

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560671

研究課題名(和文)竜巻状の回転流中における飛散物の運動に関する数値解析

研究課題名(英文) Numerical study on debris' dynamics in a tornado-like vortex

研究代表者

丸山 敬 (Maruyama, Takashi)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：00190570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、竜巻状の回転流を数値的に作成し、その中に放出された飛散物の運動を調べた。飛散物としては、過去の竜巻被害の調査結果などから被害を起こすと考えられる空力特性をもった物体を選定した。とくに、日本における代表的な飛散物として和瓦を選び、その空力特性を風洞実験により明らかにした。それらの結果から得られた飛散物の特性に関する情報は、建物や人などの竜巻による被害の低減や防止、また、飛散物に対する建物外装材の耐衝撃性能の評価に呈する情報として、学会論文、解説記事、講演会などで広く一般に公開された。さらに、本研究で開発された手法はレーダー観測による竜巻中の風速の速度推定の精度向上にも応用された。

研究成果の概要(英文)：A study on the trajectory of flying debris in a tornado-like vortex was carried out. A series of unsteady flow fields of tornado-like vortex was generated by Large Eddy Simulation and wind characteristics in the vortex were investigated. Debris resulting building damage was examined by the records of past tornado disasters and the range of aerodynamic parameter of flying debris was detected. The aerodynamic characteristics of kawara, Japanese ceramic roof tile, was also investigated by wind tunnel test. The characteristics of aerodynamics of kawara was examined by comparing with those of simple shape objects such as square plate or sphere. The trajectories of flying debris in the vortex were computed numerically using various condition of vortex strength, size, traveling speed or release height and aerodynamic parameters of debris. The statistics and the distributions of maximum speed of debris were obtained.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：竜巻 数値解析 飛散物 LES

1. 研究開始当初の背景

2006年には多くの竜巻が発生して9月の台風13号に伴う延岡市の竜巻では3名の死者を出し、JR日豊本線の特急“にちりん”が脱線した。続く11月には北海道佐呂間地区を竜巻が襲い、死者9名、負傷者26名という被害が発生した。その後、2010年10月には竜巻が新潟県胎内市を11kmにわたって襲い、広範囲の被害をもたらした。これらの竜巻被害では、強風により建物が破壊されるだけでなく、およそあらゆるものが飛ばされ、飛来物となって衝突し、建物や人など種々のものに被害を及ぼしている。

飛散物を生じさせる竜巻本体の構造や生成原因に関しては、観測や気象モデルを用いた数値シミュレーションにより、その生成過程や構造が明らかになりつつある(坪木和久2006、新野2007)が、これらの観測や計算では分解能が粗く、竜巻内部の気流性状を詳細に再現するものではない。竜巻内部の気流性状を詳しく知ろうとする研究は、竜巻発生装置を用いた実験(Churchら1979、文字信貴ら1983)、非定常乱流場を再現することのできるラージエディシミュレーション(LES)を用いて竜巻発生装置内の非定常回転流場を再現する数値トルネードシミュレーター(佐々浩司ら2006、松井正宏ら2006)や数値計算による解析(Kuaiら2008、Ishiharaら2010、Nomuraら2010)が進んでいる。

一方、物体の飛散性状に関しては数多くの研究がある(Tachikawa1983、Willsら2002、Holms2004、Wangら2003)が、ほとんどが一方向流中の解析である。竜巻中の渦中での研究としてはSimuら(1976)が挙げられるが、竜巻中の気流は乱れのない定常流を仮定している。また、喜々津(2009)は実験により物体の飛散分布を求めているが、いずれの研究においても飛散物の経路や速度変化等、運動に関して定量的に詳細な情報は得られていないのが現状である。

これに対して、本研究代表者は非定常乱流場を再現することのできるラージエディシミュレーション(LES)を用いて竜巻発生装置内の非定常回転流場を再現する数値トルネードシミュレーターを開発し(丸山2007)、種々の特徴をもった竜巻状の渦を発生させ、渦内の気流性状を明らかにしている(丸山2009、2010)。さらに、渦内部に物体片を放出し、その飛散経路を解析するプログラムを開発した(丸山2010)。これにより、渦の気流性状、飛散物の大きさ、形状、放出条件等を種々変化させることによって、竜巻状の回転流中における飛散物の運動に関する詳細な解析を行うことが可能となった。

2. 研究の目的

本研究では、建物や人などの竜巻による被害の低減や防止、また、飛散物に対する建物外装材の耐衝撃性能の評価に呈する情報を得ることを目的に、数値計算により種々の性

状をもった竜巻状の回転流を発生させ、飛散物の大きさ、形状、放出条件等を種々変化させて竜巻中における飛散物の運動を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、1.竜巻状の回転流を作成し、2.飛散物の空力特性の検討を行う。その際、3.日本における代表的な飛散物である和瓦の空力特性を明らかにし、4.回転流中における飛散物の計算を行う。そして、それらの結果を用いて飛散物の飛散経路、速度変化等の運動性状を調べ、竜巻の性状(竜巻の大きさ、強さ、移動速度)との関連を明らかにする。以下にそれぞれの概要をまとめる。

