

図 2-10 火炎伝ば速度

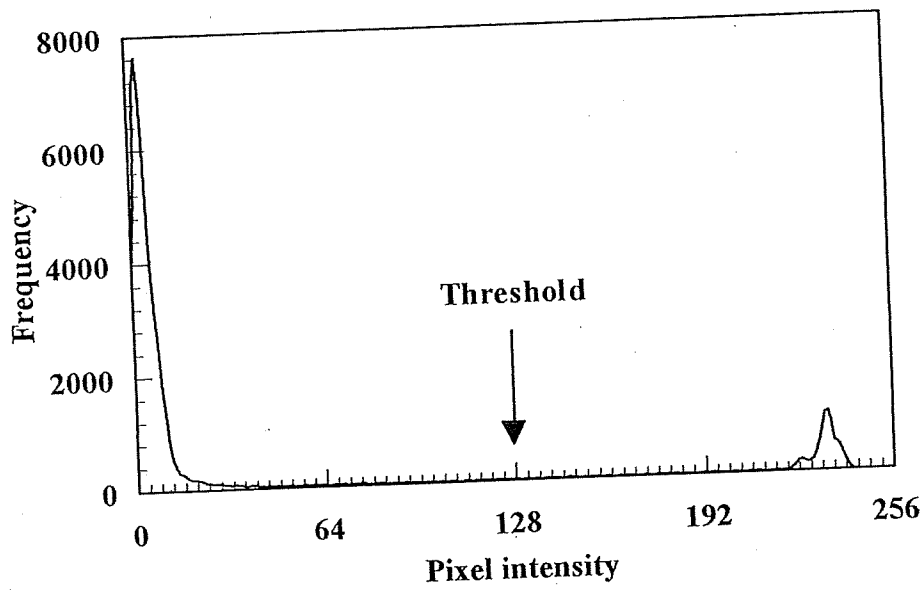


図 2-11 二値化のしきい値の決定

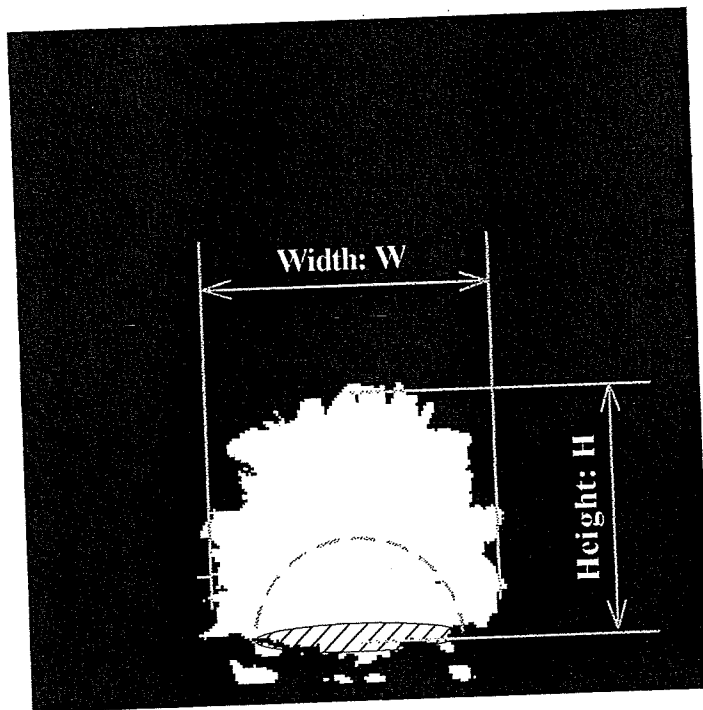


図 2-12 可視火炎の最大到達高さ H と最大広がり幅 W の定義

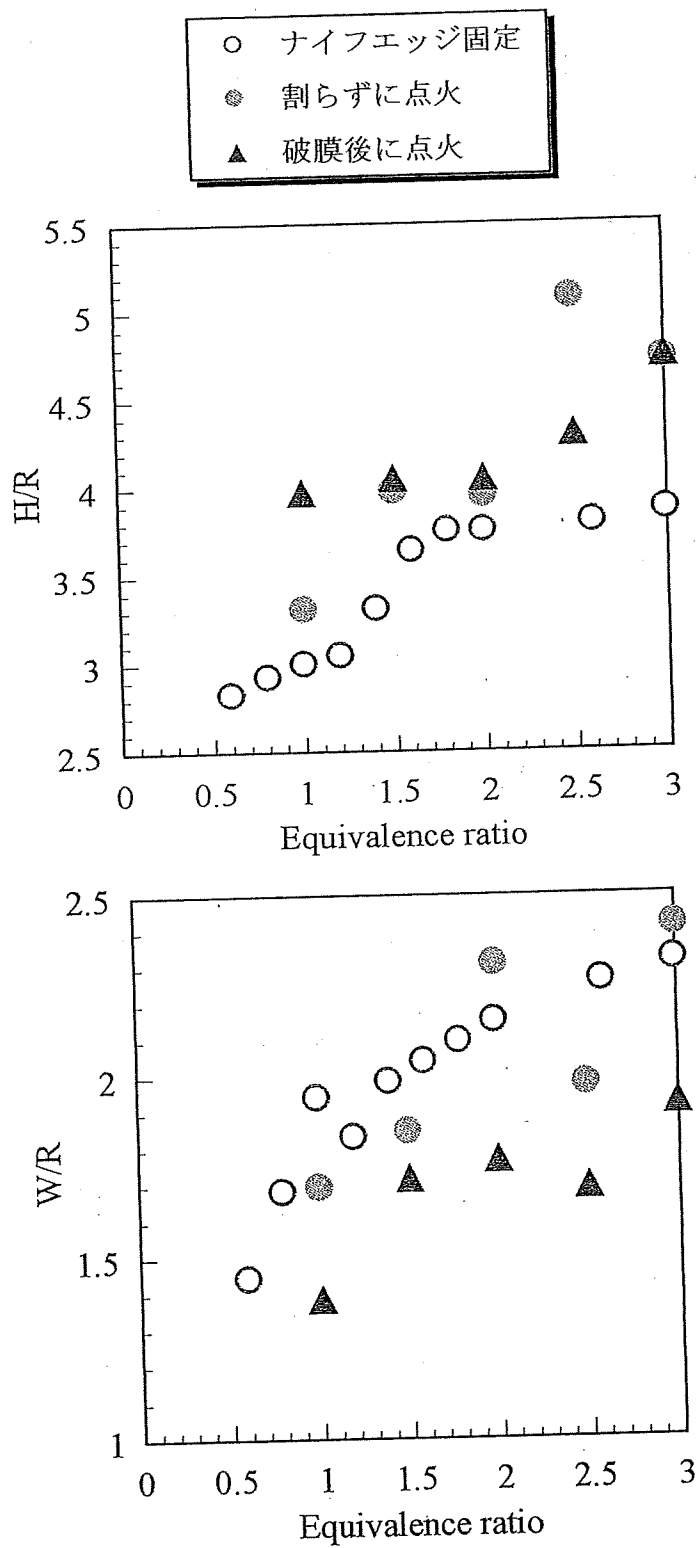
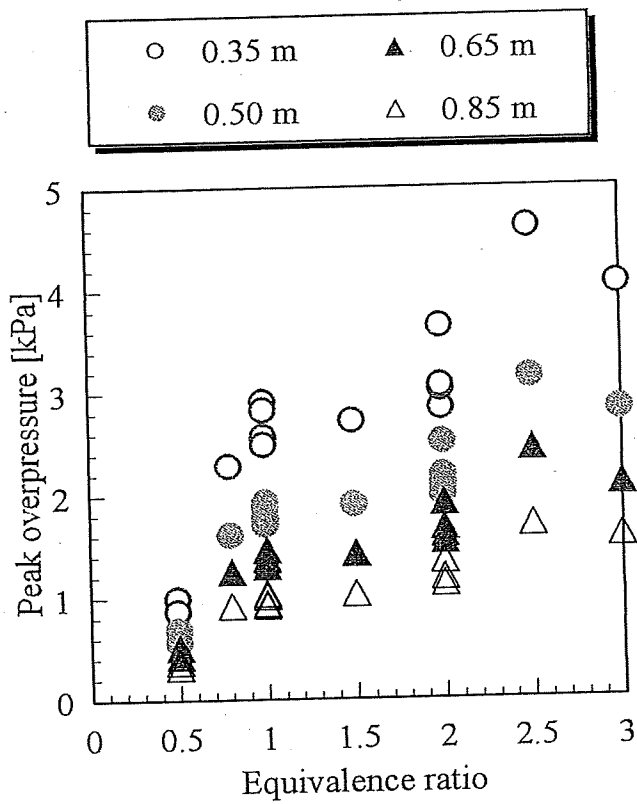
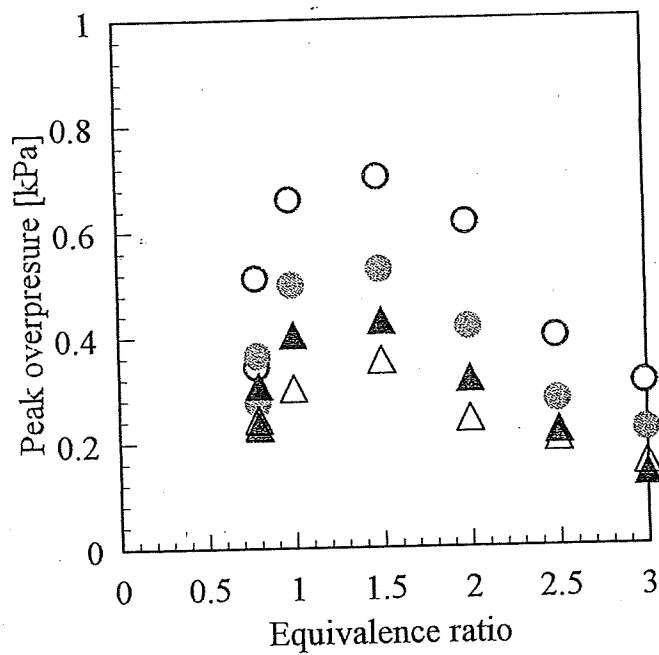


図 2-13 延焼領域

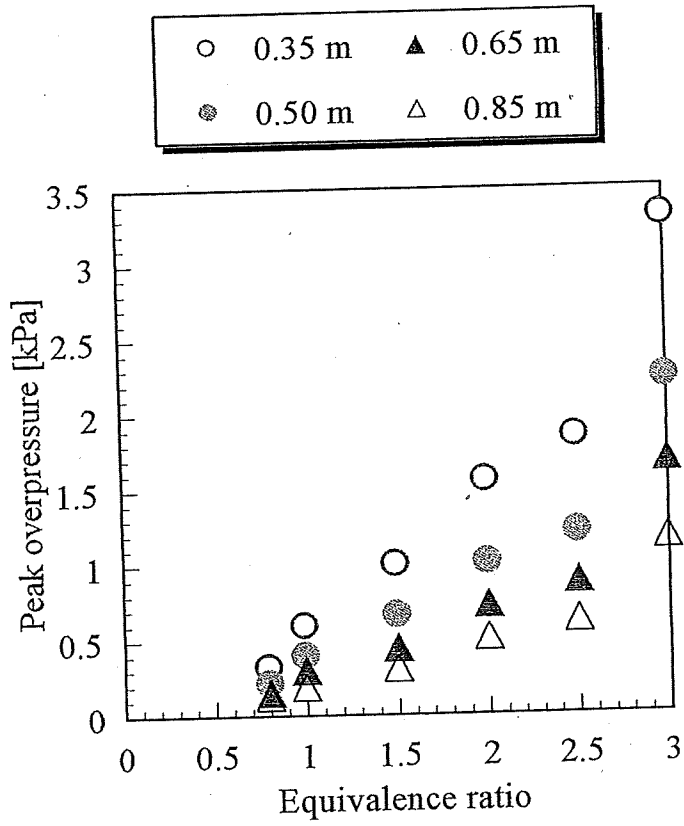


(a) ナイフエッジを固定した状態で点火



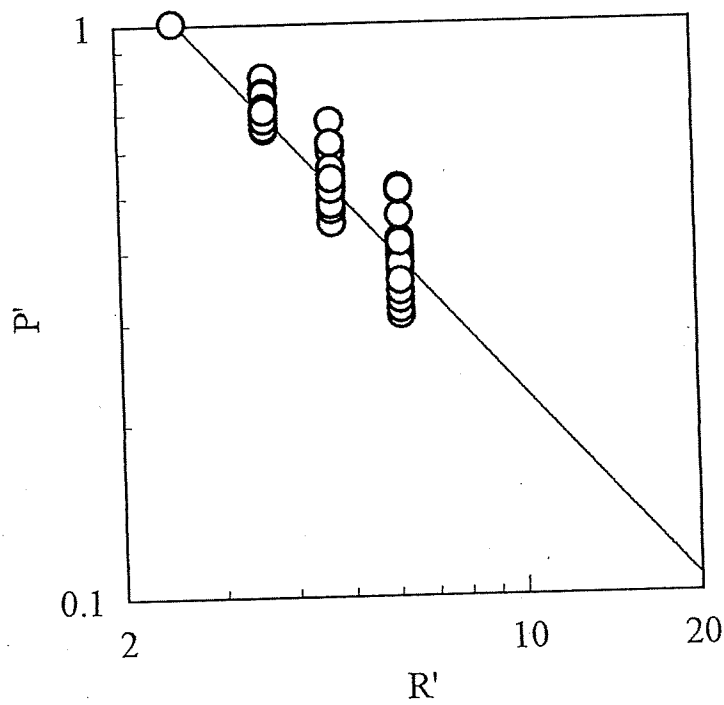
(b) 割らずに点火

図 2-14 ピーク圧力の当量比依存性



(c) 破膜後に点火

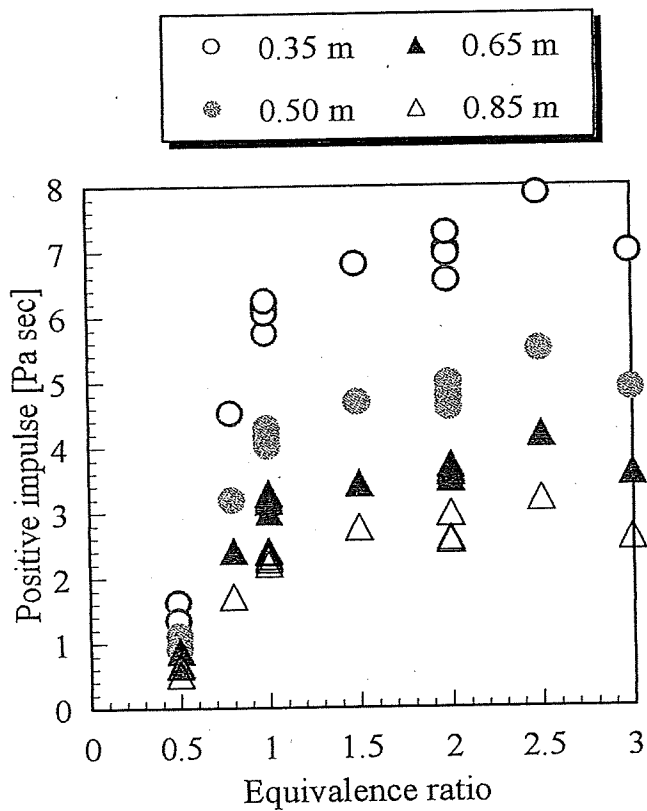
図 2-14 ピーク圧力の当量比依存性—続き



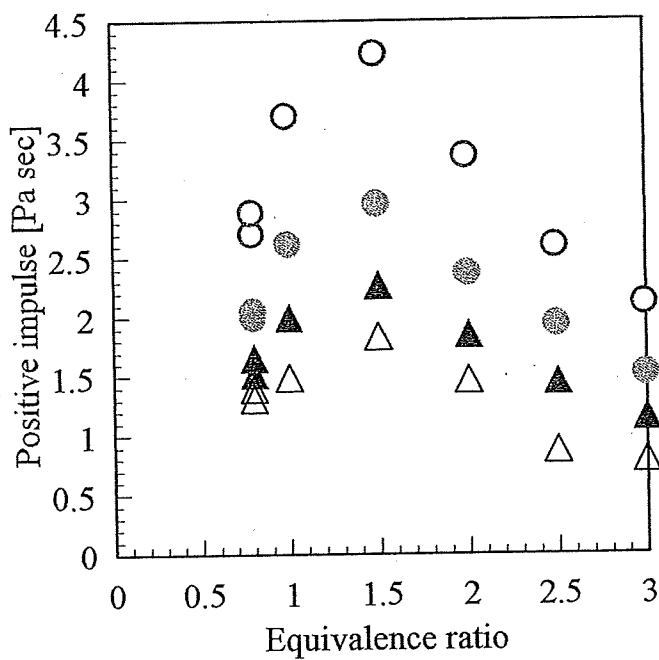
$$f(x) = a * (x^{-1.090466E+0}),$$

where $a = \exp(1.030062E+0)$
 $R^2 = 9.976784E-1$

図 2-15 圧力の距離による減衰

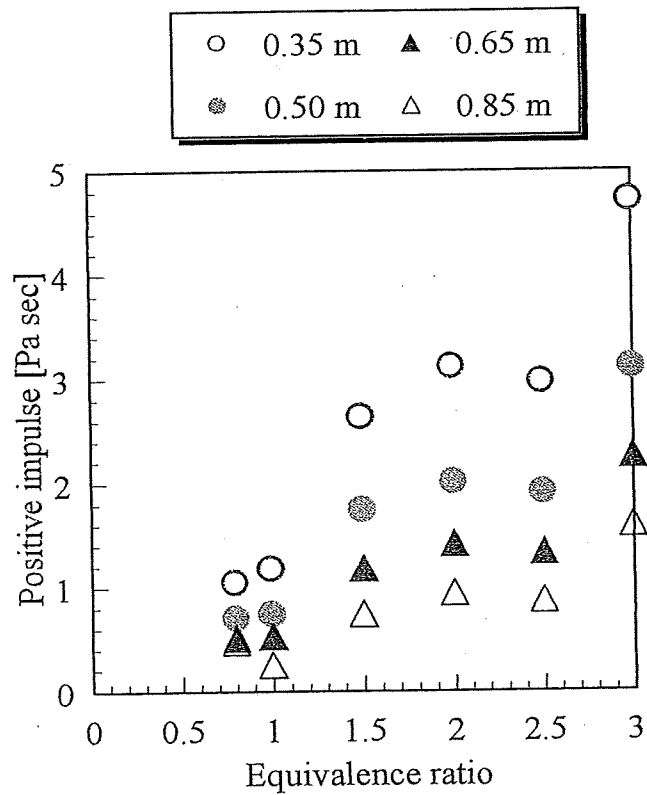


(a) ナイフエッジを固定した状態で点火



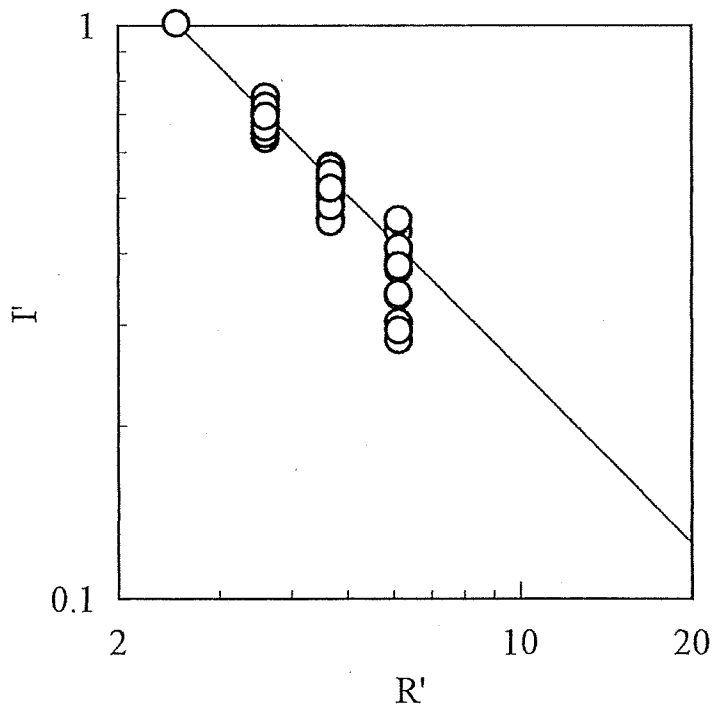
(b) 割らずに点火

図 2-16 インパルスの当量比依存性



(c) 破膜後に点火

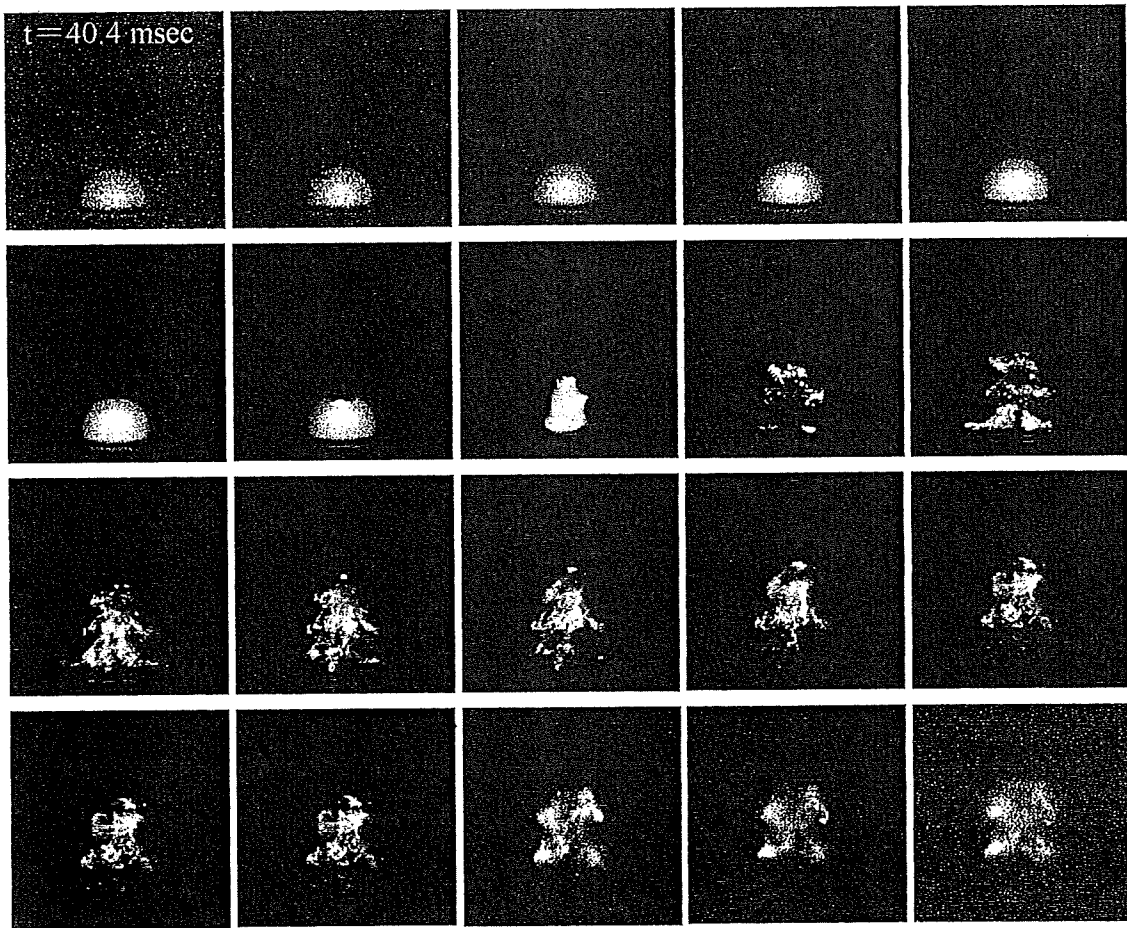
図 2-16 インパルスの当量比依存性



$$f(x) = a * (x^{-1.008851E+0}),$$

where $a = \exp(9.433449E-1)$
 $R^2 = 9.969051E-1$

図 2-17 インパルスの距離による減衰



画像補正, 画像間隔 3.56 msec

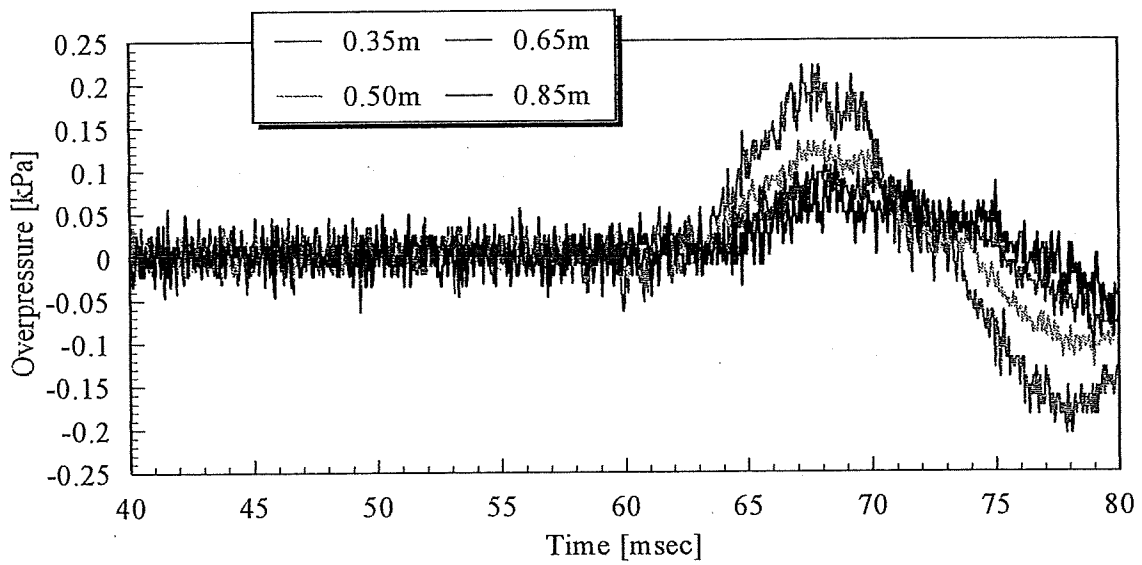


図 2-18 メタン-空気混合気の爆燃 ($\phi=1.0$, ナイフエッジ固定)

第3章 球状混合気の爆燃実験 (150 L 規模)

小型実験装置を用いた実験は、比較的手軽に行うことができる利点はあるが、混合気の量が少ないため、爆発で発生するエネルギーに対し、ラテックス膜の破膜のためにロスするエネルギーが無視できない大きさであった。そこで本実験では、大きめのゴム風船を用い、直径約 650 mm、150 L の球状の混合気を用いた。混合気の充填から点火、被害評価に重要となるデータの取得まで、小型実験装置での実験と同じ一連の手順で実験を行った。

1.4 実験装置

3.1.1 爆発試験装置

図 3-1 に本実験で使用した爆発試験装置の概略を示す。高さ 530 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ゴムバンドにより固定した。風船取り付け部には水素-空気の予混合気の注入口、風船取り付け部より上方には点火プラグ (DENSO 社製, IW16) が設置してある。点火プラグの位置は、風船取り付け口より上方 200 mm (風船中心より下方 125 mm)、風船取り付け口より上方 325 mm (風船の中心) の二箇所で行った。

3.1.2 点火系

小型実験装置のものでは自動車用の点火装置を用いたが、本実験では 100 mJ 以上のエネルギーのスパークを放つことができるコンデンサバンクを用いた。これにより、着火しにくい低濃度、高濃度の条件での実験でも、より確実に点火させることができる。ただ、スパーク時に発生するノイズが大きく、測定機器およびパルスディレイジェネレータに及ぼす影響が大きいため、コンデンサバンクとパルスディレイジェネレータの間にリレー回路 (Programmable logic controller, Keyence 社製, KV-10DR) を介したため、トリガから点火までに約 20~24 msec の時間遅れが生じた。

3.1.3 流路系

基本的には小型実験装置のものと同じであるが、使用する混合気の量が多いため、予混合チャンバとして容量が47Lの圧力容器を6本用意した。チャンバ内の圧力のモニタには圧力ゲージ（コパル電子社製，PG-200）を用い、爆発試験装置付近には安全のため電磁バルブを設置した。

1.5 実験方法

図 3-2 に実験装置の概略を示す。実験方法は小型実験装置のものと同様で、混合チャンバから風船内に水素-空気予混合気を充填し、直径約 650 mm, 150 L の球状の混合気塊を形成する。風船内部の点火プラグにより着火、その爆発過程を高速度ビデオカメラにより撮影し、発生する圧力および音圧レベルを、圧力変換器および騒音計を用いて計測する。

高速度撮影の際に用いたレンズは Nikon 社製の Nikkor レンズ（焦点距離 24 mm, f/2）でレンズの絞りは f=2 とした。高速度ビデオカメラのゲインは“NORMAL GAIN”モードを基本とし、一部火炎輝度が小さい条件では“UP GAIN”モードで撮影した。フレームレートは条件により 1125, 2250, 4500 fps と変えながら撮影し、撮影枚数はいずれも 1024 枚（撮影時間で 0.89, 0.44, 0.22 sec）とした。二箇所での点火位置では高速度ビデオカメラの視点が異なっている。風船はガスを充填した状態では扁平しており、中心より下方の位置で点火する場合は風船がほぼ円形に見える角度から撮影し、中心で点火する方法では縦方向に長い楕円に見える角度から撮影した（図 3-3 参照）。画像サイズは 256×256 pixel, 撮影領域は中心より下方で点火する場合は 2.59 m×2.59 m, 風船中心で点火する場合は 2.13 m×2.13 m であり、画像解像度はそれぞれ 10.1 mm / pixel および 8.32 mm / pixel となる。

また、爆発音のピーク音圧レベルを計測するための騒音計は実験室内に設置したところ、計測範囲外の値となってしまったため、実験室の外に設置して計測した。直線距離で約 17 m の位置であるが、この場合爆発点と計測点の間に壁を挟んでいるため、参考程度のデータとする。この場合も、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。

