

# 長野県北部地震で被災した伝統的木造軸組構法家屋の 3次元地震応答解析

3D Earthquake Response Analysis for Damaged Traditional Wooden Houses of Nagano-ken  
Northern Earthquake

村田 晶<sup>1</sup>・大門功昌<sup>2</sup>・宮島昌克<sup>3</sup>・池本敏和<sup>4</sup>

Akira Murata, Kosuke Daimon, Masakatsu Miyajima and Toshikazu Ikemoto

<sup>1</sup>金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Asistant Professor, School of Environmental Design, Kanazawa University

<sup>2</sup>技師 富山県土木部建築住宅課(〒930-8501 富山市新総曲輪 1-7)

Building and Housing Division, Public Works Deperment, Toyama Prefecture

<sup>3</sup>金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Professor, School of Environmental Design, Kanazawa University

<sup>3</sup>金沢大学講師 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Associate Professor, School of Environmental Design, Kanazawa University

In this study, seismic response analysis is conducted by the three-dimensional model considering the aseismic element for the traditional wooden house by Naganoken Northern Earthquake. It is considered the characteristics of traditional joint, earth wall and horizontal diaphragm stiffness, etc. It aims at acquiring the validity of damage presumption of the tradition wooden house in this earthquake from this analytical result.

**Keywords :** traditional wooden house, 3-D earthquake response analysis, Nagano-ken Northern Earthquake

## 1. はじめに

日本には現在多くの伝統木造建築が残されている。伝統木造建築とは釘や金物を利用せずに木組みで部材を結合し組み立てられたものであり、貫のめり込みや土壁の破壊により揺れを受け流す構造をしている。このような伝統構法の建築物は1981年の新耐震基準が定められる以前に建てられたものであり、その耐震性が不安視されている。1995年の兵庫県南部地震、2007年の能登半島地震においても被害を受けた多くの家屋はこの基準を満たしていないとされている。本研究の対象とする2011年の長野県北部地震においても、既往の地震被害と同様であると考えられる。このような背景から新耐震基準において、限界耐力法などが用いられるようになり、家屋の壁量が重視されるようになった。その結果、一般的に壁量の少ない伝統木造建築は、設計法の観点から建てるのが難しくなっている。よって、古くから存在する日本独自の伝統建築の技術・文化がすたれてしまうことが懸念される。そのようなことは避けるべく、伝統木造建築の耐震性能の評価、また、適切な補強などを示す必要がある。

伝統木造建築の耐震性評価に関する研究は古くから始まり<sup>例え(1)、2)</sup>、これら研究で、貫、柱、組物といった各要素を考慮した耐震性能は明らかになってきている。しかしながら、架構全体での耐震性能や伝統木造構法の一般家屋(町屋、農家など)を評価した研究はまだ少なく、これらの要素が組み合わさった架

構全体の耐震性能は十分に明らかになっているとは言えない。

そこで本研究では、過去に行われた実大震動台実験によって明らかにされた耐力性能をもとにして、長野県北部地震で被災した家屋を対象に柱梁接合部、柱貫接合部、柱の傾斜、土壁、板壁等の各種壁の復元力特性、水平構面を考慮した3次元モデルで地震応答解析を行い、被災時の実測値と解析値の整合性を図りながら、伝統木造建築の地震時挙動を解析上で再現し、解析での被害推定の妥当性を得ることを目的とする。

## 2. 耐震要素を考慮した3次元地震応答解析

本研究では3次元フレームモデルを用い解析を行う。解析には、フリーソフトであるWallstat<sup>3)</sup>を使用する。対象とする住宅は長野県北部地震で被災した家屋のうち、平面図の記帳を許可していただいた4棟の家屋とする。4棟の家屋は栄村森地区、青倉地区、横倉地区にある。それぞれの家屋は被害状況が異なり、一階の変位が大きく、床の損傷が大きい家屋（横倉地区）と、二階の損傷が大きい家屋、一階の残留変位が大きく出ても倒壊しなかった家屋（以上青倉地区）、豪雪地帯特有の基礎部分にコンクリート造の車庫が存在する家屋（一部損壊判定；森地区）である。森地区の家屋は築30年弱の新耐震設計基準で建てられているが、残り3棟は築30年を大きく超える建物である。本稿では図1に示す、一階の変位が大きく、床の損傷が大きい家屋（築40年以上）を対象とした解析について報告する。

ここで解析を行うにあたり、伝統構法の特徴をモデルに設定する。軸組は折損を考慮するために、弾塑性回転バネ+弾性梁要素でモデル化を行う。減衰については粘性減衰を適用し、瞬間剛性比例型の減衰定数

0.02と設定するが、下り勾配では非元帥となるよう設定する。なお、個別要素法では粘性減衰は全体マトリックスではなく、要素剛性マトリックスで与えられる。復元力特性は、図2に示す履歴則<sup>4)</sup>を用いる。部材の曲げ強度については既往研究により設定し、断面係数に従い最大曲げモーメントを決定する。図3に示す骨格曲線の曲げモーメントがゼロに達すると、部材が折損したとみなし、部材間の回転バネをピン結合に変更する。このように設定することで、通し柱の折損や、垂れ壁がついた柱の横架材接合部での折損現象を解析で表現することができると考えられる。軸組間の接合部は図4、図5に示す回転バネ+弾塑性バネ（せん断に対しては剛）特性を用いる。圧縮引張の弾塑性バネの履歴特性は片側弾性+片側スリップ型である。バネは強軸、弱軸の各方向に独立して作用するようになっている。鉛直構面は、トラスバネでブレース置換することでせん断力のモデル化を行う。履歴特性はバイリニア+スリップ型履歴則を用いる。水平構面も鉛直構面と同様にトラス要素でブレース置換することでモデル化し、履歴特性も同様にバイリニア+スリップ型履歴則を用いる。なお、床材のパラメータとしては半剛床の値を用いる<sup>4)</sup>。以上より定義した骨格曲線に

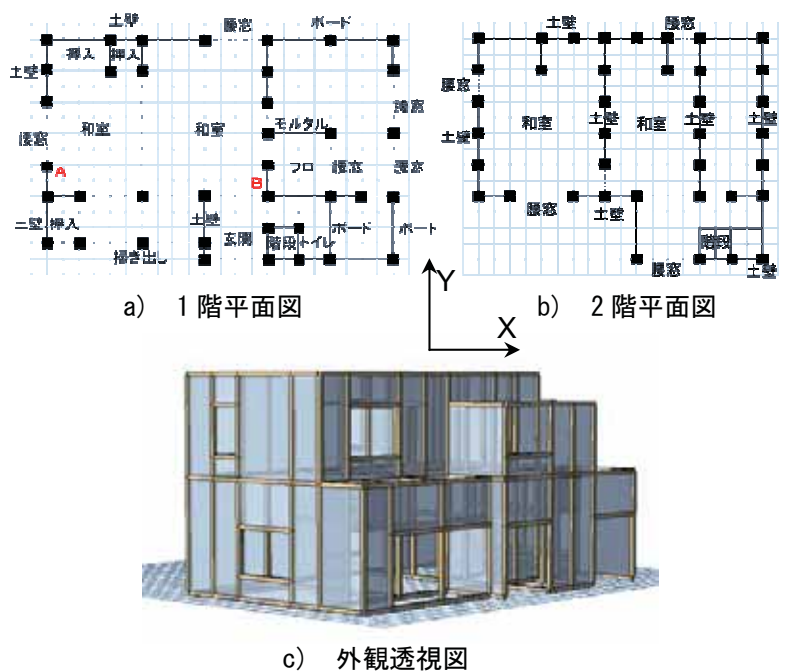


図1 被災家屋の概要図

表1 住宅の簡易重量表(床面積当たり、kN/m<sup>2</sup>)

	屋根	外壁	内壁	床	載積荷重	仕様の例
軽い建物	0.95	0.75	0.2	0.6	0.6	屋根:屋根スレート葺、外壁:ラスモルタル塗、内壁:石膏ボード張り
重い建物	1.3	1.2	0.2	0.6	0.6	屋根:棧瓦葺、外壁:土塗り壁、内壁:石膏ボード張り
非常に重い建物	2.4	1.2	0.45	0.6	0.6	屋根:土葺き瓦葺、外壁:土塗り壁、内壁:土塗り壁

