

高次精度非構造格子法を用いた圧縮性燃焼ソルバーの

GPGPU による高速化

Speed-up of Compressible Combustion Solver with High-Order Unstructured Method Using GPGPU

高木 亮治

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

1. 研究目的

高次精度の非構造格子法として知られる不連続 Galerkin (DG) 法やその拡張である Flux Reconstruction (FR) 法は、計算要素 (セル) 内に多項式近似に必要な自由度を導入する。ステンシル計算のデータ局所性が高く、隣接セルとの通信もセル境界のデータのみで完結するため、高いキャッシュ利用率と並列性能が期待できる。これらの利点に着目し、JAXA では FR 法に基づく燃焼 CFD ソルバ (LS-FLOW-HO) を開発し、Fujitsu FX100 の 32 から 3200 ノードを使用した良好な strong スケーリングを確認している。本研究では、数千万~数億点規模の実用 LES の解析ターンアラウンド時間を短縮するため、OpenACC を利用した GPGPU への拡張を行う。圧縮性の燃焼 LES は計算コスト (実行時間および使用メモリ量) が高く、マルチ GPGPU での並列実行が必須となることから、Cygnus を使用して本手法の性能を調査し有効性を検証することを目的とする。

2. 研究成果の内容

液体ロケットエンジン用の燃焼コードは空力コード (単成分, 理想気体) と比べて、多成分かつ高压下の実在気体を考慮する必要があり、Flamelet などの保存スカラーを解く手法でも、熱物性値や輸送係数の計算コストが大きな割合を占める。これらの燃焼用ルーチンではスレッド並列化したいループ内で他のルーチンをコールするという実装が多かったため、acc routine ディレクティブを使用して GPGPU 対応を行った。本研究期間では全ての燃焼用ルーチンを GPGPU 対応することはできず、以下では燃焼用ルーチンを除いた空力コード相当の計算を行った。

始めに Cygnus の 8 ノード・32GPU を使用したスケーリング性能について、チューニング前 (asis) のコードを用いて計測を行った。事前に行ったノード間の GPU 通信性能の計測により、各 GPU に近い Infiniband HDR を指定しないと性能が劣化することがわかったため、ジョブ実行時に Infiniband を指定するスクリプトを使用した。LS-FLOW-HO の asis の strong スケーリング (問題規模一定) について図 1 に示す。計算セル数は 103,600, FR p4 スキームを使用し計算点数は 12,950,000 である。4 及び 8GPU の時にスーパーリニ

アが発生している。1GPU から 4GPU に増加させたときに、10 倍以上のスピードアップを示すルーチンが存在していることが原因と考えられる。1GPU のときに性能が劣化していると考え、OpenACC の kernel 句から parallel 句による並列指定を実施したところ、1GPU での実行時間が短縮され、スーパーリニアも解消された。図 2 にチューニング後の strong スケーリング性能を示す。1GPU での実行時間が短縮されたことでスケーリング性能はチューニング前より低下しているが、実行時間としては全ケースで高速化されていることを確認した。次に並列数に比例して問題規模（格子セル数）を増加させた weak スケーリング性能を計測した。基準となる 4GPU での格子セル数は 388,500 である。100step 実行した計測結果について図 3 に示す。並列数を 8 倍にしても性能は大きく劣化しないことを確認した。本コードの実行時間を 1GPU (NVIDIA V100) と Skylake (Intel Xeon Gold 6126) @ 2.6GHz, 12Core, 998.4 GLOPS(DP) 1CPU で比較すると、GPU では約 5 倍の良好な高速化となっており、実用 LES の解析時間短縮が期待される。

3. 学際共同利用として実施した意義

昨今、数千万~数億点規模の実用 LES 解析を実施するプラットフォーム候補として GPGPU クラスタも有望視されている。そのため、JAXA が保有しない多数の GPGPU を搭載した Cygnus を用いることで、燃焼 CFD ソルバの性能評価を実施できた事は学際共同利用として意義があったと考えている。

4. 今後の展望

高次精度非構造格子法を用いた燃焼 LES およびその大規模 GPU 計算の例はまだなく、本研究の成果を活かして世界に先駆けした高速・実用燃焼 LES の可能性を示したい。また、省電力、省スペースで導入が比較的容易な GPU を用いることで産業界への展開促進も期待できる。

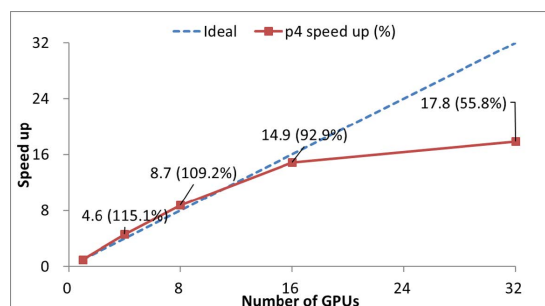


図 1 Strong scaling (チューニング前)

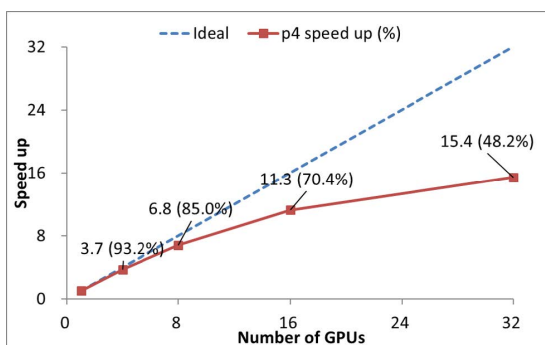


図 2 Strong scaling (チューニング後)

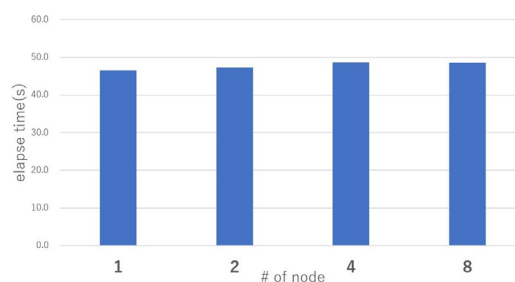


図 3 Weak scaling

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

多湖和馬, 芳賀臣紀, 福島裕馬, 堤誠司, 高木亮治, “GPU による非構造高次精度解析法を用いた圧縮性流体ソルバの高速化” 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2020 オンライン, 2020, 9/28-9/30, 講演番号 2C05.

(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	○	34,200	
Oakforest-PACS			
※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。			