

延焼過程ネットワークのスケールフリー性に着目した木造密集地域における 延焼危険建物の選択的除去効果の実証

TARGETED REMOVAL OF FIRE SPREADING WOODEN BUILDINGS

織山和久*, 小滝 晃**

Kazuhisa ORIYAMA and Akira KOTAKI

A scale-free power law distribution applies to fire-spreading networks in areas that are densely crowded with wooden-building, with each flammable wooden building as a node and its links to other buildings within fire-spreading distance of it. Based on the percolation theory of scale free networks, we have computed the percolation critical exponents and found that fire-spreading networks can be effectively disrupted by the targeted removal of each fire-spreading wooden building that links to six or more other such buildings. A targeted removal approach for the 84 highest-risk districts in Tokyo can prevent fire spread by removing 10-30% of flammable buildings, in contrast to random removal of 40-70% of flammable buildings. A detailed area survey and assortative coefficient indicate that cooperative rebuilding would be effective for a targeted removal approach.

Keywords : Scale-free networks, Areas densely crowded with wooden buildings, Percolation, Fire-spreading network, Targeted attacks

スケールフリー・ネットワーク, 木造密集地域, パーコレーション, 延焼過程ネットワーク, 選択的攻撃

1. はじめに

木造密集市街地の不燃化については、これまでは主に街区単位の不燃領域率が指標とされてきた。その整備計画もこの不燃領域率を上げるために、街区単位の大規模再開発事業が基本とされる傾向が強い。しかし街区単位の大規模再開発事業では、一帯の地権者も多数に亘り全員の合意形成も難航し、東京都の防災街区整備事業でも2006年以降の実績は3件、計1haに留まっている¹⁾。

一方、近年の研究では延焼過程について、建物をノードとし、この延焼限界距離内にある他の建物をリンクで結んで構成するネットワークとして分析²⁾³⁾⁴⁾することで不燃領域率に代わる性能基準を見出し⁵⁾⁶⁾⁷⁾、建物単位の詳細な延焼シミュレーションが可能となった⁸⁾⁹⁾。そして延焼過程ネットワーク上の隘路にある少数の建物群を優先的に不燃化することで、隘路の前後のネットワークが切断されて効果的な延焼対策が施しうることが明らかにされている¹⁰⁾¹¹⁾。

本稿は、こうした近年の研究方向に沿って、延焼過程ネットワークにおいて延焼を拡大する危険度の高い建物を特定し、延焼過程ネットワークがスケールフリー・ネットワークに漸近することを確認した上で、選択的に除去する手順とその有用性を検討した。

一般に、あるノード（頂点）から出るリンク（枝）の数を次数、ある次数を持つノードが全体に占める割合を次数分布と呼ぶ。この次数分布がべき乗則に従うネットワークは「スケールフリー・ネットワーク」と総称されており、インターネット、共著・共演関係、食物網、性交渉関係、代謝ネットワーク等がその具体例とされる¹²⁾。スケールフリー・ネットワークは、少数のノードが大きな次数を持ち、大半のノードは小さな次数しか持たない等の特徴があることから、大きな次数を持つノード（ハブ）を選択的に除去する場合には、それらが少数でもネットワークが細分化される一方、ランダムにノードを選んで取り除く場合（乱数的除去）ではそれらが多数でもネットワークの連結性が維持されることが知られている¹³⁾¹⁴⁾。従って、延焼過程ネットワークがスケールフリー・ネットワークとなっている場合は、延焼経路の数（次数）の多い建物群から順次選択的に不燃化すれば、それが少数であっても任意の不燃化よりも効果的に延焼経路ネットワークを分断できると予想される。

本研究では、この選択的除去の効果を東京都区部における火災危険度の高い町丁を対象にしたシミュレーションによって検証した。

具体的には、延焼過程ネットワークにおいて個々の建物から延焼限

* (株)アーキネット 代表取締役

** 国土交通省九州地方整備局 副局長

Chief Executive Officer, archinet,inc.

Deputy Director-General, Kyushu Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

界距離内にある他の建物の棟数（次数）を数え、次数毎の該当棟数の分布（次数分布）を火災危険度の最も高い町丁単位および東京の区単位で調べた。

こうした分析から、これらの次数分布はおおむね次数 6 以上についてはいずれもべき乗則に従っていること、すなわち延焼過程ネットワークがスケールフリー・ネットワークに近似していることを確認した。また、火災危険度ランク 5 の全 84 町丁における試算結果では、消火活動が順調に行われることを前提とした場合でも、延焼防止を図るためには、乱数的除去の場合は地区内全棟数の 50% 強の除去を要する一方、最高次数が 5 になるまで次数の多い建物群から順次選択的除去を行う場合は全棟数の 20% 弱の除去で、延焼拡大の危険性の解消に有効であった。また延焼危険度の高い建物同士は隣接し合い、群体を為すことも確認された。

以上の検討の結果、延焼危険度の高い建物群を順次特定し、共同建替えによって不燃化する方が、街区単位の大規模再開発や単独の建替えよりも効果的であることが判明した。除去対象建築物の特定や効果予測の手順も簡易であり、ネットワーク表現によって延焼拡大の危険性、延焼危険建物群の特定、不燃化による延焼抑止効果も簡明に示され、共同建替えに関する地権者の合意を促しやすいという利点も期待される。東京直下型地震による地震火災によって甚大な被害が推定されるが、この延焼危険建物群の共同建替えを基本とした対策によって、最小限の政策介入による最大の社会的費用抑制がなされうると考えられる。