3.1 竜巻状の回転流の作成

竜巻状の回転流は、非定常乱流場を再現することのできるラージエディシミュレーションを用いて数値的に作り出した。計算領域の形状や流入境界面の風速分布等のパラメータを変化させて、渦の形態、大きさ、強さなど、様々な性状をもった渦を発生させた。得られた計算結果は、既存の観測例、実験結果、数値計算結果等と比較し、作り出した回転流が実際の竜巻と同様の気流性状を持つことを確かめた。また、発生する渦の形態と計算条件の関係についても検討を行い、希望する気流性状を持った渦を発生させるための条件を明らかにした。

3.2 飛散物の空力特性の検討

飛散物として放出する物体については、過去の竜巻被害の調査結果などから、実際に被害を起こすと考えられる性質を持った飛散物を選定し、それらが持つ空力特性を検討した。また、渦内で放出する条件や、計算に必要な飛散物の空力パラメータ等の各種計算条件についても、過去の研究結果を調べたり、新たに試験計算を行って検討した。

3.3 和瓦の空力特性の解明

竜巻の被害では屋根ふき材の飛散による被害が多くみられる。そこで、日本における屋根ふき材の代表的なものとして和瓦を取り上げ、風洞実験等によりその空力特性を定量的に明らかにした。さらに、一様流および勾配乱流中で飛散計算を行って、球や正方形平板などの単純な形状をもつ飛散物と瓦を比較し、飛散性状にどのような違いがあるかを明らかにした。

3.4 回転流中の飛散物の計算

3.1で作成した回転流中に、3.2で検討した飛散物を種々の条件で放出し、飛散経路、速度変化等の飛散性状を明らかにした。また、飛散範囲や竜巻の性状(大きさ、強さ、移動速度)と飛散性状の関係を明らかにした。さらに、2012年5月6日につくば市北条地区で大きな被害をもたらした竜巻に関して、対応

する飛散物のシミュレーションを行って、被害発生当時の飛散物の速度を評価し、計算結果が被害調査結果とよく整合する値を予測することを示した。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を、以下にまとめる。

・竜巻状の回転流の作成：数値的に竜巻状の回転流を作成する方法を提案し、作り出された様々な渦の気流性状と、渦を発生させるための条件を明らかにした。

・飛散物の空力特性の検討：過去の竜巻の被害調査などから、衝突により風下の建物を破壊して被害を及ぼす可能性の高い、比較的遠くまで飛ぶ物体を調査し、飛散運動を計算する際に物体の飛びやすさを表す空力パラメータである、 $C_D A / m$ (m^2/kg) および、 T_a の値を求めた。ここで、 $C_D A$ は物体の各軸方向の見つけ面積 A_x, A_y, A_z および抗力係数 C_{Dx}, C_{Dy}, C_{Dz} を用いて、 $C_D A = (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z) / 3$ として求めた値、 m は物体の質量、 T_a は Tachikawa 数である。その結果、 $C_D A / m$ の値は $0.007 m^2/kg$ から $0.07 m^2/kg$ まで、最大接線風速=80m/s とした場合、 $T_a C_D$ の値は 2.8 から 2 の範囲であることを示した。この空力パラメータの値の範囲には、例えば、0.18kg から 3.6kg 程度の木片や石 ($10 \times 10 \times 10 cm^3$ など)、小石 ($1 \times 1 \times 1 cm^3$ など) が含まれている。

・瓦の飛散性状：風洞実験により和瓦 (JIS 規格 J 型瓦) の空力特性 (図 1) を明らかにした。それによると、瓦は正方形平板に比べその空力特性に非対称性が目立った。また、その非対称性および風向角に対する空力特性の細かな変化は、飛散物の飛翔性状に対して気流の乱れが大きくなることと同様な影響を与え、飛翔距離の最小最大の差を大きくすることがわかった。

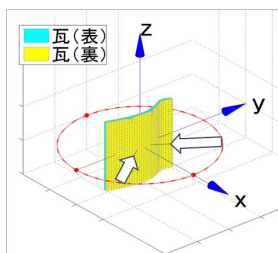


図 1 風洞実験により和瓦の空力特性を解明

・回転流中の飛散性状：回転流中の飛散物 (図 2) の飛散性状に関して、物体の飛びやすさを示す空力パラメータ $C_D A / m$ の値が大きいほど、最大接線風速や最大接線風速半径、さらには渦の移動速度が大きいほど飛散中の対地最大速度は大きくなることがわかった。また、飛散物の速度は渦の回転と移動速度が一致する領域で大きくなり、その発現位置は最

