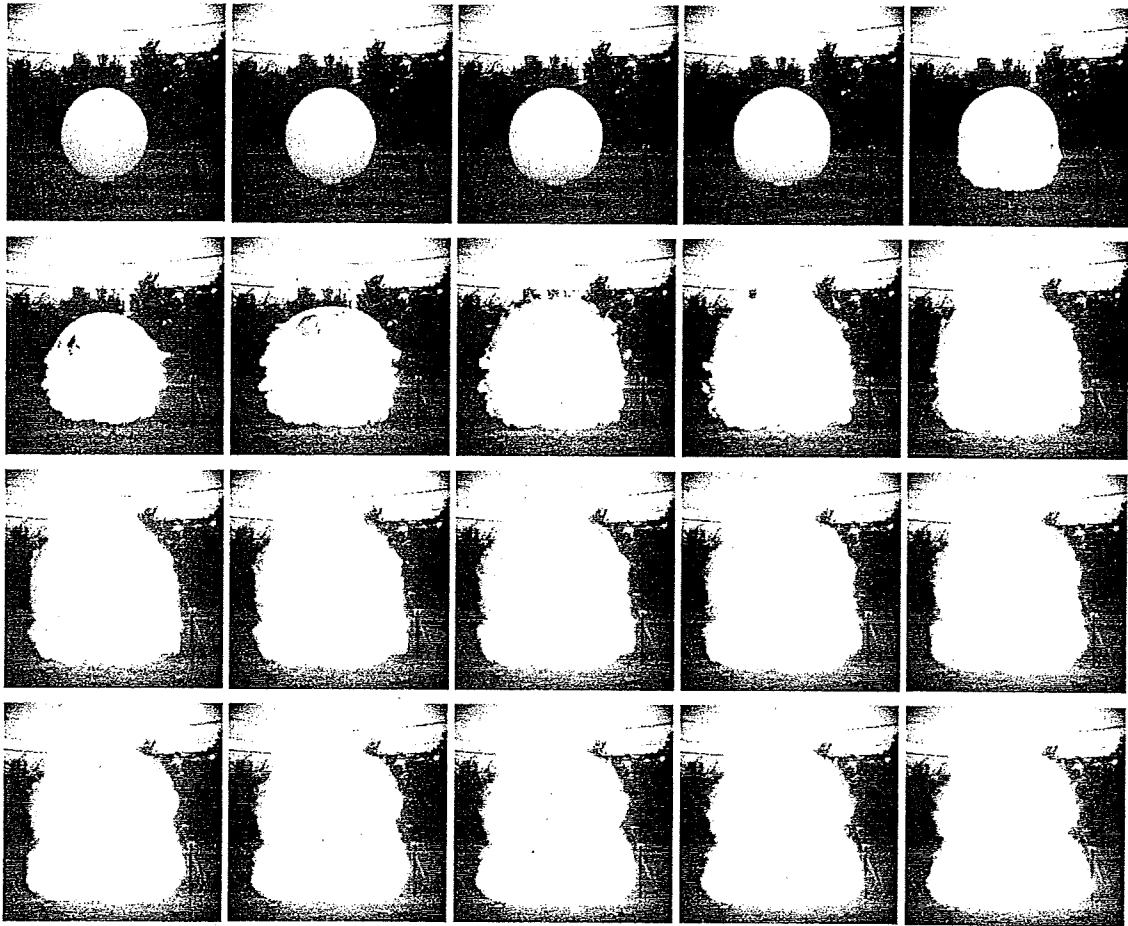


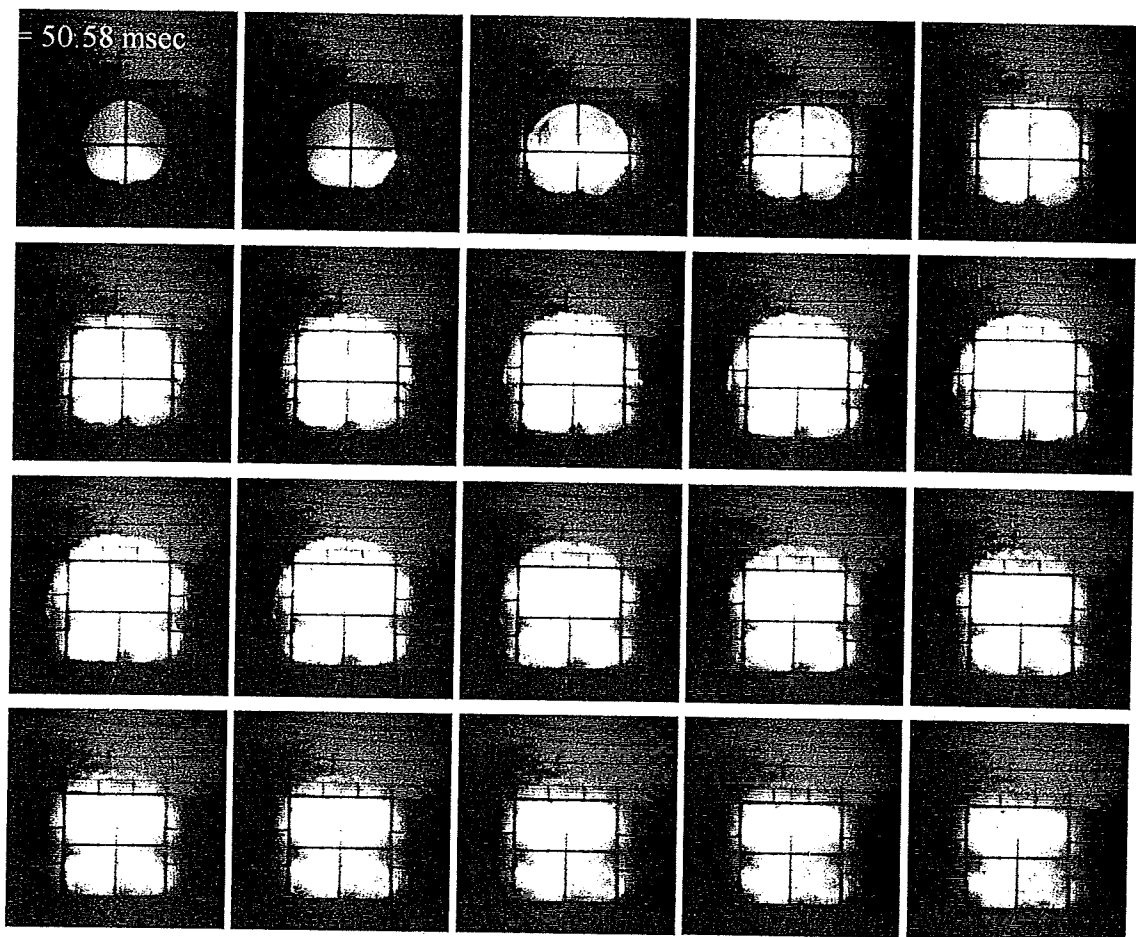
(c) 風船取り付け面より上方 750 mm

図 4-7 ピーク音圧レベルの当量比依存性—続き



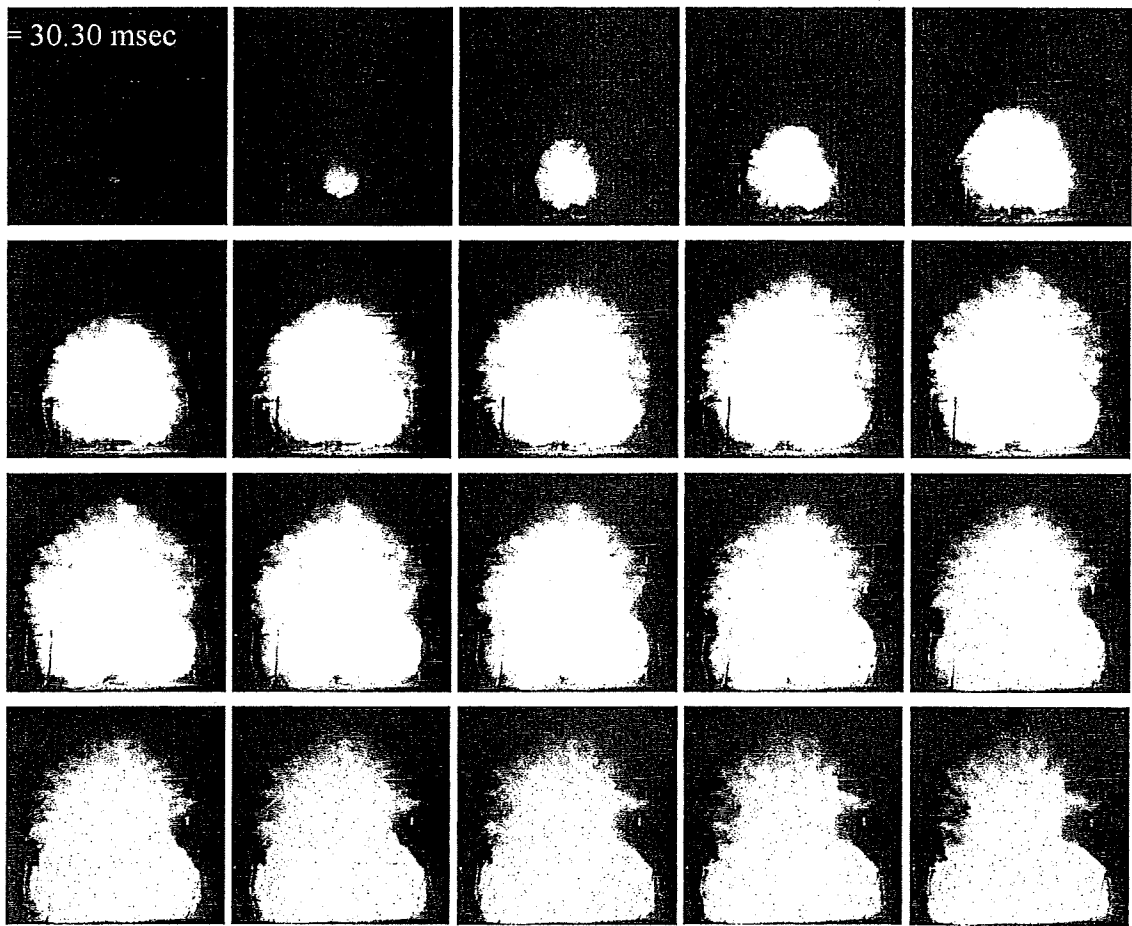
画像間隔 3.56 msec

図 4-8(a) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 1.5$, 風船取り付け面, 割らずに点火)



画像間隔 3.56 msec

図 4-8(b) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 1.0$, 風船取り付け面, 割らずに点火, 金網)



画像間隔 3.56 msec

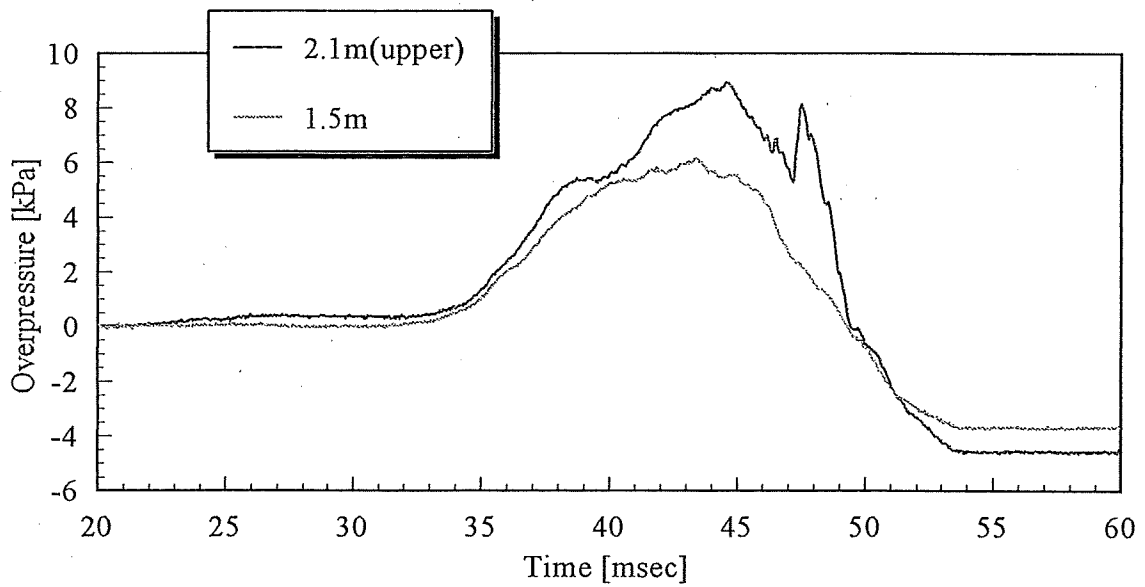
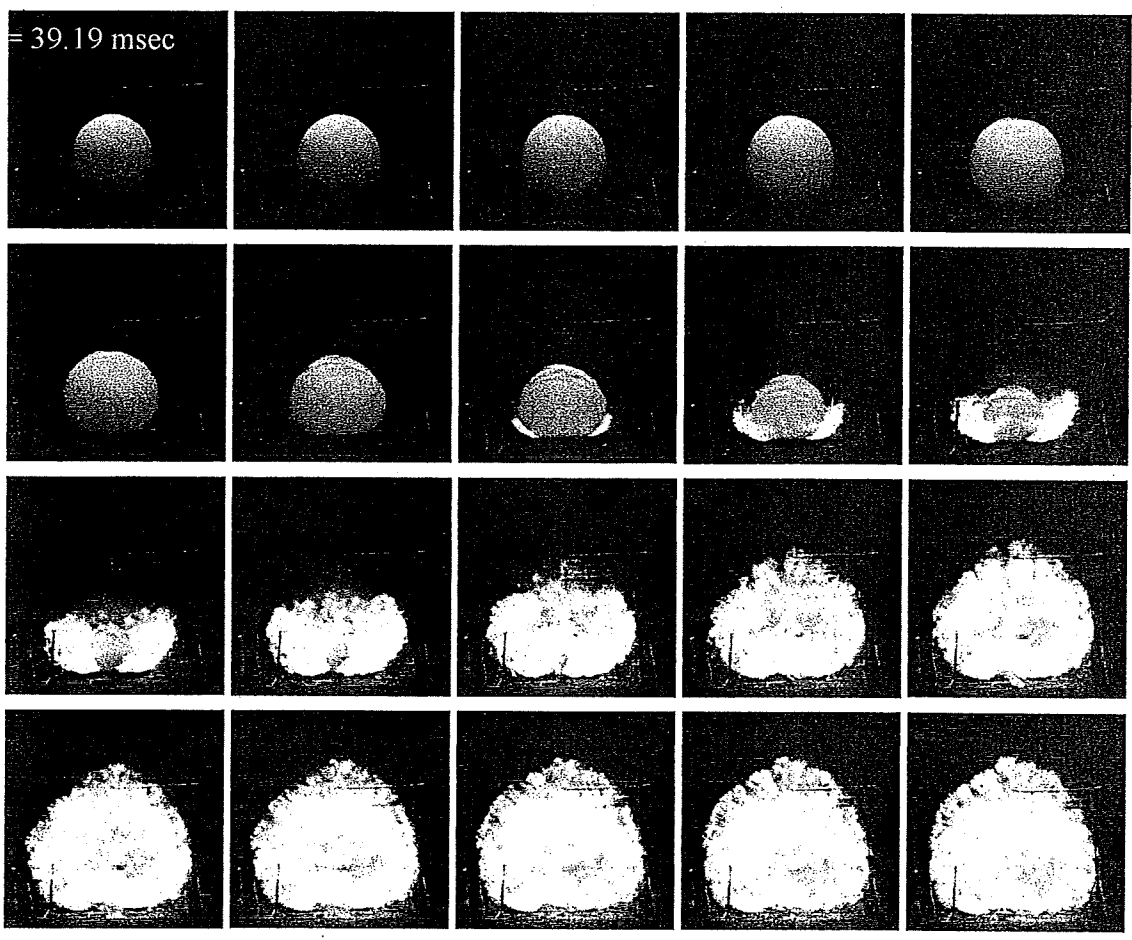


図 4-8(c) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 1.8$, 400 mm の位置, 破膜後に点火)



画像間隔 1.78 msec

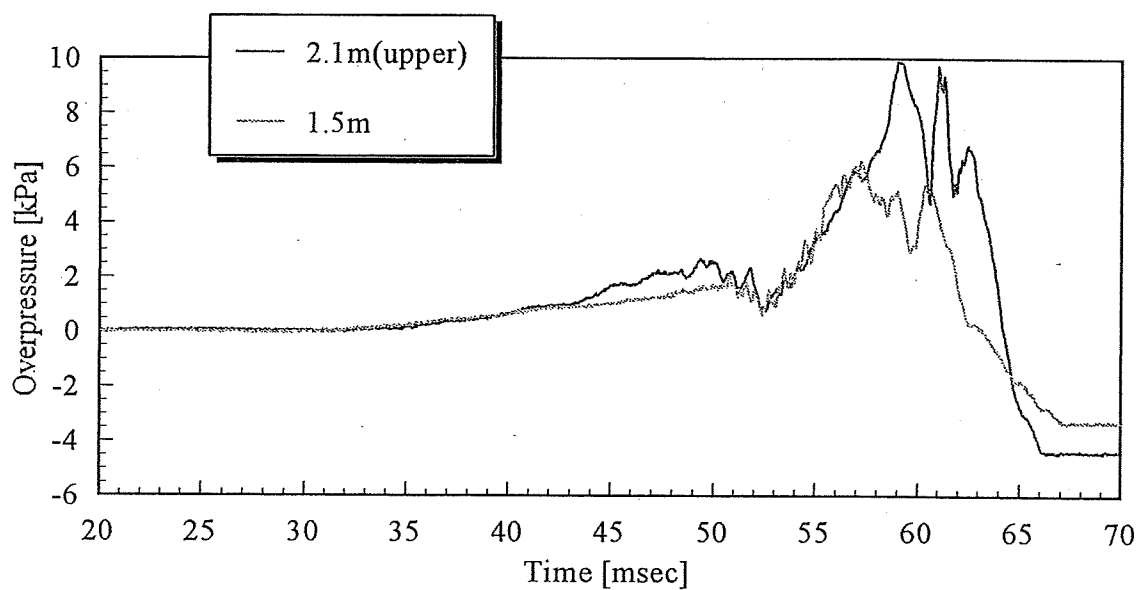
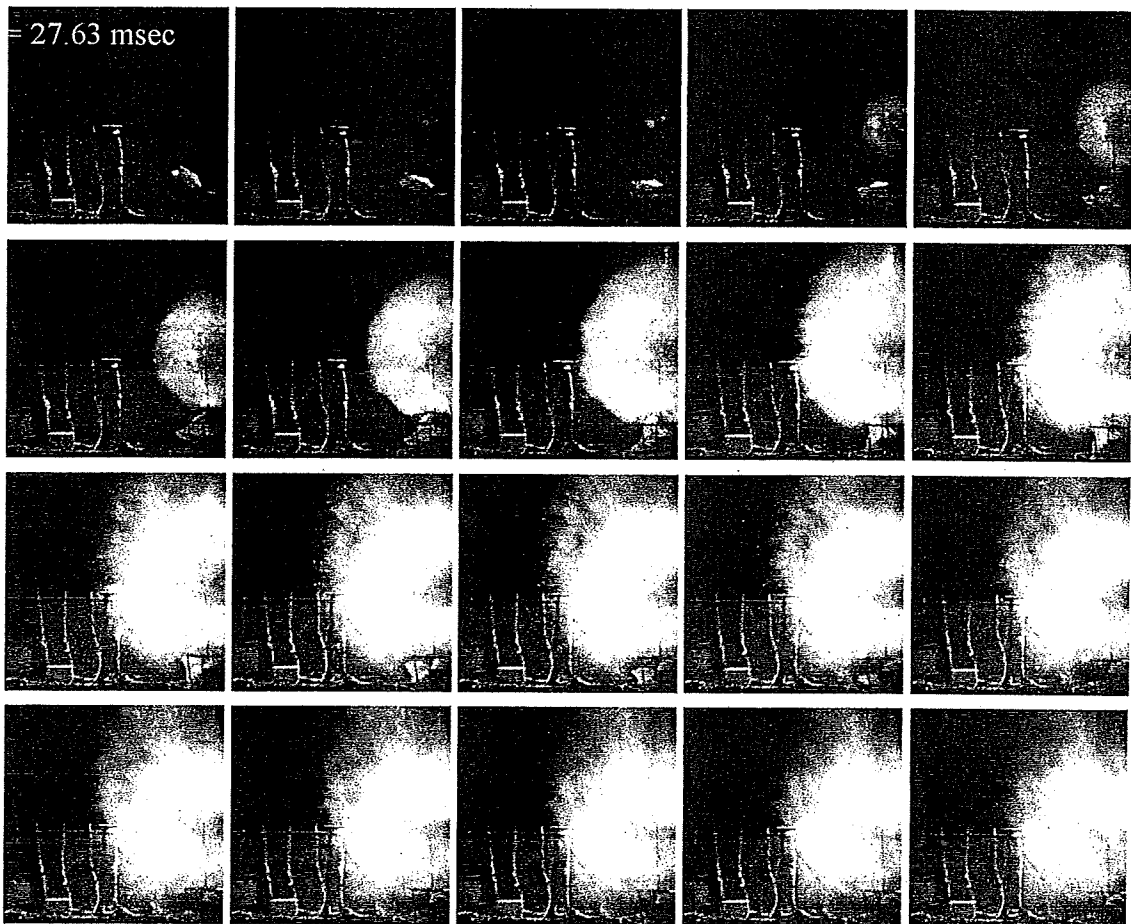


図 4-8(d) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 1.5$, 400 mm の位置, ナイフエッジを固定)



画像間隔 3.56 msec

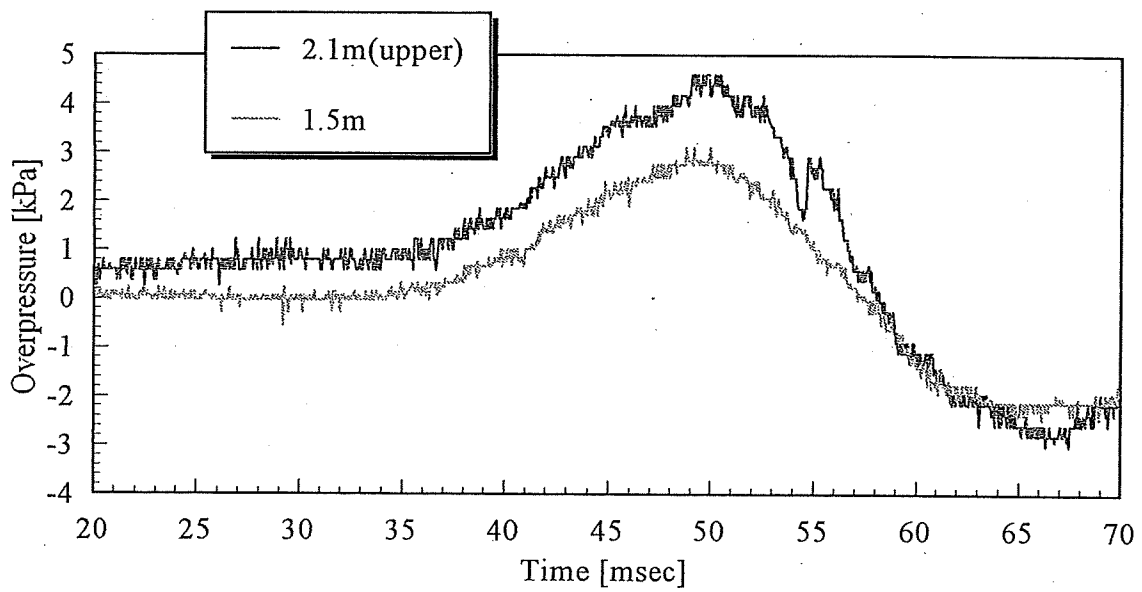
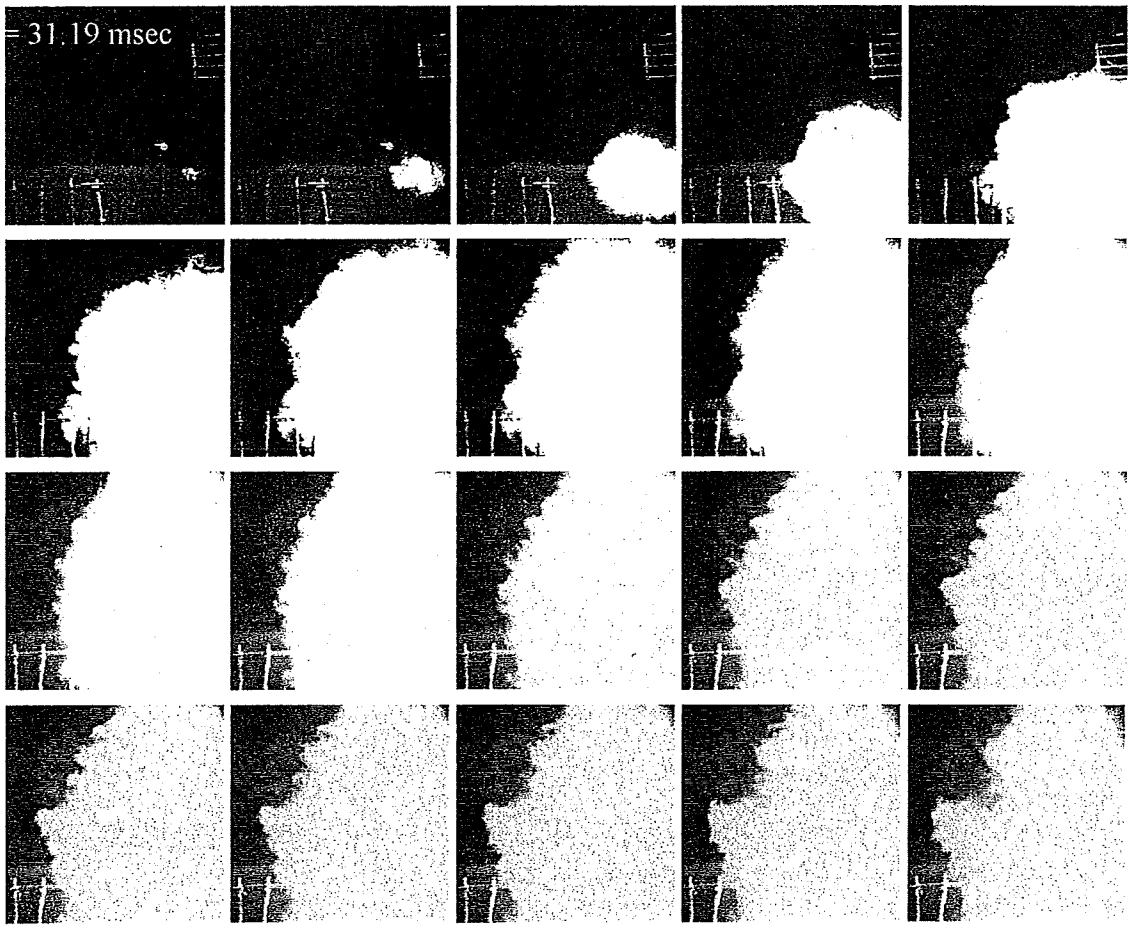


