

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	みつどうてつや 光藤哲也
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
(学位論文題目) The Kink Dynamics and the Large Deviation for the Current in the Asymmetric Simple Exclusion Process with Open Boundary Conditions (開放境界条件における非対称単純排他過程でのキンの動力 学およびカレント大偏差関数)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 早川尚男 教授 小貫 明 教授 太田隆夫 教授

(続紙 1)

京都大学	博士（理学）	氏名	光藤 哲也
論文題目	The Kink Dynamics and the Large Deviation for the Current in the Asymmetric Simple Exclusion Process with Open Boundary Conditions (開放境界条件における非対称単純排他過程でのキンクの動力学およびカレント大偏差関数)		
(論文内容の要旨)			
本論文では単純排他過程(SEP)と呼ばれる完全に排除体積効果を持った1次元多粒子ランダムウォークモデルの理論的・数値的研究を行った。特に非対称単純排他過程(ASEP)について詳しく調べて新しい知見を幾つか得ている。本論文は英文で書かれており、5つの章と3つのAppendixから成るが、その主要部である2-4章はそれぞれ欧文学術雑誌に発表(2,3章)されたもの或いは投稿中(第4章)であり、特に第2章をまとめて発表した論文は数多く引用されるこの分野の標準的論文となっている。 本論文の第2章ではJ.Phys.Aに発表した内容に基づき、2レーンのTASEP(=totally ASEP)で粒子が詰まった渋滞相と粒子があまりない稀薄相を分かちキンクが現れるパラメータ領域では、2つのレーンのキンクの位置が同期することを見出した。更にレーンチェンジ率の非対称性に応じてキンク位置がどれだけずれるかを理論的に導き、その正しさを数値計算との比較から実証した。ASEPは交通流の最も簡単なモデルと捉える事が可能なために、本研究の結果はレーン変更をしても渋滞を回避できないことを示したことになる。このように結果が直感的な意味を持つばかりでなく、解析もクリアであるために広く受け入れられた結果になっている。 第3章では通常のASEPでキンクがある場合にレーンの外からの出入りが可能なサイトを設けた影響がどうなるかを平均場に基づき解析し、キンクの位置が出入りするサイト(ランプ)から引力を受けてキンクがトラップされることを定量的に明らかにした。また多数のランプが存在する場合には、1つのランプの影響の線形結合として近似できることを定量的に示した。これらの解析の妥当性は数値計算によって定量的に確認されている。本章の結果も交通流に置き換えれば合流や分岐のあるランプで渋滞が起こることを簡単なモデルで実証したことと言え、注目に値する。 第4章では非平衡カレントのある場合に平衡系では自由エネルギーに相当する大偏差関数がどのような性質を持つかを対称単純排他過程(SSEP)とASEPについて数値的に調べたものである。申請者は、SSEPの熱力学極限では大偏差関数が2次関数に帰着するが、有限系のASEPでは大偏差関数が解析的でなくなることを数値的に示した。またSSEPにおいてもカレントが有限の値を持つ非熱力学極限では2次関数では近似できず、平衡系と異なる性質を持つことを明らかにした。もう一つの申請者による注目すべき発見はSSEPの場合に証明されているゆらぎの定理に繋がる対称化関係式は出入り口で定義した1サイトによる(揺らぎを含んだ)カレントのものと全サイトで定義したカレントによるものが異なることを発見した点である。更にSSEPでもカレントが強くなる境界条件下では対称化関係式からのずれが観測されている。またASEPの場合はそもそも近似的にも対称化関係式が成り立っていないことを明らかにした。最後の申請者による特筆すべき発見は大偏差関数とルジャンドル変換で結ばれるキュムラント生成母関数がASEPでは多価になり得ることを示した点である。以上の知見は新しいもので数値計算による発見法的研究とは言え、非平衡統計力学の本質を捉えた興味深い研究と言える。			

(論文審査の結果の要旨)

申請者の学位論文の主要部は公表論文として既に3つの英文学術雑誌の出版乃至投稿されていたため、公聴会において申請者は第2章、第3章の内容は比較的簡単に紹介するに留め、第4章の内容について詳しく説明した。また審査の際に申請者は参考論文として出版した内容にも触れ、それについても質疑応答があった。

申請者は導入部で単純排除過程(SEP)の意義と特に非対称単純排除過程(ASEP)の実現する物理系を紹介し、大偏差関数についても簡単に触れた。更にモデルの導入の後、渋滞と非渋滞の共存相で密度のパワースペクトルが振動数の $3/2$ 乗に反比例するという、申請者が第二著者であった参考論文の内容に触れた際に申請者はその直感的な説明を求められ渋滞と非渋滞を分かちキンク拡散に由来する旨の解答があった。

次に申請者は第2章と第3章で得られた結果について簡単に紹介した。その後、博士論文の主要部である第4章の内容について説明した。申請者は、対称単純排除過程(SSEP)とASEPでの2種類の方法(数値対角化とモンテカルロ法)による数値的に大偏差関数を求め、それが通常の熱力学系と異なり6次関数で表現できることを紹介した。また大偏差関数の対称化部分が何れもシステムサイズに比例することを発見した旨の報告があった。次いで、SSEPにおける対称化関係式は出入り口に当たる1サイトで観測すると理論的に予言された通り成り立っているが、全サイトカレントで改めて観測するとその破れが見えることが報告された。しかし、審査委員から対称化関係式の破れが小さい事が指摘され、その理由を問われた。申請者は対称化関係式が局所的な時間反転対称性に由来するものであり、申請者自身も1サイトで観測したカレントと全サイトでのカレントを比較する際にサイト数で規格化すると対称化関係式が近似的には成り立っているように見える点を報告していた。

一方、ASEPでは対称化関係式に相当するものが見えないだけでなく、大偏差関数が解析性を失い、カレントゼロ近傍で大偏差関数の微係数が不連続になることが報告された。この不連続性は興味深い新しい発見であるが、公聴会の折にはその意義について十分に強調していなかったと思う。

公聴会では申請者が一通りの発表を終わった後に一般的な質問が幾つか出た。そのうち複数の審査委員から出た質問は、本来解くべきマスター方程式ではなく仮想場を導入しキュムラント生成母関数である大偏差関数を計算する意義についてであった。それに対して申請者は確かにバイアスをかけた系は元の系と必ずしも一緒ではないが、バイアスに対する非線形応答を任意の次数で観測するためにはこの形式である必要がある旨の解答があった。また審査委員から対称化関係式とゆらぎの定理の関係についての質問もあった。これに対して申請者は、特殊な場合に対称化関係式は恒等式であるゆらぎの定理と一致するがより一般的な概念である旨の解答があった。更に特殊に見えるモデルの数値計算で大偏差関数等の性質を調べた本申請論文の一般的意義は何処にあるのかという質問に対して、申請者は定常解が厳密に求まり、近年更に特殊な条件下では相関関数も求まる数理モデルであるばかりでなく結晶成長モデルにもマップでき、実験的にも盛んに調べられている系であるASEPを調べ非平衡統計力学の構造を明らかにする意義を強調する解答がなされた。このように多少のもたつきはあったものの発表、質疑とも無難にこなしたと言える。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成23年1月14日に論文内容とそれに関連した事項について試問を行った。その結果、合格と認めた。