

可燃性物質表面に沿って燃え広がる  
火炎の伝ば機構に関する研究

博士論文

東京大学大学院 工学系 研究科  
化学システム専攻 八島 正明

可燃性物質表面に沿って燃え広がる  
火炎の伝ば機構に関する研究

博士論文

東京大学大学院工学系研究科  
化学システム工学専攻 八島正明

目 次	頁
第1章 序論 .....	1
1. 1 はじめに .....	1
1.1.1 炎の危険性 .....	1
1.1.2 火災と燃え燃え拡がり現象 .....	2
1. 2 燃え拡がりに関するこれまでの研究 .....	3
1.2.1 固体表面に沿った燃え拡がりに関する総説 .....	4
1.2.2 液体表面に沿った燃え拡がりに関する総説 .....	5
1. 3 本研究の目的 .....	7
第2章 各実験に共通する実験装置と各実験の概要 .....	11
2. 1 実験概要 .....	11
2.1.1 実験の考え方 .....	11
2.1.2 実験装置の要件 .....	12
2.1.3 使用した可燃性物質とその性質 .....	13
2.1.4 実験計画 .....	17
2. 2 実験装置本体および測定方法 .....	18
2.2.1 可燃性物質移動装置 .....	18
2.2.2 制御回路と移動速度測定 .....	19
2.2.3 観測装置 .....	19
2.2.4 流れの可視化方法 .....	20
2.2.5 火炎先端位置の測定 .....	21
2. 3 可燃性物質の移動 .....	22
2.3.1 静止座標と移動座標 .....	22
2.3.2 速度変化 .....	23
2.3.3 計算による境界層発達予測 .....	23
第3章 PMMA片移動時の火炎先端の挙動 .....	35
3. 1 実験概要 .....	35
3. 2 実験装置および方法 .....	35
3.2.1 可燃性物質 .....	35
3.2.2 可燃性物質固定装置 .....	35
3.2.3 質量減少速度 .....	36
3.2.4 実験手順 .....	36
3. 3 実験結果および考察 .....	36
3.3.1 火炎先端の挙動 .....	36
3.3.2 試料長さの影響 .....	40

3.3.3	火炎先端に相対する流れ	41
3.3.4	火炎先端位置の変化と火炎先端の性質	42
3.4	まとめ	45
第4章	可燃性液体の入った容器移動時の火炎先端の挙動	53
4.1	実験概要	53
4.2	実験装置および方法	55
4.2.1	可燃性液体	55
4.2.2	小型容器	55
4.2.3	静止時の質量燃焼速度の測定	56
4.2.4	実験手順	56
4.3	実験結果および考察	57
4.3.1	静止時における質量燃焼速度	57
4.3.2	静止時の火炎先端の形成位置の変化	57
4.3.3	容器移動時の火炎先端の挙動	59
4.3.4	可燃性気体の供給と火炎の伝ば	61
4.3.5	火炎先端の性質と伝ば性	65
4.4	まとめ	66
第5章	可燃性気体吹き出し領域の移動と火炎先端の挙動	79
5.1	実験概要	79
5.2	実験装置および実験方法	79
5.2.1	可燃性気体	79
5.2.2	燃焼器	79
5.2.3	可燃性気体の供給系統	80
5.2.4	未燃焼時の吹き出し流速分布	80
5.2.5	実験手順	81
5.3	実験結果および考察	81
5.3.1	静止時の火炎先端の挙動	81
5.3.2	吹き出し領域移動時の火炎先端の挙動 (可燃性気体のみの場合)	82
5.3.3	吹き出し領域移動時の火炎先端の挙動 (予混合気の場合)	84
5.3.4	火炎先端付近の流れの場と火炎先端の保持	85
5.3.5	拡散火炎の吹き飛び、消炎限界	87
5.3.6	火炎先端付近の物質拡散に関する特性時間	89
5.3.7	移動時の火炎先端の性質	90
5.4	まとめ	91

第6章 伝ば火炎の可燃性物質移動への追従性 .....	107
6.1 凝縮相内の熱移動 .....	107
6.2 実験装置および方法 .....	108
6.2.1 可燃性固体と固定装置 .....	108
6.2.2 可燃性液体と容器 .....	109
6.2.3 実験手順 .....	109
6.3 可燃性固体を移動させた場合の実験結果および考察 .....	110
6.3.1 試料厚さと燃え拡がり速度 .....	110
6.3.2 静止時の気相の流れ場 .....	110
6.3.3 ろ紙移動時の火炎先端の挙動 .....	111
6.3.4 PMMA板移動時の火炎先端の挙動 .....	111
6.3.5 火炎先端の安定性 .....	112
6.3.6 追従性に対する気相と凝縮相の関係 .....	113
6.4 可燃性液体容器槽を移動させた場合の実験結果および考察 .....	116
6.4.1 初期温度と燃え拡がり速度 .....	116
6.4.2 容器静止時の液相内の流れ場 .....	117
6.4.3 容器移動時の火炎先端の挙動 .....	118
6.4.4 ガラスビーズ層に浸潤させた場合 .....	121
6.4.5 凝縮相内の熱移動の影響 .....	122
6.5 まとめ .....	123
第7章 火炎先端付近の数値解析 .....	145
7.1 概要 .....	145
7.2 解析方法 .....	145
7.2.1 解析対象と解析モデル .....	145
7.2.2 基礎式 .....	146
7.2.3 境界条件 .....	147
7.2.4 火炎面モデル .....	148
7.2.5 物性値の簡略化 .....	149
7.2.6 計算例 .....	149
7.2.7 計算領域と計算手順 .....	150
7.3 解析結果および考察 .....	151
7.3.1 酸化剤流れの対向速度と火炎先端位置の変化 .....	151
7.3.2 濃度変化と火炎先端位置の変化 .....	152
7.3.3 気化領域の移動と火炎先端の移動 .....	152
7.4 まとめ .....	153
第8章 火炎の伝ば機構 .....	158
8.1 火炎先端の気化領域移動への追従性 .....	158
8.2 火炎先端の挙動と安定性 .....	158

8. 3	火炎先端への可燃性気体の供給	159
8. 4	濃度変化と火炎先端位置の変化	161
8. 5	火炎先端の性質と伝ば機構	162
8. 6	可燃性気体の供給速度と燃え拡がり速度	163
8. 7	伝ば機構の適用	164
第9章 総括		166
謝辞		172
参考文献		174
図表番号		190
付録(1) 燃え拡がりに関するこれまでの研究		193
1.	固体表面に沿った燃え拡がり・燃焼に関する研究	193
2.	液体表面に沿った燃え拡がり・燃焼に関する研究	222
3.	不均一濃度場における火炎の伝ばに関する研究	233
4.	可燃性物質表面上の拡散火炎に関する研究	235
付録(2) 制御回路		242
付録(3) 移動速度の測定方法		244
付録(4) 物性値の評価法		247

## 記号表

$B$	: Spaldingの物質伝達係数 (第4章)
$d$	: 可燃性物質の厚さ、または、ガラスビーズの粒径
$D$	: 分子の拡散速度
$L$	: 可燃性物質の長さ
$Le$	: ルイス数 (分子拡散速度/温度拡散速度)
$L_m$	: マノメータの液柱高さ
$L_p$	: 平板の長さ
$m$	: 質量
$\dot{m}$	: 質量の時間変化 (単位面積、時間あたりの質量 = $\rho v$ )
$P_f$	: 火炎先端の位置 ( $x_f, y_f$ )
$Q$	: 供給流量
$Re$	: レイノルズ数 (速度・代表長さ/動粘性係数), 対向する酸化剤気流速度を基準にした場合 (第7章)
$Re_w$	: 可燃性気体吹き出しを基準にした場合のレイノルズ数 $V_w L_p / \nu_f$ (第7章) あるいは、 $V_w L / \nu_f$
$t$	: 経過時間
$T$	: 温度
$T_i$	: 液体の初期温度
$U_0$	: 対向気流速度
$V$	: 可燃性物質の移動速度 (時間変化含む)
$V_{max}$	: 可燃性物質の移動速度 (= $V_T$ )
$V_T$	: 可燃性物質の移動速度 (時間によらず一定速度)
$V_F$	: 火炎先端の移動速度 (燃え拡がり速度)
$V_w$	: 可燃性気体の吹き出し速度。可燃性予混合気体の吹き出し速度 (第5章)
$V_{0.5}$	: 吹き出し領域中央の速度 (第5章)
$V_{F0}$	: 静止時の可燃性物質表面に沿った燃え拡がり速度
$V_{FT}$	: 可燃性物質移動時の物質表面上の火炎先端の移動速度 (移動座標系)
$W$	: 可燃性物質の幅 (観測方向から見て、奥行き方向)
$x$	: 可燃性物質表面上の水平距離 (移動座標系)
$x_f$	: 火炎先端の水平距離
$X$	: 火炎先端の静止空間中の移動距離 (静止・絶対座標系)
$y$	: 可燃性物質表面からの垂直距離 (移動座標系)
$y_f$	: 火炎先端の垂直距離
$Y$	: 火炎先端の静止空間中の移動距離 (静止・絶対座標系), 濃度の一般表記

- $Y_F$  : 可燃性気体の質量分率  
 $Y_{Fw}$  : 吹き出し表面における可燃性気体の質量分率  
 $Y_0$  : 酸化剤の質量分率  
 $Y_I$  : 不活性気体の質量分率  
 $Y_P$  : 燃焼生成物の質量分率  
 $\alpha$  : 第7章で定義  
 $\beta$  : 第7章で定義  
 $\gamma$  : 第7章で定義  
 $\delta$  : 可視火炎帯の厚さ  
 $\Delta$  : 差を表す一般表記  
 $\Delta x$  :  $\Delta t$  時間における火炎先端の移動距離  
 $\Delta t$  : 時間間隔  
 $\Delta Y$  : 濃度差  
 $\theta$  : 第7章で定義  
 $\theta_f$  : 火炎先端付近の物質表面との角度  
 $\nu$  : 動粘性係数  
 $\nu_f$  : 可燃性気体の動粘性係数  
 $\rho$  : 密度  
 $\rho_f$  : 可燃性気体の密度  
 $\Phi$  : 当量比  
 $\psi$  : 流れ関数  
 $\omega$  : 渦度

添字

- $i$  : 初期状態に関するもの,  $i$  化学種 (第7章)  
 $f$  : 火炎に関するもの, 可燃性気体に関するもの  
 $F$  : 火炎に関するもの, 可燃性気体に関するもの  
 $w$  : 表面に関するもの  
 $o$  : 静止時に関するもの, 酸化剤に関するもの  
 $T$  : 可燃性物質移動時に関するもの

## 第1章 序論

### 1. 1 はじめに

#### 1. 1. 1 炎の危険性

火、炎。まだ知識をもたない幼児が、初めて炎を間近に見た場合、炎というものが周囲を明るくし、暖かくするものであることを肌で感じとるであろう。それとともに、好奇心から、炎に触ろうとしても、それが難しい行為であることを体験的にすぐ理解することになる。つまり、炎は、手で触るには、あまりに熱すぎるからである。結果的には、炎とは恐いものであることを、やけどという形で肌で理解するか、あるいは、火遊びにより、炎が意図しない振る舞いをして驚がくしたという形で理解することになるであろう。

我々は、社会生活を営むほどに知識を備えていても、炎は恐いもので、危険であるという認識を、本能的に持っているのではないと思われる。これは、おそらく動物も同様であり、太古の昔から続く、炎に対する人間の認識の一つに違いない。さらに、炎が非常に魅力的な性質を持っていることを、やはり本能的に認識しているのではないと思われる。熱エネルギーを得るための炎には、光源、熱源としての実用的な価値があり、さらに、宗教儀式、精神などにおいてさえも、価値を見いだすことができる。炎には、人を惹きつける魅力がある。例えば、暗がりでの灯火が、視界を確保する役割を果たすとともに、暗がりであるがゆえの不安から開放されるという、精神を安定させる役割を果たすことを、我々は、体験的に理解している。このような炎に対する二つの認識である恐怖と魅力が、お互いに結びつかないように感じられるが、炎とともに昔から使われてきた刃物の例でたとえるならば、よく理解できるであろう。刃物には、道具としての実用性、緊張感があり、妖しい魅力を感じるものである。

ところで、人間は、危険性を感じつつも、その魅力ゆえ、炎を利用することを覚えた。利用には、火を着けるという作業と、消すという作業も含まれる。つまり、炎の利用とは、自然発生的であった燃焼反応を制御し、炎を適宜使用するということである。このような“火の利用”は、文明の創出に大きく関わっていると言われる。時代を経るとともに炎が頻繁に使われるようになり、19世紀中頃からの産業革命、火薬の発明に代表されるように、炎の利用が社会生活の転換点

に大きく介在していることは確かなようである。人間は今日まで、まだ完全とは言えないが、炎を使いこなせるようになった。”火の利用”は、自然征服の一つ、つまり、自然現象の一つである燃焼反応の制御が、不完全ではあるが、可能になったということである。これは、制御も予知すらもできない多く自然現象を対象とした挑戦のなかでは、画期的なことである。

炎を有効利用するすべを知って、種々の燃焼形態を開発し、社会は確実に発展してきたことは周知の事実である。このような積極的な、利用とは逆に、炎を利用するということを本来の目的とせずとも、予期せぬ時に燃焼反応が起こってしまったことも少なくない。社会の発展が、マイナスの側面として、災害という犠牲を払ってきたからこそ、現在の社会があるということに注意しなければならない。爆発、火災さらに燃焼生成ガスの発生などは、被害をもたらすものであるため、結果的には災害に至ることが多い。

近年、器具・装置内で燃焼させることが多くなり、炎が視覚外に置かれるため、我々は本能的に危険性を感じるものが少なくなったように思われる。災害という結果が生じ、改めて、炎の恐さを知るのが現代人である。

### 1. 1. 2 火災と燃え拡がり現象

災害の一つの火災は、可燃性物質で構成される家屋・建造物、森林、乗り物など構造物において発生し、つまるところ、身近で起こり得るものである(表1-2)。火災といった問題には、多くの研究がなされてきた[236]。火災時の炎を大局的にとらえ、実験事実を経験則で整理し、実務的に種々の火災に対応する場合や、燃焼の基礎研究として、局所的にその動きをとらえ現象を説明する場合、さらには数学的なモデル計算から火災を研究する場合などがある。

一般的な家屋における室火災には、特徴的な経過が見られる[231]。可燃性物質となんらかの着火源が存在し、火が着いた後、火災の初期、成長期、火盛期、終期と分けられる(図1-1)。危険性が最も高いのは火盛期であるが、その時期に遷移する前に何等かの処置を施すことで、拡大の抑制、消火の効果が期待でき、被害は最小限に抑えられる。燃え拡がりとは、可燃性物質に沿って火炎が移動(伝ば)する現象を指す。成長期は拡大時期とも呼ばれ、火炎からの輻射、対流、伝導の熱移動により、未燃焼の可燃性物質が予熱され、燃え拡がりが進行する状

態にある。このときの火炎先端付近の様子概略は、図2-1に示したように、火炎の伝ばとともに、火炎前方の未燃焼凝縮相内を通した熱移動と気化領域の移動が見られる。

次節では、過去にどのような燃え拡がりに関わる研究がなされてきたかを調査した結果を列挙し、燃え拡がり研究を遂行する上での問題点の検討を行った。

## 1.2 燃え拡がりに関するこれまでの研究

代表的な教科書であるLewisとvon Elbeの教科書 [238]、Williamsの教科書(第1版) [240]などは、燃焼学に関する知識を得るためによく読まれてきた。しかし、これらの(古い時代の)教科書からは燃え拡がり (FLAME SPREAD) という項目を見いだすことはできない。Williamsの第2版 [241] は、初版から20年後の1985年に出版されたものであるが、大幅な加筆とともに、新しい研究を取り上げ、燃え拡がりに関する項目を設けている。燃え拡がりが、燃焼学という学問体系のなかで明確な位置づけをなされるようになったということである。日本国内でも、疋田と秋田の教科書 [235] には、固体、液体の燃焼の形態として燃え拡がり現象が記述されるようになり、平野の教科書 [231] では、燃え拡がり現象をかなり詳しく記述されるまでになっている。

火災に関する教科書 [237] では、燃え拡がりに関する事柄が記述されてはいるが、最近の傾向としては、Drysedale [242]、田中 [236]、Coxら [248] の教科書に特徴的に見られるように、燃え拡がり現象そのものを詳しく記述されるようになってきた。燃え拡がりに関して、これだけの知識が得られる教科書が出されるようになったのは最近のことである。

以上のことからわかるように、燃え拡がりに関する研究は、必要性が高く、盛んに研究がおこなわれ、発展段階にある。

可燃性物質に沿った燃え拡がり現象は、主に凝縮相内の熱伝達機構の相違によって固体と液体に分けられ、研究がおこなわれてきた。そこで、始めにこれまでに燃え拡がりに関する分野で公表されてきた総説(論文)を以下に示し、1.2.2節以降、いくつかの論文を紹介し、1.3節で、本研究を進める上での問題を提起することにした。

なお、燃え拡がりに関係する研究の概要として、固体表面に沿った燃え拡がり・燃焼に関する研究、液体表面に沿った燃え拡がり・燃焼に関する研究、不均一濃度場における火炎の伝ばに関する研究、可燃性物質表面上の拡散火炎に関する研究を付録(1)に示した。

### 1. 2. 1 固体表面に沿った燃え拡がりに関する総説

固体表面に沿った燃え拡がり現象は、代表的な研究者が総説を書いているので、おおよそ理解でき、多くの知見を得ることができるようになってきた [3~14]。

特に驚かされるのは、その分野の研究が日本で早くからおこなわれていたことである。日本では木材家屋が多いこともあり、防火上、燃え拡がり研究が学問として世界的に見てもかなり早い時期からおこなわれていたようである。理化学研究所では、関東大震災以降、燃え拡がり研究へ精力的に取り組み、寺田 [1]、鈴木と金原 [2] が固体表面に沿った燃え拡がり現象を、金原 [128-131] は液面に沿った燃え拡がり現象を詳細に観察している。世界的には、国際燃焼シンポジウムの中で「火災」がテーマとして取り上げられるようになった。1965年、第10回シンポジウムにおいて、Emmons [3] は、その総説の中で、火災研究の中の燃え拡がり研究の位置づけを明確にし、その分野の研究の必要性を説いた。その後、Emmonsの門下生のde Ris [100] が、固体表面に沿った燃え拡がり速度を理論解析により求めたことはよく知られている。

Emmons以後、多くの研究グループが研究成果を上げ、1968年のFriedman [4]、1971年のMagee [5] の頃までには燃え拡がりの基本的な様相が把握され、代表的な燃え拡がり速度の理論式が導出されている。Sirignano [6] は、液体と固体の燃え拡がり現象の違いを示し、液相では対流の影響があり、液体表面に沿った燃え拡がり速度が、固相内で対流のない固体表面に沿った燃え拡がり速度よりも大きいことを説明した。この総説では、固体と液体の両方について記述した点と火災先端付近で燃焼反応の前に予混合化を取り上げている点が特徴的である。1977年のWilliams [47] の総説では、この時期までの燃え拡がり研究について、網羅的に固体、液体の両方に関して燃え拡がりの様子を説明した。

1980年代に入ると、Fernandez-PelloとHirano [7] が著者自身の実験研究を中心に、燃え拡がり機構を熱移動論に基づき説明している。さらに、気相における

現象にも着目し、気相中の化学反応、消炎の説明にダムケラ数を適用し、無次元表記による他の研究との比較検討を容易にした。その後、Fernandez-Pello [8] は、燃え拡がりにおける様相を図示し、気流の方向と燃え拡がりの方向で分けて現象を説明した。Sibulkin [9] は、固体表面から可燃性気体が発生し、自然対流下で拡散火炎が形成する場合について、反応速度、火炎構造、消炎限界、輻射、雰囲気濃度などの影響を消炎限界と併せて説明した。Weber [10] は、特に森林、草原、荒地での火災、燃え拡がり現象に着目し、それらを対象としてきた理論解析、モデルを取り上げ、説明した。

1990年代前半までに理論解析、数値シミュレーションによる研究成果が蓄積されてきたこともあり、Wichman [11] は、燃え拡がり速度を求めるのに提案されてきたこれまでのモデルを整理し、説明をおこなっている。この総説のなかでは、火炎先端の取扱いに関して、de Risの論文 [100] と博士論文を比較し、de Risが解析モデルの中で拡散火炎として取り扱った火炎先端付近に言及し、先端付近に予混合火炎が形成できる可能性があることを指摘した。また、気流速度と燃え拡がり速度をダムケラ数で整理し、そのような整理方法が消炎限界を調べる際に適していることを示した。Di Blasi [12] は、特に、熱分解反応モデルから燃え拡がりを考察し始めていることが特徴的で、数値シミュレーションに用いる基礎式が提示され、著者自身で得た多くの計算結果を説明した。Hirano [13] は、火炎の伝ばの例として、着火、燃え拡がり、スモルダリングなどを例に挙げ、物理的な様相と熱移動、気流の関係を示した。その後、Saitoと共に、最近の燃え拡がりに関する研究を固体、液体の両方について調べ、総説を表している [14]。この中には、あまり説明されていない室内で形成される熱流の挙動を模擬した塩水モデル、大規模燃え拡がり寸法効果、火災旋風などをトピック的に取り上げ、燃え拡がりに関する論文が、できるだけ多く引用された。

### 1. 2. 2 液体表面に沿った燃え拡がりに関する総説

液体表面に沿った燃え拡がりは、固体の場合との違いを挙げるとすれば、1) 液相の対流がある、2) 固体では熱分解反応があるが、液体では蒸発過程のみである、3) 現象を支配する温度(引火点、沸点、燃焼点など)は、熱分解温度よりもかなり低い、4) 概して燃え拡がり速度が固体表面よりも大きい、などがあ

る。そのため、液体表面に沿った燃え拡がり、液相内での対流が伴うため、固体表面に沿った燃え拡がりとは異なり、燃え拡がり解析では固体と分離して取り扱われることが多い。固体と液体の両方の燃え拡がりを記述した総説 [47, 14] の他に、液体のみを説明した総説 [123-127] がいくつか出されている。

GlassmanとHansel [123] は、引火温度の評価が燃え拡がり速度を議論する上で最も重要であることを示し、初期温度と燃え拡がり速度の模式図を使い、引火温度から化学量論温度にいたる温度範囲で伝ば速度が大きく変化するという仮説を出した。その説明には、液面に沿った燃え拡がりが引火点に依存することを示し、Feng [170] やLiebman [167] の気相中の伝ばの例を挙げ、液面に沿った燃え拡がり機構を説明している [124]。その中では、引火温度以上において、着火がおこなわれたとすれば、火炎は可燃性蒸気のさらなる発生なしに伝ばを続けることができ、その燃え拡がりは、気相における現象に支配され、予混合火炎で定義される燃焼速度に関する伝ば速度を持つが、引火温度以下では、引火温度になるまで火炎が伝ばできないと説明した。また、液相の対流の評価に粘性力と浮力の比であるグラスホフ数、表面張力については、マランゴニ数（ベクレ数）が有効であることを示した [123]。

秋田 [125] は、液体表面上の燃焼の特徴に関して、自由液面を持った容器内の液面燃焼が、気体燃料を使った拡散燃焼のように可燃性気体の供給を自由に換えられないこと、供給速度にあたる燃焼速度（液面降下速度）が火炎からの液面への熱伝達に支配されること、また、酸化剤の流入を拘束する容器の大きさに依存することを説明した。

Ross [126] は、液体表面に沿った燃え拡がりに関する研究を、1930年代から1980年代までの研究を引用し、全容を把握できるような、非常に有益な総説を公表した。その中では、研究者ごとに静止空間条件、強制気流条件、浸潤条件を整理し、多くの実験データを転載し、説明している。

HiranoとSuzuki [127] は、液体表面に沿った燃え拡がりにおいて、火炎前方への気体の流動が重要な役割を果たしていることに着目し、燃え拡がり時の火炎と気流の動きを調べた彼らの研究結果から、燃え拡がり時の気相における現象に絞り、説明した。

### 1. 3 本研究の目的

前節に示したように、燃え拡がり現象について多くの研究がおこなわれてきた。最近では、燃え拡がり機構を説明するために、燃え拡がり際の火炎先端の性質について、その重要性から、議論されるようになってきた。そして、火炎先端性質について、これまでいくつかの説が提案されてきた。

例えば、燃え拡がり際のその火炎先端の火炎構造が、予混合火炎であるという説が広く知られている。これは形成される火炎全体では拡散火炎であるが、火炎先端は予混合火炎であり、その自己伝ば性により、火炎が移動できるという説明がなされている [8, 11, 45, 102, 108, 137, 145, 216]。この伝ば機構では、火炎先端と可燃性物質表面の間の消炎距離を通した可燃性気体の前方への拡散、そして酸化剤の混合の可能性を挙げ、説明されることが多い。

消炎限界に関する固体表面、垂直下方燃え拡がりに関する T'ienら [48] の計算では可燃性気体の消炎領域を通した前方への拡散、混合領域の存在を示した。さらに、Wichmanは、火炎先端は予混合火炎であるとした仮定のもとモデル計算をおこなっている。また Izumikawaら [216] は、紙の燃え拡がりにおける燃焼抑制剤の効果のなかで、消炎領域を通した数%の酸化剤の流入が先端の混合化に作用するとしている。ほかに、液面上の燃え拡がりにおいて、Itoら [145] の場合、引火点以下の液相内の火炎先端前方に引火温度より高い領域が存在することから、火炎先端付近に可燃性気体が発生し、予混合気体が火炎先端に存在し、火炎が付着しているという可能性を示している。最近ではトリプルフレームの議論と重なり、先端の予混合火炎の可能性が盛んに述べられてきた [11]。

火炎先端が拡散火炎の性質も持つと仮定して理論解析をおこなったのは De Ris [100] や Ohkiら [119] であるが、熱移動の速度として燃え拡がり速度を求めることに成功している。最近では、SchillerとSirignano [163] が液面に沿って振動的に伝ばする火炎先端について、予混合火炎構造と拡散火炎構造が交互に発生する様子を数値シミュレーションにより明らかにし、拡散火炎の性質によっても火炎が伝ばできる可能性があることを示している。しかし、従来、拡散火炎には自己伝ば性がないという性質から、可燃性物質表面に沿って拡散火炎が伝ばするということが明確な説明がなされていない。

可燃性物質表面に沿った燃え拡がり時の火炎先端が、予混合火炎の性質を持つ

のか、拡散火炎の性質をもつのか、あるいは両者の中間的な性質を持つのか現時点では特定できないが、前述の予混合火炎とする説に対し、

①固体可燃性物質上の燃え拡がりや引火点以下の液体表面上の燃え拡がりにおいて、1cm/s以下の小さい燃え拡がり速度をもっていても火炎先端は付着され、安定に燃え拡がること、

②常温で蒸気圧のかなり低い燃料において、火炎の移動と共に火炎からの熱移動で、はじめて燃料表面から可燃性気体が発生する場合、火炎先端の反応帯への経路を考えると、可燃性気体と酸化剤の供給源は明らかに異なっていること、

③液体表面上の燃え拡がりにおいて、引火点前後で急激な燃え拡がり速度の増加はないこと、

④火炎通過前後の可燃性物質表面の温度変化は急激であり、十分な可燃性気体が火炎前方で発生する可能性がないこと。また表面前方から温度上昇があっても、気化温度（沸点や熱分解温度）に達していないこと、

⑤ ①に関して、その燃え拡がり速度は予混合火炎で定義される層流燃焼速度数10cm/sよりかなり小さいこと、

⑥明らかに火炎をはさんで燃料と酸化剤が異なる拡散火炎である、対向流拡散火炎でも、既燃焼側に数%の酸化剤の存在が認められること、

⑦いくつかのモデル計算から消炎距離では混合がおこなわれるが、火炎の進行する前方に予混合領域がないこと、

など燃え拡がりにおける火炎の伝ば機構が予混合伝ば機構ではないように思われる。

最近では、Bhattacharjee [113, 115] とDelichatosios [114] の熱分解領域と火炎先端位置の関係に関する議論に見られるように、燃え拡がり機構を論ずる際重要な燃え拡がり時の火炎先端の性質を明らかにする研究がおこなわれるようになってきている。

そこで本研究では、可燃性物質表面に沿って火炎が伝ばする機構を明らかにすることを目的とし、特に燃え拡がり時の火炎先端の性質に着目し、火炎先端の挙動を調べ、伝ば機構を検討することにした。

表1-1 火災と道路交通事故死傷者数 (各上段が死者、下段が負傷者)

Table 1-1. Numbers of casualties due to fire, traffic accident in road and natural disasters.  
(Upper: dead persons, lower: injured persons)

年次 Year	火災(a) Fire	道路交通事故(b) Traffic accident in road	台風・大雨・強風・ 高潮・地震(c) Natural disasters (typhoon, heavy rain, strong wind, high tide, earthquake)
平成2年 (1990)	1,828 (7,097)	11,227 (790,295)	95 (425)
3年 (1991)	1,817 (6,948)	11,105 (810,245)	— (—)
4年 (1992)	1,882 (6,896)	11,451 (844,003)	6 (122)

総務庁統計局、日本の統計(1995): Management and Coordination Agency, Statistics Bureau:  
"Nihon no tōkei" (1995) (a: 消防庁防災課: 「火災年報」, Fire Defense Agency, Disaster  
Prevention Section, "Kasai-Nenpō", (b: 警察庁交通局交通企画課: 「交通統計」, National  
Police Agency, Traffic Bureau, "Kōtū-Tōkei", (c: 警察庁警備局警備課調べ), National  
Police Agency, Security Bureau.

表1-2 火災の出火状況  
Table 1-2. Fire damage.

年次 Year	出火件数 Number of fire					焼損面積 Area of damage		損害額 (百万円) Amount of damage (million Yen)	り災 世帯数 Number of suffered house- hold
	総数 Total	建物 Buildings	林野 Forests and fields	車両 Vehicles	その他 Others	建物(千m <sup>2</sup> ) Buildings (thousand m <sup>2</sup> )	林野(千m <sup>2</sup> ) Forests and fields (thousand m <sup>2</sup> )		
平成2年 (1991)	56,505	34,768	2,858	6,173	12,706	1,674	13,333	148,458	32,853
3年 (1991)	54,879	34,263	2,535	6,207	11,874	1,656	27,389	161,420	32,317
4年 (1992)	54,762	33,532	2,262	6,281	12,687	1,691	23,232	156,874	32,171

総務庁統計局: 日本の統計 (1995) (消防庁防災課: 「火災年報」)  
Management and Coordination Agency, Statistics Bureau:  
"Nihon no tōkei" (1995)

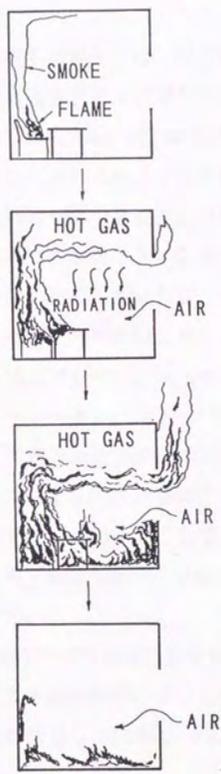


Fig. 1-1. Process of room fire.

[HIRANO, T., Quotation from textbook "Nensho-gaku"]

## 第2章 各実験に共通する実験装置と実験概要

### 2.1 実験概要

#### 2.1.1 実験の考え方

例えば、固体の燃え拡がり現象の解析では、固相内の未燃焼部分への熱移動による固相内を伝ばする熱の波の速度を燃え拡がり速度として、それを導出する [8, 11, 12]。これは、凝縮相内の熱移動に伴う可燃性気体の発生位置の移動に伴って、気相中の火炎が伝ばしているという考え方に立脚していることを示している。逆の見方をすれば、可燃性気体の発生位置が任意に移動する場合、火炎先端もそれに伴って移動すると考えていることになる。図2-1に燃え拡がりにおける典型的な火炎先端の様子を概略を示したように、火炎の移動の際には、火炎前方の未燃焼部分への固体内を通しての熱移動と気化領域が移動する現象が見られる。そこで、本実験では、燃焼とともに、固体表面から可燃性気体が発生し、気化領域が移動することをシミュレートし、図2-2のように燃焼時の可燃性固体試料を移動させることにより、可燃性固体内の水平方向への熱移動現象と火炎の伝ば現象を分離することを試みた。すなわち、可燃性気体の供給位置を任意の速度で移動させ、火炎先端の挙動を詳細に調べることで、これまで信頼できる根拠が少なく、不明確であった、実際に静止雰囲気中を伝ばしている火炎先端の性質を理解できると考えた。

図2-3には、本実験の考え方をより理解しやすいように、静止雰囲気中にある絶対座標系 (X, Y) から見た火炎の移動の様子を示す。図の左方に燃え拡がりが進み、各々の点線は、時間が経過し、時間  $t_2$  さらに時間  $t_3$  における、火炎と気化領域 (熱分解領域) の位置である。

本研究では、固体のみならず、異なる可燃性物質表面に沿った燃え拡がり現象も研究対象としている (4章, 5章)。可燃性液体を使った実験についても考え方は前述と同様であり、液相内の循環流あるいはその前方へ対流を制限することで、液相内水平方向への熱移動現象と火炎の伝ば現象を切り放すことを試みた (4章)。

また、気化領域の移動が、熱伝達に伴う蒸発過程が介在せず、単に可燃性気体

吹き出し領域の移動とのみ考えるならば、可燃性物質として、可燃性気体を用いて実験をおこなうことも可能である。可燃性気体を使った実験では、火炎の伝ば現象と熱移動現象を分離し、火炎の伝ば時に熱移動が介在しないようにし、可燃性気体の供給速度のみを可変することで、火炎先端の性質を調べることができる(5章)。

例えば、燃焼時のろうそくを移動させるように、可燃性物質を移動させれば、炎もいっしょに動くというのは直感的に把握できる。ところが、図2-1に示したように、可燃性物質表面と火炎先端は離れており、火炎先端が表面に接着するような、固定的な結合をしているようにはとても思われぬ。いわゆる火炎先端基部と呼ばれるこの領域では、可燃性物質と火炎先端の関係は、気化した可燃性気体が火炎先端に継続的に供給され、燃焼反応が持続しているだけに推測され、常に、火炎先端が可燃性物質とともに移動する必要はないように思われる。火炎先端の伝ばは、特に、可燃性気体の供給現象に関わっているように思われ、その点に着目して実験をおこなうことで、単に可燃性物質を移動させたという定性的な事実より、さらに定量的な新たな事実が得られるはずである。

以上のことから、本実験で用いる、火炎の伝ばに関わる現象を人為的に制御、シミュレートする手法は、火炎の伝ばの機構を明らかにする上で、有効なものと考えられる。

### 2.1.2 実験装置の要件

本研究の目的を達成するためには、次のようないくつかの要件を満たす実験装置が必要となる。

- ①可燃性気体を供給する面積、すなわち気化領域の大きさ(試料の大きさ)を自由に設定できること。
- ②火炎先端への可燃性気体の供給する位置を、任意の速度で移動できること。
- ③火炎先端を観測しやすいこと。

さらに、繰り返して実験をおこなうために、

- ④可動部分(台車)は安定性があり、再現性のよい動きをすること。
- ⑤作業上、安全であること。

以上の点が満足するような実験装置を製作した(図2-4、2-5)。①につい

ては、汎用的に本実験で用いた台車上に、気化領域を可変できるように可燃性物質を搭載できるようにした。②については、一般的な可燃性固体表面に沿った燃え拡がり速度は数cm/sであり、気相の対流速度も多くの実験で数10 cm/s以下であるので [14]、移動速度は、数cm/sから最大でも100 cm/sまでの範囲で変えることが可能であるようにした。③については、台車上に、火炎先端部を詳細に観測できる位置に、カメラを搭載できるようにした。さらに、④については、動的な動きを伴う実験装置の前提として、再現性のよい動作が求められることから、実験装置は堅牢なものにした。⑤については、移動実験中に可動部分が安全に作動するように、円滑動作する制御機構にした(図2-6、2-7)。また、可動部分が対人、対物に危害を及ぼさないように注意した。つまり、実験作業を容易にするため、移動する台車を約70 cmの高さとし、ワイヤやモータを含め、可動部分まわりの空間に余裕を持たせた。

実験では、引火点が低く、爆発火災の危険性があり、さらに、健康を害する可燃性物質を使用する必要があった。とはいえ、実験観測者の健康が損なわれないようにすることが最も重要なことであり、爆発火災防止のためにも、狭い実験室に可燃性気体が滞留しないような施しをおこなわなければならない。そこで、実験室には換気扇が取り付けられており、実験雰囲気の流れが乱れない程度に、実験の合間に十分な換気をおこなうように努めた。

### 2.1.3 使用した可燃性物質とその性質

本研究では、可燃性物質表面上に沿った燃え拡がり現象を検討することになるが、第1章で記述したように、このような現象の代表的な事例には、森林の火災、建築物の火災、油槽からの漏洩による火災などがある。それらの燃え拡がりを可燃性物質の状態ごとに分類するならば、セルロース、プラスチック等の可燃性固体、灯油、ガソリン、アルコール等の可燃性液体といった分け方ができる。(ただし、熱エネルギーを必要とするときに燃焼させ、その時用いる可燃性物質は“燃料”と呼ばれる。しかし、爆発・火災に視点を置くならば、故意に“可燃性物質”を、“燃料”と呼ぶことは不適である。)

使用した可燃性物質は、固体については、①ろ紙、②PMMA、液体については、③メタノール、④エタノール、⑤1-プロパノール、⑥ヘキサン、⑦デカン、

⑧ケロシン、⑨MMA、気体については、⑩メタン、⑪プロパンである。

(a) 可燃性固体

① ろ紙は、セルロース ( $C_6H_{10}O_5)_n$  を主成分とする灰分の少ない多孔質の紙である。そのセルロースは、木など植物の細胞壁の主要構成成分である多糖類で、高分子構造を形成している。紙は、木造建築等の建造物の燃え拡がりの基礎研究においては、極めて重要な可燃性物質の一つであり、特に材質が均一であるろ紙やコンピュータカード紙が市販品として容易に手に入ることからよく用いられてきた [2, 15-24, 48-50, 54, 57, 64-65, 69, 72, 73, 77, 78, 83-87]。ろ紙の厚さは一般的に 1 mm 前後までであり、燃え拡がりの際の熱移動に関しては、固体内部の厚さ方向に温度変化がなく、“熱的に薄い” という表現で代表される燃え拡がり機構の実験、解析に用いられることが多い。ただし、ろ紙の加工性（厚さの均一性、表面の粗度、圧延方向）、密度（多孔率、空隙率）など、メーカーによって異なることに注意する必要がある。

② PMMA は Polymethylmethacrylate ; ポリメタクリル酸メチルの略であり、一般的にはメタクリル樹脂あるいはアクリル樹脂と呼ばれる高分子構造をもつ樹脂である。モノマーである MMA の重合により、成形され、透明、硬質の板として製造され、身の回りでよく用いられている。燃え拡がり機構における可燃性固体の厚さの影響を調べる際に、ろ紙の場合は加工性から限界があるが、PMMA の場合、均一に製造された異なる厚さにもものを使って、容易に調べ得る利点がある。そのため、“熱的に薄い” にのみならず“熱的に厚い” という表現で代表される燃え拡がり機構の実験、解析に用いられてきた [26-34, 42-44, 55, 56, 67-71]。

燃え拡がり研究で PMMA が用いられるのは、1) 身の回りで使われるプラスチック、高分子材の一つであり、やはり、建造物の火災研究では重要な可燃性物質であること、2) 市販品で、同一性の高い PMMA が容易に得られること、3) ろ紙と異なり、チャー等の炭化物が生成せず、いわゆる、燃え方がきれいであること、3) ろ紙の熱分解機構 [36-40] よりも、PMMA の熱分解機構がよく知られていること [35, 41]、4) 多くの研究者が対象にしてきたため、結果を比較検討しやすいこと、などが挙げられる。ただし、成形、製造法によって固体凝縮

側の機械的特性、熱物性は異なり、一般的にメーカーごとに熱分解温度は異なる [44]。

#### (b) 可燃性液体

可燃性予混合気層が形成する場合と形成しない場合の燃え拡がりの挙動を調べ、伝ばにおける火炎先端の性質について議論するために、物性としては、特に着火性（引火点温度）、気化特性（揮発性（高蒸気圧）、沸点、蒸発潜熱）と燃焼性（炭素数、燃焼温度）を考慮した。物性は表 2-1 の通りで、炭素数の違いとは、高級アルコール（あるいは、炭化水素系可燃性気体）になるととも、完全燃焼に必要な酸化剤の量が増加することに関連する。炭素数の増加とともに、次第に揮発の部分が增加し、部分的にすすの発生が増加するようになることはよく知られている。完全燃焼に必要な酸化剤の量が異なるということは、拡散火炎の形成位置が異なるということである [241, 223, 274]。

③ メタノール ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) は、蒸気圧が高く、揮発性の高いアルコール系可燃性液体として知られている。Akita [142] が、液体表面に沿った火炎の伝ば機構を明らかにするために、メタノールを使い、液温と火炎の伝ば速度の関係を調べ、その伝ばの様相が、初期液体温度によって異なることを示している。初期温度が引火点温度より高い場合、液体表面上に可燃性予混合気層が形成する。この可燃性予混合気層の形成の有無によって火炎の伝ばの挙動が異なることから [126]、これまでよく使われてきたメタノールを使うことは、伝ば機構と火炎先端の性質を調べる上では、適した可燃性液体である。ただし、引火点温度が低く、伝ばの挙動を調べるために初期液体温度を制御する必要がある。メタノールは低級アルコールに族し、水によく溶解する。燃焼で生成する水蒸気が低温部への接触とともに水に戻るため、同じメタノールを繰り返し使用すると、水が次第に溶解するため、初期のメタノールの性質と異なるので注意する必要がある [128-131]。

④ エタノール ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) は、メタノールと異なり、毒性が低いことから、医療用、食用など人体に用いられる、いわゆる我々がその刺激臭で理解するところのアルコールである。引火点温度がメタノールよりもやや高く、常温 (20℃) より低いことから使用した。ここで、毒性についてみると、エタノールは他のアルコールと同様に麻醉効果があり、毒性は比較的低い。次に記述する 1-プロパ

ノールは、長時間吸引すること皮膚粘膜が冒されるので、メタノールとともに十分に換気に注意する必要がある [254-255]。

⑤ 1-プロパノール ( $C_3H_7OH$ ) は直鎖 (n-) の構造を持つアルコール系可燃性液体で、i- (イソ) 構造を持つ2-プロパノールとは物性が異なるので区別される。2-プロパノールのほうは、燃料用アルコールとして多く市販されているものである。引火点温度が常温 (20 °C) よりもやや高く、温度の制御がしやすいことから使用した。近年では、引火点温度よりもやや低い初期温度の燃え拡がり機構の解明で、その温度範囲では、振動伝ばではなく一様伝ばすることが観測され、さらに、メタノールよりも火炎からの発光が強いのて用いられることが多くなった [144-145, 164]。

⑥ ヘキサン ( $C_6H_{14}$ ) は、引火点が低く、蒸気圧がきわめて高いメタン系炭化水素の一つで、引火危険性のきわめて高い、高揮発性の可燃性液体である。そのため、常温では液面上に可燃性予混合気層が形成される。KaptainとHermance [169] はこのことを利用し、可燃性予混合空間内の火炎の伝ばを調べた。ここでは、液面上に可燃性予混合気層が形成された場に形成される火炎先端の挙動について調べるために使用した。

⑦ デカン ( $C_{10}H_{22}$ ) もメタン系炭化水素の可燃性液体であるが、ヘキサンとは異なり、蒸気圧が低く、引火点温度が約 46°Cで、常温では、可燃性予混合気層が形成されることはほとんどない。実際起こりうる油槽から漏れた際の燃え拡がりを想定する研究でよく使用される [150-151, 158-160]。常温 (20°C) で可燃性予混合気層が液面上にできることがほとんどないので、燃え拡がりとともに可燃性気体が蒸発・発生し、それが火炎先端に供給され、その際の火炎先端の性質を調べるために使用した。

⑧ ケロシンは、ガソリンの次に高い沸点 (150°C~250°C) を持つ石油留分である。常温では揮発しにくいパラフィン系の高沸点炭化水素を主成分とする混合物で、組成は原油の性状と製造法によって異なる。JIS (JIS K 2303) では、引火点温度が 40°C以上 (常温以上) になるように調整されたものを指す。実際起こりうる油槽から土壤に漏れた燃え拡がりを想定する研究でよく使用される [152-153]。引火点が 45°C前後であることから、デカンと同様、常温で予混合火炎が伝ばでき

るほどの可燃性蒸気層が液面上にできることはほとんどない。ケロシンは、家庭内はじめ、内燃機関など燃料として、社会の中で広く使用されている可燃性液体である。従って、調べる必要があり、他の可燃性液体と比較するために、使用した。

⑨ MMAはPMMAのモノマーであり、常温では液体である。PMMAが可燃性気体のMMAモノマーになる際に、燃焼による固体-解重合過程-液体-蒸発過程-可燃性気体に至る場合と液体-蒸発-可燃性気体に至る、二つの場合の端燃え拡がりの違いを見るために使用した。

### (c) 可燃性気体

⑩ メタン ( $\text{CH}_4$ ) は、メタン系炭化水素の一つの可燃性気体である。天然ガス (NG) の主成分であり、さらに、この天然ガスは用途別に混合調整され、都市ガス用に供給されている。都市ガスが燃料用として多く利用されていることから、その主成分であるメタンを使った燃焼研究は有意義で、燃焼研究においてはもっとも一般的な可燃性気体である。バーナ火炎などの基礎実験により、メタンの燃焼の基本的な性質については知られていることから [166, 167, 173, 174, 189, 191, 196, 197-203]、火炎の伝ばの研究を進める上でメタンを使用することは都合がよい。ここでは、火炎の伝ば時に凝縮層への熱移動が介在せず、可燃性気体の供給速度のみを変化させ、火炎先端の挙動を調べるために使用した。

⑪ プロパン ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) も、メタン系炭化水素の一つの可燃性気体である。プロパンは、いわゆる家庭用、工業用に利用されているLPガスの主成分で、研究対象とすべき可燃性気体としては、重要なものの一つである。物性については、表2-1に示すように、分子拡散係数と温度伝達率 (熱拡散係数) が異なり、それらは、ルイスLe数 ( $\text{Le} = \text{分子拡散係数} / \text{温度伝達率}$ ) 0.7と1.7の違いで代表される。炭素数の違いは、完全燃焼反応に必要なとする酸化剤の違いであり、拡散火炎においては火炎の形成位置の違いとなる [187]。

## 2.1.4 実験計画

2.1.1節の考え方から表2-1に示すように、実験を大きく四つに分けて、実験(1)から(4)として、実験をおこなった。

実験(1)では、可燃性固体として異なる大きさのPMMA片を用い、水平方向の熱移動現象を制限する条件下で、燃烧しているPMMA片を異なる速度で動かし、その時の火炎先端の挙動を調べた。

実験(2)では、可燃性液体を小さい容器にいれ、水平方向の熱移動現象を制限する条件下で、容器上で燃烧している状況で容器を異なる速度で動かし、その時の火炎の先端の挙動を調べた。液体の場合、容器移動とともに液体が容器外へあふれ出すことがある。このとき、火炎先端が挙動の観測に支障をことがあるので、液体だけの場合とガラスビーズを容器に充填し、液体を浸潤させた場合の二つの条件を設定した。

実験(3)では、燃烧にともなう表面への熱移動現象を切り放し、可燃性気体の供給速度(吹き出し速度)のみを変え、燃烧時に吹き出し位置を移動させた場合の火炎先端の挙動を調べた。ここでは、実験(1)と(2)と比較しやすいような気化領域、すなわち、同じ吹き出し領域を持つ多孔性焼結金属から可燃性気体が吹き出す小さな燃焼器を製作し、使用した。可燃性気体のみを吹き出すだけでなく、予混合気を吹き出した場合の火炎先端の挙動も調べてみた。

実験(4)では、燃え拡がり現象が、気相中、凝縮相内さらに界面で現象と密接に関連し、これらが、ほぼ同時に連続的に進行していることから、凝縮相内の熱移動も考慮できるようにした。そのために、静止時でも火炎が移動できるように、前実験とは異なり、長い可燃性液体容器と可燃性固体を用い、一端から燃え拡がり、凝縮相内で未気化領域側への熱伝達が進行しているときに、強制的に可燃性物質を移動させ、気相、凝縮相の場の変化に伴って火炎先端がどのような挙動をするのか調べた。

## 2.2 実験装置本体および測定方法

### 2.2.1 可燃性物質移動装置

図2-4は、本研究で使用した可燃性物質移動装置本体である。可燃性物質を移動し始め、加速から一定速度に至るまでできるだけ長い時間観測できるように、実験室内に設置が可能な最大長さとして、長さ3000 mm(実質的な移動距離は約2500 mm)の移動用レールを設けた。移動距離が長いため、スチールワイヤを台車

牽引用に用い、この台車は、ステッピングモータにより制御駆動される。スチールワイヤには、常に適度な張力が与えた。実験室の制約上、絶対座標系にあたる静止場に観測装置を設置し、移動する可燃性物質から離れて観測することは困難である。そこで、観測は、可燃性物質とともに動く移動座標上（台車上）でおこなった。

可燃性物質と観測装置を搭載する台車は、モータの駆動に対する動作応答性を高めるため、軽量でなければならない。しかし、撮影用光学系の焦点距離を確保しなければならないことから、極端に小さい寸法にできないといった相反する制約がある。そこで、台車は、木製、245 mm x 600 mmの搭載寸法を持ち、塗装を施し、タイヤを取り付けたものを製作した（図2-5）。

### 2.2.2 制御回路と移動速度測定

台車を駆動するためには、加速減速の制御がしやすく、また停止を速やかにおこなえるように、十分大きな静止トルクを持つステッピングモータを使用した。このステッピングモータを作動させるには、モータドライバとコントローラ（制御回路）が必要となる [286, 287]。コントローラとは、入力パルス (Hz) に見合った回転をするステッピングモータを制御するため、所定のパルス列を作るものである。本実験条件に適合する市販のコントローラがなかったため、コントローラは、いくつかの文献 [283-285, 288-292] を参考に製作した。その制御回路は付録(2)に示し、また台車の移動動速度は付録(3)の方法によっておこなった。

### 2.2.3 観測装置

本研究では火炎先端の挙動を詳細に観測する必要がある。火炎先端付近と可燃性物質表面を含めたこの領域は火炎基部と呼ばれることがあるが、この領域には消炎部分が存在し、温度、濃度、速度勾配のいずれも大きい [12, 20, 22-23, 48-50]。紙の燃え拡がりでは温度勾配が1400 K/mm (140 K/0.1mm) 程度もある [23]。計測プローブ類をこの領域に挿入することで、流れに擾乱を与え、場を複雑に変化させ、火炎先端の挙動を詳細に調べる上では、適当ではないと考えた。そこで、単純ではあるが、火炎からの直接光を観測・撮影し、その画像を解析することで、調べることにした。なお、温度上昇領域をみるのに、シュリーレン撮

