

# 埼玉県三芳町倉庫火災における上階延焼メカニズムの数値解析

## Numerical Analysis on Mechanism of Upper Floor Spread of Warehouse Fire in Miyoshi-machi, Saitama Prefecture

○ 阿部伸之, 消防研, 東京都調布市深大寺東町 4-35-3, E-mail: abe@fri.go.jp  
Nobuyuki ABE, National Research Institute of Fire and Disaster, 4-53-3 Jindaiji-higashimachi, Chofu-shi, Tokyo, Japan

A warehouse where a fire occurred in Miyoshi-machi, Saitama Prefecture on February 16th, 2017 is a large-scale logistics warehouse corresponding to internet sales that has been increasing in recent years. Because of the serious social impact of this fire, the Commissioner of the Fire and Disaster Management Agency investigated the cause of the fire. In the fire investigation, it was inferred that a fire spread path exists from the first-floor used paper storage room (fire room) to the second-floor doveccote. However, since the details of the mechanism were unknown in the investigation, numerical analysis was carried out with the conditions of the building. As a result, it was found that the spreading mechanism is the ejected flame caused by the Coanda effect.

### 1. はじめに

埼玉県三芳町倉庫火災（2017年2月16日発生）は、出火から12日後に鎮火し、約45000m<sup>2</sup>を焼損した。建物1階にある廃ダンボールの破材が集積される破材室から出火し、2階床貫通部を経由して2階西側ハト小屋へ延焼したと推察されたが、その詳しい延焼メカニズムはわからなかった。そこで、既報<sup>1)</sup>では1階破材室及び2階西側ハト小屋を含む防火区画を計算対象とした数値解析から延焼メカニズムを定性的に調べたが、本研究では更に火災現場に近い建物条件にて計算格子数を増やし数値解析を実施したので、その結果について報告する。

### 2. 火災調査の概要

Fig.1は数値解析で使用する計算空間及び建物モデルであり、Fig.2はその平面図である。発災建物は3階建てであるが、その一部である1階破材室及び2階西側ハト小屋を含む防火区画を切り出し、そのみを計算空間としている。1階破材室の開口部は、出入り口と2階床貫通部の2か所である。2階床貫通部は、1階破材室の天井部分にあり、1階破材室と2階西側ハト小屋を接続する。2階西側ハト小屋の開口部は、床面の2階床貫通部と、東西方向に開口部がそれぞれ1か所ずつある。他に2階には東側ハト小屋があり、そのハト小屋には床面の開口部（1階破材室には接続されていない）と北側壁の開口部の2か所の開口部がある。これらを参考に、火災調査の過程で、数値解析による分析が必要な箇所について述べる。なお、火災調査の詳細については、既にまとめられている報告書<sup>2)</sup>を参照されたい。

Fig.3は、火災現場における2階西側ハト小屋の内部から見た西面開口部及び東面開口部である。西面開口部の方が東面開口部に比べて強く加熱されている理由が不明であった。

Fig.4は、火災現場における2階西側ハト小屋の西面開口部近傍のコンクリート柱であり、コンクリート柱のA面及びB面は上方にかけて爆裂していた。一方、コンクリート柱のC面及びD面は爆裂は認められなかったため、コンクリート柱が面によって受熱量が異なる理由が不明であった。

Fig.5は、火災現場における1階破材室の出入り口周辺の様子である。出入り口の室外部の垂れ壁に焼けの跡が確認できるものの、室外部周辺に煤が付着している様子が確認できない理由が不明であった。

Fig.6は、火災現場における2階東側ハト小屋の内部の様子である。2階全体は一樣に焼損しているものの、このハト小屋内部には焼けや煤が付着している様子が確認できない理由が不明であった。

以上の不明点を解明するために数値解析を試みる。

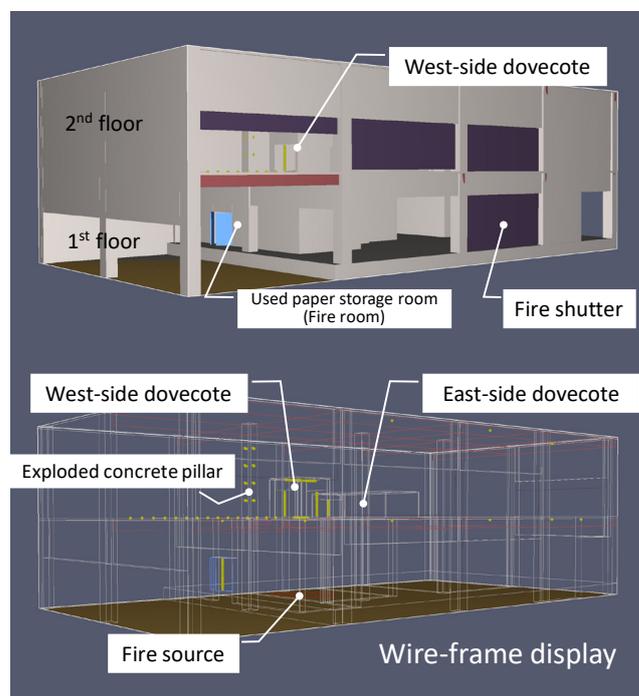


Fig. 1 Computational domain and building model.

