

# 文化遺産防災技術研究プロジェクト

代表：理工学部・教授 吉富 信太

研究メンバー：大窪 健之、金 度源、深川 良一、里深 好文、小林 泰三、藤本 将光、鈴木 祥之、  
持田 泰秀、福山 智子

## 1. 防火環境整備技術の開発

研究担当者：大窪健之、金度源

### 【研究目的】

#### (1) 地域防災情報ネットワークの開発

個別に設置されている住宅用火災警報器が感知した火災発生情報を、インターネットを介して自動的に地図付きメール配信により地域全体で共有し、地域住民による初期消火や避難活動に迅速に対応できるよう、情報共有システムの開発と実践配備を目指す。社会実験などを通して地域固有の適応性能について検証しながら、現行の火災や健康障害以外の発災情報も共有できるよう、さらには延焼火災の動態をリアルタイムで共有できるよう、高機能化に向けたニーズの把握および技術開発を行う。

#### (2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ボックスの開発

消防隊が即座に対応できないような大規模災害時には、消火活動の遅れは日本の歴史文化都市にとって致命的な被害となる。しかし現状の公設消火栓はプロの消防士が複数名で操作する必要があるなど、市民一人の力では取り扱いが不可能である。このため、災害時に地域に残された市民の力だけでも最低限の消火活動が可能にするために、特別な訓練を要することなく日常的に散水などにも利用することのできる、市民一人で操作が可能な高機能型市民消火栓を開発する必要がある。さらに、ワンタッチでホース延長が可能で、歴史的景観に調和し、平常時にも使いやすい機能を備えた、街頭設置できる多機能型消火器ボックスの開発を目指す。

### 【研究成果の詳細】

#### (1) 地域防災情報ネットワークの開発

これまで実装完了している「火災と急病」以外の新たな災害情報の配信可能性をはじめ、火元の正確な場所把握、自宅の場所を明示したハザードマップ配信、避難完了信号の発信などに対して期待が寄せられている。これまで、青森県黒岩重伝建地区で実証運用しながらデータ収集を継続している。さらに京都市・先斗町地域の伝統的木造密集地域にご協力いただき、車両の入れない街路とともに、狭小ながら避難経路となり得る伝統的な路地空間を有する地域特性を踏まえ、地域にとって最適な形で火災発見、初期消火、観光客避難誘導をサポートすべく、システムを活用した火災対応訓練を実施しており、改善に向けた課題の抽出と避難シミュレーションモデルの構築によるシステム導入の効果について検証を行ってきた。

2022年度には、コロナ禍において三密を避ける必要から通常の防災訓練を実施することが出来なくなったことを受けて、2020～2021年度に実施した、豊岡市・出石重伝建地区での「オンライン防災訓練」（グーグルフォームと記入用地図を利用したシナリオ・ゲーム形式の訓練プログラムを配信）に引き続き、京都市深草地域の住民と協力して、LINE アプリを活用した

オンラインでのリスクマップ作製を試行した。その成果は今年度の修士論文や次年度の学会発表に反映される予定である。

研究成果の一部はこれまでの特許申請につながっており、研究面でも今後学会への論文投稿を経て、広く社会に貢献していく予定である。

## (2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ボックスの開発

市民消火栓では、ホースの重さの問題から1本当たりの長さが30m程度に制限されるため、これまでは消火可能範囲が限定されてしまう問題があった。このため付近の使われていない市民消火栓からホースのみを持参すれば、ノズルを取り外すことなくそのままワンタッチで延長が可能な機構を開発し、さらにノズルヘッドのコンパクト化・操作のシンプル化を図ってきた。2021年度には最新ノズルを使用した性能評価試験と、外観デザインに関する評価試験、清水周辺地域のユーザーへの聞き取り調査を実施しており、2022年度には共同開発先と共同して、消防設備の規格に適合可能な小型延長ノズルの試作を行った。特許取得や論文発表に活かす予定である。

