

空気流・空力音シミュレータ

環境工学研究部 車両空力特性研究室
主任研究員 中出 孝次

1. はじめに

鉄道の実用問題に見られる複雑形状に対する流体解析手法の構築を目指して、空気流シミュレータの開発を進めている。また、流体解析結果から空力音を推定する空力音シミュレータの開発も進めており、将来これらの個別シミュレータを「空気流・空力音統合シミュレータ」として統合する計画である。本報告では、空気流シミュレータと空力音シミュレータの各個別シミュレータの開発状況を紹介するとともに、将来の統合計画について述べる。

2. 空気流シミュレータ

2.1 開発背景

流れの数値シミュレーションで使用される計算格子には、構造格子(直交格子、境界適合格子)と非構造格子がある。非構造格子は、複雑形状の計算格子として適しており、商用ソフトウェアによる流体解析が実用的に実施されている。しかし、非構造格子は格子生成にコスト上の問題がある。そのため、格子生成を自動化できる直交格子法が近年再注目されている。直交格子による形状表現が非構造格子のそれより劣るため計算精度の点では不利であるが、並列計算効率の高さに特徴があり、将来の超大規模並列計算機環境においては有力な流体解析手法になると予想されている。そこで、本研究では、将来の流れの数値シミュレーションを見据えて、直交格子法に基づく空気流シミュレータの開発を行っている。

2.2 大規模並列流体解析

近年のスーパーコンピュータの主流である超並列計算機の性能を最大限に活用するためには、計算プログラムの並列計算性能を向上することが重要である。開発している空気流シミュレータでは、MPI(Message Passing Interface)ライブラリを用いることで、大規模並列計算を実現した(図1、図2)。

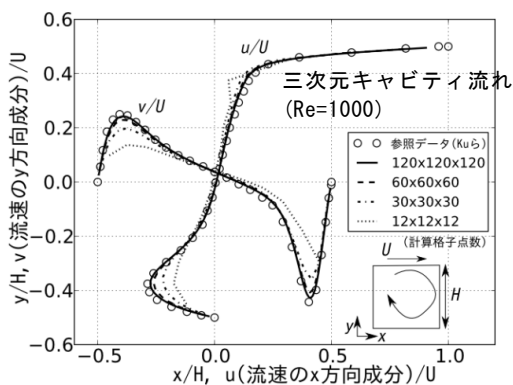


図1 計算精度の検証

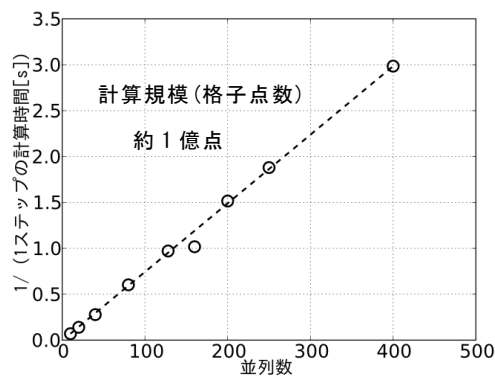


図2 並列化効率

2. 3 基本形状流れ(球・円柱流れ)の検証計算

直交格子法では曲面形状の物体を計算格子で表現することは出来ないため、計算格子を物体形状に沿わせる従来の方法と比較して、一般的に計算精度については不利である。しかし、直交格子法における曲面形状表現の近似精度を向上する手法として境界埋め込み法¹⁾などが近年盛んに研究されており、空気流シミュレータにもその手法を実装した。境界埋め込み法による計算精度を確認するため、曲面形状の基本問題である、球周りの層流解析(図3)、円柱周りの層流解析(図4)、円柱周りの乱流解析(図5)を例に計算を行った。その結果、良好な計算精度が確認出来た。なお、空気流シミュレータによる乱流解析は、ラージ・エディ・シミュレーション(サブグリッドスケールモデルはコヒーレント構造スマゴリンスキーモデル²⁾)により行った。

