

最近の竜巻による建築物の被害

Recent Tornado Damage to Buildings

奥田 泰雄*1

1. はじめに

強風による建築物の被害というと、屋根葺き材や外壁のはく離・飛散被害が代表的であるが、竜巻による被害では建築物そのものが倒壊したり飛散したりすることがある。最近、竜巻等の突風被害発生のニュースがマスコミでもしばしば取り上げられ人々の関心も高くなってきているが、実際に竜巻等の突風によって建築物がどのような被害を受けるのかはあまり知られていないように思う。本稿では、2006年の延岡竜巻と佐呂間竜巻を中心に最近の竜巻による建築物の被害について紹介する。

2. 竜巻被害の特徴

図-1, 2は気象庁が竜巻またはダウンバースト（参考資料参照）と認定した突風発生事例（1961年から2006年）の分布図¹⁾と年別の発生収録数¹⁾である。竜巻等の突風は海岸や平野を中心に日本全国で発生し、多い時で年間30個前後、1年間に平均約16個（図-2中点線）の竜巻等の突風が収録されている。突風が数多く発生している米国では、年間1000～1200個ものトルネードやダウンバーストが記録されていると言われていたが、単位面積あたりに換算すると日本の2倍程度の発生数であり、日本における竜巻等突風の発生数（年平均約16個）は世界的にみても決して少ない数字ではない。地域別では沖縄県が最も多く、北海道、高知県、宮崎県、愛知県、新潟県と続く¹⁾。

日本で発生する大半の竜巻は、藤田スケール（参考資料参照）でF0かF1クラスのものであり、F2クラスの竜巻は年平均1個程度、F3クラスの竜巻は10年くらいに1個



図-1 竜巻等の突風発生（気象庁¹⁾
赤丸は1961～2005年、緑丸は2006年に発生した竜巻等を示す

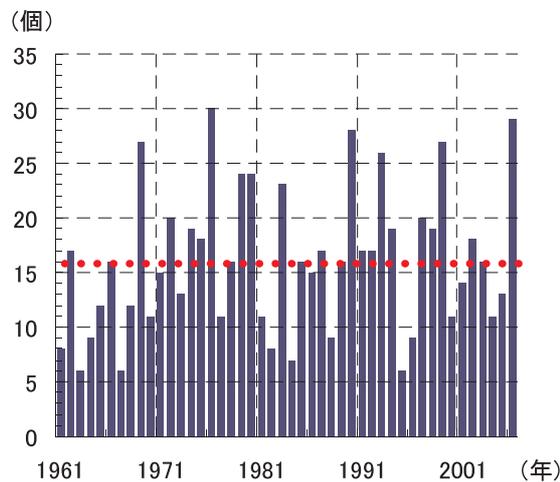


図-2 竜巻等の年別収録数（気象庁¹⁾）

*1 OKUDA Yasuo：独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員 博士（工学）

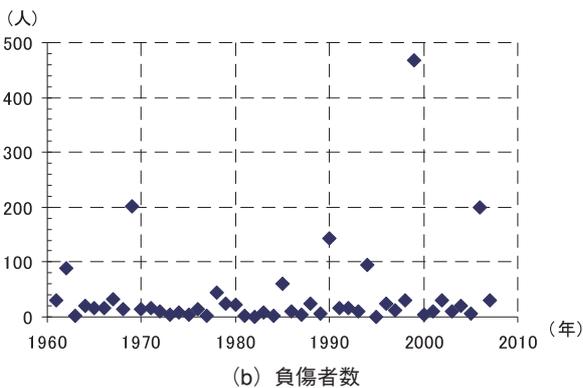
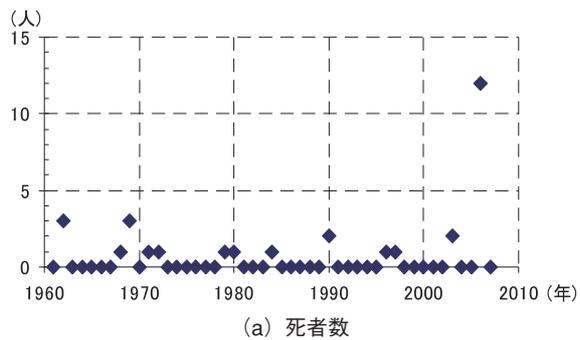


