

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860008

研究課題名（和文）不規則変動風圧シミュレータを用いた建築外装システムの耐風性の評価法の提案

研究課題名（英文）Evaluation of wind resistance of cladding material using a loading device which can apply realistic wind loads

研究代表者

ガヴァンスキ 江梨（GAVANSKI ERI）

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：00608797

研究成果の概要（和文）：

本研究では、時々刻々変化する風荷重を忠実に再現した、日本で初となる載荷装置の製作を含む実験環境を整備し、窓枠付板ガラスの破壊実験を行った。対象とした試験体は単層フロートガラスで、これを 3 種類の荷重形式により、各 20 枚ずつ実験を行なった。これにより板ガラスの破壊性状をより正確に理解でき、また実験結果より確認できた理論を用いての、より適切な耐風性能評価に必要な各種パラメータを算定することができた。

研究成果の概要（英文）：

A loading device which can apply realistic wind loading as well as a pressure box which can accommodate a framed window glass were prepared. Using these devices, full-scale window glass breakage tests were performed with a sufficient number of specimens. From this experiment, the behavior of window glass under realistic wind loading was observed in detail and the well-known glass breakage theory was also confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：風荷重、建築構造・材料、実大実験

### 1. 研究開始当初の背景

メディアなどの情報を基にすると強風被害は地震などの他の自然災害に比べて小さく見られがちである。確かに強風による個々の建物被害は小さいが、被害領域が甚大であるため、総計としての被害総額は大きくなり、世界的には自然災害による経済的損失の 85%以上が風によるものといわれている。更に毎年のように台風は襲来し、また近年では頻繁に竜巻が発生するようになり、建物外装材の被害は減るどころか逆に増える傾向に

ある。外装材被害は構造骨組の被害に比べて軽微であり、壊れたら修復すればよいと軽視されがちである。しかし、破損した外装材は飛散物となり、人的被害や他の建物被害を誘発する。飛散物により建物に開口部が生じると建物内部の圧力（内圧）が著しく変化することで、建物は風船のような状態になり、屋根全体が吹き飛ぶといった構造被害を引き起こす。更に、開口部が生じることで雨水が室内に浸入し、内装や建物内部の家財、設備機器に被害をもたらす。このように外装材の

破損は被害の連鎖を引き起こすため、最終的な被害総額は相当なものになる。従って外装材の耐風性能を確保することは建物全体の耐風性を高めるためだけでなく、地域全体の防災ポテンシャルの向上にもつながり、とても重要である。

では、どうして毎年同じような外装材被害が繰り返されるのか？我が国では、建築基準法において、構造骨組と異なり、建築外装材の構造計算は必ずしも必要とされず、建材製造業者が提示する建築外装材の耐力に基づき設計者が選択・採用している。建築外装材の耐力や試験方法は JIS 規格などで規定されているが、これらは外装システムを構成する各材料（外装材）に対して個別に試験しており、更に風荷重を簡易化した静的荷重として載荷することが一般的となっている。静的荷重が用いられる理由は主に技術的な問題、つまり時間的・空間的に変動する風荷重を載荷できる装置がないためである。従ってそのようなで試験で得られた外装材の耐力は必ずしも実態を反映しているとはいえず、それが被害の原因の一つとも考えられる。

## 2. 研究の目的

1で述べた状況より、我が国の様々な外装材に対して、アセンブリとしての耐風性能が正しく評価できる手法を確立することは、建物の強風被害を低減する上で急務の課題であると考えられる。よって本研究では不規則に変動する動的風荷重を忠実に再現した荷重下で、単体としての外装システムをアセンブリとして試験を行う新たな耐力性能評価方法を、窓ガラスを用いて提案する。なお載荷する動的風荷重は自然風を再現した境界層乱流を用いた風洞実験結果に基づき再現する。

