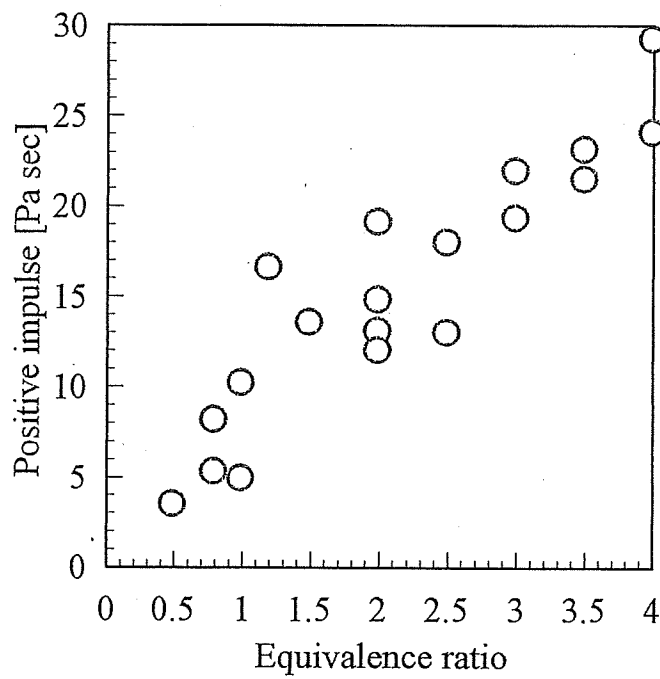
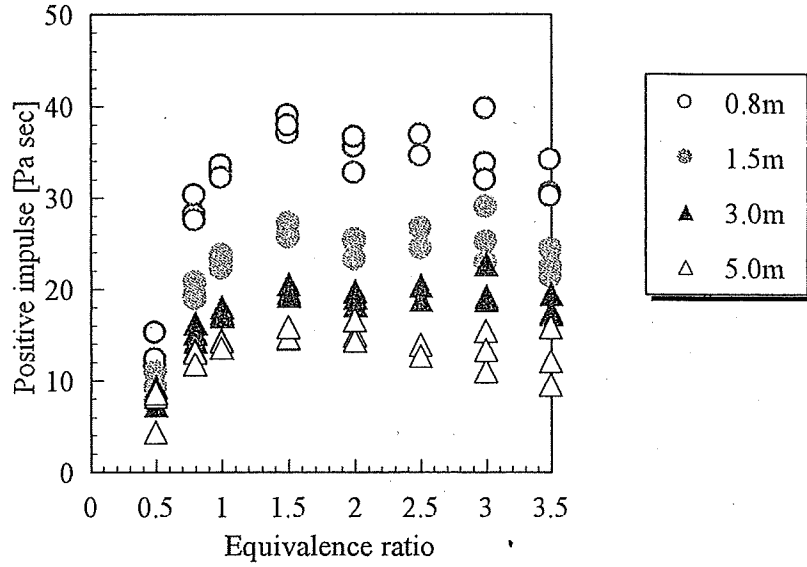


(a) 割らずに中心より下方で点火 (計測位置 1.5 m)

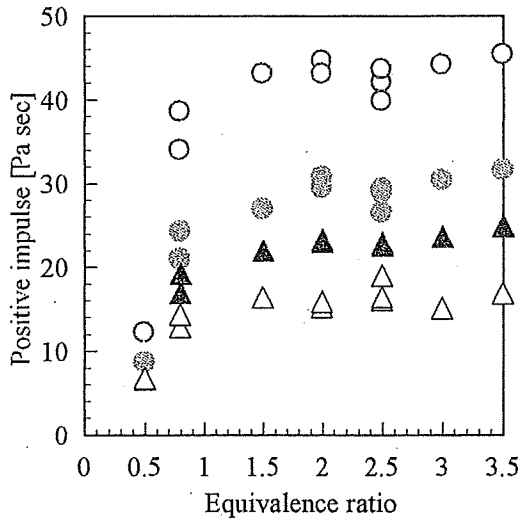


(b) 破膜後に中心より下方で点火 (計測位置 0.6 m)

