

平成30年6月12日現在

機関番号：87106

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01778

研究課題名(和文) 彩色塗装のある歴史的木造文化財建造物の加湿温風処理による虫害処理方法の検討

研究課題名(英文) Investigation of high temperature treatment with humidified hot air to eradicate insects in historic wooden buildings with colored paint layers

研究代表者

木川 りか(Kigawa, Rika)

独立行政法人国立文化財機構九州国立博物館・学芸部博物館科学課・課長

研究者番号：40261119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人体や環境に対して安全で、かつ有効な文化財木造建造物の殺虫処理として調湿温風による殺虫をとりあげ、漆などの彩色を施した日本の大型建造物に適用する手法を確立することを目的とした。基礎実験(試験用チャンバ約30m³)、応用試験(最大100m³のモデル試験棟)を通じて木材含水率を保持した状態で殺虫に必要な材芯温度(60℃)に制御できるシステムを試作し、最終的には実際の歴史的木造建造物の加湿温風処理に適用した。このような高い精度で温度と木材含水量をコントロールできる加湿温風による歴史的建造物の処理は、国内でも、また国際的にも初めての例と考えられる。

研究成果の概要(英文)：One of the most significant deterioration of historic wooden buildings is that caused by wood boring insects. Conventionally the wooden buildings damaged heavily by insects have been treated by fumigants such as sulfuryl fluoride. In this project, we did researches in order to apply humidified heated air to eradicate wood boring insects in historic wooden buildings with traditional painted layers of urushi or with polychrome sculptures. Firstly with basic research, the system to precisely control the ambient temperature and humidity of the space was built to control core temperature and humidity of timbers. And with test pieces with polychrome painted layers and with various sizes of wooden blocks, data of contractions, colors and cracks were closely investigated. Then we applied the system to a middle scale test building with cost effective insulation covering. Finally with the constructed system, a historic building in Nikko was treated without any visible adverse effects.

研究分野：文化財科学、博物館科学、文化財の生物劣化対策

キーワード：文化財保存 殺虫処理 歴史的建造物 虫害対策 温風処理

1. 研究開始当初の背景

歴史的木造文化財建造物は、各々の風土を反映した文化遺産としてきわめて貴重であり、その保存や修復は、今後も我が国をはじめ世界各地の文化を継承していくうえで必須である。歴史的木造文化財建造物の劣化や損傷要因としては、地震などの天災、火災、物理的な摩耗・損傷等のほかに、虫害や腐朽などの生物劣化による要因がきわめて大きなウェイトを占めている。研究代表者らは2008年以降、多くの文化財指定物件を含む、日光の社寺の貴重な歴史的木造文化財建造物群の大規模な虫害モニタリング、劣化度(強度)評価、そして処置が必要な場合の殺虫方法の策定などに関わってきた。そのなかで、シロアリや木材腐朽による生物劣化に加え、乾材を食害するシバンムシ類による被害がきわめて甚大な被害を歴史的木造建造物に及ぼしていることが明らかになった。

甚大なシバンムシの被害を受けていた輪王寺本堂(三仏堂)では、主要な柱・梁・台輪などの強度が失われた結果、大規模な半解体修理が必要となった。また最終的には、古材に入り込んでいたシバンムシを建物に残さないために、大規模なガス燻蒸(フッ化スルフリルを使用)を実施することとなった。

フッ化スルフリルをはじめとする文化財全般に用いられるガス燻蒸剤は、高い駆除効果を発揮する反面、人体への毒性がきわめて高い。ガス燻蒸作業中は、関係者のみならず参拝客などに対しても広域に渡って立ち入り規制を行わなければならない。また施工後に処理ガスを大気に放出することから、周辺環境へのガス放出では慎重な対応が必要である。さらに、最近の検疫燻蒸業務の縮小傾向を背景に、建造物のガス燻蒸を実施できる技術を有する専門業者が減っていった状況もあり、近い将来、これまでのように建造物のガス燻蒸ができなくなる可能性も考えられる。このような中で、ガス燻蒸以外で文化財建造物に対して効果的で、かつ安全な殺虫方法を確立することは、喫緊の課題といえた。

一方で、博物館資料などでは、ガス燻蒸剤を使用しない低酸素濃度殺虫法、二酸化炭素殺虫法、低温処理法、高温処理法などを実施する方向へ移行しつつある。海外ではそのひとつである高温処理法によって、自然史標本類、木製品や家具などを対象に55℃程度の温度で殺虫する例が知られている。国内では、国立民族学博物館において、研究分担者の日高らが大型の木造船を展示室においたままオンサイトの温風処理によって殺虫した例がある。このようなことを背景に、比較的大型の木質文化財や建造物に高温処理を適用できる可能性があると考えた。木質文化財の高温処理では、一般に70~80℃の温風を使って、部材の中心部の温度が約55℃以上になるまで温め、数時間維持する方法がとられる。ここで最も留意すべき点は、「乾燥した温風

を使用すると、木部の水分が奪われ、変形や割れ、塗膜の剥離などを引き起こす可能性がある」ことである。これを防ぐための一手法は、文化財から水分が奪われないように、対象物を水分バリア性のあるプラスチックバッグ内に封入し、その周囲に温風を流して内部の温度を上昇させる方法である。しかし、大型の文化財や建造物ではこの方法は適用が不可能である。これらの問題を解決するため、欧州では、ある一定容積の空間内に設置した木質文化財に対して、木材の含水率を殆ど変化させないように湿度をコンピュータ制御しながら昇温および冷却する手法を開発し、美術館や博物館の収蔵品など小型の物件について駆除処理の実績をあげつつある。これは湿度制御した温風で、木材の含水率を変えずに昇温することで昇温中の木材の伸縮がなくなるため、彩色などの剥離や亀裂などの損傷が発生しないという極めて合理的な原理に基づいている。しかし、大型の物件での制御方法が確立されていないこと、欧州起源の手法であり、漆など日本特有の仕上げ層に対する影響が未知であることのため、この手法が、そのまま国内の建造物で実施運用できる状況になかった。ヨーロッパで実施されている、彩色塗装のない木造建造物の温風処理例では正確な湿度制御が困難であった。また熱源として大量のプロパンガスを使用するなど、この方法をそのまま日本の一般的な文化財建造物に適用することはできなかった。

そこで研究代表者らは、日光の歴史的建造物のように、彩色された装飾、彫刻、漆塗装などを有する繊細な建造物を、安全かつ効果的に調湿温風処理するために、湿度コントロールの精度をあげた温風処理方法を検討し、その手法・装置や手順を確立することを目指した。

2. 研究の目的

従来、文化財建造物が木材害虫であるシバンムシなどによって顕著な被害を受けた場合には、修理にあわせて建物全体のガス燻蒸処理が実施されてきた。ガス燻蒸は、比較的短時間で部材内部に生息する虫まで駆除できるという点で、現時点で唯一の有効な方法である反面、燻蒸剤は毒ガスであるため、作業員や観光客の安全確保のために厳重な対策が必要となる。さらに施工後放出される有毒ガスの周辺環境に対する影響も懸念される。本研究では、人体や環境に対して安全で、かつ有効な殺虫処理として調湿温風による殺虫をとりあげ、これを漆などの彩色を施した日本の大型建造物に適用する手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、社寺建造物など部材が複雑に入り組む大規模な建造物の処理法の確立を目指し、基礎実験(試験用チャンバ約30m³)

作成)、応用試験(最大 100m³ のモデル試験棟)、および実用化試験(最大 300m³ の実際の建造物)を通じて、以下を明確化し、実施した。(1) 想定される最大断面寸法までの部材による殺虫効果および彩色への影響を評価し、調湿温風による処理条件を決定、(2) 小型建物における試験を通じた、熱源能力の見積り、温風流の制御方法や断熱条件の明確化、さらに大規模建物処理のための処理装置の仕様や省エネ対策実施、(3) 実大建物のテスト施工を通じた開発手法の妥当性の検証と、改善点の明確化、さらに実務作業で必要となる調湿温風処理の基本的仕様の策定。

具体的には、試験用チャンバ(約 30m³)を作成し、調湿温風処理時の部材温度・含水率分布の測定、彩色層・木部のひずみ測定を行い、安全処理条件を決定した。また、実際の歴史的建造物部材において常時ひずみを併行して測定し、日常的におきている部材のひずみの大きさの参考とした。

次に、約 100m³ のモデル建物の周囲に断熱覆屋を作成し、熱源能力、温風流の循環および制御方法、断熱条件を決定し、実大建物の処理方法の確立のための処理装置仕様、処理条件や手順を確立した。さらに、実用化試験では、最大 300m³ の実際の建造物に適用できるように、調湿温風処理の基本的仕様を策定した。

4. 研究成果

(1) プロトタイプチャンバ(約 30m³)の試作と試験：研究分担者の京都大学藤井義久教授の研究室にて、研究協力者の北原博幸氏、藤原裕子氏の協力のもと、気密・断熱性を確保し、調湿温風を発生・循環できるチャンバ、およびその制御プログラムを試作し、正確に殺虫条件として望まれる温度湿度制御が可能かどうか試験を実施した(図1)。その結果、昇温、昇湿についてはほぼプログラム通りの制御が実現された。一方、降温については、外気を取り入れて温度を下げる工夫が必要となり、改善が行われた。木材含水率を保持した状態で、殺虫に必要な材芯温度(60°C)に制御できるプロトタイプのチャンバとなった。



図1. 試験用チャンバ内部の様子

(2) 彩色層を毀損しないための安全処理条件の明確化：研究協力者の藤原裕子氏を中心に、調湿温風処理による彩色層・木部における含水率とひずみ分布を測定し、彩色層を毀損しないための安全処理条件を調べた。温風処理中の含水率変化を抑制することで彩色層の毀損は原理的に免れる。試作したプロトタイプチャンバの中で、調湿条件とひずみとの関係を明らかにするために測定を実施した。

(3) 上記原理とプログラムを使用した小規模処理装置の試作と山笠基台部の処理：上記で試作した制御プログラムと方法を用いて、彩色がない山笠基台部の竹、縄部の調湿温風処理を目的に小規模装置を試作し、処理対象となる無地の木材、縄などを用いて影響試験を実施した。装置が機能することを確認のうえ、九州国立博物館において山笠基台部の調湿温風による殺虫処理を実施した(図2)。



図2. 作成した加湿温風制御プログラムを使用した木部の処理例

(4) 実地(大規模)試験を念頭においた設計と準備：実際の建物の処理でもエネルギー効率を向上させ電力駆動としたシステムとするため、断熱方法を検討のうえ、研究協力者の北原博幸氏、藤原裕子氏を中心に試験用の建造物(ログハウス)(図3)を処理するための装置を製作し、断熱覆屋(図4)をその周囲に作成して、建造物の処理の実験を実施し、装置としては想定した能力を発揮することが確認された。また、その後に予定されている日光の歴史的建造物の処理が気温の低い時期になる場合に備え、加湿に使用する水のパイプ内の凍結防止対策の方法について検討した。

また、この建物試験において、研究分担者の犬塚と研究協力者の古田嶋智子氏らを中心に断熱覆屋内の温度分布のシミュレーションを実施し、実測値との照合を通して、今後の実大処理の条件検討を行った。断熱方法については、研究分担者の日高らの助言をもとに断熱材等を検討した。



図 3. 試験用建物



図 4. 試験用建物の断熱覆屋

(5) 処理を想定した建造物の一部における昆虫のモニタリング: 研究分担者の佐藤、斉藤、研究協力者の小峰幸夫氏らを中心に、今後の処理を想定した建造物のなかから、日光中禅寺愛染堂・鐘楼、日光東照宮神厩舎・鐘楼、二荒山神社大国殿などにおいて現状の状態の調査と、今後の処理効果の検証に向けてトラップによる昆虫の分布状況を調査した。

(6) 歴史的建造物の処理への適用

研究協力者の原田正彦氏、北原博幸氏らを中心に、この加湿温風処理を中禅寺愛染堂の処理に適用した。建物周囲に足場を設け、耐熱性のポリプロピレン製気泡シートを3枚重ねにして被覆し、気密・断熱性を確保し(図5)、床下地盤面にもシートを敷設した。温風処理システムは、耐熱性の加温・加湿ユニット(ファン、ヒータと水蒸気発生管で構成)8基と、温湿度調節室(水道水を軟水化、蒸気を発生)4基、冷却除湿装置(降温期の湿度調整用)2基、監視室、電源装置からなる(図6)。覆屋内の空気の温湿度の制御は、処理内の温湿度センサの信号によるフィードバック制御とした。温風処理は、2017年11月の18℃、73%RHの状態から開始し、4.5日で60℃、83%にまで昇温・加湿し、3日間温湿度状態を保持し、その後約4日をかけて10℃、73%まで降温・除湿した。

この条件に対応する木材の平衡含水率はほぼ一定とみなせ、木材には、温度変化による膨張・収縮は発生するが、水分移動による木材の膨潤や収縮(温度変化による寸法変化

より微小)はほぼ発生していないと考えられる。

また漆彩色を施したケヤキ試験体(30cm立方体)に供試虫(アフリカヒラタキクイムシ)を封入して駆除効果を検証するとともに、漆彩色を施した試験体の内部や表面の温度やひずみなどを連続測定した(図7)。



図 5. 中禅寺愛染堂の断熱覆屋

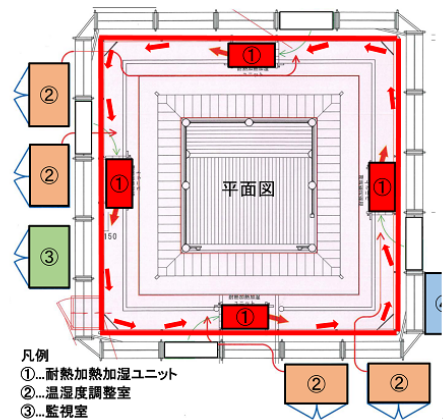


図 6. 処理システムの概要



図 7. 中禅寺愛染堂処理空間内の様子

また、覆屋内の約150点に温湿度センサを設置し、処理中の温湿度分布を監視した(図8、9)。このほか建物部材のひずみの連続計測、処理前と処理後の建物や試験体の測色、亀裂監視、含水率計測を行った。以上の検証の結果、試験体の中心部で所定の温度上昇と駆除効果が確認でき、漆・彩色や木部の毀損などは確認できなかった。試作した彩色片へ

の影響について今後詳細な検討を進める予定となっており、本研究課題の成果を今後学会や論文等に取りまとめ、順次公表していく予定である。

今回の歴史的建造物の処理は、加湿温風による国内で初めての建造物処理例であるのみならず、このような高い精度で温湿度-すなわち木材水分量を制御しながらの建造物の処理は世界的にみても初めてと考えられ、きわめて高い意義があると考えられる。

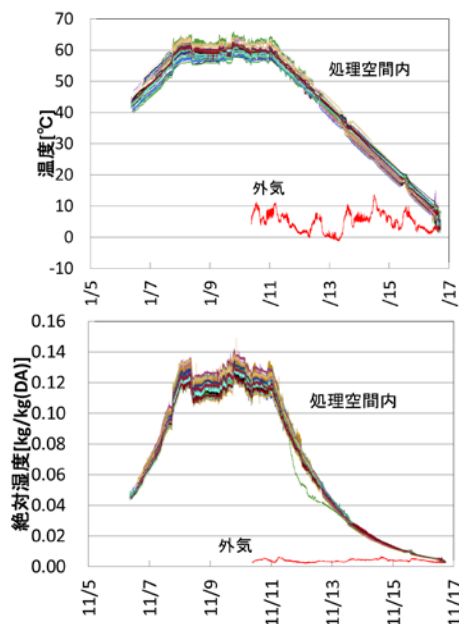


図8. 処理期間中の温度変化(上)と絶対湿度(下)の経時変化

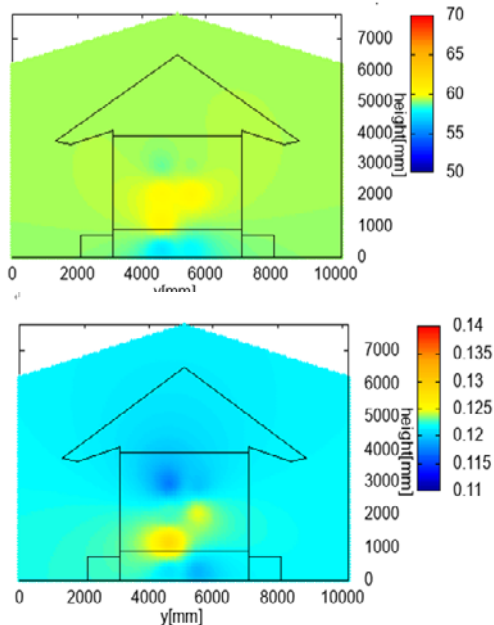


図9. 温湿度保持中の温度(上)と絶対湿度(下)の垂直分布

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計5件)

- ① 小峰幸夫、原田正彦、斉藤明子、佐藤嘉則、木川りか、藤井義久、日光の歴史的木造建造物における新たなモニタリング手法の実用性の検討、保存科学 56号、77-88 (2017)
- ② 竹口彩、藤原裕子、藤井義久、木川りか、佐藤嘉則、古田嶋智子、犬塚将英、湿度制御した温風処理による漆仕上げ材の表面ひずみの測定、保存科学 56号、165-174 (2017)
- ③ 秋山純子、今津節生、赤田昌倫、泊智子、光山文枝、本田光子、北原博幸、Tom Strang、木川りか、九州国立博物館の新たな防虫対策の取り組みについて、東風西声、12、(19)-(28) (2017)
- ④ 斉藤明子、昆虫研究者のための博物館資料論・資料保存論(1) 昆虫標本の生物被害とIPM、昆蟲(ニューシリーズ)、19(4)、159-171 (2016)
- ⑤ Watanabe, H., Yanase, Y., Fujii, Y.: Relationship between the movements of the mouthparts of the bamboo powder-post beetle *Dinoderus minutus* and the generation of acoustic emission. Journal of Wood Science 62(1), 85-92 (2016)

〔学会発表〕(計7件)

- ① 藤井義久、原田正彦、北原博幸、藤原裕子、木川りか、佐藤嘉則、小峰幸夫、犬塚将英、古田嶋智子、日高真吾、斉藤明子、福岡憲、湿度制御した温風処理による甲虫類の駆除-社寺建築における効果の検証-、文化財保存修復学会第40回大会 6月16日(2018)(高知)
- ② 藤井義久、原田正彦、北原博幸、藤原裕子、木川りか、佐藤嘉則、小峰幸夫、犬塚将英、古田嶋智子、日高真吾、斉藤明子、福岡憲、木造建築に施された漆層表面のひずみの揭示変化、文化財保存修復学会第40回大会 6月16日(2018)(高知)
- ③ 小峰幸夫、原田正彦、斉藤明子、佐藤嘉則、木川りか、藤井義久、歴史的木造建造物における新たなモニタリング手法の実用性の検討、文化財保存修復学会第39回大会 7月1日(2017)(金沢)
- ④ 日高真吾、園田直子、末森薫、西澤昌樹、松田万緒、河村友佳子、橋本沙知、和高智美、木川りか、川越和四、太陽光を利用した高温殺虫処理システム開発-殺虫処理条件を満たすための処理空間の創出を目指した試験について、文化財保存修復学会第38回大会 6月25日(2016)(神奈川、東海大学)

- ⑤ 木川りか、北原博幸、秋山純子、赤田昌倫、藤井義久、藤原裕子、岩橋神奈子、泊智子、光山文枝、山崎久美子、Tom Strang、本田光子、今津節生、博物館展示資料の加湿温風による殺虫処理について-山笠土台部材の処理事例-、文化財保存修復学会第38回大会 6月25日(2016) (神奈川、東海大学)
- ⑥ 竹口彩、藤原裕子、藤井義久、木川りか、佐藤嘉則、古田嶋智子、犬塚将英、湿度制御した温風処理による漆仕上げ材の表面ひずみの測定、日本木材学会 3月27日~29日(2016) (名古屋大学)
- ⑦ Watanabe, H., Yanase, Y., Fujii, Y.: Nondestructive evaluation of larval development and feeding and pupal ecdysis of the bamboo powderpost beetle, *Dinoderus minutus*, using X-ray CT and acoustic emission monitoring. The XXV International Congress of Entomology, Orlando, Florida, USA, 25 - 30 September, (2016), doi: 10.1603/ICE.2016.93894

[その他]

- ① 木川りか、大規模ガス燻蒸から加湿温風処理へ、加湿温風殺虫処理法に関する専門家研究集会、6月21日(2018) 東京文化財研究所
- ② 藤井義久、日光中禅寺愛染堂での加湿温風殺虫処理、加湿温風殺虫処理法に関する専門家研究集会、6月21日(2018) 東京文化財研究所
- ③ 日高真吾、基調報告「廃校を利用した民具の収蔵と求められる環境改善」、平成29年度 新潟県民具学会研究会、2月3日(2018) 新潟県立歴史博物館
- ④ 日高真吾、小規模な博物館等施設で活用できる化学薬剤を用いない可動式殺虫処理、学術潮流フォーラム I 人類基礎理論研究部・国際シンポジウム「変容する世界のなかでの文化遺産の保存」(2017) 国立民族学博物館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木川 りか (KIGAWA, Rika)
独立行政法人国立文化財機構九州国立博物館・学芸部博物館科学課・課長
研究者番号：40261119

(2) 研究分担者

藤井 義久 (FUJII, Yoshihisa)
京都大学・農学研究科・教授
研究者番号：10173402

犬塚 将英 (INUZUKA, Masahide)
独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・分析科学研究室長
研究者番号：00392548

佐藤 嘉則 (SATO, Yoshinori)
独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・生物科学研究室長
研究者番号：50466645

日高 真吾 (HIDAKA, Shingo)
国立民族学博物館・文化資源研究センター・准教授
研究者番号：40270772

斉藤 明子 (SAITO, Akiko)
千葉県立中央博物館・その他部局等・研究員(移行)
研究者番号：90250141

(3) 研究協力者

原田 正彦 (HARADA, Masahiko)

北原 博幸 (KITAHARA, Hiroyuki)

藤原 裕子 (FUJIWARA, Yuko)

福岡 憲 (FUKUOKA, Tadashi)

小峰 幸夫 (KOMINE, Yukio)

古田嶋 智子 (KOTAJIMA, Tomoko)

トム ストラング (STRANG, Tom)