

台風による強風被害と外装材の耐風設計

Typhoon Damage and Wind Design for Components and Cladding on Buildings

西村 宏昭*1

1. はじめに

過去の台風による強風被害に比べて、近年の台風被害の特徴は、人的被害が減少し構造物等の損害が増大していると言われている。人的被害が減少したのは主に気象観測と情報伝達の技術が進歩したことによる。構造物の損害の増大は、損害保険の支払額が増加していることからの結論であるが、過去の台風被害は損害額が不明であるので、比較は充分でない。過去の統計から家屋の被害数を比較すると、近年における家屋の被害数は明らかに減少している。被害数の減少は、建築技術の進歩と、過去に襲来した規模の巨大台風が近年にはわが国を襲っていない事実の二面から概して説明できよう。したがって、建築技術の進歩によって建築物の強風被害は減ったが、最大級ではない次級の台風によって被害額が増大していると言える。このことは将来最大級の台風が襲来した際の被害額は膨大なものになる恐れを示唆している。

本稿では、過去の台風被害を振り返り、近年の台風被害のレビューを通して、(近い) 将来襲来すると想定される巨大台風による被害を最小限に食い止めるための防災力を一層高める必要性について述べる。

2. 過去の台風被害

2.1 過去に甚大な被害をもたらした台風

本稿の主題の一つは、台風被害は過去のもので現在では技術的に解決された問題としてよいかという問い掛けである。そこで、過去に甚大な被害をもたらした台風を振り返ることは意義のあることであろう。顕著な被害を

もたらした台風の記録を以下に列記する。なお、気象庁の公式の統計は1951年に始まっているので、室戸台風と枕崎台風の記録は参考である。

(1) 室戸台風

室戸台風は1934年(昭和9年)9月20日、室戸岬に上陸した。上陸時の最低中心気圧は世界気象観測史上始めて最低の911.6hPa(mb)を記録した。室戸台風による死者・行方不明者は3,036人、負傷者1万5千人以上、倒壊家屋92,740戸、浸水家屋401,157戸、船舶の損壊27,594隻であった。室戸台風で四天王寺の五重塔が倒壊した(写真-1)。



写真-1 倒壊した大阪四天王寺の五重塔(毎日新聞社提供)

(2) 枕崎台風

室戸台風から11年後の1945年(昭和20年)9月17日、鹿児島県枕崎に上陸した台風は室戸台風次に次ぐ最低気圧916.3hPaを記録した巨大台風であった。これより後、現在に至るまで920hPaを下回る巨大台風は上陸していない。昭和20年はわが国の歴史で忘れてはならない太平洋戦争が終戦した年で、枕崎台風の上陸は終戦日からほぼ

*1 NISHIMURA Hiroaki : 建築物理部耐風試験室 室長 博士(工学)

1ヵ月後のことであった。原爆が投下された広島市内は追い討ちを掛けるような枕崎台風の惨事に見舞われた。全国の被害は死者・行方不明者3,756人、倒壊家屋89,839戸、浸水家屋27,388戸に達している。

(3) キャサリン台風

キャサリン台風は1947年（昭和22年）9月8日、マリアナ諸島海上で発生し、紀伊半島沖から房総半島をかすめて三陸沖に抜けた台風であった。この台風は最低気圧986hPaの弱い台風であったが、活発な秋雨前線を伴い各所で洪水を発生させた。死者・行方不明者1,930人、倒壊家屋9,298戸、浸水家屋841,743戸、罹災者1,642,571人と驚くべき数値が記録されている。なお、この年から昭和28年まで台風に年ごとに“ A ”から始まるアメリカ婦人の名前が付けられた。

(4) 洞爺丸台風

1954年（昭和29年）9月26日、この年の台風22号は鹿児島県に上陸し、日本海に抜け、夜半に北海道西方海上に到達した。このとき海上での中心気圧は956hPaで台風は強い勢力を維持していた。函館港で風雨の状況を観察していた青函連絡船「洞爺丸」は、4時間遅れで函館港を出港したが、港から出たとき強風と高波を受け、約20分後に航行不可能になり、4時間後に沈没し、乗客1,337人中1,139人が死亡した。船長は函館が台風目の中にいたにも拘わらず、台風が通り過ぎたと勘違いしたのであった。洞爺丸台風は日本海に入ってから急激に速度を速めたが、気象衛星はおろか気象レーダーすら無かった当時、このような状況の変化を知る方法は無かった。洞爺丸の沈没は、戦争による沈没を除けば、1912年のタイタニック号沈没による1,513人の犠牲、1865年のサルタナ号火災による1,450人の犠牲に次ぐ世界第3番目の海難事故として知られる。東北地方では大火も発生し、洞爺丸台風による被害は、死者・行方不明者1,761人、住家の全半壊207,542戸、船舶被害5,581隻であった。

(5) 狩野川台風

1958年（昭和33年）9月26日、台風22号が伊豆半島から関東地方を直撃した。海上での中心気圧は877hPaに達し戦後最低の気圧を記録した。海上での最大風速は75m/sに達したが、この台風で被害を受けたのは強風よりもむしろ豪雨によってであった。伊豆半島湯ヶ島で24時間雨量694mmを記録し、河川が氾濫して被害が拡大した。死者・行方不明者1,269人、倒壊家屋16,743戸、浸水家屋521,715戸が報告されている。

(6) 伊勢湾台風

1959年（昭和34年）9月26日、台風15号が潮岬に上陸した。台風進路の右側に当たる知多湾、三河湾、伊勢湾では南寄りの暴風が吹き、吹き寄せと吸い上げ効果で高潮が発生した。上陸時の中心最低気圧は929hPaで、最大の波の高さは10mに達したというから、津波のような破壊力を持っていたと思われる。吸い上げ効果は中心気圧が1hPa下がると水位が1cm上がるので、920hPaの台風が上陸するとそれだけで潮位は約80cm上昇する。吹き寄せ効果は台風の強い風が岸に向かって吹くときに海水が岸に打ち寄せられ海面がさらに上昇する効果で、波の高さは風速の2乗に比例すると言われている。強風と高潮によって過去最悪の死者・行方不明者5,098人の被害が出た。負傷者38,921人、家屋の損壊833,965戸、浸水家屋363,611戸、船舶損壊7,576隻という記録が残っている。

