

## 2012年つくば市竜巻災害を事例とした 航空写真を用いた建物被害判読精度の検討

Examination of the Accuracy of Building Damage Detection Using Aerial Photographs  
in the 2012 Tsukuba Tornado Disaster

鈴木 賢太郎<sup>1</sup>, 山崎 文雄<sup>1</sup>

Kentaro SUZUKI<sup>1</sup> and Fumio YAMAZAKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

Department of Urban Environment Systems, Graduate School of Engineering, Chiba University

When a disaster occurs, it is important to grasp damage at an early stage for quick disaster response. Aerial remote sensing can observe stricken areas quickly and extract detailed damage distribution by strong wind such as tornados and tropical cyclones. In this study, building damage due to the May 6, 2012 tornado, which gave significant building damage at Hojo district, Tsukuba City, was inspected from aerial photographs. The damage inspection result from the aerial photographs was compared with that by the local government in order to verify the accuracy of our image interpretation considering the structural type.

**Keywords:** the 2012 Tsukuba Tornado, Building Damage, Aerial Photograph, Damage Interpretation, GIS

### 1. はじめに

2012年5月6日の昼過ぎ、茨城県と栃木県において3つの比較的大きな竜巻が相次いで発生した。なかでも、茨城県常総市からつくば市にかけて12時35分頃に発生した竜巻は、つくば市で死者1名、負傷者37名、住家の全壊89棟、大規模半壊38棟、半壊153棟と、大きな被害を引き起こした<sup>1)</sup>。竜巻の強さを表すFujitaスケールは気象庁によりF3と推定された<sup>2)</sup>。F3は日本における観測史上最強のクラスであり、約5秒間の平均風速が70~92m/sに達し、非常に大きな被害を発生させることが知られている<sup>3)</sup>。

災害発生時には、災害対応を迅速に行うために早期に被害把握を行うことが重要である。しかし、被災地が中山間地にある場合や、被害が広範囲にわたる場合、直接現地被害を把握するのに時間を要する。そのような場合、航空写真や衛星画像を利用した被害把握が有効な手段と考えられる<sup>4)~7)</sup>。とくに、航空写真は対象地域を素早く撮影できる機動性・即時性を有し、衛星画像に比べて高解像度の画像を得られ、高い雲があってもその下を飛び観測できるという利点がある。

我が国では大規模な災害が発生した場合、国土地理院や民間航空会社により被災地の航空写真が撮影され、被害状況の把握に利用されてきた。航空写真を用いた建物被害の判読も既往の研究で多く行われており、小川・山崎<sup>8)</sup>は兵庫県南部地震における航空写真を用いて、木造・非木造地域における建物被害を倒壊/変形、瓦落下等、火災の3区分に分類して地上調査結果と比較し、判読精度の検討した。その結果、木造地域では地上調査で倒壊と確認された建物を高い精度で判読することができた一方、非木造地域では木造地域に比べ全体的に被害把握が困難であることを指摘した。Yamazaki *et al.*<sup>9)</sup>は2003年イラ

ン・バム地震において、地上解像度0.6mのQuickBird衛星画像を用いて、EMS-98<sup>10)</sup>の建物被害区分を使用して目視判読を行い、地上調査結果と比較した。その結果、高解像度衛星画像においても、小さな被害レベルの判読は容易でないが、大きな被害レベルの建物は判読が可能であることを示した。松崎ら<sup>11)</sup>は、2007年ペルー・ピスコ地震において、QuickBird衛星画像と解像度0.16mの航空写真を用いてEMS-98に従って建物被害判読を行い、現地調査結果と比較した結果、解像度が高い航空写真の方が中程度から崩壊レベルの被害判読精度が高くなることを示した。このほか画像解析により、空撮ビデオ画像や高解像度衛星画像から、閾値を設定して建物被害を自動抽出する研究も地震災害に対して多数行われている<sup>12)~14)</sup>。

竜巻など風災害においてもリモートセンシングによる被害把握は試みられており、Mehta<sup>15)</sup>らは災害前後のハイパースペクトル衛星画像を利用することにより、建物の被害を自動抽出し、早期の被害把握が可能である可能性を述べている。Sudha<sup>16)</sup>らは、2006年に北海道佐呂間町で死者9名を生じさせたF3の竜巻について、デジタル航空写真の可視バンドを用いてテクスチャ・ウェーブレット解析により瓦礫を自動抽出し、竜巻経路の推定を試みた。小荒井ら<sup>17)</sup>は2012年つくば市竜巻について本研究と同じ航空写真を用いて建物の被害判読を行い、地形と建物被害率の関係を分析した。

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波による被災地が非常に広範囲に及んだため、衛星や空撮によるリモートセンシングが大規模に行われた<sup>18)~21)</sup>。また、罹災証明書の交付を効率的に行う方法が提案され、航空写真を用いた津波による流出建物の罹災判定が行われた<sup>22), 23)</sup>。

今後、ますます航空写真を用いた罹災判定などの実利用が進められると考えられるが、災害の種類や被災パタ



図1 竜巻による被害範囲（気象庁作成図<sup>2)</sup>に一部加筆・修正）とつくば市北条地区の航空写真












	現地写真	航空写真	現地写真	航空写真
A				
B				
C				
D				

図2 つくば市北条地区の竜巻後の現地写真(5月8日)と航空写真(5月7日)の比較および現地調査ルートと現地写真の撮影位置(図1の青枠範囲)

