

平成 31 年 4 月 10 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17677

研究課題名(和文)複合ソリトン配位に基づく量子非摂動現象の新たな側面

研究課題名(英文)New aspects of nonperturbative quantum phenomena based on composite soliton configurations

研究代表者

三角 樹弘(Misumi, Tatsuhiro)

秋田大学・理工学研究科・講師

研究者番号：80715152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：場の量子論の定式化・解析法は主に摂動論に基づいており、クォーク閉じ込めや質量ギャップなど非摂動現象の本質的理解には未だ至っていない。この研究では「複合ソリトン配位=bion」と呼ばれる対象に注目し、その性質や関係する問題を具に調べることで以下の研究成果を上げた。(1)量子異常マッチング・格子数値計算を通じた研究により、弱結合領域でのbion凝縮閉じ込め相が強結合閉じ込め相と連続的に繋がることを示唆する結果を得た。(2)bion寄与と摂動寄与の総和を取ることで、不定性のない厳密な物理量が得られること、そしてこの手法に基づく場の量子論の非摂動的定式化=リサージェンス理論の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子は場の量子論と呼ばれる理論体系によって記述されるが、容易に解析できるのは素粒子間の相互作用が弱い領域(摂動領域)のみであり、核子形成や質量生成が起きる強結合現象(非摂動現象)の理解はいまだに不完全である。本研究では、「bion」と呼ばれる複合ソリトン配位がこのような強結合現象に重要な寄与をしていることを示すと同時に、bion配位の物理量への寄与を足しあげることで場の量子論の非摂動的定式化に繋がることを示した。これらの研究成果は、従来の場の量子論研究とは一線を画する独創的なものであり、素粒子物理のみならず物性物理の非摂動現象の理解にも大きな貢献をする可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The formulation and analysis of quantum field theory is mainly based on perturbation theory. This is the reason why we have not yet reached essential understanding on nonperturbative phenomena including quark confinement and mass gap in gauge theory. In this research we focus on composite soliton configurations called bions and investigate their properties in details. The achievements are summarized as follows: (1)We have obtained the results indicating adiabatic continuity between the bion-induced weak-coupling confining phase and the strong-coupling confining phase by use of quantum anomaly matching and lattice simulations. (2)We have found that one can obtain exact and unambiguous results of physical quantities by summing up the perturbative and the nonperturbative bion contributions, where imaginary ambiguities are cancelled. It indicates that we can construct nonperturbative formulation of quantum field theory based on the summation, which is called resurgence theory.

研究分野：素粒子論・場の量子論

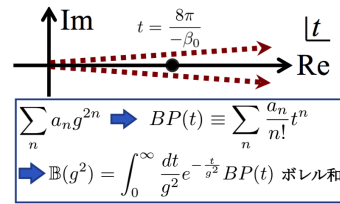
キーワード：場の量子論 非摂動現象 複合ソリトン バイオン配位 リサージェンス理論 量子異常マッチング  
格子数値計算 複素解

1. 研究開始当初の背景

素粒子や物性系を記述する場の量子論の定式化・解析法は主に摂動論に基づいている。しかし量子色力学(QCD)など漸近自由性を持つ理論においては、「閉じ込め」のような非摂動現象の理解に非摂動的定式化が不可欠である。ここではこの問題に挑むため、以下の2点に注目した。

(1)QCDにおける閉じ込めとは、高エネルギーで(ほぼ)無質量のクォーク・グルーオンが、低エネルギーでは有質量の複合粒子を構成し、クォークを単独では取り出せない事を指す。次元の低い2+1次元理論では、磁荷monopoleの凝縮によって閉じ込めが起こる [Polyakov (82)]。一方、現実の3+1次元QCDでは、格子計算を用いても閉じ込め機構の理解は未だ困難である。

