

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K20861

研究課題名(和文) 強風災害に対する日本住宅のリスク評価と耐風性能向上度の可視化

研究課題名(英文) Fragility analysis on Japanese residential houses against wind disaster

研究代表者

ガヴァンスキ 江梨 (Gavanski, Eri)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00608797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では強風被害調査結果に基づき決定した、強風による飛散物の増加->強風・飛散物による窓の破壊->建物内圧上昇による大きな風力が屋根面に作用->屋根構造部材の破損という被害のシナリオを想定し、強風が住宅に作用した場合の、対象部材の破壊確率と最大風速の関係を数値シミュレーションにより求めた。そして実際の建具費用や施工費などを基に、破壊確率をよりわかりやすい期待損失額という形に変換して示した。この結果により具体的に住宅のどの部分を強くすれば(費用をかければ)被害が低減できるのかを提示でき、建築戸数の多い住宅を強風から守ることで、最終的には強風災害に強い社会環境基盤の整備に貢献できると考えている。

研究成果の概要(英文)：In the current study, the wind damage sequence on residential house was decided based on the damage survey conducted after strong wind events occurred in Japan. Along the damage sequence considered, the failure of each building component in the assumed Japanese residential house was calculated by performing the Monte Carlo simulation with the statistic of component resistance and applied wind loads. The output from the simulation, which is the relationship between the maximum wind speed and failure probability was converted to the relationship between the maximum wind speed and repair cost of houses in order to be understood the results by non-professionals as well. This result clarifies which part of houses needs to be improved in order to reduce the damage. Since the number of houses in Japan is significant among all the buildings constructed, the mitigation of wind damage on resident houses will lead a wind disaster resilient society in Japan.

研究分野：耐風工学

キーワード：脆弱性 強風 住宅 被害連鎖 風洞実験 耐力実験

1. 研究開始当初の背景

我が国では近年、台風や竜巻などの強風被害が増えており、地球温暖化の影響でその傾向は益々強まると予想される。事実、日本損害保険協会の統計によると、津波の影響が大きかった2011年東北地方太平洋沖地震を除けば、台風による保険金支払額は他の自然災害による支払額を大きく上回っている。図1は住宅被害の例である。このような深刻な強風による住宅被害は決して稀に起こる被害ではなく、比較的大きな台風や竜巻発生時には頻繁に見受けられるものである。



図1：被害連鎖により破壊したと予想される屋根構造用合板破壊

建物の中でも住宅被害は無視できない。単体としての被害金額は他の建築物に比較して小額であるが、被災エリアが広く、地域あるいは国全体としての被害総額は膨大となるためである。また住宅は社会生活の基盤であるため、その被災は災害時の社会生活の存続に大きな影響を与える。更に高層・大空間建築物など慎重な構造設計がなされる建築物では強風の被害は近年減少しているが、住宅など構造設計を必要としない、いわゆるノンエンジニアド建物への対策は遅れており、台風等の大型化もあいまって被害は減るどころか逆に増えている。

この状況を受けて、近年では強風災害における被害連鎖を想定した住宅の脆弱性モデル(破壊確率もしくは被害総額と風速の関係)の構築が行われ、強風のリスク評価・リスクマネジメントを試みる研究が海外で増えている。しかし、強風災害に対するリスク評価の研究は我が国では殆ど行われていないのが現状である。この理由としては設計者の意識の低さが挙げられ、外装材は壊れたら交換すればよいという考えが主流であり、リスク評価の必要性が認識されていない。加えてリスク評価を行う上で必要な対象部材の耐力情報が、日本住宅の部材に対しては非常に少ないことも影響している。

日本住宅を対象とした脆弱性モデルに関する最近の研究としてはZhangら¹⁾が挙げられるが、窓ガラス破壊を支配する疲労の影響が考慮されておらず、屋根構造用合板の破壊に関しては北米の住宅様式に対応した耐力統計情報が用いられている。後者は耐力情報不足によると考えられるが、日本の住宅を対象とした正しい破壊形式を考慮した耐力情報を用

