

# Dense Gas Theory and Fluctuating Hydrodynamics Based on Extended Thermodynamics

著者(英)	Takashi Arima
学位名	博士(工学)
学位授与番号	13903甲第890号
学位授与年月日	2013-03-23
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1476/00003030/">http://id.nii.ac.jp/1476/00003030/</a>

氏名	アリマ タカシ 有馬 隆司
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第890号
学位授与の日付	平成25年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Dense Gas Theory and Fluctuating Hydrodynamics Based on Extended Thermodynamics (拡張された熱力学に基づく濃密気体理論と流体力学的ゆらぎ理論)
論文審査委員	主査 教授 杉山 勝 教授 後藤 俊幸 教授 高橋 聡 教授 尾形 修司

## 論文内容の要旨

現代工学および科学において、物理量の時間・空間的变化が急激な「強い非平衡」現象の解析は、喫緊の課題である。例えば、メゾスコピックなスケールでの熱流体现象、高速流体力学における衝撃波現象、および超音波現象が挙げられる。特に、メゾスコピックな系に対しては、「ゆらぎ」の効果も本質的に重要になる。これらの現象に対して、熱力学の立場からの研究が進展している。

強い非平衡現象に対して、「拡張された熱力学 (ET)」理論が近年 I. Müller によって提唱された。さらに、Müller を始め、T. Ruggeri や I. S. Liu により、理論の整備・応用が進んでいる。この理論は、L. Onsager、C. Eckart、J. Meixner や I. Prigogine らによる、従来広く知られている「不可逆過程の熱力学 (TIP)」の適用範囲を超えた強い非平衡現象に適用可能である。ゆらぎを含んだ現象に対しては、L. D. Landau と E. M. Lifshitz による TIP に基づく「流体力学的ゆらぎ理論」の発展が近年著しい。ただし、ET および流体力学的ゆらぎ理論には以下のような困難がある。

- ET で得られた具体的成果は主に希薄気体に限られている。
- 「ゆらぎ」と「強い非平衡現象」を同時に考慮した理論はこれまで構築されていない。

本論文では、E Tの適用範囲を多原子分子希薄気体、単原子分子濃密気体および多原子分子濃密気体にまで拡張し、その特徴を調べた。特に、多原子分子希薄気体に対し、理論の妥当性を音波の分散関係の実験結果との比較から示した。また、E Tを基礎としたゆらぎを含んだ強い非平衡現象に適用可能な熱力学理論を構築した。

本論文は全体で6章よりなる。

1章では、背景と目的を述べる。非平衡現象に対するこれまでの研究を、その位置付けを明確にしながらか概観する。特に、T I P、気体分子運動論からのアプローチについて要約する。さらに、拡張された熱力学の考え方および数学的な構造を紹介する。

2章では、従来のE Tとは異なるバランス方程式の構造を採用することで、多原子分子希薄気体、単原子・多原子分子濃密気体に適用可能なE T理論を構築する。この理論は、14個の場の量：質量密度、運動量、エネルギー、粘性応力、動圧、熱流を独立変数として採る。得られた構成式は、熱的・熱量的状態方程式によって決定することが出来る。ただし、実験的・数値的に決定すべき緩和時間を含む。また、希薄気体への極限の考察から得られる多原子分子希薄気体の場の方程式は、気体分子運動論と整合性があることが示される。最後に物理的に重要な系である、状態方程式としてビリアル方程式を用いた系、剛体球系、van der Waals 流体への応用を考える。

3章では、2章で提案した新しい理論の検証を行う。この理論に基づいて多原子分子希薄気体（水素、重水素、重水素化水素）中を伝播する音波の分散関係を調べる。得られた関係を実験やT I Pに基づく Navier-Stokes Fourier 理論 (NSF) からのものと比較する。その結果、NSFによる理論予測が実験からずれるような高振動数領域でも、E Tによる理論予測が実験をうまく再現できることが示される。また、体積粘性率と緩和時間の見積もりを行う。特に、水素・重水素において、動圧に関連する緩和時間が粘性応力・熱流に関連する緩和時間よりも非常に大きな値を持つことが明らかになる。

4章では、新しいE T理論に基づいて、分子の並進モードから内部モードへのエネルギー変換に着目した理論について論じる。そこで、散逸的な流束として動圧のみを考慮した6変数のE T理論を提案する。これは従来知られている Meixner 理論の拡張とみなせるものである。さらに、線型波動の分散関係を導出し、Meixner 理論と比較した。また、気体分子運動論の観点からも理論の妥当性が示される。

5章では、ゆらぎの効果が本質的となるメソスコピックスケールの現象を記述するために、E T理論に基づいた流体力学的ゆらぎ理論を構築する。まず、典型例として単原子分子希薄気体に対する13変数のE Tを扱う。また、Landau-Lifshitz 理論 (LL) との比較を行い、流体力学的ゆらぎの階層構造について議論する。特に、粗視化の極限で、E Tの解像度から見たゆらぎがLLの解像度で見たゆらぎに一致することを示す。

最後に6章では、全体のまとめを論じ、将来展望を述べる。

## 論文審査結果の要旨

本博士論文において、濃密気体における非平衡熱力学理論と流体力学的ゆらぎ理論が、「拡張された熱力学」に基づいて、統一的に研究されている。これらの理論の確立はナノテクノロジーや宇宙工学の分野等で待望されていたものである。

拡張された熱力学理論 (E T) は、L. Onsager、C. Eckart、J. Meixner や I. Prigogine らによる「不可逆過程の熱力学 (T I P)」の適用可能範囲を超えた、強い非平衡現象にも適用可能な理論として注目されている。さらに、L. Landau と E. Lifshitz による T I P に基づく「流体力学的ゆらぎ理論」の E T による理論化が望まれていた。ただし、E T 理論は、申請者の研究がなされるまでは、希薄な単原子分子気体に対してのみ存在していた。

本博士論文は、E T の適用可能範囲を多原子分子希薄気体、単原子分子濃密気体および多原子分子濃密気体にまで一気に広げられることを明快に証明している。そして、多原子分子希薄気体に対し、本理論の妥当性を、音波の分散関係の実験結果と比較することにより、きわめて印象的に示している。さらに、E T を基礎とした、ゆらぎを含んだ強い非平衡現象にまで適用可能な熱力学理論を構築している。

本博士論文の各章の内容は以下のとおりである。第 1 章において、本研究の背景、従来までの理論の整理と批判、および研究の目的がまとめられている。第 2 章において、従来の E T とは異なるバランス方程式系を採用することにより、多原子分子希薄気体、さらには単原子および多原子分子濃密気体に適用可能な E T 理論が具体的に構築されている。第 3 章において、第 2 章で提案された理論の検証がなされている。また、体積粘性率と緩和時間の大きさの評価もなされている。第 4 章において、Meixner 理論の拡張として、E T 理論に基づき、分子の並進モードから内部自由度モードへのエネルギー変換に着目した理論が論じられている。第 5 章において、ゆらぎの効果が本質的に重要となるメソスコピックスケールの現象を記述するために、E T 理論に基づいた流体力学的ゆらぎ理論が示されている。そして、最終章において、本研究全体をまとめ、研究の将来展望が議論されている。

以上のように本博士論文は、強い非平衡状態にある濃密気体の熱・力学的性質に関し、理論的にも工学的応用上も重要な成果を新たに得ている。これらの成果は当該分野における著名な論文誌や国内外の学会においても発表され関連研究者の注意をひいている。よって、本論文は、博士 (工学) 論文としてその価値を十分有するものと認める。