

また、ナイフエッジを設置した場合は、破膜により火炎面前方の混合気に乱れが生じ、急激に火炎伝ばが加速されている様子が観察できる。

発生する圧力も、全体の傾向として当量比の増加に伴い大きなものとなり、点火方法によっても圧力のピーク値や波形が異なっていることがわかる。割らずに点火した場合とナイフエッジを固定した場合の圧力波形を比較すると、ナイフエッジを固定した場合のほうが圧力の立ち上がりが鋭く、ピーク値も大きなものとなっている。それと比較すると、割らずに点火した場合、ピーク値は大きくないが、持続時間が長く、波形は緩やかな山を描いている。

火炎の伝ば速度

高速度ビデオカメラで撮影した画像から、火炎の伝ば速度を割り出した。割らずに点火する方法で、火炎が点火位置から伝ばし始めて、その上方 150 mm の位置に達するまで（破膜前）の平均速度を求め、プロットしたものが図 2-10 である。比較のため、水素-空気混合気の層流燃焼速度も示した。層流燃焼速度と比較すると、一桁違う値になってはいるものの、 $\phi=2$ 付近でピーク値となるなど、当量比依存性はよく似た傾向を示している。

延焼領域

水素関連施設における水素ガスの漏洩、爆発事故において考えられる主な被害として、火災によるものが挙げられる。したがって、爆発事故が起こった際にどの程度まで火炎が到達するのかを把握しておくことは重要である。そこで、実際の爆発事故における延焼領域を予測するために、高速度カメラにより得られた画像から、火炎の広がる領域を求めた。

まず、各条件で得られた時系列画像すべてに二値化処理を施し、火炎の形状を抽出する。この二値化の際のしきい値は、図 2-11 に示すように画像輝度のヒストグラムの“谷”にあたる部分の値を用いた。その後、得られた二値化画像をすべて重ね合わせ、図 2-12 のように火炎の最大到達領域を求めた。点火位置からの水平方向および鉛直方向の最大到達距離 W および H を、それぞれを初期混合気の半径 $R=137.5$ mm で正規化し、各条件でプロットしたものが図 2-13 である。水平方向、鉛直方向ともに、当量比の増加に伴い火炎が大きく広がって

る。

圧力データ

水素関連施設における水素の爆発事故による最も大きな被害として、発生する圧力による建造物などの破壊が考えられる。図 2-8 で示した圧力波形を基に、各条件、各位置での圧力データを比較し、当量比依存性や距離による減衰、点火方法による影響などを調べた。ここで、図 2-8 の圧力波形を見ると、正圧、負圧の山谷が減衰しながら繰り返されていることがわかるが、これは壁からの反射などによるものと考えられ、純粹に爆発により発生する圧力を調査するために、今後扱うデータはすべて一つ目の山に関するものであり、それ以降の山、谷は無視した。

各条件、各測定位置でのピーク圧力を求め、プロットしたものが図 2-14 である。全体として当量比の増加とともにピーク圧力値も大きくなる傾向が見られ、当量比 $\phi = 0.5 \sim 1.5$ の領域で特に顕著にこの傾向が見られる。また、各点火方法での圧力のピーク値を比較すると、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法が最も大きな値をとっており、続いて破膜後に点火する方法、割らずに点火する方法となっている。

この三パターンでの点火方法では最大ピーク圧力をとる当量比が異なっている。割らずに点火する方法では、当量比 $\phi = 1.5$ 付近で、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法では $\phi = 2.5$ 付近でピーク値となっており、それ以上の領域では減少傾向にある。一方、破膜後に点火する方法では、少なくとも今回実験を行った $\phi = 3.0$ までの領域では当量比とともに増大しており、現象傾向が見られなかった。ピーク圧力が、爆発により発生するエネルギー総量のみ依存するのではなく、火炎の伝ば速度などにも依存するために、こういった結果になったものと考えられる。水素-空気混合気の層流燃焼速度は図 2-10 で示したように当量比 1.8 付近でピーク値をとる【10】。割らずに点火する方法と比べて、ナイフエッジを設置する方法、破膜後に点火する方法と、大気への拡散を許容する条件になるにつれて、周囲の空気との混合により火炎面での実際の水素濃度は薄くなり、初期の混合気の当量比が高い条件では、火炎の伝ば速度が大きくなる方向へシフトする。これにより上述のような点火方法による差異

が生じたものと考えられる。

また、割らずに点火する方法が燃焼する水素量は最も多いにもかかわらず、ピーク圧力は小さな値となっている。考えられる原因として、この方法の場合、火炎がラテックス膜に到達して破膜にいたるまでに、ラテックス膜を押し広げているが、爆発により発生するエネルギーに対して、ラテックス膜を押し広げるために消費するエネルギーが無視できない大きさになっていることが推測できる。

これらのデータから、距離による圧力の減衰を調べた。図 2-15 は、0.35 m の位置での測定値に対して、0.50 m, 0.65 m, 0.85 m それぞれの位置でのピーク圧力がどの程度減衰しているかを調べ、それぞれプロットしたものである。縦軸の圧力値 P' は、各条件における各測定位置でのピーク圧力を、0.35 m の位置でのピーク圧力で正規化したものである。横軸の距離 R' は混合気半径 $R=137.5$ mm で正規化してある。点火位置から遠くに離れるにつれて多少のばらつきは見られるが、同様の傾向になっている。図中に示すとおり、圧力値はおおよそ距離の-1乗 ($P \propto 1/R$) で減衰していることがわかる。

次に、圧力による被害評価に重要となる正圧インパルス I_p を求めた。正圧インパルスは爆風圧の正圧となる期間を積分した値であり、次式で表される。

$$I_p = \int (p - p_0) dt \quad (2-2)$$

ここで、 p : 爆風圧, p_0 : 大気圧である。

図 2-16 は各条件、各測定位置での圧力の時間履歴からインパルスを求めたものである。点火方法で比較すると、最も大きな値をとるのはナイフエッジを固定した状態で点火する方法であり、続いて破膜後に点火する方法、割らずに点火する方法となっている。また、インパルスが最大となる当量比がそれぞれの点火方法で異なっており、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法では $\phi=2.5$ 、割らずに点火する方法では $\phi=1.5$ となっている。破膜後に点火する方法では、インパルスは当量比とともに増加しており、少なくとも $\phi=3.0$ までの範囲では減少する傾向はみられず、 $\phi=3.0$ での値が最大となっている。このように、ピーク圧力とよく似た傾向を示している。だが、ナイフエッジを固定する方法と、割らずに点火する

方法で比較すると、当量比が同じ条件では、ピーク圧力に関してはナイフエッジを固定した状態で点火する方法が4~10倍以上とかなり大きくなっていましたが、インパルスに関してはせいぜい3倍程度となっている。これは波形からもわかるように、ナイフエッジを設置した場合は瞬間的に大きな圧力が発生し、その後すぐにゼロにもどってしまうのに対し、割らずに点火した場合は正圧の期間が長く、時間積分値であるインパルスが比較的大きくなったことによるものである。

図2-17はインパルスに関して、ピーク圧力の場合と同様に、距離による減衰を調べたものである。縦軸のインパルスは点火位置から0.35 mのもので、点火位置からの距離は混合気半径で正規化してある。多少のばらつきは見られるが、おおよそ同様の傾向となっており、図中に示すとおり、インパルスもピーク圧力と同様、おおよそ距離のマイナスイ乗で減衰している ($I_p \propto 1/R$)。

2.4.3 メタン-空気混合気の爆発実験

水素の燃料としての特異性が、爆発現象にどのような影響を及ぼすか調べるために、比較のためメタンを用いて同様の実験を行った。混合気の充填量は同じく約5.4 L、当量比 $\phi = 1.0$ とし、燃料が未燃のまま拡散することや、破膜までにラテックス膜を膨張させる際にロスするエネルギーの差に大きな違いが生じないように、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法で実験を行い、比較した。比較の対象としたのは、同じく $\phi = 1.0$ の水素-空気混合気で、燃料がすべて燃焼するとみなすと、発生するエネルギーは水素の場合17.24 kJ、メタンでは18.37 kJとほぼ同じ程度のエネルギー量である。

発生するピーク音圧レベルは水素の場合の123.1 dBに対し、メタンでは108.2 dBとかなり小さくなっている。図2-18はメタン-空気混合気の爆発の高速度時系列画像およびそのときの圧力の時間履歴である。時系列画像を見ると、火炎の伝ば速度が水素に比べ非常に遅くなっていることがわかる。また、そのためラテックス膜が膨張し破膜する時点で、未燃の状態の燃料が多く残っており、破膜により生じる上方への流れに乗って、より高い位置まで火炎が達していることがわかる。ほぼ半球状に火炎が伝播している水素の場合と比較すると全

く異なった形態である。ピーク圧力を比較すると、点火位置から 0.35 m の位置では、水素の約 2.8 kPa に対し、メタンでは約 0.22 kPa と十分の一程度になっている。また、インパルスと比較すると、同様に点火位置から 0.35 m の位置では、水素の約 6 Pa・sec に対し、メタンでは約 1.1 Pa・sec とピーク圧力ほどではないが、やはりかなり小さくなっている。発生するエネルギー量が同程度の場合、ピーク圧力に比べてインパルスの差が小さくなるのは、先の水素を用いた実験での点火方法による比較の場合と同じであるが、それでもインパルスで 5 倍程度も異なっている。原因として、メタンの火炎伝ぱが比較的遅いため、発生する圧力も微弱なものとなり、本実験で使用している圧力変換器の検出限界以下のレベルになっていたか、破膜の際にメタンが上方に噴き出していることから、その一部が未燃のまま拡散してしまい、エネルギーロスが発生していたことが考えられる。