圧力の測定には同じ Entran 社製の半導体型圧力変換器 EPX シリーズを用いた。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) を用いて記録した。中心より下方の位置で点火する場合は、割らずに点火する方法では点火位置から 0.6 m, 破膜後に点火する方法では点火位置から 1.5 m の一点計測とした。中心で点火する場合は 0.8 m, 1.5 m, 3.0 m, 5.0 m の四点計測を行った。ともに、サンプリングレートは 20 kHz, サンプリング件数は 40000 点とし、2 秒間の計測を行った。

実験は同様の三パターンでの点火方法で行った。風船内に水素-空気混合気を充填した状態で内部の点火プラグで点火、やがて風船に火炎が達すると熱で破膜し、未燃の水素が残っている場合にはさらに燃え広がるという方法、風船の上方にナイフエッジを設置し、点火後に 30~50 mm 程度膨張した時点で破膜させる方法、風船上方に設置した可動式のナイフエッジにより破膜した後に点火し、開放空間を火炎が伝ばする方法である。

本実験でも同様に破膜、点火、計測機器類のスタート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 信号を図 3-4 に示す。

1.6 実験結果および考察

3.3.1 風船の破裂

ラテックス膜の場合と同様、風船の破裂が爆発挙動に及ぼす影響を把握しておくために、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た。同時に発生する音のピーク音圧レベルも計測した。破膜は風船上部のクランク機構による可動式のナイフエッジにより行った。

図 3-4 に風船を破裂させた際の時系列画像を示す。高速度ビデオカメラのフレームレートは 1125 fps で撮影した。ここに示した時系列画像から、破膜は開始から 16 枚 (約 14.22 ms) でほぼ終了していることがわかる。ラテックス膜に比べ、風船の作りの個体差のため、割れ方に多少のばらつきがみられた。騒音計の測定値は 90 dB 以下であり、ほとんど無視できるレベルであった。

3.3.2 水素-空気混合気の爆発実験

小型実験装置の場合と同様に、水素-空気混合気の爆発特性を調べる実験を行った。実

験条件は、当量比を 0.5～4.0 で変化させ、点火位置は風船の取り付け位置の上方 200 mm（混合気中心の下方 125 mm）と 325 mm（混合気の中心点）の二箇所で行い、点火方法は小型実験と同様、風船を割らずに点火、風船上方にナイフエッジを固定した状態で点火、可動式のナイフエッジにより風船を破膜後に点火、の三パターンで実験を行った。爆発挙動を高速度撮影し、発生する圧力と爆発音の音圧レベルを計測した。

ピーク音圧レベル

図 3-5 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。(a)が中心より下方 125 mm の位置で点火した場合、(b)が中心で点火した場合のものである。全体の傾向として、当量比の増加とともにピーク音圧レベルは増加しており、特に当量比 $\phi = 0.5 \sim 1.5$ の領域では大きく増加しているのがわかる。

各点火方法で比較する。割らずに点火する方法では、 $\phi = 1.5$ 付近で最大値となっており、それ以上の領域ではほとんど増加しておらず、中心点火の場合には小型実験ほど顕著なものではないが、減少傾向にあるようにも見える。破膜後に点火する方法では、当量比に伴うピーク音圧レベルの増加率が、割らずに点火する方法より大きくなっており、当量比が小さい条件では割らずに点火する方法のものより明らかに小さいが、 $\phi = 2$ 以上の領域では同程度、条件によっては大きくなっているものもある。ナイフエッジを固定した状態で点火する方法は、中心点火の場合しかデータがないが、全ての領域において最も大きな値が計測された。

次に各点火位置で比較する。ほぼ全ての領域で中心点火の値が大きな値となっており、特に当量比が 1 以下の条件ではその差が大きい。原因として、中心で点火する方法のほうが、特に破膜後に点火する方法では燃焼する水素量が多いこと、短時間で火炎が混合気全体に伝ばするため、単位時間あたりに発生するエネルギーが多いこと、などが考えられる。

時系列データ

図 3-6 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。点火位置や点火方法による影響を調べるために、全て $\phi = 1.0$ の条件で

(a)中心より下方 125 mm の位置で割らずに点火, (b)中心より下方 125 mm の位置で破膜後に点火, (c)中心で割らずに点火, (d)中心で破膜後に点火, (e)中心でナイフエッジを固定した状態で点火を比較した. また, 当量比依存性を調べるために, 全て中心で割らずに点火する方法で(c) $\phi = 1.0$, (f) $\phi = 0.8$, (g) $\phi = 2.0$, (h) $\phi = 3.5$ の条件のものを比較した. 当量比が小さい条件, 特に破膜後に点火する方法では, 火炎輝度が小さかったため, 高速度ビデオカメラの GAIN を “UP GAIN” モードで撮影し, 約 0.1 % アセチレンを混合気に加えるなどした.

まず, これらの画像について比較する. 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火炎の広がり, 発光強度ともに増加している. ただし, 割らずに点火した場合のものを見ると, 風船内部を火炎が伝ばしている間に限っては, 当量比 $\phi = 1.0$ 付近で最も発光強度が大きくなっていることがわかる. また, 当量比が低い $\phi = 0.5$ の条件ではアセチレンを添加しない場合は, 高速度カメラに火炎がほとんど撮影されなかった.

各点火方法で比較すると, 破膜後に点火する方法では他の二つの方法に比べて, 火炎の広がり, 発光強度などから, 多量の水素が未燃のまま拡散してしまっていることが推測される. また, 破膜を上方から行うため, 上方への噴き出し流れが形成され, その流れに乗って火炎が上方へ伝ばしている. この伝ばの仕方から, 破膜から点火までに 20 ms 以上の時間が経過していることもあり, 水素がかなり上方まで流れてしまっていることがわかる. このことは, 実験を行った際, 当量比 $\phi = 4.0$ の水素-空気混合気では, 割らずに点火しようとした場合は, 過濃可燃限界に近いので, 点火しなかったが, 破膜後に点火した場合は, 周囲の空気を巻き込んで点火しやすいほうへシフトしたためか点火したこと, また, $\phi = 1.0$ のメタン-空気混合気では割らずに点火した場合は点火したにもかかわらず, 破膜後に点火した場合は周囲の空気を巻き込み, 希薄状態になったためか点火しなかったことから想像できる. 割らずに点火する方法とナイフエッジを固定する方法で比較すると, 最も火炎が広がった状態での火炎の面積はおおよそ同じぐらいであるが, 破膜直後の瞬間的な火炎の速度はナイフエッジを固定する方法のほうが大きいようである. これは火炎面の前方の混合気に破膜による乱れが形成されるため, 火炎伝ばが急速に加速されたものと考えられる.