大接線風速半径の 3 倍以内に見られることがわかった。

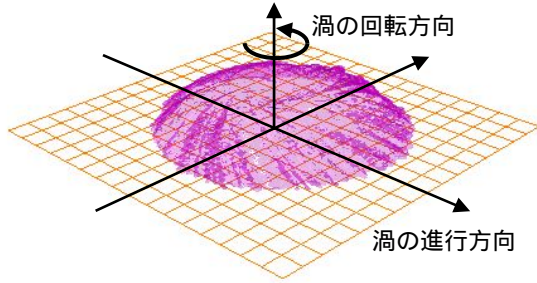


図 2 回転流中の飛散物の飛散範囲

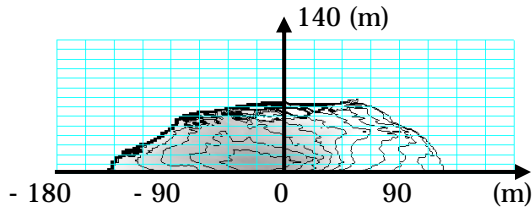


図 3 渦を前方から見た場合の飛散物の最大速度の空間分布の計算例 (色の濃い場所で、飛散物の最大速度は大きくなる)

成果の還元・波及効果および社会への貢献については、本研究で開発された手法を用い、実際の竜巻被害に対して、竜巻中の飛散物の飛散性状が推定された (科学省科学研究費補助金 (特別研究推進費) 研究成果報告書 2013) さらには、そこで明らかになった飛散物の性状は、原子力発電所の竜巻による影響評価ガイド (原子力発電所の竜巻影響評価ガイド (案) 及び解説 2013) の作成に用いられた。また、本研究で開発された飛散物の解析手法は、レーダー観測による竜巻中の風速の速度推定の精度向上にも応用された (D. Bodine 2014) 最後、竜巻による被害の低減や防止、また、飛散物に対する建物外装材の耐衝撃性能の評価に役立てるために、学会誌や協会機関紙、研究発表会やシンポジウムにおいて、竜巻のシミュレーション法や飛散物の性状に関する解説を掲載し、広く一般に公開した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

丸山敬、2012 年 5 月に北関東で発生した竜巻被害、京都大学防災研究所年報、査読無、第 56 号 A、2013.9、37-42

http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/nenpo/no56/content_menu.htm#Atop

丸山敬、2012 年 5 月 6 日につくばで発生した竜巻中の飛散物の速度推定、京都大学防災研究所年報、査読無、第 56 号 B、2013.9、349-359

http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/nenpo/no56/content_menu.htm#Atop

丸山敬、これからの設計荷重を考える - 見えない荷重を考える - 竜巻のシミュレーション、STRUCTURE、査読無、日本建築構造技術者協会、No.126、2013.4、

34-37

http://www.jsca.or.jp/vol3/123publish/str_list/structure125_130.php

丸山敬、岡崎純也、瓦の飛散数値シミュレーション、日本風工学会誌、査読無、第38巻第2号、2013.4、213-214

https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jawe/38/2/_contents/-char/ja/

高森浩治、友清衣利子、西村宏昭、野田稔、丸山敬、宮城弘守、特集 飛散物被害の状況、日本風工学会誌、査読無、第38巻1号、2013.1、31-40

https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jawe/38/1/_contents/-char/ja/

岡崎純也、丸山敬、瓦と正方形平板の飛散性状のシミュレーション、第22回風工学シンポジウム論文集、査読有、2012.12、377-382

https://www.jstage.jst.go.jp/browse/kazekosymp/22/0/_contents/-char/ja/?from=1

Maruyama T.、Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex、Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics、査読有、99(4)、2011.4、249-256

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01676105/99/4>

〔学会発表〕(計3件)

丸山敬、竜巻中の飛散物の特性に関する数値計算、京都大学防災研究所研究発表会、京都大学宇治おうばくプラザ、2014.2.28

岡崎純也、丸山敬、瓦と正方形平板の6自由度の飛翔性状に関する研究、京都大学防災研究所研究発表会、京都大学宇治おうばくプラザ、2013.2.19

丸山敬、平成24年5月6日に北関東で発生した竜巻の発生メカニズムと被害実態の総合調査、第50回自然災害科学総合シンポジウム「災害の風貌 - 調査と対策 -」、京都大学宇治おうばくプラザ、2013.9.11

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説、独立行政法人原子力安全基盤機構、2013.10

David Joseph Bodine、Polarimetric Radar Observations and Numerical Simulations of Tornadic Debris, the degree of Doctor of Philosophy、University of Oklahoma Graduate College、2014

6. 研究組織

(1)研究代表者

丸山 敬 (MARUYAMA, Takashi)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：00190570

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし