

6. 市街地火災シミュレーションによる延焼性状の確認

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。

6. 1. シミュレーターの概要

(1) シミュレーターの機能

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⁶⁾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が計算される。本計算により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。シミュレーションプログラムにおける飛び火モデルを以下に示す。

(2) 飛び火モデル

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が、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ている。

- ①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。
- ②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。
- ③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。
- ④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。

①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、①の比例係数と④の比例係数の積(以下、①の比例係数と④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。

シミュレーションで採用した飛び火モデルに基づいて、風速 12.5m/s の下で発熱速度 100MW (1棟~数棟の裸木造建築物の火災を想定) の火源から火の粉が発生する場合の、建築面積 100m² の裸木造建築物に対する飛び火確率を求めた計算例を以下に示す。

図 6.1.1 中の青色線は、風速 12.5m/s における火の粉分布の確率密度関数で対数正規分布となっている。図 6.1.1 及び図 6.1.2 の朱色線は、それぞれ、X 軸上 (Y=0) 及び X 軸に直交する軸上 (X=200) の飛び火確率の分布を、図 6.1.3 は、飛び火確率の分布の面的な広がりを図示したものである。

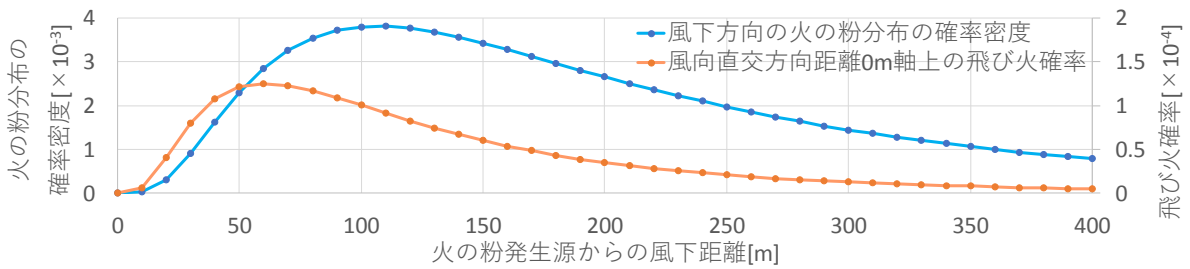


図 6.1.1 風下方向の火の粉の分布及び飛び火確率の分布

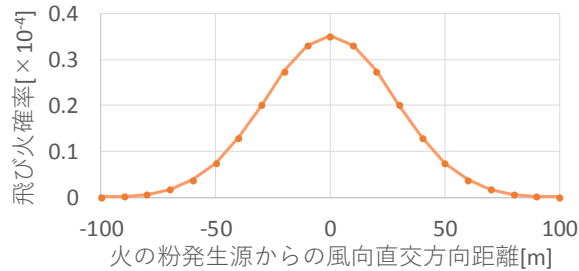


図 6.1.2 風向と直交方向の飛び火確率の分布 (風下距離 200m の風向直交軸上)

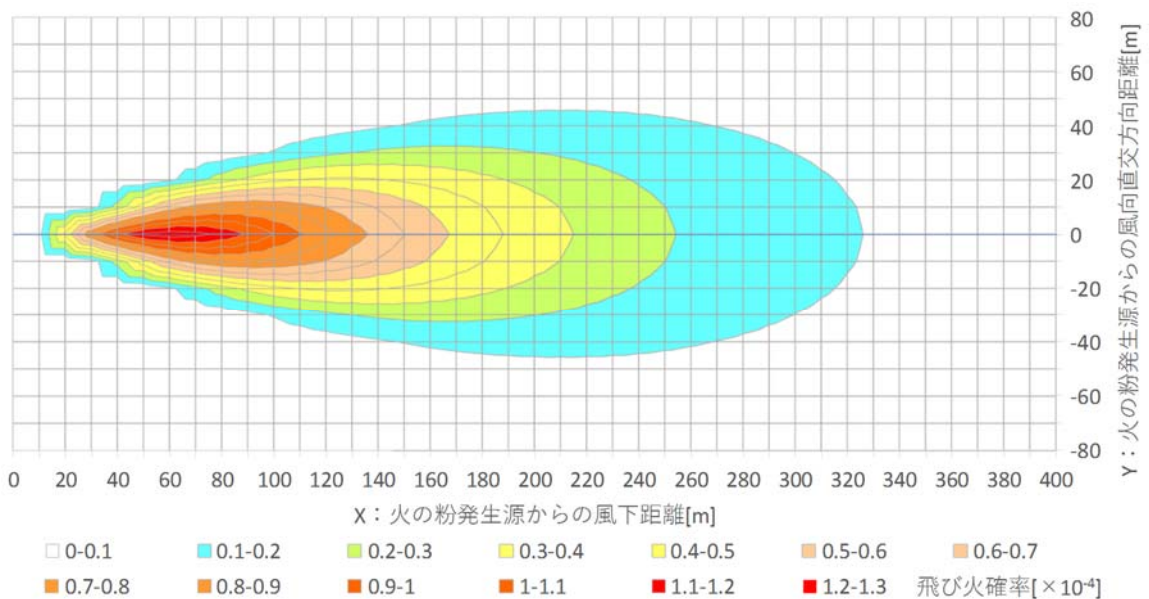


図 6.1.3 飛び火確率の分布

6. 2. シミュレーションに用いる再現市街地データ

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 6.2.1 及び表 6.2.1 のとおり作成した。データ作成範囲は、図 6.2.1 の着色した建物の範囲であり、今回の火災で焼損の激しかった建物の範囲（赤枠内）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。

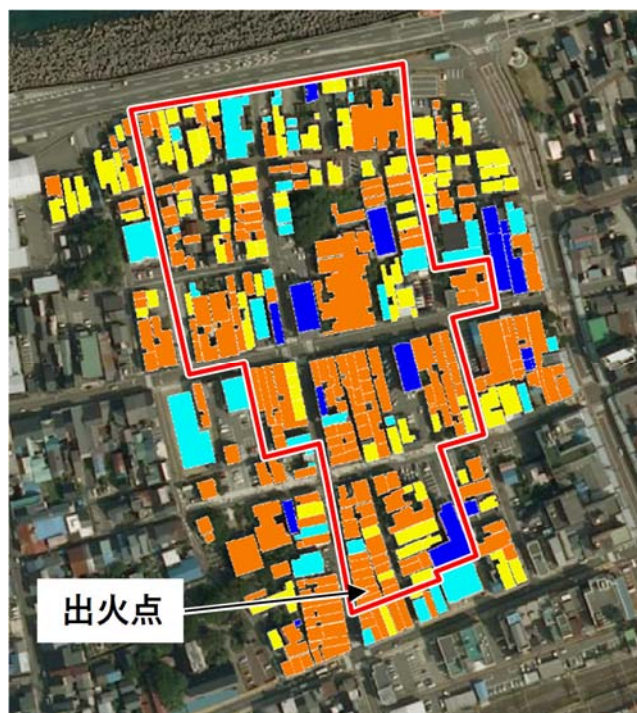


図 6.2.1 シミュレーションに用いる再現市街地データの範囲及び建物構造
 (写真出典：国土地理院撮影の空中写真 (2009 年撮影))
 (凡例は表 6.2.1 に示す)

表 6.2.1 図 6.2.1 の凡例及び構造別建物棟数

構造	建物棟数	
	データ作成範囲	赤枠内
■ 耐火	17	7
■ 準耐火	40	22
■ 防火構造	91	56
■ 裸木造	202	121
計	350	206

6. 3. 計算条件

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）12.5m/s（アメダス観測所（糸魚川）における出火から 3 時間の平均風速）とした。真南から 11 度東寄りとした理由は、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。

建物構造は、図 6.2.1 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。）
- i i) 上記 i) に加えて、全ての防火構造建築物の屋根の仕様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 6.3.1 により求めた。

- a) 5 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て、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
- b) 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

$$k = \frac{\text{市街地③の木造建物の飛び火確率}}{\text{市街地①及び市街地②の木造建物の平均飛び火確率}} = \frac{b}{xa+(1-x)b} = \frac{r}{x+(1-x)r} \approx \frac{1}{40} \quad (\text{式 6.3.1})$$

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を対象とした範囲と図 6.2.1 の赤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 6.3.1)。

なお、計算対象のデータ範囲を図 6.2.1 の赤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赤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。

表 6.3.1 シミュレーション条件

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
計算対象の データ範囲	全域	Case1	Case2	Case3
	赤枠内 （消防活動を想定）	Case4	Case5	Case6

6. 4. 計算結果と考察

(1) データ作成範囲全域を対象とした計算

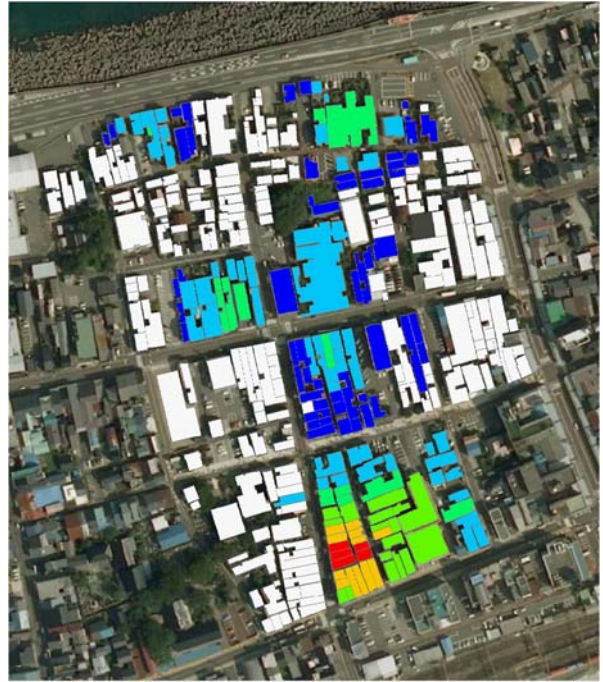
シミュレーションでは飛び火の発生する時刻や場所はランダム性があるため、計算ごとに異なる結果となることから、各市街地それぞれ 100 回ずつの計算を行った。図 6.4.1 は一例として 100 回の計算を行ったうちの典型的な 1 回の計算結果を図示したものである。また、図 6.4.2 に 100 回の計算を行った結果を集計し、経過時間ごとに焼損棟数の最大及び平均を求めた結果を示す。

Case1 では出火から 1 時間以内に仲道線を挟んだ両側の街区に広範囲に延焼が及んでおり、これが大量の火の粉を発生する原因となって飛び火の発生を助長して急速に火災が拡大する様子が見られる。飛び火計算のランダム性により計算ごとに延焼棟数の増加速度に差はあるが、4 時間後には平均でも市街地のほぼ全ての建物が焼損する結果となった。

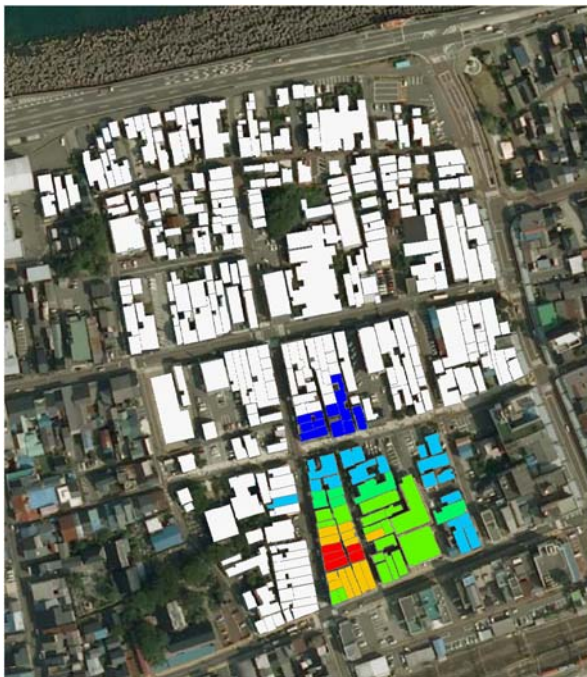
Case2 では火元建物とその周囲の防火性能が向上しているため、出火から 1 時間では数棟の火災に止まっている。広範囲に延焼が及ぶのは 3~4 時間経過後でありその頃から徐々に飛び火が発生し始めるが、飛び火した建物やその周囲の建物の防火性能が向上していることから、延焼範囲の拡大は緩慢で 6 時間経過時点でも延焼が及んだ建物の割合は平均で 1/3 程度、最大でも 1/2 程度に止まっている。Case3 では飛び火があったのは 100 回の計算中 8 回のみであり、ほとんどの計算で図 6.4.1(c)に示す延焼範囲に止まる結果となった。なお、飛び火は Case1 では 100 回の計算中 100 回、Case2 では 100 回の計算中 98 回で発生した。



(a) Case1 (再現市街地)



(b) Case2 (裸木造を全て防火構造に変更)



(c) Case3 (市街地②+飛び火係数 1/40 倍)

図 6.4.1 データ作成範囲全域を対象とした計算結果の一例

(写真出典：国土地理院撮影の空中写真 (2009 年撮影))

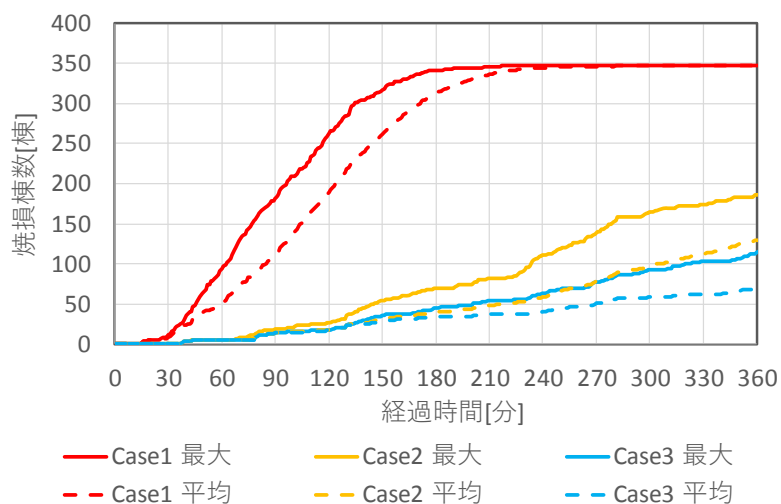


図 6.4.2 100 回計算を行った最大及び平均焼損棟数
(データ作成範囲全域を対象とした計算)

(2) 消防活動を想定して焼損の激しい範囲のみを対象とした計算

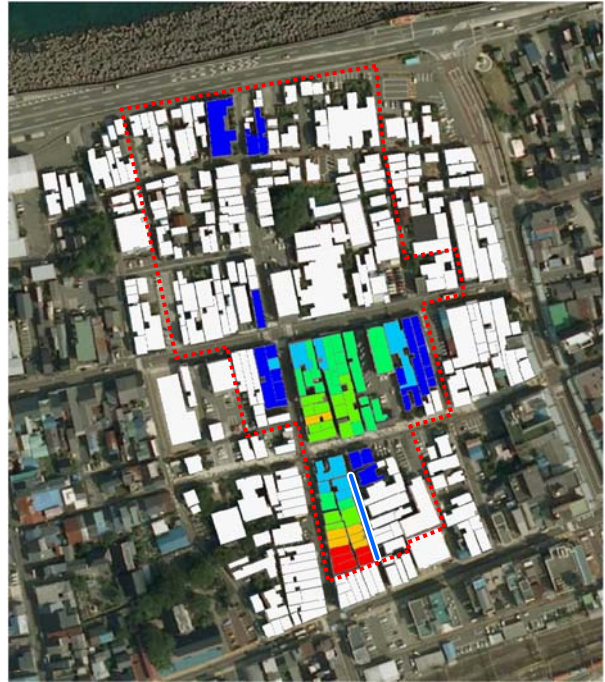
消防活動を想定して行った焼損の激しい範囲のみを対象とした計算においても (1) と同様に 100 回の計算を行った (図 6.4.3 及び図 6.4.4)。全般的な結果の傾向も (1) と同様であるが、特に火災初期の段階において消防活動の影響により延焼範囲は比較的狭い範囲に抑えられている。

図 6.4.4 には、図 4.1.1 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。

(1) に示す Case1~Case3 との比較では、Case4 では 1 時間経過程度までは、焼損棟数の増加は Case1 に比べて緩慢であるが、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慢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仲道線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 Case2 や Case3 に比べて大幅に抑制され、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。



(a) Case4 (再現市街地)



(b) Case5 (裸木造を全て防火構造に変更)



(c) Case6 (市街地②+飛び火係数 1/40 倍)

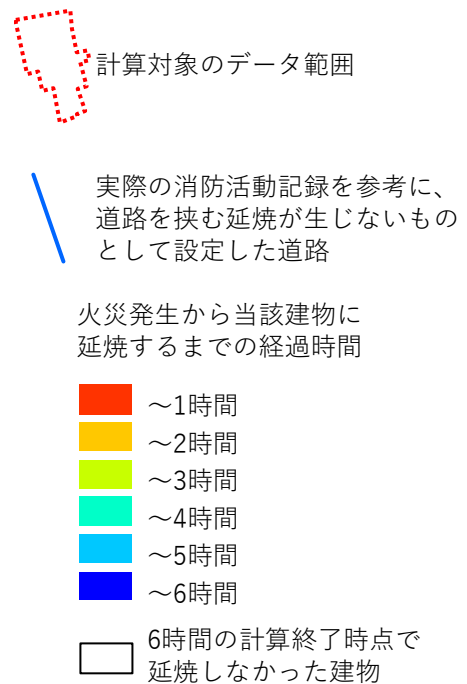


図 6.4.3 消防活動を想定して焼損の激しい範囲のみを対象とした計算結果の一例

(写真出典：国土地理院撮影の空中写真 (2009 年撮影))

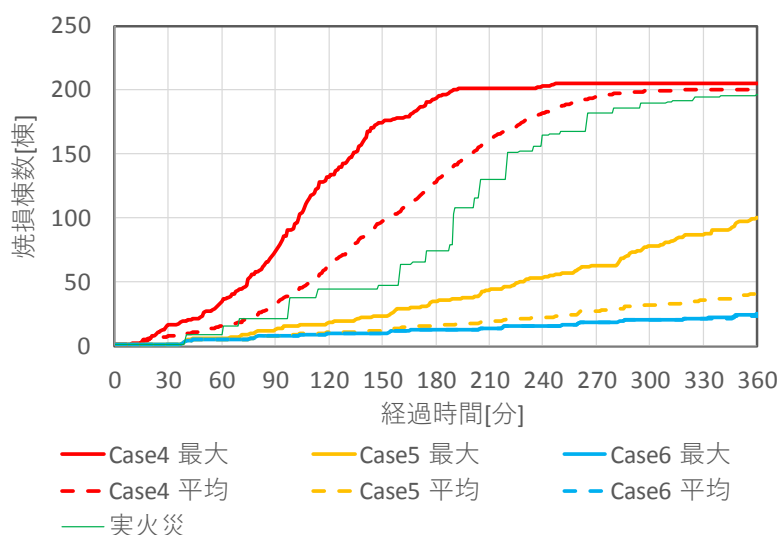


図 6.4.4 100 回計算を行った最大及び平均焼損棟数
(消防活動を想定して焼損の激しい範囲のみを対象とした計算)

(3) 考察

データ作成範囲全域を対象とした計算と消防活動を想定して焼損の激しい範囲のみを対象とした計算を行ったが、これら 2 種の計算範囲の計算に共通して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、5 章に示した火の粉による出火実験の結果に基づいて飛び火係数が 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。また、シミュレーションを用いた空地や広幅員道路の確保、延焼遮断帯の整備等の市街地整備による防災性能の向上効果の評価に関する技術的検討を進める必要がある。