ガス爆発現象の火炎伝播速度への依存性 Effect of Flame Propagation Speed on Gas Explosion

○正 茂木 俊夫 (東大院) 金 佑勁 (東大院)
土橋 律 (東大院)

Toshio Mogi, Wookyong Kim and Ritsu Dobashi
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

In the present study, the influences of flame propagation speed on the intensity of blast wave during unconfined gas explosions have been examined experimentally. The various scale tests of hydrogen/air deflagrations conducted. Results demonstrated the flame wrinkled and accelerated due to hydrodynamic instability with the flame scale and thereby the overpressure rapidly increased. In particular, the intensity of blast wave compared with the Peclet number defined as dimensional flame radius when the unburned mixture is combusted. The results of comparison show the dimensionless overpressure increased with the Peclet number, because of flame acceleration due to the hydrodynamic instability, as the explosion scale became larger.

Key Words: Gas explosion, Flame propagation, Blast wave, Hydrogen

1. 緒言

可燃性ガスはプラント等に限らず、一般家庭など社会で広く利用されている。近年では、水素燃料電池自動車の開発が進み、自動車用燃料としてさらに普及すると予想される。しかしながら、可燃性ガスは漏えいして爆発事故が発生する危険性があるため、可燃性ガスの利用にあたっては、効果的な安全対策や万が一事故が発生した場合の危険性評価や被害低減対策などが重要となる。最近では危険性評価としてリスク評価がしばしば用いられている。リスク評価には、想定される危険現象が発生した場合に予想される被害の大きさすなわち影響度が重要な情報であり、適正な評価が求められる。爆発災害では、爆風の発生によって広範囲に大きな被害が発生する可能性があるため、爆風威力の評価についてさまざまな研究が行われている⁽¹⁾。

大規模なガス爆発現象では、火炎伝播の加速が発生することが知られている⁽²⁾。音響学理論⁽³⁾によると爆風威力は火炎伝播速度と密接に関係することから、爆風による影響適正に予測するためには、火炎伝播の加速現象と爆風挙動の関係を理解する必要がある。そこで本研究では、水素ガスを用いて開放空間におけるガス爆発実験を行い、火炎伝播および爆風挙動について計測し、爆風圧の火炎伝播速度への依存性について考察した。

2. 実験装置および方法

開放空間における可燃性ガス/空気混合気の火炎伝播挙動および爆風挙動を調べるため、実験室規模の小規模実験から、屋外で行う大規模実験まで行った。可燃性ガスとして水素を用いた。小規模実験では、開放空間を模擬するために、所定の濃度の混合気を供給してシャボン玉(直径 100 mm, $V = 0.001 \text{ m}^3$)を形成し、シャボン玉の中心で火花点火により着火させた。一方、大規模実験は、1 辺が 1 m ($V = 1 \text{ m}^3$)および 3 m ($V = 27 \text{ m}^3$)の立方体型枠に薄いビニルシートを張り付けて形成した空間内に水素を供給して、所定の濃度になるように調整し、空間内の中心で着火させた。

火炎伝播挙動の計測は、小規模実験ではシュリーレン法を用いて高速度カメラで撮影し、大規模実験では、水素火炎は不輝炎であるため、モノクロ高速度カメラに短波長カットフィルター(カット波長 < 990 nm)を取り付けて、火炎からの赤外発光を撮影した。爆風は、ピエゾ型圧力センサ

ー(PCB, 106B52)およびマイクロフォン(PCB, 377B02)で同時に計測し、出力をデータ記録装置(横河電機, DL850)で記録した。

3. 実験結果および考察

規模が異なる実験で撮影された火炎伝播の様子を Fig. 1 に示す。水素濃度は化学量論組成濃度である。(a)はシュリーレン画像であり、(b)と(c)は火炎背後の高温の水分子から放射された赤外線を撮影したものである。シュリーレン画像では、燃焼初期から火炎面に筋状の乱れが確認でき、比較的火炎が小さいときから乱れが発生していることがわかる。一方、屋外で撮影された画像では、乱れの詳細までは確認できないが、火炎からの赤外線を撮影することにより、火炎伝播の様子を観察するのに十分な画像を得ることができた。

