キオスクを火源とする模擬線路階の火災実験

A FULL-SCALE FIRE TEST OF A KIOSK IN A STEEL STRUCTURE SIMULATING THE TRACK STOREY

石橋 輝樹*, 蓮田 常雄**, 藤井 光治郎***

Teruki ISHIBASHI, Tuneo HASUDA and Kojiro FUJII

The track storey is located at the lowest part of the over-track building, and therein at least two independent open spaces are furnished, so the fire behaviour is totally different from that in the general buildings. In order to study the fire engineering design method of the over-track building, we conducted a series of full-scale fire tests of a kiosk (a principal origin of fire on the track storey) in a steel structure simulating the track storey, and grasped the fundamental fire behavior on the track storey.

Keywords : fire, fire load, heat-release, fire engineering design, station

火災、火災荷重、発熱速度、耐火設計、駅

1. はじめに

近年、鉄道の線路上空を利用して、駅および旅客の利便に関連する機能が合体した複合用途の線路上空建築物の建設が進められている(図-1)。

この線路上空建築物は、駅部分として一般に第1層(最下層)に線路階(線路、ホーム等が設置され、列車の発着や旅客の乗降が行われる階)を有するのを特徴とする。また線路階の直上には一般建築諸室の他、駅部分として改札、出札、駅務室、旅行センター、およびコンコース等が位置する。この階より上部の階は、店舗や事務室等で構成され一般建築物との差は無い。これら線路上空建築物の構造種別は、施工性等の理由により鉄骨造が大半を占める。線路階はその空間構成上、少なくとも線路出入口の2方向が開放され、また天井の高さ等空間形状も列車が運行するため建築限界¹⁾の制約を受ける。さらに、可燃物の種類や量もキオスク(駅の独立した小規模物販店舗)や列車(不燃化されていない場合)に限

定されているなど火災性状を考える上で、一般の建築物とは異なる特徴を有する。

図-1 線路上空建築物

* 鉄道総合技術研究所 建築研究室長・工修

** 鉄道総合技術研究所
建築研究室主任研究員

*** 鉄道総合技術研究所
建築研究室研究係長・工修

Chief, Architecture Lab., Railway Technical Research Institute,
M. Eng.
Senior Researcher, Architecture Lab., Railway Technical Research
Institute
Researcher, Architecture Lab., Railway Technical Research Institute,
M. Eng.

近年、実火災性状に基づく部材温度予測、応力・変形解析により建築物の安全性を確認する新しい耐火設計法が建設省の総合技術開発プロジェクト²⁾により開発され、換気支配型の区画火災を対象とする一般建築物について設計法が示されている。しかし、上記の線路上空鉄道駅の線路階については、未だ正確な可燃物量や火災性状が明らかでない。

このような背景のもとに、本論文では、線路上空鉄道駅の合理的な耐火設計法確立のため、駅の正確な可燃物量の調査に基づき、主な可燃物であるキオスクを火源とする線路階を模擬した火災実験を行い火災性状を把握したので報告する。

2. 鉄道駅の可燃物量

2.1 主要用途空間における可燃物量

著者等が行った首都圏の線路上空鉄道駅および地平駅9駅（乗車客2.5万人以上で鉄骨造の駅から選択）を対象とした可燃物調査^{3) 4)}によると、駅の主な用途空間についての火災荷重（単位床面積に対する木材重量に換算した等価可燃物量）は表-1に示すとおりである。

表-1 駅主要用途空間における火災荷重
(kg/m²)

	ケース数	固定		積載		総(固定+積)	
		平均	分散	平均	分散	平均	分散
ホーム	18	1.7	1.2	1.1	0.6	2.7	1.5
コンコース	19	4.1	3.6	2.5	4.0	6.6	6.3
駅務室	48	8.6	6.9	15.6	8.9	24.2	10.7
出改札口	23	11.5	7.8	16.5	9.2	28.0	12.1
旅行センター	7	13.4	6.7	18.4	6.4	31.7	8.1
休憩室	63	10.3	8.3	29.4	23.3	39.7	24.1
倉庫	22	3.8	5.3	63.2	40.4	67.0	43.6

また、図-2に各用途空間の面積と可燃物量の関係を示す。ホームおよびコンコースの主な可燃物はキオスクでありホームおよびコンコース全面積を対象とした火災荷重の値は小さく、可燃物の総量は面積に単純に比例せずキオスクの設置個数に大きく影響される。

駅務室、出改札室の可燃物の総量は面積に比例し、総火災荷重はほぼ一定の値をとる。総火災荷重に占める積載火災荷重の割合は58～68%となっている。駅の休憩室および倉庫の火災荷重は、面積が一般に小さく、また積載物の種類や量も変動するのでばらつきが大きい。

表-2に一般建築物諸室の積載火災荷重を示す^{2) 5)}。これと駅用途空間を比較すると駅務室、出改札室、および旅行センターは一般建築物の事務室とよい対応を示す。

また、1970年に調査⁶⁾した高架下駅を含む業務施設の

火災荷重と比較すると（図-3）、固定、積載火災荷重共今回の調査結果の方が、総火災荷重で約30～70%に減少しており、O A化やスチール家具導入等による駅の不燃化が進んでいることを示している。

図-2 可燃物量－床面積関係

表-2 一般建築物の積載火災荷重

(kg/m ²)					
用途	室用途	火災荷重	用途	室用途	火災荷重
学 校	教室	16.1	事 務 所	事務所 A	14.0
	図書室	35.9		事務所 B	22.3
	会議室	13.6		倉庫	185.2
ホ テ ル	客室	10.5	デパート売場	ロビー	10.8
	宴会場	4.4			
劇 場	ロビー	2.8	紙倉庫		1061.4
	大道具庫	65.0			
	舞台	4.3			

事務所 A：事務系 事務所 B：技術系

図-3 駅の火災荷重の推移

2.2 キオスクの可燃物量

今回の駅可燃物調査^{3) 4)}によるキオスクの積載火災荷重の平均値(6体)は87.3kg/m²、最大値は98.4kg/m²で

ある。さらに比較のために行った取扱品目リストによる都心S駅のキオスク(店舗面積 8.2m^2 、単位面積当たり取扱量は最大クラス)の調査結果では、火災荷重は $104.8\text{kg}/\text{m}^2$ であり、駅調査の結果とよい一致をみている。

キオスクの固定火災荷重は、上記調査によると平均値(6体)は $60.2\text{kg}/\text{m}^2$ 、最大値は $102.4\text{kg}/\text{m}^2$ である。

キオスクの店舗面積は、 $6\sim 8\text{m}^2$ の小規模なものが多く 15m^2 程度以下のものが大半を占める。上記の駅調査による40店舗の面積分布を図-4に示す。

図-4 キオスクの面積分布

3. キオスク火災実験

3.1 実験概要

建築物の燃焼性状を把握するための実大火災実験は、昭和8年の東京帝国大学における木造家屋の火災実験をはじめとし種々実施され、昭和50年代にも木造枠組壁工法や在来工法⁷⁾、鉄鋼系プレハブ住宅⁸⁾といった住宅関係実大火災実験が行われている。しかし、開放空間や大空間を対象とする木質系可燃物を火源とする実大火災実験は蔵前国技館の例⁹⁾等少数にとどまり、キオスクを火源にした実験は行われていない。

そこで、キオスクを火源とする線路階火災の基本性状とその線路階架構への影響を把握するため、線路階を模擬した実大の1層1スパン×1スパンの鉄骨架構の中でのキオスク火災実験を3ケース(CASE1~CASE3)行った。

(1) 供試体

供試体はいずれも首都圏で使用されていたキオスクでCASE1~CASE3の3体の形状、寸法を図-5に示す。積載可燃物はキオスクの実状に合わせ、新聞・雑誌・文庫本・雑貨を配置した。積載火災荷重は、前述の可燃物調査にもとづき $100\text{kg}/\text{m}^2$ とした。固定火災荷重は、3体平均すると $106.3\text{kg}/\text{m}^2$ 、最大で $143\text{kg}/\text{m}^2$ である。駅調査結果より大きな値なのは、軸組が木造で雑誌棚等木部体積が大きいためである。キオスク天井はカラー鉄板葺で、背面に鉄製シャッターが格納されている。

線路階を模擬した実大の鉄骨架構は、1層1スパン×1スパン($12\text{m}\times 15\text{m}$)で屋根面はALC版とした。ALC版は、梁の上に載せるだけで梁の変形を拘束しないように配慮した。

図-5 キオスク供試体の形状、寸法

図-6に架構の概略を示す。ホームを模擬するため架構内部に架台を設け、その上にキオスクを設置した。架台から大梁下端までの距離は 4.2m で、架台から 0.7m 上方のキオスクカウンター高さに相当する位置を高さの基準(以下基準高さ)とし、またキオスク開口近傍の鉄骨柱に対する火災の影響を調べるため模擬柱3本を付加した。

