高性能計算機を用いた大規模流体解析手法の研究

高橋　俊[1], 石田　崇[1], 中橋　和博[1],
小林　広明[2], 岡部　公起[2],
下村　陽一[3], 曽我　隆[3], 撫佐 昭裕[3]

1, 東北大学大学院 航空宇宙工学専攻
2, 東北大学 サイバーサイエンスセンター
3, NEC
E-mail: takahasi@ad.mech.tohoku.ac.jp

概要：当研究室では，次世代の数値計算への要求を踏まえた計算手法である Building-Cube Method を開発している．この手法の有用性を検討するため，本研究では NEC SX-9 を用いて F1 レーシングカーモデルに対して約 2 億点の格子を用いて大規模な数値計算を行った．その結果 99.8%以上のベクトル化率と，64PE を用いたフラット MPI によって 48 倍の速度向上率を達成し，大規模計算における現在の計算手法の性能を確認することができた．

1　はじめに

計算機を用いた流体の数値計算は 1960 年代ごろから行なわれ，計算機の性能と共に現在まで発展してきた．限られた計算機資源の中で効率良く精度の良い結果を得るために，今日まで様々な研究が行なわれてきた．中でも流体計算に用いられる格子は，図 1 のように直交格子に始まり，その後構造格子を経て，非構造格子が広く用いられるようになった．このような変遷を経て流体解析の効率は向上したがその手続きは複雑化した．

ここで近年の計算機の発展を振り返ると，世界最速のスーパーコンピュータのピーク性能はこの 15 年で 10,000 倍に達しようとしている．これはチップの集積度の増加に加えて，多数の CPU を用いた並列計算によるものである．そこで，今後さらに巨大化していく計算機を効率良く用いることができる次世代の流体解析の手法を検討・開発することが本研究の目的である．

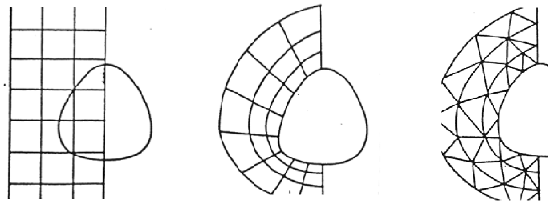

図 1．流体計算のための格子

今日，流体解析の対象となる形状は非常に複雑である．そのため計算格子を作成する前処理の期間は長いもので数日～数週間にもなり，明らかなボトルネックとなっている．それと同時に，より高精度な数値計算への要求はさらに高まっており，新しい計算の手法も日夜開発されているのでそれらへの早急な対応も望まれる．このような次世代の流体解析への要求を本研究では図 2 のように位置づけ，これらを満たす流体解析の手法を開発している．

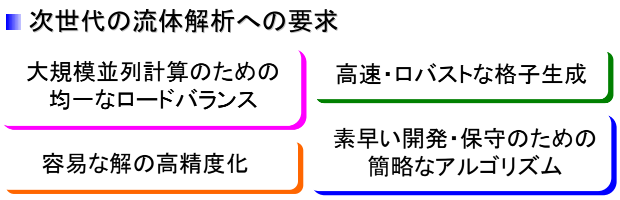

図 2．次世代の流体解析への要求

2　数値計算手法

先のような次世代の数値計算法への要求を満たすべく開発されたのが Building-Cube Method[1,2] である．この手法は流体計算に使われる計算格子の中でも最も単純な等間隔直交格子に基づいた手法であり，構造格子や非構造格子と異なって物体形状が格子線に沿って階段状に表現されることが特徴である．初期の流体解析にはこの等間隔直交格子が用いられていたが，正確な物体形

状を階段状に近似表現するには膨大な格子点数が必要になるため，より少ない格子点で物体形状を近似できる構造格子や非構造格子がこれまで発展してきた．だが近年の高性能なスーパーコンピュータの登場によって，階段状の格子でも正確な物体形状が再現できるようになってきた．そこで本手法では，大規模な計算機と高密度の計算格子を用いることによって実現象に即した流体解析を行なうことを目的としている．