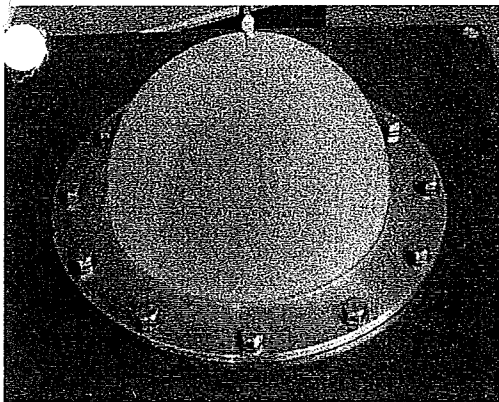
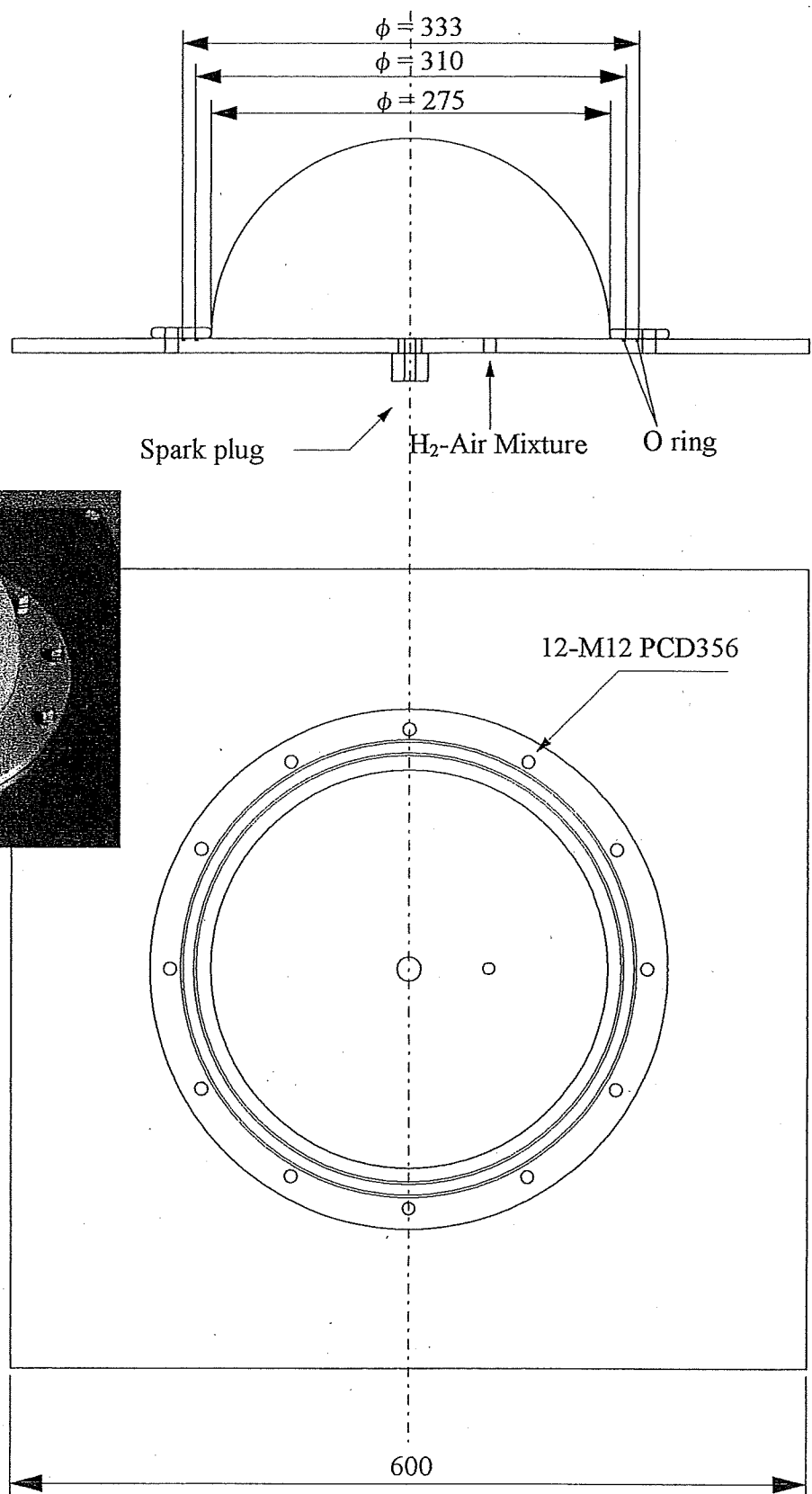


