

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0111

研究課題名（和文）表層凍結斜面崩壊メカニズムの地盤工学的解析に基づく東欧校倉木造教会堂保存の研究

研究課題名（英文）Conservation of Log Wooden Church Buildings in Eastern Europe Based on Geotechnical Analysis of Surface Frozen Slope Failure Mechanisms

研究代表者

上北 恭史（Uekita, Yasufumi）

筑波大学・芸術系・教授

研究者番号：00232736

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は東欧に残る校倉造木造教会堂の保存のために、その主な損傷を引き起こしている原因と思われる凍土による斜面崩壊のメカニズムを明らかにし、不等沈下や地すべりがもたらす原因を明らかにすることを目的に研究を実施した。斜面崩壊のメカニズムを明らかにするために木造教会堂が建つ地盤にボーリング調査を行い、土壌解析や観測井を用いたモニタリング計測を行った。ウクライナ・ポテリッチの聖神降臨聖堂の敷地は均一な砂質土でありすべり面は確認できなかった。ポーランド・ラコバの聖母マリア生誕教会堂の敷地は安定しており、教会堂劣化と地盤変位との関連性を把握するためには中長期のモニタリングを実施する必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東欧の木造教会堂の保存のためには、斜面に立地する敷地の条件を把握して保存対策を進める必要がある。本研究は寒冷地における地面の凍結という気象条件に着目し、地盤工学によるモニタリングを使って地盤の挙動と建物の変形との関連を捉えようとした。このような敷地地盤の状況の科学的把握のためのモニタリングは、職人の経験に基づく修理方法に加えて、客観的に木造教会堂の劣化要因を明らかにする手法を構築することができる。また本研究のモニタリングシステムは、太陽光パネルによる電力供給とモバイルサーバーによる遠隔モニタリングが可能なことを示し、僻地にある文化遺産の環境のモニタリングが可能なことを示した。

研究成果の概要（英文）：In order to conserve the remaining log wooden church buildings in Eastern Europe, this study was conducted to determine the mechanism of slope failure caused by frozen soil, which is thought to be the main cause of damage to these buildings, and to determine the causes of unequal settlement and landslides. Borehole investigations were conducted on the ground on which the wooden church building stands, and monitoring measurements were made using soil analysis and observation wells. The site of the Descent of the Holy Spirit Church in Potelych, Ukraine, had uniform sandy soil and no slip surfaces were identified. The Church of the Nativity of the Holiest Virgin Mary site in Rakowa, Poland is stable, and medium- to long-term monitoring should be conducted to understand the relationship between church building deterioration and ground displacement.

研究分野：文化財保存

キーワード：木造教会堂 校倉造 ウクライナ ポーランド 保存 モニタリング 斜面崩壊 地盤工学

1. 研究開始当初の背景

東欧のカルパティア山脈の周辺には正教、東方カトリック教会などの信徒によって建設されてきた木造教会堂が、ウクライナをはじめ、ポーランド、ルーマニア、スロバキアなどの周辺国に残されている。ウクライナでは現役で使われている教会堂が多く残り、リビングヘリテージ（生きている遺産）としての価値も高い。これらの木造教会堂は校倉造で作られ頑丈な構造を持つ。かつて盛んだったヨーロッパの木造建築文化は、北欧やカルパティア山脈周辺といった辺境に残されるのみとなった。北欧に残された木造教会堂は博物館や文化遺産として保存されており、その多くは宗教活動に常時使われることは少ない。ウクライナをはじめポーランドやルーマニアのカルパティア山脈周辺に残された木造教会堂の多くは現在でも宗教活動に使われ、リビングヘリテージとして木造教会堂の姿を伝えている。しかしながら地方の農村部に残る木造教会堂はコンクリートの現代建築に置き換わりつつあり、高齢化と人口減少のために修理費を捻出できずに空き家となる木造教会堂も増えている。このような現状を見ると、カルパティア山脈周辺の木造教会堂を保存することは、ヨーロッパの校倉木造建築文化を後世に伝えるためにも極めて重要である。

