

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

総合研究報告書

水素ガス漏洩爆発作業安全基準策定のための被害評価方法の確立

— 次世代燃料利用技術開発に伴う災害防止への対応

(平成 14—16 年度)

課題番号 H14-労働-27

主任研究者 名古屋大学大学院工学研究科 吉川典彦

分担研究者 名古屋大学エコトピア科学研究所 長谷川達也

分担研究者 名古屋大学大学院工学研究科 斎藤寛泰

分担研究者 独立行政法人産業安全研究所 大塚輝人

分担研究者 独立行政法人産業安全研究所 水谷高彰

目 次

1. 平成 14—16 年度 3 年間の研究総括 1-1~1-6
吉川典彦
2. 水素爆燃の実験研究 2-1~2-113
上坂直人, 斎藤寛泰, 水谷高彰, 大塚輝人, 森崎雄貴, 吉川 典彦
3. 低温における水素ガスの爆発特性評価 3-1~3-4
水谷高彰, 松井英憲
4. 開放空間における爆発危険性評価指数の導入 4-1~4-4
大塚輝人
5. 水素ガス漏洩爆発現象の計算的検証 5-1~5-7
大塚輝人, 水谷高彰, 上坂直人, 斎藤寛泰, 吉川 典彦
6. 水素爆発シミュレーションコードの開発 6-1~6-82
森崎雄貴, 長谷川達也

謝辞

1. 平成 14—16 年度 3 年間の研究総括

名古屋大学大学院工学研究科 吉川典彦

最近の水素燃料電池自動車の開発に代表されるように、水素は次世代燃料として期待されている。しかし、一般社会における利用の普及には、多くの課題があり、特に爆発危険性に関する基盤データの蓄積と、安全技術の確立は、不可欠である。

本研究は、特に水素燃料電池自動車の燃料供給ステーション開発・試験運用に関連して、労働災害防止の立場から、水素爆発危険性評価方法の確立を目指したものである。研究は、平成14-16年度の3年間にわたり、本報告書は、3年間の研究を総括するものである。

ここでは、個々の研究成果の報告に先立ち、まず、水素爆発についての従来の知見のまとめを示し、続いて、本研究の基本方針と研究項目策定の経緯、研究経過概要を述べ、最後に、本報告書の概要と主な研究成果を記す。

1. 水素爆発基本特性のまとめ

水素燃料電池自動車の開発に伴い、水素ステーションの試験運用も始まり、高圧ガスの利用に関する規制の見直しが検討されている。しかし、水素は気体燃料の中でも大きな爆発威力をもつことが知られており、水素ステーションの安全基準策定に際して、その爆発危険性をどの様に評価するか、重要な課題となっている。

可燃性物質の引き起こす事故には、爆発と火災の2つの形態がある。爆発は、爆風と呼ばれる強い圧力波（圧縮波又は衝撃波と呼ばれる）の伝播を伴う現象であり、広い範囲に高い圧力状態を作って、建物や器物を破壊する。爆風の被害は、燃料漏洩の場所から遠く離れた距離に及ぶ可能性があり、場合によっては半径数百メートル以上が被害を受ける事もある。このため、爆発は火災より被害の大きな事故となる。爆発が起きる条件は、燃料が空気と混じって、大量の可燃性混合気を作ることである。液体燃料と比べて、気体燃料は、短時間で空気と十分に混合した状態となり、爆発が起きやすい。気体爆発には、爆燃（デフラグレーション）と爆轟（デトネーション）の二つの形態がある。前者は、火炎が空間を伝播してその前方に圧縮波又は衝撃波を形成する過程であり、火炎が急速に膨張する球形ピストンの役目をして、圧力波を作り出す。後者は、衝撃波と火炎反応帯が合体して一つの安定した超音速燃焼波（爆轟波と呼ばれる）を形成し、1400~2000m/sで伝播する過程である。爆轟の方が、衝撃波の圧力上昇が高く、15~20気圧になり、ほとんどの建物が全壊する。爆燃では、火炎伝播速度の増加に伴い、衝撃波又は圧縮波の圧力が増加する。およその見積りとして、球状火炎伝播速度が100 m/sを超えると、0.1気圧以上の圧力上昇を伴い、大きな爆風被害を伴う^{1),2)}と考えられる。ちなみに、0.01気圧の圧力上昇は、面積1m²で1kNの力となり、窓ガラスは、この圧力レベルで破壊を始める。

爆燃と爆轟のどちらが起きるかは、混合気のおかれた状況に依存する。爆轟が起きる過程には、火炎が乱流の影響で加速して爆轟波に遷移する場合、密閉容器の破裂などによって放出した既燃ガス噴流が周囲の未燃混合気と混合して爆轟波が形成される場合³⁾が考えられる。乱流火炎の加速による爆轟への遷移は、管内や密閉空間で起き易く、障害物がある場合にも促進されることが分かっている。したがって、水素燃料搭載自動車のトンネル内での爆轟事故の可能性を考慮する必要がある。障害物のない完全な開放空間では、火炎が急激に加速される事はなく、爆轟への遷移は観測されていない。したがって、水素利用の施設では、配管等の乱流火炎を促進するような障害物や密閉空間を避けることが必要である。しかし、障害

