

## 格子 QCD に基づく核子構造研究のための非摂動くりこみ

### Non-perturbative renormalization for nucleon structure in lattice QCD

辻 竜太郎

東北大学・理研 R-CCS

#### 1. 研究目的

本プロジェクトでは、核子構造に関連した物理量の第一原理計算を研究主題とする。計算では、物理量の核子行列要素のみならず、くりこみ因子も評価する必要がある。本課題では、くりこみ因子非摂動計算に必要なゲージ場の大域的最適化（ゲージ固定）処方に着目し、巨大体積下での GPU 活用及び高速化研究に焦点を当てる。

#### 2. 研究成果の内容

申請者を含む PACS Collaboration ではこれまで、物理点（ $\pi$  中間子質量が実験値を再現）かつ巨大体積（一辺 10 fm の立方体で核子のサイズより十分大きい体積）という現実世界に近い環境下でのシミュレーションを行い、核子の内部構造に関連した研究を進めてきた。この成果として、格子 QCD による核子構造研究のマイルストーンであった核子軸性電荷の実験値を 2% という高い統計精度で再現することに成功し、格子 QCD に基づく核子構造研究の有用性が示されている。格子 QCD に基づいて計算することで、様々な物理量を同一の環境下で系統的に研究できる。つまり、実験的測定が難しい対象にも、同時に計算した軸性電荷の再現性を担保しつつ、有意な予言計算が行える強みを持つ。そこで次段として、実験的測定の困難な核子のテンソル、スカラー荷や核子崩壊行列要素の評価を目的とした。

核子のテンソル、スカラー荷や核子崩壊行列要素を格子 QCD の枠組みで評価するためには、対応する核子行列要素の評価だけでなく、場の量子論の手続きに従ってくりこみ因子が必須である。本課題では、巨大体積下で高速に計算を行うことを目的とした。具体的には、律速段階の 1 つであるゲージ固定に着目し、GPU 利用による高速化を行った。GPU を活用したゲージ固定用ソフトは M. Schröck 氏らにより開発され[Comp. Phys. Commun. 184 (2013) 1907-1919.]、本課題では GitHub で公開されている cuLGT (<https://github.com/culggt/culggt>) に適宜変更を加えたものを活用した。本ソフトは、我々が採用していた SU(2) 部分群法とは異なり、GPU に適したアルゴリズムである Simulated annealing (SA、擬似焼き鈍し法) を前処理に採用し、高速化が期待できる。巨大体積での大規模計算に先立ち、 $32^3 \times 48$  の問題サイズで cuLGT のコードの調整と、移行を目的としたテスト計算を行った。

本テスト計算では主に、両者の収束性の確認とコード移行による高速化率を調べた。まず収束性について、ゲージ場の特徴量であるリンクトレースに着目し、要求精度の範囲内で同一の固定点に収束することが確認できた (図 1、左)。また、高速化率