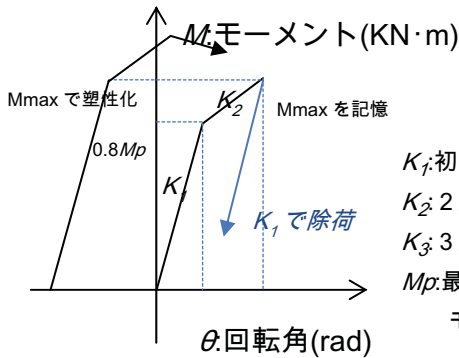


図2 軸組の復元力特性

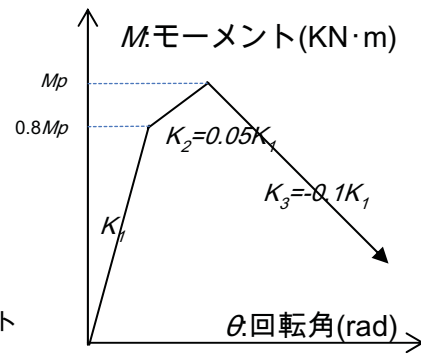


図3 軸組の骨格曲線

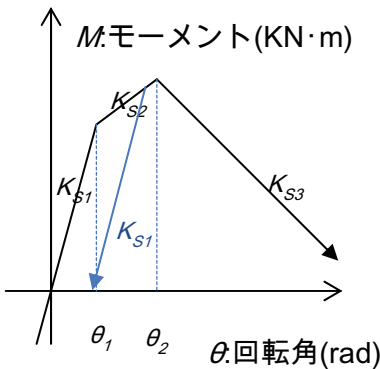


図4 接合部の回転バネ復元力特性

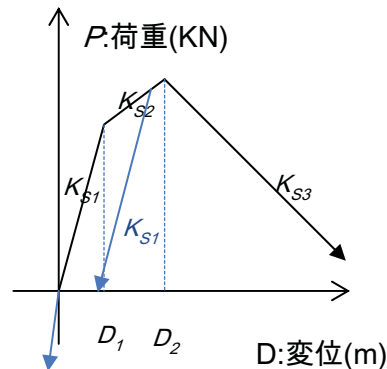


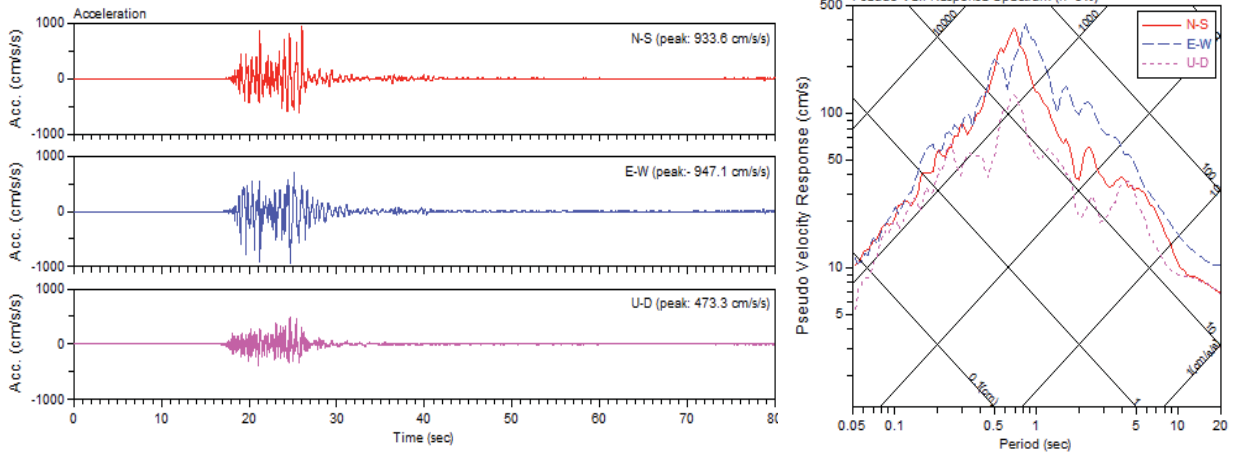
図5 接合部の弾塑性バネ復元力特性

ついて、それぞれのパラメータ値は文献<sup>5, 6)</sup>の実験結果を参考に設定する。なお、軸組間接合部のモデル化に関し、仕口の種類や寸法が剛性に大きく影響を与えるが、詳細な悉皆調査を実施できていないことから、本研究では文献<sup>6)</sup>の長ほぞ+込栓接合部の実験結果を参照している。屋根のモデル化は、現地調査時に屋根内部の構造を図面として記帳しきれなかったことと、地震時の倒壊に関する要素として屋根は質量としての影響は大きいものの、耐力面としては重要視する必要がないと考えられるため、今回のモデル化の際には質量のみを考慮する。ここで、質量計算には、表1に示す簡易重量表<sup>7)</sup>の非常に重い建物を用いる。地盤接合部のモデル化については、本来、伝統木造構造物では、基礎との境界は完全に剛接合になっていないことから摩擦を考慮することが求められている。しかし、今回のモデル化に際しては、実際に調査を行った家屋では剛接合になっていない家屋が少なかったために、剛接合と仮定する。部材であるスギのヤング係数は建築学会木質構造設計規準<sup>8)</sup>の値を用い、 $7.0 \times 10^6$  (kN/m<sup>2</sup>)とする。長野県北部地震の地震波は、最大の計測震度を観測した、東京大学が運営している首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)<sup>9)</sup>の栄村本震観測波形(SK-net栄村)を用いる。図6にSK-net栄村の強震記録を示す。