(2)場の量子論の摂動論を高次まで行くと、級数が階乗的に大きくなり一般の結合定数での物理を扱えない。しかし摂動級数から階乗部分を除いて級数和(ボレル変換)を取り、新たなパラメタについて積分すれば「ボレル和」と呼ばれる有限な量が得られる[右図]。しかしQCDなどの漸近自由性を持つ理論ではボレル変換が正実軸上に特異点を持ち、ボレル和を得る際の積分経路に不定性が生じるため[右図]、符号が定まらない虚部がボレル和に表れる。赤外リノマロンと呼ばれるこの不定虚部はQCDの力学的スケールを含むため、何らかの非摂動的効果の反映であると考えられている [ 't Hooft (77) ]。

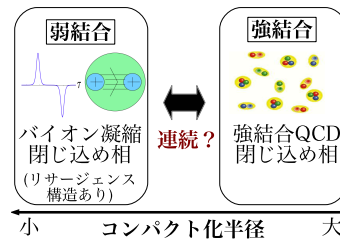


$$\text{Im} [\mathbb{B}(e^{\pm i\epsilon} g^2)] \propto \pm e^{\frac{8\pi}{\beta_0 g^2}} = \pm \Lambda_{\text{QCD}}^4$$

本研究を始める前の時点で、上記の事実に基づき以下の研究を行っていた。

(1)Bion閉じ込め機構と相構造

コンパクト化時空 ( $R^3 \times S^1$ ) 上で随伴表現クォークを導入した QCD やその理論に基本表現クォークを特殊な境界条件で導入した理論 (ZN-QCD) には、磁化を持つ分数インスタントン解が存在し、これらが正反共存する配位は bion 配位[右図]と呼ばれる。コンパクト化半径が小さい場合この理論は 2+1 次元ゲージ理論に類似しており、bion 凝縮によって弱結合閉じ込めが起こる [Unsal (07)]。一方、この理論はコンパクト化半径無限大極限で現実の QCD に帰着する。そこで、摂動計算と有効模型計算を組み合わせ、コンパクト化半径、クォーク質量、境界条件パラメタについての閉じ込め相図を描き出し、弱結合閉じ込め相が強結合閉じ込め相と連続的に繋がる可能性を示した [Misumi, Kanazawa (14)]。厳密にこの連続性が示せれば、bion 凝縮に基づく機構として QCD 閉じ込めを理解出来る。



(2)低次元場の量子論におけるリサージェンス展開

量子力学では、bion 配位の寄与(準モジュライ積分)に不定虚部が生じ、それが摂動的ボレル和の不定虚部を相殺する [Zinn-Justin (81)]。この構造=リサージェンス構造の理解を深めるため、bion を多数含む配位の寄与を計算し、不定虚部が高い精度で相殺されることを確認した [Misumi, et. al. (15)]。この結果は、全ての Bion 配位足し上げと摂動計算を組み合わせれば、一般の結合定数で不定虚部のない物理的結果が得られることを示唆しており、実際その構造に基づく非摂動定式化=リサージェンス理論 [M. Marino, et. al (06), Dunne, Unsal (12)] が注目を集めている。また、場の量子論でのリサージェンス構造を調べるため、QCD に似た性質を持つ  $R^1 \times S^1$  上の  $CP^{N-1}$  シグマ模型の bion 寄与を計算し、不定虚部が生じることを確認した [Misumi, et. al, (14)]。この結果は  $R^3 \times S^1$  上の QCD においても bion 配位が赤外リノマロン不定虚部を除去する可能性を示唆しており、特に(1)の研究で弱結合-強結合閉じ込め相が繋がる場合には、現実の QCD におけるリサージェンス構造が期待出来る。

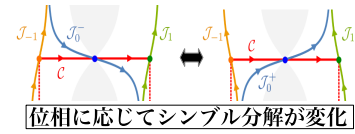
2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の研究をさらに推し進めるため、(1)bion 弱結合閉じ込め相と強結合閉じ込め相の連続性、(2)摂動論と bion 寄与の総和に基づく非摂動的定式化、という 2 つの研究により量子非摂動現象の理解を進展させることであった。これは、複合ソリトン配位である bion を軸として、場の量子論の非摂動的解析法と定式化を同時に追求する挑戦的な研究である。そこでの問いは以下に集約されていた：弱結合-強結合閉じ込め相は連続的に繋がるか？強結合閉じ込めは bion もしくは monopole によって引き起こされるのか？場の量子論でも bion 寄与により不定虚部が相殺されるか？リサージェンス理論による場の量子論の非摂動定式化は可能か？

