

## 窓システムの新たな耐風性能評価法の提案と強風下での窓システム破壊に関する信頼性解析

New evaluation method of wind load resistance for window system and its failure reliability under extreme wind loads

東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教 ガヴァンスキ 江梨

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 研究目的

我が国では台風が毎年来襲し、最近では竜巻が頻繁に発生するなど、強風被害が増大している。被害の多くは外装材に生じており、外装材は風圧による直接的な損傷・破壊の他に、破壊物が飛散物となって更なる被害の拡大(被害の連鎖)を招くため、軽視できない。中でも窓ガラスは破損すると建物に開口部を作ることによって建物の内圧上昇を引き起こし、最悪の場合屋根構造の破壊といった、より大きな構造被害を引き起こす原因となるため、窓ガラス被害の低減は急務である。

従来、窓ガラス被害の多くは飛来物によるものと考えられ研究が進められているが、実際には板ガラスそのものの風圧による破壊や窓ガラスが障子(框+板ガラス)ごと枠から抜け出す破壊形式なども多く見受けられ、後者に関してはほとんど研究が行われていない。この理由として、サッシ枠の耐風性能評価としてJISA4706が現在用いられているが、竜巻等の強風イベント時に作用する大きな風圧レベルに対する障子の挙動を確認していないことが挙げられる。

そこで、本研究では一般住宅壁面を再現し実際の窓システムそのものを試験体として設置できる装置(圧力箱)に風圧载荷を行うことで、障子抜け出し破壊パターン時の破壊メカニズムの把握と耐力算定を行う。更にここで得られた実験結果と、実際の強風下で想定しうる他の破壊パターン(板ガラス自身の破壊)から得られた耐力結果を用いてフラジリティ評価を行うことで、強風時の風速を変数とした、窓ガラスシステム破壊パターンを定量的に表すことを目指す。

#### 研究手法

本研究は以下の手順に従って実施する：

1. 窓システム(板ガラス・障子・枠)を取り付け可能な、住宅壁面を再現した圧力箱の製作
2. 障子抜け出しパターンを想定した、動的風荷重を用いての窓システム破壊実験
3. 強風時における窓システムのフラジリティ評価

1の圧力箱は2の破壊実験を行うための装置の一部で、試験体となる窓システム(板ガラス+障子+窓枠)を設置し、これに载荷装置を接続させて、試験体に風圧を作用させる。圧力箱は载荷装置の性能を十分に発揮させるために気密で、かつ試験体の取り外しを容易に行うことができる必要がある。2の破壊実験において用いる窓は一般的な低層住宅で用いられている引違窓を想定し、载荷する風圧力時刻歴は、JIS A 1515およびJIS A 4706に記述される建具の変形試験方法を参考に作成する。JIS A 1515の適正評価のためには実際の不規則変動する風荷重(動的

風荷重)を載荷した実験結果と比較する必要があるが、本研究の最終目的であるフラジリティ評価を行なう上で必要な統計値の取得を今回は優先とし、動的荷重での実験は行わなかった。3のフラジリティ評価では①板ガラス自身の風荷重による破壊と②障子抜け出し破壊を想定し、計算を行う。①に関しては申請者自身の結果、②に関しては2の実験結果から必要な統計値を算定し、強風下においてこれまで独立に考えられてきた2つの異なる破壊形式が、ある風速下においてどちらがどのくらいの破壊確率で起こりえるのかをRackwitz-Fiessler法を用いて評価する。

### (実験調査によって得られた新しい知見)

#### 実験概要(圧力箱の製作を含む)

製作した圧力箱(大きさ2 x 1.8 x 0.5m)を図1に示す。本実験において用いる窓は一般的な低層住宅で用いられている引違窓で、サイズがW×H=1690×1370mmの板厚3mmの複層窓ガラス(3mm+空気層10mm+3mm)である。窓枠は実際の木造住宅におけるサッシまわりを模擬した木枠に設置し、障子と窓枠を試験体として試験ごとに交換した。本実験においては窓枠からの障子脱落にのみ着目するため、窓部以外の木枠(壁・柱・間柱・まぐさ・窓台)については、一般的に用いられているものと同等かそれ以上の強度を持った部材を使用し破壊が生じないように設計した。また窓枠と木枠はビスで固定されているが、ビスの位置も試験体ごとに変化させ、一度穴の開いた箇所にはビスが取り付けられないことのないよう調整した。圧力箱は主に木材で構成されているが、破壊に至るまでの試験体の挙動を観察できるように、圧力箱の上面と、試験体設置面とは反対の側面にはアクリル板を用いた。最終的には窓が施工不良された場合の影響の確認として、窓枠の歪を変化させて破壊圧力への影響を確認する予定であるが、今回はサッシ枠上下の歪が施工マニュアルにある許容限界範囲に収まるように施工し、同じ条件で7体実験を行った。試験体用外壁への窓の施工取り付けは、製品マニュアルに従い申請者らが行った。

