

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：57103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04204

研究課題名（和文）Sub-shockをともなう衝撃波の拡張された熱力学に基づく解析

研究課題名（英文）Analysis of shock waves with sub-shocks based on rational extended thermodynamics

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） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：不連続面（sub-shock）をともなう強い衝撃波に着目し、「拡張された熱力学（ET）」理論に基づいて解析を行った。

- (1) 多原子分子気体中を伝播する球面・円筒衝撃波について、ET理論に基づく新たな相似解を導出した。さらに、球面・円筒衝撃波の時間発展について、強さを系統的に変化させた数値計算で性質を明らかにした。
- (2) 多原子分子混合気体中を伝播する衝撃波の破面近傍の構造について、新しいsub-shock形成のシナリオを発見し、sub-shock形成のパラメータ依存性の完全な分類に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

拡張された熱力学（ET）理論に基づく解析により、レーザー照射や爆発などによって生じる球面衝撃波や円筒衝撃波について、従来のSedov-von Neumann-Taylor解を特別な場合として含むより広い理論的枠組みを提案できた。

多原子分子混合気体中のsub-shockをともなう衝撃波構造の解析においては、理論予測と実験結果の比較を行うことにより、体積粘性率や気体間の相互作用の強さを表す物性値などの測定が難しい量の正確な評価につながり、気体分子運動論や物性理論の発展にも寄与するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：We have analyzed strong shock waves with discontinuities (sub-shocks) based on the Extended Thermodynamics (ET) theory.

- (1) For spherical and cylindrical shock waves propagating in polyatomic gases, we derived new similarity solutions based on the ET theory. Furthermore, we clarified the properties of the time evolution of spherical and cylindrical shock waves through numerical calculations.
- (2) Concerning the structure near the shock front of shock waves propagating in a binary mixture of polyatomic gases, we discovered a new scenario for sub-shock formation and successfully achieved a complete classification of the parameter dependence of the sub-shock formation.

研究分野：衝撃波工学、非平衡熱力学、数理工学

キーワード：衝撃波工学 非平衡熱・統計力学 sub-shock 拡張された熱力学 多原子分子気体 混合気体 球面衝撃波 円筒衝撃波

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

「拡張された熱力学 (ET)」は、散逸に関する物理量も独立変数として採用する理論であり、局所的熱平衡の仮定に基づく「不可逆過程の熱力学」よりも広い適用範囲を持つため、従来の Navier-Stokes, Fourier (NSF) 理論などの問題点を克服できる有望な理論の一つである。この ET 理論の有用性は、超音波や衝撃波の解析を通して示されてきた。

ET 理論において、基礎方程式となる場の方程式系は、双曲型のバランス方程式系として得られるため、ET 理論に基づく衝撃波構造の解は常に連続となるわけではなく、衝撃波の速度がある臨界値よりも大きいときには、不連続面 (sub-shock) が現れる。

従来の解釈では、この sub-shock が形成されることは理論の適用限界を超えたことを意味すると考えられてきた。しかしながら、薄い層と厚い層の二層構造となる多原子分子希薄気体中の衝撃波構造に関して、多変数の ET 理論で予測される薄い層の中の急激な変化が、より少ない変数の ET 理論の解像度では sub-shock として記述されることが、研究代表者らの最近の研究で示された。したがって、この場合、sub-shock は物理的な意味を持つことになり、これまであまり取り上げられなかった、sub-shock をともなう衝撃波構造の解を解析することが重要になってきていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでに十分な解析がなされてこなかった sub-shock をともなう強い衝撃波を ET 理論に基づいて解析することにより、その性質を明らかにし、得られた知見を工学的に応用することにあつた。

3. 研究の方法

本研究課題では、理論計算と数値計算の両面から解析を進めた。sub-shock が形成されるような強い衝撃波の解析方法は発展途上の段階であり、適切な解析手法から考える必要がある点が理論計算の特色である。加えて、ET 理論に基づくバランス方程式系の解法は通常の流れ計算ソルバーには実装されていないため、研究代表者が独自に開発してきている数値計算コードを本研究課題の問題に応用する形で研究を進めた点が数値計算の特色である。

4. 研究成果

(1) 球面・円筒衝撃波の包括的な解析

レーザー照射や爆発などによって生じる、球面衝撃波および円筒衝撃波の解析を行った。

- ① 多原子分子気体に対する ET 理論に基づき、相似解を記述する方程式系を導出した。さらに導出した方程式系を数値的に解析することで相似解の性質を明らかにした。新たに得られた相似解は、Euler 方程式系に基づく従来の Sedov-von Neumann-Taylor (SvNT) 解を特別な場合として含んでおり、動圧の影響を考慮に入れてより精密にしたものと位置づけられる。ET 理論に基づく相似解と SvNT 解の比較を図 1 に示す。本解析により、動圧が球面衝撃波や円筒衝撃波の構造に大きな影響を与え得ることを定量的に示した。

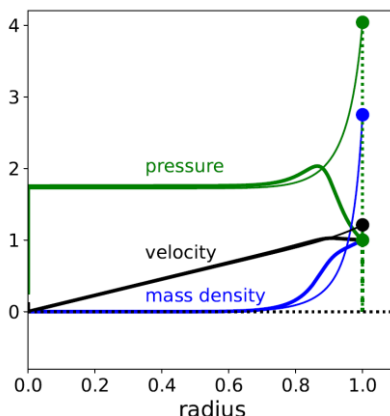


図 1. ET 理論に基づく相似解 (太線) と SvNT 解 (細線) の一例

- ② 本研究課題で開発した数値計算コードを用いて、球面・円筒衝撃波の時間発展を引き続き解析した。非常に強い爆発から、相似解の前提となる、「非常に強い衝撃波」の仮定が成り立たなくなるようなそれほど強くない爆発まで系統的に解析し、従来の SvNT 解と異なる振る舞いが予測される条件を明確にした。また、球面・円筒・平面衝撃波の解析結果の比較を行うことで、次元性の影響を定量的に明らかにした。

(2) 多原子分子混合気体中の sub-shock 形成の解析

体積粘性率が大きい一種の多原子分子気体中の衝撃波構造の解析において、sub-shock が重要な役割を果たすことが示されていた。混合気体中では原理的にはそれぞれの気体で sub-shock が生じるため、より複雑な性質を示す。本課題ではその sub-shock 形成の性質を詳細に解析した。

- ① まず、二種の多原子分子混合気体中を伝播する衝撃波の破面近傍の構造について、それぞれの気体が Euler 方程式系に従う場合の解析を行った。新しい sub-shock 形成のシナリオを発見し、sub-shock 形成のパラメータ依存性の完全な分類に成功した。分類した結果の一例を図 2 に示す。この図から分かるように、パラメータのわずかな変化が sub-shock 形成の可能性に大きく影響することを示した。

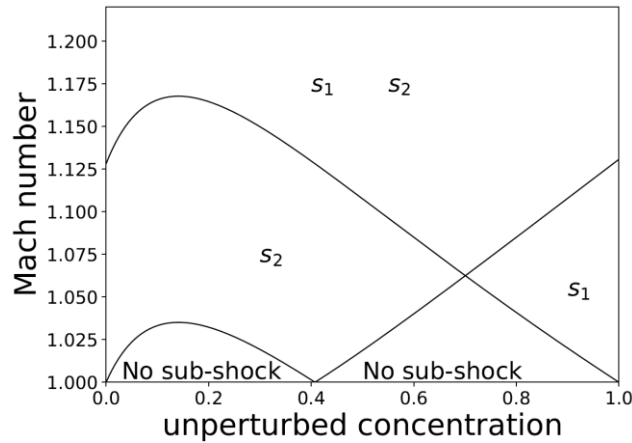


図 2. 衝撃波通過前の状態における濃度とマッハ数で整理した、Sub-shock 形成の分類結果の一例。図中の s_1 および s_2 は、それぞれ、気体 1 および気体 2 で sub-shock が形成されるための条件を満たしていることを示している。

- ② 多原子分子混合気体中を伝播する衝撃波の破面近傍の構造について、それぞれの気体が ET 理論に従う場合の解析も進めた。この理論は、多原子分子気体の体積粘性率が大きな場合に特に有効になると考えられる。①の Euler 方程式系で発見された新たなシナリオに着目しながら sub-shock 形成のパラメータ依存性を完全に分類した。Euler 方程式系の分類と比較することで、sub-shock 形成に動圧が与える影響を明確にした。衝撃波構造の理論予測の一例を図 3 に示す。動圧が存在することにより、衝撃波構造がより厚く、なめらかになることが分かった。

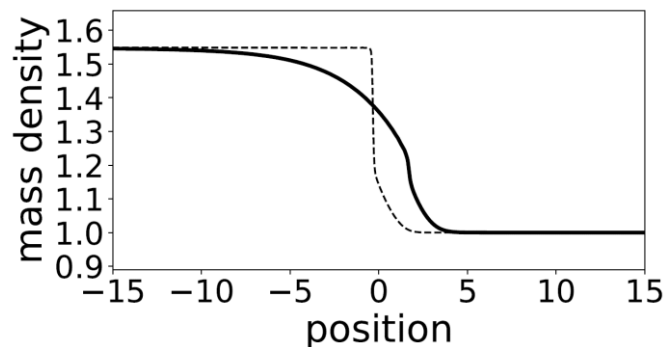


図 3. ET 理論に基づく衝撃波構造の理論予測（実線）と Euler 方程式系に基づく衝撃波構造の理論予測（点線）の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ruggeri Tommaso, Taniguchi Shigeru	4. 巻 73
2. 論文標題 Shock structure and sub-shocks formation in a mixture of polyatomic gases with large bulk viscosity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ricerche di Matematica	6. 最初と最後の頁 261 ~ 274
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11587-023-00788-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ruggeri Tommaso, Taniguchi Shigeru	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Dynamic Pressure on the Shock Structure and Sub-shock Formation in a Mixture of Polyatomic Gases	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications on Applied Mathematics and Computation	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42967-023-00320-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Tommaso Ruggeri, Shigeru Taniguchi	4. 巻 34
2. 論文標題 A complete classification of sub-shocks in the shock structure of a binary mixture of Eulerian gases with different degrees of freedom	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 066116 ~ 066116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0094835	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tommaso Ruggeri, Shigeru Taniguchi	4. 巻 32
2. 論文標題 Sub-shock formation in shock structure of a binary mixture of polyatomic gases	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Rendiconti Lincei - Matematica e Applicazioni	6. 最初と最後の頁 167 ~ 179
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4171/RLM/932	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shigeru Taniguchi	4. 巻 70
2. 論文標題 Effect of the dynamic pressure on the similarity solution of cylindrical shock waves in a rarefied polyatomic gas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ricerche di Matematica	6. 最初と最後の頁 195 ~ 206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11587-020-00505-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 地曳結衣、谷口茂
2. 発表標題 多原子分子気体中の円筒および球面衝撃波の拡張された熱力学に基づく数値解析
3. 学会等名 2023年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松本悠、谷口茂
2. 発表標題 混合気体中におけるサブショック形成の条件に基づく衝撃波構造の分類
3. 学会等名 2023年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松本悠、谷口茂
2. 発表標題 サブショック形成の条件に基づく混合気体中の衝撃波構造の分類
3. 学会等名 第129回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tommaso Ruggeri, OShigeru Taniguchi
2. 発表標題 Shock structure and sub-shocks formation in a binary mixture of polyatomic gases based on rational extended thermodynamics
3. 学会等名 XXII International Conference on Waves and Stability in Continuous Media (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tommaso Ruggeri, Shigeru Taniguchi
2. 発表標題 Sub-Shocks formation in the Shock Structure of Hyperbolic Systems with a convex extension with an application to a Binary Mixture of Gases
3. 学会等名 XXI International Conference on Waves and Stability in Continuous Media (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山北暖人、谷口茂
2. 発表標題 拡張された熱力学に基づく多原子分子気体中を伝播する衝撃波の次元性による影響
3. 学会等名 日本機械学会 第100期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 常盤 俊介、谷口 茂
2. 発表標題 混合気体中を伝播する超音波の分散関係における動圧の影響
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会 第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口茂
2. 発表標題 多原子分子気体中を伝播する円筒衝撃波の相似解に対する動圧の影響
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶川拓海, 谷口茂
2. 発表標題 混合気体中を伝播する超音波の拡張された熱力学に基づく解析
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山北 暖人, 谷口茂
2. 発表標題 多原子分子気体中を伝播する球面衝撃波の拡張された熱力学に基づく数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigeru Taniguchi and Tommaso Ruggeri
2. 発表標題 On the similarity solution of strong spherical shock waves based on extended thermodynamics
3. 学会等名 XX International Conference on Waves and Stability in Continuum Media (Maiori, Italy) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北九州高専谷口研究室ホームページ
<https://taniguchi.apps.kct.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
イタリア	ボローニャ大学	メッシーナ大学	パルマ大学