

論文の内容の要旨

論文題目 PIV・LESを用いた都市気流に関する構造分析とRANSモデルの評価

氏名 中島 慶悟

本研究は、「PIV・LESを用いた都市気流に関する構造分析とRANSモデルの評価」と題する。Particle image velocimetry (PIV)、Large-eddy simulation (LES)を用いて、都市気流の物理的な構造について分析し、その結果に基づいて、Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)モデルの予測精度、レイノルズストレス、乱流熱フラックスのモデル化の妥当性について検討したものである。本論文は、全8章により構成される。

第1章では、本研究の研究背景、研究目的、論文構成について述べた。近年、都市キャニオン流れに関するPIV測定、LES解析が行われており、都市キャニオン流れの基礎的な特性については明らかになってきている。しかし、都市キャニオンにおける特徴的な気流構造が、レイノルズストレス、乱流熱フラックスのモデル化の精度に与える影響については未だ検討されておらず、都市気流におけるRANSモデルの高精度化は十分に進んでいない。そこで、本研究では、まず、PIV、LESを用いて、様々なアスペクト比、大気安定度の都市キャニオンにおけるレイノルズストレス、乱流熱フラックスを含む乱流統計量の空間分布を取得し、都市気流データベースを作成する。作成した都市気流データベースを用いて、都市キャニオン流れの物理的な構造について検討する。さらに、その結果に基づいて、RANSモデルにおけるレイノルズストレス、乱流熱フラックスのモデル化の妥当性評価を行い、RANSモデルの高精度化に資する知見を得ることを目的とする。

第2章では、都市気流に関する風洞実験の基礎理論について説明した。まず、風洞内に都市気流を再現する際の注意点、方法について述べた。また、本研究で用いる風速測定手法であるPIVの測定原理、画像解析手法について説明した。さらに、近年、PIVにおける画像解析の高精度化のために用いられているサブピクセル解析、再帰的相関法について説明した。

第3章では、都市気流に関するCFD解析の基礎理論について説明した。まず、流れ場、温度場を求めるための基礎方程式である連続の式、ナビエ・ストークス方程式、熱輸送方程式を示した。これらに、フィルタ平均を施したLESの基礎方程式、レイノルズ平均を施したRANSモデルの基礎方程式をそれぞれ示した。さらに、LESの基礎方程式を解く際に必要となるSGSモデルとして、標準Smagorinskyモデルを導出した。また、RANSモデルの基礎方程式を解く際に必要となる乱流モデルとして、渦粘性モデル（レイノルズストレスの勾配拡散近似）、渦拡散モデル（乱流熱フラックスの勾配拡散近似）を、レイノルズス

トレス、乱流熱フラックスの輸送方程式に基づいて導出した。

第4章では、アスペクト比が1.0、大気安定度が中立の都市キャニオン流れに関するPIV測定を行った。まず、PIVの画像解析パラメータが測定結果に与える影響について検討した。最終検査領域サイズを小さくするほど空間解像度が上がり、PIVの乱流統計量が熱線風速計の測定結果に近づいた。さらに、PIVの測定結果を用いて、都市キャニオンにおける流れ場の性状、乱流エネルギー、レイノルズストレスの生産構造について分析した。都市キャニオン内には循環渦が形成され、都市キャニオン内の風下側に行くに従って乱れが大きくなった。また、都市キャニオン上端においては乱流エネルギー、レイノルズストレスの生産が最大となった。都市キャニオン内の風上側から中心、風下側の都市キャニオン上端、地表面付近においては、乱流エネルギーの生産項が負となった。乱流エネルギーの生産項が負となる時は、渦動粘性係数も負となる。負の渦動粘性係数は逆勾配拡散現象が発生していることを意味する。したがって、乱流エネルギーの生産項が負となる都市キャニオン風上側から中心、風下側の都市キャニオン上端、地表面付近においては、レイノルズストレスの勾配拡散近似の精度が低下する可能性があることを示した。

第5章では、アスペクト比が1.0、大気安定度が中立の都市キャニオン流れに関するLES解析、RANS解析(k- ϵ モデル)を行った。LES、k- ϵ モデルの解析結果を既往の風洞実験結果と比較し、k- ϵ モデルではLESと比較して、都市キャニオン内における平均風速、乱流エネルギー、レイノルズストレスの予測精度が低下することを示した。さらに、LESの解析結果を用いて渦動粘性係数の推定、レイノルズストレスの輸送方程式の収支構造解析を行った。k- ϵ モデルは、LESと比較して都市キャニオン内の風下側における渦動粘性係数を過小評価した。LESの結果から都市キャニオン内の風上側、風下側の都市キャニオン上端、地表面付近においては渦動粘性係数が負となり、逆勾配拡散現象が発生していることを示した。また、都市キャニオン上端、都市キャニオン内においてはレイノルズストレスの輸送方程式の移流項、拡散項が生産項、圧力歪相関項と同程度の大きさとなり、レイノルズストレスの勾配拡散近似は妥当性を持たないことを明らかにした。したがって、都市キャニオン流れにおいてはレイノルズストレスのモデル化に移流項、拡散項の効果を組み込む必要がある。さらに、都市キャニオン上端の風上側、中心、都市キャニオン内の風下側においては、LESから得られた圧力歪相関項とRottaモデル、Isotropization of production (IPM)から得られた圧力歪相関項の相違が大きくなるため、圧力歪相関項のモデル化の改良が必要であると考えられる。