加速度記録を見ると、最大加速度はNS方向、933.6gal、EW方向947.1galである。減衰を5%とした速度応答スペクトルを見ると、図に示すようにN-S成分は卓越周期0.69秒で359.3cm/s、E-W成分は卓越周期0.84秒で375.3cm/s、U-D成分は卓越周期0.69秒で131.9cm/sとなっており、すべての成分において0.5秒から1秒付近で卓越している、短周期成分の強い地震動であるといえる。

### 3. 解析結果および考察

三角波入力による対象構造物の1次固有振動数はX方向(長手方向)で1.66Hz、Y方向(短手方向)で1.47Hzとなり、地震動の卓越振動数より若干高振動数側の結果となった。次に図7に示すプッシュオーバー解析による荷重変位関係を見ると、最大耐力は1階X方向が120kN、Y方向116kN、2階X方向が76.8kN、Y方向75.9kNとなり、1階の耐力が2階よりも2倍弱大きい結果となった。また、1階の荷重変位関係と入力地震動のSa-Sdスペクトル結果を図8に示す。図に示すようにX方向で20cm程度、Y方向で15cm程度となったことか

ら、最低でも層間変形角が1/60radを超える、中破以上の被害を想定することができる。



a) 強震記録

b) 三軸応答スペクトル

図 6 SK-net NGN6021: 栄村観測点

次に、非線形地震応答解析結果については図1に示す観測点A, Bでの解析結果について言及する。解析家屋における被害と解析結果の比較例 (A点上付近) を図9に示す。なお、図9に示す解析結果の色は、それぞれ第一折れ点を通過した壁を黄色、第二折れ点を通過した壁を橙色、第三折れ点を通過した壁を赤色として着色している。図に示すように変形によって床が外れたような状態となっているが、右図に示すように解析でも大変形状態となっていることが分かる。また、観測点A, Bでの実被害と解析結果との比較を図10、図11にそれぞれ示す。なお、図11は外周のみヤング係数を70%に低減した結果である。図10に示すように、観測点AのY方向は安全限界をこえる最大変位となり、その他は中破を超える程度の変位であった。しかし、残留変形については、実被害

