形成、星形成から超新星残骸、パルサー、ガンマ線バースト、プラズマ物理、シミュレーションコード開発といろいろな分野に（節操なく？）手を出す筆者が、曲がりなりにもそれらの研究成果を論文出版にまでこぎつけられてこられたのは、多くの共同研究者に恵まれたからでした。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

以下本稿では筆者がこれまでに行ってきた研究について概観します。筆者は特定の天体にターゲットを固定して研究するというよりも、星間空間における衝撃波の物理を軸に据え、その物理学的性質を使って天文学的に何か面白いことを提案するという研究方法を取っています。宇宙で起きるさまざまな物事は一般的にタイムスケールが長いので、一見静的に見えても実際には衝撃波のような極めて動的な現象がシステムの性質を支配していることがよくあります。ここでは筆者が自身の代表的な仕事と考えている衝撃波による星間雲の形成理論と、現実的星間媒質における超新星残骸モデルについて手短ではありますが紹介します。とはいえ、これらの詳細については過去の天文月報やそのほかの学会記事でもすでに何度か解説しています¹⁾⁻⁴⁾。研究者として何か新しいメッセージが少しでもないとなかなか執筆の気分が乗りませんので、最後に研究者として生きながらえるためにはどの程度のペースで研究を行っていかれば良いのかについて筆者の調査も加味した一つの指標を示したいと思います。筆者自身もそうでしたが、研究者として任期のない職にありつけるの

は近年では多くの場合30代中盤になってからというのが実情です。しかしながら、全員がそのような職にありつけるわけでもないのに30代も半ば以降になるまで人生の進路が決まらないというのは精神衛生上あまり良いものではありません。本稿で示す指標が、研究実績が多くあるにもかかわらずまだ職にありつけていない若い研究者の一つの安心材料となれば幸いです。

2. 星間媒質の基本的性質と衝撃波による進化

驚くべきことに、地球上に充満する空気などの流体中に発生した有限振幅の波動が衝撃波を形成することは19世紀末頃にはすでに理解されました⁵⁾。大雑把に言うと、通常の流体中に発生した衝撃波は波面の静止系で見て上流からやってくる流体の運動エネルギーを、粘性を介した薄い衝撃波遷移層で散逸し熱エネルギーへと変換する機構になっています。上流の静止系で見ると、急激に密度、圧力と温度が上昇する衝撃波面が音の速さを超えて襲ってくることになります。

衝撃波はなにも空気特有の現象というわけではありません。たとえば銀河の星々の間に充満する星間媒質は、主成分が水素イオンや原子、分子からなる弱く電離したプラズマであり、そのプラズマ中に衝撃波が発生します。空気中では衝撃波は音速を超えた速度で伝わりますが、星間媒質のような磁場を帯びたプラズマ中では速い磁気音波、遅い磁気音波と、横波であるアルフェン波のような複数の空気中の音速に相当する特性速度が存在し、したがって衝撃波にも複数の種類があります。種類によって衝撃波の物理的性質が異なるのですが、多くの場合は速い衝撃波と呼ばれる衝撃波が重要になります。ちなみに、宇宙プラズマ中に何種類の衝撃波が存在するのかという問題は実はいまだに厳密な答えがありません。例えば有名なランダウ-リフシッツの教科書「連続媒質の電磁力学」には速い衝撃波と遅い衝撃波の2種類

のみであるという簡単な証明が与えられています。が、惑星間衝撃波の観測や磁気流体シミュレーションでは中間衝撃波という教科書では存在が否定されている衝撃波が観測されています。筆者は大学院生時代に磁気流体力学の教科書に書かれている不存在定理の欠点に気がつき、現実的な散逸系では中間衝撃波の存在が可能であることを示しました(筆者の定式化によって中間衝撃波の線形安定性が解析可能になった)⁶⁾。詳細は省きますが筆者の理論自体も完璧というわけではなく、その後も議論が続いている面白い話題です。このような数物理的論理を頼りに自然の公理を追求する研究テーマは特に一部の日本人を強烈にひきつけるようで、このテーマの論文の多くは日本人が著者になっています。

さて、星間媒質は空気とは異なり、磁場を帯びているという性質以外にも、周辺星からの紫外光による加熱や輝線放射冷却によって系の外側と輻射を介したエネルギーのやりとりを常に行っているという特徴があります。柱密度が低く光学的に薄い近似が有効な場合の星間媒質の熱平衡状態を図1に示します。この図を見るとすぐにわかるように、等圧下で星間媒質は温度10,000 K程度の星雲間ガス相、温度100 K以下の星間雲の相と、これら二つの間の熱的に不安定な相を取ることができます。体積的には銀河に充満する星間ガスの大部分は暖かい星雲間ガスの相に存在するので

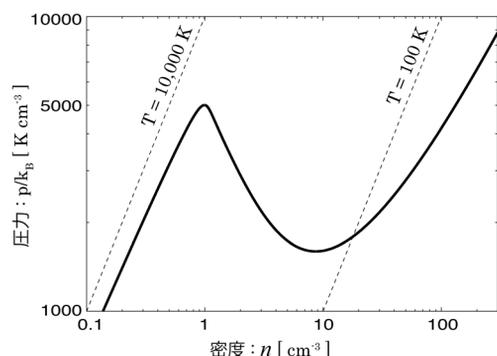


図1 光学的に薄い星間媒質の輻射熱平衡状態。

が、このガスが超新星衝撃波や銀河の渦状衝撃波によって圧縮されると熱的不安定ガスが生成され、より低温で高密度な星間雲へと進化します⁷⁾。詳細は筆者の論文や、2014年に書いた天文月報記事に譲りますが、筆者はこのような熱的性質をもった星間媒質の衝撃波による進化過程を主に磁気流体シミュレーションの手法で研究しました⁸⁾⁻¹²⁾。特に磁場を帯びた星間媒質の現実的な多次元シミュレーションを行って中性水素雲や分子雲がどのように形成されていくのかを明らかにした仕事は筆者の代表的な研究成果にすることができました。よく図2のような宇宙における物資の循環図を見かけると思います。この図を見ると、恒星風や超新星爆発でばらまかれたガスは星間媒質となり何事もなくまた分子雲に進化するかのようになっていますが、実はこの過程には衝撃波圧縮をトリガーにした熱的不安定性によるガス相転移現象やそれに伴う超音速乱流の駆動といった極めて豊富で面白い物理過程が潜んでいるのです。特に進化の最終生成物である分子雲は星の形成現場であり、天文学全般に極めて重要な星の初期質量関数などの理解を得るためにはこのような研究は避けて通れません。

筆者が本格的にシミュレーションに取り組み出した博士課程の頃には現在のような公開シミュレーションコードはあまり多くなく、コード自体も文献をあさって自作しながら研究を進めまし