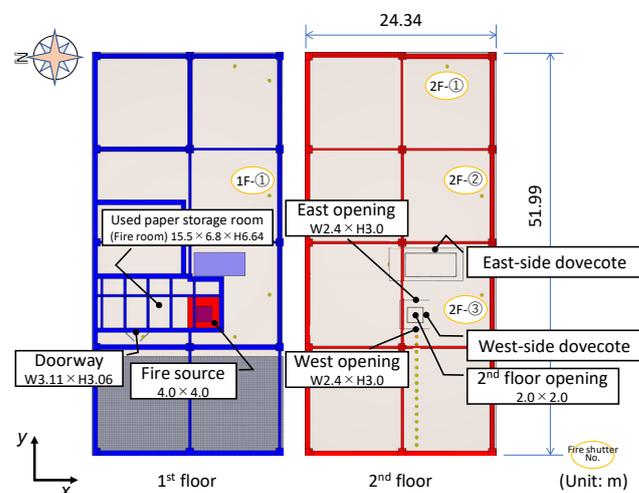


Fig. 2 Floor plan of the building model.

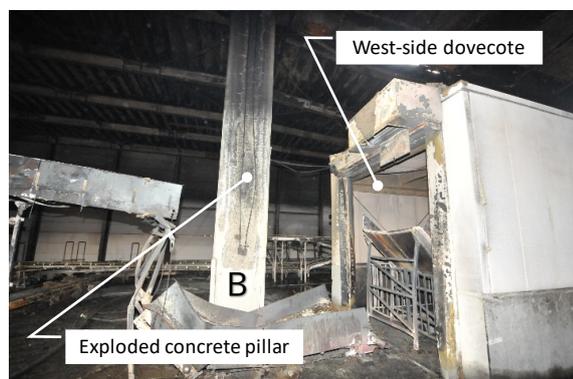


(a) West opening



(b) East opening

Fig. 3 Openings viewing from the inside of the west-side dovecote.



(a) Positional relationship between the dovecote and the pillar



(b) Each face of the exploded concrete pillar

Fig. 4 Exploded concrete pillar in the vicinity of the west opening of the West-side dovecote.



Fig. 5 Around the doorway of the used paper storage room.



Fig. 6 Inside of the east-side dovecote.

### 3. 数値計算の概要

#### 3.1 計算プログラム

計算プログラムは、米国商務省国立標準技術研究所が開発した CFD を用いた火災シミュレータである Fire Dynamics Simulator (以下、FDS) 6.6.0 を使用する。FDS では、直交直線座標系において空間微分に対して 2 次精度中心差分を、時間積分については陽的 2 次精度予測子修正子法を用いている。また、火災で生じる高温熱気流は圧縮性流れであるが、FDS では爆発のような高い密度波の伝播を捉える必要がないという立場で、低マッハ数流れとして低マッハ数近似を適用している。この近似により爆発現象は再現不可能ではあるが、計算が高速となる。計算手法として、火災時の熱気流のような乱流を取り扱うのにこの分野で一般的になりつつある Large eddy simulation (以下、LES) を用いて計算を行う。この LES には、FDS 既定の Subgrid-scale モデルとして簡易 Deardorff モデルが採用されており、本計算では Deardorff 定数 0.1 (FDS 既定値) を使用する。簡易 Deardorff モデルは、SGS 渦粘性係数  $\nu_{SGS}$  を式(1)に示すように SGS 乱流エネルギー  $k_{SGS}$  から構成される。

$$\nu_{SGS} = C_D \bar{\Delta} (k_{SGS})^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $C_D$  は Deardorff 定数である。本来の Deardorff モデル<sup>(3)</sup>は、SGS 乱流エネルギー  $k_{SGS}$  を求める際にその輸送方程式を用いる 1 方程式モデルであるが、FDS ではスケール相似則モデル<sup>(4)</sup>の概念に基づく式(2)から SGS 乱流エネルギー  $k_{SGS}$  を求める 0 方程式モデルとしている<sup>(5)</sup>。

$$k_{SGS} = \frac{1}{2} (\bar{u}_j - \tilde{u}_j)(\bar{u}_j - \tilde{u}_j) \quad (2)$$

ここで、 $\bar{f}$  は物理量  $f$  にテストフィルタ (テストフィルタ幅:  $2\bar{\Delta}$ ) を施したことを表す。

その他の機能として、伝熱モデル (熱伝導、対流熱伝達及び放射

熱伝達) や燃焼モデルが FDS には実装されており、本計算でもそれらを活用している。

### 3.2 計算空間と計算条件

Fig. 1 に示す直方体の計算空間の寸法は 24.34 m × 51.99 m × 16.13 m, 計算格子数は 240 × 512 × 160 = 19660800 である。計算格子幅は、約 0.1 m である。計算時間は、出火から 600 秒までである。計算機は CentOS 6.6, Intel(R) Xeon(R) プロセッサ E5-1660 v3 (20M キャッシュ, 3.00GHz, 8 コア) を用いて、OpenMP による並列計算で 85 日 8 時間 25 分 19 秒の長時間を計算に費やした。

初期条件は、発災時の状況を踏まえて、風速 0 m/s, 気温 5.2°C, 圧力  $1.021 \times 10^5$  Pa, 相対湿度 59.7% とする。火源条件は、1 階破材室の一角 (2 階床貫通部の直下) の床面に 4 m × 4 m の火源を設定し、発熱速度  $\dot{Q} = \alpha t^2$  を与える。ここで、 $\alpha$  は実験<sup>(1)</sup> で得られた火災成長率  $0.53 \text{ kW/s}^2$ ,  $t$  は時間 [s] である。

境界条件は、防火区画と計算空間が同一のため空間界面が大気開放条件である (地面を除く)。既報<sup>(1)</sup> では、計算負荷の軽減から壁面等はすべて 20°C (不活性条件) としたが、本研究では火災現場に近い条件として壁面等の失熱を考慮し、内壁、外壁及び地面はコンクリート (密度  $2280.0 \text{ kg/m}^3$ , 比熱  $1.04 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ , 熱伝導率  $1.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , 放射率 0.9), 防火シャッター, オーバースライダー及び鉄骨はスチール (密度  $7850.0 \text{ kg/m}^3$ , 比熱  $0.46 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ , 熱伝導率  $45.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , 放射率 0.95) とする。なお、計算開始時は防火シャッターを開放しているが、煙が拡散し、防火シャッター近傍の天井の減光係数 (光学的煙濃度) が 15%/m に到達すると防火シャッター (1F-①, 2F-①~③) が作動するように設定する。ただし、防火シャッターが作動しても、火災現場の防火シャッター閉鎖状況に合わせて、1F-①及び2F-②は閉鎖するが、2F-①及び2F-③は途中で閉鎖しなくなり半開状態となる。

## 4. 結果と考察

主として、出火室である 1 階破材室から上階への延焼メカニズムについて考察するが、他に、コンクリート柱の爆裂、1 階破材室の出入り口や 2 階東側ハト小屋の気流の様子、2 階西側ハト小屋から出現する噴出火炎が周囲可燃物への延焼に寄与する可能性、建物の防火シャッターの作動予測についても考察する。

### 4.1 上階延焼メカニズム

Fig. 7 は、2 階西側ハト小屋の 2 つある開口部から出現する噴出火炎 (出火 300 秒後) の様子である。噴出火炎の特徴は、西側ハト小屋の東面開口部からの噴出火炎に比べて西面開口部からのそれが大きいことである。また、1 階破材室の火源から 2 階西側ハト小屋に向かって伸びる火炎の様子を見てみると、破材室の南側及び西側の壁面に沿うように火炎が伸び、特に西側壁面に沿った火炎がそのまま延長線上の西側ハト小屋の西面開口部から噴出することから大きな噴出火炎となっているように見える。Fig. 8 に示す 2 階床貫通部におけるデータ取得位置での 10 秒間移動平均鉛直方向速度  $w$  の  $x$  方向及び  $y$  方向分布を Fig. 9 に示す。1 階破材室の南側壁面を沿った熱気流や火炎が、2 階床貫通部を通過することで、Fig. 9(a) の位置  $x$  が正 (南側) で鉛直方向速度  $w$  が大きくなる傾向がある。同様に、1 階破材室の西側壁面の熱気流や火炎に与える影響は、Fig. 9(b) の位置  $y$  が負 (西側) で鉛直方向速度  $w$  が大きくなる傾向がある。

Fig. 10 に示す 1 階破材室から見上げた 2 階西側ハト小屋の天井中央におけるデータ取得位置での 10 秒間移動平均水平成分速度  $v$  の  $y$  方向分布を Fig. 11 に示す。ここで、データ取得位置は、天井面から鉛直下方に 0.1 m の離隔距離がある。また、位置  $y$  の正の方向に東面開口部、負の方向に西面開口部がある。1 階破材室から 2 階床貫通部を経由して上昇する熱気流や火炎は、2 階西側ハト小屋の天井に衝突して水平方向に分歧し、西面及び東面開口部に向

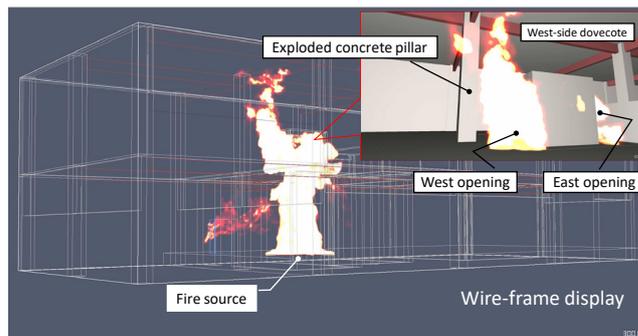


Fig. 7 Fire behavior at 300 s.

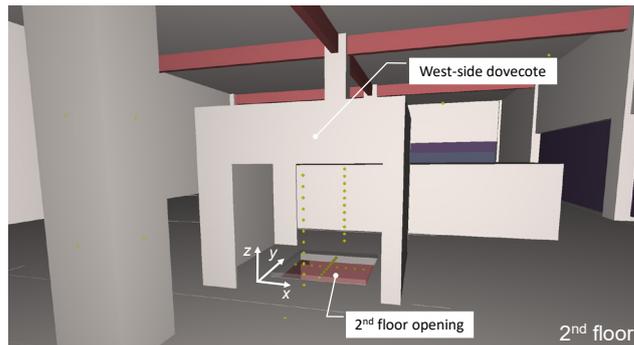
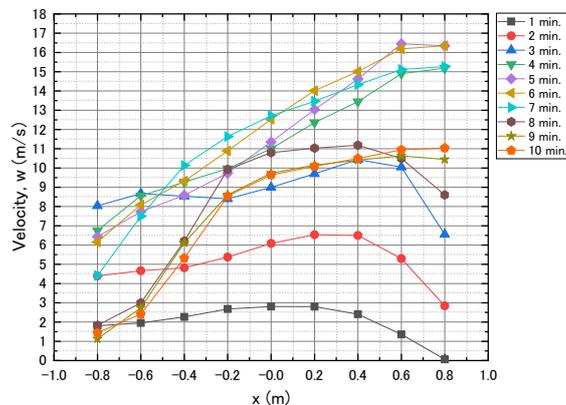
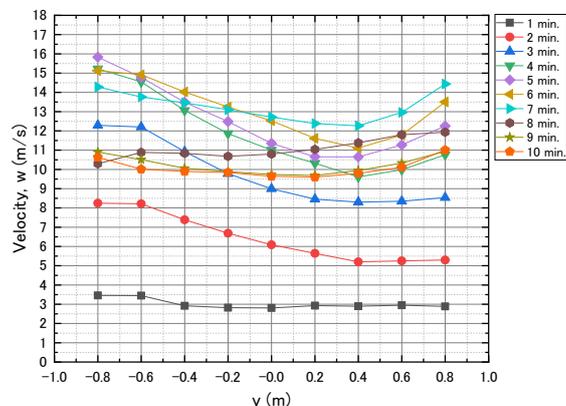


Fig. 8 Data acquisition position in the 2nd floor opening of the west-side dovetail.



(a) x-direction



(b) y-direction

Fig. 9 Moving averaged vertical velocity  $w$  for 10 seconds in the 2nd floor opening of the west-side dovetail. (Center of the opening,  $x=y=0.0 \text{ m}$ )

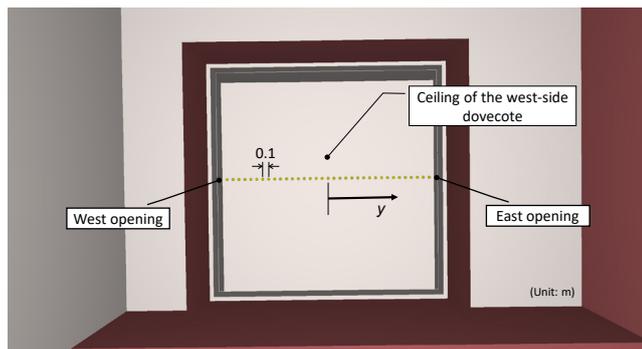


Fig. 10 Data acquisition position near the ceiling of the west-side dovecote. (Separation distance between the ceiling and the position, 0.1 m)

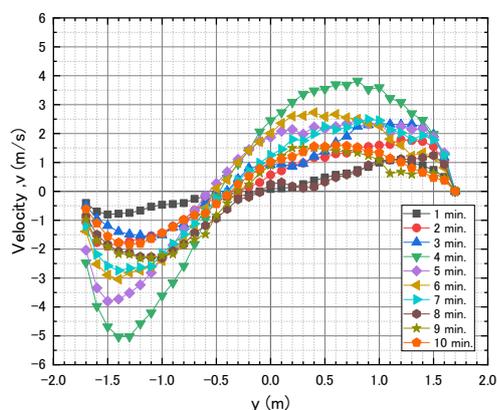


Fig. 11 Moving averaged horizontal velocity  $v$  for 10 seconds near the ceiling of the west-side dovecote. (Center of the ceiling,  $y=0.0$  m)

