

論文の内容の要旨

論文題目

LES データベースに基づく室内浮力乱流場の構造解析と RANS モデルの評価

氏名 土屋直也

建築室内の空調設計や温熱環境諸問題の解決にあたり、流れ場・温度場を精度良く予測する手法の開発は、重要な課題となる。空調された室内は、吹出噴流、衝突流、循環流、更には浮力による成層等、様々な流れが混在する極めて複雑な乱流場となっており、精度の高い予測手法の開発は容易ではない。このような建築室内の複雑乱流場の予測は、LES (Large Eddy Simulation) あるいは高精度 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) モデルによる CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析が望ましい。しかし、LES は設計段階で用いられるほど実用化に至っていない。また、高精度 RANS モデルとして応力方程式モデルが挙げられるが、圧力歪相関項のモデル化や数値定数の最適化が現在でも問題となっており汎用的でない。従って、短時間で精度良い結果が求められる実務設計の場面では、実用上優れた標準 $k-\epsilon$ モデルに非等方性の効果を組み込んだ改良 $k-\epsilon$ モデルの開発が現実的な課題となる。室内気流解析における改良 $k-\epsilon$ モデルは、低レイノルズ(Re)数効果と浮力による乱れの非等方性効果を考慮した低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデル (村上らの MKC、MKCO モデル) や、代数応力モデル (Algebraic Stress Model, ASM) の簡易版である WET モデルに対して壁の減衰効果を付加した 2 次の非線形 $k-\epsilon$ モデルが提案されてい

る。このような $k-\epsilon$ モデルをベースとする高精度 RANS モデルの開発では、 k と ϵ の輸送方程式の各項のモデリング及びレイノルズ応力と乱流熱流束のモデリングが課題となる。とくに、運動量・熱輸送に乱流拡散として直接影響を及ぼすレイノルズ応力と乱流熱流束の近似モデルの高精度化は重要となる。また一方、RANS モデルを開発する上で、モデリング検証用の基礎データや、壁や浮力の影響を受ける乱れ構造の知見を必要とする。しかし室内浮力乱流場に関する基礎データは、基本諸量となる乱流エネルギーとその散逸率でさえ正確で精密な実験データは少なく、さらに圧力拡散や圧力歪相関などの高次相関量を実験により測定することは困難である。

そこで本研究はまず、

- ①冷風水平吹出しを持つ非等温室内モデルを対象に LES を行い、高精度かつ詳細な乱流統計量の数値データベースを作成する。

そして、このデータベースに基づき、

- ②レイノルズ応力 R_{ij} 、乱流熱流束 H_i および温度変動強度 $\langle \bar{\theta}^2 \rangle$ の収支構造の解析を行い、 R_{ij} 、 H_i 、 $\langle \bar{\theta}^2 \rangle$ の生産メカニズムやそれらの相互関係などを明らかにし、RANS モデルの評価・開発のための知見を得る。
- ③ASM、WET モデル、渦粘性モデルの予測精度およびモデリングの問題点を明らかにし、 $k-\epsilon$ モデルをベースとする高精度 RANS モデルの開発のための知見を得る。

ことを目的として行ったものである。

本論文は以下の 7 章より構成される。

第 1 章では、本研究の背景と目的、そして研究の進め方を述べている。

第 2 章では、非等温・非圧縮性流れの数値シミュレーションを行う際の基礎方程式を示し、さらに乱流モデルの必要性、乱流モデルの種類について解説を行った。そして室内浮力乱流場解析で用いられている RANS モデルとして、応力方程式モデル、ASM、WET モデル、標準 $k-\epsilon$ モデル、MKC および MKCO モデルの基礎式を示し、各モデルを導出する際の仮定、モデル化について解説を行った。

第 3 章では、本研究で用いた LES の基礎式、LES に導入される subgrid scale (SGS) モデルについて解説した。SGS モデルに関しては、標準 Smagorinsky モデルと dynamic Smagorinsky モデルについて、各モデルの導出過程や問題点などを解説した。次に、非等温室内気流解析に LES を適用する際に必要となる数値計算方法として、離散化手法、計算アルゴリズムおよび境界条件について解