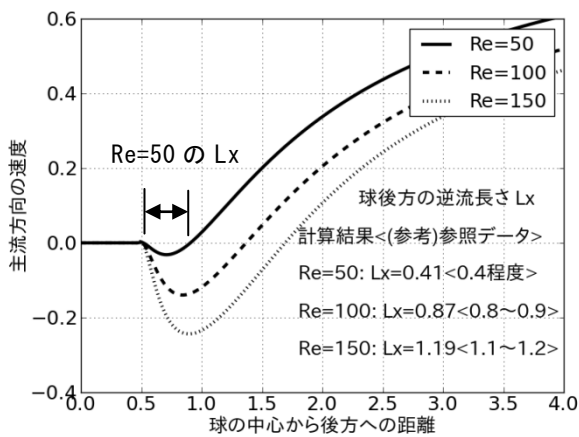


図3 球周りの層流解析 (Re=50~150)

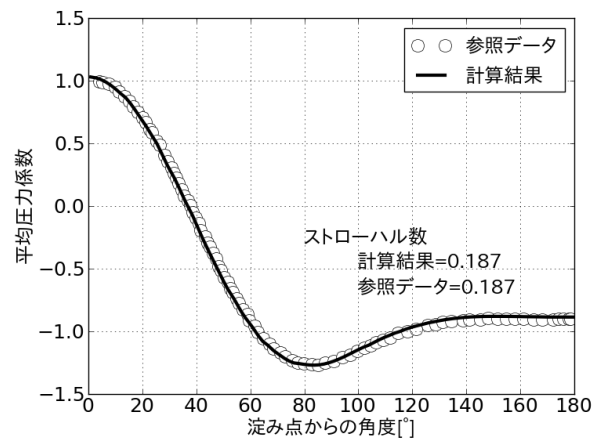
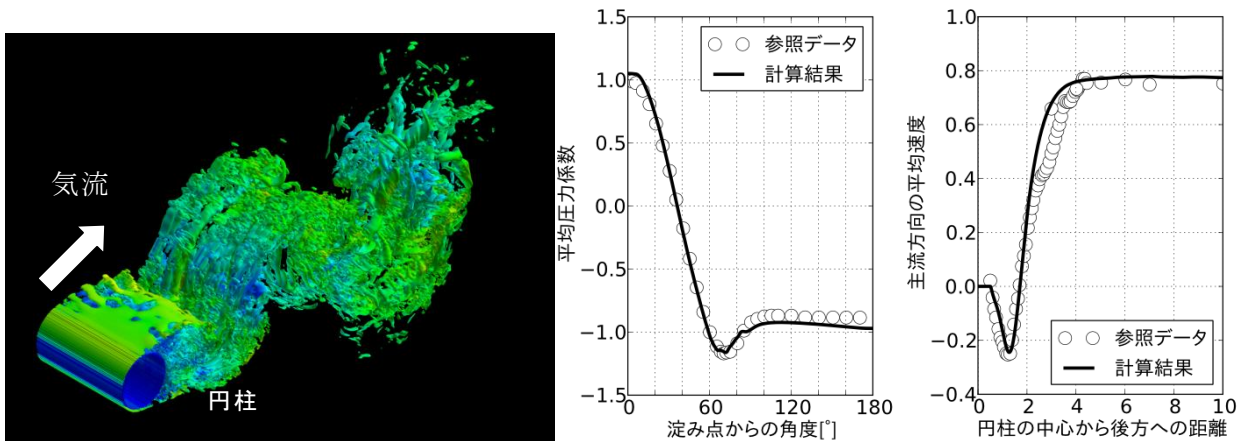


図4 円柱周りの層流解析 (Re=160)



