特集

風関連災害（風がひき起こす様々な災害）

建物におよぼす風雨の作用と関連する不具合 Wind-Driven Rain and Relating Problems in Buildings

石川 廣三*

Hirozo ISHIKAWA

1. はじめに

風関連の各種災害を取り上げる今回の特集で、雨が関わる問題を担当するように依頼を受けた。風と雨と言えば直ちに頭に浮かぶのは台風である。台風は毎年のように各地に多大な被害をもたらすが、「雨台風」、「風台風」と呼び分けられるように、水害、土砂崩れ、屋根の飛散、落果被害など、被害の内容と大きさを決定するのは雨量か風速のどちらか一方であることが多く、雨と風の相乗作用が問題となったような例は特に思い当たらない。

一方、建物の外回りで起きる雨漏りや開口部からの雨の吹き込みなどに関しては、雨と風の組合せ条件が重要な要因なので、本稿ではこの問題を扱うことにした。雨漏りで人が死ぬことはまず無いから、長年建物の防雨問題に関心を持ってきた筆者にも、雨漏りを災害と呼ぶことにはずっとためらいがあり、今回のタイトルにも不具合という語を用いた。しかし、雨漏りは時に屋内の家具調度や設備機器の甚大な被害をもたらすし、また、住宅工事で発生する不具合のうち、件数の多さで常に一、二位を占める雨漏りの補修費用は大きな社会的損失を招いていることを考えれば、やはり災害と呼ぶのが適切なのかも知れない。

2. 風雨の同時性

通常の気象データでは、風と雨（雪、みぞれ、ヒョウなどを含めて降水として扱われる）は別々に発表されるが、雨漏りの発生要因としてはこの二つが同時に

図1 降雨に伴う風速の10年間の出現頻度(横浜2007-2016年)

どのような組合せで作用するかを知りたい。

図1は、横浜地方気象台の最近10年間の毎時の観測記録から、0.5mm以上の雨が降った時間に限定して平均風速値を抜き出し、雨量段階ごとに風速の出現頻度を調べたものである。この整理方法は東京大学生産研究所の勝田氏が提示した方法¹⁾になっている。図中に○印で示した例は、時間雨量が10mm以上の時間中、平均風速が10m/sを超えた回数が、10年間で25回あったことを示す。

* 東海大学 名誉教授・工博
Professor Emeritus, Tokai University, Dr. Eng.

図2 降雨に伴う風速の10年間の出現頻度（壁面方位別，横浜 2007-2016 年）

図1によると，時間降水量が大きくなるにつれて，同一レベルの風速の出現頻度が減ることが分かる。すなわち，強雨と強風の組合せの出現頻度は全体に低いと言える。これは同様の検討を行った他の地点についても共通しており，気圧配置など雨をもたらす気象条件の特性に基づく一般的な傾向と考えられる。

我が国の外装材の水密性評価試験で採用している風雨条件は極めて厳しい。たとえば建具の水密試験方法，JISA1517-1966では，壁面への降雨を再現する水噴霧量を，毎分 4l/m^2 と規定しているが，これは降雨強度 240mm/hr に相当する。このような降雨強度は，ピーク時の値としても，時間雨量 100mm を超えるような雨でなければあり得ないものである。一方，風圧の作用については，住宅用サッシの中間的な水密等級 W-2では，試験体前後の脈動中心圧力差 150Pa で漏水の有無を確認することとしているが，これは平均風速 16m/s の速度圧に相当する。このような強雨と強風の組み合わせ条件が，通常の市街地でほとんど起こりえないことは，図1からも明らかである。実際より過酷な条件で行う試験は，製品の安全性を確認する目的では意味があるが，要求性能の検証目的には適切とは言えない。

図1は全風向に関する資料であるが，壁面に対する風雨の作用を評価する場合は，壁面の方位ごとに雨をもたらす風向の範囲が異なる。図2は，同じ横浜地方気象台の観測記録に基づき，壁面が雨を受ける風向範囲を壁面方位に対して $\pm 67.5^\circ$ 以内に限定して，壁面

方位ごとに降雨時風速の出現頻度を調べた結果である。

壁面方位によって，風雨の作用形態がかなり異なることが分かる。雨を受ける頻度が最も高いのは北面で，南と西面が最も低い。一方，風については，時間雨量 3mm 以上において 10m/s を超える風速の出現頻度をみると，最も高いのは北面と南面で，10年間で40回を超えており，東面は17回で最も低い。

3. 降雨の傾斜

風によって斜めに降る雨を，英語で以前は *driving rain* と呼んでいたが，最近では *wind driven rain* の方が多く使われるようである。この降雨の傾斜は，たとえば身近なところでは傘を差しても足元がびしょ濡れになったり，うっかり閉め忘れた窓から雨が吹き込んで，大切な資料が台無しになるなどの体験をもたらすが，建物の不具合に関しては，次章に述べる壁面の雨がかりを決定する要因となる。ここで，雨の傾斜の原理的な事項に触れておく。

風が強いほど雨足が傾きを強めることは当然だが，その傾斜度と風速の関係はどのようなものだろうか？

風の中の雨滴は図3に示すように，風速 U_w と雨滴の落下速度 U_d の合成方向に落下する。空中を落下する雨滴は空気の抵抗を受けて下の方が扁平な形になる。この空気抵抗のため，どんな雨滴でも 20m ほど落下すると一定速度に達し，それ以降は等速で落下する。こ

図3 風による雨滴の傾斜

図4 雨滴の落下終速度 (ガンとキンザーの測定値²⁾から作図)

の速度は落下終速度と呼ばれるが、重力と空気抵抗のバランスから、落下終速度は大粒の雨滴ほど大きくなる。図4は実験室における空気中の水滴の落下終速度の測定例である。

雨は雲の中で出来てから、地上まで降る間に合体や分裂を起こすため、一雨の中でも雨滴寸法は一樣ではなく、様々な大きさの粒が混ざって雨を構成する。図5は雨滴寸法の分布の調査結果の一例である。雨滴の直径は0.2mmから7mm程度の範囲にあるが、雨の強さによって中心となる雨滴寸法が異なり、雨の強さが増すほど大粒になることが分かる。すなわち、一雨の中に色々な大きさの粒があり、それぞれがまちまちな速度で落下していることになるため、wind driven rainは様々な傾斜角で斜めに落ちる雨滴の集まりということになる。

図5 雨滴寸法の分布 (Laws と Parsons が 1943 年に発表したもの)³⁾

4. 壁面の雨がかり

壁面の濡れは、風に乗って建物に向かう雨滴の傾斜がもたらすものであるが、壁面に当たる雨の量（以下、壁面雨量）は、空間中を特定の方向と傾斜角で降下する雨滴が、そのまま直進して壁面に到達した時に想定されるものではない。これは雨滴を運んできた風が、壁面の周辺をまわり込む際に、雨滴の進行方向が変わり、外方に逃げ切れない雨滴が壁面に衝突するためであり、雨の当たり方は壁面の下方と中央では少なく、周辺部で多くなる。

風雨の条件と壁面雨量の関係については、古くから北ヨーロッパを中心に高い関心が寄せられ、実建物に設置した壁面雨量計による観測が数多く行われている⁴⁾。1970年代以降、建物周辺の気流中の雨滴の挙動を理論的に解析し、壁面に達する降雨強度を求める試みが始まり⁵⁾、近年では数値流体力学の応用で任意の建物条件や風雨条件に応じて壁面雨量の分布を知ることにも可能になっている。

図6はBlockenらが、一辺が10mの立方体建物モデルに、各種の方向から風雨が作用する場合の壁面上の雨量分布を算定した結果である。壁面の外周部と中心部で雨量が著しく異なり、また、風向により分布が大きく変化することが分かる。

図7は、同じくBlockenらが、高さ60m、幅50mの高層建物モデルについて行ったシミュレーション結果である。壁面上の雨の分布はファサードの上部に限

図6 Blocken 等による低層立方体形状の建物の壁面雨量シミュレーション⁶⁾

計算条件：水平面雨量 $R_h=1\text{mm/hr}$ ，地上高 10m 位置の風速 $U_{10}=10\text{m/s}$ ， δ は壁面方位と風向のなす角度。図上の数値は， R_h に対する壁面雨量 R_w の比 η

図7 Blocken 等による高層スラブ状建物の壁面雨量シミュレーション⁷⁾

られ、下半分は雨が当たらないことが分かる。図6と比較すると、同一風雨条件における最大壁面雨量は低層建物よりむしろ少ない。

我が国で高層ビルが建ち始めた頃、巨大な壁面が強風雨時に受ける雨水が、ビルの足元で滝のように流れ落ちるのではないかという心配も一部でされたが、い

ざ建ってみるとそのようなことは無かった。その理由が図7から納得される。

戸建て住宅等では一般に壁面上部に軒の出やひさしがあり、降雨時、これらの下には風速と風向に応じて濡れない範囲が存在する。木造住宅では、軒の出が十分にある壁面は、軒の出が全くないか、あってもご

図8 軒の出寸法による雨がかり分布の相違 横浜、北壁面、2016年

く小さい壁面に比べて、浸入雨水による劣化発生が低いことが経験的に知られており、軒下壁面の濡れ性状を風雨条件に応じた的確に把握することは、住宅の耐久計画上重要である。

筆者はかねてから軒の出を有する壁面の降雨による濡れ評価に関心を持っていた⁸⁾が、図6に示されたような知見を踏まえて、多様な形状と寸法の軒の出を有する低層建物壁面の雨がかり頻度分布を、敷地の風雨条件および壁面方位に応じて、簡易に、かつよりの確に算定する手法⁹⁾の開発を試みた。この算定においては単純化のため、前章の記述にかかわらず雨滴はすべて一様な方向に運動するものとし、水平面に対する降雨の傾斜角 θ と壁面雨量 R_w を次式で計算している。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{C_{im}}{U_{10}} \right) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$R_w = \frac{1}{\tan \theta} R_h = \frac{U_{10}}{C_{im}} R_h \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 U_{10} ：地上10mにおける平均風速(m/s)

R_h ：水平面雨量(mm)

C_{im} ：壁面内の位置によって異なる常数

軒下部分の濡れ遮蔽範囲の算定においては、(1)式における C_{im} を既往の知見¹⁰⁾に基づいて9.0とし、雨滴が傾斜角 θ と平均風向に等しい水平角で壁面に到達すると仮定した。軒で遮蔽されない範囲の壁面雨量は、壁面方位と平均風向(16方位)がなす角度が $\pm 45^\circ$ 以内の条件に限って(2)式で算定するものとし、 C_{im} は図6

のBlockenらの示す壁面雨量分布を参照して、風向には関係なく壁面内の相対的位置ごとに、9から22の範囲で一定の値を与えている。

図8は横浜の市街地に建つ総2階建て住宅の壁面(基準軒高さ6m、壁面の幅8m、寄棟屋根、屋根勾配 20°)を想定し、軒の出寸法を変えた場合の算定例を示す。軒の出寸法により、軒下3m程度までの範囲の壁面濡れ頻度に著しい差が認められる。壁面雨量分布は下方ほど少なくなっているが、壁面を濡らした雨水は下方に流下するので、流下水量の分布は壁面の下部ほど多くなる。6章で述べる間隙部の浸水負荷としては流下水量が問題になる。

5. 浸水外力としての風

建物の外装面を濡らす雨水が内部に浸透する経路には、外装材の材料自体と、外装面に存在する各種の間隙がある。材料内の水の移動には、毛細管現象による吸水と圧力による透水があり、このうち吸水は材料組織内に水が保持される現象なのでそれ自体で雨漏りになることはない。また、一般に外装材料は緻密なので、風圧は透水を引き起こす圧力としては無視できる。

一方、外装面上の間隙には屋根材や壁材同士の接合部、異種部材の取り合い部、モルタルやコンクリートにつきもののひび割れ部など、多様なものがあり、これらを完全に塞ぐことは難しいため、雨漏りの経路としてはこちらが主になる。

外装面の間隙内を雨水が移動する主な原動力は、図9に示す6種である。風はこのうち雨滴を建物外面に吹き付け、その運動エネルギーで比較的大きな開口を

図9 間隙内の雨水を移動させる力

透過させるほか、風によって間隙の外部に正圧が作用する場合は内外の圧力差によって間隙を塞ぐ雨水を押し込んだり、透過気流を発生させて間隙開口周辺の雨水を引き込むなどの作用をもたらすため、特に風当たりの強い建物高層部では外装面からの雨漏り発生の最も重要な要因となる。

6. 風雨を受ける外装面上の間隙部からの浸水量評価

建物外皮には無数の間隙部が存在するので、浸水を完全に阻止することは難しく、外皮内部への雨水浸入を想定し、浸入した雨水を適切に排出処理し、影響が残らないように乾燥させるような配慮をすることが、防雨計画、耐久計画上重要である。このためには、間隙部からの雨水浸入量の的確な把握が不可欠である。以下、住宅外装で最も多用されている横張りサイディングの目地に代表される、外壁面上のスリット状水平間隙部について、風雨を受ける際の浸水量を、間隙の形状・寸法および風雨条件に応じて算出する方法について基本的な考え方を述べる。

図10に風雨を受ける水平目地間隙部の雨水浸入状況を模式的に示す。ここで Q_p は間隙内の流量、また Q_s は上方から目地部に供給される雨水の量である。実際に間隙内に浸入する雨水の量は、 Q_p と Q_s のうち少ない方で決定する。 Q_p は間隙の形状・寸法および風圧により生ずる間隙前後の圧力差により、 Q_s は壁面が受ける雨の強さ、受雨面積により決まるため、浸入量はそ

図10 水平目地間隙の浸水要因

の時点の作用風圧や壁面上の雨の強さに応じて変動する。

この際、 Q_p と Q_s の大小関係により、間隙内の雨水の浸入状況は図11の(a)～(d)のように変化する。

- (a)は、 Q_p に対して Q_s が十分多い場合で、雨水は間隙内を充満して浸入する。これに対して Q_p より Q_s が少ない場合には、雨水は間隙の形態や寸法に応じて
- (b)～(d)のような各種の状態では浸入する。
- (b)は間隙幅が全体に水膜が形成される程度に狭い場合で、雨水は不連続な水膜状に浸入する。
- (c)は間隙幅が入り口では水膜が形成される程度に狭く、立ち上がり部で広がっている場合で、立ち上がり底部に滞留する雨水に気泡が圧入される結果、滞

図 11 間隙内に浸入した水の状態

留水が攪乱され、上方にしぶきが飛散する。

(d)は間隙の幅が全体に広く、水膜が張らない場合で、間隙内には圧力差で透過気流が生じ、気流の速度が一定以上になると間隙内の水滴と内面に付着した水膜が内部に移動する。

このような浸入水の状態の違いによって、浸入量は同程度であっても、浸入水が屋内側に拡散する範囲に大きな差が生ずることに注意が必要である。

図 10 のような、立ち上がりのある目地間隙に、常時十分な量の雨水が供給される条件での、目地見つけ長さ 1m 当りの透過水量は、(3)式で示される。

$$Q_p = c \cdot b \sqrt{2 \left(\frac{\Delta P}{\rho_w} - g \cdot h \right)} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 Q_p ：透過水量($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$)

c ：目地間隙開口の流量係数

b ：目地長さ 1m 当たりの開口面積(m^2/m)

ρ_w ：水の密度(kg/m^3)

ΔP ：圧力差(Pa)

g ：重力加速度(m/s^2)

h ：立ち上がり高さ(m)

$g \cdot h$ は立ち上がり内の水の位置水頭で、圧力差と反対向きに作用するので圧力水頭から差し引いている。雨水浸入に関係する圧力差 ΔP_e は外圧と外装材の裏面圧の差である。雨水浸入に関係するのは外圧が正の条件だけである。壁面に作用する正の外圧は降雨時の風速風向、および建物や敷地条件との関係から、既往の風工学の知見に基づいて決定する。

図 12 目地の供給水量

外装材裏面の圧力は裏面の空間の寸法や通気条件により変化する。実住宅壁面の作用風圧に関する知見¹⁾によれば、通気構法の外壁の多くの部分において、外装材の裏面圧は外圧に近づき、圧力差は相当低減されと考えられるが、通気層がない場合や、下地構造により局部的に通気が不十分な範囲も存在することから、最も安全側には ΔP_e として外圧を用いれば良い。裏面圧についてはまだ不明の点が多く、今後風工学の分野での解明に期待したい。

一方、目地間隙に供給される雨水の量 Q_s は、図 12 において軒下の方 H_s までの範囲では 0、 H_s より下方の範囲では間隙上方の平均壁面降雨強度 R_w ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) と直上の目地との間隔 H_u (m) の積から求める。 R_w 、 H_s は 4 章に述べたような知見に基づいて定めることになる。

図 13 圧力差，供給水量の時間的変動と浸水量の関係

風雨の強さは常に変動するので，圧力差および供給水量の変動に応じた浸水量の評価を考える必要がある。まず，風速の時間的変動に伴い， ΔP_e も変動し，これに応じて (1) 式で計算される間隙の透過水量 Q_p が増減するが，立ち上がり分の水頭相当の圧力差以下では浸水は生じない。また，風雨の強さの変化に応じて，目地間隙部への供給水量 Q_s も変動し， Q_s が Q_p を下回る時間においては浸水量は Q_s で決まる。図 13 はこの関係の説明図である。

実際風の変動は不規則であり，また供給水量の変動については関係する要因が多く，また，風圧変動との時間的な関連性も明らかになっていないため，図 13 のように浸水量評価を行うことは難しいが，風圧変動に関しては平均風速に対応する圧力差を脈動中心圧として正弦波で近似させた圧力変動を採用し，供給水量を平均降雨強度に応じた定常値とする等の方法で，ある程度，風雨条件の変化に応じた浸水量の評価が可能である。

7. 雨漏り発生と風雨条件の関連

最後に，やや古い資料であるが，木造住宅における雨漏り事故の発生状況と降雨外力の因果関係について調査した興味深い事例¹²⁾を紹介する。

調査対象は，木造在来工法による戸建て住宅専門のある建設会社が，1976 年 7 月から 1983 年末にかけて関東地区の 8 都県に建設した 3600 棟の住宅である。この期間内に，その時点における累積建設戸数の 1%

表 1 降雨外力項目ごとの正順率

降雨外力の項目	正順率
1) 日降水量	43
2) 1 時間降水量の日最大値	22
3) 1 降水時風速の日最大値	37
4) 毎時風速×毎時降水量の日積算値	51
5) 毎時風速×毎時降水量の日最大値	39
6) 風向を限定した毎時風速×毎時降水量の日最大値	61

を超える数 (15～92 棟) の住宅で雨漏り事故が発生した日が合計 9 日あった。この 9 日間に事故を発生した住宅の戸数は延べ 355 棟で，同一住宅で複数発生しているケースがあるため，件数は 424 件あった。

事故が発生した住宅の所在地に最も近い AMeDAS の，住宅の竣工日から事故発生日までの観測値から，次の 6 項目の降雨外力データを調べた。

- 1) 日降水量
- 2) 1 時間降水量の日最大値
- 3) 1 時間降水量が 1mm 以上の時刻の風速の日最大値
- 4) 毎時風速×毎時降水量の日積算値
- 5) 毎時風速×毎時降水量の日最大値
- 6) 事故発生日の風向から左右それぞれ 90° 未満の風向時に限定した毎時風速×毎時降水量の日最大値

各外力項目について，事故発生日の外力値がそれまでの履歴期間を通じた値を上回っていた場合，その外力項目が雨漏り発生の支配的要因である可能性が高いと考えられることから，これらの 6 項目について，該当する件数の比率を正順率として集計した結果は，表 1 のようであり，最も高かったのは 6) の風向を考慮した毎時風速×毎時降水量の日最大値であった。このことから，降水量や降雨中の風速単独よりも，壁面に対する風雨の組み合わせ条件が漏水事故の発生に密接に関係しているとしている。

また，この調査では，各地の漏水事故発生日の日降水量と降雨時最大風速を，件数の大小を含めてプロットした図 14 を示している。この図によれば，発生件数が多い日は，降水量が非常に多く，風速は比較的弱い条件，風速が非常に強く，降水量は比較的少ない条件，

図 14 漏水発生時の降雨時最大風速と日降水量

降水量，風速ともに中間的な条件を結ぶ直線付近に分布している。このことから降水量と風速の積が大きい条件の日に事故が多発していることがわかる。降水量と風速の積が壁面雨量に関係することは(2)式からも明らかである。

実際に発生した雨漏りの原因箇所や内容はさまざまであるが，事故の発生件数と壁面雨量の相関が明確であることは，壁面の雨がかりが事故発生の必要条件となっていることを示している。

8. 結び

我が国の伝統的な建築は軒を深く出して壁の雨がかりを最小限にし，かつ軸組部材が露出した真壁構造など，たとえ壁が濡れても乾きやすい構造とすることで長年月にわたる風雨の作用に耐えてきた。

建築技術が進んだ今日，いかなる強風雨の下でも雨漏りしない水密構造の建築を計画することは不可能ではないが，その実現にはきわめて高性能な材料と，高度な施工技術，頻繁なメンテナンスが必要である。風雨の作用がそれほど厳しくなく，かつ事故的な含水や結露水による躯体の劣化リスクが大きい低層の木造住宅等の雨対策では，できるだけ不必要に雨がかりさせず，想定される範囲の浸水に対しては速やかに排出と乾燥を可能にするような構造とするなど，いわば自然と共生する防雨の考え方が適しているように思う。そのためには風雨条件の的確な把握が不可欠であ

る。

引用文献

- 1) 勝田 高司，寺沢 達二，片山 忠久，外壁接合部の漏水に関する風雨の統計的考察，日本建築学会論文報告集，号外，学術講演要旨集，p. 434，(1965)
- 2) 太田 正次，雨（コロナシリーズ7）コロナ社，(1959)
- 3) Lacy, R. E., Climate and Building in Britain, BRE Report, (1977)
- 4) Lacy, R. E., Driving rain maps and the onslaught of rain on buildings, Proc. of CIB/RILEM Symposium on Moisture Problems in Buildings, Paper 3-4, Helsinki, (1965) など
- 5) Choi, E. C. C., Simulation of wind-driven-rain around a building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 46 and 47, pp.721-729, (1993) など
- 6) Blocken, B., Carmeliet, J., On the validity of the cosine projection in wind-driven-rain calculations on buildings, Building and Environment 41(9), pp.1182-1189, (2006)
- 7) Blocken, B., Carmeliet, J., The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 94, pp.101-127, (2006)
- 8) 橋本 佳大，石川 廣三，壁面各部の雨がかり負荷の評価に関する研究－低層建築物の壁面内位置別壁面雨量および濡れ頻度の算定－，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 分冊，pp.1129-1130, (2004)
- 9) 石川 廣三，軒の形状・寸法に応じた外壁面内の雨がかり分布の算定方法，日本建築学会構造系論文集 664 号，pp.1069-1075, (2011)
- 10) 石川 廣三，橋本 佳大，壁面に衝突する雨滴の傾斜角の推定－外壁面におよぼす雨がかり負荷の評価に関する基礎的研究－，日本建築学会構造系論文集第 611 号，pp.13-20, (2007)
- 11) 大西 祥史他，実大住宅の外壁面に作用する圧力差の実測調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1109-1110, (2015)

- 12) 西田 和生, 伊藤 弘, 戸建住宅における漏水事故
の実態と降雨外力の関係, 日本建築学会関東支部

研究報告集 構造系, pp.301-304, (1985)