影もおこなってはいるものの、まず、直接火炎をとらえ、よく観察することこそが、火炎先端の挙動を調べる上では重要である。

観測には、直接火炎の像をとらえるため、ビデオカメラ (Sony ハンディカム、PRO 3CCD、30駒/秒) と、35 mm スチルカメラ (ニコンF3) を使用した。これらは、台車上に搭載した。その様子は図2-6の通りである。観測における移動座標は小文字の (x, y)、静止座標は大文字の (X, Y) で表す。ビデオカメラ撮影の標準条件は、絞り開放 (F1.6)、ゲイン最大、シャッタ速度 1/500秒とし、火炎先端の変動が速いときは 1/750秒から 1/1000秒に変え、撮影条件による火炎先端 (青炎) の見え方の違いを極力避けるようにした。

近接拡大した観測が主になるが、その際、像のひずみを極力さけるために、光学レンズの口径が観察対象領域 (約 13 mm) よりも十分に大きい 50 mm のものを使用し、観測対象からの像全体がカメラに入るようにした。

#### 2.2.4 流れの可視化方法

空間全体は静止しているが、移動する火炎先端は相対する気流を受けつつ移動している。そこで、火炎とともに移動する座標から見た流れの場を可視化するために、図2-7に示した微粒子追跡法をおこなった。用いた微粒子は、マイクロバルーンと酸化マグネシウム (公称粒径  $5\mu\text{m}$ ) である。このマイクロバルーン (住友スリーエム、ガラスバブルズ、主成分は酸化けい素) は、平均粒径が  $33\mu\text{m}$  と

大きい、中空であるため比重が  $0.15\text{ g/cm}^3$  (公称) と酸化マグネシウムの  $3.65\text{ g/cm}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ) に比べてはるかに小さく、粒子の形状がすべて球形をしているといった特徴を持っている。ただし、中空であるため、高温では溶解する可能性があるものの、可視化の容易さからこれを主に用いた。さらに、火炎先端前方 (酸化剤側) の流脈線を得るために、流動パラフィンを気化させた可視化もおこなった。

実験 (4) で用いた液相内の流動には、液相内にアルミニウム粉を混入した。さらに、マイクロバルーンも使い、液相内にかき混ぜ、浮遊させることと、少量表面に浮かべることにより流動を観察した。

### 2.2.5 火炎先端位置の測定

火炎先端の付近の観測では、火炎先端の位置を特定することは難しい。拡大すればするほど、見られる青炎の薄青色は薄くなり、火炎全体が判然としなくなる。拡大して得られた画像は模式的に図2-8に示すように、青色の発光が強い、いわゆる火炎帯とそのまわりに薄い発光が見られる。薄い部分は全体にぼやけたようになっており、これは拡大撮影のため、被写界深度が浅いことによるためと考えられる。つまり、二次元的な火炎が得られても、奥行き火炎の焦点が合わないで火炎が広がって見える。このことは、画像解析をおこなうにあたり、ステルカメラ撮影や、離れて撮影するなど、予備実験で得た事実である。従って、本研究では、火炎からの直接光を目視観測し、発光が“強い”火炎帯の厚み方向の中央を通り、青炎である火炎先端付近の曲率半径の小さい部分を目視により火炎先端と定めた。火炎先端の位置は、可燃性物質とそれに続く平板の境（前端部）を原点にし、可燃性物質が移動する図では水平左方向を正符号で $x_f$ 、鉛直上方に $y_f$ と定めた。なお、これは可燃性物質と火炎先端の移動座標における相対位置関係であるが、静止座標から見られる空間を移動する火炎の位置は次節2.3.1で述べる。

ところで、直接観測する場合、火炎先端の位置の定義は、いくつか考えられる。図2-9に示したように、ここでは先端を $P_f$ と定義した。しかし、水平方向の先端 $P_1$ 、あるいは、鉛直方向の表面に最も近い位置 $P_2$ と定義することもできる。定義方法によってどの程度の数値的な違いが見られるのかを幾何学的な関係から見積もると、例えば、 $P_1$ と $P_f$ の差 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ は、

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_f - x_1 = \delta \sin^2(\theta/2), \\ \Delta y &= x_f - y_1 = -(\delta/2) \sin \theta\end{aligned}\quad (2-1)$$

となる。ただし、 $\delta$ は可視火炎帯の厚さ、 $\theta$ は表面からの角度である。つまり、鉛直上方から水平の角度範囲で、定義による違いは、最大でも可視火炎帯の半分である。火炎形状が鉛直に近い場合は、 $P_1$ との差が見られるが、火炎が表面に近づくと差が小さくなる。 $P_2$ はその逆である。観測で多く見られる火炎先端の角度

は、可燃性物質の移動前、移動中で $30^{\circ} \sim 15^{\circ}$ が平均的な変化する角度範囲であることからすると [18-20, 28, 225]、図の $P_f$ と $P_l$ で定義する場合の差は小さい。

本研究では、青炎の発光強度に関する読みとり誤差が生じることは避けられないが、モニタ画面に30倍程度に拡大し、同一の実験者が火炎先端を判断し、トレースを繰り返しおこなうことで、読みとり誤差は最小になるものと思われる。読みとりに関わる火炎先端位置判断の際に、ビデオカメラによる拡大映像と、35mmスチルカメラからの拡大映像による違いがほとんどないことは確認した。

## 2.3 可燃性物質の移動

### 2.3.1 静止座標と移動座標

火炎は、可燃性物質とともに実際に静止空間を移動させている。しかし観測は可燃性物質を基準にした移動座標上でおこなっている。実際に空間を移動している座標 $(X, Y)$ 、移動座標 $(x, y)$ 、可燃性物質の移動速度 $V_T$ 、移動時間 $t$ とすると、可燃性物質の移動距離 $X_T$ は、 $V_T$ 一定として、

$$X_T = V_T \cdot t \quad (2-2)$$

で表される。

i) 移動座標で観測し、 $\Delta t$ 時間内、火炎先端が可燃性物質に対して見かけ上、動かず、静止して見えるときは、可燃性物質の動きに追従しており、

$$\Delta x_f / \Delta t = 0 (=V_{FT}; \text{観測上の火炎の移動速度})、 \quad (2-3)$$

静止空間を $X$ 方向水平に移動する(燃え広がる)火炎の速度 $V_F$ は、

$$V_F = V_T、 \quad (2-4)$$

となり、火炎先端の移動距離 $X_F$ は、式(2-2)より、

$$X_F = X_T、 \quad (2-5)$$

で表される。

ii) 移動座標上、 $\Delta t$  時間内で可燃性物質に対して火炎先端が変動しているときは、見かけの移動速度  $V_{FT}$  を持ち、

$$\Delta x_f / \Delta t = V_{FT}, \quad (2-6)$$

$$V_F = V_T + V_{FT} \quad (2-7)$$

となり、このときの火炎先端の移動距離  $X_F$  は、

$$\begin{aligned} X_F &= V_F \cdot t \\ &= V_T \cdot t + \int_0^t V_{FT} \cdot d\tau \\ &= X_T + \int_0^t V_{FT} \cdot d\tau, \end{aligned} \quad (2-8)$$

となる。火炎先端の変動に関わらず、一般的にはこの式(2-8)で火炎先端の移動距離は表される。

iii) 可燃性物質移動が加速度  $A$  で加速移動するときは、可燃性物質の移動距離は、

$$X_T = A t^2 / 2 \quad (2-9)$$

と表せ、火炎先端の移動距離  $X_F$  は式(2-8)で得られる。

### 2.3.2 速度変化

図2-10(a)と(b)に可燃性物質の速度の変化を示す。実験は、図(a)の所定の定常速度  $V_T$  に達してから観測する場合と図(b)の加速度  $dv/dt$  を一定にして観測する場合の二通りについておこなった。速度変化は、 $V_T$  は静止時から100 cm/sまで、加速度  $dv/dt$  は2.1 cm/s<sup>2</sup>から220 cm/s<sup>2</sup>まで変化させた。

### 2.3.3 計算による境界層発達予測

試料に着火していない場合の平板上の気流を平板に固定した位置で観測したとすると、移動前には気流はないが、移動開始とともに、見かけ上、平板上に移動方向の逆の方向の気流ができる。移動開始直後には境界層はまだほとんど発達し

ておらず、流れはすべり流れとして取り扱える。非定常境界層 [227-229] においては、移動開始直後、平板先端から粘性の影響により発達する流れと平板よりも下流に位置する  $x$  点から平板上方に粘性の影響が伝わり発達する流れの二つがあることに注意する必要がある。つまり、平板に先端があるという上方が下流にある点  $x$  に伝わるまでには時間遅れがあるということである。その点  $x$  から上方に発達する境界層は、平板表面上の点  $x$  では影響はなく、その粘性の情報はそこから下流側に伝わるのみである。従って、ブラジウスの解のような速度分布が有限先端のある平板上に形成されるには、時間がかかるわけである。

いま、加速度  $A$ 、速度  $V = A t$ 、 $x = (1/2) A t^2$  とすると、平板先端から 10 mm の位置、すなわち  $x = 10$  mm において、平板の加速度が  $2.1 \text{ cm/s}^2$  では 0.98 s まで、 $200 \text{ cm/s}^2$  では 0.1 s まで、流れは、十分な境界層の発達がないすべり流れとしてよい。ただし、時間経過とともに、その加速度に応じた境界層が平板先端から発達してくる。よどみ点流れによく使われる Falkner と Skan の解析 [229] を適用してみると、平板先端から 10 mm 下流の可燃性固体先端において、 $dV/dt = 10 \text{ cm/s}^2$  のとき、厚さ  $\delta = 2.5$  mm、 $180 \text{ cm/s}^2$  のとき、 $\delta = 1.2$  mm となり、加速度の増加とともに境界層の厚さが減少することがわかる。

一定速度の場合、もしブラジウスの解 [257] が適用できるとすれば、平板先端から 10 mm 下流の可燃性固体の先端上で、 $V_T = 1 \text{ m/s}$  では、 $\delta = 1.9$  mm、 $V_T = 0.1 \text{ m/s}$  では、 $\delta = 6$  mm という結果を得る。種々の  $V$  と  $\delta$  についての解の相似性より、平板上から境界層外縁までの  $1/2$ 、 $\delta/2$  での速度は概ね  $V/V_T = 0.8$  となる。

Table 2 - 1 . Experimental scheme

COMBUSTIBLE MATERIAL	CONTROL, CONSIDERATION ITEM	EXP. NUMBER
SOLID	<ul style="list-style-type: none"> <li>• With heat transfer</li> <li>• Limitation of horizontal heat transfer in solid phase</li> <li>• Gasify region</li> </ul>	( 1 ) Chapter 3
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• With heat transfer</li> <li>• Heat transfer in solid phase</li> <li>• Thickness</li> </ul>	( 4 ) Chapter 6
LIQUID	<ul style="list-style-type: none"> <li>• With heat transfer</li> <li>• Limitation of horizontal heat transfer in liquid phase</li> <li>• Gasification rate</li> <li>• Limitation of flow in liquid phase</li> </ul>	( 2 ) Chapter 4
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• With heat transfer</li> <li>• Heat transfer in liquid phase</li> <li>• Flow in liquid phase</li> </ul>	( 4 ) Chapter 6
GAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Without heat transfer</li> <li>• Gasification rate, Supply rate, Ejection velocity</li> </ul>	( 3 ) Chapter 5

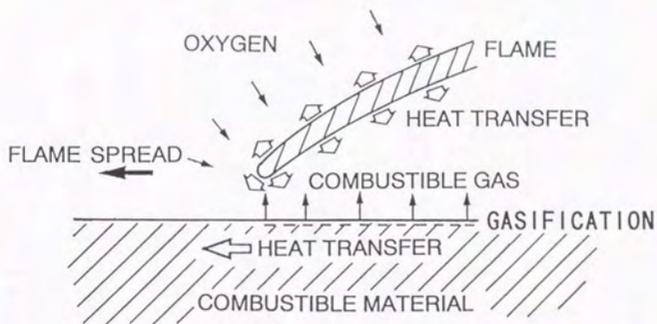


Fig. 2-1. Aspect of flame spread over combustible material.

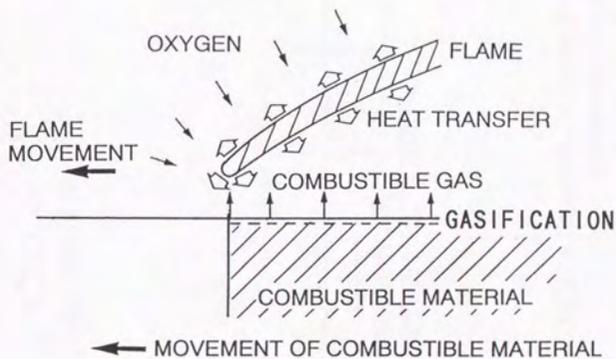


Fig. 2-2. Aspect of flame movement in this study.

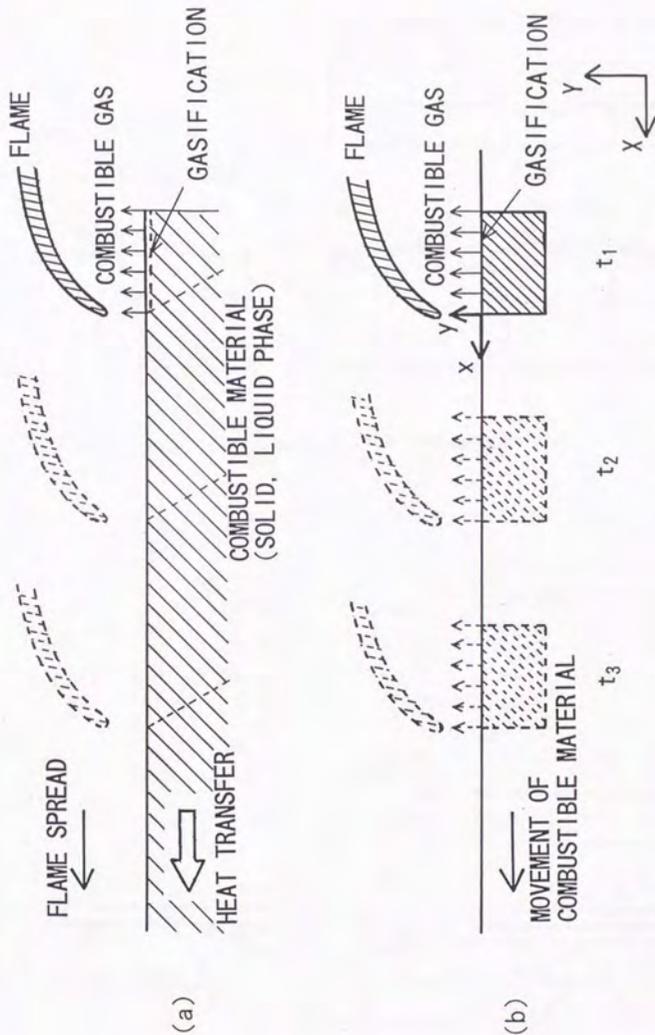


Fig. 2-3. Movements of leading flame edge.  
 (a) Movement of leading flame edge with thermal wave in condensed phase.  
 (b) Movement of leading flame edge with gasification region.

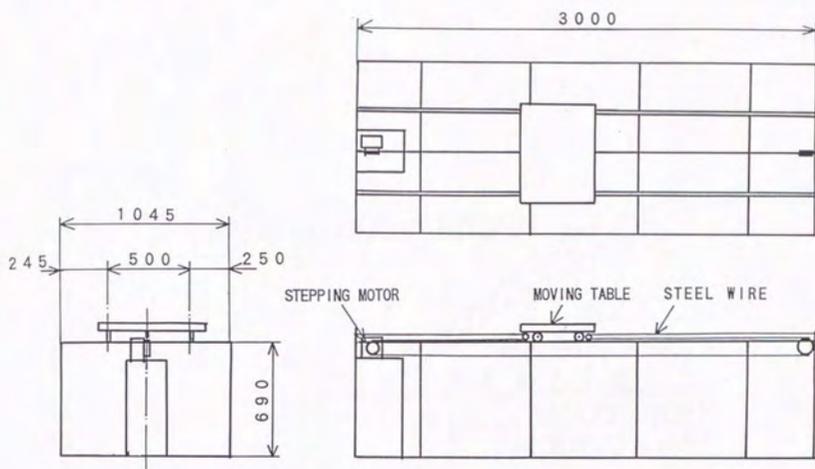


Fig. 2-4. Experimental apparatus.

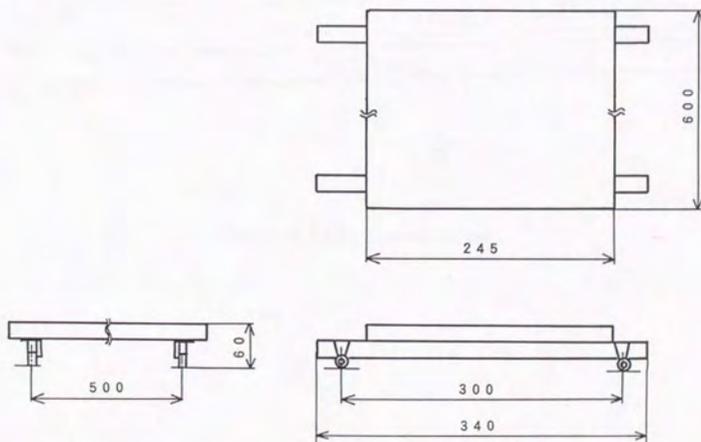


Fig. 2-5. Moving Table carrying combustible material.

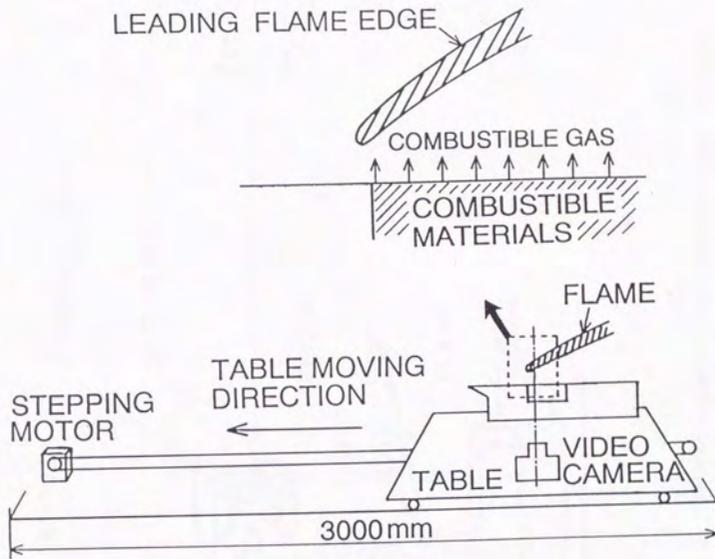


Fig. 2-6. Experimental setup.

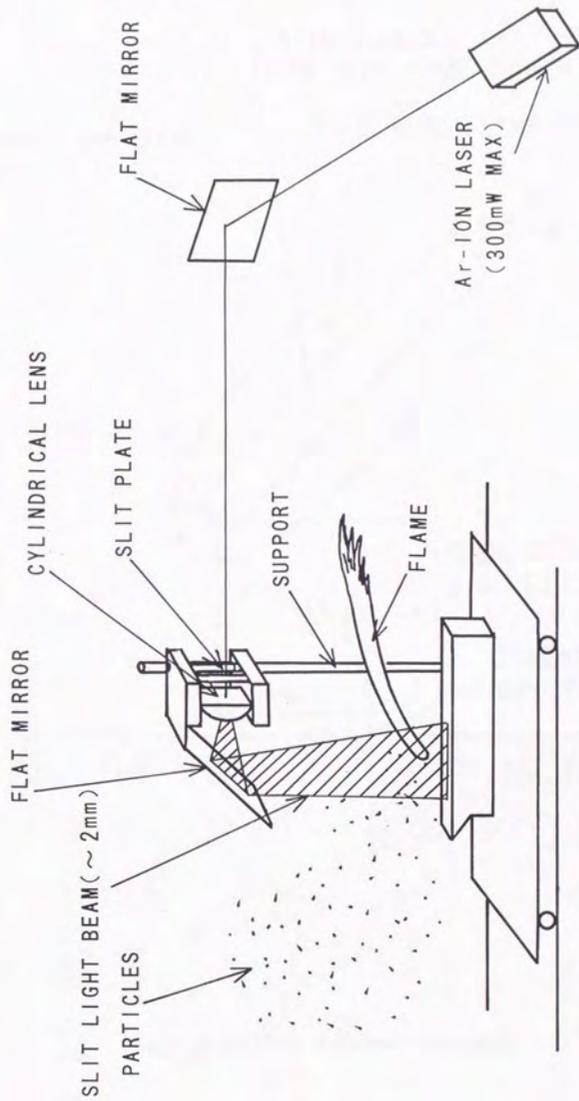


Fig. 2-7. Flow visualize technique (Particle tracer technique).

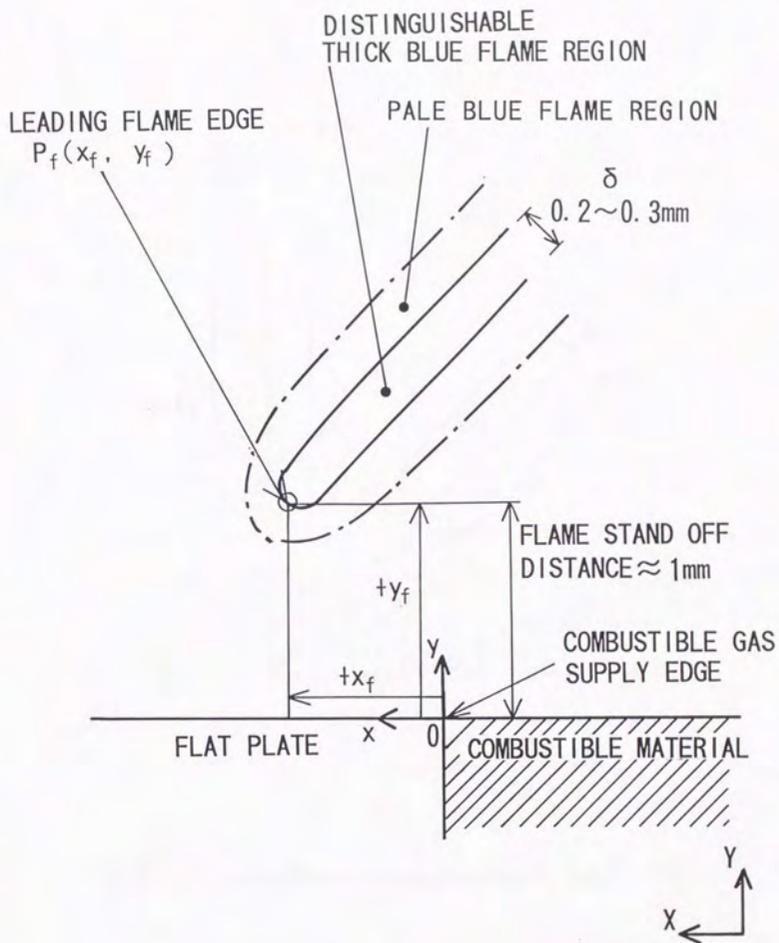


Fig. 2-8. Location of leading flame edge.

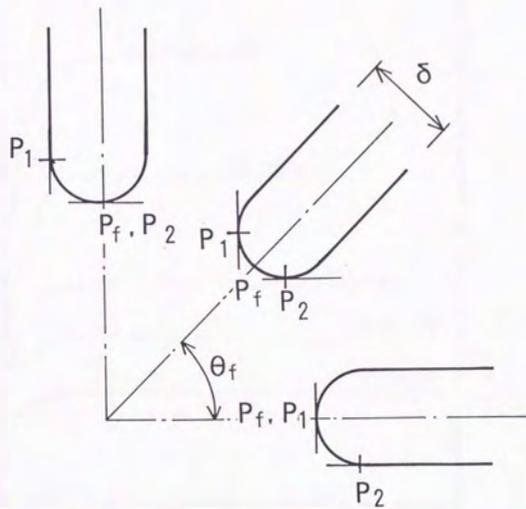


Fig. 2-9. Difference between defined location  $P_f$  and  $P_1, P_2$ .

