大規模問題での実用化に向けた気象モデル SCALE への MG 法の実装

*淺井颯馬（北大院理），　佐藤陽祐（北大院理）

1.　はじめに

日々の天気予報や気象の研究に気象数値モデルは必要不可欠である. 大気の複雑な状態を計算するためには膨大な処理が必要であり, 数値気象モデルである Weather Research & Forcasting Model (WRF[7])や Asuca[1]には, スーパーコンピュータで大規模並列計算が行えるように並列化されたコードが実装されている. しかし, 近い将来, 電力消費量などの関係からスーパーコンピュータの演算性能の向上は頭打ちになることが予測されており, より並列効率の高いアルゴリズムをモデルに実装する必要がある.

Scalable Computing for Advanced Library and Environment(SCALE)[2][3]は，理化学研究所を中心に開発されている気象・気候ライブラリで，様々な物理スキームから構成されている．近年，雲の水物質がもつ電荷を予報し，雷頻度を計算する雷モデルが実装された[4]が，その計算コストの高さが問題となっている[5]．これは，雷モデル内で電場の計算を行うために Poisson 方程式の求解を行っており，大規模な連立方程式を解いていることが一つの要因である．SCALE ではこの連立方程式を高速に求解するために，逆行列ソルバのひとつである対称ガウスザイデル前処理付 Bi-CGSTAB(SGS-Bi-CGSTAB)がデフォルトのソルバとして用いられている[5][6]．SGS-Bi-CGSTAB は，格子幅と同じ長さの波長を持つ誤差は数反復で減衰させることができるが，それよりも波長の大きい低周波の誤差は減衰させづらいという特徴を持つため，収束条件を満たすまでに反復回数がかかり計算コストが高くなるという問題をもっている．将来の計算機能力の進展とともに問題サイズの大きな計算（高解像度での計算）を実施する際にこの問題が顕在化することが見込まれる．そこで，本研究では，異なる粗さの格子で問題を解くことで各波長の誤差を一様に減衰させることが可能で, 反復回数の問題サイズに対する依存が小さいとされるマルチグリッド法（MG 法）を実装することで雷モデルの高速化を試みた.

2.　実験設定・環境

解析解が存在し, 正しい解が得られているかの確認が容易であるため, 電荷を 1 つだけ置いた問題において MG 法と SGS-Bi-CGSTAB で 1 ステップのみ電場の求解をおこなった. 問題サイズは, (nz,nx,ny)=(90,128,128),(90,256,256),(90,512,512), (90,1024,1024)とし, 並列数は, 16, 64, 256 とした. また, 実験環境は, 北海道大学情報基盤センターが管理するスーパーコンピュータである学際大規模計算機システム「Grand」のサブシステム A (Grand Chariot)を使用した.

3.　結果

MG 法と SGS-BiCGSTAB それぞれで計算された数値解を比較し, 定性的かつ定量的に同等の結果が得られていることが確認されている(図 1). 図 2 は MG 法と SGS-Bi-CGSTAB の計算時間をプロットしたものである．図 2 より, MG 法は, 問題サイズの増加に伴なう計算時間の増加が SGS-BiCGSTAB と比較して緩やかであり, (90,1024,1024)などの大規模問題では, 64-CPU で計算時間が 79.765%減少している.しかし, (90,128,128)などの小さい問題サイズでは, 通信が支配的であり, どの並列数でも MG 法のほうが計算時間が大きくなっている.

4.　今後の展望

本発表では, 点電荷を 1 つだけ置いた理想的な状態で電場の求解を行ったため, SGS-BiCGSTAB であっても高速な求解が可能であった. そのため, 今後は，より複雑な場である現実問題で性能評価を行い

たい．また，SCALE の計算コストの高い物理コンポーネントの一つである，三次元放射モデルは三次元方向のエネルギー輸送を考えるため大規模逆行列を解く必要がある．また，力学コアにも，鉛直、水平方向双方に対して陰解法で微分方程式を離散的に解く際（HIVI）に逆行列を解く必要がある．今後は，このような逆行列問題をボトルネックとするコンポーネントに対して MG 法を実装し，大規模問題での性能を評価する予定である．

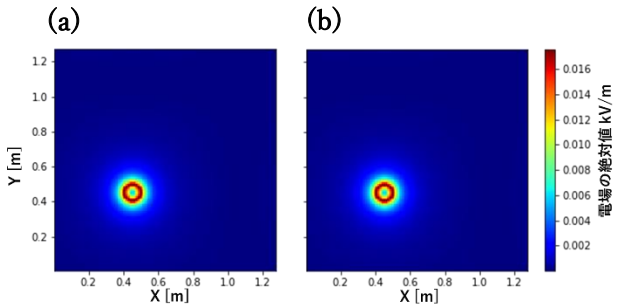

図 1 SGS-BiCGSTAB と MG 法の電場の比較
(a)SGS-BiCGSTAB と(b)MG 法の 1 ステップ計算後の電場の絶対値.

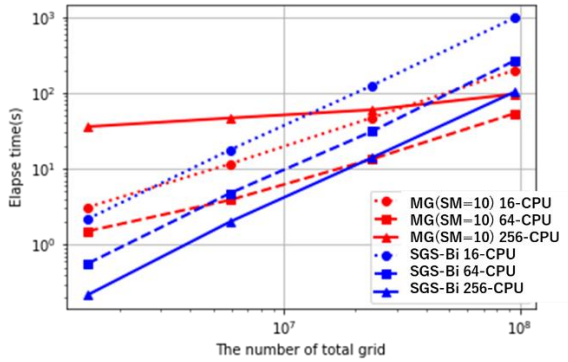

図 2 MG 法と SGS-BiCGSTAB の計算速度評価
赤線は MG 法，青線は SGS-BiCGSTAB を表している．横軸は問題サイズ(全格子数)，縦軸は計算時間を表している．問題サイズは全格子数としており，nz×nx×ny=1474560, 5898240, 23592960, 94371840 である．また，実線が 256-CPU，点線が 64-CPU，破線が 16-CPU を表している．

参考文献

[1] Ishida, J., 2022, Jornal of Meteorological Society of Japan, 100, 825-846

[2] Nishizawa, S., et al, 2015, Geosci. Model Dev., 8, 3393-3419

[3] Sato, Y., 2015, Prog. Earth Planet. Sci., 2, 23, doi: 10.1186/s40645-015-0053-6

[4] Sato, Y., 2019, Prog. Earth Planet. Sci., 6, 62, doi: 10.1186/s40645-019-0309-7

[5] Tomioka, T., 2023, Progress in Earth and Planetary Science, 10, 60,doi: 10.1186/s40645-023-00592-w

[6] Yamashita et al, 2018, 29 pp, 北海道大学工学部卒業論文

[7] Skamarock, William C., et al., 2008, 475.125, doi: 10.5065.

謝辞

本研究は JSPS 科研費（基盤研究 A：24H00257），セコム財団助成金，環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20242003）の助成を受けて実施された．