

住宅の外壁構造と小屋裏延焼の関係に関する検証 (その2)

—各外壁構造の燃焼性状と結果—

佐藤 歩*, 湯浅 弘章*, 渡邊 茂男*

概要

本検証は、外壁内から小屋裏への延焼現象に着目し、住宅の外壁と屋根の一部を再現した外気通気工法を用いた中規模の試験体による、類焼建物の外壁を擬似的に再現した燃焼実験を行ったものである。

その1では、検証の目的、実験概要及び実験ごとの類焼要因発生時間の結果についてまとめた。

その2では、各検証の温度性状を分析しながら、類焼要因発生時間についてどの試験体の仕様が影響を与えているか明らかにすることで、類焼建物の外壁内から小屋裏へ延焼するメカニズムを把握した。その結果から、消防活動上の留意事項についての知見を得た。

1 はじめに

本検証は、類焼建物の外壁内から小屋裏へ延焼する現象に着目し、住宅の外壁と屋根の一部を再現した外気通気工法を用いた中規模の試験体による、類焼建物の外壁を擬似的に再現した燃焼実験を行ったものである。

その1では、検証の目的、実験概要及び各実験の類焼要因発生時間の結果について述べた。表1に各実験の類焼要因発生時間を再度示した。

外壁内から小屋裏へ延焼する現象は、表面上ではなく、外壁内や小屋裏で起こっており、発見が遅れた場合、大きな火災となるため、消防活動上留意すべき火災である。また、大宮¹⁾は、ISO13785-2 大規模試験体による外装材の上方向火炎伝播試験を行い、通気層が延焼経路になることに触れていた。しかし、このような延焼のメカニズムは実験から明らかにされていない。

その2では、各検証の測定結果の温度分布等を分析しながら、重回帰分析を用いて類焼要因発生時間に対する試験体の各仕様が与える影響の有無を把握し、外壁内から小屋裏へと延焼するメカニズムを解明することで、消防活動上の留意事項についてまとめることを目的とした。

2 分析の方法

(1) 分析の流れ

分析の流れを図1に示した。まず、各検証の測定結果から、主に通気層内がどのような燃焼性状であったかを明らかにするため、その温度性状を明らかにした。次に、加熱位置が同一の検証について、統計的手法を用いて個々の試験体の仕様の影響の有無を分析した。最後に、分析結果を用いて、延焼メカニズムを把握することで、消防活動上の留意事項についてまとめた。

(2) 測定項目

各測定項目の測定位置を図2(1)から(3)に示した。

温度は、主に外壁表面、通気層内、外壁裏面、野地板見上げ面について、合計49点を測定した。通気層内の温度測定について、通気層内の気流を妨げないように、6本のシー型熱電対を束ねて通気層下部から挿入した。

表1 各実験の類焼要因発生時間

実験 No	試験体の仕様	時間 (分)				
		0	30	60	90	120
1	基本設定	50分				
2	基本設定	59分				
3	加熱高さ 700mm	23分				
4	加熱高さ 1100mm	26分				
5	加熱距離 800mm	96分				
6	加熱距離 800mm 加熱高さ 700mm	69分				
7	加熱距離 800mm 加熱高さ 1100mm	89分				
8	充填断熱 厚さ 75mm	38分				
9	充填断熱 厚さ 30mm	26分				
10	外張断熱	69分				
11	充填外張断熱	74分				
12	通気層なし	120分	実験打ち切り			
13	枠組工法	40分				
14	熱気止め材あり	50分				
15	横張り通気胴縁	84分	非加熱面への火炎の噴出			
16	外装材中心に目地なし	36分				
17	内装モルタル仕上げ	49分				
18	防火構造 石膏ボード厚さ 12.5mm	27分				
19	防火構造 石膏ボード厚さ 9.5mm	27分				
20	軒の出あり	29分				
21	自然換気口	73分				
22	自然換気口脇加熱	13分				
23	自然換気口中心加熱	6秒	非加熱面への火炎の噴出			
24	24時間換気給気口	46分				
25	24時間換気給気口脇加熱	17分				
26	24時間換気給気口中心加熱	1分	非加熱面への火炎の噴出			

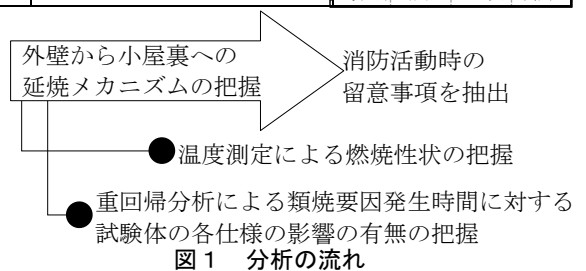
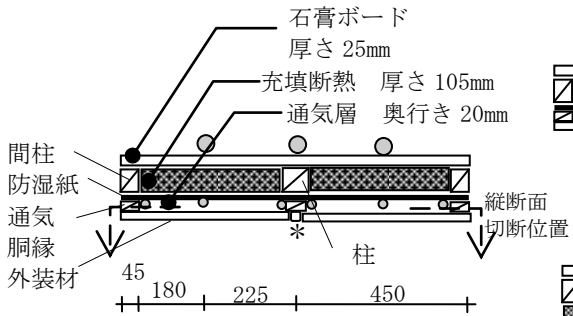
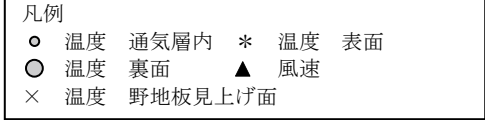
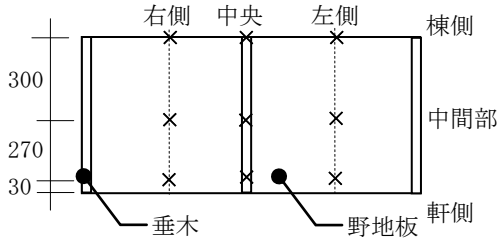


図1 分析の流れ

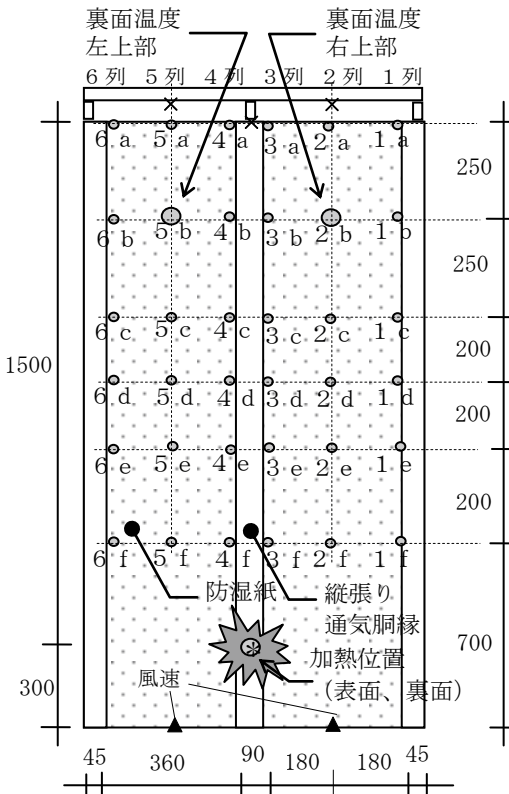
* 装備安全課



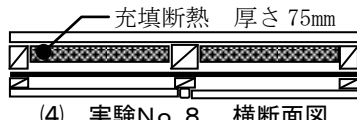
(1) 横断面図 実験No. 1から7
基本設定 測定位置



(2) 野地板見上げ面測定位置



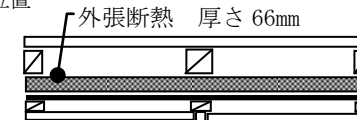
(3) 実験No. 1から7
縦断面図 基本設定
測定位置



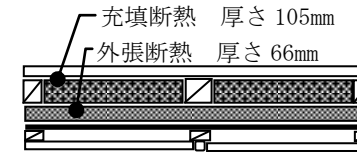
(4) 実験No. 8 横断面図



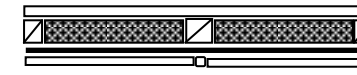
(5) 実験No. 9 横断面図



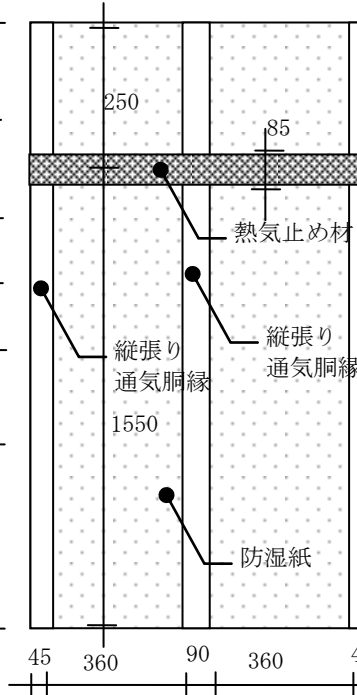
(6) 実験No. 10 横断面図



(7) 実験No. 11 横断面図



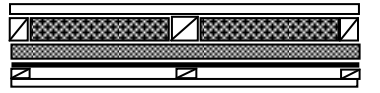
(8) 実験No. 12 横断面図
通気層なし



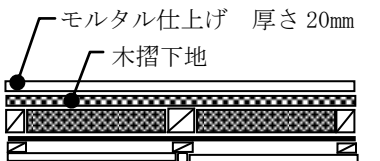
(10) 実験No. 14
縦断面図 熱気止め材



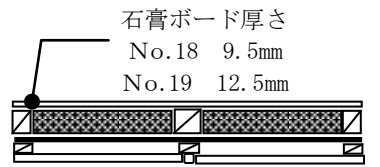
(9) 実験No. 13 横断面図
枠組工法



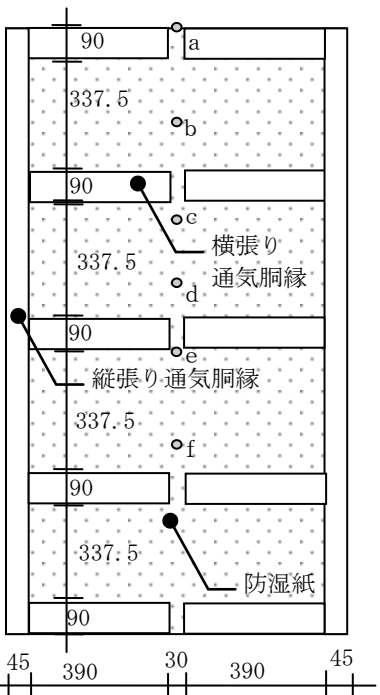
(12) 実験No. 16 横断面図
縦目地なし



(13) 実験No. 17 横断面図
内装モルタル仕上げ



(14) 実験No. 18, 19
横断面図 防火構造



(11) 実験No. 15
縦断面図 横張り通気胴縁
測定位置

図2 各測定項目の測定位置と各仕様の概要図
(各寸法の単位はmm)

(3) 類焼要因発生時間

試験体上部の通気層等からの炎の立ち上がりによる試験体上部野地板への着火、もしくは非加熱側への火炎の噴出、非加熱面での発炎、火炎が通る亀裂等の損傷の有無等、類焼の原因となるような現象の発生した時間（以下、類焼要因発生時間とする）を測定した。

(4) 試験体の設定

試験体は、外壁と野地板からなる構成とした。外壁の大きさは、幅 900mm、高さ 1800mm とした。野地板の大きさは、幅 900mm、長さ 600mm とした。野地板は、外壁の上端部に設置し、勾配は 3/10 とした。また、通気層からの火炎による野地板の着火に着目するため、軒の出がない状態に設定した。なお、詳細については、その 1 を参照のこと。

3 温度分布による考察

(1) 基本設定

実験No. 1、2では、外壁内の基本的な延焼メカニズムを確認することを目的とした。仕様の概要を図2(1)、(3)に示した。

ア 温度の時間変化

(ア) 通気層内

柱付近（3列）の温度変化について、図3をみると、下部（測定位置 3 d、3 f）において、時刻約 25 分に約 200℃であった。その約 25 分後に最大約 700℃に上昇した。目視により、その時刻前後で外装材の割れや落下等はなかったことから、亀裂から火炎が外壁内に入った可能性は低く、外壁内で急激な燃焼が生じたと考察した。

また、松山ら²⁾は、加熱された石膏ボードを有する外壁内の温度について、石膏ボード内の結晶水の放出が終了するまでは温度上昇は抑えられ、横ばい傾向を示し、結晶水の放出が終われば、外壁内の木構造材に着炎し壁内は急激な温度上昇を示す結果を得た。本検証でも時刻約 25 分までは通気層内の温度は緩やかな上昇傾向であったが、それ以降急激な温度上昇を示したことから、同様の結果が得られたと考察した。

柱間付近（5列）の温度変化について、図4をみると、下部（測定位置 5 d、5 f）の温度は時刻約 15 分以降から上昇し 500℃以上になった。それに対し、上部（測定位置 5 a、5 b）の温度は 200℃以下であった。これは、下部は火源の火熱により加熱される一方、上部では火源からの火炎が上方向に伝播するための柱等の可燃物がないため、上部の温度が高くならなかったと考察した。

間柱付近（6列）の温度変化について、図5をみると、上部（測定位置 6 f）の温度が 500℃を超えた。図3に示した柱付近の温度と比較してやや低く、急激な温度上昇はみられなかった。これは、火源から離れていたためだと考察した。

(イ) 裏面

加熱位置の温度変化について、図6をみると、小屋裏に着火した時の時刻約 45 分に約 60℃であった。また、右上部は時刻約 45 分に約 40℃であり、大きな変化はなかった。

(ウ) 野地板見上げ面

軒側の温度変化について、図7をみると、当初温度上昇は緩やかであったが、時刻約 45 分に右側が約 600℃になり急上昇した。これは、外壁上端部の発炎により、野地板に着火したことによるものである。

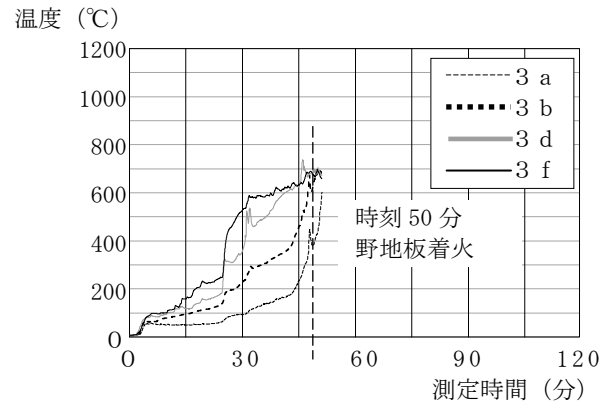


図3 通気層内3列の温度変化
実験No. 1 基本設定

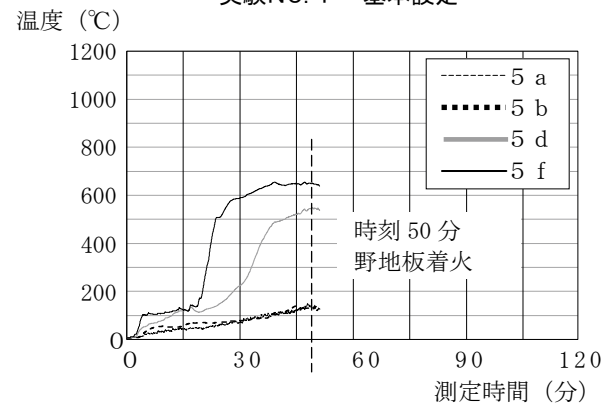


図4 通気層内5列の温度変化
実験No. 1 基本設定

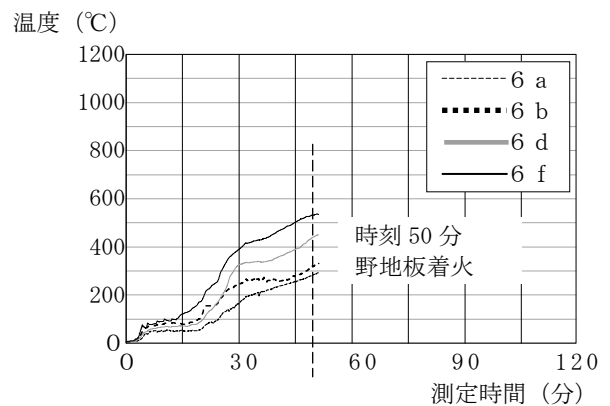


図5 通気層内6列の温度変化
実験No. 1 基本設定

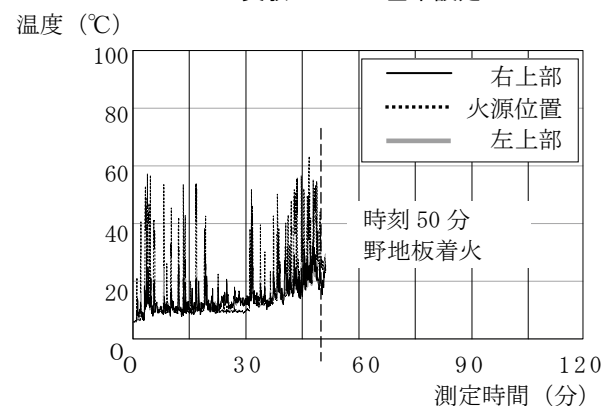


図6 裏面の温度変化 実験No. 1 基本設定

中間部の温度変化について、図8をみると、右側が時刻約45分から温度が上昇し約450℃になった。これは、野地板の軒側に着火後、野地板の中間部にまで火炎が広がって高温になったためであった。

イ 検証後の試験体

検証後の試験体の様子について、写真1をみると、加熱位置を中心に同心円状に変色していた。外装材を取り外した状態について、写真2をみると、加熱位置を中心にグラスウールが溶融していた。また、間柱付近、通気層上部付近にはグラスウールが変色していない部分があった。さらにグラスウールを取り外した状態について、写真3をみると、加熱位置付近の柱が最も炭化していた。また、柱側面から上桢に沿って炭化していた。

このことから、通気層内で、火源からの熱伝導により通気胴縁が発火し、火炎は通気層に面する柱側面を中心に、その他縦張り通気胴縁側面等の可燃物に沿って上方方向に伝播し、上桢に着火後、小屋裏に立ち上がり、野地板に着火したと考察した。

ウ 実験の再現性 実験No.2

実験No.1と同一条件で2回目を行い、実験の再現性について着目した。

実験No.2の柱付近(3列)の温度変化について、図9をみると、時刻約20分に測定位置3b、3d、3fが約200℃から最大約600℃になった。実験No.1の結果の図3と比較すると、ほぼ同様の傾向であった。このことから、本検証方法の再現性は低くないと考察した。

(2) 加熱距離と加熱高さの影響

実験No.3から7では、基本設定よりも加熱位置を上げた場合や遠ざけた場合の燃焼性状の変化を確認することを目的とした。

ア 加熱高さの影響

加熱高さが700mmである実験No.3の柱付近(4列)の温度変化について、図10をみると、時刻約20分に温度が急激に上昇していた。基本設定の図3と比較して、時刻約25分以降の加熱位置から高さ400mm離れた測定位置4dと850mm離れた測定位置4bの温度上昇が大きかった。

加熱高さが1100mmである実験No.4の柱付近(4列)の温度変化について、図11をみると、実験No.3のときと同様の傾向で、時刻約25分で温度が急激に上昇していた。基本設定の図3と比較して、特に加熱位置から高さ方向に450mm離れた測定位置4b、700mm離れた測定位置4aの上昇が大きかった。また、加熱位置から下部に位置する測定位置4fの温度変化は少なかった。