加えて元々市民利用の困難な公設消火栓に対して、取り付けだけで市民用消火栓ホースの接続が可能になる減圧バルブ付スタンドパイプを試作し、訓練等を経て改良を重ねてきた。2018年度に津和野重伝建地区で実施した訓練の結果を踏まえて、学会誌への寄稿により成果報告を行った。2021年度には出石重伝建地区における導入効果について、GISを活用したシミュレーションを実施しており、2022年度以降には特許取得や論文発表に活かす予定である。

多機能型消火器ボックスの開発については、これまで加悦重伝建地区の住民との協議を経て試作品の改良を行ってきたが、2019年度には最終的なデザイン案に対し合意形成に至ることが出来た。2020年度は予算申請と現地での制作を完了しており、2022年度にはそのうち10基の設置場所について、優先順位を検討するための手法を確立し、住民とのワークショップを実施して現場での設置作業を行った。この成果は卒業論文や投稿論文に反映される。

### 〈主な研究成果〉

- [1] Takeyuki OKUBO, Riku SUNADA, and Dowon KIM, "An Effectiveness of Spreading Fire Mitigation by the Traditional Knowledge Using Group of Trees in Japanese Historic Districts", Vol. (巻) : Le Vie dei Mercanti, No. (号) : XX International Forum, pp. (ID-20), 発行年 : 2022年7月
- [2] 南本一樹・大窪健之・金度源、火災情報を即時共有する地域防災情報ネットワークシステムの機能向上と評価に関する研究 - 豊岡市出石伝建地区でのオンライン防災訓練を通して -、歴史都市防災論文集（報告）、vol. 16, pp. 169-176, 2022年7月24日

### 【今後の研究計画・展開】

#### (1) 地域防災情報ネットワークの開発

今後は、火災発生情報や急病発生情報だけでなく、洪水や土砂災害、津波などの危険情報についても即時的な配信を可能とする多様な防災情報の受配信機能の実装と、スマートフォンによる地図情報の配信や電話による音声通知以外にも、既存の防災放送やサイレンなどと連動した多角的な情報配信により、市民への確実な情報伝達機能の実装を目指す。さらに、地震などによる建物倒壊箇所についても地図上に表示可能とすることで、最適な避難経路や消防侵入経

路についての判断材料を提供することを目指す。延焼火災をリアルタイムで把握できるようなアルゴリズムを開発中であり、できればグーグルマップ等のオンラインマップアプリと連動させることで、ユーザーの現在位置と最適な経路検索も可能としたい。

## (2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ボックスの開発

今後は、隣接する収納箱から取り出した余剰のホースを使って、ワンタッチで筒先に延長可能なノズルシステムの開発および消防認定の取得と、直観的に操作できる回転ドラム型収納箱の試作機を使った実証実験による性能評価と並行して、停電時照明機構やサイン表示などのデザイン面での改善と、普段から日常利用を広めるためのルール作り等を加えて、現場での社会実験を継続しつつ改良を加えていく予定である。

消火器ボックスについても、現場での住民評価を踏まえながら地域特性に応じた景観と機能を両立させたデザインを導くことが出来た。次年度以降には、実際に地域に実装された現状を市民の視点から評価し、最適な配置や数、運用や管理方法について検証し、研究開発を継続していく予定である。今後は地域への実践配備に対する住民による評価研究を進める予定である。デザイン案そのものも、意匠登録やグッドデザイン賞への応募を予定している。

## 2. 伝統木造建築物の耐震設計・耐震補強設計法の開発

研究担当者：鈴木祥之、吉富信太、佐藤英佑

### 【研究目的】

伝統構法木造建築物の耐震改修時には、意匠的に格子壁や面格子が用いられており、これを耐震性能を向上させるための要素として利用した検討を行う。伝統木造建物は大きな変形性能を有する特徴があり、こうした大変形に追従可能な補強要素の開発が望まれる。格子の仕口に制振効果の高いゴム要素を挿入した制振壁や、曲線部材の今日k率や断面を変更することで剛性や耐力を自由に調整可能な格子壁を提案し、加力試験を行い耐震性能評価を行う。

### 【研究成果の詳細】

伝統木造建物の大きな変形性能にマッチする耐震補強要素について、デザイン性を考慮した格子壁耐力壁について、実験的に性能を明らかにする試みをした。格子壁については、仕口部に高減衰ゴムを使用することで、制振壁としての利用方法を検討した。また曲線部材を用いた耐力壁を提案し、剛性や耐力を個別にコントロールできる方法について検討し、理論と実験の比較を行った。

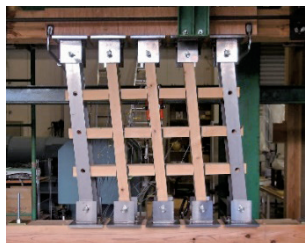


図1 伝統構法建物の立体解析モデルによる検討



図2 格子壁試験体の加力試験

### 【今後の研究計画・展開】

実験と解析の違いについて検討し、接合部の破壊性状などを考慮に入れた理論に修正するこ

とで、より精度の高い設計法の確立を目指す。

### 3. 伝統木造建築物の構造特性の解明

研究担当者：吉富信太

#### 【研究目的】

伝統的木造建築物の構造特性を、多点同時振動計測に基づく振動性状の把握により明らかにすることを目的とする。

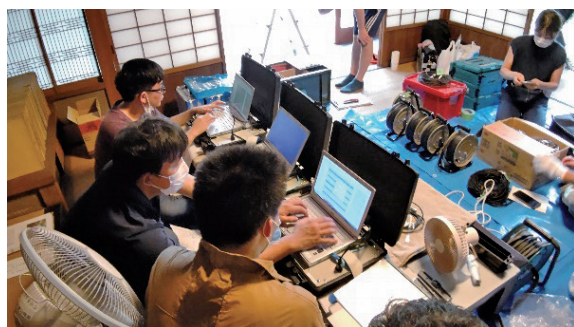
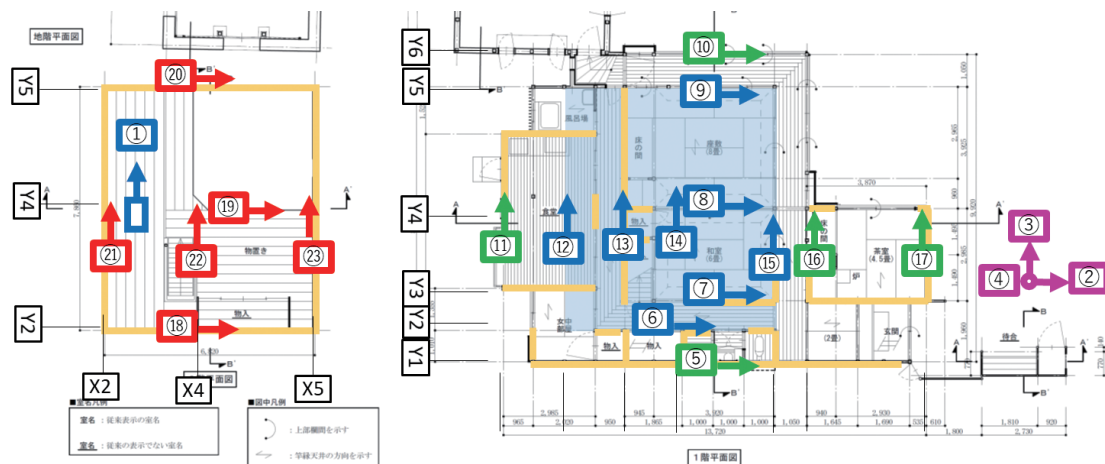