窓ガラスは一般的に飛来物による破壊が知られているが、強風による破壊や窓枠の脱落なども多数報告されている。強風による破壊に関しては、申請者がカナダ、ウェスタンオンタリオ大学(UWO)における博士研究にて世界初となる窓ガラス(1m 四方)の動的風荷重下での挙動に関する研究を行った。実大実験はUWOで開発された変動風圧を載荷できる Pressure Loading Actuator (PLA)を用いて行われた(なお、PLAの開発には申請者も参画した)。しかしこの研究ではガラスの支持条件として従来研究等で用いられている単純支持を想定しており、これは窓枠の変形や回転もある実際の窓ガラスの支持条件とは異なる。また窓枠の脱落による被害は板ガラスが無傷のまま脱落しており、窓枠と壁との接合部の破壊によるものと考えられるが、こういった問題に対し、アセンブリ実大試験体を用いた実験的研究は行われておらず、実際の窓ガラスの耐風性能が正しく評価されているとは言い難い。このような被害の実態

や建築における重要性を考慮し、様々な外装材の中から、本研究では第一ステップとして窓ガラスを選択した。本研究のような実大スケールのアセンブリ試験体を用い、かつ、実際の動的風荷重に基づく窓ガラス耐風性能評価法の開発は、国内外を通じて初めてであり、耐風性能評価手法の開発に大きく寄与する。本研究により、動的荷重による窓ガラスの耐力低下割合、そして窓枠からの脱落による破壊の頻度とそのメカニズムが明確になると考えられ、窓ガラスシステムとしての耐風性能の合理的評価が可能となり、ひいては建築物の強風被害低減につながる。この手法は原理的にはいかなる外装システムにも適用できるものであるため、将来的には住宅屋根など、大きな外装システムの耐風性能評価にも適用でき、実施を検討している。

## 3. 研究の方法

本研究は以下の手順に従って実施する。

- ① 窓ガラスを対象とした破壊実験を行うための実験環境の整備
- ② 窓ガラス実大破壊試験
- ③ 板ガラス破壊の数値シミュレーションによる耐力予測
- ④ 窓ガラスの耐風性能評価

上記の手順において本助成金を用い、①と②を行う予定である。

初年度(2011年度)は①の実験環境の整備を行う。載荷装置としてはUWOで開発されたPLAを用いる(図1)。PLAは一般に行われる漸増荷重や脈動荷重はもちろん、風洞実験で得られた風力係数より作成された風圧時刻暦を忠実に試験体表面に作用することが可能で、風荷重特有の不規則な変動(時間的な変動)を考慮できる。複数のPLAを用い、それぞれを個別に制御することで、風荷重の空間的な変動も考慮することができる。費用や技術の面などからPLAに相当する載荷装置を新規で製作することは困難であるため、このPLAをUWOからレンタルする。

同時に窓ガラス設置のための実験装置の設計・製作を行う。本研究で使用する装置は、実際の窓枠とは異なる支持条件が再現され

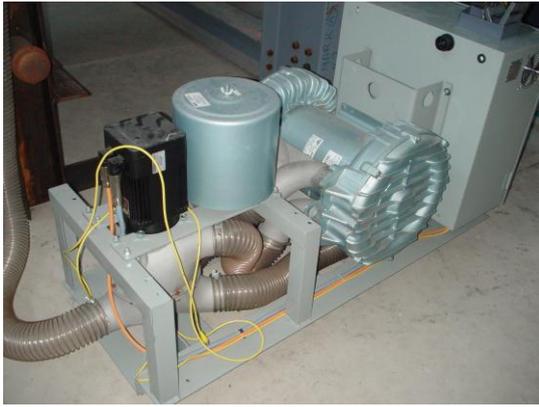


図1：UWOにあるPLA

た従来の装置ではなく、窓枠など支持部材まで含んだ外装システムそのものを設置できるように設計する。つまり圧力箱は基本的に鉄製となり、窓ガラスが設置される一面には窓枠を含んだ試験体があるまま固定できるような支持形式を再現する。

上記の装置等の製作が終了し次第、PLAの制御・作動性確認を行う。PLAは異なる空気漏れ量に対して、目標とした载荷圧力を達成するために自動的にブロワによって送風・吸引される空気量を調整する機能があり、これはPLAの大きな特徴である。

2012年度は実大実験を行う。2011年度に製作したPLA、圧力箱そして圧力測定装置を準備し、まずは窓ガラスではなく鉄板を用いて载荷し、载荷可能な最大载荷圧力を確認、これに基づき、本実験で用いる漸増荷重と動的風荷重の時刻歴波形を決定・作成する。動的風荷重の時刻歴波形は2階建一般住宅を用いて行われた風洞実験から得られた壁に作用する風圧係数時刻歴波形より作成する。次に今回使用する圧力箱の空気漏れ量・体積量に対して、最も忠実に設定した漸増荷重や動的風荷重を再現できるPLAの設定値を算定する。また実験で使用する圧力測定器の性能確認・カリブレーションも行う。

全ての準備が整った後、窓枠付板ガラスを用いての実大破壊実験を行う。当初は本助成金額を考慮し、漸増風荷重と動的風荷重を1パターンずつ、各試験体数10体で実験を行い、将来的には統計的に信頼できる値を得るため（各パラメータごと最低20枚の試験体を用いることが理想）、そしてBrown's Integralというガラス破壊の原則となっている理論の証明のためにより多くの実験を行う予定であった。しかし、企業からの試験体の提供を受けることが可能となったため、3つの異なる荷重形式に対して試験体20体ずつ、合計60枚の窓枠付板ガラスを使用することにした（表1）。

表1：载荷概要

荷重名	荷重速度	枚数
Ramp1	-16.4(Pa/sec)	20
Ramp2	-230(Pa/sec)	20
Fluc1	—	20

この実験では以下の3つの目的達成を目指して行う。

- ① 後に行う数値シミュレーション値との比較に用いる実験値の算出
- ② 板ガラスの破壊理論の基であるBrownの式に必要な定数の算出
- ③ Brownの式から求まる板ガラスの疲労値の、異なる荷重形式に対する独立性の検証

ここで触れたBrownの式とは以下の式である。

$$DA'_{crit} = \int_0^{t_f} [p(t)]^s dt \quad (1)$$

ここで、 $p(t)$ はガラス表面に作用する風圧時刻歴を示し、 $t_f$ は破壊時刻、 $s$ は定数である。式(1)は、ガラス表面の、あるクラックに作用する風圧時刻歴の $s$ 乗の積分値を疲労の蓄積( $DA'_{crit}$ )とし、この $DA'_{crit}$ がある値に達すると板ガラスが破壊に至ることを示している。

実験で測定するものは試験体破壊時の圧力と時間である。

#### 4. 研究成果

実験環境の整備：

本研究の目的は強風時の建物外装材被害低減を目指しての、新たな建築外装システムの耐風性能評価方法の提案である。本研究目的達成の上で最も重要である、不規則変動風圧を载荷できる载荷装置(PLA)は当初、カナダのUWOからレンタルする予定であったが、必要とされる電力仕様が日本の仕様と大きく異なり、検討した結果、対応するための電気工事費用やレンタル料よりも新規のPLAを製作するほうが妥当であると考えた。そこで製作が困難であるPLAの核部分であるバルブ部はUWOから入手し、その他日本で入手可能な部品を用いて、製作した(図2)。今回の実験ではPLAを用いての実大実験の足がかりとして小規模な窓ガラスを対象としているが、今後はより大きな外装システムへの適用も考えていたため、国内においてPLAが製作できたことは今後、複数のPLAを要する研究の展望が開けたと考える。製作したPLAの性能も満足できるものであり、これまで国内で製作された類似の载荷装置の性能を大幅に上回っている。カリブレーション用の圧力箱(0.3 x 0.3 x

0.18m)を用いて行った作動確認時のPLAの時刻歴波形を図3に示す。インバータ出力の最大値は60Hzであるが、図3に示す試実験結果はインバータ出力の最小値である30Hzを用い、かつカリブレーション用圧力箱に多少の空気漏れを許容した状態で行われ、最大-7.3kPaを再現した。

