

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	一次元量子開放系のダイナミクス
Title(English)	Dynamics of One-Dimensional Open Quantum Systems
著者(和文)	深代隆央
Author(English)	Takahisa Fukadai
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11548号, 授与年月日:2020年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:笹本 智弘,齋藤 晋,村上 修一,大熊 哲,西田 祐介
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11548号, Conferred date:2020/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	深代 隆央
		氏 名	職 名	
論文審査 審査員	主査	笹本 智弘	教授	西田祐介 准教授
	審査員	斎藤 晋	教授	
		村上 修一	教授	
		大熊 哲	教授	

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Dynamics of One-Dimensional Open Quantum Systems」と題し、6章からなる。

第1章「Introduction」では、近年、環境との接触がある開放量子系に対する関心が高まっていることが述べられたのち、そのような系を理論的に扱う枠組みとして、Lindblad 方程式等の量子マスター方程式と非平衡グリーン関数法が存在することが説明されている。その後、これまでの研究では数値計算や、少数自由度系に対する解析が主であったが、本論文では多自由度系に対する解析計算を行うことが目的であることが述べられている。また本論文で得られる理論的な結果が局所的な散逸を導入した冷却原子系で確認されうることが議論されている。

第2章「Nonequilibrium Green Function Method」では、本論文の主要な解析手法である非平衡グリーン関数法について、基本事項から解説されている。まず 2.1 節で絶対零度における熱非平衡グリーン関数に関して標準的な事項がまとめられたのち、2.2 節では、非平衡状態や緩和現象を扱える形に一般化された非平衡グリーン関数法が解説されている。2.3 節と 2.4 節では、2つの複素積分経路を用いた定式化が説明され、その類似性や相違点が説明されている。

第3章「Applications to Open Quantum Systems」では、第2章で導入された一般化された非平衡グリーン関数法がどのように開放量子系に適用されるか解説されている。まず 3.1 節では、非平衡グリーン関数法の枠組みで定常状態カレントを与える Meir-Wingreen 公式について説明されている。3.2 節では、一般的な開放量子系のモデルが定式化され、その運動方程式と解についての解説が与えられたのち、例として2サイト系への適用が議論されている。この解析の結果、平均粒子密度は、単独の量子ドットの場合とは違って振動を示すという結果が得られたことが説明されている。

第4章「Open Tight-Binding Model」が、本論文の主要な結果を含んでいる章である。まず 4.1 節では、解析対象となる1次元開放端タイトバインディングモデルが導入されている。4.2 節では、このモデルを非平衡グリーン関数法で扱う際に現れる、 $N \times N$ 非エルミート行列の固有値・固有ベクトルに対する具体的な表式が与えられている。特に、境界における散逸を表すパラメータの値によって、固有値の振る舞いが大きく変化することが議論されている。この結果はこの後種々の状況における種々の物理量の振る舞いを議論する際重要となる。

続いて 4.3 節では、定常状態におけるカレントや平均粒子密度に対する表式が与えられ、その性質が議論されている。その結果、まず絶対零度においては、カレントのサイト数依存性は存在せず、系はバリスティックな振る舞いをしていると考えられること、また境界パラメータの値を変化させることでカレントの値が変化し、特に上記 $N \times N$ 行列の固有値の振る舞いが変化するところでカレントが最大となることが示されている。さらにこのようなカレントの振る舞いが、光学分野で Superradiance 転移として知られる転移と類似点があることが議論されている。

さらに、有限温度においては、定常状態におけるカレントは、系のサイズが無限大となる極限では、境界パラメータの値によらず0となることが示されている。つまり上記の絶対零度における振る舞いは、純粋に量子効果によるものであることが示唆されている。

4.4 節では、2,3 章で導入された緩和現象を扱えるように一般化された非平衡グリーン関数を用いて、平均粒子密度の時間依存性が計算されている。その結果、時間依存する平均粒子密度に対して、ベッセル関数を用いた厳密な表式が導出されている。さらに、その表式を用いて粒子密度の時間依存性がグラフで表され、特徴的な2段階緩和が見られることが報告されている。これは、境界からの影響が系の各点にどのように伝わるかを表す興味深い現象であるが、そのメカニズムについても議論されている。

第5章「Fluctuation Properties of Open Tight-binding Model」では、第4章で扱った1次元開放端タイトバインディングモデルのカレントの揺らぎや相関について解析を行っている。まず 5.1 節では、

定常状態にある系のカレントのキュムラント母関数に対してかなり一般に成り立つ Levitov-Lesovik 公式が説明されている。5.2 節では、時間依存性のある場合について、カレントの相関に対する表式が得られ、その性質が議論されている。その結果、カレントの相関が有限温度になると減少し、量子性が弱まっていると考えられることなどが議論されている。

第6章「Conclusion」では、これまでに得られた成果についてまとめられたのち、今後の方向性についても議論されている。特に、物理量の温度依存性や系のサイズ依存性についての理解を深めたり、バルク部分において相互作用のあるモデルに対する解析を行うことが重要であることが述べられている。

以上、まとめると、本論文では、1次元開放端タイトバインディング模型という開放量子系の中でも基本的なモデル系に対し、緩和状態も扱えるように一般化された非平衡グリーン関数法を適用し、そのカレントや粒子密度の平均や揺らぎに関し、明示的な公式を得ることにより、詳細な解析を行っている。中でも、非平衡グリーン関数法の計算に現れる非エルミート $N \times N$ 行列の固有値分布が、モデルの境界パラメータの値によって大きく変化することが、種々の物理量にどのような影響を与えるかを多面的に検討し、絶対零度においては影響の現れ方が Superradiance 転移と類似する面があること、有限温度においては性質が大きく異なることを示している。さらに、カレント相関や粒子密度の時間依存性も議論するなど、従来の研究においてはあまり調べられてこなかった量まで解析している。これらの発見および新たな知見は、非平衡物性や非平衡統計力学の研究領域において非常に重要なものであり、本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値があると認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。