

強風災害と耐風設計

河井宏允

要 旨

伊勢湾台風による強風被害調査をはじめとして、過去50年以上にわたって京都大学防災研究所で行われた強風被害調査を概観し、強風被害の実態と変遷を調べるとともに、強風被害から明らかにされた教訓を、構造物の耐風設計との関連において検討した。また、竜巻などの小規模擾乱による強風被害と台風による強風被害を比較し、小規模擾乱における耐風対策について検討した。また、強風による人的被害を防ぐための心得を示した。

キーワード: 強風被害, 台風, 竜巻, 人的被害, 飛散物

1. はじめに

台風、竜巻あるいは地震などによって生じる被害を低減するには、被害の実態を知るとともに、被害を起こした要因を調べ、それらに基づいて対策を考え実践することが必要である。防災研究所では、1951年の発足当初から、自然災害による被害調査を実施するとともに、自然の脅威が建物や人などの地物に及ぼす影響を研究してきた。私の所属する耐風構造分野でも、その発足以前から、強風の観測および強風が建物などの地物に与える効果を自然風中で調べるとともに、大きな強風災害が生じるたびに、被害調査を実施し、その成果を社会に還元すべく活動を行ってきた。

ところで、災害を低減するには、被害調査から浮かびあがった被害状況から、被害要因を推定し、それに基づいて適切な対策を提案、実施することが必要となる。適切な対策をたてる際に重要なのは、強風が建物や人などにどのような効果を及ぼすかを正確に把握することである。すなわち、有効な対策を立てるにはどのような観測や実験が必要となるかを被害調査から導き、それに基づいて観測や実験を実施することが肝要である。また、実施された観測や実験から、これらの結果を有効な対策に結びつける手順や方法を提案しなければならない。

強風災害を低減するには、被害調査から強風による建物などの地物の脆弱性とその原因を見だし、脆弱性の克服のための観点と方法を検討することになる。この場合に重要なのが、建物の耐風設計であり、その基本となる指針の作成である。本稿では、

防災研究所で実施された強風被害調査に基づいて振り返るとともに、それを耐風設計に結びつける方法を検討する。

2. 強風被害

2.1 台風による強風被害

防災研究所年報には、1957年の伊勢湾台風の被害報告をはじめとして現在までに20以上の強風被害の報告が掲載されている。ここでは、その主なものを紹介しながら、それぞれの調査によって何が明らかになったかをまとめることにする。なお、私が所属していた耐風構造研究分野の前身である耐風構造研究部門が発足したのは1961年であるから、伊勢湾台風はそれよりも4年前ということになる。

伊勢湾台風は、死者・行方不明者あわせて5000名以上という、強風災害では室戸台風と並ぶ日本で最大級の被害を出した台風であり、人々の記憶の中に今でも残っている台風の一つである。伊勢湾台風による被災者数は全国で153万人に及び、後の災害対策基本法制定の契機となった。被害調査では、最も被害が著しかった愛知県、三重県、和歌山県における台風時の最大風速および最大瞬間風速が調査され、詳細なマップが作成された(石崎ら, 1961)。また、愛知、三重、岐阜、長野の各県における家屋の被害数も調査され、全壊率が風速マップとほぼ対応していることが報告されている。家屋の被害は最大風速ではなく、最大瞬間風速に関係が深く、全壊率は風速の5乗に比例して増大することが報告されている

(Fig. 1 (石崎ら, 1976))。また, 市街地の被害率は郡部の被害率より小さいことが報告されている。上記の結果は, 後の被害調査でも繰り返し見いだされている。

日本最大の風速 (最大風速60.8m/s, 最大瞬間風速85.3m/s) を記録した第2宮古島台風, その2年後に宮古島を来襲した第3宮古島台風では, 市町村ごとの被害の詳細なマップが作成され地形や風速および風向などの影響が検討された(石崎ら, 1968,1970)。この報告の中で注目すべきは, Fig. 2に示した狩俣地区の被害に現れた地形の影響である。狩俣地区は宮古島の北部の半島の先端にあり, 東側の海岸から50mの切り立った崖の背後に広がっている。被害時の風向は北西で, Fig. 2の奥から手前に向けて, 崖に当たるように吹いたと推定されている。Fig. 2に示されているように, 崖の直ぐ後ろでの被害がもっとも著しく, 地形による風速の増速の影響が現れている。尾根や山の頂上付近では風速が大きく増速されることが分かっているが, 崖や山の後ろでも風速が増速されることがあることは, あまり報告されていない事例として留意すべきであると思われる。また, 第3宮古島台風時に観測された強風は, Table 1に示したように第2宮古島台風時の風速より5m/s程度小さいが, 全壊戸数は1/3以下となっている。全壊率は風速の5乗に比例して増大すると言われているが, この関係で補正をしても全壊戸数は1266戸で半分以下となる。この原因は, 第2宮古島台風によって脆弱な家屋が壊れてしまったことによると思われる。なお, 平成3年に宮古島を襲った台風0314号による被害は, 第2, 第3宮古島台風による被害よりもはるかに小さい。これは, 第3宮古島台風の後, 宮古島では木造からコンクリートへの家屋の建て替えが進んだ結果である(丸山ら, 2004)。なお, 重軽傷者は台風0313号の時の方が大きいことも注目に値する。