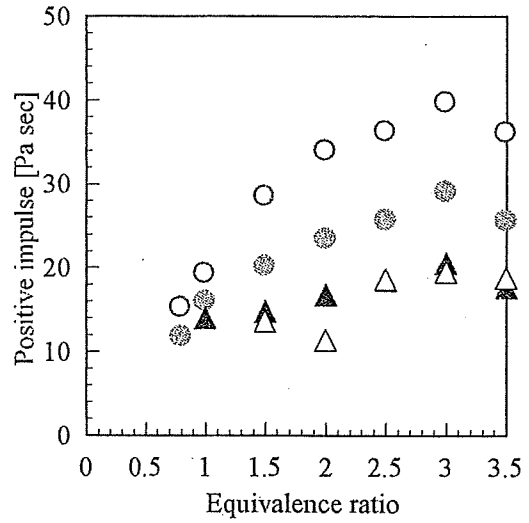
図 3-13 インパルスの当量比依存性



(c) 割らずに中心点火

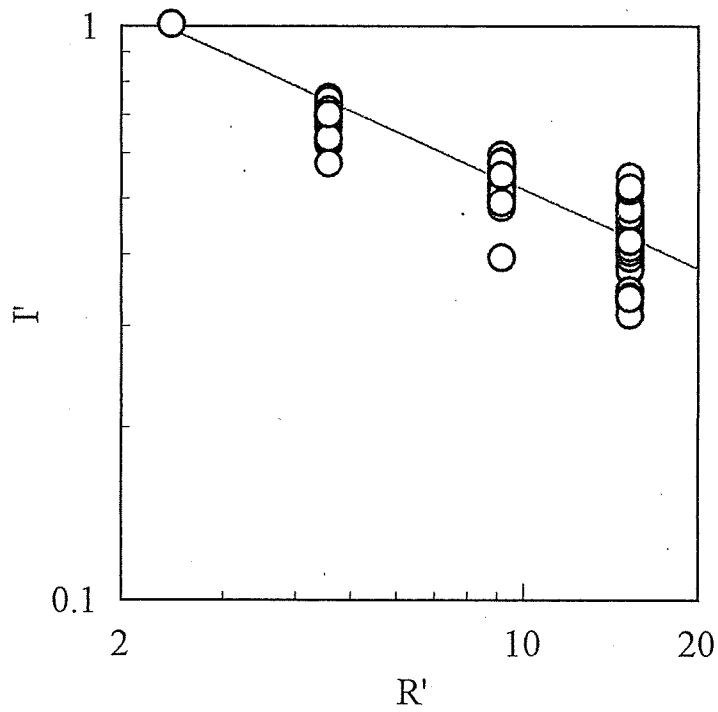


(d) ナイフエッジを固定した状態で中心点火



(e) 破膜後に中心点火

図 3-13 インパルスの当量比依存性—続き



$$f(x) = a * (x^{-4.553287E-1}),$$

where  $a = \exp(3.893095E-1)$   
 $R^2 = 9.870832E-1$

図 3-14 インパルスの距離による減衰

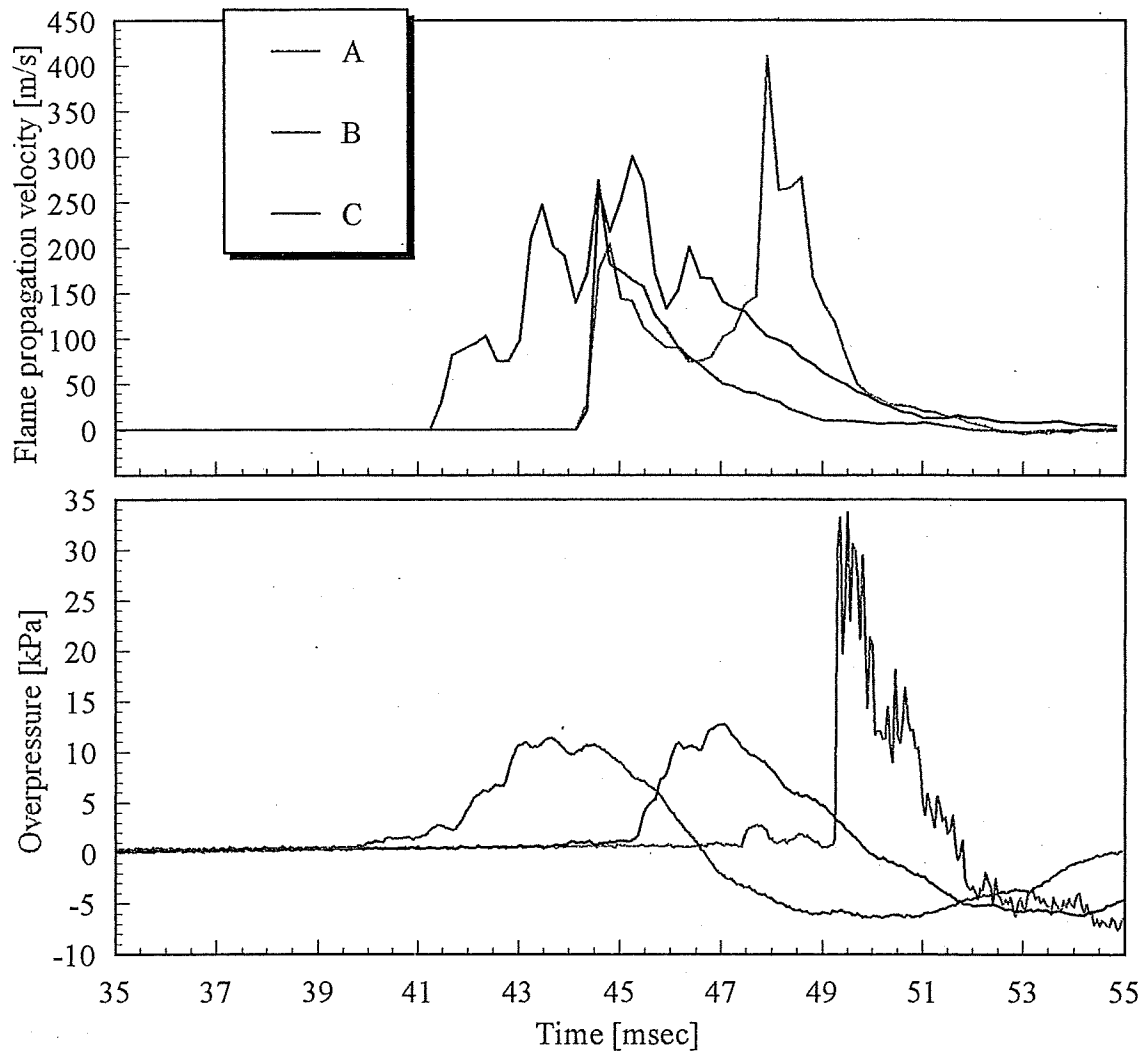
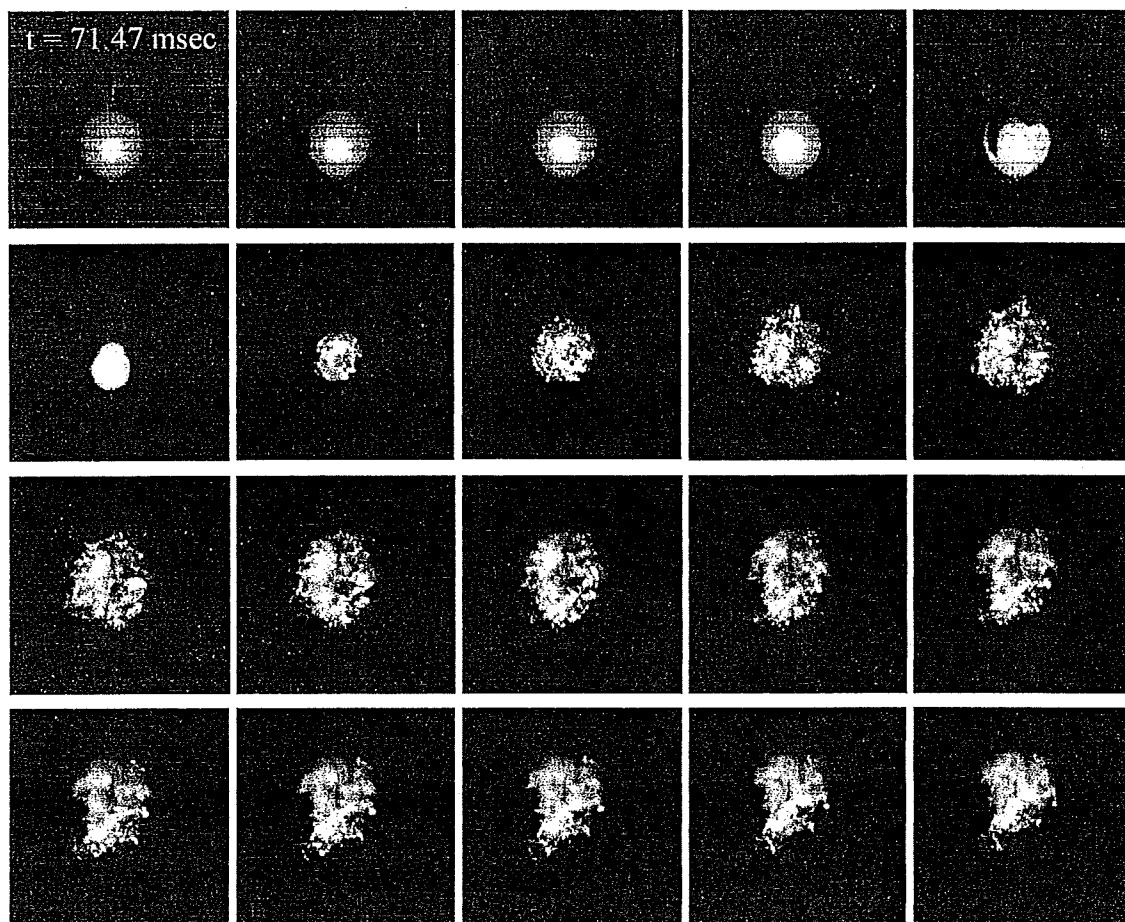