初めの問いであるゲージ理論の相構造と閉じ込め相の連続性については、80 年代に提唱されていた量子異常マッチングが高階形式対称性にまで拡張されたことで 2014 年以降大きな発展があった。場の理論が持つ大域的対称性をゲージ化した際に量子異常(ゲージアノマリー)が時に現れるが、その量子異常はエネルギースケールによらず不変である。これを用いることで、理論の低エネルギーでの真空構造に制限をかけることができる。たとえば、QCD のように低エネルギーでの質量ギャップが推定される理論において、高エネルギー(弱結合領域)でトーフト量子異常が見つかったとしよう。この量子異常が低エネルギー(強結合領域)でも現れるためには、必ずゼロ質量自由度が存在している必要がある。そのため、低エネルギーで対称性が自発的に破れ、それに付随した南部-ゴールドストーンボゾンが生じることがわかる。このような手法が量子異常マッチングであり、これが近年 Yang-Mills 理論などが持つ 1 形式対称性のゲージ化にも拡張された。1 形式対称性とは Wilson loop に代表される線演算子の変換の下での不変

性を意味しており、特に Yang-Mills 理論には 1 形式  $Z_N$  対称性が存在している。この対称性をゲージ化することで量子異常マッチングが適用され、 $\theta = \pi$  における Yang-Mills 理論の相構造に強い制限が加えられた [Gaiotto, et. al. (17)]。ただ、現実の QCD をコンパクト化した理論には 1 形式対称性が存在せず、素直にはこの手法を適用できない状況であった。

一方、後半の問いで重要になる bion 配位については、本研究を始める直前(2015 年 10 月)に、二重井戸型量子力学における複素 bion 解が導出され、理論を複素化することで bion 配位が古典解として得られることが示唆された [Behrman, et. al. (15)]。これは、量子論もしくは経路積分におけるリサージェンス構造を、以下のように解釈できることを示している：通常の実積分において径路の複素化を行うと、積分結果が各鞍点からの寄与(レフシェッツシムプル寄与)に分解される。ストークス線と呼ばれるパラメタの値では、各シムプル寄与は不定虚部を持つが、その総和においては不定虚部が相殺され実の結果を与える [右図]。経路積分においては「摂動寄与」「非摂動寄与」が異なるシムプル寄与に対応し、したがって摂動的ボレル和や複素解寄与自体は不定虚部を持つが、その総和は正しい結果を与える。したがって、場の量子論のリサージェンス構造を示すためには、まず複素化した理論において解を導き出し、その寄与をシムプル積分によって求め、最後に摂動的ボレル和とそれらの複素解寄与との総和が不定性のない厳密な結果を与えることを示す必要がある。



位相に応じてシムプル分解が変化

$$Z = \left( \text{Re}[Z_p] \pm ie^{-\frac{A}{g^2}} \right) + \left( \text{Re}[Z_{np}] \mp ie^{-\frac{A}{g^2}} \right)$$

摂動的ボレル和      複素解寄与

摂動・非摂動間で不定虚部が相殺

このような状況下で、本研究では以下の研究方針を掲げた。

(1) コンパクト化時空中の随伴表現 QCD や  $Z_N$ -QCD と呼ばれる QCD 型理論、あるいはそれらを低次元に reduction した 2 次元  $CP^{N-1}$  模型において、量子異常マッチング・格子計算を用いて弱結合閉じ込め相と強結合閉じ込め相の連続性を調べる。特に、量子異常マッチングの手法を QCD などの 1 形式対称性を持たない理論に拡張する。さらに、コンパクト化半径に依存する閉じ込め機構の変遷を推定し、QCD 閉じ込め機構の解明を目指す。

(2) コンパクト化時空中における 2 次元  $CP^{N-1}$  模型などにおいて、複素解(複素 bion 解)を導出し、その寄与と摂動的ボレル和の不定虚部相殺を示すことで場の量子論におけるリサージェンス構造を調べる。さらに、ここで得られた不定虚部のない物理量を既知の厳密計算結果と比較することでリサージェンス理論の有効性を示す。

