

京都大学	博士（工学）	氏名	文礼志（WEN LIZHI）
論文題目	A Study on Windborne Debris in Residential Areas: From Aerodynamic Analysis to Impact Assessment（住宅地における飛散物に関する研究：空力解析から衝突評価まで）		
（論文内容の要旨） 本論文は、瓦の飛散シミュレーションに資する正方形平板の空力モデルの提案ならびに日本の強風被害の要因の一つである瓦の飛散・衝突による低層建築物の被害予測について一連の研究を行ったものであり、8章からなっている。 第1章は序論であり、まず低層建築物における強風被害の主たる要因の一つである飛散物に関して、飛散物の特徴と分類方法を述べたのち、本研究で対象としている瓦が平板状飛散物に分類され、これを研究対象とすることを述べている。次に、飛散物の発生、飛散経路、衝突の概要を述べつつ、本研究での研究課題を明確にしている。 第2章では先行研究をレビューし、平板の並進と回転運動に関する空力、平板の飛散に関するモデルおよび数値シミュレーション、平板の飛散に関する風洞実験等で得られた結果に関する主要な知見を述べ、先行研究における課題として、（1）6自由度（並進について3自由度、回転について3自由度）運動する平板に対して、回転によって生じる付加的な空力に対する知見が不足していること、（2）左記の空力に対する適切なモデルが存在しないこと、（3）屋根からの飛散開始直後の飛散物の挙動を再現する適切なモデルが存在しないこと、（4）飛散物衝突による被害を予測する既存のモデルは大幅に単純化されているか多くの計算量を要することから、精度と効率を両立した新たな手法が必要であることを指摘している。 第3章では瓦を模擬した正方形平板の6自由度の飛散挙動の解明のために実施した風洞実験の内容と結果を述べ、飛散挙動の分類方法と平板の6自由度の飛散挙動に関する仮説を提案している。まず、3自由度運動（重心の移動が一つの平面に限定され、かつ回転軸が同平面の直交方向に固定されている運動）する平板の場合に用いられてきた回転運動の分類の、6自由度運動への拡張である。具体的には、相対風速ベクトルと平板の法線ベクトルのなす角β_wに着目することが有効であることを指摘し、この角の時間的变化のパターンによって、平板の回転運動を分類することを提案している。次に、平板の回転によって付加的に生じる空力の、相対風速ベクトルと平板の角速度ベクトルが張る平面に対する法線成分の大きさが、角速度ベクトルの大きさに依存するという仮説と法線成分の向きの決まり方に関する仮説を提案している。さらに、平板の回転によって生じる付加的な空力モーメントが瞬時的空力モーメントの向きに与える影響は無視できるという仮説を提案している。これらの仮説が風洞実験結果と整合的であることを示している。そのうえで、これらの仮説を採用すれば、6自由度飛散運動のシミュレーションが簡略化できることを述べている。 第4章では平板の6自由度飛散運動に関する空力モデルを提案し、提案した空力モデルを用いて平板の飛散運動に関する数値シミュレーションを行い、前章で述べた風洞実験の結果と比較することで、提案した空力モデルの妥当性を検証している。まず平板の3自由度飛散運動に関する既存の空力モデルの問題点を指摘し改良している。具体的には、先行研究による「角速度がある一定値以下では平板は autorotation しな			

京都大学	博士（工学）	氏名	文礼志（WEN LIZHI）
い」という指摘に基づいて、これまで提案されてきた回転による付加的な空力モデルを修正するとともに、autorotationを開始するための条件を提案している。次に第3章で得られた知見を用い上記の3自由度飛散運動の空力モデルを拡張し、6自由度飛散運動の空力モデルを提案している。風洞実験結果との比較においては、前章で提案した回転運動の分類則に従ったパターンごとに精度の比較を行い、多くのケースでは飛散挙動がよく一致することを示している。一方で、回転方向の逆転がβ_wが90度付近で発生する場合には精度が落ちることを指摘し、この原因が提案モデルにおいては考慮していない非定常空気力による影響にある可能性を指摘している。 第5章では瓦を模擬した平板の飛散開始直後の飛散運動に関するモデル化手法を提案している。具体的には、屋根に取り付けられた瓦が強風時に屋根から剥離した際、回転しながら上昇し平板の法線ベクトルが水平方向を向くまでの過程について、上昇および回転に関する平板と屋根の幾何学的制約条件と屋根面近傍の局所流れの影響を考慮し定式化している。本定式化においては、局所流れ内の平板の空力モデルが必要であるが、このために前章と本章における飛散挙動に関する提案モデルを用いつつ飛散物の飛散挙動に関する先行研究の風洞実験結果の1ケースに整合するように空力モデルのパラメータを経験的に推定している。最後に推定された空力モデルを用いれば、別のケースの風洞実験結果を再現できることを示し、提案手法の妥当性を示している。 第6章では前章までに提案した平板の空力モデルを用いて低層建築物が密集する住宅地での瓦の飛散挙動に影響を与える因子を明らかにしている。影響を与える因子の候補として、風向、風速、風上に位置する建物の密集度、風上に位置する建物との離間距離、飛散物が放出される建物の高さを想定している。影響を与える因子を明らかにするためにLarge Eddy Simulation（LES）によって再現された3次元非定常風速場を用いて飛散物の飛散シミュレーションを行い、風上の建物の密集度以外の4つの因子が瓦の飛散挙動に影響を与えることを明らかにしている。 第7章では住宅地に位置する低層建築物への飛散物の衝突に関する確率モデルを提案している。この確率モデルは、所与の条件に対して、ある建物から飛散した瓦が別の建物に衝突する確率を評価するものであり、前章で明らかにした飛散挙動に影響を与える4因子のほか、衝突判定を行う建物の高さ、瓦が飛散する建物と衝突判定を行う建物の位置関係、瓦が飛散する建物と衝突判定を行う建物の間に位置する建物の状況を加えた7因子を条件として考慮するものである。衝突確率は、前章までに提案した空力モデルとLESによる風速場シミュレーションの結果に基づいて計算され、データベースの形で提供される。また、飛散距離に応じた飛散速度とそのばらつきを評価するモデルも提案している。最後に、提案した一連の手法を用いて、風圧と飛散物による強風被害の風速による変化を論じ、風速が大きくなると後者による被害率が顕著に増大し、ある風速以上では前者による被害率を上回ることを示唆する結果を得ている。 第8章は結論であり、本論文での主たる成果を述べ、また残された課題を論じている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、わが国の典型的な強風被害形態の一つである、飛散した瓦の衝突による低層建築物の被害に関して、精度と効率を両立する予測手法の確立を目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 瓦を模擬した正方形平板の 6 自由度の飛散挙動について、正方形平板を用いた風洞実験を行った。実験結果に基づいて、「平板の回転によって生じる付加的な空力の特定方向の成分の大きさが角速度と相関していること」と「平板の回転によって生じる付加的な空力モーメントが瞬時的空力モーメントの向きに与える影響は無視できる」という 2 つの仮説を提唱し、その妥当性を実験結果との比較によって示した。
2. 瓦を模擬した正方形平板の飛散挙動を屋根面近傍に位置する段階とそれ以降の段階に分けることを提案し、それぞれの段階について飛散挙動のシミュレーションに資するモデル化手法と具体的な空力モデルを提案した。前者は、幾何学的制約条件と屋根面近傍の局所流れの影響を考慮した飛散運動の定式化である。後者は、3 自由度飛散運動に関する既存の空力モデルの問題点を指摘改良したうえで 6 自由度飛散運動へと拡張した空力モデルである。
3. 低層建築物への瓦の衝突予測に関して、瓦の飛散運動に影響を与える主たる因子を明らかにしたうえで、これらの因子および瓦を模擬した平板の空気力学的特性、衝突予測を行う建物およびその周辺状況に関する特徴を考慮して、高精度かつ高効率に飛散位置および飛散速度を予測する手法を提案した。

以上、本論文は、瓦を模擬した正方形平板の力学的挙動と住宅地における強風時の非定常流れ場の特性を考慮しつつ、瓦の低層建築物への衝突による被害を高精度かつ効率的に予測するための一連の流れを提示し、それらを構成する手法およびモデルを風洞実験、数値シミュレーション、先行研究の文献調査および理論的考察に基づいて具体的に提案しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 7 年 7 月 30 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。