

地上燃焼の理論で Ia 型超新星の爆発モデル検証

—未だ謎の多い爆発シナリオに新しい目で迫る—

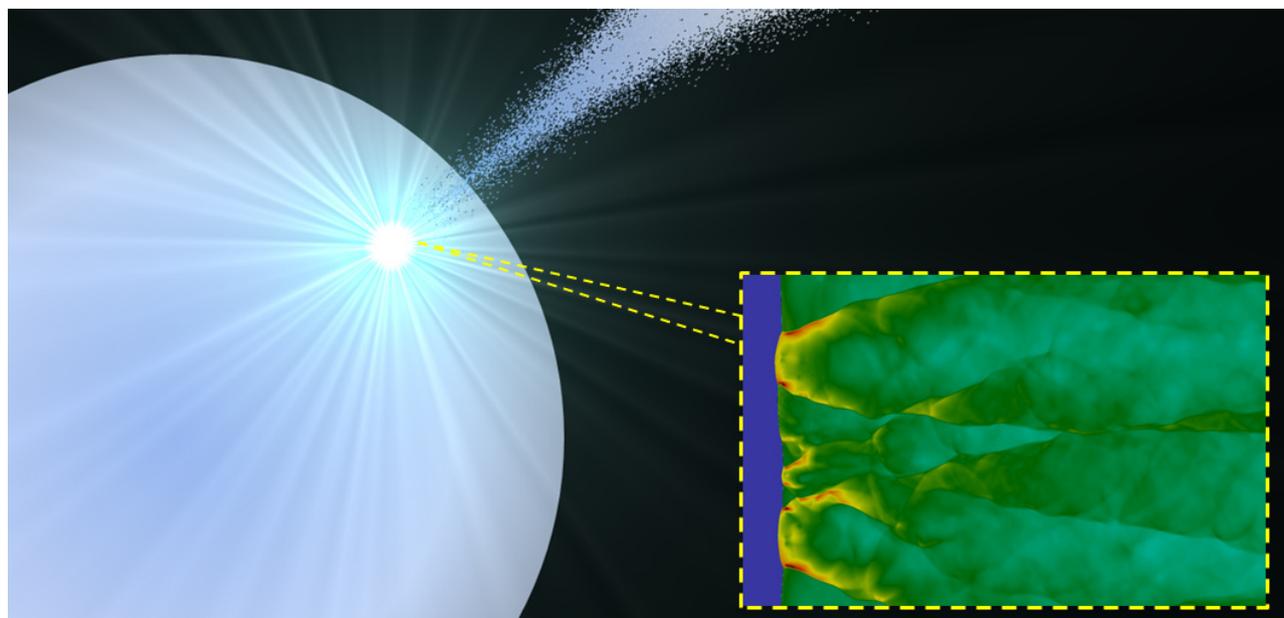
概要

岩田和也 工学研究科特定助教、前田啓一 理学研究科教授による理学・工学にまたがる研究グループは、Ia 型超新星を引き起こす「デトネーション」という超音速で伝播する核融合燃焼の火炎と、地上のロケットエンジンや爆発事故で起こる同名の化学燃焼の火炎との理論的な共通点の多さに着目し、地上の化学燃焼実験に裏付けられたデトネーション予測の理論を使って、Ia 型超新星の爆発モデルを検証できることを示しました。

Ia 型超新星は、太陽程度の質量の恒星の最終進化段階である、白色矮星で生じる暴走的な核融合による爆発であると考えられています。明るさを精度よく推定することができるため、宇宙の距離指標として使われ、宇宙膨張の証拠として 2011 年のノーベル物理学賞にもつながっています。それにもかかわらず、爆発の引き金となるデトネーションがどのような状況で発生するのか、結論に至っていません。本研究グループは、地上の化学燃焼実験で見られるデトネーションの最小単位構造「セル構造」が Ia 型超新星の有力な爆発モデルの一つにおいても見られることを見出しました。さらに、セル構造を用いた地上燃焼の理論を適用することで、デトネーションの発生・消失が判定できることを示しました。

今回の成果は、Ia 型超新星の起源という未解明問題に対し、これまでとは全く異なる視点を提案したものです。また、地上実験から得られた工学的分野の知見を宇宙物理学という理学的分野の重要問題に適用した取り組みであり、学際融合の観点からも今後の発展が期待されます。

本研究成果は、2024 年 9 月 17 日に国際学術誌「*Physical Review Letters*」に掲載されました。



白色矮星表面への質量降着流により発生する、Ia 型超新星の第一段階のデトネーションのイメージ。右のセル構造の拡大図は、本研究グループによる数値シミュレーション結果を示す(Credit: 岩田、前田)

