

溶接・溶断火花に対する有機系断熱材の難燃性試験・評価方法の検討

Study of flame retardancy evaluation test method against welding, fusing spatters for formed plastic insulation materials.

尾崎 悠平*1、鈴木 秀和*2、豊田 康二*3

1. はじめに

建設中工事現場において、溶接・溶断火花を火源とした火災が問題となっている。これは、完成前の露出した有機系断熱材の近傍で溶接・溶断作業を行い、その際に発生する火花が火源となり、有機系断熱材に引火して延焼する事例が多発しているからである。

国内における材料の難燃性評価は、国土交通省大臣認定の性能評価試験方法が一般的である。この性能評価試験では、主に「燃焼性」や「有害性」の性能を確認しており、温度上昇、発熱量やマウスの行動停止時間を判定の基準としている。これらは完成後の建物において、初期火災の拡大を遅らせることおよび避難上支障がないことを達成するための基準である。火災原因を特定していないため、外力を一定に供給できるバーナー又はヒーターを火源としている。

一方、上記の火災においては、溶接・溶断火花という特定の外力に対する有機系断熱材の難燃性能が問われており、直接的にその性能を把握することが重要であると考え。溶接・溶断火花を火源とした材料の難燃性を確認する試験方法が見当たらないため、本研究では、それらを火源とした新たな試験・評価方法を検討している。

2. 溶接火花に対する試験・評価方法の概要

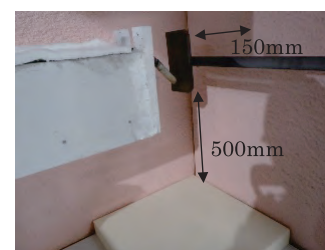
2.1 試験体形状

実際の建設工事現場では、様々な条件下で溶接作業が実施され、一般的な状況を試験体に再現することが困難であるため、より厳しい（燃え広がりやすい）条件を再

現した試験体とすることが望ましいと考える。そこで、床面および壁面に可燃物である有機系断熱材が施工された条件が厳しいと考え、試験体は写真-1-a)に示す通り、床面および壁面に有機系断熱材を配置し、且つ、壁入隅部を再現した形状とした。なお、床面の有機系断熱材（以下、一次着火物と呼ぶ）は、450mm角の大きさとし、壁面の有機系断熱材（以下、二次着火物と呼ぶ）は、幅910mm×高さ1820mmとした。火災シナリオは、溶接作業によって発生した火花が落下後、その火花に接触した可燃物が燃焼し、炎が壁面に延焼するといった状況を想定した。



a) 試験体全景



b) 溶接位置拡大

写真-1 試験体

2.2 実験条件

実験に使用する溶接機は、一般的に使用されている半自動アーク溶接機（Panasonic製：YW-35KB）を用い、電圧25V、電流200Aの出力に設定した条件で、1.2mm径の溶接ワイヤ（神戸製鋼製：DW-Z110）を12mm厚の鋼板に連続アーク接触させ、溶接火花を自

*1 OZAKI Yuhei : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐火部 評価業務室

*2 SUZUKI Hidekazu : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐火部 防耐火構造・材料試験室

*3 TOYODA Koji : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐火部 評価業務室 室長 博士(工学)

由落下させた。また、溶接位置は写真-1-b)に示す通り一次着火物より上方に500mm、二次着火物より水平に150mmの位置とした。

2.3 測定項目および評価指標

試験体を集煙フード直下に設置し、ガス分析装置を用いて酸素消費法で発熱速度を測定した。一次着火物が燃焼し、二次着火物へ延焼するまでの時間は、材料の難燃性を評価する上で重要な因子である。そこで、欧州の防火材料の基準にも用いられるEN規格の指標である式(1)に示すFIGRA (Fire Growth rate index)¹⁾を用いることとした。

$$FIGRA = 1000 \times \left(\frac{HRR}{t} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、HRR：発熱速度[W]、t：時間[秒]

