

博士論文審査報告書

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

2019年7月

断熱化された木造外壁では、断熱材の設置位置・種類・厚さ等が多様であり、それぞれの要素が防火性能に影響を及ぼし複雑に重なり合う。しかし断熱工法・断熱材が外壁の防火性能に及ぼす影響を把握する工学的体系は未整備である。この点は、防耐火性能を要する木造外壁の開発にあたり、実験の試行錯誤的な繰り返しや認定のための性能評価の煩雑化を招く背景となっている。そして結果的に、新規壁体開発を停滞させ、建築物の省エネルギー対策が推進される中、外壁の断熱化を普及させる上で障害となっている。

この課題を解決するためには、類似仕様の実験からの類推や壁体構成に基づく伝熱計算等により、断熱仕様から防火性能の優劣を予測できるようにし、実大試験への依存を軽減させることが望ましい。

本研究は、このような背景のもと、準耐火構造の木造外壁断熱工法を想定して、壁体開発の負担軽減、性能評価の合理的な円滑化、並びに実大試験への依存軽減を目指して、小型試験体を用いた実験的検討を行なっている。その結果、木造外壁の断熱仕様と防火性能の関係を系統的に把握して、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たものである。

本論文は6章より構成され、章ごとの審査の要旨を以下に述べる。

第1章では、本研究の背景および目的を述べた上で、木造外壁断熱工法の防火性能に関する既往研究を整理している。そして本研究は、木造準耐火構造外壁を対象に断熱材の高温性状や燃焼性を踏まえて、木造外壁の断熱仕様と防火性能の関係を体系的に検討する点に新規性があることを示している。

次に、断熱仕様が外壁の防火性能に及ぼす影響を、断熱工法におけ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等、材料的要因とに分け、この2つの要因に着目して、外壁に必要な防火性能、即ち遮熱性、遮炎性並びに非損傷性への影響の基本的な傾向を検討している。

構成的要因については、ロックウール断熱材を用いた防火構造仕様の木造外壁の模型実験により、非損傷性に大きく影響する壁内柱の損傷は加熱面に対する柱と断熱材の位置関係に依存するため、断熱化により防火性能が一概に向上するとは言えないことを示している。ま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の分析により、断熱材の熔融や熱分解は防火性能に支配的な影響を与えるため、断熱材の高温性状や燃焼性を把握した上で考察を進めていく必要性を確認している。最後にこれらをまとめて、第2章以降の研究の方針を示している。

第2章では、断熱材の基本情報として、各種断熱材の高温性状を示す物性値を自らの測定に加えて文献調査でも収集し、発泡プラスチック断熱材については、熱可塑性と熱硬化性に分けて、燃焼性を整理している。発泡プラスチック断熱材の燃焼性については、①着火特性、②単位質量あたり発熱量、③着火後の燃焼拡大特性の3つに着目し、断熱材の基本的物性との間の相関

性を分析している。その結果、③着火後の燃焼拡大特性は、熱可塑性発泡プラスチック断熱材では断熱材密度とよく相関し、熱硬化性発泡プラスチック断熱材ではTG-DTA分析において樹脂分解が始まる約200℃～350℃前後の質量減少量とよく相関することを明らかにした。これにより、発泡プラスチック断熱材の製品の違いによる断熱外壁の防火性能の優劣を断熱材の基本的物性から予想できるようになった。この知見は、大臣認定を取得した断熱外壁の防火性能を継続的に保証する品質管理にも利用でき、貴重な成果といえる。

第3章では、火災加熱終了まで断熱材が溶融・燃焼しない最も単純な場合として、ロックウール断熱材を用いた準耐火構造相当の仕様の木造外壁を対象に、小型試験体を用いた実験により、断熱仕様と防火性能との関係を明らかにし、防火性能の優劣の予測を可能とする次の知見を誘導している。

即ち、防火性能のうち、遮熱性・遮炎性は、断熱性能が高いほど向上する。また、柱の損傷度については、充てん断熱材は、柱の加熱側の損傷を促進させるが柱側面の損傷は抑制するように働く。準耐火構造外壁では屋外側、屋内側の両方の加熱を想定するが、外張断熱材は、屋外加熱では柱を被覆し有利に働く一方、屋内加熱では非加熱側への放熱を抑えて不利に作用する。そして、断熱工法の構成は、充てん断熱と外張断熱の単体または組み合わせとなるが、断熱工法ごとの柱の損傷度の特徴も、この特徴の組み合わせで説明できることを実証している。木造外壁の断熱仕様、層構成が防火性能に及ぼす影響への見通しが得られるようになり、意義ある成果である。

さらに準耐火構造の加熱時間に相当する45分、60分後の外壁内部各層の温度は、定常状態が成立すると仮定した一次元熱貫流計算により、やや高温側で予測できることを確認している。そして、遮熱性は常温時の熱貫流抵抗から、また柱の損傷度は加熱終了時の加熱側被覆層の裏面温度計算値から、優劣を予測できることを示している。この中で、中空層では計算値が過剰に高温となることを見出し、その原因として中空層内の自然対流と柱による熱吸収の影響の可能性を指摘し、その解明には実大実験が必要と指摘している。以上より、加熱終了まで断熱材が溶融・燃焼しない断熱工法については、材料物性に基づく防火性能予測が基本的に可能となり、意義ある成果といえる。

第4章では、火災加熱終了までに断熱材が溶融・収縮する場合として、グラスウール断熱材を用いた充てん断熱工法について、防火性能の予測可能性が検討されている。グラスウール断熱材の断熱性は火災加熱により低下するが、ロックウール断熱材と同様に、壁体の遮熱性は常温時の熱貫流抵抗から、また柱の損傷度は加熱終了時の加熱側被覆層の裏面温度計算値から、優劣を予測できることを示している。これにより、グラスウール断熱材の場合も防火性能の予測を可能とする見通しが明らかになり、貴重な成果といえる。

第5章では、火災加熱終了までに断熱材が熔融・熱分解する場合として、各種発泡プラスチック断熱材を用いた充てん断熱工法について、発泡プラスチック断熱材の種別ごとに防火性能予測に資する知見が誘導されている。

まず、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、断熱材は壁体内では着火燃焼しないことを確認している。そして、熱可塑性の発泡プラスチック断熱材は、加熱開始後の早い段階で熔融するため、45分後には遮熱性および柱の損傷は、無断熱壁体とほぼ同等となることを確認している。また熱硬化性の発泡プラスチック断熱材では、熱分解による壁体の断熱性の低下が防火性能に支配的な影響を及ぼすことを確認し、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ている。更に、柱の損傷度の優劣は、加熱終了時の加熱側被覆層の裏面温度計算値から予測できることを明らかにしている。これにより、発泡プラスチック断熱材を用いた断熱工法も材料物性に基づく防火性能の予測が可能となり、貴重な成果といえる。

第6章では、各章の結果に基づき、準耐火構造断熱外壁の防火性能の優劣の予測法をとりまとめている。即ち、遮熱性は計算により予測でき、熱硬化性の発泡プラスチック断熱材を除けば、常温時の熱貫流抵抗から予測でき、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の裏面温度計算値から予測できるとしている。また、本研究で新たに明らかになった課題として、中空層の熱収支の解明の必要性、高温で熔融・熱分解が生じる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の熱貫流抵抗の計算法の誘導の必要性を指摘している。

以上より、本論文は、木造外壁の断熱仕様と防火性能の関係性を系統的に明らかにしている。断熱仕様から防火性能の優劣を予測する枠組みを提供するものであり、本論文は建築防災学の発展に大きく寄与するものであり、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2019年7月

審査員

主査 早稲田大学理工学術院 教授

工学博士（早稲田大学） 長谷見雄二

長谷見雄二

早稲田大学理工学術院 教授

工学博士（早稲田大学） 田辺 新一

田辺新一

早稲田大学理工学術院 教授

博士（工学）早稲田大学 高口 洋人

高口洋人