私は1972年に防災研究所の助手に採用されたが, 私が初めて本格的な強風被害調査に参加したのは, 1975年に八丈島を襲った台風7513号による強風被害調査である。八丈島は2つの山の間の平地に住宅が立ち並んでおり, 山の谷間を抜ける強風によって, 大きな被害が生じている。八丈島の家屋の屋根は波形亜鉛鉄板(いわゆるトタン)葺きである。Fig. 3は, 家屋のどこが被害を受けたかを円グラフで表示したものである(石崎ら, 1976)。これによると屋根の被害が62パーセントと非常に大きいことがわかる。したがって, 屋根の耐風性能の向上が強風被害低減の鍵である。また, Fig. 4は調査した窓が何が原因で破壊したかを円グラフで示したものである。Fig. 4に示されているように, 風圧が34%, 飛散物が41%と

なり, 飛散物に対する防御が非常に重要であることがわかる。飛散物に対する防御の必要性は, この後の調査によっても明らかとなっているが, 残念ながら現在でもまだ日本では飛散物防御の指針などはない。そのため, 防災研究所では, 現在, 窓ガラスや外壁などの衝撃試験を実施し, どの程度の耐衝撃性があるかを調査中である(丸山ら, 2009)。

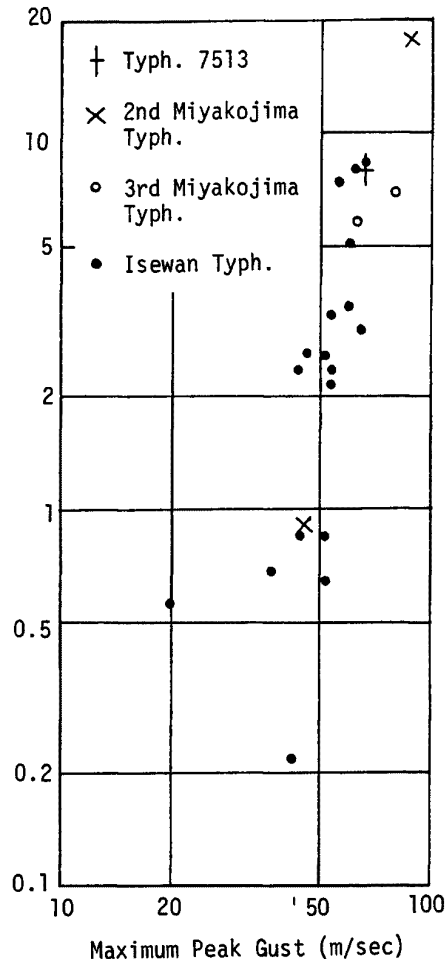


Fig. 1 Relationship between the rate of completely destroyed houses and the maximum peak gust.

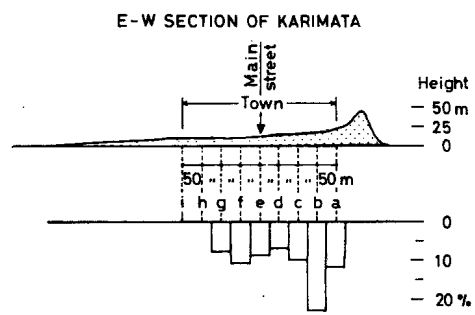


Fig. 2 East-west section of Karimata and the rate of completely destroyed houses.

Table 1 Statistics of maximum wind speed and peak gust and damage caused by four typhoons attacked Miyakojima Island.

年月日	台風名称 (英語名)	最大風速	最大瞬間 風速	最低気圧	宮古島地方の被害
		風向	風向		
1959(昭和34) .9.15	宮古島台風 (サラ)	53.0m/s	64.8m/s	908.1h P a	死者：7 重軽傷者：83 全壊：2501戸 半壊：2702戸
		南西	北		
1966 (昭和41) 9.5	第2宮古島台風 (コラ)	60.8m/s	85.3m/s	928.9h P a	死者：0 重軽傷者：30 全壊：2977戸 半壊：4756戸
		北東	北東		
1968 (昭和43) .9.22	第3宮古島台風 (デラ)	54.3m/s	79.8m/s	942.5h P a	死者：3 重軽傷者：10 全壊：907戸 半壊：2751戸
		北東	北東		
2003 (平成15) .9.11	台風14号 (セミ)	38.4m/s	74.1m/s	912.0h P a	死者：1 重軽傷者：94 全壊：18戸 半壊：86戸
		北	北		

また、本調査の結果、家屋の被害は、家屋が位置する周辺の状況によって大きく異なることも明らかになった。当然のことながら、風上が開けている場所に建つ家屋、平屋の家屋の中にある2階建ての家屋、丘の上に建つ家屋などは被害を受けやすいが、意外だったのは、風上に比較的大きな鉄筋コンクリートの建物がある場合、その直ぐ後ろでは全く被害がないが、少し離れると大きな被害が生じていたことである。被害を受けた建物は、風上側の建物を超える流れが下降し再付着する位置にあり、この下降流と建物の側面を回り込む流れの干渉によって、極めて大きな乱れが形成され、これが被害の原因となったと考えられる。周囲の状況を良く観察し、強風被害が生じる予想される家屋では事前の対策が重要である。

1980年代は台風による大きな被害はなく、比較的な静穏な10年間であった。しかし、1990年代以降は、強い台風が次々に日本に襲来し、大きな被害をもたらした。特に1991年に、九州に上陸後日本海を北上した台風9119号は日本各地に甚大な被害をもたらした。この台風に関する被害調査結果は、科学研究費突発災害研究成果報告（光田ら、1992）にまとめられているが、この中で従来の強風災害ではあまり調査されなかった強風による死亡原因が桂によって解析されFig. 5に示されている。Fig. 5によれば、風で飛ばされた者が19名(31%)、物の下敷きになった者が18名(29%)、物にあたった者が14名(23%)で残りの10名(16%)が海に落下した者であった。Fig. 5に示された人々がどこにいたかは不明であるが、家の中にいた人はほとんどいないと思われるので、台風などの強風時に家の外にでることは極めて危険である。

