

## 東京理科大学「火災安全科学研究拠点」

### ■ 研究成果概要報告書

|   |             |   |                     |
|---|-------------|---|---------------------|
| 研 究 課 題   |             | 大規模ファサード火災からの放射熱の測定方法及び推定アルゴリズムの構築のための実験的研究 | 実 施 年 度<br>平成 31 年度 |
| 研究代表者   | 所属          | 韓国火災保険協会                                    |                     |
|   | 氏名          | 申 易澈  |                     |
|   | 問合せ先メールアドレス | shinyichul@gmail.com                        |                     |
| 受入担当責任者   | 氏名          | 大宮 喜文                                       |                     |
| <p>1. 研究の背景および目的</p> <p>最近、韓国では堤川のスポーツセンター（死亡 29 人、負傷 37 人）及び密陽の世宗病院（死亡 51 人、負傷 141 人）など、重大火災が発生している。また、2010 年釜山のウシンゴールデンスイート火災から継続的に問題になったファサード火災に対する対応が喫緊の課題となっている。ファサード火災は多くの熱や煙が垂直方向へ速く伝播され建物の上層部在室者の避難が困難になる可能性が高い。一方で、ファサード火災から発生する放射熱によって隣接する建物へ燃焼拡大になる危険性を内包している。これらのファサード火災の危険性が顕在化した事例は、2015 年に発生した議政府アパート火災（死亡 5 人、負傷 125 人）である。当時ピロティ構造の建物の駐車場で発生した火災は建物の空間的特徴により、天井に沿った火炎の影響によりファサード火災に発展し、隣接する建物へ延焼拡大し、3 棟の建物が火災被害受け、重大な人命及び財産被害を発生した。また、国際的にも、英国グレンフェルタワーの火災事例の後、ファサード火災の危険性に関する問題意識が高まり、ヨーロッパやアジア諸国を中心に、国際標準である ISO 13785-2 の改訂作業を進めている。改正の主な内容は火源の設定及び熱流計の代わりに Plate Thermometer を使用する案及び代替火源について議論している。更に、ファサード火災時に発生する放射熱により、隣接する建物が受ける熱的影響を簡易的に評価できる手法について標準の制定作業が行っている。</p> <p>したがって、本研究では、ISO 13785-2 ファサード火災試験装置を使用して実験を行い、ファサード火災発生時の放射熱によって対向壁が受ける熱的影響の簡易評価手法の検証のため開口アスペクト比を 1 から 6 まで変化して実験を行う。その結果を用い、既往研究の開口噴出火炎のトラジェクトリーの予測方法を検討し、最終的に簡易評価手法に適用することを目的とする。</p> |             |   |                     |
| <p>2. 利用施設及び利用日</p> <p>ISO 13784-1 実験施設、排煙フード、流量計、データロガー、ガスバナー、熱流計、熱電</p>   |             |   |                     |

対 (2019年11月)

