不規則に配置された可燃性立方体群の燃え拡がりに対する有限サイズスケーリング Finite size scaling of flame spread along the randomly arranged combustibile cubes

○学 吉田 行伸 (弘前大院) 正 伊藤 昭彦 (弘前大院) 正 鳥飼 宏之 (弘前大院)

Yukinobu Yoshida, Akihiko Ito and Hiroyuki Torikai

Hirosaki University, 3 Bunkyo, Hirosaki 036-8561

The objective of this study is to predict the flame spread probability over urban fire by the ratio of non-combustible area to combustible area (porosity). This paper described the experimental results of flame spread experiments along randomly arranged combustibile cubes. Flame spread experiments conducted with changing porosity and size of experiment region. Porosity of flame spread probability set to 0 increased with the increase of experiment region. Subjected to finite size scaling in experimental results and examined the influence of number of grid on flame spread probability.

Key Words: Flame spread, Porosity, Percolation theory, Finite size scaling

1. 緒言

大規模地震発生後、市街地では同時多発的に火災が発生することがあり、火災の延焼により被害が拡大する。火災による二次被害を低減するには、避難経路の確保が重要であるが、火災の延焼予測は困難である。そこで、本研究では市街地を可燃域が離散的に存在する系として、市街地の延焼がそれらの可燃域を火炎がつなぎ、拡がることで生じる現象としてとらえ、実験室規模の模擬実験から火災の延焼を予測する手法の構築を目指す。実験結果の解釈にはスケール比 S ($\equiv d/l$, 不燃間距離: d , 火炎の予熱長さ: l) を導入したパーコレーション理論を基礎としている⁽¹⁾⁽²⁾。

パーコレーション理論は、空間上にランダムに分布する点のつながりを確率的に表した理論である。また、パーコレーション理論は無限に大きな領域を対象とするのに対し、市街地火災の延焼および本実験は有限領域に限られる。このため、パーコレーション理論を延焼予測に応用する上で有限領域の議論が必要となる。本報では、可燃性試料を用いた燃え拡がり実験および思考実験から空隙率の変化に伴う燃え拡がり確率の変化を調査した。これらの実験結果から、実験領域の大きさが燃え拡がり確率に与える影響をパーコレーション理論を基に検討した。実験領域の大きさと燃え拡がりの関係に対してスケーリングを行うことで、燃え拡がりに与える領域のサイズ効果を明らかにした。

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概略を示す。可燃性試料として、ろ紙 (ADVANTEC, No131, 厚さ 0.25 mm) を一辺 20 mm の立方体に組み立てたものを使用した。Excel で発生させた乱数により試料配置パターンを決定し、不燃平板上に試料および空隙を配置した。試料への着火にはトーチにより行い、燃え拡がりの様子を上部に設置したビデオカメラ (SONY, HDR-11, 30 fps) で撮影した。実験領域をビニールシートで覆うことにより外乱の影響を防いだ。

実験領域は図 2 のように正方格子状とし、格子間隔は 20mm とした。実験領域の大きさは 10×10 マスから最大で 100×100 までの範囲として実験を行った。着火位置は実験領域の角の試料とし、領域の端から端まで火炎が燃え拡がった場合を燃え拡がり成功とする。これまでの研究で一辺 20mm の試料上の火炎は 20 mm の空隙を隔てて燃え拡がることができないことを確認している⁽³⁾。図 2(b) の黒線は着火後 10 秒毎の火炎の進行位置を示しており、火炎の進行は図 2(a) の破線 (スリット) の位置で止まっていることか

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

Fig.2 (a) Schematic of test sample placement, (b) Flame spread trajectory of same sample placement

Fig.3 Relationship between limit distance for flame spread and sample width

ら、試料の配置パターンからスリットの有無により、燃え拡がり範囲を予測することができる。著者らはこの燃え拡がり範囲の予測方法を思考実験として提案しており、本研究においても思考実験を用いた⁽⁴⁾。思考実験は格子数ごとに空隙率を 40%~80%まで変化させて行い、試料配置パタ

ーンは 50 とした。燃え拡がり成功回数をパターン数の 50 で除することで燃え拡がり確率を求めた。図 3 は延焼限界距離と試料幅の関係を示している。すなわち、試料幅（格子幅）が小さくなることで $S < 1$ となる条件が存在する。 $S < 1$ かつ $S \approx 1$ のとき、図 4 に示す位置の試料に燃え拡がりが発生すると仮定し、 $S < 1$ の思考実験も行った。

3. 実験結果と考察

3.1 燃え拡がり確率

図 5 (a) は $S > 1$, (b) は $S < 1$ の燃え拡がり確率と空隙率の関係を示している。 $S > 1$, $S < 1$ の場合ともに、空隙率の増加に伴い燃え拡がり確率は減少している。また、同じ空隙率で比較した場合、 $S > 1$ に比べ $S < 1$ のほうが燃え拡がり確率は高い値となる。また、燃え拡がり確率が 0 となる空隙率は格子数によって異なっており、格子数が大きいほどより小さな空隙率で燃え拡がり確率が 0 となっている。図 6 は燃え拡がり確率が 0 となるときの空隙率と格子数の関係を示している。燃え拡がり確率が 0 となる空隙率は格子数の増加に伴い減少し、 $S > 1$ の場合では 60% 付近に漸近し、 $S < 1$ の場合では 70% 付近に漸近している。

3.2 有限サイズスケールリング

空隙率が増加することで、スリットが形成される確率が高くなるため、燃え拡がり確率は低下する。また、 $S > 1$ に比べ $S < 1$ のほうが燃え拡がることができる範囲が大きい。ため、同じ空隙率でも高い燃え拡がり確率となる。

実験領域の大きさにより変化する燃え拡がり確率について、パーコレーション理論を基に検討する。既存のパーコレーション理論において、大きさ L の系におけるつながりの有効閾値を $P(L)$ とすると、有限サイズスケールリングから、 $P(L)$ とパーコレーション理論の閾値 P_c との間に

$$P(L) - P_c \propto L^{-1/\nu}$$

という比例関係が知られている⁽⁶⁾。ここで、 ν は臨界指数（2次元では 4/3）であり、比例定数を C とおくと

$$P(L) = P_c + CL^{-0.75}$$

と書き換えられる。空隙が領域全体につながることで燃え止まりとなることから、この関係が本実験にも適用できると考え、 $P(L)$ を格子数 $L \times L$ マスの燃え拡がり確率が 0 となるときの空隙率として実験結果を近似する。 C に適当な値を用いて実験結果をフィッティングし、燃え拡がり確率が 0 となる閾値を決定した。図 6 の近似曲線は $C = 0.73$ としたときであり、 $S > 1$ のときは P_c を 59.3、 $S < 1$ のときは P_c を 71.0 としたとき、実験結果におおよそ一致した。よって、領域の大きさが燃え拡がりに対して与える効果は $S > 1$, $S < 1$ でそれぞれ以下の式でスケールされる。

$$P(L) = 59.3 + 0.73L^{-0.75} \quad (1)$$

$$P(L) = 71.0 + 0.73L^{-0.75} \quad (2)$$

これにより、有限領域の燃え拡がりに対する安全性を空隙率により評価することができると考えられる。

4. 結言

実験領域の大きさを変化させた燃え拡がり実験から以下の知見を得た。

1. いずれの領域サイズ、スケール比でも、空隙率の増加に伴い燃え拡がり確率は低下する。
2. 実験領域が大きくなるにつれ、燃え拡がり確率が 0 となる空隙率は低下する。
3. 燃え拡がり確率が 0 となる空隙率と有限領域の大きさの関係が $S > 1$ に対して(1)式で、 $S < 1$ に対して(2)式で与えられる。

Fig.4 Position which can flame spread

Fig.5 Relationship between flame spread probability and porosity; (a) $S > 1$, (b) $S < 1$

Fig.6 Relationship between porosity and number of lattice when flame spread probability set to 0

参考文献

- (1) Abe, S, Ito, A, Torikai, H, Modern Applied Science, pp11-19 (2012).
- (2) 工藤, 伊藤, 鳥飼, 日本燃焼学会誌, pp184-192 (2012).
- (3) 阿部, 伊藤, 鳥飼, 平成 24 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp86-87 (2012).
- (4) 阿部, 伊藤, 鳥飼, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012 講演論文集, pp319-320 (2012).
- (5) D. Stauffer and A. Aharony, 小田垣孝(訳), パーコレーションの基本原則 (2001).