特集

風関連災害(風がひき起こす様々な災害)

都市防火対策の系譜と市街地火災時の風の影響 Brief History of Urban Fire Prevention and Wind Effects on the Fires Behavior

竹谷修一^{*1} 林 吉彦^{*2} 樋本圭佑^{*3} 岩見達也^{*4}
Shuichi TAKEYA, Yoshihiko HAYASHI, Keisuke HIMOTO, Tatsuya IWAMI

1. 日本の都市防火対策

1. 1 阪神・淡路大震災以前¹⁾

日本の家屋は木造が多くを占めることから、古くから火災による被害を多く受けてきた。火災から家屋を守るために、江戸時代には瓦屋根、土蔵の普及といった建物単体を燃えにくくする対策が進められるとともに、火よけ地、広小路の確保といった都市・地区レベルでの対策が進められた。さらに、火消し制度の導入といった消火能力を向上させる対策も行われてきた。

明治に入ってから火災による大きな被害が発生している。明治5年に発生したいわゆる銀座大火では約95haが焼失した後、銀座では煉瓦造りの不燃建築物が建設された(いわゆる銀座煉瓦街の建設)。

地方都市でもたびたび火災が発生している。函館市では明治以降、火災被害が頻発していたが、明治11年及び明治12年の火災後、基坂、二十間坂等を防火線として拡幅整備するとともに、煉瓦造り・石造りによる建築物の不燃化を推進した。さらに大正10年の火災後は、函館市内の銀座通りを拡幅し、沿道建物をRC造建築物で不燃化した(写真1)。

写真1 銀座通り(函館市)の沿道建物

大正12年に発生した関東大震災では甚大な被害が発生し、東京市における被害世帯数約35万のうち、全焼した世帯数は約30万であり、約85%が火災による被害であった(図1)²⁾。また、この地震火災においては火災旋風が発生し、被害を拡大させている。本所区の被服廠跡の面積は10.3haであり、約4万人の避難者とともに大量の家財道具が持ち込まれている状況であった。夕刻から火災が三方向から迫るとともに、火災旋風が発生し、避難者が安全な場所へ移動することが出来なかったことから、多くの避難者が焼死することとなった³⁾。

*1 国土交通省国土技術政策総合研究所都市研究部都市防災研究室 室長
Head, Urban Disaster Mitigation Div., Urban Planning Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management
*2 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部防火基準研究室 室長
Head, Fire Standards Div., Building Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management
*3 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部防火基準研究室 主任研究官
Senior Researcher, Fire Standards Div., Building Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management
*4 国立研究開発法人建築研究所住宅・都市研究グループ 主任研究員
Senior Research Engineer, Dept. of Housing and Urban Planning, Building Research Institute

図1 関東大震災時における東京市の被害別世帯数
(内務省「大正震災誌 上」をもとに作成)

震災後は、帝都復興院による大規模な震災復興計画が進められ、その後、第二次大戦中は防空都市計画による緑地の整備、建物疎開というように、国防という観点から火災対策が進められた。

戦後に入ると、土地区画整理事業を中心とする戦災復興事業等を経て、建築基準法（昭和25年）、防火建築帯の造成を図る耐火建築促進法（昭和27年）、街区単位で防火区画の造成を図る防災建築街区造成法（昭和36年）等が制定されていった。その後、新都市計画法（昭和43年）、都市再開発法（昭和44年）が制定され、現在の都市計画関連の体系が固まった。

一方で、自治体消防制度が戦後に発足（昭和23年）し、消防能力が飛躍的に向上していくこととなる。図2は、自治体消防における消防職員数の推移と、戦後の大火時の焼損面積を年ごとに合計したものを重ねて示したものである。

図2 消防職員数と大火による焼損面積の推移
(「消防白書」をもとに作成)

建物や都市の防火上の対策が進められる中、消防能力も徐々に向上していくことにより、平常時の大火は減少していった。平常時の市街地大火としては、酒田大火（昭和51年。建物の焼損面積は約15万 m^2 ）を最後に、その後市街地での大火は平常においては発生しなくなった。