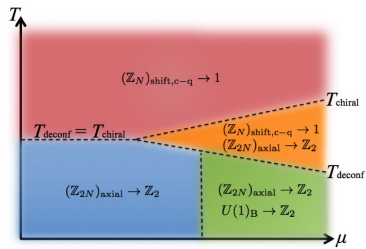
### 3. 研究の方法

- 上記の研究目的・方針に基づき、本課題研究では以下の順序で研究を進めた。
- (1) 弱結合閉じ込め相と強結合閉じ込め相の連続性
    - ・量子異常マッチング法を、1 形式対称性が存在しないコンパクト化理論(QCD など)に拡張する。
    - ・拡張型量子異常マッチングの手法を用いてコンパクト化ゲージ理論相構造に制限をかける。
    - ・Bion の閉じ込めへの寄与を推定するためトポロジカルチャージの格子計算を行う。
    - ・格子計算に基づいて弱結合-強結合閉じ込め相の連続性を調べる。
  - (2) 場の量子論におけるリサージェンス構造
    - ・ $R^1 \times S^1$  上の  $CP^{N-1}$  模型の量子力学極限において、複素 bion 解を導出しその寄与を求める。
    - ・複素 bion 解からの寄与を計算し、摂動的ボレル和の不定虚部との相殺を確認する。
    - ・Multi-bion を含む無限個の複素 bion 解を導出し、その総和と厳密結果を比較する。
    - ・厳密結果が複素 bion 解からの寄与の和 = トランス級数として表されることを示す。
    - ・コンパクト化半径が有限の  $R^1 \times S^1$  上の  $CP^{N-1}$  模型において複素 bion 解を導出する。
    - ・コンパクト化に付随する Kaluza-Klein mode を足し上げることで bion 寄与を計算する。
    - ・bion 寄与に繰り込まれた結合定数(力学的スケール)が自然と現れることを確認する。
    - ・bion 寄与がリノマロン不定虚部を相殺し得ることを確認する。
    - ・4 次元ゲージ理論と  $CP^{N-1}$  模型の関係に基づき、ゲージ理論のリサージェンス構造を考察する。
    - ・3 次元超対称チャーン・サイモン理論の複素解に基づいてリサージェンス構造を考察する。
- これらの研究計画に基づいて 3 年にわたる研究を行い、その多くについて学術論文・研究会講演につながる研究成果を上げることができた。詳細は次節で述べる。

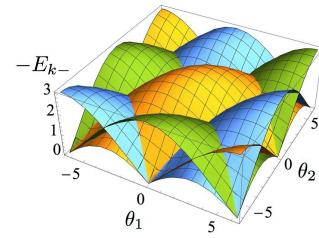
### 4. 研究成果

上記(1)(2)について、それぞれ以下の研究成果をあげた。以下番号は雑誌論文の通し番号。

- (1) 弱結合-強結合閉じ込め相の連続性
- 理研BNLの谷崎佑弥研究員、ストーニーブルック大の菊池勇太研究員、慶應大の坂井典佑訪問教授との共同研究において、まずトフープトの量子異常マッチング法をコンパクト化され且つ高階形式対称性を持たない理論(QCD がその例)に拡張した [5]。この拡張は、適切な境界条件を理論に課した場合に生じる  $Z_N$  シフト対称性に基づいており、 $CP^{N-1}$  模型を含む広範な理論に適用可能であることも示した。続いて、コンパクト化半径を無限大にする極限で通常の  $R^4$  上の QCD に帰着する  $Z_N$ -QCD の閉じ込め相構造とその連続性を、ここでの拡張型量子異常マッチングに基づいて調べた [4] [右図]。その結果、以前格子数値計算を行った  $Z_N$ -QCD の非閉じ込



め転移とカイラル転移の結果と無矛盾であること,そこからQCDの有限温度密度相構造を推定できることを示した. この手法のさらなる応用として, 谷崎佑弥研究員, 理研の本郷優研究員との共同研究において, 2次元Flagシグマ模型と呼ばれるスピッチェーン的一般化模型についてその相構造を調べた[1]. インスタントン近似に基づく相構造の解析と量子異常マッチングに基づく結果を比較することで, 相構造がコンパクト化の過程で維持される性質=連続性を強く示唆する結果が得られた[右図].

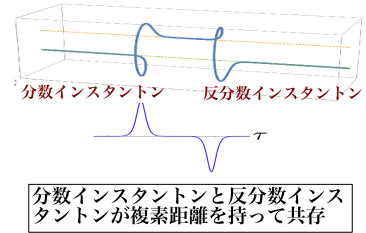


ここで得られた結果については6回の招待講演を行ったが, 共同研究者を含めるとさらに多くの招待講演に招かれており, 本科研費の成果として期待を上回るものと言える.

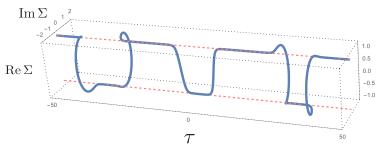
一方, 格子数値計算に基づくトポロジカルチャージの測定と閉じ込め相連続性の解明については, 研究期間内に論文を執筆するには至らなかったが, 2019年6月の国際格子理論会議(Lattice2019)において2次元 $CP^{N-1}$ 模型のトポロジカルチャージ測定と相構造についての格子計算結果を公表する予定である(abstract提出済み). この研究は, 慶應大の伊藤悦子特任講師を中心とした共同研究であり,  $R \times S^1$ 上の $CP^{N-1}$ 模型に関してPolyakov-loop期待値に関する転移を見ることで連続性を調べた. 特に,  $Z_N$ 境界条件を課した理論では, 分数インスタントンの存在が確認できており, これに基づく真空遷移によって $Z_N$ 対称な真空が維持されることが判明した. 近年ゲージ理論と $CP^{N-1}$ 模型の関係が明確になっており, この結果はゲージ理論の閉じ込め相の連続性を示す上でも重要である. 随伴表現クォークを導入したQCDのトポロジカルチャージの計測についても計算結果が得られている. ただし, この理論については現時点で分数インスタントンとbionの確認には至っていない.  $CP^{N-1}$ 模型の格子計算で得られた知見から, R方向と $S^1$ 方向の格子サイズに十分な差が必要であることがわかっており, 今後は格子サイズを変更して計算を進めることになる. これらの格子計算は今後のさらなる研究に繋がるという点で, 本科研費の成果として十分なものであると結論できる.

## (2)場の量子論におけるリサーチェンス構造の解明

慶應大の新田宗土教授, 坂井典佑訪問教授, 藤森俊明助教, ノースカロライナ大の鎌田翔研究員との共同研究において, 主に $R \times S^1$ 上の2次元 $CP^{N-1}$ 模型の複素bion解とリサーチェンス構造の研究を行い, 本研究の当初目標を達成する研究成果を上げた. 以下にはその成果を示す.



$R^1 \times S^1$ 上の $CP^{N-1}$ 模型の量子力学極限において複素bion解[右図]を導出し, 準モジュライ積分をレフシェッツシンプル法に基づいて実行することでその寄与を計算した. その結果, 摂動的ボレル和に現れる不定虚部を相殺することが確認された[10]. 次にMulti-bionを含む無限個の複素bion解を導出し[右図], 厳密結果と比較した. その結果, エネルギーなど物理量の厳密結果が, 摂動寄与と複素bion寄与の和であるトランス級数として表されることが示された[8]. また, Sine-Gordon型量子力学, 変形 $CP^{N-1}$ 模型についてもこの構造を確認することに成功した[7]. これらの結果は, 場の量子論を量子力学に帰着させた理論においては, 見事なまでのリサーチェンス構造が存在していることを示した重要な成果である.



続いてコンパクト化半径が有限の $CP^{N-1}$ 模型においても複素bion解を導出した. コンパクト化に伴うKaluza-Klein modeを足し上げることでbionに関する有効作用を導出し, それに基づいて準モジュライ積分を実行することでbion寄与を計算した[2]. その結果, bion寄与に繰り返された結合定数(力学的スケール)が自然と現れることが確認され, このbion寄与の不定虚部が力学的スケールの冪乗で現れる赤外リノマロン不定虚部を相殺し得ることを示した. また, 4次元ゲージ理論と $CP^{N-1}$ 模型の関係に基づき, ゲージ理論におけるリサーチェンス構造の存在を予想した. この結果により, 場の量子論のリサーチェンス構造が初めて定量的に示されるとともに, 低エネルギー物理に深く関係する赤外リノマロンがバイオン配位と同定できることが示された. この成果は当初の研究目標に当たる.

一方, ワイツマン研究所(現ケンブリッジ大)の本多正純研究員を含めた共同研究において, 3次元超対称物質場チャーレン・サイモン理論のリサーチェンス構造を詳細に調べた[3]. 3次元超対称チャーレン・サイモン理論においては分配関数などが局所化の手法を通して厳密に計算される. ここでは, その結果を摂動寄与と非摂動寄与を含むトランス級数として表し, リサーチェンス構造を明確化することに成功した. さらに, 本多氏が以前に発見していたこの理論の複素解とトランス級数表示を比較することで, 非摂動寄与が複素解寄与と同定できることを強く示唆する結果を得た. この結果は, 3次元以上の場の量子論での非自明なリサーチェンス構造を, 厳密結果に基づいて調べた数少ない例となっている.

ここに示したリサーチェンス理論に関する研究成果については, 本研究期間中だけで13回の招待講演, 2本の解説記事執筆を行っており, それに加えて共同研究者による招待講演も多数あることから, 国内外で高く評価されていることがわかる. 本課題の研究成果として期待を上回るだけでなく, 数ある若手研究B課題の中でも成功した事例の一つだと考えられる.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

1. Masaru Hongo, Tatsuhiro Misumi, Yuya Tanizaki, “Phase structure of the twisted  $SU(3)/U(1)^2$  flag sigma model on  $R \times S^1$ ” Journal of High Energy Physics 02(2019) 070 (2019).
2. Toshiaki Fujimori, Syo Kamata, Tatsuhiro Misumi, Muneto Nitta, Norisuke Sakai, “Bion non-perturbative contributions versus infrared renormalons in two-dimensional  $CP^{N-1}$  model” Journal of High Energy Physics 02(2019) 190 (2019).
3. Toshiaki Fujimori, Masazumi Honda, Syo Kamata, Tatsuhiro Misumi, Norisuke Sakai, “Resurgence and Lefschetz thimble in 3d  $N=2$  supersymmetric Chern-Simons matter theories” Progress of Theoretical and Experimental Physics 12(2018) 123B03 (2018).
4. Yuya Tanizaki, Yuta Kikuchi, Tatsuhiro Misumi, Norisuke Sakai, “Anomaly matching for phase diagram of massless  $Z_N$ -QCD,” Physical Review D 97, 054012 (2018).
5. Yuya Tanizaki, Tatsuhiro Misumi, Norisuke Sakai “Circle compactification and ‘t Hooft anomaly,” Journal of High Energy Physics 12(2017) 056 (2017).
6. Tatsuhiro Misumi, Hideo Aoki “New class of flat-band models on tetragonal and hexagonal lattices: Gapped versus crossing flat bands” Physical Review B 96, 155137 (2017).
7. Toshiaki Fujimori, Syo Kamata, Tatsuhiro Misumi, Muneto Nitta, Norisuke Sakai, “Resurgence Structure to All Orders of Multi-bions in Deformed SUSY Quantum Mechanics” Progress of Theoretical and Experimental Physics 08(2017) 083B02 (2017).
8. Toshiaki Fujimori, Syo Kamata, Tatsuhiro Misumi, Muneto Nitta, Norisuke Sakai, “Exact resurgent trans-series and multi-bion contributions to all orders” Physical Review D 95, 105001 (2017).
9. Syo Kamata, So Matsuura, Tatsuhiro Misumi, Kazutoshi Ohta “Numerical Analysis of Discretized  $N=(2, 2)$  SYM on Polyhedra” Proceedings of Science, Lattice2016, 210, (2016)
10. Toshiaki Fujimori, Syo Kamata, Tatsuhiro Misumi, Muneto Nitta, Norisuke Sakai, “Non-perturbative Contributions from Complexified Solutions in  $CP^{N-1}$  Models” Physical Review D 94, 105002 (2016).
11. Syo Kamata, So Matsuura, Tatsuhiro Misumi, Kazutoshi Ohta, “Anomaly and Sign problem in  $N=(2, 2)$  SYM on Polyhedra : Numerical Analysis” Progress of Theoretical and Experimental Physics, 12(2016) 123B01 (2016).
12. Tatsuhiro Misumi, Muneto Nitta, Norisuke Sakai, “Non-BPS exact solutions and their relation to bions in  $CP^{N-1}$  models” Journal of High Energy Physics, 05(2016) 057 (2016).

[学会発表] (計 24 件)

・国際会議招待講演

1. Tatsuhiro Misumi, “Non-perturbative Analysis based on Resurgence Theory and Complex saddles”, RIKKYO MathPhys 2018, Rikkyo University, Tokyo, 03/14/2018.
2. Tatsuhiro Misumi, “Exact Resurgent Trans-series and Multi-bion Contributions to All orders” Topological Science Workshop 2017, Keio University, Yokohama, 2/23/2017.
3. Tatsuhiro Misumi, “Manifest Resurgence Structure in  $CP^{N-1}$  Models” Resurgence at Kavli IPMU, IPMU, Tokyo University, Kashiwa, 12/16/2016.
4. Tatsuhiro Misumi, “Non-BPS solutions and their relation to bions in  $CP^{N-1}$  models” Resurgence in Gauge and String Theories, Instituto Superior Technico, Lisbon University, Lisbon, 7/18/2016.

・国内会議招待講演

5. 三角樹弘 “Recent Progress in ‘t Hooft anomaly matching” 新潟山形地区素粒子論グループ第23回合宿研究会 福島県立会津自然の家, 福島県, 2018年10月21日
6. 三角樹弘 “Use of topology and anomaly to study phase diagram of QFT” 第3回研究会 科研基盤S「トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性：固体物理を越えて分野横断へ」筑波大学, つくば市, 2018年5月20日
7. 三角樹弘, “リサージェンス理論に基づく量子非摂動解析” 「熱場の量子論とその応用2017」京大基礎物理学研究所, 京都市, 2017年8月28日
8. 三角樹弘, “リサージェンス理論に基づく量子非摂動解析” 「素粒子物理学の進展2017」京大基礎物理学研究所, 京都市, 2017年8月2日

・一般講演

9. Tatsuhiro Misumi, “‘t Hooft anomaly matching for compactified theory with  $Z_N$  t. b. c.” Aspen Winter conference 2019, Higher symmetries, Aspen center for physics, Aspen, US, 3/21/2019.
10. 三角樹弘, 藤森俊明, 本多正純, 鎌田翔, 坂井典佑 “ $N=2$  Chern-Simons matter theoryにおけるリサージェンス構造とシンプル構造” 日本物理学会 2018秋季大会, 14aS42-3, 信州大学, 2018年9月14日

