大規模ファサード試験 (ISO 13785-2) に準拠した火災実験

— 開口上部ファサード近傍における温度・受熱量の測定結果 —

FIRE TESTS IMPLEMENTED IN RELATION TO “ISO13785-2”

— Measurement of temperature and heat flux at facade wall above opening —

吉岡英樹 — * 1   大宮喜文 — * 2
野秋政希 — * 2   村岡 宏 — * 3
中村正寿 — * 4   森田 武 — * 5
西村光太 — * 6

Hideki YOSHIOKA — * 1   Yoshifumi OHMIYA — * 2
Masaki NOAKI — * 2   Ko MURAOKA — * 3
Masatoshi NAKAMURA — * 4   Takeshi MORITA — * 5
Kota NISHIMURA — * 6

キーワード：
大規模ファサード試験, 開口噴出火災, 熱気流, 上階延焼

Keywords:
Large-scale façade test, Ejected flame from opening, Jet plume, Vertical fire spread

When flame penetration occurs at the glass window opening located in the exterior wall after flashover happens in the room/compartment where fire originally breaks out, exterior surface of the facade wall is heated by convection and radiation produced from the flame and plume spouted out from the broken window. ISO 13785-2 “Reaction-to-fire tests for facades — Part2: Large-scale test,” prescribes the test method determining the fire performance of exterior material installed onto the outer wall when heated by the external flame from the broken window. In this study, applying the large-scale fire test apparatus of ISO 13785-2, temperature and heat flux were measured in the proximity of non-combustible exterior facade which is located above the window opening from where flame spouts.

1. はじめに

火災室の開口部から発生する放射熱・熱気流・火災により、隣棟建物に加えて、開口上部に位置する外壁スパンドレル部分も加熱を受けることになる。火災時に開口部から発生する火災・熱気流性状について、これまで模型実験等による研究^{例えば1～13)}はみられるが、実大規模スケールの実験的研究が系統的に行われた例は国内ではほとんどみられないため、上階延焼の危険性をより精確に検討するために実大規模スケール実験の重要性が指摘されている。

ISO 規格の試験装置として建築物の外装材の防火性能等を確認するための大規模ファサード試験 (ISO13785-2: Reaction-to-fire tests for facades—Part 2: Large-scale test) がある。この装置は、主に可燃性の外装材を対象とし、開口部から発生する火災・熱気流に起因する燃え拡がり性状を実大規模のスケールで確認するための試験である。本報告では、その試験方法に準拠した装置を用いて、ファサードにおける可燃物の燃焼が発生しない状況下において、実大規模のスケールで系統的に外壁スパンドレルが開口部から発生する火災・熱気流から被る影響の定量的評価や上階延焼検証手法の確立に資する実験データの収集を目的として、不燃性のファサード試験体 (25mm 珪酸カルシウム板と 25mm セラミックファイバー・ブランケットで構成) を使用して、開口上部のファサード付近の温度や受熱量等を実測した結果を示す。

2. 大規模ファサード試験 (ISO13785-2) 装置概要

2.1 概要

大規模ファサード試験 (ISO13785-2、以下 ISO) は、建築物の一室で発生した火災が成長し、フラッシュオーバー現象などの発生以後、開口上部の外壁表面 (ファサード) が開口噴出火災に炙られる状況を想定し、その際のファサード上での上方向の燃え拡がりを確認するものである。試験装置は図1、図2の通り、燃焼チャンバー (図中左側) と試験体 (図中右側) に大別することができる。燃焼チャンバーの外寸は幅 4.2m×奥行 4.3m×高さ 2.0m である。燃焼チャンバー内で燃焼させる燃料は、気体燃料 (プロパンガスなど)、液体燃料 (ヘプタンなど)、固体燃料 (木材クリブなど) が想定されている。試験体は、長翼壁 (縦 5.7m×横 3m) 及び、それに垂直に交差する短翼壁 (縦 5.7m×横 1.2m) から成る。長翼壁は開口部 (縦 1.2×横 2m) を有し、燃焼チャンバーに接続されている。なお、火災・熱気流による火害性を大きく想定するために、長翼壁に垂直に短翼壁を設置して、隅角部を設けることとされている (図3-1)。なお、ISO で明確な規定は無いが、本試験装置では燃焼チャンバー後方の壁下半分に小開口 (縦 500mm×横 600mm) を4つ、等間隔に設けた (図3-2)。その開閉状況については、表1の最右列に記載しており、開ける場合は、後方から見て右側の小開口から順に開けることとした。