都市として火災を防ぐという観点では、上述したように、建物の不燃化、道路拡幅、空地の確保といった対策が

とられてきた。こうした中、建設省（当時）では昭和52～56年に実施した研究（都市防火対策手法の開発）において、不燃建築や空地の割合から求める不燃領域率を提案するとともに、広幅員の道路、鉄道、河川、大規模な空地、耐火建築物群等から構成される延焼遮断帯によって都市を分割（都市防火区画）し、延焼被害を局限化する手法を提案している⁴⁾。

延焼遮断帯によって形成された都市防火区画内において火災が発生しても、隣接する都市防火区画への延焼を防ぐ効果が期待される（図3、図4）。しかしながら、都市防火区画内での延焼を防ぐことまでは出来ない。

図3 都市防火区画と延焼遮断帯の例⁴⁾

図4 延焼遮断帯による延焼防止イメージ⁴⁾

1. 2 阪神・淡路大震災以降

平成7年に発生した阪神・淡路大震災では、多数の人的被害、建物被害が発生したため、被災地における復興を支援するために様々な法律が制定され、迅速な復興を目指すこととなった。

建物倒壊による被害に比べれば相対的に火災被害は少なかったものの、神戸市長田区で2,500棟弱が火災被害を受けたほか、他の市区でも火災被害が発生した。火災が拡大していく中で広幅員道路等により火災は焼け止まり、

延焼遮断機能が発揮されたことが確認されたものの、密集市街地を中心に大きな火災被害が生じたこともまた事実である。

この状況を踏まえ、密集市街地での防火対策をより積極的に推進するために、平成 9 年には「密集市街地における防災街区の整備の促進に関する法律（密集法）」が制定された。さらに平成 15 年の改正により「特定防災街区整備促進地区」の制度が創設されるなど、密集市街地における防災まちづくりが従来以上に推進されることとなった。

一方、都市再生本部の第三次決定（平成 13 年 12 月）では「地震時に大きな被害が想定される危険な密集市街地について、特に大火の可能性が高い危険な市街地を対象に重点整備し、今後 10 年間で最低限の安全性を確保する。」ことを決定した。これを受けて国土交通省では、平成 15 年 7 月に「地震時等において大規模な火災の可能性があり重点的に改善すべき密集市街地」である全国約 8,000ha の地区について公表し、地方公共団体による密集市街地整備の支援を進めていった。

その後、平成 23～32 年度の 10 年間を計画期間とする新たな「住生活基本計画（全国計画）」が閣議決定された（平成 23 年 3 月 15 日）。この新たな住生活基本計画においては、住生活の安全を確保する住宅及び居住環境の整備の成果指標の一つとして、「地震時等に著しく危険な密集市街地の面積」が新たに位置づけられている。

密集市街地解消のための基本的な施策として、延焼・倒壊の危険性の高い老朽建築物の建替え・除却、道路幅員等に関する建築基準法上の緩和措置の活用等により密集市街地の整備の促進等が位置づけられている。あわせて、密集市街地解消の目標として、平成 22 年に約 6,000ha 存在する密集市街地を、10 年後には概ね解消することとしている。

2. 平成 28 年に発生した糸魚川市での火災⁵⁾

平成 28 年 12 月 22 日に新潟県糸魚川市で発生した火災では、焼損棟数 144 棟、焼損区域面積約 40,000m² に及ぶ被害⁶⁾となり、地震火災以外では比較的規模が大きな火災となった。国土技術政策総合研究所及び建築研究所は、この火災による建物の被害について、延焼拡大及び焼け止まり要因等を検討するために現地調査を実施した。以下、調査結果の概要を示す。

2. 1 気象状況

気象庁のアメダス観測所（糸魚川）によれば、火災当日の風向と風速は図 5 のように、風向はほぼ南、火災覚知

（消防署が火災の発生を認知すること）から 19 時までの間、風速は 10m/s 前後（10 分間平均値）、最大瞬間風速は 20m/s 前後で推移している。また、12 時 10 分には最大瞬間風速が 24.2m/s（風向は南）を記録しており、強風下での火災であったといえる。

図 5 アメダス観測地点（糸魚川）における火災当日の風速と風向

2. 2 地区の状況

糸魚川市は昭和 35 年に今回の焼損区域を含む 26.89ha を準防火地域に指定し、さらに昭和 43 年には東側の近隣商業地域を追加指定して現在では 32.2ha となっている。

過去には明治 44 年、昭和 3 年及び 7 年にそれぞれ大規模な火災が発生しているが、このうち、昭和 7 年に発生した火災では、今回の焼損区域を含む広範な地区において延焼しており、その後復興に際して、道路の拡幅が行われている。

また、火災発生時点では、写真等から判断する限り古い建物が多く、準防火地域の建物に求められる外壁や窓などの開口部に防火上の対応がなされていない建物が混在していたと考えられる。

2. 3 火災被害の様子

焼損区域の範囲と調査対象建物の位置を示したものが図 6 である。なお、焼損区域は、調査時点での糸魚川市公表資料⁹⁾に示された大火被災エリアを基に記載している。焼損区域は南北方向に最大で約 300m、東西方向に最大で約 200m となっている。焼損区域の南端近くで発生した火災は強い南風にあおられながら、海沿いの国道 8 号まで延焼している。

火元建物近くの、延焼した仲道線沿道建物の外壁は残っている（写真 2）。しかしながら、背後は燃え落ち、さらに背後の建物へ延焼拡大している（写真 3）。

図6 焼損区域の範囲と調査対象建物 (①～⑮)
(国土地理院基盤地図情報に焼損区域等を加筆)

写真2 火元建物付近の様子

写真3 火元建物背面の様子

焼損区域中央にあたる県道西中・糸魚川線付近では、仲道線西側の街区へ延焼が及ぶとともに (写真4)、東側への延焼が拡大している (写真5)。また、県道西中・糸魚川線 (道路台帳では10m程度の幅員) 北側の街区へも延焼が拡大している (写真6)。

写真4 火元建物より北側の仲道線の様子

写真5 県道西中・糸魚川線以南の焼損状況
(写真右側は仲道線)

写真6 県道西中・糸魚川線の北側及び南側の焼損状況
(写真左前が北側)

また、焼損区域中央の図6中の⑫番の建物の屋上では、シート防水層に穴が開いた箇所が多数残されており、多数の火の粉が飛散してきたものと考えられる (写真7)。

写真7 屋上パラペット付近の様子

焼損区域北部にあたる、海沿いの国道8号より1本南側に位置する浜町通線の沿道では、多くの建物が焼損するなか、焼失を免れた住宅（図6中の⑬番の建物）が1棟あり（写真8）、その北側及び東側には駐車場があり、南側は植栽のある庭となっていた。

写真8 焼失を免れた住宅

2. 4 飛び火の状況

飛び火は火の粉が飛散・落下して出火する現象⁷⁾である。焼損区域の中には、住民への聞き取り、報道機関等により撮影された映像の解析、火災現場の焼損状況等から、飛び火による延焼の可能性がある箇所が多数確認されている。隣接する周囲の建物が燃焼していないが、建物等から煙や火炎の噴出を確認できたものを飛び火による延焼と見なしてその範囲を示したものを図7に示す。

延焼状況を推定するに足る情報が得られていないが、飛び火があった可能性を否定できない範囲を、図中に灰色で示している。今後、追加ヒアリングや映像情報の分析により、飛び火の発生場所について精査予定である。

図7 飛び火による延焼の分布

写真出典：国土地理院撮影の空中写真（2009年撮影）

3. 市街地火災の延焼速度

図8は、川越⁹⁾による戦前から1949年（昭和24年）までの市街地火災に関する風速と延焼速度の関係を表す図に筆者がいくつかのデータを追加したものである。

図8 市街地火災に関する風速と延焼速度の関係
（参考文献8に加筆）

まず1949年までのデータに関して見てみると、無風時には100 m/h程度の延焼速度であるが、風速20 m/sでは1,000 m/h程度となっており、風速が増すほど指数的に延焼速度が増加することが示されている。同じ図上に比較的近年の大火である1976年酒田大火および1995年兵庫県南部地震時のデータ及び前章で述べた2016年に発生した糸魚川市における大規模火災のデータを追加した。

酒田大火のデータとしては、消防研究所⁹⁾による調査結果から、延焼速度は90 m/h、風速に関しては酒田測候所による平均風速11.0 m/sを採用した。兵庫県南部地震に関しては、風速1.0 m/sで延焼速度20 m/h、風速3.9 m/sで延焼速度73 m/hの2点¹⁰⁾をプロットした。2016年12月に新潟県糸魚川市で発生した市街地火災では、出火から約2時間40分後の13:00ごろに約280 m風下の海岸沿いの建物まで火災が広がっている¹¹⁾ことから延焼速度105 m/h、平均風速は最寄りのアメダス観測所（糸魚川）による出火後3時間の平均風速12.5 m/sとした。

1949年以前と比較すると1976年以降では遅い値が観測されていることがわかる。酒田大火では平均1 mm/h程度の降雨があったこともいくつかの影響はあったと思われるが、準防火地域に指定され、防火構造又は耐火構造の

建築物が混在した市街地⁹⁾であったこと、また近年ではさらに耐火建築物や防火構造の建築物が多くなっていることが、1949年までの裸木造を主体とする市街地の延焼速度との差に現れていると考えられる。延焼速度は遅くなっているとはいえ、風速との相関は認められ、さらに強風時には1時間あたり数百メートル程度の延焼速度となる可能性が示唆される。

4. 飛び火

風速に応じて延焼速度が増す主要因の一つとして飛び火による延焼が挙げられる。特に強風時には延焼速度を規定する最も大きな支配要因と考えられている。

2016年の糸魚川市における大規模火災においても飛び火の発生が多数確認されており、図8に示した延焼速度も飛び火による延焼の結果として観測された値である。

飛び火による延焼過程については未解明な部分も多く現在も各方面で検討が進められているが、一例として2012年に実施された実大火災実験において観測された火の粉の飛散性状について紹介する^{12~14)}。

4. 1 火の粉の発生性状

詳細は参考文献¹³⁾に譲るが、火の粉の観測を行った木三学(木造三階建て学校)予備実験の概要を以下に示す。

- i) 実施日時: 2012年2月22日 午前9:00点火
- ii) 実施場所: 国土技術政策総合研究所敷地内(つくば市)
- iii) 建物概要: 木造、3階建て、1時間準耐火構造(屋根・階段は30分)、2,265m²(推定木材使用量: 675m³, 256,500kg)
- iv) 風向・風速: 東北東から東の風、平均4.9m/s(地上10m, 9:00~11:00)(図9)
- v) 主な火災性状: 1階に点火した後、6分20秒までに2階及び3階室内に着火、30分過ぎに屋根の燃え抜けが発生、65分頃には炎上のピークを越え、76分~123分にかけて倒壊が進んだ。

図9 風向・風速

4. 2 火の粉の収集¹⁴⁾

4. 1に示したとおり、燃焼は極めて早く進行し、3層同時に炎上する状況が確認された。点火から18分頃から火の粉の降積が観察されはじめ、屋根の燃え抜け以降、数、大きさともに火の粉の増加が確認された。火の粉は

2012年2月22日から3月31日にかけて田畑の区画ごとに収集した(図10、写真9)。

表1は木三学予備実験で収集した火の粉について、田畑の区画ごとに降積密度を示している。

以下では、卓越風向である東から西向きをX軸、直交方向に南から北向きをY軸とする。

図10 火の粉の収集を行った田畑

写真9 収集した火の粉(218m地点)

表1 区画ごとの火の粉降積密度

(a)X軸方向

区画名称	計測軸	距離(m)	降積密度(g/m ²)
①	X軸	54	10.7
②	X軸	79	8.96
③	X軸	195	2.3
④	X軸	218	1.28
⑤	X軸	248	0.65
⑥	X軸	269	0.44
⑦	X軸	306	0.77
⑧	X軸	333	0.57
⑨	X軸	366	0.18
⑩	X軸	449	0.16
⑪	X軸	587	0.09
⑫	X軸	608	0.06
⑬	X軸	632	0.06
⑭	X軸	694	0.01

(b)Y軸方向

区画名称	計測軸	距離(m)	降積密度(g/m ²)
④a	Y1軸	-53	0.6646
④b	Y1軸	-27	0.6062
④	Y1軸	3	1.2767
④d	Y1軸	41	0.6228
④e	Y1軸	78	0.0036
⑨a	Y2軸	-74	0.0750
⑨b	Y2軸	-37	0.0378
⑨	Y2軸	18	0.1753
⑨d	Y2軸	54	0.0611
⑨e	Y2軸	104	0.0044
⑭a	Y3軸	-34	0.0153
⑭	Y3軸	2	0.0137

4. 3 火の粉飛散モデル

風向と平行方向は対数正規分布(式1)を、風向と直交方向は正規分布(式2)をそれぞれ仮定すると、表1のデータもこの仮定にほぼ従った分布となっている。

$$w_{u,x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x x} \exp \left[-\frac{\{\ln x - \bar{\mu} + \ln(\bar{u}/u)\}^2}{2\sigma_x^2} \right] \times W_g \quad (1)$$

$$w_{u,xy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(y/x)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \times \frac{w_{u,x}}{x} \quad (2)$$

x, y : X 軸方向及び Y 軸方向の位置 [m]

$\bar{\mu}$: 基準風速における分布パラメータ

σ_x, σ_y : 分布パラメータ

$\bar{u}, u$: 基準風速及び風速 [m/s]

W_g : 火の粉発生量 [g]

$w_{u,x}$: 位置 x における火の粉降積密度 [g/m]

$w_{u,xy}$: 位置 x, y における火の粉降積密度 [g/m²]

(1) 風向と平行方向の分布パラメータの推定

風向と平行方向は対数正規分布を仮定し、表 1(a)の観測値を用いて単位放角 ($y/x=1$) あたりの降積密度 (表 1 の降積密度と距離を乗じた値) に合うように最小二乗法を用いてパラメータ ($\bar{\mu}$ 及び σ_x) の推定を行った。その結果、 $\bar{\mu} = 5.00$ 及び $\sigma_x = 0.747$ となった。

火の粉の観測を行った際の平均風速は 4.9 m/s であり、上記 $\bar{\mu}$ は 4.9 m/s を基準とした場合のパラメータである。

火の粉の到達距離が風速に比例すると仮定すれば、風速 10m/s を基準とすると式 3 の通り、 $\bar{\mu} = 5.71$ となる。

$$\bar{\mu}_{(10)} = \bar{\mu}_{(4.9)} - \ln(4.9/10) = 5.71 \quad (3)$$

(2) 風向と直交方向の分布パラメータの推定

風向と直交方向は平均 0 の正規分布を仮定し、表 1(b)の観測値を用いて(1)と同様に単位放角 ($y/x=1$) あたりの降積密度に合うように最小二乗法を用いてパラメータ (σ_y) の推定を行った。その際、火の粉密度は位置 x に応じて変化するため、 $x = 100$ m での値に基準化した (すなわち、観測値に $w_{u,100}/(100w_{u,x})$ を乗じた)。その結果、 $\sigma_y = 0.142$ となった。

観測結果とモデルによる曲線を図 11 及び図 12 に示す。

5. 火災旋風

火災旋風は、大規模な屋外火災に付随して発生する竜巻状の渦 (火災を伴う場合と伴わない場合とがある) で、発生の条件によっては大きな被害をもたらす可能性がある現象である。例えば、1923 年関東地震では、当時の東京市内で約 110 か所、横浜市内で約 30 か所の火災旋風の発生が確認されている (中には小規模な渦も含まれているものと考えられる)。このうち本所被服廠跡で発生した巨大な火災旋風により、避難していた 4 万人のうち 3 万 8 千人が亡くなっている^{15), 16)}。第二次世界大戦時には、空襲による爆撃を受けた和歌山市でも複数の火災旋風の

図 11 風向と平行方向の分布

図 12 風向と直交方向の分布

発生が報告されている。このうち旧県庁跡の空地で発生した火災旋風により、当夜の空襲による死者の 6 割強に及ぶ 748 人の死者を出している¹⁷⁾。近年では、2011 年東北地方太平洋沖地震の際に、気仙沼市の火災現場で火災旋風の発生が目撃されている。周辺は津波による浸水被害を受けており、住民も避難をした後であったため大規模な被害の発生にはつながっていないものの、少なくとも約 70m の高さの火災の渦が形成されていたと推定されている¹⁸⁾。海外では、市街地火災というよりも、森林火災に付随した火災旋風の発生が頻繁に確認されており、燃焼領域の拡大防止だけでなく、消防隊の安全確保の観点からも関心が高い。なお、森林火災での火災旋風については撮影された動画がウェブ上に公開されていることが多いので、関心のある方は検索をしてみてください。

5. 1 火災旋風の種類

火災旋風と一口に言っても、実は、過去に確認された火災旋風の火源 (規模、形状) や風などの発生条件はまちまちである。現象を理解する上では、こうした条件の類型化が有効であるが、Soma らは火災旋風の代表的な発生条件を図 13 に示す DFW 型、HFW 型、HAFW 型の 3 種類に分類している¹⁹⁾ (ここに含まれない発生条件も確認されているため、網羅的ではない)。

このうち DFW 型は、Dessens による屋外実験 (125m×125m の範囲に設置された最大出力 700MW のガスバーナーを燃焼させたもの) において確認された火災旋風に由来しており、風下側に吹き倒された上昇気流の下部に形成される漏斗状の火災旋風である²⁰⁾。最近の研究によると、上昇気流が周辺の空気を巻き込む過程で形成される

図13 火災旋風の分類例¹⁹⁾

渦対（互いに逆向きに回転）が、燃焼領域周辺の高温の気体を吸い上げることで DFW 型の火災旋風が発生しているとの報告がある²⁰⁾。

HFW 型は、第二次世界大戦中に空襲による爆撃を受けた Hamburg 市で発生した火災旋風に由来しており、非対称に分布する多数の火源の上方に形成される火災旋風である。空襲時の Hamburg 市周辺の気象条件は静穏であったとされることなどから、他の 2 類型とは異なり、風の有無が発生条件に及ぼす影響は相対的に小さいと考えられている。なお、Hamburg 市の事例では、火災旋風の直径が 2.4~3km、高さが 5km に及んだとされる²¹⁾。

HAFW 型は、関東地震の際に 10.3ha ほどの空地（本所被服廠跡）で発生し、15~20 分間ほど空地内を移動し続けて被害を拡大した火災旋風に由来している。当時は、地震発生当時の気象条件（関東地方に不連続線が発生していた）に関連付けて火災旋風の発生が説明されることが多かったようである。しかし、火災延焼動態の調査記録によると、発生当時の本所被服廠跡周辺には L 字型の燃焼領域が形成されていたことが分かっており、現在ではここに風が加わることで非対称な流れが生じ、上昇気流の旋回をもたらしたとする考えが一般的である¹⁹⁾。

5. 2 火災旋風の発生条件

大規模な火災被害をもたらす市街地火災は強風時に発生することが多いせいか、火災旋風は強風下で発生しやすい現象と一般には考えられているようである。しかし、上述した火災旋風の発生事例のうち、発生箇所周辺の風速記録が残されているのを見ると、例えば和歌山市の場合には 2.5m/s、気仙沼市の場合には最大でも 2.8m/s であったとされ、強風でない場合であっても火災旋風は発生している。また、関東地震の際には、日本列島周辺を大型の低気圧が通過中で強い風が吹いていたとされるが、本所被服廠跡で火災旋風が発生した時間帯の風速は 4~5m/s であったとの指摘もあり¹⁷⁾、この場合も強風と言え

るほどの気象条件ではなかった可能性がある。

図 14 は、発熱速度や流入風速といった条件が火災旋風発生に及ぼす影響を調べるために行われた風洞実験の様子を示している²³⁾。また図 15 は、この実験において火災旋風の発生頻度 p がどのように変化したのかを、次に示すフルード数に相当する無次元数 Ω を用いて整理した結果である。

$$\Omega \equiv \left(\frac{\dot{Q}'g}{c_p \rho_\infty T_\infty U_\infty^3} \right)^{1/3} \quad (4)$$

ここで、 $\dot{Q}'$ は単位長さあたりの発熱速度、 g は重力加速度、 c_p は比熱、 ρ_∞ は外気比重、 T_∞ は外気温度、 U_∞ は流入風速である。

図14 風洞実験で再現された火災旋風²⁴⁾

図15 火災旋風の発生頻度^{23)に加筆}

この実験は L 字型火源（図 14 における HAFW 型に相当）のみを対象としたものではあるものの、図 15 では無次元数 Ω が一定の範囲内にあるときに火災旋風の発生頻度 p が高くなることが分かる。このことはすなわち、発熱速度 $\dot{Q}'$ と流入風速 U_∞ のうち、いずれか一方が大きすぎても、逆に小さすぎても火災旋風は発生しないということを示している。

なお、関東地震の際には、L 字型の燃焼領域の外側に火災旋風が移動したとされるが、図 14 に示した実験で発生

した火災旋風は、ほぼL字型の燃焼領域の内側にとどまっていた。関東地震の際の映像記録などを見ると、住民は自らの家財道具を大八車に積み上げて避難をしていたようであり、本所被服廠跡においては、このように可燃物が集積していたことが燃焼領域の外側での火災旋風の発生につながった可能性がある。現代の市街地で大規模な火災が発生した場合に同じような避難が行われるとは考えにくい、建物を含む市街地の構造的要因以外にも火源条件を左右する要因がある点には留意が必要である。

5. 3 火災旋風の内部構造

火災旋風がどのような加害性を有するのかは、温度や流速などといった火災旋風の内部構造によって決定される。ただし、図14に示したような風洞実験では火災旋風が1カ所に定在せず、内部構造を明らかにすることには適さない、スリットを設けた衝立（もしくはメッシュ状のスクリーン）を火源の四周に配置し、火源への空気の供給を制御することで旋回流が発生しやすい流れ場を作るといった方法がとられることがある。

図16は、ガスバーナーを用いた場合の中心軸上の温度上昇 ΔT_c の測定結果を無次元高さ Z （軸上高さ z を平均火災高さ H_f で正規化したもの）で整理した結果である²⁴⁾。連続火災領域、間欠火災領域、熱気流領域の3領域に分割した場合、連続火災領域の温度上昇 ΔT_c が高さ Z によらずほぼ一定である点など、乱流拡散火災と特徴が似通っている点が多い。ただし、連続火災領域の温度上昇 ΔT_c は、乱流拡散火災の場合が最大で850℃程度であるのに対し、火災旋風の場合には1000℃程度に達することが分かっている。150℃の違いは微妙に感じられるかもしれないが、放射体として周囲に放射するエネルギーの大きさは絶対温度の4乗に比例するので、火災旋風の放射エネルギー（黒体を仮定）は、通常の乱流拡散火災に比べて約1.5倍の大きさとなる。

図16 中心軸上の温度上昇²⁴⁾

また、本所被服廠跡で発生した火災旋風では、引き裂か

れるように切断された樹木の径などから、最大で80m/sほどの流速になっていたと推測されている¹⁷⁾。火災旋風の流速（円筒座標系を適用した場合の周方向成分）はバーガス渦で近似でき、連続火災領域における火災旋風コアの半径は、火源の発熱速度 Q の0.2~0.3乗に比例することが実験的に明らかにされている²⁴⁾。ただし、筆者の知る範囲では、残念ながら流速の測定結果を一般化する試みはなされていないようなので、測定結果から実際の火災旋風の最大流速を推測することは難しく、今後の検討が待たれている。

6. 今後の課題

糸魚川市での焼損区域においては、準防火地域の指定がされているものの、必要とする防火的な措置がなされない建物も多く混在していたと思われる。従来、防火上の対応が十分図られていない市街地においては、地震時には市街地火災の発生が危惧されていたところであるが、平常時であっても、強風下ではその危険性があることが改めて示された。

また、今回、火の粉による飛び火の発生が改めてクローズアップされた。火元から離れた場所で思わぬ火災を招き、市街地火災の拡大を助長するものである。屋根が一番の弱点と考えられるが、飛び火の発生メカニズムは、実験等を通じて工学的な検証が必要である（写真10）。また、市街地火災では、強風が収まったときの火災旋風の発生も懸念される。火災旋風の発生メカニズムについても検証を継続する必要がある。

