

Title	格子を用いたAdS/CFT対応の数値的検証
Sub Title	Lattice studies of AdS/CFT
Author	加堂, 大輔(Kadō, Daisuke) 杉野, 文彦( Sugino, Fumihiko) 松浦, 壮( Matsuura, Sō)
Publisher	
Publication year	2019
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2018. )
JaLC DOI	
Abstract	<p>本研究では、スーパーコンピューターを用いた数値計算により、ゲージ重力対応を検証する方法論について研究した。特に、転送行列・テンソル繰り込み群を用いた計算手法の開発と実現を行った。また、4次元N=1SYM理論における超対称グラディエントフロー法の理論体系の整備、ならびに、2次元のN=2超対称ヤンミルズ理論におけるO(a)改良の手法の開発を行った。これらは、超対称ヤンミルズ理論を数値計算して、ゲージ重力双対性を検証する際の方法論として中心的な役割を果たす。</p> <p>We have studied a methodology of verifying the gauge/gravity duality using numerical lattice simulations on a supercomputer. New transfer matrix and tensor network approaches were established. Furthermore, we have created a theory of a supersymmetric gradient flow in the four-dimensional N=1 SYM and developed a method of defining an O(a)-improved lattice action for N=2 SYM in two-dimensions. They play crucial roles in precision tests of the duality conjecture using numerical analyses of supersymmetric Yang-Mills theory.</p>
Notes	研究種目：基盤研究 (C) (一般) 研究期間：2016～2018 課題番号：16K05328 研究分野：格子ゲージ理論
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_16K05328seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_16K05328seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和元年6月3日現在

機関番号：32612  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2016～2018  
課題番号：16K05328  
研究課題名（和文）格子を用いたAdS/CFT対応の数値的検証

研究課題名（英文）Lattice studies of AdS/CFT

## 研究代表者

加堂 大輔 (KADOH, Daisuke)

慶應義塾大学・自然科学研究教育センター（日吉）・訪問研究員

研究者番号：90447219

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スーパーコンピューターを用いた数値計算により、ゲージ重力対応を検証する方法論について研究した。特に、転送行列・テンソル繰り込み群を用いた計算手法の開発と実現を行った。また、4次元N=1SYM理論における超対称グラディエントフロー法の理論体系の整備、ならびに、2次元のN=2超対称ヤンミルズ理論におけるO(a)改良の手法の開発を行った。これらは、超対称ヤンミルズ理論を数値計算して、ゲージ重力双対性を検証する際の方法論として中心的な役割を果たす。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、重力の量子論的な性質を数値計算によって明らかにすることで、宇宙がどのようにして生まれたかという宇宙創成のメカニズムや初期宇宙の進化、ブラックホールのミクロな構造の理解といった、物理学上の難問にアプローチする。特に、超対称ヤンミルズ理論と呼ばれる重力の量子論的な性質を説明できる理論をスーパーコンピューター上に実現する方法論を明らかにし、これにより日本が世界に先駆ける形で、物理学の新しい発展を実現する。

研究成果の概要（英文）：We have studied a methodology of verifying the gauge/gravity duality using numerical lattice simulations on a supercomputer. New transfer matrix and tensor network approaches were established. Furthermore, we have created a theory of a supersymmetric gradient flow in the four-dimensional N=1 SYM and developed a method of defining an O(a)-improved lattice action for N=2 SYM in two-dimensions. They play crucial roles in precision tests of the duality conjecture using numerical analyses of supersymmetric Yang-Mills theory.

研究分野：格子ゲージ理論

キーワード：格子ゲージ理論 超対称性 格子超対称性 グラディエントフロー法 ゲージ重力対応 テンソル繰り込み群 AdS/CFT ブラックホール

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

AdS/CFT 対応(Maldacena, 1997)をはじめとするゲージ重力双対性は、素粒子の基礎理論であるゲージ場の量子論と超弦理論を背景とする重力理論が等価であるという予想である。双対性を用いると、ブラックホールの情報喪失問題の理解や超弦理論の非摂動的な定義が得られる可能性、さらに、量子色力学、超伝導、超流動の理論を重力側からホログラフィックに記述し解析的に扱おうとする魅力的な試みが可能になる。これらの試みの多くは双対性が正しいとする立場に立ち、その応用が広がるにつれ、論理の根本である双対性の検証が待ったなしの状況になってきた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、AdS/CFT 対応を格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションにより検証する方法論を確立し、それを数値計算に応用していくことで分野を超えて幅広く応用されてきた同分野に新しい知見をもたらすことである。

