

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

複雑形状に対応した 空気流・空力音シミュレーション

複雑形状流れの数値シミュレーションを容易に実現できる計算手法である直交格子法に基づく空気流シミュレーターおよび空力音シミュレーターを開発しています。空気流シミュレーターの概要を紹介するとともに、パンタグラフ周りの流れ場の解析事例を紹介します。また、空力音シミュレーターを用いた単純形状(円柱空力音)に対する精度検証および複雑形状(パンタグラフ空力音)への適用例を紹介します。



中出 孝次
Koji Nakade
鉄道力学研究部
計算力学研究室
主任研究員
【専門分野】 流体工学,
計算流体力学

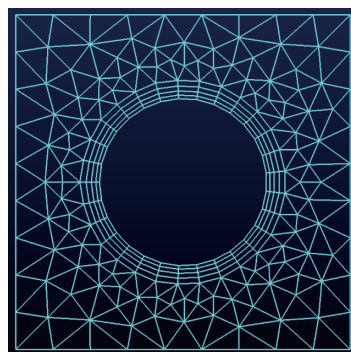


光用 剛
Takeshi Mitsumoji
鉄道力学研究部
集電力学研究室
副主任研究員
【専門分野】 集電装置ま
わりの空力現象

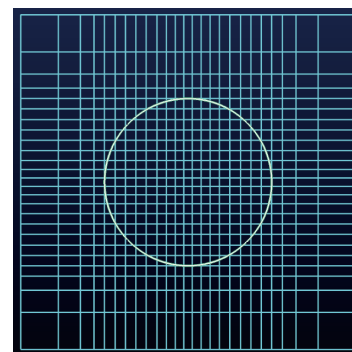
はじめに

流れの数値シミュレーションでは、現実の流れ現象を近似する流れの基礎方程式(偏微分方程式)を空間上の離散的な点について離散化し、得られた代数方程式を数値計算することによって流れ場が求められます。離散的な点の分布は計算格子と呼ばれ、通常のシミュレーションでは物体近傍の流れを高精度に計算するために、物体形状に合わせた計算格子(境界適合格子)が用いられます(図1(a))。現在、境界適合格子を採用した商用ソフトウェアによる流体解析が様々な実用問題に適

用されています。しかし、複雑形状を対象とした境界適合格子の生成はかなりのコストと時間を要します。そのため、格子生成を自動化できる直交格子法が近年注目されています(図1(b))。直交格子による形状表現は境界適合格子より劣ること、また、直交格子では無駄な計算格子が多く存在することにより、計算格子数は境界適合格子よりも多くなり、境界適合格子と同等の計算精度を得るには、より大規模な数値計算が必要とされます。しかし、直交格子法は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



(a) 境界適合格子



(b) 直交格子

図1 流れの数値シミュレーションの計算格子(例:円柱周りの流れ)