本稿の一部は 2010 年度日本建築学会大会 (北陸) にて口頭発表した¹⁴⁾。

¹⁾ 国土技術政策総合研究所 主任研究官・博士 (工学)
(〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地)

²⁾ 東京理科大学

³⁾ 榊大林組技術研究所

⁴⁾ 大成建設(株)技術センター

⁵⁾ 清水建設(株)技術研究所

⁶⁾ 鹿島建設(株)技術研究所

¹⁾ Senior Researcher, National Institute for Land and Infrastructure Management, Ph. D.

²⁾ Tokyo Univ. of Science

³⁾ Technical Research Institute, Obayashi Corporation

⁴⁾ Technology Center, Taisei Corporation

⁵⁾ Institute of Technology, Shimizu Corporation

⁶⁾ Technical Research Institute, Kajima Corporation

図 1 試験装置 (前面)

図 2 試験装置 (背面)

図 3-1 試験体の構成 (ISO 13785-2) (単位: mm)

図 3-2 燃焼チャンバー後方の小開口

2.2 実験装置

本実験は、東京理科大学が所有する大規模ファサード試験装置を使用し、それを集煙フード下に配置し実施した (図 4)。本装置の寸法は ISO 規格に準拠している (図 3)。本実験で使用したファサード (長翼壁・短翼壁) は、角型鋼管で構成したフレームに珪酸カルシウム板 (厚さ 25mm) を固定し、その表面 (火炎に晒される側) にセラミックファイバーブランケット (厚さ 25mm) を施している。本装置の火源は、気体燃料を使用する場合、都市ガスを使用し、都市ガス以外の燃料を使用する場合、ヘプタン (図 5) および木材クリブ (図 6) を燃焼チャンバー内に配置し燃焼させた。

図 5 燃焼チャンバー内に設置されたヘプタントレー (実験前)

図 6 燃焼チャンバー内における木材クリブの燃焼 (実験中)

図 4 開口噴出火炎の発生状況

3. 実験概要

3.1 加熱方法

実験条件を表 1 に示す^{注1~4)}。都市ガスを使用するにあたり ISO 規格相当の流量は、ISO におけるプロパンガスの設定流量 (120 g/s) に基づいて、完全燃焼時の発生熱量 (約 5.6 MW) がほぼ等しくなる流量 (450 m³/h) となる。そして実験では排煙処理能力を考慮して、この流量 (450 m³/h) の 1/4 (112.5 m³/h)、1/2 (225 m³/h)、3/4 (337.5 m³/h) となる流量とした。ケース①-1~3 の実験は連続して行われ、バーナー着火後、ケース①-1 (ガス流量が ISO 規格の 1/4) の条件で 5 分間燃焼を継続させた時点でガス供給を止め、10 分間の放冷後、ケース①-2~3 を同様の時間パターンで実施した。

ヘプタンは、1 実験に対し ISO では 60 リットルと規定されているが、本実験では排煙処理能力を考慮して、18 リットル及び 36 リットルで実施した。ヘプタンを入れる容器は金属製の火皿 (80cm 角、深さ 10cm) を 1 個及び 2 個用い、燃焼チャンバー床面の開口部から最も離れた燃焼チャンバー奥の壁側の中央に設置した (図 5)。

木材クリブについては、ISO ではクリブ 16 個だが、本実験では 8 個を用いた。クリブ 1 個の構成について、スギ材 (縦 36mm×横 45mm×長さ 500mm) を 1 段に 6 本設置し (水平間隔は約 46mm ずつ)、それを 10 段井桁状に組み上げて、全体として 500mm 角×高さ 360mm とした。クリブの配置について、チャンバー床面の中央部分に、開口部と平行に 4 個ずつ 2 列設置した (クリブ間隔は約 30cm) (図 6)。クリブ火源を使用した際は、目詰まりを防ぐ為にチャンバー内でバーナーとして使用するガス管をセラミックファイバー・ブランケット (厚さ 25mm) で被覆した。

