

# 長期海外派遣報告書

MERIT 3 期生・物理学専攻上田研究室博士 1 年 村下湧音

## 概要

7 月 10 日から 10 月 5 日までの 88 日間、ルクセンブルク大学の Esposito 博士の研究室に滞在した。滞在中は微小熱機関の定式化と効率についての研究を行った。本報告書では滞在先での研究および生活を報告する。

## 研究背景～受入先研究者の研究を中心に～

受入先研究者の Esposito 博士は統計力学基礎論や複雑系の研究者であり、特に確率論的熱力学での世界的権威である。確率論的熱力学は、従来統計集団にのみ定義された熱力学の概念を、個々の事象に広げる試みであり、90 年代後半に創始された。その中で定義された概念を利用することで、相対的に大きな熱ゆらぎにさらされた微小熱機関の熱力学を論じることが可能になった。また、同時期に統計力学の分野でゆらぎの定理と呼ばれる一群の定理が発見された。ゆらぎの定理は系のエントロピー生成の時間反転操作に対する非対称性を定量的に与え、線形応答を超えた強い非平衡性を持つ系でも厳密に等式の形で成り立つという点で画期的であった。その後、確率論的熱力学に基づきゆらぎの定理が定式化されていくが、その中で特にマスター方程式を用いた定式化を中心的に行ったのが Esposito 氏であった。また、2014 年に氏のグループはゆらぎの定理を用いて微小熱機関の効率の確率分布の漸近的挙動に対して普遍性の高い結果を与えた。

## 研究内容

Esposito 博士とのメールのやり取りによって滞在期間中の研究テーマを決定した。2014 年の氏のグループの微小熱機関の効率の確率分布に対する結果は、熱機関自体の状態の変化が小さいとして無視している。このことは熱機関の相空間が有界である場合には正しいが、相空間が無限に広がる場合には一般には成り立たない。実際、相空間が無限であることによって、熱量に対するゆらぎの定理が適用できなくなることが、van Zon と Cohen による解析的な仕事で確かめられている。熱機関の効率に関する解析は熱量に関するゆらぎの定理に立脚しているので、相空間が無限である場合は既存の結果からの相違が見込まれる。無限の相空間の影響を、具体的なモデルに基づいて解析的に調べるのが滞在期間中の研究テーマとなった。

我々は二熱浴と同時に結合した Brown 粒子を並進運動する調和振動し型ポテンシャルの中に閉じ込めたモデルについて解析を行った。Brown 粒子の熱力学を考える際は、計算を簡略化するために運動量自由度が瞬時に定常状態に緩和すると仮定する過減衰極限を取るのが一般的な手法である。しかし、二熱浴と結合した系において通常の方法で過減衰極限を取ると、運動量自由度による熱の輸送を無視することとなり、熱量の移動を正しく評価できないということが

わかった。このことは、一熱浴の場合は運動量自由度が平衡状態に緩和するのに対して、二熱浴の場合は運動量自由度が非平衡定常状態に緩和することに起因している。そこで我々は二熱浴と結合した系に対して運動量自由度による熱量の輸送を正しく組み入れた過減衰極限を系統的に構成する手法を開発した。この手法は熱量の生成関数に対する摂動論に基づいている。これにより、過減衰極限を使わない場合に比べてはるかに簡便に熱量の移動を計算できるようになった。この手法を利用することで、単純な熱機関に対して効率の確率分布を計算することに成功した。しかし、残念ながらこのモデルでは当初の目的である、既存の理論との違いは見出せなかった。

二熱浴と結合した系に対して運動量自由度による熱量の輸送を考慮して正しく過減衰極限を取るといふ、我々が新たに開発した手法について、“Overdamped thermodynamics with multiple reservoirs: Towards efficiency of small heat engines”なる題名の論文に纏める予定である。

### 滞在先での生活

ルクセンブルクは神奈川県程度の面積を持った人口 50 万人ほどの国である。フランス、ドイツ、ベルギーと国境を接し、人々は主にフランス語やドイツ語を話す。首都のルクセンブルク市ではフランス語が優勢である。滞在先研究室のあるルクセンブルク大学 Limpertsberg キャンパスはルクセンブルク市の中心部から徒歩 20 分程度の場所にある。滞在中は教会のような外観をした大学の学生寮に居住したが、受入先研究室から徒歩 3 分の場所にあり、非常に恵まれた立地だった。夏場の滞在だったが、日本よりも気温が低く湿度も低いためにとっても過ごしやすい気候であった。ルクセンブルクは一人当たりの GDP が世界一であり、物価について心配していた。日本に比べて外食は非常に高かったが、食料品や日用品は平均的に少し高いもののそれほど違いはなかった。肉類、チーズやフルーツは日本よりも安く自炊する上で重宝した。ルクセンブルクでは人口の 40%程度が外国人居住者であり、ヨーロッパ各地から人々が集まっている。滞在先研究所も例外ではなくヨーロッパを中心に多様な国々から研究者や学生が集まり、ルクセンブルク出身者はごく少数だった。各国の国民性や文化について知る貴重な機会を得、視野が広げられたと思う。

### 謝辞

この度の長期海外派遣にあたりご支援を下さった MERIT プログラムに深く感謝いたします。また、受入先研究者の Esposito 博士および受入先の研究室のメンバーには研究上での助言にとどまらず、生活面でもサポートしていただきました。親身なご支援に心から感謝いたします。また、円滑な派遣先の決定へ協力していただき、派遣中も研究上の助言を下さった指導教官の上田教授に深謝いたします。