

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 28 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390150

研究課題名(和文) 実在気体中の衝撃波に関する数理工学的研究とその工学的応用

研究課題名(英文) Theoretical and numerical study of shock waves in real gases and its applications to engineering

研究代表者

杉山 勝 (SUGIYAMA, Masaru)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20110257

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：実在気体中の衝撃波現象を、ミクロからマクロレベルまでの一貫した観点から、数理工学的に研究した。理論的基礎として拡張された熱力学理論を新たに構築した。(1) 衝撃波内部での強い熱的非平衡状態の熱・力学的特性を明確にした。(2) 衝撃波により誘起される気体・液体相転移現象の特徴を研究した。(3) ミクロレベルでの衝撃波現象を解析するため、拡張された熱力学に基づく流体力学的揺らぎ理論を確立し、その数値解析を試みた。

研究成果の概要(英文)：Theoretical and numerical study of shock wave phenomena in real gases has been made in a unified point of view from microscopic to macroscopic levels. A new extended thermodynamics theory was established as a theoretical basis of the present study. (1) Thermal and mechanical properties of highly nonequilibrium states in the shock wave structure have been clarified. (2) Characteristic features of the gas-liquid phase transition induced by a shock wave have been studied. (3) In order to analyze the shock wave phenomena on the microscopic level, a fluctuating hydrodynamics theory based on extended thermodynamics has been established. Numerical method of the theory has also been explored.

研究分野：数理工学、熱・統計力学、連続体力学

キーワード：数理工学 衝撃波 衝撃波面構造 非平衡物理 圧縮性流体 多原子分子気体 国際研究者交流 イタリア

1. 研究開始当初の背景

気体中の衝撃波についての理論的研究は、従来、理想気体モデルを採用したものが多数を占めてきた。理想気体モデルは気体が十分希薄な場合にのみ適用可能である。一方、実在気体、すなわち理想気体モデルでは扱えない現実的な気体の中を伝播する衝撃波の研究は、基礎的あるいは応用的に極めて重要であるにもかかわらず、研究すべき事項が多く残されてきた。

しかし、近年、種々の計測技術の発展と産業・医療応用などの可能性の拡大、あるいはナノテクノロジーの急速な発展により、実在気体中の衝撃波の研究を進める必要性が高まってきた。この研究を進展させるためには、必然的に、マルチ・スケールの視点から衝撃波現象を総合的・学際的に解析することになる。特に、この現象に対する数理工学的研究が強く求められている。

2. 研究の目的

実在気体中の衝撃波を、ミクロレベルからマクロレベルまで統一的観点から、数理工学的に研究する。すなわち、以下の研究項目(1) - (3)を、理論解析および数値解析を統合して研究する。

(1) 衝撃波面内部での強い熱的非平衡状態を熱・力学的特性を明確にし、衝撃波の構造を理解する。実在気体の典型的モデルとして、内部自由度がある剛体球分子からなる気体系と引力的相互作用を含むより一般的な分子間相互作用を考慮に入れた気体系を採用する。さらに、この非平衡現象を適切に記述できる理論として、多原子分子(複数の原子から成る分子)気体にたいする「拡張された熱力学」(Extended Thermodynamics)を整備する。

(2) 衝撃波により誘起される相転移現象(主として気体から液体への相転移)の熱・統計力学的研究を進展させる。特に、濃密気体にたいする拡張された熱力学を整備する。

(3) 微細流路などにおけるナノ流れではゆらぎの効果が無視できないが、そこで発生するミクロレベルでの衝撃波構造を、熱・統計力学理論および数値解析により研究し、その工学的応用を探求する。

3. 研究の方法

理論と数値解析を有機的に統一した数理工学的手法を採用する。理論は、主として、双曲型偏微分方程式論、連続体力学および熱・統計力学である。とりわけ拡張された熱力学と呼ばれる非平衡熱力学理論とボルツマン方程式に基づく気体分子運動論が重要となる。数値解析としては、バランス型方程式からなる双曲型偏微分方程式系を、近似の精度を上げるために特別に工夫された数値

解析手法を開発することにより、取り扱う。

4. 研究成果

(1) 衝撃波内部での強い熱的非平衡状態の熱・力学的特性を明確にするための研究を行った。特に、多原子分子気体中の衝撃波の内部構造(衝撃波構造)は、分子の内部運動(分子の回転や分子内振動)に強く依存し、マッハ数の変化により特異な挙動を示すことが実験的に知られている。このような挙動の詳細な解析を行った。得られて結果は以下の通りである。

衝撃波構造の研究において、今まで、ナビエ・ストークス・フーリエ理論と呼ばれる流体力学理論が主に用いられてきた。しかし、この理論は、「不可逆過程の熱力学」といわれる非平衡熱力学理論の特別なものであり、衝撃波内部のような強い熱的非平衡状態を記述するには不十分である。そのため、本研究では、強い熱的非平衡状態にも適用可能な「拡張された熱力学」を採用することとした。ただ、本研究開始当初には、拡張された熱力学は希薄・単原子分子気体の場合にのみ確立されていた。そこで、本研究において、まず希薄・多原子分子気体にも適用可能な拡張された熱力学を構築した。この理論の特徴は、二つの階層構造をもつバランス方程式系を採用していることである。希薄単原子分子気体の場合は、一つの階層構造しかもっていない。

