

平成 30 年 6 月 29 日に滋賀県米原市で発生した建築物等の竜巻被害 現地調査報告

国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部
国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ

1. はじめに

平成 30 年 6 月 29 日 13 時 40 分頃に、滋賀県米原市で住家の屋根が飛散するなどの突風による被害が発生した。気象庁は 6 月 30 日に、建築物の被害が集中した範囲を中心に現地調査を実施した。突風発生時に活発な積乱雲が付近を通過中であったこと、確度が高い移動する渦の複数の目撃証言が得られたこと、被害や痕跡が帯状に分布していたことから、気象庁はこの突風をもたらした現象の種類を竜巻と推定し、速報として、その強さを日本版改良藤田スケールの JEF2（風速約 65m/s(3 秒平均)）と推定している¹⁾。同スケールの概要については、参考資料 1 を参照されたい。また、7 月 1 日現在の米原市災害対策本部の被害把握状況によれば、「建物の躯体に影響のある被害数」が 38 戸、「ガラス・トタン等の被害数」が 102 戸、計 140 戸となっている²⁾。

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は、国土交通省住宅局の要請を受け、米原市土木部建設課の協力のもと 7 月 3 日午後に現地調査を実施した。調査者は下記のとおりである。本報告はこの現地調査の結果を取りまとめたものである。

- ・ 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 主任研究官 喜々津仁密
- ・ 国立研究開発法人建築研究所
構造研究グループ 研究員 中島昌一
構造研究グループ 交流研究員 早川 翔・野口裕矢

