

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：57103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760055

研究課題名(和文) 実在気体中の衝撃波に関する数理・数値手法を融合した解析

研究課題名(英文) Mathematical and numerical analysis of shock waves in real gases

研究代表者

谷口 茂 (Taniguchi, Shigeru)

北九州工業高等専門学校・制御情報工学科・助教

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)：実在気体中の波動現象について理論・数値解析を行い、主に以下の成果を得た。  
(1)多原子分子気体中の超音波および衝撃波を「拡張された熱力学(ET)」理論に基づいて解析し、従来の理論の適用可能範囲を超える強非平衡現象の説明に成功した。特に、(2)多原子分子希薄気体中の衝撃波構造を統一的に解析できる方法を初めて提案した。(3)多原子分子気体に対するET理論自体についても研究を行い、進展させた。

研究成果の概要(英文)：Theoretical and numerical study of waves in real gases was carried out. Main results are summarized as follows: (1) Ultrasonic sounds and shock waves in rarefied polyatomic gases were analyzed based on extended thermodynamics (ET). The highly-nonequilibrium phenomena beyond the validity range of previous theories were successfully explained. (2) The new approach to the shock wave structure was proposed on the basis of the ET theory. This approach enables us to analyze the shock wave structure in rarefied polyatomic gases in a unified way. (3) The ET theory itself was also studied and developed.

研究分野：工学

キーワード：衝撃波工学 実在気体 数理工学 数値解析 非平衡熱・統計力学 拡張された熱力学 非線型波動  
濃密気体

### 1. 研究開始当初の背景

衝撃波研究において、従来は宇宙・航空工学がその主な応用対象であったが、近年ではその応用範囲はさらなる広がりを見せている。例えば、人体内の結石破碎などはすでに実用化がされている。さらには、衝撃圧縮による人工ダイヤモンドの生成などの材料工学分野への応用や、ナノテクノロジーへの応用、バイオテクノロジーや医療面の応用が研究されている。

これらの動向に呼応して、衝撃波が相転移を誘起する場合など、より現実的なモデルに基づく衝撃波の解析は以前よりもはるかに高い精度を求められている。また、衝撃波面近傍の物理量の急激な変化についても詳細に調べる必要があるが、これらを解析するための適切な方法が確立されてはいないという状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、実在気体中の衝撃波現象に関して理論・数値解析を行い、実在気体系特有の性質を定量的に明らかにし、工学応用に資することにある。

加えて、典型的な強い非平衡現象である衝撃波の解析を通じ、従来よりも適用可能範囲が広い非平衡熱力学理論が満たすべき性質を明らかにする。

### 3. 研究の方法

理論および数値解析を統合した手法を採用する。理論解析において「拡張された熱力学 (ET)」理論を採用するのが特徴である。ET 理論は、従来の非平衡熱力学理論では解析できない、強い非平衡現象を解析するために提案されたものである。研究代表者らが、最近、多原子分子希薄気体や濃密気体にまでその適用可能範囲を広げる試みに成功したばかりであるため、最先端の研究課題と位置づけられる。また、衝撃波は典型的な非線型波動であり、その解析には数値手法が重要になる。数値解析プログラムを独自に開発し、解析を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 超音波の解析：

ET 理論の妥当性・有用性を確かめるため、まず、多原子分子希薄気体中の超音波の解析を行った。分散関係を導出し、超音波の位相速度と減衰係数の周波数依存性を求めた。

従来の Navier-Stokes, Fourier (NSF) 理論では説明できない高振動数領域まで、水素気体中の超音波の実験結果を説明することに成功した。特筆すべきことに、分子の回転自由度のみが重要となる低温領域から、回転自由度に加えて振動自由度が重要となる高温領域に至るまで、実験結果を説明できた。

超音波に対する核異性体効果についても明らかにした。

多原子分子希薄気体中の横波音波の可能性についても議論を行い、実験的な観測に必要な条件を明らかにした。

#### (2) 衝撃波構造の解析：

線型波動である超音波の解析を通して ET 理論の有用性が確かめられたので、非線型波動である衝撃波の解析に着手した。具体的には、ET 理論を用いて、多原子分子希薄気体中を伝播する垂直衝撃波の衝撃波構造 (衝撃波面内部の強い非平衡状態における物理量の空間分布) を解析した。

多原子分子希薄気体中では衝撃波構造が定性的に変化し得る。すなわち、マッハ数が 1 から増加するにつれて、衝撃波構造は、対称的な構造 (Type A) から非対称な構造 (Type B) に変化し、さらには厚い層と薄い層の二層からなる構造 (Type C) に変化する。この Type A-C の衝撃波構造を統一的に説明することに初めて成功した。理論予測は二酸化炭素気体中の衝撃波構造の実験データとよく一致している。

希薄な水素気体中の衝撃波構造についても解析を行い、衝撃波構造に対する水素気体の同位体効果を定量的に明らかにした。

非平衡温度の定義によってその空間分布が定性的にも異なりうることを明らかにした。温度のオーバーシュートについては良く知られているが、この現象は非平衡温度の定義によるものだと結論できた。

#### (3) 「拡張された熱力学」理論の発展

衝撃波現象の解析の基礎となる、ET 理論自体に関しても研究を行い、以下の成果を得た。

強い非平衡現象にも適用可能な、非線型構成式を持つ ET 理論の構築に初めて成功した。従来、線型構成式の範囲でしか理論構築ができておらず、この成功は大きな進展であるといえる。

Meixner の緩和現象に対する非平衡熱力学理論と ET 理論の間に成立する厳密な対応関係を導出した。

研究代表者らが提案した多原子分子希薄気体に対する ET 理論は、動圧が存在しない単原子分子希薄気体に対する ET 理論を特別な場合として含むことを示し、理論的問題点を克服した。

(4) 相転移をともなう衝撃波の解析:

最近発見された、新奇的な衝撃波現象 (compressive upper shock) についてさらなる解析を行った。

この衝撃波は、マッハ数が増加するにも関わらず密度が減少するという全く新しい圧縮衝撃波である。この現象を観測するための条件およびその性質について、詳細に解析を行った。

単一衝撃波の安定性に関して、Liu 条件を用いて解析を行い、明確にした。不安定な場合に予言される、衝撃波の分離過程 (shock splitting) についても数値解析を行い、その性質を明らかにした。

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9件)

T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama and S. Taniguchi: "Non-linear extended thermodynamics of real gases with 6 fields" *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 72 (2015) pp. 6-15. 査読有. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2015.02.005.

S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Shock wave structure in a rarefied polyatomic gas based on extended thermodynamics" *Acta Applicandae Mathematicae*, Vol. 132 (2014) pp. 583-593. 査読有. DOI: 10.1007/s10440-014-9931-y.

T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "A study of linear waves based on extended thermodynamics for rarefied polyatomic gases" *Acta Applicandae Mathematicae*, Vol. 132 (2014) pp. 15-25. 査読有. DOI: 10.1007/s10440-014-9888-x.

T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama and S. Taniguchi: "On the six-field model of fluids based on extended thermodynamics" *Meccanica*, Vol. 49 (2014) pp. 2181-2187. 査読有. DOI: 10.1007/s11012-014-9886-0.

S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Thermodynamic theory of the shock wave structure in a rarefied polyatomic gas: Beyond the Bethe-Teller theory", *Phys. Rev. E* Vol. 89 (2014) 013025 (11 pages). 査読有. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.89.013025>.

S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Effect of the dynamic pressure on the shock wave structure in a rarefied polyatomic gas" *Phys. Fluids* Vol. 26 (2014) 016103 (15 pages). 査読有. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4861368>.

T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Dispersion relation for sound in rarefied polyatomic gases based on extended thermodynamics" *Continuum Mechanics and Thermodynamics* Vol. 25 (2013) pp. 727-737. 査読有. DOI: 10.1007/s00161-012-0271-8.

T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Monatomic Rarefied Gas as a Singular Limit of Polyatomic Gas in Extended Thermodynamics" *Phys. Lett. A* Vol. 377 (2013) pp. 2136-2140. 査読有. DOI: 10.1016/j.physleta.2013.06.035.

T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Extended thermodynamics of real gases with dynamic pressure: An extension of Meixner's theory" *Phys. Lett. A*. Vol. 376 (2012) pp. 2799-2803. 査読有. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2012.08.030>.

[学会発表](計29件)

有馬隆司、杉山勝、谷口茂: "拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体の動的構造因子" 日本物理学会第70回年次大会、早稲田大学早稲田キャンパス、2015年3月22日。

谷口茂、杉山勝: "拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中の衝撃波構造 IV: Meixner 理論との関係" 平成26年度衝撃波シンポジウム、群馬県伊香保温泉 ホテル天坊、2015年3月11日。

竹内佑太、竹田宗弘、谷口茂、小石まどか、杉山勝：“拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中の衝撃波構造 V：水素の同位体効果”平成 26 年度衝撃波シンポジウム、群馬県 伊香保温泉 ホテル天坊、2015 年 3 月 10 日。

小石まどか、谷口茂、竹内佑太、竹田宗弘、杉山勝：“拡張された熱力学に基づく希薄水素気体中の衝撃波構造の解析”日本機械学会中国四国支部第 53 期総会・講演会、近畿大学工学部東広島キャンパス、2015 年 3 月 6 日。

T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama and S. Taniguchi: “Nonlinear Extended Thermodynamics of Real Gases with Six Fields. Part I: Universal Principles and Field Equations” Current Problems in Fluid-Dynamics and Non-Equilibrium Thermodynamics, Bressanone (Italy) 2014 年 12 月 19 日。

T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama and S. Taniguchi: “Nonlinear Extended Thermodynamics of Real Gases with Six Fields. Part II: Comparison with the Meixner Theory of Relaxation Processes” Current Problems in Fluid-Dynamics and Non-Equilibrium Thermodynamics, Bressanone (Italy) 2014 年 12 月 19 日。

T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama and S. Taniguchi: “Molecular Extended Thermodynamics of Polyatomic Gases with Many Number of Moments” Current Problems in Fluid-Dynamics and Non-Equilibrium Thermodynamics, Bressanone (Italy) 2014 年 12 月 19 日。

S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri and M. Sugiyama: “Shock waves in rarefied polyatomic gases with large bulk viscosity based on extended thermodynamics” Current Problems in Fluid-Dynamics and Non-Equilibrium Thermodynamics, Bressanone (Italy) 2014 年 12 月 18 日。

谷口茂、有馬隆司、T. Ruggeri、杉山勝：“多原子分子希薄気体中の衝撃波構造に対する動圧の影響”日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、春日井キャンパス、2014 年 9 月 7 日。

谷口茂、有馬隆司、T. Ruggeri、杉山勝：“多原子分子気体に対する「拡張された熱力学」理論とそれに基づく衝撃波構造の解析”第 12 回日本流体力学会中国四国・九州支部講演会、九州大学、伊都キャンパス、2014 年 6 月 21 日。

有馬隆司、谷口茂、杉山勝：“拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中を伝播する縦波 II”日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学、湘南キャンパス、2014 年 3 月 28 日。

谷口茂、有馬隆司、杉山勝：“拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中の衝撃波構造 I：14 変数理論”平成 25 年度衝撃波シンポジウム、青山学院大学、相模原キャンパス、2014 年 3 月 6 日。

有馬隆司、谷口茂、杉山勝：“拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中の衝撃波構造 II：6 変数理論”平成 25 年度衝撃波シンポジウム、青山学院大学、相模原キャンパス、2014 年 3 月 6 日。

服部拓麻、谷口茂、有馬隆司、杉山勝：“拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中の衝撃波構造 III：緩和過程”平成 25 年度衝撃波シンポジウム、青山学院大学、相模原キャンパス、2014 年 3 月 6 日。

谷口茂：“「拡張された熱力学」理論の多原子分子希薄気体中の衝撃波構造への応用”第七回紀州吉宗セミナー、和歌山大学、2014 年 2 月 14 日。

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衝撃波構造”第 79 回現象数理セミナー、九州大学、伊都キャンパス、2014 年 2 月 3 日。

T. Arima, S. Taniguchi and M. Sugiyama: “Light scattering in Rarefied Polyatomic Gases Based on Extended Thermodynamics”第 34 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、同志社大学、2013 年 11 月 20 日。

谷口茂、有馬隆司、杉山勝、T. Ruggeri: “希薄な二酸化炭素気体中の衝撃波構造に関する「拡張された熱力学」を用いた解析”日本物理学会第 2013 年秋季大会、徳島大学、2013 年 9 月 26 日。

- S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Shock structures and sub shocks in rarefied polyatomic gases based on extended thermodynamics" International Conference on Waves and Stability in Continuum Mechanics, Levico TN (Italy) 2013年6月18日.
- T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Propagation of Linear Waves in Rarefied Polyatomic Gases Based on Extended Thermodynamics" International Conference on Waves and Stability in Continuum Mechanics, Levico TN (Italy) 2013年6月18日.
- 21 M. Sugiyama, T. Arima, S. Taniguchi and T. Ruggeri: "Extended Thermodynamics of Dense Gases: Review of Its Recent Developments" International Conference on Waves and Stability in Continuum Mechanics, Levico TN (Italy) 2013年6月18日.
- 22 M. Sugiyama, T. Arima, S. Taniguchi and T. Ruggeri: "Dense-Gas Model Based on Extended Thermodynamics" 4th International Conference on New Trends in Fluid and Solid Models, Salerno (Italy) 2013年4月5日.
- 23 谷口茂: "実在気体における新しい種類の衝撃波: Compressive upper shock II" 日本物理学会第68回年次大会、広島大学、東広島キャンパス、2013年3月27日.
- 24 有馬隆司、水野葉子、谷口茂、杉山勝: "拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中を伝播する縦波と横波の解析" 日本物理学会第68回年次大会、広島大学、東広島キャンパス、2013年3月27日.
- 25 谷口茂: "実在気体における新しい種類の衝撃波: Compressive upper shock II" 平成24年度衝撃波シンポジウム、北九州国際会議場(小倉)、2013年3月14日.
- 26 T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri and M. Sugiyama: "Propagation of Sound Wave in Rarefied Polyatomic Gases Based on Extended Thermodynamics I. Longitudinal Wave" 第33回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、千葉大学、2012年11月15日.
- 27 Y. Mizuno, T. Arima, S. Taniguchi and M. Sugiyama: "Propagation of Sound Wave in Rarefied Polyatomic Gases Based on Extended Thermodynamics II. Transverse Wave" 第33回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、千葉大学、2012年11月15日.
- 28 M. Sugiyama, T. Arima, S. Taniguchi and T. Ruggeri: "Extended Thermodynamics of Dense Gases: Theory and Its Application" The 6th China-Italy Colloquium on Applied Mathematics, Shanghai (China) 2012年10月24日.
- 29 S. Taniguchi: "Shock-induced phase transitions in systems of hard spheres with attractive interactions" XXXVII Summer School on Mathematical Physics, Ravello (Italy) 2012年9月26日.
- [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]  
なし
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
谷口茂 (TANIGUCHI Shigeru)  
北九州工業高等専門学校・  
制御情報工学科・助教  
研究者番号: 00626880
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし