

2023年度(第8回) 助成支給対象者

No.	氏名	所属研究機関・職名	テーマ	ページ
1	アイダ ヤスヒロ 相田 康洋	日本大学 助教	厳島神社社殿に見る海上立地のための計画的・技術的・構法的な対応策に関する調査研究	1～4
2	アライ シゲユキ 新井 重行	東京大学 史料編纂所 准教授	江戸時代後期の大工組織の業務復元に関する基礎的研究	5～7
3	イマモト ケイイチ 今本 啓一	東京理科大学 教授	蟻害劣化を受けた木材の非破壊損傷評価と補修・補強工法の開発	8～11
4	ウノ トモコ 宇野 朋子	武庫川女子大学 准教授	大津壁表面の塩類風化の要因の解明	12～15
5	ウンノ サトシ 海野 聡	東京大学大学院 准教授	「中井家文書」にみる寛政度と安政度の御所造営と継承理念	16～18
6	エンケホルワ	八戸工業高等専門学校 助教	清水寺観音堂のデジタル保存と耐震性能評価への統合的アプローチに関する研究	19～22
7	オオノ サトシ 大野 敏	横浜国立大学大学院 教授	地域および博物館と連携した歴史的建造物の魅力や価値の周知手法に関する実践的研究	23～27
8	キタノ ノブヒコ 北野 信彦	龍谷大学 教授	社寺文化財建造物における装飾木彫の調査と保存・修復・資料活用に関する研究	28～32
9	コレサワ ノリヨ 是澤 紀子	日本女子大学 教授	摺拓本資料に基づく大工彫刻の記録と再生	33～36
10	サカイ テイスケ 坂井 禎介	奈良女子大学 専任講師	住宅系建築の意匠の研究—寺院方丈を中心として、建築史、美術史の横断的視点で—	37～40
11	スダ タツル 須田 達	金沢工業大学 教授	伝統構法を活かした瓦葺き多段棟の耐震性能評価法の開発	41～44
12	ナカオ マサト 中尾 方人	横浜国立大学 特別研究教員	社寺建築物における仕口のモーメント抵抗機構モデルおよび計算式の開発	45～48
13	ニシカワ エイスケ 西川 英佑	関西大学 助教	災害後の修理による伝統的木造建築の構造健全性の回復に関する研究	49～52
14	ノムラ ナオキ 野村 直樹	崇城大学 助教	旧海軍建築をモデルとした鉄骨柱脚部の構造性能に関する実験的研究	53～56
15	フジイ ヨシヒサ 藤井 義久	東京文化財研究所 客員研究員	鳥居など伝統的な木造外構の生物劣化の非破壊診断技術の確立	57～58
16	マルティネス・アレハンドロ	京都工芸繊維大学 助教	木造建築遺産におけるオーセンティシティに関する研究	59～62
17	ヤマナカ ミノル 山中 稔	香川大学 教授	文化財石垣耐震基礎診断で用いる累積示力線法への伝統的の石垣築造技術の導入による石垣耐震性の再評価	63～67
18	ワダ カズノ スケ 和田 一之輔	奈良文化財研究所 考古第一研究室長	国宝法隆寺五重塔の鉄釘にみる形態変化と規格の選択と変遷にかんする通史的研究	68～69

※50音順 ※原則、所属研究機関・職名は申込時を記載

研究概要

厳島神社社殿に見る海上立地のための計画的・技術的・構法的な対応策に関する調査研究

相田康洋（日本大学）

畔柳昭雄（日本大学）

1. はじめに

世界文化遺産の海上木造建築物「厳島神社」に関する調査研究は数多くの報告がある。しかし、その大半は建築の様式や歴史的側面に関心が向けられ最大の特徴である海上立地に対する説明や考察は皆無に等しい。僅かに本社本殿や廻廊・平舞台の「造り」に海の特性への配慮があるとする俗説があるに過ぎず工学的視点からの説明はない。

他方、厳島神社の創建時から仁安大造営までの文献等資料はほぼ焼失し系統的研究は困難とされてきた。こうした中で、厳島神社の海上立地に関して海洋建築的視点から解析を試みてきた。^{*1,2)} その結果、新たな視点を見出し調査研究の展開が必要と考えるようになった。

2. 研究の目的

これまでの研究成果を踏まえ本研究では、厳島神社特有の社頭景観創出のための海上社殿と海との関係性を捉えることとし、①佐伯景弘解^{*3)}に記される過酷な環境圧を被る社殿立地場所の特定。②創建後 900 年程経過の中で海上社殿が維持継続された木造の技術的・構法的特徴の把握。③海上社殿建立のための有浦湾・御笠浜の形状(人工海浜)改変説に関する工学的な検討。この 3 側面の説明から、着目されなかった海上木造建築物の有用性を捉えると共に、将来予測される海上社殿の冠水や水没に対する対策の検討を行うこととする。(写真-1)



写真-1 厳島神社全景

3. 研究結果

3-1. 厳島神社の社殿立地の場所の特定

厳島神社創建は社伝によると推古天皇即位元年（593年：飛鳥時代）に社殿造営の神託を受けた当地の豪族佐伯鞍職が宗像三女神の市杵島姫命を祀る「社」か「祠」を御笠浜に創建したのがはじまりとされる。その後、佐伯氏が代々神職を継承している。この頃までは厳島神社とは呼称されず、宗像三女神の市杵島姫命、湍津姫命、田心姫命が祀られ、市杵島や伊都岐島と詛することで 14 世紀頃から「厳島」と呼称され厳島神社となったとされる。

宗像三女神を主祭神として有浦湾の御笠浜に祀ることについては諸説ある。ただ、その場所が御笠浜のどのあたりに建立されていたのか、場所や位置は確認されていない。また、厳島神社の主祭神を祀るための建物あるいは神殿が「社」か「祠」かも不明である。「社」は神を祭る建物や場所とされ、「祠」は神を祀る小さな殿舎で、その語源は神道用語の「ほくら（神庫、宝倉）」の転訛とされるため、御笠浜の前浜あたりに創建当時の神社は建立され極小規模な「祠」で構成されていたものと考えられる。

この「祠」が建立された御笠浜が選ばれた理由は二つ考えられる。1 つは御神体としての弥山の祭事の際、神籬として臨時に神を迎えるための依り代を据えるため御神体の弥山を臨むことができる最良の場所であると共に、入江地形の有浦湾は周囲を自然林が囲むために神籬を執り行うための神域を形成するには都合よく小規模な砂浜は白い砂礫で覆われていたため、神聖な穢れのない無垢な空間と見ることもでき御笠浜は最適な場所であった。もう 1 つは神のいくつかの神聖な島の中に人為的な「祠」を建立することは憚られた。そのため、海の満ち潮と引き潮の作用によって砂浜が波間に現れ消える御笠浜に祠を建てることは島の中ではないと解釈されたと理解することもできる。

こうした御笠浜の場所性に見る自然特性や空間特性、環境特性を生かすことで弥山の祭事に際して神籬の依り代

を据えるには絶好の条件を備えた場所であった。そのため、恒常的に用いることで常設的に祭壇が設けられるようになり祭壇を風波から保護するため上屋としての「祠」が設けられたと考えることができる。

この頃の有浦湾は今日の地形とは様相を異にしていた。湾には背後から流れる御霊川（現紅葉谷川）と瀧川（現白糸川）の河口部が湾奥の海岸線の東西に流入し湾正面の海からは波が寄せるため、前後から土砂が堆積することで中洲が形成され御笠浜をつくり出した。また、現在の不明門あたりの地形を見ると小さいながらも海面との高低差は比較的高く、ここが海浜部の後浜で大鳥居の先が前浜とすると、地形的には小さな河岸段丘が形成されていたか、緩傾斜の砂浜海岸であったか、厳島神社の建つ範囲をわずかに掘り返すことで、海底を扁平に近い勾配にして社殿を建てやすいように改良したとも考えられる。

これらを考慮すると、神社の創建時には設置されていなかった大鳥居の内側に「祠」は建てられた。このときの神社の「祠」は、当初は祭壇を保護する目的で設けられたが、祭壇は通常は直接的には地面に置かれることはなく、棚か台座が設けられることから、そこに置かれた祭壇を保護するために「祠」を据えることで、脚の部分は満潮時には水の中になり、時化の時は波の影響を被ったものと思われる。

このことは宮島町史資料編地誌紀行Ⅰ（1992.3）に編纂されており、佐伯景弘が仁安3年（1168年）に厳島神社の造営完成について「伊都岐島社神主佐伯景弘解」の中で「この社は昔から海浜に建ち波にあたって壊れやすい。社殿が破損したときは安芸国司と佐伯郡司が朝廷に上申し、修造を加える建前だったが、今回は社家の力が及び難いので、景弘の私力でことごとくつくり終えた。従来神殿以外は板葺であったのをこの度はすべて桧皮葺に改め社殿の間数を増し新造し金銅金具で華麗荘厳とした。今後破損の時は負担が大きすぎるので、諸社修造の先例にならい、安芸守の重任遷任の功により修造するようにされたい」と記している。このことから創建当時の神社は、島が禁足地という場所柄や神格化された島の風習に配慮し神社は主祭神を祀る祠だけであったが、有浦湾の御笠浜の前浜の満潮時は床下が海面になり波の影響も直接被る場所に建立されていたものと推測できる。ただし、創建後、大造営までの575年程の間に御笠浜は土砂の堆積により姿かたちを

変え、「祠」の神社から拝殿などの付属舎を備えた社殿になっていたかについては不明である。

大造営後の厳島神社は景弘解の内容から察すると創建当時から600年あまり「祠」は海上に建立され続けていたことになるため、景弘は大造営後も社殿が被る波や高潮の影響による破損修復が要されることを憂うことで宣旨を下達することを朝廷に願い出ている。

その願いとは内容から過去にも被害を度々受け、その都度修築に私財を供出してきたが、大造営後の社殿修築にはさらに費用が要されるため朝廷に資金援助を願っていた。

以上のことから、厳島神社の社殿立地の場所は、有浦湾の御笠の浜の前浜を扁平にし、そこに「祠」を建立したが、高床型の祠が設けられたと考えられる。

3-2. 海上社殿に見る木造の技術的・構法的特徴

厳島神社の空間構成は海側から平面的で簡素な外部空間（平舞台・高舞台）、屋根と柱だけの立体的で原初的な内部空間（廻廊・祓殿）、屋根と壁による内包空間（拝殿・本殿）と連なり外から内へと深化させた空間が順次変質するように配されていることが分かる。（図-1）

平舞台の床面は、本社本殿の前面に置かれた拝殿とその前面に据えられた祓殿を囲み込むように配された濡縁に連なる。祓殿に繋がる平舞台の櫛の歯の左右部分にあたる2本の橋状の部分は平清盛が安元2年（1176年）に千僧供養を催すため「棧敷」として急造した「仮廊」とされる。この平舞台と棧敷部分の床面は祓殿に接続する東廻廊と西廻廊の各々高覧から突出した床板の上に載る欠込み乗せ掛けの木組で接続されている。接続された棧敷部分は廻廊の柱間2間分の間口幅で取付けられ、床板の上に配された高欄の下長押（12cm）よりも5cm程高く長手方向に簀子張りの床板が張られている。この棧敷部分と平舞台の四周に高欄はないが仁治度には刳高欄が廻されていたとされる。

平舞台床の簀子張りの隙間幅を見ると廻廊と比べて狭小で1.0～1.3cm弱程で板幅も16.7～17.0cm程と細く、板厚も3.2cm程で廻廊床面とは異なった寸法体系となっている。平舞台と棧敷部分は床下の幕板や貫部分も木肌を露出した造りとなっている。廻廊が大引きや縁葛にまで朱塗を施していることと比べると造作的にも視覚的にも異なり、造りは簡素で仮設のようにも見え、社殿群を結ぶ廻廊

とは空間的に一体化されてはおらず空間的領域の違いを表しているように見える。

平舞台は室町時代末期に毛利元就か輝元が寄進したとされる赤間石の束柱が床面を支え、束柱は八角柱の掘立て形式で柱上部に貫穴を空けて木製の貫を通し楔で止め、柱頭には杓を掘り桁を載せ、その上に根太が配され簀子張り床板が張られ桁の外側には幕板が付けられている。この床面は赤間石の束柱に固定されていたのか、積載されていただけかは明らかにされていない。平舞台や棧敷部分の端部は東西廻廊と祓殿濡縁に接続され、一端固定の片持ち梁的状态として捉えることができる。束柱の赤間石への変更は、台風や高潮時に被る波力により平舞台や棧敷が浮き上がるのを防ぐために毛利元就が変更したとする説がある。仁治2年(1241年)に平舞台上に海側から見て左側に楽屋(楽房)が、右側端部に左右門客神社の前身の戎社が置かれ、それぞれ井桁組の台座で据えられていたが、正中2年(1325年)の大風による楽屋の倒壊を経て、平舞台上に置かれたものから礎石建と貫構造による社殿建築へと変更され風波に曝される位置に立つため背面庇が廃された。

高舞台は平舞台床上で祓殿前に配されている。床面を支える基礎部分は平舞台とは別途設けられているが、近世までは平舞台上に載せられた舞台であったとされる。四隅に高欄が配され、短辺側には各々三段の階段がある。床面は長手方向に長尺の1枚板が張られ、簀子張りとはなっていない。床面は厚手の束石の上に花崗岩の石柱で支えられ、平舞台の赤間石よりも胴回りは太く、長さもあり貫は二段空けられている。高舞台の来歴は不明で仁治の奏状にも不記載で、左右楽房に記載があるため同時期のものとされる。

厳島神社の社殿は、空間的な序列や格式を重んじることで、各々の機能用途に応じ、各社殿の床面の高さが設定されている。そのため、廻廊の床面の高さは厳島神社社殿の中で最も低い位置になる。海面に接近して社殿を立てる工夫は、社殿の審美性を高めると共に波の打込みを抑える減勢的措置としての効果も期待されるためであり、海面(秋の大潮時期の最高潮位)よりも15cm程上に廻廊床面は張られている。この廻廊に接続する棧敷部分の床面は廻廊よりも17cm程高く張られているため、平舞台と繋がる祓殿を囲み込む濡縁との接続においても段差が生じている。このことから棧敷部分と平舞台は廻廊よりも空間としては

格上に扱われることで千僧供養の際は「座」として用いられたと考えられる。

平舞台に連なる棧敷部分は床面を支える束柱や貫の部分は満潮時に海面上に表れるが、仕上げはなく廻廊との接続は床板の上に載せる簡易な木組のため段差があるが、棧敷としての座を廻廊の床面よりも格上に扱うことができ、千僧供養の後、そのまま残され継承されたと考えられる。

一方、平舞台は棧敷部分を含めて前述したように毛利元就か輝元により、室町時代後期に木造の掘立柱が赤間石に換えられ、石柱頭部に杓が掘られ桁を載せ根太が配され床板が張られた造りとなっている。そのため、大潮や高潮を被った場合、床面が石柱頭部に固定されず廻廊への接続も積載だけのため平舞台と棧敷部分は全体が浮き上がる可能性がある。この「浮く」ことが「筏構造」の見方を生んだ。平舞台の被災歴に焦点をあてて振り返ると山口佳巳により読み解かれた『「伊都岐島社神主佐伯景弘解」提出の背景』では、造営完了後の仁安3年(1168年)に高潮を被り廻廊が歪み、社殿が浮かび上がる被害に遭遇し後の仁安4年(1169年)の修理の際に廻廊の床面が簀子張りにされ、拝殿や祓殿の床板は固定せずに波による打ち込みに対応した減勢・減災的な措置が施されたとされる。次いで、正中2年(1325年)には大風により大鳥居が倒壊し、左右楽房、左右門客神社、平舞台が損壊し永正6年(1509年)と享禄元年(1528年)には本殿が高潮で被災し、天文6年(1537年)には高潮により左右楽房、左右門客神社、平舞台、高舞台が損壊した。被災履歴を見ると平舞台の支持柱が赤間石の束柱に変更される前の室町時代前期の木造掘立柱の時分に高潮による損壊が生じていたことが分かる。

以上のことから、社殿の空間構成は海側から広場的平面の外部空間(平舞台・高舞台・棧敷)、屋根と柱だけの立体的原初的な内部空間(廻廊・祓殿)、屋根と壁による内包空間(拝殿・本殿)へと連なり、外から内、平面から立体へと空間は順次変質するように配され、そこに用いられた木造構法も欠込み乗せ掛けの木組や幕板や貫部分の木肌露出の造りにより空間的領域の違いを表すように用いられていた。平舞台は創建時とは異なり、赤間石の掘立て形式で柱上部に貫穴を空けて木製の貫を通し楔で止め、柱頭には杓を掘り桁を載せ、その上に根太が配され簀子床板が張られ、桁の外側には幕板が付けられていた。

3-3. 有浦湾・御笠浜の形状改変説に関する工学的検討

瀬戸内海は本州、四国、九州に囲まれた内海であり、外洋からの波の影響を受けにくい閉鎖性の高い海域である。そのため、厳島神社周辺では通常、波高は比較的低く、年間を通じて有義波高（設計波相当）は0.5m未満で推移することが多いとされる^{*1,2)}。しかし、台風や強風を伴う低気圧が通過する際には、局所的に1.0mを超える最大波高が観測されることもある。また、近年の気候変動により、極端気象の頻度や強度が増加しており、瀬戸内海でもその影響が顕在化している。特に、夏季の台風の大規模化や進路の変化により、厳島神社周辺でも一時的に高波が発生するリスクは高まってきている。厳島神社は海上に建立された特異な構造であるため、波浪の影響を直接受けやすく、それゆえ、建立当初から現在までに、これら波浪の影響を小さくするため、有浦湾・三笠浜において地形の改変が行われた可能性について検討をした。陸域観測技術衛星だいち1号-3号（ALOS, Advanced Land Observing Satellite）の観測したデータをもとに作成された地理院地図（GSI マップ）の標高データ（図-1）をもとに、陸上地形の勾配の分析を行った。結果、紅葉谷川および白糸川の流路変更に伴う有浦湾西側の地域においては、人工的な地形改変が行われているものの、有浦湾のほか地域においては人工的な地形改変の特徴は見られなかった。前者の流路変更に伴う地形改変は、主に紅葉谷川からの土石流から厳島神社を守るためのものであり、波浪を低減させる目的で成されたものとは考えにくい。また、大鳥居から沖側に漂砂をせき止めるために杭が連続して配置されているが、あくまで沖側への漂砂防止のための措置であり、厳島神社へ入射する波高を小さくする目的のものではない。

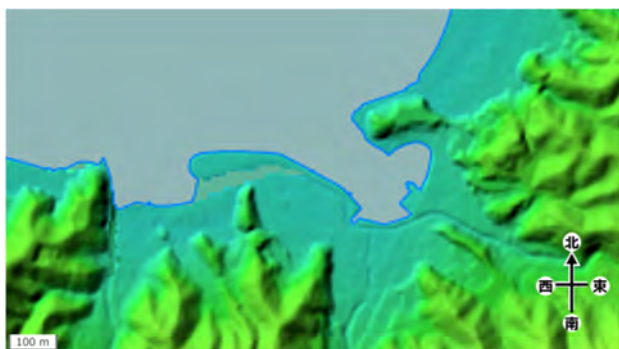


図-1 有浦湾標高図

4. まとめ

本研究では、過酷な海上環境下で約900年間維持されてきた要因を海洋建築の視点から解明することを目的とし、以下の結論を得た。まず、社殿の立地場所を特定した。創建は593年とされ、当初は御笠浜に小さな「祠」が建てられたと考えられている。この場所は弥山を望むのに最適であり、満潮時に水没する砂浜に「祠」を建てることによって、島の中ではないと解釈された可能性がある。佐伯景弘の資料からも、創建当初から社殿が海浜にあり、波で破損しやすい環境にあったことが示されている。これにより、社殿は有浦湾の御笠浜の前浜を平坦にし、高床式の「祠」として建立されたと推測される。次に、海上社殿の木造技術・構法の特徴を分析した。社殿は海側から平舞台・高舞台、廻廊・祓殿、拝殿・本殿と続く空間構成を持ち、機能に応じ床面の高さが設定されている。廻廊の床面は海面（秋の大潮時期の最高潮位）より約15cm高く設置され、波の打ち込みを抑える工夫が見られる。平舞台は室町時代後期に木造掘立柱から赤間石の束柱に変更されたが、過去の被災歴から、変更以前にも高潮による損壊があったことが明らかになった。最後に、有浦湾・御笠浜の形状改変説を工学的に検討した。地形分析の結果、波浪低減を目的とした大規模な人工的改変は見られなかった。流路変更は土石流対策であり、大鳥居沖の杭も漂砂防止が目的である。

参考文献

- *1) 畔柳昭雄, 相田康洋, 増田光一：厳島神社の海上への社殿建立に関する調査研究 厳島神社の廻廊配置及び構造に関する考察, 日本建築学会計画系論文集 第87巻 第796号, 966-974, 2022. 6
- *2) 相田康洋, 畔柳昭雄, 増田光一：厳島神社の海上への社殿建立に関する調査研究その2 厳島神社の平舞台に関する考察, 日本建築学会計画系論文集 第88巻 第816号 2024. 2, 232-239, 2024. 2
- *3) 山口佳巳：「伊都岐島神社神主佐伯景弘解」提出の背景, 厳島研究 広島大学世界遺産・厳島内海の歴史と文化プロジェクト研究センター研究報告書6号, 2010. 3

「江戸時代後期の大工組織の業務復元に関する基礎的研究」概要

新井 重行（東京大学史料編纂所・准教授）

近世建築生産史の分野は、御所など大規模造営の分析、および大工支配の成立・展開などを主たる論点として研究が進められてきた。近年では、宮内庁書陵部所蔵の「中井家文書」の公開が進みつつあり、とくに御所の造営過程についての研究には、さらなる深化が期待される。しかし、建築指図や帳簿などの検討に比べて、朝廷・幕府の役割を含めた造営事業における業務の全体像の検討は不十分であり、そのために建築史と歴史学とが積極的に協業するには、やや困難が伴うのが現状である。そこで本研究では、江戸時代の御所造営事業に関する史料を広く調査し、建具や調度といった、これまであまり注目されてこなかった分野にも目を配りつつ、歴史学の立場から、造営・修復の際に大工組織が幕府や朝廷によってどのように把握されていたのかを、記録や帳簿等をもとに復元し、両分野の協業の幅を広げる基盤を構成することを目的とする。

研究の概要と成果

1. 関係史料の調査・収集

京都府立京都学・歴彩館、京都市立歴史資料館などの所蔵機関において、関係史料の遺存状況を把握することを目的に調査を行った。

歴彩館では、「船屋太兵衛家文書」等の史料について、史料の性格および全体造の把握のための調査を行い、京都御所造営や調度品に関する必要な史料については写真複製を作成した。とくに船屋太兵衛家は、御所造営の際に建具などの調達を担当した大工家であり、詳細な帳簿類が複数残存していることを確認した。今後これらの検討を行うことで、新たな研究視角を提供してくれるものと期待される。

京都市歴史資料館では、「上野伊三郎家文書」「田中家文書」などの大工家の旧蔵文書について調査を行った。上野家は江戸時代より大工を営んでおり、御所造営に関する文書・絵図等を含む。同家の文書は、近年同館に寄贈され、昨年度に整理が済んだばかりのものであり、全体を把握するための調査を行った。

このほか、宮内庁書陵部所蔵の平田家本（蔵人所出納を代々つとめ、御所の調度品の調達や舗設を職掌とする）のうち、御所の調度品の調進に関わる資料について検討し、必要なものについて新規撮影を行った。内容については引き続き検討を行う予定である。

2. 史料の検討

本研究では、①大工組織内部の運營業務、②朝廷・幕府と大工組織の関係、の二つの視点を設定し、関係文書の調査・分析、翻刻文の作成を行った。

まず造営時の記録として、宮内庁書陵部所蔵の中井家文書に含まれる、文化年間の中宮御殿・仙洞御所の造営に関する記録・文書類に着目し、特に「小屋場会所日記」（「京都御所造営関係文書」E2-112-673）について、近世史を専攻する大学院生の協力を得つつ、史料を読む勉強会を定期的で開催して内容の検討を進めた。この小屋場会所は幕府方に連なり、造営現場において文書処理などに関わる部署であるが、造営事業における幕府方の行政組織のあり方については研究が少なく、業務内容を整理し、意義付けることが課題となる。また同じ造営事業について京都大学附属図書館にも関係史料が所蔵されていることが確認できた。

また今年度の成果として、宮内庁書陵部所蔵「安政造内裡坪取御間数等諸式寄帳」（210-115）「安政新造内裡諸備忘」（210-109）について、翻刻文を作成し報告書として刊行した。

この史料は、寛政度の内裏造営に関する複数の帳簿を、殿舎ごとに分けてまとめたものであり、坪数など基本的な情報をまとめた帳簿のほか、「御普請方より伺帳」など、従来その存在が知られていながら内容が不明であった帳簿が抜書されており、寛政度の内裏造営における大工組織の具体的な役割を検討するうえで非常に重要な史料である。

このほか、東京大学史料編纂所所蔵「御造営御用雑誌」（徳大寺家本-18-20）について並行して検討作業を進めている。かかる史料の検討を継続することで、複数の視点から、造営事業を立体的に把握することが可能になり、建築史と歴史学を接続させ、従来の認識を大きく変える可能性があると考ええる。

可同
一、本帳は、宮内庁書陵部所蔵「安政造内裡坪取御間数等諸式寄帳」(210-115)の「安政新造内裡諸備忘」(210-109)について、翻刻文を作成し報告書として刊行した。
二、本帳は、寛政度の内裏造営に関する複数の帳簿を、殿舎ごとに分けてまとめたものであり、坪数など基本的な情報をまとめた帳簿のほか、「御普請方より伺帳」など、従来その存在が知られていながら内容が不明であった帳簿が抜書されており、寛政度の内裏造営における大工組織の具体的な役割を検討するうえで非常に重要な史料である。

一、本帳は、宮内庁書陵部所蔵「安政造内裡坪取御間数等諸式寄帳」(210-115)の「安政新造内裡諸備忘」(210-109)について、翻刻文を作成し報告書として刊行した。
二、本帳は、寛政度の内裏造営に関する複数の帳簿を、殿舎ごとに分けてまとめたものであり、坪数など基本的な情報をまとめた帳簿のほか、「御普請方より伺帳」など、従来その存在が知られていながら内容が不明であった帳簿が抜書されており、寛政度の内裏造営における大工組織の具体的な役割を検討するうえで非常に重要な史料である。

3. 遺存建物の調査

史料の検討と同時に、次のとおり現地調査・熟覧調査も行った。

8 月には、恭明宮故地の現地調査を行った。恭明宮は明治 2 年に造られた、天皇・皇族の位牌などを保管するための施設で、明治 6 年には廃止される。その地は現在の京都国立博物館と豊国神社の一部にあたり、当時のものとされる建物一棟が、豊国神社に遺存している。

さらに 10 月には、泉涌寺において、寺宝および御座所などの調査を行った。同寺の御座所・小方丈は、明治初年の火災ののち、御里御殿の一部を移築したものである。

まとめと今後の課題

今年度の調査・収集によって、造営事業における大工組織と、幕府・朝廷との関係を具体的に位置づける必要があることが、課題として明確になった。幕府方で作成された記録・文書類は、国立公文書館・国会図書館などにも所蔵されており、関連史料の調査を継続して、江戸時代における造営事業を検討するための基礎的な成果を積み重ねたい。

また、造営史料と遺存建物を対照するという検討視角から、①恭明宮造営事業、②泉涌寺再建事業についても課題としたい。両事業は幕末から明治初期にかけてのものであるが、造営事業のあり方は、江戸時代の大工組織の運営方法を色濃く残していることが予想され、江戸時代のあり方と比較することにより、史料が残存しない分野についても、さらに理解が深まることが期待される。

蟻害劣化を受けた木材の非破壊損傷評価 と補修・補強工法の開発

東京理科大学 工学部 建築学科

今本 啓一

1. はじめに

蟻害は木材の主要な劣化要因の一つであり、地面に近い土台部分で被害を受けやすく、被害事例も多く報告されている。また、木造建築物では、部材耐力よりも接合部耐力が低く、接合部の破壊が先行し、接合部の変形が構造体の変形に大きく影響を及ぼす。よって、本研究では蟻害によって劣化した土台接合部に焦点を当て、横圧縮試験および柱-土台接合部における曲げせん断試験を実施した。

なお、劣化木材の補強方法として、比較的容易に行うことのできる樹脂充填工法の充填方法の検討を行うとともに、蟻害劣化を受けやすい高湿度環境下における耐久性試験も実施した。

2. 樹脂硬化熱測定試験

2.1 試験概要

既往の研究¹⁾²⁾³⁾では、木材への樹脂充填を行った際に、樹脂が発熱し木口や充填穴からあふれ出す現象が確認された。そこで、合成樹脂の熱特性を確認するため、樹脂の硬化熱の測定を行った(図1)。

試験体概要を図2、試験体一覧を表1に示す。樹脂は硬化後に硬質となる性質を持つエポキシ樹脂とポリアミンの2液混合型の合成樹脂を使用し、ベイマツの製材に穴を開けた木製型枠を2体、モルタル試験体用捨て型枠5体用意した。充填量を90g, 180gの2種類、充填間隔を2時間、4時間、24時間の3種類をパラメーターとして設け、1回の充填量や充填回数を変えることで硬化熱の抑制を試みた。

2.2 試験結果

図3に充填回数1回時の試験結果を示す。木製型枠、モルタル用試験体型枠どちらを使用した場合も、充填量が90gの場合には最大温度が30℃前後であるが、180gの場合には100℃を超える高い温度上昇を示した。このことより、充填量により硬化温度が大きく変化すること、充填量を90g程度とすることで、硬化温度を抑制できることが確認された。また、どちらの型枠を使用した場合にも、温度変化について同様の傾向を示していたことから、樹脂の硬化温度に対して木材中の水分等といった木材特有の材料特性の影響は少ないと考えられる。図4に充填回数2回時の試験結果を示す。2回目の充填を行う際にM180-2, M180-4では1回目の充填樹脂が完全に硬化しておらず、流動性のある状態であった。M180-2, M180-4, M180-24のいずれの場合でも、最大温度は40℃以下となり、充填間隔を2時間以上確保すれば、樹脂硬化まで養生せず、2度目の充填を施しても温度の抑制が可能であることが確認できた。

3. 耐久性試験

3.1 試験概要

シロアリは湿った環境を好むため、樹脂充填を行う木材は高湿度環境下にあることが想定される。また、既往の研究にて¹⁾²⁾³⁾樹脂充填による耐力回復の可能性は示唆されたが、木材と樹脂の複合材料としての耐久性に関する検討を実施した研究はほとんど見当たらない。

既往の研究⁴⁾では、床下の湿度環境は梅雨および夏季において80%以上にもなることが示されている。そこで、温度20℃湿度100%環境で15ヶ月間の曝露を行った。表2に試験体一覧

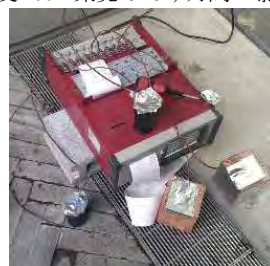


図1 試験写真

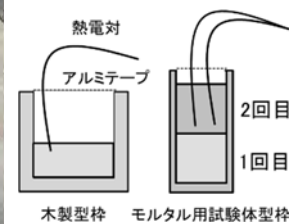


図2 試験体概要

表1 試験体一覧

	試験体名	充填回数 (回)	充填量 (g)	充填間隔 (時間)	1回目 (g)	2回目 (g)
木製型枠	W90	1	90	-	90	-
	W180		180		180	
	M90		90		90	
	M180		180		180	
モルタル用 試験体型枠	M180-2	2	180	2	90	90
	M180-4			4	90	90
	M180-24			24	90	90

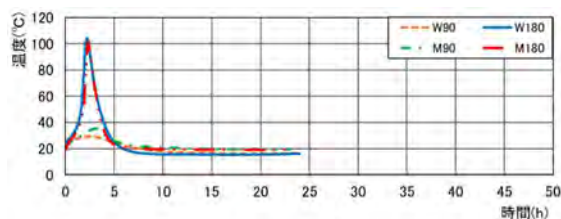


図3 試験結果(充填回数1回)

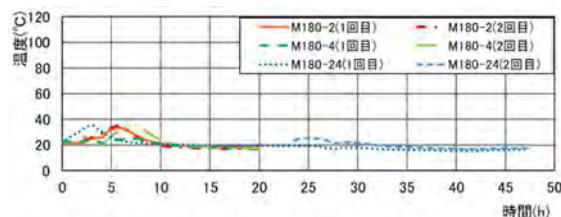


図4 試験結果(充填回数2回)

を、図5に試験体概略図を示す。木材はスギを使用し、試験体寸法は 30×30×60mm とした。また、蟻害を受けた木材の劣化状況を再現するため、体積および木口断面積に対する欠損率が30%を目標に欠損を施した。樹脂充填を施す試験体については前項と同様の樹脂 A を使用することとした。試験体は、数字とアルファベットの組み合わせとし、数字は曝露期間を、rは欠損を施していないもの、nは充填なしを、aは樹脂 A で充填したものを、zは樹脂単体(20×20×40mm)の試験体を示す。なお、アルファベットについては、縦圧縮試験を行うものは小文字表記、横圧縮試験を行うものは大文字表記とした。

高湿度曝露後には、恒温恒湿室(温度 20℃、湿度 60%)にて質量が恒量となるまで静置したのち、超音波速度測定試験および縦圧縮試験または部分横圧縮試験を行った。ただし、部分横圧縮試験においては、木表面を上面とし、試験体中心の上下面に 30×30 断面の鉄板を挟んだのち荷重を加えることとした。また、1 つの試験体条件に対し、コントロール材では各 3 体、曝露試験体では各 5 体行うものとし、結果については以下に平均値で示した。

