

電界の燃焼に及ぼす影響に関する実験的研究

岸 武行

①

電界の燃焼に及ぼす影響に関する実験的研究

指導教官 河野 通方 教授
27088 岸 武行

平成7年12月20日提出

目次

第1章 序論	1
第2章 今までの研究報告およびその検証のポイント	4
2-1 火炎からバーナへの熱伝達を用いる方法	4
2-2 Jagersらの方法	7
2-2-1 容器内の予混合気の火炎伝ばを用いる方法	7
2-2-2 火炎位置の変化により評価する方法	9
第3章 検証実験	10
3-1 対向流予混合火炎	10
3-1-1 実験装置および方法	10
3-1-2 対向流予混合火炎を用いた方法での結果	13
3-2 ノズルバーナ火炎を用いた方法	17
3-2-1 実験装置および方法	17
3-2-2 ノズルバーナ火炎を用いた方法での結果	20
3-3 今までの研究報告の問題点	23
3-3-1 熱伝達に及ぼす電界の影響	23
3-3-2 平均的方法と局所的方法	24
3-3-3 流れ場に及ぼす電界の影響	25
3-4 検証実験で得られた知見のまとめ	26

第4章 実験装置および方法	27
4-1 実験装置	27
4-2 本実験装置の前章における問題点の克服方法	30
4-3 燃焼速度の変化の確認方法	31
第5章 円筒火炎バーナでの結果および考察	33
5-1 電界印加による燃焼速度の変化	33
5-2 燃焼速度の変化以外の現象について	38
5-3 火炎伸長の影響について	40
第6章 結論	43
謝辞	
参考文献	

第1章 序論

電界の燃焼に及ぼす影響に関する研究は、昔から数多く行われてきた。古くは17世紀にイギリスでW. GilbertがQueen Elizabeth I宮廷で検電器をロウソクの炎で帯電させたことに始まり、第2次世界大戦前にも、Guenaultら⁽¹⁻²⁾が予混合気中の火炎伝ばに及ぼす電界の影響を調べ、電界印加によって火炎が変形することを確認している。

拡散火炎に及ぼす電界の影響についての報告も多い。例としては、電界を印加することによってすすの生成に変化があることが確認されている。その中の一つとして、謝ら⁽³⁾は対向流拡散火炎に電界を印加し、すすの体積濃度、数密度をMie散乱法により測定し、直流電界、低周波電界においてはすすの生成が促進され、高周波電界では抑制されることを見い出した。また、LIF法により、火炎中の代表的な活性種で、すすの酸化剤とも考えられているOHラディカルの濃度分布の電界印加による変化を、直流、交流ともに調べた。その結果、高周波電界を印加した場合、OHラディカルの濃度に特徴的な変化が現れることを見い出した。また、OHラディカルの生成エネルギーを調べ、その結果、電界印加がすす生成に影響を及ぼしていると結論づけた。

1965年の第10回国際燃焼シンポジウムが開催された際にも数多くの火炎の電氣的性質、および燃焼に及ぼす電界の影響に関する論文が発表されている。それらの論文は、火炎中のイオン、電子の分布の測定やイオン・電子が関与する反応機構の解明等、様々な観点から様々な方法が用いられ、様々な議論がなされている。しかし、一般的に燃焼に電界を印加すると、火炎の形状が変形する、あるいは、放電がおこり新たな活性種が発生するなどして、電界を印加しない場合との比較が難しくなる。それ故、かなりの論文が、個別の装置における実験結果の解析などの断片的なものにとどまっている。それらは、電界による燃焼への影響が多岐に渡り、かつ、同時に生じていることをうかがわせる。また、燃焼の研究においては、様々な実験形態、実験条件が存在し、それらから得られ互いに比較できる特性値が少ない。予混合火炎の燃焼速度は、その特性値の一つであるが、その燃焼速度に及ぼす電界の影響については、かつてから、影響があるという説と、ないという説とに2分されている。

本研究では、燃焼に及ぼす電界の影響に関して、上記の理由から、特に予混合気の燃焼速度に及ぼす電界の影響について取り上げ、電界を印加した場合に、燃焼速度の測定にどのようなことに注意し、考慮しなければならないかを、今までの研究報告をふりかえり、問

題になりうると考えられる点を拾い上げ、実験でその点を確認し、その理由を考察した。さらに、それらの問題点を考慮に入れ、問題点を克服したと考えられる実験方法を編み出し、その結果を考察した。また、結果の理由をモデル化し、数値シミュレーションを行い、そのモデルを検討した。

第2章 今までの研究報告およびその検証のポイント

ここでは、今までの研究報告についてふりかえり、問題点を調べ、解析することにする。ここで取り上げる研究報告は、Foxら⁽⁴⁾、Blairら⁽⁵⁾、Bowserら⁽⁶⁾、およびJaggersら⁽⁷⁾のものである。これらの報告について、実験方法をもとにいくつかに分類し、検討することにする。

2-1 火炎からバーナへの熱伝達を用いる方法

Foxら、Blairら、Bowserらの実験は、Bothaら⁽⁸⁾が開発した燃焼速度の測定法を用いている。代表例として図2-1にFoxらの、図2-2にBowserらの実験装置を示す。この方法では、多孔質板をバーナとして予混合気を燃焼速度以下の範囲で吹き出し、その吹出速度とバーナへの火炎の熱伝達との関係を調べ、その結果よりバーナへの熱伝達が0となる吹出速度を外挿、すなわち推定し、その値を燃焼速度とする方法である。

この方法では、吹出速度とバーナへの熱伝達量が常に線形であることを仮定している。なお、電界印加方法は、3報いずれもバーナ自身を一つの電極としており、もう一方の電極として、Foxらは、

中央にバーナ径と等しい径の穴があり外径がバーナ直径の2倍である銅板をバーナ上部に取り付けて用いており、BlairらとBowserらは、穴のあいていない金網をバーナ上部に取り付けて用いている。また、印加電界については、3報いずれも直流のみであり、電界強度は、Blairらが最大 6 kV/cm 、Bowserらが最大 10 kV/cm 、Foxらが 3 kV/cm である。実験に用いられた燃料は、BlairらとFoxらはプロパン、Bowserらはエチレンである。

Blairら、Bowserらの報告では、電界印加による燃焼速度の変化はみられなかったとしている。

Foxらの報告では、上部電極が正の場合は燃焼速度が増大し、負の場合は減少していると解釈が出来るデータを得ているが、自らこのデータの正当性を否定している。その理由を、この方法では電界印加によるイオン風の出現等を考慮していないこととしている。このため、燃焼速度に及ぼす電界の影響を調べるには、電界印加によるイオン風の効果を打ち消す、あるいは無視できるような実験方法の開発が必要だと述べている。

本研究では、まずBlairらやBowserら、Foxらが用いた方法が、電界印加時においてそれでもなお燃焼速度を求める方法として適切であるかを調べることにする。この方法では、予混合気吹出速度が燃焼速度よりも遅い領域でのみ実験可能であり、吹出速度が燃焼速度

と一致する，あるいは燃焼速度よりも大きい場合，火炎が吹き飛びを起し，実験が不可能である．その領域で，燃焼速度の推定方法のポイント，すなわち，吹出速度とバーナへの火炎の熱伝達量との関係が線形であるという仮定の有効性を検証するためには，吹出速度が燃焼速度よりも大きい場合でも実験できる方法が求められる．このことを満たす方法として，辻・山岡⁽⁹⁾の方法があり，本研究ではこの方法を用い，検証することにする．この辻・山岡の方法では，吹き出し速度の燃焼速度との大小に関わらず，バーナへの火炎の熱伝達の測定が可能である．それ故，バーナに火炎が付着する前後の吹出速度，すなわち，吹出速度が燃焼速度近傍である状態での，火炎からバーナへの熱伝達と吹出速度との関係を調べ，吹出速度とバーナへの熱伝達量との関係が線形のまま保たれているかどうかを調べる．

2-2 Jagersら⁽⁷⁾の方法

次に、Jagersらの実験では、2つの実験方法が用いられている。一つは容器内の予混合気に電界を印加し、その状態で火炎伝ばを生じさせ、火炎速度および火炎面積を調べる方法であり、もう一つは、金網で安定化された浮上火炎に電界を印加した場合の、火炎の位置の変化を測定し、その位置の変化から燃焼速度の変化を求める方法である。

2-2-1 容器内の予混合気の火炎伝ばを用いる方法

この方法では、円筒状の容器に予混合気を充填し、上方で点火した場合の、火炎速度を調べる方法である。図2-3にその実験装置を示す。電界は、円筒内部にアルミ製の2本の棒状電極を、円筒の中心軸に対し対称に、円筒壁面に設置して印加している。なお、点火直前に円筒容器の上方の蓋を取り去るため、燃焼ガスは大気中に放出されることになり、火炎伝ば中は未燃混合気の圧力は変化しない。実験に用いた予混合気は、石炭ガス-空気、メタン-空気、エチレン-空気の三種である。印加した電界は、石炭ガス-空気予混合気は、直流および50Hz交流電界で、どちらも最大で1kV/

cm (50 Hz は実効値) であり, メタン-空気予混合気は, 直流, 50 Hz および 5 MHz の交流電界で, 直流および 50 Hz は最大で 2.5 kV/cm (50 Hz は実効値) であり, 5 MHz は最大で 2.2 kV/cm (実効値), エチレン-空気予混合気は, 直流, 50 Hz および 5 MHz の交流電界で, 直流および 50 Hz は最大で 2.5 kV/cm (50 Hz は実効値), 5 MHz は最大で 2.2 kV/cm である. 結果として, 石炭-空気予混合気では, 電界による燃焼速度の変化は確認されず, メタン-空気予混合気, エチレン-空気予混合気については, 5 MHz については, 電界印加による燃焼速度の増加が確認されたが, 直流, 50 Hz については電界印加時に火炎が伝ば方向に対し垂直でなくなり傾き, 一部曲面になったため, 燃焼速度の変化を確認するデータは得られなかったとしている.

以上のことより, 電界印加による火炎の傾きや変形が, 燃焼速度の変化の観察を妨げていることは明らかである. また, 変形により, 火炎に及ぼす電界の影響が火炎に均一でない, すなわち, 火炎と電界との方向が均一でないことも考えられ, そのことが測定に誤差を生じさせる可能性も考えられる.

本研究では, ノズルバーナを用いて円錐形予混合火炎を生じさせ, 電界を印加した場合における, 火炎面積法等の平均的手法と, LD

V法による局所的手法とによる測定結果を比較し、火炎の変形が存在するときに両者が一致するかどうかを調べた。

2-2-2 火炎位置の変化より評価する方法

この方法では、煙道の中に設置されたノズルバーナの、金網によって安定化された浮上火炎に電界を印加し、火炎位置の電界印加による変化を調べ、その変化を燃焼速度の変化と対応づけている。図2-4にその実験装置を示す。電界は、煙道に設置された2枚の平板電極で印加している。印加電界は7MHzの交流電界で、0.7kV/cm（実効値）の電界強度である。電界印加により、火炎の形状、大きさ、発光が変化せず火炎の位置のみがバーナに近づいたことを確認し、この変化は燃焼速度の増加によるものと結論づけている。この方法の検証のポイントとしては、燃焼速度以外の要因で火炎の位置が変化するかどうかである。

本研究では、流れ場を可視化し、電界印加時に流れ場が変化するかどうか、また、変化する場合、その流れ場の変化が火炎位置の変化と関係があるかどうかを調べることにする。

第3章 検証実験

ここでは、まず、第2章の今までの研究報告の検証のために行った実験装置、方法および結果について述べる。なお、検証実験に用いた方法の火炎の種類は、対向流予混合火炎、ノズルバーナ火炎である。その後、第2章との関連について述べる。

3-1 対向流予混合火炎

3-1-1 実験装置および方法

この対向流予混合火炎を用いた実験では、火炎のバーナへの熱伝達を用いて燃焼速度を求める場合において、電界印加が及ぼす影響について調べた。流れの影響も同時に調べるため、可視化により電界印加時の流れ場の様子も調べた。

対向流予混合火炎の実験装置を図3-1~2に示す。この装置および燃焼速度の測定方法は、辻・山岡⁽⁹⁾により用いられたものと原理的に同じものである。なお、流れ場の可視化のため、バーナと電極のある試験部の支柱の一方に幅1mm、長さ26mmのスリットを設けている。試験部の断面は10mm×40mmの矩形である。バーナは、公称ろ過度2 μ m、長さ10mm、外径10mm、肉厚2mmの焼結

金属円筒を用いた。予混合気はメタン-空気予混合気を用い、一様流として窒素を用いた。窒素流量は毎分4リットルであり、縮流部をへて試験部に供給される。メタン-空気予混合気および窒素供給系を図3-3に示す。バーナ供給予混合気については、当量比を変化させることなく予混合気流量を変化させるため、以下の方法を用いた。当量比については、空気とメタンの混合前のそれぞれ実験する当量比に見合う流量を、校正済チョークバルブによるチョーク流量（上流圧は2気圧（ゲージ）に固定）によって、下流圧の変化に関わらず一定にする。それを混合した後一部を排気し、その排気流量を変化させること（チョークバルブ下流圧は0.5気圧（ゲージ）以下に保ち、チョークバルブでのチョーク状態を保つ）でバーナ供給予混合気流量を変化させる。予混合気は、あらかじめ校正しておいた水柱マンオメータでバーナ供給圧と大気圧との差圧によって流量を確認する。バーナの淀み点付近の表面温度は、クロメル-アルメル熱電対を用いて測定される。熱電対出力はクロメル-アルメル専用IC（AD595、アナログデバイセズ社）を用いて増幅され、デジタルオシロスコープに記録される。図3-4にバーナへの熱電対の取り付け図、図3-5にアンプの回路図を示す。熱電対は、バーナの淀み点付近に内側から開けられた穴に、接着剤によって取り付けられる。素線は、絶縁管に通してからバーナ内、予混合気供

給チューブに導き、チューブに開けられた穴から専用アンプへと導かれる。

電極は、円筒バーナ自身を一つの電極とし、もう一つの電極として、線径0.28mmのステンレスパイプ8本を3mm間隔で並べた平行棒電極をバーナ表面下部から15mmに設置した。本実験では、円筒バーナは常に接地し、平行棒電極側の電位を変化させた。以下、この平行棒電極側の電位を電圧として示すことにする。

図3-6に辻・山岡の方法での燃焼速度の求め方の概念を示す。すなわち、対向流である窒素流の流速 V を一定にし、予混合気の当量比も一定にしておき、バーナからの予混合気の吹出速度(v_w)のみをパラメータとする。 v_w を一定にして予混合気に点火すると、 v_w が燃焼速度よりも大きいときと小さいときとで、バーナ表面温度の時間に対する上昇率が変化する。すなわち、 v_w が燃焼速度よりも大きい場合(A-B間)、バーナ表面は火炎からの放射のみによって熱せられる。それに対し、 v_w が燃焼速度よりも小さい場合(B-C間)、火炎の予熱帯にバーナ表面が存在することになり、放射のみの場合よりも急激にバーナ表面が熱せられることになる。よって、予混合気吹出速度を横軸にとり縦軸にバーナ表面温度の、点火後一定時間の温度上昇をとると、ある吹出速度でグラフが折れ曲がる(b点)。この、折れ曲がったところの吹出速度が燃焼速度

と一致する。よって、本実験では、A-B間で実験データがグラフ上で直線上になるかどうかを調べることにする。

なお、流れの場の可視化の実験においては、一様流である窒素に図3-7に示す粒子混合機を用いて、粒径 $30\mu\text{m}$ のガラスマイクロバルーンを混入させ、実験装置に設けられたスリットを通して、レーザシートを一様流に入射し、流れ場の様子をビデオカメラまたは 35mm フィルムカメラで観察する。ビデオカメラは、流れ場が変化した場合に、流れの方向を確認するために用いる。図3-8に流れの可視化の測定概略図を示す。なお、この場合、可視化を容易にするため、バーナー電極間の距離を 25mm とした。なお、粒子が電界印加により帯電することも考えられるため、粒子の帯電量が粒径の2乗⁽¹⁰⁾に比例することを考慮し、粒径が $3\mu\text{m}$ のガラスマイクロバルーンも用いて実験し、粒径 $30\mu\text{m}$ のガラスマイクロバルーンでの実験結果と比較した。

3-1-2 対向流予混合火炎を用いた方法での結果

対向流予混合火炎の実験結果を図3-9～12に示す。この図は、バーナ表面を一定温度(26°C)にしておき、この状態で点火し10秒後のバーナ表面温度の上昇量を測定し、それを縦軸にとり、横

軸にバーナ供給予混合気流量をとったものである。その結果、当量比0.67, 1.30, 1.37, いずれについても、電界の有無、極性に関わらず、図3-8のA-B間にあたるデータ上で、特に燃焼速度を測定するにおいて重要であるB点付近で段が出来ることが確認された。特に当量比0.67, +2000Vの実験データでは、図3-12で示す通り、この段が他の条件に比べ強く現れている。これらのデータから、バーナの温度上昇と吹き出し速度との関係が、線形でなくなる現象、具体的にはグラフ上で段ができているのが確認された。

この原因としては、火炎中のイオンや電子が電界によってクーロン力を受け、火炎からバーナ表面への熱伝達に、電界による影響が及んだためと考えられる。

流れの可視化の実験では、電界印加時に、電界の極性に関わらず流れ場が変化したことが確認された。図3-13-A~Cに流れ場の写真を示す(粒子径は $30\mu\text{m}$)。なお、可視化のために混入したガラスマイクロバルーンの、粒径の違いによる、可視化の実験結果に違いはなかった。図Aでは、電界印加により一様流が減速し、図B~Cでは、電界印加により、一様流に逆流、すなわち渦が生じていることがわかる。

電界を印加した場合、火炎下部がバーナから離れる方向に移動す

る，すなわち一様流に対向する方向に移動することも確認された．電界を印加すると極性に関わらず，バーナ系の中心線付近での一様流が，減速，あるいは上流に逆流していることが本実験により確認されている．この現象は火炎が存在しない場合では生じない．よって，火炎が存在する場合に電界印加によって一様流が減速していることになる．辻・山岡⁽⁹⁾の報告では，一様流を減少させると火炎下部の位置はバーナから離れる方向に変化することが確認されている．よって，この実験での火炎位置の変化は，流れ場の変化による可能性が高い．すなわち，火炎位置の変化を，流れ場の電界印加による変化の確認なしに燃焼速度の変化と結びつけるのは危険であることがわかる．

ここで，逆流の生じる原因について考えてみる．バーナと火炎を，窒素流上流からみて近似的に円柱と考えた場合，円柱周りに渦が生じる原因としては，電界印加時に円柱から上流に向かって逆流する流れが生じることが考えられる．この流れの原因として，イオン風が挙げられる．そこで，渦がイオン風によるものかどうかを調べるため，イオン電流を測定した．その結果を図3-13-Dに示す．印加電圧が正負に関わらず2000V越えたところで急激に増大していることがわかる．流れの可視化の実験においても，2000V以下では渦は生じず，2000V以上で生じていることから，渦の

原因は、イオン風によるものと考えられる。なお、イオン電流値は、粒子の有無、および混入した粒子の径によって変化することはなかった。よって、粒子の混入によって流れ場の変化が引き起こされているとは考えられず、粒子の有無に関わらず流れ場は電界印加によって変化していると考えられる。ただし、上記の逆流する流れが生じなくとも、円柱が中心軸と垂直方向に振動すると、円柱周りに4つの渦が生じることがTatsuno⁽¹¹⁾によって確認されている。そこで、電極を、直径0.28mmのステンレスパイプを2mm間隔に6本平行に並べたものに変え、バーナ系の中心線上から図3-1において右側に10mmオフセットを与えて設置し、その状態で電界を印加し、可視化した。その結果を図3-14に示す。この図からわかるとおり、電界の正負に関わらず、窒素流の右側の上部では、流れが押し下げられるような変化が、右側下部では渦が生じるような変化が生じていることが確認される。しかし、左側には流れ場に何の変化も生じていない。もし、振動により渦が生じているとするならば、渦は、窒素流の左側にも生じなければならないが、実際には生じていない。従って、渦の原因としては、電界による振動の励起は考えられず、電界印加によるイオン風によるものと考えられる。

3-2 ノズルバーナ火炎を用いた方法

3-2-1 実験装置および方法

この方法では、電界を印加した場合に火炎の面積とノズルバーナからの吹き出し流量から燃焼速度を算出する平均的手法と、局所的手法であるLDV法との間に、測定結果に違いが現れるかどうかを調べるために用いた。

実験装置は、ノズルバーナ、冷却管、電極、これらを同時に移動させるXYZステージ、予混合気供給系、ダスト発生器、およびLDV測定系からなる。ノズルバーナを図3-15に示す。ノズルバーナは、内径8mm、肉厚1mmの銅パイプ製で、電界を印加した場合に火炎に電気力線が交差するよう、バーナ出口に直径40mmの円形の30番鉄製金網をバーナと同心円状に取り付けている。なお、燃焼ガス中の水分が金網で凝縮し、金網の目が一部詰まることによる火炎への影響を避けるため、金網を二重構造にしている。すなわち、まず一枚目の金網をバーナ出口に直接接着剤で取り付ける。その上部に二枚目の金網をのせ、四個の小型クリップで固定する。なお、ノズルバーナとこの二枚の金網とを同電位にするために、クリップとノズルバーナとを導線で結線する。

ノズルバーナが火炎によって熱せられ高温になると、予混合気の

温度が上昇し、燃焼速度が時間によって変化する。これを防ぐために、ノズルバーナの出口付近に外径 6 mm、肉厚 0.5 mm の焼き鈍し銅パイプを数回巻き、そのパイプの中に水を通すことによって、ノズルバーナの温度を室温で一定に保つ。

電極は、前述のノズルバーナに取り付けた金網を一つの電極とし、もう一つの電極として、バーナ出口から 15 mm はなれたところに直径 80 mm の円形の 30 番鉄製金網を、バーナ側の金網に平行で、かつ、上方からみて同心円状になるように取り付けている。なお、バーナに取り付けた金網電極は常に接地しておき、バーナ上方の金網電極の電位を変化させるものとし、以下この電極の電位を電圧として示すことにする。

以上の、バーナと電極は、XYZ ステージによって三次元方向に動かせるようになっている。なお、LDV による測定は、バーナ系の中心軸に沿って行い、LDV 装置は固定しバーナ系を上下することで、軸上の速度分布を測定した。

予混合気供給系を図 3-16 に示す。予混合気は、メタン-空気予混合気を用いる。メタン、空気はともにボンベから供給されレギュレータで減圧された後、流量調節バルブで流量を当量比 0.9 の場合メタン毎分 0.3 リットル、当量比 1.32 の場合 0.4 リットル、空気は当量比に関わらず毎分 3.05 リットルに調節し

た。T字管を経て混合された混合気はその一部を排気することにより火炎高さを当量比0.99, 1.32の場合どちらも10 mmになるように流量を調節した後、ダスト発生装置を経て、ノズルバーナに供給される。

ダスト発生装置を図3-17に示す。ダストは、宝石研磨剤用の酸化アルミニウム（平均粒径 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ ）を用いた。ダストを容器に入れ、そのダストをモータ駆動のプロペラによって常にかき回し、そこに予混合気を吹き付けることによって、LDVに最適なダスト量を混入する。

LDV測定系を図3-18に示す。波長632 nmのヘリウムネオンレーザ光は偏光面回転器で縦偏光にされた後ビームスプリッタで二本のレーザ光に分けられる。その後、 $f=240\text{ mm}$ のレンズによって、ノズルバーナ系の中心軸上で交差する。ここで生じた干渉縞を通過したダストが出す散乱光は、レンズ2, 3, 直径0.25 mmの円孔を通過した後、フォトマルチプライアで検出される。フォトマルチプライアの出力はプリアンプで増幅された後、バンドパスフィルタで0.3 MHz以下、および3 MHz以上の周波数成分がカットされた後、アンプでさらに増幅されて高速メモリに記憶される。このデータをパソコン上でスペクトル解析を行い、最大スペクトルの周波数を求める。この周波数から流速が求められること

になる。なお、周波数と流速との関係は、周波数を $a \text{ MHz}$ 、流速を $b \text{ m/s}$ とすると、 $b = a \times 3.037$ の関係となる。

火炎近傍の流速分布と燃焼速度との関係は、Guntherら⁽¹²⁾の報告を参考にした。図3-19に、流速分布と燃焼速度との関係の概略を示す。未燃予混合気の噴流は、バーナを出た後拡大するため、予混合気の流速は減速する。減速は続くがその後、火炎の予熱帯に到達し、予混合気の流速は加速を始める。従って、グラフ上での、流速分布の変曲点の位置での流速 W が火炎面に入り込む予混合気流速、すなわち燃焼速度と考えることが出来る。そして火炎に入り込むと流速は急速に加速される。よって、流速が急速に加速される直前の流速分布が、燃焼速度と密接な関係があると考えられる。

3-2-2 ノズルバーナ火炎を用いた方法での結果

ノズルバーナによる予混合火炎の、当量比 0.99 における火炎の直接写真を図3-20に示す。火炎は、その形状を変化せず相似的に火炎の面積が変化している。この写真から火炎面積の変化を求めると、電極 $+2000 \text{ V}$ の場合、 -4% 、 -3000 V の場合 $+4.5\%$ の変化が存在した。これはそれぞれ、電極 $+$ の場合、燃焼速度が増大し、 $-$ の場合減少していることを示す。当量比 1.32

の場合の火炎の直接写真を図 3-21 に示す。この当量比では、当量比 0.99 の場合と異なり、火炎の先端のみ形状が変化している。電極の正負に関わらず、火炎面積は減少している。火炎面積の変化は、電極が +3000 V の場合 -19%、電極が -3000 V の場合、-6.7% であった。これは電極の極性に関わらず、電界印加によって燃焼速度が増大していることを示す。

L D V で行った、火炎頭頂部での流速分布の結果を図 3-22 ~ 23 に示す。当量比 0.99 において、電極 +2000 V の場合、火炎直前、すなわち流速が急速に増大する直前の位置での流速が増大し、-3000 V の場合、流速が減少していることがわかる。これは、火炎面積の変化の傾向、すなわち、電極+の場合、燃焼速度が増大し、-の場合、燃焼速度が減少するという傾向と一致する。しかし、当量比 1.32 の場合では、火炎直前の流速は電界の極性に関わらず、減少している。この傾向は、上記で述べた火炎面積の変化の傾向、すなわち、電界の極性に関わらず燃焼速度が増大するという傾向と矛盾する。

当量比が 0.99 では、測定結果に矛盾がなく、当量比が 1.32 の場合矛盾が生じる原因を考えてみる。電界印加による火炎形状の変化が、当量比 0.99 では相似的に変化しているのに対し、当量比 1.32 では、火炎頂部の曲率が変化しており、電界印加によ

る火炎形状の変化は相似的でない。このことが、LDVでの測定結果と火炎面積法での測定結果との矛盾の原因と考えられる。

3-3 今までの研究報告の問題点

ここでは、今までに得られた実験結果から、過去の研究結果が、電界印加によって燃焼速度が変化するという説と、変化しないという説とになぜ二分されたかを、今までの研究結果を一つ一つふりかえって問題点を探り、その問題点を克服する方法を探索する。

3-3-1 熱伝達に及ぼす電界の影響

まず、Foxら⁽⁴⁾、Blairら⁽⁵⁾、Bowserら⁽⁶⁾の実験は、Bothaら⁽⁷⁾が開発した燃焼速度の測定法を用いている。この方法では、2-1で述べたとおり、多孔質板をバーナとして予混合気を燃焼速度以下の範囲で吹き出し、その吹き出し速度とバーナへの熱伝達との関係を調べ、その結果からバーナへの熱伝達が0となる吹き出し速度を外挿、すなわち推定する方法である。そこで、この方法が適切であるかどうかを検証することにする。

この方法では、吹き出し速度とバーナへの熱伝達量が常に線形であることを仮定し、それをもとにバーナへの熱伝達がない吹き出し速度を推定し、そこを燃焼速度としている。推定を検証するために、吹き出し速度が燃焼速度よりも大きい場合でも実験できる方法、す

なわち、辻・山岡⁽⁹⁾の方法を用い、検証した。その結果、バーナに火炎が付着する、しないの臨界領域で、吹き出し速度とバーナへの熱伝達量との関係が線形でなくなることが確認された。すなわち、電界を印加すると、特に吹き出し速度が火炎に付着する、しないの臨界領域、言い換えると、吹き出し速度と燃焼速度とが一致する、しないの臨界領域で、吹き出し速度とバーナへの熱伝達量との関係が線形でなくなことを意味している。このことは、電界を印加した場合、Spauldingらの方法では、吹き出し速度とバーナへの熱伝達との関係を常に線形と仮定することは正しくなく、そのため燃焼速度の測定に誤差が生じる可能性を示唆している。

3-3-2 平均的方法と局所的方法

Jaggersら⁽⁷⁾の方法の一つ、容器内での予混合気の火炎伝ばに電界を印加し、火炎速度および火炎面積を調べる方法は、平均的手法である。この場合、火炎に及ぼす電界の影響が均一でないことが予想される。

ノズルバーナ火炎の実験の結果では、電界を印加して火炎が変形した場合（当量比1.32）に、火炎面積法とLDV法とによる電界印加による燃焼速度の電界印加による変化を調べると、火炎面積

法では燃焼速度は増加しているという結果が得られたにも関わらず、LDV法では燃焼速度は減少しているという、矛盾した結果が得られた。これにより、火炎が電界印加によって変形すると、電界の燃焼速度に対する影響を、正しく評価することが困難になることが示唆される。

3-3-3 流れ場に及ぼす電界の影響

Jagersらの二つめの方法では、浮上火炎に電界を印加した場合の火炎の動きを燃焼速度の変化と結びつけている。そこで、火炎の位置が燃焼速度以外の要因で変化するかどうかを検証のポイントとなる。

対向流予混合火炎の流れの可視化の実験において、電界印加時に一様流の流れ場が減速する現象がみられた。この現象と関連して、辻・山岡⁽⁸⁾の方法では、燃焼速度に変化がなくとも、一様流の流速が変化する、すなわち流れ場が変化すると、それに伴い火炎の位置が変化することが確認されている。これらのことから、電界を印加した場合、火炎の位置による測定は、流れ場の電界印加による影響を考慮しない場合、正確でなくなることが示唆される。

3-4 検証実験で得られた知見のまとめ

以上述べてきたことより、電界印加時における、燃焼速度の測定に特に問題となりうる点をここで列挙すると、

- 1) 電界印加によってバーナへの熱伝達が変化すること
- 2) 電界印加によって火炎が変形すること
- 3) 電界印加によって流れ場が変化すること

があげられる。

第4章 実験装置および方法

ここでは、第3章で得られた、電界印加時における燃焼速度の測定での注意点を考慮して考案した実験装置と方法について述べる。

実験装置は、火炎伸長と消炎との関係の研究に主として用いられている、内側吹出円筒火炎バーナ⁽¹³⁾、すなわち円筒状の焼結金属等を用いて、予混合気を円筒焼結金属の外側から内側にしみ出させ、円筒焼結金属の内側に、円筒状の予混合火炎を生じさせるバーナを用いている。もちろん火炎伸長が生じているが、当量比が1から十分に離れていて予混合火炎の燃焼速度が遅い場合、しみ出す予混合気、および燃焼ガスの流量もそれに伴い少なくなり、火炎伸長の程度も十分に小さくなるため、燃焼速度に及ぼす電界の影響について、火炎伸長の効果を考慮することなく調べることが可能となる。

4-1 実験装置

内側吹き出しバーナを図4-1に示す。内径5.4 mm、長さ150 mm、肉厚3 mm、公称ろ過度 $2\ \mu\text{m}$ の焼結金属円筒は、その外側を中心軸方向に対し3つの部屋に分割した円筒で覆われている。また、焼結金属円筒の両端には、内径5.4 mm、長さ60 mmの煙

道が取り付けられている。予混合気は、3つの部屋のうちの中央の部屋に供給され、両端の2つの部屋には窒素が供給されている。火炎は焼結金属内部の、予混合気が供給されている中央50mmに生ずる。両端からの窒素の吹き出しにより、予混合気が過濃である場合にも焼結金属の内部では拡散火炎は生じず、予混合火炎のみ生じる。

電界は、バーナの焼結金属を一つの電極とし、もう一つの電極とし、バーナ内部に外径10mm長さ50mm肉厚2mm、公称ろ過度 $2\mu\text{m}$ の焼結金属をバーナと同一の軸上で、火炎が生じる箇所に取り付けて（以下この電極を中心電極と呼ぶことにする）この2つの電極により印加する。バーナ側は常に接地しておき、中心電極側の電位を変化させることとし、この電位を電圧と示すことにする。なお、中心電極から、窒素を吹き出させることにより、放電開始電圧は当量比が1.65において、電極側が正負ともに9000Vとなった。この電極の両端は内径10mm、肉厚1mmのガラス管に接着剤で固定され、両端の煙道に取り付けられた3本のネジで固定される。

予混合気および窒素供給系を図4-2に示す。予混合気供給系は第3章の対向流予混合火炎のものと同様である。また、窒素については、ポンベからレギュレータを介して、流量調節バルブで流量を

調節した後（毎分4リットル），3分割され，それぞれバーナの両端，および電極へと供給される．

本実験では，火炎を，バーナ下部から平面鏡を介してビデオカメラで撮影し，火炎直径を測定した．図4-3にその測定系を示す．

イオン電流測定用の電流計は，図4-1に示した箇所に取り付けられている．

流れの様子の可視化については，図4-4に示す様に，スリットが存在するバーナを製作し，スリットから160番の磨き砂（主成分 SiO_2 ，平均粒径 $100\mu\text{m}$ ）をカメラレンズクリーニング用ブローでバーナ内に吹き込み，火炎で赤熱した磨き砂の動きを観察する．この可視化用バーナの焼結金属円筒の，内径，肉厚は図4-1と同様で，長さ100mmのものを2個用い，どちらも一方の端を接着剤で肉厚1mmのアルミ板に接着する．その面を向かい合わせにし，間を肉厚2mmの三日月形のアルミ板を挟み込み，2個の焼結金属円筒のあいだに $2\text{mm} \times 30\text{mm}$ のスリットができるようにする．そこから磨き砂を噴射すると火炎を通過することで赤熱し，上記の火炎の撮影方法と同様の方法で赤熱した磨き砂の様子を撮影することで，流れの状態が確認できる．

4-2 本実験装置の前章における問題点の克服方法

ここでは、上記で述べた実験装置が、前章で挙げた問題点をどのようにに克服しているかについて述べる。前章で挙げた問題点は

- 1) 電界印加によってバーナへの熱伝達に変化すること
- 2) 電界印加によって火炎が変形すること
- 3) 電界印加によって流れ場に変化すること

であった。本実験装置では、熱伝達の変化については、以下に述べる燃焼速度測定法に関与しないことは明らかである。また、電界を印加しても火炎は変形せず、火炎は円筒の形状を保ったまま、その直径のみが変化することが確認されている。流れ場については変化はあるものの、火炎直径の変化とは逆の変化である。これについては、第5章で述べる。従って、以下に述べる燃焼速度測定法は上記3つの問題点を克服したものと考えられる。

4-3 燃焼速度の変化の確認方法

では、4-1に記述した実験装置を用いた、電界印加による燃焼速度の変化の確認方法について説明する。

まず、火炎のバーナ表面からの距離と燃焼速度の変化との関連を図4-5を用いて説明する。当量比 $\phi = a, b$ での、火炎のバーナ表面からの距離と吹出速度との関係が図4-5の2本の実線の直線のようにであったとする。バーナ当量比 $\phi = a$ の実験で、電界を印加した場合、火炎位置が1から3のように変化したとする。ここで、 a よりも燃焼速度が大である当量比 $\phi = b$ でのバーナ表面からの火炎の距離と吹出速度との関係がわかっていたものとする、 $\phi = a, b$ の燃焼速度はそれぞれ1', 2'で示される吹出速度と考えられる。従って電界を印加した場合の燃焼速度は3'で示される吹出速度と考えられる。その3'を求めるためには、線分1→3と3→2との長さの比を求め、その比に線分1'→2'を内分する3'を求めればよいことになる。燃焼速度の変化を求めるのであるならば、以下の方法でも測定可能である。すなわち、電界を印加した場合における火炎のバーナ表面からの距離を求め、その値と上記の2本の直線の傾きの逆数の積により燃焼速度の変化量が求められることになる。

以上の考え方は、次のように考えることもできる。電界印加により火炎のバーナ表面からの距離が1から3に変化したものとする。電界を印加したまま、破線上にそって吹出速度を1' 3'分だけ増加させると、火炎のバーナ表面からの距離が電界を印加しない場合と同じ値になる。すなわち、1' 3'の吹出速度の増加分だけ燃焼速度が、電界を印加することによって変化したと考えられる。

なお、図4-5に当たる、実際の実験データを図4-6に示す。

第5章 円筒火炎バーナでの結果および考察

この章では、円筒火炎での実験結果および考察について述べる。

5-1 電界印加による燃焼速度の変化

図5-1に電界印加による火炎半径の変化を示す。このデータと図4-6から算出された、燃焼速度の変化を図5-2に示す。円筒火炎に電界を印加すると火炎の半径が増大することが確認された。なお、火炎半径の変化は、印加電圧が+の場合のみ生じた。火炎半径が増大する、すなわち火炎がバーナ表面に近づく変化は、バーナへの予混合気流量を固定し当量比のみを変化させて燃焼速度を増大させたときにも生じる。このことより円筒火炎の燃焼速度は、電界印加によって増大したことが示唆される。

流れ場の電界印加による変化の様子を図5-3-A~Bに示す。中心電極が+の場合、流れが中心電極の方に加速されるような粒子の軌跡が存在する。この流れの変化は、火炎の直径の変化、すなわち、火炎がバーナへ近づく方向へ移動する変化とは相反する変化と考えられる。また、中心電極が-の場合、流れがバーナ表面に押し戻されるような粒子の軌跡が存在するが、中心電極が-の場合、火

炎直径に変化はない。なお、図4-4の装置では未燃混合気の流れ場は可視化できないため、図4-1の装置に図5-4-Aの様にパイプを取り付けて、バーナ上部から直径 $30\mu\text{m}$ のガラスマイクロバルーンを自然落下させて未燃混合気の流れ場を観測した結果を図5-4-B~Cに示す。この場合、図4-3の測定系に示すような光学系だと、中心軸方向の軌跡が確認できないので、本実験ではCCDカメラを図4-3の光軸からごく僅かずらせて設置した。なお、バーナ表面付近で軸方向に動く粒子は、点火時に非定常の火炎に含まれる水蒸気により粒子同士が凝集したものが、自重により落下しているもので、流れには追従していない。この図からわかるとおり、バーナ表面付近、すなわち未燃混合気の領域では、流れ場に変化がみられないことがわかる。それに対し、中心電極に近い領域、すなわち燃焼ガスの領域では、電界が正の場合流れが中心電極の向きに加速され、負の場合中心電極から離れる向きに加速されているのが確認されている。粒子を直径 $3\mu\text{m}$ のガラスマイクロバルーンに変えても同じ現象が確認された。従って本実験においては、燃焼速度の測定において重要である、未燃混合気の流れ場が電界印加により変化していないことが確認されたことになる。

火炎のバーナ表面からの距離の変化、すなわち火炎直径の変化については、図5-1からわかるとおり、印加電圧が $+7000\text{V}$

(中心電極側)を越えたあたりから確認されている。この傾向は、図5-5に示すイオン電流の変化と同様である。イオン電流は電界強度の分布に関係があるので、7000Vを越えたあたりから実際に火炎に印加されている電界強度が増加し始めると考えられる。このことについては後で述べる。また、負電界については火炎の変化がみられないが(-10000Vまで)、この傾向もイオン電流の傾向と同様であり、-10000Vまでイオン電流にほとんど変化はみられない。

火炎半径の変化は、当量比1.55付近でもっとも強い変化が現れ、当量比1.61, 1.65(本実験装置での点火可能である最大の当量比)においても変化が確認された。当量比が1.55よりも小さい場合、印加電圧を上げてゆくと、火炎に変化が生じることなく、ある電圧で(いずれの場合も7000V以下)、電圧発生装置の出力を上げて電界をそれ以上印加できなくなった。同時に火炎直径が電界印加時、無印加時に関わらず不規則に変化し始め、この現象は当量比をさらに小さくしても起こった。なお、希薄側では当量比0.58(本実験装置で最小の点火可能の当量比)から0.8までのいずれの当量比でも、電界の極性に関わらず5000V付近で火炎に変化が生じることなく放電を起こし、それ以上の電圧は印加できない。当量比が0.8よりも大きくなると、過濃側の当量

比1.55よりも小さい場合と同様に火炎直径が不規則に変化し始めた。

印加電圧が+7000V以上で火炎半径が変化する理由を、図5-5のイオン電流の変化と関連づけて考えることにする。イオン電流は、電極間で生成されるイオンおよび電子によって決定される。このことから、+7000V以上でイオン電流が増大したことは、+7000V以上で火炎中で生成されるイオンおよび電子が増大したことを表している。これは、電界を印加することによって、イオン・電子の生成が促進されていることを示している。Pedersenら⁽¹⁴⁾や瀬川⁽¹⁵⁾は、イオン・電子を含めた燃焼化学反応（燃料としてメタンを用いた場合）を考慮し燃焼に及ぼす電界の影響を数値シミュレーションすることを試みている。彼らの報告から、イオン・電子生成反応にはラジカル、特に励起したラジカルがかかわっていることがわかる。よって、電界を印加することにより、ラジカルの生成が促されていることが考えられる。以上のことはすなわち、+7000V以上において、電界がイオン生成反応、さらにラジカル生成反応に影響を及ぼし、結果として燃焼化学反応に影響を及ぼしていることを示唆しているものと考えられる。なお、イオン電流が増大する場合、3-1-2で述べたとおり、流れ場が変化する可能性があるが、前述したとおり、未燃混合気の流れ場は電界印加に

よって変化しないことが確認されている。また、燃焼ガスの流れ場
の変化については、火炎伸長とも関係するので5-3で考察する。

5-2 燃焼速度の変化以外の現象について

当量比が1.55よりも小さい場合、電界を印加した場合に数mAの電流が流れる場合があることが確認された。この現象と関連して以下のことが考えられる。燃焼速度が増大するにつれて単位時間に消費される予混合気量が多くなり、それに伴い単位時間に発生するイオン、電子の絶対量が多くなり、電流が流れやすくなることが考えられる。このために電界から火炎に与えられるエネルギーが増大するため、電界だけによる燃焼速度の変化を調べるのが困難になる。

また、当量比が0.8より小さい場合、電圧を上昇させると燃焼速度に影響を与えないで放電が生じたが、放電現象は未だ完全には解明されていない現象である。放電現象の理由の説で著名なものとしてタウンゼントの理論とストリーマ理論が挙げられる。タウンゼントの理論では電界によってイオンや電子にエネルギーが与えられ、高速になったところで中性分子と衝突し、さらにイオン・電子が増えてゆき、それに伴い電流値も増加しついに放電が起こるとしている。ストリーマ理論では、電子が正極に向かって電子なだれを形成し、正極に達するとイオンの放電路となって放電するとしている。上記で述べたように火炎が存在する場合、化学電離により大気より

も多く、イオンや電子が存在する。当量比が0.58から0.8の間の場合では、電界印加で電離が促進されるために放電まで至ると考えられる。

前述した電流が流れる現象と、放電が生じることの違いを、当量比との対比で考えてみる。当量比が1より大きい場合、メタン等の炭化水素系燃料では、炭素原子が含まれた比較的分子量の大きいイオンが多く含まれている。当量比がリーンでは、炭素原子が含まれたイオンはリッチの場合に比べ少なく、分子量が小さいイオン、あるいは電子が多く含まれている。そのため、電界から受けるクーロン力によってより高速となり、その結果、中性分子との衝突による電離が促進され、そのため、放電が生じると考えられる。

5-3 火炎伸長の影響について

円筒火炎バーナでの実験については、本実験装置から中心電極を除いたものが、火炎伸長に関する研究によく用いられている。そこで、本研究において火炎伸長の効果が、燃焼速度におよぼす電界印加の影響の観察において、どの程度影響があるかを考える。

火炎半径に変化が無い電圧が負である場合を考える。電界を印加しても火炎半径は変化しない。この時、図 5-3-A で分かるとおり、燃焼ガスが火炎を通過した後、放物線を描いて火炎の方へ戻る様子が観察されている。これから言えることは、この流れの変化は、1 つめとして、火炎をバーナ表面に押し戻す影響、すなわち、火炎半径を増大させる影響を及ぼす可能性があると考えられる。2 つめとしては、この流れの変化により、半径方向の流速の速度勾配が増大することによって火炎伸長が促進し、燃焼速度を低下させる影響、すなわち、火炎半径を減少させる影響を及ぼす可能性がある。しかし、観測結果では、火炎半径に変化は見られなかった。5-2 で述べた通り、電圧が負である場合、火炎半径に対する電界の影響はないと考えられる。従って、上記の、1 つめの影響と、2 つめの影響は、仮に存在したとしても、打ち消し合っていると考えられる。このことが印加電圧 -10000 V まで言えることになる。ここで、

電圧が正である場合での、上記の2つの影響について考えてみる。この場合、図5-3-Bから分かるように、流れはバーナ中心へ加速されるような変化が生じている。上記と同様に考えると、1つめは、火炎を中心方向へ引っ張る、すなわち火炎半径を減少させる影響である。2つめは、半径方向の流速の速度勾配が減少することによって火炎伸長が抑制され、燃焼速度を増加させる影響、すなわち、火炎半径を増加させる影響である。5-1で述べたとおり、火炎半径は印加電圧+7000Vまでは変化がない。このとき、5-2により火炎に電界の影響は無いと考えられる。従って2つの影響は打ち消し合っているものと考えられる。印加電圧が+7000Vを越えると、火炎に電界の影響が現れ始める。この時、2つの影響の打ち消し合う関係がこの時同時に崩れるとは考えにくい。その理由を考えてみる。上記2つの影響は、どちらも流れの変化によるものに起因するものである。流れが変化する理由は燃焼ガス中のイオン、電子にクーロン力が働くからである。このクーロン力は電界の強度に比例し、電界の向きに働く。ここで、影響同士が打ち消し合う印加電圧が負の場合で電圧の絶対値が7000Vを越える場合を考えてみると、電界の向きは逆であるが、クーロン力の大きさは同じである。図5-3-Aと図5-3-Bとを比較しても、その傾向が確認されている。また、印加電圧が負である場合、流れの変化は上流

に逆行する方向で不安定な場であるのに対し、正の場合、加速する方向で負の場合に比べ安定な場である。このことから、上記の2つの影響の打ち消し合う関係は+7000Vを越えても崩れていないものと考えられる。

第6章 結論

燃焼に及ぼす電界の影響について，異なる実験形態間での比較が可能な特性値である，予混合火炎の燃焼速度に関して実験的に調べ，以下の知見が得られた．

1．燃焼速度に及ぼす電界の影響を調べる場合において，電界を印加した場合に火炎形状が変形する実験方法を用いた場合，測定方法により矛盾した解釈が得られる場合がある．本研究においては，ノズルバーナを用いて電界を印加した実験を行った．その結果，当量比1.32での実験において，火炎の面積変化による観測結果の解釈と，LDVによる火炎頂上部のノズルバーナ軸上の流速分布の観測結果の解釈とが矛盾したことが例に挙げられる．

2．火炎の変形がなくとも，流れ場が電界印加により変化する場合，測定結果の解釈に誤解が生じることがある．本研究においては，円筒バーナを用い，一様流に窒素流を用いた対向流予混合火炎に電界を印加した実験を行った．その結果，電界を印加すると一様流の流速分布に変化が現れ，それに伴い火炎位置が変化する．そのため，電界印加による火炎位置の変化と燃焼速度の変化とを直結させることが出来ないことが挙げられる．また，予混合気の吹出速度を変化

させ、バーナ出口の温度を観察する方法で火炎がバーナ出口に付着している最大の予混合気吹出速度を燃焼速度と定義する方法では、電界を印加している場合、火炎がバーナ出口に付着する、しないの境界領域でバーナ出口の温度の変化が不規則になり、バーナ出口に火炎が付着する予混合気の吹出速度を正確な決定が不可能となる。

3. 上記2点を考慮し、電界を印加しても火炎の変形が生じず、また、予混合気流のみで火炎が安定するバーナとして、焼結金属円筒の内側に予混合気を吹き出させて円筒状火炎を生じさせる、円筒火炎バーナを用いて実験を行った。その結果、当量比1.55から1.65までの範囲で、バーナ側を接地、中心電極が+で印加電圧が7000Vを越えた場合、火炎直径が電界印加により増大した。この変化は予混合気の吹き出し速度を一定にし当量比を変化させて燃焼速度を増大させた場合と同様の变化であった。すなわち、電界印加によって燃焼速度が増大したと考えられる。燃焼速度が増加する印加電圧でイオン電流が増加したことから、電界印加によって、火炎中でのイオンの生成が促進され、また、同時にラジカルの生成も促進され、結果として電界が燃焼化学反応に影響を及ぼすという可能性が示唆される。

謝辞

本研究を行うにあたり、常に辛抱強くご指導頂きました河野通方先生をはじめとして、適切かつ有益な助言を頂きました、荒川義博先生、越 光男先生、平野敏右先生、松為宏幸先生に深く感謝の意を表します。

また、多くのご指導、ご助言を賜りました、津江光洋先生、
(株)ノーリツ基礎研究所の謝 林氏、大阪府立大学工学部助手の
瀬川大資先生に厚く御礼申し上げます。

さらに、実験装置の製作などでご助力頂きました、工作室助手の
百々 悟氏、技官の岩田悌次氏、また様々な面でご協力いただきま
した和田佳之氏、蛇口早哉子氏、内海正文氏をはじめとする河野・
津江研究室の皆様に、深く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) E. M. Guenault and R. V. Wheeler, The Propagation of Flame in Electric Fields - Part I. Distortion of the Flame Surface-, J. Chem. Soc., 195-199(1931).
- (2) E. M. Guenault and R. V. Wheeler, The Propagation of Flame in Electric Fields - Part II. The Effects of transverse Fields-, J. Chem. Soc., 2788-2793(1932).
- (3) 例えば, L. Xie, T. Kishi and M. Kono, Investigation on the Effect of Electric Fields on Soot Formation and Flame Structure of Diffusion Flames, 24th Symposium (International) on Combustion, pp. 1059-1066, The Combustion Institute, 1992.
- (4) J.S. Fox and I Mirchandani, Influence of Electric Fields on Burning Velocity, Combust. Flame 22:267-268(1974), The Combustion Institute.
- (5) D. W. Blair and F. C. T. Shen, A Sensitive Method for Investigating the Electric Fields on the Burning Velocities of Premixed Laminar Flames, Combust. Flame 13:440-442(1969), The Combustion Institute.
- (6) R. J. Bowser and F. J. Weinberg, The Effect of Direct

Electric Fields on Normal Burning Velocity, Combust. Flame 18:296-300(1972), The Combustion Institute.

(7) H. C. Jagers and A. von Engel, The Effect of Electric Fields on the Burning Velocity of Various Flames, Combust. Flame 16:275-285(1971), The Combustion Institute.

(8) J.P. Botha and D.B. Spalding, The laminar flame speed of propane/air mixtures with heat extraction from the flame, Proc. Roy. Soc. A225:71-96(1954).

(9) 例えば, I. Yamaoka and H. Tsuji, Determination of Burning Velocity Using Counterflow Flames, Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp.1883-1892, The Combustion Institute, 1984.

(10) 奥山喜久夫, 増田弘昭, 諸岡成治著, 微粒子工学, 新体系化学工学, 1992年, オーム社.

(11) M. Tatsuno, Secondary Flow Induced by a Circular Cylinder Performing Unharmonic Oscillations, J. Phys. Soc. Jpn. 50:330-337(1981), the Physical Society of Japan.

(12) R. Gunther and G. Janisch, Measurements of Burning Velocity in a Flat Flame Front, Combust. Flame 19:49-53(1972), The Combustion Institute.

(13) 例えば, 小林, 北野, 大塚, 伸長する円筒状予混合火炎の
消炎に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 52 巻 483 号,
p 3811-3817.

(14) T. Pedersen and R. C. Brown, Simulation of Electric
Field Effects in Premixed Methane Flames, Combust. Flame
94:433-448(1993), The Combustion Institute.

(15) 瀬川大資, 可燃性混合気の点火遅れに及ぼす電界の影響,
東京大学工学部博士論文, 平成 7 年 6 月.

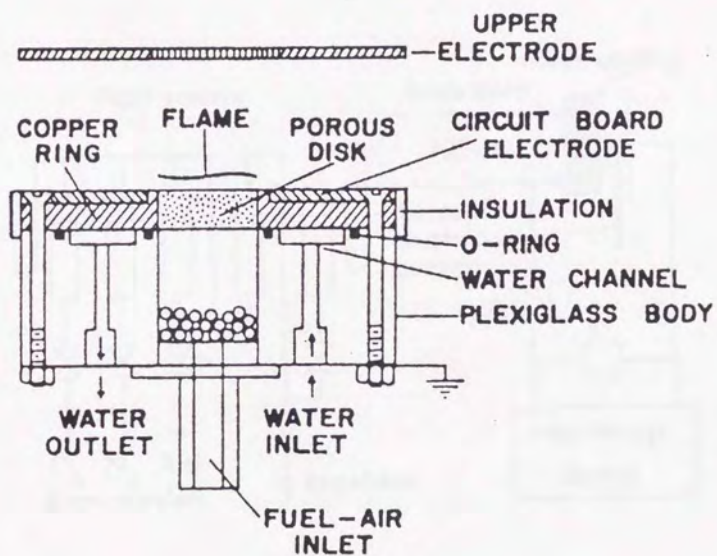


図 2-1 Foxら⁽⁴⁾の実験装置概略図

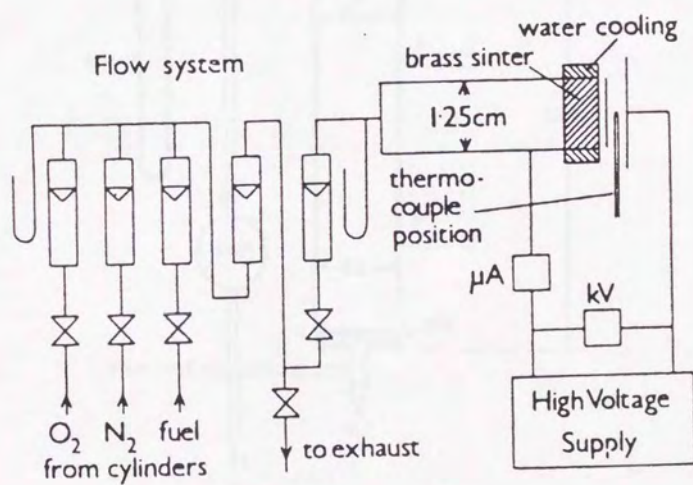
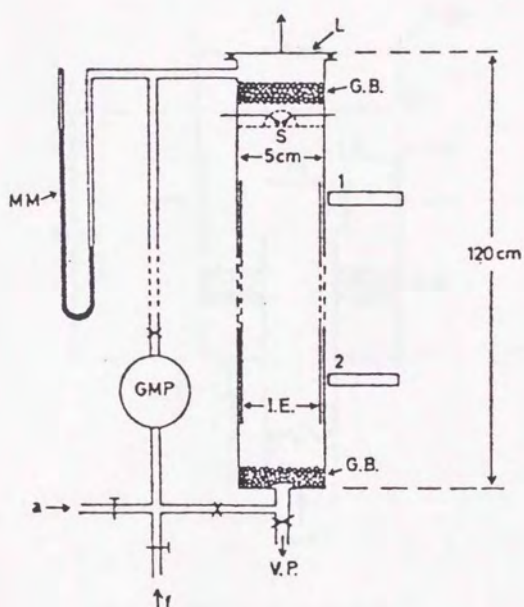


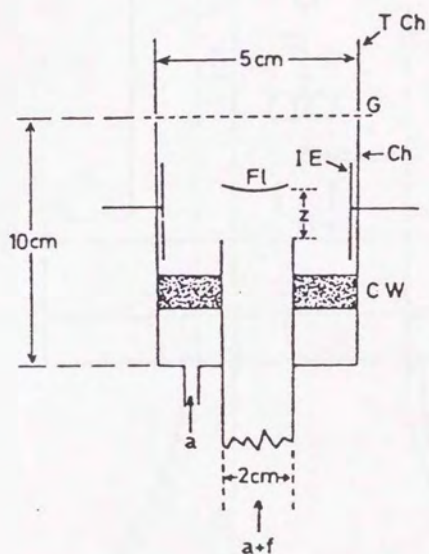
図 2-2 Bowserら⁽⁶⁾の実験装置概略図



MM, mercury manometer; *L*, movable lid;
GB, glass balls; *S*, spark; 1 and 2, photocells;
GMP, gas mixing pump; *VP*, vacuum pump;
IE, internal electrodes; *a* and *f*, air and fuel.

図 2-3 Jaggerら⁽⁷⁾の実験装置概略図

(容器内伝ば予混合火炎)



T Ch, top chimney; *G*, copper gauze;
IE, internal electrodes; *Ch*, chimney;
CW, cotton wool; *a* and *f*, air and fuel;
Fl, flame.

図 2-4 Jagger's⁽⁷⁾の実験装置概略図

(定常予混合火炎)

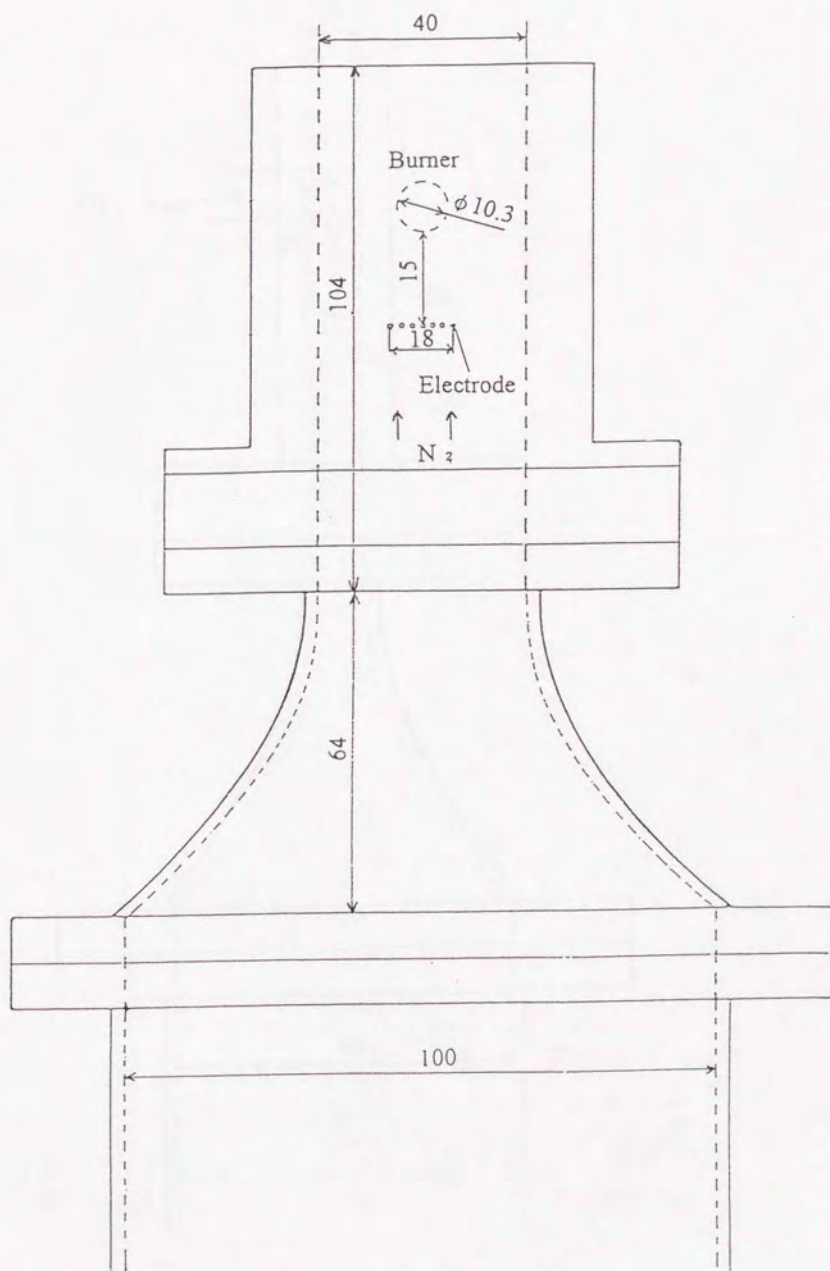


图 3-1 对向流予混合火灾实验装置概略图 (正面)

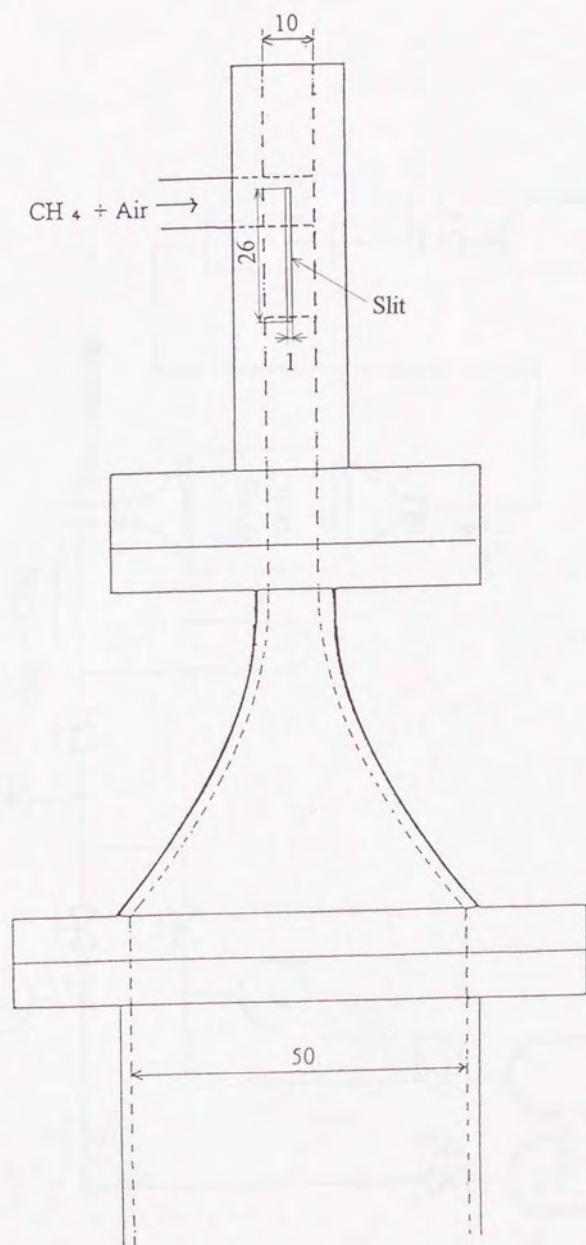


图 3-2 对向流予混合火炎実験装置概略図 (側面)

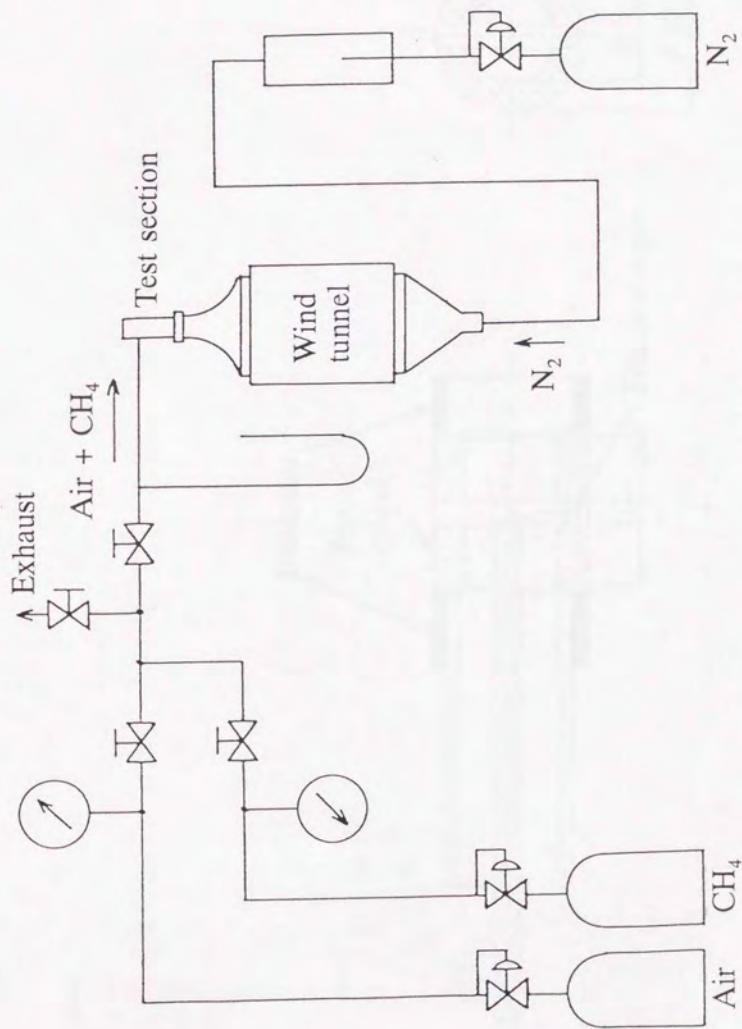


図 3-3 メタン-空気予混合気・窒素供給系

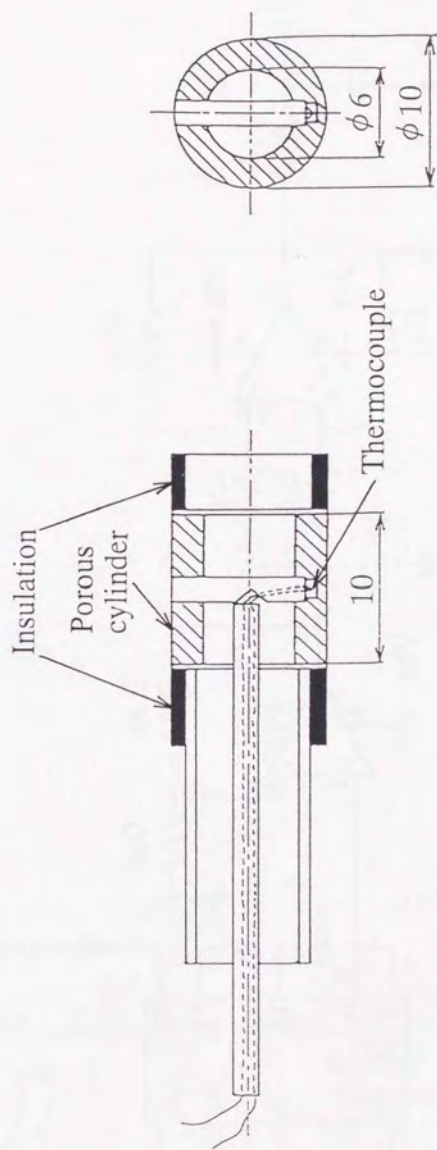


図 3-4 円筒バーナ断面図

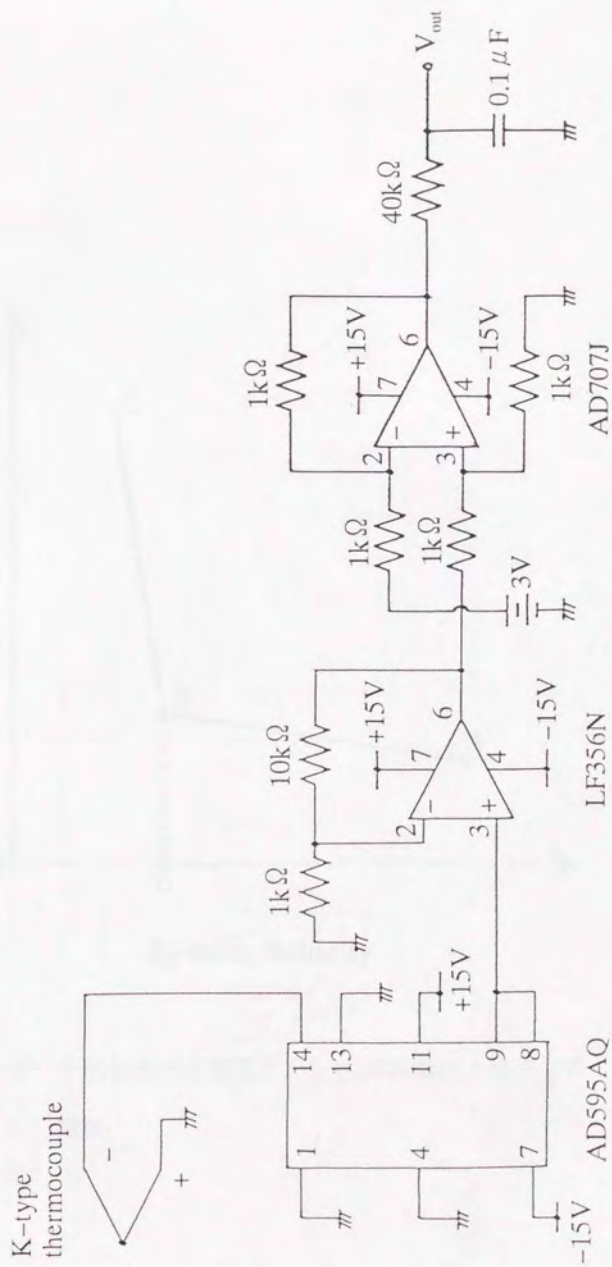


図 3-5 熱電対用アンプ回路図

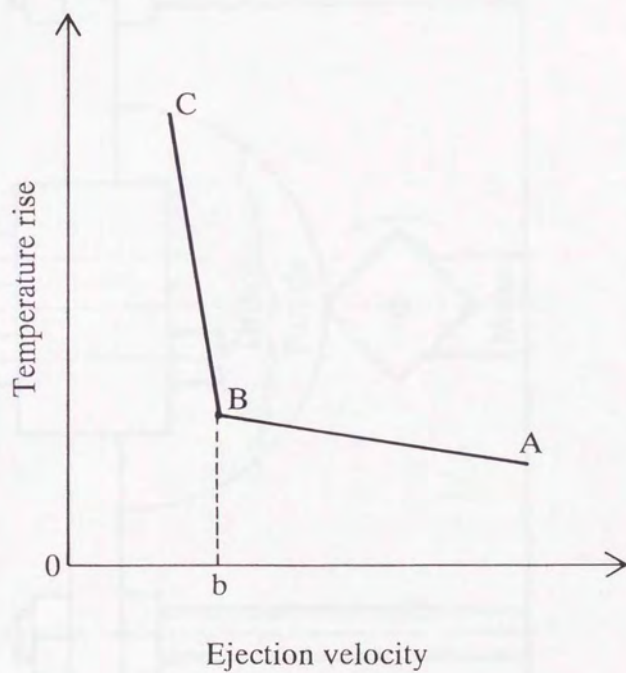


図 3-6 予混合気吹出速度とバーナ表面温度上昇率との
関係

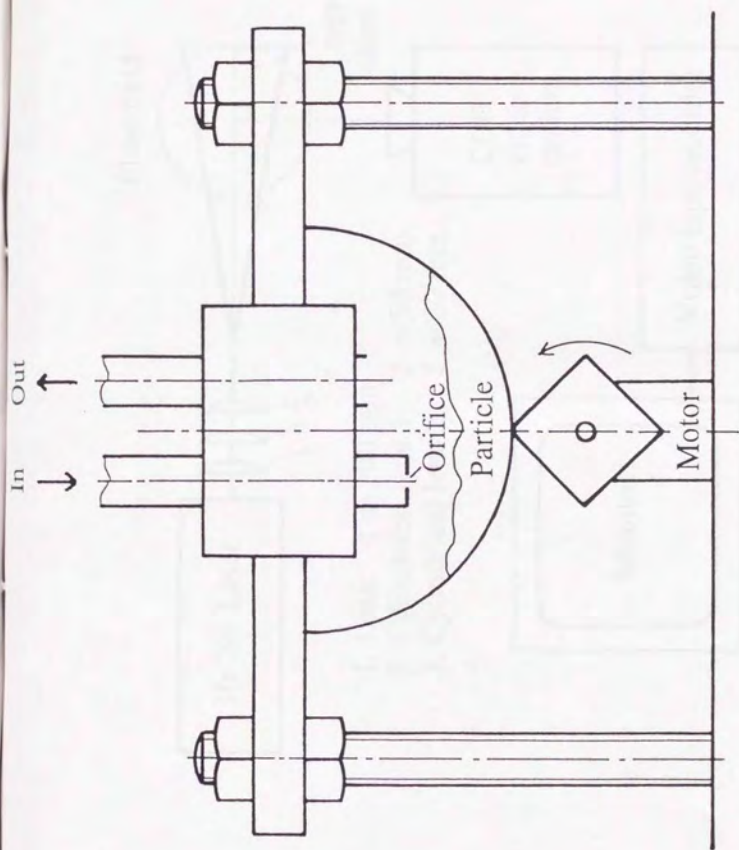


图 3-7 粒子混合機

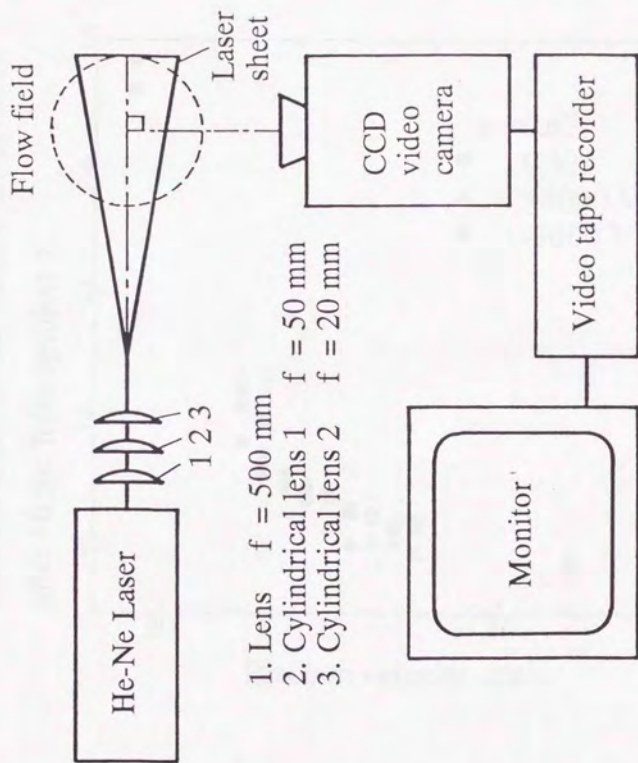


図 3 - 8 流れの可視化の測定系

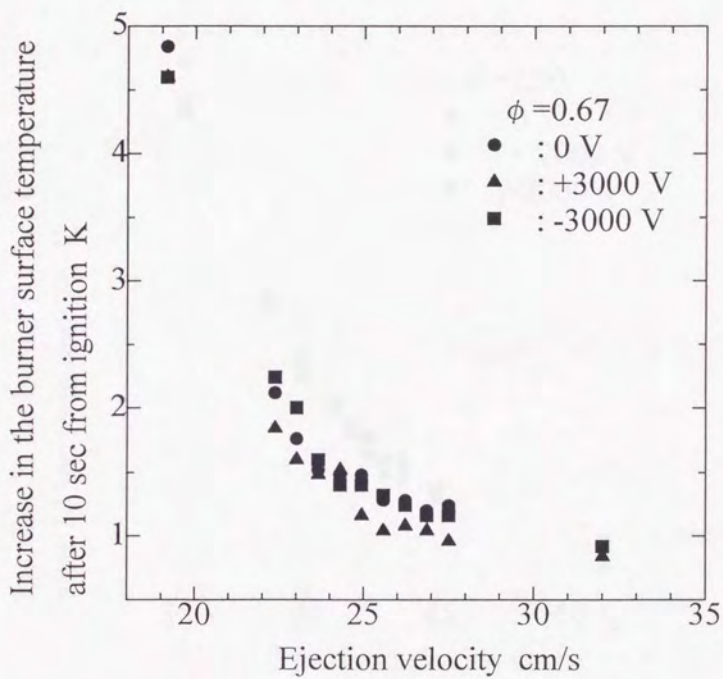


図 3 - 9 吹出速度とバーナ表面の温度上昇率との関係

($\phi = 0.67$)

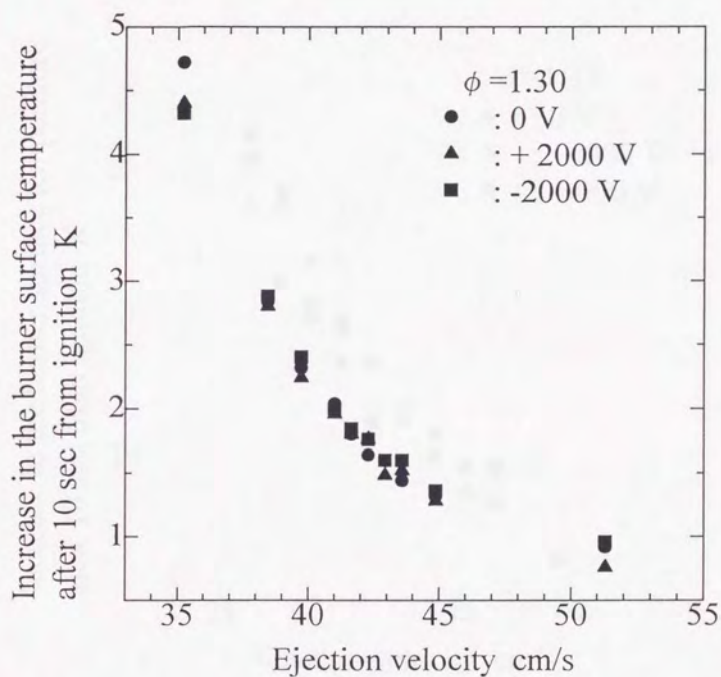


図 3 - 1 0 吹出速度とバーナ表面の温度上昇率との関係

($\phi = 1.30$)

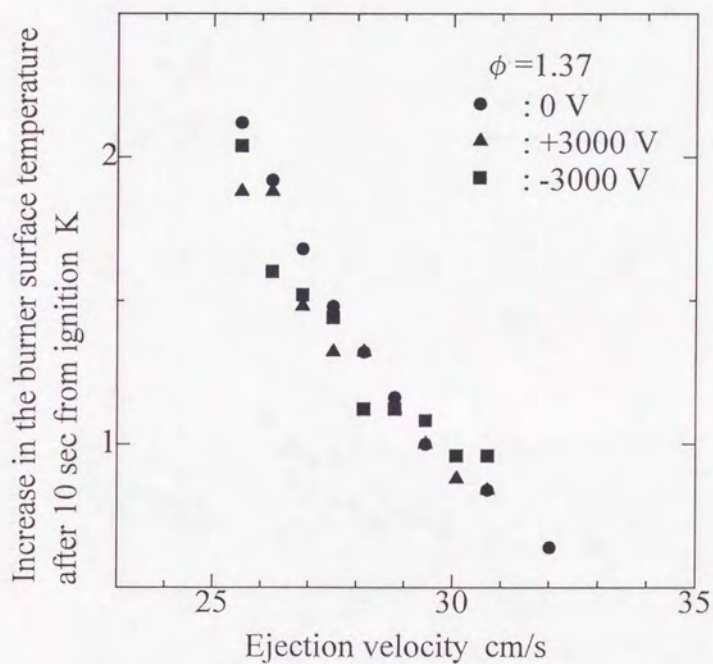


図 3-11 吹出速度とバーナ表面の温度上昇率との関係

($\phi = 1.37$)

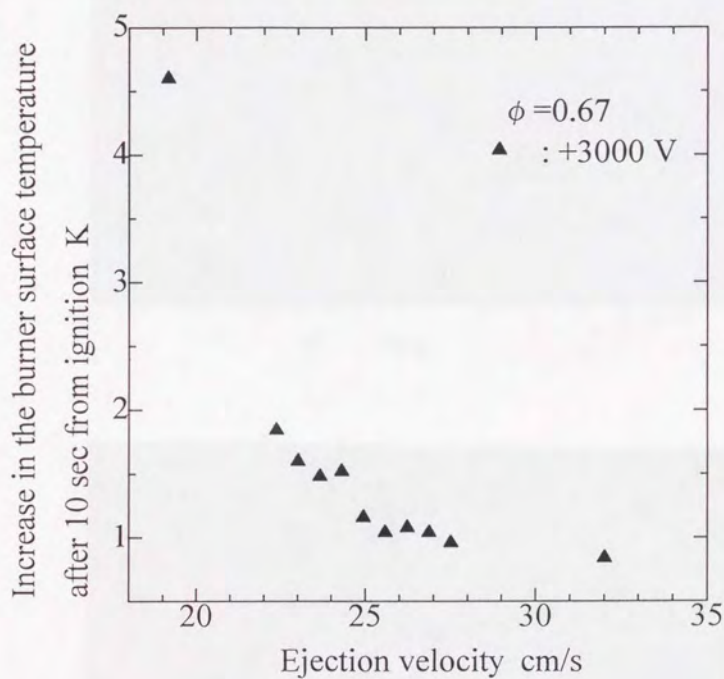
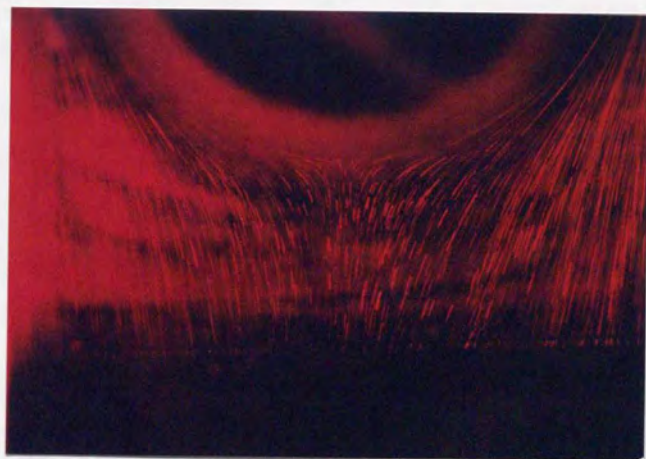


図 3-12 吹出速度とバーナ表面の温度上昇率との関係

($\phi = 0.67$, 電極 + 2000 V)



0 V



+1000 V

図3-13-A 流れ場1 ($\phi=1.3$)



0 V



+2500 V

図3-13-B 流れ場2 ($\phi=1.3$)



+2500V



-2500V

図3-13-C 流れ場3 ($\phi=1.3$)

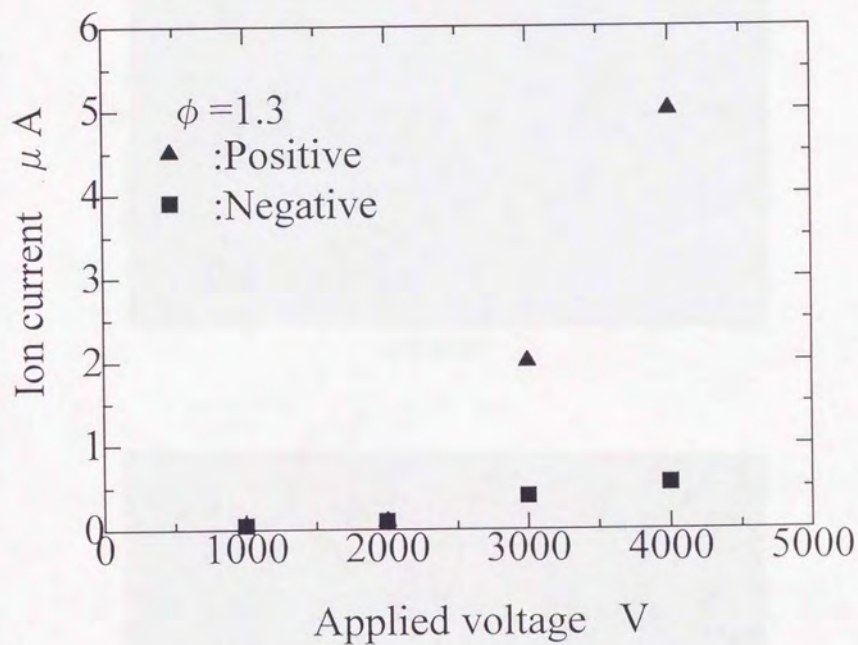


図 3-13-D イオン電流と印加電圧との関係



+2500V



-2500V

図3-14 流れ場4 ($\phi=1.3$)

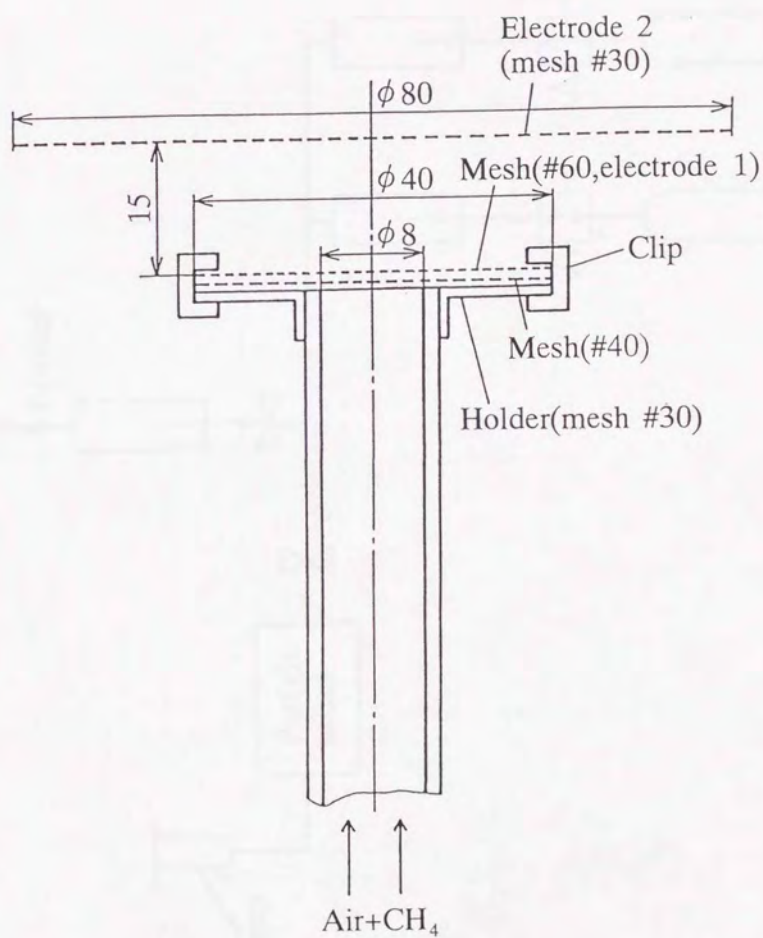


図 3-15 ノズルバーナ

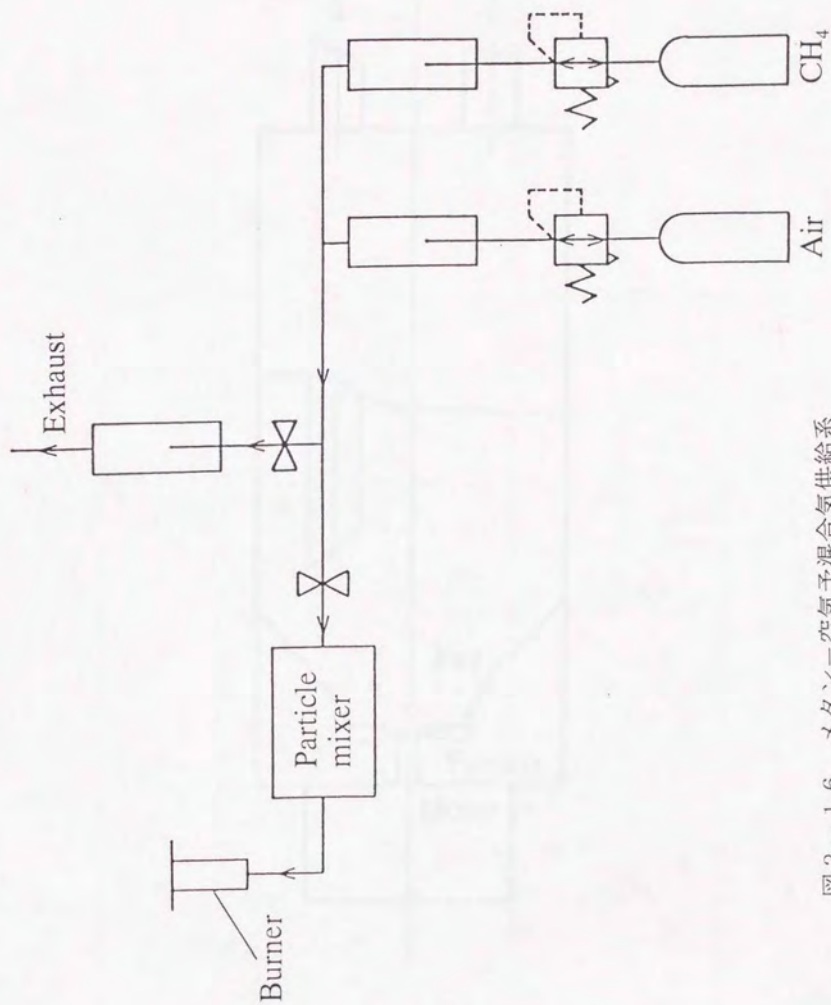


図 3-16 メタン-空気予混合気供給系

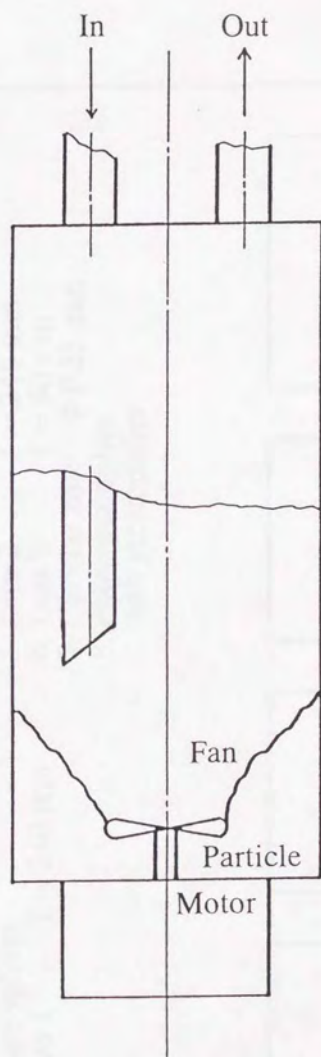


図 3-17 ダスト発生装置

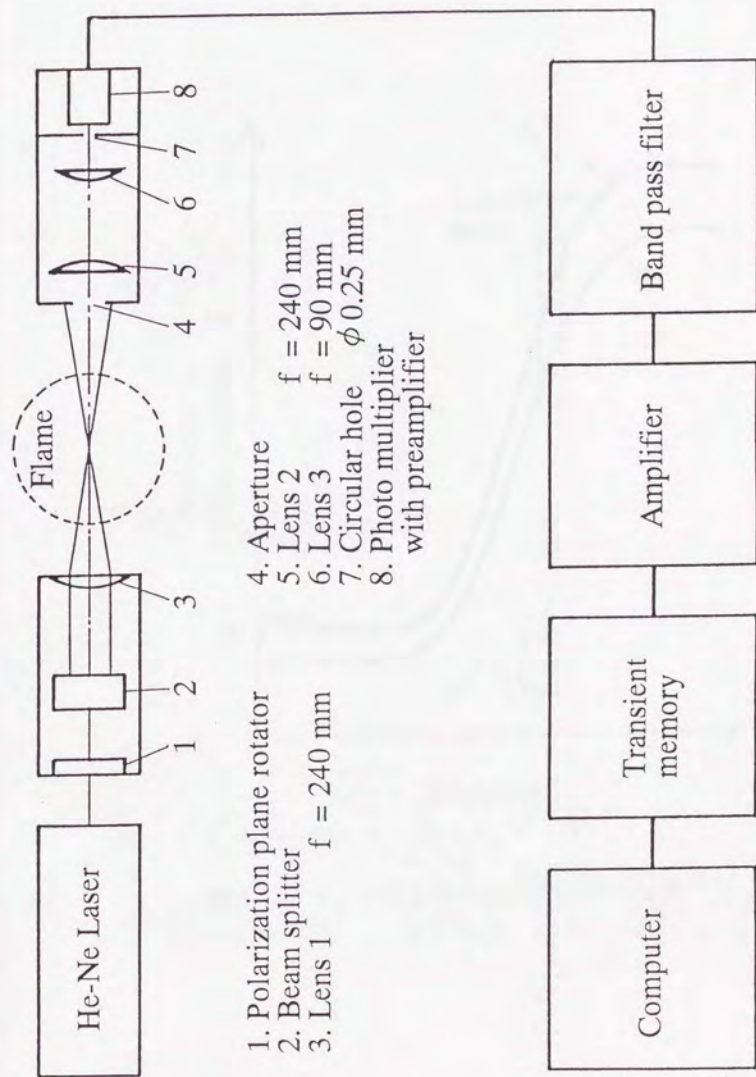


图 3-18 LDV 测定系

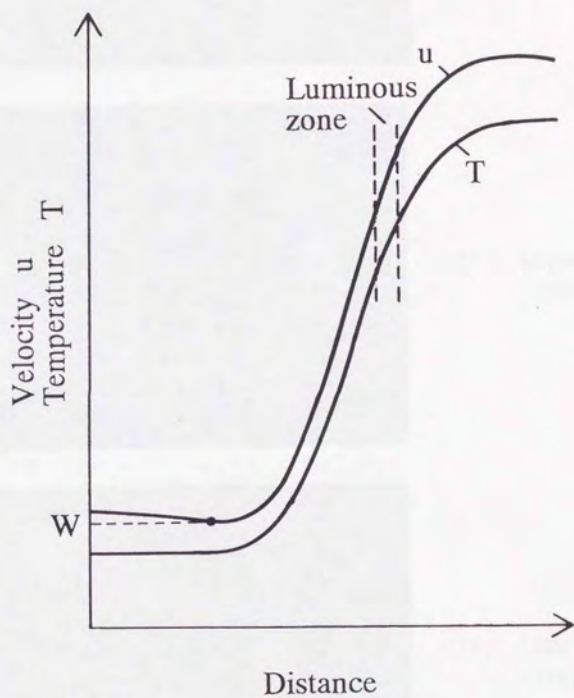
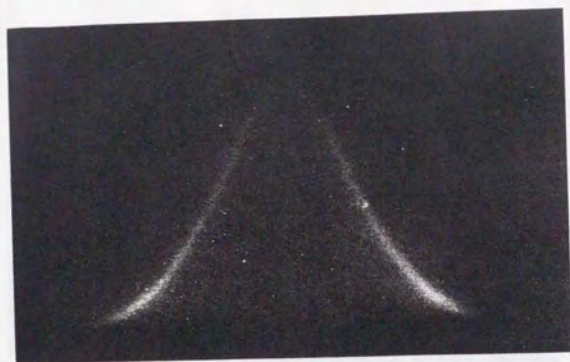
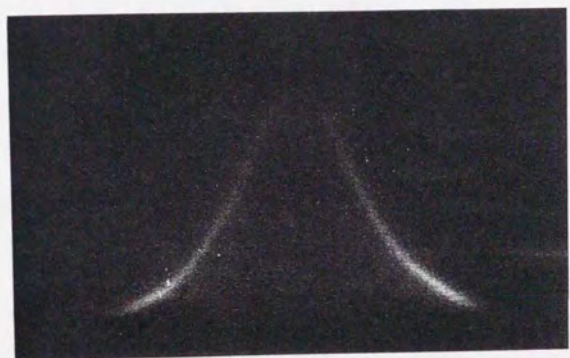


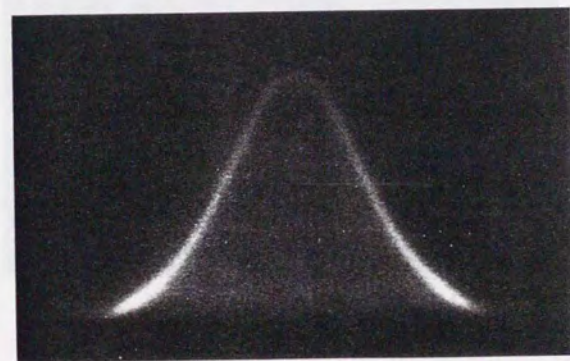
図 3 - 1 9 火炎近傍の温度と流速の分布⁽¹⁰⁾



(a) 0 V

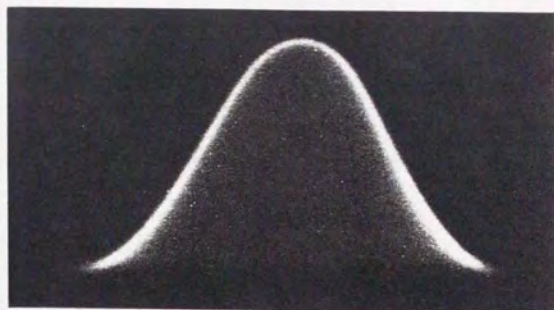


(b) Upper electrode
+2000 V

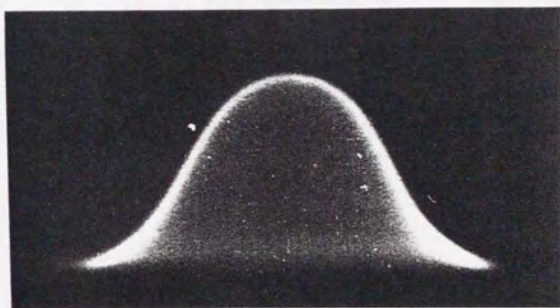


(c) Upper electrode
-3000 V

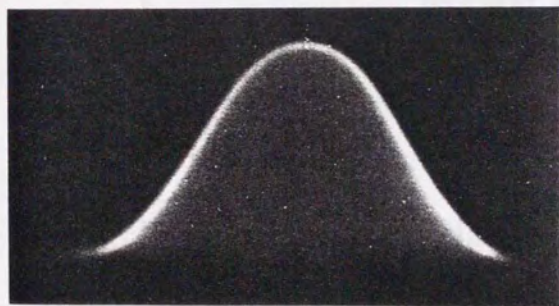
図 3-20 火炎写真 (ノズルバーナ, $\phi = 0.99$)



(a) 0 V



(b) Upper electrode
+3000 V



(c) Upper electrode
-3000 V

図 3-21 火炎写真 (ノズルバーナ, $\phi = 1.32$)

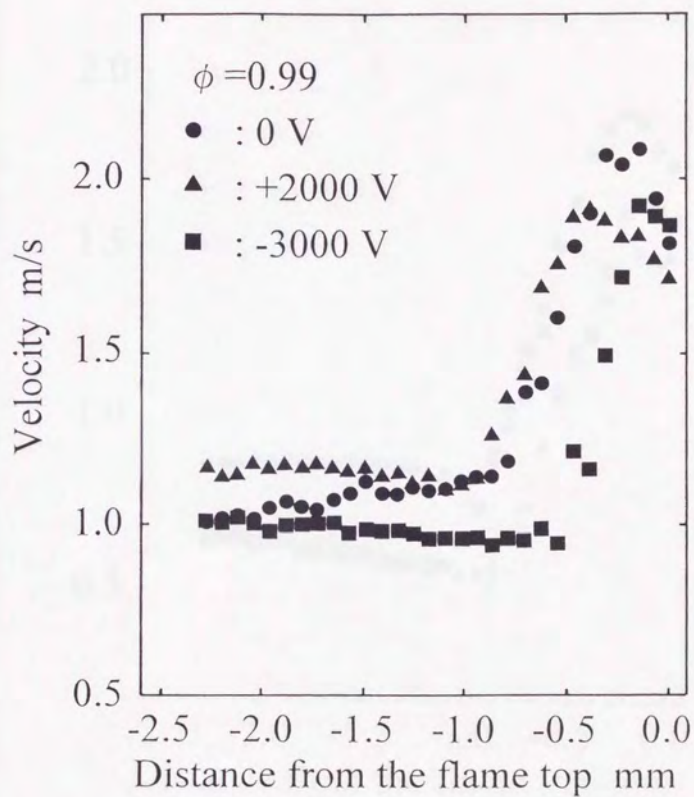


図 3-2-2 流速分布 (ノズルバーナ, $\phi = 0.99$)

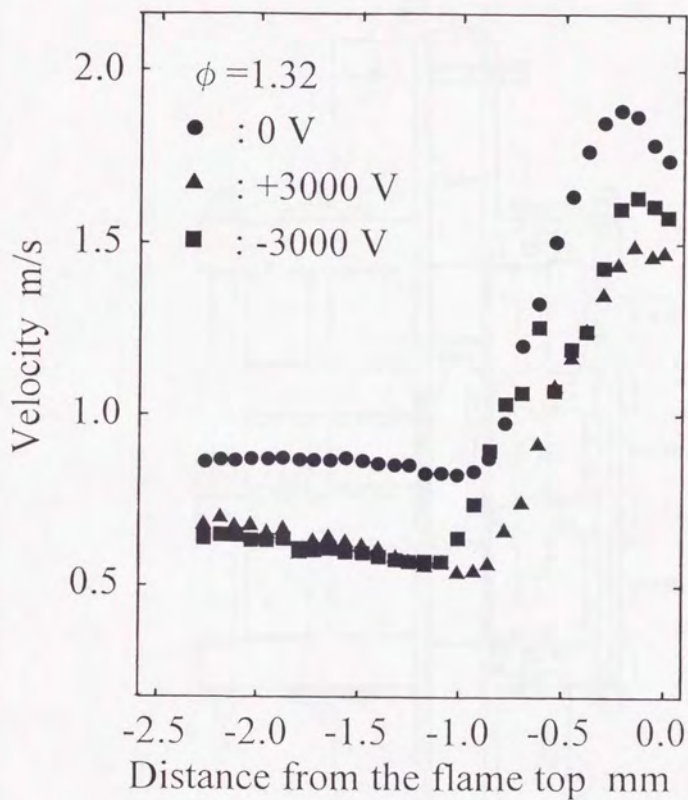


図 3-23 流速分布 (ノズルバーナ, $\phi = 1.32$)

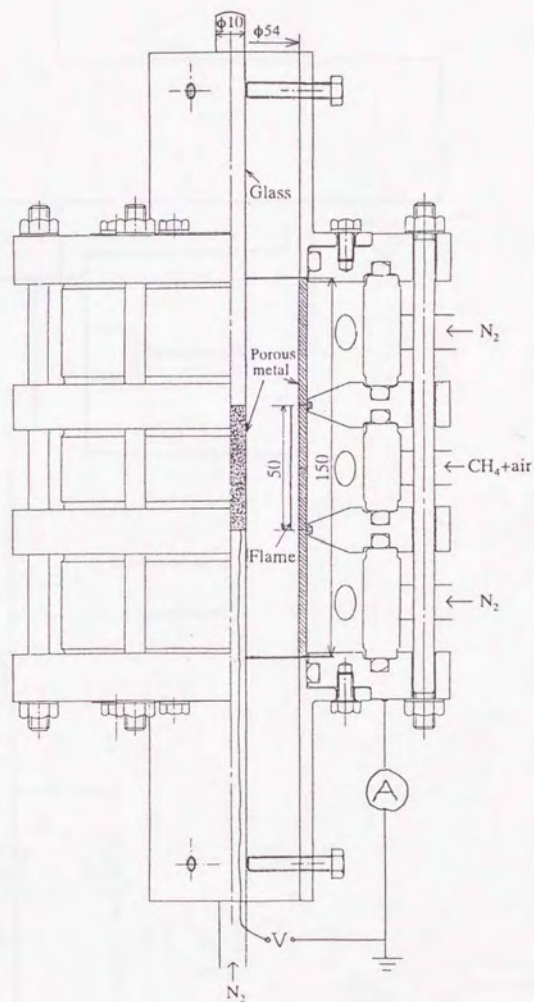


図 4 - 1 円筒火炎バーナ

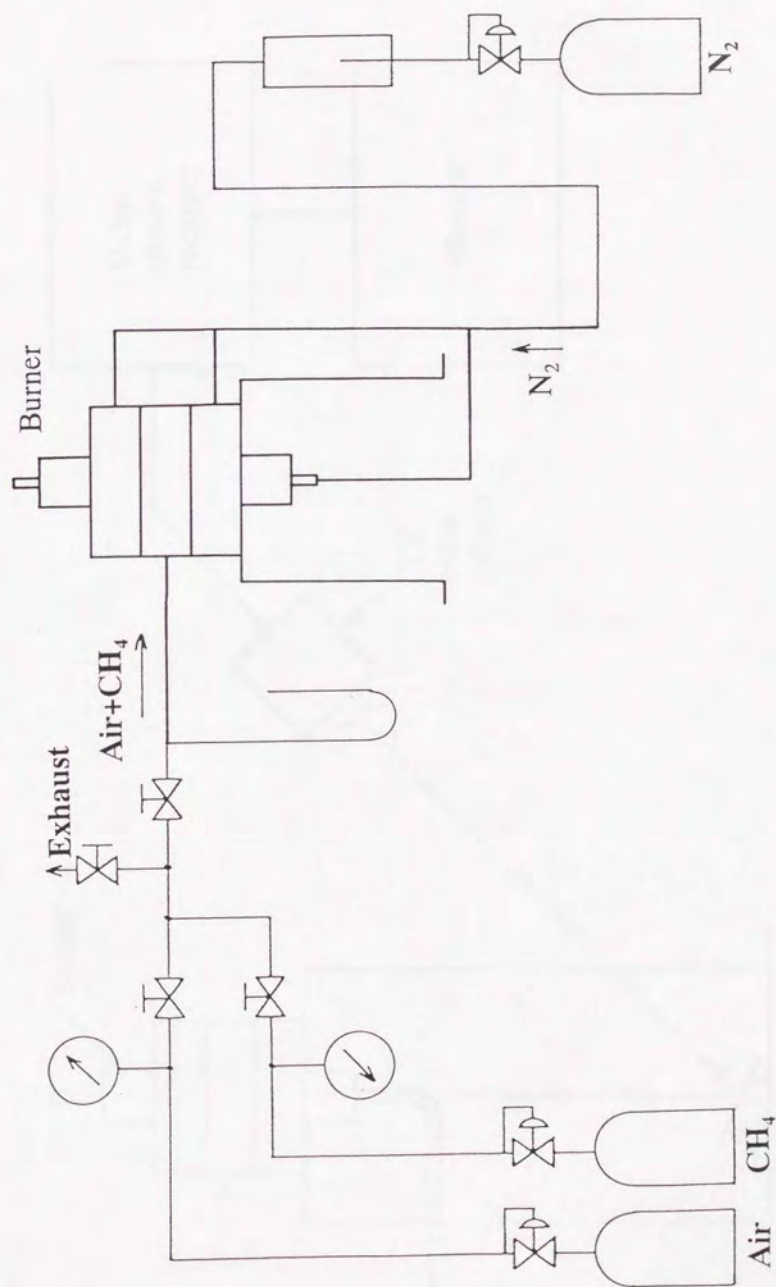


図4-2 メタン-空気混合気・窒素供給系

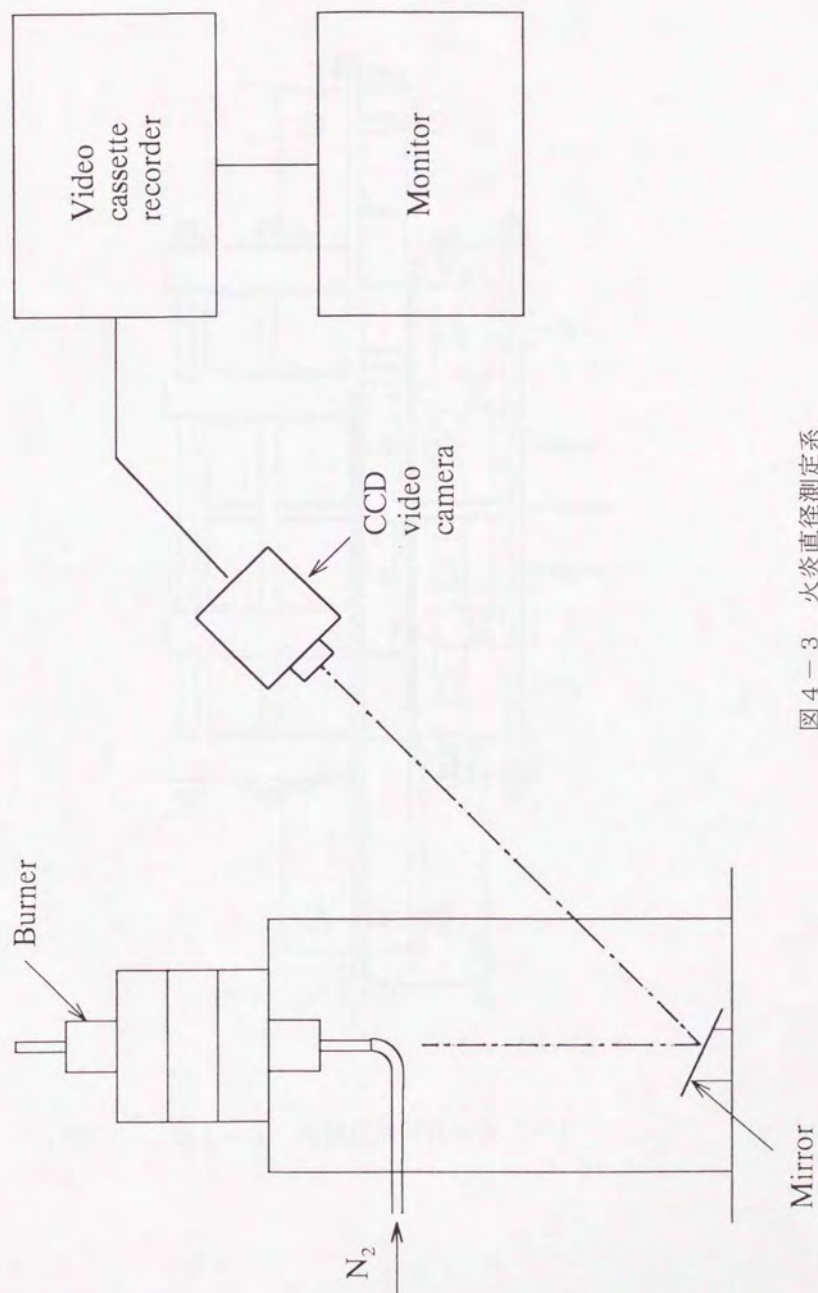


图 4-3 火焰直径测定系

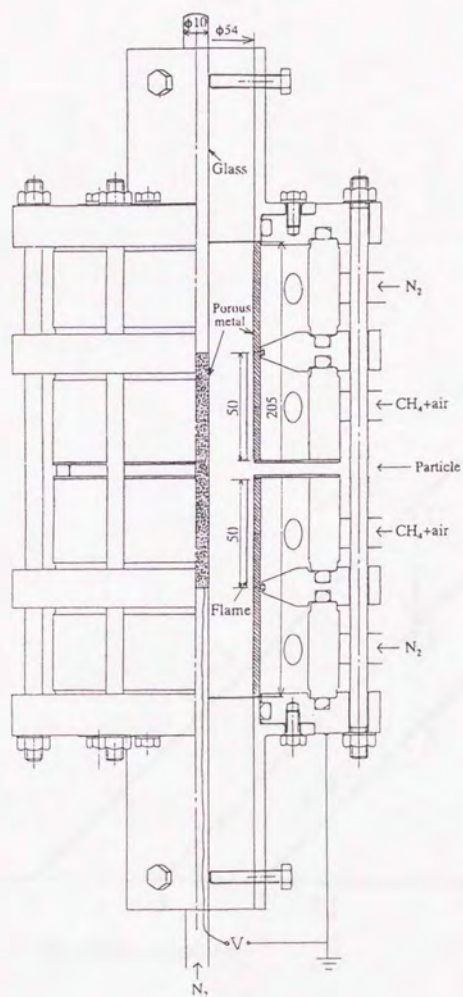


図 4-4 可視化用円筒火炎バーナ

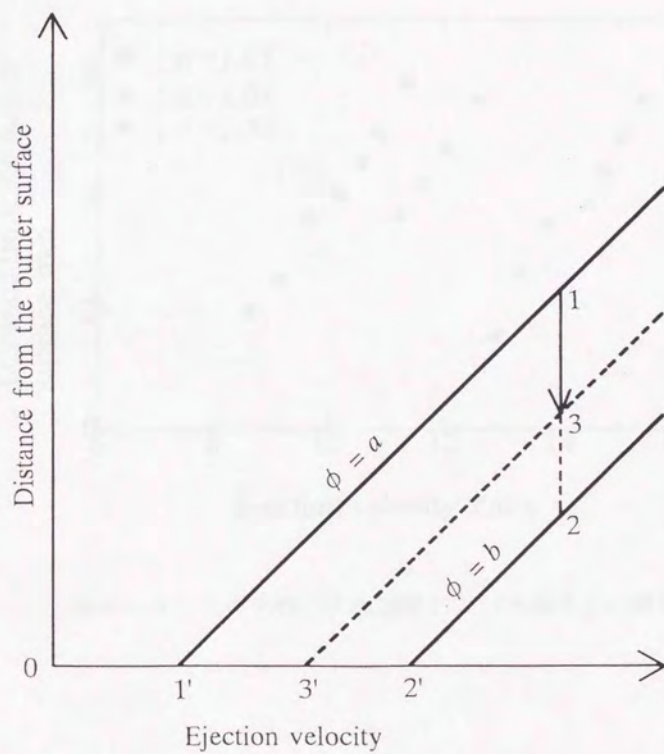


図 4 - 5 燃焼速度の変化の評価方法概念図

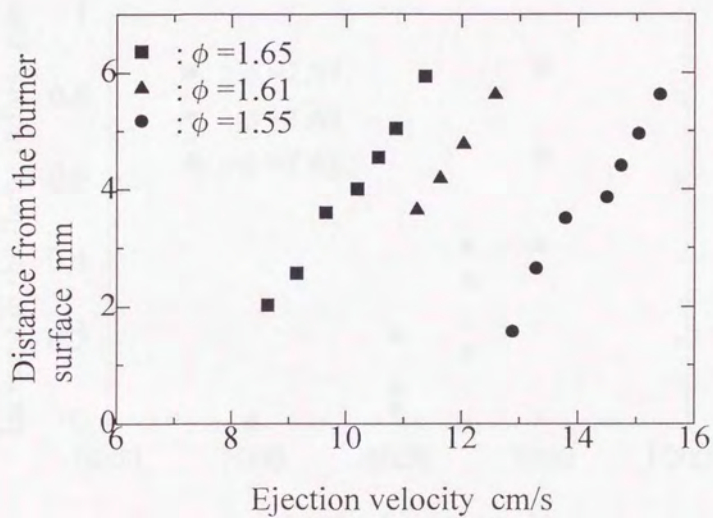


図 4-6 火炎半径と吹出速度および当量比との関係

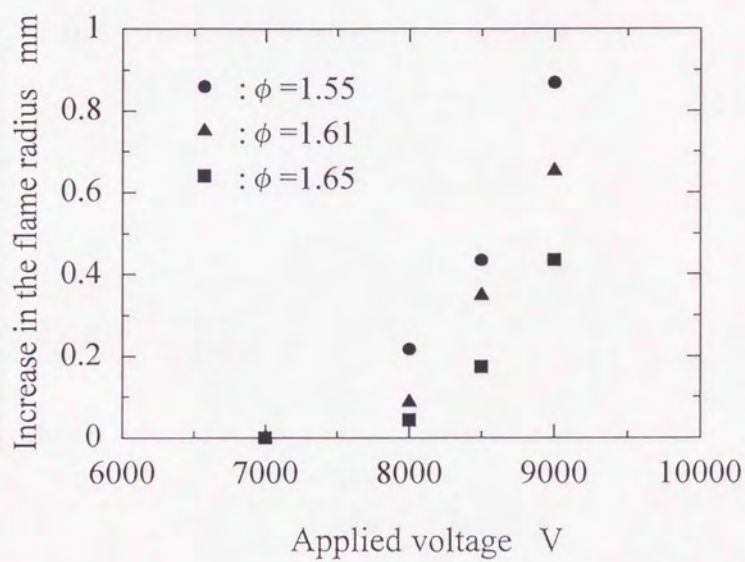


図 5-1 火炎直径の変化

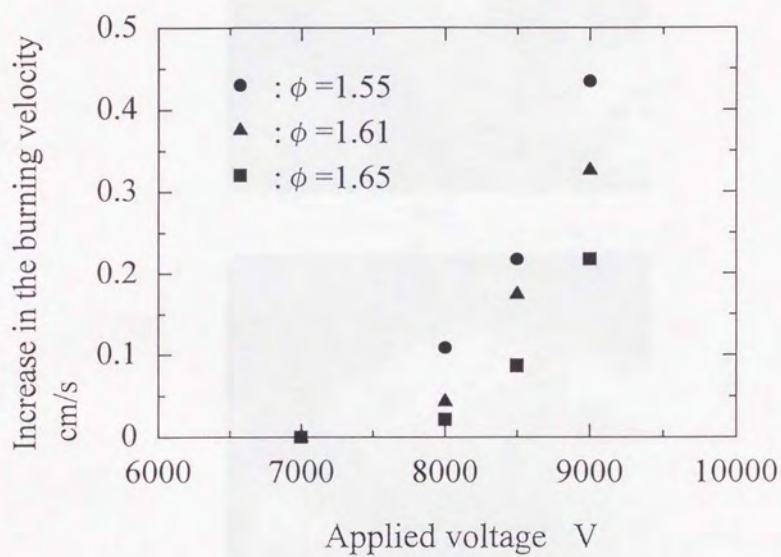


図 5 - 2 燃焼速度の変化



0 V



-8500 V

図5-3-A 流れの様子1 ($\phi = 1.65$)



0 V



+8500 V

図5-3-B 流れの様子2 ($\phi = 1.65$)

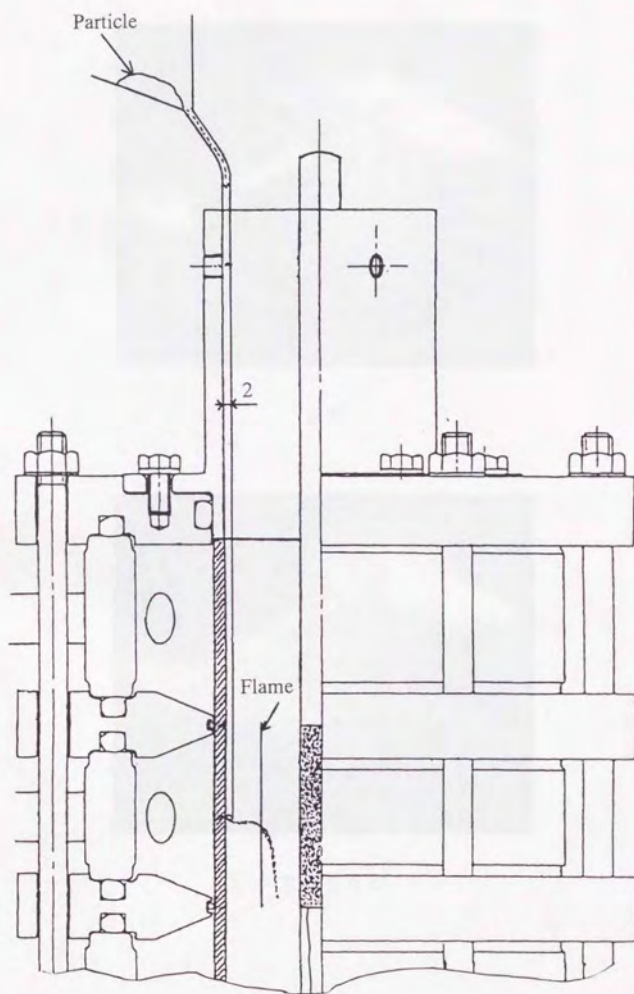


圖 5 - 4 - A 可視化裝置



0 V



+8000 V

図5-4-B 流れの様子3 ($\phi=1.65$)
(破線は火炎の位置)



0 V



-8000 V

図5-4-C 流れの様子4 ($\phi = 1.65$)
(破線は火炎の位置)

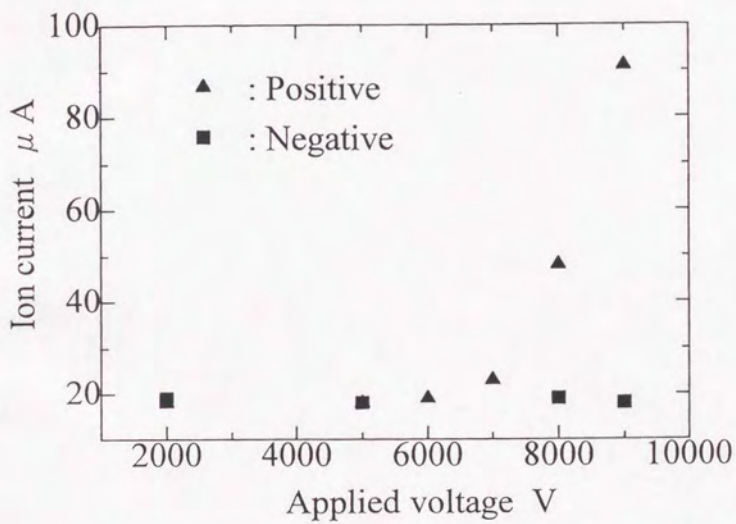


図 5 - 5 イオン電流 ($\phi = 1.65$)