図-3 竜巻等による人的被害 (気象庁¹⁾)

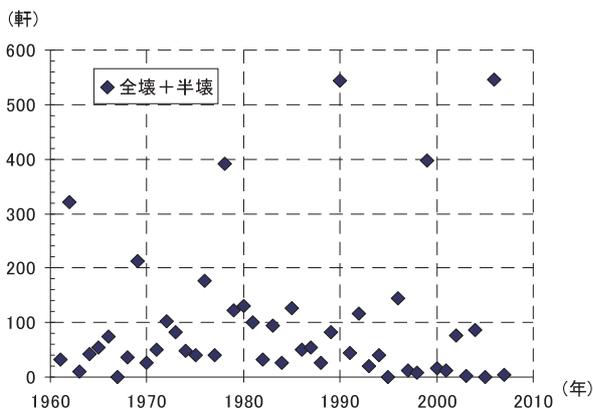


図-4 竜巻等による建築物の被害 (気象庁¹⁾)

程度の割合で発生している。F4以上の竜巻はこれまで日本では記録されていないが、専門家はF4クラス以上の竜巻が日本で発生する可能性を否定してはいない。

月別の発生数では9月が最も多く3月が最も少ない。竜巻発生時の気象状況としては、台風の接近、低気圧の発達、前線の通過などがある。

図-3は気象庁がまとめた竜巻等の突風による人的被害である¹⁾。死者数は、2006年まで年間0~2名で年平均約0.4人あったが、2006年には延岡竜巻と佐呂間竜巻により12名が亡くなった。負傷者数は1969年、1990年、1999年、2006年を除くと年間100名以下であり、年平均20名程度であった。1969年、1990年、1999年、2006年にはF2クラ

表-1 最近の主な竜巻の被害

名称 発生年月日 発生場所	藤田スケール 被害長さ 被害幅	人的被害 (人)			物的被害 (軒)		
		死者	重傷	軽傷	全壊	半壊	一部損壊
茂原竜巻 ⁴⁾ 1990.12.11 千葉県茂原市	F3 5km 1km	0	7	67	82	161	1504
豊橋竜巻 ⁵⁾ 1999.9.24 愛知県豊橋市他	F3 19km 550m	0	12	419	40	298	2343
佐賀竜巻 ⁶⁾ 2004.6.27 佐賀県佐賀市他	F2 8km 300m	0	0	15	13	34	322
延岡竜巻 ⁷⁾ 2006.9.17 宮崎県延岡市他	F2 7.5km 250m	3	4	148	117	354	981
佐呂間竜巻 ⁸⁾ 2006.11.7 北海道佐呂間町	F3 3km 600m	9	6	25	7	7	25

ス以上の竜巻が愛知県豊橋市、千葉県茂原市、宮崎県延岡市等の都市を縦断し、200~500名の負傷者を出した。2006年の延岡竜巻と佐呂間竜巻による死者数が突出しているが、竜巻は場合によっては甚大な人的被害を及ぼすことを我々に再認識させた。

図-4は竜巻等の突風による建築物の全壊+半壊数である¹⁾。1962年、1969年、1978年、1990年、1999年、2006年が多く、ほぼ10年周期で全壊及び半壊の被害が多く発生している。これらの年ではそれぞれF2クラス以上の竜巻等の突風が発生している。

即ち、わが国ではほぼ10年に1回程度の周期で、数百名規模の人的被害、全壊と半壊合わせて数百棟規模の建築物の被害等、甚大な突風災害が発生していると言える。この数値は大地震の災害と比較すると小さいかもしれないが、2003年十勝沖地震²⁾や2005年福岡県西方沖地震³⁾と同程度の被害規模であり、看過できる数ではない。表-1に最近の主な竜巻の被害を示した。

