

論文の内容の要旨

論文題目

浮力による乱流輸送の減衰・促進効果を考慮した修正 $k-\varepsilon$ モデルの開発と検証

氏名 大平 昇

流れ場の CFD 解析 (Computational Fluid Dynamics) を行う際に良く用いられている標準型 $k-\varepsilon$ モデルは、もともと十分乱れた流れ場を対象とし等方的な渦粘性に基づいている。そのため、安定成層、衝突、旋回等を含む非等方性が強い流れ場を精度よく解析するためには、これらの効果を組み込んだ高次の乱流モデルを導入することが基本となるが、実用上優れている $k-\varepsilon$ モデルに非等方性効果を導入し、修正を加えたモデルが数多く提案されている。また、標準 $k-\varepsilon$ モデルは壁近傍での壁の減衰効果や粘性効果のある流れ場、強い安定成層で乱れが減衰し疑似層流化する流れ場に対しても精度の良い解を与える事はできない。これを改善するためには、Jones and Launder 以来多くの低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルが提案され実績を上げている。

このように $k-\varepsilon$ モデルはいくつかの欠点はあるが、安定的に計算を行えるため、実用的な計算を行なうには非常に優れた乱流モデルである。従って、環境予測等の実用問題に CFD 解析を適用する際は、標準 $k-\varepsilon$ に対して修正を施し、対象とする流れ場をより高精度に予測できるようにする方がより現実的である。

近年の省エネ性の要求や環境アセスメント等から、建築環境工学では暖・冷房時の室内気流、火災時の熱気流あるいは給湯器等からの排気ガスの流れなど、浮力により大きな影響を受ける流れ場を数値計算で予測する必要がある場合が多々ある。室内気流のように浮力により流れが成層化していたり、不安定となる領域が混在していると、非常に複雑な流れ場となる。浮力により成層化している領域では鉛直方向の乱流輸送が大きく抑制され、不安定な領域では逆に大きく促進される。

安定成層がある流れ場において村上・加藤・近本は、壁面の影響を直接受けられない領域における層流化にも対応した減衰関数 f_{μ} と浮力による効果を、レイノルズストレ

ス ($\overline{u_i u_j}$)、乱流熱フラックス ($\overline{u_i \theta}$) の輸送方程式をもとに、安定成層による乱流輸送の減衰効果を持たせる関数を導出して、乱流輸送の減衰を簡易に渦粘性近似の $k-\epsilon$ モデルに組み込み、よい結果を得ている (MKC 型 $k-\epsilon$ モデル)。

本研究は、「浮力による乱流輸送の減衰・促進効果を考慮した修正 $k-\epsilon$ モデルの開発とその検証」を行ったものである。すなわち、MKC 型 $k-\epsilon$ モデルを更に拡張する形で、不安定な領域でレイノルズストレスや乱流熱フラックスが浮力により増幅される効果を簡易なモデル関数を導入することにより考慮する修正 $k-\epsilon$ モデルを開発し (MKCO 型 $k-\epsilon$ モデル)、その検証を行った。更に代数応力モデルの簡易版と位置付けられる WET モデルに低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルの壁減衰関数を組み込むことにより修正を施し、壁近傍まで適用可能とするモデル (壁関数組込 WET 型モデル) を提案し、検証している。このモデルは乱れの非等方性を考慮する 2 次の非線形 $k-\epsilon$ モデルに相当するものであり、これまでの非線形 $k-\epsilon$ モデルが乱流フラックスの近似を数学的考察から行っているのに対し、本研究では乱流フラックスの輸送方程式の基づいて導いている点に特徴がある。

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示す。

第 2 章では、非圧縮流れの数値シミュレーションを行う際の基礎式の導出について述べ、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。さらに本研究で用いる $k-\epsilon$ 乱流モデルの導出方法および流れの剥離や壁からの熱伝達をより正確に予測するための低レイノルズ数モデルについても述べ、低レイノルズ数モデルに導入するダンピング関数が壁面近傍や自由乱流で満たすべき挙動について解説を行った。

