

ガス爆発とフラクタル次元

—同心二重円筒装置を用いた実験的考察—

龍谷大学理工学部講師・里山学研究センター研究スタッフ
野口 佳樹

1. はじめに

里山を手入れした際に発生する間伐材の処理の一つとして、燃焼させてエネルギー利用する方法がとられている。しかし、間伐材をはじめとする木質バイオマスの直接燃焼では、エネルギー密度が低いために、効率よくエネルギーを得るためには工夫が必要である。もし、燃焼する直前の可燃ガスを利用することができれば、既存のバーナーやエンジンなど高効率の機器を使用することが可能になる。木質バイオマスのガス化は、エネルギーの高効率化には有効であるが、その一方でガス爆発の危険性を伴う。本研究では、ガス爆発の被害予測を目標に、被害予測のパラメータの一つとしてフラクタル次元を検討する。

ガス爆発は火炎伝ばを伴う現象であり、火炎伝ば速度の大小は爆発による被害に大きな影響を及ぼす。じょう乱のない一次元の火炎伝ばでは、火炎面に相対的な座標系において、未燃焼混合気は、火炎に向かって層流燃焼速度に等しい速度で流れる。火炎面の背後では、火炎の発熱による体積膨張により、流れは加速される。流れ場で微小じょう乱が生じた場合では、火炎面が乱れ、その結果、火炎面に凹凸が生じる。流れは火炎面の前後で、火炎面に平行方向成分は変化しないが、垂直方向成分が加速される。これにより、火炎面に乱れが増幅する¹⁾。この不安定性が流体力学的不安定性と呼ばれる。もし、爆発の規模が大きくなり、火炎のスケールが数十cm程度になると、流体力学的不安定性のため、周囲気体に全く乱れがなくても火炎が乱流化する¹⁾。このとき火炎がフラクタル構造をとる²⁾。

フラクタル次元を用いて火炎伝ば速度を表せることがGostintsevらの研究³⁾によって明らかにされている。したがって、爆発の被害予測にはフラクタル次元の知識が不可欠である。Gostintsevらが提案した火炎伝ば速度の予測式により、フラクタル次元を実験により明らかにするには、球状に伝ばする火炎の半径と着火からの経過時間から求める手法が用いられてきた。この場合、屋外の広大な空き地での大規模な火炎伝ば実験が必要であり、フラクタル次元の測定例は多くない。その理由として、火炎スケールおよび火炎伝ば速度が大きくなると、爆風圧の影響が大きく危険性を伴うためである。

先の研究²⁾では、一方向に伝ばする平面火炎でも適応できる火炎伝ば速度の予測式を提案し、数値シミュレーションにより、一方向に伝ばする平面火炎のフラクタル次元を検討した。その結果、フラクタル次元 D_f はおよそ1.04程度であることがわかった。

本研究では、一方向に伝ばする平面火炎のフラクタル次元を実験的に明らかにすることを目的とした。爆風圧などの危険性がなく、危険を伴わない比較的大きなスケールの火炎を、同心

二重円筒装置を用いることにより実現した。この装置で形成される火炎は、数十cmかそれ以上の火炎スケールながら、同心二重円筒の間のわずかな隙間を伝ばするために、消費される燃料が少なく危険を伴わず、実験室での実験が可能である。

2. 実験装置および方法

Fig. 1に同心二重円筒装置の概略を示す。同心二重円筒の外円筒はPyrex製、内円筒はアルミニウム製で、それらの全長は676mmである。内円筒と外円筒の隙間を10mmとし、外円筒（内円筒）の直径 D [mm] を、70 (50) mm、130 (110) mm、180 (160) mm、250 (230) mmの4条件で実験を行った。ここで、火炎スケール ℓ の代表長さを、外円筒の円周の長さ（ $\ell = \pi D$ ）とした。そのスケールは、それぞれ、220mm、408mm、565mm、および785mmである。燃料にはメタンを使用し、メタン-空気予混合気の当量比 ϕ を0.8~1.4とした。混合気を内円筒下部から注入し、外円筒と内円筒の隙間を通して、大気開放の装置上部へ平均流速5 cm/sで流す。混合気を装置上部より点火し、環状火炎が装置上部から下方に向って伝ばする。このときの火炎が伝ばする様子を高速カメラ（Photron FASTCAM_APX RS、1000fps）で撮影し、火炎が伝ばする時間を調べた。装置内の参照距離区間の距離と、そこを火炎が通過するのにかかった時間から火炎伝ば速度の軸方向成分 V_f [m/s] を求めた。

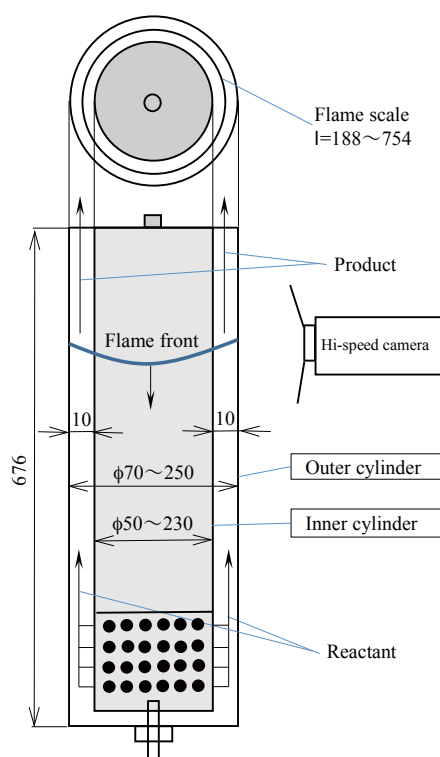


Fig. 1 Concentric Double Cylinders

3. 実験結果および考察

Fig. 2に当量比 $\phi = 1.0$ のときの火炎スケール $\ell = 220$ mm、408mm、565mm、および785mmの伝ばする火炎面の様子を示す。

火炎スケール $\ell = 220\text{mm}$ のとき火炎面には凹凸が少ないが、 408mm 、 565mm 、 785mm と大きくなるにつれ、凹凸の数が多くなっている。したがって、火炎のスケールが大きくなると、流体力学的不安定性による乱れが増加することがわかる。この傾向は、他の当量比のときと同様であった。

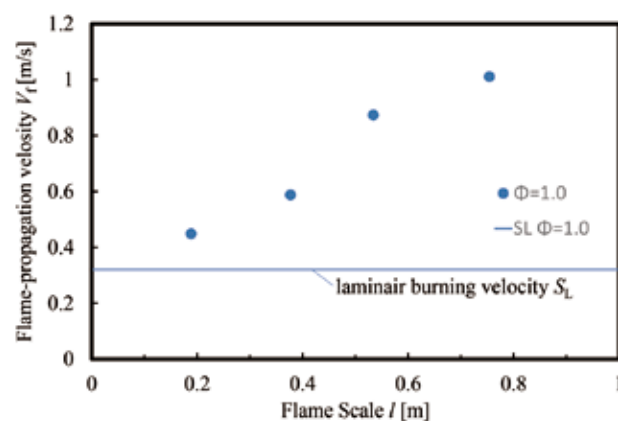


Fig. 2 Relation between apparent flame-propagation velocity and flame scale

火炎スケール ℓ と火炎伝ば速度 V_f の関係の一例として当量比 $\phi = 1.0$ のときのものを Fig. 3 に示す。火炎スケール ℓ が大きくなるにつれ、火炎伝ば速度も大きくなっていることがわかる。他の当量比についても同様の結果であった。このことは Fig. 2 のように、流体力学的不安定性に起因する乱れにより、火炎に凹凸の数が増加し、その結果、火炎伝ば速度が増加したと考えられる。

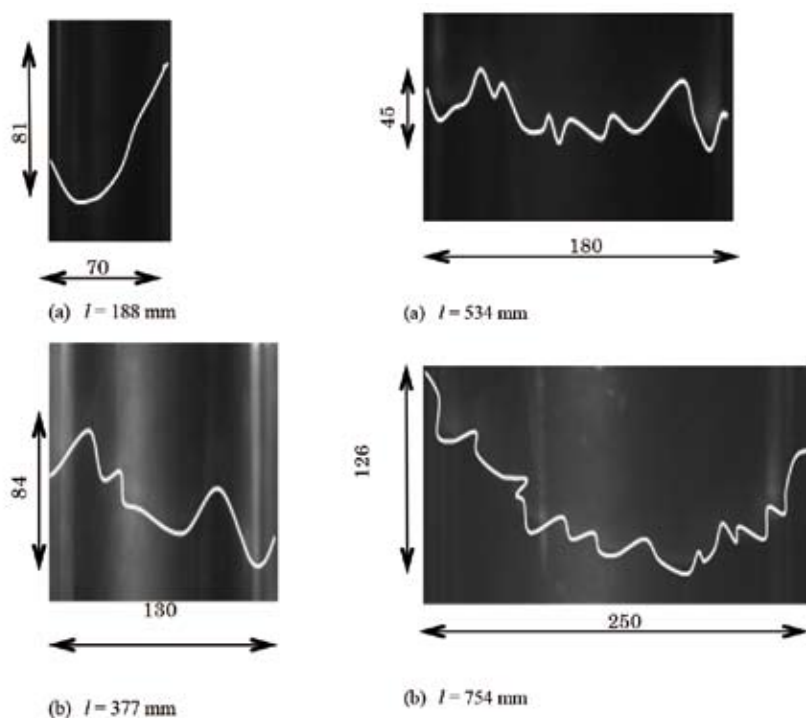


Fig. 3 Instantaneous flame shape recorded by the high-speed camera for different cylinder sizes

火炎スケール ℓ のスケール効果を明確にするために、当量比1.0のときのメタン—空気層流

燃焼速度に基づいた火炎伝ば速度をFig. 3にあわせて示す。混合気の流速5 cm/sを考慮すると、その値は0.32m/sとなる。火炎スケール $\ell = 785\text{mm}$ のときの火炎伝ば速度0.96m/sであり、層流予混合火炎のときと比較すると200%の増加となる。桑名の研究²⁾では、一方向に伝ばする平面火炎の伝ば火炎において、次式のような関係にあることを示した。

$$V_f \approx \ell^{D_f-1} \quad (1)$$

したがって、フラクタル次元 D_f を求めるには、Eq.(1)の両辺に対して、対数をとって変形すると、

$$D_f \approx \frac{\log(V_f)}{\log(\ell)} + 1 \quad (2)$$

となり、火炎スケール ℓ と火炎伝ば速度 V_f の関係を両対数プロットし、得られた直線の傾きを求めることにより、フラクタル次元 D_f を求めることができる。

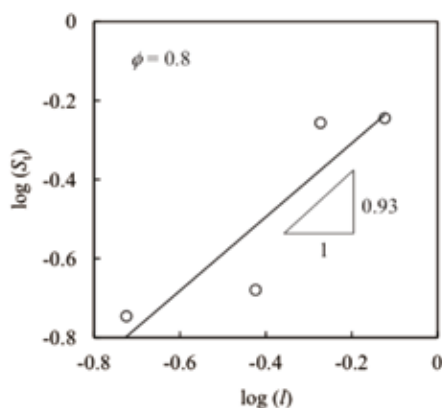


Fig. 4 Logarithm relation between turbulent burning velocity and flame scale of equivalence ratio 0.8

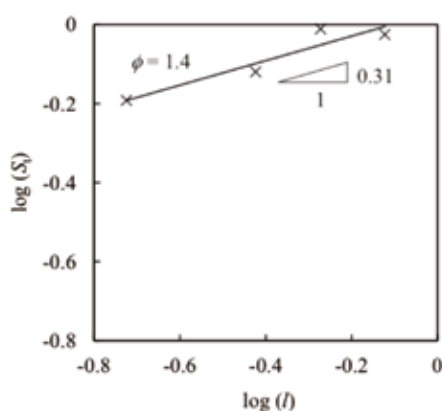


Fig. 5 Logarithm relation between turbulent burning velocity and flame scale of equivalence ratio 1.4

火炎スケール ℓ と火炎伝ば速度 V_f の関係を両対数プロットしたものをFig. 4およびFig. 5に示す。Fig. 4が当量比 $\phi=0.80$ のもの、Fig. 5が当量比 $\phi=1.40$ のものである。

Fig. 4およびFig. 5より、当量比 $\phi=0.8$ および1.4のフラクタル次元 D_f をそれぞれ2.02および1.34と求めることができる。このような手法でその他の当量比についても求めた。その結果を

Fig. 6に示す。Fig. 6は当量比 ϕ とフラクタル次元 D_f の関係を示している。同心二重円筒装置を用いて環状火炎を伝ばさせる実験を行った結果、フラクタル次元 D_f の値は1～2であることが明らかになった。混合気の濃度が希薄になるにつれ、フラクタル次元 D_f の値が大きいく。これは選択拡散の影響によるものだと考えられる。本実験での混合気はメタン-空気であり、選択拡散の効果が希薄側に現れやすい。火炎面の乱れは流体力学的不安定性によるものだけでなく、選択拡散の影響も考えられる。

4. 結言

本研究では、木質バイオマスの効率的な利用のためのガス化に懸念されるガス爆発について、その被害予測を目標に、フラクタル次元を検討した。その結果、

- (1) 火炎スケールが大きくなると、火炎面の凹凸の数が増えること、
- (2) 火炎スケールが大きくなると火炎伝ば速度が速くなること、
- (3) メタン-空気予混合火炎では、混合気の濃度が希薄になるにつれフラクタル次元の値が大きくなることから、流体力学的不安定性によるものだけでなく、選択拡散の影響も考えられることなどが明らかになった。

参考文献

- 1) Dobashi, R., Kawamura, S., Kuwana, K. and Nakayama, Y.: Consequence analysis of blast wave from accidental gas explosion, Proc. Combust. Inst., 33, (2011)、2295-2301.
- 2) 桑名一徳：火炎のフラクタル次元と大規模ガス爆発、ながれ、31、(2012)、357-364.
- 3) Gostintsev, Y. A., Istratov, A. G. and Shulenin, Y. V.: Self-similar propagation of a free turbulent flame in mixed gas mixture, Combust. Explo. Shock Waves, 24, (1988)、563-569.