

# 博士論文概要

## 論文題目

小型試験体実験による木造外壁断熱工法の  
防火性能予測に関する研究

Reduced Scale Experiments for the  
Prediction of the Fire Performance of  
External Wooden Walls with Thermal  
Insulation

申請者

糸毛	治
Osamu	ITOGE

2017年12月

建築物における外壁の断熱化は、エネルギー消費量の削減、室内の温度環境の向上を実現する重要な基盤技術である。外壁の断熱仕様は多様な組合せを持ち、断熱材の位置・種類・厚さそれぞれが、防火性能に複雑な影響を及ぼし合うが、木造外壁の断熱仕様と防火性能を関連付ける明確な指針は未だ整備されていない。そのため、木造外壁断熱工法の開発では試行錯誤的に実大実験による仕様検討を行い、その防火性能評価では仕様毎に試験を行わざるを得ないなど、数多くの実験が必要となっており、新規の壁体開発を停滞させている。この問題は建築物の省エネルギー化、外壁の高断熱化を図っていく上で障害となっている。解決に向けては、類似仕様の試験結果から類推したり、壁体構成や断熱仕様から計算したりすることにより、防火性能の優劣の予測を可能とし、実大試験への依存を減らすことが望ましい。

本研究では、準耐火構造の木造外壁断熱工法を対象に、防火性能評価を合理的に円滑化するため、また必要な防火性能を満足させる壁体設計を容易にするため、小型試験体を用いた実験により木造外壁の断熱仕様が防火性能に及ぼす影響を分析し、木造外壁の断熱仕様と防火性能の関係性を体系的に明らかにしている。そして断熱仕様から防火性能の優劣を予測するための知見を導いている。

第1章（序論）では、本研究の背景となる性能評価・開発上の課題、本研究の目的を述べた上で、木造外壁断熱工法の防火性能に関する既往研究をレビューした。本研究の位置づけとして、準耐火構造の木造外壁を対象に、断熱材の高温性状や燃焼性にに基づき、断熱仕様と防火性能の関係を検討する点を明確にした。

そして、断熱仕様が外壁の防火性能に及ぼす影響について、断熱工法による断熱材の配置や厚さに起因する構成的要因と断熱材自体の熔融や燃焼に起因する材料的要因の2つに分け、防火性能については遮熱性、遮炎性、非損傷性の3要素に分けた上で、木造外壁の断熱仕様が防火性能に及ぼす影響の基本的な傾向を把握した。構成的要因については、高温で熔融・燃焼しないロックウール断熱材（以下、RW）を対象に防火構造仕様の小型試験体による実験を行った。断熱は一般に遮熱性に有利に働くが、断熱材の位置や厚さが壁内柱の損傷に影響して非損傷性に不利に作用する場合があります。断熱化が必ずしも防火性能に有利になるとは言えないことを示した。材料的要因については、発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁の既往試験データを分析し、断熱材の熔融・熱分解が防火性能に支配的な影響を及ぼすことを示した。またグラスウール断熱材（以下、GW）はその高温性状から見て火災加熱1時間の温度範囲で熔融・収縮することが想定される点も踏まえて、第2章以降で検討が必要な課題を示し、本研究の方針を説明した。

第2章では、本研究で対象とする断熱材ごとに、文献調査や熱重量-示差熱同時分析（以下、TG-DTA分析）を行い、高温性状を示す物性値を収集した。また可燃性の発泡プラスチック断熱材については、熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に分けて、50kW/m<sup>2</sup>の加熱のもとで燃焼発熱性試験を行い、燃焼性状を把握した。

測定した断熱材の燃焼性のうち、①着火特性、②単位質量あたりの発熱量、③着火後の燃焼拡大特性の3つに着目して、燃焼性と相関性が高い材料物性を検討した。その結果、熱可塑性樹脂については、①着火特性は酸素指数とよく相関すること、②単位質量あたりの発熱量は、断熱材の種類ごとにほぼ一定で製品間の差がほとんどなく、発熱量を質量から推定できること、③着火後の燃焼拡大特性は、断熱材密度とよく相関することを示した。一方、熱硬化性樹脂は、表面被覆のある製品が多いが、①火災加熱を受けると、すべてごく短時間で着火すること、②表面材がない場合、単位質量あたりの発熱量は、フェノールフォームでは製品間の差が見られず、発熱量を質量から推定できるが、硬質ウレタンフォームでは樹脂の種類や製品仕様によりばらつきが生じること、③着火後の燃焼拡大特性は、断熱材の熱分解の進み方に依存し TG-DTA 分析から得られる 200℃ 過ぎから 350℃ 前後までの熱重量の減少量との間に対応が認められることを明らかにした。これにより、同一種別の発泡プラスチック断熱材の中で製品仕様が異なっても、断熱材の材料物性にに基づき防火性能の優劣を予想できることを示した。

第3章では、断熱工法による断熱材の位置と厚さが防火性能に及ぼす影響を明らかにするため、火災加熱中に溶融・燃焼しない RW を用いた準耐火木造外壁（軸組造、以下、RW 壁体）を対象に、充てん断熱工法、外張断熱工法、付加断熱工法について、小型試験体を用いて 45 分および 60 分の加熱実験を行った。

RW 壁体の遮熱性および遮炎性は、断熱性能が高いほど向上することを確認した。しかし、柱の損傷については、RW を充てん断熱材に用いると RW は柱の加熱側の温度を上昇させて損傷を促進させる一方、柱側面を被覆し損傷を抑制する二面性がある。また RW を外張（付加）断熱材に用いた場合は、屋外加熱時は RW が柱の被覆材となり柱の損傷を抑制するが、屋内加熱時は RW が非加熱側への放熱を妨げて柱の損傷を促進させる。断熱工法ごとの柱の損傷の特徴は、充てん断熱材と外張（付加）断熱材の働きの組合せから説明できることを明らかにした。

次に壁体断面全体を対象に一次元定常熱貫流計算（以下、一次元定常計算）を、熱伝導率等の材料物性の温度依存性を考慮して行い、計算値と実験結果と比較した結果、45 分、60 分の火災加熱終了時の木造外壁内部の各層および試験体裏面温度は、一次元定常計算により実験値をやや高温側で予測できることを示した。

さらに、断熱材の配置等の違いによる遮熱性の序列は、常温時の熱貫流抵抗を比較することで予測できることを明らかにした。また柱の損傷度の優劣は、中空層の有無に応じて加熱終了時の加熱側被覆層の裏面温度より予測でき、中空層がない場合は、一次元定常計算により予測できることを示した。中空層がある場合は、中空層では一次元定常計算値が実験結果より過剰に温度が高くなった。その原因として中空層内での自然対流や柱等への蓄熱の影響の可能性を指摘した。さらに、一次元定常計算の予測精度を高めるには、中空層における熱伝達・熱収支機構の実大実験による把握とその計算モデルの構築が必要であることを指摘した。

第4章では、GWを用いた準耐火木造外壁（軸組造、以下、GW壁体）の充てん断熱工法を対象に、小型試験体による60分屋内側加熱実験を行い、火災加熱中に断熱材が熔融・収縮する外壁の防火性能の特質を考察した。

GW壁体では、火災加熱によりGWの断熱性が低下することを確認し、その傾向はGW密度が小さいほど顕著になった。GW壁体の遮熱性は、GWの密度および断熱性能により決まり、その優劣は、常温時の熱貫流抵抗より予測できることを明らかにした。GW壁体における柱の損傷度の優劣は、加熱終了時の加熱側被覆層裏面温度を、一次元定常計算により比較することで予測できることを示した。

第5章では、各種発泡プラスチック断熱材を用いた準耐火木造外壁（軸組造・充てん断熱工法）を対象に、断熱材の種類ごとに小型試験体による45分加熱実験を行った。加えて、壁体内の発泡プラスチック断熱材の挙動および着火燃焼の有無を目視で確認するとともに、断熱材の樹脂の種類や製品仕様による熔融、熱分解挙動の差異が、遮熱性に及ぼす影響を調べた。これらの結果より、火災加熱中に断熱材が熱分解する外壁の防火性能の特質を考察した。

発泡プラスチック断熱壁体では、火災加熱時、加熱側の内外装材が保持されていれば、壁体内の発泡プラスチック断熱材には着火燃焼が発生しないことを確認した。そして熱可塑性樹脂の場合、壁体内の断熱材は、火災加熱時、早い段階で熔融するため、熱可塑性の発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁は、45分の準耐火性能を評価する上では、近似的に無断熱壁体とみなせることを示した。

次に熱硬化性樹脂の場合、火災加熱中の断熱材の熱分解により生じる壁体の断熱性の低下が、木造外壁の防火性能に支配的な影響を及ぼすことを示し、この断熱材の熱分解挙動は、窒素雰囲気下のTG-DTA分析により把握できることを明らかにした。そして熱硬化性の発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁では、45分の準耐火性能を評価するにあたり、断熱材の熱分解による壁体の断熱性の低下が小さいほど、遮熱性が高くなる一方、柱の損傷が進む傾向を明らかにした。そして、この柱の損傷度は、加熱終了時の加熱側被覆層裏面温度を、一次元定常計算により比較することで予測できることを示した。

第6章では、各章の成果をまとめて、準耐火構造の木造断熱外壁における防火性能の優劣の予測法を示した。遮熱性は計算より予測でき、熱硬化性の発泡プラスチック断熱材を除き、常温時の熱貫流抵抗から予測できる。また柱の損傷度は、断熱仕様を問わず、加熱終了時の加熱側被覆層裏面温度から予測できることを示した。今後の課題として、中空層における熱収支の解明の必要性およびグラスウール断熱材や熱硬化性の発泡プラスチック断熱材における熔融や熱分解を加味した熱貫流抵抗の計算法の必要性を指摘した。本研究で明らかにした木造外壁の断熱仕様と防火性能に関する知見により、防火性能の把握にあたっての実大試験への依存を軽減でき、技術開発や性能評価がより円滑に進められるようになることを期待したい。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 糸毛 治

(2017年 12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	(○印は本博士論文の中核を担う主業績を表す。)
論文	<ul style="list-style-type: none"> <li>○小型試験体による木造断熱壁体の防火性能予測に関する研究 ロックウール断熱材を用いた各種断熱工法の準耐火性能の予測可能性の検討, 日本建築学会環境系論文集, No.82, Vol.733, pp.183-192, 2017年3月, 糸毛治, 長谷見雄二, 鈴木大隆</li> <li>○発泡プラスチック断熱材の防火性評価のための基礎的研究 燃焼性状と相関性の高い材料物性の検討, 日本建築学会環境系論文集, No.79, Vol.705, pp.909-918, 2014年11月, 糸毛治, 小浦孝次, 永井敏彦, 長谷見雄二, 桂修, 鈴木大隆</li> <li>○ロックウール断熱材を用いた木造断熱壁体の防耐火性能に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.77, Vol.676, 2012年6月, pp.433-441, 糸毛治, 長谷見雄二, 鈴木大隆</li> <li>・発泡プラスチック断熱材の燃焼性状に関する基礎的研究 コーンカロリーメータ試験による燃焼性状と材料組成に関する考察, 日本建築学会環境系論文集, No.75, Vol.647, 2010年1月, pp1-8, 糸毛治, 入江雄司, 鈴木大隆, 小浦孝次, 安藤達夫, 堤拓哉, 南慎一</li> </ul>
講演	<ul style="list-style-type: none"> <li>・硬質ウレタンフォームの燃焼性評価に関する研究 イソシアネート指数に基づく検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.195-196, 2015.9, 井崎淳一, 糸毛治</li> <li>・小型試験体による木造断熱壁体の非損傷性の検討 その4 ロックウール断熱材を対象に加熱時間ごとの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.269-270, 2014.9, 糸毛治, 鈴木大隆, 長谷見雄二</li> <li>・発泡プラスチック断熱材の燃焼性状と相関性の高い因子の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.9-10, 2013.8, 小浦孝次, 糸毛治, 永井敏彦, 桂修, 鈴木大隆</li> <li>・小型試験体による木造断熱壁体の非損傷性の検討 その1 ロックウール断熱材を対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.147-148, 2013.8, 糸毛治, 鈴木大隆, 長谷見雄二</li> <li>・小型試験体による木造断熱壁体の非損傷性の検討 その2 熱可塑性樹脂を対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.149-150, 2013.8, 江口孝明, 糸毛治, 小浦孝次, 永井敏彦, 宮内亨, 千代田健, 桂修, 鈴木大隆</li> <li>・小型試験体による木造断熱壁体の非損傷性の検討 その3 熱硬化性樹脂を対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.151-152, 2013.8, 永井敏彦, 糸毛治, 小浦孝次, 江口孝明, 宮内亨, 千代田健, 桂修, 鈴木大隆</li> <li>・木造壁体内における発泡プラスチック断熱材の燃焼性状の把握 その1 研究概要と押出法ポリスチレンフォームを用いた可視化実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.137-138, 2011.7, 江口孝明, 糸毛治, 小浦孝次, 永井敏彦, 青木学, 大塚弘樹, 鈴木大隆</li> <li>・木造壁体内における発泡プラスチック断熱材の燃焼性状の把握 その2 熱可塑性樹脂を対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.139-140, 2011.7, 大塚弘樹, 糸毛治, 小浦孝次, 江口孝明, 永井敏彦, 青木学, 鈴木大隆</li> <li>・木造壁体内における発泡プラスチック断熱材の燃焼性状の把握 その3 熱硬化性樹脂を対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.141-142, 2011.7, 永井敏彦, 糸毛治, 小浦孝次, 江口孝明, 青木学, 大塚弘樹, 鈴木大隆</li> </ul>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発泡プラスチック系断熱材を用いた木造外張断熱壁体の防火性能に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.307-308，2008.7，<u>糸毛治</u>，入江雄司，小浦孝次，鈴木大隆</li> <li>・発泡プラスチック系断熱材の燃焼特性に関する実験 その3 ウレタンフォームの材料組成による検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.157-158，2006.7，<u>糸毛治</u>，大久保正一，入江雄司，井崎淳一，南慎一</li> <li>・発泡プラスチック系断熱材の燃焼特性に関する実験 ポリスチレンフォーム、フェノールフォーム、ポリエチレンフォームについて，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.43-44，2005.7，<u>糸毛治</u>，南慎一，入江雄司，堤拓哉</li> </ul>
その他 （博士論文に直接関係ない講演）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発泡プラスチック断熱材を用いた木造断熱壁体の準耐火性能に関する研究 その1 外張断熱工法における屋外加熱に対する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.297-298，2017.7，<u>糸毛治</u>，長谷見雄二，鈴木大隆，小浦孝次，下條芳範，永井敏彦，横家尚</li> <li>・発泡プラスチック断熱材を用いた木造断熱壁体の準耐火性能に関する研究 その2 外張断熱工法における屋内加熱に対する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.299-300，2017.7，下條芳範，<u>糸毛治</u>，長谷見雄二，鈴木大隆，小浦孝次，永井敏彦，横家尚</li> <li>・グラスウール断熱材を用いた木造断熱壁体の防火性能に関する研究 充てん断熱工法における考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.21-22，2016.8，<u>糸毛治</u>，長谷見雄二，鈴木大隆，布井洋二，鶴澤孝夫，井上幹生，平野廉香</li> <li>・ロックウール断熱材を用いた木造断熱壁体の防火性能に関する研究 