実験は、キオスク設置位置、壁の有無をパラメーターとし3ケース行った(表-3)。

(2) 測定方法

燃焼速度は、燃焼による重量減少を測定することにより算出することとし、実験中架台重量をロードセル3台で計量した。輻射は輻射計をキオスク前面と側面からそれぞれ 3m 離し基準高さから 0.5m 上方に設置し測定した。

雰囲気温度分布は、キオスク供試体周囲にワイヤで 1m ピッチの立体座標を組み、熱電対(CA $\phi 1.6$)により計測した(計測点数 113点)。鉄骨温度は、鉄骨部材に熱電対(シス 熱電対 $\phi 1.6$)を埋め込み測定した(柱59点、梁60点)。本実験ではさらに火災の影響による鉄骨架構の変形性状を測定するため、X2通りの2階床面上部に断

熱材で防護した基準梁を設け、大梁の軸方向伸び、鉛直および横たわみを基準梁からの相対変形として測定した(図-7)。計測時間間隔は15秒とした。火炎形状はビデオ、写真撮影により行った。

実験の全体状況を写真-1に示す。

表-3 実験条件とキオスク諸元

ケース	キオスク形状 WxDxH(m)	全可燃物量 (Kg)	キオスク 位置	壁の有無
CASE1	2.9x1.7x2.4	900	中央	なし
CASE2	3.1x2.2x2.3	1340	端部	なし
CASE3	3.1x2.2x2.3	1630	端部	あり

図-7 鉄骨梁の変形測定概略

写真-1 実験の全体状況

(3) 実験経過

着火方法は、キオスク床位置中央に液体燃料(N-ヘプタン)0.5ℓ入りの火皿を置き着火源とした。実験は着火後キオスク内が火炎に包まれるフラッシュオーバー、火盛り期を経て冷却期に移行し火勢が衰えるまで行った。火炎は開口から噴出したが、火盛り期以降側壁部分からの噴出もみられた。

3.2 実験結果と考察

(1) 可燃物燃焼重量-時間関係

可燃物燃焼重量-時間関係を図-8、実験結果一覧を表-4に示す。可燃物燃焼重量-時間関係が急変する時間をフラッシュオーバー時刻とし見掛けの時間原点とした。各時間原点の着火後の経過時間は、CASE1~3がそれぞれ3分、4分、22分(CASE3は自然鎮火したため、17.5分後に再着火した。)である。

CASE1~CASE3の各ケースともフラッシュオーバー以降8~15分継続する火盛り期では燃焼速度一定であり、その値は30~45kg/minである。その後冷却期に入り燃焼速度は急減し火盛り期の1/2~1/3程度でほぼ一定値をとる。この傾向は、キオスクの基本燃焼性状を把握するために行われた自由空間での燃焼試験¹⁰⁾でも明らかになっており、燃焼重量-時間関係は2直線で近似できると考えられる。また、火盛り期終了時には全可燃物量の約1/3、フラッシュオーバー後約30分を経過すると全可燃物量の約1/2が燃焼し火勢が衰えた。

図-8 可燃物燃焼重量-時間関係

表-4 キオスク燃焼速度等一覧

試験体名		CASE1	CASE2	CASE3
店舗面積 (m ²)		5.06	6.77	6.71
可燃物量 (Kg) (火災荷重) (Kg/m ²)	固定	394 (78)	663 (68)	959 (143)
	積載	506 (100)	677 (100)	671 (100)
	合計	900 (178)	1340 (198)	1630 (243)
火盛り期 τ_1 時間 (min)		7.5	14	15
同燃焼速度 (Kg/min)		43.4	30.2	45
冷却期燃焼速度 (Kg/min)		10.2	14.1	- *2
τ_1 時燃焼重量 (Kg)		330	415	680
(初期重量との比)		(0.37)	(0.31)	(0.42)
30分後燃焼重量 (Kg)		560 *1	640	- *2
(初期重量との比)		(0.62)	(0.48)	

*1 25分時点からの推定値

*2 ロードセルのケーブル焼損のためデータ無し

(2) 輻射-時間関係

輻射-時間関係を図-9に示す。CASE1～CASE3の火盛り期における平均をとった輻射は、キヨスク正面で約10.6～16kW/m²、キヨスク側面で約5.9～8.5kW/m²であり各実験ケースともそれ以降の冷却期では急減する。キヨスク側面の輻射が小さいのは開口が小さいことによる。

図-9 輻射-時間関係

(3) 雰囲気温度

a. 雰囲気温度-時間関係

主要な測定点の雰囲気温度-時間関係を図-10に例示する。図-10では3測定点とも火盛り期を過ぎ冷却期に入ると温度が低下するが、火源に近い位置程この傾向が明瞭である。

b. 雰囲気温度分布

CASE1～CASE3の火盛り期で平均した雰囲気温度分布を図-11に示す。キヨスク内部の火災室温度は、823℃～914℃に達する。火災がキヨスク開口から噴出し、その後鉛直に上昇し熱気流が天井面から水平の層となって拡がっていく様子が明瞭である。CASE3は空間の2方向に壁を有するため、基準高さから4mの位置でキヨスク背面上部(壁に近い側)の雰囲気温度が他の2ケースより高

くなっている。屋根面および背面は鉄板で遮蔽されているため、その近傍での雰囲気温度は相対的に低い値にとどまっている。

図-10 雰囲気温度-時間関係(Y5構面)

図-11 雰囲気温度分布(Y5構面)

噴出火炎の軸に沿った温度(火炎軸上温度)の変化に着目すると、キヨスク天井面から上方へ距離に応じて減衰している。既往の自然換気状態における噴出火炎の火災実験結果をまとめた火炎の軸上温度が次式で与えられている¹¹⁾。

$$\left(\frac{T_z - T_0}{T_f - T_0} \right) = 1 - \left(\frac{0.027 \cdot Q \cdot W}{R} \right) \quad \text{-----(1)}$$

ここに T_z : 火炎軸上温度 (K)
 T_f : 噴出火炎始端での温度 (K)
 T_0 : 周囲雰囲気温度 (K)
 l : 火炎軸上に沿った火炎始端からの距離
 W : 開口幅の和(m)
 R : 燃焼速度(kg/s)

図-12 に $\left(\frac{T_z - T_0}{T_f - T_0}\right)$ と $\left(\frac{l \cdot W}{R}\right)$ との関係に整理した

CASE1 ~CASE3 の実験値と(1) 式との比較を示す。天井面近傍では煙層の影響で差はあるものの傾向は一致している。

図-12 火炎軸上温度分布

天井面に近接する領域は、噴出火炎からの熱流が天井面に沿って移動するため比較的遠方まで高温になるが火源からの水平距離により温度は減衰する。Alpert¹²⁾ は、かなり大規模な(発熱速度0.67~98MW)床面上火源に対し、周囲が開放された空間における種々の高さ(4.6m~15.5m)の天井面に形成される熱気流の性状を調べ天井下の気流最高温度の予測式を得ている。

$$T_{\max} - T_0 = 5.38 \left(\frac{Q_c}{r} \right)^{2/3} / H \quad \text{.....(2)}$$

$$(r > 0.18H)$$

$$= 16.9 Q_c^{2/3} / H^{5/3} \quad \text{..... (3)}$$

$$(r \leq 0.18H)$$

ここに $T_{\max}$: 天井下気流最高温度 (K)
 T_0 : 周囲雰囲気温度 (K)
 Q_c : 発熱速度の対流成分(kW)
 r : 気流軸からの水平距離(m)
 H : 天井高(m)

無次元化量 T_m^* と r/H との関係について、(2)、(3) 式と実験結果を図-13 に示す。

$$T_m^* = (T_{\max} - T_0) \left(\frac{C_{p0} \cdot \rho_0^2 \cdot g \cdot H^5}{T_0 \cdot Q_c^2} \right)^{1/3} \quad \text{---(4)}$$

ここに C_{p0} : 空気定圧比熱
 ρ_0 : 空気密度
 g : 重力加速度

Alpertは初期火災における熱気流性状を対象としたが、本実験では周囲が解放され換気が充分で、天井下面の雰囲気温度も比較的安定している(図-10) ため火盛り期の平均的な天井下面の熱気流性状を対象としている。

この図からキオスク火災における r/H に対する T_m^* の減衰は、天井面の梁等により生じる煙層の影響でいくらか緩慢であるが、実用上Alpertの評価と対応している。

図-13 天井下気流温度分布

(4) 火炎形状

a. 火炎形状のビデオ画像による測定

噴出火炎をキオスク正面および側面からビデオ撮影し、静止画像をCAD を用いて火盛り期1分間について1秒ごとに60画面を重ね書きすることにより形状解析した(図-14)。