図 4-8(e) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 1.0$, 750 mm の位置, 破膜後に点火)



画像間隔 3.56 msec

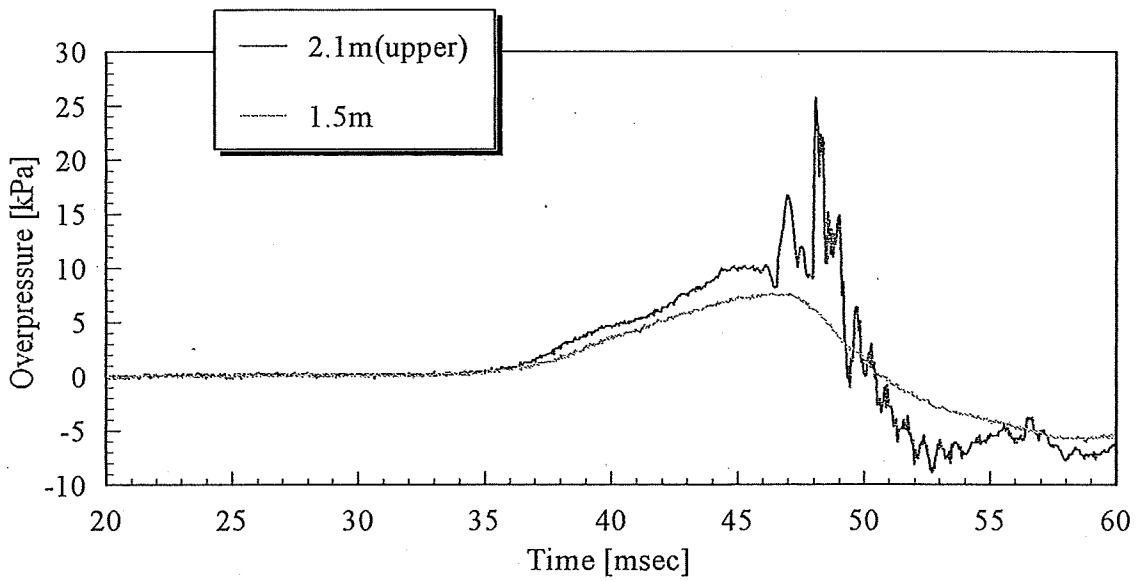
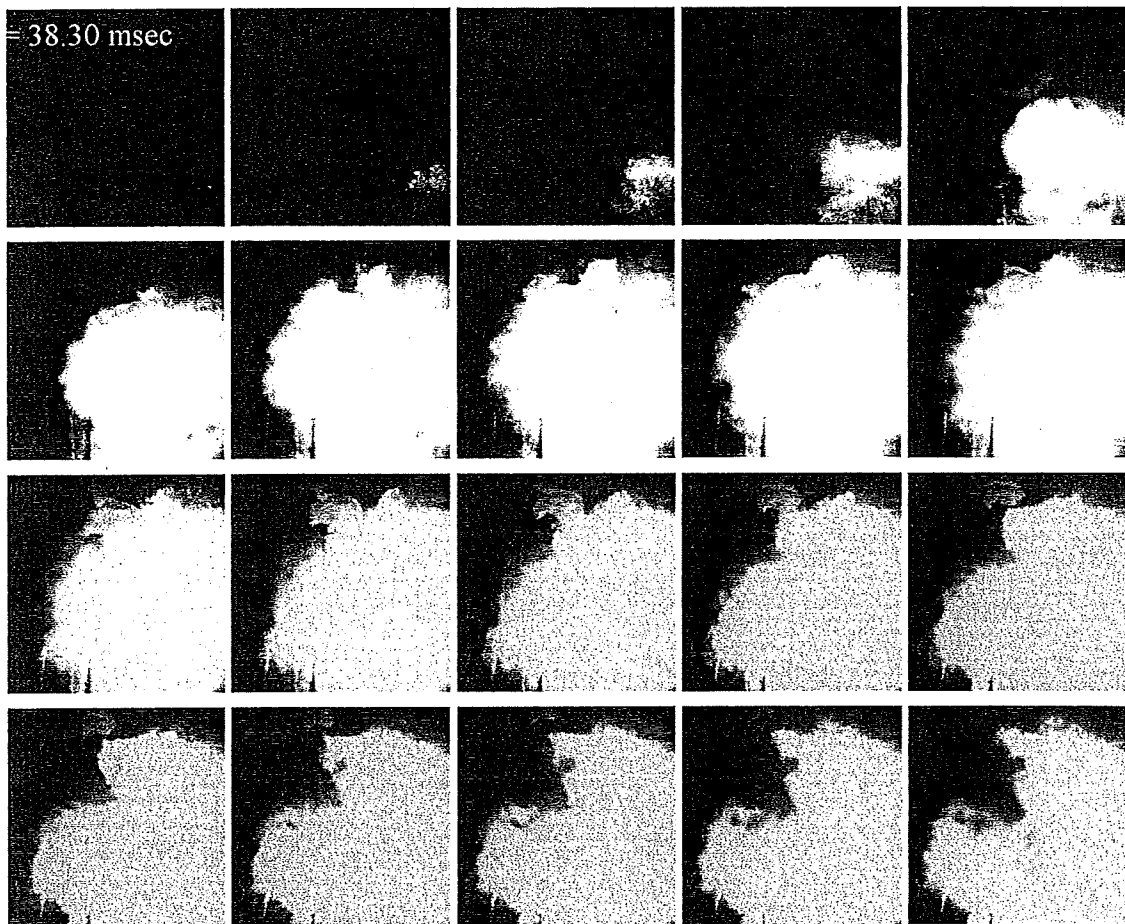


図 4-8(f) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 1.8$, 750 mm の位置, 破膜後に点火)



画像間隔 3.56 msec

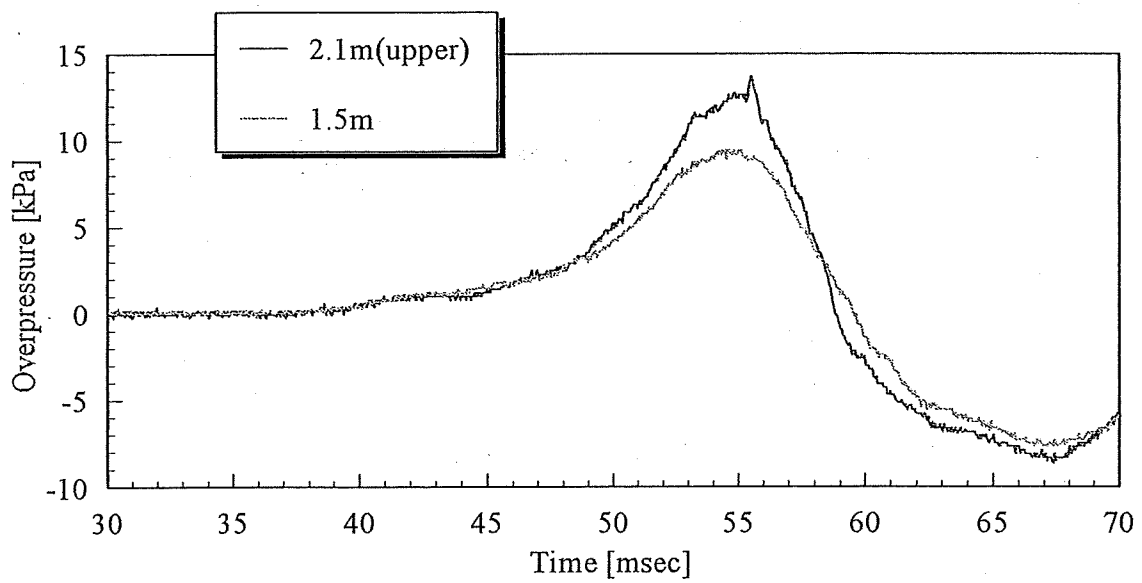
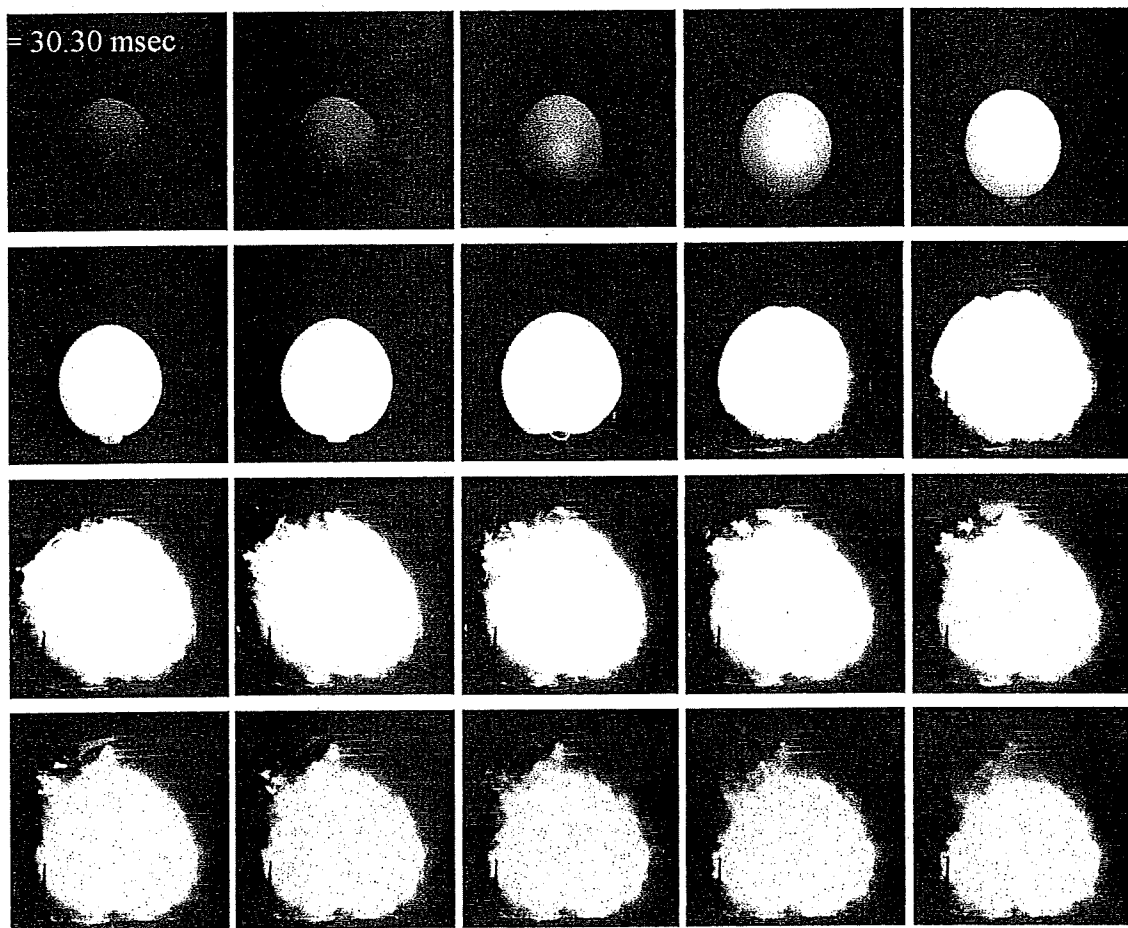


図 4-8(g) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 3.0$, 750 mm の位置, 破膜後に点火)



画像間隔 3.56 msec

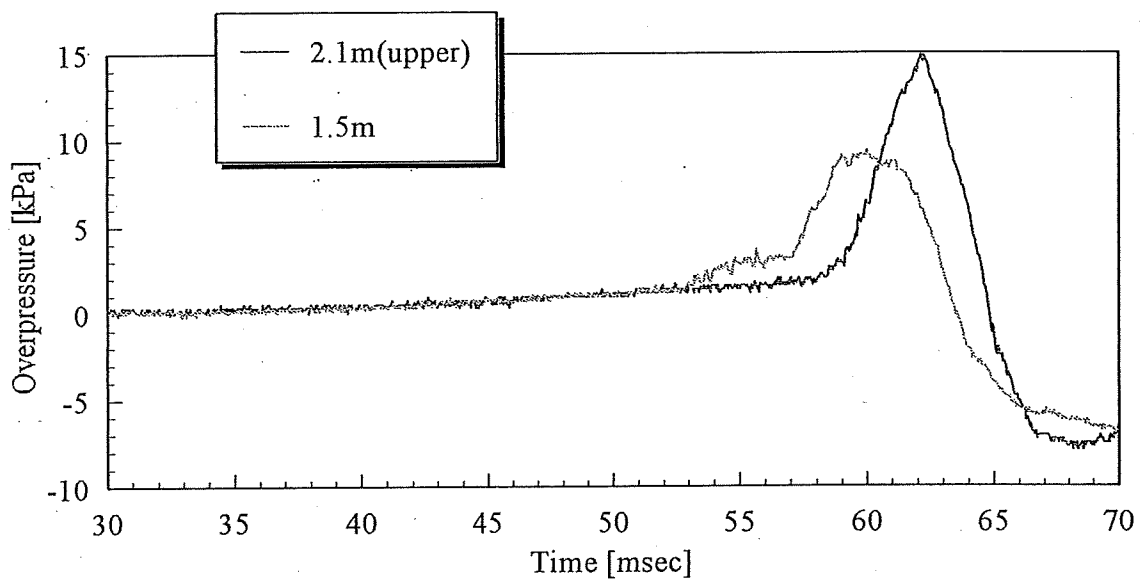
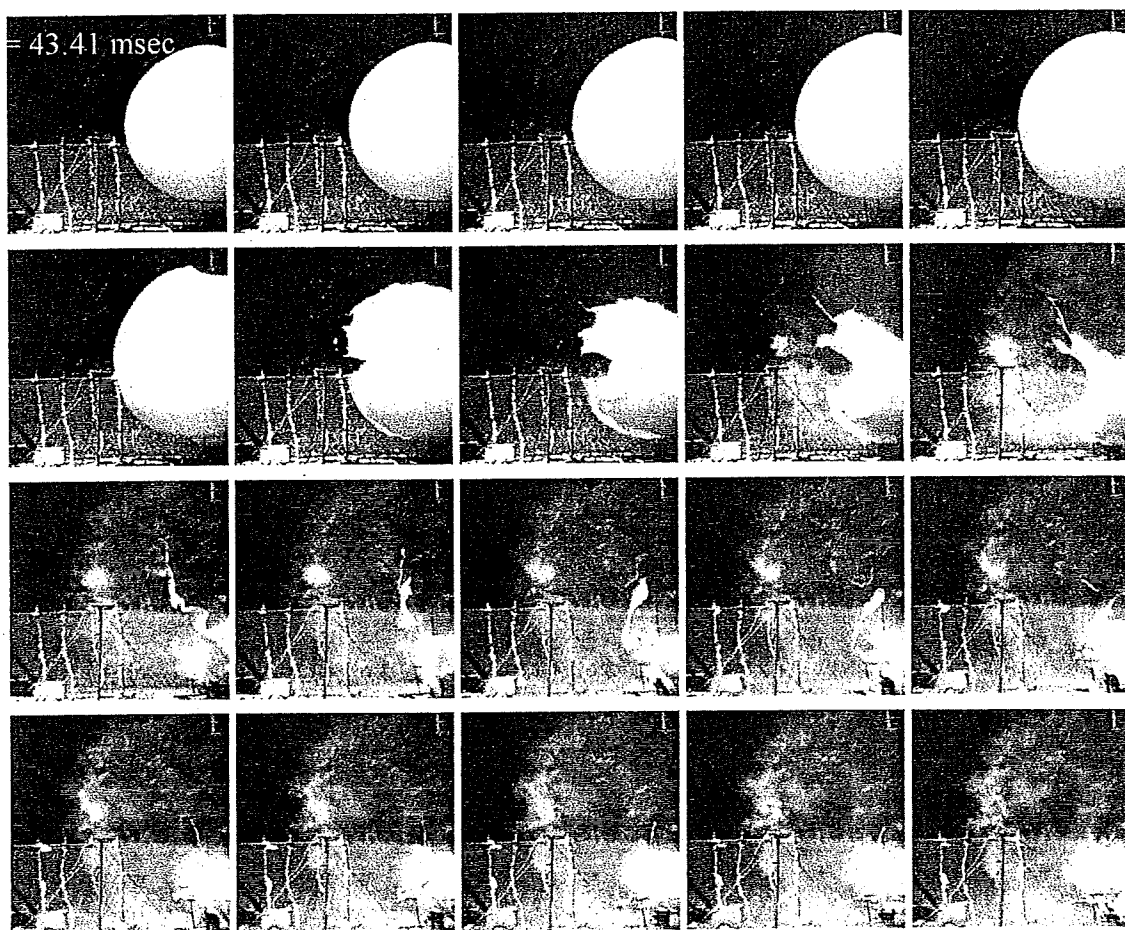


