

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

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

平成 15 年度報告書

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機構 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

平成 16 年 4 月 8 日

目 次

- | | | |
|---|---|----------|
| 1 | 平成 15 年度研究成果総括 吉川典彦 | 1-1~1-4 |
| 2 | 水素 - 空気爆燃の野外実験 斎藤寛泰, 水谷高彰, 大塚輝人, 上坂直人, 森崎雄貴, 吉川 典彦 | 2-1~2-10 |
| 3 | CFX-4 ソフトウェアを用いた水素濃度分布時間変化の計算 大塚輝人 | 3-1~3-10 |
| 4 | 水素の大気中拡散と燃焼の数値シミュレーション 長谷川達也, 森崎雄貴 | 4-1~4-19 |

1 平成 15 年度研究成果総括

名古屋大学大学院工学研究科 吉川典彦

1 研究項目と実施経過

(1) 研究項目

平成15年度の研究項目は以下の1～6であり、その実施経過をまとめる

- 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データ取得
- 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 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

(2) 実施経過

①研究項目 1, 4

ラテックス膜を水素 - 空気混合気て膨らませて直径30cmの半球状ガス塊を作り、中央部で着火して火炎伝播の爆発現象の時間変化を高速度ビデオカメラで観測し、圧力変換器 騒音計による圧力測定も行い、当量比0.6 - 3の範囲で影響を調べた。又、金網を設置して、障害物による乱流火炎の加速を調べた

- ・レーリー散乱法による濃度分布計測法は既に開発しており、新規に導入したパルスレーザーシステムとICCDカメラを用いた測定システムを立ち上げ、迅速な3次元濃度分布変化の測定に着手した

②研究項目 3

- ・産業安全研究所所有の既存プログラム(CFX-4)を用いた計算を開始したか、小さいスケールの計算には精度が良く、室内実験結果との比較には利用できることか分かった。又、大規模スケールの予測にも、格子サイズを注意して選択すれば、利用可能であることか分かった。このプログラムの利用を進めることと並行して、新たに有限体積法を用いた大規模予測プログラムの作成を開始した。特に水素の場合は、浮力の影響が大きく重要である

③研究項目 6

- ・浮力の影響を考慮し、化学反応を2段階モデルで近似し、乱流燃焼速度を圧力・温度・燃空比等の局所状態の関数としてモデル化した有限体積法コードの開発を進めている。火炎伝播と圧力波の伝播をカップルさせて解くことは困難であり、火炎の伝播を解いた結果から、火炎面をピストンとして見た。場合の衝撃波の形成過程を計算する。2次元火炎伝播のプログラムを作成して、チェックしている。又、既存のCFX-4プログラムでも火炎伝播計算が可能であり、この利用を進めている

④研究項目 2, 5

- ・あきる野市にある細谷火工の実験場と測定室を借用して、2003年秋期と2004年春期に各7日間ずつ野外実験を実施した。主に直径約1.5m、内容積約1450リッターの大型ゴム風船を用いて、水素-空気混合気を充填して着火させ、高速度ビデオカメラによる爆発現象撮影と、圧力プローブ・イオンプローブ・騒音計を設置して、火炎と圧力波の計測を行った。2003年秋期の実験では、ゴム風船の内部で着火して、圧力波によって風船膜が破裂して、火炎が伝播する過程を計測したが、ゴム風船の破裂の過程が実験ケースによってはらつき、再現性が悪かった。又、圧力測定では、直径の大きい圧力変換器では時間応答が悪い事が判明した。2004年春期の実験では、これらの点を改良した。ゴム風船が所定の大きさになるとナイフで破裂させ、風船の破裂によって、レーザー光が水素ガス混合気を通過して、光検知器に到達し、その信号を受けて、スパーク着火を起動するシステムを作成し、実験を行った。当量比0.5-4までの範囲の混合気を試験した。火炎の可視化のために、0.1%以下の微小濃度のアセチレンを混入させ、高速度ビデオ撮影で火炎面を明瞭に捉えることが可能になった。当初は水素濃度センサーを複数箇所に設置して、多点同時測定による濃度分布の時間変化を測定することを計画していたが、市販品を改良しても、0.1秒程度の時間分解能は不可能である事が判明して、計画を断念した。尚、購入した水素濃度計は、室内実験において試験混合気濃度測定に利用している。
- ・野外実験で得た結果は、火薬学会誌「ガス爆発」特集号に投稿準備中であり、2004年8月号に掲載される予定である。

上記研究項目以外の実施経過

- ⑤中央労働災害防止協会の平成15年度労働安全衛生総合研究推進事業[外国人研究者招聘事業]として、カナダ モントリオール マクギル大学のJohn H S Lee教授を招き、水素爆発に関する過去の研究と現状や野外実験方法等について、議論し多くの有益な助言を得た。又、2003年12月16日産業安全研究所において、「水素ステーション爆発危険性評価に関する講演討論会」を開催し、水素爆発に関するLee教授の基調講演に続いて、本研究の中間報告を行った。
- ⑥分担研究者の一人である大塚輝人が、中央労働災害防止協会の平成15年度労働安全衛生総合研究推進事業[外国への日本人研究者派遣事業]として、カナダ・モントリオール・マクギル大学のJohn H S Lee教授の指導の下でデトネーションの遷移に関する実験研究を実施した。この実験研究結果の論文が、2004年7月25-30日に米国シカゴで開催の国際燃焼シンポジウムで採択され、発表されることとなった。論文名は、'An Experimental Investigation of the Onset of Detonation'であり、国際会議講演論文集として後日出版される予定である。

3 主な研究成果

研究の実施経過中の研究項目別に結果をまとめて記す

①研究項目 1, 4

- ・直径30cmの半球状ガス塊を作り、着火して火炎伝播の爆発現象を高速度ビデオカメラで観測し、圧力変換器・騒音計による圧力測定も行い、当量比0.6-3の範囲で影響を調べた。

当量比の増加に伴い、圧力と火炎の伝播距離が増加した。当量比1以上では、余剰な水素が上方で燃焼する典型的なファイヤーボールが観測された。比較のためにメタン-空気の実験を行った。当量比1では、水素-空気の燃焼速度は1.8m/sで、メタンの約6倍あり、爆発圧力も高いことが示された。当量比1, 2, 3の火炎伝播速度は各々17.3, 19.3, 12.7m/sであり、爆発の最大圧力も当量比1.8近傍でピークを取ることが分かった。この結果は、当量比1.8近傍で層流燃焼速度が最大(約2.8m/s)となる従来の測定結果と比べて妥当である。又、当量比1の場合に金網を設置すると、金網のない場合の火炎伝播速度19.3m/sと比べて、30.9m/sまで増加する。直径の大きな圧力変換器は、時間応答が悪い事が分かったので、直径の小さい時間応答の良い物に取り替えて、再実験を行っている。又、野外実験で行った破膜の方法を導入して、破膜してから着火する方式に切り替え、現象のばらつきを減らした。

- ・レーザースキャンによる濃度分布計測法を用いて、3次元濃度分布変化の測定を開始したが、レーザースキャンの問題があり、未だ結果を得るまでには至っていない。

②研究項目3

- ・地中に50cm立法のガス貯蔵体積を考え、既存のプログラムを用いて、その後の大気中へのガスの拡散を計算した。計算領域は、上方10m、左右5mずつである。水素とメタンについて濃度分布時間変化を比較した。その結果、計算は充分可能であり、水素かメタンに比べて、早く上方に拡散する事が確認できた。又、格子サイズと時間刻みを変えて計算の信頼性をチェックした結果、計算プログラムが利用できるものであることが確認できた。可燃体積の時間積分値や爆発領域における燃焼エネルギーの積分値か、開放空間における爆発危険性を表す重要なパラメータである事を新たに見出した。今後は、ブタンやプロパンとも比較する予定である。

③研究項目6

- ・一次元流れ場で、水素ガス塊の周囲空気への拡散を計算した。水素濃度分布の時間変化を得て、妥当な結果であることが確認できた。又、水素のガス塊が拡散した後に、エネルギーを与えて着火させ、不均一濃度場を伝播する火炎の挙動を解析した。プログラムの信頼性をチェックするため、マコーマック陽解法による計算を行い比較した。その結果、火炎の速度と反応進行パラメータのプロファイルは良く一致することが確認できた。

④研究項目2, 5

- ・水素は、メタンと比べて爆発圧力が高いこと、当量比1.5以上の高濃度域で危険性が高いことが分かった。当量比0.5, 0.6, 0.7, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4について実験を行った。高速度ビデオから火炎伝播速度の時間変化と火炎到達最大体積を、数箇所設置された圧力変換器からは、火炎伝播によって形成される圧縮波の静圧の時間変化が得られた。イオンプローブは火炎面の通過を検出できる事は出来たが、火炎伝播の方向が測定できないために、火炎伝播速度を決定する事はできない事が分かった。圧力履歴から、静圧インパルスが計算でき、爆発特性の評価に利用できる。当量比の増加に伴い、静圧インパルスが増加する事が分かった。これは、燃料過濃混合気では、火炎面後方の既燃ガスに、高温水素ガスが残留しており、火炎面が混合気塊の終端部へ到達した後に、残留水素ガスが空気中に拡散して2次燃焼を引き起こすためと考えられる。2つのピークをもつ圧力波形が観測された原因は、この2次燃焼の影響と考えられる。これらの実験結果の傾向は、室内小型装置で

得た傾向と一致する。但し、火炎の伝播速度については、野外実験の方が 50～60m/s とかなり高い値を示しており、小型実験装置では、火炎の加速が充分得られなかったと考えられる。又、圧力についても、室内実験の方が低い値を示している。

4 本報告書の内容

この報告書では、平成 15 年度の研究成果の中で、特に重要であり、学会等発表できるレベルまでに進捗した成果について、その詳細を記す。以下に、野外実験と 2 つの数値解析の研究成果を示す。

2 水素－空気爆燃の野外実験

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 上坂直人
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

1 緒言

水素は次世代クリーンエネルギー燃料として期待され、近年の水素エンジン・水素燃料電池自動車の開発に伴い、国内外の数カ所で水素供給ステーションの試験運用も実際に始まっている。一般社会における水素燃料利用の普及には安全性の確保が重要であり、特に爆発の危険性評価と安全対策を確立することか不可欠である。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、その時間内に着火か無ければ、爆発事故は起きない。しかし、その反面、一旦着火か起きると、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か、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のか現状である。

気体爆発には、爆燃（デフラクレーション）と爆こう（デトネーション）の二つの形態がある。前者は、火炎か空間を伝ば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、後者は、衝撃波と火炎反応帯か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。爆こうの方が衝撃波の圧力上昇か高く、15～20 気圧になり、ほとんどの建物か全壊する。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か増加する。およその見積りとして、球状火炎伝ば速度か 100 ms^{-1} 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と考えられる^(1, 2)

爆燃と爆こうのどちらか起きるか、混合気のおかれた状況に依存する。爆こうか起きる過程には、火炎か乱流の影響で加速して爆こう波に遷移する場合、密閉容器の破裂などによって放出した既燃ガス噴流か周囲の未燃混合気と混合して爆こう波か形成される場合⁽³⁾か考えられる。乱流火炎の加速による爆こうへの遷移は、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か分かっている。障害物のない完全な開放空間では、遷移か起きるまで火炎か加速される事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か必要である。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か必要となる。爆燃については、火炎伝ば速度かどこまで増加するかを評価する必要かある。

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。

水素は火炎伝ば濃度範囲が広く、水素-空気混合気ではモル分率 4~75 %で火炎が伝ばする。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 mJ 以上のオータであるのに対して、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⁾。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 ms⁻¹、例外的に大きなエチレンでも 0.68 ms⁻¹である⁽⁵⁾のに対して、水素は当量比 1.8 近傍で 2.86 ms⁻¹ という大きな値をもつ⁽⁶⁾。したがって、他の燃料と比べて、火炎伝ば速度も大きくなることが分かる。

混合気の爆こう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こうになりやすく、空気混合気の中では、水素は、アセチレン 0.13 kJ に次いで爆こうしやすく、1.3 kJ であり、エチレンオキサイド 4.1 kJ、エチレン 1.1 kJ、プロパン 6.6 kJ と続く⁽⁵⁾。

以上の様に、爆こう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。火炎伝ば速度が 100 ms⁻¹ のレベルを超えて大きな爆風被害を引き起こすのか、更には爆こうに遷移するのか、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、軽微な被害で済むのか、といった判定は多くの場合に困難である。