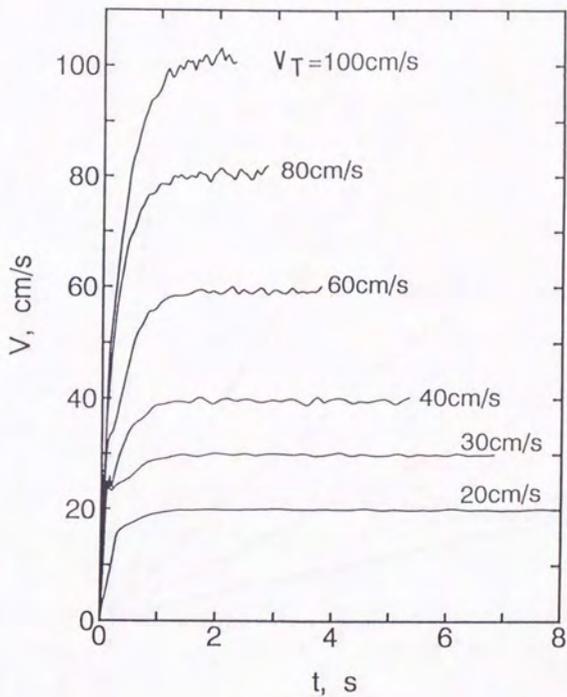


Fig. 2-10. Velocity variation of combustible material.  
 (a) Constant velocity condition)

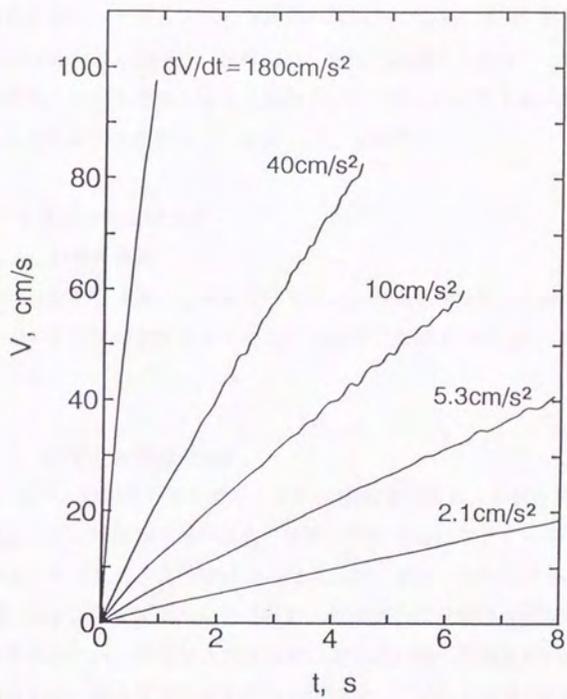


Fig. 2-10. Velocity variation of combustible material.  
(b) Constant acceleration condition

### 第3章 PMMA片移動時の火炎先端の挙動

#### 3.1 実験概要

この章では、可燃性固体表面に沿った燃え拡がりを想定し、そのときの火炎先端の性質に着目し、燃え拡がり実験用の試料としてよく用いられるPMMA試料を使って実験をおこなった。実験では、PMMA試料に着火して安定な火炎が形成された後、試料を速度を変えて動かし、その移動に対する火炎先端の追従性を調べ、火炎先端の性質について検討をおこなった。

#### 3.2 実験装置および方法

##### 3.2.1 可燃性物質

可燃性固体としては、これまでおこなわれてきた研究との比較の容易さに配慮して、燃え拡がりの研究でよく使われているPMMA (Polymethylmethacrylate) を使用した。

##### 3.2.2 可燃性物質固定装置

図3-1は、可燃性固体を載せた試料固定装置である。可燃性固体として用いたPMMAの板は、壁面への熱損失を少なくするためにセラミックファイバ上に置き、パイレックスガラスで前後からはさんだ。また、前方のガラス先端は、流れが剥離しないように鋭角的に仕上げた。観測方向に端面の影響が少ない二次元的な火炎を得るため、PMMAの板の幅(奥行き)は、予備実験から30mmとした。試料長さ $L$ は、燃え拡がりにおける気化領域、PMMAの場合には熱分解領域を考慮して選んだ。一般的に厚みのある可燃性固体表面に沿って燃え拡がる場合、気化によって表面が後方にわずかに傾いた状態となり、火炎先端へ寄与する気化領域長さを推定することは容易ではない。熱的に薄いと考えられる厚さ0.26mmのろ紙の場合、約3mmであり[18-20]、気化領域長さとしてこの程度以上の長さとする必要とされる。以上から、試料長さ $L$ が、2、3、5、10、30mmの場合について調べた。

通常の固体表面に沿っての燃え拡がりにおいては、試料厚さも燃え拡がりに大きく影響する。しかし、本実験で用いた方法によれば、固相内の未燃焼部分の水

平方向への熱移動は、火炎の挙動に影響しないと考えてよく、また厚さ方向の表面減少速度は可燃性固体の移動速度よりもはるかに小さい。したがって、熱的に見た場合、試料表面の気化特性が底面の熱損失の影響を受けないよう範囲でなるべく薄く、かつ実験が容易である 1 mm の厚さとした。

### 3.2.3 質量減少速度

PMMA 表面からの可燃性気体の吹き出し量（供給量）を見積る目的で、静止時において、質量減少速度を求めた。減少速度は天秤を使い、燃焼中の質量減少量を測定することで求めた。

### 3.2.4 実験手順

実験は、PMMA 試料表面ができるだけ一様に燃えるように、バーナで着火させた。着火後、火炎が安定したのを確かめ、試料の上面が両側からはさんだ 2 枚のガラスの上面とあまり差がないうちに、すみやかに台車を動かし、火炎の挙動をビデオカメラにより観測した。

## 3.3 実験結果および考察

### 3.3.1 火炎先端の挙動

#### (a) 一定速度における火炎先端の様子

可燃性固体の移動速度  $V_T$  が一定の場合について、ビデオカメラで撮影した火炎の様子を図 3-2、3-3 に示す。図 3-3 は静止座標から火炎を観測した場合で、可燃性物質は図の左方向に 10 cm/s 一定で移動している。0.2 秒おきに並べて示したが、火炎は一定形状、一定速度で静止空間を伝ばしている。図 3-3 は、移動座標から観測した火炎先端の様子である。ビデオカメラのシャッター速度は 1/1000 s とした。ここで、ビデオカメラと試料の PMMA は同一のテーブルに載せられ、同じ速度で左方向へ移動している。火炎先端は、移動前には PMMA の左端より左側に張り出しており、PMMA の移動開始とともに少し右側に移動する。また、火炎の形状が PMMA の移動速度  $V_T$  に応じて変化することから、火炎各部の移動速度は PMMA の移動速度  $V_T$  とは異なることがわかる。さらに、 $V_T$

の増加とともに火炎が次第に表面に近づく様子から、火炎は対向する気流の影響を強く受けていることもわかる。

火炎先端は、PMMAの移動速度 $V_T$ の増加とともに、水平方向右側へ後退するが、 $V_T=30$  cm/sまでは、平板上に安定して形成していた。このときの火炎先端はPMMAの移動と共に動き、見かけ上は静止しており、完全に“追従”していることになる。ここでの“追従”とは、火炎先端とPMMA先端の相対位置が変化せず、移動平板に固定した観測点から観測上は静止して見えることをいい、火炎先端がPMMAとともに移動していても、相対速度をもち、火炎先端の位置が変動する場合には、PMMAの移動に追従していないとした。観測上、静止して見えても2.3.1節で述べたように火炎先端は静止空間を伝ばしている。

火炎先端の動きを見ると、PMMAが静止している時には、火炎先端の揺らぎは見られなかったが、1 cm/s以下の小さい移動速度 $V_T$ で、火炎先端がわずかに揺らぐことがあった。しかし、 $V_T$ の増加とともに揺らぎはなくなり、火炎先端が安定することがわかった。このような移動速度が小さいときに観測された揺らぎは、移動による相対的な強制対流の効果と静止時に火炎が誘起する自然対流の効果が競合するためと思われる。

$V_T$ が30 cm/sより大きくなると、火炎先端は、平板およびPMMAの前端（左端）付近の表面上をわずかに前後に動き始める。このような火炎先端の動きをここでは“変動”と呼ぶことにするが、この火炎先端の変動は、 $V_T$ とともに次第に大きくなった。 $V_T=60$  cm/sの場合には、火炎先端は、PMMAの前端を中心に表面上を前後に動いている。

ところで、ここでの火炎先端の“変動”と“揺らぎ”の違いは、変動が動的なmoving、vibration、fluctuationに対し、揺らぎがろうそくの炎に見られるflickerのような挙動として区別した。

火炎からの直接発光は青薄色で、本研究では発光強度についての定量化はおこなっていないが、 $V_T$ とともに、その発光の強さを増すことがわかった。ここで、図3-3(d)のみは、輝炎からの光が強く、カメラの感度を下げて撮影したため、火炎先端付近の青炎の発光が弱くなって見えている。Lが10 mmの場合、火炎先端

から火炎に沿って4 mmから後方に輝炎が見られ始めることが $L=3$  mmの場合と異なる点で、 $L=3$  mmでは火炎全体で輝炎は見られなかった。

火炎の形状について、図の(b)と(d)の $L=3$  mmと10 mmの場合を比べてみると、 $V_T$ に対し、その先端付近の形状(傾き)はほぼ同様であり、 $L$ に対する依存性が小さい様子がわかる。

### (b) 火炎先端の位置と追従性

PMMAの移動速度 $V_T$ に関する火炎先端の水平方向の位置を調べ、整理したものを図3-4に示す。PMMA前端から水平方向の距離で、平板先端方向を正とした。火炎先端の $x_T$ は、移動速度 $V_T$ に対して直線的減少するような、すなわち火炎先端が後退してPMMA前端に近づくのではなく、次第に変化しなくなる、すなわち火炎先端は動かなくなることがわかる。この火炎先端位置の変動については、後節でさらに議論する。

火炎先端は、 $V_T$ が30 cm/s付近までは、安定して形成され、その $V_T$ より大きくなると、PMMA前端を中心に大きく変動するようになる。火炎先端の変動の判定は、目視観測によった。ここで、 $V_T$ の範囲を、火炎先端の挙動が安定している領域A、変動している領域C、安定から変動に遷移する領域Bと分類してみた。火炎先端が変動する場合について、その変動する最大範囲を棒線で示したが、火炎先端位置の変動が $V_T$ とともに増加することがわかる。火炎先端は、領域AではPMMAの動きに追従し、見かけ上静止しているのに対し、領域Cでは、PMMAの動きに追従できず、変動している。このことから、火炎先端が可燃性物質PMMAの移動速度 $V_T$ とともに動くことのできない限界があり、それがこの場合、 $V_T=30$  cm/sから40 cm/sの間にあることがわかる。

平板表面に対し、垂直方向での火炎先端の挙動に着目してみると、領域Aにおいて、平板表面から火炎先端までの高さ(stand-off distance)は、0.9 mm付近にあり、 $V_T$ とともに変化することはなかった。しかし、領域Cでは、火炎先端が、0.9 mmを中心に0.1 mmから0.2 mmさらに表面に近づいたり、離れたりという垂直方向の変動をすることが観測された。平板表面は吸熱(熱損失)として作用するため、火炎先端は、表面に付着することはほとんどなく、平板表面に対して消

炎距離以下に近づくことができず、その垂直方向の動きは拘束される。このような変動の周期は、平板の移動速度の増大とともに短くなった。

### (c) 加速時の火炎先端の様子

可燃性固体が加速移動する際の火炎の様子を調べた。加速移動する場合の火炎の挙動を示す一例として、火炎先端の水平位置を調べた結果を図3-5(a)と(b)に示す。これらの加速度は、 $5.3 \text{ cm/s}^2$ と $40 \text{ cm/s}^2$ で、 $L$ はともに $3 \text{ mm}$ である。図の横軸には、静止座標から見た可燃性物資の移動距離 $X_T$ も併せて示した。

図3-5(a)の加速が小さい場合についてみると、移動開始とともに火炎先端は除々にPMMA前端に近づいてくる。加速場であることから2.3.3節で述べたように、 $0.61 \text{ s}$ までは表面の流れはすべり流れと考えられるが、時間とともに移動固体の移動速度が増して、火炎先端は、PMMA前端に近づいてくるのがわかる。しかし、時間の経過とともにその火炎先端の動きは小さくなり、 $x_f$ は一定値約 $0.2 \text{ mm}$ に落ちつく。しかし、 $t=6 \text{ s}$ 以後では、移動速度は $30 \text{ cm/s}$ を超え、火炎先端は変動するようになった。火炎先端位置に対する加速時の移動速度 $V$ と図3-4の一定速度の場合とを比較すると、加速時の微小時間ごとの移動速度 $V$ の各段階と一定速度のときの火炎先端の位置がほぼ等しいことがわかる。つまり、 $5.3 \text{ cm/s}^2$ という場の変化速度はまだ、定常現象に近く、火炎先端の移動が十分に対応できる。別の言葉でいうと、場の変化に対して、燃焼反応と熱移動に関わる現象が十分に速いので、一定速度の場合と同様であると言える。

図3-5(b)には、加速が大きい場合の結果を示す。火炎先端は、平板の移動開始とともにPMMA前端を超えて後退するが、吹き飛びや消炎をせず保持され、その後、表面に沿って前方へ動き、また後退、前進と前後に往復する動きを示す。 $t=0.1 \text{ s}$ までは、平板の移動開始とともに火炎先端に対するその相対速度の増加に従って、火炎先端は後退していくが、PMMA表面上 $x_f = -0.3 \text{ mm}$ で火炎の後退が止まる。移動開始から $0.233 \text{ s}$ までは、平板に沿った流れに、表面から可燃性気体の吹き出しが伴う流れ場を考慮した場合、境界層の発達はまだないものと考えられる。つまり、短い時間に加速される場合、平板先端と表面における粘性の影響が上方へ拡散せず、非粘性流れ[239]と考えられ、定常な流れ場と比べて境界層の発達はない。このことからすると、加速場のなかで、火炎先端が境界層内

の流速の小さい領域で保持されているとは考えられない。火炎が後退する位置と後退のあとその場所に保持される時間は、加速の程度によって異なり、加速が大きくなるにつれて後退は大きくなり、保持時間は長くなる。しかし、後退した位置は、 $210 \text{ cm/s}^2$ でも  $x_f = -0.5 \text{ mm}$ 、時間は、 $0.066 \text{ s}$ （ビデオカメラで2から3駒）程度である。火炎先端の変動が小さくなった  $V = 20 \text{ cm/s}$  から  $30 \text{ cm/s}$  の時の火炎先端の位置は、図3-4の一定速度の場合の領域Aとほぼ同じである。平板の移動開始直後には火炎先端は、PMMAの移動に追従しないが、火炎先端が一旦後退して保持された後の経過をみると、一定速度の場合と同様な位置となることがわかった。加速度が大きくなると、非定常性が強くなり、火炎先端は、前後に変動して安定することはなく、PMMAの動きに追従しなくなる。

本実験で調べた場合よりさらに加速が大きい場合、急激な流れの場の変化のために、PMMAの動きに火炎先端が全く追従せず、吹き飛び、消炎にいたる可能性がある。しかし、Takeno [65] らの風洞内で流入空気を急激 ( $0.05 \text{ s}$ 以内) に増加させた流れ場におけるろ紙の垂直下方燃え拡がり実験で、空気の流れに  $1200 \text{ cm/s}^2$  の加速を与えた場合にも、火炎先端はすぐ吹き飛ばず、時間遅れのある消炎を示している。本実験の加速の程度は、この例よりもかなり小さく、本実験の加速度と時間の範囲内では、火炎先端の追従性に関して加速度の影響が初めにあるとはいえ、移動の初期の段階を除けば、火炎先端の挙動は、その時間ごとの移動速度に依存するという結果が得られたのは、妥当であるといえる。すなわち、移動速度に対する火炎先端の形状と位置変化については、準定常的に定まるといえる。

### 3.3.2 試料長さの影響

#### (a) 吹き出し速度

PMMA表面からの可燃性気体の吹き出し量を見積る目的で、静止時において、質量減少速度を求めた。得られた値は、 $L$ が  $3 \text{ mm}$  で  $1.5 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ 、 $10 \text{ mm}$  で  $1.7 \text{ mg/cm}^2\text{s}$  であり、両者の間に本質的な違いはなかった。PMMA表面の温度が  $380^\circ\text{C}$  とし、PMMAがすべてモノマーであるMMAになったとすると、その平均吹き出し速度は約  $0.8 \text{ cm/s}$  となる。

### (b) 火炎先端の安定性

PMMA試料の板の長さ $L$ が、火炎先端の挙動にどの程度寄与するのかを調べた。その結果として、図3-6に長さ $L$ と一定移動速度 $V_T$ に対する火炎先端の安定性を示す。移動速度が30 cm/sまでは、 $L$ によらず火炎先端が安定していることがわかる。 $L=2, 3$  mmのとき、火炎先端の吹き飛びおよび消炎が長さに依存するが、5 mm以上では、その安定性に対する $L$ の影響がほとんどなくなることがわかる。

$L$ が2 mmの場合、静止時でも消えやすく、 $V_T=80$  cm/sで吹き飛び、消炎が起こった。 $L$ の減少とともに火炎は小さくなり、さらに壁面への熱損失の割合が顕著になる。その小さい火炎からPMMA表面への熱移動と、それによる可燃性気体の発生に使われる熱量が減少し、結果的には可燃性気体の発生が減少するものと考えられる。

火炎先端への可燃性気体の供給がその安定性に及ぼす影響を確かめるためには、火炎が形成できる限界に近い、 $L$ が短い（気化領域が小さい）方がよい。そのため火炎の挙動解析では、 $L=3$  mmの場合を中心に観測してきた。その結果、 $L$ が短くても、静止時に測定した $1.5$  mg/cm<sup>2</sup>s程度の可燃性気体が発生し、火炎を形成できる最低限の可燃性気体の供給が連続的におこなわれている限り（8章）、火炎先端は安定であり、可燃性固体の移動に追従できることがわかった。

火炎先端が保持されるためには、 $L$ は重要な役割を果たす。加速のある場合、 $L=2$  mmのとき、移動開始後すぐ吹き飛び、消炎することがあったが、3 mm以上では一度必ず保持された。これは、火炎が後退して達する位置よりもPMMAの後端が後方にあれば、火炎先端が後退しても、火炎への可燃性気体の供給が継続するためであると考えられる。

### 3.3.3 火炎先端に相対する流れ

移動する火炎先端に相対的な流れの場を可視化した様子を図3-7に示す。マイクロバルーン微粒子を静止空間に浮遊させて、Arイオンレーザを光源にスリット光を入射させることで撮影した。可燃性物質が左方向に20 cm/sで移動しているが、火炎に相対する流れは右方向に向かう流れとして観測される。可燃性物質表

面に近い火炎先端付近の相対流れは 20cm/s で、表面から離れ火炎に近づくに従い、相対速度が大きくなる様子がわかる。

### 3.3.4 火炎先端位置の変化と火炎先端の性質

火炎先端の性質を議論するうえで、火炎先端の挙動を検討することは重要である。そこで、測定によって得られた火炎先端の位置変化に基づいて、火炎先端の挙動を、火炎先端が予混合火炎または拡散火炎の性質を持つと仮定して、実際の現象との整合性があるかどうか検討してみる。

火炎先端が予混合火炎の性質を持つと仮定した場合には、気相中を火炎が伝ばするために、予混合気が火炎先端前方から供給され続けなければならない。酸化剤と可燃性気体の供給が火炎反応帯の異なる側からおこなわれる本実験で調べた各条件下では、可燃性気体が火炎先端の下の表面付近の消炎領域を通して拡散し、混合することによって、燃焼範囲内の予混合気が火炎先端前方に形成される必要がある。しかし、 $V_T=30$  cm/s 以下の速度範囲では、火炎先端が PMMA 板の動きと独立に動くことはなく、また酸化剤と可燃性気体の混合がおこなわれているはずの消炎領域に向かって火炎が伝ばしてゆくこともなかった。これらの事実は、火炎先端が自己伝ば性を有するという推定を支持するものではなく、むしろ否定していると考えられる。

予混合火炎であれば、火炎先端に対して伝ばする方向に相対する気体の流れが燃焼速度と等しいとき、火炎先端は、見かけ上静止して見えることになる。この場合、圧力、温度が一定であれば、酸化剤と可燃性気体の性質と混合比に燃焼速度が依存するので、 $V$  の増加とともに火炎先端の位置は後退し、可燃性固体前端に近づくものと思われる。試料をとりつけた平板を加速させておこなった実験では、火炎先端が後退したが、静止時に消炎領域を通して予混合を起こす拡散の速度より大きな速度で可燃性固体すなわち気化領域を前方へ動かしているわけであり (図 2-2)、可燃性固体の加速は、予混合促進に役立っているはずである。しかし、加速させた場合に、移動開始後すぐに火炎先端が前方へ動くという挙動は観測されなかった。

一方、火炎先端が追従しない速度範囲（図3-4のBとCの領域）では、火炎先端がPMMA板表面上まで後退するが（ $x_f < 0$ ）、吹き飛ばされず保持される現象を含め、火炎先端前方で予混合気ができる可能性はある。この場合の火炎先端の挙動は、それが変動する時間周期も短く、 $V=0$  cm/sまでの場合の火炎先端の挙動とは異なる。

以上のことから、火炎先端がPMMAの移動に追従するVの範囲では、火炎先端の移動には、その先端が予混合火炎の性質を持たなければならない、という条件が必要でないことがわかる。

本研究では対象としている移動する試料PMMA板の前端付近の火炎先端は酸化剤側にある。PMMAが解重合した場合に発生すると考えられるMMAの化学量論係数は6であり、この種の火炎の性質は、酸化剤の流れに可燃性気体を吹き出した場合にできる対向流拡散火炎 [187]、衝突噴流拡散火炎 [189, 223] の性質に類似しているように思われる。それらの拡散火炎の形成位置は、酸化剤の流速、可燃性気体の種類、その吹き出し速度と濃度場、温度場に依存し、よどみ点から離れている。火炎は、一様な空気流の速度Vが増加しても、可燃性気体の吹き出し位置、あるいはよどみ点は単調的に近づかず、よどみ点からの火炎面の変位は $V^{-1/2}$ に比例する [233]。本研究で対象とした火炎とそれらの気体燃料を使った対向流拡散火炎とは、幾何学的にも異なり、また本研究では消炎距離だけ火炎先端が固体表面から離れており、単純に比較はできないが、火炎先端の位置に及ぼすVの影響は定性的に類似していると考えられるので、それらを比較検討することにした。

$$\begin{aligned} \text{拡散係数を } D、\text{速度を } V、\text{代表長さを } l \text{ とすると、} & D l / V \sim x_D^2、\text{すなわち、} \\ x_D \sim (D l / V)^{1/2} & \quad (3-1) \end{aligned}$$

とおける。ここで  $x_D$  は、拡散のおよぶ範囲で、拡散層の厚さ程度である。この式は、 $D l$  一定に対し、 $x_D$  が  $V^{-1/2}$  に比例するという図3-4の  $x_f$  と  $V$  の関係をよく示すものである。ここで、(3-1)式では、 $V=0$  が特異点であり図3-4と異なるが、この差は、可燃性固体を移動しない静止状態であっても、火炎の存在による自然対流があることによるためである。すなわち、 $V_T=0$  ですでに速度  $V_D$  の

自然対流があり、 $V = V_T + V_0$ とみると、この考えでよく説明できることがわかる。

さらに、火炎先端が、速度30 cm/sから40 cm/sでPMMAの移動に追従できなくなるので、この速度を、通常の対向流拡散火炎の吹き飛び条件に相当すると考え、他の代表的な拡散火炎が吹き飛びを起こす主流の速度と比較してみる。強制対流下の単一液滴の燃焼は、火炎反応帯をはさみ可燃性気体と酸化剤が異なった側から供給される代表的な拡散火炎である。Kumagai [210] はセタンを使った単一液滴の実験において、強制対流の速度が40 cm/sを超えたところで、液滴の前方に形成されていたエンベロープ火炎が吹き飛び、液滴背後にウェーク火炎として保持されることを観測した。ウェーク火炎になると、その火炎先端は燃焼範囲内の予混合気中に保持される状況となる可能性はあるが、エンベロープ火炎では、火炎先端は拡散火炎ある。これらの燃焼では強制対流の速度の増加とともに質量燃焼速度が増加する、すなわち可燃性気体の吹き出し速度が増加するため、液滴前方の火炎の形成位置の変化は小さいが、拡散火炎である火炎先端が維持できなくなる。

試料のPMMAの移動速度 $V$ の増加とともに火炎先端の発光強度が増加する(図3-3(a)(b)(c))ののは、火炎先端の燃焼強度が増加したからであると解釈できる。本実験において、火炎先端を止めて考えた場合、可燃性固体を移動させることは、火炎先端に対して可燃性気体側の可燃性気体の濃度を増加させることに相当する。その結果、可燃性気体側の可燃性気体の濃度勾配が大きくなり、それに対応して酸化剤側の酸素の濃度勾配も大きくなる。このような濃度勾配の増大による可燃性気体と酸素の火炎反応帯への供給に燃焼反応が追従できる範囲で、燃焼強度は増大し、燃焼反応が継続する。しかし、可燃性気体と酸素の火炎反応帯への供給が増大しすぎると、燃焼反応は追従できなくなり、吹き飛びがおこる。ここでは、火炎先端の燃焼反応が追従できなくなった時点で、吹き飛びが起こり、火炎先端が不安定になったと考えることができる。

### 3.4 まとめ

本章では可燃性固体表面に沿って火炎が伝ばする機構を議論する際に、常に問題となる火炎先端の性質を調べることを目的とし、移動装置に取り付けた可燃性固体試料であるPMMAに着火し、その移動に対する火炎先端の追従性を調べ、火炎先端の性質について検討し、次のような結論を得た。

(1) PMMA試料の移動が定常であれば、その速度が 30 cm/s~40 cm/s以下の範囲では、火炎先端は、移動速度とともに後退するが、常にPMMA試料の前端より先行している。

(2) PMMA試料の移動速度が 30 cm/sから 40 cm/s以上になると、火炎先端は不安定になり、火炎先端がPMMA試料の移動に追従できなくなる。

(3) PMMA試料を急激に加速すると、火炎先端は、一時的に前後に変動するが、吹き消えが起こらなければ、準定常に速度を変えた場合と同じ位置に落ち着く。

(4) PMMA試料の移動に火炎先端が追従できる速度範囲では、火炎先端は、予混合火炎の性質ではなく拡散火炎の性質を示すと考えるべきである。

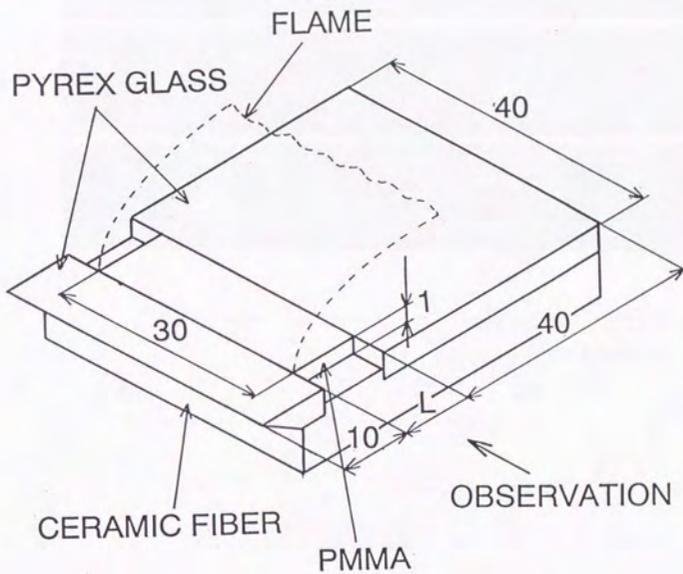


Fig. 3-1. Combustible solid holder.