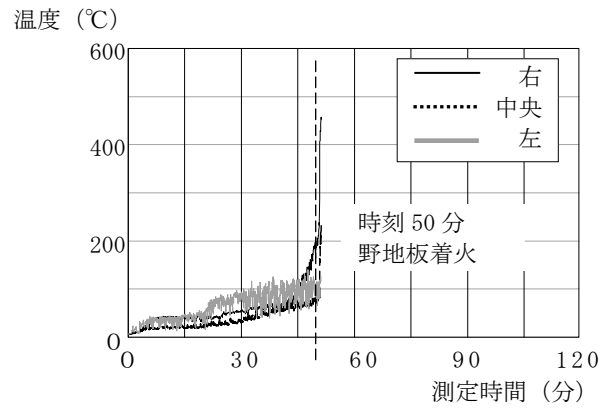


図8 野地板見上げ面中間部の温度変化
実験No.1 基本設定

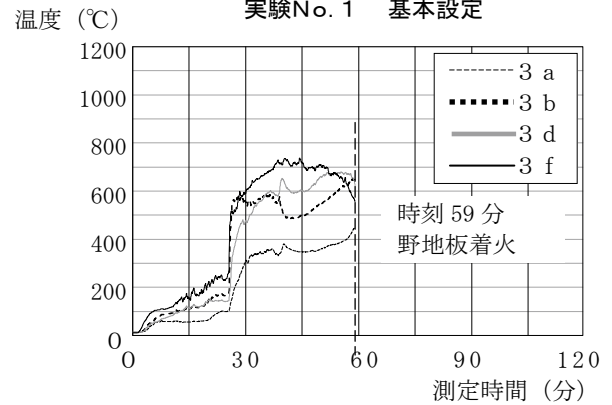


図9 通気層内3列の温度変化
実験No.2 基本設定

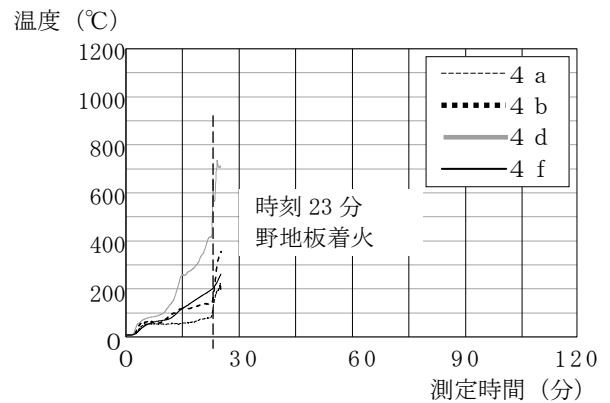


図10 通気層内4列の温度変化
実験No.3 加熱高さ700mm

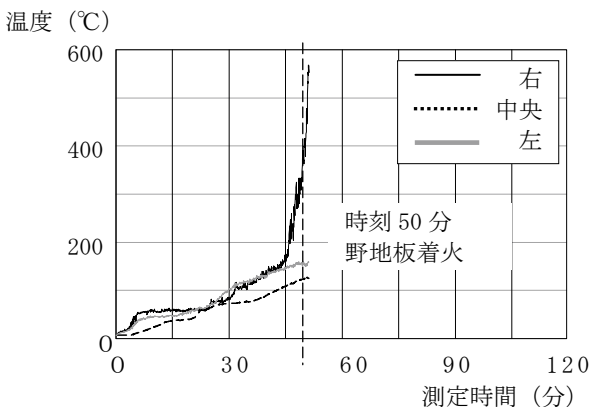


図7 野地板見上げ面軒側の温度変化
実験No.1 基本設定

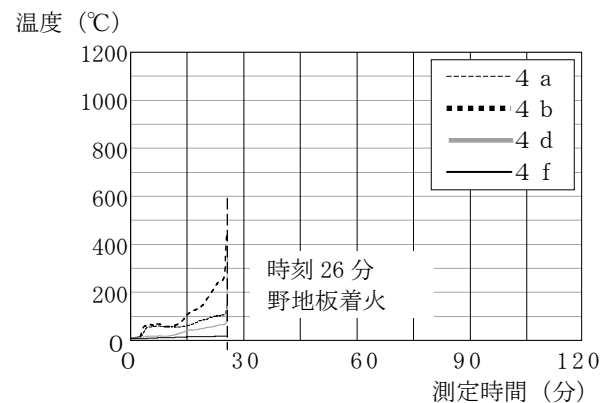


図11 通気層内4列の温度変化
実験No.4 加熱高さ1100mm

このことから、加熱高さにかかわらず、外壁から小屋裏へ着火したが、加熱高さが高いほど、類焼要因発生時間が短くなる傾向であった。

イ 加熱距離の影響

加熱位置での外壁の表面温度は、加熱距離が 400mm の実験No. 1 では約 1000℃、加熱距離が 800mm の実験No. 5 では約 500℃であった。

加熱距離が 800mm の実験No. 5 の柱付近（4 列）の温度変化について、図 12 をみると、温度上昇は緩やかであった。基本設定の図 3 と比較して、類焼要因発生時間が長かった。

加熱距離が 800mm、加熱高さが 700mm である実験No. 6 の柱付近（3 列）の温度変化について、図 13 をみると、時刻約 69 分に急激な温度の上昇が生じた。基本設定の図 3 と比較して、類焼要因発生時間が長かった。

基本設定の図 3 と比較して、外壁の表面温度が低くなったため、類焼要因発生時間が長くなったと考察した。

ウ 風速の変化

特徴的な結果が得られた実験No. 3 の通気層下部の風速について、図 14 をみると、加熱開始前後に、風速がほぼ無風の状態から約 0.4m/sec に上昇した。また、出火直前では、さらに風速が約 1.5m/sec に上昇した。

また、実験No. 7 の通気層下部の風速について、図 15 をみると、前述の結果と同様で加熱開始時前後、出火直前のタイミングで風速が増加した。

このことから、燃焼に必要な酸素は、通気層から供給され、火源の火熱により通気層内がドラフト効果により通気層内の換気が促進され、酸素の供給が進み、燃焼が促されたと考察した。

(3) 断熱材の厚さと位置の影響

実験No. 8、9 では、充填断熱材の厚さを変化させたときの燃焼性状の変化を確認することを目的とした。また、実験No. 10 では断熱材を外装材側に設置した外張断熱、実験No. 11 では充填断熱に加えて外張断熱を設置した充填外張断熱の違いについても確認した。

ア 充填断熱 厚さ 75mm 実験No. 8

仕様の概要を図 2(4)に示した。柱付近（4 列）の温度変化について、図 16 をみると、時刻約 25 分に測定位置 4 a、4 b において急激に温度が上昇し約 500℃になった。基準設定の図 3 と比較して、温度が時刻約 25 分で降約 15 分間で最大 700℃になり、短時間で温度上昇した。

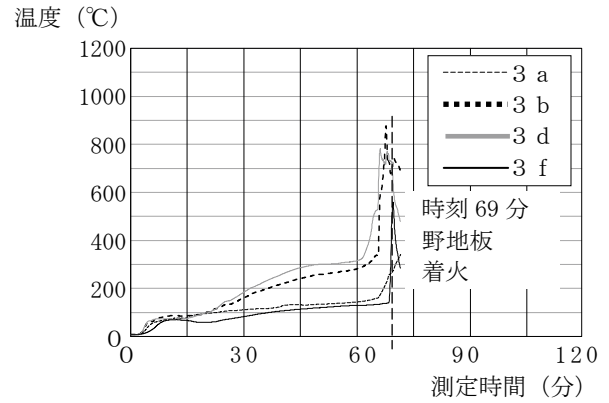


図 13 通気層内 3 列の温度変化 実験No. 6
加熱高さ 700mm 加熱距離 800mm

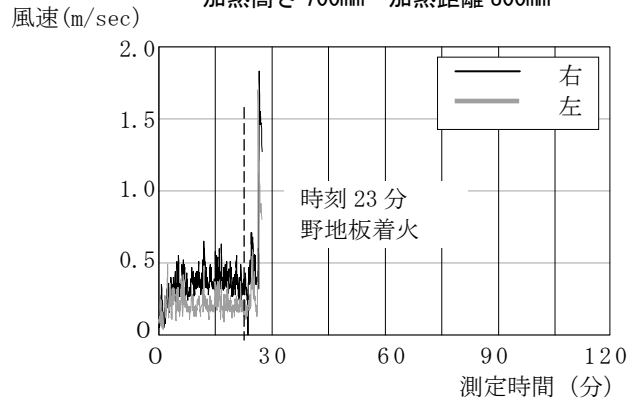


図 14 通気層下部の風速変化 実験No. 3
加熱高さ 700mm

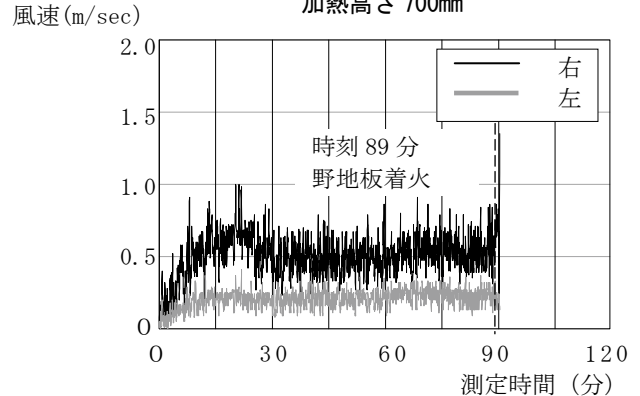


図 15 通気層下部の風速変化 実験No. 7
加熱高さ 1100mm 加熱距離 800mm

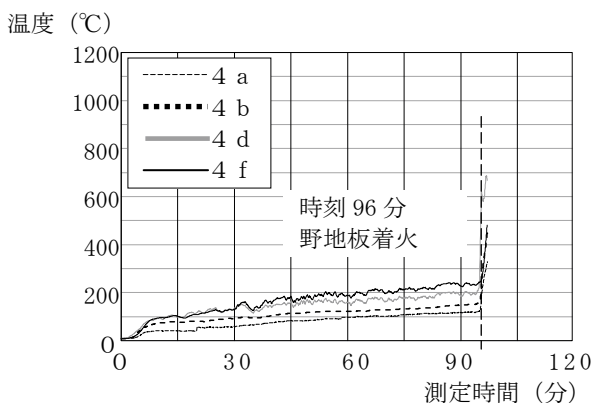


図 12 通気層内 4 列の温度変化
実験No. 5 加熱距離 800mm

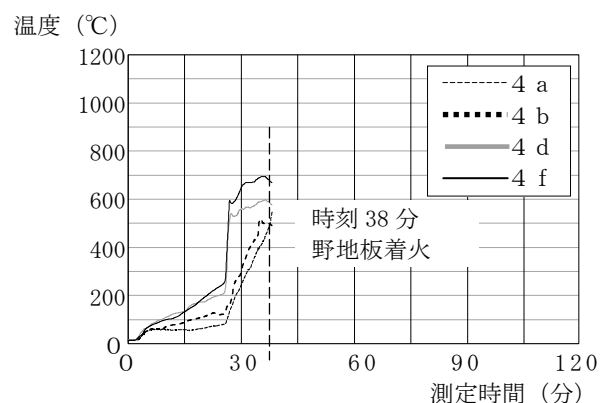


図 16 通気層内 4 列の温度変化
実験No. 8 充填断熱 厚さ 75mm

間柱付近(1列)の温度変化について、図17をみると、測定位置1fの温度が約600℃であった。基本設定の図5と比較して時刻約30分までは全体で200℃を超えなかった。

外装材を取り外した状態について、写真4をみると、柱の側面に沿って炭化していた。グラスウールは上部で溶融していなかった。

断熱材厚さ105mmの試験体と比較し、短時間で試験体上部まで延焼が進んだ原因としては、単に断熱材が薄くなったことにより、通気空間が増加したため、通気層内の燃え上がり速度が速くなり、野地板に着火する時間が短くなったと考察した。