二つの点火位置で比較すると, この二つの方法では異なる角度で撮影しているため, 火炎

の広がりやを直接比較することはできないが、破膜後に点火する方法では、明らかに中心より下方で点火したもののほうが、未燃のまま拡散する水素量が多いことがわかる。先に述べた、破膜により生じる上方への噴き出し流れにより、破膜後に点火する方法ではこのような結果になったと考えられる。また、下方で点火した場合は火炎が風船上方に達する前に取り付け位置に達し、下から破膜しているが、中心で点火した場合は、取り付け位置付近から破膜するのは同じであるものの、その時点では風船の上方にまで火炎が達していることがわかる。

次に圧力波形について比較する。各当量比で比較すると、全体の傾向として当量比の増加に伴い、発生する圧力も大きくなっている。本実験でも反射による影響か、正圧部期間のあとに負圧期間があり、その後もこの正圧、負圧を繰り返しているが、以降では一つ目の正圧部分の山に注目してデータ整理を行うこととする。

点火方法で比較すると、破膜後に点火したものは発生する圧力値が最も小さく、このことから、多量の水素が未燃のまま拡散してしまっていることが想像できる。また、割らずに点火する方法とナイフエッジを固定する方法で比較すると、圧力波形には違いが見られる。燃焼している水素量は同じか、割らずに点火する方法のほうが多いにもかかわらず、ナイフエッジを固定する方法のほうが圧力の立ち上がりがシャープでピーク値も大きい。衝撃波が発生していると思われるケースもあった(図 3-6 (i) $\phi=2.5$, ナイフエッジを固定した状態で中心点火)。ただ、正圧の期間は割らずに点火する方法のほうが長くなっている。これらの結果は、ナイフエッジを固定した状態で点火した場合の、破膜直後の急激な火炎伝ばの加速によるものであると考えられる。

二つの点火位置で比較すると、中心より下方で点火した場合に比べ、中心で点火した場合のほうが圧力値は大きくなるようである。 $\phi=1.0$ のもので比較すると、割らずに点火した場合に 1.5 m で計測した圧力値は中心点火の場合のほうが大きく、また、破膜後に点火した場合には特にこの傾向が強く、下方で点火して 0.6 m の位置で計測した値より、中心で点火して 0.8 m の位置で計測した値のほうが大きいものとなっている。

火炎伝ば速度

高速度時系列画像から、火炎伝ば速度を割り出した。図 3-7 は破膜後に点火した場合の各時刻における火炎面の位置をプロットしたものであり、これにより、火炎の伝ば速度を求めた。割らずに点火した場合の破膜直前の位置（風船内部）と、破膜後に点火した場合の火炎伝ば速度が最大となる位置での火炎伝ば速度を図 3-8 に示す。割らずに点火した場合の、破膜直前の位置での火炎伝ば速度は、オーダが一桁異なっているが層流燃焼速度とよく似た当量比依存性が見られた。これは小型実験の場合と同様の結果である。破膜後に点火する方法では、破膜により生じる上方への流れの影響もあり、さらに加速しており、 $\phi = 2.5 \sim 4.0$ の条件では 60 m/sec を超える値となった。

延焼領域

小型実験と同様の方法で、高速度時系列画像から延焼領域を調べた。点火位置からの鉛直方向および水平方向の火炎の最大到達距離 H および W を初期混合気の半径 R で正規化したものを図 3-9 に示す。(a)は中心より下方で点火した場合のもの、(b)は中心で点火した場合のものである。初期混合気の半径は 150 L の空気を充填した風船の画像から求め、中心より下方で点火した場合は、鉛直方向 341 mm、水平方向 326 mm、中心で点火した場合は、鉛直方向 341 mm、水平方向 285 mm である。

全ての点火位置、点火方法で、当量比の増加にともない、鉛直方向、水平方向ともに大きくなっている。

各点火方法で比較すると、割らずに点火する方法では、高速度時系列画像からもわかるように、ほぼ球状に火炎が伝ばしているため、鉛直方向、水平方向ともに同じ程度の値となっている。それに対し、破膜後に点火する方法では、水平方向の広がり小さいが鉛直方向にはより高い位置まで達していることがわかる。この結果は、破膜後に点火する方法では、燃焼する水素量が少ないことや、先に述べた破膜により生じる上方への流れによるものと考えられる。ナイフエッジを固定した状態で点火する方法では、データ点が少なくばらつきはあるが、水平方向については割らずに点火する方法のものとほぼ同じ程度の値、傾向となっており、破膜が上端から起こるためか、鉛直方向へは傾向は同じだが、値が少し大きくなって

いる。

圧力データ

被害評価のために非常に重要である圧力データに関して、小型実験と同様、圧力値の当量比依存性や距離による減衰、点火方法により生じる違いなどを調べた。

図 3-10 は各条件、各測定位置でのピーク圧力をプロットしたものである。それぞれ(a)割らずに中心より下方で点火、(b)破膜後に中心より下方で点火、(c)ナイフエッジを固定した状態で中心点火、(d)割らずに中心点火、(e)破膜後に中心点火である。ばらつきは多いが、ピーク音圧レベルと同様、当量比の増加に伴い、ピーク圧力も増加している。