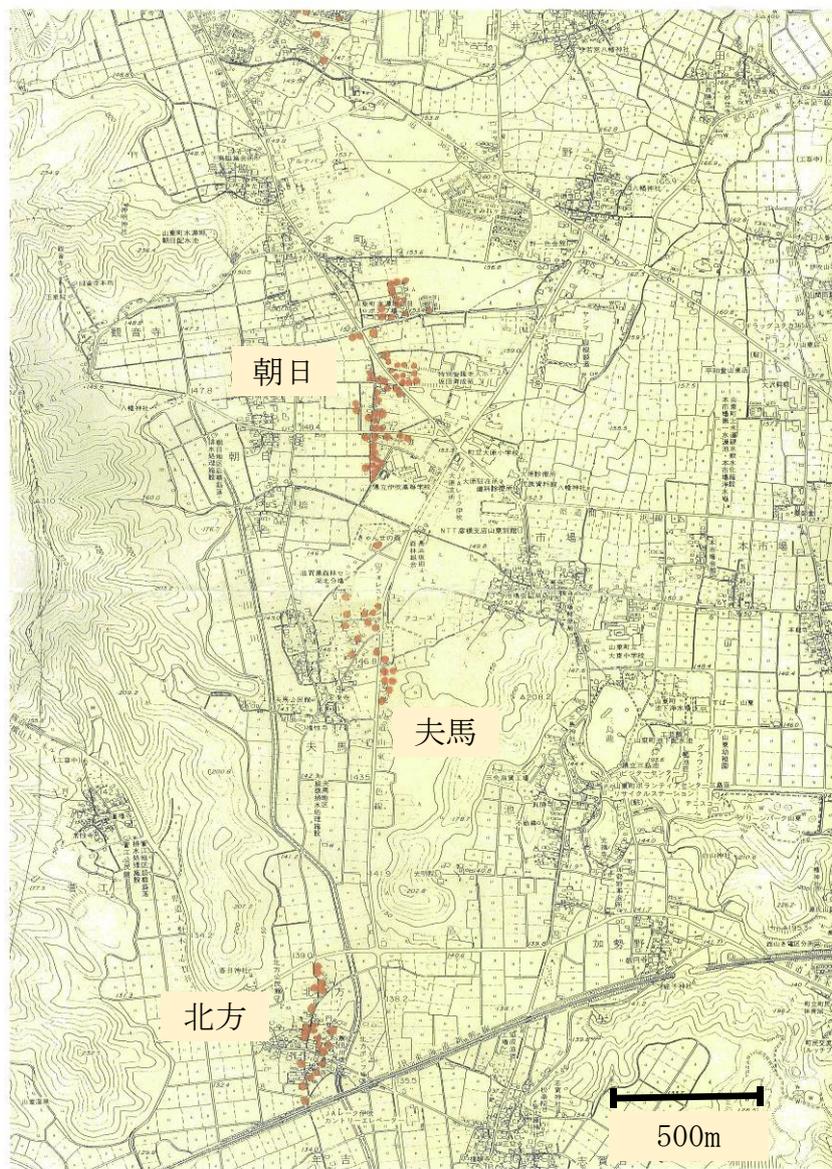
2. 竜巻被害の概要

竜巻被害は、米原市内の北方(きたがた)、夫馬(ぶま)、朝日地区にかけて発生し、その被害は南北に概ね線状に分布していた。図 1(a)に示す米原市の現地調査では、被害範囲は南北約 3.7km に及ぶものとされている²⁾。

表 1 に、米原市災害対策本部がまとめた家屋等の被害把握状況を示す。朝日、夫馬、北方地区で被害の確認件数が、他の地区と比較して多いことがわかる。本調査はこれらの 3 地区を対象に実施し、後掲の主な被害建築物等の位置を図 1(b)に示す。

表1 家屋等の被害把握状況（7月1日現在）（米原市調べ）²⁾

自治会名	建物の躯体に影響のある被害数	ガラス・トタン等の被害数	合計（戸）
朝日	7	36	43
夫馬	9	16	25
北方	20	13	33
グリーンヒルズ朝日	0	15	15
野一色	2	13	15
山東桜ヶ丘	0	3	3
坂口	0	2	2
鳥脇	0	1	1
平和台	0	3	3
合計	38	102	140



※図中の赤点は被害把握地点を表す

(a) 被害の分布状況（米原市提供資料に加筆）

図1 調査対象範囲



※図中の青点は調査経路、ピンは経路の起点と終点を表す

(b) 主な被害建築物等の位置

図1 (続き)

3. 主な建築物等の被害状況

以下では、図1(b)に示した3つの地区で把握した主な建築物等の被害状況をまとめる。3.1(1)に示す住家Aでの小屋組の被害状況が、日本版改良藤田スケールでJEF2に該当する根拠とされている²⁾。

3.1 建築物の被害

(1) 住家A

- 朝日地区にある住家Aは木造2階建てであり、居住者によれば築約30年である。2階の屋根の小屋組が飛散しており、調査時には飛散した小屋組はすでに撤去されていた(写真1~2)。
- 小屋組を構成する小屋束は、断面の寸法が100mm×100mm~120mm×120mm程度、ほぞの寸法が幅90mm、厚さ30mm、長さ75mm程度であった。調査をした範囲では、小屋束と横架材(小屋梁等)との接合部はいずれもほぞ差しであり、金物やくさびの併用は確認されなかった(写真3~4)。
- 1階南面の開口部は、玄関ドアのガラスに部分的に損傷があるが、その他の窓ガラスに損傷はみられなかった(写真5)。
- 2階の室内に突風が吹き込んだ後、1階に吹き降ろした結果と思われる汚れの痕跡が、1階の階段回りにみられた。また、その周辺の壁にはガラスの小破片もあったとのことである。
- 被害発生時、居住者は同じ敷地内の別の住家におり、住家Aには不在であった。その時点では、屋根の飛散には気づかず、2階での窓ガラスの破損と小屋組の飛散のどちらが先に発生したか不明であるが、1階の階段回りまで突風が吹き降ろした様子を見ると、印象としては窓ガラスの破損のほうが先に発生したかもしれない、とのことである。一般に、大きな開口の有無に応じて屋内に作用する内圧条件が変われば、小屋組の飛散を生じさせた風速の推定値が変わることになる。
- 住家Aと同じ敷地内に非住家(倉庫)が2棟あり、いずれも鋼製の屋根ふき材が損傷していた(写真6)。



写真1 住家Aの外観



写真2 小屋組の状況



写真3 飛散した屋根の小屋束



写真4 小屋束のほぞ



写真5 1階南面での開口部の状況



写真6 住家Aと同敷地内の2棟の非住家

(2) 事務所 B

- 朝日地区にある事務所 B は軽量鉄骨造と思われる 2 階建てで、被害直後の報道写真を参照すると一部木質の部材も用いられていたようである（写真 7）。所有者によれば、平成 4 年頃の建築で、壁にブレースが設けられていた。調査時には上部構造は撤去済みであったが、上部構造が転倒しながら倒壊したとのことである。
- 所有者は同じ敷地内の別の住家におり、目視で竜巻の接近を確認していた。なお、別の住家（木造 2 階建て）では軽微な被害として、飛来物の衝突によると思われる窓ガラスの破損を確認した（写真 8）。
- 事務所 B は、M12 アンカーボルトで東西方向 4 カ所、南北方向 8 カ所、布基礎に固定されていた（写真 9～10、図 2）。図 2 中の赤点の位置に M12 アンカーボルトが配置されていた。幅 120mm の布基礎に対して、外側から約 30mm の位置で約 70mm 突出していた。ナットが残っているアンカーボルトが複数あり、大きく曲げ変形しているアンカーボルトもあった。
- 布基礎の横にあった鋼製のユニット倉庫も、転倒した後に上下逆さまの状況であったとのことである。被害前の地盤面への固定状況は不明であるが、調査時と同様にコンクリートブロック上に置かれたのみの状態の可能性がある（写真 11）。



写真 7 被災前の事務所 B と思われる建築物(Google より) 写真 8 飛来物の衝突と思われる痕



写真 9 事務所 B の布基礎の状況

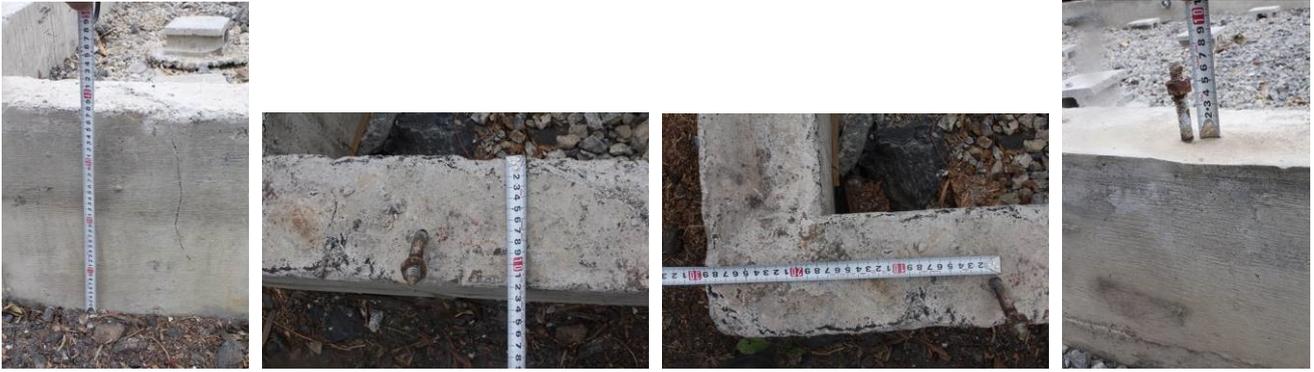


写真 10 布基礎各部の寸法

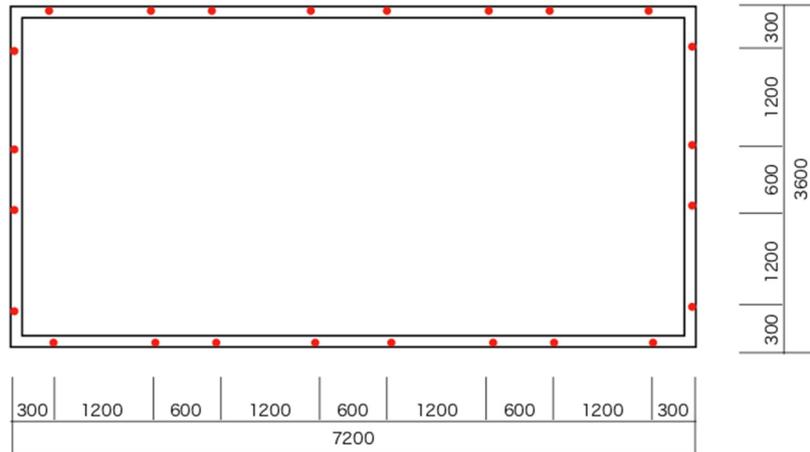


図 2 布基礎各部の寸法 (mm)



写真 11 鋼製のユニット倉庫

(3) 寺社 C

- 北方地区にある寺社 C の屋根に、近隣から飛来した鋼製屋根が衝突した。この屋根は鋼材と鋼板製折板が一体となった状態であり、調査時には、地上に吊り下げた後に解体作業中であった(写真 12~14)。この鋼製屋根は、寺社 C の南西に位置する住家から、その原形をほぼ保ったまま 100m 程度飛散したと思われる。
- 屋根の下地は H 形鋼で構成されており、調査をした範囲では、以下の 2 つに該当する鋼材の使用を確認した。高さが 200 mm の H 形鋼のスパンは約 1,950 mm である。高さが 100mm の H 形鋼にはタイトフレームとともに面戸が取り付けられており、軒先の下地材として使用されていたと思われる。また、H 形鋼の

下面を調査した範囲では、屋根スラブに緊結した形跡は確認されなかった（写真 15～16）。ここで調査した結果に基づき、飛散開始時の瞬間風速の推定結果を参考資料 2 に示している。

高さ	フランジ幅	ウェブ厚さ	フランジ厚さ
200mm	100mm	5.5mm	8mm
100mm	100mm	6mm	8mm

- 鋼板製折板は重ね形であり、タイトフレームの寸法は山高が約 90 mm、幅が約 200 mmであった（写真 17）。
- 寺社 C の管理者が被害発生後、下げ振りによる変形の計測を行っていた。その結果、躯体が北側に 1/50、西側に 1/150 程度傾いていたとのことである。なお、調査時に高さ約 2300 mm の建具の変形状況から傾斜を確認した結果、北側に約 35 mm 傾いていた（北側に 1/65 程度の変形、写真 18）。また、当該建具は開閉不能であった。



写真 12 寺社 C の外観



写真 13 鋼製屋根が衝突した範囲の状況



写真 14 鋼製屋根の状況





写真 15 鋼製屋根の下面



写真 16 (同左)



写真 17 鋼板製折板ぶきのタイトフレーム



写真 18 寺社 C の建具の状況

(4) 土蔵 D

- 北方地区には複数の土蔵があったが、そのなかに屋根のずれが生じた事例があった(写真 19)。調査時には、当該屋根は撤去済みであった。当該地区での土蔵の屋根構造について、通常は置き屋根で、特段の緊結はしていないとのことである(写真 20)。



写真 19 土蔵 D の外観



写真 20 無被害の土蔵の例

(5) その他の被害

上記以外のその他の被害として、写真 21～26 に、屋根上設置型の太陽光パネルの軽微な損傷、塀やフェンスの損壊、室外機の損傷、外壁材への木材の突き刺さり、カーポートの損傷の事例を示す。カーポートの損傷は夫馬地区、それ以外は朝日地区で確認したものである。



写真 21 太陽光パネルの軽微な損傷



写真 22 塀の損壊



写真 23 フェンスの基礎の損壊



写真 24 室外機の損傷



写真 25 外壁材への木材の突き刺さり



写真 26 カーポートの損傷

3.2 建築物以外の被害

建築物以外の被害状況として、写真 27～32 に、4 トントラックの移動、電柱と樹木の折損を示す。トラックは事務所 B と同じ敷地内の西側に駐車されており、突風の作用を受けて 3.5m 程度移動したとのことである。調査時に、写真 28 の左に見える土壌の範囲で車輪痕を確認した。折損した電柱と樹木は、事務所 B の敷地の北側に位置していた。なお、竜巻等突風による代表的な被害形態の 1 つとして墓石の転倒も挙げられるが、朝日地区にある複数の墓石には転倒被害は生じていなかった。



写真 27 突風によって移動した 4 トントラック



写真 28 (同左)



写真 29 電柱の折損



写真 30 (同左)



写真 31 樹木の折損



写真 32 (同左)

4. まとめ

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は、平成 30 年 6 月 29 日に滋賀県米原市で竜巻被害を受けた建築物等の現地調査を、米原市の協力のもとで実施した。気象庁による現地調査の結果、この竜巻の強さの速報として、日本版改良藤田スケールの JEF2（風速約 65m/s(3 秒平均)）と推定されている。

朝日地区での木造小屋組の飛散事例では、小屋束の接合状況を調査した。調査をした範囲ではほぞ差しによる接合のみであり、金物やくさびの併用は確認されなかった。また、同地区では軽量鉄骨造と思われる 2 階建ての事務所について、転倒しながら倒壊した事例もあった。北方地区では、近隣の住家から約 100 m 飛来した鋼製屋根が寺社の屋根に衝突し、その方向に残留変形が生じていた。調査をした範囲では、鋼製屋根の下面に屋根スラブへ緊結した形跡は確認されなかった。また、同地区では土蔵の屋根にずれが生じた事例があった。

上記のほか、建築物の付属設置物や工作物として、屋根上設置型の太陽光パネル、塀、カーポート等の被害を確認した。また、建築物以外の被害としては、トラックの移動、電柱と樹木の折損を確認した。

謝辞

本調査を実施するにあたり、米原市土木部建設課の高橋淳一氏、馬場伸也氏には現地調査同行のご協力を頂きました。また、京都大学防災研究所の西嶋一欽准教授には、調査に先立ち被害範囲の情報を頂きました。記して感謝の意を表します。

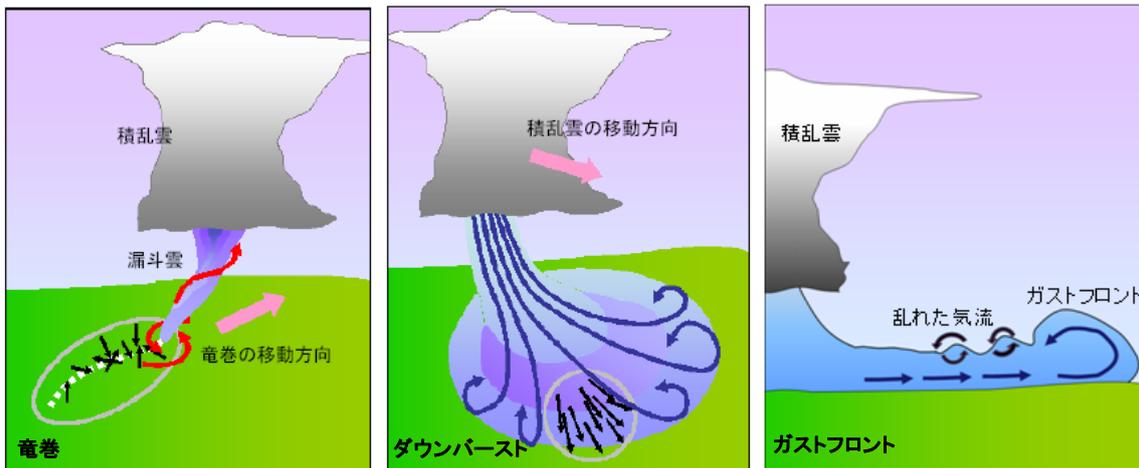
参考文献

1. 彦根地方气象台：平成 30 年 6 月 29 日に滋賀県米原市で発生した突風について（第 2 報）～気象庁機動調査班による現地調査の報告～，平成 30 年 6 月 30 日
http://www.jma-net.go.jp/hikone/news/h300630_JMA-MOT_sokuhou.pdf
2. 米原市災害対策本部：被害把握状況および災害応急対策について（第 11 報），平成 30 年 7 月 1 日

<参考資料>

突風の種類

現象	特徴
竜巻	積雲や積乱雲に伴って発生する鉛直軸を持つ激しい渦巻きで、漏斗状または柱状の雲を伴うことがある。地上では、収束的で回転性の突風や気圧降下が観測され、被害域は帯状・線状となることが多い。
ダウンバースト	積雲や積乱雲から生じる強い下降気流で、地面に衝突し周囲に吹き出す突風である。地上では、発散性の突風やしばしば強雨・ひょうを伴い露点温度の下降を伴うことがある。被害域は円または楕円状となることが多い。周囲への吹き出しが4km未満のものをマイクロバースト、4km以上のものをマクロバーストとも呼ぶ。
ガストフロント	積雲や積乱雲から吹き出した冷気の先端と周囲の空気との境界で、しばしば突風を伴う。降水域から前線状に広がる 경우가多く、数10kmあるいはそれ以上離れた地点まで進行する場合がある。地上では、突風と風向の急変、気温の急下降と気圧の急上昇が観測される。
じん旋風	晴れた日の昼間に地上付近で発生する鉛直軸を持つ強い渦巻きで、突風により巻き上げられた砂じんを伴う。竜巻と違い積雲や積乱雲に伴わず、地上付近の熱せられた空気の上昇によって発生する。
漏斗雲	竜巻と同様の現象だが、渦は地上または海上に達しておらず、地表付近で突風は生じない。
その他の突風	自然風は絶えず強くなったり弱くなったり変化しており、その中で一時的に強く吹く風をいう。また、これ以外にガストフロントの中で発生する旋風などもある。



↑竜巻の模式図(左)

赤矢印は空気の流れ、黒矢印は樹木等の倒壊方向、白点線は竜巻の経路を表しています。竜巻の発生時にはしばしば積乱雲から漏斗状の雲がのびています。竜巻は周囲の空気を吸い上げながら移動しますので、倒壊物等は竜巻の経路に集まる形で残ります。

↑ダウンバーストの模式図(中)

青矢印はダウンバーストの空気の流れ、黒矢印は樹木等の倒壊方向です。積乱雲が移動している場合には、このように移動方向の吹き出しのみが強くなる場合がほとんどです。吹き出しの強さに対応して倒壊物の方向も一方向や扇状になることが少なくありません。

↑ガストフロントの模式図(右)

薄青の領域は周囲より冷たくて重い空気を、また、青矢印は冷気外出流を表しています。黒矢印は乱れた気流を表しています。

日本版改良藤田スケール(JEFスケール)

米国シカゴ大学の藤田哲也により1971年に考案された藤田スケールを、日本国内で発生する竜巻等突風の強さをよりの確に把握できるようにするため、米国の改良スケールを参考にしつつ、日本の建築物等の特徴を加味し、最新の風工学の知見を取り入れて策定した風速のスケールです。

階級	風速 (m/s) の範囲 (3 秒値)	主な被害の状況 (参考)
JEF0	25~38	<ul style="list-style-type: none"> ・木造の住宅において、目視でわかる程度の被害、飛散物による窓ガラスの損壊が発生する。比較的狭い範囲の屋根ふき材が浮き上がったり、はく離する。 ・園芸施設において、被覆材（ビニルなど）がはく離する。パイプハウスの鋼管が変形したり、倒壊する。 ・物置が移動したり、横転する。 ・自動販売機が横転する。 ・コンクリートブロック塀（鉄筋なし）の一部が損壊したり、大部分が倒壊する。 ・樹木の枝（直径2cm~8cm）が折れたり、広葉樹（腐朽有り）の幹が折損する。
JEF1	39~52	<ul style="list-style-type: none"> ・木造の住宅において、比較的広い範囲の屋根ふき材が浮き上がったり、はく離する。屋根の軒先又は野地板が破損したり、飛散する。 ・園芸施設において、多くの地域でプラスチックハウスの構造部材が変形したり、倒壊する。 ・軽自動車や普通自動車（コンパクトカー）が横転する。 ・通常走行中の鉄道車両が転覆する。 ・地上広告板の柱が傾斜したり、変形する。 ・道路交通標識の支柱が傾倒したり、倒壊する。 ・コンクリートブロック塀（鉄筋あり）が損壊したり、倒壊する。 ・樹木が根返りしたり、針葉樹の幹が折損する。
JEF2	53~66	<ul style="list-style-type: none"> ・木造の住宅において、上部構造の変形に伴い壁が損傷（ゆがみ、ひび割れ等）する。また、小屋組の構成部材が損壊したり、飛散する。 ・鉄骨造倉庫において、屋根ふき材が浮き上がったり、飛散する。 ・普通自動車（ワンボックス）や大型自動車が横転する。 ・鉄筋コンクリート製の電柱が折損する。 ・カーポートの骨組が傾斜したり、倒壊する。 ・コンクリートブロック塀（控壁のあるもの）の大部分が倒壊する。 ・広葉樹の幹が折損する。 ・墓石の棹石が転倒したり、ずれたりする。
JEF3	67~80	<ul style="list-style-type: none"> ・木造の住宅において、上部構造が著しく変形したり、倒壊する。 ・鉄骨系プレハブ住宅において、屋根の軒先又は野地板が破損したり飛散する、もしくは外壁材が変形したり、浮き上がる。 ・鉄筋コンクリート造の集合住宅において、風圧によってベランダ等の手すりが比較的広い範囲で変形する。 ・工場や倉庫の大規模な庇において、比較的狭い範囲で屋根ふき材がはく離したり、脱落する。 ・鉄骨造倉庫において、外壁材が浮き上がったり、飛散する。 ・アスファルトがはく離・飛散する。
JEF4	81~94	<ul style="list-style-type: none"> ・工場や倉庫の大規模な庇において、比較的広い範囲で屋根ふき材がはく離したり、脱落する。
JEF5	95~	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄骨系プレハブ住宅や鉄骨造の倉庫において、上部構造が著しく変形したり、倒壊する。 ・鉄筋コンクリート造の集合住宅において、風圧によってベランダ等の手すりが著しく変形したり、脱落する。

日本版改良藤田スケールに関するガイドライン

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kentoukai/kaigi/2015/1221_kentoukai/guideline.pdf

飛散した鋼製屋根の状況に基づく瞬間風速の推定

本報告の 3.1 (3) に示した鋼製屋根の状況に基づき、これの飛散開始時の瞬間風速の推定を試みる。推定に当たり仮定した鋼製屋根の条件は下記のとおりである。

仮定 1：屋根の一般部を構成する H 形鋼のスパン(概算値)は、現地調査での採寸結果に基づき、図 1 に示すものとする。

仮定 2：鋼製屋根は、飛散元の住家の屋根スラブに緊結していないものとする。

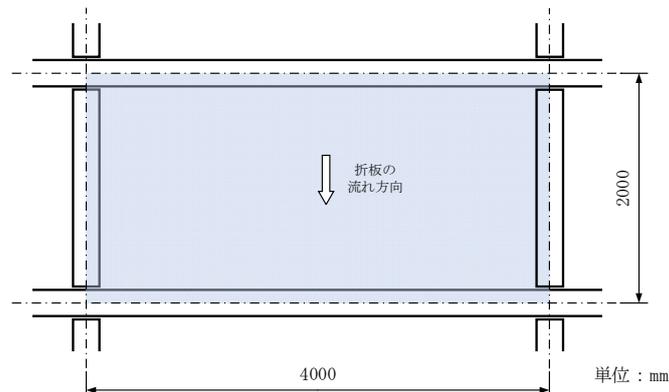


図 1 屋根を構成する H 形鋼のスパンの仮定

仮定 1 に基づき、鋼製屋根の単位面積当たりの固定荷重 W_R (N/m^2) を以下の計算により推定する。

$$W_R = \frac{20.9 \times (4+2) \times 9.8}{4 \times 2} + 120 \quad (1)$$

$$\approx 300$$

ここで、右辺の第 1 項目が H 形鋼、第 2 項目が折板材の固定荷重に相当し、H 形鋼の単位長さ当たりの質量として $20.9 \text{ kg}/\text{m}^1$ 、折板材の固定荷重として $120 \text{ N}/\text{m}^2$ ²⁾ と仮定している。

次に、当該屋根に作用する風荷重 w (N/m^2) は、既往の研究 ³⁾ の方法を参照し、以下の計算により推定する。

$$w = \frac{1}{2} \rho v_p^2 |C_f| \quad (2)$$

ここで、 ρ は空気密度 ($1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$)、 v_p は瞬間風速 (m/s)、 C_f は風力係数で、以下の式で表される。

$$C_f \approx \frac{\hat{C}_f}{(1 + g_p I_H)^2} \quad (3)$$

ここで、 g_p はピークファクター、 I_H は乱れの強さ、 \hat{C}_f は屋根面に作用する負のピーク風力係数である。

次に仮定 2 に基づき、当該屋根の固定荷重に対して風荷重が上回るときに飛散が開始するとみなすと、 W_R と w は (4) 式にしたがう。これを式展開すると瞬間風速 v_p について (5) 式が得られる。

$$w > W_R \quad (4)$$

$$v_p > (1 + g_p I_H) \sqrt{\frac{2W_R}{\rho |\hat{C}_f|}} \quad (5)$$

(1) 式で得た $W_R = 300 \text{ N}/\text{m}^2$ 、既往の研究 ³⁾ での $g_p = 3.5$ 、 $I_H = 0.25$ をそれぞれ (5) 式に代入すると、以下のようになる。

$$v_p > 1.9 \sqrt{\frac{500}{|\hat{C}_f|}} \quad (5)'$$

ここでは、ピーク風力係数 \hat{C}_f として、鋼製屋根の裏面での風圧の作用状況に比較的近いと考えられる陸屋根上の太陽電池パネルを対象にした風洞実験結果を参照し、そこで得られた負のピーク風力係数(−1.0～−0.4の範囲)⁴⁾を準用する。実験結果によれば、−1.0はパネルの隅角部、−0.4はパネルの一般部での係数に相当する。

(5)'式より、この仮定での飛散開始時の瞬間風速は

$$v_p > 42 \sim 66 \text{ (m/s)} \quad (6)$$

となる。想定するピーク風力係数の数値によって幅があるが、(6)式の右辺は日本版改良藤田スケールでの概ね JEF1 の高風速側から JEF2 の風速までの範囲に対応した結果となっている。ここで得た風速は、同スケールに定める風速と同様の考え方によるものであり、急激な気圧降下や非定常な風速の変化を伴う竜巻特有の影響も含んで発生しうる実被害と同程度の被害を発生させる風速としてみなされる。

なお、既存の屋根上に設置された屋根の強風による飛散事例として、2004年の台風6号による滋賀県近江八幡市での事例⁵⁾がある。文献5)でも飛散の状況に基づく風速推定が試みられており、今後の同様の検討に当たり参考になる。

参考文献

- 1) 例えば、(社)日本鋼構造協会：形鋼の標準断面寸法と断面積・単位質量・断面特性、わかりやすい鉄骨の構造設計 第四版、2009
- 2) (社)日本金属屋根協会・(社)日本鋼構造協会：鋼板製屋根構法標準 SSR2007、2008.
- 3) 喜々津仁密ほか：竜巻等突風の強さの評定に資する木造建築物の被害状態に基づく推定風速の検討、日本建築学会技術報告集、第23巻、第53号、pp.325-330、2017.
- 4) 染川大輔ほか：陸屋根に平行に設置された太陽電池パネルの風力係数、第23回風工学シンポジウム論文集、pp.271-276、2014.
- 5) 河井宏允ほか：台風0406号による滋賀県近江八幡市付近における被害、2004年の強風被害に関する調査報告書、日本風工学会風災害研究会、pp.11-20、2005.