通気層内の燃え上がり速度が速くなった原因として、次の2点が挙げられた。

断熱材が薄くなったことで、断熱材を溶融することなく、通気層に面した柱側面が延焼できたこと。

柱側面の燃焼に必要な通気層内の空気の循環がより促進されたこと。

なお、断熱材の断熱性能は、通気空間の増加の影響と比較し、試験体内部の炎症促進にあまり関係しないと考えられた。

イ 充填断熱 厚さ30mm 実験No. 9

仕様の概要を図2(5)に示した。柱付近(4列)の温度変化について、図18をみると、時刻約25分に全体で急激に温度が上昇した。基準設定の図3と比較して、測定位置4fにおいて時刻25分以降約1分後に約700℃を超え、短時間で温度上昇した。

間柱付近(6列)の温度変化について、図19をみると、時刻約20分に全体で急激な温度上昇が生じた。基本設定の図5と比較して、時刻約20分以降の温度上昇が大きかった。

外装材を取り外した状態について、写真5をみると、グラスウールのほとんどが溶融していた。また、柱の側面が炭化していた。

断熱材厚さ75mmの試験体と比較し、さらに短時間で試験体上部まで延焼が進んだ原因としては、実験No. 8の考察と同様の原因で、断熱材がさらに薄くなったことで、通気空間がより増加し、通気層内の燃え上がり速度が速くなったと考察した。

ウ 外張断熱 厚さ66mm 実験No. 10

仕様の概要を図2(6)に示した。柱付近(4列)の温度変化について、図20をみると、測定位置4fでは時刻約10分以降から急激な温度上昇が生じ、900℃を超えた。基本設定の図3と比較して、下部(測定位置4f)は高温になったが、上部(測定位置4a)は時刻50分の時点で300℃を超えず、野地板に着火していなかった。

検証後の外装材を取り外した状態の試験体について、写真6をみると、外張断熱材が通気層上部で膨張し通気層を塞いでいた。

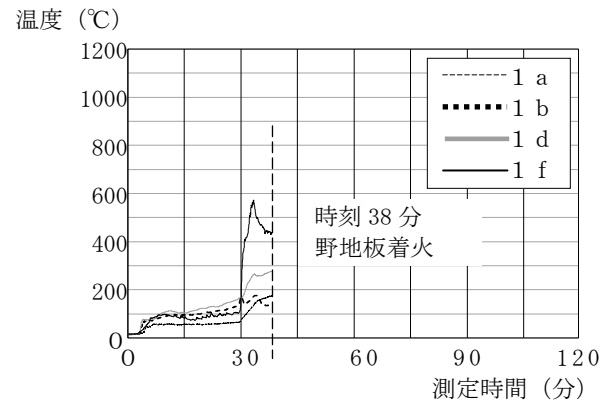


図17 通気層内1列の温度変化 実験No. 8
充填断熱 厚さ75mm

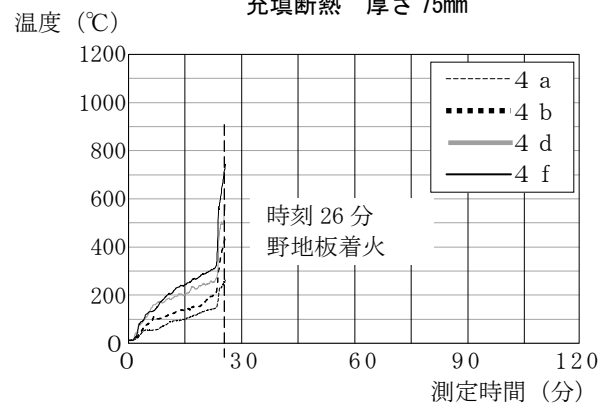


図18 通気層内4列の温度変化 実験No. 9
充填断熱 厚さ30mm

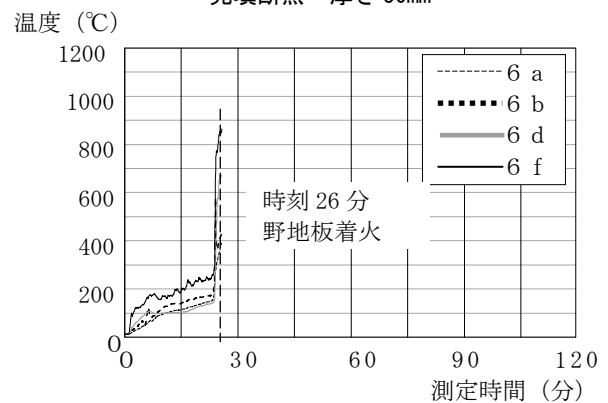


図19 通気層内6列の温度変化 実験No. 9
充填断熱 厚さ30mm

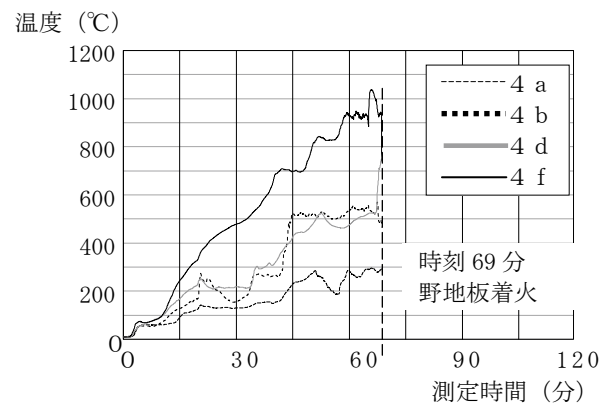


図20 通気層内4列の温度変化 実験No. 10
外張断熱

エ 充填外張断熱実験 No.11

仕様の概要を図2(7)に示した。柱付近(4列)の温度変化について、図21をみると、急激な温度上昇は、時刻約45分に起きた。通気層下部(測定位置4f)は最大900℃を超えた。通気層上部(測定位置4a)は、野地板への着火直前の約75分前後まで200℃を超えなかった。検証後の外装材を取り外した状態の試験体について、写真7をみると、外張断熱材が火熱により膨張していた。実験No.10の結果と同様であった。

よって、外張断熱材が火熱により膨張して、上端部付近の通気層を塞いでいたことにより、通気層内の通気が妨げられ、燃焼による熱気が通気層上方向に伝わらず、延焼に時間を要したと考察した。

(4) 通気層の影響 通気層なし

実験No.12では、通気層の有無の影響を確認することを目的として、通気層のない場合を調査した。仕様の概要を図2(8)に示した。

外壁上端部の温度変化について、図22をみると、全体において最大で約50℃であった。基本設定である実験No.2の通気層上端部の温度変化について、図23をみると、測定位置3a、5aにおいて最大500℃であった。基本設定の実験No.2と比較すると、通気層なしの実験No.12の方が低い温度であった。また、検証後の外装材を取り外した状態の試験体について、写真8をみると、グラスウールは火源の位置を中心として同心円状に熔融し、外壁内上方向に熔融は広がっていなかった。

このことから、外壁内に通気層による酸素の供給がないため、外壁内では延焼しなかったと考察した。また、通気層のある試験体においては、通気層より、燃焼に必要な酸素が供給されたと追認した。

(5) 工法の影響 枠組工法

実験No.13では、外壁の構造材等の影響を調査するため、荷重を柱等で支持する軸組工法と、柱壁一体で支持する枠組工法の違いを確認することを目的とした。仕様の概要を図2(9)に示した。

柱付近(4列)の温度変化について、図24をみると、時刻約20分以降に温度が急上昇し、測定位置4fにおいて時刻約30分に最高1000℃を超えた。基本設定の図3と比較すると、時刻約20分以降の温度上昇が大きかった。

間柱付近(6列)の温度変化について、図25をみると時刻約30分に測定位置6fにおいて800℃を超えた。基本設定の図5と比較すると、通気層下部は高温になったが、通気層上部は最大約300℃で変わらなかった。

検証後の外装材を取り外した状態の試験体について、写真9をみると、通気層全面で炭化していた。木材である構造用合板を、通気層に面して全面に張り付けているため、加熱により通気層全面で燃焼、高温になり、類焼要因発生時間が短くなったと考察した。

(6) 熱気止め材の影響

実験No.14では、外壁内の通気層の延焼を防ぐために設けた通気役物の熱気止め材の影響を確認することを目的とした。仕様の概要を図2(10)に示した。

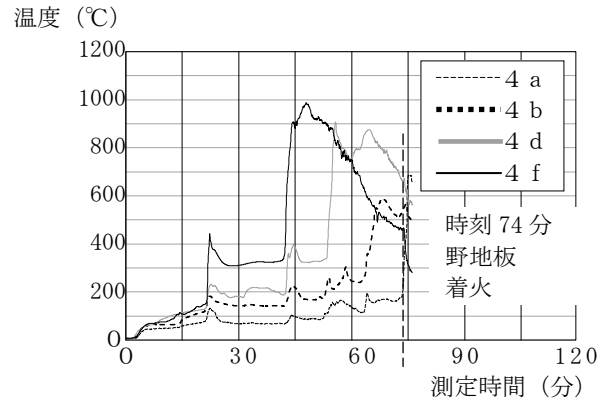


図21 通気層内4列の温度変化 実験No.11
充填外張断熱

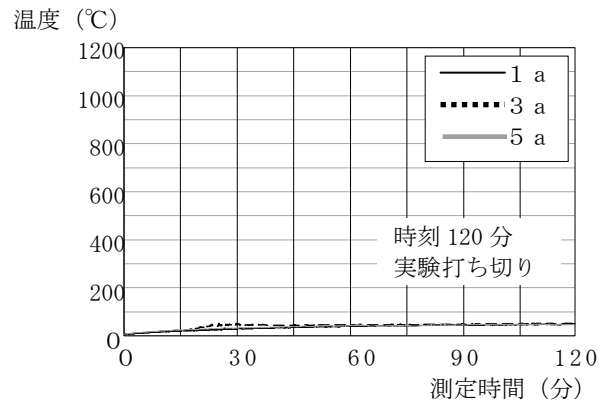


図22 通気層上端部の温度変化 実験No.12
通気層なし

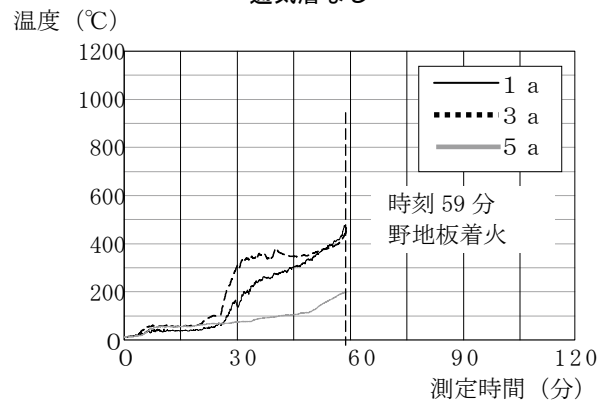


図23 通気層上端部の温度変化 実験No.2
基本設定

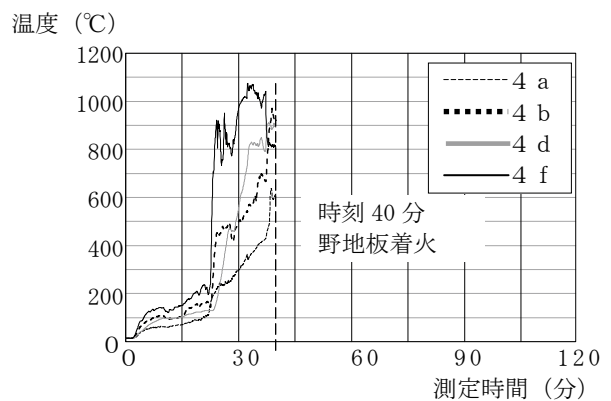


図24 通気層内4列の温度変化 実験No.13
枠組工法

通気層上端部の温度変化について、図 26 をみると、時刻約 45 分までは 200℃以下であったが、その後通気層上部(測定位置 2 a、3 a)の温度が約 700℃まで上昇した。基本設定の図 23 と比較すると、時刻約 40 分までは 200℃を超えなかった。これは、熱気止め材の効果により、時刻約 40 分までは上方向に延焼せず、上端部で約 200℃を超えなかったが、時刻約 45 分以降に急激な燃焼により通気層上部が燃焼したと考察した。検証後の試験体の柱付近について、写真 10 をみると、柱の側面部分が炭化していた。

このことから、延焼経路になるのは、通気胴縁だけでなく、柱も含まれることを再確認した。

(7) 通気胴縁の張り方向の影響 横張り通気胴縁

実験No. 15 では、壁体内の通気層内に設けた通気胴縁張り方向について、縦張り通気胴縁と横張り通気胴縁の違いを確認することを目的とした。仕様の概要を図 2 (11) に示した。

柱付近の温度変化について、図 27 をみると下部は時刻約 15 分以降に高温になり 900℃を超えた。また、上部の温度上昇は緩やかであった。

基本設定の図 3 と比較すると、下部は高温であったが、上部は 300℃を超えなかった。これは、火源の火熱により通気層下部の温度は上昇するが、通気胴縁が横張りであるため、火熱の上方向伝播が少なかったと考察した。

また、通気層上端部の開口について、写真 11 をみると、通気層の上端部の開口面積は、基本設定と比較して小さいことから、壁内の通気層内の熱気の排気が少なく、通気層内が高温になったと考察した。

さらに、検証後の試験体について、延焼経路と考えられる柱付近の延焼状況について、写真 12 をみると、加熱位置付近の柱は炭化していたが、通気層上部では炭化していなかった。

このことから、通気胴縁の張り方向を横張りとする、外壁内から小屋裏へ着火する前に外壁を貫通する炎が出たため、通気層内の上方向への火炎伝播を抑制する施工方法として有効であると考察した。

(8) 目地の影響 縦目地なし

実験No. 16 では、外装材の縦目地の有無による外壁内部への延焼の影響について確認することを目的として縦目地のない場合を調査した。仕様の概要を図 2 (12) に示した。

柱付近(4列)の温度変化について、図 28 をみると、時刻約 20 分以降の全体の温度が急激に上昇し、600℃を超えた。基本設定の図 3 と比較すると、時刻約 20 分以降の温度上昇が大きく、測定位置 4 f では 1000℃を超えた。

目視により時刻約 20 分に外装材の亀裂落下を確認した。検証後の試験体の様子を、写真 13 に示した。このことから、約 20 分前後に外壁内で急激な燃焼が生じ、火熱による熱変形が原因で、外装材に亀裂が入り、外装材が外壁から落下し、その亀裂部分から酸素が供給され急激な燃焼に至ったと考察した。

以上から、目地部分は、防火性能上弱点となるより、外装材の火熱による変形に対して目地幅が変化することにより、亀裂等の発生を最小限に留める役割があると考察した。

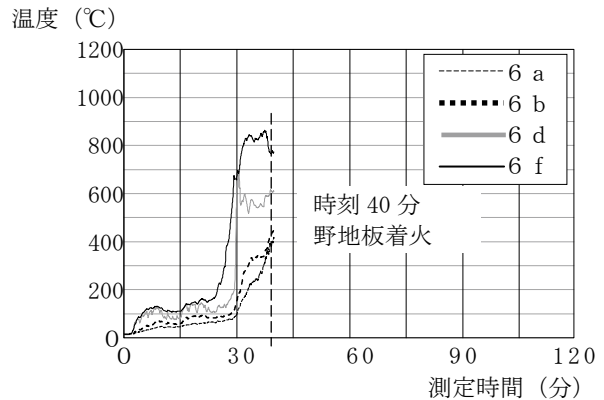


図 25 通気層内 6 列の温度変化
実験No. 13 枠組工法

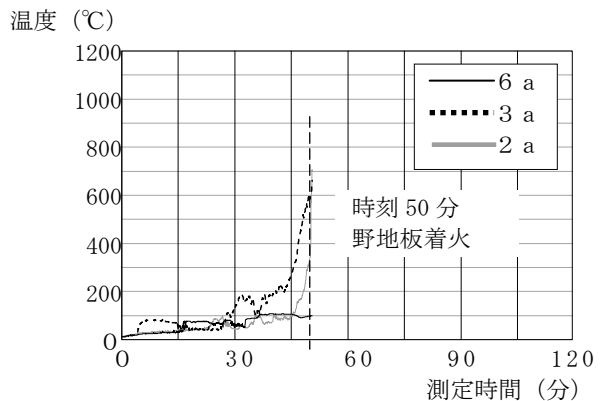


図 26 通気層上端部の温度変化
実験No. 14 熱気止め材

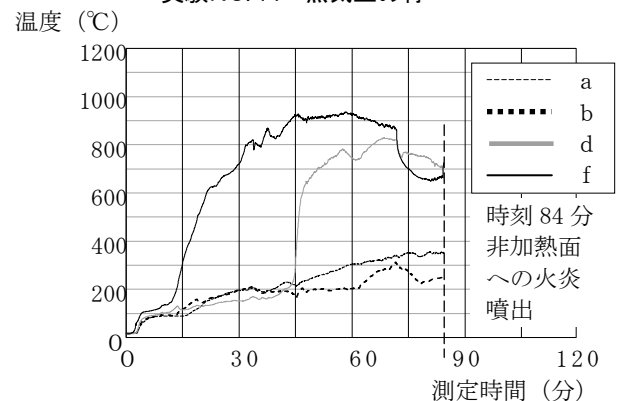


図 27 通気層内柱付近の温度変化
実験No. 15 横張り通気胴縁

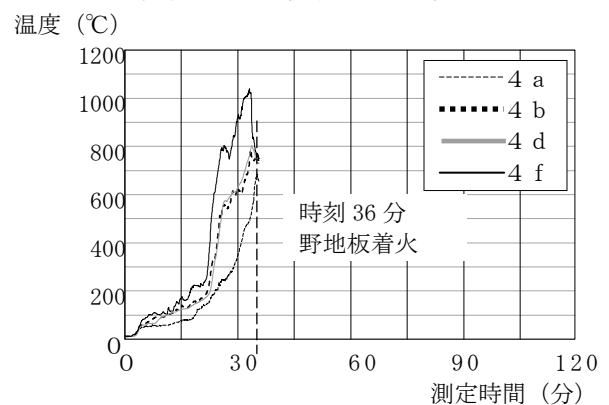


図 28 通気層内 4 列の温度変化
実験No. 16 縦目地なし

(9) 内装材仕上げの影響 モルタル仕上げ

実験No.17では、内装材を石膏ボードで仕上げた乾式と、モルタルで仕上げた湿式の違いを確認することを目的とした。仕様の概要を図2(13)に示した。

柱付近(3列)の温度変化について、図29をみると、時刻約20分に通気層下部(測定位置3f)で急激に温度が上昇し、700℃を超えた。また、通気層上部(測定位置3a、3b)では時刻約45分までは300℃以下であった。基本設定の図3と比較すると、下部は高温である一方、上部は温度上昇が緩やかであった。これは、モルタルの防火特性により、モルタル内の含有水が蒸発作用により通気層内の温度上昇を抑制させたと考えた。

間柱付近(1列)の温度変化について、図30をみると、時刻約30分までは全体が200℃以下であった。時刻約30分以降、急激に温度上昇し、最高1000℃を超えた。基本設定の図5と比較すると、時刻約30分以降に急激な温度上昇があった。

また、目視により時刻約45分に外装材が亀裂落下したことを確認した。さらに、検証後の外装材を取り外した状態の試験体について、写真14をみると、外壁内のラスモルタルを固定するため、全面に張り付けた木摺下地が炭化していた。

このことから、内装材と断熱材の間に張り付けた木摺下地が着火したことにより、外壁内全面が燃焼してより高温になり、さらに外装材の熱変形による亀裂により多量の酸素が供給され、さらに高温になったと考えた。

(10) 防耐火構造の影響

実験No.18、19では、防耐火性能が異なる準耐火(45分)構造と防火構造の違いを確認することを目的とした。仕様の概要を図2(14)に示した。試験体の仕様について、基本設定では内装材の石膏ボードが厚さ12.5mm2枚であったのに対し、実験No.18は内装材の石膏ボードが厚さ12.5mm1枚で、実験No.19は石膏ボードが厚さ9.5mm1枚とした。

実験No.18の柱付近(4列)の温度変化について、図31をみると時刻約25分に急激な上昇と同時に着火した。基準実験の図3と比較すると、時刻約25分以降の上部(測定位置4a)の温度が800℃と高温であった。

実験No.19の柱付近(3列)の温度変化について、図32をみると、時刻約20分以降に全体の温度が400℃以上になり、実験No.18と同様の結果であった。

石膏ボードの熱抵抗のメカニズム³⁾は、石膏ボードに含有する結晶水が火熱による熱分解により水蒸気として放出され、水和熱として外壁内の温度上昇を抑制するもので、防火構造では、準耐火構造と比較して、結晶水の総潜熱量が減少したため、通気層内上部へ早く熱が伝わったと考察した。

(11) 軒の影響 軒の出あり

実験No.20では、火源の火熱により、軒裏に滞留した熱気が延焼を助長する可能性を調査するため、外壁に加えて軒を再現し、その影響を確認することを目的とした。

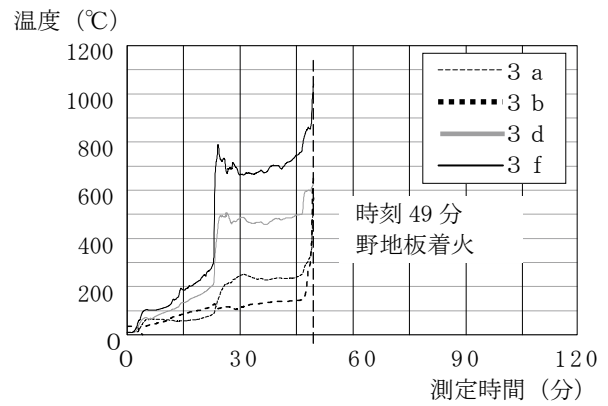


図29 通気層内3列の温度変化
実験No.17 内装モルタル仕上げ

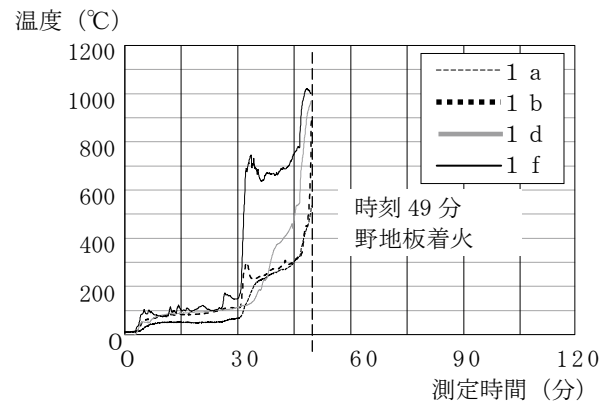


図30 通気層内1列の温度変化
実験No.17 内装モルタル仕上げ

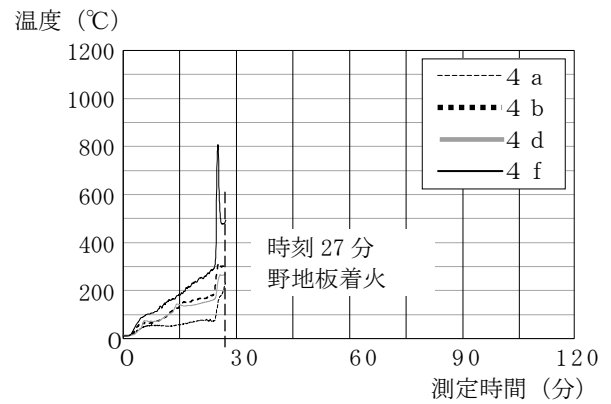


図31 通気層内4列の温度変化 実験No.18
防火構造 石膏ボード 厚さ9.5mm

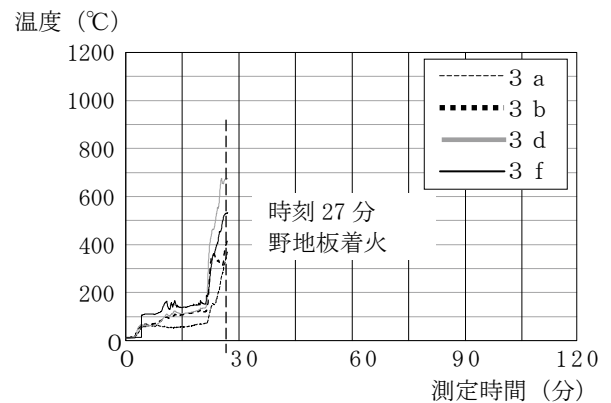


図32 通気層内3列の温度変化 実験No.19
防火構造 石膏ボード 厚さ12.5mm

通気層上端部の温度変化について、図 33 をみると、全体で 300℃を超えなかった。基本設定の図 23 と比較すると、全体的に低かった。

しかし、野地板見上げ面中間部の温度変化について、図 34 をみると、時刻約 30 分で最大 200℃を超えた。基本設定の図 7 と比較すると、時刻約 25 分までは差が少なかったが、その後約 5 分間で最大 200℃を超えた。これにより、火源の火熱により、軒先内の空気が暖められ、その熱気と通気層の熱気が野地板を加熱したことにより、類焼要因発生時間が短縮したと考察した。軒の出を有する場合は、外壁から野地板への着火を助長すると推察した。

(12) 軒元の小開口の影響

実験No. 21 から 26 では、換気のために設置した軒元の小開口から延焼する可能性を調査することを目的とし、自然換気方式と 24 時間換気方式による違いに着目した。

ア 自然換気方式

(ア) 試験体下部加熱 実験No. 21

通気層内の柱付近（4 列）の温度変化について、図 35 をみると、時刻約 30 分に温度上昇し、測定位置 4 f において約 900℃を超えた。基本設定の図 3 と比較して、類焼要因発生時間が増加したもの、大きな差はなかった。

換気口裏面側の温度の温度変化について、図 36 をみると、換気口で最大で約 150℃であった。換気口裏面側への火炎の燃え抜けはなかった。

(イ) 換気口脇加熱 実験No. 22

通気層内の柱付近（4 列）の温度変化について、図 37 をみると、時刻約 15 分で測定位置 4 b が約 500℃になった。換気口裏面側への火炎の抜けはなかった。

(ウ) 換気口中心加熱 実験No. 23

時刻約 6 秒に換気口裏面側への火炎の抜けたため、実験終了した。

この実験で想定される隣棟間の外壁相互に近接した小開口を有した場合の、隣棟の小開口からの火炎の火災安全性について、杉田らの既往研究⁴⁾では、「法令基準ではないが一定の安全策が必要と考えられる位置付けである」という考察があり、本実験からその現象が起こりうることを確認した。

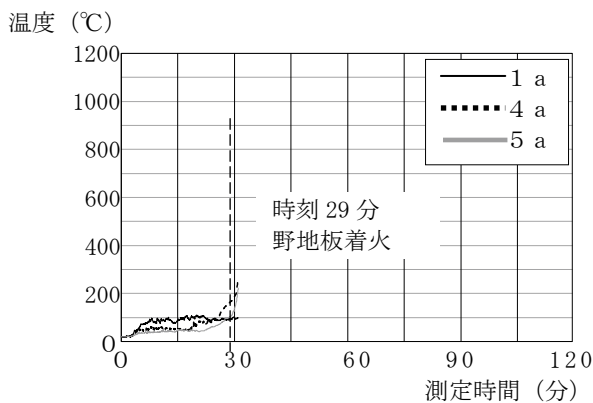


図 33 通気層上端部の温度変化
実験No. 20 軒のあり

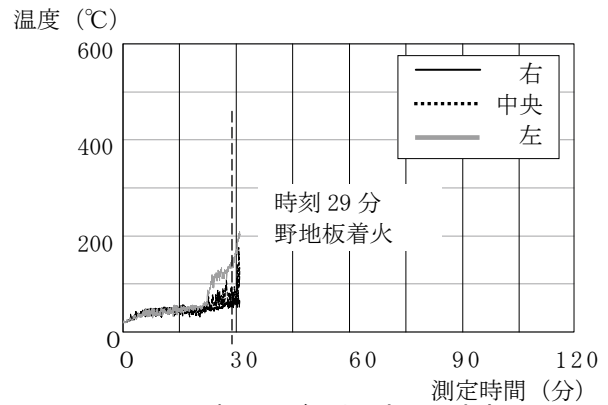


図 34 野地板見上げ面中間部の温度変化
実験No. 20 軒のあり

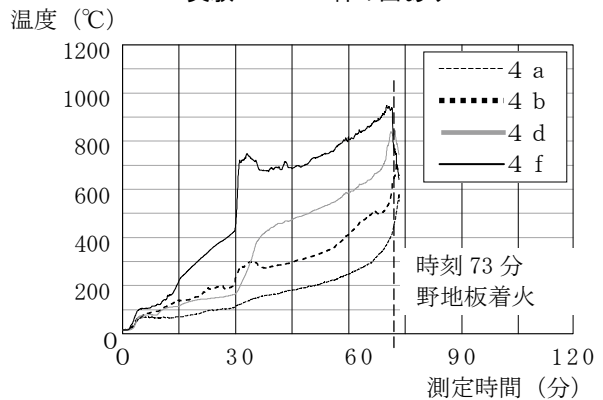


図 35 通気層内 4 列の温度変化
実験No. 21 自然換気口

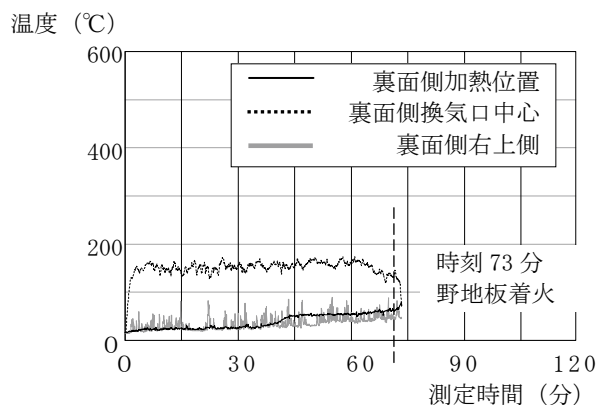


図 36 裏面の温度変化
実験No. 21 自然換気口

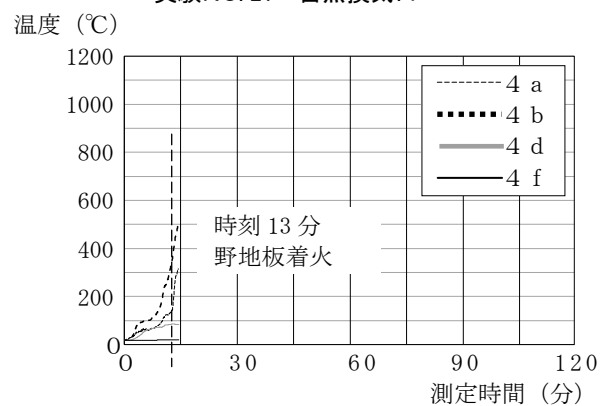


図 37 通気層内 4 列の温度変化 実験No. 22
自然換気口 換気口脇加熱

イ 24 時間換気方式

(ア) 試験体下部加熱 実験No.24

外壁表面での給気口での中心風速は平均 6.5m/sec、標準偏差は 0.1m/sec であった。

通気層内の柱付近（3列）の温度変化について、図 38 をみると、時刻約 20 分に急激な温度上昇が生じた。基本設定の図 3 と比較すると、大きな差はなかった。給気口から裏面側への火炎の燃え抜けは生じなかった。