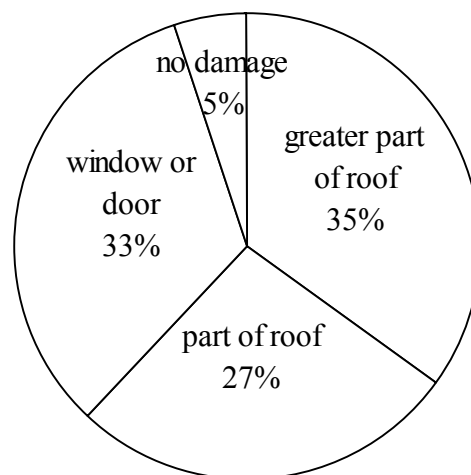


Fig. 3 Damaged part of houses

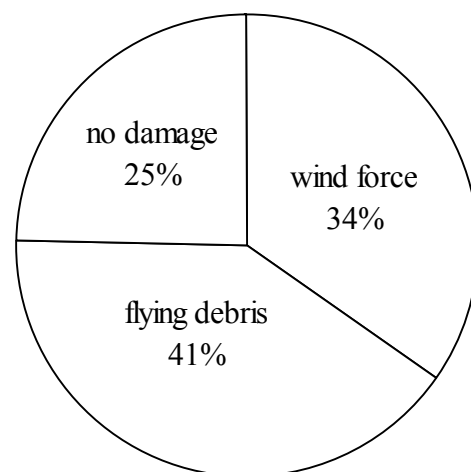


Fig. 4 Causes of damage

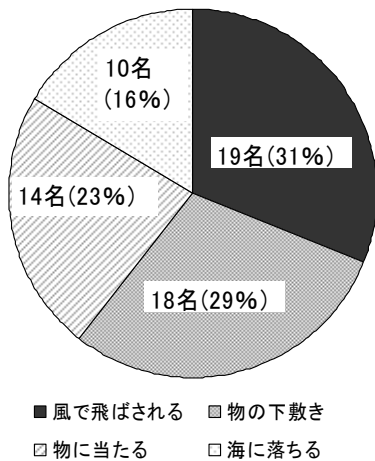


Fig. 5 Cause of dead persons in Typhoon 9119

ことがわかる。台風通過後、屋根の点検や修理をして吹き飛ばされるといった例や、台風時に田畑などの見回りに行って用水路に転落したり、海に落ちたりする例も多い。強風時には、飛散物も多く、また樹木なども倒れるので、外に出ないようにすることが重要である。

前述したように台風時の全壊率は最大瞬間風速の5乗に比例して増大するが、被害調査の結果から9119号台風による全壊率は、これまでの台風による全壊率よりも一桁以上小さい。後述するように2004年に我が国に来襲した台風0418号は、9119号とほぼ同じ強さで同じコースを移動したが、この時の全壊戸数は9119号の時よりも更に小さく、近年、日本の家屋の耐風性能が著しく向上していることが明らかとなった。

1990年代の後半には相次いで大きな台風が日本に来襲した。近畿地方に甚大に被害をもたらした台風9807号では、室生寺の五重塔をはじめ多くの歴史的建造物が強風被害にあった。奥田は、この台風に伴う市街地の強風を、消防署の気象観測網を用いて詳細に解析し、台風中心の左側と背後に2つの強風域があることを明らかにした(奥田ら, 1999)。後者は、台風通過後、奈良盆地をはじめ近畿地方中部に甚大な被害をもたらしたと述べている。奈良盆地で最も大きな被害がでたのは、台風が琵琶湖にあったときである。台風の通過後は安心しがちなものであるが、状況によっては台風の通過後の方が強い風が吹くことがあり、十分な注意が必要である。

1999年には台風9918号が八代海沿岸を襲い、不知火町では高潮によって30名以上の人命が失われた。この台風では、鹿児島県下甕島で最大瞬間風速83.9m/sを記録している。80m/sの強風は第2宮古島台風で観測されて以来であった。下甕島の被害も甚大であり、台風時でも80m/s以上の強風が吹くことがあ

ることを肝に命じ、学校や病院など重要な施設では余裕をもたせた耐風設計を行うことが肝要であろう。

私は2000年の9月に防災研究所に戻ったが、その後も次々と台風が日本を襲った。前述したように、2003年には台風0314号が宮古島を襲い、最大瞬間風速が80m/sに達する強風が吹いた。この台風の被害で特筆されたのは、宮古島に設置された風車7台すべてが被害を受け、そのうちの3台が倒壊したことである(丸山ら, 2004)。この被害が契機となり、風車の耐風設計の重要性が認識され、風車は建築基準法・同施行令の工作物として適用を受けることになり、その耐風性能が建築主事や評価機関などによってチェックされることになった。なお、前述したように、この台風による家屋の被害は、第2、第3宮古島台風時に比べ激減し、家屋の著しい耐風性能の向上が確認された。

また、2004年には気象庁が1951年から上陸した台風数を正式に発表するようになって以来最大の10個の台風が日本に上陸した。これまでの最大が6個であったから、10個は異常に多いように思われ温暖化の影響も懸念されたが、最近の研究により温暖化は上陸回数をむしろ減らす効果をもつ可能性が高いことが分かっている。