図 3-15 火炎伝ば速度と圧力の関係



画像間隔 7.11 msec

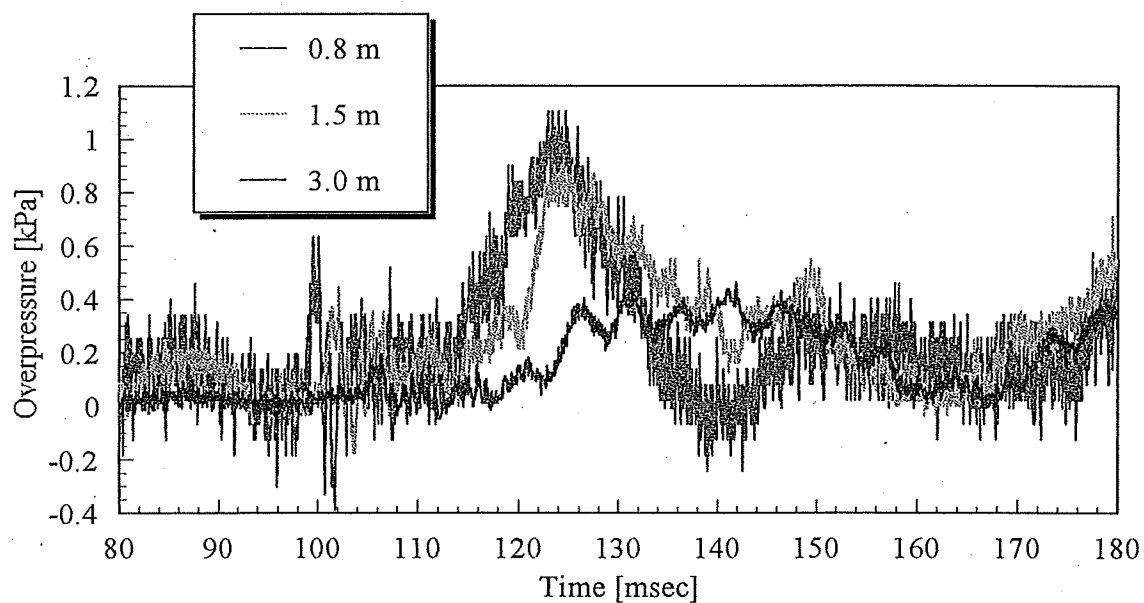


図 3-16 メタン-空気の爆燃 ( $\phi = 1.0$ , 中心, ナイフエッジ固定)

## 第4章 野外実験 (1400 L 規模)

1.7

### 1.8 概要

小型実験で用いたものと同様の装置で、中規模実験 (混合気量 150L) を行い、データを取得することができた。これまでのデータと比較し、実規模での爆発事故の被害評価を行うために、より大きな規模での実験を行った。中規模実験のものよりさらに大きな風船を用いて、直径約 1.5 m、1400L の球状の混合気を形成し、点火、データの取得に関しては同様の方法を取った。この程度の規模になると、室内での実験は困難になるので、野外で実験を行った。

### 1.9 4.2 実験装置

#### 1.10 4.2.1 爆発試験装置

図 4-1 に本実験で使用した爆発試験装置の概略を示す。高さ 300 mm のステンレス製の土台の上部にゴム風船を取り付ける。風船取り付け部には、混合気の漏れを防ぐために、O リングを二重に設置しており、風船を取り付けた上からホースバンドにより固定した。風船取り付け部には混合気充填用の穴が設けてあり、風船内部には点火用の点火プラグ (DENSO 社製, IW16) およびスパークギャップを設置した。点火位置は、風船取り付け面、その上方 400 mm (風船中心より下方 400 mm) の位置、同じく上方 750 mm (ほぼ風船中心) の位置の三箇所とした。750 mm の位置で点火する場合のみ点火プラグではなくスパークギャップを用いた。

#### 4.2.2 点火系

本実験でも中規模実験のときと同様のコンデンサバンク、リレー回路 (Programmable logic controller, Keyence 社製, KV-10DR) を用いた。スパークのエネルギーは 160 mJ, 250 mJ, 450 mJ の三パターンで行った。

#### 4.2.3 流路系

図 4-2 に本実験で用いた流路系の概略を示す。水素、空気をそれぞれ高圧大流量用のレギュレータバルブ (千代田精機製, GS-140) により減圧し、マスフローコントローラ (Brooks Instruments 社製, Model 5853S) で流量を調節する。その後、混合用チャンバ内で水素-空気

混合気を形成し、爆発試験装置に取り付けた風船に充填する。本実験は野外で行うため、室内実験のように照明を落とすことはできず、火炎を可視化するためにアセチレンを約 1.5 L (混合気の 0.1 %) 添加した。高圧ボンベから爆発試験装置までのホースが約 30 m と長く、その中の空気量が無視できる量ではないため、排除する必要がある。また、マスフローコントローラの動作が安定するまでに数秒間を要する。そこで、混合用チャンバと爆発試験装置の間には三方バルブを設置しており、それによりマスフローコントローラの動作を安定させ、同時にホース内の空気のパージを行った。また、安全面を考慮して爆発試験装置近くに電磁バルブを設置してある。

#### 1.11 4.3 実験方法

図 4-3 に計測機器類の配置、図 4-4 実験装置概略を示す。

高速度撮影の際に使用したレンズは FUJINON-TV ZOOM LENS (富士写真光機社製, H6-12.5R 1:1.2/12.5-75) で、レンズの絞りはその時々天気や太陽の高さなどにより変化する明るさに合わせた。高速度ビデオカメラのゲインは “NOMAL GAIN” モードとし、フレームレートは状況に合わせて 1125, 2250, 4500 fps の中から選択した。全てフルフレームモードで画像サイズは 256×256 pixel, 撮影枚数は 1024 枚である。撮影領域も状況に合わせて変化させながら行った。

騒音計は点火位置から 25 m の位置に設置し、他の実験と同様に、周波数特性は “FLAT” モード、動特性は “FAST” モードとした。

圧力の計測には Entran 社製の半導体型圧力変換器 EPX シリーズを用いて、デジタル較正式直流増幅器 (UNIPALS 社製, AM32) を介し、デジタルオシロスコープ (横河電機社製, DL708) により記録した。圧力の計測点は点火位置から 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m の位置と、鉛直方向での圧力履歴も計測するために風船取り付け位置から上方 2.1 m の位置とし、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。

また、火炎の伝ば速度を画像以外からも調べるために、イオンプローブを数点に設置し、その信号からイオンプローブ間の火炎伝ば速度を割り出すことを試みた。設置点は、鉛直方

向に風船取り付け面より上方 1.7 m, 1.8 m, 1.9 m, 2.0 m とした。この信号は圧力データと同様、デジタルオシロスコープにより記録した。

点火方法は、風船の上方に設置した可動式のナイフエッジにより破膜後に点火する、という方法を主として行い、他の実験との比較のためにも、割らずに風船内部で点火し、風船に達した火炎により破膜される方法、風船上部にナイフエッジを固定した状態で風船内部から点火し、風船が少し膨張した時点でナイフエッジに触れ破膜する方法も数回行った。

本実験でも同様に、破膜、点火、計測機器類の開始はパルスディレイジェネレータにより同期を取っている。本実験で同期に用いた TTL 信号線図を図 4-5 に示す。

## 1.12 4.4 実験結果および考察

### 4.4.1 風船の破裂

他の実験と同様、風船の破裂が爆発現象に及ぼす影響を把握しておくために、予備実験として、空気を充填した球形の風船が破裂する様子を高速度ビデオカメラにより撮影し、同時に破裂音のピーク音圧レベルも計測した。破膜には風船上方の可動式ナイフエッジを用いた。