### 3. 研究の方法

超対称ヤンミルズ理論を格子理論として定義し、モンテカルロ法を用いて数値計算するとき、負符号問題と呼ばれる深刻な問題を生じる。そこで本研究では、負符号問題を解決する手法として、転送行列やテンソル繰り込み群を用いた計算手法の開発を行う。また、高精度の結果を確立するために格子作用の  $O(a)$  改良と、超対称ヤンミルズ理論における超対称なグラディエントフロー法の確立も行う。

### 4. 研究成果

研究成果として、転送行列・テンソル繰り込み群を用いた計算手法の開発と実現、超対称グラディエントフロー法の理論体系の整備、超対称ヤンミルズ理論における  $O(a)$  改良の手法の開発を行った。これらは、超対称ヤンミルズ理論を数値計算して、ゲージ重力双対性を検証する際の方法論として中心的な役割を果たす。

格子上に定義された超対称量子力学系はモンテカルロ法を用いて数値計算されてきた。しかし、ゲージ重力双対性の観点で重要な BFSS 模型のようなヤンミルズ量子力学系にモンテカルロ法を適用するといわゆる負符号問題の困難を生じる。そこで、中山氏との共同研究で、転送行列を用いた格子超対称量子力学系の数値計算手法を開発した。また、藏増、中村、坂井、武田、吉村氏らと、2次元理論におけるテンソル繰り込み群を用いた超対称理論の計算手法の確立も進めた。

4次元の  $N=1$  超対称ヤンミルズ理論において、超対称グラディエントフロー法の理論的な整備を行った。結果として、ゲージ共変性を明白に保った形式で、超対称なフロー方程式を構成する方法論を確立した。この方法論を適用していくことで、超対称ヤンミルズ理論において、エネルギー運動量テンソルなどの物理的に重要な演算子を格子計算で数値的に評価することが可能となる。

2次元の超対称ヤンミルズ格子理論における  $O(a)$  改良の方法論の確立も行ってきた。これまでのナイーブな格子作用と比較して、格子上に超対称性を部分的に実現しつつ、格子作用の古典的な  $O(a)$  改良の手法を明らかにした。構成した格子作用を数値計算に用いることで、連続極限により近い振る舞いが得られ、精度の良い数値計算を実現することが可能になる。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11件)

[Daisuke Kadoh](#), Takeru Kamei, Hiroto So, Supersymmetric quantum mechanics with cyclic Leibniz rule on lattice. Apr 19, 2019. 37 pp. 査読有. Accepted for publication in PTEP, 2019.

[Daisuke Kadoh](#), Yoshinobu Kuramashi, Ryoichiro Ueno, Irregular parameter dependence of numerical results in tensor renormalization group analysis. Dec 26, 2018. 14 pp. 査読有. Accepted for publication in PTEP, 2019.

[Daisuke Kadoh](#), Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda, Yusuke Yoshimura, Tensor network study of two dimensional lattice  $\phi^4$  theory. Dec 1, 2018. 7 pp. 査読無. Accepted for publication in POS. 2019.

[Daisuke Kadoh](#), Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda, Yusuke Yoshimura, Tensor network analysis of critical coupling in two dimensional  $\phi^4$  theory. Nov 29, 2018. 21 pp. 査読有. Accepted for publication in JHEP, 2019.

Daisuke Kadoh and Katsumasa Nakayama, Direct computational approach to lattice supersymmetric quantum mechanics. Mar 21, 2018. 20 pp. 査読有. Published in Nucl.Phys. B932 (2018) 278-297.  
DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2018.05.012

Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda, Yusuke Yoshimura, Tensor network formulation for two-dimensional lattice  $N = 1$  Wess-Zumino model. Jan 12, 2018. 31 pp. 査読有. Published in JHEP 1803 (2018) 141.  
DOI: 10.1007/JHEP03(2018)141