実際の水素貯蔵施設を対象とした爆発被害予測手法を確立するためには、実規模を推定できる程度の規模の野外実験が不可欠である。火炎の伝ば速度や加速についての信頼性の高いデータを得るには、小規模実験では不十分であり、火炎が十分に加速されるまで観測できていない場合が多い。既に幾つかの野外実験⁽⁹⁾が行われているが、国内での野外実験例は非常に少ない。本研究者らは、水素爆発危険性評価方法を確立するための研究プロジェクトの一環として、大型風船を用いた水素-空気混合気爆燃の野外実験を実施し、開放空間における火炎伝ば挙動を観測した。

2 実験装置および方法

2.1 爆発試験装置

Fig 1 に、本実験で用いた爆発試験装置の概略と気体の充てん経路を示す。試験装置はステンレス製で、直径 114.3 mm の円筒形であり、縦方向、横方向の直径がそれぞれ最大 1,500 mm、1,350 mm (体積にしておよそ 1.5 m³) になるまで気体を充てん可能なゴム風船の口が、ホースハントで固定できるようになっている。

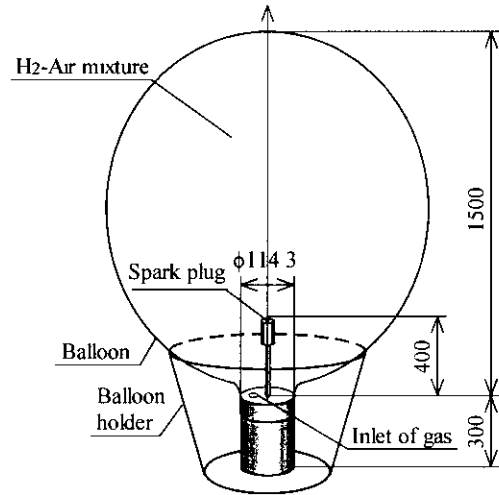
ホースから供給される水素および空気は、高圧大流量用のレギュレータハルブ (千代田精機, GS-140 型) により減圧され、マスフローコントローラ (Brooks Instruments, Model 5853S) で流量を調節された後、混合用チャンバに導かれる。混合用チャンバ内で乱流混合された水素-空気混合気は、三方ハルブおよび電磁ハルブを経て、爆発試験装置上面に設けた流入孔

より風船内部へと充てんされる 配管長が 30 m 以上に及ぶため、配管内に残留する気体が相当の量になること、また、マスフローコントローラの動作安定に多少時間がかかることより、充てんの前に三方ハーフを大気開放側へ一時的に切り替え、当量比および流量を調整した水素-空気混合気による配管内のパーシを行った

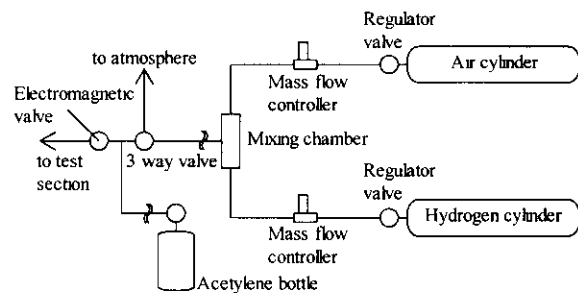
本実験で爆発実験を試みた実験条件を Table 1 に示す 風船の鉛直方向平均直径 D_z および水平方向平均直径 D_x はそれぞれ 1,500 mm, 1,346 mm である 風船内に充てんされた混合気は、自動車用のイグナイタ(ダイヤモンド電機, D-COP イグナイタ, 放電エネルギー約 30 mJ) および風船の取り付け面から 400 mm の位置に設置されたスパークプラグ (DENSO, IW16) により火花点火される たたし、当量比が 0.5, 3.0, 4.0 の場合には、イグナイタを着火エネルギーのより大きなもの (放電エネルギー約 500 mJ) に替えて点火した 両イグナイタかともに点火できる当量比条件で放電エネルギーの影響をみたか、本実験では爆発現象に大きな差は認められなかった なお、水素火炎は可視域における発光がほとんど観測されないため、0.1 %程度のアセチレンを混合気中に含ませ、可視域の火炎自発光が撮影できるようにした

2.2 火炎伝ば速度, 圧力, および高速度画像の同時時系列測定システム

本実験では、空間中に開放された水素-空気混合気塊が、何らかの理由により着火した場合の爆発挙動を観測することを目的としている したかつて、混合気を蓄えている風船のコム膜が除かれ、空間中に混合気が開放された後に点火できる機構が必要となる Fig 2 に、鉛直上方への火炎



(a) Test section



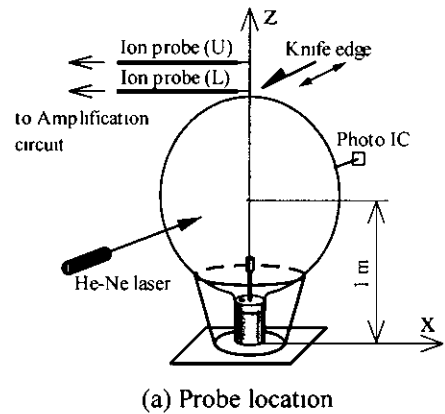
(b) Gas supply system

Fig 1 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

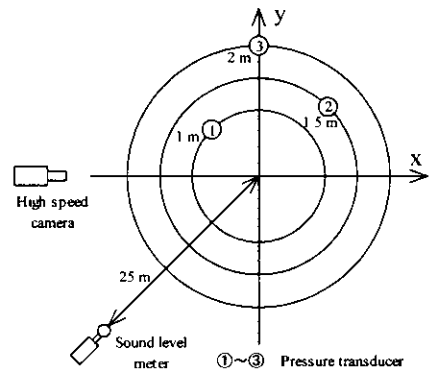
| Test No | Equiv ratio ϕ | Mole fraction C_f [%] | Total volume V_{mi} [m^3] |
|---------|--------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 1 | 0.5 | 17.4 | 1.44 |
| 2 | 0.6 | 20.4 | 1.33 |
| 3 | 0.7 | 22.7 | 1.40 |
| 4 | 1.0 | 29.6 | 1.38 |
| 5 | 1.5 | 38.7 | 1.45 |
| 6 | 2.0 | 45.7 | 1.40 |
| 7 | 2.5 | 51.0 | 1.47 |
| 8 | 3.0 | 55.8 | 1.44 |
| 9 | 4.0 | 62.8 | 1.45 |