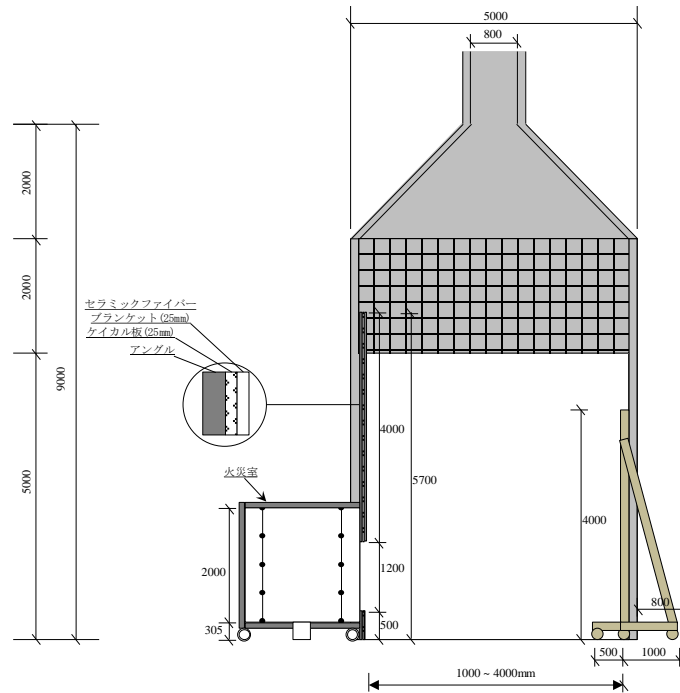


図1 実験施設-ISO 13785-2

### 3. 実験方法・研究成果、および考察

#### 3. 1 実験方法

着火後の燃焼チャンバの火災性状が燃料支配型火災から換気支配型火災に進展し、これにより、燃焼チャンバ内の火炎は開口を介して外部へ噴出し、ファサード火災へ発展する。この時、発生したファサード火災によって、図2に示すように、建築物の外壁面と対向壁に及ぼす放射熱の影響を定量的に把握する。

実験は火源としてガスバーナーを使用する。実験の主な測定項目は温度と熱流束である。温度は燃焼チャンバ内と開口、壁面、対向壁面、噴出火炎の中心軸の温度を測定する。また、熱流束は外壁面及び対向壁面で測定する (図3~5)。

本実験は開口アスペクト比が1から6の条件行う。その結果を考察し、開口アスペクト比による噴出火炎のトラジェクトリーに対する既往研究の方法の妥当性を検討する。また、図6に示すように、噴出火炎の熱流束の簡易評価手法で開口アスペクト比1から4の条件の火炎の中心軸を推定することを目指す。