説した。さらに LES 解析で未だ確立されていない温度の壁面境界条件として 2 層型の壁関数を提案した。

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た。まず、標準 Smagorinsky モデルと dynamic Smagorinsky モデルを用いた LES 解析を行い、SGS モデルの違いが予測精度に及ぼす影響を検討した。2 つの SGS モデルによる平均速度・温度分布の計算結果を比較し、両者はほとんど差がなく、本 LES 解析の格子解像度に対して SGS モデルの依存性が小さいことを確認した。さらに LES 結果は、天井付近の吹出噴流の性状をはじめとして全体的に実験結果との対応が良く、本データベースの信頼性は高いと判断した。尚、LES データベースは、計算が安定で計算負荷の小さい標準 Smagorinsky モデルを用い作成した。また本章では、データベースの中心となるレイノルズ応力、乱流熱流束および温度変動強度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の導入を検討した。コンシステントスキームを用いたレイノルズ応力等の収支式の評価は、式展開の煩雑さから、これまでは空間に一樣な方向を有し、式展開の大幅な簡略化が可能となる channel 乱流のような単純流れ場解析への適用に限られていた。そのため、3次元性の強い複雑乱流場の解析へ対応可能なレイノルズ応力等の輸送方程式に対してコンシステントスキームを用いた離散式を新たに導出した。とくに、①ノルマルストレスと温度変動強度の輸送方程式の各項は、乱流拡散項を含めすべて、運動方程式と温度輸送方程式の離散式との整合性を満たす ②乱流エネルギー k の輸送方程式は、その定義点をセル頂点に置くことで高精度にエネルギー保存性を満たす 離散式を導出した。

第 5 章では、作成した LES データベースを用い、レイノルズ応力 R_{ij} 、乱流熱流束 H_i および温度変動強度 $\langle \bar{\theta}^2 \rangle$ の収支構造の解析を行った。本章では、室内浮力乱流場の特徴的構造として、①吹出口近傍の混合層②天井付近中央のシアー流③吹出噴流衝突流④右側鉛直加熱壁付近のシアー流に着目し、レイノルズ応力等の輸送方程式の各項の寄与を詳細に検討した。その結果、 R_{ij} 、 H_i および $\langle \bar{\theta}^2 \rangle$ 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が得られた。さらに、 R_{ij} 、 H_i および $\langle \bar{\theta}^2 \rangle$ の生産メカニズムやそれらの相互関係を明らかにした。また、それぞれの収支の残差はほとんど 0 であり、収支算出にあたって数値誤差は小さく、コンシステントスキーム適用の効果を確認した。

第 6 章では、第 5 章で得られた知見と LES データベースを基に RANS モデルの評価を行った。まず標準 $k - \epsilon$ モデルと LES を比較検討した。標準 $k - \epsilon$ モ

デルの結果はLESと比べ、吹出噴流の性状を非拡散的に予測することをはじめとして壁付近の流れ場・温度場の予測精度が低い。これは、乱流エネルギー k の分布性状を見ると等方的渦粘性モデルの欠陥が明らかで、標準 $k-\epsilon$ モデルでは運動量・熱輸送における乱流拡散を正しく評価しないことに起因する。そこで、既往の室内気流解析で用いられているASM、WETモデル、渦粘性モデルの予測精度を調べ、レイノルズ応力と乱流熱流束の近似モデルを高精度化することの有効性を検討した。さらにレイノルズ応力と乱流熱流束の収支構造の知見を基に、各モデルのモデリングが予測精度に及ぼす影響およびモデリングの問題点を明確にした。

①ASMは、壁面シアー流れ及び吹出口近傍の混合層において、レイノルズ応力と乱流熱流束の非等方的な分布性状を精度良く再現する。吹出噴流衝突領域では、壁に垂直方向の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再現する。他のモデルではこの挙動を再現しない。

但しASMでは、拡散項の寄与が大きくなる壁近傍において、移流・拡散項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。これは、LRR(Launder-Reece-Rodi)モデルに基づくASMの適用限界と考えられ、圧力歪相関項の高次モデルの導入、さらに拡散項の中で圧力拡散項の寄与が大きいことを考慮した拡散項のモデリングによるASMの高精度化を必要とする。

②WET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/渦拡散モデルにより近似することで、渦粘性/渦拡散モデルの近似精度が低いところでは、それらよりも精度の低下をまねく。さらにWETモデルでは、壁減衰効果および低Re数効果を組み込まない場合、壁極く近傍で数値不安定を引き起こす極めて精度の悪い結果を与える。これに関しては、簡便な方法として壁減衰関数 f_w を課すことで、改善されることを確認した。

③等方的な渦粘性モデルは、ノルマルストレスの非等方性の再現が悪いこと、壁に平行方向の乱流熱流束を評価しないなど、他のモデルに比べ予測精度は低い。

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。