

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360221

研究課題名(和文)実風圧載荷システムの構築とそれを用いた建築外壁アセンブリの耐風圧性能評価

研究課題名(英文)Development of a realistic wind pressure loading system and wind resistance evaluation method for building walls

研究代表者

植松 康(Uematsu, Yasushi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60151833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低層建築物を対象とし、外壁システムの耐風圧性能を適切に評価できる試験方法を確立することを目的とし、(1)風洞実験に基づく壁面風圧の時間的・空間的変動特性の把握、(2)実大アセンブリ試験体に対して不規則な実変動風圧をそのまま作用させることが可能な実変動風圧シミュレータの構築、(3)典型的な金属系サイディングの破壊に至るまでの挙動の把握、(4)ビス抜け、サイディングの頭抜け、および、勘合部はずれに対する要素試験を行い、外壁の耐風圧性能の評価手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the study is to propose an experimental method for evaluating the wind resistance of wall system of low-rise buildings. Focus is on metal siding. First, the time-space correlation of fluctuating wind pressures on the walls was investigated in a wind tunnel experiment. Next, we developed a facility that can apply realistic wind pressures on a specimen 1.8 m high and 2 m wide. A series of failure tests revealed the failure mechanism of the wall system. Three kinds of failure modes were observed in the tests; i.e. pull-out of screws, tear-off of siding, and disconnection of male and female fitting portions. Component tests for these failure modes were also carried out. The results indicate that these component tests cannot provide actual wind resistance of the wall systems under realistic conditions. Based on the results, we have proposed test conditions that should be satisfied with the experiment for evaluating the wind resistance appropriately.

研究分野：建築構造学

キーワード：低層建築物 風洞実験 外壁システム 耐風性能 動風圧 アセンブリ試験体 要素試験

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 外装システムの耐風性能の重要性

近年では、台風等の強風により建物が倒壊するといった大きな構造被害は少なくなったが、屋根や壁などの外装材(ここでは、外装仕上げ材だけでなくその支持部材を含めた外装システム全体を「外装材」という)の被害は依然として多発している。外装材の被害はとかく軽く見られがちであるが、風雨が建物内部に吹き込むことによって、大きな構造被害や内装、設備機器等の損傷をもたらす、それによる経済的損失は膨大なものとなる。例えば、台風被害に対して支払われた損害保険金額は、2004年の台風18号だけでも約3,900億円、2004年全体では実に8,000億円にも上る(損害保険協会HP)。このような事態を受け、国土交通省は2007年6月に建築基準法施行規則を改正し、建築確認申請時に外装材の構造計算書の提出を義務づけた。

### (2) 外装材の耐風圧性能に関する既往の研究

外装材の耐風圧性能に関する研究は2つのアプローチからなされてきた。1つは風工学研究者を中心とした風荷重評価であり、多くは風洞実験や実大モデルを用いた実測による<sup>1)</sup>。カナダ・西オントリオ大学(UWO)や米国・テキサス工科大学など、北米では研究が行われてきたが、研究対象はほとんどが屋根であり、壁面を扱ったものは少ない。研究代表者(植松)は、1996年UWOに滞在し、低層建築物に作用する風圧特性に関する研究をIsyumov教授と共同で行った。屋根だけではなく壁面についても、風圧の空間分布の時間的変動特性を明らかにし、面平均風圧のピーク値と荷重負担面積との関係を示した。一方、我が国に目を向けると、2004年に甚大な台風被害を受けたことで、外装材の耐風圧性能の重要性が認識されて研究が行われるようになったが、それ以前においては、低層建築物の外装材の風荷重に目を向けた研究者は研究代表(植松)以外にはほとんどいなかった。

もう1つのアプローチは、外装材の耐力評価であり、主として材料研究者によってなされてきた。板ガラス(カーテンウォール)については周期的な脈動圧を用いることがあるものの、試験はほとんど静的载荷である。また、外装材は様々な部材で構成されているが、全体を再現したアセンブリ試験体が用いられることは極めて希で、一般には個々の部材や接合部の耐力試験がなされる。外装材における力の流れは複雑であり、システム全体としての耐力はこのような要素試験では必ずしも正しく評価できない。しかも、実際に作用する風圧は不規則に変動するため、動的荷重効果も無視しえない。研究代表者(植松)は、陸屋根に使用される機械的固定工法シート防水システムを対象とし、風洞実験に基づきモデル化した変動風圧を実大試験体に载荷して耐風圧性能を評価する手法を開発した。動的荷重効果を考慮した耐風圧性能評価法の先駆けである。

## 2. 研究の目的

本研究では、台風等による強風被害が多発しているにも拘らず耐風圧性能に関する研究事例の少ない低層建築物を対象とし、外装仕上材だけではなくその支持部材を含めた「外装システム」の耐風圧性能を適切に評価できる試験・評価手法を確立する。ここでは特に、国内外を通じてほとんど検討がなされていない金属系サイディングに着目する。

まず、外装システムの実大アセンブリ試験体に対して、風洞実験から得られた不規則な変動風圧をそのまま実スケールで作用させることが可能な実変動風圧シミュレータ(载荷試験装置)を構築する。次に、代表的な金属系サイディングに対して試験を行って破壊に至るまでの挙動を把握し、耐風設計のクライテリアを明確にした上で、要素試験の結果とあわせて、外壁の耐風圧性能の簡便な評価方法を提案する。

## 3. 研究の方法

本研究は以下のステップによりなる。

ステップ1: 低層建築物を対象に、風洞模型実験により、壁面に作用する風圧の時間的・空間的変動特性を明らかにする。特に、最も大きな負のピーク風圧を生じさせる条件を明確にする。その条件下で得られた風圧の時刻歴データは、外壁アセンブリ試験での载荷にも利用される。

ステップ2: 外壁システムのアセンブリ試験体を対象とした実変動風圧シミュレータを構築する。このシミュレータは、UWOで開発されたPLAの原理を応用し、風洞実験データに基づきシミュレートされた実変動風圧を作用させることのできる装置である。

ステップ3: 我が国で一般的に用いられている金属系サイディングを対象とし、外装仕上材だけでなく支持部材も含めたアセンブリ試験体を作製し、ステップ1で構築した試験装置を用いて実変動風圧作用下での破壊に至るまでの挙動を把握する。また、その破壊モードを明らかにする。

ステップ4: ステップ3で明らかになった破壊モードに対して要素試験を行い、アセンブリ試験結果との比較により、要素試験の妥当性を検証するとともに問題点を把握する。

ステップ5: 以上の結果に基づき、外装材の耐風圧性能を適切に評価できる試験方法の条件を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 壁面に作用する風圧の特性と载荷試験用実変動風圧の生成

#### 実験概要

低層建物の1/100縮尺模型を用いて、風洞実験を行った。模型の形状、寸法、および実験風向を図1に示す。既往の研究<sup>2)</sup>から図1の斜線部に大きな正と負のピーク風圧が生じることが予想されるため、この領域に測定孔を細かく設け、多点同時測定を行った。ま

た同一条件で測定は 10 回行った。

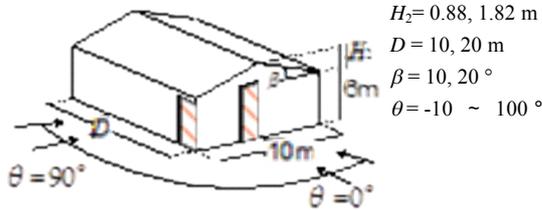


図 1 実験模型および風向

### 実験結果および実変動風圧の生成

得られた風圧係数の時刻歴から、正よりも負のピーク風圧係数の方が絶対値が大きくなることが分かった。また、外装材は留め具などによって施工されることから、外壁システムにとって負圧の方がクリティカルであることより、ここでは負圧に着目する。風洞実験結果に基づき、前述の試験装置に設置するアセンブリ試験体と等しい面積(1820mm×2000mm)に対する面平均風圧係数の時刻歴を計算したところ、図 2 に示す条件で斜線部分に負の最大ピーク値が発生することが分かった。そこで、このピーク値を有する時刻歴を用いて、载荷試験で使用する実変動風圧の時刻歴  $p(t)$  を式(1)により求める。