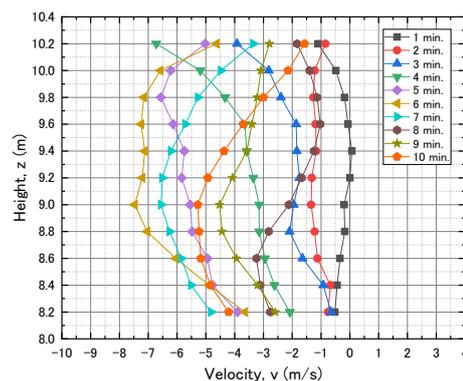
かう。その分岐位置は、およそ  $y=-0.5\sim 0.0$  m の範囲であり、西面開口部寄りに位置する。

Fig. 12 及び Fig. 13 は、2 階西側ハト小屋の西面及び東面開口部中央における 10 秒間移動平均水平方向速度  $v$  及び 10 秒間移動平均ガス温度の鉛直 ( $z$ ) 方向分布である。ここで、水平方向速度の正負について、西面開口部では負の速度、東面開口部では正の速度がハト小屋から熱気流や火炎が噴き出す方向である。また、高さ  $z=8.0$  m は 2 階床面の高さである。東側開口部の水平方向速度  $v$  は西側開口部のそれと比べて、 $z=9.8$  m (床から高さ 1.8 m) で速度が低い傾向にあり、例えば出火 6 分ではおよそ 2 m/s 噴き出しが弱い。西面開口部のガス温度は、出火 4~8 分、特に 4~5 分において、東面開口部のガス温度よりも 900°C 程度の高温になる。西面開口部の方が東面開口部に比べて強く加熱されている状況 (Fig. 3) を計算で確認することができた。

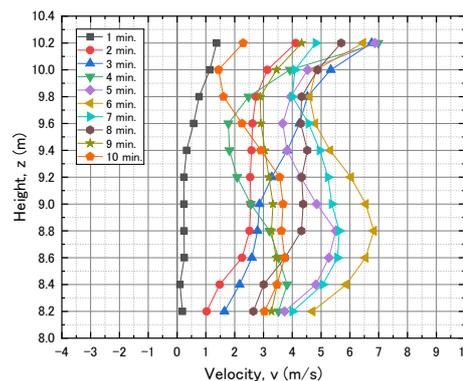
以上より、上階延焼メカニズムとしては、2 階西側ハト小屋の西面開口部の直下に 1 階破材室の壁面があり東面開口部の直下にはそれがないことから、壁面に火炎が沿って火災進展する所謂コアンダ効果が原因である。本来 2 階西側ハト小屋の天井中央で上昇する熱気流が分岐し天井流として西面及び東面開口部から均等に火炎が噴き出すところ、熱気流の分岐点が生じ西面開口部寄りになることから、分岐点からの火炎の長さが同じであると仮定すると、分岐点から遠い東面開口部よりも近い西面開口部からの火炎の高さの大きい火炎が噴き出すことになる。

#### 4.2 コンクリート柱の爆裂

火災現場では、Fig. 4 に示す 2 階西側ハト小屋近傍の柱は鉄筋コ

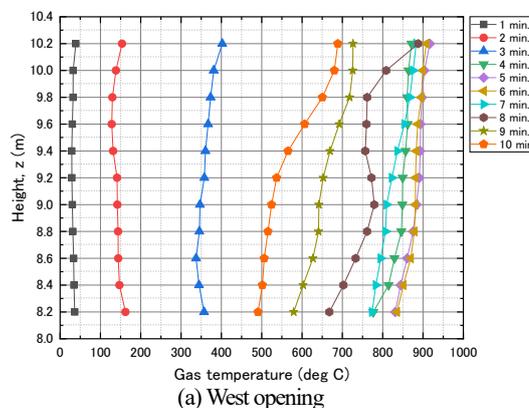


(a) West opening

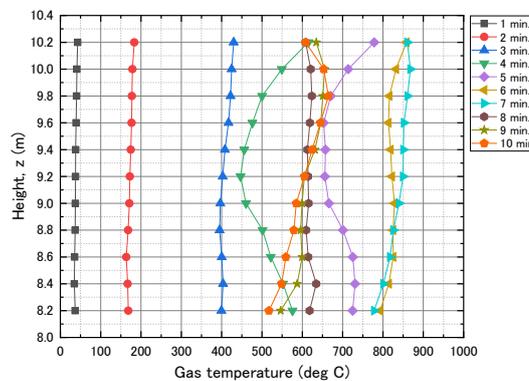


(b) East opening

Fig. 12 Moving averaged horizontal velocity  $v$  for 10 seconds at the openings of the west-side dovecote. (Floor height of 2nd floor,  $z=8.0$  m)



(a) West opening



(b) East opening

Fig. 13 Moving averaged gas temperature for 10 seconds at the openings of the west-side dovecote. (Floor height of 2nd floor,  $z=8.0$  m)

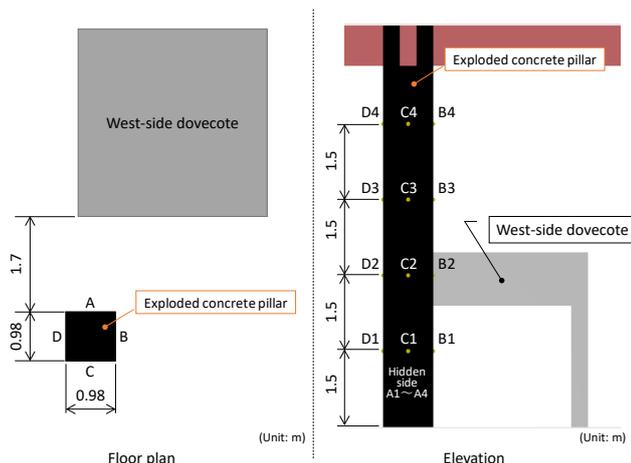


Fig. 14 Data acquisition position on the faces of the pillar.

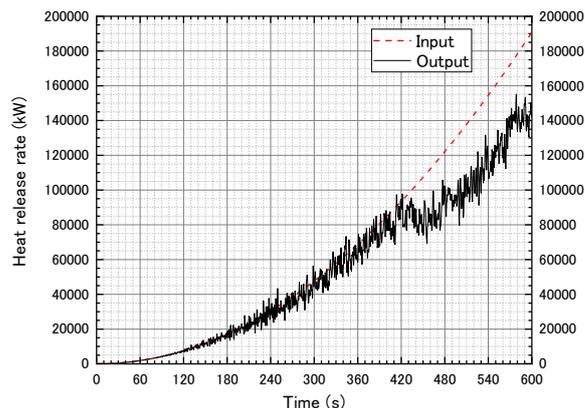


Fig. 17 Comparison with the input heat release rate and the output one.

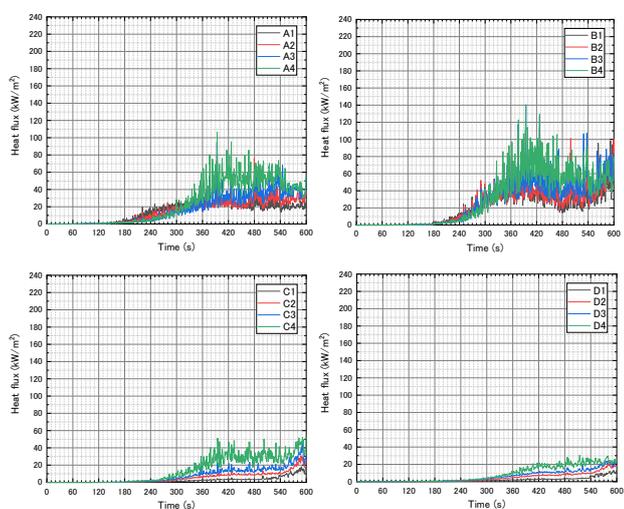


Fig. 15 Heat flux to each face of the pillar.

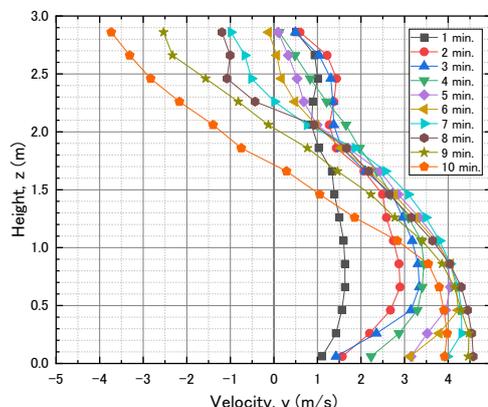


Fig. 18 Moving averaged horizontal velocity  $v$  for 10 seconds at the doorway of the used paper storage room (fire room). (Floor height of 1st floor,  $z=0.0$  m)

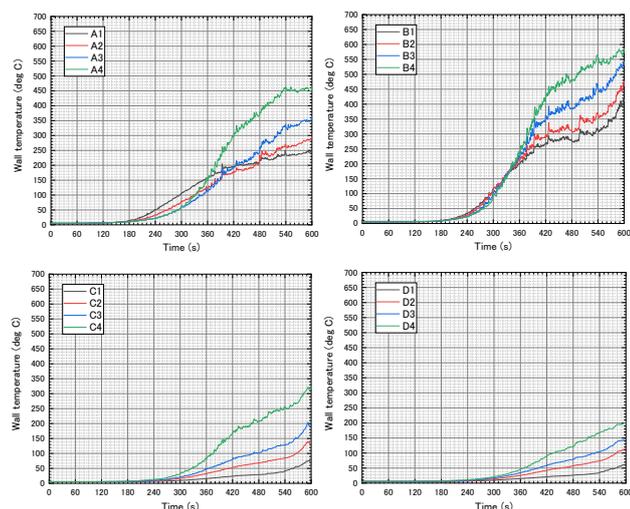


Fig. 16 Surface temperature of each face of the pillar.

