

論文の内容の要旨

論文題目 四面体有限要素を用いた並列LES解析の実用化に関する研究

氏名 海保真行

近年の計算機や乱流解析技術の進歩に伴い、新幹線や自動車の空力騒音・非定常流体力、流体機械の低流量域特性・乱流騒音、磁気ディスクの非定常流体力、回転電機やコンピュータの乱流熱伝達の問題など、実機レベルの非定常乱流解析に対するニーズが高まっている。並列スーパーコンピュータやPCクラスタの発達により、これらの非定常乱流解析のTAT (Turn Around Time) が1~2日となれば、製品開発・設計に非定常乱流解析を取り込んでいくことが可能となると考えられる。このような背景に基づく従来の研究例として、現状で最も実用的な非定常解析を実現できると考えられるLES (Large Eddy Simulation) が、上記の実用問題など、様々な分野に適用されているが、いずれも、差分法や六面体の有限要素法によるもので、高精度なLESを実現するためのメッシュ生成時間が多大であるという短所がある。メッシュの自動生成が可能な四面体メッシュによる解析も多々研究されているが、いずれもRANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) モデルに基づくもので、実用的なLESへ適用された例は少ない。そこで、本研究では、先に挙げたような実機レベルの複雑形状流路に対する非定常乱流解析の実用化を目的として、特に工学上幅広い応用が考えられる、圧力損失予測・非定常流体力予測・乱流熱伝達予測

を対象に、四面体要素を用いた有限要素法による並列 LES 解析技術を開発した。

解析アルゴリズムとしては、FS (Fractional Step) 法に準拠し、SIMPLER (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised) 法に類似の 2 段階の速度・圧力補正を行うアルゴリズムを提案した。ナビエ・ストークスの式の対流項に起因する数値的不安定性を除去するために、BTD (Balancing Tensor Diffusivity) 項を導入するとともに、解析精度の向上を図るために、Crank-Nicholson 法を用いて時間積分を行った。LES 解析を行うためのサブグリッド・スケール・モデルとしては Smagorinsky モデルを用い、壁面近傍における渦粘性係数の減衰に関しては Van-Driest 型の減衰関数を用いている。しかし、この方法は、実機レベルの解析のように解像度が必ずしも十分でない場合は、壁面近傍において減衰が効かず過度な渦粘性力が働いてしまうという短所がある。これを解決するにはダイナミック・スマゴリンスキー・モデルなどの適用が考えられるが、実用上の課題が多いため、本研究では、壁面上の渦粘性係数を強制的に 0 にする方法の実用性を検討してみた。また、本研究においては、様々な冷却問題、特に回転電機の冷却などにみられる高レイリ数での熱伝達を精度良く求めることを目的として、温度場を解く解析機能を組み込んだ。温度場を解くための移流拡散方程式についても、Crank-Nicholson 法を用いて時間積分を行っている。温度場に関する乱流モデルは、温度場 0 方程式モデルを用いた。

メッシュ生成に関しては、壁面上の三角形メッシュを壁面の法線方向に層状にスリーブした層状メッシュと、それ以外の領域のデローニ分割で生成した不規則なメッシュとを接続する層状-不規則接続メッシュを全自動で生成するメッシュジェネレータを開発した。本メッシュジェネレータにおいては、要素アスペクト比で代表されるメッシュの品質を改善し解の収束性を向上させるために、ラプラス・スムージングと呼ばれる節点座標を平均化する手法と、要素アスペクト比を直接改善する方向に節点座標を移動する方法を組み合わせた新しい手法を開発・採用している。この手法については、90 度バンド内の流れ解析問題にて、品質改善後のメッシュによる収束までの計算時間が改善前の約 1/2 になることを示し、その有効性を確認した。

解析時間の短縮を図るための並列化に関して、解析アルゴリズムの陽的部分の並列化については、RGB (Recursive Graph Bisection) 法によりメッシュを領域分割する手法を用

