

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540324

研究課題名（和文） 自発的対称性の破れの機構の幾何学的定式化

研究課題名（英文） Geometric formulation of spontaneous symmetry breaking

研究代表者

阪口 真 (SAKAGUCHI MAKOTO)

岡山光量子科学研究所・研究員

研究者番号：90382027

研究成果の概要（和文）：超対称性が自発的部分的に破れる  $N=2$ クイバーゲージ模型を構成し真空構造を明らかにした。超対称ゲージ理論の Wilson line に挿入される演算子と Anti-de Sitter 空間上の基本弦やブレーンの揺らぎとの対応を議論した。非相対論的共形対称性の超対称化を系統的に行った。また超対称 Chern-Simons-matter 理論の非相対論的極限を通じて超対称 Schrödinger 不変な非相対論的共形場理論を新たに構成した。

研究成果の概要（英文）：We constructed  $N=2$  quiver gauge models in which  $N=2$  supersymmetry is broken to  $N=1$  spontaneously. We examined a correspondence between small fluctuations around strings and branes in AdS and operator insertions on Wilson lines in the boundary gauge theories. Non-relativistic superconformal algebras are systematically derived. We obtained super Schrödinger-invariant field theories via non-relativistic limits of super Chern-Simons-matter theories.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子論, 超対称性, 自発的対称性の破れ

## 1. 研究開始当初の背景

自然の現実的な記述では、対称性は自発的に破れると期待される。藤原和人氏・糸山浩氏（大阪市大）との共同研究に基づく3編の論文 [Prog. Theor. Phys. 113 (2005) 429, Nucl. Phys.

B723 (2005) 33, Nucl. Phys. B740 (2005) 58] において、超対称性およびゲージ対称性が  $N=2$   $U(N)$ から  $N=1$   $\prod_r U(N_r)$ に自発的に破れる  $N=2$   $U(N)$ ゲージ模型を構成した。この模型は、電気的および磁氣的 Fayet-Iliopoulos(FI)項を含む

$N=2$  超対称 Yang-Mills(SYM)理論の有効作用とみなすことができる。この研究で、電氣的FI項がベクトル超場に電磁双対な超場に含まれる補助場を定数だけずらす効果を引き起こすことから、ベクトル超場の補助場を定数だけずらす項として磁氣的 FI 項を導入することが部分的自発的超対称性の破れの鍵であることを見出した。

この磁氣的 FI 項は、超弦理論の枠組みでは内部空間のサイクルに巻きついたブレーン(UV)あるいは Ramond-Ramond フラックス(IR)として幾何学的に実現される。また、orbifold 特異点を解消する効果が D3 ブレーン精査上では磁氣的 FI 項として理解できることが示唆されていた。

他方、佐々木-Einstein(SE)計量  $Y^{p,q}$  の発見と、この計量が AdS-Kerr ブラックホール計量から誘導できることを示した橋本義武氏・安井幸則氏(大阪市大)との共同研究 [Phys.Lett.B600(2004)270] に端を発し、多くの SE 計量( $L^{p,q,r}$  等)が誘導された。これにより、 $AdS_5 \times SE$  多様体上の超弦理論に AdS/CFT 双対な  $N=1$  クイバーゲージ理論が構成され、盛んに研究されていた。

そこで、これら  $N=1$  ゲージ理論の IR 固定点を  $N=2$  ゲージ模型の超対称性が  $N=1$  に破れた相として実現することで、超対称性の自発的破れの機構の幾何学的理解に迫れると期待された。これを通じて  $N=1$  ゲージ理論の双対性の統一的記述が得られると予想された。

## 2. 研究の目的

近年発展した超弦理論の真空の研究を踏まえ、上で述べた研究代表者がこれまで行ってきた研究を更に推し進め、ゲージ理論における自発的対称性の破れの幾何学的理解に迫ることが本研究の目的である。

また、対称性が自発的に破れた SYM 理論を反 de Sitter(AdS)時空上の超弦理論を使って調べる研究として、SYM 理論の Wilson line (WL)を AdS 時空上の基本弦や D ブレーンを使って解析

する。

## 3. 研究の方法

- (1) 自発的超対称性の破れを引き起こす  $N=2$  (クイバー)ゲージ模型を構成し、その真空構造を解明し、Seiberg 双対性などの  $N=1$  ゲージ理論の双対性の統一的な記述を追究する。また、 $N=2$  超対称性が自発的に破れるときに、カイラルフェルミオンが現れるのかを明らかにする。
- (2)  $AdS_5 \times S^5$  上の  $AdS_2$  に世界面が広がった弦 ( $AdS_2$  弦)の揺らぎを調べ、SYM理論のWLの微小変形に伴い挿入される演算子との対応を明らかにする。さらに、 $AdS_2 \times S^2$  に広がった D3 ブレーンや  $AdS_2 \times S^4$  に広がった D5 ブレーンの揺らぎを明らかにし、基本表現以外の WL に挿入される演算子との対応を明らかにする。

