

十分に発達した都市境界層を再現する数値流体解析 手法と乱流性状に関する研究

真光, 俊樹

<https://hdl.handle.net/2324/7363866>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏名 Name : 真光 俊樹

論文名 Title : 十分に発達した都市境界層を再現する数値流体解析手法と乱流性状に関する研究

区分 Category : 甲

論文内容の要旨

Thesis Summary

都市域の風とそれに伴う運動量・熱・物質拡散プロセスは、高層建物によるビル風、ヒートアイランド現象の顕在化、排ガスなどの汚染物質滞留など、様々な屋外環境問題の原因となり、居住空間の人々の安全性や快適性に大きな影響を及ぼす。都市を構成する建物群に作用する形状抵抗とそれに伴う大きな速度シアは、都市内外における運動量・スカラー輸送や都市キャノピー空間の乱流性状に大きな影響を与える。そのため、建物群を単純ブロックで模擬した単純都市乱流境界層を対象として、都市形状による建物群のキャノピー空間気流に対する影響力を定量的に把握することが試みられてきた。このような単純街区を対象とした研究では、風洞模型実験、屋外観測、数値流体力学解析など、研究手法に関わらず、主流方向に渡って十分に長い範囲に同質の建物群を配置した際に形成される都市乱流境界層に対して、境界層内や建物群周辺の気流を分析することが一般的である。しかしながら、数値流体力学解析により屋外観測の対象領域や風洞実験装置全体を再現するのは非常に計算負荷が大きい。また、解析対象となる都市境界層の一部を取り出して、擬似的に十分に発達した境界層を再現する代替法では、主流方向に均一な完全に発達した境界層を仮定するため、風洞模型実験のように極めて緩やかでありながらも徐々に主流方向に発達する境界層や、その結果として生じる乱流構造や強風、弱風を正確に再現できるかどうかはわかっていなかった。以上の背景に基づき、本論文では、主として風洞実験により形成される十分に発達した都市乱流境界層を正確に再現する数値解析手法を提案し、都市乱流境界層における運動量供給メカニズムを数理的に分析する。加えて、提案する計算手法による都市乱流境界層流れの乱流性状や歩行者風速場への影響を分析し、稀に発生する強風や弱風の再現性を検討する一連の研究から構成される。

第2章は、既往研究における代替法である流れの駆動手法を用いて、単純都市キャノピー周辺気流を対象とした数値流体解析を実施し、乱流性状に対する代替駆動手法の影響を分析した。平均風速で表される定常的な流れ場に対して駆動力の影響は限りなく小さいのに対し、乱流特性を表す乱流エネルギーや風速の分散、Reynolds 応力などの統計量に対しては、大きく影響することが確認された。また、四象限解析を適用し、乱流イベントの発生傾向が統計量の鉛直プロファイルに応じて変化することが確認された。これらの結果により、都市風環境評価における代替法の問題点を明らかにし、正確に十分に発達した境界層を模擬する駆動力を用いる重要性を示した。

第3章は、以上の代替手法に変わる新しい解析手法を提案している。流れの支配方程式に基づき、風洞実験に代表される十分に発達した境界層においては、主流方向のわずかな境界層発達が残るために、主流方向の圧力差に加え平均流と乱れの主流方向変化が運動量供給となることを明らかにした。それにより、床面に作用する全抗力が、従来考えられてきた圧力勾配だけではなく、平均流や乱流の主流方向変化とバランスすることが示された。これらの結果は、十分に発達した境界層を対象とした研究を実施する場合、既往研究で用いられてきた代替手法ではなく提案手法と導入する必要があることを示すものである。

第3章における提案手法を第4章において実装し、従来手法と提案手法により得られる単純キャノピー周辺速度の乱流統計量を比較し、その影響を分析した。その結果、定常流れ場を特徴づける平均風速に対して駆動手法の影響が小さいことが確認された。一方、乱流エネルギーや風速の分散といった統計量に代表される乱流場においては、駆動手法の違いにより顕著な差異が見られた。また、乱流統計量の収支分析により、エネルギー収支方程式の各項の授受とエネルギー生成が、駆動力に起因する Reynolds 応力の鉛直分布の変化

を通じて、影響を受けることが確認された。これらの知見は、境界層内における乱流特性が駆動手法に基づく運動量供給機構に影響されることを表しており、十分に発達した境界層を正確に再現することの重要性を示唆している。

第5章は、従来手法と提案手法を用いて得られた単純キャノピー内の歩行者高さでの風環境における乱流統計量を比較し、突風現象への影響を精査した。さらに、高次統計量に基づく突風予測手法の適用可能性について検討を行った。平均風速や標準偏差といった統計量に対しては駆動力の影響は小さい。一方、突風現象を代表する統計量である突風率や超過風速に関しては駆動手法による影響が確認された。また、高次統計量と突風率の関係性は、いずれの駆動手法においても類似した傾向が示され、なおかつ、Weibull分布に基づく突風予測手法によって、その関係性を精度よく再現できることが明らかとなった。これらの結果は、歩行者空間の風環境を評価するにあたり、提案手法で再現される完全に発達した境界層における極めて緩やかな主流方向の発達性を十分に考慮する必要があることを示唆している。

第6章は、第5章で明らかとなった駆動手法による歩行者風環境における突風現象への影響の原因を究明するため、特異値分解に基づく支配的なフローパターンの抽出を行い、駆動手法が歩行者空間の特徴的な乱流構造に及ぼす影響を調査した。特異モードの時間的もしくは空間的な特徴を示す特異ベクトルにおいては、駆動力の影響が確認されなかった。その一方で、乱流エネルギーに対する特異モードのエネルギー寄与を示す特異値は、低次において駆動手法間で顕著な差異が示された。この結果は、歩行者空間において支配的な低次モードのエネルギー強度が駆動力の影響を受けることを示しており、その影響を通じて歩行者空間の流れ場における統計学的特徴が変化することを明確に示すものである。運動量収支において、粘性応力やキャノピー抗力が支配的である床面近傍の歩行者高さでも、運動量供給による影響が有意であることが明らかとなった。これらの結果は、単純キャノピーの数値計算に基づいて風環境評価を行う際に、提案手法を一例として実験で見られる流れ場の条件を正確に再現する必要性を示唆するものである。

以上の知見を第7章に総括し、併せて今後の研究課題を提示することで、本論の結論としている。本論は、都市空間を包含する完全に発達した境界層を精緻に模擬する流れの駆動手法を新たに提案し、その適用の意義と重要性を明らかにするものであった。本論で得られた成果は、研究目的を十分に達成し、都市風環境解析の新たな指針を示すものといえよう。