J011011

高性能並列流体計算のための大規模格子生成手法の開発

鵜沢 憲^{*1}, 大西 順也^{*1}, 小野 謙二^{*2}

Development of large-scale grid generation method for high-performance parallel fluid computation

Ken UZAWA^{*1}, Junya ONISHI^{*1}, and Kenji ONO^{*2}^{*1} Institute of Industrial Science, University of Tokyo
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505^{*2} Univ. of Tokyo, Dept. of Mechanical Engineering
7-1-26, Minatojima-minami-machi, Chuo-ku, Kobe, Hyogo, 650-0047

Computational fluid dynamics (CFD) analysis consists of three phases: 1) pre-processing, e.g., grid generation; 2) fluid analysis; and 3) post-processing, e.g., visualization. With the recent improvement in computer performance, pre-processing takes up a higher proportion of the total number of processes in extensive and complex CFD analyses. In this study, we developed a novel method for automatic generation of robust structured grids during the initial stage of fluid analysis to reduce the computational cost of grid generation. By implementing this method, we successfully reduced the computational cost of grid generation, and approximately thirty million grids were generated on the K computer within thirty minutes. By using these generated grids, over eighty percent weak scaling up to 4000 nodes on the K computer is obtained.

Key Words : grid generation, orthogonal structured grid, parallel simulation, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. 緒 言

スーパーコンピュータ「京」の高い計算性能を利用することで、自動車産業に代表されるものづくり分野において設計プロセスの革新が期待されている。その一例として、自動車の新車開発プロセスでは、これまで実車やモックアップモデルを用いた風洞実験を実施することでしか得ることができなかった空気抵抗値を、数値流体力学(CFD)により同精度のオーダーで予測することが可能になりつつある。このことは、これまで実験的な手法に頼ってきた設計プロセスの一部(あるいは全部)を CFD で代替可能であることを意味する。ここでさらに CFD のプロセスを効率化することができれば、設計コストの削減やターンアラウンドタイムの短縮が期待できる。

CFD のプロセスは、①(格子生成などの)前処理、②流体解析、③(可視化などの)後処理、の3つの素過程から構成されるが、近年の計算機の性能向上に伴い、プロセス全体時間における①前処理(特に格子生成)の占める割合が②流体解析と比較してますます大きくなってきている。そこで本研究では、格子生成に必要な時間を抜本的に改善する新しい格子生成方法を提案する。

2. 大規模格子生成手法

ほとんどの市販コードや OSS に見られるように、これまでの CFD 解析では、三次元複雑形状に対して適応度が高い非構造多面体格子が使用されている。しかし近年、対象とする流路形状が複雑になるにつれて、非構造格子の自動生成にかかる時間は増加傾向にある。また、我々が興味のある流れ場のレイノルズ数も既に 10 の 5 乗から 6 乗のオーダー(最小渦サイズはサブミリオーダー)に達しており、高い品質を担保しつつ境界層内のプリズム格子

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

^{*2} 正員, 理化学研究所計算科学研究機構 (〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26)
E-mail: uzawa@iis.u-tokyo.ac.jp

や重合格子を自動的に生成することが困難であり、格子生成に関して専門的な知識を持つ人間の手による確認と修正のプロセスが必要となる。さらに、対象とする形状が複雑になるとともに予期しない穴や微小流路、突起物などが発生し易くなり、ロバストな格子を得るためには労力と手間が必要になる。

そこで我々は、陽に前処理として非構造多面体格子を生成する従来手法に替えて、流体解析の初期化段階でロバストな直交構造格子を自動生成する手法を開発し、格子生成にかかる時間を削減することとした。本提案手法の骨子は直交格子データ構造を用いた交点計算の分散並列処理にあり、具体的な手順は以下の通りである。

1. 計算領域や境界条件などを記述したテキスト形式のデータと、STL 形式などの形状データを用意する。
2. 流体解析ソルバ側で形状データを読み込み、識別子を付けて境界条件を設定する。
3. 計算領域から等間隔の背景格子を自動生成し、計算領域の部分空間ごとに、背景格子間を結ぶ線分と形状データとの交点を求める。
4. 背景格子と求めた交点との距離を用いて、ソルバ側で空間方向の離散化スキームを構成する。

図 1 に、本手法を用いて生成した実車のエンジンルーム内断面図を示す。形状データは自動車会社から借用した 1241 万ポリゴンの STL データ (3.3GB) である。計算格子数は、全長 24.5[m]、全幅 12.2[m]、全高 6.14 [m] の計算領域を 4[mm] 幅で分割した約 300 億もの極めて大規模なものであるが、本手法を用いることで、京コンピュータ上で 30 分以内に生成することが可能となった。

図 1 本手法により生成した 300 億規模の計算格子 (エンジンルーム近傍の断面図)

3. 大規模並列性能評価

本節では、本手法を用いて生成した計算格子を用いた大規模なベンチマーク結果について報告する。ベンチマークの対象は、FFV-C で提供されているチュートリアルの一つである 3 次元キャビフロー問題とし、京上においてノードあたりの格子数を $256 \times 256 \times 256$ (=約 1600 万) で固定したウィークスケールベンチマークを実施した。なお、流体解析には、HPC I 戦略プログラム「分野 4 次世代ものづくり」プロジェクトのもと、東京大学生産技術研究所において開発されている、等間隔等方直交格子に基づく非圧縮性流れ用の熱流体解析ソルバ FrontFlow/Violet-Cartecian (FFV-C) を用いた。また、実効性能の評価に際して、京に組み込まれているハードウェアカウンタ (FAPP) を用いた場合には、オーバーヘッドが原因で性能低下を示す場合があったため、FFV-C と同じく東大生研で開発し、これまで実績がある性能評価ライブラリ Performance Monitor library (PMLib) を使用した。

図2に、ノードあたりの演算性能を単精度演算と倍精度演算とで比較した結果を示す。バンド幅をより有効利用できることから単精度の場合のほうが10パーセントほど実効性能が高くなることが確認できたが、どちらのケースも4000ノードにおいて実効性能が単体性能の80パーセント超の実効性能が出ることを確認できた。さらに、単精度のケースにおいては、10000超のノード数においても単体性能の80パーセント以上の実効性能が出ることが分かった。

図2 ノードあたりの演算速度

4. 結 語

格子生成に必要な時間を改善するために、流体解析の初期化段階でロバストな直交構造格子を自動的に生成する方法を開発した。その結果、格子生成の時間を劇的に減らすことに成功し、京コンピュータ上に300億の計算格子を30分以内に生成することが可能となった。また、生成した格子を用いて、京コンピュータ上で4000ノード数を超えるウィークスケールベンチマークを実施し、80パーセントを超える良好なスケーラビリティを得ることができた。以上により、本手法と流体解析とを組み合わせることで、設計プロセスの支援ツールとして活用可能なCFD環境を構築する見通しを得ることができた。