

氏 名（本籍）	はやし 林	つよし 剛 史（富 山 県）
学 位 の 種 類	博	士（理 学）
学 位 記 番 号	博 甲 第	3899 号
学位授与年月日	平成 18 年 3 月 24 日	
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当	
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科	
学 位 論 文 題 目	<b>Applications of Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics to Non-Abelian Gauge Theory and to Quantum Information Theory</b> （非平衡場理論の非可換ゲージ理論と量子情報理論への応用）	
主 査	筑波大学教授	理学博士 有 光 敏 彦
副 査	筑波大学教授	理学博士 松 本 秀 樹
副 査	筑波大学助教授	博士（理学） 谷 口 伸 彦
副 査	筑波大学助教授	理学博士 阿 部 純 義
副 査	お茶の水女子大学教授	理学博士 柴 田 文 明

## 論 文 の 内 容 の 要 旨

本博士論文では、Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics (NETFD) を非可換ゲージ理論と量子情報理論に応用して、(i) NETFD の理論構成における基本的な問題を解決し、また、(ii) 量子情報理論における NETFD の有用性を示した。本論文は 2 部構成になっており、各部は、それぞれ、(i) および (ii) に充てられている。

NETFD は、非平衡散逸系を扱う正準演算子形式の場の理論である。とりわけ、一貫した量子確率微分方程式の体系を備えている点特徴的である。NETFD において、量子ランジュバン方程式と量子確率リウヴィユ方程式は、それぞれ、ハイゼンベルグ描像とシュレーディンガー描像の確率的発展方程式として統一されている。ノイズを記述する（ボソンの・フェルミオンの）量子ブラウン運動の理論も、NETFD の枠内で一貫した形で整備されている。NETFD の表現空間は熱的空間と呼ばれ、2 つのヒルベルト空間（「チルド無し」自由度に対するヒルベルト空間と「チルド有り」自由度に対するヒルベルト空間）の直積空間である。熱的空間は、非平衡状態を記述する熱真空上に生成されるフォック空間として実現される。非平衡系の時間発展は、各時刻の熱真空が提供する表現空間により記述される。不安定な真空に対する場の量子論を構築している点が、NETFD の独創的なところである。

本論文の第 1 部では、NETFD を非可換ゲージ理論に適用し、フェルミオンに対する熱的状态条件 (TSC) とチルダ共役則 (TC) における位相の不定性に関する問題を解決した。TSC, TC 共に、チルダ無し自由度とチルダ有り自由度を関連付ける関係式である。演算子形式での非可換ゲージ理論のレビューをした後、NETFD の非可換ゲージ理論への拡張を行った。その上で、非可換ゲージ理論における TSC と TC を与え、熱的真空の Becchi-Rouet-Stora (BRS) 不変性と「TSC が表現に依らない」という要請から、TSC と TC が一意的に決定されることを示した。

本論文の第 2 部では、空間的相関を有するノイズの影響下にある量子ビット列の時間発展を NETFD の理論体系で解析した。その結果、既存の（独立ノイズ仮説に基づいた）量子誤り訂正符号が、空間的相関を有

するノイズにより量子ビット列に生じる誤りをも訂正できることを示した。この結果は、スタビライザー符号（既知の重要な量子符号を全て含む、符号のクラス）において一般的に成り立つものである。まず、既存の量子誤り訂正符号における「独立ノイズ仮説」とその問題点について考察し、NETFDにおける時間発展の理論を完全正值写像の観点から再構成した上で、NETFDの枠内での（ボソンの・フェルミオンの）量子ブラウン運動の定式化が与えられている。これは、第1部で与えられたTSCやTCに基づいて実施されている。議論に本質的な、量子誤り訂正符号（特に、スタビライザー符号）の紹介の後、量子ブラウン運動の理論及びそれに基づく量子リウヴィユ方程式を利用して、空間的相関を有するノイズ影響下にある量子ビット列の時間発展を記述する完全正值写像を求めた。NETFDの体系での写像演算子の具体的表式を利用して、空間的相関を有するノイズにより量子ビット列に生じる誤りが、スタビライザー符号による通常の（すなわち、無相関ノイズに対するのと全く同じ）誤り訂正手続によって訂正されることを証明した。NETFDでは、熱的なノイズや量子的なノイズを一括して扱え、しかも散逸的な時間発展を記述する完全正值写像演算子が書き下せることが、ここでの一般的な証明を可能にしたものである。

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

位相の不定性の起原が熱真空と密度演算子に対する「対応関係」において生ずることを明らかにし、非可換ゲージ場の場合には非自明な形でその不定性が決定されることを見通しの良い形で示し、位相の不定性に関する問題を解決した。独創性に富んだ、高レベルの成果である。

これまでに提出された2, 3の無相関ノイズに対する量子誤り訂正符号の例で、『既存の（独立ノイズ仮説に基づいた）量子誤り訂正符号を用いて、空間的相関を有するノイズにより量子ビット列に生じる誤りが訂正できる』ことを確かめられ始めた現段階で、それらの例を含むスタビライザー符号に対して一般的な証明に成功したことは、量子誤り訂正に留まらず、量子情報理論一般に大きなインパクトを与えるものである。

よって、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。