

# 博士論文

ファサード型火災実験を用いた可燃性  
外装材の燃え拡がり性状及び評価基準  
に関する研究

西尾 悠平

ファサード型火災実験を用いた  
可燃性外装材の燃え拡がり性状及び評価基準に関する研究

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究の位置づけ.....	3
1.4 “JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”に関して.....	4
1.5 本論文の構成.....	5
第2章 技術の現状と課題.....	8
2.1 第2章の目的.....	8
2.2 可燃性外装材の技術の現状と火災事例と研究事例.....	9
2.2.1 外断熱工法.....	9
2.2.2 木製外装.....	13
2.2.3 金属サンドイッチパネル.....	13
2.2.4 太陽電池フィルム.....	14
2.2.5 樹脂塗材.....	14
2.2.6 樹脂サイディング.....	15
2.2.7 まとめ.....	15
2.3 ファサード試験.....	16
2.3.1 ファサード試験において評価する項目.....	16
2.3.2 既存ファサード試験における噴出火炎性状.....	18
2.3.3 燃え拡がり性状の評価高さ及び基準と噴出火炎性状の関係.....	20
2.3.4 まとめ.....	22
2.4 第2章のまとめ.....	25
第3章 加熱強度の検討.....	28
3.1 第3章の目的.....	28
3.2 検討項目.....	28
3.3 不燃性外装を用いた場合の噴出火炎性状.....	29
3.4 加熱条件の検討.....	33
3.4.1 開口噴出火炎の発熱量.....	33
3.4.2 開口噴出火炎が開口部へ与える影響.....	34
3.4.3 燃え拡がり性状の評価可否.....	35
3.4.4 上階延焼判定の評価可否.....	40

3.5 第3章のまとめ.....	45
第4章 可燃性外装の燃え広がり性状.....	48
4.1 第4章の目的.....	48
4.2 実験概要.....	49
4.2.1 実験の目的.....	49
4.2.2 試験体及び実験条件一覧.....	49
4.2.3 試験方法.....	51
4.3 試験体詳細.....	53
4.3.1 湿式外断熱工法.....	53
4.3.2 通気工法.....	53
4.3.3 木製外装.....	54
4.3.4 金属 SWP.....	54
4.3.5 太陽電池フィルム.....	55
4.3.6 樹脂塗材.....	55
4.3.7 樹脂サイディング.....	56
4.4 実験結果.....	56
4.4.1 燃焼性状.....	56
4.4.2 可燃性外装の分類.....	82
4.4.3 試験体間で差異が表れる測定値.....	87
4.5 第4章のまとめ.....	94
4.5.1 可燃性外装の燃焼性状.....	94
4.5.2 加熱強度の違いが可燃性外装の燃焼に及ぼす影響.....	95
4.5.3 可燃性外装の分類.....	96
4.5.4 試験体間で差異が表れる評価基準値.....	96
第5章 抑制手法の検討.....	98
5.1 第5章の目的.....	98
5.2 計画.....	98
5.2.1 湿式外断熱工法.....	98
5.2.2 通気工法.....	98
5.2.3 木製外装.....	99
5.2.4 金属 SWP.....	99
5.2.5 太陽電池フィルム.....	99
5.2.6 樹脂塗材.....	99
5.2.7 樹脂サイディング.....	99
5.3 抑制手法効果検証実験.....	100
5.3.1 実験の目的.....	100

5.3.2 試験体及び実験条件一覧.....	100
5.3.3 試験方法.....	101
5.3.4 試験体詳細.....	103
5.3.5 実験結果.....	108
5.4 第5章のまとめ.....	120
第6章 JIS A 1310 における防火性能評価基準の提案.....	123
6.1 第6章の目的.....	123
6.2 燃え拡がりの評価基準.....	123
6.3 上階延焼の評価.....	126
6.4 火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答の評価.....	128
6.5 隣棟への延焼加害性評価.....	129
6.6 まとめ.....	133
6.6.1 燃え拡がり性状の評価.....	133
6.6.2 上階延焼の評価.....	134
6.6.3 火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答.....	135
6.6.4 隣棟への延焼評価.....	135
6.7 加熱強度と試験の適用範囲の関係.....	138
第7章 結論.....	140
7.1 結論.....	140
7.2 今後の課題と展望.....	142

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

近年、地球温暖化の影響などにより、建築物の省エネ性能を向上させるために、耐火建築物の外壁に発泡系断熱材などの有機系材料を使用した外装システムが利用されるようになった。しかし、有機系材料を使用した外装において、火災時に短時間で火災が急激に拡大し燃え広がるという事例が海外において多数報告されている。代表的な火災事例として、2008年のモンテカルロホテル火災(アメリカ)<sup>[1-1]</sup>、2009年の北京中央テレビ文化センター火災(中国)<sup>[1-2]</sup>、2010年の釜山ウシンゴールドデンスイート超高層住宅火災(韓国)<sup>[1-3]</sup>があげられ、可燃性外装が火災拡大の大きな要因となる可能性があることが示唆された。これらの火災は主として建築内部ではなく建物の外壁で延焼しており、火災の規模と比較して人的な被害は少なかったものの、外壁面が広範囲にわたり焼損したために物的な損害が著しかった。

これらの火災を受けて中国では一時は発泡系断熱材の使用が禁止となり、韓国においては金属サンドイッチパネルを外壁に使用する際に防火材料試験が課されるようになった。ドバイにおいては外壁材料に対して、防火試験を課す防火規制が制定された。

日本においては、耐火構造物の外壁に外断熱工法を施工する場合の法的な規制として昭和60年の建築指導課長通達「耐火構造の外側に施す外断熱工法の取扱いについて」<sup>[1-4]</sup>で「外断熱工法に係る防火性能試験方法」が規定されており、性能試験を用いて検証する必要があった。この通達における要求性能は非常に厳しく、要求性能を満たすためには供給側の費用負担が大きく、結果として有機系発泡外断熱工法の需要は拡大しなかった。平成12年の建築基準法改正により前述の試験方法は廃止され、「耐火構造の外壁に木材、外断熱材等を施す場合の取扱い」が制定された。日本建築行政会議編集の「建築物の防火避難規定の解説 2002」<sup>[1-5]</sup>の解説によると、例示仕様(告示)の耐火構造(準耐火構造、防火構造、準防火構造も同様)の外壁の場合、木材などの可燃材料や不燃系の断熱材を施す場合は構造に必要な性能を損ねないと判断でき、また、鉄筋コンクリート造等の外壁については有機系の断熱材を施すことも可能であるということとなった。耐火構造において規定される性能は非損傷性、遮熱性、遮炎性の3つであり、外壁に関しては屋内火災に対する非損傷性及び遮炎性そして、屋外火災に対する非損傷性及び遮熱性が要求される。ここで、非損傷性とは火災時に必要な耐力を有することであり、遮熱性とは非加熱側の可燃物の着火を防ぐこと、遮炎性とは火炎を非加熱側へ貫通させないことである。従って、日本の現行法においては耐火構造物がこれらの3つの性能が確保していれば、その外壁に可燃物を施工しても法的には問題がないということとなる。

そのため、耐火構造の外壁に施す外断熱工法に対して有機系の断熱材は工法を問わず施

工可能になり、多様な外断熱工法が用いられるようになった。現在に至るまで日本において外壁で火災を拡大させた事例は、バルコニーのアクリル板が激しく延焼した広島基町高層住宅火災(1996年)<sup>[1-6]</sup>のみである。しかし、海外の火災事例から分かるように、耐火建築物の外壁に可燃性外装を施工することは大規模な火災を引き起こす危険性があり、可燃性外装が施工された外壁には非損傷性、遮熱性、遮炎性という従来要求されている性能に加えて、外壁面における燃え拡がりの抑制という新たな性能が求められる。

現在、日本において可燃性外装の外壁面における燃え拡がり性状を含めた防火性能を適切に評価し運用する仕組みが存在しないため、防火性能を評価する方法を確立することが日本の防火上必要である。一般的に材料の実火災時の防火性能を正確に評価し火災時の特性に関する情報を多く得るには実大規模の実験を行うのが望ましいが、実大規模の試験は実施及び試験装置の維持管理に要する労力や費用が莫大となるため、コストを抑え試験の円滑な運用を図るためには、試験規模を小さくすることが望ましい。

既往の研究<sup>[1-7][1-8]</sup>において、湿式外断熱工法を対象とした可燃性外装の防火性能試験方法の検討が行われ、これらの成果を基に、2015年1月に外装における燃え拡がり性状を評価する試験方法として“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”<sup>[1-9]</sup>が制定された。

しかしながら上記の研究で行われている試験は実規模のファサード試験(例: ISO13785-2<sup>[1-10]</sup>等)と比べて火力が弱く、実験が実施された試験体が主に湿式外断熱工法のみであるため、実際に火災が発生した際に想定外の燃え拡がり方を示す可能性があり、外装の火災安全性能を評価する試験方法として確立するためには更なる検証が必要とされている。更にこの試験においては防火上安全となる可燃性外装の燃え拡がりの基準が定められていないため、この試験における防火上必要とされる評価基準についても検討する必要がある。

今後日本においては、省エネ意識の高まりにより、外断熱工法を利用した高気密高断熱住宅の施工が増加するものと考えられ、有機系断熱材を使用する外壁に関しては、火災安全性能を適切に評価する基準及び、過度の燃え拡がりを抑制する施工技術の確立が必要とされる。また、火災事例のある金属サンドイッチパネルや「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」によって今後外壁に利用される機会が増えると予想される木材等の可燃性外装の燃え拡がりについても検討を行う必要がある。

## 1.2 研究目的

本研究では可燃性外装材が施工された建築物の「延焼の防止」という機能を確保するため、可燃性外装材の燃え拡がり性状の把握及び抑制方法の提案、そして燃え拡がりにおける防火上安全となる基準を構築することを目的とした。そこで、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を通じて、以下のような研究項目を明らかにすることとした。

- “JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の加熱強度の検討（第三章）
- 可燃性外装を用いた場合の“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の加熱強度の整合性（第四章）
- 可燃性外装の燃え拡がり性状の把握及び分類（第四章）
- 可燃性外装の燃え拡がり抑制手法の提案（第五章）
- “JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準の提案（第六章）

### 1.3 研究の位置づけ

国外に目を向けると欧州及び北米においては可燃性外装を用いる場合は材料試験をパスするか、システム全体としての防火性能をファサード型の試験で評価するのが一般的となっている。中東やアジアの国においては可燃性外装に対する規制は存在しなかったが、可燃性外装に関連する大規模な火災を受けて、試験方法の整備などを含めた法規制が急速に進みつつある。

日本においては、2000年の建築基準法改正によって性能規定となって以後、耐火構造物に施工する場合、可燃性外装は法律上容認されているのが現状である。

また、建築基準法における耐火建築物の取扱においては、開口部からの噴出火炎による延焼を防止するために、スパンドレルや庇を耐火性のあるものにする、もしくは開口部に防火戸などを設ける必要があり、外壁に高さ90cm以上のスパンドレルまたは50cm以上の庇の設置もしくは防火設備の設置（防火ガラス等）が義務付けられている。

しかし、室内火災において発生する開口噴出火炎において、火災荷重600MJ/m<sup>2</sup>床面積20m<sup>3</sup>の一般的な居室では火炎高さが0.9mをはるかに超える2.8～3.5mの大きさの噴出火炎が生じることが報告されており<sup>[1-11]</sup>、可燃性外装を施工した建築物においては更に大きな火炎高さとなることが予想される。

本研究はこれらの現状を打破すべく、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における可燃性外装の防火性能の評価基準を提案し、可燃性外装の防火安全性能を適切に評価する基準を提案することを目的とする。

なお、ISO13785-2の試験においては上記で述べた実際の火災時に発生する噴出火炎の大きさに近い火炎を再現した試験方法であるが、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”はISO13785-2と比較して試験規模は少し小さくなっている。実際の火災時の燃焼性状を把握する上では実大規模の試験方法が望ましいが、試験の実施及び運用にかかるコストを考えた場合試験の規模は小さい方が望ましく、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の試験サイズに決定された。

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”は、建築物の外壁が開口噴出火炎に炙られた際の建築ファサードの燃え拡がり性状を測定する試験方法であり、外壁の非損傷性・遮熱性・遮炎性については扱わないこととなっている。そのため、“JIS A 1310 建築

ファサードの燃えひろがり試験方法”においては湿式外断熱工法のように耐火構造物の外壁に可燃性の材料を取り付けるといった構成の建築ファサードが主な試験対象となる。

## 1.4 “JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”に関して

ここでは、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”について、規格より抜粋しその概略を示す。

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”は、ISO13785-1<sup>[1]・[2]</sup>を基とし、加熱手法、試験形状等の技術的な内容を変更して作成した日本工業規格であり、建築物の外壁が開口噴出火炎にあぶられた際の建築ファサードの燃え広がりについて、温度及び熱流束を測定し、目視観察を行う試験方法を規定したものである。建築物の外壁が開口噴出火炎に炙られた際の建築ファサードの燃え広がり性状を測定する試験方法であり、外壁の非損傷性・遮熱性・遮炎性については扱わないこととなっている。

試験装置は主に図 1-1 に示すように、試験体の基板、試験体の架台及び燃焼チャンバーから構成されている。

加熱方法として燃焼チャンバー内の火源としてプロパンガスバーナーを用い、プロパンガスの発熱速度は試験時間中 600kW 以上とし、加熱時間は 20 分とする。

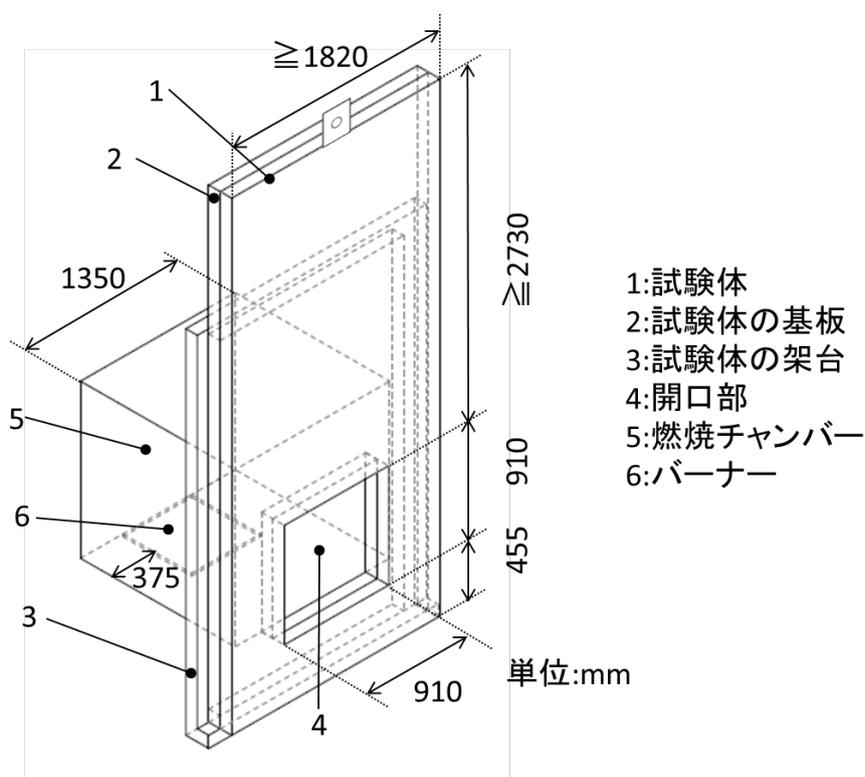


図 1-1 JIS A 1310 で規定されている試験装置及び試験体

## 1.5 本論文の構成

本論文の構成は下記の通りである。

### 第1章 序論

第1章では、本研究の背景及び目的、本論文の構成を述べる。

### 第2章 技術の現状と課題

第2章では、可燃性外装の種類及び火災事例を通じて、可燃性外装の燃え広がりの特徴及び抱えている課題について整理する。また、国外で可燃性外装の試験方法として確立しているファサード型の試験方法及びそれに類する既往研究を通じて、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”が抱える課題を明確にする。

### 第3章 加熱強度の検討

第3章では、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において、実際に可燃性外装の防火性能を評価可能な加熱条件に関して、試験における噴出火炎性状より検討を行う。

### 第4章 可燃性外装の燃え広がり性状

第4章では、実際に可燃性外装として外断熱工法、金属サンドイッチパネル、木製外装、太陽電池フィルム、樹脂塗材、樹脂サイディングを用いて実験を実施し、その燃え広がり性状を観察し、防火上の安全基準及び燃え広がりの抑制手法を考慮する上で重要な事項に関して検討を行う。

### 第5章 抑制手法の検討

第5章では、可燃性外装に対する有効な抑制手法の提案を行うことを目的とし、各可燃性外装に対して防火安全上効果的な抑制手法の検討を行い、検討事項のいくつかに対しては実際に“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いてその効果の確認を行う。

### 第6章 JIS A 1310 における評価基準の提案

第6章では、3章及び4章の結果を踏まえて、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いて可燃性外装の防火安全性能を評価するために必要な条件及び基準について検討し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準の構築を行う。

第7章 結論

第7章では、本論文における総括として論文の全般的なまとめを行う。

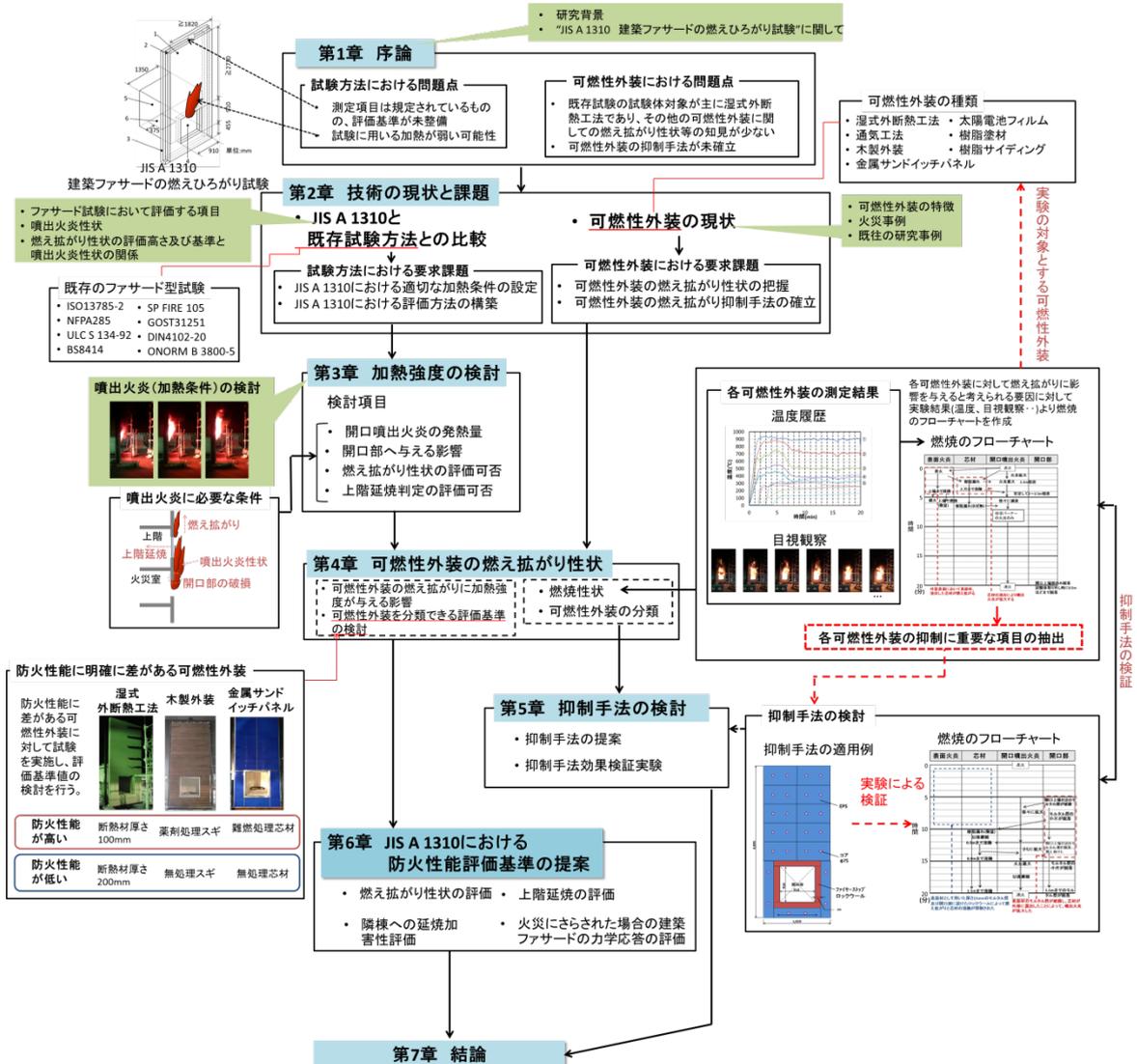


図 1-2 本論文の構成

## 第1章 参考文献

- [1-1] Bob Duval : Monte Carlo Hotel Casino Fire, NFPA Journal, Vol.102, No.3, 2008
- [1-2] 北垣亮馬：建設中に燃えた北京の超高層ビル TVCC 外断熱材の下階延焼で火災拡大、日経アーキテクチュア(912)、2009
- [1-3] 金榮善ら：韓国・釜山ウシンゴールドেনスイート超高層集合住宅の火災調査、火災61(2)、日本火災学会、2011
- [1-4] 外断熱工法の防火に関する研究報告書、日本建築センター、1985
- [1-5] 日本建築行政会議：建築物の防火避難規定の解説、2002
- [1-6] FDMA 総務省消防庁 HP：広島市基町高層住宅火災検討会最終とりまとめ、<http://www.fdma.go.jp/html/data/tuchi0904/090414yo69.pdf>
- [1-7] 崔 国臣：湿式外断熱工法外壁の防火性能評価に関する基礎的研究、東京大学大学院工学系研究科学位論文、2009
- [1-8] 楊 欣潔：耐火建築物における発泡系外断熱工法の延焼性評価手法に関する研究、東京大学博士論文、2011
- [1-9] JIS A 1310:2015 建築ファサードの燃えひろがり試験方法
- [1-10] ISO13785-2 : Reaction-to-fire tests for facades –Part2 : Large-scale tests
- [1-11] Ing. Ing. Erhardt Wilk: Brandentwicklung und Brandwirkungen bei Raumbränden, 3. MAGDEBURGER BRAND UND EXPLOSIONSSCHUTZTA, 21. /22. März 2013
- [1-12] ISO13785-1 : Reaction-to-fire tests for facades –Part1 : Intermediate-scale test

## 第2章 技術の現状と課題

### 2.1 第2章の目的

本章では燃え広がり性状を評価する上で必要な課題を可燃性外装材及び“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”<sup>[2-1]</sup>に対して既往の知見より明確化することを目的とした。

可燃性外装材に関する既往の研究及び火災事例を整理することにより、可燃性外装材が抱えている問題点を明らかにし、可燃性外装材を評価する上で重要なことを明確にした。

また、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準を決めるために、可燃性外装材を対象とした既存のファサード型の試験方法について整理し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”が抱える課題を明確化し、どのような検証が必要であるかを整理した。

## 2.2 可燃性外装材の技術の現状と火災事例と研究事例

外装に施工される可燃性材料は様々であり、その燃焼性状は各々で異なる。ここでは、可燃性外装材の特徴、火災事例及び既往の研究の知見より、可燃性外装材で火災が発生した場合にどのような危険性があるかを整理し、可燃性外装材で評価すべき事柄を明確にする。

### 2.2.1 外断熱工法

外断熱工法は通気層の有無によって非通気層工法と通気層工法に分けられる。非通気層工法は外装下地材の作り方によって湿式工法と乾式工法に分けられるが、通気層を設けない場合は断熱材に高い透湿性が求められることから、主に発泡系の断熱材が用いられる(図2-1)。特に非通気の湿式工法は海外においては Exterior Insulation Finishing Systems (EIFS) または External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) と呼ばれている。湿式外断熱工法は断熱、天気気密性を改善するために、コンクリートの外壁躯体に接着剤または機械的留め具で取り付けられて、主にヨーロッパ、アメリカにおいて普及しており、日本においても北海道等の寒冷地を中心に普及しつつある。

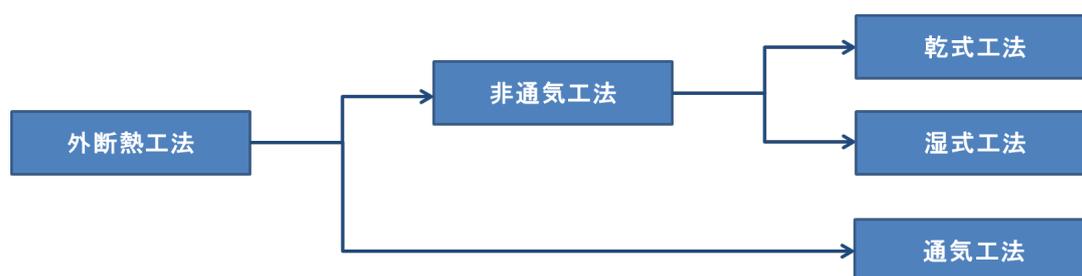


図 2-1 外断熱工法の分類

#### 2.2.1.1 非通気工法

##### (1)技術

非通気工法は断熱材と外装材の間に通気層を設けない工法で、湿式工法と乾式工法に分けられる。

湿式工法は現場で断熱材をコンクリート躯体に接着剤で直接取り付ける工法である。湿式工法の最も基本的なものは図2-2に示すように断熱層、メッシュ、ベースコートの3つの層で構成されている。断熱材の層はほとんどの外断熱工法では発泡ポリスチレン (EPS) が用いられているが、時にはフェノールフォーム、ポリイソシアヌレートフォームまたはポリウレタンフォーム等の発泡ポリマーも使用されている。断熱材の厚さは一般的には10～100mm程度の厚さが用いられるが、200mmもしくはそれ以上の厚さの物がヨーロッパでは使用される例もある。また、グラスウールのような非可燃性の断熱材を使用することもある。補強メッシュ層は一般的にガラス繊維のメッシュが用いられる。ベースコートはコテで塗布もしくは時々噴霧によって施工され、コーティング材料は、主に樹脂系のセメ

ント系ポリマーが用いられる。

乾式工法は工場で断熱材と外装下地材の複合パネルを制作する工法である。北海道においては主流であったが近年は透湿性が求められるようになり、EPS を用いた湿式工法が増加する傾向にある。

## (2)火災事例

日本においては湿式外断熱工法に関連する大規模な火災事例はないものの、外断熱工法が普及している欧州及び北米においては死傷者が出る火災事例も報告されている。

最も有名な火災としてアメリカのモンテカルロ火災<sup>[2-2][2-3]</sup>が知られている。モンテカルロホテルは32階建ての鉄筋コンクリート造であり、外壁面の平な部分及び29階から32階の装飾柱部に外断熱工法が施されていた。ポリウレタンにより塗装が施されていた。火災の原因は屋上で金属部材の切断を行った際に発生したスラグが着火したためである。モールディングのEPSとポリウレタン部分が部材に沿って横方向に延焼し、その後下方向へも延焼した。主に装飾体部分が横方向に燃え広がったが、延焼した炎によって平らな外断熱の部分にも点火した。燃え広がりが起きた主な原因は装飾部のEPSとポリウレタン部分とされており、下方向への延焼も装飾部が熔融落下したためと報告されている。輻射熱によって外断熱工法の燃焼は起こったものの火炎伝播は起こっておらず、火災拡大の原因は外断熱工法にはないと結論付けられた。

ハンガリーにおいても火災<sup>[2-4]</sup>が1968年に建てられた11階建ての建物で発生している。火災が発生した建物は2007年の改修で外装に70mm厚の難燃性EPSを断熱材として用いた表面に薄い塗装のみで被覆された外断熱工法が施工されていた。出火は6階の住宅の台所から発生し、建物の上端まで急速に燃え広がった。燃え広がった原因としては施工された外断熱工法が業界の基準を満たしていなかったため、ファイヤーストップとして繊維系の断熱材を挿入していなかったこと等、施工に問題がある建物であったとされている。

また、ファイヤーストップが設置されている建物においても火災が拡大した事例が2つ報告されている。一つ目の火災<sup>[2-5]</sup>はフランス、デジョンにある集合住宅で発生し、7人の死者と11人の負傷者を出した。火災は住宅外に設置されているゴミ箱より始まり、急速な燃え広がりを見せた。外壁はEPS断熱材、繊維系断熱材のファイヤーストップで構成された外断熱工法が施工されていたとされている。断熱材が火災を助長し、大量の煙が発生し、住民の避難を困難にした。また、火災時に風が外壁に対して吹きついていたことが報告されている。二つ目の火災<sup>[2-6]</sup>はドイツ、ベルリンにある集合住宅で発生した。火災が起きた建物は1994年に建てられたコンクリート造の建物であり、外壁(内装も同様)には型枠として使用した25mm厚の木質セメントパネルが残っており、その外側に80mm厚さの難燃化されたEPSの外断熱工法が施工されていた。木製パネルの上に断熱材を張り付けていたために建築基準を満たしていないことから2003年に外装の改修が行われ、500mmの繊維系断熱材がファイヤーストップとして2階と4階にEPSの代わりに取り付けられ、防火性能の補強がなされていた。出火の原因は消し忘れたロウソクの火がテレビに燃え移ったため

ある。消防は火災の通報があつてから9分後に到着したが、その時すでに外壁面にまで火炎が及んでいた。出火から20分で建物の上端まで延焼したと推定され、火災終了後の建物の様子を見ると火災室の下側へも延焼していたことが判明した。火災が悪化した原因としては木質セメント板内装による火災荷重の増大及びテレビの難燃性能がないことがあげられており、開口噴出火炎が強大である場合ファイヤーストップが効果を示さないことが示唆されている。

この他にも外断熱工法に関する火災事例の報告はなされているが、報告されている火災事例の多くは防火基準、外断熱の業界基準を満たしていないものであり、防火基準を満たした外断熱工法自体が燃え広がっている事例はほとんどない。また、ファイヤーストップを設置した場合であっても、想定外の開口噴出火炎には機能しないことが示唆されている。

### (3)研究事例

火災を受けた湿式外断熱工法は開口部において図2-3のような燃焼挙動<sup>[2-7]</sup>をするといわれており、欧米においては火災事例を受け湿式外断熱工法に対して実大規模のファサード試験<sup>[2-8][2-9][2-10][2-11]</sup>が実施されており、特にドイツにおいては断熱材の厚さやファイヤーストップ等の検証が実施されており、以下の知見が得られている。

- ファイヤーストップの大きさによる防火性能の違いは確認されていない。<sup>[2-10]</sup>
- 外装表面仕上げが防火性能に大きな影響を与え、有機系の仕上げは無機系の仕上げと比べて防火性能が低い。<sup>[2-10]</sup>
- 一般的に断熱材の厚さが厚いほど可燃物量が多くなり危険と判断されるはずであるが、ファサード型の試験においては防火性能の明確な差は現れなかった。<sup>[2-10]</sup>
- ファイヤーストップの設置は防火性能を向上させ、開口上端部もしくは1層もしくは2階層ごとのファイヤーストップの設置は、100～300mmの厚さのEPSを断熱材として用いた外断熱工法においては燃え広がりを抑制し、十分な防火性能を発揮する。<sup>[2-11]</sup>
- ウレタンフォーム及びフェノールフォームを断熱材として使用する場合は300mm厚さまではファイヤーストップ等の防火処置を施さなくても十分な防火性能を発揮する。<sup>[2-11]</sup>

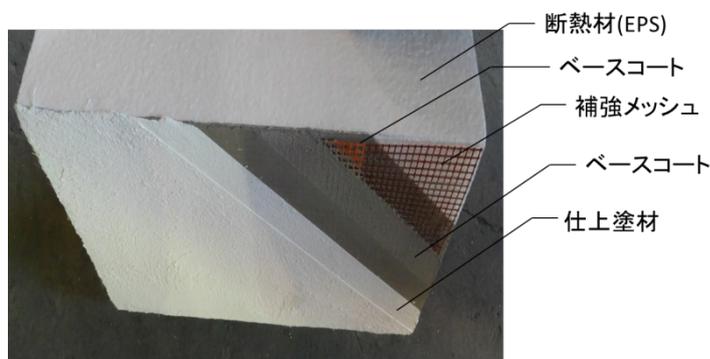


図 2-2 湿式外断熱工法の構成例

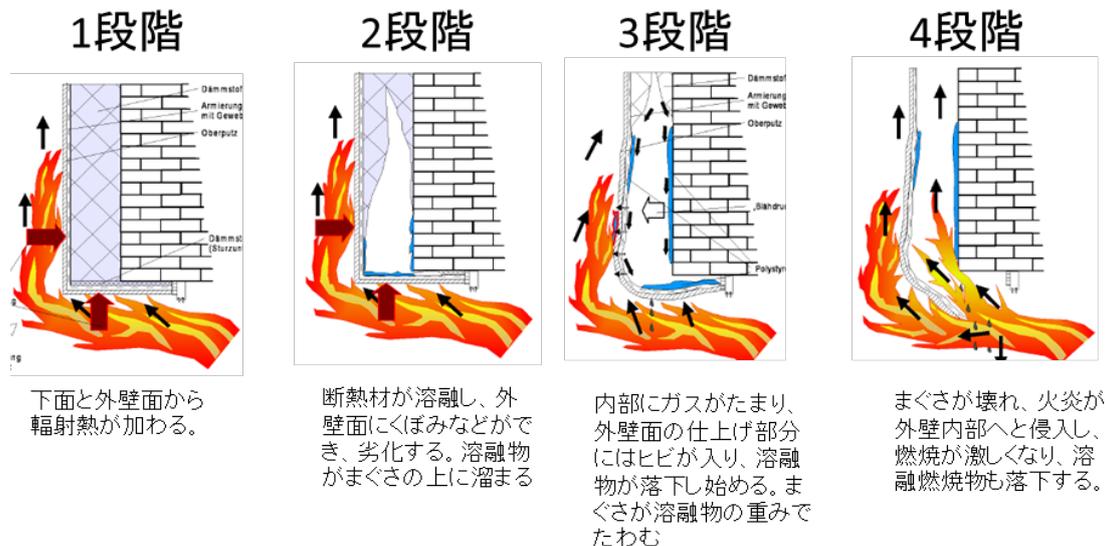


図 2-3 湿式外断熱工法のまぐさにおける燃焼挙動<sup>[2-7]</sup>を翻訳

### 2.2.1.2 通気工法

#### (1)技術

断熱材は繊維系、発泡系の両方が用いられ、基本的には釘などの留め具によって機械的に固定され、胴縁等によって通気層を設ける。外装材としては窯業系もしくは金属系のサイディングが一般的に用いられる。また、木造及び鉄骨造に用いる場合は外張り断熱工法と呼ばれて区別されることもある。外装には不燃性の材料が使用されることが多いことから外壁面における燃え拡がりの危険性はほとんどないが、基本的には通気層を有するため、通気層内部において燃え拡がり起きることが懸念される。

#### (2)火災事例

通気工法において最も有名な火災は2009年に中国・北京中央テレビ文化センター(TVCC)で起きた火災<sup>[2-12]</sup>である。この建物は高さ 159 メートル、地上 30 階の鉄筋コンクリート構造であり、火災の原因は施工現場で違法に打ち上げた花火が建物の屋上に落ちて屋上を覆うスペースフレーム部分の断熱材に引火したためである。着火後、火炎が断熱材を介して激しく延焼拡大し、瞬く間に火炎に包まれ、建物の外側がほぼ全焼した。延焼の媒体となったスペースフレーム部分の構成は、チタン亜鉛板の裏に押出ポリスチレン断熱材(XPS)が使用されており、スペースフレーム部分が層間塞ぎの無い通気層となっており、通気層を通じて火炎が急激に拡大したものとされた。

外張り断熱工法においても火災事例はあると思われるが、木造建築物に施工された場合、建物も一緒に燃えるので問題視されていない。

#### (3)研究事例

ファサード型の試験において研究報告は特にされていない。

## 2.2.2 木製外装

### (1)技術

木製の外装は木造の建物において用いられていたが、例示仕様(告示)の耐火構造(準耐火構造、防火構造、準防火構造も同様)の外壁の場合は木材などの可燃材料は構造に必要な性能を損ねないと判断できるとされている。また、「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」によって今後外壁に木材が利用される機会が増加するものと考えられる。

### (2)火災事例

日本においては木造の火災事例はあるものの耐火構造物の外装として木材を用いた場合の火災事例は特に報告されていない。

### (3)研究事例

木製外装に関しては欧州各国においてファサード型及び実大規模の実験<sup>[2-13][2-14][2-15][2-16]</sup>がなされており、薬剤注入による防火性能の向上、通気層が燃え拡がりに影響を与えること、庇や出窓が燃え拡がり抑制に効果的であり、適切に通気層内部に層間塞ぎを設置すること、もしくは庇を設置することで燃え拡がりが抑制できることが判明している。

しかし、薬剤注入は経年によって薬剤が溶脱し防火性能が低下することから施工後時間が経過した場合に防火性能が落ち、燃え拡がる危険性が高まるとされている。

## 2.2.3 金属サンドイッチパネル

金属サンドイッチパネル(以下、金属 SWP)は芯材を 2 枚の薄い金属材料で挟み込んで成型するパネルである。大きく分類すると、断熱を目的として用いられるものと化粧板として用いられるものが存在する。

### 2.2.3.1 断熱パネル

#### (1)技術

断熱を目的として施工されるパネルは、断熱材としてポリスチレンフォーム、硬質ポリウレタンフォーム、ポリイソシアヌレートフォームそしてロックウール等が用いられる。挟み込む金属材料としてはガルバリウム鋼板等が用いられる。断熱性に優れていること、軽量で施工性がよいこと等の長所を有しており、冷凍倉庫や工場、クリーンルームなどの用途で広く普及している。

#### (2)火災事例

外壁で燃え拡がった火災報告は確認されていないが、冷凍倉庫等の内装に用いた場合の火災報告はなされている。特に有名な事例に神戸で起こった倉庫火災<sup>[2-17]</sup>があげられる。この火災はウレタンフォームを芯材として鋼板を面材として用いたサンドイッチパネルにおいて発生し、火災時に天井に施工されたパネルの面材がはがれ落ち、芯材であるウレタンが露出したことによって火災が急激に拡大した。もしも火災時に面材が剥がれおちて芯材が露出した場合に火災が急激に拡大することが懸念される。

#### (3)研究事例

内装材としての研究はあるものの、ファサード試験を用いた研究はない。

### 2.2.3.2 化粧パネル

#### (1)技術

断熱用途ではなく化粧板として用いられる場合は軽量なアルミ板を金属材料として用い、芯材としてはポリエチレンやポリプロピレン等が用いられ、全体の厚さは3~5mm程度のアルミ樹脂複合板が一般的に用いられる。

#### (2)火災事例

ポリエチレンを芯材として用いたパネルでは近年火災が頻発しており、韓国のウシンゴールデンスイート超高層集合住宅で発生した火災<sup>[2-18]</sup>が有名である。この住宅は38階建て、高さ140mの超高層ビルで2010年10月1日の朝に火災が発生した。火災は急激に上階へ延焼し、広い範囲の外壁及び一部の階の室内が焼損した。人命及び建物の構造に大きな被害はなかったが、建物内部の焼損面積は1,134m<sup>2</sup>にのぼり4階から38階までの外装仕上げ材が焼損し、被害は軽傷者4名及び被害額4億円以上とされている。火災は4階のコンセント周辺から発生した電気スパークによって何らかの物品に着火したことが原因と考えられている。出火後、上層部の外壁を伝って火災が急激に拡大し、約20分で最上階まで延焼し、最上階及び37階の一部の住戸に延焼した。外装はアルミ複合パネルであり内部の芯材はポリエチレンで構成されていた。火災が拡大した要因として建物が海に面していることから海側からの強風が壁面上方に流れたこと及び外壁面の形状がコの字型にくぼんでいることにより火災の高温域が上方へ伸びたことの2つがあげられている。

また、ドバイにおいては近年の高層ビルにおいて数件の同様の火災が発生しており、その危険性が問題視され、防火規制が急速に整備されている。

#### (3)研究事例

韓国では上記の火災事例を受けてファサード型の実験<sup>[2-19]</sup>によってアルミ樹脂複合板の防火性能が検証されており、芯材を難燃処理した準不燃相当のアルミ樹脂複合板であっても開口噴出火災によって外壁面の燃焼拡大が確認された。

### 2.2.4 太陽電池フィルム

#### (1)技術

近年太陽光発電システムへの関心が高まっており、建築の屋根や壁面に施工するフィルム型の太陽電池が開発されている。<sup>[2-20]</sup>

#### (2)火災事例

太陽電池の中には有機系の物もあり、火災が起きた時に燃え広がる危険性が高いが、その防火性能に関してはまだ検証が不足している。

#### (3)研究事例

出口らによって太陽電池フィルムの検証が小~中規模の実験によって実施されている<sup>[2-21][2-22]</sup>が、ファサード型の実験による検証はまだ実施されていない。

### 2.2.5 樹脂塗材

#### (1)技術<sup>[2-23]</sup>

建築用仕上塗材はセメント、合成樹脂等の結合材、顔料、骨材を主原料としている。その施工仕様は、下塗り・主剤塗り・上塗りの工程が基本となっている。一般塗料との大きな相違は、一般塗料の膜厚が数 $10\mu\text{m}$ であるのに対し、仕上塗材は膜厚が数 $\text{mm}\sim 10\text{mm}$ 程度になる。仕上塗材はJIS A 6909 建築用仕上塗材で規格化されている。

#### (2)火災事例

建築物の躯体に塗布する樹脂塗料は多量の有機物を含んでいるわけではないが、有機系の塗料において小規模であるが火災事例が起こっている。この火災事例は新宿歌舞伎町第二ウィザードセブンビルで2014年11月3日に発生した。建物裏のゴミ捨て場から出火し火災が発生し、1階から8階までの外壁が焼損しており、壁面に塗装された塗料を介して燃え広がったとされている。延焼が発生した外壁の塗装は何度も塗り重ねられており、JIS A 6909に規定されている防水形仕上塗材Eと判断された。

#### (3)研究事例

塗料が含有する有機量は木材や断熱材と比べると非常に少なく、燃え広がる危険性は低いと考えられ、塗料の燃え広がり性状に関する研究事例はない。

### 2.2.6 樹脂サイディング

#### (1) 技術

樹脂サイディングは1965年にアメリカで製造が開始され、アメリカ・カナダといった地域で50%を超える大きなシェアを占めている。日本では1990年代後半から販売が開始され凍害などがある北海道等の寒冷地で普及が進んでいるが日本における普及率は低い。樹脂としては塩化ビニル樹脂が用いられている。塩化ビニル樹脂の自己着火温度は $454^{\circ}\text{C}$ と高く、酸素指数も45と優れた自己消火性を有しているが有機物であるため、火災時には燃焼することが危惧される。

#### (2)火災事例

目立った火災事例の報告はない。

#### (3)研究事例

カナダにおけるファサード型試験において実験<sup>[2-24]</sup>において2試験体が実施されているが外壁面における燃焼性状に関する研究は少ない。

### 2.2.7 まとめ

以上のように可燃性外装材は多くの種類があり、燃え広がり性状及び抑制手法に関しては表2-1にまとめられる。研究報告がなされているのは湿式外断熱工法及び木製外装が主であり、その他の可燃性外装材においては燃え広がり性状に関する知見や検討が不足しているのが実情であり、通気工法、金属SWP、太陽電池フィルム、樹脂塗材そして樹脂サイディングにおいては基本的な燃え広がり性状を把握する必要がある。また、湿式外断熱工法においてはファイヤーストップや仕上げ材の影響についてある程度整理されているものの施工方法が会社によって多種多様であるため細部の変更の影響に関して検討を行う必要があり、木製外装においては薬剤処理の経年劣化の問題がまだ課題として残っている。

表 2-1 可燃性外装の燃え拡がり性状及び抑制手法

可燃性外装の種類		燃え拡がり性状	検討されている燃え拡がり抑制手法
外断熱	非通気工法	加熱により内部断熱材が溶融、その後溶融した断熱材がガス化及び開口部の溜まることにより最終的に開口部周辺が損傷し、激しく燃焼する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・表面仕上げを無機系のものとする</li> <li>・ファイヤーストップを設置する</li> <li>・内部断熱材を溶融する熱可塑性の物ではなく、熱硬化性樹脂とする</li> </ul>
	通気工法	通気層内部で煙突効果によって激しく燃え拡がるのが火災事例より判明	通気層内部に層間塞ぎを設置することが有効であると考えられている
木製外装		通気層が存在する場合は無い場合と比べて燃え拡がりの速度が速くなる	<ul style="list-style-type: none"> <li>・通気層内部に層間塞ぎを設ける</li> <li>・木製外装に薬剤処理を施す(ただし、経年劣化によって薬剤処理の効果は低減する。)</li> <li>・庇を設ける</li> </ul>
金属 SWP	断熱パネル	表面の金属板が剥がれた場合に内部の芯材が燃焼すると予測される	特に検討されていない
	化粧パネル	表面のアルミ板が溶融し、内部の芯材が露出し、激しく燃え拡がるのが火災事例より判明	内部の芯材を難燃化する
太陽電池フィルム		有機物であるため燃え拡がると予測される	特に検討されていない
樹脂塗材		外装表面を燃え拡がるのが火災事例より判明	特に検討されていない
樹脂サイディング		有機物であるため燃え拡がると予測される	特に検討されていない

## 2.3 ファサード試験

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”は評価基準が定められていない。また、試験方法において用いられるバーナーの加熱強度は600kW以上と定められているが、600kWの加熱強度では弱すぎるとの指摘がされている。

そのため、評価基準を定める上で国外において制定されているファサード試験がどのような想定で試験方法及び評価基準を定めているかを整理した。また、国外のファサード試験における噴出火炎性状及び燃え拡がりの評価基準について整理し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において燃え拡がりを評価する基準及び加熱強度を定める上で必要な知見をまとめた。概要は表 2-3 にまとめた。

### 2.3.1 ファサード試験において評価する項目

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準を定める上で、試験において何を評価するかを明確にしておく必要がある。そこで、既存のファサード試

験において定められている評価項目を参照に“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価項目について検討を行った。

欧州においては建築ファサードにおける燃え拡がりの統一的な試験方法を導入する議論が EOTA(European Organisation for Technical Assessment)においてなされており<sup>[2-25]</sup>、要求される試験条件、試験において評価する項目、評価の基となる測定項目について下記のように整理している。

#### 要求される試験条件

- 試験装置は可能な限り実大規模に近づけ、開口部周辺は実際の構成を考慮する
- 火源として盛期火災の発生する開口噴出火炎を想定する
- 試験中、開口部上端(まぐさ)においては 800~900℃の継続的な温度にさらされる
- ファサード面において形成される炎の高さは少なくとも 2.5m 程度となる
- 試験時間は 20~30 分とする

#### 試験において評価する項目

- 外装表面及びファサード内部の燃え拡がり(継続的なくん焼及び燃焼を含む)
- 火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答(燃焼落下物を含む)

#### 評価の基となる測定項目

- 外装表面及びファサード内部の燃え拡がり
- 特定点における温度の測定
- 継続的なくん焼及び燃焼の発生
- 燃焼落下物及び建築ファサードの崩壊を含む力学応答
- 火炎によって損傷した範囲

各国における既存のファサード試験においては火源として開口噴出火炎を模擬する点は共通しているが、試験装置の大きさ、火源として用いる開口噴出火炎の大きさ、そして試験において評価する項目はそれぞれ異なる。各国のファサード試験において試験の評価対象としている建物及び評価項目は表 2-2 のようにまとめられる。各国のファサード試験として ISO13785-2<sup>[2-26]</sup>、BS8414<sup>[2-27]</sup>、Full-scale CAN/ULC S134-92 Test<sup>[2-28]</sup>、NFPA285<sup>[2-29]</sup>、DIN E 4102-20<sup>[2-30]</sup>、ONORM B 3800-5<sup>[2-31]</sup>、GOST31251<sup>[2-32]</sup>、SP FIRE 105<sup>[2-33]</sup>、MSZ 14800-6:2009<sup>[2-34]</sup>を参照した。

各国における既存のファサード試験においては試験規模等が各々異なり、試験を適用する建物に制限を設けているものもあるが、評価項目は

- 2~3 階層上への外装表面及びファサード内部における燃え拡がり
- 1 階層の区画への延焼
- 火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答

の 3 つに大きく分類できる。

また、可燃性外装において火災が発生した際に可燃性外装の燃焼によって隣棟への延焼することが既往の研究<sup>[2-35]</sup>において懸念されており、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろ

ろがり試験方法”においては可燃性外装が燃え広がった際の隣棟への延焼を評価することを目的としてファサード表面より 2m 離れた対向面に熱流束計を設置している。ハンガリーにおいて規格化されている試験(MSZ 14800-6:2009)<sup>[2-34]</sup>においても、建築ファサードの隣棟への加害性を評価項目として追加することを検討中であり、隣棟への延焼加害性も評価項目の一つとして考えられる。

以上のことより、ファサード試験において評価する項目として

- 外装表面及びファサード内部における燃え広がり
- 1階上階への延焼
- 火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答
- 隣棟への延焼加害性

の4つの評価項目が挙げられ、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においてもこれらの評価項目を考慮して評価基準を決めるのが妥当といえる。

表 2-2 ファサード型試験の各試験規格が評価対象としている建物及び評価項目

試験規格	試験の評価対象としている建物	試験において評価する項目
ISO13785-2	規定なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2階層上への燃え広がり</li> <li>● 噴出火炎による建築ファサードの力学応答</li> </ul>
NFPA285	全ての建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 外装表面における2階層上への燃え広がり</li> <li>● 1階層上への建築ファサード内部での燃え広がり</li> <li>● 1階層上への内装側への燃え広がり</li> </ul>
ULCS134-92	3階建てまでの建物もしくはスプリンクラー設備のある建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2階層上への燃え広がり</li> <li>● 建築ファサード内部への燃え広がり</li> <li>● 火炎プルームによって壁面が受ける受熱量</li> </ul>
BS8414	18m以上の建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2階層上への燃え広がり</li> <li>● 建築ファサード内部への燃え広がり</li> <li>● 建築ファサードの力学応答</li> </ul>
SP FIRE 105	病院以外の8階建てまでの建物 病院もしくは8階建て以上の建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 噴出火炎による外壁の損傷状況</li> <li>● 2階層上への燃え広がり</li> </ul> 上記に追加して <ul style="list-style-type: none"> <li>● 1階層上の階への開口部を通した延焼</li> </ul>
GOST 31251	3階建て以上の建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可燃性外装の燃焼による温度上昇</li> <li>● 1階層上の階への開口部を通した延焼</li> <li>● 2次火災を発生させる燃焼落下物</li> <li>● 建築ファサードが崩落した際に発生する落下物</li> </ul>
DIN4102-20	7~22mの中層の建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 3階層上への燃え広がり</li> <li>● 消防活動の障害となる落下物</li> </ul>
ONOEM B 3800-5	7~22mの特定建物及び22m以上の高層の建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2階層上を超える燃え広がり</li> <li>● 消防活動の障害となる落下物</li> </ul>
MSZ 14800-6:2009	10階建てまでの建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2階層上を超える燃え広がり</li> <li>● 1階層上の階への開口部を介した延焼</li> <li>● 避難及び消防活動の障害となる落下物</li> </ul>

### 2.3.2 既存ファサード試験における噴出火炎性状

海外においては様々なタイプのファサード型の試験があり、その噴出火炎の大きさは

様々である。各ファサード試験において火源となる噴出火炎より壁面が受ける熱量について整理したものを図 2-4 に示す。

最も代表的な試験として ISO によって規格化された ISO13785-2 があげられる。この試験方法は、開口より噴出する火炎性状は開口部における温度が 800°C以上、開口より 0.6m 上の位置における熱流束が  $55 \pm 5 \text{kW/m}^2$ 、開口より 1.6m 上において  $35 \pm 5 \text{kW/m}^2$  となるように設定して試験を実施する。

イギリスにおいて規格化されている BS8414 はクリブもしくはガスバーナーを火源として用いることができ、クリブの場合は開口より 2.5m 上の位置において雰囲気温度より 500°C高い温度を 20 分間続くような噴出火炎に設定し、ガスバーナーの場合は開口より 1m 上における受熱量が 20 分間以上  $45\text{-}95 \text{kW/m}^2$  (安定状態で  $75 \text{kW/m}^2$  程度)となるように設定する。

カナダで規格化されている試験方法(Full-scale CAN/ULC S134-92 Test)では、開口より噴出する火炎性状は、開口上 0.5m における熱流束が  $45 \pm 5 \text{kW/m}^2$ 、開口上 1.5m における熱流束が  $27 \pm 3 \text{kW/m}^2$  となるように設定する。

アメリカにおいて規格化されている試験(NFPA285)では区画内と開口部にバーナーを設置し、ガス流量を調整し火炎性状を設定する。噴出火炎は最終的に開口上端より 0.3-1.8m の高さにおいて 500-600°Cの温度となるように調整する。

ISO、イギリス、カナダ及びアメリカの試験と比べて開口の大きさが小さくなるがドイツ(DIN E 4102-20)およびオーストリア(ONORM B 3800-5)においては同様の試験装置を用いており、火源としてはクリブ又はプロパンバーナーを用いる。ドイツの試験において、噴出火炎は開口より 1m 上における温度が 780~800°Cとなり、最大火炎高さが 2.5m 程度となるように設定する。オーストリアの試験においては噴出する火炎は開口より 1m 上の位置における熱流束が  $70\text{-}95 \text{kW/m}^2$  となる。

ロシアの試験方法(GOST31251)では、チャンバーより噴出する火炎は開口部における温度が 900°C程度、試験開始から 12-22 分の間での上階開口部(開口部上端より 1.8m 上)における熱流束が  $14 \pm 2 \text{kW/m}^2$  ( $35 \text{kW/m}^2$  を超えない)となるように設定する。

スウェーデンの試験方法(SP FIRE 105)では、開口より噴出する火炎性状は開口上端より 2.1m 上における熱流束が加熱中 7 分間以上  $15 \text{kW/m}^2$  を超え 1.5 分以上  $35 \text{kW/m}^2$  を超え、決して  $75 \text{kW/m}^2$  を超えないように設定する。

ハンガリーの試験方法(MSZ 14800-6:2009)では、噴出火炎性状は区画内部の可燃物と区画内部温度(ISO834)によって規定されており、具体的な火炎の性状に関する規定は特にないが試験中に発生する開口噴出火炎の火炎高さは開口上端より 2-3m となる。

欧州においてはファサードの統一的な試験方法を導入する議論が EOTA においてなされており、開口噴出火炎においては、開口部上端(まぐさ)が 800-900°Cの温度となり、試験中の火源の火炎高さは少なくとも 2.5m 程度となることが望ましいとされた。

試験体の大きさが異なるため一概に比較はできないが、試験で用いられる噴出火炎は開

口部上端の温度が 800-900℃となり、火炎高さは 1.5-3m 程度となるように設定されている。

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”ではバーナーの出力を 600kW 以上と設定しているが、これは湿式外断熱工法を対象としてファサード型実験の実施した既往の研究<sup>[2-35]</sup>を基にしている。既往の研究においては燃焼チャンバーの区画サイズの内寸が JIS A 1310 で規定されている一辺 1.35m よりも短い 0.91m の立方体としたため、噴出火炎性状は JIS A 1310 での 600kW よりも強くなっていることが予想される。既往の研究において、噴出火炎性状は開口上端部で 880℃程度の温度を計測し、開口上端より 0.5m における熱流束は 26.5kW/m<sup>2</sup>、計測温度は 555℃となり、火炎高さは 1m 程度であったと考えられる。開口部付近の温度に関しては他のファサード試験と同等の値を示すが、火炎高さ及び壁面が受ける熱流束は低くなっている。

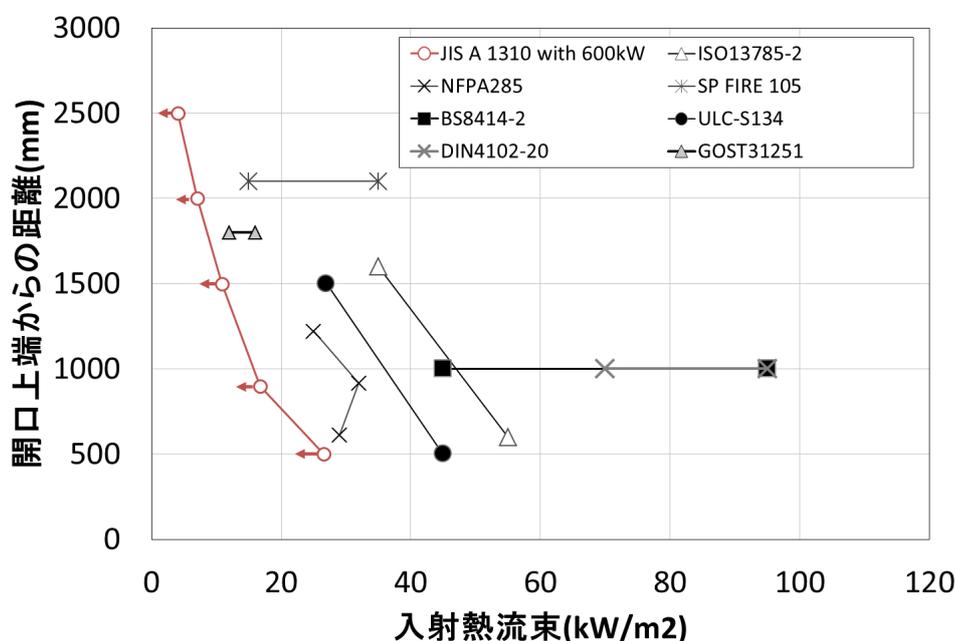


図 2-4 外装表面に与える受熱量に関する各国のファサード試験と既往文献のブランク試験結果との比較<sup>[2-36]</sup>を参考に作成

### 2.3.3 燃え拡がり性状の評価高さ及び基準と噴出火炎性状の関係

図 2-5 に各ファサード試験における噴出火炎性状に規定されている条件及び防火性能を評価する高さ、そして規定されている試験に関しては評価値も示す。

ISO13785-2 は試験規格のみ存在しており、試験方法として運用している国は存在しない。そのため温度の測定箇所が開口上端より 3.6m の位置で熱流束、4m の位置で温度を測定することのみ定められており、防火性能の判断基準は特に設定されていない。

イギリスにおける試験(BS8414)では開口上端より 5m 上の位置において 30 秒以上の間 600℃を超えないことが安全と判断される。

カナダで規格化されている試験方法では、開口上端より 5m 上まで燃え広がらない、かつ開口上端より 3.5m における熱流束が 35kW/m<sup>2</sup>を超えないことが安全上の条件とされている。

アメリカにおいて規格化されている試験(NFPA285)では開口上端より 3.05m の高さにおいて、538℃を超えない、もしくは炎が届かないことを評価の基準としている。

ドイツ(DIN E 4102-20)及びオーストリア(ONORM B 3800-5)の試験方法においては開口上端より 3.5m の高さにおいて 500℃もしくは目視で確認できる燃え広がりが観察できるかが安全の基準となっている。

ロシアの試験方法(GOST31251)では、開口上端より 3.6m の高さで判断し、他の試験と異なりキャリブレーション試験の測定値から 20%を超えなければ安全とみなされる。

スウェーデンの試験方法(SP FIRE 105)では、基準が 3 つあり、病院以外の 8 階建てまでの建物については開口上端より 4.2m の高さ(2 階上の階の窓の下端の高さ)まで壁面の燃え広がりが起きていないこと及び 6m の高さで 600 秒以上 450℃を超えず、かつ 120 秒以上 500℃をこえないことを判断基準としている。病院及び 8 階建て以上の建物については更に開口上端より 2.1m の高さで 80kW/m<sup>2</sup>を超えないことが追加される。

ハンガリーの試験方法(MSZ 14800-6:2009)では、試験中に発生する開口噴出火炎の火炎高さは開口上端より 2-3m となり、開口上端より 5.37m 上の試験体上端まで燃え広がらないことが評価の基準となっている。

噴出火炎性状と各国ファサードの評価基準を見ていると開口上端より 3~6m の高さにおいて燃え広がりの評価を行っている。開口噴出火炎が他の試験と比較して大きく、評価高さが 5m である BS8414 及び 6m である SP FIRE 105 を除くと他の試験方法においては 3~4m の高さで判断していることになる。2.3.2 で整理した噴出火炎性状を考慮すると、各試験において噴出火炎を規定する条件はバラバラではあるが、評価基準となる高さは噴出火炎の高さより 1.5~2m 程度高い位置で規定されていることが分かる。

JIS A 1310 においては、開口上端から試験体上端までの高さは 2.73m 以上と設定されており、温度を開口上端より最大で 2.5m の高さで、熱流束を開口上端より 2.83m の高さで測定する。そのため、燃え広がりの評価の高さを噴出火炎の高さよりも 1.5~2m 高い位置に設定する場合は、開口噴出火炎の大きさは 1m 程度に設定する必要がある。

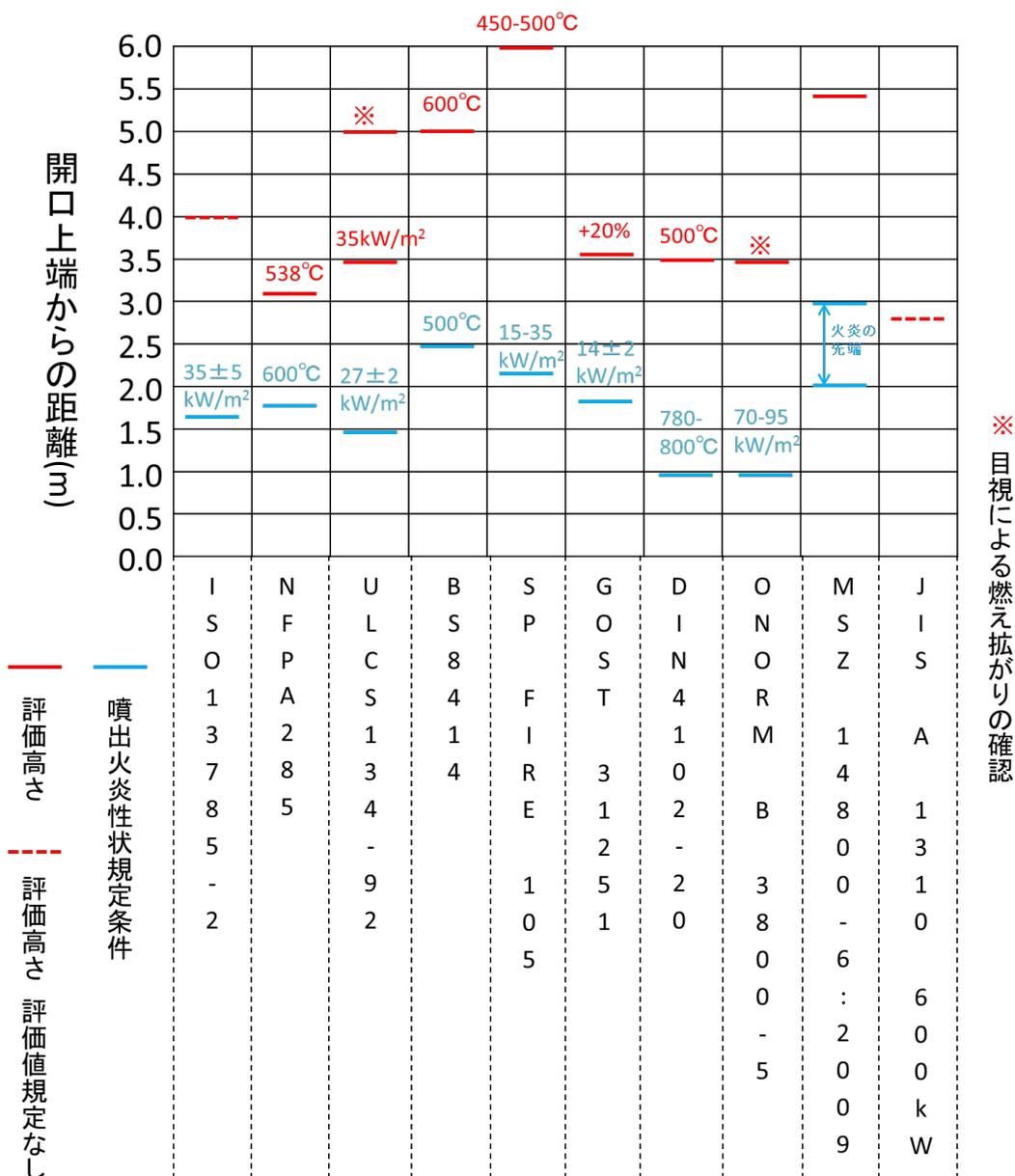


図 2-5 各国のファサード試験における噴出火炎規定条件と評価高さ

### 2.3.4 まとめ

既存のファサード試験に関して整理した結果、外装表面及びファサード内部における燃え拡がり、1階上階への延焼、火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答、隣棟への延焼加害性の4つがファサード試験において評価する項目として挙げられることが判明した。

また、既存のファサード試験と600kWの加熱強度で実施したJIS A 1310を比較した場合、噴出火炎性状及び評価基準に関して以下のことがいえる。

- 噴出火炎性状

開口上端部の温度に関しては他のファサード試験と比較して同等の温度を測定するが、外装壁面に与える熱量に関しては600kWの加熱強度では相対的に低い値となっており、開口噴出火炎性状について検討する必要がある。

- 評価基準

各国のファサード試験の評価基準においては噴出火炎の火炎高さよりも1.5～2mの高い位置に評価基準を設けている。JIS A 1310においては、開口上端から試験体上端までの高さが2.73mと他のファサード試験と比較して低いため、開口噴出火炎の火炎高さは各国のファサード試験よりも低く設定し、評価基準の高さも適切に設定する必要がある。

表 2-3 各国のファサード試験における噴出火炎性状及び防火性能の評価基準

試験規格	開口上端から試験体上端までの高さ	噴出火炎性状 高さ(m)	輻射熱(kW/m <sup>2</sup> )	防火性能評価 高さ	防火性能評価基準	試験の評価対象としている建物
ISO13785-2	4m	0.6 1.6	55±5 35±5	3.6m 4m	熱流束(規定なし) 温度(規定なし)	規定なし
NFPA285	3.05m	0.61 0.914 1.219	29±6 32±6 25±5	3.05m	538°Cもしくは炎が届く	全ての建物
ULC S 134-92	7m	0.5 1.5	45±3 27±2	3.5m 5m	35 kW/m <sup>2</sup> 目視で確認できる燃え 拡がり	3階建てまでの建物もしくはスプレ ンクラー設備がある建物
BS8414	6m	1	75	5m	600°C(30秒)	18m以上の建物
SP FIRE 105	6m	2.1	15-35	4.2m 6m	目視で観察できる燃え 拡がり 450°C(600秒)もしくは 500°C(120秒)	病院以外の8階建てまでの建物
GOST31251	3.6m	1.8	14±2	2.1m 3.6m	80kW/m <sup>2</sup> キャリブレーション +20%の測定値	病院もしくは8階建て以上の建物 の場合追加される評価基準 主に不燃性材料で作られた構造 物
DIN4102-20	5m	1	70-95	3.5m	500°C	7~22mの中層の建物
ONORM B 3800-5	5m	1	70-95	3.5m	目視で確認できる燃え 拡がり	7~22mの特定建物及び22m以 上の高層の建物
MSZ14800-6: 2009	5.37m	2-3	規定なし 火炎の先端の 高さが2-3m	1.3-2.5m 5.37m	(噴出火炎の温度)一 (上階開口部の温度) ≦300°C 目視で確認できる燃え 拡がり	10階建てまでの建物
JIS A 1310 600kW	2.73m			最大2.5m 2.83m	温度(規定なし) 熱流束(規定なし)	規定なし

## 2.4 第 2 章のまとめ

可燃性外装材に関する既往の研究及び火災事例を整理し、以下のように結論付けた。

可燃性外装材は多くの種類があるものの、研究報告がなされているのは湿式外断熱工法及び木製外装が主であり、その他の可燃性外装材においては燃え拡がり性状に関する知見や検討が不足しているのが実情であり、通気工法、金属 SWP、太陽電池フィルム、樹脂塗材そして樹脂サイディングにおいては基本的な燃え拡がり性状を把握する必要がある。

また、可燃性外装材を対象とした既存のファサード型の試験方法について調査し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においてどのような検証が必要であるかを以下のように結論付けた。

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の評価基準を考える上で、外装表面及びファサード内部における燃え拡がり、1 階上階への延焼、火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答、隣棟への延焼加害性の 4 つの項目について検討を行うのが妥当である。

開口上端部の温度に関しては他のファサード試験と比較して同等の温度を測定するが、外装壁面に与える熱量に関しては 600kW の加熱強度では相対的に低い値となっており、加熱強度を含めた開口噴出火炎性状について検討する必要がある。

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においては、開口上端から試験体上端までの高さが 2.73m と他のファサード試験と比較して低いため、開口噴出火炎の火炎高さは各国のファサード試験よりも低く設定し、評価基準の高さも適切に設定する必要がある。

## 第2章 参考文献

- [2-1] JIS A 1310:2015 建築ファサードの燃えひろがり試験方法
- [2-2] Duval B (2008) Monte Carlo Hotel Casino Fire. NFPA J 102(3):67-70
- [2-3] 吉岡英樹:外断熱工法に関する火災事例の調査 ラスベガスモンテカルロホテル火災を中心に, 火災(297号)
- [2-4] HAJPÁL, D.M., editor (2012) "Analysis of a tragic fire case in panel building of Miskolc". Integrated Fire Engineering and Response; 2012; Malta. Available from: <http://lacoltulstrazii.files.wordpress.com/2012/10/analysis-of-a-tragic-fire-case-in-panel-building-miskolc-hungary.pdf>.
- [2-5] "Seven die in fire in immigrant hostel in Dijon, France". BBC News Europe. 14 November 2010, Available from: <http://www.bbc.co.uk/news/world-europe-11752303>.
- [2-6] Anja Hofmann and Ruediger Muehlnikel: Experimental and numerical investigation of fire development in a real fire in a five-storey apartment building, FIRE AND MATERIALS Fire Mater. 2011;35:453-462
- [2-7] Dipl.-Phys. I. Kotthoff: "Fire performance of external thermal insulation composite systems (ETICS) in buildings" basics <http://www.eumeps.construction/show.php?ID=4806>
- [2-8] Vytenis Babrauskas: Façade Fire Tests: Towards an International Test Standard, pp.223-230, Fire Technology Third Quarter 1996
- [2-9] Sarah Colwell and Brian Martin: Fire performance of external thermal insulation for walls of multi-storey buildings
- [2-10] Bre global: A comparison of BS8414-1 & -2, draft DIN 4102-20, ISO13785-1 & -2, EN 13823 and EN ISO 11925-2,
- [2-11] Dipl.-Phys. I. Kotthoff: Fire performance of external thermal insulation composite systems (ETICS) in buildings, 4<sup>th</sup> Global insulation conference in Prague, 2009
- [2-12] 北垣亮馬: 建設中に燃えた北京の超高層ビル TVCC 外断熱材の下階延焼で火災拡大、日経アーキテクチュア(912)、2009
- [2-13] 田村祐介他: 木製外装材に覆われた外壁のファサード試験-防火薬剤処理の有無による燃焼性状の比較-, 3021, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), 2011年8月
- [2-14] Tuula Hakkarianen and Tuuli Oksanen: Fire Safety Assessment of Wooden Facades, Fire and Materials, Fire Mater. 2002;26:7-27
- [2-15] Birgit A.-L. Östman and Lazaros D. Tsantaridis: Fire performance of multi-storey wooden facades, Proceedings of 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, CSTB. MATEC web of conferences 9, 06001 <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20130906001>
- [2-16] Martin Teibinger, Irmgard Matzinger and Peter Schober: Experimental study of the fire performance of wooden facades, Proceedings of 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, CSTB. MATEC web of conferences 9, 02004 <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20130902004>
- [2-17] 上山 繁: 可燃性断熱材が急激な延焼拡大の要因となった火災とその対策, pp.8-13, 火災(311号)
- [2-18] 金榮善, 水野雅之, 大宮喜文: 韓国・釜山ウシンゴールドンスイート超高層集合住宅の火災調査, 火災(311号)
- [2-19] 丘仁赫, 金奉賛, 徐東九, 金亨俊, 権寧璠: アルミニウム複合パネルの垂直火災拡散解析に関する実大実験研究, pp.256-257, 平成25年度日本火災学会研究発表会概要集
- [2-20] 安藤 達夫: フィルム型太陽電池の火災安全性, pp.9-13, 火災(324号)
- [2-21] 出口 嘉一他: フィルム型太陽電池の燃焼性状と火災伝播予測モデルの開発, 3153, 防火, 2014年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会・建築デザイン発表会

- [2-22] 出口 嘉一他：フィルム型太陽電池の火炎伝播実験と温度予測, 3097, 防火, 2015 年度日本建築学会大会(東海)学術講演梗概集
- [2-23] 建築用仕上塗材ハンドブック 2007 年版：日本建築仕上材工業会 編集
- [2-24] Igor Oleszkiewicz : Fire Exposure to Exterior Walls and Flame Spread on Combustible Cladding, Fire Technology, November 1990
- [2-25] Ingolf Kotthoff and Jan Riemesch-Speer : Mechanism of fire spread on facades and the new Technical Report of EOTA “Large-scale fire performance testing of external wall cladding systems” , Proceedings of 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, CSTB. MATEC web of conferences 9, 02012.  
<http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20130902010>
- [2-26] ISO13785-2 : Reaction-to-fire tests for facades – Part2 : Large-scale tests
- [2-27] BS 8414-2:2005, Fire performance of external cladding systems - Part2:Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to and supported by a structural steel frame.
- [2-28] CAN/ULC-S134. Standard Method of Fire Test of Exterior Wall Assemblies. Underwriters Laboratories of Canada, 2013
- [2-29] NFPA 285. Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Non-Loadbearing Wall Assemblies Containing Combustible Components 2006 Edition
- [2-30] DIN 4102-20:2016-03: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20: Besonderer Nachweis für das Brandverhalten von Außenwandbekleidungen
- [2-31] Pre-standard ÖNORM B38005 “Fire performance of construction materials and building elements; part 5: Fire performance of facades – requirements, test methods and assessments” dated 1st May 2004
- [2-32] GOST 31251-2008 Façades of buildings. Fire hazard test method. Interstate council for standardization, metrology and certification 2010
- [2-33] SP FIRE 105. Issue 5. Large scale testing of façade systems. SP Boras Sweden, 1994.
- [2-34] MSZ 14800-6:2009 Fire resistance tests. Part 6: Fire propagation test for building facades.
- [2-35] 楊 欣潔：耐火建築物における発泡系外断熱工法の延焼性評価手法に関する研究, 東京大学博士論文, 2011
- [2-36] 姜 昇具他：JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法の火災外力に関する一考察, 3013, 防火, 2015 年度日本建築学会大会(東海)学術講演梗概集

## 第3章 加熱強度の検討

### 3.1 第3章の目的

可燃性材料の外壁面における燃え広がり性状を評価する試験として“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”が制定された。可燃性外装の燃え広がり性状を観察するためにはバーナーの加熱強度を 600kW 以上で試験することが定められている。加熱強度を 600kW に設定した場合の開口噴出火炎は開口部周辺における温度は欧州などの各国で制定されている実大規模もしくはそれに準ずるサイズのファサード型の試験と遜色ないものになっているものの、噴出火炎の大きさを比較すると小さくなっており、燃え広がり性状を評価するのに適切でない可能性がある。

本章では“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において、実際の火災における燃え広がり危険性及び上階延焼危険性の評価が可能な基準を定めることができる加熱強度を選定することを目的とし、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の加熱強度を試験方法の中で規定されている 600kW 以上の範囲で変更した場合の開口噴出火炎が可燃性外装に与える影響について検証を行う。

### 3.2 検討項目

第2章より、ファサード試験に要求される開口噴出火炎性状として

- 試験中、開口部上端(まぐさ)においては 800～900℃の継続的な温度にさらされる
- ファサード面において形成される炎の高さは少なくとも 2.5m 程度となる

が望ましい条件とされている。

1つ目は噴出火炎が開口部に与える影響に関する条件として、2つ目は噴出火炎の大きさに関する条件と考えられる。噴出火炎の大きさに関しては、各国の既存ファサード試験においては開口噴出火炎の火炎の高さが 2.5m に満たないものも多く存在し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においては開口上端から試験体上端までの高さが 2.73m と他のファサード試験と比較しても低いため、火炎高さに関しては 2.5m よりも低く設定する必要がある。そのため、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においては試験において形成される開口噴出火炎が実火災と比べて十分であるかどうかを開口噴出火炎の有する発熱量によって検討を行うのが妥当と考えられる。

また、第2章において既存ファサード試験に関して整理した結果、ファサード試験において評価する項目として、外装表面及びファサード内部における燃え広がり、1階上階への延焼、火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答、隣棟への延焼加害性の4項目が挙げられ、これらの項目が評価可能となる試験条件が“JIS A 1310 建築ファサードの燃え

ひろがり試験方法”においては求められる。

火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答を評価するためには、建築ファサードが実火災で被る損傷を試験において再現することが必要となる。これはファサード試験に要求される開口噴出火炎性状が十分であれば満たされる条件といえる。

可燃性外装が燃え拡がり、大規模の火災へと進展した場合は壁面における燃焼が巨大な輻射源となり、隣棟へ類焼すると言われている。壁面一体へ燃え拡がり大規模火災に発展した場合隣棟へ延焼する危険性は非常に高い。そのため、壁面において燃え拡がる可燃性外装においては隣棟への延焼加害が高いと判断できる。壁面における燃え拡がりがある一定範囲で収まる場合、可燃性外装の影響によって隣棟への延焼の危険性が高くなる主な要因は可燃性外装の燃焼による輻射源の増加である。輻射源が増加する原因は主に燃え拡がりによる燃焼範囲の拡大であるが、可燃物を内包する建築ファサードの場合、壁面の破損等によって内部の可燃物が流出し、隣棟への輻射が強くなることが考えられる。そのため、隣棟への加害性を評価する条件として、燃え拡がり性状が評価可能であること及びファサード試験に要求される開口噴出火炎性状が十分であることが必要である。

以上のことから、

- 開口噴出火炎が開口部に与える影響
- 開口噴出火炎の発熱量
- 燃え拡がり性状の評価可否
- 上階延焼判定の評価可否

の4つを“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における加熱強度の検討項目として考える。

加熱強度の検討を行う上で、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における開口噴出火炎性状を確認するために不燃性の外装を試験体として用いて実験を実施した。

### 3.3 不燃性外装を用いた場合の噴出火炎性状

外装に可燃物がない状態における噴出火炎の性状を確認するために、外装に不燃性のセラミックファイバークラッド(25mm厚)を下地材に張り付けた試験体を用いて実験を実施した。燃焼チャンバー内部のプロパンガスの流量を201→403→670→806ℓ/minに5分ごとに上昇させて実験を実施した。ガス流量はそれぞれ、加熱強度に換算して300kW, 600kW, 1000kW, 1200kWとなるように設定した。それぞれの加熱強度は下記に示す理由によって選定した。

300kWは“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において用いる燃焼チャンバーの大きさにおいて噴出火炎が発生する限界に近い加熱強度となっていることより加熱強度の下限値として選定した。

600kW は開口上端における温度が火災時に想定される 900°C程度となること、開口上端より 500mm 上の外装表面における測定温度が約 500°Cとなることより既往の研究<sup>[3-1]</sup>においてファサード試験の火源として十分であると考えられた加熱強度であり、基準となる加熱強度として選定した。

1000kW は開口上端より 1500mm 上の外装表面における測定温度が 500°C程度となり、600kW と 1200kW の間となる加熱強度として選定した。

1200kW は“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において規定されている燃焼チャンバー内の燃焼において想定される限界値となっており、加熱強度の上限値と想定して選定した。

開口上端より 500, 900, 1500, 2000, 2500mm の位置そして試験体上端に熱流束計を設置壁面への受熱量を測定し、開口上端及び開口上端より 500, 900, 1500, 2000, 2500mm の位置において外装表面温度を測定し、開口上端より 500, 900, 1500, 2000, 2500mm の位置においては外装表面より 50mm 離れた位置においても温度を測定した。また、燃焼ガスを捕集し、酸素消費法を用いて発熱量も測定した。図 3-2 に噴出火炎の様子を、図 3-3、図 3-4 及び図 3-5 に外壁面における受熱量及び温度、そして発熱速度の測定結果を示す。表 3-1 にそれぞれのガス流量における平均値(2~5 分、7~10 分、12~15 分、17~20 分)を示す。加熱強度に換算して 300kW, 600kW, 1000kW, 1200kW となるように設定したが測定の平均値は 340kW, 647kW, 940kW, 1107kW となった。以後この値を加熱強度として取り扱う。

加熱強度が 340kW では噴出火炎はあまり見られず、647kW においては噴出火炎が確認されたものの火炎は壁面に沿う形状ではなかった。940kW 及び 1107kW においては噴出火炎が壁面に沿う形状を示し、開口上端からの火炎高さも 647kW と比較して著しく大きくなった。

加熱強度が上がるにつれて受熱量、温度ともに上昇しており、受熱量に関しては開口上端より 500mm 上(①)においては流量を 647kW から 940kW に変化させた時に急激に上昇し、900mm 上(②)においては 940kW から 1107kW に変化させた時に急激に上昇した。加熱強度が 1107kW の場合、開口上端より 500, 900mm の位置において 100kW/m<sup>2</sup>の値を計測し、開口上 1500mm においても 40kW/m<sup>2</sup>程度を計測した。これは欧州等で規格化されている実大規模のファサード試験に匹敵する入射熱流束となっており、カナダ等の実規模試験と比べても高い値となっている。外装表面温度に関しては開口より 2,500mm 上において様々な可燃物を着火させるのに十分な温度である 400°Cを超え、試験体中央部においては試験体全体が厳しい加熱にさらされることとなっている。

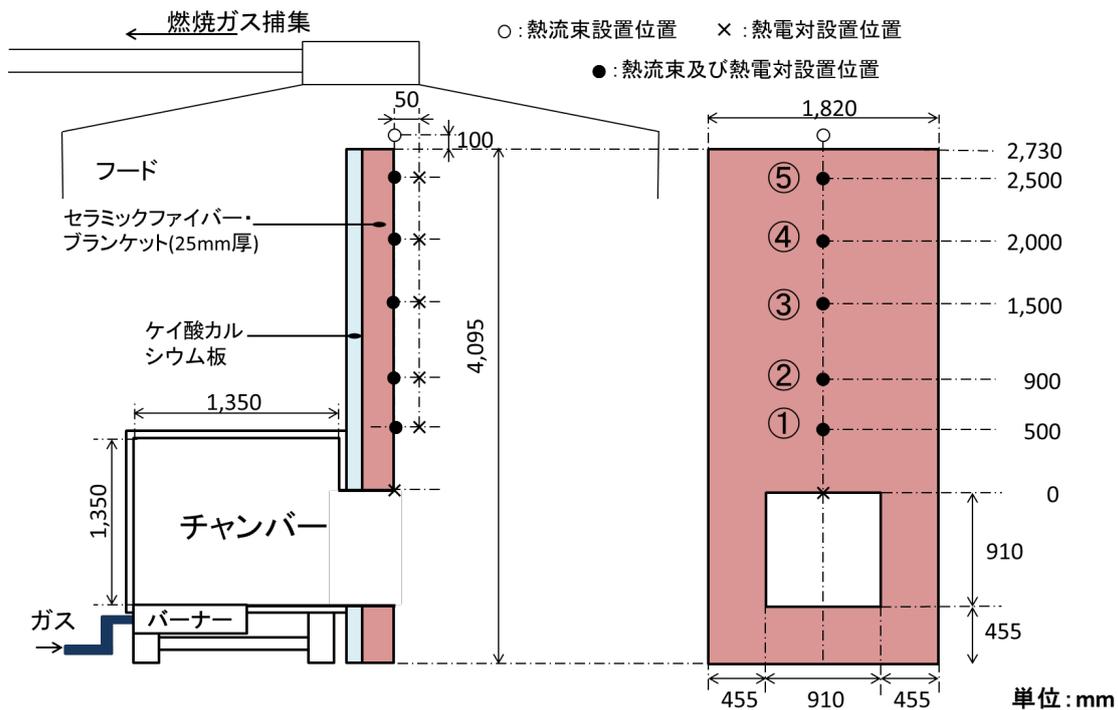


図 3-1 熱電対及び熱流束計の設置位置

加熱強度	340 kW	647 kW	940 kW	1107 kW
真横				
正面				

図 3-2 不燃性外装を用いた場合の開口噴出火炎

表 3-1 不燃性外装を用いた場合の外装表面温度、入射熱流束及び発熱速度 (340kW:加熱開始より 2~5 分の平均値、647kW:加熱開始より 7~10 分の平均値、940kW:加熱開始より 12~15 分の平均値、1107kW:加熱開始より 17~20 分の平均値)

発熱速度 (kW)		開口上端からの高さ(mm)							ガス供給量, ℓ/min
		0	500	900	1500	2000	2500	2830	
340	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	8	5	4	3	3	2	201
	温度(°C)	609	316	267	165	164	143	-	
647	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	18	11	8	6	5	4	403
	温度(°C)	934	491	403	260	240	205	-	
940	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	78	28	20	13	9	7	670
	温度(°C)	1120	880	690	453	386	323	-	
1107	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	120	98	38	21	14	11	806
	温度(°C)	1145	1100	930	642	524	428	-	

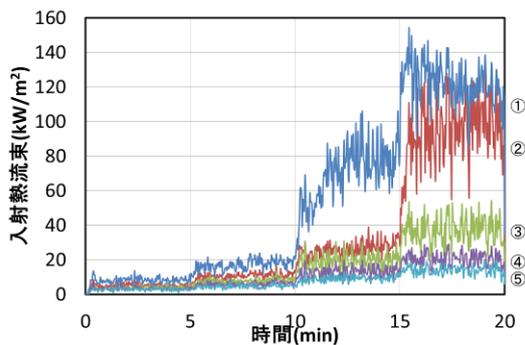


図 3-3 入射熱流束の経時変化

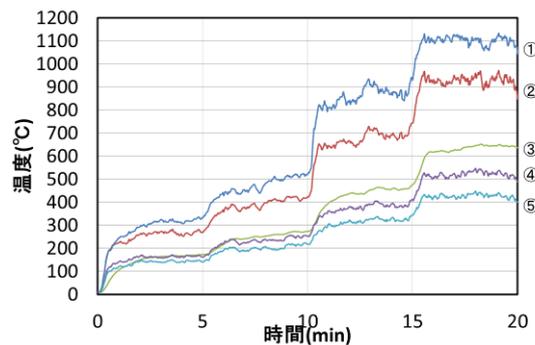


図 3-4 外装表面温度の経時変化

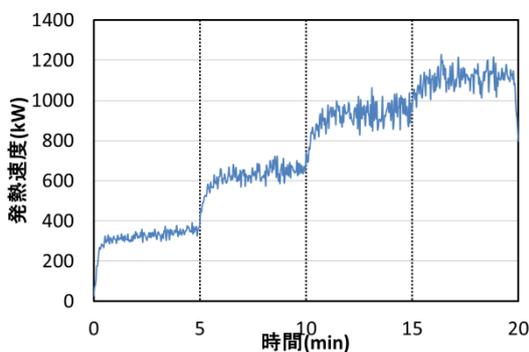


図 3-5 発熱速度の経時変化

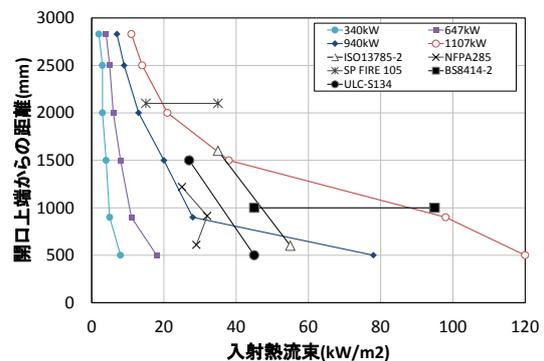


図 3-6 外装表面に与える受熱量に関する各国のファサード試験との比較

### 3.4 加熱条件の検討

#### 3.4.1 開口噴出火炎の発熱量

噴出火炎の性状は火炎が有する発熱量に大きく依存し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における開口噴出火炎性状を検討する上で、発熱量は重要な要素となれる。本項では噴出火炎における発熱量について検討を行う。

開口噴出火炎はフラッシュオーバー後に発生するとされており、一般的な火災においてフラッシュオーバー発生後、火災は盛期火災へと発展し、火災区画内の可燃物が激しく燃焼する。その燃焼性状は可燃物量と開口からの空気流入量及びその比率に依存することが知られており、開口のサイズが小さい場合は空気の流入量に区画内部の燃焼性状が支配される換気支配型の燃焼になる。開口噴出火炎は主に換気支配型の燃焼状態で発生し、空気流入量で燃焼しきれない可燃性ガスが外部において燃焼するものとされている。

換気支配型の燃焼において室内における発熱量の上限は主に開口サイズによって規定され、開口因子  $A\sqrt{H}$  に依存し、室内の発熱量の上限値  $Q_{v,max}$  は、

$$Q_{v,max} = 1500A\sqrt{H} \text{ (kW)} \quad \text{(数式 3-1)}$$

と表現できる。なお、 $A$ ：開口面積(m<sup>2</sup>)、 $H$ ：開口の高さ(m)、である。ここで、本実験において用いたチャンバーの開口サイズは 0.91m×0.91m の正方形であるため、本実験においては

$$Q_{v,max} = 1500A\sqrt{H} = 1500 \times 0.91 \times 0.91 \times \sqrt{0.91} \doteq 1200 \text{ (kW)}$$

となる。発熱量の測定結果より、ガスの供給流量が 806ℓ/min の場合においても 1200kW を超えていないことが分かる。

ただし、この値は室内における燃焼の理論上の上限値であり、実際の噴出火炎は室内のガスと空気の混合状況や燃焼効率などが影響しており、その発生メカニズムはより複雑であると推定されている。長谷見<sup>[3-2]</sup>や大宮<sup>[3-3]</sup>らの研究により、噴出火炎に発生限界における発熱量  $Q_{v,crit}$  は開口因子  $A\sqrt{H}$  及び区画の内表面積  $A_f$  を用いて、

$$\frac{Q_{v,crit}}{A\sqrt{H}} = 150 \times \left( \frac{A_f}{A\sqrt{H}} \right)^{2/5} \quad \text{(数式 3-2)}$$

で与えられることが判明しており、本実験で用いたチャンバーに適用すると噴出火炎の発生限界発熱量  $Q_{v,crit}$  は

$$Q_{v,crit} = 328 \text{ kW}$$

となる。図 3-2 に示すように加熱強度が 340kW の時には噴出火炎が発生する寸前であり、発生限界に関しては理論値と近い値を示している。

ここで、計測した発熱量から  $Q_{v,crit}$  を差し引いた値が開口噴出火炎に寄与している発熱量 ( $Q_{ex}$ )だと仮定し、開口部の上半分が火源の大きさであるとする、開口部の上半分の等価半径  $r_0$  は

$$r_0 = \sqrt{BH/2\pi} \quad \text{(数式 3-3)}$$

となり、開口噴出火炎の無次元発熱量  $Q_{ex}^*$  は

$$Q_{ex}^* = \frac{Q_{ex}}{c_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} (2r_0)^{5/2}} \quad \text{(数式 3-4)}$$

で表すことができる。なお、 $B$  : 開口の幅(m)、 $c_p$  : 空気の比熱 (kJ/kg・K)、 $\rho_0$  : 周辺空気の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $T_0$  : 周辺空気の絶対温度(K)、 $g$  : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)である。

無次元発熱量  $Q^*$  の大きさによって火炎形状が変化することが知られており<sup>[3-4]</sup>、 $Q^* \geq 1$  の領域においては火炎高さが火源寸法の影響を受けなくなり、実火災における噴出火炎は  $Q^* \geq 1$  の領域に入るものと考えられる。本実験で使用したチャンバーにおける  $Q_{ex}^*$  と発熱速度の関係は図 3-8 に示すようになり、発熱速度が 830kW 以上で  $Q^* \geq 1$  の領域に入る。表 3-2 に本実験で用いた加熱条件に適用した場合の結果を示す。ガス供給量が 403ℓ/min の場合は 0.68 と 1 を下回るため実際の噴出火炎と異なり弱いブルームとなっていると言える。

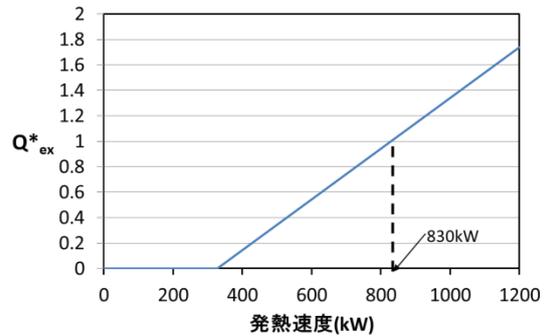
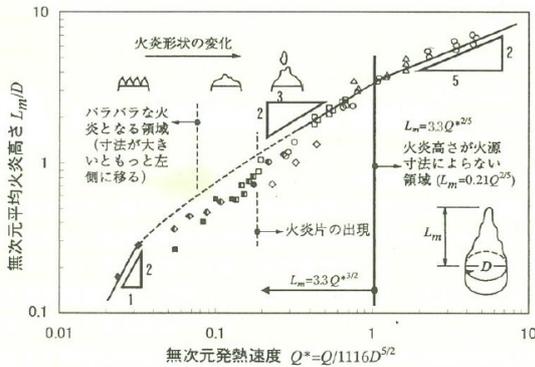


図 3-7 無次元発熱速度  $Q^*$  と無次元火炎高さ  $L_m/D$  の関係<sup>[3-5]</sup>      図 3-8 本実験における  $Q_{ex}^*$  と発熱速度の関係

表 3-2 不燃性外装を用いた場合の開口噴出火炎の無次元発熱量( $Q_{ex}^*$ )

加熱強度 (kW)	ガス供給量, (ℓ/min)	無次元発熱量 $Q_{ex}^*$
340	201	0.02
647	403	0.68
940	670	1.22
1107	806	1.55

### 3.4.2 開口噴出火炎が開口部へ与える影響

EOTA のファサード試験の議論<sup>[3-6]</sup>においては、開口部上端のまぐさにおける温度に関して 800~900℃以上の温度を継続的に受けることが必要とされている。この条件は開口上端部の温度を見ると、図 3-9 に示す通り、615kW 以上の加熱強度であれば 900℃を超えていることから 600kW 以上の開口噴出火炎であれば実火災において開口部上端部に与える影響は十分に再現できていると言える。逆に加熱強度が 1107kW の場合は 1100℃以上と 900℃

を大きく上回る温度を測定しており、加熱強度が大きい場合、開口部周辺に与える影響は過剰となっている可能性がある。

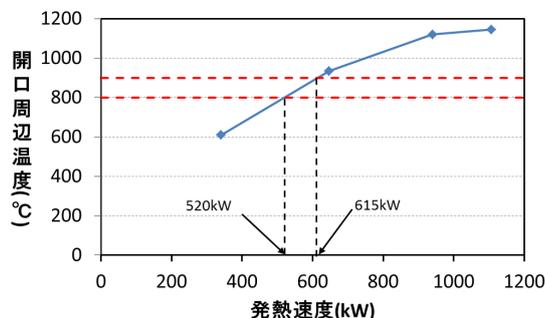


図 3-9 開口上端温度と発熱速度の関係

### 3.4.3 燃え拡がり性状の評価可否

#### (1) 可燃性外装の初期燃焼における検討

他のファサード試験の噴出火炎性状を調査すると、噴出火炎の火炎高さは 2m 程度以上が望ましいと考えられるが、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の試験装置においては開口部上端から試験体上端までの高さが 2.73m となっているため、噴出火炎高さの火炎高さが高い場合、2.73m の高さまでで可燃性外装の燃え拡がり性状が確認できない恐れがある。壁面における燃え拡がりには図 3-10 に示すように初期火源によって壁面が燃焼して燃え拡がっていき、燃焼領域が徐々に火源から離れていき、最終的には壁面の燃焼のみが未燃部分への加熱に寄与するようになる。そのため、初期火源による壁面の燃焼による”火炎の伸び”が試験体上端まで届いた場合、図 3-10 における②の段階までしか試験中に観察できず、十分な高さといえなくなる。

そのため、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において可燃性外装の燃え拡がりを観察するためには、初期火源における火炎高さと”火炎の伸び”の合計が 2.73m 以下となる必要がある。さらに、温度の測定高さが最大で開口上端より 2.5m のため、2.5m 以下であるのがより望ましい。

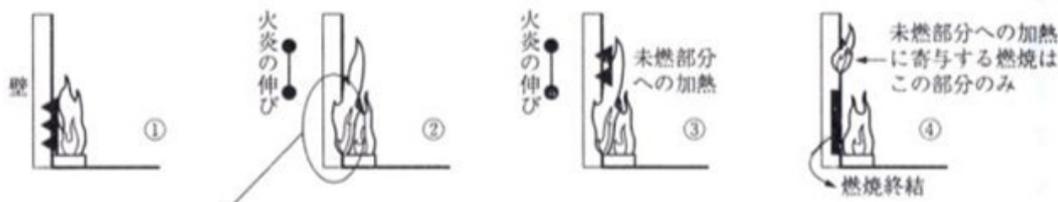


図 3-10 壁面上の火焰伝播メカニズム<sup>[3-7]</sup>

垂直面における燃焼に関する研究はそれほど多くはないが Ahmad<sup>[3-8]</sup>,長谷見<sup>[3-9][3-10]</sup>及び Quintiere<sup>[3-11]</sup>らによって整理されており、垂直加熱面の熱分解領域より上の壁面の入射熱

流束分布は材料に関係なく、燃焼領域からの高さ( $x$ )と無次元発熱量( $Q_l^*$ )と火源寸法( $D$ )を用いて以下ようになる。

$$q_w = 20 \sim 30 \text{ kW/m}^2 \quad 1 < x' < 2.8 \quad \text{(数式 3-5)}$$

$$q_w = 450(x/Q_l^{*2/3} \cdot D)^{-5/2} \text{ kW/m}^2 \quad 2.8 \leq x' \leq 10 \quad \text{(数式 3-6)}$$

$$q_w = 25(x/Q_l^{*2/3} \cdot D)^{-1.3} \text{ kW/m}^2 \quad 10 \leq x' \quad \text{(数式 3-7)}$$

ここで、 $q_w$ :入射熱流束( $\text{kW/m}^2$ )、 $x$ :垂直座標( $m$ )、 $x'$ :無次元高さ( $x/Q_l^{*2/3} \cdot D$ )、 $D$ :火源寸法( $m$ )、 $x_p$ :燃焼領域( $m$ )、 $L_f$ :燃焼領域下端からの火炎高さ( $m$ )、 $Q_l^*$ :単位長さにおける無次元発熱量、である。

試験における壁面への入射熱流束と外装表面温度の関係を見ると外装表面温度が  $500^\circ\text{C}$  前後の時に  $20\text{kW/m}^2$  の入射熱流束を壁面が受けていることが分かる。

壁面の燃焼において、炎が当たる箇所( $1 < x' < 2.8$ )においては  $20 \sim 30\text{kW/m}^2$  となることより、噴出火炎において火炎が当たる箇所は外装表面温度が  $500^\circ\text{C}$  に減衰するまでの高さであると仮定した。そして外装表面及び外装表面より  $50\text{mm}$  離れた位置における温度の高い方の温度をその高さにおける測定温度とし、測定高さの間を線形補間し、 $500^\circ\text{C}$  まで減衰した高さを各条件における火炎高さとした。

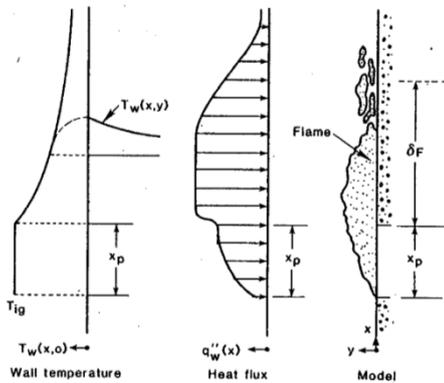


Fig.1 Schematic diagram of upward flame spread.

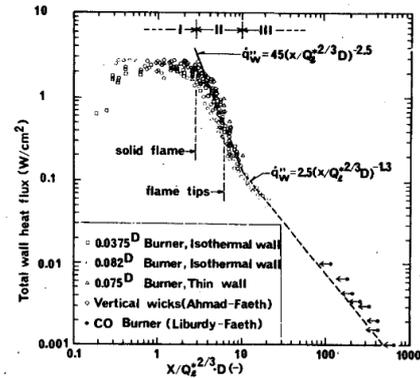


Fig.2 Total wall heat flux vs. normalized height.

図 3-11 上方向燃え拡がり図[3-9]

図 3-12 入射熱流束と無次元発熱量の関係[3-10]

一般的な可燃性外装として考えられる木材及び湿式外断熱工法においては壁面において燃焼した場合、それぞれ  $110$  及び  $120 \sim 130\text{kW/m}^2$  の発熱量があるといわれている[3-12]。初期火源の燃焼火炎高さまでの高さを初期火源による燃焼領域(火源寸法  $D$ )とした場合、 $x' = 2.8$  となる高さが火炎の伸びとなる。火炎高さと火炎の伸びの合計が  $2.73\text{m}$  以下となるためには図 3-13 に示すように  $110\text{kW/m}^2$  の場合には火炎高さが  $1.8\text{m}$  以下に、 $130\text{kW/m}^2$  の場合には火炎高さが  $1.7\text{m}$  以下となる必要がある。また、 $130\text{kW/m}^2$  の場合、火炎高さと火炎の伸びの合計を温度の測定点である開口上端より  $0.9\text{m}$ 、 $1.5\text{m}$ 、 $2\text{m}$ 、 $2.5\text{m}$  以下にするためには火炎高さをそれぞれ  $0.47$ 、 $0.86$ 、 $1.2$ 、 $1.55\text{m}$  以下とする必要がある。発熱速度は火

炎高さと発熱速度の関係を線形補間すると、図 3-14 に示す通りになる。なお、0.47m は加熱強度が 647kW の時点で既に超えているためにグラフには示していない。

図 3-14 より、火炎高さと火炎の伸びの合計が開口上端より 1.5m 上の測定点を下回るためには加熱強度が 769kW 以下に、開口上端より 2m 上の測定点を下回るためには 881kW 以下に、開口上端より 2.5m 上の測定点を下回るためには 979kW 以下に、試験体上端の熱流束計を下回るためには 1011kW 以下となることが望ましいと言える。

また、各加熱条件における不燃性外装を用いた場合の初期火源の火炎高さ及び初期火源によって発生する可燃性外装の火炎の伸びを整理すると、表 3-3 のようになる。加熱強度が 647 及び 940kW の場合は試験体上端までの高さ 2.73m を超えず、1107kW の場合は 2.73m を大きく超える値となり、燃え拡がり性状を試験によって確認するのは困難であることが伺え、加熱強度 1200kW の加熱は試験体規模と比較して燃え拡がり性状を評価するには過剰であると判断できる。

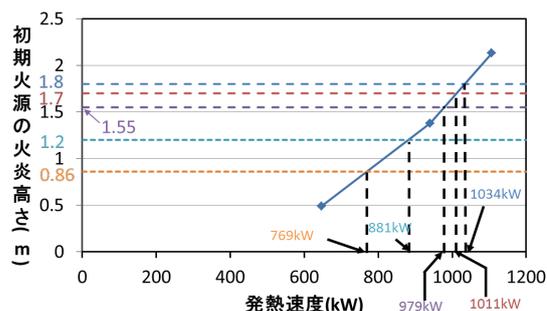
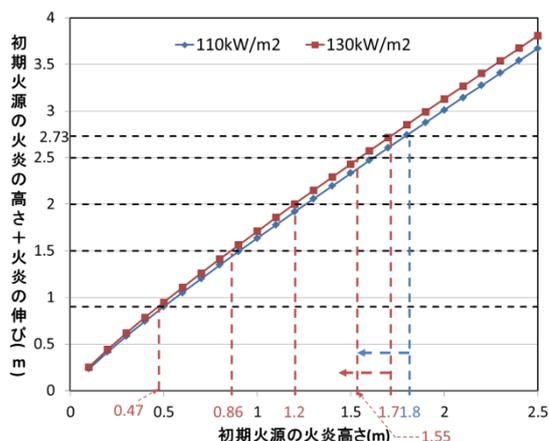


図 3-13 初期火源の火炎の高さと火炎の伸び 図 3-14 初期火源の火炎高さと発熱速度

表 3-3 不燃性外装を用いた場合の初期火源(噴出火炎)の火炎高さ及び初期火源によって発生する可燃性外装の火炎の伸び

加熱強度 (kW)	不燃性外装における初期火源の火炎高さ (m)	可燃性外装において発生する火炎の伸び(m)		初期火源の火炎高さ+可燃性外装の火炎の伸び(m)	
		110kW/m <sup>2</sup>	130kW/m <sup>2</sup>	110kW/m <sup>2</sup>	130kW/m <sup>2</sup>
647	0.49	0.40	0.44	0.89	0.93
940	1.49	0.83	0.93	2.32	2.42
1107	2.13	1.05	1.18	3.18	3.31

(2)燃え拡がりの評価基準値に関する検討

2章において整理した各国のファサード試験における評価基準では、燃え拡がりの判断は

主に測定温度と目視観察によって行っている。2章で検討したファサード試験の中で測定温度が具体的に規定されている試験はNFPA285、BS 8414、SP FIRE 105、DIN 4102-20の4つの試験規格であり、各試験における温度に関する評価基準は表 3-4 に示す通りとなる。

継続時間が600秒と比較的長いSP FIRE 105の基準を除くと、500～600℃の間で評価していることが確認できる。継続時間に関しては規定のない試験規格も多く、燃え広がりが発生する可燃性外装に関しては瞬間値で判断しても差が表れることは少ないと考えられるが、BS8414の評価基準にあるように30秒程度継続して燃焼した場合は十分燃え広がったと判断できる。なお、火炎の温度に関しては火災プルームの実験より雰囲気温度より300～800℃高温の領域とされ、火炎高さの温度は雰囲気温度より495℃高い温度と一致するとされている<sup>[3-13]</sup>。雰囲気温度を20℃とした場合火炎高さにおける温度は515℃となり、ファサード試験における評価値と近い値となる。

また、壁面の燃焼における入射熱流束は壁面が燃焼した火炎域においては20～30kW/m<sup>2</sup>となる<sup>[3-10]</sup>ことから、入射熱流束に関しては20kW/m<sup>2</sup>以上を計測した場合、燃え広がったと判断できる。

よって燃え広がりの判断基準として、500～600℃の温度もしくは20kW/m<sup>2</sup>以上の入射熱流束で判断し、継続時間に関しては30秒を目安に判断するのが妥当といえる。

表 3-4 各国ファサード試験の測定温度に関する燃え広がり評価基準

試験規格	評価基準	
	温度(℃)	継続時間(秒)
NFPA285	538	規定なし
BS 8414	600	30
SP FIRE 105	450	600
	500	120
DIN 4102-20	500	規定なし

### (3)可燃性外装(木製外装、湿式外断熱工法)を用いた実験による検証

実際に可燃性外装(木製外装及び湿式外断熱工法)に対してプロパンガスのバーナーへの供給ガス量を変更してA～Dの4つの加熱条件を用いて“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”に準拠した実験を実施した。加熱条件A, B, C, Dはそれぞれ加熱強度が581kW, 835kW, 883kW, 1107kWとなる加熱条件で実験を実施した。なお、加熱条件Aにおいては同じガス供給量で3回実験を実施し、ほぼ同様の噴出火炎性状を示しており表 3-5 に示す結果はその内の1つである。

表 3-5 に各条件での外装表面における温度及び入射熱流束そして発熱速度の計測した結果を示す。なお、火炎高さは開口上端から測定温度が500℃まで減衰するまでの長さとし、温度の測定点の間は線形補間した。

木製外装としては本実加工を施したスギ材を横張りしたもの、湿式外断熱工法としては厚さ 100mm の EPS を断熱材として用いたものを試験体として使用し、それぞれ加熱強度が 581,835,883,1107kW 及び加熱強度 581,883,1107kW の加熱条件で実験を実施した。

実験において外装表面温度が 500℃を超えた最も高い測定点をその時点における火炎高さとして設定した。また、開口上端の温度が 500℃を超えた時点用火炎の噴出が開始した時間とし、この時間を 0 分として設定した。木製外装及び湿式外断熱工法における火炎噴出開始より 5 分間の火炎高さの経時変化はそれぞれ図 3-15 及び図 3-16 に示すようになる。

加熱強度が 581kW, 835kW 及び 883kW においては火炎高さが徐々に高くなっていくのに対し、加熱強度が 1107kW においては木製外装及び湿式外断熱工法のいずれの試験体においても火炎高さが瞬時に 2.5m になり、燃え広がりの様子が確認できていないことが伺え、加熱強度が 1107kW の場合、噴出火炎の大きさが過剰であることが実際の可燃性外装における実験においても確認された。

表 3-5 実験に用いた加熱強度における外装表面温度、受熱量及び発熱速度

加熱条件	発熱速度 (kW)		開口上端からの高さ(mm)						ガス供給量(L/min)	火炎高さ (m)	
			0	500	900	1500	2000	2500			2830
A	581	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	-	17	11	7	7	5	384	0.50
		温度(°C)	943	462	393	290	233	192	-		
B	835	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	-	34	17	10	9	7	640	1.29
		温度(°C)	1130	796	620	435	342	277	-		
C	883	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	-	30	14	10	-	7	700	1.33
		温度(°C)	1138	709	592	366	364	309	-		
D	1107	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	120	98	38	21	14	11	806	2.13
		温度(°C)	1145	1100	930	642	524	428	-		

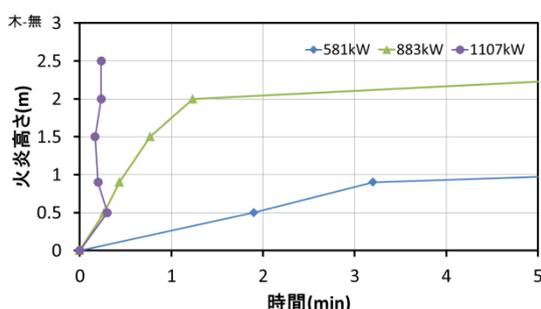


図 3-15 木製外装における火炎高さ

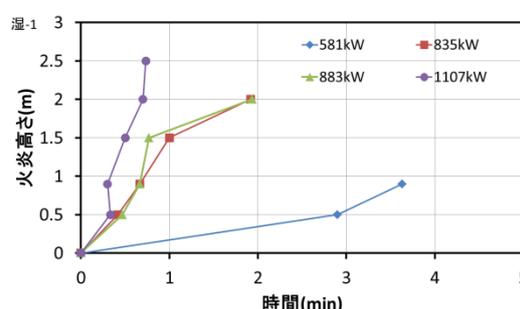


図 3-16 湿式外断熱工法における火炎高さ

(4)まとめ

以上のことから、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において加熱強

度 647kW～1107kW の間で可燃性外装材の燃え拡がりの評価を行うためには表 3-6 に示す加熱強度及び評価基準が必要かつ適切であると言える。

表 3-6 燃え拡がりの評価高さ及び評価基準値(案)

加熱強度 Q(kW)	評価基準		
	評価高さ	温度	熱流束
647≦Q<769	1.5m,2m,2.5m,試験体上端	500～600℃ 継続的な燃焼 (30 秒以上)	20kW/m <sup>2</sup> 継続的な燃焼 (30 秒以上)
769≦Q<881	2m,2.5m,試験体上端		
881≦Q<979	2.5m,試験体上端		
979≦Q<1011	試験体上端		
1011≦Q≦1107	望ましくない		

### 3.4.4 上階延焼判定の評価可否

#### (1) 上階延焼判定高さ及び初期火源の高さに関する検討

開口噴出火炎の火炎高さは一般的な居室においても 2.8～3.5m となることが知られており<sup>[3-6]</sup>、一般的な住宅においては一階層上の開口部においては不燃性の外装の建物においても開口噴出火炎が届き上階延焼を起こす危険性があると考えられている。ドイツにおいてはファサード防火上の目標を消防隊が消火を開始するまでの間 2 階層上への延焼を防止することと設定しており<sup>[3-14]</sup>、1 階層上の延焼に関してはありえるものと考えている。そのため、ドイツのファサード試験において適用可能となる建築物は消防の消火が期待できる 22m 以下の中層建物となっている。しかし、その他のファサード試験においては高層の建物に関しても適用でき、スウェーデンの試験規格(SP FIRE 105)においては一階層上に疑似開口部を設けて開口部が受ける熱流束を評価基準としている。

可燃性外装を施工した場合にどのような場合に上階延焼の危険性が高まるかを考えると、火災室の開口と上階室の開口の間に施工された可燃性外装の燃焼が上階室の開口に影響を与える場合と予想できる。日本の建築物を想定した場合、建築基準法により耐火構造物においては上階開口部との間には 0.9m 以上のスパンドレルが要求されることから火災が発生した場合、少なくとも 0.9m の可燃性外装が上階開口部の下で燃焼している状況を想定する必要がある。また、一般的な住宅を想定した場合、1 階層あたりの階高は 2.7m 程度であり、開口部と開口部の間には凡そ 1.8m の間隔が開くことになる。開口の間隔が大きくなれば上階開口部が開口噴出火炎から受ける熱量は小さくなることが予想され、安全であると考えられるが、開口間に施工された可燃性外装の面積が大きくなることから危険性が高まるとも考えられる。図 3-17 に示す通り、初期火源の火炎高さが 0.9m 及び 1.8m の場合、加熱強度はそれぞれ 782kW, 1034kW が必要となる。

開口間に施工された可燃性外装が常に開口噴出火炎に曝される状況を想定した場合、開口噴出火炎の火炎高さは少なくとも 0.9m 以上が必要となる。そして、開口間に施工された

可燃性外装燃焼の上階開口部へ与える影響を確認すると考えた場合、評価基準は開口噴出火炎より上が望ましい。しかし、開口噴出火炎から離れすぎた場合壁面の燃焼のみの影響を評価することになるため、評価を行う測定点が高くなり過ぎるのは望ましくない。そのため、上階延焼を評価する測定高さとして、『不燃性外装を用いた場合の初期火源の高さ～不燃性外装を用いた場合の初期火源の火炎高さ+初期火源によって発生する可燃性外装の火炎の伸び』の間の測定点とするのが望ましい。燃え拡がり性状の評価可否と同様に初期火源によって発生する可燃性外装の火炎の伸びより上階延焼判定の評価を検討すると、図 3-18 に示す通り初期火源の火炎高さが 0.9m であれば 0.9m～1.56m の高さが、1.8m であれば 1.8m～2.85m の高さで評価するのが望ましいと言える。また、試験体上端の熱流束の高さが 2.83m であるため、試験体上端で測定するためには最低でも 1.8m 以上の火炎高さが必要になると判断できる。

図 3-17 及び図 3-18 より 1107kW までの加熱強度と測定高さの関係は下記に示す通りとなる。

加熱強度が 782kW 以下の場合には初期火源の火炎高さがスパンドレルに要求される 0.9m を超えないため、上階延焼を評価するのに望ましくないと判断できる。

加熱強度が 782～881kW の場合、初期火源の火炎高さは 0.9～1.2m、初期火源の火炎の高さ+火炎の伸びの合計が 2m 以下となることより、開口上端より 1.5m の高さの測定高さが上階延焼の評価に適している。

加熱強度が 881～967kW の場合、初期火源の火炎高さは 1.2～1.5m、初期火源の火炎の高さ+火炎の伸びの合計が 2.5m 以下となることより、開口上端より 1.5m、2m の高さの測定高さが上階延焼の評価に適している。

加熱強度が 967～979kW の場合、初期火源の火炎高さは 1.5～1.55m、初期火源の火炎の高さ+火炎の伸びの合計が 2.5m 以下となることより、開口上端より 2m の高さの測定高さが上階延焼の評価に適している。

加熱強度が 979～1029kW の場合、初期火源の火炎高さは 1.55～1.78m、初期火源の火炎の高さ+火炎の伸びの合計が 2.83m 以下となることより、開口上端より 2m、2.5m の高さの測定高さが上階延焼の評価に適している。

加熱強度が 1029～1078kW の場合、初期火源の火炎高さは 1.78～2m となり開口上端より 2m、2.5m の高さ及び試験体上端における熱流束計の測定高さが上階延焼の評価に適している。

加熱強度が 1078～1107kW の場合、初期火源の火炎高さは 2～2.13m となり開口上端より 2.5m の高さ及び試験体上端における熱流束計の測定高さが上階延焼の評価に適している。

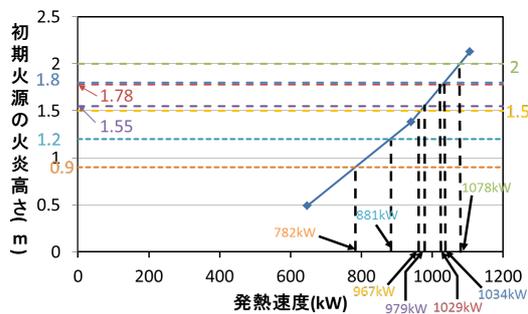


図 3-17 上階延焼判定に必要な火炎高さ及び発熱速度

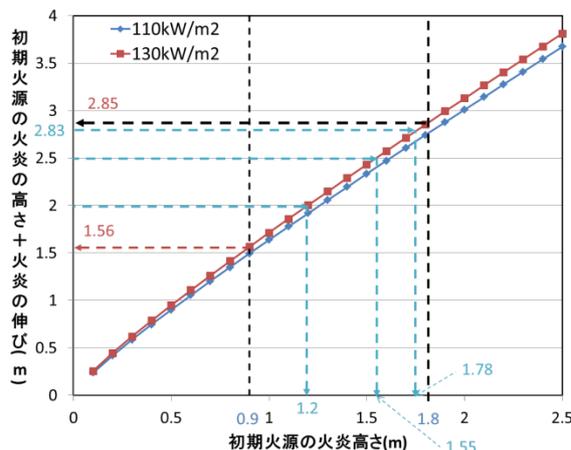


図 3-18 初期火源の高さと上階延焼評価高さの関係

(2)上階延焼判定基準値に関する検討

上階延焼が起こる原因として、上階開口部の破損後に火炎が侵入して延焼する、もしくは上階開口部からの熱の流入によって上階室内の可燃物が燃焼し延焼するという2通りの延焼方法が考えられている。

窓ガラスの破損に関しては様々な研究が過去になされており、濱田らの報告<sup>[3-15]</sup>では JIS A1301 屋外Ⅱ級加熱試験の結果、厚さ 3mm の普通並板ガラスが押縁止めでは 5.8～8.5 分、クリップパテ止めでは 5.5～6.5 分で破損落下している。その後、横井によって半実大規模の実験<sup>[3-16]</sup>がなされており、この実験では開口上端より 0.5m 上方に高さ 1m の範囲で並ガラスを鉄製サッシにはめ込んだものに対して最高 600℃に達する 500℃以上の熱気流に約 20 分間晒し、その結果 12 分目にひびが入り、15 分頃にサッシから外れた。この窓ガラスより上方に設置したガラスが 400℃程度の熱気流で破損していないことからこの実験に使用した並ガラスはおよそ 500℃の熱流を浴びると破損落下すると結論付けた。

その後、防火総プロにおいてガラスの破損に関する実験が実施され、ガラスの露出部とエッジ部の温度差により発生する応力でひび割れが生じた後脱落へと進展することが示された。ガラスのひび割れは熱気流温度が 360℃以上で割れる確率が非常に高くなると結論付けた。

また、ガラスに受ける受熱量と脱落に関しても実験がなされており、原田<sup>[3-17]</sup>らは 50cm 角の 3mm 厚の普通並板ガラスに対して輻射熱を与える実験を実施したが輻射熱が 8kW/m<sup>2</sup> 以下の場合には致命的な脱落は発生せず、9kW/m<sup>2</sup> では全体の 8～20%が脱落する結果となった。Shields<sup>[3-18][3-19]</sup>らによれば区画内の火炎による窓ガラスの破損に関して実験が実施されたがガラス表面温度が 415～486℃に到達する時に脱落し、およそ 35kW/m<sup>2</sup> の受熱量がガラスの脱落には必要と結論付けた。

これらの実験結果を踏まえて Babrauskas<sup>[3-20]</sup>は 9kW/m<sup>2</sup>の入射熱流束でガラスが脱落する可能性があるが、35kW/m<sup>2</sup>を超えるまでは脱落の可能性はとて低いと結論付けた。

以上のことからガラスの脱落を上階延焼の危険性の指標とした場合、500℃程度の温度もしくは 35kW/m<sup>2</sup>程度の受熱量が適当であると言える。

実際の建物において上階のガラスが常に存在するとは限らず、またガラスが健在であっても輻射熱によって上階内部の可燃物へ着火する危険性があることから、上階内部の可燃物への着火を検討する研究もなされている。

火災室の上階の可燃物の着火で判定を行う場合、既往の研究<sup>[3-21]</sup>の上階延焼検証法において検討がなされている。

その検証法においては、火災室の直上階が開口噴出火炎によって延焼しない限界の入射熱  $Q_{cri}$  は、開口近傍の可燃物と噴出熱気流が直接接触しないと仮定し、放射熱伝達のみを考慮して、

$$Q_{cri} = \sigma \varepsilon_f \varepsilon_r (T_{cri}^4 - T_r^4) \phi \quad \text{(数式 3-8)}^{[3-21]}$$

と表現している。なお、 $\sigma$ ：ステファンボルツマン係数、 $\varepsilon_f$ ：噴出気流の放射率、 $\varepsilon_r$ ：火災直上室の可燃物の放射率、 $T_r$ ：火災直上室の温度(K)、 $\phi$ ：放射低減係数、であり、放射低減係数 $\phi$ とは既往の研究<sup>[3-22]</sup>において行われた防火設備(耐熱ガラスなど)の入射熱流束の低減効果を係数としたものであり、実験結果よりガラスにおいては $\phi=0.5$ が期待できると結論付けられおり、(数式 3-8)より、上階窓近傍における噴出気流温度の延焼を起こさない限界値  $T_{cri}$  は、

$$T_{cri} = \sqrt[4]{Q_{cri} / \sigma \varepsilon_f \varepsilon_r \phi + T_r^4} \quad \text{(数式 3-9)}^{[3-21]}$$

と表現している。

ここでは、既往の研究<sup>[3-21]</sup>において提案されている  $T_{cri}$  を用いて、上階延焼判定基準値について検討を行うこととする。

上階の可燃物として木材を想定すると、一般に木材の着火限界熱流束は 12~15 kW/m<sup>2</sup>といわれており、安全側に見て 10kW/m<sup>2</sup>を  $Q_{cri}$  とできる。

上階のガラスが破損するまでの間は室内への熱流束が小さくなり $\phi=0.5$  となるとされているため、これを用い、破損後は $\phi=1$  とした。放射率や上階の室内温度に関しては、 $\varepsilon_f=1$ 、 $\varepsilon_r=0.9$   $T_r=20$ (℃) とした。こられの想定のもと計算を行うと、ガラス破損前は $T_{cri}=521.9$ (℃)が許容温度となり、ガラス破損後は $T_{cri}=398.5$ (℃)が許容温度となる。しかし、木材の着火限界熱流束は着火しない熱流束の値であり、図 3-19 に示す通り、15kW/m<sup>2</sup>の熱流束を受けた場合でも着火するまでには4分ほど、20kW/m<sup>2</sup>の場合でも1分ほどの時間がかかることが知られている。15kW/m<sup>2</sup>の場合、ガラス破損前においては $T_{cri}=605.4$ (℃)、ガラス破損後においては $T_{cri}=467.9$ (℃)となる。

横井らの実験<sup>[3-16]</sup>においてガラスがサッシュから外れるまでに15分の時間がかかっており、噴出火炎発生初期においては上階の窓ガラスが存在すると仮定し、継続時間に関しては安全側を見て、凡そ600(℃)以上の温度が2分以上続くと上階延焼の危険が高まると判断

できる。なお、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”にこの条件を適用する場合、試験体上端に設置してある熱流束計以外の測定点は外装表面の温度であるため、条件が厳しくなることが予測される。

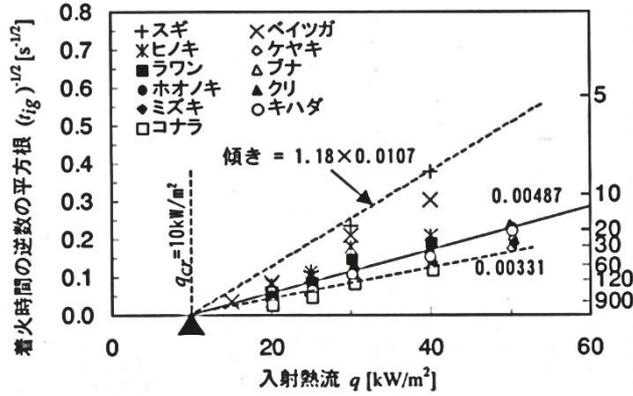


図7 各種木材の着火時間（参考文献<sup>17,18,19</sup>）のデータから作図

図 3-19 各種木材の着火時間<sup>[3-23]</sup>

(3)まとめ

以上のことより、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において可燃性外装の上階延焼の評価を行うためには表 3-7 の条件を満たす必要がある

表 3-7 上階延焼の評価高さ及び評価基準値(案)

加熱強度 Q(kW)	評価基準		
	評価高さ	温度	熱流束
Q < 782	望ましくない	600℃以上 2分間以上	20kW/m <sup>2</sup> 2分間以上
782 ≦ Q < 881	1.5m		
881 ≦ Q < 967	1.5m, 2m		
967 ≦ Q < 979	2m		
979 ≦ Q < 1029	2m, 2.5m		
1029 ≦ Q < 1078	2m, 2.5m, 試験体上端		
1078 ≦ Q ≦ 1107	2.5m, 試験体上端		

### 3.5 第3章のまとめ

可燃性外装に対して加熱強度を変更して“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”に準拠し、不燃性の外装を用いて実験を実施し、

- 開口噴出火炎が開口部に与える影響
- 開口噴出火炎の発熱量
- 燃え拡がり性状の評価可否
- 上階延焼判定の評価可否

の4つの検討項目に関して検討した結果、加熱強度と評価基準に関して以下の知見が得られ、今回実施した加熱強度が647～1107kWの範囲では表3-8のように整理できる。

表 3-8 検討項目を満たす加熱強度と測定高さの関係

検討項目	噴出火炎の大きさが実火災と比較して遜色ないこと	開口部が火炎から受ける影響が実火災と比較して遜色ないこと	試験方法の測定高さの範囲内で燃え拡がり確認可能であること	可燃外装の燃焼が火災区画の一階層上の開口部に与える影響が確認可能であること	
検討項目を満たすための条件	噴出火炎の無次元発熱速度( $Q^*$ )が1以上	開口上端の計測温度が800℃以上	測定高さ $\geq$ 火炎高さ+火炎の伸び	火炎高さ+火炎の伸び $\geq$ 測定高さ $\geq$ 火炎高さ	
加熱強度 $Q(kW)$	検討項目が条件を満たす加熱強度と測定高さの関係				
$647 \leq Q < 769$	望ましくない	可	1.5m, 2m, 2.5m, 試験体上端	望ましくない	
$769 \leq Q < 782$			2m, 2.5m, 試験体上端	1.5m	
$782 \leq Q < 830$					
$830 \leq Q < 881$	可		2.5m, 試験体上端	1.5m, 2m	
$881 \leq Q < 967$			2m		
$967 \leq Q < 979$			2m, 2.5m		
$979 \leq Q < 1011$					
$1011 \leq Q < 1029$			望ましくない	2m, 2.5m, 試験体上端	2.5m, 試験体上端
$1029 \leq Q < 1034$					
$1034 \leq Q < 1078$					
$1078 \leq Q < 1107$			2.5m, 試験体上端		

## 第3章 参考文献

- [3-1] 楊 欣潔：耐火建築物における発泡系外断熱工法の延焼性評価手法に関する研究，東京大学博士論文，2011
- [3-2] 長谷見雄二、泉潤一：火災盛期における開口噴出火炎の形成機構 模型実験による検討、pp.745-746、3009、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、昭和63年10月
- [3-3] 大宮喜文、堀雄兒：火災区画外への余剰未燃ガスを考慮した開口噴出火炎性状、pp.1-8、第545号、日本建築学会計画系論文集、2001年7月
- [3-4] Yuji Hasemi and Mitsuru Nishihata：Deterministic properties of turbulent diffusion flames from low  $Q^*$  fires, Vol.7 No.2(27~34) Fire Science and Technology, 1987
- [3-5] 原田和典：建築火災のメカニズムと火災安全設計 pp.36、日本建築センター
- [3-6] Ingolf Kotthoff and Jan Riemesch-Speer：Mechanism of fire spread on facades and the new Technical Report of EOTA “Large-scale fire performance testing of external wall cladding systems”, Proceedings of 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, CSTB. MATEC web of conferences 9, 02012.  
<http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20130902010>
- [3-7] 火災と建築 pp.152、日本火災協会編
- [3-8] Ahmad, T. etc：17<sup>th</sup> Symp.(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1149-1160, 1979
- [3-9] 長谷見 雄二：垂直面における上方火焰伝播の熱的モデル・I, pp.117-123 第359号、日本建築学会構造系論文報告集, 1986
- [3-10] 長谷見 雄二：垂直面における上方火焰伝播の熱的モデル・II, pp.141-147 第375号、日本建築学会計画系論文報告集, 1987
- [3-11] J.G.Quintiere：The application of flame spread theory to predict material performance, pp.63-70, vol.93 num.1 journal of research of the national bureau of standards, 1988
- [3-12] Ing. Ing. Erhardt Wilk: Brandentwicklung und Brandwirkungen bei Raumbränden, 3. MAGDEBURGER BRAND UND EXPLOSIONSSCHUTZTA, 21./22. März 2013
- [3-13] 成瀬友宏、菅原真一：火災ブルームの巨視的性状に関する研究、pp.25-37、44(1)、日本火災学会論文集、1996
- [3-14] Dipl.-Phys. I. Kotthoff: “Fire performance of external thermal insulation composite systems (ETICS) in buildings” basics  
<http://www.eumeps.construction/show.php?ID=4806>
- [3-15] 浜田稔、池田正二：硝子窓の防火に関する研究、日本火災学会論文集第7巻第2号、p.60-64、1958
- [3-16] 横井鎮男：耐火造火災時、横に長い窓からの噴出気流の温度に関する半実大実験、日本建築学会関東支部第25回研究発表会、p.13-16、1959
- [3-17] Kazunori Harada, Atsushi Enomoto, Kazuki Ueda and Takao Wakamatsu：An Experimental Study on Glass Cracking and Fallout by Radiant Heat Exposure, Fire Safety Science, proceedings of the 6<sup>th</sup> international symposium, pp.1063-1074
- [3-18] T. J. Shields, G. W. H. Silcock and M. F. Flood：Performance of a Single Glazing Assembly Exposed to Enclosure Corner Fires of Increasing Severity, Fire and Materials 25, pp.123-152, 2001
- [3-19] T.J. Shields, G.W.H. Silcock, and M. Flood：Performance of a Single Glazing Assembly Exposed to a Fire in the Centre of an Enclosure, Fire and Materials 26, pp.51-75, 2002
- [3-20] Vytenis Babrauskas：Glass breakage in fires,  
<http://www.doctorfire.com/GlassBreak.pdf>

[3-21] 3.外壁スパンドレルを超えた上階延焼に関する実験的検討、防火・避難対策等に関する実験的検討 平成22年度報告書 pp.3-31～3-35

[3-22] 村岡 宏ら：開口部付き壁の熱放射量に関する実験的検討 その2：各種防火設備認定品の加熱実験、日本建築学会大会学術講演梗概集.A-2pp.193-194、日本建築学会、2010

[3-23] 原田和典：建築火災のメカニズムと火災安全設計 pp.15, 日本建築センター

## 第4章 可燃性外装の燃え拡がり性状

### 4.1 第4章の目的

第3章において、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の加熱条件に関して、その噴出火炎性状より検討を行った。しかし、外装に施工される可燃性材料は様々であり、燃焼性状も各々異なり、可燃性外装材の防火上の安全基準を検討する上では実際に可燃性外装を用いて試験を実施し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における燃え拡がり性状より検証を行う必要がある。また、可燃性外装の燃え拡がりの抑制手法を検討する上で各々の可燃性外装の燃え拡がり性状の特徴を把握する必要がある。

そこで本章では、可燃性外装における防火上の安全基準及び燃え拡がりの抑制手法を構築することを目的として外断熱工法、木製外装、金属 SWP、太陽電池フィルム、樹脂塗材、樹脂サイディングといった可燃性外装材を対象として“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いて実験を実施し、その燃え拡がり性状を観察し、防火上の安全基準及び燃え拡がりの抑制手法を考慮する上で重要な事項に関して検討を行った。

## 4.2 実験概要

### 4.2.1 実験の目的

実火災においては火災区画の可燃物量、区画の大きさ、開口の大きさなどによって開口噴出火炎の大きさの様々である。可燃性外装の実火災における燃え拡がり性状を把握し抑制手法を検討する上で、様々な加熱強度においての可燃性外装の燃え拡がりを観察することは重要であり、本実験においては加熱強度 581kW,883kW,883kW,1107kW の4水準の加熱強度を用いて可燃性外装を対象に実験を実施した。

また、3章で行った4つの検討条件

- 開口噴出火炎が開口部に与える影響
- 開口噴出火炎の発熱量
- 燃え拡がり性状の評価可否
- 上階延焼判定の評価可否

について、実際に可燃性外装を用いて“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を実施した場合にも成立するかどうかを確認する。

開口噴出火炎が開口部に与える影響及び開口噴出火炎の発熱量に関しては、加熱強度を変化させた場合の可燃性外装の燃焼性状より、燃え拡がり性状の評価可否及び上階延焼判定の評価可否に関しては、防火性能に明確に差があると判断できる可燃性外装を対象として実験を実施し、区別が可能であるかどうかによって確認する。

### 4.2.2 試験体及び実験条件一覧

試験体の概要及び実験に際して用いた加熱強度を表 4-1 に示す。可燃性外装の試験体として湿式外断熱工法、通気工法、金属 SWP、木製外装、太陽電池フィルム、樹脂塗材そして樹脂サイディングを用いた。

湿式外断熱工法、木製外装、金属 SWP の可燃性外装においては、第3章において検討を行った燃え拡がり性状の評価可否及び上階延焼判定の評価可否の評価基準が実際に可燃性外装の試験によっても適用できるかを確認する目的で、防火性能に明確に差があると判断できる試験体を選別して実験を実施した。湿式外断熱工法では断熱材の厚さが 100mm のもの(湿-100)と 200mm のもの(湿-200)を、木製外装では無処理のスギ材及び薬剤処理を施したスギ材を、金属 SWP では無処理のポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板と芯材に難燃処理を施したポリエチレンを用いたアルミ樹脂複合板をそれぞれ試験体として選定した。これらの試験体に関しては比較的多くの加熱強度で実験を実施した。

通気工法、太陽電池フィルム、樹脂塗材、樹脂サイディングの可燃性外装においては、燃焼性状の加熱強度の与える影響を確認するために、加熱強度 581kW 及び第3章において開口噴出火炎が大きなプルームを形成すると 830kW 以上の加熱強度において実験を実施した。

表 4-1 試験体及び実験条件

No.	試験体		加熱強度(kW)
	分類	概要	
湿-50	湿式外断熱工法	EPS(50mm, 15kg/m <sup>3</sup> ), アクリル樹脂モルタル(厚さ: 2mm), 補強ネット(1層), 端部: バックラップ, 仕上げ材: 有機主体塗料	581
湿-100		EPS(100mm), その他は湿-50と同様の仕様	581,835,883,1107
湿-100-H		EPS(100mm, 30kg/m <sup>3</sup> ), その他は湿-50と同様の仕様	883
湿-150		EPS(150mm), その他は湿-50と同様の仕様	883,1107
湿-200		EPS(200mm), その他は湿-50と同様の仕様	581,835,883,1107
湿-300		EPS(300mm), その他は湿-50と同様の仕様	581
通-X	通気工法	XPS(50mm), 表面: ガルバリウム鋼板, 通気層幅 20mm	581
通-Fe		フェノールフォーム(50mm), その他は通-Xと同様の仕様	581
通-G		高性能グラスウール(16K, 厚さ 75mm, 間にふかし材として木材), 木胴縁(18mm), 外装材: 木繊維混入セメントけい酸カルシウム板(厚さ 14mm)下地 接着タイル張り(変成シリコン系樹脂接着剤, 陶磁器質タイル 6cm <sup>2</sup> , 厚さ 4.2mm),	835
通-E		EPS(100mm, 30kg/m <sup>3</sup> ), 間に枠材として木の 100mm 角材, 木胴縁(18mm), 外装材: 窯業系サイディング(厚さ 15mm)	883
木-無	木製外装	無垢スギ(厚さ 18mm), 本実横張り, 木胴縁	581,883,1107
木-薬		薬剤処理スギ(厚さ 18mm, リン酸アミノ系樹脂加圧注入), 本実横張り, 木胴縁	581,883,1107
金-U	金属 SWP	芯材: ウレタンフォーム(49mm), 面材: 塗装鋼板(0.5mm) 接合部: セラミック枠	581
金-N		芯材: ヌレートフォーム(49mm), 面材: 塗装鋼板(0.5mm) 接合部: セラミック枠	581
ア-無		芯材: ポリエチレン(3mm), 面材: アルミ板(0.5mm), 接合部: シリコーンシーラント, 開口部: アルミ板(2mm), 通気層幅 100mm	581,835,883
ア-難		芯材: ポリエチレン+水酸化アルミ(3mm), その他はア-無と同様	581,835,883,1107
電-板	太陽電池フィルム	基材はアルミ樹脂複合板(難燃処理ポリエチレン芯材), 表面に太陽電池フィルム(1.3mm)をラミネート, 開口部: アルミ板(2mm)	581
電-ル		基材: アルミ板(2mm), 表面に太陽電池フィルム(1.5mm)をラミネート, ルーバー1枚のサイズ: 幅 2000mm×高さ 250mm, ルーバー間に U 字型のゴム, 通気層幅: 600mm	1107
塗-単	樹脂塗材	防水形薄塗材 E(厚さ 2~3mm)	581,883
塗-複		防水形複層塗材 E, 塗-単より有機含有量は少ない	883
樹サ	樹脂サイディング	胴縁, 塩化ビニル樹脂サイディング	581,1107

### 4.2.3 試験方法

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”は外壁に可燃性外装を施工した耐火構造の建築物において、火源として盛期火災に発生する開口噴出火炎を想定し可燃性外装の燃え拡がり性状を検証する試験方法である。図 4-1 に示すように、チャンバー内部のバーナーに点火し開口部から火炎を噴出させる。実験中は外装面のはす向かいの位置にビデオカメラを設置し燃え拡がりの様子を撮影した。外装表面の温度を開口上端から 500, 900, 1,500, 2,000, 2,500mm 離れた計 5ヶ所において、発熱量を燃焼ガスサンプリングし酸素消費法により、そして入射熱流束を試験体の上端においてそれぞれ計測した。また、いくつかの試験体においては参考として通気層内部及び下地表面の温度の測定も行った。加熱条件に関しては第 3 章で述べた A～D のいずれかの条件、つまり加熱強度が 581kW, 835kW, 883kW, 1107kW のいずれかで実験を実施した。

なお、581kW の 4 体の試験体(木-葉、金-U、ア-難、電-板)に関しては外装表面温度を図 4-2 に示す位置で測定しているため他の試験体とは外装表面温度が若干異なる。

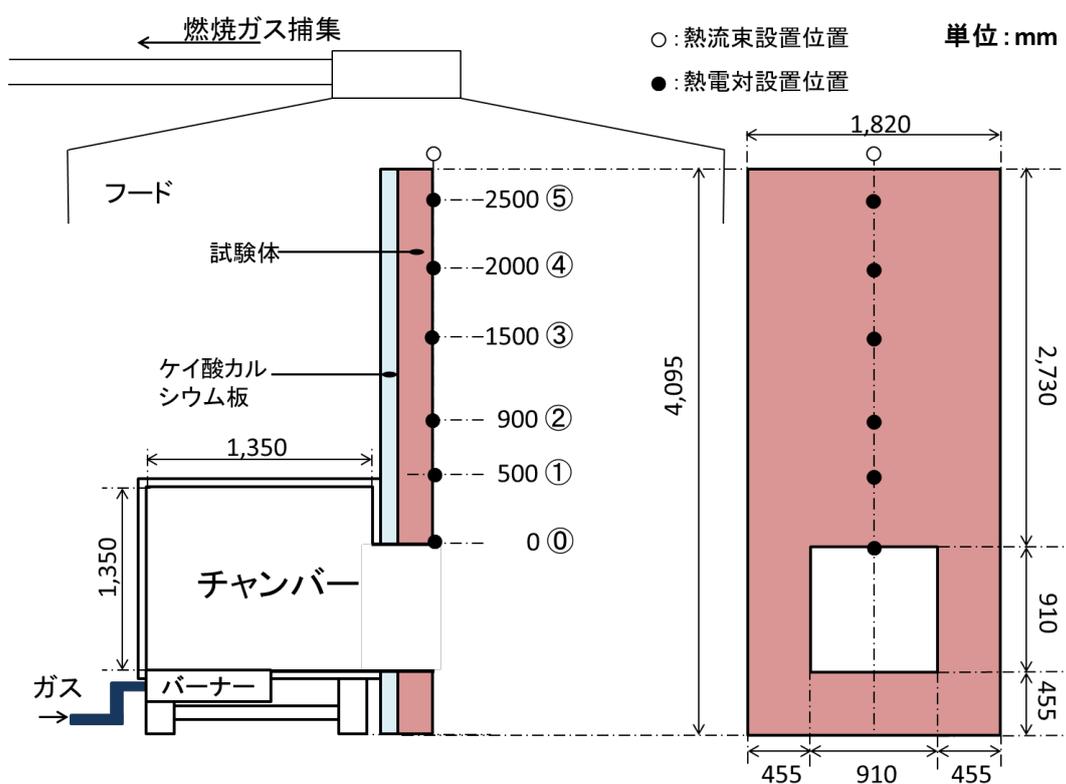


図 4-1 熱電対及び熱流束計の設置位置

表 4-2 実験に用いた加熱強度における外装表面温度、受熱量及び発熱速度

加熱条件	加熱強度 (kW)		開口上端からの高さ(mm)							ガス供給量 (ℓ/min)	火炎高さ(m)
			0	500	900	1500	2000	2500	2830		
A	581	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	-	17	11	7	7	5	384	0.50
		温度(°C)	943	462	393	290	233	192	-		
B	835	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	-	34	17	10	9	7	640	1.29
		温度(°C)	1130	796	620	435	342	277	-		
C	883	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	-	30	14	10	-	7	700	1.33
		温度(°C)	1138	709	592	366	364	309	-		
D	1107	熱流束(kW/m <sup>2</sup> )	-	120	98	38	21	14	11	806	2.13
		温度(°C)	1145	1100	930	642	524	428	-		

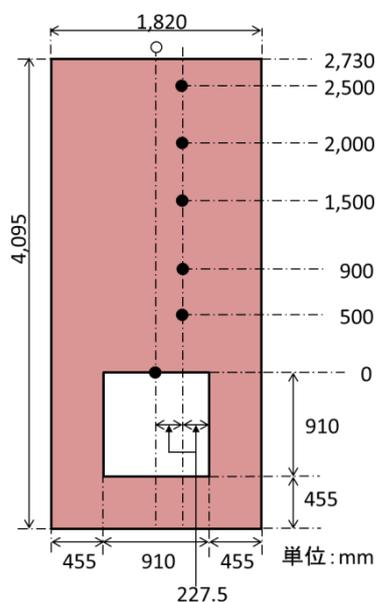


図 4-2 木-薬、金-U、ア-難、電-板(加熱強度 581kW)における温度測定箇所

## 4.3 試験体詳細

### 4.3.1 湿式外断熱工法

湿式外断熱工法として主にEPSを断熱材とした試験体を用いて実験を実施した。試験体に用いた湿式外断熱工法はEPS、メッシュ(繊維強化プラスチック)、ベースコート(樹脂モルタル)そしてトップコート(仕上塗材)で構成されており、端部は図4-3に示すようにメッシュを巻き込む形に施工して防火性能を高めるバックラップという処理が施されている。試験体の仕様として断熱材の厚さ(50, 100, 150, 200, 300mm)を変更し、100mm厚の試験体に関しては密度(15→30kg/m<sup>3</sup>)も変更したものを用いた。湿-50以外はA社、湿-50はB社の施工となっている。A社とB社品では材料に若干の違いはあるもの、基本的な構成は同じである。

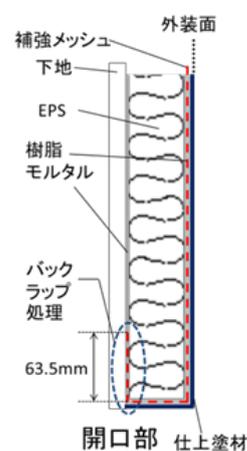


図 4-3 端部処理の詳細

### 4.3.2 通気工法

通気層を有する外断熱工法としては外装材に鋼板を、断熱材としてXPS及びフェノールフォームを使用した。通-Xは熱可塑性のXPS50mmを下地材である珪酸カルシウム板に張り付け、その外側に通気層を20mm設け、最外装面をガルバリウム鋼板で覆った試験体である。この試験体は2009年2月9日に大火災に発展した北京TVCCの施工断面を参考にして通気層を縮小した形で作成した。通-Feは熱硬化性のフェノールフォーム50mmを下地材である珪酸カルシウム板に張り付け、その外側に通気層を20mm設け、最外装面をガルバリウム鋼板で覆った試験体である。

通気工法の内の一つである木造の外張り断熱工法の試験体として、断熱材をEPS、外装材は窯業系サイディング及び窯業系サイディングの上にタイル張りを施したものを使用した。

通-Gは厚さ14mmの木繊維混入セメントけい酸カルシウム板を下地に24.5mm角のタイルをシリコン系の接着剤で接着張りしたものを外装材として用いた。断熱材として厚さ75mmの高性能グラスウールを用い、木胴縁を用いて通気層を20mm設けた。

通-Eは厚さ15mmの窯業系サイディングを外装材として用いた。断熱材として厚さ100mmのEPSを用い、木胴縁及び木の枠材を用いて通気層を20mm設けた。

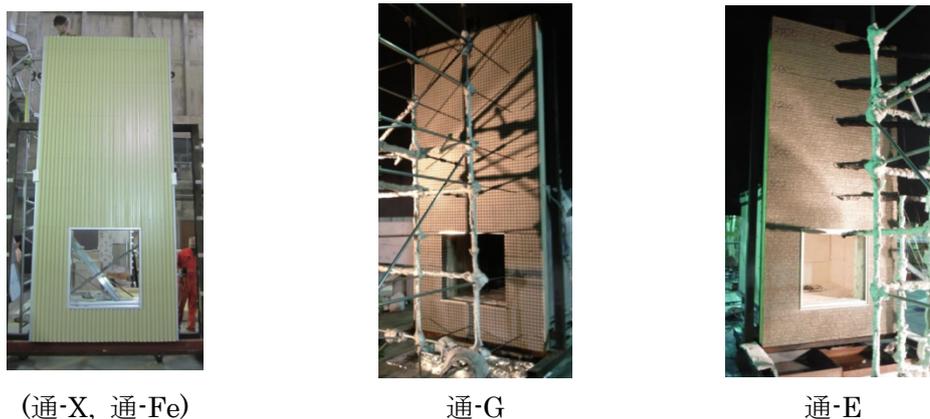


図 4-4 通気工法における試験体の詳細

#### 4.3.3 木製外装

木製外装材として本実加工を施したスギ材を木製の胴縁の上に横張りしたものをを用いた。スギ材は無垢材及び薬剤を注入し難燃処理を施したものをを用い、開口部周辺は図 4-5 に示すようにセラミックファイバーブランケットで覆い、開口噴出火炎が直接胴縁内部へ侵入しないように施工した。



図 4-5 木製外装における開口部周りの処理

#### 4.3.4 金属 SWP

金属 SWP としては断熱用途のパネルとして、ウレタンフォームを断熱材とし、鋼板で挟み込んだものを使用した。化粧板として施工されているものとしては、国外において火災事例が多発しているポリエチレンを芯材としてアルミ板で挟み込んだアルミ樹脂複合板を用いた。アルミ樹脂複合板に関しては芯材に難燃処理を施したもの、及び通気層幅を変更して実験を実施した。

金-U は熱硬化性のウレタンフォーム(厚さ 49mm)を塗装溶融亜鉛めっき鋼板(JIS-G 3312)で挟み込んだ SWP を下地に直接取り付け付けた試験体である。パネルの接合部はセラミック製となっており、開口部にはサッシ枠などは設けなかった。金-N はウレタンフォームの難燃性を高めたヌレートフォームを芯材として用いた。

アルミ樹脂複合板の試験体は下地材に鉄骨のフレームを取り付け、その上にアルミ樹脂複合板を取り付けた。アルミ樹脂複合板は内部の芯材が 3mm 厚、両面のアルミ板がそれぞれ 0.5mm の計 4mm 厚のものを使用した。開口部周りは 2mm 厚のアルミ板を取り付けてサッシの代わりとした。また、現実の施工ではありえないが、弱点部として図に示す位置に目地部を設けた。目地部はシリコンシーラントによって埋められている。

図 4-6 に示すように鉄骨フレームに試験体を取り付けているため、下地とアルミ樹脂複合板の間には厚さ 100mm の通気層が存在する。

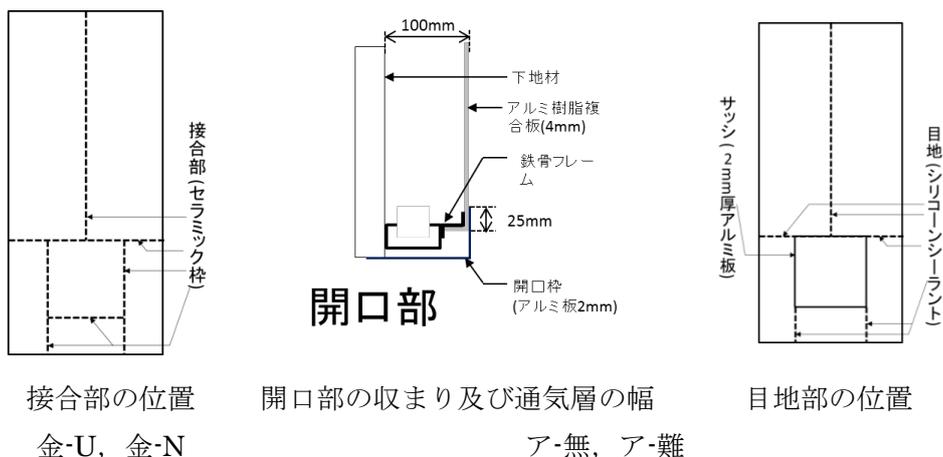


図 4-6 金属 SWP における試験体詳細

#### 4.3.5 太陽電池フィルム

太陽電池フィルムとしては板状の基材に取り付けたものと、ルーバーに取り付けたものの2種類に関して実験を実施した。

電-板は芯材が難燃処理ポリエチレンのアルミ樹脂複合板(ア-難)と同様の試験体を下地として、表面に厚さ 1.3mm の太陽電池フィルムを張り付けた試験体である。

電-ルはアルミ板(厚さ 2mm)を基材として表面に厚さ約 1.5mm の太陽電池フィルムを張り付けた幅 2000mm×高さ 250mm のルーバー16 枚を火炎が噴出する開口部より 600mm 離れた位置に施工した試験体である。ルーバーが全て閉まっている状況を想定して実験を実施した(図 4-7)。

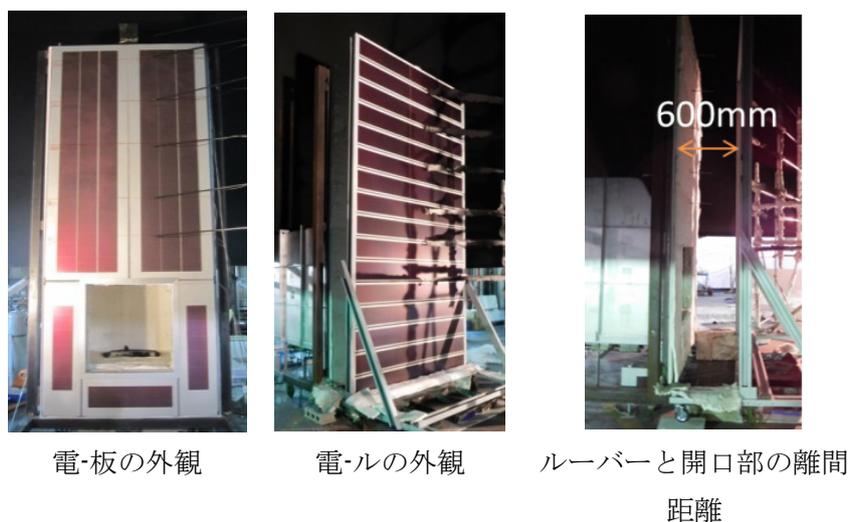


図 4-7 太陽電池フィルムにおける試験体詳細

#### 4.3.6 樹脂塗材

樹脂塗材としては JIS A 6909 建築用仕上塗材に規定されている塗料の中で単位面積当た

りの有機物含有量が最も多い防水形薄塗材 E を 2~3mm 厚で下地材に塗布した(塗-単)。また、新宿において起きた火災事例で使用されていたと考えられる防水形複層塗材 E に関しても下地材に塗布して試験体を作成した(塗-複)。なお、防水形複層塗材 E の試験体における単位面積当たりの有機物含有量は防水形薄塗材 E の試験体と比較して少なくなっている。

