

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

2019年7月

糸毛 治

Osamu ITOGE

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

2019年7月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

糸毛 治

Osamu ITOGE

# 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

## 目 次

第 1 章 木造外壁断熱工法の防火性能上の課題	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往研究と本研究の位置づけ	4
1.2.1 ロックウール断熱材	6
1.2.2 グラスウール断熱材	6
1.2.3 発泡プラスチック断熱材	7
1.2.4 まとめ	8
1.3 断熱工法が外壁の防火性能に及ぼす影響の基本的傾向の把握	
— ロックウール断熱材を用いた小型試験体による基礎的検討	10
1.3.1 検討の目的	10
1.3.2 実験方法	11
1.3.3 充てん断熱工法の試験結果および考察	17
1.3.4 外張断熱工法・付加断熱工法の試験結果および考察	24
1.3.5 断熱工法が外壁の防火性能に及ぼす影響の基本的傾向に関するまとめ	33
1.4 溶融・熱分解する断熱材が外壁の防火性能に及ぼす影響の基本的傾向の把握	
— 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に基づく検討	35
1.4.1 検討の目的	35
1.4.2 検討方法	35
1.4.3 発泡プラスチック断熱材の試験データの考察	37
1.4.4 溶融・熱分解する断熱材が外壁の防火性能に及ぼす影響の基本的傾向 に関するまとめ	40
1.5 本章のまとめ：課題の整理・検討方針と本論文の構成	41
第 2 章 断熱材の高温性状・燃焼性状	48
2.1 本章の目的	48

2.2	断熱材の高温性状に関する基礎的把握	49
2.2.1	ロックウール断熱材・グラスウール断熱材	49
2.2.2	発泡プラスチック断熱材	52
2.3	発泡プラスチック断熱材の燃焼性に関する基礎的把握	57
2.3.1	検討の目的	57
2.3.2	試験方法	57
2.3.3	燃焼性状	59
2.3.4	原料組成に基づく PUF の燃焼性状に関する考察	64
2.4	発泡プラスチック断熱材の燃焼性と材料物性の関係	67
2.4.1	検討の目的と内容	67
2.4.2	試験体	70
2.4.3	試験項目と概要	74
2.4.4	燃焼性と相関性の高い材料物性の検討	77
2.4.5	PUF の燃焼性と一次ピーク時発熱速度、一次質量減少量との関係	95
2.4.5	まとめ	100
2.5	本章のまとめ	103
2.5.1	断熱材の高温性状	103
2.5.2	発泡プラスチック断熱材の燃焼性状	104
2.5.3	発泡プラスチック断熱材の燃焼性と材料物性との関係	104
第3章	溶融・燃焼しない断熱材における断熱工法の防火性能予測に関する研究	
	—ロックウール断熱材の場合	109
3.1	本章の目的	109
3.2	実験概要および実験結果	110
3.2.1	試験体概要	110
3.2.2	実験方法	113
3.2.3	測定項目	113
3.2.4	実験結果（45分加熱と60分加熱）	116
3.3	試験体内部温度分布とその実用的予測可能性に関する考察	122
3.3.1	一次元定常熱伝導計算による壁体各層の加熱終了時温度の算出	122

3.3.2	内部温度の一次元定常熱伝導計算との比較	123
3.4	遮熱性に関する考察	125
3.4.1	試験体の遮熱性の評価概要	125
3.4.2	遮熱性と熱貫流抵抗との関係性	125
3.4.3	屋外加熱と屋内加熱との比較	127
3.4.4	中空層が遮熱性に及ぼす影響	128
3.5	柱の損傷度に関する考察	129
3.5.1	加熱側柱角部の炭化と柱の損傷度	129
3.5.2	柱の燃焼が始まる時間	131
3.5.3	加熱方向（屋外加熱と屋内加熱）と柱の損傷度	132
3.5.4	断熱工法と柱の損傷度	133
3.5.5	柱の損傷度の予測可能性	136
3.6	本章のまとめ	139
3.6.1	壁体内の温度推移と温度分布	139
3.6.2	遮熱性	139
3.6.3	柱の損傷度	140
<b>第4章</b>	<b>火災加熱により溶融する断熱材の防火性能予測に関する研究</b>	
	<b>ーグラスウール断熱材の場合</b>	<b>143</b>
4.1	本章の目的	143
4.2	断熱材の選定	144
4.3	小型試験体による加熱実験	144
4.3.1	試験体概要	144
4.3.2	実験方法	146
4.4	グラスウール断熱材(GW)を用いた断熱工法外壁の防火性能	147
4.4.1	壁体内の温度推移と断熱材の挙動	147
4.4.2	遮熱性に関する考察	149
4.4.3	柱の損傷度（非損傷性）に関する考察	151
4.5	まとめ	154
4.5.1	壁体内の温度推移と温度分布	154

4.5.2	遮熱性	154
4.5.3	柱の損傷度	154
<b>第5章 火災加熱により熱分解する断熱材の防火性能予測に関する研究</b>		
	—発泡プラスチック断熱材の場合	156
5.1	本章の目的	156
5.2	断熱材の選定	157
5.3	小型試験体による加熱実験	158
5.3.1	試験体	158
5.3.2	実験方法	159
5.3.3	実験結果	161
5.4	発泡プラスチック断熱材を用いた断熱工法外壁の防火性能	165
5.4.1	壁体内の温度推移と断熱材の挙動	165
5.4.2	遮熱性に関する考察	169
5.4.3	柱の損傷度に関する考察	173
5.5	可視化試験体による実験	180
5.5.1	検討の目的	180
5.5.2	可視化試験体	180
5.5.3	実験方法	181
5.5.4	実験結果と考察	182
5.6	発泡プラスチック断熱材の製品の仕様と防火性能との関係	185
5.6.1	検討の目的	185
5.6.2	断熱材の選定と熱硬化性樹脂の熱分解挙動の把握	185
5.6.3	小型実験の概要	189
5.6.4	実験結果と考察	191
5.7	まとめ	196
5.7.1	壁体内の温度推移と温度分布	196
5.7.2	遮熱性	197
5.7.3	柱の損傷度	197

第6章 総括および今後の課題	199
6.1 各章のまとめ	199
6.2 今後の課題と展望	205

## 第1章 木造外壁断熱工法の防火性能上の課題

### 1.1 研究の背景と目的

住宅・建築物分野（家庭部門および業務その他部門）のエネルギー消費量は、全エネルギー消費量の3分の1を占め、依然として増加傾向<sup>1)</sup>にある。一方、建築物における省エネルギー対策は、地球環境問題へ対応するため、さらなる強化が求められている。国土交通省は、新築住宅・建築物に対し、省エネルギー基準に適合させるための施策を推進している<sup>2)</sup>。このような背景のもと、建築外皮の断熱化は、建築物のエネルギー消費量を削減し、室内の温度環境を向上させる重要な基盤技術といえる。

木造外壁の一般的な断熱工法を断熱材の配置から分類すると、軸間に断熱材を充てんする充てん断熱工法、木造躯体の屋外側に断熱材を張る外張断熱工法、これらを組み合わせた付加断熱工法の3つ<sup>3)</sup>がある。さらに断熱材には、実用的なものだけでも、無機材料であるロックウール断熱材やグラスウール断熱材、有機材料である各種発泡プラスチック断熱材（押出法ポリスチレンフォーム、ビーズ法ポリスチレンフォーム、ポリエチレンフォーム、硬質ウレタンフォーム、フェノールフォーム）などがある<sup>4)</sup>。木造外壁の壁体仕様はこれら断熱材と断熱工法の組合せにより多種多様となる。

一方、建築基準法では、地域の防火規制、規模、用途によっては、住宅・建築物の構造部材に、耐火構造や準耐火構造、防火構造など所定の防火性能を備えることを要求している。鉛直荷重を支える木造外壁（耐力壁）には、火災加熱に対し、防火性能として遮炎性、遮熱性、非損傷性の3つを、所定の時間、保持し続けることが求められる<sup>5)</sup>。

また木造外壁では、不燃性断熱材を外張りした場合、屋外側からの火災加熱を想定した加熱条件（以下、屋外加熱と称す。）では、断熱材が柱を被覆するため非損傷性は向上すると考えられてきた。一方、屋内での火災を想定した加熱条件（以下、屋内加熱と称す。）では、断熱材が柱の背後に位置し柱の温度上昇を促進するため、非損傷性は低下する可能性がある。

このように木造外壁では、多様な断熱仕様（断熱材・断熱工法）の組合せを持ち、壁体内の断熱材の設置位置・種類・厚さのそれぞれが防火性能に影響を及ぼし、その影響は複雑に重なり合う。

準耐火構造の木造外壁（耐力壁）では、屋外加熱、屋内加熱それぞれに対し、所定



の防火性能（遮炎性、遮熱性、非損傷性）を満足することが求められる。そのため、準耐火構造外壁では、防火性能の評価要素全体の調整はより困難となり、断熱仕様と防火性能の関係は単純に記述できない。さらに、屋外加熱だけを想定する防火構造であっても、後述するように、断熱仕様と非損傷性との関係は、これまで素朴に予想されてきたほど単純ではない。このため、木造外壁の断熱化と防火性能を関連付ける明確な指針は、現在、整備されるに至っていない。

以上の事情から、木造外壁の防耐火性能の評価では、断熱仕様の中から最も防火上不利な壁体構成を合理的に選定する包括的な評価ができず、断熱仕様ごとに個別に評価せざるを得ない状況にある。また壁体開発を行う企業等も、断熱仕様ごとに性能確認を繰り返し、試行錯誤しながら壁体開発を進めざるを得ない。木造外壁の新規開発は、防耐火性能の認定取得まで多数の実験や試験を要し、さらに断熱仕様の変更の度に新たな防耐火認定が必要となるため、開発にかかる認定数、時間、費用は膨大となっている。この問題は、新規の壁体開発を停滞させ、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、大きな障害となっている。

木造外壁断熱工法について、防火性能評価を合理的に行ったり、必要な防火性能を適確に満足する設計を容易にしたりするためには、壁体に用いる断熱材や断熱工法が防火性能へ及ぼす影響を明らかにし、木造外壁の断熱化に対する防火性能の考え方を体系化する必要がある。

そして、断熱化された木造外壁の防火性能を全く実験に頼らずに完全に予測することは困難であるとしても、少数の仕様に関する試験の結果から、断熱材や断熱工法、細部の条件が異なる他の仕様の防火性能を類推できたり、壁体の構成や断熱仕様から計算により防火性能の優劣の見通しが予め得られたりするなど、断熱化された木造外壁の設計内容から、その防火性能の優劣を予測できるようになることが望ましい。

本研究では、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の予測が可能かを検討し、その開発や性能評価において実大試験への依存を軽減させるための知見を導くことを目的とする。

なお、本研究では、木造建築物の大部分を占める準耐火建築物以下の防火性能を想定して、木造外壁の防火性能の主たる検討対象は、屋外側・屋内側の両側からの火災加熱に対する防火性能の確保が必要な準耐火構造とし、小型試験体を用いた実験（以

下、小型実験)により多くの検討を進めていく。

本研究で対象とする木造外壁(軸組造を想定する。)では、建築基準法上、外壁の防火性能を構成する遮炎性、遮熱性、非損傷性のうち、非損傷性は最終的には柱の座屈に支配されるため、柱の全長を再現できない小型実験では評価できない。しかし外壁柱の重要な座屈要因である柱の断面性能の低下については、小型実験でも加熱条件を再現できれば把握できる可能性があり、非損傷性と外壁の設計内容の関係の見通しは得られると考えられる。

また柱の変形が小さく遮炎性、遮熱性が外壁の防火性能の主要因となる場合は、加熱に伴う壁の力学的変形は大きくなることが想定される。この場合、遮炎性、遮熱性は、壁体内の伝熱と壁を構成する面材の温度上昇による亀裂・熔融等に支配されると考えられ、内外装面材の目地等、断熱方向の伝熱を不均一化する要因の影響を除けば、断面を再現する小型試験体での把握が可能である。

## 1.2 既往研究と本研究の位置づけ

日本で木造外壁の防火性能に関する研究開発が活発化したのは、概ね、1990年代以降と考えられる。その最も重要な背景は、1992年（平成4年）の建築基準法改正（施行は1993年（平成5年））により、「準耐火建築物」および「準耐火構造」の概念が導入され、建築物の主要構造部を木造とすることができる用途、規模、階数の範囲が拡大されたことである。さらに、1950年（昭和25年）の建築基準法制定時に導入されていた防火構造についても、1998年（平成10年）の法改正により、評価対象が屋外側の被覆層だけではなく壁体全体となったうえ、認定のための試験に使われる加熱条件が、日本の伝統的木造家屋の火災性状に対応する JIS A 1301「建築物の木造部分の防火試験方法」<sup>6)</sup>から、耐火構造の性能評価試験に用いられてきた JIS A 1304「建築構造部分の耐火試験方法」<sup>7)</sup>に改正された。この改正により準耐火構造と防火構造が共通の尺度のもとに評価できるようになり、それ以前よりも部材開発を見通し良く行えるようになった。これらを通じて、木造外壁仕様が多様化したことが、外壁の防火性能の研究開発を推進させる要因となった。

準耐火構造は、柱・壁・床等の荷重支持部材の基本的な性能を火災加熱から一定時間守ることにより、火災拡大を抑制し、建物の避難安全性の向上、市街地火災発生の抑制等を図ろうとするものである。1992年（平成4年）の建築基準法改正以後、木造の準耐火構造は、住宅、共同住宅、事務所、店舗等に多数、活用されてきた。

準耐火構造の導入や防火構造の試験法の改正にあたっては、その性能を満足するオープン工法の仕様を告示により例示する必要があった。そのため、法改正前後に、建設省（現・国土交通省）や農林水産省の主導により、外壁についても、被覆材や構成を変えて多数の耐火加熱実験が行われた<sup>8),9),10),11),12),13),14),15)</sup>など。

その後も、外壁に使われる材料や工法の開発や防火性能の評価<sup>16),17)</sup>が進められており、建築基準法では、告示に例示された仕様以外の外壁を準耐火構造外壁として用いる場合について、大臣認定の取得を定めている。大臣認定にあたっては、実大規模の試験体を用いた加熱試験を前提とする性能評価が行われている。

このように、準耐火構造の外壁の防火性能については、法整備とその後の法運用に関連して防火性能を確認するための実験が多数行われてきた。一方、その間、木造建築の断熱工法についても、民生用エネルギー削減の必要から技術開発が進められてきた。しかし、断熱材の種類や厚さ、外壁内での配置等、断熱工法の設計条件と防火性

能の関係については、これらの経過をもってしても、工学的な知見が蓄積しているとは言いがたい。たとえば、準耐火構造の導入や防火構造の試験法の改正に伴って行われた木造外壁の耐火加熱試験では、断熱材は設けないか、厚さ 50 mm 程度の不燃材料による断熱を施した仕様に限っており<sup>10),13),17),18)</sup>、断熱材の種類や厚さ、配置等が防火性能に及ぼす影響は把握できていないままであった。大臣認定取得のための性能評価でも、不燃性のロックウール断熱材やグラスウール断熱材を用いた木造外壁については、無断熱の木造外壁を試験体として耐火加熱試験を行い、性能が確認できれば、断熱材の使用を認められてきた。このため、断熱化された木造外壁では、実施される耐火加熱試験の事例自体が少ない。

また、可燃性の発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁については、大臣認定取得に向けた性能評価を行うにあたり、断熱仕様ごとに個別に耐火加熱試験を実施している。しかし、この性能評価試験時の温度計測は、試験体裏面および内部数点を対象とする程度であり、断熱仕様と壁体内の温度分布や温度推移との関係性を考察できる試験データは、ほとんど得られていない。

このように、これまで、木造外壁の防耐火構造の性能評価は多数行われてきたが、その際の耐火加熱試験の試験データでは、断熱仕様ごとの防火性能への影響について考察することはできず、体系的な理解は進んでいない。

断熱仕様が外壁の防火性能に及ぼす影響には、断熱工法による断熱材の位置や厚さに起因する構造的な要因と、断熱材自体の熔融や熱分解、燃焼に起因する材料的な要因があり、これらを分けて把握する必要がある。そこで、本研究では、まず、高温で熔融・燃焼等が生じることがないロックウール断熱材を用いて、断熱工法の防火性能への影響の構造的な要因を把握することとした。

次に、グラスウール断熱材や発泡プラスチック断熱材は、標準耐火加熱 1 時間の温度範囲では、壁体内で熔融や収縮、燃焼等を起こして、壁体内の温度分布に変化をもたらす、防火性能にロックウール断熱材とは異なる影響を及ぼす可能性がある。従って、本研究では、グラスウール断熱材や発泡プラスチック断熱材は断熱材が熔融・燃焼し得る場合と位置づけ、ロックウール断熱材で同一の壁体構成とした場合と比較しながら、防火性能への影響の材料的な要因を把握することとした。

以下、本節では、本研究の位置づけを明確にするため、断熱材の種類ごとに、断熱

材による防火性能に関する既往研究についてまとめる。また発泡プラスチック断熱材は可燃性を有するため、その燃焼性に関する既往研究についても、あわせてまとめておく。

### 1.2.1 ロックウール断熱材

ロックウール断熱材の防火性能に関する既往研究を見ると、ロックウール断熱材は、同じく建築基準法上の不燃性を有するグラスウール断熱材と合わせて取り扱われることが多い。その例として、ロックウール断熱材やグラスウール断熱材を耐火被覆材として鉄骨部材に用いて、部材の耐火性能を確かめた研究報告<sup>19)</sup>がある。本研究で研究対象とする木造外壁に関しては、木質耐火構造外壁の開発を目的に行われた研究の実験報告<sup>20)</sup>はあるが、住宅等、低層建築物でより一般的に活用されている準耐火構造等の木造外壁の防火性能について検討した報告はない。木造外壁の場合、耐火構造では荷重を支持する柱への炭化、着火がないように耐火被覆材が厚く施工されるため、断熱材自体が耐火性能に及ぼす影響は小さいと考えられる。しかし準耐火構造以下では、火災加熱中、柱等の木材に引火し得ることを前提としており、断熱仕様が防火性能に及ぼす影響は大きいと考えられる。

### 1.2.2 グラスウール断熱材

グラスウール断熱材の防火性能に関する既往研究には、先述の通り、グラスウール断熱材を耐火被覆材とした鉄骨部材の耐火性能を検討した報告<sup>19)</sup>があるが、この報告では、ロックウール断熱材とグラスウール断熱材の耐熱温度の差が、そのまま耐火被覆の性能差となって現れるとしか言及されていない。

また防火構造外壁の性能を確かめた一連の実験において試験体仕様の中にグラスウール断熱材を充てんした外壁が含まれ、その実験結果が示された報告<sup>15),16)</sup>やグラスウール断熱材を用いた木質耐火構造外壁の実験報告<sup>20)</sup>がある。しかし、いずれも所定の耐火性能や防火性能を満足するか否かを確認した報告であり、壁体内でグラスウール断熱材に熱変形（熔融や収縮等）が生じることによる木造外壁の防火性能への影響を系統的に検討した報告はない。

### 1.2.3 発泡プラスチック断熱材

発泡プラスチック断熱材を用いた部材の防火性能に関する既往研究については、1984年度（昭和59年度）に（財）日本建築センターで行われた外断熱工法の防火に関する研究<sup>21)</sup>や近年では吉岡らの可燃外装材の燃え拡がりの評価に関する一連の研究<sup>22),23)</sup>等がある。これらは鉄筋コンクリート造やブロック造の外断熱工法を対象としており、耐火構造である躯体の屋外側に断熱材を施工した場合に、外壁面を通じた上階延焼等の発生に関する安全性を検討した報告である。本来、想定される市街地での建物間延焼に対する外壁の防火性能を検討したものではない。また小國<sup>24)</sup>や鈴木<sup>25)</sup>らは、建物の断熱化に伴い、壁体内での断熱材の燃焼特性を調べるため、断熱材を不燃材で被覆したモデル試験体を作製して行った実験について報告している。これらはいずれも共通して、「準耐火構造」の概念が導入される前の段階で、住宅の断熱が推進された時期の研究であり、断熱材・断熱工法と防火性能との関係を把握しようとするものではない。部材内の断熱材の燃焼により、火災安全性が損なわれる状況を招く危険性があるため、壁体内の断熱材が燃え拡がらないように工法や材料を選択することが重要であるとの指摘に留まっている。

「準耐火構造」の概念が導入された以降では、ビーズ法ポリスチレンフォームを芯材とし、木枠で四周を囲んだ断熱パネルを外壁に用いた場合の防火性能に関する実験報告<sup>26),27)</sup>がある。これらの報告では、ビーズ法ポリスチレンフォームが加熱側表面で100℃を超えて溶融すると、断熱パネルは断熱性を失うとともに、パネルで支えていた荷重を枠材のみで支持することになるため、防火性能が低下したことを報告している。ビーズ法ポリスチレンフォームの溶融が防火性能に影響を及ぼすとの指摘は重要であるが、考察は、防火性能を満たすために断熱パネルを被覆する面材の仕様について行われており、断熱材と防火性能の関係性について、それ以上の言及はない。

以上のように、これまで発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁の防火性能について、各種発泡プラスチック断熱材の高温性状や燃焼性を踏まえながら、体系的に検討されることはなかった。

また発泡プラスチック断熱材の燃焼性に関する既往研究には、古くは昭和40年代から実験報告<sup>28),29),30)</sup>があり、他にも、金属サイディングの裏打材として用いられる硬質ウレタンフォームやフェノールフォームを対象に、難燃性付与を目指した燃焼性

に関する研究報告<sup>31),32)</sup>や、コーンカロリメータ試験機を用いて酸素消費法により、定量的に発泡プラスチック断熱材の燃焼性を検討した研究報告<sup>33),34),35)</sup>などがある。

また現場施工品である吹付け硬質ウレタンフォームについては、吹付け硬質ポリイソシアヌレートフォーム（難燃化された吹付け硬質ウレタンフォームを指す。）の燃焼性に関する研究報告<sup>36),37),38)</sup>や定質量熱源による断熱材の燃焼性評価に関する研究報告<sup>39),40),41)</sup>がある。これらは建築中の施工現場を想定し、溶断・溶接等の火気から断熱材への着火、燃焼に至る火災シナリオに基づいて、断熱材の燃え広がりや燃焼ガスの特性等を評価したもので、部材の防火性能を評価する観点からの断熱材の燃焼性の評価ではない。これまでの発泡プラスチック断熱材の燃焼性に関する研究は、いずれもある特定の発泡プラスチック断熱材を対象に、その断熱材の燃焼性を把握した報告であり、建築用途に用いられる各種発泡プラスチック断熱材を横並びに比較して、燃焼性が検討されたことはない。

#### 1.2.4 まとめ

これまで、防耐火構造の性能評価にあたって多数の実大試験が行われてきた。しかし木造外壁の断熱仕様が外壁の防火性能に及ぼす影響の分析に必要な測定が行われてきたわけではなく、木造外壁断熱工法の防火性能に関して体系的な理解が進んでいるとはいえない。

木造外壁断熱工法の防火性能予測手法の研究開発を見通し良く進めていくために、本研究では、はじめに断熱材自体への火災加熱の影響が少ないロックウール断熱材を用いて、断熱工法による断熱材の位置や厚さが防火性能に及ぼす影響（断熱工法による影響）を把握する。次に、同一の壁体構成において断熱材をグラスウール断熱材や発泡プラスチック断熱材に変えて、断熱材自体の熔融や熱分解、燃焼による防火性能への影響（断熱材による影響）を把握するという方法論を設定した。

そこで断熱材の種類ごとに、断熱材を木造外壁に用いた場合の防火性能に影響すると思われる要因に関する既往研究のレビューを行った。しかし、木造の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、断熱仕様が防火性能に及ぼす影響について報告した事例は、ロックウール断熱材、グラスウール断熱材、発泡プラスチック断熱材いずれにおいても確認できなかった。また発泡プラスチック断熱材の燃焼性については、ある特定の断熱材を対象とした報告は確認されたが、建築用途に用

いられる各種発泡プラスチック断熱材を横並びに比較し検討された報告事例は確認できなかつた。



### 1.3 断熱工法が外壁の防火性能に及ぼす影響の基本的傾向の把握

#### —ロックウール断熱材を用いた小型試験体による基礎的検討

##### 1.3.1 検討の目的

木造外壁に不燃性断熱材を用いた場合、遮熱性および遮炎性は有利になると推定される。一方、非損傷性は柱部の温度上昇に支配されるため、柱との位置関係によっては断熱材により不利側に働く可能性がある。この断熱材と柱の位置関係は断熱工法により異なるため、外壁の防火性能と柱や断熱材の寸法等の関係は、断熱工法ごとに異なると予想される。

ここでは、検討を進める第一歩として、火災加熱中に断熱材が溶融・燃焼しない条件を設定し、高温時の熱変形が最も少ないロックウール断熱材を用いた一般的な木造外壁を対象に検討を行う。壁体の層構成を再現した小型試験体による実験（以下、小型実験）により、屋外加熱および屋内加熱それぞれの評価を実施して、木造外壁の防火性能が断熱工法による断熱材の位置や厚さとどう関係するか、断熱工法ごとにその基本的傾向を把握する。

### 1.3.2 実験方法

#### 1.3.2.1 実験方法

試験体仕様は、外装材に窯業系サイディング、内装材にせっこうボードを用いた乾式の木製軸組造外壁とし、防火構造を基本に設計した（表 1-1、図 1-1）。防火構造では、屋外側のみ 30 分の火災加熱を想定するが、防火構造としての認定のための加熱実験では 30 分加熱の後、直ちに加熱終了するため、火災加熱にさらにどの程度、耐えられるかは把握されていない場合が多い。また、この種の構成の壁は、被覆厚を操作して準耐火構造まで用いられる可能性があるため、屋外加熱、屋内加熱の両方について非載荷で加熱時間を 60 分とした。

実験は、幅 800 mm×高さ 800 mmの小規模の試験体（加熱面：幅 600 mm×高さ 600

表 1-1 試験体仕様の一覧

試験体No.	断熱工法	試験体仕様				壁体の熱貫流抵抗* (m <sup>2</sup> ・K/W)				
		外張断熱材		充てん断熱材		試験体*	試験体断熱部*	実大仕様*		
		密度	厚さ	密度	厚さ					
1	無断熱	無断熱壁体		なし		0.41	0.35	0.32		
2-1	充てん	55 mm室内側配置		なし	24 kg/m <sup>3</sup>	55 mm	1.67	1.80	1.49	
2-2	断熱	55 mm外気側配置					100 mm	1.73	1.89	1.55
2-3	工法	100 mm充てん						2.39	2.99	2.19
3-1	外張	25 mm外張	40 kg/m <sup>3</sup>	25 mm	なし	100 mm	1.19	1.10	0.95	
3-2	断熱	60 mm外張		60 mm			2.13	2.02	1.78	
3-3	工法	100 mm外張		100 mm			3.19	3.08	2.71	
4-1	付加	25 mm付加	40 kg/m <sup>3</sup>	25 mm	24 kg/m <sup>3</sup>	100 mm	3.13	3.64	2.92	
4-2	断熱	60 mm付加		60 mm			4.11	4.57	3.83	
4-3	工法	100 mm付加		100 mm			5.20	5.62	4.83	
試験体の共通仕様										
外装材 : 窯業系サイディング (厚さ 15 mm・市販品) 通気層 : 厚さ 18 mm ※通気胴縁 (厚さ 18 mm) を用いて、通気層の厚さを確保した。 内装材 : せっこうボード (厚さ 9.5 mm) 充てん断熱材 : 袋入りロックウール (密度 24 kg/m <sup>3</sup> , 熱伝導率 λ=0.038W/m <sup>2</sup> K) ※JIS A 9521 <sub>2003</sub> <sup>42)</sup> 規格品 外張断熱材 : ロックウール (密度 40 kg/m <sup>3</sup> , 熱伝導率 λ=0.038W/m <sup>2</sup> K, 撥水加工品) ※JIS A 9504 <sub>2004</sub> <sup>43)</sup> 規格品 防風層 : 透湿防水シート (厚さ 0.17 mm) 防湿層 : ポリエチレンシート (厚さ 0.2 mm) 柱・枠材 : ホワイトウッド (北欧産材) を使用した。木材の重量含水率は 10~15%wt の範囲とした。木材以外の各種建材は特に含水率調整は行わず、市販品を気乾させた上で用いた。										

※実際の壁体と試験体では、断熱材と木材部の見付面積の割合が異なる。また通常、防耐火構造の試験や実験は、試験体の通気層の上端と下端を塞いだうえで行う。これらの理由より、実際の壁体と試験体では熱貫流抵抗の値が異なる。ここでは、次に示す算出方法により、試験体、試験体断熱部、実大仕様の3つの値をそれぞれ求めた。

試験体 : 実験を実施した小型試験体で、両端の枠材、中央の柱の熱橋部も考慮し、通気層は空気層として外装材から内装材の層構成で算出した。

試験体断熱部 : 実験を実施した小型試験体で、木材部の熱橋を考慮せず、断熱材部のみを対象に、通気層は空気層として外装材から内装材の層構成で算出した。

実大仕様 : 実際の壁体仕様で熱橋 (105 mm×105 mmの柱を 1,820 mm間隔で、柱間に 45 mm×105 mmの間柱を 455 mm間隔で設置) を考慮し、通気層から内装材の層構成で算出した。

mm) を用いた。炉内温度を試験体表面から 100 mm の位置で  $\phi 3.2$  mm のシース熱電対 (K 熱電対) により測定し、ISO834 加熱曲線<sup>44)</sup>に合うように加熱を行った。なお、実験は、2009 年 2 月～6 月に実施し、一部、2011 年 6 月～7 月に追加して実施した。

実験に用いた小型加熱炉を写真 1-1 に、実験時の試験体の様子を写真 1-2～写真 1-4 に示す。

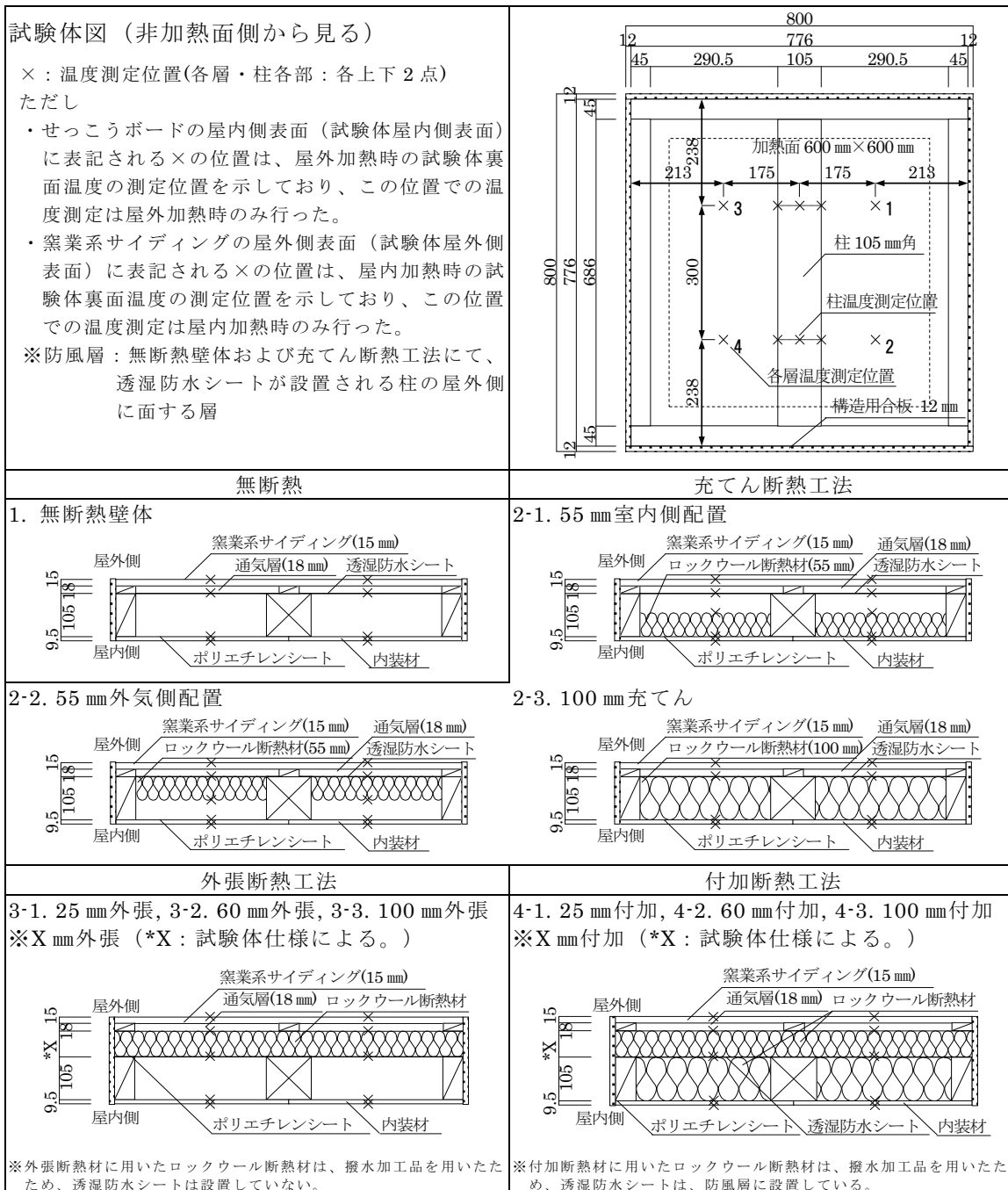


図 1-1 試験体概要および断熱工法ごとの試験体仕様



写真 1-1 実験装置：小型炉

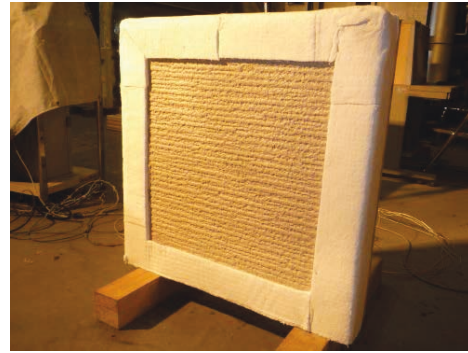


写真 1-2 試験体（実験前）

（屋外加熱：無断熱壁体）

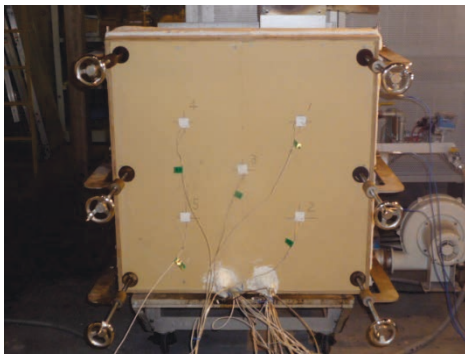


写真 1-3 試験体（実験時）

（屋外加熱：無断熱壁体）

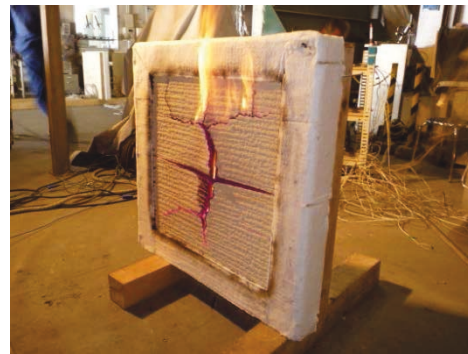


写真 1-4 試験体（実験後）

（屋外加熱：無断熱壁体）

### 1.3.2.2 試験体仕様

試験体の仕様一覧を表 1-1 に、試験体概要および断熱工法ごとの試験体仕様を図 1-1 に示す。本実験では、充てん断熱工法、外張断熱工法、付加断熱工法の 3 つの断熱工法および無断熱を対象とした。充てん断熱工法では、厚さ 55 mm の断熱材を室内側または外気側にそれぞれ配置した半充てん壁体、100 mm の断熱材を配置した充てん壁体の 3 種類を試験体とした。外張断熱工法では、外張断熱材の厚さをそれぞれ 25 mm、60 mm、100 mm とした壁体の 3 種類を試験体とした。付加断熱工法では、100 mm の断熱材を充てんした上に、付加断熱材（付加断熱工法における外張断熱材を付加断熱材と称す。）の厚さをそれぞれ 25 mm、60 mm、100 mm とした壁体の 3 種類を試験体とした。これに断熱材を有しない場合として無断熱壁体を加え、計 10 種類を試験体とした。屋内側被覆は、防火構造では屋内加熱に対する防火性能を評価しないため、木造大壁の内装材としてごく一般的に使われているせっこうボード 9.5 mm とした。なお試験体 1 種類につき、屋外加熱、屋内加熱それぞれ 1 体ずつ計 2 体の実験を行った。

### 1.3.2.3 測定項目

#### 1.3.2.3.1 遮熱性・遮炎性

壁体内部の温度分布を把握するため、図 1-1 中に示す温度測定位置に K タイプ (CA) 熱電対を設置して、試験体裏面の温度、壁体内部の断熱材および内装材の各表面温度を測定した。

壁体の遮熱性は、国土交通省指定性能評価機関の「防耐火性能試験・評価業務方法書」<sup>45)</sup>に従うと、試験体裏面の温度上昇度が、試験開始から平均値で 140K 以下、かつ最高値で 180K 以下を満たすか否かで判定される。そこで加熱開始後 30 分、45 分、60 分における試験体裏面の温度上昇度の平均値および最高値を求めた。

さらに、本実験では、断熱仕様や加熱方向による壁体内の熱の伝わり方をより詳細にみるため、壁体各層ごとに、その層における温度上昇度が、遮熱性の判定基準である平均値で 140K または最高値で 180K を超えるまでの時間を求めた。なお、実験における温度測定は 30 秒ごとであるため、測定間は線形補完を行って求めた。

遮炎性は非加熱面から目視観察で確認した。

#### 1.3.2.3.2 柱の損傷

非損傷性の評価には長期荷重を支える柱の荷重と変形評価が必要で、変形には材長が強く影響するため、小型実験では直接把握できない。しかしながら非損傷性は柱が長期許容応力度の荷重に対し座屈するか否かで決まるため、柱の損傷の程度が大きく影響する。そこで加熱終了後の柱に対し、炭化部分を取り除いた上で、炭化による欠損が最も大きく、残存する断面寸法が最も小さい箇所を目視で特定し、「柱の最小断面」とした。そして、この柱の最小断面における断面積と断面二次モーメントを求め、実験前を 100%とした時の断面積と断面二次モーメントの残存割合をそれぞれ算出した（以下、それぞれ「断面積残存率」「断面二次モーメント残存率」という。）。

本研究で対象とする大壁の木造外壁では、柱は内外装材や断熱材に被覆された状態で火熱<sup>注 1)</sup>を受ける。さらに断熱工法により柱と断熱材の位置関係、柱の被覆状況が異なるため、柱各箇所での火熱の受け方は一様ではない。断熱工法による柱の火熱の受け方の違いを把握するため、実験前の柱の表面に熱電対を設置して、柱正面、柱角部、柱側面の表面付近温度を測定した<sup>注 2)</sup>（表 1-2）。そのうち柱角部、柱側面については、柱の左右で測定し、その平均値をとって、それぞれ柱正面温度、柱角部温度、

柱側面温度の報告値とした。なお、柱側面温度は各側面で2ヵ所ずつ測定し、加熱側から近い順に柱側面A、柱側面Bとして表す。

次に柱正面温度、柱角部温度、柱側面温度が、それぞれ木材の着火温度<sup>46)</sup>(260℃

表 1-2 柱表面の温度測定位置

屋外加熱の場合		屋内加熱の場合	
1. 無断熱壁体	2-1. 55 mm室内側配置	1. 無断熱壁体	2-1. 55 mm室内側配置
2-2. 55 mm外気側配置	2-3. 100 mm充てん	2-2. 55 mm外気側配置	2-3. 100 mm充てん
3-1. 25 mm外張	4-1. 25 mm付加	3-1. 25 mm外張	4-1. 25 mm付加
3-2. 60 mm外張	4-2. 60 mm付加	3-2. 60 mm外張	4-2. 60 mm付加
3-3. 100 mm外張	4-3. 100 mm付加	3-3. 100 mm外張	4-3. 100 mm付加

×印は温度測定位置を示す。

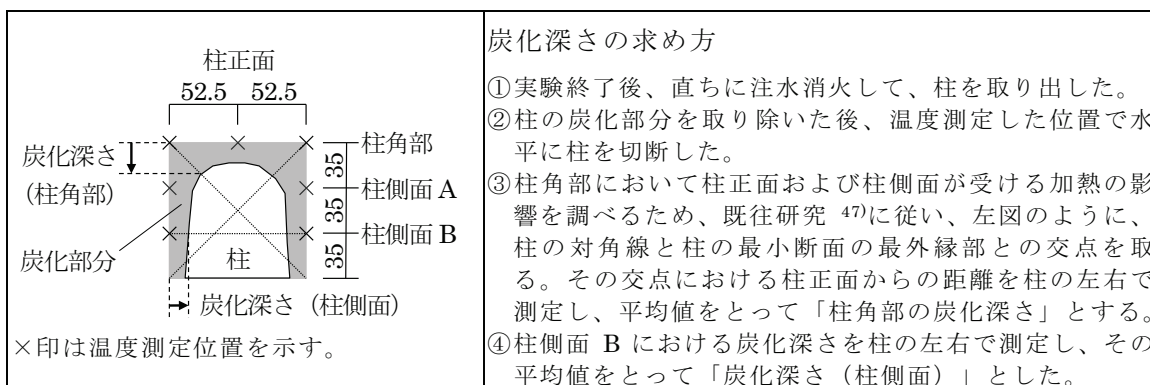


図 1-2 炭化深さ測定位置

と仮定する)を上回った時間を、その点での柱表面の着火時間とし、この着火時間から加熱終了までの時間を柱の燃焼時間とした。既往研究<sup>47)</sup>を参考に、図 1-2 に示すように、その測定点での加熱終了後の炭化深さを計測した。さらに測定点ごとに炭化深さを柱の燃焼時間で除した値の平均値を着火後の炭化速度とした。

### 1.3.3 充てん断熱工法の実験結果および考察

#### 1.3.3.1 屋外加熱

##### 1.3.3.1.1 遮熱性・遮炎性

壁中空部に断熱材を充てんすると、加熱側から非加熱側への熱の移動が妨げられ、断熱材の加熱側では温度がより高く、非加熱側では温度がより低くなった（図 1-3、図 1-4）。従って、外装材等の面材が脱落せず保持されていれば、壁体の遮熱性は断熱化されることで向上する。但し、充てん断熱材により、断熱材の加熱側にある外装材は、裏面側の下地となる通気胴縁や留付材を含め高温に曝されるため、実大規模の壁では脱落する可能性があると考えられる。

遮炎性および遮熱性に関わる実験結果を表 1-3 に示す。無断熱壁体は、45 分での裏面温度上昇度が平均 100K 程度に留まり、45 分の遮熱性を有している。また無断熱壁体に厚さ 55 mm の断熱材を充てんすると、壁体の熱貫流抵抗は  $0.41 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  から  $1.67$

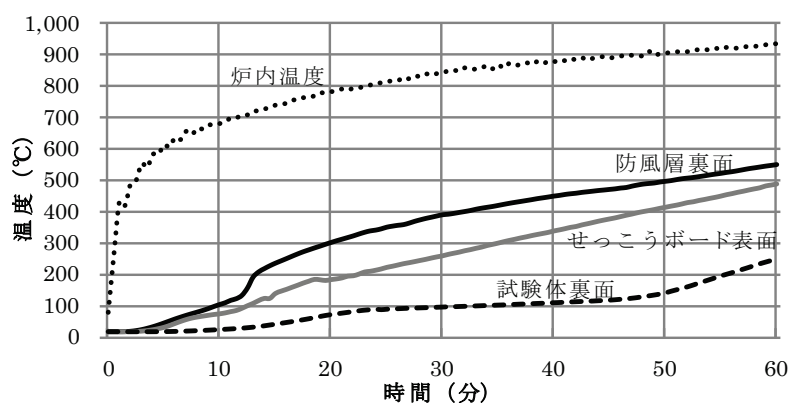


図 1-3 各層の平均温度の推移（1.無断熱壁体・屋外加熱）

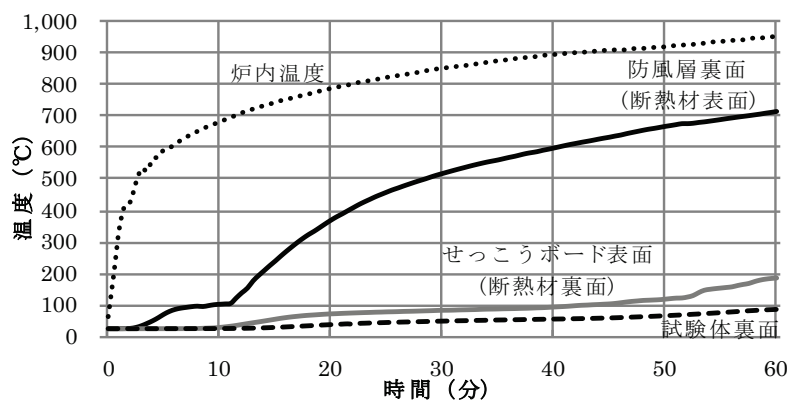


図 1-4 各層の平均温度の推移（2-3.100 mm 充てん・屋外加熱）



m<sup>2</sup> K/W～1.73 m<sup>2</sup> K/W となり、壁体の断熱性能を高めることで 60 分の遮熱性を確保できた。充てん断熱材の厚さを 100 mm にして壁体の断熱性能をさらに高めても、裏面温度上昇度は 10K 程度しか低下しなかった。従って、この構成の断熱壁体では、屋外加熱に対し、準耐火構造に必要な 60 分の遮熱性は、55 mm の断熱材を充てんした段階で達成されており、断熱材をさらに厚くしても、遮熱性がさらに顕著に向上するわけではないことがわかる。

表 1-3 遮炎性および遮熱性に関する実験結果（充てん断熱工法・屋外加熱）

試験体 No.	断熱工法	試験体仕様	試験体の熱貫流抵抗 (m <sup>2</sup> ·K/W)		遮炎性 炎の貫通の有無		各層の温度上昇度が平均 140K または最高 180K を超える時間 (分)				遮熱性 試験体裏面温度上昇度 (K)			
			試験体	試験体断熱部			防風層裏面 *1	断熱材・中空層境界面	GB 表面 *2	試験体裏面	初期温度	30 分	45 分	60 分
1	無断熱	無断熱壁体	0.41	0.35	なし	平均	12.5	16.3	51.7	15	78	100	231	
						最高	12.8	20.3	51.1	83	109	270		
2-1	充てん断熱工法	55 mm 室内側配置	1.67	1.80	なし	平均	13.2	13.8	40.0	超えず	23	33	59	75
						最高	13.5	13.9	39.2	超えず	37	71	78	
2-2	充てん断熱工法	55 mm 外気側配置	1.73	1.89	なし	平均	13.6	25.7	44.1	超えず	21	40	70	78
						最高	13.9	25.5	46.9	超えず	46	78	85	
2-3	充てん	100 mm 充てん	2.39	2.99	なし	平均	12.7	56.5	超えず	23	26	37	66	
						最高	12.5	53.2	超えず	27	40	74		

\*1 防風層裏面：防風層の非加熱側表面

\*2 GB 表面：せっこうボード (GB) の加熱側表面

### 1.3.3.1.2 柱の損傷

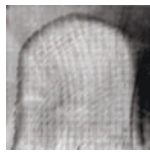
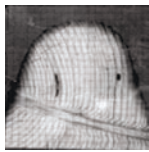
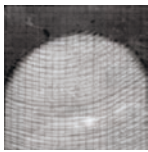
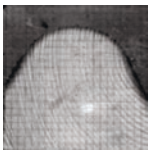
加熱終了後（60 分加熱）の柱の最小断面は、断熱材位置や厚さにより形状が異なった（表 1-4）。柱の最小断面の断面積残存率に大きな差は見られなかったが、最小断面の断面二次モーメントは、無断熱壁体が最も大きな値となった。充てん断熱材により柱の損傷が進んでいることがわかる。

柱角部温度、柱側面温度（図 1-5）を見ると、無断熱壁体では非加熱側へ放熱され、局部的に温度が高くなる部分は見られなかった。一方、断熱材を充てんすると、柱の加熱側に近い柱角部、柱側面 A の位置で、木材の着火温度<sup>46)</sup>（260℃）に達する時間は無断熱壁体より早くなり、着火後も高い温度で推移している。

特に 55 mm 外気側配置壁体、100 mm 充てん壁体では、断熱材の加熱側表面（以下、断熱材表面と称す。）は、ともに防風層の非加熱側（以下、防風層裏面と称す。）に位置し、充てん断熱材表面の温度が無断熱壁体の防風層裏面の温度より高くなった。そ

のため、柱の加熱側が激しく燃焼して柱周縁部の欠損が大きくなり、断面二次モーメントが低下したと考えられる。

表 1-4 柱の最小断面における断面積残存率と断面二次モーメント、炭化速度（屋外加熱）

加熱面		屋外加熱			
断熱工法		無断熱	充てん断熱工法		
試験体仕様		1.無断熱壁体	2-1.55 mm室内側配置	2-2.55 mm外気側配置	2-3.100 mm充てん
柱断面写真	最小断面				
断面積残存率	最小断面	74.0%	72.6%	73.2%	71.8%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	最小断面	5.86×10 <sup>6</sup>	5.19×10 <sup>6</sup>	4.31×10 <sup>6</sup>	4.47×10 <sup>6</sup>
断面二次モーメント残存率	最小断面	57.8%	51.3%	42.6%	44.1%
柱角部・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.46	0.51	0.54	0.56
柱側面・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.15	0.13	炭化部なし	炭化部なし

※炭化速度(mm/分)：測定点ごとに、炭化深さ(mm)を柱の燃焼時間(分)で除した着火後の炭化速度の平均値。

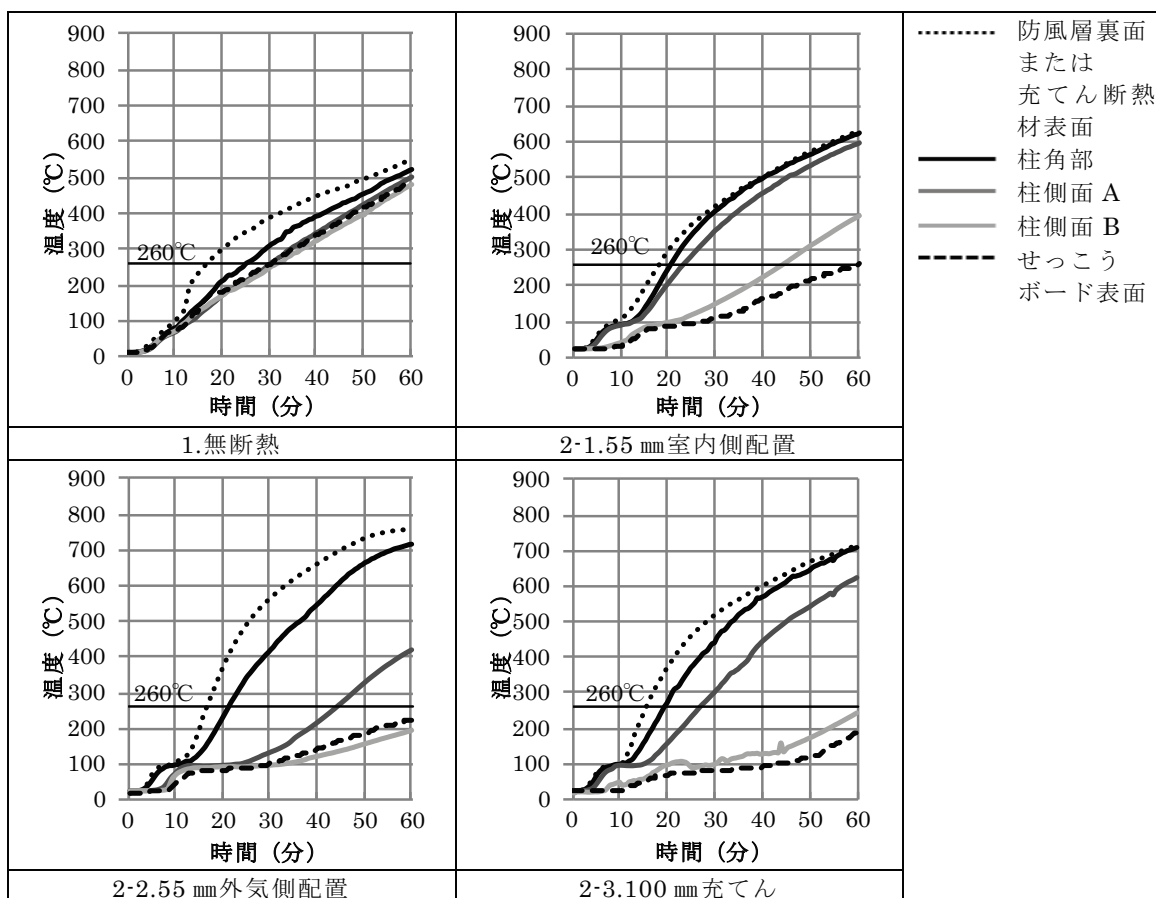


図 1-5 柱側面部の平均温度推移（充てん断熱工法・屋外加熱）

一方、55 mm外気側配置壁体は断熱材が薄く、かつ断熱材の非加熱側では、柱は壁中空部に露出しており放熱が促される。そのため柱側面 B の位置では、100 mm充てん壁体に比べ低い温度推移となった。また 55 mm室内側配置壁体では、断熱材の加熱側にある防風層裏面と木部が空気層に露出している柱角部、柱側面 A ではほぼ同じ温度推移となった。断熱材により放熱が妨げられ、断熱材の加熱側で一様な熱分布になったと考えられる。

柱角部での着火後の炭化速度は、無断熱壁体では 0.46 mm/分に対し、充てん断熱壁体では 0.51 mm/分～0.56 mm/分となり、いずれも大きくなった。炭化速度から見ても、充てん断熱材により柱角部での燃焼が進んでいることが分かる。

柱側面 B では、55 mm外気側配置壁体、100 mm充てん壁体で炭化がなく、柱の被覆効果が確認された。一方、炭化が見られた無断熱壁体、55 mm室内側配置壁体では、柱側面の着火後の炭化速度はそれぞれ 0.15 mm/分、0.13 mm/分となった。2面加熱を受ける柱角部と比べ、柱側面 B は側面部からの 1面加熱であり、かつ表面入射熱が小さいため、着火後の炭化速度は柱角部の半分以下になったと考えられる。

以上より、充てん断熱工法では、断熱材の位置、厚さにより断熱材と柱との位置関係が異なり、それにより壁体内の温度分布や柱が受ける損傷状況が変化する。断熱材を充てんすると、非加熱側への放熱が妨げられ、断熱材の加熱側では温度が高くなる。そして断熱材の加熱側表面に柱面が並んで位置していると、その位置での柱の断面欠損が大きくなる傾向がある。本実験では、その結果、柱を含む層から非加熱側への熱損失が最も大きい無断熱壁体が、他の充てん壁体に比べ、最小断面の断面二次モーメントが最も大きくなったと考えられる。

よって、外壁に断熱材を充てんすることは、屋外加熱のみを評価する場合に限っても、壁体の非損傷性を低下させる可能性があることを考えなければならない。木造真壁については、火災時に柱が直接、火災加熱されることを踏まえて、柱の欠損や内部温度の上昇に伴うヤング係数の低下を考慮した非損傷性予測が行われているが<sup>48),49)</sup>、大壁型の断熱工法の防火性能についても、火災加熱時の柱の欠損や内部の温度分布を把握して、力学的な検討を進めることが必要である。

### 1.3.3.2 屋内加熱

#### 1.3.3.2.1 遮熱性・遮炎性

屋内加熱では、断熱材を充てんとすると、加熱側のせっこうボードが高温に曝される(図 1-6、図 1-7)。しかし無断熱壁体と 100 mm 充てん壁体で、せっこうボード裏面の温度推移が 100°C より温度上昇し始める時間は、ほとんど変わらなかった。

遮炎性および遮熱性に関わる実験結果を表 1-5 に示す。加熱側被覆がせっこうボードのみであるため、屋内加熱時の中空部への火炎貫通は、屋外加熱時よりも早く、屋内加熱時の裏面温度の上昇も屋外加熱時より概して顕著である。防火構造の性能評価では屋内加熱を想定する必要はない。準耐火構造の性能評価でも、屋内加熱では遮熱性を要求されないが、厚さ 55 mm 以上の断熱材を充てんした壁体であれば、45 分の遮熱性を保持できている。無断熱壁体であっても 60 分の遮炎性を有しており、屋内加熱に対しても、壁体の防火性能は非損傷性で決まると考えられる。

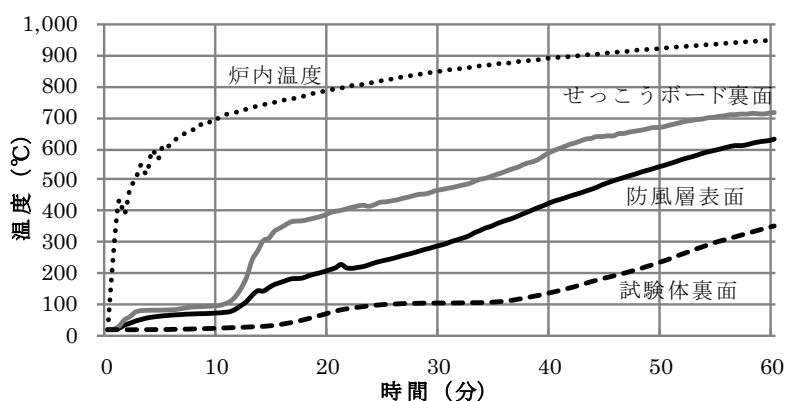


図 1-6 各層の平均温度の推移 (1.無断熱壁体・屋内加熱)

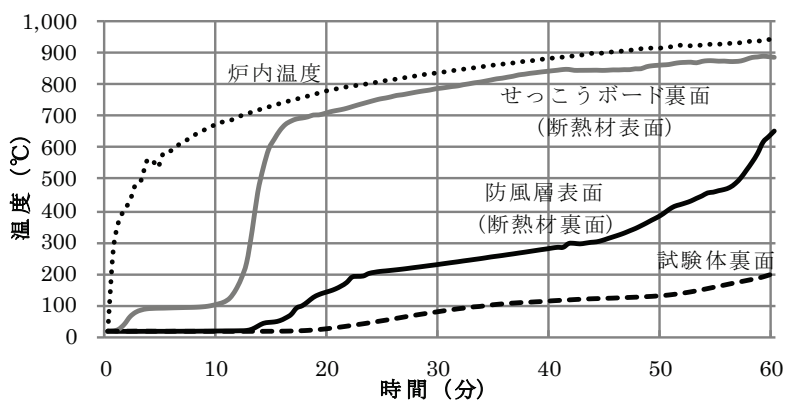


図 1-7 各層の平均温度の推移 (2-3.100 mm 充てん・屋内加熱)

表 1-5 遮炎性および遮熱性に関わる実験結果（充てん断熱工法・屋内加熱）

試験体 No.	断熱工法	試験体仕様	試験体の熱貫流抵抗 (m <sup>2</sup> ・K/W)		遮炎性 炎の貫通の有無	各層の温度上昇度が平均140Kまたは最高180Kを超える時間(分)	遮熱性 試験体の裏面温度上昇度(K)							
			試験体	試験体断熱部			GB裏面*1	断熱材・中空層境界面	防風層表面*2	試験体裏面	初期温度	30分	45分	60分
1	無断熱	無断熱壁体	0.41	0.35	なし	平均	12.1	14.7	42.2	18	86	168	333	
							12.3	15.9	42.1	88	222	430		
2-1	充てん断熱工法	55mm室内側配置	1.67	1.80	なし	平均	11.5	16.6	26.2	47.8	20	71	112	233
							11.5	15.4	16.3	46.1	85	157	393	
2-2	充てん断熱工法	55mm外気側配置	1.73	1.89	なし	平均	11.7	12.0	20.5	52.6	20	73	92	232
							11.8	12.0	17.9	48.9	80	116	438	
2-3	充てん	100mm	2.39	2.99	なし	平均	11.7	20.8	54.7	17	63	104	183	
							11.7	18.7	55.0	78	111	245		

\*1 GB裏面：せっこうボード（GB）の非加熱側表面

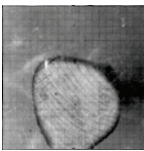
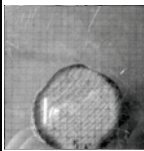


\*2 防風層表面：防風層の加熱側表面

### 1.3.3.2.2 柱の損傷

実験終了後（60分加熱）の柱の最小断面は、非加熱側である木材裏面での断面欠損もあり、充てん断熱材の配置に関係なく、いずれも断面積残存率が30%前後で、柱の損傷が激しかった（表1-6）。

柱角部温度および柱側面温度（図1-8）を見ると、充てん断熱材の有無、配置を問わず、いずれも加熱開始10分～15分の間に急激に温度が上昇している。加熱開始後、早い段階で、火炎がせっこうボード（厚さ9.5mm）を突破して壁内に侵入し、柱と充てん断熱材の間隙に火炎が通って、柱の燃焼が進んだと考えられる。すなわち、

表 1-6 柱の最小断面における断面積残存率と断面二次モーメント、炭化速度（屋内加熱）

加熱面		屋内加熱			
断熱工法		無断熱	充てん断熱工法		
試験体仕様		1.無断熱壁体	2-1.55mm室内側配置	2-2.55mm外気側配置	2-3.100mm充てん
柱断面写真	最小断面				
断面積残存率	最小断面	31.3%	30.2%	35.8%	25.9%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	最小断面	1.06×10 <sup>6</sup>	0.87×10 <sup>6</sup>	1.41×10 <sup>6</sup>	0.73×10 <sup>6</sup>
断面二次モーメント残存率	最小断面	10.4%	8.6%	14.0%	7.2%
柱角部・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.83	0.72	0.82	欠測

※炭化速度(mm/分)：測定点ごとに、炭化深さ(mm)を柱の燃焼時間(分)で除した着火後の炭化速度の平均値。

※屋内加熱では柱の損傷が柱裏面まで及び、柱側面での加熱条件が柱側面からの一面加熱でなくなったため、柱側面の炭化速度は求めないこととした。

柱が断熱材により被覆されていても、壁内に火炎の侵入を許すと、断熱材の被覆効果が発現しなくなる。そのため屋内側は、被覆が脆弱な場合、柱の燃焼が進んで、非損傷性が大きく低下するとともに、外壁の防火性能は、充てん断熱材に関係なく柱の燃焼の進行具合により決まるため、断熱材に依存しなくなる。

従って、外壁が45分または60分の非損傷性を保持するためには、火災加熱に対し加熱側被覆（屋内加熱の場合は、せっこうボード）が壁内への火炎の侵入を防ぐことが重要となる。そして、本研究で明らかにする断熱材の位置や厚さが及ぼす防火性能への影響については、この加熱側被覆が壁内への火炎の侵入を防いでいる状態が前提となって成立していることがわかった。

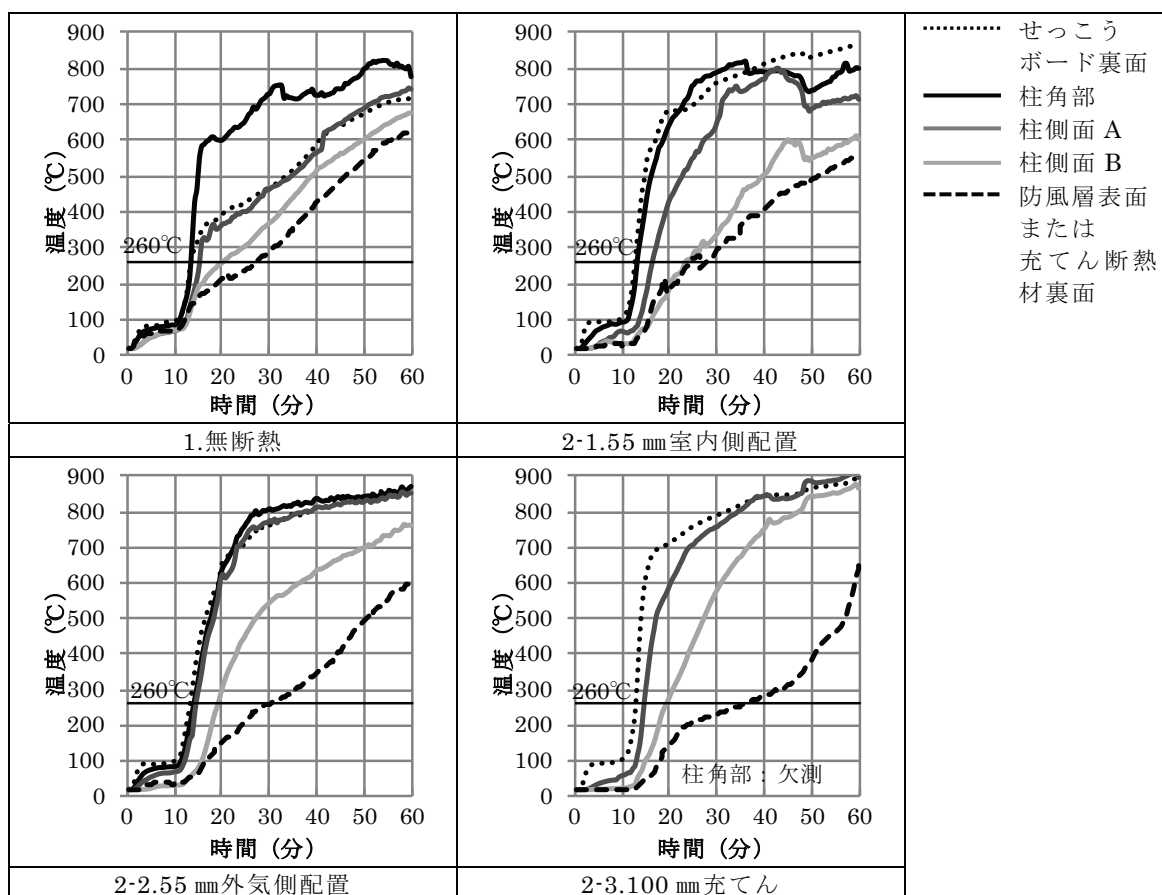


図 1-8 柱側面部の平均温度推移（充てん断熱工法・屋内加熱）

### 1.3.4 外張断熱工法・付加断熱工法の実験結果および考察

#### 1.3.4.1 屋外加熱

##### 1.3.4.1.1 遮熱性・遮炎性

遮炎性および遮熱性に関する実験結果を表 1-7 に示す。無断熱壁体に断熱材を 25 mm 外張すると、壁体の熱貫流抵抗は 0.41 m<sup>2</sup> K/W から 1.19 m<sup>2</sup> K/W となり、壁体の断熱性能を高めることで 60 分の遮熱性を確保できた。外張断熱工法では、断熱材は柱の屋外側に配置される。外張断熱材が厚くなるほど、断熱性能が高くなり、かつ壁も厚くなって加熱表面から試験体裏面への距離が離れるため、遮熱性は向上する。従って、この構成の断熱壁体で実験を行った範囲では、少なくとも 25 mm 以上の断熱材を外張すれば、遮熱性の確保の方策をさらに考慮する必要はないと考えられる。

付加断熱工法では、外張断熱工法の壁体に、さらに 100 mm の断熱材を軸間に充てんするため、さらなる高断熱化となり遮熱性は向上する。付加断熱材がない 100 mm 充てん壁体で、すでに 60 分の遮熱性は得られている。従って、この構成の断熱壁体であれば、付加断熱工法では付加断熱材の厚さを問わず、遮熱性を考慮する必要はないと

表 1-7 遮炎性および遮熱性に関する実験結果（外張断熱工法、付加断熱工法・屋外加熱）

試験体 No.	断熱工法	試験体仕様	試験体の熱貫流抵抗 (m <sup>2</sup> ·K/W)		遮炎性 炎の貫通の有無	各層の温度上昇度が平均 140K または最高 180K を超える時間 (分)	遮熱性							
			試験体	試験体断熱部			外張断熱表面*1	外張断熱裏面*2	GB 表面*3	試験体裏面	試験体裏面温度上昇度 (K)			
											初期温度	30 分	45 分	60 分
1	無断熱	無断熱壁体	0.41	0.35	なし	平均	12.5*4	16.3	51.7	15	78	100	231	
						最高	12.8*4	20.3	51.1	84	109	270		
3-1	外張断熱工法	25 mm 外張	1.19	1.10	なし	平均	14.9	23.5	40.1	超えず*	23	43	74	82
						最高	15.3	24.3	43.5	超えず*	51	79	87	
3-2	外張断熱工法	60 mm 外張	2.13	2.02	なし	平均	13.1	39.7	57.1	超えず*	23	23	45	73
						最高	12.6	37.9	56.8	超えず*	26	53	76	
3-3	外張断熱工法	100 mm 外張	3.19	3.08	なし	平均	13.7	42.6	超えず*	超えず*	23	24	32	62
						最高	14.0	45.7	超えず*	超えず*	29	37	74	
2-3	充てん断熱工法	100 mm 充てん	2.39	2.99	なし	平均	12.7*4	56.5	超えず*	超えず*	23	26	37	66
						最高	12.5*4	53.2	超えず*	超えず*	27	40	74	
4-1	付加断熱工法	25 mm 付加	3.13	3.64	なし	平均	13.8	18.8	59.4	超えず*	24	21	35	62
						最高	14.2	18.9	超えず*	超えず*	28	37	69	
4-2	付加断熱工法	60 mm 付加	4.11	4.57	なし	平均	13.5	28.6	超えず*	超えず*	21	11	22	30
						最高	14.2	28.0	超えず*	超えず*	18	25	33	
4-3	付加断熱工法	100 mm 付加	5.20	5.62	なし	平均	12.7	38.6	超えず*	超えず*	23	7	14	22
						最高	12.0	39.3	超えず*	超えず*	9	18	26	

\*1 外張断熱材表面：外張断熱材の加熱側表面

\*2 外張断熱材裏面：外張断熱材の非加熱側表面

\*3 GB 表面：せっこうボード (GB) の加熱側表面

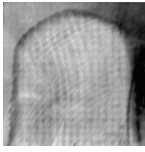
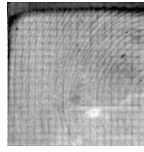
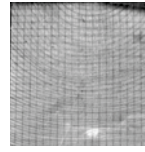
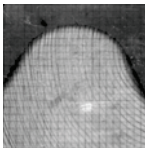
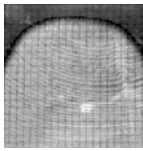
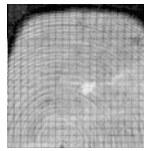
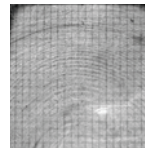
\*4 外張断熱材がない無断熱壁体、充填断熱工法では、外張断熱材裏面と同じく柱の加熱側正面が位置する防風層の加熱側表面における値を示す。

考えられる。

### 1.3.4.1.2 柱の損傷

外張断熱工法および付加断熱工法では、屋外加熱に対して、柱は外張（付加）断熱材により被覆される。外張（付加）断熱材厚さが増すと、柱角部、柱側面の温度が低く推移し、木材の着火温度（260℃）に達する時間が遅くなる。その結果、木材の燃焼時間は短くなり柱の損傷が軽減される（表 1-8、図 1-9）。従って、外張（付加）断熱材厚さが増すほど、外張断熱工法および付加断熱工法では、屋外加熱時の非損傷性が向上すると考えられる。

表 1-8 柱の最小断面における断面積残存率と断面二次モーメント、炭化速度（屋外加熱）

加熱面		屋外加熱			
断熱工法		無断熱	外張断熱工法		
試験体仕様		1.無断熱壁体	3-1.25 mm外張	3-2.60 mm外張	3-3.100 mm外張
柱断面写真	最小断面				
断面積残存率	最小断面	74.0%	92.6%	94.3%	99.0%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	最小断面	5.86×10 <sup>6</sup>	8.05×10 <sup>6</sup>	8.52×10 <sup>6</sup>	9.85×10 <sup>6</sup>
断面二次モーメント残存率	最小断面	57.8%	79.5%	84.1%	97.3%
柱角部・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.46	0.48	0.49	炭化部なし
柱側面・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.15	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし
断熱工法		充てん断熱工法	付加断熱工法		
試験体仕様		2-3.100 mm充てん	4-1.25 mm付加	4-2.60 mm付加	4-3.100 mm付加
柱断面写真	最小断面				
断面積残存率	最小断面	71.8%	82.7%	94.2%	99.2%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	最小断面	4.47×10 <sup>6</sup>	6.09×10 <sup>6</sup>	8.70×10 <sup>6</sup>	10.00×10 <sup>6</sup>
断面二次モーメント残存率	最小断面	44.1%	60.2%	85.9%	98.8%
柱角部・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.56	0.54	0.53	炭化部なし
柱側面・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし

※炭化速度(mm/分)：測定点ごとに、炭化深さ(mm)を柱の燃焼時間(分)で除した着火後の炭化速度の平均値。



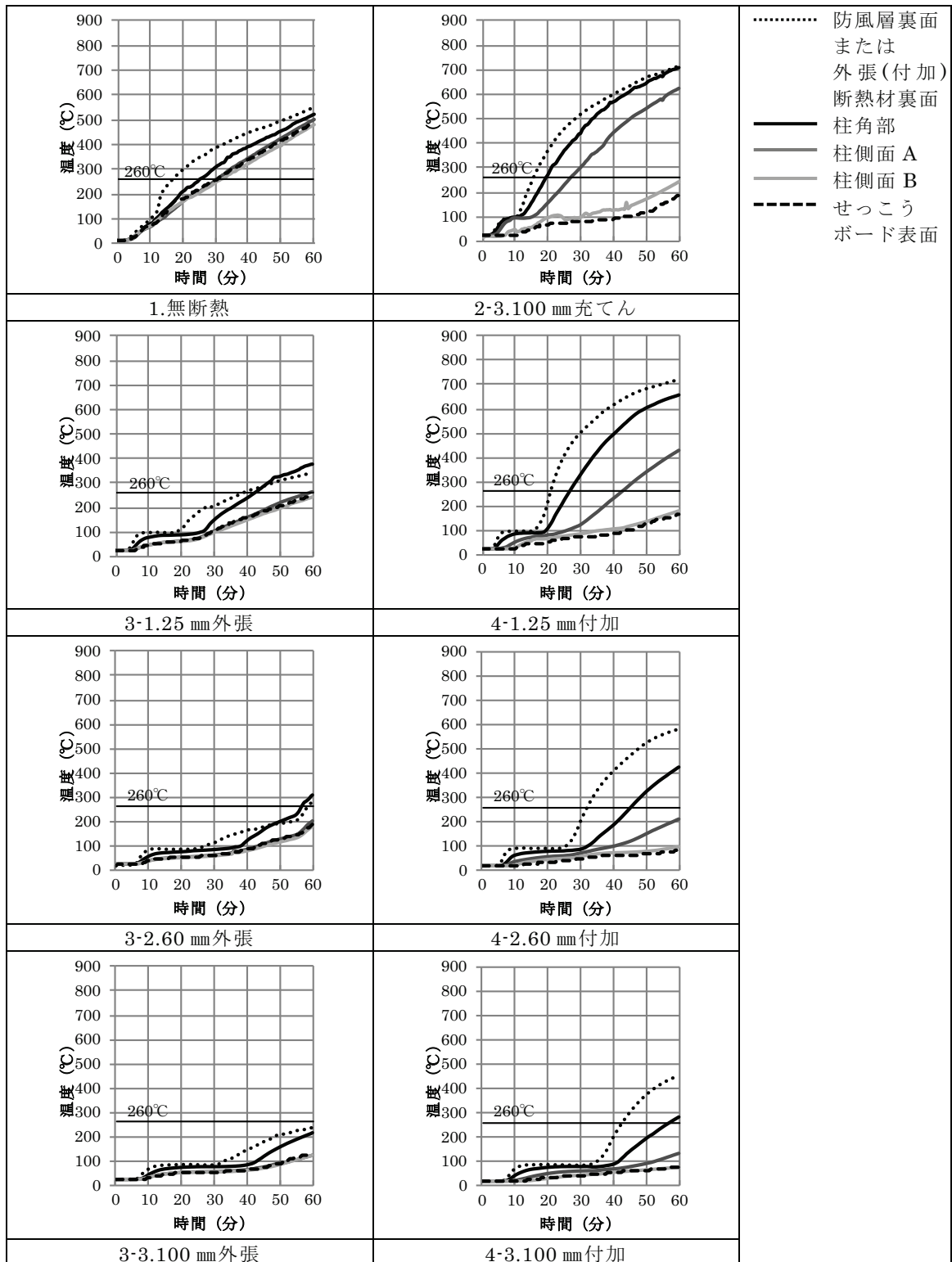
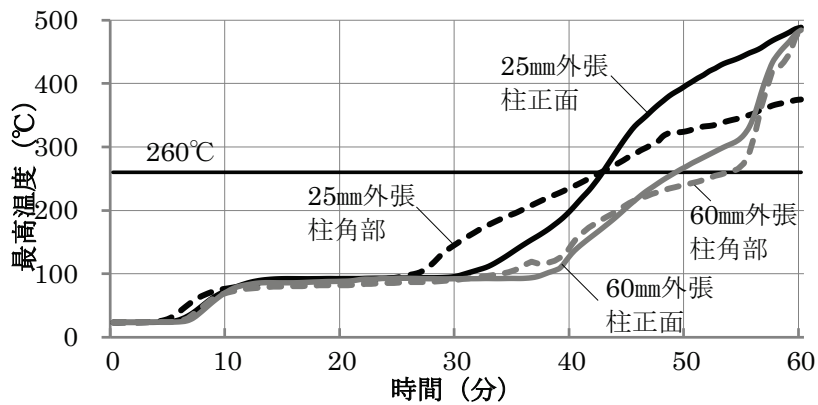