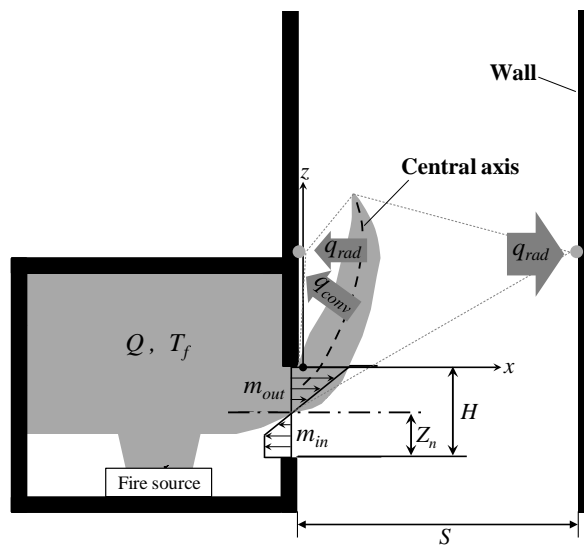


図2 ファサード火災からの放射熱の影響

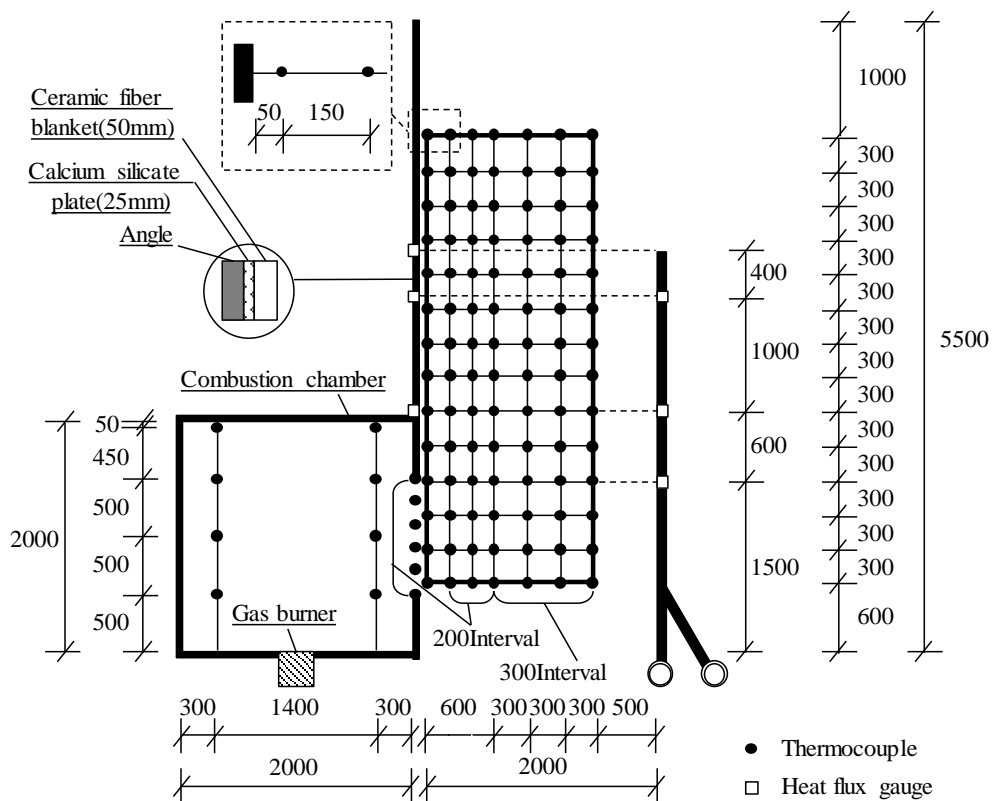


図3 断面図



図5 立面図

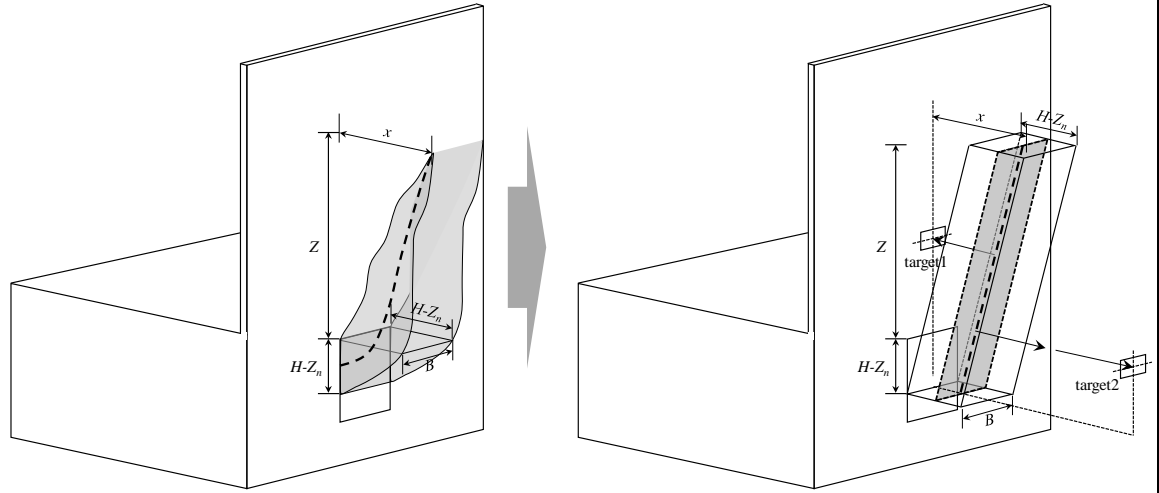


図6 噴出火炎のトラジェクトリーの推定

実験条件を表1に示すように開口条件と火源の条件を変化させた。データ計測は、データロガー (YOKOGAWA、MX100) を使用し、1秒間隔で記録した。開口条件はアスペクト比  $n (=2W/H)$  を1、2、3、4、5、6の6条件に設定し、開口上部を固定して開口の下端高さを変化させてアスペクト比を設定した。火源条件は、都市ガスを燃料とし、MFCを使用して、設定供給量から火災室内の発熱速度を算出した。発熱量は、盛期火災を考慮して  $Q_{\text{phase1}} (Q_{\text{vcrit}})$ 、 $Q_{\text{phase2}} ((Q_{\text{vcrit}}+1500AH^{1/2})/2)$ 、 $Q_{\text{phase3}} (1500AH^{1/2})$ 、 $Q_{\text{phase4}} (1800AH^{1/2})$ 、 $Q_{\text{phase5}} (2100AH^{1/2})$ 、 $Q_{\text{phase6}} (2400AH^{1/2})$  で6段階に設定し、ガス供給量は、実験時の準定常状態を考慮して、発熱量段階的に5分間隔で最大発熱量まで増加した。燃焼実験終了とデータ計測の終了は、着火から50分後とした。

