

京都大学教育研究振興財団助成事業
成果報告書

2024年 11月 20日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団

会長 藤 洋作 様

所属部局・研究科 工学研究科 機械理工学専攻

職名・学年 特定助教

氏名 岩田 和也

助成の種類	令和6年度・在外研究助成			
研究課題名	Ia型超新星爆発を引き起こすシナリオを燃焼工学的シミュレーションから解明する			
受入機関	UC Berkeley, USA			
渡航期間	2024年 9月 22日 ~ 2024年 10月 22日			
成果の概要	タイトルは「成果の概要／報告者名」として、A4版2000字程度・和文で作成し、添付して下さい。「成果の概要」以外に添付する資料 <input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有()			
会計報告	交付を受けた助成金額	527,000 円		
	使用した助成金額	527,000 円		
	返納すべき助成金額	0 円		
	助成金の使途内訳	費目	金額 (円)	
		航空機・往復(EVA air)	154,350	
		宿泊費(Airbnb)	360,242	
		現地交通費	12,408	
当財団の助成について	(今回の助成に対する感想、今後の助成に望むこと等お書き下さい。助成事業の参考にさせていただきます。) 長期間の海外滞在の経験がなく、かつ手持ちの研究費では難しかったのでまずは採択していただき非常にありがたかったです。独自性の強い研究テーマだったが、そのアイデアを受け入れてくださったという意味でも励みになりました。多くの海外研究者とのつながりをつくることができ、今後の共同研究の発展のきっかけになる、重要な機会とすることができました。また、計画の調整に伴う多少の変更に関しても、柔軟に対応していただけたので大変満足しております。			

成果の概要／岩田和也

【研究目的・内容】

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一生の最後に起こす爆発現象であり、暴走的な核融合燃焼で駆動されることが知られている。現在地球上に存在する鉄元素の大部分はこのIa型超新星を起源としているほか、その明るさにおける個体差の少なさのため、宇宙における距離指標として用いられる。宇宙が加速膨張を起こしている観測的証拠として、2011年のノーベル物理学賞にもつながっている。そうした理由で宇宙物理学上、重要な突発天体現象であるに関わらず、じつはその爆発に至るメカニズム、すなわち爆発を起こす前の星(親星)の質量、組成、伴星の存在など、主要なものが現在まで特定されていない。現在までに観測と理論シミュレーションにもとづく研究が行われているが、delayed-detonationモデル、double-detonationモデルという2つの対立する爆発モデルが主要シナリオとして提唱されている以上は、決着に至っていない。

上記の2つの爆発モデル名に含まれる、デトネーション(detonation)は超音速で核融合燃焼が燃焼波として伝播する現象である。同名の現象は地球上の燃焼工学の枠組みにおいて、爆発事故や航空宇宙機エンジンへの応用において基礎研究が長年行われている。燃焼実験による強い根拠をもとにした発生・維持・消失条件に関する定量的な指標などの知見が既に成熟している。一方で宇宙物理学のデトネーションに関しては、限られた観測情報とシミュレーションの定量的な比較検証は難しい。なによりも、両者のデトネーションは化学燃焼か核融合燃焼であるかを除いて多くの物理が共通することが知られているにも関わらず、燃焼工学のデトネーションの豊富な知見を活かす取り組みは非常に少ない。そのためIa型超新星の研究では、デトネーションを起こせる親星の条件を高精度に予測できておらず、シナリオに関して結論されていない一因となっている。

そこで本研究では、地球上の化学燃焼デトネーションの発生・伝播・消失に関する理論をIa型超新星で起こる宇宙物理学的デトネーションに適用し、シナリオに必要な親星や周囲の条件について高精度に解き明かすことを目的とする。より具体的には化学燃焼シミュレーションに用いていた計算コードに核融合反応を取り入れて波面構造を解き、理論解析に必要な空間スケールを算出する。それらを理論に適用し、デトネーションの起こる密度・温度条件を導けば、その条件を生じる親星の質量などの範囲が求まる。この一連の解析により、Ia型超新星の観測的制限におさまる爆発モデルと詳細なシナリオを同定することを目標とする。

在外研究期間においては、シミュレーションに含める核融合反応モデルに関し、受入研究者であるKen Shenが必要性を提唱する、陽子の影響を考慮した詳細なモデルを入れた計算コードの開発を共同で行う。これによりシミュレーション・解析の高精度化を図る。

【研究成果】

まずは計算コードの開発のため、受け入れ研究者である Ken Shen とのディスカッションを通じ、プロトンの触媒効果による、ヘリウム燃焼の促進効果を入れるため、55 核種を考慮した詳細な反応モデルの導入が必要であるという結論に至った。これを高速な計算手法で行うため、宇宙物理の分野で用いられる、オープンソースの流体計算コードである CASTRO に実装されている、核融合反応モジュールの使用に着目した。それを部分的に取り込むことで、高速かつ高精度に反応計算を行うことができるという方針を得るに至った。しかし当初の想定であった、申請者の所有する Fortran コードに実装するためには、Fortran-C++ の異言語の連携を可能にするための wrapper が必要であることがわかった。この問題に、経験者からの助言が必要であるとして、Stony Brook 大学の Michael Zingale 氏に協力を仰ぎ、オンラインでのやり取りのもと、wrapper の開発を完了することができた。実際に反応モデルをコードを組み込み、テスト計算としてデトネーションのセル構造を、適切に解像してシミュレーションが実施できることまでを行うことができた。

以上のようなコード開発を行ったほか、「燃焼工学の観点から、いかに Ia 型超新星爆発を議論できるか？」という論点のもと、学科構成員の前でこれまでの研究成果を発表したほか、Ken Shen 氏をはじめ、同じ部局に所属する研究者と議論を行ってきた。Ia 型超新星を含む高エネルギー天体に関するマルチメッセンジャー物理学を専門とする Wenbin Lu 氏、Ia 型超新星のデトネーション開始過程に関する研究業績を有する Daniel Kasen 氏と繰り返し議論を行い、観測・理論両面から、申請者の研究テーマであるデトネーションの高解像度計算をキーとして共同で Ia 型超新星の爆発モデルに取り組んでいける道筋を確認することができた。

【展望】

本格的な Ia 型超新星爆発の、広範囲な親星条件に対するパラメータスタディによるデトネーションに本質的な「セル構造」の解析を実施中である。半年から一年のタイムスケールで、過去行ってきたシミュレーション結果が反応モデルでいかに変わるか、それにより地上燃焼理論を適用したときに、爆発可能な親星の条件の範囲がどのように変わるか、比較のもとで学会・論文発表という形で議論を行っていく見込みである。

【謝辞】

本研究課題の実施にあたり、京都大学教育研究振興財団の在外研究助成は非常に大きな助けとなった。本助成による渡航を期に、ほとんど海外研究者とのやり取りの無かった状況から、一気に共同研究の可能性を広げるまでに至ることができた。ここに謝意を表す。