

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03822

研究課題名（和文）水素システムの爆発安全高度化技術の開発

研究課題名（英文）Development of Advanced Explosion Safety Technology for Hydrogen System

研究代表者

土橋 律（Dobashi, Ritsu）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30237177

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,300,000円

研究成果の概要（和文）：水素システムの爆発安全高度化技術の開発のため、大規模実験、加圧実験および影響度評価モデルの構築をおこなった。大規模実験、加圧実験により、ガス爆発挙動について様々な条件で詳細なデータを取得し、燃焼学的挙動解析および安全データベースに資する成果を得た。このデータを活用して危険性評価ツールとして使える影響度評価モデルを構築した。さらに、大規模実験映像は安全教育ツールとしても活用可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続可能な社会実現に向け、水素は重要なエネルギーキャリアとして様々なところで利用されていくと予想される。その一方で、都市ガスやプロパンガス等の一般的な可燃性ガスに比べて事故が起こった場合の影響度は大きく、危険性も正しく認識しておく必要がある。本研究の成果を通じて、ガス爆発における火炎伝ばの不安定性の解明だけでなく、水素安全の啓蒙に資するデータを取得することができた。

研究成果の概要（英文）：Large-scale experiments, pressurization experiments, and consequence assessment models were conducted to develop advanced explosion safety technology for hydrogen systems. Detailed data on gas explosion behavior under various conditions were obtained through large-scale and pressurized experiments, and the results contributed to combustion behavior analysis and a safety database. These data were used to develop a consequence assessment model that can be used as a hazard assessment tool. Furthermore, the large scale experimental videos can be used as a safety education tool.

研究分野：燃焼学，安全工学

キーワード：水素安全 ガス爆発 爆発影響度評価 不安定性

1. 研究開始当初の背景

水素利用の拡大により、環境負荷低減やエネルギーセキュリティの向上に大きく貢献できると期待されている。さらに、将来の二次エネルギーでは水素が中心的役割を担うことが期待されており、水素社会の実現に向けた取り組みが加速している。例えば東京都中央区晴海に整備される2020年東京オリンピック・パラリンピック選手村では、大会後に高層マンションや商業棟も整備され、水素ステーションの設置やパイプラインを用いた街区への水素供給(実用段階では国内初)も実施される計画であり、災害時のエネルギー自立も図られる。

一方、水素は都市ガス等と比べて爆発危険性が高いことが知られている。したがって、水素システムの実装のためには安全性確保が絶対条件である。もちろん水素システムの計画時にはさまざまな観点からのリスク評価が行われ、大規模漏洩などの重大事故が起こらないように多くの安全対策が行われている。しかし、水素システムの実用化段階を迎えた今、ヒューマンファクターなどによる重大事故の可能性を完全には排除できず、大規模漏洩を想定した影響度評価、緊急時対応計画の立案、安全教育の実施は必須である。万一の事故のときに「想定外だった」と言える時代ではない。多くの実用水素システムでは、水素が加圧下で供給される。このような水素システムの高度安全化のためには加圧下での水素の爆発燃焼挙動を把握しなければならないが、現状では大規模および加圧環境下における水素の爆発燃焼に関して科学的な知見が絶対的に不足している。NEDOの水素利用技術研究開発事業(平成25~29年度)などで実験データの蓄積が図られているが、大規模あるいは加圧下での水素の爆発燃焼実験は容易ではなく、限られた実験データから経験的に外挿して影響度を評価するのが一般的である。しかし、この経験則が確固たる燃焼理論に基づいているわけではないので、データ外挿の精度はよくなく、実用水素システムの高度安全化が達成されているとは言えない状況である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「水素システムの爆発安全高度化技術の開発」である。最終的には、大規模漏洩爆発時の影響度評価モデル、緊急時の危険性評価ツール、水素ハザードの疑似体験映像を含む安全教育ツールなど、実用化段階の水素システムの高度安全化に資するデータベースやツールを提供する。

3. 研究の方法

(1)大規模実験

本研究では小規模及び大規模スケールによる実験を行った。小規模実験は火炎の加速が始まる前の挙動を観測するのに適しているのに対し、大規模実験は火炎の加速が始まった後の挙動を観測するのに適している。そのため、双方のスケールで実験を行うことにより、火炎の加速開始前後の伝播挙動を詳細に解析した。

小規模実験は、半径5cmのシャボン玉を用いて H_2-O_2 および H_2-Air にArを加えて膨張率を変化させた実験を行った。また、大規模実験は、 $8m^3$ の立方体ビニールテントを用いて H_2-Air または $H_2-Air + O_2$ または $H_2-Air + N_2$ 条件での実験を行った。小規模実験では、シュリーレン法を用いた高速度撮影を行うことにより、火炎表面に生じる乱れを詳細に計測した。大規模実験では、高速度撮影及び爆風圧の計測を行った。

(2)加圧実験

本研究では高圧燃焼容器を用いて実験を行った。この燃焼容器は、SUS304製で、二重構造となっており、内側容器は容積27.4L、外側容器は容積195Lである。観察窓は、直径260mm、厚さ70mmと35mmの石英ガラスを採用し、可視領域は直径240mmである。火炎形状や伝播挙動を取得するため、直径250mm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。カメラは、高速度カメラ(Photron Fastcam AX-50)を用い、撮影速度5000fps、シャッター速度10 μ s、解像度は384 \times 384 pixelsで撮影した。

(3) 影響度評価モデルの構築

一般に、ガス爆発時の火炎伝播速度は爆風圧等の爆発被害に直結する。したがって、爆発被害を推定するためには火炎伝播速度の予測が不可欠である。本研究が対象とする水素は、分子量が小さいため他の気体と比べて拡散係数が大きい。これにより、熱拡散率と拡散係数の比として定義されるルイス数が小さくなるのが水素燃焼の大きな特徴である。ルイス数が小さい条件での予混合火炎は、拡散・熱的不安定性と呼ばれるメカニズムのために滑らかな平面火炎を維持できない。この不安定性により火炎面積つまり反応面積が増加するため見かけの伝播速度が上昇する。このため、実験で測定した燃焼速度(不安定性の影響を排除できない)は低ルイス数条件で1次元詳細化学反応計算による予測値を上回る傾向がある。以上のことより、水素のガス爆発リスク評価において、ルイス数が火炎伝播速度に及ぼす影響を明らかにすることの重要性がわかる。なお、ルイス数は物性値のみから求まるため、水素濃度などの燃焼条件から一意に定めるこ

とができる。

ルイス数が見かけの火炎伝播速度に及ぼす影響を評価するためには、以下の拡散・熱的モデルを数値的に解けばよい。

$$\frac{dY}{dt} = \frac{1}{Le} \nabla^2 Y - \frac{\beta^2}{2Le} Y \exp \left[\frac{\beta(T-1)}{\gamma(T-1)+1} \right] \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \nabla^2 T - \frac{\beta^2}{2Le} Y \exp \left[\frac{\beta(T-1)}{\gamma(T-1)+1} \right] \quad (2)$$

ここで、 Y は規格化した燃料質量分率、 T は規格化した温度である。 β はゼルドビッチ数、 γ は温度パラメータで、 Le がルイス数である。

式(1)および(2)を解くためには3次元計算領域を離散化し、数値積分しなければならない。一方、火炎面を表すグラフ $z = f(x, y, t)$ の時間発展方程式を導出できれば、次元を1つ下げることができるため計算負荷を大きく低減できる。このような火炎伝播のモデル方程式としてKuramoto-Sivashinsky (KS) 方程式[1]が知られている。しかし、KS方程式はある条件の近傍において解析的に導出されたものであり、この条件から外れると正確ではない。そこで本研究では、式(1)および(2)の線形安定性に関する分散関係を数値的に得、これをもとにKS方程式と同様なモデル方程式を導出することを試みた。

4. 研究成果

(1) 大規模実験

図1に当量比に対して臨界火炎半径をプロットした結果を示す。臨界火炎半径は、火炎の加速が見られた当量比2.0以下の条件で測定できた。このグラフでは、当量比が小さいほど臨界火炎半径が小さくなるという傾向になっており、混合ガス間における大小関係は $H_2-O_2 < H_2-O_2-N_2-Ar < H_2-Air$ の順番になっている。

乱れない火炎半径 r は、膨張率 ε と層流燃焼速度 S_L を用いて $r = S_L t$ の式により、時間に対して線形の関係で表される。一方、不安定性により乱れが成長するときの火炎半径 r は $r = At^B + C$ のような、時間に対して非線形関数になると考えられている。そこで、本研究では非線形回帰を用いることで、図2に示すように火炎半径を時間に対する非線形関数で表した。ただし、グラフの丸点が実験値、破線が非線形回帰(NLR)モデル、点線が線形回帰(LR)モデルである。LRモデルの関係は、火炎伝播の初期には成り立つものの、後半にかけて乱れにより火炎が加速するにつれて成り立たなくなっている。そのため、NLRモデルの方が厳密に火炎の伝播挙動を表現できていると言える。また、既往の研究により、爆風圧の時間変化は音響学の式(1)で表されるとされている。

$$p(t) = \frac{\rho}{a} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \left\{ 2r \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + r^2 \frac{d^2 r}{dt^2} \right\} \quad (3)$$

図3は、NLRモデルおよびLRモデルの火炎半径の関数をそれぞれ式(1)に代入して、時間に対する爆風圧の関数を計算したグラフである。ただし、グラフの実線が実験値、実線+破線が非線形回帰(NLR)モデルによる計算値、点線が線形回帰(LR)モデルによる計算値である。このグラフから、火炎伝播挙動を非線形回帰した式の形を知ることができれば、音響学の式(3)を用いることで、圧力の時間変化を見積もることが可能となることが示された。

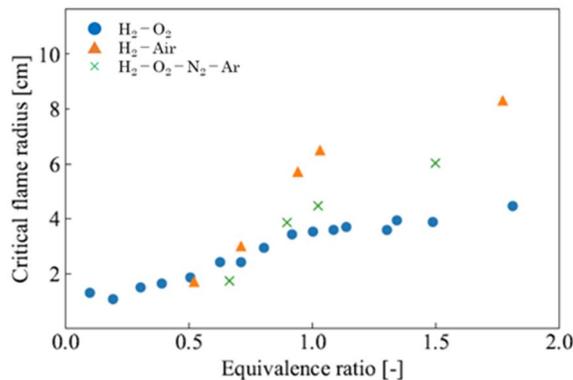


図1 臨界火炎半径と当量比の関係

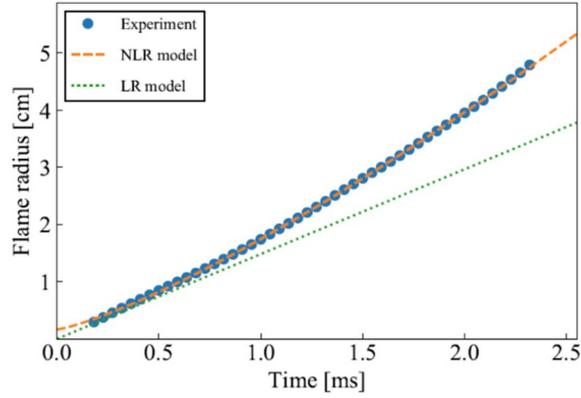


図2 火炎半径の時間変化

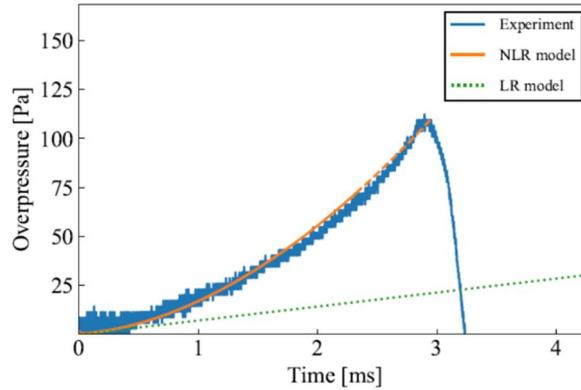


図3 爆風圧の時間変化

(2) 加圧実験

図4に水素-空気予混合気の球状伝播火炎における加速現象が始まる臨界 Peclet 数 $Pe_{cl}=r_{cl}/\delta$ と Markstein 数 $Ma_b=L_b/\delta$ の関係を示した。ここで r_{cl} は臨界火炎半径 δ は火炎帯厚さ L_b は Markstein 長さである。火炎帯厚さ δ は次の式で表される。

$$\delta = \frac{T_{ad}-T_u}{(dT/dx)_{max}} \quad (4)$$

ここで、 T_{ad} ：断熱火炎温度[K]、 T_u ：未燃ガスの温度[K]、 $(dT/dx)_{max}$ ：温度勾配の最大値[K/m]である。これらの値は、CHEMKIN Pro の GRI-mech 3.0 を用いた、平面層流火炎を仮定した計算によって求めた。Bradley ら、Bauwens らの報告したデータとそのフィッティング関数は一致しないものであったが、ここに本研究で得た水素-空気の結果をプロットすると、定性的に一致していることわかる。水素-空気のフィッティング関数は以下ようになった。

$$Pe_{cl} = 69Ma_b + 1595 \quad (5)$$

この関数は、フィッティングの範囲を $-30 < Ma < 55$ と広げても他の燃料に対しても定性的に一致した。図5には、臨界 Karlovitz 数 Ka_c と Markstein 数の関係を示した。ここで、 Ka_c は次式で定義されるパラメータである。

$$Ka_c = Kt_c \quad (6)$$

ここで、 K ：火炎半径が臨界火炎半径 r_c のときの伸張率[1/s]、 t_c ：火炎半径が臨界火炎半径 r_c のときの時刻である。この結果から、火炎を安定化させるためには最低限の伸張率が必要であるということがわかる。そして、Markstein 数が減少すると、臨界 Karlovitz 数は急速に上昇し、非常に高い値となる。これらの結果は、既往の研究結果とよく一致しており、フィッティング関数は次式となる。

$$Ka_{cl} = 0.012 \times \exp(-0.058Ma_b) \quad (7)$$

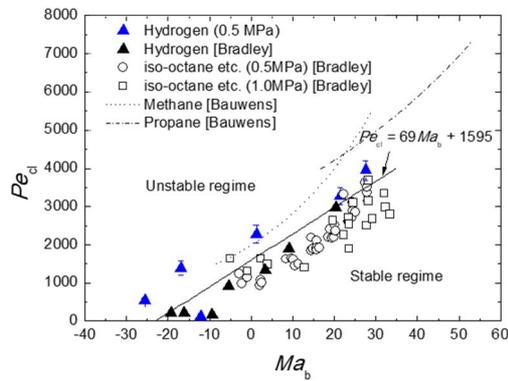


図 4 臨界 Peclet 数と Markstein 数の関係

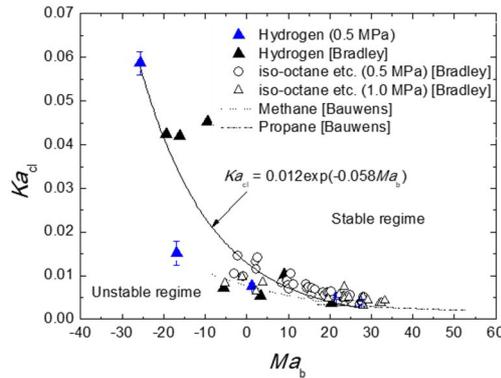


図 5 臨界 Karlovitz 数と Markstein 数の関係

(3) 影響度評価モデルの構築

図 6 に赤色で示したのは式(1)および(2)を数值的に解いて得た反応速度分布である。青色の実線がモデル方程式により得た火炎形状である。KS 方程式と比較して、本研究で導出したモデル方程式の方が式(1)および(2)で得た火炎形状を正確に再現できていることがわかる。つまり、本研究により火炎形状変化の正確で簡便な予測が可能になったといえる。これは、水素爆発被害の定量的な推定に直結する成果である。

本研究で得たモデル方程式による解析結果等をもとに拡散・熱的不安定性による火炎伝播速度の上昇に関する見積もりを行い、既往の実験結果を説明できることを確認した。

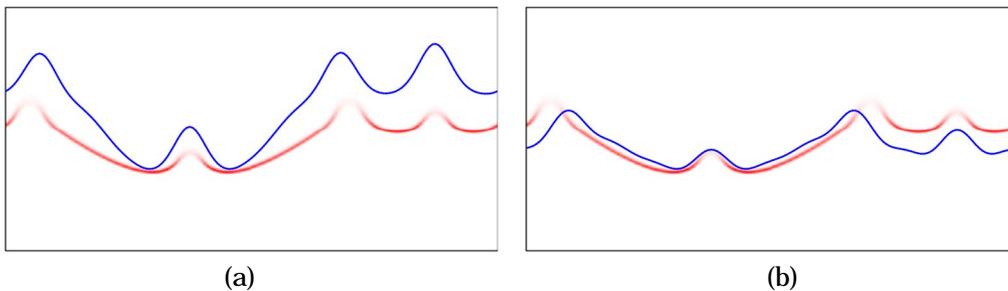


図 6 式(1)および(2)を解いて得られた火炎面形状（反応速度分布を赤色で表した）とモデル方程式による計算結果（青実線）の比較。(a)：オリジナルの KS 方程式，(b)：本研究で得たモデル方程式

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 2件）

1. 著者名 Yaguchi Jun, Kim Wookyung, Mogi Toshio, Dobashi Ritsu	4. 巻 46
2. 論文標題 Flame acceleration and blast wave of H ₂ /O ₂ /N ₂ /Ar mixtures in unconfined areas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 12329 ~ 12337
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijhydene.2020.06.046	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 桑名一徳	4. 巻 20
2. 論文標題 予混合火炎：流体力学的不安定性とフラクタル次元	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 実験力学会誌	6. 最初と最後の頁 292 ~ 294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 H. Iizuka, K. Kuwana, S. Yazaki	4. 巻 6
2. 論文標題 A simple method to evaluate the eigenvalue of premixed flame propagation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Letters	6. 最初と最後の頁 19-00610
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 桑名一徳, 矢崎成俊	4. 巻 58
2. 論文標題 火炎伝播のモデル方程式	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 伝熱	6. 最初と最後の頁 42-52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4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 飯塚洋行、桑名一徳、矢崎成俊
2. 発表標題 拡散・熱的な1次元火炎伝播モデルの燃焼速度について
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 矢口 純、金 佑勤、茂木 俊夫、土橋 律
2. 発表標題 水素のガス爆発において体積膨張率が火炎の加速挙動に及ぼす影響
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 Effect of Expansion Ratio on Flame Acceleration during Hydrogen Fueled Gas Explosions
2. 発表標題 J. Yaguchi, W. Kim, T. Mogi, R. Dobashi
3. 学会等名 8th International Conference on Hydrogen Safety (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Kim, T. Mogi, K. Kazunori, R. Dobashi
2. 発表標題 Development of theoretical model for explosion safety of hydrogen system
3. 学会等名 KIFSE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑名一徳
2. 発表標題 拡散・熱的モデルの火炎伝播速度
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑名一徳, 矢崎成俊
2. 発表標題 蔵本・シバシンスキー方程式の精度に関する検討
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018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 flame acceleration in premixed flames
3. 学会等名 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (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
研究分担者	桑名 一徳 (Kuwana Kazunori) (30447429)	東京理科大学・理工学研究科国際火災科学専攻・教授 (32660)	
研究分担者	茂木 俊夫 (Mogi Toshio) (50392668)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	K I M W O O K Y U N G (Kim Wookyung) (40781852)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教 (15401)	

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
---------	---------