

令和元年6月18日現在

機関番号：57103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17555

研究課題名(和文)多原子分子気体中の非線型波動に関する拡張された熱力学に基づく解析とその工学的応用

研究課題名(英文)Analysis of non-linear waves in polyatomic gases based on extended thermodynamics and its engineering applications

研究代表者

谷口 茂(Taniguchi, Shigeru)

北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科・准教授

研究者番号：00626880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：多原子分子気体に対する「拡張された熱力学」(ET)理論に基づく非線型波動の解析方法を提案し、以下の成果を得た。

(1) 多原子分子希薄気体中を伝播する強い衝撃波の構造を説明できた。(2) 非線型波動の時間発展の性質を数値的に明らかにした。(3) Sub-shockの形成に関して、従来の予想の反例となるモデルの構築に成功した。(4) 球面衝撃波のET理論に基づく相似解を導出した。(5) 多原子分子混合気体に対するET理論を構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した、「拡張された熱力学」(ET)理論に基づく手法により、従来の理論では解析できなかった、強い非平衡状態にある多原子分子気体中の非線型波動の性質を説明できるようになった。衝撃波が機体周りで発生する航空宇宙工学分野での設計などに新たな指針を与えることができる。

直接の測定が難しい、気体の体積粘性率などの精確な値を求める方法にもつながるため、物性物理・材料工学など他分野のさらなる発展の基礎にもなると期待される。

研究成果の概要(英文)：We proposed a method to analyze non-linear waves in polyatomic gases on the basis of extended thermodynamics (ET) and obtained the following results:

(1) The structure of strong shock waves in a rarefied polyatomic gas was explained quantitatively. (2) Properties of the time evolution of non-linear waves were clarified numerically. (3) Counter examples on the conjecture of the sub-shock formation were successfully constructed. (4) A similarity solution of spherical shock waves was derived on the basis of the ET theory. (5) An extended thermodynamics theory for mixtures of polyatomic gases was developed.

研究分野：数理工学・非線型波動

キーワード：数理工学 非平衡熱・統計力学 多原子分子気体 衝撃波 数値解析 拡張された熱力学 圧縮性流体 混合気体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙船の大気圏突入に代表される極限環境下のマクロ現象から、ナノテクノロジーに代表されるミクロ現象まで、工学はその研究範囲を広げ続けている。そのため、系の代表長さに対して急激な変化をするような強非平衡現象を解析できる数値モデルの構築と、その解析手法の確立が急務となっている。

衝撃波などの非線型波動は、典型的な強非平衡現象であり、その解析は工学応用と基礎理論の妥当性確認の両面で重要である。しかし、従来の Navier-Stokes, Fourier (NSF) 理論では、低マッハ数の弱い衝撃波しか解析することができない。特に、航空宇宙工学などで重要となる、水素気体や二酸化炭素気体中での衝撃波現象は、各分子が持つ内部自由度、すなわち、回転・振動自由度が重要な役割を果たし、NSF 理論の破れが低マッハ数でも顕著となることが実験的に知られている。この問題に対し、現象論の立場からは Bethe-Teller 理論が提案され、気体運動論の立場からボルツマン方程式に基づく数値解析も試みられてきたが、部分的にしか実験結果を説明できていなかった。

研究代表者らは「拡張された熱力学 (ET)」という新しい熱力学理論に注目して研究を行ってきた。単原子分子希薄気体に対する ET 理論は 20 年以上前に完成されていたにも関わらず、多原子分子気体に対する ET 理論については、これまでに構築の成功例はなかった。

本研究課題の開始当初、研究代表者らは、多原子分子気体に対する ET 理論を提案し、超音波や平面垂直衝撃波の解析を通してその有用性を示しつつある段階であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多原子分子気体に対する ET 理論に基づき、非線型波動の解析方法を提案し、強い非平衡状態にある波動の性質を統一的な観点から明らかにすることにあった。この新しい理論によって初めて説明できる現象を詳細に調べ、その工学的応用を目指した。

3. 研究の方法

理論解析と数値解析を統合して解析を行った。研究代表者らによって提案された、多原子分子気体に対する ET 理論に基づいた解析を行うことが本研究の特徴である。新しい理論であるため、独自に開発してきている数値計算プログラムを発展させる形で数値解析を行った。また、混合気体に対する ET 理論の構築など、ET 理論それ自体の研究も進めた。

4. 研究成果

本研究課題で得られた成果は主に以下の 5 点にまとめられる。

(1) 多原子分子希薄気体中の衝撃波構造の解析：

二酸化炭素気体中を伝播する衝撃波構造の解析を行った。特に、高マッハ数の場合特有の変曲点を持つ衝撃波構造や、非平衡温度のオーバーシュートの性質を明確にした。

単原子分子希薄気体極限における衝撃波構造を計算し、多原子分子気体に対する ET 理論が単原子分子気体に対する従来の ET 理論を特別な場合として含むという、理論的考察の裏付けを得るとともに、その漸近挙動を明らかにした。

さらに、ET 理論に基づく理論予測と、本研究課題の成果に触発される形で別グループが独立に行った気体分子運動論に基づく数値計算結果(下記の引用文献)との比較を行い、非常に強い衝撃波に対しても両者の予測がよく一致することを示した。この結果は、本研究課題で提案した手法が、期待通り、強い非平衡現象の解析において有用であることを示している。

(2) 非線型波動の時間発展に関する数値解析：

数値解析プログラムを構築し、並列化した上で大規模な数値解析を行った。まず、リーマン問題の解析を通して、衝撃波、希薄波、接触波の三種類の基本的な非線型波動を同時に解析し、長時間の時間発展に関する従来の予想を十分な精度で検討し、その妥当性を明確にした。この数値解析プログラムは、衝撃波構造の解析でも重要な役割を果たした。

さらに、気体分子の各内部モードのエネルギーの移り変わりを考慮に入れた解析ができるようになった。これにより、レーザーが誘起する衝撃波の発生過程を含む非線型波動の性質を明らかにできつつある。

(3) Sub-shock 形成の解析：

これまで、衝撃波の伝播速度が方程式系の最大の特異速度を超える場合にのみ、不連続面 (sub-shock) が現れるという予想が立てられていた。今回の解析で、ET 理論の要請を満たしつつこの予想に反するトイモデルの構築に成功した。Sub-shock の形成は理論の適用限界と深く関係しているため、この結果は、今後、高マッハ数の衝撃波の構造を調べる上で重要な観点を与えると考えられる。

(4) 球面衝撃波の相似解：

ET 理論が強い衝撃波の理論予測に有用であることが示されたため、点源爆発などで得られる強い球面衝撃波の解析も行った。多原子分子気体に対する ET 理論に基づき、相似解を導出できた。この解は、従来の Sedov-von Neumann-Taylor 解を特別な場合として含み、ET 理論特有の効果を予言できるため、今後、重要な役割を果たすと期待される。

(5) 混合気体に対する ET 理論の発展：

現実世界は混合気体であふれているため、工学的応用を考える上で、混合気体を解析することは極めて重要である。混合気体に対する ET 理論が持つべき数学的な構造を明確にし、最も簡単な場合における場の方程式の導出を行った。得られた方程式系を基礎にして、混合気体中の衝撃波構造の性質が明らかになりつつある。

以上の研究成果に関連して、国際会議の開催、本研究課題の成果を含むレビュー論文の執筆を行い、成果を広く報告した。

< 引用文献 >

Shingo Kosuge and Kazuo Aoki, "Shock-wave structure for a polyatomic gas with large bulk viscosity", Phys. Rev. Fluids, Vol. 3, 023401 (2018).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

Reishi Nagaoka, Shigeru Taniguchi and T. Ruggeri, "Similarity solution of strong spherical shock waves in a rarefied polyatomic gas based on extended thermodynamics", to appear in AIP Conf. Proc. (2019) 査読有.

Tommaso Ruggeri and Shigeru Taniguchi, "Shock waves in hyperbolic systems of non-equilibrium thermodynamics", to appear in a chapter of Applied Wave Mathematics II (Springer, 2019) 査読有.

Shigeru Taniguchi and Tommaso Ruggeri, "A 2×2 simple model in which the sub-shock exists when the shock velocity is slower than the maximum characteristic velocity", Ricerche di Matematica, Vol. 68, pp. 110-129 (2019) 査読有. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11587-018-0380-1>.

Shigeru Taniguchi, Takashi Arima, Tommaso Ruggeri and Masaru Sugiyama, "Shock wave structure in rarefied polyatomic gases with large relaxation time for the dynamic pressure", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1035, 12009 (2018) 査読有. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1035/1/012009>.

Shigeru Taniguchi and Tommaso Ruggeri, "On the sub-shock formation in extended thermodynamics", International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 99, pp. 69-78 (2018) 査読有. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2017.10.024.

Takashi Arima, Tommaso Ruggeri, Masaru Sugiyama and Shigeru Taniguchi, "Galilean invariance and entropy principle for a system of balance laws of mixture type", Rendiconti Lincei - Matematica e Applicazioni, Vol. 28, pp. 498-513 (2017) 査読有. DOI: 10.4171/RLM/773.

[学会発表](計 9 件)

永岡零士、谷口茂、"拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中の球面衝撃波の解析"、日本機械学会九州支部第 72 期総会・講演会、2019.

永岡零士、谷口茂、"多原子分子希薄気体中における球面衝撃波の拡張された熱力学に基づく相似解"、平成 30 年度衝撃波シンポジウム、2019.

谷口茂、Tommaso Ruggeri、"拡張された熱力学における sub-shock 形成"、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018.

谷口茂、Tommaso Ruggeri、"拡張された熱力学における sub-shock 形成の解析"、平成 29 年度衝撃波シンポジウム、2018.

Shigeru Taniguchi and Tommaso Ruggeri, "Sub-shock formation with slower shock velocity than the maximum characteristic velocity", International Conference on Waves and Stability in Continuum Media (招待講演、国際学会), 2017.

Shigeru Taniguchi, "Shock waves in polyatomic gases", Meeting on "Nonequilibrium thermodynamics and statistical physics: From rational modeling to its applications" (国際学会), 2017.

○石橋涼汰、谷口茂、"多原子分子気体の拡張された熱力学に基づく衝撃波管問題の解析"、日本機械学会九州学生会 第 48 回学生員卒業研究発表講演会、2017.

○ Shigeru Taniguchi, Takashi Arima, Tommaso Ruggeri and Masaru Sugiyama, "Non-linear Extended Thermodynamics of Real Gases with Six Fields and Its Application to the Shock Wave Structure", Physically-Based Modeling of Polyatomic Gases and Phase Transitions (招待講演、国際学会), 2016.

○ Takashi Arima, Tommaso Ruggeri, Masaru Sugiyama and Shigeru Taniguchi, "Comparison between extended thermodynamic of rarefied monatomic and polyatomic gases", Physically-Based Modeling of Polyatomic Gases and Phase Transitions (招待講演、国際学会), 2016

〔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://w3-cise.kct.ac.jp/taniguchi/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。