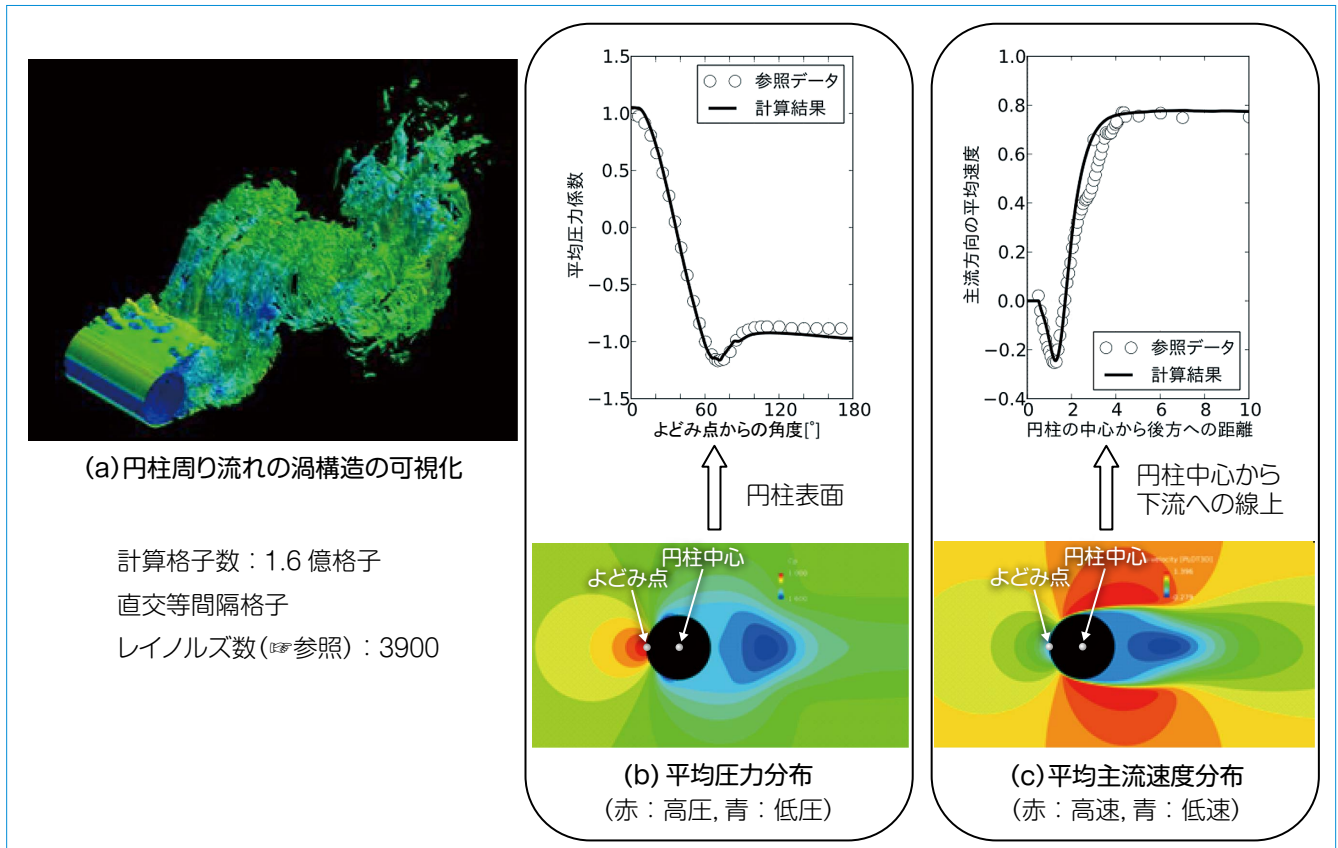


図2 埋め込み境界法による基本形状流れに対する計算精度の検証例 (円柱周りの乱流解析)

においては有力な流体解析手法になると考えられています。そこで、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ーおよび空力音シミュレーターの開発を進めています。

空気流シミュレーター

開発している空気流シミュレーターは、非圧縮性流体の基礎式をラージ・エディ・シミュレーション(小さな渦のみモデル化する乱流計算方法)により乱流解析を行う、直交格子法に基づく流体解析ソルバーです。三次元CADデータを入力し、ほぼ自動で計算格子が生成されるとともに、高い並列効率を有し大規模並列解析が容易に実現できることに特徴があります。

直交格子法特有の課題となる計算格子の効率利用については、等間隔格子

だけでなく不等間隔格子に対応するとともに、現在、階層格子(☞参照)への対応を進めています。階層格子を利用することによって、例えば平行平板間乱流の計算においては、等間隔格子とほぼ同程度の解析結果を得つつ、計算格子数を1/3程度に削減することが可能になります。

