

## ゲージ場のゲージ共変な分解に基づくクォーク閉じ込め機構の研究

### Lattice Study on the quark confinement based on the gauge-covariant decomposition.

柴田章博

高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター

#### 1. 研究の背景と目的

本研究の目的は、量子Yang-Mills理論および量子色力学(QCD)において、閉じ込めの機構を明らかにすることである。「閉じ込め」とは、強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)に従うクォーク及びグルーオンはそれらの複合粒子であるハドロンとして観測されるが、単体として観測されることはないという実験事実の説明である。一般に、単体およびカラー電荷を持つ複合粒子は全て閉じ込められて、カラー無色の状態(カラー対称性の一重項)のみが観測されるが、これを「カラーの閉じ込め」と呼ぶ。理論的な閉じ込め機構の説明は、閉じ込めの実験事実を場の量子論の枠組みで定式化し、量子色力学に基づく第一原理計算によって検証されなければならない。

我々は、理論が要請する対称性を明白に保証する方法、および、ゲージに非依存な方法によって閉じ込め機構を検証するために、ゲージ場のゲージ共変な分解の方法を提唱し検証をス据えてきた。ゲージ場のゲージ共変な分解の方法は、ゲージ場の非線形変数変換に基づく再定式化とWilsonループ演算子に対する非可換ストークスの定理の拡張の一連の仕事から導出される。更に、任意表現に属するWilsonループに対して拡張された非可換ストークスの定理に基づく考察によって、任意表現に対してゲージ共変な分解の方法を拡張した。このことによって、任意表現に属すクォークに対して、明白にゲージ非依存な手続きによって数値シミュレーションに生成したゲージ配位から閉じ込めに主要な役割を担う自由度を抽出し、直接解析することによって、閉じ込め機構の検証が可能とした。これによって、可換射影の方法に基づく従来研究における問題は最終的に解決された。

「双対超伝導描像」はクォークの閉じ込め機構の最も有力なシナリオである。我々は、ゲージ場のゲージ共変な分解の方法に基づき明白にゲージに依存しない方法論によって双対超伝導描像の検証を行ってきた。また有限温度下の閉じ込め・非閉じ込め相転移や高次元表現クォークの閉じ込めなど、様々な条件下での検証を行ってきた。

一方、物質場が存在する場合のカラー閉じ込めについては、確立したゲージ不変な閉じ込めの判定条件すら存在しない。本プロジェクトでは、物質場が存在する場合のカラー閉じ込め、及び閉じ込めと質量ギャップの関係を研究するために、SU(2)ゲージ・スカラーモデルを理論が要請する対称性を明白に保証する定式化によって研究する。しかしながら、ゲージ対称性を常に保った格子ゲージ理論の定式化では、Elitzurの定理により「局所的な連続対称性は決して自発的に破れない」ことが知られている。このことは格子上のBEH機構にはゲージ固定が必要であり、ゲージ対称性及びカラー対称性を破るために、カラー閉じ込めの要件に抵触する。この困難を避けるためには、連続理論における「ゲージ対称性の自発的破れに頼らないBEH機構の明白にゲージ不変な記述法」を格子上で定式化によって、ゲージ固定を必要としないゲージ非依存な数値シミュレーションを可能とする。また、生成したゲージ配位をゲージ場のゲージ共変な分解の方法に基づき、ゲージに依存することなく閉じ込めに主要な役割を担う自由度を抽出し直接解析する。その過程で、純粋Yang-Mills理論における閉じ込め機構(双対超伝導描像)と対比的に閉じ込め機構を明らかにする。

## 2. 研究成果の内容

○非可換ゲージ理論における閉じ込め機構と双対超伝導描像のゲージ非依存な検証：

SU(3)Yang-Mills場の配位とカラー場の配位を用いて、高次元表現のクォーク (Wilsonループ) に対する閉じ込め機構を検証する。弦張力の表現依存性、磁気モノポールの寄与、string breaking、カシミヤスケールリングンなど、非可換ゲージ理論に固有の諸性質と双対超伝導描像のとの整合に着目し解析を行った。

○ゲージに依存しない BEH 機構に基づくゲージ・スカラー模型の研究

ゲージに依存しないBEH機構を有するSU(2)ゲージ・スカラー模型について、(a)カラー場が随伴表現に属す場合、及び (b) スカラー場がゲージ群の基本表現に属す場合について、強結合ゲージ理論におけるBEH 機構のゲージ非依存な(ゲージ不変な)第一原理計算を実行した。