第 3 章では、浮力による影響が強い流れ場で顕在化する標準 $k-\epsilon$ モデルの問題点を列挙し、この問題点を解決するためにこれまで提案されているモデルについてレビューを行った。さらに、このレビューをもとに本研究でのモデル導出の方向性を示し、MKC 型 $k-\epsilon$ モデルと同様な手法で、浮力による乱れの非等方性を簡易なモデル関数を組み込むことで考慮できる修正 $k-\epsilon$ モデル (MKCO 型 $k-\epsilon$ モデル) を提案した。同時に Launder により提案された、より高精度なモデルである WET モデルの導出方法についても示した上で、壁近傍まで拡張した 2 次の非線形モデルとなる WET 型 $k-\epsilon$ モデルを導出した。新たに提案した MKCO 型 $k-\epsilon$ モデル、WET 型 $k-\epsilon$ モデルともレイノルズ応力、乱流熱フラックスの輸送方程式をそのモデリングの基礎としている。MKCO 型モデルは、輸送方程式の各項を簡略化して $k-\epsilon$ モデルを導出する過程で、浮力による影響を残す方針で導出されたものである。WET 型モデルは 2 次の非線形モデルに対応するよう簡略化した上で、壁減衰や壁から離れた場所での低レイノルズ効果による減衰を表す関数を導入したもので、代数応力モデルで用いられる煩雑な Wall reflection 項を考慮せずに簡易に壁近傍、乱れが減衰した流れ場まで適用可能とするモデルである。

第4章では、第3章で提案したMKCO型 $k-\varepsilon$ モデルとWET型 $k-\varepsilon$ モデルの有効性を代表的な浮力流であるサーマルプルームを対象にして検証を行った。両モデルの他にも安倍らのモデルで計算を行って計算結果を比較検討し、MKCO型モデルが非拡散的になった理由が鉛直方向の乱流熱フラックスを鉛直方向温度勾配でのみ表記していること、 ε 方程式の数値定数の影響も強いことを明らかにした。さらに、WET型モデルが鉛直方向乱流熱フラックスの予測精度が良いのはどの項を考慮したことによるかを考察し、サーマルプルームでは温度変動の分散と水平方向温度勾配の項による影響が非常に強いことを明らかにした。

第5章では、壁の影響がある場合の流れ場として、2次元非等温室内気流実験を対象として、MKCO型 $k-\varepsilon$ モデルと壁近傍まで適用可能なWET型 $k-\varepsilon$ モデルの検証を行った。解析は他にもMKC型 $k-\varepsilon$ モデルでも行った。計算結果の比較の結果、流れ場の予測精度は良い順でWET型モデル、MKCO型モデル、MKC型モデルとなり、浮力の効果をより多く考慮するほど予測結果が実験と一致することが明らかになった。また、WET型モデルについては壁減衰関数を導入しないモデルと導入したモデルの温度分布を比較し、壁減衰関数を導入しないモデルでは高めに予測した壁面近傍の温度予測値が、壁減衰関数を導入することにより実験結果とほぼ一致することを明らかにし、壁近傍まで簡易に拡張したWET型モデルの有効性を確認した。さらに安倍らによる温度場2方程式モデル(ANK型モデル)やANK型モデルに提案したモデル関数を導入したもの、 ε_θ を方程式で評価したモデルでも計算を行い、提案したモデル関数が他の $k-\varepsilon$ モデルに導入しても有効であること、 ε_θ の評価は流れ場と温度場の乱れのタイムスケールを定数と仮定することで十分であることを明らかにした。

第6章では、近年良く見られるボイドを有する建物を対象とし、ボイド内の熱源機の排気によって誘起される自然換気を対象として、模型実験とMKCO型モデル、壁関数組込WET型 $k-\varepsilon$ モデルによる数値解析を行い、計算結果と実験結果を比較検討した。その結果、全てのモデルとも実験よりも非拡散的になり、特に外気からボイド内部に向かう流れは実験よりも非常に小さなものとなった。本研究では乱流モデルの予測精度の比較することを目的として模型実験、数値シミュレーションを行った。当然最終的には、模型実験や数値シミュレーションにより実建物のボイド内換気性状を予測する事が目的となるが、ボイド内換気は種々の要因により影響を受け、乱流モデルの改良だけでは不十分であると考えられる。しかし、数ある要因のうちでも乱流モデルが非常に重要であるとの認識で、まずはじめに乱流モデルの検討を行ったものである。対象とする流れ場は、浮力による自然換気のみであり数値計算の際は非常に不安定でモデルの検証には適さない点も見られるが、MKCO型モデルはWET型モデルの計算時間の1/10倍程度であり、実験結果との対応も遜色がない結果を得ており、MKCO型モデルはWET型モデルよりも予測精度は若干劣るものの、計算時間が短くて済むため、浮力の影響を考慮した対象を計算する際は提案モデルも実用上有効であることが明らかとなった。

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。