1. 背景

夜空で輝く恒星の光は、その中心で水素をはじめとする軽い元素から、重い元素が作り出される核融合によって生じるエネルギーが起源です。恒星内部の核融合は通常は安定に進みますが、太陽程度の質量の星の最終進化段階である白色矮星においては、核融合が暴走的に発生し得ることが知られています。そのために白色矮星全体が爆発し明るく輝く現象は Ia 型超新星（注 1）と呼ばれます。

天体内部の核融合は「核燃焼」とも呼ばれ、工業炉などの中で燃え盛る化学反応による火災（つまり普通の意味の「燃焼」）と深く関連づけられて語られます。爆発現象を引き起こすような超音速で伝播する燃焼波は「デトネーション」（注 2）と呼ばれ、もともと炭鉱爆発事故で観測され、防災の観点から研究が進んできました。近年はロケットエンジンなどに積極的に応用する動きが活発になっています。地上におけるデトネーションは実験室レベルの観測が可能であり、豊富な基礎実験データに裏付けされた理論が多くあります。

Ia 型超新星の明るさや元素の生成量は、核燃焼によって駆動される「デトネーション」が発生すると考えるとよく説明できます。しかし、Ia 型超新星においてデトネーションがそもそも点火するのか、あるいは点火しても消失せず維持されるのか、Ia 型超新星のメカニズムを結論づけるための根本的な問題が手つかずになっていました。地上の化学燃焼によるデトネーションについては、その点火条件、消失条件に関する研究が進んでおり、その理論が確立しています。しかし、それを Ia 型超新星に応用した研究例は存在していませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究グループは、デトネーションの点火・消失に関する地上燃焼の理論を Ia 型超新星の爆発モデルの検証に応用することを提案し、その第一歩として、近年 Ia 型超新星の爆発シナリオの有力な候補の一つとして注目される double-detonation（ダブル・デトネーション）モデルをターゲットとしました。このモデルは白色矮星の表面で一回目、中心で二回目のデトネーションが引き起こされて爆発に至るというシナリオで、一回目のデトネーションがそもそも着火するか、消失せずに発達・伝播するか、それらの条件は何か、というところが未解明のキーポイントになっていました。ダブル・デトネーションモデルにもとづく白色矮星規模の大領域のシミュレーションにおいては、デトネーションの取り扱いや解像度次第で結果が大きく変わってしまっており、それに対する理論的な考察も十分ではない状況でした。

本研究グループは、デトネーションに伴う「セル構造」（注 3）に着目しました。セル（うろこ）構造はデトネーションの最小単位構造というべきものです。工学分野においてはそのサイズをもとにしたデトネーションの点火・消失を予測する理論が確立され、地上燃焼実験の結果を良く説明できることが知られています。一方で Ia 型超新星に伴う核燃焼デトネーションにおいては、そもそもセル構造がしっかり見えるほどの高解像度のシミュレーションがなされてきませんでした。本研究グループはまず、京都大学基礎物理学研究所のスーパーコンピュータ Yukawa-21 や、国立天文台のスーパーコンピュータ XC50 による、白色矮星表面のローカルな領域に注目したこれまでにない高解像度シミュレーションを行い、Ia 型超新星で想定される状況下においてもセル構造が見られることを確認しました（図 1 は結果例）。白色矮星表面の密度や組成の異なる多数のシミュレーションを実行し、これらの性質からセル構造のサイズを決定する数式を考案しました。

これによって、セル構造サイズにもとづいた地上デトネーションの理論を、Ia 型超新星へ応用する準備が出来上がりました。実際にこの理論を過去に行われてきた大領域シミュレーションにあてはめると、デトネーションが着火した例とそうでない例について、その傾向をこの理論でうまく説明できることを示しました。研究例によってばらつきのあった点火・消失条件に対し、理論的な基準を上手く提案することができたということになります。

これらは2つの点で重要な成果です。1つ目は、この理論の応用により、必ずしも大規模なシミュレーションを行わなくてもデトネーションの着火・消失がある程度判定できるため、どのような条件下でIa型超新星が発生するのか（どのような恒星進化を経たものが爆発するか、などを）探るうえで非常に有用です。2つ目は、地上の燃焼実験という強い裏付けのある知見が、宇宙物理学における重要な未解決問題に役立つことが示されたことです。本研究は、工学実験の分野で発展した視点を理学の重要問題に持ち込んだものであり、学際融合の観点からも重要な機会をもたらすと期待されます。