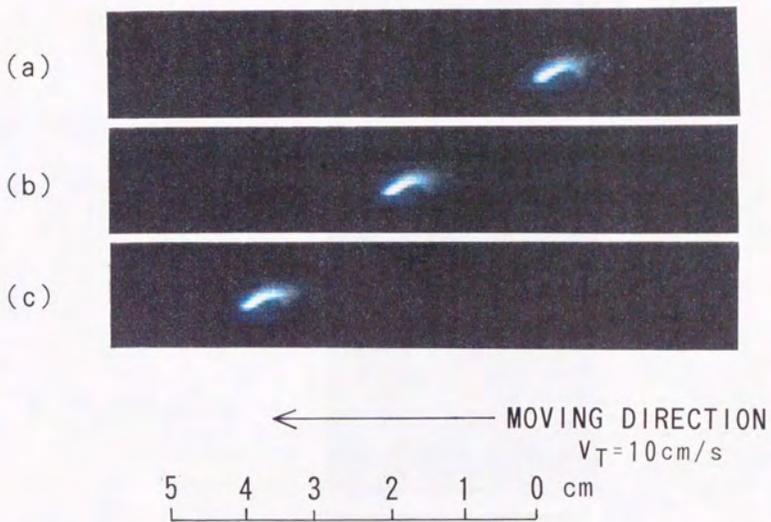


Fig. 3-2. Aspects of flame over a moving combustible material.  
(Observation from stationary system)

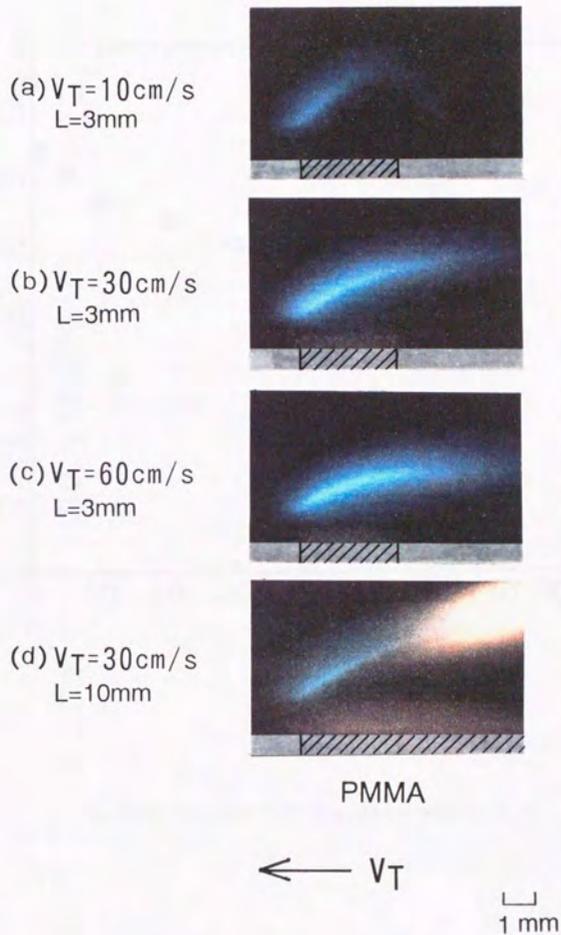


Fig. 3-3. Aspects of leading flame edge over a moving combustible material (Observation with moving system).

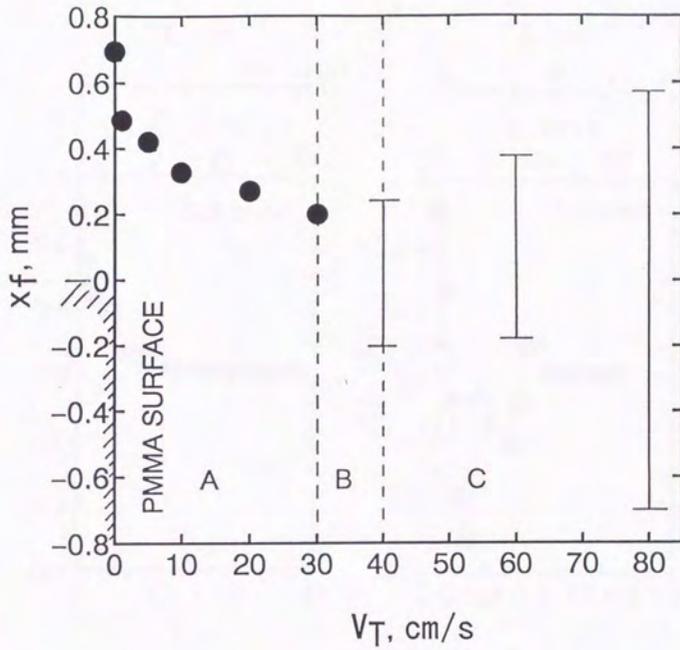


Fig. 3-4. Variation of leading flame edge with  $V_T$  .

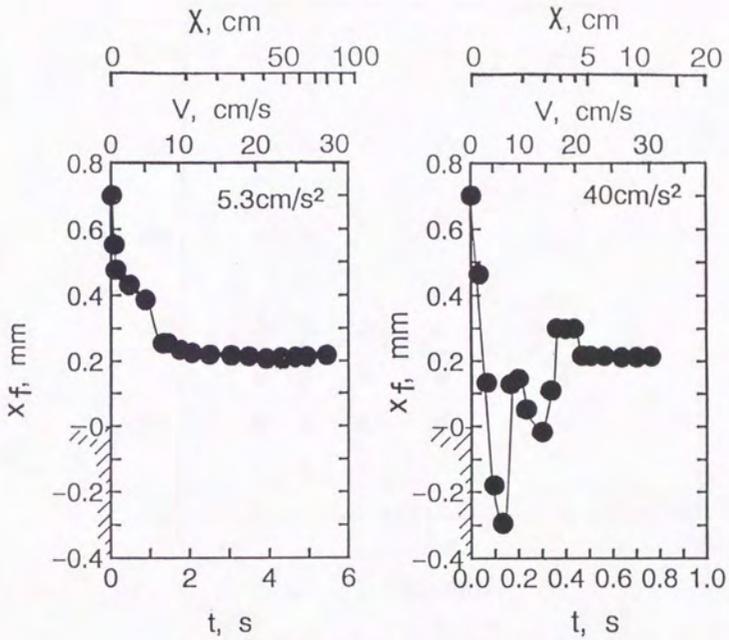


Fig. 3-5. Behavior of leading flame edge with acceleration  $dV/dt$ .

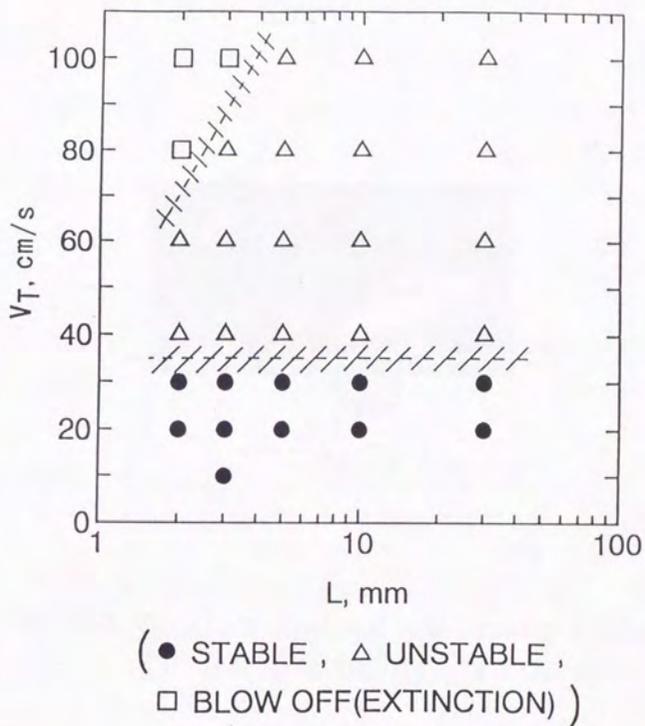


Fig. 3-6. Stability of leading flame edge over a combustible material (PMMA chip).

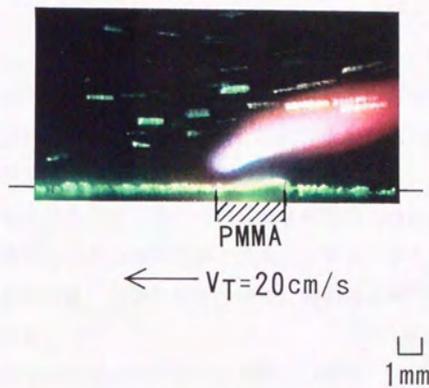


Fig. 3-7. Flow field observed with moving system.  
(Interval  $1/250\text{s}$ )

## 第4章 可燃性液体の入った容器移動時の火炎先端の挙動

### 4.1 実験概要

可燃性物質の燃焼過程については、図4-1のように平野 [231] がまとめている。これらは可燃性物質に沿った燃え拡がりに限定してはいないが、燃焼反応にいたる過程が理解しやすい。可燃性固体表面に沿った燃え拡がりにおいても気相中の過程は、図(a)に示したように、火炎の伝ばの際の火炎からの熱伝達により固体表面を加熱し、熱分解反応、(蒸発)、可燃性気体の発生、燃焼反応に至ることが知られている。これらは順次現象が起こるのではなく、燃焼が継続している場合には、同時並行的・連続的に現象が起こっていると考えてよい。可燃性液体に沿った燃え拡がりは、図(b)に示したように、火炎からの熱伝達により蒸発し、可燃性気体が発生、燃焼反応に至る。これらのことから、気相中で燃焼反応がおこなわれ、燃え拡がる現象では、可燃性気体がどのように発生するのかを調べるのがいかに重要であるかは明らかである。つまり、燃え拡がる際の火炎先端の性質を調べるためには、可燃性気体の発生に関わる現象(蒸発性、気化性)を把握する必要がある。

3章のPMMA固体片一種類のみ用いた実験(1)では、可燃性物質の気化の性質の違いを評価することはできなかった。本章では、伝ば時に火炎からの熱伝達により可燃性気体の発生がおこなわれることは実験(1)と同様であるが、気化に関わる性質を変変するために、引火点、沸点など熱物性の異なる種々の可燃性液体を使った実験をおこなうことにした。そこで、実験を始める前に、次のような点を考慮した。

①液体には固体と違い流動性があることから、燃え拡がり機構を検討する上では、液相の対流の影響を考慮しなければならない。特に燃え拡がりにおいては、火炎の伝ばする水平方向、前方への対流が重要であるが [126]、この対流の影響は6章で検討することとし、本章では、対流を制限できるような小さい容器を使用することにした。

②これまでの燃え拡がり速度の解析から、可燃性物質の気化(蒸発)温度が重要な因子であることが知られ [11-14, 47, 126, 127]、固体表面上では熱分解

温度が、液体表面上では沸点が、燃え拡がり速度を導出する際に検討されてきた。一般的に、単位面積、単位時間、同じ熱量が可燃性物質に加わった場合、気化温度が低いほど可燃性気体が速やかに発生するので、燃え拡がり速度は、気化温度の低い方が大きい [159, 126]。同様の考え方からすると、気化温度が一定であっても、気化のための熱量を多く必要とする場合、可燃性気体の発生が速やかにおこなわれず、燃え拡がり速度が小さいということが理解できる。これは、Williams [47] の総説の中で示した基本的な関係式、

$$\rho V \Delta h = q \quad (4-1)$$

から容易に理解できることである。従って、移動速度との関係を調べるために、気化温度の異なる可燃性液体を使用することにした。

③燃え拡がり機構に関わる火炎先端の性質からすると、火炎先端の予混合性など議論される問題点は多い。液体表面上の燃え拡がりの場合、液体の引火点が代表的な因子として示され、燃え拡がる前の液体の温度が引火点を境に高いか、低いかによって燃え拡がり機構が分類されてきた [6, 123, 124, 126, 127, 142-145]。本研究では、引火点を境に火炎先端の性質が変化するのかどうかは6章で調べることにし、種々の可燃性液体を使用することで、火炎の伝ば時の引火温度の影響が理解できるものと思われる。

④液体表面に沿った燃え拡がりにおいては、火炎先端に対して、可燃性気体はどこから供給されているのかを把握することも重要である。図4-2に示すように、図の左方に移動する火炎の火炎先端への可燃性気体の供給領域としては、領域A、B、Cの三つが考えられる。領域Aは、火炎の移動する前方側から可燃性気体とともに酸化剤が供給される。領域Bは、表面と火炎先端の消炎領域から可燃性気体とともに酸化剤が供給される。領域Cは、表面と火炎下の火炎帯背後から可燃性気体が供給され、酸化剤は領域AやBから供給される。本実験では小さい容器を用い、容器上に定在する火炎を対象とするので、少なくともA領域から可燃性気体が供給されないようにした。

以上の①～④の項目を考慮し、可燃性液体の入った小さい容器を移動させ、そ

の気化領域の移動に伴う火炎先端の挙動を観察し、火炎の移動（伝ば）の際の火炎先端の性質を検討することにした。

## 4.2 実験装置および実験方法

### 4.2.1 可燃性液体

可燃性液体としては、気化性、引火点、沸点、流動性を考慮し、さらに、これまでおこなわれてきた研究との対比のため、メタノール、ヘキサン、1-プロパノール、MMA、デカン、ケロシンを使用した。

容器を移動させた時に火炎先端を観測する場合、移動とともに液体が流動し容器からあふれ、火炎先端がそれに伴い容器の外へ大きく広がることもあり、観測しにくいことが多い。そこで、液体の流動を抑えるために容器内にガラスビーズを詰め、可燃性液体で満たした実験を主におこなうことにした。ガラスビーズの大きさは、火炎先端と液面との間の消炎領域約1 mmよりも小さく、ガラスビーズの凹凸の影響がでないようにするため、33  $\mu$ m直径（つまり、表面の凹凸が17  $\mu$ m）のものを使用した。このガラスビーズは、流れの可視化に用いた中空のマイクロバルーンである。ガラスビーズに液体を浸潤させた燃え拡がり実験では、粒径が減少するとともに、液相内の流動は小さく、固体表面に沿った燃え拡がりに近い挙動を示すことが明らかになっている [150-151]。本実験のガラスビーズの充てんは、流動を抑える目的で用いた。可燃性液体と固体のガラスビーズからなる浸潤させた凝縮相内の鉛直方向の熱移動において、可燃性液体の気化過程におけるガラスビーズの影響が小さいとすれば、可燃性液体に主眼をおき、可燃性液体の気化に伴う火炎先端の性質を調べることができる。

### 4.2.2 小型容器

図4-3は、可燃性液体を入れた容器である。容器は真ちゅう製、容器槽の大きさは、実験(1)との比較をおこないやすいように定め、幅は30 mm、深さは10 mmとした。容器槽は異なる長さのものを二種類製作し、その長さLについては気化領域を変えた実験をおこなうために3 mmと10 mmとした。容器が小さくなると、ボール燃焼に見られる容器壁面への熱移動の影響が無視できなくなる [164]。容器壁が heat sinkとなり熱損失に働くことも、逆に温められた壁がビーズ層内を加

熱することにもなる。このような効果をできるだけ避けるように、実験中に火炎からの熱により容器全体が急激に加熱され、観測に支障をきたさないようにするために、容器槽の底部側の温度が一定温度を保つように、容器は保温槽上に設置した。温度は 22℃（平均）とした。

ガラスビーズは、均一に、最密に充填されるように注意するように、平板を使って詰めた。このときの容器槽において占めるガラスビーズ間の空隙に関して、細密となる面心立方格子の空隙率は 25.95%（体心立方格子は 31.98%）となる。これはビーズ粒径に依存しない値である。

#### 4.2.3 静止時の質量燃焼速度の測定

移動実験の前段階として、静止時の質量燃焼速度（液体の消費速度）を調べた。測定には、電子天秤（ザルトリウスベーシック天秤 BP2100S、最小読取 0.01g）を用い、その上に容器保温槽と燃料容器を載せ、可燃性液体を燃焼させ、その時間ごとの質量減少速度を求めた。

#### 4.2.4 実験手順

容器移動実験は、液体を容器槽の上端まで満たし、着火器具により着火後、火炎が安定した後、速やかに容器を移動させた。この着火から移動開始までの時間は、移動実験が液面の降下が少ない間におこなえるように注意し、いずれも定常燃焼していることを確認後、概ね10秒以内で移動を開始させた。そのときの火炎先端の挙動を、ビデオカメラを用いて観測し、画像の解析をおこなった。

移動速度は、液体表面に沿った燃え拡がり速度（第6章）の 1 cm/s から 100 cm/s を考慮し、静止状態から 1、5、10 cm/s、それ以上は 10 cm/s ごとを標準に 100 cm/s まで変化させた。同一実験条件における実験作業は、4 回ずつを標準とし、同一条件内で火炎先端の挙動が他の回と異なる場合は、任意に回数を増やした。

### 4.3 実験結果および考察

#### 4.3.1 静止時における質量燃焼速度

静止時の質量燃焼速度を図4-4に示す。これは、 $L=3$  mmについて得たもので、着火して炎が表面に拡がってから計測を開始し、10秒ごとに計測した。得られた結果から、メタノール、MMA/ビーズの燃焼速度が大きく、デカン/ビーズが小さいことがわかる。いずれも、10秒から30秒の間は一定速度で燃焼し、その後、次第に燃焼速度が減少する。メタノール/ビーズとデカン/ビーズは50秒以降は炎が小さくなり、消炎する様子が観測された。

燃焼速度は、ガラスビーズに浸潤させると半分近く減少することがわかる。液体の充てん量（浸潤量）からすると、例えば、メタノールは約720 mg、メタノール/ビーズは190 mgとなる。メタノール/ビーズが約90 mg消費した時点で消炎していることから、浸潤量の約半分程度しか消費できないことがわかる。

表4-1には、これらの50秒までの平均質量燃焼速度と、表面では沸点温度で可燃性気体が吹き出すと仮定して算出した吹き出し速度を併せて示した。いずれも、10秒から30秒の間は一定燃焼をすることから、容器移動が10秒以内（図2-13参照）では、十分に可燃性気体が発生できることが予想される。

#### 4.3.2 静止時の火炎先端の形成位置の変化

表4-2は、容器静止時の火炎先端の形成位置を調べた結果である。この形成位置をここでは原点からの変位と定義すると、火炎先端は鉛直方向よりも垂直方向へ変位する量が多いことがわかる。鉛直変位は、0.92 mmから1.14 mmで誤差を考慮すれば、差は殆どみられないが、水平変位に関してはケロシンの0.36 mmからヘキサンの1.63 mmまで明らかな違いがみられる。ここで、火炎先端の形成位置の変化について検討をおこなってみることにする。

伊藤ら[274]の縁（リム）が薄い容器を使った場合の液面燃焼における実験では、異なる可燃性液体の火炎の形成位置の違いは、よどみ点に対して、化学量論係数が増加するほど酸化剤に変位することを明らかにしている。化学量論係数が、メタノール1.5、1-プロパノール4.5、MMA6、ヘキサン9.5、デカン15.5であることから、もし、よどみ点と同じ位置にあるとすれば、逆の順で、火炎先端は原点から酸化剤側に変位することになる。しかし、このことが本実験結果と単純に

比較できないことは、表4-2から明らかである。同じ可燃性液体でも液体のみとガラスビーズに浸潤させた場合でも火炎先端の形成位置が異なり、メタノールとメタノール/ビーズを比較すると、液体のみのほうが変位が大きい。さらに、メタノール/ビーズとデカン/ビーズの比較では、デカン/ビーズの方が変位が小さいことがわかる。従って、本実験における火炎先端位置が、個々の可燃性液体の化学量論係数により一律的に定まるわけではないことがわかる。

液面燃焼では通常、薄いリムを使用しているため、容器側壁に沿って浮力に伴う上向き自然対流があり、火炎先端には上向き対向気流流れ場に形成される。しかし、本実験で使用した容器は、十分に大きいリムを持つ構造となっているため、容器側壁に沿った流れは拘束され、上記のような比較ができないことがわかる。また、火炎の傾きが可燃性液体によって少しずつ異なることから、温度境界層 (thermal boundary) が異なり、その結果、自然対流が変化するので、流れの場が可燃性液体ごとの燃焼によって異なることが推測される。

火炎先端の形成位置の違いを、気体分子の拡散速度の見積もりから類推してみる。分子拡散速度は藤田の式 [252] より、メタノール  $4.39 \times 10^{-6} \text{T}^{1.83} \text{cm}^2/\text{s}$ 、デカン  $1.42 \times 10^{-6} \text{T}^{1.83} \text{cm}^2/\text{s}$  と推算できる。3章で用いた式 (3-1) からメタノール気体分子とデカン気体分子の拡散できる距離を考えると、それらは拡散係数の平方根に比例し、 $(4.39/1.42)^{1/2} = 1.76$  から、メタノール気体分子がデカン気体分子よりも 1.76倍だけ空気側に拡散できることがわかる。同様に、1-プロパノールは  $2.91 \times 10^{-6} \text{T}^{1.83} \text{cm}^2/\text{s}$  とすると、 $(4.39/2.91)^{1/2} = 1.23$  となり、メタノール気体分子に対し、1-プロパノール気体分子は  $1/1.23 = 0.813$  倍で空気側に拡散できるものと推測できる。

ケロシンが生成する可燃性気体分子類については、空気に対する拡散係数が概ね分子量に反比例することから [250, 252]、デカン気体分子よりも拡散領域が小さいと推測でき、火炎先端の空気側への変位が小さいことがわかる。これらの結果は、実験結果と良く一致する。しかし、ヘキサシタン気体分子の拡散係数は  $2.09 \times 10^{-6} \text{T}^{1.83} \text{cm}^2/\text{s}$  であるが、メタノール/ビーズよりも空気側に変位している点は上述の傾向とは異なる。同様に、メタノールとメタノール/ビーズの火炎先端の形成位置の違いが説明できない。

火炎先端の形成位置の違いは、吹き出し速度（質量燃焼速度）からも検討できる。表4-1に示した吹き出し速度の見積もりからは、メタノール2.6 cm/s、メタノール/ビーズ1.3 cm/sである。可燃性気体の拡散方程式は、

$$\begin{aligned} \rho \partial Y_F / \partial t + \rho u_T (\partial Y_F / \partial x) + \rho v_T (\partial Y_F / \partial y) \\ = \rho D (\partial^2 Y_F / \partial x^2 + \partial^2 Y_F / \partial y^2) + \dot{m} \end{aligned} \quad (4-2)$$

表面での吹き出し速度  $v$  と垂直方向への濃度勾配の関係は、

$$\dot{m} = (\rho v)_s = (\rho v Y_{FS})_s - \rho D (\partial Y_F / \partial y)_s \quad (4-3)$$

ただし、 $\dot{m}$  は質量燃焼速度、 $\rho$  は密度、 $D$  は拡散係数、 $Y$  は可燃性気体の質量分率で、添字FSの方は表面での質量分率である。

従って、

$$\dot{m} = (\rho v)_s = - \{ (\rho D) / (1 - Y_{FS}) \} (\partial Y_F / \partial y)_s \quad (4-4)$$

濃度場は、厳密には、今は未知となっている表面近傍の可燃性気体の濃度を運動方程式と連立させ導く必要がある。実験で得られた $\dot{m}$ が式(4-2)の生成項であることから、吹き出し速度（あるいは質量燃焼速度 $\dot{m}$ ）が増加すると、濃度の高い領域が空気側に拡がるのが容易に理解できる。（ただし、濃度場の計算は7章でおこなっている）。

以上のことから、この火炎先端の位置が、可燃性気体の分子拡散速度に基づいていることが明らかになった。

#### 4.3.3 容器移動時の火炎先端の挙動

図4-5(a)から(g)は、容器の移動速度 $V_T$ に対する火炎先端の位置を水平方向と垂直方向について調べた結果である。火炎先端が安定側(stable)にある誤差棒は、実験回数ごとの違いを示し、丸印は平均位置を示す。不安定側(unstable)にある誤差棒は火炎先端が変動しており特定できなかったため、平均位置(丸印)の記載はおこなっていない。図4-5(a)はメタノール液体のみの場合で、図(b)から(g)はそれぞれの液体をガラスビーズに浸潤した場合である。いずれも容器