図 4-8(h) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 1.0$, 750 mm の位置, 割らずに点火)



画像間隔 1.78 msec

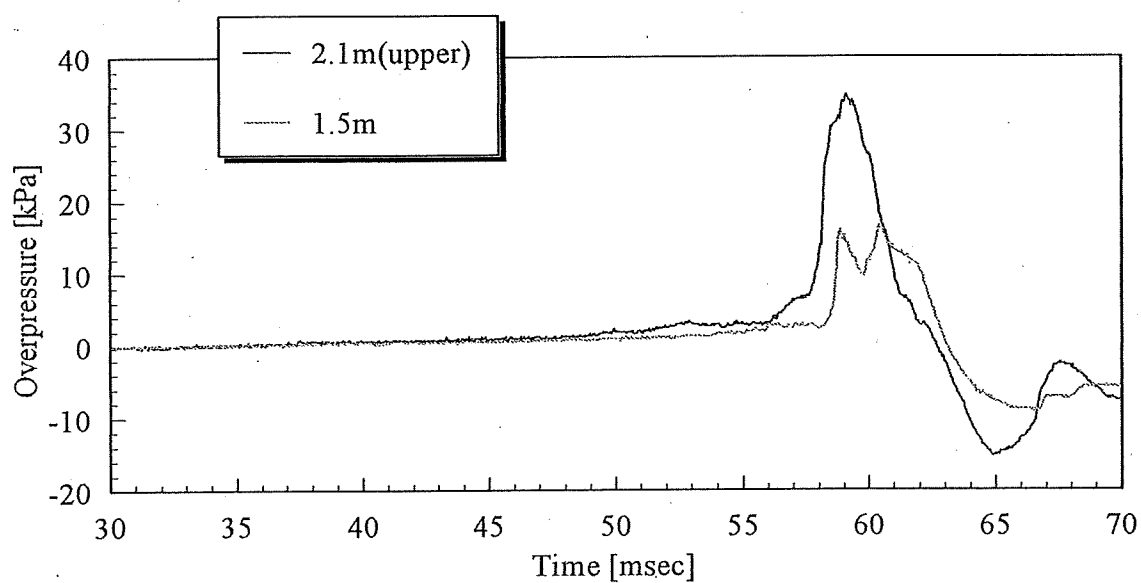


図 4-8(i) 水素-空気の爆燃 ($\phi = 1.8$, 750 mm の位置, ナイフエッジを固定)

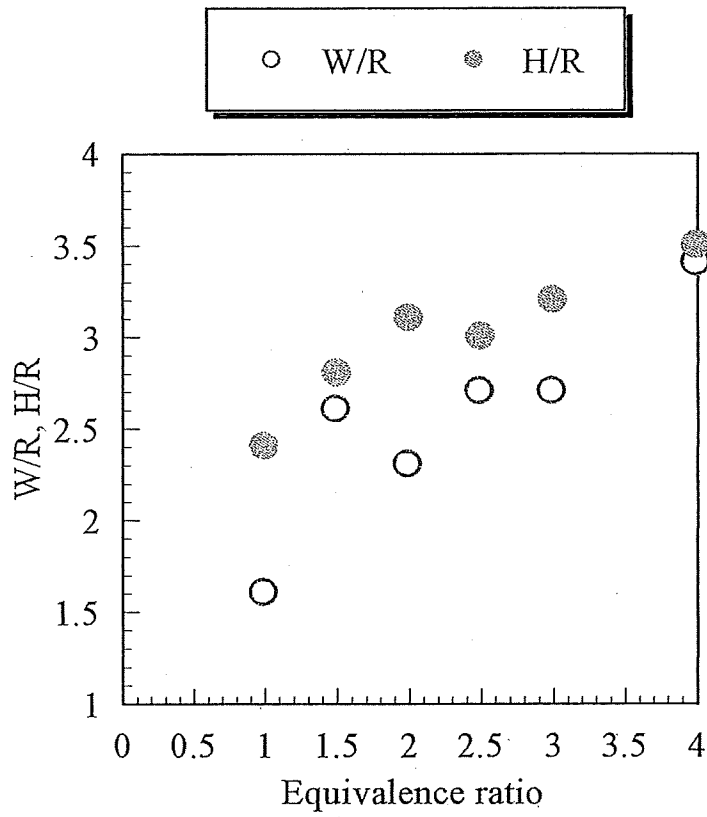
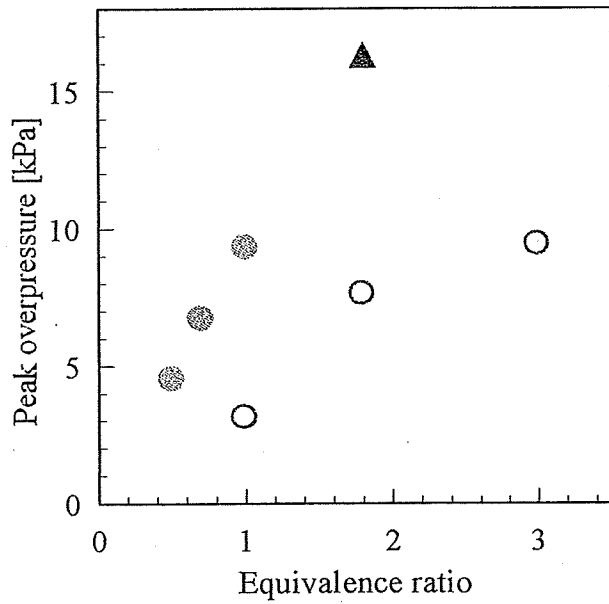
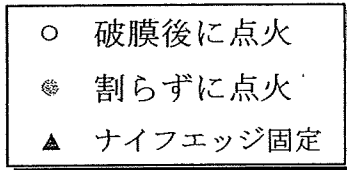
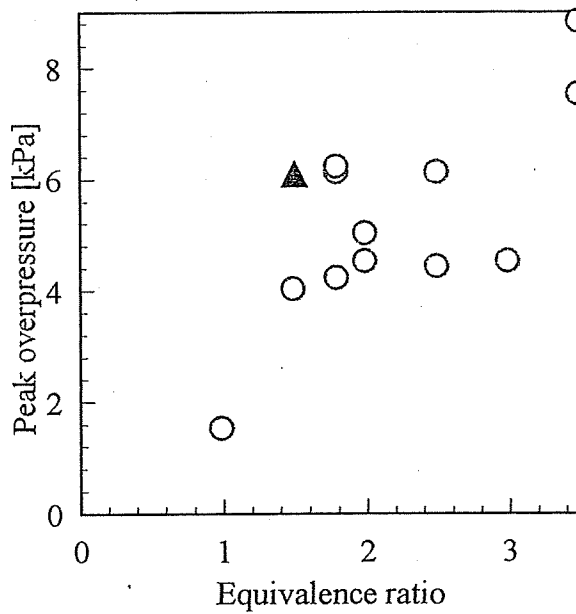


図 4-9 延焼領域 (破膜後の点火)

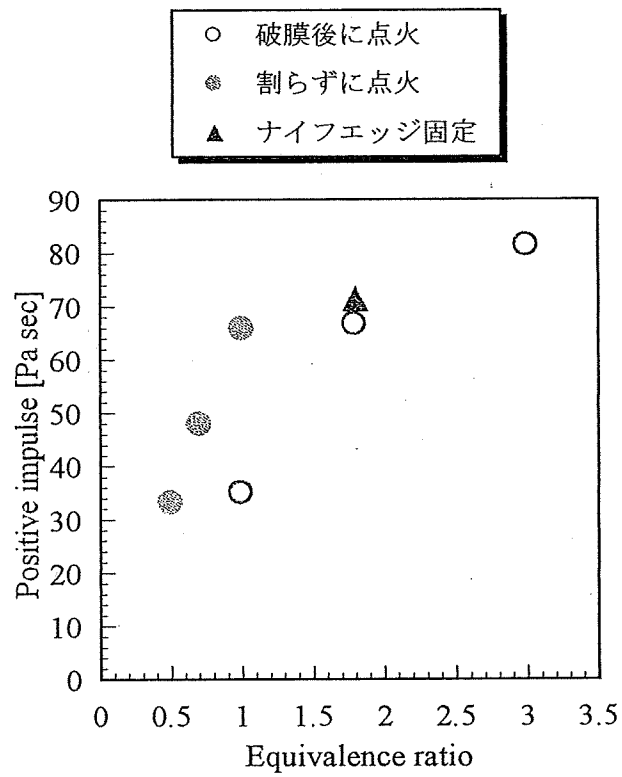


(a) 750 mm の位置で点火

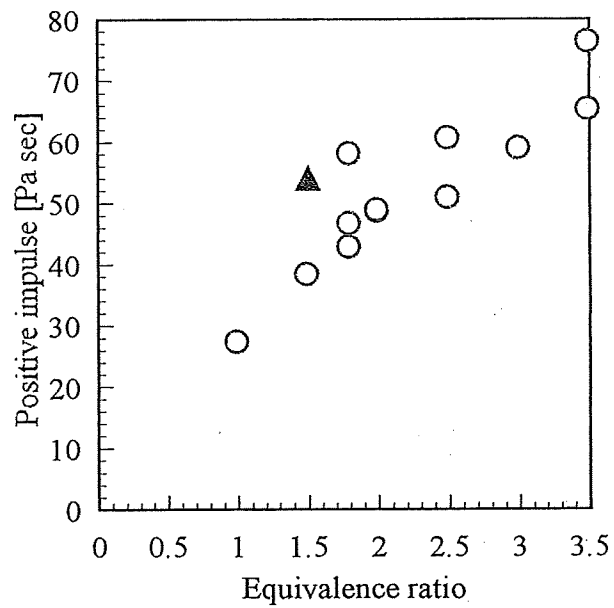


(b) 400 mm の位置で点火

図 4-10 ピーク圧力の当量比依存性



(a) 750 mm の位置で点火



(b) 400 mm の位置で点火

図 4-11 インパルスの当量比依存性

第5章 スケーリング則

1.13 概要

混合気容量 5.4 L, 150 L, 1400 L の3つの異なる規模で水素-空気の爆燃実験を行い、その爆発挙動を高速度ビデオカメラにより撮影し、発生する圧力や音圧も計測した。その結果、さまざまな条件における、圧力の時間履歴や延焼領域など、被害評価に重要となるデータを取得することができた。だが、実際に想定される事故は、今回行った中で最大の実験規模(1400 L)のさらに数十~数百倍の規模となるものである。そこで、これまでの一連の実験から得られたデータを比較し、何らかの法則性を確認し、実際の爆発事故の被害予測方法を検討する。

1.14 各実験間でのデータの比較

三つの異なる規模で得られたデータについて、それぞれの実験間での関連性を調べるために、順に比較していく。まず全ての実験で十分なデータが得られた破膜後に点火した場合について比較し、点火方法や点火位置を変えた場合に、どのような傾向が見られたかを比較する。

ピーク音圧レベル

ピーク音圧レベルについて比較する。破膜後に点火した場合について3つの実験間で比較すると、それぞれ当量比とともに増加傾向にあり、特に $\phi = 0.5 \sim 1.5$ の領域で大きく増加している。5.4 L, 150 Lの規模の実験について、割らずに点火した場合を比較すると、ともに $\phi = 1.5$ 付近でピークとなっており、それ以上の領域では減少傾向にある。点火方法による違いを比較すると、各実験でナイフエッジを固定した場合に最も大きくなっている。150 L, 1400 Lの規模の実験について、点火位置による違いを比較すると、点火位置が混合気中心に近づくにつれて大きくなっている。

このように、計測する距離や環境(実験室内, 屋外)などが様々ではあったが、それぞれ傾向は非常によく似ているといえる。

5.2.2 延焼領域

延焼領域について比較する。破膜後に点火する方法について各実験を比較すると、全ての実験で当量比の増加とともに大きくなり、また、水平方向の広がりよりも鉛直方向の広がりが大きくなっている。ただし、1400 Lの規模の実験については水平方向、鉛直方向でそれほ

ど変わっておらず、この鉛直方向への値が破膜による噴き出し流れによるものだとすると、他の2つの実験に比べ、規模が大きい分破膜の影響を受けにくかったためと考えられる。

当量比依存性については傾向が似ているが、破膜による影響が大きく、比較は難しい。

5.2.3 ピーク圧力

ピーク圧力について比較する。破膜後に点火する方法について、各実験を比較すると、いずれの場合も当量比とともに増加している。他の点火方法について比較すると、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法で、非常に大きな圧力が発生しているのも同じ傾向といえる。ただし、割らずに点火する方法について比較すると、150 L、1400 Lの規模の実験では、破膜後に点火する方法に比べ、ほぼ全ての水素を燃焼するため、ピーク圧力は大きくなっている。それに対し、5.4 Lの規模の実験では、割らずに点火する方法ではピーク圧力が非常に小さな値となっている。これは、規模が小さいために、破膜までにラテックス膜を押し広げるために失われるエネルギーが、爆発により発生するエネルギーに対し無視できない量となっているためと考えられる。150 L、1400 Lの規模の実験について、点火位置を変化させたときの傾向を比較すると、ピーク音圧レベルと同様、やはり点火位置が混合気の中心に近くなるにつれて大きくなっている。条件によってばらつきはあるが、両実験とも2倍程度の値となっている。点火位置からの距離による圧力の減衰を比較すると、5.4 L規模の実験では、距離の約-1乗で減衰しているのに対し、150 L規模では距離の約-1/2乗に比例している。

破膜の影響などから多少のばらつきはあり、異なる点もいくつかも見られるが、全体として傾向はよく似ているといえる。

5.2.4 インパルス

インパルスについても同様の比較を行う。破膜後に点火する方法について各実験を比較すると、いずれも当量比とともに増加している。破膜後に点火する方法に比べ、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法では大きな値となるのは全実験で共通である。割らずに点火する方法では150 L、1400 Lの規模では破膜後に点火する方法に比べ大きくなっており、特に150 Lの規模では、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法とほぼ同じ値となっている。

これに対し、5.4 L ではピーク圧力の場合と同様、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法と比べると小さくなっている。これもやはり破膜の際にエネルギーをロスするためと考えられる。点火位置による違いを比較すると、150 L, 1400 L の規模の両実験において、中心付近で点火した場合のほうが大きくなっている。点火位置からの距離によるインパルスの減衰を見ると、ピーク圧力の場合と同様で、5.4 L の規模の実験では距離の約-1 乗でインパルスが減衰しているのに対し、150 L の規模の実験では距離の約-1/2 乗で減衰している。

これも破膜の影響などにより、異なる点がいくつか見られる。また、全体としてピーク圧力の場合に比べ、ばらつきが少ないようである。

5.3 スケーリング則

前節のように、ピーク音圧レベル、ピーク圧力、インパルスに関しては各実験の比較においてよく似た傾向が見られ、より大きな規模でもこのような傾向が見られると推測できる。一方、延焼領域については、初期混合気の形状の違いや破膜の影響などから、各実験間でばらつきが多かった。当量比などの条件にもよるが、水平方向へは初期混合気半径の2~3 倍程度、鉛直方向には3~4 倍程度にまで広がる恐れがある、といえる程度であり、実際の爆発事故で考えられる高圧タンクからの吹き出しや風の影響などを考えると、正確にはわからない。そこで、爆発事故の被害評価に重要となるであろう、圧力とインパルスについてスケールリング側の適用を行うことにする。

まず、以下に示す Sachs のスケールリング則【2, 13】を用いて、各実験で得られたピーク圧力およびインパルスを無次元化し、同様に無次元化した距離で整理する。

$$\bar{P} = \frac{p - p_0}{p_0} \quad \bar{i} = \frac{ia}{E_t^{1/3} p_0^{2/3}} \quad \bar{R} = \frac{R}{(E_t / p_0)^{1/3}}$$

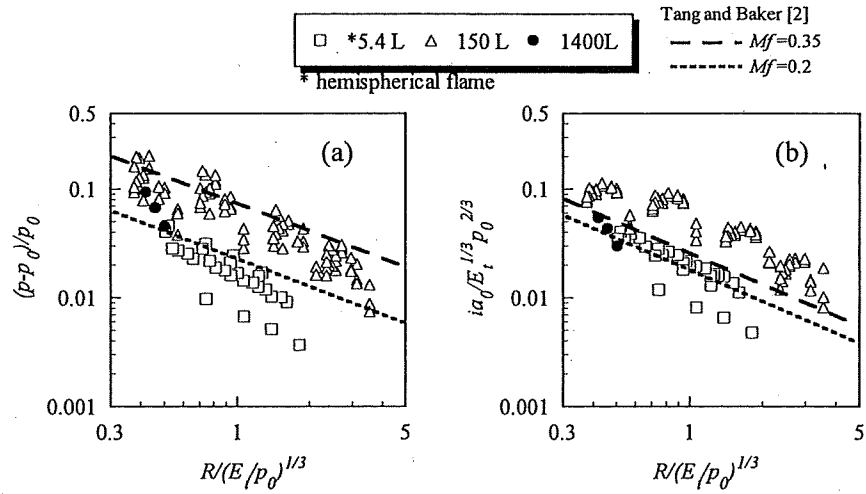
ここで、 p_0 : 大気圧, a_0 : 周囲条件での音速, p : ピーク圧力 (絶対圧), R : 爆心からの距離, E_t : 爆発により発生する全エネルギー, i : 正圧インパルスである。なお、ここで E_t の値は水素の低発熱量 241.8 kJ/mol【14】を用いて算出した。この式では、インパルスおよび距離を無次

元化する際に、分母にエネルギーの項が入っており、これにより異なる規模でのデータを比較することができる。

図 5-1 の(a)はピーク圧力、(b)はインパルスのスケール則を示す。幾分のばらつきはあるものの、1400L の場合を除いて、これらの曲線は、ほぼ同じ傾きをもって、無次元距離と共に減少することが分かる。Tang と Baker の解析した火炎伝播マッハ数 $M_f = 0.2$ および $M_f = 0.35$ に対するブラスト曲線も示してあるが、実験結果はこれらの曲線とかなり近い。150L 風船の実験でインパルスの無次元値が少し高い値を示すのは、実験室の大きさが充分ではなく、実験室内で圧力波の反射があり、第 2 ピーク以降の圧力波を増加させた影響と考えられる。

種々の大きさの爆燃の実験データについて、スケール則を適用した例は今回が初めてであり、スケール則が成り立つ可能性が初めて示された。

しかしながら、実験データが未だ不足しており、特に大型風船の多くのデータの蓄積が必要である。



- (a) 無次元ピーク圧力と無次元距離の関係
 (b) 無次元正圧インパルスと無次元距離の関係

図 5-1 実験結果と Sachs のスケール則

3. 低温における水素ガスの爆発特性評価

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 松井英憲

1. はじめに

水素燃料自動車の開発では、液体水素の利用も考えられている。液体水素は、 -253°C (20K) の極低温であるため、漏洩した場合の水素ガスはかなり低温であることが予測される。このような状態で漏洩後空気と混合し、閉鎖空間で爆発が生じた場合の爆発圧力やその威力を予め把握しておく必要がある。密閉容器内でのガス爆発時の最大爆発圧力 (P_m) は、近似的に次式によって示される。

$$P_m = P_1 \times (n_2 \cdot T_2) / (n_1 \cdot T_1) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 P_1 はガスの初圧、 n_1 , n_2 は爆発前後のガスのモル数、 T_1 , T_2 は爆発前後のガスの温度である。最大爆発圧力は、(1)式による計算で予測し得るが、昇圧速度などの動的な特性は実測でしか得られず、高温下での測定値は得られているが¹⁾、低温下でのデータは見当たらない。そこで、小型爆発円筒容器 (容積 1L) を用いて、室温から約 -60°C までの低温域での化学量論組成の水素/空気混合ガスの爆発圧力特性の測定を行った結果について示す。

2. 実験装置及び方法

実験装置の概略を図 1 に示す。爆発容器は低温での温度制御を容易にするため、内径 106mm、高さ 111mm のステンレス製円筒容器を用いた。中央部に間隙 4mm の電極を有しており、市販の電子ライタの放電回路を用いたスパークで着火した。片側のフランジは強化ガラスになっており、放電の状態及び火炎の伝播が目視できるようになっている。爆発容器には、ガス導管、弁、デジタルマノメータ、圧力変換器、シース K 型熱電対が取り付けられている。爆発容器は、 -60°C まで冷却可能な低温恒温エタノール槽に浸漬して温度制御を行った。

試験方法は、予め別のタンクに調整した 30% 水素/空気混合ガスを爆発容器内に加圧導入して、容器と一緒に低温槽内で所定の温度まで冷却し、容器内ガス温度が一定になったところで、余分のガス圧を大気圧迄放出して初圧を大気圧とした。着火、爆発時の圧力波形はデジタルオシロスコープで記録・解析した。

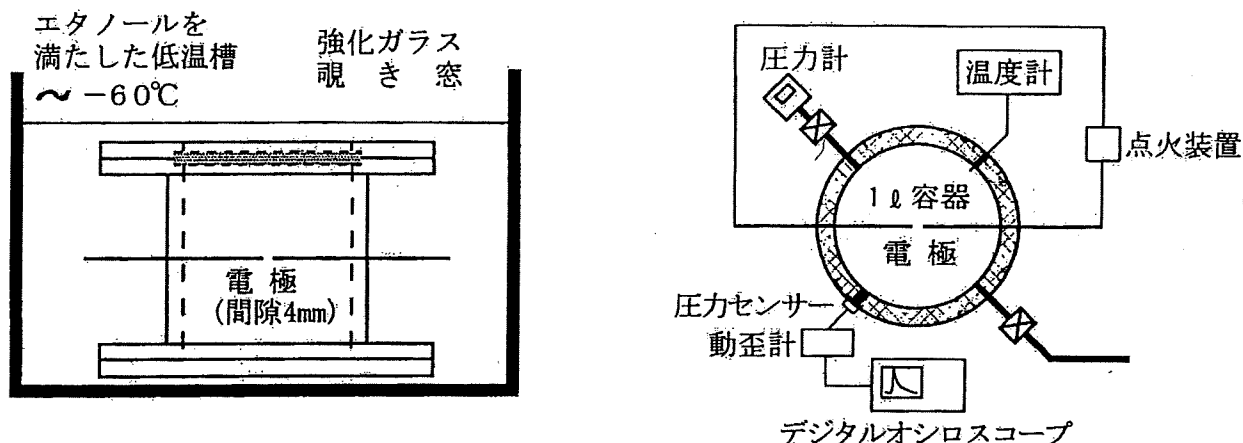


図 1 低温水素ガス爆発特性試験装置の概略

3. 実験結果と考察

種々初期温度 (T_1) における爆発圧力波形の測定結果を図 2 に示す。初期圧力はどれも大気圧であり、(1)式から予測されるように最大爆発圧力(P_m)は、初期温度(T_1)が低いほど当然ながらかなり高くなる。測定値はどれも断熱定容燃焼の計算値より 4~8%低い値であった(図 3 参照)。これは、爆発容器が 1L と小型であるため、容積に対する表面積の割合が大きくなり、熱損失が増大したためと考えられる。ここで注目すべき点は、初期温度が低くなると反応速度が遅くなるため燃焼速度が低下して昇圧速度が低下することが予測されるが、爆発威