

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13958

研究課題名（和文）ガス爆発における火炎伝播加速現象の自己相似的な特徴

研究課題名（英文）Self-similarity of flame acceleration in gas explosions

研究代表者

KIM WOOKYUNG (Kim, Wookyung)

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・助教

研究者番号：40781852

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、水素燃焼における火炎伝播加速現象の自己相似的な特徴の解明である。初期圧と当量比を変化させ、希薄水素空気混合気の球状伝播火炎の加速現象を実験的に調べた。希薄水素空気混合気の球状伝播火炎の加速現象は無次元火炎半径を用いてまとめることができた。火炎半径が臨界火炎半径より大きくなると火炎の不安定性により火炎面に乱れが発達し、火炎伝播速度が増加する。さらに、火炎半径が大きくなると流体力学的不安定性による影響が顕著になり、火炎伝播がより加速し、火炎半径が臨界火炎半径より10倍以上大きくなると自己相似的な伝播をすることであり、そのときの火炎面は自己相似的な構造になることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガス爆発現象では、火炎伝播の加速が発生し、周囲に伝播する爆風圧が大きくなり、爆発被害が増大することが知られている。ガス爆発事故における爆風圧等の影響を正確に予測するためには、火炎伝播の加速現象を的確に理解する必要がある。自己相似的な伝播を明らかにすることによって火炎伝播加速現象と爆風圧がより正確に予測できるため、災害のリスク評価の高精度化に寄与できるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The self-similar propagation of expanding spherical flames in lean hydrogen-air mixtures at elevated pressure was experimentally investigated using a dual-chamber apparatus. The acceleration exponent, n , corresponding to the fractal dimension in lean hydrogen-air mixtures at elevated pressure was evaluated by plotting the experimental flame radius as a function of time. The value of n increased with an increase in the dimensionless flame radius r/r_c and saturated at $n = 1.43$ at $r/r_c > 10$, and the saturated values of the hydrogen-air flame are within $n = 1.4-1.5$. The results demonstrated that the flame propagation in lean hydrogen-air mixtures was classified as laminar, acceleration, transition, and self-similar regimes.

研究分野：安全工学

キーワード：ガス爆発 火炎伝播加速 自己相似

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ガス爆発事故の被害を最小限にとどめるためには、事故の発生確率や被害影響度を評価し、的確なリスク対策を実施することが重要である。ガス爆発は火炎伝播を伴う現象である。可燃性ガスと空気の混合気が何らかの原因で着火すると着火源から火炎が伝播する。このように伝播する火炎は、はじめ滑らかに層流燃焼速度で伝播する。ところが、火炎が大きくなると、火炎面の乱れが発達し、火炎面積が増大して見た目の火炎伝播速度が高まる。さらに、火炎半径が大きくなると、火炎伝播速度が高まり、ある限界値をもつ自己相似的な領域が存在する。しかし、どのような条件で自己相似的な伝播に至るかについては明らかになっていない。この自己相似的な伝播における火炎のフラクタル次元が明らかにできれば、火炎伝播の加速現象を定量的に見積もることができ、高い精度でガス爆発被害を予測できるため、火炎伝播加速現象における自己相似的な伝播の特性解明は必要である。

2. 研究の目的

本研究は、ガス爆発における火炎伝播加速現象の自己相似的な特徴を解明することが目的である。

3. 研究の方法

自己相似性を測定する一般的な方法は、大規模ガス爆発実験を実施して大規模な火炎(火炎半径 1m 以上)を再現する必要があるため、自己相似性に関する研究事例は世界的にも数例しか報告されていない。そのため、本研究では、初期圧を上げると火炎帯厚さが小さくなり、流体力学不安定性により加速が始まる臨界火炎半径が小さくなること、また、水素空気混合気では当量比を下げると熱拡散不安定性により小さくなるこれらの特性を利用し、初期圧を上げて希薄水素空気混合気を用いて実験を行った。開発した燃焼容器は、SUS304 製で、二重構造となっており、内側容器は容積 27.4 L、外側容器は容積 195 L である。内側容器のパイプ部分には直径 10 mm の穴が複数開いておりそこから気体が入り出りできるようにした。実験前に厚さ 60 μm の薄膜で穴を塞ぎ、内側容器と外側容器の圧を等しくした後、実験を行った。内側容器は水素空気混合気、外側容器は窒素を入れて着火させた。燃焼途中の内側容器内の圧力上昇を薄膜が破れることで、内圧上昇が火炎伝播に及び影響を減らした状態で実験を行った。観察窓は、直径 260 mm、厚さ 70 mm と 35 mm の石英ガラスを採用し、可視領域は直径 220 mm である。火炎形状や伝播挙動を取得するため、直径 250 mm の凹面鏡を有するシュリーレン法測定装置により観測を行った。

4. 研究成果

シュリーレン法で測定された水素/空気の混合気の火炎伝播挙動を図 1 に示す。火炎伝播の初期段階では、当量比が低くなるにつれ拡散・熱的不安定性が顕著に表れ、火炎がより乱れて伝播していることが観察できる。また、初期圧が上がると火炎帯厚さが小さくなり流体力学的不安定性が顕著に表れ、火炎が乱れていることがわかる。高圧場における希薄水素空気混合気の火炎では拡散・熱不安定性と流体力学的不安定性による影響が総合的に現れていることがわかる。球状伝播火炎においてセル状火炎になるのは、火炎伝播の初期段階に火炎核にクラックが生じ、そのクラックが火炎面の膨張とともに火炎面の上を伝播して行く。このクラックの伝播は、同時に様々な所から生じ、それぞれのクラックがクロスしながら発達し、セル状火炎なる。火炎面に乱れが発達され完全にセル状火炎なり、火炎面積が増大して火炎伝播速度が速くなる。火炎伝播の初期段階では火炎伸長の影響が多いため、本研究では、火炎の伝播速度と伸張率の関係から加速



- | | | |
|---|---|--|
| • $P_i = 0.1 \text{ MPa}$, $\phi = 0.5$ | • $P_i = 0.2 \text{ MPa}$, $\phi = 0.7$ | • $P_i = 0.5 \text{ MPa}$, $\phi = 0.5$ |
| • $\delta = 0.0997 \text{ mm}$ | • $\delta = 0.0219 \text{ mm}$ | • $\delta = 0.0496 \text{ mm}$ |
| • $r = 102 \text{ mm}$, $r_{cl} = 26 \text{ mm}$ | • $r = 102 \text{ mm}$, $r_{cl} = 10.4 \text{ mm}$ | • $r = 102 \text{ mm}$, $r_{cl} = 5.8 \text{ mm}$ |
| • $r/r_{cl} = 3.92$ | • $r/r_{cl} = 9.8$ | • $r/r_{cl} = 17.5$ |

図 1 シュリーレン法で測定された水素/空気の混合気の火炎伝播挙動

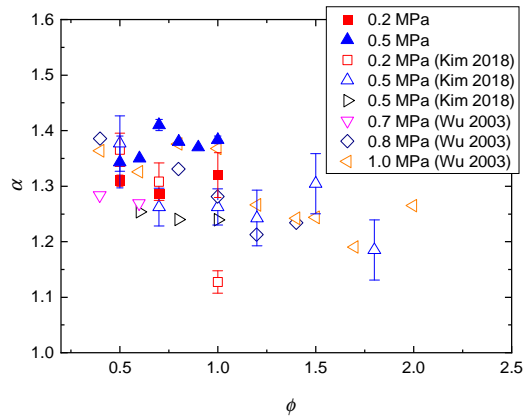


図2 各条件における加速指数の当量比依存性

が始まる臨界火炎半径 r_c を求めた。

今回の燃焼容器実験で求めた火炎伝ばの加速指数 α と小規模燃焼容器実験から求めた α の比較を図2に示す。拡散・熱不安定性により当量比が低くなるにつれて α が大きくなる。また、流体力学的不安定性による影響で初期圧が高くなるほど α が大きくなることわかる。特に、今回の燃焼容器実験により求めた値は、同じ条件でも大きい値になっていることがわかる。これは火炎スケールが小さい時には、 α が過小評価されているからである。図3に α を r/r_c の関係を示す。 α の値は r/r_c が大きくなるにしたがって α の値が大きくなり、 $r/r_c > 10$ になると $\alpha = 1.43$ に漸近することがわかる。つまり、火炎半径が臨界火炎半径より10倍以上大きくなると自己相似的な伝播をすることであり、そのときの火炎面は自己相似的な構造になると考えられる。この時のフラクタル次元は、 $D = 2.29$ であり、Gostintsev らが提案した $D = 2.33$ に近い値になっている。特に、水素空気混合気の大規模実験のデータと比較すると、 $r/r_c > 100$ になっても $\alpha = 1.43$ になっており、 $r/r_c > 10$ では自己相似的な伝播する領域であると考えられる。

希薄水素空気混合気の球状伝播火炎の加速現象の領域を以下の通りにまとめることができる。

Laminar regime ($r/r_c < 1$): 火炎が安定、火炎伝播速度が一定である。 Self-acceleration regime ($r/r_c > 1$): 火炎の不安定性により火炎面に乱れが発達し、火炎伝播速度が増加する。

Transition regime ($1 < r/r_c < 10$): 流体力学的不安定性による影響が顕著になり、火炎伝播がより加速する。 Self-similar regime ($r/r_c > 10$): 自己相似的な伝播をする。

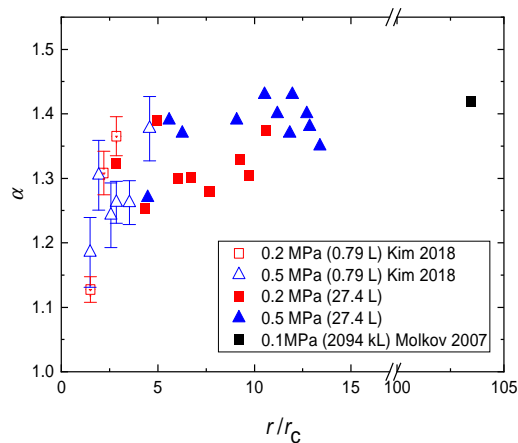


図3 加速指数の無次元火炎半径依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kim Wookyung、Namba Takumi、Johzaki Tomoyuki、Endo Takuma	4. 巻 45
2. 論文標題 Self-similar propagation of spherically expanding flames in lean hydrogen-air mixtures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 25608-25614
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijhydene.2020.06.261	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Wookyung、Sato Yoshitatsu、Johzaki Tomoyuki、Endo Takuma	4. 巻 60
2. 論文標題 Experimental study on the onset of flame acceleration due to cellular instabilities	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Loss Prevention in the Process Industries	6. 最初と最後の頁 264 ~ 268
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jlp.2019.05.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 金佑勤、難波拓巳、城崎知至、遠藤琢磨
2. 発表標題 希薄水素空気混合気の球状伝播火炎の自己相似伝播
3. 学会等名 2020年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kim Wookyung、Namba Takumi、Johzaki Tomoyuki、Endo Takuma
2. 発表標題 Self-similar propagation of expanding spherical flames in lean hydrogen-air mixtures
3. 学会等名 13th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kim Wookyung, Namba Takumi
2. 発表標題 Transition to self-similarity of expanding spherical flame in lean hydrogen-air mixtures
3. 学会等名 13th International Symposium on Fire Safety Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金 佑勤・難波 拓巳・城崎 知至・遠藤 琢磨
2. 発表標題 水素-空気混合気における自己相似的な火炎伝播
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wookyung Kim, Yoshitatsu Sato, Tomoyuki Johzaki, Takuma Endo, Toshio Mogi, Ritsu Dobashi
2. 発表標題 Self-acceleration of a spherically expanding hydrogen-air flame at elevated pressure
3. 学会等名 The 8th International Conference on Hydrogen Safety (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wookyung Kim, Yoshitatsu Sato, Tomoyuki Johzaki, Takuma Endo
2. 発表標題 Experimental study on the onset of flame acceleration due to cellular instabilities
3. 学会等名 12th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshitatsu Sato, Wookyung Kim, Tomoyuki Johzaki, Takuma Endo
2. 発表標題 Correlations for the onset of cellular instabilities in outwardly propagating spherical flames
3. 学会等名 2nd International Symposium on Fuels and Energy (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------