3. 波及効果、今後の予定

以上のとおり、本研究はセル構造の理論という、「地上の」デトネーションの研究分野では一般的といえる理論を、これまで応用のなかった「宇宙の」デトネーションの着火・消失の判定に用いることができることを示した点で、新しい手法を提案する画期的な成果といえます。今後、白色矮星中心で発生されるとされる二回目のデトネーションに関する検証や、ダブル・デトネーションとは異なる他の爆発モデルに対する検証など、Ia型超新星の爆発メカニズムに対する理解を大きく進展させる可能性を秘めた手法として、今後さらに発展が期待されます。今後は、天文学研究において主要な手法である観測やシミュレーションとのさらなる協調を視野に、地上燃焼実験の応用の可能性をさらに広げていきたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科研費「若手研究(23K13146)」 「基盤研究(S)(JP18H05223)」 「基盤研究(A)(JP20H00174)」 「学術変革領域研究(A)(JP24H01810)」、及び京都大学教育研究振興財団「研究活動推進助成」の支援により実施されました。

また、京都大学基礎物理学研究所のYukawa-21、国立天文台のXC50のスーパーコンピューターシステムを使ってシミュレーションを行いました。

<用語解説>

(注1) Ia型超新星

恒星がその一生の最後に爆発する現象を総称して超新星とよび、その観測的な特徴から「~型」とつけて分類されます。Ia型超新星は、太陽の8倍程度以下の中小質量の恒星が、その最終形態である白色矮星となった後に生じます。他の星からの質量降着を通して星の中心、あるいは星の表面で暴走的核融合が起こる条件がそろえば、星全体へと核燃焼火炎が伝播し爆発に至ります。異なるIa型超新星を比べても明るさがほぼ同程度であり、かつ個々のばらつきも精度よく補正できるため、地上で観測される明るさから距離を測定することが可能です。この性質のため、宇宙の距離指標として使われており、宇宙膨張の観測的証拠として2011年のノーベル物理学賞にもつながっています。しかし、複数の有力な爆発メカニズム候補が提案されており、どのモデルが正しいのか、現在まで確定していません。この点について、観測とシミュレーションによる検証が今もなお続けられています。例えば、今回ターゲットとしたダブル・デトネーションモデルはもともと80年代に提案されましたが、2017年以降にいくつかの有力な観測データが得られて以降、爆発メカニズムの有力候補と考えられるようになりました (<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2017-10-05>)。

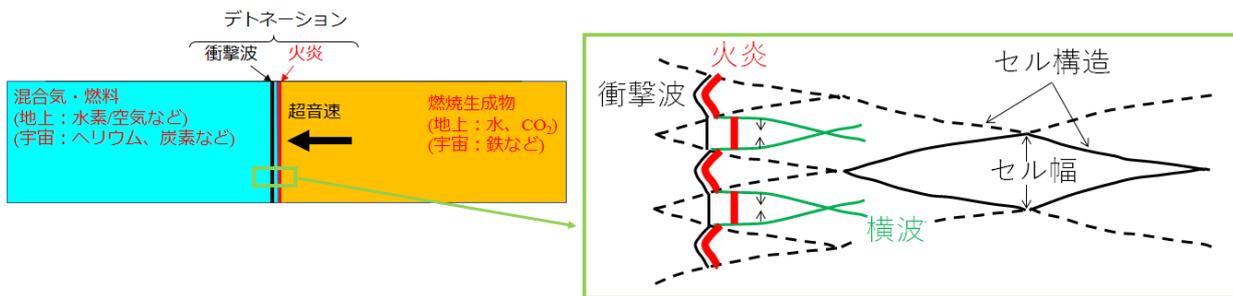
(注2) デトネーション

火炎は燃料と酸化剤で満たされた混合気の中を伝播していく性質がありますが、反応性が特に高い場合は、音よりも速い伝播速度を持ちえます。そのような火炎はデトネーションとよばれ、下図左側のように、火炎面

の前方に衝撃波が形成された構造を持ちます。衝撃波は、音波が一か所に集中して強い圧縮エネルギーを持った波です。デトネーションは、もともとは炭鉱で発生する爆発事故において観測され、安全工学の面から研究されてきました。ここ数十年は、既存のロケットエンジンなどの推進機関にとって代わる、高熱効率かつ軽量コンパクトなデトネーションエンジンとしての応用研究が進められています。例えば、名古屋大学・推進エネルギーシステム工学研究グループは、2021年に世界初の宇宙飛行実証を成功させています。Ia型超新星のデトネーションの場合は、ヘリウムや炭素、酸素などの元素による核融合によって駆動され、伝播していきます。

