

審査の結果の要旨

氏名 劉震卿

竜巻は最も破滅的な災害をもたらす大気現象の一つである。竜巻による災害を低減するために、竜巻に伴う 3 次元乱流場、地表面粗度および移動効果が竜巻に及ぼす影響、そして、竜巻が建物に作用する空気力を明らかにする必要がある。これまでに竜巻に関する実験と解析が行われてきたが、竜巻に伴う 3 次元乱流場を支配するパラメータであるスワール数に対して、系統的な数値流体解析を行った研究例は少なく、室内実験や数値解析から得られた竜巻状渦と実際に観測された竜巻との関係は明らかにされていないのが現状である。また地表面粗度および移動効果が竜巻に及ぼす影響に関する研究も少なく、これまでの研究では、地表面粗度の効果に関する矛盾点、静止している竜巻と移動する竜巻の違いも見られた。さらに、竜巻が建物に作用する空気力に関する 3 次元数値流体解析の例がほとんどなく、従来の風洞実験から得られた空気力係数を建物に適用できるかについては不明である

そこで、本研究では、まず竜巻に伴う 3 次元乱流場を支配するパラメータであるスワール数に対して系統的な数値流体解析を行い、室内実験や数値解析から得られた竜巻状渦と実際に観測された竜巻との関係を明らかにする。次に、数値流体解析により、地表面粗度および移動効果が竜巻に及ぼす影響を調べる。さらに、3 次元数値流体解析を実施し、竜巻が建物に作用する空気力を明らかにすると共に、従来の風洞実験から得られた空気力係数を利用し、竜巻が建物に作用する空気力を予測する方法を提案する。

第 1 章は既往研究のレビューを行い、本研究の背景と目的を明らかにすると共に、本論文の概要を示した。

第 2 章ではまず LES モデルを用いた有限体積法の基礎方程式を提示した。そして、地表面粗度や竜巻の移動を解析する手法を示すと共に、建物に作用する空気力をスライディング格子により解析する方法を解説した。最後に、数値解析の収束条件や流れ場を可視化するための粒子の計算方法について述べた。

第 3 章は、層流渦から、渦の崩壊、渦の接地、複合渦まで 4 つの代表的な竜巻渦に伴う 3 次元流れ場を示すと同時に、時間平均軸対称 N-S 方程式を用いることにより、地表面における風速の増大のメカニズムを明らかにした。本研究から地表面の増速および竜巻渦の幾何学形状はローカルスワール比により規定されていることを明らかにした。また数値解析から求めた竜巻状渦と実際の竜巻の間の相似則を調べ、ローカルスワール比と藤田スケールの関係を導出した。これにより、数値解析から求めた竜巻状渦を実際の竜巻に変換することができ、実際に観測された竜巻渦に伴う流れ場と比較することにより、その有用性を示した。

第 4 章では、地表面粗度および移動効果が竜巻に伴う流れ場に及ぼす影響を調べた。複合渦の場合には、地表面粗度の増大に伴う地表面付近の最大風速の減少はほとんど見られず、また

最大風速が出現する高さも滑面の場合とほとんど変わらない。竜巻の移動を考慮した解析では実際に観測された竜巻に伴う流れ場の一致性がよくなる。地表面粗度および移動効果が竜巻に伴う流れ場の相似性についても調べ、地表面付近においてローカルスワール比は流れ場における支配的なパラメータであることや、ローカルスワール比と藤田スケールの関係も維持されていることを明らかにした。

第 5 章では、竜巻が建物に作用する空気力を解析し、建物の大きさおよび移動速度の効果を調べた。数値解析の結果は実験とよく一致し、建物の大きさおよび移動速度の効果が小さいことを明らかにした。体積速度を提案することにより、従来の風洞実験から得られた空気力係数から、竜巻による空気力を予測することを可能にした。また体積速度を用いることにより、最大風速より外側において空気力を精度よく予測できることを示した。

第 6 章は本研究の結論を示している。竜巻に伴う流れの再現に成功し、数値解析から求めた竜巻状渦と実際の竜巻の関係を示した。地表面粗度の増大に伴い、地表面付近の最大風速が減少しないことや最大風速の出現する高さもほとんど変わらないことを明らかにした。また竜巻の移動を考慮することにより、実際に観測された竜巻に伴う流れ場も精度よく再現された。さらに、3 次元数値流体解析により、竜巻が建物に作用する空気力の再現に成功した。既存の風洞実験から得られた空気力係数から竜巻が建物に作用する空気力を予測するために、体積速度を提案し、最大風速より外側において空気力を精度よく予測できることを示した。

以上のように、本論文は竜巻を再現する数値モデルを開発し、数値流体解析を系統的に行うことにより、自然界に存在するさまざまな竜巻渦の再現に成功した。実際の竜巻を表わす指標藤田スケールと室内試験や数値解析で使われてきた指標スワール比との関係式を導出することにより、数値解析により求めた竜巻渦から現実の竜巻に伴う 3 次元乱流場を予測することを可能にした。また地表面粗度および移動効果が竜巻に及ぼす影響を数値流体解析により明らかにし、米国で観測された実際の竜巻の流れ場を精度よく再現した。本研究で開発した数値モデルにより、竜巻が建物に作用する空気力の特性を明らかにすると共に、従来の風洞実験から得られた空気力係数から、竜巻による空気力を予測する手法も提案した。

これらの研究成果は、竜巻による風災害の発生メカニズムの解明や竜巻の襲来時における建物の耐風安全性の向上に貢献するものである。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る。