

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540330

研究課題名(和文) 超対称性理論の非摂動的定式化と数値シミュレーション

研究課題名(英文) Non-perturbative formulation of the supersymmetric theories and numerical simulations

研究代表者

鈴木 博 (Suzuki, Hiroshi)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90250977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の基本構成要素である素粒子は、ゲージ場理論という高い対称性を持った理論で記述されます。ゲージ場理論のダイナミクスを研究する現在最も強力な手法が格子場の理論ですが、この手法は構成上、時間や空間に関連した時空対称性と極めて相性が悪い側面があります。現在の素粒子の標準模型を越える一つの可能性である超対称性はまさにこうした時空対称性の一つで、この研究ではこうした超対称性や並進対称性などの時空対称性を格子場の理論でいかに実現するかについての研究を進め、一定の成果を得ました。

研究成果の概要(英文)：The elementary particles, the most fundamental element of our universe, are described by a theory with a higher symmetry which is called the gauge theory. The most powerful method to study the dynamics of the gauge theory known so far is the lattice field theory. This method, however, because of its way of construction, is highly incompatible with spacetime symmetries. The supersymmetry, which is a possible element of the theory beyond the standard model of elementary particles, is one of such spacetime symmetries. In this research project, we investigated how such spacetime symmetries, including the supersymmetry and the translational invariance, can be realized in the lattice field theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：非摂動的論 格子場理論 格子ゲージ理論 超対称性 時空対称性

1. 研究開始当初の背景

宇宙の基本構成要素である素粒子はゲージ理論という高い対称性を持った場の理論で記述される。場の量子論の非摂動的ダイナミクスを研究する現在最も強力な手法が格子場理論であるが、この手法はその構成法から時空対称性との相性が極めて悪い。素粒子標準模型を越える理論の可能性の一つである超対称性はこうした時空対称性の代表例であり、この理由から超対称性を持った理論の非摂動的定式化は古くからの難しい問題であった。

2. 研究の目的

ここでは、超対称性を持った理論の格子場理論による非摂動的定式化とそれに基づいた非摂動的な研究を目指した。これに関連して、超対称性と密接に関連した時空対称性である並進対称性に付随したネーターカレント(エネルギー運動量テンソル)の格子場理論での構成も研究目的に設定した。

3. 研究の方法

定式化に関しては純粋に理論的な解析的研究、定式化のチェックやダイナミクスの解明に関してはコンピュータを用いた数値計算により研究を行った。

4. 研究成果

主なものとしては、

(1) 非ゲージ超対称性理論での超対称性を明白に保つ運動量空間切断とニコライ写像を用いた 2D  $N=(2,2)$  超対称ランダウ-ギンツブルグ模型の非摂動的解析。

(2) 4D  $N=1$  超対称ヤン-ミルズ理論の格子定式化における連続極限での超対称性の回復のメカニズムの理論的解析。

(3)  $N=1$  超対称ヤン-ミルズ理論の格子定式化におけるフェラーラ-ズミノ多重項を利用したエネルギー運動量テンソルの構成法の研究。

(4) 純ヤン-ミルズ理論におけるグラディエントフローの手法を用いたエネルギー運動量テンソルの構成法の開発。この研究は格子ゲージ理論におけるエネルギー運動量テンソルの全く新しい構成法を与えるものである。

(5) 2次元時空で定義される IIA 型超弦理論の行列模型による非摂動的定式化による超対称性の自発的破れの解析的・数値的研究。

(6) (4)の方法で構成した格子上のエネルギー運動量テンソルの有限温度ゲージ理論の数値シミュレーションへの応用。これは(4)の構成法のテストにもなっている。従来全く別の方法で計算された熱力学量とのよい一致を見た。