各点火方法で比較する。破膜後に点火する方法では、割らずに点火した場合よりかなり小さくなっており、特に中心より下方で点火した場合には、0.6 m の位置での計測値が、割らずに点火した場合の 1.5 m の位置での計測値より小さくなっている。中心点火の場合の当量比、計測位置が同じ条件での各点火方法でのピーク圧力を比較すると、最も大きいのがナイフエッジを固定した状態で点火する方法、次いで割らずに点火する方法、最も小さいのが破膜後に点火する方法となっている。破膜後に点火する方法では、未燃のまま拡散してしまう水素が多く、発生するエネルギー量が小さいため、発生する圧力も比較的小さなものとなったと考えられる。一方、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、ほぼ同量のエネルギーが発生していると考えられるが、破膜後に火炎が加速され伝ば速度が大きくなる、ナイフエッジを固定する方法で大きな圧力値が計測されたものと考えられる。

二つの点火位置で比較する。割らずに点火する方法ではともに点火位置から 1.5 m の位置で計測しているので、その値を比較すると、例えば $\phi = 1.0$ では中心より下方で点火した場合のピーク圧力が 2 kPa 程度であるのに対し、中心で点火した場合には 7~8 kPa 程度とかなり大きな値となっている。また、破膜後に点火する方法でも、中心より下方で点火した場合の 0.6 m での計測値より、中心点火の場合の 0.8 m での計測値のほうが、かなり大きくなっている。これも燃焼に用いられる水素量、および単位時間あたりに燃焼している水素量が多いためと考えられる。

ピーク圧力の距離による減衰を調べた。小型実験のときと同様に、最も点火位置に近い 0.8 m での計測値を 1 として、それに対して 1.5 m, 3.0 m, 5.0 m での計測値がどの程度減衰しているかを調べたものを図 3-11 に示す。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、0.8 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' は点火位置から計測位置の距離を混合気半径 $R=325$ mm で正規化したものである。点火位置から離れるに従い多少のばらつきはみられるが、各条件でよく似た結果となっている。図中に示すとおり、ピーク圧力はおおよそ距離の-1/2 乗で減衰している ($p \propto 1/R^{1/2}$)。

次に各条件、各測定位置での正圧インパルスを求め、その当量比依存性、距離による減衰、点火方法により生じる相違を調べた。インパルスの当量比依存性を図 3-12 に示す。それぞれ (a) 割らずに中心より下方で点火、(b) 破膜後に中心より下方で点火、(c) ナイフエッジを固定した状態で中心点火、(d) 割らずに中心点火、(e) 破膜後に中心点火である。インパルスも当量比の増加とともに大きくなっており、ピーク圧力と同様の傾向といえるが、ばらつきは比較的小さくなっている。

各点火方法で比較する。中心より下方で点火した場合、(a) 割らずに点火する方法での 1.5 m の位置と、(b) 破膜後に点火する方法での 0.6 m の位置のインパルスを比較すると、破膜後に点火する方法の方が大きな値となっており、ピーク圧力の場合と逆転している。圧力波形を見ると破膜後に点火する方法のほうが、正圧の持続時間が長くなっており、インパルスが大きくなったためである。ただし、この場合も同じ位置で計測したものであれば、割らずに点火したもののほうが大きくなったと考えられる。中心点火の場合の、同じ位置でのインパルスを比較すると、破膜後に点火する方法では、やはり燃焼する水素量が少ないため、他の二つの方法と比べるとインパルスも小さくなっている。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、ピーク圧力ではナイフエッジを固定する方法のほうが大きな値を示していたのにもかかわらず、インパルスはほぼ同じ値となっている。また、 $\phi=2.5$ でナイフエッジを固定した状態で中心点火、と全く同じ条件での実験を三回行ったが、そのうち一回だけ衝撃波が発生したと思われるケースがあり、ピーク圧力に関しては他の二回の 2 倍かそれ以上 (点火位置から 0.8 m の距離では、12.8 kPa, 11.4 kPa に対し、33.7 kPa)

にまで達している (図 3-6(i), (j)参照)。だが、この三回の実験でもインパルスは同じ程度の値 (同じく 0.8 m の距離では, 39.7 Pa・sec, 43.6 Pa・sec に対し, 42.0 Pa・sec) となっている。これらの結果から、ピーク圧力は発生するエネルギーの総量だけでなく、火炎の伝ば速度、すなわち単位時間あたりに発生するエネルギー量 (エネルギーの解放速度) にも大きく依存していることがわかる。これに対し、インパルスは正圧をその持続期間で積分したものであるから、結局発生するエネルギーの総量に大きく依存しているものと考えられる。

二つの点火位置で比較を行う。割らずに点火した場合の 1.5 m の位置でのインパルスを比較すると、 $\phi=2.0$ で中心より下方で点火では 12 Pa・sec 程度、中心点火では 40 Pa・sec 程度と、やはり中心で点火した場合のほうがインパルスは大きくなっている。破膜後に点火する方法でも、測定位置が 0.6 m と 0.8 m と中心点火の場合のほうが遠いにもかかわらず、インパルスは中心点火のほうが大きな値となっている。破膜後に点火する方法では上方への流れが発生しており、また他の二つの方法では火炎が風船の上端に達する前に破膜が起こってしまっていることから考えると、やはり燃焼する水素量、すなわち発生するエネルギー量の相違からこの差が生じていると考えられる。

中心点火の場合のインパルスの値から、その距離による減衰を調べた。図 3-13 はピーク圧力の場合と同様、0.8 m の位置でのインパルスを 1 として正規化し、その値に対する 1.5 m, 3.0m, 5.0 m での減衰を調べたものである。同様に、縦軸のインパルス I は、各条件における各測定位置でのインパルスを、0.8 m の位置でのインパルスで正規化したものである。横軸の距離 R' は点火位置からの計測位置の距離を混合気半径 $R=325$ mm で正規化したものである。多少のばらつきはあるが、同様の傾向になっており、図中に示すように、インパルスは距離の $-1/2$ 乗で減衰している ($I_p \propto R^{-1/2}$)。

圧力と火炎伝ば速度の関連性

発生する圧力とそのときの火炎伝ば速度の関係を調べた。図 3-14 は同時計測した圧力と火炎伝ば速度の時間履歴である。当量比 $\phi=2.5$ でナイフエッジを固定した状態で中心点火した A, B, C 三ケースのものである。ここで用いた火炎の伝ば速度の求め方について説明する。高速度時系列画像から、輝度があるしきい値 (例えば 128) を超える部分を火炎とみなし、