

2024 年度年次報告書

複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学

2023 年度採択研究代表者

有馬 隆司

苫小牧工業高等専門学校 創造工学科
准教授

非平衡流れに対する階層的流体力学の創成

研究成果の概要

本研究は、強い非平衡流れを記述する「階層的流体力学」を、拡張された熱力学(RET)の枠組みで体系化することを目的とする。本年度は、(i) RET の有効モデルの導出、(ii)実在気体モデルの提案、(iii)非線形粘弾性に対する RET における構成量の決定の三つの課題について進展を得た。

まず、(i)では、多原子分子気体に対する RET を Knudsen 数展開することで、二温度を持つ Navier–Stokes–Fourier(NSF)モデルを導出した。RET は散逸量の時間発展も記述する詳細理論であるが、分子内部自由度緩和の存在に伴って、場の方程式系構造が複雑化することが知られている。得られた粗視化モデルは、この複雑さを回避しつつ、従来の NSF 理論よりも広い適用範囲を持つ。さらに、従来個別に提案されてきた複数の二温度 NSF モデルを統一的に導出可能であることも示した。本成果について、論文投稿準備中である。また、関連する基礎的枠組みである最大エントロピー原理に関する総合報告を発表した¹⁾。

(ii)では、昨年度から取り組んでいる実在気体中の非平衡緩和過程を記述する RET モデルをさらに発展させ、実在気体特有の内部自由度緩和と構造緩和を分離した新しいモデリングを構築した。これにより、従来の希薄気体や低密度実在気体に対する RET を自然に包含しつつ、密度が高い領域において重要となる構造緩和過程を取り込むことができた。さらに、これまでの課題であった、剛体球系における体積粘性効果を適切に取り入れられるようになった。

(iii)に関しては、等温一軸伸長条件下の非線形粘弾性体を対象とした RET モデルで、これまで不明確であった構成量の決定法を示した²⁾。特に、一定ひずみ下の応力緩和実験データを用いて粘性エネルギーを推定する方法を提示した。これは、特定の実験データに依存しない汎用性の高い結果である。

【代表的な原著論文情報】

- 1) T. Arima and T. Ruggeri, “The Maximum Entropy Principle in Nonequilibrium Thermodynamics: A Brief History and the Contributions of Wolfgang Dreyer”, in *Advances in Continuum Physics: In Memoriam of Wolfgang Dreyer*, edited by J. Fuhrmann, D. Hömberg, W. H. Müller, W. Weiss, *Advanced Structured Materials*, Vol. 238, Springer Cham, in press.
- 2) M. Amabili, T. Arima and T. Ruggeri, “Stress relaxation and viscous energy in nonlinear viscoelasticity: A rational extended thermodynamics framework”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **196**, 106033 (2025)