図 4-6 に風船を破裂させた際の高速度時系列画像を示す。これらの画像から、破膜は開始から約 44.4 ms でほぼ終了していることがわかる。この際発生する破裂音のピーク音圧レベルは 91.7 dB であった。

### 4.4.2 水素-空気混合気の爆燃実験

他の実験と同様、この実験装置を用いて水素-空気混合気の爆燃実験を行った。実験条件は当量比を 0.5~4.0 で変化させ、点火位置は風船取り付け面、取り付け面より上方 400 mm (風船中心より下方 400 mm)、取り付け面より上方 750 mm (風船中心) の三箇所とし、点火方法は他の実験と同様、割らずに点火、ナイフエッジを固定した状態で点火、破膜後に点火の三通りである。また、爆発事故が起こった際に、水素関連施設の配管等により火炎の伝ばが加速され、より大きな被害を及ぼす恐れもあるため、そういった障害物の影響を調べるために、金網を用いた実験も数回行った。ここで用いた金網は、1.8 m×1.8 m×1.8 m の立方体型の枠組み全面の外側に、網目 10 mm の金網を 50 mm 間隔で 5 枚重ねて取り付けられたものである。本



実験でも同様に、爆発挙動の高速度撮影、発生する圧力やピーク音圧レベルの測定を行った。

### ピーク音圧レベル

図 4-7 は発生するピーク音圧レベル  $L_{p(\text{Max})}$  の当量比依存性を示したものである。それぞれ、(a)風船取り付け面で点火、(b)取り付け面より上方 400 mm の位置で点火、(c)取り付け面より上方 750 mm の位置で点火した場合のものである。(a)では全て風船を割らずに点火する方法で実験を行っており、障害物の影響を調べるために、金網を設置した状態での実験も行った。

まず(a)を見ると、 $\phi = 0.7 \sim 1.5$  の狭い範囲ではあるが、当量比の増加に伴い、ピーク音圧レベルも増加する傾向が見られる。また、金網を設置した場合、開放状態の場合と比べて、わずかに大きくなってはいるが、その差は明確なものではなく、測定誤差の範囲内と考えることもでき、これが金網の影響によるものなのかはわからない。(b)を見ると、同様にピーク音圧レベルは当量比とともに増加しており、特に  $\phi = 0.5 \sim 1.5$  の領域で急激に増加しており、 $\phi = 2.0$  以上の領域ではほぼ横ばいとなっている。また、ナイフエッジを固定した状態で点火した場合、破膜後に点火したものより大きくなっているのがわかる。(c)を見ると、データ点は少ないが、割らずに点火する方法、破膜後に点火する方法でそれぞれ当量比とともに増加している。また、 $\phi = 1.0$  を見ると、破膜後に点火する方法より割らずに点火する方法のほうが大きな値となっている。

各点火位置について比較すると、 $\phi = 1.0$  の条件で割らずに点火する方法では、点火位置が風船取り付け位置の場合は  $L_{p(\text{Max})} = 124.7, 128.0$  dB、風船取り付け位置より上方 750 mm の位置の場合は  $L_{p(\text{Max})} = 133.8$  dB となっており、 $\phi = 1.0$  の条件で破膜後に点火する方法では、点火位置が風船取り付け面より上方 400 m の場合は  $L_{p(\text{Max})} = 124.9$  dB, 125.5 dB に対し、上方 750 mm の場合は  $L_{p(\text{Max})} = 128$  dB と点火位置が風船の中心に近づくにつれて、ピーク音圧レベルは大きくなっていることがわかる。

本実験で用いている騒音計は 130 dB を超える計測値に関してはあまり信頼性がなく、そのため中心点火で  $\phi = 1.8$  の場合は破膜後に点火する方法、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法で、あまり変わらない値となっているが、体感的には明らかに大きい音であり、点

火位置から約 30 m 離れたコントロールルームが揺れたほどであった。割らずに点火する方法とナイフエッジを固定した状態で点火する方法に関しては、本実験では直接比較できるデータはない。

### 時系列データ

図 4-8 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。それぞれの条件で高速度ビデオカメラの絞りは異なっており、周囲の明るさも天気や時間によって変わっているため、見た目の明るさがそのまま火炎輝度と考えられるわけではないが、火炎の広がりなどを概算するには十分用いることができる。それぞれ点火位置ごとに、風船取り付け面で(a)  $\phi = 1.5$  の条件で割らずに点火、(b)  $\phi = 1.0$  の条件で金網を設置して割らずに点火、風船取り付け面より 400 mm 上方で(c)  $\phi = 1.8$  の条件で破膜後に点火、(d)  $\phi = 1.5$  の条件でナイフエッジを固定した状態で点火、風船取り付け面より 750 mm 上方で(e)  $\phi = 1.0$  の条件で破膜後に点火、(f)  $\phi = 1.8$  の条件で破膜後に点火、(g)  $\phi = 3.0$  の条件で破膜後に点火、(h)  $\phi = 1.0$  の条件で割らずに点火、(i)  $\phi = 1.8$  の条件でナイフエッジを固定した状態で点火である。ここで、(a)、(b)に関しては、圧力計測を行わなかったため、圧力データはない。

まず、圧力値に関して水平方向と鉛直方向の測定位置での比較を行う。点火位置からの距離は、水平方向は 1.5 m、鉛直方向は中心付近で点火する場合は 1.3 m、中心より下方 400 mm の位置で点火する場合は 1.7 m である。ほぼ同じ距離であるが、どちらの場合も鉛直方向での計測値は水平方向の計測値の 1.5~2 倍程度の値となっている。これは破膜を上方から行うことによる流れもあり、上方への火炎の伝ば速度が大きいことによると考えられる。ここで、いくつかの条件では、上方で計測した圧力波形の正圧の山の後半に、さらにもう一つの山ができています。これは、実際に発生している圧力ではなく、圧力プローブを設置した位置にまで火炎が達しており、その影響を受けているため、このような波形になったものと考えられる。これ以降、圧力に関するデータは、水平方向 1.5 m の位置での計測値を主に扱うこととする。

(e), (f), (g)を比較すると、当量比の増加とともに火炎の広がりは大きくなっており、 $\phi = 1.0$  の条件に比べ、 $\phi = 1.8, 3.0$  の条件ではかなり大きく広がっていることがわかる。また、そのときの圧力値も $\phi = 1.0$ のものに比べ、 $\phi = 1.8, 3.0$ のものは二倍程度にも達している。

金網の影響を見るために、(a), (b)の画像を比較すると、火炎が金網により大きく加速されている様子は見られない。想定していたのは、伝ばする火炎に押しやられた未燃状態の混合気が金網を通過することにより、混合気中に乱れが生じ、その中を伝ばする火炎が乱流加速されることであったが、火炎が金網に達した時点で既にほとんどの水素が燃焼してしまっており、そのような現象が見られなかったと考えられる。

(a), (h)を比較すると、風船取り付け面で点火した場合には風船が下方から破裂しており、その時点では、火炎が風船上方には達していない。一方、中心付近で点火した場合には、破裂した時点で風船内全体に火炎が伝ばしていることがわかる。

(i)を見ると、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法では、破膜直後に火炎が急激に加速されている様子が観察できる。(f)と比較すると、破膜後に点火する方法に各点火方法で比較すると、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法の場合、圧力波形の立ち上がりが鋭くなっており、その値も大きくなっている。また、(e), (h)を比較すると、割らずに点火した場合の圧力が、破膜後に点火した場合のものに比べかなり大きくなっており、やはり破膜後に点火する方法では、一部の水素が未燃のまま拡散することによるエネルギーのロスが少ないことが推測できる。

割らずに点火する方法とナイフエッジを固定した状態で点火する方法では、同じ条件で実験を行っておらず、直接比較することはできない。

## 延焼領域

前章までで述べてきた他の実験と同様に、ここでも被害評価に重要となる延焼領域を調べた。図 4-9 は点火位置からの水平方向および鉛直方向の火炎の最大到達距離  $W$  および  $H$  を初期混合気の半径  $R$  で正規化したものである。ナイフエッジを固定した状態で点火する方法と割らずに点火する方法はデータ数が少ないため、破膜後に点火する方法のデータを整理した。

他の実験と同様、当量比の増加に伴い、鉛直方向、水平方向とも増加する傾向にある。鉛直方向と水平方向で比較すると、やはり鉛直方向のほうが大きな値となっており、水平方向には2~3倍程度、鉛直方向には3~4倍程度にまで達していることがわかる。

## 圧力データ

圧力値の当量比依存性や点火方法、点火位置により生じる違いなどを調べた。本実験では水平方向には一箇所ではしか圧力の計測ができていないため、距離による減衰を調べることはできなかった。

図 4-10 は各条件でのピーク圧力を当量比ごとにプロットしたものである。それぞれ、(a) 風船取り付け面より上方 750 mm で点火した場合、(b) 400 mm の位置で点火した場合である。同じ点火位置、点火方法でのピーク圧力を見ると、データ点は少ないが、それぞれ当量比とともに増加する傾向がある。これを図 4-6 に示したピーク音圧レベルと比較すると非常によく似た傾向になっているのがわかる。

各点火方法で比較すると、(a)の $\phi = 1.0$ では3.1 kPaに対して9.3 kPa、 $\phi = 1.8$ では9.4 kPaに対して16.3 kPa、また、(b)の $\phi = 1.5$ では4 kPaに対して6.1 kPaなど、ナイフエッジを固定した状態で点火する方法、割らずに点火する方法での値が、破膜後に点火する方法に比べ1.5~3倍程度と非常に大きい値となっている。

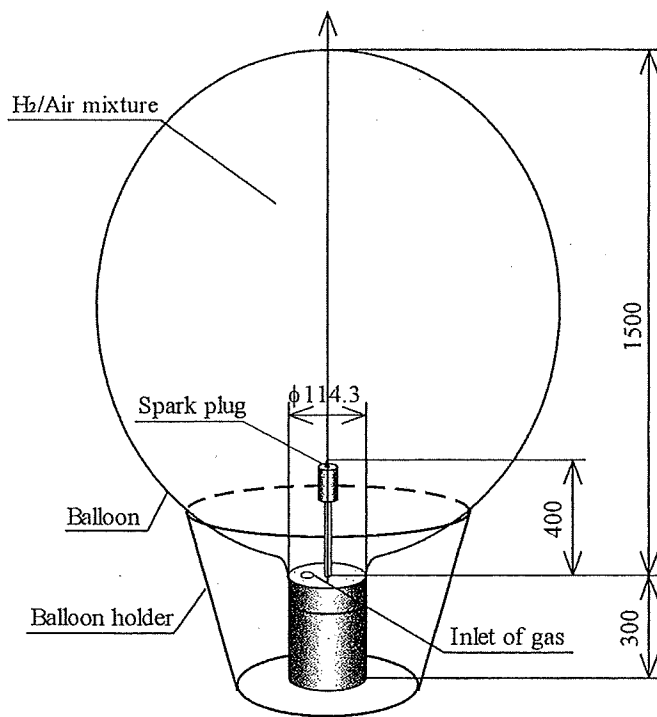
各点火位置で比較を行う。(a)、(b)の $\phi = 1.0$ の破膜後に点火した場合のピーク圧力はそれぞれ3.1 kPa、1.5 kPaとなっており、 $\phi = 3.0$ の破膜後に点火した場合のピーク圧力は9.4 kPa、4.5 kPaと、点火位置を350 mm程度上方へ移動させるだけで、2倍ほどの値にもなっている。

次に各条件での正圧インパルスを求め、その当量比依存性や、点火位置、点火方法により生じる相違を調べた。図 4-11 にインパルスの当量比依存性を示す。それぞれ、(a) 風船取り付け面より上方 750 mm の位置で点火、(b) 400 mm の位置で点火した場合である。ピーク圧力と同様、当量比の増加に伴い、インパルスも増加傾向にあるが、ピーク圧力よりもばらつきが小さくなっている。

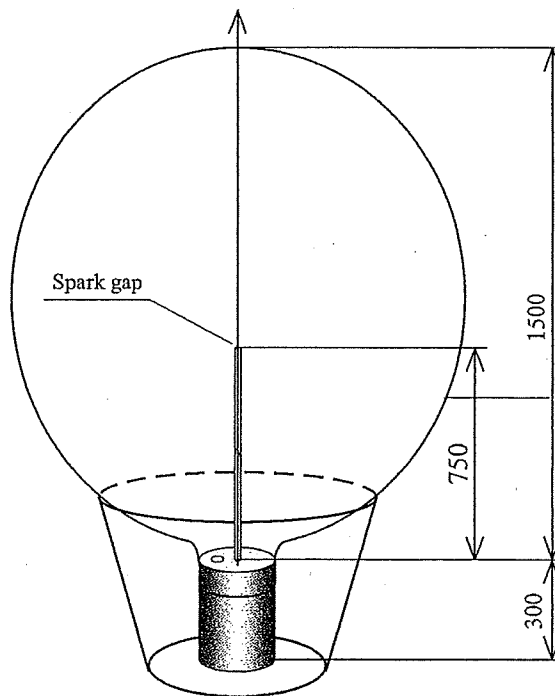
各点火方法で比較すると、(a)の $\phi = 1.0$ では34.8 Pa·secに対して65.7 Pa·sec、 $\phi = 1.8$ で

は  $66.5 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$  に対して  $71.4 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$ , また, (b)の  $\phi = 1.5$  では  $38.1 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$  に対して  $54.1 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$  など, ナイフエッジを固定した状態で点火する方法, 割らずに点火する方法での値が, 破膜後に点火する方法に比べ大きい値となつてはいるが, 1.1~2 倍程度であり, ピーク圧力ほどの差は見られない.

各点火位置で比較する. (a), (b)それぞれの  $\phi = 1.0$  の破膜後に点火した場合のインパルスと比較すると,  $34.8 \text{ Pa}$ ,  $27.1 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$  となつており, 同様に  $\phi = 3.0$  の破膜後に点火した場合のインパルスと比較すると,  $81.3 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$ ,  $58.7 \text{ Pa}$  と, ピーク圧力ほどではないが, やはり点火位置を  $350 \text{ mm}$  上方へ移動させるだけで, かなりの差が現れている.