第6章では、アスペクト比が1.0、0.5、0.25の都市キャニオン流れに関するLES解析、RANS解析(k- ϵ モデル)を行い、都市キャニオン形状がk- ϵ モデルの予測精度、レイノルズストレスのモデル化の妥当性に与える影響について検討した。まず、LES、k- ϵ モデルの解析結果を既往の風洞実験結果と比較した。k- ϵ モデルでは、アスペクト比の変化に伴う気流パターンの変化が十分に再現されなかった。また、アスペクト比が小さくなるに従って、LES、k- ϵ モデルにおける乱流エネルギー、レイノルズストレスの空間分布の相違が大きく

なった。さらに、LES の解析結果を用いて、乱流エネルギーの生産構造の分析、渦動粘性係数の推定、レイノルズストレスの輸送方程式の収支構造解析を行った。アスペクト比が小さくなるに従って、 $k-\epsilon$ モデルでは都市キャニオン上端における乱流エネルギーの生産の再現精度が低下した。アスペクト比が 1.0、0.5 の Case では、 $k-\epsilon$ モデルは LES と比較して都市キャニオン内における渦動粘性係数を過小評価した。都市キャニオン内の風上側、風下側の都市キャニオン上端、地表面付近においては、逆勾配拡散現象が発生した。また、都市キャニオン上端、都市キャニオン内においてはレイノルズストレスの輸送方程式の移流項、拡散項が生産項、圧力歪相関項と同程度の大きさとなり、レイノルズストレスの勾配拡散近似は妥当性を持たないことを明らかにした。一方、アスペクト比が 0.25 の Case では、逆勾配拡散現象が発生する領域はほとんど存在せず、レイノルズストレスの輸送方程式の移流項、拡散項も無視できる程度の大きさとなった。さらに、都市キャニオン上端の風上側、アスペクト比が 1.0、0.5 の Case の都市キャニオン内の風下側においては、LES から得られた圧力歪相関項と Rotta モデル、IPM から得られた圧力歪相関項の相違が大きくなるため、圧力歪相関項のモデル化の改良が必要であると考えられる。

第 7 章では、大気安定度が強不安定、弱不安定、弱安定、強安定の都市キャニオン流れに関する LES 解析、RANS 解析 ($k-\epsilon$ モデル) を行い、大気安定度が $k-\epsilon$ モデルの予測精度、レイノルズストレス、乱流熱フラックスのモデル化の妥当性に与える影響について検討した。まず、LES、 $k-\epsilon$ モデルの解析結果を既往の風洞実験結果と比較した。 $k-\epsilon$ モデルでは LES と比較して、大気安定度が不安定になるほど平均風速、平均温度、乱れ性状の予測精度が低下することを示した。また、 $k-\epsilon$ モデルでは、大気安定度の変化に伴う都市キャニオン内におけるレイノルズストレス、乱流熱フラックスの変化がほとんど見られなかった。さらに、LES の解析結果を用いて渦動粘性係数、渦熱拡散係数、乱流プラントル数の推定、レイノルズストレス、乱流熱フラックスの生産構造の分析を行った。 $k-\epsilon$ モデルは LES と比較して不安定になるほど、都市キャニオン内における渦動粘性係数、渦熱拡散係数を過小評価した。大気安定度にかかわらず、都市キャニオン風上側、風下側の都市キャニオン上端、地表面付近においては、運動量の逆勾配拡散現象が発生した。また、都市キャニオン内においては乱流プラントル数の空間分布が存在し、強安定以外では $k-\epsilon$ モデルの値 0.9 の半分程度の値となった。したがって、 $k-\epsilon$ モデルの乱流プラントル数を一定値 0.9 とする仮定は妥当ではないことを明らかにした。さらに、都市キャニオン内においては、 $k-\epsilon$ モデルでは無視される乱流熱フラックスの平均風速勾配による生産項、浮力生産項が平均温度勾配による生産項と同程度の大きさとなった。また、上空においても強不安定、強安定では乱流熱フラックスの浮力生産項が平均温度勾配による生産項の半分程度の大きさとなった。したがって、都市キャニオン流れにおける乱流熱フラックスのモデル化には、平均風速勾配による生産項、浮力生産項の効果を組み込む必要があることを明らかにした。

上記の通り、本研究では PIV、LES を用いて、都市キャニオン流れにおけるレイノルズストレス、乱流熱フラックスのモデル化の問題点について明らかにした。特に、レイノルズ

ストレスのモデル化については移流、拡散のような非局所的な効果、乱流熱フラックスのモデル化については平均風速勾配による生産、浮力生産の効果が重要であることを示した。したがって、今後はレイノルズストレス、乱流熱フラックスのモデル化にこれらの効果を組み込み、RANS モデルの高精度化を行っていく予定である。