図1 対象建物と振動計測状況

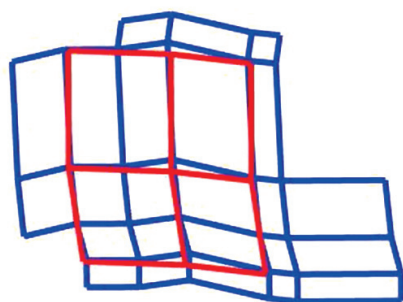


図2 計測された振動性状

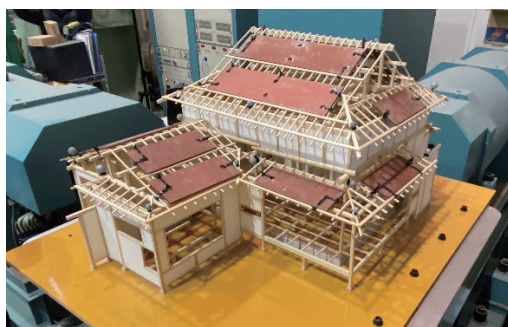


図3 小型模型の振動実験

#### 【研究成果の詳細】

豊中に現存する伝統構法木造建物を対象として、起震機を用いた加振実験を行い、構造特性の推定を行った。また、小型模型を作成し、振動台実験を行った。

## 【今後の研究計画・展開】

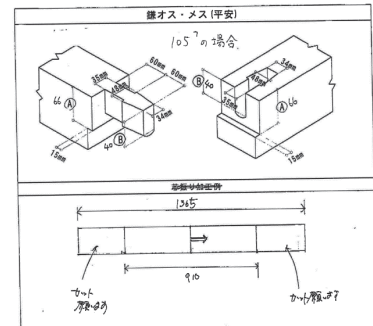
伝統的な木造建物の振動性状に基づいて、建物性能を推定する手法について検討した。

## 4. 木材継手加工法、ポリウレタ塗装補強の構造性能

研究担当者：持田泰秀

### 【研究目的】

歴史的建物にも使われている標準的な継手に対し、熟練大工の手加工と機械加工の2つの作り方による構造性能に対する違いと、表面塗装のポリウレタを用いて補強した場合の構造性能の向上に関して、引張試験を通して明らかにする。これにより、木造建物での加工法の違いを考慮した有効な造り方や、腐朽した木材の補修補強や応急処理へのポリウレタの活用の可能性を検証する。

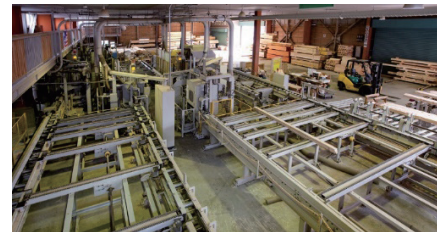


腰掛け鎌継ぎ概要

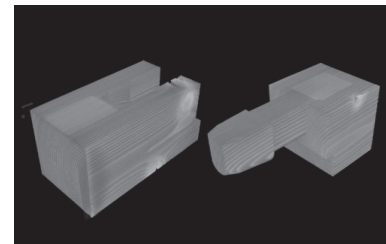
### 【研究成果の詳細】

#### (1) 加工方法による生産性の違い

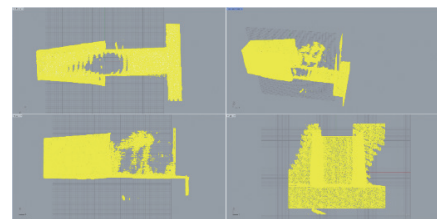
熟練大工の手加工と機械加工の2つの腰掛け鎌継ぎの生産性について、ヒアリング調査を行った。加工時間については、手加工が約1時間掛かり、機械加工がプレカット加工ラインにセットし、雄鎌、雌鎌の一对の加工初めから終了に約5分程度である。経済性では、1か所の手加工が約2000円、機械加工が単純に加工費のみの費用では、約7,500円である。手加工は職人の日当を所要加工時間で換算算出しており、機械加工は、1か所の加工金額は手加工より高いが、実際の一棟建物の場合、同様な4m程度の多くの部材があるので、鎌継ぎの加工費は下がる。職人の手加工の方が実質高くなる。その他にも、同じ材種での優れた木目の木材の入手は、手加工で可能となる。機械加工より手加工の方が、木材の歩留まりが良くなる。



機械加工作業状況



CT スキャナーの3次元画像



CT スキャナーの隙間の STL データ

#### (2) 加工方法による施工精度の違い

熟練大工の手加工と機械加工の2つの作り方による腰掛け鎌継ぎの継ぎの代表試験体を作成した。X線CTスキャナー試験にて、各々の加工法の継ぎの隙間の分布を調査し、その違いを明らかにした。

