

Title	Research on novel lattice fermions toward efficient QCD simulations( Abstract_要旨 )
Author(s)	Misumi, Tatsuhiro
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2012-03-26
URL	<a href="https://doi.org/10.14989/doctor.k16623">https://doi.org/10.14989/doctor.k16623</a>
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

## 審　查　報　告　書

(ふりがな) 氏　名	(みすみ　たつひろ) 三角　樹弘
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)

Research on novel lattice fermions  
toward efficient QCD simulations

(高速格子QCD計算の実現へ向けた  
新たな格子フェルミオンの研究)

論文調査委員	(主査) 静谷謙一 教授 青山秀明 教授 井澤健一 准教授
--------	-------------------------------------

理　学　研　究　科

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	三角 樹弘
論文題目	Research on novel lattice fermions toward efficient QCD simulations (高速格子 QCD 計算の実現へ向けた新たな格子フェルミオンの研究)		

(論文内容の要旨)

本論文は格子数値計算の大幅な高速化を可能にする格子フェルミオンの定式化とその応用についての研究に関するものである。特に naive lattice fermion に基づいて構成される “generalized Wilson&overlap fermions” と staggered fermion に基づく “staggered-Wilson&overlap fermions” という新規の格子フェルミオンについて詳しい研究が行われた。

格子場の理論を用いた数値シミュレーションは今や素粒子・原子核物理の研究に欠かせない手法であるが、ダブリング問題の回避に要する計算コストが未だに格子数値計算の高速化を妨げている。ダブルング問題とはカイラル対称なフェルミオンを格子上に定義するダブラーと呼ばれる多数の余分なフェルミオン自由度が必ず理論に含まれることを指す(4 次元では一般に 16 species)。これまでこの問題に対する対処法としては大きく分けて 2 つの方法が提案されており、一つはあらわにカイラル対称性を破る Wilson term を導入することでダブラーを排除する Wilson fermion であり、もう一つは 1 成分フェルミオンを格子点上に定義することで余分な自由度の数を削減する staggered fermion である。前者はダブラーを完全に排除出来ており、質量パラメータの tuning を通したシミュレーションが可能な上に、overlap formulation と呼ばれる方法により格子上でのカイラル対称性である Ginsparg-Wilson 対称性を厳密に保つ overlap fermion を構成出来る。しかしこれらの定式化は大きな計算コストを必要とする。一方 staggered fermion は数値計算に大変適した格子フェルミオンであるが、4 つのフェルミオン自由度を含むため 4 の倍数の flavor を持つ系にしか応用出来ず、特に現実的な 2-flavor や 3-flavor QCD のシミュレーションには直接応用出来ないという難点がある(Sec. 2)。

本論文では、まず Wilson term の一般化が行われた(Sec. 3)。従来の Wilson term は species の 16 縮退を解くことで 1 自由度の fermion を取り出すが、実は縮退の解き方は一通りではなくすべての species-splitting の可能性を含む一般的な Wilson term (flavored-mass terms) が構成された。これによりさまざまな flavor 数を持つ generalized Wilson fermion, generalized overlap fermion の構成が可能になり、2-flavor QCD はもちろん many-flavor QCD 数値計算もより効率的に実行出来る可能性が高まった(Sec. 5)。また、これらの格子フェルミオンにおいてディラック演算子の zero mode がゲージ場の topology を正しく反映すること、いわゆる指数定理が成り立つことが示され、格子数値計算への有用性が立証された(Sec. 6)。

一方これらの格子フェルミオンは、spin diagonalization という方法によって staggered fermion の形に帰着することが本論文で示された(Sec. 3)。実はこのようにして得られた staggered-Wilson fermion もしくは staggered-overlap fermion は近年格子上の指数定理の研究を通して別の文脈で提案されており、本論文における再導出はこれらの格子フェルミオンに理論的土台を与えるだけでなくその有用性を強く示唆する結果になっている(Sec. 5)。数値計算の観点からは、staggered Wilson fermion や staggered overlap fermion は 1 成分フェルミオンに基づく定式化であるため、従来の Wilson や overlap に比べて大幅に小さいコストで数値計算が実行出来る可能性がある。本論文ではこれらの格子フェルミオンの格子 QCD 数値計算への現実的な応用の可能性を調べるために、lattice Gross-Neveu model と strong-coupling lattice QCD を用いて staggered-Wilson fermion におけるパリティ対称性の相構造が調べられた(Sec. 6, Sec. 7)。その結果相境界が二次相転移線になっており、質量パラメータの tuning によって PCAC 関係式を満たすカイラル極限が定義出来ることが示された。これにより staggered-Wilson fermion の格子 QCD への実用性が初めて示された。またこの結果は、それに基づいて構成される staggered-overlap fermion の有用性を間接的に

示したことにもなる。この研究によりこれらのフェルミオンの数値計算への応用の準備が整ったことになり、格子 QCD 数値計算の高速化を通して関連分野の発展に大きく貢献すると推察される。

(論文審査の結果の要旨)

格子場の理論は素粒子・原子核物理の研究には欠くことのできない非摂動的で実用的な理論的枠組である。強力な計算手法をもたらす反面、難点も併せ持つ。フェルミ粒子を素朴に格子上に乗せると本来の粒子の自由度の他に（カイラル対称性を保つように）余分な数のフェルミ粒子が現れてしまう。4次元ではフェルミオン1種が格子上では16種に拡大してしまう。これをフェルミオン・ダブリング問題と言い、実際の数値実験の際には余分な粒子の自由度（ダブラーと呼ばれる）を抑制するような工夫が必要となる。通常はWilson項と呼ばれるカイラル非対称項を導入し、数値的な微調整をすることにより（15種の）ダブラーを除く。このようにして作られるフェルミオンをWilsonフェルミオンと呼ぶ。他方、複数の格子点を使ってフェルミオンを表示することにより、余分な自由度を（1/4にまで）削減するstaggeringという処方も使われる。この処方により構成されるstaggeredフェルミオンはまだ4つの粒子自由度を持つので4の倍数のflavorを持つ系にしか適用できないという難点をもつ。現実的なQCDのシミュレーションには直接には応用できない。

このような状況の下に、申請者はM. CreutzとT. Kimuraとの共同研究を通して、Wilson項を拡張することによりダブラーの構成を自由に調整できることを示した。まずWilson項の構造をspinとflavorの自由度で分類した上で、適当なflavor質量項を組み合わせた新たなWilson項を再構成することにより、ダブラーの縮退内容が制御できることを明らかにした。これにより、1から15までの望む数のflavorsをもつ一般化したWilsonフェルミオンと、それから派生するoverlapフェルミオンが構成できる。また申請者はこれらの格子フェルミオンがspin対角化という方法によって、D. Adams や C. Hoelblingが提唱した（flavor質量項を付加した）staggeredフェルミオンに結びつけられることも示した。さらに申請者はこれらの格子フェルミオンが実際のゲージ理論の数値計算においてフェルミ粒子として正しく振る舞うことを確認するために、連続極限での基本的な時空対称性の回復やカイラル対称性の実現に係わる各種の基本的な考察を行った。この研究によりこれらの新たなフェルミオンの数値計算への応用の準備が整ったことになり、今後の理論的・実用的な発展が期待される。

以上のように申請者の論文は、格子上のフェルミオンの構成に関する基礎的な、オリジナルで重要な業績である。よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

平成24年1月13日、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。