長さ $L=3$  mmに関する結果である。

いずれの結果にも共通していえる火炎先端の挙動は、 $V_T$ が増加すると火炎先端が原点側（可燃性液体側）に近づき、さらに $V_T$ が増加すると、火炎先端が不安定に変動を始め、容器の移動速度に追従できなくなるということである。図(c)～(f)に示したように、 $V_T$ が80 cm/sに達する前に吹き飛び、消炎することがわかった。特に水平方向の変位をみると、 $V_T$ が1 cm/sでも火炎先端はすぐ原点側に近づき、 $V_T$ 増加とともに移動速度に反比例するように変化するのは、PMMA片を使用した場合と同様である。しかし、図(e)のデカン/ガラスビーズと図(f)のケロシン/ガラスビーズでは、火炎先端が安定しているものの、 $V_T$ の増加に伴い $x_T$ が負になることがわかった。ケロシン/ガラスビーズでは $V_T$ が25 cm/sを過ぎ30 cm/sになると、火炎先端が変動し始め、40 cm/sを過ぎ、50 cm/sになると吹き飛び・消炎に至る。これらの火炎先端の容器の移動に追従できなくなる速度は、30 cm/sから45 cm/sであることがわかった。なお、このような限界については、次節以降で検討する。

いずれの液体についても垂直方向の変位は、わずかではあるが、移動とともに表面に近づく傾向が見られる。このことから、平板付近の火炎先端に相対する流れの影響を受けることがわかる。可燃性液体表面や平板表面は熱損失があるため、火炎先端は壁面から離れて形成している。予混合火炎の着火に関する消炎距離は、0.1 mmのオーダ [238] で、表面上に形成するここでの火炎先端の距離はそれよりも大きい。つまり、火炎先端は、燃焼反応が継続できる距離だけ離れて形成していることになる。また、鉛直方向の変動範囲が大きくないのは、表面から火炎先端までの距離、最大でも1.2 mm程度までは、移動速度が増加しても、鉛直方向の可燃性気体の分子拡散がその距離は十分拡散しうることを示すものと考えられる。このような上限が、用いた可燃性液体のいずれにも存在することが特徴的な火炎先端の挙動の一つである。

#### 4.3.4 可燃性気体の供給と火炎の伝ば

##### (a) 物質伝達

燃え拡がり機構を論ずる理論解析の定式化のなかでは、物質伝達数、いわゆる Spalding の B ナンバを用いて説明されることがある [45, 113, 244]。Spalding は、単一液滴に見られるような可燃性液体の燃焼について、加熱-蒸発-可燃性気体発生の一連の過程を次式で表した [247]。

$$B = \frac{m_0 H / r + c (T_g - T_s)}{Q} \quad (4-5)$$

ただし、 $m_0$  は酸化剤濃度、 $H$  は燃焼熱、 $r$  は化学量論係数、 $c$  は比熱、 $Q$  は気化熱、 $T_g$  は気体の温度、 $T_s$  は表面温度である。

このような関係は、加熱によって可燃性固体から可燃性気体の発生にも拡張されている [45, 244]。例えば、De Ris の式 12 [100] の適用では、可燃性固体表面に沿った燃え拡がりの式の導出で、火炎先端をはさみ表面への熱伝達から可燃性気体の発生を熱分解（気化）領域の境界条件として考慮している。Bhattacharjee [113] は、De Ris の式を再整理し、気化の特性が火炎先端位置と火炎全体の形状、さらに燃え拡がり速度を考慮する上で重要であることを示している。

式(4-5)では、メタノールが2.95、デカンが8.4、ケロシンが9.8となり [247, p. 130]、ケロシンが蒸発のために多くの熱量を必要とすることがわかる。火炎先端の変動が増加し非正常性が強くなると、物質表面からの可燃性気体が発生する場合、加熱-気化の相互作用、熱伝達-物質伝達の相互作用が火炎先端の保持に大きく影響し、加熱の減少が可燃性気体の発生を減少させる。従って、火炎先端の時間あたりの変動はより顕著になる。

##### (b) 質量燃焼速度と追従限界速度

Emmons 問題 [244] に代表される気流速度と質量燃焼速度の関係をを用い、質量燃焼速度と火炎の伝ばの関係を検討してみる。境界層燃焼に関するこの Emmons 問題における流れの場は、境界層の発達のあるブラジウス型の流速分布を仮定しているため、Hirano ら [175] が実際に境界層燃焼における流れの場を求めた結果とは

だいぶ異なる。Emmonsの場合、気流速度の増加に伴い、質量燃焼速度が増加するという解析結果は、気流速度の増加に伴って、火炎が表面近くに形成するようになることを考慮して得ている。Spaldingは、ケロシン単一滴の質量燃焼速度が強制気流速度とともに増加することを明らかにしている [149, 247]。これらのことと図4-5(f)に見られたケロシン/ガラスビーズの実験事実を例にとれば、

- 1) 表4-1に示した静止時の質量燃焼速度が他のものよりも小さいということ、
- 2) 火炎先端の容器移動に追従できる速度が他の液体よりも小さいこと、
- 3) 他の液体と異なり、40~50 cm/sで吹き飛び、消炎に達すること、
- 4) 移動速度が5 cm/sで可燃性液体表面上まで後退して形成すること、

などから、質量燃焼速度が火炎の伝ばに強く影響していることが容易に推測できる。火炎の伝ば速度が有限までは、火炎先端へ可燃性気体が十分に供給されるが、供給が低下すると火炎先端が吹き飛び、消炎に至るということである。

ここで、容器の移動速度に火炎先端が追従できる速度が30~40 cm/sで、それ以上の速度では火炎先端が変動を開始し、吹き飛び・消炎に至る速度が50 cm/s~80 cm/sから見られることから、それらの速度を追従限界速度と吹き飛び・消炎速度として検討をおこなってみた。

メタノール/ガラスビーズとデカン/ガラスビーズの追従限界速度は、それぞれ40 cm/sと30 cm/sであり、吹き飛び・消炎速度については、デカン/ガラスビーズは60 cm/sであるが、メタノール/ガラスビーズでは80 cm/sでも吹き飛び消炎することはなかった。移動速度が小さい間は、液体の種類によって火炎先端の形成位置の違いがあるものの、先端は安定形成し、移動速度に対する形成位置変化が次第に後退する様子は、いずれにも見られる。このような場合、前節4.3.2の静止時の際に火炎先端の形成位置の変化の説明が適用でき、追従限界速度までは、火炎先端の性質が静止時と同様であることが推測される。しかし、吹き飛び・消炎速度に達するまでには、火炎先端が大きく変動する様子が見られる。ここでの、消炎にいたる原因としては、

- 1) 可燃性気体の供給不足（質量燃焼速度の減少）、
- 2) 熱損失（容器や可燃性液体表面による、または相対気流速度の増加により火炎が表面に近づき、火炎反応帯が伸長すること）、

3) 化学反応時間の増加 (ダムケラ数の減少)、  
などが考えられる。可燃性気体のみの吹き出しの場合 (5章) の3) の効果と異なり、ここでの液体の場合、熱伝達に対して、1) の効果が大きいようである。

以上のことを整理すると、火炎が空間内を大きい速度で伝ばするには、十分な可燃性気体が発生する必要があることがわかる。逆に、可燃性気体が十分に発生すれば伝ばが可能となる。つまり、火炎先端の伝ば速度が増加するときは、火炎先端には相対的には強制対流の増加があるが、それとともに可燃性気体の発生が増加すればよいと考えることができる。Spaldingは、その液体燃焼に関する実験 [149] から、強制対流の増加とともに質量燃焼速度が増加することを明らかにし、このときは燃焼強度が増加していくが、燃焼反応が継続できなくなり、消炎に至ることを説明している [247]。

#### (c) 質量燃焼速度、可燃性気体の供給速度と火炎の伝ば速度

火炎の伝ばと質量燃焼速度の関係を明らかにするために、EmmonsとSpaldingの考え方をもとに、本実験における現象を説明するために、模式的に図4-6のように描いてみた。これは、火炎先端が燃焼反応速度、熱伝達による可燃性気体の供給に依存し、拡散火炎における性質から説明しようというものである。横軸は火炎の伝ば速度 (燃え拡がり速度)  $V_f$  で、縦軸は可燃性気体の質量燃焼速度  $\dot{m}_f$  である。併せて、火炎の温度  $T$  も模式的に示した。火炎が空間を伝ばする場合、 $\dot{m}_f$  に対する酸化剤側の質量燃焼速度 (酸化剤の消費速度) も示すことができる。近似的に  $\dot{m}_f$  は、火炎先端への供給速度と見ることができる。

線(I)は、火炎からの熱伝達による加熱の影響と燃焼速度の関係 ( $\dot{m} \propto V^b$ ) を表し、移動速度の増加に伴い、その相対気流のため火炎が表面側に近づくことによる熱流束の増加と可燃性気体の発生量の増加から推定される。線(II)は、移動速度と燃焼反応の関係 ( $\dot{m} \propto V^a$ ) で燃焼強度に限界値が存在することから、図のような曲線が推定される。線(III)は温度変化を表す。着火後、急速に温度上昇があり、火炎温度に達し、吹き飛び消炎に至る場合、火炎温度の低下から急速に消炎に達することが推定される (Fendell曲線 [190])。

点Aは、静止時の質量燃焼速度  $\dot{m}_{f0}$  で、移動速度とともに線(I)上の値をとる。

しかし、反応が継続できない限界の存在によりD点で消炎する。線(I)と(II)の間は安定伝ば領域、線(I)より下は不安定、変動伝ば、消炎領域、線(II)より上は吹き飛び・消炎領域にあたる。安定領域とは、火炎先端が消炎せず、安定伝ばができることを示す。

例えば、ある可燃性物質(の気化領域)が $V_C$ で移動し、火炎先端がそれに追従している場合、火炎先端は $V_{FC}(=V_C)$ で伝ばしている(C点)。火炎先端はC点の条件のもとで伝ばしているが、もし可燃性気体の量 $\dot{m}_f$ が突然増えた場合、線(II)以下にあると化学反応速度は十分に大きく、火炎先端が点Eの条件のもとに置かれると、火炎先端が図上で平衡する位置として、火炎先端は線(I)上の点Gに移動し(注意)空間内の火炎先端の移動ではない)、点Gにおける条件に見合う可燃性気体の供給がなければ、線(I)に沿って、伝ば速度が減少する。線(I)に沿った変化は熱伝達に関するもので、加熱量が増加すると、線(I)に沿って上方に向かい、伝ば速度が増加する。点Dは(最大の)燃焼強度に相当し、伝ば速度が $V_{FD}$ 以上になると燃焼反応速度が律速となり、線(II)に沿ってJ方向へ向かうが、不安定領域にあたる。つまり、線(I)以下にあるので、その伝ば速度を維持するには可燃性気体の供給量が少ない。

火炎先端が点Cの条件のもとで伝ばした場合、仮に、可燃性気体の供給量が急激に減少し、火炎先端が点Fに置かれると、点Hまで伝ば速度が減少する。もし、その伝ば速度で、熱伝達と可燃性気体の発生、質量燃焼速度の関係が平衡状態にあれば、その速度で一定となる。

点Bでは、可燃性気体の発生量が少ないため燃焼反応が不安定になり、点Aに至らず、線(II)の点線に沿って消炎する可能性がある。着火前に $\dot{m}_{f0}$ だけ空間に吹き出し、何らかの形で着火がおこなわれると、火炎先端は伝ばをせずとも自然対流にともなう相対気流の存在のため、線(I)に沿って点Bよりも右上方に平衡する。

以上のような質量燃焼速度、可燃性気体の供給速度が熱伝達と反応速度を介して伝ば速度と密接に関連することがこのような模式的な図から理解でき、実験結果を矛盾なく説明できることがわかる。

可燃性気体ごとに線(I)と線(II)の曲線は異なるが、静止時、追従限界速度、吹き飛び消炎速度における $\dot{m}_f$ が実験的に特定できると、このような曲線が得られるものと思われる。

#### 4.3.5 火炎先端の性質と伝ば性

静止時の火炎先端の形成位置の変化、追従できる限界と変動開始、吹き飛び消炎限界に対する傾向が、3章でのPMMA片の実験結果と同様であることがわかった。特に3章の実験との比較のために用いたMMA/ガラスビーズを用いた実験では、吹き飛び・消炎に至る限界速度があるものの、容器の移動に対する火炎先端の追従性に関する様相はほとんど同じであった。火炎先端の形成位置がわずかに異なるのは、質量燃焼速度のわずかの違いであると考えられる。

いずれにしろ、これらの火炎先端の性質が拡散火炎の性質とよく一致することから、追従できる速度範囲までは、静止時の火炎先端の性質(拡散火炎)を持ち、移動速度の増加には可燃性気体の供給速度の増加で対応することがわかる。

追従できる速度に対する火炎先端の形成位置の変化について、デカン/ガラスビーズやケロシン/ガラスビーズは、移動とともに火炎先端が後退し、移動速度が増加すると、伝ばする火炎先端の前方から可燃性気体が供給されることが推測される。これは、可燃性気体の発生領域が伝ばする火炎先端に先行するということであり、その伝ばできる速度の限界が5 cm/sよりも小さいということが推測でいける結果である。実際の静止時のデカン/ガラスビーズ表面に沿った燃え拡がり速度が0.07 cm/s程度[225]であることからすると、可燃性気体の供給は常に火炎先端背後にあり、火炎先端は拡散火炎による性質をもって伝ばしていると見てよい。

その他の液体は、火炎先端が変動しない限り、常に火炎先端が可燃性気体の発生領域よりも先行していることがわかった。

#### 4.4 まとめ

可燃性液体の入った容器（気化領域）を移動させ、そのときの火炎先端の挙動を観察し、火炎の移動（伝ば）の際の火炎先端の性質を検討した。異なる可燃性液体を用いて調べた結果、次のような結論を得た。

- (1) 容器静止時に可燃性液体表面上に形成される火炎先端の位置は、可燃性気体の分子拡散速度に基づいていることがわかった。
- (2) 同じ可燃性液体においても、ガラスビーズに浸潤させると火炎先端の形成位置が異なることがわかった。
- (3) 実験で用いたいずれの可燃性液体においても、火炎先端が容器の移動速度に追従できなくなる速度が 45cm/s 以下にあることがわかった。さらに、吹き飛び、消炎に至る限界速度があることがわかった。
- (4) 火炎先端が移動速度に伴って変動し、吹き飛び、消炎にいたる場合、可燃性気体の供給速度（質量燃焼速度）が重要な役割を果たしていることがわかった。
- (5) 火炎先端が追従できる範囲では、ケロシンとデカンを除き、火炎先端が可燃性気体の供給位置よりも常に先行していることから、火炎先端の背後から可燃性気体が供給されることで火炎が伝ばできることが推測できた。そして、火炎の伝ば速度は、どれだけ可燃性気体が火炎先端に供給されるかということに密接に関連することが推測された。

Table 4-1. Mass burning rate and gas ejection velocity at rest condition.

COMBUSTIBLE LIQUID	MASS BURNING RATE, $\text{mg/cm}^2\text{s}$ (L = 3 mm)	EJECTION VELOCITY, $\text{cm/s}$ (AT BOILING TEMP.)
METHANOL	3 . 0	2 . 6
METHANOL(WITH GLASS BEADS)	1 . 6	1 . 4
1-PROPANOL(WITH GLASS BEADS)	1 . 7	0 . 8 6
MMA (WITH GLASS BEADS)	2 . 9	0 . 8 9
DECANE (WITH GLASS BEADS)	1 . 6	0 . 8 9
KEROSENE(WITH GLASS BEADS)	1 . 0	-

Table 4-2. Location of leading flame edge  
at rest condition.

COMBUSTIBLE LIQUID	$x_f$ , mm	$y_f$ , mm
METHANOL	1 . 6 3	1 . 1 4
METHANOL (WITH GLASS BEADS)	0 . 9 0	0 . 9 2
1-PROPANOL(WITH GLASS BEADS)	0 . 7 8	1 . 1 2
MMA (WITH GLASS BEADS)	0 . 8 0	1 . 0 5
DECANE (WITH GLASS BEADS)	0 . 4 8	1 . 0 7
KEROSENE (WITH GLASS BEADS)	0 . 3 6	1 . 1 3
HEXANE (WITH GLASS BEADS)	1 . 1 4	1 . 0 2

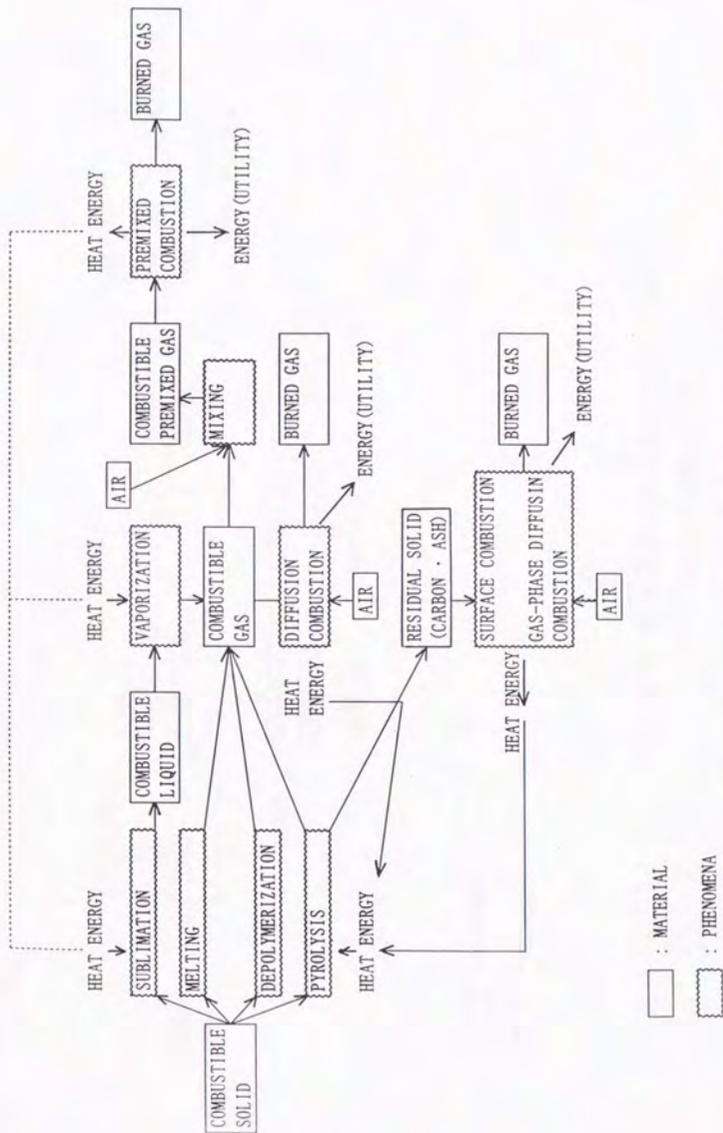
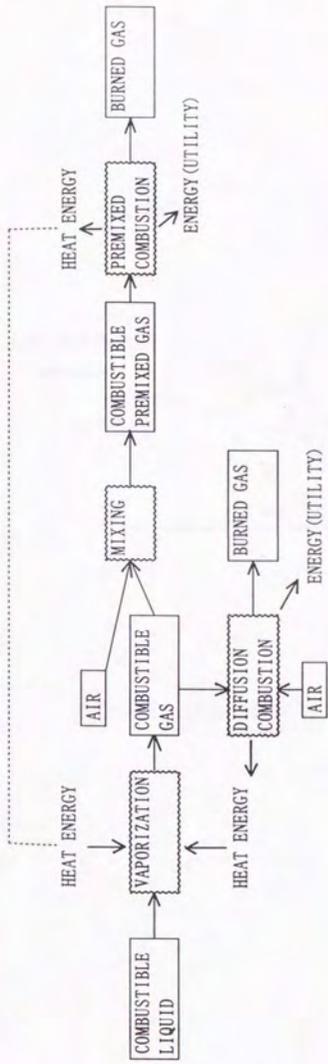


Fig. 4-1. Burning process of combustible material.

(a) Combustible solid

[HIRANO, T., Quotation from textbook "Nensho-gaku"]



[ ] : MATERIAL  
 [ ] : PHENOMENA

Figure 4-1 Burning process of combustible material.

(b) Combustible liquid

[HIRANO, T., Quotation from textbook "Nensho-gaku"]

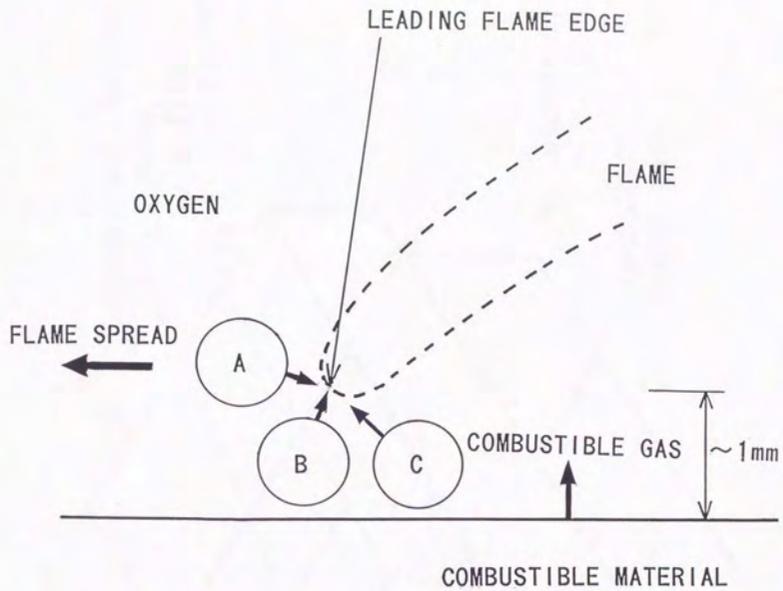


Fig. 4-2. Supply region of combustible gas to leading flame edge.

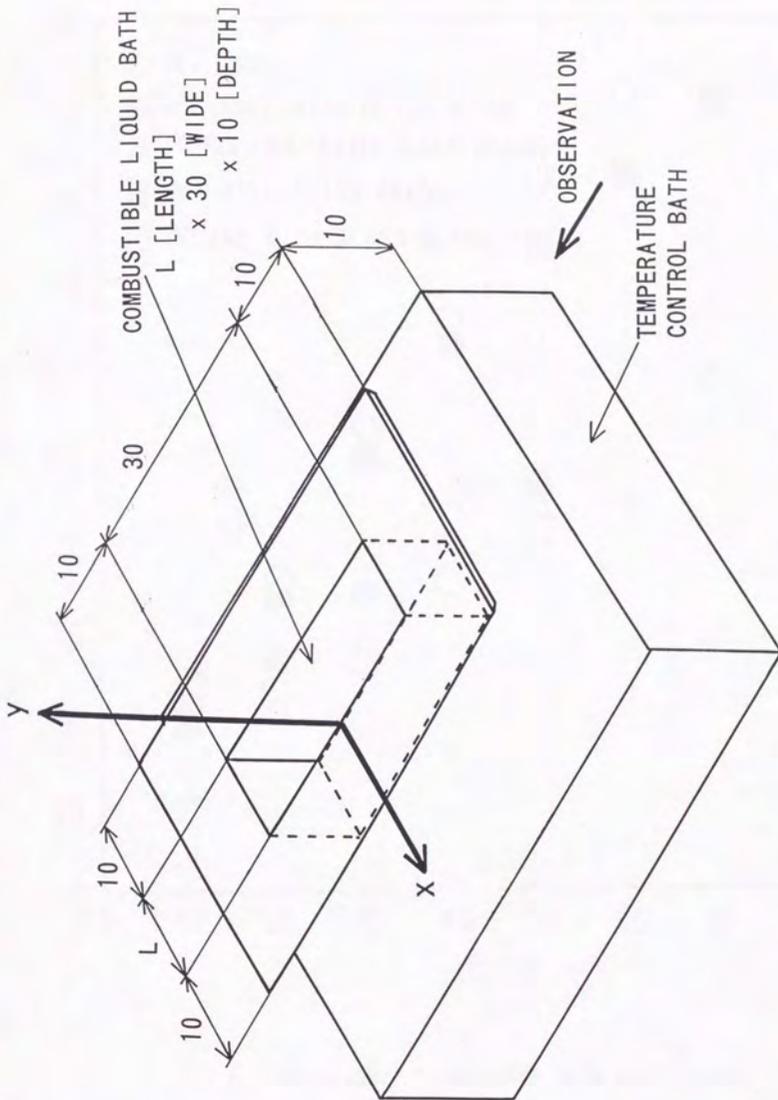


Fig. 4-3. Small tray for combustible liquid.