伝ば速度，および爆発現象の高速度撮影を行う同時時系列測定システムの概略を示す 遠隔操作により，風船の直上に取り付けた可動ナイフエッジで風船のコム膜が割られると，地上からの高さか 1 m の位置に設置された小型の He-Ne レーザ (MELLES GRIOT) より照射されるレーザ光か，その対面に置かれたフォト IC (東芝，TPS823) に入射するようになる 光を検知したフォト 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 (Stanford Research Systems, Model DG535) にトリガかかけられ，高速度カメラ (Kodak, Ektapro HS Model 4540)，圧力変換器 (Entran, EPX シリーズ) および，風船の直上に 0.21 m の間隔で設置されたイオンプローブからの信号を記録するデジタルオシロスコープ (横河電機，DL708) か駆動し，画像撮影と各信号の記録か開始される 同期信号は，スパークプラク回路に送られ 10 ms の遅れ時間で混合気か点火される



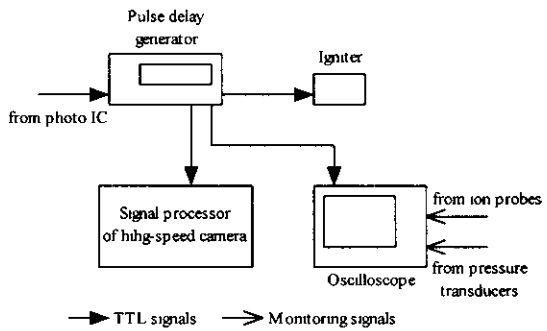
(a) Probe location

コム膜の破裂後，フォト IC かトリガ信号を発してから火花点火するまでの時間は可変であるか，本実験では全条件で一定とした 高速度カメラのフレームレートは 1,125 fps，オシロスコープのサンプリングレートは 10 kHz である さらに，爆発時に発生する音圧のピーク値を，試験装置中心から 25 m 離れた位置で騒音計 (小野測器，積分型精密騒音計 LA-1250) により計測した これらの機器の制御とデータの記録は，爆発試験装置から 30 m 離れた地点より行った



(b) High-speed camera, sound level meter and pressure transducers

なお，本研究では圧力測定も同時に行ったか，圧力変換器か，火炎の熱の影響を受けて，感度か変化したと考えられる測定データを示したため，爆風の強さを評価することはできなかった



(c) Signal flow

Fig 2 Measuring system

3 実験結果および考察

3.1 高速度時系列画像による爆発挙動解析

水素貯蔵施設等より水素か漏洩する場合，高濃度の混合気かその周囲に形成される可能性か高い したかつて，水素を高濃度を含む混合気塊の爆発現象を調べておくことは重要であ

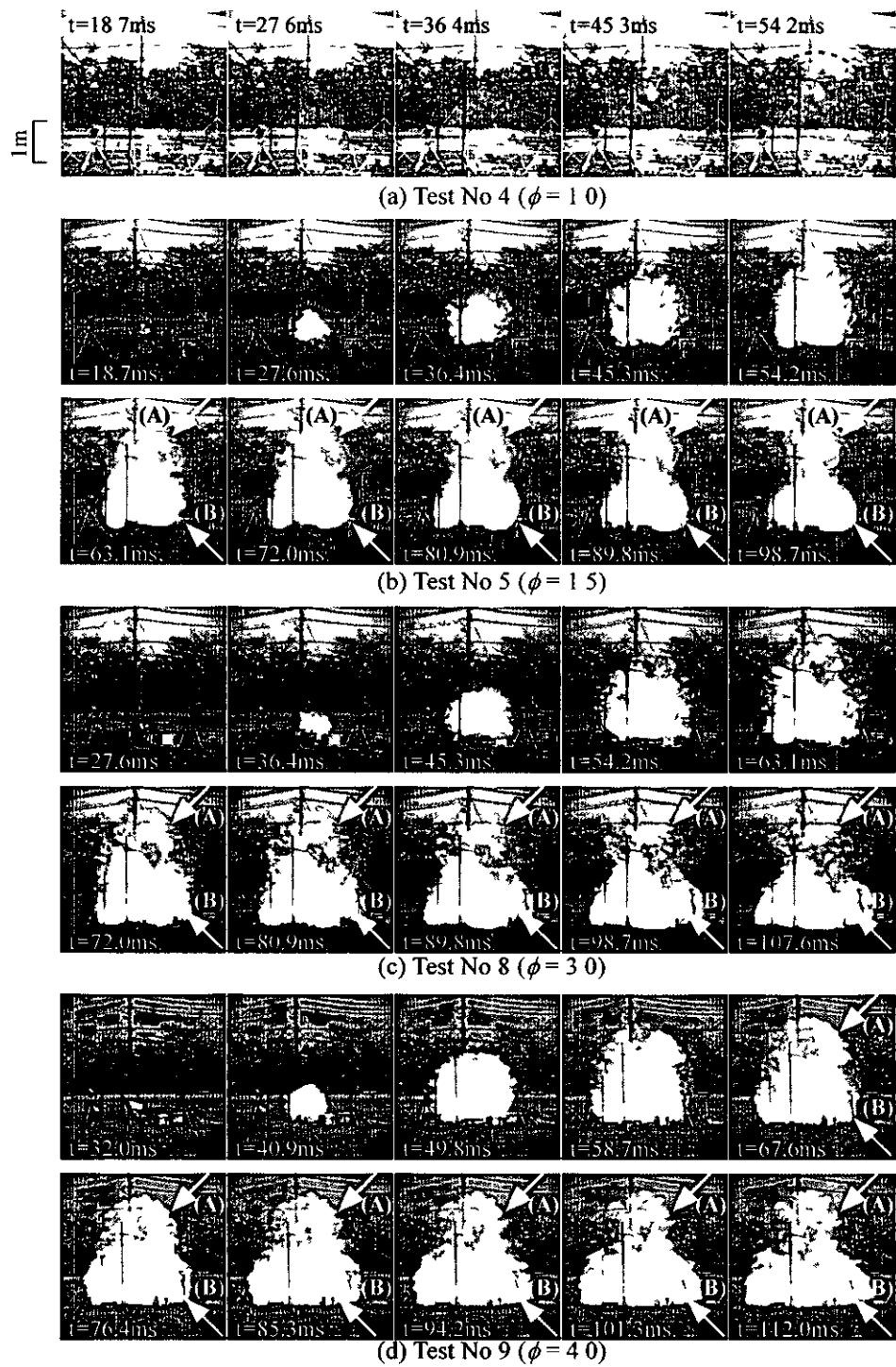


Fig 3 High-speed images of the hydrogen-air deflagration

る Fig 3 に、充てん当量比 ϕ が(a) 1.0, (b) 1.5, (c) 3.0, (d) 4.0 の場合の爆発過程を捉えた時系列画像を示す。いずれもイグナイタに放電開始の TTL 信号が送られた時刻を $t = 0$ ms とし示している。時系列画像からわかるように、初期当量比によって火炎領域の広がり方が全く違うものになっている。 $\phi = 1.0$ の場合、画像中に点線で示したように、目視により判別できる火炎領域が着火点からほぼ球形状に広がっていくのみであった。このような爆発過程は、当量比が 1.0 より希薄側の他の条件でも同様であった。

一方、燃料過濃の条件になると、火炎の広がり形態は大きく変化した。例えば(d) $\phi = 4.0$ の場合、 $t = 58.7$ ms 付近までは希薄条件と同様に火炎が球状に広がるが、その後、画像中に矢印で示したように、地表付近を水平方向へ伝ばする火炎の領域(矢印 A)と上昇する火炎球(矢印 B)の二つの領域が現れることが分かる。充てん当量比が大きい場合、膨張により多量の混合気が火炎の広がりとともに周囲へ押し出されていくことが考えられるが、下方へ押し広げられた過濃混合気は周囲空気と混合しても依然可燃範囲の混合気であるため、火炎領域が地表付近の残存混合気中を伝ばして拡がったとみることができると考えられる。また、火炎が球状に伝ばした後も、既燃ガス領域の内部には水素が依然残存していると考えられ、この領域が上昇して火炎球 (ファイアホール) を形成すると考えられる。

つぎに、これらの画像から、可視火炎が占有する領域の水平方向最大長さ W と鉛直方向最大長さ H の変化を計算した。その当量比依存性を Fig 4 に示す。 W と H は各々 D_z と D_x で無次元化してある。水素濃度が高くなると、火炎領域が鉛直方向には初期直径の 2 倍程度にしか拡がらないが、水平方向には 3.5 倍程度まで大きく拡がること分かる。このことは、高濃度の混合気が爆発する際に、膨張によって着火点付近から周囲へと押し広げられた混合気が、外壁などの遮蔽物の存在 (本実験の場合は地表) により、拡散できず凝った領域に火炎が拡がる可能性があることを示す。

さらに、充てん混合気体積 V_{init} に対して、火炎体積が最大で何倍となったかを Fig 5 に示す。火炎が占める体積は、火炎面積が最大となる時刻の火炎形状を中心軸まわり

りに回転させた際の回転体の体積であると仮定して求めたものである。火炎体積は、爆燃事

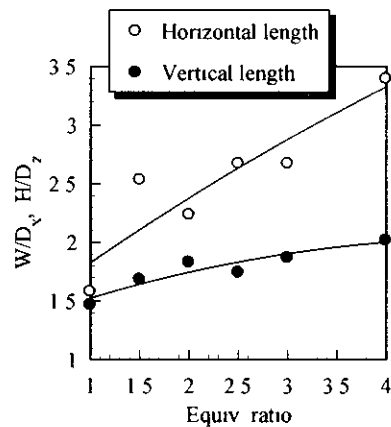


Fig 4 Horizontal and vertical reach of the flames

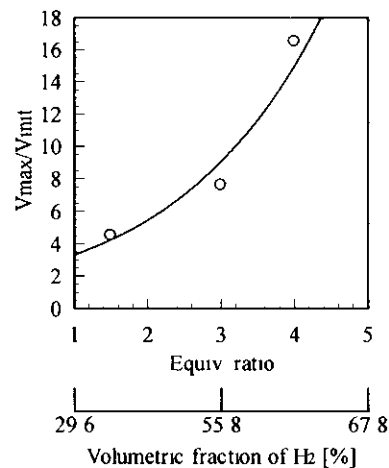


Fig 5 Maximum volume of the flames

故における延焼領域や放射熱の影響領域を推定する際に重要であるか、このような具体的なデータはこれまでほとんど呈示されていないものである。図から、当量比の増加にともない火炎体積は増加し、当量比 4.0 では初期体積の 16 倍程度になることがわかる。当量比 4.0 の場合を 1.5 の場合と比べると、水素の質量は約 1.6 倍であるが、火炎体積は約 3.7 倍になっている。球状火炎の伝ばに伴い、伝ば火炎の前方にある未燃混合気は膨張するか、その際、混合気と周囲空気との境界では燃料の拡散が起これり、燃料濃度が火炎伝ば限界値以下に低下する部分が形成される。当量比 1.5 の場合には、この境界付近で火炎伝ば限界濃度以下になった体積が大きかったと推察される。これらのことから、高濃度水素混合気の危険性領域は大きく、火炎伝ば濃度範囲が広い燃料に特有のものと考えられる。

3.2 火炎領域の広がり速度と混合気中の火炎伝ば速度

火炎が球状に拡がる段階における火炎既燃領域の投影面積速度 V_a (m^2/s) を算出した結果を Fig. 6 に示す。得られた時系列画像のピクセル輝度分布を考慮してしきい値を決定し、二値化処理を施した後、ラベリング処理により火炎領域のみを抽出して求めた火炎既燃領域面積の時間変化から面積速度を以下の式で求めた。

$$V_a = \frac{S_{i+1} - S_i}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで、 S_i は i フレーム目の面積、 Δt はフレームインターバルである。当量比が 1.5 の結果より、面積速度は緩やかに増加し、やがて減少に転じていることがわかる。減少傾向になるのは、周囲空気との混合により外周部で混合気濃度が低下し、火炎伝ば速度が減少するためである。混合気外周部ではコウ膜の破裂が誘起する乱れによって多少の混合が発生しているが、Fig. 4 に示した火炎の到達距離を考えると、火炎領域の膨張により周囲へ押し広げられた混合気が周囲空気によって希釈される効果が大きいと考えられる。当量比が大きくなっても

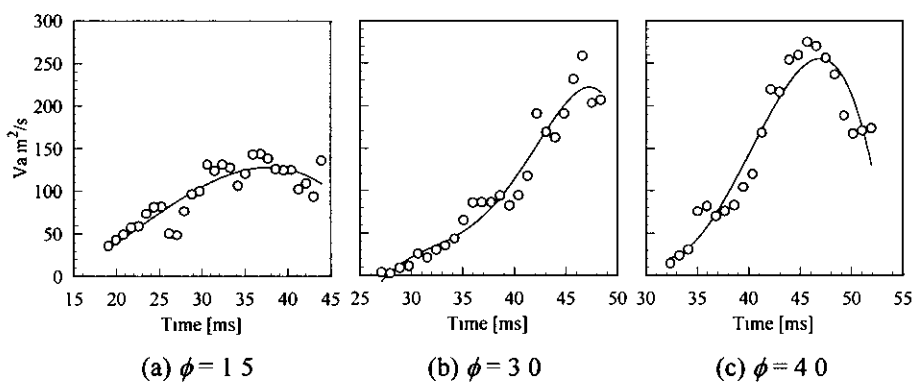


Fig. 6 Expansion speed of flame area

この傾向は変わらないか、面積速度とその時間変化率は顕著に増大する。すなわち、火炎伝ばが可能な濃度範囲にある混合気中を火炎が球状に伝ばする場合、水素濃度が高いほど火炎領域が大きく加速されながら拡がることになる。今回の実験では、画像解像度が不十分であったため、画像記録から火炎伝ば速度の時間変化を正確に決定することはできなかった。

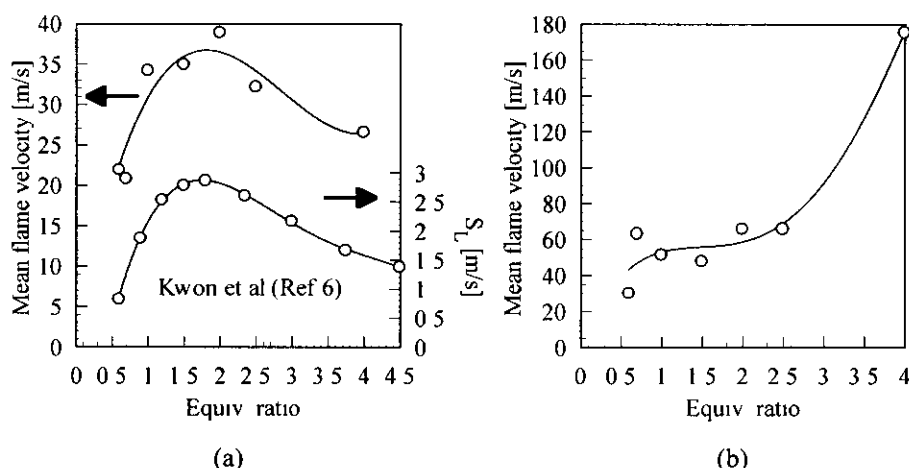


Fig 7 Mean flame velocity between (a) the ignition point and the lower ion probe, (b) the ion probes

Fig 7に、イオンプローブのデータから求めた鉛直上方への火炎伝ば速度を示す Fig 7(a)は着火点から下側のイオンプローブまでの平均火炎伝ば速度、Fig 7(b)はイオンプローブ間の平均火炎伝ば速度である。平均火炎伝ば速度は、着火時刻とそれぞれのイオンプローブに火炎が到達した時刻から求めた。全ての実験条件で、下側のイオンプローブの位置まではほぼ球状の火炎が伝ばすることを確認してきているので、Fig 7(a)は球状火炎の伝ば速度を示していることになる。一方、Fig 7(b)は、当量比が1以下の場合には、それ以降の球状火炎の伝ば速度を、当量比が1より大きい場合には、後に火炎球領域となる部分の速度を示していると考えてよい。比較のために、Fig 7(a)中に水素-空気混合気の層流燃焼速度 $S_L^{(6)}$ も示した。当量比が1.8付近で最大値をとる傾向は同じであるが、球状火炎伝ば速度の値そのものは一桁大きい。また、イオンプローブ間の伝ば速度 (Fig 7(b)参照) は、球状火炎の速度 (Fig 7(a)参照) よりも大きく、火炎が加速していることを示しており、当量比と共に増大している。特に、火炎球の形成が顕著となる当量比2.0以上の領域でその増加が大きく、当量比4.0では約 180 ms^{-1} という急激な加速を示した。鉛直方向にこのような大きな速度をとる要因として、1) 熱膨張により発生する速度成分の寄与、2) 火炎の前方で発生する乱れによる乱流燃焼への遷移、3) 浮力、4) 当量比が2.0以上の濃い混合気の場合、火炎前方で空気との混合が進み、当量比が燃焼速度の増大する方向にシフトする、ことなどが挙げられる。本実験で得られた速度値は層流燃焼速度に比べれば大きいのか、爆こうへの遷移速度に比べるとかなり小さいので、爆こう波への遷移は認められない。しかし、上述の要因に加えて、障害物などの影響により火炎前方で発生する混合気中の乱れが一層強くなると、火炎が大きく加速し、爆こう波へと遷移する可能性も出てくると思われる。

3.3 騒音レベル

爆発規模を示す一つの指標として、最大音圧レベル L_p を測定した。爆発時に発生する音圧レベルのピーク値を Fig 8 に示す。音圧レベルは以下の式で定義される。

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{P^2}{P_0^2} \quad (2)$$

ここで、 P は測定された音圧の実効値、 P_0 は規準となる音圧の実効値で、人間の最小可聴音圧 (=20 μ Pa) である。図からわかるように、当量比の増加と共に発生する音圧レベルは大きくなっている。特に、当量比が 2.0 までの領域では音圧レベルの増加は著しい。しかし、2.0 以上の領域になると、発生する爆発音の増加は目立たなくなる。ジェットエンジンから発生する騒音がおよそ 120 dB 以上であり、瞬間的にはそれと同等以上の騒音が発生されたことになる。

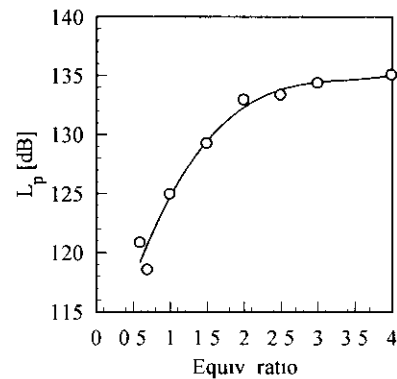


Fig 8 Sound pressure level

4 結 言

今回の野外実験では、アセチレンを混入して水素-空気火炎を可視化し、高速度撮影によって火炎伝ばの詳細を明らか明らかにした。また、ゴム膜の破膜装置を導入することにより、比較的乱れの少ない球状混合気中での火炎伝ばを実現できた。本実験で得られた結果を以下に示す。

- (1) 爆燃被害の推定に重要なパラメータである火炎体積を得ることかできた
- (2) 水素は燃料過濃側の高い爆発危険性をもつことか示された

実際の水素利用施設は、今回の野外実験よりもはるかに多量の水素を貯蔵する。しかし、実規模の実験は困難であり、爆発被害の評価方法の確立には、数十センチから数メートル程度の範囲のデータを集積し、スケールング則を決定することか不可欠である。今後は、さらに実験を重ねていく予定である。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、労働安全衛生総合研究事業「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(H14 - 労働 - 27)」(平成 14-16 年度, 主任研究者 吉川典彦) 厚生労働科学研究費の支援を受けたここに謝意を表す。

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)
- 7) 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 第II期研究開発, タスク 2, 安全対策に関する調査・研究, NEDO-WE-NET 0202, 財団法人エネルギー総合工学研究所 (2003)

3 CFX-4 ソフトウェアを用いた水素濃度分布時間変化の計算

独立行政法人産業安全研究所 大塚輝人

1 目的

本研究項目における最終的な目的は、数値流体計算によって、水素の拡散、燃焼爆発に対する危険性を評価することである。本年度は拡散の計算において、危険性評価のために二つのインテックスを導入した。このインテックスの観点から、野外実験規模の拡散を計算するために必要な条件の検討を行った。また、同等の計算をメタンについても行うことで水素の相対的な危険性評価についても検討した。

2 本年度の実行内容

前年度、比較的単純なモデルについて、非常に粗い格子を用いて計算を行い、計算の可能性について検討を行った。その結果、粗い格子であれば初期条件等を勘案しても十分な計算が行えること分かっている。

本年度は、

- ・ 時間間隔
- ・ 格子の大きさ
- ・ メタンとの比較

についての検討を行い、燃焼計算を行うため予備的な拡散の計算を行った。

3 計算条件

作業安全基準を策定するための被害評価方法を確立することか、本研究テーマを通しての目的である。したがって、数値計算によって得られた値から、災害発生確率、災害規模に関する知見を提供することか、本研究項目を行う目的である。

本年度は具体的なインテックスとして、1)爆発領域の時間積分値、2)爆発領域における燃焼熱の積分値の二つを挙げ、検討を行った。この二つのインテックスは漏洩条件が同じ場合に、1)の爆発領域の時間積分値は、着火の発生確率か時間的、空間的に一様である場合に災害の発生頻度を提供でき、2)の燃焼熱の積分値は、災害に寄与する燃焼熱の期待値を提供する。

ここでは計算に供したモデルにおいて共通する部分を挙げておく。

- ・ 円筒対称性

計算時間の短縮を狙って、円筒対称座標を用いての計算を行った。揺らきに対する応答、横風などに起因する異方性などを考慮することは出来ないか、本質的な拡散、浮力については正確さを損なうことなく、計算に供することの出来る格子密度を飛躍的に増やすことが出来る。

- ・ 格子

初期漏洩部分において、初期に水素濃度勾配の大きな点が発生する。また、対応する野外実験のように、風船を割って拡散を開始させるようなモデルを考えると、濃度か不連続

な点もありうる。したがって、初期条件で水素が存在する部分に格子を密にし、また、そこから十分遠方においては計算負荷を減らすために疎となるような格子を二次元方向に同じようにとった。格子間隔は、疎になる方向へ格子番号に比例する格子間隔を用いた。すなわち、 i 番目の格子座標は $i(i+1)/2$ となり、格子番号の 2 乗にほぼ比例した座標をもつ格子の例を図 1 に示す。

・ 境界条件

図 1 に示した通り、2 次元格子の計算領域は 1 辺を対称軸とし、その対称軸に直行する 1 辺を地面、あるいは実験装置面に見立てて断熱壁として扱った。重力方向は対称軸に平行で、断熱壁方向に重力加速度 9.8m/s^2 を設定した。残りの 2 辺は計算領域の大きさによる影響を避けるため圧力一定で境界条件を設定し、空気が自由に出入りする条件を採用した。このような境界条件でも、十分な高さとなる分だけ格子をとることで、燃料気体の総量はほとんど変化しないよう、すなわち境界からの流出がないようにした。

・ 流体モデル

最終的には乱流燃焼モデルの利用が必要であるか、本年度は拡散・浮力の評価に主眼を置いているため、層流モデルの範囲で計算が可能である。また、温度は 25°C で均一とした粘性については空気の値 $1.812 \times 10^{-5} \text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ をそのまま用いた。

・ 計算に用いた定数

メタンの値とともに諸定数をまとめたものが表 1 である。本項では水素の爆発下限界として、上方伝播しか行えない燃焼限界の 4%ではなく、通常伝播し、かつ、有意な爆発圧力を与える 8%を用いている。単位系は CFX 内で利用されている質量基準の SI 系を用いた。

表 1 計算に用いた諸定数

| 気体 | 水素 | メタン |
|--|-----------------------|-----------------------|
| 拡散定数($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) | 5.75×10^{-6} | 1.06×10^{-5} |
| 分子量 | 2.00 | 16.0 |
| 燃焼熱(kJ/mol) | 241.82 | 890.7 |
| 爆発上限界(質量分率) | 0.006 | 0.0324 |
| 爆発下限界(質量分率) | 0.172 | 0.0892 |

4 計算結果と考察

4.1 時間間隔

図 2 に最小格子間隔 10mm で直径 1m の球状に水素を配した初期条件からの爆発可能領域の推移を示す。時間間隔は 1, 5, 10ms として計算を行った。格子の粗さからくるプロクノイズは見られるものの、結果はほとんど同じプロファイルを与えている。各々の計算における結果をまとめたものが以下の表 2 である。

CFX-4 で用いられている時間変化の計算法は後退差分、すなわち完全陰開放に由来するため比較的安定であり、時間間隔に左右されにくいことが確認できた。

表 2 時間間隔に対する結果のまとめ

| 格子サイズ | 1ms | 5ms | 10ms |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| 最大体積(m ³) | 2 36 | 2 37 | 2 35 |
| 平均上端速度 (m/s) | 2 76 | 2 80 | 2 71 |
| 最大半径(m) | 0 659 | 0 656 | 0 648 |
| 爆発領域の積分(m ³ s) | 6 78 | 6 88 | 6 98 |
| 燃焼熱の積分(MJs) | 9 07 | 9 16 | 9 34 |

4 2 格子の大きさ

図 3 は格子間隔を変更して、直径 1m の球状に水素を配した初期条件からの爆発領域の推移を計算した結果を示したものである。格子間隔は 1mm, 5mm, 10mm を用い、時間間隔は 10ms とし計算を行った。全体としての傾向は、2 秒前後で最大ピークを迎えることは変わらないものの、爆発領域の消失寸前の部分には大きな変化がある。特に 1mm の格子のグラフでは、明確な屈曲が見られる。その原因を詳しく調べるため、格子間隔 1mm と 5mm について爆発領域、すなわち濃度 8%以上 75%以下の領域を等濃度線を用いて図 4 に示した。とちらも、初期条件で水素の多い中央軸に沿って大きな浮力が働くため、拡散の形状は俗に言うキノコ雲状の形をとるか、格子間隔 1mm の場合、4.5sec 付近で、中心軸部分とその周りの爆発領域が分断される様子が見られる。この分断された周りの部分が消失することで、爆発領域の変化に屈曲部が出来たものと考えられる。

図 4 において、0.5 秒経過時点を比較すると、すでに濃度差が見られる。この差は初期条件に対する表面からの拡散項の評価か、格子間隔に依存しているためと考えられる。上記の分断も、この拡散初期における違いが影響を及ぼしている可能性もある。

さらに、爆発領域の上端部分がほとんど時間に比例して移動していることも、図 4 からは読み取れる。この等速性は、爆発領域の上端部分で粘性項か浮力項を相殺したと考えられる。粘性項は粘性値と速度勾配との積からなるか、粘性値は同じ値を用いているので、速度勾配の評価に格子間隔が影響を及ぼしているものと推測できる。

各々の計算における結果をまとめたものが表 3 である。

表 3 格子間隔に対する結果のまとめ

| 最小格子間隔 | 1mm | 5mm | 10mm |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| 水素総量(m ³) | 0 525 | 0 529 | 0 486 |
| 最大体積(m ³) | 2 68 | 2 62 | 2 35 |
| 平均上端速度 (m/s) | 3 05 | 2 71 | 2 57 |
| 最大半径(m) | 0 739 | 0 747 | 0 648 |
| 爆発領域の積分(m ³ s) | 8 59 | 7 26 | 6 98 |
| 燃焼熱の積分(MJs) | 11 6 | 9 84 | 9 38 |

計算格子の粗さから、初期設定時すでに水素の総量が球面の凹凸により異なっていることには注意する必要がある。

4 3 メタンとの比較

最小格子間隔 1mm, 時間間隔 10ms を用いて, 水素の場合と同様に直径 1m の球状にメタンを満たした初期条件からの爆発領域の推移を図 5 に示す

メタンの爆発領域の消失は 13.5sec であり, 9sec に見られる急激な減少は水素の場合と同様に中心軸と, 周囲部分の分断による。水素と同様に分断前後の推移を等濃度線で表したものを図 6 に示す。爆発領域の積分は 18.9m³s となり, 水素の 8.59 m³s よりもメタンの方が大きい

さらに, 各々の 25°Cでの純粋な燃料の体積に換算した爆発領域内の燃料の総量と, 爆発領域内の燃焼熱の総量とを図 7 に水素, 図 8 にメタンの場合について示した。この図では, 燃焼熱の総量と, 燃料の総量との目盛をちょうど反応熱分の比をつけてプロットした。つまり, 爆発領域内の燃料が当量比以下であれば, 燃料は全て燃焼するとしているので, 曲線は一致する。どちらのプロットも, 燃料カスか十分に拡散すると希薄になるので, 燃料の総量と燃焼熱の総量の曲線は一致している。拡散か開始された直後は当量比よりも濃い部分があるため, 燃焼熱には濃い分の燃料分だけ, 燃料の総量か大きくて水素の場合, 図 3 と図 7 から, 爆発領域における水素の総量の減少か 0.6sec で始まり, ついて燃焼熱の総量のピークが 1.3sec にあり, 最後に爆発領域の減少か 2.2sec に始まることか分かる。爆発領域内の水素の総量の最大値は 0.493m³で元の水素の 90%を超える量か爆発に関与する可能性がある。また, 燃焼熱の総量か減少に転じる 1.3sec で, すてに当量比よりも濃い部分は解消され, ほとんどか希薄側になっており, この時点以降に着火かあつて乱流燃焼に転移したとしても, ここで評価した燃焼熱以上のエネルギーか放出されることはない。一方, 図 8 から, メタンの場合は先に挙げたピーク全てか 4.4sec にあり, かつその後 1 秒程度は当量比よりも濃い部分か存在している。爆発領域内のメタンの総量の最大値は 0.356 m³で元の量の 70%弱に過ぎない。水素とメタンの燃焼熱の積分値は 11.6MJs と 52.4MJs となり, このインテノクスからは反応熱比を勘案してもメタンの方が危険であるといえる

4 次年度の課題

本年度は時間間隔及び, 格子の大きさについての検討を行ったか, 時間間隔に対して格子の大きさか非常に大きな影響を及ぼすことか分かった。今回の計算から, 野外実験規模程度で, 円筒対称ならば十分に扱えることか分かり, その最低限の計算規模についての知見も得られた

次年度は, この拡散の結果を受けて

- ・ 燃焼挙動と圧力発生挙動のシミュレート
- ・ 室内/野外実験との比較

を行う必要かあると考えられる