いることで結果の信憑性が向上すると考える。

2. 研究の目的

1で述べた状況より、強風災害において日本の住宅が被る強風被害総額と風速の関係を示す脆弱性モデルを構築することを目的とする。建物被害の中でも住宅は被災戸数が多く、地域あるいは国全体としての被害総額は膨大となるため、特に着目する必要がある。モデル構築においては、被害調査結果に基づき決定した、飛散物の発生から屋根構造部材の破壊に至る被害のシナリオ(強風による飛散物の増加→強風・飛散物による開口部の破壊→建物内圧上昇による大きな風力が屋根面に作用→屋根構造部材の破損)を想定する。強風時の風速と住宅被害総額の関係を提示することで、より具体的な強風災害に対する安全性を有する住宅建設・修繕の促進、これに伴う強風災害時の社会生活断絶の回避、そして老朽化した空き家に伴うリスクの具現化による空き家の解消を促し、強風災害に強い社会環境基盤の整備に貢献する。

3. 研究の方法

本解析を行う為に必要な入力情報は①強風に対する窓ガラス耐力情報、②飛来物に対する窓ガラス耐力情報、③屋根壁接合部耐力情報、④作用する風荷重情報、の4つある。

①に関しては研究代表者の研究グループで実物大破壊実験と数値シミュレーションを用いた算定方法を提案しているためその結果を用いる。②に関しては既往文献調査を行い、耐力情報を取得する。③に関しては日本の住宅で一般的に用いられる材料・金物で作製した実寸大試験体を多数用いて破壊実験を行うことで取得する。④に関しては住宅模型を用いた風洞実験により風圧係数時刻歴を取得する。最終的にはモンテカルロシミュレーション法(MC法)を用い、上記の情報を基に、想定した被害シナリオにおける風速と破壊確率、被害総額の関係性を計算する。

4. 研究成果

(1)強風に対する窓ガラス耐力情報

「窓ガラス」の耐風性能情報取得のため、動的風荷重装置PLAを用いた実物大実験、及び窓ガラスの破壊風圧を予測するシミュレーションを用いて、窓ガラスの耐力評価を行った。実物大実験においては、既往研究においては板ガラスが単純支持された状態を再現したものが多く、一般的に用いられる板ガラス端部はガスケットなどにより弾性支持されているため、これを再現した試験体を用いた。速度の異なる2種類の漸増荷重及び時々刻々と変動する実変動風圧を載荷して行い、ガラスの静的疲労現象を実験的に確認した。その実験結果に基づき、破壊風圧を予測する数値シミュレーションの妥当性検証を行った。

作成した数値シミュレーションを用いて、板ガラス耐風性能に与える板ガラス支持条件、板ガラス面積・厚さ・アスペクト比の影響評価を行った。加えて我が国で用いられている窓ガラスの耐風性能算定式である建設省告示

1458号から計算される耐力値との比較を行った(図2)。その結果、告示値はガラスの耐力を過大評価している可能性が示唆され、特にガラス面積やアスペクト比の変化に対する耐力値への影響は大きいことが明らかとなった。よってこれまでの国内における類似研究では耐風性能値として告示値を用いていたが、本研究では作成した数値シミュレーションから求めた値を用いることにした。

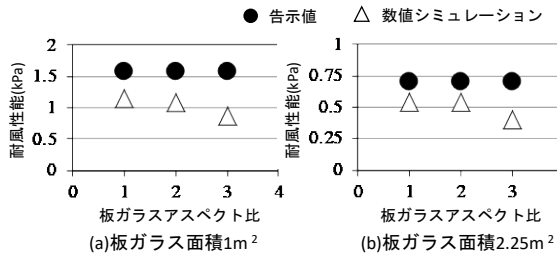


図 2: 窓ガラス耐風性能の数値シミュレーションと告示値の比較

(2) 飛来物に対する窓ガラス耐力情報

既往文献調査の結果、ガラス寸法と衝撃モーメントとの関係で窓ガラス破壊確率を考察することが多く、この破壊確率は実物大窓ガラスを用いた衝撃実験結果に基づいている。しかし対象とされた窓ガラス寸法は限定的であるため、中でも一般住宅に用いられている寸法に近い Master ら²⁾の研究結果を採用し、この窓ガラス寸法を脆弱性モデル作成時に想定する住宅の有する窓ガラス寸法とした。

(3) 屋根壁接合部耐力情報

屋根壁接合部を再現した試験体を用いた耐力算定実験を行った。具体的には垂木と軒桁を金具を用いて作成した接合部を再現した試験体(図3)が破壊するまで、単調引張荷重を載荷した。使用した垂木・軒桁・金具は一般的な住宅建設で用いられているものを想定し、寸法や材種、金物種類を選定した。また既往研究より耐力に影響を及ぼすパラメータとして住宅の屋根勾配と荷重載荷速度を選定し(表1)、試験体数は各20体、各条件間で垂木・軒桁の平均含水率、平均密度が概ね等しくなるように分配した。

最大耐力の統計値を表2に示す。特徴的な結果として、屋根勾配が緩い2.5-2Pにて最も平均最大耐力が高く、載荷速度が速い3.5-10Pにて最もばらつきが小さいという結果が得られた。また、試験体の破壊性状としては、「垂木の割れ(以下、垂木割れ)」、「垂木からの釘の引き抜け(以下、釘引き抜け)」の2種類が確認された。破壊性状が「垂木割れ」の場合は、その最大耐力は木材の割裂強度に左右され、端空き距離 l が重要なパラメータとなることが推察される。また、破壊性状が「釘引き抜け」の場合は、最大耐力は釘の引き抜け強度に依存するものと推察される。最後に屋根勾配と載荷速度の影響を標本コルモゴロフ・スミルノフ検定を用いて各試験パターン間の分布の相違の検証することで確認した。

結果、屋根勾配の違いにより破壊性状が変化し、結果的に耐力にも影響を与えらる。また本試験で用いた載荷速度の範囲内において、載荷速度がある程度速い場合には最大耐力への影響は見られないが、載荷速度が遅い場合には最大耐力に影響を与える可能性があることが分かった。

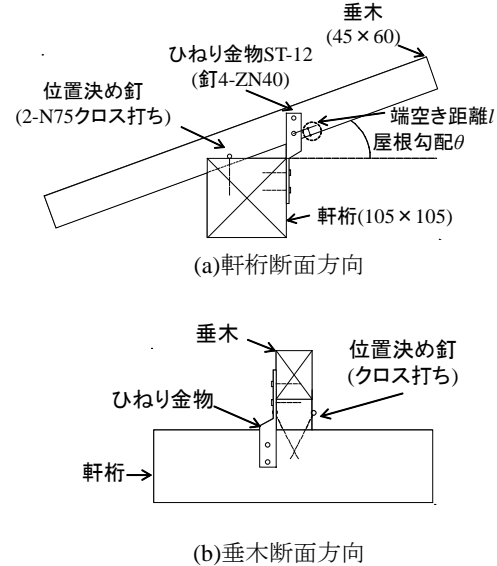


図 3: 試験 A の試験体概要(単位:mm)

表 1: 試験体諸元

試験記号	屋根勾配 θ	載荷速度	端空き距離 l
		(kN/min)	
3.5-2P	3.5 寸(19.3°)	2	14.7
2.5-2P	2.5 寸(14°)		17.7
6-2P	6 寸(31°)		7.4
3.5-5P	3.5 寸(19.3°)	5	14.7
3.5-10P	3.5 寸(19.3°)	10	

表 2: 最大耐力値の統計情報

試験記号	最大耐力 (上:平均、 下:COV)	破壊形式	
		垂木割れ (上:試験体数、下:平均 最大耐力)	釘引き抜け (上:試験体数、下:平均 最大耐力)
3.5-2P	2.94	20 体	該当なし
	0.16	2.94(kN)	該当なし
2.5-2P	3.60	10 体	10 体
	0.14	3.42(kN)	3.79(kN)
6-2P	3.12	20 体	該当なし
	0.17	3.12(kN)	該当なし
3.5-5P	3.40	17 体	3 体
	0.14	3.36(kN)	3.61(kN)
3.5-10P	3.29	19 体	1 体
	0.10	3.28(kN)	3.54(kN)

上述の実験は新品の木材・金具を用いて行ったが、これに加えて取り壊し予定の住宅(築23年)から軒桁-垂木接合部の試験体27体を取り出す機会を得た。屋根勾配は45°であったが、軒桁が屋根勾配に合わせて傾いていたことから、軒桁と垂木は水平に75mmもしく

は90mmの丸釘2本でクロス打ちされて接合されている(それぞれの試験体をo75、o90と称する)。建物から取り出した試験体の試験終了後には、劣化の影響を確認するために、載荷後に大きな割れなどが生じなかった試験体の垂木・軒桁に対し、新品の釘で再度接合することで比較用の試験体を製作した。27体全ての試験体を新しい75mmの釘で作直した試験体をn75、更にn75の試験終了後、27体中12体の試験体を新しい90mmの釘で作直した試験体をn90と称する。

最大耐力の統計値を表3に示す。破壊性状に着目すると、古い釘であるo90、o75においては全てが「釘の引き抜け」で破壊に至っている。これは、垂木端部に打たれる釘が無かったために、木材の割裂破壊に至りにくかったことによるものと考えられる。一方で、新しい釘を使った試験体n75、n90の場合、一部の試験体において垂木の割れが生じている。その要因としては、o75、o90と同じ部材を使って試験体を再加工したことから、一度目の試験の影響が生じたという可能性が考えられる。また、破壊性状の違いによる最大耐力値の大きさに着目すると、n90に関しては破壊性状が「垂木割れ」の場合より、「釘引き抜け」の方が高く、n75に関しては「垂木割れ」の方が「釘引き抜け」の場合よりも若干高い。このような差が生じた要因としては、o75の場合は釘が短いため、「垂木割れ」よりも、「釘引き抜け」が先行し、o90においては釘が長いために「釘の引き抜け」が生じる前に、「垂木割れ」が生じたケースが多かったのではないかと推察される。また、同じ寸法の釘で劣化度の異なるo75とn75、o90とn90を比較すると、75mm、90mmの両方において古い釘を用いた試験体の方が高い耐力を示している。これは、釘表面の錆が影響を及ぼしているものと考えられる。

表3: 最大耐力値の統計情報

試験記号	最大耐力 (上: 平均、 下: COV)	破壊形式	
		垂木割れ	釘引き抜け
		(上: 試験体数、 下: 平均最大耐力)	
o75	2.00	該当なし	5体
	0.16	該当なし	2.00(kN)
o90	2.74	該当なし	22体
	0.24	該当なし	2.91(kN)
n75	1.66	12体	15体
	0.23	1.71(kN)	1.62(kN)
n90	2.24	4体	8体
	0.24	2.15(kN)	2.28(kN)

(4)風荷重情報

建物壁面に開口部がある場合に作用する内圧の性状は今回対象としている被害のシナリオにおいて重要であり、開口部の瞬間的開放に関する既往研究としては、松井³⁾や染川⁴⁾、今野⁵⁾が挙げられる。しかし周辺建物状況の影響や異なる開口部サイズに対する検討は行

われていない。そこで壁面開口を瞬間的に発生できる風洞実験模型を用いて、風速、風向、開口部の開放状態・大きさ及び周辺建物状況が与える建物内圧と内外圧の相関への影響に関して検討を行った。

対象は実寸で10m(B)×10m(D)×5m(H)の陸屋根建物であり、幾何学的縮尺1/100として風洞実験模型を作製した。図4に風洞実験模型の詳細を示す。風洞実験では、風速、開口部の開放状態・大きさ及び周辺建物の状況の条件を変えて測定を行った。開口部の開放状態は開口部を常に開放する「常時開放」、風洞気流が定常状態に達した後、開口部を開放する「瞬間開放」の2つである。開口部の大きさは「開口部1」(30mm×25mm)、「開口部2」(60mm×25mm)の2種類である。周辺建物の状況は住宅街を想定し、データベース⁶⁾を参考に図5に示す建物密集度合 $C_A=0, 0.3, 0.6$ とした。実験風速は10m/sと25.4m/sの2種類である。実験風向は対象とする開口部に正対する方向を $\theta=0^\circ$ とし、時計回りに図4に示す9風向とした。

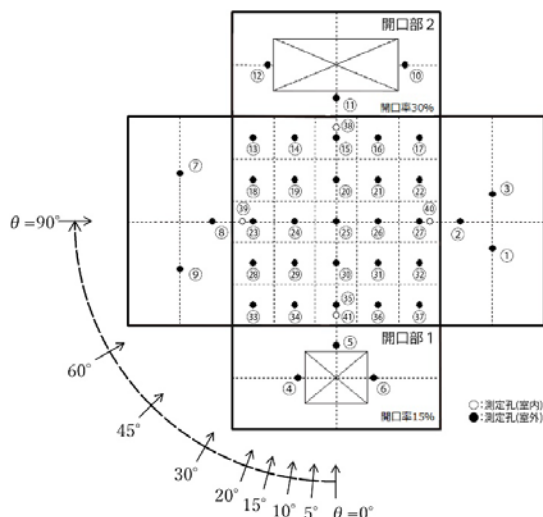


図4: 風洞実験模型と圧力測定孔配置図

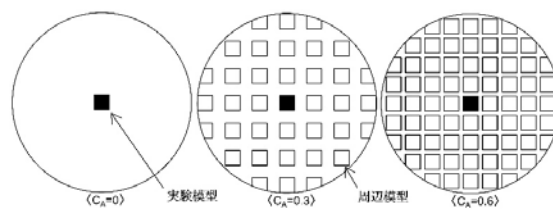


図5: 周辺模型の配置

風速の影響としては、低風速の場合には開口開放直後に顕著な過渡振動(Helmholtz共鳴)を生じ(図6)、非常に大きな内圧が発生するが、高風速時には過渡振動は生じない。これは、風速が速くなることで、外圧変動の大きさがHelmholtz共鳴の大きさに対してより大きくなったことや、減衰効果の増大によって内圧変動の共鳴が抑制されたためと考えられる。低風速の場合の内圧の過渡振動により、開口開放直後には各部位に作用する外圧と合わさり、大きなピーク風力が生じる可能

性がある。しかし住宅のような小規模な建物を対象とした場合には、これらの現象は特に低風速の場合にのみ生じる為、強風災害時には内圧の変動は開口部付近の外圧と同等とみなして良いと考えられる。

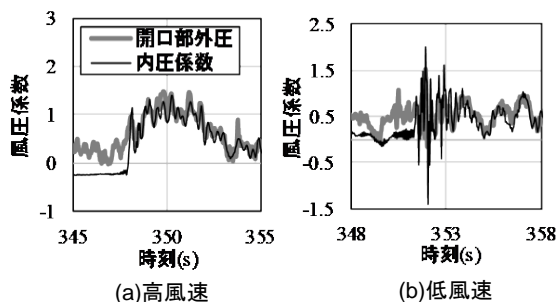


図 6: 開口開放前後の内外圧係数時刻歴の比較

また、開口部の大きさについては、小開口に比べて大開口の場合には内圧変動の周波数帯におけるパワースペクトルのピークが大きく、内圧の過渡振動の大きさや継続時間に影響を与えると考えられる。

内圧と外圧の相関を検討するため、式(1)に示す Kopp⁷⁾ で用いられた計算方法により相関係数 γ を計算した。

$$\gamma = (C_{pi} - C_{pe})_{max} / (C_{pi,max} - C_{pe,min}) \quad (1)$$

ここで、 C_{pi} は内圧係数時刻歴であり、開口部 1、2 ではそれぞれ測定点④、③のデータを用いている。 C_{pe} は荷重負担面積を考慮した屋根面外圧係数時刻歴、 $C_{pi,max}$ 、 $C_{pe,min}$ はそれぞれピーク内圧・外圧係数である。

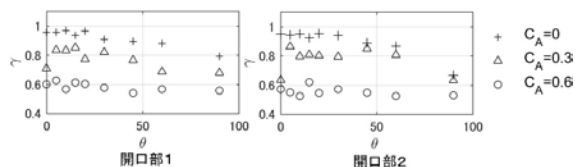


図 7: 相関係数 γ の風向による変化

図 7 によると、開口部の開放状態の違いは γ にあまり影響しない。また同一条件下の γ と最大内圧係数の風向による変化の傾向が似ていることから、外圧係数よりも内圧係数の方が γ に対する影響が大きい。 γ は $\theta=90^\circ$ に近づくにつれ、つまり開口部に正対する位置からずれるにつれて小さくなっており、 γ に対する内圧係数の影響が小さくなっているためであると考えられる。周辺模型の影響はピーク内圧係数と γ に顕著に表れており、 C_A が小さいほど γ の風向による変化も大きい。よって脆弱性モデルを作成する際は、これまでの既往研究とは異なり、周辺建物の状況に応じた内圧係数と相関係数を用いるべきであると考えられる。この具体的な影響評価を行った研究が学会発表[1]である。

(5)脆弱性モデルの作成

(1-4) で得られた窓ガラス及び小屋組の耐力情報、風洞実験で得られた外圧及び開口が瞬間的に発生した場合の内圧の外力風荷重情報を用いた、日本住宅の強風に対する脆弱

性モデルの提案を行った。手順としては、

- ①任意のパワースペクトルを持つ変動風速時刻歴を MC 法により発生させる⁸⁾。
- ②この風速が、様々な立地情報(地表面粗度区分、周辺状況)や建物自体の情報(築年数、窓の数、建物形状)を有する対象住宅に作用すると仮定する。
- ③対象住宅における、想定した被害シナリオを成す部材(屋根瓦、窓ガラス、屋根壁接合部)の耐力とこれに作用する風荷重を MC 法により発生させる(風荷重は変動風速時刻歴と風洞実験から得られた建物屋根形状に応じた内外圧の風圧係数を用いて計算する)。
- ④発生させた耐力と風荷重を比較して各部材の破壊判定を行い、破壊確率を算定する。
- ⑤住宅建設を行う工務店へのヒアリングを基に作成したコストモデルと破壊確率を組み合わせて期待損失額の試算を行う。

である。この算定法を用いて様々なパラメータに対して計算を行い、特に脆弱性に大きな影響があった、窓ガラスの経年劣化の影響と開口部破損による内圧上昇に伴う屋根壁接合部破損への影響に関して図 8 に結果を示す。

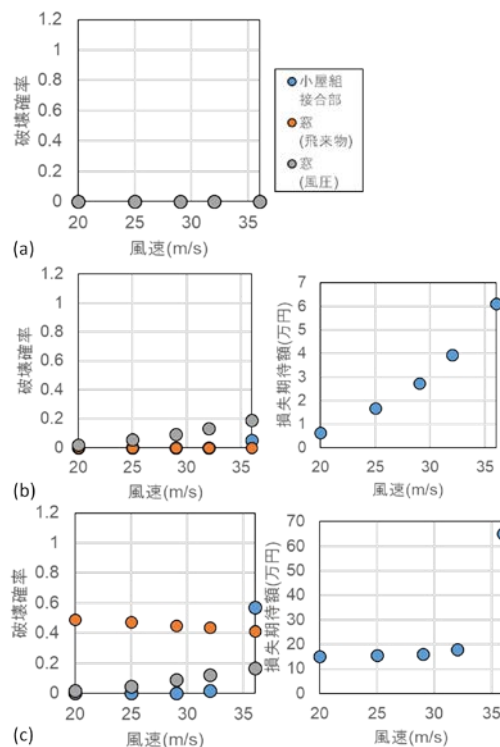


図 8: 脆弱性モデルと期待損失額 (a)基本パターン、(b) (a)+経年劣化した窓ガラス、(c) (b)+飛来物を想定

図 8(a)は田園地帯に建つ、屋根勾配 20 度の切妻屋根と 0.61m x 0.61m x 3mm の単層板ガラスの窓を有する、建物寸法 10[m] x 10[m] x 5[m] の建物を想定した場合の、風圧と飛来物による窓ガラスと屋根壁接合部の破壊確率と風速の関係を示したものである。全く破壊は起きていない。次に図 8 (b)は(a)の状況において新品の窓ガラスではなく、設置後 10 年経った窓ガラスを想定した場合の

結果である。経年劣化に伴い、窓ガラスの耐力が低下したことで、窓ガラス破損が高風速で発生している。次に図 8 (c)は(b)の状況に加えて、周囲に飛来物の要因となる破損された部材が存在している状況を想定しており、飛来物による窓ガラスが増加し、それに伴い建物内圧が上昇、屋根面に作用する風力が増大することで屋根壁接合部の破損を引き起こしたことがわかる。屋根壁接合部が破損をすると窓ガラスのみが破損した場合に比べて損失期待値が大きく増加していることもわかる。本研究において、これまで紹介されてきたモデルに比べて、より多くの建物情報を想定し、そしてより正確な建物部材統計情報を利用した日本住宅の強風に対する脆弱性モデルを作成することができた。しかし、未だに改善の余地は多々あり、今後もより精度と実用性の高い脆弱性モデルを構築するために、研究を進めるつもりである。

参考文献

- 1) Zhang, S. et al. (2014). Reliability-based modeling of typhoon induced wind vulnerability for residential buildings in Japan. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 124, 68-81.
 - 2) Masters, F. J. et al. (2010). The vulnerability of residential window glass to lightweight windborne debris. *Eng. Struct.*, 32(4), 911-921.
 - 3) 松井ら. (2005) 強風時の建物内圧の非定常性に関する風洞実験、理論応用力学会講演会講演論文集、54(0), 99-200.
 - 4) 染川ら. (2008) 内圧のオーバーシュートを考慮した外装材設計用風荷重、日本建築学会構造系論文集、73(628), 867-873.
 - 5) 今野ら. (2016) 強風災害時の建物破壊過程を考慮したリスク評価手法の開発 (その1) 瞬間的に開放可能な開口を持つ模型を用いた風洞実験、2016年度日本建築学会大会 (九州) 学術講演梗概集、181-182.
 - 6) 東京工芸大学風工学研究センターホームページ、http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/groupwise/mainpage.html
 - 7) Kopp, G.A. et al. (2008). Wind-induced internal pressures in houses, *J. Struct. Eng.*, 134(7), 1129-1138.
 - 8) 星谷勝(1974). 確率論手法による振動解析、鹿島出版会.
5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕 (計 2 件)
1. 吉田早智子、今野大輔、ガヴァンスキ江梨、植松康(2017). “積雪寒冷地における木造住宅の強風被害予測モデルに関する研究”、日本風工学会論文集 42、 3、 89-99.
 2. 今野大輔、ガヴァンスキ江梨、植松康(2017). “窓ガラスの耐風性能に対するガラスの支持条件と形状の影響に関する研究”、日本風工学会論文集 42、 3、 100-112.
- 〔学会発表〕 (計 7 件)
1. Gavanski, E., Konno, D., Uematsu, Y. (2018). “Surrounding effect on internal wind pressure and correlation between external-internal pressures on low-rise buildings.” International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation, Sendai.
 2. 今野大輔、植松康、ガヴァンスキ江梨 (2017). “瞬間的な開口発生時の室内圧変化に及ぼす開口面積と風速の影響”. 平成 29 年度東北地域災害科学研究集會、青森.
 3. 今野大輔、植松康、ガヴァンスキ江梨(2017). “強風災害時の建物破壊過程を考慮したリスク評価手法の開発 その2 瞬間的な開口開放時の内圧上昇に及ぼす開口面積と風速の影響” 日本建築学会大会講演梗概集 (中国)、構造I、20067、広島工業大学.
 4. 今野大輔、吉田早智子、ガヴァンスキ江梨、植松康(2016). “木造住宅の垂木一軒桁接合部の耐風性能算定と経年劣化の影響” 第 24 回風工学シンポジウム、東京.
 5. 今野大輔、植松康、ガヴァンスキ江梨(2016). “強風災害時の建物破壊過程を考慮したリスク評価手法の開発 その1 瞬間的に開放可能な開口を持つ模型を用いた風洞実験” 日本建築学会大会講演梗概集 (九州)、構造I、20091、福岡大学.
 6. 吉田早智子、今野大輔、ガヴァンスキ江梨、植松康(2016). “積雪寒冷地における木造住宅の小屋組接合部耐力試験に基づく強風被害予測に関する研究” 日本建築学会大会講演梗概集 (九州)、構造I、20106、福岡大学.
 7. Konno, D., Gavanski, E., Uematsu, Y. (2015). “Study on load resistance of elastically-supported window glass.” 14th Int. Conf. on Wind. Eng., Porto Alegre, Brazil.
- 〔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 (ERI GAVANSKI)
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00608791
(2)研究協力者
植松 康 (YASUSHI UEMATSU)
東北大学・大学院工学研究科・教授