(a)スカラー場が随伴表現に属す場合：ゲージ固定を行わない明白なゲージ非依存な数値シミュレーションと作用密度の秩序パラメータとする相構造の解析を行った。Brower達のスカラーの配位をユニタリーゲージに固定した先行研究とコンシステントな結果(閉じ込め相とHiggs相を完全に分ける相境界線)を得た。一方、ゲージ場のゲージ共変な分解の方法によって、ゲージ場から抽出した「カラー方向場」と「スカラー場」のゲージ不変な相関を新たな秩序パラメータとすることで、閉じ込め相を2分割する新たな相境界を発見した。[論文 1]

(b)スカラー場がゲージ群の基本表現に属す場合：ゲージ固定を行わない明白なゲージ非依存な数値シミュレーションと作用密度の秩序パラメータとする相構造の解析を行い、従来手法に基づく熱力学的な閉じ込め相・Higgs相の相転移の相境界を再現した。一方、ゲージ場のゲージ共変な分解の方法によって、ゲージ場から抽出した「カラー方向場」と「スカラー場」のゲージ不変な相関を新たな秩序パラメータとすることで、閉じ込め・Higgs相(解析的連続な領域)を閉じ込め相とHiggs相に2分割する新たな相境界を発見した。[論文 2]

## 2. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

大規模計算機を有しない大学・研究所の小規模グループの研究者にとって、学際共同利用は研究推進に必要な計算資源を確保するための貴重なプログラムである。

## 3. 今後の展望

○高次元表現に属すWilsonループに対する閉じ込めの機構の解析を通じて、非可換ゲージ理論における閉じ込めの描像が弦張力に対する「制限場ドミナンス(アーベリアンドミナンス)」や「磁気モノポール・ドミナンス」などの双対超伝導描像と整合するのかを検証する。また、深赤外領域において弦張力が切断されるstring breaking などの非可換ゲージ理論における閉じ込めの特徴的な性質をゲージ場のゲージ共変な分解の観点から解析する

○ゲージ・スカラー模型においては、新たに発見した相境界について様々な秩序パラメータを用いた詳細な解析によって数値的証拠を積み上げるとともに、相構造を確定させる。

○ゲージ・スカラー模型の閉じ込め相及びHiggs相 それぞれにおいて、ゲージ場のゲージ共変な分解の方法によって、純粋Yang-Mills理論の場合と同様に閉じ込めに主要な役割を果たした自由度を抽出しゲージスカラー模型における役割を対比的に解析することで、物質場の存在する場合のカラーの閉じ込め、及び、質量ギャップと閉じ込めの関係を明らかにする。

4. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo  
Gauge-independent transition dividing the confinement phase in the lattice SU(2) gauge-adjoint scalar model  
arXiv:2307.15953 [hep-lat], KEK Preprint 2023-24, CHIBA-EP-258 (submitted to Phys.Rev.D)
- [2] Ryu Ikeda, Seikou Kato, Kei-Ichi Kondo, Akihiro Shibata,  
Gauge-independent transition separating confinement and Higgs phases in lattice SU(2) gauge theory with a scalar field in the fundamental representation  
Phys.Rev.D 109 (2024) 5, 054505, arXiv:2308.13430 [hep-lat], CHIBA-EP-259, KEK Preprint 2023-27

(2) 国際会議発表・会議録

- [3] Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo  
New gauge-independent transition dividing the confinement phase in the lattice gauge-adjoint scalar model  
PoS(LATTICE2023) 373 DOI: <https://doi.org/10.22323/1.453.0373>, KEK Preprint 2023-46; CHIBA-EP-261  
Presented at the 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023), July 31 – Aug. 4, Fermi National Accelerator Laboratory
- [4] Ryu Ikeda, Seikou Kato, Kei-Ichi Kondo, Akihiro Shibata,  
New gauge-independent transition separating confinement-Higgs phase in the lattice gauge-fundamental scalar model  
PoS(LATTICE2023) 383 , DOI: <https://doi.org/10.22323/1.453.0383>, CHIBA-EP-260, KEK Preprint 2023-45  
Presented at the 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023), July 31 – Aug. 4, Fermi National Accelerator Laboratory

(3) 学会発表

- [5] 柴田章博 近藤慶一  
格子 SU(2)伴スカラーモデルにおける閉じ込め相を分けるゲージ非依存転移  
日本物理学会 2024 年春季大会, 3 月 18 日～21 日 オンライン
- [6] 池田龍, 近藤慶一, 柴田章博, 加藤清考  
格子 SU(2)ゲージ・スカラーモデルにおけるゲージ非依存な閉じ込め-Higgs 相の分離  
日本物理学会 2024 年春季大会, 3 月 18 日～21 日 オンライン

(4) その他

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	36,000	0
Wisteria/BDEC-01	○	180,000	0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			