継ぎの隙間をSTLデータとして表示したものを示す。Rhincerosを用い、体積の測定算出を行った。

手加工が $27451.1105\text{m}^3$ 、機械加工が $1604.29137\text{m}^3$ と算出した。それを継ぎの男木・女木の接地面の表面積で除して隙間の平均厚さを算出した。その結果、手加工が $0.623\text{mm}$ 、機械加工が $0.0512\text{mm}$ という結果となった。隙間の平均厚さは、約10倍手加工の方が大きい結果となった。

### (3) 加工方法による構造性能の違い

ジグ取付部を両端に有する 105mm × 105mm × 600mm の中央に、腰掛け鎌継ぎの接合部を有する試験体を作成する。樹種がスギとヒノキ材、継手が手加工と機械加工、ポリウレア塗装の有無があり、各々5体で、計40体の引張試験を行った。

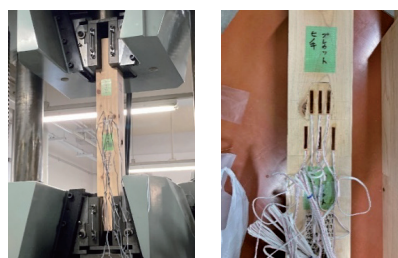
材軸変形と引張荷重の関係では、全体的に多少の非線形の引張剛性を維持しながら、最大引張荷重時材軸変形4mm程度、最大引張荷重約23kNを示した。最大荷重後は、急激に荷重低下した。手加工が機械加工より材軸変形、最大引張荷重のばらつきが大きい。破壊形式は、3種類あり、①男木の首部分がせん断破壊する形式、②男木のかまの首部分により女木のせん断破壊させる形式、③男木のかまの首部分が女木にめり込み材軸垂直方向に広げる形式があった。手加工は、①②③のすべての破壊形式がみられ、機械加工は、②の破壊形式のみとなった。継手の鎌近辺の材軸方向のひずみは、手加工で最大荷重に近づくと、大きなばらつきの生じる状態となり、機械加工では、最大荷重まで、手加工に比べて小さなばらつきのひずみにとどまっている。

### (4) ポリウレア塗装による補強効果

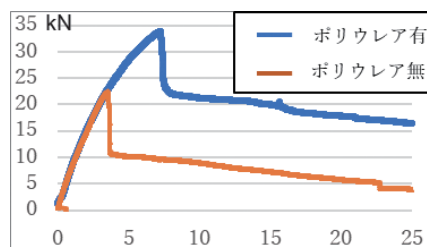
ポリウレア塗装を施した試験体も作成し、比較の引張試験を行った。塗装無しと同様に多少の非線形の引張剛性を維持しながら、最大引張荷重時材軸変形8mm程度、最大引張荷重約34kNを示した。引張剛性の非線形性は、変化が無く最大引張荷重に達した。約1.5倍の強度向上を実現した。

### 【今後の研究計画・展開】

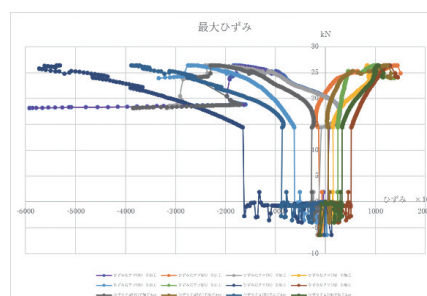
今回は、熟練大工の手加工と機械加工を対象としたが、次回は、本来予定していた宮大工の手加工の性能試験も行う。ポリウレア塗装補強については、下地処理とプライマーによる構造材との一体化を図った試験から、アンボンドとなる処理方法での構造性能の状況を明らかにする。



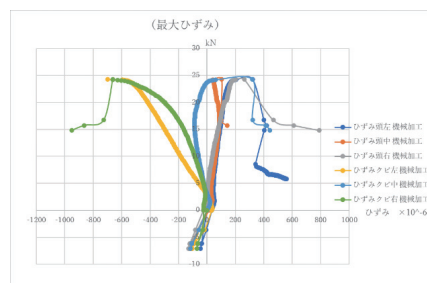
引張試験外観写真 歪測定位置写真



材軸変形と引張荷重の関係図



手加工の材軸方向ひずみと引張荷重の関係図



機械加工の材軸方向ひずみと引張荷重の関係図



ポリウレア塗装施工状況

## 5. 歴史文化地域の地盤環境を踏まえた防災技術の開発

研究担当者：深川良一、里深好文、小林泰三、藤本将光

研究協力者：酒匂一成（鹿大教授）、藤井大佑（鹿児島市教育委員会）

### 5.1 世界遺産・寺山炭窯跡の被災・復旧状況調査

#### 【研究経緯および目的】

2019年6月28日から7月4日にかけて梅雨前線が九州に停滞し、前線に向かって南から暖かく非常に湿った空気が流れ込んだため、特に南九州では記録的な豪雨となった。世界遺産・寺山炭窯跡周辺での総降水量は700～800mmにも達した。そのため、寺山炭窯跡自身の石積み擁壁の一部が崩壊し、また炭窯跡の周辺を包むように存在する高い斜面の一部が崩壊し、その崩壊土砂と途中巻き込まれた樹木が一体となって炭窯跡を襲うことになった。

本研究では、2019年8月、2021年3月、2022年3月、8月、11月の計5回にわたり現地調査を行った。その調査結果を踏まえて被災実態・メカニズム、被災以前の現地の取り組み、および被災後の現地の取り組みについて分析を加え、評価すべき点、今後の課題等について明らかにすることを目的とした。

#### 【研究成果の概要】

##### (1) 世界遺産「寺山炭窯跡」

寺山炭窯は、薩摩藩主・島津斉彬の命により1858年に旧集成館近くの吉野村寺山地区に設置された。薩摩藩は近代産業の育成に熱心であったが、藩内に石炭を産しないため、大量の木炭が必要となっていた。炭窯が寺山に設置されたのは、旧集成館に近く、シイ、カシ等、木炭製造に適した樹木が繁茂していたからである。寺山炭窯跡は、旧集成館等とともに、2015年7月5日に「明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業」構成遺産の1つとして世界遺産に登録された。写真1に被災前の寺山炭窯跡を示す。

##### (2) 寺山炭窯跡の被災

###### 1) 被災当時の気象概況

2019年の梅雨前線に伴う雨は6月28日から7月4日にかけて鹿児島県内で降り続くことになった（図1参照）。県内各地で累積雨量は600～800mmに達し、それに伴って各地で土砂災害が頻発した。

寺山炭窯跡に影響を与えたのは、以上の6月28日～7月2日にかけての最初の線状降水帯であった。寺山炭窯跡における被害は2回発生した。1回目は6月28日である。累積雨量は100mm前後であったと推定される。2回目は7月1日であった。7月1日には累積雨量は400mmに達していた可能性がある（写真2参照）。また、1時間雨量も50mmを超えるような非常に激しい雨が降っていた可能性がある。

###### 2) 被災状況

炭窯跡の被災は2回発生した。1回目は2019年6月28日である。その前日から降り続いた大雨により、炭窯の外周を囲む石積みの裏側の土が水を含み、石積みがその重さに耐えられなくなったため、正面右側の石積みが高さ約2.5m、幅約2mに亘り崩落した。