2004年に来襲した台風は我々に幾つかの教訓を残した。最初の被害をもたらしたのは台風0406号であった。この台風は室戸岬付近に上陸し淡路島を通り若狭湾に抜けたが、台風被害は中心から60km以上も離れた琵琶湖の東岸で発生した。国道8号線沿いのホテルの屋根(9m×40m)が飛んで新幹線の架線に引っ掛かり、新幹線が6時間にわたり不通になった(河井・西村, 2005)(Photo 1)。幸いにして新幹線は強風の為に事前に運行を見合わせおり、大事故には至らなかったが、もし運行中に屋根が飛ばされたとしたら大事故に繋がるどころであった。新幹線にかぎらず、鉄道の線路脇には強風で飛散しやすい地物も多く、この被害は我々に近代社会のもつ災害への脆弱性の一端を見せた。後で述べる例のように、強風で列車そのものが転倒することがなくても、周りの地物の飛散によって、大きな事故が生じる恐れがあり、至急点検が必要だと思われる。

ところで、この時に被害のあった屋根は、被害のほぼ直前に改修したもので、既存の屋根に鉄骨造の新しい屋根を設置したものであった。屋根そのものはかなり頑丈に作られてはいたが、既存の構造体との接合が不十分なことが原因で飛散に至ったものである。この屋根の質量は7t程度であるが、ただ置いただけの場合には揚力係数を-1とすると18m/s程度の風で飛散する。このように、重量のみで風の力に抗することは極めて難しく、確実に構造体に接合す

ることが重要である。既存の屋根に新しい屋根をかぶせる置屋根は北海道では良く見られるが、この年の台風0418号によって、多くの置屋根に同様の被害が発生した。

2004年で最も大きい被害をもたらした台風は0418号である。この台風は9119号とほぼ同じコースをたどって日本海を北上し北海道に再上陸した台風である。この台風での被害の教訓は、スプリングエイト、山口情報センター、出雲ドームなどの現代建築の屋根が大きく飛散したことである。これらの被害は我々にあらたな問題を提起した。

スプリングエイトの屋根は2重の金属屋根の間に断熱材が挟み込まれた構造を有していたが、強風で飛散する前に金属板を構造体に接合するボルトが、日射などの温度変化に伴う屋根葺き材の収縮によって疲労し破断あるいは強度が著しく低下していた。被害は強風によって発生したものの、原因は強風よりも屋根システムそのものに欠陥があることが明らかとなったわけである。このような温度変化に伴う葺き材の収縮による接合部のボルトなどの疲労破壊に伴う屋根の飛散は、その後も数多くの屋根で生じている。

また、山口情報センターの被害では、コンクリートの下地の上に貼られた長尺の金属薄板が大きく飛散した。近年、施工技術等の革新によって、100mもの広い範囲にわたって金属薄板を葺くことが可能になっている。強風によって、これらの金属薄板を止めている留め具（ファスナー）が一箇所でもはずれると、他のファスナーに大きな力がかかることになり、金属薄板は広範囲にめくれてしまう。山口情報センターの場合、大きな負圧が生じる屋根端部で、金属薄板が木網セメント板にバタフライビスで留められており、一部のビスの留めつけが不完全だったため飛散にいたったものである。

なお、2004年の台風では、その年に起きた新潟中越地震の死者の5倍の200名以上の死者を出した。強風による被害は、強風が原因となって生じた船の転覆などや高波を含めて、半数以上に上ると推定されている。また、60才以上の高齢者の死者の割合が、9119号台風では30%程度だったのにたいして、0418号では85%と激増したことも注目された。地震や津波にも同様の傾向が現れており、高齢化社会が進むにつれて、この傾向はますます拍車がかかると予想される。

この台風の被害で注目すべき点として、Fig. 6に示したように、北海道を除く九州、四国、本州ではほとんどの気象観測点の最大風速が設計風速以下だったにも係わらず、家屋を含め多くの地物が被害を受けたことである。スプリングエイトや山口情報セ



Photo 1 Blown roof of a hotel onto JR track.
(Yomiuri news paper, 2004/6/22)

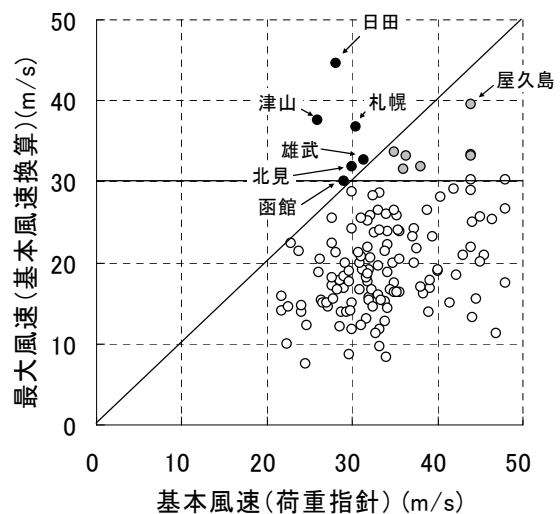


Fig. 6 Comparison of the maximum wind speed with design wind speed defined in AIJ Recommendation.

ンターの場合でも、最大風速は設計風速をかなり下回っていたにも係わらず、大きな被害となっていました。このことは、家屋等が必ずしも建築物荷重指針・同解説などに示されている風荷重にたいして壊れないようには作られてはいないことを示している。特に強風による被害の多い外装材では、必ずしもその耐力が十分ではないのではないかとと思われる。