載荷装置と同様に本研究において必須である装置は窓ガラスそのものを設置できる圧力箱である。重要となる箱の気密性や窓ガラスの交換作業性、破壊した板ガラス掃除の簡便性を考慮し、図4に示す圧力箱を製作した。



図2：東北大学で製作したPLA

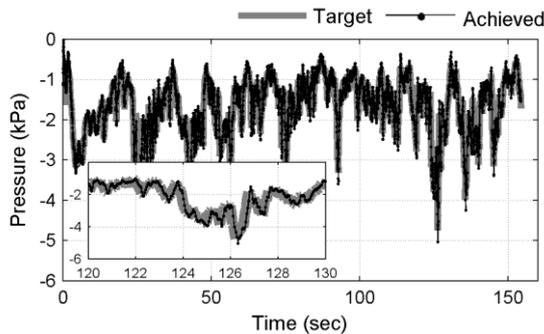


図3：PLAによる動的風荷重の時刻歴シミュレーション



図4：圧力箱

窓ガラス実大破壊実験：

実験方法としては、圧力箱の一面に試験体(障子枠付板ガラス)を固定し、PLAで吸引力を載荷する。また、実験では3種類の荷重を用い

て窓ガラスが破壊するまで作用させた。2種類は載荷速度の異なる漸増荷重(Ramp1,Ramp2)であり、それぞれの載荷速度は既往の研究で用いられた16.4(Pa/sec)と230(Pa/sec)を採用した。もう一つは風洞実験データを基に作成した時々刻々と変化する風圧時刻歴を再現した動的風荷重(Fluc1)である。実験に用いた動的風荷重は、低層建物を対象として行われた風洞実験から得た風圧係数時刻歴 $C_p(t)$ と式(2)を用いて作成した。

$$p(t) = 0.5\rho V_f^2 C_p(t) \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ は空気密度、 $V_f$ は実大スケールにおける風速、 $C_p$ は風圧係数である。本実験における $V_f$ は50(m/s)を基準とし、約8分程度の基準動的風荷重時刻歴を作成した。また、動的風荷重載荷実験の目的は、漸増荷重とは異なる時々刻々と変化する実際の風荷重の載荷により、漸増荷重に比べて疲労値 $DA'_{crit}$ に変化が現れるのかを検討することである。よって装置の耐久性や実験時間を考慮し、破壊が起きるまで同じ風圧時刻歴を繰り返し載荷するのではなく、基準風速を用いて作成した風圧時刻歴でガラスが破壊しなかった場合には、 $V_f$ を3(m/sec)ずつ上げて風圧レベルを大きくした風圧時刻歴を載荷し、破壊に至るまでこの過程を繰り返すことにした。風圧時刻歴の例を図5に示す。異なる色は異なる $V_f$ を用いて作成された風圧時刻歴を指す。

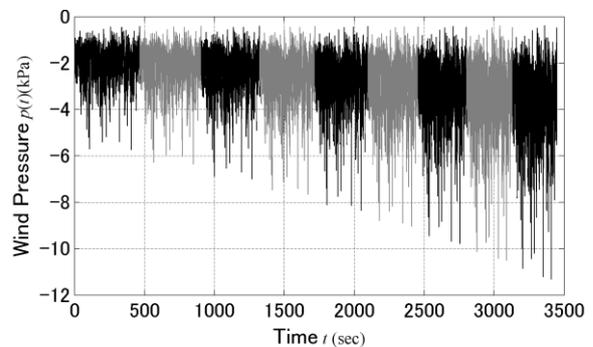


図5：動的風荷重時刻歴例

本実験で用いる試験体は、仮設住宅等で用いられている一般的なアルミ障子枠付き単層フロート窓ガラスである。ガラスがグレイジングチャンネルによって支持されているため、支持部でも面外方向への変形が許容された弾性支持状態である。試験体の寸法を表2に示す。試験体数は各荷重形式に対してそれぞれ20枚である(合計60枚)。

表2：試験体概要

板ガラスサイズ W×H	790mm×855mm
-------------	-------------

全体(障子枠付)サイズ W'×H'	830mm×907mm
板ガラス厚さ	3mm
支持条件	弾性支持

実験結果：

漸増荷重実験結果を表3に示す。一般的にガラス強度の変動係数は0.22程度と言われている為、今回の結果(0.07~0.12)は妥当であると考えられる。

次に、 $DA'_{crit}$ は荷重速度に対して独立であると仮定し(証明は後に行う)、式(1)と、Ramp1, Ramp2の荷重速度、平均破壊風圧を用いてsを算出すると、sは17となり、既往の研究にて

表3：漸増荷重実験結果

	Ramp1	Ramp2	added Ramp2
荷重速度 (Pa/sec)	-16.4	-230	-230
試験体数 (枚)	20	20	5
湿度 RH (%)		42-66	12-18
平均破壊風圧 (kPa)	-7.48	-8.66	-9.82
平均破壊時間 (sec)	455.4	37.8	43.33
標準偏差 (kPa)	0.92	0.89	0.70
変動係数 (-)	0.12	0.10	0.07

示されている値の範囲 (10-20)に収まる結果となった。

続いて、荷重毎の結果の比較を、同じ評価時間を用いて疲労値 $DA'_{crit}$ を換算した等価荷重の形式で表現することで行う。等価荷重は、式(4)により計算される。

$$P_{eq}(t_{ref}) = \left\{ \int_0^{t_f} [p(t)]^s dt / t_{ref} \right\}^{1/s} = (DA'_{crit} / t_{ref})^{1/s} \quad (4)$$

ここで、 $t_{ref}$ は評価時間を示す。算出したsと式(4)を用いて実験結果から等価荷重(評価時間3(sec))を計算し、Thomas法により破壊確率-等価荷重の関係を描画したものを図6に示す。Ramp1とRamp2の分布はよく重なっており、コルモゴロフ・スミノルフ検定及び分散分析(以下、検定)によって、信頼区間95%において2つの分布は同じ確率分布から得られたものであるという帰無仮説は棄却できず、荷重速度に対して $DA'_{crit}$ は依存していないと考えられる。一方で、Ramp1, 2とFluc1の比較においては、大きな結果のずれが見られた。この結果の原因としては、実験時の湿度環境に問題があると考えられるため、Fluc1の実験を行った時と出来るだけ同じような湿度環境下(4-22%RH)で、Ramp2の追加実験を行った(added Ramp2)。その結果、added Ramp2はRamp2よりも平均破壊荷重が大きく、5枚という少ない試験体数を考慮すると、Fluc1の分布と良い対応を見せていると言える。さらに、2

つの分布が同じ確率分布から得られたものであるという帰無仮説に対する検定においても信頼区間95%において棄却できず、今回の実験からは少なくとも「 $DA'_{crit}$ が荷重形式に対して依存していない」という仮定を否定する結果は得られなかったと言える。よって今後は弾性支持条件下においてもこの仮定が正しいものとして、検討を進めることにする。

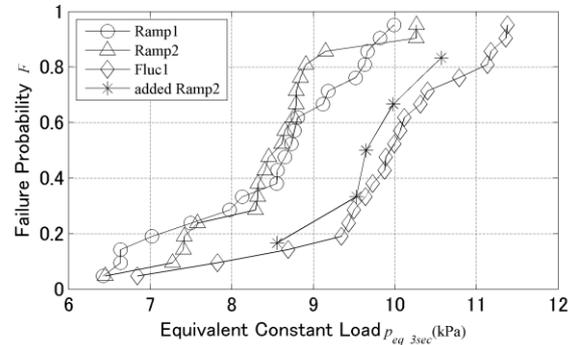


図6：等価定荷重による破壊確率分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計1件)

- ① ガヴァンスキ江梨、強風による板ガラスの実大破壊実験、日本建築学会大会、2012年9月14日、名古屋大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ガヴァンスキ 江梨 (GAVANSKI ERI)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：00608797

(2) 研究分担者

無

(3) 連携研究者

無