図2に示す載荷装置を、試験体が設置されている圧力箱に接続して破壊実験を行った。

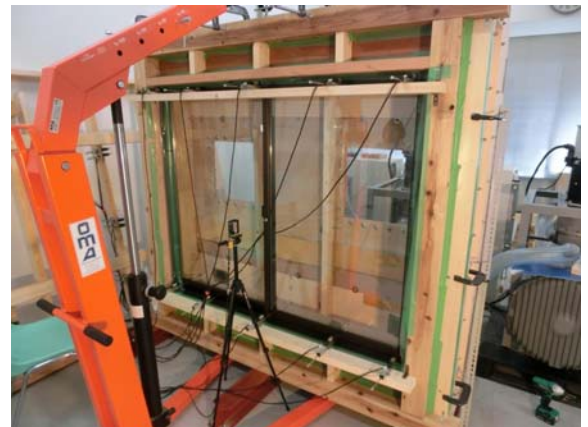


図 1：製作した圧力箱とそこに設置した試験体である窓システム



図 2：載荷装置

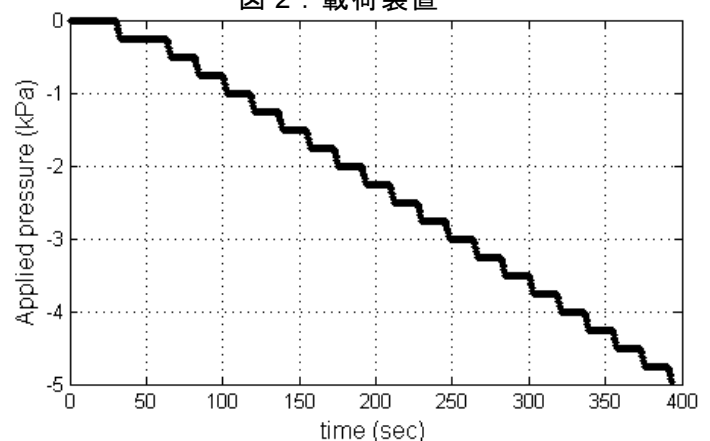


図 3：載荷風圧時刻歴

JIS A 1515およびJIS A 4706を参考に作成した載荷風圧時刻暦を図3に示す。安全性を考慮して負圧のみを、框が窓枠から抜けるまで載荷する。実験では、載荷風圧を測定するための圧力変換器・障子の変位を計測するための変位計での測定の他に、ビデオ撮影により載荷時の窓システムの挙動について記録した。

### 実験結果・考察

実験を行った7体の試験体の破壊風圧を表1に示す。破壊風圧にばらつきはあるが、破壊に至るまでの挙動は共通しており、載荷が進むにつれて障子が全体的に窓枠を圧力箱内側に押し出し始めた。そして上部窓枠の変形が始まり、脱落風圧に達した時点で上部の障子が窓枠から外れた。これにより圧力箱からの空気漏れが発生し、載荷装置は自動的に停止した。7体中5体は板ガラスが割れることはなく障子が窓枠から抜け、この状態は実際の竜巻被害調査を行ったときに見られた破壊状態とほぼ同じになっていた。今後、より多くの試験体数を用いて実験を行う予定であるが、これまでの実験結果より実際の強風下での窓枠抜け破壊状態を実験でよく再現できたと考えられる。また窓枠の施工誤差により、障子の開閉につまりがあったり、窓枠と障子の間に隙間が出来たりする場合は、戸車を調整して障子の傾きを窓枠の傾きに合わせることが一般的な施工で行われており、今回もこの手法に従った。この調整が必要であった試験体は7体中4体あり(試験1,5,6,7)、破壊強度が増加していた。この理由としては障子の傾きを調整した際、窓枠とのかかりが増大し、障子が抜けにくくなった可能性がある。これと合わせて破壊が窓枠上部から発生していることより、施工時の窓枠の変形による、チリ寸法(窓枠と柱の隙間)の差が抜け出しに大きな影響を与えることが分かった。更に、今回の実験ではすべて引き違い窓に施錠して実験を行っていたため、2つの障子が全体として窓枠の変形に影響を与えていた。しかし施錠しなければ2つの障子が独立して作用することになり、抜け出しが遅れる、もしくは2つの障子の重なる部分に隙間が生じることになり、障子に荷重が100%作用せず抜け出し破壊が起きない(他の破壊形状になる可能性があるが、とにかく破壊を遅らせることができる)可能性も考えられる。今後この2つ(チリ寸法、施錠の有無)に着目して、更に実験を進めていく予定である。