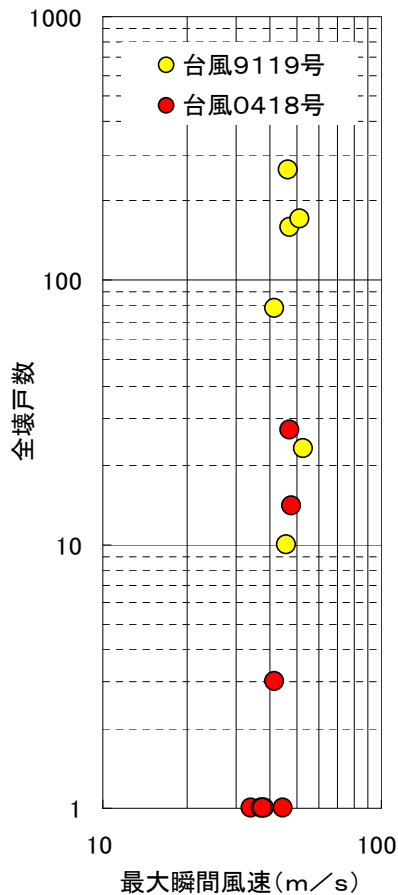


Fig. 7 Relationship between the rate of completely destroyed houses and the maxim peak gust in Typhoon 9119 and 0418

Fig. 7は0418号台風の九州の各県の全壊戸数と最大瞬間風速を9119号台風と比較したものである。Fig. 7では全壊率が小さいため全壊戸数で示してあるが、最大瞬間風速50m/sでの全壊率は0.02%程度で、前述した伊勢湾台風時と比較して2桁程小さく、この20年~30年程の間に建物の強度が大きく増加したことが伺える。しかし、注意すべきは、最大瞬間風速のわずかな差が全壊戸数の大きな差につながっていることである。伊勢湾台風時には、全壊率は風速の5乗に比例して増大したのに対して、この2つの台風の被害戸数は最大瞬間風速の実に12乗に比例して増大する。したがって、最大瞬間風速が70m/sでは全壊率は1%、80m/sでは5.6%、90m/sでは23%に達する。90m/sの強風は、フジタスケール3程度の竜巻に匹敵する風速ではあり、竜巻によって多くの建物が破壊されている現状をみれば、この程度の被害ができることは別に不思議ではない。台風で果たして80m/s以上の風が吹くことがあるかどうかということについては、過去に第2、第3宮古島台風や台風9918号、台風0313号で最大瞬間風速が80m/s以上に達する強

風を経験しており、今後、日本で吹かない強風とは言えないであろう。もし、このような強烈な台風が来襲すれば、伊勢湾台風や室戸台風なみの被害は、現在でもなお発生する恐れがあると言える。

2.2 竜巻等の小規模擾乱による強風被害

近年、竜巻等の強風による建物などの被害が、地震とならんでマスコミに大きく取り上げられるようになってきている。今年の5月の連休中に茨城県や栃木県を竜巻が襲い、死者2名を含む多くの被害を出したことは記憶に生々しい。しかし、竜巻等の被害は近年になって急増したわけではない。防災研究所では、早くから竜巻を含む様々な小規模擾乱による被害調査を行ってきた。1969年12月7日に愛知県豊橋市を襲った竜巻は、死者1名、重軽傷者69名、住家の全半壊69名という被害を出すとともに、東海道新幹線を初め多くの交通機関が不通になり社会に大きな影響を及ぼした(石崎ら, 1971)。竜巻の調査では、被害の分布の他、竜巻時の強風予測、竜巻発生時の気象状況の調査などが実施される。当時私は大学院の1回生であったが、調査に参加することができた。多くの被害から竜巻の破壊力の凄さを実感するとともに、竜巻時に発生する強烈な揚力によって、鉄骨造のドライブインの屋根が大きく折れ曲がったことにショックを受けた。当時の建築学会発行の鉄骨構造基準に掲載されていたトラス組の山形ラーメンの設計例では、屋根面を支えるトラスの下限材の座屈の計算は示されていない。トラスの上限材は母屋で区切られており、座屈長さは下限材に比べて短く、雪などの鉛直荷重に安全なように、その座屈がチェックされていたが、下限材については、どのような計算もなされていない。しかし、目にした光景は、トラスの下限材が大きく座屈、屋根がめくりあがった状況であった。勿論、当時の構造設計にも風荷重の影響は考慮されていたが、下限材の座屈は盲点のような気がした。なお、鉄塔の斜材の座屈から計算された竜巻時の風速は80m/s以上と極めて大きなものであり、推定された風速分布や被害分布から、最大風速半径が20m程度で、竜巻時の風速がFig. 8に示したように、ランキン渦によって近似できることが明らかとなった(石崎ら, 1971)。ランキン渦による竜巻時の風速のモデル化の有効性はその後の竜巻の調査でも実証されている。

石崎らは1972年夏に起こった竜巻、サンダーストームなどの3つの小規模擾乱による被害を調べ、被害を受けた建物のほとんどが基準以上の強度を持っておらず、壊れるべくして壊れたと結論付けている(石崎ら, 1973)。先に述べた2004年の台風による

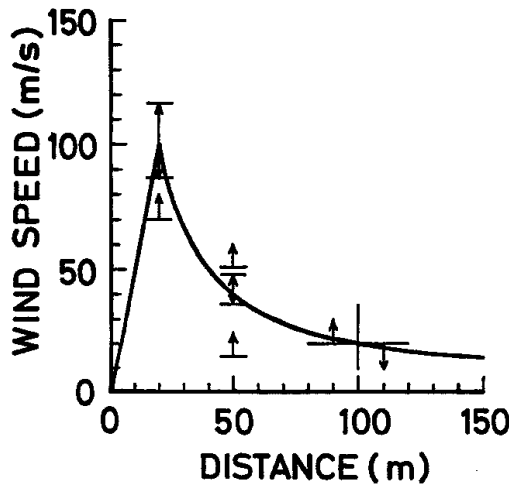


Fig. 8 Relation between wind speed estimates and distance from the Tatsumaki center.

被害も同様の結果となっており、基準を作るだけでは、建物に十分な強度が担保されたことにはならない。また、新しい基準によって適切な風荷重を定めたとしても、新基準改定前に作られた建物は、依然として強度が不足しており、これらに対する適切な対策がなければ、被害の低減に結びつかないことも明らかである。また、この時の教訓として、建設中の強度の弱い建物では、ネットで覆い飛散物を出さないことが薦められている。ネットで覆うことは一考に値するが、ネットにより風圧力が増大し、かえって建設中の建物が壊れ易くなることを考えると、建設中の弱い建物でどのような対策がとれるかは、ケースバイケースで考えることが必要であろう。竜巻などの強烈な強風に対する対策として、重要施設はなるべく分散して配置することが良いのではないかという提案もなされている。

翌年の1973年に石川県の押水町で起こった竜巻の被害調査は、私の郷里が石川県金沢市であったことから、私が中心になって被害調査をした初めてのものであった。この時の調査では、戸や窓が家の外側に向かって飛び出したりしていることや、飛散した瓦が少なく屋根上で叩きつけられるように破壊していることが判明した。竜巻被害の主要因は、竜巻に伴う強風と竜巻中心付近の気圧の低下だと言われている。その時の調査では、後者の結果がどのような影響を建物にもたらすかを理論的に検討した(石崎ら, 1974)。Fig. 9はその結果を示したもので、竜巻をランキン渦と仮定した場合、竜巻通過時の気圧の変化によって建物にどのような力がかかるかを示している。Fig. 9中のKは、建物の壁の隙間の状態と竜巻時の気圧降下、最大風速半径、移動速度などで決まる定数であり、一般の家屋で0.003から0.06程度で

ある。気密性の高い建物では竜巻通過時にも建物内の内圧の変化は小さいため、竜巻の急激な気圧降下によって外向きに大きな力が作用する。一方、気密性のない建物や窓などが開いたり壊れたりした場合、建物の内圧は外部の圧力に追従するため、建物にはあまり大きな力は作用しない。ただし、内圧の変化は常に竜巻に伴う気圧降下に遅れるため、竜巻が近づく時には外向きに、竜巻の通過後は内向きに作用することになる。このことが、屋根瓦が叩きつけられるように割れたことと関係があったのかも知れない。なお、Fig. 9の計算は電卓を用いて逐次数値計算をした結果である。

近年になって竜巻やダウンバーストなどの小規模擾乱による強風被害がマスコミによって大きく報道されるようになった契機は、死者5名を出した2005年12月25日に起きた山形県でのJR羽越本線・特急いなほ14号の転覆、及び死者3名を出した2006年9月17日の宮崎県でのJR日豊本線特急にちりん9号の脱線転覆であると思われる。列車は、強風が観測されると停止する仕組みになっているが、竜巻等ではその来襲が突然で、風速が急上昇するため、列車が停止できないことが多い。また、2006年11月7日には、北海道佐呂間町でフジタスケール3という強烈な竜巻が発生、プレハブの工事事務所が吹き飛ばされ9名の方々の命が失われた。相次ぐ竜巻による被害を受けて、その年の科学研究振興調整費によって「竜巻等の実態および発生予測と対策」(田村ら 2007)に関する研究が行われた。現在行われている竜巻のノウハウキャスト予報は、この研究の成果の一部として実用化されたものである。

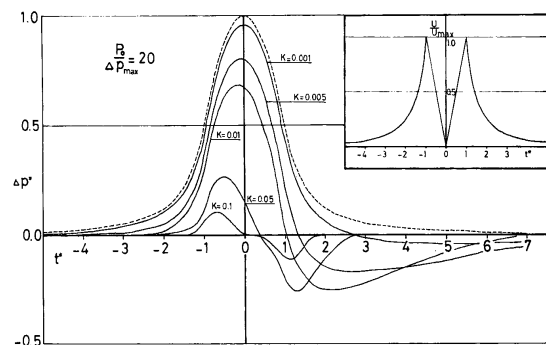


Fig. 9 Time history of explosive pressure by the pressure drop of a tornado.

竜巻ばかりではなく、突然襲う小規模擾乱による突風は様々な危険をはらんでいる。たとえば、2008年7月27日に発生した敦賀市の突風では、幅40m、奥行き10m、高さ3.5mのイベント用大型テントが吹き飛ばされ、死者1名、負傷者9名の被害を出した。このテントは幅1mのコンクリートの立方体ブロッ

ク（質量300kg）8個で押さえられていた。しかし、風洞実験より求めた風力係数を用いた計算の結果、このテントは10m/s程度の風で浮き上がることが判明した（河井・西村，2009）。このように、一見しっかりと押さえられているように見えても、風の力は意外に大きく、結構簡単に吹き飛ばすことが分かる。テントに限らず、イベント用の遊具などは風で簡単に吹き飛ばしてしまうものも多いので十分に気をつける必要がある。

また、クレーンや足場なども風に弱い。これらは、期間が限定されていることを理由に、設計で仮定した以上の強風が吹くと予想される場合には、風荷重をかからないようにする、例えば足場を覆う布などを外す、ことを前提として、設計風速が低減されている。しかし、小規模擾乱に伴う突風では、そのような対策を施す間もなく、強烈な強風にさらされるため被害が後をたたない。ゴルフ場あるいはゴルフ練習場のフェンスも同様の思想で設計風速を低減しているが、これらも突然の強風に弱く、頻繁に大きな被害を出している。幸運なことにいまだ人身事故には至ってはいないが、放置して良い問題ではないと思われる。

3. 強風被害の教訓と耐風設計

前章では、主に防災研究所年報に掲載された強風の被害調査報告に基づいて、強風被害の特徴について述べた。これらの被害の特徴を耐風設計と関連してまとめると以下ようになる。

