

延焼ネットワーク分割による大規模焼損被害低減効果の検証

谷本光大 *・大佛俊泰 **・廣川典昭 **・岸本まき **

Verification of Fire Spread Network Segmentation for Reducing Large-Scale Fire Damage

Kodai TANIMOTO, Toshihiro OSARAGI, Noriaki HIROKAWA and Maki KISHIMOTO

Abstract: In densely built-up wooden residential areas, there is a high risk of large-scale fires in the event of a major earthquake. Therefore, there is an urgent need to promote the reconstruction of buildings into fireproofing ones. In this paper, we propose a method to efficiently reduce fire damage by reconstructing a small number of buildings. In the proposed method, we firstly divide fire spread clusters, which are clusters of buildings that are simultaneously damaged by fire spread. Secondly, we confirm the effectiveness of the proposed method by applying it to several densely built-up wooden residential areas.

Keywords: 延焼ネットワーク (fire spread network), 不燃化 (fireproofing), グラフ理論 (graph theory), 焼損被害 (fire damage), 木造住宅密集地域 (densely-built wooden house area)

1. はじめに

大地震時に大規模火災が発生する危険性の高い木造住宅密集地域では、建物の不燃化促進が急務である。しかし、むやみに家屋の不燃化を図っても、延焼は不燃化した建物を回り込むように進展するため、焼損被害の低減には結び付きにくい。地域全体の焼損被害を低減させるためには、延焼の要となる建物を不燃化することが重要である。

阿部ら (2003) は、延焼経路を効果的に遮断可能な建物の抽出を、延焼経路ネットワークを用いたネットワーク問題として扱い、建物の整備優先順位を定める手法を提案している。しかし、地域全体の焼損被害を確実に効率的に低減させる建物の抽出には課題を残している。

本稿では、グラフ理論の分野で知られているモジュラリティ最適化手法を用いて、延焼経路で密に連結した建物群を検出し、検出した建物群間を

繋ぐ延焼経路を切断することで (要となる建物を不燃化することで) 焼損被害を効率的に低減する。また、複数の地域で延焼シミュレーションによる検証を行い、提案手法の妥当性を検証する。

2. 延焼ネットワークと延焼クラスター分割

大規模な延焼を伴う市街地大火による建物焼損被害は、出火した建物を含む延焼クラスター (火災延焼で同時に焼損する建物の集塊) の大きさに依存する。本稿では、以下に示す手順に基づき、延焼クラスターを分割することで焼損被害の低減を試みる。まず、延焼速度式 (東京消防庁, 2001) に基づいて、延焼する可能性のある建物間に有向リンクを設定する (3章)。この仮想的に設定した有向リンクの集合を延焼ネットワークと呼ぶ。その上で、延焼ネットワークを構成するノード (建物) の中から、延焼拡大の要となる建物

* 学生会員 東京工業大学環境・社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology)

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 E-mail:tanimoto.k.aa@m.titech.ac.jp

** 正会員 東京工業大学環境・社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology)

(以下、不燃化対象建物)を検出する(4章)。これらの建物を不燃化し、巨大な延焼クラスターを複数の小さな延焼クラスターに分割することで、建物焼損被害の低減が図れることを検証する(5章)。

3. 延焼ネットワークの構成および単純化

3.1. 延焼ネットワークの構成方法

延焼ネットワークの例を図1(a)に示してある。延焼ネットワークは、分析対象地域に含まれるすべての建物について以下の条件を満足する建物を探索し、該当する建物間にリンクを設定することで得られる。すなわち、①建物構造(耐火造・準耐火造・防火造・木造)種別から決まる「延焼限界距離」の範囲内に存在し、②他の建物に遮蔽されることなく直接火炎の影響が及ぶ建物ペア間について有向リンクを設定する。実際に延焼するか否かは、建物用途、加熱側の建物構造、受熱側の建物構造のほか、両建物の空間的な位置関係、風向・風速などにも依存するため、発災前には断定できない。すなわち、延焼ネットワークは「延焼する可能性のある建物間を網羅的に抽出したネットワーク」であるといえる。