表 1 : 破壊風圧

	1	2	3	4	5	6	7
破壊風圧(kPa)	-3.37	-2.25	-2.5	-2.75	-2.8	-3	-2.75
破壊開始場所	すべて外側障子の上部						

### フラジリティ評価

フラジリティ関数の計算にはRackwitz-Fiessler法を用い、限界状態関数(limit state function,  $g$ )を以下のように設定する：

$$g = R - W \quad (1)$$

ここで $R$ は板ガラスもしくは障子耐力、 $W$ は風荷重を示す。 $R$ に関しては弾性支持された板ガラス破壊実験結果と今回行った窓枠脱落实験結果を用いる。板ガラス破壊実験は障子付き板ガラス(830mmx907mm, 板厚3mm)を試験体として用い、2種類の漸増荷重(230Pa/sec, 6500Pa/sec)を板ガラスが破壊するまで載荷し、破壊風圧を得た(文献1, 2)。各漸増荷重に対して試験体は20である。こうして得られた破壊風圧をそのまま $R$ に用いることは出来ない。それ

は板ガラスの破壊は「疲労」という概念で説明され、荷重の载荷時間に応じて強度が変化するという性質を有するためである。よって、一般的な材料とは異なり、必ずしも最大荷重値(応力値)や最大歪で破壊に至るわけではない。このガラスの特異な性質は以下に示す「Brownの式」<sup>文献3)</sup>により説明される。

$$DA_c = \int_0^{t_f} [p(t)]^s dt \quad (2)$$

ここで、 $DA_c$ は特定の種類・サイズの板ガラスが許容できる最大疲労値、 $t_f$ は破壊時間、 $p(t)$ は板ガラスに作用した载荷圧力時刻暦、 $s$ は定数であるが、様々な値が提案されている(10~20)。板ガラス破壊は式(2)で示す疲労値が限界値に達した段階で破壊となる。つまり板ガラスの破壊を検討する際は、式(2)で示す疲労値で比較をする必要がある。しかし疲労値はとても大きな値になるため、一般的にはこれがある評価時間で変換した等価定荷重として扱う。よって今回も式(2)と破壊に至るまでの風圧時刻暦を用いて計算した等価定荷重を $R$ として用いることにより、疲労の影響を考慮した、正しい板ガラスの耐力が算定できる。等価定荷重を計算する際、評価時間を決定する必要があるが、今回は既往の研究で用いられたことのある10秒とした。こうして得られた40の等価定荷重が正規分布、対数正規分布、ワイブル分布のいずれの分布で最も良く近似されるのかを調べるために、対数尤度・赤池情報量規準をそれぞれの確率分布に対して計算した。その結果、ワイブル分布が対数尤度・赤池情報量規準の両方において適切であると判断された。ワイブル分布が次の式で表せるとき、得られた係数は尺度母数 $u=8.282$ 、形状母数 $k=9.865$ となった。

$$P_f(p_f) = 1 - \exp\left\{-\left(p_f/u\right)^k\right\} \quad (3)$$

次に障子抜け出し破壊形式の耐力であるが、こちらも表1の結果がいずれの統計分布で最もよく近似できるのか検討し、結果、対数正規分布が最適であると判断され、対数正規分布が次の式で表せるとき、得られた係数は $m_{pf}=1.013$ 、 $V_{pf}=0.126$ となった。

$$P_f(p_f) = \Phi\left[\frac{\left(\ln y - \ln \frac{m_{pf}}{\sqrt{1+V_{pf}^2}}\right)}{\sqrt{\ln(1+V_{pf}^2)}}\right] \quad (4)$$