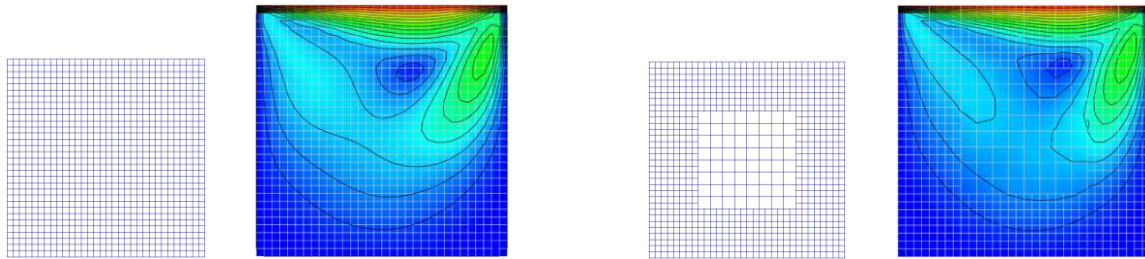
(a) 渦構造の可視化 (b) 円柱表面の平均圧力係数 (c) 主流方向の平均速度

図5 円柱周りの乱流解析 (Re=3900)

2. 4 計算格子の効率的利用(計算格子の粗密化)の基礎検討

流れの数値シミュレーションでは、物理量が急激に変化する箇所では計算格子解像度を高くし、物理量が緩やかに変化する箇所では計算格子解像度を低くすることによって全体の計算格子数を節約する。つまり、計算機負荷が過大とならないように計算格子の粗密を工夫することが求められる。直交格子法では計算格子の粗密を実現するために、計算格子の大きさを不連続に変化させ

る方法が研究されている。ここでは、その空気流シミュレータへの実装を目的とした基礎検討として、不連続境界面を有する直交格子を用いた2次元キャビティ流れの計算を行った。計算格子の不連続境界面で線形補間を基本に流れを接続する手法を用いたところ、不連続格子においても等間隔格子の計算結果を概ね再現出来ることを確認した(図6)。



(a) 等間隔格子による計算(速度コンター) (b) 不連続格子による計算(速度コンター)

図6 不連続格子を用いた計算例(計算対象:2次元キャビティ流れ)

2.5 パンタグラフ周りの流れへの適用の進捗状況(試計算)

パンタグラフ周りの流れを例に、空気流シミュレータによる実用計算の一連の手順について紹介する。まず、3次元CADデータ(STL形式)をもとに、直交格子の計算格子を自動生成する(図7)。ここでは、パンタグラフの形状表現はボクセル法により行った。次に、計算格子を空気流シミュレータに入力し、試計算を行った(図8)。流れのレイノルズ数は実機と同程度、計算格子数は約5億点とした。CADデータを入力してから計算結果を得るまでには、計算格子作成に10分程度、鉄道総研の計算機(Cray製 xt4)512並列を用いた空気流シミュレータの計算に4日程度であり、構造格子を用いた従来の方法(格子生成から流れ計算まで数週間)より、格段に早く結果が得られた。今回の計算は試計算ではあるが、空気流シミュレータが実用化すると、流れ場の傾向を手早く得るためのツールとしての利用が期待される。なお、計算格子解像度の検討など計算結果の検証を含めた本計算は今後進める計画である。また、実車により近い乱流流入条件を実現したが、空気流シミュレータにおけるその検証も今後の課題である。

三次元CADデータ → 直交格子法の計算格子

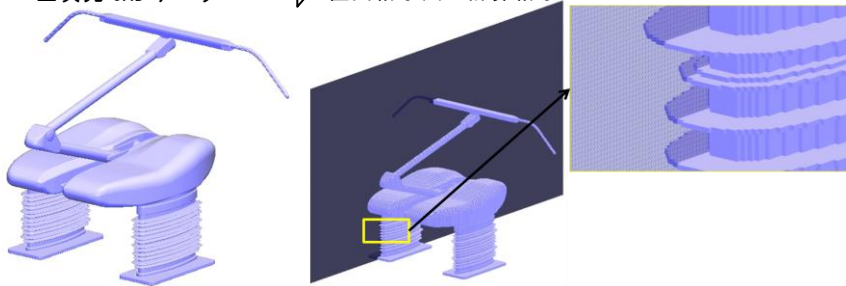


図7 三次元CADデータから直交格子法の計算格子を自動生成

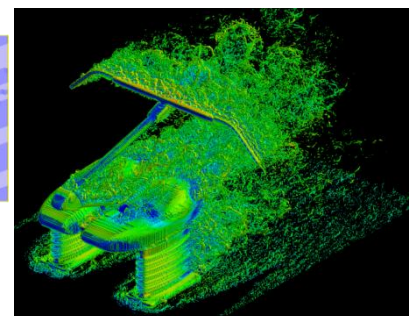


図8 試計算(渦構造の可視化)