い、陰的部分については全体マトリクスを行分割する手法を用いた。陽的部分と陰的部分とでデータ構造が異なるため、陽的部分のデータ構造から陰的部分で使用する全体マトリクスを高速に作成する手法を開発した。並列の行列解法については、日立製並列計算機SR8000, SR2201 に付属している並列行列計算ライブラリの中のPCG (Preconditioned Conjugate Gradient) 法のソフトウェアを用いている。並列化効率については、SR2201 の32CPUを用い、約80%を実現した。

本解析手法の検証例として、レイノルズ数が10,000の円柱周りの流れ、円管サーモサイフォン内の自然対流解析、及び、プラントル数が0.71(空気)でレイリ数が $10^3 \sim 10^{10}$ の場合の3次元立方キャビティ内自然対流解析を行い、層状-不規則接続メッシュが四面体有限要素を用いたLES解析に有効に使用できることを確認した。円柱周りの流れ解析における本解析手法の解析誤差は、円柱の抗力係数、揚力係数、ストロハル数に関して3%程度である。円管サーモサイフォンの解析では、円管の熱伝達率を誤差約30%で予測することができた。立方キャビティ内自然対流問題においても、加熱壁面の平均ヌセルト数に関する従来報告例との差は、レイリ数が $10^3 \sim 10^8$ で6%以下で、従来の報告例がないレイリ数が 10^9 程度以上 10^{10} までの乱流域においても、流れ場の非定常性を再現でき、平均ヌセルト数の時間平均値を安定に計算することができた。さらに本問題では、先に述べた、壁面上の渦粘性を強制的に0にする手法の実用性を示した。なお、これらの検証例において、メッシュ生成パラメタと解析精度の影響を検討した。等温場の場合には滑らかな平板に沿った乱流境界層厚さの実験式を、非等温場の場合には垂直平板自然対流熱伝達の乱流境界層厚さの実験式を用い、層状メッシュ部厚さが境界層を含み、境界層内に数層以上の層状メッシュが含まれ、かつ、層状メッシュと不規則メッシュの接続部においてメッシュ品質を連続的にすることにより高精度な解析を実現でき、層状メッシュが境界層を含まない場合でも、層状メッシュと不規則メッシュの連続性を確保すれば、それほど解析精度を落とさずにすむことを示した。

実用問題として、先に得たメッシュ生成パラメタに関する知見に基づき、タービン発電機の通風冷却流路の圧力損失予測、新幹線車両集電装置に働く非定常流体力予測、及び、回転機械内の高レイリ数における熱伝達予測に本解析手法を適用した。タービン発電機の通風冷却流路の圧力損失予測については、検証が十分になされている六面体による解析と

の差は3%以内で、冷却流路入口部の流速分布・境界層厚さなどについても六面体の結果と同様であった。新幹線車両集電装置周りの解析に関しては、六面体ではメッシュ生成に膨大な時間が必要であった、パンタグラフの形状を忠実に再現するような非常に複雑な流路形状の解析が、全自動メッシュ生成の有効性を活かし、実用的なT A Tで可能となった。回転機械内の高レイリ数における熱伝達予測については、コイル等からの発熱を伴う回転機械内に見られる閉塞空間部の回転実験との比較において、本解析手法により計算された加熱壁面の平均ヌセルト数が、誤差15%以内で実験値と一致した。円柱周りの解析など検証問題で得られたメッシュ生成パラメタに関する知見に基づいて作成したメッシュを用いて、実用問題の高精度な解析が実現できたことから、平板乱流境界層や垂直平板自然対流の乱流境界層の実験式を用いるメッシュ生成指標が、実用問題でも有効に活用できることがわかった。

以上の結果から、本解析手法が、六面体によるメッシュ生成に多大な時間が必要な、複雑形状を有する実用的な非定常乱流解析に有効に活用でき、圧力損失予測・非定常流体力予測・乱流熱伝達予測という、工学上非常に幅広い応用が考えられる問題に対して有効に活用できることが明らかとなった。