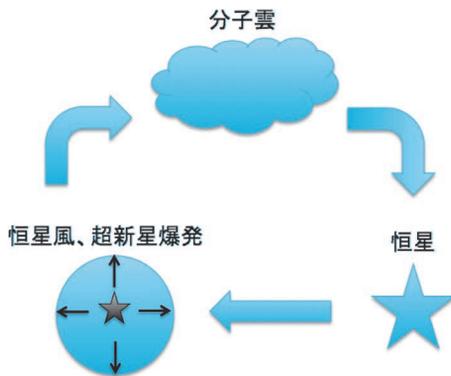


図2 宇宙における物質循環の概念図。

た。当時、京都大学の天体核研究室ではポストクの鈴木建氏（現・名大准教授）や、町田正博氏（現・九大准教授）、三浦均氏（現・名市大准教授）らが筆者と同様に犬塚准教授（当時）をスーパーバイザーとして宇宙流体シミュレーションを用いた研究を行っていましたが、犬塚准教授（当時）の方針で計算コードは同じものを用いずに各自が独立して開発と運用を行っていました。当時は無意味な遠回りをしているようにも思いましたが、このときに自ら手を動かして重ねた膨大なテストやスキームの独自開発の経験はその後に本当に身を助けてくれました。学位取得後も開発を重ねて化学進化を考慮した3次元磁気輻射流体コードを完成させ、世界で初めて“分子雲形成”シミュレーションを実行できたのも¹²⁾、すべて院生時代に築いた基礎があったからであると思います。また、学位取得後にそれまで門外漢であった超新星残骸や相対論的磁気流体現象に関する研究を始めることができたのも、これだけ下積みをしたのだから基礎知識に不足はないはずだという自信をもてたからだと思います。現在、数値シミュレーションの世界は適合格子計算の時代を迎え、一人ですべてを開発しきるのはほぼ不可能になっていますが、この道を進みたい大学院生は基本的な流体エンジン部分だけでも一度は自分でコード開発を行っておくと、その後に驚くほど役に立つと思います。特に、数値シミュレーションに万能な方法はないため、問題に合わせて最適なスキームを選択したり、コードの問題点を見極めるスキルはある程度の開発経験がなければ決して身につけません。

3. 新しい超新星残骸のモデル構築

学位取得後に筆者は当時広島大学の助教であった山崎了氏（現・青学大准教授）に誘われて超新星残骸の研究を開始しました。その当時、現在立教大学准教授の内山泰伸氏がChandra宇宙X線望遠鏡を用いて発見した、若い超新星残骸からの

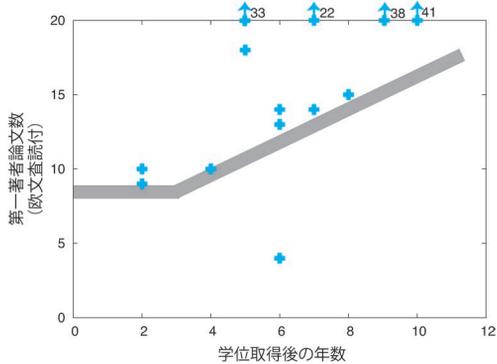


図3 就職の可能性が高くなる研究業績数. 横軸が学位取得後の年数で、縦軸が欧文査読付きの第一著者論文数を表す。太線は東北大学の大向教授が若手研究者のキャリア教育のために作成した就職のための経験則。点は筆者が気づく限りのこの約7年の主要研究大学や研究所の任期なし助教の職を得た日本人の業績（精密な調査ではなく、大学等のウェブページやADSで検索した結果なので誤差がそれなりにあります）。

そこで最後に、研究者としてどの程度のペースで研究成果を出していれば最終的に職にありつける可能性が高くなるのかという一つの指標を提示して本稿の締めくくりとさせていただきます。図3に示したこの指標は、元々は東北大学の大向一行教授が研究室の若手ポスドクにキャリア教育の一環として示していた経験則（太線）を、筆者が最近のデータ（青点）で補強して作ったものです。横軸が学位取得後の年数で、縦軸が査読付き欧文誌に出版された第一著者論文数になっています。太線で示してある第一著者論文数を越えた成果を出していると最終的に任期なしの職を得られる可能性が高くなります。図中の青点は雑把な検索で得られたこの約7年間で主要研究大学や研究所の任期なし助教の職を得た日本人のデータです。ただし、これは理論天文学、理論宇宙物理学のポストに限ったのもであり、観測系についても同様のことが言えるのかについては筆者は関知しません。データ点は大向教授が書いた経験則によく合致して分布していることがわかります。こ

