

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

矩形の空隙が不均一に分布する薄い可燃性固体の平面上燃え拡がり

Two-Way Flame Spread along a Thin Combustible Solid with Randomly Distributed Square Pores

工藤 翔平・伊藤 昭彦*・鳥飼 宏之

KUDO, Shohei, ITO, Akihiko*, and TORIKAI, Hiroyuki

弘前大学大学院理工学研究科 〒036-8561 弘前市文京町3
Graduate School of Hirosaki University, Hirosaki 036-8561, Japan

2012年1月1日受付; 2012年6月1日受理 / Received 1 January, 2012; Accepted 1 June, 2012

Abstract : Flame spread route in fire strongly depends on distribution of combustible areas. Two types of scenario are considered in flame spread when combustible areas randomly distributed; one case is that flame spreads and combustible areas burn out, and the other case is that flame self-extinguishes on the way. The threshold of burning out or self-extinguishing may be determined by quantity of combustible areas and their placement in space. Our objectives are to clarify the characteristics and threshold of flame spread based on the percolation theory. In this paper, we examine two-way flame spread in open air along a thin combustible solid with randomly distributed square pores, which are considered as noncombustible space. Experimental results show that the flame can not spread any way and completely self-extinguish over 65% of porosity. This threshold is higher than that of 60% for one-way flame spread which was previously examined. However, instead of porosity, the threshold of flame spread is decided by the number of slits, which is made by connecting pores each other. The slit for two-way flame spread needs to extend over two-way direction. In addition, we obtained the ratio of unburned area (unburned area / total combustible area) by means of counting the unburned area after flame spread test, which might be useful to predict urban hazards by fire. We found that the ratio of unburned area is linearly decreasing to the flame-spread probability.

Key Words : Flame spread, Combustible solid, Porosity, Flame-spread probability, Percolation theory

1. 緒言

大規模地震発生後、市街地で複数の火災が発生することがあり、これが更なる被害をもたらす。市街地では、建物や植木などの可燃域と、道路や空き地などの空間としての不燃域が不均一に分布しているため燃え拡がりは一様ではなく、さらに地形や風向きなどの条件が加わるため、燃え拡がり経路を予測することは困難となる。このことが逃げ遅れの原因につながると考えられる[1]。したがって、人命を守るためには市街地での非一様な火災の拡がりを予測したハザードマップを作製し、これをもとにした避難経路などの安全対策を確立することが重要である。さらには、地震や火災に対する被害を最小限にする、より安全な市街地を構築するための都市計画に活かされることが望まれる。

日本の多くの市街地が木造家屋であることと相まって、古くから延焼に関する研究がなされてきた[2,3]。とりわけ、

関根[3]による模型実験では、地表の区画面積に対する可燃物(可燃物として木材クリブを設置)の無い空地面積を空地比と定義し、この値と延焼との関係を風向をパラメタとして論じられた報告は興味深い。最近になって市街地火災や森林火災の燃え拡がり(延焼)予測にパーコレーション理論を応用した研究がいくつか成されている[4-8]。パーコレーション理論の燃焼現象への応用についての概説は文献[9]を参照するとして、ここでは市街地の燃え拡がりを簡単なモデルを用いて説明する。Fig.1(a)と(b)は、ある市街地の航空写真から建物を可燃域、道路や空き地などの空間を不燃域として二値化したものである。建物を可燃域としたのは建造物自体が不燃構造であってもその内部に可燃物がある場合、延焼の可能性がありうるからである。ここでは不燃域である道路や空き地と明確に分けるため、建物を全て可燃域とみなす。全面積に対する可燃域の割合を R ($R \leq 1$)、不燃域の割合を $(1 - R)$ とする。Fig.1(a)で示すように可燃域の割合がある値 R_{th} より大きいと火災は鎮火することなく広範囲に燃え拡がる ($R > R_{th}$)。一方、(b)で示したように、

* Corresponding author. E-mail: aito@cc.hirosaki-u.ac.jp

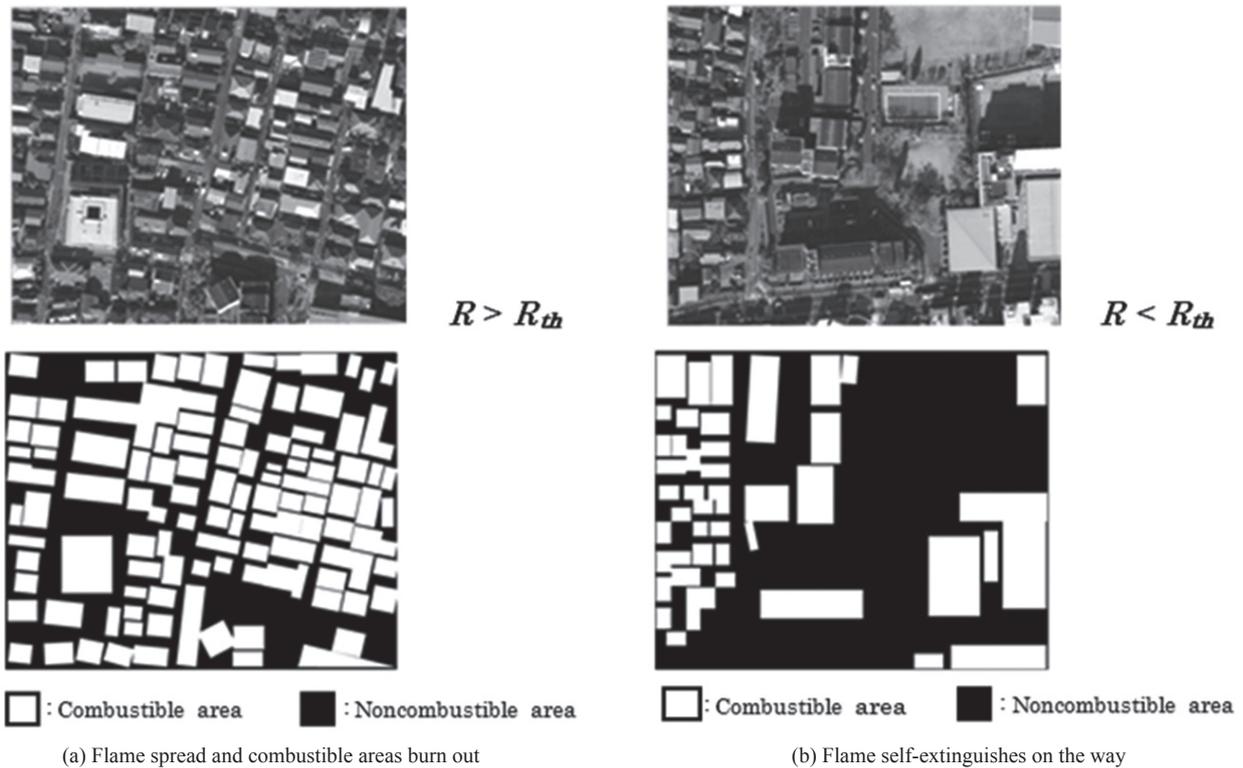


Fig.1 Distribution of combustible / noncombustible areas in the city

$R < R_{th}$ の場合は不燃域が広くつながる箇所ができ、火災は途中で鎮火する。このように、ある値を境に様相が一変する臨界現象を確率的に表わした理論をパーコレーション理論と呼ぶ。既存のパーコレーション理論[10,11]を燃え拡がりに適用すると、不燃域の大きさがどのような場合でも、それがつながりさえすれば燃え拡がり確率はゼロとなり、必ず燃え止まることになる。しかし、不燃域とした空間が狭い、または火炎のスケールが大きい場合に空間を超えて飛び火して燃え拡がるなど、既存のパーコレーション理論に適合しない場合が存在する。著者らは、Fig.2に示すように可燃域間距離: d と火炎影響距離: L_h との比であるスケール比: $S \equiv d/L_h$ をパーコレーション理論に導入することで、様々な大きさの不燃域が存在する可燃域間の燃え拡がりを予測することを試みている。すなわち、本研究は実験室規模の小さなスケールからスタートして、実規模に近い模型実験結果と比較し、最終的には地形や風速などの環境条件や3次元可燃物を考慮した不連続可燃物間の延焼メカニズムとスケール則を解明することを目的としている。

第一段階として、著者らは不燃域として様々な大きさの空隙を長方形のろ紙に分布させた場合の燃え拡がり実験から燃え拡がり確率を調査してきた[12-16]。燃え拡がり確率とは、試料の一端から他端に燃え拡がった回数を試行回数で除した値で定義している。その際に燃え拡がり方向は試料の一端から他端に向かう1方向燃え拡がりで行われた。本報では Fig.3 に示すように正方形の可燃物に矩形の空隙を形成した可燃物の平面上燃え拡がりに対する燃え拡がり

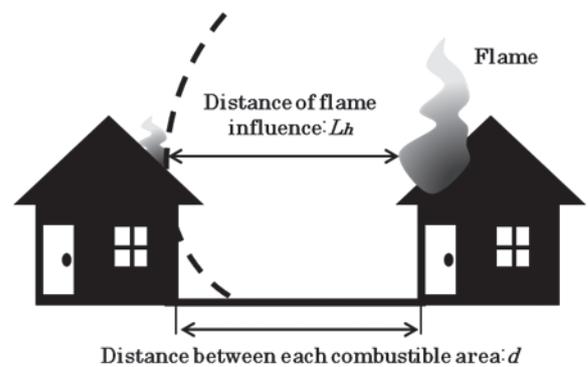


Fig.2 Flame spread model

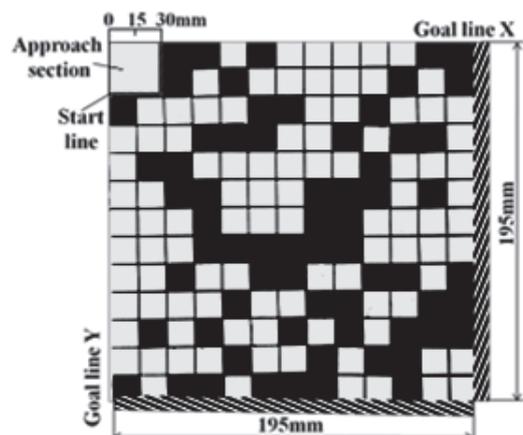


Fig.3 Subject of the experiment

確率と空隙率の関係を実験的に調査[16]した。これまでの研究[12-15]との主な相違はゴールラインが X と Y の 2 つがある, 2 方向燃え拡がりにした点である。ここでは, 燃え拡がりのゴールラインが 2 方向にある場合を 2 方向燃え拡がり (two-way flame spread) と定義し, これまでの 1 方向燃え拡がり (one-way flame spread) と区別する。また, 比較の実規模に近いこれまでの実験結果と比較検討する。

2. 実験装置および実験方法

2.1. 格子の大きさの選定

パーコレーション理論では検査領域を格子で区切り, そのつながりについて議論する。本実験も同様に燃え拡がり領域を格子で区切った。格子の大きさの選定は以下の方法で行った。これまでに火炎がろ紙上を燃え拡がる際に空隙をジャンプする現象が確認されている[12]。これは火炎影響距離: L_h に対して空隙の大きさが小さいことに起因する。燃え拡がり実験に先立ち, 格子の大きさ (空隙の大きさ) を決定するために以下のジャンプ実験を行った。試料寸法が長さ 200 mm, 幅 60 mm のろ紙に様々なスリット幅の空隙を形成し, 各スリットに対して 10 回ずつ実験を行った。スリットを飛び越し燃え拡がった場合を火炎のジャンプ可能, スリットを飛び越さず途中で燃え止まった場合を火炎のジャンプ不可能とし, 火炎のジャンプ確率を次式から求めた。

Flame jumping probability [%]

$$= \frac{\text{Number of flame jumping successes}}{\text{Number of flame jumping tests}} \times 100 \quad (1)$$

火炎のジャンプ確率とスリット幅の関係を Fig.4 に示す。これより, スリット幅 4 mm まで火炎はスリットをジャンプし燃え拡がった。しかし, 5 mm 以上では徐々にジャンプができる確率が減少し, 8 mm 以上になると完全に火炎のジャンプ現象は確認されなくなった。本実験では, これまでの研究の結果[12,13]と比較するために格子の大きさを火炎が常にジャンプできる 4 mm と火炎が常にジャンプできない 15 mm の 2 種類を選定した。

2.2. 実験装置

本研究で用いた実験装置概略を Fig.5 に示す。実験試料にはろ紙 (ADVANTEC No.131, 厚さ 0.25 mm, 灰分 0.1 %) を用いた。本実験で用いた試料寸法は空隙の大きさ 15×15 mm の場合, 長さ 195 mm, 幅 195 mm (格子 13×13 マス) である。また空隙の大きさ 4×4 mm の場合, 格子のマス数 (13×13 マス) を合わせるため長さ 52 mm, 幅 52 mm である。実験装置内にある試料図は黒の正方形が空隙 (不燃域), 白の正方形がろ紙 (可燃域) である。試料は水平面を保つよ

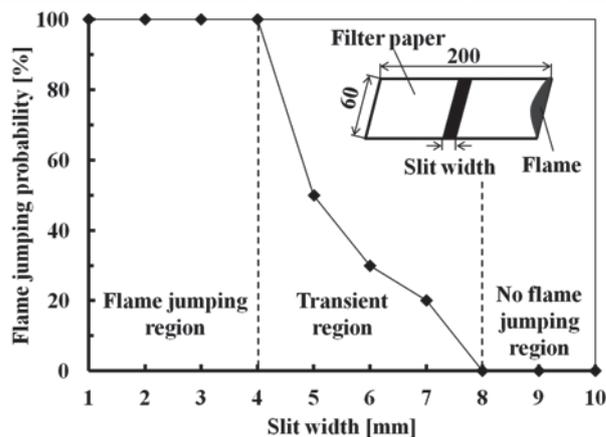


Fig.4 Relationship between flame jumping probability and slit width

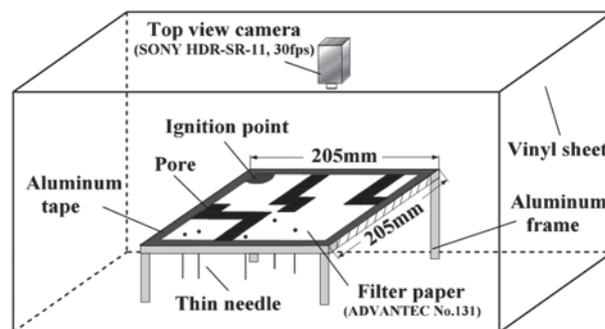


Fig.5 Schematic of the experimental apparatus

うにアルミフレームに張力をかけた状態で取り付けられている。また試料は四辺を幅 5 mm のアルミテープによって装置に固定されている。空隙を形成した際, 試料が空隙に囲まれ抜け落ちるのを防ぐために細い針で試料を支えた。15×15 mm の試料を支える際に $\phi = 0.7$ mm の細い針を, 4×4 mm の試料には $\phi = 0.3$ mm の細い針を用いた。なお, これらの細い針による熱損失は小さく, 平均の燃え拡がり速度をわずかに低下させるものの, 燃え拡がり確率には影響していないことを確認している。また, 周囲の外乱が燃え拡がりに影響を及ぼさないように実験装置をビニールシートで覆った状態で全ての実験を行った。ビニールシートの覆いは実験装置に比べて十分大きく大気中 (酸素濃度 21 %) での実験と同等である。

2.3. 実験方法

実験は試料に設けた着火点にトーチを用いて着火させ, 火炎がスタートラインを通過し, ゴールラインまで燃え拡がる様子を試料面垂直上方に設置したビデオカメラ (SONY HDR-SR11, 30fps) によって撮影した。本実験では 1 つの空隙率に対して, 空隙の分布が異なる 5 パターンの試料で 2 回ずつ計 10 回行った。燃え拡がるか燃え止まるかは X と Y 方向のどちらか一方でもゴールラインに到達したか否かで判定した。本実験は空隙率 40 % から燃え止まるまで空

隙率を増加させ実験を行った。空隙の配置は Microsoft の Excel により乱数を用いてランダムに選択した。空隙率は試料面積に対する空隙面積の割合から算出し、次式で定義した。

$$\text{Porosity [\%]} = \frac{\text{Total pore area [mm}^2\text{]}}{\text{Test sample area (length}\times\text{width)[mm}^2\text{]}} \times 100 \quad (2)$$

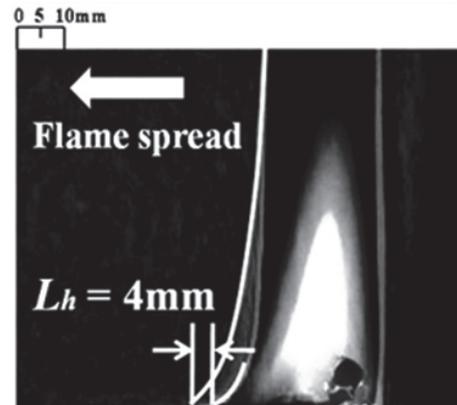
3. 実験結果と考察

3.1. 予熱帯とスケール比

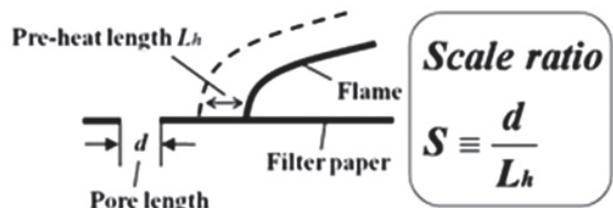
火炎が空隙をジャンプできるか否かは空隙の 1 辺の大きさ: d と予熱帯の長さ: L_h の関係で決まる。予熱帯は火炎から未燃部へ熱輸送が生じる範囲で、予熱帯の長さは予熱帯の先端が自立的な燃焼を開始する火炎影響距離として定義する。火炎が空隙をジャンプするには、少なくとも火炎影響距離が空隙の大きさ以上になる必要があるが、十分条件としての L_h は Fig.4 で示された火炎のジャンプが確実に生じるスリット幅とするのが妥当である。ここで、火炎がジャンプできるか否かの条件をスケール比: $S \equiv d/L_h$ の定義をもとに定める。すなわち、空隙の大きさ: $d = 4 \text{ mm}$ の場合は $S \leq 1$ の範囲に入り、火炎はジャンプ可能、 $d = 15 \text{ mm}$ の場合は $S > 1$ となり、ジャンプ不可能となる。一方、スケール効果を検討する上で、火炎のジャンプ可能となる距離と予熱帯の長さとの関係を明確にする必要がある。本実験のようにスケールが小さい場合は、予熱帯を決定するのはおもに対流熱伝達であるので、シュリーレン法を用いて火炎前方の温度場を可視化した。その結果を、Fig.6(a) に示す。水平燃え拡がりでは上面と下面で火炎影響距離が異なるが、ここでは通常、可燃物が地面より上にある火災現象を視野に入れて、Fig.6(b) で示した上面での予熱帯の長さを火炎影響距離に選ぶ。この距離は約 4 mm であり、火炎がジャンプ可能なスリット幅に一致する。対象とする実験のスケールが大きくなると火炎前方への伝熱過程は対流熱伝達から放射に移行し、それに伴って火炎の影響距離も変化するが、スケール比を同等にすることで、パーコレーション理論をもとにした燃え拡がり確率の議論ができると考えられる。実験規模の燃え拡がり確率に与える実験規模の影響については 3.6 節で検討する。

3.2. 燃え拡がり速度

Fig.7 に燃え拡がり速度と空隙率の関係を示す。燃え拡がり速度はスタートラインからゴールラインまでの最短距離(実験試料の 1 辺の長さから助走区間の長さを引いた距離)を、火炎先端がスタートライン通過してから X または Y のゴールラインに到達するまでの時間で除した値とし、次式で定義した。



(a) Image visualization by schlieren method



(b) Relationship between pre-heat length and pore length

Fig.6 Flame spread along a thin filter paper

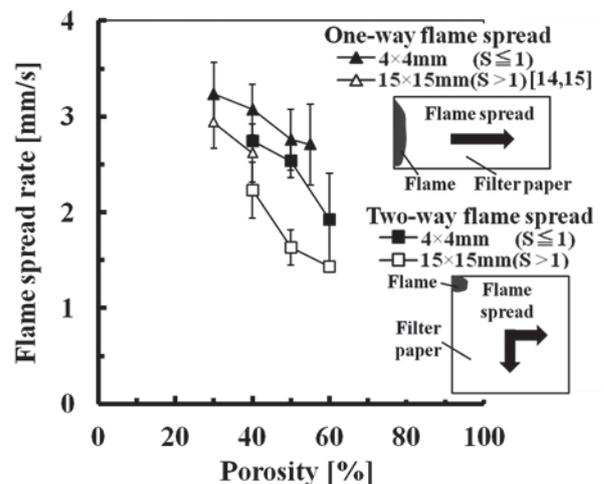


Fig.7 Relationship between flame spread rate and porosity

Flame spread rate [mm/s]

$$= \frac{\text{Minimum distance between start line and goal line [mm]}}{\text{Flame spread time interval from start line to goal line [s]}} \quad (3)$$

Fig.7 の各プロットは実験回数 10 回の平均速度、エラーバーは標準偏差を表している。また、燃え止まった場合に燃え拡がり速度は定義できないため Fig.7 には表記されない。Fig.7 より、同じスケール比で比較すると 2 方向燃え拡

がりの方が1方向燃え拡がりよりも平均速度が遅くなった。これは燃え拡がりの経路が増加したことで1方向に空隙がつながったスリットが形成されても別の方向に燃え拡がることができるためである。すなわち、燃え拡がる際に片方の経路がスリットにより燃え止まっても他方の経路にスリットがない場合は火炎が回り道をして燃え拡がることがあるため、平均的な燃え拡がり速度が低下したものである。また、2方向燃え拡がりの空隙率40-50%では $S > 1$ の方が $S \leq 1$ よりも燃え拡がり速度が遅い。これは $S > 1$ では火炎が空隙をジャンプできずに回り道するのに対して、 $S \leq 1$ では火炎が空隙をジャンプすることでゴールラインまでの距離が短縮したことによる。

3.3. 燃え拡がり確率

燃え拡がり確率は火炎先端がスタートライン通過後、XまたはYのどちらかのゴールラインに到達した回数を各実験回数で除した値として、次式で定義した。

$$\text{Flame-spread probability [\%]} = \frac{\text{Number of flame spread successes}}{\text{Number of flame spread tests}} \times 100 \tag{4}$$

燃え拡がり確率と空隙率の関係を Fig.8 に示す。スケール比によらず2方向燃え拡がりの方が1方向燃え拡がりよりも燃え拡がり確率が増加した。これは前述のごとく燃え拡がりの経路が増加したことで、たとえ1方向が燃え止まったとしても他方へ燃え拡がる可能性があるためである。一方、燃え拡がり確率に与えるスケール比の影響は1方向燃え拡がりの場合より小さい。これは、2方向燃え拡がりでは火炎がジャンプできない空隙でも回り道をして燃え拡がる可能性があるため、火炎が空隙をジャンプできるか否かの違いが1方向燃え拡がりより小さいためと考えられる。

3.4. 燃え拡がりの軌跡と平均スリット数

Fig.9 に $S > 1$ での2方向燃え拡がりの軌跡を、(a)空隙率40%と(b)空隙率65%とを比較して示している。図中の黒い実線は火炎がスタートラインを通過してから2秒毎の燃え拡がりの軌跡を、白い一点鎖線は空隙がつながったスリットを表している。空隙率40%の燃え拡がりには Fig.9(a) に示すとおりゴールライン X, Y 両方に燃え拡がった。一方、空隙率65%の燃え拡がりには Fig.9(b) に示すとおり、ゴールライン X, Y どちらにも燃え拡がらなかった。2方向燃え拡がりでは、ゴールラインが2辺あるため、燃え止まるには、ゴールライン以外の2辺にまたがるL字形スリットの形成が必要となる。このL字形スリットの形成は、1方向燃え拡がりのI字形スリットに対応する。

そこで、試料に形成されるスリットの数を実験回数で

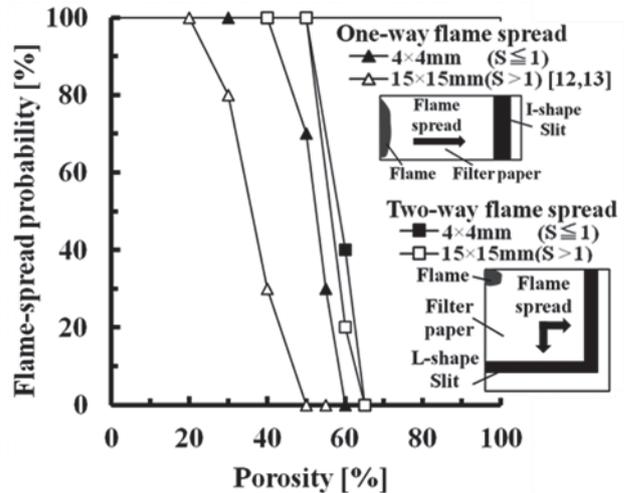
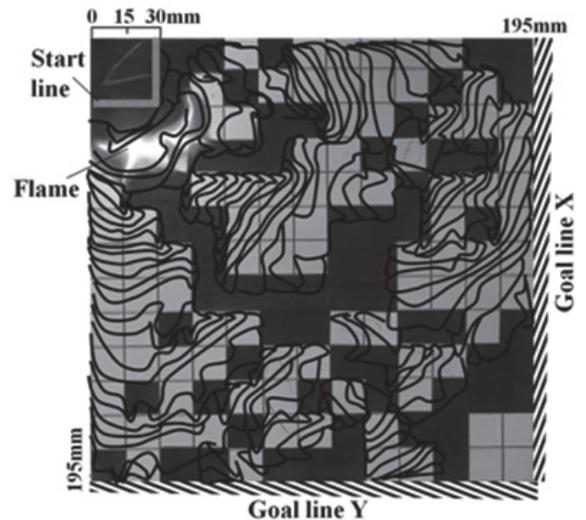
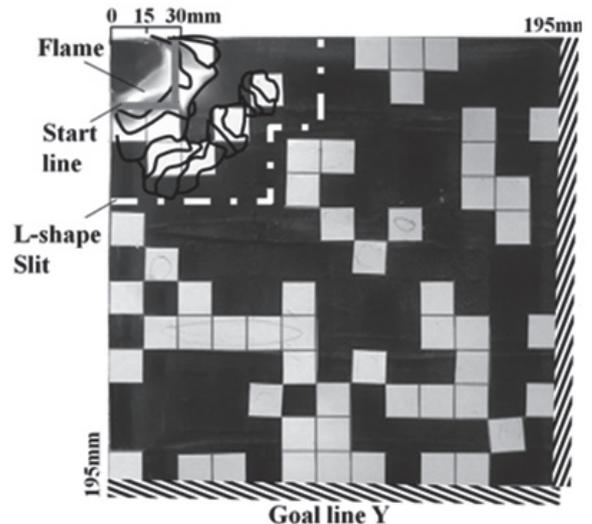


Fig.8 Relationship between flame-spread probability and porosity



(a) Porosity 40%



(b) Porosity 65%

Fig.9 Flame spread trajectory

除した値を平均スリット数とし, 次式で定義した.

$$\text{Averaged-number of slits [-]} = \frac{\text{Number of slits}}{\text{Number of flame spread tests}} \quad (5)$$

スリット数と空隙率の関係を Fig.10 に示す. これより, 空隙率が増加するにつれてスリット数が増加していることがわかる. ただし, $S \leq 1$ の結果は, 次の理由から格子数を 20×20 に増やして得た結果である. 当初の実験では 4×4 mm の格子 ($S \leq 1$) も 15×15 mm の格子 ($S > 1$) と同じ格子数 (13×13) で実験を行ったが試料全体の寸法が小さく, これが予熱帯の大きさに影響することが判明した. すなわち, 4×4 mm の格子 ($S \leq 1$) でもスケール比が必ずしも 1 以下でない場合がある. そこで, 格子数を 20×20 に増やして同様の実験を行った. まず, 次の方法で思考実験を行い, 後に燃え拡がり実験により確かめた. 思考実験とは空隙の配置を Excel により乱数を用いてランダムに選択した後, スリットが形成されているかを目視により確認し, 燃え拡がるか燃え止まるかを判断する実験方法である. 思考実験は空隙率 40% から燃え止まるまで各空隙率毎に 20 回ずつ行った. また, 思考実験の結果が実際の燃え拡がりとは相違がないか確認するために, 一部の試料で実際に燃え拡がり実験も行った. その結果, 格子数 20×20 では思考実験と実際の燃え拡がり実験は一致した. 一方, 15×15 mm の格子については, 格子一つの可燃域も大きいため, 格子数 13×13 で思考実験と実際の燃焼実験の結果は一致し, これで十分であると考えられる.

以上の結果をもとに, 燃え拡がり確率と平均スリット数の関係を求めると Fig.11 のようになる. Fig.11(a) は 2 方向燃え拡がりで, スリット数は L 字形スリットを形成した数である. 図中の $S \leq 1$ は格子数 20×20 , $S > 1$ は格子数 13×13 の結果である. また, Fig.11(b) は 1 方向燃え拡がりでは, 1 字形スリットの数である. Fig.11(a) より $S > 1$ の場合, 燃え止まりに必要な平均スリット数は 1 に漸近した. これは, 空隙が 15 mm と広く, 火炎が空隙をジャンプできず, 燃え止まるには 1 列のスリットで十分であることを意味する. 一方, $S \leq 1$ の場合, 燃え止まるためには, 少なくとも 2 列以上のスリットが存在する必要があるため, 平均スリット数は 2 に漸近した. しかし, 本実験では, 必ずしも 2 列が隣接したスリットである必要はなかった. これは, 火炎が 1 列のスリットをジャンプできても, 次の 1 列のスリットに向かう時に可燃域が少なく, 結果的に火炎がジャンプできなかったことに起因している. これらより, 2 方向燃え拡がりでもその確率はスリット数に依存し, とりわけ, 燃え拡がるか燃え止まるかの閾値 (燃え拡がり確率ゼロ) はスリット数で決定されるものと考えられる.

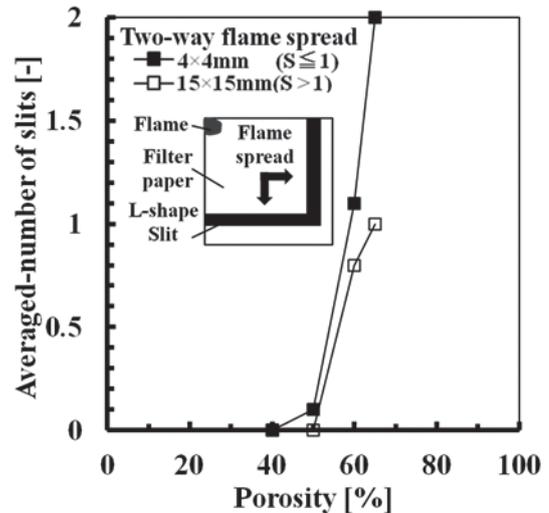
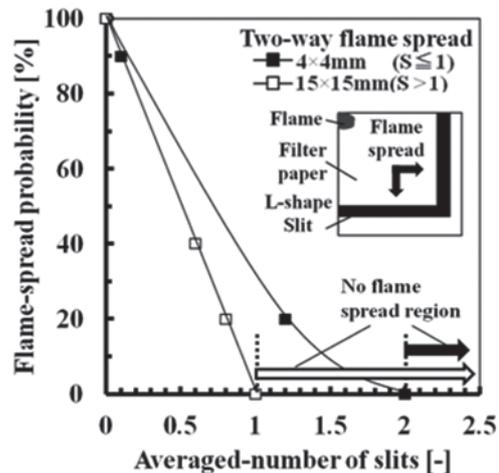
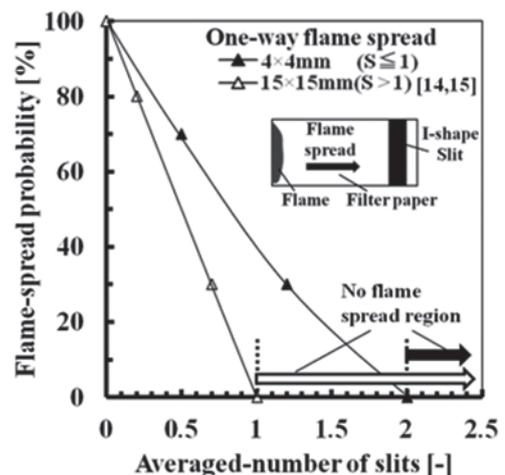


Fig.10 Relationship between averaged-number of slits and porosity



(a) Two-way flame spread



(b) One-way flame spread

Fig.11 Relationship between flame-spread probability and averaged-number of slits

3.5. 残存率

燃え拡がり確率が変化すると、試料が燃え残る割合も変化した。そのため、燃え拡がり確率が定まれば火災における被害の度合いを予測することができると考えられる。ここで、残存率を可燃域のうち燃え残った面積を可燃域の面積全体で除した値とし、次式で定義した。

Ratio of unburned area [%]

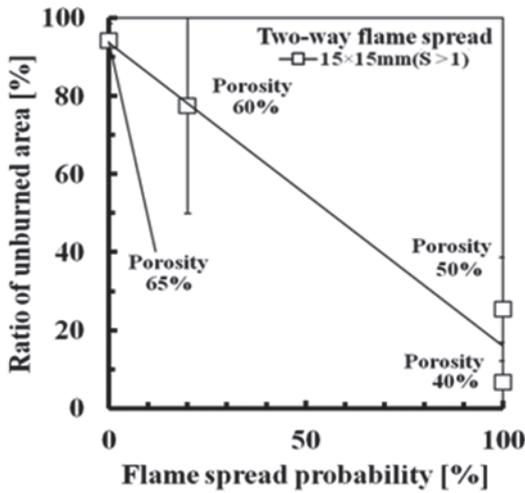
$$= \frac{\text{Unburned area [mm}^2\text{]}}{\text{Total combustible area [mm}^2\text{]}} \times 100$$

(6)

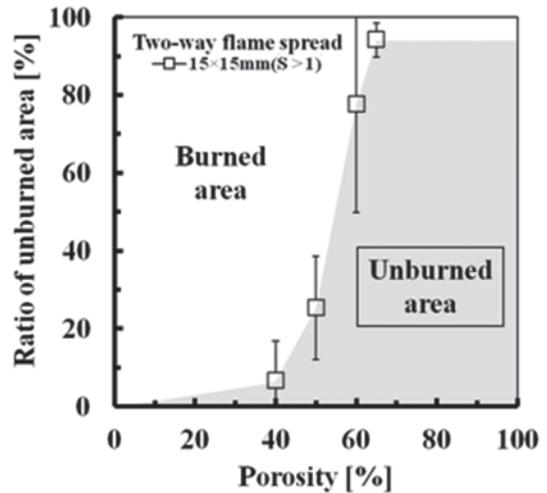
残存率と燃え拡がり確率の関係を、(a) $S > 1$ の場合と、(b)

$S \leq 1$ の場合に分けて Fig.12 に示す。Fig.12 のエラーバーは標準偏差を表す。残存率は燃え拡がり確率の上昇と共にほぼ直線的に減少することがわかる。スケール比によらず燃え拡がり確率 0 % の場合、残存率は 100 % に近い値となった。残存率が 100 % に至らなかった理由は、Fig.9(b) のようにスリットに達する前に着火地点近傍の可燃域が少しだけ燃え拡がる場合があるためである。Fig.12(a) より、 $S > 1$ の場合、燃え拡がり確率 100 % での残存率が空隙率 40 % と 50 % では異なった。そこで、残存率と空隙率の関係を調べた結果を Fig.12(a) に示す。Fig.13 の各プロットは実験回数 10 回の平均の残存率、エラーバーは標準偏差を表す。

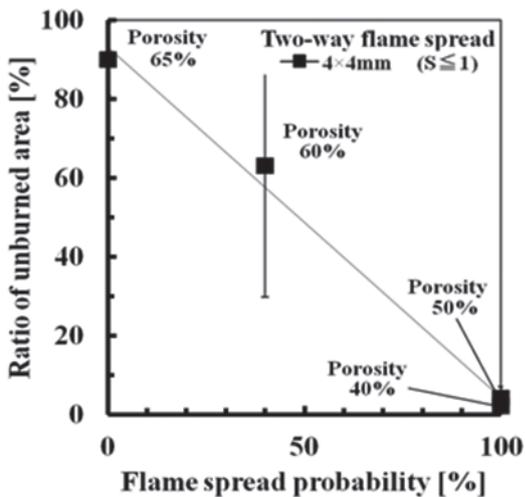
空隙率 40 % では Fig.9(a) のようにほぼ全体に燃え拡がる。しかし、空隙率が増加すると空隙に囲まれて燃えずに



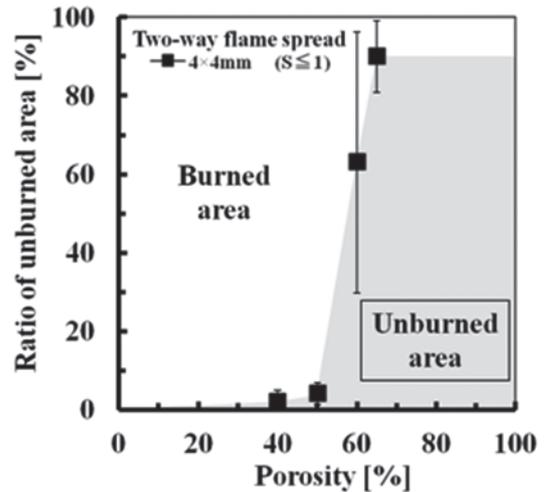
(a) Pore length $d = 15\text{mm}$ ($S > 1$)



(a) Pore length $d = 15\text{mm}$ ($S > 1$)



(b) Pore length $d = 4\text{mm}$ ($S \leq 1$)



(b) Pore length $d = 4\text{mm}$ ($S \leq 1$)

Fig.12 Relationship between ratio of unburned area and flame-spread probability

Fig.13 Relationship between ratio of unburned area and porosity

残る、孤立した可燃域が生じる。そのために残存率は空隙率と共に増加する。空隙率 60 % になると空隙のパターンによってはほぼ全体に燃え拡がる場合と途中で燃え止まる場合があるため、大きなばらつきが生じた。一方、 $S \leq 1$ の場合は Fig.12(b) より燃え拡がり確率 100 % での残存率のばらつきは小さい。残存率と空隙率の関係を Fig.13(b) に示す。ばらつきが小さい理由は燃え拡がりを阻害する空隙があっても火炎がジャンプし、たとえ 1 方向が燃え止まったとしても他方へ燃え拡がり続けたためである。 $S \leq 1$ の場合であっても空隙率 60 % 付近では大きなばらつきが見られる。これは空隙率 60 % 付近では、空隙の分布によって、全実験回数のうち数回燃え拡がる状態が存在したためである。また、空隙率 60 % 以上になるとスリットが形成され始めるため燃え拡がり確率は減少し、残存率は増加する。空隙率 65 % では燃え止まり、スケール比によらず残存率は 100 % に近い値となった。Fig.13 を燃え尽きる領域 (白い領域) と燃え残る領域 (灰色の領域) に分けると $S > 1$ の方が $S \leq 1$ よりも燃え残る領域が多い。特に、空隙率 40~50 % では $S \leq 1$ の残存率がほぼゼロであるのに対し、 $S > 1$ では残存率が 10~30 % となる。

3.6. 実規模に近い実験結果との比較

関根[3]によって実施された地表面 18 m×16 m 区画での模型実験と比較検討する。可燃物として断面 3.6 cm×3.6 cm、長さ 1 m の 5 段組みクリブを点在させての延焼実験であり、地表面区画の大きさおよび可燃物の大きさからして実規模に近い模型実験と判断される。すなわち、本実験とのスケールの違いから、火炎の影響範囲 (延焼距離) を決定する伝熱形態は対流よりも放射が支配的になると考えられる。野外での実験で風速は平均で 6 m/s であったため、延焼可能な空地比は風向きによって異なる。ここでの空地比は (クリブの無い空地の面積)/(その区画の面積) で定義され、本報での空隙率と同等である。ここで注目すべき点は、最も延焼しやすい風下方向であっても空地比 60 % で延焼が止まっており、この値は本実験結果ならびにパーコレーション理論から予測される閾値の 60 % に一致することは興味深い。延焼に関するスケール則を明確にするには更に可燃物のサイズや立体火源を用いた実験が必要であるが、実験のスケールによる伝熱形態の違いがあってもパーコレーション理論から燃え拡がり確率や残存率の予測が可能であることを示唆している。

以上より、市街地の情報 (航空写真や地図情報) から建物などの可燃域と道路や空き地などの不燃域を二値化し、これをスケールダウンした実験や思考実験を用いることで、火災が生じたときの被害の度合いが予測可能と考えられる。特に不燃域の割合が 60 % 以上と 60 % 未満では残存率に大きく差が生じる。これを火災に対する被害を最小限にするための都市計画に活かすことが重要であると考えられる。

4. 結言

本研究では、2 方向燃え拡がりを 1 方向燃え拡がりと比較して検討すると共に、新たに残存率と燃え拡がり確率の関係を実験的に検討し、以下の知見を得た。

1. 燃え拡がりの平均速度は、2 方向燃え拡がりの方が 1 方向燃え拡がりよりも遅い。これは燃え拡がりの経路が増加したために火炎が不燃域を避けながら燃え拡がり続け、結果としてゴールラインに到達するまでの時間が長くなったことによる。
2. 燃え拡がり確率は、2 方向燃え拡がりの方が 1 方向燃え拡がりよりも増加する。これは燃え拡がりの経路が増加したことで、燃え止まりにくくなり空隙がゴールライン以外の辺でつながった L 字形スリットが形成されなければ燃え止まらないためである。
3. 燃え止まりはスリットの形成に依存する。2 方向燃え拡がりでは、ゴールライン以外の 2 辺にまたがる L 字形スリットを形成する必要がある。L 字形スリットの数で整理すれば 1 方向燃え拡がりと同様に議論できる。すなわち、 $S > 1$ では燃え拡がり確率ゼロ (燃え止まり) は平均スリット数 1 に漸近し、 $S \leq 1$ では平均スリット数 2 に漸近する。
4. 残存率はスケール比によらず不燃域の割合がパーコレーション理論での閾値に近い 60 % 付近で急激に増加した。すなわち、市街地での火災の被害を最小限にするためには不燃域の割合を 60 % 以上にすることが望まれる。

References

1. 総務省消防庁, 平成 22 年度版消防白書, (2011).
2. 星野昌一, 建築雑誌, 49-597 (1935), 447.
3. 関根孝, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), (1976), 1803.
4. G. Albinet, G. Searby and D. Stauffer, *J. Physique*, 47, (1986), 1.
5. T. Beer, *Combust. Sci., Technol.*, 73, (1990), 297.
6. 加藤孝明, 小出治, 日本建築学会計画系論文集, 516, (1999), 185.
7. 加藤孝明, 久貝壽之, 小出治, 南部世紀夫, 出原至道, 日本建築学会計画系論文集, 525, (1999), 241.
8. 関本, 工藤, 平成 20 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.232-233, (2008).
9. 梅村章, 日本燃焼学会誌, 第 53 巻 165 号, pp.145-152, (2011).
10. 小田垣 孝, つながりの科学, 裳華房, (2000).
11. Stauffer, D. and Aharony, A., 小田垣 孝 (訳), パーコレーションの基本原理解, 吉岡書店, (2001).
12. 渡邊, 伊藤, 鳥飼, 第 47 回燃焼シンポジウム公演論文集, pp.292-293, (2009).

13. Watanabe, Y., Ito, A., Torikai, H., "Effect of Porosity on Flame Spread along a Thin Combustible Solid Randomly Distributed Pores", Sixth International Symposium on Scale Modeling, Proceedings, (2009).
14. 工藤, 伊藤, 鳥飼, 渡邊, 平成 22 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.360-361, (2010).
15. Watanabe, Y., Ito, A., Torikai, H., "Flame spread along a thin solid randomly distributed combustible and noncombustible areas", Proceedings of The Combustion Institute, 33, pp.2449-2455, (2011).
16. 工藤, 伊藤, 鳥飼, 平成 23年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.206-207, (2011).