審査の結果の要旨

論文提出者氏名　　土屋　直也

本論文は、非等温の乱れた室内気流の性状を詳細に解析し、これを記述する数学モデルの性能を検証し、新たなモデルを導く際の指針を示したものである。論文は、流れ場の形状依存性が高く複雑な乱れ構造を示す非等温室内気流のLES（Large Eddy Simulation）を実行し、乱流統計量の詳細な数値データベースを作成し、実験結果との比較によりその信頼性を検証している。このデータベースを用いてレイノルズ応力及び乱流熱流束の収支構造の解析を行い、室内複雑流れ場における乱流構造・浮力特性を解明し、レイノルズ平均操作に基づく乱流モデル（Reynolds Averaged Navier-Stokes equations model、RANSモデル）の評価・開発に必要、有用となる知見を得ている。さらにこの知見に基づき、現在、室内気流解析で用いられているRANSモデルの予測精度およびそのモデリング上の問題点を検討し、精度、信頼性向上のための指針を示している。本論文は、以下全７章より構成されている。

第１章では、本研究の背景と目的及び構成について述べている。

第２章では、非等温室内気流解析で用いられているRANSモデルとして、ASM（Algebraic stress model）、WETモデル、標準k－εモデル、低Re数型k－εモデルの基礎式を示し、モデル導出の仮定、モデリングについて解説している。

第３章では、非等温流れ場におけるLESの基礎式、モデリング（subgrid scaleモデル）について解説している。また、その数値計算手法を説明している。

第４章では、冷風水平吹出しを持つ非等温室内モデルを対象に、十分細かい格子解像度を確保したLESを実行し、乱流統計量の数値データベースを作成している。この結果はレザー流速計を用いた詳細な実験結果と比較され、データベースの精度と信頼性が確認されている。また、データベースの中心となるレイノルズ応力及び乱流熱流束の輸送方程式の各項（収支式）の評価の際、数値誤差を防ぐためにコンシステントスキーム（解析的微分操作と整合性をもつ離散式の構成）を導入している。従来、コンシステントスキームを用いた各収支式の評価は、式展開の煩雑さから、空間に一様な方向を有し、式展開の大幅な簡略化が可能となるチャンネル乱流のような単純流れ場解析への適用に限られていた。しかし本研究では、３次元性の強い複雑乱流場におけるコンシステントスキームを新たに導いて使用している。

第５章では、作成した数値データベースを用い、室内浮力乱流場の特徴的構造として吹出噴流及び噴流衝突領域に着目し、レイノルズ応力及び乱流熱流束の輸送方程式における各項の寄与を詳細に調べ、レイノルズ応力等の生産･散逸･再分配･移流･拡散に対する貢献の定量的な知見を得ている。この解析によりレイノルズ応力等の形成機構やそれらの相互関係など、非等温室内気流での浮力乱流構造の特徴を明らかにしている。また、レイノルズ応力等の収支算出にあたり、数値誤差が小さく、コンシステントスキーム適用の効果が

有用であることを確認している。

第６章では、数値データベースを用い室内気流解析で用いられる代表的な RANS モデルとして ASM、WET モデル、渦粘性モデルのアプリオリテストを行い、レイノルズ応力及び乱流熱流束の生産･散逸･再配分･移流･拡散の寄与に対する各モデルで用いられたモデリングが予測精度に及ぼす影響と問題点を検討している。その結果、ASM は吹出噴流領域において、レイノルズ応力と乱流熱流束の非等方性状を精度良く再現し、噴流衝突領域では、ノルマルストレスと乱流熱流束の壁減衰挙動を物理的に正しく評価するものの、両領域の壁近傍において、ASM は移流･拡散項の代数近似と圧力歪相関項の近似モデルの精度が悪く、両者が相反する非物理的な挙動のもと良い結果を与えることを明らかにしている。そのため、ASM の高精度化では、圧力歪相関項の高次モデルの導入と同時に、移流･拡散項の代数近似の改良を必要とすることを指摘している。WET モデルは、モデル式中のレイノルズ応力と乱流熱流束を渦粘性モデルで近似することで、渦粘性モデルの近似精度が悪くなる領域では、その相乗効果により更なる精度の低下を招くことを指摘している。また、壁の極近傍では数値不安定を引き起こすなど極めて精度の悪い結果を与えるが、簡便な解決方法として壁減衰関数の付加によりこれを改善できることを確認している。渦粘性モデルに関しては、もはや衆知のことでもあるが、ノルマルストレスの非等方性の再現性が悪いこと、せん断流において壁に平行方向の乱流熱流束を評価しないことなど、大幅な予測精度低下が非等温室内気流の解析においても免れ得ないことを示し、その精度低下を定量的に評価している。

第７章では、全体のまとめを行っており、本研究の成果と今後の課題を総括している。

以上を要約するに、本論文は室内の浮力乱流場を対象に乱流統計量の詳細な数値データベースを作成し、これに基づき、レイノルズ応力及び乱流熱流束の収支構造を解明し、さらに室内気流解析で用いられる代表的な RANS モデル（ASM、WET モデル等）の予測精度及び問題点を定量的に明らかにし、建築室内気流の予測に用いられる RANS モデルの評価･開発のための有用な知見を得ている。本研究の成果は、建築環境工学分野のみならず工学全般における熱流体解析技術の発展に寄与するところが大である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。