ンクリート構造で一部爆裂していた。Fig. 14 に 2 階西側ハト小屋と爆裂したコンクリート柱の位置関係を平面図及び立面図で示す。柱はハト小屋西面開口部と約 1.7 m の離隔距離があり、ハト小屋西面開口部に正対する柱の面を柱 A 面と呼ぶ。柱の他の面は平面図で見たときの時計回りの順に柱 B 面、C 面、D 面と呼ぶ。柱 C 面を例にとりて、床から鉛直方向に 1.5 m の柱面上を C1、更に 1.5

m 毎上方に C2, C3, C4 とする位置が、データ取得位置である。Fig. 15 及び Fig. 16 に柱の各面に受熱した熱流束及び柱の各面の表面温度の経時変化を示す。柱 A 面及び B 面について、出火から高い位置より低い位置の方が熱流束が大きい。出火 300 秒を超えると低い位置より高い位置の方が熱流束が大きくなる。西面開口部から噴出する熱気流や火炎が、時間の経過に伴い成長し、より高い位置を加熱することが影響しているものと考えられる。また、柱 A 面と B 面が、柱 C 面と D 面に比べて、熱流束が大きい。爆裂するために必要な熱流束がどの程度かは不明であるが、柱 A 面及び B 面の受熱量は明らかに大きく、現場で爆裂していた柱の面はまさに A 面及び B 面であったことと一致する。柱各面の表面温度は、熱流束が一定になっても、上昇を続ける。

Fig. 17 は入力及び出力した発熱速度である。入力した発熱速度は  $\dot{Q} = 0.53t^2$  であり、放物線を描く。出力した発熱速度は 420 秒以降に入力したそれよりも低くなり、火災室の酸素が不足している傾向が見られる。コンクリート柱の A 面及び B 面への熱流束が C 面及び D 面に比べて大きくなり始めるときの発熱速度は約 20 000 kW (20 MW) である。

### 4.3 破材室の出入り口の気流

Fig. 18 は、1 階破材室の出入り口における 10 秒間移動平均水平成分速度  $v$  の鉛直 ( $z$ ) 方向分布である。出火から 5 分までは、破材室内に新鮮空気が流入している。出火 6 分から 10 分にかけて、新鮮空気の流入は継続するものの、出入り口上方から破材室から

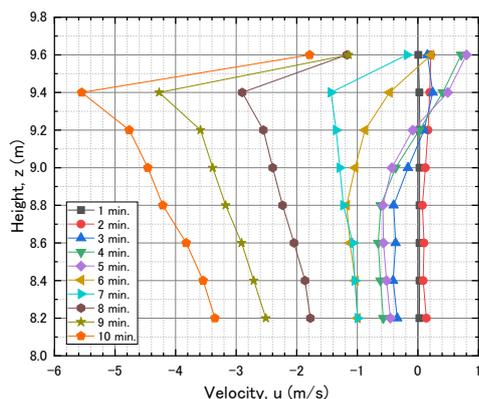


Fig. 19 Moving averaged horizontal velocity  $u$  for 10 seconds at the opening of the east-side dovecote. (Floor height of 2nd floor,  $z=8.0$  m)

熱気流が流出する速度は増加していく。火災現場において、出入り口の室外部の垂れ壁に焼けの跡が確認できるものの、室外部周辺に煤が付着している様子が確認できない理由が、出入り口が給気役割を担っていたことを計算結果から確認できた。

#### 4.4 東側ハト小屋内の気流

Fig. 19 は、2 階東側ハト小屋の開口部における 10 秒間移動平均水平成分速度  $u$  の鉛直 ( $z$ ) 方向分布である。1 階から東側ハト小屋を經由して 2 階へ新鮮空気が流入しており、時間の経過と共に流速が大きくなる。実際の火災において、比較的閉鎖された中でも燃焼が維持できたのはこの空気の流れが寄与したことも一因と考える。火災現場において、東側ハト小屋の内部が煙による汚染や熱による焼損を受けていないので、東側ハト小屋開口部から新鮮空気が供給されていることと計算結果が一致する。