物や密閉空間を完全に排除する事は困難であり、実際の施設の適正な危険性評価が必要となる。爆燃については、火炎伝播速度がどこまで増加するかを評価する必要がある。

水素は最も軽い気体であり、開放空間において急速に上方に拡散する。したがって、空気と可燃性混合気を形成する時間は短く、その時間内に着火が無ければ、爆発事故は起きない。しかし、その反面、一旦着火が起きると、他の燃料と比べて、爆発の威力は大きい。水素利用の普及に際して、上記の相反する二つの特性を考慮して、その事故災害の危険性を総合的にどの様に評価するかは重要な課題であるが、実験研究の蓄積は不十分であり、結論を導ける段階にはない。

ここで、既存データを基にして、水素の爆発特性を他の燃料と比較しておく。

水素は火炎伝播濃度範囲が広く、水素-空気混合気ではモル分率 4~75 %で火炎が伝播する。他の燃料、例えば、メタン 5.3~15.0 %、エチレン 3.1~32.0 %、プロパン 2.2~9.5 %と比べると、広い濃度範囲を持つことが分かる。水素に匹敵する燃料は少なく、アセチレン 2.5~100.0 %、エチレンオキサイド 3.0~100.0 %といった分解爆発特性を有するなど、特殊な反応機構をもつガスのみである。大気圧混合気の最小着火エネルギーについても、多くの燃料が 0.1~0.3 mJ であるのに対して、水素は一桁小さい 0.01 mJ であり、静電気によるスパークで充分着火する⁴⁾。燃焼速度は火炎伝播の強さを表す量として用いられる。火炎が伝播するときには、前方の未燃混合気も速度をもち、燃焼速度 = (静止座標系で見た火炎の伝播速度) - (静止座標系で見た前方未燃ガスの速度) で定義される。又、静止座標系で見て、火炎後方の既燃ガスが静止すると近似すると、火炎伝播速度 = 燃焼速度 × 火炎の膨張比 の関係式を得る。火炎の膨張比 = 未燃ガス密度 / 既燃ガス密度 であり、多くの量論混合気で 6~8 である。したがって、火炎伝播速度 = 燃焼速度 × (6~8) が成り立つ。層流燃焼速度が混合気の基準特性となり、乱流の場合には、乱れ強さによって、燃焼速度が層流の場合の 10 倍以上にもなることがある。水素-空気予混合気の層流火炎の最大燃焼速度についても、多くの炭化水素燃料が 0.3~0.4 m/s、例外的に大きなエチレンでも 0.68 m/s である⁵⁾のに対して、水素は燃料モル分率 43.1% 近傍で 2.86 m/s という大きな値をもつ⁶⁾。したがって、他の燃料と比べて、火炎伝播速度も大きくなることが分かる。水素の層流火炎伝播速度は 20~30 m/s であり、乱流火炎になって燃焼速度が 2,3 倍に上がれば、100 m/s に近い伝播速度となり、圧力上昇 0.1 気圧に対応する爆風が形成される可能性がある。

量論混合 (燃料と酸化剤の過不足ない比率の混合、水素モル分率 29.6%) の水素-空気爆轟波の伝播速度と圧力は、各々、1970 m/s と 1.58 MPa である。これは他の炭化水素-空気量論混合気、例えば、メタン-空気: 1800 m/s, 1.74 MPa, エチレン-空気: 1825 m/s, 1.86 MPa, プロパン-空気: 1800 m/s, 1.85 MPa と比べて余り変わらない値である。混合気の爆轟の起こり易さを表すのに、起爆させる際に用いる放電スパークや爆薬による爆発のエネルギー量を用いることがある。起爆開始限界エネルギー量が小さいほど爆轟になり易く、空気混合気の中では、水素は、アセチレン 0.13 kJ に次いで爆轟し易く、1.3 kJ であり、エチレンオキサイド 4.1 kJ, エチレン 11 kJ, プロパン 66 kJ と続く⁵⁾。

以上の様に、爆轟と爆燃のいずれをとっても、他の燃料と比べて、水素は爆発危険性の高い燃料であることが分かる。しかし、実際の高圧貯蔵システムから水素が漏れて混合気を形

成した場合に、どのような被害が起きるかを定量的に推定する事は容易ではない。火炎伝播速度が 100 m/s のレベルを超えて大きな爆風被害を引き起こすのか、更には爆轟に遷移するのか、