## 4. 研究成果

- (1) 自然の現実的な記述では、対称性は自発的に破れると期待される。糸山浩氏・丸吉一暢氏(大阪市大)との共同研究として  $N=2$  超対称性が自発的に  $N=1$  に破れる  $N=2A$  型クイバーゲージ模型を新たに構成した。この模型は、 $N=2$   $U(N)$ ベクトル超場と双基本表現の  $N=2$  ハイパー超場で構成され、磁氣的・電氣的 FI 項を含む  $N=2$  SYM 理論の有効作用とみなすことが出来る。磁氣的 FI 項はベクトル超場に含まれる補助場を定数だけずらす項として特長付けられる。この模型の真空構造を調べ、クーロン相では  $N=2$  超対称性が自発的に  $N=1$  に破れること、自発的超対称性の破れに伴う南部-Goldstone フェルミオンがゲージ対称性の overall  $U(1)$ 部分から供給されることがわかった。また  $N=2$  クイバーゲージ模型のクーロン相では「超対称性が自発的に  $N=1$  に破れるときにカイラルフェルミオンは現れない」ことが分かった。そこで Higgs 相においてもこの no-go 定理が成り立つのかは興味深い問題として残されている。

この模型の応用として、orbifold 特異点上にあ

る D3 ブレーン上の  $N=2$  ゲージ理論から conifold 特異点にある D3 ブレーン上の  $N=1$  ゲージ理論への質量摂動による繰込み群の流れ [Klebanov-Witten'98] が、この模型で記述できることが分かった。この研究により  $N=1$  ゲージ理論の様々な双対性がゲージ模型を使って自然に理解できる可能性が示された。

さらに、 $N=2$  ADE 型クイバーゲージ模型を構成し真空構造を考察した。このゲージ模型を使って、超対称/非超対称双対性 [Aganagic et al'0804] が統一的に理解できることが示された [丸吉'0808]。

(2) ゲージ理論に超弦理論から迫る研究として、吉田健太郎氏(カリフォルニア大学サンタバーバラ カブリ理論研(UCSB KITP))と共に以下を行った。SYM 理論の基本表現に関する Wilson loop(WL)は、 $AdS_2$  弦とホログラフィック双対であると考えられる。そこで WL に挿入される演算子と  $AdS_2$  弦の揺らぎとの対応を明らかにした。また対称表現に関する WL に対応すると期待されている  $AdS_2 \times S^2$  に広がる D3 ブレーンの揺らぎを調べ、 $AdS_2$  弦の揺らぎのスペクトラムが KK モードとして含まれることが分かった。これにより D3 ブレーンの境界条件と WL の表現の違いとの関係を明らかに出来ると期待できる。

(3) 自発的ゲージ対称性の破れが重要な役割を果たす例として超伝導や量子ホール効果が知られている。中山優氏・笠真生氏(カリフォルニア大バークレー)・吉田健太郎氏(UCSB KITP)との共同研究として、特に後者と深く関係する 3 次元超対称 Chern-Simons-matter(CSM)理論から、非相対論的(NR)極限を通じて超対称 NR 共形場理論(CFT)を誘導した。NR 極限によって、スケール不変性と共形対称性が回復し Schrödinger 対称性が出現するが、一般には超対称性は破れること、ゲージ対称性が破れた真空では超対称性は完全に破れること等が分かった。この「破れ」の構造の数理物理的理解は興

味深い。得られた NRCFT の中で最も超対称性が高いものとして、 $N=3$  CSM 理論から 8 超対称で  $U(1) \times U(1)$  R 対称性をもつ NRCFT を得た。同様に  $N=6$  CSM 理論から、14 超対称で  $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$  R 対称性を持つ NRCFT を誘導した。

Schrödinger 代数が、一次元高い共形代数に部分代数として含まれることから、超対称共形代数から超対称な Schrödinger 代数が誘導できることを示し、24 超対称などの超対称性の高い Schrödinger 代数を得た。この超対称 Schrödinger 代数の超電荷は、超対称共形代数の超共形電荷の半分以外で与えられる。特に  $U(1)$  R 対称性を持つ 6 超対称 3 次元 Schrödinger 代数は、 $N=2$  CSM 理論の非相対論的極限の対称性 [Leblanc et al'92] と一致することが分かった。24 超対称 Schrödinger 不変な NRCFT の構成は興味深い問題として残されている。