希薄・単原子分子気体の拡張された熱力学理論と希薄・多原子分子気体のそれとの関係を明確にした。分子運動を凍結した極限において、後者は前者に、特異極限として、漸近することが証明された。これにより、従来までの希薄・単原子分子気体の拡張された熱力学理論は、本研究で確立された希薄・多原子分子気体の拡張された熱力学理論の特別な場合として包含されることがわかった。

以上のように構築された拡張された熱力学理論を用いて、希薄・多原子分子気体中の線型波動(超音波)を理論的に解析した。得られた分散曲線と減衰曲線は、高振動数の超音波領域まで、実験結果を忠実に再現した。この結果は、拡張された熱力学が、確かに、ナビエ・ストークス・フーリエ理論よりも適用範囲が広く、強い熱的非平衡状態にも妥当であることを明瞭に示している。また、希薄・多原子分子気体における不可逆過程においては、分子の並進運動と内部運動とのエネルギー交換が本質的に重要な役割を演じていることがわかった。これに関連して、多原子分子気体中の不可逆過程において、その体積粘性率が異常に大きくなる場合がありうることを見出した。この事実は、動圧(非平衡圧力)の本質的に重要性を示すものである。

拡張された熱力学理論を用いて、希薄・多原子分子気体中の衝撃波構造を理論的および数値的に解析した。マッハ数が、1 から次第に増加していくと、衝撃波は、ほぼ対称的

な波形 (Type A) から非対称な波形 (Type B) へと移り変わる。更にマッハ数を増大させると、急激に変化する部分 (サブショック) Δ とゆっくりと変化する部分 Ψ とをもつ複雑な波形 (Type C) へと移行する。

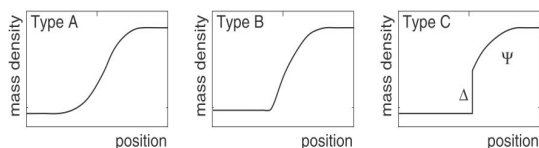


図1 衝撃波構造

このような特異な挙動は、20世紀半ば頃から実験的によく知られていたが、これを部分的に説明する理論しかなかった。本研究において、拡張された熱力学がこの挙動の全体を首尾一貫した形で説明できることを、初めて明確にした。理論的予測と実験結果との比較も定量的に十分に満足いくものである。多原子分子気体中の衝撃波構造の詳細は、たとえば宇宙往還機が惑星の大気 (多原子分子気体から成る) に突入するときの基礎的情報として、往還機設計時などで極めて重要になるであろう。今後のさらなる研究が大いに期待できる。

上記の解析においては、14の独立変数をもつ拡張された熱力学理論と6つの独立変数をもつ理論を採用した。後者は前者の簡略版であるが、多原子分子気体の体積粘性率がせん断粘性率や熱伝導率よりも大きい効果をもつ場合、超音波や衝撃波の解析に非常に有用な理論であることが具体例を解析することにより示された。6変数理論のほうが14変数理論よりもその取り扱いが格段に容易であるため、この事実は応用上も重要である。また、一つの内部変数を持った非平衡熱力学理論として、マイクスナー理論がよく知られているが、6変数の拡張された熱力学理論はマイクスナー理論と1対1の対応関係があることが証明された。この事実は、拡張された熱力学理論の妥当性を別の視点から支持するものである。さらに、6変数理論は数理工学的な側面からも興味がある。すなわち、この理論は、流体に対する最も簡単な理論、すなわちオイラー理論 (粘性が無視できる完全流体の理論) の次に簡単なものであり、粘性の効果を入れた理論としては最も簡単な理論となっている。この理由により、現在、双曲型偏微分方程式を研究する数学者たちからも注目されている。今後、このような数理工学からの研究も重要となるであろう。

マッハ数が大きくなると衝撃波内部での非平衡の度合いがよくなっていく。このような非常に強い非平衡状態の場合にも適用可能な非線型構成式をもつ拡張された熱力学理論もあわせて構築した。拡張された熱力学において、厳密な非線型理論はこれが最初

である。この理論を用いることにより、衝撃波構造でサブショック後に現れるゆっくりとした緩和過程の非線型効果を詳細に調べることができた。特に、サブショック後に現れる非平衡温度のオーバーシュートについて興味ある結果を得た。すなわち、非平衡温度としてマイクスナーの意味での温度を採用するとオーバーシュートが現れることがありうるが、運動論的な非平衡温度を採用するとオーバーシュートは決して現れないことが示された。この事実は、実験データを整理するとき、非平衡温度としてどの定義を採用するか細心の注意を払わねばならないことを示している。

(2) 衝撃波により誘起される相転移現象 (気体から液体への相転移) の熱・統計力学的解析を行った。

この研究を遂行するためには、希薄気体とは違って、質量密度が大きい気体にも適用できる拡張された熱力学理論を構築する必要がある。現時点でその構築がほぼ終了し、論文として近々公表する。

この濃密気体の拡張された理論を具体的な気体モデル、たとえばファン・デル・ワールス気体に適用し、予備的な解析を開始した。その結果、特別な状況下では膨張性の衝撃波が存在しうることを示すことができる。今後、この理論の特徴を深く理解すると同時に、その工学的な応用も検討する必要がある。理論的・応用的に大きな発展が期待できる。

(3) 微細流路におけるナノ流れでは流体のゆらぎの効果が無視できないが、そこで発生するマイクロレベルでの衝撃波現象を解析するための理論的枠組みを、拡張された熱力学にランダム力の効果を付け加えることにより構築した。この理論は、有名なランダウ・リフシッツの流体力学的ゆらぎ理論の拡張になっている。さらに、上で述べたように、衝撃波現象で重要となる、気体の体積粘性率の微視的起源を、熱的ゆらぎ理論を用いることにより明らかにした。この結果も論文として公表準備中である。今後の発展が大いに期待できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計16件)

S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama: Overshoot of the non-equilibrium temperature in the shock wave structure of a rarefied polyatomic gas subject to the dynamic pressure, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 79, 2016, 66-75, 査読有. [URL:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2015.11.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2015.11.003)

M. C. Cristina, S. Pennisi, T. Ruggeri,

M. Sugiyama: Extended thermodynamics of dense gases in the presence of dynamic pressure, *Ricerche di Matematica*, Vol. 64, 2015, 403-419, 査読有.

DOI:10.1007/s11587-015-0247-7

T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama, S. Taniguchi: Non-linear extended thermodynamics of real gases with 6 fields, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 72, 2015, 6-15, 査読有.

URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2015.02.0035>

T. Ruggeri, M. Sugiyama: Recent developments in extended thermodynamics of dense and rarefied polyatomic gases, *Acta Appl Math*, Vol. 132, 2014, 527-548, 査読有.

DOI:10.1007/s10440-014-9923-y

T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri, M. Sugiyama: On the six-field model of fluids based on extended thermodynamics, *Meccanica*, Vol. 49, 2014, 2181-2187, 査読有.

DOI:10.1007/s11012-014-9886-0

S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama: Effect of the dynamic pressure on the shock wave structure in a rarefied polyatomic gas, *Physics of Fluids*, Vol.26, 2014, 016103 (15 pages), 査読有.

URL:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4861368>

S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama: Thermodynamic theory of the shock wave structure in a rarefied polyatomic gas: Beyond the Bethe-Teller theory, *Physical Review E*, Vol. 89, 013025 (11 pages), 査読有.

DOI:10.1103/PhysRevE.89.013025

T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri, M. Sugiyama: Monatomic rarefied gas as a singular limit of polyatomic gas in extended thermodynamics, *Physics Letters A*, Vol. 377, 2013, 2136-2140, 査読有.

URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2013.06.035>

[学会発表](計28件)

T. Arima, T. Ruggeri, M. Sugiyama, S. Taniguchi: Nonlinear extended thermodynamics of real gases with six fields, Part I: Macroscopic theory and its

comparison with the Meixner theory. International Conference on Waves and Stability in Continuum Mechanics (WASCOM2015), 4th June 2015, Cetraro (Italy) (招待講演)

S. Taniguchi, T. Arima, T. Ruggeri, 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, 18th December 2014, Bressanone (Italy) (招待講演)

M. Sugiyama: Extended thermodynamics of polyatomic gases and its applications to shock waves. Conference of the International Society of the Interaction of Mechanics and Mathematics, 11th September 2014, Poitiers (France) (招待講演)

M. Sugiyama, T. Arima, T. Ruggeri, S. Taniguchi: Dense-gas model based on extended thermodynamics. 4th International Conference on New Trends in Fluid and Solid Models, 5th April 2013, Salerno (Italy) (招待講演)

[図書](計1件)

T. Ruggeri and M. Sugiyama, Springer, Rational Extended Thermodynamics beyond the Monatomic Gas, 2015, XXIV, 376 pages.

DOI: 10.1007/978-3-319-13341-6

[その他]

名古屋工業大学研究者データベースシステム:

http://researcher.nitech.ac.jp/html/104_ja.html?l=ja&k=&o=title-a&p=4

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 勝 (SUGIYAMA, Masaru)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20110257

(2) 海外共同研究者

RUGGERI, Tommaso: University of Bologna, Italy, Prof.

MENTRELLI, Andrea: University of Bologna, Italy, Assistant Prof.

趙 南蓉 (ZHAO, Nanrong): 中国・四川大学・理学部・教授