图 2-1 燃烧试验装置

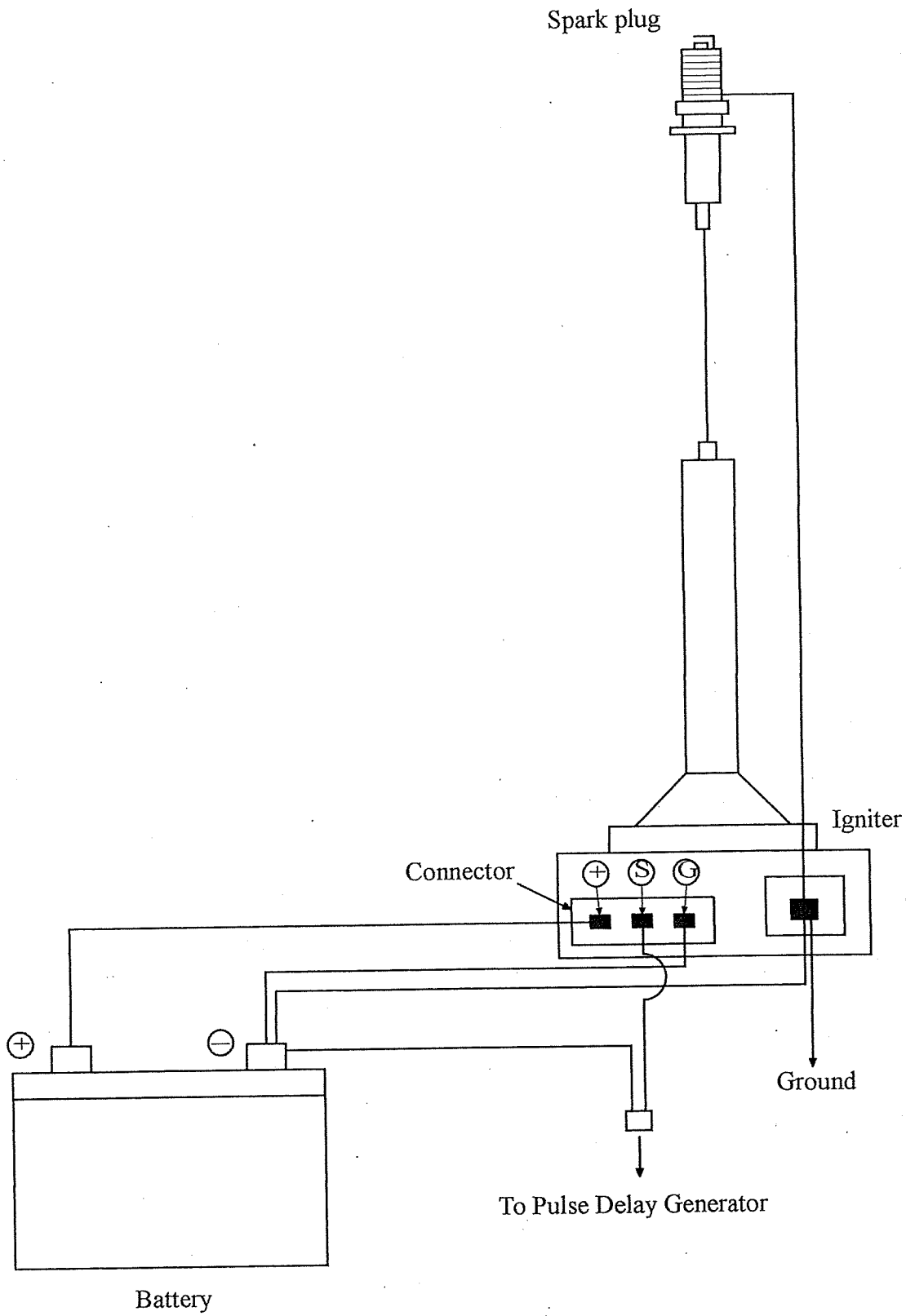


图 2-2 点火系

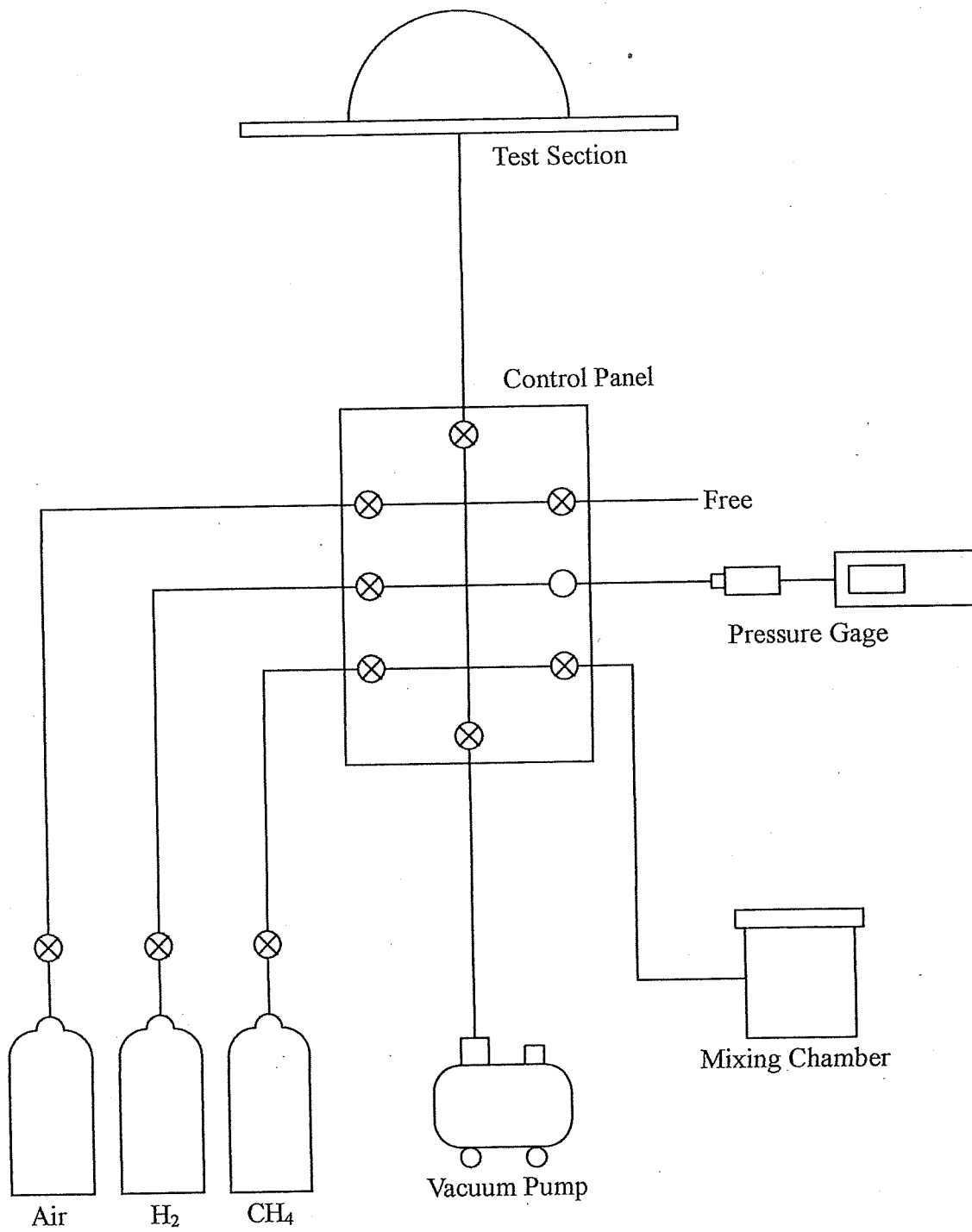


図 2-3 ガス流路系

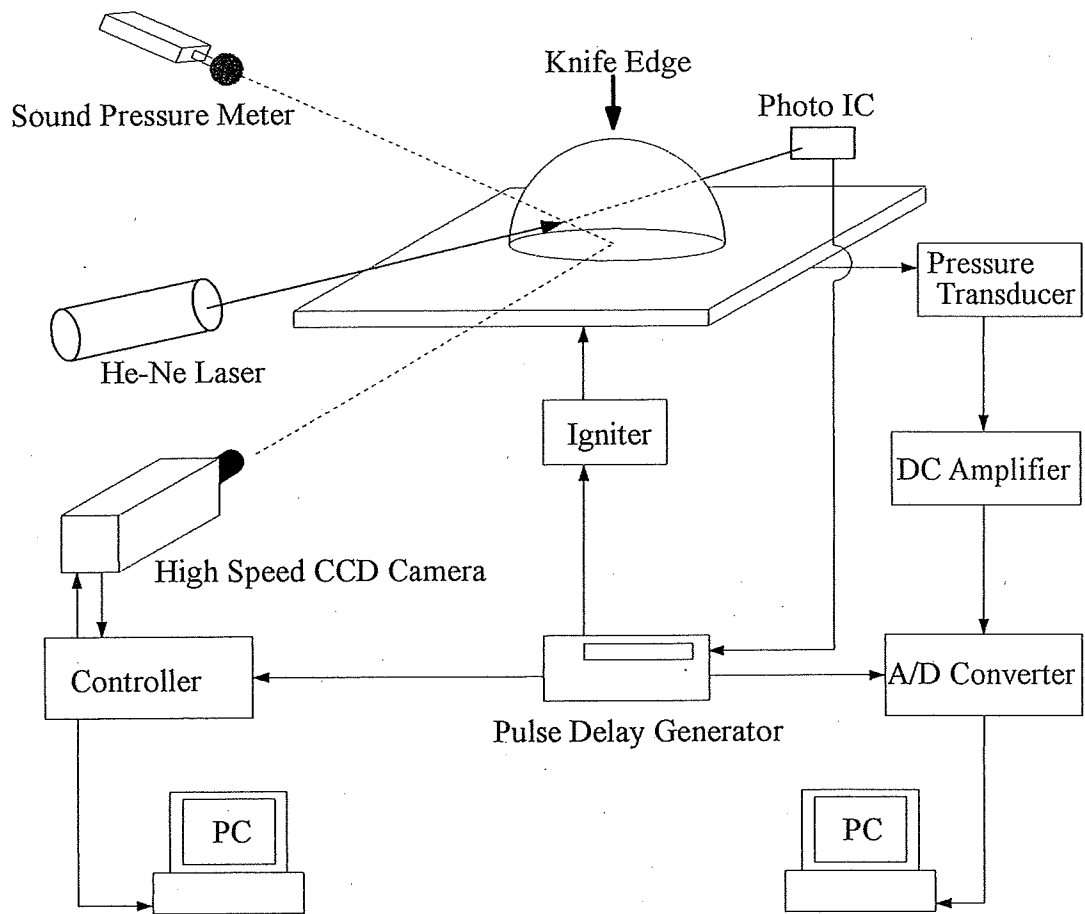
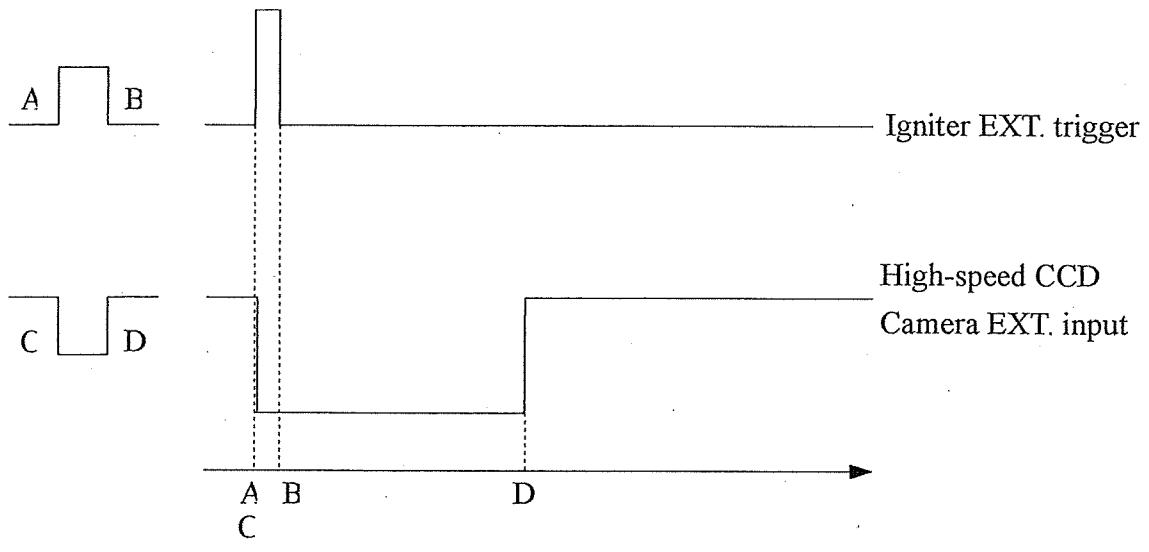


图 2-4 实验装置概略

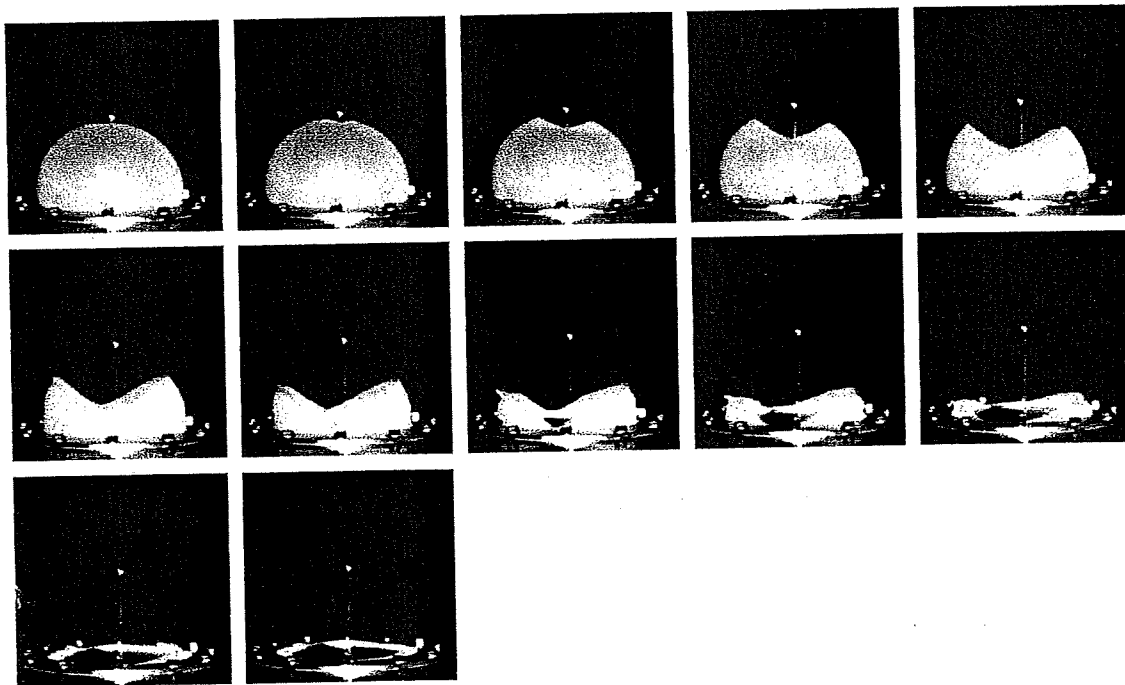
$$A = T_0 \quad B = A + 10 \text{ msec}$$

$$C = T_0 \quad D = C + 100 \text{ msec}$$

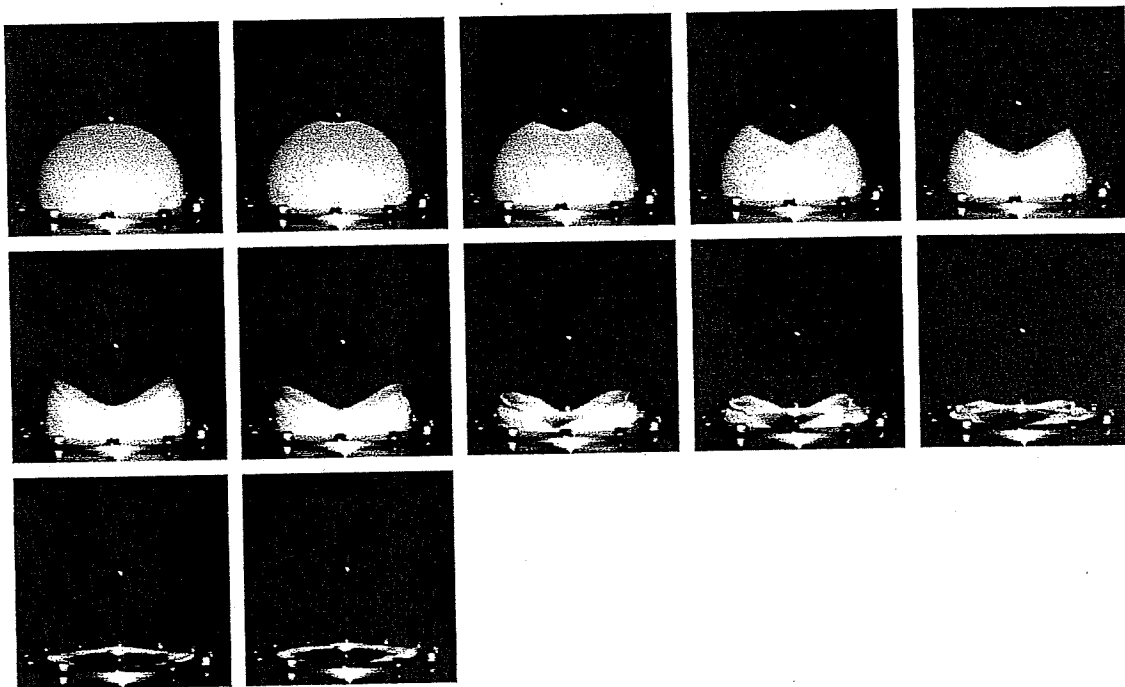


- A : A/D Converter EXT. trigger → Start
- B : Spark
- C : High Speed CCD Camera Start

图 2-5 TTL 信号线

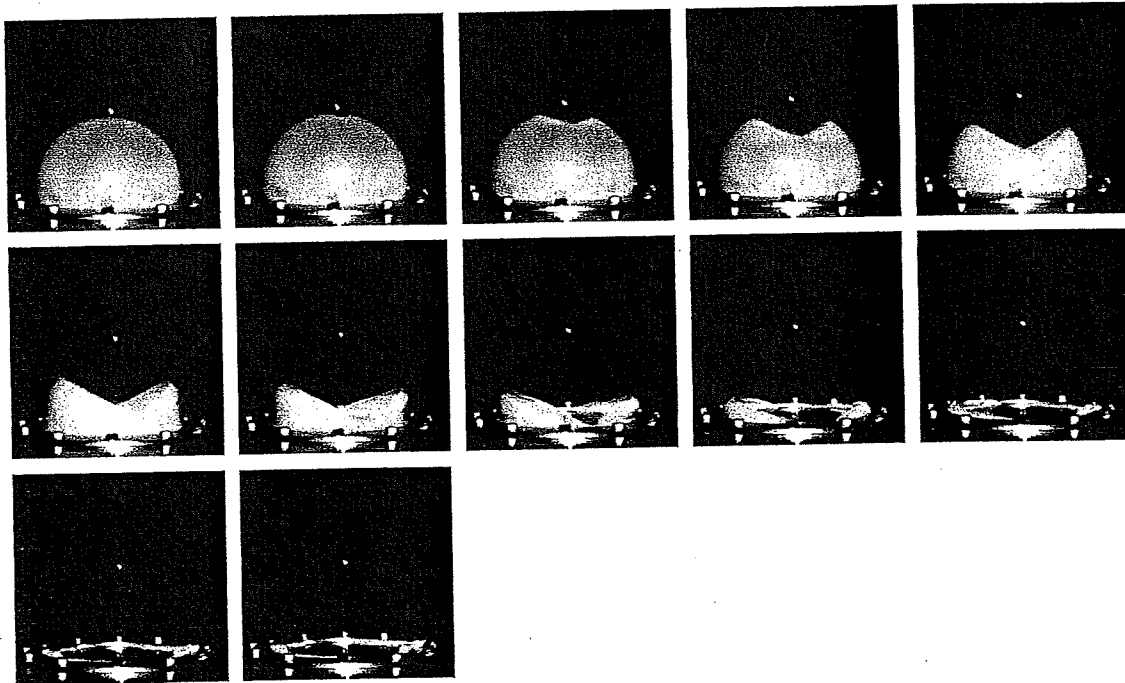


(a) $d_i = 0.1 \text{ mm}$



(b) $d_i = 0.14 \text{ mm}$

図 2-6 ラテックス膜の破裂 (画像間隔 0.889 ms)



(c) $d_i = 0.3 \text{ mm}$

図 2-6 ラテックス膜の破裂—続き (画像間隔 0.889 ms)