その1 試験概要と充てん断熱工法における考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.111-112，2015.9，<u>糸毛治</u>，長谷見雄二，鈴木大隆，宮崎孝司，小竹和広，高橋淳一</li> <li>・ロックウール断熱材を用いた木造断熱壁体の防火性能に関する研究 その2 外張断熱工法および付加断熱工法における考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.113-114，2015.9，高橋淳一，<u>糸毛治</u>，長谷見雄二，鈴木大隆，宮崎孝司，小竹和広</li> <li>・木質パネル工法の面材が石膏ボード被覆に及ぼす影響について（その2）面材変形の測定，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.271-272，2014.9，杉田敏之，長谷見雄二，<u>糸毛治</u>，玉川祐司</li> <li>・木質パネル工法の面材が石膏ボード被覆に及ぼす影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.157-158，2013.8，杉田敏之，長谷見雄二，<u>糸毛治</u>，玉川祐司，吉雄敏斗</li> <li>・木造壁体内における発泡プラスチック断熱材の燃焼性状の把握 その4 熱可塑性樹脂を対象とした熱変形温度による考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.349-350，2012.9，江口孝明，<u>糸毛治</u>，小浦孝次，永井敏彦，宮内亨，大塚弘樹，桂修，鈴木大隆</li> <li>・木造壁体内における発泡プラスチック断熱材の燃焼性状の把握 その5 熱硬化性樹脂の表面材を対象とした検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.351-352，2012.9，<u>糸毛治</u>，小浦孝次，江口孝明，永井敏彦，宮内亨，大塚弘樹，桂修，鈴木大隆</li> </ul>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・防火材料等の防火性能に関する試験研究 その1 コーンカロリメータ試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.61-62, 2011.7, 吉田正志, 糸毛治, 成瀬友宏, 五頭辰紀, 菅原進一</li> <li>・防火材料等の防火性能評価に関する試験研究 その5 試験法の相関と防火性能に関する情報提供に関して, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.69-70, 2011.7, 成瀬友宏, 五頭辰紀, 吉田正志, 糸毛治, 西本俊郎, 田坂茂樹, 菅原進一</li> <li>・住宅の防耐火性能の課題に関する実験 その1 検討概要および鋼板のファイアーストップ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.143-144, 2011.7, 玉川祐司, 長谷見雄二, 安井昇, 増田秀昭, 上川大輔, 山田誠, 遊佐秀逸, 金城仁, 糸毛治, 関真理子, 泉潤一, 杉田敏之, 吉雄敏斗</li> <li>・住宅の防耐火性能の課題に関する実験 その2 枠組壁工法の小屋裏空間に面する外壁(妻壁)の防火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.145-146, 2011.7, 金城仁, 長谷見雄二, 安井昇, 玉川祐司, 増田秀昭, 上川大輔, 山田誠, 遊佐秀逸, 糸毛治, 関真理子, 泉潤一, 杉田敏之, 吉雄敏斗</li> <li>・住宅の防耐火性能の課題に関する実験 その3 軸組造の小屋裏の天井懐に面する外壁の防火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.147-148, 2011.7, 糸毛治, 長谷見雄二, 安井昇, 玉川祐司, 増田秀昭, 上川大輔, 山田誠, 遊佐秀逸, 金城仁, 関真理子, 泉潤一, 杉田敏之, 吉雄敏斗</li> <li>・住宅の防耐火性能の課題に関する実験 その4 外壁の屋内側被覆に合板を用いた場合の防火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.149-150, 2011.7, 杉田敏之, 長谷見雄二, 安井昇, 玉川祐司, 増田秀昭, 上川大輔, 山田誠, 遊佐秀逸, 金城仁, 糸毛治, 関真理子, 泉潤一, 吉雄敏斗</li> <li>・酸素指数を用いた発泡プラスチック断熱材の燃焼特性把握に関する基礎的研究 その1 熱可塑性樹脂を対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.167-168, 2010.7, 小浦孝次, 糸毛治, 青木学, 松江賢治, 永井敏彦, 奥谷達也, 鈴木大隆</li> <li>・酸素指数を用いた発泡プラスチック断熱材の燃焼特性把握に関する基礎的研究 その2 熱硬化性樹脂を対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.169-170, 2010.7, 糸毛治, 小浦孝次, 青木学, 松江賢治, 永井敏彦, 奥谷達也, 鈴木大隆</li> <li>・ロックウール断熱材を用いた木造外張断熱壁体の遮熱性能に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.277-278, 2009.7, 糸毛治, 鈴木大隆</li> <li>・TG/DTA 解析を用いた発泡プラスチック断熱材の燃焼特性把握に関する基礎的研究 ポリスチレンフォームを対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.349-350, 2009.7, 小浦孝次, 糸毛治, 青木学, 松江賢治, 永井敏彦, 奥谷達也, 鈴木大隆</li> <li>・建築用内外装材料の防火性能評価に関する研究 その1 研究概要とコーンカロリメータ試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.1-2, 2007.7, 糸毛治, 入江雄司, 田坂茂樹, 成瀬友宏, 五頭辰紀, 菅原進一</li> <li>・発泡プラスチック系断熱材の燃焼特性に関する実験 その4 発熱性と発煙性の関係について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.15-16, 2007.7, 入江雄司, 糸毛治</li> <li>・発泡プラスチック系断熱材の燃焼特性に関する実験 その2 ウレタンフォームの被覆条件による検討-両面鋼板パネルの場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.155-156, 2006.7, 入江雄司, 大久保正一, 糸毛治, 井崎淳一, 南慎一</li> </ul>
	その他 20件