11. 三角樹弘, 青木秀夫 “分散バンドを貫通する平坦バンド模型”  
日本物理学会 2018年次大会, 25aK403-4 東京理科大学, 2018年3月25日
12. 三角樹弘, “摂動級数と複素解に基づく量子非摂動解析”  
新潟山形地区素粒子論グループ第23回合宿研究会 福島県, 2016年11月19日
13. 三角樹弘, 新田宗土, 坂井典佑 “CPN模型におけるNon-BPS厳密解とBion配位の関係”  
日本物理学会 2016秋季大会, 23pSB-3, 宮崎大学, 2016年9月23日  
・招待セミナー講演
14. 三角樹弘 “高次形式対称性と量子異常マッチングの最近の発展”  
新潟大学素粒子論研究室セミナー 2019年3月28日
15. 三角樹弘 “Recent progress in ‘t Hooft anomaly matching”  
茨城大学素粒子論研究室セミナー 2018年7月20日
16. 三角樹弘 “‘t Hooft anomaly matching for circle compactification”  
高エネルギー加速器研究機構理論センターセミナー 2018年6月11日
17. 三角樹弘 “‘t Hooft anomaly matching for circle compactification”  
名古屋大学素粒子論研究室セミナー 2018年5月11日
18. 三角樹弘 “Current status of application of resurgence theory”  
名古屋大学素粒子論研究室セミナー 2018年5月11日
19. 三角樹弘 “リサージェンス理論と複素化に基づく非摂動解析”  
理研STAMPセミナー 2018年3月28日
20. Tatsuhiro Misumi “Resurgence Theory: Nonperturbative quantum effects vs  
Perturbative analysis” Tohoku University GP-PU seminar 2018年3月6日
21. 三角樹弘 “リサージェンス理論と複素化に基づく非摂動解析”  
金沢大学素粒子論グループセミナー 2017年11月17日
22. 三角樹弘 “Exact Resurgent Trans-series and Complex Solutions to All Orders”  
大阪大学素粒子論グループセミナー 2017年10月17日
23. 三角樹弘, “複合ソリトン解とリサージェンス理論” 奈良女子大学素粒子論グループセ  
ミナー, 奈良女子大学, 奈良市, 2017年6月16日
24. 三角樹弘, “Resurgence理論と複素解に基づく量子非摂動解析” 理研STAMP-iTHEMSセ  
ミナー, 理化学研究所, 和光市, 2016年11月11日

[図書] (計 2 件)

1. 藤森俊明, 三角樹弘, 坂井典佑 “リサージェンス理論：摂動論から非摂動効果を理解する”  
日本物理学会誌 2018年6月号
2. 三角樹弘 “摂動級数の発散と非摂動効果：リサージェンス理論の量子論への応用”  
「特集／摂動論を考える：現象の真の姿を探るために」数理科学, サイエンス社, 2016年9月号  
[その他]

ホームページ等

<http://sht.phys.akita-u.ac.jp/misumi/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

研究代表者氏名：三角樹弘 ローマ字氏名：Tatsuhiro Misumi 所属研究機関名：秋田大学  
部局名：大学院理工学研究科 職名：専任講師 研究者番号 (8 桁)：80715152

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：坂井典佑 ローマ字氏名：Norisuke Sakai 所属研究機関名：慶應義塾大学  
部局名：自然科学研究教育センター 職名：訪問教授 研究者番号 (8 桁)：80108448

研究協力者氏名：新田宗土 ローマ字氏名：Muneto Nitta 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)：60433736

研究協力者氏名：藤森俊明 ローマ字氏名：Toshiaki Fujimori 所属研究機関名：慶應義塾大学  
部局名：商学部 職名：助教 研究者番号 (8 桁)：60773398

研究協力者氏名：鎌田翔 ローマ字氏名：Syo Kamata 所属研究機関名：ノースカロライナ大学  
部局名：物理学科 職名：研究員

研究協力者氏名：本多正純 ローマ字氏名：Masazumi Honda 所属研究機関名：ケンブリッジ大  
学 部局名：DAMTP 職名：研究員

研究協力者氏名：伊藤悦子 ローマ字氏名：Etsuko Itou 所属研究機関名：慶應義塾大学  
部局名：自然科学研究教育センター 職名：特任講師 研究者番号 (8 桁)：50432464

研究協力者氏名：谷崎佑弥 ローマ字氏名：Yuya Tanizaki 所属研究機関名：ノースカロライナ  
大学 部局名：物理学科 職名：研究員

研究協力者氏名：菊池勇太 ローマ字氏名：Yuta Kikuchi 所属研究機関名：理研BNL 研究員

研究協力者氏名：本郷優 ローマ字氏名：Masaru Hongo 所属研究機関名：慶應義塾大学  
部局名：自然科学研究教育センター 職名：特任助教

※科研究費による研究は、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。