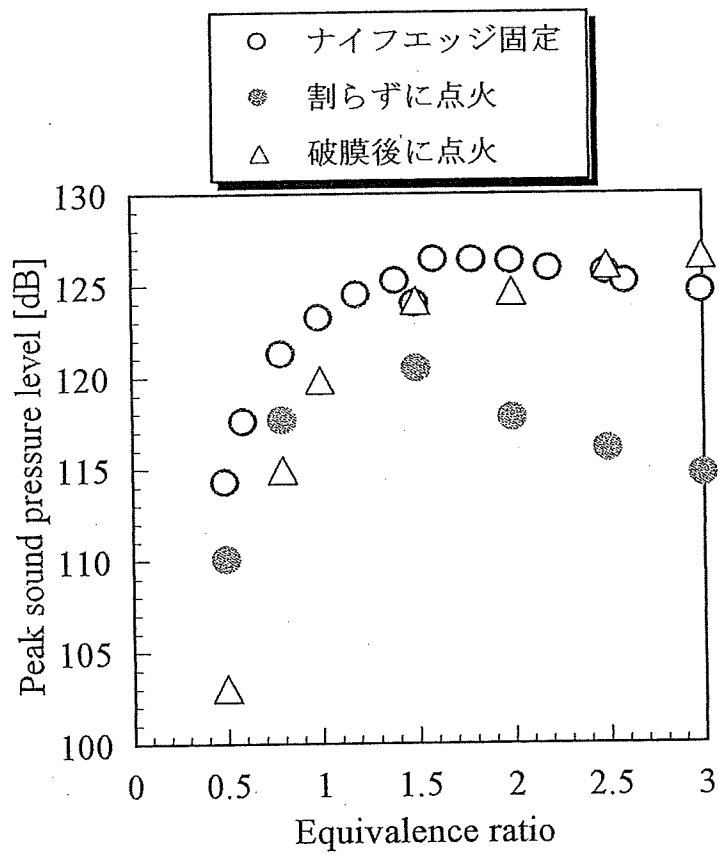
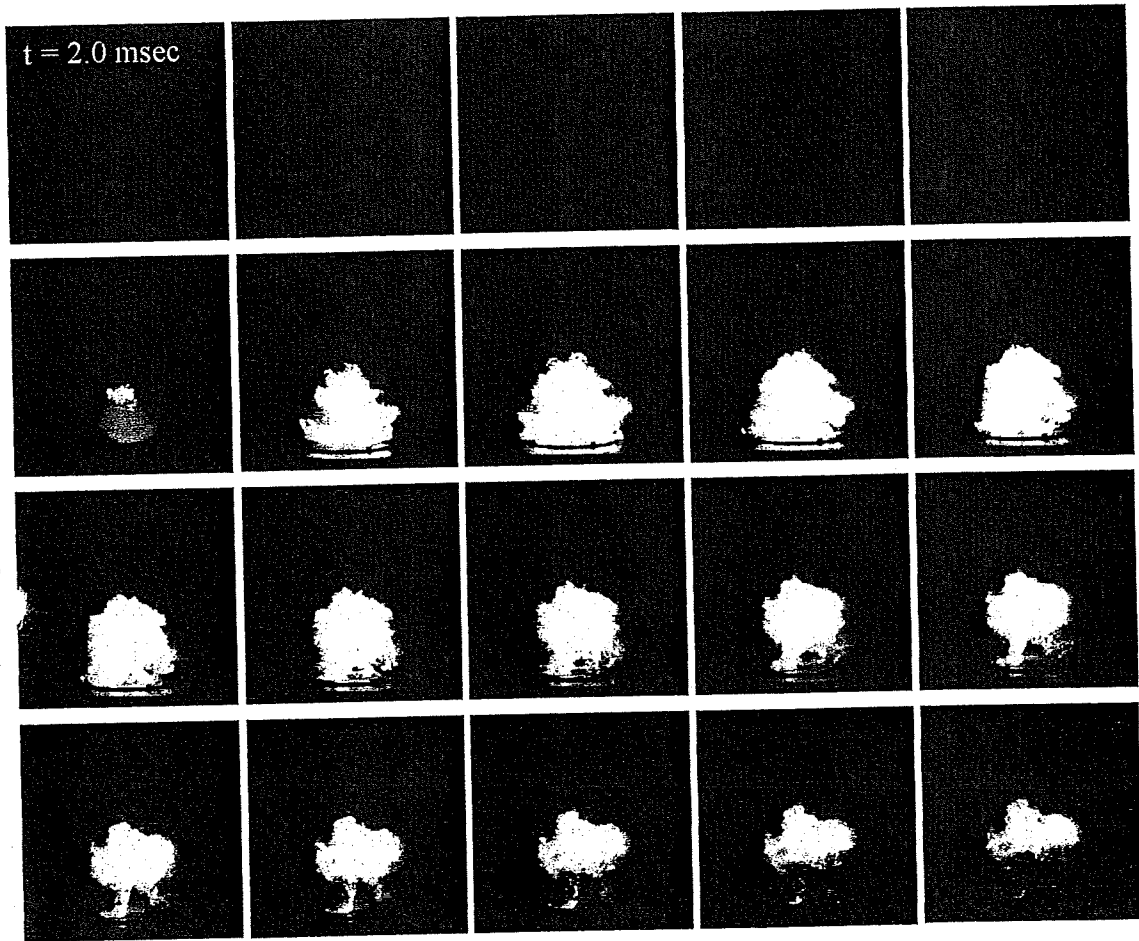


図 2-7 ピーク音圧レベル



画像間隔 1.78 msec

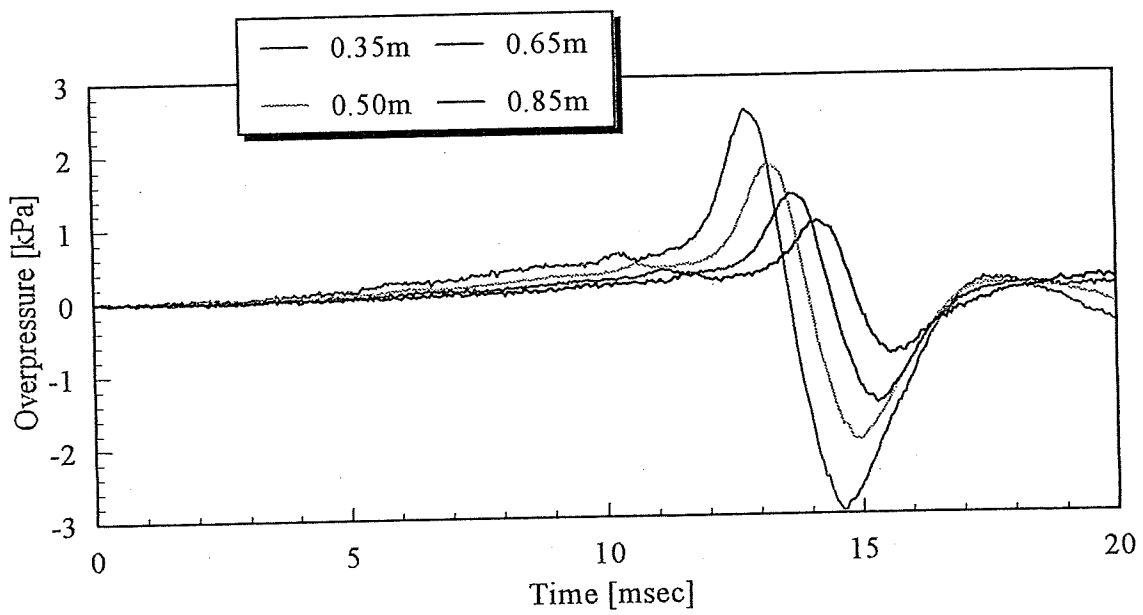
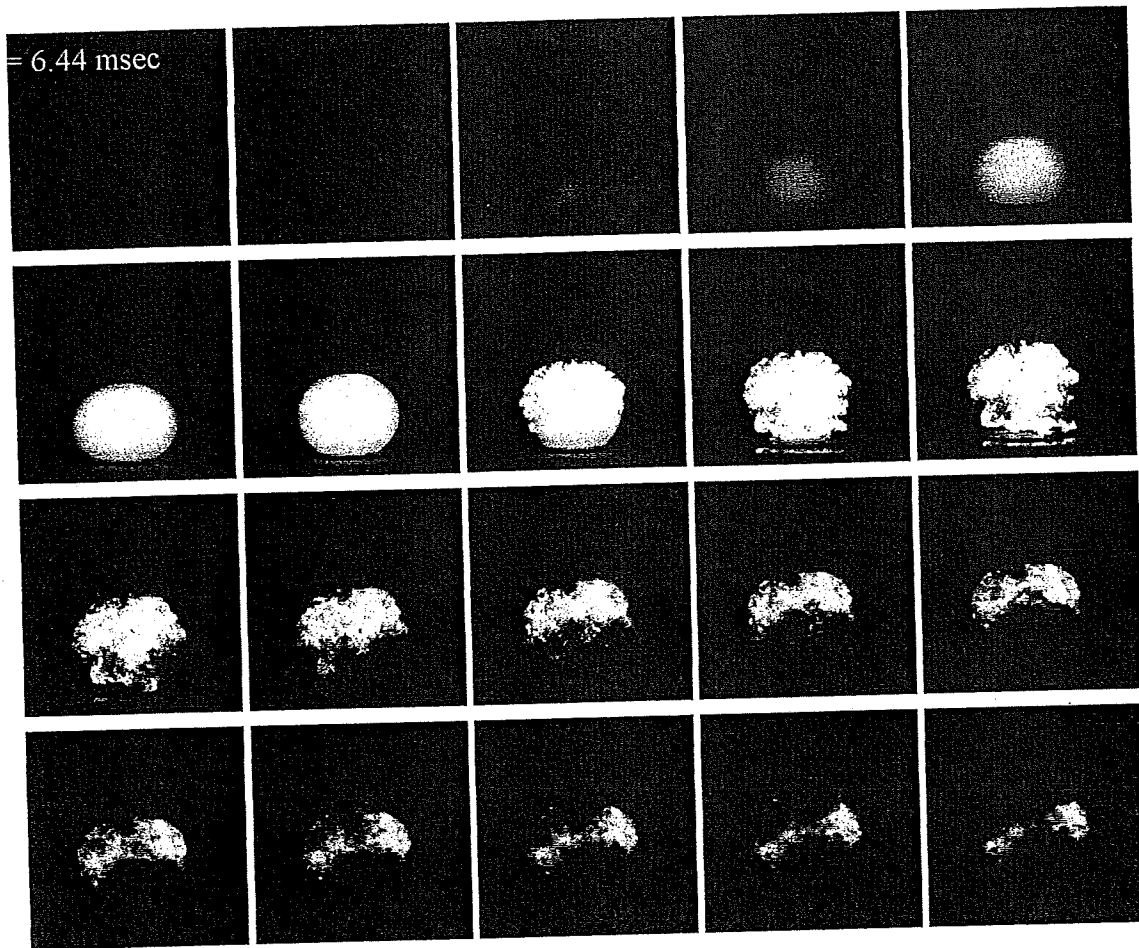


図 2-8 (a) 水素-空気の爆燃 ($\phi=1.0$, 刃固定)