なお、以降では発熱速度と総発熱量が一定値以下の場合を無視するFIGRA_{0.2MJ}(2)を用いている。

$$FIGRA_{0.2MJ} = (HRR > 3kW) \text{ and } (THR > 0.2MJ) \dots (2)$$

ここで、THR：総発熱量[MJ]

2.4 実験

2.4.1 天井材の有無による影響の確認

一般的に、閉鎖された室内空間で発生した火災においては、炎が天井に達すると、天井面からの輻射等の影響により、一気に火災が拡大する可能性がある。建設工事現場の溶接作業は、室内空間で実施することがあり得ることから、天井材を設置した影響を確認することとした。

試験体は表-1に示す通り、A-1は一次着火物を厚さ50mmの硬質ウレタンボード、二次着火物を厚さ30mmの吹付け硬質ウレタンフォーム(下地：せっこうボード12.5mm)とした。B-1は、A-1に二次着火物と同じ材質の天井材を設置した。

実験結果は写真-2に示す通り、天井材がなしのA-1は二次着火物に着炎し、炎は直上に延焼していった。天井材が有りのB-1は二次着火物に部分的に着火したものの、あまり延焼しない結果となった。これは、B-1の場合には、一次着火物の炎が入隅部から離れる方向に傾いており、天井材を設けたことにより集煙フードへの吸込み気流が変化し、一次着火物および二次着火物の可燃性ガス・炎が直上に広がらなかったと考えられる。また、火球の落下位置のばらつきも影響したと考えられる。以上の要因から、天井設置により一気に火災が拡大するという試験結果を得ることができなかった。

2.4.2 一次着火物の比較(ブランク試験)

一次着火物の燃焼性が高ければ、前述した要因の影響

を受けにくいと考え、硬質ウレタンボードとポリスチレンボードとで燃焼状況を比較した。

試験体は表-1に示す通り、C-1は一次着火物を厚さ50mmの硬質ウレタンボード、二次着火物をなしとし、せっこうボード12.5mmのみとした。D-1は、一次着火物を厚さ50mmのポリスチレンボードとし、二次着火物はC-1と同じくなしとした。

実験結果について、硬質ウレタンボードは、溶接火花によって着火するものの、5分間溶接火花発生を継続したが、溶接終了後より2分弱で自己消火し、一次着火物全体へ燃焼が拡大しなかった。一方、ポリスチレンボードは燃焼が激しかったため2.5分弱で溶接火花発生を終了し、一次着火物全体が燃え尽きるまで燃焼が継続した。なお、試験中の状況は写真-2に示す。以上のことから、ポリスチレンボードの方が、燃焼性が高いことが分かった。

2.4.3 一次着火物の比較(天井材あり)

ポリスチレンボードの方が燃焼性が高いことが確認できたため、B-1との比較をおこなうこととした。試験体については、B-1と一次着火物以外の条件を合わせた。記号はE-1とし、詳細は表-1に示す。

実験結果について、試験開始から60秒時に溶接を終了し、その後、観察を行った結果、写真-2に示す通り、激しく燃焼することを確認した。これまでの実験結果から、一次着火物は一定の可燃性がないと二次着火物に延焼しないことが分かった。前述した試験結果等から、本研究における一次着火物はポリスチレンボードに統一することとし、試験対象物は二次着火物および天井材の有機系断熱材とすることにした。

表-1 試験体一覧

記号	一次着火物	二次着火物	天井材
A-1	硬質ウレタン ボード(厚50mm)	吹付け硬質ウレタン フォーム(厚30mm) (下地：せっこうボード厚 12.5mm)	
B-1			二次着火物 と同じ
C-1			
D-1	ポリスチレン ボード(厚50mm)	なし (せっこうボード厚12.5mm)	
E-1		吹付け硬質ウレタン フォーム(厚30mm) (下地：せっこうボード厚 12.5mm)	二次着火物 と同じ

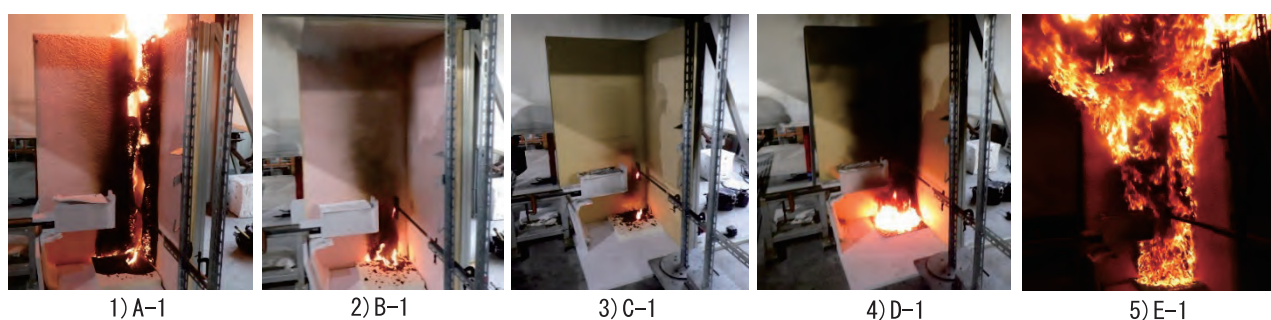


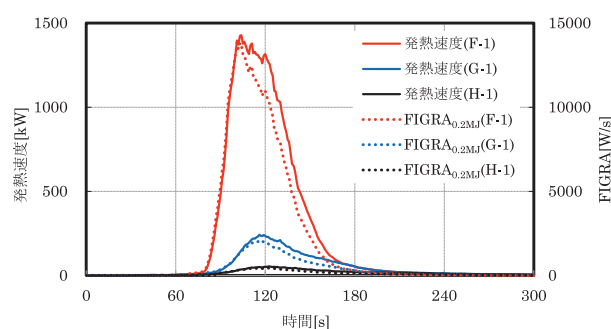
写真-2 試験中の状況

2.4.4 二次着火物の比較

前述した試験結果等から、実験条件を確定し、イソシアネート指数が異なる3種類の硬質ウレタンフォームの燃焼性を測定した。一般的に、イソシアネート指数が高いほど難燃性が高いとされており、試験結果もイソシアネート指数が高い順に発熱速度およびFIGRA_{0.2MJ}が低くなると考えられる。なお、溶接時間は60秒で統一した。

試験体は表-2に示す通り、F-1はイソシアネート指数が150未満、G-1はイソシアネート指数が150～400の間、H-1はイソシアネート指数が400以上である。

実験結果について、F-1では溶接終了後すぐに延焼し、溶接終了から1分30秒後に天井材を含めて二次着火物が燃え尽きた。G-1では溶接終了後すぐに延焼し、天井材まで急速に燃え広がったが、溶接終了から1分30秒後には水平方向は1/2～3/4ほどの範囲で二次着火物が燃え止まった。H-1では溶接終了後すぐに延焼するが、燃え広がる範囲は小さく、天井材に接炎しなかった。溶接終了から2分後には、二次着火物が燃え止まった。測定結果について、表-2、図-1に示す通り、イソシアネート指数が低いほど発熱速度が最高となるまでの時間が短くなり、FIGRA_{0.2MJ}は燃え広がりが速いほど大きくなる傾向が確認され、二次着火物の難燃性能により、実験結果に差が出ることが分かった。

図-1 発熱速度とFIGRA_{0.2MJ} (F-1～H-1)

2.5 まとめ

溶接火花に対する有機系断熱材の難燃性を把握するため、実験方法を提案し、数種類の実験をおこない以下の知見を得た。

- ・溶接火花の発生位置、落下位置にばらつきが生じ、実験の再現性が低いと考えられる。
- ・一次着火物は一定の可燃性がないと気流の影響を受けやすく、二次着火物に延焼しづらいことが分かった。
- ・欧州の防火材料の基準に用いられるFIGRA_{0.2MJ}を評価項目に加えることで、初期の燃え広がりを数値で確認することができ、複数の試験体間で結果を比較することが可能である。

表-2 二次着火物の比較実験における試験体・結果一覧

記号	一次着火物	二次着火物	天井材	溶接時間	測定時間	最高発熱速度	FIGRA _{0.2MJ}
F-1	ポリスチレン ボード (厚30mm)	吹付け硬質ウレタン フォーム(厚30mm) (下地: せっこうボード厚12.5mm) イソシアネート指数: 150未満	二次着火物と同じ	60秒	600秒	1428kW	13829W/s
G-1		同上 イソシアネート指数: 150～400				242kW	2086W/s
H-1		同上 イソシアネート指数: 400以上				54kW	443W/s

3. 溶断火花に対する試験・評価方法の概要

前述の通り、溶接火花を火源とした試験・評価方法を検討した結果、溶接時に発生する火花は外力としては小さく、一次着火物の燃焼性に試験結果が左右されること、且つ、火花の発生位置および落下位置にばらつきがあり、実験方法の再現性が低くなることを示した。ここからは、溶接火花よりも外力として大きく、建設・解体工事現場で使用され、火災原因となり得る溶断火花についての検討を示す。

3.1 試験体形状

試験体は写真-3に示す通り、910mm角のボードを3枚組み合わせ隅角部を再現した。溶断火花は隅角部下部を狙うことで、厳しい条件下における燃え広がり性状を確認できるようにした。また、断熱材の難燃性を把握できるように壁材と床材を同一の材質とした。

3.2 実験条件

既往の試験方法として、JIS規格に建築工事用シートの難燃性試験方法²⁾がある。外力は溶断時に発生する火花であり、一定の出力条件で建築工事用シートに火花を曝露させ、貫通孔等の発生を確認する試験方法である。本研究では、この試験に使用されているガス切断機を参考とし、設備の検討をおこなった。JIS規格の試験では、鋼板を固定し、ガス切断機がレールに沿って自走することにより、鋼板を切断していく方法であり、ガス切断機の移動に伴って溶断火花発生位置が移動する仕様である。本研究ではガス切断機を固定し、鋼板を動かすことにより、溶断火花発生位置を固定するようにした。これにより、断熱材に対する熱影響が大きくなるようにした。図-2・図-3にガス切断機の概要を示す。なお、ガス切断機の燃料はプロパンガスおよび酸素とし、流量計を備えた。

実験時の溶断機の条件は表-3に示す通りであり、流量について、予熱酸素は4.7L/分、切断酸素は25L/分、プロパンガスは2.3L/分とし、鋼板厚は9mm、切断速度は350mm/分とした。溶断火花は試験体の隅角部下部に直接飛散するようにし、ガス切断機と試験体の位置関係は写真-4に示す通り離隔距離1000mm、火口と可燃物上面までの高低差320mmとした。

3.3 測定項目および評価指標

測定項目は前述した「溶接火花に対する試験・評価方法」と同じく、発熱速度およびFIGRA_{0.2MJ}とした。

3.4 実験

3.4.1 難燃性の異なる硬質ウレタンフォームの比較

前述した「2.4.4 二次着火物の比較」と同じく、イソ

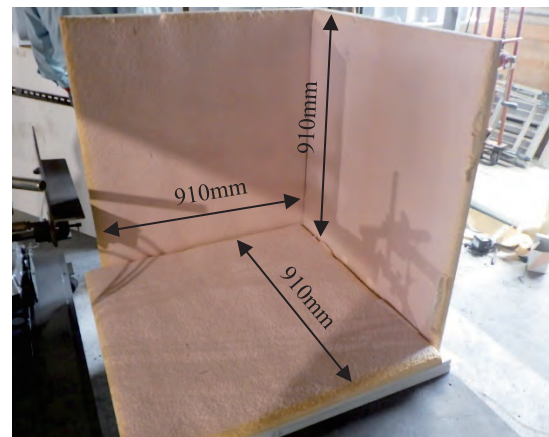


写真-3 試験体

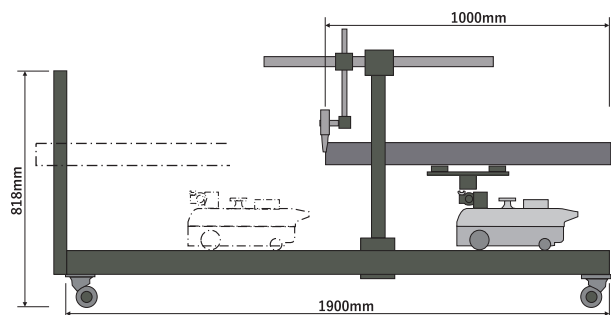


図-2 自動ガス切断機 正面図

表-3 溶断実験時の条件

予熱酸素流量	4.7L/分
切断酸素流量	25L/分
プロパンガス流量	2.3L/分
鋼板厚	9mm
切断速度	350mm/分

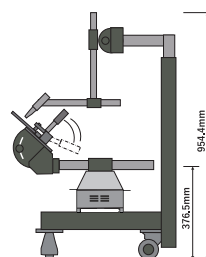


図-3 自動ガス切断機 側面図

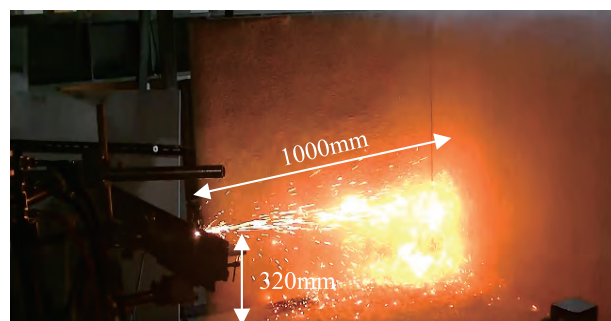


写真-4 試験イメージ

シアネート指数が異なる3種類の硬質ウレタンフォームの燃焼性を測定する。

試験体は表-4に示す通り、A-2はイソシアネート指数が150未満、B-2はイソシアネート指数が150～400の間、C-2はイソシアネート指数が400以上である。

実験結果は表-4、写真-5、図-4に示す通りである。A-2は加熱開始10秒時には燃焼をはじめ、着炎したことを確認できた。30秒時には火炎高さ1m程度に達し、壁面へと燃え広がった。加熱開始50秒時には、さらに燃え広がっていたため、危険と判断し加熱を中止した。その後、1分程度激しく燃焼したが、可燃物が焼失していくに伴い炎の勢いが弱まっていった。最高発熱速度は325kW、最高発熱速度到達時間（以下、到達時間）は加熱開始66秒時、 $FIGRA_{0.2MJ}$ は5125W/sとなった。

B-2は加熱開始20秒時には燃焼をはじめ、着炎したことを確認できた。50秒時には火炎高さ約30cm程度に達したが、その後40秒間加熱を継続しても燃え広がらなかった。加熱終了後、残炎があることを確認したが、加熱終了後45秒時には消炎したことを確認した。最高発熱速度は5kW、到達時間は加熱開始後52秒時、 $FIGRA_{0.2MJ}$ は総発熱量が0.2MJを超えなかったため、0となった。A-2と比較し、一般的な難燃性の指標であるイソシアネート指数が高いため、熱分解が促進しなかったと考えられる。

C-2は加熱開始15秒時には燃焼をはじめ、着炎したことを確認できたが、その後75秒間加熱を継続しても燃え広がらなかった。また、加熱終了とほぼ同時に消炎したことを確認した。最高発熱速度は3kW、到達時間は加熱開始後45秒時、 $FIGRA_{0.2MJ}$ はB-2と同じく総発熱量が0.2MJを超えなかったため、0となった。イソシアネート指数はB-2よりも高いが、ほぼ同じ測定結果となった。

実験結果より、イソシアネート指数が低い硬質ウレタンフォームは、激しく燃焼し燃え広がったが、イソシアネート指数が高くなるにつれ、燃焼しづらいことが確認できた。

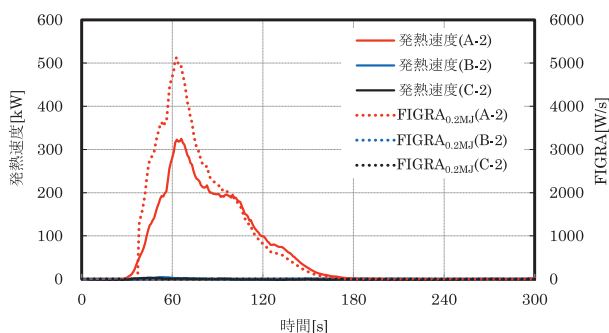


図-4 発熱速度と $FIGRA_{0.2MJ}$ (A-2～C-2)

3.4.2 試験体形状の比較

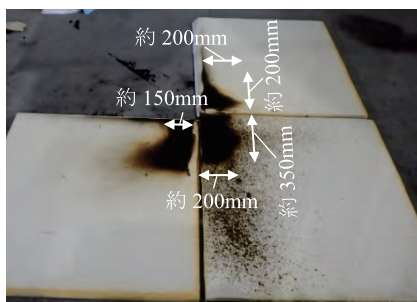
実際の建設現場においては、壁高さが910mmよりも高く、且つ、天井もあることから、燃え広がり性状を把握するためには、より実際の形状に近づけることが望ましい。そこで、壁高さを1820mmに大きくし、同材質の天井(910mm角)を設け加熱実験を行った。なお、試験体は壁高さ910mmの実験の際に、ほとんど燃え広がらなかったイソシアネート指数150～400の間の硬質ウレタンフォームおよびイソシアネート指数400以上の硬質ウレタンフォームの2種類で確認する。

表-4 難燃性の異なる硬質ウレタンフォームの比較実験における試験体・実験結果一覧

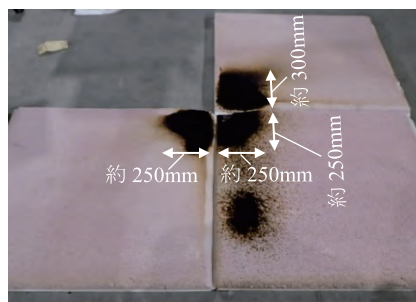
記号	試験体	加熱終了時間	測定時間	最高発熱速度	最高発熱速度 到達時間	FIGRA _{0.2MJ}
A-2	吹付け硬質ウレタンフォーム(厚30mm) (下地：せっこうボード 厚12.5mm) イソシアネート指数：150未満	40秒	600秒	325kW	66秒	5125W/s
B-2	同上 イソシアネート指数：150～400	90秒		5kW	52秒	0W/s
C-2	同上 イソシアネート指数：400以上			3kW	45秒	0W/s



1) A-2



2) B-2



3) C-2

写真-5 難燃性の異なる硬質ウレタンフォームの比較 (試験後)

表-5 試験体形状の比較実験における試験体・実験結果一覧

記号	試験体	加熱終了時間	測定時間	最高発熱速度	最高発熱速度 到達時間	FIGRA _{0.2MJ}
D-2	吹付け硬質ウレタンフォーム(厚30mm) (下地: せっこうボード 厚12.5mm) イソシアネート指数: 150~400	90秒	600秒	21kW	16秒	589W/s
E-2	同上 イソシアネート指数: 400以上			5kW	22秒	0W/s