2回目の被災は7月1日に発生した。寺山炭窯跡を谷沿いに覆うように存在している斜面が



写真1 被災前の寺山炭窯跡



写真2 被災後：鹿児島県観光連盟提供

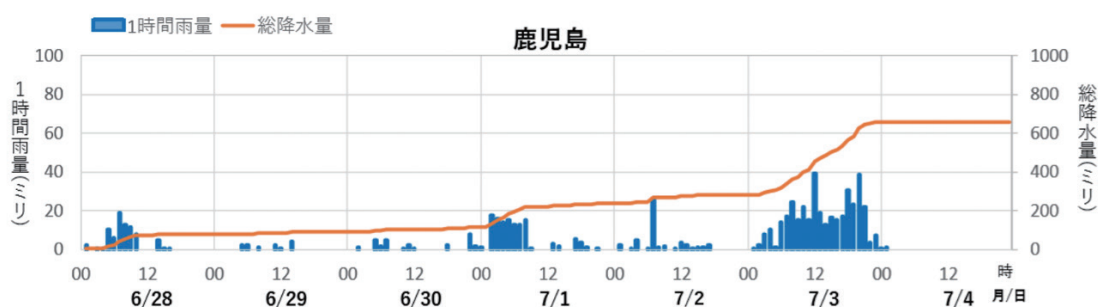


図1 6月28日から7月4日にかけての鹿児島市内における降雨状況

大規模に崩壊し、崩壊した土砂が転倒した樹木を巻き込みながら下流側に流下し、炭窯跡を襲うことになった。

### (3) 被災前の現地の取り組み

現地では2015年7月に世界遺産に登録されるとすぐに①石積みのはらみだし計測、②3次元測量、③変状要因分析等が行われていた。注目すべき取り組みである。このことが被災後の復旧を早めることにつながった。

### (4) 被災後の現地の取り組み

復旧に向けては、図2に示すような3つのエリア、即ち①世界遺産を構成する炭窯跡本体、②同じく世界遺産の一部である斜面の下部エリア、③世界遺産ではない斜面上部エリアに分けられ、それぞれ防災対策が講じられた。上部エリアの斜面部については、景観の復旧に配慮したジオファイバー工法が実施された。

上部エリア、下部エリアの復旧については植生が重要な意味を持つ。小学生や地元自治会等を巻き込み、現地で採取したどんぐりなどを数年かけて育て、植生を復活させるという興味深い取り組みが継続中である。

復旧工事は、2023年度中に炭窯本体の石積み擁壁の積み直しが完了する予定であり、この作業完了をもって一応終結する。

以上の世界遺産登録から被災後の復旧過程について、2023年7月の歴史都市防災シンポジ

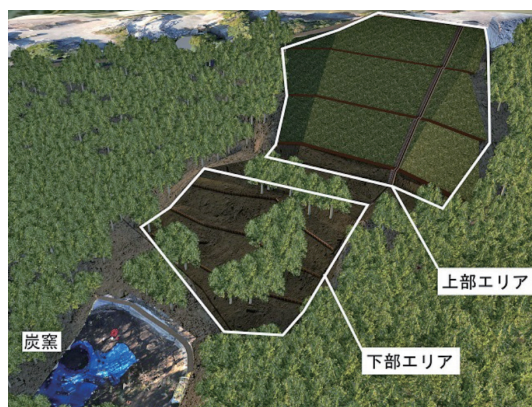


写真3 復旧に向けたエリア分け：鹿児島市提供



ウムにおいて研究協力者である鹿児島市教育委員会文化財課世界遺産係・藤井大輔主査より特別講演がなされる予定である。

## 5.2 清水寺におけるディープラーニングを用いた土砂災害発生雨量の予測に関する研究

本研究は、ディープラーニングを用いて、京都府の過去の雨量データを基に、清水寺の土砂災害発生危険性を数値的に明らかにする。研究は、Sonyが開発しているNeural Network ConsoleというAI開発ツールを用いて解析を行う。実験データは対象地域である清水寺の土砂災害のデータが4件、京都府の土砂災害のデータが15件で合計19件の災害データを使用する。これらの災害発生時の雨量を基に、災害の有無の予測を行う。

1時間ごとの雨量の場合には災害が発生した19件の内、11件の災害を予測することができた(表-1)。また、10時間毎の雨量の場合、災害が発生した19件の内、18件の災害を予測することができた(表-2)。1時間ごとの雨量の場合、集中豪雨による土砂災害の予測することができたが、長期的雨量による土砂災害は予測することができなかつたと考えられる。10時間ごとの雨量の場合、長期的な雨量の予測も可能となったが、1時間ごとの雨量と比べると災害発生の空振りが多くなった。

表-1 1時間ごとの雨量の場合

		予測結果	
		発生(P)	未発生(N)
実際の土砂災害状況	発生(P)	真陽性(TP) 11	見逃し(FN) 8
	未発生(N)	空振り(FP) 6	真陰性(TN) 1162

表-2 10時間ごとの雨量の場合

		予測結果	
		発生(P)	未発生(N)
実際の土砂災害状況	発生(P)	真陽性(TP) 18	見逃し(FN) 1
	未発生(N)	空振り(FP) 10	真陰性(TN) 987

## 6. 歴史的実建造物の耐久性評価調査

研究担当者：福山智子

### 【研究目的・成果の概要】

本研究の目的は、歴史的な鉄筋コンクリート(RC)建造物の経時変化の記録と、それに基づく構造物耐久性向上と延命に関する研究である。担当者らのグループは、歴史的なRC建造物として長崎県端島(軍艦島)を対象として取り上げ、継続的な調査を行ってきた。2020年度以降Covid-19の影響により本研究グループによる上陸調査は中止されていたが、2022年10月31日と11月1日に3年ぶりの上陸調査を行った。

軍艦島は120×600m程度の海に囲まれた埋立て島であり、海水による鉄筋腐食が主な構造物劣化要因としてみなされているが、世界遺産の一部を構成する構造物群としてその維持管理を考えた場合、構造物の経年変化を把握しその対策についても考慮する必要がある。

本研究では構造物の定点観測写真を撮影し、軍艦島の各種構造物の経年変化から、構造物が受けている劣化外力の種類やその程度、劣化の進行の把握を試みる。

なお、軍艦島のRC構造物調査の主体は日本コンクリート工学会と東京大学(代表：野口貴文教授)であるが、東京理科大学、芝浦工業大学、名城大学、琉球大学その他の建築材料の耐久性に関する研究室・研究機関が参画する共同プロジェクトであり、各機関は独自の調査を実施することができる。調査と写真撮影は長崎市の特別な許可により実施された。

### 【研究成果の詳細】

代表者が調査を開始した2011年以降に撮影された写真と同アングルの写真の比較により、

RC 構造物の劣化進行の把握と補修履歴の記録を行った。また、観測位置を地図上にプロットし今後の定点観測に使用する資料を整備した。ただし、2011 年から 10 年以上経過したことで建物の劣化が進行し、完全な同一アングルでの撮影や建物内への進入が難しい場合があった。

以下に、いくつかの建物の写真を例示する。

図 1 は 1939 年に建てられた 57 号棟の経年変化を示したものである。この建物は直接海に面してはいない。2011 年と 2022 年を比較すると、開口部のかぶりコンクリートや建具の脱落を確認することができる。

写真 2 は、1939 年築の 56 号棟の階段を撮影したものである。この建物は島の短手方向の真ん中に近い場所に位置し、海からある程度の距離がとられている。2011 年と 2022 年では鉄筋の腐食進展やかぶりコンクリートの脱落のほか、コンクリート表面の汚れ箇所の拡大、構造物



図 1 57 号棟 A 地点



図 2 56 号棟 AA 地点



図 3 14 号棟 AA 地点

中の水の移動を示唆するエフロレッセンスが観察された。

写真3は、1941年築の14号棟を示したものである。14号棟は比較的高台に建てられているが、海に面した建物である。2011年と2022年の比較では、かぶりコンクリートや建具木材の脱落が見られるが、2011年時点で鉄筋の腐食がかなり進行していることから、部材の脱落は風雨の影響も考えられる。

#### **【今後の研究計画・展開】**

軍艦島では多くの調査が実施され、公開されている写真だけでもかなりの数を見ることができ、しかし、経年変化を意識した撮影は少なく過去と現在の比較が難しい場合もある。今後も島内全構造物の定点観測を継続して経年劣化の種類やその進行速度を把握・整理し、構造物の維持管理だけでなく歴史的資料としても残していきたいと考えている。