$$p(t) = 0.5\rho C_{pA}(t)V_i^2 \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は空気密度、 $V_i$  は実物大スケールにおける設計風速であり、荷重指針<sup>1)</sup>に示される基本風速  $U_0$  を基に計算される。時刻歴  $p(t)$  を 1 セット(約 5 分) 载荷しても試験体が破壊しなかった場合は、 $U_0$  を 1~2m/s ずつ上げて再度時刻歴  $p(t)$  を作成し、载荷を行う過程を破壊に至るまで繰り返す。図 3 に試験に用いた実変動風圧の時刻歴を示す。図中で時刻歴の色の変化が  $U_0$  の変化に対応している。

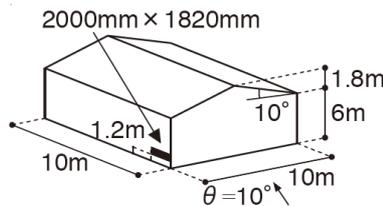


図 2 対象領域(実寸)

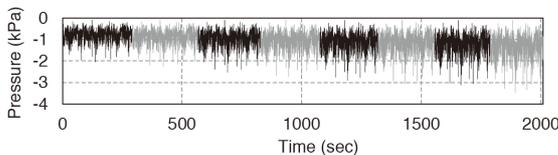


図 3 生成された実変動風圧

### (2) 実変動風圧载荷装置の設計・製作

#### 実変動風圧载荷装置の構成

本研究では実変動風圧を高い追従性をもって再現できる装置が必要となる。そこで Kopp ら<sup>3)</sup>により開発された Pressure Loading Actuator(PLA)を応用し、本研究の目的に適した装置を独自に設計・製作した(図 4)。試験体を設置した圧力箱と PLA を接続し、圧力箱

内の圧力を変化させることで、試験体へ载荷をする。また、PID 制御により、時々刻々と変化する圧力を再現することが可能である。



図 4 実変動風圧载荷装置

### 実変動载荷装置の性能試験

本研究で製作した PLA は、Kopp らによるものとは異なる構成要素を用いているため、適切に実変動風圧を再現できるかどうかを確認する必要がある。そこで、正弦波圧力と実変動風圧の時刻歴を用いた性能試験を行った。実変動風圧は上述の(1)で得られた  $C_{pA}(t)$  の時刻歴と荷重指針<sup>1)</sup>で定められている基本風速  $U_0$  の最大値  $U_0=50\text{m/s}$  を用いて計算した。そのパワースペクトル密度  $S(f)$  (図 5) より、周波数 4Hz で  $S(f)/\sigma^2$  ( $\sigma^2$  は変動の分散を表す) が最大値の 1/100 以下になっていることが分かる。したがって、4Hz 程度までの周波数成分を含む変動風圧を再現できれば、载荷装置として十分な性能を有していると判断できる。以上より、 $U_0=50\text{m/s}$ 、カットオフ周波数 7.0Hz のローパスフィルターをかけた実変動風圧を用いて性能試験を行った。入力した実変動風圧(入力)に対する出力の追従性を図 6 に、周波数ごとの振幅比を表わすルートコヒーレンス  $\text{coh}(f)$  および位相差  $\phi$  を図 7 に示す。これによると、0~4Hz における  $\text{coh}(f)$  は概ね 0.8 以上である。また位相差遅れが周波数に比例しているため、時間遅れは周波数に依らずほぼ一定であり、波形をほとんど崩すことなく再現していることが分かる。これらの結果より本载荷装置は適切な性能を有していると判断できる。

