

平成 28 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の被害概要と発生要因

住宅・都市研究グループ 主任研究員 岩見 達也

目 次

- I はじめに
- II 糸魚川市大規模火災の概要と延焼状況の推定
 - 1) 焼損区域の概要
 - 2) 延焼状況の推定
- III 瓦屋根仕様調査
 - 1) 現地の瓦屋根仕様
 - 2) 瓦屋根試験体
- IV 火災風洞実験
 - 1) 木片散布実験
 - ①実験条件（木片散布実験）
 - ②実験結果と考察（木片散布実験）
 - 2) 火の粉による出火実験
 - ①実験条件（火の粉による出火実験）
 - ②実験結果と考察（火の粉による出火実験）
- V 市街地火災シミュレーションを用いた被害発生要因の分析
 - 1) 分析の目的と方法
 - 2) 計算条件
 - 3) 計算結果と考察
- VI おわりに
 - 参考文献

I はじめに

2016 年 12 月 22 日に新潟県糸魚川市で発生した市街地火災は、焼損棟数 147 棟、負傷者数 17 名を数える大規模な被害をもたらした。市街地火災によってこれほどの被害が発生したのは、地震時以外では 1976 年に山形県酒田市で発生した酒田大火以来となる。今回の火災では、南からの強風の中で多数の飛び火が発生し、延焼被害を拡大させる要因となったことが大きな特徴となっている。

建築研究所では国総研と共同で今回の火災による被害状況に関して調査・分析を進めてきた¹⁾。本稿では、被害が拡大した要因を明らかにすることを目的として、火災当時の空撮映像等の分析から建物毎の延焼時刻や飛び火の発生状況等を推定した結果、瓦屋根の飛び火に対する抵抗性の検証実験、及び市街地に建つ建物の構造が異なる場合の延焼状況の違いについてシミュレーションを用いて分析を行った結果を報告する。

II 糸魚川市大規模火災の概要と延焼状況の推定

1) 焼損区域の概要

火災は2016年12月22日10時20分ごろに発生し、風速10 m/s以上の南風によって北方向へ大きく燃え広がった(図1)。焼損区域は海沿いまで到達し、南北方向に約300m、東西方向に約200mにわたる約40,000m²の区域が焼損した。焼損区域は1960年に全域が準防火地域に指定されており、指定以降に建築される木造建物に対しては、建築基準法により外壁・軒裏を防火構造とし開口部に防火設備を設けることが求められているが、それ以前に建築されたと見られる古い建物も多く確認されている。

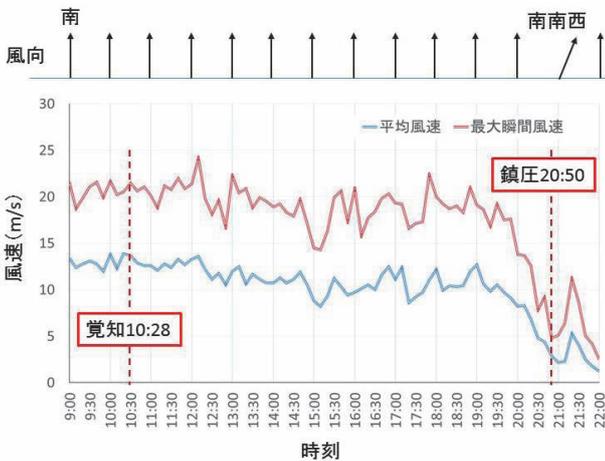


図1 火災当日の風速と風向



図2 準防火地域指定状況と焼損区域(昭和7年、平成28年)

2) 延焼状況の推定

今回の火災の延焼状況に関しては、糸魚川市消防本部によって消防活動記録に基づく延焼方向や延焼時刻が報告されている²⁾ほか、報道機関や公的機関によってヘリコプター等から火災時の空撮映像が記録されている。これらの資料に基づいて、個別建物

に延焼した時刻を推定するとともに、隣接する周囲の建物が燃焼していない(あるいは強い加熱を受けるほどの激しい燃焼ではない)にもかかわらず、建物から煙や火炎の噴出を確認できたものを飛び火と見なして、15カ所の飛び火地点を特定した。図3に延焼動態の推定結果を示す。

この15地点の建物の状況を個別に調べた結果、全てが木造2階建ての建物であり、このうち13地点は1936年以前建築であった。さらにこのうち少なくとも10地点の建物の屋根は空中写真を用いた判読により、次章に後述する昭和初期に一般的であった仕様(以下、「昭和初期仕様」という。)の瓦屋根であることが推定された。このような古い木造建物が混在していたことが延焼被害の拡大に大きく影響したと考えられる。



*1 映像により初めて状況が確認できた時点で燃焼しており、当該領域が燃焼を開始した時刻は確認できていない。

*2 13:42の映像により当該領域中央付近において発炎を確認。

*3 14:20の映像により当該領域南端付近において発炎を確認。

図3 映像・画像等から推定した延焼動態

表1 飛び火があったと推定される時刻と建物の状況

番号	飛び火確認時刻	建物の状況	建築年	屋根仕様
①	11:21	木造2階建	S8	●
②	11:58	木造2階建	S8	●
③	12:14	木造2階建	S8	○
④	12:48	木造2階建	S8	●
⑤	13:00	木造2階建	T1	●
⑥	13:26	木造2階建	S8	○
⑦	13:45	木造2階建	S8	●
		木造2階建	S8	○
⑧	14:07	木造2階建	S8	●
⑨	14:24	木造2階建	S46	○
⑩	15:33	木造2階建	-	○
⑪	13:07	木造2階建	S8	●
⑫	13:08	(木造2階建)	(S8)	(●)
⑬	13:31	木造2階建	S8	●
⑭	13:31	木造2階建	S8	●
⑮	13:44	木造2階建	S9	●

※建築年の「T」は大正、「S」は昭和を表す。

※屋根仕様欄の「●」は、昭和初期仕様（次章参照）、「○」は、その他の仕様又は仕様不明を表す。

※飛び火⑦に関しては最初に発煙を確認した時点で2棟の建物から発煙があり、いずれの建物に飛び火したかを特定できず、2棟の情報を併記している。

※飛び火⑩に関しては空撮映像から主屋以外の部分から最初の発煙が確認された。主屋の状況を括弧（ ）に示すが、飛び火のあった部分とは異なる可能性がある。

※飛び火⑮の建築年は、糸魚川市より「大正元年又は昭和9年」との情報が得られたが、当該建物は昭和7年の大火による焼損区域内にあるため、昭和7年以降に建築された可能性が高いことから昭和9年の情報を採用した。

III 瓦屋根仕様調査

糸魚川市では昭和7年に、今回の焼損区域の大部分を含む広範な地区が焼ける大火を経験していることもあり、昭和35年に準防火地域を指定している（図2）。この防火規制地区では屋根を例に挙げると、瓦や金属板などの不燃材料で葺くか造ることが要求される。加えて日本海に面する糸魚川地域では、塩害による腐蝕を考慮するため瓦屋根が多く見受けられた。

しかしながら、写真1及び表1に示すように、不燃材料である瓦葺き屋根であっても飛び火による延焼が見られたことから、その発生メカニズムを解明するため、当地に存在した建物の建設当時の瓦屋根の仕様調査を行った上で、得られた仕様に基づいて模型試験体を作成して火災風洞実験を行うこととした。

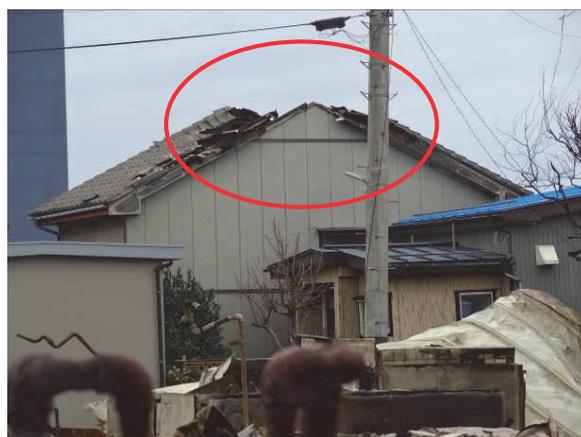


写真1 瓦屋根の飛び火による延焼事例

1) 現地の瓦屋根仕様

糸魚川市における昭和初期に建設された建物の瓦屋根の標準仕様（以下、「昭和初期仕様」という。）について現地調査及びヒアリングを行い、得られた知見は以下の通りである。

- ・ 写真2に示すように、焼損区域外に残る建物の現地調査では、昭和初期仕様の瓦屋根では、瓦のねじれや寸法の不揃いに伴って指1本が入るほどの隙間が多数見られた。
- ・ 瓦自体は、昭和30年代まではそれぞれの地場で焼く瓦が主流であり、昭和40年代から狂いの少ない三州瓦や陶器瓦が全国に流通した。地場産の瓦として、新潟県では安田瓦や陣ヶ峰瓦が有名だが、糸魚川地域では主に佐渡や石川と同じ49判の能登瓦が用いられていた。また、これら地場産の瓦も製造業者毎に個別の変遷を経ており、大まかには昭和45年以降、工業化が進む過程で寸法精度が向上したといえるが、昭和初期の段階では、依然としてねじれや反りの大きな瓦が用いられていた。
- ・ 瓦のねじれは、塩害や凍害の防止及び積雪荷重に耐えるための曲げ破壊強度の向上を狙った焼成温度の高さも一因であるが、現在のガス窯に対し古くは達磨窯であったために、均一で一定の焼成温度を保つことが難しかったことが第一の要因である。土の練り込みについても手練りから真空土練機の採用に移行しており、土粒子の粗密性及び空隙率の改善が寸法誤差の低減につながっている。
- ・ その結果、粘土瓦は昭和29年に工業製品として、日本工業規格（JIS）が定められ、ねじりや反りによる寸法誤差が±2mm以下に規定・管理されるようになっていく。加えて、平成13年には瓦屋根標準設計・施工ガイドラインも示され、施工管理も進んでいる。

- ・ 留め付け方法については、昭和初期仕様では瓦尻を瓦棧に載せず、銅線で吊る方法が用いられている。この方法の場合、長い年月を経ると潮風により腐食が進んで瓦がずれる恐れがある。これに対し現代仕様では、瓦棧に引掛けて釘留め、全数留め付けをする方法が推奨されている。
- ・ 留め付けの自由度が高い銅線で吊る方法では、地震時の瓦相互の接触被害に対しては有効とされるものの、過去の風被害によって瓦の重なりにずれが生じていた可能性も高い。瓦自身の耐久性は高いといえるが、地震・台風などの災害時及び定期的なメンテナンスが推奨される。
- ・ 棟の葺き土については、糸魚川地域ではモルタルを使った事例も報告されているが、塩害による溶融・流出の恐れがある。昭和50年頃から南蛮漆喰が利用されるようになっており、現代仕様では、繰り返し練りの効く葺き土と併用して、耐久性の高い棟葺土が構築されている。
- ・ 下地については、昭和20年以前の糸魚川地域では、手割り板を屋根葺き材とした木羽屋根が多かったため、そのまま上から瓦を張った屋根が多く、昭和20年以降、新たに屋根をかける場合は、屋根下地として目透かし張りした広小舞に杉皮や巻木羽（約3mm程度）を張り、腐らないようコールターを塗布することが流行ったようである。現代仕様では、目透かしなく張りつめられた野地板あるいは構造用合板の上に、アスファルトルーフィングなどの防水層で下地が構成されており、例えば火の粉が瓦の隙間より侵入したとしても、即座に着火・延焼しにくい構造となっている。

験体を図5に示すとともに、両者の間の主な違いを表2に示す。仕様が複数ある場合には、次章に示す火災風洞実験で用いた再現試験体仕様を括弧【 】で表示する。

表2 瓦屋根仕様の現地調査と現代仕様の比較

	昭和初期仕様 糸魚川	現代仕様 屋根標準施工
野地板	巾3寸厚12mm目透し	構造用合板・【野地板】
防水層	【巻木羽 杉3mm】 ・杉皮	アスファルトルーフィング ・【高分子系下葺材】
瓦	地場産（古い能登瓦） 49判（49枚/坪）	工業製品化 53A JIS規格判（53枚/坪）
留付け	銅線縛り（瓦尻は瓦棧に不載）	引掛け瓦棧、釘留め
棟葺土	【葺き土】・モルタル	南蛮漆喰

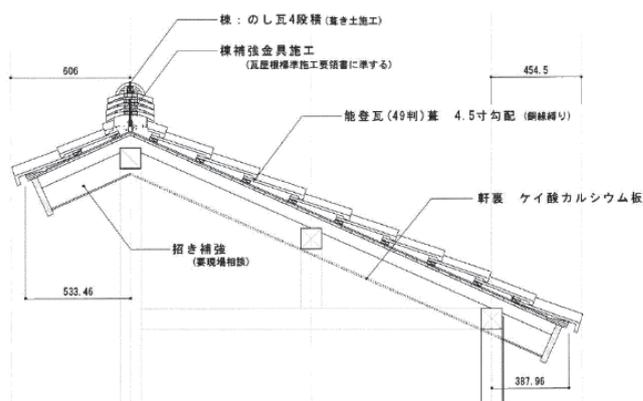


図4 試験体断面図 昭和初期仕様



写真2 昭和初期仕様の例

写真3 現代仕様の例

2) 瓦屋根試験体

現地調査・ヒアリングを元に作成した糸魚川市における昭和初期の瓦屋根仕様を再現した試験体を図4に示す。また、近年の新築木造建物の瓦屋根の標準仕様（以下、「現代仕様」という。）

（写真3）についても調査を行っており、これを元に作成した試

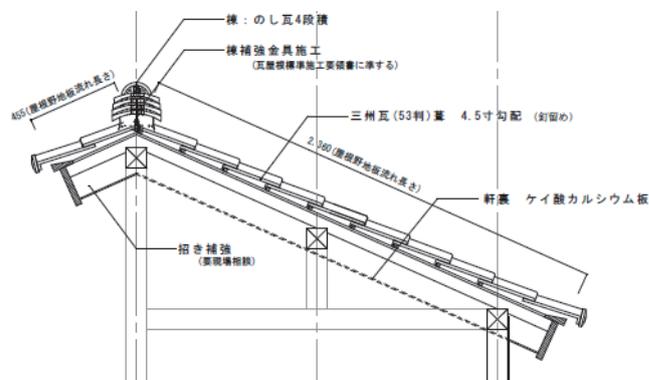


図5 試験体断面図 現代仕様

IV 火災風洞実験

表2及び図4、5に示す昭和初期仕様及び現代仕様の2種類の試験体に対して、下記の2種の実験を実施した。実験は、昭和初期仕様に対する実験は2017年3月、現代仕様に対する実験は2017年5月に実施した。

i) 木片散布実験

屋根面に火の粉が降積する状況を想定し、火の粉を木片で代替して瓦屋根に向けて風上から木片を散布し、瓦下への木片の侵入状況を確認した。

ii) 火の粉による出火実験

屋根面に風上より火の粉を吹き付け、屋根下地への火の粉の着床及び燃え抜け状況について観察した。

1) 木片散布実験

① 実験条件 (木片散布実験)

家屋に火の粉が降積する状況を想定し、火の粉を木片で代替して瓦屋根への火の粉の侵入状況を検証するための実験を実施した。前章に示した昭和初期仕様の試験体及び現代仕様の試験体それぞれの屋根面に対して有風下において風上から木片を散布し、瓦上に滞留する木片及び瓦下に侵入する木片の数を計測するとともに、散布数に対する割合を求めた。

a) 木片の形状・大きさ及び散布方法

実験条件としては、試験体仕様2条件、風速2条件 (5m/s及び10m/s) の計4条件であり、それぞれの条件において2カ所 (昭和初期仕様) 又は3カ所 (現代仕様) から木片を散布した (木片の放出位置の詳細はb)に示す)。散布方法としては、木片を木片籠に入れて木片籠を傾けることで放出する方法とした (図6)。

木片籠に木片を入れて
単管につり下げる

木片籠下部をロープで引き
上げて、木片籠の口を下に
向け木片を放出する

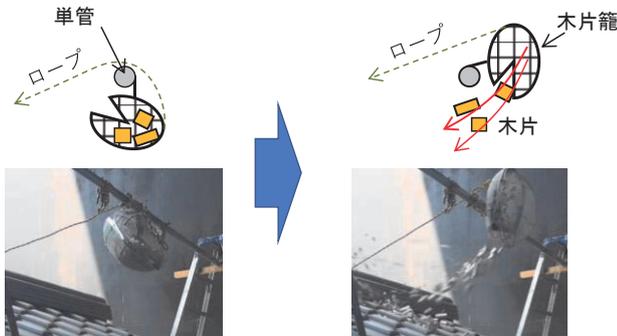


図6 木片散布方法

木片は比重が軽い気乾状態のバルサ材 (呼び寸法に対する実測重量で比重約0.17) を用い、形状3種、大きさ5種の計15種とした。各条件で1カ所から散布する木片数は形状・大きさごとに表3に示す数とした。

表3 木片の形状・大きさ及び1カ所から散布する木片の数

		呼び寸法				
		5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	30 mm
立方体状	サイズ [mm]	5×5 ×5	10×10 ×10	15×15 ×15	20×20 ×20	30×30 ×30
	散布数	100	100	100	50	50
棒状	サイズ [mm]	5×5 ×20	10×10 ×40	15×15 ×60	20×20 ×80	30×30 ×120
	散布数	50	50	50	50	25
板状	サイズ [mm]	5×5 ×1	10×10 ×1	15×15 ×1	20×20 ×1	30×30 ×1
	散布数	100	100	100	100	100

b) 木片の放出位置及び分析対象

昭和初期仕様の試験体に対する実験では、屋根面中央の約800mm上方 (図7中のAの位置) 軒先の約800mm上方 (図7中のBの位置) の2カ所から散布し、現代仕様の試験体に対する実験では、さらに前方風上側 (屋根面を軒先から前方に1,120mm延長した高さから約800mm上方) (図7中のCの位置) も加えた計3カ所から散布した。

本稿では、昭和初期仕様と現代仕様で共通で実施した放出位置A及び放出位置Bのみを対象として、瓦下への侵入状況の分析結果を示す (表4)。

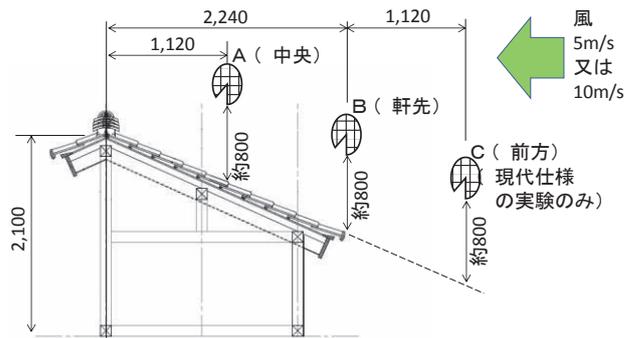


図7 木片放出位置 (単位: mm)

表4 木片散布実験条件と分析対象

実験条件		木片 放出位置	本稿の分析対象	
試験体 仕様	風速		瓦上滞 留状況	瓦下侵入状況
昭和初 期仕様	5 m/s	A、B	対象外	AB：対象
	10 m/s	A、B		
現代仕 様	5 m/s	A、B、C	対象外	AB：対象 C：対象外
	10 m/s	A、B、C		

② 実験結果と考察（木片散布実験）

表5に木片の瓦下への侵入率（＝瓦下へ侵入した木片数／放出した木片数）を示す。昭和初期仕様と現代仕様では、大きな違いが見られ、昭和初期仕様の方が多くなっている。立方体状、棒状に関しては、現代仕様では風速5m/s、10m/sいずれの条件においても瓦下への侵入は見られず、厚さ1mmの板状の木片のみが瓦下へ侵入する結果となった。一方で、昭和初期仕様では、5m/sで5mmサイズの立方体状及び棒状の木片が侵入し、10m/sでは最大10mmサイズの木片の侵入が確認された。

表5 木片の瓦下への侵入率

形状	呼び 寸法	サイズ [mm]	瓦下侵入率			
			昭和初期		現代	
			5m/s	10m/s	5m/s	10m/s
立方体	5	5x5x5	0.065	0.045	0	0
	10	10x10x10	0	0.03	0	0
	15	15x15x15	0	0	0	0
	20	20x20x20	0	0	0	0
	30	30x30x30	0	0	0	0
棒	5	5x5x20	0.05	0.04	0	0
	10	10x10x40	0	0.01	0	0
	15	15x15x60	0	0	0	0
	20	20x20x80	0	0	0	0
	30	30x30x120	0	0	0	0
板	5	5x5x1	0.155	0.015	0.015	0
	10	10x10x1	0.155	0.03	0.015	0
	15	15x15x1	0.045	0.02	0	0.005
	20	20x20x1	0.03	0.005	0	0.005
	30	30x30x1	0.005	0.005	0	0

表6 瓦下へ侵入した木片体積[mm³]

形状	昭和初期仕様(X)		現代仕様(Y)		Y / X	
	5m/s	10m/s	5m/s	10m/s	5m/s	10m/s
立方体	1625	7125	0	0	0.000	0.000
棒	2500	4667	0	0	0.000	0.000
板	9200	2875	375	625	0.041	0.217
計	13325	14667	375	625	0.028	0.043

瓦下へ侵入した木片の体積を算出すると、表6のとおりとなる。現代仕様の瓦下へ侵入した木片体積は昭和初期仕様の瓦下へ侵入した木片体積の3～4%となっており、瓦の仕様による木片の侵入しやすさが大きく異なることがわかる。風速の違いでは、風速が強い方が瓦下への侵入体積がやや多い結果となったが、屋根仕様の違いに比べればその差はわずかであり、例えば昭和初期仕様に対する板状木片のように風速5m/sの方が逆に多くなる場合も見られた。

2) 火の粉による出火実験

① 実験条件（火の粉による出火実験）

屋根試験体より風上に水平距離で3m、高さ1.5mに設置した約0.5m×0.5m×0.5mの木製クリブ2個に着火し、炎が木製クリブ全体を包み込んだのを確認した後に、風速5m/s及び10m/sの一定条件下で火の粉を発生させて屋根面に吹き付け、屋根下地への火の粉の着床及び燃え抜け状況について確認した（図8）。

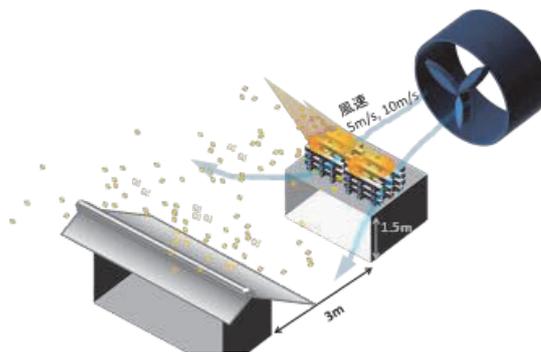


図8 有風下での火の粉による出火実験概要

② 実験結果と考察（火の粉による出火実験）

昭和初期仕様の試験体を用いた実験では、風速5m/sでは屋内側への燃え抜けは確認されなかった一方で、風速10m/sでは瓦屋根上部より白い煙が上がった後（写真4）、屋内側に火炎の燃え抜けが確認された（写真5）。消火後に瓦を除去して屋根下地を観察した結果、32箇所屋内側への燃え抜けが確認され（写真6）、瓦の隙間を通じて侵入した火の粉が、屋根下地である巻木端あるいは瓦棧に着床して燃焼が継続し、やがて屋内側へと燃え抜けることが確認された。火の粉の侵入箇所は風向きに平行な瓦尻からのものが多いと見られ、瓦の緊結用に水平に配された瓦棧付近で大きく燃え抜けた箇所が多い（写真7）ことから、瓦下へ侵入後、瓦棧付近に火の粉が堆積し、薄く乾いて燃えやすい巻木端が燃え抜けることで、屋内に延焼したと考えられる。



写真4 風速 10 m/s 実験時の瓦屋根上部

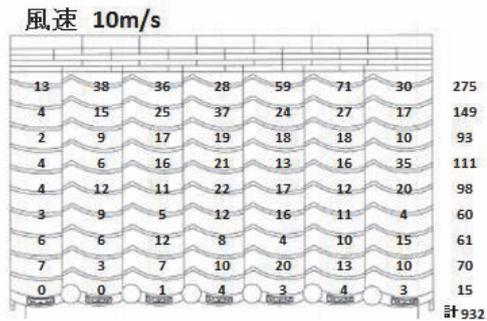
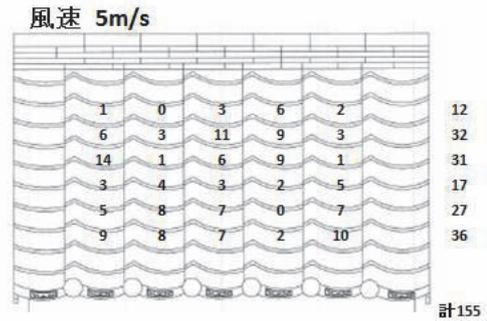


図9 昭和初期仕様における火の粉の着床による焦痕の数

現代仕様の試験体を用いた実験では、風速 5 m/s、10 m/s のいずれにおいても屋内側への燃え抜けは確認されなかった。屋根下地における焦痕箇所を観察したところ、風速 5 m/s では焦痕は確認されず、10 m/s では僅かに 11 か所のみと、昭和初期仕様での 932 か所（図9）に比べて約 1/80 と大幅に低減されることが確認された。侵入箇所は瓦尻の差込部周囲に限定されており、当該部分は瓦棧で引掛ける構造上、数ミリ程度の隙間は避けられない。しかし瓦の重なりにより覆われる上、鍵状になっていることから、実際には瓦尻の段違い部分に堆積した火の粉が侵入するには、かなり焼け細るまで瓦上に留まると考えられ、実際に実験後には数多くの火の粉が瓦上で消炎した状態で堆積しているのが確認された（写真9）。内部の屋根下地で確認された焦痕も最大で 5 mm 程度に留まっており、現代仕様であれば、屋根下地が燃え抜けることはないことが確認された。



写真5 実験中の屋内側の状況



写真6 棟部で屋根下地（巻木端）が燃え抜けた例



写真7 瓦棧付近で燃え抜けた例



屋根下地に付いた火の粉の着床によるとみられる焦痕の数を数えた。実験は屋内側への延焼が確認された時点（写真6）で、消火、解体を行っており、また焦痕面積は考慮せず、写真7のように焦げ広がった部分の焦痕数は1とした。図9に焦痕の分布と数を記す。風速が上がるにつれて焦痕の数が増加することが分かる。また軒先から棟までの段数ごとに集計した数を比較すると、風速 5 m/s では全体に均等に散らばっているのに対し、風速 10 m/s では棟に近い側で焦痕が増加していることが分かる。これは棟付近での燃え抜けが多くみられた現地調査結果と符合する。今回の実験では瓦の隙間は軒と棟で大きな差はなく、また瓦下部には瓦を銅線で吊るための瓦棧が水平方向に通っており瓦下侵入後に火の粉が棟部に吹き寄せられたとは考えにくいので、瓦上部において棟の立ち上がりの影響で棟付近の方が火の粉が吹き溜まりやすく、結果として瓦下部に侵入する火の粉も多くなったと考えられる。

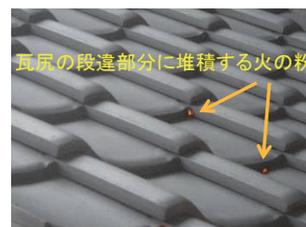


写真8 瓦尻段違い部分での火の粉の堆積



写真9 瓦上で消炎して堆積した火の粉

V 市街地火災シミュレーションを用いた被害発生要因の分析

1) 分析の目的と方法

今回の火災の焼損範囲は準防火地域に指定されていたものの、古い建物が多く、準防火地域の木造建物に対して求められる性能を有していない建物が混在していたことが推定された。そこで、全ての木造建物が準防火地域において求められる性能を有する場合等の延焼性状を確認するため、市街地火災シミュレーションを用いた検討を行った。

シミュレーションは国土技術政策総合研究所及び建築研究所が開発した市街地火災シミュレーションプログラム³⁾⁴⁾を用いた。このプログラムでは建物（1棟以上）の情報（形状、階数、構造）を市街地データとして入力し、出火点、風向・風速を設定すれば、出火以降の時々刻々の火災性状（各建物の延焼時刻の他、各建物の詳細な火災性状（火災室内の温度や発熱速度等））が得られる。今回の火災では飛び火が多数確認されており、飛び火の影響を含めた延焼性状を確認する必要があるが、飛び火の発生機構は未解明な部分が多く、現在もさまざまな研究が取り組まれている途上にある。今回用いた飛び火モデルは、過去の実験や観測を踏まえて以下の設定に基づいたモデルを採用した。

- i) 燃焼建物から放出される火の粉の発生量（単位時間あたりの発生質量）は、当該建物の発熱速度に比例する。
- ii) 火の粉の分布は、風向に平行方向風下側には発生源を原点とした対数正規分布に、風向に直交方向には正規分布にそれぞれ従う。
- iii) 火の粉落下後は、指数関数に従って質量が減少（1分間あたり質量が20%減少）する。
- iv) 火の粉による単位時間あたりの延焼確率（以下、1分間あたりの火の粉による延焼確率を「飛び火確率」という。）は、屋根面に降積した火の粉の当該時刻における残存質量に比例する。

i) の比例係数は発生量に関する係数であるが、発生した量の火の粉が風下側に分布することから最終的には風下側建物の屋根面に降積する火の粉の密度に対する比例係数（さらに言えば、風下側建物の屋根面に降積した火の粉の残存質量に対する比例係数）となる。このため、風下側の各建物の飛び火確率は、i) の比例係数と iv) の比例係数の積（以下、i) の比例係数と iv) の比例係数の積を「飛び火係数」という。）を比例係数とする式に置き換えることができる。この飛び火係数は、過去の市街地火災で観測された延焼速度と計算による延焼速度が比較的良く合うように調整

して求めたが、今回の火災で観測された飛び火の発生地点数より計算によって得られる飛び火発生地点数が著しく少ない傾向が見られたことから、過去の市街地火災に基づく係数を50倍した値に設定することで調整した。

なお、今回の火災では空撮映像等によって建物単位の詳細な延焼状況及び飛び火の状況が確認されたが、過去の市街地火災時には今回の火災で得られたような詳細な情報を得ることは困難であったことが考えられ、そのために、過去の記録に基づいて設定した飛び火係数では今回の火災の飛び火性状を十分再現できなかった可能性が考えられる。

2) 計算条件

シミュレーション用の市街地データとして、現地の火災当時の建物の状況を再現した市街地データ（以下「再現市街地データ」という。）を図10及び表7のとおり作成した。データ作成範囲は、図10の実線枠内の範囲であり、今回の火災で焼損の激しかった建物の範囲（破線枠内）から1ブロック程度拡張した範囲とした。建物形状は糸魚川市より提供を受けた地形図データ（シェープ形式）に基づいて作成し、建物属性（構造及び階数）は現地調査、Web等の写真画像及び特定行政庁より提供を受けた建築確認データに基づいて推定した。

出火建物は実際の火災で火元となった建物に設定し、出火から6時間後までの計算を行った。風向及び風速は南風（真南から11度東寄り）12.5 m/s（アメダス観測所（糸魚川）における火災当時の出火から3時間の平均風速）とした。真南から11度東寄りとしたのは、火災時の空撮映像から煙が国道8号にほぼ直交する方向に流れていたことから図上計測により国道8号に直交する角度を11度東寄りと確認したことによる。



図10 再現市街地データの範囲及び建物構造

表7 再現市街地の構造別建物棟数

構造	建物棟数	
	データ作成範囲 (図10 実線枠内)	焼損の激しい範囲 (図10 破線枠内)
耐火	17	7
準耐火	40	22
防火構造	91	56
裸木造	202	121
計	350	206

建物構造は、図10に示した再現市街地（以下「市街地①」という。）を基本ケースとして、以下に示す一部の建物構造を変更した2種の仮想的な市街地データを作成し、それぞれの延焼状況を比較した。

- i) 裸木造建築物が、全ての外壁面及び開口部に防火措置を施した防火構造建築物となった場合を想定した市街地（以下「市街地②」という。）
- ii) 上記 i) に加えて、全ての防火構造建築物の屋根の様子が現代仕様であると仮定して、市街地①及び市街地②に比べて飛び火係数を1/40倍に低減した市街地（以下「市街地③」という。）飛び火係数の倍率1/40は、以下の仮定に基づいて式(1)により求めた。

仮定1：前章に示した火の粉による出火実験においては昭和初期仕様の屋根に比べて現代仕様の屋根では炭化痕の数が1/80であった。炭化痕の数の比は必ずしも飛び火確率の比そのものではないが、炭化痕の数は火の粉の侵入の可能性と火の粉侵入後の野地板等の燃え抜けの可能性を含めた飛び火に対する抵抗性を示した結果と考えられることから、飛び火確率が炭化痕の数に比例すると見なし、屋根仕様の違いによる木造建物の飛び火確率が1/80であると仮定

仮定2：今回の火災時に昭和初期仕様の屋根がどの程度の割合で混在していたかは不明であることから、昭和初期仕様の屋根と現代仕様の屋根が1/2ずつであったと仮定

$$k = \frac{\text{市街地③の木造建物の飛び火確率}}{\text{市街地①及び市街地②の木造建物の平均飛び火確率}} = \frac{b}{xa + (1-x)b} = \frac{r}{x + (1-x)r} \approx \frac{1}{40} \quad (1)$$

k : 市街地①及び市街地②において設定する飛び火係数に対する市街地③において設定する飛び火係数の比

a : 昭和初期仕様の瓦屋根の飛び火確率

b : 現代仕様の瓦屋根の飛び火確率

x : 市街地①及び市街地②における、木造建物のうちの昭和初期仕様の瓦屋根の建物の割合 (=1/2)

r : 昭和初期仕様の瓦屋根の飛び火確率に対する現代仕様の瓦屋根の飛び火確率の比 (= $b/a = 1/80$)

計算対象のデータ範囲は、データ作成範囲全域（実線枠内）を対象とした範囲と図10の破線枠内のみを対象とした範囲の2種類を設定した。以上により、建物構造3種の市街地（市街地①～③）に対してそれぞれ計算対象のデータ範囲を2種設定し、計6種（Case1～Case6）の計算を行った（表8及び表9）。

表8 計算条件

出火点	今回の火災の火元建物
風向・風速	南風（真南から11度東寄り） 12.5 m/s
計算時間	出火から6時間
建物構造	市街地①、市街地②、市街地③の3種
計算対象範囲	図10 実線枠内、図10 破線枠内の2種

表9 計算条件の組み合わせとケース名称

建物構造		市街地 ①	市街地 ②	市街地 ③
計算 対象 範囲	実線枠内 (データ作成範囲全域)	Case1	Case2	Case3
	破線枠内 (消防活動を想定)	Case4	Case5	Case6

なお、計算対象のデータ範囲を図10の破線枠内のみとした場合の計算は、消防活動によって周囲への延焼が阻止されることを想定したものである。今回の火災による焼損区域は、消防活動等によって周囲への延焼が阻止された結果としてできた区域であることから、今回の火災時に行われた消防活動と同程度の消防活動が行われる状況を計算するために、計算対象のデータ範囲を焼損の激しい範囲に限定した。

また、糸魚川市消防本部によれば、出火点のある街区から東側街区への延焼は、一旦北方面へ延焼が進んで街区北端付近で東側街区へ延焼し、その後東側街区を南向きに延焼が進んだとされている。同様の証言は現地の周辺住民へのヒアリングでも確認された。出火点周辺ではこれらの街区間では消火活動が行われたために延焼が阻止されたと考えられる。火災初期の延焼性状の違いは火の粉の発生源となる燃焼建物数の違いでもあり、市街地全体の火災性状への影響が極めて大きいことから、消防活動を想定した図10破線枠内のみを対象とした計算においては、出火点のある街区とその東側街区間の延焼が街区北端部以外では発生しないように設定した。

3) 計算結果と考察

シミュレーションでは飛び火の発生する時刻や場所はランダム性があるため、計算ごとに異なる結果となることから、各市街地それぞれ100回ずつの計算を行った。Case1～Case3とCase4～Case6では、同様の傾向を示していることから、ここでは、Case4～Case6の結果について示す。

図11～図13は100回の計算を行ったうちの典型的な1回の計算結果をそれぞれのCaseについて一例として図示したものである。また、100回の計算を行った結果を集計し、経過時間ごとに焼損棟数の最大及び平均を求めた結果を図14に示す。図14には、図3に示した今回の火災で確認された実際の延焼動態から求めた焼損棟数の時刻歴を併せて示している。実際の火災に最も近い計算条件となるCase4と今回の火災を比較すると、Case4の平均値は、今回の火災をやや上回っているものの、焼損棟数の増加

傾向は概ね同様の経過を示しており、シミュレーションによる計算の有効性を確認することができる。

Case4では1時間経過程度までは、焼損棟数の増加は比較的緩慢であるが、東側や北側の街区に延焼が及ぶ頃に急激に加速し、平均で5時間程度で計算対象のデータ範囲の全域が焼損する結果となった。なお、Case4では100回の計算全てで飛び火が発生した。Case5及びCase6に関しては、火元建物のある街区では、北方向にのみ1時間あたり数棟ずつの緩やかな延焼性状を示しており、飛び火の影響を除けば火元建物のある街区北側の道路を越えずに計算が終了する結果となった。これにより、飛び火の発生が大幅に抑制され、飛び火の発生はCase5では100回の計算中66回、Case6では100回の計算中1回のみであった。

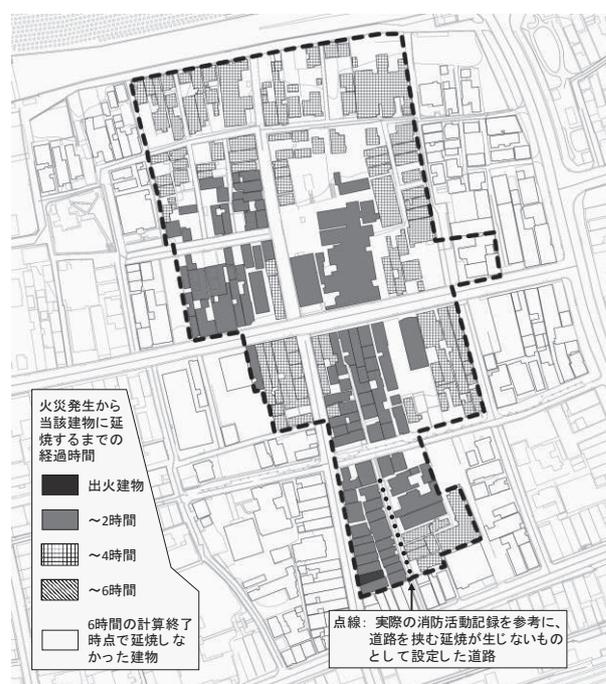


図11 Case4の計算結果の一例
(再現市街地・消防活動を想定)

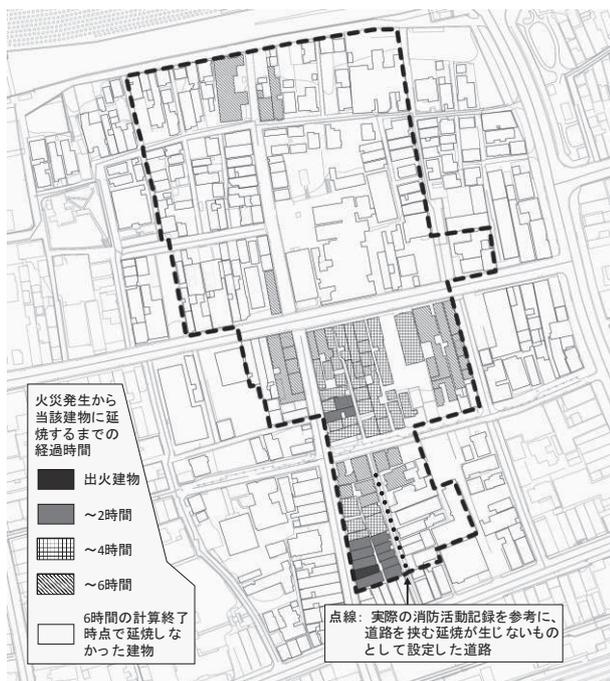


図 12 Case5 の計算結果の一例
(裸木造を全て防火構造の変更・消防活動を想定)

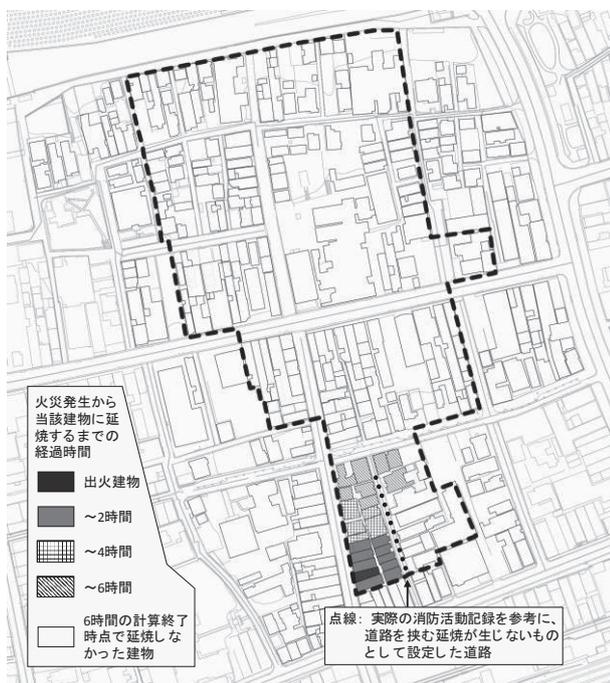


図 13 Case6 の計算結果の一例
(市街地②+飛び火係数 1/40 倍・消防活動を想定)

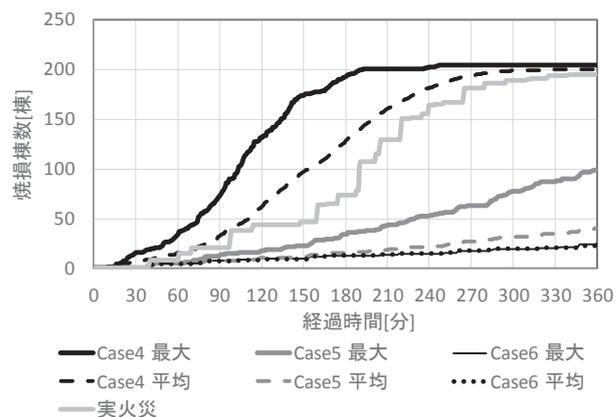


図 14 100 回計算を行った最大及び平均焼損棟数
(消防活動を想定した計算)

VI おわりに

平成 28 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では、多数の飛び火による延焼拡大が確認された。そこで、その要因を解明するため、火の粉が瓦の隙間から入って屋根下地が燃える状況を想定した 2 種の火災風洞実験を行うとともに、建物の構造及び屋根の仕様が市街地火災の延焼性状に及ぼす影響を確認することを目的として市街地火災シミュレーションを用いた分析を行った。

実験は、昭和初期仕様と現代仕様の屋根試験体を作成し、それぞれに対して行った。本検討により、現代仕様の瓦屋根であれば飛び火の影響は極めて小さいことが明らかとなった。以下に各実験から得られた結果の概要を示す。

木片散布実験は、火の粉を木片で代替して瓦屋根へ散布して、木片の瓦下への侵入状況を確認した。その結果、現代仕様の瓦屋根の瓦下に侵入する木片は厚さ 1 mm の板状のもののみで、厚さ 5 mm 以上のものの侵入は生じなかった。侵入した木片の体積の合計は昭和初期仕様の瓦屋根の 3~4% に少なく、現代仕様の火の粉の侵入に対する抵抗性が高いことが明らかとなった。

火の粉による出火実験は、屋根試験体の風上で木製クリブを燃焼させて火の粉を発生させて屋根面に吹き付け、屋根下地への火の粉の着床及び燃え抜け状況を確認した。その結果、今回行った実験条件においては、現代仕様の瓦屋根は風速 10 m/s の状況下であっても燃え抜けることはなく、焦痕数を確認したところ、昭和初期仕様の焦痕数の約 1/80 と大幅に低減されることが確認された。

市街地火災シミュレーションを用いた分析では、3 種の市街地データに基づいて計算を行い、次の傾向が確認された。

市街地①：再現市街地では、実際の火災と同様に多数の飛び火が発生し、市街地北端まで3時間程度で延焼。計算範囲内のほとんどの建築物が焼失。

市街地②：裸木造の外壁や開口部全てに防火措置を施した防火構造とした場合には、延焼速度が遅くなり、飛び火の発生数及び焼損棟数が大きく減少。

市街地③：市街地②に対して現代仕様の瓦屋根を想定して飛び火係数を1/40倍に低減した場合の計算を実施。飛び火がほとんど発生しなくなり、焼損棟数がさらに減少。

裸木造を主体とする市街地では、出火後早期に隣棟への延焼拡大が生じ、飛び火が発生する可能性も高くなる。計算では、実際の火災と同程度あるいはさらに早く市街地北端の海岸沿いの建築物にまで延焼が拡大する状況が確認された。一方で裸木造建築物の外壁や開口部の全てに防火措置を施した防火構造建築物とした場合には、急激に延焼速度が遅くなり、出火後2時間程度までは、飛び火が生じにくい状況が確認できる。ただし、時間経過と共に燃焼範囲が拡大し、4～5時間後には飛び火の影響により焼損棟数の増加が徐々に早くなっている。さらに、屋根の仕様を現代仕様に変更した場合を想定して、飛び火係数が1/40倍に低減すると設定すれば、飛び火はほとんど発生せず、焼損棟数の極端な増加も見られなくなることが確認された。

なお、今回のシミュレーションによる検討は糸魚川市を対象として、特定の条件に基づいて行ったものであり、既存の市街地における延焼可能性を評価する際には、様々な気象条件や市街地特性などの条件を設定する必要がある。

謝辞：本調査を実施するにあたり、被災直後の混乱した状況下、あるいは復興・生活再建に向けて大変お忙しい中、被災建築物の調査に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、ここに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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建物被害調査報告書」，
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/184/all.pdf>，
2017.7（2018年1月23日閲覧）
- 2) 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（2018年1月23日閲覧）
- 3) 国土地理院技術資料C・1-No.400「高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発総合報告書」，
<http://www.nilim.go.jp/lab/jdg/doc/gensai.pdf>（2018年1月23日閲覧）
- 4) 岩見達也，林吉彦，大宮喜文「飛火を反映した市街地火災シミュレーションの構築（その2）火災実験に基づいた飛火現象のモデル化とシミュレーションの構築」，日本建築学会2011年度大会(関東)学術講演梗概集A-2，2011.7