写真10 実験のイメージ（建築研究所火災風洞実験棟における火の粉による建物への加害性解明の実験）

謝辞

糸魚川での火災調査を実施するにあたり、御協力いただいた方々、関係資料を御提供いただいた方々に対し、こ

ここに深謝申し上げます。また、本火災で被災された方々に心からお見舞いを申し上げるとともに、被災地の一刻も早い復興を祈念いたします。

参考文献

- 1) 都市防災実務ハンドブック編集委員会,「都市防災実務ハンドブック 地震防災編」, pp. 124, (1997)
- 2) 内務省,「大正震災誌 上」, (1926)
- 3) 西田 幸夫,「関東大震災における避難」, 2012 年度日本建築学会大会防火部門パネルディスカッション資料・広域避難計画を再考する, pp. 7~10, (2012)
- 4) 建設省,「総合技術開発プロジェクト 都市防火対策手法の開発 報告書」, (1982)
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所,「平成 28 年 (2016 年) 12 月 22 日に発生した新潟県糸魚川市における大規模火災に係る現地調査報告 (速報)」, <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h28/itoigawa01.pdf>, (2017. 1)
- 6) 糸魚川市駅北大火対策本部,「糸魚川市駅北大火対応状況 平成 29 年 1 月 10 日午後 3 時 30 分現在」, <http://www.city.itoigawa.lg.jp/secure/19850/>【1 月 10 日午後配布】記者発表資料.pdf, (2017.1)
- 7) 日本火災学会,「火災便覧」, 第 3 版, (1997)
- 8) 川越 邦雄,「新訂建築学大系 21 建築防火論」, (1970)
- 9) 自治省消防研究所,「消防研究所技術資料」, 第 11 号, (1977)
- 10) 東京消防庁,「兵庫県南部地震に伴う市街地大火の延焼動態調査報告書」, (1995)
- 11) 糸魚川市大規模火災を踏まえた今後の消防のあり方に関する検討会,「糸魚川市大規模火災を踏まえた今後の消防のあり方に関する検討会報告書」, http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi_kento/h29/itoigawa_daikibokasai/06/houkokusyo.pdf, (2017)
- 12) 林 吉彦ほか,「大規模木造建物実大火災実験で発生,飛散した火の粉の降積量と個別計測」, 日本建築学会技術報告集第 20 巻第 45 号, (2014)
- 13) 長谷見 雄二ほか,「木造 3 階建て学校の実大火災実験 (予備実験) (その 1~その 14)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), (2012)
- 14) 岩見 達也, 林 吉彦, 橋本 隆司,「木造建築物燃焼時の火の粉飛散性状のモデル化」, 日本火災学会研究発表会概要集, (2015)
- 15) 震災予防調査会,「震災予防調査会報告 第百号 (戊)」, (1925)
- 16) 中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会,「1923 関東大震災報告書 第 1 編」, (2006)
- 17) 相馬 清二,「被服廠跡に生じた火災旋風の研究」, 地学雑誌, Vol.84, No.4, pp.119-129, (1974)
- 18) 篠原 雅彦, 松原 早苗,「東日本大震災で目撃された火災旋風」, 季刊消防防災, No.108, (2012)
- 19) Soma, S. and Saito, K., “Reconstruction of fire whirls using scale models”, Combustion and Flame, Vol. 86, pp. 269-284, (1991)
- 20) Dessens, J., “Man-made tornadoes”, Nature, Vol.193, pp. 13-14, (1962)
- 21) Shinohara, M. and Matsushima, S., Formation of fire whirls: Experimental verification that a counter-rotating vortex pair is a possible origin of fire whirls, Fire Safety Journal, Vol. 54, pp. 144-153, (2012)
- 22) Ebert, C. H. V., “Hamburg’s fire storm weather,” NFPA Quarterly, Vol. 56, pp. 253-260, (1963)
- 23) Himoto, K. and Naruse, T., “Probabilistic aspect of fire whirl generation around an L-shaped fire source in a crosswind”, Fire Safety Journal, Vol. 88, pp. 89-95, (2017)
- 24) Lei, J., Liu, N., Zhang, L. and Satoh, K., “Temperature, velocity and air entrainment of fire whirl plume: a comprehensive experimental investigation”, Combustion and Flame, Vol. 162, pp. 745-758, (2015)