

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大 平 昇

本論文は、工学の分野で多く見られる浮力の影響が強い流れを CFD( Computational Fluid Dynamics 数値流体力学)により簡明かつ高精度に解析するための基礎となる乱流モデルの開発を行ったものである。

浮力の影響の強い乱流(浮力乱流)では、浮力により乱れの非等方性が強くなるため、鉛直方向の乱流輸送が大きく抑制される安定成層流や、逆に大きく促進される不安定流れなどが生じる。流れ場の CFD 解析で良く用いられる標準型 k-e モデルは、等方的な渦粘性に基づいたモデルであり、浮力による乱れの非等方性を考慮するものではないため、浮力乱流を精度よく解析することは期待できない。しかしながら、k-e モデルは、極めて汎用かつ安定した性能を示す乱流モデルであり、乱流の実用解析に極めて有用な実績を持つ。そのため、浮力乱流に関しても k-e モデルに浮力効果に対応する修正を施したモデルが、有用になるものと考えられる。

本論文は、浮力による乱流輸送の減衰・促進効果を簡易なモデル関数を導入することにより考慮できるようにする新たな乱流モデル(MKCO 型 k-e モデル)を提案している。更に、代数応力方程式モデルの簡易版である WET モデルに修正を施した乱流モデル(壁関数組込 WET 型モデル)を提案している。後者のモデルは、乱れの非等方性を考慮する、いわゆる 2 次の非線形 k-e モデルに相当するものであり、既存の 2 次の非線形 k-e モデルが乱流フラックスの近似をその数学的考察から行っているのに対し、レイノルズ応力や乱流熱フラックスなどの乱流フラックスの輸送方程式に基づいて 2 次の非線形モデルを導いている点に特徴がある。本論文ではこの 2 次の非線形 k-e モデル(WET 型 k-e モデル)に、低レイノルズ数型 k-e モデルの壁減衰関数を導入し、壁近傍まで適用可能とするモデル(壁関数組込 WET 型 k-e モデル)を提案している。

本論文で提案されている MKCO 型 k-e モデル、壁関数組込 WET 型 k-e 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。前者はレイノルズ応力、乱流熱フラックスの輸送方程式の各項を簡略化して k-e モデルの渦粘性近似を導く過程で、浮力による影響を表す項を残す方針でそのモデリングを行ったものであり、浮力による非等方性を表現しつつ標準 k-e モデルと同様、数値的に安定的に解くことが期待できるものである。また後者のモデルは、代数応力方程式モデルの簡易版である WET モデルを 2 次の非線形 k-e モデルに対応するよう簡易化した上で、更に k-e モデルで良く用いられる壁減衰と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ているもので、代数応力方程式モデルなどで用いられる煩雑な Wall reflection 項を考慮せず簡易に壁近傍や乱れが減衰した流れ場にまで適用を可能とするモデルとなっている。

本論文はこれらの導出した修正乱流モデルを用いて、サーマルプルーム、二次元非等温室内気流、三次元中庭空間自然換気問題に適用し実験結果と他の乱流モデルによる計算結果を比較検討し、その有効性を確認している。

論文の構成は第1章の序論以下、次の6章より成る。

第2章では、乱流モデルの必要性、乱流モデルの種類、k-e型乱流モデルの導出方法について解説を行っている。

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-eモデルの問題点を列挙し、本研究でのモデル導出の方向性を示している。初めにLaunderにより提案されたWETモデルの導出方法について示し、その後浮力による乱れの非等方性を簡易にk-eモデルに組み込むためのモデル関数を導き、新たな乱流モデルであるMKCO型k-eモデル提案している。また2次の非線形モデルであるWET型k-eモデルを同じく導出している。

第4章では、MKCO型k-eモデルと、WET型k-e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ている。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、浮力による減衰・促進効果を表すモデル関数の考察、e方程式の数値定数の影響を明らかにしている。

第5章では、壁の影響がある場合の流れ場である二次元非等温室内気流を対象として、MKCO型k-eモデルと壁関数組込WET型k-eモデルの検証を行っている。解析結果を実験や他の乱流モデルによる解析結果と比較し、両モデルの精度を検証している。またMKCO型k-eモデルで提案した浮力による減衰・促進効果を表すモデル関数は、標準k-eモデルなど他のk-eモデルにそのまま導入しても有効になることをあわせて示している。

第6章では、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k-eモデルと壁関数組込WET型k-eモデルによる数値解析を行い、これらを比較検討した結果を示している。対象とした流れ場が極めて不安定であり、モデルの検証には不適な点も見られるが、MKCO型k-eモデルによる解析は、壁関数組込WET型k-eモデルに比べて、計算時間が約1/10であり、実験結果との対応もさほど遜色がない結果を得ており、実用問題での乱流モデルの選択法に言及している。

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、本論文は浮力による乱流輸送の減衰、促進効果を考慮できる新たな乱流モデル(MKCO型k-eモデル)を提案し、このモデルが非等温室内気流等の複雑な流れ場に効果があること、モデル関数を他のモデルに導入しても効果があることを確認している。また、あわせて壁減衰関数を導入した2次の非線形モデルであるWET型k-eモデル(壁関数組込WET型k-eモデル)を導出、提案し、その有効性も確認している。両モデルは精度と解析結果を得るための計算時間にそれぞれ差異があり、解析条件によって使い分けが

必要であるが、ともに、k-e モデルの利点である計算安定性を損なわず浮力の効果を考慮でき、市販の汎用モデルに組み込むことによって建築環境分野のみならず機械、土木、化学等の多くの分野で効果をあげることが期待できるものである。

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。