

テンソルネットワークを活用した流体解析の基礎評価

Fundamental Evaluation of Fluid Analysis Utilizing Tensor Network

三菱電機株式会社¹ ○柳澤孝一¹

Mitsubishi Electric Corporation¹, °Koichi Yanagisawa¹

E-mail: yanagisawa.koichi@df.mitsubishielectric.co.jp

数値流体解析はデジタルツインの構築と活用に有効である一方で計算コストが高い。テンソルネットワーク法は高ランクテンソルを低ランクテンソルの集合で表現することで、精度の低下を抑えたままテンソルに含まれるデータの規模を削減する手法であり^[1]、近年流体解析の計算コスト削減への応用が報告されている^{[2][3]}。文献[2,3]の手法では、流速の離散データ列を並び替えることで高ランクテンソルを生成し、その高ランクテンソルに対してテンソルネットワークを用いてデータの規模を削減することで、計算コストの低減を狙っている。

テンソルネットワークを効果的に活用するためには、テンソルネットワークの構造を保ったまま計算することが重要となる。文献[2]では、流体の時間発展シミュレーションを低ランクテンソルの更新により再現できることが理論的に示されている。詳細には、図1に示すように、時間発展シミュレーションのための支配方程式として非圧縮性のナビエーストークス方程式を前提として、そこからの乖離をコスト関数として定義するペナルティ法を導入し、そのコスト関数の極値が得られるように低ランクテンソルの更新を繰り返す方法が導出されている。

文献[2]における手法の妥当性は、低ランクテンソルの更新を繰り返す処理を行うことで得られた流速を、テンソルネットワークを用いずに直接数値シミュレーションで得られた流速と比較することで評価されている。反面、その途中過程である、ペナルティ法で定義したコスト関数の最適化における最適化速度や最適値への収束などの特性について示されておらず明確でない。そのため、本研究では、低ランクテンソルの更新の繰り返しによるコスト関数の最適化特性を数値計算により評価する。これにより、手法の有効範囲や最適化手法の指針に対する知見が深まると期待している。

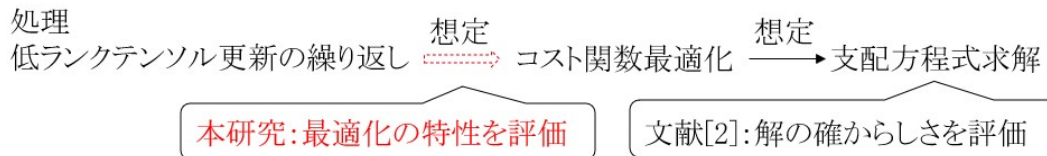


図1 テンソルネットワークによる数値流体解析[2]と本研究の位置づけ

参考文献

- 1) Schollwöck U. (2011). Annals of Physics, 326(1), 96-192.
- 2) Gourianov N., Lubasch M., Dolgov S. et al. Nat Comput Sci **2**, 30-37 (2022). arXiv preprint arXiv:2106.05782.
- 3) Peddinti R.D., Pisoni S., Marini A. et al. Commun Phys **7**, 135 (2024).