表1 実験条件

|       | Opening conditions |        |              |                | Fire sources |                             |                |                |                |                |
|-------|--------------------|--------|--------------|----------------|--------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       | Width              | Height | Aspect ratio | Opening factor | Q_phase1     | Q_phase2                    | Q_phase3       | Q_phase4       | Q_phase5       | Q_phase6       |
|       | W                  | H      | n            | $AH^{1/2}$     | $Q_{crit}$   | $(Q_{crit}+1500AH^{1/2})/2$ | $1500AH^{1/2}$ | $1800AH^{1/2}$ | $2100AH^{1/2}$ | $2400AH^{1/2}$ |
|       | [m]                | [m]    | [-]          | $[m^{5/2}]$    | [kW]         | [kW]                        | [kW]           | [kW]           | [kW]           | [kW]           |
| Case1 | 0.5                | 1      | 1            | 0.50           | 461.6        | 605.8                       | 750.0          | 900.0          | 1050.0         | 1200.0         |
| Case2 | 1                  | 1      | 2            | 1.00           | 525.8        | 1012.9                      | 1500.0         | 1800.0         | 2100.0         | 2400.0         |
| Case3 | 1                  | 0.67   | 3            | 0.55           | 469.2        | 647.1                       | 825.0          | 987.2          | 1155.0         | 1320.0         |
| Case4 | 1                  | 0.5    | 4            | 0.35           | 429.9        | 477.4                       | 525.0          | 636.4          | 735.0          | 840.0          |
| Case5 | 1                  | 0.4    | 5            | 0.25           | 402.6        | 388.8                       | 375.0          | 455.4          | 525.0          | 600.0          |
| Case6 | 1                  | 0.33   | 6            | 0.19           | 381.5        | 333.3                       | 285.0          | 341.2          | 399.0          | 456.0          |

### 3. 2 実験結果

#### 1) 燃焼チャンバの温度

図7に、時間変化に伴う火災室の平均温度 ( $T_R$ ) を示す。グラフにプロットした値は、火災室の開口部を基準に対角線上に設置した8つの熱電対で測定した温度を平均した。6つの実験条件の火災室温度を比較した結果、着火後15分まで火源条件が増加するにつれて、火災室の内部の温度が増加する傾向がみられたが、着火後15分から30分までの区間では、火源条件が増加しても、温度が一定となる傾向がみられた。また、火災室の温度は開口因子  $AH^{1/2}$  が大きいほど、火災室温度が高くなる傾向がみられた。

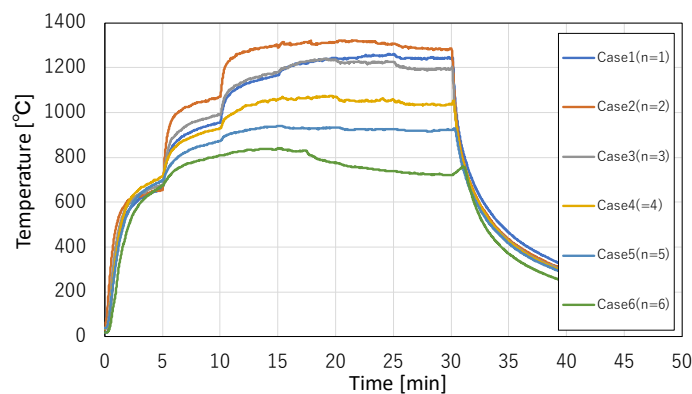


図7. 燃焼チャンバの温度

#### 2) 開口部の温度分布

図8に、時間変化に伴う開口部の平均温度 ( $T_o$ ) を示す。グラフにプロットした値は、中性帯の高さから、開口部の上部の高さまで測定した値を平均化した。6つの実験条件の開口部温度を比較した結果、Case6を除いた残りの条件で、開口因子  $AH^{1/2}$  が大きいほど、開口