3.2 試験結果

(1) 強度試験

図 6 に縦圧縮強度試験結果、図 7 に横圧縮強度試験結果を示す。曝露期間 3、6、12 および 15 ヶ月のすべての試験体で各条件の平均値は、曝露前と比較すると強度変化率は-22%～+33%の範囲であった。また、曝露 15 ヶ月目の試験体でも 15-z 以外のすべての条件で曝露前と同等もしくはそれ以上の耐力が確認され、15-z についても 5%低下と減少の度合いは小さく、曝露前に近い耐力が確認された。本実験の範囲内ではあるが、高湿度環境下においても、樹脂充填を施した試験体は試験開始前と同等の耐力を保持していたことから、樹脂充填はある程度耐久性を有する補強方法であることが示唆された。

(2) 超音波速度測定試験

図 8 に超音波速度測定試験による曝露前後での速度変化率を示す。曝露を行ったほとんどの試験体で速度低下が見られたものの、曝露期間と速度低下率との間に相関関係はなく、低下率は平均して 10%程と、非常に小さいものであった。これは前項での強度試験結果で、曝露前後での耐力変化がほとんどなかったことと共通していることより、超音波速度を測定することで耐力変化を確認できる可能性が示唆された。

4. 蟻害曝露試験

イエシロアリが生息している試験地において、3 ヶ月から 16 ヶ月ほどベイトマツ試験体を土中に埋設し(図9)、目標食害率が30%となるように蟻害劣化試験体を作製した。なお、食害の程度を表す指標として用いる食害率は、以下の式のように食害前後の質量減少率から定義した。

$$\text{食害率 (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

m1: 食害前の試験体の質量 (g)

m2: 食害後の試験体の質量 (g)

5. 全面横圧縮試験

5.1 試験概要

表 3 に試験体一覧、図 10 に試験体概要を示す。試験体は、105×105×315mm または 105×105mm 断面の柱-土台接合部試験体から切り出し、105×105×105mm とした。また、既往の研究²⁾での柱-土台接合部の曲げせん断試験において、樹脂充填率が40%でも健全体と同等まで耐力が回復したことが報告されている。その結果を参考に、食害による空隙率に対して、充填目標率を30%、50%と2種類設けることで、補強効果に対する充填量の影響を検討した。充填方法は、試験体を防水テープで覆い、試験体側面に千鳥状に穿孔したのち、樹脂を注入するものである。また、2章の結果に基づき、各充填穴に対する1回の樹脂の最大充填量は90g、充填間隔を2時間とし、蟻害程度に応じ複数回に

超音波伝播速度試験

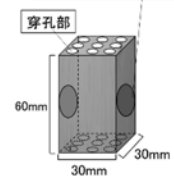


図5 試験体概略図

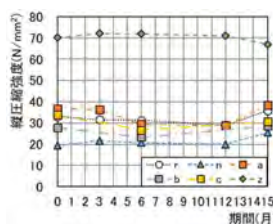


図6 縦圧縮試験結果

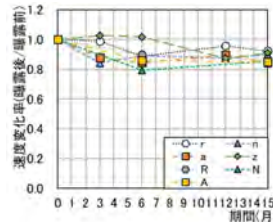


図8 速度変化率

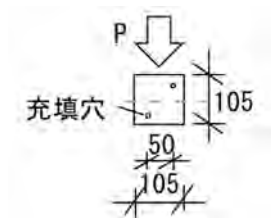


図10 試験体概要

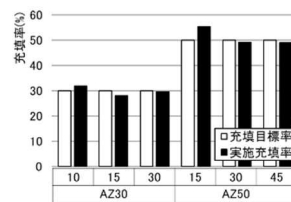


図11 充填率

表2 試験体一覧

試験体 シリーズ	試験方法	欠損	充填	曝露期間(月)				
				0	3	6	12	15
r	縦圧縮試験	x	x					
n		○	○					
a			○					
z		x	樹脂単体	○		○		○
R	横圧縮試験		x					
N		○		x			x	
A			○					

図7 横圧縮試験結果



図9 曝露写真

表3 試験体一覧

試験体	食害率 (%)	充填	充填 目標率 (%)
0-Z1	0	-	30
0-Z2			
0-Z3			
0-Z4			
5-NZ	5	×	
10-NZ1	10		
10-NZ2			
15-NZ	15		
25-NS	25		
30-NZ1	30		
30-NZ2			
10-AZ30	10	○	50
15-AZ30	15		
30-AZ30	30		
15-AZ50	15		
30-AZ50	30		
45-AZ50	45		

分けて注入を行った。ただし、食害後も超音波速度の変化が見られない充填位置がある試験体については、速度変化のあった1箇所のみで充填するものとした。また、各充填穴に対し、既往の研究²⁾の超音波速度と食害率の関係を参考に食害率を算出し、その割合によって充填量を振り分けた。

5.2 試験結果

(1) 充填施工

樹脂の量をコントロールすることで、樹脂の硬化による発熱や木口および充填穴からのあふれ出しを防ぐことが出来た。その結果、目標充填率と実際の充填率は概ね一致し(図11)、充填回数を分けることで充填量をコントロールできることが明らかとなった。目標充填率を実際の充填率が上回った15-AZ50については、注入器に樹脂を入れる際の計量誤差があったと考えられる。

(2) 強度試験

図12に食害率と耐力変化率の関係を示す。無補強試験体において、耐力変化率は食害率との間に高い相関がみられ、食害率に対し指数関数的に急激に低下していく傾向が確認された。既往の研究⁵⁾において、蟻害劣化したホワイトウツヅ、ヒバ、スギについても今回と同様の傾向がみられていた。よって、蟻害は材種によらず、低い食害率でも耐力低下や変形に大きく影響することが明らかとなった。充填を行った試験体においては、同等欠損率の無補強試験体と比較すると、充填目標率30%の試験体では1.2倍から2.2倍、充填目標率50%の試験体では2.3倍から5.3倍まで耐力の回復が見られたが、いずれの試験体も健全体までの回復には至らなかった。これは、載荷時に初めに食害による空隙部分が押しつぶされ、そこから載荷方向に亀裂を生じながら扁平状に変形が起きるため、空隙の残っている状態では載荷した直後の変形量が大きいためであると考えた(図13)。そこで、図14に示すように、充填後の空隙率と耐力変化率を比較してみると、横圧縮において耐力は空隙量に依存していることが確認できた。このように低い食害率でも急激な耐力およびヤング係数の低下が生じる横圧縮では樹脂充填による健全体までの耐力回復は難しいと考えられる。

6. 柱-土台接合部曲げせん断試験

6.1 試験概要

表4に試験体一覧、図15にセットアップ図、図16に試験体詳細を示す。柱および横架材の断面寸法は105mm×105mmとした。接合方法は耐震診断上の接合部区分を参考に、ホールダウン金物、フラットプレートおよびほぞ差しの3種類を採用した。充填を施す試験体については、試験体側面に100mm間隔で千鳥上に穿孔を行い、充填目標率を50%、100%と2種類設け、50%については前章と同様に充填を施し、100%については、充填回数は1回とし樹脂が充填孔からあふれ出すまで注入し続けた。

次に、曲げせん断試験方法については、まず土台は左右両側に載せた鉄板にボルトを通し、各ボルト20Nで緊結することで基礎鉄筋に固定した。また、部材が健全な場合柱1本あたりにかかる軸力は20kN程度だが本研究で扱うような劣化した部材ではかかる軸力は小さくなる。この点を考慮し、鉛直加力は柱頭治具

を介して10kNの荷重をかけた状態から土台の上端から460mmの高さで正負交番繰返し加力を行った。接合部回転角 θ は1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50 rad.の順に各3サイクル、その後1/30、1/15、1/10 rad.の順に各1サイクル加力を行い、最終加力は引き壊しとした。

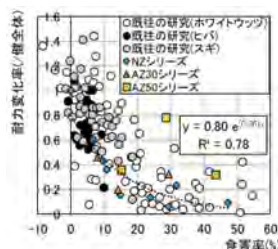


図12 食害率-耐力変化率

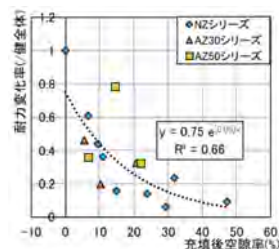


図14 空隙率-耐力変化率



図13 実験写真(左:載荷直後、右:載荷中)

表4 試験体一覧

試験体	ほぞ厚 b(mm)	ほぞ幅 w(mm)	ほぞ長 h(mm)	接合方法	食害率 (%)	充填	充填 目標率
0-M1	30	75	50	ほぞ差し	0	-	50
0-M2					20	×	
20-NM					10	○	
10-AM50					35	○	
35-AM50	75	30		フラットプレート	0	-	50
0-RM					20	×	
20-NRM					15	○	
15-ARM50					0	-	
0-P	30	75		ホールダウン	0	-	100
15-NP					15	×	
10-AP50					10	○	
25-AP50					25	○	
40-AP100	75	30		ホールダウン	0	-	50
0-H					20	×	
20-NH					25	○	
25-AH100					35	○	
35-AH50	75	30		ホールダウン	0	-	50
0-RH					25	×	
25-NRH					20	○	
20-ARH50					20	○	

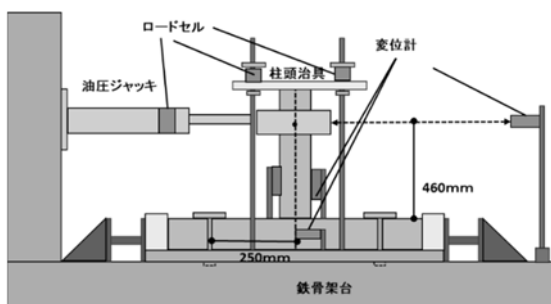


図15 セットアップ

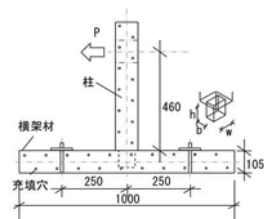


図16 試験体詳細

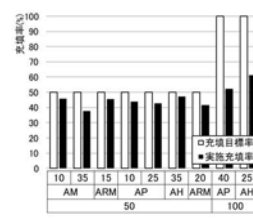


図17 充填率

6.2 試験結果

(1) 充填施工

図 17 に充填率を示す。充填目標 50%試験体においても、予定の充填量まで注入が行えない箇所もあり、いずれの試験体も目標充填率よりも実際の充填率は低い値となった。これは蟻害のランダム性が原因であり、選定した充填箇所が食害の多い部分に適切に当たるとは限らないためだと考えられる。また、充填目標 100%試験体については、樹脂が発熱し木口や充填穴からあふれ出す現象が確認され、充填率は 50~65%程度までしか充填は施せなかった。一方、充填回数や充填間隔を分けた方法においては、注入量の多い接合部試験体においても樹脂の硬化による発熱やあふれ出しを防ぐことができたため、充填率のコントロールおよび外観変化を防ぐ上で有効であることが示唆された。

(2) 曲げせん断試験

図 18 に無補強試験体における食害率と耐力変化率を示す。耐力は食害率 10%程度であっても、健全体の半分まで低下していることから、蟻害が接合部の耐力低下に甚大な影響を及ぼしていることが確認された。また、耐力変化率は、横圧縮試験と同様に食害率に対し指数関数的に減少する傾向がみられ、両者の間には相関が確認された。

前章の全面横圧縮試験では充填による補強効果はあまり確認できなかったが、接合部曲げせん断試験では充填を施した試験体において大幅に耐力が回復した。その理由の 1 つとして、仕口の接合形態が考えられる。一般的にほぞ差し接合した健全体および無補強体についてはピン接合として扱われる。しかし、充填を施した試験体では 1/30 rad. のサイクルに至るまでは柱と横架材部分が合成樹脂で強固に接着されており、それ以降の大変形になり初めて柱と横架材の接着面の剥離が確認された。したがって、接合部分は充填した樹脂によって拘束され、剛接合に近い接合形態となっていると考えられる。次に、図 19 では充填試験体全体における食害率と耐力変化率の関係を示し、図 20 では、既往の研究²⁾の超音波速度と食害率の関係を参考にして算出した横架材の接合部分付近の食害率とそれぞれ耐力変化率を示す。これらが示すように、柱および横架材を含めた試験体全体の食害率と耐力低下には高い相関は確認されなかったが、接合部分の食害率と耐力低下には高い相関が確認された。今回の曲げせん断試験では、ほとんどの試験体が柱の土台へのめり込み破壊(図 21)が生じていることが大きく関係しており、試験体全体の状態で考えるよりも、横架材の接合部分周辺の状態を適切に判断することが、高精度で接合部の耐力を把握できるものと考えられる。これらの結果より、ほぞの形によらず、接合部分付近の横架材の食害率が 30%程度までは健全体近くまで耐力が回復できる可能性があり、補強時に接合部付近の状態を適切に判断する必要があることが示唆された。

7. 結び

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 樹脂充填において、蟻害の程度によって充填回数を変えることは充填率のコントロールや外観変化を防ぐうえで有効な施工

方法である可能性が示された。

2) 高湿度環境下における耐久性試験において、樹脂充填を施した試験体は曝露後も曝露前と同等の耐力を保持しており、樹脂充填はある程度耐久性を有する補強方法であることが示唆された。

3) 蟻害劣化した木材では、横圧縮強度は材種によらず、低い食害率でも指数関数的に急激に耐力が低下することが確認された。めり込みが重要となる接合部においても、食害率に対して指数関数的に耐力減少することが確認された。

4) 横圧縮試験において、無補強試験体および充填試験体ともに、耐力は試験体の空隙量に依存している可能性が示唆され、充填によって完全に耐力回復させることは難しいと考えられる。

5) 接合部では、樹脂充填を施すことにより、接合部分付近の横架材の食害率が 30%程度までは健全体近くまで耐力が回復できる可能性があり、補強時に接合部付近の状態を適切に判断し補強を行う必要があることが示唆された。

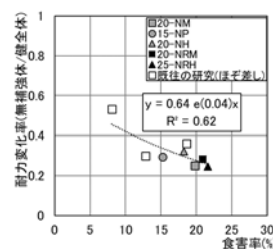


図 18 食害率
-耐力変化率

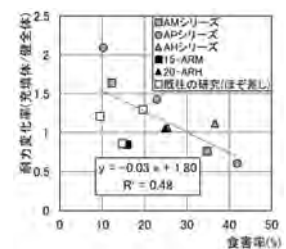


図 19 食害率
-耐力変化率

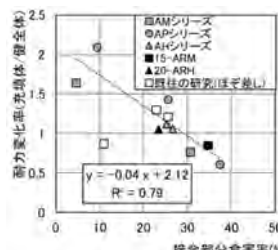


図 20 接合部分食害率
-耐力変化率



図 21 破壊性状
(めり込み)

謝辞

本稿の試験において、本学大学院修士課程2年生(当時)山田実可子さんに実施いただきました。また、接合部試験においては日本工業大学那須秀行教授のご指導をいただくとともに、大西郷先生、田中章夫先生および那須研究室の皆様と懇切なる試験協力をしていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 五郎丸修平ら:内部が劣化した木造建築物への欠損調査と樹脂充填による補強法の提唱, 日本建築学会関東支部報告集 2018.3, Vol.88, pp.45-48
- 2) 山田実可子ら:蟻害劣化した土台接合部に対する樹脂充填による補強効果に関する基礎的研究, 日本建築学会関東支部報告集 2020.3
- 3) 澤田将光ら:蟻害劣化した各部材に対する樹脂充填による補強効果に関する基礎的研究, 日本建築学会関東支部報告集 2019.3, Vol.89, pp.73-76
- 4) 藤平真紀子:伝統的木造住宅における部材周囲の温湿度環境と継ぎ目管理に関する研究, 歴史的市街地における空き家をケーススタディとして, 日本建築学会計画系論文集 2015.6, Vol.712, pp.1391-1400
- 5) 森村真ら:シロアリ食害材の強度特性と密度および超音波伝搬速度の関係材料, 2010, Vol.59(4), pp.297-302,
- 6) 岩月万祐子ら:スギ材の耐久性評価に向けた吸湿性に関する研究, 日本建築学会関東支部 2015.3, Vol.86, pp.109-112
- 7) 竹之内裕ら:文化財建造物の修復に用いられた合成樹脂の変遷, 保存科学 No.37, pp.99-123

大津壁表面の塩類風化の要因の解明

宇野朋子（武庫川女子大学）

1. 研究の背景と目的

1.1. 研究の背景

大津壁¹⁾とは、土壁の仕上げの材料に色土と石灰とスサを用い、表面を押えながら施工する壁仕上げのことで、緻密な仕上がりとなる壁である。表面の磨きの程度により、磨大津や並大津と呼ばれる(表1)。しっくい壁との違いは、色土が主成分であり糊を使わずに施工されることである²⁾。

大津壁が用いられた建物に、大阪府吹田市の旧西尾家住宅³⁾(重要文化財)の主屋(木造、1895(明治29)年築造)がある。住宅は現在、吹田文化創造交流館として保存活用されている。

旧西尾家住宅の主屋では、台所、調理場、縁廊下、土間、外壁などに大津壁(並大津壁)が使われており、多くの壁で劣化がみられる。なかでも、特徴的なものとして表面にあばた状の析出物を伴って剥落する塩類風化がある(図1)。

旧西尾家住宅は2022年(令和4年度)から大規模な修繕工事が行われている⁴⁾。建物の保存修復の過程で、劣化した大津壁の保存や壁材料の再利用の可能性、保存修理後の環境管理の方法を検討する必要がある。そのため、大津壁の劣化の要因を明らかにすることが求められていた。

1.2. 研究の経緯

既往研究⁵⁾では、対象建物の大津壁の分布と劣化の状況と要因について調べ、大津壁の劣化は上塗り表面に石こうが析出することにより生じる塩類風化であることを明らかにした。大津壁に生じている石こう(CaSO₄)は大津壁の主な原料には含まれず、また構成元素のうち、カルシウムCaは、大津壁の材料である消石灰にも含まれているが、

硫黄Sは通常は含まれない。そのため、硫黄を含む物質が、壁の外部から供給されたと考えられた。

1.3. 本研究の目的

本研究は、旧西尾家住宅の主屋の大津壁にみられる塩類風化の要因とメカニズムを明らかにすることを目的としている。そのうち、本研究助成では、大津壁の表面への硫黄を含む物質の付着の可能性について検討する。

2. 大津壁の劣化に関するこれまでの研究

2.1. 対象建物における大津壁の分布と劣化の状況

旧西尾家住宅の主屋の大津壁の劣化は、筋状のものとあばた状のものがあつた(図2)。

筋状の劣化は、壁や垂れ壁の中央部に垂直や水平にみられるもの、梁の角から放射状にのびるものがあつた。図2右の壁には中央部に亀裂が垂直に走っており、亀裂部分が孕んでいた。また、図2左の壁では縦に何本も筋状の亀裂があつた。壁や垂れ壁の中央部はたわみやすく、構造面でも亀裂の入りやすい場所であり、また、構造の角や梁の中央部は応力の集中しやすい部分であるため、ひび割れが生じやすいと考えられる。また、上塗り層に亀裂がある箇所は、裏面に構造体や木舞など、異なる構造体の境界部であり、壁土の収縮の違いが生じることで細かな亀裂が生じていると考えられた。

あばた状の劣化は比較的広い平らな面に生じており(図2右)、析出物を伴っていた(図1)。上部よりも下部での劣化が著しく、上下温度分布にともなう結露の影響が考えられる。また、縁廊下(図2中)では、同じ面でも劣化の程度が大きく異なる。劣化の少ない箇所は縁廊下扉の影に

表1 大津壁の原料と施工方法

仕上げ名		磨大津	並大津
原料	上塗り(引土)	色土、石灰、紙スサ	色土、石灰、さらしスサ・麻スサ
	上塗り層下地(灰土・下こすり)	粘土、麻スサ、石灰	粘土、麻スサ、石灰
施工方法		抑え込み表面に光沢を出す	磨き上げをせず、抑えて仕上げる



図1 大津壁の析出物を伴う劣化



図2 旧西尾家住宅の大津壁の保存状態

なっていた部分であり、劣化が壁近傍の環境変化の影響を受けていた可能性が考えられた。

2.2. 析出物と土壁の構成材料の分析

大津壁は室内側表面から、(1) 上塗り、(2) 上塗り下地(下こすり)、(3) 中塗りで構成されている(図3)。

対象建物の大津壁の劣化部より採取した析出物、層出し作業の際に層ごとに取得した試料について、X線回折分析^{註1}を行った(表2)。析出物は石こう(CaSO₄)であり、石こうは大津壁の主な材料には含まれない。また、上塗りには石こうが含まれるが、下こすりには含まれないことから、石こうが大津壁の塩類風化の要因であり、石こうに含まれる硫黄が室内側から供給されたことが考えられた。

2.3. 大津壁試料の断面の元素分析

劣化している大津壁と劣化がみられない大津壁の試料を採取し、SEM/EDX分析^{註2}を行った(図4)。

いずれの試料においても、表面に硫黄が薄く層状に存在しており、劣化している試料では内部にも存在していた。また、カルシウムは上塗り層の室内側に薄く存在し、硫黄が同じ位置にあることから、この部分で石こうが析出していると考えられる。このように、大津壁の表面に硫黄が付着(吸着)しているようにみえることから、室内側からの硫黄の供給が考えられる。

3. 硫化物の起源

大津壁の表面に付着した硫黄については、室内空気や大気など空気中から供給された可能性が考えられる。

たとえば、大気汚染が深刻であった1970年には、大気中の二酸化硫黄SO₂濃度は0.03ppmを超えており⁶⁾、また、大阪の都心部では、ピーク時には0.2ppmを超えていた記録⁷⁾もある。大気中に含まれる硫化物の影響は、文化財でも報告されており、炭酸カルシウムを主成分とする大理石が、大気中の二酸化硫黄と反応し、石こうが生成され、脱落する事例⁸⁾や、金属の硫化による変色や、彩色や木部の劣化などの事例がある^{9、10)}。

室内においても、二酸化硫黄は発生している。1970年以

前には、調理にはガス、風呂には石炭、こたつの熱源は炭火、炭団(たどん)、豆炭など硫黄が含まれている燃料が用いられた時期もあり¹¹⁾、また、暖房中に高濃度が記録された例もある¹²⁾。対象建物でも暖房や調理の燃焼に伴って、室内に二酸化硫黄が発生していたことが考えられる。

以上より、硫黄の起源として室内空気に含まれる二酸化硫黄ガスが大津壁に付着した可能性は十分考えられる。

4. 硫化物(二酸化硫黄)への暴露実験

4.1. 実験の背景

大津壁の表面に硫黄が付着し、石こうが生成するメカニズムについて検討するため、硫黄の起源と考えられる空気汚染物質である二酸化硫黄の存在する環境に大津壁を暴露する実験を行った。今回の実験では、二酸化硫黄ガス濃度を調整したガスバッグに大津壁試験体片を入れ、一定期間暴露することとした。

4.2. 実験方法

4.2.1. 試験体

試験体として30cm角の大津壁としっくい壁を製作した^{註3}。暴露実験用には、30cm角の試験体を9分割した10cm×10cmの試験体片を用い、その表面約8cm×8cmが露出するように、試験体の周囲と裏面を養生した(図5)。

4.2.2. 実験条件

JIS C60068-2-42¹³⁾、ISO 22479¹⁴⁾を参考に、高濃度の二酸化硫黄ガスに暴露する実験条件を検討した。

容量10Lのガスバッグ内にラックを組み、試験体を設置した。ガスバッグを温度25℃に設定した恒温庫内に入れ、ガスバッグ内に二酸化硫黄ガス濃度と空気温湿度と調整した空気を循環させた。

実験1では、二酸化硫黄ガス濃度1000ppm、温度25℃、相対湿度を0% (乾燥空気、Case 1) と75% (湿潤空気、Case 2) を循環させることとし、10日間暴露した。

実験2では、二酸化硫黄ガス濃度1000ppm、温度25℃とし、相対湿度90%以上(湿潤空気)を8時間、その後、相対湿度0% (乾燥空気)を16時間循環させるプロセスを

表2 XRF分析結果

	XRF分析結果
析出物	Gypsum・Quartz
上塗り	Quartz・Gypsum
上塗り下地(下こすり)	Calcium carbonate・Quartz
中塗り	Quartz他

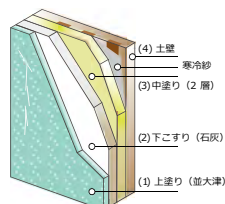


図3 大津壁の層構成



図5 試験体片(大津壁)

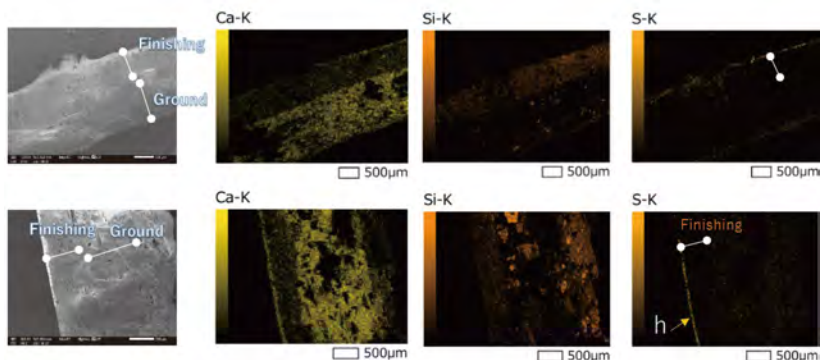


図4 SEM/EDX分析結果(上:劣化した箇所、下:劣化がない箇所)

10 サイクル繰り返した。Case3 とする。

4.3. 実験結果

4.3.1. 暴露後の試験体片の元素マップ分析

大津壁とシックい壁について、暴露なしの試験体片、Case 1 (RH0%) と Case 2 (RH75%) の暴露後の試験体片の元素マップ分析^{註4}を行った。硫黄は暴露なしの試験体片にも存在しており、壁の材料に含まれていた。

大津壁では、石灰の成分であるカルシウムと、砂に含まれる鉄、チタンがあり、シックい壁ではカルシウムが多い。硫黄はカルシウムの多い試験体片ほど多い傾向であった。

暴露なしの試験体片と比較すると、暴露後の試験体片はいずれも硫黄の強度が高かった (表 3)。試験体片の厚みに個体差があることから、ここでは二酸化硫黄による影響を受けないチタンと硫黄の強度の比を比較した。

暴露なしの試験体片を基準にすると、大津壁 Case 1 (RH0%) と大津壁傷 Case 1 (RH0%) はそれぞれ 1.70 と 1.67 倍、高湿度下で暴露した大津壁 Case 2 (RH75%) とは大津壁傷 Case 2 (RH75%) はそれぞれ 2.22 と 2.04 倍であった。また、シックい壁では、暴露なしに対して、シックい壁 Case1 (RH0%) が 1.20 倍、シックい壁 Case 2 (RH75%) が 1.90 倍であった。大津壁もしシックい壁も硫

黄が付着しており、付着量は高湿度環境において付着量が多い。

4.3.2. 暴露後の試験体片の SEM/EDX 分析 (図 6)

大津壁 Case 1 (RH0%) では、硫黄は上塗り層と下こすり層にわずかに均一に存在し、下こすり層でやや多い。大津壁 Case2 (RH75%) では、下こすり層の上塗り側に硫黄が存在している。Case 3 (RH0%⇔90%) でも、Case 2 (RH75%) と同様に下こすりの上塗り側に存在しているが、付着量は少ない。

4.4. 実験結果の考察

高濃度の二酸化硫黄ガスへの暴露において、大津壁では、硫黄が下こすり層に付着していたことから、硫黄はカルシウムが多く含まれる環境で付着しやすいことが分かった。

乾燥環境下 Case1 (RH0%) の結果では、硫黄は、大津壁では上塗り層と下こすり層に分布し、やや下こすり層に多く見られた。一方、シックい壁では全体的に分布していた。大津壁とシックい壁の元素マッピングにおけるカルシウムと硫黄の強度比を比較すると、暴露なしの 1.75 倍 (大津壁) と 1.73 倍 (シックい壁) であり、カルシウムの量に比例して硫黄が付着していた。このことから、カルシウムの存在が硫黄の付着に影響しているといえる。

高湿度環境下での暴露 Case 2 (RH75%) では、大津壁は下こすり層と上塗り層の境界に近い下こすり層で、硫黄の付着量が多かった。これは、水分が存在する環境下で、二酸化硫黄ガスが亜硫酸となり、さらにイオン化して亜硫酸イオン SO_3^{2-} が生成されたためだと考えられる。多孔質内では、水分移動に伴い亜硫酸イオンもより内部へ移動する。その結果、移動した亜硫酸イオンが上塗り層と下こすり層に含まれる石灰と反応したと考えられる。とくに大津壁の上塗り層には空隙が多く、下こすり層は緻密であるこ

表 3 元素マッピングにおける硫黄とチタンの強度比

		RH	S/ cps/eV	Ti/ cps/eV	強度比S/Ti	暴露なしとの比較
大津壁	暴露なし	-	0.22	5.35	0.04	-
	Case1	0%	0.39	5.57	0.07	1.70
	Case1傷	0%	0.39	5.69	0.07	1.67
	Case2	75%	0.51	5.58	0.09	2.22
	Case2傷	75%	0.5	5.96	0.08	2.04
シックい壁	暴露なし	-	0.56	0.24	2.33	-
	Case1	0%	0.87	0.31	2.81	1.20
	Case2	75%	1.02	0.23	4.43	1.90

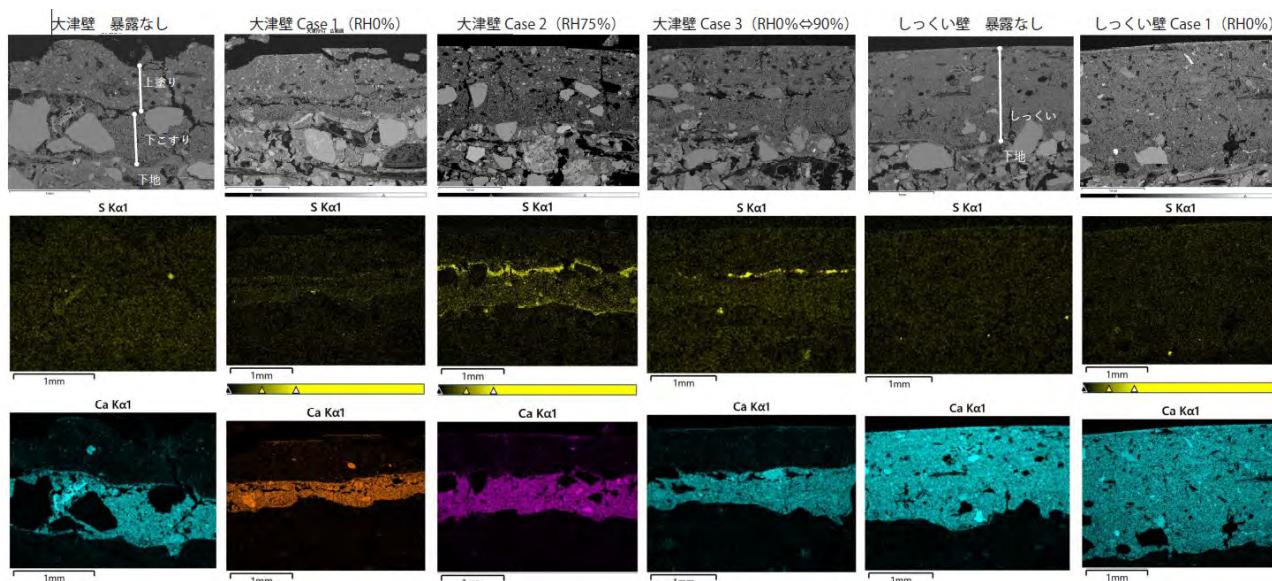


図 6 試験体片の SEM/EDX 分析結果

とから、水分移動は上塗り層で起こりやすく、下こすりと境界に水分が滞留しやすいと考えられる。また、上塗り層にはカルシウムが少ないことから、相対的にカルシウムの多い下こすり層で、とくに上塗り層の境界部で硫黄の付着が多くなったと推察される。

湿潤と乾燥を繰り返した Case 3 (RH0%⇔90%) では、下こすり層に付着した硫黄の量は、Case 2 (RH75%) よりも少なく、上塗り層で多い傾向がみられた。

硫黄の付着部位については、現地の試料 (図 3) が上塗り層の室内側表面に生じていた状況と異なる。この要因の一つとして、高い二酸化硫黄濃度 (1000ppm) を維持した実験であったため、水分の存在下で硫黄の濃度拡散により内部に移動したことが考えられる。

5. まとめ

本研究では、旧西尾家住宅の主屋を調査対象として、大津壁の塩類風化の要因である析出部 (石こう) に含まれる硫黄の由来と大津壁への付着について検討した。

旧西尾家住宅の大津壁の保存状態

- ・ 大津壁の劣化には筋状とあばた状のものがある。
- ・ 筋状の劣化は、壁の中央や角など、たわみや応力集中など構造的に生じている。
- ・ あばた状の劣化は広い面に生じており、上下や扉の裏などで、劣化の状況が異なることから、温度差や結露など環境変化の違いが影響していると考えられる。

析出物とその要因物質

- ・ 大津壁の塩類風化は石こうの析出である。石こうに含まれる硫黄は大津壁のおもな材料には含まれていないことから、外部から共有されたことが考えられる。
- ・ 大気汚染および室内汚染物質に含まれる亜硫酸ガスは、大気中に高濃度に存在していた可能性があり、硫黄の起源の一つと考えられる。

二酸化硫黄ガスへの暴露実験の結果

- ・ 大津壁およびしっくい壁の試験体を高濃度の二酸化硫黄ガスに暴露する実験を行った。その結果、大津壁、しっくい壁ともに硫黄が付着することを確認した。
- ・ 硫黄はカルシウムの存在する箇所が付着し、その付着量はカルシウムの存在量に依存する。
- ・ 大津壁・しっくい壁ともに、高湿度環境下において硫黄の付着量が多くなる。
- ・ 大津壁では、カルシウムの多い下こすり層の上塗り層側で、硫黄の付着が多い。
- ・ 大津壁内の水分に二酸化硫黄ガスが溶解して生じた亜硫酸イオンが、石灰と反応することで石こうが生成された可能性がある。

今後、しっくい壁の硫黄の付着の分析や、大津壁内の硫黄の分布を分析、劣化促進実験を通して、より詳細な劣化のメカニズムの解明と保存対策を示す予定である。

註釈

註 1) X 線回折分析は PANalytical 製 Aeris で行った。分析条件は、X 線管球 Cu、管電圧 40kV、管電流 8mA である。

註 2) 日本電子株式会社製、ネオスコープ卓上走査電子顕微鏡を用いた。

註 3) 2022 年度 (第 6 回) 研究助成『土壁表面の塩類風化メカニズムの解明』において製作した試料である。製作は佐藤左官工業所の左官職人である佐藤ひろゆき氏に依頼した。

註 4) 元素マップ分析には、奈良文化財研究所の大型試料対応蛍光 X 線分析装置 M6Jetstream (Bruker 社) を利用した。

謝辞：本研究は公益財団法人 松井角平記念財団 2023 年度 (第 8 回) の助成を受けました。京都大学名誉教授銚井修一先生、建築研究協会 (野々部万美恵様、辻良平様) には、吹田市教育委員会 (柿本卓志様、河合智子様)、佐藤左官工業所 (佐藤ひろゆき様)、MC エバテック (武内正己様、安丸純一様、山根康平様)、武庫川女子大学生活環境学部 (澤渡千絵先生、竹本由美子先生)、奈良文化財研究所 (脇谷草一郎様) にご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

- 1) 日本建築協会出版委員会 (1960)『1961 年版左官工法指針』、pp.59、77-80、日本建築協会
- 2) 中村伸 (1954)『日本壁の研究』、p.11、相模書房
- 3) 吹田市 (2024)『旧西尾家住宅 (吹田文化創造交流館)』<https://www.city.suita.osaka.jp/kyunishioko/index.html> (2025 年 6 月 20 日アクセス)
- 4) 吹田市 (2024)『旧西尾家住宅 保存修理事業』<https://www.city.suita.osaka.jp/kyunishioko/1031168.html> (2025 年 6 月 20 日アクセス)
- 5) Tomoko Uno and Shuichi Hokoi (2023) Identification of Crystallized Deposit on Otsu Walls and Its Deterioration Mechanism, *Proceedings of SWBSS ASIA 2023: First International Conference in Asia on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures, Nara, Japan*.
- 6) 環境省「平成 22 年度大気汚染状況」4.二酸化硫黄 (SO₂)、5.一酸化炭素 (CO) 図表』『大気環境・自動車対策』、https://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_h22/figs4_5.html (2025 年 6 月 30 日アクセス)
- 7) 新良宏一郎、熊澤安正 (1988)「大阪における過去の大気汚染対策」『環境技術』17(11)、pp. 690-695

- 8) 芳住邦雄 (1988)「文化財保存における大気汚染の影響」『PPM』、pp.2-9
- 9) 江本義理 (1968)「大気汚染と文化財」『官公庁公害専門資料』Vol. 3、No.6、pp.58-64
- 10) 江本義理 (1992)「大気汚染の文化財に及ぼす影響と対策」『防錆管理』3、pp.59-66
- 11) 宮崎玲子 (2002)「住まいと台所の自分史-昭和初期から現在まで」『住まいの 100 年』、pp.211-232
- 12) 金子ふさ、中土井隆、山岡茂夫、瓦家敏男、春木孝祐、福田正則、神浦俊一、田中正宣、宮崎竹二、岡三知夫、富田絹子、三宮茂人、福原絹子、高橋喜治、岡崎政司 (1977)「冬期暖房時における一般住宅室内環境」『生活衛生』21-5、pp.153-161
- 13) JIS C60068-2-42 環境試験方法-電気・電子-接点および接続部の二酸化硫黄試験方法
- 14) ISO 22479 : Corrosion of metals and alloys — Sulfur dioxide test in a humid atmosphere (fixed gas method)「金属および合金の腐食 — 湿潤雰囲気における二酸化硫黄試験 (固定ガス法)」

研究課題

「中井家文書」にみる寛政度と安政度の御所造営と継承理念

研究代表者 海野 聡（東京大学大学院）

1. 研究目的・概要

これまでの生産史研究では、工匠組織や技術史を中心に研究がおこなわれてきたが（海野聡 2015、学界展望、山岸吉弘 2017 ほか）、主に工匠組織の研究の建築の形態（様式）への還元、工匠の現場における作業や判断の解明、工匠関連史料の位置づけが不足してきた。とりわけ日本には近世に畿内大工を支配した京都大工頭の中井家に関する良好な工匠史料「中井家文書」が残っており、これらをもとにした一連研究があり（谷直樹 2003 他）、その組織の形成などが明らかになっている。

「中井家文書」のなかでも宮内庁所蔵の史料はアクセスが限られていたが、近年、デジタル化され、研究環境が整いつつある（田島公、基盤研究 S）。いっぽうで、実際の建築と史料の比較検討には上述のような課題がある。またこのデータをもとに、2019 年 11 月より研究手法を試験的に検討し、上記の一部を解明しうることが明らかになってきている（海野 2020～2024 他）。一方で工匠史料の精読には建築史的知見が不可欠であり、十分な検討なしに安易に使用されかねない危険性も生じている。そのため造営現場の史料として精読・分析し、近世における工匠史料の特質、生産体制を継続して検討する。

こうした状況を踏まえ、本研究では、安政度の京都御所に着目して分析し、寛政度と比較することで、この規範の踏襲による継承の構図を明らかにすることは、日本建築の特質をうかがう手がかりとなろう。また本研究は「中井家文書」の整理・デジタル化に基づくもので、文献史における古典籍の目録学との連携による文理融合研究の可能性もあり、さらなる研究の展開が期待される。加えて、研究会や国際研究集会を通じて、後進となる日本建築史研究者の育成の場を継続的に提供する。

本年度は、現在の京都御所である安政度の京都御所の造営に関する史料を取り上げて分析するとともに、復古を目指した寛政度との比較を行う。また他の江戸時代の工匠史料との比較による、「中井家文書」においても課題となっている近世の設計と木材、そして杢の関係について検討し、その特徴を明らかにした。

2. 宮内庁書陵部図書寮文庫所蔵内匠寮本「中井家文書」

「中井家文書」はじめ、建築資料類に関しては、その情報のみが着目され、

制作意図・過程の検討の視座が不足し、さらに図面類に興味が集中してきた。一部の公的機関や工匠家蔵の史料整理はなされており、江戸時代を通して京都大工頭を務めた中井家による中井家文書は一部、公刊されている（平井聖 1976-85、谷直樹 2003）。いっぽうで、当初は一群であった史料が、現在は京都大学附属図書館、宮内庁、京都府立京都学・歴彩館・中井家等に分蔵されている。前二者はデジタル化が進み、このデジタル化された史料の精読・分析によって、建築生産や造営現場の実態に関する研究が展開されている（海野基盤 A2022-26 他）。建築図面や造営関連史料の整理・精読・分析のため、「デジタル化→公開→他分野の専門家による検討」という研究手法の有効性を、以下に述べるように実証的に示した。

3. 「中井家文書」の精読・分析と個別の成果

本研究では、当研究室の大学院生らとともに、宮内庁書陵部図書寮文庫所蔵内匠寮本「中井家文書」の精読を行う研究会を月 1 回程度の頻度で開催し、建物の復元や造営史料における記載方法や用語の検討、史料が作成された経緯と造営の流れや生産組織について検討を加えた。2026 年 6 月 16 日に京都学・歴彩館において、第 5 回国際研究集会「御所（宮殿）・邸宅造営関係資料の地脈と新天地」を開催し、研究の成果を発表した。

本国際研究集会は、史料編纂所や宮内庁によって培われてきた膨大な建築関係史料のデジタルデータをもとに、近世の建築生産や建築技術を再検討するものである。宮内庁書陵部内匠寮本「中井家文書」を対象に、デジタルデータを用いた精読による建築情報の抽出・建築技術の実証的解明という研究手法の提示を行ってきた。とりわけ、看過されてきた帳簿類を検討すると、個々の資料の精読・分析により近世の建築物や建築生産の実態がありありと浮かびあがってきた。

宮内庁書陵部図書寮文庫所蔵内匠寮本「中井家文書」の「禁裏廻廊木積」などの廻廊に関する史料の精読をもとに、朱鳳亭「禁裏廻廊仕様書」の解釈および現存建築との比較、小野優華「禁裏廻廊木積」の積算方法の検討および安政度禁裏廻廊の復元により、上部構造を検討した。また白松楠「安政度禁裏廻廊関係造営史料についての比較検討及びその位置付け」、前田 瑠嘉「禁裏廻廊工割帳」に見る「工割帳」の解釈と検討から、廻廊の造営に関する諸史料の比較を通して、それぞれの造営資料の作成や特徴を明らかにした。また前田瑠嘉「禁裏清涼殿并附物共工割帳」に見る安政度工割帳の作成では安政度における寛政度の史料の利用などについて検討した。またまた海野聡による「桂離宮の用材にみる設計思想と造営現場の接続」では、近世の工匠史料と樹種を中心に、文書を中心とする設計の段階と造営現場をつなぐ検討をおこなった。

以上、各研究会での精読の成果を踏まえ、後進となる大学院生らによる研究

発表を後押ししてきた。また発表にあたっては、研究代表者が司会を行い、ディスカッションをリードした。

今回の研究では検討に至っていないが、これらの廻廊に関しては、安政期の建築が現存している。それゆえ、「中井家文書」は今後の修理において、新造時の状態や修理履歴を知るうえでも有効な情報源として期待される。

4. おわりに

本研究により、近世の工匠史料の特徴として、文書における行政的な判断と現場の接続を伺うことができたとともに、安政度の廻廊造営において、寛政度を史料的にもほぼそのまま写す形で作成されていることがあきらかになり、史料から実証的に安政度造営の特徴を示すことができた。また他の建物に関しても、同様の視座での検討により、寛政度からの継承と設計変更という造営現場での実態も見えてこよう。

これらの点は、建築史学をはじめとする歴史学において、史料の精緻な分析にもとづく分析が欠かせないことを示している。そして第一段階となる史料調査とデジタル化に関して分業することで、専門知にもとづく解説に専念でき、文理融合研究を実践的に実現できている。

さてこれまでと同じく、重ねて述べたいが、「中井家文書」をはじめとする膨大なデジタル化史料から得られる濃密な建築情報は高い研究価値を有している。しかし、その全容の解明には多くの研究者による検討が不可欠である。日本建築史の若手研究者も減少傾向にあるなかで、未来への投資は重要な課題であり、本研究会の研究手法をひろく公開することで、同様の手法を用いた研究が展開し、後進が続くことを期待している。

「清水寺観音堂のデジタル保存と耐震性能評価への統合的アプローチに関する研究」要旨・概要

八戸工業高等専門学校・環境都市・建築デザインコース・助教授 エンケホルワ

八戸工業高等専門学校・環境都市・建築デザインコース・准教授 金 善旭

1. はじめに

本研究では、国指定重要文化財である青森県最古の木造建造物「清水寺(せいすいじ)観音堂」を対象とし、従来の修理工事報告書に基づく実測データと3Dレーザースキャン(3Dスキャン)による測定データを統合し、BIM技術を活用して建築物のデジタル化を実施したものである。このデジタル化の過程で、従来の実測調査データと3Dスキャンで取得した実測データ(点群データ)を用いてモデリングを行い、両手法の比較分析を行った。さらに、その結果をもとに、意匠情報だけでなく構造情報も統合した建物の簡易的な耐震診断(以下、耐震予備診断)を可能にする新たなデジタル化手法を試みた。

清水寺観音堂は、青森県八戸市是川字中居に1581年(天正9年)に建立され、桁行3間、梁行3間の一重宝形造で、茅葺き屋根の禅宗様式の仏堂である(図1)。

本研究の手順は、第1段階から第3段階までの三つのステージで構成される。本研究ではまず事前調査として、修理報告書の既存図面や部材寸法データを整理し、不足や不明点を現地調査で補うために従来手法による実測調査を実施した。また、資料調査や関係者への聞き取りにより、**建物の3D情報化**において従来手法の測定手順や工夫を確認した。さらに、従来手法で得た実測データと3Dスキャンによる点群データを比較し、精度や作業量の違いを分析した。その結果、**従来手法の有用性が明らかとなり、3Dスキャンとの相補関係**

や最適な活用方法を検討することができた。

続いて第2段階では、建物の3Dレーザースキャンによる高精度な実測調査と各種関連情報の収集を行った。修理報告書から得た2D図面データと3Dスキャンで取得した点群データを突き合わせながら、それぞれのデータをもとにBIMモデルのモデリングを進めた。モデリング作業を通じて、従来測定で取得した実測データと最新技術で取得した**実測データの類似点と相補性**を明らかにし、**二つのモデルを融合して一つの統合モデルを構築**した。この過程で、従来手法と最新技術を組み合わせた歴史的建造物のモデリング手法の最適解を検討している。清水寺観音堂のBIMモデル作成に際しては、参考資料である『重要文化財清水寺観音堂保存修理工事報告書』記載の図面・寸法データおよび修理記録を活用し、不足している情報は新たな実測調査によって補完してモデルに反映した。モデリングにはBIMソフトとしてArchiCADを用い、複雑な曲面形状の表現にはRhinoceros 3Dを併用した。さらに、モデルを構成する各部材の情報を整理するとともに、BIMモデル作成過程で明らかとなった課題や、文化財建造物のBIMデータを維持管理に活用する可能性について検討した。

第3段階では、構築したBIMデータを用いて意匠情報と構造情報を統合した総合的なモデルを構築し、清水寺観音堂の耐震予備診断を実施した。具体的には、修理報告書の実測データおよびレーザースキャンによる点群データをもとに作成された精密なBIMモデル上で、部材寸法や荷重条件、地盤の支持力、部材の劣化状況、過去の改修履歴など耐震診断に不可欠な情報の考察を行った。次に、このBIMモデルを用いて文化庁の指針に基づく簡易診断法(所有者診断)を試行し、必要耐力の算定と保有耐力の概略評価を可能かの**検討**を実施した。今回の予備診断により、BIMを活用した簡易的かつ迅速な耐震評価手法の有効性が確認されたと同時に、詳細な診断に向けて検討すべき課



図1 (左) 青森県八戸市に所在する清水寺観音堂外観(左)・小屋裏(右)

題と限界も指摘することができた。

2. 実測調査&BIM データ構築

本研究では、従来手法と 3D レーザースキャン技術を併用した実測調査を実施した手法の特徴や課題を具体的に整理・分析し、得られた 2D 図面データおよび 3D 点群データを用いて 3D モデルおよび BIM データを構築し、その比較検討を行った。その結果、従来手法と 3D レーザースキャン技術の利点を相互に補完することで、より精度の高い実測データを効率的に取得可能であることを確認し、現段階で残っている課題点などもより具体的に示された。

2.1 従来手法

建物の実測調査における従来手法では、平面図→断面図・立面図などの順に進むことが多い。そして、各図面の実測調査はまず建物の観察から始め、次に各図面の実測調査に基づいてスケッチになると思う。今回の観音堂の建物では、以下の過程からなる。平面図だと次に建物の柱間などを把握し、通り芯を方眼紙に示してスケッチを書き、各柱の寸法や壁面を描き入れ、柱間装置や建具の種類を明記する。床の構造（母屋や縁回り）、基壇や雨落石の配置、さらに周囲環境までを順次スケッチに記録する。実測作業は 2 人 1 組で実施し、1 人が測定値を読み上げ、もう 1 人が尺および mm 単位で記録し、柱間寸法、柱径、縁床や建具の寸法、階段など細部までコンベックスや矩尺を用いて精密に測定し、壁に埋め込まれた計測困難な部位は類似箇所の寸法から推測し、建築設計基準となる一枝寸法を各間の枝数をもとに算出することで、精度の高い図面作成を効率的に行う。また、断面図作成は、方眼紙に柱の通り芯を示した後、礎石や柱、縁廻り、軸部、軒廻りの各部材から茅葺屋根まで順次詳細に描写し、各部材の寸法はコンベックスや矩尺、トータルステーションを用いて精密に計測・記録することで、建物の立体的構造を明確に把握する。立面図作成では、方眼紙に柱の通り芯、地面、雨落石、基壇を明示し、柱や礎石から茅葺屋根まで各部材を順次細部まで描き込み、断面図で不足する寸法情報については鴨居・敷居、建具、階段などの詳細寸法を補完し、建物外観の精密な情報を得る。

2.2 3D スキャナー

本研究で導入した 3D レーザースキャン技術は、対象物の形状や空間情報を高精度な点群データとして効率的に取得する手法である。清水寺観音堂の調査では、FARO 社の「Focus Laser Scanner」を使用し、360 度全周を迅速かつ高精度（測距精度 $\pm 2\text{mm}$ 程度、レンジノイズは 10m で約 0.6～1.2mm）に計測するとともに、RICOH の全天球カメラ「THETA Z1」を併用してカラー情報も取得した。計測作業では、内部と外部を複数箇所からスキャンし、専用ソフトウェア（FARO SCENE、Autodesk As-Built）を用いて点群データを合成・整合した（図 2）。これにより、従来の手計測と比べて大幅に多い情報量を効率よく得ることができ、特に詳細寸法や微妙な変形も含めた高精度な現況把握が可能となった。取得した点群データは BIM ソフトウェアと連携し、建物の構造解析や耐震診断に必要な BIM モデルを構築するための基盤となった。一方で、レーザーが届かない陰影部分のデータ欠落、データ処理における専門的スキルの必要性、現場の明暗差や障害物の存在に伴う計測時の工夫など課題もあり、他の建造物への適用に際しては各建物の特性に応じた計測計画や運用手順を十分に検討する必要がある。

3. BIM モデリングについて

3.1 2D データもと

2D データとは、修理報告書および実測調査による建物の 2D 図面情報であり、それに基づき、清水寺観音堂の床組、軸部、組物、軒廻り、小屋組、屋根など各部材の BIM モデルを作成し、材質や改修履歴などの情報を付与した。作成した BIM モデルでは、部材の分類や位置情報、改修履歴、材質などをデータとして管理でき、各部材の寸法や断面積などの抽出も可能である。しかし、屋根など複雑な形状を有する部材については、ArchiCAD のモルフ機能や Rhinoceros 3D による



図 2 取得した清水寺観音堂の点群データの
外観（左）と小屋裏（右）

補完モデリングを行ったため、材質情報の入力に困難となった。今後はこうした部材を含め、詳細な材質情報や部材間の接合方法、釘止めなど構造に関連する情報をさらに充実させる必要がある(図3、表1)。

3.2 点群データをもとにした BIM モデリング

レーザースキャナーを用いた測量により、観音堂の外部・内部・小屋組(屋根裏構造)を高精度の点群データとして取得した。複数地点から得た点群はソフトウェア上で位置合わせ・統合を行い、建物全体の3Dデータを生成している。取得し

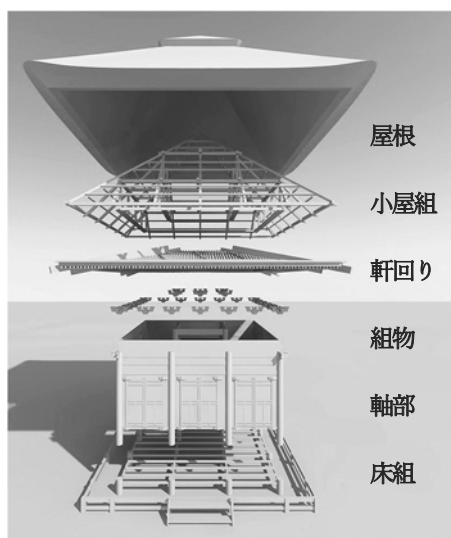


図3 2DデータによるBIMモデル
※(左表の情報は修理報告書により整理された)

表1 BIMに反映した部材の分類情報

分類	部材	部材箇所(数量)	改修履歴	工事区分	材料	作成ツール
床組	縁束	内部床裏(4)	新規	明治20年(1887年)	栗	柱
	床束		新規	明治20年	記載なし	柱
	縁葛		新規	明治20年	杉	梁
	縁板		新規	明治20年	杉	スラブ
軸部	側柱	右面2番目(1)	既存	天正9年(1581年)	ケヤキ	柱
	末迎柱		新規	享保7年(1722年)	ケヤキ	柱
	頭貫		既存	天正9年	ケヤキ	梁
	飛貫		既存	天正9年	ヒバ	梁
	内法貫	右面2箇所(2)	既存	天正9年	ヒバ	梁
	足固貫		新規	享保7年	松	梁
	虹梁		既存	天正9年	ケヤキ	モルフ
	斗拱		新規	天正9年	ヒバ	モルフ
軒回り	地垂木		既存	天正9年	ヒバ	梁
			新規	享保7年	松	梁
	飛檐垂木		既存	天正9年	ヒバ	梁
			新規	享保7年	松	梁
	土居桁		新規	享保7年	松	梁
	栂木		新規	享保7年	松	梁
	木負		新規	享保7年	松	梁
	茅負		新規	享保7年	松	梁
	裏甲	背面(2)	新規	享保7年	松	梁
	丸桁		既存	天正9年	ヒバ	モルフ
			新規	享保7年	松	モルフ
	地隅木		新規	享保7年	松	梁
小屋組	小屋束		新規	昭和3年(1928年)	松	柱
	母屋		新規	昭和3年	杉	梁
	斜材		新規	昭和3年	杉	梁
屋根	茅葺き屋根		新規	昭和57年(1982年)	茅	Rhinoceros

た点群データは Autodesk ReCap などの処理ソフトで統合・編集し、汎用的な点群ファイル形式(RCP/RCS等)に変換して軽量化した上で、BIMソフトに取り込んで活用する。たとえば Autodesk Revit や Graphisoft ArchiCAD に点群を読み込むことで、既存建物の形状を下敷きにしてモデリングが可能である。特に本事例では、点群から平面図や断面図・立面図相当の断面スライスを抽出し、それらを ArchiCAD 上で背景図面として表示することで、従来の2D図面と同様の感覚で各部材の配置位置を決定できるようにした。点群は常に3D空間で確認できるため、必要に応じて奥行き方向の寸法を直接測定・参照でき、複雑な既存形状のトレース精度向上に寄与している。こうした手順により、点群データを下地に実測建物のBIMモデルを効率的に構築した(図4)。

しかし、点群データを用いたモデリングにはデータ容量と視認性の課題もある。高密度な点群はデータが重く、BIMソフト上で表示や操作が遅くなりがちであるうえ、多数の点が重なった部分では必要な部材の輪郭や寸法を判別しにくい。そこで、モデル化する各部材周辺の点群をトリミングして必要最低限の点に間引くなど軽量化し、干渉する不要点を減らしたデータを使用して作業を行った。縮小・整理した点群を参照しながら、ArchiCADのモルフ機能等で部材の形状をなぞるように線を描き、柱や梁、組物などの部材モデルを作成している。点群を間引くことで処理は軽快になったが、その反面、斗拱(組物)や精緻な彫刻といった細部意匠の寸法把握が難しいという限界もあった。そこで本調査では、大まかな構造は据え置き型スキャナーの点群でモデル化しつつ、細部ディテールの取得方法も検討した。今後はハンディタイプの高解像度3Dスキャナーを併用して微細な形状まで点群計測し、複雑な彫刻部分を精密に再現することを計画している。また、現地実測調査により判明した小屋組内部の多数の丸太材

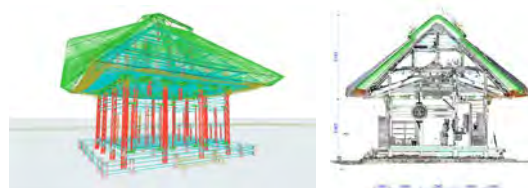


図4 点群データ元に作成したBIMモデル
構造図(左)と点群データと合わせた断面図(右)

の使用状況や、従来図面に記載のない屋根材との固定方法などの詳細も、取得した点群から読み取れる。これらの情報は今後の高精度モデリングや歴史的建造物の復元検討に資するものであり、今回取得した点群データの活用範囲をさらに拡大できる可能性がある。

4. 耐震予備診断について

本研究では、清水寺観音堂を対象に BIM データを活用した耐震予備診断を実施し、そのプロセスと結果は以下の通りになる：BIM モデルには詳細な部材寸法・荷重・材料・地盤情報を入力し、文化財建造物の耐震簡易診断法に則って初期的な安全性評価を行った。その過程で、ソフトウェア上の自動計算により荷重伝達や応力度、変形量の把握が効率的になり、観音堂の構造上の弱点と安全性について客観的データに基づく知見を得ることができた。主な結論として、清水寺観音堂は大地震に対して柔構造ゆえの大きな変形を許容しつつも倒壊に至らない耐性を有する一方、柱脚や仕口部などに局所的な補強の検討余地があることが明らかになった。BIM による診断支援は、視覚化と迅速化によって文化財建造物の耐震評価に有効に機能し、限られた調査期間で合理的な判断を下す一助となった。一方で、入力データの不確実性や伝統構法の再現性など、古建築特有の課題も認識された（表2）。

今後は、本予備診断の結果を踏まえて更なる詳細な耐震診断（例えば動的時刻歴解析や非線形解析など）を実施し、必要に応じて最小限の補強設計を検討する予定である。その際も BIM モデルは基礎データとして活用でき、また診断・補強過程の記録を蓄積することで、清水寺観音堂のみならず他の歴史的木造建造物の耐震安全性向上にも資する知見が得られると期待される。本研究は、デジタル技術と伝統建築保存工学を統合することで、文化財建造物の耐震的保存活用に新たな可能性を示すものである。

5. 結論

以上の清水寺観音堂を対象とした実測調査および BIM データ構築により、効率的なデジタル化手法の有効性と、それを用いた耐震予備診断の可

表 2 耐震予備診断の入力項目と調査・判定方法

項目	No.	項目3	調査方法	判定	判断条件	調査者判断
立地環境に係る事項	1	地域区分	住所	自動	住所	
	2	災害歴	資料*	自動	有無	
	3	活断層	資料	自動	地質図・距離	
	4	地盤	資料	自動	地質図・種類	
	5	造成状況	資料	自動	地質図・種類	
	6	周辺地形	目視	定性	地形状況	隣接判断
構造特性に係る事項	7	延床面積	実測	定量	各階面積	上重判断
	8	軒高	実測	定量	柱底から茅負外下角	塔屋除外判断
	9	軒高/短辺長	実測	定量		
	10	形状	目視	定性	整形・不整形	形状判断
	11	軸部構造に係る事項	目視	定量		他の耐震壁の判断
	12	柱の配置	目視	定性	規則・不規則	規則性判断
	13	柱断面積計/床面積	実測	定量		
	14	柱底部の一体性	目視	定量	部材有無	直線補間
	15	柱脚部の一体性	目視	定量	部材有無	直線補間
	16	天井	目視	定量	様式	直線補間
	17	礎石の大きさ	実測	定量		
	18	小屋組	目視	定量	形式	
	19	屋根野地	目視、資料	定量	形式・材料	
	20	屋根葺材	目視	定量	材料	
	21	軒面積/床面積	実測	定量	最上階床面積・軒面積	塔屋・庇除外判断
	22	不同沈下	目視	定性	程度	程度の判断
	23	主要構造材の腐朽・虫害	目視	定性	劣化程度	程度・割合の判断
	24	主要構造材の変形	目視	定性	程度	程度の判断
	25	根本修理歴	資料	自動	修理時期	

能性を示し、それに伴う課題点も明確した。最後に、本研究を支援いただいた松井角平記念財団の研究助成に深く感謝申し上げる。

研究題名「地域および博物館と連携した歴史的建造物の魅力や価値の周知手法に関する実践的研究」

横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 大野敏^{*1}、守田正志^{*2}、菅野裕子^{*3}

はじめに

平成 30 年(2018)の文化財保護法改正は、未指定を含めた文化的歴史的資産（広義の文化財）について、その所在する地域が総合的に資産を把握したうえで、計画的な保存・活用によりまちづくりに活かすことを主眼とする。その具体策として、各都道府県が定める「文化財保存活用大綱」に基づき、各市町村が文化財の保存及び活用に関する総合的な計画「文化財保存活用地域計画」を作成することにより、文化財を地域全体で「知り」「活かし」「守る」流れの促進を期待している。

「文化財保存活用地域計画」の実現は、地域の人々自ら文化財の魅力を「知る」ことにより、「活かし」「守る」へ展開することが必須となり、地域文化財の魅力をわかりやすく伝える基礎資料整備と公開が必須である。その具体的な進展のために、博物館と大学による博学連携事業や、大学と地域の交流に基づく域学連携事業を通して、地域の魅力を再発見して地域住民へ還元する活動が有効である。

そこで本研究は、上記の課題とその解決策として有効と期待される博学連携・域学連携の手法を、以下の実践例 4 例を通して有効性を示すものである。これらは対象と内容が異なり、今後の博学連携・域学連携の有用性・発展性を考えるうえで参照すべき事例といえる。

1. 横浜市歴史博物館との博学連携 写真 1

横浜市歴史博物館（公益財団法人横浜市ふるさと歴史財団）および横浜市教育委員会は、重要文化財関家住宅（個人所有）保存修理事業終了年の平成 17 年度(2005)以降、毎年一回特別公開を開催してきた。例年抽選倍率が高い文化財公開イベントである。説明は博物館職員と教育委員会職員が分担して行い、適宜資料を配布してきた。その中で、建築の説明をもう少し充実させたいという思いが年々大きくなった。

そのため 2023 年度に横浜市歴史博物館の学芸員の相談を受け、2024 年度の特別公開において建築史・建築芸術研究室として協力した。実施に当たり大学院都市イノベーション研究院と横浜市ふるさと歴史財団との間で、関家住宅特別公開に関する覚書を交わして、組織的に連携関係を築いて対応した。

令和 6 年(2024)の特別公開は 11 月 23 日（土祝）に設定されたので、まず 5 月に研究室の学生に向けた関家住宅見学会を開催して、協力学生を募った。そして古民家の魅力を一般見学者に伝える手法を考えてもらい、リーダーも決めた。そして学生による協議の結果、「主屋の構造模型を作って現地へ持ち込み、現物と模型を対照させて解説するのが有効であろう」との結論に達した。

模型制作は主に夏休みに進めた。まず平成 17 年度(2005)に竣工した主屋保存修理時の図面資料を、設計監理を担当した（公財）文化財建造物保存技術協会から提供してもらい、1/50 サイズの軸組模型を試作したうえで、1/20 の本模型をつくることに決定した。梁の曲がり材は切り出して成形し、梁組の上下関係はもとより形状もできるだけ実物に倣うように努めた。柱の太さもできるだけ同じ寸法に近い材を用いて、柱断面の大きさも判別できるように努めた。

模型に関連して解説パネルも A1 サイズ 3 枚を制作した。関家住宅の全体像（屋敷配置図と主要建築概要）、模型の制作過程、模型をもとに関家住宅主屋の魅力を総観するもの、の 3 種である。

1 回の見学時間は 40 分で、①見学上の諸注意と入場、②関家の概要と屋敷構え、③主屋の建築解説、④書院の建築解説、⑤庭園を見学して退出、の行程を誘導役の引率で見学する。誘導役と①、②、⑤は横浜市歴史博物館の学芸員が担当し、③、④を建築学生が 6 名で対応（必要に応じて教員が補足）し、事務対応は横浜市教育委員会職員が担当した。学生の解説は、リーダーの事前シナリオをもとに適宜進めた。

11 月 23 日の特別公開日、見学者は長屋門前にて概要説明を受けた後に、主屋の土間に誘導された。模

型は土間の大戸口を少し進んだ場所に設置して、模型を囲んで建築概要を説明したうえで、実物と対照して空間・構造・意匠を実感してもらった。説明中に「一番太い柱はどこにあると思いますか」とか「柱の仕上げに違いを感じますか」などと問いかけて、見学者に関心を持ってもらう工夫が効果的だった。

主屋の床上では間取の特徴を中心に説明し、(最上層住宅であっても)天井を設けない部屋が普通に存在したということを通して、封建時代を実感してもらったり、書院へ移動して座敷に座って天井のある特別な空間を実感してもらったりしながら、適宜学生の説明をまじえて理解を深めてもらった。

出口では教育委員会によるアンケート調査が行われていたが、「解説がわかりやすかった」「横浜国大の学生さんが熱心に研究し説明してくれたことが良かった」など満足度の高い意見が多かった。

上記のような博物館と大学の連携の中で、横浜国立大学が大学周辺で行っている地域貢献活動を大型都市模型とパネルで紹介する活動について、横浜市歴史博物館で公開する機会を得た(11月5日～12月17日)。なお、横浜市歴史博物館は都筑区区政30周年記念事業の一環として「丘の横浜」展を企画しており、その中で大野が関連講座として「横浜の茅葺き」という題名の講演会講師を引き受けていた。そのため、11月30日の講演会の前に、関家模型を学生が解説する機会も得た。こちらも、大変好評であった。

模型はいずれ関家に常設できるようにするつもりで考えている。関家の文化財建築概要や主屋の建築の見どころを紹介したパネルは、よくできていると関係者に評価されたが、見学会時にはゆっくり見ていただく時間的余裕がなかった。そのため、従来横浜市が製作配布してきた解説冊子との関係に考慮したうえで冊子化を検討したい。

関家住宅の特別公開については、研究室の恒例行事として協力することにより、教員と学生がともに学ばせていただく機会を常態的に継承して行ければよいと感じた。

2. 神奈川県立歴史博物館との博学連携 ～コレクション展の共催～ 写真2,3

神奈川県立歴史博物館の本館である旧横浜正金銀行本店本館は、明治37年(1904)竣工の日本を代表する近代建築で重要文化財である(設計者妻木頼黄、工事監督遠藤於菟)。その敷地も旧横浜居留地の一面に所在し、日本の近代金融市場重要な場所であるため史跡に指定されている。