(注3) セル構造

実際のデトネーションにおける衝撃波と火炎は、下図左側のような単純な平面ではなく、同図右側のように、凹凸や分岐を持った複雑な多次元構造を持っています。このような構造は、もともと実験装置の壁面に塗ったすす膜の上でうろこ(=cell)のような模様を描いたものとして観測されてきたため、セル構造と呼ばれています。このセル構造のサイズは、混合気の反応性が高いほど小さくなる傾向があり、どれくらいのエネルギーを与えれば点火するか、どれくらいの流路サイズならばデトネーションが安定して伝播あるいは消失するか、といった基準が、セル構造のサイズで与えられることが実験と理論で示されてきました。これらは上述の、デトネーションエンジンの設計にも役立てられるなど、「地上の」デトネーション工学で長年用いられてきた重要な理論です。



<研究者のコメント>

私はもともと航空宇宙工学系の分野出身で、学生のと時から、もともとロケットエンジン関連の「地上の」デトネーションを専門にしていました。当時参加した国際学会の特別講演をきっかけに知った「宇宙の」デトネーションの存在に衝撃を受け、両者のつながりに対する知的好奇心が尽きませんでした。いつか絶対に双方の架け橋になるような面白いことをやってやろうと思い、共同研究者の前田さんのところを訪ねてから4年ほどたちますが、こうして本当に面白い成果につながられて大変うれしいです。これからはますます私たちの理学・工学系にまたがった研究グループだからこそ可能な、独自のカラーを発揮していきたいです。(岩田)



この研究は、私自身はじめての、理学・工学分野にまたがった取り組みです。岩田さんは工学研究科所属ですが、勤務終了後や週末に、頻繁に議論のために立ち寄ってくれました。お互いが知らない知識を共有することで新しいアイデアが浮かぶということが何度もあり、ワクワクしながら研究を進めることが出来ました。今回の成果は第一歩、今後ますます発展していくと期待しています(前田)



<論文タイトルと著者>

タイトル：Viewing explosion models of type Ia supernovae through insights from terrestrial cellular detonation (地上のセルデトネーションの知見から見た Ia 型超新星の爆発モデル)

著者：Kazuya Iwata, Keiichi Maeda

掲載誌：Physical Review Letters DOI：未定

プレプリント (arXiv.org のページ): <https://arxiv.org/abs/2408.10721>

<参考図表>

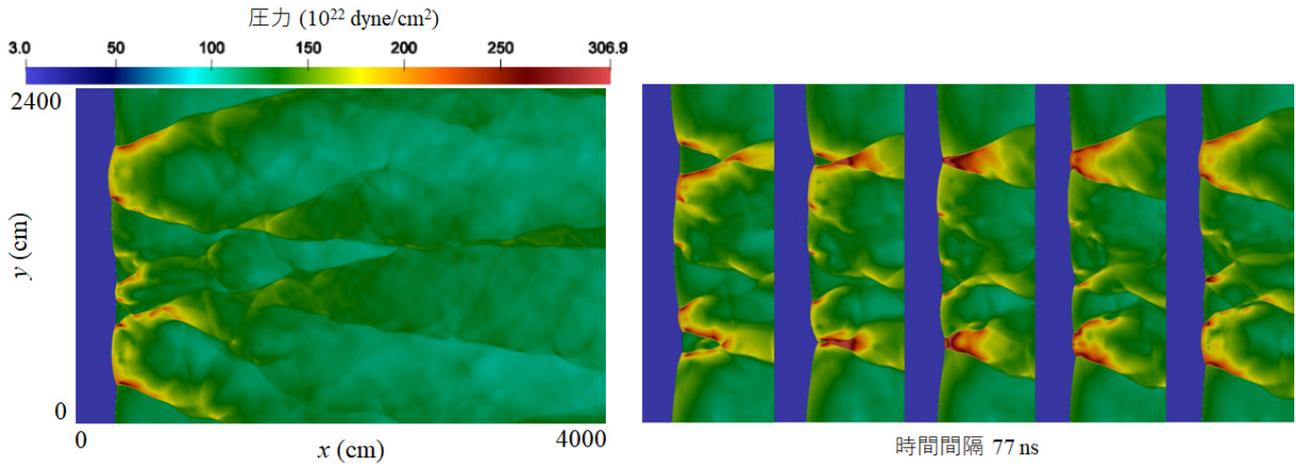


図1 セル構造シミュレーション結果の例。密度 1×10^6 g/cm³、ヘリウム質量分率 0.6 における圧力分布：(左)計算領域全体の瞬間図 (右)77ns 間隔の連続図