(7) 第2室戸台風

1961年（昭和36年）9月16日、室戸岬に上陸した台風は、室戸岬で最低中心気圧925hPa、最大風速66.7m/s、最大瞬間風速84.5m/sを記録した猛烈な強さの台風であった。死者行方不明者8人、負傷者4,972人、住家全壊15,238戸、半壊46,663戸、浸水家屋384,120戸を記録している。台風の強さの割りに人的被害が少ないのは、このころから気象観測と予報の伝達によってほとんどの人が事前に台風の経路を知ることになったことによると考えられる。

2.2 人的被害

1951年から2004年までの台風による人的被害の推移を図-1に示す。これには強風被害以外に洪水や高潮による被害も含まれている。記録では、1959年の伊勢湾台風における死者・行方不明者5,098人を最高として1950年～1960年の10年間に多くの人的被害が発生したが、1960年以降は500人規模の被害が最大であり、人的被害は劇的に減少したと言える。近年では、2004年に観測史上最多の10個の台風が上陸したが、それでも合計214人の死者数であった。公式の統計以前であるが、1934年の室戸台風で3,036人、1945年の枕崎台風で3,756人の人命が失われている。これらの二つの台風は上陸台風の強さではわが国で最大級の台風であった。

1960年以降の顕著な死者数の減少は1954年の洞爺丸台風における「洞爺丸」の沈没事故で多くの犠牲者を出したことによる反省から、気象観測とメディアを通しての情報伝達手段が急速に進んだ結果であると考えられる。

今では死語になっているが、「一吹き千人」というのは1回で千人規模の死者が発生した台風の脅威を表す言葉である。当時は、気象観測が今ほど発達しておらず、台風の強さや位置が正確にわからず、台風の進路予測も不十分だったので、突然の強風に対して恐怖を抱いていたのであろう。

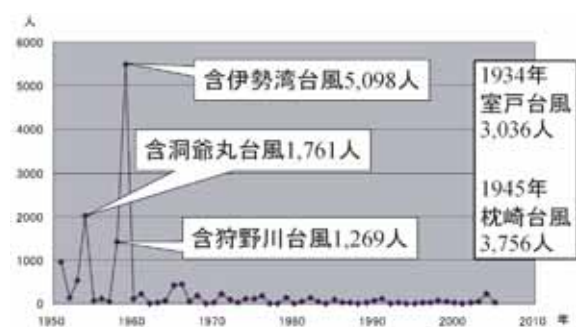


図-1 過去の台風による死者・行方不明者 (1951～2005年)

気象観測技術の進歩とともに情報伝達手段の発達被害の低減に大きく貢献した。1925年にラジオ放送が開始され、この年ラジオによる天気予報が開始されている。室戸台風翌年の1935年には、室戸台風の被害を教訓として暴風警報を暴風警報と気象特報（現在の注意報）の二つに分けて発令することとした。1953年（洞爺丸台風の1年前）にはテレビ放送が開始され、テレビによる天気予報が放映された。1974年には地域気象観測システム（AMeDAS）の運用が開始され、1977年には静止気象衛星「ひまわり」打ち上げなどの気象観測網が整備され、テレビ等のメディアも国民の間で普及して、現在では台風の発生から消滅までの詳細な情報が逐次手に入る状況となっている。

死者数が大幅に減少したことは喜ばしいことに違いないが、人命の損失はいくらであれば許されるかという問題ではない。近年の台風による人的被害では不可抗力とは言えない死亡原因が報告されている。例えば、屋根の修理中に強風を受けて転落した老人、田圃の様子を見に行き水路の水に流された男性、係留した船の様子を見に行き高波に呑まれた男性、波しぶきを見に防波堤に行き波にさらわれた若者、強風中を歩いていて飛来した木の枝の直撃を受けて死亡した婦人などがいた。これらの被害を受けた人々は危険に対する感覚が鈍くなっているのであらうか？台風の情報が詳細に報道されることによって、未知の恐怖が払拭され、身に迫る危険までもが克服されたかのような勘違いに陥ったとしか考えられない。我々はこれらの無防備な人々に対して危険性につ

いての情報が適切ではなかった点を反省する必要があるであろう。風に乗って20m/sの速度で飛んで来る枝を、身をかわして避けることなど通常の人間にはできないことを知らせる必要がある。1秒前には20m先にあった物が、次の瞬間（1秒後）に目の前にあることを想像すれば、それを避けることなどできないことは容易に理解できるはずである。

これらの被害が発生するのは、台風の情報が不十分なのではない。台風に対処する方法を知らせていないだけなのである。室内にいる人が外の様子を窺っていて飛来物によって窓ガラスが割れ、頸動脈を切断した人もいた。米国赤十字社は強風が近づくと窓に厚手のカーテンを引き窓から離れて頑丈なソファの陰で身を低くするようにパンフレットを出しているのに、わが国ではそのような防災情報は見たことがない。台風の構造を今以上に詳細に分析してもこれらの被害は減らないであろう。適切な防災情報が必要なのである。このまま無為に過ぎて巨大台風を迎えると「一吹き千人」の悪夢が再来するであろう。

2.3 建築物の被害

統計にある過去の台風による建築物の被害を図-2に示す。この図から、1950年代から1960年代初頭に掛けて多くの台風被害があったが、1970年代から1980年代までの20年間はほとんど被害がなかったことが分かる。台風は活発な時期と不活発な時期があるとされており、わが国に襲来する台風は活発期、不活発期に続いて1990年代から再び活発期を迎えているのかもしれない。



図-2 過去の台風による建築物の被害 (1951～2005年)

1990年以前の台風による被害額は分からないが、近年の自然災害による支払保険金については表-1に示すような日本損害保険協会による統計がある。台風9119号による支払保険金5,679億円を筆頭として、多くの台風によって多額の保険金が支払われ、2004年に上陸した10個の台

風による支払保険金の合計は7,000億円を超えた。この統計は火災保険、自動車保険、傷害保険等の合計で、すべての被害額の合計を表していないことに注意する必要があるが、それでも充分大きい被害額である。表-1には台風上陸時の中心気圧を併記した。これらの被害額の大きい台風の上陸時の気圧は940 hPa～965 hPaで、室戸台風や枕崎台風などの強さに比べるとかなり弱い台風である。実際、最低基準として決められている建築基準法から計算される設計風速よりも低い風速で被害が多く発生している。

なお、1995年の阪神・淡路大震災時に支払われた保険金は783億円、2004年の新潟県中越地震時に支払われた保険金は140億円（この地震による死者は40名であるが、同じ年の台風23号では死者94名）であるから、台風被害が如何に大きいかが分かる。余談であるが、本稿の読者は台風被害を補償する保険契約を結ぶことをお勧めする。統計的には将来に巨大台風が上陸するのはほぼ確実であるが、建築技術は最大級の台風に対して防御できるほど完成されていないと思われる（後述するように、強風被害の過半を占める飛散物に対する防御がなされていない）。多くの保険免責額は20万円であるが、これを超える被害が最大級でない次級の台風で多く発生しているのである。

表-1 過去高額自然災害支払保険金（日本損害保険協会調べ）

順位	災害名	年	支払保険金 (億円)	中心気圧 (hPa)
1	台風9119号(全国)	1991	5,679	940
2	台風0418号(全国)	2004	3,874	945
3	台風9918号(九州)	1999	3,147	940
4	台風9807号(近畿)	1998	1,600	960
5	台風0423号(西日本)	2004	1,380	955
6	台風0613号(九州)	2006	1,219	950
7	台風0416号(全国)	2004	1,210	950
8	平成12年9月豪雨(愛知)	2000	1,030	—
9	台風9313号(西日本)	1993	977	965
10	ひょう災(千葉, 茨城)	2000	700	—

3. 台風の強さ

これまでに観測された最大風速を表-2に、最大瞬間風速を表-3にそれぞれ示す。ここで、最大風速は10分間の平均風速の最大値を意味し、最大瞬間風速は2,3秒間の平均風速の最大値を意味する。風速値は岬や島嶼で記録されており、地形の影響を強く受けていることが分かる。建築基準法では、各所で観測された最大風速を統計的に処理し、地表面の状態なども考慮した基準風速が50年再現期待値として表現されている。表-2は統計処理される

前の個々の観測高さで記録された値であるが、過去に60m/s以上の風速が記録されていることを認識しておく必要があるであろう。たかだか数十年前に記録された風速の風が今後は発生しないと考える人はいないであろう。地球の温暖化の影響による台風の多発を予測する研究者もいるが、温暖化が問題になる以前に巨大台風は襲来している。

表-2 最大風速の歴代記録

順位	年月日	台風名	風速 (m/s)	記録地点
1	1965.9.10	6523号	69.8	室戸岬
2	1951.10.14	5115号	69.3	細島(宮崎)
3	1951.10.14	5115号	67.1	佐多岬
4	1961.9.16	第2室戸台風	66.7	室戸岬
5	1954.9.7	5413号	65.0	都井岬(宮崎)
6	1954.9.27	洞爺丸台風	63.3	神威岬
7	1966.9.5	第2宮古島台風	60.8	宮古島
8	1954.9.26	洞爺丸台風	58.8	佐多岬
9	1970.8.21	7010号	57.5	土佐沖ノ島
10	1930.8.9	台風(命名なし)	57.0	南大東島

表-3 最大瞬間風速の歴代記録

順位	年月日	台風名	風速 (m/s)	記録地点
1	1966.9.5	第2宮古島台風	85.3	宮古島
2	1961.9.16	第2室戸台風	84.5 超	室戸岬
3	1968.9.22	第3宮古島台風	79.8	宮古島
4	1970.8.13	7009号	78.9	名瀬
5	1965.9.10	6523号	77.1	室戸岬
6	1945.9.17	枕崎台風	75.5	細島(宮崎)
7	2003.9.11	0314号	74.1	宮古島
8	1956.9.8	5612号	73.6	那覇
9	1964.9.25	6420号	72.3	宇和島
10	1994.8.7	9413号	70.2	与那国島

表-4はハリケーンの強さを示すSaffir-Simpsonハリケーン・スケールである。このスケールには3つの指標があるが、高潮の上昇水位は地形によって変化が大きいので参考値とされている。風速は1分間平均風速で表されており、わが国で用いられている10分間平均風速と異なる。また、風速は、とくにわが国では急峻な地形の影響を強く受けることから、上陸時の中心気圧を指標として過去の上陸台風をSaffir-Simpsonハリケーン・スケールに当てはめ、図-3に上陸地点における台風の強さの分布を示した。上陸台風は当然ながら太平洋岸、とくに西日本に多いことが分かる。

表-5は歴代の台風上陸時の中心気圧とカテゴリー分類

表-4 Saffir-Simpsonのハリケーン・スケール

カテゴリー	中心気圧	風速 (1 分間平均)	高潮の 上昇水位
1	980hPa～	33～42m/s	4～5 ft
2	965～979hPa	43～49m/s	6～8 ft
3	945～964hPa	50～58m/s	9～12 ft
4	920～944hPa	59～69m/s	13～18 ft
5	～919hPa	70m/s～	19 ft～

Saffir-Simpsonスケールのカテゴリー

- カテゴリー 1
- カテゴリー 2
- カテゴリー 3
- カテゴリー 4
- ★ カテゴリー 5

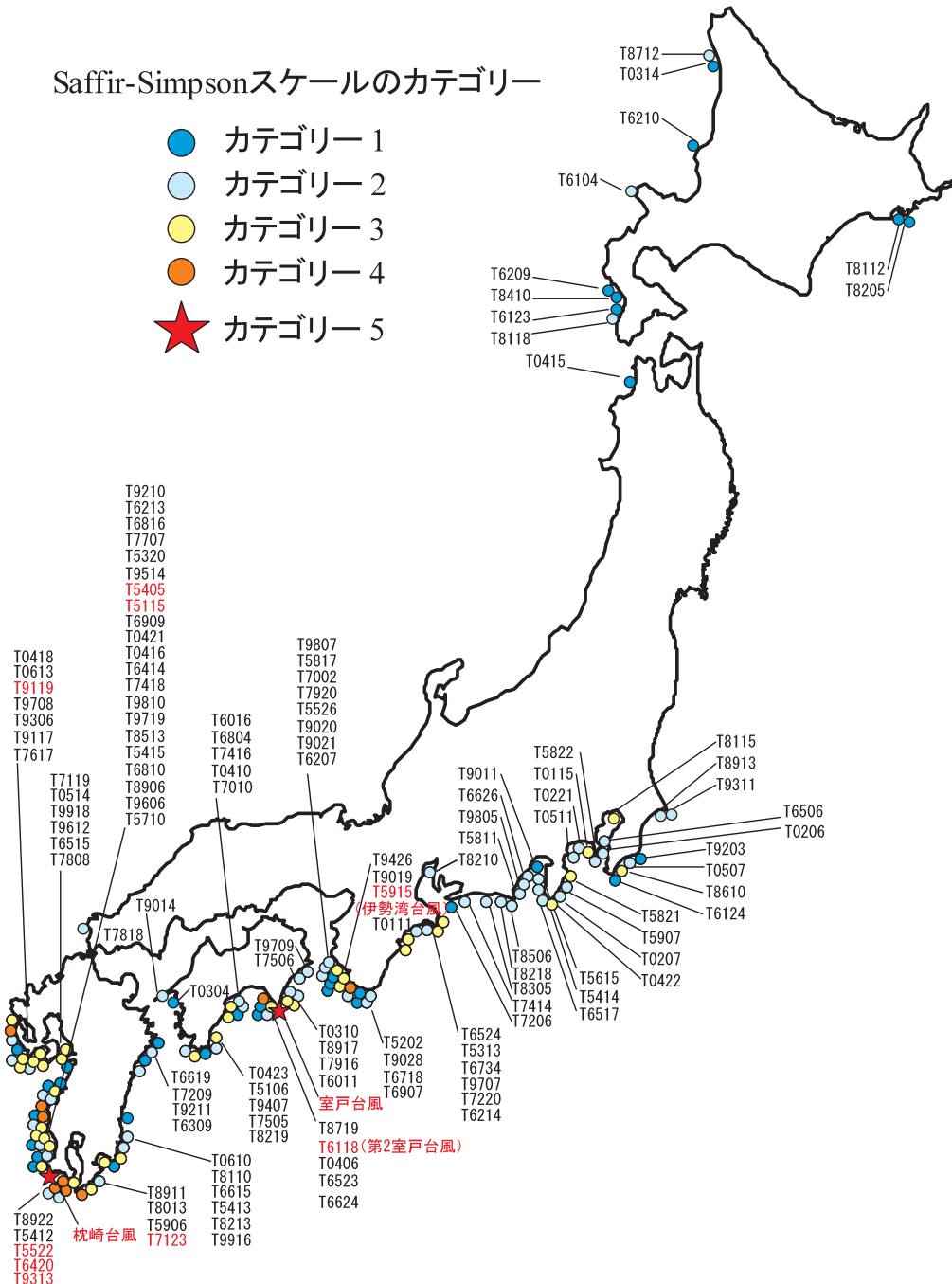


図-3 上陸台風の 카테고리

1934年の室戸台風と1945年の枕崎台風は、1951年から始められた気象庁の統計以前の台風であるが、カテゴリー5に分類される920hPaを下回る猛烈な強さを保持して上陸した。これに比べて、近年の甚大な被害をもたらした台風9119号はカテゴリー4の940hPa、台風0418号はカテゴリー3の945hPaで上陸している。

ここで重要なことはカテゴリー5級の巨大台風が過去に二度わが国を襲った事実である。それは今より60年から70年ほど前のことである。現在の建築物の耐風設計には、基準風速として50年再現期待値が便宜上用いられているが、50年再現期待風速はカテゴリー5級の巨大台風に伴う風速より小さいことを認識しておく必要がある。

日本の台風とUSAのハリケーンの上陸時のスケールの比較を表-6に示す。日本の台風の方が上陸個数は多い。統計年数はほぼ同じであり、日本に台風が上陸する単位面積当たりの率は高いと言えよう。正式の統計年間ではカ

テゴリー5の台風はわが国に上陸していないが、今後巨大台風が上陸する確率は低くないと考えられる。

4. 近年の台風被害の特徴

2004年には観測史上最多の10個の台風が上陸し、各地で甚大な被害をもたらした。これらの被害の詳細については既に報告している^{1), 2)} ので、ここではそれらの被害の特徴についてのみ述べる。

写真-2は台風0406号の強風によって吹き飛ばされ、約30m離れた新幹線の架線に掛かった滋賀県近江八幡市のホテルの屋根である。屋根と言っても法規上は屋根ふき材に属する。この屋根は既存屋根の改修のために既存屋根を覆ったものであり、構造骨組としての屋根は存在している。吹き飛ばされた屋根は幅9m×長さ41mの最大級の飛散物である。重さは約7トンであるが、耐風工学的には決して重量物とは言えず、むしろ極めて軽量の外装材である。この屋根の単位面積当たりの重量は20kg/m²未満しかなく、低層住宅においてさえ屋根の設計風荷重は1,000N/m²(100kgf/m²)を超えるので、この屋根の重量は設計風荷重の1/5未満の重量しか有しない。当然ながら風荷重に対して重量で抵抗することはできず、強固な固定が必要であるが、写真に示すような貧弱な固定金具で、わずかばかり留められているだけであった。結果的に平均風速約十数m/sで飛散したと考えられる。

この被害は外装材に作用する風荷重（負圧）の大きさに対して無知であることが最大の原因であると思われる。規基準を用いて風荷重を適切に設定し、それに対し

表-5 上陸時の歴代中心気圧

順位	台風名	中心気圧(hPa)	カテゴリー
*	室戸台風	912	5
*	枕崎台風	916	5
1	第2室戸台風	925	4
2	伊勢湾台風	929	4
3	T9313	930	4
4	T5115	935	4
5	T9119	940	4
6	T7123	940	4
7	T6523	940	4
8	T6515	940	4
9	T5522	940	4
10	T0418	945	3

*室戸台風と枕崎台風は公式発表以前の記録である。

表-6 上陸した台風およびハリケーンについてのSaffir-Simpsonスケールのカテゴリー別個数

カテゴリー	日本 (1951～2006年)	USA (1950～2004年)
1	34	38
2	59	18
3	40	28
4	9	7
5	0(2*)	2
合計	142	93

*：室戸台風(1934年：911.6hPa)、枕崎台風(1945年：916.3hPa)

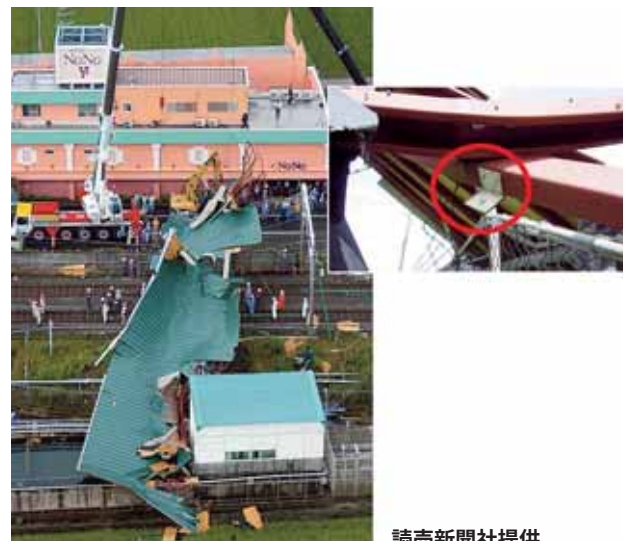


写真-2 飛散したホテルの屋根（円内は貧弱な固定金具）

て十分な強度を有する固定方法を考えればこの種の被害は発生しないと思われる。固定金物の施工に設計基準が活かされないことがあったとしても、風荷重を想定できればこれ程貧弱な固定方法は用いないと思われる。屋根に作用する最低風荷重が、例えば $1000\text{N}/\text{m}^2$ 程度であることが想像できれば、施工者はそれなりに固定方法を考えるはずである。

実際、風荷重に対する無知や無関心は多く存在する。固定されていない空調屋外機や物置は至る所に存在する。それらがすべて被害を受けるものではないが、巨大台風が襲来すると多くの被害が発生することは避けられない。写真-3は台風0613号の強風で吹き飛ばされ、隣家の屋根に転がった石垣島の簡易なプレハブ建物である。毎年のように台風の襲来を受ける南西諸島にあっても固定がなされていない家屋や物置がある。1970年代以降顕著な被害を被っていない都市部を巨大台風が襲うと目を覆いたくなるような惨状が発生するであろう。



写真-3 プレハブ建物の被害 (石垣市提供)

風荷重が考慮されていないもう一つの例に寒冷地における置き屋根がある。置き屋根は、コンクリートの凍害を防ぐ目的でコンクリートスラブの上に置かれる屋根である。寒冷地では鉛直下向きの雪荷重が支配的な荷重であるが、鉛直上向きに作用する屋根の風荷重については配慮が欠けることがある。強風的主要因は冬季の季節風であり、その場合にも多くは雪荷重が存在するので、屋根に上向きの荷重が作用することは少ない。しかし、台風が日本海側を通過すると東北・北海道地方にも強風が発生する。写真-4は台風0418号が北海道に接近した時の置き屋根の飛散被害である。飛散した折板屋根の端部に変形が無く、風荷重に対してほとんど抵抗しなかったこ

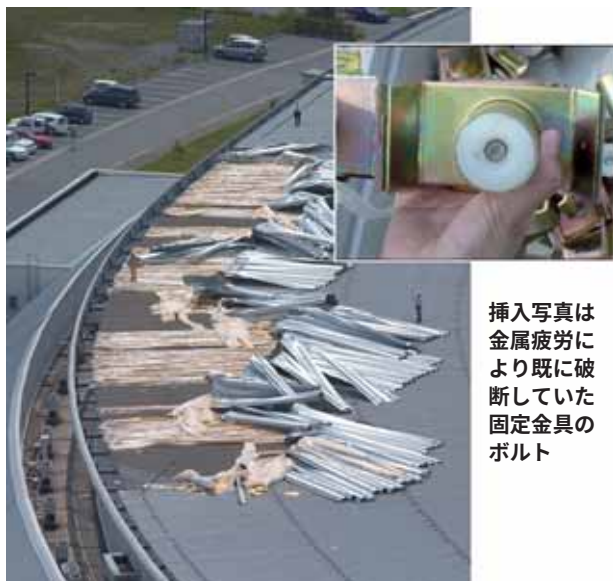


写真-4 置き屋根の被害 (江別市提供)

とを示している。

台風の強風による多くの被害は設計風速に至らない風速で発生している。このことは、風荷重を受ける外装材や部材に問題があったことを示唆している。写真-5は台風0416号と台風0418号の二つの台風で断熱二重折板が剥離した兵庫県のSPring8の被害である。この被害については調査委員会が設けられ、日射を受ける上折板の熱伸縮によって固定金具に繰り返し応力が発生し、強風を受ける前に固定金具が金属疲労していたことが被害の原因であることが分かった。二重折板は上折板と下折板の間に断熱材が挟まれており、温度差ができるので、両者の伸縮量が異なる。その熱伸縮の差を力として受け持つ金具には過大な応力が生じ、この場合にはいわゆる高ストレス低サイクル疲労が発生する恐れがある。

断熱二重折板では、上折板の熱伸縮を固定金具部分で



挿入写真は
金属疲労により既に破断していた
固定金具の
ボルト

写真-5 断熱二重折板の被害 (読売新聞社提供)

スライドさせることで過大な応力が発生しないように工夫された工法がある。SPring8に採用された工法もスライド機構を有していたが、それが有効に働くかどうかを確認されていなかったことに問題がある。熱伸縮に対するスライド機構の有効性の確認方法は、現在、当財団、独立行政法人建築研究所および日本金属屋根協会の3社で共同開発中である。

屋根ふき材の熱伸縮の影響は断熱二重折板にだけ生じるものではない。シングル折板や平ふき金属板にも現れる恐れがある。**写真-6**は2004年に三度も強風被害を受けた香川県東かがわ市の大川体育館である。この屋根ふき材はALC版下地上の金属板瓦棒ふきであるが、ALC版に固定されたアルミニウム製ヒッターネイルに屋根ふき材の熱伸縮によって金属疲労が発生していたことが原因であると考えられている。**写真-7**は台風0418号の強風により竣工1年足らずで屋根ふき材の約半分が脱落した山口情報芸術センターの被害である。この被害の原因は特定されなかったが、金属板の熱伸縮の影響もあると考えられる。



写真-6 瓦棒ふき鉄板屋根の熱伸縮による強風被害



写真-7 屋根ふき材の熱伸縮も原因の一つと考えられる山口情報芸術センターの被害（山口大学藤川氏提供）

日射による熱の影響では、固定金具の金属疲労の他に、機械固定式防水シートの接着剤の剥離による被害があった。**写真-8**は台風0418号の強風による大牟田市にある工場の防水シートが剥離して室内に漏水を生じた被害である。この接着の健全な部分を現場より切り出し、恒温槽で温度を上げると、設計値より低い温度約70℃で剥離した。（**写真-8**の挿入写真）屋根表面の温度は80℃以上にも上昇することが分かっており、台風に伴う強風を受ける以前に既に剥離していたと思われる。



写真-8 防水シートの被害。固定部の接着剤が熱剥離していたことが原因。（大牟田市内の工場）

強風被害のうち飛散物の衝撃による建築物の被害は過半に達すると云われるほど多い。飛散物による被害は外壁や開口部の破損とそれに続く室内への漏水被害、および破損部分からの圧力の伝播による室内圧の上昇が引き起こす外装材の脱落・剥離や構造骨組の損傷がある。**写真-9**は飛散物による住宅の被害である。飛散物には瓦、スレート、サイディング、木の枝などがあり、飛散距離は数mから数十mに達する。

高層建築物の屋上から脱落した飛散物はより遠くに飛



写真-9 飛散物による被害（宮崎気象台提供）



写真-10 ハリケーン・カトリナによるニューオリンズ市内の高層ホテルの窓の被害（部屋では、飛散してガラスに衝撃を与えた碎石が見つかった）。

散し、大きい運動エネルギーを持つ攻撃体となる。写真-10は2005年のハリケーンKatrinaの強風によって隣接した高層建築物の屋上から飛散した碎石の衝突によるニューオリンズ市内のハイアット・リージェンシー・ホテルの窓ガラスの破損被害である³⁾。屋上スラブ上の断熱材の浮き上がりを防ぐ目的で碎石を敷設するこの工法はわが国では採用されていないと思われるが、高層建築物の屋上からの飛散物は、それが小さい物であっても、ガラスを破損させるだけの破壊力を有する。

飛散物による被害を防ぐ第一の方法は飛散物を発生させないことで、それは建築物の各部にわたって入念な耐風設計を行うことに他ならない。写真-2に示した滋賀県のホテル屋根の飛散に対し、JRは建築主に損害賠償を請求し、1億5千万円の支払命令判決が出された。このように今後、飛散物を発生させた側の責任が問われる事態は多く生じると思われる。

第二の方法は飛散物を受ける側で建築物を防御する方法である。雨戸やシャッターは飛散物から開口部を防御

するための優れた設備であるが、わが国ではこれらの防御システムを設計に取り入れるための研究はこれまでになされていない。飛散物を受ける建築物がまったく無傷であることは不可能であるが、防御システムは居住者の人命を守り負傷を避けること、および建築物の一部の損傷が重大な被害に至らないことを目的とする。したがって、防御システムは飛散物を外壁や開口部を貫通させないことが基本的な要求性能である。

USAでは、飛散物の衝撃に対する防御システムの性能を評価するための試験方法を規定している。ASTM E1886は、鋼球と木材を飛散物に代表させ、それらを高速で建材に衝突させて、その後建材に圧力を加えて建材に大きな開口が生じず脱落しない性能を確認する試験方法である。写真-11はテキサステック工科大学の飛散物発射装置を示す。また、要求される耐飛散物衝撃性能の標準仕様を決定する基準ASTM E1996も決められている。

飛散物の衝撃に耐える建材としては、積層ガラスや開口部に取り付けるシャッターなどがある。これらの建材の耐飛散物衝撃性能を確認して認定し、避難所や病院などの地域の安全を守る重要施設に使用する基準作りを始める必要がある。

飛散物の衝撃に耐える建材の性能はわが国では規定されておらず、要求されていないが、強風被害を軽減するためには耐風設計の中に組み込むべきである。現在の耐風設計には防御の考えはないので、USAの規格をそのまま輸入してもわが国の耐風設計に適用できない。まず重要な建築物を指定して、それらに要求される性能を明確にして、飛散物に対する防御システムを設計に組み込まなければならない。



写真-11 飛散物発射装置（テキサステック工科大学提供）

5. 強風被害の低減に向けて

近年の台風被害が設計風速に至らない風で外装材に多く発生していることから、建材・部材の耐風性能を的確に評価する必要がある。そのためには要求性能を明確にすること、および性能確認のための適切な試験を実施する必要がある。

5.1 外装材の要求耐風性能

外装材における耐風性能の要求は、建築基準法施行令第39条に「屋根ふき材、内装材、外装材、帳壁その他これらに類する建築物の部分及び広告塔、その他建築物に取り付けるものは、風圧並びに地震その他の振動及び衝突によって脱落しないようにしなければならない。」と決められている。この規定に対して、個々の外装材は満たすべき性能を明確にする必要があろう。西山氏⁴⁾は、外装材の要求性能について次のように考えてはどうかと提案を行っている。

- ① 稀に発生する暴風に対して非構造部材は無損傷とする。
- ② 極めて稀に発生する暴風に対して非構造部材が脱落しない、ただし、構造躯体が暴風時に大きく塑性変形する場合は除く。

西山氏の提案は、建築基準法の適用において、重要な点を指摘している。つまり、建築物構造骨組の設計においては、使用限界状態と安全限界状態の二つのレベルにおいてそれぞれの要求性能を満たすことが要求される。超高層建築物においては告示第1461号において、施行令第87条に示された風速レベル（レベル1）で構造耐力上主要な部分に損傷が生じないこと、及びその風速の1.25倍の風速レベル（レベル2）で建築物が倒壊・崩壊しないことが求められている。外装材については明確な規定はないが、外装材が脱落した状態では構造骨組の設計に仮定した風荷重と異なる風荷重で構造骨組を設計しなければならないことは明らかであり、外装材についてもある程度の健全性が要求されるのは当然である。「無損傷」と「非脱落」の定義は外装材の種類ごとに異なると思われるが、共通認識の得られる耐風性能を明確にすべきである。

ここで、一部に誤解があると思われる再現期待値について触れておく。強風は自然現象であり、発生する風速は確定的ではなく、確率で表され、設計風速は再現期間を用いて表現されている。建築基準法に定められた設計

風速は50年再現期待値を想定している。つまり、再現期間は50年である。この再現期待値を「ある再現期間（例えば50年間）に発生する最大の風速（したがって、この値以上の風は発生しない）と誤解している人がいるが、これは間違っている。

再現期間は図-4に示すように、ある風速を超え、次にその風速を超えるまでの期間の平均値である。つまり、再現期間 T は式(1)で表される。

$$T(>V) = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + \dots}{N} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (1)$$

ここで、超えるかどうかの基準の風速 V が再現期待値であり、その値を超えとは言っているが、どれほど超えるかということは問題にしていないことに注意する必要がある。再現期間は再現期待値が発生する平均のインターバルであることから、「再現期待値は再現期間にほぼ確実に発生すると考えられる値」と理解されるべきである。

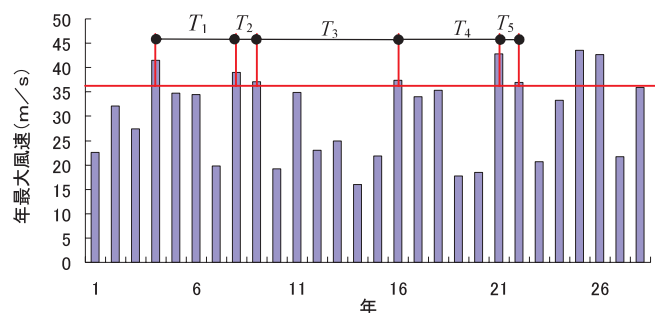


図-4 再現期待値の概念

建築物の供用期間 n 年中に再現期間 T 年の期待値を超えるイベントが発生する確率 P は次の式(2)で表され、

$$P = 1 - \left(\frac{T-1}{T} \right)^n \quad (2)$$

建築物の供用期間 $n=50$ 年間に再現期間 T 年の期待値を超過する確率は表-7のように計算できる。

表-7 再現期間 T とその期待値の超過確率（供用期間50年間）

T (年)	P (%)
50	63
100	39
200	22
500	9.5
1000	4.9

表-7から、建築物の供用期間50年間に50年再現期待値を超える確率は63%もある。ほぼ確実に発生すると考えられる値と言った意味がお分かりであろう。500年再現期待値でも50年間の供用期間内に約10%の超過確率がある。したがって、建築基準法の設計風速で計算される荷重を適用さえしていれば絶対安全ということではないのである。建築基準法は最低基準であるから、これを用いて計算される荷重は安全性を確保するための最低荷重と理解すべきである。構造骨組におけるレベル1の暴風は50年再現期待値を、レベル2の暴風は500年再現期待値をそれぞれ想定している。それらは一般の建築物が遭遇する可能性の高い暴風であることを念頭に置いて、西山氏の提案を参考にして要求性能を決定する必要がある。なお、外装材のレベル2の暴風の再現期待値を構造骨組の再現期待値と異なる値に設定する正当な理由は見当たらないが、外装材の再現期待値を構造骨組の値より小さくしていることがある（例えば、日本板硝子協会では200年再現期待値を推奨している）。今後、再現期待値について十分な議論とコンセンサスが必要である。

5.2 性能確認試験

性能確認のための試験にとって重要なことは、適切な試験方法を採用することである。試験結果は採用された試験方法によって左右されるからである。建材やその支持部材の強度確認のための試験では、実物の破壊モードを再現することが重要である。しかし、試験装置や試験体の制約のために完全な破壊モードの再現は実際には困難で、実際の破壊モードを模擬するには力学的な知識を要する。試験方法を決定する際には、以下の点に注意して、関係者間で合意する必要がある。

強風被害は外装材の材料そのものではなく、材料と構造骨組との接合部で生じていることが多いので、接合強度が適切に評価されなければならない。接合部が弱点である場合、構成材料だけの試験では、性能が過大評価されることになる。弱点部が予測できない場合は、外装材、接合部および下地を含む外装システム全体を試験体とし、実際に近い荷重として風圧を載荷することが望ましい。接合部や支持部材のスパンを実物と等しくすることは重要である。支持スパンが実物と試験体とで異なる場合は、外装システム各部に伝達される力の大きさが異なるだけでなく、発生する変形量や局部応力度が異なり、実物と違った破壊モードと強度を示すことになる。破壊

モードが異なる場合は、試験結果について支持スパンの差異などを補正できないのは当然である。

試験結果のばらつきにも注意を要する。一般に破壊強度のばらつきは大きいので、破壊強度の平均値は意味を成さないことがある。注目すべきは強度の最小値であるべきで、十分な数のサンプルで強度の確認をする必要があるが、弾性範囲でばらつきが小さい場合には許容耐力として弾性限界の平均値を用いてもよい。

外装材の性能に西山氏の提案を採用する場合、典型的な試験結果の利用について述べておく。試験で荷重（強度）－変形曲線が図-5のように求められると、(a)ではほぼ弾性域が定義できるが、(b)では弾性域が定義できない。図-5(a)の場合は外装材の許容耐力 F_c はほぼ弾性域とみなせる限界の強度を選択すればよい。コンクリートの例を参考として、 F_c の値を初期剛性の1/3の傾きまで変化した点を許容耐力とする方法でもよい⁵⁾。材料強度 F_{max} と許容耐力との比 $SF = F_{max}/F_c$ が安全率となる。荷重が除荷された後、初期剛性の直線に従って荷重がゼロになったときの変位量 δ が残留変位量となる。レベル1では外装材に損傷を許さないで、この残留変位量が許容できるかどうかで許容耐力が決定されるが、許容の程度は個々の外装材で異なる。残留変位量が許容されない場合はさらに小さい強度を許容耐力とすべきである。残留変位量の大きさだけでそれが許容できるかどうかの判断ができない場合は、耐風性能以外の性能、例えば防水性能試験を行って、それらの性能が維持できることを確認すればよい。

図-5(b)は種々の部材や部材で構成される外装システムに多く見られる例で、弾性域が明確でない。この場合、最大強度の1/2または1/3の強度を許容耐力とすることが多い。この場合の安全率は2または3であり、残留変位量 δ が許容されるかどうかで、許容耐力が決定されるのは(a)の場合と同じである。

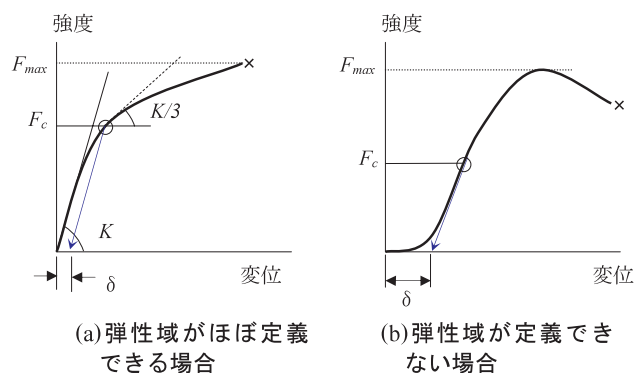


図-5 代表的な外装材の荷重－変形曲線

レベル2は、構造骨組に崩壊しない性能が要求され、外装材は脱落しないことが要求されるレベルであるので、外装材に大きい残留変形が生じること、また外装材の機能が維持されることまでは要求されない（もちろん、残留変形が少なく、機能が維持されることが望ましい）。レベル2の荷重に対して外装材が脱落しないためには、取り付け部を含む外装システムの面内変形追従機構がうまく機能するとともに、風圧による面外方向の最大強度がレベル2の荷重よりも大きい必要がある。レベル1の荷重とレベル2の荷重がそれぞれ50年と500年の再現期待値を想定したものであるとすると、両者の荷重の比は1.56になるので、許容耐力に対する最大強度の比は1.56以上なければならない。つまり、ここで言う安全率は1.56以上必要なことになる。なお、安全率の定義は統一されておらず、信頼性指標が望ましいという議論もある。ここでは、安全率をレベル1とレベル2に要求される耐力の比と定義していることになる。

なお、最大強度 F_{max} はばらつきが大きいので、平均値ではなく、最小値を採用しなければならない。試験では限られた数の結果しか得られないので、統計的に推定された最小値を採用することが望ましい。サンプリング理論に基づく最小値の推定は、最大強度の分布を学生分布の t 分布に近似して、不偏標準偏差と仮定した信頼水準から求めることができる。不偏標準偏差 σ は式(3)で与えられる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

ここで n は試験に用いたサンプル数で、推定最小値 X_{min} は、 $X_{min} = X - k\sigma$ で表される。 k は t 値で、信頼水準95%とすると、サンプルの個数 n によって表-8の値をとる。

表-8 信頼水準95%の t 値

n	k
2	12.71
3	4.30
4	3.18
5	2.78
10	2.26
20	2.09
50	2.01

なお、試験結果から得られる許容耐力には経年劣化による耐力低下は含まれていない。経年劣化の効果が無視

できない場合には、これを含めて耐力を決定するか、使用期間を決定し、それを過ぎるとメンテナンスを行って耐力を回復するための補強または取替えが必要となる。

6. おわりに

過去に甚大な被害を発生させた台風をレビューし、台風の脅威を再確認した。ハリケーン・スケールを用いて台風を表すとカテゴリー5で上陸した台風は、室戸台風と枕崎台風であることが分かった。これらの巨大台風が襲来したのは今より約60年前と70年前のことであった。建築基準法で設計風速として用いられている50年再現期待値はこれらの巨大台風に伴う非常に強い風より小さいと考えられる。また近年の最大級でない次級の台風によって強風被害に対する損害保険支払額は増加の傾向にあり、来るべき巨大台風によってもたらされる被害に対する損害保険支払額は膨大なものになる恐れがある。

近年の台風被害では、風荷重を考慮していなかったこと、日射による熱伸縮の影響など風荷重以外の要素で外装材の強度が低下していたこと、飛散物などが原因であったものがある。前哨戦ともいべき次級の台風被害からの教訓をできる限り活かして巨大台風に備える必要がある。

強風時の人的被害については、気象予測と情報伝達技術の進歩により劇的に減少した。しかし、強風の力を軽んじた無謀な行動による被害がなくなるのは残念と言わざるを得ない。自然の力に対する正しい知識を情報として発信する必要がある。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：2004年の強風被害とその教訓—強風被害が残したもの—，2006.3.
- 2) 日本風工学会風災害研究会：2004年の強風災害に関する調査報告書，2005.5.
- 3) 西村宏昭，長尾文明：ハリケーン・カトリーナの被害調査，GBRC，Vol.31，No.2，2006.4.
- 4) 西山功，非構造部材の地震・風被害の軽減に向けて，主題解説(3)現行の規基準類，2007年度日本建築学会特別研究委員会研究協議会資料，2007.8.
- 5) 時野谷浩良，非構造部材の地震・風被害の軽減に向けて，主題解説(5)メカニズム・実験例（屋根），2007年度日本建築学会特別研究委員会研究協議会資料，2007.8.