3. 空力音シミュレータ

3.1 開発背景

これまで鉄道総研では、Howeの渦音理論と物体形状に適合したグリーン関数を組み合わせた、分離解法による空力音の数値解析手法の開発を行ってきた³⁾。この手法では、境界要素法を用いてグリーン関数を数値的に求めることによって、有限要素法や差分法で問題になる伝播過程における数値的な減衰などの影響を受けることなく遠方場における放射音を評価することができる。

また、音源の分布や放射音への寄与を明らかにすることも可能である。一方で、境界要素法では多元連立一次方程式を解くが、その係数行列は密になるため、並列化が難しい。また、近年の趨勢である分散メモリ型の並列計算機においては、1 ノードあたりのメモリは数 GB～数十 GB 程度であることが多いため、並列化によって係数行列を分割しない限り、大規模問題を扱うこと自体ができない。そこで本研究では、分散メモリ型の並列計算機を用いて複雑な物体形状に適合したグリーン関数を解けるように、境界要素法のアルゴリズムを中心とした空力音解析プログラムの並列化を行った。

3. 2 大規模並列音響解析⁴⁾

MPI(Message Passing Interface)規格を用いて、多元連立一次方程式の解法とグリーン関数の演算部分の並列効率を高めた結果、実行速度の大幅な向上と、使用するメモリ量の削減を図ることに成功した(図9)。次に、パンタグラフの表面に約13万要素の境界面を作成し、並列化したプログラムを用いてパンタグラフ周りの音響伝搬特性の計算を行ったところ、計算速度の向上を達成しながら、凹凸のある複雑な形状周りの音響特性を得ることができた(図10)。

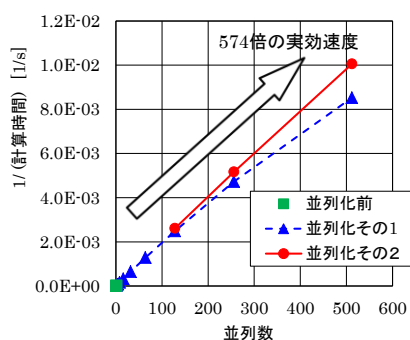


図9 音響特性計算プログラムの並列化効率

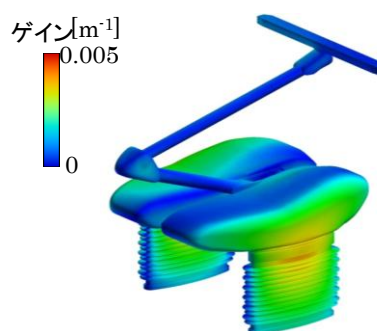


図10 パンタグラフ周りの音響伝搬特性 (グリーン関数)の計算結果

4. 今後の統合計画について

空気流及び空力音の個別シミュレータの開発に続き、今後はそれらの個別シミュレータを接続して統合シミュレータの開発を実施する。パンタグラフの空力音を計算対象とした数値シミュレーションの実現を目標に、空気流シミュレータにより得られる流れ場を用いて、空力音シミュレータによる音響解析を実現するための研究開発を進めていく計画である。

文献

- 1) R. Mittal and G. Iaccarino : Immersed boundary methods, Annual Review of Fluid Mechanics, 37(2005), pp. 239-261.
- 2) H. Kobayashi : The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow, Physics of Fluids, 17(2005), 045104.
- 3) Takaishi, T., Miyazawa, M. and Kato, C. : A computational method of evaluating noncompact sound based on vortex sound theory, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 121, No. 3 (2007), pp. 1353-1361.
- 4) 高石武久 : 複雑形状物体から発生する空力音の並列計算, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 790 (2012), pp. 1206-1219.