

論文の内容の要旨

論文題目 LES と DES による一開口通風換気特性の解明

氏名 挾間 貴雅

(本文) 本研究は 3 次元的な空気の流出入性状が詳細に解明されていない単一の開口のみを使用した自然風通風換気時の空気流動特性を解明する為に、Large-eddy simulation (LES) を使用して一つの開口を有する建物壁面を模擬した流れ場の解析を行った。これは、自然通風換気において室内の窓を一つあけて通風換気を行うという言わば「自然通風換気の基本行為」である一開口通風換気における詳細な単一開口の流出入特性に関する知見が殆ど無いことを踏まえての研究である。また、もう一つの研究テーマとして、通風換気解析に対する DES の適用可能性に関する検討を行った。近年、航空機分野においてレイノルズ平均モデル (RANS) と LES のハイブリッド手法である Detached-eddy simulation (DES) が計算格子増加を抑えつつ高精度に気流場を予測出来る手法として注目され良好な費用対効果を示しており高精度の流れ場予測性能が求められる今日の建築環境工学分野においての適用が期待されるが、計算負荷が非常に大きい LES の代換案として提案するには建築環境工学分野における DES の適用可能性を調査する必要がある。複雑流れ場の時空間的な気流特性を高精度で予測する上で必要となる数値気流解析手法である LES は壁面近傍の渦構造を解像する為に格子数を密に設定する必要があり計算コストの大幅な上昇を招く主因となり工学的応用に制限が生じるが、DES 格子数増加問題を壁面近傍において RANS することで格子増加を大幅に抑制することが可能になる為、建築環境工学分野において適用可能性が検証されれば、同手法は更なる温熱環境予測精度の高精度化に貢献しうる可能性がある。その為に、RANS/LES の組み合わせに起因する問題が顕在化する流れ場として一開口通風換気を選定し、先の LES 解析結果と比較することにより、建築環境工学分野に対する DES の適用可能性を検討することを行った。

まず、一開口通風換気時の単一開口を通した空気流出入特性の検討するため単一の開口を有する建物を模擬した流れ場を対象に LES を適用し、1. 基本的な空気流出入特性の検討、2. 開口形態と流出入特性との関連、3. 流入風性状と流出入特性との関係、の三つ項目について検討し、空気流出入性状の変化を調査した。その結果、以下に示す知見を得た。

単一開口を通した通風換気において、Cavity 流れと同様に自励振動が生ずることが確認された。しかしながら、自励振動を生ずる原因である feedback メカニズムが Cavity 流れのそれと異なる原因で生じることがわかった。スパン方向及び主流方向に室内外を隔てる”lid”を有し、主にスパン方向の”lid”による速度減速が生じる為に 3 次元的な流出入特性を示し、その結果、開口近傍において左右の”lid”に起因する主流方向を軸とした渦が周期的に形成されるために、Reynolds stress は開口面に不均一に分布することが明らかにされた。また、主流方向開口長さに相当するスケールを持つ渦が乱流による空気交換を主に担うが、流入風の乱れの存在により大スケールの渦が崩壊し、小スケールの渦による輸送が支配

的となり空気交換量が大幅に低下することが明らかにされた。

次に、通風換気性状解析建築環境工学分野、特に通風換気解析に対する DES の適用可能性を検討するため、先の LES 計算を行った単一開口通風換気解析に DES を適用し、LES の計算結果を用いて比較・検討を行った。その結果として、以下に示す知見を得た。

今回の通風換気解析で対象とした RANS 領域で発達した流れが LES 領域へと流入する構成の DES 計算において、少なくとも速度分布に関しては良好な予測性能を得られることが確認された。しかしながら、流入境界条件に乱れを有する速度分布を設定した場合、開口内に形成される LES 領域において算出される Sub grid scale (SGS) 粘性が大幅に減少し、本章で設定した流入境界条件下では 1/10 まで減少することが明らかにされた。流入風に乱れの無い速度分布を設定した場合、開口に至るまでの壁面上にて境界層は殆ど発達せず乱流エネルギー及び Reynolds stress は開口を通過する時点では殆どゼロの値を示したが、その際の DES 計算における開口内 LES 領域の SGS 粘性は LES と比較して 10 倍以上の値をした。流入風に乱れを有する速度分布を設定した場合、通常の LES 計算であれば上流側壁面で乱流境界層は発達する。DES 計算の場合は壁面近傍において RANS 域を有する LES 領域で乱流境界層が発達するが、RANS 領域から LES 領域にかけての人工粘性は通常の LES 計算時と比較して過大算出されるために流れの発達が阻害されるため、この上流域における DES 計算時の turbulent-front は通常の LES 計算ほど明確には再現されず拡散的な傾向を示すことが明らかになった。既往の研究においても LES 領域での SGS 粘性の過大評価傾向は確認された。しかしながら、DES 計算時における開口内 LES 領域の SGS 粘性は、流入境界風に乱れを付与するか否かで大きく変化し、開口部前半において DES 計算は Grid scale の乱流統計量 (乱流エネルギー、Reynolds stress) が LES 計算と比較して分布傾向が同じだが低い値で分布しているものの開口の主流方向後半において LES 計算とほぼ同値に回復しているのは、乱れを付与した場合における SGS 粘性が大きく低下した為であることが明らかにされた。

DES において RANS/LES 領域を決定するのは偏に人工粘性の振る舞いであり、流れ場の特徴は人工粘性の分布により規定され、本研究での解析と同様の流れ場の場合ではある程度の流れの情報量の欠損は避けられない為に計算負荷抑制と LES 並の予測性能達成とはトレードオフの関係であり、この領域における流れ場の再現性は LES 計算と言うより寧ろ非定常 RANS (URANS) に近いと言える。とはいえ、RANS/LES 境界において形成される人工粘性は通常の LES 計算時の SGS 粘性と比較して過大算出されるが非定常現象の再現性を大幅に損なうものではなく、RANS 領域を有する上流側壁面で発達する流れは turbulent-front 等の乱流情報を保持したまま LES 領域に流入する為に、上流域の流れ情報が有る程度加された LES 計算が可能となる。したがって、以下の場合であれば良好な予測性能が得られるとことが示された。

- ・ 流れ場の非定常性をある程度再現する必要がある場合
- ・ 解析において高精度を要求される領域が LES 領域に設定される場合
- ・ 厳密な上流域流れの再現が必要無い場合

特に第 3 項に示す様に、ディフューザ内の流れ等、正確な剥離現象を再現する為の上流側壁面における厳密な渦構造の再現性が求められる場合に DES は向かないが、建築環境工学分野においてはそのようなケースは殆どないと考えられるため、従って少なくとも通風換気解析における適用は問題無いと結論づけられた。