図 1-9 柱側面部の平均温度推移 (外張断熱工法、付加断熱工法・屋外加熱)

次に、柱が最も強く加熱を受ける柱正面、柱角部の最高温度推移をみる（図 1-10、図 1-11）。柱正面または柱角部の温度が木材の着火温度（260℃）に達する時間は、外張断熱工法では、25 mm外張で 43.0 分、60 mm外張で 49.5 分、付加断熱工法では、25 mm付加で 27.5 分、60 mm付加で 44.5 分、100 mm付加で 54.5 分であった。

今回の実験結果より、この構成の断熱壁体で外装材や外張断熱材の脱落がない条件下で、柱に炭化部が生じなくなる外張（付加）断熱材の厚さを求めると、30 分防火構造の場合は、外張断熱工法で 25 mm以上、付加断熱工法で 60 mm以上、45 分準耐火構造の場合は、外張断熱工法で 60 mm以上、付加断熱工法で 100 mm以上とすればよいと考えられる。

一方、図 1-9 において、同じ外張（付加）断熱材厚さで外張断熱工法と付加断熱工法を比較すると、付加断熱工法の方が、柱の中央より加熱側にあたる柱角部、柱側面



※100 mm外張は 60 分加熱終了後であっても柱正面および柱角部ともに、260℃に達していなかったため、図より除外した。

図 1-10 柱正面・柱角部における最高温度推移（外張断熱工法・屋外加熱）

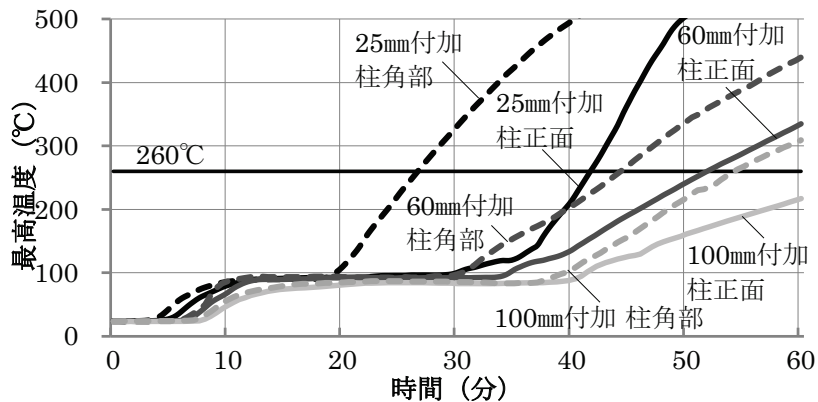


図 1-11 柱正面・柱角部における最高温度推移（付加断熱工法・屋外加熱）

A の温度が高く推移し、木材の着火温度(260℃)に達する時間が早くなった(図 1-9)。さらに表 1-8 において、25 mm 付加断熱壁体における柱の最小断面は、25 mm 外張断熱壁体より柱断面残存率で 9.9%、断面二次モーメントで約 19.3%ほど小さくなった(表 1-8)。外張断熱工法では、外張断熱材の厚さに関わらず、断熱層の非加熱側に柱正面が位置する。一方、付加断熱工法では充てん断熱材が存在するため、付加断熱材が薄くなるほど、加熱面に近い柱正面の断熱層における位置が相対的に加熱側へと変化する。柱角部では非加熱側へ放熱されにくく高温となって柱の燃焼が進むため、25 mm 外張断熱壁体に、充てん断熱材を入れて 25 mm 付加断熱壁体とすると、柱の損傷が進んだと考えられる。

しかし、外張(付加)断熱材の厚さが 60 mm、100 mm と厚くなると、付加断熱工法と外張断熱工法における柱の損傷の差はほとんどなくなった。付加断熱工法では付加断熱材の厚さが増すほど、断熱層における付加断熱材の割合が大きくなり、付加断熱材の断熱性能が支配的となる。この点に加え、断熱材厚さによる柱の被覆効果が大きくなるため、外張断熱工法に充てん断熱材を追加した時、柱角部の温度推移は若干高くなる(図 1-9)が、柱の断面欠損にはその影響がほとんど見られなくなったと考えられる。

柱角部での着火後の炭化速度は、外張断熱工法では 0.46 mm/分～0.49 mm/分であったのに対し、付加断熱工法では 0.53 mm/分～0.56 mm/分となった。軸間が中空の場合に比べ、断熱材を 100 mm 充てんすることで、柱角部では着火時間が早くなるだけでなく、着火以後の燃焼が進みやすくなることがわかった。

以上より、外張断熱工法、付加断熱工法ともに、外張(付加)断熱材により柱は被覆されるため、断熱材が厚いほど、非損傷性は向上すると考えられる。さらに外張(付加)断熱材がある一定の厚さを確保すれば、30 分加熱や 45 分加熱に対しては、外装材や外張断熱材の脱落がない限り柱に炭化部が生じなくなる可能性がある。

しかし付加断熱工法では、充てん断熱材により、外張断熱工法と比べて柱の加熱側温度が上昇しやすくなり、柱角部での着火時間、炭化速度ともに早くなり、付加断熱材厚さが十分でないと外張断熱工法に比べ、柱の損傷が進む場合がある。従って、付加断熱工法においても、断熱材を充てんすることが、壁体の非損傷性を低下させる可能性があることがわかった。

### 1.3.4.2 屋内加熱

#### 1.3.4.2.1 遮熱性・遮炎性

遮炎性および遮熱性に関する実験結果を表 1-9 に示す。前述の通り、準耐火構造の性能評価において、屋内加熱では、遮熱性は要求されないが、外張断熱工法では厚さ 25 mm 以上の断熱材を外張することで 45 分の遮熱性を、付加断熱工法では 60 分の遮熱性を保持できる結果となった。また実験を行った範囲では、60 分の火災加熱に対しすべての外張断熱工法、付加断熱工法で、十分な遮炎性を有することが確認された。

本実験で使用した試験体の屋内側被覆は、一般的な準耐火構造の外壁に用いられる屋内側被覆よりも薄いため、遮炎性および遮熱性にとっては不利側となる。しかしそれでも、準耐火構造以下で想定する 60 分以内の火災加熱に対して、遮炎性および遮熱性は十分な性能を有している。よって、屋内加熱に対する壁体の防火性能は、非損傷性で決まると考えられる。

表 1-9 遮炎性および遮熱性に関する実験結果（外張断熱工法・付加断熱工法：屋内加熱）

試験体 No.	断熱工法	試験体仕様	試験体の熱貫流抵抗 (m <sup>2</sup> ・K/W)		遮炎性 炎の貫通の有無	各層の温度上昇度が平均 140K または最高 180K を超える時間 (分)	遮熱性 試験体裏面温度上昇度 (K)							
			試験体	試験体断熱部			GB 裏面 *1	外張断熱表面 *2	外張断熱裏面 *3	試験体裏面	初期温度	30 分	45 分	60 分
1	無断熱	無断熱壁体	0.41	0.35	なし	平均	12.1	14.7*4	42.2	18	86	168	333	
						最高	12.3	15.9*4	42.1	88	222	430		
3-1	外張断熱工法	25 mm 外張	1.19	1.10	なし	平均	11.2	12.3	20.9	超えず*	19	66	85	133
						最高	10.9	12.4	21.2	超えず*	81	88	178	
3-2	外張断熱工法	60 mm 外張	2.13	2.02	なし	平均	12.2	13.0	27.4	超えず*	19	48	82	114
						最高	12.2	12.3	23.8	超えず*	53	86	160	
3-3	外張断熱工法	100 mm 外張	3.19	3.08	なし	平均	12.6	12.3	28.5	超えず*	15	31	79	94
						最高	12.5	12.7	30.8	超えず*	35	86	97	
2-3	充てん断熱工法	100 mm 充てん	2.39	2.99	なし	平均	11.7	20.8*4	54.7	17	63	104	183	
						最高	11.7	18.7*4	55.0	78	111	245		
4-1	付加断熱工法	25 mm 付加	3.13	3.64	なし	平均	11.6	21.7	42.6	超えず*	14	10	44	85
						最高	11.5	20.4	38.8	超えず*	23	75	94	
4-2	付加断熱工法	60 mm 付加	4.11	4.57	なし	平均	11.6	20.5	48.9	超えず*	14	7	29	69
						最高	11.4	19.7	46.4	超えず*	10	35	86	
4-3	付加断熱工法	100 mm 付加	5.20	5.62	なし	平均	11.4	21.1	57.6	超えず*	26	5	15	31
						最高	11.6	20.6	56.3	超えず*	10	22	41	

\*1 GB 裏面：せっこうボード (GB) の非加熱側表面

\*2 外張断熱材表面：外張断熱材の加熱側表面

\*3 外張断熱材裏面：外張断熱材の非加熱側表面

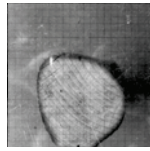
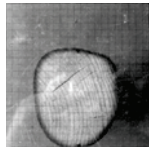
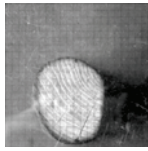
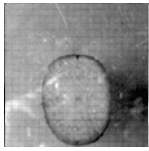
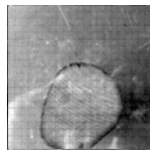
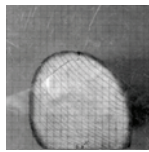
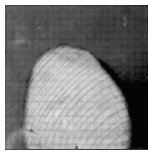
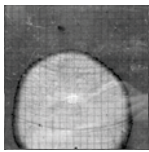
\*4 外張断熱材がない無断熱壁体、充てん断熱工法では、外張断熱材表面と同じく、柱の非加熱側正面が位置する防風層の非加熱側表面における値を示す。

### 1.3.4.2.2 柱の損傷

加熱終了後（60分加熱）の柱の最小断面を見ると、外張断熱工法、付加断熱工法ともに、柱の損傷は充てん断熱工法と同じく激しい（表 1-10）。屋内加熱 60 分に対し、加熱開始後早い段階で、火炎がせっこうボード（厚さ 9.5 mm）を突破して壁内に侵入したとみられる（図 1-12）。しかし断面積残存率は、外張断熱工法は 30%前後と無断熱壁体よりも小さい場合が見られたが、付加断熱工法ではいずれも 40%～50%に留まった（表 1-10）。

外張断熱工法では、柱が断熱材より加熱側に位置し、かつ中空層にむき出しとなる。柱角部、柱側面の温度は、外張断熱材により裏面側への放熱が妨げられ、無断熱壁体に比べ、一様に高く推移した（図 1-12）。そのため、外張断熱工法の方が、無断熱壁体よりも柱の損傷が進んだとみられる。屋内加熱に対する外張断熱工法の非損傷性は、外張断熱材によって無断熱壁体に比べ不利側に作用すると考えられる。

表 1-10 柱の最小断面における断面積残存率と断面二次モーメント、炭化速度（屋内加熱）

加熱面		屋内加熱			
断熱工法		無断熱	外張断熱工法		
試験体仕様		1.無断熱壁体	3-1.25 mm外張	3-2.60 mm外張	3-3.100 mm外張
柱断面写真	最小断面				
断面積残存率	最小断面	31.3%	32.7%	23.6%	24.9%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	最小断面	1.06×10 <sup>6</sup>	1.25×10 <sup>6</sup>	0.67×10 <sup>6</sup>	0.79×10 <sup>6</sup>
断面二次モーメント残存率	最小断面	10.4%	12.3%	6.3%	7.8%
柱角部・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.83	0.70	0.79	欠測
断熱工法		充てん断熱工法	付加断熱工法		
試験体仕様		2-3.100 mm充てん	4-1.25 mm付加	4-2.60 mm付加	4-3.100 mm付加
柱断面写真	最小断面				
断面積残存率	最小断面	25.9%	40.7%	44.2%	48.1%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	最小断面	0.73×10 <sup>6</sup>	1.61×10 <sup>6</sup>	1.99×10 <sup>6</sup>	1.97×10 <sup>6</sup>
断面二次モーメント残存率	最小断面	7.2%	15.9%	19.6%	19.5%
柱角部・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	欠測	0.70	0.79	0.84

※炭化速度(mm/分)：測定点ごとに、炭化深さ(mm)を柱の燃焼時間(分)で除した着火後の炭化速度の平均値。

※屋内加熱では柱の損傷が柱裏面まで及び、柱側面での加熱条件が柱側面からの一面加熱でなくなったため、柱側面の炭化速度は求めないこととした。

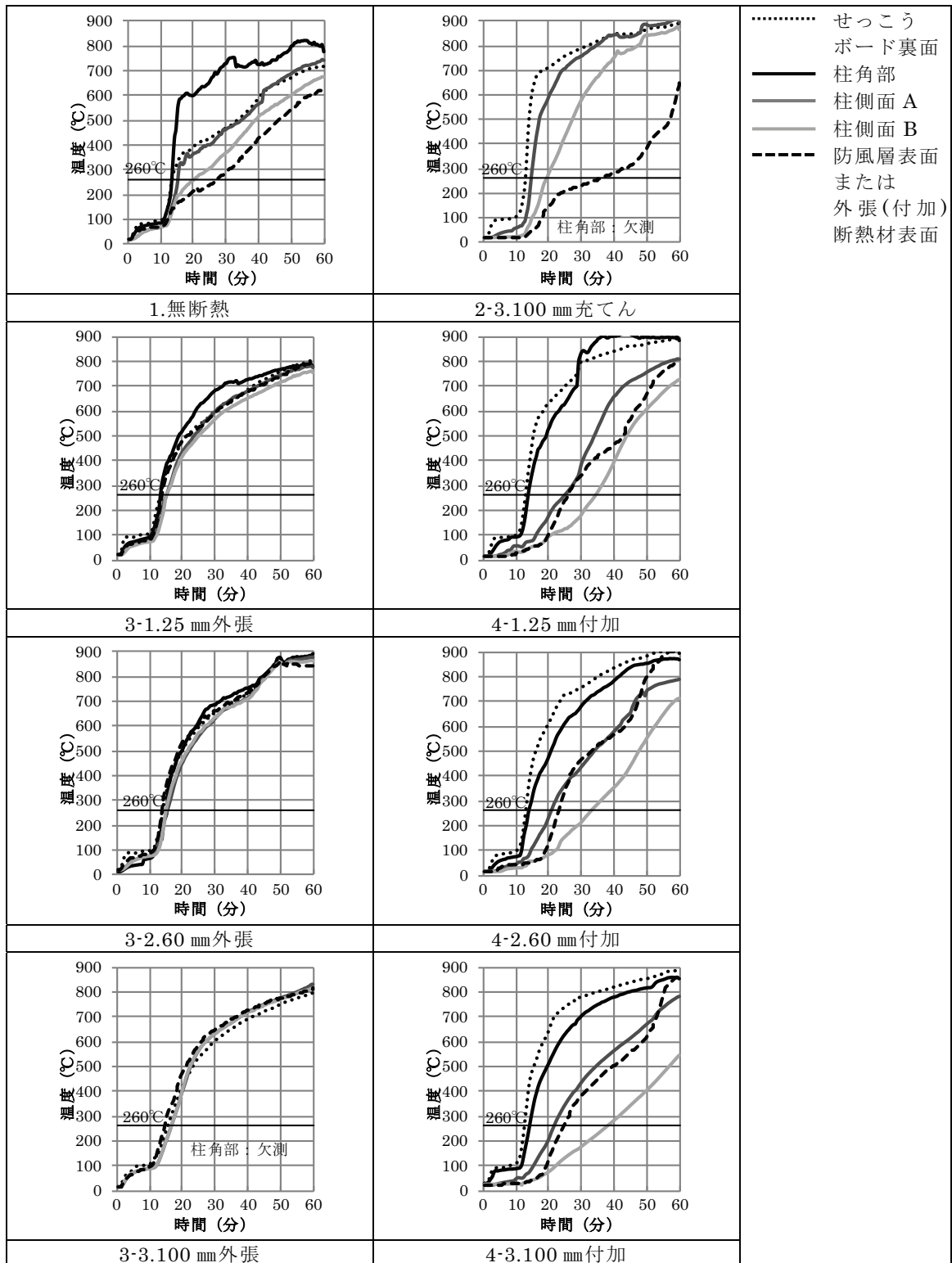


図 1-12 柱側面部の平均温度推移（外張断熱工法、付加断熱工法・屋内加熱）

一方、付加断熱工法は、屋内加熱に対して、充てん断熱工法に比べ、柱の背後にある付加断熱材により柱の非加熱側が断熱されるため、柱の損傷が進むと予測されたが、実験結果をみると、付加断熱工法では、充てん断熱工法ほど柱の損傷が進まなかった。

柱角部温度および柱側面温度（図 1-12）の推移を見ると、25 mm付加、60 mm付加、100 mm付加いずれも、100 mm充てんと同じく、加熱開始後、早い段階で壁内へ火炎が侵入したが、その後、付加断熱工法における柱側面 A および柱側面 B の温度は 100 mm充てんよりも遅れて上昇している。本実験では、付加断熱工法の方が、充てん断熱工法よりも、壁体内に入った火炎に対して、断熱材による柱の被覆効果が多少なりとも残存して、柱と断熱材の間の隙間を通る火熱が少なく、柱の損傷が低減されたとみられる。この要因については、軸間に断熱材を充てんした際に生じる柱と断熱材の密着の程度等に試験体間の施工誤差があった可能性も考えられ、壁内へ火炎が入った状態では、充てん断熱材により柱の損傷が低減された要因の分析は難しく、これ以上の考察ができなかった。

ここでも、1.3.3.2.2.における屋内加熱時における充てん断熱工法での検討と同じく、木造外壁における断熱材の位置や厚さと防火性能との関係について検討するためには、加熱側被覆により壁内へ火炎が侵入しない条件が前提として成立していないといけないことがわかった。

### 1.3.5 断熱工法が外壁の防火性能に及ぼす影響の基本的傾向に関するまとめ

木造外壁における断熱工法と防火性能との関係を把握する目的で、ロックウール断熱材を用いた木造壁体を対象に、小型試験体による加熱実験を行った。

断熱工法による外壁の構成が防火性能に及ぼす影響について、基本的な傾向を次の通り明らかにした。

- ・ある程度の断熱材厚さ（試験体では断熱材厚さ 25 mm）があれば、所定の遮熱性および遮炎性は確保でき、木造外壁の防火性能は非損傷性により決まる。
- ・充てん断熱工法では、断熱材の位置・厚さにより、加熱面に対する断熱材と柱との位置関係、壁体内の温度分布が変化し、柱が受ける損傷状況が異なる。充てん断熱材により柱断面の二次モーメントが低下し、柱の損傷に対し不利側に作用しており、非損傷性が低下する可能性がある。
- ・外張断熱工法では、屋外加熱時、外張断熱材が厚いほど防火性能は向上するが、屋内加熱時は、外張断熱材により柱周辺の温度は一様に高くなり、柱の損傷が進むため、非損傷性は不利側に作用する。
- ・付加断熱工法では、屋外加熱時、付加断熱材が厚いほど防火性能は向上する。但し、付加断熱工法では、充てん断熱材が柱の加熱側温度の上昇を助ける方向に働くと、外張断熱工法よりも柱の損傷が進んで、非損傷性が低下する可能性がある。
- ・充てん断熱工法および付加断熱工法では、屋内加熱時、柱が断熱材により被覆されていても、壁内に火炎の侵入を許すと、断熱材による柱の被覆効果は発現しなくなり、防火性能は断熱材に依存しなくなる。
- ・断熱材の位置や厚さが及ぼす防火性能への影響については、加熱側被覆により壁内へ火炎の侵入を防いでいる状態が前提となって、成立している。

以上のように、加熱面に対する断熱材の位置や厚さにより、柱の損傷が進んで、非損傷性が低下する、またはその可能性がある場合が見られ、木造外壁の防火性能は、断熱化により、必ずしも向上するとは言えないことが実験的に確認された。断熱工法と防火性能との関係は、単純に整理はできず、複雑であることがわかった。

また本実験では、この種の構成の壁では、内外装材の被覆厚を操作して準耐火構造まで用いられる可能性があると考え、防火構造外壁を想定した試験体を用いて、加熱時間を 60 分として検討を行っていた。しかし屋内加熱では、屋内側被覆が薄いため、



火炎が壁内に侵入して、断熱材の被覆効果が発現せず、断熱材の位置や厚さが及ぼす防火性能への影響について把握できなかった。そのため、断熱工法ごとに加熱方向に対する断熱材の位置、厚さと防火性能との関係は、屋外加熱について一般的な傾向を把握するに留まった。

そこで、あらためて試験体の設計仕様と加熱時間を検討対象である準耐火構造に合致させたうえで、火災加熱中に断熱材が溶融・燃焼しない場合としてロックウール断熱材を用いた木造外壁を対象に、断熱工法による外壁の構成が防火性能へ及ぼす影響を系統的に明らかにすることとした（第3章）。その上で、実験で得られる外壁内部の各層温度の推移や、外壁の層構成、断熱仕様に基づく計算等により、木造外壁の防火性能の優劣を予測できるか検討する方針とした。

## 1.4 溶融・熱分解する断熱材が外壁の防火性能に及ぼす影響の基本的傾向の把握

### —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に基づく検討

#### 1.4.1 検討の目的

グラスウール断熱材や発泡プラスチック断熱材は、ロックウール断熱材とは異なり、火災加熱時、断熱材の溶融や収縮、熱分解、燃焼などの現象を伴うと予想され、それらの現象は壁体内の温度分布に変化をもたらす可能性がある。このうち、グラスウール断熱材は、建築基準法上、不燃材料と位置付けられており燃焼はしないが、原料であるガラス繊維に成分が近いソーダ石灰ガラスの軟化点が文献値<sup>50)</sup>で720℃～730℃とあり、火災加熱時に断熱材の溶融や収縮等が生じると想定できる。

一方、発泡プラスチック断熱材は、断熱材厚さが増すほど、断熱性能が高まり遮炎性・遮熱性は有利に働くと予想されるが、火災加熱により溶融する可能性があるものがあるうえ、可燃性を有する。そのため発泡プラスチック断熱材は、壁体内で燃焼する可能性があり、壁体内の可燃物量の増大が防火性能の低下につながる懸念がある。

そこで本節では、発泡プラスチック断熱材が木造外壁の防火性能に及ぼす影響について、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用いて、その基本的な傾向を検討する。

#### 1.4.2 検討方法

発泡プラスチック断熱材が防火性能に及ぼす影響について検討を進めていくにあたり、発泡プラスチック断熱材のメーカー各団体より提供を受けた実大規模の木造外壁の载荷加熱試験<sup>注3)</sup>の試験データを用いた。

この試験データは、発泡プラスチック断熱材を用いた外張断熱工法の木造外壁を対象に、4種類の発泡プラスチック断熱材(押出法ポリスチレンフォーム(以下、XPS)、ビーズ法ポリスチレンフォーム(以下、EPS)、硬質ウレタンフォーム(以下、PUF)、フェノールフォーム(以下、PF))について、断熱材の種類ごとに、外張断熱材の厚さを変えて载荷加熱試験を行ったものである。以降、試験体は、断熱材の略称に応じて、それぞれXPS壁体、EPS壁体、PUF壁体、PF壁体と称す。

試験データの提供を受けた試験体の仕様を図 1-13 に示す。試験体はすべて共通して、幅 2,000 mm×高さ 3,030 mmの木製軸組造外壁である。外装材には、XPS 壁体では木繊維補強セメント板(厚さ 12 mm)が、EPS 壁体、PUF 壁体、および PF 壁体では、木繊維混入セメント・けい酸カルシウム板(厚さ 12 mm)が用いられている。内装材には、PF 壁体では、せっこうボード(厚さ 15 mm)が、XPS 壁体、EPS 壁体および

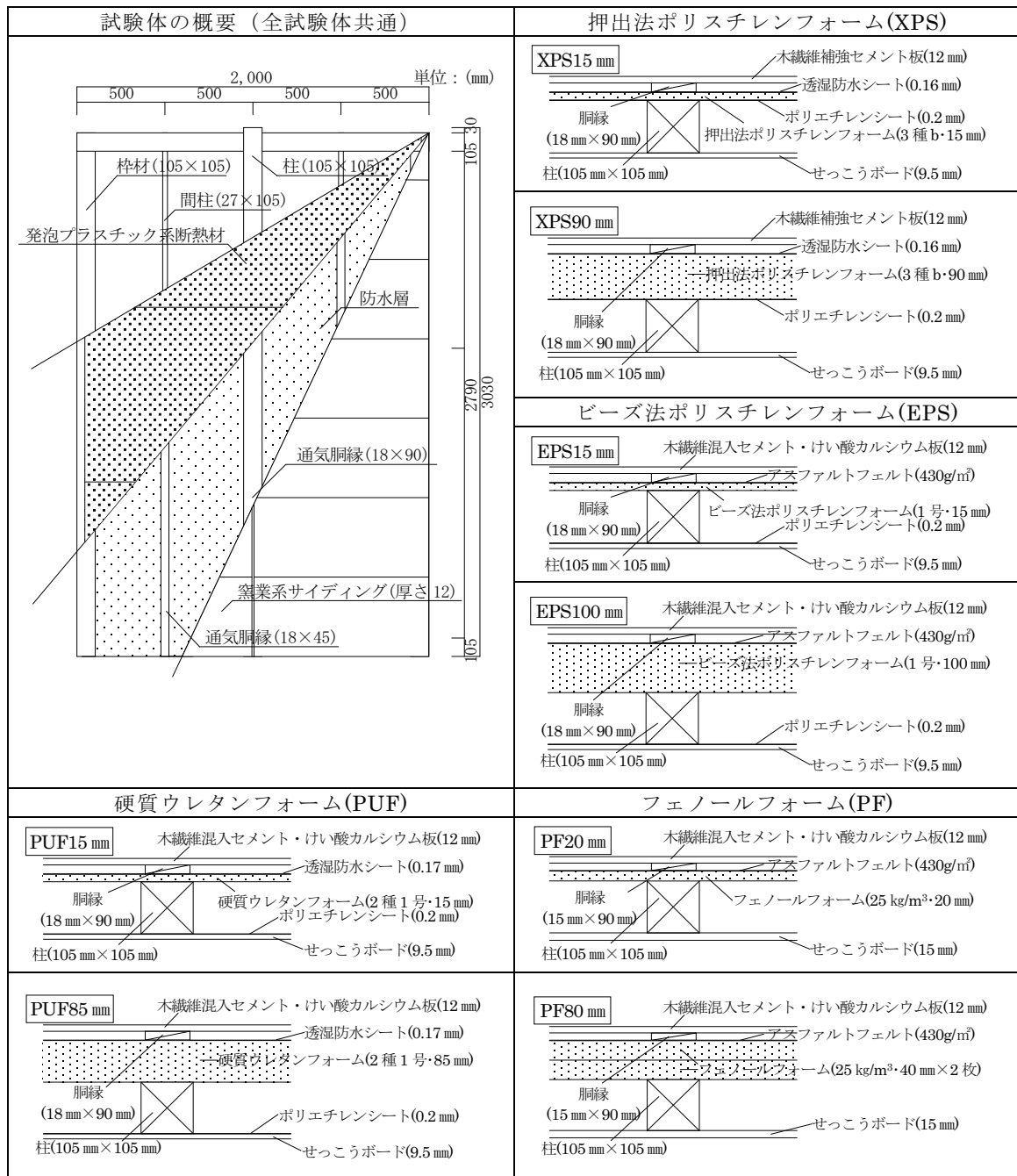


図 1-13 試験体概要および断熱材の種類ごとの試験体仕様

PUF 壁体では、せっこうボード（厚さ 9.5 mm）が用いられている。PF 壁体は準耐火構造外壁、XPS 壁体、EPS 壁体および PUF 壁体は防火構造外壁に相当する外壁仕様といえる。

試験体は、4 種類の種類に対し、外張断熱材厚さが異なる 2 体ずつ、計 8 体が用意され、外張断熱材の厚さは、XPS 壁体で 15 mm と 90 mm、EPS 壁体で 15 mm と 100 mm、PUF 壁体で 15 mm と 105 mm、PF 壁体で 20 mm と 80 mm（40 mm を 2 枚重ね）である。

温度測定は、試験体裏面に加えて、外張断熱材の加熱側表面（以下、断熱材表面）と外張断熱材の非加熱側表面（以下、断熱材裏面）に熱電対を設置して測定している。加熱方向はすべて屋外加熱とし、試験時間は、PF 壁体では 45 分、XPS 壁体、EPS 壁体および PUF 壁体では、遮熱性が失われるまで（試験体裏面の温度上昇度が、平均値で 140K または最高値で 180K を超えるまで）としている。

#### 1.4.3 発泡プラスチック断熱材の試験データの考察

試験結果を表 1-11 に、壁体各層の平均温度推移を図 1-14 にそれぞれ示す。

屋外加熱に対し、すべての試験体で 30 分防火構造の性能を満たしたが、45 分準耐

表 1-11 非損傷性、遮炎性および遮熱性に関する試験結果（屋外加熱）

断熱材の種類		押出法 ポリスチレンフォーム		ビーズ法 ポリスチレンフォーム		硬質ウレタン フォーム		フェノール フォーム			
(JIS <sup>50</sup> 上の規格)		(XPS-3 種 b)		(EPS-1 号)		(PUF-2 種 1 号)		(PF-1 種 2 号)			
断熱材の密度 (kg/m <sup>3</sup> )		41		33		53		26			
断熱材厚さ		15 mm	90 mm	15 mm	100 mm	15 mm	85 mm	20 mm	80 mm		
加熱時間 (分)		39.5	44.5	42	47	44	54	45	45		
非損傷性	最大軸方向収縮量 (mm)	0.6	0.6	0.9	1.0	0.7	1.1	0.6	0.4		
	最大軸方向収縮速度 (m/分)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1 未満	0.1 未満		
遮炎性		なし		なし		なし		なし			
遮熱性①	初期温度 (°C)		22	23	18	20	20	27	33	29	
	最大裏面温度上昇度 平均 (K)		89	106	91	107	83	57 <sup>*1</sup> , 74 <sup>*2</sup>	50	33	
	(時間) (分)		(39.5)	(44.5)	(40)	(43)	(44)	(45), (54)	(45)	(45)	
	最大裏面温度上昇度 最高 (K)		194 <sup>*2</sup>	208 <sup>*2</sup>	190 <sup>*2</sup>	146 <sup>*1</sup> , 190 <sup>*2</sup>	193 <sup>*2</sup>	74 <sup>*1</sup> , 217 <sup>*2</sup>	61	61	
(時間) (分)		(39.5)	(44.5)	(42)	(45), (47)	(44)	(45), (54)	(45)	(45)		
遮熱性②	裏面温度 上昇度 (柱部除く) <sup>*3</sup>	30 分	平均 (K)	83	75	76	69	67	6	31	3
		最高 (K)	86	80	78	71	75	9	34	3	
	45 分	平均 (K)	—	—	—	104	—	61	56	43	
		最高 (K)	—	—	—	146	—	74	60	61	

\*1 加熱時間が 45 分を超えているため、加熱開始後 45 分時点での最大値をあわせて示す。

\*2 裏面温度上昇値の最高値が、遮熱性の判断基準である 180K を超えており、遮熱性を喪失している。

\*3 断熱材間の遮熱性の比較をより明確にするため、柱部で測定した裏面温度を外して、断熱材部で測定した裏面温度より、裏面温度上昇度を求めている。

火構造としてみると、PF 壁体では 2 体とも性能を満たしたものの、XPS 壁体の 2 体並びに、断熱材厚さ 15 mm の EPS 壁体および PUF 壁体で、性能を満たさなかった。

PF 壁体では、内装材にせっこうボード 15 mm が用いられていたのに対し、XPS 壁体、EPS 壁体、PF 壁体では、防火構造の外壁として設計され、内装材にせっこうボード 9.5 mm が用いられていたため、30 分の遮熱性を満たしたものの、45 分の遮熱性を有さず、準耐火構造の性能を満たさなかったとみられる。

発泡プラスチック断熱材の厚さによる遮熱性の優劣は、断熱材の種類を問わず、いずれも断熱材が厚い方が高い遮熱性を示す結果となった（表 1-11）。外張断熱工法では、外張断熱材が厚くなると、壁厚も外張断熱材厚さに応じて厚くなるため、遮熱性にとって有利になる面はある。しかし既往試験データからは、少なくとも、発泡プラスチック断熱材が厚くなることにより、1.4.1 で当初、懸念していた壁体内の可燃物量の増大による防火性能の低下は認められない。

壁体各層の平均温度の推移（図 1-14）を見ると、PF80 mm 壁体で、加熱開始 30 分手前より外装材の脱落等によると見られる断熱材表面温度の急激な上昇があった点を除くと、壁体内において断熱材の燃焼を示唆するような急激な温度上昇は見られなかった。断熱材が内外装材等により被覆された条件下では、発泡プラスチック断熱材は

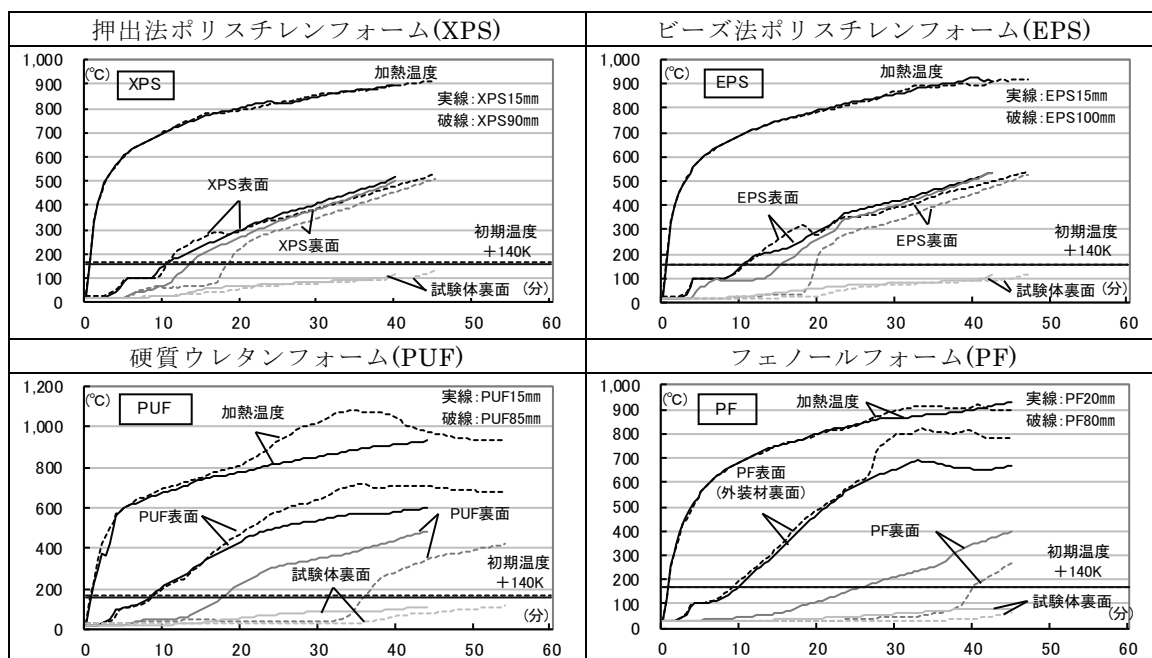


図 1-14 断熱材の種類ごとの各層の平均温度の推移（屋外加熱）

加熱を受けても、壁体内部における着炎燃焼は起こらないと考えられる。

また、同程度の断熱材厚さであっても、断熱材の種類により、壁体内部の温度推移は異なった。XPS90 mm壁体および EPS100 mm壁体では、加熱開始 20 分過ぎには、断熱材表面と断熱材裏面（図 1-14 中、XPS 表面と XPS 裏面、EPS 表面と EPS 裏面が該当）の温度差がほぼなくなっており、熱可塑性樹脂である XPS、EPS は、この時点でともにの溶融しており、壁体内は空洞になっているとみられる。

一方、熱硬化性樹脂である PUF85 mm壁体では加熱開始 35 分頃に、PF80 mm壁体では加熱開始 40 分頃に、断熱材裏面（図 1-14 中、PUF 裏面、PF 裏面が該当）の温度が急激に上昇して、それ以降、断熱材表面と断熱材裏面（図 1-14 中、PUF 表面と PUF 裏面、PF 表面と PF 裏面が該当）の温度差が小さくなっている。この時間に PUF、PF の熱分解が断熱材裏面に達して、壁体の断熱性が大きく低下したとみられる。但し断熱材表面と断熱材裏面の温度差は、加熱終了まで、少なくとも PUF85 mm壁体で 250℃以上、PF80 mm壁体で 500℃以上あり、PUF、PF は加熱終了まで、断熱性を完全に喪失しておらず、ある程度、形状を保っていたと考えられる。

断熱材の溶融や熱分解の進行による壁体の断熱性低下が起きた時間は、早い順から XPS・EPS、PUF、PF となり、この時間が早いほど、壁体の遮熱性も低くなる傾向が確認された。従って、断熱材の溶融や熱分解の進み方が、木造外壁断熱工法の防火性能に支配的な影響を及ぼしていると言える。

以上より、内外装材等により発泡プラスチック断熱材の被覆が保持され、着炎燃焼しない条件下であれば、発泡プラスチック断熱材が木造外壁の防火性能に及ぼす影響は、断熱材の高温性状に基づき、断熱材の溶融や熱分解の進捗を踏まえて考察することで把握できると考えられる。

ただし発泡プラスチック断熱材は、内外装材等の損傷、脱落等により直接、火炎に曝されると燃焼し、防火性能に大きな影響を及ぼすと想定される。従って、発泡プラスチック断熱材については、断熱材単体の燃焼性もあわせて把握しておく必要がある。

#### 1.4.4 溶融・熱分解する断熱材が外壁の防火性能に及ぼす影響の基本的傾向に関するまとめ

本節では、木造外壁断熱工法に用いる断熱材が防火性能に及ぼす影響を検討するにあたり、断熱材の状態が火災加熱を受けて変化する可能性のある断熱材として、グラスウール断熱材および発泡プラスチック断熱材を取り上げた。

そのうち、発泡プラスチック断熱材は、火災加熱時に壁体内で溶融や燃焼する可能性があるため、断熱材厚さを増すことで壁体内での可燃物量の増大につながり、防火性能を低下させる懸念がある。

そこで本節では、さらに発泡プラスチック断熱材が防火性能に及ぼす影響について、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より、基本的な傾向を検討し、次の見通しが得られた。

- ・発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁の遮熱性は、種類を問わず、いずれも断熱材が厚い方が高くなり、壁体内の可燃物量の増大による防火性能の低下は起こらなかった。
- ・熱可塑性樹脂である XPS、EPS は、火災加熱時、厚さが 90 mm や 100 mm であっても、加熱開始 20 分過ぎには溶融して、壁体内は空洞になっているとみられる。
- ・熱硬化性樹脂である PUF、PF は、熱分解が断熱材裏面に達すると、壁体の断熱性は大きく低下するが、加熱終了まで断熱性を完全に喪失しておらず、ある程度、形状を保っていたと考えられる。
- ・発泡プラスチック断熱材が内外装材等により被覆された条件下では、火災加熱時、壁体内部での断熱材の着炎燃焼は見られず、断熱材の溶融や熱分解が進行する。この進み方が、木造外壁内部の温度分布および木造外壁の防火性能に支配的な影響を及ぼす。
- ・発泡プラスチック断熱材が木造外壁の防火性能に及ぼす影響は、各種発泡プラスチック断熱材の高温性状に基づいて、断熱材の溶融や熱分解の進捗を踏まえて考察することで把握できる。
- ・内外装材等による断熱材の被覆機能が失われ、断熱材が直接、火炎に曝されると、発泡プラスチック断熱材は燃焼し、防火性能に大きな影響を及ぼすと想定される。発泡プラスチック断熱材の燃焼性もあわせて把握しておく必要がある。

## 1.5 本章のまとめ：課題の整理・検討方針と本論文の構成

外壁の断熱化は、建築物における省エネルギー、快適性を実現する重要な基盤技術である。木造外壁の断熱仕様は多種多様であり、断熱材の種類・厚さ、断熱工法による断熱材の位置それぞれの要因が重なり合って防火性能に複雑な影響を及ぼす。そのため、断熱仕様と防火性能を結び付ける指針は整備されておらず、木造外壁の防火性能評価・壁体開発は、仕様ごとに個別に対応せざるを得ず、新規の壁体開発を停滞させている。

本論文は、このような背景のもと、木造外壁の防火性能評価を合理的かつ円滑に行うために、また、木造外壁の新規開発に対し要求される防火性能を的確に満足し得る壁体設計を可能とし負担を軽減するために、これまでほとんど検討されてこなかった木造外壁の断熱仕様と防火性能の関係を、小型試験体を用いた実験により系統的に検討、把握して、木造外壁の断熱仕様から防火性能を予測するための知見を導こうとするものである。

本章では、1.1 で本研究の背景となる性能評価・開発上の課題および解決に向けた本研究の目的を述べた上で、1.2 で断熱材と木造外壁の防火性能の関係に関する既往研究のレビューを行い、本研究の位置づけを行った。そして、1.3 および 1.4 では、外壁の防火性能に対し、断熱工法による断熱材の位置や厚さが及ぼす影響と断熱材自体の熔融・燃焼が及ぼす影響の2つの視点から、防火構造を想定した一般的な断熱仕様の試験体により断熱仕様と防火性能の基本的な傾向を把握した。

1.3 で示したロックウール断熱材を用いた木造外壁断熱工法と防火性能の検討では、遮熱性・遮炎性については、断熱材厚さが増すと向上する単純な見通しが得られた。

しかし、断熱材の位置や厚さにより柱が受ける損傷状況が異なるため、非損傷性については、断熱化により一概に向上するとは言えず、断熱工法による断熱材の位置や厚さと防火性能との関係は複雑であることがわかった。

一方、今回の検討では、内装材の被覆厚が薄かったため、屋内加熱時に、内装被覆が破られて、壁内への火炎の侵入を許すと、断熱材の被覆効果、断熱性が発現せず、断熱材の位置や厚さが及ぼす柱の損傷への影響について把握できなかった。そのため、断熱工法ごとに加熱方向に対する断熱材の位置、厚さと防火性能との関係は、屋外加熱を中心に一般的な傾向を把握するに留まった。

あらためて準耐火構造外壁として、内装被覆をはじめ、試験体の設計仕様と加熱時



間を合致させて、断熱工法と防火性能との関係を調べた上で、木造外壁の防火性能の優劣を予測できるか検討する必要がある。

次に 1.4. で示した火災加熱中に熔融や燃焼等が起こる断熱材と防火性能の検討では、検討対象としてグラスウール断熱材と発泡プラスチック断熱材を取り上げた。

そのうち、発泡プラスチック断熱材は、火災加熱時、内外装材等により被覆された条件下では、着炎燃焼は見られず、熔融や熱分解が進行する。この断熱材の熔融や熱分解の進み方が、木造外壁の防火性能に支配的な影響を及ぼすことがわかった。従って、発泡プラスチック断熱材と防火性能の関係も、断熱材の高温性状に基づき、断熱材の熔融や熱分解の進捗状況を確認しながら考察することで把握できる。但し、発泡プラスチック断熱材は、直接、火炎に曝されると燃焼し、防火性能に大きな影響を及ぼすため、断熱材の燃焼性についても、高温性状とあわせて把握しておくこととした。

なお、グラスウール断熱材は火災加熱中に燃焼しないが、熔融や収縮等が起きると想定される。グラスウール断熱材と防火性能との関係は、火災終了まで熔融や燃焼が生じないロックウール断熱材の場合との違いを、グラスウール断熱材の高温性状に基づき考察することにより把握できると考えられる。

以上より、第 1 章では、既往研究や実験による検討をもとに、本研究を進めていくにあたっての論点を整理し、検討方針を明らかにした。この検討方針のもとで、本論文の各章で取り上げる課題を要約すると以下の通りとなる。

第 2 章では、断熱仕様と木造外壁の防火性能の関係を検討するために、各種断熱材の基本情報として、断熱材の高温性状を示す物性値を既往文献調査や測定等により収集する。発泡プラスチック断熱材については、可燃性を有するため、各種断熱材の基本的な燃焼性状を把握する。加えて発泡プラスチック断熱材は、同じ名称で表される断熱材であっても、製品仕様の差異が本研究で対象とする木造外壁だけでなく、断熱材を含む建築部材すべての防火性能に影響を及ぼす可能性がある。そのため、防火性能評価の観点から発泡プラスチック断熱材の優劣を判断できるようにするため、簡易な試験により測定できる断熱材の材料物性の中から、燃焼性と相関性の高い材料物性を検討する。

第 3 章では、外壁の構成要素と断熱材の位置関係による防火性能への影響を明らか

にするため、加熱中に断熱材が溶融・燃焼することがないロックウール断熱材を用いた準耐火構造相当の木造外壁（軸組造を想定）を対象に、小型試験体による加熱実験を実施する。そして一次元の定常熱伝導計算を行って、壁体内における断熱材の位置や厚さなど、木造外壁の層構成や断熱仕様から防火性能の優劣を予測するための知見を誘導する。

第4章では、火災加熱中に溶融・収縮する断熱材としてグラスウール断熱材を取り上げる。グラスウール断熱材の溶融・収縮が、外壁の防火性能に及ぼす影響を明らかにするため、グラスウール断熱材を用いた準耐火構造相当の木造外壁（軸組造を想定、充てん断熱工法）を対象に、小型試験体による加熱実験を実施する。そして断熱材の密度をパラメータとして変化させ、ロックウール断熱材の場合と比較しながら、グラスウール断熱材の高温性状に基づいた考察を加えて、グラスウール断熱材を用いた木造外壁の防火性能の予測可能性を検討する。

第5章では、第4章のグラスウール断熱材に引き続き、火災加熱中に溶融、熱分解に至る断熱材として、各種発泡プラスチック断熱材を取り上げる。発泡プラスチック断熱材の溶融・熱分解が外壁の防火性能に及ぼす影響を明らかにするため、発泡プラスチック断熱材を用いた準耐火構造相当の木造外壁（軸組造を想定、充てん断熱工法）を小型試験体による加熱実験を実施する。さらに詳細な検討として、壁体内の発泡プラスチック断熱材の挙動および着炎燃焼の有無を目視で確認するとともに、断熱材仕様による溶融、熱分解挙動の差異が、遮熱性に及ぼす影響を調べる。

これらの結果に、断熱材の種類ごとに、断熱材の高温性状、溶融・熱分解挙動に基づいた考察を加えて、発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁の防火性能の予測可能性を検討する。

第6章では、これまで本章で提示した目的、断熱材・断熱工法と防火性能に関する課題に対し、第2章～第5章の検討によって得られた成果を述べ、本研究の成果と今後の課題を明らかにする。

本論文の構成は、図 1-15 に示す通りになる。

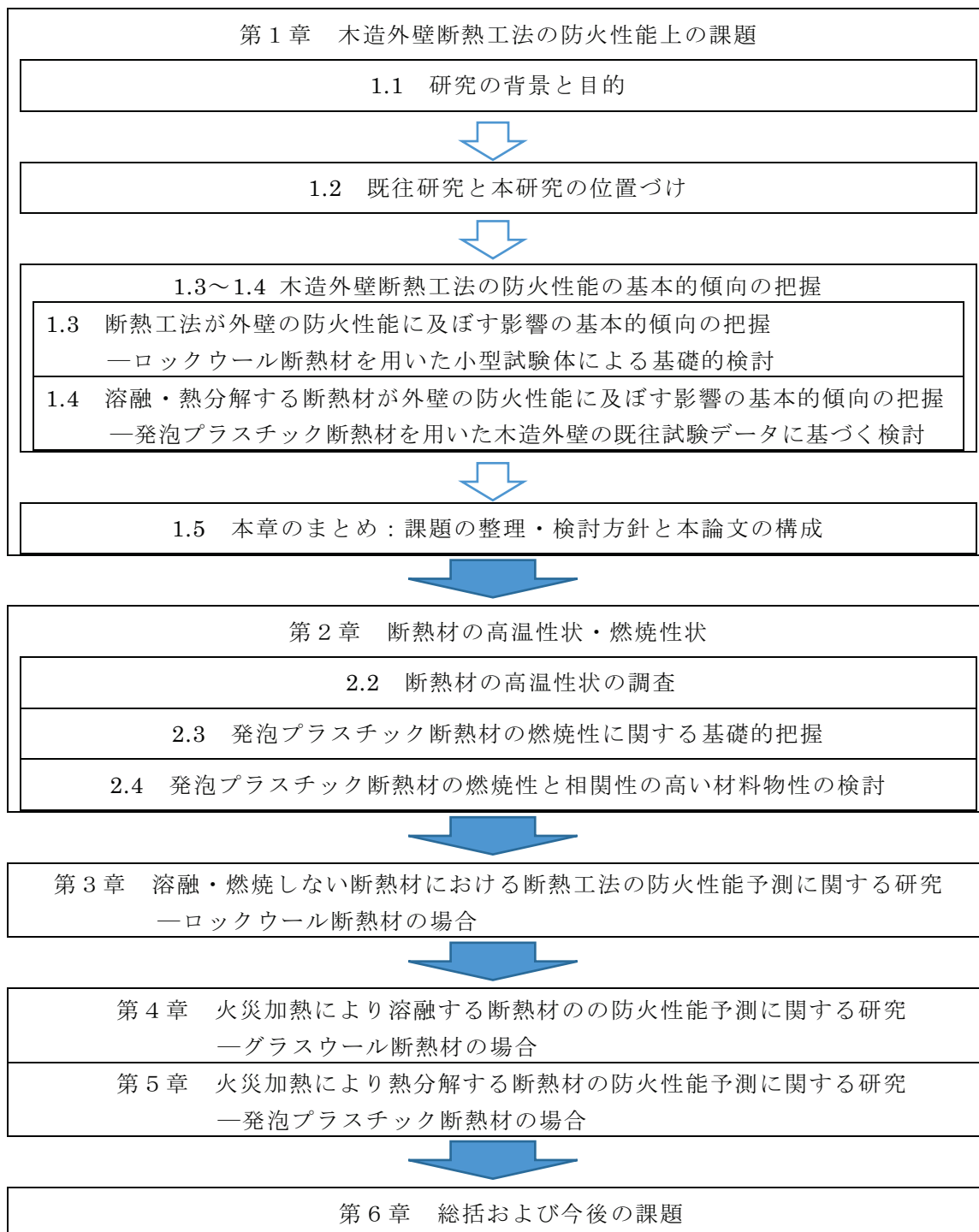


図 1-15 本論文の構成

## 【参考文献】

- 1) 国土交通省住宅局住宅指導課, 住宅生産課: 「今後の住宅・建築物の省エネルギー対策のあり方について」(第二次答申)(参考資料), 2019.1.31,  
<https://www.mlit.go.jp/common/001275971.pdf> (参照日 2019.6.10)
- 2) 国土交通省: 建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律の一部を改正する法律(令和元年5月17日公布)概要, 2019.5.17,  
<https://www.mlit.go.jp/common/001289407.pdf> (参照日 2019.6.10)
- 3) 財団法人建築環境省エネルギー機構: 住宅の省エネルギー基準の解説第3版第7刷, pp187-192, 2010.12
- 4) (財)建築環境・省エネルギー機構: 断熱建材出荷統計, 2017
- 5) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構: 防耐火性能試験・評価業務方法書, 2017.3
- 6) 日本工業標準調査会: 日本工業規格 JIS A 1301 建築物の木造部分の防火試験方法, 1994<sup>注4)</sup>
- 7) 日本工業標準調査会: 日本工業規格 JIS A 1304 建築構造部分の耐火試験方法, 1994<sup>注5)</sup>
- 8) 佐藤寛, 菅原進一, 山田誠: 木造住宅の床及び壁の延焼防止に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 1988.10
- 9) 増田秀昭, 塚越功, 山田誠: 木質系区画部材の防火性(その1. 壁および床部材), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 1989.10
- 10) 高山英之, 長谷見雄二, 野原聰哲, 泉潤一: 木質系壁工法の防火性能に関する実験的研究 その1 実験方法と2×4工法に関する実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 1989.10
- 11) 中林卓哉, 長谷見雄二, 野原聰哲, 山田誠: 木質系壁工法の防火性能に関する実験的研究 その2 在来工法に関する実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 1989.10
- 12) 山田誠, 菅原進一, 佐藤寛: 木質系外壁構造の耐火性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 1991.9
- 13) 山田誠, 菅原進一, 佐藤寛, 最上滋二, 高田峰幸: 在来軸組工法の外壁構造の耐火性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 1993.9
- 14) 山田誠, 菅原進一, 佐藤寛, 最上滋二, 高田峰幸: 木質系乾式壁構造の耐火性能の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 1994.9
- 15) 吉川利文, 仲谷一郎, 須藤昌照, 中村賢一: 载荷加熱試験による防火構造外壁等の耐火性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 1998.9
- 16) 吉川利文, 仲谷一郎, 須藤昌照, 金城仁, 中村賢一: 载荷加熱試験による不燃下地防火構造外壁の耐火性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 2000.9
- 17) 高田峰幸, 佐藤寛, 最上滋二, 山田誠: 60分を超える耐火性能を有する木造区画壁の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 2000.9
- 18) 高田峰幸, 中村賢一, 佐藤寛, 最上滋二, 山田誠: 枠組壁工法による間仕切壁の耐火性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 1994.9
- 19) 青木浩, 菅原進一, 西脇武, 樋口憲爾: 無機質系断熱材の防・耐火性能実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 1989.10
- 20) 野秋政希, 牧野淳, 大宮喜文, 安井昇, 山田誠, 宮林正幸, 泉潤一, 清野明, 小川直紀, 小藤捷吾: 木造枠組壁工法の壁の各部の仕様が防耐火性能に及ぼす影響 その1 実験概要および断熱材の種類による影響, 日本火災学会研究発表会梗概集, 2011.5
- 21) 日本建築センター: 外断熱工法の防火に関する研究報告書, 1985.6
- 22) 吉岡英樹, 楊欣潔, 田村政道, 吉田正志, 野口貴文, 兼松学, 小浦孝次, 尾崎泰治: 外断熱工法外壁の燃え拡がり性状を評価する新しい試験方法の検討, 日本建築学会技術報告集, 第17巻, 第36号, pp.537-542, 2011.6
- 23) 吉岡英樹, 西尾悠平, 田村政道, 吉田正志, 野口貴文, 兼松学, 安藤達夫, 小浦孝次, 富松太基, 尾崎泰治: 外断熱工法外壁の燃え拡がり性状を評価する新しい試験方法の検討, 日本建築学会技術報告集, 第19巻, 第42号, pp.595-600, 2013.6
- 24) 小國勝男, 菅原進一, 高田司: 建物用途における合成高分子材料の防火性(その2 工法実験: 火焰伝播性, 延焼性, 断熱材の燃焼性), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 1986.8
- 25) 鈴木弘昭, 宮沢辰紀: 有機系断熱材料を用いた壁体の加熱時の燃焼性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 1985.10
- 26) 須藤昌照, 沼川次郎, 泉潤一, 吉川利文, 中村賢一: 断熱パネルを用いた枠組壁工法建築物外壁の耐火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 1999.9
- 27) 水野敬三, 柳澤孝次, 加納英範: 構造パネルにMDFを用いた断熱パネルの耐火性能, 日本建築

- 学会大会学術講演梗概集（東北），2000.9
- 28) 森本博，小國勝男：フェノール樹脂発泡体の難燃性，日本火災学会昭和 40 年度秋季学術講演会梗概集，1965.11
- 29) 小國勝男：プラスチックフォームの燃焼性，日本火災学会昭和 47 年度秋季学術講演会梗概集，1972.5
- 30) 笹川文隆，堀内智，川越邦雄：ウレタンフォームの燃焼性，日本火災学会学術講演会梗概集，1978.5
- 31) 田代侃，沼田修：硬質ウレタンフォームの発泡性状と難燃性，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），1989.10
- 32) 田代侃，沼田修：金属サイディングの性能向上に関する研究（ノボラック型フェノールフォームについて），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），1992.8
- 33) 田口信子，堀長生，川地武，高橋晃一郎：有機系断熱材のコーンカロリー計による燃焼性評価 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），2000.9
- 34) 高橋晃一郎，堀長生：有機系断熱材の火災リスク評価 押出法ポリスチレンフォームの燃焼特性 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），2004.10
- 35) 吉岡英樹，吉田正志，荻原一郎，五頭辰紀，成瀬友宏，野口貴文，崔国臣：湿式外断熱工法の材料の燃焼特性に関する基礎的研究（その 1）コーンカロリーメータ試験による発熱量の把握、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），2008.8
- 36) 水野敬三，市原英樹，谷垣勝彦：現場発泡硬質ポリイソシアヌレートフォームの燃焼性 その 1 燃焼性実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），1997.9
- 37) 市原英樹，水野敬三，谷垣勝彦：現場発泡硬質ポリイソシアヌレートフォームの燃焼性 その 2 燃焼メカニズムの解明，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），1997.9
- 38) 小國勝男，藤中英生：断熱工法に用いるポリウレタンフォームの燃焼性，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），1988.10
- 39) 齋藤仁，山本康弘，菅原進一：発泡断熱材の耐火性能の評価方法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 512 号，pp197-204，1998.10
- 40) 齋藤仁，山本康弘，菅原進一：発泡断熱材の燃焼生成物等の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 520 号，pp141-146，1999.6
- 41) 齋藤仁，山本康弘，菅原進一：発泡断熱材の火災初期時における燃焼性の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 521 号，pp163-168，1999.7
- 42) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9521 住宅用人造鉱物繊維断熱材，2003<sup>注 6)</sup>
- 43) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9504 人造鉱物繊維保温材，2004<sup>注 7)</sup>
- 44) International Organization for Standardization：ISO 834-1 Fire resistance tests Reaction-to-fire tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements，1999
- 45) 北海道立北方建築総合研究所：防耐火性能試験・評価業務方法書，2007.11<sup>注 8)</sup>
- 46) 日本火災学会編：火災便覧第 3 版，共立出版，1997.5
- 47) 安井昇・長谷見雄二・秋月通孝・馬屋原敦・大西卓・上島基英・畑俊充・木村忠紀・田村佳英・村上博：木造土壁の各部仕様が防耐火性能に及ぼす影響，日本建築学会環境系論文集，第 567 号，pp7-13，2003.5
- 48) 安井昇・清水真理子・長谷見雄二・村上雅英・上島基英・木村忠紀・北後明彦・田村佳英・吉田正友・山本幸一：柱圧縮実験による木造土壁の火災加熱時の非損傷性予測と木造土壁外壁の防火設計，日本建築学会環境系論文集，第 574 号，pp1-6，2003.12
- 49) 清水真理子・長谷見雄二・村上雅英・安井昇：木造真壁の耐火性能予測，日本建築学会構造系論文集，第 611 号，pp165-170，2007.1
- 50) (一社)日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック第 3 版，2017.2
- 51) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9511 発泡プラスチック保温材，2006（現行の JIS 規格は 2017 に改定）

## 注

- 注 1) 「火熱」という表現は、防火工学では一般的に使われていないが、ここでは、壁体内部への火炎の貫通または被覆材等を通じた熱伝導により、壁体を構成する部材が強い加熱を受ける状況を総称して「火熱」と表現した。どちらも「加熱」ではあるが、それに至る経過と加熱機構は大きく異なっており、一般的な表現である「加熱」では論点の一部を見失う可能性があるからである。
- 注 2) 柱角部および柱側面の表面付近温度を測定する熱電対は、試験体製作時に柱表面に接する状態でステーブルで固定した。実験時、柱が炭化・燃焼した後の測定値は、熱電対と柱表面との間に隙間が生じて、厳密には柱表面近傍の温度を測定している可能性がある。この点を認識した上で、本実験では、柱角部温度、柱側面温度として扱っている。
- 注 3) 本論文では、「実験」と「試験」という 2 つの表現を用いているが、把握されていない事実・法則性等の把握を目的として、方法が計画され、結果の分析がされるものを「実験」、方法や結果の評価基準が予め明確化されていて、それに準拠して実施されたものを「試験」と呼んで区別した。但し、「実験」に使われる材料、部材等は、本分野の習慣に従って「試験体」と表現している。
- 注 4) 本文に該当する JIS A 1301 を示す。現行の JIS A 1301 は 2011 年に改訂されている。
- 注 5) 本文に該当する JIS A 1304 を示す。現行の JIS A 1304 は 2017 年に改訂されている。
- 注 6) 実験時に参照した JIS A 9521 住宅用人造鉱物繊維断熱材を示す。現行の JIS 規格は JIS A 9521 建築用断熱材となり、2017 年に改訂されている。
- 注 7) 実験時に参照した JIS A 9504 を示す。現行の JIS A 9504 は 2017 年に改訂されている。
- 注 8) 実験時に参照した防耐火性能試験・評価業務方法書を示す。現行の防耐火性能試験・評価業務方法書は、2017 年 3 月に改訂されており、参考文献 5) に該当する。

## 第2章 断熱材の高温性状・燃焼性状

### 2.1 本章の目的

第1章において、木造外壁の防火性能は、断熱材の高温時の熔融・分解の有無や物性の変化に大きく影響を受けることが明らかになった。木造外壁の断熱仕様（断熱材・断熱工法）と防火性能（遮熱性・遮炎性・非損傷性）との関係を把握するためには、断熱仕様が防火性能に及ぼす作用や現象について、断熱材の物性にに基づき考察を行う必要がある。

2.2 では、断熱仕様と木造外壁の防火性能の関係を検討するために、必要となる断熱材に関する情報整理を目的に、断熱材の種類ごとに、断熱材の高温性状を示す物性値を既往文献等より調査し、実験に用いる断熱材については測定を加えて把握する。

2.3 では、可燃性を有する発泡プラスチック断熱材については、その燃焼性が防火性能に大きな影響を及ぼすため、断熱材を燃焼させて、断熱材の燃焼性状を把握する。

2.4 では、発泡プラスチック断熱材は、物質として同じ名称で表されるものであっても、製品や製造工程によって、樹脂の原料組成や発泡剤、難燃剤、密度などが異なる場合がある。これら製品間の差異は、断熱材の燃焼性や熱分解挙動に変化をもたらす。本論文で対象とする木造外壁だけでなく建築部材すべての防火性能に影響を及ぼす可能性がある。断熱材を用いた建築部材の開発や防耐火構造の認定取得後の品質管理等において、製品間の差異による断熱材の燃焼性、建築部材の防火性能への影響を把握し、断熱材の品質を制御して、建築部材として所定の防火性能を確保できるようにすることは、重要な課題であると考えられる。

そのため、発泡プラスチック断熱材について、製品情報や簡易な試験により、製品間の差異による燃焼性の違いを捉えて、建築部材の防火性能に対する断熱材の優劣を評価、判断できれば、木造外壁をはじめ、各種建築部材の開発や性能評価、品質管理において、目標とする防火性能を確保するための方策について予め見通しが得られるようになり、その意義は大きい。

そこで本章では、防火性能評価の観点から断熱材の優劣を判断できるようにするため、発泡プラスチック断熱材を対象に燃焼性状を把握した上で、製品情報や簡易な試験により断熱材の材料物性の中から、燃焼性と相関性の高い材料物性を検討する。

## 2.2 断熱材の高温性状に関する基礎的把握

### 2.2.1 ロックウール断熱材・グラスウール断熱材

ロックウール断熱材およびグラスウール断熱材は、ともに建築基準法上の不燃材料に該当し、燃焼発熱はごく限られる。従って、防火性能評価の観点から、ロックウール断熱材およびグラスウール断熱材については、燃焼自体は無視できるとしても、加熱を受けて断熱材自体の熔融や収縮が起きる温度が重要となる。そのため、その目安となるガラス転移点や軟化点など、耐熱性を示す物性値が重要であると考えられる。

#### 2.2.1.1 高温性状に関する文献値

ロックウール断熱材やグラスウール断熱材の耐熱温度を示す指標として、JIS A 9501「保温保冷工事施工基準」<sup>1)</sup>およびJIS A 9504「人造鉱物繊維保温材」<sup>2)</sup>には、熱間収縮温度が示されている(表 2-1)<sup>注 1)</sup>。熱間収縮温度は、JIS A 9504<sup>2)</sup>附属書 B に示される試験方法に基づいて計測され、断熱材の厚さ方向の収縮率が 10%となる時の温度と定められており、JIS 規格<sup>2)</sup>に規定される温度範囲を満たすよう品質管理がなされている。ロックウール断熱材やグラスウール断熱材は、少なくともこの熱間収

表 2-1 ロックウール保温材(断熱材)・グラスウール保温材(断熱材)における  
熱間収縮温度(JIS A 9501<sub>2014</sub><sup>1)</sup> および JIS A 9504<sub>2017</sub><sup>2)</sup> より抜粋)

種類		密度(kg/m <sup>3</sup> )	熱間収縮温度(°C)*1
ロックウール (RW)	ウール	40~150	650 以上
	保温板 1号	40~100	600 以上
	保温板 2号	101~160	600 以上
	保温板 3号	161~300	600 以上
	フェルト	20~70	400 以上
	ブランケット 1号	40~100	600 以上
	ブランケット 2号	101~160	600 以上
グラスウール (GW)	ウール	—	400 以上
	保温板 24K	24±2	250 以上
	保温板 32K	32±4	300 以上
	保温板 40K	40+4,-3	350 以上
	保温板 48K	48+4,-3	350 以上
	保温板 64K	64±6	400 以上
	保温板 80K	80±7	400 以上
	保温板 96K	96+9,-8	400 以上
	ブランケット a	24~40	350 以上
	ブランケット b	41~120	400 以上

\*1 「熱間収縮温度」は、JIS A 0202<sub>2008</sub><sup>3)</sup>「断熱用語」の中で、「資料を容器に入れ、質量を調整したおもり板及び測定棒を載せ、加熱炉で加熱・昇温し、測定先端の高さが、試料厚さの 10%相当低下したときの炉内温度。人造鉱物繊維保温材に適用される試験方法である。」とあり、人造鉱物繊維保温材の耐熱温度を示す指標として用いられる。



縮温度の温度域に達するまでは、断熱材は本来の形状を保つと見なすことができる。

ガラス転移点や軟化点については、グラスウール断熱材の原料であるガラス繊維に成分が近いソーダ石灰ガラスの軟化点が文献値<sup>4)</sup>で 720℃～730℃とあるが、ロックウール断熱材やグラスウール断熱材の情報は、今回の文献調査では見つからなかった。

### 2.2.1.2 高温性状を示す物性値の測定

ロックウール断熱材については、経験的に標準耐火加熱 1 時間の温度範囲では、ロックウール断熱材の形状は、ほぼ保持されると想定しても差し支えないと考えられる。

一方、グラスウール断熱材では、文献<sup>4)</sup>に示されたソーダ石灰ガラスの軟化点より標準耐火加熱 1 時間の温度範囲では、断熱材の熔融や収縮が起こると考えられるが、2.2.1.1 で示した通り、グラスウール断熱材のガラス転移点や軟化点を示す文献値は見つからなかった。

そこで、第 4 章の実験で試験体に用いるグラスウール断熱材のガラス転移点および軟化点を調べる。第 4 章の実験に用いたグラスウール断熱材の情報を表 2-2 に示す。試験体には密度が異なる 3 種類のグラスウール断熱材（密度が 10kg/m<sup>3</sup>、16kg/m<sup>3</sup>、

表 2-2 第 4 章で試験体に用いるグラスウール断熱材

断熱材の種類		JIS A 9521 <sub>2014</sub> <sup>5)</sup> 上の分類	製品仕様	密度*2	熱伝導率*2	
GW	グラスウール断熱材	グラスウール断熱材 通常品*1	GW10-50	袋入品	10 kg/m <sup>3</sup>	0.050 W/m・K
			GW16-45	袋入品	16 kg/m <sup>3</sup>	0.045 W/m・K
			GW24-38	袋入品	24 kg/m <sup>3</sup>	0.038 W/m・K

\*1 通常品は、標準的な製品を指す。繊維が細くして断熱性能を高めた「高性能品」と区別して、「通常品」は種類として JIS A 9521<sub>2014</sub><sup>5)</sup>に分類されている。

\*2 密度、熱伝導率は、用いた断熱材の製品としての公称値を示している。

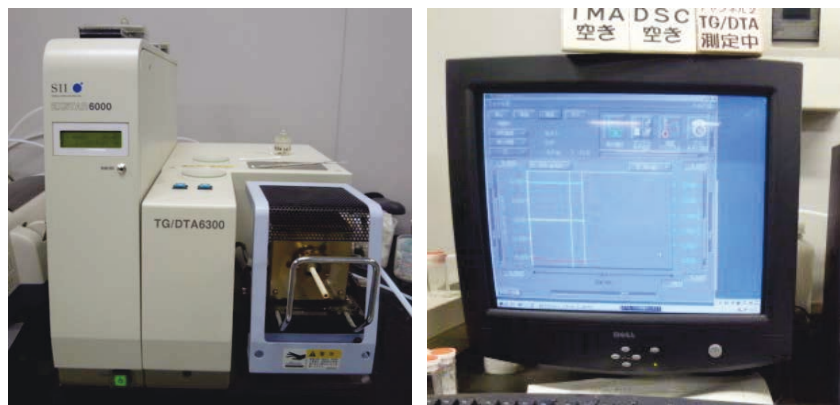


写真 2-1 TG-DTA 同時測定装置

24kg/m<sup>3</sup>の製品)を用いるが、グラスウール断熱材のガラス繊維は同一とみなせる。そこで、グラスウール断熱材(密度 16kg/m<sup>3</sup>の製品)を代表させて試料とし、熱重量-示差熱同時分析(以下、TG-DTA 分析と称す。)を行った。

TG-DTA 分析の測定は、TG-DTA 同時測定装置(セイコーインスツルメンツ(株)製示差熱熱重量同時測定装置 TG/DTA6300)を用いて、室温約 25℃に保たれた試験室で行った。TG-DTA 同時測定装置の写真を写真 2-1 に、TG-DTA 分析における測定条件等の分析方法および分析結果を表 2-3 に示す。

TG-DTA 分析より、グラスウール断熱材(密度 16kg/m<sup>3</sup>の製品)のガラス転移点は 478.0℃、軟化点は 659.4℃との結果が得られた。

表 2-3 TG-DTA 分析の測定条件等の分析方法および分析結果(グラスウール断熱材)

断熱材の種類		グラスウール断熱材(密度 16kg/m <sup>3</sup> の製品)					
着目した熱物性		ガラス転移点 7),*			軟化点 7),*		
熱物性値	平均値	478.0			659.4		
	計測値	478.1	471.3	478.1	655.9	657.9	664.3
熱物性値の求め方 6)		温度-DTA 曲線より外挿法で求める。					
測定条件	試料の形状	断熱材をくり抜いたもの(直径 5 mm×高さ 2.5 mm)					
	雰囲気条件 6)	200mL/min の窒素雰囲気下					
	温度条件 6)	測定温度 30℃~800℃、昇温速度 5℃/分					
	測定回数	3 回					
熱分析装置		TG-DTA 分析(熱重量-示差熱分析) [TG-DTA 同時測定装置:セイコーインスツルメンツ(株)製 示差熱熱重量同時測定装置 TG/DTA6300]					

※文献 7)に倣い、TG-DTA 分析結果より、ガラス転移点(発熱ピーク)と軟化点(吸熱の最大ピーク)を検出した。

## 2.2.2 発泡プラスチック断熱材

発泡プラスチック断熱材には、押出法ポリスチレンフォーム (XPS)、ビーズ法ポリスチレンフォーム (EPS)、硬質ウレタンフォーム (PUF)、フェノールフォーム (PF)、ポリエチレンフォーム (PE) の 5 種類<sup>1),8)</sup>がある。いずれも可燃性を有するため、加熱を受けてから熱分解、着火、燃焼に至る過程で、性状が大きく変わる目安となる熱分解温度や引火温度、発火温度、またその際の燃焼熱量などが重要な物性値となる。

また発泡プラスチック断熱材は、プラスチックの分子構造の特徴から、熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) と熱硬化性樹脂 (PUF、PF) の 2 つに分けられる。

熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) は、加熱を受けると熔融して液体となり、冷却すれば固体になる性質がある。熱可塑性樹脂は熔融し始めると、断熱材の形状を保持できなくなるため、少なくとも、この温度に達するまでは形状を維持されると考えられるガラス転移点が重要な物性値となる。

一方、熱硬化性樹脂 (PUF、PF) は、加熱を受けても熔融しないが、加熱を受ける表面から徐々に熱分解が進む性質がある。防火性能評価の観点から考えると、樹脂の熱分解量が大きいと、壁体の遮熱性が大きく低下する上、断熱層で樹脂が燃焼する可能性がある。従って、曝される加熱温度に対し、樹脂の熱分解がどの程度進むのか、樹脂の熱分解挙動を定量的に把握する必要がある。

### 2.2.2.1 高温性状に関する文献値

発泡プラスチック断熱材の熱的性質に対し、JIS A 9501「保温保冷工事施工基準」<sup>1)</sup>および JIS A 9511「発泡プラスチック断熱材保温材」<sup>8)</sup>には、各種発泡プラスチック断熱材の使用温度が示されている (表 2-4)。この使用温度について、JIS A 9501<sup>1)</sup> 附属書 I には、「大きな変形、寸法変化のない経験的に使用できる温度の最高値を想定している。」との記載がある。使用温度は、断熱材の熔融・熱分解の開始温度を示しているものではないが、最も低い PE で 70℃以下、最も高い PF で 130℃以下とあり (表 2-2)、発泡プラスチック断熱材は、いずれも 100℃前後の温度域までしか常温で使用している際の形状を保持できないと想定される。

以下、熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) と熱硬化性樹脂 (PUF、PF) に分けて、既往文献より得られた主成分となる樹脂の高温性状に関する物性を要約しておく。

表 2-4 発泡プラスチック保温材（断熱材）の使用温度

（JIS A 9501<sub>2014</sub><sup>1)</sup> および JIS A 9511<sub>2017</sub><sup>8)</sup> より抜粋）

種類		密度(kg/m <sup>3</sup> )	使用温度(°C)*1
A 種ビーズ法 ポリスチレンフォーム (EPS)	保温板 特号	27 以上	80 以下
	保温板 1 号	30 以上	80 以下
	保温板 2 号	25 以上	80 以下
	保温板 3 号	20 以上	80 以下
A 種押出法 ポリスチレンフォーム (XPS)	保温板 1 種 a,b	20 以上	80 以下
	保温板 2 種 a,b	25 以上	80 以下
	保温板 3 種 a,b	25 以上	80 以下
A 種 硬質ウレタンフォーム (PUF)	保温板 1 種	35 以上	100 以下
	保温板 2 種 1 号	35 以上	100 以下
	保温板 2 種 2 号	25 以上	100 以下
	保温板 2 種 3 号	35 以上	100 以下
B 種 硬質ウレタンフォーム (PUF)	保温板 2 種 4 号	25 以上	100 以下
	保温板 1 種 1 号	35 以上	100 以下
	保温板 1 種 2 号	25 以上	100 以下
	保温板 2 種 1 号	35 以上	100 以下
A 種フェノールフォーム (PF)	保温板 2 種 2 号	25 以上	100 以下
	保温板 1 種 2 号	25 以上	130 以下
A 種 ポリエチレンフォーム (PE)	保温板 1 種 1 号	10 以上	70 以下
	保温板 1 種 2 号	10 以上	70 以下
	保温板 2 種	20 以上	70 以下

\*1 「使用温度」は、JIS A 0202<sub>2008</sub><sup>9)</sup>「断熱用語」の中で、「最高使用温度」、「最低使用温度」の用語として「断熱材が必要な特性の劣化、又は危険の発生を伴うことなく断熱材としての機能を持続する最高（最低）温度」とある。また JIS A 9501<sub>2014</sub><sup>1)</sup>の附属書 I に「使用温度」について「大きな変形、寸法変化のない経験的に使用できる温度の最高値を想定している。」と述べられている。

#### 2.2.2.1.1 熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）

XPS、EPS の主成分であるポリスチレンは、ガラス転移点「ポリスチレンポリマー」100°C<sup>9),10)</sup>、熱変形温度「ポリスチレン（一般）」66～91°C<sup>9)</sup>、軟化点（Vicat B）「PS（ポリスチレン）」88°C<sup>11)</sup>とある。表 2-3 のように JIS の規定する使用温度が 80°C 以下であることを踏まえると、80～100°C の温度域で、熔融し始めると推測される。

さらに熱分解温度は「ポリスチレン」285～440°C<sup>9)</sup>または 300～400°C<sup>10)</sup>とあり、引火温度は、「ポリスチレン（発泡体）」391°C<sup>9)</sup>、「PS（ポリスチレン）」345～360°C<sup>9),10),11)</sup>、「ポリスチレン」370°C<sup>12)</sup>とある。発火温度は「ポリスチレン（発泡体）」491°C<sup>9)</sup>、「PS（ポリスチレン）」490°C<sup>11)</sup>とある。

また燃焼熱量は、「ポリスチレン」40.2 kJ/g<sup>9)</sup>、「発泡ポリスチレン」41.0kJ/g<sup>9)</sup>、「PS（ポリスチレン）」42.0kJ/g<sup>11)</sup>、火災便覧<sup>12)</sup>でも「ポリスチレン」39.9kJ/g とあり、いずれも燃焼熱量は 40kJ/g 前後とされている。

一方、PEの主成分であるポリエチレンは、ガラス転移点が「ポリエチレン」 $-125^{\circ}\text{C}$ <sup>9),10)</sup>とあるが、熱変形温度は「ポリエチレン(低密度)」 $41\sim 49^{\circ}\text{C}$ <sup>9)</sup>、軟化点(Vicat B)「PS(ポリスチレン)」 $75^{\circ}\text{C}$ <sup>11)</sup>とあり、溶融し始める温度はポリスチレンより若干、低いと考えられる。

熱分解温度は「ポリエチレン」 $335\sim 450^{\circ}\text{C}$ <sup>10),11)</sup>とあり、引火温度は「ポリエチレン」 $341^{\circ}\text{C}$ <sup>9),10)</sup>、 $340^{\circ}\text{C}$ <sup>12)</sup>、「PE(ポリエチレン)」 $341\sim 357^{\circ}\text{C}$ <sup>11)</sup>とある。発火温度は「ポリエチレン」 $349^{\circ}\text{C}$ <sup>9)</sup>、「PE(ポリエチレン)」 $350^{\circ}\text{C}$ <sup>11)</sup>とある。ポリエチレンはポリスチレンに比べ、熱分解温度は若干高いが、引火温度はほぼ同程度の温度域になり、発火温度は $100^{\circ}\text{C}$ 以上低い。

また燃焼熱量は、「軟質ポリエチレン」 $46.6\text{ kJ/g}$ <sup>9)</sup>、「硬質ポリエチレン」 $45.9\text{ kJ/g}$ <sup>9)</sup>、「PE(ポリエチレン)」 $46.5\text{ kJ/g}$ <sup>11)</sup>とあり、いずれも $46\text{ kJ/g}$ 前後とされ、ポリスチレンに比べ、約1割程度大きい。文献値からは、火災加熱を受ける場合、PEの方がXPS、EPSに比べ溶融が若干早く、着火後の燃焼熱量が大きいと予想される。

#### 2.2.2.1.2 熱硬化性樹脂(PUF、PF)

PUFの主成分であるポリウレタンについては、熱変形温度のデータを確認できなかったが、先述のPUFの使用温度が $100^{\circ}\text{C}$ であることを踏まえるとPUFは $100^{\circ}\text{C}$ 以上で熱変形が生じると考えられる。さらに引火温度は「ポリウレタン」 $310^{\circ}\text{C}$ <sup>9),11)</sup>、発火温度は「ポリウレタン」 $416^{\circ}\text{C}$ <sup>9),11)</sup>、燃焼熱量は「ポリウレタン」 $18.6\text{ kJ/g}$ <sup>9)</sup>とある。

一方、PFの主構成材であるフェノール樹脂については、熱変形温度は「フェノール樹脂 紙積層」 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ <sup>9)</sup>とあり、引火温度は「フェノール樹脂(ガラス繊維積層)」 $520\sim 540^{\circ}\text{C}$ <sup>9),11)</sup>、発火温度は「フェノール樹脂(ガラス繊維積層)」 $571\sim 580^{\circ}\text{C}$ <sup>9),11)</sup>とある。燃焼熱量は、「フェノール樹脂」 $13.5\text{ kJ/g}$ <sup>9)</sup>とあり、文献値からはフェノール樹脂はポリウレタンに比べ、高い耐熱性を有しており、着火後の燃焼熱量が小さいと推測される。

#### 2.2.2.2 高温性状を示す物性値および熱分解挙動の測定

2.2.2.1の文献調査より、発泡プラスチック断熱材が溶融し始める温度やその熱分解挙動については、明快にわからない。そこで、第5章の実験において、試験体に用いる発泡プラスチック断熱材として選定したXPS、PUF、PFの3種類について、断熱

材自体の高温性状を検討する。第5章の実験に用いた発泡プラスチック断熱材(XPS、PF、PUF)の情報を表2-5に示す。以下、熱可塑性樹脂(XPS、EPS、PE)と熱硬化性樹脂(PF、PUF)に分けて検討結果を示す。

表 2-5 充てん断熱材の仕様

断熱材の種類		JIS規格上の分類*1	製品仕様	密度*4	熱伝導率*4
XPS	押出法ポリスチレンフォーム	JIS A 9511 <sup>13)</sup> A種保温板3種b	3種b品	37 kg/m <sup>3</sup>	0.028 W/m・K
PUF	硬質ウレタンフォーム	JIS A 9511 <sup>13)</sup> A種保温板2種2号	一般品*2 表面材:クラフト紙	30 kg/m <sup>3</sup>	0.024 W/m・K
PF	フェノールフォーム	JIS A 9511 <sup>13)</sup> A種保温板1種2号	一般品*2(密度27K*3) 表面材:PET不織布	27 kg/m <sup>3</sup>	0.020 W/m・K

\*1 住宅用断熱材は2014年9月のJIS改定により、すべてJIS A 9521<sup>5)</sup>に統合されている。

ここでは実験実施時に合わせ、発泡プラスチック断熱材については、2014年9月改定前のJIS規格を示す。

\*2 「一般品」は製品群の中で、標準的な製品を指す。

\*3 「密度OK」とあるのは、樹脂の密度が○kg/m<sup>3</sup>であることを示す。

\*4 密度、熱伝導率は、用いた断熱材の製品としての公称値を示している。

#### 2.2.2.2.1 熱可塑性樹脂(XPS、EPS、PE)

XPSは、少なくともガラス転移温度に達するまでは溶融せず、形状を維持されると考えられるので、XPSのガラス転移温度をTG-DTA分析より求めた。TG-DTA分析における測定条件等の分析方法および分析結果を表2-6中に示す。TG-DTA分析より、XPSのガラス転移点は108.8℃との結果が得られた。

表 2-6 TG-DTA分析の測定条件等の分析方法および分析結果(発泡プラスチック断熱材)

断熱材の種類		熱可塑性樹脂(XPS)			熱硬化性樹脂(PUF・PF)	
着目した熱物性		ガラス転移点 <sup>6)</sup>			樹脂の熱分解挙動	
熱物性値	平均値	108.8℃			図2-1に示す通り	
	計測値	105.6℃	110.1℃	110.7℃		
熱物性値の求め方 <sup>6)</sup>		温度-DTA曲線より外挿法で求める。			温度-TG曲線(図2-1)の推移を読み取る。	
測定条件	試料の形状	断熱材をくり抜いたもの(直径5mm×高さ2.5mm)				
	雰囲気条件 <sup>6)</sup>	200mL/minの窒素雰囲気下			200mL/minの空気雰囲気下および窒素雰囲気下	
	温度条件 <sup>6)</sup>	測定温度30℃~250℃ 昇温速度5℃/分			測定温度30℃~800℃ 昇温速度20℃/分	
	測定回数	3回			各2回(再現性を確認)	
熱分析装置		TG-DTA分析(熱重量・示差熱分析) [TG-DTA同時測定装置:セイコーインスツルメンツ(株)製 示差熱重量同時測定装置TG/DTA6300]				

## 2.2.2.2.2 熱硬化性樹脂（PUF、PF）

PUF、PF では、加熱を受けた際、樹脂の熱分解量が大きいと、壁体の遮熱性が低下するうえ、断熱層で樹脂が燃焼する可能性がある。そこで、TG-DTA 分析を行って、空気雰囲気下および窒素雰囲気下における樹脂の熱分解挙動を把握した。TG-DTA 分析における測定条件等の分析方法を表 2-6 中に、TG-DTA 分析の結果を図 2-1 に示す。

燃焼反応が伴う空気雰囲気下の分析結果では、PUF は、200℃過ぎから 350℃前後までの温度域と 500℃から 600℃前後までの温度域において、大きな発熱反応とともに熱重量（TG）が大きく減少しており、発熱による樹脂分解が 2 段階で進んでいる。PF では、200℃を超えると発熱反応がはじまり、約 400℃より急激に熱重量（TG）の減少が進み、500℃を超えると、樹脂はほぼすべて熱分解してしまう。

一方、燃焼反応が生じない窒素雰囲気下の分析結果では、PF は PUF に比べ、温度上昇とともに熱重量(TG)が減少していく傾きが小さく、樹脂の熱分解が進みにくい。また PF の方が測定終了時の熱重量（TG）も大きく、炭化物等の残渣量大きい。

以上より、空気雰囲気下、窒素雰囲気下ともに、PF の方が PUF に比べ、樹脂の熱分解が進みにくいと考えられる。

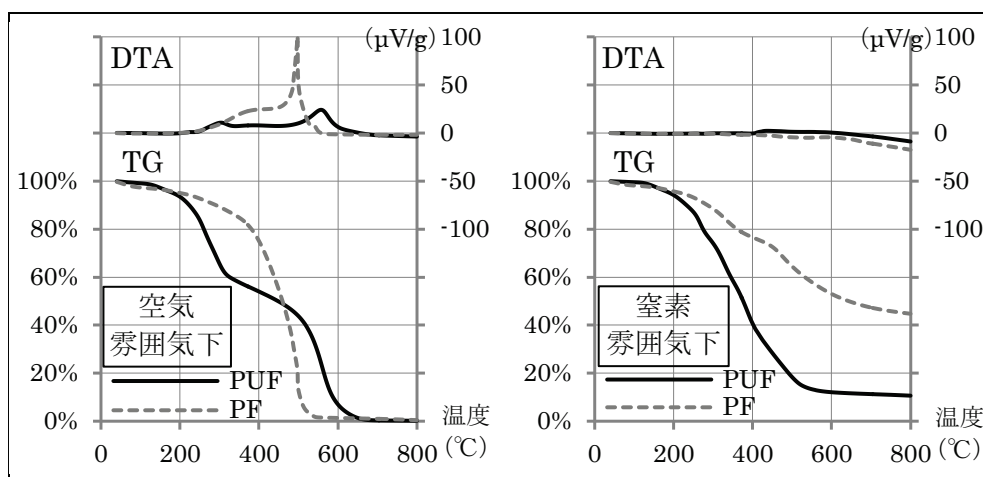


図 2-1 熱硬化性樹脂（PUF、PF）の TG-DTA 分析結果

（左：空気雰囲気下、右：窒素雰囲気下）

## 2.3 発泡プラスチック断熱材の燃焼性に関する基礎的把握

### 2.3.1 検討の目的

可燃性を有する発泡プラスチック断熱材について、表面から加熱された場合の燃焼性状を把握する。

種類が異なる発泡プラスチック断熱材の燃焼性状を比較するためには、材料が受ける加熱外力を同一にした上で、燃焼時の性状を定量的に表現できる方法でなくてはならない。これに適した試験法として、ISO5660-1<sup>14)</sup>で示されるコーンカロリメータ試験が挙げられる。コーンカロリメータ試験では、試験体に一定の加熱強度の輻射熱を入射し、発生した可燃ガスを電気スパークで着火させて燃焼させる。本試験では、その燃焼ガスを排気する排煙ダクト内の酸素濃度および質量流量から消費された酸素量を計測し、酸素の単位消費量あたりの燃焼生成熱を乗じて、燃焼発熱速度を把握できる。この発熱速度を時間で積分すれば、燃焼時間中に材料の燃焼により生成する総発熱量が得られる。

ここでは、発泡プラスチック断熱材の燃焼性について、コーンカロリメータ試験を実施し、着火時間、燃焼時の発熱速度の推移を計測する。

### 2.3.2 試験方法

試験はコーンカロリメータ試験装置(東洋精機社製 Cone III :写真 2-2)を用いて、ISO5660-1<sup>14)</sup>に従って行った。加熱強度は日本の防火材料の性能評価<sup>15)</sup>で使われている 50kW/m<sup>2</sup>とし、試験時間は原則 20 分間とした。ただし、試験体が燃え尽きた場合



写真 2-2 コーンカロリメータ試験装置



には、その時間に応じて、試験時間を5分、10分、15分とした。試験体は1種類につき原則2体とした。

試験体一覧を表2-7に示す。すべてのコーンカロリーメータ試験は2004年6月～2007年1月に行った。試験体とする断熱材はすべてJIS A 9511<sub>2003</sub><sup>16)</sup>の規格を満たすボード状の製品とし、試験体は2004～2006年時点での市販品から採集した。PUFにはフロン品とノンフロン品の両方があったが、PUFを除く4種類の断熱材(XPS、EPS、PE、PF)はいずれも、すべてノンフロン品であった。

熱可塑性樹脂であるXPS、EPSは、ボード状の製品の中で最も密度の大きい製品をそれぞれ選んで、厚さは25mm、50mmのそれぞれ2種類とし、PEは唯一の住宅用断熱材として用いられる製品(1種類)、厚さ50mmを試験体とした。XPS、EPS、PEはそれぞれ表面材のない製品を対象とした。一方、熱硬化性樹脂であるPUF、PFは、ボード状の製品の場合、薄いシート状の面材の間に発泡させて成形されるため、面材付きが一般的である。試験体は標準的な製品として最も広く使われている可燃性の面材(クラフト紙や不織布)を選んだ。XPS、EPS、PUFについては、同種断熱材における製造メーカーによる違いを確認するため、複数社の製品を対象とした。

表2-7 試験体仕様の一覧

1. 熱可塑性樹脂

	JIS上の規格 <sup>13)</sup> *1	メーカー	厚さ
XPS	3種b	A社, B社, C社, D社	25mm 50mm
EPS	1号	E社	25mm 50mm
		F社	25mm
PE	1種2号	G社	50mm

2. 熱硬化性樹脂

	JIS上の規格 <sup>13)</sup> *1	メーカー	製品仕様	表面材の仕様 (表面材は両面とも同じ)	厚さ
PUF	A種2種1号 (ノンフロン品)	H社	一般品*2	クラフト紙	30mm
		I社	一般品*2	クラフト紙	50mm
	B種2種1号 (フロン品)	J社	一般品*2	ラミネート紙	50mm
		J社	難燃仕様*3	ラミネート紙	50mm
PF	A種1種2号	K社	一般品*2 (密度27K*4)	ポリエステル不織布	25mm, 35mm

\*1 試験体として収集する時は、JIS A 9511<sub>2003</sub><sup>16)</sup>を満たす製品を収集したが、JIS A 9511<sub>2006</sub><sup>13)</sup>に沿って分類し、表記している。

\*2 「一般品」は製品群の中で、最も標準的な製品を指す。

\*3 「難燃仕様」は製品群の中で、一般品に比べ樹脂の難燃性を高めた製品を指す。

\*4 「密度27K」は、樹脂の密度が27kg/m<sup>3</sup>であることを示す。

## 2.3.3 燃焼性状

### 2.3.3.1 熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）

コーンカロリメータ試験の結果を表 2-8、図 2-2 に、試験体の試験前および試験後の写真を写真 2-3 に示す。

熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）は加熱を受けると、いずれも加熱表面から融けて、一部はガス化するものの、ほとんどは一旦液体となり、その後、熱分解、ガス化の過

表 2-8 コーンカロリメータ試験の結果（熱可塑性樹脂）

断熱材 分類 <sup>13)</sup>	公称 厚さ	メー カー	No.	試験 時間 (分)	初期 質量 (g)	実測 密度 (kg/m <sup>3</sup> )	発熱量 (MJ/m <sup>2</sup> )	発熱速度		着火 へ 至る 過程 *1	溶融 時 着火 時間 *2,*3 (秒)	液化 時 消炎 時間 *2,*4 (秒)	ガス 化時 着火 時間 *2,*5 (秒)	燃焼 終了 消炎 時間 *2,*6 (秒)
								最大値 (kW/m <sup>2</sup> )	時間 (秒)					
XPS 3種 b	25 mm	A 社	1	5	9.4	38.0	28.5	462.7	64	(b)	5	12	32	120
			2	5	9.6	38.8	27.4	422.7	62	(b)	6	13	31	133
		B 社	1	5	8.7	35.5	27.1	629.6	56	(c)	—	—	31	104
			2	5	9.0	36.6	28.4	493.5	40	(a)	3	—	—	98
		C 社	1	5	8.1	32.9	24.4	497.1	40	(b)	3	14	20	111
			2	5	8.0	32.5	25.3	486.3	40	(b)	3	15	21	97
		D 社	1	5	9.6	37.4	29.4	554.7	40	(a)	3	—	—	103
			2	5	9.7	37.7	30.1	502.4	38	(a)	2	—	—	143
	50 mm	A 社	1	10	16.4	32.9	51.9	267.2	126	(b)	5	25	72	317
			2	10	17.0	33.8	53.4	261.2	132	(b)	6	25	70	341
		B 社	1	10	19.5	39.4	61.8	277.7	80	(a)	10	—	—	330
			2	10	18.7	38.0	62.6	304.6	110	(a)	8	—	—	310
		C 社	1	10	15.8	31.9	50.5	322.0	90	(b)	3	25	54	290
			2	10	15.8	32.0	51.4	313.8	82	(b)	3	24	46	296
D 社		1	10	19.2	38.3	58.8	352.6	80	(a)	2	—	—	239	
		2	10	19.1	38.2	61.1	297.9	94	(a)	2	—	—	286	
EPS 1号	25 mm	E 社	1	5	7.6	29.3	24.8	410.4	44	(b)	4	12	25	123
			2	5	7.4	28.5	22.9	420.8	58	(c)	—	—	29	153
		F 社	1	5	7.5	29.2	23.9	459.7	32	(c)	—	—	14	105
			2	5	7.4	29.0	24.0	411.3	32	(c)	—	—	23	110
	50 mm	E 社	1	10	15.2	29.7	51.2	337.4	74	(b)	4	21	38	278
			2	10	15.1	29.5	52.9	322.0	78	(b)	4	21	44	317
PE	50 mm	G 社	1	10	5.5	12.1	21.5	341.2	30	(c)	—	—	12	191
			2	10	5.8	12.0	23.3	365.4	32	(c)	—	—	11	238

\*1 熱可塑性樹脂の加熱から着火、燃焼へ至る過程を本文中にある通り、3つに分類した上で、その着火へ至る燃焼過程を(a),(b),(c)で示す。

\*2 継続時間 10 秒以下のフラッシュを含み、目視により炎が確認できた状態を着火、消えたことを確認できた状態を消炎とし、試験開始からの時間を測定した。

\*3 着火へ至る燃焼過程(a),(b)において、加熱を受け、断熱材が融ける過程で着火した場合のその着火時間を示す。

\*4 着火へ至る燃焼過程(b)において、加熱を受け、断熱材が融ける過程で着火した後、液体となった段階で一旦消炎した場合のその消炎時間を示す。

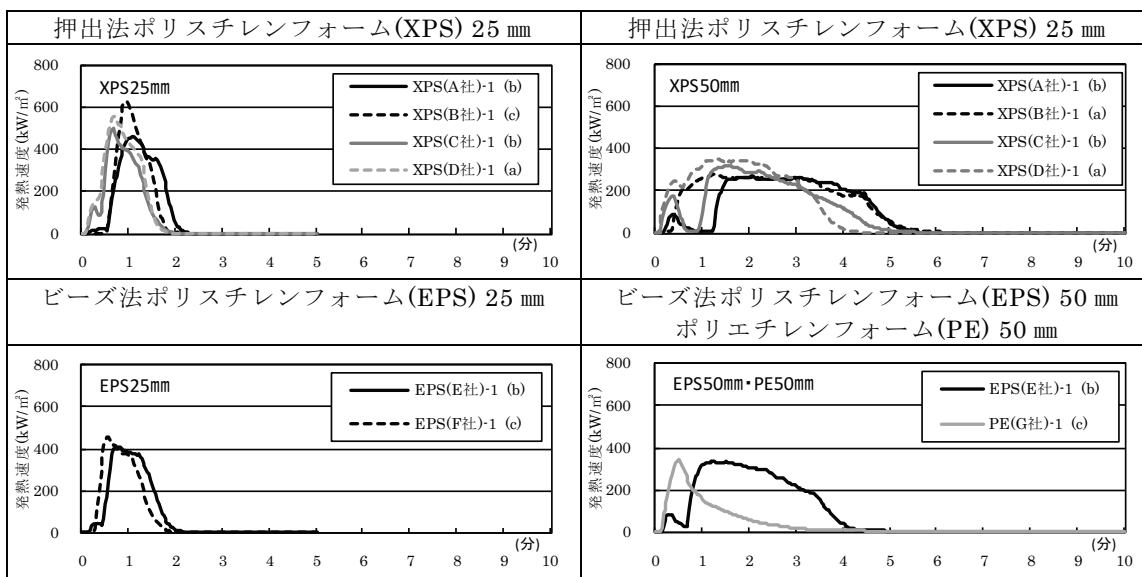
\*5 着火へ至る燃焼過程(b)において、一旦消炎後、熱分解、ガス化の過程を経て再着火した場合、または着火に至る燃焼過程(c)において、融けて液体となった後、熱分解、ガス化の過程を経て着火した場合の着火時間を示す。

\*6 断熱材が最終的に燃え尽き、消炎した時間を示す。

程をたどる。樹脂への着火は、この過程の中で起こり、燃焼に至る。

加熱から着火、燃焼へ至る過程は次の(a)~(c)の3つに分類される。

- (a)加熱を受け、樹脂が融ける過程で着火し、そのまま燃焼する。
- (b)加熱を受け、樹脂が融ける過程で着火した後、液体となった段階で一旦消炎し、その後、熱分解、ガス化の過程を経て再着火し燃焼する。



試験体とした断熱材ごとに、それぞれ2体ずつ試験を実施したが、そのうち1体目の発熱速度の推移を示す。

図 2-2 発泡プラスチック断熱材（熱可塑性樹脂）の燃焼性状（発熱速度の推移）

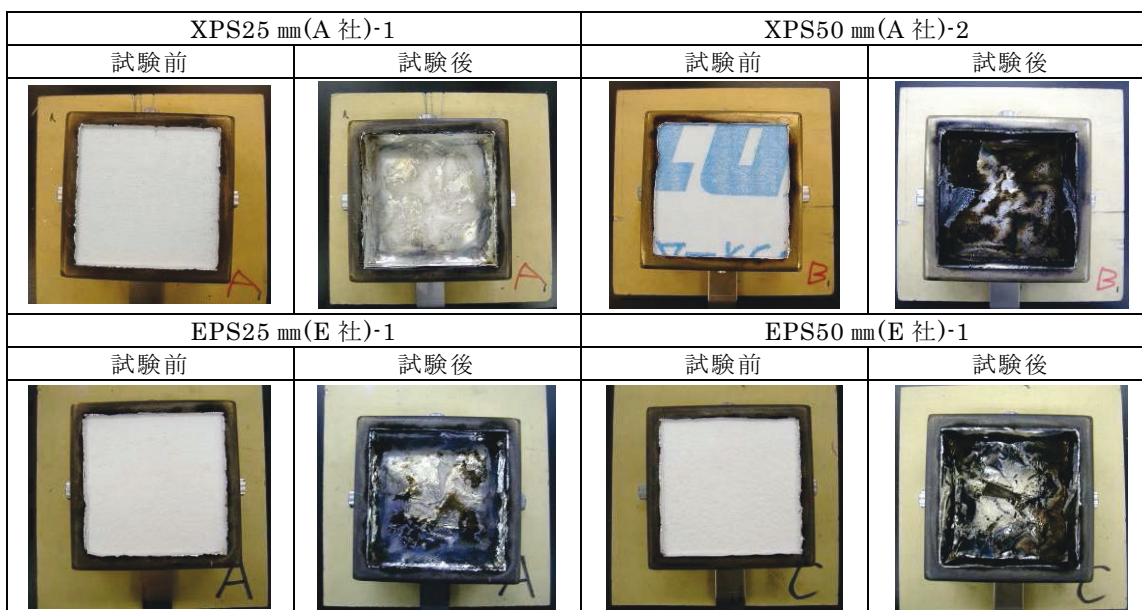


写真 2-3 試験体（XPS、EPS）

(c)加熱を受け、樹脂が融けて液体となった後、熱分解、ガス化の過程を経て着火し燃焼する。

安定に着火した後 ((a), (c)では着火後、(b)では再着火後) は、いずれも樹脂はそのまま一気に燃え上がり燃焼のピークを迎えて、燃え尽きるまで激しい燃焼が続いた。加熱終了後、試験体には炭化物などの燃え残りはみられなかった (写真 2-3)。

断熱材の種類ごとに見ると、XPS は(a)もしくは(b)の過程、EPS は(b)もしくは(c)の過程、PE は(c)の過程を経て、それぞれ着火、燃焼に至った (表 2-8)。XPS、EPS では同種の断熱材であっても、メーカーや製品が異なると、加熱から着火、燃焼へ至る過程が変化し、着火時間や最大発熱速度に差が生じた。XPS と EPS の主成分は同じポリスチレンであり、この着火、燃焼へ至る過程が異なった要因は、XPS、EPS に添加される発泡剤、難燃剤やその含有量等の違いに起因するものと考えられる。

また XPS、EPS では、厚さ 25 mm に比べ、厚さ 50 mm の方が、加熱開始から燃焼に至るまで時間を要し、最大発熱速度が小さくなった。XPS、EPS では、着火前に熔融し、液体となった際、断熱材が厚いほど液面とヒーターとの距離が離れ、液面が受ける入射熱強度が小さくなる。発熱速度はこの時の入射熱に依存するため、試験体が厚い方が最大発熱速度が小さくなったと考えられる。さらに、この入射熱強度の低下に加えて、試験体が厚いほど熱容量が大きくなり、試験体表面温度の上昇が遅れるため、試験体が厚い方が着火時間が長くなったと考えられる。従って、着火時間の相違は、いずれも材料の組成等ではなく、試験体の大きさや試験条件に由来するものと考えられる。なお、PE (厚さ 50 mm) は、熔融、液化、熱分解、ガス化の過程 ((c)の過程) を経て着火し燃焼に至った。

本実験の結果より単位質量あたりの発熱量を求めると、XPS は 28kJ/g、EPS は 30kJ/g、PE は 35kJ/g となった。PE の単位質量あたりの発熱量は、XPS、EPS に比べ高く、2.2.2.1.1 の文献調査でポリエチレンの燃焼熱量 (46kJ/g 前後) がポリスチレンの燃焼熱量 (40kJ/g 前後) より高くなった点と合致した。しかし本実験で得られた単位質量あたりの発熱量は、XPS、EPS、PE いずれも、2.2.2.1.1 で調査した燃焼熱量の文献値より小さい値となった。

### 2.3.3.2 熱硬化性樹脂（PUF、PF）

コーンカロリメータ試験の結果を表 2-9、図 2-3 に、試験体の試験前および試験

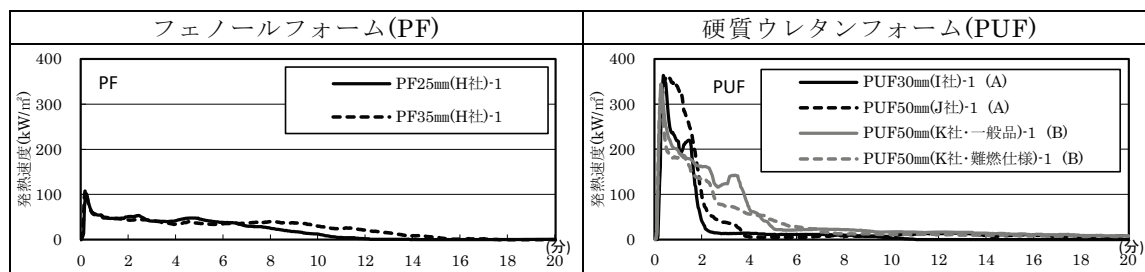
表 2-9 コーンカロリメータ試験の結果（熱硬化性樹脂）

断熱材 分類 <sup>13)</sup>	公称 厚さ	メー カー	製品 仕様 <sup>*1</sup> (密度 27K <sup>*2</sup> )	No.	試験 時間 (分)	初期 質量 (g)	実測 密度 (kg/m <sup>3</sup> )	質量 減少量 (g)	発熱量 (MJ/m <sup>2</sup> )	発熱速度		着火 (再着火) 時間 (秒)	消炎 (再消炎) 時間 (秒)
										最大値 (kW/m <sup>2</sup> )	時間 (秒)		
PF	25 mm	H 社	一般 品 <sup>*1</sup> (密度 27K <sup>*2</sup> )	1	15	7.5	29.8	7.5	23.6	102.6	12	3	288
				2	15	7.5	30.1	7.5	22.2	100.2	14	4	368
	35 mm			1	20	10.4	29.7	10.4	29.7	108.0	10	4 (203)	167 (298)
				2	20	10.4	29.9	10.4	28.5	132.2	12	3 (332)	183 (430)
PUF ノンフロン品	30 mm	I 社	一般 品 <sup>*1</sup>	1	20	12.8	42.6	12.8	28.3	363.6	22	7	123
				2	20	12.7	42.3	12.7	30.0	350.9	20	6	153
	50 mm	J 社		1	20	19.8	40.4	19.1	43.4	362.9	34	5	185
				2	20	20.1	41.9	19.7	38.9	308.0	30	6	174
PUF フロン品	50 mm	K 社	一般 品 <sup>*1</sup>	1	20	25.3	49.7	22.9	55.5	344.8	16	6	390
				2	20	25.3	50.1	22.9	52.9	341.9	18	7	290
		難燃 仕様 <sup>*3</sup>		1	20	21.2	42.0	17.7	45.4	318.8	16	6	383
				2	20	21.1	42.0	18.8	47.4	305.4	14	6	487

\*1 「一般品」は製品群の中で、最も標準的な製品を指す。

\*2 「密度 27K」は、樹脂の密度が 27kg/m<sup>3</sup>であることを示す。

\*3 「難燃仕様」は製品群の中で、一般品に比べ樹脂の難燃性を高めた製品を指す。



試験体とした断熱材ごとに 2 体ずつ試験を実施したが、そのうち 1 体目の発熱速度の推移を示す。

図 2-3 発泡プラスチック断熱材（熱硬化性樹脂）の燃焼性状（発熱速度の推移）

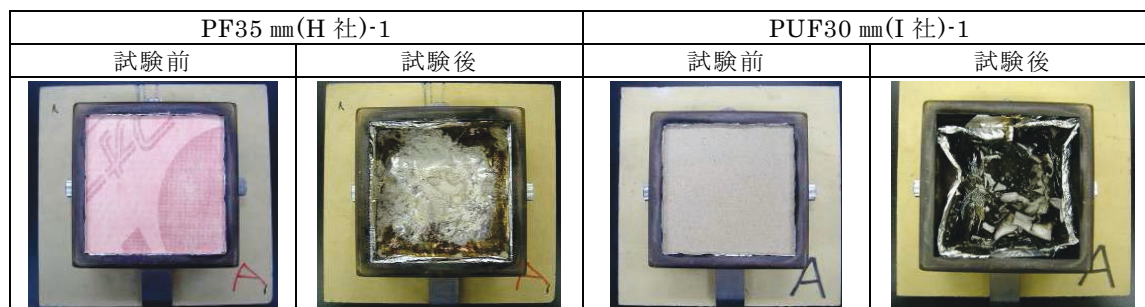


写真 2-4 試験体（PF、PUF）

後の写真を写真 2-4 に示す。

PF では加熱を開始すると、表面材に着火した後、燃え上がって燃焼のピークを迎えた。PF の最大発熱速度は、他の断熱材に比べ著しく低い値となった。燃焼が樹脂へ移ると、PF は炭化、変形しながら、ほぼ一定の発熱速度で燃焼が進行する。その後、緩やかに発熱速度が減衰し、消炎後も PF は燃え尽きるまで赤熱燃焼が続いた。

PF では、メーカーや製品間での比較はできなかったが、同じ製品で断熱材厚さを変えて比較すると、PF は厚さに応じてほぼ一定の発熱速度で推移する時間が長くなる以外、燃焼性状にほとんど違いはみられなかった。これより PF では燃焼が受熱面から順に進んでいることがわかる。

PUF では、PF と同様、加熱を開始すると表面材に着火した後、燃え上がって燃焼のピークを迎えた。以後、PUF は、炎をあげて燃焼が進むとともに、加熱側表面に炭化層を形成する。この炭化層の形成状況により燃焼性状が大きく異なった。

すなわち、形成される炭化層が少ない場合は、PUF がなくなるまで激しい燃焼が続いた後、発熱速度が急激に小さくなり消炎に至る。一方、形成される炭化層が多い場合は、炭化層の形成とともに、発熱速度は緩やかに減衰し、炭化層により燃え止まって消炎に至る。消炎後は、いずれも形成された炭化物が輻射熱を受け、徐々に融けるように小さくなり、炭化物が残っている間は発熱速度はわずかであるが計測された。PUF では、製品により炭化物の生成状況が異なることにより、燃焼性状が変化することがわかった。

なお、本実験の結果より、PF の単位質量あたりの発熱量は  $25\text{kJ/g}$  となった。また PUF では、加熱を終了した時点（加熱開始 20 分時点）で残渣があったため、単位質量あたりの発熱量を、残渣を除いた質量減少量で除して求めると  $21\text{kJ/g}$ 、残渣を含む初期質量で除して求めると  $19\text{kJ/g}$  となった。

PUF、PF は表面材の発熱量を含むため、2.2.2.1.2 の文献値とは単純に比較はできないが、PF の単位質量あたりの発熱量は、フェノール樹脂の燃焼熱量（ $13.5\text{kJ/g}$  前後）よりも倍近く大きな値となり、PUF の単位質量あたりの発熱量は、ポリウレタンの燃焼熱量（ $18.6\text{kJ/g}$  前後）より 1 割程度大きな値となった。

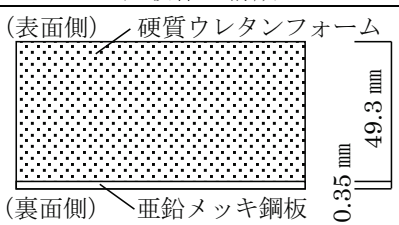

### 2.3.4 原料組成に基づく PUF の燃焼性状に関する考察

これまで発泡プラスチック断熱材の燃焼性状を、断熱材の種類ごとに把握した。PUF 以外の 4 種類の断熱材 (XPS、EPS、PE、PF) は、製品間の燃焼性状の差異は小さかったが、PUF は、製品により炭化物の形成状況が異なり燃焼性状に違いが生じた。PUF だけが、他の 4 種類の断熱材 (XPS、EPS、PE、PF) と大きく異なる傾向を示している。

PUF を除く 4 種類の断熱材 (XPS、EPS、PE、PF) は、概ね単一の化合物を主成分とし重合した樹脂に、発泡剤、難燃剤等の添加剤が付加された発泡体である<sup>17)</sup>。一方、PUF は、-NCO 基を 2 個以上持つポリイソシアネート (略して「イソシアネート」ともいう。) と -OH 基を 2 個以上持つヒドロキシ化合物 (「ポリオール」ともいう。) とを縮重合反応させる際に、発泡剤を添加し発泡させたものである<sup>17)</sup>。PUF の原料であるポリオールとイソシアネートは、どちらも官能基を持つ化合物の総称であり、ポリオール、イソシアネートで指し示される化学物質は多数存在する<sup>10)</sup>。

従って、PUF を除く 4 種類の断熱材 (XPS、EPS、PE、PF) であっても、樹脂の

表 2-10 試験体の原料組成と構成

種類	イソシアネート指数		140	200	300	400	300	300
	発泡剤		水 (CO <sub>2</sub> )	水 (CO <sub>2</sub> )	水 (CO <sub>2</sub> )	水 (CO <sub>2</sub> )	HFC	シクロペンタン
物性	コア密度(kg/m <sup>3</sup> ) [JIS K 7222]		48	51	51	52	49	50
	酸素指数 [JIS Z 7221-2]		21.0	21.9	22.8	23.7	23.1	23.1
原料組成と成分(重量%)	イソシアネート	ポリメリック MDI	62	69	72	78	55	60
	ポリオール	ポリエーテルポリオール	31	—	—	—	—	—
		ポリエーテルポリオール / ポリエステルポリオール	—	24	18	10	25	24
	発泡剤	水(CO <sub>2</sub> )	1	1	1	1	—	—
		HFC	—	—	—	—	10	—
		シクロペンタン	—	—	—	—	—	5
	難燃剤、製泡剤等	リンハロゲン系難燃剤	6	6	9	11	10	11
触媒	アミン触媒	○	—	—	—	—	—	
	アミン触媒+スレート触媒 (金属塩等)	—	○	○	○	○	○	
試験体の構成			試験体写真					
								

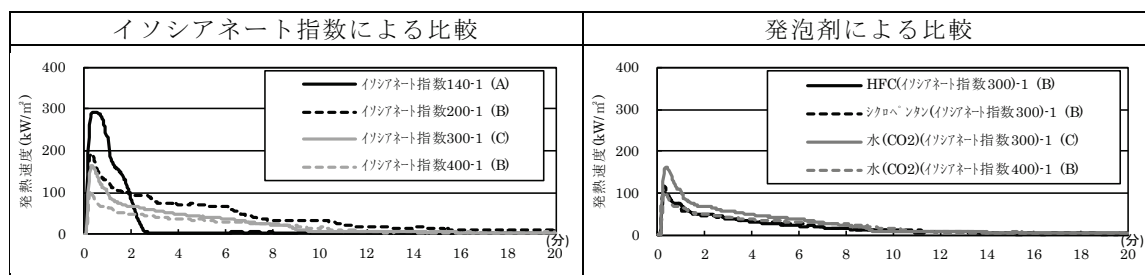
組成や発泡剤、難燃剤により様々な種類が存在するが、PUFの場合はイソシアネートとポリオール配合割合、発泡剤や難燃剤の種類と添加量の違いまでを含めると、PUFの原料組成の組合せは、他の4種類の断熱材よりもはるかに多くなる。

そこで PUF について、その原料組成の中で燃焼性状に寄与する因子を明らかにすることを目的に、共同研究者である PUF のメーカーの協力を得て、ポリオールに対するイソシアネートの配合割合であるイソシアネート指数<sup>10)</sup>（「ヌレート指数」ともいう。）と発泡剤の2つの因子に着目して、原料組成を明らかにした試験体を製造した（表 2-10）。そして、これら試験体に対し、加熱強度 50kW/m<sup>2</sup>、加熱時間 20 分の試験条件でコーンカロリメータ試験を実施して、PUF の燃焼性状を比較した。

試験結果を表 2-11 および図 2-4 に、試験体の試験前と試験後の様子を写真 2-5 に示

表 2-11 硬質ウレタンフォーム（PUF）のコーンカロリメータ試験結果

発泡剤	ウレタン種別	イソシアネート指数	No.	試験時間 (分)	初期質量 (g)	質量減少量 (g)	発熱量 (MJ/m <sup>2</sup> )	発熱速度		着火時間 (秒)	消炎時間 (秒)	再着炎 (再々着炎) 時間 (秒)	再消炎 (再々消炎) 時間 (秒)
								最大値 (kW/m <sup>2</sup> )	時間 (秒)				
水 (CO <sub>2</sub> )	ウレタン	140	1	20	40.6	15.4	28.2	292.5	28	3	141	—	—
			2	20	41.1	17.6	36.3	296.6	30	3	139	444	636
			3	20	40.1	15.2	27.5	276.2	24	3	204	—	—
	イソシアネートスレート	200	1	20	44.6	18.9	51.4	195.6	18	3	431	437	664
			2	20	44.4	18.6	49.2	201.8	20	3	—	—	—
		300	1	20	43.3	13.5	32.4	163.5	20	3	—	—	—
			2	20	43.6	13.3	32.6	171.6	22	3	—	—	—
		400	1	20	44.7	11.5	25.7	103.6	16	3	583	—	—
			2	20	44.7	11.6	25.7	96.4	16	3	379	413	439
		HFC	イソシアネートスレート	300	1	20	43.2	13.6	22.9	100.9	16	3	323
2	20				42.5	13.4	20.9	100.8	16	3	248	361	670
シクロペンタン	イソシアネートスレート	300	1	20	38.3	9.2	23.2	117.7	14	3	698	—	—
			2	20	41.3	10.3	25.1	120.1	18	3	874	—	—



試験体とした断熱材ごとに2体ずつ試験を実施したが、そのうち1体目の発熱速度の推移を示す。

図 2-4 硬質ウレタンフォーム（PUF）の燃焼性比較（発熱速度の推移）



す。PUFの燃焼性状は、発泡剤の種類やイソシアネート指数により異なる。イソシアネート指数が高くなると、燃焼後の炭化物の生成量が多くなって、難燃性が高まる傾向があり、また発泡材の種類が変わると、同じイソシアネート指数であっても、燃焼性状に差異が生じることが確認された。

すなわち、PUFは、原料組成の違いにより燃焼時の炭化性状が異なり、燃焼性状は一定ではないことがわかった。

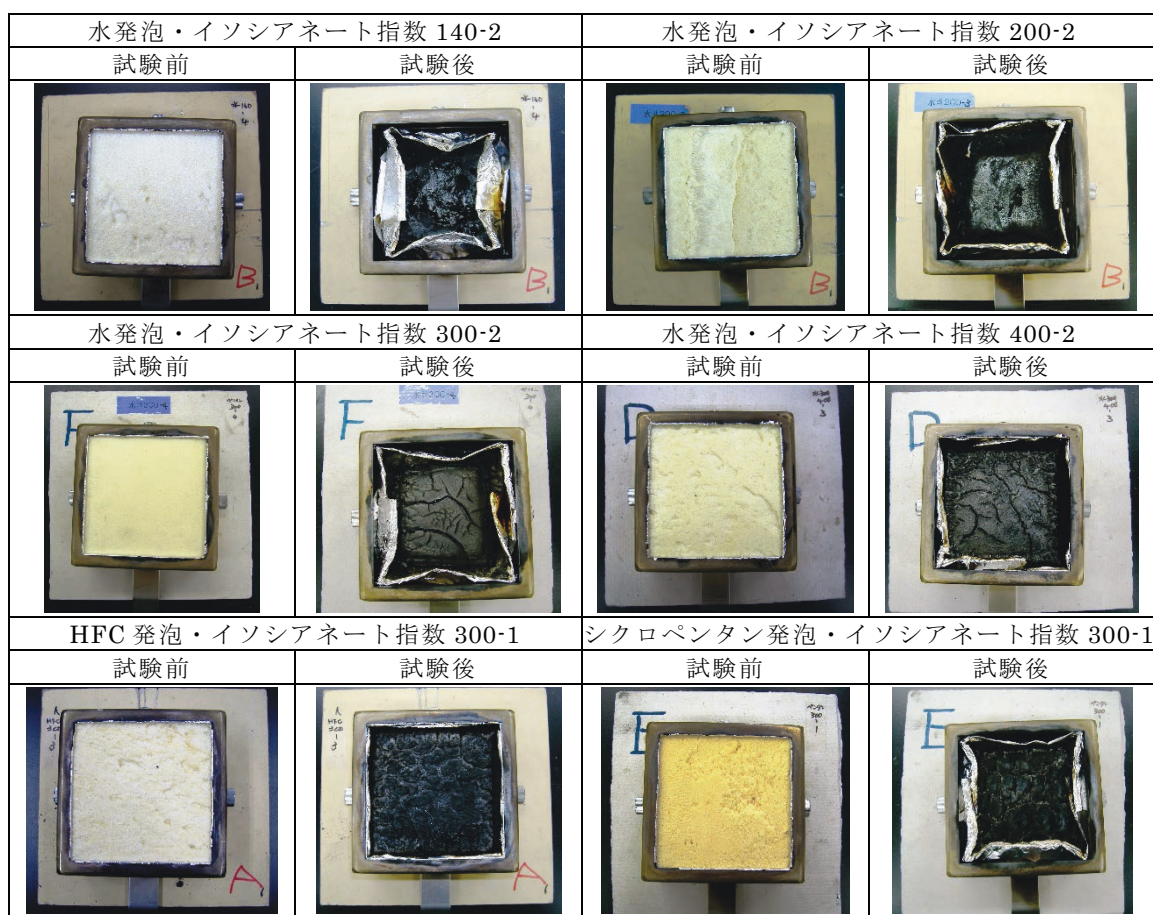


写真 2-5 試験体 (PUFにおける原料組成による比較)

## 2.4 発泡プラスチック断熱材の燃焼性と材料物性との関係

### 2.4.1 検討の目的と内容

#### 2.4.1.1 検討の目的

発泡プラスチック断熱材は、開発や改良により日々更新される。同じ種類の断熱材であっても、製品ごとに原料組成や密度等が異なり、この製品間の差異が、断熱材の燃焼性に変化を及ぼし、本論文で対象とする木造外壁だけでなく、建築部材すべての防火性能に影響を及ぼす可能性がある。

一方、認定取得した外壁の防耐火性能を維持するための品質管理上の課題として、発泡プラスチック断熱材の市場流通品の性能が、認定取得時の試験体に使われたものと同等かどうか判断するのが難しいことが挙げられる。

発泡プラスチック断熱材について、断熱材の情報や簡易な試験により、製品間の差異による燃焼性の違いを捉えて、防火性能を評価する観点から断熱材の優劣を把握できれば、市場流通する発泡プラスチック断熱材に対し、認定時の性能との同等性を確認することで、認定取得時の防火性能を確保できた製品を選択できるようになる。また防火性能が既知の建築部材においても、断熱材の仕様変更の際に断熱材間の比較から、防火性能の優劣を判断できるようになる。

しかし、2.3.4 で示した通り、原料組成により燃焼性が異なるが、原料組成の情報は開発ノウハウが含まれており、メーカーから情報開示を受けることは難しい。また発泡プラスチック断熱材を原料として購入し、防火材料や防耐火部材を製品化する二次メーカーにおいても、これら断熱材の情報を十分には得られない状況にある。そのため、簡易な方法で断熱材を調べることにより、発泡プラスチック断熱材の燃焼性を把握できることが望ましい。

ここでは、発泡プラスチック断熱材を対象に、防火性能評価の観点から断熱材の優劣を判断できるようにするため、簡易な試験により測定できる発泡プラスチック断熱材の材料物性の中から、燃焼性と相関性の高い材料物性を検討する。

#### 2.4.1.2 検討内容

発泡プラスチック断熱材の燃焼が、建築材料や建築部材の火災時の挙動に与える影響を考えると、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つが着目すべき事象として挙げられる。

着火（断熱材への引火）は、加熱を受け、樹脂から熱分解された可燃性ガスと空気が混合した可燃範囲内の予混合気に、火花などの着火源が与えられて起こる<sup>12)</sup>。コーンカロリメータ試験では、通風の影響を受けない相対湿度 20%～80%、温度 15℃～30℃の雰囲気中で、放射加熱を受け、電気スパークを着火源とした際の着火性状を把握できる<sup>14)</sup>。また酸素指数（Oxygen Index, OI）は、温度 23±2℃、ガス流速 40±2 mm/sec の環境下で酸素濃度と点火を用いた着火の有無との関係より、添加した難燃剤の効果を把握できる<sup>18)</sup>。

単位質量あたりの発熱量は、燃焼による周囲への熱的影響の大きさを示す指標となる。コーンカロリメータ試験では、測定した総発熱量と試験体の質量から、単位質量あたりの発熱量を求めることができる<sup>注2)</sup>。

また 2.3 の燃焼性状の検討によると、コーンカロリメータ試験における断熱材の燃焼は共通して、着火後、急速に燃え上がって燃焼のピークを迎えて、その後、燃焼は減衰していく。この時、断熱材の燃焼が進むにつれて、炎が成長し、発熱速度が大きくなっていく過程は、断熱材における着火後の燃焼拡大の過程であり、断熱材ごとにその特性が現れる。

そこで、コーンカロリメータ試験において、着火した後、断熱材の燃焼が成長して燃焼がピークを迎える際の発熱速度を「一次ピーク時発熱速度（または、発熱速度の一次ピーク値）」とし、具体的には、熱可塑性樹脂および熱硬化性樹脂において、それぞれ 2.3 で得られた燃焼性状を踏まえて、次の通り定義する。

熱可塑性樹脂では、着火した後すぐに一旦、消炎する場合を除き、安定的な着火を迎えると、熔融した樹脂から熱分解ガスの供給が加速度的に進み、断熱材の燃焼が急速に拡大していく。その後、樹脂からの熱分解ガスの供給が追い付かなくなり供給量が落ちたり、頭打ちになってほぼ一定となると、燃焼の拡大過程が終わり、発熱速度がピークを迎える。この時の発熱速度のピーク値を、一次ピーク時発熱速度とする。

一方、熱硬化性樹脂では、表面材や樹脂に着火した後、加熱面において、表面材や樹脂からの熱分解ガスが増加するとともに、燃焼が拡大していく。その後、熱分解ガスの供給量が頭打ちになってほぼ一定となったり、表面材の残渣や樹脂の炭化により熱分解ガスの供給量が落ちたりすると、燃焼の拡大過程が終わり、発熱速度がピークを迎える。この時の発熱速度のピーク値を一次ピーク時発熱速度とする。

熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂いずれにしても、コーンカロリメータ試験において、

加熱強度、試験体の受熱面積および試験体の大きさをすべて同一にした条件下で得られる「一次ピーク時発熱速度」の大小は、断熱材における着火後の燃焼拡大の程度を示す指標としてみることができる。

以上より、「②単位質量あたりの発熱量」については、コーンカロリメータ試験で得られる総発熱量と試験体質量から求めることができ、「①着火特性」については、コーンカロリメータ試験における着火時間と酸素指数から、「③着火後の燃焼拡大特性」については、コーンカロリメータ試験における一次ピーク時発熱速度から、それぞれ情報を得ることができる。従って、発泡プラスチック断熱材の燃焼が建築材料や建築部材の火災時の挙動に与える影響を考える上で着目すべき3つの事象（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）については、コーンカロリメータ試験と酸素指数の測定を実施することにより把握できる。

一方、2.3の燃焼性状の検討では、断熱材の種類ごとに、入手できた数種類の断熱材について燃焼性状の基礎的な把握を行ったが、得られた結果が市場で流通する発泡プラスチック断熱材の一般的な燃焼性状を示すのか確認を行うまでには至っていない。

ここでは JIS A 9511<sub>2006</sub><sup>13)</sup>に示される発泡プラスチック断熱材5種類を対象に、日本国内で流通する断熱材ほぼすべてを包括できるように試験体を選定して、あらためてコーンカロリメータ試験を実施して燃焼性状を確認する。あわせて酸素指数を測定して、断熱材が備える難燃性（点火による着火のしづらさ）の程度を把握する。

これらの結果より、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂の2つに分けて、燃焼性状の特徴を述べた上で、①着火特性（着火時間と酸素指数）、②単位質量あたりの発熱量、③着火後の燃焼拡大特性（一次ピーク時発熱速度）の事象ごとに、発泡プラスチック断熱材の材料物性の中から、その特徴を最もよく示す相関性の高い材料物性を検討する。さらに、その相関性の高い材料物性が断熱材の熱物性や熱分解挙動に関係すると考えられる場合には、熱重量・示差熱同時分析（TG-DTA分析）による詳細な検討を行う。

## 2.4.2 試験体

### 2.4.2.1 試験体の選定

発泡プラスチック断熱材は、JIS A 9511<sub>2006</sub><sup>13)</sup>に示される 5 種類の断熱材 (XPS、EPS、PE、PF、PUF) を対象とした。試験体は、2008 年時点で建築用途向けに量産

表 2-12 試験体仕様の一覧

#### 1. 熱可塑性樹脂

	JIS 上の規格 <sup>13)</sup>	メーカー
XPS	1 種 b, 2 種 b, 3 種 b	A 社 B 社 C 社 D 社
EPS	特号, 1 号, 2 号, 3 号, 4 号	E 社
PE	1 種 2 号	F 社

#### 2. 熱硬化性樹脂

	JIS 上の規格 <sup>13)</sup>	メーカー	製品仕様	表面材の仕様 (表面材は両面とも同じ)
PF	A 種 1 種 2 号	G 社	一般品 <sup>*2</sup> (密度 27K <sup>*3</sup> )	PET 不織布 表面材なし <sup>*7</sup>
			高密度品 <sup>*4</sup> (密度 40K <sup>*3</sup> )	PET 不織布 表面材なし <sup>*7</sup>
		H 社	一般品 <sup>*2</sup> (密度 37K <sup>*3</sup> )	難燃紙 表面材なし <sup>*7</sup>
			高密度品 <sup>*4</sup> (密度 42K <sup>*3</sup> )	難燃紙 表面材なし <sup>*7</sup>
PUF	A 種 2 種 1 号	I 社	一般品 <sup>*2</sup>	炭酸カルシウム紙 表面材なし <sup>*7</sup>
	A 種 2 種 2 号	I 社, J 社	一般品 <sup>*2</sup>	クラフト紙 炭酸カルシウム紙 表面材なし <sup>*7</sup>
		I 社	難燃仕様 <sup>*5</sup>	クラフト紙 表面材なし <sup>*7</sup>
	A 種 2 種 3 号	K 社	一般品 <sup>*2</sup>	表面材なし <sup>*7,*8</sup>
	A 種 2 種 4 号	K 社	一般品 <sup>*2</sup>	表面材なし <sup>*7,*8</sup>
	B 種 2 種 2 号	J 社	一般品 <sup>*2</sup>	クラフト紙 表面材なし <sup>*7</sup>
		K 社	一般品 <sup>*2</sup>	クラフト紙 炭酸カルシウム紙, 表面材なし <sup>*7</sup>
A 種 2 種 2 号相当 <sup>*1</sup>	L 社	難燃仕様 <sup>*5</sup> (ガラス繊維混入) <sup>*6</sup>	表面材なし <sup>*7,*8</sup>	

\*1 樹脂中にガラス繊維が混入され、厳密に言えば JIS 規格外の製品である。他の要件を照合すると A 種 2 種 2 号に相当するため、「A 種 2 種 2 号相当」とした。

\*2 「一般品」は製品群の中で、標準的な製品を指す。

\*3 「密度〇K」とあるのは、樹脂の密度が〇kg/m<sup>3</sup>であることを示す。

\*4 「高密度品」は製品群の中で、一般品に比べ樹脂の密度を高めた製品を指す。

\*5 「難燃仕様」は製品群の中で、一般品に比べ樹脂の難燃性を高めた製品を指す。

\*6 「ガラス繊維混入」は樹脂の中に、一部、ガラス繊維が混入している製品を指す。

\*7 表面材付きの製品から両面の表面材を剥がし「表面材なし」とした。

\*8 製品として使われている樹脂であるが、製品に用いられる表面材がアルミ箔など不燃性面材に限られて、可燃性面材の製品が存在しない。そのため、表面材を剥がし、表面材なしの試験のみ実施した。

され、市場で流通するボード状の断熱材（JIS品）を対象に、JIS A 9511<sub>2006</sub><sup>13)</sup>で示される分類（以下、JIS上の分類）に沿って、日本国内で流通するほぼすべての断熱材を包括できるように選定した（表2-12）。

熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）は、XPS12種類、EPS5種類、PEは唯一の住宅用の断熱材1種類を選び、それぞれ表面材のない製品を対象とした。

一方、熱硬化性樹脂（PF、PUF）は、製法上の理由から、製品の状態では必ず両面に表面材を有する。そのため表面材が可燃性のものを対象に、PFは4種類、PUFは9種類を選び、さらに表面材が異なる製品を加えた。また樹脂の燃焼性を把握し、比較するため、表面材を剥がした樹脂部のみの断熱材（以下、表面材なし）もあわせて対象とした。なお、PUFについては、樹脂の種類（A種、B種）および製品仕様（一般品、難燃仕様）に基づいて考察を行うにあたっては、表2-13に示す通り、9種類の試験体を5つに分類した。

試験体とした断熱材の製造年月は、すべて2008年8月～2009年1月であり、材齢による影響を無視できるようにするため、試験体の材齢ができる限り同じになるように配慮した。

表2-13 樹脂の種類および製品仕様に基づく考察時に用いる分類と名称（PUF）

	メーカー	JIS上の規格 <sup>15)</sup>		製品仕様	樹脂の種類および製品仕様に基づく考察時に用いる分類と名称
		保温板の種類	熱伝導率 (W/mK)		
PUF-1	I社	A種2種1号*1	0.023以下	35以上	一般品
PUF-2	I社	A種2種2号*1	0.024以下	25以上	一般品
PUF-3	J社	A種2種2号			一般品
PUF-4	I社	A種2種2号			難燃仕様
PUF-5	K社	A種2種3号*1	0.027以下	35以上	一般品
PUF-6	K社	A種2種4号*1	0.028以下	25以上	一般品
PUF-7	J社	B種2種2号	0.024以下	25以上	一般品
PUF-8	K社	B種2種2号			一般品
PUF-9	L社	JIS規格外 A種2種2号相当*2	0.024以下*2	25以上*2	難燃仕様 (ガラス繊維混入)

\*1 A種2種1号～4号は、材料設計上、熱伝導率の観点から、A種2種1号、2号とA種2種3号、4号に分類され、次にA種2種1号(A種2種3号)とA種2種2号(A種2種4号)は、密度により分類される。

A種2種1号、2号とA種2種3号、4号では、材料設計上、樹脂の原料組成が変わるが、次にA種2種1号(A種2種3号)とA種2種2号(A種2種4号)は、発泡倍率により密度を制御している。

そのため、考察を行う上では、一般品については、A種2種1号～4号を扱うにあたり、A種1号、2号とA種3号、4号の2つに分類とした

\*2 樹脂中にガラス繊維が混入され、厳密に言えばJIS規格外の製品である。他の要件を照合するとA種2種2号に相当するため、「A種2種2号相当」とした。

#### 2.4.2.2 化学物質安全性データシート（SDS）より得られた原料組成の情報

試験体に用いた断熱材の基礎情報として、化学物質安全性データシート（以下、SDS<sup>注 3)</sup>）より、断熱材ごとの原料組成の情報を把握しておく。SDS から得られる原料組成の情報は、PUF ではほとんど得られない（表 2-14）が、XPS、EPS、PE、PF の 4 種類については得られることを確認した（表 2-15、表 2-16）。

PUF を除く 4 種類の断熱材の SDS の表記を比較する限り、メーカーにより表現は異なるが、同じ種類の断熱材であれば、原料組成の中の難燃剤や添加量などの種類や割合に大きな差は見られず、原料組成に燃焼性の違いを推定できるような差異は見られなかった。

表 2-14 SDS より得られた試験体の原料組成の情報（PUF）

	メーカー	JIS 上の規格 (保温板) <sup>13)</sup>	製品 仕様	原料名(原料組成(%)) ※「-」は「未記載」を示す。			
				主成分	発泡剤	難燃剤	触媒・整泡剤
PUF-1	I 社	A 種 2 種 1 号	一般品	硬質ウレタンフォーム(-)	炭化水素(-)	-(-)	-(-)
PUF-2	I 社	A 種 2 種 2 号	一般品	硬質ウレタンフォーム(-)	炭化水素(-)	-(-)	-(-)
PUF-3	J 社	A 種 2 種 2 号	一般品	ジフェニルメタンジイソシアネート(-) ポリエーテルポリオール(-)	発泡剤(-)	難燃剤(-)	触媒(-) 整泡剤(-)
PUF-4	I 社	A 種 2 種 2 号	難燃仕様	硬質イソシアヌレートフォーム(-)	炭化水素(-)	-(-)	-(-)
PUF-5	K 社	A 種 2 種 3 号	一般品	ノンフロン硬質ウレタンフォーム(-)	-(-)	-(-)	-(-)
PUF-6	K 社	A 種 2 種 4 号	一般品	ノンフロン硬質ウレタンフォーム(-)	-(-)	-(-)	-(-)
PUF-7	J 社	B 種 2 種 2 号	一般品	ジフェニルメタンジイソシアネート(-) ポリエーテルポリオール(-)	発泡剤(-)	難燃剤(-)	触媒(-) 整泡剤(-)
PUF-8	K 社	B 種 2 種 2 号	一般品	ポリエーテルポリオール系ウレタン樹脂(-)	HFC(-)	-(-)	-(-)
PUF-9	L 社	JIS 規格外 A 種 2 種 2 号相当	難燃仕様 ガラス繊維混入	イソシアネート(66) ポリオール(28)	発泡剤(6)	-(-)	-(-)

表 2-15 SDS より得られた試験体の原料組成の情報 (XPS、EPS、PE)

	メーカー	JIS 上の規格 (A 種保温板) 13)	原料組成 (%)				
			主成分 (PS or PE)*1	発泡剤 (炭化水素ガス)	難燃剤 (臭素系難燃剤)	造核剤 (滑石)	その他 (添加剤等)
XPS-1	A 社	1 種 b	93 以上	3 以下	3 以下	—	1 以下
XPS-2	A 社	2 種 b	93 以上	3 以下	3 以下	—	1 以下
XPS-3	A 社	3 種 b	90.5 以上	4.5 以下	4 以下	—	1 以下
XPS-4	B 社	1 種 b	85~95	1~6 未満	2~5	0.1~0.5	—
XPS-5	B 社	2 種 b	85~95	1~6 未満	2~5	0.1~0.5	—
XPS-6	B 社	3 種 b	85~95	1~6 未満	2~5	0.1~0.5	—
XPS-7	C 社	1 種 b	95.0~99.0	1.1~2.5	2.0	—	0~0.5
XPS-8	C 社	2 種 b	93.0~96.5	1.6~3.5	2.0~4.0	—	0~0.5
XPS-9	C 社	3 種 b	91.0~95.0	3.1~5.5	2.0~4.0	—	0~0.5
XPS-10	D 社	1 種 b	94 以下	4 以下	約 2	—	—
XPS-11	D 社	2 種 b	94 以下	4 以下	約 2	—	—
XPS-12	D 社	3 種 b	94 以下	4 以下	約 2	—	—
EPS-1~5*2	E 社	特号~4 号	97 以上	2 以下	約 0.6	—	—
PE-1	F 社	1 種 2 号	95.5 以上	1.0	—	—	3.5 以下

\*1 XPS、EPS の場合は、主成分 (ポリスチレン (PS)) を、PE の場合は、主成分 (ポリエチレン (PE)) をそれぞれ示す。

\*2 EPS は、原料ビーズから、製品密度に合わせてかさ密度を調整して予備発泡させた後、粒子を成形金型に入れて加熱し、さらに発泡させ、粒子同士を融着させて断熱材となる。従って、EPS は特号~4 号まで、予備発泡時のかさ密度が異なるだけで、原料は同じ原料ビーズである。EPS に SDS は存在せず、原料ビーズの SDS が存在するのみである。ここでは原料ビーズの SDS を示す。

表 2-16 SDS より得られた試験体の原料組成の情報 (PF)

	メーカー	JIS 上の規格 (A 種保温板) 13)	製品仕様	原料組成 (%)	
				主成分*1	発泡剤 (炭化水素ガス)
PF-1	G 社	1 種 2 号	一般品 (密度 27K*2)	94~98	2~6
PF-2	G 社	1 種 2 号	高密度品 (密度 40K*2)	94~98	2~6
PF-3	H 社	1 種 2 号	一般品 (密度 37K*2)	94 以上	6 以下
PF-4	H 社	1 種 2 号	高密度品 (密度 42K*2)	94 以上	6 以下

\*1 主成分は「フェノール樹脂」または「レゾール樹脂」と表記されている。

\*2 「密度○K」とあるのは、樹脂の密度が○kg/m<sup>3</sup>であることを示す。



### 2.4.3 試験項目と概要

#### 2.4.3.1 コーンカロリメータ試験

コーンカロリメータ試験は、(株)東洋精機製作所製のコーンカロリメータ試験装置 (CONE CALORIMETER III : 写真 2-1) を用いて、ISO5660-1<sup>14)</sup>に定められた試験環境および試験方法に従って実施した。加熱強度は日本の防火材料の性能評価<sup>19)</sup>で使われている 50kW/m<sup>2</sup>とし、試験時間は燃え尽きて発熱速度が測定されなくなるまで、5分おきに、それぞれ 5分～30分までとした。試験体の大きさは、縦横 99 mm 角で、厚さを 25 mm とすべて同一とし、試験体数は 1 種類あたり 3 体とした。試験は表 2-12 に示すすべての断熱材を対象に、製造後約 1～3 ヶ月となるよう、すべての試験を 2008 年 10 月～2009 年 3 月に実施した。

#### 2.4.3.2 酸素指数 (Oxygen Index, OI)

酸素指数 (Oxygen Index, OI) は、所定の環境のもとで材料が最小限の燃焼を維持するために必要となる酸素と窒素との混合ガスの酸素の最低濃度で、プラスチック材料では、材料の燃焼性や添加した難燃剤の効果を示す指標として使われる。

測定は、酸素指数測定装置 (株)東洋精機製作所製キャンドル法燃焼試験機、スガ試験機(株)製酸素指数燃焼性試験器 (ON-2M) など) を用いて、JIS K 7201-2<sup>2007 18)</sup>に定められた試験環境および試験方法に従って行った<sup>注 4), 注 5)</sup>。試験体寸法は、JIS K 7201-2<sup>2007 18)</sup>中の発泡材料用である試験片 II 形に従い、試験体の大きさを長さ 80～150 mm、幅 10 mm、厚さ 10 mm とし、切り出した発泡体にてそのまま測定を行った。測定は表 2-12 に示すすべての断熱材の樹脂部のみを対象に、試験体の材齢が約 1 ヶ月となるように、測定時期を配慮して行った。

#### 2.4.3.3 熱重量-示差熱同時分析 (TG-DTA 分析)

TG-DTA 分析は、温度変化に伴う試料の質量変化 (熱重量 (TG)) と標準試料に対する温度差を示す電位差より吸発熱 (示差熱 (DTA)) の情報を同時に把握する試験法<sup>6)</sup>である。TG-DTA 分析は、一定の昇温条件下で物質の質量変化、発熱や吸熱の有無などの挙動を把握でき、断熱材樹脂の分解挙動の過程を検証できる。また測定器が広く普及していて、容易かつ安価で測定できる長所がある。

測定は、室温約 25℃に保たれた試験室に設置されている TG-DTA 同時測定装置 (セ

イコーインスツルメンツ(株)製示差熱熱重量同時測定装置 TG/DTA6300) により行った (写真 2-1)。測定条件は、流量 200mL/min の空気雰囲気下で、測定温度を 60℃～800℃、昇温速度を 20℃/min とし、一定昇温の環境下で測定を行った。試料は、断熱材の樹脂をくり抜いたものをそのまま用いた。樹脂が完全に分解する温度まで昇温させるため、最終的な質量減少量を 100%として熱重量 (TG) を求めた。また同時に得られる示差熱曲線 (DTA 曲線) より、温度に沿って発熱反応、吸熱反応の有無を確認した。測定回数は、分析装置の再現性を確認した上で、各 1 回ずつとした。

## 2.4.4 燃焼性と相関性の高い材料物性の検討

### 2.4.4.1 熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）

#### 2.4.4.1.1 燃焼性状の特徴

熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）におけるコーンカロリメータ試験の結果と酸素指数の測定結果を表 2-17 に示す。

表 2-17 試験体と酸素指数、コーンカロリメータ試験結果（熱可塑性樹脂）

試験体			コーンカロリメータ試験（試験体 3 体の平均値を示す。）																	
No.	JIS 上の分類 <sup>15)</sup> (A種)	メーカー	酸素指数	試験時間 (分)	初期質量 (g)	実測密度 (kg/m <sup>3</sup> )	発熱量 <sup>*1</sup>		質量減少量 (g)	発熱量／初期質量 (kJ/g)	発熱速度 <sup>*1</sup>		燃焼速度		溶融時着火時間 <sup>*3</sup> (秒)	液化時消炎時間 <sup>*3</sup> (秒)	ガス化時着火時間 <sup>*3</sup> (秒)	燃焼終了消炎時間 <sup>*3</sup> (秒)	着火へ至る過程 <sup>*4</sup>	
							(kJ)	(MJ/m <sup>2</sup> )			一次ピーク値 <sup>*2</sup> 最大値 (kW)	時間 (秒)	最大値 (g/秒)	時間 (秒)						
XPS-1	1種 b	A社	26.9	5	6.6	26.2	181	20.6	6.6	27.7	3.86	438.4	45	0.139	34	4	10	20	92	(b)
XPS-2	2種 b	A社	26.3	5	6.9	28.1	192	21.8	6.9	28.0	4.03	457.9	51	0.140	38	4	12	24	91	(b)
XPS-3	3種 b	A社	26.6	5	7.6	31.0	216	24.5	7.6	28.5	4.04	459.5	45	0.144	34	2	12	20	100	(b)
XPS-4	1種 b	B社	26.2	5	6.4	25.6	178	20.3	6.4	28.0	4.22	479.4	34	0.143	27	3	—	—	77	(a)
XPS-5	2種 b	B社	26.2	5	6.2	25.6	175	19.9	6.2	28.2	4.66	529.1	34	0.151	26	3	—	—	70	(a)
XPS-6	3種 b	B社	26.0	5	8.1	33.2	230	26.2	8.0	28.5	5.39	612.6	38	0.174	31	3	—	—	70	(a)
XPS-7	1種 b	C社	26.5	5	7.8	31.8	223	25.3	7.8	28.5	4.06	461.2	53	0.140	37	3	14	22	96	(b)
XPS-8	2種 b	C社	26.5	5	7.4	29.7	212	24.1	7.4	28.5	3.83	435.1	39	0.139	29	2,3 <sup>*4</sup> 14 <sup>*5</sup>	— 17 <sup>*5</sup>	— 19 <sup>*5</sup>	95, 109 <sup>*5</sup>	(a), (b) <sup>*5</sup>
XPS-9	3種 b	C社	26.0	5	9.1	36.5	255	28.9	9.0	27.9	5.10	579.5	49	0.175	38	3	16	21	98	(b)
XPS-10	1種 b	D社	26.2	5	7.4	29.4	220	25.0	7.3	29.7	5.26	597.9	35	0.165	29	3	—	—	83	(a)
XPS-11	2種 b	D社	26.1	5	7.5	29.7	216	24.5	7.5	28.8	4.67	531.1	35	0.151	28	3	—	—	93	(a)
XPS-12	3種 b	D社	26.5	5	8.9	35.2	254	28.9	8.7	28.7	5.38	611.7	42	0.169	33	2,2 <sup>*4</sup> 14 <sup>*5</sup>	— 19 <sup>*5</sup>	— 19 <sup>*5</sup>	98, 108 <sup>*5</sup>	(a), (b) <sup>*5</sup>
EPS-1	特号	E社	34.4	5	6.7	27.2	191	21.7	6.7	28.5	4.30	488.3	49	0.150	43	—	—	29	101	(c)
EPS-2	1号	E社	34.4	5	7.1	29.0	205	23.2	7.1	28.8	4.40	499.9	51	0.150	46	—	—	29	102	(c)
EPS-3	2号	E社	36.0	5	6.2	24.5	180	20.4	6.2	29.0	4.17	473.4	47	0.140	41	—	—	27	98	(c)
EPS-4	3号	E社	33.6	5	5.0	20.1	143	16.2	5.0	28.8	3.72	422.8	48	0.131	41	—	—	27	90	(c)
EPS-5	4号	E社	33.6	5	3.8	15.4	107	12.2	3.8	28.6	3.47	394.0	47	0.125	41	—	—	27	74	(c)
PE-1	1種 2号	F社	18.3	5	2.9	11.1	107	12.1	2.8	37.1	3.06	347.9	42	0.084	31	—	—	11	64	(c)

\*1 コーンカロリメータ試験では、発熱速度や発熱量は、得られた値を試験体フォルダーの開口面積(0.0088 m<sup>2</sup>)で除して、単位面積あたりの値で示されることが多い。ここでは発熱速度、発熱量については、得られた値(kW, kJ)とそれを開口面積(0.0088 m<sup>2</sup>)で除した値(kW/m<sup>2</sup>, MJ/m<sup>2</sup>)の両方を併記する。

\*2 熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）では、すべて発熱速度の一次ピーク値が、発熱速度の最大値となった。

\*3 継続時間 10 秒以下のフラッシュを含み、目視により炎が確認できた状態を着火、消えたことを確認できた状態を消炎とし、試験開始からの時間を測定した。

\*4 熱可塑性樹脂の加熱から着火、燃焼へ至る過程を本文中にある通り、3 つに分類した上で、その着火に至る燃焼過程を(a),(b),(c)で示す。

\*5 試験体 3 体の中で着火へ至る過程が異なる試験体があり、表記の位置を対応させて着火へ至る過程ごとにそれぞれの着火時間、消炎時間を示す。

熱可塑性樹脂における発熱速度の推移を図 2-5 に、試験体の試験前および試験後の写真を写真 2-6 に示す。

熱可塑性樹脂は、加熱を受けると、2.3.3.1 の実験結果と同じく、本実験でも加熱表面から熔融して、液化、熱分解、ガス化の過程をたどり、この過程の中で着火して燃焼した。

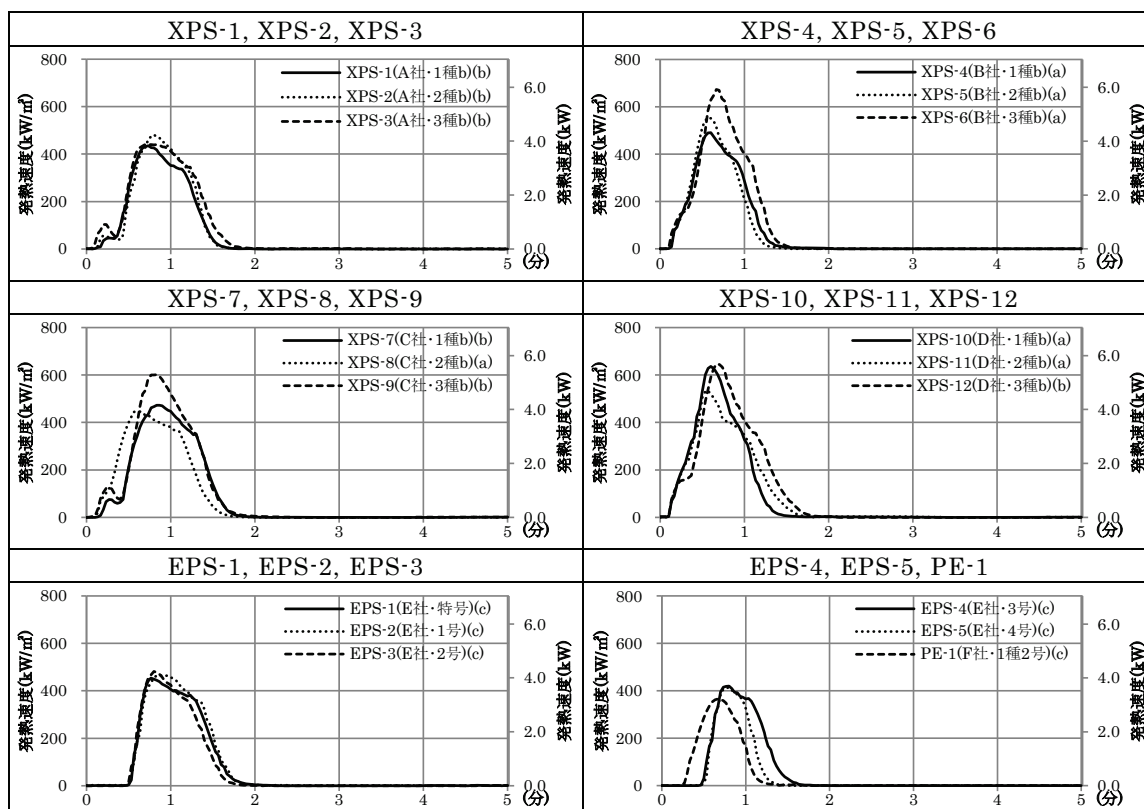
加熱から着火、燃焼へ至る過程も、2.3.3.1 の実験結果と同じく、次の(a)～(c)の 3 つに分類された。試験体ごとの着火、燃焼にへ至る過程については表 2-17 中に示す。

(a)加熱を受け、樹脂が融ける過程で着火し、そのまま燃焼する。

(b)加熱を受け、樹脂が融ける過程で着火した後、液体となった段階で一旦消炎し、その後、熱分解、ガス化の過程を経て再着火し燃焼する。

(c)加熱を受け、樹脂が融けて液体となった後、熱分解、ガス化の過程を経て着火し燃焼する。

安定に着火した後 ((a), (c)では着火後、(b)では再着火後) は、いずれも樹脂はその



試験体とした断熱材ごとに、それぞれ 3 体ずつ試験を実施したが、そのうち 1 体目の発熱速度の推移を示す。

図 2-5 熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) の発熱速度の推移

まま一気に燃え上がる。厚さ 25 mm の試験体では、加熱開始後約 35～50 秒で一次ピークを迎えるが、加熱開始後約 1 分半前後には燃え尽きて燃焼が終わり、残渣はほとんど残らない（図 2-5、写真 2-6）。

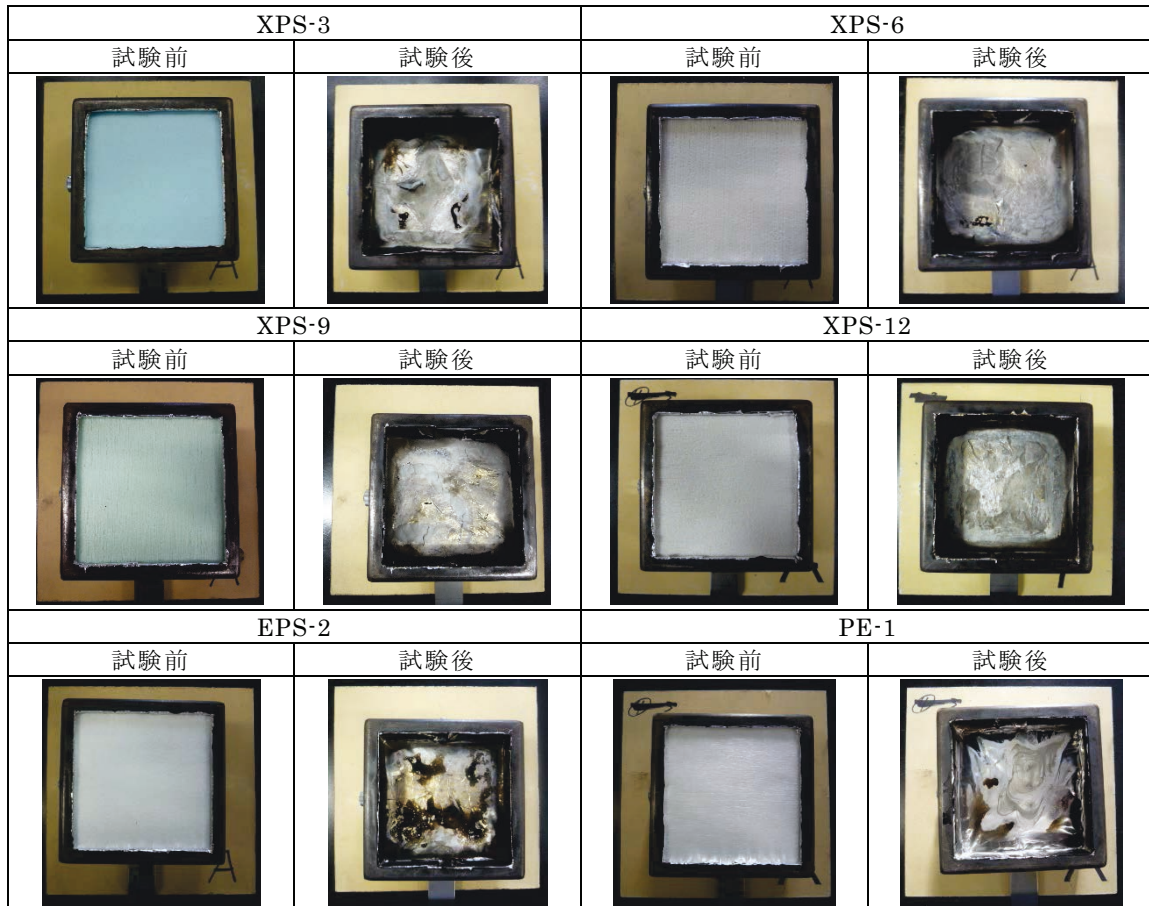


写真 2-6 試験体 (XPS、EPS、PE)

#### 2.4.4.1.2 着火特性（着火時間と酸素指数）

2.3.3.1 の実験結果では、EPS は一部、過程(b)を経て着火する場合も見られたが、本試験では EPS はすべて過程(c)で燃焼に至った（表 2-17）。また XPS では B 社、D 社では過程(a)を A 社、C 社では過程(b)を経る場合が多く、メーカーにより着火性状が分かれた（表 2-17）。この同種断熱材における着火性状の差は、熔融時の着火の際に自消性が発現されたか否かによるため、難燃剤効果の発現の差によると考えられる。

しかし、酸素指数や発泡剤、難燃剤の配合割合からは、メーカー間の明確な差は確認できず、この着火性状の違いを捉えることはできなかった。XPS、EPS における熔融時の着火の要因やメーカー別による着火性状の違いを明らかにするためには、さらに樹脂の化学的な組成の分析等、化学的見地からの検討が必要である。

熔融時の着火でそのまま持続的な燃焼に至る過程(a)を除くと、樹脂は熔融、熱分解、ガス化の過程を経た後で着火、燃焼に至る。XPS、EPS ともに同種の断熱材であれば、密度（熱容量）により着火時間に差が生じると予想したが、燃焼に至った着火時間は、密度に依らず、XPS の方が EPS よりも早くなった。そして PE は XPS、EPS よりも

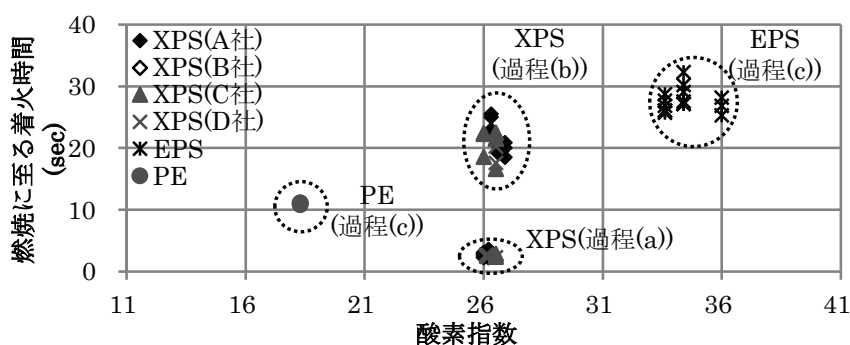


図 2-6 酸素指数と燃焼に至る着火時間（熱可塑性樹脂）

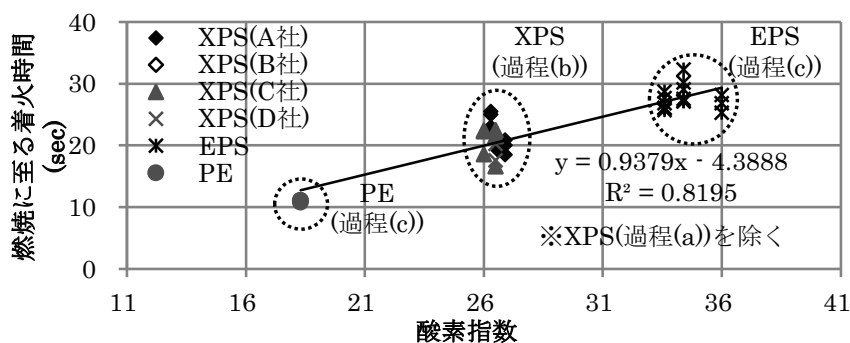


図 2-7 酸素指数と燃焼に至る着火時間（熱可塑性樹脂）における相関性

さらに着火時間が早くなった（図 2-6）。

また PE では、2.2.2.1.1 における熱可塑性樹脂の高温性状の調査結果より、主成分であるポリエチレン樹脂の引火温度は、XPS、EPS の主成分であるポリスチレンと比べて、ほぼ同じか、若干低い。表 2-15 に示す通り、PE は原料組成の中に難燃剤が配合されておらず、また表 2-17 に示すように、PE の密度は低く、酸素指数も低い。これらの情報は、PE が XPS や EPS に比べ着火しやすい樹脂であることを示しており、この点も着火性状と合致した。

酸素指数は、断熱材密度によらず、断熱材の種類ごとに値が分かれた。酸素指数は高い順から EPS（33.6～36.0）、XPS（26.0～26.9）、PE（18.3）となり、酸素指数が高い断熱材ほど着火時間が遅くなった（図 2-6）。さらに熔融時の着火でそのまま持続的な燃焼に至る過程(a)を除いて、過程(b)および過程(c)を対象に、酸素指数と着火時間の間で相関を取ると、酸素指数が高いほど、着火時間が遅くなる強い相関が得られた（図 2-7）。酸素指数が高いほど、難燃剤の効果が高く発現して、加熱開始から着火に至るまで時間を要して、着火時間が遅くなったと考えられる。よって、樹脂が熱分解、ガス化の過程を経て着火に至る場合、主成分が同じである XPS と EPS の着火性状の違いは、酸素指数により添加された難燃剤の効果の差として捉えることができると考えられる。

以上より、熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）の着火特性については、一部、加熱を受けて樹脂が熔融する際に着火する可能性があるが、酸素指数が高くなるほど、着火までに時間を要し、着火しづらくなると判断できる。

### 2.4.4.1.3 単位質量あたりの発熱量

熱可塑性樹脂における断熱材の種類ごとの初期質量と発熱量との関係を図 2-8 に示す。熱可塑性樹脂では、断熱材の種類ごとに初期質量と発熱量の間に、非常に高い相関性が得られた。単位質量あたりの発熱量を求めると、本実験では、XPS 28kJ/g、EPS 29kJ/g、PE 37kJ/g となった。2.3.3.1 の実験結果では、XPS 28kJ/g、EPS 30kJ/g、PE 35kJ/g であり、コーンカロリメータ試験の既往報告<sup>20)</sup>では、EPS 29kJ/g となっており、これらの値と比較しても概ね近い値となった。特に XPS、EPS における単位質量あたりの発熱量に製品間の差は見られず、ほぼ一定の値と見なせる（図 2-8）。

以上より、熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）では、質量から発熱量を推定できる。

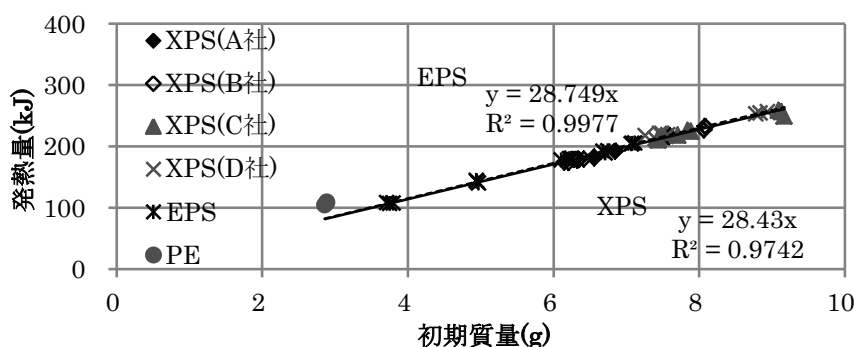


図 2-8 初期質量と発熱量（熱可塑性樹脂）

### 2.4.4.1.4 一次ピーク時発熱速度

熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）では、発熱速度はいずれも一次ピーク時で最大となり、燃焼速度は、いずれも着火から一次ピークを迎えるまでの燃焼が成長する過程で最大となる（表 2-17）。

熱可塑性樹脂では、XPS、EPS、PE の順に、初期質量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度、最大燃焼速度が大きくなる傾向が見られた（図 2-9、図 2-10）。断熱材厚さを 25 mm に統一した本試験では、熱可塑性樹脂はいずれも、安定的に着火した後、樹脂の熱分解が急速に進み、存在する可燃物量が一気に燃え上がって、発熱速度が一次ピークを迎えていることが分かる。

本試験は試験体の大きさをすべて同一としているため、熱可塑性樹脂は、断熱材密度を比較することで、一次ピーク時発熱速度の大小関係を捉えられることがわかった。

以上より、熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）では、その密度が大きいほど、着火後



の燃焼拡大が急激に進みやすいと推定できる。

ただし XPS では、メーカー間で比べると、この傾向が明確には認められない場合があった。過程(a)で燃焼に至った B 社、D 社と過程(b)で燃焼に至った A 社、C 社の着火性状の差異は、メーカーごとの原料組成の化学的な違いなどがその一因と考えられる。この点についても、前述の着火性状とあわせて、XPS における化学的見地からの検討が必要である。

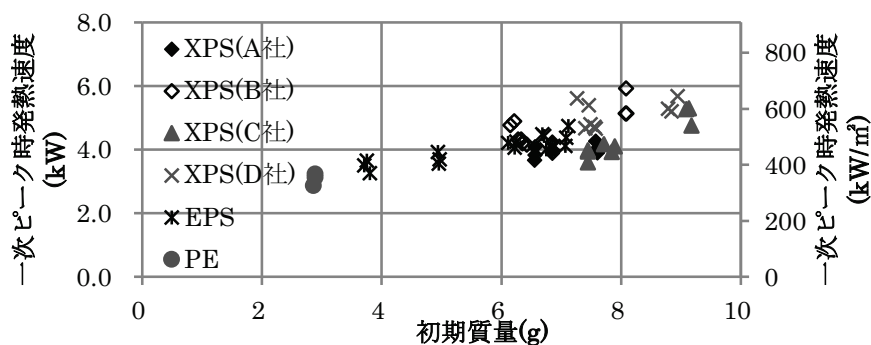


図 2-9 初期質量と一次ピーク時発熱速度（熱可塑性樹脂）

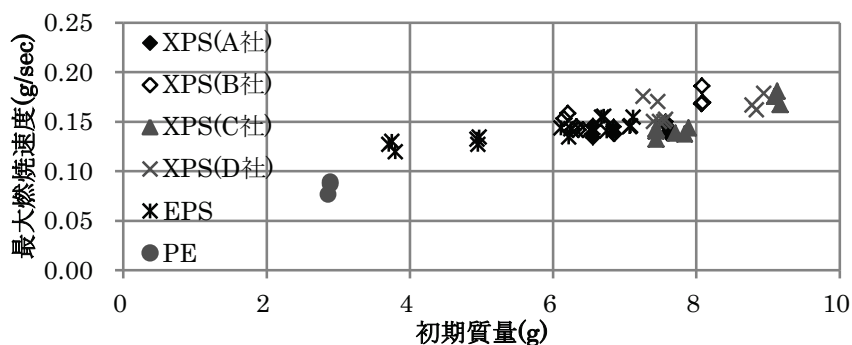


図 2-10 初期質量と最大燃焼速度（熱可塑性樹脂）

## 2.4.4.2 熱硬化性樹脂 (PF、PUF)

### 2.4.4.2.1 燃焼性状の特徴

熱硬化性樹脂におけるコーンカロリメータ試験の結果と酸素指数の測定結果について、PFの結果を表 2-18、PUFの結果を表 2-19 にそれぞれ示す。

表 2-18 試験体と酸素指数、コーンカロリメータ試験結果 (熱硬化性樹脂 PF)

試験体				酸素指数	コーンカロリメータ試験 (試験体3体の平均値を示す。)																
No.	JIS上の分類 <sup>1)</sup>	メーカー	製品仕様 <sup>1)</sup> 表面材		試験時間 (分)	初期質量 (g)	実測密度 (kg/m <sup>3</sup> )	発熱量 <sup>2)</sup>		質量減少量 (g)	発熱量/初期質量 (kJ/g)	発熱速度 <sup>2)</sup>				燃焼速度		着火時間 <sup>3)</sup>	消炎時間 <sup>3)</sup>		
								(kJ)	(MJ/m <sup>2</sup> )			最大値	時間	一次ピーク値	時間	最大値	時間				
						(kW)	(kW/m <sup>2</sup> )	(秒)	(kW)	(kW/m <sup>2</sup> )	(秒)	(g/秒)	(秒)								
PF-1	A種1号	G社	一般品 (密度27K) PET不織布 表面材なし	28.1	15	7.6	29.8	193	21.9	7.6	25.5	1.16	132.3	13	1.16	132.3	13	0.055	16	4	334
					15	6.7	26.6	177	20.1	6.7	26.5	0.64	73.2	14, 114 <sup>4)</sup>	0.64	72.3	15	0.038	15	3	305
PF-2	A種1号	G社	高密度品 (密度40K) PET不織布 表面材なし	31.8	20	10.9	42.8	265	30.1	10.9	24.4	0.99	112.1	13	0.99	112.1	13	0.055	16	4	439
					20	10.0	39.7	253	28.8	10.0	25.4	0.62	70.9	155 <sup>4)</sup>	0.58	66.0	17	0.039	16	4	452
PF-3	A種1号	H社	一般品 (密度37K) 難燃紙 表面材なし	31.4	25	10.2	45.7	241	29.3	10.1	25.3	0.74	84.1	14, 157 <sup>4)</sup>	0.71	81.2	16	0.046	16	4	338
					20	8.5	38.8	216	24.6	8.4	25.6	0.79	90.2	16	0.79	90.2	16	0.053	15	3	261
PF-4	A種1号	H社	高密度品 (密度42K) 難燃紙 表面材なし	32.1	30	12.3	51.4	281	31.9	11.6	22.7	0.92	105.0	14	0.92	105.0	14	0.065	16	4	418
					20	9.8	42.0	252	28.6	9.8	25.6	0.74	83.8	15	0.74	83.8	15	0.052	16	3	379

\*1 「密度○K」とあるのは、樹脂の密度が○kg/m<sup>3</sup>であることを示す。

\*2 コーンカロリメータ試験では、発熱速度や発熱量は、得られた値を試験体フォルダーの開口面積(0.0088 m<sup>2</sup>)で除して、単位面積あたりの値で示されることが多い。そのため発熱速度、発熱量については、得られた値(kW, kJ)とそれを開口面積(0.0088 m<sup>2</sup>)で除した値(kW/m<sup>2</sup>, MJ/m<sup>2</sup>)の両方を併記する。

\*3 燃焼後、燃え尽き、最終的に消炎した時間を示す。

\*4 PFの一部では一次ピークを迎えた後、燃焼が減衰しながら進む過程において、試験体中央部が隆起して発熱速度が再び大きくなってピークとなり、そのピーク値が一次ピーク値を上回り最大値となる場合がみられた。

表 2-19 試験体と酸素指数、コーンカロリメータ試験結果（熱硬化性樹脂 PUF）

試験体				コーンカロリメータ試験（試験体3体の平均値を示す。）																			
No.	JISの分類 <sup>13)</sup>	メーカー	製品仕様 <sup>*1</sup>	表面材	酸素指数	試験時間 (分)	初期質量 (g)	実測密度 (kg/m <sup>3</sup> )	発熱量 <sup>*1</sup>		質量減少量 (g)	発熱量／初期質量 (kJ/g)	発熱速度 <sup>*2</sup>				燃焼速度		着火時間 (秒)	消炎時間 <sup>*3</sup> (秒)	樹脂燃焼過程 <sup>*4</sup>		
									(kJ)	(MJ/m <sup>2</sup> )			最大値 (kW)	時間 (秒)	一次ピーク値 (kW)	時間 (秒)	最大値 (g/秒)	時間 (秒)					
PUF-1	A種2種1号	I社	一般品	炭酸カルシウム紙	23.2	20	19.1	77.7	369	41.9	17.8	19.3	2.63	298.1	30	2.63	298.1	30	0.147	27	7	238	(A)
				表面材なし		20	11.8	49.3	249	28.3	11.8	21.2	2.35	266.9	15	2.35	266.9	15	0.147	16	3	163	
PUF-2	A種2種2号	I社	一般品	クラフト紙	22.3	15	10.7	43.2	232	26.3	10.7	21.6	3.45	391.7	22	3.45	391.7	22	0.195	20	7	93	(A)
				炭酸カルシウム紙		15	11.2	45.4	205	23.3	9.6	18.4	2.69	305.8	24	2.69	305.8	24	0.138	21	7	107	
				表面材なし		15	7.8	32.1	170	19.3	7.8	21.9	2.59	294.6	18	2.59	294.6	18	0.151	16	2	90	
PUF-3	A種2種2号	J社	一般品	クラフト紙	23.3	15	10.8	46.0	216	24.5	10.8	20.0	3.15	357.9	21	3.15	357.9	21	0.184	20	6	104	(A)
				炭酸カルシウム紙		20	12.3	50.2	218	24.8	10.7	17.7	2.07	234.7	24	2.07	234.7	24	0.128	20	7	129	
				表面材なし		15	8.1	34.1	154	17.5	8.0	19.2	2.55	289.9	19	2.55	289.9	19	0.167	16	2	88	
PUF-4	A種2種2号	I社	難燃仕様	クラフト紙	23.3	20	12.8	51.6	314	35.7	12.8	24.5	3.04	345.5	20	3.04	345.5	20	0.146	20	7	499	(B)
				不織布		20	12.4	47.7	294	33.4	12.2	23.7	2.74	311.7	16	2.74	311.7	16	0.125	17	5	265	
				表面材なし		15	9.5	38.8	243	27.6	9.5	25.5	1.60	181.4	18	1.60	181.4	18	0.100	16	3	432	
PUF-5	A種2種3号	K社	一般品	表面材なし <sup>*6</sup>	22.3	15	11.8	42.8	224	25.4	11.7	19.0	3.37	382.9	23	3.37	382.9	23	0.202	17	3	103	(A)
PUF-6	A種2種4号	K社	一般品	表面材なし <sup>*6</sup>	22.3	15	9.0	37.7	173	19.7	9.0	19.2	3.38	384.6	23	3.38	384.6	23	0.199	17	3	76	(A)
PUF-7	B種2種2号	J社	一般品	クラフト紙	23.1	15	10.1	40.4	192	21.9	10.1	19.1	2.88	327.1	20	2.87	325.9	20	0.189	19	6	78	(A)
				表面材なし		15	7.1	29.3	117	13.3	7.1	16.5	2.64	300.4	21	2.64	300.4	21	0.202	16	2	48	
PUF-8	B種2種2号	K社	一般品	クラフト紙	22.5	15	10.8	43.8	210	23.9	10.8	19.4	3.30	374.7	20	2.82	320.6	21	0.195	20	6	79	(A)
				炭酸カルシウム紙		15	11.4	46.0	176	20.1	9.7	15.5	2.75	313.0	20	2.48	282.1	29	0.172	28	6	83	
				表面材なし		15	8.1	33.2	139	15.7	8.1	17.1	2.80	318.4	20	2.75	312.3	27	0.202	16	3	53	
PUF-9	A種2種2号相当 <sup>*5</sup>	L社	難燃仕様 ガラス繊維混入	表面材なし <sup>*6</sup>	21.1	20	9.1	35.4	199	22.6	8.4	21.8	1.11	125.8	16	1.11	125.8	16	0.064	16	2	415	(B)

\*1 コーンカロリメータ試験では、発熱速度や発熱量は、得られた値を試験体フォルダーの開口面積(0.0088 m<sup>2</sup>)で除して、単位面積あたりの値で示されることが多い。そのため発熱速度、発熱量については、得られた値(kW, kJ)とそれを開口面積(0.0088 m<sup>2</sup>)で除した値(kW/m<sup>2</sup>, MJ/m<sup>2</sup>)の両方を併記する。

\*3 燃焼後、燃え尽き、最終的に消炎した時間を示す。

\*4 目視観察より PUF の樹脂部の燃焼過程は、炭化層の形成状況も含め、大別すると次の 2 つの傾向がみられた。欄中の (A),(B)は下記に示す通り、着火へ至る過程を示す。

(A)炭化層が形成されるもののその量は比較的少なく、樹脂がなくなるまで一気に激しい燃焼が続き、その後、発熱速度が急激に小さくなり消炎に至る。

(B)炭化層の形成につれて、火が徐々に小さくなるように発熱速度が緩やかに減衰していく燃焼が続き、炭化層により燃え止まって、消炎に至る。

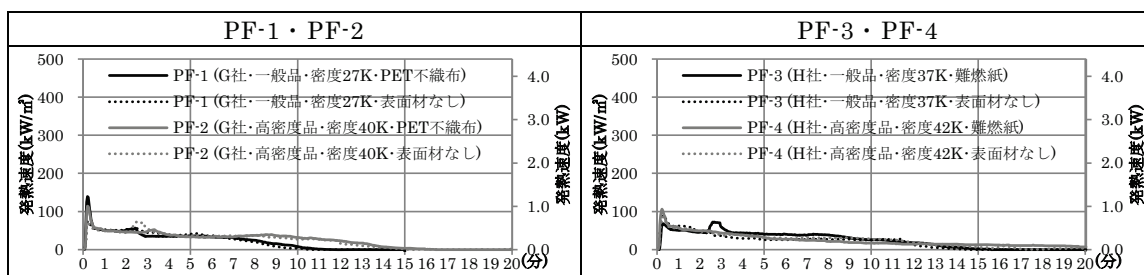
\*5 樹脂にガラス繊維が混入されているため、厳密には JIS 品には該当しないが、断熱材の物性は A 種 2 種 2 号を満たすため、A 種 2 種 2 号相当と表記した。

\*6 製品では表面材がアルミ箔など不燃性面材に限られ可燃性面材の製品がないため、表面材を剥がして、表面材なしの試験のみを実施した。

\*7 PUF の一部では一次ピークを迎えた後、一旦、発熱速度が小さくなると、再び大きくなってピークとなり、そのピーク値が一次ピーク値を上回り最大値となる場合がみられた。

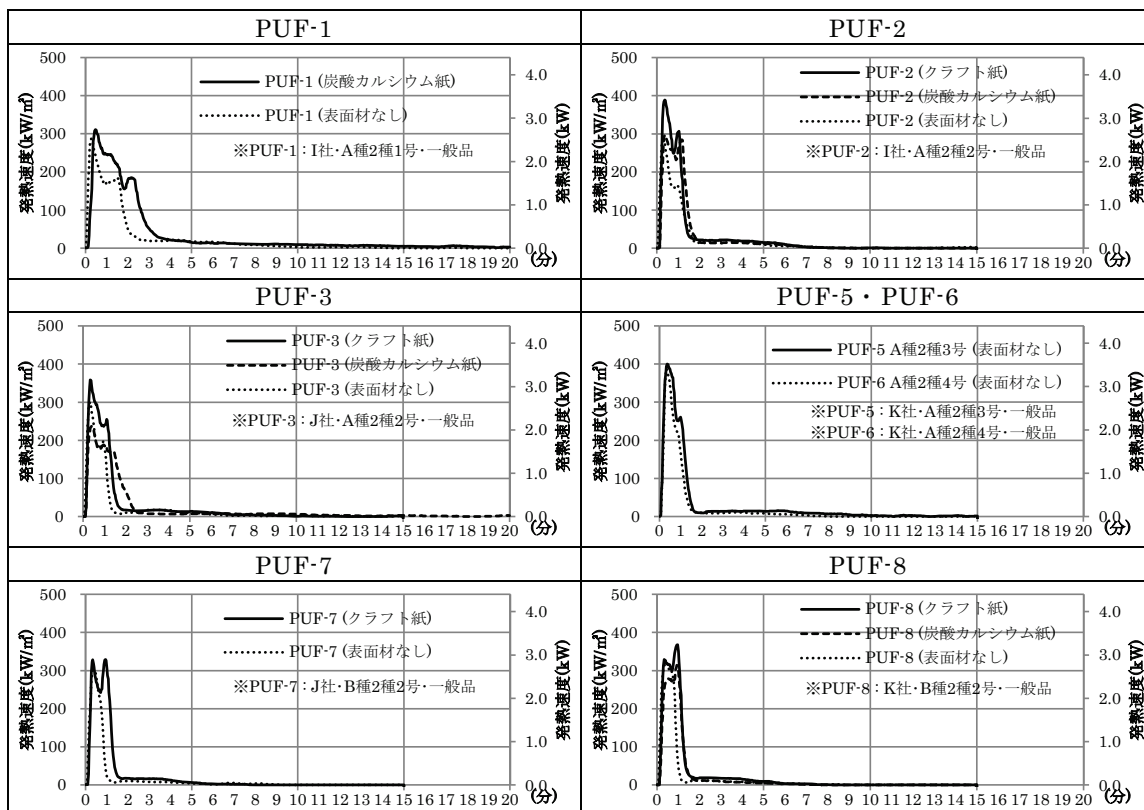
熱硬化性樹脂における発熱速度の推移を図 2-10～図 2-12 に、試験体の試験前および試験後の写真を写真 2-8～写真 2-10 に示す。

熱硬化性樹脂では、加熱を受ける表面材や樹脂の種類により着火時間および燃焼の一次ピークを迎える時間が異なる。表面材がある場合、PF では加熱開始後約 3～4 秒で、PUF では加熱開始後約 5～7 秒で表面材に着火した（表 2-18、表 2-19）。その後、加熱表面から順次、燃焼が進み、PF では約 13～17 秒で、PUF では約 16～30 秒で、



試験体とした断熱材ごとに、それぞれ 3 体ずつ試験を実施したが、そのうち 1 体目の発熱速度の推移を示す。

図 2-10 熱硬化性樹脂（PF）の発熱速度の推移



試験体とした断熱材ごとに、それぞれ 3 体ずつ試験を実施したが、そのうち 1 体目の発熱速度の推移を示す。

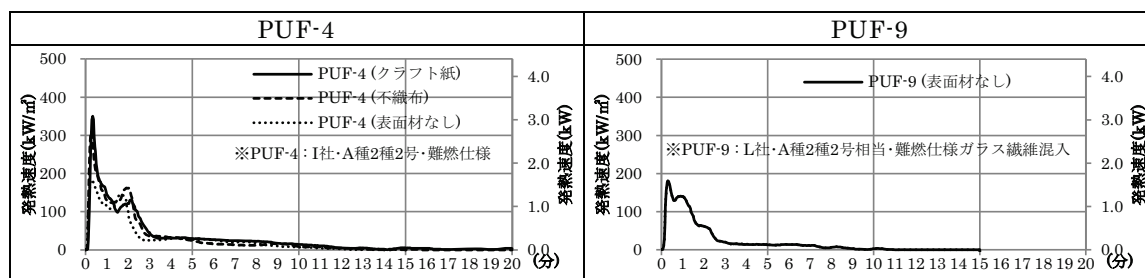
図 2-11 熱硬化性樹脂（PUF（一般品））の発熱速度の推移

発熱速度が一次ピークを迎えた（表 2-18、表 2-19）。燃焼は表面材から樹脂へと順に進むが、一次ピークを迎えた後、表面材は燃え尽き、燃焼は樹脂に移った。その際、表面材の残渣が樹脂表面に残ると、加熱を受ける樹脂にとって遮蔽物となるため、以後の樹脂の燃焼が緩慢になった。

表面材がない場合は、PUF、PF いずれも、加熱開始後約 2～4 秒で加熱表面の樹脂に着火した（表 2-18、表 2-19）。樹脂の燃焼が加熱面から順次進み、PF では約 15～16 秒で、PUF では約 15～27 秒で一次ピークを迎えた（表 2-18、表 2-19）。

一次ピーク後の PF の燃焼は、樹脂の炭化や変形とともに進んだ後、緩やかに減衰しながら消炎、赤熱の過程を経て、燃え尽きるまで続く（図 2-10）。

一方、一次ピーク後の PUF の燃焼は、炎をあげて進行するとともに、炭化層が形



試験体とした断熱材ごとに、それぞれ 3 体ずつ試験を実施したが、そのうち 1 体目の発熱速度の推移を示す。

図 2-12 熱硬化性樹脂（PUF（難燃仕様））の発熱速度の推移

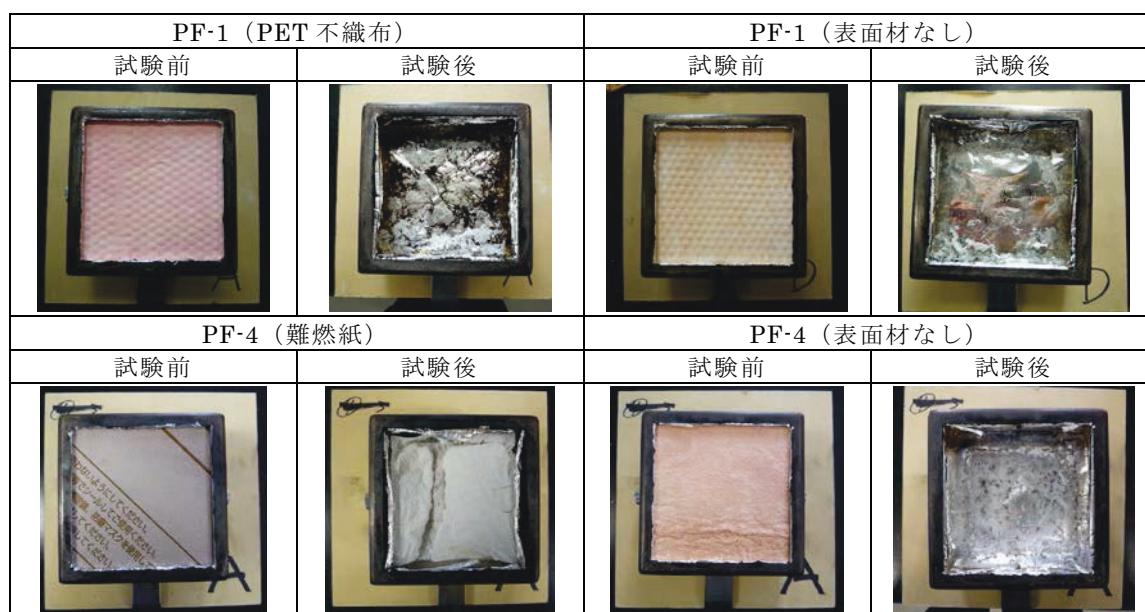


写真 2-8 試験体 (PF)

成される。一般品の場合は、炭化層が少なく、樹脂の燃焼が一気に進んだ後、発熱速度が急激に小さくなり消炎に至る（図 2-11）。難燃仕様の場合は、炭化層が多く、炭化層が形成されるにつれ、発熱速度が緩やかに減衰しながら燃焼し、燃え止まって消炎に至る（図 2-12）。一般品、難燃仕様ともに消炎後は、炭化層の熱分解が進み、炭化層がなくなるまで発熱速度が測定された。そのため、形成される炭化層の多い難燃仕様の方が、消炎後、発熱速度が計測される時間は長くなった。

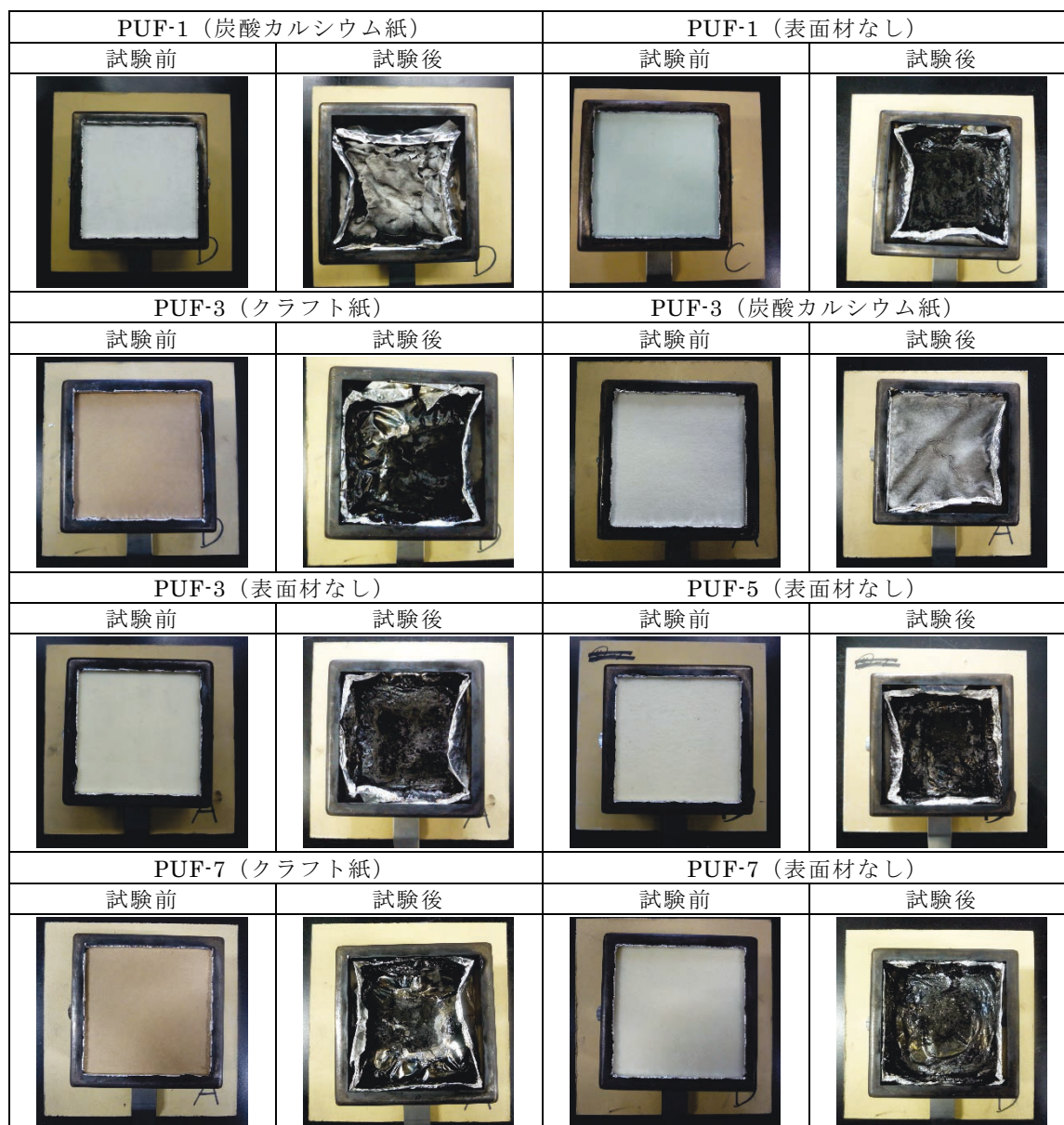


写真 2-9 試験体（PUF（一般品））

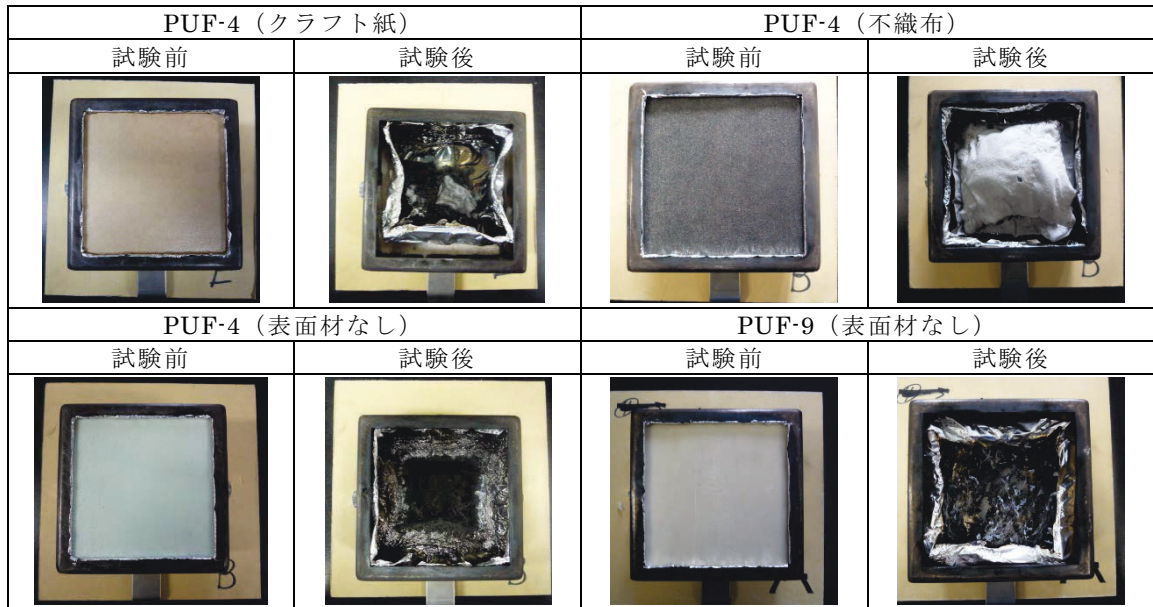


写真 2-10 試験体 (PUF (難燃仕様))

#### 2.4.4.2.2 着火特性 (着火時間と酸素指数)

表面材がある場合、本実験では、PF では加熱開始後約 3~4 秒で、PUF では加熱開始後約 5~7 秒で着火した (表 2-18、表 2-19)。着火時間の差は数秒程度であったが、着火時間は表面材の熱容量や引火温度によっては影響を受ける。

表面材がない場合、熱硬化性樹脂 (PF、PUF) はすべて加熱開始後 2 秒~4 秒とごく短時間で樹脂に着火した (表 2-18、表 2-19)。着火時間にほとんど差が見られず、熱硬化性樹脂の着火特性を考察できるような情報は得られなかった。

酸素指数を見ると、PF では 28.1~32.1 と差があり、本実験の範囲では、密度が大

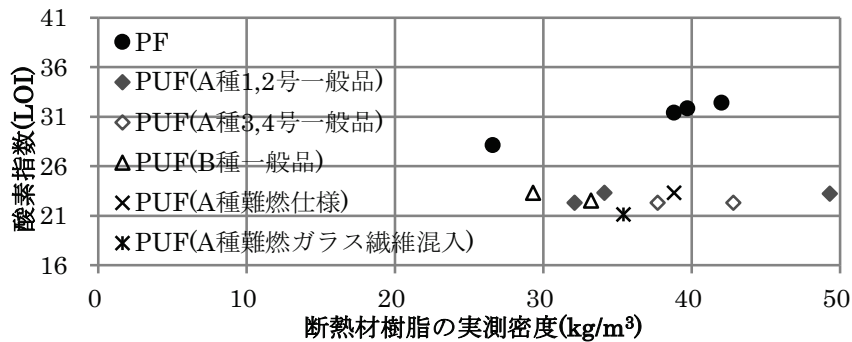


図 2-13 断熱材樹脂の実測密度と酸素指数 (熱硬化性樹脂)

きいほど、酸素指数が高くなる傾向が見られた（図 2-13）。

なお、PUF では、21.1～23.3 の範囲にあり、PF と比べると差が小さく、樹脂の種類や製品による酸素指数の差はほとんど見られなかった（図 2-13）。特に A 種一般品（PUF-2,3）と A 種難燃仕様（PUF-4）とで酸素指数に差がほとんどない。酸素指数では、PUF の一般品と難燃仕様の違いを捉えられないことがわかった。

以上より、熱硬化性樹脂（PF、PUF）における酸素指数の傾向は把握できたが、着火時間や酸素指数により、熱硬化性樹脂（PF、PUF）の着火特性を推定できる知見を得ることはできなかった。

その要因の一つとして、本実験における試験体の加熱強度は接炎時に近く、この条件では着火時間にほとんど差はみられなかったことが挙げられる。着火（断熱材への引火）の有無自体が問題となるような弱い加熱条件では、着火時間や着火の有無に差が生じる可能性がある。今後は、より弱い加熱条件において、樹脂の着火限界の把握という観点から着火特性を検討する必要がある。

#### 2.4.4.2.3 単位質量あたりの発熱量

表面材がある場合、単位質量あたりの発熱量には、表面材の発熱量も含まれる。PF の単位質量あたりの発熱量は 23～26kJ/g となり、2.3.3.2 の実験結果における PF の単位質量あたりの発熱量 25kJ/g であり同程度の発熱量となる結果が得られた。

一方、PUF の単位質量あたりの発熱量は、A 種 1,2 号一般品で 18～22kJ/g、B 種一般品で 16～19kJ/g、A 種難燃仕様で 24～25kJ/g となった。表面材だけでなく、樹脂の種類（A 種、B 種）や製品仕様（一般品、難燃仕様）によって、単位質量あたりの発熱量が異なる。2.3.3.2 の実験結果に示した PUF の単位質量あたりの発熱量は、平均で 19kJ/g であり、本実験における樹脂の種類や製品仕様による値のばらつきの範囲内にある。

次に、表面材がない試験体を対象に、表面材の発熱量への影響を取り除き、熱硬化性樹脂における断熱材の種類ごとの初期質量と発熱量との関係を図 2-14 に示す。

PF では、熱可塑性樹脂と同じく、質量と発熱量の間に非常に高い相関性が得られた（図 2-14）。PF の単位質量あたりの発熱量は 26kJ/g となり、単位質量あたりの発熱量に製品間の違いは見られない（表 2-17）。

一方、PUF では、表面材による発熱量への影響を除き、樹脂の種類や製品仕様ごと



に単位質量あたりの発熱量を求めると、A種1,2号一般品で19kJ/g、A種3,4号一般品で21kJ/g、B種一般品で17kJ/gとなり、A種難燃仕様で26kJ/g、A種難燃仕様ガラス繊維混入で22kJ/gとなった。PUFでは樹脂の種類や製品仕様により、PUFにおける樹脂の単位質量あたりの発熱量は、17~26kJ/gと幅がある。

以上より、熱可塑性樹脂（PUF、PF）では、表面材があるため、表面材の発熱量の影響を受ける。樹脂の発熱量については、PFでは質量から発熱量を推定できるが、PUFでは樹脂の種類や製品仕様により単位質量あたりの発熱量が異なり、ばらつきが生じた。

また本実験で得られた発泡プラスチック断熱材の単位質量あたりの発熱量は、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂を問わず、コーンカロリメータ試験以外の測定方法を用いた既往の文献値<sup>9),10),11),12)</sup>とは異なる値となった<sup>注6)</sup>。しかし、その差はコーンカロリメータ試験の測定原理や反応条件だけでは合理的に説明できない。今後それぞれの断熱材ごとに、特にPUFについては樹脂の種類ごとに、燃焼熱量を測定して単位質量あたりの発熱量の値を検証する必要がある。

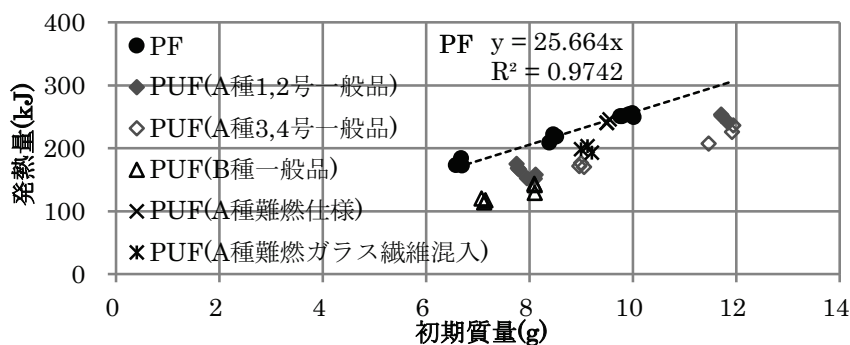


図 2-14 初期質量と発熱量（熱硬化性樹脂）

#### 2.4.4.2.4 一次ピーク時発熱速度

表面材がある場合、表面材により一次ピーク時発熱速度が受ける影響は、表面材自体の燃焼による発熱と、表面材の残渣による樹脂への入射熱の遮蔽の2つに、整理できる。以下、表面材がない場合について、考察を進める。

表面材がない場合、熱硬化性樹脂（PF、PUF）では、一次ピークを迎えた後、一旦、燃焼が減衰した後に、発熱速度が再びピークとなり、一次ピーク時の発熱速度を若干上回って最大となる場合が数例見られたが、概ね一次ピークで発熱速度は最大となる（表 2-18、表 2-19）。樹脂の燃焼速度も一次ピークとほぼ同時か、燃焼が成長する過程でいずれも最大となる。しかし熱硬化性樹脂では、熱可塑性樹脂とは異なり初期質量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度、最大燃焼速度が大きくなる傾向は見られなかった（図 2-15、図 2-16）。

PUF の一次ピーク時発熱速度は、初期質量に関係なく、樹脂の種類（A 種、B 種）や製品の仕様（一般品、難燃仕様）により値が大きく異なった。PF の一次ピーク時発熱速度は、PUF より小さく、最も高くても  $100\text{kW/m}^2$  程度となった（図 2-15）。

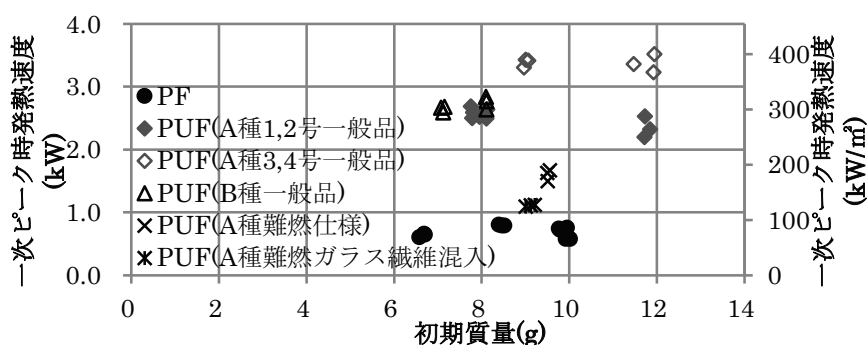


図 2-15 初期質量と一次ピーク時発熱速度（熱硬化性樹脂）

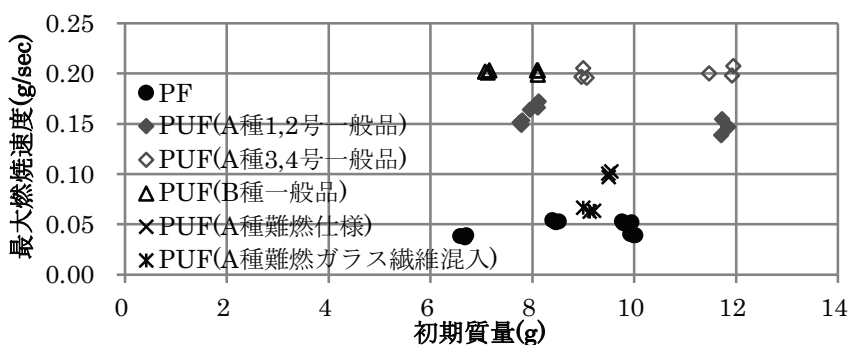


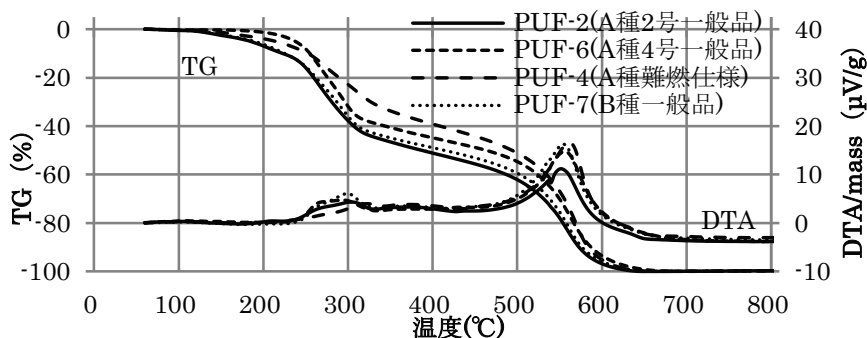
図 2-16 初期質量と最大燃焼速度（熱硬化性樹脂）

熱硬化性樹脂は、着火後、加熱面側から順次、樹脂が熱分解しながら燃焼が進むため、樹脂の熱分解量（樹脂の燃焼速度）が大きくなると、発熱速度も大きくなると考えられる。従って、熱硬化性樹脂は、樹脂の特性として、熱分解しやすい樹脂ほど、一次ピーク時発熱速度が大きくなる傾向があると推察される。

そこで、樹脂の熱分解の性状をより詳しく調べるため、熱硬化性樹脂（PF、PUF）の樹脂部のみを対象にして、TG-DTA 分析を実施した。

PUF の TG-DTA 分析の結果を図 2-17 に示す。PUF では、200℃過ぎから 350℃前後までと 500℃から 600℃前後までの 2 段階で、それぞれ大きな発熱反応とともに、樹脂の熱分解が進むと考えられる。このうち、前者の 200℃過ぎから 350℃前後までに発生する樹脂分解に伴う質量減少を「一次質量減少」<sup>注 6)</sup>と定義し、その減少量を「一次質量減少量」<sup>注 7)</sup>とする。

コーンカロリメータ試験では、樹脂が加熱を受けて着火し、温度が上昇する中で熱分解する過程を考えると、TG-DTA 分析における一次質量減少量が、熱分解のしや



PUF の樹脂の種類ごとに代表的な試験体の測定結果を示す。

図 2-17 TG-DTA 分析の結果 (PUF)

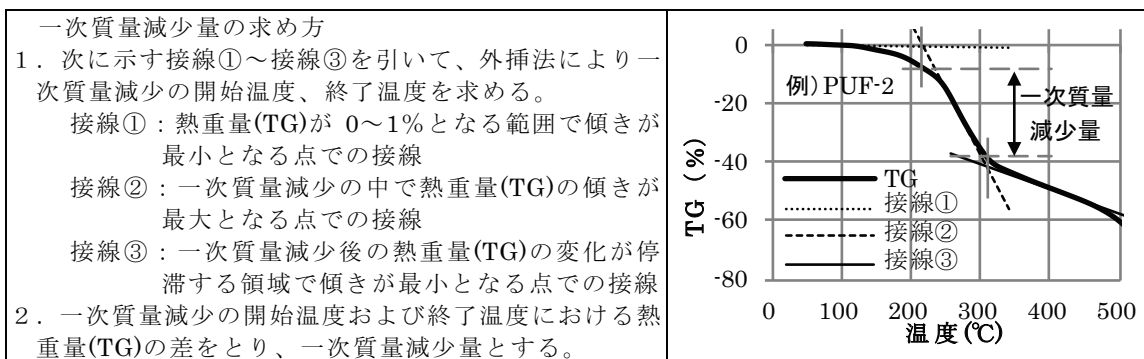


図 2-18 PUF における TG-DTA グラフの解析手法 (PUF-2)

すさに対応すると推測される。そのため、次に図 2-18 に示す手順で、すべての PUF の試験体を対象に、TG-DTA 分析より一次質量減少量を求め、コーンカロリメータ試験で得られた一次ピーク時発熱速度との関係性を検討した。

その結果、TG-DTA 分析における一次質量減少量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度が大きくなる傾向が確認された（図 2-19）。

よって、PUF における一次ピーク時発熱速度（着火後の燃焼拡大の進み方）は、TG-DTA 分析により 200°C 過ぎから 350°C 前後での一次質量減少量（加熱を受けた際の樹脂の熱分解の進み方）に対応すると考えられる。

特に、難燃仕様の方が一般品に比べ、一次ピーク時発熱速度、TG-DTA 分析における一次質量減少量ともに小さい点は、この点と合致している。PUF の一般品と難燃仕様の違いは、酸素指数では捉えることができなかったが、TG-DTA 分析における一次質量減少量に基づき、樹脂の熱分解の進み方の観点から説明できる。

なお、PUF の一般品については、図 2-19 の中である一定の範囲に集まっており、

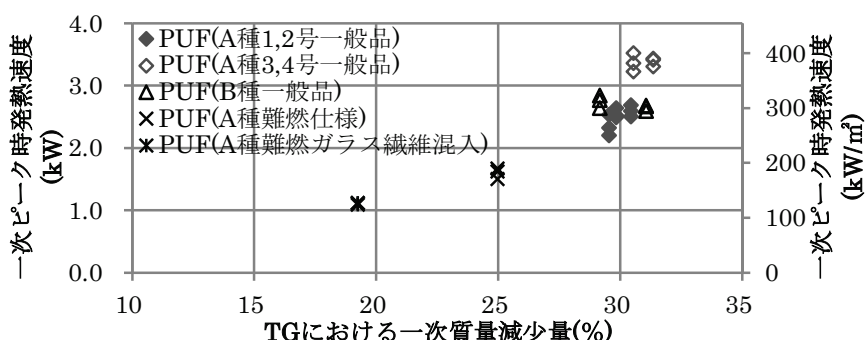
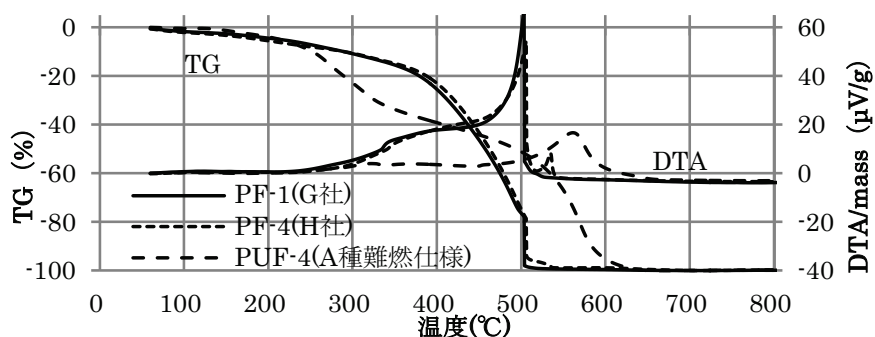


図 2-19 TG-DTA 分析における一次質量減少量と一次ピーク時発熱速度 (PUF)



PF はメーカーごとに代表的な試験体の測定結果を示す。なお PUF-4 は PF の比較対象として例示する。

図 2-20 TG-DTA 分析の結果 (PF)

群としては捉えている。TG-DTA 分析における一次質量減少量でみると 29.2%から 31.3%と 1 割弱程度のばらつきが、一次ピーク時発熱速度でみると 250kW/m<sup>2</sup>から 400kW/m<sup>2</sup>と約 4 割強のばらつきが生じている。これらのばらつきには、試験体とした PUF 製品のばらつきや測定や試験のばらつきの両方が含まれていると考えられる。

PF の TG-DTA 分析の結果を図 2-20 に示す。PF では、200℃を超えると発熱反応がはじまり、約 400℃より急激に質量減少が進み、500℃を超えると、樹脂はほぼすべて熱分解してしまう（図 2-20）。しかし PUF において一次質量減少が起きる 200℃過ぎから 350℃前後の温度帯では、PF ではあまり質量減少が進んでいない。この点が、コーンカロリメータ試験において、PF が着火し樹脂の温度が上昇する中で、PUF に比べあまり熱分解が進まず、一次ピーク時発熱速度が小さくなった点と合致する。

以上より、熱硬化性樹脂 (PF、PUF) では、TG-DTA 分析で樹脂分解の始まる 200℃から 350℃前後までの温度域で熱重量 (TG) の減少量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度が大きくなる傾向がわかった。

これにより、PF の方が PUF よりも、また PUF の中では難燃仕様の方が一般品よりも、加熱を受けた際、樹脂の熱分解が進みにくいため、着火後の火災拡大が進みにくくなる点は説明できる。加えて、PUF 一般品については、ばらつきが大きいですが、熱重量 (TG) の減少量と一次ピーク発熱速度との対応が、ともに一定の範囲内に収まっており、群として捉えることができた。

## 2.4.5 PUFの難燃化と一次ピーク時発熱速度、一次質量減少量との関係

PUFの難燃性を高めるにあたっては、添加する難燃剤の量を増やす方法と、イソシアネートの配合割合をポリオールより高め、 $-NCO$ 基による三量体を生成させて、樹脂自体を熱分解しづらくし、難燃化する方法がある<sup>10)</sup>。難燃剤の添加量は、酸素指数で制御されるのに対し、樹脂の熱分解を抑制する難燃化は、製造時、ポリオール( $-OH$ 基)とイソシアネート( $-NCO$ 基)の混合比率(イソシアネート指数)によって制御される<sup>8)</sup>。

2.3.4「原料組成に基づくPUFの燃焼性状」の検討では、コーンカロリメータ試験によりイソシアネート指数に基づき燃焼性状を比較したところ、イソシアネート指数が大きくなるにつれ、着火後、燃え上がって迎える一次ピーク時の発熱速度が小さくなる傾向がみられた。

一方、2.4.4.2.4「一次ピーク時発熱速度」の検討により、PUFにおいて、一次ピーク時発熱速度は、TG-DTA分析を用いて、 $200^{\circ}\text{C}$ 過ぎから $350^{\circ}\text{C}$ 前後での一次質量減少量を調べることで、その大小関係を把握できる見通しが得られた。

そこで、イソシアネート指数をパラメータに試験体を作成し、コーンカロリメータ試験とTG-DTA分析を実施して、イソシアネート指数、一次ピーク時発熱速度および一次質量減少量との関係性について検討する。

### 2.4.5.1 試験体と試験方法

#### 2.4.5.1.1 試験体

試験体は、共同研究者の協力を得て、イソシアネート指数がそれぞれ110、150、230、300となるようにポリオールとイソシアネートを配合して、厚さ25mmの板状のフォームを作成した。(イソシアネート指数にあわせて試験体をそれぞれIndex110, Index150, Index230, Index300と称す。)各試験体の原料組成を表2-20に示す。

表 2-20 試験体の原料組成

試験体名	酸素指数 (LOI)	イソシアネート指数	樹脂の原料組成と成分比率 (重量%)									
			ポリオール成分 (%)		イソシアネート成分 (%)		発泡剤 (%)		難燃剤 (%)		触媒・その他 (%)	
Index 110	21.6	110	ポリエーテルポリオール	38	ポリメリックMDI	42	HFO	9	りんハロゲン系	9	アミン触媒・整泡材等	2
Index 150	22.9	150	ポリエーテルポリオール	35		45		9		9	アミン触媒 +	2
Index 230	23.5	230	ポリエーテルポリオール	28		54		8		8	ヌレート化触媒 (金属塩等)	2
Index 300	23.9	300	ポリエステルポリオール	23		60		7		8	・整泡材等	2

### 2.4.5.1.2 試験方法

表 2-20 に示す試験体に対し、コーンカロリメータ試験、TG-DTA 分析の他に、PUF の基礎的な物性把握として酸素指数 (Oxygen Index, OI) を加えた 3 つの測定を、いずれも 2.4.3.1~2.4.3.3 に示す試験条件と同一とし実施した。但し、TG-DTA 分析では、測定精度をさらに高める目的で、事前に樹脂中の揮発成分を除去するため、試料を 140℃で 24h 養生させた上で分析を実施した。なお試験体は測定時の材齢が、製造後約 1 ヶ月~3 ヶ月となるように配慮し、すべての試験を 2014 年 11 月~2015 年 1 月に実施した。

### 2.4.5.2 試験結果と考察

コーンカロリメータ試験結果を表 2-21 および図 2-21 に、試験体の試験前および試験後の写真を写真 2-11 に示す。

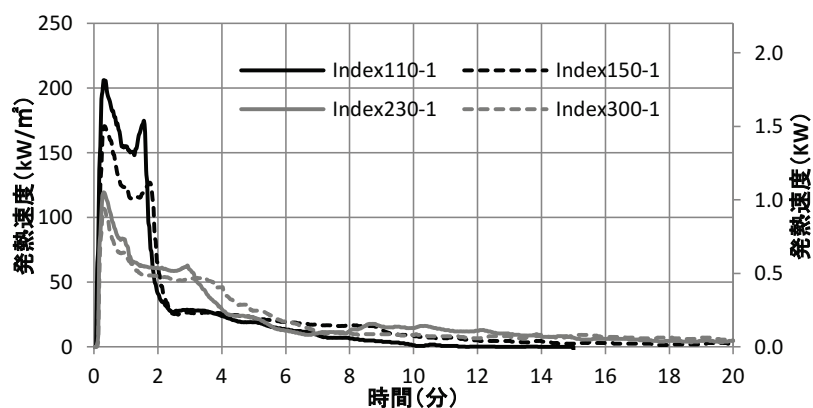
表 2-21 コーンカロリメータ試験の結果

試験体名	試験 No.	試験時間 (分)	初期質量 (g)	実測密度 (kg/m <sup>3</sup> )	発熱量				質量減少量		一次ピーク時発熱速度		着火・消炎時間				
					5 分時*1 (kJ)	21 分時*1 (MJ/m <sup>2</sup> )	214 (kJ)	24.3 (MJ/m <sup>2</sup> )	5 分時 (g)	終了時 (g)	一次ピーク値* (kW)	時間 (秒)	着火 (秒)	消炎 (秒)	再着炎 (秒)	再消炎 (秒)	
Index 110	1	15	11.7	48.6	190	21.6	214	24.3	11.5	11.7	1.81	206.1	18	3	193	—	—
	2	15	11.6	48.6	194	22.1	219	24.9	11.4	11.6	1.84	209.5	20	4	247	—	—
Index 150	1	20	11.1	47.1	169	19.2	233	26.5	9.7	11.1	1.50	170.8	20	4	475	—	—
	2	20	11.6	46.9	182	20.7	245	27.8	10.1	11.6	1.54	175.3	20	4	464	—	—
Index 230	1	25	11.2	46.4	145	16.5	229	26.0	8.3	11.2	1.05	119.4	18	5	320	390	374
	2	25	10.7	45.2	136	15.5	216	24.6	7.8	10.7	1.01	114.6	18	4	358	374	697
Index 300	1	30	12.1	49.5	142	16.1	230	26.1	8.0	11.6	0.94	106.8	18	5	386	—	—
	2	30	12.1	49.0	148	16.8	258	29.3	8.1	11.8	0.96	109.3	20	4	405	—	—

\*1 コーンカロリメータ試験では、発熱速度や発熱量は、得られた値を試験体フォルダーの開口面積(0.0088 m<sup>2</sup>)で除して、単位面積あたりの値で示されることが多い。そのため発熱速度、発熱量については、得られた値(kW, kJ)とそれを開口面積(0.0088 m<sup>2</sup>)で除した値(kW/m<sup>2</sup>, MJ/m<sup>2</sup>)の両方を併記する。

PUF はいずれも加熱開始後約 3~5 秒で加熱表面の樹脂に着火して、加熱面側から順次、熱分解しながら燃焼が進み、約 20 秒前後で発熱速度は一次ピークを迎えた（図 2-21）。イソシアネート指数が大きくなるにつれ、一次ピーク時発熱速度は低下し、燃焼とともに形成される炭化層が多くなる傾向は、2.3.4「原料組成に基づく PUF の燃焼性状」の検討でも確認されており、本実験でも同じく確認された。

次に TG-DTA 分析における熱重量（TG）の測定結果を図 2-22 に示す。2.4.4.2.4 で実施した TG-DTA 分析の結果と同じく、PUF の熱重量（TG）は、200℃過ぎから 350℃前後までと、500℃から 600℃前後までの 2 段階で樹脂分解が進む。



試験体とした断熱材ごとに、それぞれ 3 体ずつ試験を実施したが、そのうち 1 体目の発熱速度の推移を示す。

図 2-21 発熱速度の推移（試験開始 20 分まで）

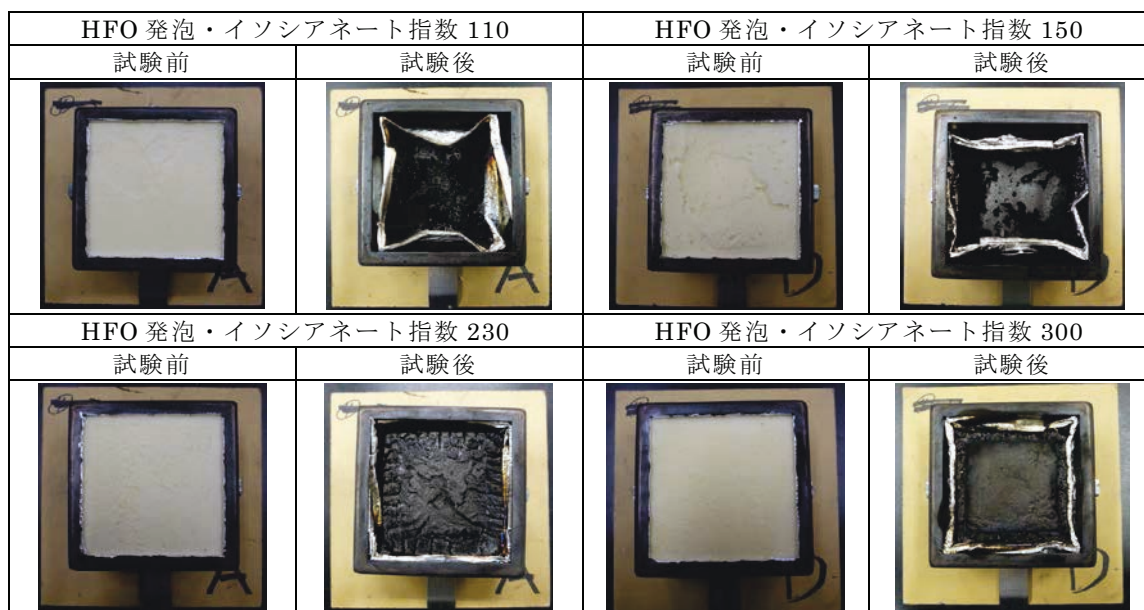


写真 2-11 試験体（PUF における原料組成による比較）



熱重量 (TG) の推移 (図 2-22) より、イソシアネート指数が大きくなるにつれ、200°C過ぎから 350°C前後で進む一次質量減少量が小さくなる傾向が確認された。

すべての試験体について、TG-DTA 分析における一次質量減少量を図 2-23 に示す手順で求めた。一次質量減少量とコーンカロリメータ試験で得られた一次ピーク時発熱速度との関係性を図 2-24 に示す。2.4.4.2.4 の検討結果と同じく、PUF において一次質量減少量が大きくなるほど、一次ピーク時発熱速度が大きくなり、両者に強い相関が認められた (図 2-24)。

従って、PUF では、イソシアネート指数が大きくなるにつれ、TG-DTA 分析における一次質量減少量は小さくなり、樹脂の熱分解が抑制されるとともに、コーンカロリメータ試験における一次ピーク時発熱速度も小さくなり、着火後の燃焼拡大の進み方が抑制されることが確認された。

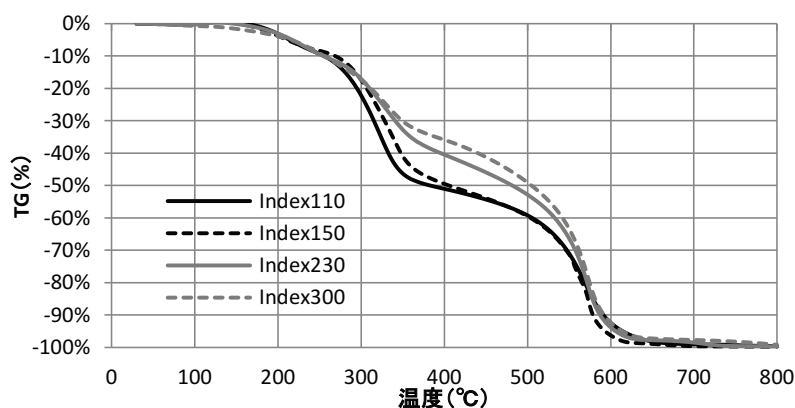


図 2-22 TG-DTA 分析による熱重量 (TG) グラフ (PUF)

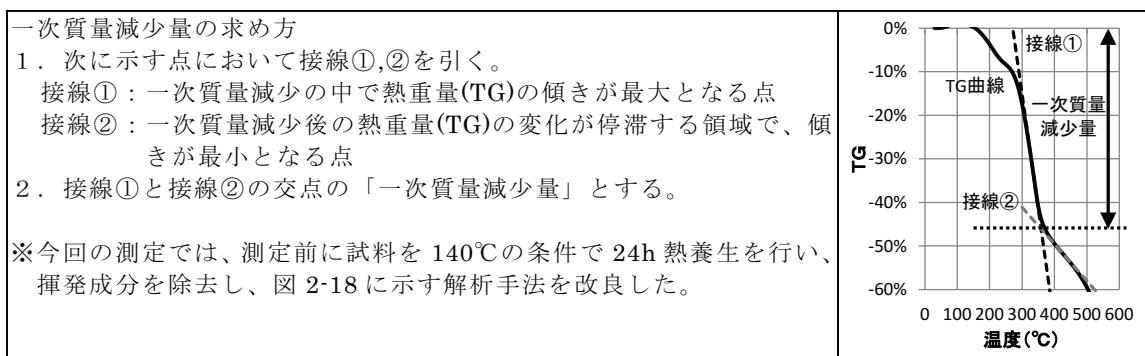


図 2-23 PUF における TG-DTA グラフの解析手法 (改良版)

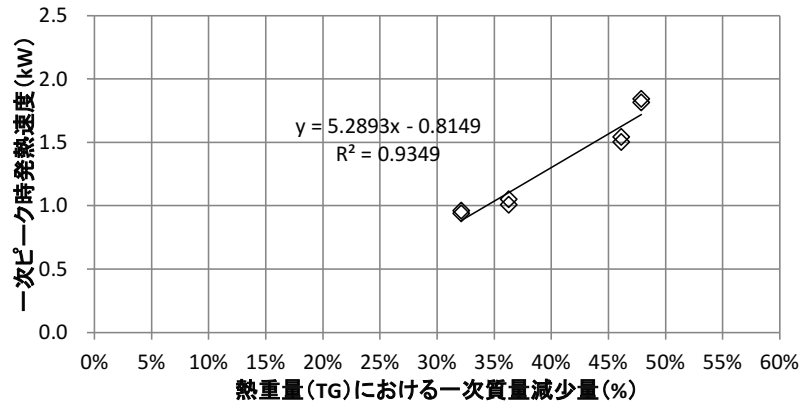


図 2-24 TG-DTA 分析における一次質量減少量と一次ピーク時発熱速度

## 2.4.6 まとめ

本節では、防火性能評価の観点から発泡プラスチック断熱材の優劣を判断できるようにするため、コーンカロリメータ試験による燃焼性の把握、TG-DTA 分析、酸素指数の測定を行った。これらの結果より、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂の2つに分けて、①燃焼性状の特徴を述べた上で、②着火特性（着火時間と酸素指数）、③単位質量あたりの発熱量、④着火後の燃焼拡大特性（一次ピーク時発熱速度）の事象ごとに、発泡プラスチック断熱材の材料物性の中から、その特徴を最もよく示す相関性の高い材料物性を検討した。本節で得られたコーンカロリメータ試験による 50kW/m<sup>2</sup>の加熱のもとでの燃焼性と材料物性の関係の検討結果についてまとめる。

### 2.4.6.1 熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）

#### ①燃焼性状の特徴

熱可塑性樹脂の燃焼は、加熱から着火、燃焼へ至る過程では、(a)樹脂の熔融時に着火し燃焼する場合、(b)樹脂の熔融時に着火、液化時に一旦消炎、熱分解時に再着火し燃焼する場合、(c)樹脂の熔融、液化を経て熱分解時に着火し燃焼する場合の3つのパターンがあり、安定した着火後は、燃え尽きるまで一気に燃焼し、発熱速度が大きくなる傾向がある。

#### ②着火特性（着火時間と酸素指数）

熱可塑性樹脂の酸素指数は、断熱材の種類ごとに分かれ、EPS で 33.6～36.0、XPS で 26.0～26.9、PE で 18.3 となった。加熱から着火、燃焼へ至る過程では3つのパターンがあり、着火性状は安定しない。(b)、(c)のように、液化後の熱分解時に着火し燃焼に至る場合、着火時間は酸素指数に対応し、酸素指数が高くなるほど、着火までに時間を要する傾向が確かめられ、着火特性は酸素指数より判断できる。

#### ③単位質量あたりの発熱量

熱可塑性樹脂における単位質量あたりの発熱量は、XPS 28kJ/g、EPS 30kJ/g、PE 35kJ/g となり、製品間の差は見られず、ほぼ一定の値と見なせる。熱可塑性樹脂の発熱量は質量から推定できる。

#### ④着火後の燃焼拡大特性（一次ピーク時発熱速度）

熱可塑性樹脂の発熱速度は一次ピーク時で最大となり、燃焼速度は着火から一次ピークを迎えるまでの間で最大となる。その時の発熱速度、燃焼速度の最大値は、いずれも初期質量に応じて大きくなる傾向があり、安定的な着火をした後は、存在する可燃物量が一気に燃え上がっていることがわかる。

熱可塑性樹脂の一次ピーク時発熱速度は、断熱材密度が大きくなるほど、大きくなる傾向があり、大小関係を把握できる。断熱材密度が大きくなるほど、着火後の燃焼拡大が急激に進みやすくなると推定できる。

### 2.4.6.2 熱硬化性樹脂（PUF、PF）

#### ①燃焼性状の特徴

熱硬化性樹脂は加熱を受けると、表面材または樹脂にすぐに着火して燃え上がり、燃焼が一次ピークを迎えると、その後は受熱面から順に燃焼が続く。一次ピーク後のPFは、炭化や変形とともに進んだ後、緩やかに減衰しながら燃え尽きるまで続く。一方、ピーク後のPUFは、燃焼とともに炭化層が形成される。一般品の場合は、炭化層が少なく、樹脂の燃焼が一気に進んで消炎に至る。難燃仕様の場合は、炭化層が多く、炭化層とともに燃焼は緩やかに減衰し、燃え止まって消炎に至る。

#### ②着火特性（着火時間と酸素指数）

熱硬化性樹脂は、表面材がない場合、いずれも加熱開始後2秒～4秒とごく短時間で着火する。PFの酸素指数は28.1～32.1と差があり、本実験の範囲では、密度が大きいほど、酸素指数が高くなる傾向があった。PUFの酸素指数は21.1～23.3の範囲にあり、樹脂の種類や製品、一般品と難燃仕様による酸素指数の差はほとんど見られなかった。

#### ③単位質量あたりの発熱量

表面材がない場合、PFにおける単位質量あたりの発熱量はPF 26kJ/gとなり、製品間の差は見られず、PFの発熱量は質量から推定できる。PUFでは、A種1,2号一般品で19kJ/g、A種3,4号一般品で21kJ/g、B種一般品で17kJ/gとなり、A種難燃仕様で26kJ/g、A種難燃仕様ガラス繊維混入で22kJ/gとなり、樹脂の種類や製品仕

様により 17～26kJ/g と幅が生じた。

#### ④着火後の燃焼拡大特性（一次ピーク時発熱速度）

表面材がない場合、熱硬化性樹脂は、着火後、加熱面側から順次、樹脂が熱分解しながら燃焼が進むため、樹脂の特性として、熱分解しやすい樹脂ほど、一次ピーク時発熱速度が大きくなる傾向がある。

そこで TG-DTA 分析により、樹脂の熱分解挙動を調べると、TG-DTA 分析で樹脂分解の始まる 200℃から 350℃前後までの温度域で熱重量(TG)の減少量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度が大きくなる傾向がわかった。これにより、PFの方が PUFよりも、また PUF の中では難燃仕様の方が一般品よりも、加熱を受けた際、樹脂の熱分解が進みにくいため、着火後の火災拡大が進みにくくなることが明らかになった。また PUF 一般品については、ばらつきが大きいですが、熱重量 (TG) の減少量、一次ピーク時発熱速度との関係性が一定の範囲内に収まり、群として捉えることができた。

PUF については、さらにイソシアネート指数をパラメータにした試験体を作成して追加検討を行い、一次ピーク時発熱速度と、材料設計の際に用いられるイソシアネート指数、TG-DTA 分析で得られる一次質量減少量、これら 3 者の間に相関性を確認した。そしてイソシアネート指数が大きくなるにつれ、一次質量減少量は小さくなり、さらに一次ピーク時発熱速度も小さくなることを明らかにした。

## 2.5 本章のまとめ

本章では、次章以降、木造外壁における各種断熱材が防火性能に及ぼす影響を検討するために、必要となる断熱材に関する基本的な情報整理を目的に、各種断熱材の高温性状を示す物性値や熱分解挙動について、既往文献調査および TG-DTA 分析を行って把握した。

また発泡プラスチック断熱材については、可燃性を有するため、断熱材の種類ごとに、断熱材を燃焼させて、その性状を把握した。これらは次章以降、木造断熱外壁の小型加熱実験により得られる壁体内の温度分布や温度推移から、火災加熱時に、壁体内の断熱材に生じる現象や作用を考察するための視点、根拠となる。

さらに発泡プラスチック断熱材は、同じ種類の断熱材であっても、製品の違いが、建築材料の不燃性や、建築部材の防火性能へ影響を及ぼす可能性がある。そこで、発泡プラスチック断熱材の優劣を判断できるようにするため、簡易な試験により測定できる材料物性の中から、燃焼性と相関性の高い材料物性を、燃焼性や防火性能を評価する観点から検討した。得られた知見を次に記す。

### 2.5.1 断熱材の高温性状

#### ①高温性状に関する文献値

- ・ JIS（日本工業規格）には、ロックウール断熱材やグラスウール断熱材の耐熱性を示す指標として熱間収縮温度が、発泡プラスチック断熱材について、寸法変化がなく経験的に使用できる温度を示す指標として使用温度がそれぞれ規定されている。
- ・ ロックウール断熱材やグラスウール断熱材のガラス転移点や軟化点の文献値は見つからなかったが、グラスウール断熱材の原料であるガラス繊維に成分が近いソーダ石灰ガラスの軟化点が 720℃～730℃との文献値を得た。
- ・ 各種発泡プラスチック断熱材の主成分となる樹脂について、熱変形温度やガラス転移点、軟化点、熱分解温度、引火温度、発火温度、燃焼熱量などの文献値を得た。

#### ②高温性状に関する測定（TG-DTA 分析）

- ・ 第 4 章の実験で試験体に用いるグラスウール断熱材のガラス転移点は 478.0℃、軟化点は 659.4℃との結果が得られた。
- ・ 第 5 章の実験で試験体に用いる XPS のガラス転移点が 108.8℃であった。

- ・PFの方がPUFに比べ樹脂の熱分解が進みにくいことを確認した。

## 2.5.2 発泡プラスチック断熱材の燃焼性状

発泡プラスチック断熱材の燃焼性状は、熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂で異なる。

以下、断熱材の種類ごとに燃焼性状の特徴を示す。

- ・熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）は加熱を受けると、樹脂は加熱表面から熔融し、液化、熱分解、ガス化の過程をたどる。この過程の中で、着火には「①熔融時に着火する」、「②「熔融時に着火し、液化時に消炎した後、ガス化時に再着火する」、「③熔融、液化後、ガス化時に着火する。」の3つのパターンがあり、安定的に着火した後は燃え尽きるまで一気に燃焼する。そのため、燃焼時の発熱速度は大きくなる。
- ・熱硬化性樹脂（PF、PUF）は、表面材が可燃性の場合、加熱を受けると、すぐに表面材に着火して燃え上がり、燃焼はピークを迎える。その後、燃焼は樹脂の受熱面側から順に炎を上げながら進む。
- ・PFは受熱面側から炭化、変形しながら、ほぼ一定の発熱速度で燃焼した後、緩やかに減衰して、消炎後も燃え尽きるまで赤熱燃焼が続く。
- ・PUFは、受熱面側から炎をあげて燃焼が進むとともに、加熱側表面に炭化層を形成する。製品により燃焼時の炭化物の形成状況は異なり、燃焼性状が変化する。
- ・本実験で対象とした発泡プラスチック断熱材の中で、製品間の燃焼性状の違いは、PUFが最も大きい。
- ・PUFの燃焼性状は、原料組成のうち、発泡剤およびポリオールに対するイソシアネートの配合割合を示すイソシアネート指数と発泡剤により異なることを確認した。イソシアネート指数が大きく難燃性が高い製品ほど、形成される炭化層が多く、燃焼が緩慢になる傾向がある。

## 2.5.3 発泡プラスチック断熱材の燃焼性と材料物性との関係

発泡プラスチック断熱材を対象に、建築部材の防火性能を評価する観点から、断熱材の優劣を判断できるようにするため、断熱材の燃焼性状のうち、①着火特性（着火時間と酸素指数）、②燃焼による周囲への熱的影響の大きさ（単位質量あたりの発熱量）、③着火後の燃焼拡大特性（一時ピーク時の発熱速度）の3つに着目し、発泡プラスチック断熱材の材料物性の中から、その特徴を最もよく示す相関性の高い材料物性を検

討した。

以下、コーンカロリメータ試験による  $50\text{kW/m}^2$  の加熱のもとでの燃焼性と材料物性の関係について、得られた知見と今後の課題を記す。

### ①着火特性

- ・熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）の着火性状は安定しないが、酸素指数は、断熱材の種類ごとに分かれ、EPS で  $33.6\sim 36.0$ 、XPS で  $26.0\sim 26.9$ 、PE で  $18.3$  となる。XPS の一部（加熱を受けて樹脂が溶融する際に着火する場合）を除き、着火時間は酸素指数に対応して、酸素指数が高くなるほど、着火までに時間を要する傾向が確かめられ、着火特性は酸素指数より判断できる。
- ・熱硬化性樹脂（PF、PUF）は、すべて加熱開始後ごく短時間で着火してしまう。

### ②単位質量あたりの発熱量

- ・熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）では、単位質量あたりの発熱量は、XPS  $28\text{kJ/g}$ 、EPS  $30\text{kJ/g}$ 、PE  $35\text{kJ/g}$  となり、製品間の差は見られず、ほぼ一定の値と見なすことができる。熱可塑性樹脂の発熱量は質量から推定できる。
- ・表面材がない場合、PF における単位質量あたりの発熱量は PF  $26\text{kJ/g}$  となり、製品間の差は見られず、PF の発熱量は質量から推定できる。
- ・表面材がない場合、PUF における単位質量あたりの発熱量は、A 種 1,2 号一般品で  $19\text{kJ/g}$ 、A 種 3,4 号一般品で  $21\text{kJ/g}$ 、B 種一般品で  $17\text{kJ/g}$  となり、A 種難燃仕様で  $26\text{kJ/g}$ 、A 種難燃仕様ガラス繊維混入で  $22\text{kJ/g}$  となり、樹脂の種類や製品仕様により  $17\sim 26\text{kJ/g}$  と幅が生じた。

### ③着火後の燃焼拡大特性（一次ピーク時発熱速度）

- ・熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）では、断熱材密度を比較することで、一次ピーク時発熱速度の大小関係を捉えることができ、断熱材密度が大きいほど、着火後の燃焼拡大が急激に進みやすいと推定できる。
- ・熱硬化性樹脂（PF、PUF）における一次ピーク時発熱速度は、TG-DTA 分析で、 $200^\circ\text{C}$  過ぎから  $350^\circ\text{C}$  前後での熱重量（TG）の減少量に対応すると考えられる。この熱重量（TG）の減少量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度が大きくなる傾向が



ある。

- ・ PFの方が PUFよりも、また PUFの中では難燃仕様の方が一般品よりも、加熱を受けた際、樹脂の熱分解が進みにくく、着火後の火災拡大が進みにくい点が、樹脂の熱分解挙動から明らかになった。
- ・ PUF一般品については、ばらつきが大きいですが、TG-DTA分析における200℃過ぎから350℃前後での熱重量(TG)の減少量、一次ピーク発熱速度との関係において一定の範囲内に収まり、群として捉えることができた。
- ・ PUFでは、一次ピーク時発熱速度と、材料設計の際に用いられるイソシアネート指数、TG-DTA分析で得られる一次質量減少量、これら3者の間に相関性があり、イソシアネート指数が大きくなるにつれ、一次質量減少量は小さくなり、さらに一次ピーク時発熱速度も小さくなる関係性が明らかになった。

以上より、発泡プラスチック断熱材を対象に、建築部材の防火性能を評価する観点からの断熱材の優劣について、今回の検討では、断熱材の材料物性により判断できる部分とできない部分があった。

断熱材の材料物性から防火性能の優劣を判断できる部分については、これらの知見を用いることにより、発泡プラスチック断熱材を用いた建築部材に関する技術開発や防火性能評価を円滑に進められるようになる。加えて、製品が日々更新される発泡プラスチック断熱材に対し、認定取得時の防火性能との同等性を確認できるようになり、大臣認定取得後の品質管理に有用であると考えられる。

一方、今回の検討で判断できなかった部分を、今後、解明するためには、発泡プラスチック断熱材について、今回のような簡便な方法による分析ではなく、材料組成に関する詳細な情報の収集、樹脂の化学的組成の分析、事細かな高温性状の把握等、発泡プラスチック断熱材の詳細な情報収集、精緻な分析を行っていく必要がある。

#### 【参考文献】

- 1) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9501 保温保冷工事施工標準, 2014
- 2) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9504 人造鉱物繊維保温材, 2017
- 3) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 0202 断熱用語, 2008
- 4) (一社)日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック第3版, 2017.2
- 5) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9521 建築用断熱材, 2017
- 6) 日本熱測定学会編：熱量測定・熱分析ハンドブック第2版, 丸善, 2010.1
- 7) 山本明：示差熱分析による実用ガラスの諸特性点の検出, 分析化学, 第14号, (公社)日本分析学会, 1965
- 8) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9511 発泡プラスチック保温材, 2017
- 9) 旭化成アミダス株式会社「プラスチック」編集部編：プラスチック・データブック, 工業調査会, 1999.12
- 10) 英一太：プラスチックの難燃化—低発煙化と有害性燃焼ガス対策—, 日刊工業新聞社, 1978.6
- 11) 西沢仁, 武田邦彦編：難燃材料活用便覧—難燃化の課題と実際技術—, テクノネット社, 2002.5
- 12) 日本火災学会編：火災便覧第3版, 共立出版, 1997.5
- 13) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9511 発泡プラスチック保温材, 2006<sup>注8)</sup>
- 14) International Organization for Standardization : ISO 5660-1 Reaction-to-fire tests -- Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method), 2015
- 15) 北海道立北方建築総合研究所：防耐火性能試験・評価業務方法書, 2003.10<sup>注9)</sup>
- 16) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9511 発泡プラスチック保温材, 2003<sup>注8)</sup>
- 17) 断熱建材協議会：断熱建材ガイドブック, 建築技術, 2017
- 18) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 7201-2 プラスチック—酸素指数による燃焼性の試験方法—第2部：室温における試験, 2007
- 19) 北海道立北方建築総合研究所：防耐火性能試験・評価業務方法書, 2007.11<sup>注9)</sup>
- 20) 吉岡英樹, 吉田正志, 萩原一郎, 五頭辰紀, 成瀬友宏, 野口貴文, 崔国臣：湿式外断熱工法の材料の燃焼特性に関する基礎的研究, その1 コーンカロリメータ試験による発熱量の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 分冊, pp.165~166, 2008.8
- 21) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS Z 7250 化学物質等安全データシート(MSDS)—第1部：内容及び項目の順序, 2005<sup>注3), 注10)</sup>
- 22) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS Z 7253 GHSに基づく化学品の危険有害性情報の伝達方法—ラベル, 作業場内の表示及び安全データシート(SDS), 2012
- 23) International Organization for Standardization : ISO 3582 Flexible cellular polymeric materials -- Laboratory assessment of horizontal burning characteristics of small specimens subjected to a small flame, 2000
- 24) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS K 6400-6 軟質発泡材料—物理特性の求め方—第6部：燃焼性, 2004

## 注

- 注 1) JIS A 9521「建築用断熱材」に該当するロックウール、グラスウールには、熱間収縮温度は規定されていない<sup>5)</sup>。
- 注 2) 単位質量あたり発熱量は、「発熱量を質量減少量で割った値」ではなく、「発熱量を初期質量で割った値」と定義した。本研究のコーンカロリメータ試験では、消炎後、残渣がほとんど残らなくなるまで加熱しており、「質量減少量」≒「初期質量」と見なせること、また試験で得られる質量減少量には、試験体を包むアルミ箔やセラミックウールの質量減少量も含むことから、電子天秤で測定できる初期質量の値をとって上記の定義とした。
- 注 3) 化学物質安全性データシート (SDS) は、2012 年以前までは MSDS と表記されていたが、2012 年に表記法を定める JIS Z 7250<sup>21)</sup>が廃止され、新たに JIS Z 7253<sup>22)</sup>が新設されて、呼称が MSDS から SDS に変更となった。
- 注 4) 酸素指数の測定は、北海道立北方建築総合研究所 (現 (地独) 北海道立総合研究機構 建築研究本部 北方建築総合研究所) および発泡プラスチック断熱材連絡会との共同研究「発泡プラスチック断熱材の燃焼性状と評価技術に関する研究」の中で、共同研究者である発泡プラスチック断熱材連絡会のメンバー (共著者を含む) が、断熱材の種類ごとに分担して実施した。
- 注 5) JIS K 7201-2<sup>18)</sup> (プラスチック-酸素指数による燃焼性の試験方法-第 2 部: 室温における試験) の適用範囲には、「この試験方法は、垂直な棒状の材料又は 10.5 mm 厚さまでのシート状の材料に適用できる。この試験方法は、100kg/m<sup>3</sup> 以上の見かけ密度の固体材料、積層材料又は発泡材料に適用する。また、この試験方法は、100kg/m<sup>3</sup> 未満の見かけ密度の発泡材料についても適用できる場合がある。」とある。さらに「備考 2」に「見掛け密度 100 kg/m<sup>3</sup> 未満の発泡材料の火炎伝ば特性を評価するためには、ISO 3582:2000, Flexible cellular polymeric materials -- Laboratory assessment of horizontal burning characteristics of small specimens subjected to a small flame の方法を考慮する。」とある。本実験で試験体とした 5 種類の発泡プラスチック断熱材はすべて JIS A 9511<sup>2006 13)</sup>に適合しており、いずれも「垂直な棒状の材料」であり「100kg/m<sup>3</sup> 未満の見かけ密度の発泡材料」に該当する。また ISO3582:2000<sup>23)</sup> (翻訳した規格: JIS K 6400-6<sup>24)</sup>) は軟質発泡材料を対象とした燃焼性試験の方法を示すものであり、JIS A 9511<sup>2006 13)</sup>の発泡プラスチック断熱材は、直接対象となっていないことから、この試験方法を用いた燃焼性の確認は行っていない。従って、ここで試験体とした JIS A 9511<sup>2006 15)</sup>の発泡プラスチック断熱材が、JIS K 7201-2<sup>18)</sup>の適用範囲に該当するか否かについて、この JIS K 7201-2<sup>15)</sup>の文章上では、厳密に判断できなかった。
- 一方で、フェノールフォーム (PF) は JIS A 9511<sup>2006 13)</sup>中の燃焼性において、JIS K 7201-2<sup>17)</sup>の方法に従い、酸素指数 28 以上と規定されている。また押出法ポリスチレンフォーム (XPS)、ビーズ法ポリスチレンフォーム (EPS) は、JIS A 9511<sup>2006 13)</sup>適合品であれば、消防法第 9 条の 4 の「指定可燃物」に該当しないように、JIS K 7201-2<sup>18)</sup>の方法に従い、酸素指数 26 以上となるよう調整されている。以上のように、JIS A 9511<sup>2006 13)</sup>の発泡プラスチック断熱材の品質管理に、JIS K7201-2<sup>18)</sup>に従った酸素指数が、実用上、利用されていることから、本実験では、JIS K 7201-2<sup>18)</sup>に従い、酸素指数の測定を実施した。
- 注 6) 本実験で計測した単位質量あたり発熱量は、文献にある燃焼熱量とは異なる値となった。文献にある燃焼熱量は、いずれも 1960 年代または 1970 年代の値であり、今回対象としている発泡プラスチック断熱材とは樹脂の化学的な組成が異なる可能性があることや、当時の測定法が現在と異なることが、その要因の一つと推察される。しかし文献には、物質名と燃焼熱量が表記されるだけで、当時の樹脂組成や測定法に関する情報は一切なく、これ以上の検討はできなかった。
- 注 7) コーンカロリメータ試験における一次ピーク時発熱速度と、TG-DTA 分析における一次質量減少量との間に、語句の定義上、何の関係性もない。計測した発熱速度または質量減少の推移をみて、計測開始から初めての発熱速度ピークまたは質量減少のピークをともに「一次」と称している。
- 注 8) 実験時に参照した JIS A 9511 を示す。現行の JIS A 9511 は 2017 年に改訂されており、参考文献 8) に該当する。
- 注 9) 実験時に参照した防耐火性能試験・評価業務方法書を示す。現行の防耐火性能試験・評価業務方法書は、2017 年 3 月に改訂されている。
- 注 10) 実験時に参照した JIS Z 7250 を示す。注 3)に示す通り、JIS Z 7250 は 2012 年に廃止され、新たに JIS Z 7253<sup>22)</sup>が新設された。

### 第3章 溶融・燃焼しない断熱材における断熱工法の防火性能予測に関する研究 —ロックウール断熱材の場合

#### 3.1 本章の目的

第1章、第2章の検討によると、断熱材が外壁の防火性能に及ぼす影響は、被覆材や柱等、外壁を構成する各種要素と断熱材の位置関係によるものと、断熱材の高温性状によるものとに分けて考えることができる。このうち、外壁の構成要素と断熱材の位置関係による影響は、断熱材の種類を問わず、壁体内に断熱材が存在することにより生じるため、すべての断熱材に共通した検討課題と言える。

そこで、本章では、準耐火構造外壁として仕様を設計した小型試験体について、加熱時間を要求性能に対応するよう設定した加熱実験を行い、断熱工法に基づく断熱材と外壁の他の構成要素の位置関係が防火性能に及ぼす影響を把握する。そして一次元の定常熱伝導計算を加えて、木造外壁内の断熱材の位置や厚さ等、木造外壁の層構成や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く。

第2章で述べた通り、断熱材の溶融・熱分解等、断熱材の高温性状は、断熱材の種類ごとに異なる。本章の実験では、断熱材の高温性状が及ぼす防火性能への影響をできる限り排除するため、火災加熱中に断熱材が溶融・燃焼することのないロックウール断熱材を使用する。また準耐火構造外壁では、火災加熱を屋外側からと屋内側からの双方を想定するため、本実験でも、可能な限り、その両方について加熱実験を行うこととする。

なお、第4章、第5章では、火災加熱時に溶融・熱分解が生じると想定される断熱材を使用する外壁を対象に、断熱材が外壁の防火性能に及ぼす影響を検討することになる。そのため本章の実験は、ロックウール断熱材を使用する外壁断熱工法の防火性能の設計・評価に有効な情報を得るだけでなく、さらに、第4章、第5章で実施する火災加熱時に溶融・熱分解が予想される断熱材を使用する外壁の実験との比較から、断熱材自体の高温挙動が防火性能にどのような影響を与えるのかを把握し易くするための基礎的な知見を得ることも、重要な目標とする。

### 3.2 実験概要および実験結果

#### 3.2.1 試験体概要

試験体概要を図 3-1 に、断熱工法ごとの試験体仕様を図 3-2 に示す。

試験体は、木造壁体の典型的な構成として、外装材を不燃面材、内装材をせっこうボードとする乾式工法の木製軸組造外壁とし、代表的な断熱工法を網羅するように設

試験体図（試験体を屋内側から見る）	温度測定位置 各上下 2 点、左右 2 点を測定
	<p>層 A 外装材 内装側表面  層 B 外張（付加）断熱材 外装側表面  層 C 外張（付加）断熱材 または防風層 内装側表面  層 D （強化）せっこうボード 外装側表面  柱 A 柱外装側角部 柱 B 柱外装側中部  柱 C 柱内装側中部 柱 D 柱内装側角部  裏面（屋外加熱時）せっこうボード内装側表面（45分）  強化せっこうボード 内装側表面（60分）  裏面（屋内加熱時）けい酸カルシウム板 外装側表面  ※層 A～層 D の温度測定は、実験開始から終了まで、測定位置が変わらないように、熱電対を針金で固定して行った。</p>
試験体の共通仕様	
外装材 ※乾式工法 通気層 防風層 外張・付加断熱材 充てん断熱材 防湿層 内装材 柱 柱材・胴縁等	けい酸カルシウム板（厚さ 12 mm） ※含水率をはじめ品質が管理された製品として、「屋根葺き材の飛び火性能試験」において「基準板」として用いられるものを使用した。 厚さ 18 mm ※通気胴縁（厚さ 18 mm）を用いて、通気層の厚さを確保した。 透湿防水シート（厚さ 0.17 mm） ロックウール断熱材 JIS A 9504 <sup>2011</sup> の規格上では「ロックウール保温材 フェルト」に該当するため、「熱間収縮温度が 400℃以上」とあるが、密度（公称値）40 kg/m <sup>3</sup> の製品、熱伝導率（公称値）0.038W/m・K では、熱間収縮温度が 600℃以上であることをメーカーに確認して用いた。なお、本実験では撥水加工されていない断熱材を用いた。 ロックウール断熱材（袋入り品、厚さ 100 mm） JIS A 9521 <sup>2011</sup> に示す「ロックウール断熱材 MA（RWMA）」に該当する。密度（公称値）32 kg/m <sup>3</sup> ～35 kg/m <sup>3</sup> 、熱伝導率（公称値）0.038W/m・K の製品を用いた。 ポリエチレンシート（厚さ 0.2 mm） せっこうボード（目地処理なし・突付合わせ） 45分加熱：せっこうボード 15 mm 60分加熱：強化せっこうボード 15 mm スギ集成材（対称異等級構成集成材 E75-F240） ホワイトウッド（輸入材） ※木材の重量含水率は 10%～15%wt の範囲とした。 ※木材以外の各種建材は含水率調整を行わず、市販品を屋内で約 1 ヶ月以上、常温で気乾させた上で用いた。

図 3-1 試験体概要

計した。試験体の大きさは、1.3の実験と同じく、幅 800 mm×高さ 800 mm（加熱面：幅 600 mm×高さ 600 mm）とした（図 3-1）。

木造壁体は 45 分準耐火構造と 60 分準耐火構造の両方を想定した。試験体は内装材以外の構成材料は変えずに、内装材の仕様を 45 分準耐火構造の場合は、厚さ 15 mm のせっこうボード<sup>注 1)</sup>、60 分準耐火構造の場合は、厚さ 15 mm の強化せっこうボード<sup>注 2)</sup>とした。

検討対象とする断熱工法は、充てん断熱工法、外張断熱工法、付加断熱工法の 3 種類<sup>3)</sup>とし、比較のため無断熱壁体を加えた。外張断熱工法の外張断熱材および付加断熱工法の付加断熱材（付加断熱工法における外張断熱材を付加断熱材と称す。）の厚さは、25 mm と 100 mm の 2 通りとした（図 3-2）。試験体に用いるロックウール断熱材は、住宅用断熱材として一般的に流通するものとし、充てん断熱材にはロックウール断熱

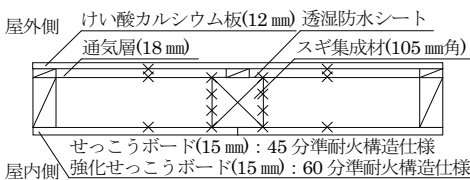
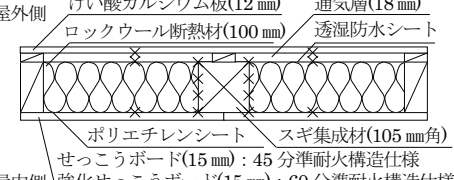
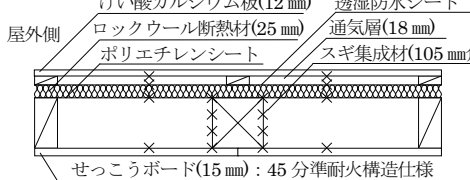
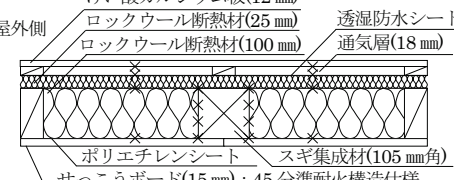
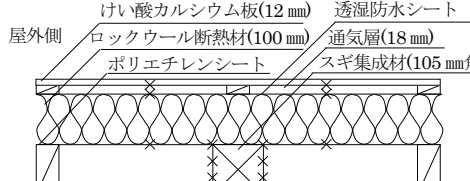
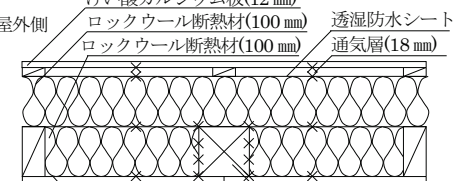
無断熱壁体	充てん断熱壁体（充てん断熱工法）
<p>① 無断熱壁体（屋外加熱・屋内加熱）</p>  <p>屋外側 けい酸カルシウム板(12 mm) 透湿防水シート            通気層(18 mm) スギ集成材(105 mm角)            屋内側 せっこうボード(15 mm) : 45 分準耐火構造仕様            強化せっこうボード(15 mm) : 60 分準耐火構造仕様</p>	<p>② 100 mm 充てん（屋外加熱・屋内加熱）</p>  <p>屋外側 けい酸カルシウム板(12 mm) 通気層(18 mm)            ロックウール断熱材(100 mm) 透湿防水シート            屋内側 ポリエチレンシート スギ集成材(105 mm角)            せっこうボード(15 mm) : 45 分準耐火構造仕様            強化せっこうボード(15 mm) : 60 分準耐火構造仕様</p>
外張断熱壁体（外張断熱工法）	付加断熱壁体（付加断熱工法）
<p>③ 25 mm 外張（屋外加熱・屋内加熱）</p>  <p>屋外側 けい酸カルシウム板(12 mm) 透湿防水シート            ロックウール断熱材(25 mm) 通気層(18 mm)            ポリエチレンシート スギ集成材(105 mm角)            屋内側 せっこうボード(15 mm) : 45 分準耐火構造仕様            強化せっこうボード(15 mm) : 60 分準耐火構造仕様</p>	<p>④ 25 mm 付加（屋外加熱・屋内加熱）</p>  <p>屋外側 けい酸カルシウム板(12 mm) 透湿防水シート            ロックウール断熱材(25 mm) 通気層(18 mm)            ロックウール断熱材(100 mm) スギ集成材(105 mm角)            屋内側 ポリエチレンシート            せっこうボード(15 mm) : 45 分準耐火構造仕様            強化せっこうボード(15 mm) : 60 分準耐火構造仕様</p>
<p>⑤ 100 mm 外張（屋内加熱のみ）</p>  <p>屋外側 けい酸カルシウム板(12 mm) 透湿防水シート            ロックウール断熱材(100 mm) 通気層(18 mm)            ポリエチレンシート スギ集成材(105 mm角)            屋内側 せっこうボード(15 mm) : 45 分準耐火構造仕様            強化せっこうボード(15 mm) : 60 分準耐火構造仕様</p>	<p>⑥ 100 mm 付加（屋内加熱のみ）</p>  <p>屋外側 けい酸カルシウム板(12 mm) 透湿防水シート            ロックウール断熱材(100 mm) 通気層(18 mm)            ロックウール断熱材(100 mm) スギ集成材(105 mm角)            屋内側 ポリエチレンシート            せっこうボード(15 mm) : 45 分準耐火構造仕様            強化せっこうボード(15 mm) : 60 分準耐火構造仕様</p>
<p>※外張断熱材に用いたロックウール断熱材には、撥水性がないため、透湿防水シートは、外張断熱材の外装側に設置している。</p>	<p>※付加断熱材に用いたロックウール断熱材には、撥水性がないため、透湿防水シートは、付加断熱材の外装側に設置している。</p>

図 3-2 断熱工法ごとの試験体仕様

材（袋入り品、密度 32～35 kg/m<sup>3</sup>）、外張（付加）断熱材にはロックウール断熱材（密度 40 kg/m<sup>3</sup>）を用いた（図 3-1）。

なお加熱実験にあたっては、試験体と炉壁の間の隙間や熱交換の発生を防ぐため、試験体に加熱面の外縁部（幅 100 mm）と試験体上面および左右側面の木枠部に、厚さ 12.5 mm のセラミックウールブランケットを張り付けた（写真 3-1）。

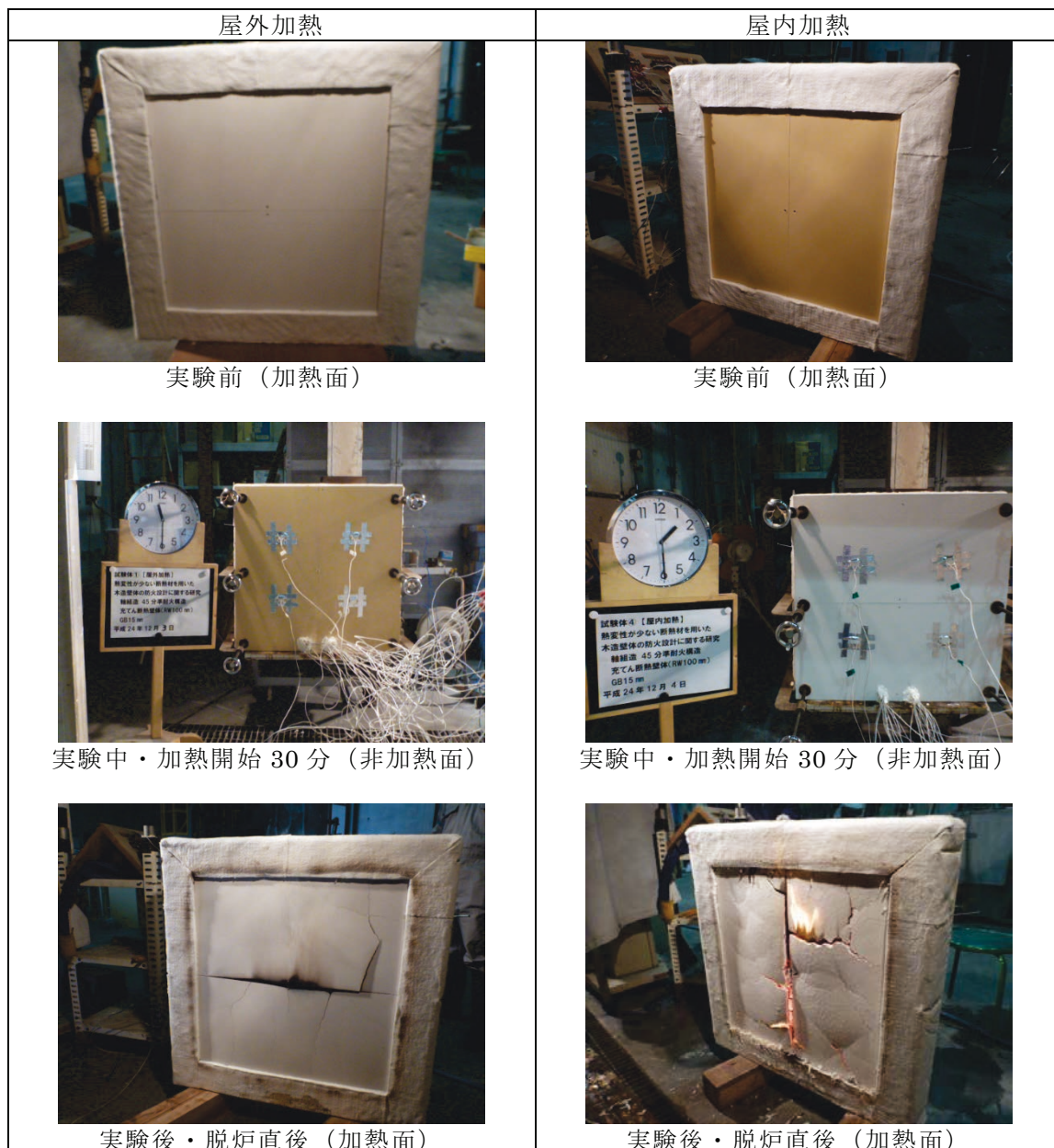


写真 3-1 小型実験時の試験体の様子（充てん断熱工法・45 分加熱）

### 3.2.2 実験方法

加熱実験は、小型炉（装置：幅 1,360 mm×高さ 1,315 mm×奥行き 1,045 mm、炉内寸：幅 600 mm×高さ 600 mm×奥行き 810 mm）に試験体を設置して行った。小型実験時の試験体の様子を写真 3-1 に、実験装置である小型炉を写真 3-2 に示す。試験体には载荷せず、炉内温度を試験体表面から 100 mm の位置で  $\phi 3.2$  mm のシース熱電対（K 熱電対）により測定し、ISO834<sup>4)</sup>加熱曲線に沿って加熱した。加熱時間は、試験体仕様に合わせて、45 分準耐火構造仕様の場合は 45 分、60 分準耐火構造仕様の場合は 60 分とした。

また加熱実験は、試験体仕様ごとに、屋外側加熱（以下、屋外加熱）と屋内側加熱（以下、屋内加熱）の両方の加熱条件で行った。ただし外張断熱工法・付加断熱工法では、屋外加熱に対して断熱材が厚いほど、防火性能上、有利になるのは明らかなため、屋外加熱を外張（付加）断熱材が薄い場合のみ実施し、厚い場合は省略した。

実験は、2012 年 12 月～2013 年 5 月に実施した。

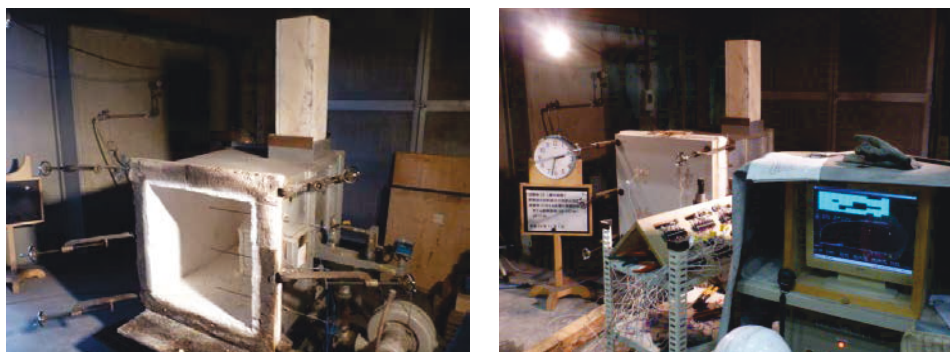


写真 3-2 実験装置（左：小型炉・右：実験時の様子）

### 3.2.3 測定項目

#### 3.2.3.1 遮熱性・遮炎性に関する要因の測定

遮熱性・遮炎性に影響する要因の把握を目的として、遮熱性の判定指標<sup>5)</sup>である試験体裏面温度の他、図 3-1 中および図 3-2 中に示す温度測定位置（×印）に K タイプ（CA）熱電対を設置して各構成材料の表面温度を測定し、層ごとに測定点 4 点の平均温度を求めて、壁体内部各層の温度の報告値とした。なお遮炎性は、非加熱側から目視により確認した。



### 3.2.3.2 非損傷性に関する要因の測定方法と柱の損傷度の定義

非損傷性は小型試験体では直接把握できないが、軸組工法では柱の断面の損傷に支配されると考えられる。そこで図 3-1 中および図 3-2 中に示すように、幅 105 mm の柱側面部を 3 等分し、両端（柱角部）を含む 4 点に K タイプ（CA）熱電対を設置して、柱角部および柱側面の表面付近温度（以下、それぞれ柱角部温度、柱側面温度とする。）を測定し、標準火災加熱時の柱の加熱状況を分析した<sup>注 3)</sup>。

また柱の座屈に関わる指標として 45 分、60 分加熱後の柱の損傷の程度を、次のように定量化した。まず実験終了後、柱の炭化部を取り除いた上で、炭化による欠損が最も大きく、残存する柱の断面寸法が最も小さい部分（以下、「柱の最小断面」という。）を目視で特定した。この柱の最小断面に対し、その断面積、断面積の残存率（実験前の断面積を 100% とした時の残存割合）および断面二次モーメントをそれぞれ求めた。さらに第 1 章での検討と同じく既往研究<sup>6)</sup>に従い、柱正面および柱側面が受ける加熱の影響を調べるため、柱の加熱側柱角部の炭化深さを、図 3-3 に示す方法で求めた。なお加熱側柱角部は、加熱面に近い柱の隅角部を指し、屋外加熱時は柱外装側角部、屋内加熱時は柱内装側角部が該当する。

次に、柱の最小断面と壁体の非損傷性との関係を、柱の最小断面における断面二次モーメントに着目して次のように分析する。オイラーの座屈式<sup>7)</sup>（式 3-1）より材の支点間距離、端部条件、座屈長さ（ $L_k$ ）が同じであれば、座屈荷重（ $P$ ）は曲げ剛性（ $EI$ ）に比例する。

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \quad (\text{式 3-1})$$

$P$  座屈荷重(kN)  $E$  ヤング係数(kN/mm<sup>2</sup>)  $I$  断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>)  $L_k$  座屈長さ(mm<sup>2</sup>)

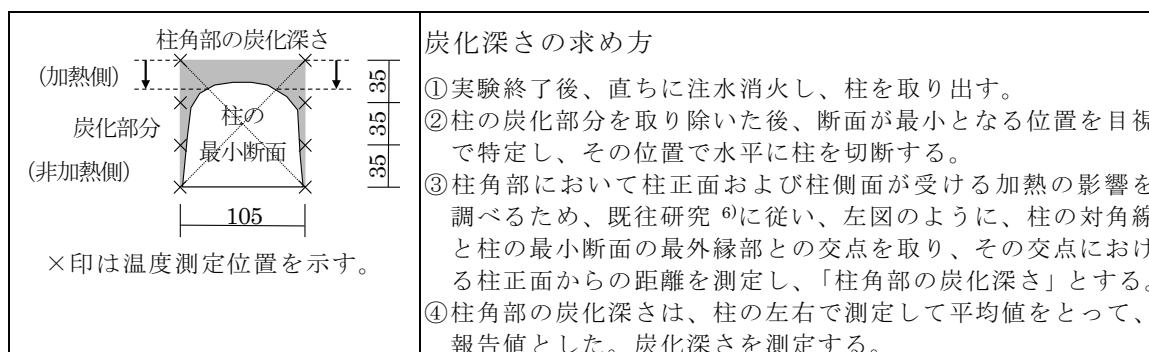


図 3-3 「加熱側柱角部の炭化深さ」の求め方

ここで実大規模の壁を想定して、ヤング係数を一定 ( $E=7.5\text{kN/mm}^2$ )、柱の座屈長さを  $3,200\text{ mm}$  (柱の有効細長比 100 以上) と仮定すると、座屈荷重は断面二次モーメント ( $I$ ) に比例する。つまり柱の損傷が進むと、柱の断面二次モーメントが小さくなり、座屈荷重も小さくなる。そして、この座屈荷重が想定される実大実験時の載荷荷重と等しくなると、柱に座屈が生じると考えられる。

そこで柱に対し、実験前の断面二次モーメントを  $I_o$ 、最小断面における断面二次モーメント  $I$ 、想定される実大実験時の載荷荷重と座屈荷重が等しくなる時の断面二次モーメントを  $I_e$  とし、柱の損傷の程度を示す指標として、「柱の損傷度」( $Y$ ) を式 3-2 に示す通り定義する。

$$Y = \frac{I_o - I}{I_o - I_e} \times 100 \quad (\text{式 3-2})$$

$Y$  柱の損傷度(%)

$I$  最小断面における柱の断面二次モーメント( $\text{mm}^4$ )

$I_o$  ( $= 1.013 \times 10^7$ ) 実験前の柱の断面二次モーメント( $\text{mm}^4$ )

$I_e$  ( $= 2.65 \times 10^6$ ) 想定される実大実験時の載荷荷重と座屈荷重が等しくなる時の柱の断面二次モーメント( $\text{mm}^4$ )

すなわち「柱の損傷度」( $Y$ ) は、実験前の断面二次モーメント ( $I_o=1.013 \times 10^7 \text{mm}^4$ ) を柱の損傷度 0% ( $Y=0$ )、想定される実大実験時の載荷荷重と座屈荷重が等しくなる時の柱の断面二次モーメント ( $I_e=2.65 \times 10^6 \text{mm}^4$ ) を柱の損傷度 100%<sup>注 4)</sup> ( $Y=100$ ) とし、柱の最小断面における断面二次モーメントに対し、この 2 点間で線形補間した値をパーセント表示したものと定義される。

なお、木材のヤング係数は、本来、温度および含水率の影響を受ける<sup>8)</sup>が、本実験では木材内部の温度等の分布の測定には至っていないため、材の力学的性能の温度・含水率依存性を考慮しない範囲で、断熱工法の種別・加熱方向と非損傷性の関係を検討する。

### 3.2.4 実験結果（45分加熱と60分加熱）

45分加熱および60分加熱の各層の温度推移について、屋外加熱時の結果を図3-4に、屋内加熱時の結果を図3-5に示す。また実験終了時の試験体の様子を写真3-3～写真3-6に示す。

45分準耐火構造と60分準耐火構造の場合で、試験体の内装材としたせっこうボードの仕様は異なるが、断熱仕様、加熱方向ごとに両者の実験結果を比較すると、45分加熱における各層の温度推移は、60分加熱における45分までの各層の温度推移といずれもほぼ合致した（図3-4、図3-5）。特に屋内加熱では、すべての試験体で共通して、せっこうボードが火災加熱を受け、せっこうボード外装側（非加熱側）表面の温

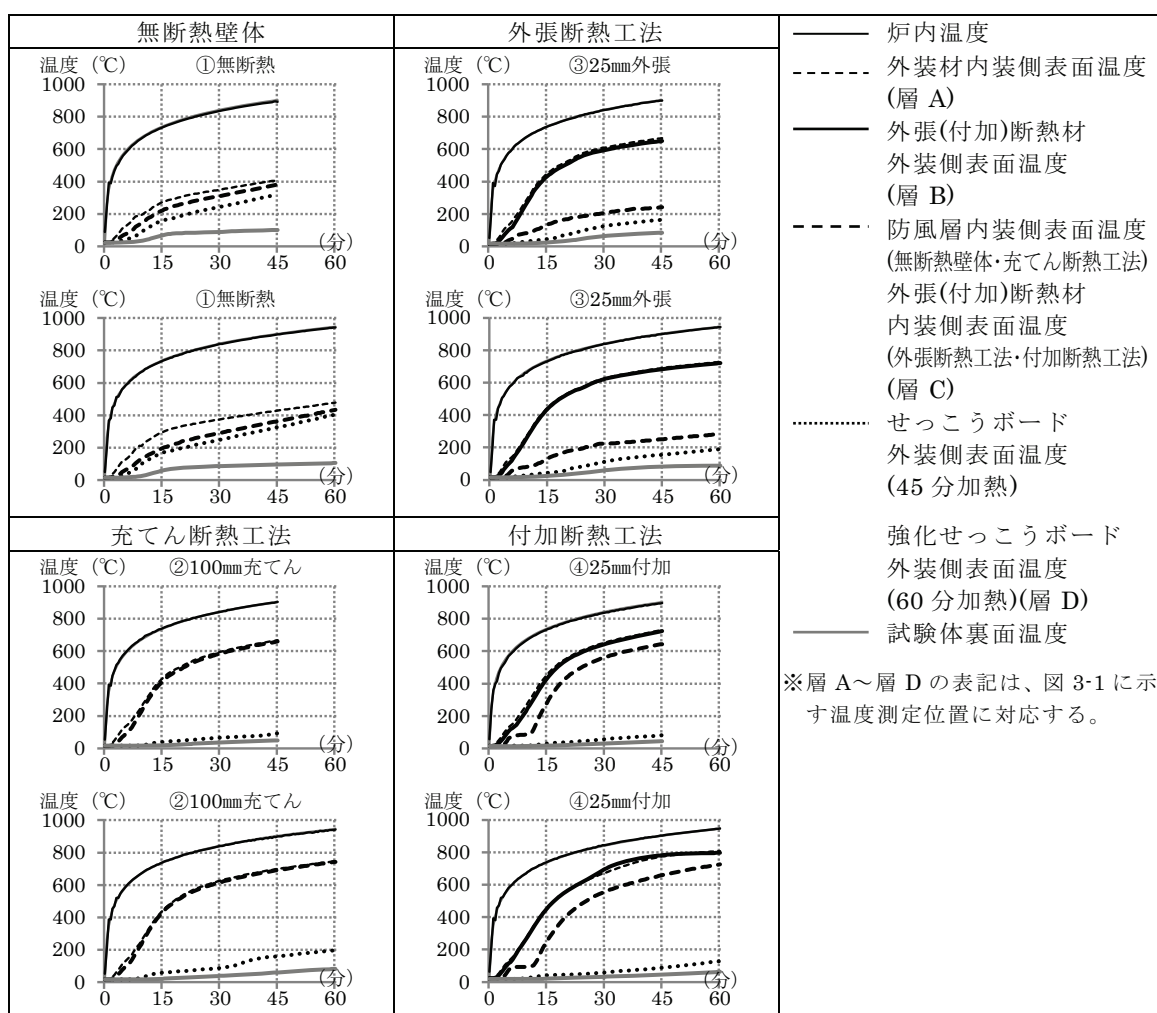


図 3-4 断熱工法別・屋外加熱時における各層の平均温度推移

(上段：45分加熱・下段：60分加熱)

度が 100℃付近になると温度停滞が生じた。この温度停滞の間、せっこうボードより非加熱側に位置する各層や柱は温度上昇を抑制される。45 分加熱、60 分加熱ともに 100℃付近での温度停滞は、加熱開始 20 分頃まで続きほぼ同じ停滞時間となった<sup>注 5)</sup>。

以上より、以降、壁体内の温度推移に着目し考察する場合には、60 分加熱の実験結果で代表させて論を進めていく。

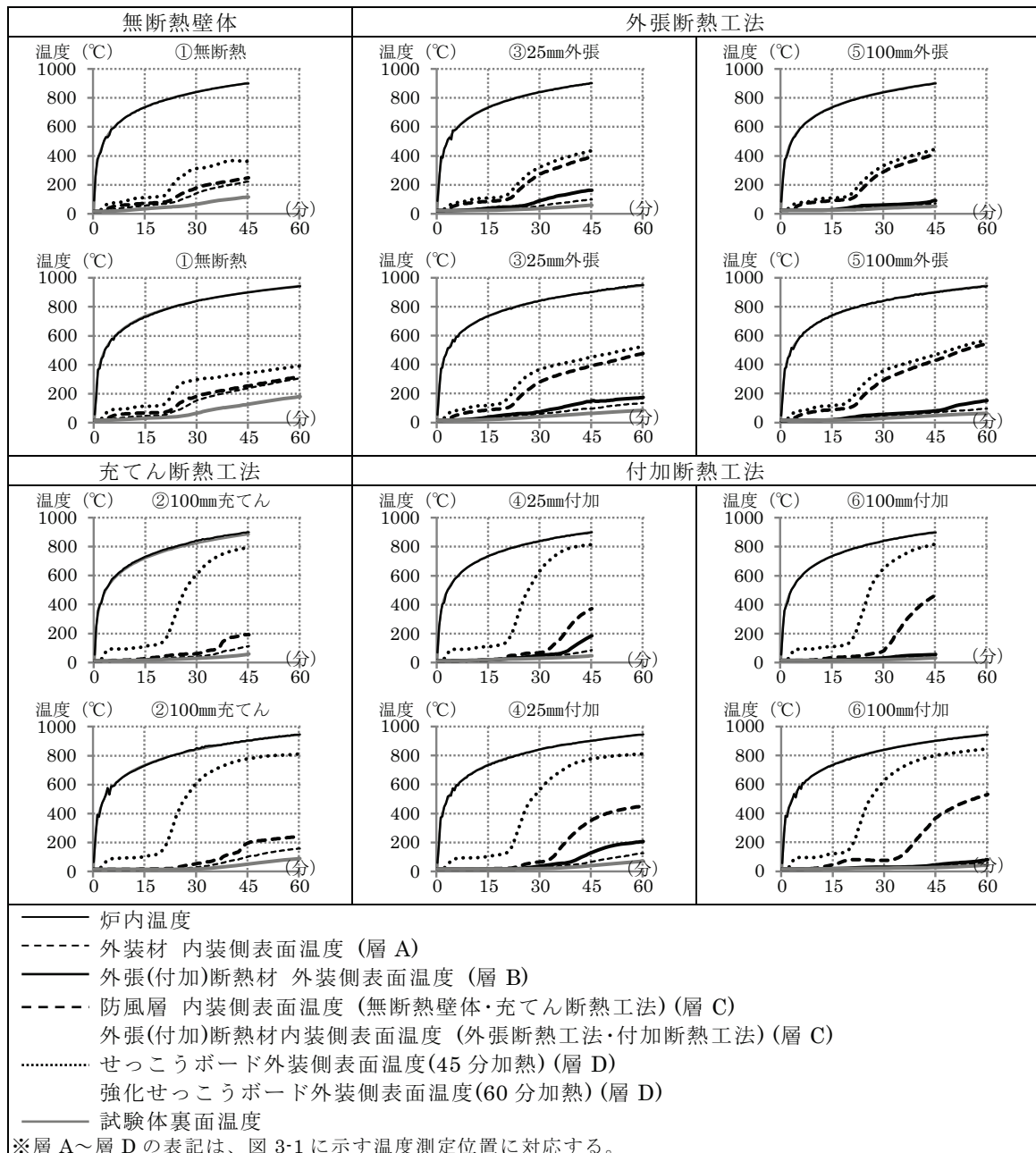


図 3-5 断熱工法別・屋内加熱時における各層の平均温度推移

(上段：45分加熱・下段：60分加熱)











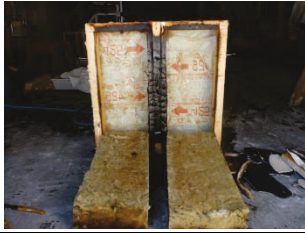

試験体	①無断熱壁体	③25 mm外張
脱炉後 (加熱面)		
外装材 除去後 (加熱面)		
外張 断熱材 除去後 (加熱面)	/	
		
試験体	②100 mm充てん	④25 mm付加
脱炉後 (加熱面)		
外装材 除去後 (加熱面)		
付加 断熱材 除去後 (加熱面)	/	
		
充てん 断熱材 除去後 (加熱面)		

写真 3-3 脱炉時の試験体の様子 (45分屋外加熱：外装材 けい酸カルシウム板 (12 mm))



試験体	①無断熱壁体	③25 mm外張	
脱炉後 (加熱面)			
外装材 除去後 (加熱面)			
外張 断熱材 除去後 (加熱面)	(欠測)		
試験体	②100 mm充てん	④25 mm付加	
脱炉後 (加熱面)			
外装材 除去後 (加熱面)		(欠測)	
付加 断熱材 除去後 (加熱面)	(欠測)		
充てん 断熱材 除去後 (加熱面)		(欠測)	

写真 3-4 脱炉時の試験体の様子 (60分屋外加熱：外装材 けい酸カルシウム板 (12mm))




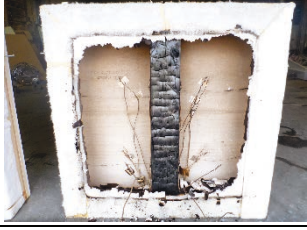








試験体	①無断熱壁体	③25 mm外張	⑤100 mm外張
脱炉後 (加熱面)			
内装材 除去後 (加熱面)			
試験体	②100 mm充てん	④25 mm付加	⑥100 mm付加
脱炉後 (加熱面)			
内装材 除去後 (加熱面)			
充てん 断熱材 除去後 (加熱面)			

写真 3-5 脱炉時の試験体の様子 (45分屋内加熱：内装材 せっこうボード (15 mm))



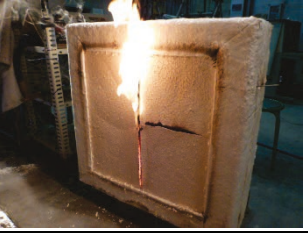











試験体	①無断熱壁体	③25 mm外張	⑤100 mm外張
脱炉後 (加熱面)			
内装材 除去後 (加熱面)			
試験体	②100 mm充てん	④25 mm付加	⑥100 mm付加
脱炉後 (加熱面)			
内装材 除去後 (加熱面)			
充てん 断熱材 除去後 (加熱面)		(欠測)	

写真 3-6 脱炉時の試験体の様子 (60分屋内加熱：内装材 強化せっこうボード (15mm))



### 3.3 試験体内部温度分布とその実用的予測可能性に関する考察

#### 3.3.1 一次元定常熱伝導計算による壁体各層の加熱終了時温度の算出

ロックウール断熱材は高温でも溶融・燃焼しないため、裏面を含む試験体内部の温度分布は、熱貫流に支配されると考えられる。特に防火性能評価の対象となる加熱開始 45 分後、60 分後では、一般に、部材の崩壊や火炎貫通が生じない限り、裏面温度等の時間的变化はすでに緩慢になっており、試験体内の断面方向の温度分布は両側の気温を境界条件とする定常熱伝導が成り立つ状態に近づいていると考えられる。そこで、定常熱伝導を仮定して内部温度を計算すれば、やや高温側、すなわち危険側で予測できる可能性があると考えて、加熱側（炉内温度）の境界条件を加熱終了時における ISO834 加熱曲線が示す温度（45 分 902℃、60 分 945℃）、非加熱側（雰囲気温度）の境界条件を 20℃として、一次元定常熱伝導計算（以下、一次元定常計算）を行った。用いた計算モデルを図 3-6 に、設定条件を表 3-1 に示す。

なお、各層の熱伝達率、各構成材料の熱伝導率は温度に依存するため、本計算では、各部分の温度がこれら物性値に対応する温度と一致するまで反復計算を行った。実験の過程では水分の蒸発や結晶水の放出が見られるが、計算では高温部の水分が散逸した後の定常状態を想定している。そのため、計算では、水分の移動が壁体内部の温度分布に及ぼす影響は高温での材料の物性値以外は考慮していない。また、部材の脱落や損傷等、発生条件や防火性能への影響の程度を現状では予測できない事項も考慮していない。

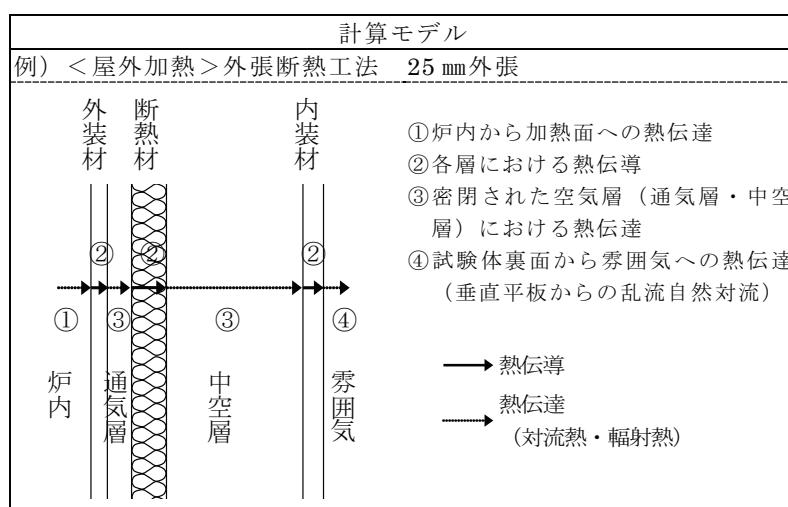


図 3-6 一次元定常熱伝導計算のモデル

表 3-1 一次元定常熱伝導計算における設定条件

設定と適用した数式		出典	
① 炉内から加熱面への熱伝達	輻射熱伝達率 $h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	$h_r = \delta_{1,2}\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$	9)
	対流熱伝達率 $h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	$h_c = 23$ (W/m <sup>2</sup> K)	10)
② 各層における熱伝導	平均熱伝導率 $\bar{\lambda}$ (W/mK)	$\bar{\lambda} = \int_{t_1}^{t_2} \lambda dt / (t_2 - t_1)$	11)
	外装材：けい酸カルシウム板 $\rho = 0.52^*$ の場合	$\lambda = 0.123 - (1.02 \times 10^{-4})t + (1.86 \times 10^{-7})t^2$	10)
	断熱材：ロックウール断熱材 $\rho = 0.040^*$ の場合	$\lambda = 0.0565 - (1.53 \times 10^{-4})t + (1.16 \times 10^{-6})t^2$	12)
	内装材：(強化) せっこうボード $\rho = 0.84^*$ の場合	$\lambda = 0.279 - (5.23 \times 10^{-4})t + (5.81 \times 10^{-7})t^2$	10)
③ 密閉された空気層 (通気層・中空層) における熱伝達	熱輻射伝達率 $h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	$h_r = \delta_{1,2}\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$	9)
	対流熱伝達率 $h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	$h_c = \bar{\lambda}/d$ ( $Nu < 1$ ), $h_c = Nu \cdot \bar{\lambda}/d$ ( $Nu \geq 1$ ) $Nu = 0.035(Gr \cdot Pr)^{0.38}$ , $Pr = 0.7$ , $Gr = g\beta(T_1 - T_2)d^3/\bar{\nu}^2$ , $\beta = 1/\{(T_1 + T_2)/2\}$	13) 13), 14)
④ 試験体裏面から雰囲気への熱伝達 (垂直平板からの乱流自然対流)	熱輻射伝達率 $h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	$h_r = \delta_{1,2}\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$	9)
	対流熱伝達率 $h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	$h_c = Nu \cdot \bar{\lambda}/x$ $Nu = 0.13Ra^{1/3}$ , $Ra = Gr \cdot Pr$ ( $10^9 \leq Ra \leq 10^{11}$ ), $Pr = 0.7$ , $Gr = g\beta(T_1 - T_2)x^3/\bar{\nu}^2$ , $\beta = 1/\{(T_1 + T_2)/2\}$	14) 14) 14) 14)
※ 空気の熱伝導率と動粘性係数	平均熱伝導率 $\bar{\lambda}$ (W/mK)	$\bar{\lambda} = \int_{t_1}^{t_2} \lambda dt / (t_2 - t_1)$ , $\lambda = 0.0244 + (6.98 \times 10^{-5})t - (1.28 \times 10^{-8})t^2$	11), 15)
	平均動粘性係数 $\bar{\nu}$ (m/sec)	$\bar{\nu} = \int_{t_1}^{t_2} \nu dt / (t_2 - t_1)$ , $\nu = (1.31 \times 10^{-5}) + (1.08 \times 10^{-7})t + (5.80 \times 10^{-11})t^2$	11), 15)

凡例  $\sigma$  (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>) ステファン・ボルツマン定数,  $\delta$  放射率,  $\delta_{1,2}$  有効放射率,  $T$  (K) 絶対温度 ( $T_1$  (K) 低温側絶対温度,  $T_2$  (K) 高温側絶対温度),  $\lambda$  (W/mK) 熱伝導率,  $t$  (°C) 温度 ( $t_1$  (°C) 低温側温度,  $t_2$  (°C) 高温側温度),  $\rho$  (t/m<sup>3</sup>) 密度,  $d$  (mm) 空気層厚さ,  $x$  (mm) 平板下端から高さ,  $g$  (m/sec<sup>2</sup>) 重力加速度,  $\nu$  (m/sec) 動粘性係数,  $Nu$  ヌセルト数,  $Pr$  プラントル数,  $Gr$  グラスホフ数,  $\beta$  (1/K) 拡散係数,  $Ra$  レイリー数

\* 文献にある熱伝導率の計算式は、試験体に用いた建材の密度に最も近いものを用いた。従って計算式に示される密度と試験体に用いた建材の密度とは必ずしも合致しない。

### 3.3.2 内部温度の一次元定常熱伝導計算との比較

45分加熱および60分加熱における加熱終了時の各層の温度分布を、一次元定常計算値と比較して図3-7に示す。全体に計算の方が温度は高く、中空層がない充てん断熱工法および付加断熱工法において、実験結果で60分加熱の方が45分加熱より計算結果に近いのは、計算が定常状態までの加熱を想定しているためと考えられる。遮熱性や柱に接する内外装・断熱層等、柱の損傷に影響する材料の加熱終了時の壁体内部温度は、定常計算でやや危険側で比較的容易に予測できることがわかる。

しかし中空層がある無断熱壁体および外張断熱工法では、計算値は実験結果に比べて中空層の温度が著しく高くなっており、安全側の設計を導く結果とはなっても、計算値は実験結果から乖離した<sup>注6)</sup>。その原因として、第一に中空層境界の熱収支計算

で想定している静止空気層と固体表面間の対流熱伝達の仮定が加熱実験では成立せず、中空層の熱伝達を過小評価している可能性があること、第二に計算では系外となる柱の熱容量は中空層よりも大きく、実験では柱の存在により中空層の温度上昇が抑制されると推測されるが、計算ではその点を評価できていないこと等が考えられる。

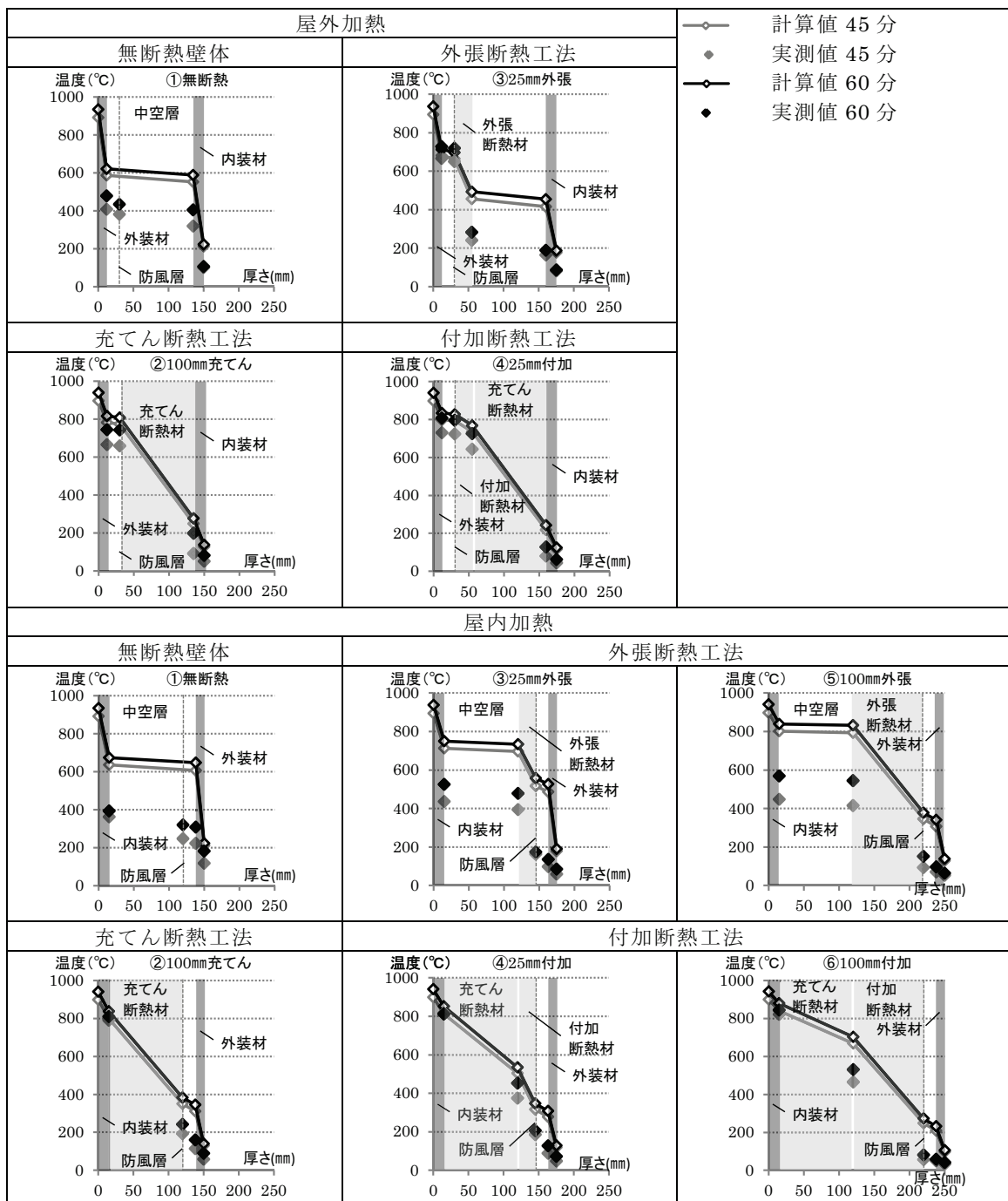


図 3-7 壁体内各層の温度 (加熱実験の結果と一次元定常計算値)

### 3.4 遮熱性に関する考察

#### 3.4.1 試験体の遮熱性の評価概要

遮炎性・遮熱性に関する実験結果を表 3-2 に示す。無断熱壁体では遮炎性は満たしたが、遮熱性は屋外加熱よりも屋内加熱で低く、60 分屋内加熱では所定の性能を満たさなかった。ロックウール断熱壁体では、すべての試験体で遮炎性、遮熱性を満たした。また同じ試験体仕様（壁体構成）で裏面温度上昇度を比較すると、45 分加熱、60 分加熱ともに、無断熱壁体、充てん断熱工法、付加断熱工法（25 mm 付加断熱壁体）では屋内加熱の方が、外張断熱工法（25 mm 外張断熱壁体）では屋外加熱の方が、試験体裏面の温度上昇度が高くなり、遮熱性が低くなった（表 3-2）。

表 3-2 遮炎性・遮熱性に関する実験結果

加熱方向	断熱工法	試験体仕様	加熱時間		熱貫流抵抗 *1 (m <sup>2</sup> K/W)	45 分加熱			60 分加熱			
			45 分 準耐火 仕様	60 分 準耐火 仕様		遮炎性 炎の 貫通の 有無	遮熱性 裏面温度上昇度		遮炎性 炎の 貫通の 有無	遮熱性 裏面温度上昇度		
							初期 温度 (°C)	平均 (K)		最高 (K)	初期 温度 (°C)	平均 (K)
屋外 加熱	無断熱壁体	① 無断熱	0.38	0.37	なし	23	78	80	なし	16	89	98
	充てん断熱工法	② 100 mm 充てん	3.01	3.00	なし	16	37	39	なし	18	64	67
	外張断熱工法	③ 25 mm 外張	1.12	1.12	なし	16	67	69	なし	18	72	73
	付加断熱工法	④ 25 mm 付加	3.66	3.66	なし	16	29	32	なし	19	45	51
屋内 加熱	無断熱壁体	① 無断熱	0.38	0.37	なし	17	100	114	なし	19	162 <sup>*2</sup>	179
	充てん断熱工法	② 100 mm 充てん	3.01	3.00	なし	13	45	59	なし	17	73	84
	外張断熱工法	③ 25 mm 外張	1.12	1.12	なし	22	37	42	なし	17	67	79
		⑤ 100 mm 外張	3.10	3.09	なし	25	27	30	なし	17	47	48
	付加断熱工法	④ 25 mm 付加	3.66	3.66	なし	14	35	38	なし	17	55	57
		⑥ 100 mm 付加	5.64	5.63	なし	16	18	21	なし	17	25	31

\*1 実験を実施した小型試験体で、柱や枠材の熱橋を考慮せず、断熱材部のみを対象に、中空層や通気層は上端と下端を塞いだ空気層と見なし、外装材から内装材の層構成で算出した。

\*2 加熱開始 53.5 分時の測定で、遮熱性の規定値（裏面温度上昇度の平均値 140K）を超えて、遮熱性を満足しなくなった。

#### 3.4.2 遮熱性と熱貫流抵抗との関係性

壁体の熱貫流抵抗と裏面温度上昇度の関係を、先述の一次元定常計算の結果とあわせて、図 3-8、図 3-9 に示す。常温時の熱貫流抵抗が大きくなるほど、裏面温度は低くなる傾向があり、ロックウール断熱壁体の遮熱性の序列は、常温時の熱貫流抵抗を比較することにより、概ね予想できることがわかる。

裏面温度は、どの条件でも計算値の方が実験値より高くなった。その主な原因として、実験では加熱終了時点で、最も非加熱側となる試験体裏面では想定する定常状態

に達していない可能性が高いことや、温度が高くなるほど断熱材の熱抵抗が小さくなるため、裏面温度が高く算出されて実験値との差がより広がった可能性があることなどが考えられる。さらに中空層のある仕様では、先述のように、実験では計算より大きい熱損失が生じていることが影響を大きくしている可能性がある。

次に遮熱性を満たす目安となる熱貫流抵抗値を考える。一次元定常計算により遮熱性の判定基準<sup>4)</sup>である裏面温度上昇度（平均）が140Kを超えない熱貫流抵抗の範囲を求めると、45分準耐火外壁で1.70 m<sup>2</sup> K/W以上、60分準耐火外壁で2.10 m<sup>2</sup> K/W以上となる。この範囲でロックウール断熱壁体を設計すると、裏面温度が実験より高めに推定されるため、図3-8、図3-9のように、十分、安全側の設計を誘導することがわかる。

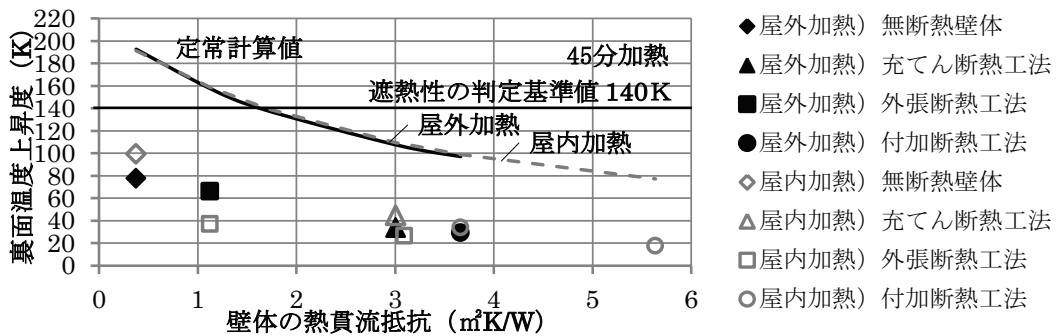


図 3-8 壁体の熱貫流抵抗と裏面温度上昇度（平均）（45分加熱）

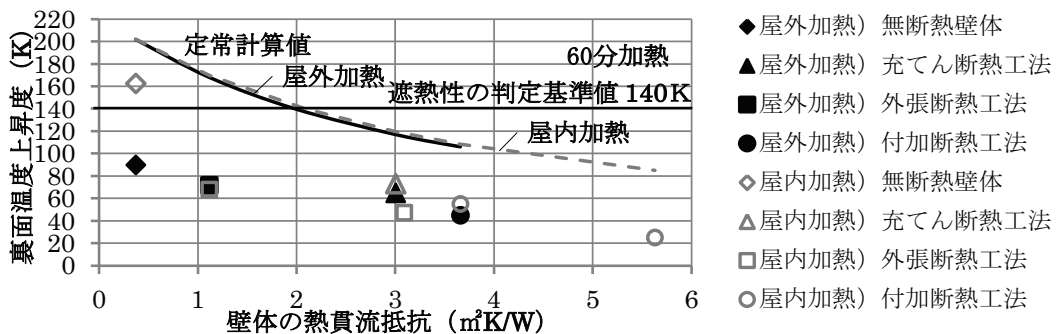


図 3-9 壁体の熱貫流抵抗と裏面温度上昇度平均値（60分加熱）

### 3.4.3 屋外加熱と屋内加熱との比較

定常熱貫流計算が近似的に成り立てば、加熱を受ける壁体の裏面温度は雰囲気温度に対し表面熱伝達の分だけ高くなる。そのため同じ壁体構成であれば、加熱方向に依らず試験体の裏面温度はほぼ同程度の温度となり、遮熱性にさほど大きな差は生じないはずである。しかし実験結果を見ると、3.4.1 に示した通り、試験体裏面温度は、壁体構成が同じでも加熱方向により経過が異なり（図 3-10）、無断熱壁体、充てん断熱工法、付加断熱工法では屋内加熱の方が高く、外張断熱工法では屋外加熱の方が高くなった（表 3-2）。

屋内加熱では、加熱開始 20 分過ぎまで、炉に暴露されるせっこうボードの結晶水が 100℃付近で放出される間は、その非加熱側の温度上昇は低く抑えられる（図 3-4、図 3-5）。そのため、裏面温度上昇度も加熱開始 30 分頃までは低く推移したが、温度停滞が終わった後は、外張断熱工法を除き、傾きが大きくなって上昇した（図 3-10）。一方、屋外加熱では、試験体の裏面温度は時間の経過とともに単調に上昇し、裏面温度上昇度が約 60℃を超えると傾きが小さくなってほぼ横ばいに推移した。最も非加熱側に位置するせっこうボードの加熱側表面がようやく 100℃に達した時に、温度停滞が生じたとみられる（図 3-10）。

火災加熱時の壁体の遮熱性に見られるこの非対称性は、壁体の屋外・屋内方向に非対称に配置された材料の熱的特性の温度依存性や高温での吸発熱の有無が各々異なることに起因すると考えられる。例えば、せっこう系面材を含む壁体は結晶水を放出す

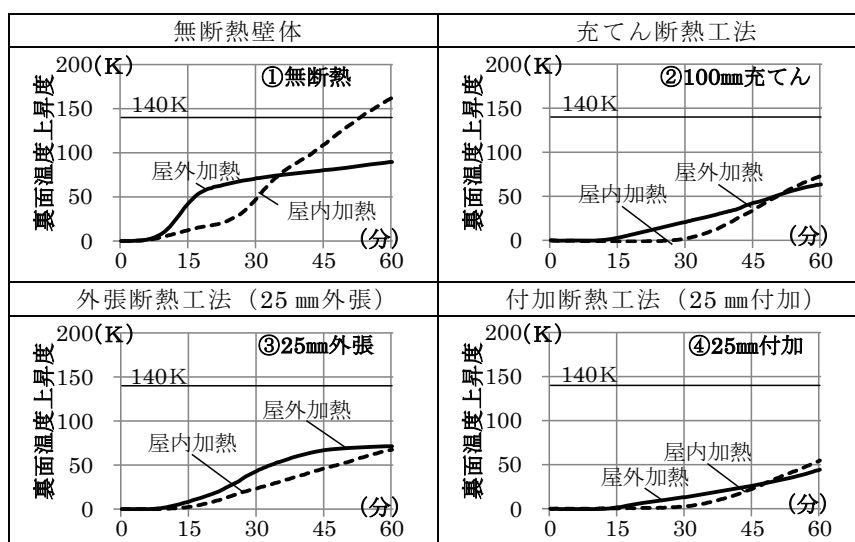


図 3-10 断熱工法別・加熱方向による裏面温度上昇度（平均）の比較

る間は熱貫流が抑制されるが、さらに高温になると、熱伝導率が上昇して熱貫流を援けるため、加熱時の温度と加熱時間によって、遮熱性に関しては有利にも不利にも働く。外張断熱工法以外、屋内加熱時の方が遮熱性が低いのは、屋内側表面のせっこうボード又は強化せっこうボードの結晶水の放出が早く始まり、熱伝導率が上昇した状態が長く続いたためと考えられる。そして、外張断熱工法のみ屋外加熱時の方が屋内加熱より遮熱性が低くなったのは、屋内加熱時に早く高温に達する中空層において、前述のように顕著な熱損失があったためと考えられる。無断熱壁体も中空層を有するが、断熱層がないため、その温度は加熱方向とほとんど無関係である。

#### 3.4.4 中空層が遮熱性に及ぼす影響

3.3.2 での検討において、図 3-7 に示した加熱実験における 45 分および 60 分時点での壁体内各層の温度を見ると、中空層が存在することにより、中空層より非加熱側への伝熱が抑えられて、試験体裏面を含む中空層より非加熱側の各層温度は、計算値に比べて著しく低く推移している。従って、断熱外壁に中空層が設けられると遮熱性に大きな影響が生じることがわかった。本実験では、中空層は火災加熱時に温度上昇が著しい部分に配置した場合に、遮熱性の向上に大きな効果がある結果となった。

中空層により非加熱側への伝熱が抑えられて遮熱性が向上する現象は、中空層内で対流による熱損失が生じているか、中空層に露出する柱等の木造部材による吸熱・温度上昇抑制効果が顕著であるのかいずれかに起因する可能性がある。前者については、さらに中空層の厚さ・高さが影響する可能性があり、後者については、柱・間柱等の断面が中空層に占める割合は工法によって異なり、また本実験のような小型試験体と実大壁体でも異なる。そのため中空層がある壁体の火災加熱時の内部温度・遮熱性の実用的な予測については、小型試験体での再現性に限界がある可能性の検討も含め、今後、中空層内の熱伝達の状況や柱の熱容量による影響など、中空層内の熱収支を把握し、火災加熱時における中空層の伝熱計算モデルを構築して、考察を進めていく必要がある。

### 3.5 柱の損傷度に関する考察

#### 3.5.1 加熱側柱角部の炭化と柱の損傷度

柱最小断面の断面積残存率、断面二次モーメントおよび 3.2.3.2 で定義した柱の損

表 3-3 加熱後の柱最小断面の状況（屋外加熱）

加熱面		屋外加熱			
断熱工法		無断熱壁体	充てん断熱工法	外張断熱工法	付加断熱工法
試験体仕様		① 無断熱	② 100 mm 充てん	③ 25 mm 外張	④ 25 mm 付加
屋外側	45 分 加熱				
柱断面写真					
屋内側					
断面積残存率		94.7%	85.2%	98.4%	92.7%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	$8.8 \times 10^6$	$6.6 \times 10^6$	$9.7 \times 10^6$	$8.3 \times 10^6$	
柱の損傷度	17.5%	46.6%	5.9%	24.2%	
屋外側	60 分 加熱				
柱断面写真					
屋内側					
断面積残存率		80.2%	75.3%	92.5%	79.4%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	$6.3 \times 10^6$	$4.7 \times 10^6$	$8.1 \times 10^6$	$5.5 \times 10^6$	
柱の損傷度	51.1%	73.0%	27.7%	62.3%	

表 3-4 加熱後の柱最小断面の状況（屋内加熱）

加熱面		屋内加熱					
断熱工法		無断熱壁体	充てん断熱工法	外張断熱工法		付加断熱工法	
試験体仕様		① 無断熱	② 100 mm 充てん	③ 25 mm 外張	⑤ 100 mm 外張	④ 25 mm 付加	⑥ 100 mm 付加
屋外側	45 分 加熱						
柱断面写真							
屋内側							
断面積残存率		88.3%	79.3%	82.7%	84.9%	79.6%	79.0%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	$7.0 \times 10^6$	$5.4 \times 10^6$	$6.2 \times 10^6$	$6.6 \times 10^6$	$5.4 \times 10^6$	$5.3 \times 10^6$	
柱の損傷度	42.2%	63.8%	53.3%	47.6%	63.0%	65.0%	
屋外側	60 分 加熱						
柱断面写真							
屋内側							
断面積残存率		77.6%	67.5%	63.7%	55.0%	67.6%	65.6%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )	$4.8 \times 10^6$	$3.4 \times 10^6$	$3.4 \times 10^6$	$2.7 \times 10^6$	$3.5 \times 10^6$	$3.2 \times 10^6$	
柱の損傷度	71.6%	89.4%	89.4%	98.9%	89.2%	92.6%	



傷度を表 3-3、表 3-4 に、また、60 分加熱時の柱側面の平均温度推移を図 3-11 に示す。実験終了後の柱の最小断面をみると、炭化により減少した柱断面の形状は、多様なパターンが認められる（表 3-3、表 3-4）が、図 3-3 で定義した加熱側柱角部の炭化深さと柱の損傷度（断面二次モーメントの減少分）との関係性を見ると、両者の間に強い正の相関性が確認された（図 3-12）。

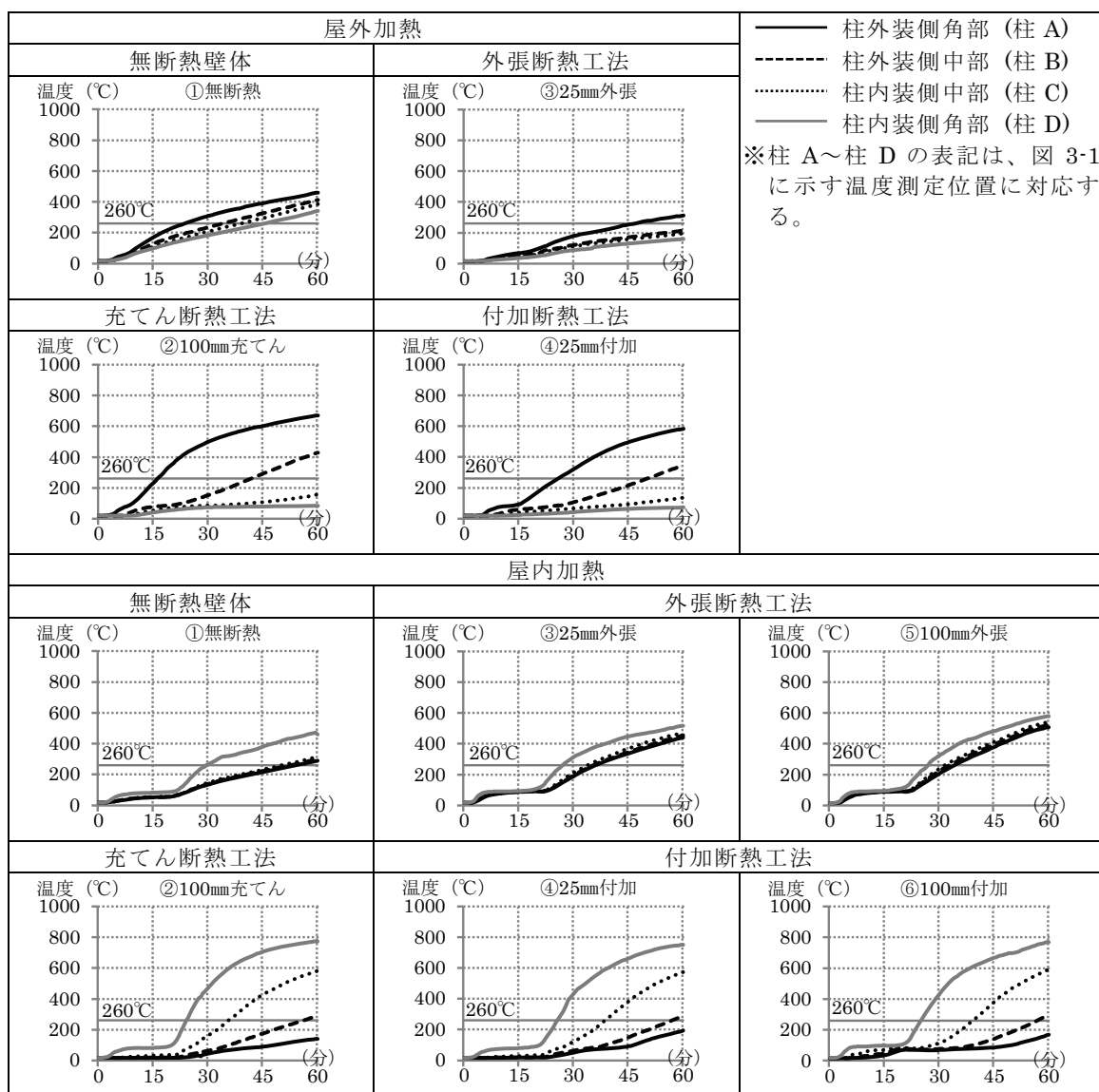


図 3-11 60 分加熱時の柱側面の平均温度推移

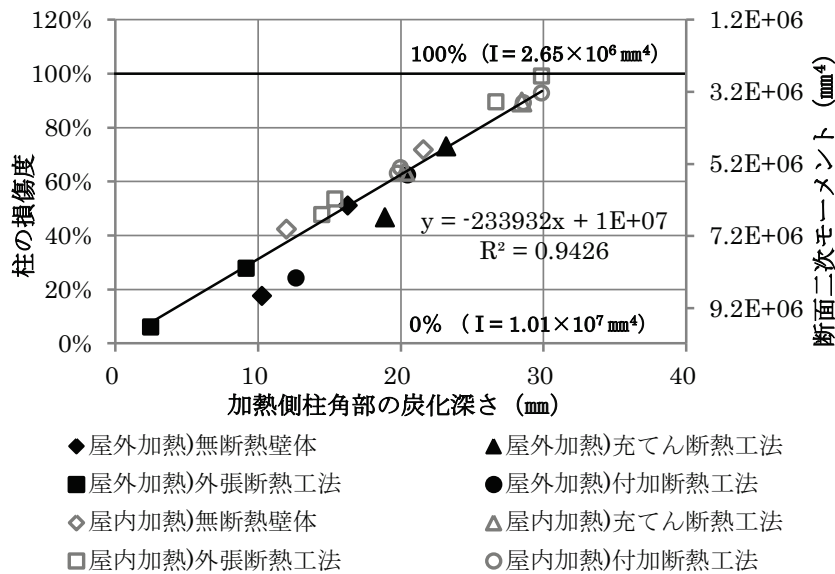


図 3-12 加熱側柱角部の炭化深さと柱の損傷度（最小断面）

### 3.5.2 柱の燃焼が始まる時間

加熱側柱角部の温度上昇は、加熱面から柱の加熱側表面までの被覆（以下、被覆層とする。）を厚くして、熱抵抗を大きくして入射熱量を減らすほど、また、被覆層より非加熱側に位置する軸間および柱を含む被覆層以外の熱抵抗を小さくして非加熱側への放熱が促されるほど、抑制されるはずである。

ここで柱の断面減少が続く時間を評価するために、図 3-11 より柱側面の温度上昇が最も早い加熱側柱角部に着目して、加熱側柱角部の温度が木材の着火温度<sup>16)</sup>である 260°C を超える時間を「柱の燃焼開始時間」と定義し、柱の燃焼開始時間と壁体の熱抵抗に占める被覆層の熱抵抗<sup>注 7)</sup>の割合との関係を検討する。

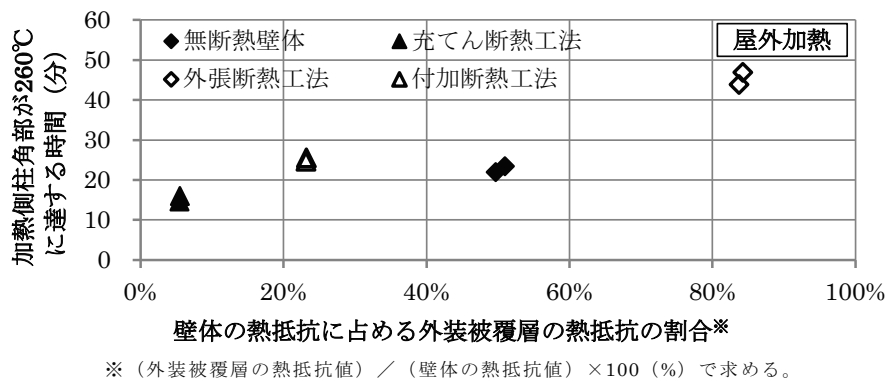


図 3-13 外装被覆層の熱抵抗と加熱側柱角部が 260°C に達する時間（屋外加熱）

屋外加熱では、柱の燃焼開始時間は、外装材や外張断熱材等の外装側の被覆層（以下、外装被覆層とする。）の熱抵抗が大きくなると遅くなり、充てん断熱材により非加熱側への放熱が抑制されると早まる傾向が顕著に現れた。特に充てん断熱工法が、断熱工法の中で柱の燃焼開始時間が最も早い（図 3-13）。

屋内加熱では、断熱工法を問わず、内装側の被覆層（以下、内装被覆層とする。）はせっこうボードのみとなる。屋内加熱時、加熱側柱角部の温度はいずれもせっこうボードの結晶水の放出による 100℃付近での温度停滞が終わった後、急激に上昇して 260℃を超える（図 3-11）。柱の燃焼開始時間は、せっこうボードによる 100℃付近での温度停滞時間の影響が支配的であり、充てん断熱材があると 1 分～3 分程度早まるが断熱工法による影響は小さい（図 3-14）。

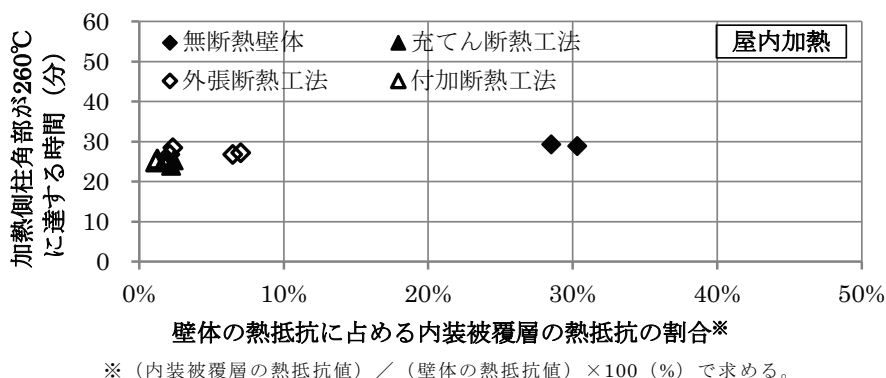


図 3-14 内装被覆層の熱抵抗と加熱側柱角部が 260℃に達する時間（屋内加熱）

### 3.5.3 加熱方向（屋外加熱・屋内加熱）と柱の損傷度

外壁の場合、外装被覆層には構造用面材や外装材など、断熱材以外にも面材が複数設置されることが多い。それに対し内装被覆層はせっこうボードだけである場合が多く、外装被覆層に比べ被覆が薄い傾向がある。従って、外壁内の柱は、屋内加熱の方が屋外加熱に比べて、損傷がより進む傾向にあると予想される。

実験結果を見ると、予想通り、無断熱壁体およびすべての断熱仕様で、45 分加熱、60 分加熱ともに、屋内加熱の方が屋外加熱よりも、加熱後の柱の断面二次モーメントは小さく、断熱化しても、柱の損傷度は屋内加熱の方が不利となる傾向は変わらないことがわかる（表 3-3、表 3-4）。この加熱方向による柱の損傷度の差は、無断熱壁体で約 20～25%程度、充てん断熱工法で約 25～27%程度となり、外張断熱工法、付加

断熱工法では、外張（付加）断熱材によりさらに広がった（表 3-3、表 3-4）。特に無断熱壁体と充てん断熱工法では、柱の屋外側正面に留め付けられた通気胴縁が、屋外加熱時には柱を被覆する役割を果たした可能性が考えられる。その結果、加熱側柱角部および柱正面の断面欠損を軽減、抑制したことが、屋内加熱時に比べ柱の損傷度に2割を超す差が生じた重要な要因と考えられる。

なお、ロックウール断熱壁体のすべての断熱仕様で60分屋内加熱時の柱の損傷度は100%を超えないが、約90%前後またはそれ以上に達している。このように部材内の温度上昇によるヤング率の低下を考慮していない範囲ですでに柱が座屈して非損傷性を喪失するとされる近くまで柱の損傷が進んでおり、非損傷性に対し余裕が少ない点には留意が必要である。

### 3.5.4 断熱工法と柱の損傷度

すべての試験体について、加熱側柱角部における260℃を超えた部分の温度時間面積（受熱量）と柱の損傷度との関係を見ると、充てん断熱材がある場合とない場合に分かれ、それぞれ強い相関性が認められる（図 3-15）。

また、充てん断熱材の有無により柱が受ける受熱量と柱の損傷度の関係が異なる。断熱材がない方が、炭化開始後の柱の受熱量が小さくても柱の損傷が進んでおり、柱の損傷度に及ぼす影響が大きくなる。これは、充てん断熱材がないと、加熱側の被覆層裏面から柱への放射加熱により柱の損傷が進んでおり、柱の損傷に対する被覆裏面から柱への放射加熱の役割が大きいことを示している。

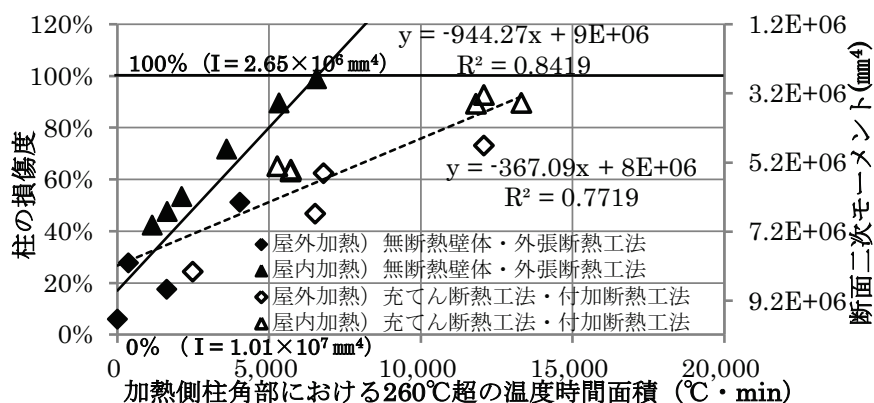


図 3-15 260℃超の温度時間面積と柱の損傷度（加熱側柱角部）

断熱工法ごとに見る（図 3-16、図 3-17）と、屋外加熱では充てん断熱工法が、45分屋内加熱では充てん断熱工法と付加断熱工法が、また 60分屋内加熱では外張断熱工法が、それぞれ柱の損傷が最も進んでいる。特に屋内加熱では、すべての断熱工法で無断熱壁体よりも柱の受熱量が増えて損傷が進んだためであり、断熱化が火災時の柱の損傷を促進させる傾向があるといえる。

### 3.5.4.1 充てん断熱工法と無断熱壁体との比較

充てん断熱工法では無断熱壁体に比べ、屋外加熱、屋内加熱ともに柱の断面二次モーメントは小さくなり、柱の損傷度は約 18~29%大きくなった（図 3-16、図 3-17）。充てん断熱材により被覆層裏面で温度が高くなり（図 3-4、図 3-5）、加熱側柱角部および柱正面の損傷が進んだが、柱側面では加熱面から離れるにつれて温度が低くなり（図 3-11）、柱の損傷も抑制された（表 3-3、表 3-4）。これにより、充てん断熱が柱

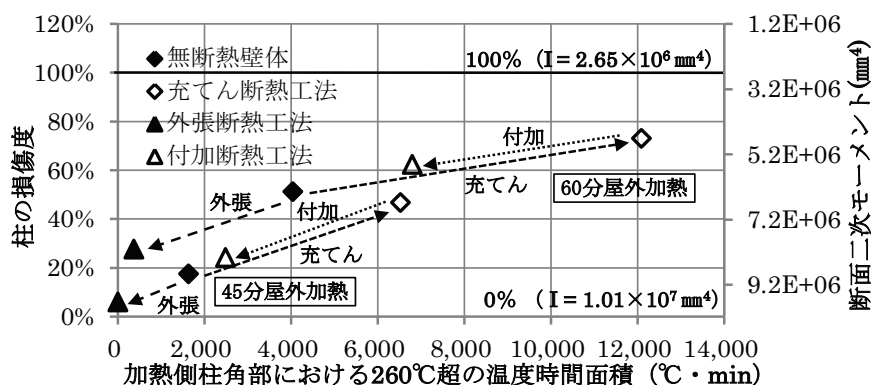


図 3-16 断熱工法ごとの 260°C超の温度時間面積と柱の損傷度（屋外加熱）

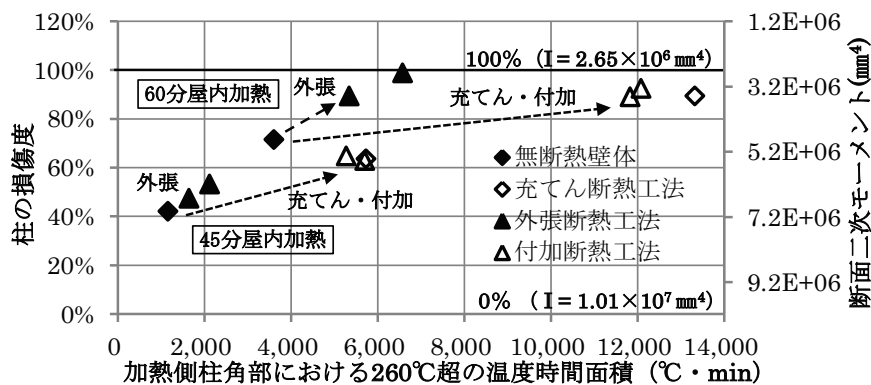


図 3-17 断熱工法ごとの 260°C超の温度時間面積と柱の損傷度（屋内加熱）

の損傷に対し不利に働く要因と有利に働く要因の両方があることが分かるが、本実験の範囲では、全体としては断熱が柱の損傷に対し不利側に働いている。

#### 3.5.4.2 外張断熱工法と無断熱壁体との比較

外張断熱工法では無断熱壁体に比べ、柱の断面二次モーメントは屋外加熱では大きく、屋内加熱では小さい(表 3-3、表 3-4、図 3-16、図 3-17)。屋外加熱では、柱の炭化は屋外側正面にほぼ限られるのに対して、屋内加熱では柱側面の炭化が無断熱壁体や他の断熱工法よりも大きく、60分加熱では特に顕著である(表 3-3、表 3-4)。屋外加熱では、外張断熱材が被覆材として中空層温度を低く保ったまま柱の損傷を抑えたが、屋内加熱では、外張断熱材が柱・中空層から非加熱側への放熱を妨げるため、柱の側面を含めて柱の受熱量を増やし、損傷を促進させることがわかる(表 3-3、表 3-4、図 3-11)。また屋内加熱時、外張断熱材厚さが柱の損傷に及ぼす影響が45分以降に顕在化し、60分加熱で顕著になるのは、加熱側被覆のせっこうボードの結晶水の放出後、中空層温度が不連続的に上昇し始めるのが約20分(図 3-4、図 3-5、図 3-11)であり、時間の経過とともに柱への入熱が大きくなるためと考えられる。

#### 3.5.4.3 付加断熱工法と充てん断熱工法との比較

付加断熱工法では、屋外加熱時、付加断熱材が充てん断熱層・柱の被覆となり柱の損傷を抑えるが、屋内加熱時は、付加断熱材の加熱側境界温度が上昇すると、付加断熱材が充てん断熱層・柱からの熱損失を抑制し、その温度をさらに上昇させると予想された。しかし本実験では、付加断熱工法は充てん断熱工法と比べ、柱の断面二次モーメントは、それから予想されるように屋外加熱では大きくなったが、屋内加熱では付加断熱材の有無、厚さに依らず同程度となった(表 3-3、表 3-4、図 3-16、図 3-17)。

屋内加熱時の柱側面温度(図 3-11)は、付加断熱材の有無、厚さに関係なく、ほぼ一致している。ロックウール断熱材 100 mmの充てん断熱層に対し、45~60分では、非加熱側の付加断熱層の断熱性能は充てん断熱層・柱の温度に特に影響を与えないことを示している。

#### 3.5.4.4 付加断熱工法と外張断熱工法との比較

外張断熱工法では、中空層は屋外加熱時には低温を保ち、屋内加熱時には急激に温度が上昇した（図 3-4、図 3-5、図 3-11）。しかし付加断熱工法では、この中空層の効果は消失する。従って、付加断熱工法は、屋外加熱時には外張断熱工法より柱の損傷に不利に働くが、屋内加熱時には柱側面の損傷に有利に働く。一方で、被覆層の裏面温度は、充てん断熱により上昇するため、不利に働くという二面性が予想される。

本実験で実施した外張（付加）断熱材厚さ 25 mm では、屋外加熱に対し、付加断熱工法の方が外張断熱工法よりも、柱の断面二次モーメントは小さくなった（表 3-3、表 3-4）。一方、第 1 章での検討では、屋外加熱に対する付加断熱工法と外張断熱工法における柱の断面欠損の差は、外張（付加）断熱材が厚くなるにつれ小さくなる傾向があり、厚さ 100 mm になると差はほとんどみられなかった。従って、屋外加熱時の柱の損傷に予想される付加断熱工法の外張断熱工法に対する不利は、外張（付加）断熱材と充てん断熱材の厚さの相対的な関係で決まり、外張（付加）断熱材が充てん断熱材と同等となれば、充てん断熱材の影響はほぼ解消すると考えられる。

屋内加熱時の柱の断面二次モーメントは、45 分加熱では付加断熱工法の方が小さくなったが、60 分加熱では、外張断熱工法の方が小さいかほぼ同程度となった（表 3-3、表 3-4）。外張断熱工法で柱側面の損傷が進まないうちは、付加断熱工法の方が、充てん断熱材により被覆層裏面で温度が高くなり（図 3-4、図 3-5）、加熱側柱角部や柱正面で柱の損傷が進む。つまり付加断熱工法の方が不利になる面が卓越する。一方、外張断熱工法で柱への入熱が大きくなり柱側面の損傷が進む段階になると、付加断熱工法では、充てん断熱材により外張断熱工法ほど柱の損傷が進まない。実験は付加断熱工法の充てん断熱材が柱の損傷を抑えて有利に働く効果が、ここでようやく顕在化することを示しているといえる（表 3-3、表 3-4、図 3-11）。

#### 3.5.5 柱の損傷度の予測可能性

これまで加熱側柱角部に着目して柱の損傷度について考察してきたが、柱の温度は実験による実測によらなければ把握が難しい。被覆層裏面の温度から柱の損傷度との関係性を明らかにできれば、一次元定常計算により被覆層裏面の温度を求めることで、柱の損傷度についてある程度の予想が可能になると考えられる。

そこで被覆層裏面における 260℃ を超えた部分の温度時間面積と柱の損傷度との関

係（図 3-18）を見ると、加熱側柱角部と柱の損傷度との関係（図 3-15）とほぼ同じ傾向がある。加熱終了時の被覆層裏面温度は、260℃を超えた部分の温度時間面積（受熱量）が大きくなるほど高くなる傾向（図 3-19）があり、柱の損傷度と加熱終了時の被覆層裏面温度の関係は、充てん断熱材の有無により異なる傾向を示すことがわかる（図 3-20）。よって、充てん断熱材の有無に応じて、加熱終了時の被覆層裏面温度から、柱の損傷度を判断できるといえる。

3.3.2 内部温度の一次元定常計算との比較より、充てん断熱材があり中空層がない場合は、一次元定常計算により、加熱終了時の被覆層裏面温度はやや高温側で予想できる見通しが得られており、柱の損傷度も同様に予測できる（図 3-21）。

なお充てん断熱材がなく中空層がある仕様では、前述のように中空層の熱収支に試

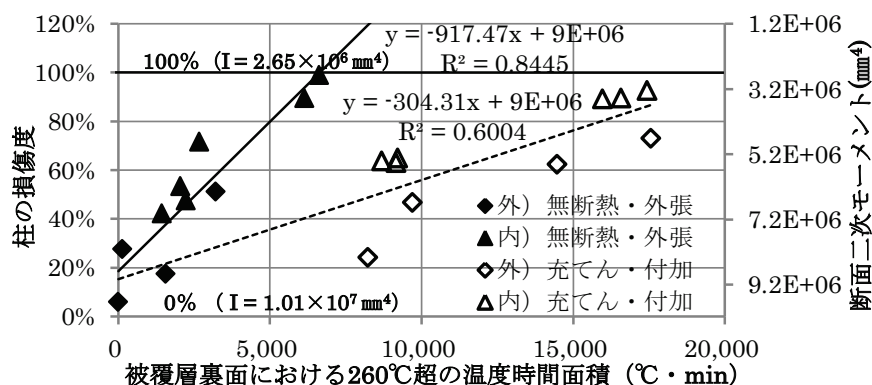


図 3-18 260℃超の温度時間面積と柱の損傷度（被覆層裏面）

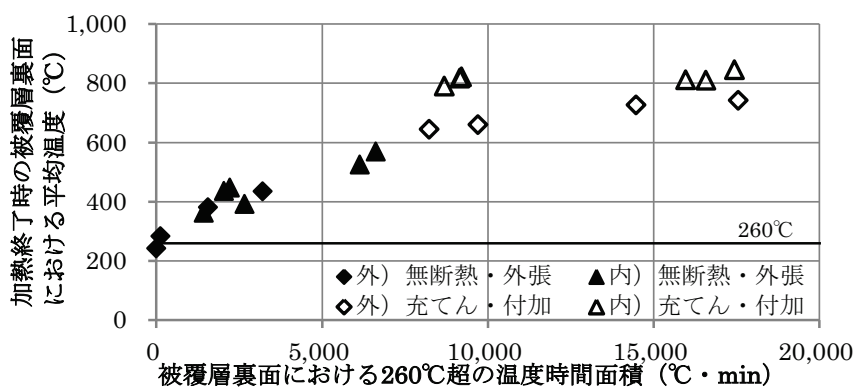


図 3-19 260℃超の温度時間面積と加熱終了時の温度（被覆層裏面）

※図 3-18～図 3-19 中にある外) は「屋外加熱」、内) は「屋内加熱」、無断熱・外張は「無断熱壁体・外張断熱工法」、充てん・付加は「充てん断熱工法・付加断熱工法」であることを示す。



験体が小型であることの影響が現れた可能性があり、柱の損傷度についても、その影響が生じている可能性を検討する必要がある。

また柱の非損傷性には、先述のように断面減少だけでなくヤング係数の温度依存性も影響するが、充てん断熱材の有無等は柱の内部温度へ影響を及ぼすので、ヤング係数の差異を引き起こすと考えられる。断熱工法により柱内部の温度分布にどのような差が生じ得るかについては、本実験で得られた柱の加熱性状に関する知見をもとに、柱内部温度測定に関する既往研究<sup>6),17)</sup>に示されている手法等を参照して、断熱工法ごとに柱内部の温度分布をあらためて実測し検討していく必要がある。今後の課題としたい。

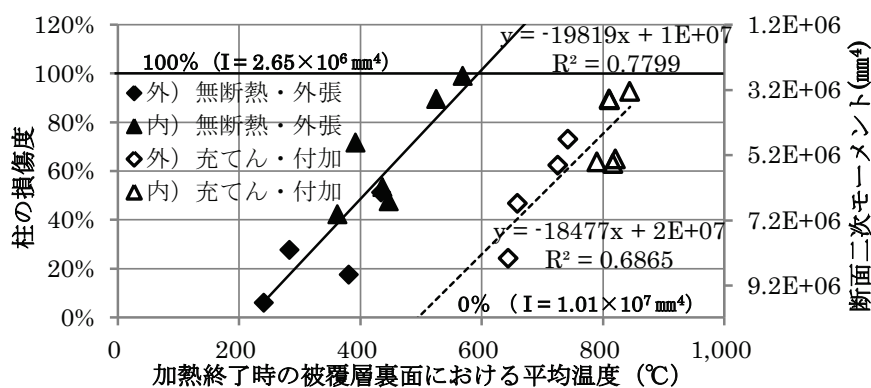


図 3-20 加熱終了時の被覆層裏面温度と柱の損傷度

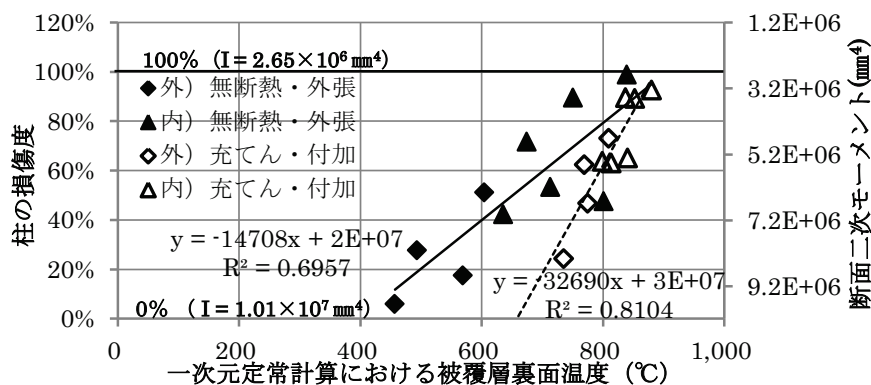


図 3-21 一次元定常計算における被覆層裏面温度と柱の損傷度

※図 3-20～図 3-21 中にある外)は「屋外加熱」、内)は「屋内加熱」、無断熱・外張は「無断熱壁体・外張断熱工法」、充てん・付加は「充てん断熱工法・付加断熱工法」であることを示す。

### 3.6 本章のまとめ

本章では、断熱材が外壁の防火性能に及ぼす影響を明らかにするにあたり、最も基本的な条件として、火災加熱中に断熱材が溶融・燃焼しないロックウール断熱材を用いた準耐火構造相当の木造外壁（軸組造）を対象に、小型試験体による加熱実験により、壁体内の断熱材の位置と厚さが、他の構成要素との関係性の中で防火性能に及ぼす影響を明らかにした。そして、一次元の定常熱伝導計算を加えて、木造外壁の層構成や断熱仕様から防火性能の優劣を予測するための知見を誘導した。

ロックウール断熱材を用いた木造外壁では、遮熱性は常温時の熱貫流抵抗を、また柱の損傷度は、充てん断熱材の有無に応じて、加熱終了時の被覆層裏面温度を比較することで、防火性能の優劣を予測できる。得られた知見と課題を 3.6.1～3.6.3 に示す。

#### 3.6.1 壁体内の温度推移と温度分布

- ・ 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（遮熱性）は、熱伝導率等の材料物性について温度依存性を考慮した一次元定常計算によりやや高温側で予測できる。
- ・ 但し、中空層がある無断熱壁体、外張断熱工法では、中空層温度が実験結果と一次元定常計算による計算値が乖離し、計算値の方が実験結果より顕著に高めとなった。この原因として、火災加熱時には中空層での自然対流が本計算の想定よりも発達して熱損失が増大した可能性があることや熱伝導計算では系外となる柱等への蓄熱の影響の可能性が考えられたが、本研究では、原因特定に至らなかった。中空層における熱伝達・熱収支の実態把握と火災加熱時における中空層の伝熱計算モデルの構築は、木造外壁の防火性能予測上、今後、取り組みが必要な重要な課題である。

#### 3.6.2 遮熱性

- ・ 断熱材の配置等の違いによる遮熱性の序列は、評価する加熱時間ごとに、常温時の熱貫流抵抗を比較することで予測できる。
- ・ 木造外壁の断熱性能（壁体の熱貫流抵抗）が 45 分準耐火外壁で  $1.70 \text{ m}^2\text{K/W}$  以上、60 分準耐火外壁で  $2.10 \text{ m}^2\text{K/W}$  以上あれば、遮熱性は十分確保できる。

### 3.6.3 柱の損傷度

- ・外壁では屋内側の被覆が熱的に薄いため、柱の損傷は、屋内加熱の方が屋外加熱より不利になる傾向がある。
- ・非損傷性評価に繋がる断熱工法ごとの柱の損傷の特徴は、次に示す充てん断熱材と外張（付加）断熱材の働きの組み合わせから説明できる。但し、充てん断熱材の有無による非損傷性の優劣は、柱の損傷度だけでは評価できず、柱内部の温度推移に基づく力学的物性の変化も考慮して検討する必要がある。
- ・充てん断熱材は、柱の損傷に対し、本研究の範囲では不利側に働いたが、被覆層裏面温度を上昇させて加熱側柱角部および柱正面の損傷を促進させて不利に働く面と柱側面の損傷を抑制して有利に働く面の二面性がある。
- ・外張（付加）断熱材は、柱の損傷に対し、屋外加熱時、柱の被覆材となり有利に働く。しかし屋内加熱時は、非加熱側への放熱を妨げて、柱の損傷を促進させるため、不利側に作用する。
- ・外張断熱工法と付加断熱工法を比較した場合、付加断熱工法の方が、外張断熱工法において柱側面の損傷が進まない段階では、充てん断熱材が加熱側柱角部や柱正面の損傷を促進させて不利に働く面が卓越するが、外張断熱工法で柱への入熱が大きくなり柱側面の損傷が進む段階になると、付加断熱工法の方が、充てん断熱材が柱の損傷を抑えて有利に働く。
- ・柱の損傷度の優劣は、充てん断熱材の有無に応じて、加熱終了時の被覆層裏面温度から判断できる。
- ・充てん断熱材があり中空層がない場合、加熱終了時の被覆層裏面温度は、一次元定常計算により予測できる。

ロックウール断熱材を用いた木造外壁については、これらの知見を用いることで、実大試験を実施する前に防火性能の見通しが予め得られると考えられる。これにより木造外壁断熱工法の防火性能に関する技術開発や性能評価を円滑に進められるようになり、実大試験への依存軽減につながると考えられる。

## 【参考文献】

- 1) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9504 人造鉱物繊維保温材，2011<sup>注 8)</sup>
- 2) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9521 住宅用人造鉱物繊維断熱材，2011<sup>注 9)</sup>
- 3) 財団法人建築環境省エネルギー機構：住宅の省エネルギー基準の解説第 3 版第 7 刷，2010.12
- 4) International Organization for Standardization：ISO 834-1 Fire resistance tests Reaction-to-fire tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements, 1999
- 5) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構：防耐火性能試験・評価業務方法書，2011.5<sup>注 10)</sup>
- 6) 安井昇，長谷見雄二，秋月通孝，馬屋原敦，大西卓，上島基英，畑俊充，木村忠紀，田村佳英，村上博：木造土壁の各部仕様が防耐火性能に及ぼす影響，日本建築学会環境系論文集，第 567 号，pp7-13，2003.5
- 7) 小幡守著：最新建築学シリーズ 3. 最新 建築構造力学 I 第 1 版第 8 刷，森北出版(株)，1994.9
- 8) 加來千紘，長谷見雄二，上川大輔，鈴木達朗，安井昇，腰原幹雄，長尾博文：含水率が火災加熱を受ける木材の力学的性能へ及ぼす影響 -多様な含水率状態におけるスギ及びケヤキの高温時ヤング係数・曲げ強度の測定-，日本建築学会構造系論文集，第 732 号，pp.299～308，2017 年 2 月
- 9) 田中俊六，武田仁，土屋喬雄，岩田利枝，寺尾道仁：最新建築環境工学 [改訂 3 版]，(株)井上書院，2009
- 10) (一社)日本建築学会：鋼構造耐火設計指針，(一社)日本建築学会，2008
- 11) 日本工業標準調査会：JIS A 9501 保温保冷工事施工基準，2014
- 12) (株)ニチアス：ロックウール MG 製品カタログ，2015  
<https://www.nichias.co.jp/products/download/PDF/I02.PDF>，(参照日 2015.8.10)
- 13) 日本工業標準調査会：JIS R 3107 板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の算定方法，1998
- 14) (一社)日本機械学会：JSME テキストシリーズ 伝熱工学，(一社)日本機械学会，2005
- 15) (一社)日本機械学会：伝熱工学資料 改訂第 3 版，(一社)日本機械学会，1975
- 16) 日本火災学会編：火災便覧第 3 版，共立出版，1997.5
- 17) 清水真理子，長谷見雄二，村上雅英，安井昇：木造真壁の耐火性能予測，日本建築学会構造系論文集，第 611 号，pp165-170，2007.1
- 18) 水上点晴：耐火試験結果を用いたバリエーションの認定に関する研究，BRI-H26 講演会テキスト 独立行政法人建築研究所講演会 日本を支える建築技術 建研の取組み－国立研究開発法人スタート－，独立行政法人建築研究所，2015.3

## 注

- 注 1) 45 分準耐火構造の場合は、内装材の仕様を平成 12 年建設省告示第 1358 号に従い、厚さ 15 mm のせっこうボードとした。
- 注 2) 60 分準耐火構造の場合は、平成 12 年建設省告示第 1380 号に従うと、内装材の仕様は厚さ 16 mm の強化せっこうボードとなるが、市場で一般に流通していないため、石膏ボード工業会が取得した国土交通大臣の認定を取得した壁体構成を参考にして、厚さ 15 mm の強化せっこうボードを用いた。
- 注 3) 柱角部および柱側面の表面付近温度を測定する熱電対は、試験体製作時に柱表面に接する状態でステーブルで固定した。実験時、柱が炭化・燃焼した後の測定値は、熱電対と柱表面との間に隙間が生じて、厳密には柱表面近傍の温度を測定している可能性がある。この点を認識した上で、本実験では、柱角部温度、柱側面温度として扱っている。
- 注 4) の損傷度が 100% となる断面二次モーメント ( $I_e = 2.65 \times 10^6 \text{ mm}^4$ ) の算出方法は、柱の有効細長比を 100 以上となる場合、次の通り、求められる。実大実験時の載荷荷重  $N$  は  $N = 1.1/3 \times 3000/\lambda^2 \times F_c \times A$  ( $\lambda$ : 柱の有効細長比、 $F_c$ : 基準強度 ( $\text{N/mm}^2$ )、 $A$ : 実験前の断面積 ( $\text{mm}^2$ )) と表され、 $N = 1.1/3 \times 3000/L^2 \times F_c \times I_o$  ( $L$ : 座屈長さ ( $\text{mm}$ )、 $I_o$ : 実験前の断面二次モーメント ( $\text{mm}^4$ )) と書ける。一方、座屈荷重  $P$  は  $P = \pi^2 EI/L^2$  ( $E$ : ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ )、 $I$ : 断面二次モーメント ( $\text{mm}^4$ )) と表される。柱の損傷が進むとともに  $I$  が小さくなると、座屈荷重  $P$  も小さくなる。そこで  $P = N$  となる  $I$  を求めると、 $I = (1.1/3 \times 3000 \times F_c \times I_o) / (\pi^2 E)$  と表され、 $I$  は  $L$  に依存しなくなる。値を代入して  $I = 1.1/3 \times 3000 \times 17.6 \times (1.013 \times 10^7) / (3.142 \times 7.5 \times 10^3) \approx 2.65 \times 10^6 (\text{mm}^4)$  が求められる。
- 注 5) 今回の 100℃ 付近での温度停滞時間は、水上<sup>18)</sup>が CLT における検討結果の中で示す実験値と比べると 1~2 分程度長くなったが、第 1 章での検討結果と合わせてみると、せっこうボードの厚さにほぼ比例して長くなっており、概ね妥当な結果であったと考えられる。

- 注 6) 計算値と実験結果が乖離した要因の考察として、計算値が加熱側面材（内外装材）の熱伝導率を過小評価しており設定値が適切ではないと仮定したが、加熱方向（屋外加熱・屋内加熱）を変えても、計算値が実験結果より中空層温度が低くなるため、この仮定は当てはまらなかった。
- 注 7) 外装被覆に対し、層ごとに温度伝導率  $\alpha$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、壁厚  $d$  ( $\text{m}$ ) から熱貫通時間  $\tau$  ( $=d^2/\alpha$ ,  $\text{s}$ ) として積算し、外装被覆の熱貫通時間を求め、加熱側柱角部の温度が  $260^\circ\text{C}$  を超える時間との関係も検討したが、熱抵抗値で検討した場合と概ね同様の傾向が得られたため、本文では熱抵抗値で議論を進めた。
- 注 8) 実験時に参照した JIS A 9504 を示す。現行の JIS A 9504 は 2017 年に改訂されている。
- 注 9) 実験時に参照した JIS A 9521 住宅用人造鉱物繊維断熱材を示す。現行の JIS 規格は JIS A 9521 建築用断熱材となり、2017 年に改訂されている。
- 注 10) 実験時に参照した防耐火性能試験・評価業務方法書を示す。現行の防耐火性能試験・評価業務方法書は、2017 年 3 月に改訂されている。

## 第4章 火災加熱により熔融する断熱材の防火性能予測に関する研究

### —グラスウール断熱材の場合

#### 4.1 本章の目的

本章では、木造外壁に用いられる断熱材が火災加熱中に熔融・収縮する場合として、グラスウール断熱材（以下、GW とする。）を取り上げ、木造外壁の防火性能への影響を実験的に考察する。

第1章での検討より、GW の熔融・収縮が防火性能に及ぼす影響は、熔融や燃焼が生じないロックウール断熱材（以下、RW とする。）の場合と比較し、その差異を GW の高温性状に基づいて考察することで把握できると考えられる。

グラスウール断熱材の熔融・収縮が防火性能に及ぼす影響を検討するにあたり、壁体内の GW は、ガラス転移点や軟化点を超えて、高い温度に曝されるほど、RW との差が顕著になると考えられる。

第2章で実施した GW の高温性状の調査では、TG-DTA 分析を行い、GW のガラス転移点は 478.0℃、軟化点は 659.4℃との測定結果を得た。

第3章で実施した RW を用いた小型試験体の加熱実験の結果(図 3-4 および図 3-5)をみると、60 分屋内側加熱（以下、60 分屋内加熱）時の充てん断熱工法および付加断熱工法の試験体で、充てん断熱材の加熱側表面温度が最も高く推移しており、その温度は約 800℃に達している。GW の断熱性能は RW とは異なるが、この実験で断熱材を GW に置き換え、仮に、GW が加熱中に熔融・収縮しなければ、断熱材部分の温度はこれと同程度まで上昇すると予想される。

そこで本章では、GW を用いた準耐火構造水準の木造外壁を対象に、基本的な断熱工法である充てん断熱工法を選び、加熱条件の中で GW と RW との違いが最も顕著になると想定される 60 分屋内加熱の条件で、GW を用いた試験体の断面構成は第3章にならって、小型試験体による実験を行う。

実験では、GW の密度をパラメータとして変化させ、RW を用いた場合との比較しながら、GW の高温性状に基づいた考察を加えて、GW を用いた木造外壁の防火性能の予測可能性を検討する。

## 4.2 断熱材の選定

試験体に用いる GW は、住宅用の充てん断熱材として一般的に流通するものとし、密度の違いに着目して 10K 品（密度 10 kg/m<sup>3</sup>の製品）、16K 品（密度 16 kg/m<sup>3</sup>の製品）、24K 品（密度 24 kg/m<sup>3</sup>の製品）の 3 つを選定した（表 4-1）。以降、これら GW を密度に応じて区別するため、それぞれ GW10K、GW16K、GW24K と称す。

表 4-1 充てん断熱材の仕様

断熱材の種類		JIS A 9521 <sup>2014</sup> <sup>1)</sup> 上の分類	製品仕様	密度 <sup>*3</sup>	熱伝導率 <sup>*3</sup>	
GW	グラスウール断熱材	グラスウール断熱材 通常品 <sup>*2</sup>	GW10-50	袋入品	10 kg/m <sup>3</sup>	0.050 W/m・K
			GW16-45	袋入品	16 kg/m <sup>3</sup>	0.045 W/m・K
			GW24-38	袋入品	24 kg/m <sup>3</sup>	0.038 W/m・K
RW <sup>*1</sup>	ロックウール断熱材	ロックウール断熱材 MA	RWMA	袋入品	32 kg/m <sup>3</sup> ～35 kg/m <sup>3</sup>	0.038 W/m・K

\*1 第 4 章では、第 3 章で検討したロックウール断熱材を用いた場合と比較して考察を進めるため、表中に第 3 章で用いたロックウール断熱材の仕様についても、あわせて明記しておく。

\*2 通常品は、標準的な製品を指す。繊維が細くして断熱性能を高めた「高性能品」と区別して、「通常品」は種類として JIS A 9521<sup>2014</sup><sup>1)</sup>に分類されている。

\*3 密度、熱伝導率は、用いた断熱材の製品としての公称値を示している。

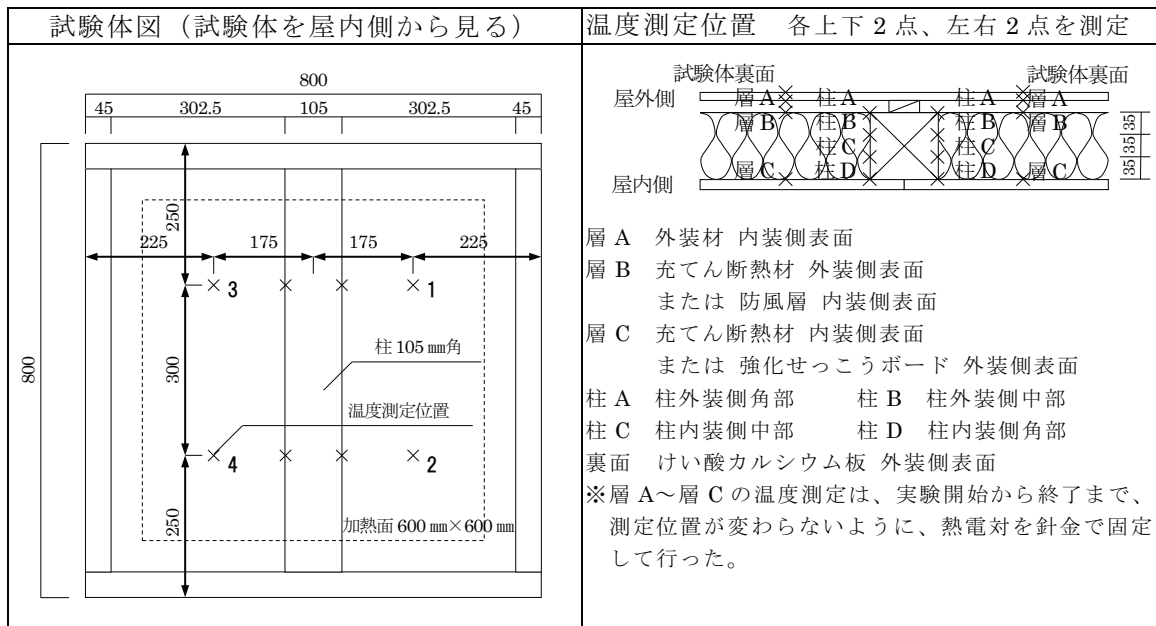
## 4.3 小型試験体による加熱実験

### 4.3.1 試験体概要

試験体概要を図 4-1 に、GW 壁体の試験体仕様を図 4-2 に示す。

断熱工法は、断熱材や柱の加熱側温度が最も高くなる充てん断熱工法（100 mm 充てん断熱壁体）の 1 種類のみを対象とした。試験体は、第 3 章の実験に用いた試験体の RW を GW に置き換え、これ以外の仕様は第 3 章の試験体に倣った。具体的には、試験体は乾式工法の木製軸組造外壁（外装材：不燃面材、内装材：強化せっこうボード）とし、各部仕様は 60 分準耐火構造外壁を想定して選定し、内装材は厚さ 15 mm の強化せっこうボード<sup>注 1)</sup>とした（図 4-1、図 4-2）。

試験体の大きさは、幅 800 mm × 高さ 800 mm（加熱面：幅 600 mm × 高さ 600 mm）とした。試験体数は、実験を実施する GW10K、GW16K、GW24K の 3 種類について、それぞれ 1 体ずつとした。



試験体の共通仕様

外装材 ※乾式工法	けい酸カルシウム板（厚さ 12 mm） ※含水率をはじめ品質が管理された製品として、「屋根葺き材の飛び火性能試験」において「基準板」として用いられるものを使用した。
通気層	厚さ 18 mm ※通気胴縁（厚さ 18 mm）を用いて、厚さを確保した。
防風層	透湿防水シート（厚さ 0.17 mm）
充てん断熱材	グラスウール断熱材（袋入り品、厚さ 100 mm） 表 4-1 に記載
防湿層	ポリエチレンシート（厚さ 0.2 mm）
内装材	強化せっこうボード 15 mm（目地処理なし・突付合わせ）
柱	スギ集成材（対称異等級構成集成材 E75-F240）
枠材・胴縁等	ホワイトウッド（輸入材）
※木材の重量含水率は 10%～15%wt の範囲とした。	
※木材以外の各種建材は含水率調整を行わず、市販品を屋内で約 1 ヶ月以上、常温で気乾させた上で用いた。	

図 4-1 試験体概要

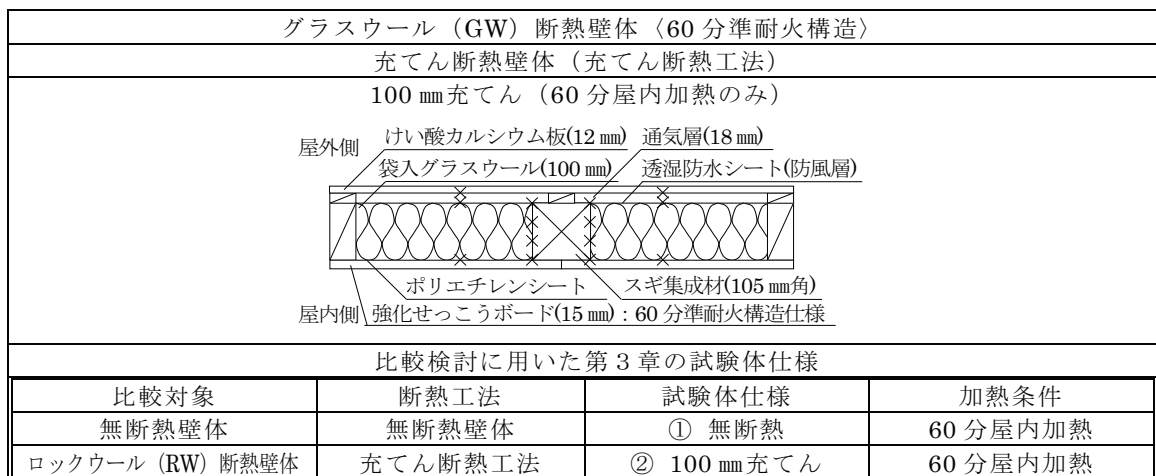


図 4-2 グラスウール（GW）断熱壁体の試験体仕様



#### 4.3.2 実験方法

加熱実験は、第3章の実験と同じ小型炉に試験体を設置して、実験方法、測定項目の条件は、いずれも第3章の実験に倣って行った。

本実験では、試験体には載荷せずに、炉内温度を試験体表面から100 mmの位置でK熱電対により測定し、ISO834<sup>2)</sup>加熱曲線に沿って加熱した。

GW壁体では、火災加熱時、屋外加熱、屋内加熱ともに、加熱側からGWの収縮・溶融が進むと想定され、さらにRW壁体の実験結果(表3-2～表3-4)より、充てん断熱工法では、屋内加熱の方が屋外加熱に比べて、遮熱性および柱の損傷は不利になると考えられる。GW壁体の性能評価を考える上で、加熱方向は屋内加熱とし、加熱時間は60分とした。実験はすべて2015年5月に実施した。

##### 4.3.2.1 遮熱性・遮炎性に関係する要因の測定

遮熱性は、準耐火構造の判定指標<sup>3)</sup>である試験体裏面温度の他、図4-1中および図4-2中に示す温度測定位置(×印)にKタイプ(CA)熱電対を設置して各構成材料の表面温度を測定した。層ごとに測定点4点の平均温度をそれぞれ求めて、壁体内部各層の温度の報告値とした。遮炎性は、非加熱側から目視により確認した。

##### 4.3.2.2 非損傷性に関係する要因の測定

非損傷性は小型試験体では直接把握できないため、標準火災加熱時の柱の加熱状況、60分加熱後の柱の損傷の程度を、第3章の実験と同じ手法(3.2.3.2参照)で分析した。すなわち、標準火災加熱時の柱の加熱状況は、柱側面の表面付近温度<sup>注2)</sup>を測定し、柱の座屈に関わる加熱終了後の柱の損傷の程度は、次の順序で定量化した。

加熱終了後、柱の炭化部を取り除いた上で、炭化による欠損が最も大きく、残存する柱の断面寸法が最も小さい部分(以下、柱の最小断面)を目視で特定した。そして、この柱の最小断面の断面積残存率(実験前の断面積を100%とした時の残存割合)と断面二次モーメントを求めた。さらに考察を進めるにあたり、3.2.3.2で定義した柱の損傷度を、3.2.3.2に示す式3-2に従って求めた。

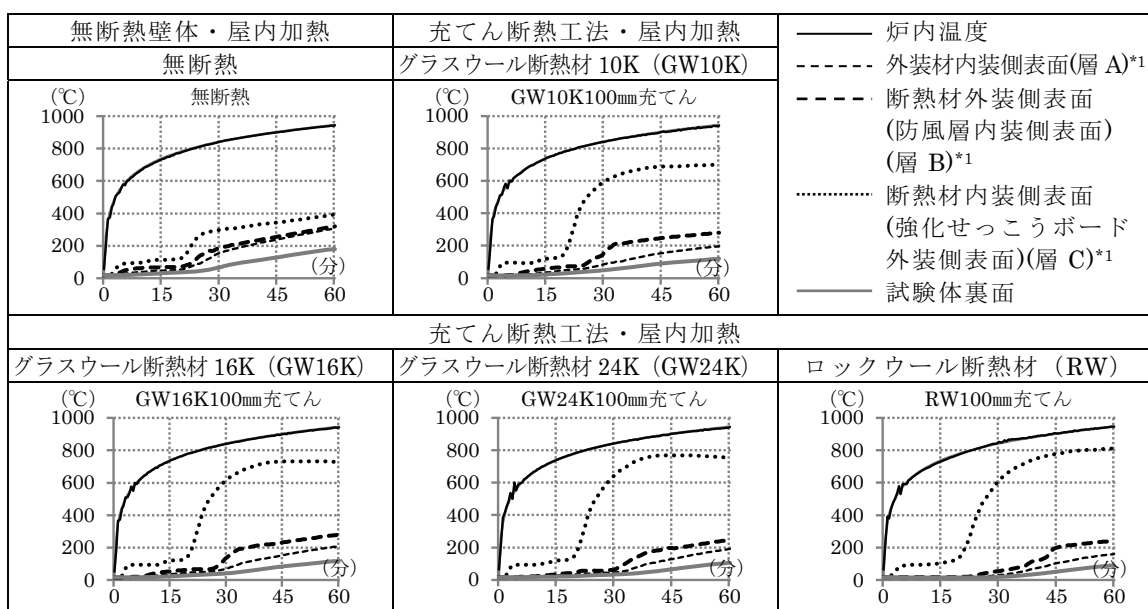
なお3.2.3.2に示した通り、木材のヤング係数は温度の影響を受けるが、本実験においても木材の内部温度を測定しておらず、材の力学的性能の温度依存性を考慮しない範囲で、断熱材の種類・加熱方向と非損傷性の関係を検討する。

## 4.4 グラスウール断熱材(GW)を用いた断熱工法外壁の防火性能

### 4.4.1 壁体内の温度推移と断熱材の挙動

GWを用いた壁体（以下、GW壁体と略す。）における60分屋内加熱時の各層の温度推移を、無断熱壁体、RWを用いた壁体（以下、RW壁体と略す。）とともに図4-3に示す。なお、本節4.4では、以降、GW壁体の実験結果に加え、比較対象である無断熱壁体とRW壁体の実験結果（3章で実施した実験結果）を併せて示していく。また実験終了時の試験体の様子を写真4-1に示す。

GW壁体の内部温度は、加熱開始後、無断熱壁体よりもRW壁体に近い温度分布で推移する（図4-3）。しかしGW壁体では、断熱材の加熱側温度が600℃付近に達する



\*1 層A～層Cの表記は、図4-1に示す温度測定位置に対応する。

図4-3 60分屋内加熱時の各層の平均温度推移（グラスウール断熱壁体）

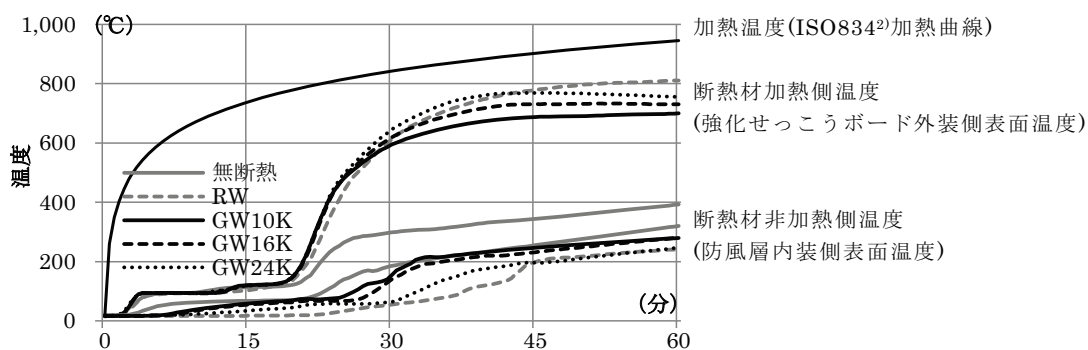


図4-4 断熱材の加熱側と非加熱側の温度推移（60分屋内加熱）

と、温度上昇が緩やかになる。一方、断熱材の非加熱側温度は、RW 壁体よりも高く推移して、断熱材の加熱側と非加熱側の温度差は RW 壁体より小さくなる（図 4-4）。





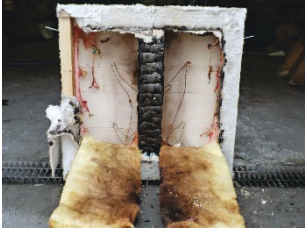
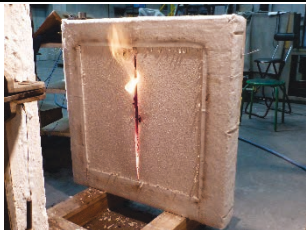







60 分屋内加熱・充てん断熱工法			
試験体	無断熱壁体	GW10K100 mm 充てん	
脱炉後 (加熱面)			/
内装材 除去後 (加熱面)			
充てん 断熱材 除去後 (加熱面)	/		
試験体	GW16K100 mm 充てん	GW24K100 mm 充てん	RW100 mm 充てん
脱炉後 (加熱面)			
内装材 除去後 (加熱面)			
充てん 断熱材 除去後 (加熱面)			

写真 4-1 脱炉時の試験体の様子（60 分屋内加熱：内装材 強化せっこうボード（15 mm））

よって、GW は温度上昇により断熱性が低下していることがわかる。この傾向は GW の密度が小さいほど、顕著に現れる。

また脱炉時の目視観察では、GW の加熱側表面において、熔融した形跡が確認されている（写真 4-1 内装材除去後の写真）。GW の加熱側表面温度がガラス転移点（478.0℃）を超えた以降に、加熱側表面の GW に熔融や収縮が生じて、その影響が、GW の加熱側表面温度において、600℃付近に達した以降の緩やかな温度上昇として現われたと考えられる。RW 壁体と GW 壁体における断熱材の加熱側および非加熱側温度の推移の差は、RW と GW の熱伝導率の違いに加えて、この GW 加熱側表面の熔融・収縮による影響が反映されたものと考えられる。

#### 4.4.2 遮熱性に関する考察

遮炎性・遮熱性に関する実験結果を表 4-2 に示す。また壁体の常温時の熱貫流抵抗と裏面温度上昇度の関係を、第 3 章で計算した RW 壁体での一次元定常計算の結果とあわせて、図 4-5 に示す。GW 壁体と RW 壁体の常温時の熱貫流抵抗が等しい場合、

表 4-2 遮炎性・遮熱性に関する実験結果（GW 壁体・60 分屋内加熱）

加熱方向	断熱工法	試験体仕様	断熱材	熱貫流抵抗*1 ( $\text{m}^2 \text{K/W}$ )	遮炎性 炎の貫通の有無	遮熱性		
						試験体裏面の温度上昇度		
						初期温度(℃)	平均(K)	最高(K)
屋内加熱	無断熱壁体	無断熱	—	0.37	なし	19	162*2	179
	充てん断熱工法	100 mm 充てん	GW10K	2.37	なし	17	103	120
			GW16K	2.59	なし	17	101	126
			GW24K	3.00	なし	18	88	89
			RW	3.00	なし	17	73	84

\*1 実験を実施した小型試験体で、木材部の熱橋を考慮せず断熱材部のみを対象に中空層や通気層は上端と下端を塞いだ空気層と見て、外装材から内装材の層構成で算出した。

\*2 加熱開始 53.5 分時の測定で遮熱性を満足しなくなった。

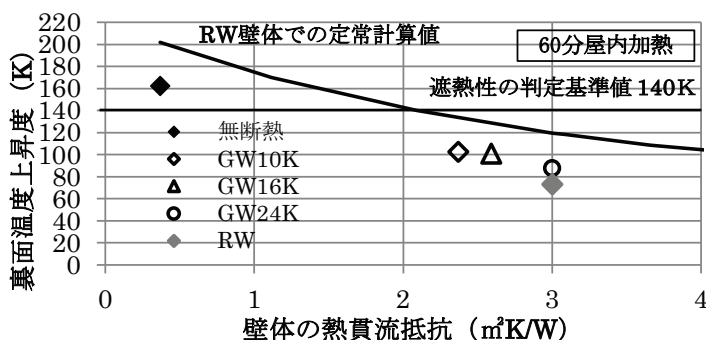


図 4-5 試験体の熱貫流抵抗と裏面温度上昇度

GW 壁体の遮熱性は、RW 壁体に比べ低くなる。GW 壁体の間で比較すると、遮熱性は GW の密度が大きく、壁体の常温時の熱貫流抵抗が大きくなるほど向上する傾向がある。よって、GW 壁体の遮熱性の優劣は、常温時の熱貫流抵抗を比較することで予測できると考えられる。

また加熱終了時、残存する断熱材の断熱性能が高いほど、断熱材の加熱側温度はより高く、断熱材より非加熱側となる試験体裏面温度はより低くなり、外壁の遮熱性が向上すると考えられる。そこで、加熱終了時における GW 壁体、RW 壁体および無断熱壁体の断熱材加熱側温度（無断熱壁体では、強化せっこうボード外装側表面温度）と裏面温度上昇度との関係を図 4-6 のように整理すると、GW 壁体は、無断熱壁体と RW 壁体を結ぶ線上に GW 密度の順に並んでいる。GW は密度が大きいほど断熱性能が高い（表 4-1）ため、GW 壁体の遮熱性は、GW の密度および GW 自体の断熱性能に応じて定まると言える。

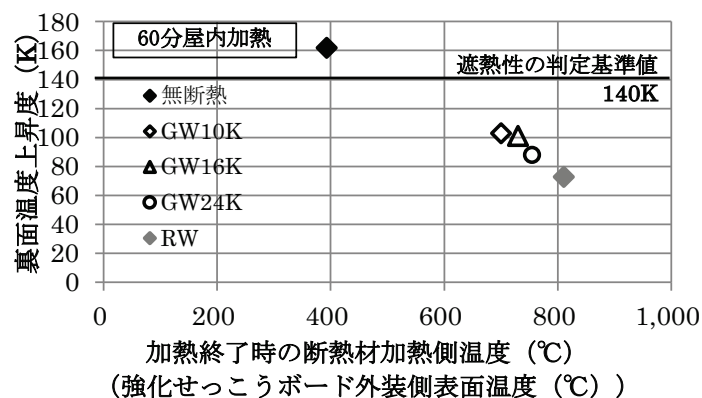



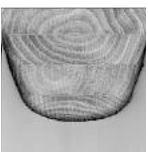
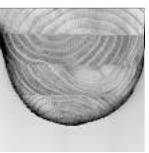


図 4-6 加熱終了時の断熱材加熱側温度（強化せっこうボード外装側表面温度）と裏面温度上昇度

#### 4.4.3 柱の損傷度に関する考察

柱最小断面の断面積残存率、断面二次モーメントおよび損傷度を表 4-4 に、60 分屋内加熱時の柱側面の平均温度推移を図 4-7 に示す。

GW 壁体の柱の損傷度は、本実験では密度に依らずほぼ同程度となったが、GW 壁体の柱の損傷は無断熱壁体より著しく進み、加熱後の柱の断面形状は RW 壁体に近い（表 4-4）。GW 壁体では、RW 壁体と同様、充てん断熱材により、被覆層（加熱面から柱の加熱側表面までの被覆）裏面にあたる断熱材の加熱側温度が高くなって、加熱側柱正面（屋内加熱時は、柱内装側角部が該当する。）および柱角部の損傷が進んだ。しかし GW 壁体の場合、RW 壁体に比べ、断熱材の加熱側温度（被覆層の裏面温度）、

表 4-4 加熱後の柱最小断面の状況（GW 壁体・60 分屋内加熱）

断熱工法		無断熱壁体	充てん断熱工法			
試験体仕様		無断熱	100 mm 充てん			
断熱材		—	GW10K	GW16K	GW24K	RW
柱断面写真	屋外側					
	屋内側					
断面積残存率		77.6%	66.6%	67.7%	68.3%	67.5%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )		4.8×10 <sup>6</sup>	3.7×10 <sup>6</sup>	3.8×10 <sup>6</sup>	3.6×10 <sup>6</sup>	3.4×10 <sup>6</sup>
柱の損傷度		71.6%	86.4%	84.8%	86.9%	89.4%

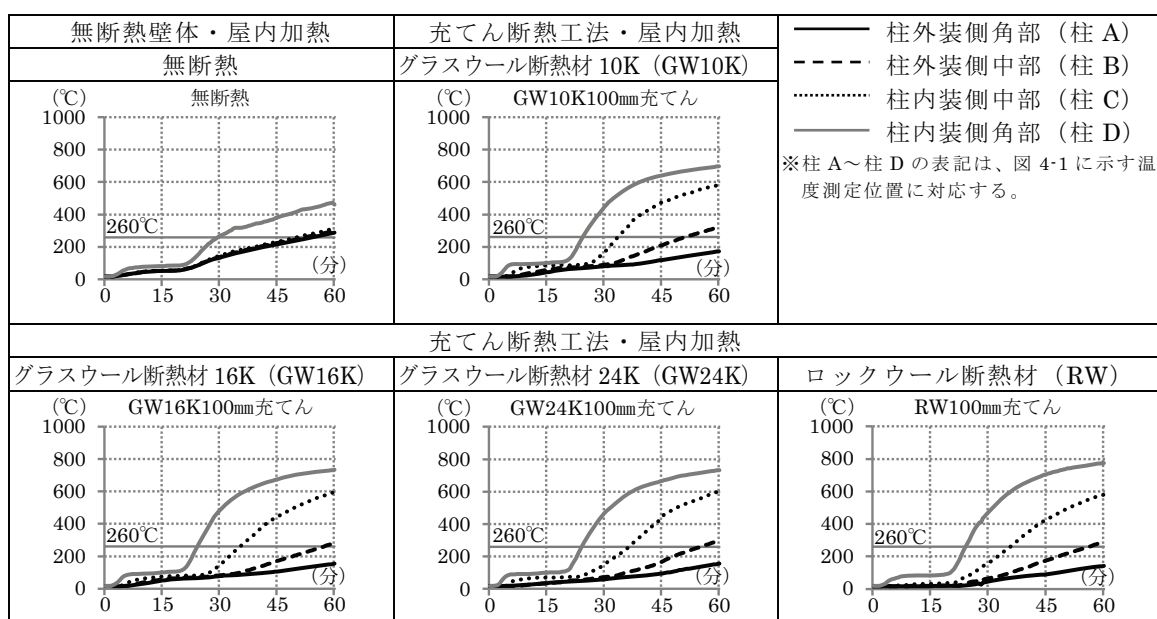


図 4-7 60 分屋内加熱時の柱側面の平均温度推移（グラスウール断熱壁体）

加熱側柱角部温度は低く推移し、加熱側柱正面および柱角部の損傷も、RW 壁体ほど進まなかった。

一方、柱側面では、GW 壁体も RW 壁体と同じく、加熱面から離れるにつれて温度が低くなっており GW の被覆効果が確認できるが、RW 壁体に比べ柱側面の損傷が進んでおり、GW の被覆効果は RW より低いと考えられる（図 4-7、表 4-4）。

従って、GW 壁体でも RW 壁体と同じく、充てん断熱が柱の損傷に対し有利に働く面と不利に働く面の二面性が確認されるが、その作用は RW 壁体ほど強く働かないと言える。

このように、充てん断熱工法において、GW と RW の間で、火災時、加熱側柱正面および柱側面の損傷に及ぼす影響が異なることは、柱の断面形状と防火性能の優劣の関係が異なる可能性があることを示しており、軸組構法と枠組壁工法の防火性能の比較にあたっては留意が必要であろう。

また加熱側柱角部における 260°C 超の温度時間面積と柱の損傷度との関係（図 4-8）を見ると、GW 壁体は、無断熱壁体と RW 壁体を結ぶ線上に位置し、GW 壁体の柱の損傷度は、RW 壁体より柱角部の受熱量が減った分、僅かに小さくなったといえる。

ここで第 3 章の RW 壁体における 3.5.5 柱の損傷度の予測可能性での検討を踏まえ、加熱側柱角部の温度ではなく、加熱終了時の被覆層裏面温度（断熱材の加熱側温度）と柱の損傷度の関係（図 4-9）を見る。

加熱終了時の被覆層裏面温度と柱の損傷度の関係においても、無断熱壁体と RW 壁体を結ぶ線上に GW 壁体が位置づけられる。GW 壁体の柱の損傷度は、RW 壁体に比

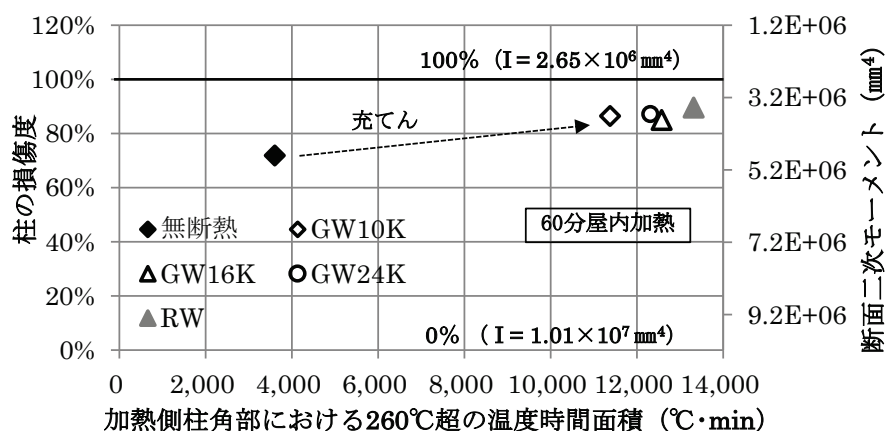


図 4-8 加熱側柱角部における 260°C 超の温度時間面積と柱の損傷度（GW 壁体）

べて、加熱終了時の被覆層裏面温度が低くなる分、小さくなるといえる。

第3章のRW壁体での検討より、加熱終了時の被覆層裏面温度は、充てん断熱材があり中空層がない場合は、一次元定常計算によりやや高温側で予想できる。そのため、GW壁体でも同様の手法を適用して、予測することが可能と考えられる。

RWおよびGWの熱伝導率、熱抵抗値はともに温度に依存する。RWの場合は、耐熱性が高く高温時であっても形状が保持できるため、熱伝導率が実測されて、第3章表3-1中に示す通り、高温時の熱伝導率の算定式がある。しかしGWの場合、JIS A 9501「保温保冷工事施工標準」<sup>4)</sup>に熱間収縮温度に至らない200℃までは、熱伝導率の算定式が示されているが、GWが溶融・収縮が生じる温度域になると、GWの熱伝導率は実測できずデータが存在しない。

GW壁体において、一次元定常計算により被覆層裏面の温度を求めて、柱の損傷度を予想できるようにするためには、GWの溶融や収縮を加味した見かけの熱貫流抵抗の値を工学的にどう設定すればよいのか、今後の検討課題となる。

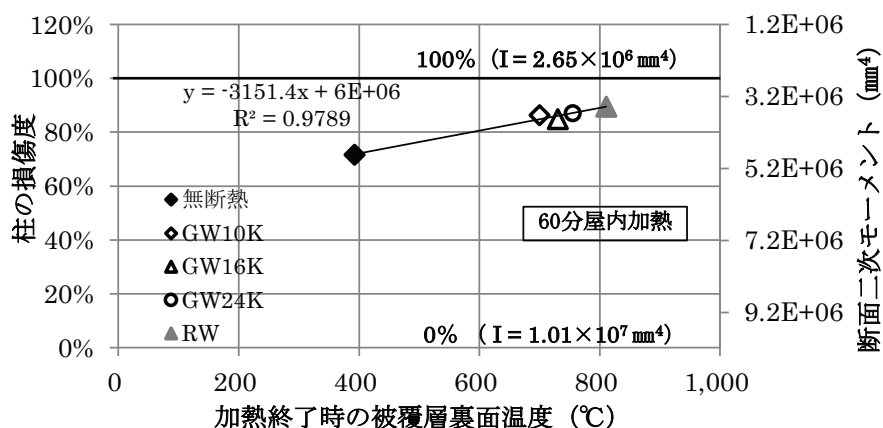


図 4-9 加熱終了時の被覆層裏面温度と柱の損傷度 (GW 壁体)



## 4.5 まとめ

本章では、グラスウール断熱材（以下、GW）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、小型試験体による加熱実験（60分屋内加熱）を行い、火災加熱中に断熱材が溶融・収縮する外壁の防火性能の特質を考察した。そして木造外壁に用いるGWの仕様から、その木造外壁の防火性能の優劣を予測するための知見を導いた。

防火性能上、最も不利となる60分屋内加熱において、充てん断熱工法のGW壁体の防火性能については、遮熱性の優劣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、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を比較することで判断できることを明らかにした。

充てん断熱工法のGW壁体について、得られた知見を次に示す。

### 4.5.1 壁体内の温度推移と温度分布

- ・GW壁体では、火災加熱を受け、GWの加熱側表面温度が600℃付近に達した以降、RW壁体よりも断熱性が低下する。
- ・GWの溶融・収縮による断熱性の低下は、GW密度が小さいほど顕著になる。

### 4.5.2 遮熱性

- ・GW壁体とRW壁体の常温時の熱貫流抵抗が等しい場合、GW壁体の遮熱性はRW壁体に比べ低くなる。
- ・GW壁体の遮熱性は、GWの密度およびGW自体の断熱性能に応じて定まり、遮熱性の優劣は常温時の熱貫流抵抗を比較することにより予測できる。

### 4.5.3 柱の損傷度

- ・GW壁体の柱の損傷度は、本実験ではGWの密度に依らずほぼ同程度となった。
- ・GW壁体では、RW壁体と同じく、充てん断熱材は、柱の損傷に対し、加熱側柱角部および柱正面の損傷を促進させて不利に働く面と柱側面の側面を抑制して有利に働く二面性があるが、その作用はRW壁体ほど強く働かない。
- ・GW壁体では、充てん断熱工法における柱の断面形状が非損傷性に及ぼす影響が、RW壁体とは異なる可能性があり、断面の異なる柱・間柱を用いる工法間で防火性

能を比較する場合には留意が必要である。

- ・ GW 壁体の柱の損傷度は、無断熱壁体と RW 壁体を結ぶ線上に位置づけられ、RW 壁体に比べて、加熱終了時の被覆層裏面温度が低い分、小さくなったといえる。
- ・ GW 壁体の柱の損傷度は、RW 壁体と同じく、加熱終了時の被覆層裏面温度より判断でき、中空層のない充てん断熱工法では、一次元定常計算より予測できると考えられる。
- ・ 一次元定常計算に用いる GW の熱抵抗値は、GW の溶融や収縮を加味した見かけの熱貫流抵抗値とする必要があり、この値を工学的にどう近似値を設定すればよいか、防火性能予測に向けた今後の検討課題となった。

これらの知見により、GW を用いた木造外壁の防火性能について、使用する GW の仕様等がどのような影響を及ぼすかを、実大試験を実施する前に予め把握できるようになる。従って、GW 壁体についても、防火性能に関する技術開発や性能評価を円滑に進められるようになり、実大試験への依存軽減につながると考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9521 建築用断熱材，2014<sup>注 3)</sup>
- 2) International Organization for Standardization：ISO 834-1 Fire resistance tests Reaction-to-fire tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements, 1999
- 3) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構：防耐火性能試験・評価業務方法書，2011.5<sup>注 4)</sup>
- 4) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9501 保温保冷工事施工標準，2014

#### 注

- 注 1) 60 分準耐火構造の場合は、平成 12 年建設省告示第 1380 号に従うと、内装材の仕様は厚さ 16 mm の強化せっこうボードとなるが、市場で一般に流通していないため、石膏ボード工業会が取得した国土交通大臣の認定を取得した壁体構成を参考にして、厚さ 15 mm の強化せっこうボードを用いた。
- 注 2) 柱角部および柱側面の表面付近温度を測定する熱電対は、試験体製作時に柱表面に接する状態でステーブルで固定した。実験時、柱が炭化・燃焼した後の測定値は、熱電対と柱表面との間に隙間が生じて、厳密には柱表面近傍の温度を測定している可能性がある。この点を認識した上で、本実験では、柱角部温度、柱側面温度として扱っている。
- 注 3) 実験時に参照した JIS A 9521 住宅用人造鉱物繊維断熱材を示す。現行の JIS 規格は JIS A 9521 建築用断熱材となり、2017 年に改訂されている。
- 注 4) 実験時に参照した防耐火性能試験・評価業務方法書を示す。現行の防耐火性能試験・評価業務方法書は、2017 年 3 月に改訂されている。

## 第5章 火災加熱により熱分解する断熱材の防火性能予測に関する研究

### —発泡プラスチック断熱材の場合

#### 5.1 本章の目的

本章では、第4章のグラスウール断熱材に引き続き、木造外壁に使われる断熱材が火災加熱中に熔融、熱分解に至る場合として、各種発泡プラスチック断熱材を用いた実験を行って、木造外壁の防火性能への影響を考察する。

第1章での検討より、木造外壁内の発泡プラスチック断熱材は、火災加熱を受けると熔融・熱分解して、その進み方が木造外壁の防火性能に支配的な影響を及ぼす。そして、これら発泡プラスチック断熱材が防火性能に及ぼす影響は、断熱材の種類ごとに、その高温性状に基づいて、断熱材の熔融や熱分解の進捗とあわせて考察を行うことで把握できる見通しが得られている。

第2章で調査した発泡プラスチック断熱材の高温性状を踏まえると、発泡プラスチック断熱材は、いずれも100℃前後の温度域までしか常温で使用している際の形状を保持できないと想定されるため、木造外壁内の断熱材は火災加熱時の比較的早い段階で熔融・熱分解して、断熱材が木造外壁の防火性能に及ぼす影響も火災加熱時の比較的早い段階から顕在化すると予想できる。

本章では、各種発泡プラスチック断熱材を用いた準耐火構造水準の木造外壁（軸組造）を対象に、比較的早い段階で起こると考えられる火災加熱時の断熱材の熔融・燃焼の影響を把握するため、加熱時間を45分間とし、試験体の断面構成を第3章、第4章に倣った充てん断熱工法の小型試験体により実験を行う。

さらに、発泡プラスチック断熱材の熔融・熱分解の特性について解明するため、小型試験体を用いた実験を追加し、次に示す検討を行う。壁体内での発泡プラスチック断熱材の熔融や熱分解の進み方、着炎燃焼の有無を、壁体内部を可視化した小型試験体を用いて直接、目視で確認する。また発泡プラスチック断熱材は、同じ物質名の断熱材であっても、密度や表面材、難燃性付与の有無等の仕様が製品ごとに異なるため、断熱材の仕様による差異が壁体の遮熱性にどの程度の影響を及ぼすのかを調べる。

これらの実験は、発泡プラスチック断熱材の種類を変えて実施し、得られた実験結果に、断熱材の高温性状、熔融・熱分解に基づいた考察を加えて、発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁断熱工法の防火性能の予測可能性を検討する。

## 5.2 断熱材の選定

試験体に用いる断熱材の仕様を表 5-1 に示す。

発泡プラスチック断熱材は、熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に分かれる。第 2 章での検討によれば、発泡プラスチック断熱材は、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂いずれも 100℃前後の温度域を超えると形状や熱的性質に不可逆的な変化が現れ、火災加熱の早い段階で溶融や熱分解が生じ始める。

熱可塑性樹脂の断熱材は、押出法ポリスチレンフォーム（以下、XPS）、ビーズ法ポリスチレンフォームおよびポリエチレンフォームが普及しているが、いずれも加熱を受けると、100℃前後<sup>1)</sup>にて溶融する。そのため、火災加熱が遮熱性に与える影響が顕在化し易いと予想される断熱材として、最も密度が大きく有機質量が多い XPS3 種 b 品を選定した。一方、熱硬化性樹脂の断熱材は、硬質ウレタンフォーム（以下、PUF）、フェノールフォーム（以下、PF）の 2 種類が普及している。PUF、PF は加熱を受けると、いずれも受熱面から樹脂の熱分解が進むが、その熱分解挙動が異なるため、PUF、PF の両方を選定した。なお、ここで選定した発泡プラスチック断熱材はすべて、住宅用断熱材として一般的に流通するものとした（表 5-1）。

表 5-1 充てん断熱材の仕様

断熱材の種類	JIS 規格上の分類*2	製品仕様	密度*5	熱伝導率*5
XPS	押出法ポリスチレンフォーム JIS A 9511 <sup>2)</sup> A 種保温板 3 種 b	3 種 b 品	37 kg/m <sup>3</sup>	0.028 W/m・K
PUF	硬質ウレタンフォーム JIS A 9511 <sup>2)</sup> A 種保温板 2 種 2 号	一般品*3 表面材:クラフト紙	30 kg/m <sup>3</sup>	0.024 W/m・K
PF	フェノールフォーム JIS A 9511 <sup>2)</sup> A 種保温板 1 種 2 号	一般品*3(密度 27K*4) 表面材:PET 不織布	27 kg/m <sup>3</sup>	0.020 W/m・K
RW*1	ロックウール断熱材 JIS A 9521 <sup>3)</sup> ロックウール断熱材 MA	袋入品	32 kg/m <sup>3</sup> ~35 kg/m <sup>3</sup>	0.038 W/m・K

\*1 第 5 章では、第 4 章に引き続き、第 3 章で検討したロックウール断熱材を用いた場合と比較して考察を進めるため、表中に第 3 章で用いたロックウール断熱材の仕様についても、あわせて明記しておく。

\*2 住宅用断熱材は 2014 年 9 月の JIS 改定により、すべて JIS A 9521<sup>3)</sup>に統合されている。  
ここでは実験実施時に合わせ、発泡プラスチック断熱材については、2014 年 9 月改定前の JIS 規格を示す。

\*3 「一般品」は製品群の中で、標準的な製品を指す。

\*4 「密度 OK」とあるのは、樹脂の密度が○kg/m<sup>3</sup>であることを示す。

\*5 密度、熱伝導率は、用いた断熱材の製品としての公称値を示している。

### 5.3 小型試験体による加熱実験

#### 5.3.1 試験体

試験体概要を図 5-1 に、発泡プラスチック断熱壁体の試験体仕様を図 5-2 に示す。

断熱工法は、第 4 章と同じく、断熱材や柱の加熱側温度が最も高くなる充てん断熱工法（100 mm 充てん断熱工法）の 1 種類のみを対象とした。試験体は、第 3 章および第 4 章と同じく乾式工法の木製軸組造外壁（外装材：不燃面材、内装材：せっこうボード）とし、試験体に用いる断熱材を各種発泡プラスチック断熱材に置き換え、45 分準耐火構造外壁を想定して内装材は厚さ 15 mm のせっこうボード<sup>注 1)</sup>とした。これ以外の仕様は第 3 章および第 4 章と同一にした（図 5-1、図 5-2）。試験体の大きさは幅 800 mm × 高さ 800 mm（加熱面：幅 600 mm × 高さ 600 mm）とした。

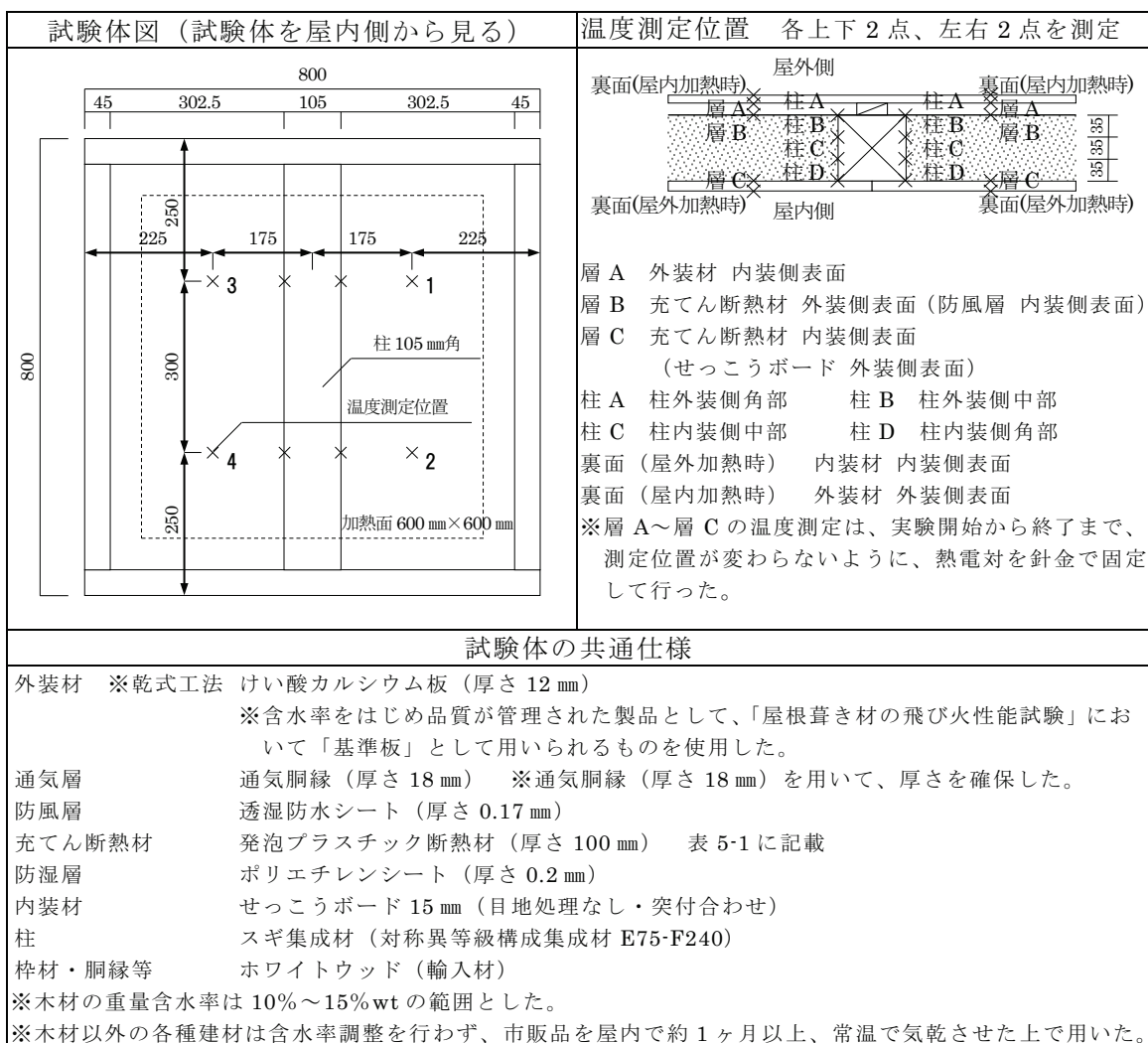


図 5-1 試験体概要

試験体数は、発泡プラスチック断熱材 XPS、PUF、PF の 3 種類について、それぞれ屋外側加熱（以下、屋外加熱と称す。）、屋内側加熱（以下、屋内加熱と称す。）の両方を実施するため 2 体ずつ作製した。試験体は、断熱材の略称に応じて断熱材ごとに、以下、XPS 壁体、PUF 壁体、PF 壁体と称す。

発泡プラスチック (XPS・PUF・PF) 断熱壁体 (45 分準耐火構造)			
充てん断熱壁体 (充てん断熱工法)			
100 mm 充てん (45 分屋外加熱・45 分屋内加熱)			
屋外側	けい酸カルシウム板(12 mm)	発泡プラスチック断熱材(100 mm)	通气層(18 mm) 透湿防水シート
屋内側	ポリエチレンシート	スギ集成材(105 mm角)	せっこうボード(15 mm): 45 分準耐火構造仕様
*断熱材が PF の場合、厚さ 100 mm の製品がなく、厚さ 50 mm の製品を 2 枚重ねて厚さ 100 mm とした。			
比較検討に用いた第 3 章の試験体仕様			
比較対象	断熱工法	試験体仕様	加熱条件
無断熱壁体	無断熱壁体	① 無断熱	45 分屋外加熱・45 分屋内加熱
ロックウール(RW)断熱壁体	充てん断熱工法	② 100 mm 充てん	45 分屋外加熱・45 分屋内加熱

図 5-2 発泡プラスチック断熱壁体の試験体仕様

### 5.3.2 実験方法

加熱実験は、第 3 章および第 4 章の実験と同じ小型炉を用いて行い、実験方法、測定項目の条件も、第 3 章および第 4 章の実験と同一にした。本実験では、試験体には載荷せずに、炉内温度を試験体表面から 100 mm の位置で K 熱電対により測定し、ISO834<sup>4)</sup>加熱曲線に沿って加熱した。

発泡プラスチック断熱材 (XPS、PUF、PF) を用いた壁体 (以下、発泡プラスチック断熱壁体) では、火災加熱時の断熱材の熔融・燃焼が比較的早い段階で起こると考えられるが、その影響を把握するために、加熱は 45 分加熱のみとし、各試験体仕様につき屋外加熱、屋内加熱の両方を行った。実験は 2012 年 4 月～11 月に実施した。

#### 5.3.2.1 遮熱性・遮炎性に関する要因の測定

遮熱性は、判定指標<sup>5)</sup>である試験体裏面温度の他、図 5-1 中に示す温度測定位置 (× 印) に K タイプ (CA) 熱電対を設置して各構成材料の表面温度を測定し、層ごとに測定点 4 点の平均温度をそれぞれ求めて、壁体内部各層の温度の報告値とした。遮炎

性は、非加熱側から目視により確認した。

#### 5.3.2.2 非損傷性に関係する要因の測定

非損傷性は小型試験体では直接把握できないため、標準火災加熱時の柱の加熱状況、加熱終了後の柱の損傷の程度を、第3章および第4章の実験と同じ手法(3.2.3.2 参照)で分析した。

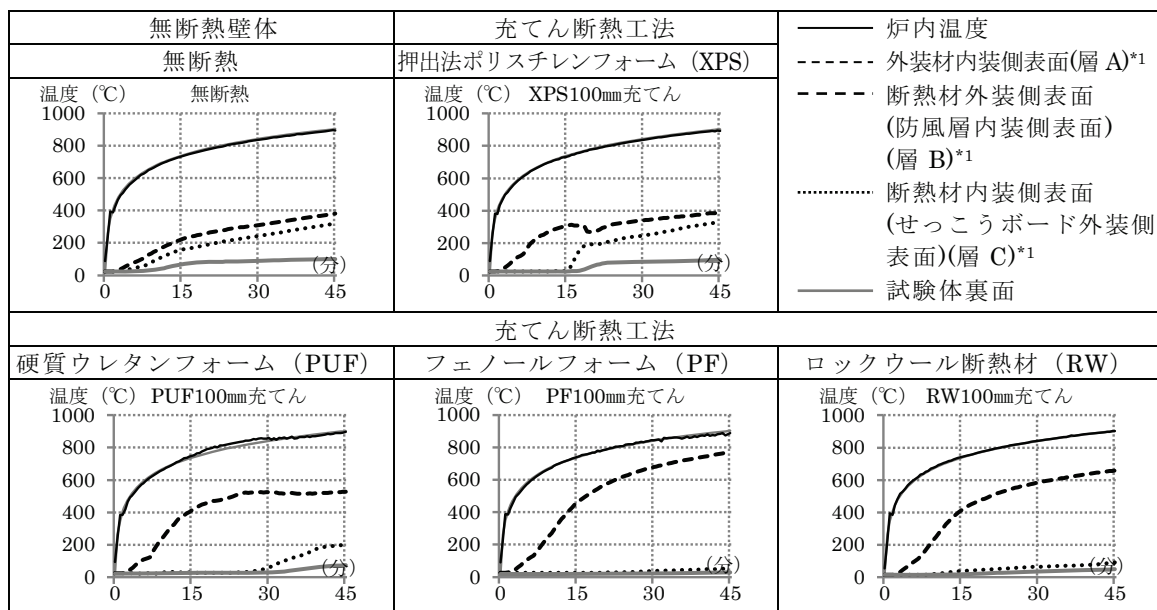
すなわち、標準火災加熱時の柱の加熱状況は、柱の柱側面の表面付近温度<sup>注3)</sup>を測定し、柱の座屈に関わる加熱終了後の柱の損傷の程度は、次の順序で定量化した。

加熱終了後、柱の炭化部を取り除いた上で、炭化による欠損が最も大きく、残存する柱の断面寸法が最も小さい部分(以下、柱の最小断面)を目視で特定した。そして、この柱の最小断面の断面積残存率(実験前の断面積を100%とした時の残存割合)と断面二次モーメントを求めた。さらに3.2.3.2で定義した柱の損傷度を、3.2.3.2に示す式3-2に従って求めた。

なお3.2.3.2および4.3.2.2に示した通り、木材のヤング係数は温度の影響を受けるが、本実験においても木材の内部温度を測定しておらず、材の力学的性能の温度依存性を考慮しない範囲で、断熱材の種類・加熱方向と非損傷性の関係を検討する。

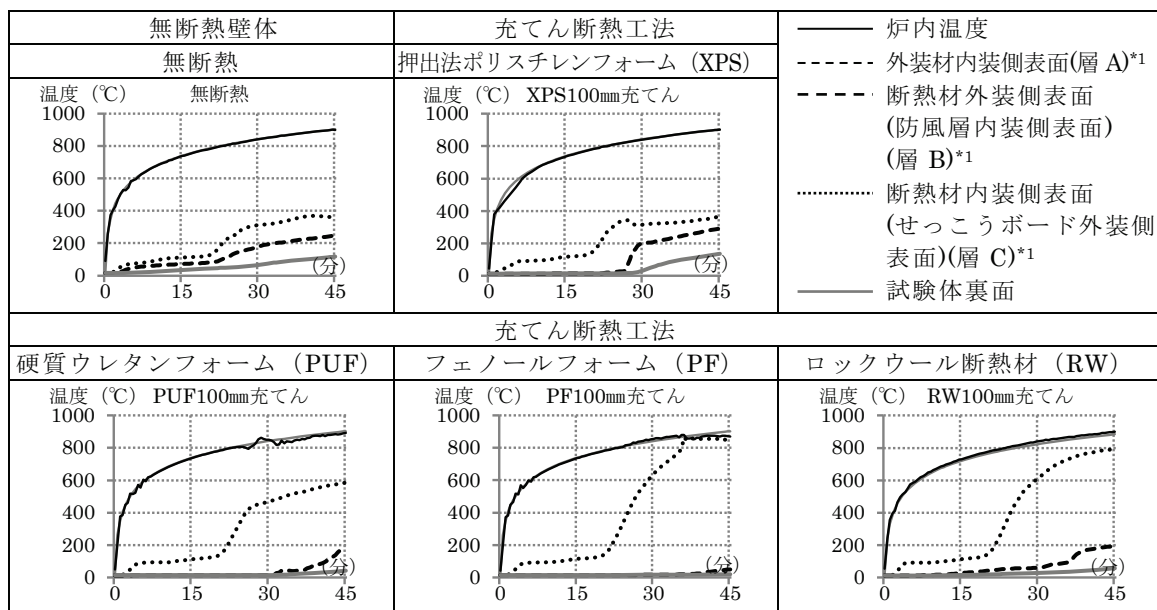
### 5.3.3 実験結果

発泡プラスチック断熱壁体（XPS 壁体、PUF 壁体、PF 壁体）における 45 分屋外加熱時および 45 分屋内加熱時の各層の温度推移を、無断熱壁体とロックウール断熱壁体（以下、RW 壁体）とあわせて、図 5-3、図 5-4 にそれぞれ示す。なお、5.3.3 お



\*1 層 A～層 C の表記は、図 4-1 に示す温度測定位置に対応する。

図 5-3 45 分屋外加熱時の各層の平均温度推移（発泡プラスチック断熱壁体）



\*1 層 A～層 C の表記は、図 4-1 に示す温度測定位置に対応する。

図 5-4 45 分屋内加熱時の各層の平均温度推移（発泡プラスチック断熱壁体）



よび次節 5.4 では、以降、発泡プラスチック断熱壁体の実験結果に加えて、比較対象として無断熱壁体と RW 壁体の実験結果（3章の実験結果）を併せて示していく。

また、実験終了時の試験体の様子を写真 5-1 および写真 5-2 に示す。

屋内加熱時の PF 壁体では、加熱開始 35 分以降にせっこうボードの脱落（図 5-4、写真 5-2）によると見られる断熱材の加熱側温度の上昇があったが、これを除くと、屋外加熱、屋内加熱ともに、すべての発泡プラスチック断熱壁体において、壁体内で












45分屋外加熱・充てん断熱工法			
試験体	無断熱壁体	XPS100 mm充てん	
脱炉後 (加熱面)			/
外装材 除去後 (加熱面)			
試験体	PUF100 mm充てん	PF100 mm(50 mm×2)充てん	RW100 mm充てん
脱炉後 (加熱面)			
外装材 除去後 (加熱面)			
充てん 断熱材 除去後 (加熱面)	/		

写真 5-1 脱炉時の試験体の様子（45分屋外加熱：外装材 けい酸カルシウム板（12 mm））

断熱材の燃焼を示すような急激な温度上昇は見られなかった。通気層を塞いで加熱する防火実験では、加熱側の内外装材の脱落がなければ、壁体内部は酸素不足の状態になると推定される。そのため、発泡プラスチック断熱材は、可燃性を有するものの、壁体内では着炎燃焼せず、加熱側の内外装材越しに加熱を受けて溶融・熱分解が進むと考えられる。

また XPS 壁体では、写真 5-2 に示す通り、屋内加熱時、樹脂から発生する熱分解ガ








45分屋内加熱・充てん断熱工法			
試験体	無断熱壁体	XPS100 mm 充てん	
脱炉後 (加熱面)			
内装材 除去後 (加熱面)			
試験体	PUF100 mm 充てん	PF100 mm (50 mm × 2) 充てん	RW100 mm 充てん
脱炉後 (加熱面)			
内装材 除去後 (加熱面)			
充てん 断熱材 除去後 (加熱面)		(欠測)	

写真 5-2 脱炉時の試験体の様子 (45分屋内加熱：内装材せっこうボード (15mm))

スが炉内へ吹き出しによって、無断熱壁体に比べて加熱側のせっこうボードが損傷しており、遮熱性が低下している。熱分解ガスの吹き出しによる内装材の損傷については防火性能評価上、留意しておく必要がある。

## 5.4 発泡プラスチック断熱材を用いた断熱工法外壁の防火性能

### 5.4.1 壁体内の温度推移と断熱材の挙動

#### 5.4.1.1 断熱材種類ごとの各層温度推移の比較

発泡プラスチック断熱壁体の屋外加熱時の内部温度を図 5-5 に、屋内加熱時の内部温度を図 5-6 に示す。

屋外加熱（図 5-5）では、加熱開始直後、発泡プラスチック断熱壁体の内部温度は、RW 壁体に近い状態で推移する。その後、XPS 壁体では、加熱開始約 10 分頃から断熱材の加熱側温度の上昇が緩やかになり、加熱開始 15 分頃から断熱材の非加熱側温度が急激に上昇する。また PUF 壁体においても、加熱開始約 20 分頃から断熱材加熱側の温度上昇が緩やかになり、加熱開始 30 分頃から断熱材の非加熱側温度が上昇している。XPS 壁体、PUF 壁体では、この過程で XPS の熔融、PUF の熱分解が断熱材の非加熱側に達して、断熱性が大きく低下したとみられる。

PF 壁体では、RW より高い断熱性を示し、加熱終了まで、XPS 壁体や PUF 壁体で見られた断熱性の大きな低下は見られなかった（図 5-5）。本実験では PF の厚さが 100

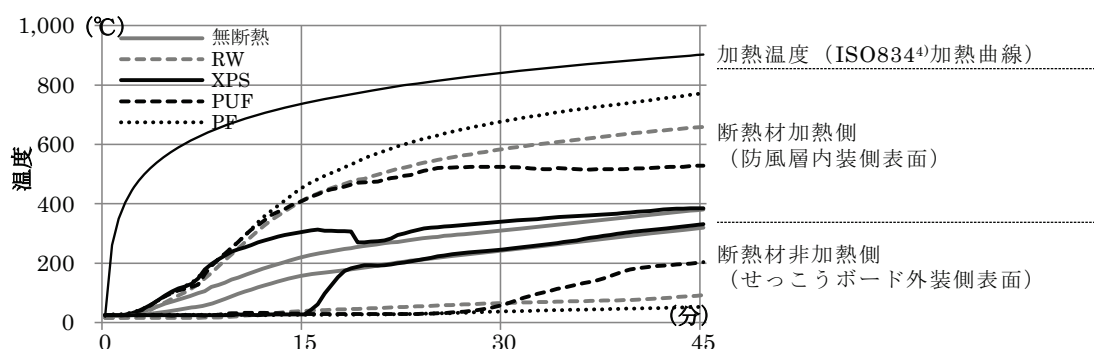


図 5-5 断熱材の加熱側温度と非加熱側温度の推移（屋外加熱）

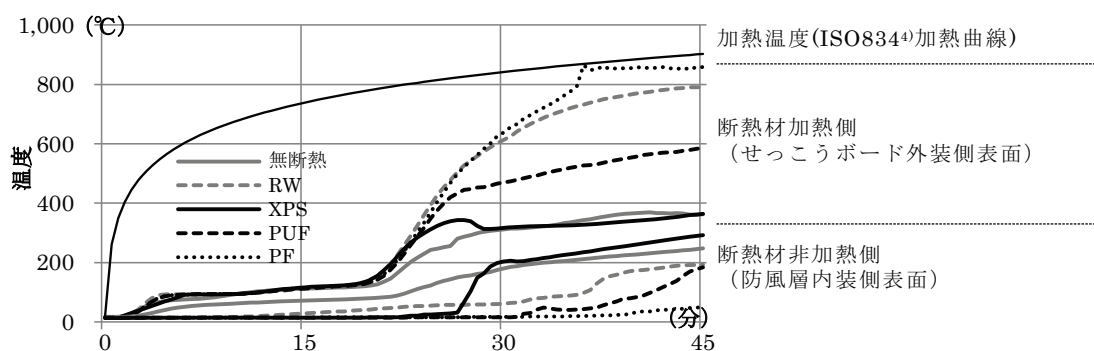


図 5-6 断熱材の加熱側温度と非加熱側温度の推移（屋内加熱）

mmと厚く、45分加熱では、PFの熱分解は進行しても、断熱材の非加熱側まで達しなかったと考えられる。

一方、屋内加熱（図5-6）では、すべての試験体において、断熱材の加熱側温度（無断熱壁体ではせっこうボード非加熱側表面温度）が100℃付近になると温度停滞が生じ、加熱開始20分頃までせっこうボードより非加熱側に位置する各層の温度上昇が抑制された。しかし温度停滞が終わった以降は、屋外加熱時と同じく、XPS壁体の方が、PUF壁体より早く断熱性が低下した。またPF壁体でも、屋外加熱時と同じく、RW壁体よりも高い断熱性を示し、加熱終了まで壁体の断熱性に大きな低下は見られなかった。

以上より、発泡プラスチック断熱壁体では、火災加熱を受けると、断熱材の熔融・熱分解が起こる。この熔融、熱分解の進行に伴い、断熱材の温度上昇が鈍くなり、最終的に断熱材の非加熱側に到達すれば、断熱材非加熱側の温度が上昇して壁体の断熱性が大きく低下する傾向が得られた。

すなわち、発泡プラスチック断熱壁体では、断熱材の種類による各層温度推移の違いは、断熱材の熔融・熱分解の進み方とその進捗に依存し、45分の火災加熱時間内で、断熱材の熔融・熱分解が、断熱材の非加熱側に到達して壁体の断熱性が大きく低下するか否か、また低下する場合はその所要時間の違いによって現れるといえる。

#### 5.4.1.2 熱可塑性樹脂（XPS）の壁体内の挙動に関する考察

XPSは加熱を受けると熔融するが、ガラス転移点に達するまでは、少なくともXPSは形状を保持していたと考えられる。

2.2.2.2.1で測定したXPSのガラス転移点は、108.8℃であった。ここでXPS壁体において、XPSの熔融が、XPSの加熱側温度がガラス転移温度に達した時点から始まり、XPSの非加熱側温度がガラス転移温度に達した時点で非加熱側に達したと仮定する。図5-5、図5-6より、屋外加熱では、厚さ100mmのXPSが加熱開始4.5分に熔融し始めてから、13.5分間でXPSの非加熱側に達したことになり、屋内加熱では加熱開始13.5分にXPSの熔融が始まってから14.5分間でXPSの非加熱側に達することになる。

XPSの熔融がXPSの非加熱側に達した以降は、XPS壁体の内部温度は無断熱壁体に近い推移を示している（図5-5、図5-6）。そこで、3.3.2図3-7に示す無断熱壁体に

における 45 分加熱終了時の壁体内各層温度（実験値、一次元定常熱伝導計算値）に、XPS 壁体における 45 分加熱終了時の壁体内各層温度（実験値）を重ねると図 5-7 になる。

図 5-7 より、防火性能評価の対象となる 45 分時点では、XPS 壁体の各層温度は、無断熱壁体（実験値）とほぼ一致しており、XPS 断熱層が加熱終了時の温度分布に及ぼす影響は消失しているとみられる。よって、準耐火構造程度の防火性能の外壁を想定する限りでは、XPS 壁体は近似的に無断熱壁体とみなして差し支えない。

また 45 分加熱終了時の XPS 壁体の温度分布は、無断熱壁体の実験値とほぼ一致している（図 5-7）。そのため、第 3 章で確認されたように、無断熱壁体における中空層温度の一次元定常熱伝導計算（以下、一次元定常計算）による計算値と実験値との乖離は、XPS 壁体においても解消されず、存在する。

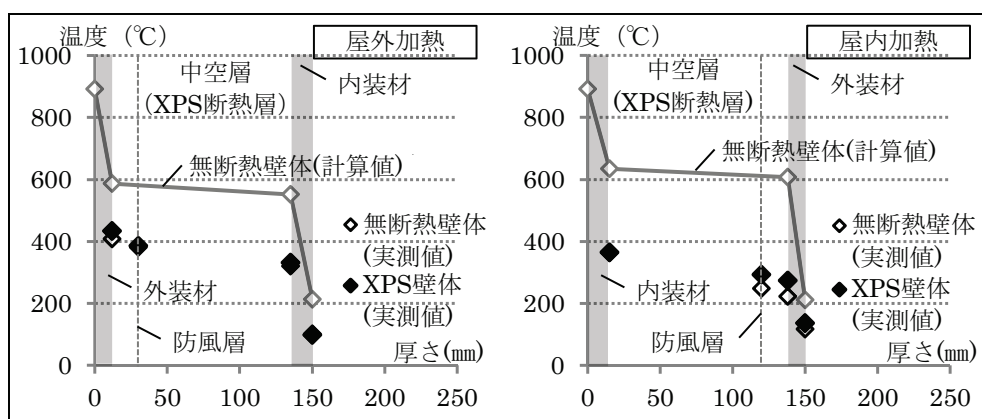


図 5-7 無断熱壁体・XPS 壁体の各層温度（実験結果と計算値）

#### 5.4.1.3 熱硬化性樹脂（PUF、PF）の壁体内の挙動に関する考察

5.3.3 実験結果より、熱硬化性樹脂（PUF、PF）は加熱を受けると、加熱面から順次、熱分解が進む。この樹脂（PUF、PF）の熱分解は、PFの方がPUFより緩やかで、PUF壁体では火災加熱時間内に断熱材の非加熱側に達したが、PF壁体では達しなかった。

小型実験では、加熱側の被覆材（内外装材）が保持されているため、断熱材が配置される壁体内部は酸素不足となり、断熱材の質量減少の様態は、窒素雰囲気下のTG-DTA分析に近いと考えられる。2.2.2.2.2で実施した窒素雰囲気下のTG-DTA分析結果では、PFの方がPUFに比べ、樹脂の熱分解が進みにくいとの結果が得られて

おり、本実験において、PF の熱分解の方が、PUF の熱分解より緩やかに進んだ点と合致する。

今後、データを積み重ね検証する必要があるが、火災加熱時における壁体内の熱硬化性樹脂の熱分解挙動（断熱材の熱分解のしやすさや炭化物等の残渣量）は、窒素雰囲気下の TG-DTA 分析により相対的に把握できると考えられる。

## 5.4.2 遮熱性に関する考察

### 5.4.2.1 遮熱性と熱貫流抵抗との関係性

発泡プラスチック壁体における遮炎性・遮熱性に関する実験結果を表 5-5 に示す。

45 分加熱では、すべての試験体で遮炎性、遮熱性を満足した。壁体の常温時の熱貫流抵抗と裏面温度上昇度の関係を、第 3 章で示した一次元定常計算の結果とあわせて図 5-8 に示す。

PF 壁体は熱貫流抵抗が最も大きく、加熱終了後の裏面温度上昇度が最も小さい。常温時の熱貫流抵抗と裏面温度上昇度の関係（図 5-8）をみると、PF 壁体は、無断熱壁体と RW 壁体を結ぶ延長線上にある。つまり PF と同じ熱抵抗を持つ RW を仮定した場合、その壁体の遮熱性は PF 壁体とほぼ同程度になると推定される。PF 壁体では、本実験で設定した断熱材厚さ 100 mm のように、PF が十分に厚く高い断熱性能を有す

表 5-5 遮炎性・遮熱性に関する実験結果（発泡プラスチック断熱壁体・45 分加熱）

加熱方向	断熱工法	試験体仕様	断熱材	熱貫流抵抗*1 ( $\text{m}^2 \text{K/W}$ )	遮炎性 炎の貫通の有無	遮熱性		
						試験体裏面の温度上昇度		
						初期温度( $^{\circ}\text{C}$ )	平均(K)	最高(K)
屋外加熱	無断熱壁体	無断熱	—	0.38	なし	23	78	80
	充てん断熱工法	100 mm 充てん	XPS	3.95	なし	25	73	75
			PUF	4.54	なし	24	51	55
			PF	5.38	なし	19	10	19
			RW	3.01	なし	16	34	39
屋内加熱	無断熱壁体	無断熱	—	0.38	なし	17	100	114
	充てん断熱工法	100 mm 充てん	XPS	3.95	なし	14	122	143
			PUF	4.54	なし	15	27	37
			PF	5.38	なし	15	6	8
			RW	3.01	なし	13	45	59

\*1 実験を実施した小型試験体で、木材部の熱橋を考慮せず、断熱材部のみを対象に、中空層や通気層は上端と下端を塞いだ空気層と見なし、外装材から内装材の層構成で算出した。

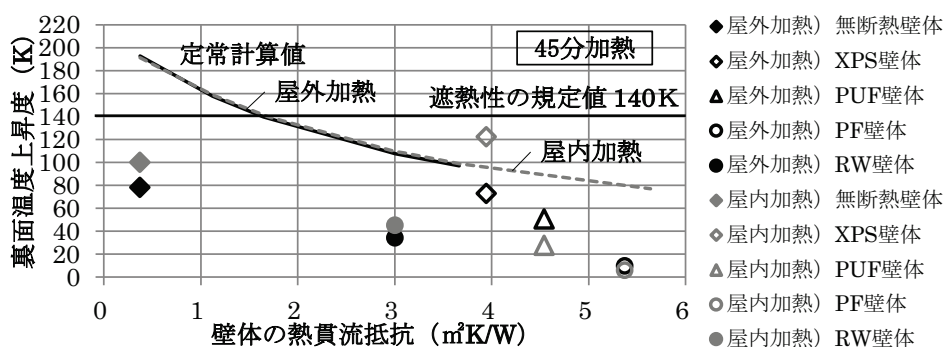


図 5-8 試験体の熱貫流抵抗と裏面温度上昇度



る場合、断熱材の熱分解による遮熱性への影響は無視できるほど小さく、断熱材が厚い PF 壁体は熱貫流抵抗に応じた遮熱性を示していると言える。

一方、PUF 壁体、XPS 壁体では、常温時の熱貫流抵抗が大きくても、断熱材の溶融、熱分解により壁体の断熱性が大きく低下するため、裏面温度上昇度は高くなった（図 5-8）。特に XPS 壁体では、XPS の溶融後は、ほぼ無断熱壁体と同じ挙動を示すため、XPS 壁体の遮熱性は無断熱壁体と同程度となる。

#### 5.4.2.2 屋外加熱と屋内加熱の比較

第 3 章で検討した無断熱壁体、RW 壁体では、同じ壁体構成であっても、試験体裏面温度の経過は加熱方向により異なった。そこで発泡プラスチック断熱壁体について加熱方向による裏面温度の経過を比較する。断熱材種類ごとに屋外加熱、屋内加熱における試験体裏面温度の推移を図 5-9 に示す。

屋外加熱、屋内加熱ともに、発泡プラスチック断熱壁体では、断熱材の溶融・熱分解が進んでも、断熱材の非加熱側まで届かず壁体の断熱性が維持される間は、試験体裏面温度は上昇せず RW 壁体よりも低く抑えられる。この要因としては、発泡プラスチック断熱材の熱分解が吸熱反応となって裏面温度の上昇を抑制した可能性や、多孔

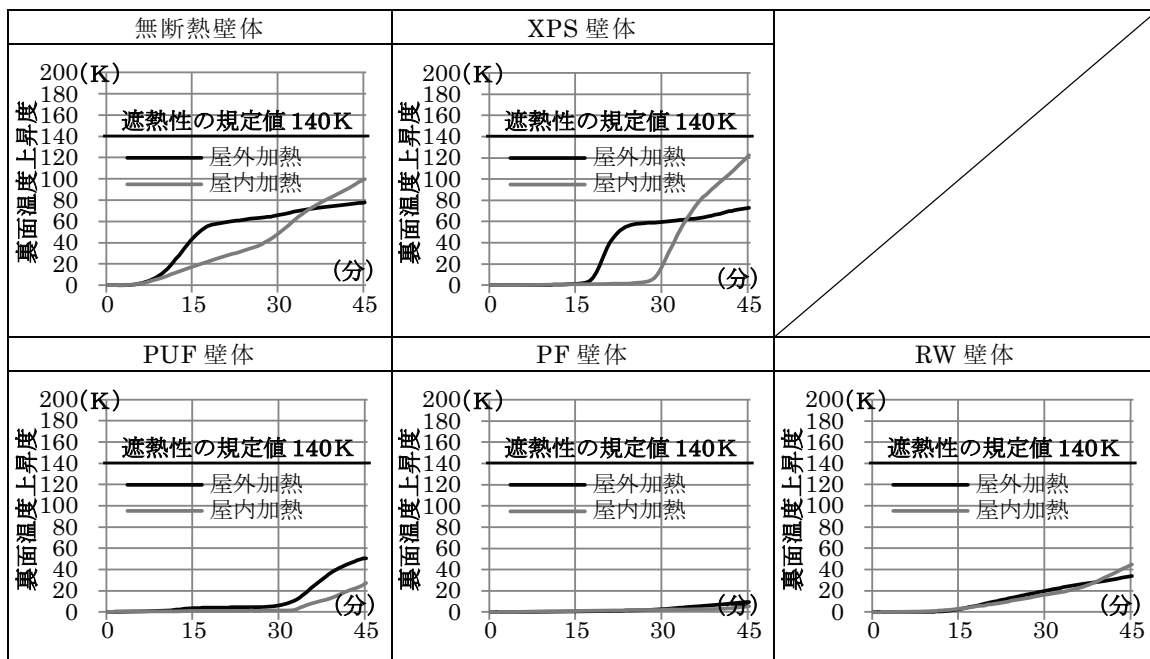


図 5-9 断熱材種類ごとの裏面温度上昇度（平均）の推移

質である RW に対し、発泡プラスチック断熱材は熱分解が起こらない 100°C までの低温域であれば断熱性が高く、またボード状で気密性が高いため非加熱側への通気を抑えて、裏面温度の上昇を抑制した可能性が考えられる。

3.4.3 の RW 壁体における屋外加熱と屋内加熱との比較で述べた通り、本仕様のよりにせっこうボードを含む壁体では、せっこうボードが結晶水を放出する間は加熱側への熱貫流が抑制されるが、さらに高温となるとせっこうボードの熱伝導率が上昇して非加熱側への熱貫流を援ける。

発泡プラスチック断熱壁体の場合は、このせっこうボードの作用に加えて、断熱材の熔融・熱分解による影響が加わる。断熱材の熔融・熱分解が断熱材の非加熱側まで達せず、壁体の断熱性が維持される間は熱貫流を抑制するが、断熱材の熔融・熱分解が断熱材の非加熱側に達して、壁体の断熱性が大きく低下した後は、残存する壁体の断熱性能に応じて熱貫流が進む。

遮熱性は、このせっこうボードと発泡プラスチック断熱材の作用の重ね合わせにより、加熱時の温度と加熱時間によって有利にも不利にも働く。その結果、XPS 壁体では屋外加熱の方が、PUF 壁体、PF 壁体では屋内加熱の方が、それぞれ遮熱性が高くなったと考えられる。

### 5.4.2.3 遮熱性の予測可能性に向けた考察

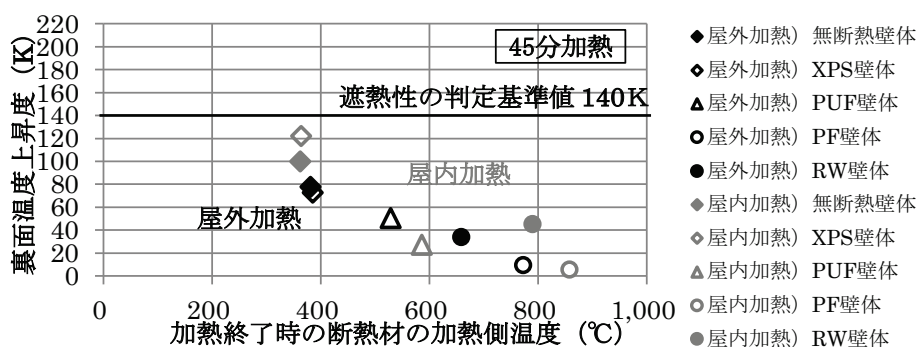
発泡プラスチック断熱壁体では、断熱材の溶融・熱分解の進行により壁体の断熱性が低下すると、断熱材加熱側温度は低くなる一方、試験体裏面温度は高くなって、遮熱性が低下すると想定される。

そこで、45分加熱終了時における発泡プラスチック断熱壁体の断熱材加熱側温度と裏面温度上昇度の関係を図 5-10 に示す。加熱終了時の断熱材加熱側温度が低いほど、裏面温度上昇度は高くなり、遮熱性が低くなる傾向が確認された。発泡プラスチック断熱壁体（XPS 壁体、PUF 壁体、PF 壁体）の遮熱性は、断熱材の断熱性能と溶融・熱分解による断熱性の低下度に応じて定まると言える。

PF 壁体では、本実験のように、PF が十分に厚く、断熱性能に対し熱分解により生じる断熱性の低下を無視できる場合、PF 壁体の熱貫流抵抗に応じた遮熱性を示していると言える。PF の熱伝導率を用いて、PF 壁体の常温時の熱貫流抵抗を求めて比較することで、PF 壁体の遮熱性の優劣を予測できる。

XPS 壁体では、5.4.1.2 の熱可塑性樹脂（XPS）に関する考察より、準耐火構造程度の防火性能の外壁の遮熱性を評価する上では、近似的に無断熱壁体と捉えてよいと考えられる。

PUF 壁体では、PUF の熱分解による断熱性の低下度と遮熱性との関係性を定量的に捉えることができず、これ以上の考察はできなかった。この点は、PF 壁体においても、PF の厚さが薄く、熱分解により生じる断熱性の低下が無視できない場合にも同様にあてはまる。



※無断熱壁体における「加熱終了時の断熱材加熱側温度」は、屋外加熱時は「防風層内装側表面温度」を、屋内加熱時は「せっこうボード外装側表面温度」を指す。

図 5-10 加熱終了時の断熱材加熱側温度と裏面温度上昇度

### 5.4.3 柱の損傷度に関する考察

#### 5.4.3.1 柱の損傷度と内部温度推移との関係性

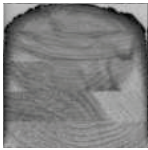
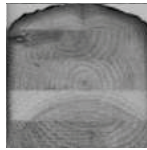
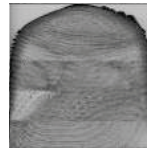
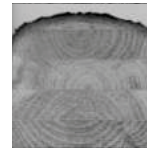
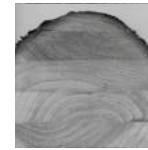
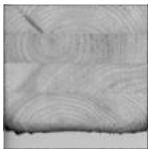
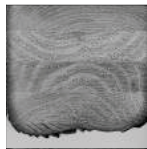
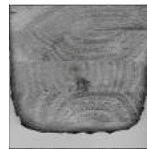
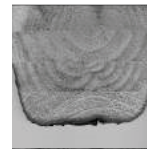
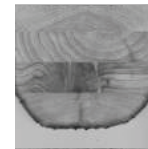
発泡プラスチック断熱壁体における柱の最小断面の断面積残存率、断面二次モーメントおよび損傷度を表 5-6 に、45 分屋外加熱時および 45 分屋内加熱時の柱側面の平均温度推移を、図 5-11、図 5-12 にそれぞれ示す。

発泡プラスチック断熱壁体では、いずれも無断熱壁体より柱の損傷が進み、断熱材の種類ごとに柱の断面形状が異なる。

XPS 壁体では、屋内加熱時、せっこうボードが損傷した分、無断熱壁体に比べて加熱側柱角部の損傷が進んだとみられる（写真 5-2、表 5-6）が、屋外加熱、屋内加熱ともに、柱側面の温度推移（図 5-11、図 5-12）は無断熱壁体に近く、柱の損傷度を評価する上では、近似的に無断熱壁体と捉えて良いと考えられる。

PUF 壁体では、RW 壁体に比べ、屋外加熱、屋内加熱ともに、加熱側柱角部および柱正面の損傷は抑えられたが、柱側面の損傷は進んだ。PUF 壁体では、RW 壁体に比

表 5-6 加熱後の柱の最小断面の状況（発泡プラスチック断熱壁体・45 分加熱）

加熱面		屋外加熱				
断熱工法		無断熱壁体	充てん断熱工法			
試験体仕様		無断熱	100 mm 充てん			
断熱材		—	XPS	PUF	PF	RW
屋外側	45 分 加熱					
柱断面写真 屋内側						
断面積残存率		94.7%	94.6%	89.4%	88.5%	85.2%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )		$8.8 \times 10^6$	$8.7 \times 10^6$	$7.8 \times 10^6$	$7.1 \times 10^6$	$6.6 \times 10^6$
柱の損傷度		17.5%	18.7%	30.8%	40.2%	46.6%
加熱面		屋内加熱				
断熱工法		無断熱壁体	充てん断熱工法			
試験体仕様		無断熱	100 mm 充てん			
断熱材		—	XPS	PUF	PF	RW
屋外側	45 分 加熱					
柱断面写真 屋内側						
断面積残存率		88.3%	86.3%	82.3%	77.6%	79.3%
断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )		$7.0 \times 10^6$	$6.6 \times 10^6$	$6.2 \times 10^6$	$5.1 \times 10^6$	$5.4 \times 10^6$
柱の損傷度		42.2%	46.9%	53.2%	67.2%	63.7%

べ、加熱側柱角部（屋外加熱では柱外装側角部、屋内加熱では柱内装側角部が該当。）の温度上昇が、壁体の断熱性が大きく低下した以降、緩やかになったため、加熱側柱角部および柱正面の損傷が進まなかった。一方、柱側面では、PUFの熱分解が加熱側から順に進むことで、被覆される面積が徐々に減ったため、柱側面の損傷が進んだ。

PF壁体では、PFの熱分解の進行はPUFより緩やかで、かつPFの断熱性能はRW

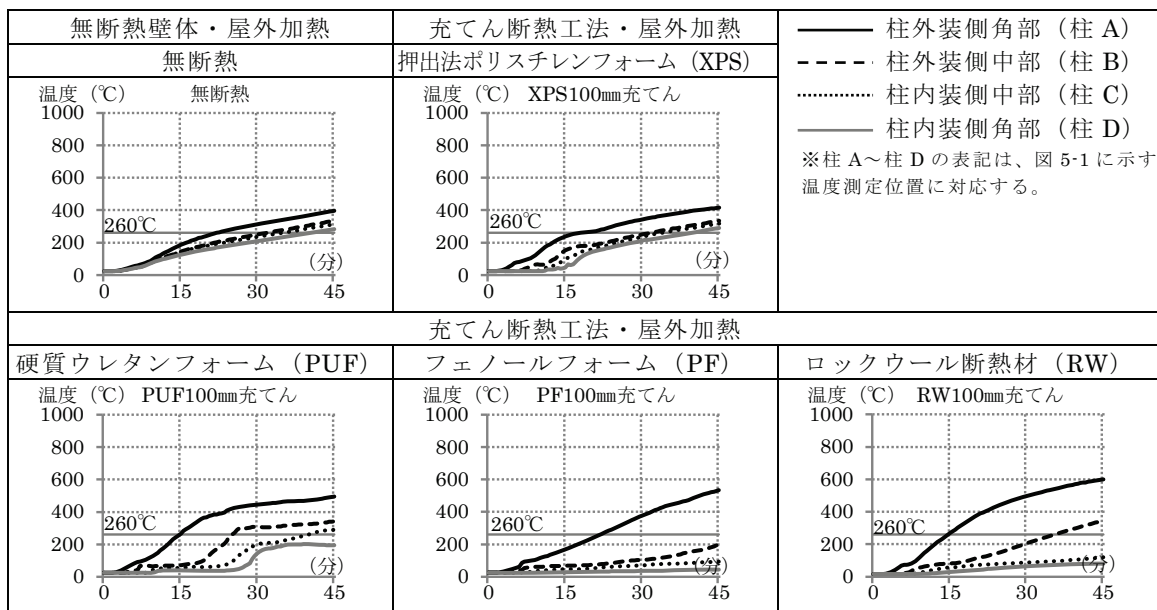


図 5-11 45 分屋外加熱時の柱側面の平均温度推移（発泡プラスチック断熱壁体）

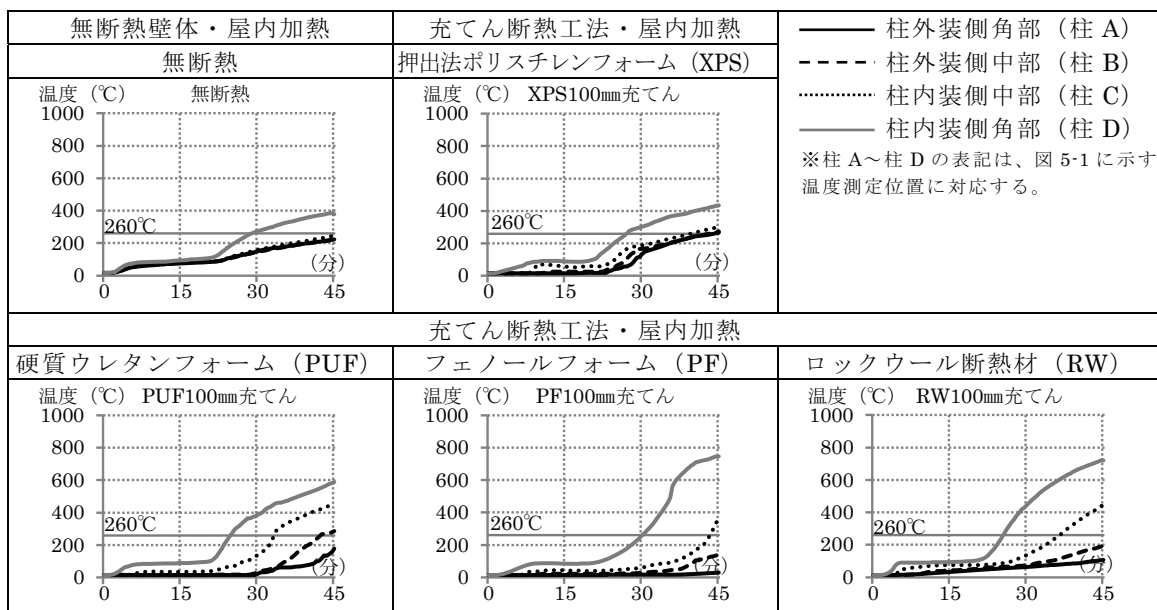


図 5-12 45 分屋内加熱時の柱側面の平均温度推移（発泡プラスチック断熱壁体）

や PUF より高い。屋内加熱時の PF 壁体は、加熱側のせっこうボードが脱落して柱の損傷が進んだ。そのため、屋外加熱時の PF 壁体の結果を見ると、加熱側柱角部および柱正面では柱の損傷が進んだが、柱側面では加熱終了まで柱側面の大部分が PF により被覆されたため、柱の損傷が抑制された。

なお、PF 壁体では、図 5-11 に示す加熱側柱角部（屋外加熱では柱外装側角部、屋内加熱では柱内装側角部が該当。）の温度推移は、柱正面方向（加熱側）から強い加熱を受けているにもかかわらず、測定された温度は低く推移した可能性が高い。その理由として、PF はボード状で気密性があり、かつ熱分解が遅いため、加熱側柱角部に設置された熱電対は PF により被覆された状態が長く続き、柱側面方向からの熱対流が遮断された分、温度が低く測定されたと考えられる。

以上より、PUF 壁体、PF 壁体では、加熱側柱角部および柱正面では、断熱材の熱分解の進行が遅いほど、柱の損傷が進む。一方、柱側面では、断熱材の熱分解が進むにつれて断熱材により被覆される面積が減っていくため、熱分解の進行が遅いほど柱の損傷が抑制される。断熱材の熔融・熱分解により作用するこの 2 つの働きによって、柱の断面形状が定まると考えられる。

### 5.4.3.2 柱の損傷度の予測可能性に向けた考察

ここでは、断熱材の溶融や熱分解挙動に応じて定まる加熱側柱角部や被覆層裏面の温度推移をもとに、充てん断熱工法の45分準耐火構造外壁を対象に、発泡プラスチック断熱壁体における柱の損傷度の予測可能性を検討する。

発泡プラスチック断熱壁体においても、加熱側柱角部における260℃超の温度時間面積と柱の損傷度には、加熱側柱角部温度に測定誤差が生じたPF壁体を除くと、屋外加熱、屋内加熱ともに強い相関性があり、発泡プラスチック断熱壁体は、無断熱壁体とRW壁体を結ぶ線上に位置している(図5-13、図5-14)。発泡プラスチック断熱壁体は、断熱材の溶融・熱分解により柱角部の受熱量が変化し、その受熱量に応じて

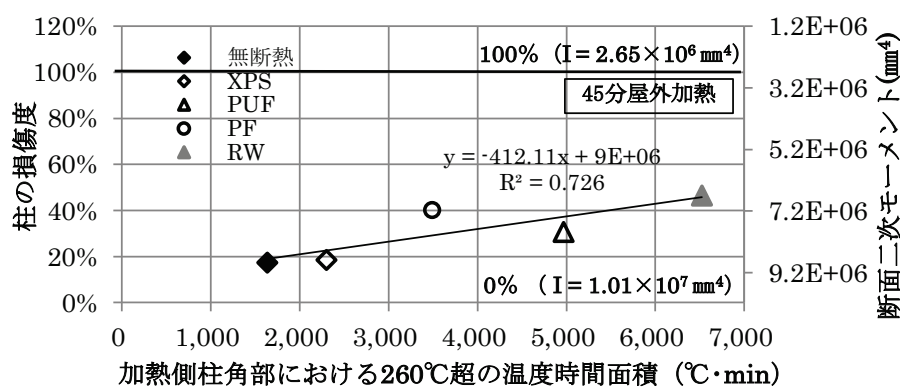


図 5-13 加熱側柱角部における 260℃超の温度時間面積と柱の損傷度  
(45分屋外加熱・発泡プラスチック断熱壁体)

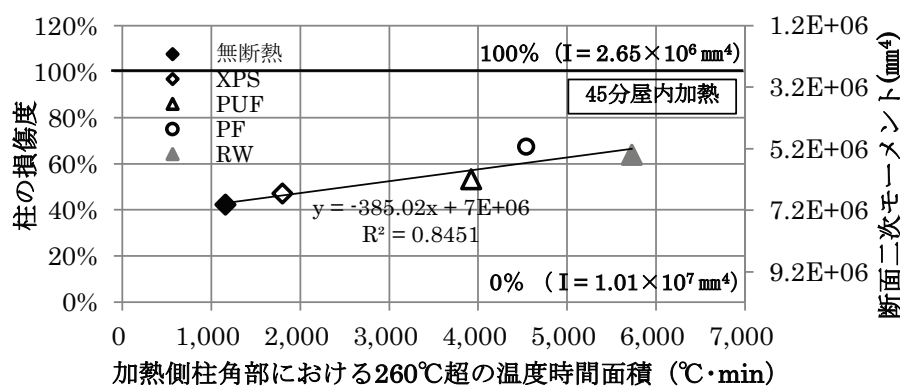


図 5-14 加熱側柱角部における 260℃超の温度時間面積と柱の損傷度  
(45分屋内加熱・発泡プラスチック断熱壁体)

柱の損傷が進むことがわかる。

ここで、3.5.5 の RW 壁体での柱の損傷度の予測可能性の検討に倣い、発泡プラスチック断熱壁体を対象に、被覆層裏面における 260℃超の温度時間面積と柱の損傷度の関係（図 5-15、図 5-16）および加熱終了時の被覆層裏面温度と柱の損傷度の関係（図 5-17、図 5-18）を見ると、いずれも加熱側柱角部と柱の損傷度との関係（図 5-13、図 5-14）とほぼ同じ関係性が得られる。従って、発泡プラスチック断熱壁体においても、45 分加熱終了時における柱の損傷度は、加熱終了時の被覆層裏面温度を比較することで、柱の損傷度の優劣を判断できるといえる。

第 3 章 RW 壁体における柱の損傷度の予測可能性の検討（3.5.5 参照）より、壁体

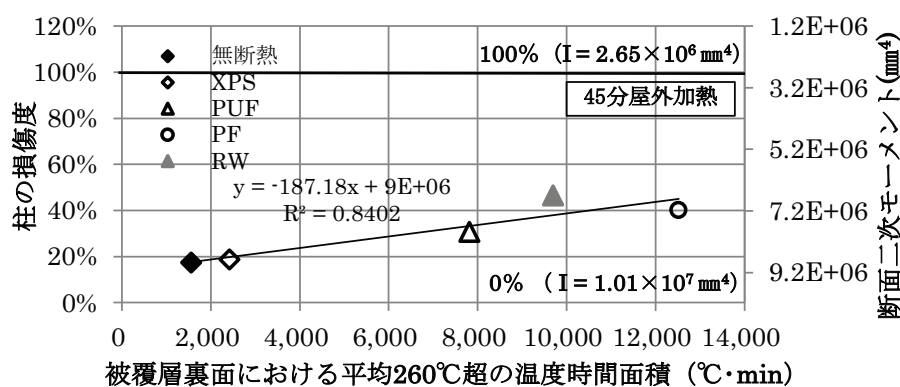


図 5-15 被覆層裏面における 260℃超の温度時間面積と柱の損傷度  
(45 分屋外加熱・発泡プラスチック断熱壁体)

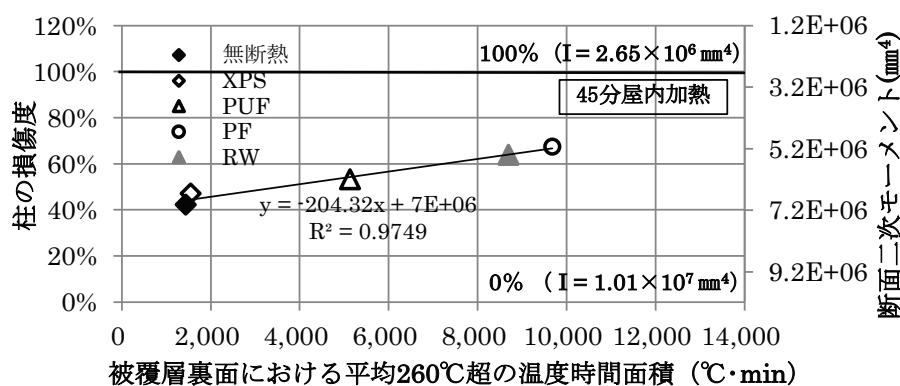


図 5-16 被覆層裏面における 260℃超の温度時間面積と柱の損傷度  
(45 分屋内加熱・発泡プラスチック断熱壁体)



内に充てん断熱材があり中空層がない場合は、加熱終了時の被覆層裏面温度は一次元定常計算によりやや高温側で予想できる。しかし熱硬化性の PUF 壁体、PF 壁体の場合、断熱材の熱分解による断熱性の低下度を含めた見かけの熱貫流抵抗値が求められないため、現状では計算による予測が成り立たない。従って、PUF 壁体、PF 壁体の柱の損傷度の予測に向けては、実測できない熱分解後の PUF および PF の見かけの熱貫流抵抗値を工学的にどう近似的に設定するかが、今後、重要な検討課題である。

一方、熱可塑性である XPS 壁体の場合、加熱終了時の壁体内部温度は、近似的に無断熱壁体と捉えることができる。但し、XPS 熔融後の XPS 壁体の中空層温度には、無断熱壁体と同じく、一次元定常計算による計算値と実験結果の間に乖離が存在する。

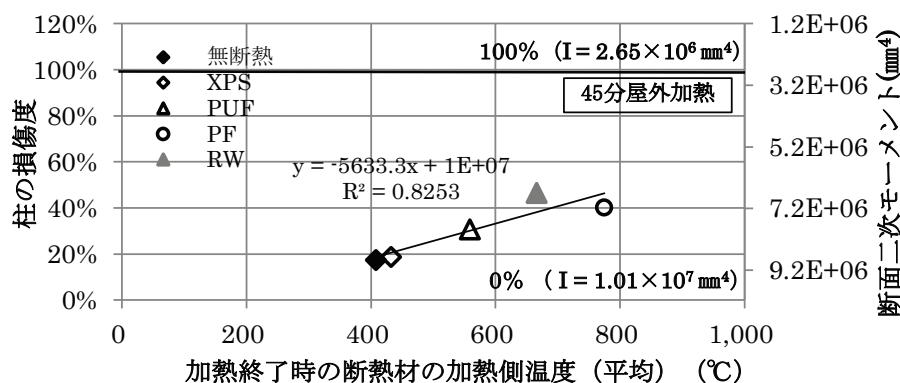


図 5-17 加熱終了時の被覆層裏面温度と柱の損傷度  
(45分屋外加熱・発泡プラスチック断熱壁体)

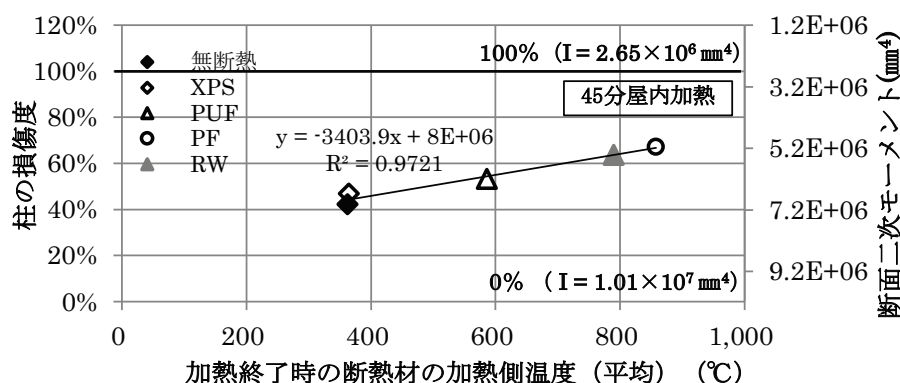


図 5-18 加熱終了時の被覆層裏面温度と柱の損傷度  
(45分屋内加熱・発泡プラスチック断熱壁体)

XPS 壁体の防火性能予測の観点からも、中空層における熱伝達・熱収支の実態把握と計算モデルの構築は課題となる。

## 5.5 可視化試験体による実験

### 5.5.1 検討の目的

発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁では、1.4 での検討および 5.4.3 の実験結果ともに、火災加熱時、壁体内の発泡プラスチック断熱材は着火燃焼せず、加熱側の内外装材越しに加熱を受けて溶融・熱分解が進むと考えられる結果となった。

ここでは、この火災加熱時における壁体内の発泡プラスチック断熱材の挙動（溶融や熱分解等）や着火燃焼の有無を目視で確認することを目的に、試験体裏面に耐熱ガラスを嵌めて、加熱実験中の壁体内を可視化できる小型試験体（以下、可視化試験体と称す。）を作製して小型実験を実施した。

試験体の非加熱側から直接、壁体内での発泡プラスチック断熱材の溶融や熱分解、着火燃焼の有無など、それらの過程を目視で検証する。

### 5.5.2 可視化試験体

検討対象とした断熱材の仕様を表 5-7 に、試験体の詳細および温度測定位置を図 5-19 に示す。可視化試験体は、乾式工法の木製外壁（外装材：窯業系サイディング（厚さ 15 mm）、内装材：耐熱強化ガラス（厚さ 5 mm））とし、断熱材の種類（XPS、PUF、PF）ごとに作製した。可視化試験体の大きさは、幅 800 mm×高さ 800 mm（加熱面：幅 600 mm×高さ 600 mm）とした。

可視化試験体を用いた加熱実験（以下、可視化実験と称す。）は、試験体非加熱側から火災加熱時の断熱材の挙動を目視で確認することを目的とするため、45 分の火災加熱のうちに、断熱材の溶融・熱分解が断熱材の非加熱側に達してからの断熱材の変

表 5-7 可視化試験体に用いた断熱材の仕様

断熱材の種類	厚さ*1	JIS 規格上の分類*2	製品仕様	密度*1	熱伝導率*1
XPS 押出法ポリスチレンフォーム	75 mm	JIS A 9511 <sup>2)</sup> A 種保温板 3 種 b	3 種 b 品	37 kg/m <sup>3</sup>	0.028 W/m・K
PUF 硬質ウレタンフォーム	50 mm	JIS A 9511 <sup>2)</sup> A 種保温板 2 種 2 号	一般品*3 表面材:クラフト紙	30 kg/m <sup>3</sup>	0.024 W/m・K
PF フェノールフォーム	25 mm	JIS A 9511 <sup>2)</sup> A 種保温板 1 種 2 号	一般品*3(密度 27K*4) 表面材:PET 不織布	27 kg/m <sup>3</sup>	0.020 W/m・K

\*1 厚さ、密度、熱伝導率は、用いた断熱材の製品としての公称値を示している。

\*2 住宅用断熱材は 2014 年 9 月の JIS 改定により、すべて JIS A 9521<sup>3)</sup>に統合されている。

ここでは実験実施時に合わせ、発泡プラスチック断熱材については、2014 年 9 月改定前の JIS 規格を示す。

\*3 「一般品」は製品群の中で、標準的な製品を指す。

\*4 「密度 27K」とあるのは、樹脂の密度が 27kg/m<sup>3</sup>であることを示す。

化を、耐熱ガラス（耐熱強化ガラス（厚さ 5 mm））越しに観察できるように、可視化試験体に用いる断熱材厚さを設定した。

第 2 章の発泡プラスチック断熱材の高温性状の調査によると、発泡プラスチック断熱材は 100℃前後の温度域を超えると形状を保持できなくなると考えられる。そこで 1.4 の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における各層温度の推移（図 1-14）から、断熱材裏面の温度が 100℃未満から急激に上昇した時に、樹脂の溶融・熱分解が断熱材の非加熱側に達したと仮定した。この時間と断熱材厚さとの関係を勘案して、可視化試験体に用いる断熱材の厚さをそれぞれ、XPS は 75 mm、PUF は 50 mm、PF は 25 mm とした（表 5-7、図 5-19）。

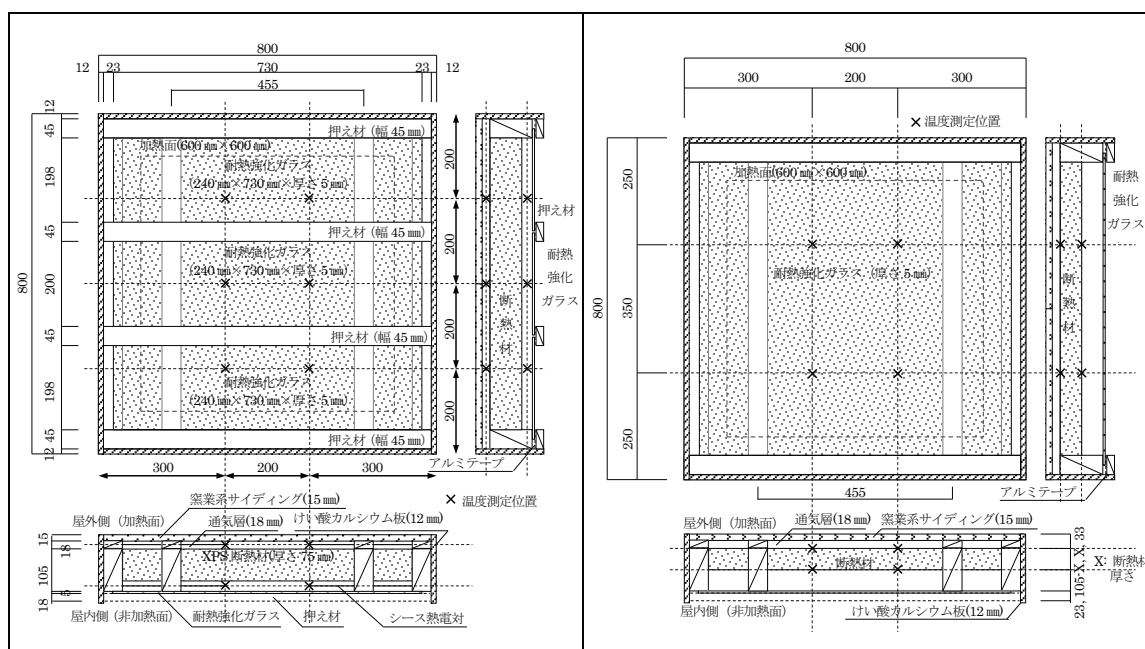


図 5-19 可視化試験体・試験体図（左図：XPS・右図：PUF、PF）

### 5.5.3 実験方法

可視化実験は、第 3 章～第 5 章の小型実験と同じ小型炉を用いて、非载荷で ISO834<sup>4)</sup> 標準加熱曲線に従って加熱して実施した。加熱方向は、可視化試験体では木製外壁の内装材を耐熱ガラスとしているため屋外側加熱とし、加熱時間は、試験体内部の様子に変化が見られなくなるまでとした。その結果、加熱時間は、XPS で 42 分、PUF で 40 分、PF で 60 分となった。

XPS の場合は、断熱材の加熱側の空間（通気層）と非加熱側の空間（中空層）に試

験体側面の小口面よりシーブ熱電対（K 熱電対）を差し込み、その先端を図 5-19 中に示す位置にあわせて、30 秒間隔で壁体内部の温度測定を行った。PUF、PF の場合は、断熱材の加熱側と非加熱側の表面に針金を用いて熱電対（K 熱電対）を固定、設置して、30 秒間隔で壁体内部の温度を測定した。なお、温度測定位置はできる限り試験体端部の影響を排除できるように配慮し、試験体中央に近い位置で、上下左右均等になるように配置した。そして各層の測定温度の平均をそれぞれ求めて、壁体内部各層温度の報告値とした。

XPS は 2011 年 1 月に、PUF、PF は 2013 年 11 月に、それぞれ実験を実施した。

#### 5.5.4 実験結果と考察

XPS、PUF、PF の可視化実験の結果を図 5-20 に示す。

熱可塑性樹脂である XPS（厚さ 75 mm）は、加熱開始後、加熱側から樹脂の溶融が徐々に進んだとみられ、加熱開始 17 分に XPS の非加熱側中央部に孔が開いた（図 5-20 左段、上から 2 枚目の写真）。この時とほぼ同じ時間に、断熱材非加熱側の温度が、急激に上昇するのが確認された（図 5-20 左段グラフ）。XPS の非加熱側中央部に開いた孔を通じて、XPS の加熱側の熱が、XPS の非加熱側に流入したためと考えられる。

さらに加熱が進むと、融けた XPS は試験体の下端に落ちながら、孔は上下左右に広がった。加熱開始 25 分の時点では、広がった孔が断熱材を囲む四周の枠材に達して、壁体内（試験体中央部）はほぼ空洞となった（図 5-20 左段、上から 3 枚目の写真）。加熱開始 42 分に加熱を終了するまで、壁体内が空洞の状態は続き、溶融した XPS への着火燃焼は見られなかった（図 5-20 左段、上から 4 枚目の写真）。

一方、熱硬化性樹脂である PUF（厚さ 50 mm）、PF（厚さ 25 mm）は、加熱開始後、加熱側から樹脂の熱分解が進み、PUF では加熱開始 25 分頃に、PF では加熱開始 45 分頃に、断熱材の一部に孔が開いて、熱分解ガスとみられる煙が吹き出し、断熱材と耐熱ガラスの間に充満した（PUF：図 5-20 中段、上から 2 枚目の写真、PF：図 5-20 右段、上から 3 枚目の写真）。この時、断熱材加熱側温度は、PUF で 400℃、PF で 600℃に達していた。そして PUF、PF はいずれも、断熱材に孔を確認した時とほぼ同じ時間に、断熱材非加熱側の温度上昇が確認された。

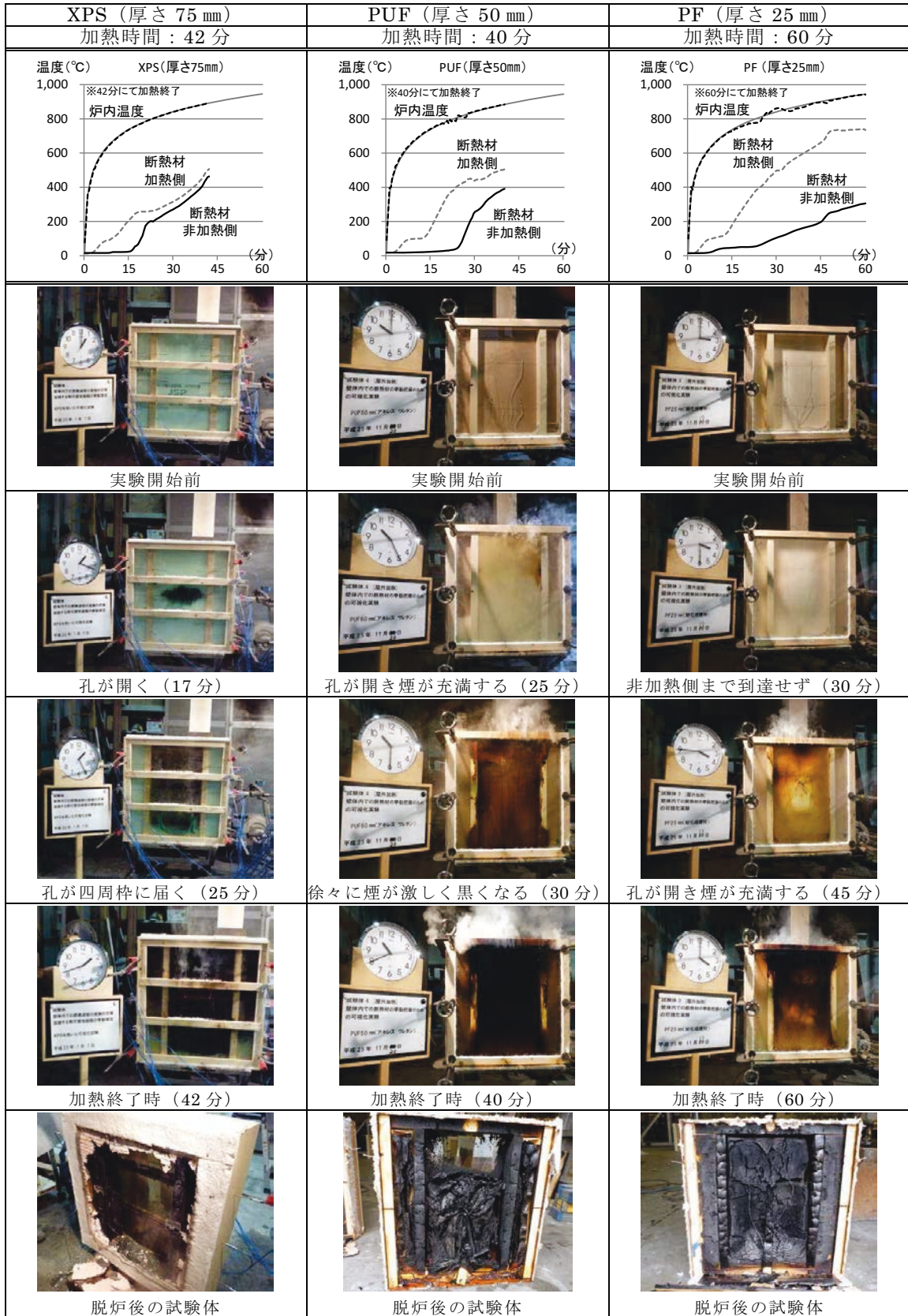


図 5-20 可視化実験の結果

さらに加熱が進むと、非加熱側に吹き出した煙の動きは激しくなり、煙の色も徐々に黒くなって、加熱終了まで壁体内で PUF、PF の着炎燃焼は見られなかった（PUF：図 5-20 中段、上から 4 枚目の写真、PF：図 5-20 右段、上から 4 枚目の写真）。一方、加熱炉の観察窓からは、加熱終了まで外装材の亀裂および目地部から炎の吹き出しが確認された。

以上より、熱可塑性樹脂（XPS）、熱硬化性樹脂（PUF、PF）ともに、外装材に被覆された断熱材は、火災加熱を受けても、壁体内で着炎燃焼しないことを目視で確認した。

また可視化試験体における温度推移と目視観察より、断熱材非加熱側の温度の急激な上昇は、断熱材の熔融・熱分解が断熱材の非加熱側に到達して、断熱性が低下したためと考えられる。よって、断熱材の熔融・熱分解が、いつ頃、断熱材の非加熱側に到達したかは、断熱材非加熱側の温度の推移からおおむね推定できることがわかった。

これまでの考察結果をまとめ、断熱材の壁体内における燃焼過程を図 5-21 に示す。

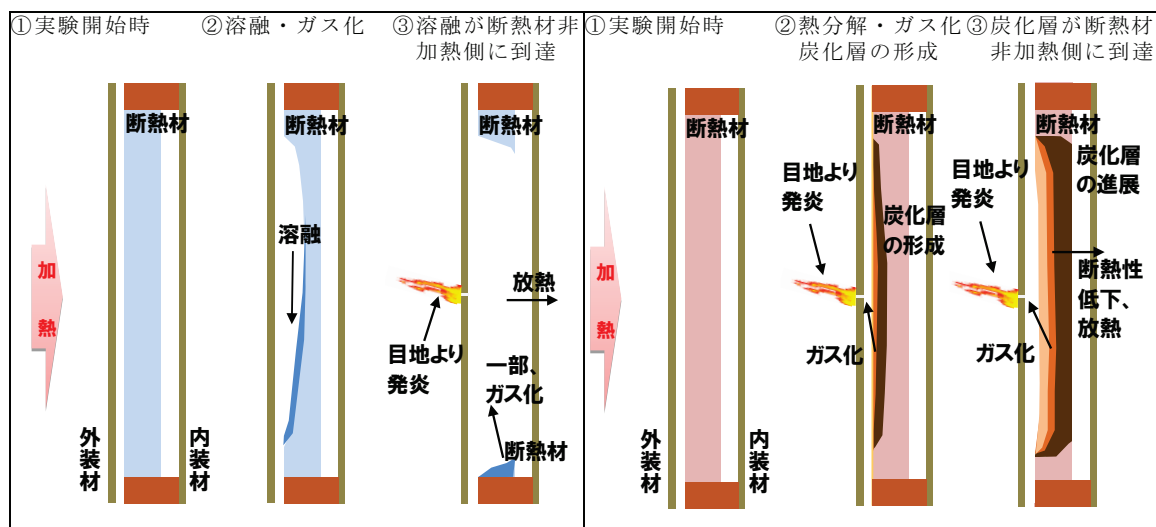


図 5-21 壁体内の断熱材の挙動（左図：熱可塑性樹脂・右図：熱硬化性樹脂）

## 5.6 発泡プラスチック断熱材の仕様と断熱壁体の防火性能との関係

### 5.6.1 検討の目的

発泡プラスチック断熱壁体では、火災加熱時、壁体内における断熱材の熔融・熱分解の進み方が、断熱材の種類により異なり、防火性能に支配的な影響を及ぼす。そのため、前々節 5.4 までは、発泡プラスチック断熱壁体を対象に断熱材の熔融・熱分解と木造外壁の防火性能との関係を考察し、前節 5.5 では、可視化試験体より火災加熱時における壁体内の断熱材の挙動や着炎燃焼の有無を目視で確認した。

ここでは、発泡プラスチック断熱材の仕様（メーカー、密度、表面材の種類、難燃性付与の有無等）に着目し、小型実験により壁体内での断熱材の熔融・熱分解との関係性を把握して、断熱材の仕様の差異が壁体の遮熱性にどの程度の影響を及ぼすのかを調べる。

### 5.6.2 断熱材の選定と熱硬化性樹脂の熱分解挙動の把握

#### 5.6.2.1 断熱材の選定

対象とした発泡プラスチック断熱材を表 5-8 に示す。

発泡プラスチック断熱材は、第 2 章の検討と同じく、JIS A 9511<sup>2006</sup><sup>2)</sup>に示される XPS、ビーズ法ポリスチレンフォーム（以下、EPS）、ポリエチレンフォーム（以下、PE）と PF、PUF の計 5 種類を対象とした。そして断熱材の種類ごとに、2.4 で実施したコーンカロリメータ試験の試験体に用いたボード状の断熱材の中から、次に示す視点により代表的な仕様を選び、試験体とした。

熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）については、5.5 の可視化実験より、XPS の熔融が XPS の非加熱側に達するまでの時間が遮熱性に影響すると考え、密度に着目した。XPS は、密度が最も大きく有機質量が多い 3 種 b 品を選定し、2011 年時点で市場に製品を供給する 3 社でメーカー間の比較を行った。EPS は密度による差を把握するため、メーカーを同一の 1 社とし、密度が最も大きいものと最も小さいものをそれぞれ選定した。また PE は製品の中で唯一の住宅用断熱材として用いられるものを選定した。

熱硬化性樹脂（PUF、PF）については、第 2 章の検討および 5.5 の可視化実験より、断熱材ごとの熱分解の進み方や表面材が遮熱性に影響を与えられとされる。

そこで PUF は、一般品と難燃仕様、メーカー、表面材（クラフト紙とアルミクラ



フト紙)による比較を行うため4種類を、PFはメーカーに、密度による比較を行うため3種類を選定した。また比較のため、無断熱仕様の試験体(以下、無断熱)を追加した。なお、試験体とした断熱材は、小型実験を実施した期間(2011年1月～2012年1月)に日本国内で流通する断熱材を用いた。

表 5-8 対象とした断熱材

1. 熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE)

	試験体No.*1	JIS上の規格 <sup>3)</sup>	メーカー*2	密度 ボード(kg/m <sup>3</sup> )*3	密度 フォーム(kg/m <sup>3</sup> )*4	厚さ(mm)
XPS	XPS-3	3種b	A社	36.3	36.3	50
	XPS-6		B社	29.9	29.9	50
	XPS-9		C社	31.0	31.0	50
EPS	EPS-1	特号	E社	30.2	30.2	50
	EPS-4	4号		16.2	16.2	50
PE	PE-1	1種2号	F社	11.2	11.2	50

2. 熱硬化性樹脂 (PUF、PF)

	試験体No.*1	JIS上の規格 <sup>3)</sup>	メーカー*4	製品仕様	表面材仕様(両面同じ)	密度 ボード*10(kg/m <sup>3</sup> )	密度 フォーム*11(kg/m <sup>3</sup> )	厚さ(mm)
PUF	PUF-2	A種2種2号	I社	一般品*5	クラフト紙	37.9	30.8	50
	PUF-3		K社			42.2	35.8	50
	PUF-4		I社			難燃仕様*6	クラフト紙	38.5
	PUF-9	A種2種2号相当*3	L社	難燃仕様*6 (ガラス繊維混入)*7	アルミ箔	37.9	34.2	50
PF	PF-1	A種1種2号	G社	一般品*5 (密度27K*8)	PET不織布	30.8	29.2	25
	PF-2		G社	高密度品*9 (密度40K*8)		40.6	37.9	25
	PF-3*2		H社	一般品*5 (密度40K*8)	不燃紙	46.4	35.0	25

\*1 第2章2.4の検討の際に表示した試験体No.(表2-13～表2-19)との対応を示す。

\*2 第2章2.4の検討では密度37Kを用いたが、製品の仕様に変更されていたため密度40Kを用いた。

\*3 樹脂中にガラス繊維が混入され、厳密に言えばJIS規格外の製品である。他の要件を照合するとA種2種2号に相当するため、「A種2種2号相当」とした。

\*4 断熱材の製品仕様とメーカー名のアルファベットとの対応は、表2-12に合わせた。

\*5 「一般品」は製品群の中で、標準的な製品を指す。

\*6 「難燃仕様」は製品群の中で、一般品に比べ樹脂の難燃性を高めた製品を指す。

\*7 「ガラス繊維混入」は樹脂の中に、一部、ガラス繊維が混入している製品を指す。

\*8 「密度OK」とあるのは、樹脂の密度がOKkg/m<sup>3</sup>であることを示す。

\*9 「高密度品」は製品群の中で、一般品に比べ樹脂の密度を高めた製品を指す。

\*10 表面材を含めた断熱材製品の密度を指す。表面材がない熱可塑性樹脂はフォームの密度と同じとなる。

\*11 表面材を含めない断熱材樹脂部の密度を指す。

## 5.6.2.2 熱硬化性樹脂の熱分解挙動の把握

### 5.6.2.2.1 検討の目的と方法

5.4.1.3 の検討より、火災加熱時における壁体内の熱硬化性樹脂の熱分解挙動は、窒素雰囲気下の TG-DTA 分析により相対的に把握できるとの結論を得ている。

ここでは、小型実験を行う前段階として、本節の小型実験の試験体に用いるすべての熱硬化性樹脂（PUF、PF）について、TG-DTA 分析を実施し、火災加熱時の熱分解の進み方や炭化物の生成量について把握しておく。TG-DTA 分析は、熱硬化性樹脂

（PUF、PF）の熱分解挙動を、小型実験における壁体内の環境をできる限り再現した環境下で把握するため、窒素雰囲気中で行った。試料の昇温条件は 5.3.3 小型実験の実験結果に示す図 5-3 中の PUF 壁体、PF 壁体における 45 分屋外加熱時の各層の平均温度推移に基づき、壁体内の断熱材加熱側（断熱材外装側表面）の温度推移をおおよそ再現するように設定した（表 5-9）。

表 5-9 TG-DTA 分析の測定条件

試料	断熱材の樹脂をくり抜いたもの
実験室	室温約 25℃に保たれた環境
雰囲気	流量 200mL/min の窒素雰囲気下
測定温度	PF : 30℃～700℃ PUF : 30℃～500℃
昇温速度	PF : 30℃～500℃ 30℃/分 500℃～700℃ 10℃/分 700℃ 一定 PUF : 30℃～500℃ 30℃/分 500℃ 一定
測定回数	分析装置の再現性を確認した上で、各 1 回ずつ

### 5.6.2.2.2 TG-DTA 分析の分析結果と考察

PUF、PF における TG-DTA 分析の分析結果を図 5-22 に示す。

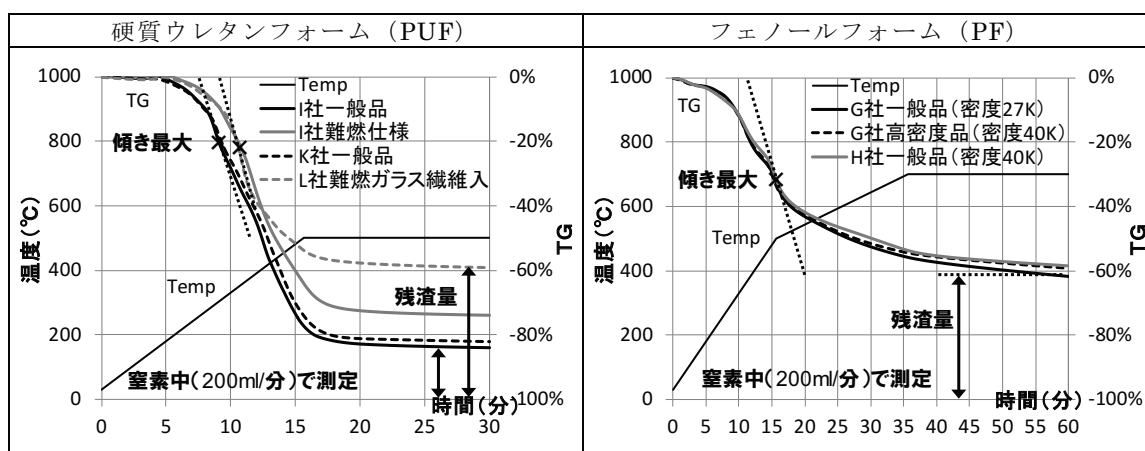


図 5-22 PUF、PF における TG-DTA 分析の結果（TG 曲線）

PUF はいずれも、昇温中 200℃から 400℃を超えるまでの間で、樹脂の熱分解が最も進み、500℃で温度を一定にした後は、熱重量 (TG) はほぼ一定の値に収束した (図 5-22)。ここで最も熱分解が進む 200℃から 400℃を超えるまでの間で、熱重量 (TG) の減少幅が最大となる点、つまり TG 曲線における接線の傾きが最大となる点を求め、その時点の温度を熱分解ピーク温度とした (図 5-22)。その結果、PUF 難燃仕様の方が熱分解ピーク温度が高くなり、その出現時間も遅くなることがわかった。

また TG-DTA 分析において測定終了時まで残った熱重量 (TG) は、断熱材の熱分解後の残渣とみることができ、小型実験では熱分解時に生成した断熱材の炭化物に相当すると考えられる。PUF では、TG-DTA 分析の結果、最終的に残る熱重量 (TG) は、難燃仕様の方が一般品に比べ多くなった (図 5-22)。

よって、TG-DTA 分析の結果より、PUF が内外装材等の被覆材越しに火災加熱を受けた際、難燃仕様の方が一般品に比べ、熱分解の進行が緩やかで、かつ熱分解時に生成される炭化物が多くなって、壁体の遮熱性に有利になると想定される。

一方、PF は、いずれも樹脂の熱分解が 500℃過ぎで最も進み、700℃で温度を一定にした後は、熱重量 (TG) はほぼ一定の値に収束した。すべての PF において TG 曲線はほぼ同じ軌跡を描いており、熱分解ピーク温度および測定終了時まで残った樹脂量に、PF の仕様による差はほとんど見られなかった (図 5-22)。

従って、TG-DTA 分析の結果より、PF が内外装材等の被覆材越しに火災加熱を受けた際、PF 自体は、PF の仕様に依らずほぼ同じ熱分解挙動を示す。そのため、PF は密度が大きい方が PF の熱分解に時間を要し、残存する断熱材の量も多くなり、壁体の遮熱性に有利になると想定される。

### 5.6.3 小型実験の概要

#### 5.6.3.1 試験体

小型実験に用いる試験体の図を図 5-23 に示す。試験体の大きさは、幅 400 mm×高さ 800 mm（加熱面：幅 300 mm×高さ 600 mm）とし、左右に 2 つ並べて幅 800 mm×高さ 800 mm（加熱面：幅 600 mm×高さ 600 mm）の試験体を作製した。試験体の仕様は、これまでの小型実験と同じく、乾式工法の木製軸組造外壁（外壁：不燃面材、内装材：せっこうボード）とした。発泡プラスチック断熱材の厚さは、熱分解が緩やかな PF は 25 mm、PF 以外の断熱材は 50 mm とし、断熱材は屋外側に寄せて充てんした。

本実験では、後述する通り加熱方向を屋外加熱のみとしたため、試験体裏面の温度上昇度の差を比較するにあたり、その差が明確になるように、内装材のせっこうボードの厚さは 15 mm 品ではなく 9.5 mm 品を用いた。

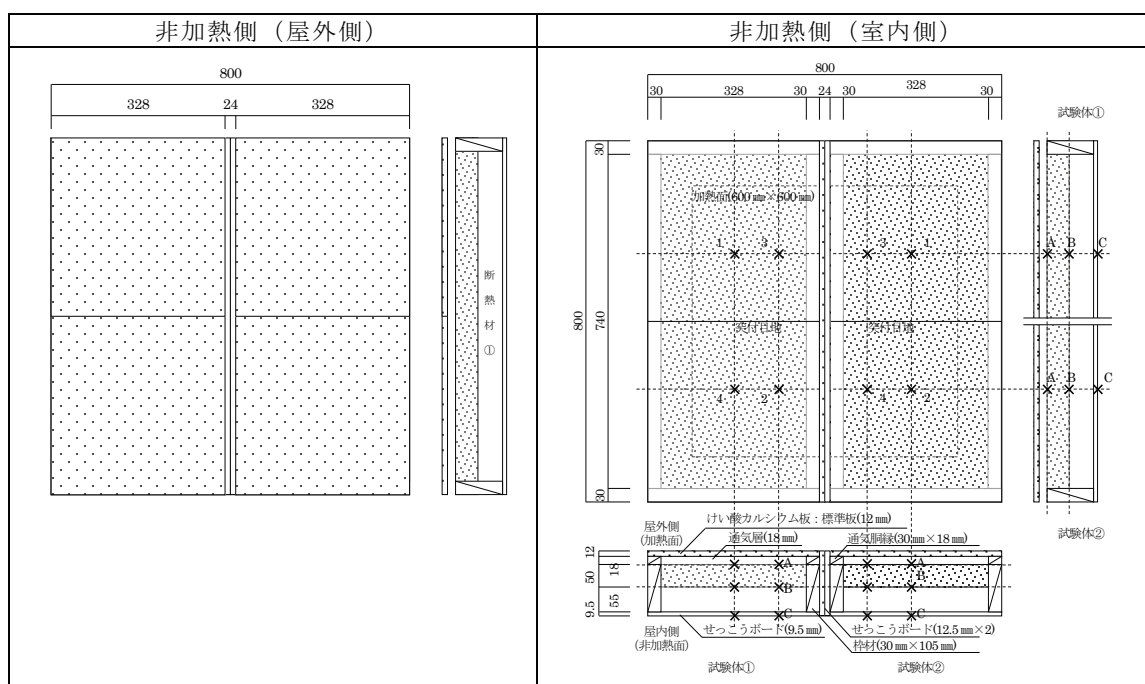


図 5-23 小型試験体の試験体図（断熱材厚さ 50 mm の場合）

### 5.6.3.2 実験方法

実験は、第3章～第5章の小型実験と同じ小型炉を用いて、試験体2体を左右に並べて同時に、非载荷としISO834<sup>4)</sup>標準加熱曲線に従って加熱した。

屋内加熱の場合、壁体内における断熱材の熔融・熱分解の進み方は、炉に暴露されるせっこうボードからの結晶水の放出による温度停滞の影響を大きく受ける。本実験では、断熱材の仕様間の比較を行うにあたり、このせっこうボードによる影響を排除して考察するため、加熱方向は屋外加熱のみとした。

試験の様子を写真5-3に示す。なお、この実験では、試験体2体を左右に並べて同時に行うため、事前に炉の左右で実験結果にばらつきが生じないことを確認した。

温度測定は、試験体裏面と試験体内部の断熱材表面と断熱材裏面において、K熱電対により30秒間隔で測定し、層ごとに測定点4点の平均温度を求めて、壁体内部各層の温度としての報告値とした。

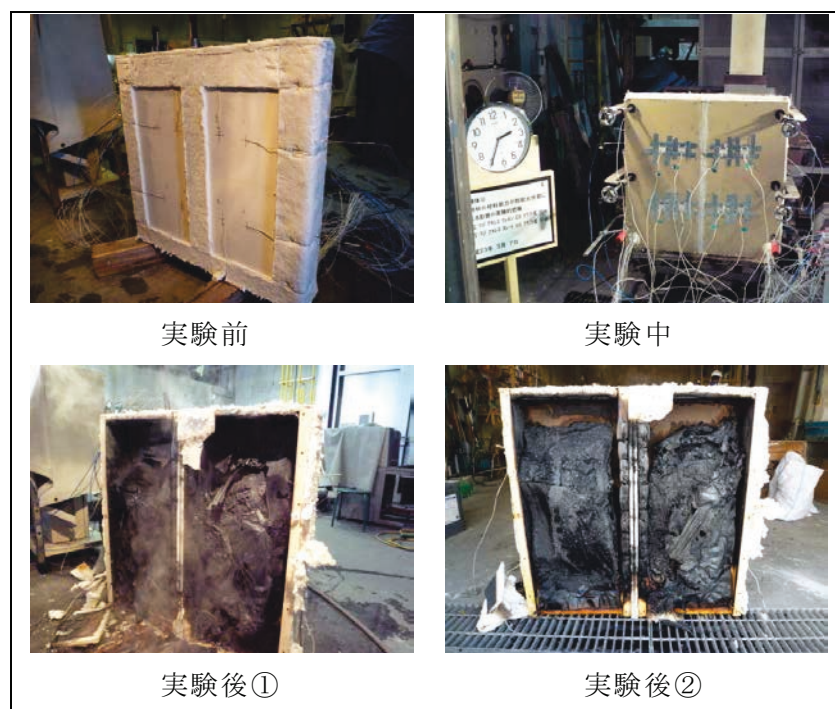


写真 5-3 試験体と実験時の様子（例：PUF）

## 5.6.4 実験結果と考察

### 5.6.4.1 熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）

実験結果を表 5-10 に、各層の温度推移を図 5-24 に示す。

熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）はいずれも、厚さ 50 mm では加熱開始 10 分～15 分の間には断熱材非加熱側温度が急激に上昇しており、この時に断熱材の熔融が断熱材の非加熱側に達して、断熱性が大きく低下したと考えられる。断熱材密度が大きいほど、断熱材の熔融により断熱性が大きく低下するまでの時間は長くなる傾向があったが、その差は実験を行った密度  $11.3 \text{ kg/m}^3$ （PE（F 社））～密度  $36.3 \text{ kg/m}^3$ （XPS（A 社））の範囲では、2 分～3 分程度に過ぎなかった（図 5-24）。断熱材の熔融により断熱性が大きく低下した以降、壁体の内部温度は無断熱に近い推移を示している。

試験体の裏面温度上昇度は、無断熱が最も高くなったが、無断熱を含め断熱材の仕様による温度上昇度の差は概ね数 K 以内であった（表 5-10）。熱可塑性樹脂の場合と

表 5-10 熱可塑性樹脂における小型実験結果（XPS、EPS、PE）

試験体 No.	断熱材の仕様（メーカー）			厚さ (mm)	密度		遮熱性・裏面温度上昇度(K)				
					ボード (kg/m <sup>3</sup> )	フォーム (kg/m <sup>3</sup> )	初期 (°C)	30 分		45 分	
	JIS 上の規格 <sup>3)</sup>	メーカー	平均					最高	平均	最高	
XPS-3	XPS	Ⅲ種 b	(A 社)	50	36.3	36.3	16.7	84	87	94	97
XPS-6	XPS	Ⅲ種 b	(B 社)	50	29.9	29.9	10.5	88	93	100	105
XPS-9	XPS	Ⅲ種 b	(C 社)	50	31.0	31.0	10.3	85	90	97	102
EPS-1	EPS	特号	(E 社)	50	30.2	30.2	12.6	81	89	96	98
EPS-4	EPS	4 号	(E 社)	50	16.2	16.2	12.9	88	91	98	102
PE-1	PE	2 種 1 号	(F 社)	50	11.3	11.3	8.6	88	90	101	103
※	無断熱			—	—	—	9.6	90	93	102	107

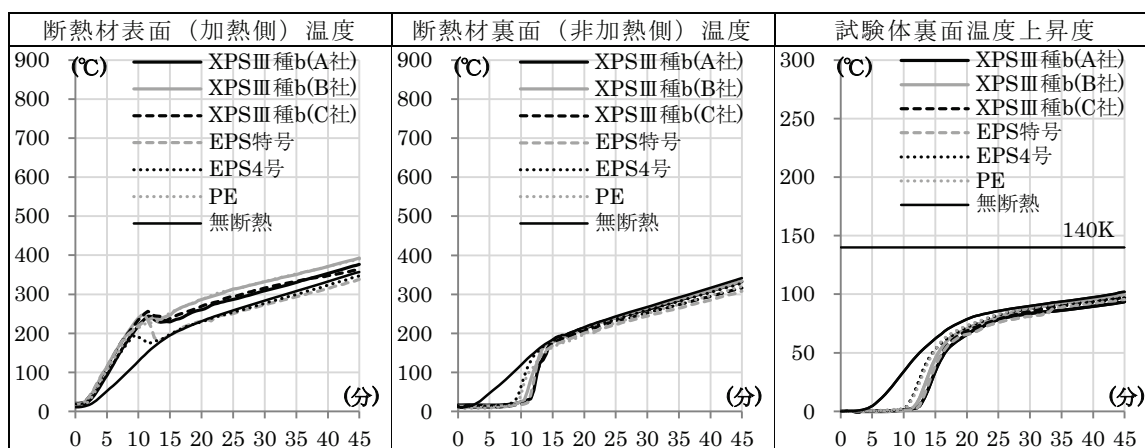


図 5-24 小型試験体における各層の平均温度推移（熱可塑性樹脂）

無断熱では、遮熱性にほとんど差がみられない。

以上より、前節 5.5 までの検討で得られた XPS 壁体の知見は、熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) を用いた壁体であれば、概ね当てはまる。

また断熱材非加熱側温度の急激な上昇とともに、断熱性が大きく低下した時間は、本実験 (図 5-23) では XPS 厚さ 50 mm に対し加熱開始 10 分～15 分までの間であったが、5.3 の加熱実験 (図 5-3) では XPS 厚さ 100 mm に対し加熱開始 15 分～20 分までの間、可視化実験 (図 5-20) では XPS 厚さ 75 mm に対し加熱開始 15 分～20 分までの間であった。試験体に用いた外装材が、本実験および 5.3 の加熱実験 (外装材：けい酸カルシウム板 (厚さ 12 mm)) と、可視化実験 (外装材：窯業系サイディング (厚さ 15 mm)) では異なる点を勘案すると、断熱性が大きく低下するまでの時間は、断熱材の厚さに応じて長くなると考えられる。しかし、その差は、断熱材厚さ 50 mm と 100 mm で 5 分程度であり、厚さ 100 mm であっても加熱開始 20 分には壁体の断熱性が大きく低下している。断熱材の厚さは、遮熱性に大きく影響しないといえる。

従って、熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) を用いた壁体で、加熱側面材が加熱終了後まで保持される場合、防火性能を評価する上では、近似的に無断熱壁体と捉えることができる。

### 5.6.4.2 熱硬化性樹脂（PUF、PF）

実験結果を表 5-11 に、PUF における各層の温度推移を図 5-25 にそれぞれ示す。

本実験では、PUF について、メーカーや表面材による遮熱性への影響は、認められなかったが、一般品と難燃仕様による遮熱性への影響については、明らかな傾向が見られた。

PUF の一般品では、加熱開始 20 分～25 分までの間に、断熱材非加熱側の温度が急激に上昇しており、この時、PUF の熱分解が PUF の非加熱側に達して、壁体の断熱性が大きく低下したとみられる（図 5-25）。一方、PUF の難燃仕様は、一般品に比べ断熱材非加熱側の温度上昇が緩やかであり、PUF の熱分解が PUF の非加熱側に達し

表 5-11 熱硬化性樹脂における小型実験結果（PUF、PF）

試験体 No.	断熱材の仕様（メーカー）			厚さ (mm)	密度		遮熱性・裏面温度上昇度(K)				
	製品仕様	表面紙	メーカー		ボード (kg/m <sup>3</sup> )	フォーム (kg/m <sup>3</sup> )	初期	30分		45分	
							(°C)	平均	最高	平均	最高
7	PUF 一般品	クラフト紙	(I社)	50	37.9	30.8	16.9	52	66	81	89
8	PUF 難燃仕様	クラフト紙	(I社)	50	42.2	35.8	13.1	26	30	73	86
9	PUF 一般品	クラフト紙	(K社)	50	38.5	33.2	10.5	60	69	84	93
10	PUF 難燃仕様 ガラス繊維混入	アルミ箔	(L社)	50	37.9	34.2	10.2	32	34	67	84
11	PF 一般品 (密度 27K)	PET 不織布	(G社)	25	30.8	29.2	7.6	42	46	72	85
12	PF 高密度品 (密度 40K)	PET 不織布	(G社)	25	40.6	37.9	14.7	32	36	63	79
13	PF 一般品 (密度 40K)	難燃紙	(H社)	25	46.4	35.0	15.8	32	37	58	70
※	無断熱			—	—	—	9.6	90	93	102	107

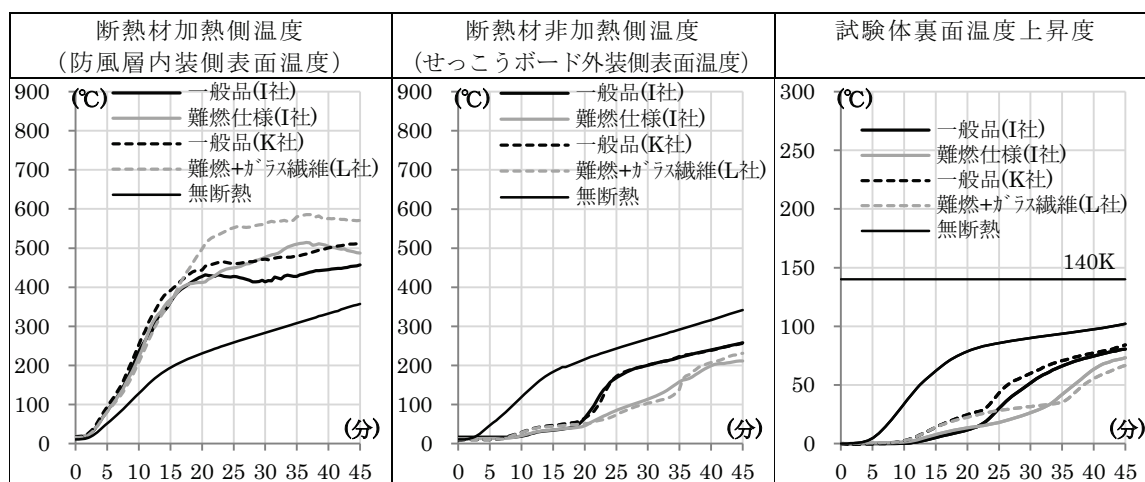


図 5-25 小型試験体における各層の平均温度推移（PUF）



た時間は加熱開始 35 分前後とみられ、一般品より遅くなった (図 5-25)。また試験体裏面温度上昇度 (表 5-11、図 5-25) をみても、難燃仕様の方が一般品に比べて低く推移しており、遮熱性が高い結果となった。

5.6.2.2.2 で実施した TG-DTA 分析の結果より想定した通り、PUF では難燃仕様の方が一般品に比べ、熱分解の進行が緩やかで、かつ熱分解時に生成される炭化物が多くなって、壁体の遮熱性に有利になったと考えられる。

これら難燃仕様と一般品における傾向を踏まえ、PUF を対象に TG-DTA 分析における測定終了時の熱重量 TG と加熱終了時の裏面温度上昇度の関係を示すと図 5-26 となる。測定終了時の熱重量 TG が大きく炭化物の生成量が多くなるほど、加熱終了時の裏面温度上昇度が小さくなる傾向が確認される。PUF については、TG-DTA 分析により、小型実験における壁体内の熱分解の進み方や炭化物の生成量の大小関係を把握でき、最終的に残る熱重量 (TG) が多い PUF ほど、壁体の遮熱性が高くなると判

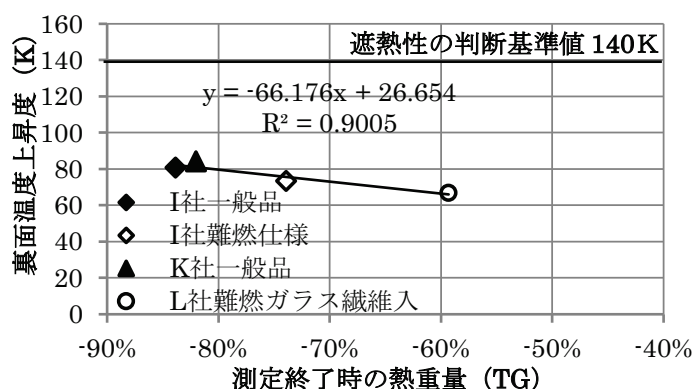


図 5-26 測定終了時の熱重量 (TG) と裏面温度上昇度 (平均)

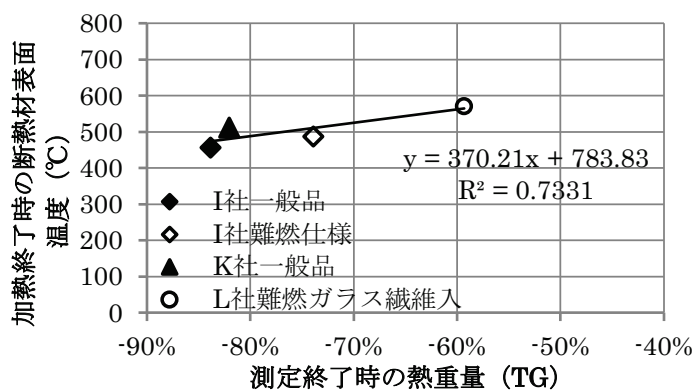


図 5-27 測定終了時の熱重量 (TG) と加熱終了時の断熱材表面温度

断できることがわかった。

さらに、本実験に用いた試験体では柱を設けていないが、試験体の層構成より本実験に用いた試験体を 5.4 の検討と同じ充てん断熱工法の外壁と捉えて考えると、断熱材加熱側温度は、5.4 の検討における被覆層裏面温度に相当する。そして 5.4.3.2 の柱の損傷度予測に向けた考察より、加熱終了時の被覆層裏面温度を比較することで、加熱終了時における柱の損傷度の優劣を予測できることがわかっている（図 5-17、図 5-18）。そこで、PUF を対象に、TG-DTA 分析における測定終了時の熱重量 TG と加熱終了時の断熱材加熱側温度の関係を示すと図 5-27 となる。測定終了時の熱重量 TG が大きく炭化物の生成量が多くなるほど、加熱終了時の断熱材加熱側温度が高くなる傾向が確認された。

従って、PUF については、窒素雰囲気下の TG-DTA 分析を行い、最終的に残る熱重量 (TG) を調べることにより、被覆層裏面温度の高低を把握でき、柱の損傷度に対する断熱材の優劣についても判断できると推定される。

一方、PF では、断熱材厚さが薄い 25 mm であっても、PF の断熱材非加熱側の温度推移より、加熱終了まで PF の熱分解による断熱性の低下は見られなかった(図 5-28)。PF 壁体の遮熱性は、PF の密度の大きい方が高くなる傾向がある (表 5-11)。

5.6.2.2.2 で実施した TG-DTA 分析の結果より想定した通り、PF は断熱材の仕様によらず、ほぼ同じ熱分解挙動を示すため、PF は密度が大きい方が PF の熱分解に時間を要し、残存する断熱材の量も多くなり、壁体の遮熱性が高くなったと考えられる。

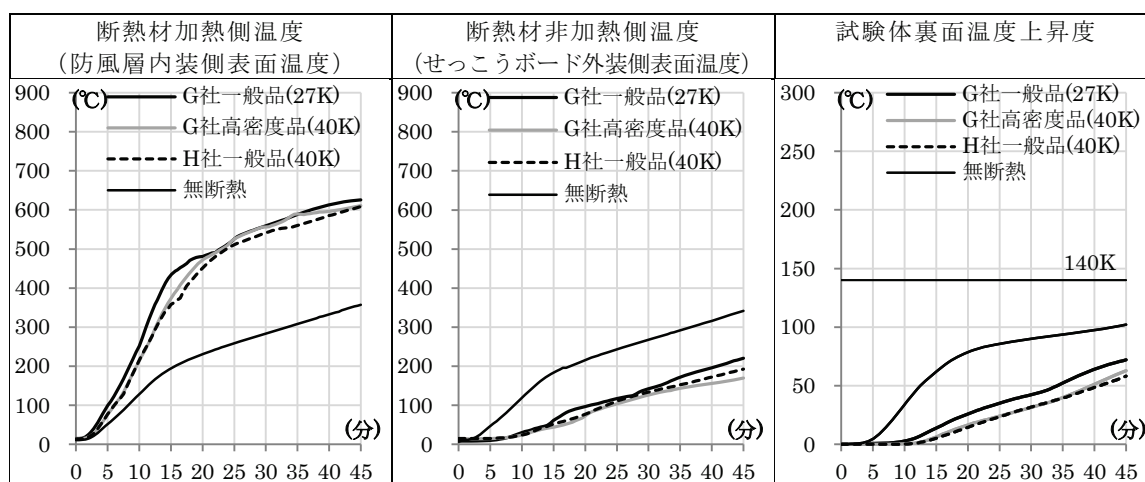


図 5-28 小型試験体における各層の平均温度推移 (PF)

## 5.7 まとめ

本章では、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加熱実験（45分屋外加熱および45分屋内加熱）を行った。加えて、壁体内での発泡プラスチック断熱材の熔融や熱分解の挙動および着火燃焼の有無を直接目視で確認し、また発泡プラスチック断熱材の仕様による差異が壁体の遮熱性にどの程度の影響を及ぼすのかを調べた。

これらの結果より、火災加熱中に断熱材が熔融・熱分解する外壁の防火性能の特質を考察して、発泡プラスチック断熱材の種類ごとに、その木造外壁の防火性能の優劣を予測するための知見を導いた。

熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）を用いた木造外壁では、加熱開始後、壁体内の断熱材が早い段階で熔融するため、遮熱性および柱の損傷度を評価する上では近似的に無断熱壁体と捉えることができる。

熱硬化性樹脂（PF、PUF）を用いた木造外壁では、遮熱性の優劣は、断熱材が十分に厚いPF壁体に限り、常温時の熱貫流抵抗より予測できる。柱の損傷度の優劣は、PUF壁体、PF壁体ともに、加熱終了時の加熱側被覆層の裏面温度を比較することで判断できる。さらに熱硬化性樹脂（PUF、PF）については、窒素雰囲気下のTG-DTA分析を行うことで、樹脂の熱分解挙動の観点から、遮熱性、柱の損傷度に対する断熱材の優劣を判断できる。

充てん断熱工法の発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁（45分準耐火構造）について、以下の得られた知見を次に示す。

### 5.7.1 壁体内の温度推移と温度分布

- ・発泡プラスチック断熱材は、火災加熱時、内外装材越しに加熱を受けて、壁体内では着火燃焼せずに、断熱材表面から熔融・熱分解が進む。熔融・熱分解が断熱材の非加熱側へ達する時間は、断熱材非加熱側の温度推移からおおむね推定できる。
- ・熱可塑性樹脂（XPS）を用いた木造外壁では、加熱開始後、早い段階で熔融し、以後、壁体内部の温度は、無断熱壁体に近い推移となる。なお、第3章で確認された無断熱壁体における中空層温度の一次元定常計算による計算値と実験結果との乖離は、熱可塑性樹脂（XPS）を用いた木造外壁においても存在する。
- ・XPSを用いて確認した壁体内での熔融、それに伴う壁体内の温度推移と温度分布は、

同じ熱可塑性樹脂である EPS、PE についても同様に確認された。従って、XPS と防火性能との関係は、EPS、PE を含めた熱可塑性樹脂においても適用できる。(以下、熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) と表記する。)

- ・熱硬化性樹脂 (PF、PUF) を用いた木造外壁では、加熱開始後、壁体内での断熱材の熱分解の進み方が防火性能に支配的な影響を及ぼす。
- ・熱硬化性樹脂 (PUF、PF) の熱分解挙動 (熱分解のしやすさと炭化物等の残渣量) は、窒素雰囲気下の TG-DTA 分析により相対的に把握できる。

### 5.7.2 遮熱性

- ・熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) を用いた木造外壁の遮熱性は、無断熱壁体と同程度であり、無断熱壁体と見なせる。
- ・熱硬化性樹脂 (PUF、PF) を用いた木造外壁の遮熱性は、PF では密度が大きい方が、PUF では熱分解しにくい樹脂を用いた難燃仕様の方が向上する。
- ・断熱材が十分に厚い PF 壁体の場合、常温時の熱貫流抵抗から遮熱性を予測できる。
- ・熱硬化性樹脂 (PUF、PF) を用いた木造外壁の遮熱性に対する断熱材の優劣は、窒素雰囲気下の TG-DTA 分析により、樹脂の熱分解挙動を比較することで把握できる。

### 5.7.3 柱の損傷度

- ・熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) を用いた木造外壁では、遮熱性と同じく、柱の損傷度を評価する上では近似的に無断熱壁体と捉えることができる。
- ・熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE) を用いた木造外壁では、防火性能予測の観点からも、中空層における熱伝達・熱収支の実態把握と計算モデルの構築が課題であることを確認した。
- ・熱硬化性樹脂 (PF、PUF) を用いた木造外壁では、断熱材の熱分解挙動により壁体内の温度分布が変化し、柱の断面形状が定まる。断熱材の熱分解の進行が遅いほど柱側面では損傷が抑制されるが、加熱側柱正面および柱角部では損傷が進んで、その結果、柱の損傷度は大きくなる傾向がある。
- ・発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁における柱の損傷度の優劣は、RW 壁体、GW 壁体と同じく、加熱終了時の被覆層裏面温度 (充てん断熱工法では、断熱材加熱側温度) を比較することで判断できる。

- ・熱硬化性樹脂（PF、PUF）を用いた木造外壁では、熱分解による断熱性の低下度を含めた加熱終了時の見かけの熱貫流抵抗値を求められないため、加熱終了時の被覆層裏面温度の計算が成立せず、一次元定常計算より予測できるまでに至らなかった。
- ・熱硬化性樹脂（PUF、PF）を用いた木造外壁における柱の損傷度に対する断熱材の優劣は、窒素雰囲気下の TG-DTA 分析により、樹脂の熱分解挙動を比較することで把握できる。

これらの知見により発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁の防火性能について、用いる発泡プラスチック断熱材がどのような影響を及ぼすのか、実大試験を実施する前に、予め見通しが得られるようになる。従って、発泡プラスチック断熱壁体についても、防火性能に関する技術開発や性能評価を円滑に進められるようになり、実大試験への依存軽減につながると考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 旭化成アミダス株式会社「プラスチック」編集部編：プラスチック・データブック，工業調査会，1999.12
- 2) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9521 建築用断熱材，2017
- 3) 日本工業標準調査会：日本工業規格 JIS A 9511 発泡プラスチック保温板，2006
- 4) International Organization for Standardization：ISO 834-1 Fire resistance tests Reaction-to-fire tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements, 1999
- 5) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構：防耐火性能試験・評価業務方法書，2011.5<sup>注2)</sup>

#### 注

- 注 1) 45 分準耐火構造の場合は、内装材の仕様を平成 12 年建設省告示第 1358 号に従い、厚さ 15 mm のせっこうボードとした。
- 注 2) 実験時に参照した防耐火性能試験・評価業務方法書を示す。現行の防耐火性能試験・評価業務方法書は、2017 年 3 月に改訂されている。

## 第6章 総括および今後の課題

### 6.1 各章のまとめ

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、防火性能に影響を及ぼし、その影響は複雑に重なり合うが、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、木造外壁の性能評価では合理的で包括的な評価ができず、また壁体開発では、試行錯誤的に実大実験による仕様検討をせざるを得ないため、結果的に数多くの実験を要して、新規の壁体開発を停滞させている。

本研究では、木造外壁断熱工法について、防火性能評価を合理的に行ったり、また必要な防火性能を適確に満足する設計を容易にしたりするために、木造外壁の断熱仕様（断熱材・断熱工法）が防火性能に及ぼす影響を小型試験体を用いた実験により解明し、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た。そして断熱仕様から防火性能の予測に向けた検討を行い、実大試験への依存を軽減させるための知見を導いた。

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、既往研究をレビューし、本研究の位置づけを明確にした。そして、防火構造を想定した一般的な断熱仕様の試験体により、木造外壁の断熱仕様と防火性能の基本的な傾向を把握した。

加熱終了まで溶融・燃焼しないロックウール断熱材（RW）を用いた小型試験体による実験を行い、断熱工法による断熱材の位置や厚さが防火性能に及ぼす影響を検討した。断熱材の位置や厚さによっては柱の損傷が進み、非損傷性に対し不利側に作用する場合があります。断熱工法による断熱材の位置・厚さと防火性能との関係は複雑であることがわかった。

次に、火災加熱を受けて、断熱材の溶融や燃焼など断熱材の状態が変化する可能性があるグラスウール断熱材（GW）および発泡プラスチック断熱材を取り上げた。そのうち、発泡プラスチック断熱材は可燃性を有し、壁体内での可燃物量の増大が防火性能を低下させる懸念があるため、発泡プラスチック断熱材が防火性能に及ぼす影響について、木造外壁の既往試験データより、基本的な傾向を検討した。

外装材に被覆された条件下であれば、壁体内の発泡プラスチック断熱材に着火燃焼による急激な温度上昇は見られず、断熱材の熔融・熱分解の進み方が防火性能に支配的な影響を及ぼすことがわかった。なお、GWについては、燃焼しないが、標準耐火加熱1時間の温度範囲で熔融・収縮することが想定された。

これらの結果から、防火構造より高度な防火性能が求められ、かつ断熱仕様と防火性能の関係がより複雑となる準耐火構造外壁において、断熱仕様と防火性能の関係を予測できるようにするために、検討が必要な課題を明らかにし、本研究の方針を説明した。

第2章では、各種断熱材が木造外壁の防火性能に及ぼす影響を検討するに先立ち、断熱材の種類ごとに高温性状を示す物性値を既往文献より調査し、断熱材に関する基本情報を整備した。加えて、グラスウール断熱材および発泡プラスチック断熱材は、火災加熱時に、熔融や収縮、熱分解の熱変形が生じるため、第4章および第5章の実験に用いる断熱材を対象に、TG-DTA分析を行い、高温性状を示す物性値や熱分解挙動を把握した。

1時間の火災加熱に対し、RWは加熱終了まで断熱材の形状をほぼ保持できるが、GWでは熔融や収縮が起こる。TG-DTA分析の結果、実験に用いるGWのガラス転移点は478.0℃、軟化点は659.4℃であった。発泡プラスチック断熱材では、火災加熱の早い段階で熔融や熱分解が生じ始める。TG-DTA分析より、実験に用いるXPSのガラス転移点は108.8℃との結果が得られ、PF、PUFの熱分解挙動は、PFの方がPUFに比べ樹脂の熱分解が進みにくいことを確認した。

また発泡プラスチック断熱材は可燃性を有するため、断熱材の種類ごとに50kW/m<sup>2</sup>の加熱のもとで発熱速度を測定し、基本的な燃焼性状を把握した。

熱可塑性樹脂（押出法ポリスチレンフォーム（XPS）、ビーズ法ポリスチレンフォーム（EPS）、ポリエチレンフォーム（PE））は加熱を受けると、樹脂は加熱表面から熔融し、液化、熱分解、ガス化の過程をたどる中で着火に至り、そのまま燃え尽きるまで一気に燃焼する。熱硬化性樹脂（フェノールフォーム（PF）、硬質ウレタンフォーム（PUF））は加熱を受けて可燃性の表面材に着火すると、表面材が燃焼して発熱ピークを迎えた後、受熱面から順に樹脂の熱分解、燃焼が進む。特にPUFでは難燃性が高い樹脂を用いた製品ほど、燃焼は緩慢になり、生成される炭化物が多くなる。

さらに発泡プラスチック断熱材では、同種の断熱材であっても、市場で入手できる製品の違いが、本論文で対象とする木造外壁だけでなく、建築部材すべての防火性能へ影響を及ぼす可能性がある。そこで、防火性能評価の観点から断熱材の優劣を判断できるようにするため、断熱材の燃焼性状のうち、①着火特性、②燃焼による周囲への熱的影響の大きさ（単位質量あたりの発熱量）、③着火後の燃焼拡大特性（一次ピーク時発熱速度）の3つに着目して、燃焼性と高い相関を示す材料物性を検討した。

熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）では、①XPSの一部（樹脂が熔融する際に着火する場合）を除き、着火特性は酸素指数により判断できること、②単位質量あたりの発熱量は製品間でほとんど差が見られず、断熱材種類ごとにほぼ一定の値とみなせるため、発熱量を質量から推定できること、③一次ピーク時発熱速度は、断熱材密度と相関性があり、断熱材密度より大小関係を捉えられることがわかった。

熱硬化性樹脂（PUF、PF）では、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について、PFでは製品間でほとんど差が見られないため、質量から樹脂の発熱量を推定できるが、PUFでは樹脂の種類や製品仕様により値が異なり幅が生じること、③一次ピーク時発熱速度は、熱重量・示差熱同時分析（TG-DTA分析）から得られる200℃過ぎから350℃前後までの熱重量（TG）の減少量に対応することがわかった。特にPUFについては、TG-DTA分析で得られる一次質量減少量により、一般品と難燃仕様の違いを分けることができること、一次ピーク時発熱速度と材料設計に用いられるイソシアネート指数一次質量減少量、これら3者の間に相関性があることを明らかにした。

今回の検討では、建築部材の防火性能を評価する観点から発泡プラスチック断熱材の優劣を判断するにあたり、断熱材の材料物性より判断できる部分と判断できない部分があった。断熱材の材料物性より判断できる部分については、これらの知見を用いることにより、発泡プラスチック断熱材を用いた建築部材に関する技術開発や防火性能評価を円滑に進められるようになる。加えて、発泡プラスチック断熱材に対し、認定取得時の防火性能との同等性を確認でき、大臣認定取得後の品質管理の一助となる。一方、判断できない部分について、今後、解明を進めるためには、材料組成に関する詳細な情報の収集、樹脂の化学的組成の分析、事細かな高温性状の把握等、発泡プラスチック断熱材の詳細な情報収集、精緻な分析を行っていく必要がある。



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、火災加熱中に熔融・燃焼しないRWを用いた準耐火木造外壁（軸組造）を対象に、充てん断熱工法、外張断熱工法、付加断熱工法の各断熱工法について、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を用いた木造外壁（以下、RW壁体）における柱の損傷は、外壁では屋内側の被覆が熱的に薄いため、屋内加熱の方が屋外加熱より不利になる傾向がある。またRW壁体において、充てん断熱材は、柱の加熱側の温度を上昇させて、加熱側柱角部と柱正面の損傷を促進させて不利に働く面と柱側面の損傷を抑制して有利に働く面がある。一方、外張（付加）断熱材は、屋外加熱時は柱の被覆材となり有利側に働く。しかし屋内加熱時は、非加熱側への放熱を妨げて、柱の損傷を促進させて不利側に作用する。そして断熱工法ごとの柱の損傷の特徴は、この充てん断熱材と外張（付加）断熱材の働きの組み合わせから説明できることがわかった。

次に熱伝導率等の材料物性について温度依存性を考慮した一次元の定常熱伝導計算（以下、一次元定常計算）を行い、小型実験の結果と比較した。

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（遮熱性）は、一次元定常計算により、やや高温側で予測できることを確認した。

そして断熱材の配置等の違いによる遮熱性の序列は、評価する加熱時間ごとに、常温時の熱貫流抵抗を比較することで予測でき、木造外壁の断熱性能（壁体の熱貫流抵抗）が45分準耐火外壁で $1.70 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 以上、60分準耐火外壁で $2.10 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 以上あれば、遮熱性は十分確保できることが明らかになった。

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を比較することで判断でき、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がわかった。

以上より、無断熱壁体およびRW壁体については、これらの知見を用いることで、実大試験を実施する前に防火性能の見通しが予め得られるようになった。

但し、無断熱壁体や外張断熱工法のように中空層がある場合は、一次元定常計算による計算値と実験結果との間に乖離が生じ、中空層温度および被覆層裏面温度の計算値が実験結果より顕著に高くなった。本研究ではその原因特定には至らず、中空層における熱伝達・熱収支の実態把握と計算モデルの構築は、木造外壁の防火性能を予測するうえで、今後、取り組むべき重要な課題とした。

第4章では、グラスウール断熱材（GW）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、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を用いた木造外壁（以下、GW壁体）では、火災加熱を受け、GWの加熱側表面温度が軟化点に近い約600℃付近に達すると、GW自体に熔融や収縮が起こり、GWの断熱性が低下し、その傾向はGW密度が小さいほど顕著になる。そしてGWは、高温下で熔融・変形するため、GW壁体の防火性能の特徴は、無断熱壁体とRW壁体のように断熱材が温度の影響を受け難い工法との間に位置づけることができる。

GW壁体の遮熱性は、常温時の熱貫流抵抗がRW壁体と等しい場合、RW壁体より低くなるが、GWの密度およびGW自体の断熱性能に応じて決まる。またGW壁体では、RW壁体と同じく、充てん断熱材が柱の加熱側の温度を上昇させて、加熱側柱角部と柱正面の損傷を促進させて不利に働く一方、柱側面の損傷を抑制して有利に働く二面性が確認されたが、RW壁体ほど強く作用しない。

GW壁体の遮熱性の優劣は、常温時の熱貫流抵抗を比較することで予測でき、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を比較することで判断できることがわかった。

これにより、GW壁体（充てん断熱工法）について実大試験を実施する前に、GWが外壁の防火性能にどのような影響を及ぼすのか、予め見通しが得られるようになった。またGW壁体でもRW壁体と同じく、中空層のない充てん断熱工法では、柱の損傷度は、一次元定常計算により加熱終了時の被覆層裏面温度を求めることで予測できると考えられる。しかしGWの熱抵抗値は、GWの熔融や収縮を加味した見かけの熱貫流抵抗値とする必要があり、この値を工学的にどう設定するかは、GW壁体の防火性能の予測に向けて、今後の課題となった。

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し、断熱材仕様による熔融、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、加熱側の内外装材が保持された条件下で、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。

木造外壁に発泡プラスチック断熱材を用いた場合、内外装材越しに火災加熱を受けると、断熱材は着火燃焼せず、断熱材表面から熱分解が進む。この熱分解が断熱材の非加熱側に達する時間は、断熱材非加熱側温度が大きな傾きで上昇し始める時間で推定できることがわかった。

発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁（充てん断熱工法）の防火性能の特徴は、熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）と熱硬化性樹脂（PF、PUF）で大きく異なる。

熱可塑性樹脂を用いた木造外壁では、加熱開始後、壁体内の断熱材が早い段階で溶融するため、防火性能（遮熱性、柱の損傷度）を評価する上では、近似的に無断熱壁体とみなせる。

一方、熱硬化性樹脂を用いた木造外壁では、断熱材の熱分解が、加熱時間内に断熱材の非加熱側に達するか否か、また達するまでに要する時間が、防火性能に支配的な影響を及ぼす。この断熱材の熱分解の進みややすさは、熱硬化性樹脂の場合、窒素雰囲気下の TG-DTA 分析により相対的に把握できることがわかった。

遮熱性は、PF では熱分解に時間を要する密度の高い方が、PUF では熱分解しにくい樹脂を使用する難燃仕様の方が向上する。そして断熱材が十分に厚い PF を用いた木造外壁（PF 壁体）の場合は、常温時の熱貫流抵抗から遮熱性を予測できる。

また熱硬化性樹脂を用いた木造外壁では、熱分解の進行が遅いほど、柱側面では損傷が抑制されるが、加熱側柱角部および柱正面では損傷が進んで、柱の損傷度が大きくなる傾向がある。そして柱の損傷度は加熱終了時の加熱側被覆層の裏面温度を比較することで、その優劣を判断できる。

これにより、発泡プラスチック断熱材を用いた木造外壁（充てん断熱工法）についても、実大試験を実施する前に、用いる断熱材の種類や仕様等が外壁の防火性能にどのような影響を及ぼすのか、予め見通しが得られるようになった。

但し、熱可塑性樹脂を用いた木造外壁では、断熱材が溶融した後は中空層が形成されるため、無断熱壁体と同様、一次元定常計算による計算値と実験結果との間に乖離が生じ、中空層温度および被覆層裏面温度の計算値は、実験結果より顕著に高くなった。熱可塑性の発泡プラスチック断熱壁体の防火性能予測の観点からも、中空層における熱伝達・熱収支の実態の把握とその計算モデルの構築が重要な課題である。

また熱硬化性樹脂を用いた木造外壁でも、熱分解による断熱性の低下度を含めた加熱終了時の見かけの熱貫流抵抗が定量化できないため、一次元定常計算が成立せず、

計算より柱の損傷度の予測には至らなかった。実測できない熱分解後の PUF および PF の見かけの熱抵抗値を工学的にどう設定するかは、防火性能を予測に向けて、今後、解決すべき課題である。

## 6.2 今後の課題と展望

ここでは、木造外壁の断熱仕様から防火性能を予測するにあたり、本研究で得られた知見と今後の課題をまとめた上で、今後の展望を述べて、本研究を結ぶ。

無断熱壁体および RW 壁体のように加熱終了時まで断熱材の形状が維持される断熱壁体、GW 壁体のように断熱材の熔融や収縮が生じても断熱性能に応じて遮熱性が決まる断熱壁体、または PF 壁体のように断熱材の熱分解が生じても断熱材が十分に厚く遮熱性への影響が無視できる断熱壁体については、常温時の熱貫流抵抗から予測できることがわかった。

熱可塑性の発泡プラスチック断熱壁体は、加熱中に断熱材が熔融して加熱終了時の熱貫流特性は、事実上、無断熱壁体と同様になるため、熱可塑性の発泡プラスチック断熱壁体の遮熱性は、無断熱壁体の遮熱性と同等とみなすことができ、無断熱壁体の常温時の熱貫流抵抗から予測できることがわかった。

一方、PUF 壁体、断熱材が十分に厚いとは言えない PF 壁体のように、火災加熱時に断熱材に熔融や熱分解が生じる場合は、遮熱性は無断熱壁体（無断熱の場合）と RW 壁体（加熱終了まで断熱材形状が保持される場合）を結ぶ線上に位置づけられ、断熱材の熱分解による断熱性の低下度に応じて定まることはわかった。しかし本研究の範囲では、断熱材の熱分解による断熱性の低下度を定量化することができず、今後の課題となった。

木造外壁の防火性能に支配的な柱の損傷度の優劣は、無断熱壁体の場合、加熱終了時の熱貫流特性が無断熱壁体とみなせる熱可塑性の発泡プラスチック断熱壁体の場合および RW 壁体のように断熱材の形状が保持される場合は、いずれも中空層の有無に応じて、加熱終了時の被覆層裏面温度を比較することで判断できる。

そして中空層がない場合は、材料物性の温度依存性を考慮した一次元定常計算により、加熱終了時の被覆層裏面温度を算出し比較することで、柱の損傷度の優劣を予測できる。しかし、無断熱壁体や外張断熱壁体のように中空層がある場合や熱可塑性の

発泡プラスチック断熱壁体のように断熱材が溶融して中空層が形成される場合は、一次元定常計算による被覆層裏面温度の計算値は実験結果より顕著に高くなって、予測ができなかった。木造外壁の非損傷性を予測するうえで、中空層における熱伝達・熱収支の実態の把握とその計算モデルの構築が重要な課題となった。

一方、GW 壁体や熱硬化性である PUF 壁体、PF 壁体のように、火災加熱中に、断熱材に溶融や熱分解が生じる場合、加熱終了時の被覆層裏面温度と柱の損傷度の関係は、無断熱壁体と RW 壁体を結ぶ線上に位置づけられる。GW 壁体では GW の断熱性能に応じて、PUF 壁体、PF 壁体では溶融や熱分解によって生じる断熱性の低下度に応じて、それぞれ加熱終了時の被覆層裏面温度が定まるため、この加熱終了時の被覆層裏面温度を比較することで、柱の損傷度の優劣を判断できることがわかった。

しかし、本研究の範囲では、溶融、熱分解による断熱性の低下度を含めた加熱終了時の見かけの熱貫流抵抗を定量化できなかったため、一次元定常計算が成立せず、計算より柱の損傷度を予測するまでには至らなかった。非損傷性に関わる柱の損傷度の予測に向けて、溶融・収縮の影響を加味した GW の見かけの熱貫流抵抗値および熱分解による断熱性の低下度を見込んだ PUF、PF の見かけの熱貫流抵抗値について、工学的に適切な近似法の開発が、今後の課題となった。

以上より、本研究で得られた知見を用いることで、木造外壁の断熱仕様（断熱材・断熱工法）と防火性能との関係が明らかになり、用いる断熱材の種類や仕様等が外壁の防火性能にどのような影響を及ぼすのか、その見通しがかなり鮮明に得られるようになった。

建築部材の防火性能を評価する観点から、発泡プラスチック断熱材の優劣について、断熱材の材料物性より判断できる部分と判断できない部分があり、判断できない部分については課題を残した。

また、木造外壁の防火性能の予測に向けては、溶融・熱分解する断熱材の見かけの熱抵抗値の近似手法の開発、中空層における熱伝達・熱収支の実態把握と計算モデルの構築の大きく 2 つの課題を残した。また本研究では扱うことができなかったが、本来、非損傷性を評価・予測するにあたっては、木材内部の温度分布や水分移動の状況を把握し、温度および含水率による木材のヤング率への影響を考慮する必要がある。この点を本研究で提案する予測手法にどのように組み込むかも、今後、検討すべき課

題の1つである。一方、充てん断熱材があり中空層がないRW壁体のように、一次元定常計算より加熱終了時の被覆層裏面温度を比較的精度よく求めることができ、柱の損傷度の優劣を予測できている場合もある。これら残された課題を解決できれば、本研究で提案する一次元定常計算により、木造外壁の断熱仕様（断熱工法・断熱材）から防火性能について、かなり高い精度で予測ができるようになると思われる。

これにより、断熱化された木造外壁の防火性能について、多岐にわたる断熱仕様から、断熱工法による断熱材の位置、厚さ、種類による防火性能の序列を明らかにできるようになる。そして木造外壁の防火性能評価では、最も防火性能が不利となる断熱仕様を選定できるようになり、一度の実大試験で断熱仕様に対する包括的な評価が可能となり、合理的でかつ円滑な実施につながると考えられる。

また木造外壁の新規開発においては、断熱仕様を変化させた場合の防火性能の優劣が把握できるようになり、類似仕様の試験結果をを足掛かりに、要求される防火性能に対する適切な壁体設計を可能とし、実大試験への依存を大幅に軽減させることができると考えられる。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方々に、多大なるご指導とご協力を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

早稲田大学大学院創造理工学研究科 教授 長谷見雄二博士には、2009年に筆者が研修として研究室にお世話になって以来、常に心暖かい激励のもと、研究のまとめ方や学術論文の書き方をはじめ、実に多くのことをご指導いただきました。本論文をまとめるにあたり、時には厳しくかつ明解なご指導やご助言をいただき、最後まで心暖かくご指導、ご鞭撻を賜りました。本論文がこのように完成を迎えることができましたのは、長谷見雄二博士のご指導のお陰でございます。心より深く感謝申し上げます。

学位論文審査において、早稲田大学大学院創造理工学研究科 教授 田辺新一博士、同 教授 高口洋人博士には、貴重なお時間を何度も割いていただいて、本論文に対して、多くのご指導、ご助言を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

また大浦千春氏はじめ長谷見研究室の学生の皆様には、研究室にお伺いした際、暖かく迎えていただきましたことに感謝申し上げます。また安井昇博士、上川大輔博士、中村正寿博士、加來千紘博士をはじめ長谷見研究室 OBの方々には、本論文の作成および審査の進行にあたり、多大なるご支援をいただきましたことに御礼申し上げます。

本研究の実施および本論文の作成にあたって、筆者の職場である（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部 北方建築総合研究所および建築性能試験センターの皆様、および北海道庁建築職の諸先輩方には、長きにわたり、ずっと見守り応援していただき、多大なるご支援を賜りました。心より感謝申し上げます。

特に（地独）北海道立総合研究機構 理事 鈴木大隆博士、北方建築総合研究所 月館司博士には、研究実施から本論文の作成まで、終始助言を賜り、建築環境工学の観点よりご指導いただきましたことに、深甚の謝意を表します。

元北方建築総合研究所 桂修博士、北方建築総合研究所 谷口円博士には、建築材料学の見地から数多くのご指導、ご助言を賜りましたことに深く感謝申し上げます。

何より建築防火の分野に導いていただいた元北方建築総合研究所 故 南慎一博士、入江雄二氏、元北海道庁 鈴木大智氏、須田敏則氏、に心より感謝申し上げます。

本研究では、数多くの実験を実施しました。実験実施にあたり、これまで数多くの試験技術、実験計画の策定についてご指導いただいた（地独）北海道立総合研究機構において防耐火構造の性能評価の評価員である菊地伸一博士、小國勝男氏、また土橋常登博士はじめ（一財）日本建築総合試験所の皆様に深く感謝申し上げます。そして、試験体製作を一手に引き受けて下さった新濱建設 新濱寿男氏、藤澤俊輔氏のご協力に感謝申し上げます。実験の実施にあたって、十河哲也氏、小川貢氏をはじめ、（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部 建築性能試験センターの皆様のご協力がなければ、実験の実施はできなかったことを記すとともに御礼申し上げます。

本研究の内容の多くは、（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部と各種断熱材メーカー団体との共同研究として実施されたものです。

共同研究実施に向けて、各方面への調整をはじめ道筋をつけていただいたロックウール工業会 宮崎孝司氏、硝子繊維協会 布井洋二氏、発泡プラスチック断熱材連絡会 小浦孝次氏に深く感謝申し上げます。

また共同研究者として研究活動を支えていただいた小竹和広氏、高橋淳一氏ほかロックウール工業会の皆様、鶴澤孝夫氏、井上幹生氏ほか硝子繊維協会の皆様、江口孝明氏、松江賢治氏ほか押出發泡ポリスチレン工業会の皆様、鈴木修氏はじめ発泡スチロール協会の皆様、奥谷達也氏、伊熊健二氏ほかウレタンフォーム工業会の皆様、横家尚氏、青木学氏ほかフェノールフォーム協会の皆様、元三菱樹脂の安藤達夫氏、大久保正一氏、井崎淳一氏に、心より感謝申し上げます。

また研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力を賜りながら、お名前をここに記すことができなかった数多くの方々に感謝申し上げます。

最後になりますが、いつも支えとなってくれた神戸に暮らす両親、札幌に住む義母に感謝します。そして今まで一番近くで、ずっと応援し支えてくれた素晴らしい妻と娘に心より深く感謝します。

2019年7月 糸毛 治



本研究は、次に示す（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部（旧 北海道立北方建築総合研究所）が実施する研究活動および LIXIL 住生活財団による研究助成により実施されたものです。ここに記して、謝意を表します。

#### 第 1 章

- ・北海道立北方建築総合研究所，ロックウール工業会：民間共同研究「新たな防火性能を付与した木造高断熱壁体の開発」，平成 19 年度～平成 21 年度

#### 第 2 章

- ・北海道立北方建築総合研究所：経常研究「有機系建材の燃焼性状と防火対策に関する基礎的研究」，平成 17 年度～平成 19 年度
- ・北海道立北方建築総合研究所，三菱化学産資(株)：民間共同研究「硬質ウレタンフォームの燃焼性評価に関する基礎的研究」，平成 17 年度
- ・北海道立北方建築総合研究所，発泡プラスチック断熱材連絡会：民間共同研究，「発泡プラスチック系断熱材の燃焼性状と評価技術に関する研究」，平成 20 年度～平成 21 年度
- ・（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部：経常研究「防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標の構築」，平成 24 年度～平成 26 年度

#### 第 3 章

- ・LIXIL 住生活財団 2012 年度研究助成：「熱変性が少ない断熱材を用いた木造壁体の防火設計に関する研究」

#### 第 4 章

- ・（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部，ロックウール工業会，硝子繊維協会，押出發泡ポリスチレン工業会，発泡スチロール協会，ウレタンフォーム工業会，フェノールフォーム協会：「木造高断熱壁体の防耐火性能の実大試験検証と評価手法の提案」，平成 26 年度～平成 28 年度

#### 第 5 章

- ・（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部，発泡プラスチック断熱材連絡会：一般共同研究「発泡プラスチック断熱材を用いた木造壁体の断熱工法と防火性能に関する研究」，平成 22 年度～平成 25 年度
- ・（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部，経常研究「防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標の構築」，平成 24 年度～平成 26 年度 ※再掲

## 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