

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820271

研究課題名(和文)非線形性を有する水平構面の増幅効果を考慮した伝統的木造建築の地震応答評価

研究課題名(英文) Seismic response evaluation for traditional wooden buildings considering the nonlinearity of horizontal diaphragm

研究代表者

佐藤 利昭 (Sato, Toshiaki)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：00637887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、伝統的木造建築が有する構造特性の評価を目的に、実験的検討と強震観測に基づく検討を進めた。実験的検討では、木材の粘弾性を調べる方法として、ボルト軸力の応力緩和に基づく簡易な試験方法を試案し、その有効性を検証した。また試験結果を基に、緩和時間が長い領域における粘弾性特性を評価した。強震観測に基づく検討では、システム同定手法の1つである部分空間法の演算を実行する解析環境を構築した。さらに実構造物の強震記録にこの方法を適用し、各部の剛性を逆問題として評価した。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the structural characteristics of traditional wooden buildings, this study was carried out with two processes; one is based on experimental, the other is based on observation records under strong motions. The experimental investigation is tried to assess the viscoelasticity based on stress relaxation of a bolt, which is set up through the wood specimens. The effectiveness and applicability of the test method was validated, and the viscoelasticity of wood on long relaxation time was evaluated by the test method. The examination on basis of earthquake observation is deal with as inversion problem. An analysis program based on subspace method, which is one of the system identification method, was constructed. By using this program, the stiffness of a part of target structure was evaluated.

研究分野：耐震工学, 木質構造

キーワード：伝統的木造建築 剛性評価 システム同定 部分空間法 粘弾性

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の影響を受け、耐震診断や補強設計、改修工事に対する国民の関心は高く、その社会的需要に応えなければならない。殊に我が国では、総数に比例して既存不適格と呼ばれる耐震性能に乏しい建物が多く残る木造建物の耐震安全性を、簡便かつ適切に評価することが必要不可欠と言える。一方、現在でもその基盤が十分に整備されているわけではなく、実務者が様々な解釈を持ち、具体的な案件毎に個別の方法を採用することで、建物の安全性を検査している。また、補強設計や改修工事では、法規的な制限が殆どなく、木質構造の耐震安全性は、それを担当する実務者個人の裁量に委ねられる部分が多いことも、1つの重要な点である。

### 2. 研究の目的

本研究は、これらの現況を研究的側面から改善することを目的に、実務者が業務の中で検討に十分な時間を充てられない評価基準に関わる根本的な問題点の解決を試みたものである。具体的には、伝統的木造建築を対象に、その応答増幅効果が明らかではない水平構面に着目して検討を進めた。

### 3. 研究の方法

応答増幅は、力の伝達経路にある各部の特性によって決定されるため、ここでは、実験的検討と強震観測に基づく検討の2つのアプローチから、剛性に代表される各部の特性の評価を試みた。実験的検討では、研究計画に従い、摩擦特性の評価から先んじて進めたが、その過程で粘弾性特性の評価が不可欠と判断されたため、木材の粘弾性を主体的に調べることにした。

強震観測は、埼玉県春日部市に所在する不二山浄春院に協力を依頼したもので、本堂に複数の強震計を設置し、実構造物の応答を調べた。検討には構造ヘルスマニタリングの方法を適用し、解析プログラムの構築からはじめ、各部の剛性評価を進めた。

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果を、研究方法に記した実験的検討の結果と強震観測に基づく検討の結果に分けてまとめる。

#### (1) 実験的検討で得られた成果

木材の摩擦特性に関する研究は、凝着理論に基づくものから摩擦係数として整理されたものまで、これまでに数多くの成果が報告されてきた。しかし、これらの成果を実構造物に適用する方法を考えた場合、対象とする力の釣り合い状態での経過時間を考えなければ、根拠のある予測は困難と言える。仮に

凝着理論が成立する立場をとれば、粘弾性の影響によって凝着部の拡大が予想され、一方でいわゆる Coulomb 摩擦が成立すると考えれば、同じく粘弾性の影響により、時間経過と共に変動する応力の釣り合い状態から圧縮荷重が定まらず、摩擦力も未知となる。これらの考察から、本研究の目的である実構造物への応用を念頭におけば、優先して評価すべきは粘弾性特性と考えられ、以降では、木材の粘弾性を調べた結果をまとめる。

木材の粘弾性を検討した既往研究は多いが、経験的な知見を除き、それを定量的に評価することは容易ではない。粘弾性特性の評価に当たり問題となるのは、まず実験条件である。木材が天然材料であることから、複数の試験片を同一環境下で評価することが求められるが、恒温・恒湿環境での長期間に渡る精度の高い実験を実施することは一般に困難である。この解決策として2つの方法が考えられる。1つは、試験片1つに対して高い精度の試験を短期間に実施する方法、もう1つは制御機構を設けずに多数の試験片に対して長期間に渡って安定した環境で試験を実施する方法である。前者は、力学モデルと整合する試験方法で有意な成果が見込まれるが、試験機の制限から短期間の試験しか望めず、結果として得られた知見を外挿する必要が生じる。一方、後者には高い精度が望めない反面、複数の試験片を同時に評価でき、長期間に渡る結果を知ることが可能となる。以上を踏まえ、本研究では後者の試験方法を試案し、その精度検証を前者の試験との比較により検証した。

検討した試験方法は、20 mm 角の試験片を用いる簡易な試験である。試験片のセッティング概要を図1に示す。

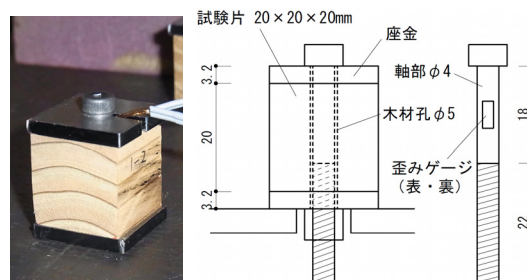


図1 試験片セッティング

図1に示すように、本研究で検討した試験方法は、ボルトの軸力から応力を評価するもので、直径5 mmのボルト孔を設けた木材を試験片とする。荷重条件は2枚の鋼板(座金)による全面圧縮で、直径4 mmのボルトに締結力を与えることで初期軸力を導入し、その後の応力緩和を長期間に渡って調べる試験である。応力緩和の定義に従えば、変位を拘束条件とする必要があるが、実構造物のボルト接合部等に生じ得る粘弾性特性を評価する上では、必要十分と考えられる。

この試験方法の特徴は、制御が不要かつ占有スペースが小さい点にあり、同一条件下で多数の試験を同時に実施できる。以降には、具体的な成果として、恒温・恒湿環境で約2週間に渡って記録した結果を1例として示す。ここで、恒温・恒湿環境で試験を実施したのは、含水率が粘弾性に与える影響が明らかではないため、温湿度を変動させた検討も並行して進めたが、本成果の範囲では恒温・恒湿環境の結果のみを示す。まず図2に試験片の抽出方法を示す。

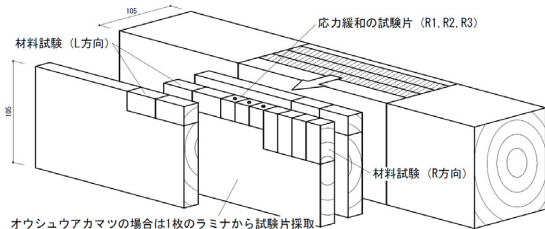


図2 試験片の抽出方法

図2に示すように、各試験片は相互に結果を比較するため、同一年輪内の近接した部分から抽出した。以降では検討した2つの樹種、スギとオウシュウアカマツをそれぞれW1, W2と呼ぶ。なお、同図に示すようにオウシュウアカマツは集成材のため、同一のラミナから試験片を抽出した。

