

科学研究費補助金研究成果報告書

平成23年5月31日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560519
 研究課題名（和文） 竜巻状の回転流中に置かれた建物周りの非定常流れ場の数値解析
 研究課題名（英文） Numerical Study on the unsteady flow fields around a building in a tornado like vortex
 研究代表者
 丸山 敬（MARUYAMA TAKASHI）
 京都大学・防災研究所・准教授
 研究者番号：00190570

研究成果の概要（和文）：竜巻内の気流性状、および、建物に加わる空力特性を明らかにすることを目的に、竜巻状の回転流を作り出す数値トルネードシミュレーターを開発した。これにより、いくつかの形態を持った竜巻状の回転流を作り出し、渦内の気流性状を明らかにし、また、建物周りの気流・風圧性状を検討した。さらに、竜巻時の建物被害の主な原因である飛来物の飛散特性を明らかにするために、渦内に放出された物体の飛散運動を追跡する方法の検討も行った。

研究成果の概要（英文）：A numerical tornado simulator was developed. It can generate various types of tornado like vortices numerically by Large Eddy Simulation. A series of unsteady flow fields of vortex were generated and examined the flow characteristics with varying the inflow conditions, the boundary conditions, and the configuration of calculating domain. The normalized differential mean pressure indicates almost equivalent magnitude of -1.5 at the radius of maximum mean tangential speed, R_{tmax} and also the absolute mean wind speed shows the half of the maximum mean tangential speed at the radius of $3R_{tmax}$ irrespective of core type of vortex. The unsteady flow fields and the pressure fields around a building put in the vortex was examined. The function of the calculating the trajectories of missiles released in the vortex was also installed in the tornado simulator and the trajectories of simple shaped missile were tested.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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、強風、建物被害、非定常流れ場、数値解析、飛散物、気流性状、風圧性状

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2006年11月の北海道佐呂間町で発生した竜巻では9名もの死者を出した。これらの竜巻に関しては観測やメソスケール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（気象庁気象研究所報道発表資料、2006年11月。竜巻シンポジウム—わが国の竜巻研究の今後の課題と方向性—、2007年1月）。しかしながら、これらの計算では水平分解能が500から1km程度と粗く、竜巻内部の気流性状を詳細に再現するものではなかった。

一方、竜巻による建物被害のメカニズムを明らかにするためには、竜巻内部の気流性状を詳しく知る必要があり、ドップラーレーダー等による観測や竜巻発生装置を用いた実験（Church, C.R.ら¹⁾、文字信貴ら^{2,3)}、佐々浩司ら⁴⁾、松井正宏ら⁵⁾）など多くの研究がなされている。このうち、観測は主に、上空の竜巻内の気流性状を調べるものであり、建物被害に直接関係する地上付近の気流性状を明らかにするものではない。また、竜巻発生装置を用いた実験では、渦の発生条件や気流性状、地表面ラフネスや建物の影響が調べられているが、気流性状を測定することが困難であることから、定量的な情報が少ないのが現状であった。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、竜巻による強風に伴う被害のメカニズム解明と、被害の防止・軽減を目指して、数値計算手法を用いて、種々の特性をもつ竜巻状の回転流を発生させることができる手法⁶⁾を用いて、竜巻状の回転流を作りだすための数値トルネードシミュレーターを作成する。そして、竜巻状の回転流内の非定常流れ場の気流性状を明らかにし、回転流中におかれた建物に加わる風圧性状を検討する。さらに、建物被害の主な原因の一つである飛散物の性質を明らかにするため、渦中に放出された物体の飛散運動を追跡する方法の検討も行う。

3. 研究の方法

本研究では、数値計算により竜巻状の回転流を種々の条件で発生させることのできる、数値計算手法を開発し、それを用いて、竜巻内の気流性状および、竜巻内の建物まわりの風圧特性を明らかにする。具体的な項目を以下に挙げる。

(1) 数値計算手法の確立

希望する性質を持った竜巻状の回転流を

発生させるために必要となる、乱流モデル、境界条件、解析格子形状などを明らかにし、本研究に必要となる数値計算手法を確立する。計算手法の妥当性に関しては、既存の観測や実験結果との比較を行う。