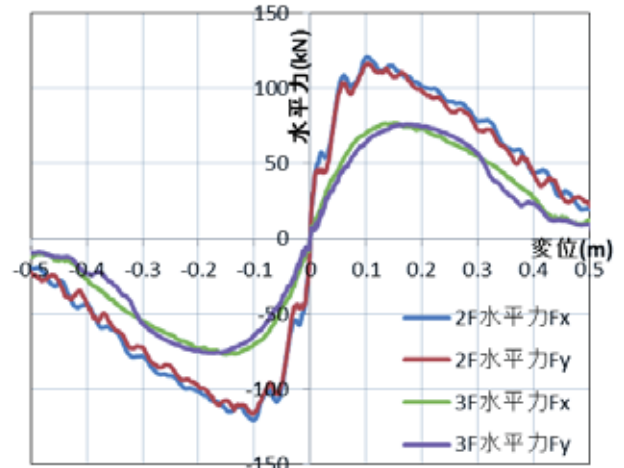


図 7 荷重変位関係

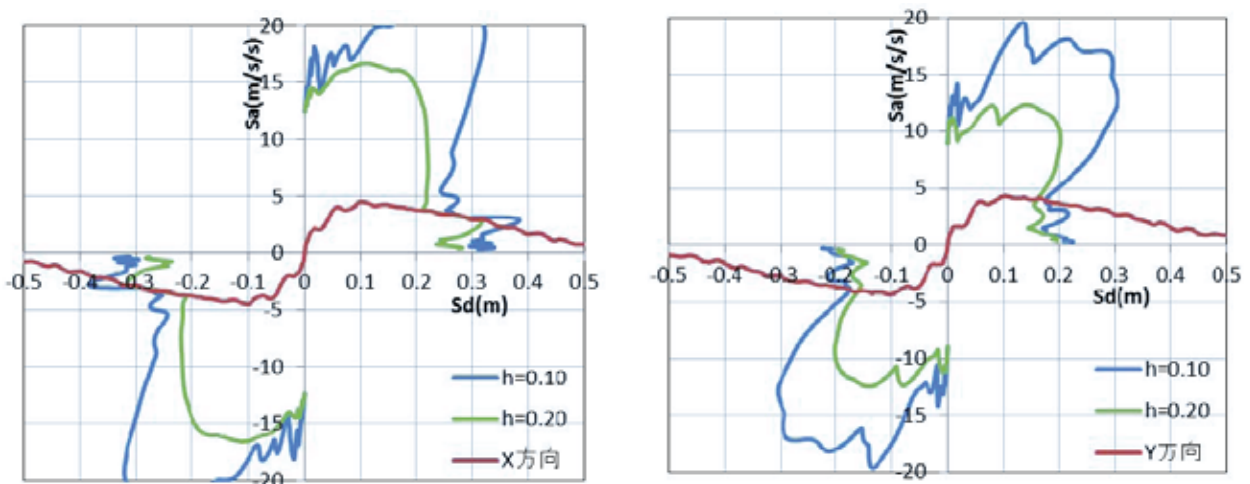


図 8 Sa-Sd スペクトルとの重ね合わせ



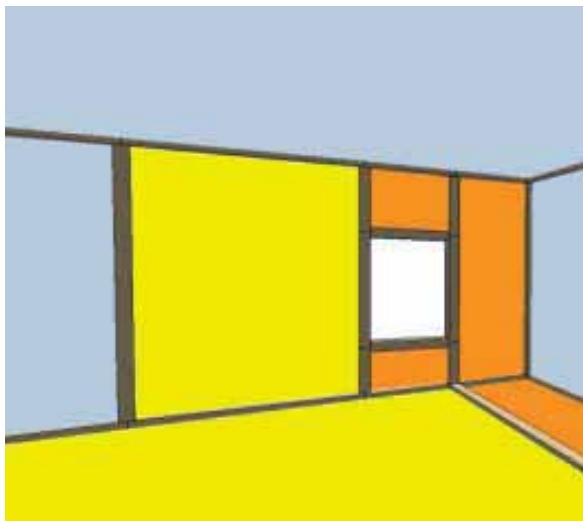
との整合が十分でないとと言える。次に、図11に示す、部材の劣化を考慮した結果では、観測点AのY方向における最大変位が低減し、残留変位が増加しており、実被害と概ね整合している結果となった。また、図10に示す2質点系地震応答解析結果はX、Y方向ともに本解析より被害大に判定し、過大評価する結果となった。これらより、実際の破壊状況と解析の破壊状況具合は一致し、経年劣化として耐力低減を考慮することでより実被害に近い結果となることが明らかとなり、本解析の妥当性を示すことができたと考えられる。



実被害(壁)



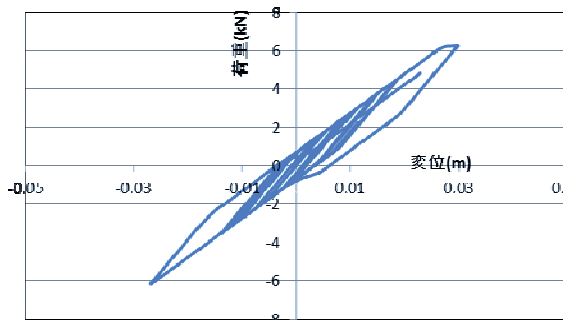
実被害(床)



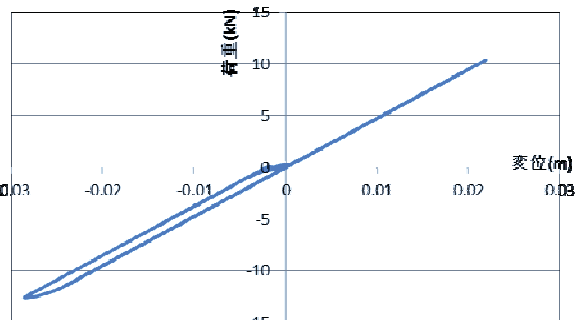
解析(壁)



解析(床)



荷重変位関係(壁)



荷重変位関係(床)

図9 解析家屋における被害と解析結果の比較例

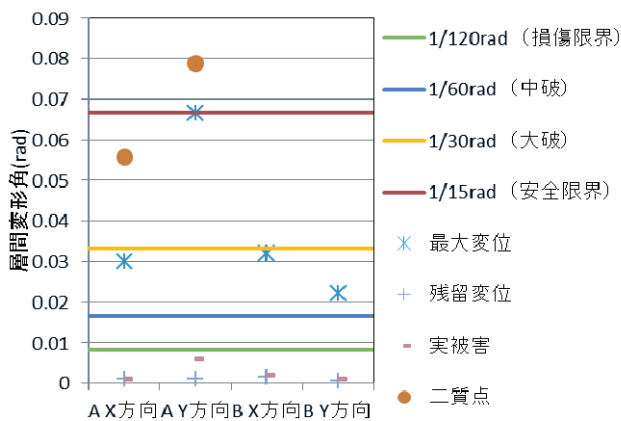


図 10 解析結果(層間変形角)

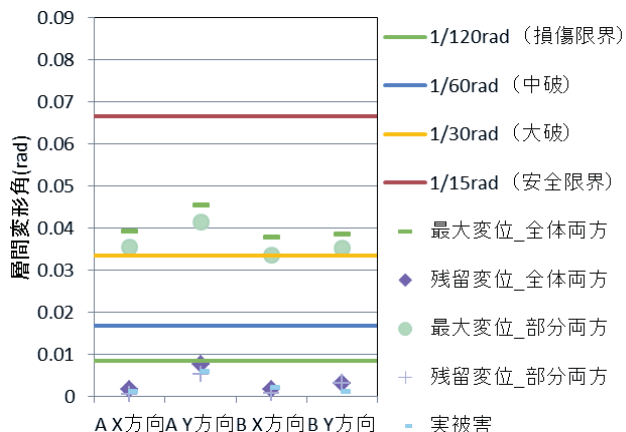


図 11 劣化考慮時結果(層間変形角)

#### 4. まとめ

本研究による建物外周の劣化による耐力低下を適用した3次元地震応答解析を用いることにより、実被害結果に近い残留変位を再現でき、強震時の地震応答と最大変位を要素レベルで推定することが可能となった。残留変位に対して最大変位がかなり大きかったことを明らかにした。しかし、劣化時に関しては、実被害データと劣化の程度を定量的に評価した建物データが少ないこともあり、建築年代等からどの程度劣化させればよいかを判断するには、詳細な解析をする上で多くのサンプルが必要となる。2質点モデルによる解析結果は安全側の結果ではあるが、かなり過大評価になってしまうことから、伝統的な木造構造物が多数存在するような地区で被害推定を行うことに注意が必要であると考えられる。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり、解析プログラムは（独法）建築研究所のwallstat ver.2.00 を利用させて頂きました。また、解析に用いた強震記録はSK-netの観測記録を利用させて頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 花里利一・萩原幸夫・稲山正弘・大倉靖彦・三井所清典・坂本功：木造伝統構法五重塔の設計における構造安全性の検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.7, pp.33-38, 1999.
- 2) 鈴木隆志・伊津野和行・土岐憲三：懸造形式を有する伝統木造建築物の保有水平耐力と地震応答, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.52B, pp.477-490, 2006.
- 3) T. Nakagawa, M. Ohta, Et. al.: Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading III: Numerical simulations of the real size wooden houses, Journal of Wood Science, Vol.56, No.4, pp.284-292, 2010.
- 4) 吉川盛一・相馬智明・宋昌易・稲山正弘・安藤直人：木造軸組工法における水平構面の面内せん断試験（その1）面材張り床構法, 第58回日本木材学会大会研究発表要旨集, CD-ROM, 2008.
- 5) 加藤勉・秋山宏：鋼構造部材の耐力（その4）, 日本建築学会論文報告書, 第151号, pp.15-20, 1988.
- 6) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統木造構法を生かす木造耐震設計マニュアル, 2004.
- 7) 国土交通省住宅局建築指導課監修：木造住宅の耐震診断と補強方法（初版第7刷）, (財) 日本建築防災, 2006.
- 8) 日本建築学会：木質構造設計規準同解説, 丸善, 2002.
- 9) SK-net: 首都圏強震動総合ネットワーク, <http://www.sknet.eri.u-tokyo.ac.jp/>,