#### 4.3.7 樹脂サイディング

樹脂サイディングとして、胴縁に塩化ビニル樹脂サイディングを取り付けた試験体を用いた。開口部まわりには塩化ビニル樹脂性のサッシを取り付けた。

### 4.4 実験結果

可燃性外装の燃え広がりにおける原因を明確化することを目的とし、実験中において測定した外装表面温度、下地表面温度、通気層内部温度、発熱量そして目視による観察から試験体ごとにどのように燃焼が進展したのかを整理した燃焼のフローチャートを作成し、その燃焼性状を考察した。

また、異なる加熱強度で実施した試験体に関しては加熱強度の違いが可燃性外装に与える影響についても検討し、湿式外断熱工法、木製外装、金属 SWP においては加熱強度の違い及び試験体間の差異より試験体が比較可能な評価基準値について検討を行った。

#### 4.4.1 燃焼性状

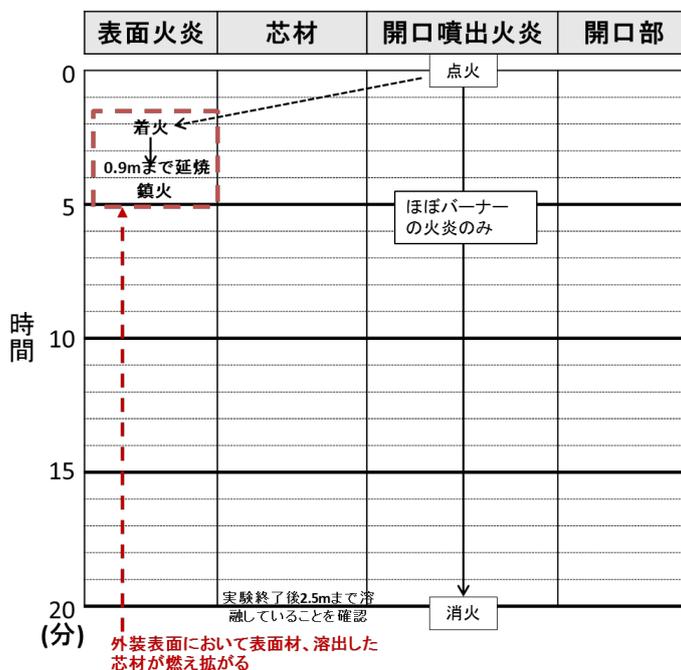
“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の実験結果より、各可燃性外装材の燃焼のフローチャートを作成し、その燃焼性状を考察した。また、異なる加熱強度で実施した試験体に関しては加熱強度の違いが可燃性外装に与える影響についても検討した。

##### 4.4.1.1 湿式外断熱工法

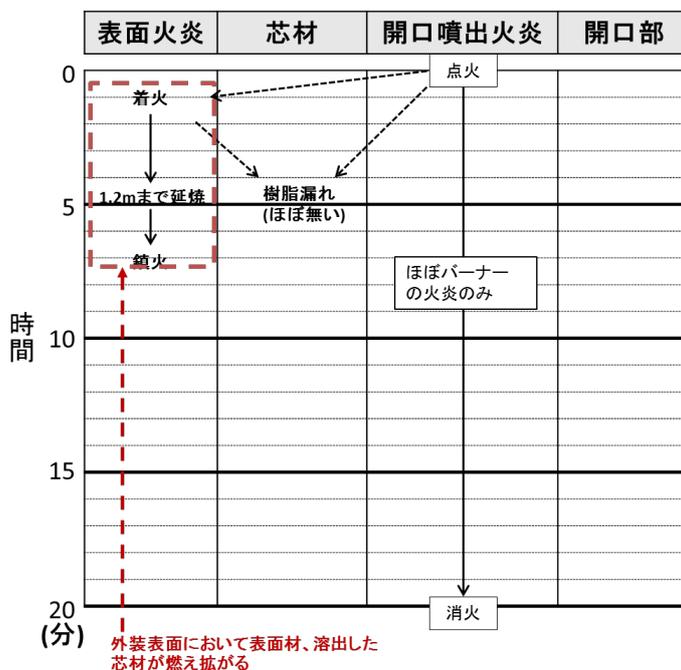
図 4-8 に実験結果より作成した湿式外断熱工法の試験体における燃焼のフローチャートを示す。断熱材の厚さ、密度を変更して実験を実施した結果、断熱材の厚さが厚くなるほど外装表面における温度が高くなる傾向を示し、密度を 2 倍に増加させると高温となる継続時間が長くなった。また、外装表面の仕上げ材の損傷が軽微であっても噴出火炎が大きくなることより、既往の研究<sup>[4-1]</sup>においては開口部の破損によって壁面の燃え広がりが激しくなるとされているが、一般的な湿式外断熱工法においては開口部に目立った破損が無い場合においても内部断熱材が溶融し可燃ガスとして外部へ溶出し燃焼することが伺える。加熱初期に表面材において燃え広がり、その後内部の EPS が漏れ出ることによって噴出火炎が拡大するという燃え広がり経過を示し、内部断熱材の溶出を抑えることが燃え広がり抑制において重要であることが示唆された。

断熱材厚さが 100mm の場合、加熱強度 581kW 及び 835kW では噴出火炎の拡大は確認できなかったのに対し、断熱材厚さが 200mm 及び 300mm の場合は加熱強度 581kW の時より噴出火炎の拡大が確認された。ただ、加熱強度が 581kW の場合は加熱強度が大きい場合と比較して噴出火炎の拡大が緩やかであった。

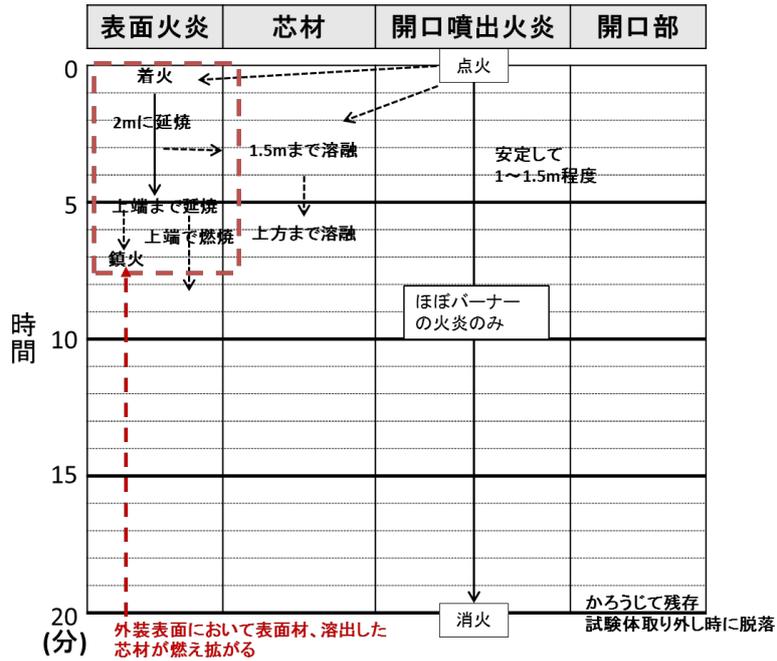
断熱材の厚さ 100mm 以上を想定した場合、加熱強度が 883kW 以上であれば噴出火炎の拡大といった燃焼性状が確認できた。100mm 以下の場合、加熱強度が 883kW 以上であってもこの燃焼性状は確認できない可能性があるが、湿式外断熱工法の燃焼性状を評価する場合は加熱強度 883kW 以上であることが望ましいと言える。



湿-50 加熱強度 581kW



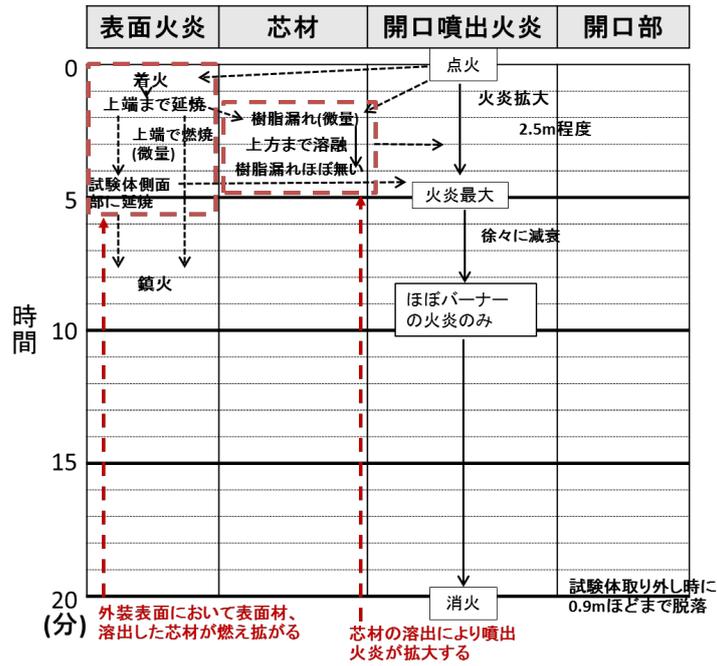
湿-100 加熱強度 581kW



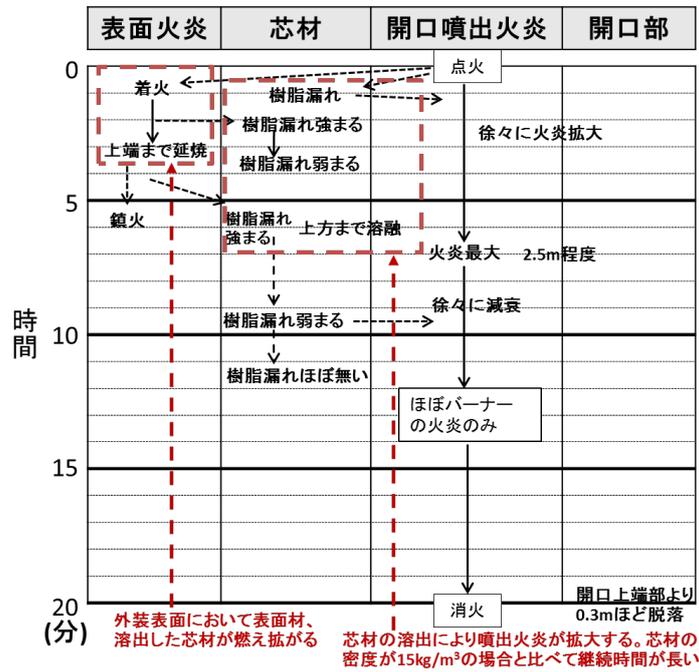
湿-100 加熱強度 835kW



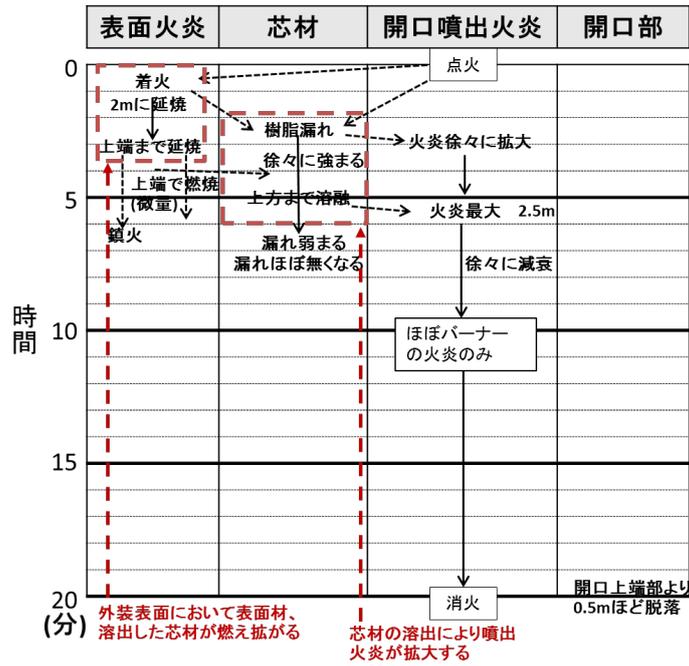
湿-100 加熱強度 883kW



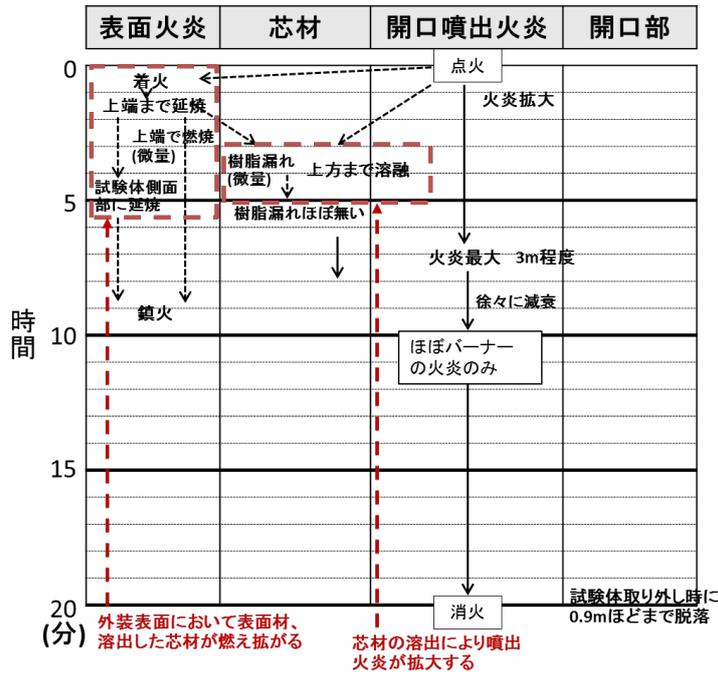
湿-100 加熱強度 1107kW



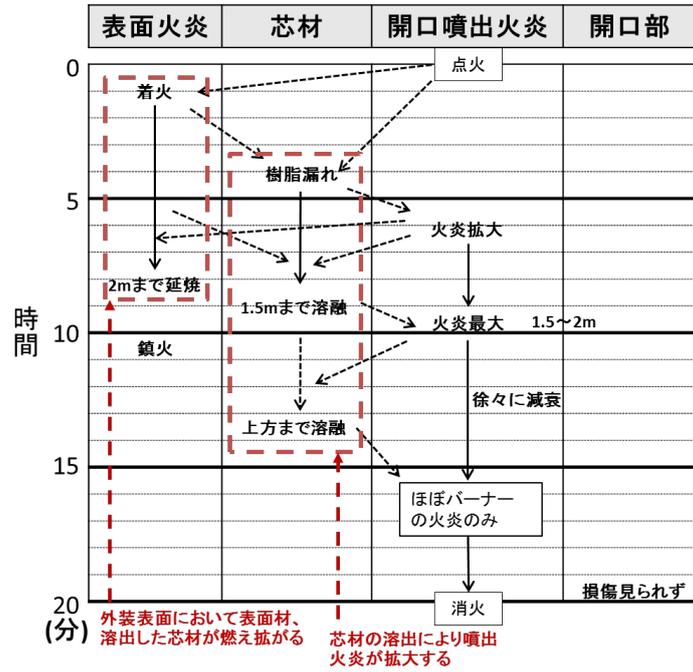
湿-100-H 加熱強度 883kW



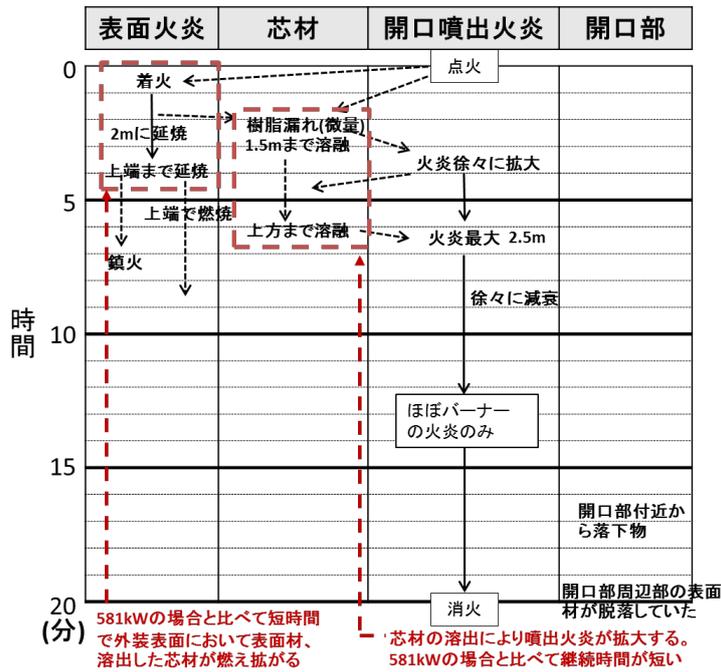
湿-150 加熱強度 883kW



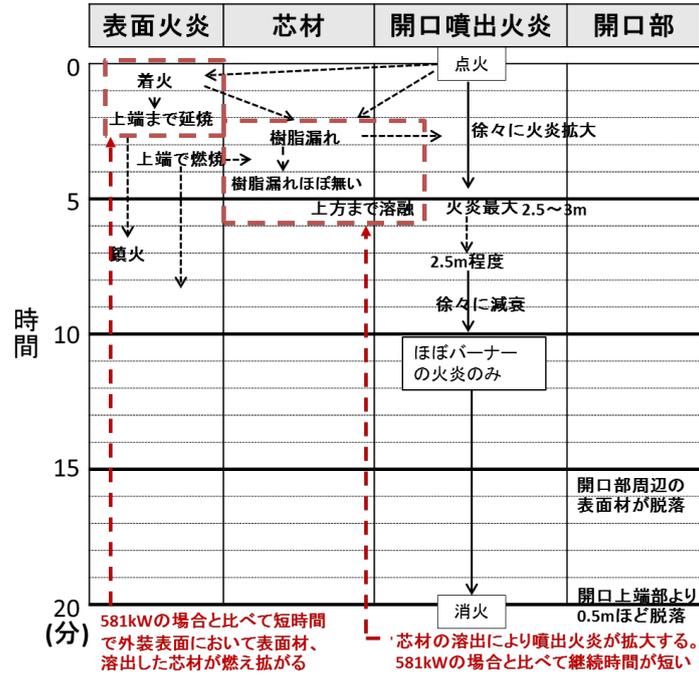
湿-150 加熱強度 1107kW



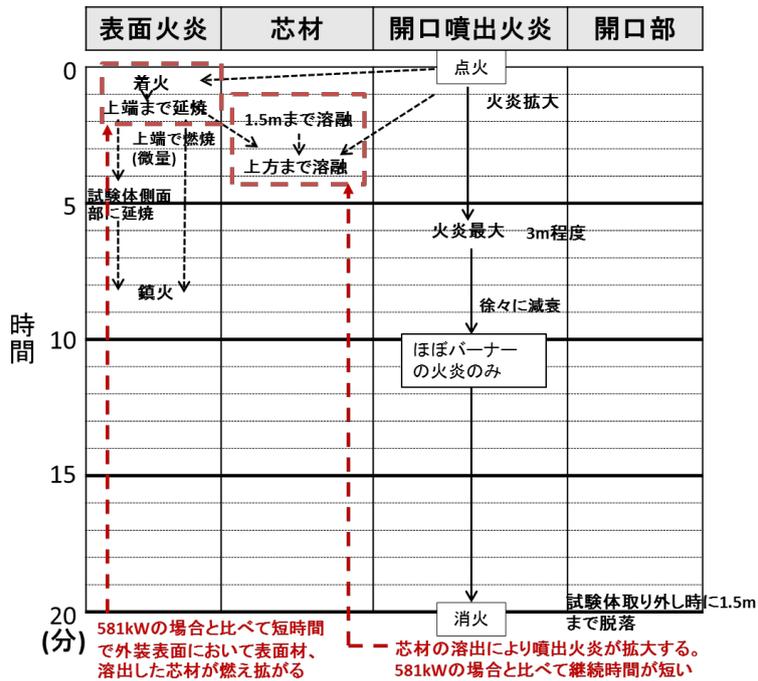
湿-200 加熱強度 581kW



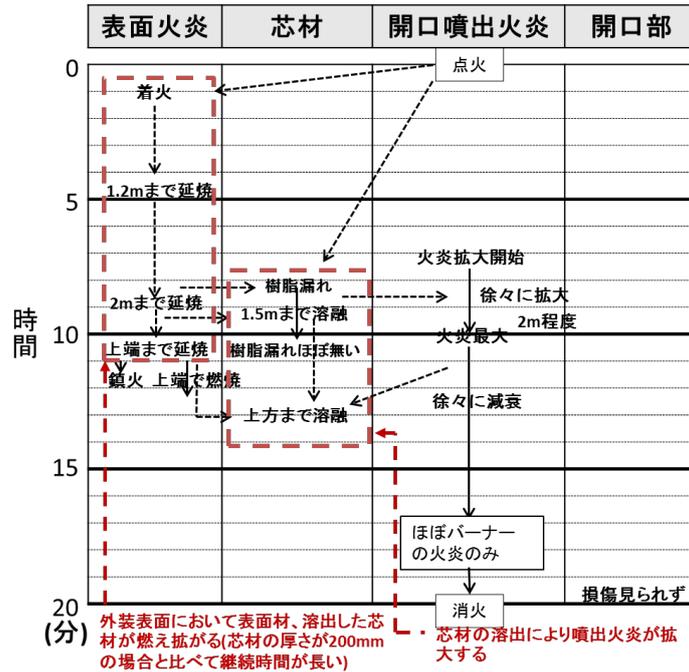
湿-200 加熱強度 835kW



湿-200 加熱強度 883kW



湿-200 加熱強度 1107kW



湿-300 加熱強度 581kW

図 4-8 燃焼フローチャート(湿式外断熱工法)

#### 4.4.1.2 通気工法

図 4-9 に実験結果より作成した通気工法の試験体における燃焼のフローチャートを示す。

通-X 及び通-Fe の試験体は加熱強度 581kW で実験を実施したため外装表面温度の上昇自体は緩やかであったが、断熱材が XPS, フェノールフォームの試験体ともに通気層内部で燃焼していることが確認された。XPS の試験体においては通気層内部の XPS が溶けて開口部上端付近で漏れだして外装側で燃焼したが、ほとんどの断熱材は通気層内部で激しく燃焼し、2009 年に中国・北京中央テレビ文化センター(TVCC)で発生した火災<sup>[4-2]</sup>と同様の燃え拡がり性状を示した。フェノールフォームの試験体は開口部付近で焼損していたが試験体上部の断熱材はほとんど焼損していなかった。

通-G においては加熱強度 835kW で実験を実施した。加熱開始すぐに外装表面でタイルを張り付けた接着剤が燃焼したが、加熱開始より 3 分程で外装表面の温度上昇は収まり、その後は目立った温度上昇は確認されなかった。通気層内部の温度は開口上端より 2.5m の高さにおいて、加熱開始より 10~15 分後に 500℃を超え、実験終了まで 800℃程度を維持していた。加熱終了後も通気層内部で火炎が確認されたことから加熱開始より 10 分以後、通気層内部で継続的に燃焼が起きていたと考えられる。実験終了後、外装材は表面のタイル及び接着剤が焼失していたが、下地のサイディングは損傷しているものの目立った破損は確認されなかった。外装材を外してみると、内部の断熱材の大部分が焼失していた。グラスウールは不燃性の断熱材であるが、直接火にあぶられた場合に溶融することが知られており、通気層内部の木胴縁が燃焼したために溶融したものと考えられる。

通-E においては加熱強度 883kW で実験を実施した。加熱開始後すぐに開口部のサッシ枠が脱落し、内部断熱材が溶けて溶融樹脂が開口上端より漏れだしてきた。加熱開始より 5～7 分には着火した溶融樹脂が多く漏れ出るようになった。外装表面の温度は徐々に上昇する傾向を見せ、開口上端より 1.5, 2 及び 2.5m の高さにおいては加熱開始より 17 分経過してから最大値を記録した。通気層内部の温度は開口上端より 2m 及び 2.5m の高さにおいて加熱開始よりそれぞれ 12 分後、15 分後に 500℃を超え、実験終了まで 800℃程度を維持していた。外装材は損傷しているものの目立った破損及び脱落は確認されなかった。実験終了後に外装材を外してみると、内部の断熱材の大部分が焼失していた。

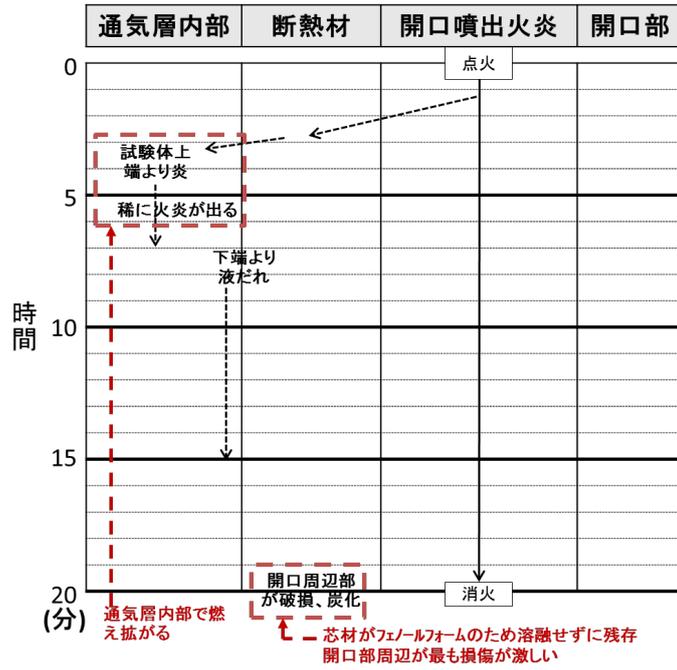
XPS 及び EPS といった熱可塑性樹脂に関しては外装表面に漏れ出して燃焼するという危険性があるが、外装表面が鋼板のように破損が発生しないもの場合は基本的には通気層内部でのみ燃え拡がる。

加熱強度 581kW, 835kW, 883kW において実施したがいずれの加熱強度においても通気層内部への延焼が確認された。グラスウールのような不燃性の断熱材を用いて内部の主な可燃物が木材の胴縁のみであっても通気層内部において十分に燃え拡がる事が確認された。また、熱硬化性樹脂を対象としたものは通-Fe のみで、加熱強度は 581kW の実験だけであるが、加熱強度を上げた場合には通気層内部の損傷及び燃え拡がりが増大する大きさに比例して大きくなる事が予想される。

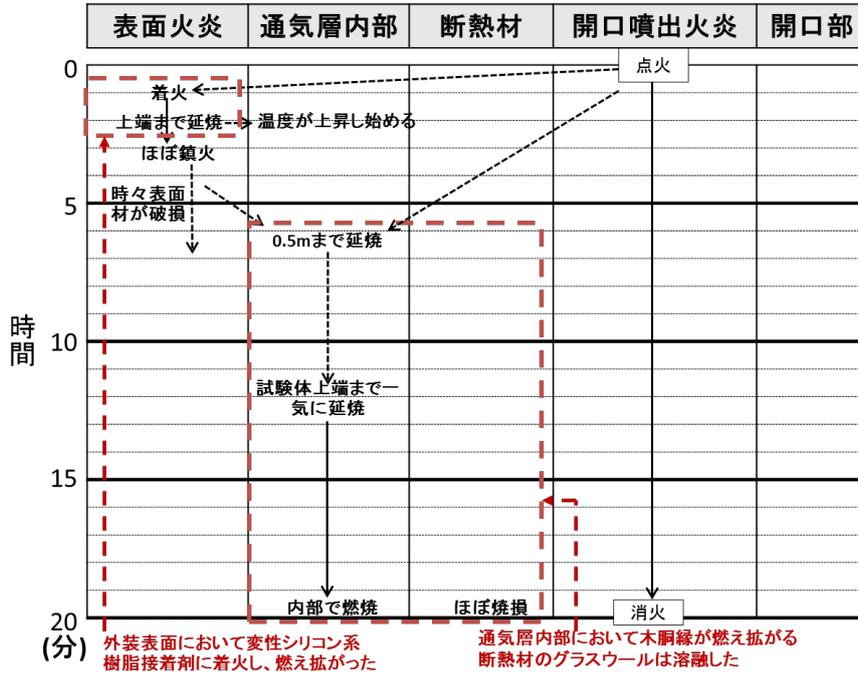
通気工法は通気層内部に可燃物が存在する場合は木の胴縁程度であっても燃え拡がる危険性があることから燃え拡がりを抑制するためには通気層内部における可燃物の燃焼を抑える必要がある。



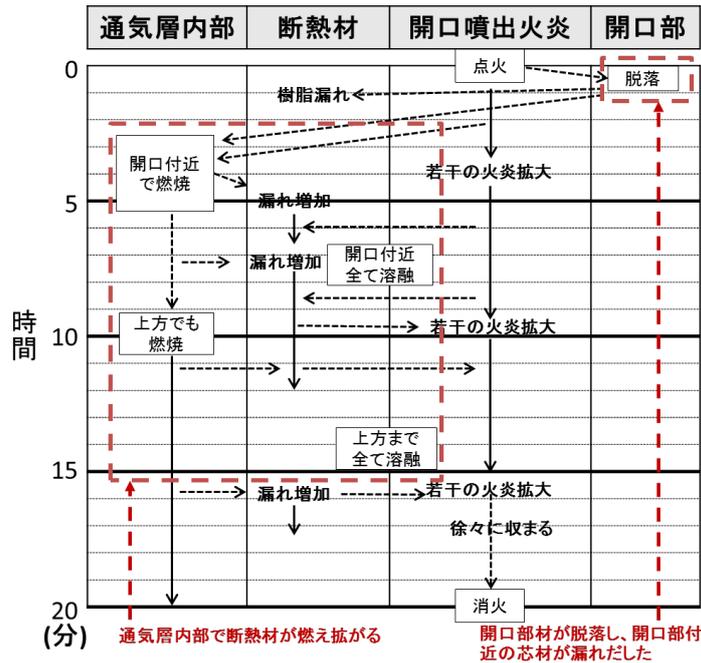
通-X 加熱強度 581kW



通・Fe 加熱強度 581kW



通・G 加熱強度 835kW



通-E 加熱強度 883kW

図 4-9 燃焼フローチャート(通気工法)

#### 4.4.1.3 木製外装

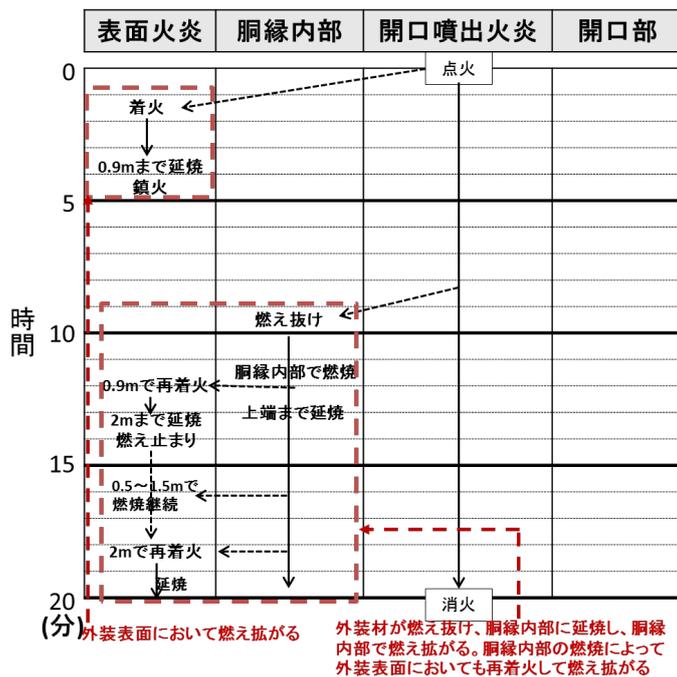
図 4-10 に実験結果より作成した木製外装の試験体における燃焼のフローチャートを示す。

無処理のスギを外装材として用いた場合、外装表面における燃え拡がりには加熱強度 581kW では加熱初期において僅かに延焼するのに対し、加熱強度 883kW, 1107kW では加熱初期より激しく燃焼している様子が確認された。通気層内部においては火炎の侵入は加熱強度が強い程早くなる傾向を示した。加熱強度が 581kW 及び 883kW の場合、通気層内部での試験体上方まで延焼した後に外装表面の温度が上昇し、通気層内部の延焼が外装表面の延焼に影響を与えたものと考えられる。加熱強度が小さいため当然ではあるが、加熱強度 581kW においては燃え拡がりや他の加熱強度と比べて小さく、外装材の損傷が比較的軽微であった。通気層内部への延焼は延焼が始まる時間に差があるものの、全ての加熱条件で確認された。木製外装は加熱初期においては外装表面で燃え拡がり、外装表面が燃え抜けた後は通気層内部での試験体上方まで延焼した後に外装表面の温度が上昇し、外装表面と通気層内部が一体となって燃え拡がるといった経過を示すことが明らかとなった。既往の研究<sup>[4-3]</sup>で示唆されている通り、通気層の存在が木製外装の燃え拡がりに影響を与えており、木製外装の燃え拡がりにおいては、外装表面の燃え拡がりだけでなく、外装材の燃え抜け及び胴縁内部の延焼も燃え拡がりの大きな要因となっていることが伺える。

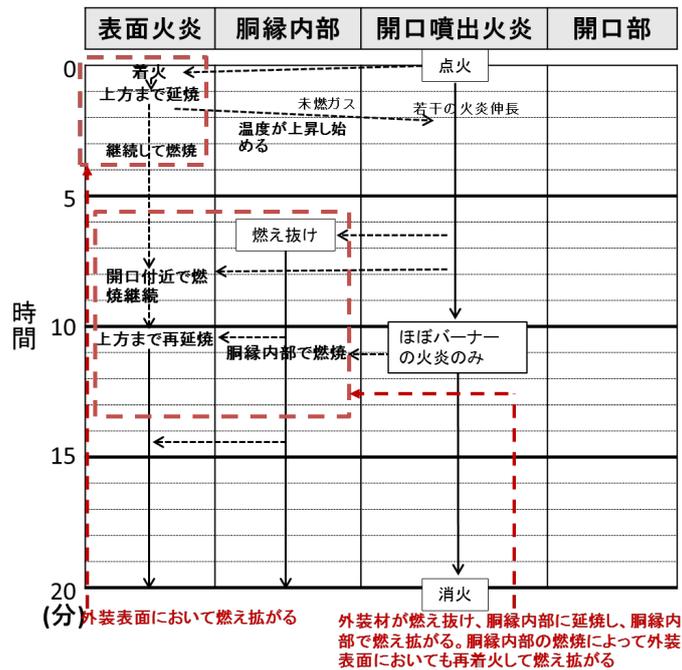
薬剤処理したスギを外装材として用いた場合、いずれの加熱強度においても外装表面に

おける燃え拡がり確認されず、既往の研究<sup>[4-4]</sup>でも示唆しているように難燃処理を施した場合には木製外装において十分な防火性能を有すると言える。加熱強度 581kW においては外装表面材の破損による通気層内部への燃え抜けが発生しなかったのに対し、加熱強度 883kW 及び 1107kW においては燃え抜けが発生し、外装材の一部が焼損した。胴縁内部の温度の経時変化より加熱開始より 10 分前後で胴縁内部へ噴出火炎が侵入したものと考えられる。

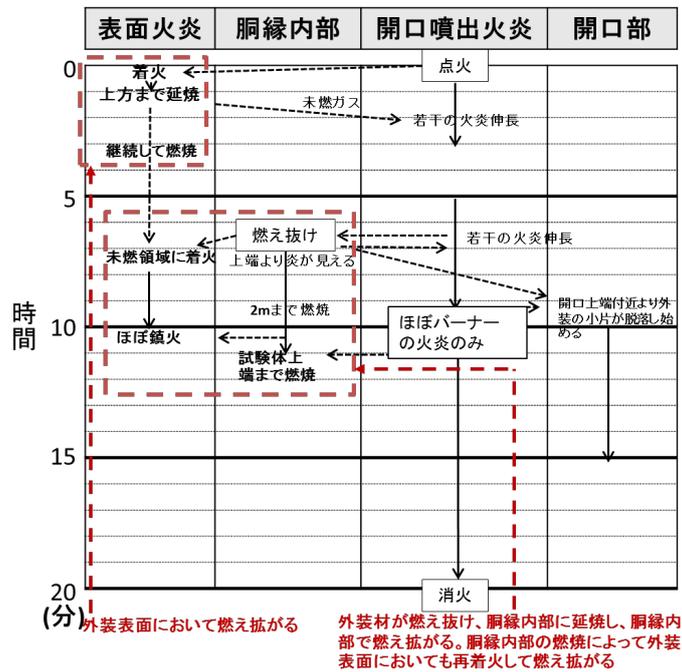
加熱強度 581kW では外装材の表面が燃え抜けないため、薬剤処理したスギ材に対しては適切に評価できない可能性があるかと判断できる。



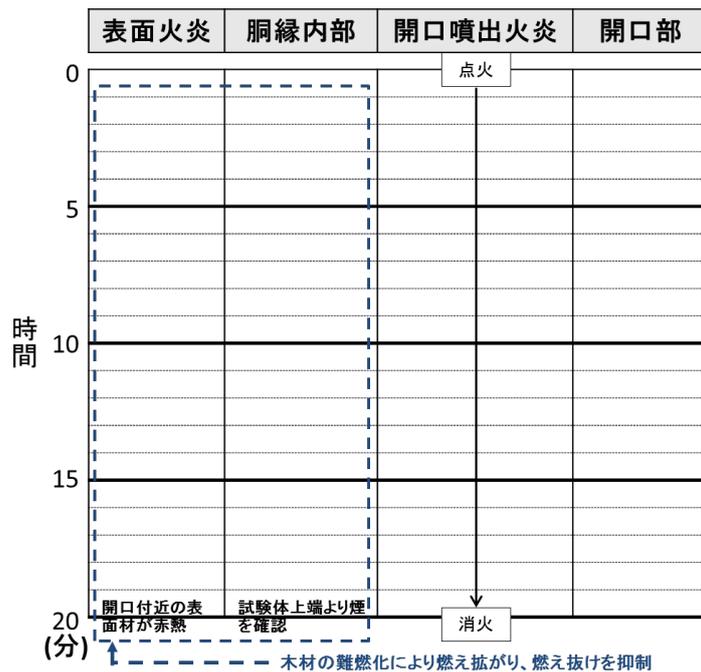
木-無 加熱強度 581kW



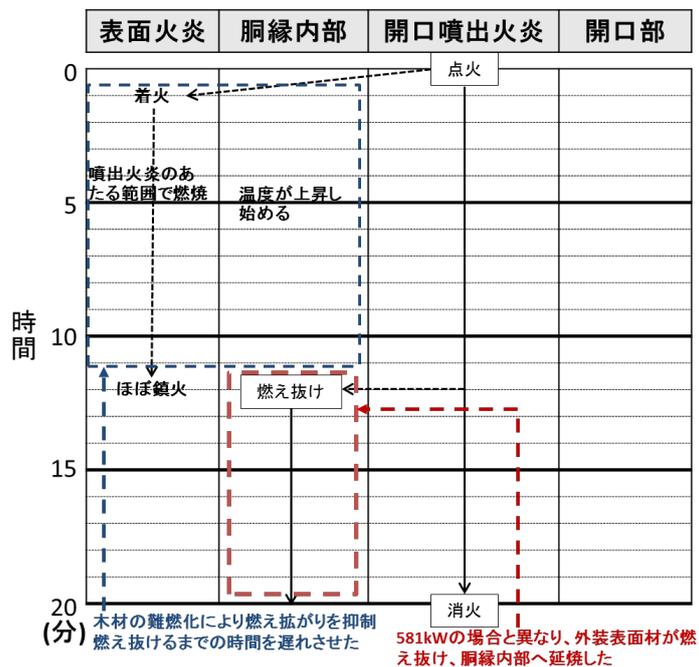
木-無 加熱強度 883kW



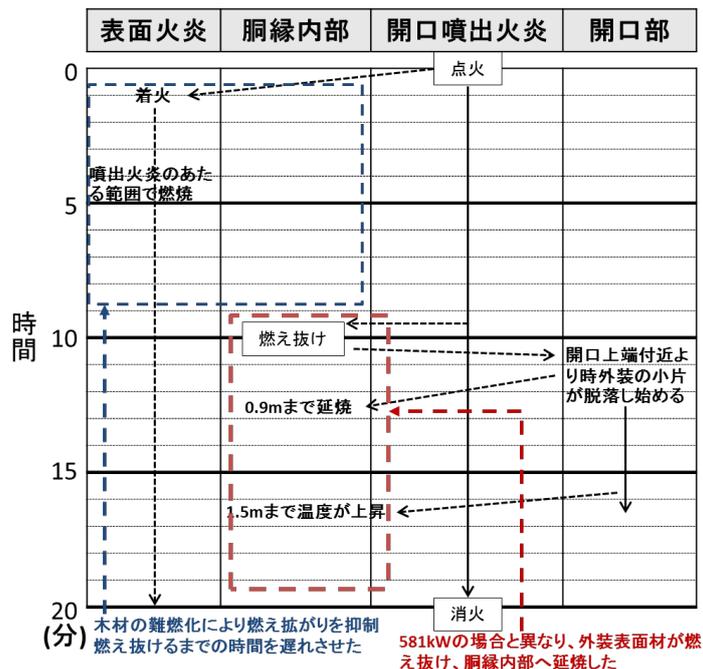
木-無 加熱強度 1107kW



木-薬 加熱強度 581kW



木-薬 加熱強度 883kW



木-薬 加熱強度 1107kW

図 4-10 燃焼フローチャート(木製外装)

#### 4.4.1.4 金属 SWP

図 4-11 に実験結果より作成した金属 SWP の試験体における燃焼のフローチャートを示す。

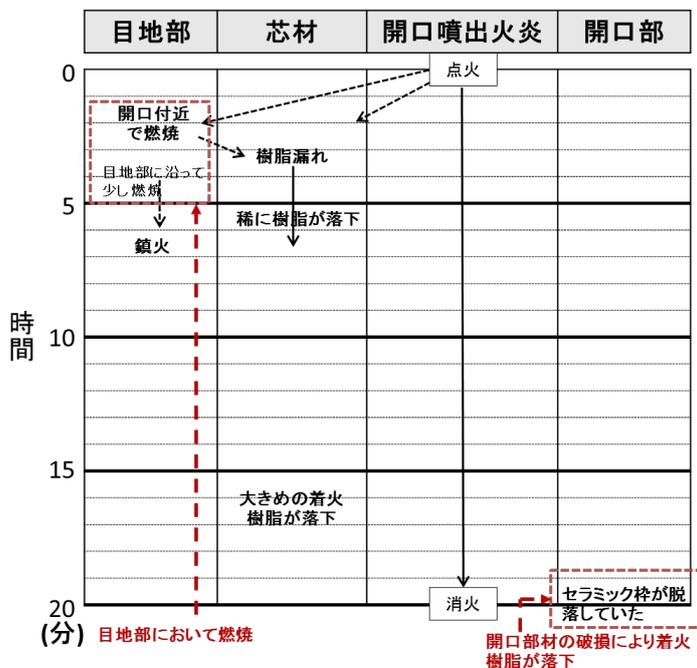
金-U 及び金-N に関しては加熱強度 581kW で実験を実施したため外装表面温度の上昇自体は緩やかであった。外装表面における燃焼はほとんどなく、目地部において若干の燃焼が観察されるだけであった。実験終了後には開口上端より 0.9m の高さまでの断熱材が炭化及び脱落していることが確認された。試験体の大部分が鋼板で覆われているため、端部周辺での燃焼、内部芯材の損傷はあるものの、燃え拡がりは発生しなかった。鋼板が表面材の金属 SWP に関しては加熱強度 581kW のみで実施したが、加熱強度を上げた場合は目地部の損傷及び表面材の変形が激しくなり、内部の芯材がより燃焼するものと考えられ、燃え拡がりを抑制するためには内部の芯材が変形によって火炎に直接露出しないように接合部を適切に施工することが求められる。

無処理のポリエチレンを芯材として用いたアルミ樹脂複合板の場合、加熱強度 581kW においては試験体中央付近の目地部において徐々に燃え拡がっているのに対し、加熱強度が 835kW 及び 883kW では開口より上方の試験体全体に燃え拡がり、試験体全般が焼損し、韓国のウシンゴールデンスイート超高層集合住宅で発生した火災<sup>[4-5]</sup>と同様の燃え拡がり性状を示した。アルミ板が表面材の場合、表面材の焼損とともに内部の芯材が露出し、燃え拡がるといった経過を示す。目視観察より加熱強度 581kW において加熱開始より 6 分程、加熱強度 835kW 及び 883kW において 2 分程で開口部のアルミ板が脱落したことが確認さ

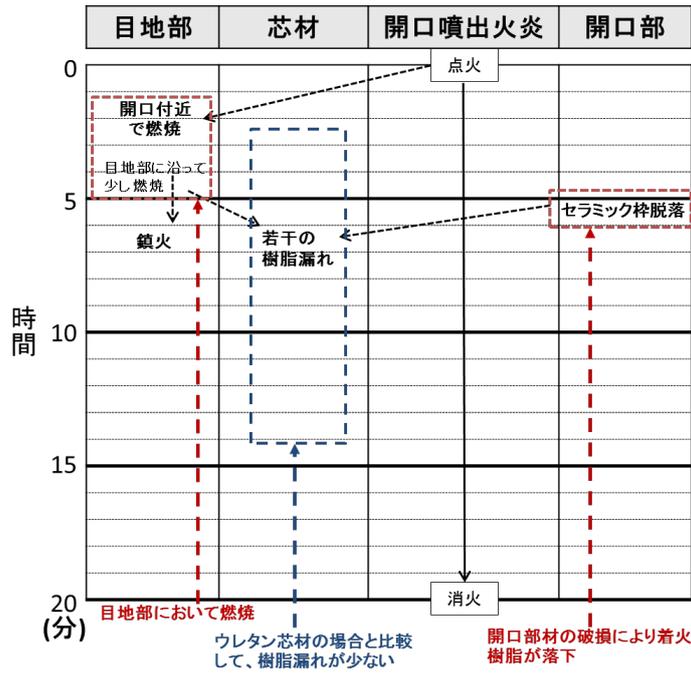
れ、外装表面における火炎高さが上昇し始める時間と一致している。加熱強度 883kW における外装表面と通気層内部の温度履歴より、加熱開始後に外装表面で燃え拡がった後に通気層内部へ延焼して燃え拡がったものとみられる。

難燃処理を施したポリエチレン芯材を用いたアルミ樹脂複合板の場合、全ての加熱強度において目地部において最も燃焼が激しく、目地部以外の複合板部分においてはそれほど燃え拡がらなかった。加熱強度が 835, 883, 1107kW の条件においてはアルミ樹脂複合板の焼損も激しくなった。外装表面温度の温度上昇は目地部の燃焼が激しい時間帯と重なるため、目地部の燃え拡がりがあるまま温度上昇に寄与しているものと考えられる。目視観察より加熱強度 581kW において加熱開始より 4 分程、加熱強度 835, 883, 1107kW においては 1 分 30 秒程で開口部のアルミ板が脱落したことが確認され、外装表面温度が上昇し始める時間と一致している。加熱強度 581kW においては外装表面及び通気層内部共に温度の上昇が小さかったが、加熱強度 835, 883, 1107kW においては外装表面材の焼損及び通気層への燃えぬげが確認された。外装表面における火炎高さの上昇の方が早いこと及び開口部の脱落より時間が経過していることより、アルミ樹脂複合板が破損した後に通気層内部へ延焼したものと考えられる。

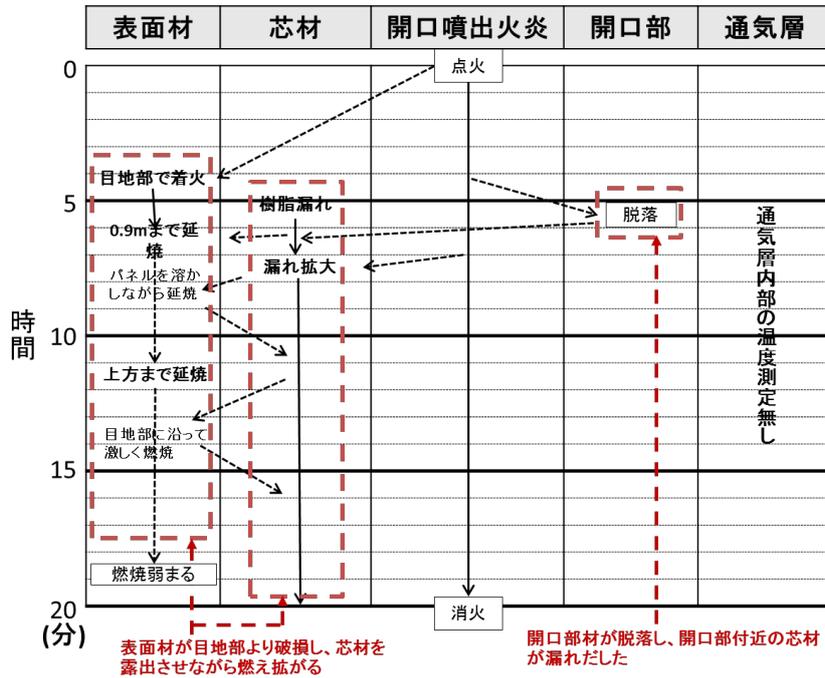
無処理のポリエチレン芯材を用いたアルミ樹脂複合板の場合、加熱強度 581kW では目地部のみが激しく燃焼し、パネル全体には燃え拡がらなかった。また、難燃処理したポリエチレンを芯材として用いた場合も加熱強度 581kW ではパネルの焼損が開口上端部のみに限定されており、燃焼性状を確認する上では加熱強度 835kW 以上が望ましい。



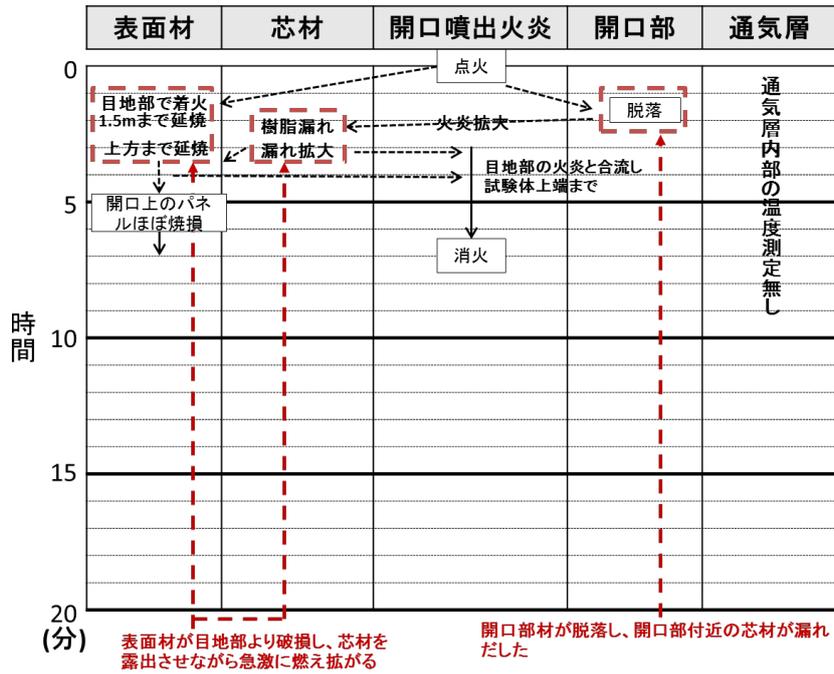
金-U 加熱強度 581kW



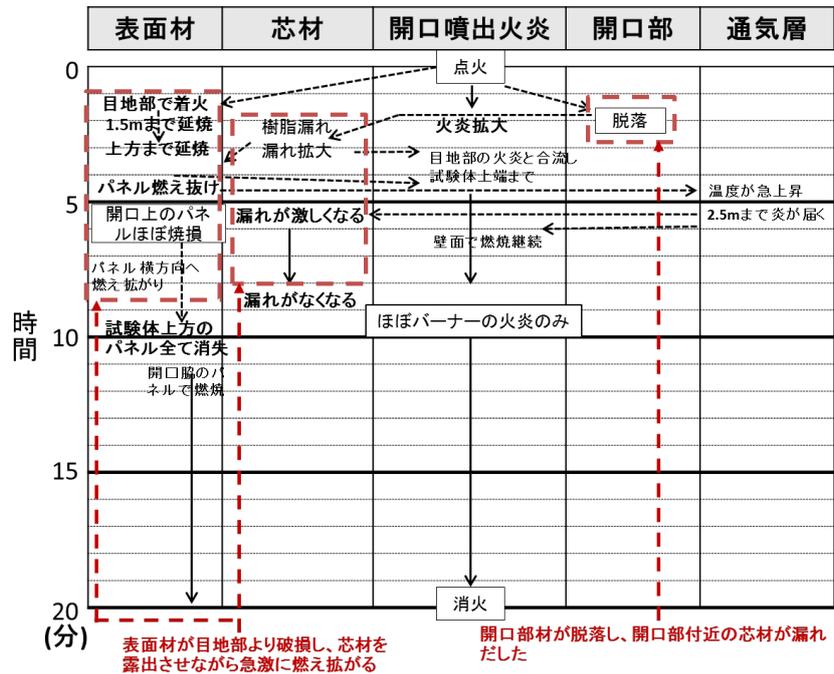
金-N 加熱強度 581kW



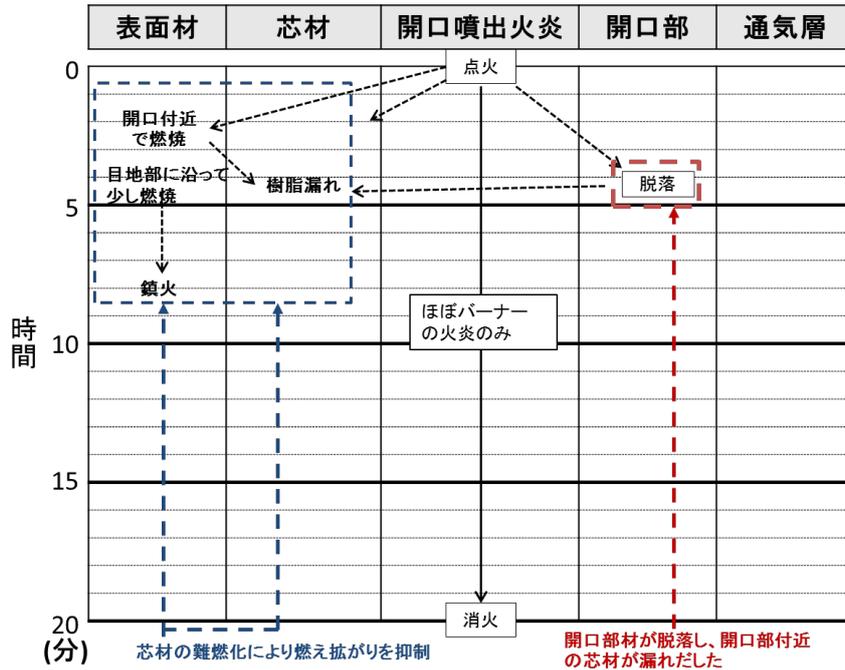
ア-無 加熱強度 581kW



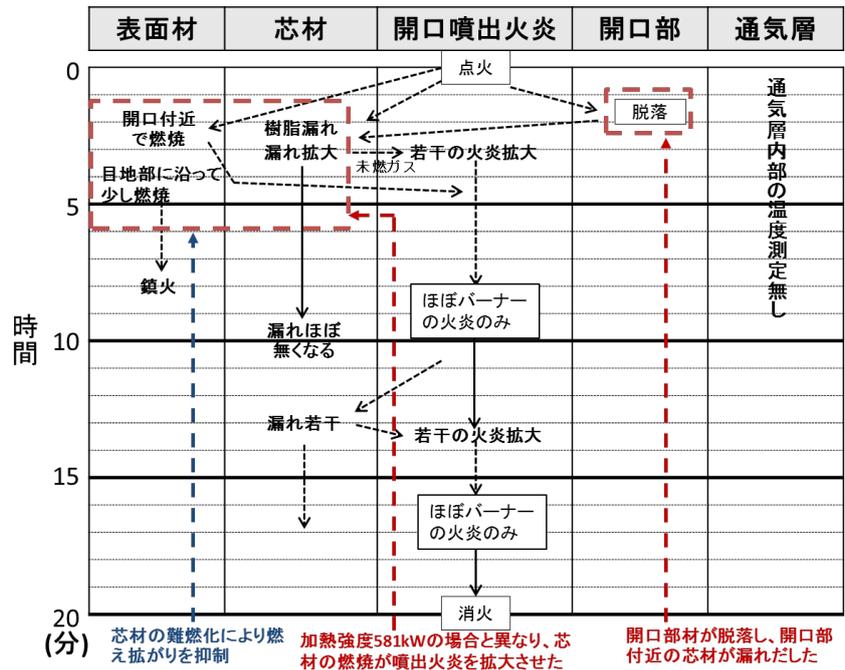
ア-無 加熱強度 835kW



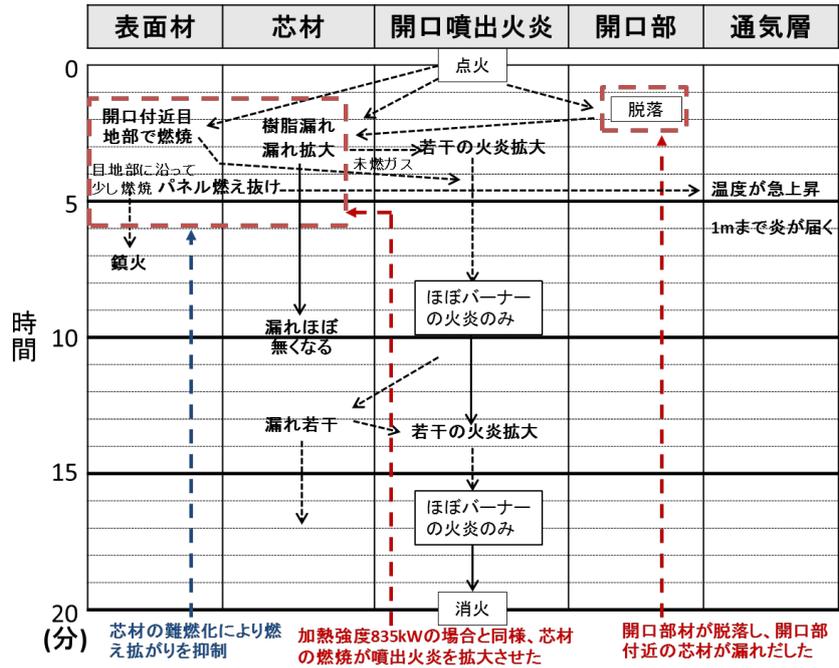
ア-無 加熱強度 883kW



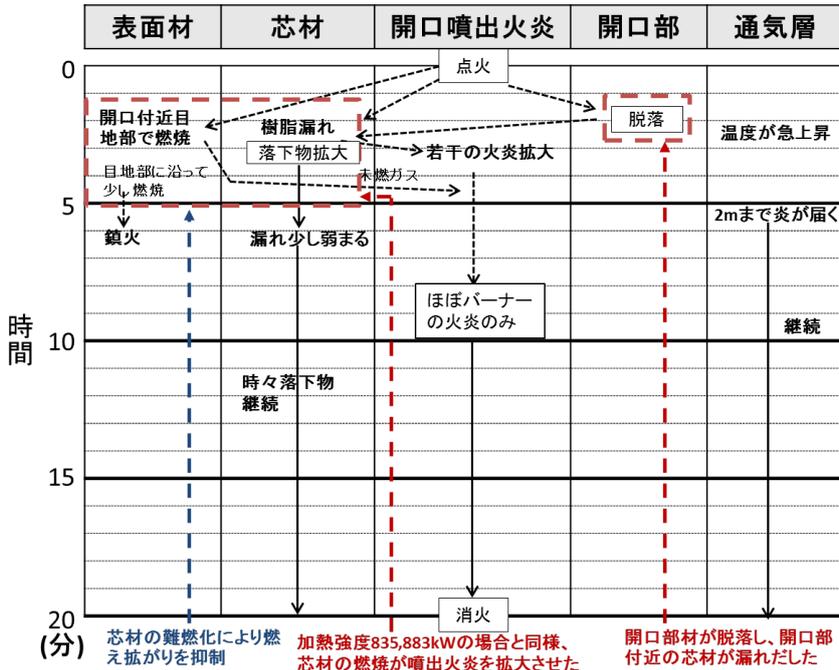
ア-難 加熱強度 581kW



ア-難 加熱強度 835kW



ア-難 加熱強度 883kW



ア-難 加熱強度 1107kW

図 4-11 燃焼フローチャート(金属 SWP)

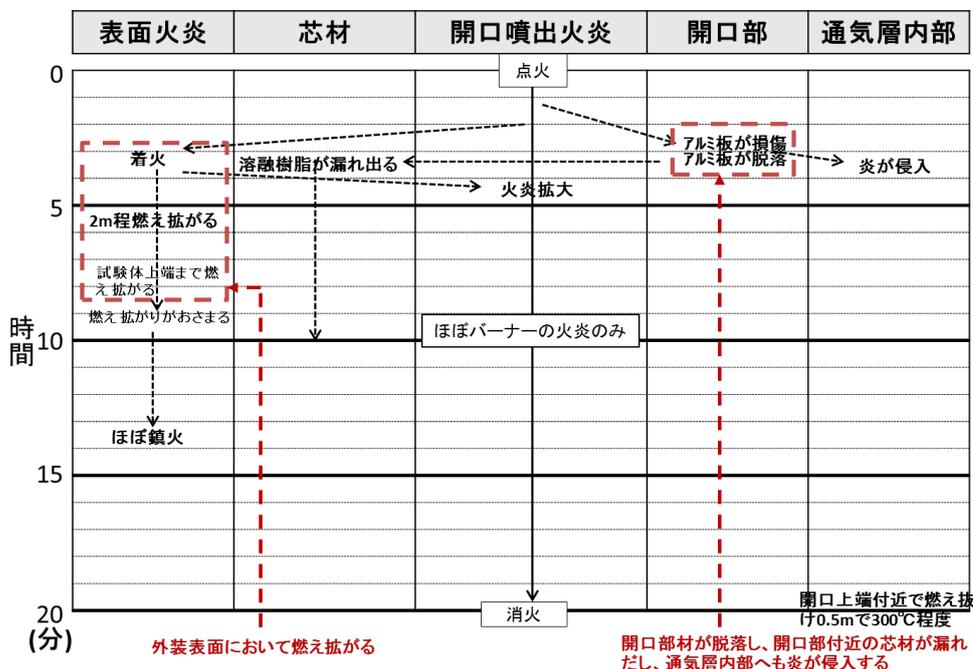
4.4.1.5 太陽電池フィルム

図 4-12 に実験結果より作成した太陽電池フィルムの試験体における燃焼のフローチャートを示す。

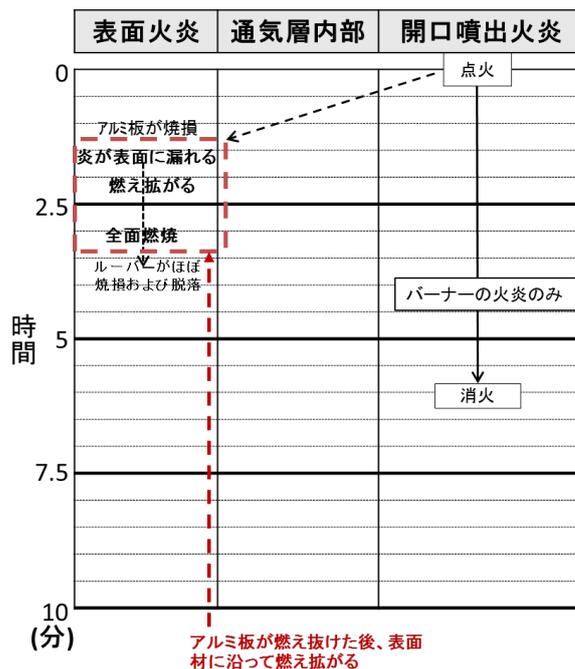
電-板においては加熱強度 581kW で実験を実施したため外装表面温度の上昇自体は緩やかであった。開口部のアルミが脱落した後に、熔融樹脂及び表面の太陽電池フィルムの燃焼が目地部を中心に急激に拡がった。加熱開始より 4~9 分の間で外装表面の燃焼が継続した。実験終了後の試験体より、開口上端付近のみ下地であるアルミ樹脂複合板が燃え抜けている及び内部の芯材が開口上端より 0.9m の高さまで焼損していることが確認された。加熱強度を上げた場合は太陽電池フィルムの燃焼が加熱初期より発生し、外装表面の太陽電池フィルムが燃え尽きた後はア-難と同様の性状になるものと考えられる。

電-ルにおいては加熱強度 1107kW で実験を実施した。ルーバーにおいては開口噴出火炎が通気層内部においてあることより、加熱開始後に開口噴出火炎がルーバーを燃えぬいた後にルーバー表面に太陽電池フィルムに着火し燃え拡がり、加熱開始より 3 分ほどでほぼ全焼した。

太陽電池フィルムにおいて、着火後は施工した基材の表面に沿って燃え拡がるという経過を示した。



電-板 加熱強度 581kW



電-ル 加熱強度 1107kW

図 4-12 燃焼フローチャート(太陽電池フィルム)

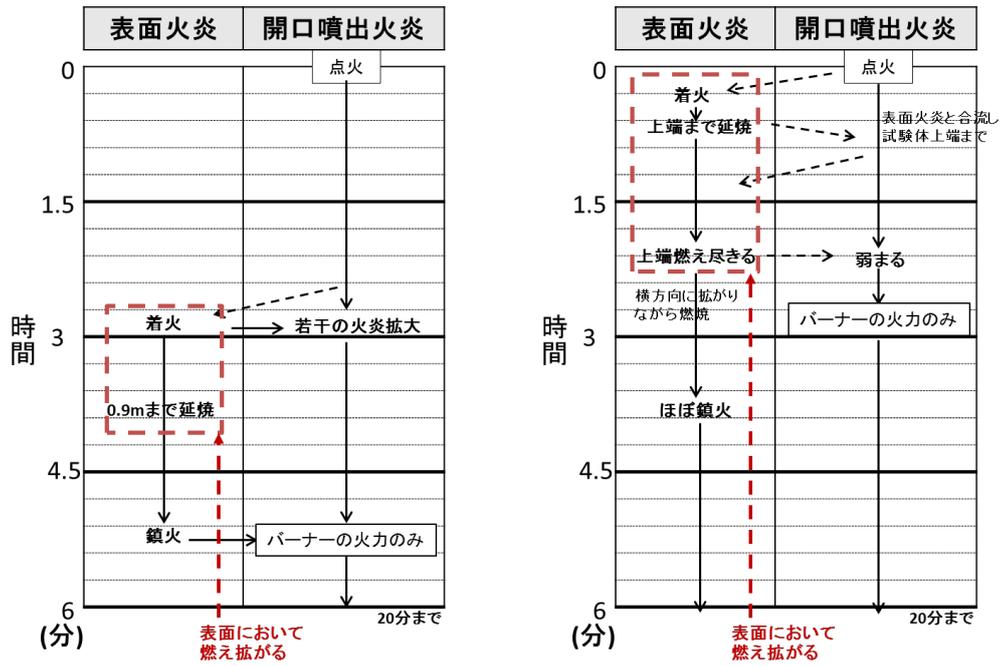
#### 4.4.1.6 樹脂塗材

図 4-13 に実験結果より作成した樹脂塗材の試験体における燃焼のフローチャートを示す。

防水形薄塗材 E を塗布した試験体(塗-単)においては 581kW 及び 883kW の 2 つの加熱強度で実験を実施した。加熱強度 581kW においては加熱開始より 3 分経過した後に若干の燃え拡がり確認されたが、加熱強度 883kW においては加熱開始よりすぐに燃え拡がり、加熱開始より 2 分で燃え拡がりがほぼ終了した。実験終了後の試験体を確認すると加熱強度 581kW においては開口部上端付近のみが完全に焼損しているのに対し、加熱強度 883kW においては開口上端より 1.4m 程まで完全に焼損していた。

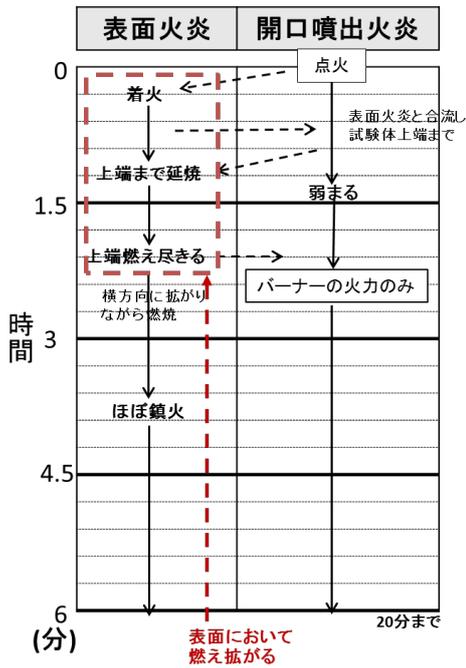
新宿のビル火災において使用されていたと想定された防水形複層塗材 E を塗布した試験体(塗-複)においては加熱強度 883kW で実験を実施した。防水形薄塗材 E とほぼ同様の燃え拡がり性状を示し、新宿で発生したビル火災同様燃え拡がることが示唆されたが、防水形複層塗材 E の方が単位面積当たりの有機物含有量が比較的少ないことから燃え拡がるまでの時間が若干短くなった。

樹脂塗材においては加熱後すぐに燃え拡がり、数分で燃え尽きるといった燃え拡がりの経過を示し、加熱強度 581kW の場合は火災事例のように大きくは燃え拡がらず実火災を再現できない可能性がある。



塗-単 加熱強度 581kW

塗-単 加熱強度 883kW



塗-複 加熱強度 883kW

図 4-13 燃焼フローチャート(樹脂塗材)

4.4.1.7 樹脂サイディング

図 4-14 に実験結果より作成した樹脂サイディングの試験体における燃焼のフローチャ

ートを示す。樹脂サイディングにおいては加熱強度 581kW 及び 1107kW で実験を実施した。いずれの加熱強度においても塩化ビニル樹脂のサイディングの大部分が溶融落下した。加熱強度 581kW においては溶融が緩やかであり開口周辺部のみで燃焼が確認されたのに対し、加熱強度 1107kW においては溶融落下が起きる前に外装表面においても若干の燃焼が確認された。いずれの加熱強度においても加熱開始より 3 分ほどで外装表面材である樹脂サイディングのほとんどが脱落及び焼損した。

樹脂サイディングにおいては加熱後にすぐに溶融し、燃え拡がりに至る前に溶融落下するといった挙動を示し、加熱強度 581kW においても十分に燃え拡がり性状を確認できるといえる。

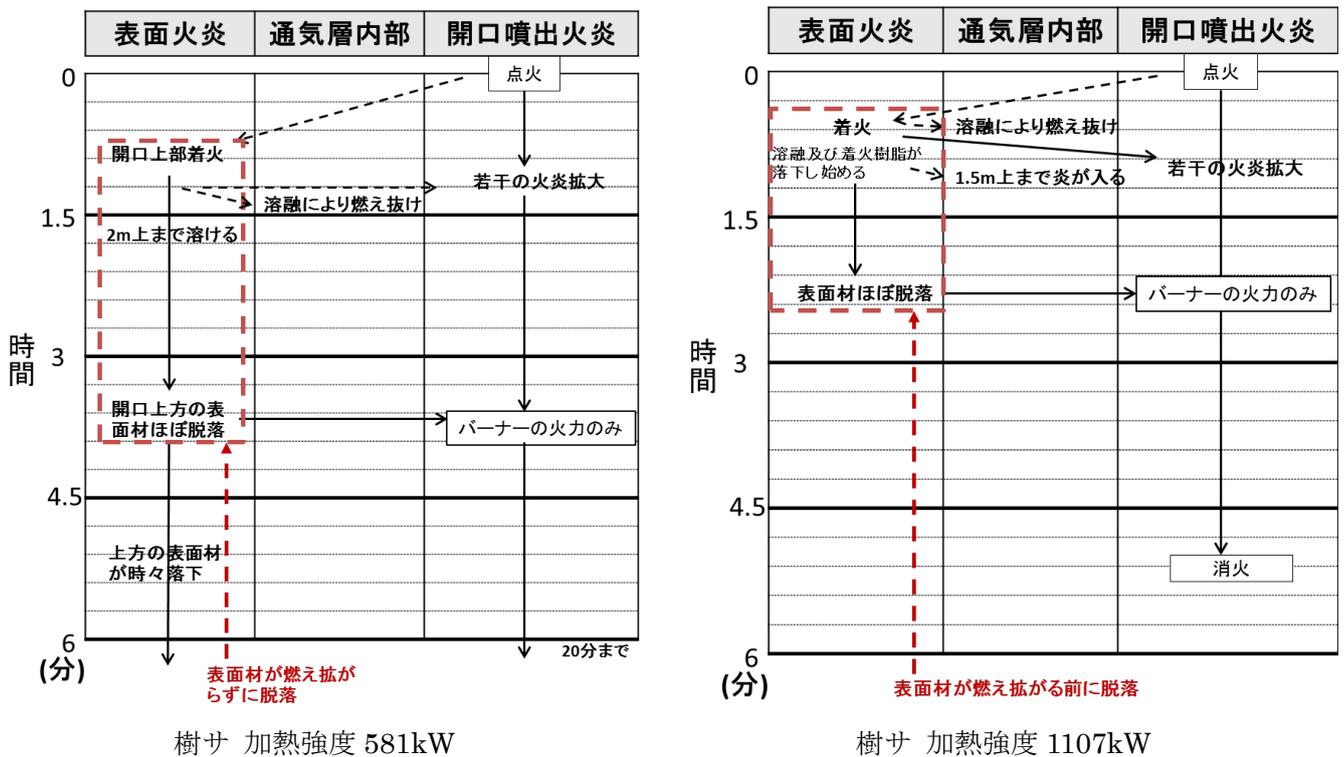


図 4-14 燃焼フローチャート(樹脂サイディング)

#### 4.4.1.8 可燃性外装の燃焼性状のまとめ

外断熱工法、木製外装、金属 SWP、太陽電池フィルム、樹脂塗材、樹脂サイディングといった可燃性外装材を対象として“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”で実験を実施し、実験結果より燃焼フローチャートを作成した結果、各可燃性外装における燃焼性状には以下の特徴があることが判明した。

- 湿式外断熱工法

加熱初期に表面材において燃え拡がり、その後内部の EPS が漏れ出ることによって噴出火炎が拡大するという燃え拡がりの経過を示し、内部断熱材の溶出を抑えることが燃え拡がりの抑制において重要である。

また、既往の研究<sup>[4-1]</sup>においては開口部の破損によって燃え拡がりが激しくなるとされているが、開口部に目立った損傷が無い場合であっても内部断熱材が溶出し、燃え拡がることを確認された。

- 通気工法

XPS及びEPSといった熱可塑性樹脂に関して外装表面に漏れ出して来て燃焼する危険性があるが、外装表面が鋼板などのように破損が発生しないもの場合は基本的には通気層内部でのみ燃え拡がる。火災事例<sup>[4-2]</sup>同様、煙突効果によって通気層内部で急激に燃え拡がる様子が確認された。通気層内部に可燃物が存在する場合は木の胴縁程度であっても燃え拡がる危険性があることから燃え拡がりを抑制するためには通気層内部における可燃物の燃焼を抑える必要がある。

- 木製外装

加熱初期においては外装表面で燃え拡がり、外装表面が燃え抜けた後は通気層内部で試験体上方まで延焼し、その後に外装表面の温度が上昇し、外装表面と通気層内部が一体となって燃え拡がる。外装表面の燃え拡がりだけでなく、外装材の燃え抜け及び通気層内部の延焼も燃え拡がりの大きな要因となっている。また、薬剤を注入することによって難燃処理を施した場合は燃え拡がらない。

既往の研究<sup>[4-3][4-4]</sup>の通り、通気層が燃え拡がりの大きな要因となり、薬剤処理によって燃え拡がりが抑制できることを確認した。

- 金属 SWP

加熱強度 581kW のみでの実験ではあるが、鋼板が表面材の金属 SWP の場合、端部周辺での燃焼、内部芯材の損傷はあるものの、燃え拡がりは発生しなかった。内装材として利用した場合に発生した火災事例のように表面材が剥がれ落ちるという性状は見られなかった。加熱強度を上げた場合は目地部の損傷及び表面材の変形が激しくなり、内部の芯材がより燃焼すると予測され、燃え拡がりを抑制するためには内部の芯材が変形によって火炎に直接露出しないように接合部を適切に施工することが求められる。

アルミ板を表面材とした金属 SWP の場合、表面材の焼損とともに内部の芯材が露出し、燃え拡がり、加熱強度 835kW 及び 883kW においては火災事例<sup>[4-5]</sup>と同様に激しく燃え拡がる様子が確認された。また、芯材が難燃処理されている場合には表面材の焼損及び芯材の燃焼が起こるものの燃え拡がりは抑制される。

- 太陽電池フィルム

着火後に外装表面に沿って一気に燃え拡がるがすぐに燃え尽きる。

- 樹脂塗材

着火後に外装表面に沿って一気に燃え拡がるがすぐに燃え尽きる。加熱強度 883kW においては火災事例にある通り、燃え拡がる危険性が確認された。

- 樹脂サイディング

着火後に燃え拡がらずに溶融落下する。

## 4.4.1.9 加熱強度の違いが燃焼性状に与える影響

第3章において“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の加熱強度の検討項目として開口噴出火炎が開口部に与える影響、開口噴出火炎の発熱量を条件として挙げ、それぞれ加熱強度が 520kW 以上、830kW 以上が望ましい加熱条件であるとした。

可燃性外装を対象として実験を実施した場合、加熱強度の違いが可燃性外装に影響を与えるかどうか、また火災事例を再現できているかどうかを表 4-3 に整理した。実施した加熱強度の中で、最も強い加熱強度と同様の燃焼性状を示すものを“○”、異なるものを“×”と示した。

加熱強度 581kW で実験を実施した場合、通気工法、太陽電池フィルム、樹脂塗材、樹脂サイディングに関しては加熱強度を強くした場合と比べて燃焼性状に特に変化が確認されなかったのに対し、湿式外断熱工法、木製外装、金属 SWP に関しては加熱強度が 800kW 以上で実施した結果と比較すると燃焼性状が異なることが判明し、加熱強度が低い場合は実火災を想定した場合の燃え広がり性状を試験で確認できない可能性があることが示唆された。また、樹脂塗材においては燃焼性状に変化は見られないもの、加熱強度が 581kW の場合は火災事例のように広範囲にわたる燃え広がりを確認できず、実火災を再現できていない可能性がある。加熱強度 520kW 以上とする開口噴出火炎が開口部に与える影響の検討項目を満たすだけでは燃焼性状を把握するのに不十分であることが示唆された。

また、湿式外断熱工法の断熱材厚さが 100mm の試験体においては、加熱強度 835kW で実験した場合の燃焼性状が 883 及び 1107kW の時と比較して燃焼性状が異なり、加熱強度 830kW 以上が望ましいとする開口噴出火炎の発熱量の検討項目を満たしていても燃焼性状を把握する上で十分でない可能性があることが判明した。

加熱強度が 581kW 及び 835kW の場合、可燃性外装の種類によっては燃焼性状が異なり、実験において実火災において起こりうる燃焼性状を再現できない可能性がある。加熱強度が 883kW 以上で実験を実施すれば、実大規模のファサード試験と遜色のない加熱強度 1107kW における開口噴出火炎で実験を実施した場合と同様の燃焼性状が確認されており、全ての可燃性外装に対して燃焼性状が加熱強度の影響を受けないためには、加熱強度が 883kW 以上で実験を実施することが望ましいと言える。

表 4-3 加熱強度が燃焼性状に与える影響

(×:燃焼性状が異なる,○:燃焼性状が同じ,—:実施実験無し)

	581kW	835kW	883kW	1107kW
湿式外断熱工法	×	×	○	○
通気工法	○	○	○	—
木製外装	×	—	○	○
金属 SWP	×	○	○	○
太陽電池フィルム	○	—	—	○

樹脂塗材	×	—	○	—
樹脂サイディング	○	—	—	○

### 4.4.2 可燃性外装の分類

#### 4.4.2.1 燃焼タイプ分類

可燃性外装の燃焼性状に関して、その特徴ごとに分類することができれば、防火性能の評価基準及び抑制手法を考える上で大変有用である。

建築空間における可燃物に対して既往の研究『可燃物の燃焼性状の分類と考察』<sup>[4-6]</sup>において主に発熱速度の測定結果より燃焼性状の分類を行っており図 4-15 に示すようにタイプ1～6の6タイプに分類している。これらの可燃物は主に建築区画内部の可燃物であるため外壁に用いられる可燃物とは若干異なるものの、可燃性固体の燃焼が主であるという点では可燃性外装と同様である。タイプの分類から分かるように可燃物の燃焼性状はタイプ1の自己消火するものを除くと、主に可燃物が熱可塑性(タイプ2)か熱硬化性(タイプ3)かどうか、燃焼領域が移動するような形状をしているかかどうか(タイプ4)、そして不燃性の外殻を持つかどうか(タイプ5)の3点によって分類されている。

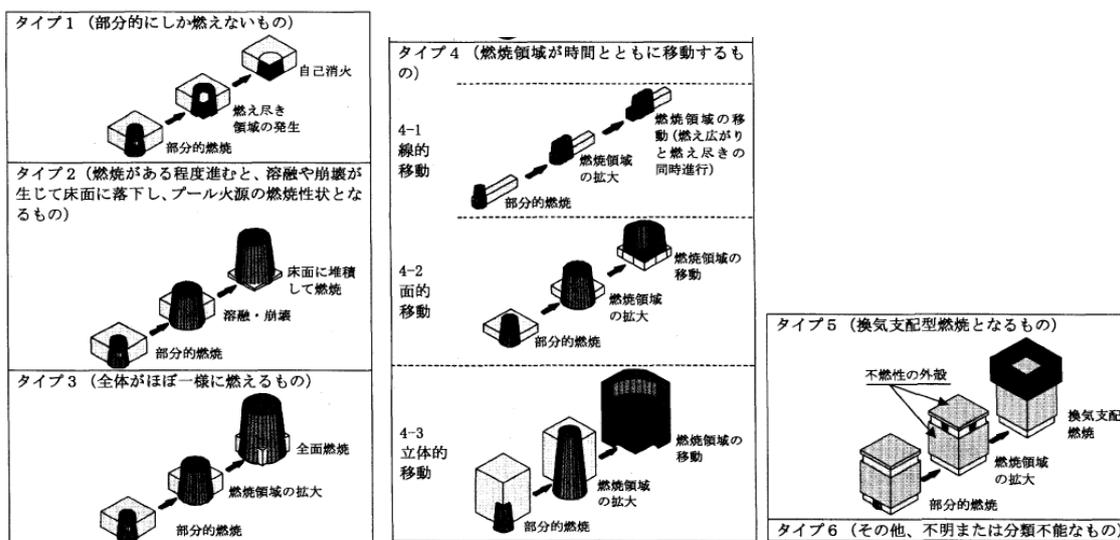


図 4-15 燃焼タイプの分類 [4-6]

可燃性外装においても使用される可燃物の有機系の固形物であり、大きく異なるのは火源となる開口噴出火炎が室内における初期火災の火源と比べて非常に大きく、外装であるため対象物が常に垂直に立っているという点のみであり、燃焼性状はこの分類と大きくは変わらないと予想される。そこで、この分類を参考に外装材の燃焼性状を各可燃性外装の燃焼フローチャートより、以下の6種類に分類した。今回実施した試験体はそれぞれ表 4-4 のように分類できる。

(1)部分的にしか燃焼しないもの(タイプ 1)

表面材の大部分が破損しない不燃性材料で覆われている、もしくは難燃処理が施されているため自己消火作用が強く、燃え広がりが全く起きない外装が当てはまる。

(2)内部断熱材の溶出に伴い噴出火炎が拡大するもの(タイプ 2)

湿式外断熱工法に代表される内部に熱可塑性樹脂を内包し、外装表面が金属パネルや窯業系サイディングと気密性に高いものでない可燃性外装において当てはまる。

この燃焼タイプの特徴は外装表面において燃え広がるという一般的な壁面燃焼ではなく、内部断熱材が外装表面に漏れ出し、噴出火炎の形成に寄与しているという点である。断熱材を覆う被覆材が火災初期に破損した場合は内部断熱材が燃え広がり、異なる挙動を示すと考えられるが、基本的には噴出火炎周辺で火炎が拡大する外装が当てはまる。

(3)外装表面において継続的に燃え広がるもの(タイプ 3)

この燃焼タイプは壁面において継続的に燃焼を持続するもので、木製外装が当てはまる。この燃焼タイプの特徴は壁面における可燃物の燃焼継続時間が比較的長いという特徴がある。

(4)外装表面において瞬間的に燃え広がるもの(タイプ 4)

塗材などが当てはまる。この燃焼タイプは一瞬にして壁面で燃え広がるものの、有機量が少ないため燃焼の継続時間は非常に短く、数分で燃え尽きる。

(5)内部断熱材が溶融し外装へ漏れて外装表面で燃焼(タイプ 5)

この燃焼タイプは表面材が破損することによって露出した芯材、もしくは芯材が露出している端部から燃え広がる。金属 SWP のうち、薄いアルミを面材として用いているアルミ樹脂複合板が当てはまる。加熱初期は面材が健在であるため燃え広がりが抑制されるが、芯材の露出とともに激しく燃え広がる。表面材を溶かしながら芯材を露出させていくため燃焼の継続時間は塗材などに比べると長い。

(6)通気内部において換気支配型の燃焼を起こすもの(タイプ 6)

この燃焼タイプは通気層内部において燃え広がりが発生する。火災時に大きな破損が生じない外装材が表面にあり、内部に通気のある空間と可燃物がある通気工法に当てはまる。外装表面は不燃材で覆われているため燃え広がりが起きないものの、通気層内部において延焼が起こる。

表 4-4 燃焼タイプの分類

燃焼 タイプ	タイプの特徴	試験体		
		分類	No.	試験体概略
1	部分的にしか燃焼しないもの	金属 SWP	金-U	ウレタンフォーム(面材鋼板)
			金-N	ヌレートフォーム(面材鋼板)
			ア-難	アルミ樹脂複合板 (難燃処理ポリエチレン芯材)
		木製外装	木-薬	薬剤処理スギ
		樹脂サイディング	樹サ	塩化ビニル樹脂サイディング
2	内部断熱材の溶出に伴い噴出火炎が拡大するもの	湿式外断熱工法	湿-50	50mm 厚 EPS 断熱材
			湿-100	100mm 厚 EPS 断熱材
			湿-100-H	100mm 厚高密度 EPS 断熱材
			湿-150	150mm 厚 EPS 断熱材
			湿-200	200mm 厚 EPS 断熱材
			湿-300	300mm 厚 EPS 断熱材
3	外装表面において継続的に燃え拡がるもの	木製外装	木-無	無垢スギ
4	外装表面において瞬間的に燃え拡がるもの	樹脂塗材	塗-単	防水形薄塗材 E
			塗-複	防水形複層塗材 E
		太陽電池フィルム	電-板	基材にアルミ樹脂複合板
			電-ル	基材に 2mm 厚アルミ板ルーバー
通気工法 (表面材のみ)	通-G	外装材に接着タイル張り、変成シリコン系樹脂接着剤		
5	内部断熱材が溶融し外装へ漏れて外装表面で燃焼	金属 SWP	ア-無	アルミ樹脂複合板 (ポリエチレン芯材)
6	通気内部において換気支配型の燃焼を起こすもの	通気工法	通-X	XPS(50mm), 外装材：ガルバリウム鋼板
			通-Fe	フェノールフォーム(50mm), 外装材：ガルバリウム鋼板
			通-G	高性能グラスウール(75mm)、木胴縁、 外装材：木繊維混入セメントけい酸カルシウム板
			通-E	EPS(100mm)、木胴縁、 外装材：窯業系サイディング

#### 4.4.2.2 燃焼タイプごとの燃焼性状

加熱強度 883kW における試験結果より、それぞれのタイプの開口上端より 2m 及び 2.5m 上における外装表面温度の履歴及び火炎高さ(500℃以上を計測した高さ)を整理すると、図 4-16 のようになる。なお、各試験体のタイプ分類はタイプ 1：ア-難、タイプ 2：湿-200、

タイプ3：木-無、タイプ4：塗-単、タイプ5：ア-無、タイプ6：通-Eとなっており、各可燃性外装の火炎高さの経時変化をみるとそれぞれ以下ようになる。

ア-難(タイプ1)：燃え拡がらない。

湿-200(タイプ2)：初期に燃え拡がり、8分ほどで燃え拡がりが収まる。

木-無(タイプ3)：初期より緩やかに燃え拡がり、継続して燃焼する。

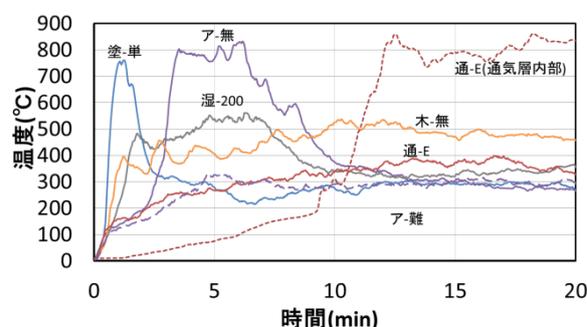
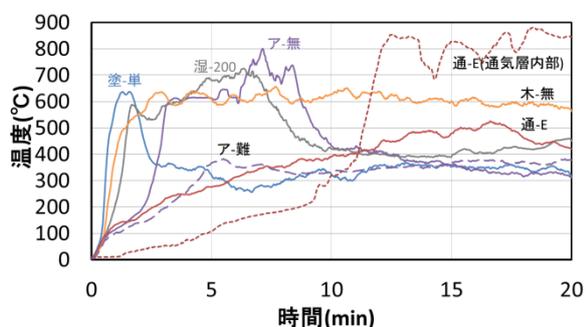
塗-単(タイプ4)：初期に急激に燃え拡がり、2,3分で燃焼が収まる。

ア-無(タイプ5)：加熱開始より2,3分経過後に急激に燃え拡がり、約8分で燃焼が収まる。

通-E(タイプ6)：通気層内部に10分経過後に急激に燃え拡がり、継続して燃焼する。

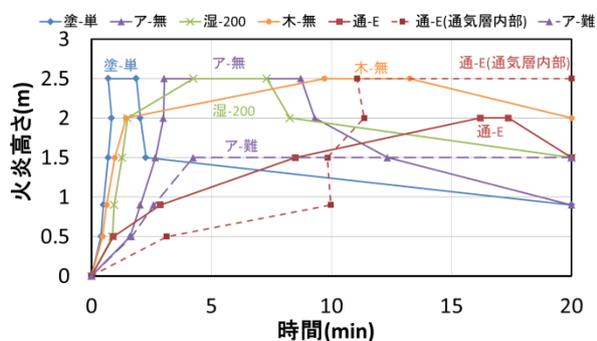
塗材(タイプ4)、無処理ポリエチレン芯材を用いたアルミ樹脂複合板(タイプ5)、そしてEPSを断熱材として用いた通気工法の通気層内部(タイプ6)においては、開口上2mと2.5mで高い温度を計測し、温度の経時変化にそれほど大きな差が見られなかった。しかし、断熱材厚さが200mmの湿式外断熱工法(タイプ2)及び無処理も木製外装(タイプ3)においては開口上2mにおいては他の試験体(タイプ4,5,6)と比べても高い温度を計測しているが開口上2.5m上においては開口上2mと比べてそれほど高い温度には至らなかった。

加熱強度883kWにおいては開口噴出火炎の火炎高さが1.33mであるため第3章の検討より上階延焼の評価は2m上で、燃え拡がりの評価は2.5m上で判断するのが望ましいと考えられ、タイプ2及び3においては燃え拡がりの危険性が低いものの、上階延焼の危険については他のタイプ(タイプ4,5,6)と同等もしくはそれ以上に高いと結論づけられる。



開口上端より2m上における外装表面温度(°C)

開口上端より2.5m上における外装表面温度(°C)



火炎高さ

図4-16 各タイプにおける外装表面温 (加熱強度883kWの場合)

#### 4.4.2.3 各燃焼タイプに対する抑制手法を検討する上で考慮する項目

可燃性外装の燃焼タイプごとに各々の燃焼性状に対して共通の抑制方法があると考えられる。そこで、4.4.2.2 で例として挙げた加熱強度 883kW において実施した各可燃性外装を各々の燃焼タイプの代表的な可燃性外装とし、タイプ 1~6 の各燃焼タイプに対してどのような抑制手法が考えらるかを燃焼タイプの特徴及び代表的な可燃性外装の燃焼性状より検討を行う。表 4-5 に燃焼タイプごとのタイプの特徴及び各燃焼タイプにおける代表的な可燃性外装の燃焼性状の特徴を整理した。

燃焼タイプ 1 は部分的にしか燃焼しないものである。難燃処理を施したポリエチレンを芯材として用いたアルミ樹脂複合板(ア-難)の燃焼性状から、ほとんど燃焼しておらず、抑制手法は特に必要ないと考えられる。

燃焼タイプ 2 においては可燃性外装の外装表面で自立炎を形成して燃え拡がるという一般的な可燃性外装の燃焼性状は示さず、内部断熱材が溶出により噴出火炎が拡大という燃焼性状を示す。200mm 厚の断熱材を用いた湿式外断熱工法(湿-200)の燃焼性状から、断熱材の溶出は噴出火炎発生後しばらくの間継続し、外装表面温度の上昇は開口上 2m の開口噴出火炎に比較的近い高さにおいて顕著であることが確認でき、溶出した断熱材の燃焼によって、噴出火炎発生初期より上階へと延焼する危険性が高いことが伺える。上階延焼を抑制するためには断熱材の溶出を抑えることが必要であり、溶出を抑制するためには表面材の補強が重要となる。

燃焼タイプ 3 においては可燃性外装の外装表面で自立炎を形成して燃え拡がるという一般的な可燃性外装の燃焼性状は示す。無垢スギを用いた木製外装(木-無)の燃焼性状から、外装表面温度は開口上 2.5m においては緩やかに温度が上昇し、樹脂塗材のような急激な温度上昇や燃え拡がりは観察されなかった。しかし、開口上 2m の開口噴出火炎に比較的近い高さにおいては継続的に高い温度を測定し、上階へと延焼する危険性が高いことが伺える。上階延焼を抑制するためには開口噴出火炎に近い位置での燃焼を抑えることが必要であり、そのためには外装に難燃処理等を施すことが重要となる。

燃焼タイプ 4 においては一瞬にして壁面で燃え拡がるものの燃焼の継続時間は非常に短く、数分で燃え尽きるといった燃焼性状を示す。防水形薄塗材 E の樹脂塗材(塗-薄)の燃焼性状より開口上 2m, 2.5m において外装表面温度が著しく上昇するものの、燃焼の継続時間は比較的短い。有機含有量を減らすことが燃え拡がりの抑制に効果的であると考えられる。樹脂の有機含有量が多い場合材料の燃え拡がり自体を抑制するのは難しく、庇などによって物理的に抑制する必要があると考えられる。

燃焼タイプ 5 においては、内部断熱材が溶融し外装へ漏れて外装表面で燃焼するという燃焼性状を示す。ポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板(ア-無)の燃焼性状より、噴出火炎発生直後においては表面材であるアルミ板が健在であるため、燃焼が発生しないものの、表面材が破損した後は、芯材であるポリエチレンが燃え尽きるまで継続的に燃焼した。表面材が破損する可燃性外装の場合には内部の芯材に難燃処理を施すことが必要と

なる。

燃焼タイプ6においては、通気層内部において燃焼を起こすものである。外装材が窯業系サイディングで、100mm厚のEPSを断熱材として用いた通気工法(通-E)の燃焼性状より、通気層内部で延焼が発生後は継続的に通気層内部で燃焼している様子が伺える。通気層内部の延焼に伴い外装表面の温度も上昇するがそれほど大きくは上昇せず、主に通気層内部での延焼が抑制手法において重要といえる。通気層内部においては煙突効果により外装表面よりも激しく延焼するため、通気層内部の延焼を抑制するためには層間塞ぎ等によって通気層内部における炎の伸展を物理的に防ぐことが重要となる。

表 4-5 各燃焼タイプの特徴及び各燃焼タイプの代表的な可燃性外装の燃焼性状

燃焼タイプ	タイプの特徴	代表的な可燃性外装		代表的な可燃性外装における加熱強度 883kW における燃焼性状
		No.	試験体概略	
1	部分的にしか燃焼しないもの	ア-難	アルミ樹脂複合板(難燃処理ポリエチレン芯材)	燃え広がらない。 外装表面温度の目立った上昇は見られない。
2	内部断熱材の溶出に伴い噴出火炎が拡大するもの	湿-200	湿式外断熱工法(200mm厚 EPS 断熱材)	初期に燃え広がり、8分ほどで燃え広がりが収まる。 開口上 2m で比較的高い温度をある程度の時間維持する。
3	外装表面において継続的に燃え広がるもの	木-無	木製外装(無垢スギ)	初期より緩やかに燃え広がり、継続して燃焼する。 開口上 2m で比較的高い温度を継続的に維持する。
4	外装表面において瞬間的に燃え広がるもの	塗-単	樹脂塗材(防水形薄塗材 E)	初期に急激に燃え広がり、2,3分で燃焼が収まる。 開口上 2m,2.5m で比較的高い温度を短時間維持する。
5	内部断熱材が溶融し外装へ漏れて外装表面で燃焼	ア-無	アルミ樹脂複合板(ポリエチレン芯材)	加熱開始より2,3分経過後に急激に燃え広がり、約8分で燃焼が収まる。 開口上 2m,2.5m で比較的高い温度をある程度の時間維持する。
6	通気内部において換気支配型の燃焼を起こすもの	通-E	通気工法(窯業系サイディング外装材、100mm厚 EPS 断熱材)	通気層内部に10分経過後に急激に燃え広がり、継続して燃焼する。 通気層内部の開口上 2m,2.5m で比較的高い温度を燃え広がり以後維持する。

#### 4.4.3 試験体間で差異が表れる測定値

第3章において“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の評価基準を噴出火炎性状から検討したが、評価基準を定める上で最も重要なことは、防火上安全な可燃性外装と防火上危険な可燃性外装が区別可能かどうかである。

湿式外断熱工法、木製外装、金属 SWP の可燃性外装においては防火性能に明確に差があると判断できる試験体を選別して実験を実施し、防火性能の差を明確に区別可能な測定値について検討を行う。

湿式外断熱工法では断熱材の厚さが 100mm のもの(湿-100)と 200mm のもの(湿-200)を

試験体として選定した。これらの試験体は、アメリカのファサード試験(NFPA285)において、100mm厚さの試験体では要求性能を満たすが、200mm厚さの試験体では要求性能を満たさないとされている。

木製外装では無処理のスギ材(木-無)及び薬剤処理を施したスギ材を試験体(木-薬)として選定した。薬剤処理を施したスギ材は日本の防火認定試験であるコーンカロリメータ試験(ISO5660-1)により難燃材料の認定を取得しているものを用いた。

金属 SWP では無処理のポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板(ア-無)と芯材に難燃処理を施したポリエチレンを用いたアルミ樹脂複合板を試験体(ア-難)として選定した。無処理のポリエチレンを芯材とした試験体は中東やアジアにおいて火災事例が確認されており、防火性能を満たしていないと判断できる材料である。難燃処理を施したポリエチレンを芯材として用いたアルミ樹脂複合板はカナダのファサード試験規格(ULCS134-92)における試験結果より要求性能を満たすと判断された試験体を用いた。

本節では外装表面温度及び試験体上端に設置した熱流束計の測定値の中で、選別した試験体が明確に区別できる値について検討を行う。

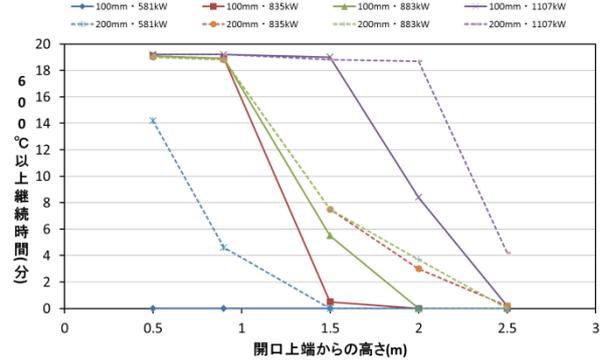
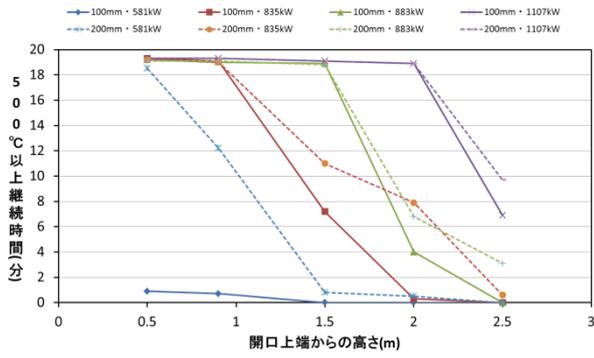
#### 4.4.3.1 湿-100 及び湿-200 における測定値の比較

湿式外断熱工法においては断熱材の厚さが 100mm 及び 200mm において 581, 835, 883, 1107kW の 4 種類の加熱強度において実験を実施した。図 4-17 に湿-100 及び湿-200 における実験中に 500°C以上を継続的に測定した時間及び 600°C以上を継続的に測定した時間を、図 4-18 に試験体上端における入射熱流束の測定結果を示す。

継続時間を比較すると、加熱強度 581kW においては開口上端より 0.5, 0.9m において差が表れ、加熱強度 835kW においては開口上端より 1.5, 2m において差が表れた。加熱強度 883kW においては 500°C以上の継続時間で比較すると、開口上端より 2, 2.5m において差が表れ、600°C以上の継続時間で比較すると、1.5, 2m において差が表れた。加熱強度 1107kW においては 500°C以上の継続時間で比較すると、開口上端より 2.5m 上において 2 分間ほど差が表れ、600°C以上の継続時間で比較すると、2, 2.5m において差が表れた。

試験体上端の入射熱流束を比較すると、581kW 及び 883kW においては若干の差がみられ、835kW においてはピーク時において 10kW/m<sup>2</sup>ほどの差がみられた。1107kW においてはピーク時に 20kW/m<sup>2</sup>近い値が表れた。883kW においてはあまり差が表れなかったが、加熱強度が大きくなるほど、湿-100 と湿-200 との差が顕著になる傾向を示した。

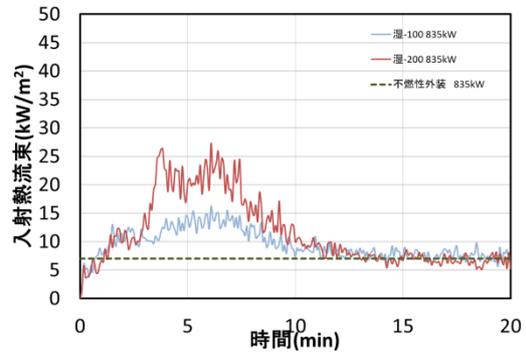
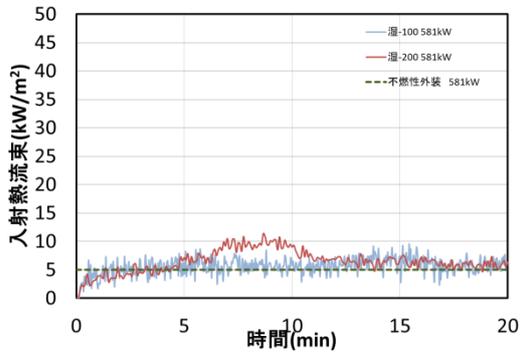
JIS A 1310 において、湿式外断熱工法における断熱材厚さが 100mm と 200mm でその防火性能が明確に異なると温度の継続時間及び試験体上端の入射熱流束で判断する場合、表 4-6 における○で示す温度及び高さ及び入射熱流束で測定するのが望ましい。



500°C以上の継続時間

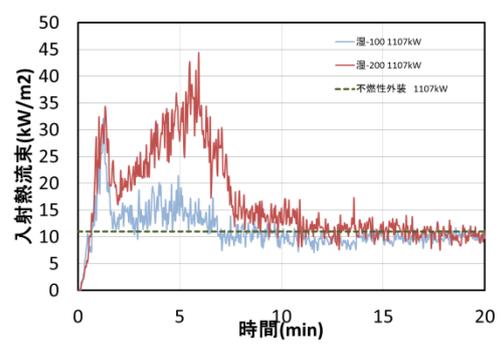
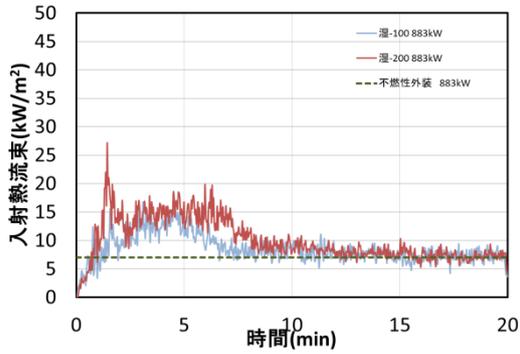
600°C以上の継続時間

図 4-17 湿-100 及び湿-200 における高温継続時間



581kW

835kW



883kW

1107kW

図 4-18 湿-100 及び湿-200 における試験体上端の入射熱流束

表 4-6 湿-100 及び湿-200 において差が出る測定値及び測定箇所

	500℃以上の継続時間					600℃以上の継続時間					熱流束
	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	
581kW	○	○	×	×	×	○	○	×	×	×	×
835kW	×	×	○	○	×	×	×	○	○	×	○
883kW	×	×	×	○	○	×	×	○	○	×	×
1107kW	×	×	×	×	○	×	×	×	○	○	○

4.4.3.2 木-無及び木-薬における測定値の比較

木製外装においては薬剤注入の有り無しにおいて 581, 883, 1107kW の 3 種類の加熱強度において実験を実施した。ここでは、薬剤処理の有無が区別できる基準について検討を行った。図 4-19 に木-無及び木-薬における実験中に 500℃以上を継続的に測定した時間及び 600℃以上を継続的に測定した時間、図 4-20 に試験体上端の入射熱流束の計測結果を示す。

加熱強度 581kW においては開口上端より 0.5, 0.9m において差が表れた。加熱強度 883kW においては 500℃以上の継続時間で比較すると、開口上端より 1.5, 2, 2.5m において差が表れ、600℃以上の継続時間で比較すると、1.5, 2m において差が表れた。加熱強度 1107kW においては 500℃以上の継続時間で比較すると、開口上端より 2, 2.5m 上において差が表れ、600℃以上の継続時間で比較すると、1.5, 2, 2.5m において差が表れた。

試験体上端の入射熱流束を比較すると、加熱強度 581kW において最も差が顕著に表れた。これは初期の燃焼において試験体上端付近がほとんど燃焼せず、燃え広がりも胴縁内部を介して延焼したため、試体上端まで燃焼した時に未燃の木材が多く存在し、結果として高い入射熱流束となったと考えられる。加熱強度 883kW 及び 1107kW においては無処理の木材の方が薬剤処理した木材と比較して継続的に高い値を計測した。

JIS A 1310 において、木製外装の薬剤の有無によって防火性能が明確に異なると温度の継続時間で判断する場合、表 4-7 に示す通り、加熱強度が 581kW の場合は 0.9m の高さで、883 及び 1107kW の場合は 1.5m 以上の高さで判断するのが妥当と考えられる。また、試験体上端の入射熱流束であれば、いずれの加熱強度においても判断可能であると言える。

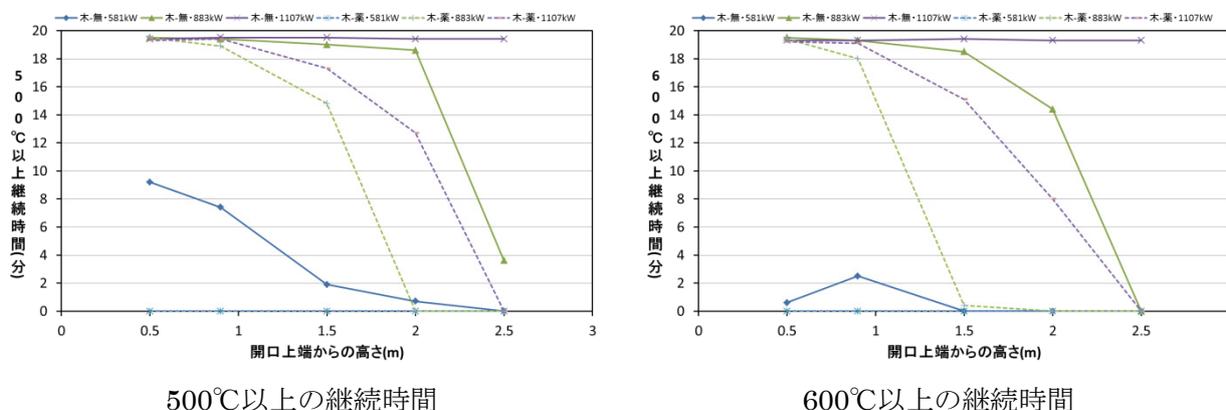


図 4-19 木-無及び木-薬における高温継続時間

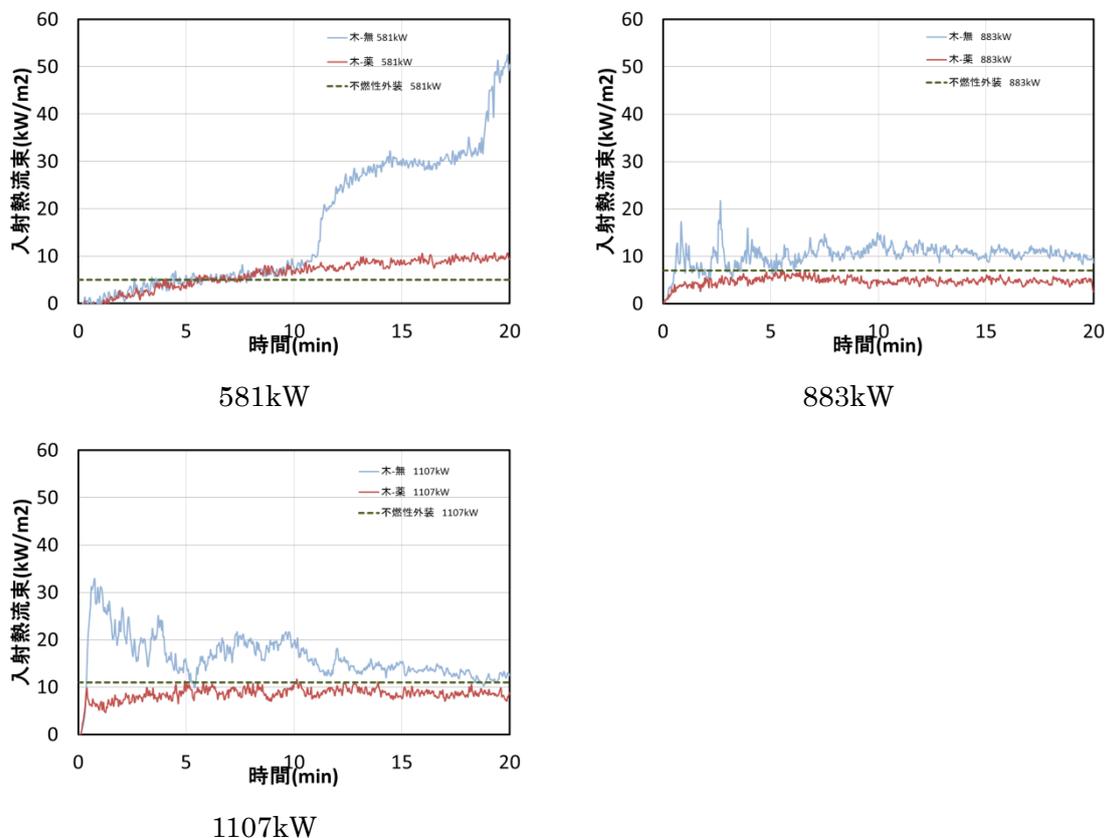


図 4-20 木-無及び木-薬における試験体上端の入射熱流束

表 4-7 木-無及び木-薬において差が出る測定値及び測定箇所

	500℃以上の継続時間					600℃以上の継続時間					熱流束
	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	
581kW	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×	○
883kW	×	×	○	○	○	×	×	○	○	×	○
1107kW	×	×	×	○	○	×	×	○	○	○	○

#### 4.4.3.3 ア-無及びア-難における測定値の比較

金属 SWP においてはアルミ樹脂複合板において芯材をポリエチレンと難燃処理を施したポリエチレンに変更して 581, 835, 883kW の 3 種類の加熱強度において実験を実施したが、加熱強度 835kW で実施したポリエチレン芯材の試験体においては試験中に危険が生じたため加熱は 7 分間で停止した。そのため、ここでは 581kW 及び 885kW の 2 種類の加熱強度を用いて芯材の難燃処理の有無が区別できる測定値について検討を行った。図 4-21 にア-無及びア-難における実験中に 500℃以上を継続的に測定した時間及び 600℃以上を継続的に測定した時間を、図 4-22 に試験体上端における入射熱流束の測定結果を示す。参考とし

て、835kW 及び 1107kW におけるア・難の継続時間も図 4-21 に示す。

加熱強度 581kW においては 500℃以上の継続時間で比較すると、開口上端より 0.5,0.9,1.5,2m 上において差が表れ、600℃以上の継続時間で比較すると、0.5, 0.9, 1.5m において差が表れた。加熱強度 883kW においては 500℃以上の継続時間で比較すると、開口上端より 2, 2.5m において差が表れ、600℃以上の継続時間で比較すると、1.5, 2, 2.5m において差が表れた。加熱強度 883kW の開口上端より 0.9m の高さにおいては、600℃以上の継続時間が難燃処理した試験体の方が長くなった。これは、無処理のポリエチレン芯材を用いた試験体においてはパネル焼損後に熱を保持するものが外装周辺に無くなり、結果として短い継続時間となったと考えられる。

試験体上端における入射熱流束を比較すると、加熱強度 581kW においてはア・無で燃え拡がり確認される加熱開始 10 分後から差が表れ始めピーク時にはおよそ 15kW/m<sup>2</sup> の差が表れた。加熱強度 835 及び 883kW ではア・無で燃え拡がり確認される加熱開始 2 分後から差が表れ始めピーク時には 60kW/m<sup>2</sup> 以上の差が表れた。

JIS A 1310 において、アルミ樹脂複合板の芯材の難燃処理の有無によって防火性能が明確に異なると温度の継続時間で判断する場合、表 4-8 に示す通り加熱強度が 581kW の場合は 0.5, 0.9, 1.5, 2m の高さで、883 kW の場合は 1.5m 以上の高さで判断するのが妥当と考えられる。試験体上端の入射熱流束に関してはいずれの加熱強度においても判断可能と考えられる。

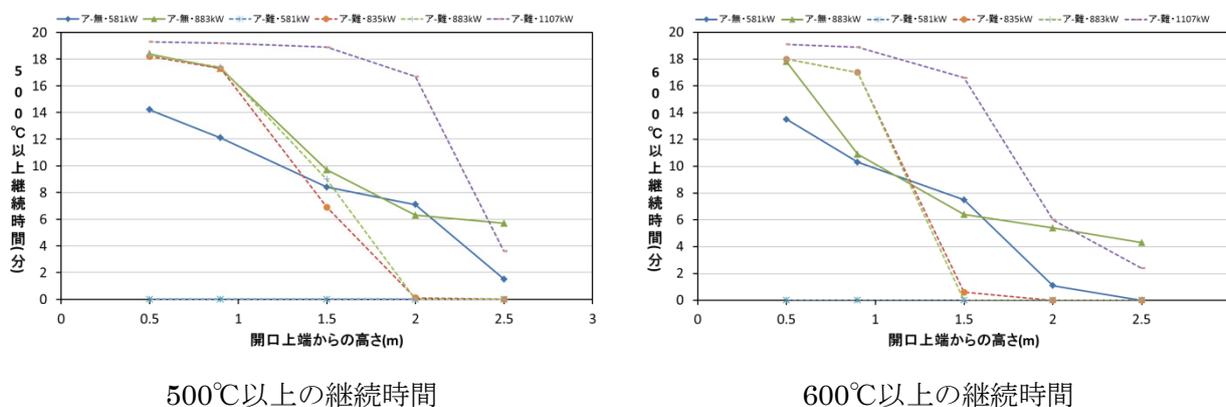


図 4-21 ア・無及びア・難における高温継続時間

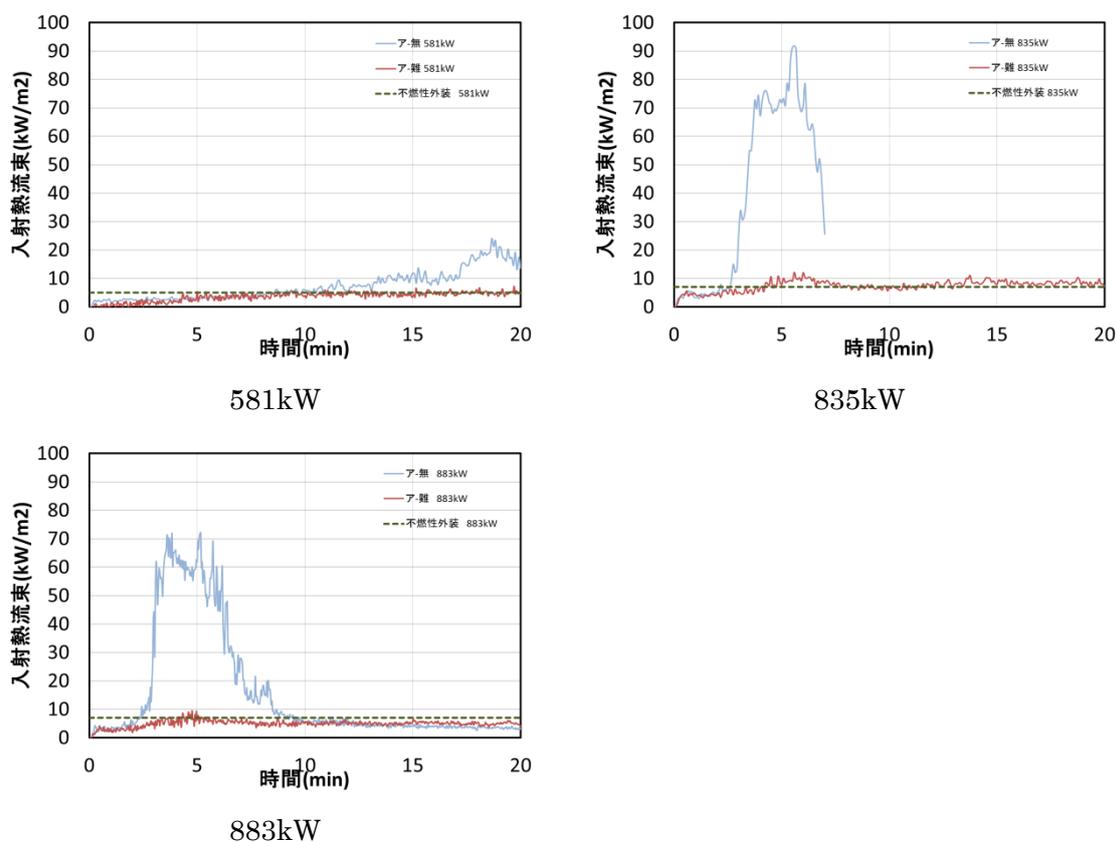


図 4-22 ア-無及びア-難における試験体上端の入射熱流束

表 4-8 500℃、600℃以上の外装表面温度継続時間 (ア-無、ア-難)

	500℃以上の継続時間					600℃以上の継続時間					熱流束
	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	
581kW	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	○
883kW	×	×	×	○	○	×	×	○	○	○	○

#### 4.4.3.4 実験結果のまとめ

試験体上端の熱流束においては、100mm厚と200mm厚の湿式外断熱工法を比較すると加熱強度が581kW及び883kWにおいてはあまり差が出ず、1107kWにおいて最も差が顕著となった。無処理と薬剤処理の木製外装を比較した場合は581, 883, 1107kWの加熱強度で、無処理ポリエチレンと難燃処理ポリエチレンのアルミ樹脂複合板を比較した場合は581, 835, 883kWの加熱強度で差が出ることを確認された。

581kW及び883kWの加熱強度においては断熱材の厚さが異なる湿式外断熱(湿-100, 湿-200)、難燃処理の有無を変更した木製外装(木-無, 木-薬)、芯材の難燃処理を変更した金属SWP(ア-無, ア-難)において実験を実施し、これらの試験体同士を3種類とも明確に区別するためには581kWの加熱強度では開口上端より0.5m, 0.9mの高さのいずれかで、883kWの

加熱強度では2m,2.5mのいずれかで比較する必要がある。

湿式外断熱(湿-100, 湿-200)、難燃処理の有無を変更した木製外装(木-無,木-薬)、芯材の難燃処理を変更した金属SWP(ア-無,ア-難)の3対の試験体を区別するためには表4-9中で3/3と示す温度及び高さもしくは試験体上端の入射熱流束で比較する必要がある。加熱強度が835kWにおいては湿式外断熱工法のみであるが、1/1と示す部分、1107kWにおいては湿式外断熱工法と木製外装の2種類であるが、2/2と示す温度及び高さ及び試験体上端の入射熱流束で区別が可能となる。

表 4-9 試験体を区別可能な外装表面温度継続時間及び試験体上端熱流束

	500℃以上の継続時間					600℃以上の継続時間					熱流束	実施 試験体
	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m		
581kW	3/3	3/3	2/3	1/3	0/3	2/3	3/3	1/3	0/3	0/3	2/3	湿,木,ア
835kW	0/1	0/1	1/1	1/1	0/1	0/1	0/1	1/1	1/1	0/1	1/1	湿
883kW	0/3	0/3	0/3	3/3	3/3	0/3	0/3	2/3	3/3	1/3	2/3	湿,木,ア
1107kW	0/2	0/2	0/2	1/2	2/2	0/2	0/2	1/2	2/2	2/2	2/2	湿,木

## 4.5 第4章のまとめ

本章においては、外断熱工法、木製外装、金属SWP、太陽電池フィルム、樹脂塗材、樹脂サイディングといった可燃性外装材を対象として“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”で実験を実施し、以下のことが判明した。

### 4.5.1 可燃性外装の燃焼性状

各可燃性外装における燃焼性状には以下の特徴があることが判明した。

- 湿式外断熱工法

加熱初期に表面材において燃え拡がり、その後内部のEPSが漏れ出すことによって噴出火炎が拡大するという燃え拡がりの経過を示し、内部断熱材の溶出を抑えることが燃え拡がりの抑制において重要である。

また、既往の研究においては開口部の破損によって燃え拡がりが激しくなるとされているが、開口部に目立った損傷が無い場合であっても内部断熱材が溶出し、燃え拡がる事が確認された。

- 通気工法

XPS及びEPSといった熱可塑性樹脂に関して外装表面に漏れ出して来て燃焼する危険性があるが、外装表面が鋼板などのように破損が発生しないもの場合は基本的には通気層内部でのみ燃え拡がる。火災事例同様、煙突効果によって通気層内部で急激に燃え拡がる様子が確認された。通気層内部に可燃物が存在する場合は木の胴縁程度であっても燃え拡がる危険性があることから燃え拡がりを抑制するためには通気層内部における可燃物の燃

焼を抑える必要がある。

- 木製外装

加熱初期においては外装表面で燃え拡がり、外装表面が燃え抜けた後は通気層内部での試験体上方まで延焼した後に外装表面の温度が上昇し、外装表面と通気層内部が一体となって燃え拡がる。外装表面の燃え拡がりだけでなく、外装材の燃え抜け及び胴縁内部の延焼も燃え拡がりの大きな要因となっている。また、薬剤を注入することによって難燃処理を施した場合は燃え拡がらない。

既往の研究の通り、通気層が燃え拡がりにおいて大きな要因となり、薬剤処理によって燃え拡がりが抑制できることを確認した。

- 金属 SWP

加熱強度 581kW のみでの実験ではあるが、鋼板が表面材の金属 SWP の場合、端部周辺での燃焼、内部芯材の損傷はあるものの、燃え拡がりは発生しなかった。内装材として利用した場合に発生した火災事例のように表面材が剥がれ落ちるといった性状は見られなかった。加熱強度を上げた場合は目地部の損傷及び表面材の変形が激しくなり、内部の芯材がより燃焼と予測され、燃え拡がりを抑制するためには内部の芯材が変形によって火炎に直接露出しないように接合部を適切に施工することが求められる。

アルミ板を表面材とした金属 SWP の場合、表面材の焼損とともに内部の芯材が露出し、燃え拡がり、火災事例と同様に激しく燃え拡がる様子が確認された。芯材が難燃処理されている場合には表面材の焼損、芯材の燃焼が起こるものの燃え拡がらない。

- 太陽電池フィルム

着火後に外装表面に沿って一気に燃え拡がるがすぐに燃え尽きる。

- 樹脂塗材

着火後に外装表面に沿って一気に燃え拡がるがすぐに燃え尽きる。火災事例にある通り、燃え拡がる危険性が確認された。

- 樹脂サイディング

着火後に燃え拡がらずに熔融落下する。

#### 4.5.2 加熱強度の違いが可燃性外装の燃焼に及ぼす影響

加熱強度を変更し、実際に可燃性外装材に対して“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いて実験を実施した結果、湿式外断熱工法、木製外装、金属 SWP に関しては加熱強度が 581kW の場合、燃焼性状が異なることが判明し、加熱強度が低い場合は実火災を想定した場合の燃え拡がり性状を試験で確認できない可能性があることが示唆された。

湿式外断熱工法に関しては厚さ 100mm の試験体においては 835kW の加熱強度においても 883 及び 1107kW の時と比較して燃焼性状が異なることが判明した。

### 4.5.3 可燃性外装の分類

可燃性外装材はその燃焼性状より以下の6タイプに分類でき、それぞれのタイプごとに特徴的な燃え拡がり性状及び温度履歴を持つことが確認された。また、タイプ2及び3においては燃え拡がりの危険性は低いものの、上階延焼の危険については他のタイプ(タイプ4,5,6)と同等もしくはそれ以上に高いと結論付けた。また、各々の燃焼タイプにおいてどのようなことが抑制手法上重要であるかの検討を行い、以下のように結論付けた。

(1)部分的にしか燃焼しないもの(タイプ1)

抑制において重要な項目：特に必要ない

(2)内部断熱材の溶出に伴い噴出火炎が拡大するもの(タイプ2)

抑制において重要な項目：内部断熱材の溶出を防止すること

(3)外装表面において継続的に燃え拡がるもの(タイプ3)

抑制において重要な項目：外装材の難燃化

(4)外装表面において瞬間的に燃え拡がるもの(タイプ4)

抑制において重要な項目：有機含有量を減らすこと、庇の設置

(5)内部断熱材が溶融し外装へ漏れて外装表面で燃焼(タイプ5)

抑制において重要な項目：内部芯材の難燃化

(6)通気内部において換気支配型の燃焼を起こすもの(タイプ6)

抑制において重要な項目：通気層内部に層間塞ぎの設置

### 4.5.4 試験体間で差異が表れる評価基準値

581kW及び883kWの加熱強度においては断熱材の厚さが異なる湿式外断熱(湿-100, 湿-200)、難燃処理の有無を変更した木製外装(木-無, 木-薬)、芯材の難燃処理を変更した金属SWP(ア-無, ア-難)において実験を実施し、これらの試験体同士を3種類とも明確に区別するためには581kWの加熱強度では開口上端より0.5m, 0.9mの高さのいずれかで、883kWの加熱強度では2m, 2.5mのいずれかで比較する必要がある。

試験体上端の熱流束においては、100mm厚と200mm厚の湿式外断熱工法を比較すると加熱強度が581kW及び883kWにおいてはあまり差が出ず、1107kWにおいて最も差が顕著となった。無処理と薬剤処理の木製外装を比較した場合は581, 883, 1107kWの加熱強度で、無処理ポリエチレンと難燃処理ポリエチレンのアルミ樹脂複合板を比較した場合は581, 835, 883kWの加熱強度で差が出ることを確認された。

## 第 4 章 参考文献

[4-1] Dipl.-Phys. I. Kotthoff: “Fire performance of external thermal insulation composite systems (ETICS) in buildings” basics

<http://www.eumeps.construction/show.php?ID=4806>

[4-2] 北垣亮馬：建設中に燃えた北京の超高層ビル TVCC 外断熱材の下階延焼で火災拡大、日経アーキテクチュア(912)、2009

[4-3] Tuula Hakkarianen and Tuuli Oksanen: Fire Safety Assessment of Wooden Facades, Fire and Materials, Fire Mater. 2002;26:7-27

[4-4] Birgit A.-L. Östman and Lazaros D. Tsantaridis: Fire performance of multi-storey wooden facades, Proceedings of 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, CSTB. MATEC web of conferences 9, 06001

<http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20130906001>

[4-5] 金榮善, 水野雅之, 大宮喜文：韓国・釜山ウシンゴールデンスイート超高層集合住宅の火災調査, 火災(311号)

[4-6] 名取晶子、抱憲誓、土橋常登、長岡勉、原田和典：可燃物の燃焼性状の分類と考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、3055、2004年8月

## 第5章 抑制手法の検討

### 5.1 第5章の目的

可燃性外装に対して抑制手法を検討しておくことは今後可燃性外装の防火安全性能を確保する上で大変重要なことである。本章では可燃性外装に対する有効な抑制手法の提案を行うことを目的とし、各可燃性外装に対して防火安全上効果的な抑制手法の検討を行い、検討事項のいくつかに対しては実際に“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いてその効果の検証を行った。

### 5.2 計画

第4章において実施した可燃性外装材を対象とした実験により、各可燃性外装における燃焼性状及び防火安全上考慮すべきことが整理できた。また、燃焼タイプの分類により、各燃焼タイプにおいて抑制において重要な項目に関しても整理できた。ここでは、それらの成果をもとに、各可燃性外装に対して有効な抑制手法について検討を行った。各可燃性外装に対する有効な抑制手法を表 5-1 に整理した。

#### 5.2.1 湿式外断熱工法

湿式外断熱工法は主に燃焼タイプ 2 に分類され、燃焼の特徴として、内部断熱材の溶出による噴出火炎の拡大があげられる。内部断熱材の溶出は主に開口部上端付近で起きていると想定されている。

湿式外断熱工法の燃焼を抑制するには

- 1) 溶出した断熱材の燃焼を抑制する
  - 2) 断熱材の溶出自体を抑制する
- の2通りの方法が考えられる。

溶出した断熱材の燃焼を抑制するには燃焼が主に発生している開口部上端付近を補強することが有効であると考えられる。

断熱材の溶出自体を抑制するには表面材を強固にする、一定の高さにファイヤーストップを導入し、ある高さ以上の溶融を抑える、もしくは断熱材自体を溶融が起きにくいものにするという方法が考えられる。

#### 5.2.2 通気工法

通気工法は燃焼タイプ 6 に分類され、主に通気層内部での延焼が問題となる。通気層内部の延焼を抑えるためには

- 1) 通気層内部への開口噴出火炎の侵入を防ぐ

## 2)通気層内部における延焼を防ぐ

の2通りの方法が考えられる。前者においては噴出火炎が発生する開口部付近における補強が有効であり、後者においては通気層内部に層間塞ぎを設けることが有効であるといえる。

### 5.2.3 木製外装

木製外装は燃焼タイプ3に分類され、継続的に燃焼し、表面材が燃えぬけて胴縁内部においても延焼することから、無処理の木製外装を用いる場合は既往の研究にある通り、通気層内部に層間塞ぎもしくは外装表面部に庇を用いるなどの処置を用いる必要がある。

第4章の実験において薬剤処理を木製外装に用いることは抑制に効果があることが確認されており、有効であるといえるが経年劣化による性能の低下については検証を行う必要がある。

### 5.2.4 金属 SWP

表面材が鉄の場合は燃焼タイプ1に分類され、表面材が芯材から剥がれない限り燃焼は接合部のみに限定され、燃え広がりは基本的には起こらない。しかし、表面材が剥がれた場合には激しく燃え広がる危険性があり、表面材が剥がれる危険性が最も高いのは開口噴出火炎によっては炙られる開口部付近であると推察される。そのため、延焼の抑制には接合部及び開口部の補強が効果を発揮するものと考えられる。

表面材がアルミの場合は燃焼タイプ5に分類され、表面材が溶けて内部の芯材が露出してしまうため、内部の芯材自身を難燃化することが必要となる。特にパネルの端部は芯材が若干露出しており、弱点部となり、端部を適切に処理することも重要であると考えられる。

第4章における実験の結果より、アルミ樹脂複合板の場合は芯材の難燃処理によって防火性能が高まることが確認された。しかし、アルミ樹脂複合板はフレーム等に取り付けて施工するため内側に通気層を有するのが一般的であり、防火性能を検証するためには更に通気層幅における検討が必要となる。

### 5.2.5 太陽電池フィルム

太陽電池フィルムは燃焼タイプ4に分類され、有機物であるため材料の燃え広がり自体を抑制するのは難しい。そのため、庇等を設置もしくは設置面積を制限することによって燃え広がりを抑制するのが有効と考えられる。

### 5.2.6 樹脂塗材

樹脂塗材は燃焼タイプ4に分類され、塗材の有機含有量を減らすことが燃え広がりの抑制に有効であると考えられる。有機含有量が多い場合、材料の燃え広がり自体を抑制するのは難しく、庇等を設置する、もしくは塗装面積を制限することによって燃え広がりを抑制するのが有効と考えられる。

### 5.2.7 樹脂サイディング

樹脂サイディングは燃焼タイプ1に分類され、塩化ビニル樹脂の自己消火性が高いため

燃え拡がりの危険性は低い。しかし、塩化ビニル製の樹脂サイディングの場合、燃え拡がるより先に外装材が溶融落下し、外装材自体の損傷してしまい、落下物による燃焼が懸念される。溶融落下を防止するためには庇等を設置することによって開口噴出火炎を外装材から遠ざけるのが有効と考えられる。

表 5-1 各可燃性外装に対する有効な抑制方法

可燃性外装の種類	抑制において考慮すべき項目	有効な抑制方法
湿式外断熱工法	溶出した断熱材の燃焼	開口部の補強
	断熱材の溶出	表面材の補強
		ファイヤーストップの設置
		芯材の難燃化
通気工法	通気層内部への開口噴出火炎の侵入	開口部の補強
	通気層内部における延焼	層間塞ぎの設置
木製外装	胴縁内部における燃え拡がり	層間塞ぎの設置
	表面材の燃え拡がり	庇の設置
		木材の難燃化
金属 SWP	芯材の露出	接合部、開口部の補強
	芯材の燃焼	芯材の難燃化
太陽電池フィルム	表面材の燃え拡がり	庇の設置
		設置面積の制限
樹脂塗材	表面材の燃え拡がり	庇の設置
		塗装面積の制限
樹脂サイディング	表面材の溶融	層間塞ぎ及び庇の設置

## 5.3 抑制手法効果検証実験

### 5.3.1 実験の目的

5.2 で整理した可燃性外装に対する有効な抑制方法に関して、実際に“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いてその抑制効果の検証を行った。

### 5.3.2 試験体及び実験条件一覧

試験体の概要を表 5-2 に示す。可燃性外装の試験体として外断熱工法、通気工法、金属 SWP、木製外装、太陽電池フィルムを用い、その抑制手法の検証を行った。

湿式外断熱工法においては、抑制手法の検討が既往の研究において実施されており、いくつかの試験体で既往の抑制手法の効果の検証を実施した。

抑制手法の効果を明確に確認するために、比較対象となる抑制手法を適用する前の試験体(第4章で実施した試験体)と同じ加熱強度で実験を実施した。ただし、通-E-RO に関しては、通-E では 883kW で実施したのに対し、加熱強度 1107kW で実験を実施した。

表 5-2 試験体及び実験条件

No.	試験体		加熱強度(kW)
	分類	概要	
湿-50-W	湿式外断熱工法	仕上げ材：不燃木材+木胴縁，その他は湿-50と同様の仕様	581
湿-100-P1		EPS(100mm, 20kg/m <sup>3</sup> ), SBR系ポリマーセメントモルタル(厚さ：20mm), 補強ネット(2層), アンカーピン, 仕上げ材：無機主体塗料, ALC板(厚さ60mm)：開口部周辺, 開口上端より2m上に設置	883
湿-100-P2		EPS(100mm, 20kg/m <sup>3</sup> ), SBR系ポリマーセメントモルタル(厚さ：15mm), 補強ネット(2層), アンカーピン, 仕上げ材：無機主体塗料, ロックウール：開口部周辺	1107
湿-150-RO		開口部周辺及び試験体上端にEFR※(厚さ200mm), 断熱材厚さ150mm, 端部：切り離し, その他は湿-50と同様	883
湿-150-Fe		断熱材：EFR※, 断熱材厚さ150mm, 端部：切り離し, その他は湿-50と同様	883
湿-150-FB		開口部周辺及び開口上端より2m上にロックウール(厚さ200mm)を施工, 断熱材厚さ150mm, 試験体の幅は2730mm, その他は湿-50と同様	1107
湿-200-FB		断熱材の厚さ:200mm その他は湿-150-FBと同様	1107
通-Fe-RO	通気層外断熱	開口部の補強として開口部上面の端部にL字金物, その他は通-Feと同様の仕様	581
通-E-FB		開口上端より900mm上の通気層内部の木製枠に層間塞ぎ(通気金物), その他は通-Eと同様	883
通-E-RO		開口上端の通気層内部に層間塞ぎ(L字鉄板), その他は通-Eと同様	1107
木-薬-劣	木製外装	促進劣化, その他は木-薬と同様	1107
金-U-RO	金属SWP	芯材：ウレタンフォーム(49mm), 面材：塗装鋼板(0.5mm) 接合部：塩ビ枠, 開口部：鉄枠	581
金-N-RO		芯材：ヌレートフォーム(49mm), 面材：塗装鋼板(0.5mm) 接合部：塩ビ枠, 開口部：鉄枠	581
ア-難-RO		開口部：鉄枠, その他はア-難と同様	581
ア-難-300		通気層幅：300mm, 支持フレームの一部にアルミを使用, 試験体上端及び側面部にパネルを施工, その他はア-難と同様	1107
電-板-RO	太陽電池フィルム	開口部：鉄枠, その他は電-板と同様	581
電-ル-FB		開口上端より1,200mmに層間塞ぎ及び庇として鉄板(厚さ1.6mm)を設置, その他は電-ルと同様	1107

※EFR：ビーズ法ポリスチレン・フェノール耐火被覆フォーム

### 5.3.3 試験方法

実験概要は第4章4.2.3試験方法と同様、図5-1に示す箇所で温度及び熱流束を測定し、酸素消費法を用いて発熱量を計測し、ビデオカメラによって燃え拡がりの様子を撮影した。また、いくつかの試験体においては参考として通気層内部及び下地表面の温度の測定も行った。加熱条件に関しては前節で述べたA～Dのいずれかの条件、つまり加熱強度が581kW, 835kW, 883kW, 1107kWのいずれかで実験を実施した。

なお、581kWの3つの試験体(湿-50-W、通気-Fe-RO、金-N-RO)に関しては外装表面温



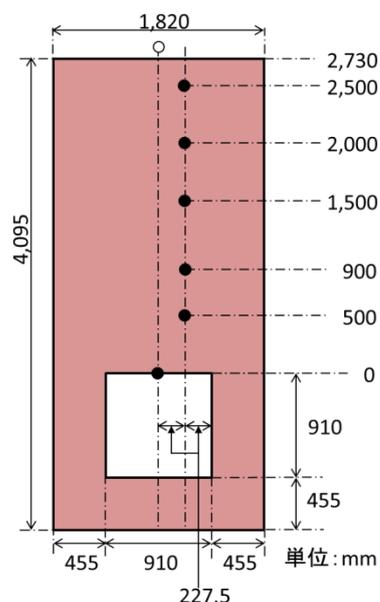


図 5-2 湿-50-W、通気-Fe-RO、金-N-RO における温度測定箇所

### 5.3.4 試験体詳細

#### 5.3.4.1 湿式外断熱工法

湿式外断熱工法においては燃焼を抑制するために開口部周辺の補強、もしくは内部断熱材の溶出を抑制するために外装材の変更及び補強、断熱材の変更、試験体中にファイヤーストップの導入を行い、その効果を検証した。

第2章で整理した既往の研究<sup>[5-1][5-2]</sup>より、

- 表面仕上げを無機系のものとする。
- ファイヤーストップを設置する。
- 内部断熱材を溶融する熱可塑性の物ではなく、熱硬化性樹脂とする。

の3つが湿式外断熱の抑制手法として有効であることが報告されており、実験を実施した試験体においては表5-4に示すように既往の抑制手法と類似した抑制手法を利用している。湿-150-FB、湿-200-FBの試験体に関しては既往の研究で有効とされている抑制手法と同様の方法を使用しており、既往の抑制手法が有効であるかを確認するために実施した。

湿-50-WはEPSの厚さが50mmの湿式外断熱工法を施工した後、さらにその上に木胴縁を設けて最終的に不燃木板で仕上げた試験体であり、開口部は不燃木材で囲っている(図5-3)。

湿-100-P1はEPSの厚さが100mmの湿式外断熱工法に表面材との接着の補強にアンカーピンを施工し、表面のモルタル層の厚さを20mmにし、更に開口部周りより2m上にALC板(60mm)を設置し、仕上げ塗材は無機主体の塗料とした(図5-4)。

湿-100-P2はEPSの厚さが100mmの湿式外断熱工法に表面材との接着の補強にアンカーピンを施工し、表面のモルタル層の厚さを15mmにし、更に開口部周りにロックウール

を施工し、仕上げ塗材は無機主体の塗料とした(図 5-5)。

湿-150-RO は開口部を補強する目的で、EPS の厚さが 150mm の湿式外断熱工法の開口部上端から 200mm までの開口部廻りを EFR(EPS・フェノール耐火被膜フォーム)に変更し、更に試験体上端にファイヤーストップとして EFR を挿入したものである(図 5-6)。なお、EFR とは熱可塑性の発泡ポリエチレンを、難燃剤を含む熱硬化性のフェノール樹脂で被覆したものである。また、開口部上端の施工方法はバックラップとはせず突き付けとした。なお、突き付けとはバックラップ処理とは異なり、端部のメッシュを断熱材の裏に巻き込まず、端部にそのまま取り付ける施工方法である。

湿-150-Fe は断熱材の溶出を抑える目的で湿式外断熱工法の内部の断熱材を熱可塑性の EPS から耐火性の高い EFR に変更し、断熱材の厚さは 150mm のものを使用した。また、開口部上端の施工方法はバックラップとはせず突き付けとした。EFR はコーンカロリーを用いた燃焼試験(ISO5660-1)において EPS のように熔融せず、炭化した EPS・フェノール耐火被膜フォームが元の形のまま残存しており、熱硬化性樹脂の特性が強い材料である。

湿-150-FB, 湿-200-FB はそれぞれ断熱材の厚さが 150mm 及び 200mm の湿式外断熱工法に対して試験体の横幅を左右にそれぞれ 455mm 伸ばし、溶出した断熱材の燃焼及び断熱材の熔融を抑制するために開口廻りと開口上端より 2m の高さに幅 250mm のロックウールを施工した(図 5-7)。

なお、湿-50-W、湿-150-RO、湿-150-Fe、湿-150-FB、湿-200-FB は B 社の施工、湿-100-P1 及び湿-100-P2 は C 社の施工となっている。

表 5-4 湿式外断熱工法において使用した抑制手法の詳細

No.	試験体で使用している抑制手法	
	既往の研究と類似した手法	既往の研究に無い手法
湿-50-W	特になし	表面仕上げ材を不燃木板とする
湿-100-P1	表面仕上げを無機系のものとする	アンカーピンを用いて表面材を補強
	ファイヤーストップを設置(開口部廻り及び開口部上端より 2m の位置)	表面材のモルタル層を 2mm→20mm に厚くする ファイヤーストップの材料として ALC 板を使用
湿-100-P2	表面仕上げを無機系のものとする	アンカーピンを用いて表面材を補強
	開口部廻りにファイヤーストップの設置	表面材のモルタル層を 2mm→15mm に厚くする
湿-150-RO	開口部廻り及び試験体上端にファイヤーストップを設置	ファイヤーストップの材料として EFR を使用
湿-150-Fe	内部断熱材を熱可塑性樹脂(EPS)から熱硬化性樹脂(EFR)に変更	熱硬化性樹脂として EFR を使用
湿-150-FB 湿-200-FB	ファイヤーストップを設置(開口部廻り及び開口部上端より 2m の位置)	特になし



図 5-3 湿-50-W

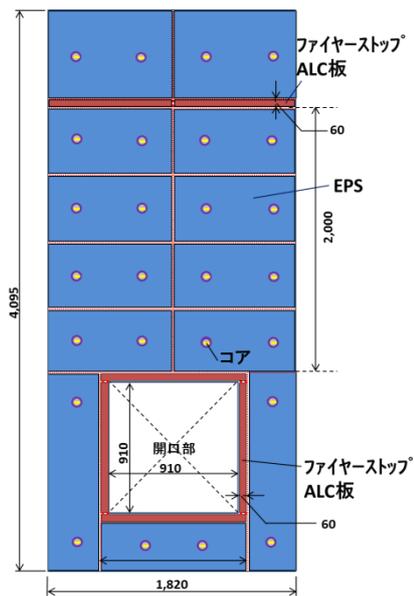


図 5-4 湿-100-P1

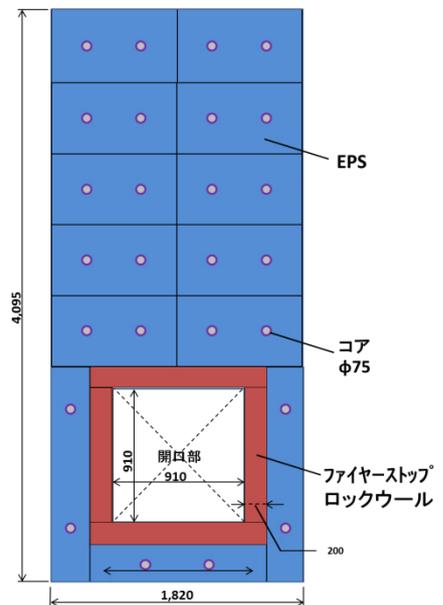


図 5-5 湿-100-P2

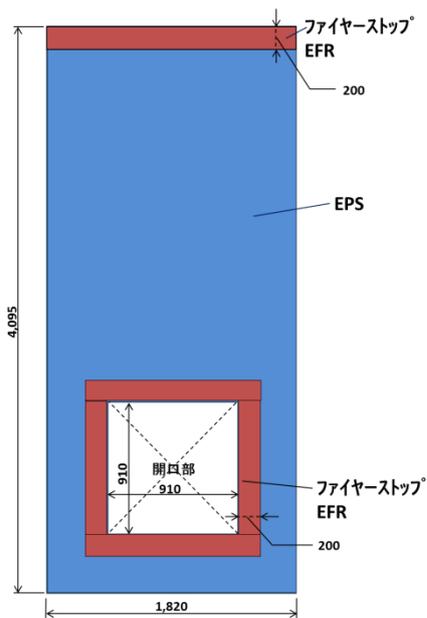


図 5-6 湿-100-RO

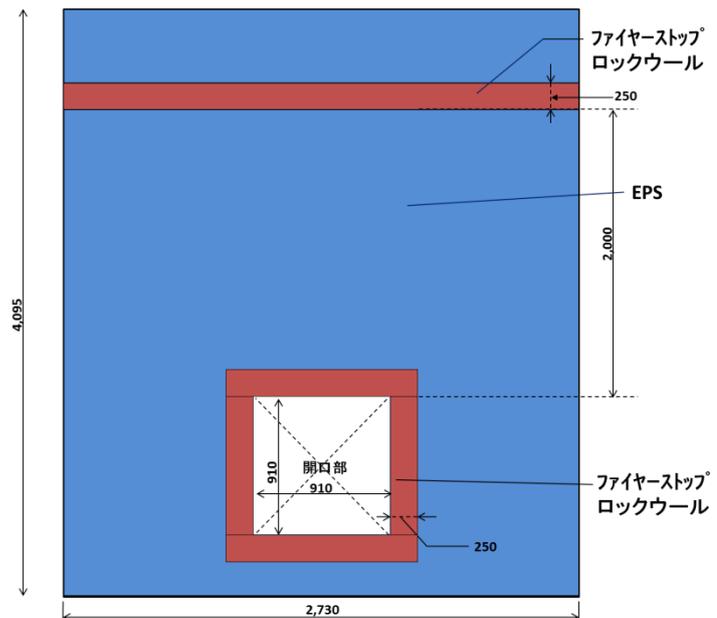


図 5-7 湿-150-FB,湿-200-FB

### 5.3.4.2 通気工法

通気工法においては、通気層内部への炎の侵入を防止するために開口部上端を補強、もしくは通気層内部における燃え拡がりを防止するために通気層内部に層間塞ぎの設置、を実施し、その効果を検証した。

通-Fe-ROは開口部周辺からの開口噴出火炎の通気層内部への侵入を防ぐためにフェノールフォームを断熱材とした通気工法(通-Fe)の開口部上端を補強したものである。図 5-8 に示す補強箇所 L 字金物を追加している。

通-E-FB は通気層内部の延焼を防止するために、通-E と同様の試験体の開口上端より 800mm 上の位置に層間塞ぎとして通気金物を設置した(図 5-9)。

通-E-RO は開口部周辺からの開口噴出火炎の侵入を防ぐために、通-E と同様の試験体の開口上端の位置に層間塞ぎとして L 字の鉄板を設置した。なお、加熱強度は 1107kW を用いて実験を行った(図 5-10)。

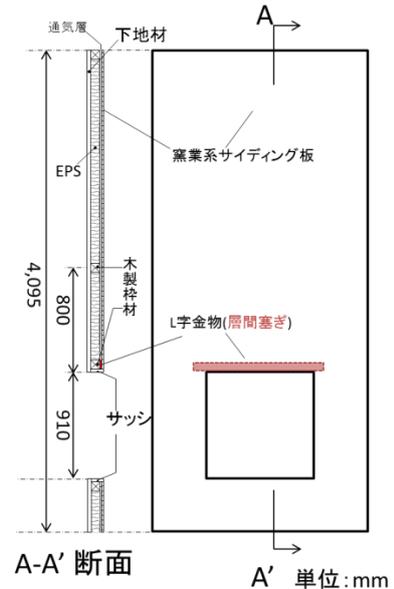
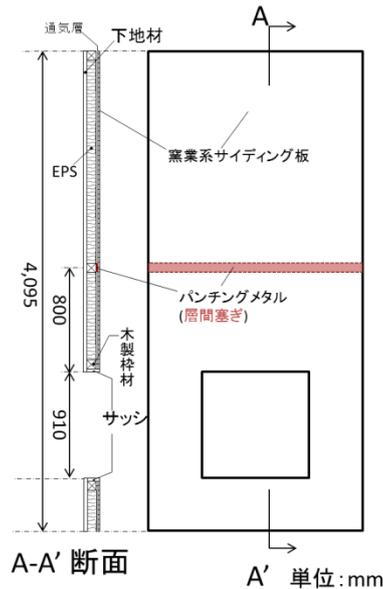


図 5-8 開口部補強箇所(通-E-RO)

図 5-9 層間塞ぎの位置(通-E-FB)

図 5-10 層間塞ぎの位置(通-E-RO)

#### 5.3.4.3 木製外装

木製外装に関しては薬剤処理を施した外装が経年劣化した場合においても十分な耐火性能を保持しているかを確認した。木-薬-劣は薬剤処理した木製外装(木-薬)を JSTM J 7001 「実大外壁等の日射熱による熱変形性及び耐久性試験方法」に基づき、人工気象室にて赤外線ランプと散水ノズル、温度制御による複合劣化促進処理を施した試験体である。

木材に難燃処理を施す際に用いる薬剤は主に水溶性であるため、外壁に用いる場合雨水などの水分の影響によって薬剤が溶脱することが知られている。そこで、本実験においては劣化条件として散水があり、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”で使用する木製外装を促進劣化させるのに十分な大きさのチャンバーを有する促進劣化試験方法として JSTM J 7001 を使用した。

試験体は表面寸法 1980×1980mm の試験体 2 体で促進劣化を行い、その後ファサード型の試験体として施工しなおした。加熱、散水、冷却のサイクルと回数は表 5-5 に示す通り JSTM J 7001 において耐久性試験を実施する際の標準的な条件を用いた。<sup>[5-3]</sup>なお、加熱強度は 1107kW で実験を実施した。

表 5-5 木-薬-劣に用いた促進劣化

1 サイクルの時間(h)		8
繰り返しサイクル数		90
加熱	合計時間(h)	360
	温度(°C)	80
冷却	合計時間(h)	360
	温度(°C)	-20
散水	合計時間(h)	15
	散水量(L/(m <sup>2</sup> ・min))	1
	合計散水量(L/m <sup>2</sup> )	900

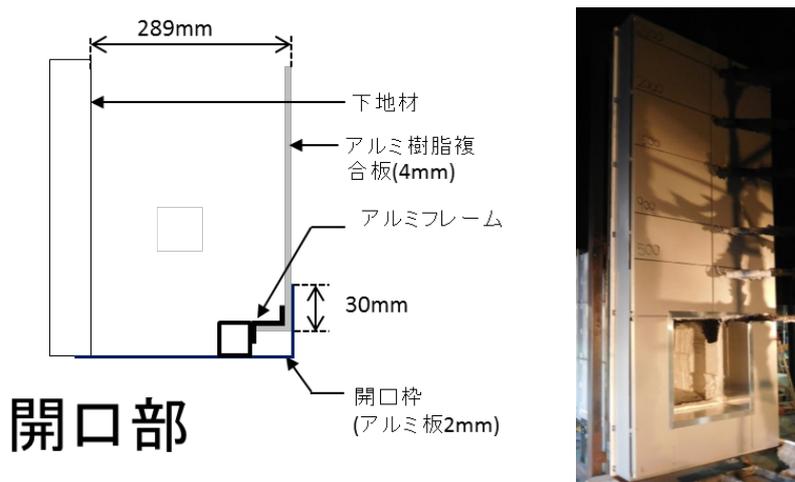
#### 5.3.4.4 金属 SWP

金属 SWP に関しては内部芯材への延焼を抑制するために開口部材及び接合部材を補強し、その効果を検証した。また、難燃処理したアルミ樹脂複合板に関しては通気層幅を大きくした場合の防火性能を検証した。

金-U-RO 及び金-N-RO は弱点部となる開口部及び目地部での燃焼を抑制する目的でそれぞれ、金-U 及び金-N のパネル接合部をセラミック製のものから塩化ビニル製のものに変更し、開口部に鉄の枠を設けた試験体となっている。

ア-難-RO は開口部破損による端部の露出を防止し、燃え広がりを抑制することを目的に難燃処理を施したポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板(ア-難)の開口枠をアルミ板(2mm)から鉄板(2mm)に変更した試験体である。なお、加熱強度は 581kW を用いた。

ア-難-300 は難燃処理を施したポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板(ア-難)の通気層幅を 100mm から 300mm(正確には 289mm)に変更した試験体である。通気層幅を 300mm にするために支持フレームを軽量なアルミ製のものに変更し、通気層の側面部と試験体上端部にアルミ樹脂複合板を施工し、通気層を塞いだ。図 5-11 に示すようにア-難と異なり開口枠のアルミ板が破損した場合に通気層内部に火炎が侵入するのを妨げるものがほとんどない状態になっている。なお、加熱強度は 1107kW を用いて実験を実施した。



開口部の収まり及び通気層の幅

試験体外観

図 5-11 ア-難-300 の試験体詳細

#### 5.3.4.5 太陽電池フィルム

太陽電池フィルムに関しては基材の燃焼を抑制する目的で開口部の補強、また延焼を防止する目的で層間塞ぎ及び庇を設置し、それぞれ効果の検証を行った。

電-板-RO は開口部破損による端部の露出を防止し、燃え拡がりを抑制することを目的に電-板の開口枠をアルミ板から鉄板に変更した試験体である。

電-ル-FB は図 5-12 に示すように太陽電池フィルムを貼りつけたルーバーの試験体(電-ル)の開口上端より 1,200mm の位置に層間塞ぎ及び庇として鉄板(厚さ 1.6mm)を通気層内部及びルーバー表面側に設置した。ルーバー表面側には庇のように 600mm 突き出した形で設置されている。



図 5-12 層間塞ぎ及び庇の設置箇所(電-ル-FB)

### 5.3.5 実験結果

それぞれの実験結果に対して燃焼フローチャートを作成し、抑制手法が有効であったかを検証した。

#### 5.3.5.1 湿式外断熱工法

難燃処理を施した木材を表面に胴縁とともに張り付けた断熱材の厚さが 50mm の試験体は加熱強度 581kW で実施した。加熱開始より 12 分ほどで表面材である木材が火炎によって燃え抜けた後に胴縁内部へ火炎が廻り、開口部上端から若干の樹脂の漏れが確認された。断熱材の厚さが 50mm と薄く、加熱強度も 581kW と小さかったため目立った燃焼には至らなかったが、表面材が損傷して燃え抜けた後は溶出した樹脂が胴縁内部もしくは噴出火炎として燃焼すると考えられる。燃え抜けるまでは目立った燃焼が確認されないことから、表面に難燃処理した木材を取り付けることは燃え拡がりを遅らせる効果があったといえる。

湿-100-P1 は加熱強度 883kW において実施したが目立った燃え拡がりが確認されなかった。実験終了後に表面材を剥がすと、内部の断熱材は開口付近において若干溶融しているのみであった。また、表面材であるモルタル層を実験終了後に測定した結果、測定箇所によっては 30mm の厚さがあり、非常に強固な表面材であったことが伺える。

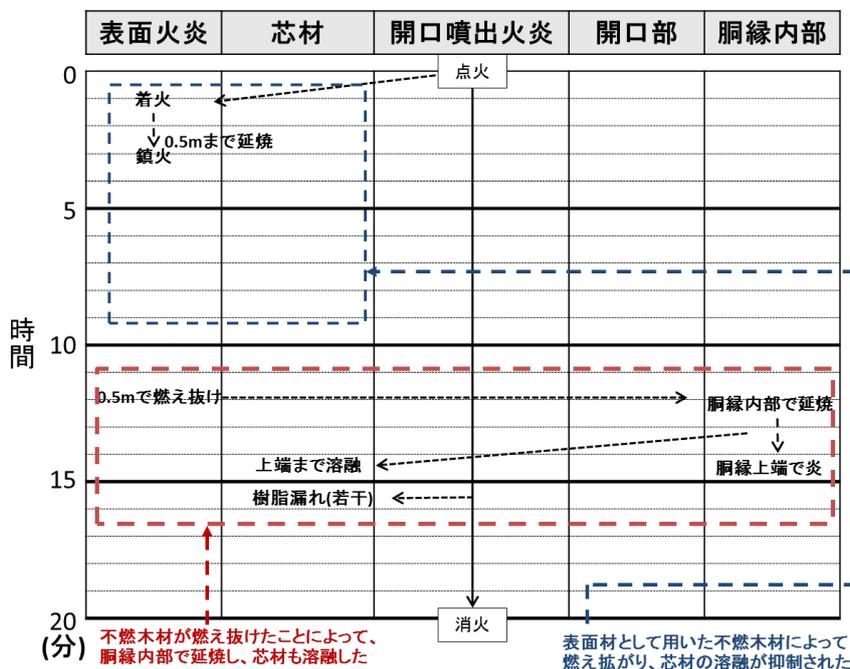
湿-100-P2 は加熱強度 1107kW において実施した。加熱初期においては湿-100-P1 同様目立った燃え拡がりは確認されなかったが、加熱開始より 5 分後に開口部上端付近の表面材が破損し、徐々に火炎の拡大が発生した。その後、表面材の破損が継続的に起こり、加熱開始より 10 分後には溶融樹脂が開口部上端より漏れ出てきた。さらに、加熱開始より 12.5

分後には開口部上端の表面材が完全に脱落し、内部断熱材が露出する形となり、内部断熱材の熔融及び開口噴出火炎の拡大がより顕著になった。実験終了後の試験体を確認すると開口上端より 1.5m 程度まで表面材が脱落しており、内部の断熱材は開口上端より 2m ほどまで熔融していた。表面材が破損するまでは湿-100-P1 同様の高い抑制効果を発揮したものの、破損後は湿-100 よりも高い外装表面温度を計測し、逆に燃え広がりを助長する形となった。適切に表面材を処置しない場合、抑制手法が逆効果になる可能性があることが確認された。

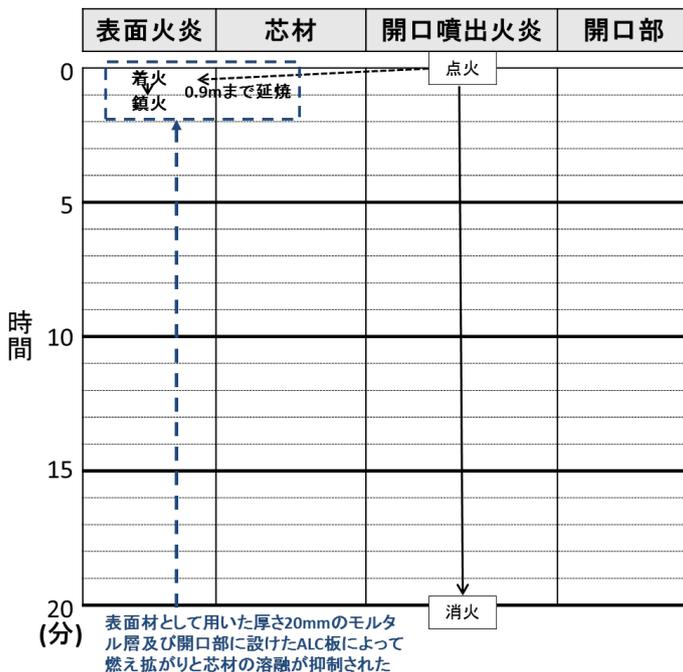
湿-150-RO は開口部まわり及び試験体上端を EFR(EPS・フェノール耐火被膜フォーム)によって補強したもので、加熱高度 883kW において実施した。同様の加熱強度で実施した湿-150 と比較すると、加熱開始より 6 分までは外装表面温度が 100~200℃低くなり、加熱初期における燃焼は抑制されているものの、その後の外装表面温度は燃え広がりが収まった湿-150 と比較して高い値を計測し、更に加熱開始より 13 分後に発生する開口部補強材の脱落によって最大温度においても湿-150 を上回り結果となった。中途半端な開口補強材は初期加熱に対して高い抑制効果を持つものの、破損時に結果として抑制手法適用前よりも悪い結果を引き起こす可能性があることが判明した。

湿-150-Fe は断熱材を EPS から EFR に変更した試験体であり、端部の処理は突き付けとなっており、加熱強度 883kW で実験を実施した。EFR は EPS と異なりあまり熔融しないため、同様の加熱強度で実施した湿-150 と比較すると、加熱開始より 7 分までは外装表面温度はそれほど上昇しないが、開口部付近の表面材が脱落后は開口上端より 0.9m 付近までの高さで外装表面温度が上昇した。表面材の破損がほとんどない試験体上方では燃焼も外装表面温度の上昇もそれほど見られなかった。断熱材を熔融が起こらず、難燃性も高いものに変更した場合、燃焼抑制にかなりの効果を発揮し、表面材が若干破損した場合においても熔融がないためそれほど大きな火炎の拡大は発生しなかった。既往の研究<sup>[5-2]</sup>のとおり、熱可塑性樹脂を熱硬化性樹脂に変更することは燃焼抑制にはかなり有効な手法であることが確認された。

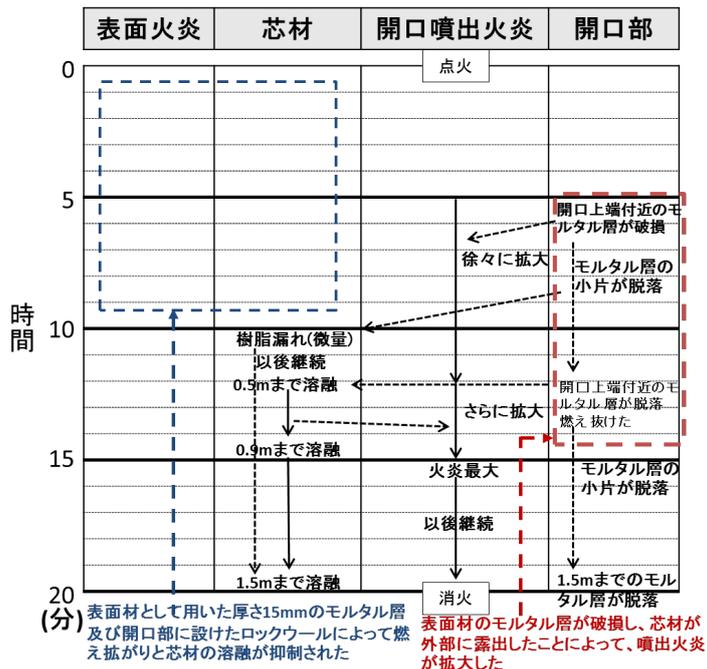
湿-150-FB 及び湿-200-FB はそれぞれ断熱材の厚さが 150mm 及び 200mm の試験体に対して、試験体の幅を 1820mm→2730mm に広げ、開口部まわり及び開口上端より 2m 上に幅 250mm のロックウールを施工した試験体となっている。いずれの試験体も加熱初期において若干の外装表面温度の上昇を確認したが、それ以後は安定して低い値を示し、かなりの抑制効果を発揮した。ただ、150mm 厚の試験体においては加熱開始より 10 分後に火炎の拡大が確認された。実験終了後に観察すると外装表面に直径 0.5m ほどの大きな穴が開いているのが確認された。これは外装表面を測定している熱電対が外装表面材と接触し、実験中に穴をあけてしまったものと考えられる。実験終了後に表面材をとり外すと、開口上端より 2m 上のロックウールより上においては試験体の両脇で多くの EPS が熔融せずに残っていることが確認された。そのため、既往の研究<sup>[5-2]</sup>の検討にある通り、ファイヤーストップとしてロックウールを施工することはかなりの抑制効果を発揮したといえる。



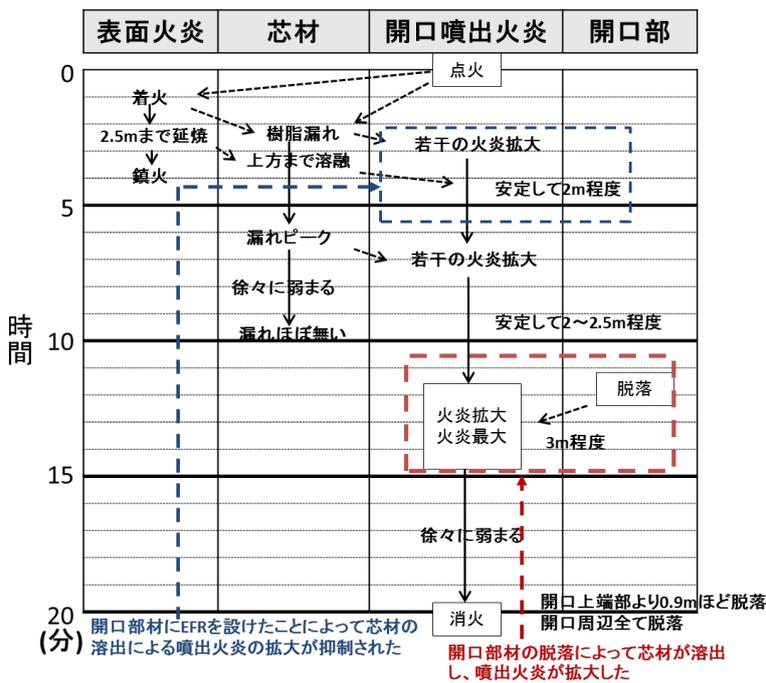
湿-50-W 加熱強度 581kW



湿-100-P1 加熱強度 883W



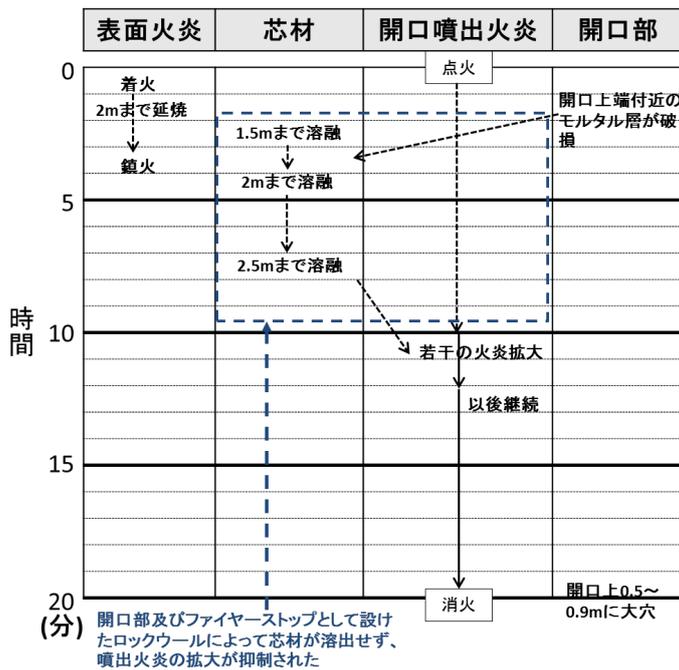
湿-100-P2 加熱強度 1107kW



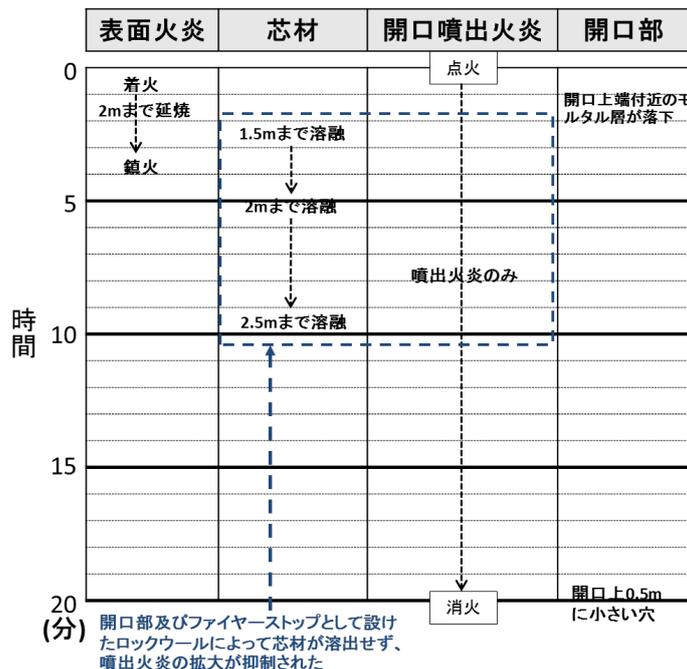
湿-150-RO 加熱強度 883kW



湿-150-Fe 加熱強度 883kW



湿-150-FB 加熱強度 1107kW



湿-200-FB 加熱強度 1107kW

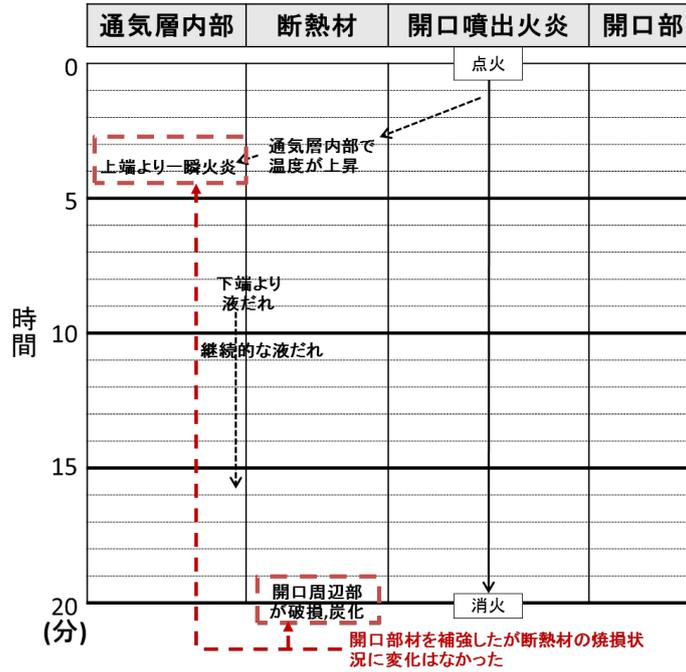
図 5-13 燃焼フローチャート(湿式外断熱)

### 5.3.5.2 通気工法

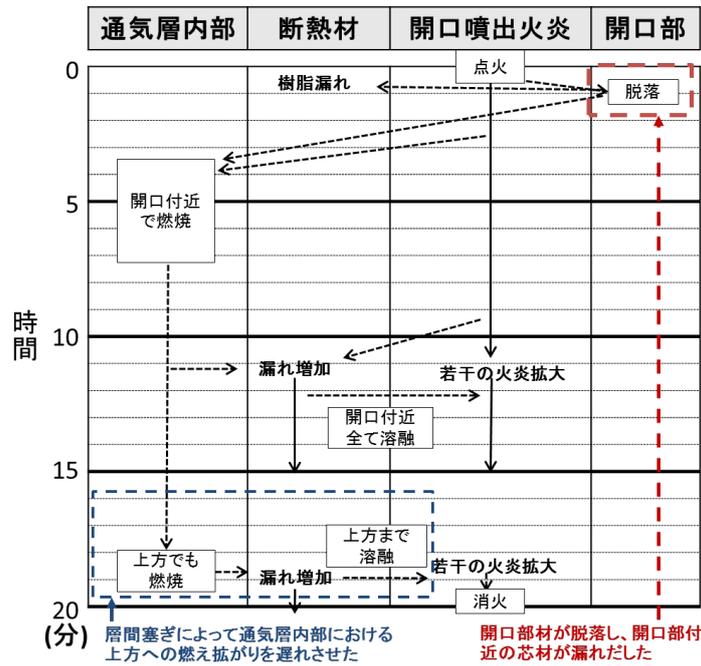
開口部を補強した通-Fe-RO においては通-Fe と比べて大きな変化は見られず、抑制効果は得られなかった。試験終了後外装材を取り外して断熱材の焼損状況を確認すると、通-Fe と同様開口部周辺の断熱材が炭化及び焼損していた。

通気層内部に層間塞ぎとして通気金物を設置した通-E-FB は通気金物を設置した高さより上においては通気層内部での燃焼を大幅に遅らせられた。通-E においては通気層内部の試験体上端まで燃え広がるのに加熱開始より 10 分かかったのに対し通-E-FB では 18 分ほどかかった。

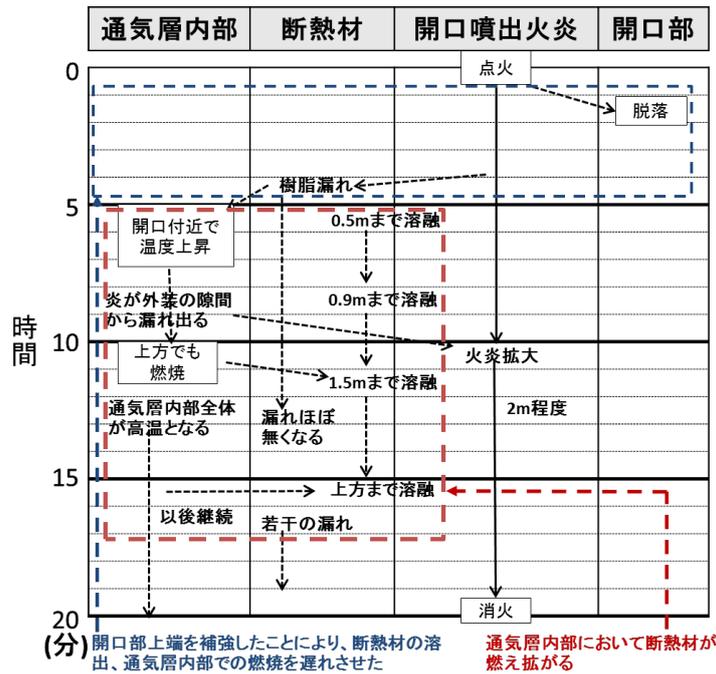
通-E-RO は加熱強度 1107kW で実施したため単純に比較はできないが、加熱強度が 1107kW にも関わらず、開口部付近での通気層内部の延焼時間を遅らせることができた。しかし、通気層上方への燃え拡がりにはそれほど遅らせられなかった。通気層内部の初期燃焼は抑制できるものの、通気層内部における燃え拡がりには抑制効果が小さいと考えられる。



通-Fe-RO 加熱強度 581kW



通-E-FB 加熱強度 883W



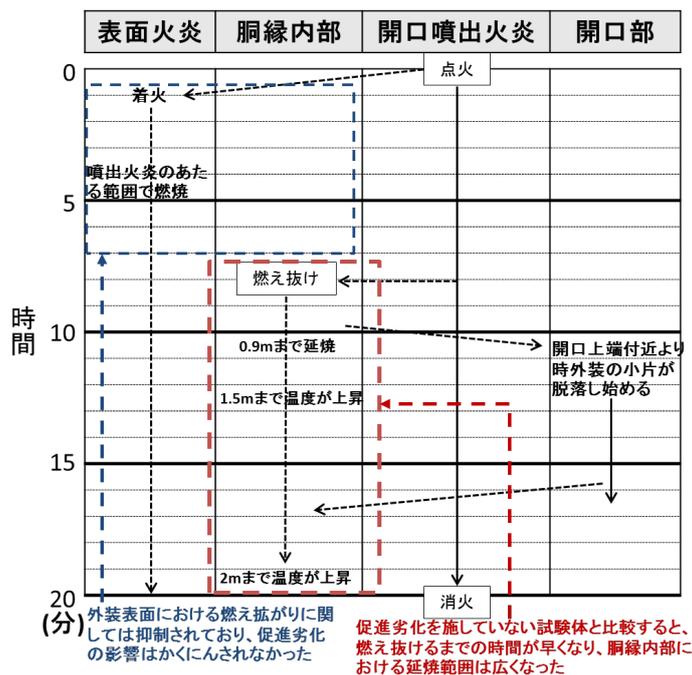
通-E-RO 加熱強度 1107kW

図 5-14 燃焼フローチャート(通気工法)

### 5.3.5.3 木製外装

促進劣化試験を施した薬剤処理木材の試験体は目に見える燃え広がりには発生せず、薬剤処理のみを施した試験体と比べて燃焼性状に大きな差は見られなかった。しかし、胴縁内部への燃え抜け時間及び通気層内部の温度を比較すると促進劣化を施した試験体の方が 2 分ほど早く燃え抜け、開口上端より 2m 上においては 300℃ほど高い温度を計測した。

JSTM J 7001 の試験方法で促進劣化させた場合、薬剤処理した木材は燃え抜け等開口噴出火炎に対して劣化していない場合と比較して防火性能は低下するが、燃え広がり性状に関してはそれほど大きな違いが確認されなかった。



木-薬-劣 加熱強度 1107kW

図 5-15 燃焼フローチャート(木-薬-劣)

### 5.3.5.4 金属 SWP

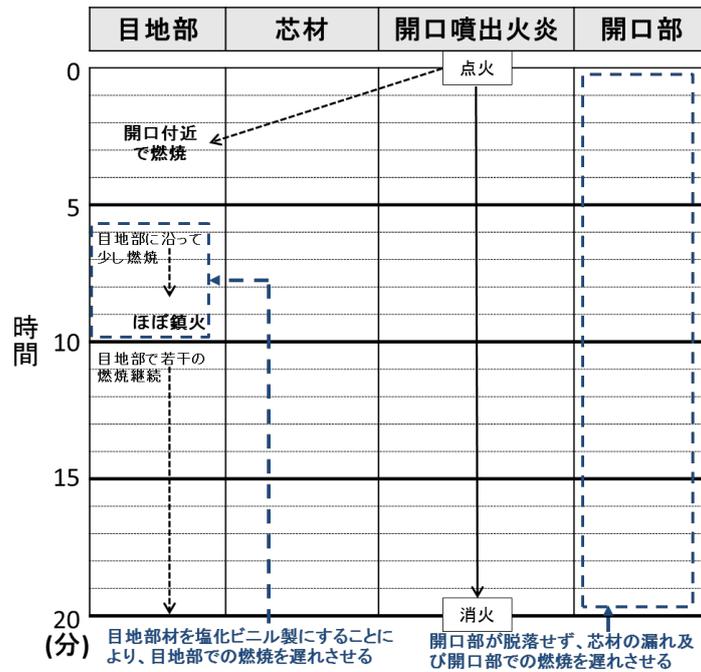
開口廻りを鉄板で囲い、端部処理をセラミック製から塩化ビニル製に変更した金-U-RO及び金-N-RO に関しては開口廻りを鉄板で覆ったため、開口部からの樹脂の落下はなかったが、樹脂が落下しなかったため目地部における燃焼が試験終了まで継続した。実験終了後表面材を剥がすと開口上端より 0.9m の高さまでの断熱材が炭化していることが確認された。接合部においては 1.5m の高さまで炭化していることが確認された。樹脂の落下が発生しなかったため、目地部での燃焼が継続する結果となったが燃え拡がり性状に関しては加熱強度 581kW で実施したため大きな差は現れなかった。

開口廻りの枠材をアルミ板から鉄板に変更したアルミ樹脂複合板(ア-難-RO)においては、開口部の損傷とともに開口部上端に着火したア-難とは異なり、目地部より燃焼が始まった。開口部上端においてはア-難より 5 分ほど遅れた加熱開始より 9 分に燃焼が確認され、その後は多少の樹脂が溶融落下し、目地部において燃焼が確認されるのみで大きな変化は見られなかった。ア-難においては実験終了後開口部上端付近が激しく焼損し裏面のアルミ板まで損傷していたのに対し、ア-難-RO においては開口部上端付近の外装表面のアルミが若干焼損しているのみであった。

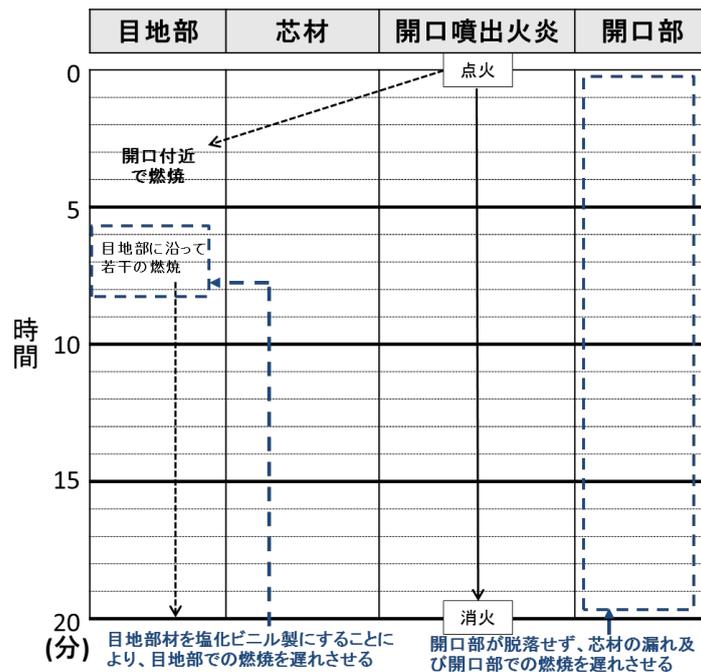
通気層の幅を 300mm に変更した試験体(ア-難-300)においては、開口上端のアルミ板の破損と同時に開口噴出火炎の大部分が通気層内部に侵入し、加熱開始より 3 分で通気層の上端まで炎が到達した。その後、通気層内部において激しく焼損し、加熱開始より 5 分で開口より上方のパネルをほぼ焼損させた。通気層内部温度においてはア-難と比較して非常に

高い温度を計測したが、外装表面温度に関しては通気層幅が 100mm のア・難の試験体の方が高温を計測した。

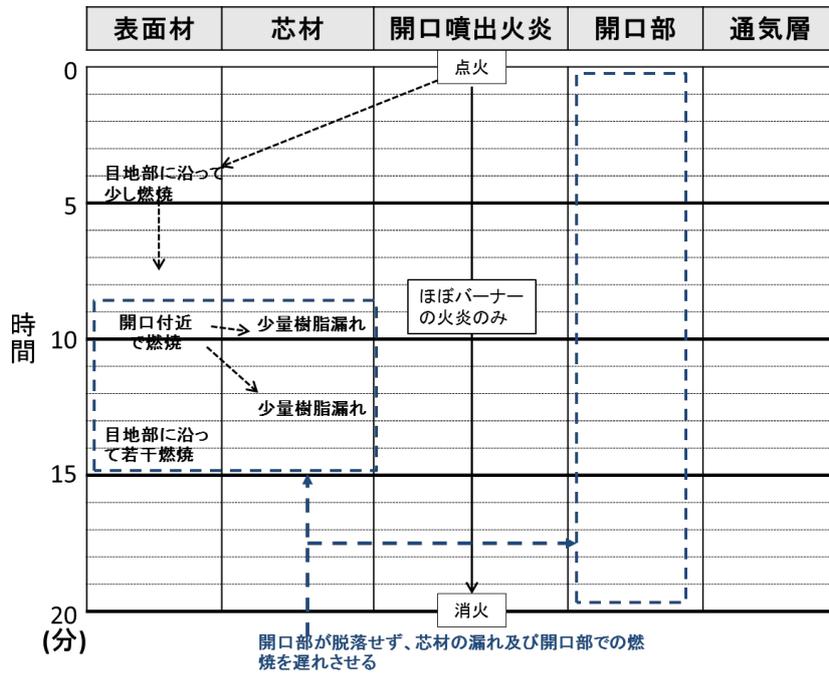
開口廻りの処置が適切でない場合、通気層内部に開口噴出火炎が直接入り、難燃処理されたポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板においても煙突効果によって激しく損傷することが確認された。



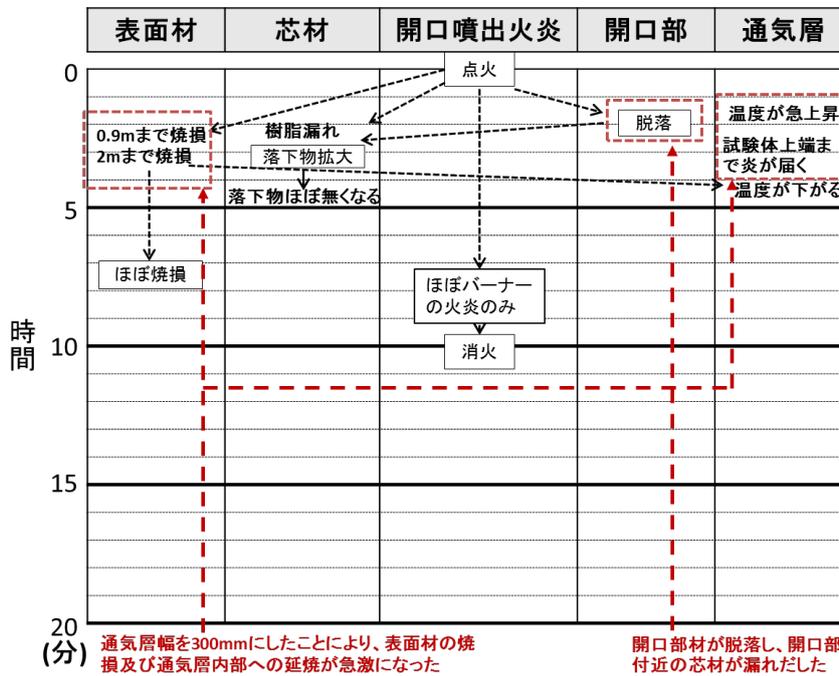
金-U-RO 加熱強度 581kW



金-N-RO 加熱強度 581W



ア-難-RO 加熱強度 581kW



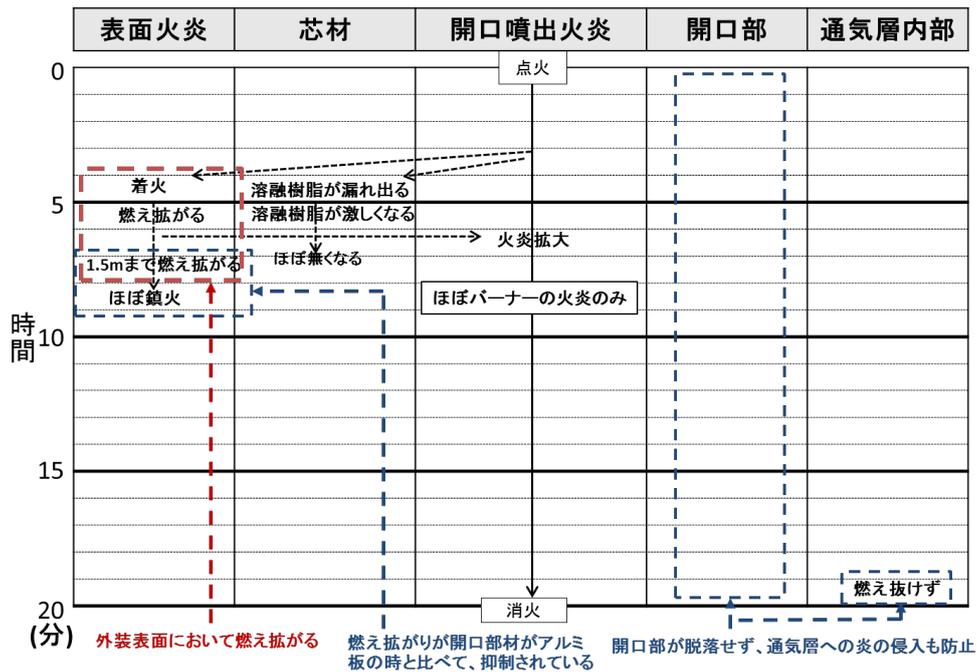
ア-難-300 加熱強度 1107kW

図 5-16 燃焼フローチャート(金属 SWP)

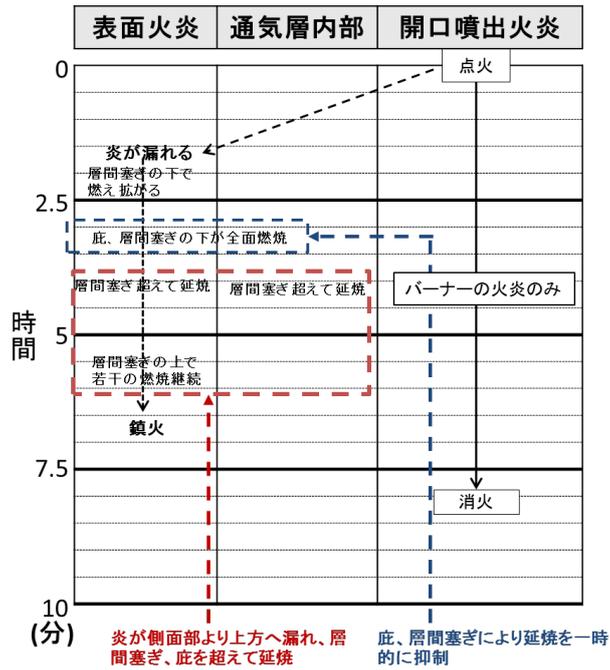
5.3.5.5 太陽電池フィルム

開口廻りの枠材をアルミ板から鉄板に変更した太陽電池フィルムを貼り付けたアルミ樹脂複合板(電-板-RO)においては、開口部の損傷とともに開口部上端及び外装表面の太陽電池フィルムに着火した電-板とは異なり開口部の損傷がないため太陽電池フィルムの着火により燃焼が始まった。加熱開始より4分ほどで壁面の太陽電池フィルムに着火し、基材であるアルミ樹脂複合板を損傷させ溶融樹脂を落としながら燃え広がったが、電-板と異なり着火後3分ほどで試験体上端まで燃え広がる前に燃え止まった。電-板においては実験終了後開口部上端付近が激しく焼損し裏面のアルミ板まで損傷していたのに対し、電-板-ROにおいては開口部上端付近の外装表面のアルミが若干焼損しているのみで燃え抜けてはいなかった。

通気層内部に層間塞ぎを取り付け、外装表面に庇を設置した太陽電池フィルムを貼り付けたルーバーの試験体(電-ル-FB)においては、加熱開始より2分ほどで燃え抜けるまでは抑制手法を施していない試験体(電-ル)と同様であったが、その後庇の脇から炎が漏れて庇を超えて延焼するまでに2分ほどの時間を要し、燃え広がりを若干抑制した。



電-板-RO 加熱強度 581kW



電-ル-FB 加熱強度 1107W

図 5-17 燃焼フローチャート(太陽電池フィルム)

## 5.4 第5章のまとめ

可燃性外装に対し燃え拡がりに対する抑制手法を検討し、いくつかの方法に関しては実験によって抑制手法の効果の検証を行い、以下の知見を得た。

### 1) 湿式外断熱工法

不燃性の木材を表層部に施工するもしくは表面材のモルタル層を厚くすれば、噴出火炎によって表面材が大きく破損しない限り、燃え拡がりを十分抑制できる。

開口部廻りの補強もしくはファイヤーストップの設置は、噴出火炎によって補強材が脱落しない場合は燃え拡がりの抑制に十分な効果を発揮する。

断熱材を耐火性の高いものにし熔融を抑えれば、表面材が破損した場合に破損部分で若干燃え拡がるが、十分燃え拡がりを抑制できる。

### 2) 通気工法

開口噴出火炎の通気層内部への侵入を防止する目的で開口部上端を補強することは、初期の通気層内部への燃え拡がりを少し遅れさせられるものの、通気層内部の燃え拡がりを十分には抑制できない。

通気層内部に層間塞ぎを設置することは通気層内部の燃え拡がりを遅れさせられ、燃え拡がりを抑制できる。

### 3) 木製外装

薬剤処理を施せば、JISM J 7001 の標準的な条件の耐久性試験を用いて木製外装を促進劣化させても、十分に燃え広がりを抑制できる。

4) 金属 SWP

開口部をアルミ枠から鉄枠に変更すれば、内部断熱材の落下及び開口部付近での焼損を抑制できるが、より強い加熱強度での検証が必要である。

アルミ樹脂複合板において、芯材に難燃処理を施し、通気層幅を 100mm 程度までに抑えれば十分燃え広がりを抑制できる。

5) 太陽電池フィルム

太陽電池フィルムを貼りつけたルーバーにおいて、層間塞ぎ及び庇の設置が燃え広がりを遅延させたが、庇の脇から炎が漏れて延焼した。脇部分にも庇をつけ、庇より下からの炎を完全に遮断するように設計すれば、燃え広がりを抑制できると予測される。

## 第 5 章 参考文献

[5-1] Bre global: A comparison of BS8414-1 & -2, draft DIN 4102-20, ISO13785-1 & -2, EN 13823 and EN ISO 11925-2,

[5-2] Dipl.-Phys. I. Kotthoff : Fire performance of external thermal insulation composite systems (ETICS) in buildings, 4th Global insulation conference in Prague,2009

[5-3] 荻原伸治：建築試験センター規格(JSTM)紹介環境関係その 1 -JSTM J 7001-、建材試験情報 2004 年 10 月号

[http://www.itccm.or.jp/library/itccm/shiken/hinsei/kankyo/2004-10\\_J7001.pdf](http://www.itccm.or.jp/library/itccm/shiken/hinsei/kankyo/2004-10_J7001.pdf)

## 第6章 JIS A 1310 における防火性能評価基準の提案

### 6.1 第6章の目的

第2章において既存のファサード試験における評価項目より“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において評価する項目を検討した結果

- 外装表面及びファサード内部における燃え拡がり
- 1階上階への延焼
- 火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答
- 隣棟への延焼加害性

の4つが評価項目として挙げられた。

また、第4章で“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いた実験により、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における燃焼チャンバー内部の加熱強度の違いが、可燃性外装の上階延焼及び壁面における燃え拡がりに著しい影響を与えることが明らかとなった。

本章では、第3章及び第4章の結果を踏まえて、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”に上記4つの評価項目を適用する場合に必要な条件及び基準について検討し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準を構築することを目的とした。

### 6.2 燃え拡がりの評価基準

第3章において、燃え拡がりが評価可能な火源に関して検討した結果、最大でも 1011kW 以下が望ましく、開口上端より 2.5m 上の外装表面温度で燃え拡がりを評価する場合には最大でも 979kW 以下である必要があり、評価基準に関しては 500～600℃の温度もしくは 20kW/m<sup>2</sup>以上の熱流束の 30 秒以上の継続的な計測が妥当であると結論付けた(表 6-1)。

表 6-1 燃え拡がりの評価高さ及び評価基準値(案)

加熱強度 Q(kW)	評価基準		
	評価高さ	温度	熱流束
647 ≤ Q < 769	1.5m, 2m, 2.5m, 試験体上端	500～600℃ 継続的な燃焼 (30 秒以上)	20kW/m <sup>2</sup> 継続的な燃焼 (30 秒以上)
769 ≤ Q < 881	2m, 2.5m, 試験体上端		
881 ≤ Q < 979	2.5m, 試験体上端		
979 ≤ Q < 1011	試験体上端		
1011 ≤ Q < 1107	望ましくない		

第4章において、実際の可燃性外装を対象に“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を実施し、湿式外断熱工法、木製外装、金属 SWP においては防火性能に明確に差があると判断できる試験体を選別して実験を実施した。表 6-1 より加熱強度 1011kW 以上においては燃え広がり性状を評価するのに望ましくないことから、加熱強度 581kW, 835kW, 883kW で実施した実験結果を用いた。加熱強度 581kW, 835kW, 883kW で実験を実施した場合、湿式外断熱工法の断熱材の厚さの違い(100mm と 200mm)、木製外装の難燃処理の有無、アルミ樹脂複合板の芯材の難燃処理の有無を表 6-1 の条件で判別できるかどうかを検討すると、表 6-2 のようになる。表中の“○”は、防火性能の高い試験体(断熱材の厚さが 100mm の湿式外断熱工法、難燃処理を施した木製外装、芯材を難燃処理したアルミ樹脂複合板)において表 6-1 の評価基準を満たし、防火性能の低い試験体(断熱材の厚さが 200mm の湿式外断熱工法、無処理の木製外装、芯材がポリエチレンのアルミ樹脂複合板)において表 6-1 の評価基準を満たさないことを示し、表中の“×”は防火性能の高い試験体と低い試験体において表 6-1 の評価基準で区別できないことを示す。なお、表 6-1 において評価基準の温度は 500~600℃と設定してあるが、ここでは暫定的に評価基準となる温度を 500℃もしくは 600℃と設定し、加熱強度 581kW における実験結果は表 6-1 の  $647 \leq Q < 769$  の条件で判定した。ポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板(ア-無)を対象として実施した加熱強度 835kW の実験においては実験開始より 7 分後に加熱を停止しているが、加熱開始より 7 分間の測定値を用いて評価基準値と比較した。

加熱強度 581kW においては、開口上端より 1.5m, 2m の高さにおいて 500℃を 30 秒以上継続するかどうかで湿式外断熱、木製外装、アルミ樹脂複合板の全ての可燃性外装において燃え広がり性状の差が判断できた。

加熱強度 835kW においては木製外装の試験体で実験を実施していないものの、開口上端より 2m の高さにおいて 500℃及び 600℃、開口上端より 2.5m の高さにおいて 500℃を 30 秒以上継続するかどうか、もしくは試験体上端の熱流束で受熱量が  $20 \text{ kW/m}^2$  以上を 30 秒以上継続するかで湿式外断熱、アルミ樹脂複合板の可燃性外装において燃え広がり性状の差が判断できた。

加熱強度 883kW においては、開口上端より 2.5m の高さにおいて 500℃を 30 秒以上継続するかどうかで湿式外断熱、木製外装、アルミ樹脂複合板の全ての可燃性外装において燃え広がり性状の差が判断できた。

第3章で検討した表 6-1 の条件によって燃え広がり性状を評価可能であることが確認されたが、加熱強度が低い場合は開口上端より 2.5m の高さの噴出火炎と比べて相対的に高い測定位置においては燃え広がり性状の差が確認できないことが判明した。また、評価基準の温度を 600℃に設定した場合、可燃性外装の種類によっては燃え広がり性状の差が確認できないことが判明した。

以上のことから、表 6-3 に示す加熱強度及び評価基準が燃え拡がりの評価基準として望ましいといえる。

表 6-2 燃え拡がりの評価基準において試験体を区別可能な  
外装表面温度継続時間及び試験体上端熱流束

加熱強度	実施試験体	500℃を 30 秒以上継続					600℃を 30 秒以上の継続					20kW/m <sup>2</sup> を 30 秒以上継続
		0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	
581 kW	湿			○	○	×			×	×	×	×
	木			○	○	×			×	×	×	○
	ア			○	○	○			○	○	×	○
835 kW	湿				○	○					○	×
	ア				○	○					○	○
883 kW	湿					○					×	×
	木					○					×	×
	ア					○					○	○

※湿：湿式外断熱工法、木：木製外装、ア：アルミ樹脂複合板

表 6-3 燃え拡がりの評価基準

実験による確認	加熱強度 Q(kW)	評価基準	
		評価高さ	温度、熱流束
確認済み	647 ≤ Q < 769	1.5m, 2m	500℃、継続的な燃焼(30 秒以上)
確認済み	769 ≤ Q < 881	2m, 2.5m	
確認済み	881 ≤ Q < 979	2.5m	
未確認	979 ≤ Q < 1011	試験体上端	20kW/m <sup>2</sup> 、継続的な燃焼(30 秒以上)
範囲外	1011 ≤ Q < 1107	望ましくない	

### 6.3 上階延焼の評価

第3章において、上階延焼の評価可能な火源に関して検討した結果、最低でも782kW以上が望ましく、表6-4に示す加熱強度と評価高さにおいて上階延焼を評価し、評価基準に関しては600℃以上の温度もしくは20kW/m<sup>2</sup>以上の熱流束の2分間以上の継続的な測定が妥当であると結論付けた。

表 6-4 上階延焼の評価高さ及び評価基準値(案)

加熱強度 Q(kW)	評価基準		
	評価高さ	温度	熱流束
Q < 782	望ましくない	600℃ 2分間以上	20kW/m <sup>2</sup> 2分間以上
782 ≤ Q < 881	1.5m		
881 ≤ Q < 967	1.5m, 2m		
967 ≤ Q < 979	2m		
979 ≤ Q < 1029	2m, 2.5m		
1029 ≤ Q < 1078	2m, 2.5m, 試験体上端		
1078 ≤ Q ≤ 1107	2.5m, 試験体上端		

第4章において、実際の可燃性外装を対象に“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を実施し、湿式外断熱工法、木製外装、金属SWPにおいては防火性能に明確に差があると判断できる試験体を選別して実験を実施した。表6-4より加熱強度782kW以下においては上階延焼を評価するのに望ましくないことから、加熱強度835kW, 883kW, 1107kWで実施した実験結果を用いた。加熱強度835kW, 883kW, 1107kWで実験を実施した場合、湿式外断熱工法の断熱材の厚さの違い(100mmと200mm)、木製外装の難燃処理の有無、アルミ樹脂複合板の芯材の難燃処理の有無を表6-4の条件で判別できるかどうかを検討すると、表6-5のようになる。表中の“○”は、防火性能の高い試験体(断熱材の厚さが100mmの湿式外断熱工法、難燃処理を施した木製外装、芯材を難燃処理したアルミ樹脂複合板)において表6-4の評価基準を満たし、防火性能の低い試験体(断熱材の厚さが200mmの湿式外断熱工法、無処理の木製外装、芯材がポリエチレンのアルミ樹脂複合板)において表6-4の評価基準を満たさないことを示し、表中の“×”は防火性能の高い試験体と低い試験体において表6-4の評価基準で区別できないことを示す。ポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板(ア-無)を対象として実施した加熱強度835kWの実験においては実験開始より7分後に加熱を停止しているが、加熱開始より7分間の測定値を用いて評価基準値と比較した。

加熱強度835kWにおいては木製外装の試験体で実験を実施していないものの、開口上端より1.5mの高さにおいて湿式外断熱、アルミ樹脂複合板の可燃性外装において上階延

焼性状の差が判断できた。

加熱強度 883kW においては、開口上端より 2m の高さにおいて湿式外断熱、木製外装、アルミ樹脂複合板の全ての可燃性外装において上階延焼性状の差が判断できた。

加熱強度 1107kW においては、開口上端より 2.5m の高さ及び試験体上端の熱流束計において湿式外断熱、木製外装では上階延焼性状の差が判断できたが、アルミ樹脂複合板では難燃処理を施した試験体において評価基準を上回る値を測定し、上階延焼性状の差が評価基準として表れないと判断される。

第3章で検討した表 6-4 の条件によって上階延焼をある程度評価可能であることが確認されたが、加熱強度が強い場合はアルミ樹脂複合板において、難燃処理を施したアルミ樹脂複合板であっても上階延焼の評価基準値を上回ることが確認された。

以上のことから、加熱強度 967~1078kW の範囲においては実験による確認がなされていないものの、表 6-6 に示す加熱強度及び評価基準が上階延焼の評価基準として望ましいといえる。

表 6-5 上階延焼の評価基準において試験体を区別可能な外装表面温度継続時間及び試験体上端熱流束

加熱強度	実施試験体	600°Cを2分以上の継続					20kW/m <sup>2</sup> を2分以上継続
		0.5m	0.9m	1.5m	2m	2.5m	
835 kW	湿			○			
	ア			○			
883 kW	湿			×	○		
	木			○	○		
	ア			○	○		
1107 kW	湿					○	○
	木					○	○
	ア					×	×

※湿：湿式外断熱工法、木：木製外装、ア：アルミ樹脂複合板

表 6-6 上階延焼の評価基準

実験による確認	加熱強度 Q(kW)	評価基準	
		評価高さ	温度、熱流束
範囲外	$Q < 782$	望ましくない	
確認済み	$782 \leq Q < 881$	1.5m	600°C、2分間以上
確認済み	$881 \leq Q < 967$	2m	
未確認	$967 \leq Q < 979$	2m	

未確認	$979 \leq Q < 1029$	2m, 2.5m	
未確認	$1029 \leq Q < 1078$	2m, 2.5m	
		試験体上端	20kW/m <sup>2</sup> 、2 分間以上
確認済み	$1078 \leq Q \leq 1107$	上階延焼を判断できない	

## 6.4 火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答の評価

火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答を評価するためには、建築ファサードが実火災で被る損傷を試験において再現することが必要となる。これはファサード試験に要求される開口噴出火炎性状が十分であれば満たされる条件といえる。

第 3 章において、

- 開口噴出火炎が開口部に与える影響
- 開口噴出火炎の発熱量

を加熱強度の検討項目として考えた結果、それぞれ加熱強度が 520kW、830kW を超えるのが望ましい条件とした。

第 4 章において、実際の可燃性外装を対象に“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を実施し、加熱強度が 581kW では湿式外断熱工法、木製外装、金属 SWP、異なる燃焼性状を示し、樹脂塗材においては火災事例を三軒できていないことから加熱強度として妥当でないと結論付けられた。また、開口噴出火炎の発熱量より検討した加熱強度 830kW を超えた場合においても、湿式外断熱工法においては燃焼性状が加熱強度の影響を受け、883kW 以上が望ましい試験条件であるとした(表 6-7)。

表 6-7 加熱強度が燃焼性状に与える影響

(×:燃焼性状が異なる,○:燃焼性状が同じ,―:実施実験無し)

	581kW	835kW	883kW	1107kW
湿式外断熱工法	×	×	○	○
通気工法	○	○	○	―
木製外装	×	―	○	○
金属 SWP	×	○	○	○
太陽電池フィルム	○	―	―	○
樹脂塗材	×	―	○	―
樹脂サイディング	○	―	―	○

火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答の評価基準として、既存のファサード試験を例に挙げると SP FIRE 105<sup>[6-1]</sup>においては噴出火炎が当たる範囲における壁面の損傷状況を、DIN4102-20<sup>[6-2]</sup>及び ONORM B 3800-5<sup>[6-3]</sup>においては消防活動の障害となる

落下物(燃焼落下物を含む)を評価基準として用いている。噴出火炎の損傷状況も防火性能を測る上では重要であるが、建築ファサードの力学応答として実火災時の被害に直結するのは外壁面からの落下物と考えられる。2012年にトルコのポラットタワーにおいて起きた火災においてはアルミ樹脂複合板の外装が燃焼した際の落ちた大量の落下物によって周辺道路が通行止めとなり、火災による被害を拡大した。もしも落下物が消防活動中の消防隊員に落下した場合、非常に危険である。

日本においては労働安全衛生法第42条の規定に基づく保護帽の規格に適合したものが用いられ、衝撃吸収性試験として5kgの重りを1m上の高さから落下させる試験が用いられている。また、オーストリアの試験(ONORM B 3800-5)<sup>[6-3]</sup>においては0.4m<sup>2</sup>以上、もしくは5kg以上の落下物を評価の対象としている。

以上のことより、5kg以上の落下物が落ちた場合は危険であると判断できる。

## 6.5 隣棟への延焼加害性評価

第3章において、隣棟への延焼加害性評価を行うためには、ファサード試験に要求される開口噴出火炎性状が十分であることが必要であるとした。また、可燃性外装が燃え広がり、大規模の火災へと進展した場合は壁面における燃焼が巨大な輻射源となり隣棟へ類焼するため、可燃性外装の燃え広がり性状も同時に評価する必要がある。

第3章において、

- 開口噴出火炎が開口部に与える影響
- 開口噴出火炎の発熱量

を加熱強度の検討項目として考えた結果、それぞれ加熱強度が520kW、830kWを超えることを条件とし、表6-7より加熱強度が可燃性外装の燃焼性状に影響を与えないためには加熱強度883kW以上が望ましいと判断した。また、6.2より燃え広がりの評価においては加熱強度1011kW以下が望ましいと結論付けた。

以上より、隣棟への延焼加害性評価を行うためには、883kW～1011kWの範囲の加熱強度を用いるのが望ましいと言える。

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においては図6-1に示すファサード表面より2m離れた対向面の①、②、③において入射熱流束を測定する。

3.3で実施した不燃性外装を用いた場合の噴出火炎の実験においては、図6-1に示すように、外装表面より2m離れた対向面において、開口部中心(A)、開口上端より0, 500, 900, 1500, 2000, 2500mmの位置(①～⑥)に熱流束計を設置し、対向面への受熱量を測定した。

この実験においては、燃焼チャンバー内部のプロパンガスの流量を201→403→670→806 l/minに5分ごとに上昇させており、それぞれ流量における加熱強度は340kW, 647kW, 940kW, 1107kWとなっており、対向面における受熱量の測定結果は図6-2に示す通りとなる。燃焼チャンバー内部からの輻射熱も受ける開口部周辺の熱流束計(A, ①)において最も



加熱強度 883kW～1011kW の範囲内においては、加熱強度 883kW で可燃性外装を対象として実験を実施し、図 6-1 に示す①、③、④、⑤において入射熱流束を測定した。なお、開口上端より 90cm 上(②)においては熱流束計の不良により、測定に失敗した。不燃性外装を用いた場合の最大値を表 6-8 に、経時変化を図 6-3 に示す。時間の経過とともに入射熱流束が上昇し、安定するまでに時間がかかる様子が確認できる。これは、開口噴出火炎によって加熱された周辺物からの放射熱が徐々に大きくなるためと考えられる。

表 6-8 不燃性外装を用いた場合の対向面における最大入射熱流束

加熱強度	最大入射熱流束(kW/m <sup>2</sup> )				
	①	②	③	④	⑤
883kW	15.1	測定不良	9.6	5.8	3.8

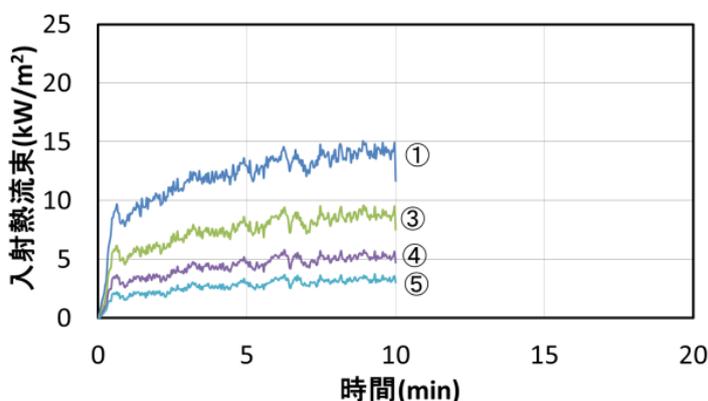


図 6-3 不燃性外装を用いた場合の対向面における入射熱流束の経時変化

実際の建築物においては、建築基準法第2条により隣地境界線から1階においては3m以下、2階以上においては5m以下の距離を延焼のおそれのある部分とし、延焼のおそれのある部分においては防火戸などの防火設備を設ける必要がある。

開口部の上半分から開口噴出火炎が 500℃まで減衰するまでの高さを主な輻射源として想定した場合、幅 0.91m、高さ 1.785m の輻射源となり、輻射源中心から 2,3,5m 離れた位置の形態係数はそれぞれ 0.11648, 0.53809, 0.020263 となる。仮に試験体上端まで燃え広がった場合は幅 0.91m、高さ 3.185m の輻射源となり、輻射源中心から 2,3,5m 離れた位置の形態係数はそれぞれ、0.163426, 0.86125, 0.034544 となる(表 6-9)。

2m の位置における形態係数との比率より 3m の位置においては測定値を 0.5 倍し、5m 離れた位置においては測定値を 0.2 倍するとその位置における輻射熱がおおよそで計算できる。

隣棟として木造の建物を想定すると、木材の限界着火熱流束は 10kW/m<sup>2</sup> であるため 1 階であれば 20kW/m<sup>2</sup>、2 階以上であれば、50kW/m<sup>2</sup> 以下となる必要がある。また、木材が着

火するまでには15 kW/m<sup>2</sup>において4分ほどかかることより、10kW/m<sup>2</sup>以上の値を4分以上計測した場合に隣棟延焼する危険性が高まると判断できる。

1階において火災が発生した場合、開口上端より1,500mm上の高さである③は建物によっては1階層に含まれる可能性があることから“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においては①, ②, ③の全ての高さにおいて20kW/m<sup>2</sup>を4分以上継続しないことが評価基準となる。

また、隣棟への延焼加害性においては燃え拡がり性状の評価基準も同時に満たす必要があるため隣棟への延焼加害性の評価基準は表6-10のようになる。

表 6-9 輻射源の大きさと形態係数の関係

輻射源の大きさ		形態係数			形態係数の比率	
幅	高さ	2m	3m	5m	3m/2m	5m/2m
0.91m	1.785m	0.11648	0.53809	0.020263	0.482	0.181
0.91m	3.185m	0.163426	0.86125	0.034544	0.527	0.211

表 6-10 隣棟への延焼加害性評価基準

対向面の熱流束			燃え拡がりの評価	
対向面の位置	測定高さ	測定値	測定箇所	測定値
外装表面より 2m離れた位置	開口上端より500, 900, 1,500 mmの高さ	20kW/m <sup>2</sup> 4分以上	開口上端より 2,500mmの高さ	500℃ 30秒以上

## 6.6 まとめ

以上より、燃え拡がり性状、上階延焼、火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答、隣棟への延焼加害性の4つの評価項目を“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における防火性能評価基準とし、4つの評価項目をまとめると表 6-11 のようになる。それぞれの評価項目は独立であるが、隣棟への延焼加害性において評価基準を満たすためには燃え拡がり性状の評価基準も同時に満たす必要がある。表 6-11 の条件を満たす加熱強度では、883kW において可燃性外装を対象として実験を実施しているため、評価基準を適用した場合、今回実施した可燃性外装がどのように評価されるかを下記に示す。

表 6-11 JIS A 1310 における防火性能評価基準

評価項目	燃え拡がり性状		上階延焼		火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答		隣棟への延焼加害性※	
	評価値	測定箇所	評価値	測定箇所	評価値	測定物	評価値	測定箇所
883 ≤ Q < 979	500℃ 30 秒以上	開口上端より 2,500mm	600℃ 120 秒以上	開口上端より 2,000mm	5kg 以上	床面へ落下した試験体	20kW/m <sup>2</sup> 240 秒以上	2m 離れた対向面において、開口上端より 500mm, 900mm, 1,500mm の高さ
979 ≤ Q < 1011	20kW/m <sup>2</sup> 240 秒以上	試験体上端		開口上端より 2,000mm, 2,500mm				

※隣棟への延焼加害性においては燃え拡がり性状の評価基準も満たす必要がある

### 6.6.1 燃え拡がり性状の評価

加熱強度 883kW の場合、燃え拡がりの評価基準は表 6-11 より外装表面温度の測定高さは開口上端より 2.5m、計測温度は 500℃、30 秒(0.5 分)以上継続した場合に燃え拡がり性状の防火性能を満たさないと判断する。加熱強度 883kW において実施した試験体に関してこの評価基準を適用すると、表 6-12 の通りとなる。湿式外断熱工法においては断熱材の密度を 30kg/m<sup>3</sup>に変更したもの(湿-100-H)、厚さ 200mm のもの(湿-200)、開口を EFR によって補強したもの(湿-150-Fe)が、通気工法において層間塞ぎを設置していない外張り断熱工法(通-E)が、木製外装においては無処理のもの(木-無)が、金属 SWP においては無処理ポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板、そして樹脂塗材が燃え拡がると判定された。

表 6-12 加熱強度 883kW で実施した試験体の燃え拡がり評価判定

No.	分類	2,500mm における 最大測定温度(°C)	500°C以上の 継続時間(分)	判定
湿-100	湿式外断 熱工法	465	0	○
湿-100-H		558	0.6	×
湿-150		490.5	0	○
湿-200		560.7	3.1	×
湿-150-RO		545	1.1	×
湿-150-Fe		485.8	0	○
湿-100-P1		339.6	0	○
通-E (通気層内部)	通気工法	398.3	0	○
通-E-FB (通気層内部)		861.2	4.7	×
通-E-FB (通気層内部)	通気工法	462.8	0	○
通-E-FB (通気層内部)		549.2	0.2	○
木-無 (通気層内部)	木製外装	536.9	3.6	×
木-薬 (通気層内部)		928.3	12.7	×
木-薬 (通気層内部)	木製外装	331.8	0	○
木-薬 (通気層内部)		393.9	0	○
ア-無	金属 SWP	832	5.7	×
ア-難		329.3	0	○
塗-単	樹脂塗材	760.6	1.2	×
塗-複		695.8	0.8	×

### 6.6.2 上階延焼の評価

加熱強度 883kW の場合、上階延焼の評価基準は表 6-11 より外装表面温度の測定高さは開口上端より 2m、計測温度は 600°C、120 秒(2 分)以上継続した場合に上階延焼に関する防火性能を満たさないと判断する。加熱強度 883kW において実施した試験体に関してこの評価基準を適用すると、表 6-13 の通りとなる。厚さ 200mm の湿式外断熱工法、無処理の木製外装、無処理ポリエチレンを芯材としたアルミ樹脂複合板以外では、層間塞ぎを設置していない通気工法(通-E)のみが上階延焼すると判定された。

表 6-13 加熱強度 883kW で実施した試験体の上階延焼判定

No.	分類	2,000mm における 最大測定温度(°C)	600°C以上の 継続時間(分)	判定
湿-100	湿式外断 熱工法	553.6	0	○
湿-100-H		563.4	0	○
湿-150		598.3	0	○
湿-200		725.3	3.7	×
湿-150-RO		692.3	1.9	○
湿-150-Fe		540.3	0	○
湿-100-P1		384.7	0	○
通-E (通気層内部)	通気工法	525.1	0	○
通-E-FB (通気層内部)		881.1	8.4	×
通-E-FB (通気層内部)	通気工法	607.7	0.1	○
通-E-FB (通気層内部)		594.2	0	○
木-無 (通気層内部)	木製外装	657	11.1	×
木-無 (通気層内部)		913.6	12.3	×
木-薬 (通気層内部)	木製外装	398	0	○
木-薬 (通気層内部)		489.4	0	○
ア-無	金属 SWP	800.5	5.5	×
ア-難		383	0	○
塗-単	樹脂塗材	636.9	0.7	○
塗-複		489.8	0	○

### 6.6.3 火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答

加熱強度 883kW で実施した可燃性外装の中には 5kg 以上の落下物が発生する試験体は無かった。

### 6.6.4 隣棟への延焼評価

表 6-11 より、隣棟への延焼加害性においては燃え拡がり性状の評価基準も同時に満たす必要があるため、表 6-12 に示すように燃え拡がり性状の評価基準を満たしていない湿-100-H, 湿-200, 湿-150-RO, 通-E, 木-無, ア-無, 塗-単, 塗-複においては隣棟への延焼加害性が高いと判断できる。開口上端より 900mm の高さにおける熱流束計は測定の不備により測定できず、対向面においては開口上端より 500mm, 1,500mm の高さにおいてのみの測定ではあるが、燃え拡がり性状の評価基準を満たし、かつ 2m 離れた対向面で 20kW/m<sup>2</sup> を 4 分以上継続する可燃性外装は無かった。

湿・200, 通・E, 木・無, ア・無, 塗・単においては燃え拡がりの評価基準を満たしていないため、2m離れた対向面の測定値に関わらず隣棟へ延焼する危険性が高いと判断されるが、第4章で分類した6タイプの燃焼タイプにおいて、外装表面温度の経時変化と同様の傾向を示したため、6タイプの試験体の対向面における入射熱流束の経時変化を図6-4に示す。タイプ5のア・無以外の試験体においては不燃性外装で計測した入射熱流束と比較して若干の差はあるものの大きくは変わらなかった。特に加熱初期に燃え拡がり、2分ほどで燃え尽きる樹脂塗材(塗・単)においては加熱開始から2分間に若干の上昇があるのみで、それ以降は不燃性外装を用いた場合と変わらなかった。

タイプ1では、不燃性外装を用いた場合と比べてほぼ同じか少し低めの値を計測した。

タイプ2に関しては内部EPSの溶融により噴出火炎が拡大する加熱開始より7分までは不燃性外装を用いた場合と比べて高い値を計測するものの、燃焼が終了後は不燃性外装を用いた場合とほぼ同等の値を計測した。

タイプ3に関しては加熱開始より継続的に不燃性外装を用いた場合と比べて高い値を計測した。

タイプ4に関しては樹脂塗材が燃え拡がる加熱初期において、不燃性外装を用いた場合と比べて高い値を計測するものの、燃焼が終了する加熱開始より2分後からは不燃性外装を用いた場合とほぼ同等の値を計測した。

タイプ5に関してはアルミの面材が破損する加熱開始より2分ごろまでは不燃性外装を用いた場合と比べて低い値を計測するものの、燃え拡がりが始まってからは試験体上方の熱流束においても高い値を計測し、燃焼が終了する加熱開始より10分後からは不燃性外装を用いた場合とほぼ同等か少し低い値を計測した。

タイプ6に関しては不燃性外装を用いた場合と比べて高い値を計測するものの、通気層内部における燃焼が激しくなる加熱開始より10分後からは不燃性外装を用いた場合と比べて高い値を計測した。

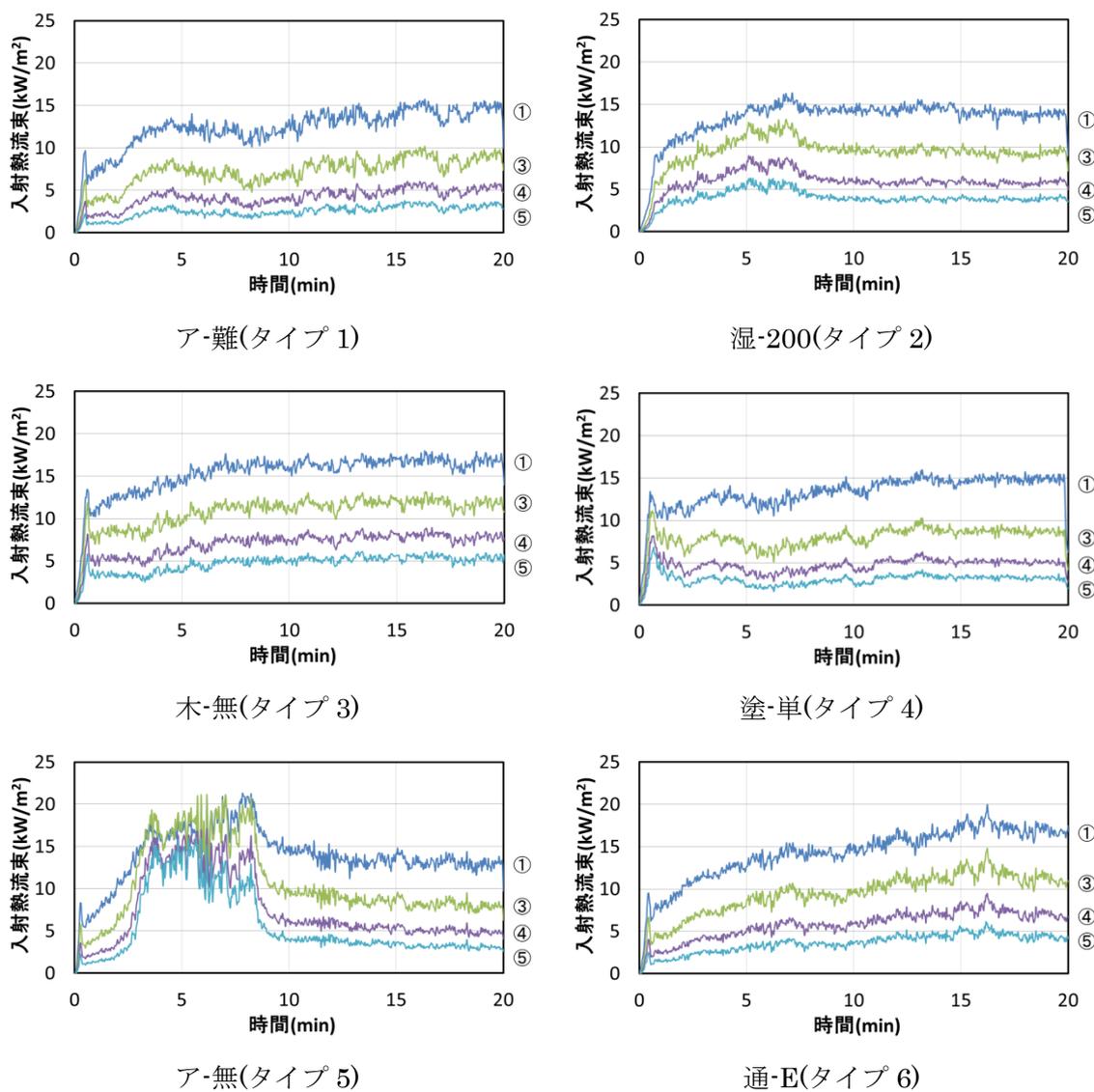


図 6-4 各燃焼タイプにおける対向面入射熱流束の経時変化

## 6.7 加熱強度と試験の適用範囲の関係

6.6において、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の防火性能評価基準を定めたが、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において用いられるバーナーの加熱強度は600kW以上と定められている。そこで、今回実験を行った581kW、835kWに対してどのような工法及び評価基準が適用できるかについてを表6-14に整理した。なお、ここでは加熱強度581kWを600kW相当として取り扱う。

“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において規定されている最小値600kWとほぼ同等の加熱強度581kWでは、適用可能な評価基準は燃え拡がり性状のみであり、適用可能な試験対象は通気工法、太陽電池フィルム、樹脂サイディングのみとなる。

加熱強度835kWでは4つの評価基準が全て適用可能であるが、湿式外断熱工法が試験対象とできない。

今回定めた評価基準の上限値1011kW以上の場合、全ての工法に適用可能であるが、燃え拡がり性状と隣棟への延焼加害性の評価を行うことができない。

試験体として通気工法、太陽電池フィルム、樹脂サイディングのみを用い、燃え拡がり性状のみを評価するのであれば、加熱強度600kWでも試験可能であるが、その他の可燃性外装を試験対象とし、燃え拡がり性状以外の防火性能を評価するためには本研究において定めた評価基準を用いるのが適していると言える。

表 6-14 加熱強度と試験に適用可能な可燃性外装及び評価基準の関係

加熱強度		581kW	835kW	883kW ≤Q< 1011kW	1011kW ≤Q< 1107kW
適用可能な可燃性外装	湿式外断熱工法	×	×	○	○
	通気工法	○	○	○	○
	木製外装	×	※	○	○
	金属 SWP	×	○	○	○
	太陽電池フィルム	○	○	○	○
	樹脂塗材	×	※	○	○
	樹脂サイディング	○	○	○	○
適用可能な評価基準	燃え拡がり性状	○	○	○	×
	上階延焼	×	○	○	○
	火炎にさらされた場合の建築ファサードの力学応答	×	○	○	○
	隣棟への延焼加害性	×	○	○	×

※：実験において確認されていない

## 第 6 章 参考文献

[6-1] SP FIRE 105. Issue 5. Large scale testing of façade systems. SP Boras Sweden, 1994.

[6-2] DIN 4102-20:2016-03: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20:  
Besonderer Nachweis für das Brandverhalten von Außenwandbekleidungen

[6-3] Pre-standard ÖNORM B38005 “Fire performance of construction materials and  
building elements; part 5: Fire performance of facades – requirements, test methods  
and assessments” dated 1st May 2004

## 第7章 結論

### 7.1 結論

本研究では可燃性外装材が施工された建築物の「延焼の防止」という機能を確保するため、可燃性外装材の燃え広がり性状の把握及び抑制方法の提案、そして燃え広がりにおける防火上安全となる基準を構築することを目的とし、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を通じて、

- “JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の加熱強度の検討
- 可燃性外装を用いた場合の“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の加熱強度の整合性
- 可燃性外装の燃え広がり性状の把握及び分類
- 可燃性外装の燃え広がり抑制手法の提案
- “JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準の提案

の研究項目を明らかにするために一連の研究を行った。本研究における各章の要約を以下にまとめる。

第3章では“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”の加熱強度を試験方法の中で規定されている600kW以上の範囲で変更した場合の噴出火炎性状について検証し、その結果を踏まえて“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において、実際の火災における上階延焼の可否の評価基準を定めることができる加熱強度を検討した。

開口噴出火炎が開口部に与える影響、開口噴出火炎の発熱速度、燃え広がり性状の評価可否、上階延焼評価可否の4つの検討項目に対して検討した結果、それぞれの検討項目に関して“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において望ましい加熱強度及び評価基準を導き出した。

第4章では、外断熱工法、木製外装、金属SWP、太陽電池フィルム、樹脂塗材、樹脂サイディングといった可燃性外装材を対象として“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を実施し、その燃え広がり性状を観察し、防火上の安全基準及び燃え広がりの抑制手法を考慮する上で重要な事項に関して検討を行った。

その結果、各可燃性外装の燃焼性状に関してその特徴を整理し、燃焼性状の特徴より可燃性外装を分類でき、燃焼性状の分類から抑制手法に関する知見が得られることが判明した。

また、加熱強度を変更した場合、可燃性外装の種類によっては燃焼性状が異なることが判明し、可燃性外装を“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いて防

火性能を判断するためには、581kWの加熱強度においては開口上端より0.5及び0.9mの高さで、883kWの加熱強度においては2m及び2.5mの高さで比較する必要があることが判明した。

第5章では、外断熱工法、木製外装、金属SWP、太陽電池フィルム、樹脂塗材、樹脂サイディングといった可燃性外装材を対象として防火安全上効果的な抑制手法の検討を行い、検討事項のいくつかに対しては実際に“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いて効果の検証を行った。

検証の結果、湿式外断熱工法においては、破損が発生しなければ、抑制手法は十分な抑制効果を発揮することが確認された。通気工法において、通気層内部における層間塞ぎの設置が燃え拡がりの抑制に効果があることが確認された。薬剤処理した木製外装、促進劣化を施した場合においても十分な抑制効果を発揮することが確認された。金属SWPにおいて、開口部の補強が内部断熱材の落下及び開口部付近での焼損を抑制できることが確認された。アルミ樹脂複合板において、難燃処理及び通気層幅を100mm以下に設計することが燃え拡がりの抑制に効果を発揮することが確認された。太陽電池フィルムを貼りつけたルーバーにおいて、庇を適切に設置しなければ燃え拡がりを抑制できないことが確認された。

第6章では、第3章及び第4章の結果を踏まえて、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”を用いて可燃性外装の防火安全性能を評価するために必要な条件及び基準について検討し、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準を構築した。また、燃え拡がり性状に関する評価だけでなく、可燃性外装で火災が発生した際に影響があると考えられる火災にさらされた場合の建築ファサードの力学応答及び隣棟への延焼加害性の評価基準についても検討を行った。

可燃性外装の燃え拡がり性状、上階延焼、火災にさらされた場合の建築ファサードの力学応答、隣棟への延焼加害性を全て評価するためには加熱強度は883～1011kWの間が望ましいとした。可燃性外装の燃え拡がり性状を評価するためには、加熱強度が883～979kWの場合は外装表面温度の測定高さは開口上端より2.5mにおいて30秒以上の間500℃以上を計測した場合に燃え拡がる危険性が高いと判断し、加熱強度が979～1011kWの場合は試験体上端の熱流束計において30秒以上の間20kW/m<sup>2</sup>以上を計測した場合に燃え拡がる危険性が高いと判断した。可燃性外装による上階延焼の危険性を評価するためには、加熱強度が883～979kWの場合は外装表面温度の測定高さは開口上端より2mにおいて120秒以上の間600℃以上を計測した場合に燃え拡がる危険性が高いと判断し、加熱強度が979～1011kWの場合は外装表面温度の測定高さは開口上端より2m及び2.5mにおいて120秒以上の間600℃以上を計測した場合に燃え拡がる危険性が高いと判断した。隣棟への延焼加害性に関しては2m離れた対向面において20kW/m<sup>2</sup>を超える入射熱流束が4分以上継続した場合に危険であると判断でき、継続して燃焼する可燃性外装においては燃え拡がる危険性が高く、燃え拡がり性状の評価基準を満たしていない場合は上記条件を満たしていない場合も危険であると結論付けた。火災にさらされた場合の建築ファサードの力学応答の評価

基準としては、試験体からの5kg以上のものが落下した場合危険であると判断できるとした。

本研究で得られた成果を以下の成果をまとめる。

- 可燃性外装の燃え拡がり性状に関して燃え拡がりの流れをフローチャート化し、また、燃え拡がり性状から可燃性外装を分類することによって可燃性外装の燃え拡がりを抑制する上で必要な情報を整備した。
- 各可燃性外装の燃え拡がりに対して有効な抑制手法を提案した。
- JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法において試験を行う上で適切な試験条件を導き出した。
- JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法において評価を行う上で必要となる基準を整備した。

## 7.2 今後の課題と展望

本論文においては、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準を噴出火炎性状及び実際の可燃性外装の実験結果より構築したが、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”における評価基準が実火災における可燃性外装の燃え拡がり性状を正確に評価しているかは実大規模の試験方法によって確認する必要がある。また、現状の建築基準法においては耐火構造の外壁に有機系断熱材や木材を施工することが可能であることより、可燃性外装の防火性能を確保する上で“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”と今回定めた評価基準を今後どのように運用していくかも検討していく必要がある。

また、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においてどのような可燃性外装を試験の対象とするかも検討していく必要がある。“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”においては耐火構造物の外壁に可燃性の材料を取り付けるといった構成の建築ファサードが主な試験対象としている。しかし、試験の規模と実際の建築物においては大きさが異なるため、ファイヤーストップや庇の設置位置に関しては実建築物との相関性を確認する必要がある。例えば、湿式外断熱工法においてファイヤーストップを開口上端より離れた位置に設置する場合、実建築物においてどの高さにファイヤーストップ設置するべきかを検討しなければならない。また、ドイツにおいては100～300mm厚さの湿式外断熱工法に対して2階層ごとにファイヤーストップを設置することが燃え拡がり性状においての安全な抑制手法とされている<sup>[7-1]</sup>が、もしも2階層ごとにファイヤーストップを設置した場合の抑制効果を“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”において確認する場合には、今回の定めた評価基準では判断できないため、新しく検討を行う必要がある。

国外に目を向けると国ごとに様々なファサード試験が防火性能の評価試験に用いられ

ており、統一的な試験方法が確立されていない。国によって建築物に要求される条件や消火活動の能力が異なるため試験方法が異なるのは当然のことではあるが、欧州においてはファサード試験に関して統一的な見解を設ける方向で議論が進んでおり、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”に関する今後各国の試験方法との関係性を検討していく必要が出てくると考えられる。

また、“JIS A 1310 建築ファサードの燃えひろがり試験方法”はフラットな外装面を用いた試験方法であるが、実際の建築物においては庇等が設けられている場合も多く、可燃性外装における庇の有効性に関する検討を行っていく必要がある。

## 第 7 章 参考文献

[7-1] Dipl.-Phys. I. Kotthoff: “Fire performance of external thermal insulation composite systems (ETICS) in buildings” basics  
<http://www.eumeps.construction/show.php?ID=4806>

# 謝辞

本論文は筆者が防火の研究に携わった2012年8月から2016年9月に至る6年間の研究成果をまとめたものです。

東京大学工学系研究科建築学専攻教授 野口貴文博士からはご多忙にも拘らず、著者が学部生のころより終始暖かいご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻講師 北垣亮馬 博士からは研究のご指導のみならず、研究室で生活をする上で多岐に渡りご助力頂きました。ここに感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご協力を賜りました。ここに記して、これらの方々への感謝の意に代えさせていただきます。

著者が防火の研究に携わるに当たり、国土交通省技術政策総合研究所主任研究官 吉岡英樹 博士より、建築防火の基礎から実験の実施に至るまで多岐に渡りご指導いただきました。

国外の試験方法の調査するにあたっては、三菱樹脂(株) 長谷様にご協力いただきました。

実験の実施にあたって、国立研究開発法人建築研究所防火研究グループ主任研究員 吉田正志 博士、同研究所防火研究グループ上席研究員 成瀬友宏 博士、東京理科大学理工学部建築系研究科教授 兼松学 博士よりご指導いただきました。

試験体準備及び実験計画立案に際し、建築研究開発コンソーシアム「有機系外壁材の燃え拡がり抑制に関する勉強会」、「建築ファサードの燃え拡がり試験方法」JIS 原案作成委員会及び「ファサード防火基準研究会」のメンバーの皆様よりご協力いただきました。

実験実施の際に、東京大学野口・北垣研究室、東京理科大学兼松研究室の皆様にご協力いただきました。

本論文の審査にあたり、東京大学院工学系研究科化学システム学専攻教授 土橋 律 博士、東京理科大学理工学部建築学科教授 大宮喜文博士、東京大学大学院工学系研究科建築学専攻准教授 藤田香織博士 より有益なご助言を頂きました。厚くお礼申し上げます。

また、研究生生活をより有意義なものにして下さいました野口・北垣研究室の皆様には感謝致します。特に、ほぼ毎日のように研究室にいらっしゃり、暖かい言葉とご助言を頂きました技術専門員 田村政道氏には深甚なる感謝を表します。

最後に、常に暖かく見守り続けてくれた家族、友人そして歴代の研究室メンバーに心より深く感謝致します。

平成28年9月  
西尾 悠平



補足資料：

4章・5章で扱った

可燃性外装の試験体の実験写真

## 補足資料：4章・5章で扱った可燃性外装の試験体の実験写真

試験体 No. : 湿-50 加熱強度 : 581kW.....	1
試験体 No. : 湿-100 加熱強度 : 581kW.....	2
試験体 No. : 湿-100 加熱強度 : 835kW.....	3
試験体 No. : 湿-100 加熱強度 : 883kW.....	4
試験体 No. : 湿-100 加熱強度 : 1107kW.....	5
試験体 No. : 湿-100-H 加熱強度 : 883kW.....	6
試験体 No. : 湿-150 加熱強度 : 883kW.....	7
試験体 No. : 湿-150 加熱強度 : 1107kW.....	8
試験体 No. : 湿-200 加熱強度 : 581kW.....	9
試験体 No. : 湿-200 加熱強度 : 835kW.....	10
試験体 No. : 湿-200 加熱強度 : 883kW.....	11
試験体 No. : 湿-200 加熱強度 : 1107kW.....	12
試験体 No. : 湿-300 加熱強度 : 581kW.....	13
試験体 No. : 通-X 加熱強度 : 581kW.....	14
試験体 No. : 通-Fe 加熱強度 : 581kW.....	15
試験体 No. : 通-G 加熱強度 : 835kW.....	16
試験体 No. : 通-E 加熱強度 : 883kW.....	17
試験体 No. : 木-無 加熱強度 : 581kW.....	18
試験体 No. : 木-無 加熱強度 : 883kW.....	19
試験体 No. : 木-無 加熱強度 : 1107kW.....	20
試験体 No. : 木-葉 加熱強度 : 581kW.....	21
試験体 No. : 木-葉 加熱強度 : 883kW.....	22
試験体 No. : 木-葉 加熱強度 : 1107kW.....	23
試験体 No. : 金-U 加熱強度 : 581kW.....	24
試験体 No. : 金-N 加熱強度 : 581kW.....	25
試験体 No. : ア-無 加熱強度 : 581kW.....	26
試験体 No. : ア-無 加熱強度 : 835kW.....	27
試験体 No. : ア-無 加熱強度 : 883kW.....	28
試験体 No. : ア-難 加熱強度 : 581kW.....	29
試験体 No. : ア-難 加熱強度 : 835kW.....	30
試験体 No. : ア-難 加熱強度 : 883kW.....	31
試験体 No. : ア-難 加熱強度 : 1107kW.....	32
試験体 No. : 電-板 加熱強度 : 581kW.....	33
試験体 No. : 電-ル 加熱強度 : 1107kW.....	34
試験体 No. : 塗-単 加熱強度 : 581kW.....	35
試験体 No. : 塗-単 加熱強度 : 883kW.....	36

試験体 No. : 塗-複	加熱強度 : 883kW	37
試験体 No. : 樹-サ	加熱強度 : 581kW	38
試験体 No. : 樹-サ	加熱強度 : 1107kW	39
試験体 No. : 湿-50-W	加熱強度 : 581kW	40
試験体 No. : 湿-100-P1	加熱強度 : 883kW	41
試験体 No. : 湿-100-P2	加熱強度 : 1107kW	42
試験体 No. : 湿-150-RO	加熱強度 : 883kW	43
試験体 No. : 湿-150-Fe	加熱強度 : 883kW	44
試験体 No. : 湿-150-FB	加熱強度 : 1107kW	45
試験体 No. : 湿-200-FB	加熱強度 : 1107kW	46
試験体 No. : 通-Fe-RO	加熱強度 : 581kW	47
試験体 No. : 通-E-FB	加熱強度 : 883kW	48
試験体 No. : 通-E-RO	加熱強度 : 1107kW	49
試験体 No. : 木-薬-劣	加熱強度 : 1107kW	50
試験体 No. : 金-U-RO	加熱強度 : 581kW	51
試験体 No. : 金-N-RO	加熱強度 : 581kW	52
試験体 No. : ア-難-RO	加熱強度 : 581kW	53
試験体 No. : ア-難-300	加熱強度 : 1107kW	54
試験体 No. : 電-板-RO	加熱強度 : 581kW	55
試験体 No. : 電-ル-FB	加熱強度 : 1107kW	56

試験体 No. : 湿-50 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-100 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後

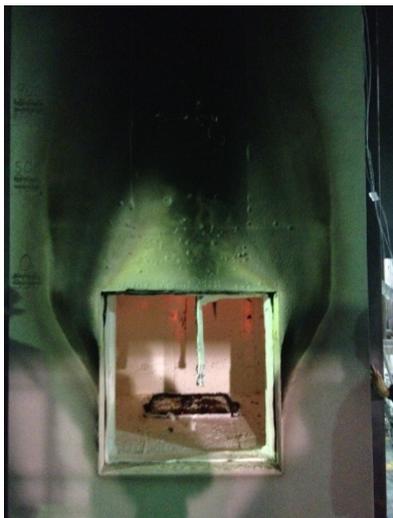


焼損状況

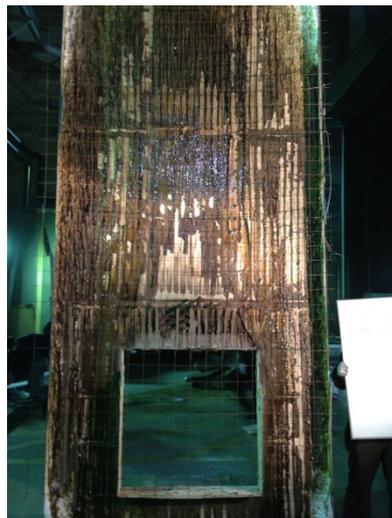
実験の様子



試験体 No. : 湿-100 加熱強度 : 835kW



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-100 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-100 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-100-H 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-150 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

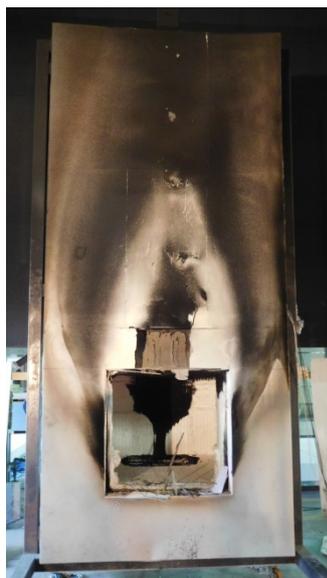
実験の様子



試験体 No. : 湿-150 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



01 : 00



01 : 30



04 : 00



05 : 00



06 : 00



08 : 00



10 : 00

試験体 No. : 湿-200 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-200 加熱強度 : 835kW



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-200 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-200 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



01 : 00



01 : 30



04 : 00



05 : 00



07 : 00



10 : 00

試験体 No. : 湿-300 加熱強度 : 581kW



実験終了後



焼損状況

### 実験の様子



試験体 No. : 通-X 加熱強度 : 581kW

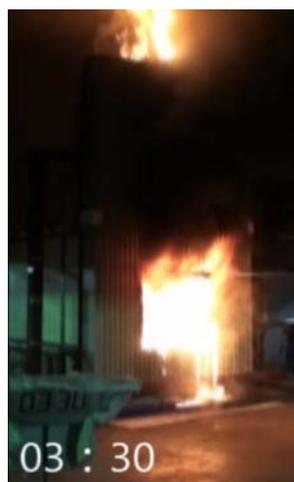
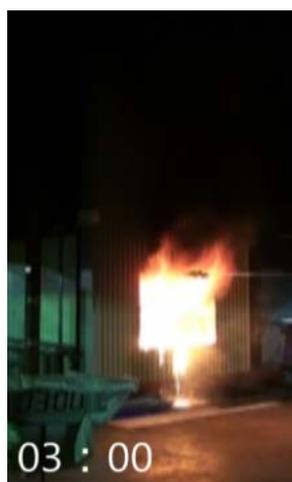


実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 通-Fe 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 通-G 加熱強度 : 835kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 通-E 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 木-無 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 木-無 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 木-無 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



01 : 00



03 : 00



09 : 00



12 : 00



13 : 30



19 : 30

試験体 No. : 木-薬 加熱強度 : 581kW

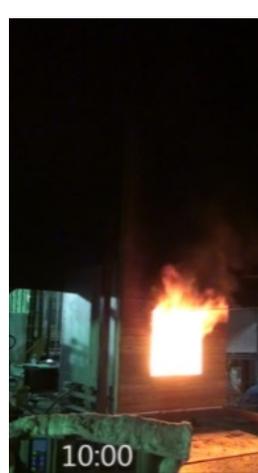


実験前



焼損状況

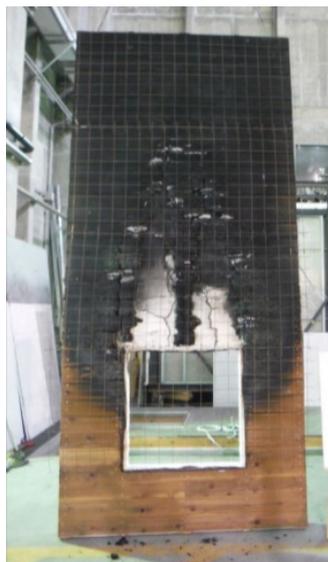
実験の様子



試験体 No. : 木-薬 加熱強度 : 883kW



実験前



焼損状況

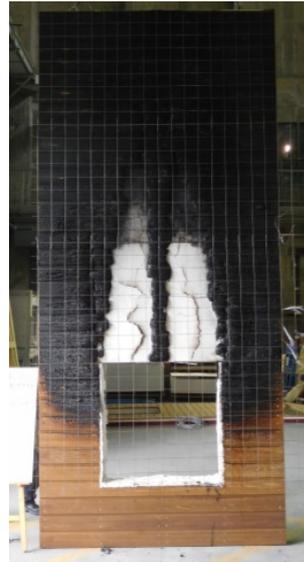
実験の様子



試験体 No. : 木-薬 加熱強度 : 1107kW



実験前



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 金-U 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



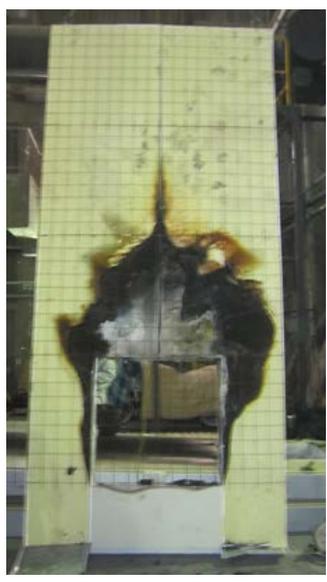
試験体 No. : 金-N 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : ア-無 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後

実験の様子



試験体 No. : ア-無 加熱強度 : 835kW



実験前



実験終了後

実験の様子



試験体 No. : ア-無 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後

実験の様子



試験体 No. : ア-難 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後

実験の様子



試験体 No. : ア-難 加熱強度 : 835kW



実験前



実験終了後

実験の様子



試験体 No. : ア-難 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後

### 実験の様子



試験体 No. : ア-難 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後

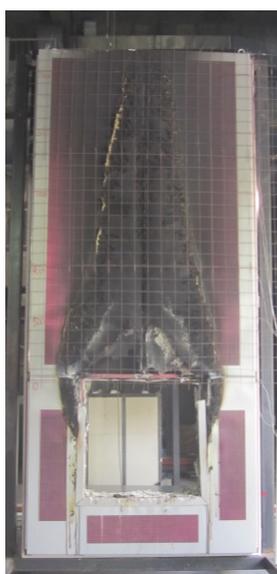
実験の様子



試験体 No. : 電-板 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

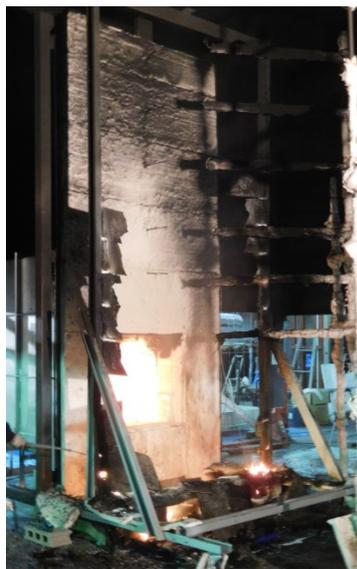
実験中の様子



試験体 No. : 電-ル 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後

実験中の様子



試験体 No. : 塗-単 加熱強度 : 581kW



実験終了後



焼損状況

実験中の様子



試験体 No. : 塗-単 加熱強度 : 883kW



実験前



焼損状況

実験中の様子



試験体 No. : 塗-複 加熱強度 : 883kW



実験前



焼損状況

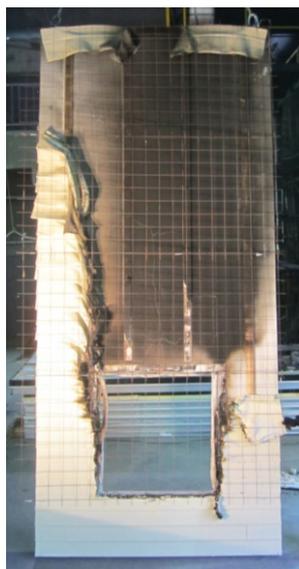
実験中の様子



試験体 No. : 樹-サ 加熱強度 : 581kW



実験前



焼損状況

実験中の様子



試験体 No. : 樹-サ 加熱強度 : 1107kW



実験前



焼損状況

実験中の様子



試験体 No. : 湿-50-W 加熱強度 : 581kW



実験前

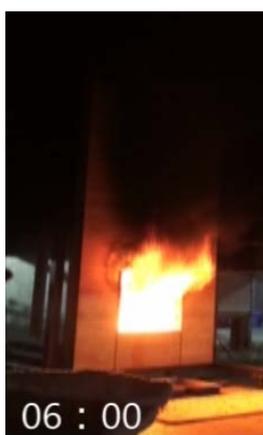
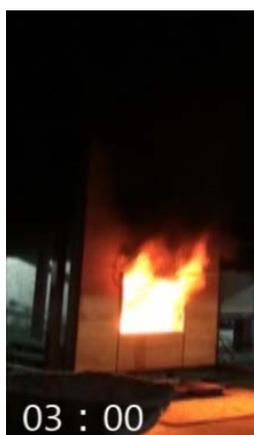
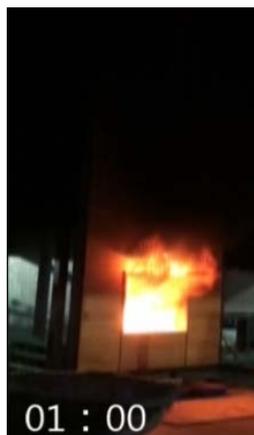


実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-100-P1 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-100-P2 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-150-RO 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-150-Fe 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-150-FB 加熱強度 : 1107kW



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 湿-200-FB 加熱強度 : 1107kW



実験終了後

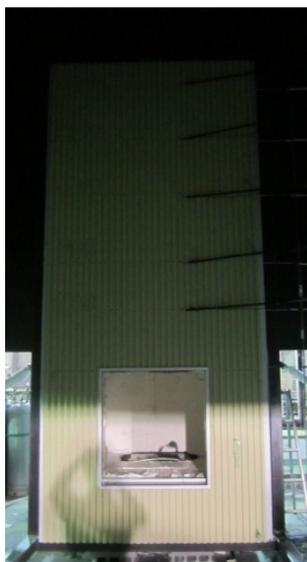


焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 通-Fe-RO 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後

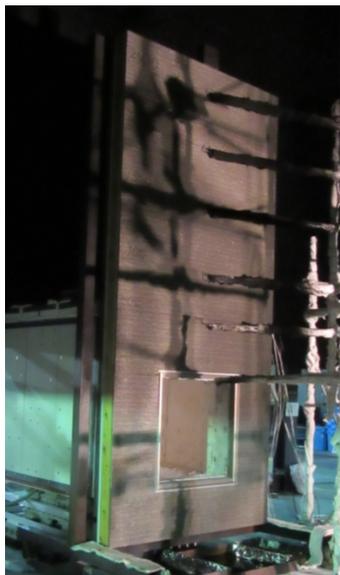


焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 通-E-FB 加熱強度 : 883kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 通-E-RO 加熱強度 : 1107kW



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 木-薬-劣 加熱強度 : 1107kW



実験前



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 金-U-RO 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 金-N-RO 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後

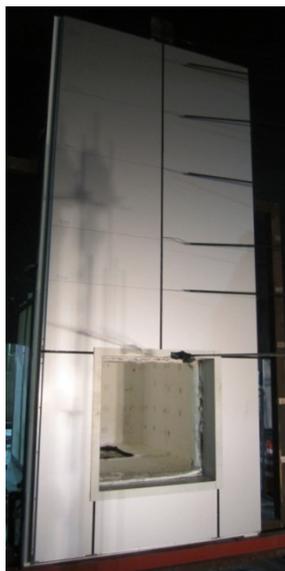


焼損状況

実験の様子



試験体 No. : ア-難-RO 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : ア-難-300 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後

実験の様子



試験体 No. : 電-板-RO 加熱強度 : 581kW



実験前



実験終了後



焼損状況

実験の様子



試験体 No. : 電-ル-FB 加熱強度 : 1107kW



実験前



実験終了後

実験の様子