画像間隔 1.78 msec

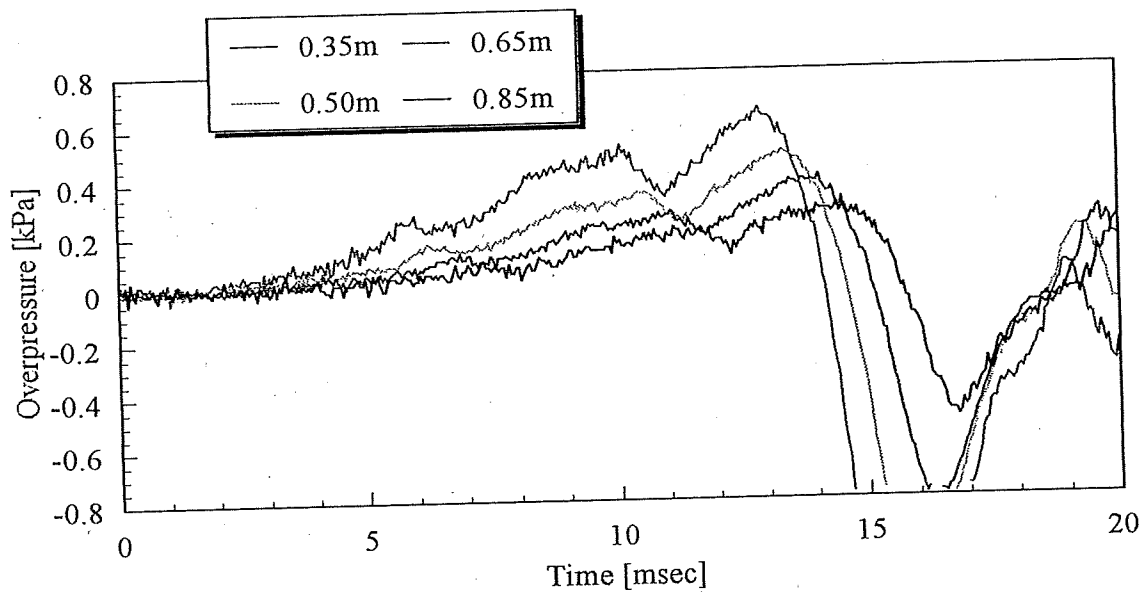
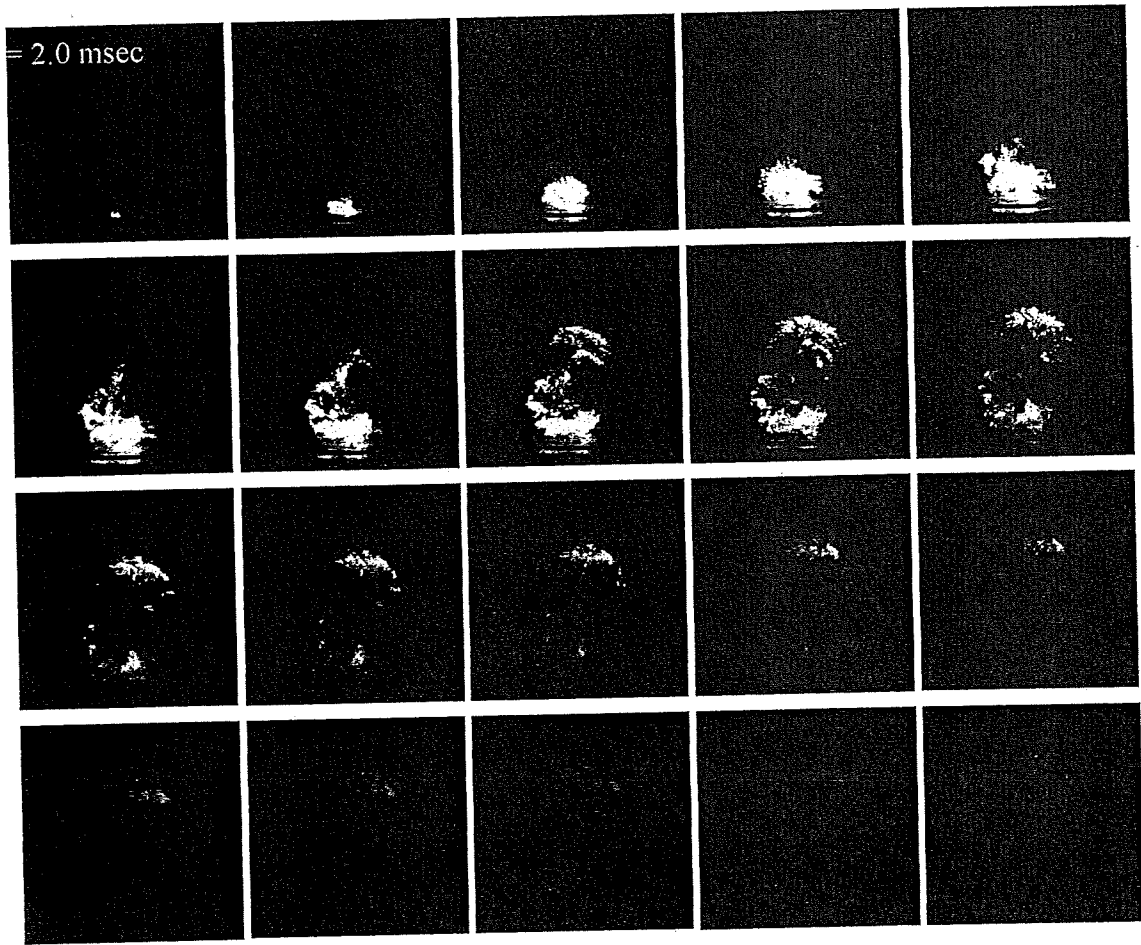


図 2-8 (b) 水素-空気の爆燃 ($\phi=1.0$, 割らずに点火)



画像間隔 1.78 msec

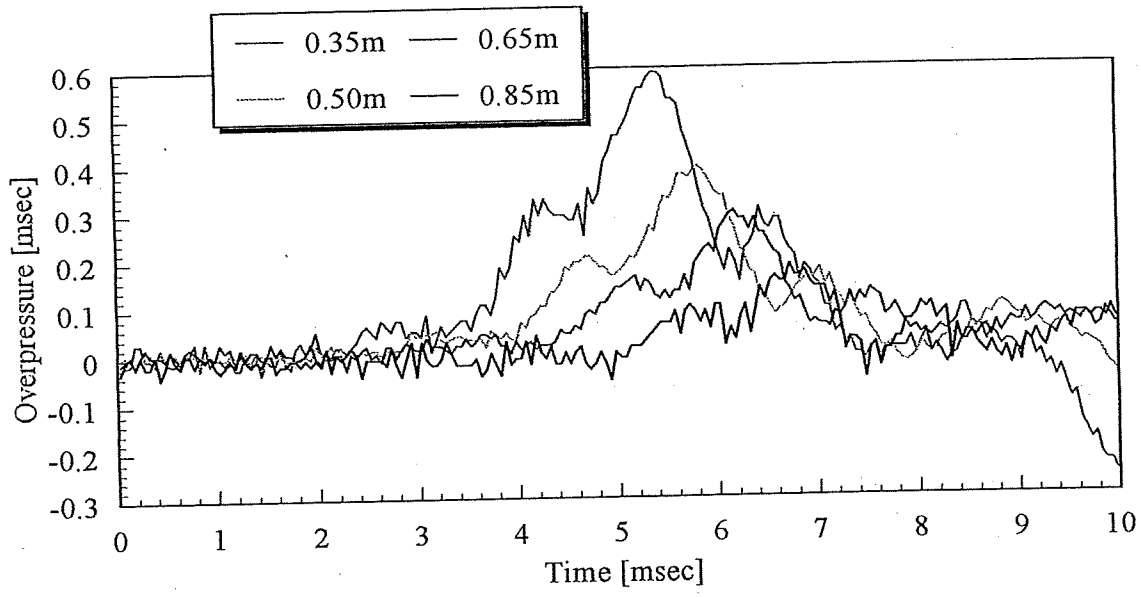
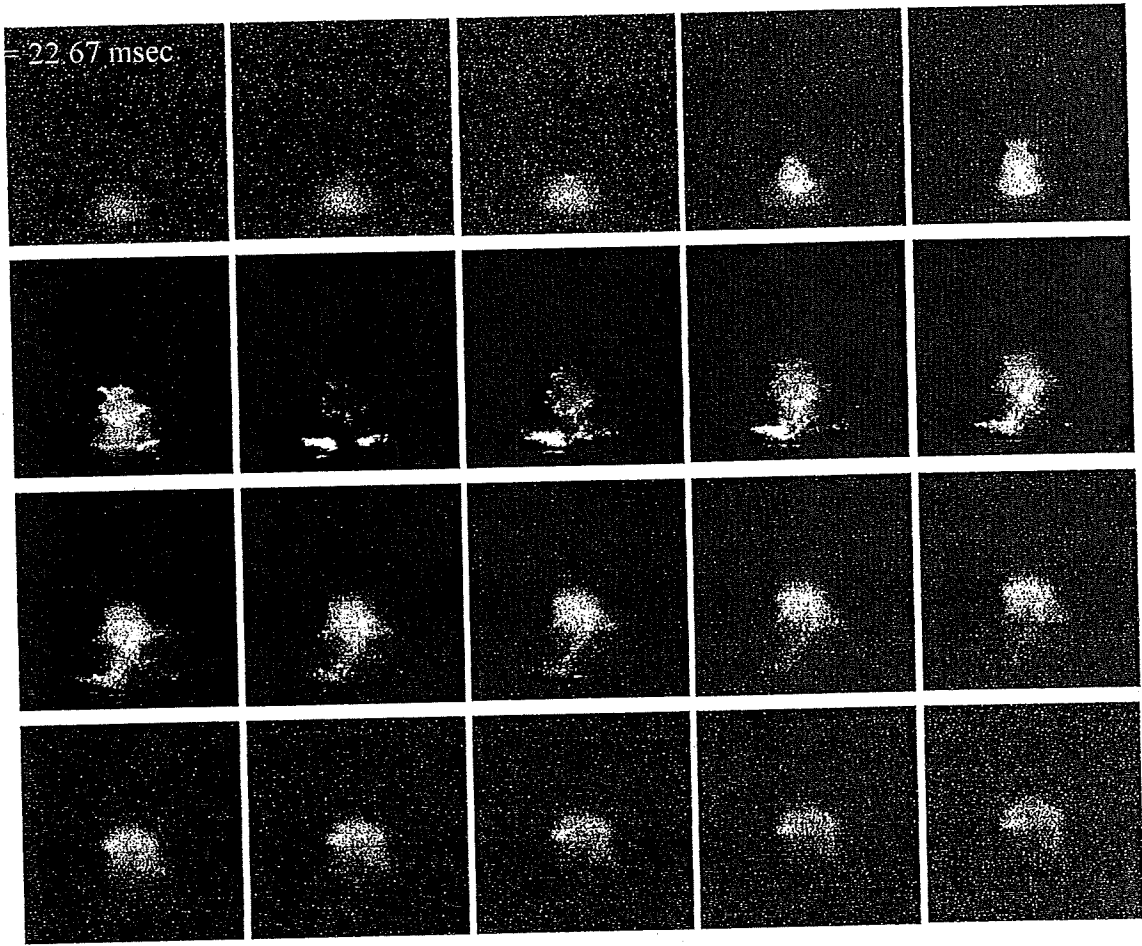