なお、延岡竜巻と佐呂間竜巻を契機に、気象庁は全国の気象レーダのドップラー化計画を平成20年3月までに実施し、同月26日より「竜巻注意情報」を出すことになった⁹⁾。竜巻注意情報とは、今後1時間以内に竜巻等の突風災害が発生する可能性が高い場合に、都道府県単位で気象庁から出されるものである。また、内閣府¹⁰⁾や気象庁¹¹⁾は竜巻に関するリーフレットを作成し、竜巻注意情



写真-1 飛散した工事事務所 (国土交通省北海道開発局撮影)



写真-4 倒壊した木造住宅 (延岡市撮影)



写真-2 工事事務所の被害 (防衛大学校小林文明氏撮影)



写真-3 飛散した店舗住宅 (国土交通省北海道開発局撮影)

報が出たときの避難方法など、竜巻に対する啓蒙を行っている。

3. 竜巻による建築物の被害

竜巻等突風の建築物等の被害の特徴は、きわめて局所的な被害範囲である、激しい被害であり住家自体が跡形

もなく飛ばされたりする、さまざまな飛来物が発生し周辺の建築物等に衝突する等がある。具体的には、建築物・工作物の倒壊・転倒・飛散、屋根小屋組の崩壊・飛散、屋根葺き材や外壁の剥離・飛散、窓ガラス等の建具の破損、外壁や屋根への飛来物の衝突・貫通等の被害がある。

建築基準法では、このような竜巻等の突風に対する耐風設計法を明示的には規定していない。これは、1つの建築物について竜巻等に遭遇する確率は非常に小さく、このような竜巻等の突風荷重を考慮して設計することは、一般の建築物にとっては過剰な設計となると考えられているためである。しかしながら、防災拠点や原子力発電所等の耐風設計には竜巻等の突風についても考慮すべきではないかという指摘がなされている。また、飛来物に対しても設計者が参照できるような設計資料が未整備であることも指摘されている¹²⁾。

3.1 建築物や工作物の倒壊・飛散

F2, F3クラスの竜巻の直撃を受けると、軽量であり堅牢ではない建築物は倒壊し吹き飛ばされる。写真-1, 2は2006年の佐呂間竜巻の直撃によって倒壊・飛散した工事事務所である。現場には3棟の仮設事務所があったが、1棟が吹き飛ばされ1棟が倒壊し、9名の死者を出した。隣接して建っていた残りの1棟はほとんど無傷の状態が残っていた。工事事務所敷地内では、工事中重機が転倒しトラックや乗用車も数十mも吹き飛ばされている。仮設事務所は木ぐいと土台が羽子板プレートや鋸(かすがい)で結合されていたが、ほとんど抵抗するまでもなく仮設事務所が吹き飛ばされていた。写真-3は佐呂間竜巻の直撃によって吹き飛ばされた住宅の跡である。基礎と土台、床版を残して上部建築物が全て吹き飛ばされた。



写真-5 倒壊した木造住宅（宮崎県撮影）



写真-8 屋根小屋組の飛散



写真-6 折損した交通標識（国土交通省北海道開発局撮影）



写真-9 屋根葺き材と屋根下地の飛散・外壁の破壊



写真-7 屋根小屋組・構造骨組みの飛散



写真-10 折板屋根のはく離（宮崎県撮影）

写真-4, 5は2006年の延岡竜巻の直撃によって倒壊した木造建築物である。写真-5の中央の木造倉庫は押し潰されたように倒壊しているが、写真下方の住家の被害は比較的軽微である。このように竜巻被害の境界は非常に明確

であり、竜巻経路上の建築物等は大きな被害を受けるが、経路から少しでも離れた建築物はほとんど被害を受けないことがある。写真-6は佐呂間竜巻で折損した交通標識であり、さまざまな飛来物が鉄柱に巻きついている。