- (1) 建物などの被害では屋根の被害が全体の60%以上を占める。屋根の被害は、葺き材の飛散から、小屋組の飛散まで、様々な形態があるが、被害のほとんどが葺き材および部材の接合部で生じており、接合方法の工夫によって、被害の多くは低減できると予想される。
- (2) 既存の屋根に新たな屋根を置く置屋根では、置屋根をしっかりと構造体に緊結することが、耐風安全性を担保するための鍵である。
- (3) 窓や戸では、半分あるいはそれ以上が、風圧ではなく飛散物によって破壊する。したがって、飛散物から建物を防御することは強風被害低減にとって不可欠であると考えられる。窓ガラスなどが飛散物によって壊れると、室内圧が上昇し屋根が壊れる原因になるとともに、屋内にいる人にも大きな危険が生じる。残念ながら、現在の基準や指針には飛散物からの防御に関する記述がなく、飛散物からの防御の重要性が十分認

識されているとは言えない。これについて早急に指針などを整備し、飛散物に対する外装材の防御を徹底する必要がある。

- (4) 家屋の被害率は最大瞬間風速と密接な関係がある。1970年頃までの被害調査の結果からは、全壊率は最大瞬間風速の5乗に比例して増大していたが、近年の家屋は建物強度の上昇によって、最大瞬間風速50m/sでの全壊率は2桁程度低下している。一方、全壊率は風速の約12乗に比例して増大し、わずかな風速の増加によって、全壊する家屋が急速に増大するようになっている。もし、80m/s以上の最大瞬間風速が吹くことになれば、現在でもなお、5%~10%程度の家屋は全壊を免れないかも知れないことに留意して、被災後の対策を検討すべきである。
- (5) 風速には地形の影響が極めて大きい。荷重指針等で示されている崖、丘、尾根の頂部付近は勿論のこと、丘の麓であっても、風が丘に平行に吹く場合には、風速が増大することを頭に入れておく必要がある。
- (6) 地形だけではなく、周りの状況や他の建物の位置関係も、被害に大きく影響する。風が開けた場所や、周りの建物よりも高い建物、例えば2階建家屋の中に3階建て家屋が建つ場合など、には注意が必要である。また、大きな建物から少し離れた場所に建つ家屋は、思わぬ強風に見舞われることがあるので注意が必要である。
- (7) 人的被害の多くは屋外にいる時に生じる。したがって、強風時には室内に留まるべきである。ただ、窓ガラスなどの防御が十分でないと、ガラスの破壊によって思わぬ怪我に繋がる恐れがある。
- (8) 竜巻による風荷重を評価するには、建物の室内圧が竜巻によってどのように変化するかを、窓などが壊れた場合を含めて明確にすることが重要である。
- (9) テントやイベント用の遊具など、耐風設計の対象でないものは、風で簡単に飛ばされる危険がある。強風によるこれらの事故を未然に防ぐには、行政に働きかけ、イベントの主催者に事前にレクチャをすることが有効かも知れない。テントなどの固定方法の改善、風荷重を減らしリスクを低減する方法、飛びそうな時の対処などについては、専門家のもつ知識を有効に活用することができそうである。
- (10) 強風被害を減らすには、合理的な耐風設計

法の提案とともに、その普及が肝心である。2004年の強風被害にみられるように多くの被害が基準や指針に示された設計風速以下で生じていることから、強風に弱いところを分析し、それを改善する方法を見いだし広く普及させることが肝心である。

4. 強風から身を守るために

桂が調べたように、死亡や重軽傷などの人的被害の多くは屋外で生じる（科学研究費突発災害研究成果報告（光田ら、1992））。ここでは、台風や竜巻などがもたらす強風から身を守るためには、どのような知識及び心構えが必要で、強風時には如何に行動すべきかを箇条書きでまとめた（日本風工学会2011）。

その1 風の力は想定外？

我々の生活にとって風は非常に馴染み深い自然現象の一つである。ただ、風が吹いたときにどんな力が生じるかは、ほとんどの人は分かっていない。しかし、風の力は多くの人が想像する以上に大きく、20m/s程度の風でも人は立っていることは困難で、多くの場合、風の乱れによって転倒してしまう。また、敦賀市で起きたテントの飛散事故の例にあるように、大型のテントは10m/s程度の風でも、場合によっては簡単に吹き飛ばされてしまい、これを人の力で押さえることは極めて危険である。

その2 強風時の屋外は飛散物の嵐？

強風時の屋外には風によって被害を受けた木や家などから発生した飛散物が、我々に向かって高速で飛んでくる。どこから飛んでくるか予測できない高速の飛散物をよけることは、余程の反射神経の持ち主でないと不可能である。また、根が腐っている街路樹や根が十分に張っていない街路樹は、見た目は立派でも風速20m/s以下の風で倒壊してしまうので注意が必要である。

その3 情報は防災の基本、目、耳を働かせ災害を防げ！

竜巻は地震と同様突然予告なしにやってくるものと思われがちである。しかし最近、竜巻等突風の発生可能性のある大気環境が認められる場合、竜巻注意報やナウキャストと呼ばれる短時間警戒情報が出されているので、予め警戒することができようになった。警戒するのとしめないのでは、襲われたときの行動に大きな差が出る。

台風は数日前から進路予想が報道されるので事前

に準備をしておくことができる。屋外の風で飛ばされそうなものを片付け、強風注意報が発令されたら、早めに帰宅し雨戸やシャッターを閉める。暴風警報が出たら屋外に出ない。

また、台風時の風は中心よりも数10kmも離れた場所の方が強いので、自宅が予想されている台風の進路上から多少はずれているように思っても警戒を怠らないことが重要である。