試験結果として、年輪方向であるR方向の試験片R1～R3に対して得られたボルト軸力の時刻歴を導入軸力で除し、荷重保持率としてまとめた結果を図3に示す。

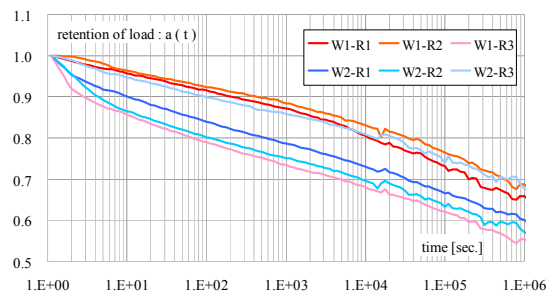


図3 R方向の荷重保持率

図3では、横軸にした時間経過を対数で表示してある。同図の結果より、緩和過程初期では、W1-R1, W2-R1, W2-R2の緩和が大きいことがわかる。この3片は、各樹種の中で導入軸力が大きくなった試験片で、クリープ歪み等の非線形性が関与している可能性がある。一方、緩和過程の後半では、グラフの傾きがいずれも同様の傾向を示し、樹種による違いも小さい。これらの傾向の裏付けとして、線形粘弾性を仮定し、緩和時間と弾性率の関係である緩和スペクトル  $H_R(t)$  を求めた結果を図4に示す。ここで、緩和スペクトルの計算にはAlfrey & Dotyの近似解を採用したが、緩和スペクトルの演算方法も別途検討を進めている。

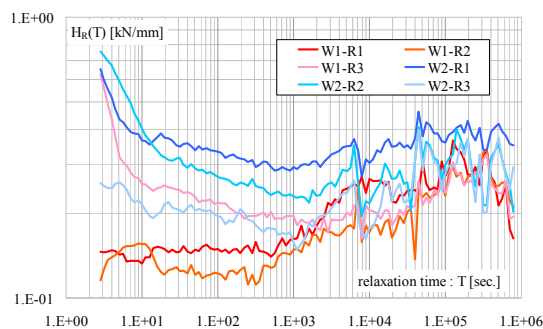


図4 異なる樹種の緩和スペクトル

図4の結果からも、同様の傾向が認められ、緩和時間の長い領域では樹種によらず同程度の弾性率に近づくことが分かる。

このように本研究で検討した試験方法は、軸力の導入をマニュアル制御とするため、非線形性の影響が強い100s程度までの信頼性に乏しい。しかしながら、先にも述べた通り比較的短い試験時間であれば、試験機の利用が可能であり本試験方法は有用であると思われる。以上が実験的検討で得られた主たる成果である。現在でも、上記の試験方法による計測を継続している他、既に試験機による精度の高い試験方法との比較、温湿度変化に伴う緩和傾向の差異を調べてきた。一方、粘弾性特性の評価には検討課題が複数挙げられるのが現状で、検討した試験方法を活用しながら研究を継続する計画である。

## (2) 強震観測に基づく検討で得られた成果

強震観測に基づく伝統的木造建築の評価は、既往研究でも数多く取り組まれているが、伝達関数による検討などが主体で、詳細な分析を進めた例は少ない。本研究では、システム同定手法の1つである部分空間法を適用するため、まず解析環境を整備した上で、実構造で得られた観測記録の分析を進めてきた。部分空間法は、観測記録を配列したデータ行列から、主に代数演算によって固有値を求める方法に相当する。ここで用いる演算方法には現在までに複数の提案があるが、本研究ではMOESP法を採用した。演算の詳細は論文に譲り、以降には強震観測で得られた分析結果を成果として示すことにする。

本研究では、不二山浄春院の本堂を対象に検討を進めた。この建物は、伝統的な軸組構法で造られた平屋建ての木造建築で、水平力には軸組架構のモーメント抵抗の他、土塗り壁とそれを垂壁とした独立柱が抵抗する。2011年の東北地方太平洋沖地震を契機に耐震補強を検討し、補強設計の計画中から強震観測をはじめ、工事期間を除き現在まで観測を継続している。以降には、既に発表した耐震補強前の観測記録として、図5に概要を示す4つの地震動に対して得られた記録を分析した結果をまとめる。

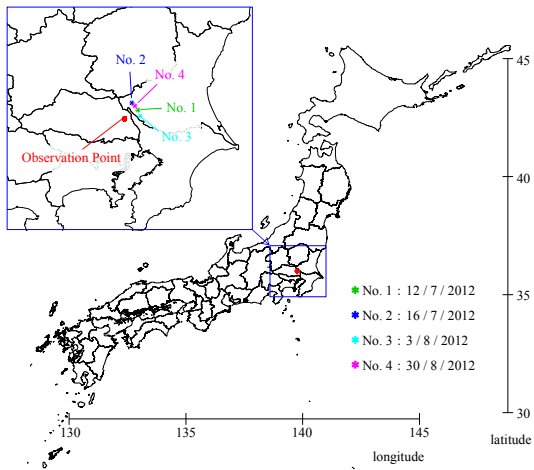


図 5 検討に用いた地震動の震源分布

強震計の設置位置を 1 F 平面図および各方向の軸組図に加筆して図 6, 7 に示す。

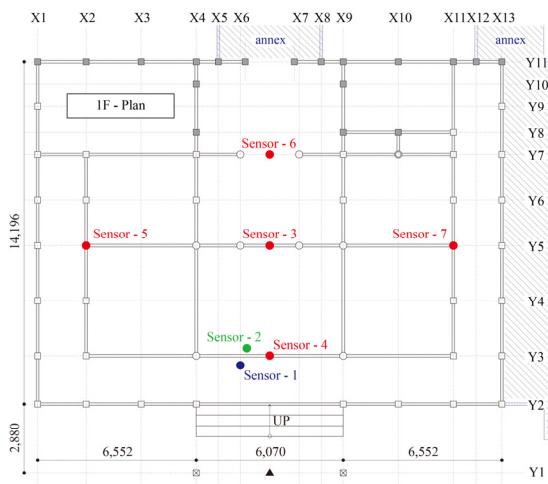


図 6 強震観測の概要-1 (平面図)

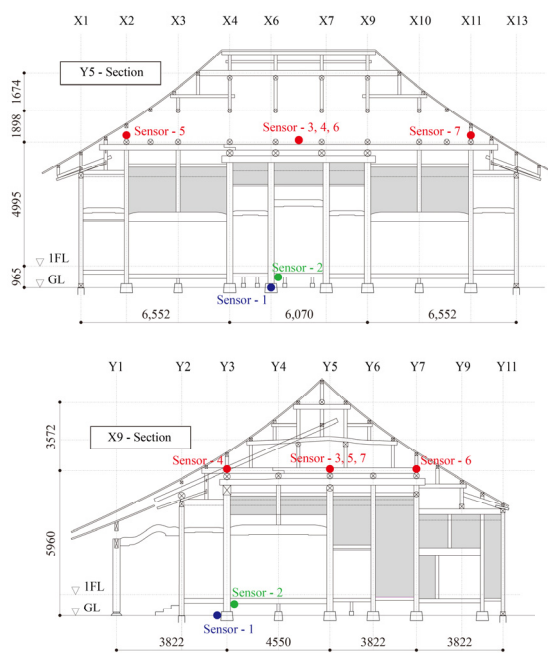


図 7 強震観測の概要-2 (軸組図)

図 6, 7 に示す通り, 対象建物は平面が約  $14 \text{ m} \times 19 \text{ m}$ , 最高高さが約  $10.5 \text{ m}$  で, 強震計を地表面と 1 F 床組に各 1 台, 小屋組に 5 台設置してある。図 5 の地震動による入力, 最大でも  $30 \text{ cm/s}$  程度であるが, 図 8 に示す各点の記録から求めたフーリエスペクトルに応答増幅が認められることから, 構造物の特性を反映した結果と判断した。

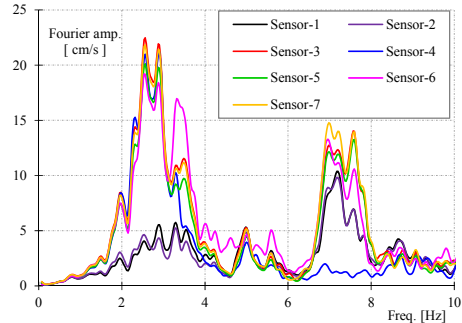


図 8 各観測点のフーリエスペクトル

(地震 No. 3, 継続時間: 約 40 s, X 方向)

強震記録は, 7 つの観測点において水平 2 成分, 鉛直 1 成分の時系列データとして得られており, これらの一部で構成されたデータ行列から構造物の特性を推定した。本研究では, 直交する 3 成分が相互に影響しないことを仮定し, 特に水平 2 成分のデータを独立して扱った結果をまとめる。まず, 構造物の特性の経時変化を調べるため, データを 4 s 毎に分割した。一般にフーリエ変換を基に分析を進める場合, Gabor 変換に代表されるように, 時系列データの切り出しには注意が必要となるが, システム同定では時間窓を乗じるなどの手続きが不要で, かつ短い時間間隔のデータでも, 比較的精度の高い同定が可能である。また, 多数の提案があるシステム同定手法の中でも, 本研究で採用した部分空間法は, 多入力・多出力システムを容易に扱える特徴を持つもので, ここでも本構造物を 1 入力 5 出力のシステムとして同定した結果について述べる。

得られた結果の 1 例として, 地震 No. 1, 2 で得られた強震記録より, 構造物の 1 次固有振動数を同定した結果と当該区間における層間変位と比較して図 9 に示す。

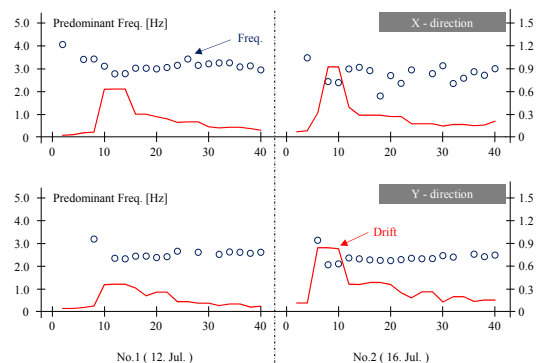


図 9 層間変位と固有振動数の経時変化

同図の結果には、層間変位の増大に伴う固有振動数の低下が認められ、また 1 mm 程度の極めて小さい変形領域でも、顕著な非線形性が現れることが確認された。図 9 の結果は、同定結果のうち 1 次固有振動数のみに着目したものであるが、本研究で得られた観測記録からは、より高次の固有値までを同定できる。参考として、地震 Nos. 1 ~ 4 における Y 方向の固有値として、最大層間変位を経験した時刻を含む時間区間におけるモード図を固有振動数と共に図 10 に示す。ここで同図には 3 次までの結果を抽出して示してあるが、特異値分解の結果から 5 次の固有値までを安定的に計算可能であることは、別途確認してある。

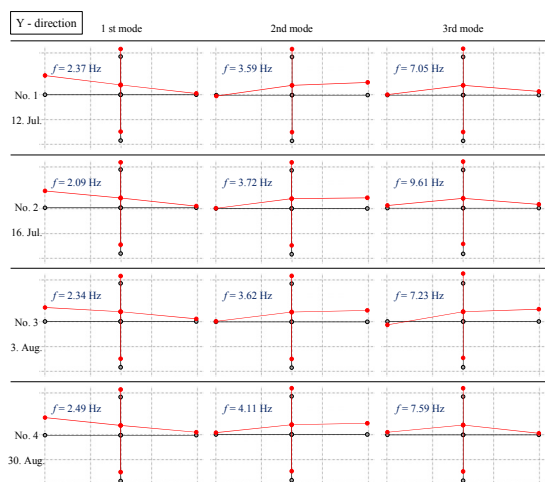


図 10 強震記録より同定した固有値

図 10 の結果より、対象建物の左右、すなわち X1 通り側と X13 通り側の応答には一体性が認められない。このことから、水平構面に剛床仮定が成立しないことが示唆された。また、X13 通り側に付帯する客殿が、本堂の応答に影響を及ぼすことも、同図の結果より確認される。これらの知見は、本研究で得られた成果の 1 つで、水平構面の柔性を観測記録より説明した稀な事例と言える。また、付帯する構造物の影響に関しては、耐震診断法に代表される構造計算で無視されることが多いが、本建物のように双方を直接接合していない場合でも、応答に影響を及ぼすこともこの検討を通して確認された。

これら同定した固有値から、研究目的である各部の特性を評価するためには、力学モデルを仮定した上で、その応答と固有値を結びつける必要がある。本研究では、図 11 に示すような集中質量系の擬似 3 次元モデルを仮定し、各質量間を結ぶバネの剛性評価を試みた。ここで同定される固有値は、複素数であることから各次の減衰定数も同時に評価できているが、その経時変化をみると結果が安定せず、定性的な議論には至らないため、ここでは剛性評価のみに取り組んだ。

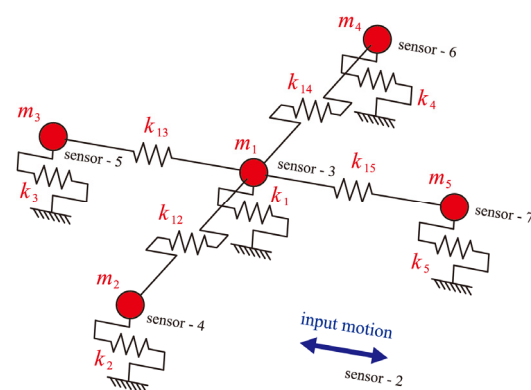


図 11 剛性を評価する力学モデル

図 11 のモデルより各部の剛性を定める上では、質量を与条件とする必要があり、本構造物の部材・構法調査を実施した結果を基に、計算に用いる質量を求めた。部材のサンプリング抽出は難しいため、各樹種の比重は公称値を用いたが、調査結果を踏まえ対象建物の全重量は約 402 kN と想定された。剛性評価の結果として、図 12 に構造計算との対比が可能な鉛直構面の評価結果の 1 例を示す。なお、同図には指数関数への回帰結果も併せて示してある。

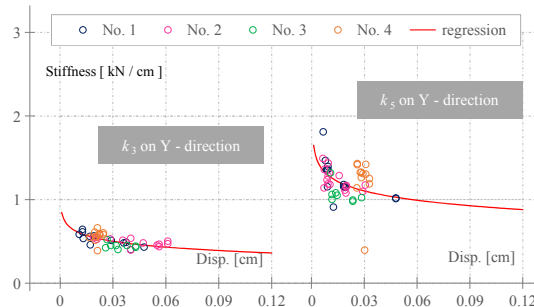


図 12 対象建物の Y 方向の剛性評価

図 12 に示すように、剛性を評価した結果にはバラツキが認められるが、対象建物の左右には 2 倍近い剛性の差異があることが推察される。この結果に対して、耐震診断法で評価される剛性は、既報の結果より約 1.3 倍程度であり、構造計算との差異が認められた。これらの差異を与えた要因には、モード図に認められた付帯する客殿の影響などが挙げられる。上記以外にも、同様の検討によって水平構面の剛性評価を試みた他、力学モデルの修正も含めて検討を進めてきたが、モデルの妥当性をはじめ、検討すべき点は複数考えられるため、今後も耐震補強後の経過観察も含めた検討を進め計画である。

以上、(1) と (2) としてまとめた知見が、本研究で得られた実験的検討および強震観測に基づく検討で得られた成果である。今後も、本予算で検討が進められた上記 2 つの軸にしたがって研究を進める計画である。

## 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 5 件)

- ① 佐藤利昭, 中島裕貴, 永野正行: 木造住宅の長期的な耐震安全性に関する研究 木-ボルト接合部の応力緩和試験 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 北海道大学, 北海道・札幌市, pp.13-14, 2013. 8
- ② 中島裕貴, 佐藤利昭, 永野正行: 木造住宅の長期的な耐震安全性に関する研究 木-ボルト接合部の応力緩和試験 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 北海道大学, 北海道・札幌市, pp.15-16, 2013. 8
- ③ 中島裕貴, 佐藤利昭, 永野正行: 木造住宅の長期的な耐震安全性に関する研究 木-ボルト接合部の応力緩和試験 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 神戸大学, 兵庫県・神戸市, pp.479-480, 2014. 9
- ④ 佐藤利昭, 永野正行, 望月英二, 肥田剛典: 伝統的木造建築の動特性評価 強震観測と常時微動の関係性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 神戸大学, 兵庫県・神戸市, pp.247-248, 2014. 9
- ⑤ SATO, T., NAGANO, M. and MOCHIZUKI, E.: Seismic Performance of A Wooden Temple Inferred from Earthquake Observation and Seismic Diagnosis, World Conference on Timber Engineering 2014, Proceedings (10 pages) Quebec, Canada, 2014. 8

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

佐藤 利昭 (SATO, Toshiaki)  
東京理科大学・理工学部・助教  
研究者番号: 00637887

### (2)研究分担者

なし