図 2-8 (c) 水素-空気の爆燃 ($\phi=1.0$, 破膜後に点火)



画像補正, 画像間隔 1.78 msec

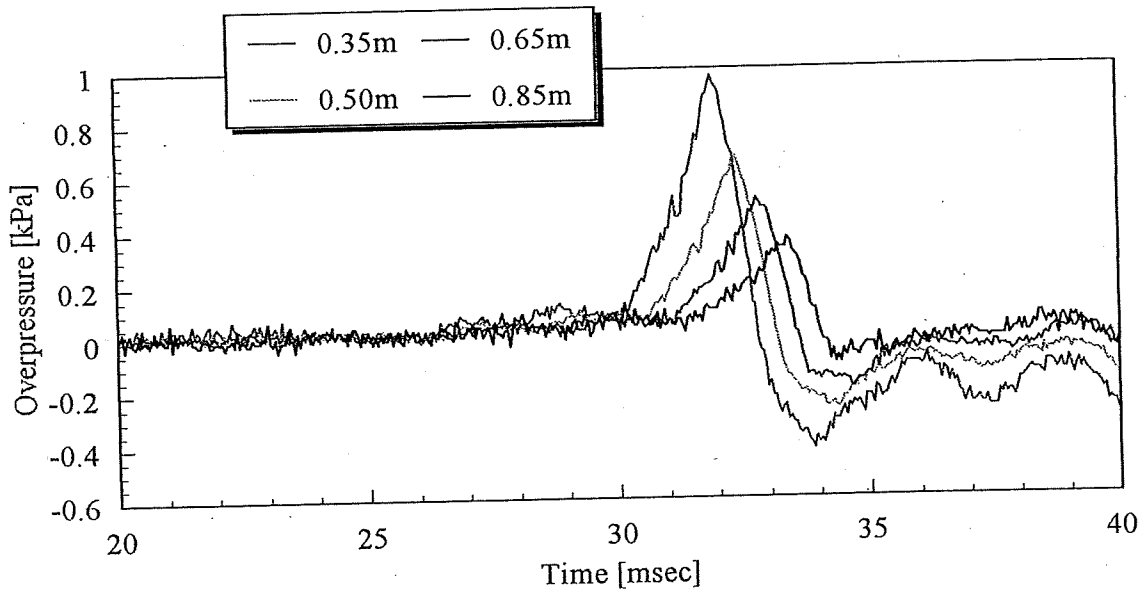
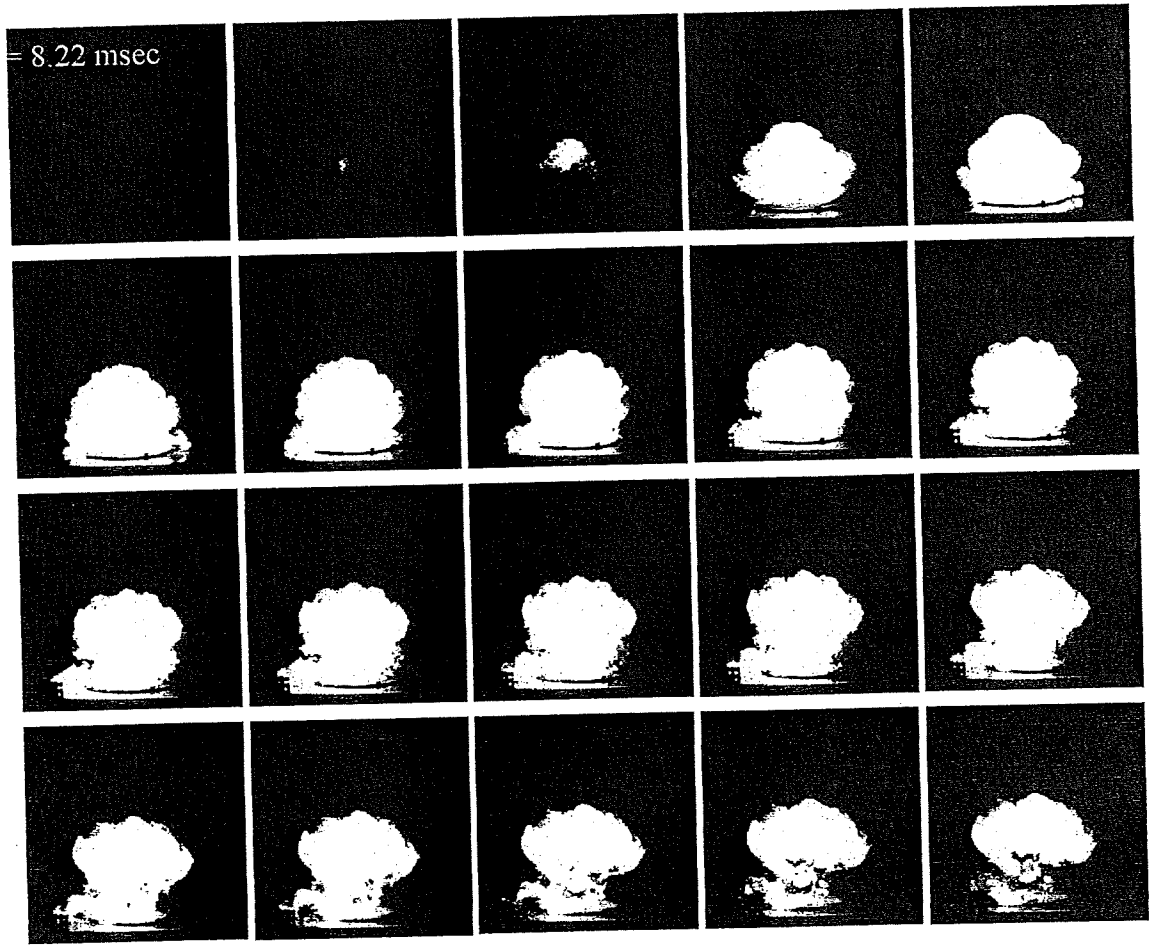


図 2-8 (d) 水素-空気爆燃 ($\phi=0.5$, 刃固定)