3.2 測定項目・方法

ファサード近傍の温度・受熱量、開口部分の温度、燃焼チャンバー内の温度を計測した。ファサード近傍について、熱電対 (シース熱電対 (K)、φ 1.6mm 及び 3.2mm) の設置箇所及び番号を図 7 に、熱流束計 (メドサーム社製、ガードン型、型番: GTW-20-40-484、測定範囲: 0~200kW/m²、精度: ±3%以内) の設置箇所及び番号を図 8 に示す。熱電対はファサード近傍の熱気流温度を測定するために最外装面の 50mm 外側で計測し、熱流束計は最外装面における受熱量を計測するためにセラミックファイバー・ブランケットと同じ面上で計測した。また、燃焼チャンバー内温度は、図 9・10 に示した A 点および B 点で鉛直方向にシース熱電対 (K) (φ 1.6mm) を設置して測定した。

表 1 実験条件^{注) 1~4}

Case	Fire Source	Heating Strength	Test Duration	Flow Rate of Gas (m ³ /h)	HRR (MW)	Opening			Vents at rear of Chamber
						B (m)	H (m)	B/(H/2)	
I-1	City Gas	1/2 of ISO	5 min	225	2.8	2	1.2	3.3	3: Closed 1: Open
I-2	City Gas	3/4 of ISO	5 min	337.5	4.2	2	1.2	3.3	3: Closed 1: Open
①-1	City Gas	1/4 of ISO	5 min	112.5	1.4	2	1.2	3.3	All (4) Open
①-2	City Gas	1/2 of ISO	5 min	225	2.8	2	1.2	3.3	All (4) Open
①-3	City Gas	3/4 of ISO	5 min	337.5	4.2	2	1.2	3.3	Former: All Open Latter: 2 Closed
②-1	City Gas	1/8 of ISO	5 min	56.25	0.7	2	0.2	20.0	All (4) Closed
②-2	City Gas	1/4 of ISO	5 min	112.5	1.4	2	0.5	8.0	All (4) Closed
②-3	City Gas	1/2 of ISO	5 min	225	2.8	2	1	4.0	All (4) Closed
③	Heptane	36 liters (two pans)	3 m 30 s	—	5.2	2	1.2	3.3	All (4) Closed
④'	Heptane	18 liters (one pane)	3 m 30 s	—	2.6	2	1.2	3.3	All (4) Closed
⑤	Wood Cribs	8 pieces	30 min	—	2.0	2	1.2	3.3	All (4) Closed

図 7 熱電対の設置箇所 (単位: mm)

図 8 熱流束計の設置箇所 (単位: mm)

図 9 燃焼チャンバー内の熱電対スタンドの配置

図 10 燃焼チャンバー内の熱電対 (番号および床面からの高さ) (単位: mm)

4. 実験結果

4.1 燃焼チャンバー内温度

燃焼チャンバー内の区画火災性状について、火源が都市ガス・ヘプタンの場合は換気支配型、木材クリブでは燃料支配型であった。図 11, 12 は、ケース①-1～3 の実験条件におけるチャンバー内温度について、A 点と B 点の時間変化を示している。都市ガスを使用した本実験条件では、チャンバー内の温度は垂直方向に概ね一樣になることが分かる。また、B 点に比べ、ファサード正面に近い A 点の温度が全体的に高温になる傾向が見られる。図 13, 14 は、ケース④' およびケース⑤の測定結果を示している。燃料としてヘプタンを使用したケース④' では、着火後、170 秒位まで温度上昇を続け、その後、温度減衰が始まっており、激しい燃焼性状であったことが図 13 からうかがえる。木材クリブを使用したケース⑤では、着火後、1300 秒位まで温度上昇した後、ピークを迎え、その後、徐々に温度減衰する結果となり、緩慢な燃焼であったことが図 14 からうかがえる。また、ケース⑤では、高温層（熱電対番号：28・29・30）と低温層（熱電対番号：31・32）の 2 層に分かれる結果となった。

図 11 チャンバー内温度(A 柱) (ケース①-1～3)

図 12 チャンバー内温度(B 柱) (ケース①-1～3)

図 13 チャンバー内温度(A 柱) (ケース④')

図 14 チャンバー内温度(A 柱) (ケース ⑤)

4.2 ファサード面の受熱量^{注5)}

図 15～17 は、ケース①-1～3 の実験条件で、ファサード面の受熱量の時間変化を整理した結果である。この結果より、ガス供給量が増加する程、ファサードの受熱量は増加する傾向が見られる。受熱量の値は開口部中央 (図中の b 列) が最大値をとっており、ケース①-3 では特に大きい値が観測されており、現実の建物火災を想定した場合、開口部の有無やその性能、外装材の燃焼性状も影響されるので断定は困難であるが、上階延焼の可能性を有するものと考えられる。

図 18 は、ケース⑤の b 列の受熱量の測定結果である。ケース⑤は、木材着火後、約 1300 秒後まで、測定値は徐々に上昇し、その後、減衰する結果となった。

図 15 ファサード面の受熱量(a 列) (ケース①-1～3)

図 16 ファサード面の受熱量(b 列) (ケース①-1～3)

図 17 ファサード面の受熱量(c 列) (ケース①-1～3)

図 18 ファサード面の受熱量(b 列) (ケース⑤)

4.3 噴出熱気流温度

図 19～21 は、ケース①-1～3 の実験条件で、ファサード近傍の噴出熱気流温度の時間変化を整理した結果である。受熱量同様にガス流量が増すほど、噴出熱気流温度は全体的に高温になる傾向が見られる。開口上端からの高さごとで見れば、受熱量同様、b 列の温度が最も高い温度を示しており、特にケース①-3 では上階延焼の危険性が相対的に高いと考えられる。

図 22～23 は、ケース④' およびケース⑤の b 列の噴出熱気流温度の時間変化である。ケース④' では、ヘプタンに着火後、130 秒位まで温度は上昇し、その後、概ね横ばい、あるいは緩やかな上昇を示す変化となり、約 170 秒後に急激に減少している。熱流計の結果と同様、目視観察で激しい噴出火炎が確認された時間（約 130 秒～170 秒頃）と温度が横ばい、あるいは緩やかな上昇の時間帯は概ね一致している。ケース⑤は、木材着火後、開口上端からの高さに関わらず、温度は約 1300 秒後まで徐々に上昇し、その後、減衰する結果となった。

図 19 ファサード近傍噴出熱気流温度(a 列) (ケース①-1～3)

図 20 ファサード近傍噴出熱気流温度(b 列) (ケース①-1～3)

図 21 ファサード近傍噴出熱気流温度(c 列) (ケース①-1～3)

図 22 ファサード近傍噴出熱気流温度(b 列) (ケース④')

図 23 ファサード近傍噴出熱気流温度(b 列) (ケース⑤)

表 2 ファサード面の受熱量 (b 列) (左: 平均値、右: 最大値)

熱流束計 No.	9		7		4		2	
開口上端からの垂直距離	900 mm		1,200 mm		1,500 mm		2,000 mm	
ケースⅠ-1 (kW/m ²)	35	50	31	42	29	41	23	36
ケースⅠ-2 (kW/m ²)	80	117	61	82	59	76	39	52
ケース①-1 (kW/m ²)	9	11	8	11	8	10	11	15
ケース①-2 (kW/m ²)	19	27	23	31	18	23	19	28
ケース①-3 (kW/m ²)	56	75	56	84	38	56	33	50
ケース②-1 (kW/m ²)	7	15	7	16	6	11	7	14
ケース②-2 (kW/m ²)	9	12	9	12	7	10	7	10
ケース②-3 (kW/m ²)	24	28	15	17	20	25	19	23
ケース⑤ (kW/m ²)	13	16	11	13	11	14	10	11

表 3 ファサード近傍の温度 (b 列) (左: 平均値、右: 最大値)