の線を越えた業績をもっている若いポスドクは、例えば現在は不安定でも最後には高確率で職を得られるので自信をもって研究を楽しんでいけば良いと思います。

筆者はポスドク時代にこの線の存在を知り、運やコネではなく実績がちゃんと評価の対象になっているのだと勇気づけられました。研究者になりたければ一所懸命に研究をすれば良いという正しい道が確保されていることは、学会コミュニティが正常に機能している一つの証です。このような図を書くと、数さえ書けばそれで良いのか？ という反論があるかと思いますが、職を得るのに必要な著者で10本程度以上の論文をすべて質の低い論文でそろえるのはほぼ不可能です。実際に質の良い論文を書く研究者は数も多いというのが一般的な傾向だと思います。ただし、準備に数年かかってしまうが確実にノーベル賞級の論文がかけるというアイデアをもっている方は、この図を所詮小物の生活術と鼻で笑って無視すれば良いでしょう（筆者もそのような研究者でありたかった…）。

任期なしの就職先は研究大学や研究所ばかりではありません。地方大学や私大が研究業績の多寡とは異なる基準で人選を行う場合もありますので決して境界線以下での就職が不可能なわけではありません（ただし努力では得られない運命の巡り合わせ？ のようなものがおそらく必要です）。ちなみにこの線を大きく下回って採用が出た場合、何か裏で黒い取引があったに違いないとポスドクの間で噂になります。理論天文学宇宙物理学とは別分野の方は同様の基準が存在するのをご自身の分野で確かめてみると良いかもしれません。もし客観的数値で表せない判断基準で頻繁に人選が行われている場合、正攻法ではない裏技が必要であることを物語っていますので、そのような渡世とは決別したほうが良いのかもしれない。

参考文献

- 1) 井上剛志, 犬塚修一郎, 2008, プラズマ核融合学会誌 84, 422
- 2) 井上剛志, 2009, 天文月報 102, 685
- 3) 井上剛志, 2014, 天文月報 107, 36
- 4) 井上剛志, 2015, 天文月報 108, 109
- 5) Rankine W. J. M., 1870, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 160, 277
- 6) Inoue T., Inutsuka S., 2007, Prog. Theor. Phys. 118, 47, 2007
- 7) Koyama H., Inutsuka S., 2000, ApJ 532, 980
- 8) Inoue T., Inutsuka S., Koyama H., 2006, ApJ 652, 1331
- 9) Inoue T., Inutsuka S., Koyama H., 2007, ApJ 658, L99
- 10) Inoue T., Inutsuka S., 2008, ApJ 687, 303
- 11) Inoue T., Inutsuka S., 2008, ApJ 704, 161
- 12) Inoue T., Inutsuka S., 2012, ApJ 759, 35
- 13) Uchiyama Y., et al., 2007, Nature 449, 576
- 14) Giacalone J., Jokipii J. R., 2007, ApJ 663, 41
- 15) Inoue T., Yamazaki R., Inutsuka S., 2009, ApJ 695, 825
- 16) Moriguchi Y., et al., 2005, ApJ 631, 947
- 17) Inoue T., Yamazaki R., Inutsuka S., 2010, ApJ 723, 108
- 18) Sano T., et al., 2012, ApJ 758, 126
- 19) Inoue T., et al., 2013, ApJ 772, 201
- 20) Shimoda J., et al., 2015, ApJ 803, 98
- 21) Inoue T., et al., 2012, ApJ 744, 711
- 22) Fukui Y., et al., 2012, ApJ 746, 82
- 23) Inoue T., Asano K., Ioka K., 2011, ApJ 734, 771
- 24) Takamoto M., Inoue T., 2011, ApJ 735, 113
- 25) Takamoto M., Inoue T., Inutsuka S., 2012, ApJ 755, 76
- 26) Inoue T., 2012, ApJ 760, 43

Physics of Interstellar Shock Wave and Its Implications to Astrophysics

Takeshi INOUE

National Astronomical Observatory of Japan, Division of Theoretical Astronomy, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: I am delighted to be chosen for the ASJ young astronomer award 2014, and I greatly appreciate the support of my collaborators and family. In this article, based on my results of studies, I briefly review the basic physics of interstellar shock wave and its implications to astronomy. In addition to this, to encourage future astronomers, I show a bellwether of research publication output pace to get a faculty position of theoretical astronomy in Japan.