

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23710190

研究課題名（和文） 高圧で噴出する可燃性ガスの自己着火危険性の科学的解明

研究課題名（英文） Analysis on Self-ignition hazards during discharge of high-pressure flammable gas

研究代表者

茂木 俊夫 (MOGI TOSHIO)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号：50392668

研究成果の概要（和文）：高圧の可燃性ガス、特に水素ガスが瞬間的に空気中に放出されると、自発的に着火する場合がある。この現象について多くの研究が行われているが、本研究では 70MPa の水素ガス噴出したときの挙動について、実験室レベルで調べられるように、一般的な 14.7MPa のボンベを利用した模擬的な実験手法により調べた。その結果、低圧側が 0.07MPa までは現象を再現できることがわかった。さらに、自己着火の発生には、放出された高圧水素と空気との混合が重要であり、直管よりも曲がり管や乱れが発生しやすいような配管の方が、より着火しやすいことがわかった。また、自己着火が起こる最小圧力を簡易に予測する手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：When high-pressure hydrogen is suddenly discharged into air, it is possible to be spontaneously ignited. Many researches were carried out on this phenomenon recently. Among those lab-scale experimental works, the maximum value for hydrogen release pressure was 14.7 MPa. In order to investigate into the behavior of 70 MPa hydrogen, we adopted a new method of enlarging pressure ratio by vacuuming the air. It was found that this method to imitate high pressure hydrogen release is only valid when the pressure of air is larger than 0.07 MPa. Another major contributing factor in self-ignition is the mixing of hydrogen and air. It was discovered that hydrogen blends into the heated air before the contact surface of two gases arrives. We also tested the effect of enforced gas mixing. Hydrogen was discharged through pipes with various geometries. The onset pressures for ignition were lower than the pressure when hydrogen was released in a straight pipe. A simple way to estimate the minimum pressure for self-ignition was proposed and validation was attempted.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：高圧水素，衝撃波，自己着火

## 1. 研究開始当初の背景

可燃性ガスはハンドリングしやすいエネルギー源として、一般家庭から工業現場まで広く用いられているが、漏洩し着火が起こるとガス爆発災害を引き起こす危険がある。また、

近年、環境に配慮した新規エネルギーシステムとして水素などの可燃性ガスを用いたシステムの開発が進められているが、的確な安全対策が準備できなければ、「環境対策にはリスクがつきもの」という状況は避けられな

い。特に、次世代エネルギーとして期待されている水素は、最小着火エネルギーが小さい、可燃濃度範囲が広いなどの爆発危険性を有するため、安全な利用に向けて数多くの安全性に関する研究が行われている。その中で、高圧水素ガスが大気中に噴出した際に自然着火する可能性があることが知られているが、この現象を実験的に解明した研究例はほとんどなく、着火条件を詳細に調べることは安全上重要である。実際に運用されている水素ステーションにおいても水素放出配管等での自然着火が確認されており、危険性は認められないものの、社会的受容性を向上するためにその対策は不可欠である。さらに、事故等で水素が着火した場合に原因が特定できないときは静電気によるものと断定される傾向が強いため、科学的に自己着火による発火可能性を明らかにしておくことは、科学的に原因を説明し、安全対策を講じることに貢献できる。

これまでに、高圧水素ガスが大気中に急激に放出された際に、実際に着火することを実験的に確認し着火条件を明らかにしてきた。しかしながら、自己着火が起こる場合の放出圧力の下限については、他の研究グループの結果と差異が見られることがわかっている。下限における着火要因を明らかにすることは、安全工学上極めて重要であると考えられる。また、水素燃料電池自動車などでは、効率を高めるため、燃料タンクや水素供給インフラの高圧化が図られている。そのため、高圧での着火危険性を確認するとともに、着火することが明らかになれば、安全上、着火防止の指針を定める必要がある。しかし、実験設備や実験手法が複雑となるため、高圧(40MPa以上)条件では、実験的手法では研究が行なわれておらず、自己着火発生の有無も確認されていない。もし、低圧条件よりも容易に着火しやすいことが確認されれば、さらに安全対策を検討する必要が発生するため、安全工学上重要な知見が得られるものと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、高圧可燃性ガスが空気中に瞬時的に放出された際の着火危険性について、着火に及ぼす要因およびこれまでに明らかにされていない高圧条件における着火危険性を実験的および解析的に明らかにすることを目的とする。具体的には、低圧で噴出した場合の着火限界条件に及ぼす要因を明らかにする。また、高圧で噴出した場合については、モデル実験により基本的な噴出特性データを収集し、熱流体計算により、実際の圧力を想定したシミュレーションを行い、配管の破断や亀裂等からの瞬時的な噴出による着火危険性について検討を行う。

## 3. 研究の方法

本研究は、高圧の可燃性ガスが噴出したときの自己着火現象に及ぼす因子を明らかにするとともに、実験室規模で実規模(70MPa)の現象をシミュレーションできるような実験手法の開発も目的としている。そこで、図1に示すようにバッファタンクを組み合わせた放出装置を構築した。さらに、着火に及ぼす乱れの影響を明らかにするため、形状を変更できるような配管システムを構築した。また、放出された高圧の可燃性ガスが着火に至る過程を明らかにするために、小型の圧電ピンにより圧力波(衝撃波)を計測するとともに、光ファイバーとフォトディテクターにより火炎伝ばを同時かつ精密に計測できるシステムを構築した。

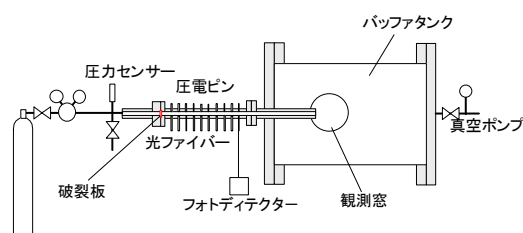


図1 実験方法

## 4. 研究成果

(1) まず、圧力波の速度が音速以上であることを示すために直管を用いて着火の起こらない条件で衝撃波の速度を測定した。初期圧力比と速度の関係を図2に示す。用いたのは直径10mmの配管であり、圧力センサーの位置は破裂板から60mmと90mmである。一般的に衝撃波管で衝撃波が生成するためには管直径の10倍以上の長さが必要とされるが、今回の条件でも衝撃波になっていることが示された。曲線は以下の式から求めた理論値である。

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} \left[ \left( \frac{U_s}{a_1} \right)^2 - 1 \right]$$

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \left[ 1 - \frac{(\gamma_4 - 1)a_1}{(\gamma_1 + 1)a_4} \left( \frac{U_s}{a_1} - \frac{a_1}{U_s} \right) \right]^{-2\gamma_4 / (\gamma_4 - 1)}$$

$p_4/p_1$  を大きくすると破膜時に生ずる乱れの影響により実験値は理論から外れやすくなっている。

(2) バッファタンク内を減圧したときも理論通りに衝撃波ができていたことが確認されたので、長さ300mmの管を用いて空気側を減圧したときの最低着火  $p_4/p_1$  を調べた。各  $p_4/p_1$  で自着火が起こったかどうかを図3に示す。 $p_1 > 0.06$  MPa では自着火の起こる最低圧力が一定となり、既知の値と等しかった。しかし  $p_1$  をそれより下げると、最低着火  $p_4/p_1$  は  $p_1$  が小さいほど高くなった。衝撃波の強さ

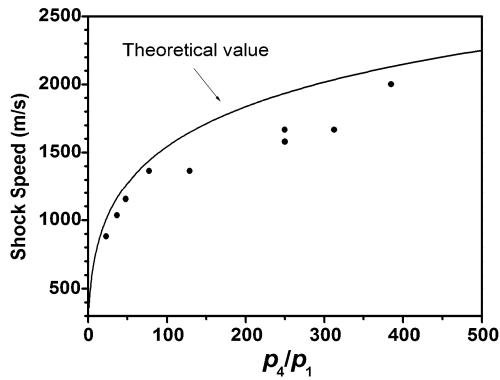


図2 圧力比と衝撃波速度の関係

は圧力比  $p_4/p_1$  で決まることから、もし現象が  $p_4/p_1$  のみに依存すれば、高圧の実験を行わずとも高圧での現象が予測できることが期待されたが、ここで  $p_1$  への現象の依存性が示されたためこのような予測は困難であることが分かった。 $p_1$  を下げると着火しにくくなる原因として、酸素の濃度が影響していると考えられる。酸素分子の数が少なくなり反応しにくくなった効果と、気体の密度が下がり流体力学的に混合しにくくなった効果があることが推測される。

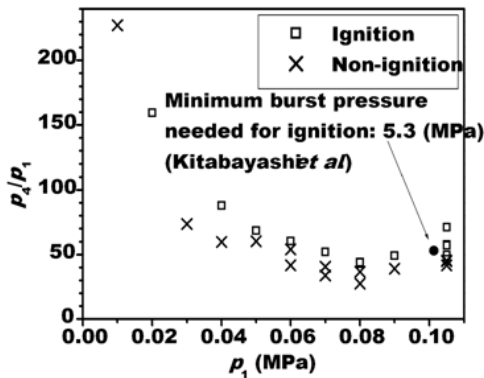


図3 着火に及ぼすバッファタンク内圧力の影響

(3) 圧力センサと光ファイバーを 20 mm 間隔で壁に設置した長さ 300 mm の管を用いて管内での衝撃波伝播と圧力波発光領域の時間変化に関して調べた。先行研究により最低着火破膜圧力は管が長くなるほど低くなるということが指摘されていることから、発光開始位置を着火位置であると仮定すれば  $p_4/p_1$  を変えたときの衝撃波と発光領域の位置関係から着火のメカニズムが議論できると考えられる。

$p_1$ ,  $p_4$  と発光開始位置 (着火位置) を調べた結果を表 1 に示す。データにばらつきがあるが、同じ  $p_1$  であれば  $p_4$  が高いほうが破裂板の近くで着火する可能性があるといえる。

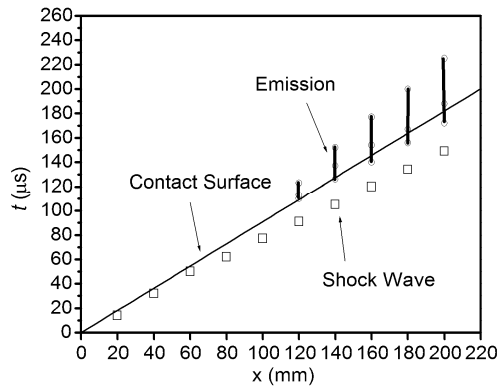
表 1 圧力比と着火位置の関係

$p_1$ (MPa)	$p_4$ (MPa)			
	Distance from the diaphragm (mm)			
$1.0 \times 10^{-2}$	8.67			
	100			
$2.0 \times 10^{-2}$	6.44	8.34	10.4	
	100	100	80	
$4.0 \times 10^{-2}$	5.16	7.16	10.4	
	120	100	80	
$5.0 \times 10^{-2}$	7.83	8.11	8.95	
	100	80	100	
$6.0 \times 10^{-2}$	9.07	10.2		
	180	100		
$7.0 \times 10^{-2}$	8.77	10.9		
	100	100		
$8.0 \times 10^{-2}$	9.72	10.7	10.8	
	100	100	160	
$1.0 \times 10^{-1}$	10.7	11.2	13.1	
	120	100	60	

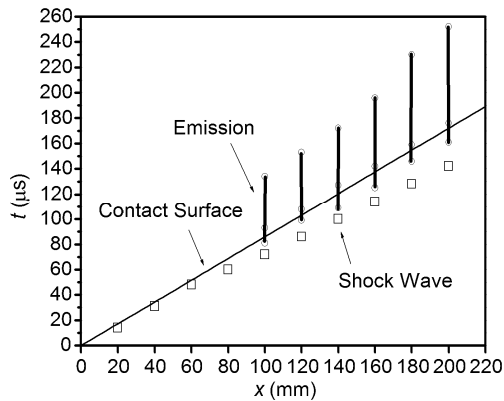
次に、 $p_1=0.10$  MPa での 3 実験で測定した、各センサ位置における衝撃波到達時刻と発光時間を図 4 示す。衝撃波到達時刻は四角のプロットで、発光時間は太い棒で表している。太い棒を描くのに利用した丸は下から発光開始時刻、強度ピーク時刻、発光終了時刻である。接触面の到達時刻を衝撃波速度から推定し、直線で表した。ここで注目すべきは接触面より先に発光が確認されていることである。衝撃波の通過により加熱された空気中に水素が混入し着火していることが示唆される。混合機構について考察すると、 $p_4/p_1$  が大きいと衝撃波が到達してから光り始めるまでの時間が短く、また光っている時間も長いことから、拡散ではなく境界層や流体の不安定性の影響により混合していると考えられる。

(4) 自着火のしやすさには衝撃波温度  $T_2$  だけでなく水素と空気の混合が影響することを明らかにするため、管の形状を複雑にすることで気体を強制的に混合させた。結果の一部を表 2 に示す。ほとんどの条件において、直管よりも複雑な形状の管のほうがそれより低い破膜圧で着火が起こった。したがって、管の中で水素と空気が混合することが自着火のしやすさに影響を与えていると考えられる。

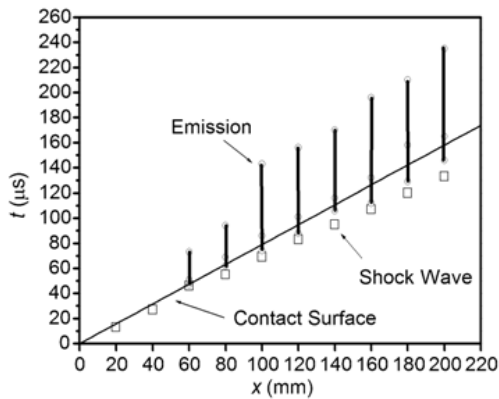
(5) 最低着火初期圧力比の簡易予測手法の検討を行った。接触面において混合が一瞬で起きると仮定すると、管内の最低着火  $p_4/p_1$  に関して次の簡易予測が成り立つ。ある  $p_4/p_1$  を仮定し、一次元衝撃波理論から接触面速度  $u_2$  と熱気体の圧力  $p_2$ 、温度  $T_2$  を計算しておく。長さ  $L$  の管を通過する時間  $\tau_2=L/u_2$  と、圧力  $p_2$ 、温度  $T_2$  の水素-空気予混合気の着火誘導時間  $\tau_1$  を比較する。 $\tau_1 > \tau_2$  の場合は着火が起きないため、 $\tau_1 = \tau_2$  となる  $p_4/p_1$  が最低着火  $p_4/p_1$  となる。この予測を 100 mm から 1000 mm 管での実験結果と比較した結果を図 5 に示す。



(a)  $p_4 = 10.7$  MPa



(b)  $p_4 = 11.2$  MPa



(c)  $p_4 = 13.1$  MPa

図4 衝撃波と発光時間との関係

す。データには先行研究から引用した値も含む。管が長くなるにつれ簡易予測法で求めた最低着火  $p_4/p_1$  よりも実験値のほうが小さくなった。

以上をまとめると、高压水素ガスの噴出自着火現象について衝撃波管を用いて実験を行った。バッファタンクを減圧することでより強い衝撃波を発生させることはできるが、それだけでは 70 MPa の水素が大気中に放出

表2 配管形状と着火し易さ

Length (mm)	Straight pipe minimum burst pressure (MPa)	Blocked pipe	
		Geometry	Burst pressure range (MPa)
100	7.3	Coil $l=30$ (mm)	2.2 ~ 2.5
		Orifice $d=4$ (mm)	1.9 ~ 2.2
150	7.0	Bent once	1.1 ~ 1.4
400	5.3	Bent twice	2.7 ~ 3.3
500	5.0	Bent 5 times	2.1 ~ 3.3

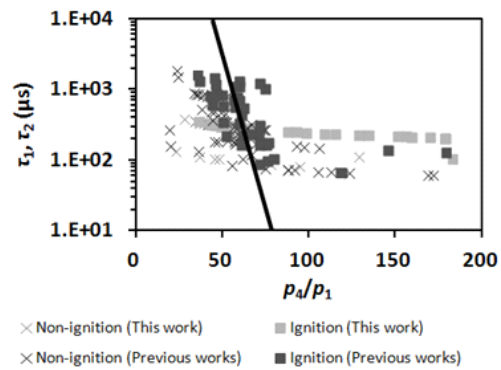


図5 着火誘導時間と圧力比

今後の課題として、酸素濃度を大気と同程度に保ってバッファタンク内を減圧し、70 MPa の水素放出時挙動を調べることや、管内のある位置における発光強度の時間変化と数値流体力学計算で算出された化学種の分布を比較し着火機構を素反応レベルで解明することが期待される。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

①Chika Miwada, Toshio Mogi, Ritsu Dobashi, Turbulent effect in spontaneous ignition of high-pressure hydrogen during sudden discharge, 9th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, 2012/7/24, Cracow, Poland.

②三輪田知佳, 茂木俊夫, 土橋律, 高压水素ガスの噴出自着火現象における配管構造の影響, 第22回水素エネルギー協会大会, 2012/12/6, 広島.

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

茂木 俊夫 (TOSHIO MOGI)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号：50392668

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者