木造教会堂の躯体の劣化は大きく見ると二つに分けられる。ひとつは屋根からの漏水による校木の腐れからくる劣化、そして地盤の不同沈下による校倉構造の歪みである。屋根からの漏水は過去に増築した接合部から起こることが多いが、基本的に屋根の修理を怠らなければ解決できる。一般的に木造校倉造への修理は、雨漏りによる対策として行われている。もうひとつの地盤の不同沈下は、小高い丘の上に建つ木造教会堂の立地に関係している。昔の墓地の上に建設されることも多かった木造教会堂は丘の頂部や斜面に建てられており、雨水などによる斜面の崩壊の影響を受ける。ルーマニアでは60、70年代の社会主義政権時代に木造教会堂の下にコンクリートの布基礎を入れている。調査でわかったことは配筋も入れずモルタルに骨材を入れただけの柔らかいコンクリートであり、ほとんど耐力のない基礎であった。ルーマニアの専門家に聞いても基礎を入れた理由ははっきりわからなかったが、基礎を強化する理由があったと思われる。ポーランドでは木造教会堂を修理する専門会社が、移築された歴史のある木造教会堂の基礎に1メートル掘り下げ、コンクリートのベタ基礎を打っていた。これは冬期の凍結と春期の融解による斜面崩壊を防ぐ理由によると説明していたが、科学的根拠に基づく対策ではなく経験によるものであった。ウクライナではテコの原理を使って人力で教会堂を持ち上げ、不同沈下した箇所に薄い石を充填する伝統工法がある。このように木造教会堂の地盤の不同沈下は歴史的に見られ、当時から修理をする都度に対策がなされる悩ましい問題であった。ウクライナの木造教会堂を保存において立地している地盤の状態について明らかにする調査方法はまだ一般的とは言えず、地盤工学的分析に基づく地盤崩壊のメカニズムなどの新しい科学的評価方法の導入が必要であるといえる。

2. 研究の目的

本研究は東欧に残る校倉造木造教会堂の保存のために、その主な損傷を引き起こしている原因と思われる凍土による斜面崩壊のメカニズムを明らかにし、不等沈下や地すべりもたらす木造教会堂の損傷の過程およびその対策について研究する。斜面崩壊のメカニズムを明らかにするために木造教会堂の建つ地盤にボーリングを行い、土壌解析や観測井を用いたモニタリング計測を行う。凍土による斜面崩壊の過程を地盤工学的に明らかにし、不均質で多種多様な地盤の工学情報を得る。

当初の観測場所はウクライナの世界遺産 Potelych の聖神降臨聖堂(Descent of the Holy Spirit Church)を対象と考えた。この教会堂は16世紀初頭に建設され、ハリキ(Halych)様式とよばれる東側のアプスと中央部礼拝室上に塔をもつ古い形式で、「ポーランドとウクライナのカルパティア地方の木造教会群」の構成資産として2013年に世界遺産に指定されている。この教会堂は、小高い丘の東から西への斜面を敷地とし、60年代以降に斜面崩壊が顕著になって躯体にひずみを生じるようになった。斜面への漏水対策、建築物の内部に補助フレームを入れるなど対策が行われているが、根本的解決に至っていない。

東欧の木造教会堂は礎石の上に組まれた土台から校木を積み上げ、壁を内部に内転させながら屋根まで立ち上げる壁構造である。建物は完成されたときに多少歪んでいても安定していて、状態が良ければ数百年も状態を保つ。そして劣化するときは建物全体を歪ませながら変形させていく。本研究は、斜面崩壊によりバランスを崩すことにより、躯体に波及していくプロセスについても建築構法的調査を行う。教会堂の内部に温湿度モニタリングを行い、常時微動などの計測データを収集することによって、斜面崩壊と構造物変形について関連性を把握することを目的とした。

また東欧の多くの木造教会堂は都市部から離れた農村部、山間部に所在していることが多い。村はずれの小高い丘の上などに建設され、現在使われていない教会堂も少なくない。そのような不便なところにある木造教会堂のモニタリング手法についても本研究でリモートによるデータ収集、太陽光発電などのモニタリング機器の電力供給のシステムの可能性も実験する。

3. 研究の方法

本研究は、東欧の木造教会堂劣化のメカニズムの解明するために、()凍土地盤による斜面崩壊のメカニズムの解明、()校倉木造建造物の劣化のメカニズムの解明を行い、()凍土による斜面崩壊への対策と校倉造木造教会堂への修理方針の考察、を行うこととした。

()凍土地盤による斜面崩壊のメカニズムの解明について

木造教会堂の敷地に4箇所径10センチ深さ10メートルのボーリング切削を行い、土壌資料をサンプリングする。資料から流動性・不安定性の原因となる粘土層の把握と、表層資料の凍上試験を行い、凍結膨張率を把握する。サンプリングした土壌の国外持ち出しは制限されるため、現地検査機関において資料分析を行う。そしてボーリング孔に凍結融解中の斜面内の状態を計測するために温度センサー、土壌水分センサー、テンシオメーターを設置し、凍結融解中の斜面内の変形を計測するために層別沈下計、多段傾斜計を設置する。さらに周辺の気象情報等を計測するために気温計、日射計、雨量計、積雪深計を設置する。2020年の設置から最終年度の2022年度まで観測を行う。観測データは教会堂内部に設置するデータロガーに記録し、モバイルサーバーを通して現地から日本のサーバーにデータを収集する。

()校倉木造建造物の劣化のメカニズムの解明について

本研究では調査対象となる木造教会堂の実測とともに腐朽等個所の診断を行うことによって、木造教会堂の劣化状態を把握する。特に建造物全体の傾きについて計測を行い、その要因について考察する。そして前室、礼拝室、祭壇室の3つの構造特性を把握する。

4. 研究成果

4-1 ウクライナのポテリッチ聖神降臨聖堂の土壌調査

2019年度後半から研究を開始して2020年度3月に渡航を準備していたが、まもなく新型コロナウイルスが世界的に流行し、外国での活動が制限されることになった。当初の研究計画ではウクライナのリヴィウ県ポテリッチ村に所在する聖神降臨聖堂をモニタリングの対象としていたが、ウクライナへの渡航は制限されていたために研究組織が渡航して調査を行うことができなかった。そのためウクライナの外国人共同研究者を通してリヴィウの地質調査会社に教会堂敷地の測量とボーリング調査を依頼した。



図1 ポテリッチ村聖神降臨聖堂

2022年5月にポテリッチ村の聖神降臨聖堂敷地においてボーリングが行われた。ボーリング孔は深さ10メートルで3本切削された。表土は約1メートルで樹木や建築資材の堆積層、それ以降の地層は砂質土であった。この砂質土は氷河によって切削された堆積砂であると思われる。

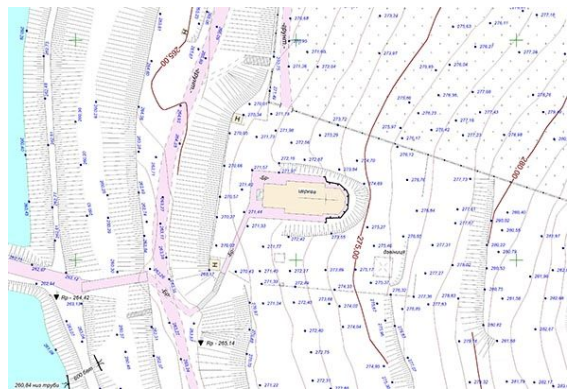


図2 聖神降臨聖堂の敷地

地質調査会社の説明によると、教会堂の敷地は、ラタ川とソロキア川のザンドロ沖積平野に属しており、これらの川の谷間は防水泥灰土の下にある砂の地層で満たされているという。砂地には、隣接するロストツェの高地を覆っていた氷河の雪解け水が堆積したものであり、北方産の岩石が含まれている。調査地域の標高は91.7-103.7メートルである。この場所の地形構造は、テリヒ渓谷の傾斜した斜面の下部であり、西側から見て教会堂の敷地は高さ8-9メートル

のほぼ垂直の急な岩棚によってさえぎられている。凍結深度は0.9-1.2メートルと考えられる。

土壌サンプルを採取し、実験室における物理試験を行ったところ、現代の堆積物は、緩い土(建設残渣と有機残留物を含む砂質土)、有機残留物の不純物を含む細かい砂、第四紀の堆積物は中低砂であることが示された。0.0-2.0メートルの採取土は、緩い土(建設残土と有機残滓の混じった砂質土)と、有機残滓の混じった細かい湿った低水分の砂からなり、暗灰色と黒色の塩素を含んでいて、その土壌の組成は不均一であった。1.0-11.0メートルの採取土は、中低水分、中密度の砂で、細砂の層があり、層の下部には石灰岩の断片があり、淡黄色と黄灰色であった。

これらのボーリング調査および土壌分析からいえることは、1.凍結深さが1メートル程度となるので、表土層までしか凍結しないように見える。この場合、表土層の下の沖積砂質土層は冬

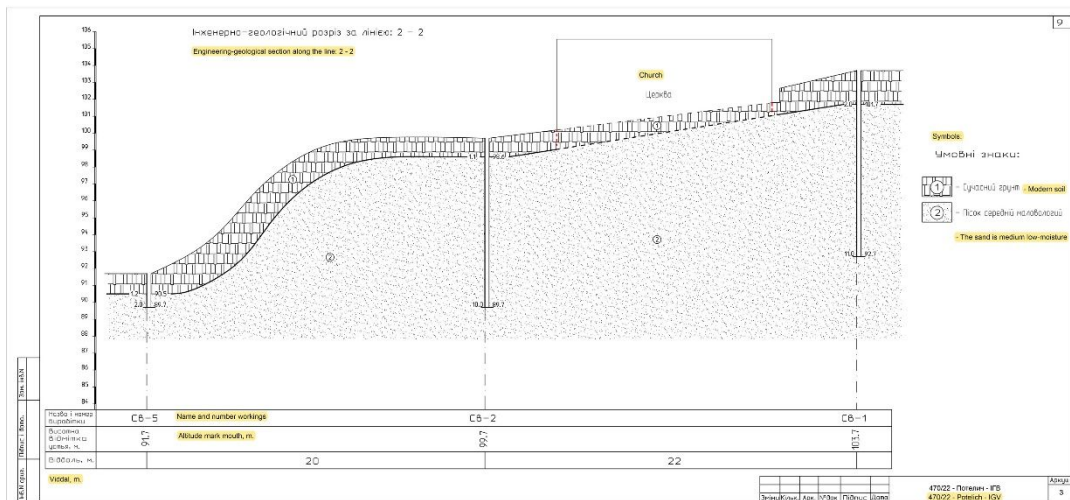


図3 聖神降臨聖堂敷地の土壌断面

期も凍結はしないと思われるので、凍結による沖積砂質土層の影響はないと考えられる。一般に砂質土では、地すべり面のような明確なすべり面はボーリングコアで確認されないため、すべり面がどの位置で生じているのかをボーリング結果から判定するのは難しい。2. 表土層は、砂質土を主体とした混合土のようであるが、こちらは凍結融解の影響を受ける可能性がある。砂質土が主体であれば、土質的に凍上性は低いと考えられ、表土層の下は沖積砂質土層で地下水位も高くないと思われる。

4-2 ポーランドのラコバ村聖母マリア生誕教会堂のモニタリング

コロナ感染症も終息してきたため、ウクライナへの渡航を計画していたところ、2022年2月にウクライナにロシアが侵攻し、ウクライナへの渡航はできなくなった。戦争の早期終了を期待していたが状況は深刻を極め、本研究の調査対象地を隣国のポーランドで行うこととした。2022年から2023年にかけてポーランド東部のカルパティア山脈に連なるサヌク郡を中心にモニタリングのための条件に該当する木造教会堂を探し、ラコバ村(Rakowa)に残る聖母マリア生誕教会(Church of the Nativity of the Holiest Virgin Mary)を候補として調査の許可を得るために所有者およびポーランド遺産保存事務所と交渉を行った。聖母マリア生誕教会は1779年に建造されたといわれ、東方カトリック教会の校倉造木造教会堂として使われてきた。



図4 ラコバ村聖母マリア生誕教会堂

教会堂は南北に流れるティラウカ(Tyrawka)川に浸食された東側の河岸段丘上に位置して西に面して建っている。敷地の南西部は浸食のために傾斜しており、教会堂の南西角の土台には亀裂が見られ、また西側の入り口上部に立つ鐘楼も西に若干傾斜していることから、浸食による敷地の傾斜が徐々に進んでいると考えられる。しかしこれらの浸食による傾斜は緩慢なものと考えられることから、教会堂の劣化に影響を及ぼす要素として春先に副強風または敷地の河川方向への地盤沈下が想定された。

2023年7月に同教会堂敷地に斜面方向に土壌調査のための2本のボーリング切削を行い、土壌分析及び切削孔へ地温、土壌水分量、傾斜計、歪計などのセンサーを設置し、土壌観測のシステムを構築した。また雨量、風速、気温などの気象データとの同期をとるために気象センサーを敷地内に設置し、太陽光パネルによる電力供給を行うシステムとした。また観測データを記録するためのデータロガーを教会内に設置し、モバイルサーバーによって定期的に日本のサーバーにデータを転送し、現地に行かずに観測データを収集する体制を整えた。土壌分析によれば、当該敷地の地質はおもに粘土質であった。

この教会堂は前室の上に鐘楼を備えているが、鐘楼は目視で入口・西側斜面方向に傾いている。また入り口近くの土台は斜面側に一部損壊が見られ、敷地地滑りによる不同沈下の変形が加わっていると思われる。教会堂の外側は校倉の上に縦板が張られるが、礼拝室の北側土台付近は雨水による腐朽が広くみられる。

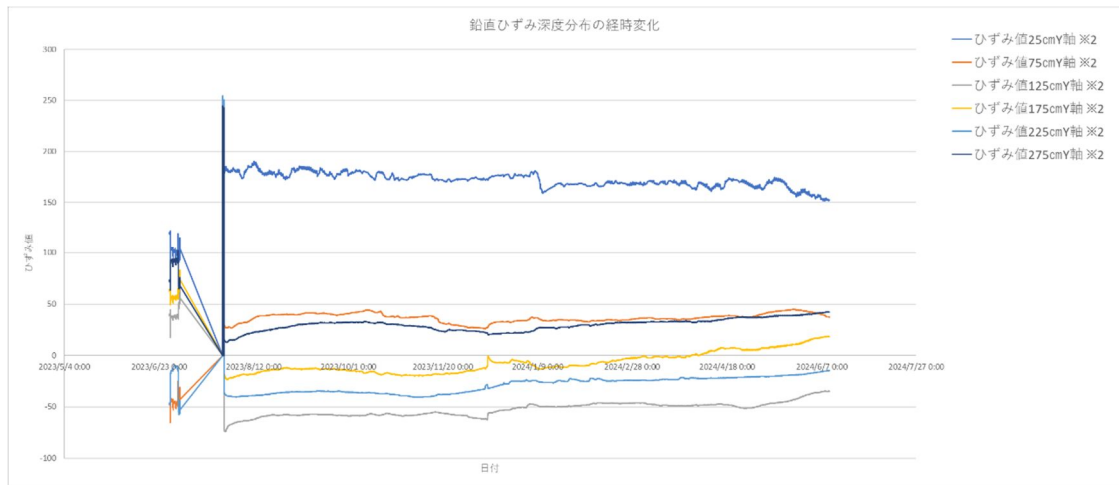


図5 聖母マリア生誕教会堂敷地の垂直方向変位

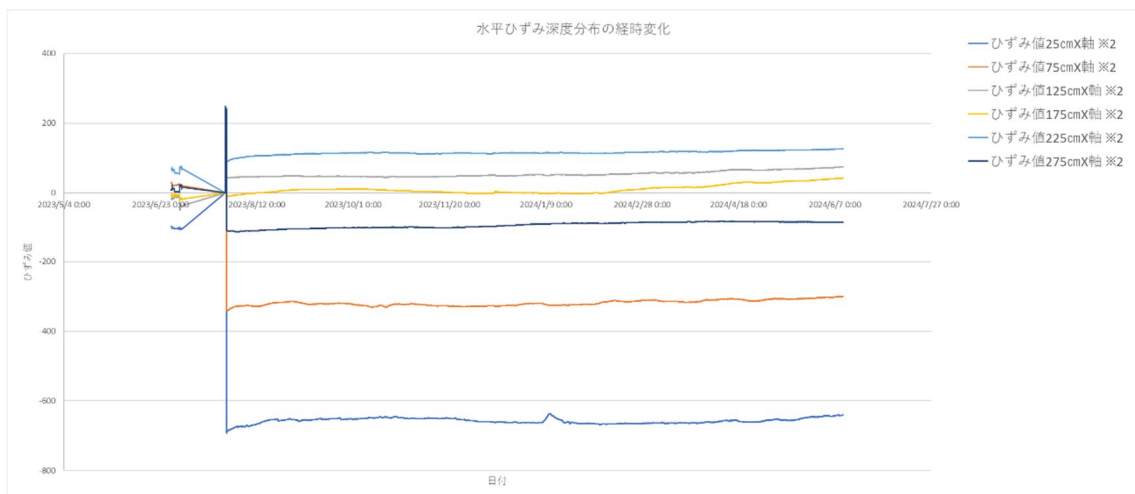


図6 聖母マリア生誕教会堂敷地の水平方向変位

観測データから 2023 年から 2024 年にかけての冬季において地中の凍結は見られず、凍結融解の状況は観測されなかった。これは当該地の気温が十分に下がらず、暖かい状態が続いているためと考えられる。また観測個所の地表面、地盤の挙動は安定しており動きもみられていない。このため教会堂の敷地は現在安定していると考えられる。

4-3 考察

本研究は東欧の木造教会堂の保存のために、冬季の厳しい気候によって凍結が想定される敷地の問題に着目し、ボーリング切削による土壌調査および気象や土中の観測を通して土壌の状態を把握し、地滑り等の対策について検討した。ウクライナのポテリッチにある聖神降臨聖堂の敷地は、表土の下は均一な砂質土からなり明快なすべり面はなかった。春先の融雪時による地温の変化や水分量の変化から敷地の変位が起こっている可能性がある。またこのような砂質土は氷河期に形成された氷河によって削られた堆積砂と考えられ、カルパティア山脈に沿った他の場所にも同様の地質条件による地盤挙動が想定される。今回はコロナ感染症やウクライナ侵攻のために地盤の挙動を確認するためのモニタリングを行うことができなかったため、教会堂変形と地盤挙動の関連性を捉えることができなかった。また調査対象地を変更したポーランドのラコバ村にある聖母マリア生誕教会堂の敷地では、地中観測のモニタリングを開始することができ、リモートによる観測体制を構築することができた。しかし観測時間が短く、敷地は安定しているため、降雨などの気象条件と地盤の挙動との因果関係は捉えられていない。ウクライナと地続きのカルパティア山脈の周縁部に位置するが、土壌は粘土質でウクライナのポテリッチと異なるものの、近年の温暖化により地中の凍結はみられない。地中が凍結するためには地表面が零下 20 度以下になる必要があり、近年はあまり記録されていないことから、今後教会堂の敷地の変化は、凍結や積雪よりも雨量の増加によって引き起こされる可能性も考えられる。木造教会堂の劣化要因と敷地地盤の変形の関連を捉えるためには、中長期にわたるモニタリングによる観測が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 日塔和彦、花里利一、上北恭史、藤田香織、マルティネス アレハンドロ	4. 巻 2021
2. 論文標題 東欧の茅葺き技術 - カルパティア地方を中心に - - ウクライナ木造教会堂群保存手法の構築 - 日欧校倉造理工法の比較研究 その4	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会2021年度大会学術講演梗概集建築計画	6. 最初と最後の頁 15-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 日塔和彦、上北恭史、稲葉信子、花里利一、藤田香織、清水重敦、マルティネスアレハンドロ	4. 巻 F-2
2. 論文標題 カルパチア地方における校倉造木造教会堂の建築技法 ウクライナ木造教会堂群保存手法の構築：日欧校倉造理工法の比較研究 その3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年度大会学術講演梗概集建築歴史・意匠	6. 最初と最後の頁 905-906
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 日塔和彦
2. 発表標題 東欧の茅葺き技術 - カルパティア地方を中心に -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wataru Saeki, Kaori Fujita, Yasufumi Uekita
2. 発表標題 Structural System of Historical Log Architecture
3. 学会等名 2021 World Wood Day Virtual Symposium Program (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤田 香織 (Fujita Kaori) (20322349)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	
研究分担者	マルティネス アレハンドロ (Martinez Alejandro) (50807815)	京都工芸繊維大学・デザイン・建築学系・助教 (14303)	
研究分担者	石川 達也 (Tatsuya Ishikawa) (60359479)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	シュツコバ ガリーナ (Galyna Shevtsova)	キエフ国立建設大学・建築学部・教授	
研究協力者	トーマスゼック トーマス (TOMASZEK Tomasz)	ジェシュフ工科大学・土木環境工学建築学部・准教授	
研究協力者	ベイツ ミコラ (Bevz Mykola)	リヴィウ科学技術大学・建築学部・教授	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ドゥビク ユーリ (Dubyk Yuri)	リヴィウ科学技術大学・建築学部・准教授	
研究協力者	日塔 和彦 (Nitto Kazuhiko)	保存修復建築家	
研究協力者	大平 茂男 (Odaira Shigeo)	伝統技法研究会・代表	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
	ウクライナ	キエフ国立建設大学	リヴィウ科学技術大学	
ポーランド	ジェシュフ工科大学			