また、給気口裏面側及び給気ファン入口の温度変化について、図 39 をみると、両者はほぼ同じ変化を示し、時刻約 33 分後に約 150℃から約 500℃に急上昇し、その後約 250℃まで低下した。これは、時刻約 33 分までは給気ファンは作動していたが、火熱により停止したものと考察した。検証後給気ファンは通電しなかった。給気口裏面側への火炎の抜けはなかった。

(イ) 給気口脇加熱 実験No.25

通気層内の柱付近（4列）の温度変化について、図 40 をみると、時刻約 15 分過ぎに測定位置 4 b において約 500℃になった。給気口裏面側及び給気ファン入口の温度変化について、図 41 をみると、両者は時刻約 3 分後に約 300℃に急上昇し、その後約 200℃まで低下した。これは、時刻約 5 分までは給気ファンは作動していたが、火熱により停止し、温度が下がったと考察した。検証後給気ファンは通電しなかった。給気口裏面側への火炎の抜けはなかった。

(ウ) 給気口中心加熱 実験No.26

時刻約 72 秒に、断熱ダクトが溶融し、給気口裏面側へ火炎が抜けたため、実験終了した。

4 重回帰分析による、類焼要因発生時間に影響を与える試験体の仕様の把握

(1) 計算の方法

類焼要因発生時間は、試験体の各仕様が外壁内の燃焼にもたらす影響が組み合わされた結果であると仮定し、重回帰分析により重回帰モデルの設定を試みた。重回帰モデルを用いて、どのような試験体の仕様が類焼要因発生時間に影響を与えているかについて整理し、考察した。

対象試験は、加熱位置が同一である実験No. 1、2、8 から 21、24 とした。ただし、野地板への着火が生じなかった実験No.12、15は除いた。また、小開口を有する試験体のNo.21、24は、小開口の火炎の貫通に関する検証を主眼としたため除いた。

各実験の目的変数及び説明変数のデータを表 2 に示した。目的変数は秒単位の類焼要因発生時間とした。独立変数について、「充填断熱材の厚さ」は mm 単位の量的変数とした。「外張断熱」「熱気止め材」「縦目地」「軒の出あり」はそれぞれ質的変数であったため、それぞれ施工した場合を「1」、施工しなかった場合を「0」とした。また、「工法」において、「軸組工法」を「1」に、「枠組工法」を「0」に変換した。内装仕上げにおいて、「乾式石膏ボード仕上げ」を「1」に、「湿式モルタル仕上げ」を「0」に変換した。「防火構造」において、「準耐火構造」を「1」に、「防火構造」を「0」に変換した。

(2) 目的変数及び各独立変数の相関係数

各独立変数の相関係数について、表 3 をみると、各値は高くなかったため、多重共線性の疑いは少ないと判断した。

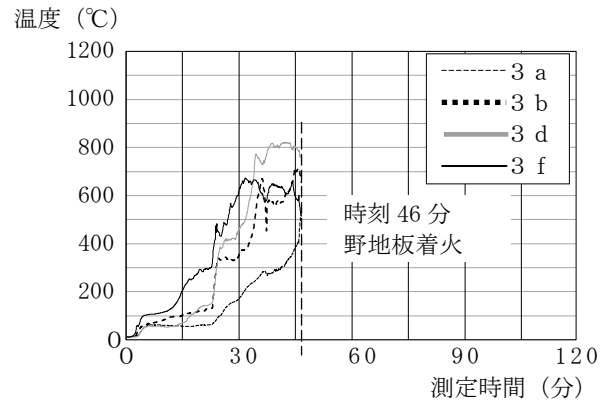


図 38 通気層内 3 列の温度変化
実験No. 24 24 時間換気給気口

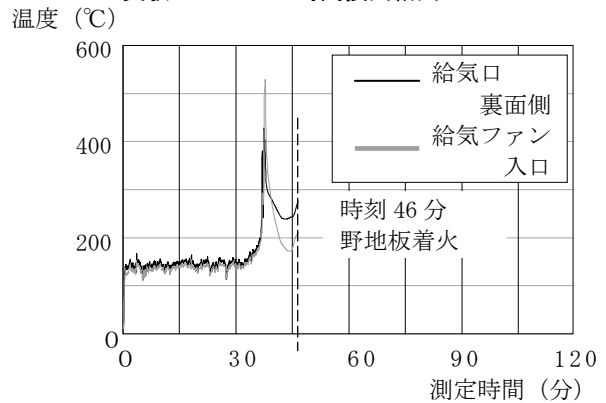


図 39 給気口裏面側及び給気ファン入口の温度変化
実験No. 24 24 時間換気給気口

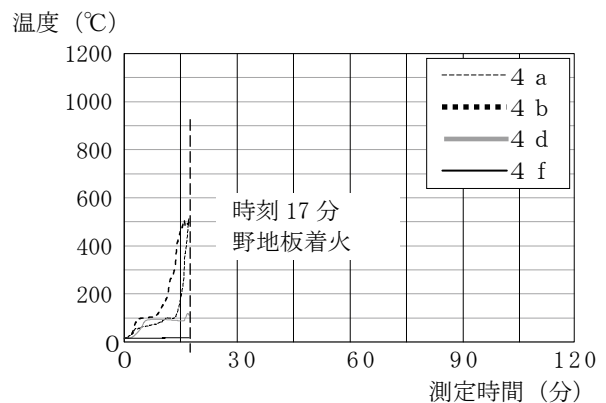


図 40 通気層内 4 列の温度変化 実験No. 25
24 時間換気給気口 給気口脇加熱

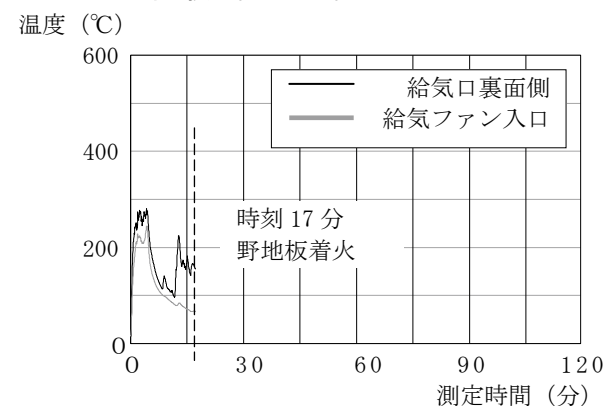


図 41 給気口裏面側及び給気ファン入口の温度変化
実験No. 25 24 時間換気給気口 給気口脇加熱

(3) 重回帰モデルの検定

変数減少法により各独立変数を選択しながら、重回帰モデルの検定を行った。

その結果、独立変数を「充填断熱材の厚さ」「外張断熱」「防耐火構造」「軒の出あり」を用いた重回帰モデル式が最も説明力のあるモデルと判断した。

採用した重回帰モデル式を式に示した。回帰統計について表4をみると、目的変数が持つ情報のうち、独立変数の変動を説明できる程度を示した決定係数は0.841で、自由度調整済み決定係数は0.761であった。

重回帰モデルの妥当性の検定について、表5をみると、有意確率F値が1%以下であり、帰無仮説「重回帰モデルは成立しない」は棄却でき、重回帰モデルは有意であると判断した。

重回帰モデル式の偏回帰係数の妥当性の検定について、表6をみると、各偏回帰係数の有意確率P値が10%以下で、帰無仮説「偏回帰係数は0である」を棄却した。また、絶対値の大きさが目的変数を説明する上での影響度を示したt値は低くなかった。以上から、重回帰モデル式の各偏回帰係数は妥当であると判断した。

残差の検定について、図42をみると、各残差は0を中心に隔たりなくランダムに表れているので、重回帰モデルの残差は妥当だと判断した。

(4) 結果

変数減少法により重回帰モデル式の検定を行い、試験体の各仕様のうち、「充填断熱材の厚さ」「外張断熱」「防耐火構造」「軒の出あり」の仕様は類焼発生要因発生時間に影響を与えると判断した。また、「工法」「熱気止め材」「縦目地」「内装仕上げ」は類焼発生要因発生時間に大きな影響を与えないと判断した。

(5) 解釈

得られた重回帰モデル式から、以下のように試験体の各仕様の効果を解釈した。

ア 式により他の目的変数が一定の場合、充填断熱が1mm薄くなれば、類焼発生要因発生時間が約10秒短くなると解釈できた。

イ 式により他の目的変数が一定の場合、外張断熱により、類焼発生要因発生時間が約34分長くなると解釈できた。ただし、この結果は外張断熱材にフェノールフォームを施工した場合の重回帰モデルの解釈であることに注意が必要である。

ウ 式により他の目的変数が一定の場合、防火構造と比較して、準耐火構造では、類焼発生要因発生時間が約19分長くなると解釈できた。

エ 式により他の目的変数が一定の場合、軒の出を有することで、類焼発生要因発生時間が約17分短くなると解釈できた。

5 まとめ

本検証は、外壁内から小屋裏への延焼現象に着目し、住宅の外壁と屋根の一部を再現した外気通気工法を用いた中規模の試験体による、類焼建物の外壁を擬似的に再現した燃焼実験を行ったものである。それらから、火熱が加えられた外壁内の温度分布等の性状を把握した。また、重回帰分析による要因解析を行い、類焼発生要因発生時間に影響があると判断した試験体の仕様を整理し、それらを、以下に列挙した。

表2 目的変数及び独立変数のデータ表

実験No.	類焼発生時間	充填断熱材の厚さ	外張断熱	工法	熱気止め材	縦目地	内装仕上げ	防耐火構造	軒の出あり
1	2976	105	0	1	0	1	1	1	0
2	3541	105	0	1	0	1	1	1	0
3	2264	75	0	1	0	1	1	1	0
9	1544	30	0	1	0	1	1	1	0
10	4111	0	1	1	0	1	1	1	0
11	4443	105	1	1	0	1	1	1	0
13	2424	105	0	0	0	1	1	1	0
14	2909	105	0	1	1	1	1	1	0
16	2137	105	0	1	0	0	1	1	0
17	2963	105	0	1	0	1	0	1	0
18	1617	105	0	1	0	1	1	0	0
19	1623	105	0	1	0	1	1	0	0
20	1741	105	0	1	0	1	1	1	1

表3 目的変数及び各独立変数の相関係数

	類焼発生時間	充填断熱材の厚さ	外張断熱	工法	熱気止め材	縦目地	内装仕上げ	防耐火構造	軒の出あり
類焼発生時間	1								
充填断熱材の厚さ	-0.151	1							
外張断熱	0.753	-0.470	1						
工法	0.069	-0.141	0.123	1					
熱気止め材	0.110	0.141	-0.123	0.083	1				
縦目地	0.159	-0.141	0.123	-0.083	0.083	1			
内装仕上げ	-0.101	-0.141	0.123	-0.083	0.083	-0.083	1		
防耐火構造	0.472	-0.209	0.182	-0.123	0.123	-0.123	-0.123	1	
軒の出あり	-0.283	0.141	-0.123	0.083	-0.083	0.083	0.083	0.123	1

$$Y = 10x_1 + 2067x_2 + 1116x_3 - 998x_4 + 565 \dots \text{(式)}$$

Y: 類焼発生時間 (秒)

X₁: 充填断熱材の厚さ (mm)

X₂: 外張断熱あり「1」なし「0」

X₃: 準耐火構造「1」防火構造「0」

X₄: 軒の出あり「1」なし「0」

表4

回帰統計	
重相関係数	0.917
決定係数	0.841
自由度調整済み決定係数	0.761
標準誤差	470.032
観測数	13

表5 モデルの妥当性の検定

	自由度	変動	分散	観測分散比	有意確率 F
回帰	4	9329090	2332272	10.557	0.003
残差	8	1767444	220930		
合計	12	11096533			

表6 重回帰式の偏回帰係数とその妥当性の検定

	偏回帰係数	標準誤差	t値	P値
切片	565	582.215	0.970	0.361
充填断熱材の厚さ	10	4.553	2.213	0.058
外張り断熱	2067	412.572	5.010	0.001
防耐火構造	1116	376.367	2.966	0.018
軒の出あり	-998	502.113	-1.987	0.082

残差 (分)

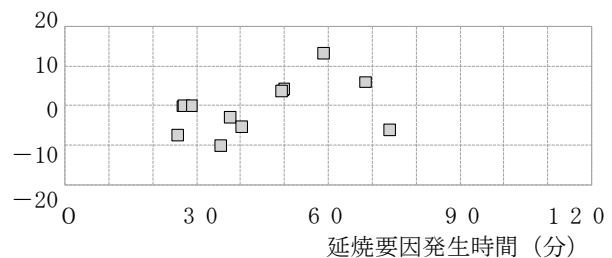


図42 残差の検定

(1) 外壁内から小屋裏への延焼メカニズムの把握

酸素、着火源及び可燃物が揃えば延焼拡大するとされている。この観点に着目すれば、次のように考察した。

ア 酸素の供給

通気層がない実験では、野地板への着火は起きなかった。また、通気層下部の風速は、加熱後及び野地板の着火後に増加した。このことから、酸素は通気層から供給されたと考察した。

イ 着火源

外装材は準不燃材で、亀裂等が生じなかった実験でも、外壁から小屋裏への延焼が起こった。火源により加熱された外装材から通気胴縁に伝導により熱が伝わり、通気層からの酸素の供給により、通気胴縁が発火に至ったと考察した。

ウ 着火源及び延焼経路

通気層に面する縦張り通気胴縁側面で発火し、その燃焼によって生じる熱や火源の火熱によりガラスウールを溶解することで、通気空間が増加するとともに、柱側面がより通気層に表出し、柱側面を燃焼しながら、急激な温度上昇を伴って通気層内を燃焼拡大したと考察した。

延焼経路について、火炎は、通気層に面する柱側面を中心とし、その他縦張り通気胴縁側面及び構造用合板等の可燃物に沿って上方向に伝播し、上枠に着火後火炎が小屋裏に立ち上がり、野地板に着火したと考察した。

(2) 試験体の仕様における類焼要因発生時間に与える影響

類焼要因発生時間がより短時間又は長時間となる試験体の仕様は、その延焼メカニズムの影響度が大きいという前提のもと、加熱位置が同一で外壁から小屋裏へ着火した実験について、重回帰分析による要因解析を行った結果は以下のとおりである。

ア 重回帰分析による要因解析から、「充填断熱材の厚さ」「外張断熱」「防耐火構造」「軒の出あり」の仕様が、類焼要因発生時間に影響を与えると判断した。

イ 重回帰分析による要因解析から、「工法」「熱気止め材」「縦目地」「内装仕上げ」の仕様が、類焼発生要因発生時間に大きな影響を与えないと判断した。

(3) 影響を与えると判断した試験体の仕様と延焼メカニズムの関係

類焼要因発生時間に影響を与えると判断した試験体の仕様について、延焼メカニズムに以下の作用があると考察した。

ア 「充填断熱材の厚さ」について、断熱材が薄くなることで、通気空間が増えたため、通気層内の延焼を促進し、類焼要因発生時間が短くなったと考察した。

イ 「外張断熱」について、外張断熱材として使用したフェノールフォームが火源の火熱により膨張し通気層を塞いだため、通気層内の延焼を抑制し、類焼要因発生時間が長くなったと考察した。

ウ 「防耐火構造」について、防火構造と比較して準耐火構造は石膏ボードが厚く、石膏ボードに含有する結晶水の総潜熱量が増加したため、結晶水による水和熱により外壁内の温度上昇を抑制し、類焼要因発生時間が長くなったと考察した。

エ 「軒の出あり」について、軒の出を有する外壁は、類焼要因発生時間が短くなった。このことから、本検証ではほとんどが軒の出がない仕様で検証を行ったが、

実際の住宅は軒の出を有するものが多いと推察されることから、本検証で得られた類焼要因発生時間を、実際の火災にそのまま適用するのではなく、より短時間で外壁内から小屋裏へ着火すると考察した。

6 おわりに

以上から実験で得られた消防活動上の留意事項は、以下のとおりである。

- (1) 盛期火災に至った火災室の開口からの噴出火炎により、隣棟の住宅の外壁が煽られた場合には、たとえ、非加熱側の室内に変化がなくても、原則どおり隣棟にも筒先を配置するとともに、軒の出を有する外壁には、優先的に警戒筒先を配置する必要があると考えられる。さらに、小屋裏等に重点的に警戒し、煙等の発生状況から延焼状況を確認する必要があると考えられる。
- (2) 外観からの判断は困難であるが、準耐火構造より防火構造の方が、また断熱材が薄い傾向にあるより古い住宅の方が、より短時間で外壁内から小屋裏へと延焼することを念頭に置いて、活動する必要があると考えられる。
- (3) 外壁内の延焼状況の確認について、延焼経路が主に柱及び通気胴縁になることから、消防活動においてそれらを重点的に確認する必要がある。柱の位置が外観上特定困難な場合は、柱上に外装材の目地を設けることから、目地の位置が目安になる可能性があると考えられる。
- (4) 外壁破壊により外壁内の火災の延焼状況を確認することは、外壁内で火炎が発生していた場合通気層内に多量の酸素を供給することになり、外壁内の延焼を促進し、小屋裏等へ延焼拡大する可能性があることから、小屋裏等へ警戒筒先を配置した後に行う方が安全であると考えられる。
- (5) 大規模の建売住宅でみられるような隣棟間で左右対称の平面形態では、換気口等の小開口が相対することになる。そのような、隣棟間の外壁相互に小開口を有した場合、隣棟の小開口からの火災が数秒で外壁小開口を貫通する恐れがあることから、早期に筒先を配置し警戒する必要があると考えられる。

[参考文献]

- 1) 大宮喜文：木質外装材の火災安全性、自主防災、No229、P16～17、2012年9月
- 2) 松山知生他3名：壁内通気層を有する木質系建築物の延焼阻止工法に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集、P309～312、2005年
- 3) 小野博宣他10名：建築材料、P274、理工図書、2001年4月
- 4) 杉田敏之他10名：木質系住宅の防火性能コンプライアンス検討（その2 検討項目の詳細と取組優先順位）、日本建築学会大会講演梗概集、P91～92、2009年8月



写真1 試験体の様子
実験No. 1 基本設定



写真2 外装材取り外し
実験No. 1 基本設定

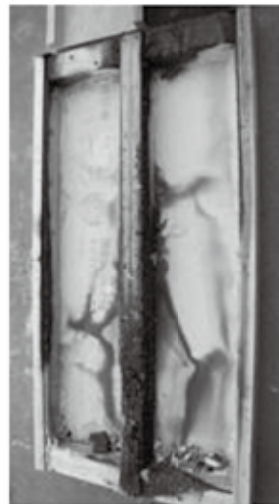


写真3 グラスウール
取り外し
実験No. 1 基本設定

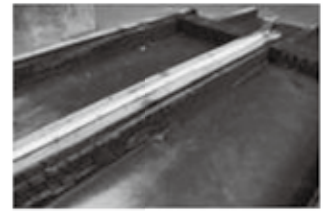


写真5 外装材取り外し
実験No. 9
充填断熱 厚さ 30mm

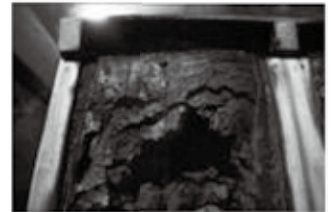


写真6 外装材取り外し
実験No. 10
外張断熱



写真4 外装材取り外し
実験No. 8
充填断熱 厚さ 75mm



写真8 外装材取り外し
実験No. 12
通気層なし



写真9 外装材取り外し
実験No. 13
枠組工法

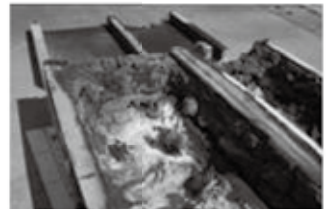
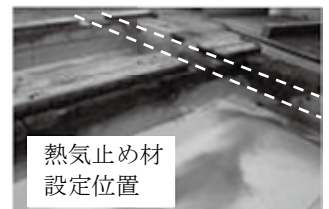


写真7 外装材取り外し
実験No. 11
充填外張断熱



熱気止め材
設定位置



写真12 外装材取り外し
実験No. 15
横張り通気胴縁

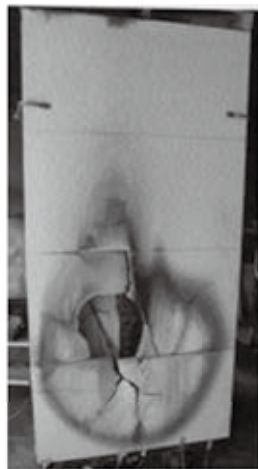


写真13 試験体の様子
実験No. 16
縦目地なし



写真14 外装材取り外し
実験No. 17
内装モルタル仕上げ

写真10 外装材及び
グラスウール取り外し
実験No. 14
熱気止め材



写真11 通気層上部の開口
実験No. 15
横張り通気胴縁