直交格子法特有のもう一つの課題として、曲面形状の表現手法の向上があります。曲面形状を直交格子で階段上に単純表現するボクセル法だけでなく、現在、埋め込み境界法という手法の導入を進めています。埋め込み境界法では、計算格子点に一致しない物体表面位置の速度を線形補間で近似することにより、ボクセル法よりも曲面形状表現の精度を向上しています。埋め込み境界法を用いた計算例を図2に示します。参照データとの良好な一致が見ら

れ、曲面形状の代表例である円柱周りの流れが、精度良く解析できることが確認できます。

複雑形状流れの解析例(パンタグラフ周りの流れのシミュレーション)

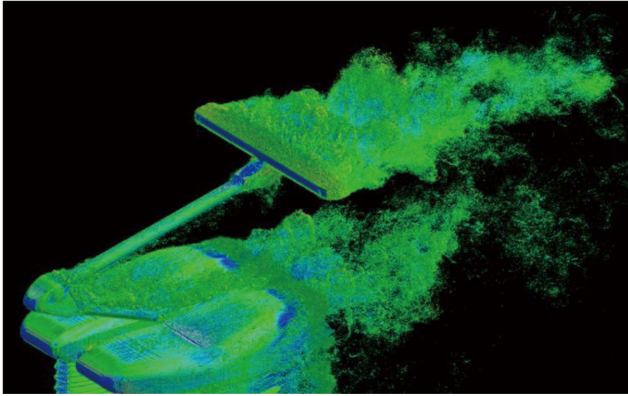
複雑形状流れへの空気流シミュレーターの適用例として、パンタグラフ周

☞ 階層格子

粗密をつけた計算格子のひとつで、隣接計算セルの境界面積が異なる状況も許容することにより、不必要な計算格子を効率良く排除できる計算格子です。ただし、境界面積が異なる箇所では計算方法に工夫が必要です。

☞ レイノルズ数

「代表速度×代表長さ/動粘性係数」で算出される無次元数で、流れを特徴付ける最も重要な指標です。



(a) 渦構造の可視化(「京」による100億格子の計算)

計算格子数：7億格子(XC30)、100億格子(京)
 並列計算：2,400並列計算(XC30)、24,000並列計算(京)

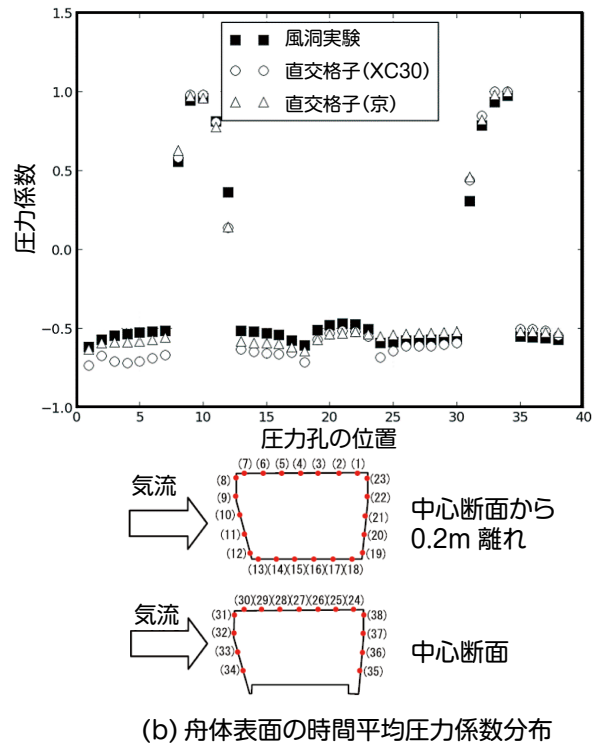


図3 複雑形状流れの計算例 (パンタグラフ周りの乱流解析(実物大, 風速260km/h (72.2m/s)))