ーンに対して、被害判定手法の有効性をより明確にしておく必要が指摘できる。日本においてもF3やF2の強い竜巻は何度か発生しており、航空写真による屋根の被害や瓦礫の抽出に関する研究は行われているが、多数の建物被害を発生させた事例があまりないことから、航空写真による被害判読で建物全体の被害がどの程度評価できるかの検討は十分にされてはこなかった。しかし、2012年に発生した今回の竜巻は被災地が広範囲に及び、市街地を竜巻が通過したことから、多くの建物被害が発生した。そこで本研究では、2012年5月6日につくば市を襲った竜巻を事例として、航空写真を用いた建物被害の目視判読を行う。この結果を地上からの1次見た目調査結果、および罹災判定調査結果と比較し、竜巻などの強風による航空写真を用いた建物被害把握の有効性を検討する。とくに、被害程度や建物構造の違いによる被害判読における影響について定量的な評価を試みる。

## 2. 航空写真を用いた建物被害判読

### (1) 対象地と使用データ

本研究では、市街地を竜巻が直撃し、全壊住家72棟ととくに大きな被害を被ったつくば市北条地区を対象地に設定した(図1)。国土地理院は竜巻翌日の5月7日に竜巻が通過した茨城県常総市からつくば市にかけて解像度0.20m/pixelと高解像度の垂直直下デジタル航空写真を40枚撮影した<sup>24)</sup>。本研究では、このうち北条地区を撮影した3枚の航空写真を重ね合わせて判読に用いた。また、判読に用いる建物輪郭は、防災科学技術研究所が災害情報の共有による効果的な災害対応を行うために開発したeコミュニティ・プラットフォーム(以下eコミマップ)<sup>25), 26)</sup>で表示されるGIS住宅地図(株式会社ゼンリン, 2011年秋版)から、北条地区の建物1825棟を抽出して用いる。



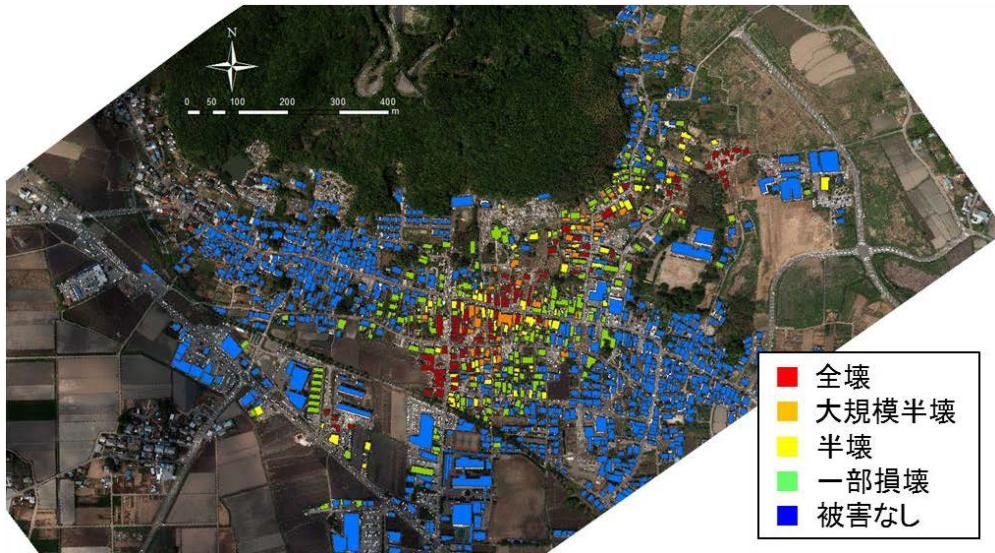



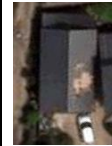


図3 国土地理院による航空写真を使用した本研究での目視被害判読結果

表1 本研究で用いた航空写真による建物被害判読基準

	全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊
R (%)	$R \geq 70$	$70 > R \geq 50$	$50 > R \geq 20$	$20 > R > 0$
例				

## (2) 現地調査写真と航空写真の比較

著者らは、GPSとデジタルカメラを持って5月8日午後につくば市北条地区の現地調査を行った。ここで地上から見た被害の様子と航空写真による被害の様子を図2に比較する。図中には現地調査のルートと地上写真の撮影箇所を示す。

図中のAは竜巻により倒壊した木造建物である。航空写真からは、屋根の位置がずれて、周りに瓦礫が散乱している様子が確認できる。この例のように、倒壊した建物では、ほぼ全てにおいて航空写真から被害の様子を確認することができた。Bは屋根が吹き飛ばされた木造建物であるが、このように屋根が大きな被害を受けた場合、航空写真から容易に被害が把握できる。さらに、Cのようにブルーシートで屋根が覆われている木造建物も現地調査で多く観察したが、航空写真で見ると屋根がどの程度ブルーシートで覆われているかは把握できる一方、被災程度と範囲は推測するしかない。B、Cの例のように、竜巻により典型的な被害を受けた屋根部については、垂直航空写真によって、被災状況の判読が容易である。

一方、Dは竜巻が直撃したRC造の集合住宅であり、建物側面の窓ガラスが割れ、ベランダの手すりやサッシが損壊するなど大きな被害が出た。しかし、垂直航空写真では建物の前面に瓦礫が散乱しているのが確認できるだけであり、側面の被害を把握することはできない。同様にRC構造と思われるEの建物も、建物自体は窓ガラスが割れるなどの被害を受けているが、航空写真では屋根部しか見えないため、被害を把握することは容易でない。D、Eのような例はそのほかの非木造建物でも見られ、屋根に被害が生じにくい非木造建物の場合、垂直航空写真では被害の見逃しや過小評価をしやすいと考えられる。

## (3) 被害判読手法

日本における住家被害の罹災判定は、内閣府が「災害に係る住家の被害認定基準」で定めた「損壊認定基準」と「損害認定基準」の2通りに従って行われる<sup>27)</sup>。地震による建物被害の航空写真判読において、既往の研究ではEMS-98が指標としてよく用いられたが、本研究では竜巻による被害は屋根に表れやすいということを考慮し、以下の屋根の損壊割合Rを用いることとする。

$$R = \frac{\text{屋根の損壊面積}}{\text{屋根全体の面積}} (\%)$$

この屋根損壊率Rが、おおむね建物全体の損壊割合に一致すると考え、被害認定の基準を損壊認定基準に準じて表1のように独自に設定した。なお、本研究で用いる航空写真では、屋根がすでにブルーシートで覆われた建物も存在したが、今回はブルーシートで覆われた面積も損壊面積と見なすこととした。

判読の手順は、GIS上で航空写真と建物輪郭を重ね合わせ、Google Earthの事前写真と比較しながら建物1棟ごとにおおよその屋根の損壊面積を判断し、表の通りに被害を分類した。

## (4) 目視判読結果

つくば市北条地区の建物1825棟に対して、1棟単位で目視判読を行った結果、全壊112棟、大規模半壊54棟、半壊88棟、一部損壊187棟となった。判読したGIS建物輪郭を被害レベルごとに色付けして航空写真に重ね合わせたものを図3に示す。この図から建物被害が全壊や大規模半壊といった大きな被害が、ほぼ一直線上に分布していることが確認できる。したがってこの図から、竜巻の通過した経路もおおよそ推定することもできる。

この目視判読は筆頭筆者が1人で行い、約8時間を要した。また、屋根の損壊箇所を確認する際、表の例のように損壊箇所が分かりやすい建物だけでなく、屋根が損壊したのか竜巻で吹き上がった瓦礫や埃が屋根に載っているだけなのか見分けにくい建物も多く存在した。

## 3. 目視判読と罹災判定、地上調査結果の比較

### (1) 地上調査データと比較対象建物

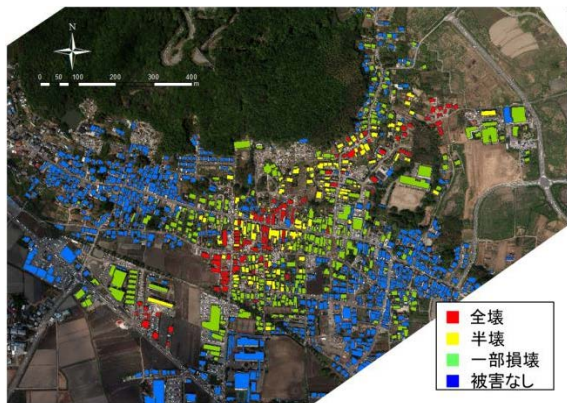


図4 つくば市消防本部による1次見在目判定結果

航空写真による目視判読結果の精度を検証するために、地上調査結果との比較を建物1棟単位で行う。地上調査結果は、つくば市による罹災判定とつくば市消防本部による「1次見在目判定」<sup>26)</sup>を用いる。これらの地上調査データは、防災科学技術研究所が作成したeコミマップに公開されているものを使用した。

1次見在目判定データは、つくば市消防本部が建物を地上巡回によって目視で被害判定したものであり、被害区分は大規模半壊の区分がなく、全壊、半壊、一部損壊、被害なしの4区分である。判定は建物1棟ごとに行われており、公開されているデータも図4のように建物単位であるため、航空写真による判読結果と建物1棟単位で比較することが可能である。

一方、罹災判定データはつくば市が「災害に係る住家の被害認定基準」<sup>27)</sup>にしたがって建物1棟単位で行ったものであり、被害区分は全壊、大規模半壊、半壊、一部損壊、被害なしの5区分である。しかし、eコミマップ上で公開されているデータは個人情報保護のため、建物1棟単位でなく番地単位であり、同番地内の建物の一番大きな被害判定結果を居住建物と非居住建物に区別して表示している。例えば、同じ番地に2つ以上の建物がある場合、一方の建物が全壊で別の建物が無被害や一部損壊ということもある。この場合は、同一番地では大きな被害を優先して表示するため、同一番地内に一つでも全壊建物があれば、全て全壊の表示がされる。このため、eコミマップ上の罹災判定データと航空写真による被害判読結果を建物1棟単位で比較することはできない。

そこで、航空写真の判読結果と比較を行う建物を選別することにした。まず、航空写真から瓦礫の散乱や倒木の様子、建物被害の大きさなどから大まかに竜巻の経路を推定し、対象建物を被害建物が多く存在する竜巻の中心経路から200m以内の建物713棟を抽出した。次に建物単位で罹災判定との比較を行うために、番地単位の表示から建物単位で罹災判定結果を特定できる建物を選別した。選別の手順は、同一番地内に建物が1棟しかない場合は建物と罹災判定の表示が1対1で対応するため、表示されている罹災判定をそのまま入力した。建物が複数存在する場合は、1次見在目判定が最大の建物に罹災判定結果を入力し、それ以外の建物は比較対象から除外した。これにより、対象範囲内の罹災判定結果がある建物は618棟と減少した。最後に、消防本部の1次見在目判定データの中に、航空写真から明らかに被害が見受けられる建物に、判定が行われていないものが6棟存在したので、これらも対象から除外した。以上より、3種類の被害判定結果の比較対象とする建物は612棟となった。

表2 罹災判定と航空写真判読の比較

罹災判定 \ 航空写真	全壊	大規模半壊+半壊	一部損壊	被害なし	合計	ユーザ精度
全壊	68	14	4	0	86	79.1%
大規模半壊+半壊	25	52	17	14	108	48.1%
一部損壊	4	45	58	45	152	38.2%
被害なし	1	11	64	190	266	71.4%
合計	98	122	143	249	612	
プロデューサ精度	69.4%	42.6%	40.6%	76.3%	全体精度	60.1%

表3 罹災判定と1次見在目判定の比較

罹災判定 \ 1次見在目	全壊	大規模半壊+半壊	一部損壊	被害なし	合計	ユーザ精度
全壊	72	19	5	0	96	75.0%
半壊	19	54	18	0	91	59.3%
一部損壊	6	43	93	67	209	44.5%
被害なし	1	6	27	182	216	84.3%
合計	98	122	143	249	612	
プロデューサ精度	73.5%	44.3%	65.0%	73.1%	全体精度	65.5%

表4 1次見在目判定と航空写真判読の比較

1次見在目 \ 航空写真	全壊	半壊	一部損壊	被害なし	合計	ユーザ精度
全壊	69	15	2	0	86	80.2%
大規模半壊+半壊	21	40	27	20	108	37.0%
一部損壊	6	25	83	38	152	54.6%
被害なし	0	11	97	158	266	59.4%
合計	96	91	209	216	612	
プロデューサ精度	71.9%	44.0%	39.7%	73.1%	全体精度	57.2%

市による罹災判定は、通常、建物内部の被災状況も加味して被害割合の認定が下される。これを被害レベルの基準と考え、航空写真の目視判読によって、これとどの程度近い判読ができるかを検証するために用いる。つくば市消防本部による1次見在目判定結果は、竜巻による被害を建物の上面から見る場合(航空写真)と側面から見る場合(地上調査)での、結果の差異を比較することに用いる。また参考のために、地上からの1次見在目判定結果と罹災判定結果も直接に比較を行った。

## (2)被害調査法による被害レベルの比較

判読精度の比較にはエラーマトリクスを用いる。プロデューサ精度は行列の縦方向に算出した精度で、罹災判定の各被害区分に関して、何%を正しく評価することができたかの「抽出率」を示す。ユーザ精度は横方向に算出した精度で、行った判読・判定の何%が基準に対して正しいものだったかの「正答率」を示す。総合精度は対角方向の成分の合計を総数で除したものである。なお、エラーマトリクスを作成する際、消防本部の1次見在目判定には大規模半壊の区分がなく、大規模半壊の母数自体も少ないため、航空写真判読と罹災判定における大規模半壊と半壊は、それぞれ同じ区分に合体した。

まず、選定した612棟の建物に対して、罹災判定を基準とした航空写真判読と1次見在目判定の精度の比較を行った(表2, 3)。全壊区分についてみると、航空写真判読ではユーザ精度が79.1%と高いことがわかる。これより、図2のB, Cの建物のように竜巻により屋根の大半が損壊した場合、そのような建物の約8割が罹災判定



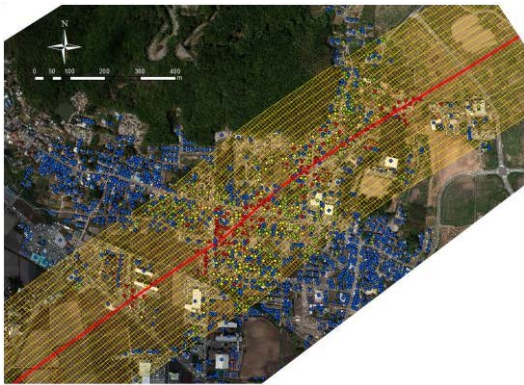


図5 竜巻中心経路から両側 20m ごとに引いた平行線と建物中心点

で全壊と判定されるような大きな被害を受けていたといえる。

一方、航空写真判読のプロデューサ精度は 69.4%とユーザ精度から 10%ほど精度が低くなった。原因として、図 2 の D、E の建物のように側面に大きな被害を受けても屋根に被害が表れにくい非木造建物において、航空写真判読では建物全体としての被害を過小評価した可能性が挙げられる。地上からの 1 次見えた目判定では、表からプロデューサ精度が 75.0%、ユーザ精度が 73.5%とともに高い値で両精度にあまり差がないことから、建物の被害が大きい場合、地上からは建物構造にかかわらず被害を高い精度で判定できることが確認できる。

次に、大規模半壊や半壊など中程度の被害区分においては、航空写真判読のプロデューサ精度が 42.6%、ユーザ精度が 48.1%と低く、既往の研究と同じように被害を主として過小評価する傾向がみられる。一方、地上 1 次見えた目判定では、表からプロデューサ精度が 44.3%と航空写真判読と同様に低い、ユーザ精度は 59.3%と比較的高い。このことから、竜巻による中程度の被害では建物の屋根と側面の両面において被害が発生する一方、損壊箇所がそれほど大きくないことから、解像度に限界がある航空写真判読よりも、現地での地上調査の方が被害をより正確に把握できたと考えられる。

一部損壊の被害区分では、航空写真判読においてプロデューサ精度が 40.6%と低く、とくに 44.8%の建物については被害を低めに判定して（見逃して）いることが分かる。一方、1 次見えた目判定では 65.0%と抽出率が向上し、とくに被害の過小評価が少ないことがわかる。原因としては、一部損壊など軽微な被害は飛来物による側面の被害が多かったことや、屋根に小さな被害があっても航空写真からでは、解像度により判読できなかったことが考えられる。またユーザ精度は、2 つの方法とも高いとはいえず、一部損壊の被害は見る方向や部位によって異なり、とくに建物内部の被災状況を考慮した罹災判定とは差異が出る結果となった。

1 次見えた目判定を基準とした航空写真判読の精度評価を行ったところ（表 4）、全壊のユーザ精度は 80.2%とかなり高いが、プロデューサ精度は 71.9%とやや下がり、航空写真の方が被害をやや小さめに評価している。このことから、建物が航空写真から全壊と判読できるほど屋根に大きな被害を受けた場合、多くの場合、地上からもその状況が観察でき、それに加えて側面に甚大な被害を受ける場合があることが考えられる。大規模半壊+半壊や一部損壊においては、プロデューサ精度、ユーザ精度ともに低く、1 次見えた目判定に比べて航空写真判読の方

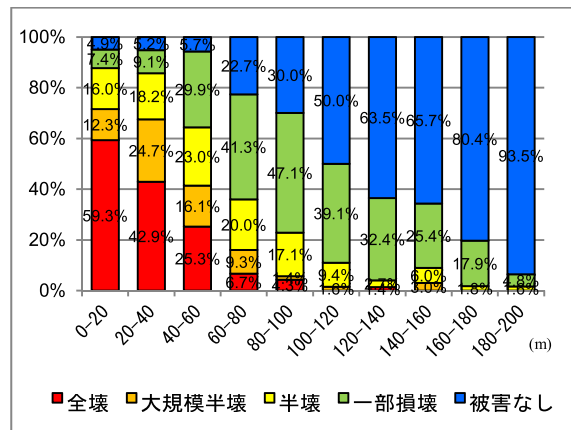


図6 竜巻中心経路から両側 20m 間隔での航空写真判読による建物被害の割合

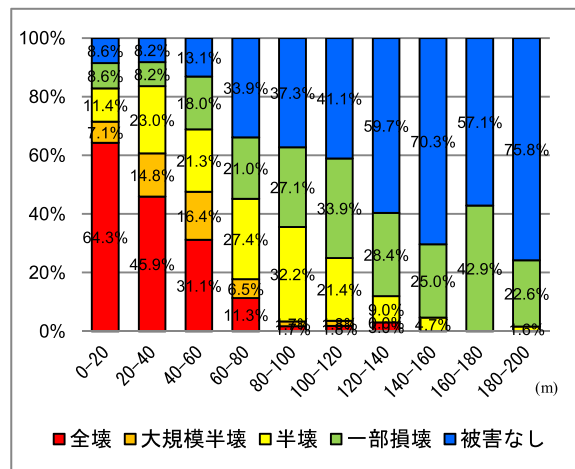


図7 竜巻中心経路から両側 20m 間隔での罹災判定による建物被害の割合

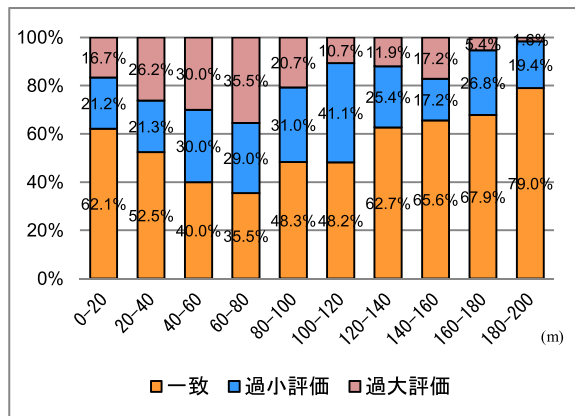


図8 竜巻中心経路から両側 20m 間隔での罹災判定に対する航空写真判読結果の被害レベル

が被害を小さめに評価していることが多い。しかし、1 次見えた目で被害なしと判定された建物でも、航空写真で半壊以上や一部損壊と判読された建物も多数あり、屋根部の被害は、地上からは見えにくいものも多いことを表しているといえる。

### (3) 竜巻の経路と被害分布の関係

竜巻経路からの距離による建物被害の分布特性を航空写真から調べてみる。まず、建物位置に関して、建物輪



図9 木造と非木造への建物構造の分類結果

郭から建物中心点を計算した。次に、目視で決定した竜巻の中心経路から、20m間隔に両側200mの範囲まで平行線を引き(図5)、各距離範囲内に含まれる建物中心点から、航空写真判読と罹災判定による建物被害率を算出した(図6, 7)。また、同時に表2の航空写真判読と罹災判定の比較から、竜巻中心経路からの距離による2つの方法の被害レベルの差異を算出した(図8)。

これらの図より、竜巻中心経路から両側20m以内の区間では、屋根が大きく損壊した全壊と大規模半壊の割合が約70%を占め、航空写真判読と罹災判定の被害区分の一致率も60%以上と高い。これより、竜巻中心経路に近いほど建物に上向きの力が強く働き<sup>28)</sup>、屋根に大きな被害が出やすくなり、航空写真判読の精度も高くなることが考えられる。

一方、竜巻経路から80mを超えると、航空写真判読、罹災判定ともに全壊と大規模半壊の割合が10%以下と大幅に下がる。また、竜巻から100m以上離れると、図より被害の過大評価が減る一方、過小評価の割合はあまり変わらない様子が見られる。すなわち、竜巻から離れるにしたがって、風力による直接的な被害よりも、飛来物による付随的な被害が多くなり、屋根に被害が出にくくなることによって、航空写真判読の精度が下がったと考えられる。

また、今回の竜巻の被害幅は、気象庁の現地調査により500mと発表されたが<sup>2)</sup>、航空写真による目視判読では、最も離れた場所で竜巻から240mの場所に一部損壊の建物を確認することができた。したがって幅にすると480mとなり、気象庁の観測結果とほぼ一致する数字となった。

#### 4. 建物構造別の被害比較

前節の結果から、建物構造による被害部位や形態の違いが航空写真判読の精度に影響を及ぼしていると考えられた。そこで、木造と非木造に建物構造を分類して、3つの手法による被害判定・判読結果を集計し、その結果を再度、比較してみることにした。構造区分は罹災判定や1次見在目調査結果にも含まれていなかったため、航空写真、著者らによる現地調査写真、e コミマップ上にある現地写真に基づいて、対象とする612棟の建物を屋根に被害を受けやすい木造戸建て住宅527棟と集合住宅や倉庫、学校などの非木造建物85棟に分類した(図9)。

##### (1) 木造建物

まず、木造建物527棟について、罹災判定を基準とし

表5 木造建物における罹災判定と航空写真判読の比較

罹災判定 \ 航空写真	全壊	大規模半壊+半壊	一部損壊	被害なし	合計	ユーザ精度
全壊	67	13	4	0	84	79.8%
大規模半壊+半壊	21	50	15	11	97	51.5%
一部損壊	4	40	51	42	137	37.2%
被害なし	0	8	52	149	209	71.3%
合計	92	111	122	202	527	
プロデューサ精度	72.8%	45.0%	41.8%	73.8%	全体精度	60.2%

表6 木造建物における罹災判定と1次見在目判定の比較

罹災判定 \ 1次見在目	全壊	大規模半壊+半壊	一部損壊	被害なし	合計	ユーザ精度
全壊	69	18	2	0	89	77.5%
半壊	17	48	16	0	81	59.3%
一部損壊	5	40	78	42	165	47.3%
被害なし	1	5	26	160	192	83.3%
合計	92	111	122	202	527	
プロデューサ精度	75.0%	43.2%	63.9%	79.2%	全体精度	67.4%

表7 木造建物における1次見在目判定と航空写真判読の比較

1次見在目 \ 航空写真	全壊	半壊	一部損壊	被害なし	合計	ユーザ精度
全壊	68	14	2	0	84	81.0%
大規模半壊+半壊	18	38	21	20	97	39.2%
一部損壊	3	22	75	37	137	54.7%
被害なし	0	7	67	135	209	64.6%
合計	89	81	165	192	527	
プロデューサ精度	76.4%	46.9%	45.5%	70.3%	全体精度	60.0%

て、航空写真判読と「1次見在目判定」による被害の比較を行った(表5, 6)。屋根に被害が表れにくい非木造建物を除いたため、若干であるが航空写真判読のプロデューサ精度、ユーザ精度ともに向上した。また、全壊のユーザ精度は、航空写真判読が79.8%と地上1次見在目判定の77.5%よりも高いことから、木造建物の全壊レベルの被害においては、地上外観調査より航空写真判読の正答率が高いことがわかる。また、プロデューサ精度は全壊、大規模半壊+半壊などの規模の大きな被害では航空写真判読と地上1次見目がほぼ同じ精度であるが、これは木造建物の風害の特徴といえる。一方、一部損壊においては、地上1次見目の方が、ユーザ精度、プロデューサ精度ともに高く、風害においても垂直航空写真の小さい被害レベルの抽出における限界を表している。しかし、もし無人機(UAV)などを用いてより低空から観測すれば、航空写真によって小さい被害レベルを抽出できる可能性はある。

1次見在目判定を基準とした航空写真判読の精度比較を表7に示すが、ここでも同様に、木造建物に限定したことにより、全体的に2つの判定法の一致度が僅かではあるが向上した。

木造建物においては全壊被害の判読精度が高く、小さな被害では判読精度が低くなる傾向は、地震災害における既往の研究<sup>8)</sup>でも指摘されている。本研究で扱った風災害の場合、屋根に被害が出やすいため、全壊被害の判読精度がとくに高くなることが確認できた。



表 8 非木造建物における罹災判定と航空写真判読の比較

罹災判定 航空写真	全壊	大規模半壊 +半壊	一部 損壊	被害 なし	合計	ユーザ 精度
全壊	1	1	0	0	2	50.0%
大規模半壊 +半壊	4	2	2	3	11	18.2%
一部損壊	0	5	7	3	15	46.7%
被害なし	1	3	12	41	57	71.9%
合計	6	11	21	47	85	
プロデューサ 精度	16.7%	18.2%	33.3%	87.2%	全体 精度	60.0%



図 10 航空写真判読で被害を過小評価した非木造建物

表 9 非木造建物における罹災判定と  
1次見在目判定の比較

罹災判定 1次見在目	全壊	大規模半壊 +半壊	一部 損壊	被害 なし	合計	ユーザ 精度
全壊	3	1	3	0	7	42.9%
半壊	2	6	2	0	10	60.0%
一部損壊	1	3	15	25	44	34.1%
被害なし	0	1	1	22	24	91.7%
合計	6	11	21	47	85	
プロデューサ 精度	50.0%	54.5%	71.4%	46.8%	全体 精度	54.1%

表 10 非木造建物における1次見在目判定と  
航空写真判読の比較

1次見在目 航空写真	全壊	半壊	一部 損壊	被害 なし	合計	ユーザ 精度
全壊	1	1	0	0	2	50.0%
大規模半壊 +半壊	3	2	6	0	11	18.2%
一部損壊	3	3	8	1	15	53.3%
被害なし	0	4	30	23	57	40.4%
合計	7	10	44	24	85	
プロデューサ 精度	14.3%	20.0%	18.2%	95.8%	全体 精度	40.0%

## (2) 非木造建物

次に非木造建物 85 棟に対しても、罹災判定を基準とした航空写真判読と 1 次見在目判定結果の比較を行った。

(表 8, 9) . 母数が少ないので一概には言えないが、表 8 から航空写真判読ではどの被害レベルに対してもプロデューサ精度が低く、とくに全壊と大規模半壊+半壊についてはともに 20%を下回り、木造建物に比べると極端に低くなっている。また罹災判定に対して、全壊において 83.3%、大規模半壊+半壊では 72.8%の被害を小さめに評価していることがわかる。図 10 の建物は罹災判定が全壊ながら航空写真判読で半壊と、被害を過小評価した例である。この建物は垂直航空写真からは被害は確認できないが、地上の視点では被害を観察することができ、1 次見在目では全壊と判定されている。

表 9 から 1 次見在目判読は全壊と大規模半壊+半壊に対してはプロデューサ精度が 50%台で小さめの評価が多いが、航空写真判読と比べると高い精度といえる。一部損壊に関しては 71.4%と高い抽出率であるが、被害なしの建物を一部損壊と判定したものが多く正答率は 34.1%と低い。

表 10 に、1 次見在目判定を基準とした航空写真判読の精度を比較するが、どの被害レベルに対してもプロデューサ精度が低く、1 次見在目判読で半壊と判定した建物の 40%の被害を確認できていない。この結果からも、非木造建物は風害においても一般的に屋根に被害が表れづら

く、航空写真による被害の把握が困難であるといえる。

以上の結果より、航空写真による竜巻による被害把握は、屋根に被害が現れやすい木造家屋の大被害の抽出に有効であり、早期の被害範囲の特定に有効といえる。

## 5. まとめ

本研究では、2012 年 5 月 6 日に茨城県常総市からつくば市を襲った竜巻に対して、被害の集中したつくば市北条地区を対象に、航空写真を利用した建物被害把握の有効性を検討した。竜巻の翌日に国土地理院が撮影したデジタル航空写真を用いて、北条地区の建物 1825 棟に対して被害の目視判読を行った。このうち、とくに被害が集中した竜巻中心経路から両側 200m 以内の建物 612 棟に対して、つくば市による罹災判定、つくば市消防本部による地上からの「1 次見在目判定」の 3 つの方法による結果を相互に比較・検討した。また検証用に、各種の現地写真を用いて、建物構造の特定と被害状況の詳細把握を行った。

航空写真判読では、建物の屋根部分における被害面積の割合によって、全壊、大規模半壊、半壊、一部損壊、被害なしの 5 レベルを目視で判定した。罹災判定の被害区分も同じ 5 段階であるが、1 次見在目判定に大規模半壊が無かったため、大規模半壊+半壊を 1 つにまとめて、相互比較を行った。全建物に対する比較では、航空写真判読は全壊に関しては、罹災判定結果と比較して 80%程度のユーザ精度（正答率）と 70%程度のプロデューサ精度（抽出率）を示した。しかし、被害レベルが小さくなるにつれて、建物上面の被害が少なくなり、画像解像度の制約もあって両精度とも低下していく。1 次見在目判定結果も建物内部の被害状況を考慮していないため、とくに小さいレベルの被害を罹災判定に比べると少なめに評価していたが、主として建物側面の被害を観察するため、飛来物による被害を確認できている。

建物構造を木造と非木造に区分して、被害レベルの比較を行った結果、木造に関しては航空写真判読の精度は全壊に関しては、多少向上した。これは木造家屋の竜巻による全壊では、屋根が飛ばされるなど、垂直航空写真で被害を把握しやすいことによると考えられる。一方、非木造建物では建物上面に被害を受けにくいいため、航空写真判読の罹災判定に対する精度はどの被害レベルに対しても低く、1 次見在目判読の罹災判定に対する精度と比べても低いことから、航空写真による建物の正確な被害判読は困難であるといえる。

本研究の結論として、航空写真を用いた竜巻災害における建物被害判読は、屋根に被害が出やすい木造建物の大被害に対しては有効であると考えられる。一方、屋根

に被害が出にくい非木造建物に対しては、垂直航空写真では判読が困難であるため、斜め航空写真など別の方法で被害の推定を行うか、地上調査で被害を確認する必要がある。

## 謝辞

本研究で使用した航空写真は国土地理院から提供させていただきました。また、地上調査結果は防災科学技術研究所が作成した e コミマップで公開されているものを使用させていただきました。ここに感謝を記します。

## 参考文献

- 1) つくば市災害対策本部：5月6日に発生した竜巻による被害と復旧状況について，2013。  
[https://www.city.tsukuba.ibaraki.jp/dbps\\_data/\\_material/\\_localhost/kou002/tatsumaki/No231.pdf](https://www.city.tsukuba.ibaraki.jp/dbps_data/_material/_localhost/kou002/tatsumaki/No231.pdf)
- 2) 気象庁：平成24年5月6日に発生した竜巻について（報告），2012.6。  
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/tatsumaki-portal/tyousa-houkoku.pdf>
- 3) 日本気象学会編，気象科学事典，1998.
- 4) Ellen M. Rathje, Beverley J. Adams: The Role of Remote Sensing in Earthquake Science and Engineering: Opportunities and Challenges, *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 2, pp. 471-492, 2008.
- 5) Eguchi, R.T., Huyck, C., Ghosh, S., Adams, B.J.: The Application of Remote Sensing Technologies for Disaster Management, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.
- 6) Yamazaki, F. and Matsuoka, M.: Remote Sensing Technologies in Post-Disaster Damage Assessment, *Journal of Earthquakes and Tsunamis*, World Scientific Publishing Co., Vol. 1, No. 3, 193-210, 2007.
- 7) 山崎文雄：防災におけるリモートセンシング技術利用の最新動向，土木学会第10回地震災害マネジメントセミナー：地震災害対応におけるリモートセンシング・テクノロジーの活用，ISBN978-4-8106-0686-7, 1-12, 2009.
- 8) 小川直樹，山崎文雄：航空写真を用いた兵庫県南部地震における建物被害の目視判読，地域安全学会論文集，No. 2, 119-128, 2000.
- 9) Yamazaki, F., Yano, M., Matsuoka: Visual Damage Interpretation of Buildings in Bam City Using QuickBird Images Following the 2003 Bam, Iran, Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.21, No. S1, pp. S329-S336, 2005.
- 10) Grünthal, G.: European Macroseismic Scale 1998, European Seismological Commission, 1998.
- 11) 松崎志津子，山崎文雄，ミゲル・エストラーダ，カルロス・サバラ：QuickBird 衛星画像を用いた2007年ペルー・ピスコ地震の建物被害把握，地域安全学会論文集，No. 13, pp.407-413, 2010.
- 12) 青木久，松岡昌志，山崎文雄：空撮画像を用いた地震による被害建物の抽出，写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol. 40, No. 4, 27-36, 2001.
- 13) 鈴木大輔，丸山喜久，山崎文雄：デジタル航空画像を用いた新潟県中越沖地震の建物被害抽出，日本地震工学会論文集，Vol. 10, No. 3, pp. 33-45, 2010.
- 14) 三浦弘之，翠川三郎，Soh Hui Chen: 2010年ハイチ地震における被害地域検出のための高分解能衛星画像のテクスチャ解析，日本地震工学会論文集，Vol. 12, No. 6(特集号), 2-20, 2012.
- 15) Mehta, K. C., Womble, J. A., Liang, D.: Use of Satellite Images to Document Windstorm Damage: A Future Trend?, *Journal of Wind & Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-7, 2008.
- 16) Sudhan, R., Tamura, Y., Matsui M.: Use of post-storm images for automated tornado-borne debris path identification using texture-wavelet analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 107-108, pp. 202-213, 2012.
- 17) 小荒井衛，岡谷隆貴：つくば市における竜巻災害の写真判読と地形との関係，写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol.51, No. 3, 134-135, 2012.
- 18) 政春尋志，永山透：東日本大震災への国土地理院の対応，写真測量とリモートセンシング，Vol. 50, No. 4, 179-185, 2011.
- 19) 国土地理院 Web サイト：平成23年（2011年）東日本大震災に関する情報提供，2011。  
[http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23\\_tohoku.html](http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html)
- 20) 高分解能衛星リモートセンシング研究会：東北地方太平洋沖地震・津波災害の高分解能衛星リモートセンシング，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 31, No. 3, 344-367, 2011.
- 21) 高橋陪夫，島田政信，宮城洋介，大木真人，河野宣幸，白石知弘，本岡毅：東日本大震災における宇宙航空研究開発機構の取組み，写真測量とリモートセンシング，Vol. 50, No. 4, 198-205, 2011.
- 22) 内閣府防災担当：平成23年東北地方太平洋沖地震に係る被害認定迅速化のための調査方法について，  
<http://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/h23jishin.pdf>
- 23) 田中聡，重川希志依：東日本大震災における津波被害の建物被害認定に関する考察，地域安全学会論文集，No.18, 269-275, 2012.
- 24) 国土地理院 Web サイト：平成24年（2012年）茨城県・栃木県に発生した突風等に関する情報，2012。  
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h24-toppu-index.html>
- 25) 李泰榮，田口仁，須永洋平，長坂俊成，坪川博彰：つくば市竜巻災害対応における地理空間情報の活用と効果，地理情報システム学会講演論文集，Vol.21, 4p., CD-ROM, 2012.
- 26) 防災科学技術研究所：e コミュニティ・プラットフォーム公式サイト，<http://ecom-plat.jp>
- 27) 内閣府防災担当：災害に係る住家の被害認定基準運用指針（平成21年6月改定），  
<http://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/shishinall.pdf>
- 28) 国土政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：平成24年（2012年）5月6日茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告，国土政策総合研究所資料 No. 703，建築研究所資料 No. 703, 2013.

(原稿受付 2013.5.22)  
(登載決定 2013.9.7)