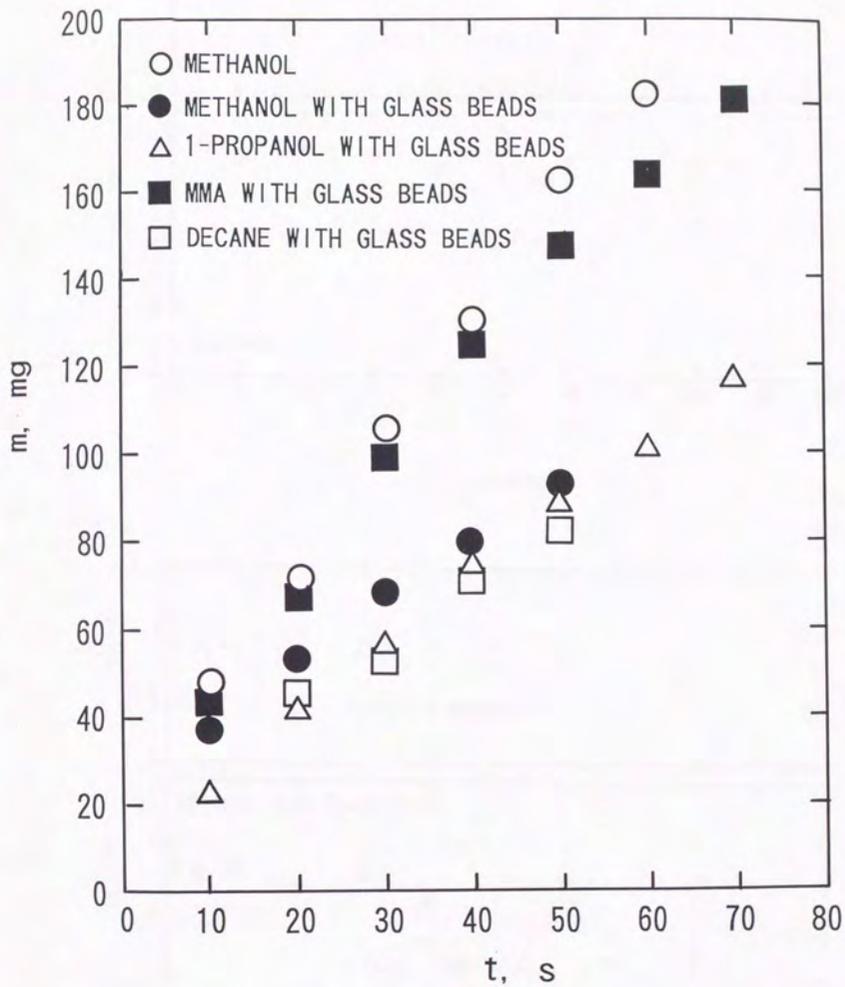
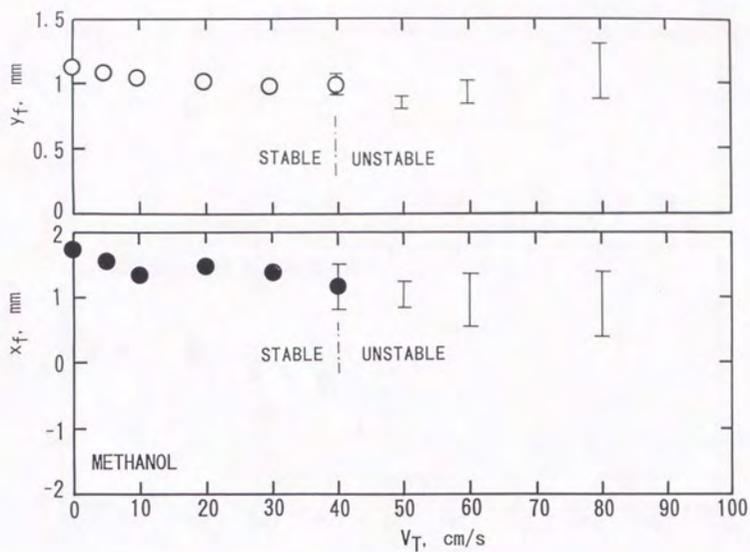
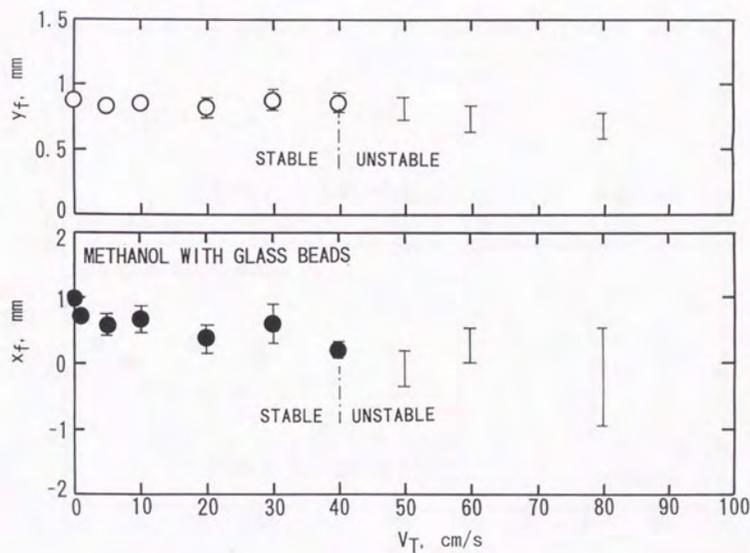


Fig. 4-4. Consumption of combustible liquid due to burning.

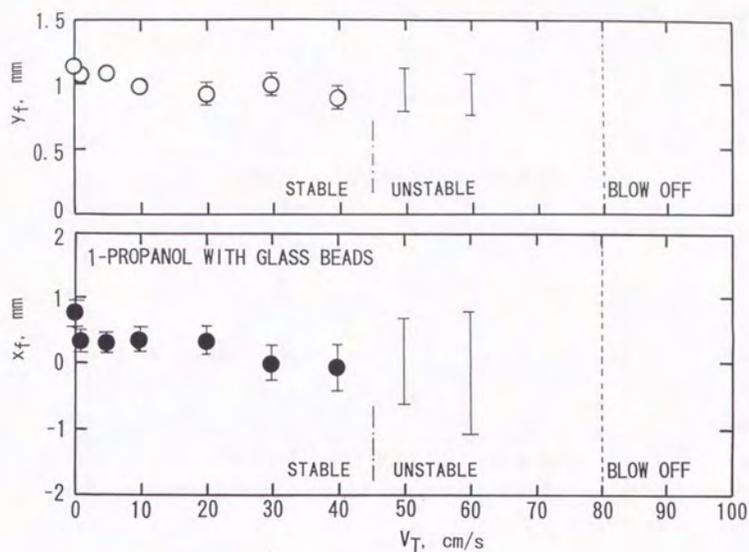


(a)Methanol.

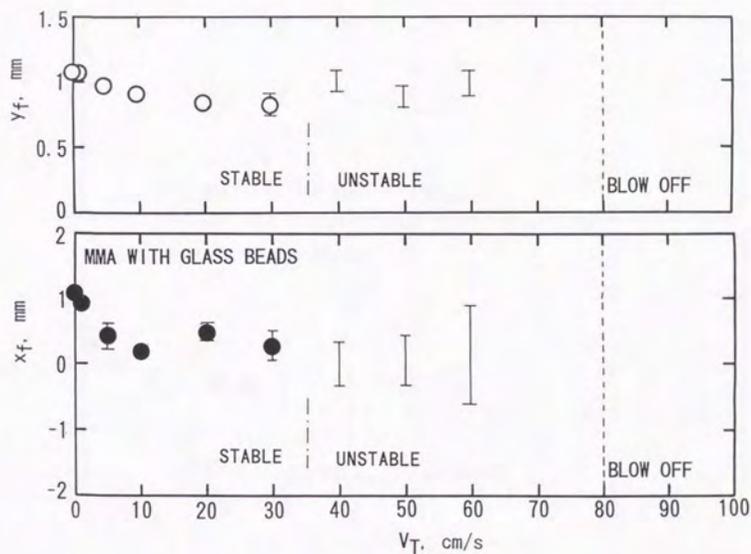


(b)Methanol with glass beads.

Fig. 4-5. Variations of leading flame edge with  $V_T$ .

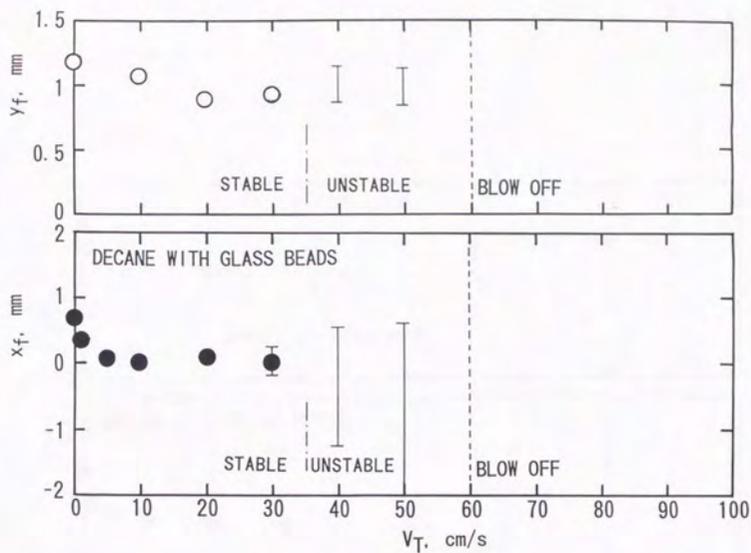


(c)1-Propanol with glass beads

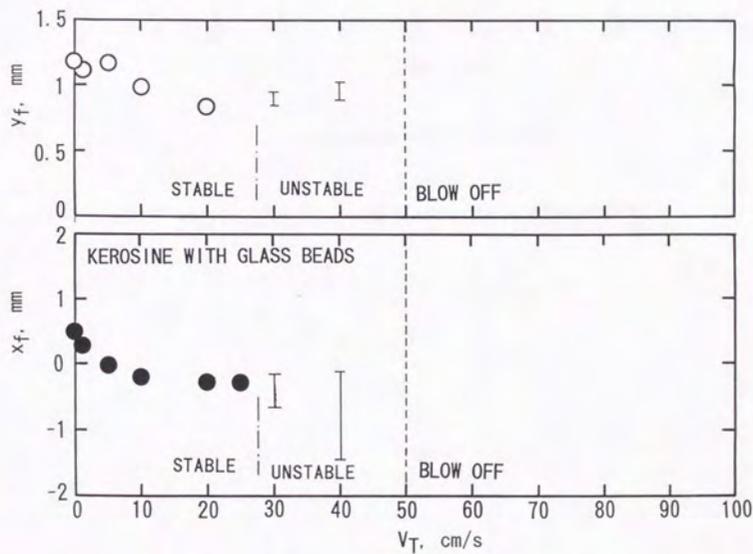


(d)MMA with glass beads

Fig. 4-5. Variations of leading flame edge with  $V_T$ .

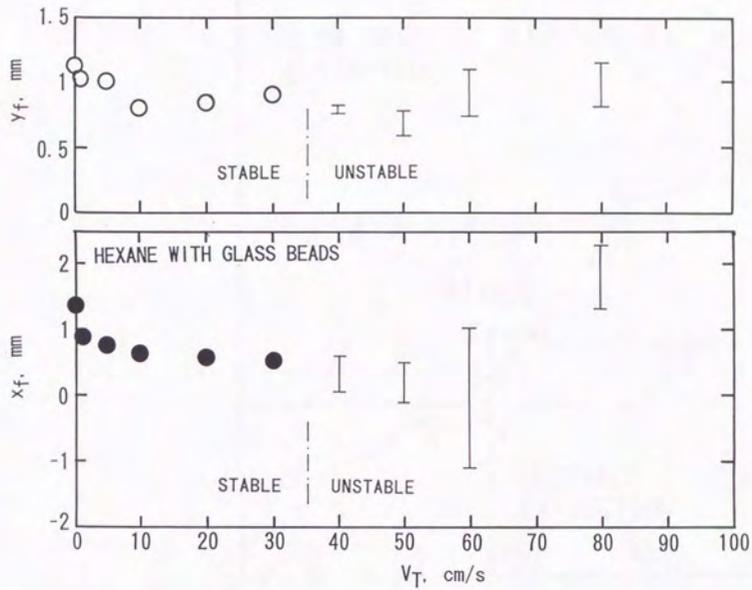


(e) Decane with glass beads.



(f) Kerosine with glass beads.

Fig. 4-5. Variations of leading flame edge with  $V_T$ .



(g) Hexane with glass beads.

Fig. 4-5. Variations of leading flame edge with  $V_T$ .

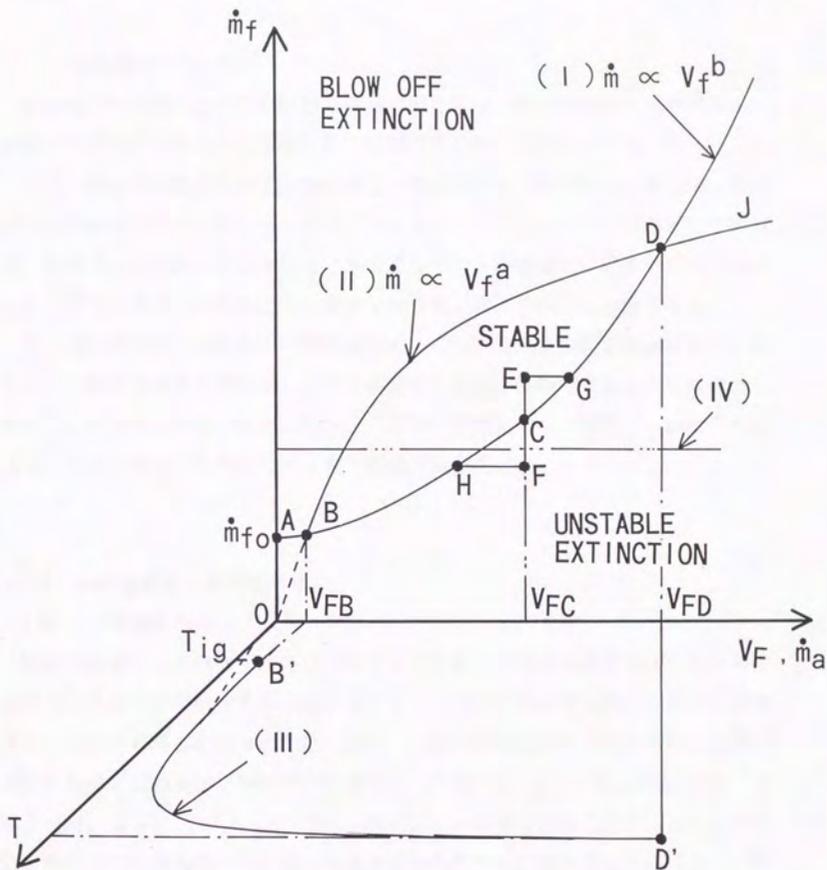


Fig. 4-6. Schematic relation among flame spread rate, mass burning rate, and temperature.

## 第5章 可燃性気体吹き出し領域の移動と火炎先端の挙動

### 5.1 実験概要

燃え拡がり際には火炎の移動とともに気化領域（熱分解領域）が移動するが、凝縮相内の火炎前方へ伝わる熱移動もほぼ同時におこなわれている（図2-1）。これは、熱移動が燃え拡がり速度に関して律速であり、燃え拡がり速度が、凝縮相内の熱移動の速度に等しいということを表している。しかし、表面反応を除けば、通常の火炎は明らかに気相側に形成するので、凝縮相内の熱移動にのみ依存した現象ではなく、気相側にのみ着目した現象を調べることも必要である。

そこで本章では、火炎からの熱伝達によって可燃性気体の供給速度が変化しないように熱移動現象を切り放し、単に吹き出し領域が移動できるように燃焼器を製作し、燃焼器の移動（吹き出し領域の移動）速度に対して吹き出し速度を変化させ、そのときの火炎先端の挙動を詳細に観察した。

### 5.2 実験装置および実験方法

#### 5.2.1 可燃性気体

物性値の異なる可燃性気体によって形成される火炎先端の挙動の違いを観察するため、代表的な可燃性気体であるメタンとプロパンを使用した。さらに、拡散火炎として形成する場合と予混合火炎として形成する場合の火炎の挙動の違いを見るために、これらの可燃性気体の吹き出し実験では、1)メタンのみ、2)プロパンのみ、さらに、3)メタン-空気予混合気の3種類についておこなった。メタン-空気の予混合火炎の時には、逆火を避けるために、吹き出し速度に比べ、燃焼速度が小さくなるようにメタン過剰の当量比1.6で実験をおこなった。

#### 5.2.2 燃焼器

実験に使用した燃焼器は図5-1に示したように、焼結金属（真ちゅう）製の多孔板の吹き出し口とリムにあたる外縁の平板から構成される。焼結金属は実験中の目詰まりを防止するために、公称濾過度45  $\mu\text{m}$ のものをを用いた。焼結金属の板厚は10 mmである。吹き出し口の寸法は、長さL x 幅W（奥行き）30mmとし、他

の章の実験の気化領域と同じ吹き出し領域を持つように $L$ を定めた。 $L$ は3 mmと10 mmの2種類とし燃焼器を二つ製作した。幅は2種類とも同じ30 mmである。吹き出し口外縁にあたる平板は10 mmとし、その先端は鋭角的に仕上げた。この燃焼器を台車上に載せ、吹き出し位置が移動する際の火炎の挙動を観測できるようにした。

なお、平板の長さが火炎先端の挙動に影響するのかどうか確認するために、移動方向側の平板を10 mmから50 mmに代えられるようにした。

### 5.2.3 可燃性気体の供給系統

図5-2は、可燃性気体の供給系統の概略である。ボンベから減圧されたメタンあるいはプロパンは、流量測定用のオリフィスを通り、燃焼器から吹き出させるようになっている。予混合気を使った実験では、空気を酸化剤として用い、ガラスビーズの詰まった混合器内で混合し、さらに混合器から燃焼器まで約2.5 mの長さの管を通すことで十分に混合がおこなわれるようにした。

### 5.2.4 未燃焼時の吹き出し流速分布

図5-3は、製作した燃焼器の吹き出し出口の流速を確認するために、空気を吹き出し表面から1 mm高さで調べた流速分布である。これらは熱線流速計を用いて測定したもので、 $L = 3$  mmと10 mmの二つについて、それぞれの流速は吹き出しの中央位置の流速で無次元化した。 $V_{0.5}$ とは $x/L = 0.5$ 、つまり中央位置での流速を表し、吹き出し速度 $V_w$ は供給流量 $Q$ を吹き出し面積 $A (= L \times W)$ で除した平均吹き出し速度を表す。

測定の結果、ほぼ左右対称で放物線型の流速分布となることがわかった。一様な流速分布とはならない理由としては、吹き出し口が小さいこと、45  $\mu$ mの焼結金属を使ったこと、また吹き出し端部の影響を受けることなどが考えられる。予備実験として火炎を形成させたところ、火炎の振動、揺らぎ、非対称性は見られず、吹き出し速度にも依るが、安定的であることがわかったので、これらの燃焼器を本実験で使用した。

### 5.2.5 実験手順

実験は、流量が少ないときに読み取り誤差が小さくように、精密に流量を制御しつつ火炎の全体の大きさを確認しながら形成させた。そして、定常燃焼を確認後、燃焼器を移動させ、その時の火炎先端の挙動をビデオカメラを使って観測した。

## 5.3 実験結果および考察

### 5.3.1 静止時の火炎先端の挙動

#### (a) 吹き出し速度の影響

図5-4(a)から(c)は燃焼器が静止しているときにメタン、プロパンを吹き出した場合の吹き出し速度に対する火炎先端の水平方向の形成位置  $x_f$  の変化を示したものである。また、形成位置  $x_f$  を変位とも呼ぶことにする。

メタンについて調べた図(a)より、吹き出し速度の増加とともに一定の値3.2 mmに達する様子が見られる。プロパンの場合(図(b))も、一定の値に達するが、さらに、吹き出し速度を増加させると火炎の高さは増加し、1.4mm程度表面から離れて形成する。火炎先端は浮き上がらずに、吹き出し口(原点側)に近づいてくることが特徴的な様相で、図(b)の  $V_w=7$  cm/s以降がそのときの  $x_f$  の変化を示している。火炎先端付近は青炎で上方にいくにしたがい輝炎になるが、吹き出し速度の増加によって火炎先端の青色は強まる。 $V_w=30$  cm/sの範囲まで観測したが、吹き出し表面から大きく離れるような火炎(浮き上がり火炎)に移行することはなく、火炎先端はむしろ安定的であることがわかった。

メタンとプロパンの火炎の形成位置を吹き出し速度の違いで比較すると、プロパンのほうの変位が大きい。Lによる形成位置の違いは、流速分布の違いと思われる。なお、鉛直方向の吹き出し速度への依存性は小さく、あえてグラフ化はおこなっていないが、例えば、図5-6(b)、図5-7(c)の  $V_T=0$  のときの  $y_f$  の値として見ることができる。

#### (b) 質量流束による評価

質量流束  $\rho v$  で再整理したものが図5-4(c)である。密度は、実験室温17℃に

おける物性値を用いた。この図から、同じ質量流束の場合、気体の種類によって火炎の形成位置が比較できることがわかる。メタン(L=3 mm, 10mm)、プロパン(L=3mm, 10mm)の4条件の点を重ねて見てわかることは、可燃性気体ごとに計測データがばらつくものの、全体の傾向が同じであるということである。メタン、プロパンともに、 $\rho_f v_w$ の増加とともに $x_f$ が一定値に達する傾向が見られ、 $x_f$ への質量流束の影響が同じように表れている。

一定位置に火炎先端が定在している場合に質量流束が増加するという事は、火炎反応帯で単位時間に反応する量が増加するという事である。厳密には吹き出した量がすべて反応に関わったとは限らず、火炎先端から下流側の火炎反応帯で燃焼、消費することになるが、火炎先端が一定位置に達し、メタン(L=3 mm) 11 mg/cm<sup>2</sup>s、プロパン(L= 3mm) 14 mg/cm<sup>2</sup>s以降 $x_f$ が減少するという結果から、火炎先端における燃焼反応に限界があるということが推察される。

### 5.3.2 吹き出し領域移動時の火炎先端の挙動(可燃性気体みの場合)

#### (a) 平板長さの影響

図5-5は、移動方向に対する平板長さ $L_p$ の影響を調べたものである。図の黒丸と点線が $L_p=50$  mmの場合、白丸と実線が10 mmの場合である。点線と実線は、火炎先端が安定範囲にある場合はいわゆる誤差棒に相当し、データごとのばらつきの範囲を示すが、火炎先端が吹き出し領域に追従せずに変動範囲にある場合は、火炎先端の実験時間内に変動する最大範囲を示す。従って、その範囲では火炎位置が特定できないので、丸印は記載していない(4章と同じ記載)。

この図から、移動速度 $V_T$ の増加とともに火炎先端は相対的には静止空間を移動しつつも、吹き出し側に変位することがわかる。 $L_p=10$  mmと50 mmの両方とも火炎先端が移動速度に追従できる限界があり、 $L_p$ が10 mmでは $V_T=25$  cm/s、50 mmでは $V_T=35$  cm/sである。その安定限界を超えると火炎先端は、空間中を移動する燃焼器平板上を変動する。

図より、火炎先端は平板の長いほう(黒丸)が移動速度に対し、より安定的な挙動を示すことがわかる。平板が短い場合、移動速度の増加とともに $x_f$ の減少傾

向が長いものよりも小さいことから、平板が長い場合には、平板上の境界層の概念が適用できるが、平板が短くなると、単純に境界層に概念が適用できなくなることが推測される。

本実験では、平板上の境界層と火炎先端の相互作用を主眼に調べることにしてはいないので、移動速度に対し火炎先端が敏感な挙動を示す $L_p=10$  mmを中心に移動速度と火炎先端の関係を以下に調べた。

### (b) 吹き出し速度の影響

メタンを吹き出した場合の火炎先端の位置変化について、火炎先端の水平方向を図5-6(a)、鉛直方向の変化を図(b)に示す。これらの吹き出し長さは3 mmで、10 mmの場合の火炎先端の水平、鉛直方向の変化は、併せて図5-6(c)に示した。

例えば、図5-6(a)より、白丸と点線で示した $V_w=5$  cm/sの場合、移動速度 $V_T$ が15 cm/sまでは $x_f$ が減少し、吹き出し位置側（可燃性気体側）に近づき、安定して空間中を移動する。しかし、 $V_T$ が15 cm/sを超えると逆に $x_f$ が増加し、吹き出し位置から離れ、25 cm/sのときには火炎先端が明らかに変動を示し、1.4から2.0 mmの範囲で前後に変動している。 $V_T$ が30 cm/s以上になると、火炎先端が前方に変位し、60 cm/sでは2.8から5.5 mmの範囲で変動するという特徴的な様相を示す。さらに $V_T$ が増加すると水平方向の火炎先端の変動は小さくなる。このときの一連の変化を図(b)で見ると、 $V_T$ の移動とともにわずかに $y_f$ が減少し、表面に近づく様相を示すが、その変化量はせいぜい0.1 mmほどである。 $V_T$ が増加し、25 cm/sを超えると変動とともに表面から離れるようになる。この様相は水平方向と同じであり、 $V_T$ が増加すると火炎先端は吹き出し口から離れるという挙動を示ることがわかる。

図5-6(c)は、吹き出し長さが10 mm、 $V_w=2$  cm/sの場合で、 $V_T$ とともに10 cm/sまで $y_f$ はほぼ一定であるが、 $x_f$ はわずかに減少し、その後、 $x_f$ 、 $y_f$ とともに増加していく。さらに、25 cm/sでは明らかな変動は見られず、安定している。30 cm/sを超えると明らかな変動が見られ、火炎先端そのものは吹き出し口よりも離れて形成するようになり、80 cm/sでは水平方向で5.5 mmから6.5 mmの範囲で変動する。移動速度が増加し、火炎先端がかなり変位するとむしろ火炎先端が安定

し、安定の中に小刻みな変動が見られるというような挙動を示す。

以上のような燃焼器の移動と火炎先端の形成位置の変化の傾向は、4章の実験(2)の変動範囲が可燃性液体前端部(原点)を境に変動するのとは明らかに異なるものである。吹き出し速度とともに、静止時でも火炎先端の形成位置が変化するが(図5-4(a))、移動に伴う火炎先端の挙動は吹き出し速度を変えても似通っていることから、吹き出し速度の違いに強く依存しないことがわかる。

プロパンを吹き出した場合も一連の挙動は類似している(図5-7(a)~(c))。メタンの場合との違いとしては、追従できる速度(変動を開始する $V_T$ )が異なり、 $L=3\text{ mm}$ では $35\text{ cm/s}$ で変動を開始すること、 $V_T$ に対する変動範囲が広いことが挙げられる。 $V_w=2\text{ cm/s}$ と $5\text{ cm/s}$ を比較したときの吹き出し速度への依存性はそれほど強くはなく、火炎先端は $V_T$ に対して同じような挙動を示す。むしろ、可燃性気体の物性への依存性が見られ、同じ吹き出し速度であれば、 $x_f$ はプロパンの方が大きく、燃焼器が移動していてもプロパンの方が大きい。しかし、鉛直方向の変化を見ると、プロパンは、移動とともに表面に少し近づき、移動速度が増加しても、メタンほど表面からは離れないで上下に変動する。