部の温度が高くなり傾向がみられた。

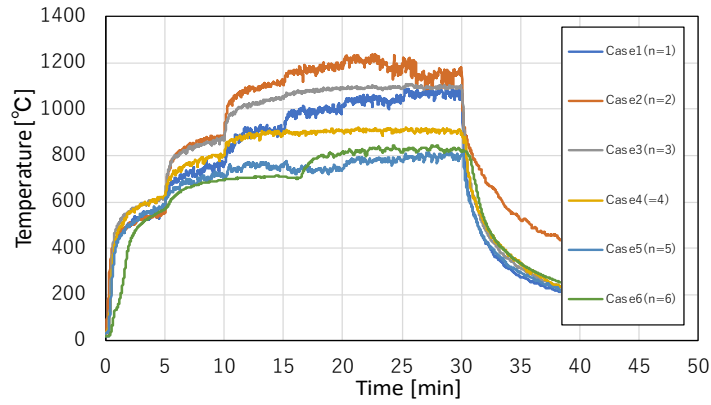
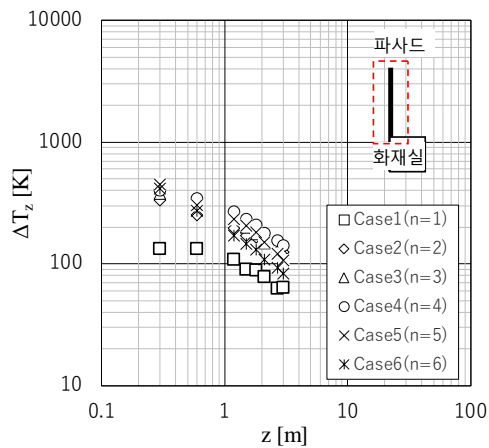


図8. 開口部の温度分布

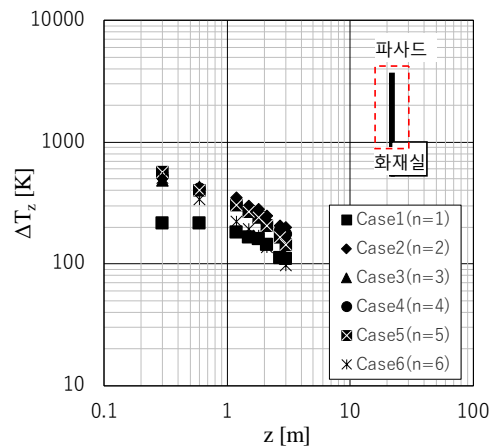
### 3) 外壁面の温度分布

図9にファサード壁面の温度分布 ( $\Delta T_z$ ) とファサードの高さ ( $z$ ) の関係を示す。ファサード壁面の温度分布をアスペクト比と火源の条件に基づいて比較した。また、実験時の目視観察した噴出火炎の発生時間を参考にして、噴出火炎発生前の領域のグラフのプロットは白、噴出火炎発生後の領域のグラフのプロットは黒で表記した。

ファサード壁面の温度分布をアスペクト比と火源条件について比較した結果、全体的に開口上端から離れるほど温度が低くなる傾向がみられた。また、火源条件が増加するほど、温度が高くなる傾向がみられた。



(a) Q\_phase1



(b) Q\_phase2

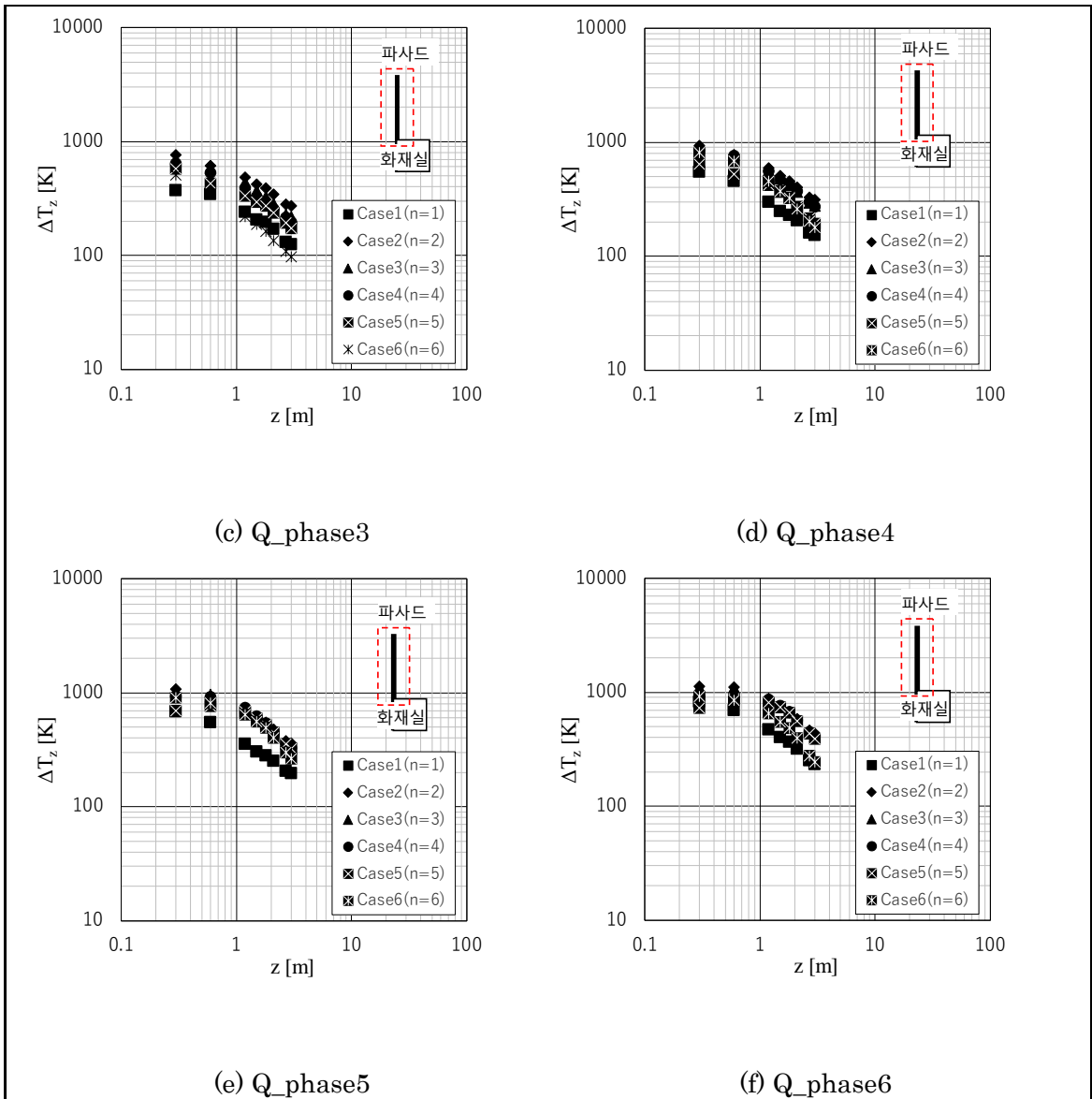


図 9. 外壁面の温度分布

### 3. 3 開口噴出火炎の温度分布及び Trajectory

#### 1) 開口噴出火炎の温度分布

図 10 にファサード周辺の等温グラフをアスペクト比 1~4 に区分し示す。グラフの値は、準定常状態の時間帯の平均値を用いた。

Case1~Case4 までファサード周辺の等温グラフを火源条件で区切って示した結果は、ほとんど火源条件にかかわらず、アスペクト比が小さいほど、開口部から噴出する火炎の中心軸温度と推定される温度は、開口上端から離れるほどファサード壁からの距離が遠ざかる性状がみられた。一方、アスペクト比が大きくなるほど開口部から噴出する火炎の中心軸温度と推定される温度は、開口上端から離れるほどファサード壁面に近づく傾向がみられた。



特に、アスペクト比 4 の条件は、ファサード壁に沿って上部方向に上昇することが確認できた。

## 2) 開口噴出火炎のトラジェクトリー

開口噴出火炎による上階や周辺建物への延焼危険性を予測するうえで、噴出火炎のトラジェクトリーを正確に予測することが重要である。噴出火炎の中心軸の軌跡については、横井による古典的な研究が行われ、その結果に基づき火災安全設計において実用に供されている。しかし、横井により提示された結果は、実験結果を無次元化したグラフのみであり、トラジェクトリーの方程式は確立されていない。そのため、中心軸のトラジェクトリーを折れ線で近似して距離を求める手順が必要となり、実務的計算としては煩雑となるため、実用性の上で課題がある。そこで、実大実験のデータを用い、横井による噴出火炎の中心軸のトラジェクトリーデータに数式を当てはめた原田の予測式の検証を行う。