常に火炎が存在した領域(火炎域)は、CAD画面では白抜きになっている。また、少なくとも1画面に火炎が存在した領域(間欠火炎域)はCAD画面で黒い描線の集合した領域となる。CASE1 ~CASE3 において火炎域高さは基準高さ(カウンター高さ)から2.0 ~2.5 m、左右の幅はキオスク端部から0.5 ~0.7mであった。間欠火炎域高さは3.9 ~4.6m、間欠火炎域の広がり(キオスク端部から)は1.5 ~1.8mであった。

また、火炎領域を包絡する領域の形状を単純化すると、キオスク正面および側面ともに、開口下端から開口高さの約1/3の位置から45°方向に拡がり開口上端高さから鉛直方向のびるモデルを考えることができる(図-14中の白線)。

(5) 鉄骨温度

a. 鉄骨温度-時間関係

火源直上の大梁中央における鉄骨温度-時間関係(CA

表-5 部材最高温度、架構変形

	部材最高温度 (°C)				架構変形(梁)(mm)	
	大梁	小梁	柱	模擬柱	軸伸び	鉛直変位
CASE1	152	240	89	247	5.7	0.1*1
CASE2	190	234	148	83	11.1	-0.6
CASE3	246	346	169	110	15.8	-0.1

*1 上向きを正とする。

図-18 大梁軸方向伸び-時間関係

4. まとめ

本論文では線路上空鉄道駅における可燃物の実態を明らかにし、線路階の主要な可燃物であるキオスクを火源とする火災実験により、線路階火災の基本的な性状を示した。

キオスクの燃焼は、開口からの噴出火災としての性質の他、一般に正面および側面の開口が連続し面積も大きい床面に置かれた矩形火源としての性質も有する。

そして、実験から得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 火災はフラッシュオーバー以降、火盛り期、冷却期が明瞭な経過をたどり燃焼速度はそれぞれほぼ一定で火盛り期は約40kg/min、冷却期はその1/2～1/3である。
- (2) 輻射はキオスク正面3m位置で、火盛り期平均約16kW/m²に達する。
- (3) 火災軸上温度や天井下面気流温度の分布は、実用上Alpert等の既往の評価法で説明できる。
- (4) 常時火災の存在する火災域の高さは、基準高さからキオスク開口高さの約2倍、幅は開口端から開口高さの2/3倍程度に広がる。
- (5) 鉄骨温度は大半が火盛り期終了時に最高温度に達しその後温度は低下する。

謝辞

本研究は、(財)日本建築防災協会「線路上空利用建築物耐火設計法技術検討委員会」(委員長 日本大学教授 岸谷孝一)の研究活動の一環として行われたものであり、ここに関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 運輸省令第十四号：普通鉄道構造規則第二十条 建築限界, 1987.3
- 2) (財)国土開発技術研究センター：建築物の総合防火設計法 第4巻耐火設計法, 1989.4
- 3) 北澤章他4名：線路上空利用建物における耐火設計に関する研究 その1 駅の可燃物調査の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.1195～1196, 1991.9
- 4) 藤井他3名：線路上空利用建物における耐火設計に関する研究 その2 駅の可燃物調査結果の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.1197～1198, 1991.9
- 5) 高野均, 齊藤光：学校建築の積載可燃物量に関する調査研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp1411～1412, 1975.10
- 6) 鉄道鋼構造物耐火班：鋼構造物の耐火に関する研究(鋼高架駅の耐火について), JSSC Vol.6 No.51, pp.1～53, 1970.3
- 7) 日本火災学会：火災便覧 第5編第1章木造建築物の火災性状, pp431～434, 1984.3
- 8) 中村賢一：鉄骨系プレハブ住宅の火災実験, 建築研究資料 No.40, 1983.1
- 9) 勝野仁、河崎和夫：蔵前国技館の火災実験結果の概要, 火災 Vol.35 No.2, 1985.5
- 10) 石橋輝樹他4名：線路上空利用建物における耐火設計に関する研究 その3 キオスク店舗実大火災実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.1199～1200, 1991.9
- 11) Margaret Law :Fire Safety of External Building Elements, Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Second Quarter, 1978
- 12) Alpert, R.L : Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors, Fire Technology, Vol8 pp.181～195, 1972
- 13) FIRES-FRAME1: A Computer Program for the Fire Response of Structures of Tall Buildings by H. Koike, H. Uesugi, H. Saito, Chiba University, Faculty of Engineering, Department of Architectural Engineering, MAY 1988

(1994年10月4日原稿受理, 1995年2月1日採用決定)