(a) 点火位置 風船取り付け部より上方 400 mm



(b) 点火位置 風船取り付け部より上方 750 mm

図 4-1 爆発試験装置

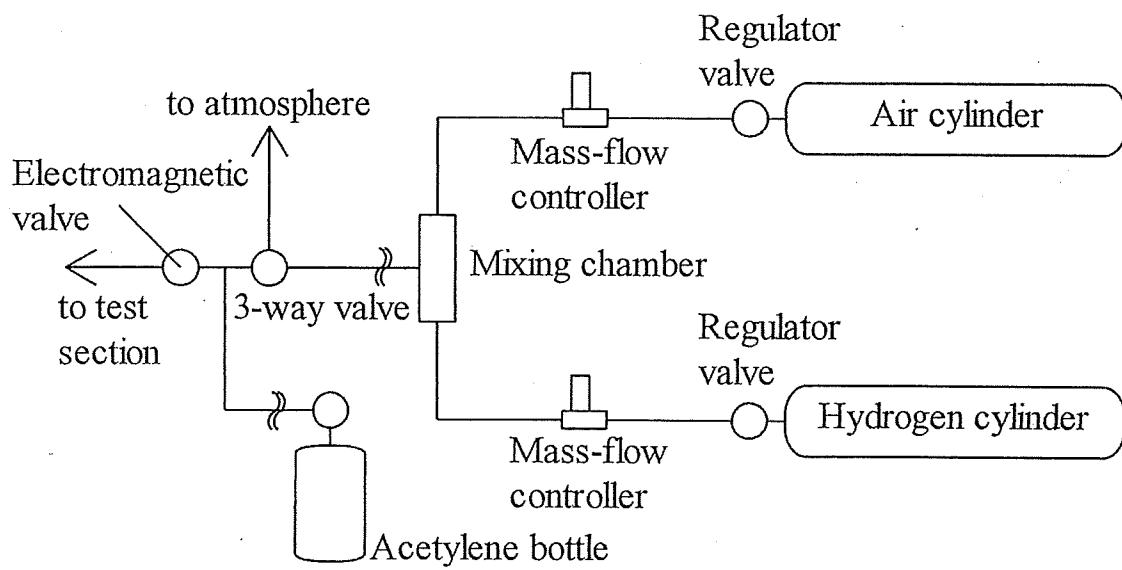


图 4-2 流路系

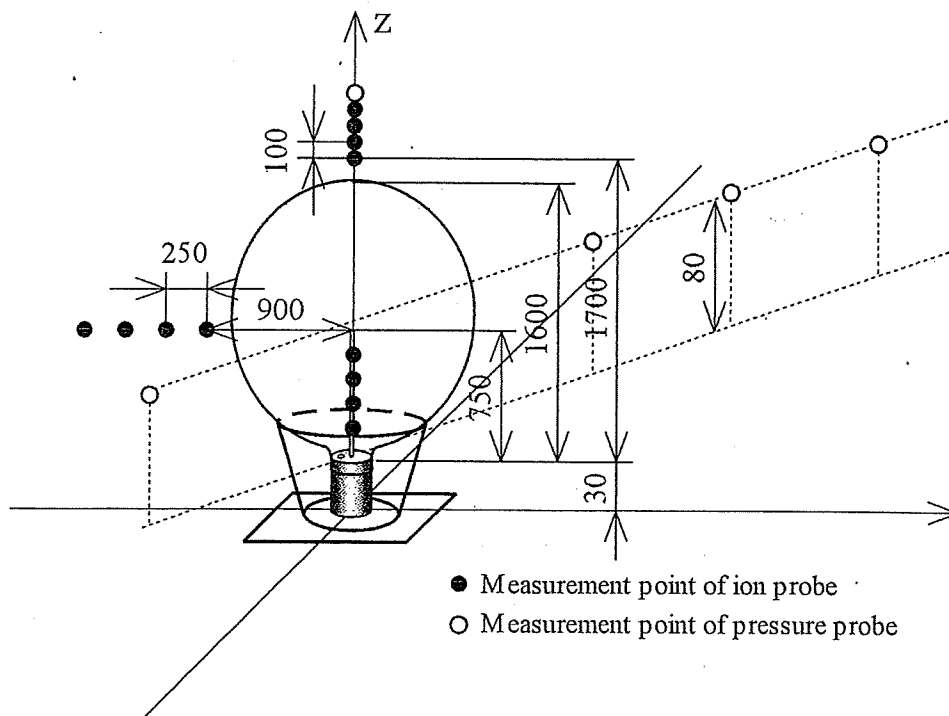
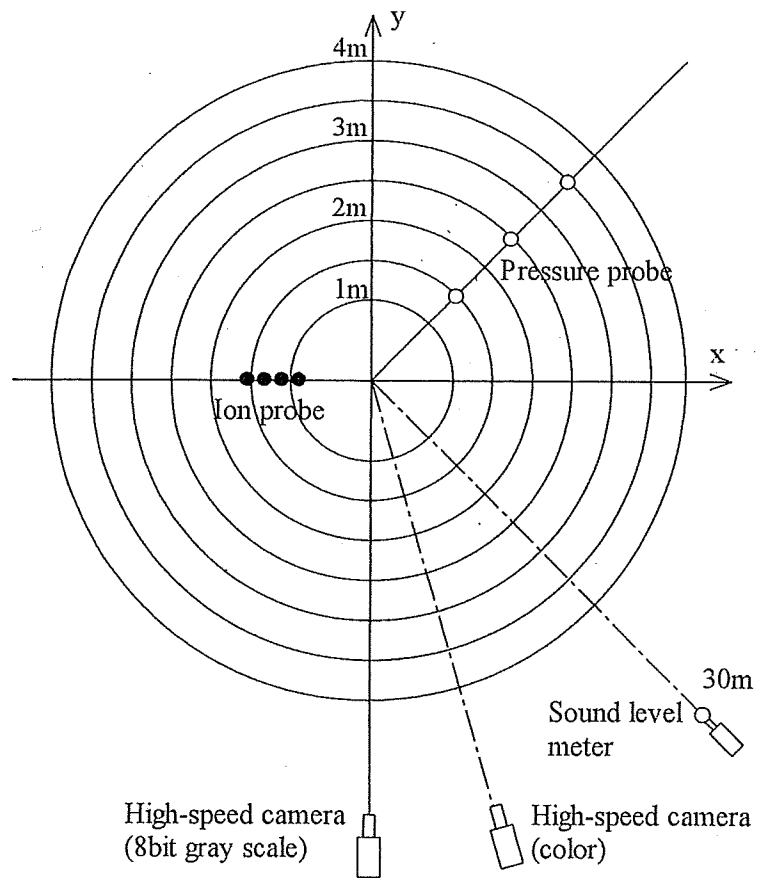