あるいは、火炎の加速が小さくて僅かの圧力上昇しかなく、軽微な被害ですむのか、といった判定は多くの場合に困難である。

参考文献

- 1) C. M. Guirao, G. G. Bach, and J. H. Lee, "Pressure Waves Generated by Spherical Flames", *Combustion and Flame*, vol. 27, pp.341-351 (1976).
- 2) M. J. Tang, and Q. A. Baker, "A New Set of Blast Curves from Vapor Cloud Explosion", *Process Safety Progress*, vol.18, No.3, pp.235-240 (1999).
- 3) R. Knystautas, J. H. Lee, I. Moen, and H. Gg. Wagner, "Direct Initiation of Spherical Detonation by a Hot Turbulent Gas Jet", *Proc. of the Combustion Institute*, Vol. 17, pp.1235-1245 (1979).
- 4) B. Lewis and G. von Elbe, "Combustion, Flames and Explosions of Gases", 3rd edition, Academic Press, pp.333-361 (1987).
- 5) 燃焼工学ハンドブック, 日本機械学会, 丸善, pp.28-29, pp.124-125 (1995).
- 6) O.C. Kwon and G.M. Faeth, "Flame/Stretch Interactions of Premixed Hydrogen-Fueled Flames: Measurements and Predictions", *Combustion and Flame*, vol. 124, pp.590-610 (2001).

2. 基本方針と研究項目策定の経緯・研究経過概要

従来の水素爆発の研究成果を検討し、平成 14 年度の研究開始時に、本研究の基本方針を確定した。従来の水素爆発の研究は、デトネーションに集中していたが、水素ステーションの爆発危険性評価の見地からは、有益な知見は得られないと判断した。多くの研究は、管内や密閉容器のデトネーションの開始機構の研究であり、デトネーション開始に必要な爆薬のエネルギー量等のデータは、安全工学上の水素爆発危険性評価には寄与しないと考えた。又、過去の知見から、水素ステーションでは、密閉容器や閉鎖空間を徹底的に避ける設計が不可欠であることは自明であり、そうした研究を再度繰り返す事はしないことに決定した。基礎データとして欠落していた部分は、開放空間における爆燃危険性の評価であり、その評価方法も確立されていなかった。幾つかの方法を検討した結果、野外実験も含めて、幾つかの異なるスケールの実験を行い、水素爆燃に関するスケール側が成り立つかどうかを検証する事を第一の目標とした。実験方法は、比較的単純なラテックス膜や大型ゴム風船を用いる方法を試行し、試行錯誤の後に、適切な実験方法を確立することができた。実験と共に、数値シミュレーションによる被害予測手法の確立にも注力した。既存の計算コードの利用と並行して、新たに計算コードの開発も行った。研究の過程で、開放空間における爆燃危険指数の導入を初めて提唱し、有効なパラメーターであることが確認できた。

3年間の主な研究項目は以下の1.～8.である.

1. 室内小型実験による水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化のレーザーレーリー分光計測法の開発と実験データの取得
2. 野外実験における水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化計測・レーザーレーリー分光計測法の開発とデータ取得
3. 水素ガス漏洩空間濃度分布時間変化の計算コードの開発
4. 室内小型実験による水素ガス漏洩爆発過程の計測方法の開発とデータ取得
5. 野外実験による水素ガス漏洩爆発過程の計測方法の開発とデータ取得
6. 水素ガス漏洩爆発過程の計算コードの開発
7. 高圧水素噴出野外実験(ラプチャーディスクの実験)
8. 低温水素の爆発特性評価

以下に, 上記1.～8.の項目の研究経過を説明する.

1. レーザーレーリー散乱法については, 小型装置を用いた瞬時濃度分布計測は成功したが, パワー不足のために, 連続撮影は成功しなかった. 瞬時の測定に限られるが, カメラのタイミングをずらして, 水素濃度分布の変化の概略を把握する事が可能になる.
2. 上記1.の結果から, 野外実験規模には適用できないことが分かった.
3. 既存のコード(CFX-4)を用いて, 大規模の水素漏洩にも計算可能であることが分かった. 新規のコード開発については, 小規模の詳細計算は可能であることを確認できる段階になったが, 大規模計算については, 格子点の配置や計算方法について更に改良が必要であることが分かった.
4. ラテックス膜を用いて半球状の水素-空気混合気ガス塊を作り, 着火後の火炎の伝播と圧力上昇を計測する技術を確立した. 火炎伝播は高速度ビデオで撮影した. 圧力測定に関しては, 火炎の熱や輻射の影響で圧力センサーの動作が不安定になることが分かり, 正確な測定法の確立に時間が掛かったが, キスラー社のエンジン排気ガス測定用のセンサーが適している事や, マノメータータイプの気柱圧力の測定によって火炎や輻射の影響が低減できる事が分かった. 室内小型実験測定法は概ね確立できたと思われる.
5. 容積150Lや1400Lの大型ゴム風船に水素-空気混合気を充填して着火させ, 火炎の伝播過程と圧力測定を行った. 実験方法は確立できたが, 野外実験場の爆発騒音の制約により, 実験を途中で中止せざるを得なかった. 日本では, 周囲への騒音について厳しい制約があり, 野外実験敷地使用を依頼していた会社との協議の結果, 実験を中断した.
6. 既存のコード(CFX-4)を用いて, 室内実験の結果と比較した. 爆発挙動について, かなり良い一致を示した. 大型計算機を利用すれば, 大規模水素爆発にも計算が期待できることが分かった. 新規のコード開発については, 小規模の詳細計算は可能であることを確認したが, 格子点の配置や乱流の計算方法について, 更に改良が必要であることが分かった.
7. 前述の野外実験場における騒音の制約によって, 実験を断念した.