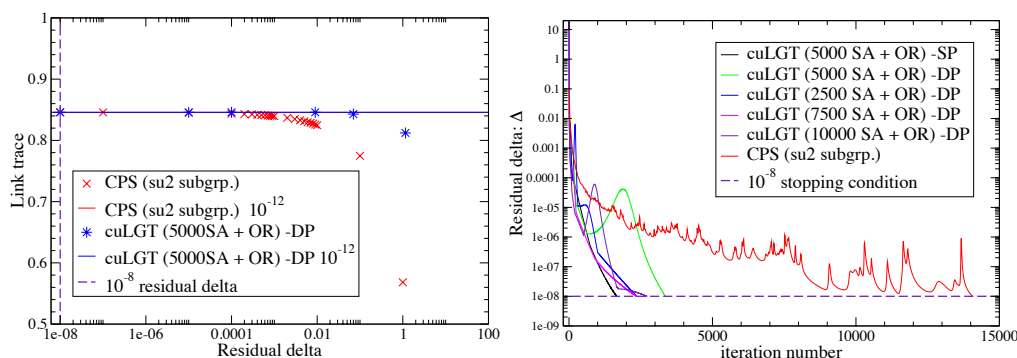


図 1. 収束性の確認と移行による高速化率

については、ある特定の収束条件までに必要な反復回数と所要時間の比較を行った (図 1、右)。結果として、SU(2)部分群法から、擬似焼き鈍し法による前処理を含めたオーバーラックス最速急降下法 (OR) へ移行することにより、固定に必要な反復回数は、前処理のステップ数によらず 3 分の 1 程度に抑えられることが確認できた。また所要時間についても、コードの効率化・高速化により、全体として最大 30 倍程度の高速化があることを示唆している (表 1)。律速段階の高速化を具体的な目的とした本課題において、本テスト計算の結果は大きな意義を持つと言える。

表 1. 所要時間の比較

コード	アーキテクチャ	所要時間 (分)	備考
CPS	CPU: Xenon Gold 6126	~64	2x2x2x2=16PEs
cuLGT	GPU: Tesla V100	~2 (90s:SA + 30s:OR)	5,000 ステップ

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

格子 QCD に必要なメモリ及び計算時間は、系の体積 (格子点数) に比例して大規模なものが要求される。更に非摂動くりこみ因子計算では多数の大規模逆行列計算 (クォーク伝播関数) やその高速フーリエ変換、ゲージ場の大域的最適化が要求される。この観点から、本課題の目指す巨大体積での計算は、学際共同利用での高性能 HPC の Wisteria/BDEC-01 と GPU 搭載の Cygnus の両立で初めて可能となった。

### 4. 今後の展望

当該年度の成果として、くりこみ因子非摂動計算に必要なゲージ固定処方に着目し、GPU 利用による高速化を議論した。今後の展望として、我々の目的である巨大体積でのくりこみ因子計算に向けた計算を進めていきたい。擬似焼き鈍し法によるゲージ固定の前処理が巨大体積下での最適化にもたらす影響や、収束性・高速化の定量的計算は未だ発展途上である。次年度では、巨大体積下でのくりこみ因子非摂動計算に必要なコードの拡張研究も併せて、格子点数 $128^4$ や $160^4$ の計算に着手したい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① “Nucleon isovector couplings in  $N_f=2+1$  lattice QCD at the physical point”, R. Tsuji, N. Tsukamoto, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani, S. Sasaki and T. Yamazaki (PACS Collaboration), Physical Review D106 (2022) 094505.
- ② “The lower moments of nucleon structure functions in lattice QCD with physical quark masses”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, Proceedings of Science, Vol.396 (LATTICE 2021), (2022) 504.

(2) 学会発表

- ① “Nucleon structure from lattice QCD on  $(10 \text{ fm})^4$  lattices at the physical point”, R-CCS workshop on “Challenges and opportunities in lattice QCD simulations and related fields”, S. Sasaki, RIKEN-CCS, Kobe, Feb. 15-17, 2023.
- ② “Nucleon scalar and tensor couplings from lattice QCD at the physical points”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, XVth Quark confinement and the Hadron spectrum, Stavanger, Norway, Aug. 1-5, 2022.
- ③ “Towards the continuum limit of nucleon form factors at the physical point using lattice QCD”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory, Bonn, Germany, Aug. 8-12, 2022.
- ④ 「核子形状因子の物理点格子 QCD 計算」, 辻竜太郎、青木保道、石川健一、藏増嘉伸、佐々木勝一、新谷栄悟、山崎剛, 日本物理学会秋季大会(2022), 岡山理科大学, 2022 年 9 月 6-8 日.
- ⑤ 「物理点格子 QCD に基づく核子軸性形状因子の研究」, 辻竜太郎、青木保道、石川健一、藏増嘉伸、佐々木勝一、新谷栄悟、山崎剛, 日本物理学会春季大会(2023), オンライン, 2023 年 3 月 22-25 日.

(3) 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	○	12600	
Wisteria/BDEC-01	○	212500	
※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。			