以上、耐力に関する統計値をまとめると表2のようになる。

表 2：耐力  $R$  の統計値

	分布	係数
板ガラス破壊形式	ワイブル分布	$u=8.282, k=9.865$
窓枠抜け出し破壊形式	対数正規分布	$m_{pf}=1.013, V_{pf}=0.126$

風荷重に関しては建築物荷重指針・同解説(以後「荷重指針」と称する)にある以下の式を用いて計算した：

$$p_{code} = q_H \cdot \hat{C}_c = \frac{1}{2} \rho (U_0 K_D E_H k_{rW})^2 \cdot \hat{C}_{pe} \quad (5)$$

ここで $\rho$ は空気密度( $1.22\text{kg/m}^3$ )、 $U_0$ は基本風速、 $K_D$ は風向係数、 $E_H$ は基準高さにおける鉛直分布係数、 $k_{rW}$ は再現期間換算係数、 $\hat{C}_{pe}$ はピーク外圧係数である。各係数のうち、空気密度 $\rho$ 、 $E_g$ と $k_{rW}$ は確定値として扱うこととし、それぞれ1.22, 1, 1とした。また $E_H=E_r \cdot E_g$ であり、こ

ここで $E_r$ は平坦とみなせる状況での風速の鉛直分布を表す係数、 $E_g$ は小地形による風速の割り増し係数であり、 $E_g$ を確定値として扱うこととし、その値を1とした。その他の係数に関しては、荷重指針にある値を公称値として用いることにした(表 3)。 $E_r$ の公称値算定には地表面粗度区分II, III, IVを、また建物高さも低層のものを想定している。 $\hat{C}_{pe}$ の公称値算定には正・負両方の値を比べて、より大きな絶対値を有する負圧と仮定した。また、本来内圧係数である $\hat{C}_{pi}$ も考慮すべきであるが、 $\hat{C}_{pe}$ を負圧と仮定した場合、より大きな風力を生み出す $\hat{C}_{pi}$ の公称値が0であるため、今回は0とした。

表 3 : 風荷重  $W$  の統計値

		公称値	平均値 /公称 値	変動係 数	分布
$K_D$		1	1.05	0.16	正規分布
$E_r$	II	0.9	0.96	0.14	
	III	0.79	1.01	0.19	
	IV	0.69	1.01	0.19	
$\hat{C}_{pe}$		-3	0.95	0.12	

風荷重に関しても板ガラス破壊を想定した場合は、疲労値で検討する必要があるため、式(5)で求まる風荷重を疲労の影響を考慮した形式(等価静的荷重)で表現する必要がある。文献4によると荷重指針の値を用いて板ガラスの設計を行なう場合、荷重指針の値に係数 $F_c=1.3$ をかけることで疲労の影響を考慮した等価静的荷重と同等になる。

上記の情報を考慮すると式(1)で表現された限界状態関数は以下のようになる：

$$g = R - F_c \cdot 0.5 \cdot 1.22 \cdot (U_0 \cdot K_D \cdot E_r)^2 \cdot \hat{C}_{pe} \quad (6)$$

ここで $F_c$ の値は、板ガラスの破壊を想定したフラジリティ関数を求める際は $F_c=1.3$ 、障子抜け出し破壊を想定したフラジリティ関数を求める際は $F_c=1$ とする。この中で考慮すべき確率変数は $R$ 、 $K_D$ 、 $E_r$ 、 $\hat{C}_{pe}$ の4つであり、様々な規準風速 $U_0$ ごとに信頼性指標 $\beta$ を計算する。 $\beta$ と破壊確率 $P_f$ の関係は

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

となっており、ここで $\Phi$ は標準正規確率分布関数である。

計算したフラジリティ関数を図4に示す。板ガラス破壊実験に用いた試験体と障子抜け出し実験で用いた試験体の寸法が異なるが、障子抜け出し破壊の耐力はその破壊形式から試験体の大きさに大きく依存しないと仮定して考察をする。いずれの粗度区分においても障子抜け出し破壊が板ガラス破壊に先行して発生し、障子抜け出し破壊の確率が50%の風速でも、板ガラス破壊の確率は0%にほぼ近い。日本本州における、荷重指針で設定されている最大風速は48(m/s)であり、この風速は今回の結果からはいずれの粗度区分においても障子抜け出し破壊がほぼ確実に起こりうる風速であることが分かる。更に今回の結果からは、板ガラス破壊が起こるような風速状況下では既に障子抜け出し破壊が発生していることになるが、申請者のこれまでにを行った被害調査からの印象では必ずしもそうではなく、板ガラス破壊のみが発生している場合もある。実際の被害状況と今回の計算結果の差が生じた理由としては①荷重指針で与えられている各係数の統計値の設定根拠が不明確である、②板ガラス破壊・障子抜け

出し破壊ともにより多くの試験体を用いた実験により耐力値を算定する必要がある，が挙げられる．今後は上記2点に関して精度を向上する必要がある．また，強風下での窓システム破壊の最大の要因である飛来物による破壊についても同様のフラジリティ評価を行い，3つの破壊形式の定量的な評価を行う予定である．

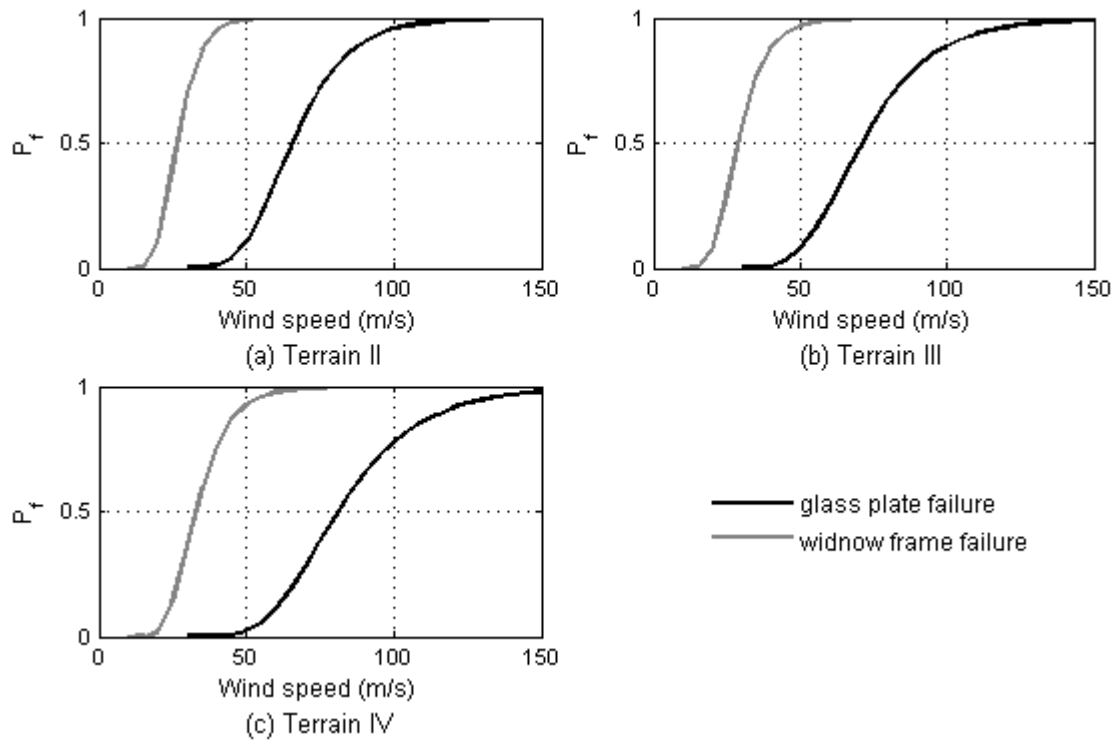


図 4：フラジリティ関数

参考文献

1. 今野大輔，ガヴァンスキ江梨，植松康：窓ガラスの耐風性能評価法に関する研究，日本建築学会大会，2013年，講演梗概集．
2. 今野大輔，ガヴァンスキ江梨，植松康：弾性支持された板ガラスの強度評価，日本建築学会大会，2014年，講演梗概集．
3. Brown, W.G.: A load duration theory for glass design. Pub. No. NRC 12354, National Research Council Canada, Ottawa, 1972.
4. ガヴァンスキ江梨，2012：外装材用板ガラスの許容耐力と設計用風荷重の検討-日本の設計基準値との比較-，第22回風工学シンポジウム，東京．

（発表論文）

なし