写真-11 鋼板製屋根のはく離（宮崎県撮影）



写真-14 消防本部の窓ガラスの破損（宮崎県撮影）



写真-12 アスファルトシングル屋根のはく離（宮崎県撮影）



写真-15 外壁のはく離と窓ガラスの破損



写真-13 谷筋の住家の屋根の被害（宮崎県撮影）

3.2 屋根小屋組の崩壊・飛散

写真-7, 8は佐呂間竜巻での木造の住宅や作業事務所の被害で、屋根の半分くらいが崩壊し飛散している。風が吹くと屋根面には上向きの風圧力が作用するが、外壁や窓ガラスの破損により開口部ができると、そこから風が

侵入し屋根を内側から押し上げる力が発生する。それらの合力によって屋根全体が吹き飛ばされることがある。

3.3 屋根葺き材や外壁の剥離・飛散

写真-9は延岡竜巻の被害で、屋根葺き材と屋根下地がはく離している。写真-10は延岡竜巻による大型量販店の被害で、鋼板製折板屋根がはく離した。ここでは出入口のサッシが室内側に倒壊する被害も出ている。屋根のはく離により竜巻中心の低圧が室内に伝わったため室内圧が急激に低下し、出入口サッシを内側に倒したものと考えられる。写真-11も平葺き鋼板製屋根の被害であるが、野地板までのはく離している。写真-12はRC造の屋上に架けたアスファルトシングル葺き屋根の被害で、野地板と共にはく離している。写真-13は谷筋の木造住家の屋根被害で、写真中央の住家は屋根瓦と野地板が剥離している。

3.4 窓ガラスや外壁の破損

写真-14は延岡市の消防本部（RC造）の被害で、竜巻



写真-16 さまざまな飛来物（国土交通省北海道開発局撮影）



図-5 トルネード用設計風速マップ（ASCE 7-02¹³⁾）



写真-17 飛来物の衝突痕と貫通痕（東京工芸大学松井正宏氏撮影）



写真-18 角材の貫通（東京工芸大学松井正宏氏撮影）



写真-19 角材の貫通（東京工芸大学松井正宏氏撮影）

の直撃により2, 3階の南面の窓ガラスが全て割れてしまい、室内が使用できなくなってしまった。このため被災後の応急復旧時に消防本部が機能しなかったとのことである。防災拠点になるような建築物は一般の建築物よりも重要度が高いため、竜巻等の突風についても考慮した耐風設計が望まれる。

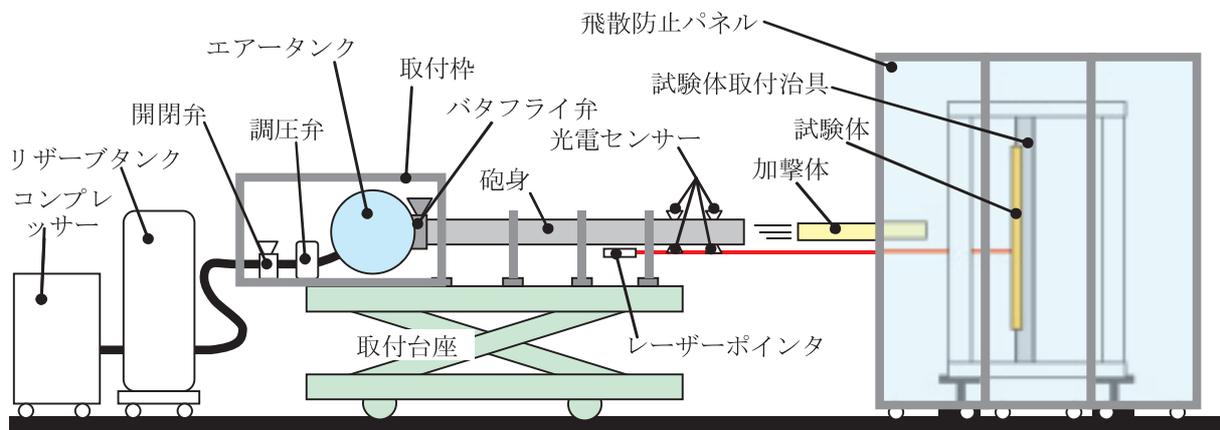
写真-15は鉄骨造店舗の被害で、外壁仕上げの一部がはく離し、窓ガラスは全て割れてサッシが湾曲している。このような場合には、外装材だけでなく内装材、建具等にも被害が発生している。また、台風等で外装材が破損した場合には、雨水の浸入により内装材や断熱材等が吸水し、交換しなければならなくなることもある。

3.5 飛来物の衝突

外壁や窓ガラスは竜巻の風力だけで損傷するわけではない。竜巻ではさまざまなものが飛来物として外壁や屋根に衝突する。写真-16は佐呂間竜巻の飛来物で、屋根葺き材、倉庫の構造骨組み、外壁パネル、内装材、家具等さまざまなものがある。竜巻では無数の飛来物が外壁に衝突する（写真-17）。また飛散した角材が住家の外壁に突き刺さることもある（写真-18）。写真-19は写真-18の住家の室内の様子で、角材が室内まで貫通している。

4. 各国の規定等における竜巻の風荷重と飛来物の取り扱い

建築基準法施行令第87条に定める基準風速 V_0 は、各気象官署等の過去の台風や季節風等の最大風速（10分間平均風速）の記録を踏まえて定めたものであり、竜巻の風荷重をとくに考慮して定めたものではない。ASCE 7-02¹³⁾、Australian/New Zealand Standard 1170.2¹⁴⁾、National Building Code of Canada¹⁵⁾も、一般の建築物に

図-6 エアーキャノン式射出装置²⁰⁾写真-20 エアーキャノン式射出装置²⁰⁾

対しては「トルネードの作用を考慮した耐風設計は経済的ではない」ことからトルネードの風荷重は適用除外としている。ただし、ASCE 7-02では、付録として米国のトルネード用設計風速マップ(図-5)を掲載している。またNational Building Code of Canadaでは、東部カナダでの被害調査結果から、基礎と床版との緊結、屋根システムと壁との緊結が不十分な建築物ではトルネードによる人的被害が甚大である、と報告している。

建築基準法施行令第39条に、「屋根ふき材、内装材、外装材、帳壁(中略)は、風圧並びに地震その他の震動及び衝撃によつて脱落しないようにしなければならない。」とあり、平成12年建設省告示第1458号に風圧力に対するガラスの許容耐力は示されているが、飛来物に対する外壁等の設計をどのようにすればよいか明示されていない。日本建築センターは1991年台風19号による住宅の強風被害を調査研究した結果、住宅の開口部を飛来物の衝突から防ぐ方法として開口部に雨戸や格子・格子戸の設置を推奨している¹⁶⁾。一方、ASCE 7-02の規定では、ハリケーンの強風による飛来物に対してはハリケーン常

襲地域や飛来物影響地域を定め、その地域内の建築物については建築物区分(建築物の重要度等によって分類)に応じて想定する飛来物に対して、試験等により安全性が確認されたシャッターやガラス等を使用することを求めている。Australian/New Zealand Standardでは、トルネードによる飛来物の影響は建築物の構造設計にとって重要であるが、局所性、発生頻度から除外している。ただし、送電線やパイプラインといった長い構造物ではその影響を受ける可能性が高いとしている。また、ISO 16932¹⁷⁾ではASTM E1886-05¹⁸⁾、ASTM E1996-06¹⁹⁾の試験法を踏まえて外装材の対飛来物性能を検証する試験法を定めている。日本では飛来物に対する外装材の性能を検証する試験法について検討が始まった段階である。河井ら²⁰⁾はASTMの試験法を参考に図-6、写真-20のようなエアーキャノン式射出装置を開発している。

5. まとめ

竜巻被害の特徴をまとめ、2006年の延岡竜巻と佐呂間竜巻を中心に最近の竜巻による建築物の被害(建築物・工作物の倒壊・転倒・飛散、屋根小屋組の崩壊・飛散、屋根葺き材や外壁の剥離・飛散、窓ガラス等の建具の破損、外壁や屋根への飛来物の衝突・貫通等の被害)について紹介した。また、竜巻荷重や飛来物に関して各国の建築規定を紹介した。

【参考文献】

- 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>
- 2) 総務省消防庁：平成15年(2003年)十勝沖地震について(確定報), 2004.3.31.

<http://www.fdma.go.jp/data/H160331TokachiJishin.pdf>

- 3) 総務省消防庁：3月20日発生の福岡県西方沖を震源とする地震（第34報），2005.5.12.
<http://www.fdma.go.jp/data/010600271816273701.pdf>
- 4) 光田 寧・林 泰一・浅井富雄・岩谷祥美：1990年12月11日、房総半島で発生した竜巻について、文部省科学研究費（No.02306029）突発災害調査研究成果 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（研究代表者 桂 順治），pp.1-24, 1991.3.
- 5) 総務省消防庁：平成11年10月19日 平成11年9月21日からの大雨による被害状況について（第30報）～台風第18号の被害を含む～，1999.11.19.
<http://www.fdma.go.jp/data/010409221606548465.pdf>
- 6) 総務省消防庁：6月27日に佐賀県で発生した突風による被害状況，2004.7.2.
<http://www.fdma.go.jp/data/H160702sagatoppu.pdf>
- 7) 総務省消防庁：平成18年 台風第13号と豪雨による被害状況（第14報），2006.11.14.
<http://www.fdma.go.jp/data/010610141801517885.pdf>
- 8) 総務省消防庁：北海道佐呂間町の竜巻による災害（確定報），2006.12.14.
<http://www.fdma.go.jp/data/010611141800541467.pdf>
- 9) 気象庁：突風に注意を呼びかける新しい府県気象情報の提供開始について，2008.1.17.
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0801/17c/tatsumaki-chui-joho.html>
- 10) 内閣府：竜巻等突風災害とその対応，2007.6.
http://www.bousai.go.jp/tornado/tornado_low.pdf
- 11) 気象庁：リーフレット「竜巻から身を守る～竜巻注意情報～」，2008.2.
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/tatumaki/T-ALL.pdf>
- 12) 奥田泰雄：竜巻等突風に対する研究課題（建築分野の立場から），2006.12.
http://www.bousai.go.jp/tornado/contents_2nd/handout_1-5.pdf
- 13) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-02), American Society of Civil Engineers, 2002.
- 14) Australian/New Zealand Standard(AS/NZS 1170.2 風行動作), 2002.
- 15) National Building Code of Canada, 1995.
- 16) 日本建築センター：飛来物に対する計画，住宅の台風設計施工点検指針，1993.3.
- 17) ISO 16932 : Glass in building -- Destructive-windstorm - resistant security glazing -- Test and classification, 2007.
- 18) ASTM E1886-05 : Standard Test Method for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Missile(s) and Exposed to Cyclic Pressure Differentials, 2005.
- 19) ASTM E1996-06 : Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Windborne Debris in Hurricanes, 2006.
- 20) 河井宏允・丸山 敬・西村宏昭：飛散物に対する外装仕上材

の耐力評価基準に関する研究 - 衝撃試験装置の試作 -, 平成19年度文部科学省科学技術振興調整費「竜巻等の実態および発生予測と対策」報告書, 2008.3.

参考資料

藤田スケール (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秒間の平均風速)	テレビ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秒間の平均風速)	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、強い木の幹が折れたりする。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秒間の平均風速)	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もある。
F3	70～92m/s (約5秒間の平均風速)	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、自動車が持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、また引抜かれることもある。
F4	93～116m/s (約4秒間の平均風速)	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。鉄骨づくりでもベシヤンコ。列車が吹き飛ばされ、自動車は何十mも空中飛行する。1t以上もある物体が降ってきて、危険この上もない。
F5	117～142m/s (約3秒間の平均風速)	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tもある物体がどこからともなく降ってくる。

ダウンバースト (気象科学辞典より)

ダウンバーストは、積雲や積乱雲から生じる、冷やされて重くなった強い下降気流のこと。地面に到達後激しく発散し、突風となって周囲に吹き出していく。突風の風速は、10m/s程度のものから強いものでは75m/sに達する。吹き出しの水平的な広がり、数km以下と小さく寿命は10分程度以下と短いことが多い。