

論文の内容の要旨

論文題目: 低無次元振動数を有する非定常流れの LES 解析の
ハーモニックバランス法による高効率化

氏名: 岩本 雄馬

本論文は、低無次元振動数を有する非定常流れの高信頼かつ高効率な数値シミュレーション手法を開発し、その有用性を実証するものである。

低無次元振動数を有する非定常乱流流れには、主翼遷音速バフエットやジェットエンジン空力要素での翼列フラッタなど、航空機の安全性や効率に強く影響するものが多くあり、数値計算による高信頼な予測が工学的な重要性を増している。非定常乱流流れの計算手法である Large-Eddy Simulation(LES) は、剥離や遷移を含む非定常乱流流れを高信頼に予測できる手法だが、低無次元振動数を有する流れでは計算コストが高く、効率改善が課題となっている。一方 Harmonic Balance(HB) 法は周期流れを高効率に予測できる計算手法であるが、非周期的な乱流変動は乱流モデルで表現されるため、剥離や遷移を含む乱流流れに対する信頼性向上が課題となっている。

提案手法である Harmonic Balanced Large-Eddy Simulation: HB-LES は、相補的な関係にある LES と HB を組み合わせることで、LES を高効率化し、また HB を高信頼化するものである。HB-LES では、流れを周期成分と非周期的な乱流変動成分に分離し、これらの時間スケールが分離できることを仮定する。乱流変動成分は短いシミュレーション時間の LES で解像し、周期成分は HB を用いて効率的に求解する。変動から周期成分への影響は、時間スケールの分離を活用することで、LES で得られる変動の統計量を用いてモデル化せず評価される。LES と HB を交互に繰り返すことで、変動から周期成分、また周期成分から変動への影響が共に適切に反映された解を得ることができる。

本論文では HB-LES の検証および有用性の調査のため、Stokes Boundary Layer, NACA0012 翼のピッチング, OAT15A 翼での遷音速バフエットの三ケースの解析を実施した。これらの解析結果から、低無次元振動数を有する非定常流れの数値シミュレーション手法として、従来手法に対し HB-LES が大きく三点の長所を有することが分かった。

一点目は予測の信頼性である。HB-LES では時間スケールの分離が成立する限り、剥離や遷移を含む乱流流れに対しても、LES の信頼性での予測が可能である。Stokes Boundary Layer では乱流境界層の逆流や遷移を精度良く予測でき、また NACA0012 のピッチングと遷音速バフエットについては、混合層、剥離境界層の非定常性を再現できた。

二点目は計算コスト低減である。HB-LES では計算時間を従来の LES のストローハル数倍まで短縮できる。これは一般に従来の LES の実施が困難なストローハル数の低い現象ほど、大きな計算効率の向上が得られることを意味する。また位相平均を用いずに各時刻における乱流現象や乱流統計量を評価できるため、数十周期分の瞬時場を逐次保存する必要がない。さらに周期中の各時間ごとに実時間解析手法や格子を切り替えられるため、効果的に計算資源を節約できる。

三点目は後処理の簡単さである。HB で基本周波数とその高調波成分のみを計算するため、シグナルノイズ比の低い現象においても、周期変動と相関のある変動のみを解として得ることができる。また収束計算であるため、過渡状態を経てリミットサイクルに入った解が得られるのに加え、計算の終了判定が容易となる。

以上の長所から、HB-LES は低無次元振動数を有する非定常流れの高信頼かつ高効率な数値シミュレーション手法として、広い航空分野での重要課題に対し産学両面での活用が期待でき、その有用性は高いと考えられる。