Daisuke Kadoh, Gauge/gravity duality – From lattice gauge theory to black hole. 2017. 6 pp. 査読無. Published in Int.J.Mod.Phys. A32 (2017) no.36, 1747018.  
DOI: 10.1142/S0217751X17470182

Masanori Hanada, Daisuke Kadoh, So Matsuura, Fumihiko Sugino,  $O(a)$  Improvement of 2D  $N=(2,2)$  Lattice SYM Theory. Nov 7, 2017. 32 pp. 査読有. Published in Nucl.Phys. B929 (2018) 266-297.  
DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2018.02.008

Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda, Yusuke Yoshimura, Application of tensor network method to two dimensional lattice  $N=1$  Wess-Zumino model. Nov 6, 2017. 8 pp. 査読無. Published in EPJ Web Conf. 175 (2018) 11019.  
DOI: 10.1051/epjconf/201817511019

Daisuke Kadoh, Precision test of the gauge/gravity duality in two-dimensional  $N=(8,8)$  SYM. Feb 6, 2017. 7 pp. 査読無. Published in PoS LATTICE2016 (2017) 033.  
DOI: 10.22323/1.256.0033

Daisuke Kadoh, Recent progress in lattice supersymmetry: from lattice gauge theory to black holes. Jul 5, 2016. 15 pp. 査読無. Published in PoS LATTICE2015 (2016) 017.  
DOI: 10.22323/1.251.0017

〔学会発表〕(計 28 件)

加堂大輔, 浮田尚哉, SQCD における超対称グラディエントフロー方程式. 日本物理学会 第 74 回年次大会. 2019 年 3 月 17 日. 九州大学 (伊都キャンパス).

浮田尚哉, 加堂大輔, 超対称グラディエントフローが持つ紫外有限性に基づいた物理量の構成. 日本物理学会 第 74 回年次大会. 2019 年 3 月 17 日. 九州大学 (伊都キャンパス).

加堂大輔, 菊地健吾, 浮田尚哉, Wess-Zumino グラディエントフローとその摂動計算. 日本物理学会 第 74 回年次大会. 2019 年 3 月 17 日. 九州大学 (伊都キャンパス).

浮田尚哉, 加堂大輔, 超対称グラディエントフロー方程式を用いた 4 次元  $N=1$  超対称ヤン・ミルズ理論の超カレントの構成. 日本物理学会 2018 年秋季大会. 2018 年 9 月 15 日. 信州大学 (松本キャンパス).

加堂大輔, 浮田尚哉,  $N=1$  SYM における超対称グラディエントフロー方程式について. 日本物理学会 2018 年秋季大会. 2018 年 9 月 15 日. 信州大学 (松本キャンパス).

加堂大輔, 菊地健吾, 浮田尚哉, Wess-Zumino 模型に対するグラディエントフロー方程式. 日本物理学会 2018 年秋季大会. 2018 年 9 月 15 日. 信州大学 (松本キャンパス).

加堂大輔, 亀井武成, 宗博人, Numerical analysis of supersymmetric quantum mechanics on lattice with cyclic Leibniz rule. 日本物理学会 2018 年秋季大会. 2018 年 9 月 15 日. 信州大学 (松本キャンパス).

中山勝政, 加堂大輔, 自発的に超対称性が破れた系の数値的研究. 日本物理学会 2018 年秋季大会. 2018 年 9 月 15 日. 信州大学 (松本キャンパス).

加堂大輔, 藏増嘉伸, 中村宜文, 坂井涼, 武田真滋, 吉村友佑, テンソルくりこみ群による 2 次元 4 理論の臨界結合定数の計算. 日本物理学会 2018 年秋季大会. 2018 年 9 月 14 日. 信州大学 (松本キャンパス).

加堂大輔, 藏増嘉伸, 上野峻一郎, テンソルくりこみ群の改良に関する幾つかの考察. 日本物理学会 2018 年秋季大会. 2018 年 9 月 14 日. 信州大学 (松本キャンパス).

加堂大輔, "Supersymmetry gradient flow". 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 2018. 2018 年 9 月 9 日. 東北大学.

Daisuke Kadoh, "Supersymmetry gradient flow". Quantum Gravity meets lattice QFT. ECT\*, Trento, Italy, 6 September 2018.