2. 木造密集地域の形成過程

木造密集地域は、東京大空襲後に帝都復興事業施行区域の縁辺部に急激に形成された¹⁵⁾。空襲被災者の住宅建設において、公道から街区内部に樹状に私道を分岐させて接道とし、大きな区画を分割して敷地として利用される例が広範に出現した。このような接道分岐が繰り返されるほど、区画面積及び建物規模が小さくなり棟数密度が増す。こうして密集した木造家屋群に隣接して、一層密集した木造家屋群が生成する（図1¹⁶⁾）。こうした敷地細分化が累進して密集化する過程は、優先的選択によるネットワークの成長に相当するため、延焼過程ネットワークがスケールフリー性を備えること¹⁷⁾、すなわち、個々の木造家屋に隣接する木造家屋棟数の分布がべき乗則に従うこと、が予想される。

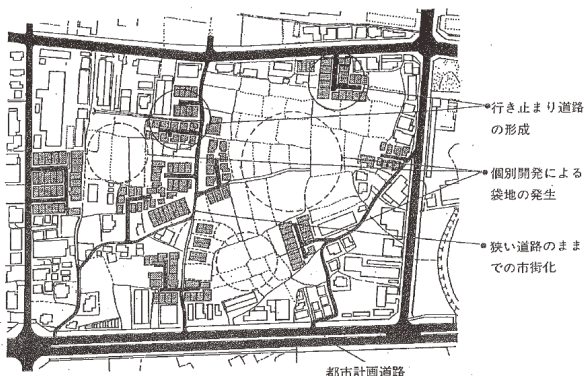


図1 市街化区域での接道分岐と敷地細分化の例

3. 検証

検証の手順として、まず、GIS データ^{注1)}を元に建物毎に延焼限界距離圏を設定する。次に個々の建物の中心をノードとして、延焼限界距離圏内にある建物相互をリンクで結び、延焼過程ネットワークを作図する。この延焼過程ネットワークの次数分布を調べ、スケールフリー性の有無を検証する。ここでスケールフリー・ネットワークは選択的攻撃に脆弱である性質を踏まえ、最も延焼危険度の高い建物（最高次数を有するノード）から順次、選択的に不燃化した場合の延焼抑止効果を検証する。最後に次数相関を測り、共同建替えの有効性を示唆する延焼危険度の高い建物同士の集積性を確認した。

3.1 延焼限界距離圏の設定

延焼限界距離圏の設定は、「GIS を活用した延焼危険性・消火活動困難性の評価手法」¹⁸⁾に準拠した。ある建物の延焼限界距離（延焼に至らない建物間の距離）は、 a を建物の一辺の長さ(m)とすると、木造 $12 \times (a/10)^{0.422} \text{m}$ 、防火造 $6 \times (a/10)^{0.322} \text{m}$ 、準耐火造 $3 \times (a/10)^{0.181} \text{m}$ 、耐火造 0m と与えられる。この延焼限界距離を、集団火災による火災拡大の効果の増大を加味して、

$$\text{延焼限界距離} \times \text{延焼拡大係数}(=1.5) \times 1/2$$

と補正し、建物外周の外方向に延焼限界距離圏を描く¹⁹⁾（図2）。延焼拡大係数とは、集団火災による火災拡大の効果を検討し、延焼限界距離に乗ずる補正係数である²⁰⁾。より安全側に考慮し、集団火災時には建物間にある建物を飛び越しても延焼が拡大し^{注2)}、間にある耐火造建築物の延焼抑止効果も空地並みと想定した。また火元側と被害側の建物構造が異なると、延焼限界距離は延焼経路の方向に依存して議論が複雑になるが、この延焼経路の異方性の問題を避けるために、それぞれの建物から延焼限界距離の 1/2 をとって延焼限界距離圏としている¹⁸⁾。こうして発生させた延長限界距離圏が相互に重なるとき、双方の建物に延焼の加害・被害の危険性があるとした。



図2 延焼限界距離圏の描画（荒川区町屋地区）

3.2 延焼過程ネットワークの作図

各建物の中心をノードとし、建物の延焼限界距離圏が相互に重なっている場合には相互のノードをリンクで結ぶ作業を繰り返して延焼過程ネットワークを作図する。荒川区町屋地区における例示であるが、図2の延焼限界距離圏相互の重なりから、図3の延焼過程ネットワークが作成されている。延焼過程ネットワークにおいては延焼危険度は、各点に接続するリンクの本数に対応するが、これがネットワークの濃淡によって視覚的に明示されることとなる。

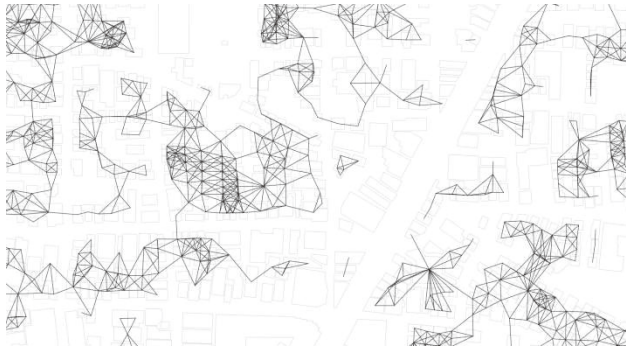


図3 延焼過程ネットワークの作図（荒川区町屋地区の例）

3.3 度数分布

スケールフリー・ネットワークについては、他分野におけるさまざまなネットワークの分析結果によると、ほとんどの実データにおいてスケールフリー性は次数の大きなところで成り立ち、次数の小さいところではべき分布の式から予想されるよりもノード数は少ない傾向があることが知られている²¹⁾。

このような知見を踏まえ、延焼過程ネットワークについても、全部の建物又は一定の次数以上の建物についてスケールフリー性が成り立つことを検証した。本研究の目的は、大きな次数を持つ少数のノード（ハブ）の選択的除去による延焼防止効果の確認にある。従って一定の次数以上の建物についてスケールフリー性が認められるのであれば防災対策上の有効性があると考えられる。

こうした考え方にもとづき、対象地域において延焼過程ネットワーク図を作成し、次数ごとに該当するノード数（度数分布）を調べ、全部又は一定の次数以上の建物の度数分布についてスケールフリー性を検証する。度数分布がべき乗則に従う、すなわちスケールフリー性を有するのは、両対数目盛でグラフ化すると一定次数以上の度数分布が直線に近似する場合である。

まず対象地域を町丁単位に絞り、度数分布のスケールフリー性を検証した。図4に例示した荒川区町屋4丁目、都区部の町丁単位で火災危険度3位²²⁾になる地区の例であるが、同地区の度数分布では、次数6以上においては、両対数目盛でほぼ直線上に並び^{注3)}、べき乗則（決定係数 $R^2=0.8782$ ）に近似した。

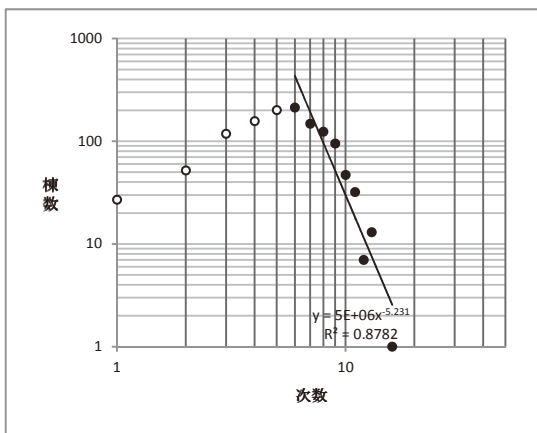


図4 度数分布のスケールフリー性（荒川区町屋4丁目）

次に、町屋4丁目と同様に、東京都区部の火災危険度ランク5の84町丁²²⁾の度数分布のスケールフリー性への近似度（決定係数 R^2 ）を調べた（図5）。検証の結果、いずれの町丁の度数分布でも、次数6以上では、両対数目盛でほぼ直線上に並び、次数6以上についての度数分布はスケールフリー性に決定係数 R^2 は0.75以上、うち70町丁は0.85以上に近似することが示された。各町丁で次数6以上の建物が全棟数に占める割合は30.1%（本木1丁目）から71.8%（京島3丁目）までと開きはあるが、この割合に関らずスケールフリー性への近似性が確認される。

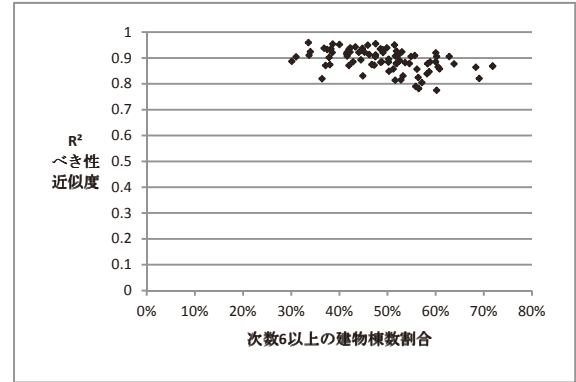


図5 火災危険度ランク5の町丁の特性（全84町丁）

次に広域の度数分布として、火災危険度の高い街区を多く含む特別区である荒川区においてフリースケール性を検証した。図6に示されるように、荒川区全域においても次数6以上（全棟数の39.2%）の度数分布は両対数目盛でほぼ直線上に並び、次数6以上についての度数分布はべき乗則（決定係数 $R^2=0.9552$ ）に強く近似した。

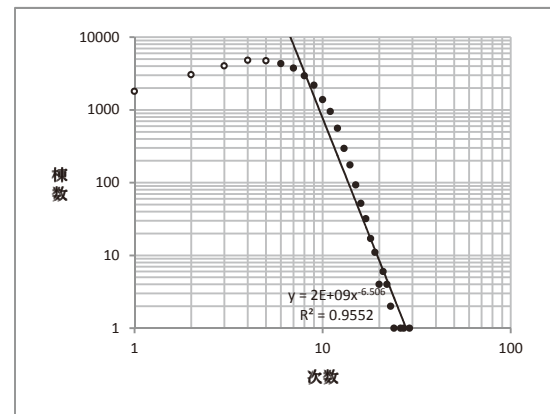


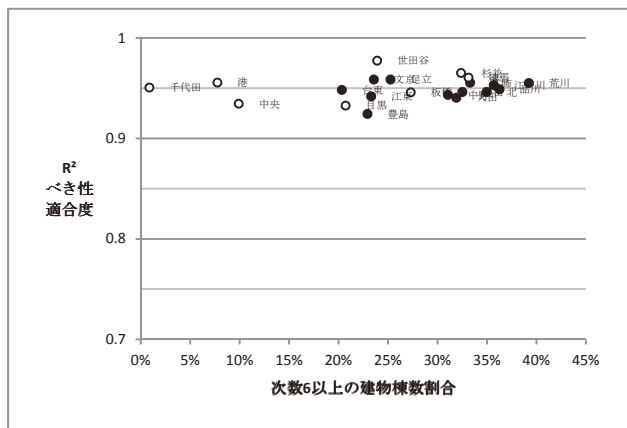
図6 度数分布のスケールフリー性（荒川区）

さらに23区のそれぞれについて、度数分布のスケールフリー性を検証した（図7）。いずれの区についても次数6以上の度数分布は両対数目盛でほぼ直線上に並び、べき乗則に対して決定係数 $R^2=0.95$ 前後と顕著にスケールフリー性を示した。

また、火災危険度5の町丁を含む区では、延焼危険度の高い建物（次数6以上）の全棟数に対する割合は20.3%（台東区）から39.2%（荒川区）、一方、千代田区・中央区・港区ではこの割合は10%未満である。実際の延焼過程ネットワーク図を参照しつつ両者を比較すると、この割合の差は延焼拡大範囲の分布の広域性（荒川区等）・

局所性（港区等）を反映していると考えられる（図 8）。

以上の分析によって、いずれの区においても少数の延焼危険建物群を介して延焼拡大の恐れがあること、延焼危険建物の占める割合に応じて延焼拡大範囲の分布が局所的・広域的といった相違があるものの、いずれの区でも延焼防止には選択的な不燃化が効果的とな



りうることを示された。

図 7 延焼危険建物の割合と次数分布のスケールフリー性
(区単位、火災危険度 5 の町丁を●:含む区、○:含まない区)



図 8 延焼過程ネットワーク比較（左 港区三田、右 荒川区町屋）

3.4 選択的除去

スケールフリー・ネットワークは任意の乱数的な攻撃に対しては頑健だが、大きな次数を持つノード（ハブ）への選択的な攻撃には脆弱である^{注4)}。スケールフリー・ネットワークでは、大半のノードは比較的小さな次数しか持たず、大きな次数を持つ少数のノード（ハブ）がネットワーク全体を連結する構造となっている。このため、ハブを選択的に順次除去すれば、ネットワーク分断の効果は著しいとされる。次数の高いノードほど他の隣接点から作用を受けやすく、他の隣接点に作用を及ぼしやすいため、ハブ除去はその次数の二乗で効果的となる。

延焼過程ネットワークがスケールフリー・ネットワークであれば、その延焼限界距離内には比較的小数の建物しかない建物が大半を占める中で、延焼限界距離内に多数の建物がある少数の建物（ハブ）がネットワーク全体を連結している構造となっている。ここである建物を不燃化することはこれを経由する延焼経路を遮断し、ネットワーク上のノードを除去することに相当する。従ってハブに相当する建物から選択的に不燃化すれば、それが少数であっても延焼過程ネットワークを効果的に分断しうると予想される。

大規模な延焼を抑止するに至る除去棟数割合は、疫学モデルの数理的な研究¹²⁾²³⁾を応用することによって導かれる。

建物の延焼限界距離圏が相互に重なっている場合、放任火災時ではほぼ延焼を及ぼすが、消火活動が行われる場合は、延焼を一定程

度抑える効果が生じる。こうした消火能力を考慮した上で隣接する建物間で延焼が起きる確率を λ （以下、隣棟間延焼確率と呼ぶ。）と置く。平常時における木造建物の延焼率は 30.6%、放水した建物全体の延焼率は 34.9%²⁴⁾との実績値を参考にすると、 λ の値は、通常防火時で概ね 1/3 (≈ 0.33)、放任火災時では概ね 1 であり、大規模地震時の実際の値はその中間にあると考えられる。

また、ある地区において延焼拡大が局所的に留まらずに広域に及ぶのは、同地区一帯における「類焼を受けて延焼を広げる平均棟数」が「類焼を受ける平均棟数」を上回ることによって、火の手の勢いが増していく状況であると考えられる。ここで、次数 k の建物が全建物に占める割合を $p(k)$ 、あるパラメータの平均値を $E(\cdot)$ として表すと、ランダムに建物を選んだときに、その建物に類焼を及ぼす建物棟数は $\lambda kp(k)$ であり、そのネットワーク全体での合計は、 $\sum_k \lambda kp(k) = \lambda E(k)$ となる。また、ランダムに選んだ建物が類焼を受けた後に再延焼を及ぼす棟数は、火元は再延焼しないのでこれを省き、 $\lambda(k-1)$ となる。従って類焼を受けて延焼を広げる棟数は、ネットワーク全体では $\sum_k \lambda(k-1) \cdot \lambda kp(k) = \lambda^2(E(k^2) - E(k))$ となる。ここで全棟数を N とおくと、大規模な延焼発生の起こりやすさを示す指標（延焼増幅係数 S ）は、両者の比として

$$S = \frac{\lambda^2(E(k^2) - E(k))/N}{\lambda E(k)/N} = \frac{\lambda(E(k^2) - E(k))}{E(k)}$$

となり、広域に延焼が拡大する条件は $S > 1$ 、その臨界条件は $S = 1$ である。 S は大規模な延焼発生の起こりやすさについての有力な指標となる。

(1) 町屋 4 丁目についての分析

ある対象地域（町屋 4 丁目）を例にとって、次数の最も高い点（次数 16）から順に除去、すなわち延焼危険度の最も高い非耐火建物から順次耐火造に建替えた場合の延焼過程ネットワークおよび延焼増幅係数 S の変化を分析する。ここで隣棟間延焼確率 λ を、通常防火時で 1/3 (≈ 0.33)、放任火災時では概ね 1 としている。

① 現状

現状の延焼過程ネットワーク（図 9）では、非耐火建物 1,310 棟が複雑に絡み合っており、出火すれば街区全体に延焼が広がる危険性が視覚化されている。

② 通常消火 ($\lambda=0.33$) を仮定した場合の選択的除去効果

震災時においても通常並みの消火活動（隣棟延焼率 $\lambda=0.33$)を維持できると仮定した場合でも、延焼拡大を抑えるには一定数の建物を除去しなければならない。この通常消火時の仮定において、延焼増幅係数 S がほぼ 1 になるまで次数の高い建物を順次除去する。図 10 は、この場合の選択的除去の対象となる対象家屋の分布を示し、図 11 は選択的除去を施した後の延焼過程ネットワークであり、図 9 の現状に比べてほぐれた状態になることが示される。

図 12 は、選択的除去ないし乱数的除去をした場合のそれぞれについて、除去棟数割合と延焼増幅指数 S の関係を表わす。延焼拡大を抑止するには、乱数的除去の場合は 673 棟（51%）を除去・不燃化する必要がある一方、次数の最も高い建物から最大次数 5 になるまで順次選択的除去を行う場合は、その対象は 259 棟（20%）となる。

なお、次数の最も高い点から順次除去すればその隣接点の次数も一つずつ下げる。このためネットワーク内の最高次数を順次除去によって一定値以下にするために必要な建物除去棟数は、当初にその

値以上の次数を有する建物を一括で除去する場合よりも少なくなる。この例でも、次数 6 以上の建物割合は 52%であるが、最大次数 5 まで順次除去する場合では除去建物割合は 20%と少なくなっている。

③ 放任火災 ($\lambda \asymp 1$) を想定した場合の選択的除去効果

震災時に消火活動が機能不全に陥り、ほぼ放任火災状態（隣棟延焼率 $\lambda \asymp 1$ ）となった場合を想定し、延焼増幅係数 S が概ね 1 になるまで次数の高い建物を順次除去する。図 13 はこの選択的除去の対象となる家屋の分布を示す。図 14 は除去後の延焼過程ネットワークであり、放任火災の想定の下では、元と比べて大幅に細分化された状態とすることがわかる。このような放任火災時を想定した場合でも、次数の最も高い建物から順次選択的除去を行う場合、延焼危険建物 446 棟（34%）（最大次数 3 まで）の建物除去によって延焼拡大は抑止されるという結果が得られている。



図 9 現状の延焼過程ネットワーク（町屋 4 丁目）



図 10 延焼抑止に至る除去対象家屋（通常消火時： $\lambda=0.33$ ）

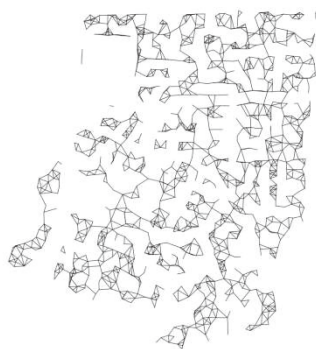


図 11 除去後の延焼過程ネットワーク（通常消火時： $\lambda=0.33$ ）

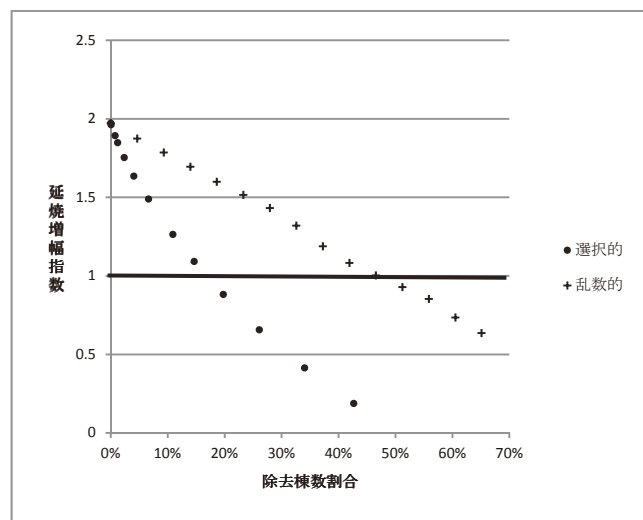


図 12 除去棟数割合と延焼増幅指数（町屋 4 丁目、 $\lambda=0.33$ ）



図 13 延焼抑止に至る除去対象家屋（放任火災時： $\lambda \asymp 1$ ）

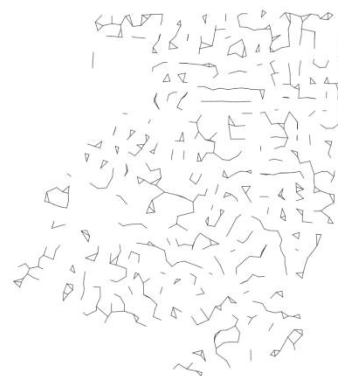


図 14 除去後の延焼過程ネットワーク（放任火災時 $\lambda \asymp 1$ ）

(2) 都区部の火災危険度ランク 5 の 84 町丁についての分析

さらに分析の対象地域を、都区部の火災危険度ランク 5 の 84 町丁に広げて検証した。通常消火時の想定の下で延焼拡大を抑制するには、非耐火建物を乱数的に除去する場合では対象棟数割合は全体の 40~70%を要する一方、最大次数（次数 33）の建物から順次選択的に除去する場合は 10~30%で済み、除去棟数に対する延焼防止効果は後者が約 2~4 倍となることが確認された（図 15）。選択的除去の対象となる延焼危険建物の次数は、82 の町丁においては最大次数

5 になるまで、2 町丁では最大次数 6 になるまで順次特定することで、延焼増幅指数がほぼ 1 に抑えられることが確認された。

また、84 町丁全体(全 79,595 棟)に対しては、通常消火($\lambda=0.33$)を想定した場合は延焼危険建物 15,391 棟 (19.3%)、放任火災を想定した場合 ($\lambda \approx 1$) は 25,362 棟 (31.9%) を除去・不燃化すれば延焼拡大を効果的に抑止できることが確認された。

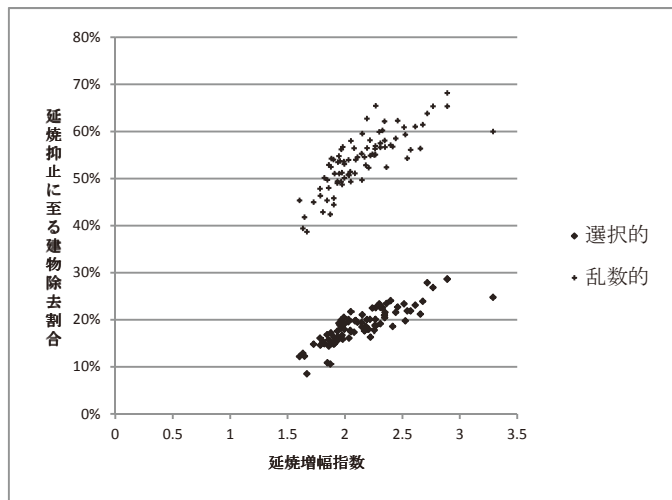


図 15 除去棟数割合と延焼増幅係数
(火災危険度ランク 5 84 町丁, $\lambda=0.33$)

3.5 次数相関

町屋 4 丁目について区画単位で詳細に観察すると、延焼危険建物(順次除去による次数 6 以上)が数棟ほど隣接し合う状況が見とれる(図 16)。すなわち、延焼危険度の高い建物は集積性(次数の小さい建物の隣には次数の小さい建物が、次数の高い建物の隣に次数の高い建物が分布しやすい傾向)を有していることが、この図から推測される。



図 16 延焼危険建物の分布
(次数 6 以上、町屋 4 丁目内)

このような隣接する 2 点の次数が似る度合いを測る概念が次数相関²¹⁾である。対象地区内において、ある次数を有する非耐火建物群について、それらの建物に隣接する非耐火建物の次数の平均値を調べる。この値が正の相関、すなわち次数とともに隣接点の次数が増える傾向にあるのであれば、それは、次数の小さい建物の隣には次数の小さい建物が、次数の高い建物の隣に次数の高い建物が分布している傾向(集積性)を示す。

対象地域を町屋 4 丁目(図 17)さらに荒川区(図 18)とし、それぞれの次数相関を調べた。いずれも次数 12 までは単調増加であり正の次数相関を示すことから、延焼危険度の高い建物が相互に隣接して群体を為す傾向が確認される^{注 5)}。

このように、延焼危険度の高い建物が相互に隣接して群体を為す傾向は、次数の高い延焼危険建物群をまとめて除去して共同で耐火造に建替える方式が、単独建替えよりも合理的となる可能性を示唆している^{注 6)}。

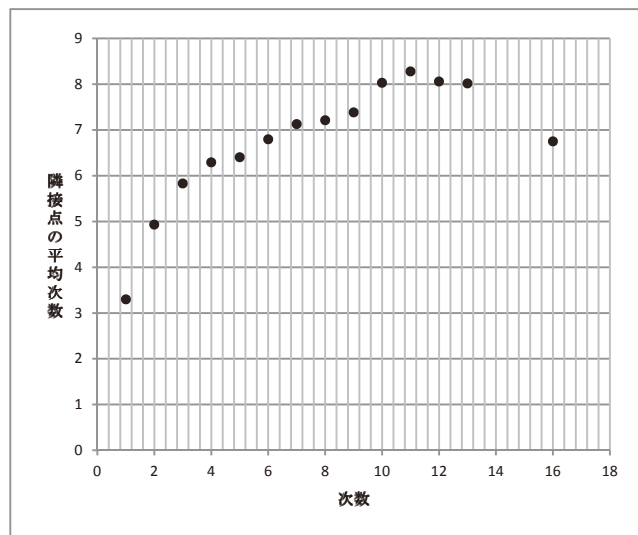


図 17 次数相関(町屋 4 丁目)

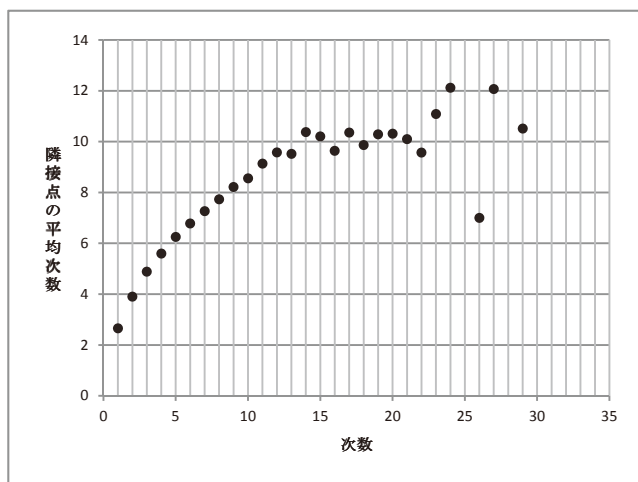


図 18 次数相関(荒川区)

4. まとめ

本研究の結果、木造密集市街地の延焼防止対策は、延焼危険建物を順次選択的に除去して延焼過程ネットワークを分断することが効果的であることが確認された。

- ① 建物の延焼限界距離圏が相互に重なっている場合に相互のノードをリンクで結ぶ作業を繰り返して延焼過程ネットワークを作図することができる。このようなネットワーク表現によって、一帯の延焼危険度、延焼危険建物、不燃化効果を直観的に示すことが可能となり、不燃化について地権者間の合意形成を促す効果も期待される。

- ② 都区部の火災危険度ランク5に相当する84町丁及び23区の各々すべてにおいて、概ね次数6以上の延焼過程ネットワークはスケールフリー性を有している。
- ③ スケールフリー・ネットワークは、次数の高いノード（ハブ）への選択的攻撃に脆弱である。木造密集市街地における実証結果においても、この簡易な手順を適用して、延焼危険度を地区単位ではなく建物単位で特定できる。そして延焼危険度の最も高い建物から順次除去することで、乱数的除去の半数以下の除去棟数で効果的に延焼拡大を抑止することが確認された。
- ④ さらに延焼危険建物に隣接する建物同士の次数相関を調べると、延焼危険度の高い建物が相互に隣接して群体を為す傾向（集積性）が認められる。これは単独建替えよりも、一群を共同で耐火造に建替える方式の有効性を示唆するものである。

今後は、こうした共同建替えの事業化可能性を検証し、これを促すための施策（より良好な住環境を保つ条件、地権者等のインセンティブ）について研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 東京都都市整備局市街地整備部防災都市づくり課：木造住宅密集地域の解消に向けた取組，2012
- 2) 東京消防庁火災予防審議会：火災予防審議会地震対策部会答申書（第19期）―減災目標を達成するため木造住宅密集地域において緊急に実施すべき震災対策一，pp.99-100，2012.3
- 3) 加藤孝明，小出治：延焼過程のネットワーク表現による都市防災区画の評価方法の研究，日本建築学会大会学術講演梗概集F，pp.223-224，1990
- 4) 阿部英樹：延焼被害を軽減する市街地の空間構成に関する研究，筑波大学修士論文，2002.1.
- 5) 阿部英樹，糸井川栄一：延焼経路ネットワークを用いた都市防火対策の評価について，2002年日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会，pp.144-145，2002.9.
- 6) 加藤孝明，小出治：市街地延焼からみた市街地整備のための性能基準に関する基礎的考察―不燃領域率による性能基準の一般化―，日本建築学会計画系論文集 516，pp.185-191，1999.2.
- 7) 加藤孝明，久貝壽之，小出治：市街地延焼からみた市街地整備のための性能基準に関する基礎的考察，その2，有限領域への展開，日本建築学会計画系論文集 525，pp.241-248，1999.11.
- 8) 加藤孝明，久貝壽之，小出治，南部世紀夫：市街地延焼からみた市街地整備のための性能基準に関する基礎的考察，その3，建物配置の現実化『逐次充填間引き分布』についての考察，日本建築学会計画系論文集 534，pp.163-170，2000.8.
- 9) 林吉彦，糸井川栄一，中野孝雄，齋藤正俊，平澤一浩：延焼シミュレーションモデルの実市街地への適用と予測結果の検証，2004年日本建築学会関東支部研究報告集，pp.473-476，2005.2.
- 10) 阿部英樹，糸井川栄一：延焼経路ネットワークを用いた市街地防火対策における整備優先順位の最適化，地域安全学会論文集No.5，pp.141-147，2003.11
- 11) 阿部英樹，繁野麻衣子，糸井川栄一：延焼経路ネットワークを用いた難燃化整備計画問題の近似解法の比較，日本オペレーションズ・リサーチ学会 2004年秋季研究発表会，pp.100-101，2004.9
- 12) Reuven Cohen, Sholomo Havlin, and Daniel ben-Avraham, Structural Properties of Scale-Free Networks, Wiley-VCH Verlag Berlin GmbH, 2002
- 13) Réka Albert, Hawoong Jeong, Albert-László Barabási, Error and attack tolerance of complex networks, nature, 2000
- 14) Reuven Cohen, Keren Erez, Daniel ben-Avraham, and Shlomo Havlin, Resilience of the Internet to Random Breakdowns, Physical Review Letters, 2000
- 15) 高橋厚信，関川陽介，宮下清栄，高橋賢一：木造密集市街地の形成過程とその構造特性に関する研究，土木計画学研究・講演集，2004.11.
- 16) 国土交通省社会資本整備審議会 住宅宅地分科会 宅地政策ワーキンググループ：宅地政策の転換の基本的方向のあり方に関する報告，参考資料P172収録図，2002.7.15
- 17) László Barabási, Réka Albert, Emergence of Scaling in Random Networks, nature, 1999
- 18) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：国土交通省総合技術開発プロジェクト 循環型社会および安全な環境形成のための建築・都市基盤整備技術の開発―まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発一，2003.3
- 19) 火災予防審議会，東京消防庁：火災予防審議会地震対策部会答申書（第19期）―減災目標を達成するため木造住宅密集地域において緊急に実施すべき震災対策一，p.100，2011.3.
- 20) 加藤孝明，程洪，亜力坤 玉素甫，山口亮，名取晶子：建物単体データを用いた全スケール対応・出火確率統合型の地震火災リスクの評価手法の構築，地域安全学会論文集，No.9，pp.279-288，2006.11.
- 21) 増田直紀，今野紀雄：複雑ネットワーク，p.12，近代科学社，2010.4.30
- 22) 東京都都市整備局：地震に関する地域危険度測定調査（第7回），2013.9
- 23) S.N.Dorogovtsev and A.V.Goltsev, Critical phenomena in complex networks, Reviews of Modern Physics, 2008
- 24) 総務省消防庁：平成25年度版消防白書，p.59，2013.12

注

- 注1) 東京都「平成23年度土地利用現況調査（GISデータ）」による。空中写真より直接地物データ（座標値、建物形状を含む）を取得し作成されたもので、都区部の建物を構造別（耐火造・準耐火造・防火造・木造）に表示する。「東京都縮尺1/2,500地形図更新事業」の特記仕様書（平成19年）によれば、建物の位置精度の制限値は、標準偏差で1.0m、最大で1.5m以内とされる。建物の相対的な位置関係の精度については、航空写真の解像度40cmが相当すると考えられる。
- 注2) 間の建物を飛び越して延焼が拡大する分析モデルであるため、間に挟まれていた建物を除去した場合でも、除去された建物の裏側にある建物とは元々リンクがあり、除去後に新たにリンクは形成されない。
- 注3) スケールフリー性は次数の大きなところで成り立ち、次数の小さいところではべき分布の式から予想されるよりもノードが少ない²²⁾。延焼過程ネットワークでも同様で、次数6未満を含めていくとべき性への近似度は落ちる。町屋4丁目では、次数5以上で0.827、4以上で0.734、3以上で0.607となる。当初次数6以上の建物棟数よりも除去対象建物棟数が少なければ、防災対策上は当初次数6以上を対象範囲として限定しても問題はないと考えられる。
- 注4) 選択的攻撃の考え方は、人の感染症対策、コンピューター・ウィルス対策、インターネットや航空網の保全、種の絶滅による食物連鎖の分断作用など、様々なスケールフリー・ネットワークに応用されている。
- 注5) 次数12以上では隣接点の平均次数は一定値（町屋4では8前後、荒川区では10前後）を示し、正負とも次数相関はみられない。このことから、群体の中心となる特に延焼危険度の高い建物（次数12以上）は地図上にランダムに分布すること、つまり群体相互の距離（連結性）はさまざまであることが推測される。
- 注6) 共同建替え事業は、接道不良区画も含めて区画統合すれば統合後は接道条件も改善されて法規上も建替え可能になること、従前の区画間に係る斜線規制等も外れて建築の自由度も増すこと、規模の経済によって耐火造の工事費も下げられること、といった理由から単独建替えよりも有利と考えられる。

TARGETED REMOVAL OF FIRE SPREADING WOODEN BUILDINGS

Kazuhisa ORiyAMA and Akira KOTAKI***

*Chief Executive Officer, archinet,inc.

**Deputy Director-General, Kyushu Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

A predicted intense earthquake in Tokyo is expected to generate widespread fire in areas densely crowded with wooden buildings and take a heavy toll of human lives. Fire prevention measures have been taken in blocks to improve main roads and high-rise buildings have been constructed around areas crowded with wooden buildings. However, it is not possible to proceed with fireproofing redevelopment of whole blocks because it is difficult to obtain a consensus among the large number of landowners. In contrast to the whole-block approach, we find scale-free power law distribution on fire spreading networks and have proved that targeted removal of a few adjacent buildings can prevent fire spread effectively.

We have acquired our hypotheses from the development process of regions densely crowded with wooden buildings after the great Tokyo air raid of World War 2. The further roads branched out, the more densely smaller wooden houses were built along them. The process indicates preferential linking that grows scale-free networks. The hypotheses is verified by network analysis that power law notably explains degree distribution of fire spreading networks in the 84 highest risk regions and wards that consist of each flammable wooden building as a node and its links to other nodes within fire spreading distance.

The result leads to an effective targeted removal approach to those scale-free networks that are vulnerable. Then we compute the percolation critical exponents and conclude that fire spreading networks can be effectively disrupted by targeted removal of fire-spreading wooden buildings with six and more degree. The targeted removal approach for the highest risk 84 districts in Tokyo is designed to prevent fire spread by removing 10-30% of flammable buildings, in contrast to random removal of 40-70% of flammable buildings. As a whole, the targeted removal of 15,391~25,362 buildings among 79,595 could possibly prevent fire spreading in the highest risk districts of Tokyo.

Furthermore, a detailed area survey and assortative coefficient demonstrates that each targeted building adjoin by several units. It denotes that cooperative rebuilding, among which sites might not connect roads legally, will work on a targeted removal approach more effectively than individual rebuilding and whole block redevelopment.

These observations are considered as a fruitful application of network analysis on urban disaster prevention. A fire-spreading network graph enables stakeholders to recognize risk by each unit and the importance of targeted removal intuitively. In order to shape solutions, a forthcoming survey will examine the feasibility of the cooperative rebuilding method, to design mechanisms to encourage landowners to participate in cooperatives, and to introduce design codes to generate better urban environments.

(2014年5月2日原稿受理, 2015年1月19日採用決定)