画像間隔 1.78 msec

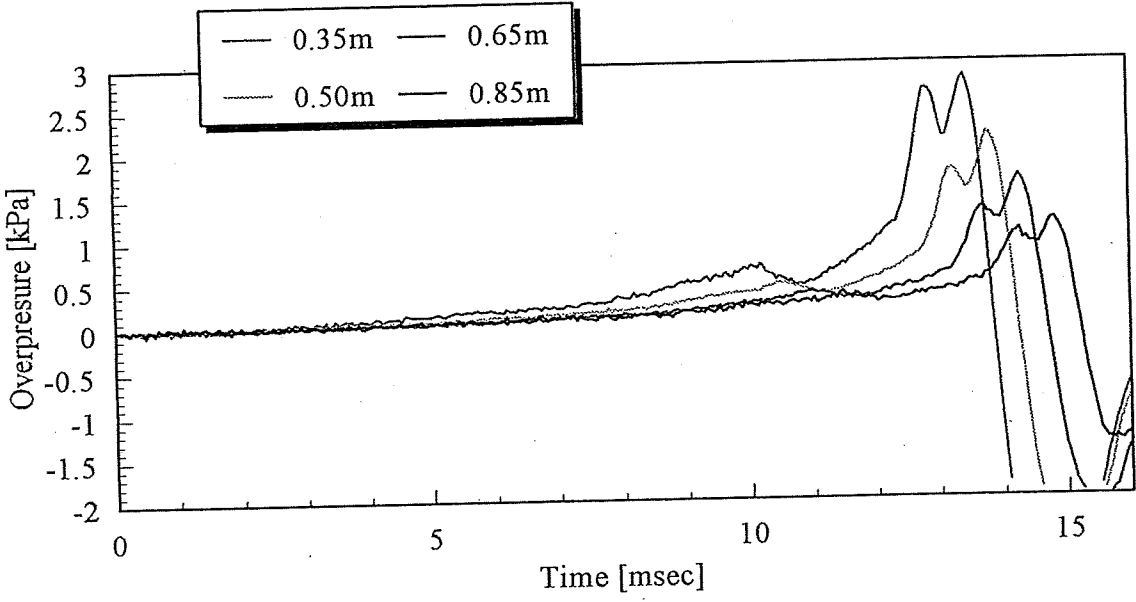
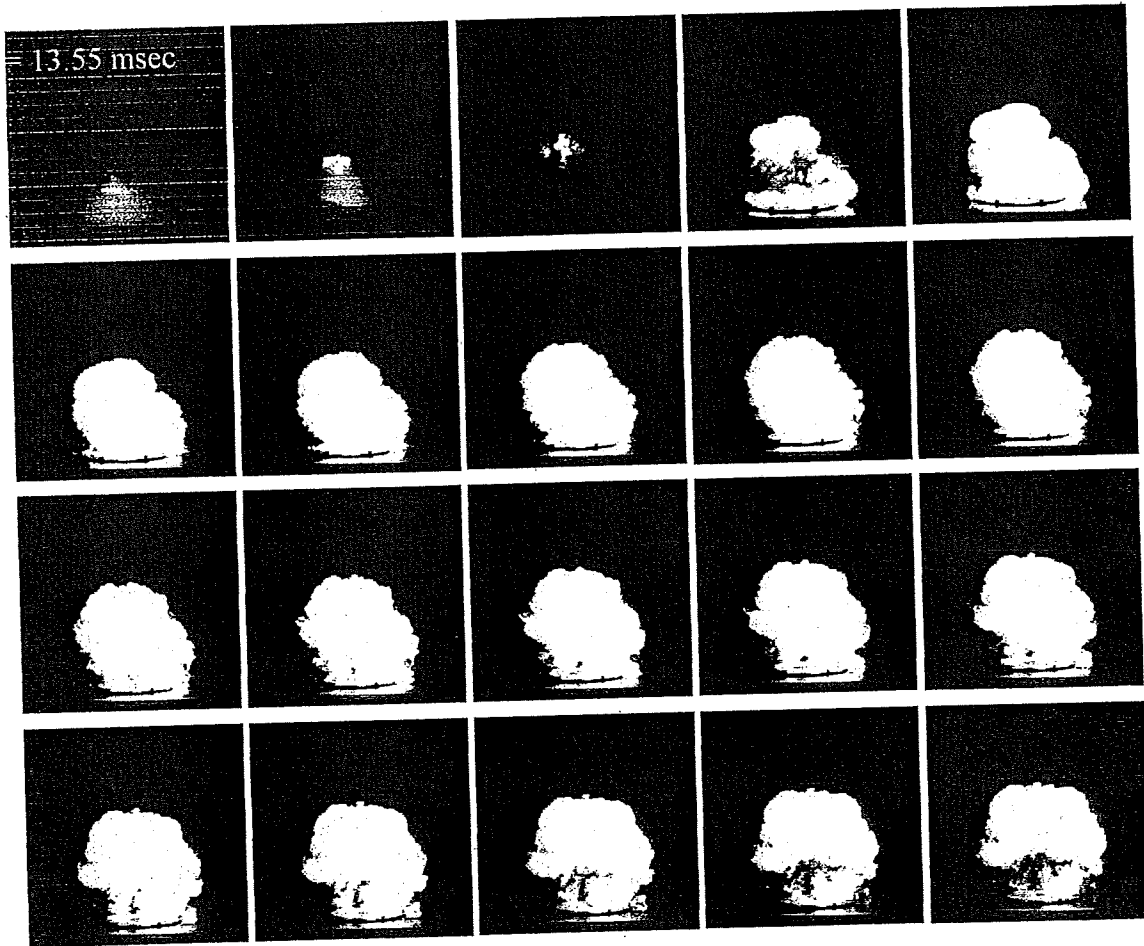


図 2-8 (e) 水素-空気の爆燃 ($\phi=2.0$, 刃固定)



1, 2 枚目のみ画像補正, 画像間隔 1.78 msec

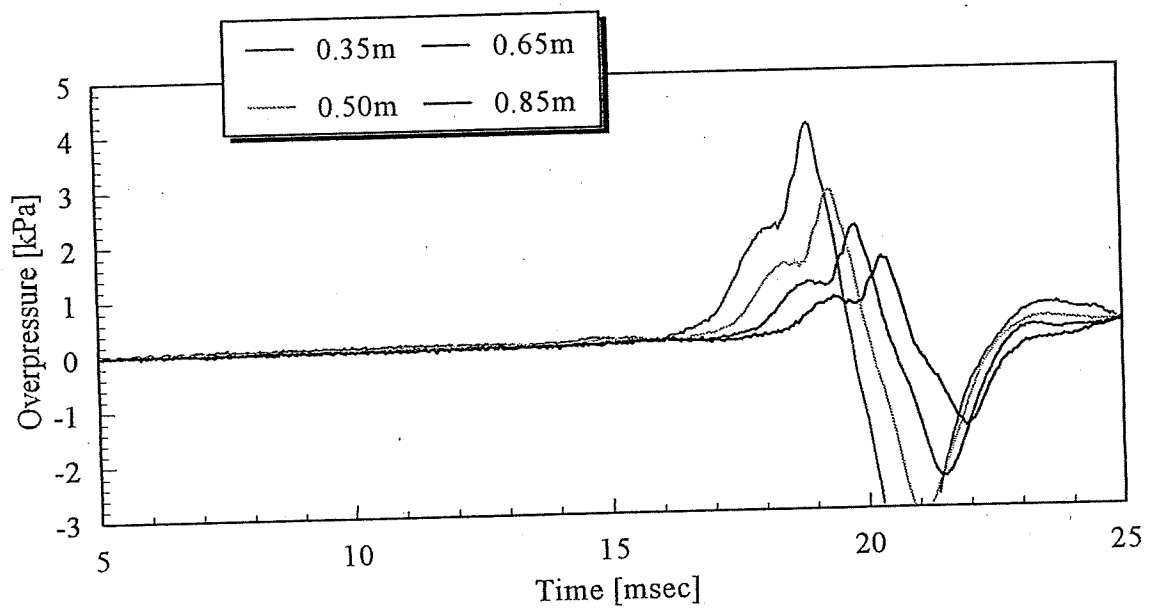


図 2-8 (f) 水素-空気の爆燃 ($\phi=3.0$, 刃固定)

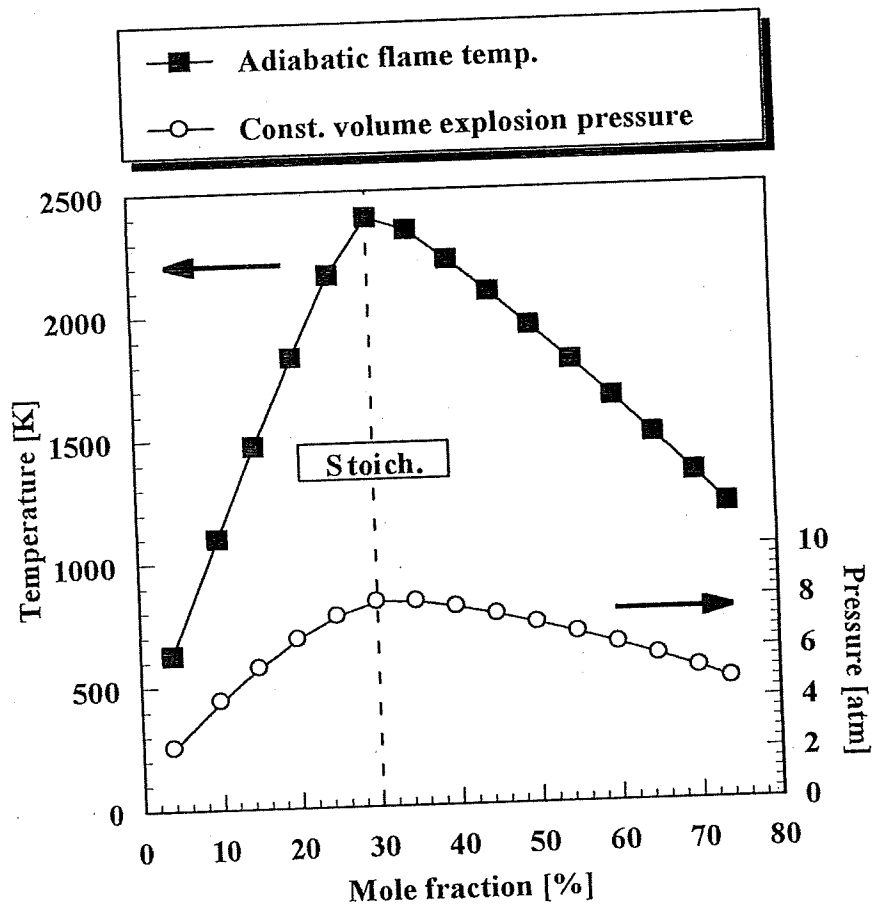


図 2-9 水素-空気予混合気の燃焼における断熱火炎温度および定容燃焼圧力【12】