図 4-3 計測機器類の配置



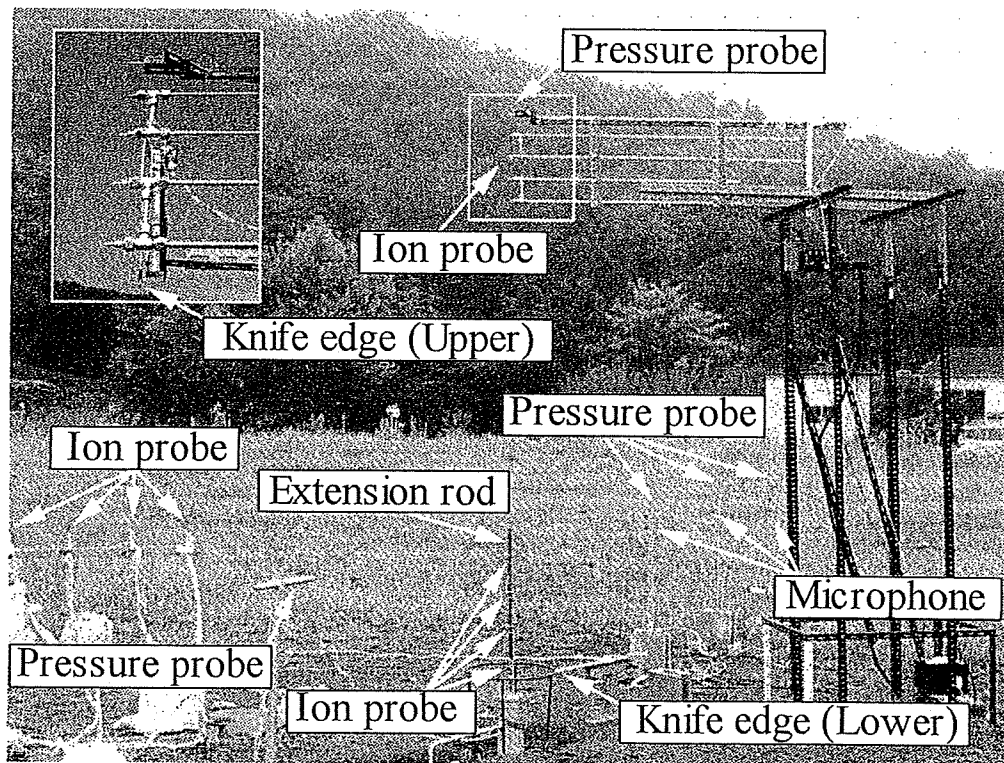
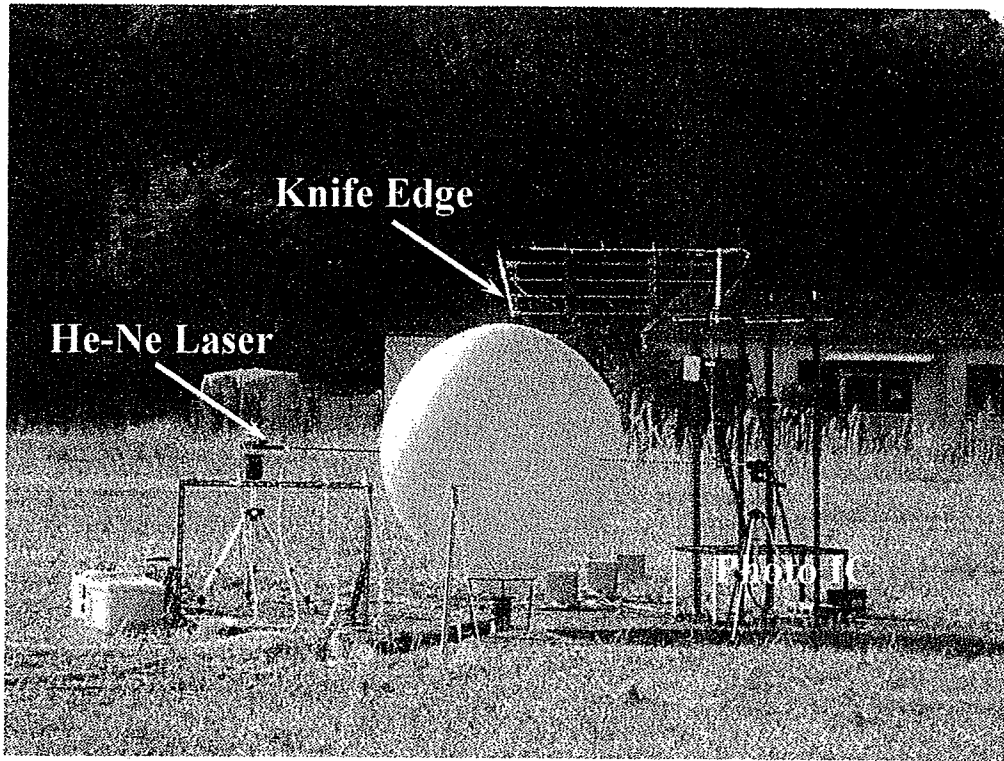
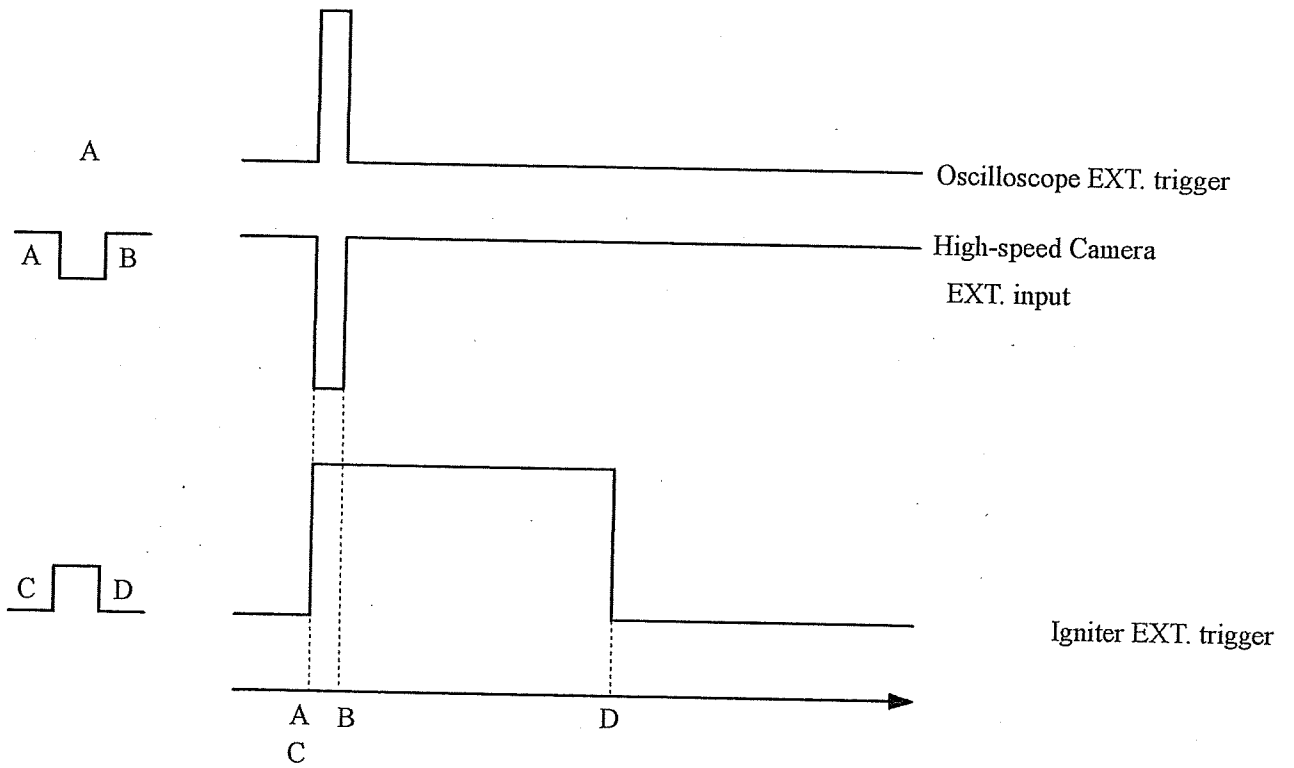