また本手法は，直交格子法を基礎とすることで高速かつロバストな格子生成，理解しやすい簡易なアルゴリズム，そして容易に拡張できるスキームなどの特長を兼ね備えている．さらに Building-Cube Method では cube と呼ばれる様々な大きさの立方体を用いて計算領域を分割し，それらの中に同数の計算格子を配置することで完全に均等なロードバランスを達成している．

3　数値計算例

数値計算例として Formula-1 レーシングカーモデル周りの解析結果を示す．物体の表面は全長を 4800mm としたとき一辺が約 3.5mm の大きさの立方体の集合で近似されており，計算格子の総数は約 2 億である．本手法では，このように巨大な計算格子でも 64 ビットのマルチコア PC を用いて 10 分程度で容易に作成できる [3]．さらに，等間隔直交格子の利点を生かしたデータ圧縮法を用いることで，2 億点という膨大なデータを僅か 8 メガバイトに圧縮している．

流れの基礎方程式には非圧縮 Navier-Stokes 方程式を用い [4]，流れ場の Reynolds 数は全長を基準として $14.9\mathrm{x}10^6$ として解析を行なった．この解析は最新のベクトル-並列計算機である SX-9 によって行なわれたが，その演算性能を最大限に発揮するために解析プログラムは高度にベクトル化・並列化の処理を施され，最終的に 99.8%以上のベクトル化率と， 4 ノードを用いた 64PE のフラット MPI 並列計算によって 48 倍の速度向上率を達成した．

またデータ量が大きく，計算に用いた形状をそのまま可視化することは困難であったため，ここでは単純に各軸方向に 2 分の 1 にデータを疎視化して可視化を行なった．図 3 に流れ場の可視化結果を示す．

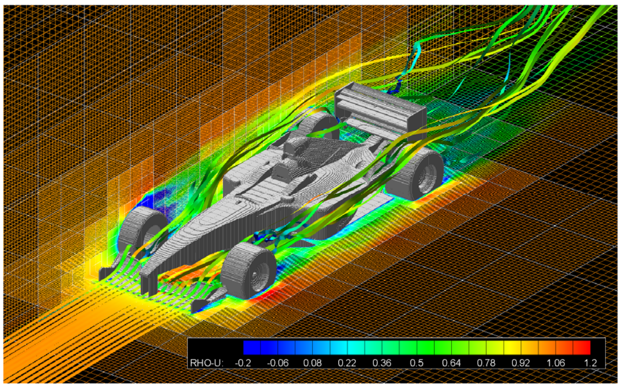

図 3．F1 周りの解析結果

4　まとめ

次世代の計算機と，それに適した流体計算の手法の観点から新しい計算手法 Building-Cube Method を開発した．またその手法を用いて，Formula-1 レーシングカーモデル周りの非圧縮 Navier-Stokes 流体計算を行った．格子点の総数は 2 億であったが，NEC SX-9 を用いて 99.8%以上のベクトル化率と 64PE によって 48 倍の速度向上率を得ることができた．結果は定性的には良好であり，現在定量的な評価を行なっている．効率的な可視化手法に関しては今後の研究課題に挙がることが予想されるが，Building-Cube Method では等間隔直交格子の利点を生かした可視化のためのデータ圧縮法を検討中であり，これを用いることでデータの劣化を抑えながら後処理を行なうことができると考えられる．

参考文献

[1] Nakahashi K., “High-Density Mesh Flow computations with Pre-/Post-Data Compressions,” AIAA paper, 2005-4876, 2005

[2] Kamatsuchi T., “Turbulent Flow Simulation around Complex Geometries with Cartesian Grid Method,” AIAA paper, 2007-1459, 2007

[3] Ishida, T., Takahashi, S., Nakahashi, K. “Fast Cartesian Mesh Generation for Building-Cube Method using Multi-Core PC,” AIAA paper, 2008-919, 2008

[4] Takahashi, S., Ishida, T., Nakahashi, K., “Dynamic Load Balancing for Flow Simulation Using Adaptive Refinement,” AIAA paper, 2008-920, 2008