図 11 に示すように、幅  $B(m)$ 、高さ  $H(m)$  の単一開口からの噴出火炎のトラジェクトリーは、噴出面のアスペクト比  $n$  に依存する。

$$n = B / (H - z_n) \quad (1)$$

開口部の上部からの噴出火炎の高さ  $z$  は、式(2)～(5)で計算できる。

$$\frac{z' - z}{H - Z_n} = C \exp(-an^m) \quad (2)$$

$$C = 0.345 \exp(-0.297n^{1.07}) + 0.0833 \quad (3)$$

$$a = -0.321n^2 + 2.09n + 1.54 \quad (4)$$

$$m = -0.0230n^2 + 0.122n + 0.571 \quad (5)$$

開口部の上部から放出された火炎の水平距離、 $x$ 、および 5 未満のアスペクト比は、式(6)～(9)で与えられます。

$$\frac{x}{H - Z_n} = C' \left( \frac{z}{H - Z_n} \right) \exp \left\{ -a' \left( \frac{z}{H - Z_n} \right)^{m'} \right\} \quad (6)$$

$$C' = 110 \exp(-0.209n^{2.36}) + 0.945 \quad (7)$$

$$a' = 3.31 \exp(-0.0121n^{4.13}) + 1.59 \quad (8)$$

$$m' = -1.12 \exp(-0.00175n^{4.32}) + 1.25 \quad (9)$$

開口部から噴出する火炎の中心軸温度の高さを把握するために横井が提案したトラジェクトリーグラフと原田が提案したトラジェクトリー予測式を利用して、青実線は横井モデルと赤実線は原田モデルで表記した。

本実験の範囲で横井モデルと原田モデルを比較した結果、横井モデルの場合、開口部の上部、原田モデルの場合、中性帯の高さをトラジェクトリーの起点としているが、原田モデルの場合、アスペクト比 2~4 で横井モデルより実験値とはほぼ一致する傾向がみられた。

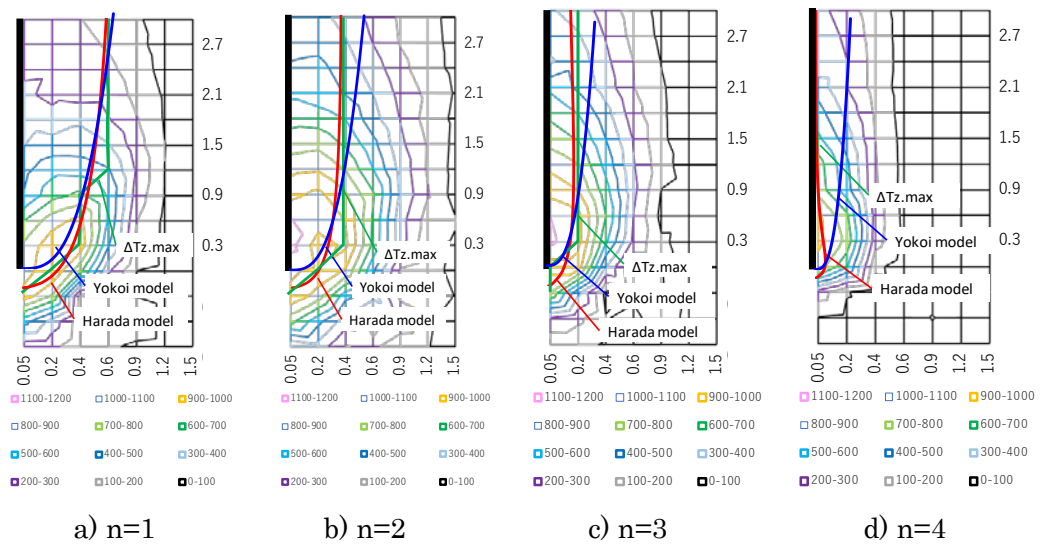


図 10 開口噴出火炎のトラジェクトリー

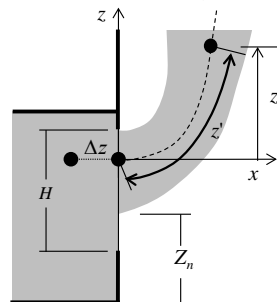


図 11 噴出火炎の形状の定義

#### 4 結論

開口アスペクト比による噴出火炎のトラジェクトリーに対する既往研究の方法の信頼性を検討した結果、アスペクト比 2~4 では原田モデルの方が横井モデルより実験値と良好に一致する傾向がみられた。この結果を基に現在開発している開口噴出火炎の放射熱の予測