(2) 竜巻状の回転流中の気流性状の解明

開発した数値トルネードシミュレーターを用いて、種々の特性を持った竜巻状の渦を発生させ、それによってできた渦内の気流性状を明らかにする。

(3) 建物を含んだ流れ場の計算

通常、建物に強風被害を生じさせるような竜巻のスケールは数十メートルから数百メートルに達する。一方、建物に加わる風圧力を評価するために必要となる計算格子の解像度は1メートル以下であるため、建物周りには詳細な計算格子を設定する必要がある。しかし、上述の数値トルネードシミュレーターでは、渦中に設置された建物周りの変動風向風速圧力を明らかにするには格子間隔が大きいため、建物周りで詳細な計算格子を用いることができるように、重合格子法を用いた計算手法を組み込む。これにより、竜巻と建物周囲の流れ場という異なるスケールを持った現象を連続的に計算できるようになり、いくつかのケースについて、建物が渦中にある場合の計算を行い、建物周囲の変動風圧場の特性を明らかにする。

(4) 竜巻内の飛散物の計算手法の検討

飛散物は竜巻による建物被害の重要な原因の一つであり、その性質を明らかにすることは、被害の防止・軽減に重要である。そこで、渦中に放出された物体の飛散運動を追跡する方法の検討も行う。

4. 研究成果

(1) 数値トルネードシミュレーターの作成

直交格子により流れの支配方程式系を差分化し、乱流モデルとして変動流れ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）⁶⁾を用いて、竜巻状の回転流を作りだすための数値トルネードシミュレーターを開発した。開発した数値トルネードシミュレーター（図1）により生成される竜巻状の回転流の性状は、収束域の高さ、対流域の大きさ、上部吸い出し口の風速、流入境界条件などを適当に制御することにより、種々の性状を持った回転流を作り出すことができることを示した。

(2) 作成された竜巻状の渦の特性

境界条件、解析格子形状などを変化させて、種々の竜巻状の回転流を発生させ、それらの気流性状を明らかにした。得られた結果をま

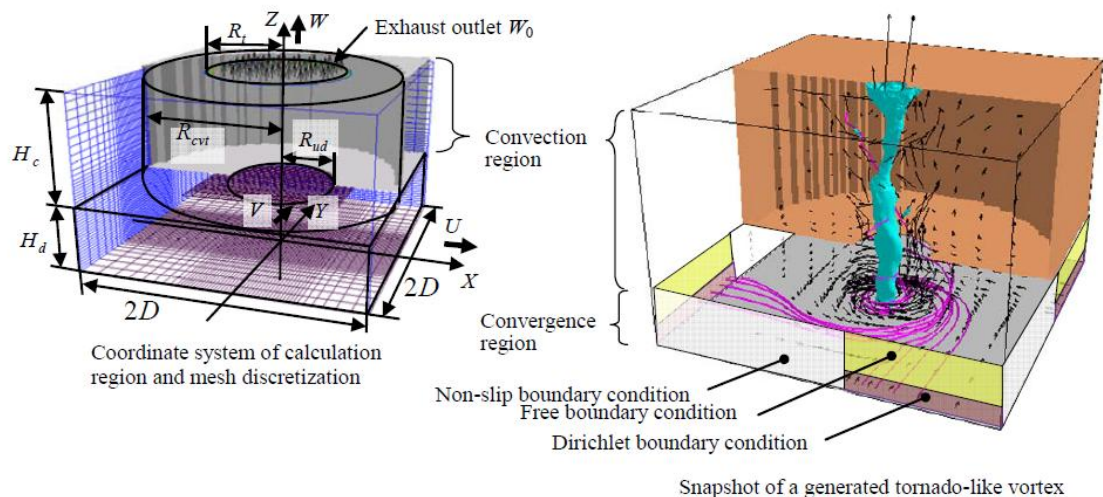


図1 本研究で用いた数値トルネードシミュレーター

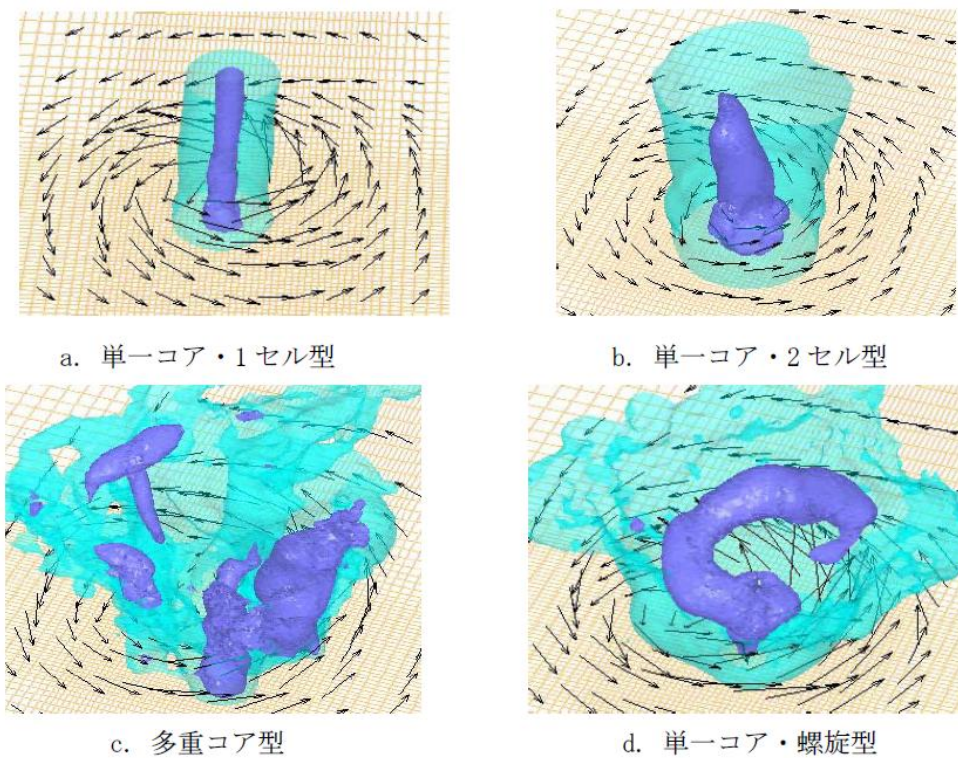


図2 作り出された種々の渦

とめると、作り出した竜巻状の回転流は、大きく大別して、・1セルタイプの渦、・2セルタイプの渦、・多重コアをもつ渦、・中心の低圧コアが螺旋状になった渦（図2）、に分類できる。それぞれの渦内部の風速や圧力分布の特徴を調べ、建物の耐風設計上重要となる基準風速と基準圧に関して検討した結果、上記の渦のタイプによらず、・最大接線風速発現位置における圧力降下は、最大接線風速で無次元化された風圧係数で周囲の気圧から1.5程度低くなること、・渦中心から最大接線風速半径の3倍離れた位置では、接線風速が

最大接線風速の約半分になること、がわかった。一方、風速の鉛直方向成分および径方向成分、最大接線風速半径内の圧力分布は、渦の形態により複雑に変化することがわかった。研究成果の詳細は雑誌論文④,③,⑤および、学会発表③として発表済み。

(3) 建物周りの気流性状

建物周りの気流性状の解析は、多重格子を使って格子解像度を上げて計算を行った（図3）。建物周りの風速（図4）は、建物が無い場合に比べて2倍以上（鉛直速度成分）の

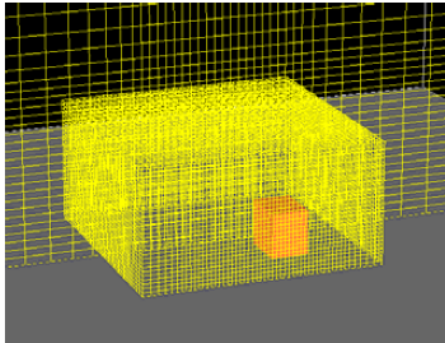


図3 建物を含む解析に用いた多重格子

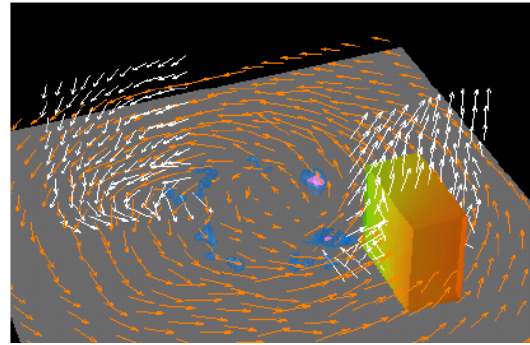


図4 建物を含む渦の計算例

増加を示す場合もあるが、その変化は建物の大きさや、渦と建物の相対位置により変化し複雑なものとなった。

なお、当初の研究予定では建物周囲の気流および風圧性状に影響を及ぼす種々の要因を系統的に調べる予定であったが、上述のように、それらは建物の形状、渦との相対位置、地表面粗度、渦の形状、渦の移動速度等、数多くの要因に左右されるため、研究期間内に全てを網羅することは不可能であった。また、計算結果の精度を検証するための実験データも少ないため、今回は、本研究で開発した計算方法で、渦内に置かれた建物周りの非定常変動風速場が、安定して再現できることを確認することとどめた。なお、上記、各種パラメータの影響や実験結果との比較に関しては、引き続き研究を行い、順次成果を発表していく予定である。

(4) 渦中に放出された物体の運動

竜巻時の建物被害の原因としては風圧力によるものだけでなく、飛来物によるものも重要なものと考えられるので、建物周囲の気流・風圧性状だけでなく、渦中に放出された物体の飛散を再現する手法の開発も行った。ここでは、飛散物として風向角によらず抗力係数が一定な物体と仮定し、渦中に放出された場合の運動を追跡する機能(図5)を数値トルネードシミュレーターに付け加えた。そして、過去に行われたいくつかの解析例に対応した計算を行い、用いた手法の妥当性と、物体の飛散性状を検討した。研究成果は雑誌論文②,①および、学会発表②,①として発表した。

以上のように本研究では、数値計算により竜巻状の回転流を種々の条件で発生させることのできる、数値計算手法を開発し、それを用いて、竜巻内の気流性状および、竜巻内に置かれた建物まわりの気流および風圧特性を明らかにした。さらに、渦内に放出された飛散物の運動を再現する機能も付け加え、竜巻による建物被害のメカニズムを解明するうえで必要となる解析機能を備えた数値

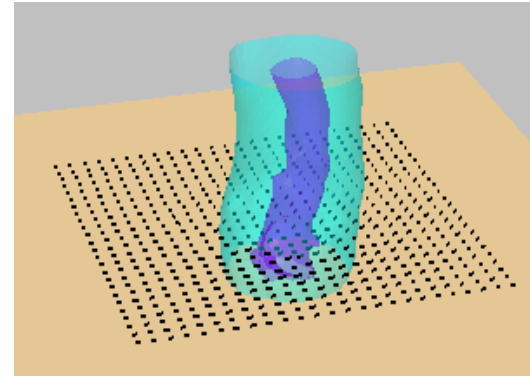


図5 竜巻状の渦内に放出された物体の計算例

トルネードシミュレーターを作成した。今後、希望の特性を持った渦や、建物形状、周囲の気流(親雲や地面近くのシア)や地形、地表面粗度が、竜巻の生成や性状にどのような影響を及ぼすかについての感度試験を行い、竜巻による建物の強風災害を防止、軽減のための資料を提供していく予定である。

参考文献

- 1) Church, C.R., Snow, J.T., Baker, G.L. and Agee, E.M. (1979) : Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio, J. Atmos., Sci., Vol.36, pp.1755-1776.
- 2) 文字信貴 (1982) : 竜巻渦の室内実験, 京都大学防災研究所年報, 第 25 号 A, pp. 27-45.
- 3) 文字信貴・光田寧 (1983) : 竜巻実験装置を用いた1セル及び2セル渦の研究, 京都大学防災研究所年報, 第 26 号 B-1, pp. 393-401.
- 4) 佐々浩司・竹村早紀・山下賢介 : 日本流体力学会年会, 2006 講演アブストラクト集, 134.
- 5) 松井正宏ら : 竜巻状流れ場に対するスワール比, 粗度の影響に関する室内実験, 松井正宏, 田村幸雄, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, 2006, pp.7-12.
- 6) 丸山 敬 : ラージ・エディ・シミュレーションによる竜巻状の渦を作る試み, 京都大学防災研究所年報, 2008, pp.481-488, 第 51 号 B.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Takashi Maruyama : Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.99, 2011.4, pp.249-256, 査読有.
- ② 丸山 敬 : 竜巻状の渦の中に放出された単純な形状をもった物体の運動, 第 26 回生研 TSFD シンポジウム講演論文集, 2011.3, pp.43-49, 査読無.
- ③ 丸山 敬 : 数値トルネードシミュレーターによりつくられた竜巻状の渦の性質, 第 25 回生研 TSFD シンポジウム講演論文集, 2010.3, pp.18-23, 査読無.
- ④ 丸山 敬 : 数値トルネードシミュレーターの特性, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009.12, 論文集 CD, pp.G1-4, 査読無.
- ⑤ 丸山 敬 : 数値的に生成された竜巻状の渦の性質, 京都大学防災研究所年報, 2010, 第 53 号 B, pp.383-390、Vol.34, No.2 (No.119), 2009.4, pp.31-38, 査読無.

[学会発表] (計 3 件)

- ① Takashi Maruyama : Flying debris in the numerically generated tornado like vortex, 5th International Symposium on Wind Effects on Buildings and Urban Environment Wind Hazard Resilient Cities, March 7, 2011, Proceedings, Tokyo.
- ② Takashi Maruyama : Simulation of Flying Debris using Numerically Generated Tornado-like Vortex, The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), May 24, 2010, Chapel Hill Durham USA.
- ③ Takashi Maruyama : A Numerically Generated Tornado-Like Vortex by Large Eddy Simulation, Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 9, 2009, Proceedings of Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, pp.349-352, Proceedings, Taipei Taiwan.

[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]
なし

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・准教授
研究者番号 : 00190570