その4 台風は通り過ぎても安心は禁物、思わぬしっぺ返しを待っている、辛抱、辛抱！

台風来襲の前後に雨漏りの修理などで屋根に上り吹き飛ばされる人が後を絶たない。台風が通り過ぎた後も吹き返しの強い風が吹く恐れがある。前述したように、1998年の台風9807号来襲時には、台風が過ぎ去った後に、吹き返しの強風によって奈良県では室生寺をはじめ各地で大きな被害を受けた。完全に台風が通り過ぎ、強風の吹く恐れがないことが気象情報で確認できるまでは、家の中にとどまった方がよい。慎重すぎるに越したことはない。

その5 強風時には壊れた窓ガラスは凶器に変身！

ガラスは飛来物の衝突に弱く強風時には容易に壊れる。壊れたガラスは宙を舞い人を襲う。したがって、窓ガラスを衝撃に強い合わせガラスにしたり、窓を雨戸などで覆ったりして、飛来物から窓ガラスを防御することは重要である。防御できない場合には、強風時には窓のそばには近づかないことが肝心である。君子、危うきには近寄らず。

その6 おかしいなと思ったら逃げる、隠れる！

竜巻等の突風のように突然襲うものでも、竜巻注意報やナウキャスト情報で事前に警戒していれば、空が突然暗くなる、あられが降るなどの前兆を捉え、しっかりした建物に隠れるなどの対策がとれる。竜巻注意報やナウキャスト情報を事前に知らなかった場合でも、普段には見られない黒い雲が近づき樹木等がざわめきだしたり雷が降ったりした時には、頑丈な建物の中に逃げ込む慎重さが命を救う。

その7 怖いもの見たさは怪我のもと！

竜巻の移動速度は時速20~60km/sで、我々が日頃思っている以上に速い速度で移動する。遠くにある竜巻も近づいてきたらと思ったら、気がついた時には巻き込まれている。豊橋の中学校の被害では多くの生徒が窓から竜巻を見ているうちに襲われてしまった。竜巻は見せ物ではない。

参考文献

- 石崎潑雄・川村純夫・許昌九（1961）：伊勢湾台風による建築物の風害分布について，京都大学防災研究所年報，No. 4, pp. 95-104.
- 石崎潑雄・桂順治・室田達郎（1968）：第2宮古島台風による建物の被害について—第2宮古島台風被害調査報告Ⅱ—，京都大学防災研究所年報，No. 11A, pp.517-533.
- 石崎潑雄・山元龍三郎・光田寧・室田達郎（1970）：第3宮古島台風による家屋の風災害について，京都大学防災研究所年報，No. 13A, pp. 449-461.
- 石崎潑雄・光田寧・川村純夫・室田達郎・木本英爾（1971）：1969年12月7日，豊橋市を襲った「たつまき」に関する調査研究，京都大学防災研究所年報，No. 14A, pp. 481-500.
- 石崎潑雄・成仁煥・吉川祐三・藤谷徳之助（1973）：1972年夏に起こったSEVER LOCAL STORMによる被害について，京都大学防災研究所年報，No. 16B, pp. 273-284.
- 石崎潑雄・河井宏允，成仁煥・森武雄（1974）：龍巻による建物の被害について—1973年5月21日石川県押水町を襲った竜巻の被害調査—，京都大学防災研究所年報，No. 17B, pp. 209-217.
- 石崎潑雄・桂順治・吉川祐三・河井宏允（1976）：台風7513号による八丈島の構造物の被害について，京都大学防災研究所年報，No. 19B, pp. 279-292.
- 光田寧他（1992）：1991年耐風19号による強風災害の研究，平成3年度文部省科学研究費突発災害調査研究成果報告，1991 No.B-4
- 奥田泰雄・桂順治・藤井健・林泰一・石川裕彦・丸山敬（1999）：台風9807号による強風災害について—その1：消防署で観測された気象要素—，京都大学防災研究所年報，No. 42B-1, pp. 247-265.
- 丸山敬・河井宏允・奥田泰雄・林泰一（2004）：宮古島を来襲した台風0314号について—その2 被害の特性—，京都大学防災研究所年報，No. 47B, pp. 491-502.
- 河井宏允・西村宏昭（2005）：台風0406号による近江八幡市ホテルの屋根の被害，京都大学防災研究所年報，No. 48B, pp. 579-586.
- 田村幸雄他（2008）：竜巻等の実態および発生予測と対策，平成19年度科学技術振興調整費補助金-重要政策課題の推進-研究成果報告書
- 丸山敬・河井宏允・奥田泰雄・林泰一（2009）：試作された耐衝撃性能試験用エアークャノンの性能，京都大学防災研究所年報，No.52B, pp. 481-489.
- 日本風工学会（2011）：強風災害の変遷と教訓—第2版（2011）

Strong Wind Induced Damages and Wind Resistant Design of Houses and Buildings

Hiromasa KAWAI

Synopsis

The investigations of damage induced by strong wind like typhoon, tornado and other local severe storms which have been carried out by the wind research group in DPRI since 1960's, are reviewed in the paper. A lot of lessons can be extracted from the investigation to improve wind resistant design of houses and buildings. Most vulnerable part of houses to wind is a roof and claddings. As more than half of damage of window and doors are induced by flying debris, it is very important to protect wind glasses from the flying debris by shutter or other measure e.g. use of laminated glass. Most of accident to peoples happens outdoor, so it is safe for us to stay in a house and a building when typhoon or tornado is approaching. Ten lessons and seven directions to be safe in strong wind are given in the paper.

Keywords: wind induced damage, typhoon, tornado, flying debris,