8. 既存の低温貯蔵装置を用いて、低温水素の爆発特性を明らかにした。従来の常温付近の結果を外挿したような結果となり、妥当な結果と評価できる。

3. 報告書の概要と主な研究成果

本報告書の残りの部分は、2.～6.の5つ研究報告を含んでいる。

爆燃の実験研究については、2.でまとめており、小規模実験から野外実験規模までの方法と結果について記述し、最後にスケール測についてまとめている。3.は低温水素の爆発特性評価実験を記す。4.は既存の計算コードを用いて、新しい爆発危険指数の導入を示している。5.は小規模実験と既存計算コードを用いた計算の比較であり、6.は詳細反応機構を含んだ爆発過程計算コードの開発結果を示す。

本研究成果の最も重要な3つの貢献を以下にまとめる。

- (1) 小規模から野外実験規模まで、ラテックス膜や風船を用いた比較的簡便な装置で、水素爆燃の基礎特性を評価する手法を確立し、サイズの大きく異なる実験データを無次元して、スケール則が成り立つ事を明らかにした。
- (2) 開放空間における爆燃危険指数を導入し、水素濃度分布時間変化の数値解析を基にして、爆発危険性を評価する手法を確立した。
- (3) 低温水素爆発特性を明らかにして、水素爆発特性に関する新たな知見を与えた。

2. 水素爆燃の実験研究

名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程 2 年	上坂直人
名古屋大学大学院工学研究科	斎藤寛泰
独立行政法人産業安全研究所	水谷高彰
独立行政法人産業安全研究所	大塚輝人
名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程 2 年	森崎雄貴
名古屋大学大学院工学研究科	吉川典彦

第1章 緒言

1.1 背景

20世紀、先進工業国は急激な経済成長を遂げ、現在の豊かな生活を享受できるまでになった。これを支えているのは大量のエネルギー消費であり、その大部分は石油を中心とする化石燃料によるものである。だが、原油価格の高騰に見られるように、これらは世界各地に無尽蔵にあるわけではなく、特に石油にいたっては21世紀中の枯渇が危惧されている。また、京都議定書や各国の自動車の排ガス規制などに見られるように、地球の温暖化や大気汚染といった自然環境への配慮が求められている。今後のアジア・南米・アフリカなどにおける経済成長、生活水準の向上を考慮すると、より大きな問題となってくるであろう。

このような問題の解決のためには、省エネだけでなく、さらなるエネルギーの確保が必要となり、しかもそのエネルギーはクリーンであることが求められる。このクリーンな代替エネルギーの一つの候補として水素に大きな期待が寄せられ、水素エンジンや水素ガスタービン、燃料電池など、さまざまな利用方法が検討されている。

水素エネルギー社会への期待は大きい。だが、いかにクリーンなエネルギーとして優れていても、普及のためには安全に低コストで安定的に供給できる体制の確立が不可欠である。そのためには、水素の製造・利用にかかわる技術だけでなく、輸送・貯蔵・供給にいたるまでのインフラの整備など、クリアしなければならない課題は多い。特に燃料電池自動車に関してはガソリンスタンド並みの拠点網をどう整備していくか、ということが重要となる。水素は爆発の危険性があり、街中に水素ステーションが建設されることになると、当然、万が一の爆発災害に備え、その被害予測と建設の安全基準が必要になる。

1.2 混合気爆発

気体爆発には爆燃（デフラグレーション）と爆ごう（デトネーション）の二つの形態がある。前者は、火炎が空間を伝ばしてその前方に圧縮波または衝撃波を形成する過程であり、後者は、衝撃波と火炎反応帯が合体して一つの安定した超音速燃焼波を形成し、マッハ数4～6で伝ばする過程である。爆ごうの方が衝撃波の圧力上昇が大きく、15～20気圧になり、

ほとんどの建物が全壊する。爆燃では、火炎伝ば速度の増加に伴い、衝撃波または圧縮波の圧力が増加する。おおよその見積もりとして、球状火炎伝ば速度が 100 m/s を超えると、0.1 気圧以上の圧力上昇を伴うと考えられる【1-2】。

爆燃と爆ごうのどちらが起きるかは、混合気のおかれた状況に依存する。爆ごうが起きる過程には、火炎が乱流の影響で加速して爆ごう波に遷移する場合、密閉容器の破裂などにより放出した既燃ガス噴流が周囲の未燃混合気と混合して爆ごう波が形成される場合【3】が考えられる。乱流火炎の加速による爆ごうへの遷移は、管内や密閉空間で起きやすく、障害物のある場合にも促進されることがわかっている。障害物のない完全な開放空間では、遷移が起きるまで火炎が加速されることは観測されていない。したがって、水素の利用施設では、配管等の乱流火炎を促進させるような障害物や密閉空間を避けることが重要である。しかし、障害物や密閉空間を完全に排除することは困難であり、実際の施設の適正な危険性評価が必要となる。爆燃については、火炎伝ば速度がどこまで増加するかを評価する必要がある。

1.3 従来の爆発被害評価方法

これまでも、爆発災害における被害評価の研究は行われている。その中で、長年一般的に行われてきたのがいわゆる「TNT 換算」という手法である。混合気の燃焼により発生するエネルギー量に相当する TNT 火薬の質量に変換する手法である。この手法は単純であり、爆発点からの距離による TNT の影響はよく知られていたため、適用しやすいという利点がある。だが、この手法には欠点もある。まず、実際の混合気の爆発事故では、漏れた混合気の量のすべてが燃焼に用いられるわけではなく、未燃のまま拡散してしまう部分があるが、このことを考慮していない点である。事故調査によると、漏れた混合気のうち燃焼に用いられるのは 0.1~10%程度であり、そのほとんどが 1~2%以下である【2】。また、TNT 換算の主な欠点は、関連するのが燃料量のみで、燃焼の形態を考慮していない点である。火炎の伝ば速度が燃料により異なることはよく知られているが、同じ燃料でもその環境（加圧されているかどうか、密集しているか、開放状態か、など）によって大きく異なる【4】。当然、発生する圧力値も異なってくる。さらに、爆発点から近距離においては、火薬と混合気の爆発による影

響には劇的な相違がある。エネルギー量が同じ条件では、火薬による爆発は混合気によるものに比べオーバープレッシャーはかなり大きいものとなる。水素ステーションなどの施設では爆発点付近に建造物などが存在するため、TNT換算は不向きである、と考えられる。

1.4 本研究の目的

このようなことを踏まえて、混合気の爆発に関して行われた研究もある。工業施設におけるプロパンや天然ガスによる爆発事故を想定し、約 4000m^3 という規模での爆発実験を行い、施設内の複雑な配管類などを考慮しながら、密集条件が火炎伝ば速度や圧力波に与える影響の調査【4】、原子力発電所内での冷却水から発生する水素による爆発事故を想定したもの【5-6】、数値シミュレーションではストックホルムで実際に起こった水素漏洩爆発事故をもとに行われた研究【7】、もっと単純に、円筒、球形火炎が一定速度で膨張する際に発生する圧力を、膨張火炎と等価の膨張ピストンを想定して流体力学的に求める研究【1】など数多い。

だが、大気圧下における開放空間もしくは準開放空間における水素-空気の爆発を扱った、実験的な研究は意外と少ない。

水素-空気混合気では可燃範囲はモル濃度で4~75%（当量比では0.1~7以上）となっている。一般的な炭化水素燃料と比較すると、メタン5.3~15%、プロパン2.2~9.5%、エチレン3.1~32.0%と水素がいかに広い可燃範囲を持っているかがわかる。水素に匹敵する燃料は少なく、アセチレン2.5~100%、エチレンオキサイド3.0~100%といった分解爆発特性を有するなど、複雑な反応機構を持つもののみである。最小着火エネルギーに関しても、一般的な炭化水素燃料が0.3~1 mJ程度であるのに対し、水素は0.02 mJとなっており、静電気などのスパークでも十分着火する【8】。層流燃焼速度に関しても、一般的な炭化水素燃料が当量比1.0付近で最大値を取り、0.3~0.4 m/s程度である【9】のに対し、水素は当量比1.0付近で1.8 m/s、最大値は当量比1.8付近で2.86 m/sと一桁大きい値をもつ【10】。したがって、他の燃料と比べて、火炎伝ば速度が大きくなることは容易に想像できる。このような特殊ともいえる性質のある気体による爆発事故の被害予測を他の気体燃料の爆発実験により得られたデータから類推することは難しい。

本研究では、主に水素ステーションにおいて水素が漏洩し爆発事故が起こった際の被害予測のため、実際に水素-空気の爆発実験を行い、その延焼距離や発生する圧力などの被害評価に重要なパラメータを取得する。だが、想定される実際の爆発事故の規模（混合気量が数十～数百 m^3 、もしくはそれ以上）での実験を行うのは時間的にもコスト的にも困難である。そこで、比較的实验を行いやすい範囲で規模を変化させながら爆発実験を行い、得られたデータを比較し、何らかのスケールリング則を用いることで、実際の爆発災害の被害予測を試みる。

第2章 小型実験装置による基礎実験 (5.4 L 規模)

1.3 概要

まずは、実験方法の確立のため、室内での小型実験装置を用いた爆発実験を行った。ラテックス膜を用いて直径 275 mm, 混合気量約 5.4L, 当量比 0.5~3.0 の半球状の水素-空気混合気塊を形成し、中心部からスパーク点火した。その爆発挙動を高速度ビデオカメラにより撮影し、また発生する圧力、音圧レベルをそれぞれ圧力変換器、騒音計により計測した。一般的な燃料との比較のため、メタンを用いた実験も行った。

2.2 実験装置

2.2.1 爆発試験装置

図 2-1 に本実験で使用した爆発試験装置の概略を示す。平板と環状の固定板でラテックス膜 (初期膜圧 $d_i=0.10$ mm, 0.14 mm, 0.30 mm, 不二ラテックス社製) を挟んでボルトで固定し、中心から 65 mm の位置にある注入口から予混合チャンバに貯められた水素-空気予混合気を充填し直径 275 mm の半球状の予混合気塊を形成する。ラテックス膜の取り付け部からの予混合気の漏れを防ぐために、直径 310 mm, 333 mm, の位置に O リングを二重になるように設置している。また、平板中心部には、予混合気にスパーク点火するための点火プラグ (NGK 社製, D8EA) を取り付けた。

2.2.2 点火系

図 2-2 に点火系の概略を示す。本実験で使用した点火装置は自動車用のイグナイタ (ダイヤモンド電機社製, D-COP イグナイタ, 放電エネルギー約 30 mJ) で、5V の TTL 信号により点火のタイミングを制御することが可能である。また、イグナイタの電源としては、自動車用のバッテリー (YUASA 社製, DYNAGRID 38B19L) を接続して使用した。

2.2.3 ガス流路系

図 2-3 にガス流路系を示す。まず真空ポンプ (佐藤真空社製, SW-500) により混合チャンバ内を真空にする。その後、燃料として用いた水素およびメタンと酸化剤の空気を、高压ポンプからレギュレータバルブを通り、チャンバ内に導かれる。真空にする際や予混合気を生成する際には、チャンバ内の圧力を圧力計 (MKS 社製, 722A) および、そのパワーサプラ

イ (MKS 社製, 133B) を用いてモニタした。

2.2.4 計測機器類

高速度ビデオカメラ

高速度ビデオカメラは、高感度撮影機能と高速ゲート動作 (高速シャッタ) により、高速現象の瞬間的な挙動を撮影することが可能なカメラである。本実験で用いた高速度ビデオカメラ (Eastman Kodak 社製, Ektapro HS Model 4540) の主な仕様を以下に記す。

- ・レンズマウント : C マウント
- ・撮像方式 : 固体撮像素子
- ・記録容量 : 64 MB (増設可)
- ・録画速度 : フルフレーム方式 30,60,125,250,500,750,1125,2250,4500 コマ/sec
分割フレーム方式 9000,13500,18000,27000,40500 コマ/sec
- ・画素数 : フルフレーム方式 256×256
分割フレーム方式 256×128, 256×64, 128×128, 128×64, 64×64
- ・グレイレベル : 8 bit (256 階調)
- ・録画時間/記録枚数 : フルフレーム方式 0.22 sec/1024 枚 (4500 コマ/sec のとき)
分割フレーム方式 0.40 sec/16384 枚 (40500 コマ/sec)
- ・同期出力信号 : オープンコレクタ TTL 5V ロジック (負極性)

騒音計

騒音計は騒音レベル (L_A) および音圧レベル (L_P) を測定する機器であり、計量法で特定計測器として指定されている。本実験では、水素-空気予混合気塊の燃焼時に発生する爆発音を計測するために騒音計を用いた。本実験で用いた騒音計 (小野測器社製, LA-1250) は、時間率騒音レベル (L_X) や、等価騒音レベル (L_{eq})、単発騒音レベル (L_{AE}) などの積分量を測定する機能を持った積分形騒音計である。また、突発的に発生する騒音に対して、その最大ピーク値をホールドする機能も有している。以下に、LA-1250 の主な仕様を記す。

- ・リニアリティレンジ : 85 dB
- ・周波数範囲 : 20 Hz - 8 kHz

・測定範囲：27 - 130 dB (A), 32 - 130 dB (C), 37 - 130 dB (FLAT)

・周波数特性補正：A, C, FLAT

・動特性：FAST, SLOW

・サンプリング周期：等価騒音レベル (L_{eq}) 32 μ sec

時間率騒音レベル (L_x) 100 msec

最大値 (L_{Max}) 32 μ sec

パルスディレイジェネレータ

パルスディレイジェネレータを用いることで、複数の計測機器の動作タイミングを制御することができる。本実験では、破膜や点火のタイミングと高速度カメラ、圧力計測のための A/D コンバータの同期をとっている。今回用いたデジタル・ディレイ/パルスジェネレータ (Stanford Research Systems 社製, WC Model DG535) は、GPIB 制御を用いている。また、内部基準信号および外部入力信号に対して 4 つの出力間のディレイ量を独立に設定することができる。以下に DG535 の主な仕様を記す。

- ・ディレイ出力 : 4 チャンネル (BNC)
- ・可変パルス出力 : 2 系統
- ・ディレイ設定範囲 : 0 - 999.9 sec
- ・ディレイ分解能 : 5 psec
- ・内部ディレイ時間 : 85 nsec
- ・内部レート発生器 : 0.001 Hz - 1 MHz
- ・しきい値電圧 : ± 2.56 V

2.3 実験方法

図 2-4 に実験装置の概略を示す。実験はラテックス膜内に混合気を充填し、中心部の点火プラグにより点火、その爆発過程を高速度ビデオカメラにより撮影し、同時に発生する圧力、音圧レベルの計測を行う。

高速度ビデオカメラによる撮影の際に、カメラレンズは、Nikon 社製の Nikkor レンズ (焦

点距離 24 mm, $f/2$) を用い, レンズの絞りは開放状態 ($f=2$) とした. 高速度ビデオカメラのゲインは”NORMAL GAIN”モード, フレームレートは 4500 fps, 撮影枚数は 1024 枚 (撮影時間: 0.22sec) とした. 画像サイズは 256×256 pixel で撮影領域は $908.6 \text{ mm} \times 908.6 \text{ mm}$ (画像解像度は 3.55 mm/pixel) である.

また, 爆発規模の指標となる爆発音の最大ピーク音圧レベルは, 爆発試験装置中心から 10 m の位置に設置した騒音計により計測した. 騒音計の周波数特性は”FLAT”モード, 動特性は”FAST”モードとした.

半導体型圧力変換器 (Entran 社製, EPX シリーズ) を用いて, 爆発により発生する圧力の時間履歴の計測を行った. 圧力信号は圧力変換器により電圧に変換され, デジタル較正式直増幅器 (UNIPALS 社製, AM32) を介し, A/D コンバータ (Interface 社製, PSI - 3174) により記録される. 爆発試験装置本体の土台と面一になるように板を継ぎ足し, 測定点は点火位置から 0.35 m, 0.50 m, 0.65 m, 0.85 m の位置とした. A/D コンバータのサンプリングレートは 20kHz, サンプリング件数は 40000 点とし, 2 秒間の計測を行った.

実験は三パターンの点火方法で行った. まず一つ目が混合気を充填後, そのまま中心部の点火プラグによりスパーク点火し, やがて火炎がラテックス膜に達すると熱で破膜し, 未燃分の水素が残っていればさらに燃え広がるという方法である. この場合は, 破膜までの間はほぼ乱れのない半球状混合気内を伝ばする火炎を観察することができる. また, ほとんど全ての水素が燃焼したとみなすことができるため, 発生するエネルギーの総量と圧力の関係を直接得ることができる. ただし, この場合, 火炎が膜に達するまでに数十 mm ではあるが, 膜を押し広げるため, エネルギーのロスがあると考えられる. そこで, 半球状の膜の上方約 10 mm の位置にナイフエッジを設置し, 膜が押し広げられ始めるとすぐにナイフエッジにより破膜するという方法でも実験を行った. これが二つ目の方法である. もう一つは, 上方に設置した可動式のナイフエッジにより破膜させたあとに点火し, その後は開放空間中を火炎が伝ばする方法である. この方法の利点として, 実際の場合で考えられるような混合気の周囲への拡散を許容した状態での爆発現象を観測できること, 高速度カメラで撮影する際に, 火炎の伝ばを観測しやすいことなどが挙げられる.

これら一連の実験では、点火と、高速度ビデオカメラ、A/D コンバータの起動は、パルスディレイジェネレータからの TTL 信号で同期をとっている。また、破膜後に点火する方法の場合、破膜と点火、計測機器の同期をとる必要がある。そこで、混合気充填後の半球状のラテックス膜を挟んで He-Ne レーザ (NEC 社製, GLG5000) とフォト IC (東芝社製, TPS823) を設置し、破膜によりレーザ光がフォト IC に入射すると、フォト IC から発せられる TTL 信号によりパルスディレイジェネレータにトリガがかけられるようにした。ここで同期に用いた TTL 信号を図 2-5 に示す。

2.4 実験結果および考察

2.4.1 ラテックス膜の破裂

破膜により、燃焼挙動に及ぼされる影響を把握しておくために、予備実験として、空気を充填した半球状のラテックス膜が破裂する様子を高速度ビデオカメラにより撮影した。また、実験では爆発音の音圧レベルを計測するため、同時に破膜により発生する音の音圧レベルの計測も行った。半球状の膜の天頂付近に設置したナイフエッジにより、破膜を行った。

図 2-6 (a)~(c)に、初期膜厚 $d_i=0.10$ mm, 0.14 mm, 0.30 mm のラテックス膜を破裂させた際の時系列画像を示す。画像間隔は 0.889 ms である。高速度カメラのフレームレートは 1125 fps で撮影しているが時系列画像から、破膜は開始から 8.89 ms 程度で終了していることがわかる。これらの画像を見る限りでは、膜厚による違いはほとんど見られず、また複数回の実験から破膜過程には再現性があることがわかった。このことから、ある決まった条件下で実験を行う場合、当量比を変化させても破膜による燃焼挙動への影響は一定であると考えることができ。

また、騒音計で計測した音圧レベルのピークの平均値は $d_i=0.10$ mm, 0.14 mm, 0.30 mm のとき、それぞれ 87.4 dB, 91.4 dB, 93.8 dB であった。以降の水素-空気混合気の爆発実験において、主に用いるのは $d_i=0.14$ mm のものであるが、爆発音の音圧レベルからこの値を差し引くものとした。

2.4.2 水素-空気混合気の爆発実験

水素-空気の爆発現象の当量比依存性を調べるために、混合気の当量比を 0.5~3.0 の間で変化させながら実験を行った。この際、爆発挙動を高速度ビデオカメラで撮影し、同時に圧力の時間履歴、発生する爆発音のピーク値を計測した。

ピーク音圧レベル

音圧レベルとは、音の物理的尺度であり、人間の最小可聴音の音圧である 20 μPa を 0 dB と定義しており、音圧レベル L_p は次の式で定義される。

$$L_p = 10 \log_{10} (p^2 / p_0^2) \quad (2-1)$$

ここで、 p : 測定音圧, p_0 : 基準音圧 (=20 μPa) である【11】。例えば、深夜の郊外では 10 dB, ジェットエンジンでは 120 dB 以上というように計測される。

図2-7は点火から燃焼完了までの間に発生した爆発音のピーク音圧レベル $L_{p(\text{Max})}$ の当量比依存性を示したものである。

まず、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法を見ると、当量比の増加に伴いピーク音圧レベルも増加する傾向にあるが、特に当量比 $\phi = 1.0$ 以下の領域においてその傾向が大きい。逆に $\phi = 2.0$ 以上の領域では横這いになりつつあるようである。また他の方法に比べると、この方法では大きなピーク音圧レベルを記録している。これは、未燃のまま拡散する水素がほとんどないことと、破膜の瞬間に混合気前方の混合気に乱れが生じ、火炎の伝ばが加速されることによると考えられる。

破膜後に点火する方法では、未燃のまま拡散する水素があるためか、特に当量比の小さい条件では、ピーク音圧レベルは他の二つの方法に比べてかなり小さい値となっている。だが、 $\phi = 0.5 \sim 2.0$ の領域では、当量比の増加とともに急激に大きくなっており、 $\phi = 2.5, 3.0$ ではナイフエッジを固定する方法とほぼ同じ値となっている。 $\phi = 0.5, 0.8$ といった当量比が小さい条件では未燃のまま拡散してしまう水素量が多いことに加え、ラテックス膜内にあった混合気が周囲の空気と混合し、水素濃度が薄くなっていくなかで、より層流燃焼速度の遅い方向へシフトするのに対し、 $\phi = 2.5, 3.0$ といった当量比が大きい条件では、未燃のまま拡

散する水素が比較的少なく、周囲の空気と混合し、水素濃度が薄くなると、逆に燃焼速度が速いほうへシフトするためにこういった結果になったと考えられる。

割らずに点火する方法では、当量比が小さい領域ではピーク音圧レベルが当量比の増加とともに大きくなっているのは他の点火方法と同じであるが、 $\phi = 1.5$ 付近をピークに、それ以上の領域では減少傾向にある。割らずに点火する方法では火炎がラテックス膜に達し破膜するまでは周囲の空気と混合することはない。当量比が大きい条件ではラテックス膜内を火炎が伝ばする中で空気不足となり、より高濃度の条件となる。その結果、火炎の伝ば速度が遅くなり、破膜後、周囲の空気と拡散しながら燃焼する水素を考慮するとトータルで発生するエネルギーは大きい、そのエネルギーの解放速度は遅いと考えられる。ピーク音圧レベルは発生するエネルギー量だけでなく、その解放速度にも依存しているためこういった結果が見られたものと考えられる。

時系列データ

図 2-8 は、各条件における爆発挙動の高速度時系列画像と、同時に計測した圧力の時間履歴を示したものである。当量比が 1 より小さい条件では火炎の発光輝度が弱かったために、画像の輝度、コントラストに補正をかけたものを示してある。また一部の条件では高速度ビデオカメラのゲインを“UP GAIN”モードとして撮影を行った。

これらの画像を各当量比で比較すると、混合気の当量比が大きくなるにつれて形状が変化し、火炎輝度も増加していく傾向が見られる。特に当量比が大きい条件に関しては、未燃の水素が残存しているため、上方に火炎が噴き出して火炎球を形成しているのがわかる。割らずに点火した場合、上方にナイフエッジを固定した場合は、破膜までの間にラテックス膜内部を火炎が伝ばしていく様子を観察することができるが、当量比 1.0 付近で最も強い発光強度を示している。発光強度は火炎の温度に依存しており、外気と混合しない状態では断熱火炎温度と同様、当量比 1 付近で最も高温になる【12】ためと考えられる（図 2-9 参照）。次に、各点火方法での画像を比較すると、破膜後に点火した場合は、他の点火方法の場合に比べ、火炎の輝度が低く、未燃のまま拡散してしまっている水素量が少なくないと予測できる。