火炎伝播データから算出した火炎伝播速度と計測された爆風圧の経時変化を Fig. 2 に示す。水素濃度は化学量論組成濃度である。爆風圧は、換算距離(R/R_0)が 0.8 から 0.9 の範囲で測定されたものである。ここで、 R は点火位置からの距離、 R_0 は次式で定義される。

$$R_0 = (E/p_0)^{1/3} \quad (1)$$

Fig. 1 Comparison of flame propagation image of hydrogen-air mixture at stoichiometric concentration.

ここで、 E は混合気の総発熱量、 p_0 は大気圧である。
スケールが大きくなるにしたがって火炎伝播速度が速くなっている、つまり加速していることが確認できる。

一方、爆風威力に及ぼす火炎伝播の影響を考察するために、次の式を用いた。

$$p = \frac{\rho}{R} \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon} \left\{ 2r\varepsilon^2 S^2 + r^2 \frac{dS}{dt} \right\} \quad (2)$$

ここで、 ρ は未燃ガスの密度、 R は点火位置からの距離、 ε は膨張率、 r は火炎半径、 S は燃焼速度である^[3]。燃焼速度が一定であると仮定して、式(2)に実測した燃焼速度を代入して得られた爆風圧の計算値を示す。着火からの時間が短い場合、すなわち火炎伝播のごく初期においては、燃焼速度を一定とした仮定とほぼ一致する。つまり、火炎伝播の加速は見られていない。しかし、火炎の規模が大きくなるにつれて計算値から大きくずれる傾向がみられ、爆風圧に対して、火炎伝播の加速が大きく影響していることがわかる。

Fig. 2(b) および(c) はビニルハウスを用いた屋外実験での爆風圧の経時変化を示しているが、波形の急激な立ち上がりは、ビニルハウスの破膜により火炎が乱れて急速に燃焼したことにより圧力が上昇したと思われる。換算距離ではほぼ同程度であり、ピーク過圧もほぼ同程度であるにも関わらず、破膜直前の爆風圧に注目すると、計算値との差に大きな違いが見られることがわかる。これまでの研究で、火炎半径が増大すると流体力学的不安定性が顕著になることを報告しているが、火炎規模の増大が爆風圧に対しても顕著に影響することが考えられる。

次に最大爆風圧について考察する。Fig. 3 は混合気が完全に燃焼したときの火炎半径を火炎厚さで除して無次元化した Peclet 数 Pe_q と、実験値の最大爆風圧 P_t と燃焼速度一定として求められる最大爆風圧 P_1 との比 P_t/P_1 との関係を示す。屋外実験の場合は立方体形状であるが、球体に近似して求めた。Peclet 数が大きくなると P_t と P_1 の比が指数関数的に大きくなっていくことがわかる。これは、火炎が大きくなると流体力学的不安定性による火炎の自発的な乱れが大きくなり、火炎の伝播が加速していることが影響していると考えられる。

4. 結言

開放空間におけるガス爆発実験を行い、火炎伝播挙動と爆風挙動について検討した。火炎の規模が大きくなるほど、爆風挙動に対して火炎伝播の加速の影響が顕著になる。したがって、爆発の規模が大きくなるほど、爆風威力の予測に際し、火炎伝播の加速を考慮する必要がある。

謝辞

本研究は、科研費基盤研究(A)No.23241051 の助成を受けて実施した。ここに謝意を示す。

参考文献

- (1)R. Dobashi, et al, Proc. Combust. Inst., 33(2011), 2295-2301.
- (2)金, 他, 日本燃焼学会誌, 56 (2014), 74-79.
- (3)W. Kim, et al, J. Loss Prevention in the Process Industries. .

Fig. 2 Time histories of overpressure and flame speed.

Fig. 3 Relation between Pe_q and P_t/P_1 .