横浜国立大学建築史・建築芸術研究室では、博物館側のご好意で折に触れて旧横浜正金銀行本店本館の建築見学機会を得ていた。その中で、この建築が関東大震災時に当初建築資料の多くを失っていること、現状図に関しても本格的な平面図や断面図は作成されていない事などを知った。そのため平成30(2019)年度の松井角平記念財団研究助成「近代の文化財建造物の保存活用に関する基礎的研究～神奈川県立歴史博物館(旧横浜正金銀行本店本館)を例として～」を得て、博物館が所蔵する建築関係資料整理、建物の平面実測、昭和40年博物館改修工事写真の内容確認、近代銀行建築の保存活用事例収集、等を行った。この調査研究活動は学部と大学院の演習として、建築理論系(建築史、建築計画、ストック活用などの複合分野)としても実施し、学生達にとって普段なかなか触れることのできない重要文化財・旧横浜正金銀行本店本館の建築と史料の実態を直接実体験できる機会を得た。

その後も上記の経験を活かし、博物館側の理解を得て、大学院演習において旧横浜正金銀行本店本館の金庫室周辺、階段室、第一営業室における関東大震災復旧部分の建築細部、などを把握する調査を継続するとともに、博物館として継承していくための改修案検討に取り組んできた(2021年度～2023年度)。

こうした継続的な連携関係をもとに、2022年秋に神奈川県立歴史博物館から「2024年は旧横浜正金銀行本店本館竣工120年記念の年なので、建築を主題とした展示を共同で行えないか」との相談を受けた。

我々としても、今までの調査研究の成果を還元でき、学芸員さんの指導の下で学生が「本物の博物館展示」を経験できる絶好の機会であった。そのため、大学院組織(都市イノベーション学府および研究院)

としてもこの件に協力する旨、研究院長の承諾を得て取り組むこととした。

そして具体的な展示プログラムは「コレクション展 横浜正金銀行本店本館」をテーマに、第1章 旧横浜正金銀行本店本館、第2章 正金銀行員たち、第3章 建物の現在と未来の3章構成とし、第1章・第2章は博物館学芸員が担当、第3章を横浜国立大学大学院の建築系学生が担当した。第1章は横浜正金銀行の歴史と建築に関する博物館所蔵資料の紹介を行い、第2章は国際的な活躍を見せた正金銀行員の勤務や家族のくらしの実像について関係者寄贈資料を通じて紹介した。第3章は、現存する正金銀行本店本館の建築の建築調査を踏まえた価値と魅力、および重要文化財建築を博物館として継承・活用していくための学生提案を、一般の方々向けに展示資料化することを念頭に作業した。会期は令和6年(2024)11月9日～12月22日まで、博博物1階無料展示ゾーンにおいて開催した。

学生が展示に関わるうえで、まず今までの大学における活動概要と旧横浜正金銀行本店本館の建築概要について教員が解説した。そして実際に神奈川県立歴史博物館を訪れ、学芸員の方から文化財建築としての旧横浜正金銀行本店本館の見どころ、および人文系博物館としての利用実態について詳しくご案内いただき、その魅力と課題を確認した。

その上で学生達(15名)が話し合った結果、「建物の現在と未来」展示構想の骨格を、①日本を代表する明治期銀行建築である、②銀行建築が博物館として再利用された、③その間に関東大震災からの復興があった、④敷地も建物も文化財なので継承していくためには課題がある、ことについて来館者にわかりやすく伝えることを目標とした。そしてこの目標達成のために、明治37年竣工時と現在の建物各階の使い方を比較した平面イラスト、高大な吹抜け空間(旧第一営業室)を増床して展示室を確保した状況を比較する断面模型、補強煉瓦構造「錠聯鉄工法」を触って理解する模型、過去の演習成果のパネルをそれぞれA1版サイズにプリントして新聞ラック(新聞掛け)に整理収納して展示する、などを工夫した。さらに展示主旨を凝縮した解説パンフレットを制作した。その表面は横浜正金銀行(1880)→東京銀行(1947)→神奈川県立博物館(1967)→神奈川県立歴史博物館(1995)への業務形態変化と、正金銀行本店本館竣工(1904)から関東大震災後の改修(1925)を経て博物館改修を2度経験した経過を通覧できる写真付で年表化した。裏面は、建築の見どころを創建時の防火シャッター、第一営業室の展示室への改修状況と一部再現した大正修理時の建築装飾、ドームの復原という3つのテーマに絞って解説した。

また、コレクション展にあわせて神奈川県立歴史博物館が3回連続講演会「県博セミナー 横浜正金銀行本店本館の現在と未来」を開催してくれた。我々3名の教員がそれぞれ博物館との連携による研究成果(建築履歴研究、博物館継承手法検討、博物館建築意匠研究)を発表した。

3. 山形県金山町における域学連携 写真4

山形県金山町における域学連携事業は、大学院の短期学外演習(旧科目名は短期インターンシップ)という演習の一環で行ってきた。その契機は、金山町と進めていた総務省「域学連携」実践拠点形成モデル実証事業(風土に根差した金山町まるごとエコ・アート・ミュージアムの核となる『里山里まち交流活性化センター』構想)に参加したことにある(2013年度)。

令和5年度(2023)に、過去11年間の調査活動を総括し、金山町幹部を交えて今後の域学連携のあり方を協議した。その中で、調査成果を地域の人たちにもっと知ってもらうための方策を工夫すべきとの結論を得た。それをうけて、まず一年目として、地元小学生と大学院生が連携して地域の歴史的建造物(町で唯一の国登録有形文化財である近岡家住宅)見学会を企画・試行し、その成果をポスターや模型で表現して公開することにより、地域の人たちに歴史的建造物の魅力を知ってもらい、地域資産を維持するコミュニティの在り方と考える契機とすることを試行した。

活動は令和6年(2024)10月31日(木)～11月3日(日・祝)の3泊4日で実施し、1日目と2日目はおもに学生達が金山町およびその周辺の文化的歴史的資産の魅力を実感することに充てた。特に登録文化財・近岡家住宅における建築の特徴把握と、近岡家の生業である林業の実態を見学して200年以上経過した杉植林の迫力を体験することを重視した。3日目は事前に募集した小学生5名を対象として「金山町の魅力発見」を実施した。午前中は近岡家住宅主屋において「古建築探検」を行った。そこでは学生が近岡家の屋敷と主屋を案内してから、子供たちが興味を示した事物を「深掘り」した。例えば広縁の長さを自分たちの体の大きさ(身長や足の大きさ)と比較して感じてみる、風雪に耐えた柱の風化や建築金具の形など気になる部分を色鉛筆と紙で「摺形」に記録する、部屋の模型作りに挑戦する、等である。

午後は公民館にて、近岡家で学んだ成果を子供たちと学生が協働して大パネル「近岡家住宅」の製作に通り組んだ。その夜は学生達が、パネルの最終仕上げに取り組んでくれた。

4日目は、金山町の町民文化祭の日で、町制100周年に当たり公民館は多くの町民が訪れていた。その玄関ホールに子供と学生による作品を展示した。大変好評で、公民館内で長期展示することになった。

来年度以降もしばらく「金山町の魅力発見」は続ける予定である。

4. 群馬県伊勢崎市における域学連携 写真5

群馬県伊勢崎市境島村における蚕種製造民家建築群の保存継承機運を高めるため、保存想定地区の核となる蚕種製造民家6件を対象にクイズ・スタンプラリーを企画(昨年施行版を更新)して2回実施した。

第1回目は2024年10月27日の伊勢崎市主催の田島弥平旧宅世界遺産登録10周年記念フェスタにおけるクイズ・スタンプラリー参加で、200組以上の参加者を得た。第2回目は伊勢崎市教育委員会による田島弥平旧宅世界遺産登録10周年記念事業「島村アカデミー」の参加で、100組以上の参加者を得た。

クイズ・スタンプラリーの対象となる蚕種製造民家6件にクイズを設置し、各家を訪れた参加者が家の中や敷地内に設置されたクイズを解くことによって、蚕種製造民家の特徴を理解していけるように工夫されており、6件の家それぞれが独自の公開手法で参加者を受け入れてくれる。わずかかもしれないが、所有者と一般来訪者の触れ合いを通じて、蚕種製造建築群としての継承の重要性の相互理解が進展していると実感する。今後も継続していくとともに、その範囲や種類も必要に応じて変更・拡大することも検討すべきである。

おわりに

今回試行した4つの調査研究活動とその公開手法は、歴史的建造物の存在意義を地域の人たちと考える契機として大いに期待できる。横浜国立大学は、このような実践的な地域貢献活動を学生演習などの教育研究活動として展開することを「オープンイノベーション教育」と呼んで重視している。特に、我々の所属する大学院都市イノベーション研究院・学府は、オープンイノベーション教育の拠点として位置づけられている。令和7年(2025)3月1日に都市イノベーション研究院主催の「オープンイノベーション・シンポジウム」が開催され、上記のなかから横浜市歴史博物館および神奈川県立歴史博物館との「博学連携」による研究教育活動の成果を学生・教員が事例発表し、博物館側の出席者からもその経験談を発表していただいた。そこでは博物館と大学における今までにない連携(建築展示の共同開催)の可能性を評価する意見や、地域学として展開するうえで博物館と大学の柔軟な連携拡大を益々期待する意見が示された。

今後も今回示した活動を継続することにより、地域社会へ研究成果を有効に還元でき、その過程におけるオープンイノベーション教育による(大学としての)人材育成にも有効であることを示していきたい。

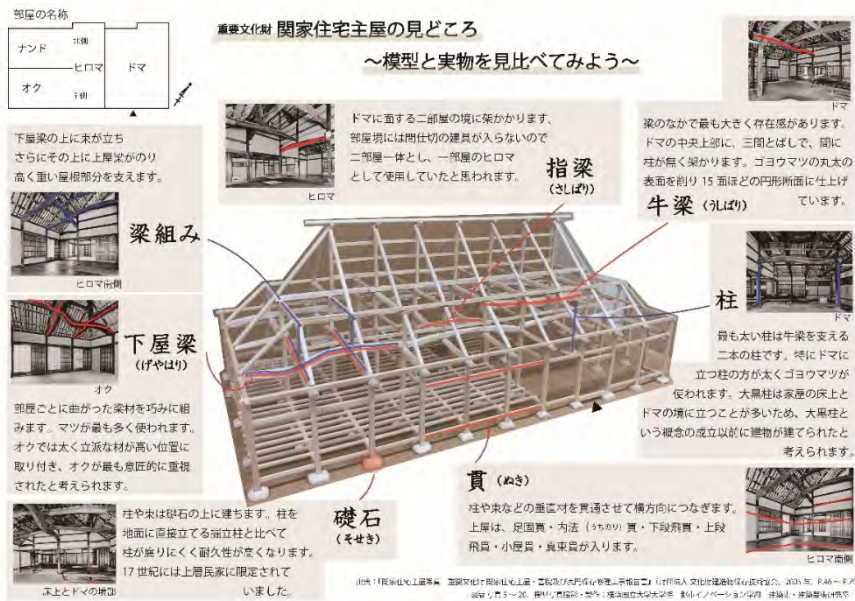


写真1 関家住宅主屋 模型を使った見どころ紹介パネル

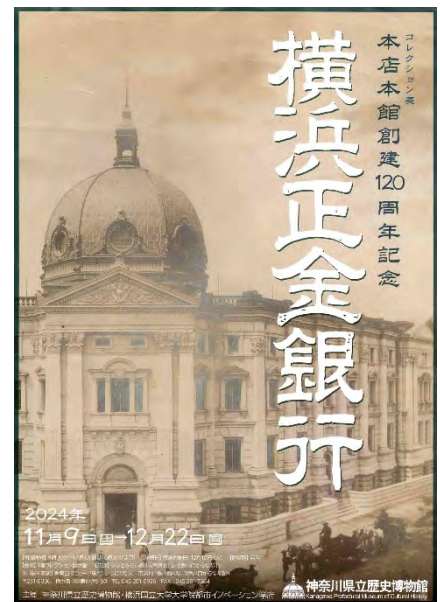


写真2 コレクション展ポスター



写真3 神奈川県立歴史博物館 コレクション展示「第3章正金銀行本店本科の現在と未来」

写真3は神奈川県立歴史博物館提供



写真4 金山町公民館に展示した「近岡家住宅」パネル



写真5 2024年版クイズ・スタンプラリー用紙

社寺文化財建造物における装飾木彫の調査と保存・修復・資料活用に関する研究

龍谷大学 文学部 歴史学科 教授

北 野 信 彦（博士（学術）・（史学））

令和 7 年 6 月 30 日

1. 研究目的

文化財建造物の装飾木彫は、中世社寺の小規模な墓股部材などに初源が求められるが、桃山文化期以降には二条城二の丸御殿などの城郭御殿建造物や比叡山延暦寺根本中堂・日光東照宮などの近世社寺建造物を荘厳する建造物部材として華開いたとされる。ところが彩色欄間の保存修復科学的な調査研究は極めて低調である。その理由は、彩色欄間は凹凸が複雑な三次元表現であるとともに二次元表現の金碧障壁画に比較して埃・汚れ・塗装彩色の退色や劣化が著しく、当初の状況が確認しづらいことがあげられる。ところが社寺建造物の場合、特に堂内は国指針として現状維持修理が求められる文化財ではあるが、旧塗装彩色の掻き落として主教空間としての荘厳を再現するための新規塗り直し修理が所有者側から強く求められる事例も多い。金碧障壁画は模写絵画や高精細写真絵画を建造物内に配置してオリジナル絵画は収蔵施設で保管管理する事例が一般化しているが、装飾木彫を彩色模刻と入れ替えるための基礎調査と技術開発に注目した先行研究はほとんど見られない。本研究はこの現状に注目して、現在申請者が塗装彩色修理専門委員を拝命していることもあり、具体的なモデルケースとして国宝比叡山延暦寺根本中堂内陣の彩色欄間を対象に、①材料分析や三次元計測による図様データの蓄積、②オリジナル彩色欄間の保存修復方法の開発、③三次元計測データを基にした木地模刻の切削技術の開発などの基礎研究を行うことを目的とする。このような希少であるにも関わらず劣化が著しいため、早晚、基礎調査や保管管理が困難となることが懸念される装飾木彫の調査・修理・資料活用方法の構築を行うための基礎研究は急務であるとともに、宗教施設の活用に極めて意義が深いものと考えている。

2. 研究結果

①木地切削技術を応用した木地模刻資料作成の検討

本研究では、比叡山延暦寺根本中堂の彩色墓股木彫の三次元計測と分析調査をまず実施した。この理由は、修理時には足場が掛かるため普段近づけない箇所にある装飾木彫間近で観察・分析が可能であり、予め修理時に現状の形状と塗装彩色材料・技術を記録しておき、将来懸念される劣化の際の復原事業に備えること。さらには近年汎用性が著しい3Dプリンターによる合成樹脂製レプリカ作製技術を受けて、切削構造が極めて複雑な装飾木彫の模刻資料の活用に資する製作にどの程度適応できるか再確認することなどである。特に、合成樹脂模刻資料は建造物部材である木地の装飾木彫資料に比較して強度は弱く、紫外線劣化にも脆弱である。さらに木地と合成樹脂の胎部素材の違いは、直接伝統材料・技術で復原着彩した場合、前者のオリジナルの木地木彫とは異なり後者の郷税樹脂では膠の染み込みがないため濡色が強くなる傾向があった。木地模刻資料の製作に三次元計測により取得した点群データを応用した事例は、東京芸術大学大学院文化財保存学彫刻研究室による木彫仏の模刻資料作製などの実績がある。しかし、木地切削機器で自動切削する模刻資料の作製は、単純な一軸切削であれば二次元図様の形状を木地に直角に切削することは比較的容易であるが、オーバーハングなどがある複雑な形状の文化財資料の自動切削はこれまで困難であった。近年になってこの一軸切削技術にきめ細かい三次元計測情報を組み込んで能面や干菓子木型などの比較的凹凸が少ない木地模刻資料の製作技術が開発された。本研究では、この技術に実績がある（有）嶋モデリングの嶋光太郎氏の協力を得て、一軸の木地切削技術を発展させた三軸切削技術を応用するとともに、

オーバーハング面は2 パーツを貼り合わせて、凹凸が多く形状が複雑な装飾木彫の林地模刻資料作製技術の開発に関する基礎研究を実施した。三次元計測データは、(株) TOPPAN 文化事業推進本部の中山香一郎氏によって取得された宝厳寺観音堂内正面長押上に装着された「朝鮮鹿と紅葉」両面彫彩色欄間の朝鮮鹿部分の 1/1 原寸大箇所である。中山氏により、点群データ修正・造形方向及び造形パラメーターの最適化などのデータ処理した三次元計測の XYZ (長さ×幅×高さ) 軸データを、木目に併せた数パーツ箇所に分割して林地に三軸自動切削し、それを接着させて一体化した木彫模刻資料を製作した。その結果、切削機器の回転速度によっては林地木目にササクレが生じる危険性があるなど、担当する造形エンジニアの技術に依存する部分が多いため、汎用的な手法構築の開発が必要であること、さらには3 軸切削から切削すべき林地を、設置台を縦・横の斜め方向の情報も加えた5 軸切削へ機器性能のバージョンアップを図ったことで、より精細で複雑な形状の林地模刻資料の作製が可能となることがわかった。本研究では、この自動切削機械を使用して比叡山延暦寺根本中堂外部の「麒麟と纏綱」臺股部材の彩色木彫資料について、新たな 1/2 寸法、1/4 面積スケールの林地模刻資料の製作を実施した。その結果、オリジナルの臺股木彫と比較しても遜色ない林地造形の切削模刻資料を作製することができた。

②林地模刻資料への復原着彩作業

前記したように光合成樹脂胎部で作製した装飾木彫の模刻資料に伝統材料。技術を用いた復原着彩を行った場合より、林地模刻資料の着彩したほうが自然な仕上がりとなる。令和期の比叡山延暦寺根本中堂における装飾木彫の臺股木彫の彩色痕跡箇所の目視観察とデジタル顕微鏡における拡大観察、ハンドヘルド蛍光X線分析装置による科学分析では、造営当初期は金箔を多用するとともに、青色彩色材料には天然岩群青顔料の使用が、江戸時代中期の宝暦期彩色修理時には金箔箇所は黄土彩色、岩群青彩色はスマルト(花紺青)顔料、臺股縁取箇所は朱彩色からベンガラ彩色に変更されていることが確認された。ただし、寛永再建当初期の旧塗装彩色の残存状態は宝暦期彩色修理時の旧塗装彩色に比較して希少であるため、宝暦修理時のそれがほぼ彩色復元が可能であった点と比較して推定箇所が多い復原見取り図となった。そのため、オリジナル木彫には宝暦期の姿に復することとなった。本研究では、寛永再建当初期の姿を広く一般にイメージできるような参考資料として提供する目的で、本研究で作製した「麒麟と纏綱」の彩色臺股の林地模刻資料に復原着彩する、研究の目的である復原見取り図を参考にした三次元模刻資料への着彩作業を実施した。この方法は、現在、伝統的な彩色木彫への着彩方法を応用して、①林地直上への捨て膠1 回目→捨て膠(2 回目)→捨て膠(3 回目)→ドーサ引き→下胡粉塗布1 回目→下胡粉2 回目→日光東照宮などの伝統技法である金箔貼り箇所への箔下塗装である丹の具(膠+胡粉+鉛丹塗料)の塗布→金箔押し作業→復原見取り図と塗装彩色塗り重ねの断面観察結果を参照にした膠+顔料による中塗り着彩→同上塗り着彩作業を実施した。その結果、極めて精緻な林地復原彩色模刻資料を製作することができ、比叡山延暦寺に完成資料を提供した。この林地模刻彩色復原資料は、比叡山延暦寺の文化財公開施設である比叡山国宝殿の春季特別展で公開展示された。その後、7月2日～7月6日にかけて、現在開催中の大阪・関西万国博覧会のジャパンデーに併せたイベントである第3回日本国際芸術祭において、メインテーマの一つである「日本の最高の美」の比叡山延暦寺の展示ブースにおいて公開展示される予定である。なお、同テーマ展示では、建仁寺のブースでは、高精細写真撮影技術を応用した「風神雷神時屏風」の高精細屏風の公開展示、仁和寺ブースでは、秘仏の国宝薬師如来像の3D計測データを基にした合成樹脂出力プリンターによる合成樹脂レプリカが公開展示される予定である。このことは、本研究の目的と同様、文化財の資料活用を目指した様々な取り組みが現在活発であることを表しているものと理解した。

(図版一覧)



宝暦期修理時の彩色復元図



宝暦期修理時の彩色作業完了後の現物の葺股木彫



延暦寺根本中堂彩色葺股の三次元計測風景



木地模刻資料を作製した5軸自動切削装置



三次元計測データをもとに製作した機械切削技術による白木状態の木地模刻資料



寛永再建当初期の彩色復元図



葺股木地模彫資料(麒麟図様)への着彩作業①



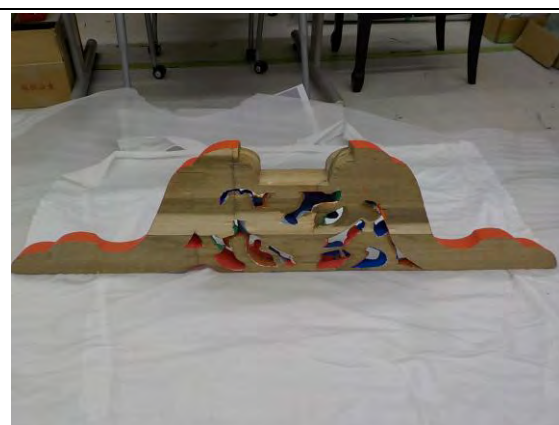
墓股木地模彫資料(麒麟図様)への着彩作業②



墓股木地模彫資料(麒麟図様)への着彩作業③



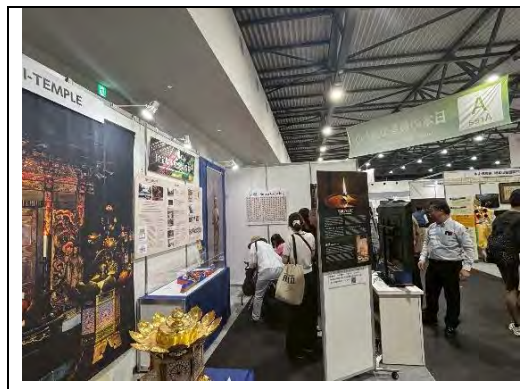
墓股木地模彫資料(麒麟図様)への着彩作業④



墓股木地模彫資料(麒麟図様)の裏側



塗装彩色材料に関する分析調査を踏まえた復元模写図をもとに着彩復原した模刻資料(完成品)



大阪・関西万博展示会場における本模刻資料の展示の様子(比叡山延暦寺ブース)

公益財団法人松井角平記念財団 2024 年度助成研究 研究報告（概要）

「摺拓本資料に基づく大工彫刻の記録と再生」

研究代表者 是澤紀子（日本女子大学建築デザイン学部・教授）

研究助成期間 2024 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日

1. はじめに

歴史を語る建築の多くは、近代以降の建築史学の確立と、古社寺や国宝の保存にはじまる、現在の文化財保存の実践を背景として評価されてきた。これに伴い、専門家による幾度もの調査が実施され、その成果に基づく修理や復原を経て、現存する姿を保持している。その際、図面や写真記録、彩色見取図等にくわえて、大工彫刻に関しては原寸の摺拓本が採取されていることに着目したい。それらは現在、文化財に関する研究所や美術館・博物館等の機関、文化財修理に携わった技術者のほか所有者等により保管されているものの、一部機関におけるリスト化にとどまる現状である。全体像の把握や保管の困難さゆえ、資料価値がありながらも取り上げられることは少ない。

このことから、筆者らは過去の文化財修理や建築調査の際に採取された摺拓本資料として国立歴史民俗博物館所蔵の『天沼俊一旧蔵資料』（以下、歴博天沼資料）を対象に整理・分析を行い、主に寺社建築の意匠や技法の伝播について研究をすすめてきた。本研究の目的は、これらの摺拓本資料を用いて、建築の造営に関与した工匠の移動や系統に着目し、それらの流通に支えられた大工彫刻の特質について探ることで、その記録と再生の実態を検証することにある。とくに 2024 度は一部の摺拓本についてフラットニングを施した撮影画像を作成し、精度の高い分析結果が得られたことから、2025 年度も継続して未調査の摺拓本の撮影をすすめ全体像を把握し取りまとめたい。今年度も継続中であるが、2024 年度に実施した概要を報告する。

2. 国立歴史民俗博物館の摺拓本資料の調査とフラットニングによる精緻な記録撮影

本研究で取り上げる歴博天沼資料は、写真や図面、摺拓本など多岐にわたるもので、未調査の資料を含む膨大な資料である（図 1）。同館情報資料研究系の島津美子氏の協力のもと歴博天沼資料のデータベース化に向けた整理をすすめており、資料群の種類や構成が明らかになってきた。摺拓本は資料群 23 件のなかに約 700 点が把握できている。

このうち瓦や鐘銘、碑文など拓本中心の資料群に対して、墓股や木鼻、手挟や懸魚、欄間等の木部の摺拓本資料群は約 4 割を占める。これらのリスト化と記録撮影をすすめる中で、今回新たに東京修復保存センター（TRCC）の協力によりフラットニングを行ったうえで撮影することで、折り目がない原寸資料として他類例と比較することが可能となった（図 2）。



図 1 資料保管状態と摺本調査の様子

このようなフラットニング作業は、期間と予算の関係から全ての木部の摺拓本は実施できなかったものの、約 250 点（総枚数 300 枚）の撮影画像が得られ、従来の画像とは精度が異なる比較分析をすすめている。撮影した 300 枚はすべて画仙紙に摺られたもので A3～B0 相当の大きさである。フラットニングや整形にあたり採寸した記録によると、長さ 1000 mm 以上が 43 枚、最大は拝懸魚鰭付の摺拓本で 1085×3330 mm に及ぶ。なか



図2 フラットニング後の撮影画像例
(国立歴史民俗博物館所蔵)

には建造物名称が記載されていないことも少なくない。しかしながら修理工事報告書や天沼自身の著作等を参照しつつ調べをすすめ、いくつか慈眼院金堂など現地確認もふまえて特定することができた。また、現状では風食の著しい細部装飾の情報も摺拓本から確認できたことで、修理時に旧規に倣って補修した中古部材に対する知見が得られた。なお、形を写しとるための補助線グリッドが描かれている摺拓本はごく一部である。製図のためというよりも、図面と写真と摺拓本という三つを常に重視した天沼の姿勢からは、摺拓本が建築を洞察する上で不可欠であったことがわかる。ここでは歴博天沼資料の木部の摺拓本にみられる「欄間」の事例から、大工彫刻の記録と再生についてみていきたい。

3. 資料収集と現地調査をふまえた大工彫刻の伝播の様相——彫刻欄間の事例から

摺拓本の画像撮影とともに、同時並行して進めてきたのが文献資料に基づく大工彫刻および工匠のデータ整理と現地調査の対象抽出である。摺拓本には墓股や木鼻、手挟や欄間など、彫刻を施した細部装飾が多い。そのような細部装飾に着目すると、神社建築においても中世に仏教建築同様の細部を取り入れて装飾化を伴い変化していく。とくに中世から近世にかけての展開において、神社本殿の身舎正面には内法長押を廻さずに、隅柱で見廻しとするか枕捌として彫刻欄間を入れる手法が用いられていることに着目し研究をすすめてきたが、身舎正面の内法長押を見廻しとしながら彫刻欄間のない東田中神社境内社旧竹房神社本殿（和歌山県指定文化財）に関して、今回の摺拓本調査と現地調査により、同社が移築される前の旧建物における彫刻欄間の摺拓本であったことが判明した。以下に詳述する。

3-1. 「変則な手法」の伝播にかんする四天王寺系の工匠たちの関与

この手法に関しては拙稿「畿内中世神社本殿の内法長押に関する意匠と技法——見廻しと枕捌にみる近世初頭への変容」（日本建築学会計画系論文集、88 巻、2023）として発表しているが、ここで扱った神社本殿の多くは天沼自身も現地を訪ねている。その特徴は、建築史家・浅野清が「変則な手法」と評したもので、杭全神社（大阪市平野区）の本殿（第三殿）に見ることができる（『大阪府文化財図説 建造物篇 1』大阪府教育委員会、1960）。正面のみ内法長押を廻さず、そこには虹梁形に彫りを入れた頭貫を通し、建具の鴨居との間には透彫の欄間と竹の節を入れる手法であり、室町後期に一つの定型化をなしたとみられる。

各地の工匠が地域を超えて現場に集い、活躍した時代にあって、いくつかの事例には共通して、四天王寺系の工匠が造営にあたった記録が残っている。このような手法を用いた神社本殿は、中世末から近世にかけて、とくに大阪府南部と和歌山が注目されがちであるが、大阪府西北部や兵庫県南東部でも室町後期にみられる。すなわち摂津、河内や和泉、紀伊での事例を通して桃山時代への展開が理解できる。ここでは棟札に工匠が記された紀伊の白岩丹生神社本殿（有田川町）を中心に提起して、他事例と比較しながら「変則な手法」に類する造形の伝播と、各々に込められた独創性に注目したい。

白岩丹生神社本殿の建立年代は永禄三年（1560）とされているが、さらに遡って明応五年（一四九

六)の棟札を文化四年(1807)に書き写したものが現存する。それによると「白岩造営之事自天王寺工祖廿人明応五年」とあり、明応時には四天王寺系の工匠集団が造営を担ったことがわかる。一方、永禄の棟札にも「白岩造営之事自天王寺工祖数人」「其時之桧皮ノ大工 四天王寺住 藤原宗広」とある。明応の棟札には工匠の数や工期など具体的記載がある一方、永禄の棟札からは屋根の葺替えを主とした工事ともみられ明応時に建てられた可能性が高いとの指摘がある(『重要文化財白岩丹生神社本殿修理工事報告書』重要文化財白岩丹生神社本殿修理委員会、1959)。いずれの時期にも四天王寺系の工匠の関与が認められ、明応時であれば「変則な手法」の出現が杭全神社本殿(第三殿)よりも遡ることになる。

3-2. 竹の節欄間と透彫の図案と彫刻技法

白岩丹生神社本殿の造形をみると、杭全神社本殿(第三殿)にみる「変則な手法」と極めて酷似している。同じ一間社で正面内法長押の見廻しがあり、鴨居と虹梁形頭貫の間に透彫の竹の節欄間を入れ、海老虹梁端は身舎柱頂部に納まる。大きく異なるのは竹の節欄間で、全体を三分割するように竹の節を入れて、その間に立体的な透彫を嵌めている。このように三分割した竹の節欄間で「変則な手法」を用いた事例が、高野山の政所があった慈尊院南に位置する丹生官省符神社本殿(伊都郡九度山町)の第一殿・第二殿にある。永正一四年(1517)とみられるもので、ここは平面的な透彫とはいえ、立体的な彫物はすでに寛正三年(1462)の鞆淵八幡神社本殿(紀の川市)にもある。このことを考慮すれば、白岩丹生神社本殿の部位によっては年代が永禄より遡っても不思議ではない。

ここで注目したいのは、三分割した竹の節欄間の中央にある菊と葉の透彫である。杭全神社本殿(第三殿)の彫刻欄間にみる透彫も主題は同じである。白岩丹生神社本殿のそれは前後に交差する茎も表現され、立体感が増している。とくに菊の葉の円欠が特徴であり、同じ紀伊のなかで「変則な手法」を用いた慶長元年(1596)の加太春日神社本殿(和歌山市)や、室町後期から桃山時代とされる東田中神社境内社旧竹房神社本殿(紀の川市)の彫刻欄間にもみることができる。なお、旧竹房神社本殿の欄間は旧部材とみられるもので、現在は別途保管されている。

この菊の葉と円欠に着目し、白岩丹生神社本殿と旧竹房神社本殿の彫刻欄間にあることを指摘した上で、後者は著しく立体的であることに言及したのが、建築史家の天沼俊一(1876~1947)であった。天沼は『史迹と美術』に両社殿の彫刻欄間の部分図を紹介しているが、筆者らは歴博天沼資料を調査するなかで、天沼自身が原稿を執筆するひと月前の昭和二一年三月に現地で採取した写生図を見出した(図2に一部掲載)。近年、旧竹房神社本殿の文化財修理の際には、現場関係者等に資料情報を共有している。

旧竹房神社本殿はもと竹房にあった一の宮神社で、合祀により戦後に移築されたものであるが、記録によると天沼は移築前の竹房を訪ねていることが判明した(天沼俊一『續續成蟲樓隨筆』明窗書房、1947)。この写生図は現在、摺拓本として分類されているものの、天沼が記すように彫刻欄間の凹凸と古さから「摺本は望みがないが、高い所だけ記しをつけ、夫を元にして一部分を描いたもの」であり、これらを比較すると彫刻部分の成はほぼ等しい。白岩丹生神社本殿よりも旧竹房神社本殿の欄間は立体感を増していることにくわえ、円欠はさらに円くなって完全に閉じた孔も多く、図案における便化の一端がよくわかる。

これら二つの事例に対し、天沼は播磨の一乗寺弁天堂にある脇障子欄間「木葉に毛筆」とあわせて葉の縁にある円欠の類例は三つあると記した上で、「自然の手本から独創的意匠を以て、同じようなものを案出し施工したのであろう」とし、後世に多くの事例が出た際には「自然考」も変わってくるかもし

れないと付言した。あらためて現在、加太春日神社本殿の欄間をはじめ、後述する三船神社本殿（紀の川市）の手挟や、他社殿の墓股にも同様の円欠をもつ葉の彫刻は見出すことができ、それらをふまえる図案として流通し伝播していたものと考えられる。

先述の通り、現在、旧竹房神社本殿の彫刻欄間は別途保管されている。建立当初のオリジナルとみられる部材である。ここでの「変則な手法」の展開をみれば、虹梁形の頭貫と鴨居の間、すなわち欄間があった位置には中古材の横板を嵌めて、その両脇の柱で内法長押を見廻している。横板部分の幅や高さを欄間の寸法と比較すると一〇ミリ程度の誤差はあるが、欄間の形状や釘痕からは白岩丹生神社本殿や加太春日神社本殿とは違って竹の節はなかったことがわかる。欄間の上下には枳を残さず際まで彫り込み、左右の端には木部を残して繰形を入れる手法は、加太春日神社本殿と同様である。