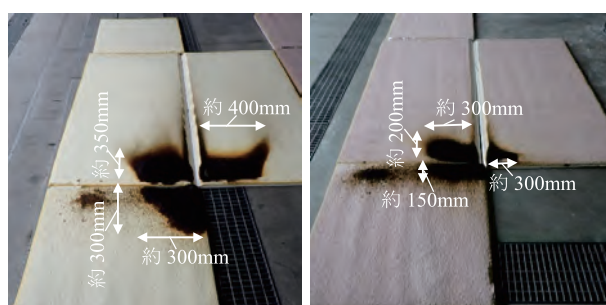
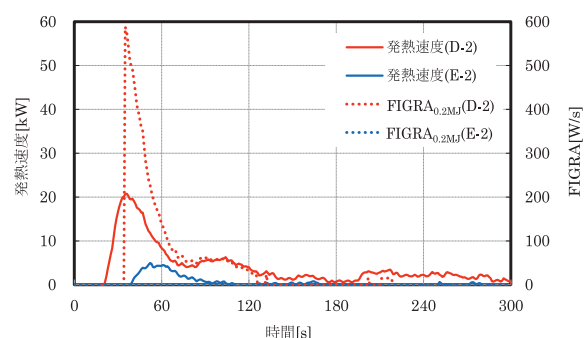


写真-6 試験体形状の比較 (試験後)

図-5 発熱速度とFIGRA_{0.2MJ} (D-2~E-2)

実験結果について、測定結果を表-5に、試験後の写真およびグラフを写真-6、図-5にそれぞれ示す。D-2は加熱開始10秒時には燃焼をはじめ着火したことを確認できた。90秒間加熱を継続した結果、壁面に水平方向約40cm、鉛直方向約35cm程度燃え広がったが、それ以上拡大はしなかった。加熱終了後、残炎があることを確認したが、加熱終了後35秒時には消炎したことを確認した。最高発熱速度は21kW、到達時間は加熱開始後16秒時、FIGRA_{0.2MJ}は589W/sとなった。試験体高さ910mm時と比較すると、最高発熱速度は約4倍、FIGRA_{0.2MJ}は0W/sだったものが、589W/sとなった。これは、天井材を設けたことにより、熱分解により生じた可燃性ガスが溜まり、燃焼しやすくなったこと、断熱性能が向上し、熱籠りにより空間温度が高くなり、燃焼しやすくなった等が考えられる。

E-2は加熱開始15秒時には燃焼をはじめ炎を確認できたが、その後75秒間加熱を継続しても燃え広がらなかった。加熱終了後、残炎があることを確認したが、加熱終了後5秒時には消炎したことを確認した。最高発熱速度は5kW、到達時間は加熱開始後22秒時、FIGRA_{0.2MJ}は総発熱量が0.2MJを超えなかったため、0となった。試験体高さ910mm時と比較してもほぼ同様な結果となった。これは、断熱材の難燃性能が高いため、火源に対して、難燃性能が上回ったと考えられる。

3.5 まとめ

溶断火花に対する有機系断熱材の難燃性を把握するため、実験方法を提案し、数種類の実験をおこない以下の知見を得た。

- ・実験条件を定量的に把握および設定することができ、溶接火花を用いた加熱実験と比較し、火花の発生位置等にはばらつきがなく、安定した外力を供給できる。
- ・壁高さを高くすることで、燃え広がり方を把握しやすいこと、天井材を設けることで発熱速度及びFIGRAが高くなりやすいことが分かった。

今後は試験体水準の増加および硬質ウレタンフォーム以外の有機系断熱材についても実験をおこない、知見を増やしていくことを考えている。また、一般的な火花対策とされる建築工事用シート又は不燃材によるコーティングなどの妥当性についても、併せて検討していきたい。

【参考文献】

- 1) EN 13823:2010+A1:2014
Reaction to fire tests for building products. Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item
- 2) JIS A 1323, 建築工事用シートの溶接及び溶断火花に対する難燃性試験方法, JSA, 1995

【執筆者】

*1 尾崎 悠平
(OZAKI Yuhei)*2 鈴木 秀和
(SUZUKI Hidekazu)*3 豊田 康二
(TOYODA Koji)