(4) ユニタリティー・フェルミ気体の重力理論による記述の可能性に端を発し、近年 NRCFT が注目されている。Schrödinger 対称性と共に NR 共形対称性として知られるガリレイ共形(GC)対称性に注目し、GC 対称性が共形対称性の Inönü-Wigner 縮約として誘導できることと、(D+1)次元 AdS 対称性と D 次元共形対称性が同型であることから、GC 対称性が 1 次元高い Newton-Hooke string 対称性の境界での実現であることを明らかにした。さらに GC 対称性の超対称化を行った。

また、時間の指数  $z$  が 2(Schrödinger 対称性)や 1(GC 対称性)に限らない場合についても、超対称な「非相対論的共形対称性」を 1 次元高い共形超対称性から誘導した。

(5) 重なった M2 ブレーン世界面上の低エネルギー有効理論として  $N=6$   $U(N) \times U(N)$  CSM 理論 (ABJM 模型)が提出され、 $AdS_4 \times CP^3$  上の IIA 超弦理論(あるいは  $AdS_4 \times S^7/Z_k$  上の M 理論)との

双対性が期待されている。特に CS 項のレベル  $k$  が  $k=1,2$  のとき超対称性が  $N=8$  に拡大する。そこで Hyeonjoon Shin 氏(Sogang 大 CQeST)と吉田健太郎氏(京大理)との共同研究として、 $AdS_4 \times S^7/Z_k$  の  $AdS_2 \times S^1$  に広がる M2 ブレーンの揺らぎを調べた。この M2 ブレーンは  $k$  が無限大の極限で  $AdS_4 \times CP^3$  上の IIA 弦となる。 $AdS_2$  上の KK モードとしてみた場合、揺らぎは  $SO(8)$  対称性を持つ超対称多重項にまとまることわかった。さらに境界まで届く揺らぎを明らかにし、境界の  $N=8$  超対称性との整合性を見出した。これらは境界の WL に挿入される演算子と関係すると期待され、1/2BPS WL の構成への足がかりになると期待している。

#### 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 18 件)

- ① Makoto Sakaguchi, "Super Galilean conformal algebra in AdS/CFT," Journal of Mathematical Physics 51 (2010) 042301 (16pp) 査読有
- ② Yu Nakayama, Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, "Non-Relativistic M2-brane Gauge Theory and New Superconformal Algebra," Journal of High Energy Physics 0904 (2009) 096 (21pp). 査読有
- ③ Yu Nakayama, Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, "Interacting SUSY-singlet matter in non-relativistic Chern-Simons theory," Journal of Physics A 42 (2009) 195402 (9pp). 査読有
- ④ Yu Nakayama, Shinsei Ryu, Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, "A family of super Schrödinger invariant Chern-Simons matter systems," Journal of High Energy Physics 0901 (2009) 006 (29pp). 査読有
- ⑤ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida,

"Holography of non-relativistic string on  $AdS_5 \times S^5$ ," AIP Conf. Proc. 1078 (2009) 468-470. 査読無

- ⑥ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, "More super Schrödinger algebras from  $psu(2,2|4)$ ," Journal of High Energy Physics 0808 (2008) 049 (14pp). 査読有
- ⑦ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, "Super Schrödinger algebra in AdS/CFT," Journal of Mathematical Physics 49 (2008) 102302 (19pp). 査読有
- ⑧ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, "Holography of non-relativistic string on  $AdS_5 \times S^5$ ," International Journal of Modern Physics A 23 (2008) 2275-2276. 査読有
- ⑨ Kazuhito Fujiwara, Hiroshi Itoyama, and Makoto Sakaguchi, "Spontaneous partial breaking of N=2 supersymmetry and the U(N) gauge model," Advanced Studies in Pure Mathematics 55 (2009) 223-233 査読有
- ⑩ Holger B. Nielsen and Masao Ninomiya, "Non-existence of Irreversible Processes in Compact Space Time," International Journal of Modern Physics A 22 (2008) 6227-6241. 査読有
- ⑪ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, "Holography of Non-relativistic String on  $AdS_5 \times S^5$ ," Journal of High Energy Physics 0802 (2008) 092 (28pp). 査読有
- ⑫ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, "A Semiclassical String Description of Wilson Loop with Local Operators," Nucl. Phys.B 798 (2008) 72-88. 査読有
- ⑬ Hiroshi Itoyama, Kazunobu Maruyoshi and Makoto Sakaguchi, "N=2 Quiver Gauge Model and Partial Supersymmetry Breaking," Nucl. Phys. B 794 (2008) 216-230. 査読有
- ⑭ Holger B. Nielsen and Masao Ninomiya,

“Search for Effect of Influence from Future in Large Hadron Collider,” International Journal of Modern Physics A 23 (2008) 919-932. 査読有

⑮ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, “Noncommutative D-brane from covariant AdS superstring,” Nucl. Phys. B 797 (2008) 179-198. 査読有

⑯ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, “Non-relativistic string and D-branes on  $AdS_5 \times S^5$  from semiclassical approximation,” Journal of High Energy Physics 0705 (2007) 051 (23pp). 査読有

⑰ Holger B. Nielsen and Masao Ninomiya, “Complex Action, Rearrangement for Future and Higgs Broadening,” Proceedings to the 10th Workshop ‘What Comes Beyond the Standard Models’, Bled, July 17. - 27., 2007, Slovenia, p.144-185. 査読無

⑱ Makoto Sakaguchi and Kentaroh Yoshida, “Intersecting noncommutative M5-branes from covariant open supermembrane,” Nucl. Phys. B 781 (2007) 85-98. 査読有

#### 〔学会発表〕（計 15 件）

① 阪口真, “Semiclassical Analysis of M2-brane in  $AdS_4 \times S^7/Z_k$ ,” 日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20 日 岡山大学

② 阪口真, “Galilean conformal symmetry in AdS/CFT,” 日本物理学会 秋季大会 2009 年 9 月 11 日 甲南大学

③ 阪口真, “Super Galilean conformal algebra in AdS/CFT,” 基研研究会「場の理論と弦理論」2009 年 7 月 9 日 京都大学基礎物理学研究所

④ 阪口真, “Super Schrödinger in Super Conformal,” 日本物理学会 2008 年秋季大会 2008 年 9 月 21 日 山形大学小白川キャンパス

⑤ 阪口真, “Super Schrödinger invariant field

theories,” 日本物理学会 第 64 回年次大会 企画講演, 2009 年 3 月 27 日, 立教学院池袋キャンパス

⑥ 阪口真, “Non-relativistic limit of supersymmetric Chern-Simons-matter theories,” 大阪素粒子セミナー, 2009 年 3 月 23 日 大阪市立大学文化交流センター

⑦ 阪口真, “Non-relativistic limits of  $N=6$  Chern-Simons-Matter theory,” KEK 理論研究会 2009, 2009 年 3 月 17 日 高エネルギー加速器研究機構

⑧ Makoto Sakaguchi, “Super Schrödinger invariant field theories,” 国際会議 Sapporo Winter School 2009, 2009 年 1 月 9 日, 北海道大学

⑨ 阪口真, “Super Schrödinger algebra & non-relativistic limits of supersymmetric Chern-Simons-matter theories,” 理研シンポジウム「場と弦の理論の新展開に向けて」2008 年 12 月 20 日 理化学研究所

⑩ 阪口真, “Non-relativistic limits of supersymmetric field theories & super Schrödinger algebras,” KEK 研究会「ヘテロティック弦と M 理論」2008 年 12 月 3 日 高エネルギー加速器研究機構

⑪ 阪口真, “Super Schrödinger in Super Conformal,” 基研研究会「量子場理論と弦理論の発展」2008 年 7 月 31 日 京都大学基礎物理学研究所

⑫ Makoto Sakaguchi, “Holography of non-relativistic string on  $AdS_5 \times S^5$ ,” 国際会議 SUSY2008, 2008 年 6 月 21 日 Seoul, Korea

⑬ 阪口真, “Holography of non-relativistic string on  $AdS_5 \times S^5$ ,” 日本物理学会, 2008 年 3 月 24 日 近畿大学

⑭ 阪口真, “Holography of Non-relativistic String on  $AdS_5 \times S^5$ ” (poster), 国際会議 “Progress of String Theory and Quantum Field

Theory,” 2007 年 12 月 9 日 大阪市立大学

⑮ 阪口真, “Non-relativistic string and circular  
Wilson loop,” 日本物理学会, 2007 年 9 月 24  
日 北海道大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阪口 真(SAKAGUCHI MAKOTO)

岡山光量子科学研究所・研究員

研究者番号:90382027

### (2) 研究分担者

二宮 正夫(NINOMIYA MASAO)

岡山光量子科学研究所・所長

研究者番号:40198536

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: