

ISSN 1346-7328
国総研資料 第 703 号
ISSN 0286-4630
建築研究資料 第 141 号
平成 25 年 1 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of

National Institute for Land and Infrastructure Management

No.703

January 2013

建築研究資料

Building Research Data

No.141

January 2013

平成 24 年（2012 年）5 月 6 日に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

Report on Field Surveys and Subsequent Investigations of Building Damage
Following the May 6, 2012 Tornado in Tsukuba City, Ibaraki Prefecture, Japan

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

独立行政法人 建築研究所

Building Research Institute
Incorporated Administrative Institution, Japan

Technical Note of NILIM

No.703 Jan. 2013

Building Research Data

No.141 Jan. 2013

平成24年（2012年）5月6日に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

Report on Field Surveys and Subsequent Investigations of Building Damage Following the
May 6, 2012 Tornado in Tsukuba City, Ibaraki Prefecture, Japan

概 要

2012年5月6日12時35分頃に茨城県常総市で発生した竜巻（フジタスケールF3）によって、茨城県常総市とつくば市で建築物等の被害が生じた。国土交通省国土技術政策総合研究所と独立行政法人建築研究所は、つくば市の建築物等の被害状況を把握する目的で、竜巻被害発生直後から現地調査を行ってきた。この報告は被害調査の最終報告として、現地調査等の内容を纏めたもので、発生時の気象状況、被害統計、被災建築物の分布、被害の分類、被害発生メカニズムに関する議論、建築物の被害からの推定された風速、日本の過去の竜巻被害事例との比較等で構成されている。

キーワード：竜巻、つくば、建築物被害、F3

Summary

The damage to buildings occurred in Joso city and Tsukuba city, Ibaraki prefecture, induced by a F3 tornado generated in Joso city at about 12:35 on May 6, 2012. NILIM and BRI carried out field surveys just after the outbreak in order to grasp the degree of damage to the buildings in Tsukuba city. This report compiled the contents of the field surveys as a final report and contains the meteorological condition at the outbreak, damage statistics, distribution of damaged buildings, classification of damaged buildings, discussion on mechanism for the occurrence of damage, estimated wind velocity from damage of buildings and comparison with the past tornado damage examples in Japan.

Key Words: Tornado, Tsukuba, Building Damage, F3

は し が き

平成 24 年 5 月 6 日 12 時 35 分頃に茨城県常総市で発生した竜巻により、茨城県つくば市の北条地区、大砂地区及び筑波北部工業団地を中心に建築物等の被害が発生しました。気象庁の発表によると、この突風をもたらした現象は竜巻であると認められ、被害の範囲は茨城県常総市からつくば市にかけて長さ約 17km、最大幅約 500m で、被害の状況から藤田スケール F3 と推定されています。また、これ以外に茨城県筑西市（同日 12:30 頃）と栃木県真岡市（同日 12:40 頃）でもほぼ同時に竜巻が発生し、それぞれ藤田スケール F1・長さ約 21km・最大幅約 600m、藤田スケール F1~2・長さ約 32km・最大幅約 650m の被害が発生しています。

つくば市の発表によると、つくば市では人的被害（死者 1 名・負傷者 37 名）、住家被害（全壊 89 棟・大規模半壊 35 棟・半壊 143 棟・一部損壊 384 棟）、公共施設（北条小学校・筑波幼稚園・北条保育園・市営住宅・地区集会施設等）被害、農業被害（施設（倉庫・パイプハウス等）被害、農作物被害、機器類被害、森林立木被害、農地への飛散物の散乱、降雹被害も含む）、電柱の折損等による停電（発災直後約 21,000 世帯）が発生しました。これらの被害のほか、北部工業団地では研究施設や工場等が被災しました。

国土交通省国土技術政策総合研究所と独立行政法人建築研究所では、竜巻の発生当日から、つくば市内での建築物の被害状況を把握するため現地調査を実施しました。本報告は現地調査の内容を最終報告としてまとめたものであり、被害発生時の気象状況、被害統計、建築物等の被害分布、建築物等の被害形態、被害発生メカニズム、被害発生時の風速推定、過去の被害事例との比較等で構成されています。

最後に、今回の竜巻で亡くなられた方及びそのご遺族に対し哀悼の意を表するとともに、災害で被害に遭われた皆様にお見舞い申し上げます。また、現地調査にあたって、調査にご協力いただいた方々、資料等をご提供いただいた方々に厚く御礼申し上げます。

平成 25 年 1 月

国土交通省国土技術政策総合研究所
副所長 金井 昭典
独立行政法人建築研究所
理事長 坂本 雄三

平成 24 年（2012 年）5 月 6 日に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

目 次

はしがき

第 1 章 調査の概要	1
第 2 章 被害の概要	
2.1 気象状況	3
2.2 被害統計	4
2.2.1 人的被害	4
2.2.2 建築物の被害	4
2.2.3 ライフラインの被害	6
2.3 被害分布	7
2.3.1 強風被災度ランク	7
2.3.2 調査の方法	8
2.3.3 被害分布の分析	11
参考文献	16
第 3 章 建築物等の被害形態	
3.1 木造建築物の被害	18
3.2 鉄骨造建築物の被害	26
3.3 鉄筋コンクリート造建築物の被害	29
3.4 外装材等の被害	31
3.4.1 屋根ふき材	31
3.4.2 外壁材	33
3.4.3 開口部等	34
3.4.4 内装材	41
3.4.5 屋外設備	42
3.5 その他の被害	43
3.5.1 工作物等	43
3.5.2 乗用車	44
3.5.3 樹木	45
第 4 章 木造建築物の被害原因の検討	
4.1 建築物に作用する外力	48

4.2 木造建築物の被害原因に関する考察	50
4.3 木造住宅の風力による崩壊メカニズムに関する考察	53
参考文献	55

第5章 建築物等の被害形態に基づく風速の推定

5.1 検討の主旨	56
5.2 風力評価	56
5.3 転倒した木造建築物	57
5.4 上部構造が飛散した木造建築物	61
5.5 崩壊した鉄骨造建築物	66
5.6 傾斜した鉄骨造建築物	68
5.7 面外方向に転倒した石塀	69
5.8 風速の推定結果に関する考察	70
参考文献	72

第6章 過去の被害事例との比較

6.1 被害統計と被害分布	73
6.2 被害形態	77
参考文献	79

第7章 まとめ

参考資料	81
------	----

謝辞

執筆分担

第1章 調査の概要

奥田 泰雄 国土交通省国土技術政策総合研究所 危機管理技術研究センター 建築災害対策研究官

第2章 被害の概要

石井 儀光 独立行政法人建築研究所 住宅・都市研究グループ 主任研究員

奥田 泰雄 (前掲)

第3章 建築物等の被害形態

荒木 康弘 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ 研究員

奥田 泰雄 (前掲)

壁谷澤寿一 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部基準認証システム研究室 研究官

喜々津仁密 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ 主任研究員

第4章 木造建築物の被害原因の検討

奥田 泰雄 (前掲)

植本 敬大 国土交通省国土技術政策総合研究所総合技術政策研究センター評価システム研究室長

中川 貴文 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ 主任研究員

第5章 建築物等の被害形態に基づく風速の推定

奥田 泰雄 (前掲)

壁谷澤寿一 (前掲)

喜々津仁密 (前掲)

中川 貴文 (前掲)

第6章 過去の被害事例との比較

奥田 泰雄 (前掲)

喜々津仁密 (前掲)

第7章 まとめ

奥田 泰雄 (前掲)

喜々津仁密 (前掲)

第1章 調査の概要

国土交通省国土技術政策総合研究所及び独立行政法人建築研究所では、平成24年5月6日の竜巻被害発生日より、茨城県つくば市内における建築物等の被害状況を把握する目的で現地調査を開始した。5月7日からは、つくば市北条地区その他の地区にて住家等の悉皆調査を実施し、強風被災度ランクによって建築物ごとの被害の程度を評価した。また、被災建築物等の構造躯体等の寸法を計測し、建築物等の耐力から被害発生風速を推定した。さらに、木造建築物の被害発生原因について検討し、東日本大震災で収集した木造住宅の図面等をもとに風力による崩壊メカニズムを検討した。調査担当者と現地調査の行程は以下の(1)と(2)に示すとおりである。

なお、当該調査結果の一部は速報等として、既に両研究所のホームページにて公表している。調査結果の公表状況を(3)に掲げる。

(1) 調査担当者

国土交通省国土技術政策総合研究所

危機管理技術研究センター	建築災害対策研究官	奥田 泰雄
建築研究部	基準認証システム研究室長	深井 敦夫
建築研究部	基準認証システム研究室 研究官	壁谷澤寿一
総合技術政策研究センター	評価システム研究室長	槌本 敬大

独立行政法人建築研究所

構造研究グループ	主任研究員	喜々津仁密
構造研究グループ	研究員	荒木 康弘
材料研究グループ	主任研究員	中川 貴文
建築生産研究グループ	交流研究員	永井 渉
住宅・都市研究グループ	主任研究員	石井 儀光

(2) 現地調査行程

平成24年5月6日 つくば市北条地区

平成24年5月7日 つくば市北条地区・吉沼地区・北部工業団地

平成24年5月8日 つくば市北条地区・山木地区・水守地区ほか

(上記以外にも個別に被害状況を確認する目的等で、現地調査を実施した。)

(3) 調査結果の公表状況

1) 速報

- ・国土交通省国土技術政策総合研究所

<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h24tsukuba/h24tsukuba.pdf>

- ・独立行政法人建築研究所

<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/120506-tsukuba.pdf>

2) 速報英語版

- ・国土交通省国土技術政策総合研究所

<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h24tsukuba/h24tsukuba-e.pdf>

- ・独立行政法人建築研究所

http://www.kenken.go.jp/english/contents/activities/other/pdf/120522tornado_quick_report_eng_final.pdf

3) 転倒した木造建築物に作用した風速の推定について

- ・国土交通省国土技術政策総合研究所

<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h24tsukuba/wind.pdf>

- ・独立行政法人建築研究所

http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/201205-fuusoku_suitei.pdf

第2章 被害の概要

2.1 気象状況

気象庁の発表^{2.1)}によると、5月6日は日本の上空5500メートルにおいて、氷点下21度以下の強い寒気が流れ込んだ。一方、12時には日本海に低気圧があって、東日本から東北地方の太平洋側を中心に、この低気圧に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ(図2.1-1)。さらに、日射の影響で地上の気温が上昇したことから、関東甲信地方は大気の状態が非常に不安定となり、落雷や突風、降ひょうを伴う発達した積乱雲が発生した(写真2.1-1)。突風が発生した時間に茨城県常総市からつくば市の被害地付近は、活発な積乱雲が通過中であった。気象研究所はドップラーレーダー及び気象環境場の解析・高解像度モデルでの数値シミュレーション結果から、この積乱雲が強い竜巻をもたらすスーパーセルであったと推定している^{2.2)}。

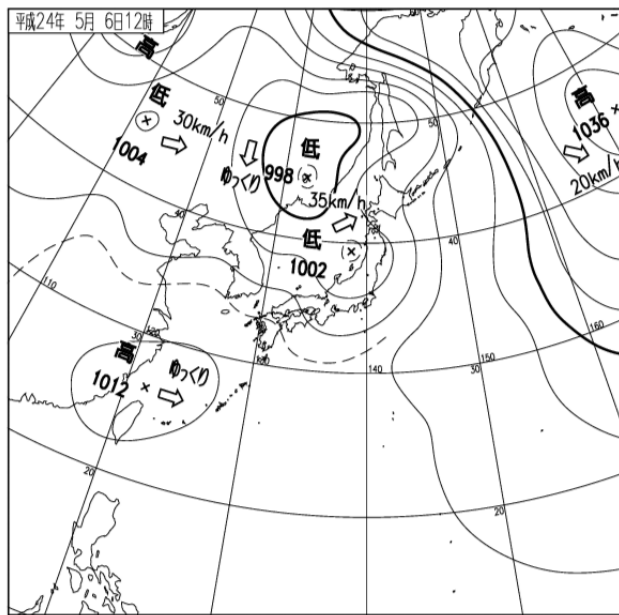


図2.1-1 平成24年5月6日12時の地上天気図^{2.1)}

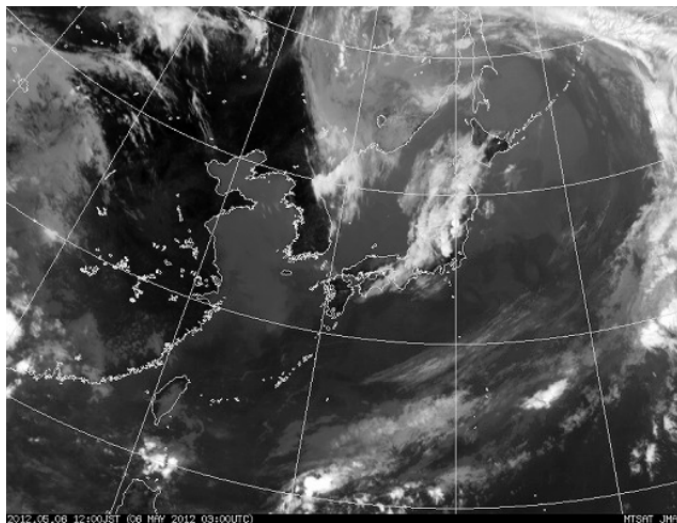


写真2.1-1 平成24年5月6日12時の気象衛星「ひまわり7号」赤外面像^{2.1)}

2.2 被害統計

2.2.1 人的被害

5月6日の竜巻によるつくば市内の人的被害(死者、行方不明者、負傷者)については、表2.2-1の通りである。

表2.2-1 つくば市内の人的被害(5月9日時点)

単位：人

死者	行方不明者	負傷者		
		重症	中等症	軽症
1	0	0	5	32

注1：つくば市公表資料「茨城県つくば市における竜巻による被害状況等について」(6月25日付け)^{2,3)}から作成した。

注2：重症は3週間以上の入院，中等症は3週間未満の入院を示している。

注3：救急搬送患者は19名である。

注4：中等症の入院患者は5月23日時点で全員退院した。

2.2.2 建築物の被害

(1) 建築物危険度判定

つくば市では、被災建築物が道路及び隣地に倒壊することによる2次災害を防ぐため、「建築物危険度判定」を5月9日から実施した。調査の対象は、「被災地区において、目視によって傾きがあると見えたもの及び調査依頼があったもの」であり、74棟の調査が行われた。集計結果については、表2.2-2の通りである。

今回実施された「建築物危険度判定」はつくば市独自の調査であり、危険度の判定基準は以下の通りである。

- ・危険：傾きが1/20超であり、道路及び隣地に倒壊する恐れがある
- ・要注意：傾きが1/20以内，又は傾きが1/20超だが、道路及び隣地に倒壊する恐れがない
- ・問題なし：傾きがほぼない

表2.2-2 つくば市内の建築物危険度判定結果(6月22日現在)

単位：棟

地 区	問題なし	要注意	危険	調査件数計
北条地区	29	17	13	59
泉・山木地区	4	1	0	5
西高野・大砂・吉沼地区	6	3	1	10
合 計	39	21	14	74

注1：つくば市公表資料「茨城県つくば市における竜巻による被害状況等について」(6月25日付け)^{2,3)}から作成した。

注2：危険と判定されたものは、5月19日までに解体撤去済みである。

(2) 住家等の被害状況

つくば市が実施した、り災証明のための建築物被害認定調査による住家等の被害については、表2.2-3の通り

である。つくば市内で 1,093 棟の現地調査が行われた。納屋等の住家以外の建築物についても調査が行われており、「居宅以外」の区分に集計されている。各地域での無被害の建築物棟数が不明なので比率で比べることは出来ないが、建築物被害の絶対数は北条地区が最も多い。

表 2.2-3 つくば市内の住家等被害（6月22日現在）

単位：棟

地域		区分	全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊	小計	合計	
筑波地域		居宅	79	31	129	301	540	846	
		居宅以外	75	5	32	194	306		
内訳	北条	居宅	72	27	127	230	456	697	
		居宅以外	63	5	30	143	241		
	平沢	居宅	0	1	0	16	17	28	
		居宅以外	2	0	0	9	11		
	小泉	居宅	0	0	1	6	7	17	
		居宅以外	1	0	1	8	10		
	泉	居宅	0	0	0	19	19	33	
		居宅以外	2	0	0	12	14		
	山木	居宅	7	3	1	23	34	54	
		居宅以外	6	0	1	13	20		
	水守	居宅	0	0	0	7	7	13	
		居宅以外	1	0	0	5	6		
	大穂地域		居宅	10	4	14	83	111	247
			居宅以外	46	7	22	61	136	
内訳	大砂	居宅	9	3	13	57	82	175	
		居宅以外	31	7	15	40	93		
	西高野	居宅	1	1	1	25	28	65	
		居宅以外	12	0	7	18	37		
	吉沼	居宅	0	0	0	1	1	7	
		居宅以外	3	0	0	3	6		
合計		居宅	89	35	143	384	651	1093	
		居宅以外	121	12	54	255	442		

注1：つくば市公表資料「茨城県つくば市における竜巻による被害状況等について」（6月25日付け）^{2,3)}から作成した。

注2：被害区分のうち、「大規模半壊」とは「災害の被害認定基準について」（平成13年6月28日府政防第518号内閣府政策統括官（防災担当）通知）に定める「住家半壊」の基準のうち、「損壊部分が延床面積の50%以上70%未満のもの」または、「損害割合（経済的被害）が20%以上50%未満のもの」とする（平成22年9月3日府政防第608号内閣府政策統括官（防災担当）通知）。

2.2.3 ライフラインの被害

つくば市内の電力の供給停止戸数の推移については、表 2.2-4 の通りである。5 月 6 日の 21,012 世帯は発災直後の数値である。なお、5 月 9 日に停電世帯数が 0 となっているが、東京電力によると建築物の倒壊等により受電することが出来ない世帯を除いた数値である。

表 2.2-4 つくば市内の停電戸数の推移

日付	停電世帯数
5 月 6 日	21,012
5 月 7 日	約 2,800
5 月 8 日	約 200
5 月 9 日	0

注 1：つくば市公表資料「茨城県つくば市における竜巻による被害状況等について」（6 月 25 日付け）^{2,3)}から作成した。

上水道については、停電により山口地区（北条地区の東側に位置する地区）の一部で断水したが、5 月 6 日 21 時 50 分には全面復旧した。簡易水道については、停電により当初約 800 戸が断水し、5 月 8 日に全面復旧した。なお、簡易水道とは、人の飲用に適する水として供給する水道のうち、給水人口が 100 人を越え 5,000 人以下であるものをいう。つくば市では、つくば市が運営する水道以外に、簡易水道事業組合が運営する簡易水道が複数ある。

公共下水道については、停電により中継ポンプ場 7 箇所、マンホールポンプ 29 箇所が停止し、5 月 7 日に全面復旧した。

2.3 被害分布

2.3.1 強風被災度ランク

本調査では、建築物等の被害を表 2.3-1 に示す強風被災度ランク^{2,4)}によって分類した。強風被災度ランクは建築物等の被害を外観から判定する指標で、5つの被災度ランクに分けられる。

表 2.3-1 強風被災度ランク

ランク 1 (極く軽微な被害)	
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。	
ランク 2 (軽微な被害)	
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。	
ランク 3 (顕著な被害)	
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。	
ランク 4 (甚大な被害)	
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。	
ランク 5 (壊滅的な被害)	
家屋が倒壊する。	

2.3.2 調査の方法

国土交通省国土技術政策総合研究所と独立行政法人建築研究所は被災直後から現地調査を実施し、建築物等の被害状況を調査^{2.5)}した。発災翌日の平成 24 年 5 月 7 日からは、つくば市北条地区を中心に建築物一棟ごとに調査を実施し、建築物の被害を前述の強風被災度ランクを用いて評価した。また、5 月 7 日に国土地理院が撮影した高解像度の航空写真の判読により、地上からの調査では分からなかった屋根の被害等についても被害の評価を行った。現地調査及び航空写真判読により被害の評価を行った棟数は、被災度ランク 1 以上の建築物が 548 棟で、無被害の建築物が 149 棟、合計 697 棟であった。表 2.3-2 に、強風被災度ランク別の調査棟数を示す。

表 2.3-2 強風被災度ランク別調査棟数

被災度	棟数
5	51
4	78
3	149
2	181
1	89
合計	548

図 2.3-1 はつくば市内の調査区域全域における被害分布図で、5 段階の強風被災度ランクで建築物の被害を色分けして示している。建築物の代表点の位置情報（緯度経度データ）は、国土地理院の基盤地図情報 2500（2011 年 3 月時点）における建築物の形状データ（ポリゴンデータ）の重心点を用いた。また、形状データが存在しない建築物については、周辺建築物及び前述の国土地理院提供の被災後航空写真を見ながら、目視で代表点を定めた。詳細な被害分布の考察については後述するが、大局的に見ると、ほぼ直線上に被害が発生していることが分かる。

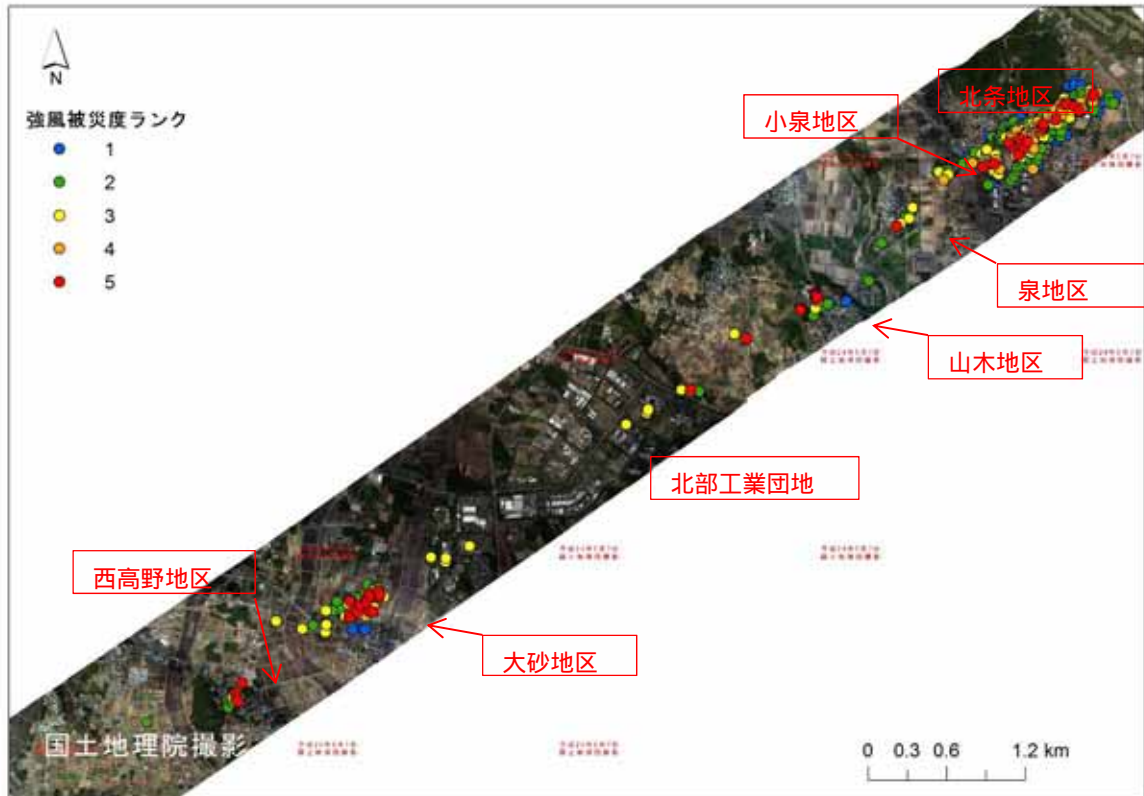


図 2.3-1 被害分布図（調査地区全域）

次に、ある程度まとまって被害が見られた地区毎に、被害分布の拡大図を示す。図 2.3-2 は北条地区及び小泉地区の拡大図である。北条地区はもともと建築物の多い地区であることもあり、つくば市内で最も被害棟数の多い地区である。

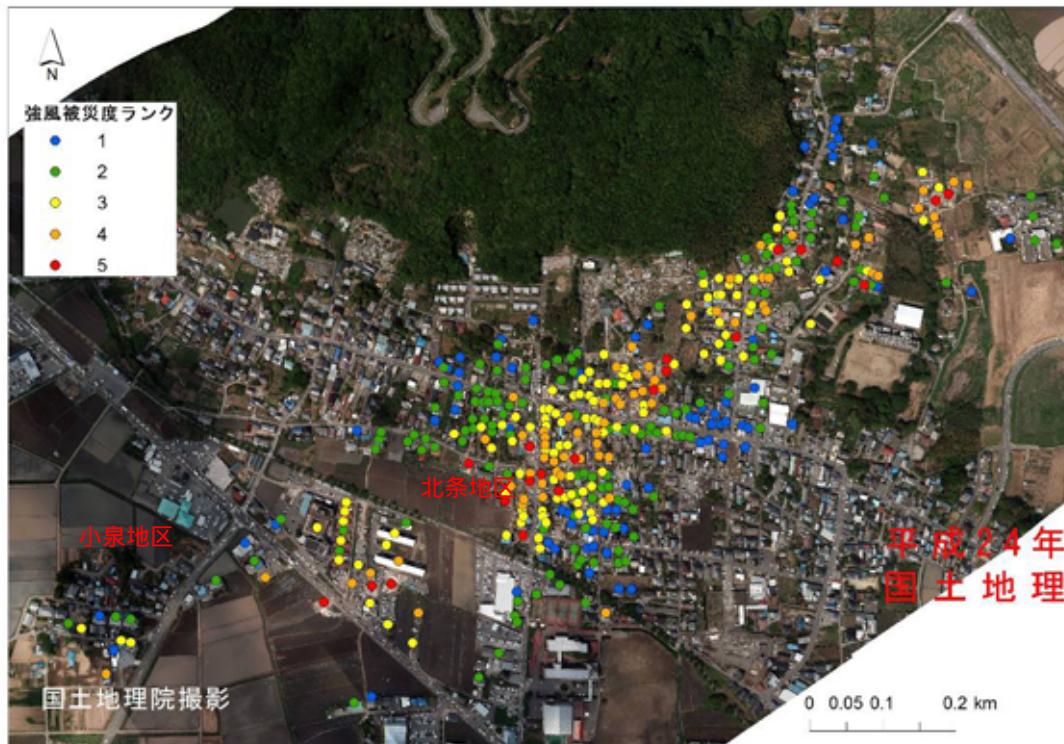


図 2.3-2 北条・小泉地区の被害分布拡大図

図 2.3-3 は泉地区及び山木地区の拡大図である。被害は局所的であり、隣接する 6 棟の木造建築物の上部構造の倒壊と飛散が見られた。



図 2.3-3 泉・山木地区の被害分布拡大図

図 2.3-4 は大砂地区及び西高野地区の拡大図である。

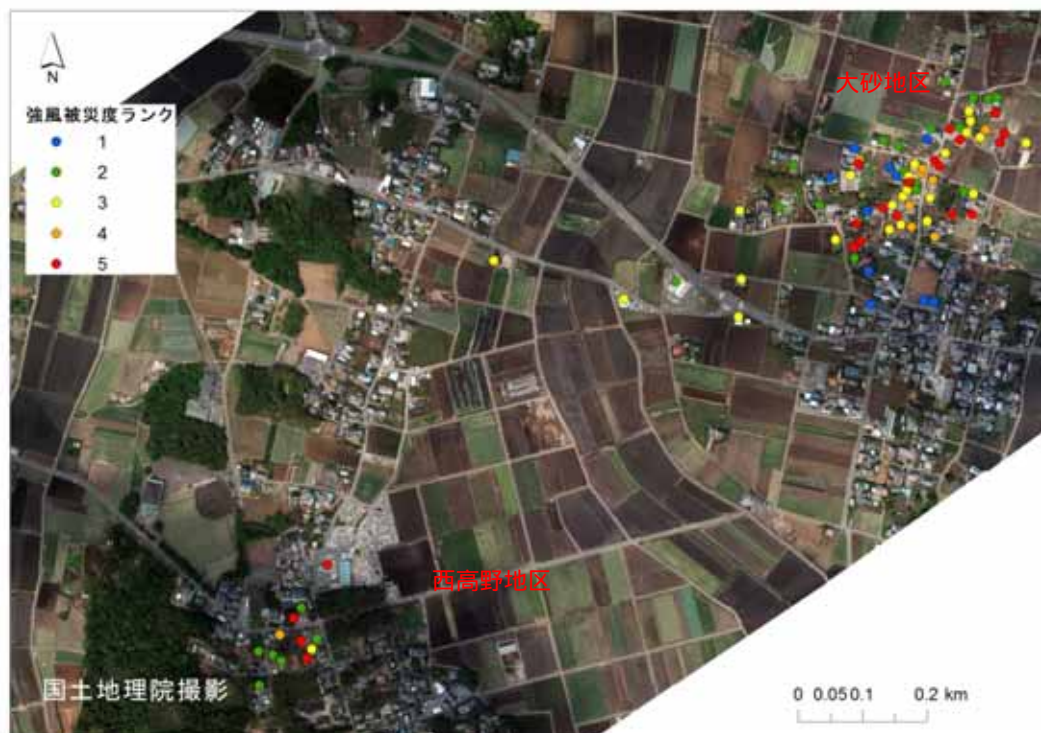


図 2.3-4 大砂・西高野地区の被害分布拡大図

2.3.3 被害分布の分析

(1) 被害中心線からみた被害分布

竜巻は直進する傾向が強いことが知られており、図 2.3-1 から竜巻の被害がほぼ直線上に分布している様子が分かる。そこで、この直線を被害中心線と呼ぶこととし、被害中心線からみた被害分布について考察する。

被害中心線の導出方法は、被災建築物の代表点から被害中心線までの距離の総和が最小となる直線を被害中心線とした。具体の導出方法は、次の通りである。

まず、作業の都合上、建築物の位置を 2 次元平面上の (x, y) 座標で表現するため、位置情報は緯度経度から平面直角座標系（第 IX 系）に変換した。次に、建築物 i の位置を (x_i, y_i) で表し、被害中心線を、

$$Y = aX + b \quad (a, b \text{ はパラメータ}) \quad (2.3.1)$$

で表現することにする。被災度ランク 1 以上の建築物から被害中心線までの距離の 2 乗が最小となるように被害中心線のパラメータ (a, b) を定める問題は、以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \min_{a,b} \quad & \sum_{i=1}^n \frac{1}{1+a^2} (y_i - ax_i - b)^2 \\ \text{s.t.} \quad & i = 1, \dots, n \\ & a, b \in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

式(2.3.2)を解くと、被害中心線は平面直角座標系（第 IX 系）において、以下の式で表せる。なお、数値の単位はメートルである。

$$Y = 0.702X + 3525.998 \quad (2.3.3)$$

なお、強風被災度ランク 5 と 4 に該当する建築物の座標のみを用いて同様に被害中心線を求めたところ、

$$Y = 0.704X + 3473.039 \quad (2.3.4)$$

となった。

導出された被害中心線を図 2.3-5 に示す。図中の肌色の線が式(2.3.3)によって予想された被害中心線である。また、被災度ランク 5 と 4 に該当する建築物の座標のみを用いて式(2.3.4)で導出した被害中心線を、図中の緑色の破線で示している。同図に示す通り、両式によって得た被害中心線はほぼ重なっていることがわかる。したがって、以降では被災度ランク 1 以上の全ての建築物を用いて導出した直線を被害中心線として用いることにする。

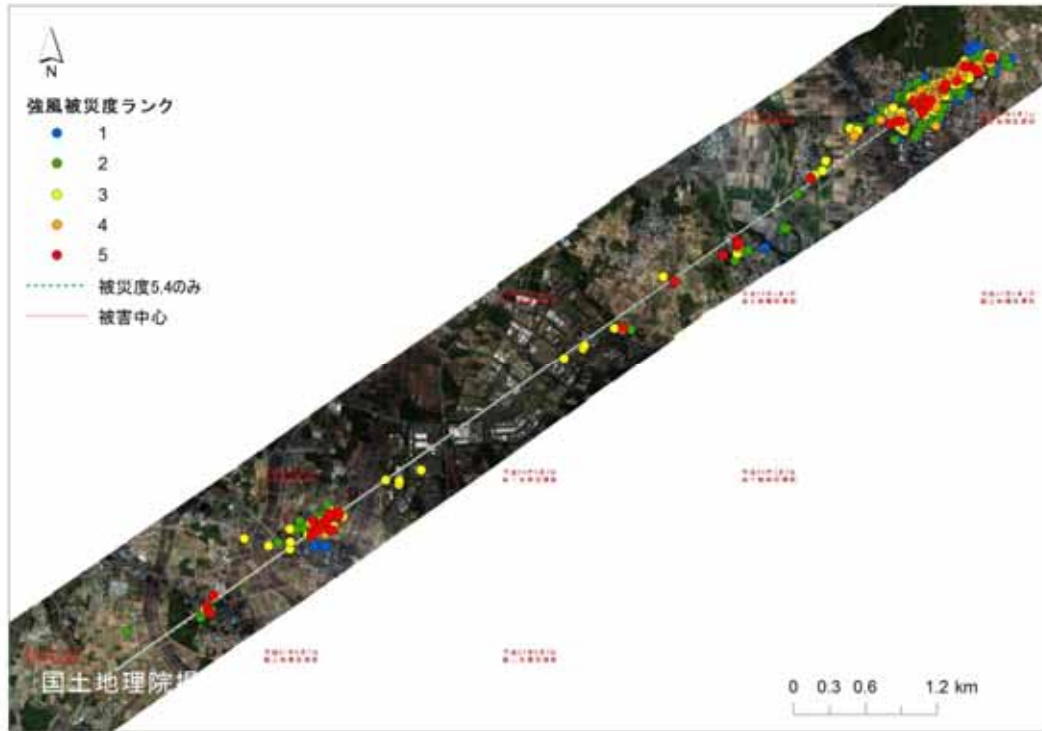


図 2.3-5 被害分布と被害中心線

次に、被害中心線を横軸にとって被害分布を座標変換（合同変換）したグラフを図 2.3-6 に示す。横軸は西端の吉沼地区を原点として、竜巻の進行距離(km)を示している。また、縦軸は被害中心線から建築物までの距離(m)を示しており、プラス側が竜巻の進行方向に向かって左側（北西側）で、マイナス側が右側（南東側）に位置することを示している。

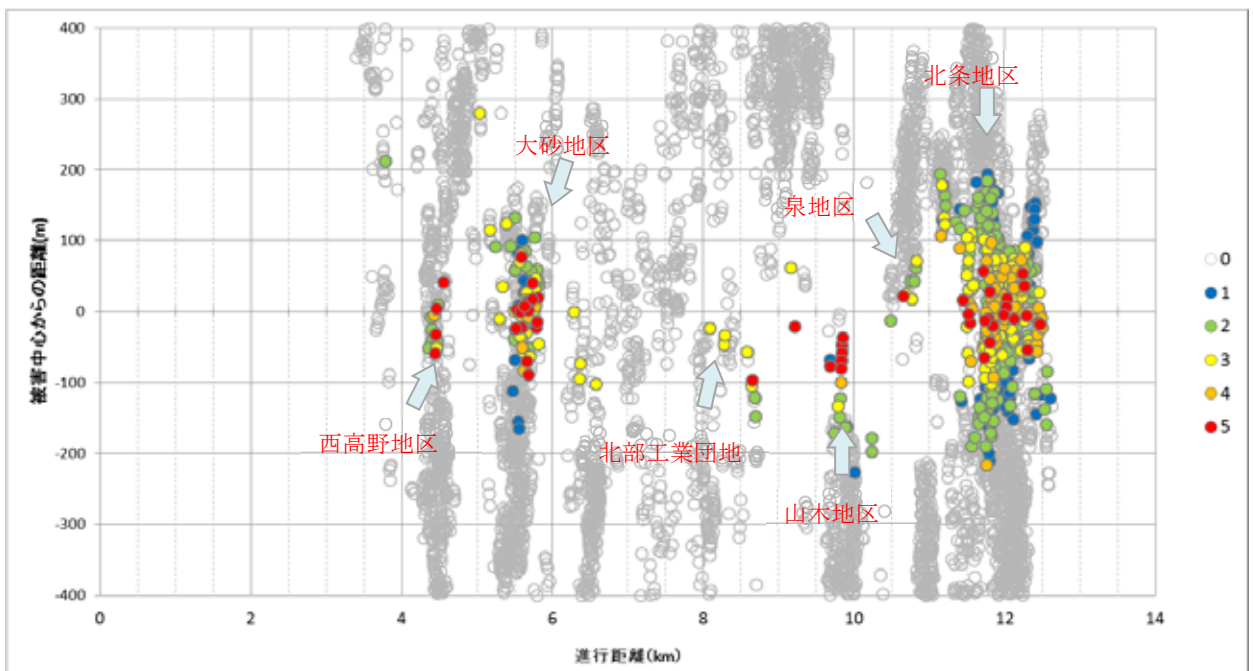


図 2.3-6 被害中心線から見た建築物被害分布

西高野、大砂、北条地区は被害中心線を中心に被害が分布しているように見えるが、北部工業団地や山木地区では被害の分布が進行方向に向かって右側に偏っているように見える。また、泉地区では被害の分布が進行方向に向かって左側に偏っているように見える。図 2.3-6 では、被害の無かった建築物をグレーの○印で示しており、被害分布に偏りがみられるこれらの地区ではちょうど被害中心線の付近でもともと建築物の立地に偏りが見られることが分かる。このために被害分布が偏っているように見えている可能性もある。

次に、竜巻の進行距離帯別（500 m 毎）に強風被災度ランク別の建築物棟数を集計した結果を図 2.3-7 に示す。被災していない建築物を含めて、進行距離帯毎の全棟数に占める被災した建築物の割合で表現したものが図 2.3-8 である。ただし、被災していない建築物については、被害中心線から片側 200 m 以内に立地している建築物に限って棟数を集計している。図 2.3-8 では、進行距離が進むにつれて、被災した建築物の割合が高くなっていることが読み取れる。被害棟数が最も多い北条地区では、距離帯によっては最大で約 50% の建築物に何らかの被害が生じている。建築物の立地状況（密度）の違いがあるため一概には言えないが、図 2.3-8 では、竜巻は発生地点から北条地区に向かって、徐々にその勢力を増していったのではないかと推測される。

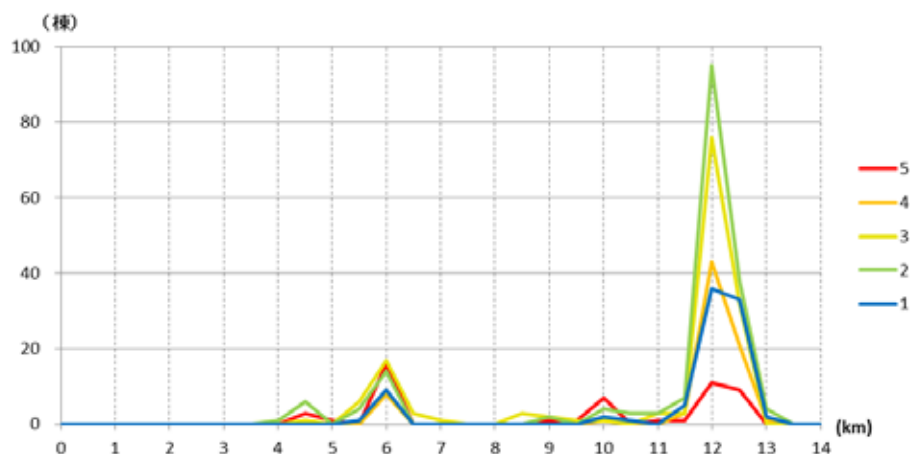


図 2.3-7 進行距離帯別の建築物被害分布（棟数）

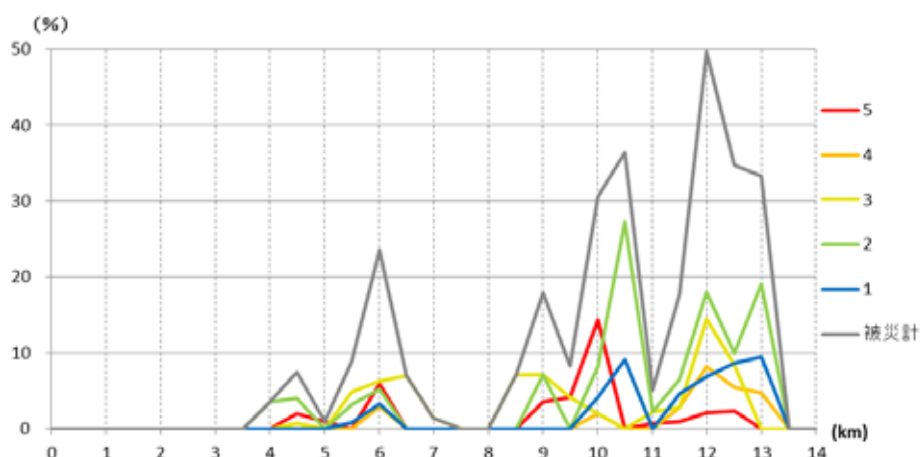


図 2.3-8 進行距離帯別の建築物被害率分布（%）

(2) 被害中心線からの距離分布

図 2.3-9 は、図 2.3-6 と同様の手法で、被災建築物の座標を合同変換して作成した図である。図 2.3-6 とは変

換の際の回転角を変えており、縦軸を竜巻の進行距離(km)とし、横軸を被害中心線からの距離(m)としている。横軸のプラス側が竜巻の進行方向に向かって右側(南東側)にあたり、マイナス側が向かって左側(北西側)となる。

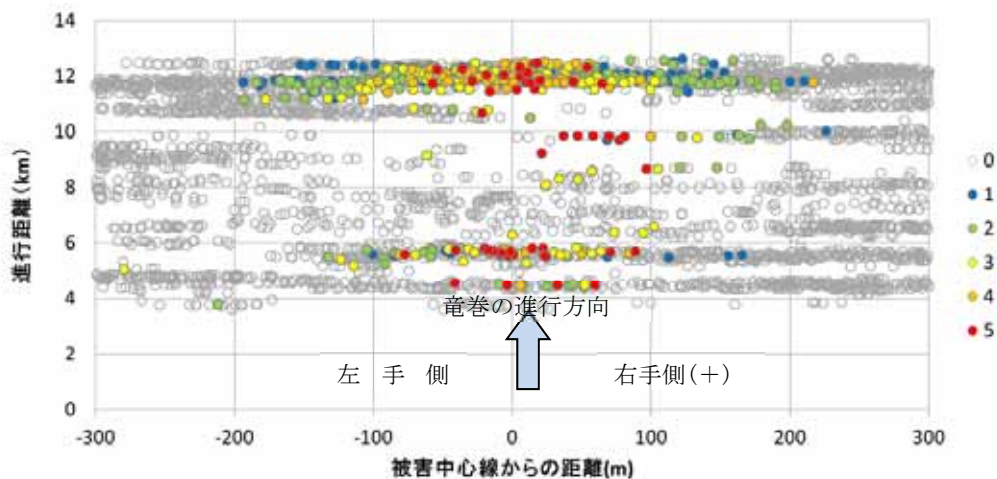


図 2.3-9 被害中心線からの距離と被害分布

図 2.3-10 は、被害中心線からの距離帯別に強風被災度ランク毎の建築物棟数を集計した結果である。図の左側は縦軸を棟数で表したもので、図の右側は縦軸を全棟数に占める被害建築物棟数の割合を百分率であらわしたものである。強風被災度ランクが5と4の棟数は被害中心線付近で若干右側に偏って分布し、強風被災度ランクが2と1の棟数は被害中心線付近が窪んだ二山の分布を示す。被害のあった棟数の割合では、被害中心線を中心に、若干右側の被害割合が高い。

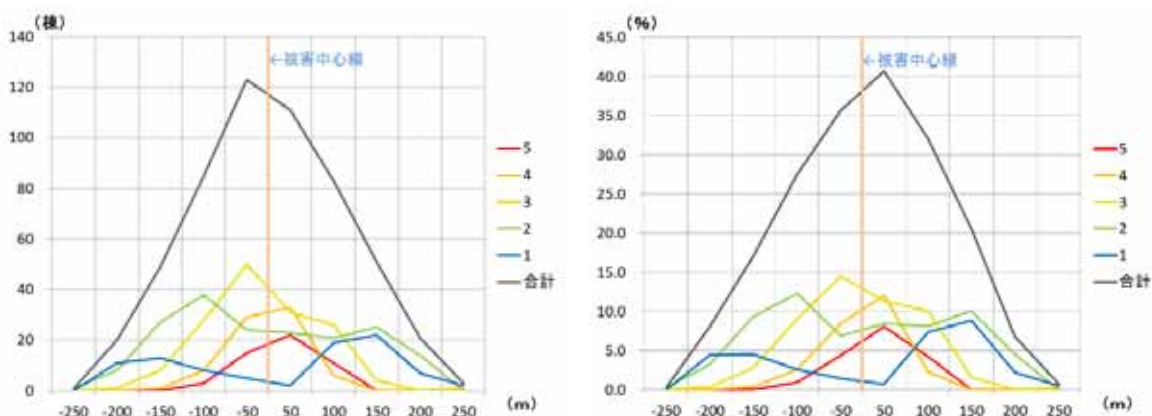


図 2.3-10 つくば市内全域の被害中心線からの距離と被害分布(左：棟数、右：被害率%)

図 2.3-11 は、北条地区を対象として被害中心線からの距離帯別に強風被災度ランク毎の建築物棟数を集計した結果である。分布の傾向としては図 2.3-9 に示したつくば市内全域の場合と同様であるが、図 2.3-11 の右側の図の被害棟数の割合では、被害中心線を中心にほぼ左右対称の分布となっており、わずかではあるが、左側の被害の割合が高くなっている。また、北条地区とつくば市内全域を比較すると、約 60%と約 40%で明らかに被害割合が高くなっている。

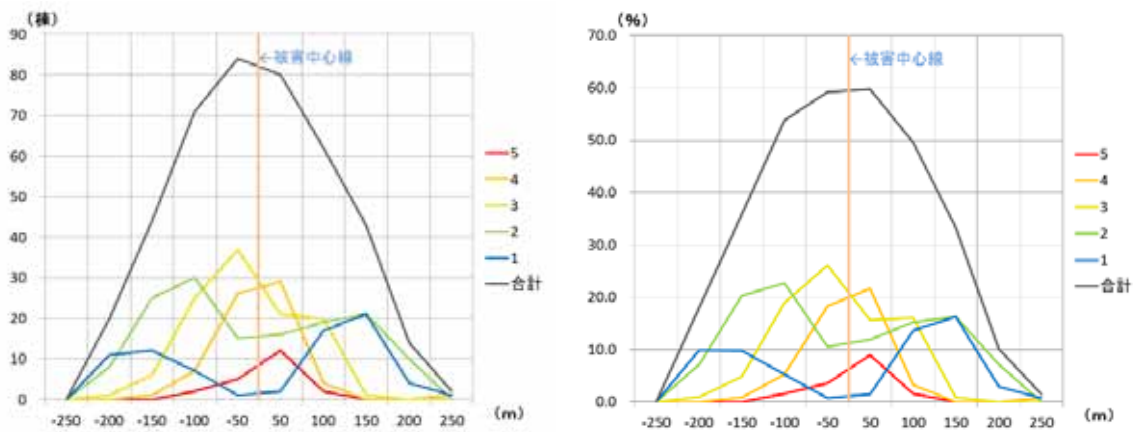


図 2.3-11 北条地区の被害中心線からの距離と被害分布(左：棟数、右：被害率%)

図 2.3-12 は、大砂地区を対象として被害中心線からの距離帯別に強風被災度ランク毎の建築物棟数を集計した結果である。北条地区に比べると被災棟数は大きく減少し、被害の幅も狭く、被害割合は最大でも約 40%である。これはつくば市全域の場合の最大値に近い値である。

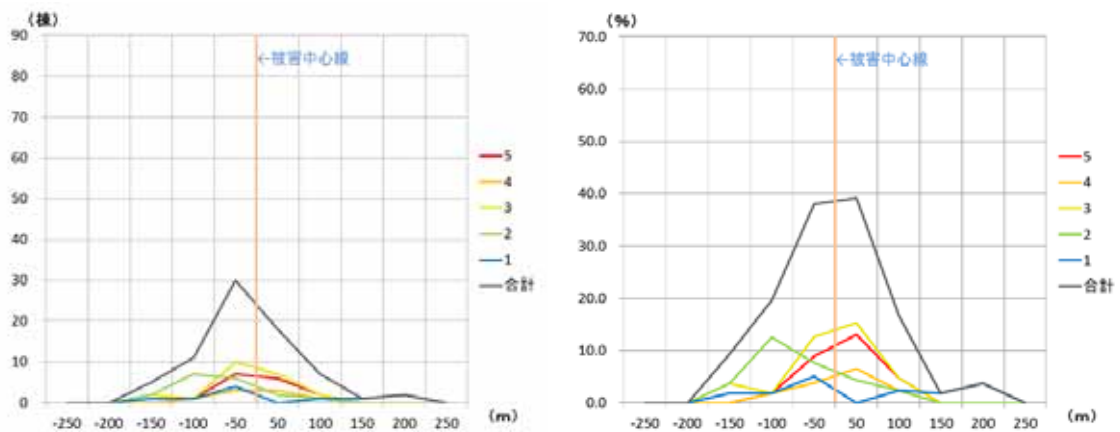


図 2.3-12 大砂地区の被害中心線からの距離と被害分布(左：棟数、右：被害率%)

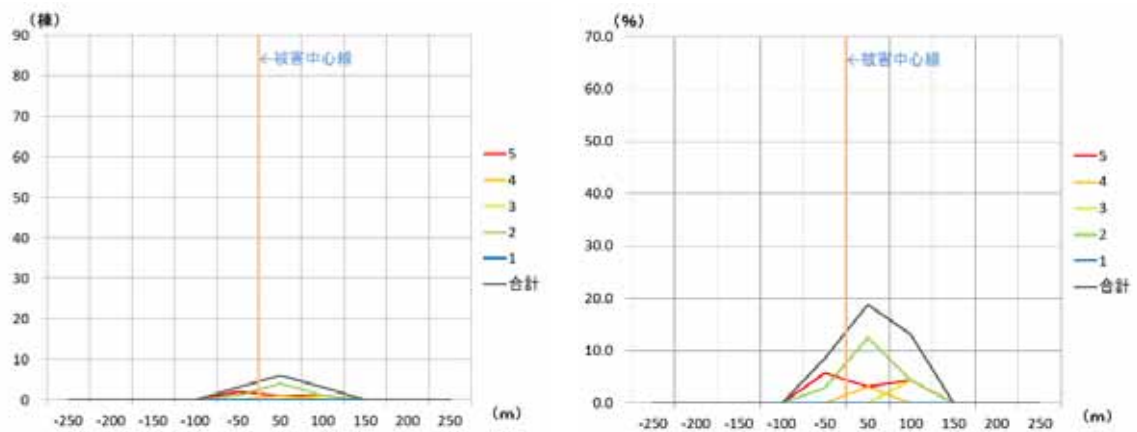


図 2.3-13 西高野地区の被害中心線からの距離と被害分布(左：棟数、右：被害率%)

図 2.3-13 は、西高野地区を対象として、被害中心線からの距離帯別に強風被災度ランク毎の建築物棟数を集計した結果である。被災棟数は大砂地区より更に大きく減少し、被害割合は最大でも約 20%の被害で、北条地区の約 1/3 である。また、被害の幅も、大砂地区と比較しても狭くなっている。以上から、竜巻が西高野・大砂から北条地区にかけて、被害の幅や被害割合等が増し、竜巻の勢力が増大したのではないかと推測される。

(3) 被害中心線と竜巻の中心経路との関係

図 2.3-14 は、北条地区の被害分布の拡大図である。図中の緑線は、赤色の点線円の地域から撮影された竜巻の画像から宮城弘守氏（宮崎大学工学部）が推定した竜巻（の漏斗雲）の中心の経路である。前述の被害中心線と推定された竜巻の中心経路はお互いにほぼ平行で、被害中心線は竜巻の中心経路よりも進行方向右側に約 35m ずれている。この結果からもこの竜巻が反時計回りに回転していたものと推測される。竜巻の旋回流をランキン渦^{2.6)}と仮定し、被害中心線上で竜巻の速度（旋回流の速度と移動速度のベクトル和）が最も速いと考えると、この地域（図 2.3-14 の赤点線円内）での竜巻の最大風速半径は約 35m と推定される。



図 2.3-14 被害中心線と竜巻の中心経路（北条地区）

参考文献

- 2.1) 気象庁・気象研究所・東京管区气象台・仙台管区气象台：平成 24 年 5 月 6 日に発生した竜巻について（報告）、2012. 6. 8
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/tatsumaki-portal/tyousa-houkoku.pdf>
- 2.2) 気象研究所：平成 24 年 5 月 6 日に茨城県つくば市付近で発生した竜巻について、2012. 5. 11
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/tatsumaki-portal/kishouken-kaiseki.pdf>
- 2.3) つくば市（2012）茨城県つくば市における竜巻による被害状況等について、
http://www.city.tsukuba.ibaraki.jp/dbps_data/_material_/localhost/kou002/tatsumaki/hohon-siryou-higaijoukyou.pdf
- 2.4) 奥田泰雄・喜々津仁密・西村宏昭：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

- 2.5) 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）、2012.5.8
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/120506-tsuba.pdf>
- 2.6) J.Lee, T.Samaras, C.Young: Pressure Measurement at the Ground in an F-4Tornado, 22nd Conference on Severe Local Storms, 2004

第3章 建築物等の被害形態

茨城県つくば市内の現地調査を通して、多数の建築物等の竜巻被害事例を収集した。本章では、木造、鉄骨造及び鉄筋コンクリート造の建築物のほか、建築物以外として工作物等、乗用車及び樹木について確認された被害形態をまとめる。

3.1 木造建築物の被害

北条地区、吉沼地区及び山木地区における木造建築物の主な被害事例を以下に示す。

(1) 基礎を伴う上部構造の転倒（1棟）

北条地区では、木造建築物の上部構造が基礎を伴って転倒した事例が確認された。2階部分の天地が逆転した状態で確認されたが、小屋組及び1階部分は確認されなかった（写真3.1-1）。また、べた基礎は反転していた（写真3.1-2, 3.1-3）。基礎底面には防湿シートが確認された（写真3.1-4）。基礎下の割栗石には引きずられた跡はほとんど確認されなかった（写真3.1-5, 3.1-6）。被災後の航空写真より、竜巻の進行方向に対し右側に部材が飛散しているのが確認できる（写真3.1-7, 3.1-8）。



写真 3.1-1 基礎から転倒した木造建築物



写真 3.1-2 写真 3.1-1 の 2 階床面



写真 3.1-3 写真 3.1-1 のべた基礎底面の露出



写真 3.1-4 写真 3.1-1 のべた基礎底面の防湿シート



写真 3.1-5 基礎下の割栗石の状況



写真 3.1-6 建築位置と転倒位置の関係



写真 3.1-7 写真 3.1-1 の被災前の航空写真



写真 3.1-8 写真 3.1-1 の被災後の航空写真

(2) 上部構造の飛散 (6 棟)

上部構造が建設地から飛散する事例が複数確認された。土台を含む上部構造が飛散し基礎のみ残存する事例（写真 3.1-9, 3.1-10）や、土台を含む 1 階床組のみ残存する事例（写真 3.1-13～写真 3.1-14）等が確認された。写真 3.1-15、3.1-16 の被災前後の航空写真より、被災した建築物の部材が飛散し、後方の鉄筋コンクリート造建築物に衝突していることが確認できる。

また県道沿いの木造建築物 7 棟のうち 6 棟が基礎のみを残し飛散しているのが確認された（写真 3.1-17～3.1-21）。

建築物の基礎は無筋コンクリート基礎（写真 3.1-19）、またはコンクリートブロック基礎で、土台と基礎を緊結するアンカーボルト等は確認されなかった。被災前後の航空写真より、飛散した部材が県道を挟んで移動しているのが確認できる（写真 3.1-20, 3.1-21）。

写真 3.1-21 に今回の竜巻による被害中心線を併せて示したが、この地区の被害は中心線から大きくそれていることから、竜巻がこの地域で曲線的な進路を通った可能性がある。



写真 3.1-9 飛散した木造建築物



写真 3.1-10 写真 3.1-9 の基礎（隅角部）



写真 3.1-11 写真 3.1-9 の飛散した部材



写真 3.1-12 写真 3.1-9 の残存する接合金物



写真 3.1-13 土台を残し飛散した木造建築物



写真 3.1-14 写真 3.1-13 の1階床仕様



国土地理院提供

写真 3.1-15 飛散した建築物の被災前の航空写真



国土地理院提供

写真 3.1-16 飛散した建築物の航空写真



写真 3.1-17 飛散した木造建築物群



写真 3.1-18 写真 3.1-17 の基礎外観



写真 3.1-19 写真 3.1-18 の無筋コンクリート基礎



写真 3.1-20 被災前の航空写真

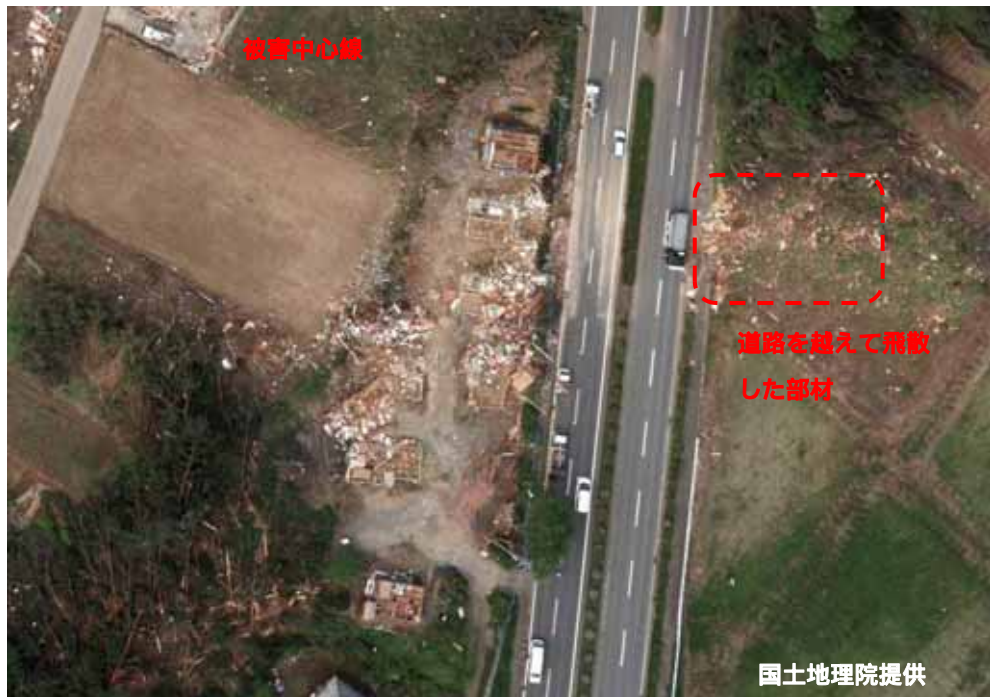


写真 3.1-21 被災後の航空写真（部材が道路を越えて飛散）

(3) 上部構造の倒壊（多数）

倒壊した建築物が多数確認された。外壁や屋根等の形状を一部残す事例(写真 3.1-22～写真 3.1-25)や、建築物の形状を全く残さない事例(写真 3.1-26, 3.1-27)等が確認された。



写真 3.1-22 倒壊した木造建築物



写真 3.1-23 倒壊した木造建築物



写真 3.1-24 倒壊した木造建築物



写真 3.1-25 倒壊した木造建築物



写真 3.1-26 倒壊した木造建築物



写真 3.1-27 倒壊した木造建築物

(4) 上部構造の傾斜（多数）

残留変形が生じた建築物が多数確認された（写真 3.1-28, 3.1-29）。



写真 3.1-28 傾斜した木造建築物



写真 3.1-29 傾斜した木造建築物

(5) 上部構造の移動（1棟）

北条地区では、上部構造が基礎から移動し、前面の道路まで移動した事例が確認された（写真 3.1-30, 3.1-31）。



写真 3.1-30 移動した木造建築物の外観



写真 3.1-31 移動した木造建築物の外観

(6) 小屋組の被害（約 70 棟）

小屋組の被害事例が多く確認された。比較的古い住家の切妻屋根（写真 3.1-32）、比較的新しい住家の切妻屋根（写真 3.1-33）、寄棟屋根（写真 3.1-34）、片流れ屋根（写真 3.1-35）等、屋根形状に関係なく被害が確認された。



写真 3.1-32 切妻屋根の被害



写真 3.1-33 切妻屋根の被害



写真 3.1-34 寄棟屋根の被害



写真 3.1-35 片流れ屋根の被害

3.2 鉄骨造建築物の被害

本節では、鉄骨造建築物 3 事例にみられた構造被害についてその被害形態をまとめる。なお、本節では構造体の被害に限定し、鉄骨造建築物の外装材や屋根ふき材の被害については 3.4 節で詳述する。

(1) 構造骨組の崩壊

写真 3.2-2 は 2 階建て鉄骨造建築物であり、構造骨組と基礎の移動、構造骨組の張間方向の崩壊、基礎の部分的破壊が認められた。本建築物は上部構造が崩壊後に基礎ごと移動したと考えられる。建築物は 1 階柱頭が張間(弱軸)方向に曲げ破壊し、ベースプレートでは柱脚ボルトの破断が確認された。基礎は部分的に破壊され、明確な形状は確認できなかった。



写真 3.2-1 鉄骨造建築物 A(点線)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.2-2 鉄骨造建築物 A



写真 3.2-3 部分的に破壊した基礎

(2) 構造骨組の残留変形

写真 3.2-5 は倉庫と思われる平屋の鉄骨造建築物であり、構造骨組の桁行方向に変形角約 $1/10$ (rad) 程度の残留変形が認められた。建築物桁行方向には胴縁だけで圧縮桁梁材は確認できなかった。桁行方向の引張ブレース端部のせん断ボルト(破断位置が上端か下端かはブレースにより異なる)が破断していた。



写真 3.2-4 鉄骨造建築物 B(点線)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.2-5 鉄骨造建築物 B



写真 3.2-6 引張ブレース端部のボルト破断

(3) 転倒

写真 3.2-8 は車庫として使われていた鉄骨造建築物 C であり、柱脚の引き抜けに伴う転倒が認められた。



写真 3.2-7 鉄骨造建築物 C(点線)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.2-8 鉄骨造建築物 C



写真 3.2-9 写真 3.2-8 の柱脚の引き抜け状況

3.3 鉄筋コンクリート造建築物の被害

写真 3.3-1～3.3-4 に鉄筋コンクリート造建築物の事例を示す。本調査の範囲では、鉄筋コンクリート造建築物の構造躯体に竜巻による突風により生じた被害は確認されなかった。なお、3.4 節で後述する鉄筋コンクリート造の集合住宅(雇用促進住宅北条宿舎)周辺では、木造建築物に上部構造の飛散等の甚大な構造被害が生じているものの、同集合住宅には開口部等の被害のみ確認され、他の鉄筋コンクリート造建築物と同様に構造躯体の被害は確認されていない。



写真 3.3-1 鉄筋コンクリート造建築物 A(線囲み)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.3-2 鉄筋コンクリート造建築物 A



写真 3.3-3 鉄骨造建築物 B(線囲み)と調査建築物の被害中心線(矢印)との位置関係



写真 3.3-4 鉄筋コンクリート造建築物 B

3.4 外装材等の被害

本節では、建築物の外装材等に見られた被害について、屋根ふき材、外壁材、開口部等に分類して各々の主な被害形態をまとめる。外装材は竜巻等突風に対して最も脆弱な部位であり、調査地域においても多数の被害が確認された。また、北部工業団地内の事業所施設では上記の外装材だけでなく、外装材の被害に伴って発生した内装材の被害、屋外に設置された設備系統の被害もみられ、これらの事例についてもここで掲げる。

3.4.1 屋根ふき材

(1) 住宅等

屋根ふき材の被害形態として最も多く確認されたのは、木造建築物の屋根瓦の脱落であり、これは既往の竜巻による被害でも最も典型的な被害形態の1つである。写真3.4-1～3.4-4に被害事例を示す。写真3.4-4では屋根瓦の脱落だけでなく、野地板の被害も認められる。



写真 3.4-1 屋根瓦の脱落



写真 3.4-2 屋根瓦の脱落



写真 3.4-3 屋根瓦の脱落



写真 3.4-4 屋根瓦の脱落と野地板の被害

屋根ふき材の被害としては屋根瓦以外にも、複数の地点で飛散した長尺の鋼板製屋根材が電線等に引っ掛かっていたほか、周囲の住宅へ落下又は衝突していた（写真3.4-5～3.4-7）。また、写真3.4-8に示す飛散した屋根材の事例からは、タイトフレームと母屋との間の接合具の抜け及び木製母屋の破壊によって飛散した状況が確認できる。長尺の鋼板製屋根材は一般に自重が軽く、一枚当たりの面積が比較的大きい（すなわち、受風面積が大きい）ことから、接合部や支持部材の破壊後に飛散する状況となりやすい。



写真 3.4-5 電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）



写真 3.4-6 飛来物（鋼板製屋根材）の衝突



写真 3.4-7 飛来物（小屋組）の衝突



写真 3.4-8 飛散した折板屋根の状況

(2) 事業所施設

北部工業団地での鉄骨造の事業所施設では、屋根ふき材の損傷が確認された（写真 3.4-9）。また、鋼板製屋根材のなかには、通りを挟んだ敷地まで数十メートル以上飛散したのものもあった（写真 3.4-10）。



写真 3.4-9 屋根ふき材の損傷



写真 3.4-10 飛散した鋼板製屋根材

3.4.2 外壁材

(1) 店舗及び住宅

写真 3.4-11～3.4-15 に北条地区の商店街に面していた店舗の外壁材の脱落事例を示す。写真 3.4-11～3.4-12 に示すように、外壁材の脱落はモルタル外壁に多くみられた。モルタル外壁の下地材が腐朽している例も確認された。また、写真 3.4-13～3.4-15 は鋼板製の外壁材であり、いずれも木製の下地材から脱落又ははく離している。

以上の店舗だけでなく、軽量鉄骨造の住宅でも外壁材の脱落被害がみられた（写真 3.4-16）。



写真 3.4-11 モルタル外壁の脱落



写真 3.4-12 モルタル外壁の脱落



写真 3.4-13 外壁材の脱落



写真 3.4-14 外壁材の脱落



写真 3.4-15 外壁材の脱落



写真 3.4-16 軽量鉄骨造住宅の外壁材の脱落

(2) 事業所施設及び医療施設

北部工業団地での鉄骨造の事業所施設では、外壁材、軒天井等の損傷が確認された（写真 3.4-17～3.4-19）。また、北条地区の医療施設でも渡り廊下底面の仕上げ材が脱落していた（写真 3.4-20）。



写真 3.4-17 外壁材とガラスの損傷



写真 3.4-18 軒天井の損傷



写真 3.4-19 渡り廊下底面の仕上げ材の脱落



写真 3.4-20 渡り廊下底面の仕上げ材の脱落

3.4.3 開口部等

(1) 店舗及び店舗併用住宅

写真 3.4-21～3.4-22 に店舗前面の窓ガラスの破損状況を示す。いずれも大部分の窓が竜巻の作用や飛来物の衝突により破損しており、中には明らかに飛来物によるものと思われる衝突痕も認められる（写真 3.4-22 中の矢印）。

写真 3.4-23～3.4-24 は店舗併用住宅の被害状況である。商店街の通りに面した開口の木製建具が脱落しているほか、突風が吹きこんだことによる屋内の被害も確認された。また、写真 3.4-23 に示す開口部と反対側の壁面での開口部も同様にほぼ全面的に破損していた（写真 3.4-25）。



写真 3.4-21 店舗の窓ガラスの被害状況



写真 3.4-22 店舗の窓ガラスの被害状況



写真 3.4-23 店舗併用住宅の開口部の被害状況



写真 3.4-24 店舗併用住宅の屋内の被害状況



写真 3.4-25 店舗併用住宅の開口部の被害状況

(2) 集合住宅

写真 3.4-26～3.4-32 に雇用促進住宅北条宿舎（昭和 59 年 10 月竣工）での開口部等の被害状況を示す。本住宅は鉄筋コンクリート造 5 階建てであり、写真 3.4-26 に示すように南面の開口部等が全ての階にわたって著しく損壊していた。低層階の被害状況をみると、2 階のベランダには多くの飛来物が堆積していること、1 階の桁行中央

にある鉄筋コンクリート造の手すりにひび割れが認められたことから、多数の飛来物の衝突を被ったことが想定される（写真3.4-27～3.4-28）。一方、4～5階のベランダには低層階よりも比較的堆積物は少ないが、写真3.4-30に示すように4階の桁行中央付近にある手すりが屋外方向に引き抜けていた。この状況から、上層階の特に桁行中央付近では、極めて大きな負圧が作用したことが竜巻接近時の可能性の1つとして想定される。一方、北面でのアルミサッシも南面と同様に破損しており、可動式の小窓のアルミサッシも複数脱落していた。また、屋内の物品（寝具類等）が屋外方向に出た状況も確認できる（写真3.4-31～3.4-32）。

図3.4-1に、各階でのベランダの目隠しパネルとアルミ手すりの被害分布状況を示す。同図(a)に示す南面でのベランダの被害は外観からの調査によるものであり、目隠しパネルについては全面破壊して残存していないものを黒色、アルミ手すりについては両端又は片端が支柱から離脱しているものを赤線、著しい変形が認められるものを黄色でそれぞれ表示した。また、同図(b), (c)に示す各階でのアルミサッシの被害分布状況は、応急措置と復旧に際しての継続使用の可否の観点で住宅管理会社が調査したものである。当該サッシにガラスを入れることが不可能で、サッシ自体の継続使用も不可能であると判断されたものが最も被害の程度が著しいと判断でき、ここではこれを赤色で表示した。



写真3.4-26 5階建て集合住宅南面の被害状況



写真 3.4-27 2階ベランダの堆積物



写真 3.4-28 RC造手すりの被害状況



写真 3.4-29 4～5階の被害状況の例



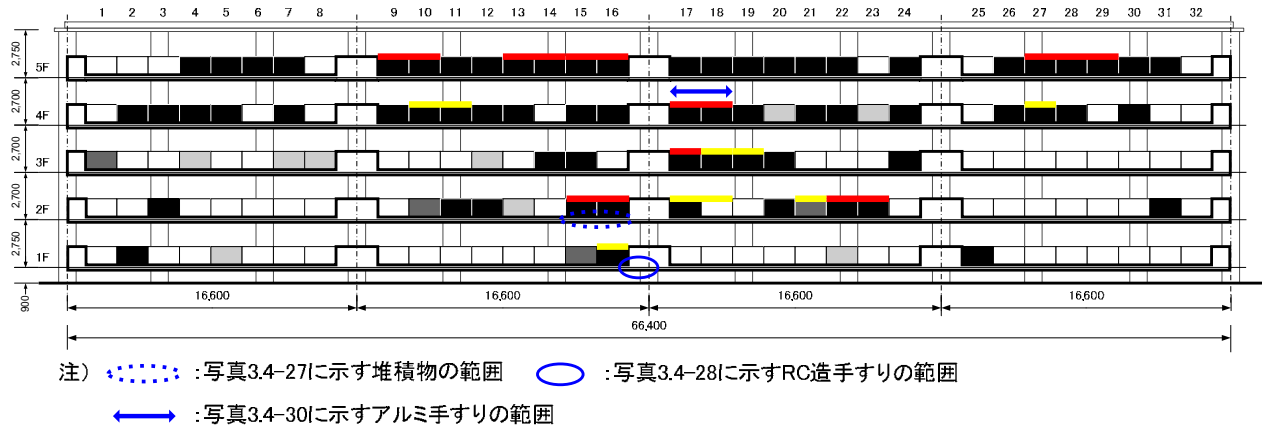
写真 3.4-30 屋外方向に引き抜かれたアルミ手すり



写真 3.4-31 北面の被害状況

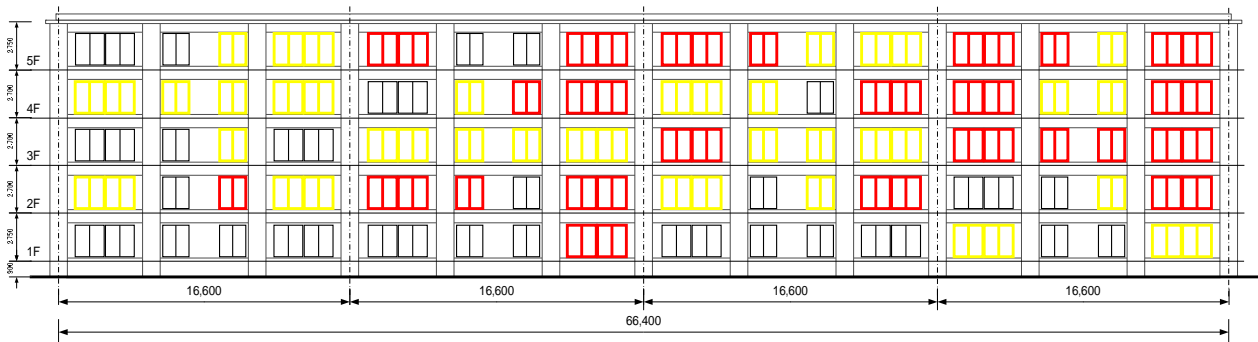


写真 3.4-32 北面の被害状況

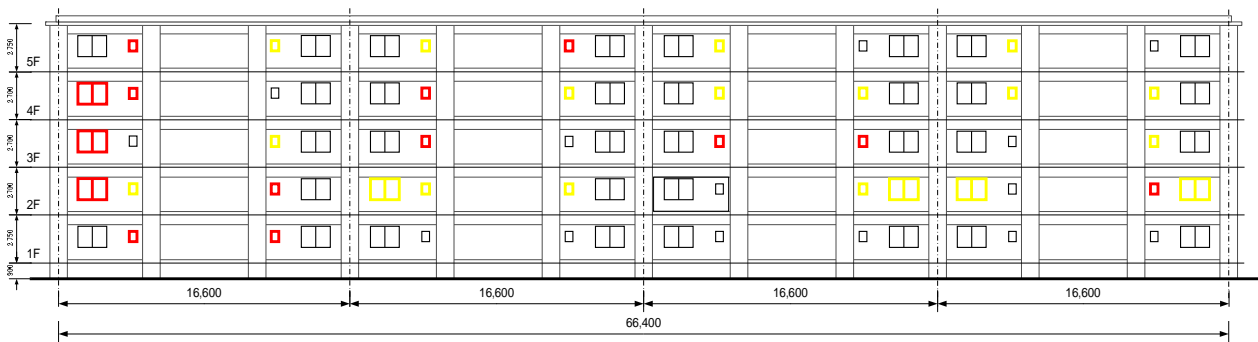


部位	色	被害の状況
目隠し パネル	淡灰	軽微な衝突痕又は亀裂が認められる
	濃灰	著しい衝突痕が認められる
	黒	全面的に破壊し、残存していない
アルミ 手すり	黄	著しい変形が認められる
	赤	手すりの両端又は片端が離脱している（残存していないものを含む）

(a) ベランダの目隠しパネルとアルミ手すり（南面）



(b) アルミサッシ（南面）



(c) アルミサッシ（北面）

図 3.4-1 各階における開口部等の被害分布状況

色	被害の状況	復旧時の対応
黒	当該サッシにガラスを入れることが可能で、サッシ自体の継続使用も可能であると判断される	サッシは継続使用する
黄	当該サッシにガラスを入れることが可能であるが、サッシ自体の継続使用は不可能であると判断される (例 サッシ下部が破損、サッシに歪みや凹みがあり開閉不能である等)	サッシを交換する(応急措置として、ガラスを入れて養生している)
赤	当該サッシにガラスを入れることが不可能で、サッシ自体の継続使用も不可能であると判断される(脱落・飛散したものを含む)	サッシを交換する

図 3.4-1 各階における開口部等の被害分布状況(続き)

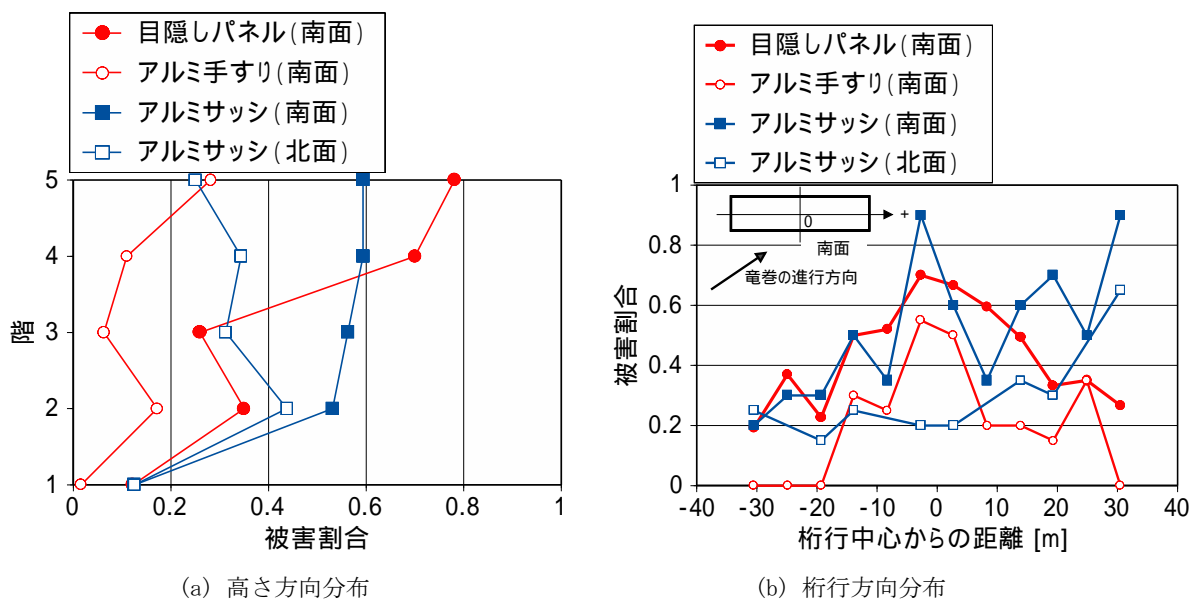


図 3.4-2 ベランダの目隠しパネル、アルミ手すり及びアルミサッシの被害割合

図 3.4-1 に示した開口部等の被害分布状況に基づき、高さ方向及び桁行方向の被害割合の傾向を図 3.4-2 にまとめる。以下では、各々の被害割合 R は式(3.4.1)で算出した。ここで、 N_a : 目隠しパネルの黒色、手すりの赤色、アルミサッシの赤色に該当する被害箇所の総数、 N_b : 目隠しパネルの濃灰色、アルミ手すりの黄色、アルミサッシの黄色に該当する被害箇所の総数、 N_c : 目隠しパネルの淡灰色に該当する被害箇所の総数、 N_{all} : 対象範囲での目隠しパネル、アルミ手すり又はアルミサッシの総数であり、被害の程度に応じた係数を 1.0、0.5、0.2 と仮定した。

$$R = \frac{1}{N_{all}}(N_a + 0.5N_b + 0.2N_c) \quad (3.4.1)$$

図 3.4-2(a) をみると、いずれも 1 階の被害割合が他の階よりも極めて小さい。また、南面でのベランダの目隠しパネル、アルミ手すり及びアルミサッシはいずれも上階になるにつれて甚大な被害範囲が大きくなる傾向が認められる。ただし、目隠しパネルとアルミ手すりは 2 階の被害割合が 3 階よりも大きく、これは飛来物による衝突の多寡が影響している可能性がある。一方、北面での 2~5 階のアルミサッシは南面での結果と逆の傾向である。

次に同図(b)をみると、南面でのベランダの目隠しパネル、アルミ手すり及びアルミサッシはいずれも桁行き中心付近の被害率が高い結果となっている。この範囲は、第 2 章の図 2.3-13 で想定した被害中心線の位置と整合し

ており、実際に写真 3.4-30, 図 3.4-1(a)中の⇄印に示すようにアルミ手すりが屋外方向に著しく引き抜かれる状況もみられた。またアルミサッシは南北面いずれも、竜巻の接近する側から見て桁行方向右側のほうが左側よりも被害率が相対的に高い傾向にある。

ここで対象にした目隠しパネル、アルミ手すり及びアルミサッシは、供用期間中に部分的に更新されていないと仮定すると、各々の耐力の程度は高さ方向及び桁行き方向についてほぼ同様であるとみなすことができる。したがって以上の結果から、南面において地盤面からの高さが高いほど竜巻による強風域の範囲が広く、また被害中心線に相当する範囲では竜巻による力（又は瞬間風速）が大きい傾向であったと考えられる。

上記で得られた被害分布の傾向と竜巻の鉛直方向の気流分布や地表面粗度との関係については、建築研究所が所有する竜巻状気流発生装置¹を活用した実験によって今後検証する予定である。

(3) 商業施設

写真 3.4-33～3.4-36 に北条地区での商業施設の被害状況を示す。エントランスでの建具が脱落しているほか、ガラス等への飛来物の衝突痕が多数みられた。



写真 3.4-33 建具の脱落



写真 3.4-34 エントランスでの飛来物の衝突痕



写真 3.4-35 ガラスへの飛来物の衝突痕



写真 3.4-36 ガラスへの飛来物の衝突痕

(4) その他の施設

写真 3.4-37 に消防団施設のシャッター被害の状況を示す。スラットがガイドレールから外れ、屋外方向に引き抜かれた状態になっている。

¹ 旋回流と上昇流を発生させることにより、竜巻が通過する際の突風性状を工学的に再現することができる装置。



写真 3.4-37 消防団施設のシャッターの被害状況

3.4.4 内装材

北部工業団地内の事業所施設では外装材の破損によって、天井材その他の内装材に被害が及んだ事例も確認された（写真 3.4-38～3.4-39）。机やいす等の家具等の転倒も見られた。なお、これらの建築物について、構造躯体の被害は確認されなかった。



写真 3.4-38 内装材の被害



写真 3.4-39 天井材の被害

3.4.5 屋外設備

北部工業団地内の事業所施設や北条地区の集合住宅では、屋外に設置される設備の被害も確認された（写真3.4-40）。



(a) 事業所施設



(b) 集合住宅

写真 3.4-40 屋外に設置される設備の被害

3.5 その他の被害

調査対象地域では建築物以外にも、工作物等、乗用車、樹木の被害も多数みられた。本節ではこれらの被害形態についてまとめる。

3.5.1 工作物等

写真3.5-1～3.5-2はガソリンスタンド及び駐輪場での鋼板製屋根の被害で、駐輪場での屋根材は波打った状態であった。写真3.5-3～3.5-4は石塀、写真3.5-5は石灯籠の倒壊事例である。道路標識及び電柱の被害については、写真3.5-6が道路標識の折損状況、写真3.5-7が複数の電柱が連続して折損又は傾斜している状況、写真3.5-8が折損した電柱が隣接する住家に倒れ掛かっている状況である。また、パイプハウスの骨組やフェンスが著しく変形している状況もみられた（写真3.5-9～3.5-10）。



写真 3.5-1 ガソリンスタンドの折板屋根の脱落



写真 3.5-2 駐輪場の折板屋根の著しい変形



写真 3.5-3 石塀の倒壊



写真 3.5-4 石塀の倒壊



写真 3.5-5 石灯籠の倒壊



写真 3.5-6 道路標識の折損



写真 3.5-7 電柱の折損・傾斜



写真 3.5-8 電柱の折損・傾斜



写真 3.5-9 パイプハウスの被害状況



写真 3.5-10 フェンスの被害状況

3.5.2 乗用車

調査対象地域では多数の乗用車の横転や転倒の被害が発生している（写真 3.5-11～3.5-12）。また、写真 3.5-13～3.5-14 に示すように、軽乗用車以外の比較的重量のある乗用車やトラックが横転する事例もみられた。



写真 3.5-11 乗用車の横転等



写真 3.5-12 軽乗用車の転倒



写真 3.5-13 乗用車の横転



写真 3.5-14 トラックの横転

3.5.3 樹木

写真 3.5-15～3.5-18 に樹木の折損事例を示す。写真 3.5-16 に示す事例では、折損した樹木の衝突によって石造の鳥居が一部倒壊している。また、写真 3.5-19～3.5-20 をみると、樹木が竜巻の進行に沿った方向だけでなく、進行に対してほぼ直交する方向にも折損している状況が把握できる。



写真 3.5-15 樹木の折損



写真 3.5-16 樹木の折損と鳥居の被害



写真 3.5-17 樹木の倒木



写真 3.5-18 倒木による社の倒壊



写真 3.5-19 樹木の折損状況（上空からの写真）



写真 3.5-20 樹木の折損状況（上空からの写真）

第4章 木造建築物の被害原因の検討

4.1 建築物に作用する外力

一般に、竜巻によって建築物に作用する力としては、以下の3つが挙げられる^{例えば4.1)}。これらの3つの力のうち、ii)は竜巻特有の力であるが、i)とiii)は竜巻特有の力ではなく、台風等の強風でも建築物に作用する力である。図4.1-1はそれらの模式図である。

- i) 竜巻の旋回流によって生じる風力
- ii) 急激な気圧降下によって生じる力
- iii) 飛来物による衝撃力

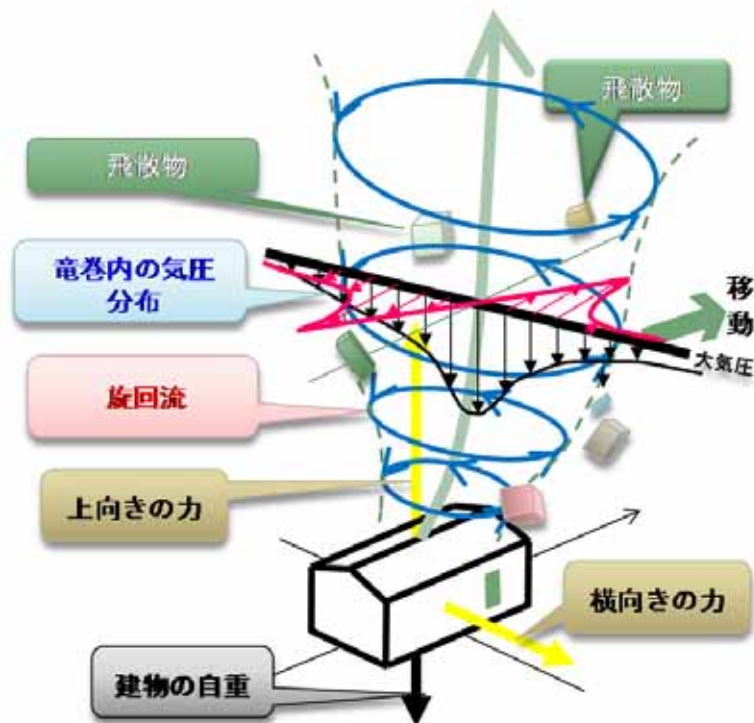


図4.1-1 建築物に作用する竜巻の外力

上記 i) の風力は、竜巻の旋回流が建築物に作用することで発生する。竜巻の旋回流には水平方向成分だけでなく鉛直方向成分もあるが、地表面付近では水平方向の速度成分が卓越すると考えられる。また、建築物全体を水平方向に押すだけでなく、屋根面には屋根を上向きに持ち上げる負圧も発生する。一方、竜巻の旋回流や iii) の飛来物によって開口部や外壁が破損した場合には、建築物内に風が入ることで建築物の内圧が上昇し、屋根全体を下から押し上げる力が作用する場合もある。

大きな渦である竜巻の中心付近では、気圧が数十 hPa (= 数 kN/m²) も周辺よりも低下するとされている。上記 ii) の力は、竜巻の中心付近が建築物を通過する場合など、竜巻渦内の低い気圧が急激に建築物に作用した時、建築物の室内等の大気圧との圧力差によって、屋根や建築物全体を上向きに引き上げる力が発生する。竜巻の気

圧分布はおおよそランキン渦の圧力分布にあてはまるとの報告^{4.2)}があり、竜巻の渦をランキン渦と仮定すると、藤田スケールと気圧降下量には表 4.1-1 の関係がある。

表 4.1-1 藤田スケールと気圧降下の関係

藤田スケール	風速 (m/s)	中心での気圧降下 (kN/m ²)	最大風速半径での気圧降下 (kN/m ²)
F0	- 32	- 1.2	- 0.6
F1	33 - 49	1.2 - 2.8	0.6 - 1.4
F2	50 - 69	3.0 - 5.6	1.5 - 2.8
F3	70 - 92	5.8 - 10.2	2.9 - 5.1
F4	93 - 116	10.4 - 16.2	5.2 - 8.1
F5	117 - 141	16.4 - 24.0	8.2 - 12.0

たとえば、中規模の竜巻の中心気圧は 950hPa 程度と言われている。大気圧を 1013hPa とするとその差は約 60hPa でこれは 6kN/m² に相当する。建築物の真上に竜巻が来たとして、屋根面に竜巻の中心気圧が作用し、室内もしくは基礎底面に大気圧が作用したとすると、屋根や建築物全体に数 kN/m² の力が鉛直方向上向きに作用することになる。

また、竜巻は建築物や工作物等の構造物やその部材、什器、樹木、自動車等を巻き上げる。これらは上記 iii) に掲げる飛来物として別の建築物等に衝突し、開口部、外壁、屋根ふき材等の外装材を破損させる(写真 4.1-1, 2)。外装材を貫通して建築物の室内に飛び込んでくることも多く、中には内壁に突き刺さる飛来物も見られる。また、飛来物は架線に引っ掛かることも多く、受圧面積の増大によって、電柱等を倒壊させることもある。



写真 4.1-1 つくば竜巻(2012)での飛散物の状況



写真 4.1-2 佐呂間竜巻(2006)での飛散物の状況

4.2 木造建築物の被害原因に関する考察

(1) 基礎を伴う上部構造の転倒 (写真 4.2-1)

上部構造が転倒するためには、竜巻による水平方向の風力が当該建築物のせん断耐力を上回らずに、風力によって生じた転倒モーメントが、基礎底部の風下側端部を回転中心とした当該建築物の重量による転倒抵抗モーメントを上回ることが条件となる。

また、上部構造の転倒に基礎を伴うためには、上部構造と基礎を接合する 1 階柱脚接合部、及び土台－基礎間のアンカーボルト等が、建築物の転倒モーメント以上の耐力を有することが条件となる。

さらに、2 階部分単独で転倒していないものと仮定すると、1 階の柱頭接合部、2 階の柱脚接合部の耐力が、2 階が単独で転倒する場合の転倒モーメントを超える耐力を有したものと推定される。

なお、基礎の滑動と建築物の転倒の時間的な前後関係については、現在のところ不明である。



写真 4.2-1 上部構造の転倒

(2) 上部構造の倒壊 (写真 4.2-2)

上部構造がせん断力によって倒壊するためには、以下の条件すべてが成り立つときと考えられる。

- ・ 竜巻による水平方向の風力が当該建築物のせん断耐力を上回る。
- ・ 竜巻による水平方向の風力によって生じる建築物全体の転倒モーメントより、基礎を含めた建築物全体の重量による抵抗モーメントが大きい。
- ・ 竜巻による水平方向の風力によって生じる建築物全体の転倒モーメントによって接合部に生じる引き抜き力より、上部構造と基礎を接合する 1 階柱脚接合部、及び土台－基礎間のアンカーボルト等の耐力が大きい。
- ・ 竜巻による鉛直上向きの力より、建築物の重量が大きく、かつ柱脚柱頭接合部とアンカーボルトの耐力が上回る。

また、小屋組が先行的に飛散していないとすると、竜巻の風力による鉛直上向きの力などに対して小屋組各部の接合耐力が上回っていたと推測される。



写真 4.2-2 上部構造の倒壊

(3) 上部構造の飛散 (写真 4.2-3, 4.2-4)

上部構造が飛散する場合は、以下の3通りのうちいずれかと考えられる。

- 1) 上部構造の形態を保ったまま、飛散する。
- 2) 上部構造が転倒した後、飛散する。
- 3) 上部構造が倒壊した後、部材等が飛散する。

1) が生じるためには、竜巻による鉛直上向きの風力が、当該建築物の上部構造の重量を上回り、かつ上部構造と基礎を接合する1階柱脚部、もしくはアンカーボルトの引き抜き耐力を上回ったものと考えられる。なお、鉛直上向きの風圧力には、開口部が先行的に破壊した後、小屋組や上階床組に風力が作用して鉛直上向きの力となること、及び1階床下換気口から吹き込んだことによる鉛直上向きの荷重を含むと考えられる。

2) が生じるためには、(1) とほぼ同様に竜巻による水平方向の風力が当該建築物のせん断耐力を上回らずに、風力によって生じた転倒モーメントが、上部構造の重量による抵抗モーメントを上回ることが条件となる。

3) が生じるためには、(2) と同様の条件が考えられる。

なお、2), 3) の場合は、転倒、もしくは層崩壊の後も大きな風力が継続的に作用して、部材等が飛散すると考えられる。

また、1階柱脚接合部の引き抜き耐力がアンカーボルトの引き抜き耐力より下回る場合は土台が残存し、上回る場合は土台も含めて飛散すると考えられる。



写真 4.2-3 上部構造の飛散



写真 4.2-4 上部構造の飛散

(4) 上部構造の(水平)移動

木造建築物の上部構造が水平に移動するためには、以下の3条件を満たすと考えられる。

- ・竜巻による水平方向の風力より、当該建物のせん断耐力が上回る。
- ・竜巻による水平方向の風力によって、転倒が生じない。(水平方向の風力が当該建物の基礎を含めた重量による転倒抵抗モーメントを超えず、転倒モーメントによって生じる柱脚接合部、及びアンカーボルトの引き抜き力が当該接合部、アンカーボルトの引き抜き耐力より下回った。)
- ・竜巻による水平方向の力が、当該建物の基礎と地盤の摩擦力には及ばず、基礎と上部構造を留め付けるアンカーボルト、または柱脚接合部のせん断耐力を上回った。

(5) 小屋組の損壊・飛散

小屋組に作用する荷重条件としては、以下が考えられる。

- ・竜巻による鉛直上向きの力
- ・開口部等が損壊し、室内に吹き込んだ力が天井を介して小屋組に吹き上げ力として作用する。
- ・軒やけらばに対して作用した吹き上げ力が、垂木や母屋へ伝達され鉛直上向きの力として作用する。
- ・竜巻による水平力が小屋組に水平せん断力として作用する。

以上の荷重が複合的に作用し、小屋組各部の接合耐力を上回ったために小屋組が損壊、飛散したと考えられる。

(6) 開口部の損壊

開口の大小によらず、竜巻による大きな面外荷重の作用又は飛来物の衝突によって、開口部が破損したと考えられる。

面外風力によって開口部が破損した場合は、概して当該外壁構面の開口部全てが損壊に至っている場合が多く、局所的な開口部の破壊は、飛来物による場合が多いと考えられる。

(7) 屋根ふき材と外壁材の脱落・飛散等

屋根ふき材は、竜巻による鉛直上向きの力、もしくは、竜巻による水平方向の風が、屋根葺き材の重ね合わせ部分のわずかな隙間に吹き込むことによって、飛散したと考えられる。

一方、モルタル外壁は、構造躯体のせん断変形、もしくは面外力が生じない限り、脱落しないため、竜巻による水平方向の風力により、構造躯体がせん断変形していたか、竜巻によって外壁面に負圧が作用したと想像される。もしくは、建物が部分的に破壊し、室内側から屋外側へ向かって風力が作用した場合も考えられる。

なお、モルタル下地が生物劣化を引き起こしていた場合は、その外壁の面外保持力は著しく低下していると考えられる。

4.3 木造住宅の風力による崩壊メカニズムに関する考察

本節では、木造住宅が風力によって崩壊する場合の崩壊メカニズムを推定することを目的として、文献^{4.3)}で調査対象となっている2階建て木造住宅53棟を対象として、木造住宅が風力によって、水平耐力の喪失により崩壊する場合と、転倒によって崩壊する場合を想定した風速の計算を行った。分析対象の建物は、平面図、立面図、耐力壁配置図があり、文献において建物の各方向の水平耐力の最大値が計算されている。

(1) 水平耐力の喪失により崩壊する場合

住宅の水平耐力 Q は各壁の荷重-変形関係の加算を行い、最大耐力を水平耐力とする。ここでは、限界耐力計算の手引き^{4.4)}による荷重-変形関係から小壁等の耐力も考慮した水平耐力を用いた。崩壊の際の推定風速 V は下記のつり合い式(4.3.1)より算出した。

$$Q/A \text{ (N/m}^2\text{)} = 0.5 \rho C_f V^2 \quad (4.3.1)$$

ここで、 Q : 住宅の水平耐力 (N)

A : 見附面積 (1F 下半分を除外) (m²)

ρ : 空気密度 1.2 kg/m³

V : 推定風速 (m/s)

C_f : 風力係数 1.2

(2) 転倒によって崩壊する場合

建物の重量は、上部構造については各階の床面積あたり 2.0kN/m²、基礎については 1F 床面積あたり 6.0kN/m² (1F 床重量を含む) と仮定し算出した。転倒で崩壊する際の推定風速 V は下記のモーメントのつり合い式より算出した。5.2 節の風速の推定過程と同様にここでも、(a) 竜巻による急激な気圧降下が建築物に作用する場合と、(b) 竜巻の水平方向の旋回流のみが建築物に作用する場合の2通りについて風速の計算を行った。

(a) 竜巻による急激な気圧降下が建築物に作用する場合

$$\text{転倒モーメント} \quad M_w = W \times (D/2) \times 1000 \text{ (Nm)} \quad (4.3.2)$$

$$\text{水平方向風圧力モーメント} \quad M_h = 0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times C_{ft}) \times BH^2 \quad (4.3.3)$$

$$\text{鉛直方向風圧力モーメント} \quad M_v = 0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times C_{pe}) \times BD^2 \quad (4.3.4)$$

$M_w = M_h + M_v$ として V を算出

ここで、 W : 建物重量 (kN)

D : 建物奥行 (m) B : 建物幅 (m)

$C_{ft} = 2.0$ (最大の場合を仮定)、 $C_{pe} = 1.8$ として計算

(b) 竜巻の水平方向の旋回流のみが建築物に作用する場合

$$\text{転倒モーメント} \quad M_w = W \times (D/2) \times 1000 \text{ (Nm)} \quad (4.3.5)$$

$$\text{水平方向風圧力モーメント} \quad M_h = 0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times C_f) \times BH^2 \quad (4.3.6)$$

$$\begin{aligned} \text{鉛直方向風圧力モーメント} \quad M_v = & -0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times C_{pe2}) \times BD^2 \\ & -0.5 \times (0.5 \cdot V^2 \times (C_{pe1} - C_{pe2})) \times B(D^2 - D'^2) \end{aligned} \quad (4.3.7)$$

$M_w = M_h + M_v$ として V を算出

ここで、 W : 建物重量 (kN)

D : 建物奥行 (m) B : 建物幅 (m)

$C_f = 1.2$, $C_{pe1} = -0.5$, $C_{pe2} = -1.0$ として計算

図 4.3-1 に水平耐力の喪失で崩壊する場合の耐力と風速の関係、図 4.3-2 に竜巻状気流発生装置を用いた既往の風圧実験結果^{4,5)}に基づいて算出した風速（以下、仮定(a)と称する）と転倒モーメントの関係を、図 4.3-3 に通常の風力算定時の風力係数を用いて算出した風速（以下、仮定(b)と称する）と転倒モーメントの関係を示した。

水平耐力の喪失で崩壊する場合は 60m/s 程度以上の風速であり、転倒によって崩壊する風速は、仮定(a)では 50m/s 程度、仮定(b)では 80m/s 程度以上の計算結果となった。仮定(a)の場合は、水平耐力により決まる風速が、転倒によって決まる風速よりも大きい場合が多く、図 4.3-4 に両者を比較して示したが、多くが水平耐力で崩壊が生じるより先に、転倒による崩壊が生じる計算結果となった。反対に仮定(b)の場合は、図 4.3-5 に示したとおり、転倒によって決まる風速が、水平耐力の喪失で決まる風速よりも概ね大きくなる結果となった。竜巻による水平流のみを風力として考えた場合（仮定(b)）には、2階建ての木造住宅の転倒が起こる可能性が低いが、気圧差による鉛直上向き方向の風力を考慮すると（仮定(a)）、転倒が起こる可能性が高くなることが示唆された。

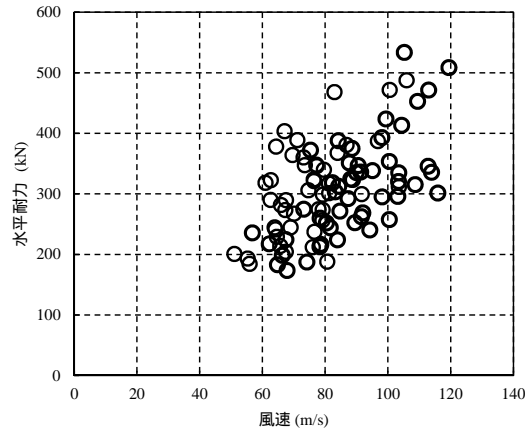


図 4.3-1 水平耐力の喪失で崩壊する場合の耐力と風速の関係 ($C_f = 1.2$)

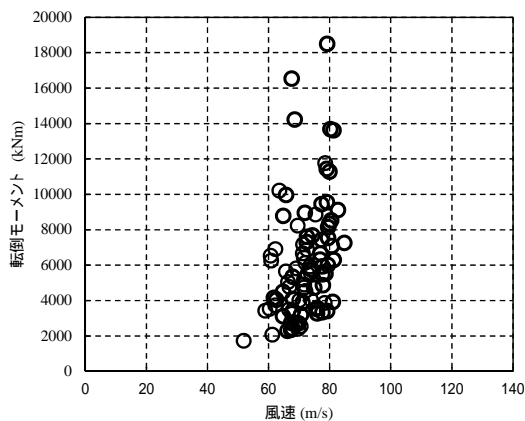


図 4.3-2 転倒で崩壊する場合の転倒モーメントと風速の関係（仮定(a)）

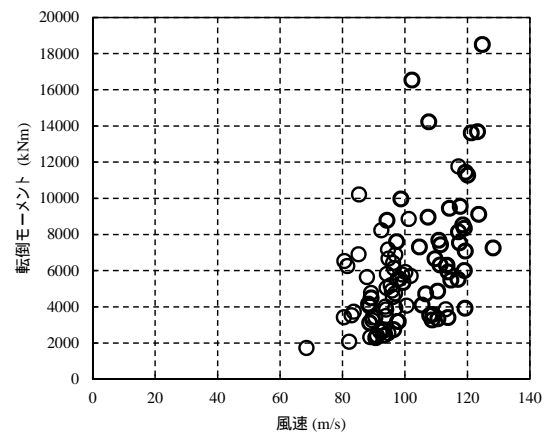


図 4.3-3 転倒で崩壊する場合の転倒モーメントと風速の関係（仮定(b)）

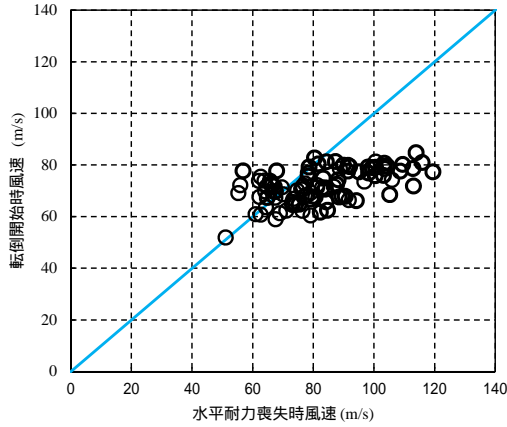


図 4.3-4 水平耐力の喪失で崩壊する場合の風速と転倒により崩壊する場合の風速の関係 (仮定(a))

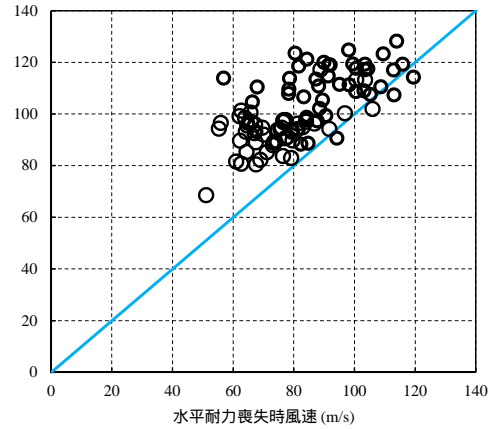


図 4.3-5 水平耐力の喪失で崩壊する場合の風速と転倒により崩壊する場合の風速の関係 (仮定(b))

参考文献

- 4.1) 室田達郎, 山口修由, 鈴木 恒, 新野 宏, 藤谷徳之助: 1990 年の千葉県茂原市の竜巻による建築物の被害調査報告, 建築研究資料, No. 78, 1992. 3
- 4.2) J. Lee, T. Samaras and C. Young: Pressure Measurement at the Ground in an F-4Tornado, 22nd Conference on Severe Local Storms, 2004
- 4.3) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 建築研究資料, No. 136, 2012. 3
- 4.4) (財) 日本住宅・木材技術センター: 木造軸組工法住宅の限界耐力計算による設計の手引き, 2009. 3
- 4.5) 喜々津仁密, パーサー サーカー, フレッド ハーン: 竜巻状気流発生装置を活用した低層建築物に作用する風力特性に関する基礎的研究, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, Vol. 21, pp. 149-154, 2010

第5章 建築物等の被害形態に基づく風速の推定

5.1 検討の主旨

国土技術政策総合研究所と建築研究所が実施した建築物等の現地調査^{5.1)}では、被害形態の分類と並行して、竜巻により被災した建築物及び工作物の採寸等も行った。以下の検討では竜巻による被害が確認された建築物及び工作物について、水平方向の旋回流や急激な気圧降下によって生じる力、建築物の崩壊メカニズム、建築物重量、構成部材断面等のいくつかの計算上の仮定に基づき、建築物の骨組が崩壊メカニズムに達する風速、基礎や工作物底部の風上端が浮き上がり始める風速（以下「崩壊開始風速」、「転倒開始風速」等）を推定した。

5.2 風力評価

一般に、竜巻によって建築物に作用する力としては、以下の3つが挙げられる^{例えば5.2)}。

- i) 水平方向の旋回流によって生じる風力
- ii) 急激な気圧降下によって生じる力
- iii) 飛来物による衝撃力（本検討では考慮しない）

i) では、一様な水平流が建築物に作用すると仮定し、その風圧力 ω (N/m²) は下式で表される。ここで、 ρ : 空気密度 (1.2 kg/m³)、 V : 竜巻の突風風速 (m/s)、 C_f : 風力係数であり、 V は水平方向の旋回流の風速と竜巻の進行速度をベクトル的に加算したものである(式(5.2.1))。

$$\omega = 0.5 \rho V^2 \times C_f \quad (\text{N/m}^2) \quad (5.2.1)$$

一方、ii) では、一様な水平流を想定した風力算定では考慮されないものであり、竜巻の中心が建築物付近を通過する場合など、i)に加えて、竜巻による急激な気圧降下により鉛直上向きに吸い上げる力が屋根等の各部を含めた建築物全体に作用する。

なお、本推定のうち、風力による転倒モーメントについて検討している建築物は水平方向に対しては屋根平均高さから地盤面までの風圧力の積分値、鉛直方向に対しては屋根面の範囲（軒の出の範囲を除く）での風圧力の積分値がそれぞれ風力として建築物に作用したと考えている。風力による水平力について検討している建築物は水平方向について通常風力計算と同様に建築物高さから1階中央高さまでの風圧力の積分値が風力として建築物に作用したと考えている。また、風力による転倒モーメントについて検討している工作物については水平方向については建築物と同様に、工作物高さから地盤面までの風圧力の積分値が風力として作用したと考え、鉛直方向に作用する風力については無視している。

5.3 転倒した木造建築物

写真 5.3-1 に示す建築物（つくば市北条地区）は木造 2 階建てであり、基礎が上下反転した状態で張間方向に転倒し、1 階部分が崩壊していた。周辺には傾斜した鉄骨造建築物（写真 3.2-5）、土台基礎を残し上部構造が飛散した木造建築物（写真 3.1-13）等が確認され、竜巻で生じた突風により建築物等に甚大な被害が確認された地域である。



写真 5.3-1 転倒した木造建築物

転倒した基礎の寸法（レーザー距離計測及び写真から推定）から床平面は張間 6.5 m×桁行 9.2 m と推定された。屋根は寄棟瓦屋根であり 3 寸勾配（屋根傾斜角 16.7°）と仮定した。軒の出の長さは航空写真から測定された屋根平面と床平面を比較し、木造建築物の標準的な寸法も踏まえて 0.455m（片側）と推定した。これらより、地盤面からの屋根平均高さは 6.45 m と算定される。また、崩壊メカニズムは張間構面の風下側の基礎底辺（図 5.3-1(a)の基礎底辺）を転倒回転中心と仮定し、高さ H として 6.45m（地盤面からの屋根平均高さ）+0.2m（基礎の底盤厚さ）=6.65m を用いた。一方、建築物総重量は、630.5 kN と算定した（参考 1 参照）。

(1) 竜巻の水平方向の旋回流のみが建築物に作用する場合

当該建築物に対して一様な水平流を想定した風力係数（水平及び鉛直上向き方向）で算定した風力が、当該建築物の転倒抵抗モーメントに達する時の風速は、以下のとおり算定される。

桁行長さ B (m)、張間長さ D (m)、高さ H (m) とする。

建築物総重量 W (kN)、基礎の底盤厚さ H' (m) とする。

転倒抵抗モーメント M_w (Nm)、水平方向の風力による転倒モーメント M_h (Nm)、鉛直方向の風力による転倒モーメント M_v (Nm) とする。

ここで、建築物の基礎回転中心周りの転倒抵抗モーメント M_w は建築物総重量 W に建築物張間長さ D の半分を乗じて算定している（式(5.3.1)）。一方、風力による転倒モーメント (M_h 及び M_v) は建築物の屋根面 ($B \times D$) と建築物桁行の壁面 ($B \times (H - H')$) に作用する風圧力 ($0.5 \cdot \rho \times C_{fb}$ または C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4}) を積分して算定している（式(5.3.2)、式(5.3.3)～(5.3.4)）。ここで、 q は速度圧 (N/m^2) を表し、 C_{fb} は建築物桁行の壁面の風力係数、 C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4} はそれぞれ寄棟屋根に作用する鉛直上向きの風力係数である。

$$M_w = W \times (D/2) \times 1000 \quad (\text{Nm}) \quad (5.3.1)$$

$$M_h = B \int_{H'}^H (0.5 \rho C_{fh} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.3.2)$$

$$q = 0.5 \rho V^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (5.3.3)$$

$$\begin{aligned} M_v &= \int_0^{D/2} 2C_{fv2} q \cos(16.7^\circ) x^2 dx + \int_{D/2}^D 2C_{fv1} q \cos(16.7^\circ) x(D-x) dx \\ &\quad + \int_0^{D/2} C_{fv4} q \cos(16.7^\circ) x(B-2x) dx + \int_{D/2}^D C_{fv3} q \cos(16.7^\circ) x(B-2D+2x) dx \\ &= \left\{ \frac{1}{12} D^3 C_{fv2} + \frac{1}{6} D^3 C_{fv1} + \left(\frac{1}{8} BD^2 - \frac{1}{12} D^3 \right) C_{fv4} + \left(\frac{3}{8} BD^2 - \frac{1}{6} D^3 \right) C_{fv3} \right\} q \cos(16.7^\circ) \end{aligned} \quad (\text{Nm}) \quad (5.3.4)$$

ここで想定した風圧力分布を図 5.3-1(a) に示す。鉛直上向きの風力係数 C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4} としては、参考文献^{5.4)}に掲載されている寄棟屋根を有する建築物に作用する外圧係数 ($C_{fv1} = -1.0$ 、 $C_{fv2} = -0.5$ 、 $C_{fv3} = -0.69$ 、 $C_{fv4} = -0.5$) を仮定し、建築物桁行の壁面の風力係数 $C_{fb} = 1.2$ を仮定すると、転倒開始風速は

$$V = 97 \text{ m/s}$$

と推定される。

(2) (1)に加えて竜巻による急激な気圧降下が建築物に作用する場合

当該建築物に対して、水平方向の旋回流によって生じる風力に加えて竜巻通過時の急激な気圧降下によって生じる力が作用する場合、これらの合力としての力が当該建築物の転倒抵抗モーメントに達する時の風速は、以下のとおり算定される。

ここで、鉛直上向きの風力係数 C_{fv} と建築物桁行の壁面の風力係数 C_{fb} は、既往の竜巻状気流発生装置を活用した風圧実験結果^{5.3)}を援用する (参考 2 参照)。ただし、実験結果は参表 1 に示す限られた実験条件で得られたものである。一般に風力係数の値は旋回流のコア半径と建築物の寸法との比や竜巻の移動速度等の諸条件によって異なると考えられることから、建築物桁行の壁面の風力係数として一様な水平流を想定した場合に用いる係数 1.2 (竜巻状気流発生装置を活用した風圧実験結果における風力係数 C_{fb} の 6 割) による検討も行った。これらの検討においては、べた基礎の底面に作用する圧力は竜巻状気流発生装置による風圧実験での模型内圧 (模型壁面には均質に微小な隙間が開けられている) と仮定し、竜巻通過時の気圧差 (屋根面と基礎底面との圧力差) による鉛直上向きの力として最大値を用いた。

(1)での検討と同様に建築物の基礎回転中心周りの転倒抵抗モーメント M_w は建築物総重量 W に建築物張間長さ D の半分を乗じて算定している (式(5.3.5))。一方、風力による転倒モーメント (M_h 及び M_v) は建築物の屋根面 ($B \times D$) と建築物桁行の壁面 ($B \times (H - H')$) に作用する風圧力 ($0.5 \cdot V^2 \times C_{fb}$ または C_{fv}) を積分して算定している (式(5.3.6)、式(5.3.7))。

$$M_w = W \times (D/2) \times 1000 \quad (\text{Nm}) \quad (5.3.5)$$

$$M_h = B \int_{H'}^H (0.5 \rho C_{fb} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.3.6)$$

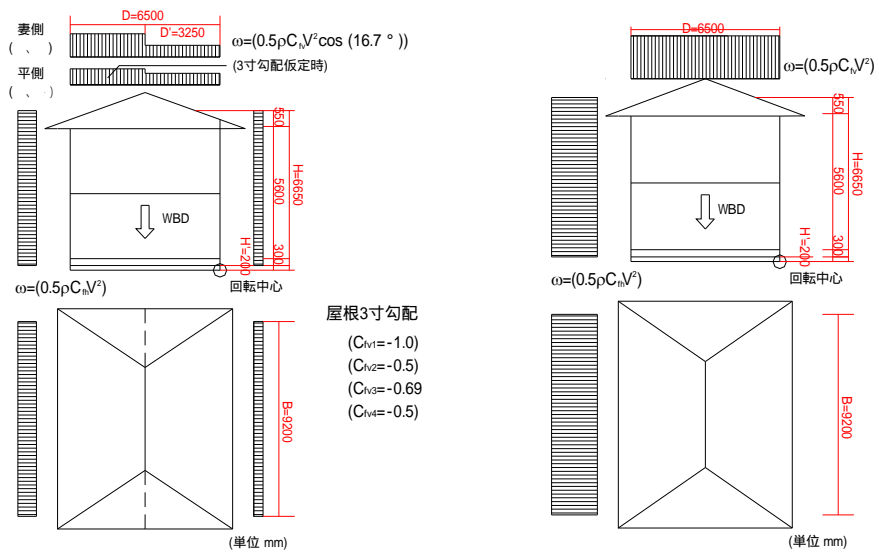
$$M_v = B \int_0^D (0.5 \rho C_{fv} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.3.7)$$

ここで想定した風圧力分布を図 5.3-1(b)に示す。参考 2 に示す竜巻状旋回流の実験 (参図 1、参表 1 参照) の結果を踏まえて、参図 2(a)の C_{pe} ($x/R_m \doteq 1.0$)から鉛直上向きの風力係数を $C_{FV} = -1.8$ (C_{Fz} の最大値)とする。また、竜巻状旋回流が反時計周りに建築物に作用するものとして、参図 2 (b)の C_{Fy} ($x/R_m \doteq 1.0$)から建築物桁行の壁面の風力係数を $C_{Fh} = 2.0$ 又は 1.2 とすると、転倒開始風速は

$V = 68 \text{ m/s}$ (建築物桁行の壁面の風力係数 C_{Fh} が 2.0 の場合) 又は

77 m/s (建築物桁行の壁面の風力係数 C_{Fh} が 1.2 の場合)

と推定される。



(a) 水平方向の旋回流のみが作用する場合

(b) 急激な気圧降下が作用する場合

図 5.3-1 想定した風圧力分布

(参考1) 建築物重量算定時の仮定

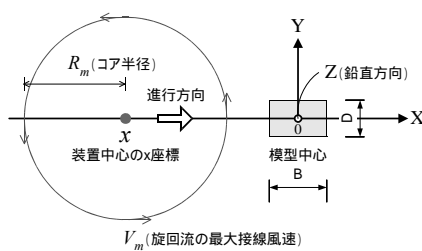
- 壁 : 外壁/サイディング, 内壁/せっこうボード(飛散物より推定)
- 屋根 : 寄棟屋根, 瓦(飛散物より推定)、3寸勾配、軒の出0.455m
- 基礎 : べた基礎(一般的な木造住宅の仕様を勘案して、立ち上がり高さ0.3m、幅0.15m、底盤厚さ0.2mと仮定)
- 積載重量 : 0.3 kN/m²(地震力算定用の積載荷重の半分とする)
- 内壁壁線 : 桁行方向3通り、張間方向4通り(基礎立ち上がりから推定)
- 外壁開口率 : 1階30%, 2階20%(一般的な木造住宅を想定)
- 建築物の地盤面からの屋根平均高さ : 6.45m (=0.3m+2.8m×2+0.5×1.1m)(図5.3-1参照)
- 建築物総重量 : 630.5 kN

(参考2) 参考文献^{5.3)}における座標等の定義、実験条件及び風圧実験結果

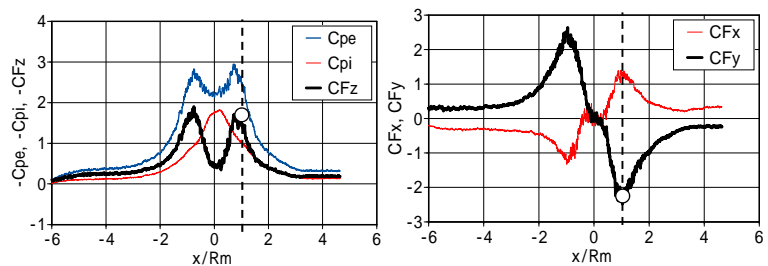
- C_{pe} : 鉛直上向きの外圧係数、 C_{Fy} : 壁面の風力係数(Y方向)
- (C_{pi} : 内圧係数、 C_{Fz} : 鉛直上向きの風力係数、 C_{Fx} : 壁面の風力係数(X方向))
- x : 模型の中心に対する移動する竜巻状気流発生装置の中心の座標、 R_m : 旋回流のコア半径

参表1 実験条件(実験縮尺スケールは1/250)

模型の寸法	張間 D	98mm
	桁行 B	152mm
	軒高	49mm
	屋根勾配	1/12(切妻)
旋回流のコア半径 R_m		0.36m
模型の寸法と旋回流のコア半径との比 $(BD)^{0.5}/R_m$		0.34
旋回流の最大接線風速 V_m		9.6m/s
装置の移動速度		0.15m/s



参図1 座標等の定義



(a) 鉛直上向きの外圧係数 (b) 壁面の風力係数

参図2 竜巻状気流発生装置を用いた風圧実験結果

5.4 上部構造が飛散した木造建築物

写真 5.4-1 に示す建築物（つくば市北条地区）は枠組壁工法による木造 2 階建てであり、基礎を残し、土台から上が崩壊していた。当該建築物の北側には雇用促進住宅北条宿舎があり、この周辺では竜巻で生じた突風により建築物等に甚大な被害が確認された。被災直後に撮影された写真では、基礎の上に、崩壊した部材と自動車が載った状態であった。写真 5.4-1 に示すように基礎には柱脚金物とアンカーボルトが確認された。ハウスメーカーの協力により詳細な図面と各部の構造仕様が確認できる資料を入手した。

崩壊メカニズムとして、下記の 4 通りのケースを想定し、それぞれ風速の推定を行った。ここで、(2)から(4)のメカニズムを想定した検討に当たっては、(1)のメカニズムが先行して発生しないこと（つまり、小屋組の形状が保たれていること）を前提とする。

- (1) 鉛直上向きの風力によって小屋組が飛散する場合
- (2) 鉛直上向きの風力によって柱脚部が崩壊する場合
- (3) 水平方向の風力によって生じる水平力により、1 層が層崩壊する場合
- (4) 水平方向の風力によって生じる転倒モーメントにより、柱脚部が崩壊する場合



写真 5.4-1 上部構造が飛散した木造建築物

- (1) 鉛直上向きの風力によって小屋組が飛散する場合

当該建築物の近辺で撮影された動画や、調査時の状況から小屋組が先に飛散した可能性が考えられる。ここでは、図 5.4-1 に示した通り、小屋組が鉛直上方向に受ける引き抜き力と、小屋組と 2F の上枠材を繋結する金物の引張耐力の比較により風速の計算を行う。小屋組に作用する鉛直上向きの引張力は既往の実験結果^{5.3)}により風力係数 C_{f2} を卓越開口がある場合は 2.5、卓越開口がない場合 1.8 として下記の式により計算を行った。

$$\frac{T}{A_r} = 0.5 \rho C_{f2} V^2 - \frac{W_r}{A_r} \quad (5.4.1)$$

ここで、 T : 小屋組に作用する引き抜き力 = 金物の引張耐力の合計 (N)

A_r : 屋根面の面積 (m²)

ρ : 空気密度 1.2kg/m³

C_{f2} : 竜巻状気流発生装置による風圧実験で得た風力係数の最大値

1.8 (卓越開口なし) 2.5 (卓越開口あり)

W_r : 屋根の重量 (N)

上部構造重量 W_r と屋根面積 A_r は下記の通り計算を行う。

$$\cdot 0.5 \rho C_{f2} V^2 = 0.5 \times 1.2 \times C_{f2} \times V^2 = 1.1 \sim 1.5 V^2$$

・屋根（母屋を含まない）の重量 $W_r = 87.84\text{m}^2 \times 200\text{N/m}^2 = 17.57\text{kN}$

・屋根面積 $A_r = 93.96\text{m}^2$

小屋組の引張耐力は、小屋組と2階の上枠を連結する金物の耐力の総和とし、図面、仕様書で確認された下記情報により算出した。

・図面により確認した小屋組と上枠を緊結する金物の数：72本

・金物1個あたりの引張耐力：0.77（ZN40－ベイツガ）×4本×1.5（短期許容→終局）= 4.62kN

・小屋を緊結する金物の引張耐力の合計 $T = 4.62 \times 72 = 332.64\text{kN}$

耐力と風圧力の釣り合いから風速を計算すると、小屋組引張破壊時風速は

$$V = 50 \sim 57\text{m/s}$$

と推定される。

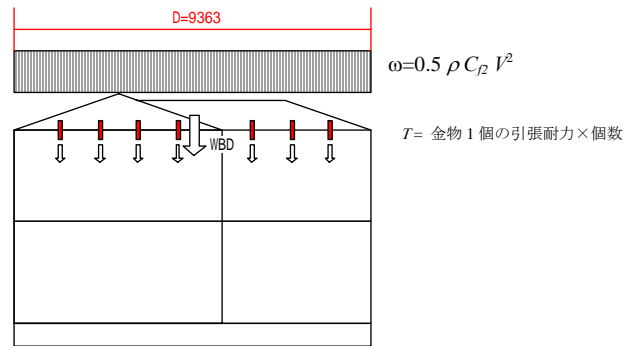


図 5.4-1 想定した風圧力分布

(2) 鉛直上向きの風力によって柱脚部が崩壊する場合

現地調査の際に基礎と柱脚を緊結する金物の崩壊が確認された。ここでは、(1)で試算した鉛直上向きの引張力が基礎－柱脚接合部に作用して崩壊したと仮定して、下式の耐力の計算と引張力の釣り合いによって風速の計算を行う。

$$\frac{T}{A} = 0.5 \rho C_{f2} V^2 - \frac{W}{A} \quad (5.4.2)$$

ここで、 T ：緊結部金物の引張耐力の合計(N)

A ：1Fの床面積 (m^2)

C_{f2} ：竜巻状気流発生装置による風圧実験で得た風力係数の最大値

1.8（卓越開口なし） 2.5（卓越開口あり）

W ：上部構造の重量 (N)

上部構造重量 W と床面積 A は下記の通り計算を行う。

$$\bullet 0.5 \rho C_{f2} V^2 = 0.5 \times 1.2 \times C_{f2} \times V^2 = 1.1 \sim 1.5 V^2$$

・上部構造（1F床を含む）の重量 $W = 270.6\text{kN}$

・1F床面積 $A = 63.43\text{m}^2$

基礎－柱脚接合部の引張力は基礎と縦枠材を連結する金物（写真 5.4-1）の耐力の総和とし、図面、仕様書で確認された下記情報により算出した。

- ・ 図面により確認した柱脚金物の個数：24 本
- ・ 金物 1 個あたりの引張耐力：0.77 (ZN65-バイツガ) × 8 本 × 1.5 (短期許容→終局) = 9.24kN
- ・ 柱脚金物の引張耐力の合計 $T = 9.24 \times 24 = 221.76\text{kN}$

耐力と風圧力の釣り合いから風速を計算すると、柱脚接合部引張破壊時風速は

$$V = 69 \sim 83\text{m/s}$$

と推定される。

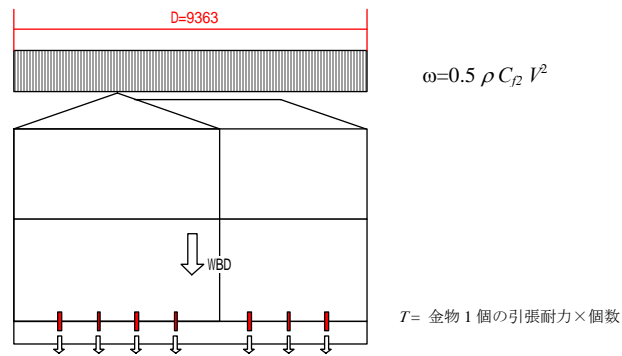


図 5.4-2 想定した風圧力分布

(3) 水平方向の風力によって生じる水平力により、1層が層崩壊する場合

ここでは水平方向の風力によって生じる水平力により 1 層が層崩壊する場合の風速の計算を行う。当該建築物の被災直後の航空写真によると、竜巻による旋回流は南から北の方向に作用したと推測されるため、ここでは梁間方向の南から北へ風力が作用したと仮定する。一方、建物の耐力は入手した耐力壁の荷重-変形関係の短期許容せん断耐力の 1.5 倍を単位長さあたりの水平耐力とし、壁長を乗じることで、1 層の崩壊メカニズム時の層せん断力とした。

1 層梁間方向の層せん断力

$$Q_s = Q_a \times 1.5 = 8690.5 \text{ (kgf)} \times 9.8 / 1000 \times 1.5 = 127.75 \text{ (kN)}$$

建築物に作用する風力による水平力 (P_h) は建築物の壁面 ($B \times$ 小屋の半分までの高さ) に作用する風圧力 ($0.5 \rho V^2 \times C_{th}$) を鉛直方向に積分して算定している ((5.4.3) 式)。ここで、 q は速度圧 (N/m^2) を表し、 C_{th} は建築物の壁面の風力係数である。

$$P_h = B \int_0^H q C_{th} x dx \quad (\text{N}) \quad (5.4.3)$$

$$q = 0.5 \rho V^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (5.4.4)$$

ここで想定した風圧力分布を図 5.4-3 に示す。壁面の風力係数 $C_{th}=1.2$ を仮定すると、1 階層崩壊時風速は

$$V = 57\text{m/s}$$

と推定される。

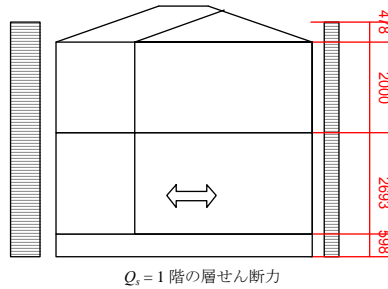


図 5.4-3 想定した風圧力分布

(4) 水平方向の風力によって生じる転倒モーメントにより、柱脚部が崩壊する場合

ここでは、水平方向の風力によって生じる転倒モーメントにより、柱脚部の接合部が破壊する場合の風速の計算を行う。建物に作用する風力は、5.3節の検討と同様に、下記の2通りのケースを想定して計算を行った。

ケース1：竜巻の水平方向の旋回流のみが建築物に作用する場合

ケース2：ケース1に加えて竜巻による急激な気圧降下が建築物に作用する場合

① 竜巻の水平方向の旋回流のみが建築物に作用する場合

転倒抵抗モーメント M_w (Nm)、水平方向の風力による転倒モーメント M_h (Nm)、鉛直方向の風力による転倒モーメント M_v (Nm)とする。ここで、建築物の基礎回転中心周りの転倒抵抗モーメント M_w は建築物総重量 W に建築物梁間長さ D の半分を乗じて算定し、回転中心からの距離の比率に応じた柱脚金物の引張力 ($9.24 \times x/D$: x は回転中心からの距離) が転倒抵抗モーメントに寄与すると仮定する(式(5.4.5))。一方、風力による転倒モーメント (M_h 及び M_v) は建築物の屋根面と建築物桁行の壁面に作用する風圧力 ($0.5 \rho V^2 \times C_{fh}$ または C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4}) を積分して算定している(式(5.4.6)、式(5.4.7)～(5.4.8))。ここで、 q は速度圧 (N/m^2) を表し、 C_{fh} は建築物桁行の壁面の風力係数、 C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4} はそれぞれ寄棟屋根に作用する鉛直上向きの風力係数である。 $B(x)$ は屋根面を三角形と、台形に領域分割した際の各領域の幅の関数である。 x_1 、 x_2 は領域の積分における始点、終点の回転中心から見た距離である。

$$M_w = W \times (D/2) \times 1000 + \Sigma(T \times x / D \times x) \quad (\text{Nm}) \quad (5.4.5)$$

$$M_h = B \int_0^H (0.5 \rho C_{fh} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.4.6)$$

$$q = 0.5 \rho V^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (5.4.7)$$

$$M_v = \int_{x_1}^{x_2} C_{fv1} \sin \theta x B(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} C_{fv2} \sin \theta x B(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} C_{fv3} \sin \theta x B(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} C_{fv4} \sin \theta x B(x) dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.4.8)$$

ここで想定した風圧力分布を図 5.4-4(a) に示す。鉛直上向きの風力係数 C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4} としては、参考文献 5.4) に掲載されている寄棟屋根を有する建築物に作用する外圧係数 ($C_{fv1} = -1.0$ 、 $C_{fv2} = -0.5$ 、 $C_{fv3} = -0.67$ 、 $C_{fv4} = -0.5$) を仮定し、建築物桁行の壁面の風力係数 $C_{fh} = 1.2$ を仮定すると、転倒開始風速は

$$V = 94 \text{ m/s}$$

と推定される。

② ①に加えて竜巻による急激な気圧降下が建築物に作用する場合

5.3節における検討と同様にここで、鉛直上向きの風力係数 C_{fv} と建築物桁行の壁面の風力係数 C_{fh} は、既往の風圧実験結果^{5.3)}を援用する(5.3節の参考2参照)。

①での検討と同様に建築物の基礎回転中心周りの転倒抵抗モーメント M_w は建築物総重量 W に建築物張間長さ D の半分を乗じて、回転中心からみて、最も遠い外周壁の柱脚金物の引張力を考慮して算定している(式(5.4.9))。一方、風力による転倒モーメント (M_h 及び M_v) は建築物の屋根面 ($B \times D$) と建築物桁行の壁面 ($B \times H$) に作用する風圧力 ($0.5 \rho V^2 \times C_{fh}$ または C_{fv}) を積分して算定している(式(5.4.10)、式(5.4.11))。

$$M_w = W \times (D/2) \times 1000 + \Sigma(T \times x / D \times x) \quad (\text{Nm}) \quad (5.4.9)$$

$$M_h = B \int_0^H (0.5 \rho C_{fh} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.4.10)$$

$$M_v = B \int_0^D (0.5 \rho C_{fv} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.4.11)$$

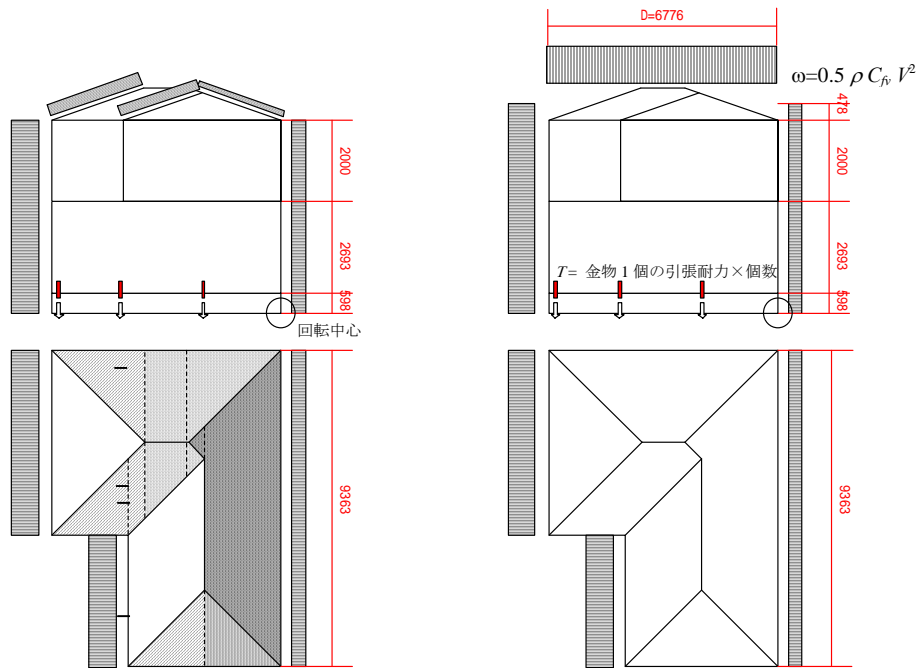
ここで想定した風圧力分布を図5.4-4(b)に示す。5.3節の参考2に示す竜巻状旋回流による風圧実験(参図1、参表1参照)の結果を踏まえて、鉛直上向きの風力係数を $C_{fv} = -1.8$ とする。また、竜巻状旋回流が反時計周りに建築物に作用するものとして、建築物桁行の壁面の風力係数を $C_{fh} = 2.0$ 又は 1.2 とすると、転倒開始風速は

$$V = 56 \text{ m/s (建築物桁行の壁面の風力係数 } C_{fh} \text{ が } 2.0 \text{ の場合) 又は} \\ 62 \text{ m/s (建築物桁行の壁面の風力係数 } C_{fh} \text{ が } 1.2 \text{ の場合)}$$

と推定される。

以上の検討より、想定する崩壊メカニズムと竜巻の作用条件によって風速の推定結果に幅のある結果となったが、以下の3つの崩壊メカニズムの場合が他のメカニズムと比較して、比較的低い風速時(50~60m/s程度)に発生する可能性が高いことが推測される。

- ・ 鉛直上向きの風力によって小屋組が飛散する場合
- ・ 水平方向の風力によって生じる水平力により、1層が層崩壊する場合
- ・ 竜巻による急激な気圧降下も考慮した場合に、水平方向の風力によって生じる転倒モーメントにより、柱脚部が崩壊する場合



① $C_{p1}=-1.0$ ② $C_{p2}=-0.5$ ③ $C_{p3}=-0.67$ ④ $C_{p4}=-0.5$
 (a) 水平方向の旋回流のみが作用する場合 (b) 急激な気圧降下が作用する場合

図 5.4-4 想定した風圧力分布

5.5 崩壊した鉄骨造建築物

写真 5.5-1 に示す建築物（つくば市水守地区）は 1×1 スパン 鉄骨造 2 階建てであり、基礎及び上部構造の崩壊を伴い原位置から車道を挟んだ反対側まで飛ばされて転倒していた。また、写真に示すように 1 階の柱頭では張間（弱軸）方向に曲げ破壊が生じ、ベースプレートでは柱脚ボルトが破断した形跡が確認された。基礎は布基礎と思われるが部分的に破壊されており、明確な形状は確認できなかった。周辺に被災した建築物は確認されていない。



写真 5.5-1 崩壊した鉄骨造建築物

建築物の原位置における基礎跡の寸法から、床平面は張間 11.5 m×桁行 7.0 m と推定された。階高は被災建築物の採寸結果から、1 階 3.5 m、2 階 1.8 m と推定された。1 階柱は H 形鋼(175× 175× 7.5× 11 mm)であり、柱脚ボルトは孔径より 2M16 と推定された。また、崩壊メカニズムは張間方向の 1 階層崩壊とし、柱脚はピン支承

と仮定している。なお、ここでは建築物重量算定が困難であるため、柱曲げ終局モーメントに寄与する柱軸力及び鉛直上向き方向の風力を無視している。

当該建築物に対して一様な水平流を想定した風力係数(水平方向)で算定した風力が、当該建築物の骨組の水平耐力に達する時の風速は、以下のとおり算定される。

桁行長さ B (m)、張間長さ D (m)、1階階高 H_1 (m)、2階階高 H_2 (m) とする。

建築物張間方向の崩壊メカニズム時層せん断力 Q_m (N)、水平方向の風力による層せん断力 Q_h (N) とする。

ここで、建築物張間方向の崩壊メカニズム時層せん断力 Q_m は、柱頭弱軸周りの全塑性モーメント M_p を1階階高で除して柱1本当たりのせん断力を算定し、架構を形成する柱4本のせん断力を加算することにより算定している(式(5.5.2))。また、柱頭全塑性モーメント M_p は塑性断面係数 Z_p (当該建築物の柱部材の場合は 172000 mm^3) に鉄骨降伏応力度 σ_y (本検討では 300 N/mm^2 と仮定している) を乗じて算定している((5.5.1)式)。一方、風力による層せん断力(Q_h)は1階中央高さ $H_1/2$ から建築物高さ H_1+H_2 までの建築物桁行の壁面($B \times (H_2+H_1/2)$)に作用する風圧力($0.5 \rho V^2 \times C_{fh}$)を積分して算定している(式(5.5.3))。ここで、 C_{fh} は建築物桁行の壁面の風力係数である。

$$M_p = Z_p \times \sigma_y / 1000 \quad (\text{Nm}) \quad (5.5.1)$$

$$Q_m = 4 \times M_p / H_1 \quad (\text{Nm}) \quad (5.5.2)$$

$$Q_h = B \int_{H_1/2}^{H_1+H_2} (0.5 \rho C_{fh} V^2) dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.5.3)$$

想定した風圧力分布を図5.5-1に示す。建築物桁行の壁面の風力係数 $C_{fh}=1.2$ を仮定すると、崩壊開始風速は

$$V = 45 \text{ m/s}$$

と推定される。

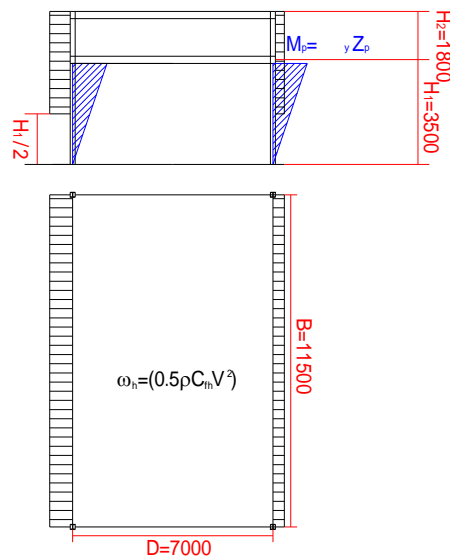


図 5.5-1 想定した風圧力分布

5.6 傾斜した鉄骨造建築物

写真 5.6-1 に示す建築物（つくば市北条地区）は1×3 スパン鉄骨造平屋であり、桁行方向の引張ブレース端部のせん断ボルトの破断（破断位置が上端か下端かはブレースにより異なる）を伴い、桁行方向に変形角 1/10 rad 程度傾斜していた。周辺には転倒した木造建築物（写真 3.1-1）、土台基礎を残し上部構造が飛散した木造建築物（写真 3.1-13）等が確認され、竜巻で生じた突風により建築物等に甚大な被害が確認された地域である。



写真 5.6-1 傾斜した鉄骨造建築物

建築物の採寸結果から床平面は12×9mと推定された。屋根は切妻山形屋根であり、建築物高さはレーザー距離計により計測し、棟高6.8m、軒高5.0mと推定された。桁行構面にはブレース材(ターンバックル(M16))が使用されているが、胴縁だけで圧縮桁梁材は確認できなかった。羽子板がせん断ボルト1本(孔径からM12と推定される)でガセットプレート(板厚4mm)に止められているのみであった。通常せん断ボルトは引張荷重が作用する部分に使用されるものであり、本検討ではボルトの終局せん断耐力を引張耐力の概ね6割程度と仮定し、建築物の崩壊メカニズムは桁行ブレース端部破壊に伴う層崩壊としている。

当該建築物に対して一様な水平流を想定した風力係数(水平方向)で算定した風力が、当該建築物の骨組の水平耐力に達する時の風速レベルを算定した。

桁行長さ B (m)、張間長さ D (m)、棟高 H_0 (m)、軒高 H_1 (m) とする。

建築物桁行方向の崩壊メカニズム時層せん断力 Q_m (N)、水平方向の風力による層せん断力 Q_b (N) とする。

ここで、建築物桁行方向の崩壊メカニズム時層せん断力 Q_m は、架構を形成する4本の引張ブレースの引張耐力 P_b を加算し、水平方向の抵抗力に換算することにより算定している(式(5.6.2))。引張ブレースの引張耐力 P_b はブレース端部せん断ボルト(M12)のせん断耐力が概ねボルト引張耐力 T_b (M12ボルトの場合35.4kN)の6割程度と仮定して算定している(式(5.6.1))。一方、風力による層せん断力(Q_b)は1階中央高さ $H_1/2$ から建築物棟高 H_0 までの建築物張間の壁面に作用する風圧力($0.5\rho V^2 \times C_{fn}$)を積分して算定している((5.6.3)式)。ここで、 C_{fn} は建築物張間の壁面の風力係数である。

$$P_b = T_b \times 0.6 \times 1000 \quad (\text{N}) \quad (5.6.1)$$

$$Q_m = 4 \times P_b \times (D/3) / (H_1^2 + (D/3)^2)^{0.5} \quad (\text{N}) \quad (5.6.2)$$

$$Q_h = \int_{H_1/2}^{H_0} B(x)(0.5\rho C_{fh}V^2) dx \quad (\text{N}) \quad (5.6.3)$$

想定した風圧力分布を図 5.6-1 に示す。建築物張間の壁面の風力係数 $C_{fh}=1.2$ を仮定すると、崩壊開始風速は

$$V = 49 \text{ m/s}$$

と推定される。

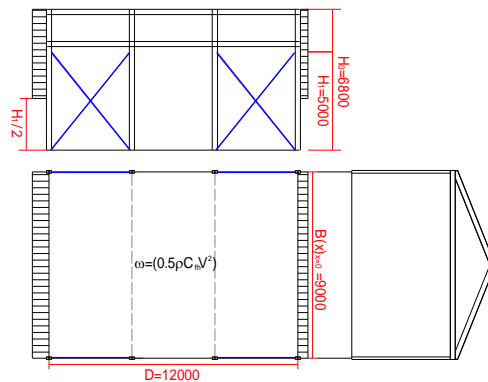


図 5.6-1 想定した風圧力分布

5.7 面外方向に転倒した石塀

写真 5.7-1 に示す工作物（つくば市大砂地区）は大谷石による塀であり、石材間に挟まれた鉄筋が底部で土台に 3cm ほど定着されていた。この底部鉄筋の引張定着破壊を伴い、塀全体の形を保ったまま面外方向に転倒していた。周辺では木造建築物の傾斜被害が確認されている。



写真 5.7-1 転倒した石塀

当該工作物の採寸結果から石材寸法は幅 0.3 m×長さ 0.9 m×高さ 1.2 m であり、高さ方向に 4 段(最上段に一体化されていない笠石)積まれていたものと推定された。抜け出した鉄筋(D10)は 1 段目石材の底面の幅中央位置に石材と石材の間に 1 本ずつ配筋されており、定着長さは 35 mm であった。崩壊メカニズムは風下側の底辺(図 5.7-1 の工作物底辺)を面外転倒回転中心と仮定し、定着長さの短い鉄筋の影響は無視している。一方、工作物重量 W は

石材密度が 1.7 ton/m³ と仮定して、1 スパン(石材 4 ブロック) 当たり 2.7 kN と算定した。

工作物 1 スパンに対して一様な水平流を想定した風力係数(水平方向)で算定した風力が、面外転倒抵抗モーメントに達する時の風速を算定した。

長さ B (m)、幅 D (m)、高さ H (m) とする。

工作物 1 スパン当たりの転倒抵抗モーメント M_w (Nm)、工作物 1 スパンに作用する水平方向の風力による転倒モーメント M_h (Nm) とする。

ここで、面外転倒回転中心周りの転倒抵抗モーメント M_w は 1 スパン(石材 4 ブロック)の工作物重量 W に幅 D の半分を乗じて算定している(式(5.7.1))。一方、風力による転倒モーメント M_h は石材工作物 1 スパンの壁面 ($B \times H$) に作用する風圧力 ($0.5 \rho V^2 \times C_{fh}$) を積分して算定している(式(5.7.2))。

$$M_w = W \times (D/2) \times 1000 \quad (\text{Nm}) \quad (5.7.1)$$

$$M_h = B \int_0^H (0.5 \rho C_{fh} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (5.7.2)$$

想定した風圧力分布を図 5.7-1 に示す。工作物壁面の風力係数 $C_{fh}=1.2$ を仮定すると、転倒開始風速は

$$V = 21 \text{ m/s}$$

と推定される。

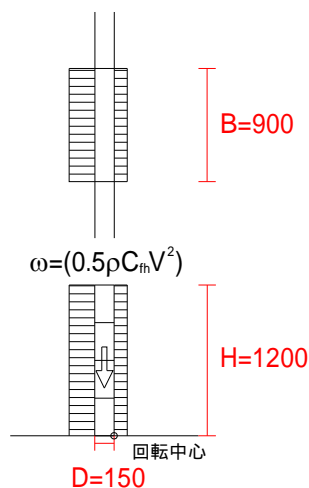


図 5.7-1 想定した風圧力分布

5.8 風速の推定結果に関する考察

喜々津らは既往の研究^{5.5)}において、拡張フジタスケール EF5 規模の竜巻による住家被害の分布状況から得た風速の推定結果とランキン渦モデルに基づく風速分布との比較を行なっている。本節ではこれと同様に、5.3～5.7 節に示した竜巻により生じた突風による被災構造物から推定される最小風速値 V (m/s) とランキン渦モデルに基づく風速分布の比較を行った。

ここでは、ランキン渦モデルにおける最大接線風速 V_{lm} (m/s) は、転倒した木造建築物 (5.3 節) における転倒開始風速 (一様な水平流を仮定したモデル、急激な気圧降下を考慮したモデル) を直接仮定している。竜巻の移

動速度については、当該建築物が竜巻進行方向にほぼ直交する方向に転倒していたため、推定された風速値に与える影響が少ないと考え、ここでは無視している。他の構造物に関しては推定された風速値に竜巻の移動速度が少なからず含まれていると考えられるが、構造物の倒壊方向は風力の主軸方向で定まっていなかったため、明確に区別することが困難であり本検討では無視している。なお、気象研究所の発表において当該竜巻の平均移動速度は17 (m/s)とされている^{5,6)}。最大接線風速に対応するコア半径 R_m (m)については前述のとおり被害中心線と竜巻経路の中心との距離から35mと仮定し、竜巻経路の中心から被災構造物までの距離を r (m)としている。なお、本検討で対象にした被災構造物はいずれも竜巻の進行方向右側に位置していた。

図 5.8-1 に被災構造物から推定される最小風速値とランキン渦モデルに基づく風速分布を比較して示す。全体として竜巻の中心経路からの距離に応じて推定風速が低下する傾向が確認された。気圧降下を考慮した場合に5.3節に示す建築物が転倒開始する風速、気圧降下を考慮した場合の5.4節に示す上部構造飛散建築物が転倒モーメントにより柱脚部が崩壊開始する風速、5.5節に示す鉄骨造建築物が崩壊開始する風速はランキン渦モデルと良い対応関係が確認された。

5.6節に示す傾斜した鉄骨造建築物については竜巻経路の中心から当該建築物までやや離れているにも関わらず、大きな崩壊開始風速値を示した。これは、骨組耐力をボルトのせん断耐力に基づいて算定した点等、推定時の仮定に不確かさがあることに起因していると考えられる。また、5.7節に示す転倒した石塀はコア半径内に相当する範囲に位置しているが、非常に小さい転倒開始風速に留まっている。

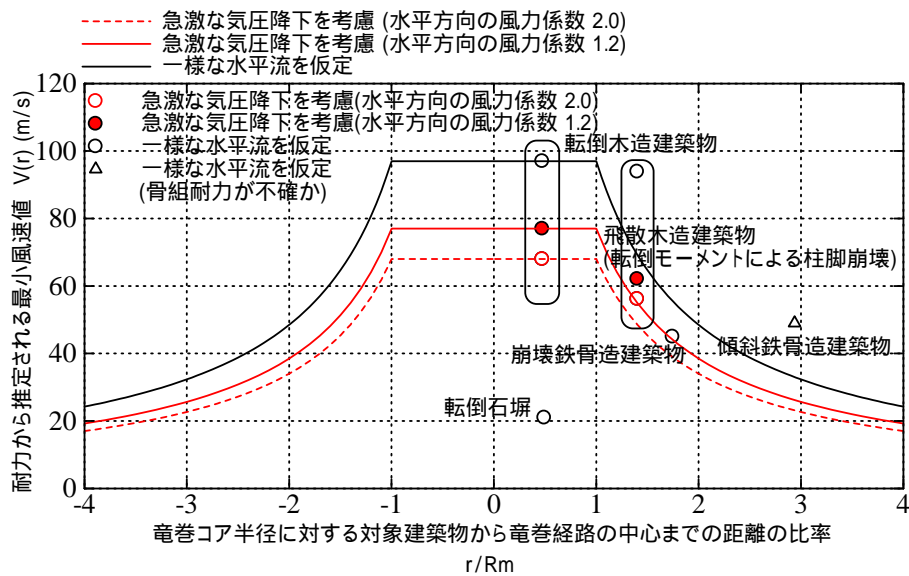


図 5.8-1 推定風速とランキン渦モデルに基づく風速の比較

参考文献

- 5.1) 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突風による建築物被害（速報），2012. 5
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h24tsukuba/h24tsukuba.pdf>，又は
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/120506-tsukuba.pdf>
- 5.2) Emil Simiu, Robert H. Scanlan : Wind Effects on Structures, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp.551-575, 1996
- 5.3) 喜々津仁密，パーサ サーカー，フレッド ハーン：竜巻状気流発生装置を活用した低層建築物に作用する風力特性に関する基礎的研究，第 21 回風工学シンポジウム論文集，Vol. 21, pp.149-154, 2010
- 5.4) 中村修，河井宏允，奥田泰雄，岡田恒：「風圧力、耐風設計等の基準の合理化に関する調査」の実施結果報告，ビルディングレター，日本建築センター，pp.2-5, 2012. 1
- 5.5) 喜々津仁密，パーサ サーカー：2008 年 5 月に米国アイオワ州で発生したトルネードによる建築物被害に関する後日調査，日本風工学会論文集，Vol. 35, No. 3, pp. 73-87, 2010
- 5.6) 気象研究所：平成 24 年 5 月 6 日に茨城県つくば市付近で発生した竜巻について、
2012. 5. 11<http://www.jma.go.jp/jma/menu/tatsumaki-portal/kishouken-kaiseiki.pdf>

第6章 過去の被害事例との比較

6.1 被害統計と被害分布

表 6.1-1 に平成 2 年（1990 年）以降に日本で発生した主な竜巻の規模や被害の概要を示した^{6.1)}。今回同時に発生したつくば竜巻（2012）、筑西竜巻（2012）、真岡竜巻（2012）は、過去の主な竜巻と比較しても、いずれも被害域が長いのが特徴である。また、市街地を直撃した茂原竜巻（1990）、豊橋竜巻（1999）、延岡竜巻（2006）では、甚大な人的被害や住家被害が発生したが、つくば竜巻（2012）、筑西竜巻（2012）、真岡竜巻（2012）はそれらに次ぐ規模の被害であった。

表 6.1-1 平成 2 年以降に発生した主な竜巻と被害の概要^{6.1)}

発生日	発生場所	竜巻規模			人的被害[人]		住家被害[棟]		
		フジタ スケール	被害域 幅[m]	被害域 長さ [km]	死亡	負傷	全壊	半壊	一部 損壊
1990. 12. 11	千葉県茂原市	F3	500～1200	6.5	1	73	82	161	1504
1999. 9. 24	愛知県豊橋市	F3	50～550	18.0	0	415	40	309	1980
2002. 7. 10	埼玉県深谷市	F2	100～150	4.5	0	11	7	0	87
2004. 6. 27	佐賀県佐賀市	F2	200～400	8.0	0	15	15	25	305
2005. 12. 25	山形県酒田市 ^{注1)}	F1	100	9.0	5	33	0	0	4
2006. 9. 17	宮崎県延岡市	F2	150～300	7.5	3	143	79 ^{注2)}	348 ^{注2)}	753 ^{注2)}
2006. 11. 7	北海道佐呂間町	F3	100～300	1.4 15 ^{注3)}	9	31	7	7	25
2009. 7. 19	岡山県美作市	F2	200	6.0	0	2	2	11	65
2009. 7. 27	群馬県館林市	F1～F2	50	6.5	0	21	14	24	286
2009. 10. 8	茨城県土浦市	F1	200～300	2.8	0	2	1	11	94
	茨城県利根町	F1	100～200	6.0	0	4	0	5	116
	千葉県九十九里町	F1	20～30	1.6～ 1.7	0	0	1	0	36
2011. 11. 18	鹿児島県徳之島町	F2	100	0.6	3	0	1	0	0
2012. 5. 6	茨城県常総市・ つくば市	F3	500	17	1	37	76	158	400
	茨城県筑西市・桜川市	F1	600	21	0	3	0	1	144
	栃木県真岡市・益子町・ 茂木町、 茨城県常陸大宮市	F1～F2	650	32	0	12	13	35	438
	福島県会津美里町	F0	300	2	0	0	0	0	(不明)

注 1) 竜巻等の突風データベース^{6.1)}上では、山形県酒田市で発生した突風は「その他（不明を含む）」の分類であるが、突風の全部又はその一部が同時時間帯に同市浜中・黒森地区で発生した竜巻と同一の可能性があるとされている。

注 2) 他の気象現象による被害数を含む。

注 3) 北海道佐呂間町で発生した竜巻では、飛来物が約 15km 先のサロマ湖周辺まで到達していた。

表 6.1-2 に強風被災度ランクで建築物の被害を調べた延岡竜巻（2006）^{6.2)}、つくば竜巻（2012）のランク別の被災建築物の棟数を纏めた。延岡竜巻（2006）では竜巻が延岡市の中心部を縦断したため被災建築物の棟数が1000棟を超えるが、強風被災度ランクで4以上の割合は10%程度である。一方、つくば竜巻（2012）では被災建築物の棟数は延岡竜巻（2006）の約半分であるものの、強風被災度ランクで4以上の割合は20%を超え、甚大な被害を受けた建築物の割合が多い。

表 6.1-2 最近の主な竜巻での強風被災度ランク別の被災建築物の棟数

強風被災度ランク	被害の程度	被害の状況	つくば竜巻 (2012) F3		延岡竜巻 (2006) F2	
			棟	%	棟	%
1	極く軽微な被害	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。	89	16	242	24
2	軽微な被害	瓦がずれる。軒先やケラバなどで部分的に瓦が飛散する。太い枝が折れる。	181	33	344	34
3	顕著な被害	屋根の広範囲で瓦が飛散し、野地板の広い面が見える。部分的に窓ガラスが割れる。太い木が倒れる。	149	27	323	32
4	甚大な被害	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。	78	14	77	8
5	壊滅的な被害	家屋が倒壊する。	51	9	30	3
合 計			548		1,016	

図 6.1-1～6.15 に、茂原竜巻（1990）^{6.3)}、豊橋竜巻（1999）^{6.4)}、佐賀竜巻（2003）^{6.5)}、延岡竜巻（2006）^{6.2)}、佐呂間竜巻（2006）^{6.6)}の被害分布を示す。竜巻は上空の親雲に伴って移動するので、被害分布はほぼ直線状に分布することが多い。つくば竜巻でも、つくば市北条地区での被害はほぼ直線状に分布していた（第2章の図 2.3-1 や図 2.3-5 参照）。一方、被害分布が曲がる（佐賀竜巻）、蛇行する（豊橋竜巻、延岡竜巻）、被害幅が広がる（茂原竜巻、佐呂間竜巻）といった分布をもつことがある。

1990年12月11日千葉県に発生した竜巻による暴風災害の調査研究



図 6.1-1 茂原竜巻 (1990) の被害分布 ^{6.3)}

図 6.1-3 佐賀竜巻 (2003) の被害分布 ^{6.5)}

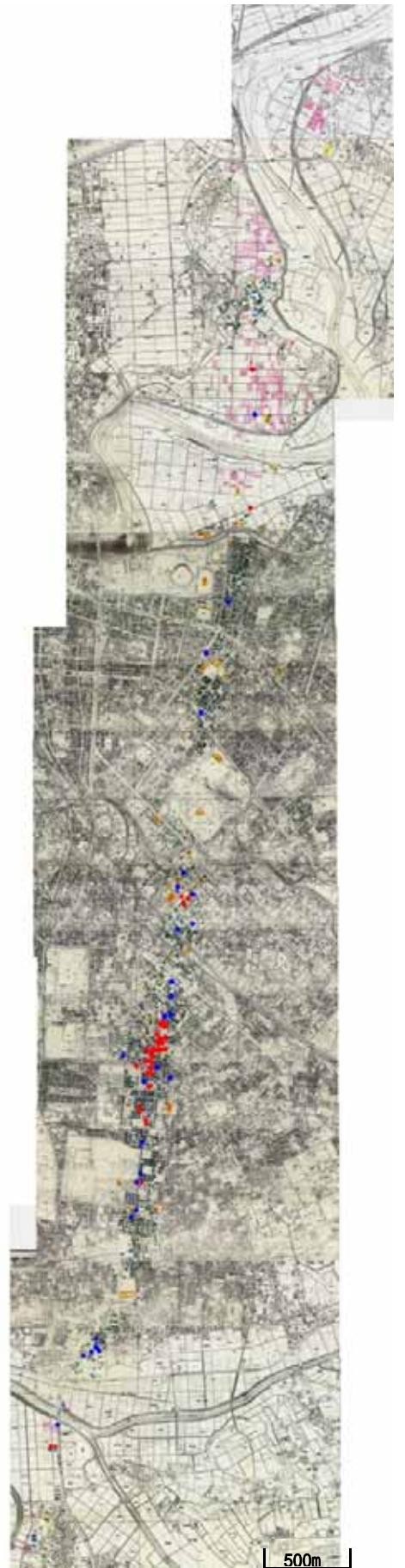
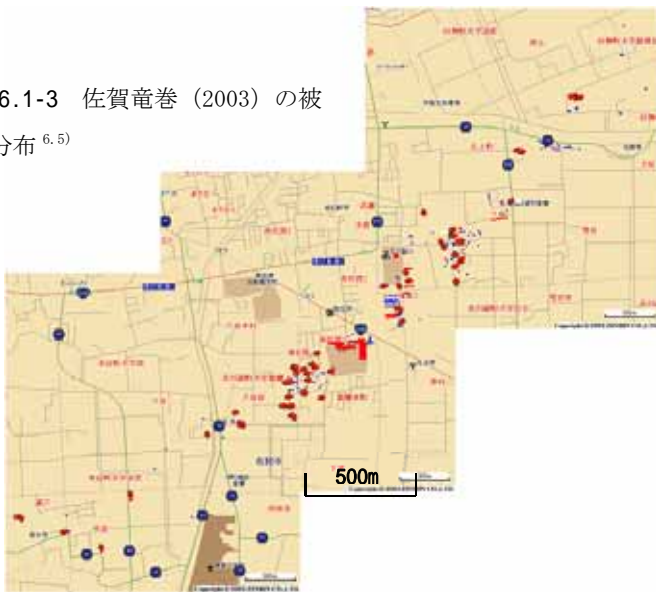


図 6.1-2 豊橋竜巻 (1999) の被害分布 ^{6.4)}

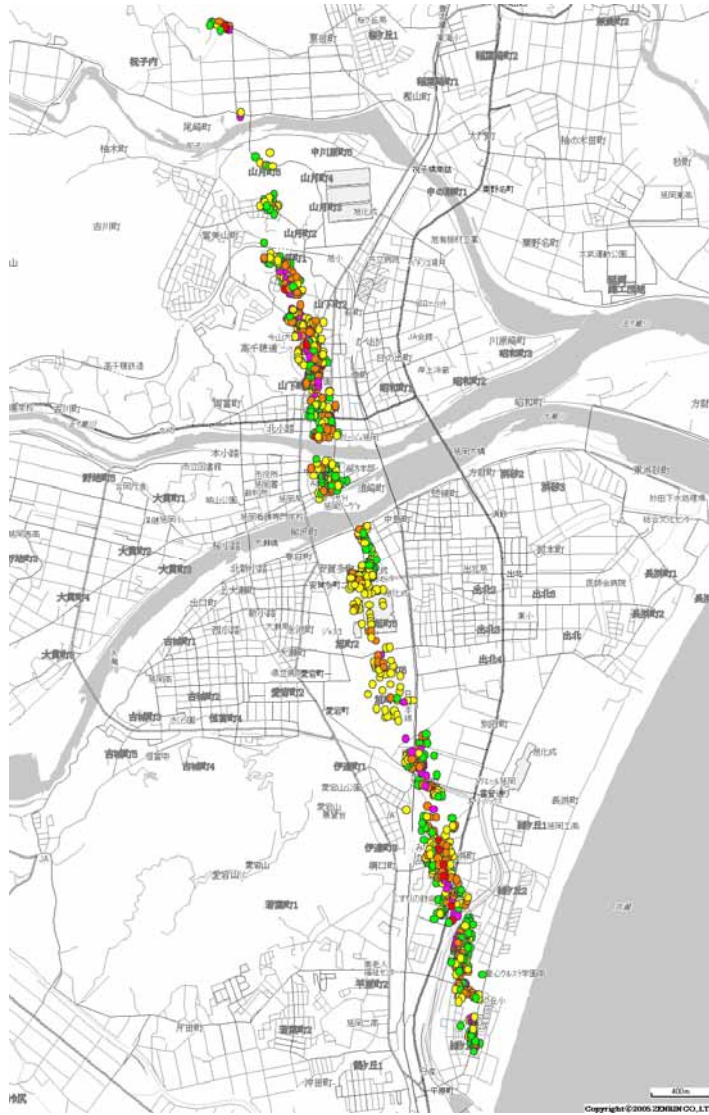


図 6.1-4 延岡竜巻 (2006) の強風被災度ランク別の頻度分布 ^{6.2)}

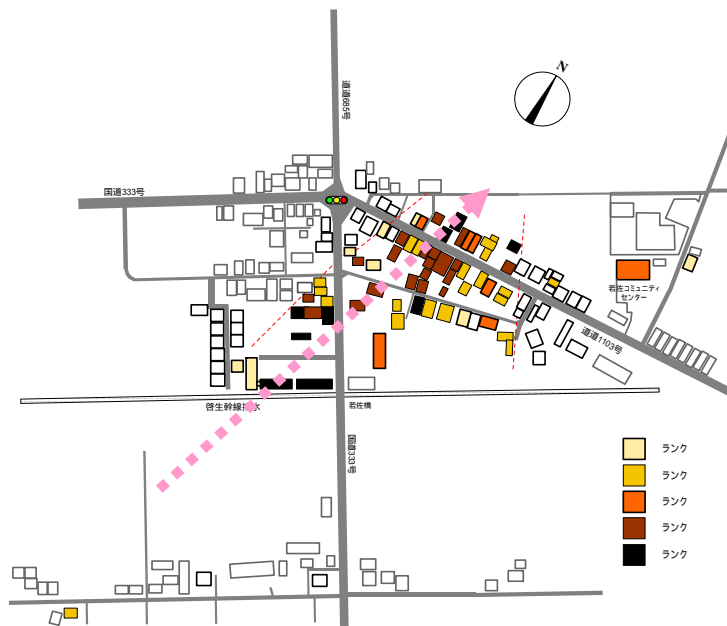


図 6.1-5 佐呂間竜巻 (2006) の強風被災度ランク別の頻度分布 (矢印は竜巻中心部の経路) ^{6.6)}

6.2 被害形態

(1) 木造建築物

これまでの枕崎竜巻（1990）^{6.7)}、茂原竜巻（1990）^{6.2)}、佐呂間竜巻（2006）^{6.6)}でも木造建築物の上部構造が転倒・倒壊・飛散する被害事例（写真 6.2-1～6 参照）が見られたが、これらは大きな開口部をもつ店舗、作業所との併用住宅、小規模な事務所などが多かった。茂原竜巻（1990）では、転倒・倒壊・飛散した建築物は「平面上に比較的大きな柱・壁なしの空間（8～48 坪）を有しているながら、それに対応した構造的配慮が特にはなかった」との報告^{6.8)}があり、多くの一般的な木造住宅では、屋根ふき材の剥離、小屋組みの崩壊までの被害であり、転倒・倒壊・飛散した一般的な木造住宅は報告されていない^{6.8)}。一方、今回のつくば竜巻（2012）のように、柱・壁が適切に配置された一般的な木造住宅が転倒・倒壊・飛散した事例は、過去の被害事例では確認されていない。



写真 6.2-1 枕崎竜巻（1990）での被害
（鹿児島地方気象台）



写真 6.2-2 茂原竜巻（1990）での被害
（茂原市消防署）



写真 6.2-3 茂原竜巻（1990）での縫製
工場屋根の飛散（茂原市消防署）



写真 6.2-4 茂原竜巻（1990）での作業
所の倒壊（茂原市消防署）



写真 6.2-5 茂原竜巻（1990）での店舗の上部構造の移動（茂原市消防署）



写真 6.2-6 佐呂間竜巻（2006）での店舗併用住宅の飛散（国土交通省北海道開発局）

(2) 鉄骨造及び鉄筋コンクリート造建築物の被害

写真 6.2-7, 6.2-8 は茂原竜巻（1990）での軽量鉄骨造住宅の被害で、開口部だけでなく壁や屋根版が吹き飛ばされた被害があったが、倒壊や飛散といった被害は報告されていない。一方、つくば竜巻（2012）でも軽量鉄骨造住宅の被害で屋根版が吹き飛ばされた被害があった（写真 3.4-16 参照）。



写真 6.2-7 茂原竜巻（1990）での軽量鉄骨造住宅の被害（茂原市消防署）



写真 6.2-8 茂原竜巻（1990）での軽量鉄骨造集合住宅の被害（茂原市消防署）

つくば竜巻では、5階建ての鉄筋コンクリート造集合住宅に竜巻が直撃したため、窓ガラスやサッシ、ベランダ手摺、内装材、家具等が被害を受けたが、構造躯体の被害は確認されなかった（写真 3.4-26～30）。また、同日に栃木県真岡市で発生した竜巻が3階建ての鉄筋コンクリート造校舎を直撃し窓ガラスが破損し、室内の机や椅子が散乱したとの報告^{6.9)}があったが、構造躯体の被害は確認されていない。

これまでも茂原竜巻^{6.3)}、豊橋竜巻^{6.4)}、佐賀竜巻^{6.5)}などのように、竜巻が鉄筋コンクリート造の建築物を直撃したことがあるが、窓ガラス等の外装材及び内装材・家具等が被害を受けたのみであり、構造躯体自体が損傷を受けた事例の報告はない。

参考文献

- 6.1) 気象庁：竜巻等の突風データベース
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>
- 6.2) 奥田泰雄・村上知徳・喜々津仁密：延岡竜巻による建築物被害の評価、日本風工学会 2006 年台風 13 号および同年 11 月 7 日に北海道佐呂間町で発生した竜巻による強風災害に関する調査報告書、pp. 89-96、2007. 10
- 6.3) 桂 順治・丸田榮蔵・神田 亮・奥田泰雄：1990 年 12 月 11 日千葉県に発生した竜巻による暴風災害の調査研究－被害の調査－、文部省科学研究費 (No. 02306029) 突発災害調査研究成果、pp. 69-94、1991. 3
- 6.4) 石川裕彦・林 泰一・桂 順治・大澤輝夫・吉野 純・奥田泰雄：1999 年 9 月 24 日に東三河地方で発生した竜巻について、平成 11 年度科学研究費補助金 (特別研究促進費) 研究成果報告書「台風 9918 号に伴う高潮と竜巻の発生・発達と被害発生メカニズムに関する調査研究」、pp. 165-185、2000. 6
- 6.5) 奥田泰雄・喜々津仁密・村上知徳・石原 直：佐賀市・鳥栖市竜巻 現地被害調査報告、独立行政法人建築研究所 HP、
<http://www.kenken.go.jp/japanese/research/str/list/topics/saga-tatsumaki/index.pdf>、2004. 7
- 6.6) 奥田泰雄・喜々津仁密・村上知徳：2006 年佐呂間町竜巻被害調査報告、独立行政法人建築研究所 HP、2006. 11
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2006saroma/2006saroma.pdf>
- 6.7) 林 泰一・前田潤滋・丸山 敬：報告 1990 年 2 月 19 日に鹿児島県枕崎市で発生した竜巻について、日本風工学会誌 Vol. 43、pp. 45-48、1990. 4
- 6.8) 坂本 功：茂原における竜巻による木造建築物の被害とその考察、1990 年 12 月 11 日千葉県に発生した竜巻による暴風災害の調査研究、文部省科学研究費突発災害調査研究成果「自然災害」総合研究班、pp. 95-102、1991. 3
- 6.9) 日本風工学会風災害研究会：【速報】2012 年 5 月 6 日に北関東地方で発生した広域突風災害について、日本風工学会誌 Vol. 37, No. 3 (No. 132)、pp. 210-222、2012. 7

第7章 まとめ

国土交通省国土技術政策総合研究所及び独立行政法人建築研究所では、平成24年5月6日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害について、現地調査を通して被害の形態や被害分布状況をまとめるとともに、被害発生風速の推定、被害発生メカニズムの検討等を行った。これらの調査検討の結果を以下にまとめる。

(1) 被害統計と被害分布

つくば市での建築物等の被害状況を強風被災度ランクで評価し、作成した被害分布図の結果に基づき、被害分布性状について検討した。つくば市北条地区での被害分布の状況から、ランキン渦モデルを仮定した竜巻の最大風速半径に相当する距離が約35mであると推定した。

(2) 建築物等の被害形態と被害発生メカニズム

現地調査の結果得られた竜巻による主な被害形態に関しては、木造建築物では上部構造の転倒・飛散・倒壊、小屋組の破壊、外装材（屋根ふき材・外壁材・開口部材）の破損・剥離、鉄骨造又は鉄筋コンクリート造建築物では外装材（屋根ふき材・外壁材・開口部材）の破損・剥離等が確認された。また、内装材への被害の進展や屋外設備の被害も確認された。これらの建築物以外の事例として、工作物等、乗用車及び樹木の被害形態を収集した。

木造建築物の被害発生メカニズムについては、想定される被害形態別にその原因を検討した。2階建て木造住宅について倒壊（水平耐力の喪失）と転倒の破壊モードについてその発現風速を比較した。

(3) 建築物等の被害形態に基づく風速推定

複数の被災した建築物や工作物等の崩壊メカニズム、風力係数等を仮定して被害発生時の風速を推定した。また、竜巻中心からの距離と推定風速との関係を調べ、その結果がランキン渦モデルを前提とした竜巻の風速分布と良い対応関係があることを確認した。

最後に、建築物等の竜巻被害の軽減に資する対策を推進する観点から、今後の研究等において取り組むべき諸課題を以下にまとめる。

- ・ 竜巻による建築物等の被害事例の蓄積
- ・ 竜巻通過時に建築物等に作用する荷重・外力（飛来物による衝撃力を含む）に関する実験的検討
- ・ 竜巻による被害発生メカニズムの解明に資する検討
- ・ 竜巻に対する外装材等の耐風圧性、耐衝撃性の評価方法に関する検討
- ・ 人命・財産保護の観点で被災後の影響が極めて大きい用途施設（重要施設等）について、竜巻通過時の機能維持に資する検討
- ・ 被災者の住宅再建プロセスに関する検討
- ・ 国内外の関係機関との連携、情報交換の強化

参 考 資 料

フジタスケール (F0～F12) (気象科学辞典より)

竜巻、トルネード、ダウンバースト等の風速を建築物や構造物の被害状況から簡便に推定するために、シカゴ大学の藤田哲也により 1971 年に考案された。各スケールの風速の下限值 V は

$$V=6.3 (F+2)^{1.5} \text{ [m/s]}$$

で、F1 はビューフォートの風力階級の第 12 段階、F12 は音速に等しくなるように定めた。1/4 マイル (約 400m) の風程で評価された平均風速で示されている。

F0	17～32m/s (約 15 秒間の平均)	テレビのアンテナなどの弱い構造物が倒れる。小枝が折れ、根の浅い木が傾くことがある。非住家が壊れるかもしれない。
F1	33～49m/s (約 10 秒間の平均)	屋根瓦が飛び、ガラス窓が割れる。ビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木は幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると、道から吹き落とされる。
F2	50～69m/s (約 7 秒間の平均)	住家の屋根がはぎとられ、弱い非住家は倒壊する。大木が倒れたり、ねじ切られる。自動車が道から吹き飛ばされ、汽車が脱線することがある。
F3	70～92m/s (約 5 秒間の平均)	壁が押し倒され住家が倒壊する。非住家はバラバラになって飛散し、鉄骨づくりでもつぶれる。汽車は転覆し、自動車はもち上げられて飛ばされる。森林の大木でも、大半折れるか倒れるかし、引き抜かれることもある。
F4	93～116m/s (約 4 秒間の平均)	住家がバラバラになって辺りに飛散し、弱い非住家は跡形なく吹き飛ばされてしまう。鉄骨づくりでもペシャンコ。列車が吹き飛ばされ、自動車は何十メートルも空中飛行する。1 トン以上ある物体が降ってきて、危険この上もない。
F5	117～142m/s (約 3 秒間の平均)	住家は跡形もなく吹き飛ばされるし、立木の皮がはぎとられてしまったりする。自動車、列車などがもち上げられて飛行し、とんでもないところまで飛ばされる。数トンもある物体がどこからともなく降ってくる。

(気象庁ホームページより)

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado1-5.html>

謝 辞

茨城県つくば市内の現地調査の実施及び本調査報告の作成に当たっては、以下のとおり、多くの建築物所有者、管理者の方々や関係機関各位から、調査への協力や情報提供などのご協力を頂きました。ここに記して、深甚なる感謝の意を表します。なお、位置の表示や図の作成等においては、国土地理院による航空写真、Google Map、GoogleEarth、GMT の各プログラムを利用させて頂きました。

第 2 章に掲げた被害の概要については、気象庁、気象研究所及びつくば市による各種公表資料を活用させて頂きました。第 3 章 3.4.3 項に掲げた集合住宅の被害状況については、独立行政法人 高齢・障害・求職者雇用支援機構より提供頂いた調査資料及び図面を参考にさせて頂きました。

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

N o. 703 January 2013

建築研究資料

Building Research Data

N o. 141 January 2013

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

©独立行政法人建築研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国土交通省国土技術政策総合研究所 企画部研究評価・推進課

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 TEL 029-864-2675

独立行政法人建築研究所 企画部企画調査課

〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地 TEL 029-864-2151(代)