

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760116

研究課題名（和文） 定在衝撃波不安定性の機構解明と流れ場制御への応用

研究課題名（英文） Mechanism of Stationary Shock Wave Instability and Its Application

研究代表者

大西 直文 (OHNISHI NOAFUMI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20333859

研究成果の概要（和文）：

超新星コアや鈍頭物体前方に形成される衝撃波で起こる流体力学的不安定性のメカニズムを解明するため非構造格子を用いた三次元流体シミュレーションを行い、解析に適した計算手法や計算条件を調べた。また、弧状衝撃波による造波抵抗を低減するために不安定性を利用する手法として、レーザー生成プラズマによって衝撃波前方へ低密度領域を作る手法を検討し、開発した数値計算コードによりレーザーの入力条件による低減効果への影響を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Three-dimensional numerical simulations were conducted using the discontinuous Galerkin (DG) finite-element method to clarify mechanism of bow-shock instability, which has been experimentally observed for a blunt body. The most favorable flux functions and numerical conditions were explored through the comparisons among them. Laser energy deposition that leads to a low-density region ahead of a bow shock was investigated for reducing the wave drag, and the effect of laser input condition was clarified with our developed code.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：数値流体力学，流体力学的不安定性，衝撃波，超新星爆発，造波抵抗低減

## 1. 研究開始当初の背景

超新星爆発メカニズムの解明については、多くの宇宙物理学者によって20年近くの間数値シミュレーションによる研究が行われているが、近年、超新星コアの降着流中に形成される定在衝撃波に流体力学的不安定性が存在することが二次元および三次元の数

値シミュレーションによって発見され、非常に注目を集めている。この流体力学的不安定性は、観測されている超新星爆発の非球対称性の有力な原因の一つとして考えられ、さらに、パルサーとして観測されている中心天体が角運動量を獲得する起源の候補としても期待されている。申請者は、早稲田大学と国

立天文台の研究者らとの共同研究によって、この流体力学的不安定性が超新星爆発を促進する可能性について研究を行い、特に中心天体から放射されるニュートリノと不安定性との相互作用に注目して数値シミュレーションを主体とした研究を行った。

この衝撃波の不安定性について申請者らは数値的に線形解析を行い、他の研究者によって理論的な解析も行われている。その中で、この不安定性は衝撃波面で擾乱により発生した渦が降着流によって中心付近まで輸送され、中心付近で音波となって衝撃波まで戻ってくるというサイクルが擾乱を成長させる方向に働くことがわかってきた。擾乱の成長率はその波長に依存するが、特に低次モードで顕著な成長が見られ、衝撃波は大きく変形し非定常な振動を繰り返す。

一方、申請者らは非定常な衝撃波の振動を誘起することで、超音速飛行物体の造波抵抗を低減する手法についても研究を行った。この手法では、離脱衝撃波の前方にパルスレーザーによってプラスト波を形成し、離脱衝撃波と干渉させることによって造波抵抗を低減する。レーザーを用いて流れ場を制御する技術はロシアを始めとして古くから検討されているが、レーザーの大出力化に伴い現実的な技術として認識されるようになり、近年再び注目され、日本でも名古屋大学が精力的に実験的研究を行っている。申請者らの研究により、衝撃波の低減は離脱衝撃波がプラスト波内部のプラズマと干渉することによって非定常な衝撃波の振動が渦を発生し、結果として衝撃波面でのエントロピー上昇が抑えられている可能性を示した。つまり、非定常な振動を誘起することで低エントロピー衝撃波を実現し、それが造波抵抗の低減に繋がると考えられるため、このような振動を促進する不安定モードを発見できれば、より効率的に造波抵抗の低減、ひいては超音速飛行における騒音の低減も期待できる。

超新星コアにおける衝撃波の不安定性は、もちろん中心天体が作る重力場による降着流中という特殊な状況において発生するものであるが、今のところ降着流が重力によって形成されている必要性は指摘されておらず、超音速中の飛行物体周りに形成される離脱衝撃波も同様の状況下にあると考えられる。したがって、同じように離脱衝撃波においても条件によっては不安定性が存在する可能性がある。

しかし、残念ながらこの不安定性の発生メカニズムが全て明らかになっているとは言えず、したがって、どのような条件下なら離脱衝撃波に不安定性が発生し得るのかも今のところ不明である。