#### 4.5 噴出火炎による周囲可燃物への延焼可能性

2 階西側ハト小屋の西側開口部の先には緩衝材置き場があった<sup>2)</sup>。西側開口部からの噴出火炎が、周囲の可燃物に延焼する影響について考える。Fig. 20 は、2 階西側ハト小屋の西側開口部を基点として、西側開口部の法線方向を  $y$  としたときの床面のデータ取得位置であり、位置  $y$  での床面への熱流束及び床面の表面温度を Fig. 21 に示す。周囲への延焼を可能にする熱流束を  $16 \text{ kW/m}^2$  とすると、出火 4 分で直近の可燃物は延焼の可能性があり、出火 10 分で可燃物と 8 m の離隔距離があっても延焼する可能性がある。したがって、噴出火炎が緩衝材を燃焼させ、2 階に延焼拡大させるきっかけになったものと考えられる。

#### 4.6 防火シャッターの作動予測

Table 1 に各防火シャッターの作動予測時間を示す。2 階西側ハト小屋に近い防火シャッターから作動開始し、最後に 1 階の防火シャッターが作動する。参考までに、火災現場の作動記録では、これら 4 つの防火シャッターについて出火 4 分となっていることから、2 階の作動時間は早めの予測を、1 階の作動時間は遅めの予測をしていることになる。しかし、煙の流れを見ても各防火シャッターで作動時間に差があると考えられるので、火災現場の作動記録と単純には比較はできないものの、作動時間の予測精度は常に向上させていかなければならないと考える。

### 5. まとめ

埼玉県三芳町倉庫火災の火災調査の一環として、1 階破材室から進展する火災の延焼メカニズムについて調べることを目的に、CFD を用いた火災の数値解析を実施した。

ダンボール箱の燃焼実験データを入力条件にし、火災現場に近い建物条件により実施した数値計算結果から、既報<sup>1)</sup>から更に定量的に延焼メカニズムがコアンダ効果による噴出火炎であることを

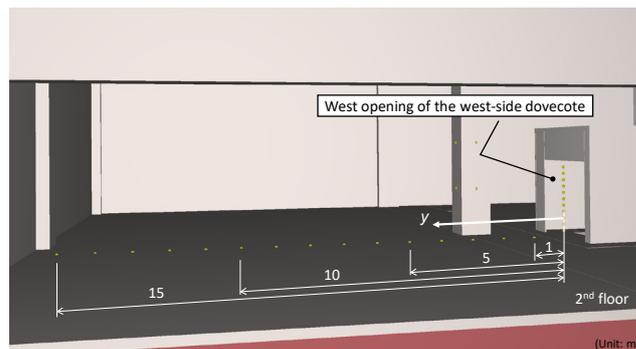


Fig. 20 Data acquisition position on the floor surface.

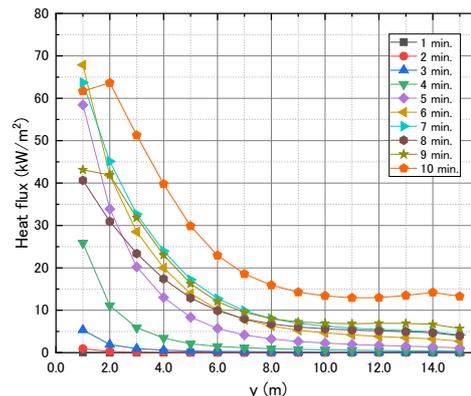


Fig. 21 Moving averaged heat flux to the floor for 10 seconds.

Table 1 Operation start time of the fire shutters.

Fire shutter No.	Detection time [s]	
	(Operation start time of the fire shutters)	
1F-①	350	
2F-①	143	
2F-②	118	
2F-③	107	

改めて確認した。また、コンクリート柱の爆裂、1 階破材室出入り口や 2 階東側ハト小屋気流の様子、2 階西側ハト小屋からの噴出火炎が周囲可燃物に延焼する可能性、防火シャッターの作動予測についても、計算結果から確認や評価をすることができた。

#### 参考文献

- (1) 阿部伸之, 塚目孝裕, 小清水雄二, 高垣克樹, 藤崎草多, 青野肇範, 長谷川巧, 田村裕之, 松崎崇史, "ダンボール箱から出火した倉庫火災の火災進展予測," 平成 30 年度日本火災学会研究発表会概要集, (2018), pp. 220-221.
- (2) 埼玉県三芳町倉庫火災を踏まえた防火対策及び消防活動のあり方に関する検討会, 埼玉県三芳町倉庫火災を踏まえた防火対策及び消防活動のあり方に関する検討会報告書, (2017. 6).
- (3) J. W. Deardorff, "Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model", Boundary-Layer Meteorology, Vol. 18, (1980), pp. 495-527.
- (4) J. Bardina, J. H. Ferziger, W. C. Reynolds, "Improved Subgrid Scale Models for Large Eddy Simulation", In AIAA 13th Fluid & Plasma Dynamics Conference, AIAA-80-1357, (1980).
- (5) 阿部伸之, 種々のSGSモデルによるサーマルプルームのLES, 第30回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2016), F08-1.