Daisuke Kadoh, "Supersymmetry gradient flow". The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory(LATTICE2018). Kellogg Hotel & Conference Center, MSU, East Lansing, Michigan, USA, 27 July 2018

Daisuke Kadoh, "Supersymmetry gradient flow", Numerical approaches to holography, quantum gravity and cosmology, 21-24 May 2018, Higgs Centre for Theoretical Physics, The University of Edinburgh.

加堂大輔, 浮田尚哉,  $N=1$  超対称グラディエントフロー方程式での紫外有限性の証明. 日本物理学会 第 73 回年次大会. 2018 年 3 月 23 日. 東京理科大学 (野田キャンパス).

中山勝政, 加堂大輔, 格子化された一次元の超対称模型における数値解析. 日本物理学会 第 73 回年次大会. 2018 年 3 月 23 日. 東京理科大学 (野田キャンパス).

加堂大輔, 藏増嘉伸, 中村宜文, 坂井涼, 武田真滋, 吉村友佑, 2 次元格子  $N=1$  Wess-Zumino 模型のテンソルネットワーク形式: 超対称性の相構造. 日本物理学会 第 73 回年次大会. 2018 年 3 月 23 日. 東京理科大学 (野田キャンパス).

加堂大輔, グラスマンテンソルのネットワークとその繰り込み群に関する一考察. 日本物理学会 第 73 回年次大会. 2018 年 3 月 23 日. 東京理科大学 (野田キャンパス).

Daisuke Kadoh, "Lattice Study of Gauge/Gravity Duality in Two-dimensional  $N=(8,8)$  SYM", Nonperturbative and Numerical Approaches to Quantum Gravity, String Theory and Holography, 27 January 2018 to 03 February 2018, ICTS Bangalore, Tata Institute of Fundamental Research.

加堂大輔, "超弦理論の数値的研究の展望", 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, 2017 年 12 月 28 日, 筑波大学東京キャンパス.

⑲ 加堂大輔, 藏増嘉伸, 中村宜文, 坂井涼, 武田真滋, 吉村友佑, テンソルくりこみ群による 2 次元格子  $N=1$  Wess-Zumino 模型の相構造解析. 日本物理学会 2017 年秋季大会. 2017 年 9 月 14 日. 宇都宮大学 (峰キャンパス).

⑳ 加堂大輔, 浮田尚哉, 超対称ヤンミルズ理論のグラディエントフロー方程式に関する幾つかの考察. 日本物理学会 2017 年秋季大会. 2017 年 9 月 14 日. 宇都宮大学 (峰キャンパス).

㉑ 加堂大輔, 藏増嘉伸, 中村宜文, 坂井涼, 武田真滋, 吉村友佑, テンソルくりこみ群を用いた格子上の 2 次元  $N=1$ Wess-Zumino 模型の研究. 日本物理学会 第 72 回年次大会. 2017 年 3 月 18 日. 大阪大学 (豊中キャンパス).

㉒ 加堂大輔, 2 次元格子超対称ヤンミルズ理論の数値計算によるゲージ重力双対性の検証. 日本物理学会 第 72 回年次大会. 2017 年 3 月 17 日. 大阪大学 (豊中キャンパス).

㉓ 加堂大輔, 花田政範, 杉野文彦, 松浦壮, 格子超対称ヤンミルズ理論における  $O(a)$ 改良の方法. 日本物理学会 2016 年秋季大会. 2016 年 9 月 22 日. 宮崎大学 (木花キャンパス).

㉔ 加堂大輔, 格子超対称性と  $O(a)$ 改良について. 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 2016. 2016 年 9 月 16 日. 静岡労政会館.

⑳ 加堂大輔, "格子超対称性の進展", Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories, 2016年9月12日, 筑波大学.

㉑ D. Kadoh, "Precision test of the gauge/gravity duality in two-dimensional  $N=(8,8)$  SYM". The 34th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2016). Highfield Campus, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK, 24-30 July 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし。

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：杉野文彦

ローマ字氏名：SUGINO, Fumihiko

所属研究機関名：岡山光量子科学研究所

部局名：

職名：専門研究員

研究者番号(8桁)：60393419

研究協力者氏名：松浦壮

ローマ字氏名：MATSUURA, So

所属研究機関名：慶應義塾大学

部局名：商学部

職名：教授

研究者番号(8桁)：70392123

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。