

## GISを用いた2012年つくば竜巻の突風による建物被害の分析

加藤, 敢士  
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

友清, 衣利子  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 : 助教

前田, 潤滋  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/1804183>

---

出版情報 : 都市・建築学研究. 29, pp.49-54, 2016-01-15. Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

## GISを用いた2012年つくば竜巻の突風による建物被害の分析

### Analysis of Tornado-Related Structural Damage in Tsukuba, 2012 using GIS

加藤敢士\*, 友清衣利子\*\*, 前田潤滋\*\*

Kanji KATO, Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

For analysis of wind disaster, it is important to examine not only wind speed but a lot of geography space information, for example building structure and land use. Use of GIS is very effective to examine structural damage due to strong wind, because GIS can manage and visualize a lot of geography space information about strong wind damage. The purpose of this research is to clarify usefulness of GIS to arrange a lot of information and to predict wind damage. In this paper, we examined structural damage in the Hojo, Tsukuba City due to the tornado which occurred on May 6, 2012, as an example. As a result, it was confirmed that use of GIS is effective to analyze damage because of strong wind quantitatively. We need to examine much more structural damage examples using much information to predict future strong wind damage.

**Keywords:** GIS, Tornado, Wind disaster, Geography space information  
GIS, 竜巻, 強風被害, 地理空間情報

#### 1. 序

近年、都市部で発生する竜巻被害が注目されている。現地での被害調査<sup>1,3)</sup>によれば、竜巻等の突風による特徴的な被害には、突風で破損した屋根葺材や外装材などの構造材が飛散して近隣の建物に衝突する二次的な被害と、突風風圧または飛散物による窓ガラスなどの開口部の破損が原因となる人的被害や建物内部の破損がある。2012年に北関東で発生した竜巻被害報告<sup>2)</sup>によれば、被害が甚大であった住宅密集地では近隣建物に二次被害を及ぼす飛散物の数や種類が多く、突風による飛散物被害は土地利用状況と密接な関係にあることが指摘された。また、文献4)と5)は台風による強風被害に着目したものであるが、被害拡大には強風風速だけでなく、被災地域の気候や構造物の構法、種別などの空間特性が影響を及ぼすことを指摘しており、強風被害の分析には、風速だけでなくさまざまな地理空間情報を合わせて検討することが重要である。そのためには地理空間情報を一元管理して視覚化することのできるGISの利用が有効であると考えられる。東日本大震災ではさまざまな地理空間情報が公開され、情報の分析や視覚化など、GISの特性を活かした利用が活発化した<sup>例えは6)</sup>が、強風災害分野においては地理空間情報の活用は進んでいない。

\* 都市共生デザイン専攻修士課程

\*\* 都市・建築学部門

本論ではGISを用いた竜巻被害情報の整理手法の有用性を検討し、その手法を確立することを目的に、2012年5月6日に茨城県つくば市北条地区で発生した竜巻での建物被害を一例として、竜巻中心からの距離や竜巻の推定風速、建物の規模、形状、被害程度や部位に関する地理空間情報を整理し、被害状況の分析を行う。

#### 2. 2012年つくば市での竜巻と建物の特徴

##### 2.1 竜巻とその被害の概要

2012年5月6日正午頃、北関東では4つの竜巻が発生して多くの被害が生じた。そのなかでも12時35分頃に茨城県常総市からつくば市にかけて発生した竜巻による被害が特に甚大であった。図1に竜巻による被災建物位置と周辺地図を示す。被災建物は後述する被災度ランクで色分けされている。この竜巻の被害範囲は長さ約17km、最大幅約500m、フジタスケールF3程度と報告されており<sup>2)</sup>、コア半径(最大接線風速に対応する半径)は約35mと推定されている。

表1に示したつくば市が実施した建物被害認定調査による地域ごとの被災建物棟数を見ると北条地区が最も被災数が多く、つくば市内の建物被害の6割が集中している。地域区分は図1に示す。

本論では、被害が最も集中した北条地区を中心とした範囲を分析対象範囲とした。表1では、地震や土砂災害でも用いられる被害分類基準に基づき、建物の被災程度を分類しているが、以下では国土交通省国土技術政策総合研究所と国立研究開発法人建築研究所による現地被害調査結果<sup>7)</sup>に基づき、「強風被災度ランク」<sup>8)</sup>を用いて建物の被害状況を整理する。強風被災度ランクの分類を表2に示すが、ごく軽微な被害(ランク1)から壊滅的な被害(ランク5)まで、強風による建物被害を5つに分類している。上述の調査において、被害が評価された建物棟数は697棟である。図1に示すように竜巻による被害は带状の広い範囲に及んでいるが、本論ではつくば市内で特に被害が集中した北条地区のうち、竜巻経路を中心に幅490m、長さ1550mの範囲に含まれる建物に着目した。検討対象範囲内の被災建物の分布と竜巻経路、中心経路からの距離区分を図2に示す。被災建物は被災度ランクごとに色分けし、竜巻経路から最も離れた被災建物を含む、幅245mまでの範囲を竜巻のコア半径である35mごとに

表1 つくば市の地域ごとの被災建物棟数<sup>2)</sup>

地域	建物区分	被害区分 (単位:棟数)				計	合計
		全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊		
北条	居室	72	27	127	230	456	697
	居室以外	63	5	30	143	241	
平沢	居室	0	1	0	16	17	28
	居室以外	2	0	0	9	11	
小泉	居室	0	0	1	6	7	17
	居室以外	1	0	1	8	10	
泉	居室	0	0	0	19	19	33
	居室以外	2	0	0	12	14	
山木	居室	7	3	1	23	34	54
	居室以外	6	0	1	13	20	
水守	居室	0	0	0	7	7	13
	居室以外	1	0	0	5	6	
大砂	居室	9	3	13	57	82	175
	居室以外	31	7	15	40	93	
西高野	居室	1	1	1	25	28	65
	居室以外	12	0	7	18	37	
吉沼	居室	0	0	0	1	1	7
	居室以外	3	0	0	3	6	
合計	居室	89	35	143	384	651	1089
	居室以外	121	12	54	251	438	

表2 強風被災度ランク<sup>8)</sup>

ランク	被害程度	被害状況
1	ごく軽微な被害	住宅のテレビアンテナが曲がる。樋が落ちる。小枝が折れ、葉が飛散する。瓦がずれる。軒先やケラバなどで部分的(屋根面積の30%未満)に瓦やシングル、金属屋根といった屋根ふき材が飛散する。太い枝が折れる。
2	軽微な被害	屋根の広範囲(屋根面積の30%以上)で瓦やシングル、金属屋根といった屋根ふき材が飛散し、野地板の広い面が見える。部分的に窓ガラスが割れる。軽微な外壁が破損する。太い木が倒れる。
3	顕著な被害	屋根の垂木や母屋が破損する。小屋組が壊れる。多くの窓ガラスが割れる。
4	甚大な被害	家屋が倒壊する。
5	壊滅的な被害	

区切って距離区分を示した。対象範囲内の建物は958棟で、そのうち被災度ランクがつけられた建物は、403棟であった。図3に建物の被害の有無と被災度ランクごとの建物数とその割合を示す。被災建物は全体の42%で、軽微な被害(被災度ランク2)までの建物が半数を占めるが、壊滅的な被害(被災度ランク5)の建物は19棟ある。

## 2.2 検討対象範囲の建物特性と被災建物の特徴

(株)ゼンリンが提供している住宅統計データ<sup>9)</sup>の建物利用状況によれば、対象地区を含むつくば市北条地区周辺では建物の95%が個人の家屋であった。対象範囲で実際に被災した建物総数に対する構造種別ごとの割合と各構造種別の被害棟数を図4に示すが、被災建物の90.6%が木造であった。図4には無被害建物の情報が含まれていな

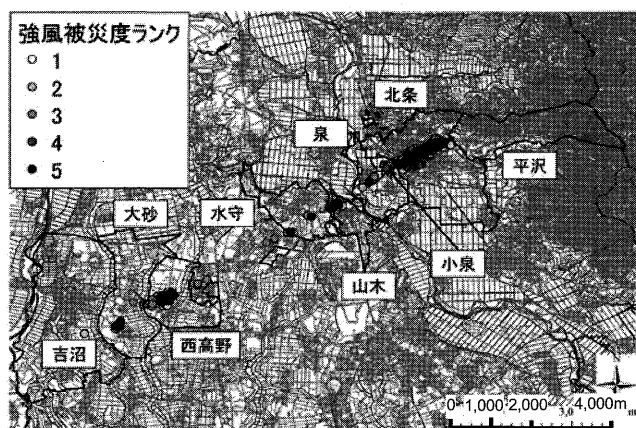


図1 竜巻による被害建物分布とつくば市の地域区分

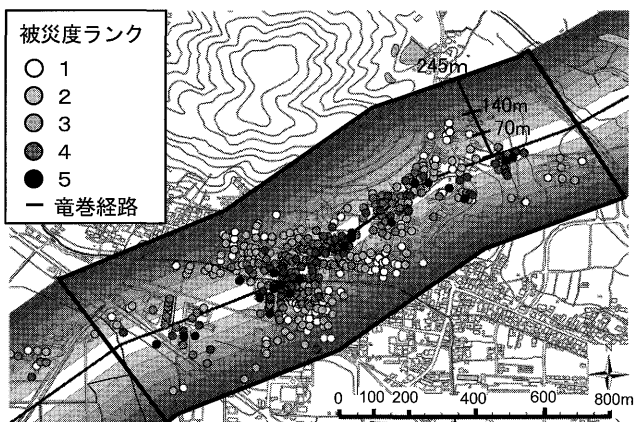


図2 対象範囲の被害建物分布(つくば市北条地区)

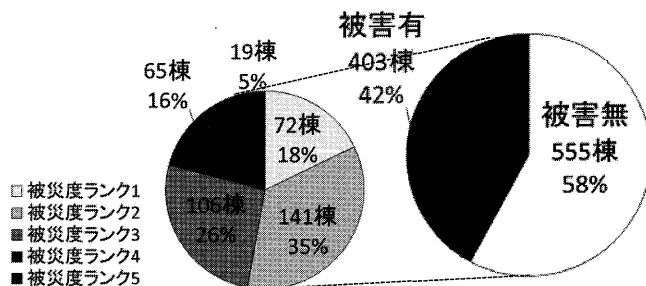


図3 建物の被災割合と被災度ランク

いことに留意する必要があるが、この地区の個人家屋の多くが平屋または二階建ての木造住宅で、検討対象範囲内では全体に占める木造建物の割合が非常に大きいと考えられる。対象範囲では木造以外の構造種別の被災建物件数が少なく、被害のなかった建物の構造種別に関するデータが不足しているため、以下では構造種別と被災度ランクとの関係には言及しない。

また、2012年に北関東で発生した竜巻被害は、東北大学のチームによっても調査されている<sup>2)</sup>。検討対象範囲内での同調査の対象建物は136棟で、被災建物の写真とともに構造種別、階数、屋根形状などの情報がまとめられている。図5に被災建物の階数別の建物の数と割合を、図6に屋根形状別の建物数とその割合を示す。階数が不明の20%を除くと、調査された被災建物の多くは一階建てと二階建てである。被災建物の屋根形状は切妻屋根が最も多く、ついで寄棟屋根が多い。ただし、建物の上部構造が飛散または倒壊したために屋根形状が不明な被災建物が24%あった。

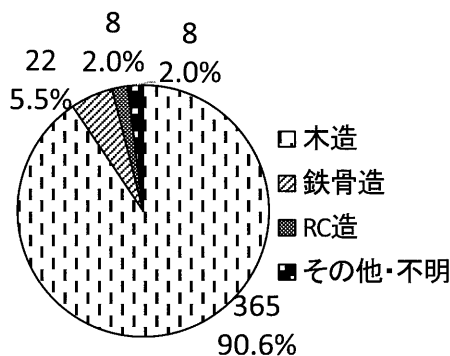


図4 被災建物の構造種別ごとの建物数と割合

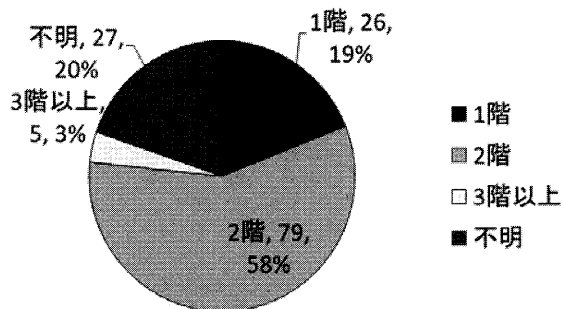


図5 被災建物の階数ごとの建物数と割合

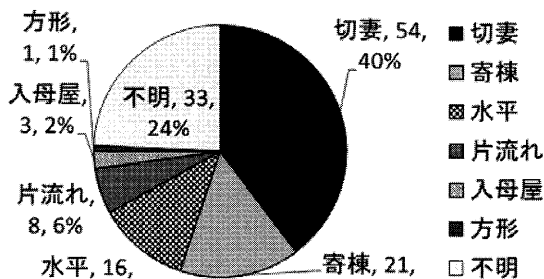


図6 被災建物の屋根形状ごとの建物数と割合

### 2.3 竜巻風速の推定

竜巻を想定した旋回流の風速分布としてよく用いられるランキン渦に従う風速分布モデルで、つくば市での竜巻による風速分布を推定した。風速分布は以下の式で表される。

$$V_R(r) = V_{Rm} \frac{r}{R_m} \quad (r \leq R_m)$$

$$V_R(r) = V_{Rm} \frac{R_m}{r} \quad (r \geq R_m)$$

(1)

$V_R$ は接線風速 (m/s)、 $V_{Rm}$ は最大接線風速 (m/s)、 $R_m$ はコア半径 (m)、 $r$ は竜巻中心からの距離 (m) である。竜巻中心経路に直交する軸を竜巻中心からの距離  $r$  の軸とし、竜巻の進行方向の右側を正、左側を負とした。文献2)より竜巻のコア半径は35m、最大接線風速は70m/sとしたが、竜巻の移動速度が15m/sであるため、竜巻経路の右側では竜巻の最大接線風速70m/sに竜巻の移動速度15m/sを加えた85m/sとし、左側では最大接線風速70m/sから移動速度15m/sを引いた55m/sとした。竜巻風速モデルの概念図を図7に示す。ランキン渦モデルでは、竜巻コア半径の内側での風速は減少して竜巻中心で0m/sとなるが、竜巻コア半径の内側でも竜巻が最接近する前後には最大接線風速と同程度の風が吹くと考えられることから、竜巻の左右の最大接線風速を線形補間した風速が生じると仮定し、図8の推定風速を求めた。

### 3. 竜巻の突風による建物被害の分析

#### 3.1 竜巻中心経路からの距離と建物被害程度との関係

図9に竜巻中心経路からの各距離区分内の被害の有無別の建物総数を、図10に竜巻経路からの距離区分ごとの被害率と被災度ランクごとの割合を示す。ここでの被害

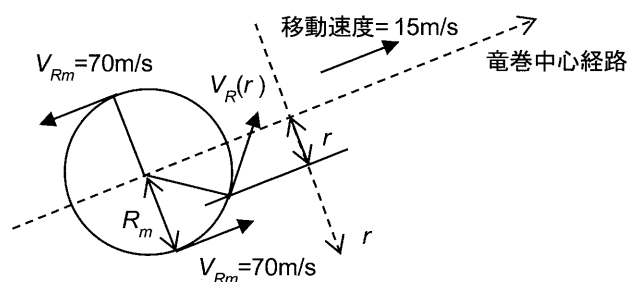


図7 竜巻風速モデルの概念図

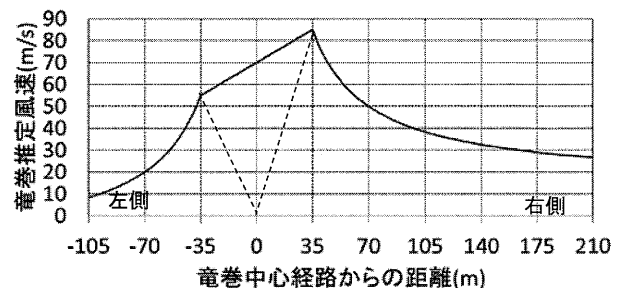


図8 ランキン渦モデルによる竜巻の推定風速と竜巻中心経路からの距離との関係

率とは、強風被災度ランク1以上の建物棟数を各距離区分内の総建物棟数で除した値である。

図9より竜巻経路の右側により多くの建物が存在しており、被災建物の総数も経路の右側が多いが、図10の被害率に着目すると、竜巻中心経路の左側35m以内の位置での被害率が最も大きい。一方、被災度ランク別の被害率に着目すると、最も被害の大きいランク5は、竜巻中心の左側70mから右側105mの範囲内に分布し、竜巻中心から右側35mの範囲では被災度ランク5の建物が全ての建物の9%を占めている。一方、被害の最も小さいランク1は、竜巻経路中心の左側35mから右側70m以内の範囲にはほとんどみられず、中心から右側35m範囲内には分布していない。また、竜巻経路の右側と左側とを比較すると、右側のほうが竜巻中心から離れた範囲まで被害率が高い。2.3節で示すように竜巻中心の左側に比べて右側のほうが、竜巻の移動速度が加わって風速が大きくなるためと考えられる。

### 3.2 建物の屋根面積、壁面積と建物被害程度との関係

一般に建物の見付面積が広いほど突風の風圧力が大きく、屋根や壁などの外装材面積が大きいほど飛散物による被害を受けやすいと考えられるので、GISを用いて国土地理院の提供する基盤地図情報<sup>10)</sup>の建物外周線と竜巻被害調査の情報を組み合わせ、2012年の竜巻で被害を受けたつくば市北条地区の建物の屋根面積と壁面積を求

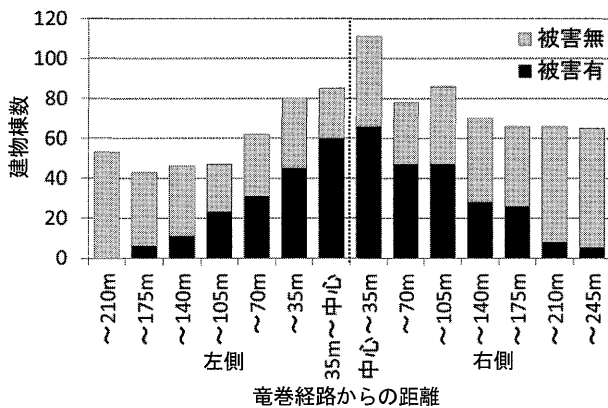


図9 竜巻中心経路からの距離帯別の建物棟数と被害の有無

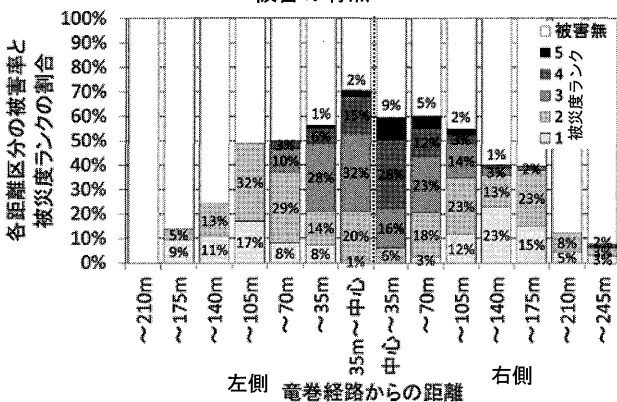


図10 強風被災度ランクと竜巻中心経路からの距離との関係

めた。建物の屋根面積は建物外周線で囲まれた範囲とし、壁面積は外周線に階数と階高(2.8m)を乗じた値とした。

図11に被災の有無にかかわらず対象範囲内のすべての建物の屋根面積ごとの割合を竜巻中心からの距離帯別に示す。竜巻中心の右側70~105mと左側35~70mの距離帯では、屋根面積150m<sup>2</sup>以下の建物の占める割合がやや大きいですが、ほとんどの距離帯では150m<sup>2</sup>以下の建物が約50%を占めた。すべての建物の階数の情報が得られていないため、検討対象範囲内の建物の壁面積ごとの割合は不明であるが、図5に示したように平屋または2階建ての建物が多く、屋根面積と建物の周長、壁面積には相関関係があることから、壁面積ごとの建物の割合も屋根面積ごとの割合と似た傾向を示すと考えられる。

図12に強風被災度ランク別の竜巻中心からの距離と建物屋根面積との関係を、図13に壁面積との関係を示す。建物規模と被災度ランクには明確な関連は見られないが、3.1節で述べたように竜巻経路の右側35m付近で被災度

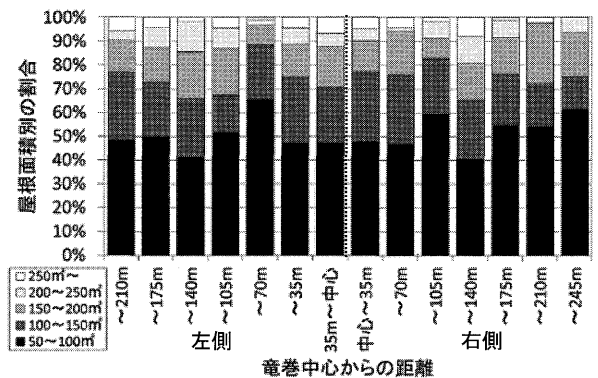


図11 竜巻中心からの距離帯別の建物の屋根面積ごとの割合

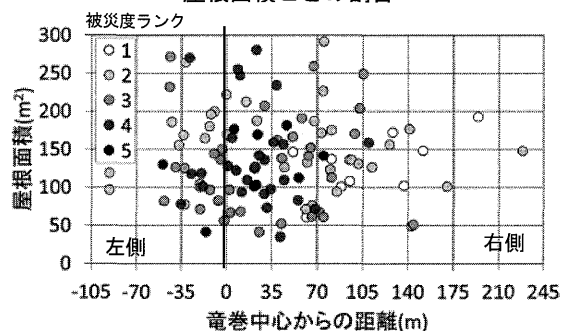


図12 被災度ランク別の竜巻中心経路からの距離と屋根面積との関係

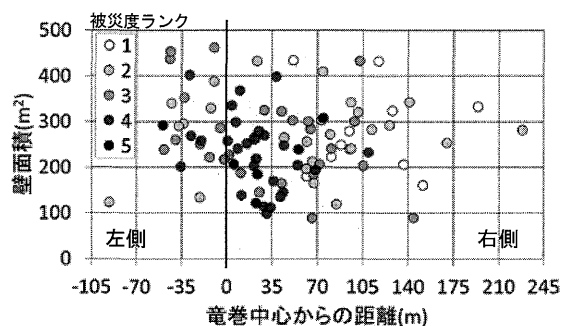


図13 被災度ランク別の竜巻中心経路からの距離と壁面積との関係

ランクが大きい建物が多く、その位置では壁面積が比較的小さな建物が特に大きな被害を受けている。竜巻中心から離れるにつれて壁面積の小さな建物の被害棟数は少なくなり、その程度は小さくなる傾向がある。竜巻経路の右側 105m 以上の範囲では、飛散物等による比較的軽微で部分的な被害が多くなるため、被災度ランクが小さい。その範囲では小規模な建物の被害はあまり見られず、壁面積が 200m<sup>2</sup> 以上の建物の被害が多い。

### 3.3 竜巻推定風速と建物被害程度との関係

図 14 に被災建物の位置での竜巻の推定風速に対する被災度ランク別の建物棟数を示す。推定風速が 35m/s を超えると被災建物の棟数が急激に増加し、75m/s を超えると被災度ランク 4 以上の被災建物の棟数が急激に増加する。図 15 にはそれぞれの被災度ランクの建物位置での推定風速のばらつきを箱ひげ図で示す。箱ひげ図とはデータのばらつきを表す図で箱の上端が 75 パーセントイル値、下端が 25 パーセントイル値を、また、ひげの上端と下端で最大値と最小値を示す。箱内の横線は中央値である。被災度ランク 3 までは被災度ランクが大きくなるにつれて推定される風速の中央値が大きくなり、被災度ランク 3 での推定風速は 50~70m/s 程度であるが、被災度ランク 4 と 5 の被害は 60~80m/s の推定風速で生じた。2.3 節で示す竜巻風速の推定手法に基づく最大風速は 85m/s であるが、実際にはそれ以上の風速で被害が生じたため、異なる強風被災度ランクの推定風速がほぼ同じになった可能性がある。また、被災度ランク 4 と 5 では風速の大きさそのものだけではなく、被災した建物の構造種別や屋根形状などの建物の耐風性能の影響を受けて被害程度が異なったとも考えられる。

### 3.4 竜巻推定風速と建物の被災箇所との関係

東北大学チームによって撮影された被災建物の写真から、建物の被災箇所を、屋根、壁、窓、全体の 4 つに分

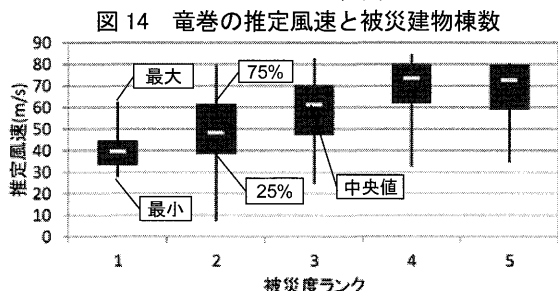
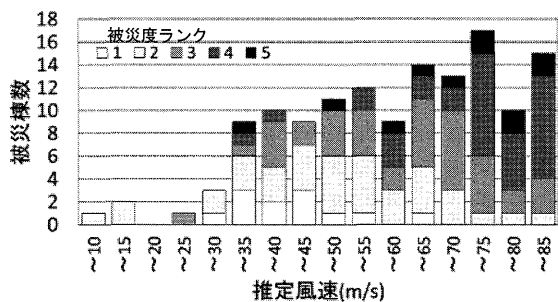


図 15 被災度ランク別の竜巻の推定風速のばらつき

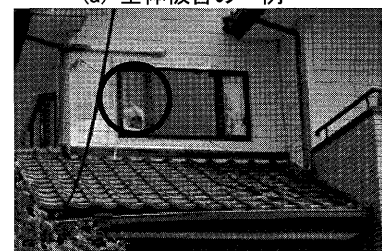
類して整理した。写真 1(a)と(b)は被害とその分類の一例である。写真 1(a)は屋根葺材と開口部だけでなく、屋根の小屋組も破損しており、「全体」被害に分類される。写真 1(b)は窓ガラスの一部が破損しており、「窓」被害に分類される。

図 16 に竜巻の推定風速と強風被災度ランクとの関係を被災箇所別で分類して示す。表 2 に示したように被災度ランク 4 以上はほぼ全て「全体」被害となり、被災度ランク 1 または 2 では部分的な被害が中心となる。

竜巻の推定風速が約 10m/s で被災した建物があるが、一般的な建物の被災風速としてはやや小さい<sup>11,12)</sup>と考えられ、推定風速値に誤差が生じたか、施工不良や老朽化等の要因で建物の耐風性能に問題があった可能性がある。竜巻の推定風速が 35m/s を超えると建物全体の被害が生じ始め、推定風速が 60m/s を超えるとほとんどの建物で全体的な被害が生じる。竜巻推定風速が 60m/s 未満では屋根や壁への部分的な被害にとどまる場合が多い。「屋根」被害は推定風速 25m/s 程度から分布しており、強風被害の多くが屋根の被害に端を発することを示唆している。一方、「窓」のみの被害は推定風速 40m/s 程度で生じている。被害写真より、これらの被害は周辺建物からの飛散物が要因であると可能性が高い。また、窓等の開口部が破損すると室内圧が上昇し、建物全体の被害に



(a) 全体被害の一例



(b) 窓被害の一例

写真 1 つくば竜巻による被害写真の一例

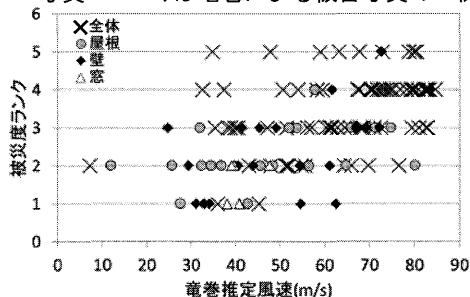


図 16 被災箇所別の竜巻の推定風速と強風被災度ランクとの関係

繋がることが多いことから、さらに風速が増すと「窓」だけでなく「全体」に被害が生じると考えられる。「壁」の被害はすべての被災度ランクに分布しており、飛散物だけでなく風圧力によっても被害が生じた可能性がある。

### 3.5 竜巻推定風速と屋根形状との関係

図 17 に竜巻の推定風速と強風被災度ランクとの関係を屋根形状で分類して示す。屋根形状の分類は 2.2 節で述べた東北大学チームの被害調査資料による。図 6 で示したように検討対象の被災住家で方形屋根と入母屋屋根のものは少ない。屋根形状と被災度ランクとの間に明確な相関は見られないが、推定風速 40m/s 前後での分布に着目すると、切妻屋根建物では被災度ランク 4 になる場合があるが、寄棟屋根では被災度ランクは 3 までにとどまっている。水平屋根の被災度ランクはさらに小さい。RC 造建物は水平屋根を持つ場合が多いことから、建物の構造種別の違いに留意する必要があるが、切妻屋根に比べて寄棟屋根の被災程度が小さくなる<sup>13)</sup>ことが確認できた。

## 4. まとめ

本論は強風被害情報の整理と被害予測への GIS 利用の有用性を明らかにすることを目的に、一例として 2012 年 5 月 6 日に発生した竜巻によって被害を受けたつくば市北条地区の建物に着目した。GIS を利用して竜巻被害調査資料と一般に公表されている住宅統計情報、基盤地図情報を整理分析したところ、以下のことを確認した。

- 1) 竜巻中心経路に近いほど建物の被害率が大きく、被害程度が大きい建物は竜巻の右側に多い。
- 2) 竜巻の右側の被災範囲は左側よりも広い。
- 3) 竜巻中心付近では壁や屋根面積の小さい建物の被災程度が大きいですが、中心から離れると大きな建物に被害がみられる。
- 4) 竜巻推定風速が 35m/s を超えると被災建物数が急激に増加しはじめ、75m/s を超えると強風被災度ランク 4 以上の建物が増大する。
- 5) 竜巻の推定風速と強風被災度ランクには関連があるが、被災度ランク 4 や 5 では風速以外の要因で被災程度が異なる可能性がある。

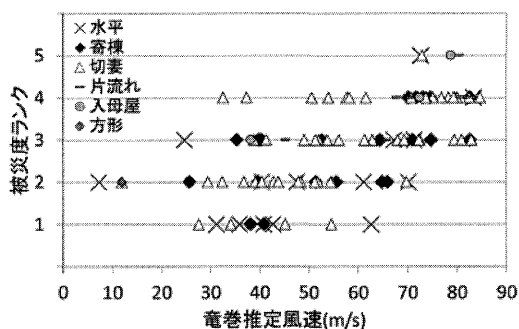


図 17 屋根形状別の竜巻の推定風速と強風被災度ランクとの関係

- 6) 竜巻の推定風速 25m/s 程度から屋根に被害が生じ始め、推定風速 35m/s を超えると建物全体に被害が及び始める。
- 7) 窓のみの被害は推定風速 40m/s 前後で生じており、それ以上の風速では被害が全体に及ぶと考えられる。
- 8) 同程度の推定風速で比較した場合、切妻屋根に比べて寄棟屋根建物の強風被災度ランクが小さい。

本論での分析は 1 つの竜巻被害に着目したものであるが、GIS の利用によって竜巻中心経路と被災建物との位置関係や被災建物の規模等を地図情報から容易に取得することができ、強風被害調査の定量的な分析に対する有用性を確認した。将来の強風被害予測への利用のためには、多くの情報を用いてさらに多くの被害事例を検討する必要がある。

**謝辞** 本研究の一部は科学研究費補助金「時空間データ分析による都市の突風被害予測精度の向上と防災インフォグラフィックス（基盤研究 (C) 26350489 代表：友清衣利子）」および「基盤研究(B) 26282108 代表：丸山敬」の助成を受けた。

### 参考文献

- 1) 平成 18 年度科研費補助金特別研究促進費 18900002 代表：真木太一、2006 年台風 13 号に伴う暴風・竜巻・水害の発生機構解明と対策に関する研究」報告書、2007。
- 2) 平成 24 年度文科省科研費補助金特別研究促進費 24900001 代表：前田潤滋、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、2013。
- 3) 気象庁ホームページ、現地災害調査速報 平成 25 年 9 月 2 日に埼玉県さいたま市、越谷市、北葛飾郡松伏町、千葉県野田市、茨城県坂東市で発生した突風について、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>, (2013-09-13 参照)
- 4) 友清、前田：強風時の住家被害の拡大に及ぼす影響因子の抽出、構造物特性の指標化による強風被害の相関分析、第 20 回風工学シンポジウム論文集、pp.229-234, 2008。
- 5) 友清、前田：強風による住家建物被害の拡大に及ぼす影響因子の抽出法に関する試み、強風被害発生要因の分析への構造物特性指標の利用例、日本建築学会構造系論文集第 74 巻第 642 号、pp.1423-1431, 2009。
- 6) 段、渡辺：東日本大震災時の仙台市指定避難所における退所行動と水道復旧に関する基礎的研究、日本建築学会大会（近畿）学術講演梗概集、pp.739-740, 2014.9。
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 24 年 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害（速報）、<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/120506-tsukuba.pdf>, 2012.5.8。
- 8) 奥田、喜々津、西村：強風被災度ランク、第 19 回風工学シンポジウム論文集、pp. 223-228, 2006.12。
- 9) (株)ゼンリン：住宅統計データ 2013 版。
- 10) 国土交通省国土地理院、基盤地図情報、<http://www.gsi.go.jp/kiban/etsuran.html>, (2013-09-30 参照)
- 11) 光田、藤井：台風による風災害の予測、日本風工学会誌、Vol.72, pp.73-91, 1997.7。
- 12) 渡部、松本：台風 9918 号による最大瞬間風速値と支払保険金に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.81-82, 2001.9。
- 13) 岡田、前田、他：ハリケーン「Andrew」の被害調査報告、日本風工学会誌、第 56 号、pp.33-37, 1993.7。

(受理：平成27年11月12日)