熱電対 No.	1 9		1 6		1 3		1 1	
開口上端からの垂直距離	900 mm		1,200 mm		1,500 mm		2,000 mm	
ケースⅠ-1 (℃)	616	664	628	680	550	588	480	538
ケースⅠ-2 (℃)	776	790	785	811	696	714	597	646
ケース①-1 (℃)	323	343	325	341	311	329	278	294
ケース①-2 (℃)	513	575	509	563	485	520	424	465
ケース①-3 (℃)	737	783	664	759	595	681	503	608
ケース②-1 (℃)	313	411	277	402	256	328	214	244
ケース②-2 (℃)	348	375	298	328	258	275	198	202
ケース②-3 (℃)	646	679	589	626	535	559	433	443
ケース④' (℃)	938	1070	905	1026	825	957	695	868
ケース⑤ (℃)	450	511	454	508	427	470	365	393

5. 考察

ファサード面の b 列の受熱量 (平均値および最大値) を表 2 に、噴出熱気流温度 (平均値および最大値) を表 3 に示す^{注 6)}。ケース①-1～3 の結果の比較から、受熱量および噴出火炎・熱気流温度は、ガス供給量が増加するほど高い値を示すことが分かる。なお、木材クリブを燃料としたケース⑤ではチャンパー内の燃焼が緩慢で測定値が低い値を示す結果となった。また、ケースⅠ-1 と①-2、Ⅰ-2 と①-3 は各々同じ火源条件 (都市ガス流量) であるが、チャンパー後方の開口条件が異なり、ケース①の方がケースⅠと比較して、より開放された状況にあり、受熱量・温度共にケース①の方が小さい傾向が見られ、区画外での未燃ガスの燃焼が減ったことが一因と考えられる。

6. まとめ

大規模ファサード試験 (IS013785-2) に準拠した実大規模スケールの装置を使用し、火源条件および開口条件をパラメータとして変化させて、チャンパー内温度、開口上部のファサード面の受熱量、噴出火炎・熱気流の温度を測定した。受熱量、温度共に、長翼壁の開口中央ラインである b 列が、a 列 (袖壁反対側) および c 列 (袖壁側) に比べて高い値を示す結果となった。また、実験ケース毎に測定値の傾向を考察すると共に、チャンパーにおける火源の種類や規模による影響を確認することにより、不燃性ファサードにおける上階延焼危険性に係る実測データについて系統的に確認した。

これらの計測結果は、外壁スパンドレルを越えた上階延焼抑制に係る性能検証手法を構築するにあたっての基礎的なデータとして利用することが可能である。今後、本装置を使用し、さらに系統的にファサード部分及び開口部の形状・種類、火源規模・種類を変えた実験を実施して、一般的な開口に適用可能な実験結果を入手すると共に、既存の噴出火炎長に関する縮尺模型実験の結果、及び、実火災事例の結果との相関性を明確にする等、検討を継続していく計画である。

【注釈】

- 表 1 中の HRR の値について、都市ガスについては、ISO における 100%出力時の計算値が約 5.6[MW]である事を踏まえて、その 1/8、1/4、1/2、3/4 の値になる様に都市ガスの流量を設定しており、また、HRR についても対応する値を記載した。
- 表 1 中の HRR の値についてヘプタンは、36[?]の総発熱量が約 1,091[MJ]である事を踏まえて、実際の燃焼時間 210[s]で除算した平均発熱速度である約 5.2[MW]を参考値として記載した。18[?]についても、燃焼時間は同じく約 210[s]であり、平均発熱速度として約 2.6[MW]を記載した。
- 表 1 中の HRR の値について、木材クリブについては、総質量を約 200[kg]と仮定し、木材の発熱量 17.76 [MJ/kg]を使用すると総発熱量は 3,552[MJ]となり、実際の燃焼時間である約 30[分]で除算した結果、平均発熱速度として約 2.0[MW]が算出され、当該値を記載した。
- 表 1 内の最右列の「Former: All open, Latter: 2 Closed」については、Case ①-3 において、実験前半 (2 分 30 秒まで) では後方開口を 4 つ全て開放しており、実験後半では 2 つを閉鎖し、残り 2 つは開放したままであった事を意味する。
- Case④' の受熱量測定結果については、計測装置の不具合等の影響が懸念されたため、データを示していない。
- 表 2～3 の平均値は、各ケースにおいて、燃焼性状が比較的安定している状態の計測データから算出した。具体には、Ⅰ-1～2、①-1～3、②-1～3 は各サイクル (5 分) の消火前 1 分間、ケース④' は着火から 120～180 秒 (1 分間)、ケース⑤は着火から 900～1,500 秒 (10 分間) とした。

【謝辞】

実験実施に際し、池田憲一氏 (清水建設)、宮本圭一氏 (鹿島建設)、河野守教授・棚池裕氏 (東理大) らの協力を得た。研究推進に際し、野口貴文准教授・田村政道氏 (東大)、成瀬友宏氏・鍵屋浩司氏・岩見達也氏 (国総研)、萩原一郎氏・増田秀昭氏・吉田正志氏 (建研) らの協力を得た。本報告は国土交通省平成 21 年度建築基準整備促進補助金事業「防火・避難対策等に関する実験的検討ー防火・避難対策における部材・材料等の防耐火性能に関する調査ー」における共同研究の成果の一部をまとめたものである。

【参考文献】

- 横井鎮男: 建築物の火災気流による延焼とその防止に関する研究, 学位論文, 1959
- 林慶元, 菅原進一, 成瀬友宏: 区画開口部からの噴出火災発生限界ー単一開口模型実験による考察ー, 日本建築学会構造系論文報告集第 419 号, pp.163-168, 1991.1
- 大宮喜文, 佐藤雅史, 田中孝義, 若松孝旺: 区画内における可燃物の燃焼速度と噴出火災の発生限界, 日本建築学会構造系論文集第 469 号, pp.149-158, 1995.3
- O. Sugawa, D. Momita, and W. Takahashi: Flow behavior of ejected fire flame/plume from an opening effected by external side wind, Proceedings of the Fifth International Symposium, Fire Safety Science, pp.249-260, 1997.3
- 山口純一, 岩井裕子, 田中孝義, 原田和典, 大宮喜文, 若松孝旺: 開口噴出気流温度の相似則としての無次元温度の適用性, 日本建築学会計画系論文集第 513 号, pp.1-7, 1998.11
- 大宮喜文, 堀雄児: 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, 日本建築学会計画系論文集第 545 号, pp.1-8, 2001.7
- T. Yamada, K. Takahashi, E. Yanai, T. Suzuki, A. Sekizawa, H. Satoh and H. Kurioka, : An experimental study of ejected flames and combustion efficiency, Proceedings of the Seventh International Symposium, Fire Safety Science, pp.903-914, 2002.6
- 樋本圭佑, 土橋常登, 田中義昭, 田中孝義: 給気した火炎室の開口から噴出する火炎・熱気流の温度と軌跡ー開口噴出火炎・熱気流による火災拡大に関する研究 その 1ー, 日本建築学会環境系論文集第 598 号, pp.1-8, 2005.12
- 樋本圭佑, 土橋常登, 田中義昭, 田中孝義: 開口上方壁面の影響を考慮した噴出火炎・熱気流の軌跡モデルー開口噴出火炎・熱気流による火災拡大に関する研究 その 2ー, 日本建築学会環境系論文集第 607 号, pp.1-6, 2006.9
- G. M. F. Jeffs, H. G. Klingelhöfer, F. H. Prager, H. Rostek : Fire-performance of a ventilated facade insulated with a B2-classified rigid polyurethane foam, Fire and Materials, Volume 10, Issue 2, pp.79-89, June 1986
- Igor Oleszkiewicz: Fire exposure to exterior walls and flame spread on combustible cladding, Fire Technology, Volume 26, Number 4, pp.357-375, November 1990.
- Igor Oleszkiewicz: Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections, Fire Technology, Volume 27, Number 4, pp.334-340, November 1991
- 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.745-746, 1988
- 大宮喜文, 吉岡英樹他: 大規模ファサード試験に準拠した火災実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.203-206, 2010.9

[2012 年 6 月 18 日原稿受理 2012 年 8 月 7 日採用決定]