りの流れのシミュレーションを、鉄道総研のスパコン (Cray XC30) と理化学研究所のスーパーコンピューター「京」により実施し、風洞実験結果と比較しました(図3)。なお、「京」を用いた計算は、「京」産業利用課題(個別利用)として実施しました。計算格子解像度向上とともに風洞実験結果の再現性が良くなること、京コンピューターを用いた大規模解析(100億計算格子)では、詳細なスケールの渦がシミュレーションにより再現できることが確認できました。このような詳細なシミュレーションは、広帯域空力音などの予測精度向上に有用であると考えられます。

空力音シミュレーター

次に、鉄道総研で開発した空力音シミュレーターについて紹介します。流れのシミュレーション結果から遠方に伝搬する空力音を解析する手法はいくつかありますが、本空力音シミュレ-

ターではHoweの渦音理論に基づいた手法により、空力音を解析しています。

この手法では、物体周りの流れの状態と、物体からの音波の放射効率(グリーン関数)から、物体周りの音源分布を求め、それらを物体周りの全空間にわたって積分することで遠方に伝搬する空力音を求めます。この手法では、音波の回折、散乱、遮蔽の影響や、音源位置から観測点までの音波の伝搬経路による位相差を考慮することができるため、物体の大きさよりも波長が小さい(非コンパクトな)音波についても、すなわち高い周波数帯の空力音も解析することが可能です。さらに、遠方に伝搬する空力音だけでなく、物体周りの音源分布を得られることが大きな利点となっており、空力音の発生メカニズムの解明や低減対策の検討において有用なツールとなっています。

ここでは、先述した空気流シミュレーターによって得られた流れ場解析結果から、空力音シミュレーターに

よって空力音を解析した結果をご紹介します。

円柱からの空力音解析結果

空気流シミュレーターによって得られた円柱周りの流れ場解析結果から、空力音を解析した結果を図4、図5に示します。空力音の観測点は、円柱側方2m位置(図4参照)としています。

図4は円柱から放射される空力音の周波数スペクトルを、風洞試験結果と空力音シミュレーターの解析結果とで比較したものです。図4を参照すると、100Hz以下の周波数帯では、風洞試験の暗騒音の影響で両者の結果に差が生じていますが、それ以外の周波数帯については、カルマン渦(図5参照)に起因する200Hz付近のピーク音

カルマン渦

流れの中に物体を置いたときに、物体の下流側で交互に渦が生じることによって形成される2列の渦列です。

や、それより高い周波数帯の広帯域音も含め、空力音シミュレーターの解析結果は風洞試験結果の傾向を概ね再現できることが確認できます。図5は代表的な周波数における音源分布を描画したものであり、赤や青の部分が流体の渦運動に起因する強い音源を表しています。ピーク音が生じる周波数帯の音源分布(図5(a))では、カルマン渦の巻き込み位置に相当する部分に強い音源が見られることから、このピーク音はカルマン渦に起因する音であることが推測できます。また、高い周波数帯の音源分布(図5(b))では、流れの剥離領域全体にわたってスケールの小さな強い音源が分布していることから、剥離領域内の乱流に起因する小さいスケールの渦が音源となっていることが推測できます。このように、空力音シミュレーターによって、遠方場に伝搬する空力音を解析出来るだけでなく、音源分布から空力音の発生要因を推定することが可能です。

パンタグラフからの空力音解析結果

空気流シミュレーターによって得られたパンタグラフまわりの流れ場解析結果から、音源分布を解析した結果を図6に示します。空気流シミュレーターにおける格子点数は約7億点、レイノルズ数は 4.7×10^6 (実物大、風速72.2m/s相当)です。また、空力音の観測点は、パンタグラフ側方5m位置としています。図6より、舟体や中間ヒンジ、台枠周辺の構造部材の後流領域に強い音源が分布している様子が確認できます。これらの音源領域は、別途実施した風洞試験における音源探査で得られる音源部位と一致していることを確認しています。