## 2. 研究の目的

前述のように、申請者らは衝撃波における流体力学的不安定性が超新星爆発を促進する可能性について研究を行っており、衝撃波面で擾乱により発生した渦が降着流によって中心天体の表面付近まで輸送され、音波に変換されて衝撃波まで戻ってくるというサイクルが不安定発展に寄与していることがわかりつつある。一方で、申請者らは非定常な衝撃波の振動をレーザー生成プラスト波によって誘起することで、超音速飛行物体の造波抵抗を低減する手法についても研究を行っており、非定常な衝撃波振動が渦を生成し衝撃波面でのエントロピー上昇を抑える可能性を示した。つまり、非定常な振動を誘起することが造波抵抗の低減に繋がると考えられるため、衝撃波振動を促進する不安定モードを発見できれば、より効果的に造波抵抗の低減、ひいては超音速飛行における騒音の低減も期待できる。そこで、本研究では降着流中の定在衝撃波不安定性の数値解析を行い、そこから得られた知見により、離脱衝撃波に不安定モードが存在し得るかどうかを検討し、その工学応用への可能性を探る。

## 3. 研究の方法

本研究では、超新星コアの降着流中における定在衝撃波の流体力学的不安定性を二次元および三次元の輻射流体シミュレーションによって解析し、その結果と理論的な解析から不安定発展のメカニズムを解明する。それに加えて、超音速飛行物体周りの離脱衝撃波の制御への応用を検討し、数値シミュレーションによってレーザー生成プラズマを利用した効率的な抵抗低減の実現性を調べる。また、非構造格子を用いた三次元流体シミュレーションによって鈍頭物体周りに形成される弧状衝撃波に本来備わっている不安定性について調べる。

## 4. 研究成果

初年度においては、これまで研究を行ってきた超新星コアにおける定在衝撃波不安定性について引き続き数値シミュレーションを中心とした解析を行い、降着流の回転の影響や、衝撃波の変形の結果生じる重力波についての成果を国内外にて報告した。また、離脱衝撃波と低密度領域の干渉の結果現れる流体力学的不安定性に起因した造波抵抗低減の解析も行い、低密度領域を形成するレーザーの入力条件等、より現実的な状況における有用性について検討し、これも国内外において報告を行った。国際会議における議論を通して離脱衝撃波が本来持つといわれる不安定性について実験を行っているロシアの研究者と情報を交換することができ、彼らの実験を参考にして三次元数値流体計算を始めた。数値計算手法としては、これまで用い

ていた構造格子では形状表現に限界があるため、非構造格子に基づく高次精度計算手法を採用し、衝撃波計算においてみられる数値不安定性を生じにくい方法として近年提案されたものを用いた。しかし、流体力学的に不安定な離脱衝撃波の状況は数値的にも不安定になりやすく、両者を見分ける手段が必要であることがわかった。その手法としてスペクトル解析が適当であると判断し、両者に擾乱成長の特徴がないかを調べることで、不安定メカニズムの違いによって支配的なモードや成長率等の違いが生じるかに注目した。線形理論等のモデル構築はこれらの数値計算結果を見極めることで可能になると考えられる。

次年度においては、主に鈍頭物体周りの弧状衝撃波不安定性について三次元数値流体計算を用いた解析を行うことによって、メカニズムの解明を試みた。それに先立ち、強い衝撃波を伴う数値流体計算において以前よりその存在が指摘されている、カーバンクル現象と呼ばれる数値不安定性を排除するために、非構造格子においても高精度の数値計算を実現可能な不連続ガレルキン法を用いて、数値流束スキームや鈍頭形状、計算格子に対する不安定性発展の依存性を調べた。数値流束スキームの比較の結果、比較的年数不安定性に強いスキームの中でも、鳴らの提案した SLAU スキームが鈍頭物体周りの衝撃波解析に適していることを確かめた。また、物体表面形状がより鈍頭なほど不安定性が発現しやすいことがわかった。さらに、物体表面が平坦に近い場合には、SLAU を用いた場合でも不安定性成長を確認することができた。この不安定性の原因を特定するため、スペクトル解析によって特徴的な擾乱波長が何に依存するかを調べたが、ほとんどの場合、計算格子に依存した波長が成長していることがわかった。そのため、さまざまな計算格子を用意したところ、鈍頭形状が非常に平坦であっても定常な流れ場を得ることができ、単純な鈍頭形状では不安定性を誘起することが困難であることがわかった。実際、衝撃層内の亜音速領域では、音波が介在する不安定性発展が起きにくい状況である。したがって、弧状衝撃波不安定性の発展には鈍頭形状以外の要因が不可欠であるという、不安定性のメカニズム解明に向けた重要な知見が得られた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. 佐藤陽介, 鈴木佑一郎, 保江かな子, 大西直文, 弧状衝撃波不安定性の三次元数値

- 流体解析, 平成 22 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 査読無, 2011, 167-168
2. M. Tate, Y. Ogino and N. Ohnishi, Thermochemical nonequilibrium flow computation of drag reduction by pulsed laser, AIAA Paper, 査読無, 2010, 2010-1535
  3. 鈴木佑一郎, 保江かな子, 大西直文, 弧状衝撃波不安定性の三次元数値流体解析, 第 42 回流体力学講演会/航空宇宙シミュレーション技術シンポジウム 2010 講演論文集, 査読無, 2010, 2E10
  4. K. Kotake, W. Iwakami, N. Ohnishi, and S. Yamada, Stochastic nature of gravitational waves from supernova explosions with standing accretion shock instability, *Astrophysical Journal*, 査読有, 697 巻, 2009, L133-L136
  5. Y. Ogino, N. Ohnishi, S. Taguchi, and K. Sawada, Baroclinic vortex influence on wave drag reduction induced by pulse energy deposition, *Physics of Fluids*, 査読有, 21 巻, 2009, 066102-1-11
  6. W. Iwakami, K. Kotake, N. Ohnishi, S. Yamada and K. Sawada, Effects of rotation on standing accretion shock instability in nonlinear phase for core-collapse supernovae, *Astrophysical Journal*, 査読有, 700 巻, 2009, 232-242
  7. K. Kotake, W. Iwakami, N. Ohnishi, and S. Yamada, Ray-tracing analysis of anisotropic neutrino radiation for estimating gravitational waves in core-collapse supernovae, *Astrophysical Journal*, 査読有, 704 巻, 2009, 951-963
  8. 楯真沙美, 荻野要介, 大西直文, パルスレーザーを用いた衝撃波制御の熱化学非平衡流計算, 第 23 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 査読無, 2009, E8-2

[学会発表] (計 11 件)

1. 佐藤陽介, 鈴木佑一郎, 保江かな子, 大西直文, 弧状衝撃波不安定性の三次元数値流体解析, 平成 22 年度衝撃波シンポジウム, 2011 年 3 月 16 日, 青山学院大学
2. N. Ohnishi et al., Trigger physics of gravitationally collapsing supernova explosion in three-dimension and its model experiments, 3<sup>rd</sup> Japan-France Workshop and School on High Energy Density Science, 2011 年 1 月 10 日, Les Houches, フランス
3. N. Ohnishi et al., Computational study of stationary shock wave toward a laboratory experiment, 52<sup>nd</sup> Annual Meeting of the APS Division of Plasma

- Physics, 2010年11月12日, シカゴ, 米国
4. N. Ohnishi et al., Computational study of shock instability and its application, China-Japan CUP Seminar on Laser Plasma Physics, 2010年10月16日, 上海, 中国
  5. N. Ohnishi et al., Three-dimensional simulation of stationary shock wave instability, ISWI 2010: The Shock and High Strain Rate Properties of Matter, 2010年9月8日, ケンブリッジ, 英国
  6. 鈴木佑一郎, 保江かな子, 大西直文, 弧状衝撃波不安定性の三次元数値流体解析, 第42回流体力学講演会/航空宇宙シミュレーション技術シンポジウム, 2010年6月25日, 米子コンベンションセンター BiG SHiP
  7. N. Ohnishi, W. Iwakami Nakano, K. Kotake, Y. Suzuki, S. Yamada, and H. Takabe, Computational study of standing accretion shock instability in core-collapse supernovae, 8<sup>th</sup> International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics, 2010年3月15-18日, Pasadena, 米国
  8. M. Tate, Y. Ogino, and N. Ohnishi, Thermochemical nonequilibrium flow computation of drag reduction by pulse laser, 48<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Explosion, 2010年1月4-7日, Orlando, 米国
  9. 楯真沙美, 荻野要介, 大西直文, パルスレーザーを用いた衝撃波制御の熱化学非平衡流計算, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009年12月16日-18日, 仙台市
  10. N. Ohnishi, Y. Ogino, M. Tate, W. Iwakami Nakano, K. Kotake, and S. Yamada, Radiation hydrodynamics of explosive phenomena in laboratory and astrophysics, Japan-Korea CFD Workshop 2009, 2009年12月16-17日, 仙台
  11. N. Ohnishi, M. Tate, and Y. Ogino, Computational study of shock wave control by pulse energy deposition, 27<sup>th</sup> International Symposium on Shock Waves, 2009年7月19-24日, St. Petersburg, ロシア

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rhd.mech.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大西 直文 (OHNISHI NAOFUMI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20333859

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：