手法に展開していく計画である。

## References

- [1] 田中哮義：改訂版建築火災安全工学入門，日本建築センター，2002.1
- [2] S.YOKOI：Study on the Prevention of Fire-Spread Caused by Hot Upward Current, BRI Report No.34, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan.
- [3] 大宮喜文，申易澈，野秋政希，姜昇具：横長開口から噴出する熱気流の鉛直壁面近傍温度分布，日本建築学会環境系論文集第 81 巻第 730 号，pp1055-1063, 2016.12
- [4] 吉岡英樹，楊欣潔，田村政道，吉田正志，野口貴文，兼松学，小浦孝次，尾崎泰治：外断熱工法外壁の燃え拡がり性状を評価する新しい試験方法の検討，日本建築学会技術報告集 17(36)，pp.537-542, 2011
- [5] 長谷見雄二：垂直面における上方火炎伝播の熱的モデル・I，日本建築学会構造系論文報告集 359，pp.117-124, 1986
- [6] Yuji Hasemi：Experimental wall flame heat transfer correlations for the analysis of upward wall flame spread, Fire science and Technology Vol.4, No.2, pp.75-90, 1984
- [7] McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G. and Harkleroad, M.F.：Estimating Room temperatures and Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations, Fire Technology, Vol.17, No.2, pp.98-119, 1981
- [8] Waterman, T.E.：Room Flashover-criteria and Synthesis, Fire Technology, Vol.4, 1968
- [9] 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，日本建築学会計画系論文集第 545 号，pp1-8, 2001.7
- [10] 申易澈：高層建築物における火災時の開口噴出熱気流性状に関する研究，東京理科大学博士学位論文，2015
- [11] K.Harada, D.Nii, Y.C.Shin, K.W.Park, M.Noaki, Y.Ohmiya：A Practical formula for trajectory of flame ejected from an opening, IFiress 2019-3rd International Fire Safety Symposium, 2019
- [12] 日本建築学会：建築物の火災荷重および設計火災性状指針(案)，2013
- [13] 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針，2008

## 5. 今後の展望（今後の発展性，見込み等についても記述）

本研究では、ファサード火災試験装置を使用した実験を行い、開口噴出火炎のトラジェクトリーの実験結果を用いて原田モデルの信頼度を検証し、ファサード火災発生時の放射熱によって対向壁が受ける熱的影響の簡易評価手法へ利用できることを確認した。

6. 成果の公表状況（学会への発表，学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

研究結果の学会発表成果

- K.Harada, D.Nii, Y.C.Shin, K.W.Park, M.Noaki, Y.Ohmiya : A Practical formula for trajectory of flame ejected from an opening, IFiress 2019-3rd International Fire Safety Symposium, 2019
- 申易澈、開口部から噴出される火炎の Trajectory 推定アルゴリズムの構築に関する研究、韓国火災消防学会、2019

7. 経費の使用状況

| 消耗品費・会議費・印刷費等           |         | 旅費  |                                     | 人件費 |       |
|-------------------------|---------|---|-------------------------------------|-----|-------|
| 事 項                     | 金額(円)   | 事 項   | 金額(円)                               | 事 項 | 金額(円) |
| 噴出火炎実験区<br>画制作・実験補<br>助 | 467,621 | 7月1日～7月3日<br>旅費<br>宿泊費<br>10月30日～11月9日<br>旅費<br>宿泊費 | 74,766<br>6,000<br>71,603<br>30,000 |     |       |
| 小計                      | 467,621 | 小計  | 182,369                             | 小計  |       |
| 東京理科大学 負担分 総計 649,990 円 |         |   |                                     |     |       |
| 上記以外負担分 総計 0 円          |         |   |                                     |     |       |

※スペースが足りない場合はページを増やしても構いません。

※上記5に記載された成果公表については、別刷1部をご提出願います。PDFファイル等の電子データでも構いません。

※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告としてWeb等で公開されることをお含み置き下さい。

※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。（フォーマットは問いません。）

※後日開催予定の成果講評会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。（学内での報告に使用）