图 4-4 实验装置概略

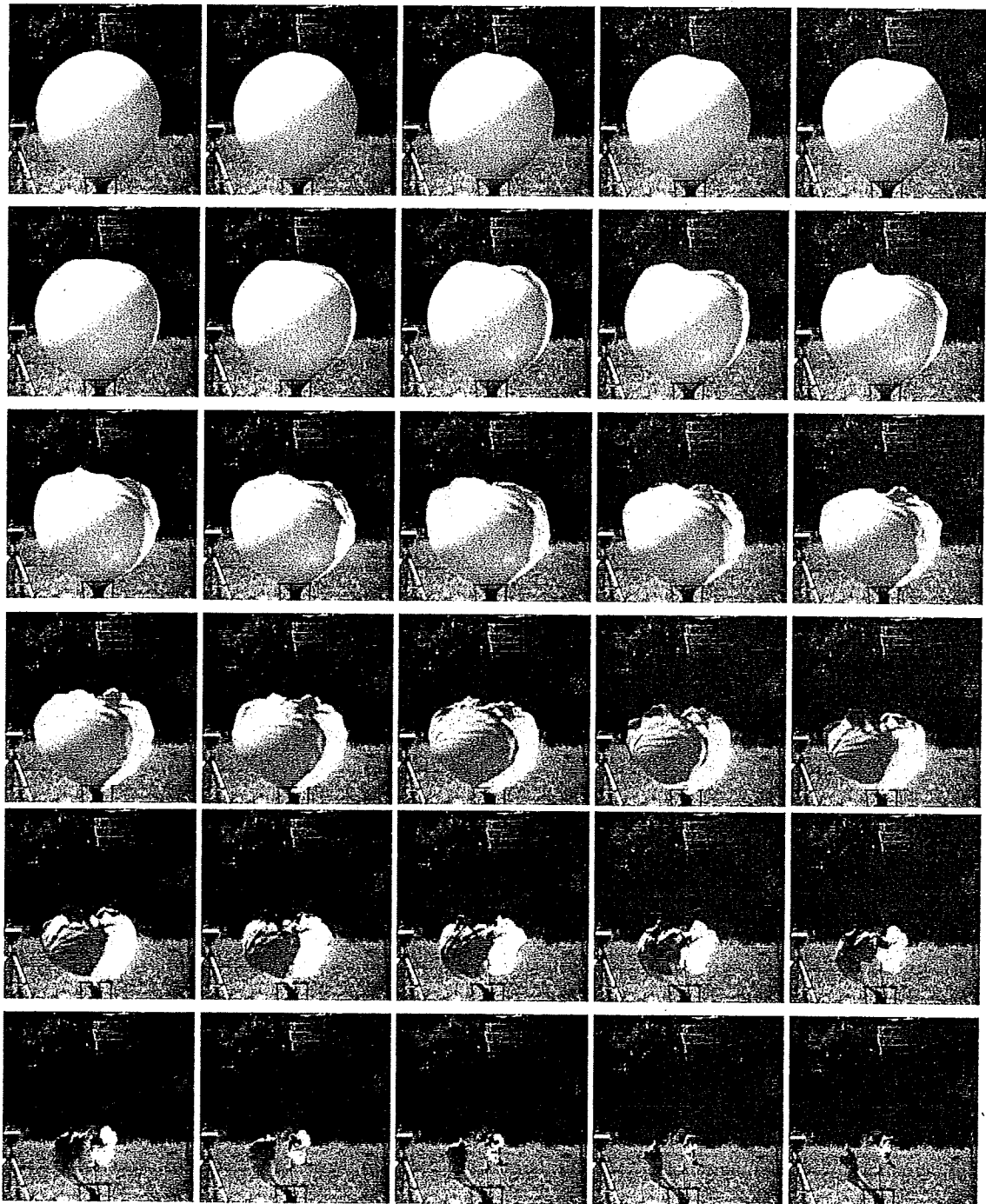
$$A = T_0 \quad B = A + 10 \text{ msec}$$

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



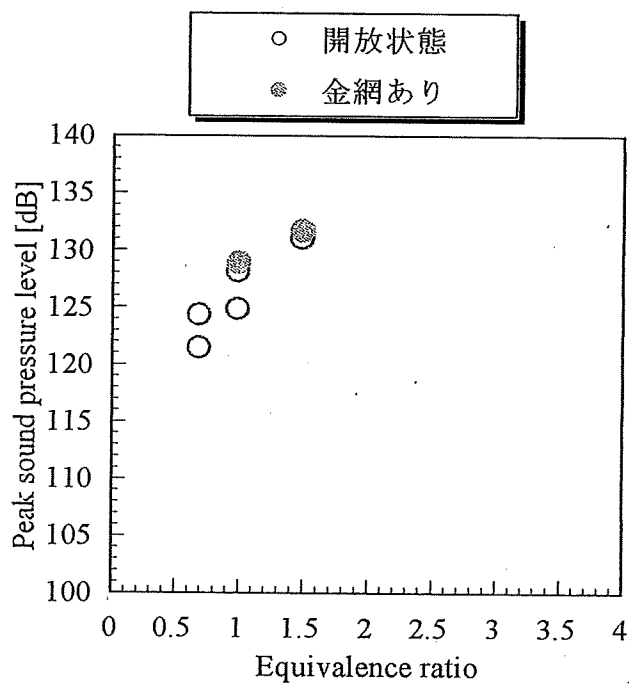
- A : Oscilloscope Start
- A : High-speed camera Start
- A : Spark

图 4-5 TTL 信号线图

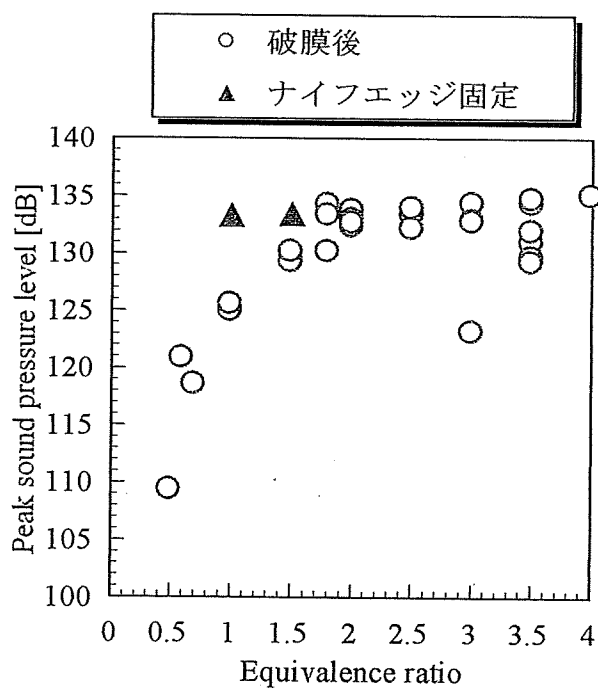


画像間隔 1.78 msec

図 4-6 風船の破裂



(a) 風船取り付け面で点火



(b) 風船取り付け面より上方 400 mm で点火

図 4-7 ピーク音圧レベルの当量比依存性