興味深いことに、白岩丹生神社本殿よりも加太春日神社本殿、さらには旧竹房神社本殿ほど厚みを増し立体的な透彫となっていることにくわえ、背面側に木部をより多く残した造りとなっており、透かしの度合いは減っている。また菊と葉の主題に関しては、加太春日神社では流水を添えて菊水とし、旧竹房神社本殿ほど厚みはなくても白岩丹生神社本殿より木部の密度は増している。これらのことは、旧竹房神社本殿の建立年代が加太春日神社本殿より下る可能性を示唆すると考えられる。

以上のように、「変則な手法」にみる欄間もまた造形が変化しながら伝播してゆく様相がうかがえるのである。これらの成果については、『アジア遊学 建築におけるオリジナルの価値（仮題）』（赤澤真理・加藤悠希・米澤貴紀編、勉誠出版、2025年刊行）に「中世の神社本殿にみる造形の伝播と創造性」として発表している。

4. おわりに

中世から近世にかけて、大工彫刻が平彫から薄肉彫、透彫、丸彫、籠彫へと立体化する大きな流れがあるなかで、薄肉彫や透彫の彫刻部分を加筆あるいは描写した摺拓本は、その技法や特質にくわえ経年劣化による変化を捉えるという意味でも再生の一助となる記録である。たとえば木鼻や墓股など複数ある部材ほど、修理時に旧規に倣って補修した中古の部材と、修理時に参照された建立当初の部材が現存する建物において混在している。その劣化の度合いも異なるものであり、変化そのものの傾向を理解する上で摺拓本の記録は一つの指標となる。また建築にくわえて彫刻の視点から得られた知見として、フラットニングを施した摺拓本の比較から、表の図案には伝播のなかにも便化の一端がうかがえた。2025年度は引き続き、摺拓本資料がもつ記録と再生の意義について、他機関が所蔵する摺拓本との比較もふまえて検証したい。

謝辞

本研究は公益財団法人松井角平記念財団の2024年度研究助成によるものであり、国立歴史民俗博物館島津美子准教授の協力を得て実施した。ここに記して謝意を表したい。

公益財団法人 松井角平記念財団 概要報告
住宅系建築の意匠の研究
－寺院方丈を中心として、建築史、美術史の横断的視点で－

坂井 禎介

1 研究の目的

私は、古建築の美意識に興味をもち、民家の意匠について研究を行い博士論文としてまとめ、書籍化（『近世民家における意匠操作』）もした。その中で生じた根本的な問いが「なぜ座敷のように華奢な部材で構成された小さな部屋が民家では高級なのか」である。普通は逆ではないか。大きな空間を太い部材で作る方がお金もかかるし、人を招くならそちらの方が過ごしやすいはずだ。この華奢で小さな空間を是とする文化はどこに源流があるのだろうか。また、それは現代の日本の軽快な建築に通ずる、日本の重要なミニマルな美意識だと考えた。そこで、寺院方丈を中心に現地確認を進めたところ、建築自体は部材が細く華奢なのだが、周囲には枯山水庭園が広がり、内部には隠者等を描いた障壁画が描かれる。そこで、京都大学で美術史・近世絵画を研究している筒井忠仁先生と、庭園史の三浦彩子先生の助言指導を受けながら進めていった。すると、この隠者をモチーフとした絵画や庭園は中世寺院方丈に限らず、古代から近代まで存在していることがわかった。これは大きな収穫で、それをもとに住宅史全体を見直すことができると考えた。この成果の詳細は私家版の報告書を作成したが、いずれ書籍として出版予定である。本概要報告ではその概要を記す。

2 隠逸思想と日本のミニマルな住文化 建築史・美術史・庭園史の視点から

隠逸思想の源流は自然の真前に生きることを唱えた中国の老子の思想にあった。彼の思想が後の隠者に影響を与えていった。特に、竹林七賢（3世紀ごろ）、4-5世紀の陶淵明^{とうえんめい}、8-9世紀の白楽天^{はくらくてん}は日本人が度々参考にした隠者で、美しい自然に囲まれたミニマルな庵での暮らしが真に豊かだとした¹。この時の隠棲の場が図と文字でわかる史料が図1で鳥の舞うような自然に溢れた場所の中で琴などで優雅に遊ぶ奥山の環境や、小建築の山亭が描かれる。ただし、隠逸思想が日本に伝搬する際、神仙、仏教と融合して持ち込まれたため、僧侶が山林で隠れて修行する姿が絵画に描かれ、隠逸した僧侶が仙人になったという話が生まれ、聖徳太子や山林修行をする空海や役小角などの修験者が仙人とみなされた³。（すでに中国の隠者で仙人との融合が始まっていたが、日本ではそれがさらに強められた。）

そもそも、科挙を通過した官僚が文人や隠者となる中国や朝鮮と違い、日本では科挙がないために貴族、武士、茶人、禅僧、政治家など、様々な人が隠逸思想を受容し、それぞれの立場に都合のよいように隠逸思想を変容して受容した。いずれも富裕な身分であることも重要で、隠逸が「余裕」を前提とした擬似的な貧しさであったために非日常性を感じ、家・庭・絵に神仙の境地や奥山の景色など壮大な構想を思い描いたのであろう。

奈良時代には陶淵明の桃源郷を神仙境と捉えるとともに、奈良の吉野の奥山を神仙境や陶淵明の桃源郷として捉えた（懐風藻）。平安時代には、白氏文集が貴族によく読まれたことで白楽天の思想が日本に伝播し、隠者を美化した『源



図1 隠逸の場が文字と図でわかる古い事例
(唐時代の伯牙彈琴鏡 東京国立博物館蔵 Image : TNM Image Archives)

氏物語』などの文学作品がつくられ、慶滋保胤のような白楽天の家を模倣した貴族も現れる。平安末期には実際に隠者が登場し、西行が各所で庵を結び、世の儂さと自然の美しさを唱える詩を多数作った。「梅の風に散りけるを主いかに風わたるとていとふらむよそにうれしき梅のにほひを」と詠んだ歌の情景が図2に描かれ、隣接する大邸宅の梅の香りと色を拝借して借景のように享受することで、ミニマルな庵でも豊かな暮らしができるというのである。隣の景色を借りるという点では、借景の原点と見なすこともできる価値観である。

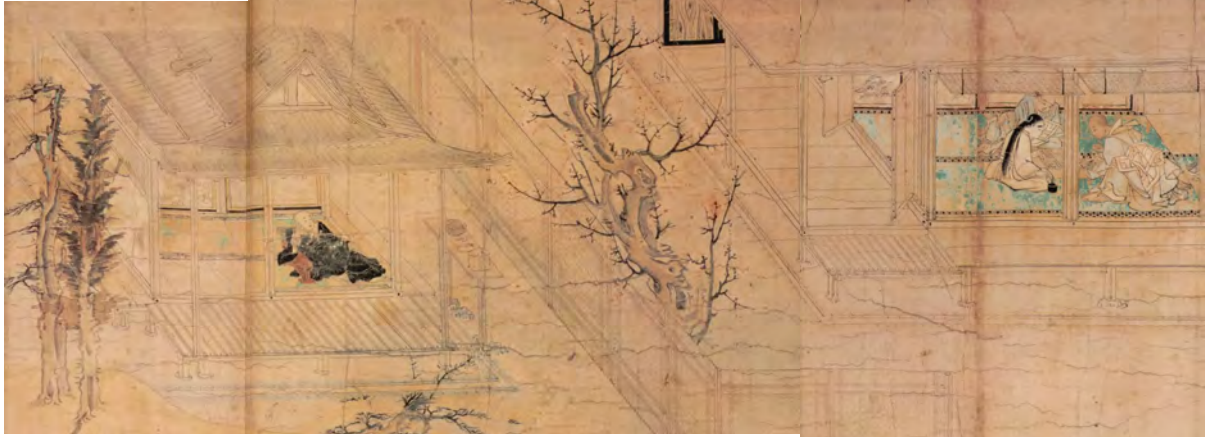


図2 隣の大邸宅から梅の香りと色を拝借して、簡素な庵で楽しむ西行
13世紀中期の『西行物語絵巻 日本絵巻大成 26』(中央公論社 1979.5) p.32

このような西行の思想は後世の人に影響を与え、庭に西行像を祀る西行堂（小石川後樂園）が作られ、西行にちなんだ茶室の命名などがなされた。近代数寄者の代表者である益田孝が西行の扮装をした姿もある（図3）ため、近代まで影響を与え続けたことがわかる。隠者鴨長明の方丈庵は3m角の小さな庵でありミニマルである。しかし、その中では仏・文学・音楽・自給自足の生活などが行われ、真に豊かな生活が送れるとした。数寄という言葉も鴨長明が最初に使い始めたことも考え合わせると、後世の茶人が茶室の標準形を方丈庵の3m角、つまりは四畳半としたのも繋がりが強いであろう。極楽往生を重視する中世の隠者の価値観では、貴族の作る大建築は無駄の象徴で、鴨長明（方丈庵）や卜部兼好（徒然草）は巨大で装飾に溢れた建築を否定した。



図3 益田孝が西行の扮装をした写真
右上に「益田紅艶時西行扮装」とある『大正茶道記 辛酉』（高橋義雄、大正 11、巻頭）

平安時代の隠者は、社会の閉塞感の中で登場してきた人たちであった。平安時代には、極楽浄土へ往生することを重視するために、寺院の中だけでなく、自宅でも阿弥陀仏を描いた仏画を掲げ祈ることがあった。これは、慶滋保胤の自宅の仏画、源氏物語、鴨長明の方丈庵の仏画などからわかる。これは平安時代に限ったことでなく、中世の禅僧は忙しいなかでも隠逸を願ったし、室町期の足利義政の山荘内に阿弥陀三尊が祀られた持仏堂（図4 慈照寺東求堂）が存在する。近世の桂離宮に園林堂があるのも、隠者と仏堂の繋がりの深さに起因するだろう。これまで住宅史の中では寝殿造から書院造への流れの様式論の中で東求堂が語られてきたが、その際、東求堂の中の持仏堂は触れられず、奥の同仁斎の書院造に注目されてきた。これは、浄土思想と一体の隠逸思想の流れの中で住宅史を捉えると、山荘の中の持仏堂は非常に重要な存在だと理解できる。

中世には、禅僧が隠逸思想の担い手となった。禅の無の思想は隠逸思想のミニマリズムや老子の無為自然と共通するとともに、中国の文人文化の担い手として禅僧が隠逸思想も日本に持ち込んだ。それは、日本の禅宗寺院の規範とした15世紀頃の『大宋諸山図』で霊隠寺の門の手前に隠者の「白楽天撰」とされる「冷泉亭」があることからよくわかる。また、初期の禅僧である夢窓疎石は自身が隠逸生活を送るとともに、白楽天の自然を愛する心を参考にして庭を作った(1342年『夢中間答集』)。その約400年後の庭園のマニュアル本である『築山庭造伝』では夢窓疎石と白楽天を参照したとしており、白楽天の思想が様々な人を介して後世の人に受け継がれる様を看取できる。禅僧が官僚化し、裕福だが縛られた生活を送っていたという社会状況も、禅僧の隠逸への憧れを増幅させたため、禅僧の独立住宅である〈方丈〉の障壁画に竹林七賢などの隠者の障壁画が描かれた。書斎の新築を祝っ

て度々作られた〈詩画軸〉の上部には、隠逸への憧れを込めた詩を禅僧たちが書いた。庭の枯山水に神仙境を表現するのも、隠逸と神仙境の融合があったからだろう。会所での派手な遊びである中世のバサラの実例と位置付けられてきた15世紀初期の『喫茶往来』に飾られた絵のモチーフのほとんどが隠者であることも重要で、隠逸思想の住文化は必ずしも質素ではない。

足利義政のような将軍も、縛られた政治生活から逃げ出して隠逸を志し、山荘東山殿を完成させた。その山荘の中で、書院造の萌芽と建築史で重要視される東求堂(1486年)は、これまで述べた隠者の住まいの様々な要素が表出しており、四畳半の同仁齋に鴨長明の方丈庵が、西三間には白楽天を理想とした夢窓疎石の墨蹟が、持仏堂には隠者が極楽浄土を願うための阿弥陀三尊像が安置された。(図4)

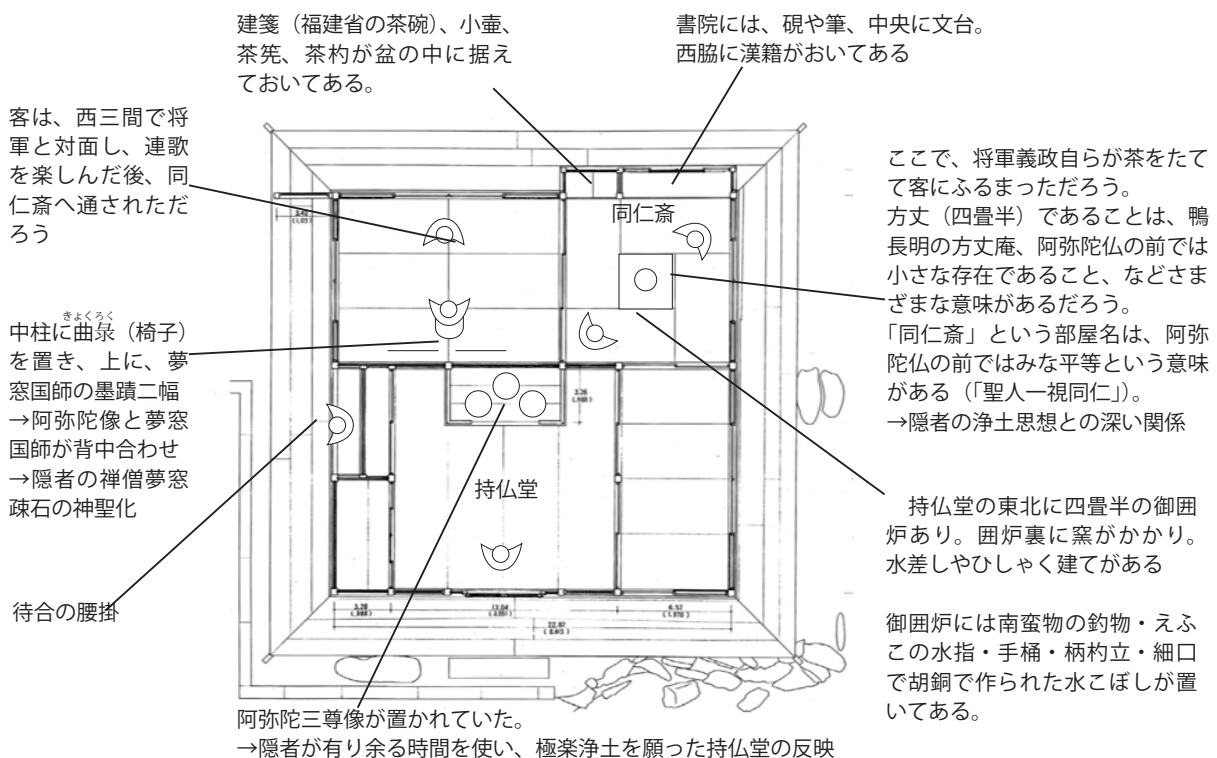


図4 慈照寺東求堂にみる隠逸思想

数寄屋には市中の山居に代表される隠逸思想が込められるのは先行研究でよく指摘される。あまり指摘されないが、数寄という言葉の初期例が隠者鴨長明の『発心集』(1216年以前)である。また、茶の湯を確立した武野紹鷗の「数寄者といふは、隠逸の心第一に侘て仏法の意味をも得知り和歌の情を感じ候べし」という言葉は、仏・文学がセットであった隠逸思想を象徴するとともに、隠者の数寄文化の一例として茶数寄の文化があることを物語る。茶室の既往研究では侘び茶の起点を戦国時代に置くことが多いが、数寄文化としては古代から連綿と続くものであることを再認識しなければならないであろう。また、茶室の基本の大きさが四畳半の起源を鴨長明の方丈庵に求める既往研究が多いが、陶淵明の五柳先生伝や、白楽天の冷泉亭記でも方丈の概念があり、それらを鴨長明を真似た可能性が高い。

近世の庭園には隠者の思想がよく反映されており、貴族庭園である桂離宮は白楽天の文章と強い相関性があるし、陶淵明や白楽天を参照する源氏物語の世界を桂離宮に表現したという点でも、隠者の思想が直接あるいは間節に取り入れられたと言えるであろう。江戸後期の文人煎茶の代表である頼山陽は、老子や陶淵明を参照しながら、白楽天が作ったような亭記を多数残した。彼の詩文には建築をミニマルに作り、その周辺の自然の美しさを楽しむべきだとする思想が記される。頼山陽の書籍は幕末の志士によく読まれ、明治期の山縣有朋が頼山陽の書籍を愛読書としていたほど、頼山陽を媒介として明治に隠逸思想が伝搬した。

近代の建築家は、西洋文化を移入したために、隠逸や数寄に関わる文章がほぼ確認できない。一方、近代の財界人の中で近代数寄者と呼ばれる人は隠逸に関連する文章を多く残す。山縣有朋は無鄰菴で頼山陽の詩を引用す

るとともに隠逸の詩を残した。益田孝が隠者西行の扮装をした写真を残すのは先述の通りである。戦後は隠逸の言葉があまり確認できないが、代わりに「わび・さび」が使われ茶の湯と同一視された。つまり、本来は様々な住文化に関連した隠逸思想が、戦後は茶の湯の中に矮小化されたのである。ただし、隠逸思想に類似する記載はモダニズムの建築家の現説に時々確認される。コルビュジエの『小さな家：1923』では、ミニマルにつくことで周囲の美しい自然を感じることができるという思想が展開されるし、隈研吾は平安時代の隠者と同様に災害を経験したことで小さな建築に関心を持つようになったし、妹島和世や石上純也の文章にも建築をミニマルにすることで周りの自然を楽しめるという、偶然にも隠者と共通する意識が確認できる。

ところで、西洋にも隠逸思想があった。修道士の語源が「隠者」を意味し、人里離れた山奥で自給自足の共同生活を送った。16世紀の宗教改革により修道院は解散したが、いなくなったからこそ、絵画や文学の中でその理想像が醸成し、18世紀には装飾隠者という、庭の中の見せ物としての隠者が、庭の所有者に雇われた庵の中に住まう事例があった(図5)。イエズス会の中国布教や、イギリスと中国との交易を通じて中国の隠者の文化が伝わった可能性が高い。

以上のように、日本の建築や庭園や絵画の文化は、隠逸思想の影響を古代から近代に至るまで強く受けてきたことを示した。従来日本の重要な美意識とされてきた、禅、茶などのミニマリズムは、それ単独で構想されたも

のではなく、中国を起源とする隠者の文化が様々な人や書籍を通じて連綿と後世に受け継がれ、それぞれの時代に合わせて変化したということである。その視点で見ると、東求堂になぜ持仏堂があるのか、なぜ禅僧が隠逸を夢見たのか、など従来特に触れられてこなかった不思議な要素を隠逸思想の歴史の中で理解できるようになる。従来の寝殿造から書院造へという研究者がどう分類するのかという分類史にすぎなかった住宅史を、建築史だけでなく美術史や庭園史まで含めてより生き生きとした歴史を描き出せる



図5 ペインズヒル・パークの隠者の小屋
Campbell, Gordon 『The Hermit in the Garden: From Imperial Rome to Ornamental Gnome (English Edition)』 (p. 62, 2013)

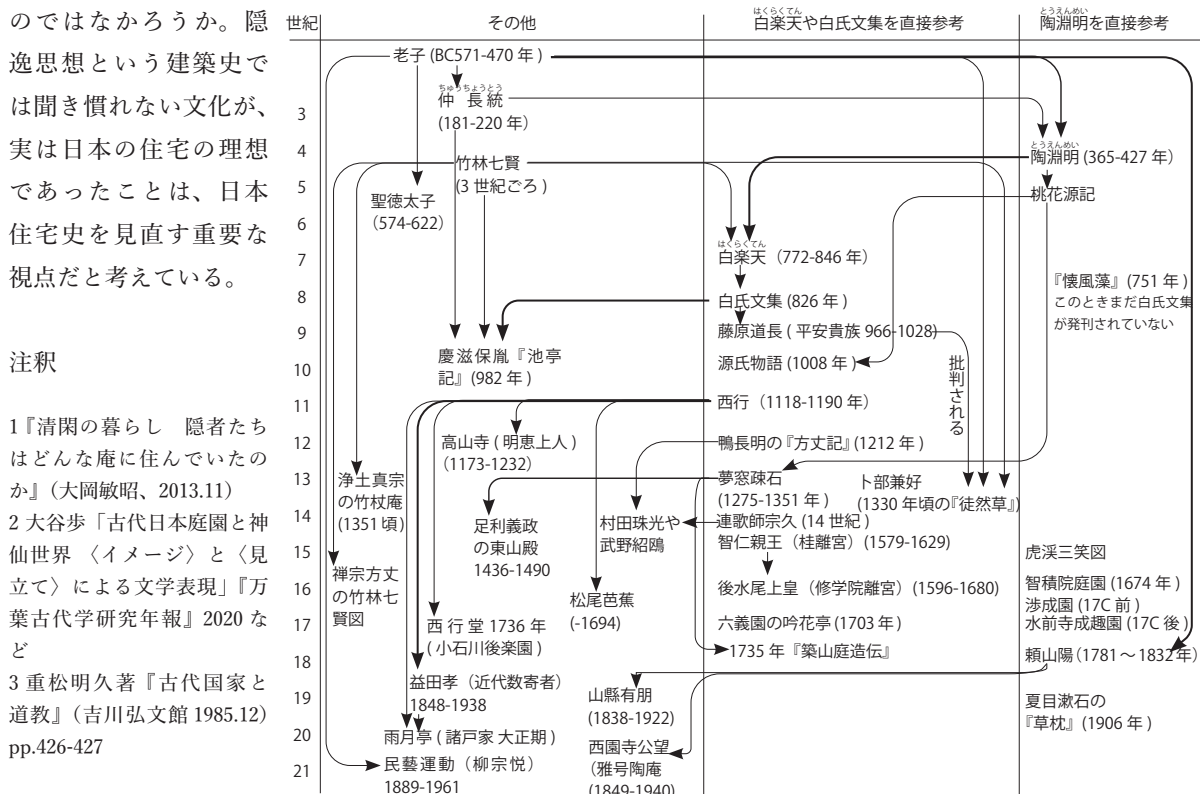


図6 陶淵明、白楽天を中心とした隠逸思想の伝搬

伝統構法を活かした瓦葺き多段棟の耐震性能評価法の開発における報告書（概要）

須田 達

金沢工業大学建築学部建築学科

1. はじめに

瓦屋根の大棟の地域性と常時微動計測による振動挙動の特性を明らかにするとともに、高棟の動的挙動と軸組みに与える影響について確認するために棟の高さが異なる2体の瓦屋根試験体を用いて振動台実験を行った。

2. 高棟4棟の常時微動計測

茨城県石岡市の桜井瓦工業の協力のもと、茨城県石岡市ひたちなか市の大覚寺本堂、大覚寺客殿、A瓦工業、成等寺の4つの建築物(図1)を対象に常時微動計測を行った。計測には株式会社東京測振製のサーボ型速度計 VSE-15-D6 を9台用いて、地盤面、桁梁レベル、棟下レベル、棟瓦上の水平および鉛直成分の常時微動計測を行った。棟瓦上の設置には冠瓦の曲がりに合わせて油粘土を敷くことで固定した(図2)。得られた波形データをフーリエ解析によりフーリエスペクトル比を算出して固有振動数を求めた(図3、表1)。地盤に対する各層のフーリエスペクトル比を見ると、けた行、張り間方向ともに棟下よりも棟瓦上のフーリエスペクトル比が大きく、振動モードでは梁桁レベルに比べて棟瓦上の方が、けた行で約3倍、張り間で約1.3倍大きくなった。棟瓦レベルと棟下レベルでは、けた行で1.005倍、はり間で約1.05倍となり、掘り間方向の方が棟瓦レベルと棟下レベルとで差が大きくなっている(図4)。



図1 対象建物（左:大覚寺本堂、右:大覚寺客殿）



図2 速度計設置状況（左:速度計、中央:棟瓦上、右:小屋組）

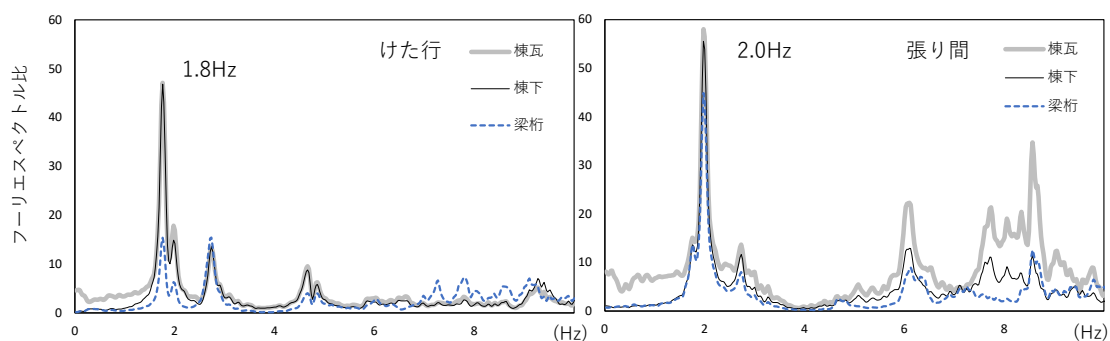


図3 フーリエスペクトル比

表1 対象建物の固有振動数と棟の構造特性

建物名	建物高さ (m)	棟高さ (mm)	棟束の有無	固有振動数 (Hz)	
				けた行	張り間
大覚寺本堂	15	965		1.8	2.0
大覚寺客殿	8	510	鉄筋束	4.7	5.2
成等寺	11	830	有	2.9	2.9
A瓦工業	10	1000	なし	3.0	4.0

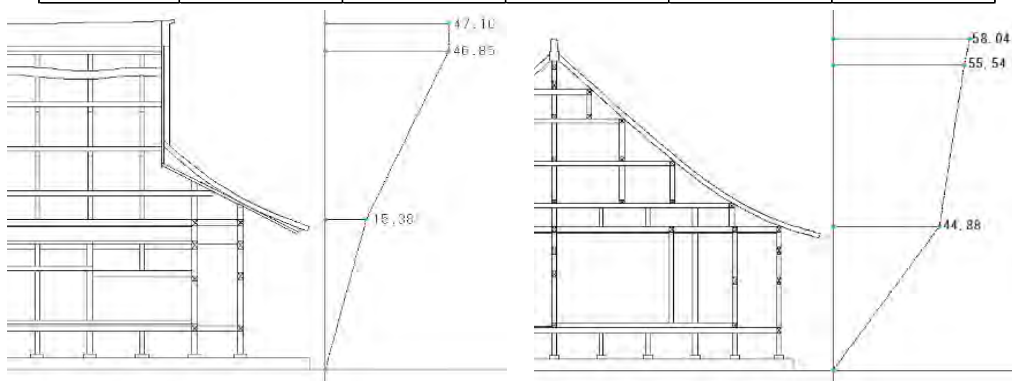


図4 振動モード

大覚寺本堂の固有振動数はけた行方向が1.8Hz、張り間方向が2.0Hzであり、その他3棟の対象建物は約2Hz～5Hzの間であった。5Hzを記録した大覚寺客殿は鉄筋束で棟部が補強されているが、大覚寺本堂と比較すると建物高さが異なり、客殿は高さ8m、本堂は15mと建物高さによる影響と考える。成等寺は高さ約11mで固有振動数は、けた行と張り間方向ともに約3Hz、A瓦工業の高さが約10mで、固有振動数はけた行で約3Hz、張り間で約4Hzであり、建物高さが高いほど固有振動数が小さい。

3. 振動台実験

試験体は土台、柱、桁、梁の軸組みと束、棟木、棟束、野棟、瓦の小屋組の2つで構成される伝統木造試験体である。屋根の棟は棟束あり(のし12段)と棟束なし(のし5段)の2つとした(図5)。



図5 試験体全景と振動台設置状況（左：棟なし、右：棟あり）

加振実験はBCJ-L2波（BCJ）とWhite Noise波（WN）および令和6年度能登半島地震の観測波（輪島、穴水、正院）の5つの地震波を作成した。加振スケジュールは、束なし試験体でBCJを50～400galまでと観測波の穴水、正院、輪島をそれぞれ100～300galまで入力した。束あり試験体はBCJを50～600galまでと実地震波を束なし試験体と同様に入力した。

WN加振から試験体の固有振動数は、束なし試験体で5.1～4.6Hz、束あり試験体で4.3～2.4Hzまで変化した。加振実験で得たデータから作成した復元力と層間変形角の関係から履歴曲線を作成した（図6）。損傷観察は、試験体作成期間の2024年3月10日から実験日の同年9月20日までと実験での損傷観察を行った。BCJと実地震波の加振の合間に棟の立ち上がり部分の漆喰が見える部分にひび割れの観察において損傷は確認されなかった（図7）

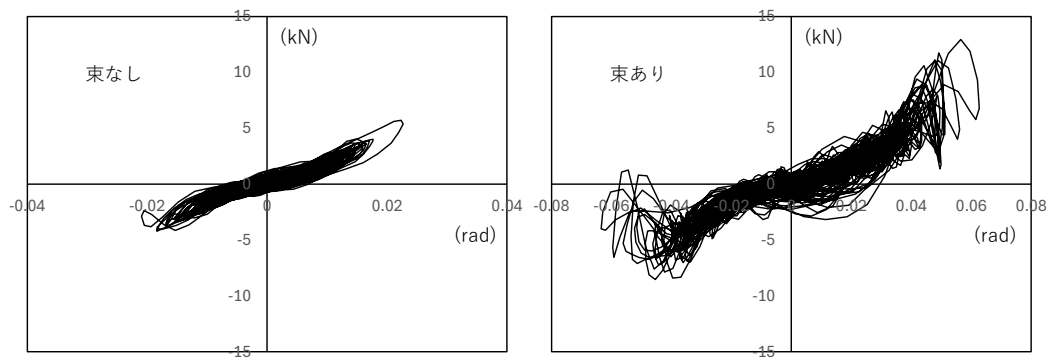


図6 履歴復元力



図7 瓦と南蛮漆喰の損傷観察

4. 解析モデル

ほぞ差し接合された軸組の上に屋根架構を載せた試験体として解析モデル作成した（図8）。部材は梁要素を用いた。部材間接合は剛接合とし、ほぞ接合部では端部の断面二次モーメントをほぞ断面から設定した。軸組の桁と屋根架構の土台は金物で接合されている。軸組と屋根架構が異なる振動をしないと仮定して剛体連結とした。本解析モデルを用いて時刻歴応答解析を進めている。

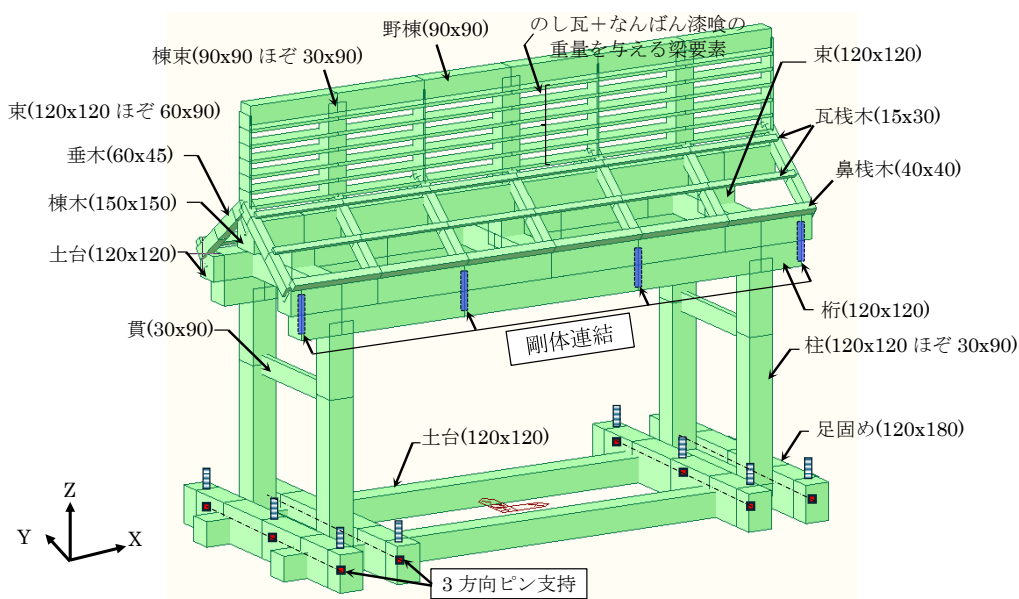


図8 解析モデル

5. まとめ

社寺建築物の瓦屋根の大棟の地域性と常時微動計測から解析を行い振動挙動の特性について算出した。地域性については、沿岸部や山間部など地域ごとに棟積みの方法に違いがあることを確認できた。このことから気候によって適切な葺き方が変わるため違いが生まれると考えられ、以上のことから瓦屋根の棟積み法には地域性があるといえる。常時微動計測からのまとめとして、棟瓦上と固有振動数は建物高さに関係し、棟束の有無よりも建物高さに影響された。しかし、建物高さが近い2つの建築物においては棟束の有無で固有振動数に違いが見られたため、棟束や補強材を用いることで、固有振動数を抑え、共振を起こしにくく、地震の際でも崩れにくい大棟になる。高棟試験体の動的挙動と軸組みに与える影響を確認するために高さが異なる2つの伝統木造試験体で振動台実験を行った。実験結果より、応答加速度と応答変位関係、復元力と層間変形角の関係、軸力、曲げモーメントを求め、高棟の動的挙動と軸組みに与える影響を確認した。しかし、軸組みに与える影響では、柱が太すぎたことによって曲げモーメントの影響が確認できていない。

社寺建築物における仕口のモーメント抵抗機構モデルおよび計算式の開発

横浜国立大学
大学院都市イノベーション研究院
中 尾 方 人

1. はじめに

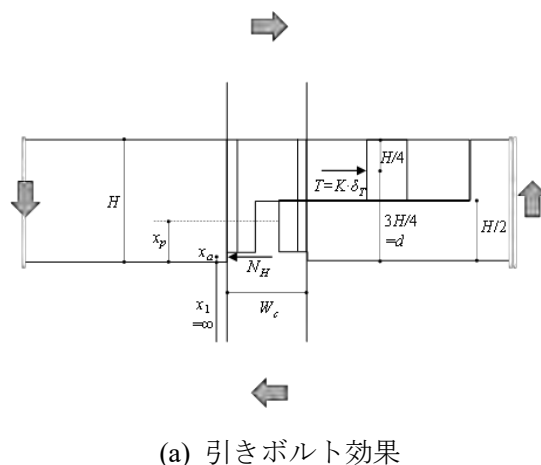
木造の社寺建築物では、比較的大きな断面の柱材や梁材などが用いられ、ラーメン構造のように、架構だけでも大きな水平耐力を有する。その水平耐力を定量的に評価するためには、仕口のモーメント抵抗力を評価することが必要であり、様々な形式の仕口について、各部の寸法や樹種の組み合わせなども考慮できる設計用のモーメント抵抗力－回転角関係の計算式が必要とされている。

本研究では、既往の実験研究を参考に、モーメントに対する抵抗機構モデルを設定することによって、仕口のモーメント－回転角関係を求める計算式を構築する。そして、その計算式の妥当性を実験によって検証する。既に各種仕口の引張実験は実施しているため、これをもとに、仕口のモーメント－回転角関係を求める。

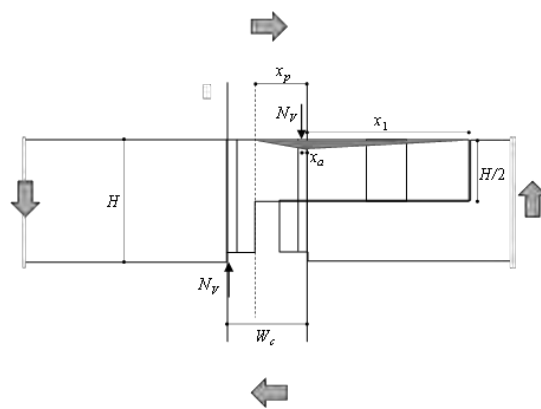
2. 仕口のモーメント－回転角関係を求める計算式

抵抗機構としては、図 1(a)に示す①引きボルト効果と、図 1(b)に示す②竿上面のめり込みとし、同じ回転角時の引きボルトによるモーメントと、竿上面のめり込みによるモーメントを加算することで、全体のモーメントとした。以下に、計算の際の仮定を示す。

- ・車知部や込栓部の引張力－変位関係は既知とする 2)、3)、4)。
- ・圧縮側縁から中立軸までの距離を x_p とし、非線形域に入っても不変とする。
- ・めり込みの圧縮力－変位関係はバイリニアとし、めり込み降伏後の 2 次剛性は、初期剛性の 1/8 とする。
- ・めり込み強度は、スギの値である $F_{cv} =$



(a) 引きボルト効果



(b) 竿上面のめり込み

図 1 竿車知仕口のモーメント抵抗機構

6.0 N/mm²、縁端距離を無限大としたときのめり込み降伏応力度 $F_m = 0.8F_{cv} = 4.8$ N/mm² とする。

- ほぞと柱との間には多少のすきがあることを考慮し、計算で求めたモーメントに 0.8 を乗じる。
- 下側の N_V の位置は柱面とし、上側の N_V と下側の N_V は同じ大きさとする。
- ほぞ上面のめりこみでは、中立軸は大根の先端の位置とし、図 1(b)における左側の柱面から大根の先端までの距離を x_p とする。

ここでは、竿車知仕口の図を示したが、他の仕口についても、基本的には同じである。竿上面のめり込みについて、雇い車知、雇い込栓においては、文献 1)の方法で計算を行った。

3. 静的加力実験の概要

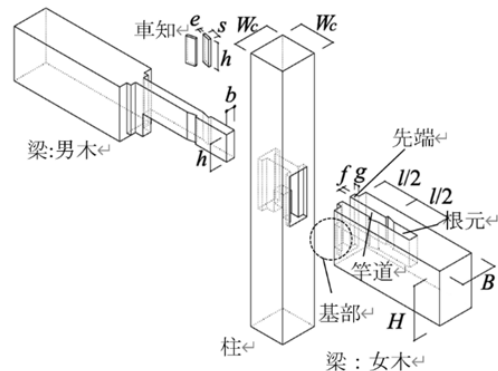
各仕口の部材構成を図 2 に示す。竿車知試験体と雇い車知試験体は、柱は 150mm 角、梁せいは 180mm、240mm および 300mm の 3 種類とした。雇い込栓試験体の柱は 120mm 角で、梁せいは 180mm および 240mm の 2 種類とした。全ての試験体において、柱と梁の樹種はスギ、雇いはヒノキ、車知および込栓はカシとした。いずれも、正負 1 回ずつの漸増繰り返し载荷である。写真 1 に実験の状況を示す。

4. 静的加力実験の結果

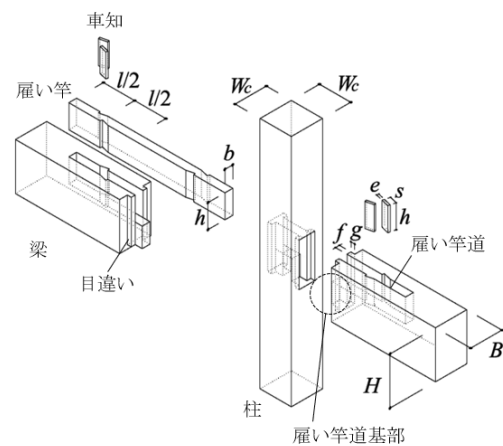
図 3 に、各梁せいにおける平均的なモーメント一回転角関係を示す。梁せいが大きくなるに伴って、モーメントが大きくなった。最大のモーメントの平均は、表 1 に示すように、梁せいに比例するように大きく

なった。いずれの仕口でも同程度であったが、梁せいが 300mm のときに、竿車知仕口と雇い車知仕口に差が見られた。

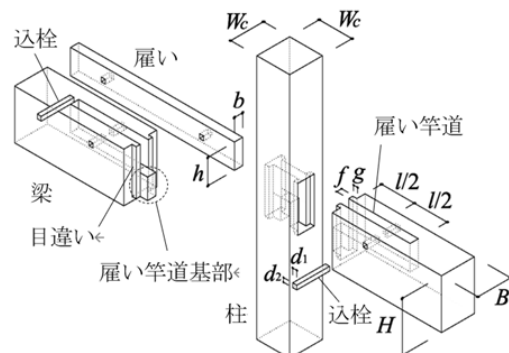
車知を用いた仕口の破壊性状としては、圧縮力が作用したことによる車知栓の変形、車知栓の女木へのめり込み、車知栓によ



(a) 竿車知仕口



(b) 雇い車知仕口



(c) 雇い込栓仕口

図 2 各仕口の部材の構成



写真 1 竿車知仕口試験体の実験の状況

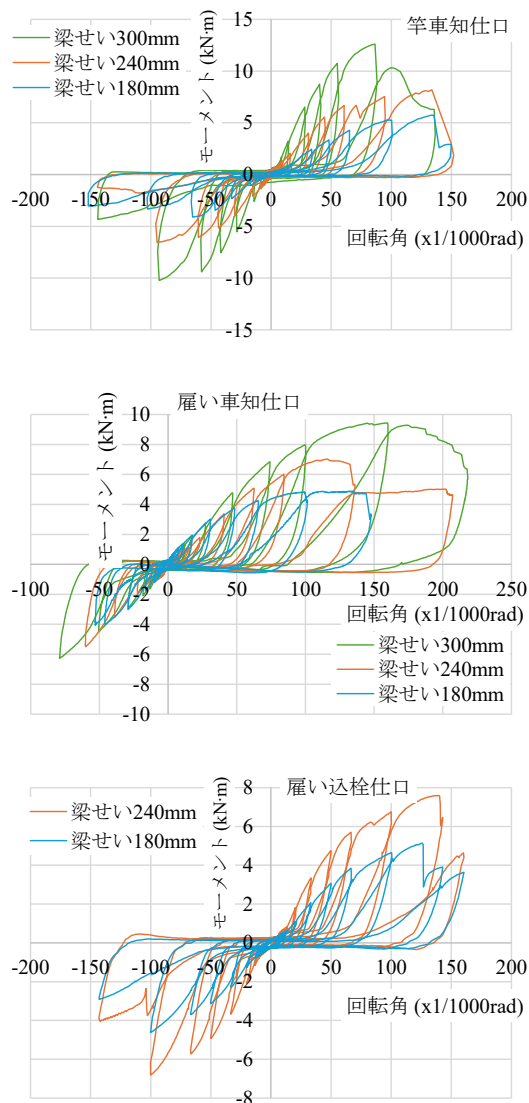


図 3 モーメントー回転角関係

表 1 最大モーメント平均

梁せい (mm)	竿車知 (kN·m)	雇い車知 (kN·m)	雇い込栓 (kN·m)
180	5.61	5.17	5.13
240	7.55	7.41	7.10
300	11.72	9.23	—

て面外に押し出されたことによる女木側面の割れなどであった。雇い込栓仕口では、雇いの込栓孔より外側の端抜け、込栓の曲げ変形などが見られた。

5. 計算式の妥当性の検証

計算式は、各部材が完全に密着していることを前提にしているため、計算値に 1/100rad のスリップを考慮すると、竿車知仕口では、1/10rad までの全体的なモーメントー回転角関係は、実験値と概ね対応している。

雇い車知仕口では、梁せいが 240mm と 300mm のときに、実験値に比べて計算値が高くなった。これは、雇いが回転しながら車知栓に引張力が作用するため、引張実験のときよりも小さい剛性になることが考えられる。

雇い込栓仕口では、計算による初期剛性は実験値と概ね対応したが、1/25rad 程度以降で、実験値に見られた荷重の上昇が計算値では見られていない。実験では、大変形域で雇いが貫のように抵抗した結果、大きくモーメントが上昇したものと考えられる。

6. まとめ

竿車知仕口、雇い車知仕口および雇い込栓仕口のモーメントに対する抵抗機構モデルを設定し、各仕口のモーメントー回転角関係を計算で求めた。そして、その計算結果

と実験結果とを比較することによって、計算の妥当性を検証した。

計算結果は実験結果の傾向と対応しており、計算式の仮定は概ね妥当であると考えられるが、この計算式を設計に用いるためには、今回とは異なる各部の寸法や樹種での検証も必要である。

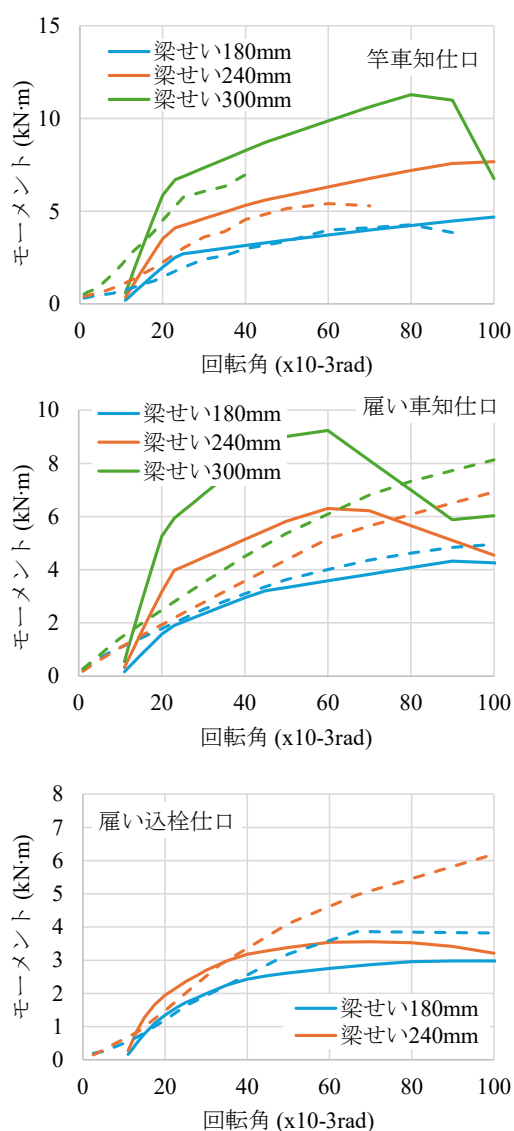


図4 実験値（破線、50%下限値）と計算値（実線）の対応

参考文献

- 1) 北守顕久、稲山正弘、後藤正美、五十田博：雇い竿車知栓留め柱―梁接合部の曲げ性能の評価式 伝統構法における雇い竿車知栓留め柱―梁接合部の力学性能 その 2、日本建築学会構造系論文集、Vol.83、No.748、pp.859-867、2018.6
- 2) 浦久保幹也、宮本慎宏、宇都宮直樹、中尾方人、大橋好光：伝統構法木造建築物に用いられる竿車知継手を有する柱―梁接合部の引張性能に関する研究、日本建築学会技術報告集、Vol. 29、No. 73、pp.1268-1272、2023.10
- 3) 荘所直哉、早崎洋一、三芳紀美子、角野嘉則、大橋好光：雇い竿車知継手の柱-梁接合部の引張性能に関する研究 その 1 引張試験の方法と結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造III、pp.161-162、2023.9
- 4) 横内基、河原大、中尾方人、大橋好光：雇い込栓による伝統木造柱梁接合部の引張性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造III、pp.733-734、2024.7

公益財団法人 松井角平記念財団 2023 年度 研究助成 実績報告書概要版
災害後の修理による伝統的木造建築の構造健全性の回復に関する研究

関西大学 環境都市工学部 助教 西川英佑

1. はじめに

本研究は、伝統的木造建築の耐震要素として重要な接合部に関して、地震や強風による構造性能の低下に対し、修理等での回復可能性を明らかにする。具体的には、①柱貫接合部の楔抜け出し機構及び締め直し効果、②鐘楼の接合部での貫折損発生機構及び修理方法に関して、被害調査や模型実験を行った。

なお、研究助成申請後に令和6年能登半島地震が発生したため、公益財団法人松井角平記念財団に相談の上、伝統木造建築物の被害調査等を研究内容に盛り込んだ。

2. 柱貫接合部の楔抜け出し機構及び締め直し効果

2-1. 概要

柱貫接合部は、地震や強風で建物が揺れると接合部を固める楔が抜け出すため、接合部の抵抗力が低下する。そのため、定期的な楔の締め直しが必要となるが、楔の抜け出しの機構や締め直しの効果はまだ十分に明らかになっていない。これまで行われた研究では柱貫接合部の静的載荷実験のみが行われてきており、建物が揺れるときに柱貫接合部に加わる動的載荷を再現した実験は行われていない。本研究では載荷速度を制御できる電動ジャッキを使用した動的載荷実験を行い、地震や強風時の楔の抜け出しの機構を解明し、楔の締め直し効果を確認する。

2-2. 試験体概要

試験体は柱貫接合部を含む十字型部分を抽出したものとし、材種はヒノキとした。楔は、普通楔・重ね楔をケヤキ・ヒノキで作成した（図1・図2）。

2-3. 実験方法

実験セットアップを図3に示す。電動ジャッキで載荷することで、載荷振動数を変化可能に、載荷繰

り返し回数を著しく増大することができた。

加振スケジュールは漸増・漸減区間が5秒、間の定常加振区間が20秒（10秒）とした。載荷振幅は層間変形角 $1/240 \cdot 1/120 \cdot 1/60$ rad 相当の振幅に、載荷振動数は $0.5\text{Hz} \cdot 1\text{Hz} \cdot 1.5\text{Hz} \cdot 2\text{Hz}$ とした。

楔はハンマーで両側から叩き締めることとし、楔の締め方によるばらつきを確認するため、各ケース3回ずつ実験を行い、実験の度に楔を締め直した。

2-4. 実験結果

2-4-1. 楔の抜け出しと荷重変位関係

重ね楔（ヒノキ）の試験体の 1.0Hz 載荷の振幅 $1/60$ について、 $3 \cdot 6 \cdot 9 \cdot 12$ サイクル目の荷重変位関係を図4に示す。載荷を繰り返し楔が抜け出すことで復元力が低下していくことが確認できる。

同試験における左楔（上楔）と右楔（下楔）の抜け出し量の時刻歴波形を図5に示す。楔は載荷振動数で前後に振動しながら抜け出している。

以下、楔の抜け出し量及びそれに伴う復元力低下について、楔の形状ごとに材種の影響を検証する。

2-4-2. 普通楔におけるヒノキ・ケヤキの比較

普通楔においては、復元力はヒノキに比べケヤキの方が大きく（図6）、楔の抜け出し量もヒノキに比べケヤキの方が大きかった（図7）。

楔の抜け出し量と復元力低下の関係には、材種による低下率の違いがほとんどなかった（図8）。

2-4-3. 重ね楔におけるヒノキ・ケヤキの比較

重ね楔においては、復元力はヒノキに比べケヤキの方が大きかった（図9）。楔の抜け出し量は載荷振動数によって傾向に変化がみられ（図10）、 0.5Hz と 1Hz の場合は材種による違いは左楔ではなく、右楔ではケヤキに比べヒノキの方が大きい。 1.5Hz

の場合、ケヤキにおいては左楔の抜け出し量が増え、ヒノキにおいては両方の楔で抜け出し量が減った。

楔の抜け出し量と復元力低下の関係については、ヒノキの方がケヤキより低下率が高く、また、重ね楔は普通楔に比べ、ヒノキで 1.75 倍、ケヤキで 1.5 倍、復元力の低下率が高かった (図 11)。

2-5. 小結

柱貫接合部の楔に関して、以下の知見が得られた。

- ・ケヤキの方が普通楔も重ね楔も復元力大きい
 - ・普通楔はケヤキの方が抜け出しは大きい
 - ・重ね楔はヒノキの方が抜け出すが、載荷振動数が高くなると、ケヤキの方が抜け出しやすくなる
- 今後の課題として、載荷システムの制御精度の向上や摩擦の低減が挙げられる。



図 1 普通楔 (上ケヤキ・下ヒノキ)



図 2 重ね楔 (同左)

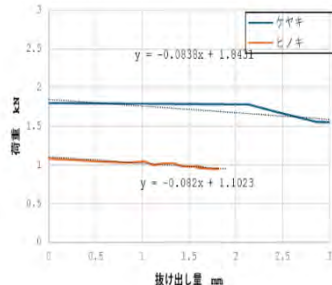


図 8 普通楔の左楔の抜け出し量と引側復元力 (振数:1Hz・振幅:1/60)

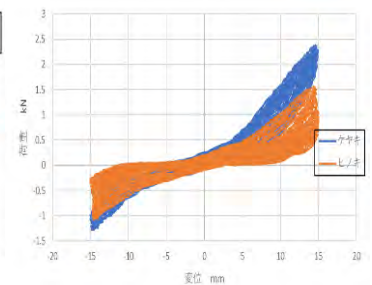


図 9 重ね楔の荷重変位関係 (振動数:1Hz・振幅:1/60)

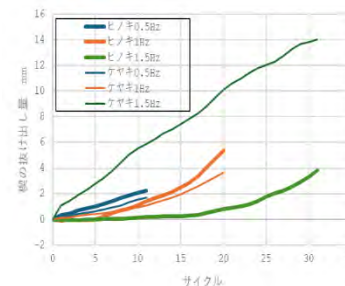


図 10 重ね楔の左楔の抜け出し量 (振動数:0.5, 1.0, 1.5Hz・振幅:1/60)

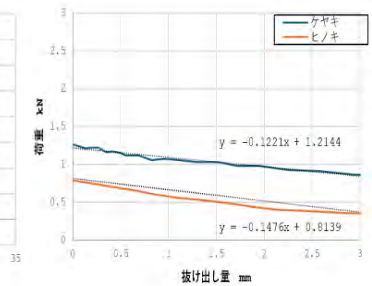


図 11 重ね楔の左楔の抜け出しと引側復元力 (振動数:1Hz・振幅:1/60)

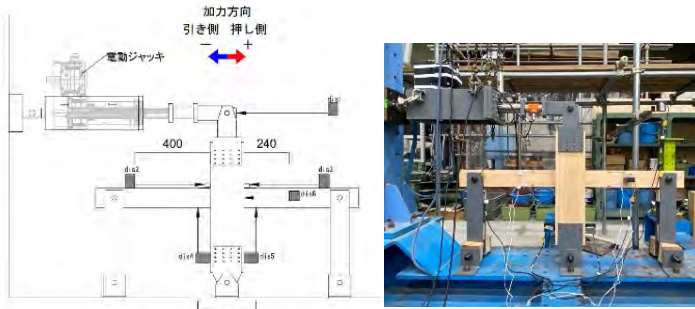


図 3 実験のセットアップ

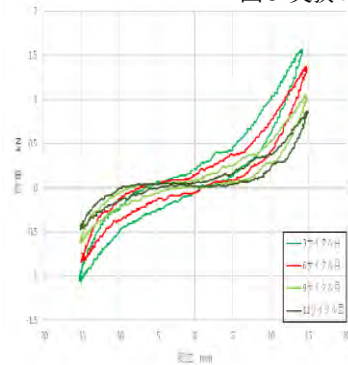


図 4 各サイクルの荷重変位関係 (振動数:0.5Hz・振幅:1/60)

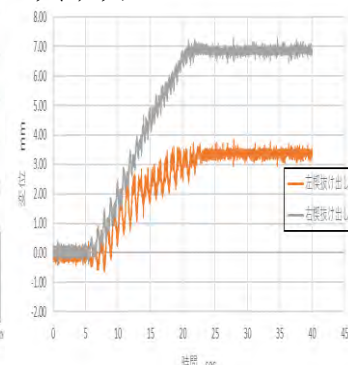


図 5 楔の抜け出し時刻歴波形 (振動数:1Hz・振幅:1/60)

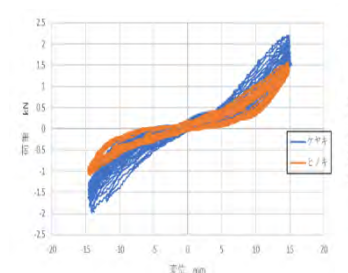


図 6 普通楔の荷重変位関係 (振動数:1Hz・振幅:1/60)

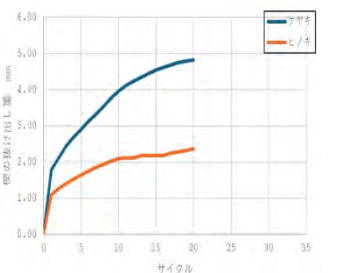


図 7 楔の抜け出し量 (振動数:1Hz・振幅:1/60)

3. 鐘樓の接合部での貫折損発生機構及び修理方法

3-1. 概要

令和 6 年能登半島地震では、前年の令和 5 年奥能登地震で被災した珠洲市正院周辺で被害がさらに拡大した。申請者が奥能登地震後に調査した鐘樓も、被害が進行しその殆どが倒壊した。

本研究ではこれらの被害の進行状況を調査し、被害の累積の影響を考察するとともに、模型実験を行い、鐘樓の地震被害の発生機構について検証する。

3-2. 被害調査

3-2-1. 調査概要

調査は地震から約 1 か月後と約半年後の 2 回、実施した。調査対象としたのは、奥能登地震後の調査で対象とした鐘樓のうち、奥能登地震で倒壊した鐘樓 A と地震後に解体された鐘樓 I を除く、8 棟であ

る（図 12）。調査時の鐘楼の状況を図 13 に示す。

3-2-2. 被害の進行状況とその分類

申請者らの先行研究では、奥能登地震における鐘楼の被害を軸部のせん断変形によるものとロッキングによるものに分類したが、同様に能登半島地震による被害状況も分類した。また、同研究では構造計算で求めた軸部耐力とロッキング開始力の比率を求め、これを被害分類と比較したが、これにも能登半島地震の被害分類を加筆した（図 14）。

3-3. 縮尺模型を用いた載荷実験

3-3-1. 実験概要

模型実験を行い、貫の本数や配置が地震被害の発生機構に与える影響を検証する。

試験体は金戒光明寺鐘楼をモデルとした 1/10 スケールの縮小模型である（図 15）。各面に飛貫・胴貫が入り、貫は柱に小根ほぞ差である。

本試験体では貫穴を下に貫成分拡大して、そこに埋木を施した。埋木を外すと、貫の取替が可能で、実物鐘楼の貫の修理方法にも応用可能と考える。

縮小模型の相似則に基づき模型重量が実物の 1/10 となるように屋根面に錘を設置した。なお、本実験では梵鐘を取り外した状態となっている。

載荷方向の構面の貫の本数や配置を変化させた 3 種類の状態の試験体（A・B・C）で実験を行った。試験体 C は撞木吊り下げのために飛貫を省略した状態を再現している。

1/120・1/60・1/30・1/15 の正負交番載荷試験を行う。載荷は試験体の両側に設置した電動ジャッキで交互に引くことで行った。計測は載荷荷重をジャッキ先端に取り付けたロードセルで、各部の変位をレーザー変位計で、貫の歪みを貫の上端・下端に貼り付けた歪みゲージで測定した（図 16・図 17）。

3-3-2. 各試験体の復元力特性と破壊性状

試験体 A・B・C の +1/15 載荷時の荷重変位関係を比較する（図 18）。貫の本数が減るほど、剛性が低下し、ロッキングしにくくなることが分かる。

試験体 A は柱頭位置の 17mm 変形時に載荷ジャッキと反対側の柱の浮き上りが発生し、以降、ロッ

キングが進むに連れて復元力が低下した。貫に損傷はなかった。試験体 B は 32mm 変形時に柱の浮き上りが発生した。また、貫の小根ほぞ部分に水平の亀裂が確認された。試験体 C は 21.5mm 変形時に飛貫・腰貫の構面において柱の浮き上りが発生し、24.9mm 変形時に腰貫のみの構面においても柱の浮き上りが発生した。また、それぞれの柱が浮き上がった時に、浮き上がった側の柱脚が載荷方向と直交方向に滑り、両方の柱が浮き上がった時に、貫の小根ほぞが引張破断した。以上より、本実験では試験体 C のみが倒壊に結び付く脆性的な破壊性状を示した。

3-3-3. 貫の偏在と貫の破壊の関係

ここで貫の破壊時における試験体 C の挙動をみていく。模型の捩れ回転角と載荷荷重の変化を、実験時に観察された現象と合わせて比較する（図 19）。また捩れ回転角が増大する区間の柱頭移動の軌跡を示す（図 20）。飛貫・腰貫の構面の柱の浮き上りの時も、腰貫のみの構面の柱の浮き上りの時も、まず柱の浮き上りが生じ、浮き上がった側の柱脚が直交方向に滑り、捩れ回転角が増大、腰貫のみの構面の変形が進み、その直後に復元力が低下している。

以上より、貫の偏在による偏心により、柱の浮き上りに伴う滑動を伴いながら、捩れが大きくなったことが、貫の破壊を誘引した可能性が高い。

3-4. 小結

鐘楼の耐震性能に関して、以下の知見が得られた。

- ・被害調査の結果、貫の破損やロッキングによる移動の累積は著しい被害の要因となる
- ・模型実験の結果、貫の本数を減らすと建物の軸部のせん断変形が進行しやすくなり、貫を偏在させると捩れを生じ貫の破損が生じやすくなる

以上より、地震被害の復旧、特に破損した貫の補修は速やかに行い、撞木吊り下げのための飛貫の省略は行わない等の対応が推奨される。

4. まとめ

本研究では、柱貫接合部や鐘楼の地震被害の発生機構を被害調査や模型実験から明らかにし、その構造健全性回復の検討のための基礎データを提供した。継続的な研究が必要ではあるが、今後の伝統木

造建築の維持管理や修理の在り方にも示唆を与えるものとする。

謝辞

本研究は公益財団法人松井角平記念財団の助成金による

補助を受けて実施されました。また調査や実験の実施においては寺院の関係者の方々や関西大学建築構造学研究室の卒業生の和泉直人氏・足達雄馬氏にご協力いただきました。ここに謹んで深甚なる謝意を表します。



図 12 調査対象とした鐘楼 (図中の A・I は本調査の対象外)

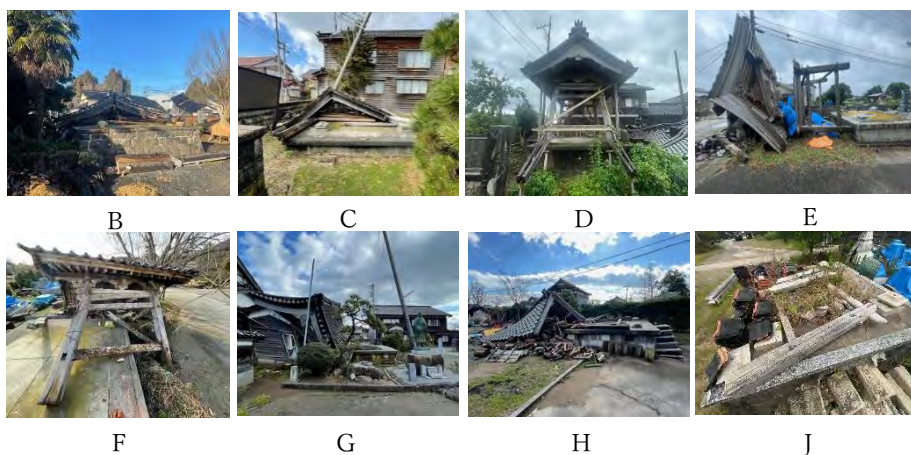


図 13 能登半島地震後の鐘楼の被害状況

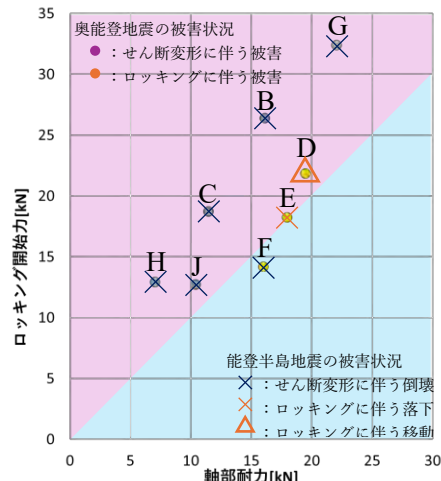


図 14 ロッキング開始力／架構復元力の比率と地震被害の対応関係



図 15 鐘楼の縮小模型 (1/10 縮尺)

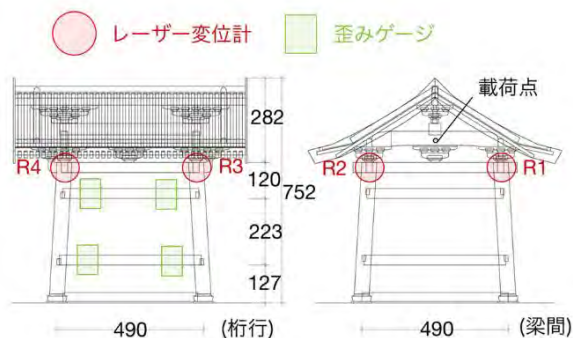


図 16 模型寸法および荷重装置・計測機器の設置位置

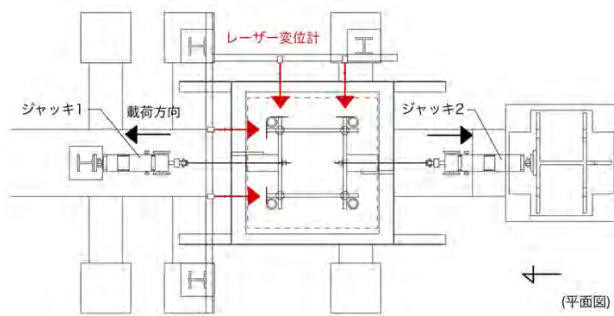


図 17 荷重装置・計測機器の設置位置

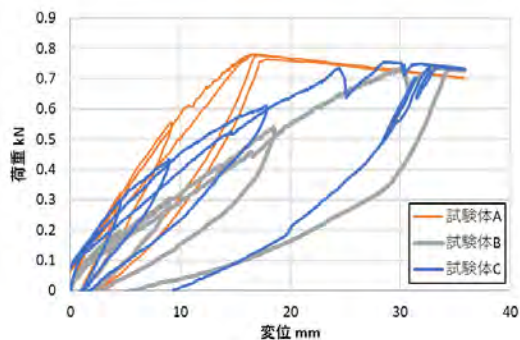


図 18 各試験体の荷重変位関係

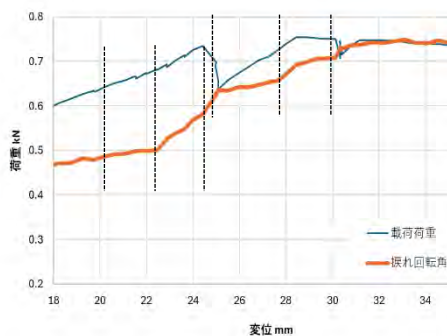


図 19 C の捩れ回転角と載荷荷重の変化

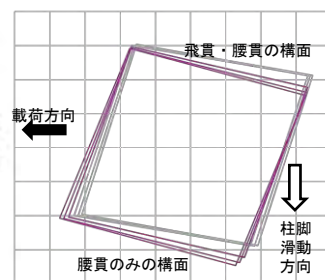


図 20 C の柱頭移動の軌跡

旧海軍建築をモデルとした鉄骨柱脚部の構造性能に関する実験的研究

野村直樹*1

*1 崇城大学工学部建築学科（〒860-0082 熊本県熊本市西区池田 4-22-1）

要旨：本研究では、旧海軍建築で使用されていたアンカーボルトの一部にパラフィンを塗布する技術の構造性能を確認するために実験を行った。パラフィン塗布で剛性や耐力の増減は見られないが、荷重変形関係の形状に差異が見られた。これを塗布することで、アンカーボルトとコンクリートが絶縁され、アンカーボルトに変形の可動域が増加したと考えられる。また、履歴エネルギーは減少するものの、剛性は一定の値となることが分かった。降伏耐力と剛性を計算式から求めることができ、実験結果の荷重変形関係を評価できた。この工法は大正・昭和初期の計算機のない時代に建物の振動性状を理論的に算出するために行われたものであると考えられる。

キーワード：パラフィン、RC 基礎、アンカーボルト、真島健三郎、近代建築、旧海軍建築、技術保存

1. はじめに

煉瓦、石、鉄、コンクリートといった材料からなる近現代建築が日本に数多く存在している。文化庁¹⁾は2018年に近現代建造物の保存と活用の在り方を示している。文化財の価値を継承し、かつ安全性のための耐震診断・改修を行うが、その際現在の技術とは異なる過去の技術を正しく評価しなければ文化の継承がうまく行えていない。これより過去の技術の知見を深めることが重要である。

旧海軍建築は、明治から昭和初期に海軍技師の真島健三郎博士の柔構造理論により設計されている。柔構

造理論は、旧海軍建築で用いられたもので水野氏などが行った解体調査²⁾から現在は使用されていない技術が使われていることが分かっている。その技術は真島博士の著書の中でも示されており、『...取付ボルトは少なくとも長さ1m以上とし、下底には大きな座金を当て脱出を防ぐべきだが、上半は紙を巻くかあるいはパラフィンを塗り基礎コンクリートの付着を絶縁するが好い...』とある³⁾。旧海軍建築についての研究は建物の解体時の調査と常時微動観測や真島氏の論文をもとにしたフレーム解析がある^{6)~7)}。本研究では、現在には伝わっていない技術を有する旧海軍建築の保存を目

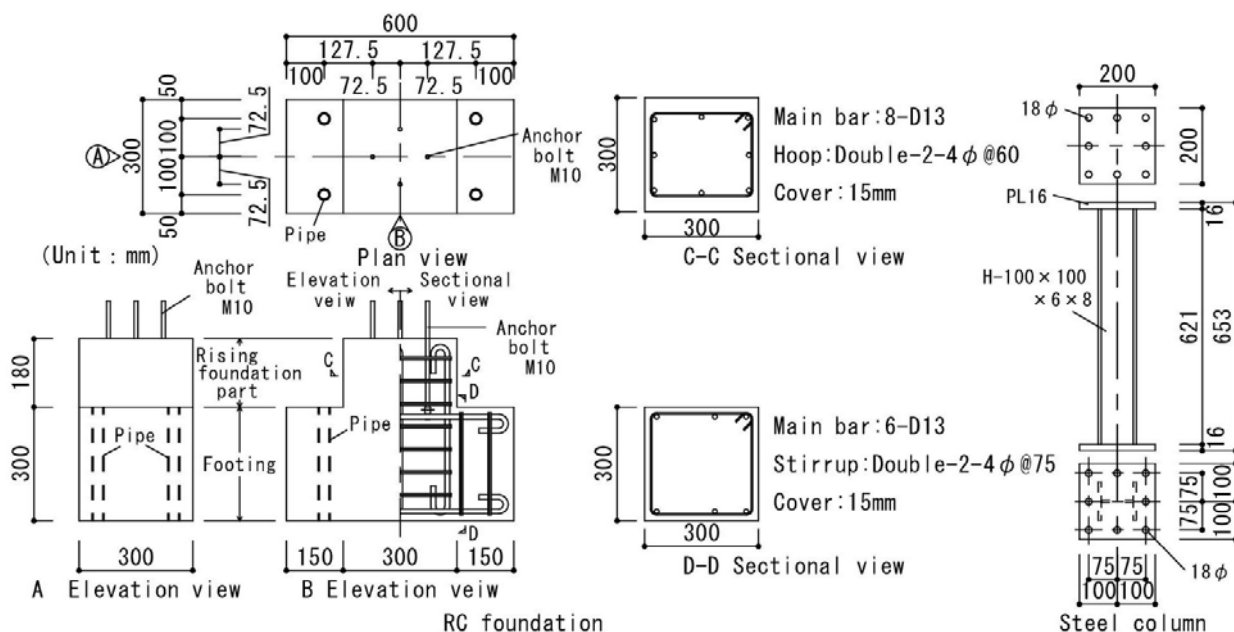


Fig. 1 RC foundation Shape dimensions and reinforcement arrangement ,Steel column Shape

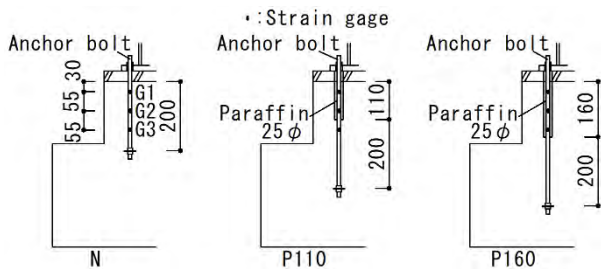


Fig. 3 Parameter of experiment

Table 1 Test results of used Concrete and No shrinkage mortar

	Concrete		No shrinkage mortar
	σ_{BC}	E_c	σ_{BM}
	N/mm ²	$\times 10^4$ N/mm ²	N/mm ²
N	38.1	3.09	57.5
P110	38.4	2.92	40.2
P160	40.6	3.14	51.2

σ_{BC} : σ_{BM} : Compression strength, E_c : Young's modulus

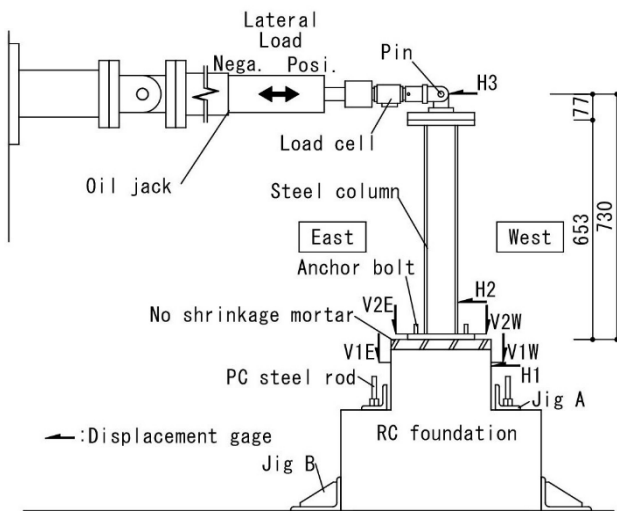


Fig. 2 Setup

的としている。建物を保存するためには耐震診断を行い、安全性を確認するが、旧海軍建築の構造性能を正しく評価する方法が必要である。そのため、実験を行い、旧海軍建築にある技術を明らかにしていく。

2. 実験計画

2.1 実験目的

本実験では、旧海軍建築の基礎を模した RC 基礎を作成し、それに地震時を想定した水平繰り返し載荷実験を行う。これによりパラフィン塗布したアンカーボルトを使用する RC 基礎の地震時挙動・構造性能を確認することを目的とする。

2.2 試験体概要

試験体は、概ね実物の 3 分の 1 程度の大きさで作成基礎の形状寸法と鉄骨柱の寸法を示す。RC 基礎と鉄骨柱に大きく分かれる。Fig. 1 に RC 基礎と鉄骨柱の形状寸法を示す。形状は凸型をしており、外形が幅 600×奥行 300×高さ 480mm である。凸型の上部に飛び出た部分の立ち上がり部とフーチング部に分かれ、立ち上

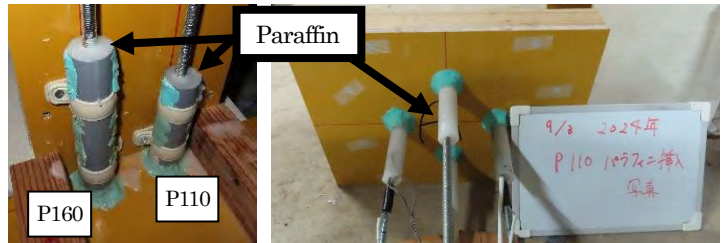


Photo. 1 Paraffin (Left: Coating in progress, Right: After Coating)

Table 2 Test results of used steel and bar

	σ_y	ε_y	E_s	σ_T
	N/mm ²	μ	$\times 10^5$ N/mm ²	N/mm ²
M10	421	4318	1.82	498
PL16	283	3398	2.02	431
H-100×100×6×8	310	1691	1.98	415
D13	340	2290	1.80	470
4φ	636	5163	2.01	721

σ_y : Yield stress, ε_y : Yield strain, E_s : Young's modulus, σ_T : Tensile strength

がり部上面の 4 本のアンカーボルトは鉄骨柱と取り付けの際に用いる。フーチング部のパイプは反力台に設置するために PC 鋼棒を通すために設けている。鉄骨柱は長さ 621mm の H 型鋼(H-100×100×6×8)の上下端に 200 角の PL16 のベースプレートが溶接され、全長は 653mm である。上下端のベースプレートには 18φ 孔を設けており、各辺の中央にある孔にアンカーボルトを通し固定する。

コンクリート・無収縮モルタルと鉄筋・鋼材の材料試験結果を Table 1 と Table 2 に示す。パラフィンは既往の研究²⁾から融点が 45.7°C のものが使用されていたことがわかっているため、融点が 44~46°C を使用する。

試験体はパラフィンの有無と長さで 3 種類作成し、Fig. 3 に示す。アンカーボルトのコンクリート上面から定着板上面までの長さ(定着長さ)を 200mm とすべての試験体で同様で作成する。パラフィンのないものを N、パラフィンの長さが 110mm・160mm を P110・P160 とする。真島氏の著書²⁾から 1m の半分の 500mm はパラフィンがあったと考え、それに試験体の縮尺を乗じて 160mm としている。P110 はひずみゲージ位置の設置を考慮し、パラフィンの長さを 160mm の 70% の 110mm とする。ひずみゲージの位置はコンクリート上面を基準にして配置している。RC 基礎上部に鉄骨柱を設置する際には柱を垂直水平に設置したのちに、柱脚部に無収縮モルタルを充填する。パラフィンは無収縮モルタル部にも設ける。Photo. 1 左にボルトに 160mm と 110mm 塗布したものを示し、右に例で P110 のパラフィン塗布後の状況を示す。パラフィンの塗布の厚さについて明確になっていないため、アンカーボルトと同程度の厚さとなるようパラフィンの直径を 25mm (厚さ 7.5mm 程度)とする。

2.3 セットアップ・実験方法

セットアップ状況を Fig. 2 に示す。RC 基礎を設置し、転倒・移動防止用の治具 A・B で固定する。鉄骨柱と

RC 基礎の接続時に、油圧ジャッキを水平にし、ピンを取り付け、それに鉄骨柱を接続する。その後東西南北のアンカーボルト 4 本で鉄骨柱の垂直を確認し、ナットを締め付けて位置を固定する。その後鉄骨柱の下部に無収縮モルタルを充填し、硬化後にナットを緩める。実験直前に南北のアンカーボルトはナットを取り外し、東西アンカーボルトのナットは所定のトルク^{注1)}で締め付けてから水平加力実験を行う。

Fig. 2 のロードセルで水平荷重を計測し、片側矢印の位置に水平及び垂直の変位計を設置している。実験は柱頭部の水平変位計 H3 を基準に変位制御とする。変形角 R は H3 の変位を柱脚ベースプレート下面から変位計 H3 の距離 (730mm) で除した値とする。また、各試験体のアンカーボルトにひずみゲージを設置位置は Fig. 3 に示す。設置する位置はコンクリート上面から 30mm (G1)、85mm (G2)、140mm (G3) で、P110 は G1 と G2 が、P160 は G1~G3 のすべてのひずみゲージがパラフィンで覆われている。実験方法は Fig. 2 の試験体を設置後に油圧ジャッキで柱頭部を水平方向に正負交番繰り返し載荷を行う。載荷スケジュールは変形角 $R=0.1\%$ を 1 サイクル、 $0.2\% \cdot 0.4\% \cdot 1.0\% \cdot 2.0\%$ 及び 3.3% を 2 サイクル行う。

3. 実験結果

3.1 降伏荷重

Fig. 4 に荷重変形関係を示し、同図の▲が降伏荷重で、×が最大荷重である。同図の緑色のバイリニアモデルは計算値で 4 章で後述する。降伏荷重はアンカーボルトのひずみゲージの値が M10 の降伏ひずみを 1 か所超えた点の荷重とする。荷重変形関係の Fig. 4 の▲印の降伏荷重付近から剛性が低下し、荷重があまり上昇していない。P110 と P160 はアンカーボルトに設置するひずみゲージが一斉に降伏ひずみを迎えた。これは、柱脚が回転することでアンカーボルトに引張力が生じ、パラフィンを塗布部には同じひずみ度が生じて、 $R=1.0\%$ 付近で降伏している。パラフィンの塗布でアンカーボルトとコンクリートが絶縁され、アンカーボルトの可動域が増加したことがわかる。N は、すべてのひずみゲージが降伏せず、上から下に向かいながら降伏が進んでいった。アンカーボルトが引っ張られること

により、上部からコンクリートの付着が切れ、定着長が短くなっていった。N のほうが P110 や P160 より大きい変位で、降伏しているものの荷重は概ね 6.0kN 前後と等しく、Fig. 4 を見ると N は $R=1.0\%$ を超えてすぐに降伏していることがわかる。パラフィンの塗布は降伏荷重にあまり影響しない。

3.2 最大荷重

最大荷重・最小荷重は概ね 7.1kN 程度で、どの試験体もほとんど等しく、パラフィンは最大・最小荷重に影響しない。ただ、Fig. 4 を見ると、どの試験体も概ね $R=3.3\%$ 時の 1 回目に最大・最小荷重を迎えている。Photo. 2 に実験後の東側のアンカーボルトのナットとワッシャーで、ベースプレートの孔径とナットの外形の形にめり込みの跡がワッシャーに確認できる。また、Photo. 2 の真ん中の P110 のワッシャーには一部に亀裂が生じている。荷重変形関係からも P110 の最大荷重は $R=2.0\%$ 以降に最大を迎え、その後荷重が下がっていることから、本実験の最大荷重はワッシャーの強度の影響を受けることがわかる。

4. 考察

4.1 耐力

正側の降伏荷重 P_y ・最大荷重 P_{max} と露出柱脚の終局曲げ耐力 Q_y とする。 M_u は文献⁸⁾の計算式を参考とし、本実験では軸方向力が作用しないことから $N=0$ とし、式[1]を用いる。そして式[2]のように M_u を高さ H (730mm) で除し、 Q_y (6.84kN) を求めた。 Q_y に対する P_y (5.77~6.50kN) は 0.84~0.95 となり実験値が計算値より若干小さいが、概ね式[1]で算出できている。 Q_y に対する P_{max} (7.01~7.56kN) は 1.02~1.11 と実験値が計算

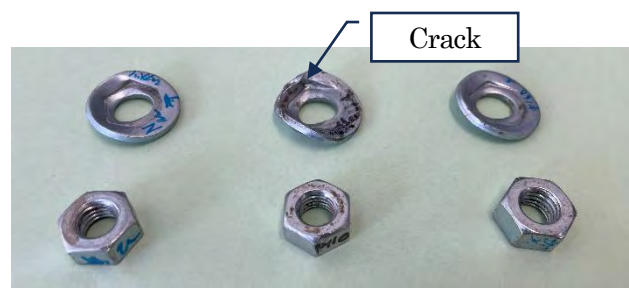


Photo. 2 East side nut and washer after experiment (Left: N, Center: P110, Right: P160)

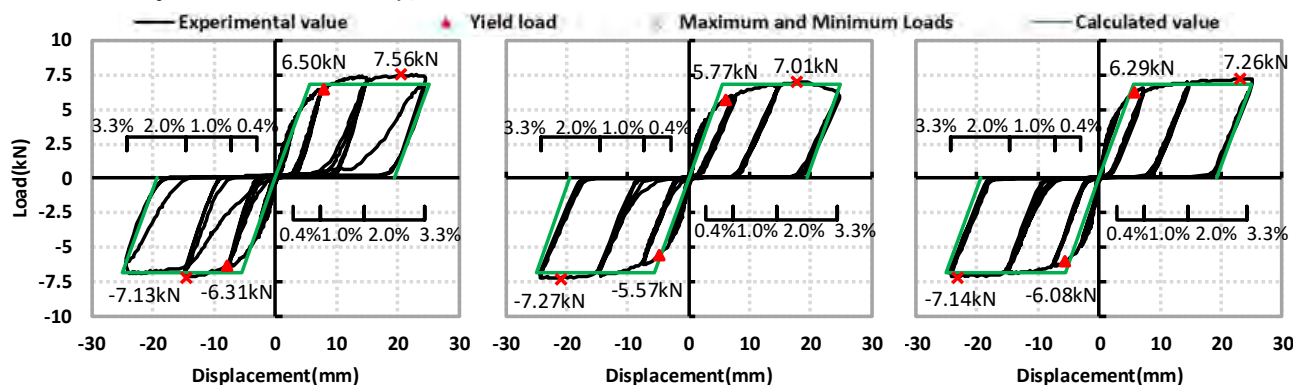


Fig. 4 Loading displacement relationship (Left: N, Center: P110, Right: P160)

値より若干大きく、安全側の値を示している。

4.2 剛性

Fig.4の緑色のバイリニアモデル（以下モデル）の降伏耐力は4.1 耐力の露出柱脚の終局曲げ耐力 Q_y を用いる。また、剛性は式[5]⁸⁾の $\alpha=1$ を用いている。式[5]は露出柱脚の回転剛性で、式[6]で曲げ剛性と比較できるように単位をそろえる。式[8]は片持ち柱の曲げ剛性である。式[9]で回転剛性と曲げ剛性を合成し、等価剛性 K を求めている。式[6]の計算値は $1.55\text{kN/mm}(\alpha=1)$ 、式[7]は 5.77kN/mm である。これより、式[8]でモデルの等価剛性は 1.22kN/mm となる。 $R=0.4\%$ までの実験値と計算モデルを比較すると、計算値は概ね実験値を図化できている。モデルでは終局曲げ耐力付近で実験値より大きくなっている部分がある。これは Photo. 2 のワッシャーの変形がアンカーボルトの降伏付近で生じ、剛性を低下させ要因になり、計算値より実験値下回ったのではないかと考えている。Nについては $R=2.0\%$ や 3.0% の1 サイクル目の加力時の剛性が、コンクリートとアンカーボルトとの付着の影響で、モデルと異なった傾きとなっている。しかし、P110 や P160 において、モデルの傾きとほとんど同じである。また、式[6]の値が式[7]の値よりもかなり小さい。つまり、露出柱脚部の回転による変形が鉄骨柱の曲げ変形より大きいこととなる。そのため、等価剛性（式[8]）に露出柱脚の回転剛性が大きく影響する。海軍技師の真島健三郎氏は建物の剛性に大きく影響する露出柱脚の回転剛性に着目し、アンカーボルトを安定して変形させるためにパラフィンを塗布しコンクリートと絶縁したと考えられる。つまり、建物の剛性を理論通りとなり、地震のような振動を理論的に計算するための技術であると推測される。

$$M_u = T_u \cdot d_t + \frac{(T_u)D}{2} \left(1 - \frac{T_u}{N_u}\right) \quad [1]$$

$$Q_y = \frac{M_u}{H} \quad [2]$$

$$N_u = 0.85 \cdot B \cdot D \cdot F_c \quad [3]$$

$$T_u = n_t \cdot A_B \cdot F \quad [4]$$

$$K_{BS} = \frac{E \cdot n_t \cdot A_b (d_t + d_c)^2}{\alpha l_b} \quad [5]$$

$$K_{BSB} = \frac{K_{BS}}{H^2} \quad [6]$$

$$K_b = \frac{3EI}{H^3} \quad [7]$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{BSB}} + \frac{1}{K_b} \quad [8]$$

α : ねじ部の影響によるヤング係数の低下やベースプレート曲げ変形などを考慮する係数（理論上は1）

5. まとめ

旧海軍建築の基礎を模したアンカーボルトの一部に

パラフィンを塗布した RC 基礎を作成し、それに対して載荷実験を行った。これによりパラフィンを塗布したアンカーボルトを使用した RC 基礎について以下の知見を得た。

1. アンカーボルトのパラフィンを塗布の有無で降伏荷重や最大荷重に変化は見られない。
2. 既往の露出柱脚の終局曲げ耐力式を用いてパラフィンを塗布時の耐力も評価することができた。
3. 本実験においては、剛性を評価するにあたり、既往の剛性計算式の $\alpha=1$ を用いたものが実験値に近似した。

以上のようにパラフィンを塗布するによりアンカーボルトがコンクリートと絶縁され、剛性が一般的な荷重変形関係となった。真島氏のこの工法は建物の剛性を理論通りの一定とすることで、PC や計算機のない時代に地震時などの振動状態を理論的な計算で求めるための技術ではないかと考えられる。まだ、旧海軍建築には不明な点も多いが、この一部の研究が建物の保存に役立てばと望んでいる。

謝辞：

本研究は公益財団法人松井角平記念財団の 2023 年度（第 8 回）の助成金による補助を受けて実施されました。また、本実験の実験にあたり崇城大学の学生に多大なご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

注記：

注1) ボルトの締付トルクはトルク係数 0.2 とし、SS400 の降伏強度 235N/mm^2 の 6 割程度の軸力がボルトに作用するようにする。

参考文献：

- 1) 井川博文：近現代建造物の保護 現況と展望、建築史学、72 号、pp. 44-63 (2019)
- 2) 水野僚子ほか：旧海軍水雷学校第四兵舎にみる真島健三郎の柔構造理論の影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、建築歴史・意匠、pp. 363-364 (2017)
- 3) 真島健三郎：地震と建築、丸善、pp. 186-187 (1930)
- 4) 真島健三郎：重層架構建築耐震構造論、土木学会誌、12 巻 2 号、pp. 229-303 (1926)
- 5) 汲川圭司：翁の憶い出 我が生ある限り、鋼構造出版、pp. 46-75 (1993)
- 6) 藤本利昭ほか：柔剛論争における柔構造に関する研究、日本大学生産工学部研究報告A、50 巻 1 号、pp. 29-35 (2017)
- 7) 水野僚子ほか：旧横須賀海軍工廠造機部仕上場の解体調査について、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp. 621-622 (2019)
- 8) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針同解説、pp. 126-129・pp. 228-233 (1992)

鳥居など伝統的な木造外構の生物劣化の非破壊診断技術の確立

東京文化財研究所 藤井義久

目的

木造鳥居など伝統的な木質外構における腐朽や虫害といった生物劣化について非破壊診断技術の確立を目指す。本研究は木造鳥居に注目し、その調査を行い、生物劣化の種類、程度や範囲や進行性の一次診断を実施する。続いて非破壊的手法である穿孔抵抗測定、応力波による断層画像診断などの二次診断を行う。一次、二次診断の結果の相関性を検討し、診断手順や判定基準を明らかにする。

1. 木造鳥居の倒壊事例の調査

2010（平成 22）年以降の報道やインターネットのニュース情報の検索から、木造鳥居の損傷や倒壊事例として 13 件を検出することができた。13 件の殆どは台風などの風によって倒壊していたが、柱脚部分の劣化（腐朽）が関与していると推定された。また風や地震などの外力がない状態で倒壊した事例も 1 件あった。

2. 既往の木造鳥居の劣化調査結果の分析

藤井らが、過去において実施した木造鳥居の調査事例（福岡市（1 基）、広島県廿日市市（1 基）、埼玉県大宮市（1 基）、大津市（2 基）、大阪府堺市（1 基）、京都市（約 60 基））を分析し、木造鳥居（主に神明鳥居形式）の劣化の特徴を抽出した。生物劣化（腐朽や虫害）が発生しやすい部分は、柱脚、柱頭、貫穴、笠木であることがわかった。柱脚では、地際から上方に向かって、腐朽や蟻害が発生しやすく、構法・仕様や地下水位と関連して土中部分が腐朽している場合もあった。また柱脚の保護のための根巻がある場合については、根巻内部に雨水が浸潤し、腐朽している場合があった。柱頭木口は、多くの場合金属板で覆われているが、金属板と木部の隙間からの雨水の浸潤により腐朽している場合があった。柱に対して貫が差し込まれる貫穴の周囲についても雨水の浸潤と内部での滞留によって腐朽している場合があった。柱頭部と貫穴部の腐朽が一体化している場合もあった。笠木は、金属板で被覆の場合や、箱型の場合があるが、部材の取り合い部分からの雨水の浸潤により腐朽が発生している場合があった。

柱脚部分は、地震力や風力が作用した時に最も大きな曲げひずみが作用する部分であり、かつこの部分に腐朽や虫害によって大きな断面欠損が生じている場合には、倒壊のリスクが高くなる。その一方でこの部位の劣化状態を診断・評価することは難しい。本研究では、非破壊的な手法を含めて、鳥居の劣化診断の可能性を検討した。

3. 木造鳥居の劣化調査

京都市内の神社において、4 基の木造鳥居の劣化調査をおこなった。調査の手順は以下の通りである。

1) 事前準備

木造鳥居に関するデータを収集し、構造、材料、施工方法、環境や維持管理の履歴などを収集し、診断手順を検討した。

2) 一次診断（基礎診断）

視診・触診・打診などによる診断で、劣化部位を抽出し、その種類、範囲、程度や進行性の判定を行った。実際には、鳥居の構造部材の内部の状態をこの診断で完全に把握することは難しいが、隙間や割れ目などがある場合には、ファイバースコープによる内部観察も行う。さらに含水率計測も行う。

3) 二次診断（機器診断）

一次診断の結果、内部劣化が推定される場合は、応力波断層画像測定と穿孔抵抗測定で非破壊的に内部の状態を診断した。この時に、倒壊の原因となりうる柱脚での内部状態は可能な限り正確に把握する。特に内部劣化が認められる場合には、有効断面積（特に周囲の有効肉厚）を評価する。穿孔抵抗測定では直径 3mm の穿孔があくが、測定後に穿孔には防腐・防虫剤を注入し、木栓で閉じる。また超音波断層撮像ではセンサを突き立てるための浅い小孔が表面にあく場合があるが、これを避けるための緩衝パッドを用いる。

4) 三次診断（精密診断）

二次診断までで倒壊リスクに対する判定は可能であると思われる。しかし、内部の強度（密度）低下や空洞化が確認された場合には、その原因を明らかにしておく必要もある。特に腐朽や虫害については、進行性判定をしておくことが望ましい。内部から多少の検体の採取を採取し、観察や分析によって、劣化の種類や進行性判定を行う。

4. 木造鳥居の劣化調査手順

以上の結果を総括して、木造鳥居の劣化診断手順をまとめ、今後公開する予定である。

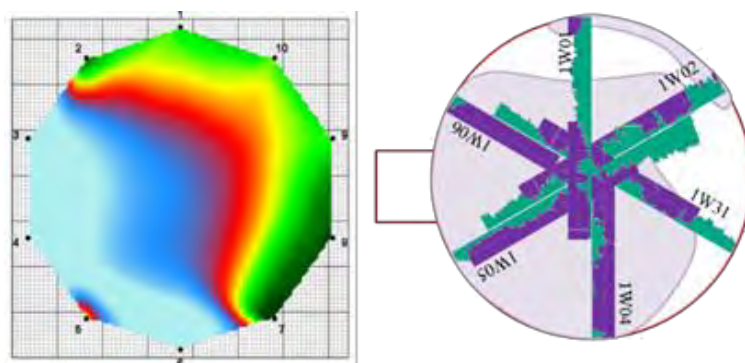


図1 鳥居柱脚の非破壊診断の結果例

左：応力波断層画像（青色部は応力波速度が低く内部劣化に対応）、右：穿孔抵抗（紫部が抵抗が低く劣化部に対応）

木造建築遺産におけるオーセンティシティに関する研究 概要

京都工芸繊維大学 教授 清水重敦

京都工芸繊維大学 准教授 マルティネス アレハンドロ

1. 研究の目的および意義

建築遺産の保存においては、オーセンティシティ（価値が本物であることを示す指標）が中心的な概念とされているが、その具体的な定義と証明方法は必ずしも明確ではない。石造建築を念頭において組み立てられた西洋の保存論では、オリジナルの材料が建物に残されていることがオーセンティシティを証明する上での最も重要な根拠とされてきた。一方、日本の木造建築の場合には、腐朽や破損により材料の取り替えが不可欠である。さらに、式年造替のように、材料の更新を前提とした特有な継承手法もみられる。そのため、西洋のオーセンティシティ概念を直接に日本の木造建築遺産に適用することは妥当ではないと思われる。

本研究では、オリジナルの材料を中心とした従来の枠組みをのり越えて、木造建築遺産の特質と多様性に即した新たなオーセンティシティ概念を考案することを目的とする。その際には、文化財建造物の保存修理のみならず、式年造替や失われた建築の復元など、日本における多様な木造建築の継承方法を包括的に捉える。さらに、建造物の保存とともに、伝統的な建築技術の継承を考慮に入れて、木造建築遺産の有形と無形の両側面を意識した、木造建築遺産固有のオーセンティシティ概念を一から組み立てることによって、オーセンティシティに関する国際的な議論に日本から寄与することを目指す。

2. 研究の背景

建築遺産のオーセンティシティ概念を巡っては、1994 年に開催されたオーセンティシティに関する奈良会議に代表される数々の議論が積み重ねられてきている。それらの議論は1994 年の「奈良ドキュメント」、2004 年の「有形文化遺産及び無形文化遺産の保護のための統合的アプローチに関する大和宣言」、2014 年の「奈良+ 20」そして2005 年改定の「世界遺産条約履行のための作業指針」といった形で明文化されている。ここには当然ながら木造建築遺産も対象に含まれており、その保存管理のあり方は基本的にはオーセンティシティ概念の枠組みの中で捉えることができる。ただ同時にその枠組みに収まりきらない木造建築遺産の存続、継承、保存管理のあり方があることも確かである。例えば伊勢神宮における式年遷宮や錦帯橋における架替といった、木造部分の材料を完全に更新しながら継承される木造建築遺産の継承のあり方を挙げてみれば容易に理解されよう。錦帯橋を世界遺産に登録するための議論が継続的に進められているように、木造建築遺産のオーセンティシティをいかに捉えるべきか、根本的な議論を行うことが求められている。

本研究では、木造建築遺産のオーセンティシティを考えるにあたり、奈良ドキュメント以降に議論され定義された文化遺産のオーセンティシティに関する枠組みから出発するのではなく、

また文化遺産の「保存」を意識した建築行為に限定することなく、あるいは建築を意識的に「継承」していく行為だけに限定するのでもなく、木造建築遺産の様々な「存続」の方法を一旦横並びにし、そのオーセンティシティを考える枠組み自体の考察から出発することとした。

3. 木造建築遺産の存続を巡る前近代と近代の差異

木造建築遺産のオーセンティシティを多様な側面において捉えるには、前近代における木造建築遺産の存続のあり方を含む枠組みで考えていくことが有益だろう。そこには今日とは異なる前提に立った存続のあり方が含まれることになる。しかし前近代と近代以降とでオーセンティシティすなわち本物らしさを捉える観点が異なっている。端的に言えば、文化財保存の概念が登場する以前と以後で、この問題は観点が変化する。よって両者を一旦分けて考える必要がある。

近代以降から考えてみると、建築遺産には物自体にオーセンティシティが宿っており、それをいかに失わずに保持するか、という姿勢を保つのが文化財保存の概念が成立した後の近代の考え方といえる。すなわち存続のための建築行為は、「本物」らしさを保持するプロセスであったといえよう。

一方前近代においては、文化財保存の意識については、似たものはあったにせよ近代以降のそれとは異なっていた。前近代においては、本物らしさは物だけに宿るものとは考えられていなかったようで、むしろ無形の部分に、あるいは無形と有形がないまぜになったようなところに本物らしさは宿っていると考えられていたらしい。だから建築遺産の存続のプロセスは、「本物」らしさを保持するというよりは、「本物」らしさを確認する、あるいは「本物」らしさを再現するかのようなプロセスであったのだろう。前近代と近代以降とではこの部分の認識に差異があり、そこを理解しながら議論を進めていく必要がある。

3.1. 前近代における木造建築遺産の存続

前近代における木造建築遺産の存続方法には、形を変えながら寿命を伸ばすプロセス、意識的に本物らしさを再現するプロセス、そして意識せずとも類似形状となるプロセスとがあった。建造物の修理について見れば、修理の際には形状が変わるのが普通であった。同形式を守るといよりは、建築空間を一つの間と捉え、時代の要請に合わせてながら変化させ、寿命を延ばしていくようなプロセスだったのである。

意識的に本物らしさを保持するプロセスは、修理という方法よりもむしろ材料を完全に更新するケースにおいて見られた。形式を保持しつつ建物を周期的に建て替える式年造替、あるいは重要建築の火災後の再建などがその例である。これは本物らしさの保持というよりは、本物らしさの確認、もしくは本物らしさを再現する行為とすべきであろう。言い換えれば、これらの行為は同一性の保持を意識した行為といえる。そこでは材料や形態のみが同一性を保証するものではなく、由緒、平面・機能、権威など、さまざまな側面において同一性の保持が図られる。物理的側面ないし有形の側面だけでなく、ソフト面あるいは無形の要素が同一性の保持の上で重要視されていたといえよう。

ここには意識的に同一性が求められるケースと、不可避免的に同一性が獲得される場面がある。例えば神社における式年造替は意識的に同形式を保持するケース、錦帯橋における架替のシス

テムは不可避免的に同形式にならざるを得ないケースといえる。

3.2. 近代における木造建築遺産の存続

前近代の同一性保持のプロセスは、近代以降も伝統化して存続するが、文化財保存の概念の登場により本物らしさを保持するプロセスを重視する新たな枠組みへと整序されていく。

例えば式年造替は明治になると多くの神社で修理をもって造替に変える、という形に変わっていく。火災後の再建については可能な限りの資料を集め、焼失前の形式を正確に再現することが心掛けられるようになる。

文化財保存としての建造物修理も明治以降に始まっていく。形式、材料、技術を尊重する修理へと一挙に舵が切れ、今日のオーセンティシティ概念に合致する考え方も早期から生まれた。だが一方で、部分的に材料を更新する必要があったのも確かで、檜皮葺、茅葺などの植物性材料による屋根葺材の修理では、雨水から建物を守ることを目的に、屋根葺材を周期的に全て更新する葺き替えが行われてきた。

これと似たものにノルウェーにおける「プロセス」のオーセンティシティがある。材料を更新しなければならない場合、材料の産地や種類、形式、技術、工程に至るまで、可能な限り当時の建設プロセスに沿ってそれを再現することにより、オーセンティシティを担保しようとするものである。しかしここには考えるべき問題が残されている。それは「プロセス」の理解が正確と言えるのか、という点である。日本の修理では正確にやったつもりが、過去の技術への理解が不足していたために重要な情報を失うことになってしまった事例もある。茅葺も実は過去の技術から変わっている面がある。

ヨーロッパでは、木造建築の伝統技術が近代に失われ、技術が断絶した時期があった。建物の修理によってその技術を再発見し、再修得するというプロセスが踏まれていった。この状況を明確に理解しておく必要がある。

失われた建物の再建についても前近代から大きな変化があった。考証に基づき復古的なデザインによって建物を再建する行為は江戸時代から御所や神社の再建において行われてきたが、明治以降は学術的な考察を加えより正確な復元が追求されるようになっていく。昭和戦前期に始まる考古学遺跡における復元は、戦後になると先史住居、古代寺院、城郭など、多くの建築類型に広がっていく。復元の動きは文化財としての史跡整備に統合され、復元建物は本物としてではなく遺跡のプレゼンテーションとして位置付けられていく。従って遺跡復元は本物らしさを問題とするオーセンティシティの概念の埒外にあるものとみられるようになっていく。一方、焼失建物の再建においても考古学的正確さが追求され、鹿苑寺金閣や首里城の復元などが実現している。これらもまた遺跡のプレゼンテーションと位置付けられてはいるものの、近年はこうした突発的な火災や戦災等で失われた建物を復元する行為にオーセンティシティを認めようとする姿勢が優勢になりつつある。

3.3. 20世紀的なオーセンティシティ観から21世紀的なオーセンティシティ観へ

木造建築遺産のオーセンティシティは、文化財保存の考え方の登場とともに、前近代に行われていた様々な存続行為が有していた豊かな可能性を制限するような方向に向かってしまったのかもしれない。しかし木造建築遺産の存続方法を考えると、近年の傾向はそれらを再び開

いていく方向に向かっているようにも見える。21 世紀的なオーセンティシティは、材料の更新を総合的観点で埋める方向性に拡大しつつある。この流れのなかでは、前近代の手法が再び意味を持つように思われる。この見方は、オーセンティシティ概念がインテグリティ概念に近づいていると見ることもできるように思われる。

4. 木造建築遺産のオーセンティシティを巡る問題群

以上の考え方に基づき、本研究では木造建築遺産のオーセンティシティを巡る問題群を以下のようにリストアップした。

A 前近代における建築存続の様相

- ① 前近代における建造物修理におけるオーセンティシティとは
- ② 前近代において再建を繰り返された建物はいかなるオーセンティシティを有するか
- ③ 写しにより建てられた建物はオーセンティックといえるか

B 近代以降における建築存続の様相

- ① 文化財建造物の修理に際して、部材の取替はどこまで許容されるか
- ② 桧皮葺、茅葺等の周期的な取替が不可欠な部材はいかにオーセンティシティを担保すべきか
- ③ 文化財建造物の「指定解除」はどの程度の損傷により判断されるか
- ④ 近代以降に復元された建物はいかなるオーセンティシティを有するか
- ⑤ 「移築」のオーセンティシティとは
- ⑥ 技術のオーセンティシティ、プロセスのオーセンティシティとはいかなるものか
- ⑦ 木造建築遺産のオーセンティシティにいかなる国際的な共通性と差異があるか

これらの問題群について考えることのできる事例をそれぞれ挙げ、木造建築遺産の存続のあり方を分析し、そこに本物らしさがいかに保持されているのかを考察していく。

ただし、具体的な事例を取り上げると、当然ながら前近代の建築存続の様相は近代以降にも継続しており、近代におけるその転換についても理解すべき重要な観点となる。よって本研究では前近代と近代以降の差違については念頭においた上で、両者を大きくは分けず、建築存続のあり方によって全体を以下の6章に分けて捉えていく。

第1章 建造物修理：日本と世界の木造の建造物修理におけるオーセンティシティを論じる。

第2章 修理技術：建造物修理のうち、特に技術に焦点が当てられる諸問題を論じる。

第3章 反復的建て替え：木造建築遺産の最も重要な特質の一つである材料が更新される建築存続のうち、反復的に建て替えがなされたものを広く集めて論じる。

第4章 失われた建物の復元：一旦失われた建物を復元する行為をオーセンティシティの観点からいかに捉えられるかを考える。

第5章 写しと移し：茶室建築において典型的に見られる「写し」による増殖の問題、あるいは繰り返される「移し」の問題を取り上げる。

第6章 仮設建造物：周期的に立ち現れる仮設の建造物について、同一性とオーセンティシティの問題として論じる。

文化財石垣耐震基礎診断で用いる累積示力線法への伝統的 stone 築造技術の 導入による石垣耐震性の再評価

研究代表者 山中 稔（香川大学創造工学部）

1. はじめに

近世城郭石垣は築城から 400 年以上が経過し、多くの城郭石垣で緩み・孕み・抜け落ち等の老朽化が生じている。さらには、近年の 2011 年東日本大震災や 2016 年熊本地震等の大地震により、大変形や崩壊するなど石垣に甚大な被害が生じた。我が国の貴重な歴史遺構である城郭石垣の老朽化による変形や地震による被災を防ぐためには、城郭石垣の常時および地震時の安定性を適切に評価し、土木工学的見地から合理的な対策方法を検討する必要がある。特に、今後の巨大地震の発生に備えて、城郭石垣の地震時安定性評価手法の開発が強く求められている。

文化庁が 2023 年 7 月に公開した文化財石垣耐震診断指針（案）¹⁾において、近世城郭石垣の耐震診断は、「予備診断」、「基礎診断」、「専門診断」の三段階からなっている。「予備診断」で主に外観目視や簡易な計測等での点数評価を行い、「基礎診断」では円弧すべりや累積示力線等での簡易な安定性評価を、「専門診断」では高度な有限要素 FEM 解析や個別要素 DEM 解析等による詳細な安定性評価を行うとしている。

研究代表者は、文化庁が「基礎診断」で推奨する累積示力線法を用いて丸亀城天守台石垣を対象に石垣耐震診断を実施したところ、丸亀城天守台石垣は過去の南海地震を含む地震で崩壊被害の記録がないにも係わらず、耐震性を満足しないとする結果となった。すなわち、現状の累積示力線法で解析すると、これまでの地震で崩れていない石垣であっても耐震性が低いと判断され、無用な耐震補強策が施されることで、歴史の証拠である石垣の文化財価値を損なう懸念が極めて大きいことが判明した²⁾。

研究代表者は、この現状の累積示力線法が実際の耐震性を評価できていない要因として、解析過程において、伝統的 stone 築造方法における、間詰石や介石の挿入による築石間の摩擦力向上を評価していないことや（築石抵抗力の過小評価）、築石に作用する栗石層や盛土層からの地震時土圧の算定方法に問題がある（背面土圧の過大評価）と認識している。

本研究では、石垣耐震診断指針における「基礎診断」で用いる累積示力線法での解析過程に、間詰石や籬介石による築石間の摩擦力を新たに導入するとともに、築石背面からの地震時土圧の算定手法を改善することで、伝統工法で築造された城郭石垣の耐震性評価を適切に行おうとするものである。

2. 石垣累積示力線法について

1) 基本的考え方

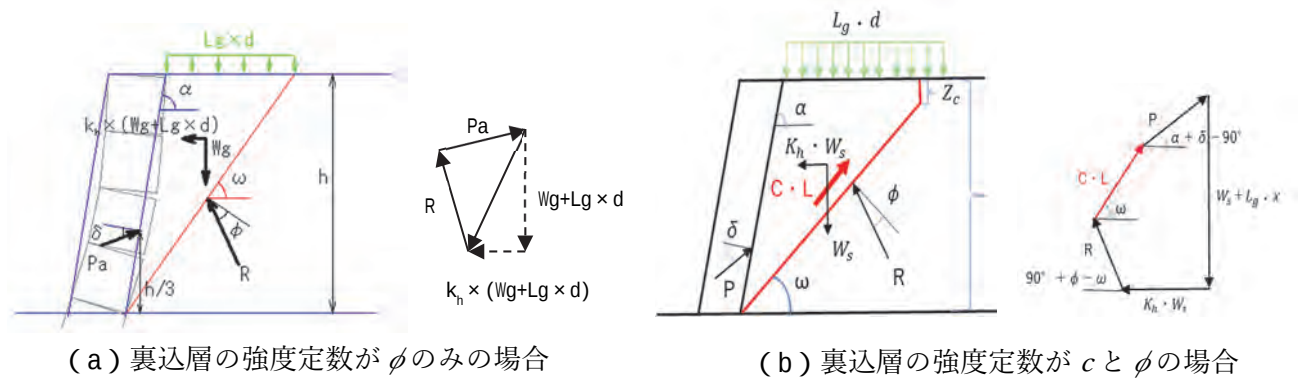
示力線法は、石積み擁壁やブロック積擁壁等の設計において転倒に対する安定性照査に適用されてきた手法であり、城郭石垣の安定性照査に適用された事例があるものの、実際の現象を十分に反映できていないとして実用的な段階には至っていなかった。

しかし、2016 年熊本地震による熊本城石垣の被災要因の検証や復旧設計において、これまでの示力線法を改良した橋本ら³⁾による累積示力線法が適用された。この累積示力線法は、1 段ごとに積み勾配が異なる積石に作用する土圧を試行くさび法により算定し、石垣の築石に加わる土圧と石垣の自重による合力の軌跡が下位の築石に作用するようになっている。

2) 地震時主働土圧の算出方法

地震時に築石に加わる荷重として、築石背面の裏込層のすべりを想定し、作用する主働土圧の P_a を算定する。なお、すべり面の想定においては試行くさび法を用いた。

図-1(a), (b)に、築石に作用する地震時の主働土圧算定の力のつり合いを示す。近世城郭石垣においては築石の背面には一般的に栗石層、盛土層、地山層が構成するが、本研究における地震時主働土圧の算定には栗石による裏込層の1層のみとした。(a)図は裏込層の強度定数が ϕ のみの場合、(b)図は裏込層の強度定数が c と ϕ の場合である。



L_g : 裏込層への上載荷重	(kN/m)	W_g : すべり領域の裏込層の重量	(kN)
α : 築石の平均勾配 (背面も同じと仮定)	(°)	R : すべり面に作用する抵抗力	(kN)
α' : 築石の平均勾配 (背面)	(°)	c : 裏込層の粘着力	(kN/m ²)
ω : 仮定したすべり面と水平面の角度	(°)	ϕ : 裏込層の内部摩擦角	(°)
h : 対象石垣のすべり領域の高さ	(m)	δ : 石垣の背面摩擦角 (= ϕ)	(°)

図-1 石垣に作用する地震時の主働土圧算定の力のつり合い

図-1(a), (b)に示す力のつり合いから地震時主働土圧 P_{ae} を求めると、裏込層の強度定数が ϕ のみの場合が式(1)、裏込層の強度定数が c と ϕ の場合が式(2)として表される。

$$P_{ae} = \frac{(W_g + L_g \times d) \times \left\{ 1 + \frac{k_h \times \cos(\omega - \phi)}{\sin(\omega - \phi)} \right\}}{\frac{\cos(\alpha + \delta - 90^\circ) \times \cos(\omega - \phi)}{\sin(\omega - \phi)} + \sin(\alpha + \delta - 90^\circ)} \quad \text{式(1)}$$

$$P_{ae} = \frac{W \times \left\{ 1 + k_h \times \frac{\cos(\omega - \phi)}{\sin(\omega - \phi)} \right\} - \frac{cL \times \cos \phi}{\sin(\omega - \phi)}}{\left\{ \frac{\cos(\alpha + \delta - 90^\circ) \cos(\omega - \phi)}{\sin(\omega - \phi)} + \sin(\alpha + \delta - 90^\circ) \right\}} \quad \text{式(2)}$$

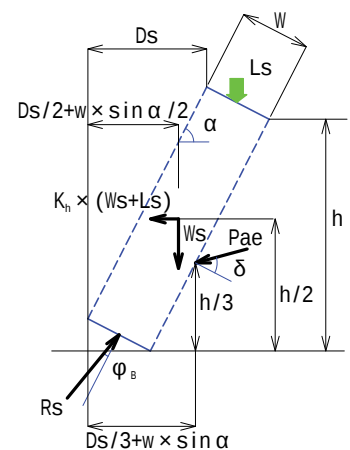


図-2 地震時の築石に作用する力のつり合い

3) 合力の作用位置

図-2 に、地震時の石垣に作用する力のつり合いを示す。この力のつり合いを元に、道路土工・擁壁工指針に準じて築石前面より合力の作用位置までの距離 d を式(3)で算出する。この合力の作用位置が、地震時転倒判断基準位置(築石幅 $W/3$)より背面にあれば安定であり○、石垣前面と地震時転倒判断基準位置の間にあれば△、石垣前面より前側にあれば不安定であり×と判断することとした。

$$d = (\text{抵抗モーメント} - \text{転倒モーメント}) / \text{鉛直荷重}$$

式(3)

3. 石垣累積示力線による解析例

1) 解析条件

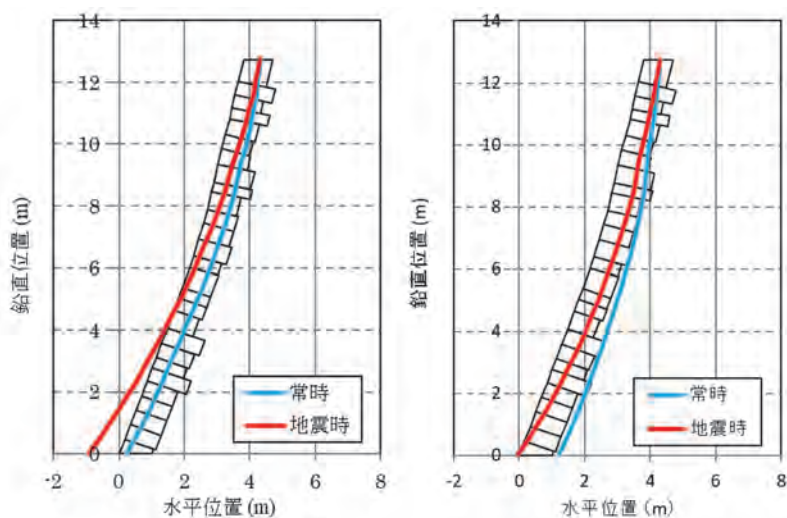
表-1 に、示力線解析に用いた物性値を示す。地震時の設計水平震度はⅠ種地盤でレベル2地震動に相当する 0.16 とした。築石の底面摩擦角は、石材の一般的な 35.0° とし、裏込材の強度定数は実粒径の栗石の一面せん断試験結果の $\phi_1=36.4^\circ$ 、 $c_1=8.1 \text{ kN/m}^2$ を採用した。解析モデルは、実際の石垣の形状と寸法（高さ、奥行き）を参考にモデル化した。

2) 常時と地震時の合力の作用位置

図-3 に、常時と地震時における累積示力線図を示す。(a)図の裏込材(栗石)の強度定数を内部摩擦角 ϕ_1 のみとした場合の合力の作用位置は、常時ではどの鉛直位置においても築石前面より後方に位置して安定しているが、地震時では鉛直位置が 4 m より下方では築石前面つま先より外側にあり不安定となる。一方、(b)図の裏込材(栗石)の強度定数に内粘着力 $c_1=8.1 \text{ kN/m}^2$ を加えた場合の合力の作用位置は全体的に築石背後側に移動し、地震時においても築石前面より内側に入り安定性が高まっていることが分かる。

表-1 解析に用いる物性値

設計水平震度		k_h	常時 0.00 地震時 0.16
築石	密度	$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	23.0
	底面摩擦角	$\phi \text{ (}^\circ\text{)}$	35.0
	背面摩擦角	$\delta \text{ (}^\circ\text{)}$	35.0
裏込材	密度	$\gamma_1 \text{ (kN/m}^3\text{)}$	20.0
	内部摩擦角	$\phi_1 \text{ (}^\circ\text{)}$	36.4
	粘着力	$c_1 \text{ (kN/m}^2\text{)}$	0 or 8.1
上載荷重		$L_g \text{ (kN/m)}$	—



(a) ϕ のみの場合

(b) ϕ と c を与えた場合

図-3 合力の作用位置

4. 栗石層へのジオテキスタイルの敷設状況

2011 年東日本大震災で崩落し復旧を終えた仙台城石垣が、2022 年 3 月福島県沖地震で再度石垣が大変形や崩壊した。この 2 度の石垣被害で着目されたのが、ジオテキスタイルを敷設した石垣は、変形が生じたものの崩壊にはつながらなかったことである。この事例から、城郭石垣の修復においては現代工法であるジオテキスタイルの利用が進むことになった。

写真-1 に、現地視察で得た仙台城石垣工事でのジオテキスタイルの敷設状況を示す。築石と背面地山に挟まれた栗石層にジオテキスタイルを水平方向に面的に敷設していることが分かる。

図-4 に、仙台城本丸北西石垣修復断面図を示す。上段に 1 枚、中段に 2 枚のジオテキスタイルを敷設する断面である。この仙台城石垣修復工事での事例、以後の解析の参考とした。



写真-1 仙台城石垣工事でのジオテキスタイルの敷設状況

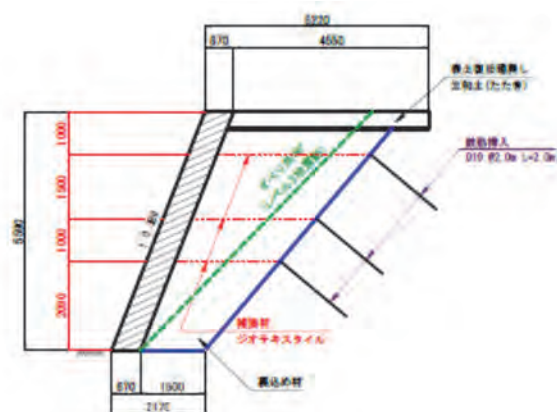


図-4 仙台城本丸北西石垣修復断面図⁴⁾

5. ジオテキスタイルの石垣累積示力線法への導入方法

1) 地震時土圧に引張り効果を作用させた場合

地震時土圧によって栗石が押され石垣前面に流動することで築石に力が加わる。ジオテキスタイルを栗石層に敷設することで、ジオテキスタイルと栗石の間に摩擦抵抗が発生する。前面に押し出される栗石に対して摩擦抵抗は背面側に引張力として働く。このとき築石に加わる土圧は、ジオテキスタイルと栗石との摩擦による引張力によって減少すると考えられ、ジオテキスタイルによる引張り効果が土圧減少効果として働くとして式を改良する。

$$\cdot \text{ジオテキスタイルによる引張力} \quad T = \frac{(L - L_{SE}) \times 2(c + \sigma_v \tan \phi)}{F_{SE}} \quad \text{式(4)}$$

築石に加わる土圧が、地震時土圧から引張力が引かれた土圧として働くと考え、式(5)および式(6)を用いて安全率の算出を行う。

$$\cdot \text{滑動力} \quad P_{he} = Pa \times \cos(\alpha + \delta - 90^\circ) - T \quad \text{式(5)}$$

$$\cdot \text{転倒モーメント} \quad M_{te} = \{Pa \times \cos(\alpha + \delta - 90^\circ) - T\} \times h/3 - Pa \times \sin(\alpha + \delta - 90^\circ) \times (Ds/3 + w \times \sin \alpha) \quad \text{式(6)}$$

「ジオテキスタイルを用いた補強土の合理的な設計法に関する共同研究報告書」⁴⁾において、重力式擁壁の場合土圧の下限値として水平土圧合力の 2/3 と設定している。本研究においても同様に下限値を設定することとし、採用する土圧の下限値を式(7)に示す。

$$\cdot \text{土圧の下限値} \quad P_{ac} \times \cos(\alpha + \delta - 90^\circ) - T \geq P_{ac} \times \cos(\alpha + \delta - 90^\circ) \times 2/3 \quad \text{式(7)}$$

2) 築石に引張り力を作用させた場合

ジオテキスタイルによる引張り効果が、栗石層に作用するのではなく築石に働くと考え。摩擦による引張力が築石の抵抗力として作用するならば、築石が前面に押し出される力に抵抗する力が増加するとして式を改良する。力の釣り合いにおいて引張力が新たに加わっているとして滑動安全率、転倒安全率を求める。

以下の式(8)および式(9)を用いて安全率の算出を行う。

$$\cdot \text{滑動抵抗力} \quad R_{he} = \{(Ws + Ls) + Pa \times \sin(\alpha + \delta - 90^\circ)\} \times (\sin \alpha \times \tan \phi_B \times \sin \alpha + \cos \alpha \times \sin \alpha) + T \quad \text{式(8)}$$

$$\cdot \text{抵抗モーメント} \quad R_{te} = (Ws + Ls) \times (Ds/2 + w \times \sin \alpha/2) + T \times h/3 \quad \text{式(9)}$$

5. 石垣累積示力線法にジオテキスタイルを導入した解析結果

1) 地震時土圧に引張り効果を作用させた場合

図-5 に、石垣累積示力線法にジオテキスタイルの地震時引張り効果を導入した解析結果を示す。

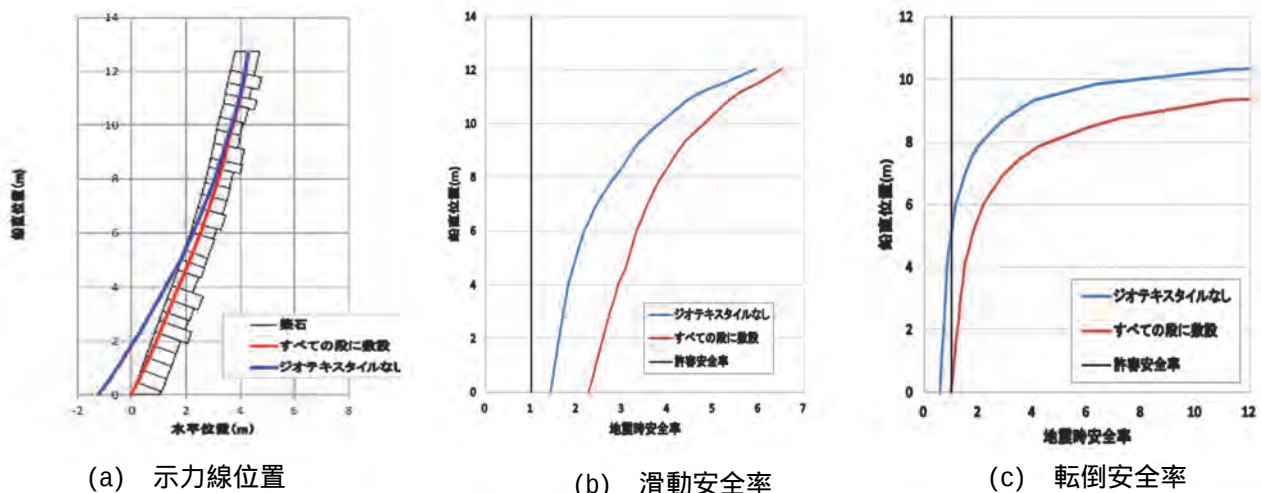


図-5 地震時土圧に地震時の引張り効果を作用させた場合

図-5(a)の示力線位置は、中段から下段にかけて大きく背面側に移動した。この結果より石垣の安定性が大きく上昇している。不安定な箇所は最下段のみとなったが、上段ではほとんど変化が見られない。

図-5(b),(c)に示す滑動安全率、転倒安全率は全体的に上昇し、少なくとも2倍程度の安全率になっている。転倒安全率についてジオテキスタイルを敷設することで、最下段を除き安全率1を上回る、すなわち地震時安定性が高まる結果となった。

2) 築石に引張り力を作用させた場合

図-6より示力線位置は全体的に背面側に移動しているが、ジオテキスタイルを敷設していない場合に築石前面に示力線が位置している下段では、転倒判断基準位置より前面に位置したまま不安定な結果となった。

図-6(a),(b)に示すように滑動安全率、転倒安全率ともに上昇し、上段では安全率の上昇量は大きくなる傾向が見られた。転倒安全率については下段ではほとんど変化が見られなかった。すなわち、築石抵抗に引張り効果を作用させる解析方法には、今後改良の予定があると考えられる。

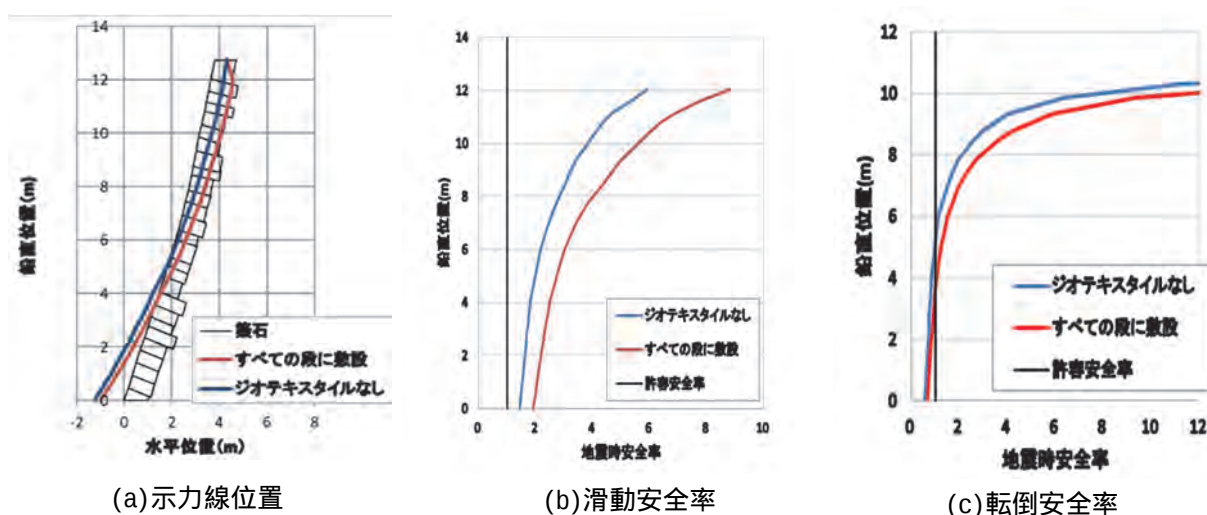


図-6 築石に引張り力を作用させた場合

6. まとめ

本研究では、城郭石垣の耐震性評価に累積示力線法を適用し、現状の常時および地震時の安定性が評価し得る物性と方法での解析を試みた。また、石垣の安定性を向上させる方策として築石層にジオテキスタイルを敷設する現代工法を適用した場合の石垣累積示力線法による解析手法を改良した。

本研究により、石垣累積示力線へのジオテキスタイルの効果を2つの方法で導入した結果、地震時土圧に引張り効果を作用させた場合が地震時安定性が高まり、実現象とも一致し妥当な結果となることが判明した。今後は、より高精度な地震時安定性評価に向けて、ジオテキスタイル導入式の改善を進めていきたい。最後に、本研究を助成いただいた公益財団法人松井角平記念財団に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 文化庁：文化財石垣 耐震診断指針（案），2023.7.5.
- 2) 山中 稔：土木工学の観点からの石垣の背面構造の重要性～高松城天守台を事例として～，基調講演，第18回全国城跡等石垣整備調査研究会，pp.12-28, 2023.1.
- 3) 橋本隆雄，近藤和仁，石作克也：熊本城石垣の示力線による安定性照査の適用性について，土木学会第73回年次学術講演会，pp.1161-1162, 2018.8.
- 4) 仙台市：仙台城跡石垣復旧部会資料，2024.8.11.

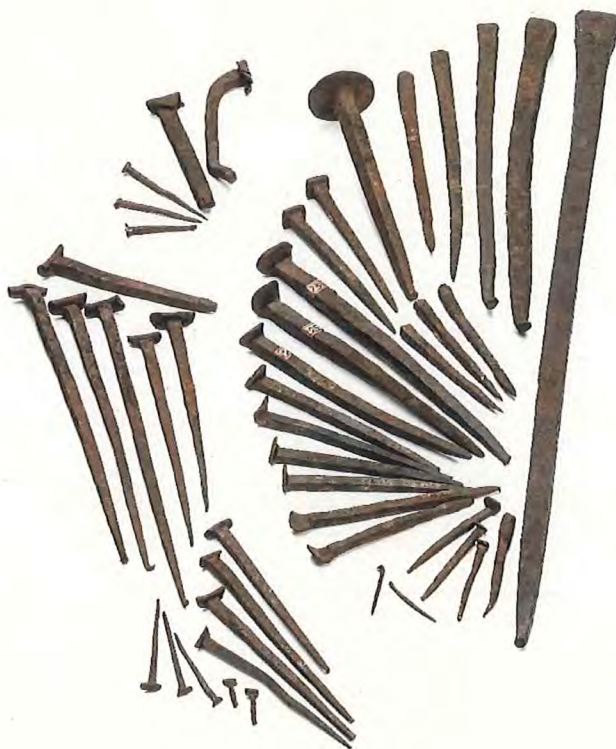
②研究成果の要旨・概要

奈良文化財研究所 和田 一之輔

本研究は国宝法隆寺五重塔の解体修理時に取得された各時代の鉄釘約 400 本を対象に、歴史的建造物に使用された鉄釘の通史的な形態変化と建築部位ごとの規格の選択性を解明することを目的とする。

国宝・世界遺産である法隆寺五重塔は世界最古の木造塔である。昭和大修理の際に、各時代約 400 本の鉄釘が建築部材ごとに採取されており、鉄釘の頭部形態の違い、建築部位ごとに使用する鉄釘の寸法・規格の違いを、1,300 年という長期間を通史的に把握できる唯一の資料である。建築史学では建築部材に注目が集まり、付属金具はあまり注意されてこなかったが、緻密な形態論や寸法分析を得意とする考古学と建築史学とを融合させた、新たな研究視座の創出を目論む。そして、鉄釘の資料的価値を高め、解体修理現場での鉄釘の記録・採取と更なる比較研究を促し、学術的かつ実践的な意義をあわせもつ。

五重塔に使用された鉄釘は
大別 15 ヲ所・細別 70 ヲ所ほ
どの部位から採取したもの
で、最大で全長 62.0cm、最小
で全長 1.9cm である。時代ご
とにみると、創建当初では全
長 3.6cm～62.0cm、中世で全
長 3.7cm～14.9cm、近世で全
長 1.9cm～27.3cm となる。頭
部の形態は大別 7 種細別 19 種
が認められる。古代では叩折
式が主流であり、近世には巻
頭式が主流となる。両者は形
態と製作技術が異なるが、方
頭式を起点に叩折式から巻頭
式への変化と理解でき、そこ
には方形の頭部形態を志向し
た模倣の変遷を読み解くこと
ができる。このほか、鉄釘に
残された諸痕跡も写真で表現
した。



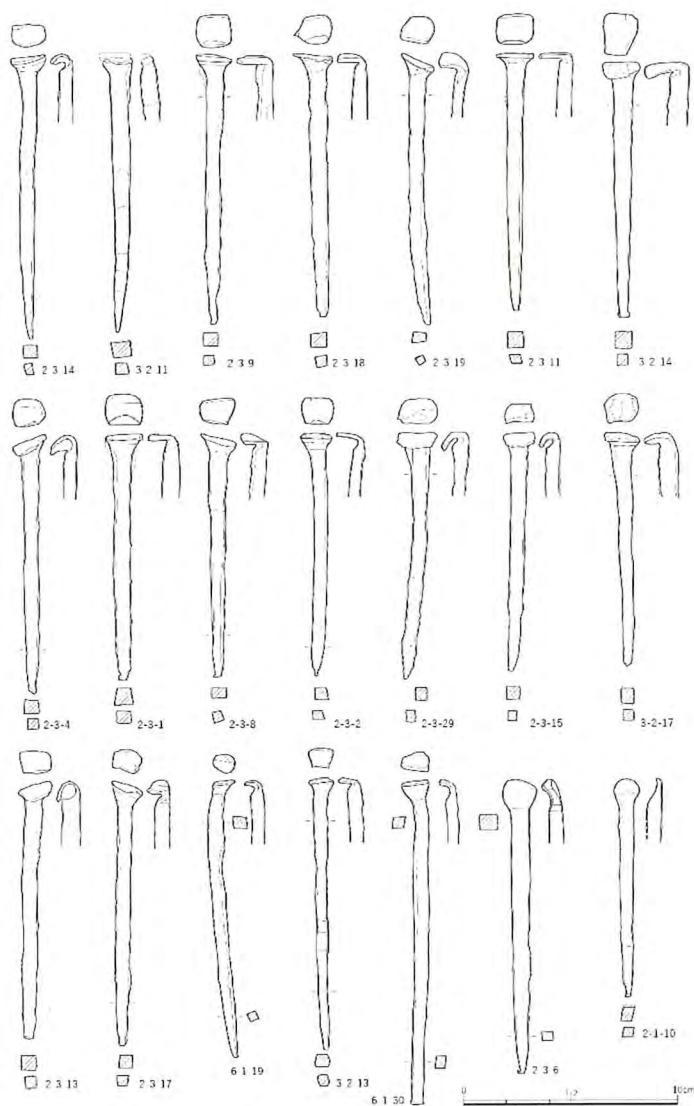
法隆寺五重塔に使用された鉄釘

本研究は、考古学的な基礎作業である観察と実測にもとづき、寸法、形態（形式と型式）と変遷、製作・使用痕跡を視点に論をすすめた。実測図は鉄釘281点と銅釘27点を、写真は683点を掲載し、全貌を示し得た。歴史的建造物の修理現場における鉄釘の採取方針や方法、報告の仕方について再考を促す契機となることを期待する。いっぽうで、課題も残った。全国的な視野で変遷と規格の詳細を論じることや科学的調査の実践だ。これは研究の進展を意味するだけではなく、歴史的建造物の修理現場で使用する現代鉄釘の製作にもおおきく寄与する重要な視点だ。

本書の成果が、まさしく釘のごとく、考古学と建築史学さらには歴史的建造物の修理現場とを強固に緊結する、そのようなことを願ってやまない。



鉄釘の型式分類図



古代の叩折式鉄釘