3.2. 延焼ネットワークの単純化手法

延焼ネットワークは上述したように非常に複雑であり、これを直接用いて、延焼の要となるノード(建物)を特定することは困難である。そこで、延焼過程に作用する条件を限定することで、比較的単純な延焼ネットワークを構成する。ここでは、図1(c)に示した条件下で延焼ネットワークを再構成した(図1(b))。これにより、延焼ネットワークが単純化され、延焼経路や密に連結した建物群を明瞭に把握することができる。この時、延焼ネットワークの単純化の条件によって、ネットワーク形状は変化することに注意する。

4. グラフ理論を応用した延焼クラスターの分割手法

建物同士が密な延焼ネットワークで連結され、一塊となって存在する建物群については、どの建



図1 延焼ネットワークの構成方法

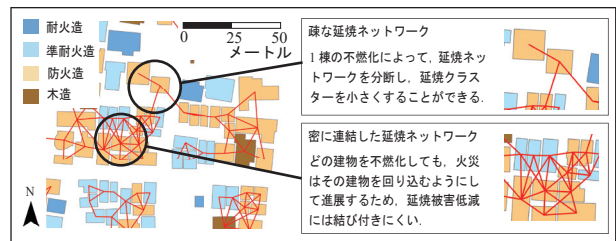


図2 延焼ネットワークの疎密の例

物を不燃化してもその効果は限定的である。しかし、建物群と建物群の間を繋ぐ延焼ネットワークが疎であれば、少数の建物を不燃化することで延焼ネットワークを分断し、延焼クラスターを小さくすることができる(図2)。すなわち、より密接に結びついている複数の家屋群を抽出し、これらを分離すればよい。

具体的には、まず、延焼ネットワーク内において、相互に接続されているリンクの密度が高いグループ(コミュニティ)を検出するため、モジュラリティ Q の最大化を図る(図3(a))。ただし、建物数が多いネットワークの場合には厳密解を求めることは難しく、ヒューリスティックな解法が用いられることが多い。そこで、本稿では、同様の計算を複数回繰り返し、モジュラリティ Q の平均値をもとに評価する。

次に、抽出されたコミュニティの質を評価する指標であるコンダクタンス $\Phi(G)$ を算出する(図

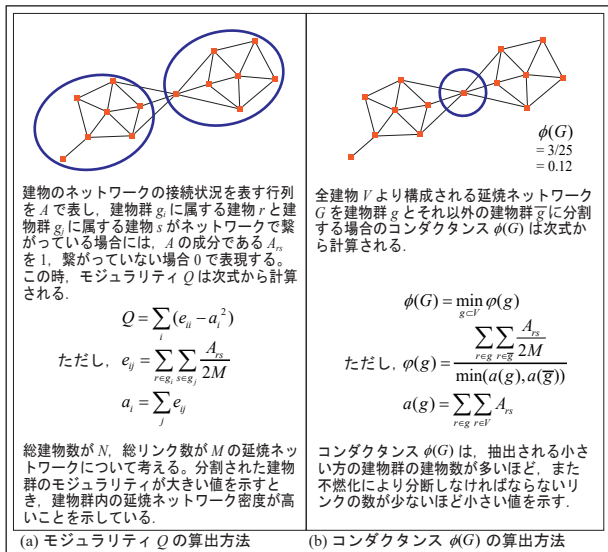


図3 不燃化建物抽出方法

3(b)．これは、分割後における小さい方の建物群の建物数が多いほど、また、分割のために切断しなければならないリンク数が少ないほど小さい値を示す統計量である。すなわち、コンダクタンスの値が小さい建物を不燃化対象建物の候補として選出する。最後に、同時に不燃化する建物数は少ない方が優れた分割であると考え、延焼ネットワークを分割するために同時に不燃化する必要のある建物数が小さいものを優先的に選出する。本稿では、同時に不燃化する建物数が4棟以下となる不燃化対象建物の組の中から、コンダクタンスの視点から評価の高い10組を選出した。

5. 木造住宅密集地域における提案手法の適用

5.1. シミュレーションの実行条件

本章では、4章で提案した手法の有効性を検証する。具体的には、まず、東京都より不燃化特区に指定されている3地域（荒川区町屋4丁目、世田谷区太子堂5丁目、世田谷区若林2丁目）を分析対象地域に設定し（図4）、各地域において不燃化対象建物を抽出する（5.2節）。その上で、抽出した建物の不燃化を図ることによる焼損被害の低減効果を延焼シミュレーション（図5）を用いて評価する（5.3節）。本稿では、建物ごとの出火確率は考慮せず、各建物1棟から出火した場合の延焼被害を1ケースとし、分析対象地域全棟に

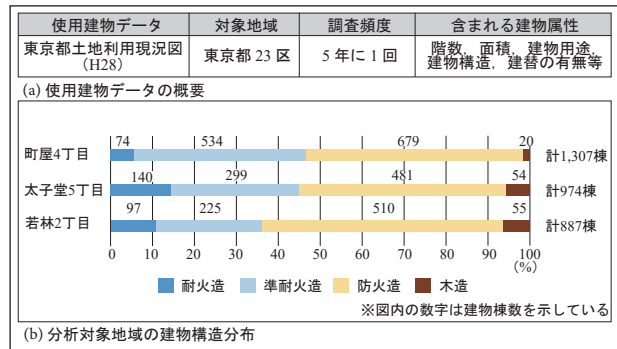


図4 分析対象地域の概要

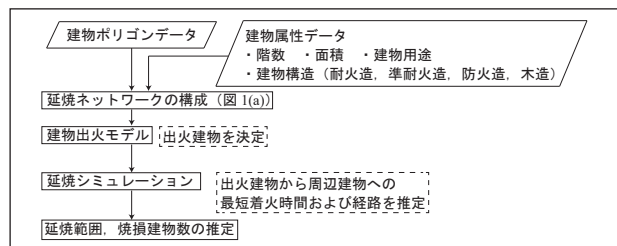


表1 抽出された不燃化対象建物（町屋4丁目）

優先順位	建物数	建物ID	コンダクタンス	コミュニティの建物数
①	1	40198	0.00265252	77
②	1	40297	0.00662252	31
③	1	41266	0.01052632	22
④	2	40771	0.01428571	36
④	2	40684	0.01428571	36
⑤	1	40644	0.01449275	33
⑥	4	41298	0.01459854	63
⑥	4	40883	0.01459854	63
⑥	4	40794	0.01459854	63
⑥	4	40884	0.01459854	63
⑦	1	41225	0.01639344	18
⑧	3	41164	0.01657459	45
⑧	3	41104	0.01657459	45
⑧	3	41181	0.01657459	45
⑨	2	40588	0.02127660	23
⑨	2	40584	0.02127660	23
⑩	2	41180	0.02702703	21
⑩	2	41188	0.02702703	21

ついて延焼シミュレーションを実行する。なお、シミュレーションの実行条件は、図1(c)①～⑦と同様とする。また、建物の不燃化は、建物構造を耐火造へ変更することで図られると想定する。

5.2. 木造住宅密集地域での不燃化対象建物の抽出

町屋4丁目における不燃化対象建物の抽出結果を表1に示してある。ここでは、コンダクタンスの値（100回の平均値）が小さい上位10組を示してある。コンダクタンスが最小の建物（図

6(a) を不燃化すれば、77 棟の建物群を、優先順位⑥の 4 棟（図 6(b)）を同時に不燃化すれば、63 棟の建物群を大きな延焼クラスターから分離可能であることがわかる。

5.3. 不燃化対象建物による焼損被害低減効果

各地域における不燃化対象建物による焼損被害低減効果を図 7 に示してある。例えば、町屋 4 丁目では、コンダクタンスに基づく優先順位が最も高い建物 1 棟を不燃化することで、延焼棟数が平均 104.2 棟減少し（図 7(a)）、焼損建物数が 1,000 棟から 86 棟まで減少するケースも確認できる（図 8）。このような効果的な焼損被害の低減は、太子堂 5 丁目や若林 2 丁目においても確認された。コンダクタンスに基づく優先順位が最も高い建物の組を不燃化することにより、太子堂 5 丁目では、延焼棟数が平均 35.9 棟（図 7(b)）、若林 2 丁目では、19.7 棟減少した（図 7(c)）。

6. まとめ

本稿では、モジュラリティ最適化手法とコンダクタンスを用いて、火災の延焼経路にあたる延焼ネットワークを合理的に分断する方法を構築した。また、この手法を木造住宅密集地域に適用し、その有用性を確認した。この手法によれば、少数の建物を不燃化することで延焼クラスターを分割し、効率的な焼損被害の低減が可能である。今後は、風向・風速や想定地震などの条件の違いが、提案手法を用いた不燃化対象建物の抽出および焼損被害低減効果に及ぼす影響について、さらなる検証を行う。

謝辞

本稿は、都市再生機構との共同研究「大地震災害シミュレータを活用した密集市街地の分析手法および整備効果指標に関わる基礎研究」の一部を取りまとめたものである。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

阿部英樹・糸井川栄一・繁野麻衣子（2003）実市

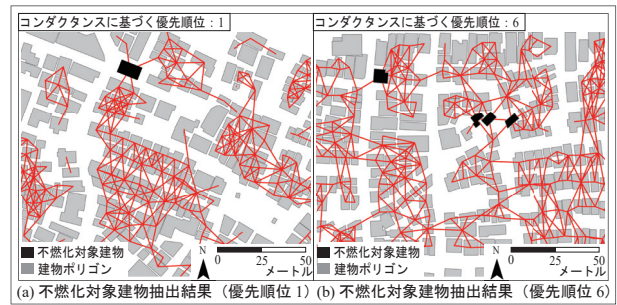


図 6 抽出された不燃化対象建物の組（町屋 4 丁目）

不燃化対象建物	コンダクタンスに基づく優先順位									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
同時に不燃化する必要がある建物数（棟）	1	1	1	2	1	4	1	3	2	2
不燃化後の延焼棟数の平均減少数（棟）	104.2	43.2	30.6	50.7	24.7	85.5	21.2	62.1	31.9	15.5
不燃化後に延焼棟数が減少するケースの割合（%）	65.9	65.9	65.9	65.9	68.8	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9

(a) 不燃化による焼損被害低減効果（町屋 4 丁目）

不燃化対象建物	コンダクタンスに基づく優先順位									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
同時に不燃化する必要がある建物数（棟）	3	1	2	1	1	4	2	3	3	2
不燃化後の延焼棟数の平均減少数（棟）	35.9	1.9	2.6	10.8	2.4	37.6	3.3	20.6	18.8	23.7
不燃化後に延焼棟数が減少するケースの割合（%）	47.0	6.5	8.3	47.0	8.3	47.0	6.5	47.0	47.0	47.0

(b) 不燃化による焼損被害低減効果（太子堂 5 丁目）

不燃化対象建物	コンダクタンスに基づく優先順位									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
同時に不燃化する必要がある建物数（棟）	1	1	1	1	1	1	2	1	1	3
不燃化後の延焼棟数の平均減少数（棟）	19.7	15.7	11.7	4.0	9.5	1.0	1.5	8.7	5.9	3.7
不燃化後に延焼棟数が減少するケースの割合（%）	38.8	38.8	38.8	38.8	5.9	7.0	7.0	38.8	38.8	7.0

(c) 不燃化による焼損被害低減効果（若林 2 丁目）

図 7 不燃化による延焼防止効果検証

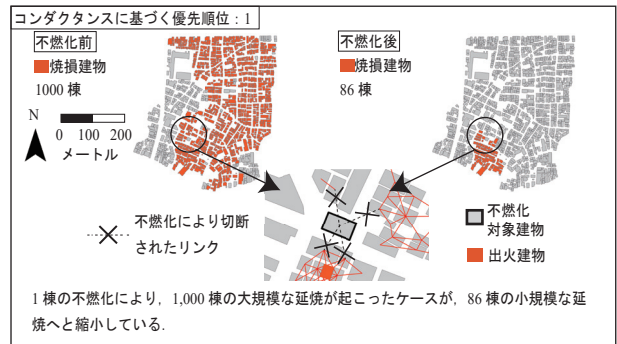


図 8 焼損被害が大幅に縮小するケース（町屋 4 丁目）

街地データへの難燃化整備計画問題の適用可能性。「地域安全学会論文集」、5, 141-148.

東京消防庁（2001）『地震火災に関する地域の防災性能評価手法の開発と活用方策』、火災予防審議会答申。

廣川典昭・大佛俊泰（2017）同時多発火災を想定した大規模延焼シミュレーションに基づく延焼危険性指標の提案と消防隊行動支援への活用。「日本建築学会計画系論文集」、82（732）、301-310.