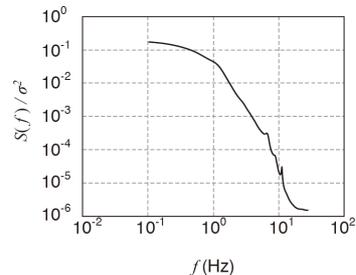


図 5 実変動風圧のパワースペクトル

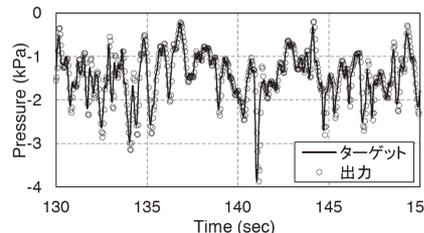
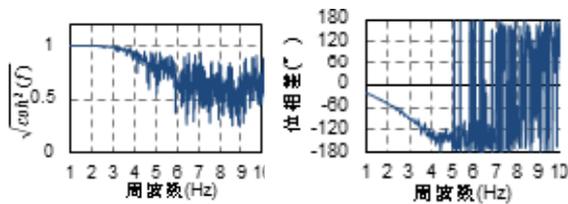


図 6 実変動風圧の再現性



(a)ルートコヒーレンス (b)位相差  
図7 ルートコヒーレンスと位相差

### (3) 要素試験

#### 目的と概要

過去の強風被害調査によると、被害形態として、サイディングの留め具のみが引き抜ける「留め具抜け破壊」、留め具が下地に残るがサイディングのみがちぎれる「頭抜け破壊」、サイディングの嵌合部が外れる「嵌合部はずれ破壊」の3種類が想定される。そこで各破壊形態の破壊性状や耐力を詳細に把握するために要素試験を行った。

#### 留め具引抜試験

##### 1) 試験方法

試験では表1に示す3種類の留め具を用いた。ビスはメーカーが指定する留め具要領を最低限満たす留め具、ビスはメーカーが施工試験に用いているものである。くぎはメーカーがカタログに掲載する耐風圧性能値を求める実験で用いているものである。留め具を打ちつける下地は、住宅にて胴縁として使用され、施工基準<sup>4)</sup>を満たしている木材(断面18mm×45mm)を用いた。留め具を鉄板と共に木材に打ち付け、鉄板ごと留め具を引き抜いた。引抜速度はJAS<sup>5)</sup>で定められている5mm/minとその2倍の10mm/minとし、各留め具引抜速度に対して50回試験を行った。

表1 試験に用いた留め具(単位: mm)

種類	頭径	長さ	呼び径	首下長さ
ビス	6.0	25	3.3	21.3
ビス	7.5	25	3.8	20.8
くぎ	4.9	38	2.4	38.5

##### 2) 試験結果

Kolmogorov-Smirnov 検定により、全ての留め具において、引抜速度による結果の差がないことが確認された。したがって、2種類の荷重速度の結果(計100体)を合わせて平均値を求め、引抜強度として扱う。また、求めた引抜強度を風圧に換算するにあたり、本研究で用いるサイディングの幅は396mm、固定間隔は500mmであるので、留め具1本当たりの荷重負担面積は396mm×500mmとする。試験で得られた引抜強度をこの荷重負担面積を除いた値(風圧換算値)を表2の要素試験の破壊形態Iの欄(網掛け部)に示す。

#### 頭抜け・嵌合部はずれ破壊試験

##### 1) アセンブリ試験体

試験では幅396mmの金属サイディングを用いて、アセンブリ試験体(図8)を作製した。固定金具は表1に示した2種類のビスと同じ

頭径のものとし、留め具抜け破壊が発生しないよう、首下長さが長いものを用いた。本試験ではY3通りの挙動に着目するため、X3Y3の固定箇所(図8のオレンジ部分)を正確に再現できる試験体・圧力箱を設計・製作した。また、Y3通り以外の部分から破壊する可能性も予想されたため、図8の×部分の嵌合部をボルトで固定した。破壊の瞬間を特定するため、また、周辺の変位の影響を確認するため、9箇所の変位を測定し、フレームと胴縁に対する金属サイディングの相対変位を求めた。

##### 2) 荷重圧力

本試験では、PLAを用いて段階式圧力と実変動風圧の2種類を荷重し、荷重形式の違いによる影響を確認する。図9に示す段階式圧力は現在外装材の耐風圧性能試験において一般的に用いられている荷重形式である。また、実変動風圧は、図8の試験体の大きさに対する面平均風圧係数 $C_{pA}(t)$ を用いて作成した。各留め具、試験条件ごとに6ないし7体の試験体を用いた。

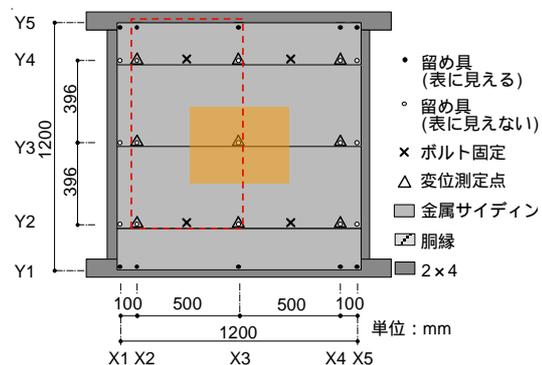


図8 頭抜け試験用の試験体

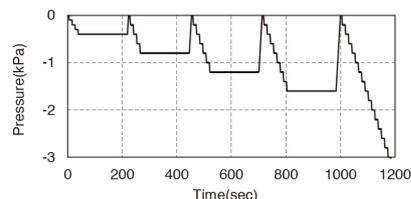


図9 多段式圧力

##### 3) 試験結果

破壊形態として、X3Y3において頭抜け破壊が発生したもの、Y3通りで嵌合部はずれ破壊が発生したもの、2つの破壊が同時に発生したものの3種類が確認された。ここでは、これら3つの破壊形態のうちいずれかが発生した時点として「破壊」とする。

破壊した時点での荷重を「破壊時荷重」、破壊までに試験体に荷重された絶対値が最大となる負圧を「破壊耐力」と呼ぶ。ただし、段階式圧力の場合、破壊時の荷重が絶対値最大の負圧となるため、これを破壊耐力とする。各試験条件に対し、最初に発生した破壊形態ごとに、破壊時荷重および破壊耐力の平均値を表2に示す。いずれの破壊形態においても段階式圧力よりも実変動風圧を荷重した場

合の方が破壊耐力は大きくなっている。また、頭径が大きなビスを用いた方が破壊耐力は高くなるが、頭抜け破壊から嵌合部はずれ破壊への破壊形態の移行が見られる。さらに、頭抜け破壊よりも嵌合部はずれ破壊の方が発生しやすいことがわかる。

#### (4) 実物大動風圧試験

##### 試験概要

本試験では強風下での外壁システムの破壊までの挙動および耐力を再現できるように試験を計画した。試験体は1.8m×2.0mのアセンブリ試験体である(図10)。本試験では、表1に示されるビスとビスの2種類を用いた。図10に△で示す16か所での破壊形態を確認し、発生試験体数を把握した。また、载荷形式の影響を見るためPLAを用いて段階式圧力(図9)と実変動風圧の2種類を载荷した。合計4パターンの試験を行い、それぞれ試験体5体ずつを用いた。

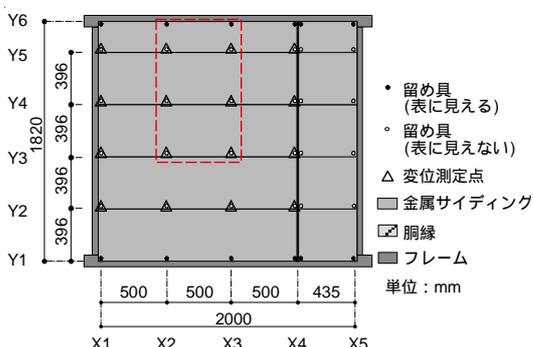


図10 実物大動風圧試験用の試験体

##### 試験結果

本試験では前述した3種類の破壊形態が確認された。ここで、最初に発生した破壊形態に着目し、各試験条件、破壊形態ごとに破壊荷重および破壊耐力を表2に示す。载荷形式による影響については、(3)と同様の傾向が見られた。破壊形態については、ビスを用いた場合、頭抜け破壊が支配的であるが、ビスでは異なる破壊形態も同程度発生している。また、留め具の頭径を大きくすることで破壊耐力は向上したが、どの破壊形態に対して有効であるかは破壊耐力からは明らかにできない。

#### (5) 適切な耐風圧性能評価法に関する考察

##### 試験結果の比較

(3)および(4)に示した3種類の試験結果の比較・検討に基づき、適切な試験方法を提案するにあたって重要な点を以下にまとめる。

1)段階式圧力よりも実変動風圧を载荷した方が、破壊耐力が大きい。これは段階式圧力では常に大きな負圧が作用し続けるが、実変動風圧では大きな負圧が瞬間的にしか作用しないため、载荷の影響が原因と考えられる。

2)留め具抜け破壊と頭抜け破壊については、

要素試験の結果が実物大動風圧試験に比べ大きくなっている。その原因として要素試験では実際の荷重負担面積を適切に再現できていないことが考えられる。また、留め具に作用する引抜荷重がサイディングの変形などにより、留め具を打ち込んだ軸上とは異なる方向に作用している点も考えられる。

3) 嵌合部はずれ破壊は、上記2)とは逆の傾向を示し、実物大動風圧試験の結果の方が大きくなっている。これは嵌合部はずれ破壊は1固定箇所などの局所的な破壊ではなく、サイディング丸ごと1枚などといった広範囲に発生する破壊であり、実物大動風圧試験のように試験体が大きくなれば嵌合部はずれを起こすのに大きな荷重が必要となるためであると考えられる。

表2 各破壊形態の破壊時荷重および破壊耐力(単位: kPa)

留具	载荷形式	破壊形態	動風圧試験		要素試験	
			破壊耐力	破壊荷重	破壊耐力	破壊荷重
ビス	多段	I	-	-	-	-3.86
		II	-2.80	-	-2.85	-
		III	-	-	-2.66	-
	実変動	I	-	-	-	-3.86
		II	-3.02	-2.78	-3.60	-3.61
		III	-	-	-3.25	-3.05
ビス	多段	I	-3.40	-	-	-4.45
		II	-	-	-	-
		III	-	-3.55	-2.88	-
	実変動	I	-4.01	-4.01	-	-4.45
		II	-3.51	-3.02	-4.33	-4.09
		III	-	-	-3.43	-3.06
くぎ	多段	I	-	-	-	-1.06

破壊形態の分類: I, 留め具抜け, II, 頭抜け, III, 嵌合部はずれ

#### (6) 妥当な要素試験方法の提案

アセンブリ試験体の実変動風圧を载荷した際の耐力を適切に評価するための簡便な試験方法とJISとの比較を併せて表3のように提案する。

表3 本研究に基づく提案とJISとの比較

JISA 1515		提案
载荷形式	簡易化された風荷重 段階式・繰返し圧力	目的によっては段階式圧力を用いることも可能 ○許容風圧力 ×破壊形態, 発生割合
最高圧力	メーカーが定める値	破壊発生まで载荷
試験体大きさ	構成 使用状態に組み立てたもの 記述なし	実際の施工を基に複数部材で構成 実際の壁面大きさを 基に決定する

また、今後の課題として以下のものが挙げ

られる。

- 1)各固定箇所の荷重負担面積や、力の分配を求めるために、ある場所に作用する荷重がどのように分配されるのかを示す影響係数を求める必要がある。
- 2)実現象下での留め具の引抜方向や固定部への疲労の影響を明確にするために、サイディング固定部の応力分布や変位特性を求める必要がある。

#### (7)まとめ

強風下における外壁システムの挙動および耐力を明らかにするために2つの試験を行い、耐風圧性能評価法の確立に向けて適切な要素試験方法について考察し、今後の検討課題を明示した。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015
- 2) 植松康，イシモフ・ニコライ：低層建築物に作用する局部風圧に関する研究，その1，日本風工学会誌，70，pp.3-14，1997
- 3) G. A. Kopp et al.: "Three Little Pigs" Project : Hurricane Risk Mitigation by Integrated Wind Tunnel and Full-Scale Laboratory Tests, Natural Hazards Review © ASCE / NOVEMBER, 2012, pp.151-161
- 4) 日本金属サイディング工業会：金属サイディング施工の手引き，[http://www.jmsia.jp/pdf\\_data/manual01.pdf](http://www.jmsia.jp/pdf_data/manual01.pdf)
- 5) JAS「構造用パネルの日本農林規格」，2013

#### 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12件)

ガヴァンスキ 江梨，高橋 麻衣，植松康，モリソン マリー，実変動風荷重装置の性能評価，日本建築学会技術報告集，査読有，第21巻，2015(印刷中)

高橋 麻衣，星野 菜摘，ガヴァンスキ 江梨，植松 康，実変動風圧下における金属サイディングを用いた外壁システムの耐風圧性能試験，第23回風工学シンポジウム論文集，査読有，2014，403-408

ガヴァンスキ 江梨，植松 康，低層建物壁面に作用する外装材用風圧係数の検討，第23回風工学シンポジウム論文集，査読有，2014，253-258

Gavanski, E.，Uematsu, Y.，Local wind pressures on walls of low-rise buildings and comparisons to the Japanese and US wind loading provisions. J. Wind Eng. Ind. Aerodyna., 査読有，Vol. 132, 2014, 77-91

高橋 麻衣，金 南昔，飯田 有美，植松康，2013年9月2日埼玉県などで発生した竜巻による建物被害，東北地域災害科学研究，

査読無，第50巻，2014，69-74

[学会発表](計16件)

高橋 麻衣，星野 菜摘，ガヴァンスキ 江梨，植松 康，実変動風圧下における外壁システムの耐風性能評価法に関する研究その1 PLA(Pressure Loading Actuator)の基本性能，日本建築学会2014年度大会(近畿)，2014年9月12~14日，神戸大学(兵庫県・神戸市)

星野 菜摘，高橋 麻衣，ガヴァンスキ 江梨，植松 康，実変動風圧下における外壁システムの耐風圧性能評価法に関する研究その2 金属サイディングを用いた試験体による実大動風圧試験，日本建築学会2014年度大会(近畿)，2014年9月12~14日，神戸大学(兵庫県・神戸市)

Konno, D., Gavanski, E., Uematsu, Y., Evaluation of the strength of of elastically-supported glass plates for wind-resistant design of windows, The 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM '14), Aug. 24 - 28, 2014, Busan Korea

高橋 麻衣，植松 康，ガヴァンスキ 江梨，奥田 泰雄，切妻屋根を有する低層建物の壁面に作用する風圧性状，日本建築学会2013年度大会(北海道)，2013年8月30日~9月1日，北海道大学(北海道・札幌市)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

植松 康(UEMATSU, Yasushi)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60151833

##### (2)研究分担者

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

奥田 泰雄(OKUDA, Yasuo)  
国土技術政策総合研究所・建築研究部・建築災害対策研究官  
研究者番号：70201994

##### (3)連携研究者

喜々津 仁密(KIKITSU, Hitomitsu)  
独立行政法人建築研究所・構造研究グループ・主任研究員  
研究者番号：10370694