(7) フェルミオンを含むベクトル型のゲージ理論におけるグラディエントフローによるエネルギー運動量テンソルの構成法の開発。これは(4)の構成法を現実の量子色力学

の研究に応用可能なように拡張したものである。

(8) 2D  $O(N)$ 非線形シグマ模型におけるグラディエントフローの繰り込み可能性の証明。

(9) 2D  $O(N)$ 非線形シグマ模型におけるエネルギー運動量テンソルのグラディエントフローによる構成とその large  $N$  近似での非摂動的計算。

(10) 経路積分によるボゾン化の定式化に関する研究。

(11) 2次元のグロス-ヌブー模型におけるグラディエントフローによるエネルギー運動量テンソルの構成と large  $N$  近似によるその保存則の検証。

(12) グラディエントフローによるフレーバー軸性カレントの構成法の研究。(13) 2次元ヤン-ミルズ理論を用いた複素ランジュバン法とゲージ冷却法の検証。

(14) グラディエントフローの摂動計算における背景場の方法の開発と応用。

(15) コンフォーマルブートストラップ法に基づいた多フレーバーゲージ理論における質量異常次元の上限に関する研究。である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 17 件)

1 H. Iha, H. Makino and H. Suzuki, "Upper bound on the mass anomalous dimension in many-flavor gauge theories: a conformal bootstrap approach," Progress of Theoretical and Experimental Physics に掲載予定、査読有

2 H. Suzuki, "Background field method in the gradient flow," Progress of Theoretical and Experimental Physics 2015, no. 10, 103B03 (2015)、査読有  
doi:10.1093/ptep/ptv139

3 H. Makino, H. Suzuki and D. Takeda, "Complex Langevin method applied to the 2D  $SU(2)$  Yang-Mills theory," Physical Review D 92, no. 8, 085020 (2015)、査読有  
doi:10.1103/PhysRevD.92.085020

4 T. Endo, K. Hieda, D. Miura and H. Suzuki, "Universal formula for the flavor non-singlet axial-vector current from the gradient flow," Progress of Theoretical and Experimental Physics 2015, no. 5, 053B03 (2015)、査読有  
doi:10.1093/ptep/ptv058

<sup>5</sup> H. Suzuki,  
"Universal formula for the energy -  
momentum tensor via a flow equation in  
the Gross-Neveu model,"  
Progress of Theoretical and Experimental  
Physics 2015, no. 4, 043B04 (2015) 、 査読  
有  
doi:10.1093/ptep/ptv036

<sup>6</sup> K. Fujikawa and H. Suzuki,  
"Bosonization in the path integral  
formulation,"  
Physical Review D 91, no. 6, 065010  
(2015) 、 査読有  
doi:10.1103/PhysRevD.91.065010

<sup>7</sup> H. Makino, F. Sugino and H. Suzuki,  
"Large-N limit of the gradient flow in the  
2D O(N) nonlinear sigma model,"  
Progress of Theoretical and Experimental  
Physics 2015, no. 4, 043B07 (2015) 、 査読  
有  
doi:10.1093/ptep/ptv044

<sup>8</sup> M. Kitazawa, M. Asakawa, T. Hatsuda,  
T. Iritani, E. Itou and H. Suzuki,  
"Measurement of thermodynamics using  
gradient flow,"  
Proceedings of Science LATTICE 2014, 022  
(2014) 、 査読有  
[http://pos.sissa.it/archive/conferences/214/022/LATTICE2014\\_022.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/214/022/LATTICE2014_022.pdf)

<sup>9</sup> H. Makino and H. Suzuki,  
"Renormalizability of the gradient flow in  
the 2D O(N) non-linear sigma model,"  
Progress of Theoretical and Experimental  
Physics 2015, no. 3, 033B08 (2015) 、 査読  
有  
doi:10.1093/ptep/ptv028

<sup>10</sup> H. Makino and H. Suzuki,  
"Lattice energy-momentum tensor from  
the Yang-Mills gradient flow inclusion of  
fermion fields,"  
Progress of Theoretical and Experimental  
Physics 2014, 063B02 (2014) 、 査読有  
Erratum: [Progress of Theoretical and  
Experimental Physics 2015, 079202 (2015)]  
doi:10.1093/ptep/ptu070,  
10.1093/ptep/ptv095

<sup>11</sup> M. Asakawa, H. Suzuki et al.  
[FlowQCD Collaboration],  
"Thermodynamics of SU(3) gauge theory  
from gradient flow on the lattice,"  
Physical ReviewD 90, no. 1, 011501 (2014) 、  
査読有  
Erratum: [Physical Review D 92, no. 5,

059902 (2015)]  
doi:10.1103/PhysRevD.90.011501,  
10.1103/PhysRevD.92.059902

<sup>12</sup> M. G. Endres, T. Kuroki, F. Sugino and  
H. Suzuki,  
"SUSY breaking by nonperturbative  
dynamics in a matrix model for 2D type IIA  
superstrings,"  
Nuclear Physics B 876, 758 (2013) 、 査読有  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2013.09.005

<sup>13</sup> H. Suzuki,  
"Energy-momentum tensor from the Yang  
-Mills gradient flow,"  
Progress of Theoretical and Experimental  
Physics 2013, 083B03 (2013) 、 査読有  
Erratum: [Progress of Theoretical and  
Experimental Physics 2015, 079201 (2015)]  
doi:10.1093/ptep/ptt059,  
10.1093/ptep/ptv094

<sup>14</sup> H. Suzuki,  
"Remark on the energy-momentum tensor  
in the lattice formulation of 4D N=1 SYM,"  
Physics Letters B 719, 435 (2013) 、 査読有  
doi:10.1016/j.physletb.2013.01.028

<sup>15</sup> H. Suzuki,  
"Ferrara-Zumino supermultiplet and the  
energy-momentum tensor in the lattice  
formulation of 4D N=1 SYM,"  
Nuclear Physics B 868, 459 (2013) 、 査読有  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2012.11.023

<sup>16</sup> H. Suzuki,  
"Supersymmetry, chiral symmetry and the  
generalized BRS transformation in lattice  
formulations of 4D N=1 SYM,"  
Nuclear Physics B 861, 290 (2012) 、 査読有  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2012.04.008

<sup>17</sup> S. Kamata and H. Suzuki,  
"Numerical simulation of the N=(2,2)  
Landau-Ginzburg model,"  
Nuclear Physics B 854, 552 (2012) 、 査読有  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2011.09.007

{ 学会発表 } ( 計 24 件 )

<sup>1</sup> 鈴木 博  
"Bosonization in the path integral  
formulation,"  
日本物理学会 2015 年秋季大会  
2015 年 9 月 27 日  
大阪市立大学 ( 大阪市 )

<sup>2</sup> 鈴木 博  
"Background field method in the gradient  
flow,"

日本物理学会 2015 年秋季大会  
2015 年 9 月 25 日  
大阪市立大学 (大阪市)

3 Hiroshi Suzuki

``Energy-momentum tensor on the lattice from the gradient flow,``  
Numerical approaches to the holographic principle, quantum gravity and cosmology  
2015 年 7 月 24 日  
京都大学基礎物理学研究所 (京都市)

4 Hiroshi Suzuki

``Background field method in the gradient flow,``  
The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2015)  
2015 年 7 月 18 日  
神戸コンベンションセンター (神戸市)

5 鈴木 博

``Large N limit of the gradient flow in the two-dimensional  $O(N)$  non-linear sigma model,``  
日本物理学会第 70 回年次大会  
2015 年 3 月 24 日  
早稲田大学 (東京都)

6 Hiroshi Suzuki

``Yang-Mills gradient flow and the energy-momentum tensor on the lattice,``  
国際研究集会「Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015-Effective theories and lattice-」  
2015 年 3 月 16 日  
京都大学基礎物理学研究所 (京都市)

7 鈴木 博

``格子場の理論における Yang-Mills/Wilson gradient flow の応用,``  
日本物理学会 2014 年秋季大会・企画講演  
2014 年 9 月 18 日  
佐賀大学 (佐賀市)

8 鈴木 博

``gradient flow による格子上のエネルギー運動量テンソル,``  
離散的手法による場と時空のダイナミクス  
2014 年 9 月 14 日  
慶應義塾大学 (横浜市)

9 Hiroshi Suzuki

``Energy-momentum tensor on the lattice from the gradient flow,``  
Conceptual advances in lattice gauge theory (LGT14)  
2014 年 7 月 21 日  
CERN (スイス・ジュネーブ)

10 鈴木 博

``Lattice energy-momentum tensor from the Yang-Mills gradient flow,``  
計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) 研究会  
「Lattice QCD at finite temperature and density」  
2014 年 1 月 22 日  
高エネルギー加速器研究機構 (つくば市)

11 鈴木 博

``Lattice energy-momentum tensor from the Yang-Mills gradient flow,``  
第 3 回計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) セミナー  
2013 年 10 月 16 日  
大阪大学 (豊中市)

12 鈴木 博

``Yang-Mills gradient flow による格子上のエネルギー運動量テンソル,``  
研究会「離散的手法による場と時空のダイナミクス」  
2013 年 9 月 27 日  
高エネルギー加速器研究機構 (つくば市)

14 鈴木 博

``Energy-momentum tensor from the Yang-Mills gradient flow,``  
日本物理学会 2013 年秋季大会  
2013 年 9 月 22 日  
高知大学 (高知市)

15 鈴木 博

``Ferrara-Zumino supermultiplet and the energy-momentum tensor in the lattice formulation of 4D  $N=1$  SYM,``  
日本物理学会第 68 回年次大会  
2013 年 3 月 29 日  
広島大学 (東広島市)

16 鈴木 博

``超対称性をもつ場の理論の格子定式化の基礎と応用,``  
計算基礎科学レクチャー  
2012 年 12 月 18 日  
高エネルギー加速器研究機構 (つくば市)

17 Hiroshi Suzuki

``Ferrara-Zumino supermultiplet and the energy-momentum tensor in the lattice formulation of 4D  $N=1$  SYM,``  
New Frontiers in Lattice Gauge Theory  
2012 年 9 月 27 日  
The Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics (イタリア・フィレンツェ)

18 鈴木 博

``Can we define SYM on the lattice?``  
研究会「離散的手法による場と時空のダイナミクス」

2012年8月31日  
理化学研究所(和光市)

19 鈴木 博

``Supersymmetry, chiral symmetry and the  
generalized BRS transformation in lattice  
formulations of 4D N=1 SYM,``  
基研研究会「場の理論と弦理論」  
2012年7月24日  
京都大学基礎物理学研究所(京都市)

20 鈴木 博

``On supersymmetry restoration in lattice  
formulation of 4D N=1 SYM,``  
日本物理学会第67回年次大会  
2012年3月26日  
関西学院大学(西宮市)

21 鈴木 博

``Numerical test of the N=2  
Landau-Ginzburg description,``  
立教研究会「弦理論・場の理論における非摂  
動的手法」  
2012年2月19日  
立教大学(東京都)

22 鈴木 博

``超対称性場の理論の数値シミュレーシ  
ョン,``  
第34回素粒子論グループ四国セミナー集中  
講義  
2011年12月17日、18日  
愛媛大学(松山市)

23 鈴木 博

``Computer simulation of N=(2,2)  
Landau-Ginzburg model,``  
日本物理学会2011年秋季大会  
2011年9月18日  
弘前大学(弘前市)

24 鈴木 博

``Computer simulation of N=(2,2)  
Landau-Ginzburg model,``  
基研研究会「場の理論と弦理論」  
2011年7月27日  
京都大学基礎物理学研究所(京都市)

[その他]

ホームページ等  
<http://higgs.phys.kyushu-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 博 (SUZUKI, Hiroshi)  
九州大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号: 90250977

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: