

伝統的木造町家建築の地震被害と構造性能評価

Damage from Earthquake Disaster and Evaluation of Structural Performance
of Traditional Timber Townhouse in Japan

佐藤弘美¹・藤田香織²

Hiromi Sato and Kaori Fujita

¹徳島大学助教 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

Assistant Professor, the University of Tokushima, Department of Ecosystem Design

²東京大学准教授 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Associate Professor, The University of Tokyo, Department of Architecture

This paper presents the results of the damage investigation and the evaluation of structural performance of traditional timber townhouse in Japan. The aim of this research is to clarify the failure mode of traditional timber townhouse based on the results of damage investigation after earthquakes. Damage investigation, seismic diagnosis and earthquake response analysis were performed on a traditional townhouse in Wajima City, which was severely damaged by the 2007 Noto Peninsula earthquake. The results of the damage investigation is discussed in relation with the results of seismic diagnosis and earthquake response analysis operated on the specific structure after the earthquake.

Key Words : *traditional timber construction, failure mode, seismic diagnosis, the 2007 Noto Peninsula Earthquake*

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

平成19年3月25日に発生した能登半島地震の被害調査において、伝統的な町家建築に多くの被害が見られた。伝統的な木造建築には歴史的、構法的にも価値があり後世に残すべき建築物が多く存在するが、一方でそれらの伝統的木造建築は現在求められる耐震基準を満たさないものも多い。このことは近年各地で発生している大地震の被害、特に1995年兵庫県南部地震の際に被害が多かったことから指摘されており、古い構法で建てられた木造住宅の構造性能の評価とそれに伴う補強等対策は危急の課題である。伝統的木造住宅の中で農家建築においては実験を伴う様々な研究が行われ構造性能評価がされてきたが、町家建築については、「京町家」以外の一般的な町家については未だ十分構造性能が検証されているとはいえないのが現状である。歴史都市を構成する一要素である伝統的町家建築について構造性能が適切に評価されることは、非常に重要な課題と考えられる。本論文では伝統的木造住宅のうち、一般的な町家建築を対象とし、地震被害調査結果に基づいて破壊モードの分類を行い、構造性能評価の検証を行うことを目的とする。

(2) 既往の研究

伝統的木造住宅に関する研究は、農家型の住宅を対象とした研究は1984年に杉山らによって行われた実大建物実験¹⁾をはじめとして数多くの研究が行われている。一方町家型の住宅を対象とした研究は、町家の中でも特徴的である京町家に関する研究が多く、それ以外の一般的な町家建築に関する研究は少ない。京町家を対象とした研究では、2005年にE-ディフェンスの3次元振動台実験を用いた実大振動台実験が鈴木らによって行われている²⁾。振動性状に関する評価について林、鈴木らによって研究が行われており、京町家のみ

を対象とした簡易なベースシア係数の算出式が提案されている³⁾。耐震性能評価、補強設計手法としては、鈴木らによって限界耐力計算による耐震補強設計の方針が提案されている⁴⁾。京町家の耐震要素として重要である土壁の性能評価については、近年では小松らの研究が挙げられる⁵⁾。現在、町家建築の構造性能評価、検証に関しては京町家を対象としたものが中心であり、それ以外の特徴を持つ町家建築については構造性能評価、検証が十分行われてきていない。本研究では京町家ではない伝統的町家建築を対象とし、地震被害調査結果を基に破壊モードを分類し、構造性能評価、耐震診断の精度の向上につながる基礎的な資料となることを目指す。

2. 伝統的町家建築の地震被害

(1) 2007年能登半島地震による町家の被害

a) 2007年能登半島地震の概要

平成19年3月25日9時42分頃、能登半島沖（北緯37度13.2分、東経136度41.1分）の深さ11kmを震源とするマグニチュード6.9の地震が発生した。石川県七尾市、輪島市、穴水町で震度6強、石川県志賀町、中能登町、能登町で震度6弱を観測した⁶⁾。本地震による人的被害は、死者1名、負傷者356名であり、建物被害は住家については全壊684棟、半壊1733棟、一部損壊26935棟であった（2007年12月28日14:00現在）⁷⁾。

b) 伝統的木造建築の地震被害傾向

本地震による建物被害の例を示す。石川県は輪島市、七尾市を中心に伝統的町家建築、土蔵が多く存在し古い町並みを残しているが、これらの伝統的な建築物に多くの被害が見られた⁸⁾、⁹⁾（図1）。特に輪島市に被害が集中し、全壊被害の7割が輪島市の被害である。

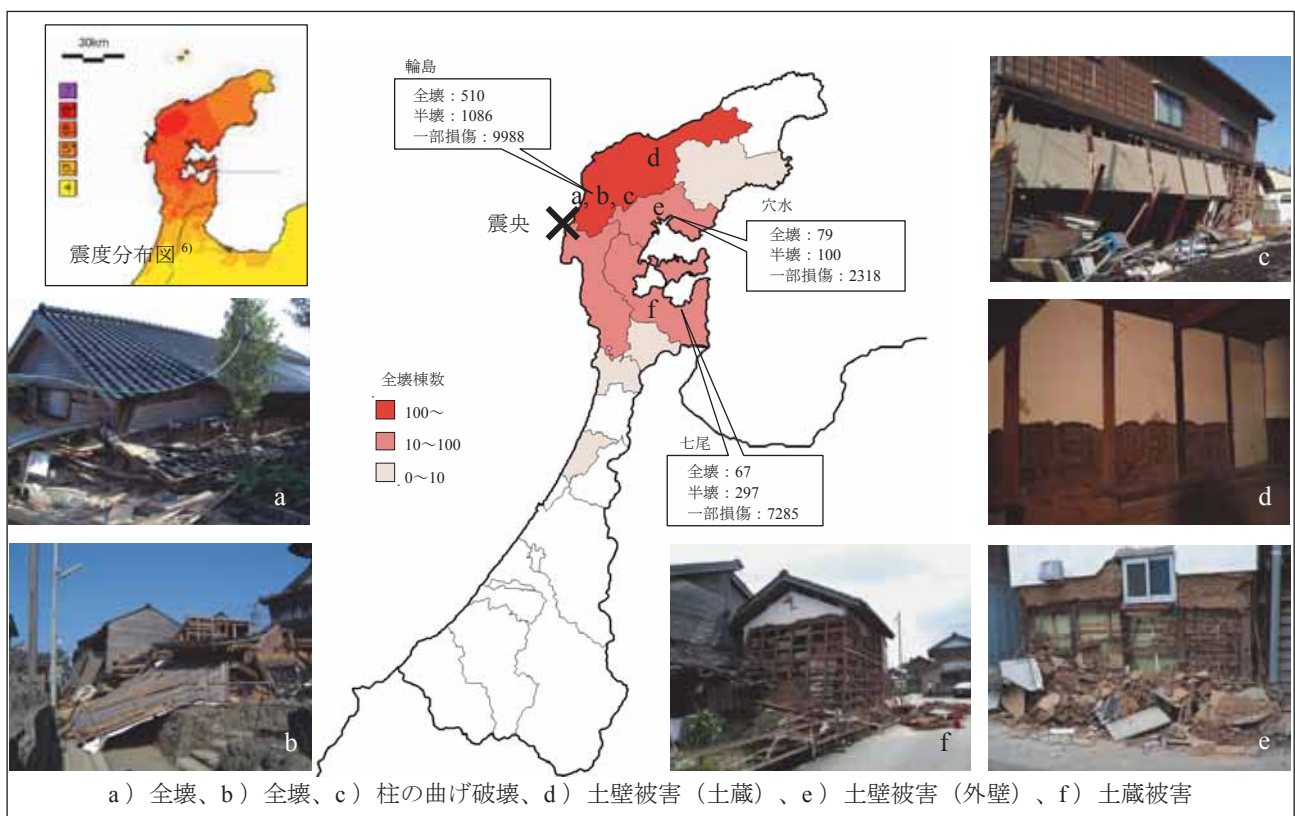


図1 2007年能登半島地震による伝統的木造建築被害の概要

c) 個別被害 FK邸

2007年能登半島地震では木造住宅に多くの被害が見られた。輪島市市内では伝統的な町家と土蔵が多く被災しており、地震被害詳細調査を実施した伝統的町家FK邸について被害状況の検証を行った。



写真1 FK邸外観（西面）

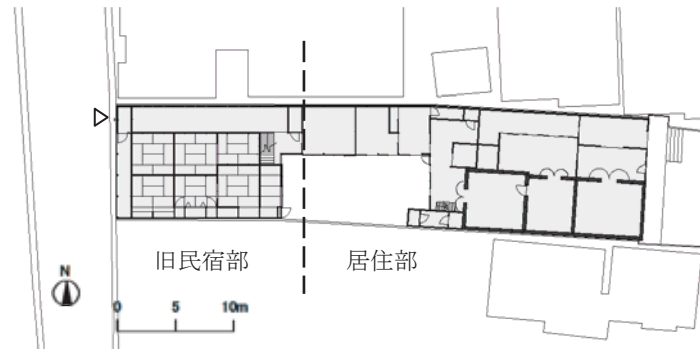


図2 FK邸 配置図

対象としたFK邸は、河原田川西側の古い町並みを残す街区に立地し、2007年能登半島地震では大規模半壊の被害を受けた。部分二階建て、瓦屋根の木造軸組構法の住宅であり、築約100年の旧民宿部と、居住部からなる（写真1、図2）。

2007年能登半島地震による被害概要を示す。主な被害は土壁（全面壁・垂れ壁）のひび、剥落、横架材接合部に破損が認められた（写真2）。柱の残留変形角は最大 $1/22\text{rad}$. (NS方向)、 $1/28\text{rad}$. (EW方向)が認められ、全体としては1階約 $1/30\text{rad}$.、2階約 $1/100\text{rad}$.の残留変形角が見られた（図3）。残留変形角から、1階Y2-Y4構面、2階Y6-Y8構面に建物のねじれが見られた。1階において、建物のねじれが生じたことから、通り庭（土間）との接合部（X1Y4、X2Y4）に破損が生じたと考えられる。2階吹き抜け部分の下で柱の変形が進んでおり接合部に損傷が認められた。腐朽が見られた柱脚（X2Y4）は潰れて沈下が見られた。

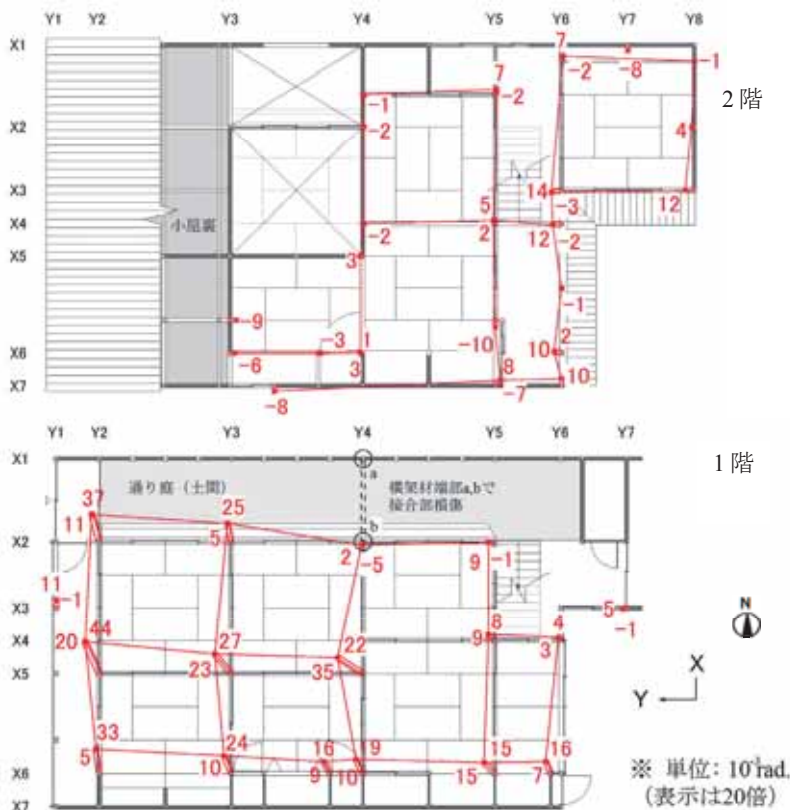


図3 柱の残留変形角と被害概要



写真2 被害部位の様子

(2) 既往の研究による伝統的木造建築の地震被害傾向

過去の地震被害調査の結果について文献調査を行った。下記にその概要を示す。

北原、鈴木らによる2000年鳥取県西部地震における被害調査の結果から、町家風建物の典型的な被害例として1階部分の剛性不足による1階の大変形が挙げられている¹⁰⁾。内部の被害状況としては、柱・建具等が傾斜・破損しており、特に開口部の多い方向に被害が偏っていた。倒壊は免れ、最大残留変形角約 $1/10\sim 1/7$

rad.に達した建物が多くみられた。槌本らによる2007年能登半島地震による被害状況では、開口の多い1階部分などに被害が見られた¹¹⁾。最大残留変形角は1/10 rad.を超えているものも多くみられた。土台にずれの生じた建物が2件報告されている。同じく2007年能登半島地震による地震被害において、清水、林らによる報告で比較的被害の小さかった伝統的木造建物を対象に詳細調査が行われており、耐震性能との関係について報告されている¹²⁾。被害が小さい建物では、主要な被害は土壁に生じるひびがほとんどであった。

(3) 破壊モード

地震被害調査結果などから以下の破壊モードが確認された(表1)。

地震被害の多くは1階の剛性不足が要因となっているが、それ以外の要因によって被害の拡大が生じていると考えられる。町家建築の特徴である通り庭(土間)や吹き抜けが設けられることで、水平構面の剛性が均一に確保されていないことが特徴として挙げられ、そのことは接合部の破損など脆性的な破壊モードにつながると考えられる。また、残留変形角が1/10 rad.前後と非常に大きいにも関わらず倒壊に至らない住宅が多く存在した。

表1 伝統的町家建築の破壊モード

要因	被害概要
1階剛性不足	傾斜(内部:土壁被害、柱の曲げ破壊、垂れ壁付き独立柱の被害)
横架材の引き抜き(接合部性能)	垂れ壁の被害
ねじれ(水平構面)	接合部の損傷
吹き抜け空間(水平構面)	吹き抜け下の柱被害

3. 伝統的町家建築の構造性能評価

(1) 耐震診断によるFK邸の評価

一般診断法¹³⁾を用いてFK邸の耐震性能の評価を行った(図4)。

耐震診断(上部構造評点)の結果は、壁の少ない1階NS方向で0.3以下となり、倒壊する可能性が高いという結果を示した(表2)。その他の評点は0.7前後であった。一方、実際の地震被害では大規模半壊となったものの倒壊は免れた。被害の集中した1階ではNS、EW方向ともに残留変形に大きな差はなく、方向による被害の差はあまり認められなかった。耐震診断で得られた結果と実際の被害に差が認められた。

表2 耐震診断結果(上部構造)

階	方向	上部構造評点
1階	NS	0.28
	EW	0.67
2階	NS	0.74
	EW	0.78

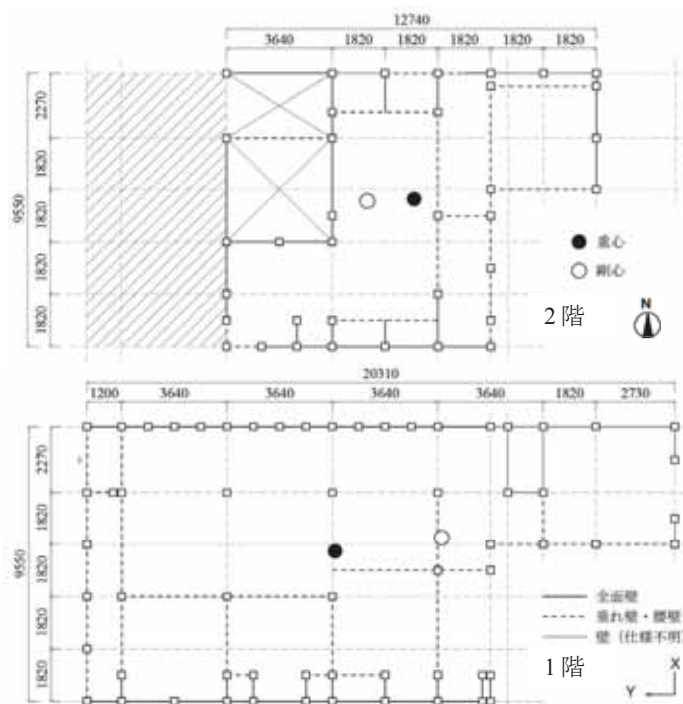


図4 FK邸平面図

(2) 地震応答解析によるFK邸の評価

a) 解析モデル・入力地震波について

全面土壁、垂れ壁付き独立柱を耐力要素とみなして、各階の荷重-変形関係の推定を行った¹⁴⁾、¹⁵⁾。最大

耐力は1階のNS方向33kN、EW方向197kNとなり、方向により大きく差が生じた。得られた荷重 - 変形関係をもとに、解析モデルの各層の剛性を決定した。解析モデルはせん断質点系モデルとし、P- Δ 効果は考慮せずに解析を行った（表3、図5）。

入力波は、対象としたFK邸から約500mに位置するJMA輪島市鳳至町で観測された地震波を用いた。観測された最大加速度は464galであった。解析手法にはNewmark β 法（ $\beta=1/6$ ）を用い、減衰モデルは初期剛性比例型（ $h=0.05$ ）とした。

b) 解析結果

地震応答解析の結果を以下に示す（図6）。NS方向では1階が最大約600mmに到達し、残留変形角約1/9 rad. という結果が得られた。2階はほとんど変形していない。EW方向では1階が最大約125mm、2階が約50mm変形し、残留変形角約1/90 rad.であった。

地震被害調査の結果から得られた1階残留変形角は、方向による差は少なく約1/30 rad.であった。本解析では、全面土壁のほかに、垂れ壁付き独立柱（接合部性能考慮）を耐力要素として評価しているが、実際の地震被害とは異なる結果となった。このことから、各要素の耐力要素を評価するだけでなく、通り庭（土間）や吹き抜けを有するというような、町家建築特有の構造的な特徴を評価する必要があると考えられる。

表3 解析モデルパラメタ

方向	階	重量 (kN)	高さ (mm)	初期剛性 (kN/mm)
NS	1	170	2750	1.07
	2	287	2400	6.14
EW	1	170	2750	7.81
	2	287	2400	6.26

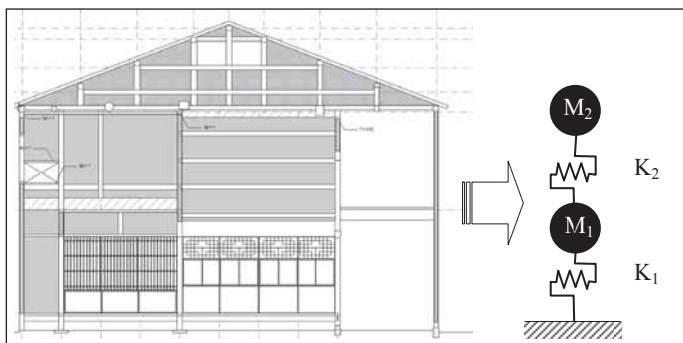


図5 解析モデル置換

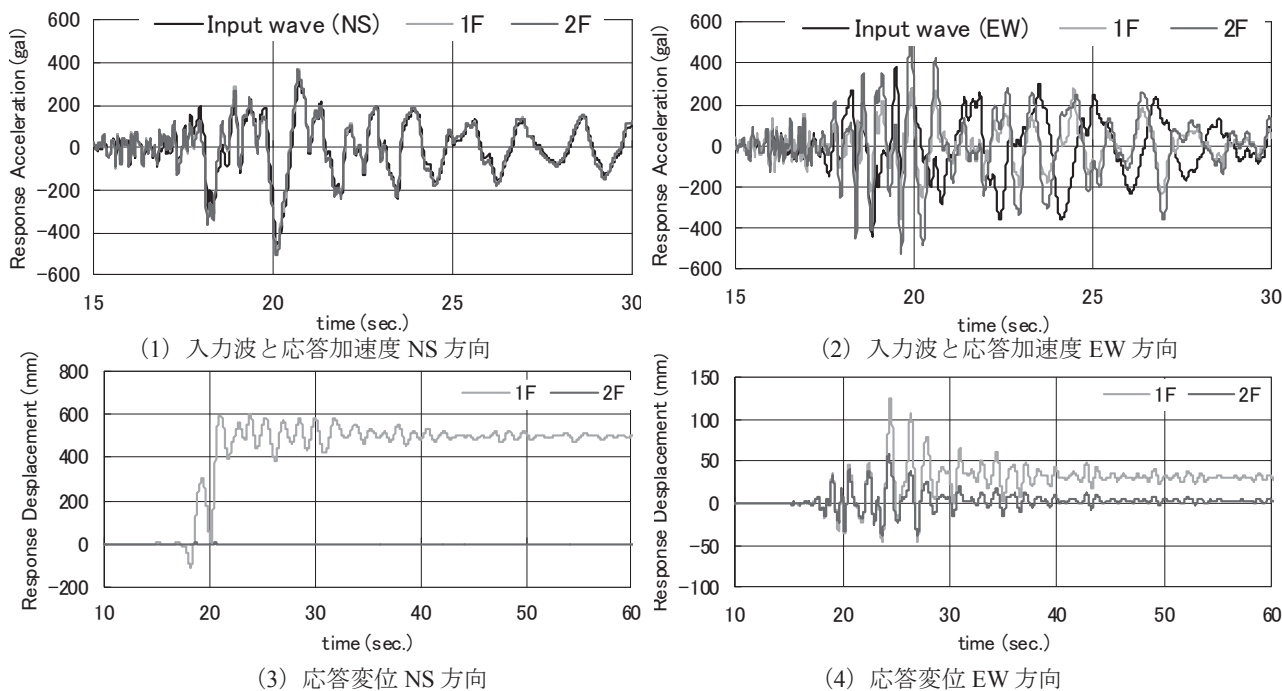


図6 時刻歴応答解析 解析結果

(3) 評価方法に関する考察

本研究で行った耐震診断、地震応答解析による評価はいずれも土壁、垂れ壁付き独立柱を耐力要素としての評価方法である。町家建築の地震被害によく見られる破壊モードのうち1階の剛性不足による被害は比較

的評価できていると考えられる。また、横架材の引き抜きによる垂れ壁付き独立柱の被害は、垂れ壁付き独立柱の評価時に横架材接合部の性能を付加することで評価可能となる。しかし、ねじれや吹き抜け空間などの水平構面に問題が起因する破壊モードについては考慮できておらず、評価結果と実際の地震被害と異なる点が多い。多くの町家建築にはこれらの要因となる通り庭（土間）や吹き抜けが設けられており、町家建築の構造性能を的確に評価するためには、吹き抜け部や水平構面の評価が重要であると考えられる。水平構面の性能を踏まえ、建物全体としての構造特性を考慮した簡易な評価手法を構築する必要がある。

4. 結論

本研究では、地震被害調査結果に基づいて伝統的木造町家建築について破壊モードの把握と構造性能評価を行った。

- 1) 伝統的木造町家建築の破壊モードは、1階の剛性不足による被害が多い。そのほかの破壊モードとして、横架材引き抜きによる垂れ壁の被害、ねじれによる接合部被害、吹き抜け部の柱被害というような、接合部性能、水平構面に起因する破壊モードが確認された。
- 2) 現在用いられる耐震診断などの構造性能評価手法は、剛性不足による破壊モードについては評価することが可能である。しかし、町家特有の水平構面に起因する破壊モードについては、水平構面に関する要素を考慮できていないため実際の地震被害を評価、検証することは困難である。

今後は、地震被害調査結果を元に、町家建築特有の通り庭（土間）や吹き抜けなどの水平構面に関する評価を取り入れて構造性能評価を行えるよう、評価手法の検討、構築が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたって地震被害調査にご協力いただいた古窪様、萩野紀一郎氏（萩野アトリエ）、松田昌洋氏（東洋大学）、千葉一樹氏（東京理科大学）、東京大学藤田研究室、首都大学東京藤田研究室の皆様へ謝意を示します。

参考文献

- 1) 杉山英男ほか：江戸時代に建築された農家の水平加力試験の結果，日本建築学会構造系論文報告集，No. 360，pp.23-30，1986.2
- 2) 伝統構法木造建物振動台実験研究会：伝統構法木造建物の耐震性を検証する，2007
- 3) 新居藍子，鈴木祥之ほか：常時微動計測から推定される京町家の振動性状，日本建築学会構造系論文集，No. 613，pp. 43-50，2007.3
- 4) 須田達，鈴木祥之ほか：京町家の耐震性能評価と耐震補強設計法，日本建築学会構造系論文集，No. 616，pp.149-156，2007.6
- 5) 田淵敦士，小松幸平ほか：京町家型土壁の水平せん断性能，日本建築学会構造系論文集，No. 605，pp.143-150，2006.7
- 6) 気象庁，災害時地震・津波速報 平成19年(2007年)能登半島地震，http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2007_03_25_noto/saigai.pdf，2007年4月
- 7) 消防庁，平成19年(2007年)能登半島地震（第4報），2007.12
- 8) Hiromi. S., Yoshinari. S. and Kaori. F.: Study on the Structural Performance of Traditional Timber Townhouse in Japan based on the Disaster of the Noto Hanto Earthquake in 2007, *2008 World Conference on Timber Engineering*, June 2008, CDR
- 9) 藤田香織ほか：2007年能登半島地震の被害調査 伝統的木造建築の地震被害，建築防災，pp.38-43，2007.8
- 10) 北原昭男，鈴木祥之ほか：2000年鳥取西部地震における木造建物の構造特性と被害，日本建築学会構造系論文集，No. 561，pp. 161-167，2002.11
- 11) 榎本敬大ほか：平成19年能登半島地震による木造建築物の被害状況，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp. 5-6，2007
- 12) 清水秀丸，林康裕ほか：2007年能登半島地震における被災木造建物の耐震性能と地域特性の評価，日本建築学会構造系論文集，Vol. 73，No. 631，pp.1503-1510，2008.9
- 13) 国土交通省住宅局建築指導課：木造住宅の耐震診断と補強方法 木造住宅の耐震精密診断と補強方法（改訂版），財団法人日本建築防災協会，2004.7
- 14) 河合直人ほか：伝統的木造建築物の振動特性 その9，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.145-146，2000.9
- 15) 佐藤弘美，坂本功ほか：現地実験による伝統的木造住宅の構造性能に関する研究 山口県の農家を対象とした静的水平加力実験，日本建築学会構造系論文集，No. 602，pp.187-194，2006.4