このように、本空力音シミュレーターによって、風洞試験では把握する

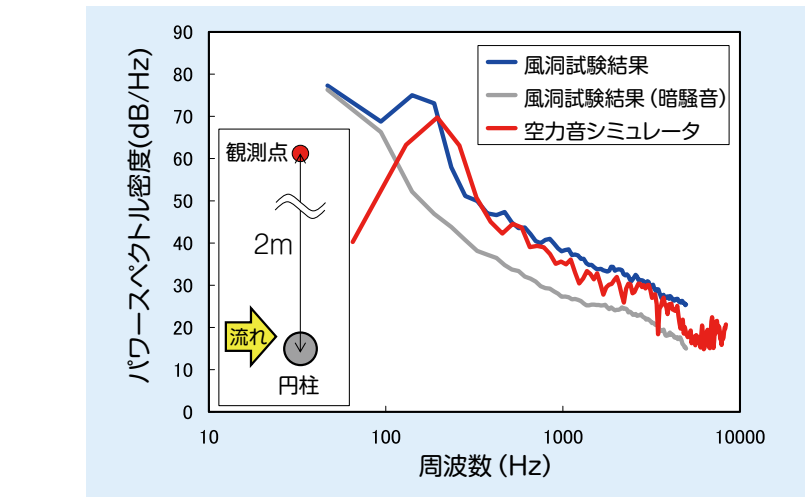


図4 円柱から放射される空力音の解析結果
(直径50mm, 風速41.7 m/s, 観測点は円柱側方2m位置)

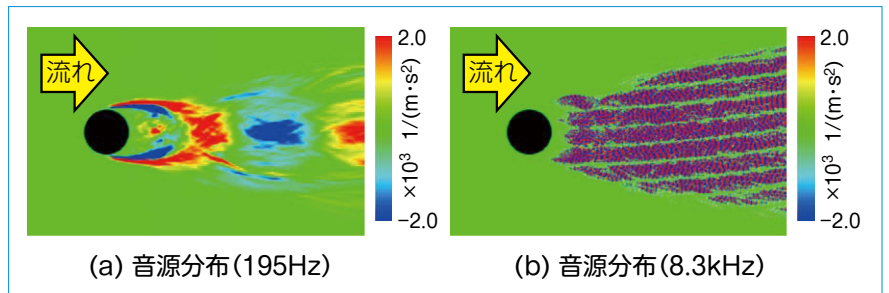


図5 円柱まわりの音源分布の解析結果
(直径50mm, 風速41.7 m/s, 観測点は円柱側方(図の上方)2m位置)

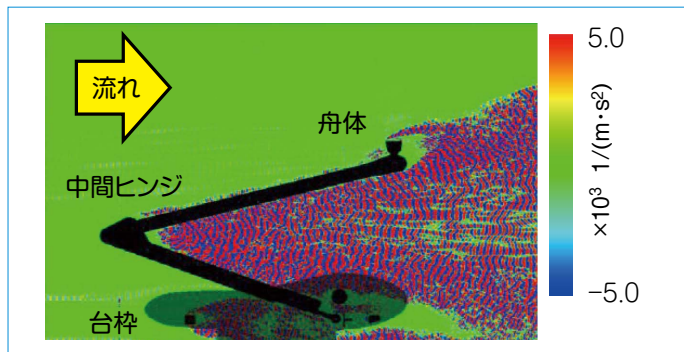


図6 パンタグラフまわりの音源分布(2.3kHz)
(実物大, 風速72.2m/s, 観測点はパンタ側方(図の紙面奥側)5m位置)

ことが困難なパンタグラフ周りの音源分布を詳細に把握することができるため、空力音の発生メカニズムの解明や低減対策の検討において有用なツールとなっています。

おわりに

直交格子法に基づく空気流シミュレーターと空力音シミュレーターは複

雑形状を対象とした空気流・空力音の研究開発において有用なツールとなります。今後、実用問題への適用をさらに進めることによって、シミュレーターを活用していきます。また、編成車両周りの流れのような、さらなる大規模解析に対応するための改良を進めるとともに、シミュレーターの機能向上の開発を継続していきます。[RRR]