図5-7(c)を図5-6(c)と比較すると、プロパン火炎の方は、 $V_T$ が増加するとともに $x_f$ が増加し、平板前方へ大きく張り出し、 $10\text{ mm}$ 平板の先端付近まで移動する。

### 5.3.3 吹き出し領域移動時の火炎先端の挙動(予混合気の場合)

図5-8は、当量比1.6、 $V_w=5.3\text{ cm/s}$ のときのメタン-空気予混合気炎における $V_T$ と火炎先端形成位置の変化を示したものである。この条件で形成される火炎は、層流燃焼速度と吹き出し速度の関係から、火炎が表面に傾いた、いわゆる鈍角、テント型の火炎形状をしている。

図5-6(c)の可燃性気体のみを吹き出した場合と明らかに異なる様相は、移動速度が増加すると $x_f$ が $20\text{ cm/s}$ までは直線的に減少し、その後、直線的に増加することで、 $y_f$ については変化がほとんど見られないということである。 $V_T$ に対して $x_f$ が直線的に減少する傾向は、可燃性気体のみ吹き出した場合の火炎先端が

$V_T$ の増加とともに $x_f$ が反比例的に減少し、一定値に近づく傾向、

$$x_f \sim V_T^{-1} \quad (3-1)'$$

とは明らかに異なる。つまり、対向気流の増加に見合うだけ相対的に火炎が後退することがわかる。この実験の $V_T$ が20cm/sまでの $x_f$ の変化から、

$$x_f = -0.03 V_T + 1.20, \text{ mm} \quad (V_T \leq 20 \text{ cm/s}) \quad (5-1)$$

という関係を得ることができた。

過濃予混合気であるため、二次火炎としての拡散火炎が一次火炎である予混合火炎面の既燃焼側（下流）に形成することになる。流れを考えると、火炎先端付近において、過剰な可燃性気体が伝ばする火炎前方に形成するとは考えられないので、このような火炎先端の挙動は、火炎先端が予混合火炎の性質を持つことによる挙動を示していると考えられる。

### 5.3.4 火炎先端付近の流れの場と火炎先端の保持

#### (a) 流れの可視化

火炎先端が $V_T$ の増加とともに次第に前方へ変位する様子が観察されたことから、流れの場を調べてみた。可視化にはマイクロバルーンを用いた粒子追跡法と気化させたパラフィンを用いたスモーク法を用いた。実験方法は2章2.2.4節に示したように微粒子は静止空間にあり、移動座標から見ると後方に移動するように見える。

メタンについて、 $V_T=20$  cm/sの時の様子を図5-9(a)と(b)に、80 cm/sの時の様子を図(c)から(e)に示す。これらはビデオカメラ映像から得たもので、シャッタ速度は(a)から(d)は1/180 秒、広い範囲を撮影した(e)は 1/250 秒である。燃焼器（吹き出し領域）は、図の左方へ $V_T$ で移動している。

火炎全体が吹き出し位置の移動に追従している場合、左方へ移動する火炎先端は相対する対向気流を受けて、静止空間を火炎先端が伝ばしていることになる。移動速度20 cm/sではよく見られないが、80 cm/sでは火炎先端の前後に循環流が形成している様子が見られる。いずれも、これらの図で、時計まわりに回転する流れで、一つは火炎先端前方の表面付近の空気（酸化剤）流の循環流で、もう一

つは、火炎背後の吹き出し位置前端よりも前に（左に）形成する既燃焼気体と（未燃焼）可燃性気体の循環流である。

$V_T = 20$  cm/sの図5-9(a)と(b)を見ると、火炎先端に近づくと流れは減速し、火炎先端を通る流れ（bでは流脈）と逸れる流れがあり、この付近では流管が広がっていることがわかる。また、吹き出し口前端から約2 mm前方表面に向かう流れが見られる。ただし、微粒子の流れへの追従性もあり、移動速度20 cm/s程度における循環流の発達の可能性を議論することはできないが、移動速度がより小さくなるとこのような循環流がほとんど見られなくなるようである。

なお、火炎がかなり前方まで移動する様子は、図5-9(e)に示した通りで、吹き出し口付近の流れだけでなく、大局的に見ると、燃焼器まわりの流れが影響してくることがわかる。

#### (b) 火炎先端の保持

火炎直下と吹き出し口上方領域には、既燃焼気体、吹き出しによる未燃焼の可燃性気体などで占められる。

Kalghatgi [196] は、横風を受ける噴流拡散火炎の火炎基部の吹き飛びに関する安定性を調べ、噴出孔の径、吹き出し速度が増加するとともに流体力学的には保炎円柱のような物体があるような効果を示すことを明らかにしている。本実験でも、強制的に吹き出し形成される火炎の存在が流れの中で抵抗物体のような効果を示し、このような効果は、移動速度の増加とともに火炎背後に既燃焼気体の循環流の形成を促し、火炎先端の安定化に寄与する保炎の効果としても役立つものと考えられる。火炎先端の前方には火炎の存在により流速が小さい部分が存在し、流れ場全体からは少し圧力の高い領域が形成する [174]。そのため、火炎先端では流管が広がり、流れが緩慢になり、火炎先端前方においても循環流が生じやすくなる。

可燃性気体の火炎先端への供給を考慮すると、火炎背後の既燃焼循環流れによって可燃性気体が促進的に運ばれ、火炎先端への継続的な供給を可能としていると推測できる。火炎が吹き出し領域の移動に追従しているならば、移動速度の増加は、火炎背後の循環流の速度の増加となり、むしろ、促進的に可燃性気体が前方へ運ばれ供給されるので、燃焼反応が継続でき、吹き飛び、消炎することがな

い。従って、移動速度が増加しても、火炎先端が伝ばできるものと考えられる。

火炎は表面に近づき伸長の効果を受けるが、熱的な損失によって吹き飛び・消炎に至るといった傾向は見られないようである。火炎先端の変動する様子をよく見ると、移動速度が増加にともなって火炎先端が平板に平行、水平方向に前後することよりも火炎帯に沿った方向へ変動することが多く見られる。本実験でおこった速度範囲では吹き飛びから消炎に至る場合が少ないものの、火炎先端の火炎帯に沿った変動過程のなかで火炎が後退したとき、火炎先端がそのまま下流に流され、吹き消えることがわかる。このような観測は移動座標から見かけ上見られるもので、静止座標から見ると伝ばが停止し、消炎するということになる。

このような吹き飛び、消炎に対する火炎先端の挙動から、火炎先端の保持には、火炎に沿った方向成分の可燃性気体の供給と流れに依存するということがわかる。このような保持機構は、おそらく、表面ごく近いところ（1 mmより小さい）に存在する可燃性気体が火炎背後の循環流によって消炎領域を通して火炎先端前方へ運ばれ、空気と混合し形成される予混合火炎として保持されていると推測される。ただし、循環する中心付近で保持され、予混合気が前方に供給されるのかどうかは明らかではない。

### 5.3.5 拡散火炎の吹き飛び、消炎限界

#### (a) 移動速度と吹き出し速度の影響

図5-10(a)から(d)は、 $L=3$  mmについて $V_T$ と $V_w$ を変化させた場合の火炎先端の安定性を示したものである。

メタンについて見ると、例えば、 $V_w$ を2 cm/s一定にして移動実験をおこした場合、15 cm/sまでは、火炎先端は安定しているが、20 cm/sでは変動する場合と安定したままの場合が見られ、 $V_T$ が25 cm/sより大きくなると、火炎先端は明らかに変動するようになる。

プロバンの場合、 $V_w=1$  cm/s一定で移動速度が小さいところで火炎先端が変動するが、 $V$ が15 cm/sから25 cm/sでは安定している。このような小さい速度での変動は揺らぎのような感じで、急激な動きではなく、3章の実験で見られたように、強制対流と自然対流が競合することによるためであると考えられる。

以上ことから、 $V_w$ が小さい場合には $V_T$ への安定性に影響すること、 $V_w=1$  cm/s以上では、 $V_w$ への依存性は小さくなることがわかった。

### (b) 他の拡散火炎との比較

吹き出し領域の移動にともない空間を実際に伝ば火炎について、図5-10のような安定限界が明らかにされたことは、これまでにはないようである。

代表的な拡散火炎である境界層拡散火炎 [278, 279] と比較を試みると、梅田ら [279] のメタン吹き出しでは、1 cm/sの吹き出しのもとで主流速度が50 cm/sが火炎先端の安定限界、2 cm/s吹き出しでは、主流速度50 cm/sが火炎先端の安定範囲内にある。プロバンの場合 [278]、吹き飛び限界についてのみ示されているが、0.2 cm/s吹き出しで主流速度50 cm/sが吹き飛び限界、1 cm/s吹き出しでは安定範囲内にある。

可燃性気体の吹き出しのある境界層拡散火炎では主流速度に比べ、速度の小さい領域で火炎先端が保持されるために、火炎先端の主流速度に対する安定範囲が広い。この点が境界層のあまり発達のない伝ば火炎である本実験とは異なる。ところで、王ら [271] のメタンを吹き出した場合、1 cm/s吹き出しで、主流速度約30 cm/sに安定限界があるというような火炎先端の安定範囲が狭い例もあるが、これは、吹き出し領域の幅が2 cmと小さいことに起因しているようである。

Kalghatgi [196] の横風を受ける噴流拡散火炎の吹き飛びに関する安定曲線では、吹き出し速度が増加することによって吹き飛ぶことも横風が増加することで吹き飛ぶこともあり、安定限界がそれら二つの条件で定まるという結果を得ている。本実験範囲内の吹き出し速度での上方への吹き飛びはなかった。

Spalding [149] は、拡散火炎に対する燃焼強度の概念を適用し、対向流拡散火炎の消炎現象を説明した。これは、単位面積あたりの質量燃焼速度 $m$ が(気流速度/バーナ径) $^{1/2}$ に比例することから、消炎が[時間 $^{-1}$ ]という次元で説明できることから示されたものである。拡散火炎の消炎には化学的な作用として、単位面積、単位時間に火炎反応帯に流入する可燃性気体と酸化剤が過剰になり、燃焼反応が継続できなくなるという説明がなされている [247; pp213-217]。本実験では火炎反応帯を基準に見ると、伝ばする前方からは空気(酸化剤)の対向気流を受け、火炎反応帯背後からは可燃性気体が供給されているので(7章、図7-5)、

火炎先端が吹き出し位置の移動に追従している場合には、燃焼強度の考え方が適用できる。

火炎先端が変動を開始する速度が吹き飛びと定義し、速度勾配  $V_T/L$  と質量流束  $\rho_f V_w$  に関して整理した安定曲線が図 5-11 である。図より、 $L=3$  mm で比較するとプロパンのほうがメタンよりも安定範囲がやや広いことがわかる。図の吹き出し長さ  $L$  による違いは  $V_T/L$  で整理したため、分母の  $L$  が (10mm/3mm) の割合だけ勘案して評価すれば、 $L$  の影響がそれほど効いているわけではないことがわかる。

このような結果から、 $\rho_f V_w$  が  $2 \text{ mg/cm}^2\text{s}$  以上では、移動速度への依存性が見られなくなることがわかった。

### 5.3.6 火炎先端付近の物質拡散に関する特性時間

Tsuji の研究 [187] では、臨界速度勾配における火炎の吹き消えが反応速度の有限性に基づく説明している。本実験の追従できなくなり火炎先端の変動開始を吹き飛びと定義したこと、Tsuji の定義した一般的な対向気流中の吹き飛び消炎に関する定義とは異なるが、火炎先端が吹き出し領域の移動速度に追従できなくなることが火炎反応帯での定常的 (継続的) な化学反応ができなくなり後退、変動を始めるという解釈をすれば、その研究と同様に火炎先端における反応速度の限界を評価できるはずである。

物質拡散に関する特性時間  $t_D$  と化学反応に関する特性時間  $t_c$  の比較で吹き飛び・消炎に関する特性値が評価できるとすれば、物質拡散に関する特性時間は、

(可燃性気体の反応帯への拡散距離)<sup>2</sup>/拡散係数  $D_f$  と考えられ、火炎先端の変位が拡散距離に対応するものとして、 $x_f y_f / D_f$  と表せる。吹き出し口から火炎先端への鉛直方向の拡散に関する特性時間は、水平方向への拡散の特性時間よりも大きいと仮定すれば、水平方向への拡散時間に依存的となる。この仮定は、実験では  $y_f > x_f$  であることがほとんどであり、また  $y_f$  の変化が小さく、 $x_f$  の変化の方が大きいことから理解できる。

移動速度 (相対気流) の影響による吹き飛びを考慮するため、 $x_{0X}$  を火炎反応

帯をはさみ酸化剤側からの拡散距離とし、それを代表長さとして流体力学的な特性時間は、 $x_{0x}/V_T$ と置くことができる。ただし、火炎構造の変化はないものとする。

流体力学的には、物質拡散に関する特性時間が対流に関する特性時間で評価でき、もし、 $x_{0x} = x_f$ とおけるならば、火炎先端付近の物質拡散に関する特性時間  $t_D$  について、以下の関係が得られる。

$$t_D = x_f v_f / D_f \sim x_f^2 / D_f \sim x_f / V_T \quad (5-2)$$

図5-12はこのような考察のもと、実験結果を整理し、 $x_f$  に関して移動速度と特性時間の関係を示したものである。ただし、特性時間は逆数で表記した。これは  $t_c / t_D$  の比で評価する場合、ある比率において  $t_D^{-1}$  の増加が  $t_c$  の減少と解釈でき、化学反応速度の限界に関連するためである。

図より  $V_T$  が増加すると、特性時間が減少 ( $V_T/x_f$  が増加) し、限界値に達することがわかる。そして、 $V_T$  がさらに増加すると、変動を開始することがよくわかる。 $V_w$  が増加すると、火炎が前方に張り出し、変位が大きくなるので特性時間が増加する ( $V_T/x_f$  が小さくなる)。このとき、移動速度がやや増加してから変動を開始することから、吹き出し速度の影響が小さいことがわかる。

### 5.3.7 移動時の火炎先端の性質

徐々に加速していく移動の場合、火炎先端が準定常的な挙動を示す(3章3.3.1(c))。例えば、図5-6(a)の  $V_w = 5$  cm/s を参考に説明すると、一回の加速実験で、 $V_T$  の増加とともに火炎先端は吹き出し位置に近づき最小変位に達し、 $V_T$  がさらに増加すると、逆に火炎は前方へ変位するというように、前節までに示してきた定常移動速度後に観測した実験と同じ様な挙動を示す。

移動速度と火炎先端の性質を検討する場合、静止時に形成されていた火炎先端の性質、移動後の火炎先端の性質、さらに前方へ変位し、保持される火炎先端の性質が同じなのかどうかは明らかになっていない。つまり、実際に空間を伝ばする火炎先端が、 $V_T$  の増加によって変化するのかどうか検討する必要がある。さらに、このような  $V_T$  の変化にともなって火炎先端の性質が連続的に変化できるのか

どうか問題として挙げられる。例えば、拡散火炎から予混合火炎に、あるいは予混合火炎から拡散火炎に連続的に移行できるのかどうか、そのような現象の可能性は、伝ばする火炎においてよく知られていない。トリプル火炎においては、希薄予混合火炎—拡散火炎—過濃予混合火炎が火炎先端の一点でつながり、それらの火炎の性質のもとで空間を伝ばすると考えられるが [171-173]、濃度勾配中では火炎先端位置が化学量論比になるところを伝ばすることが知られている。このときの火炎の伝ばは、予混合火炎の性質により伝ばするものと考えられる。

火炎先端の性質の変化の可能性として、図 5-6 と 5-7 を見ると次のようなことが推測できる。メタンを吹き出した場合、 $L=3$  mm と 10 mm の  $V_T$  が 30 cm/s では、 $x_f$  と  $y_f$  が小さい傾向が見られ、25 cm/s の場合と同程度の変位  $x_f$  と  $y_f$  をもつ。しかし、35 cm/s になると  $x_f$  と  $y_f$  が増加する。プロパンでも  $L$  が 3mm では 35 cm/s から 40 cm/s で、 $L=10$  mm では、 $V_T=30$  cm/s における  $x_f$  と  $y_f$  が小さい傾向をもつことに気がつく。そして、 $x_f$  と  $y_f$  が増加傾向を示すとき、火炎背後の既燃焼気体の循環流の発達に関わり、それがこのような  $V_T=30$  cm/s から 40 cm/s の範囲にあたる。

このような速度が、予混合火炎の層流燃焼速度と同程度 [231] であることから、上記の追従できる移動速度以上の範囲では、予混合火炎に準ずるような性質が現れることが推察される。

#### 5.4 まとめ

燃え拡がり時の伝ば機構を調べる目的で、燃焼をともなっている際に可燃性気体の吹き出し領域を移動させ、火炎先端のその移動への追従性と火炎先端の挙動を調べた。得られた結論は次の通りである。

(1) 可燃性気体 (メタンあるいはプロパン) のみを吹き出させた場合と可燃性予混合気 (メタン—空気) を吹き出させた場合では、移動時の火炎先端の挙動が異なることがわかった。

(a) 可燃性気体のみを吹き出させた場合； 火炎先端は吹き出し位置上方よりも外側 (酸化剤側) に形成する。吹き出し位置の移動速度の増加とともに火炎先端は吹き出し位置側へ近づき、移動速度が 10 cm/s から 20

cm/sまでは安定した火炎先端の挙動が見られるが、それ以上の移動速度では、逆に火炎先端の形成位置は前方へ移動する。

(b)可燃性予混合気を吹き出させた場合； 吹き出し位置の移動とともに20 cm/sまでは火炎先端は吹き出し位置側に近づき、安定的に追従移動できる。

(2)移動速度の増加とともに火炎先端が前方へ変位するようになるとき、火炎前後に時計方向の循環流が発生していることが明らかとなった。このような循環流が、火炎先端の保持に寄与していると思われるが、循環流の発生がない移動速度でも火炎が伝ばすることから、循環流の発生が火炎の伝ばに必要な条件ではないことが推察できた。

(3)移動速度100 cm/sまで調べ、メタンは吹き出し速度 1 cm/s (0.67 mg/m<sup>2</sup>s)、プロパンは 1 cm/s (0.9 mg/cm<sup>2</sup>s)でも、吹き消えることはなく、火炎先端の保持に十分な可燃性気体が供給されていることがわかった。

(4)可燃性気体の種類により火炎先端の位置が異なることがわかった。同じ吹き出し速度では、火炎先端の位置はメタンよりもプロパンの方が吹き出し位置の外側、酸化剤側に形成する。

(5)移動速度の増加とともに火炎先端の性質が変化する可能性があることがわかった。

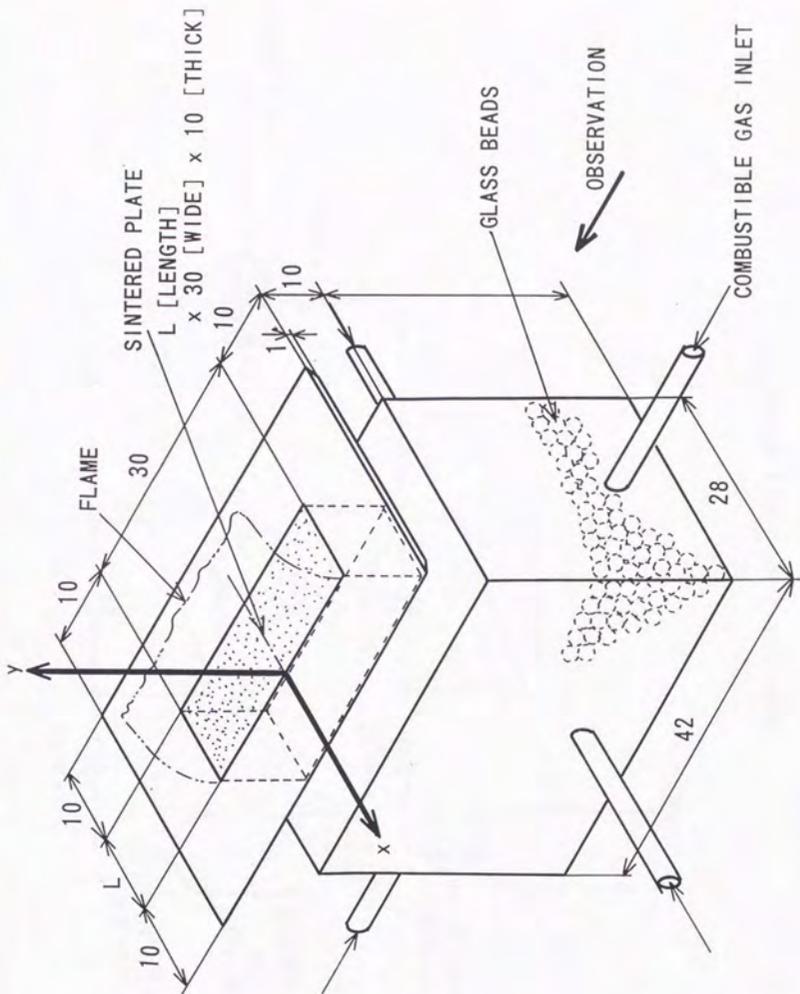


Fig. 5-1. Combuster.

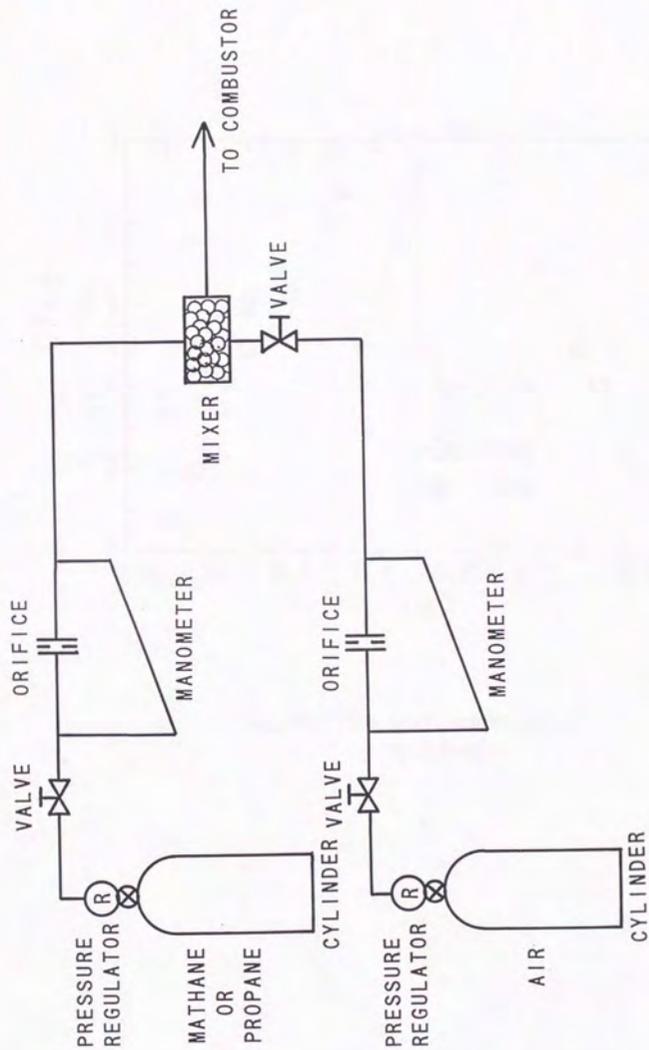


Fig. 5-2. Combustible gas supply system.

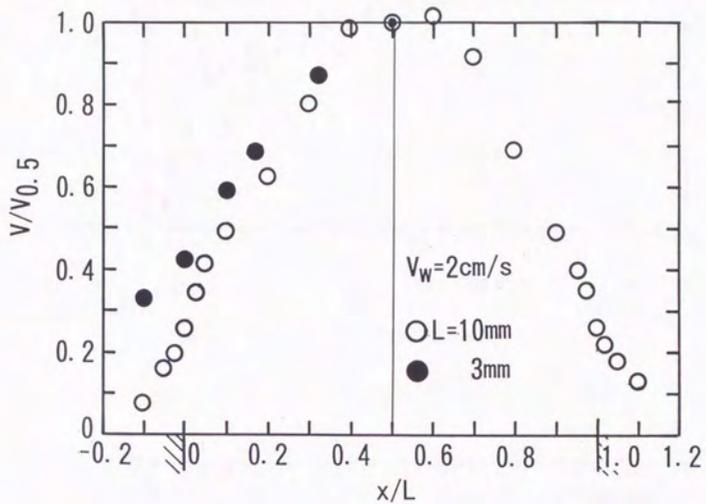
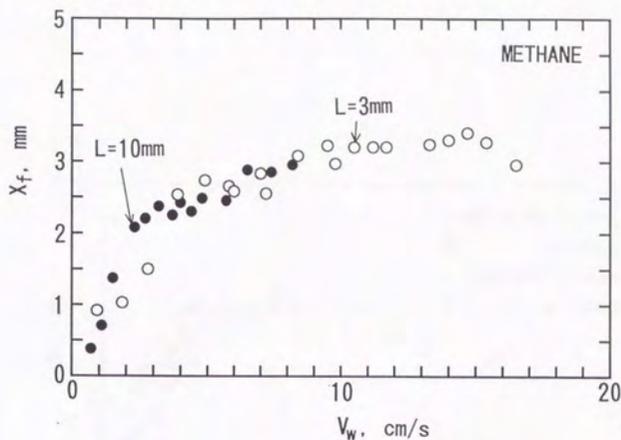
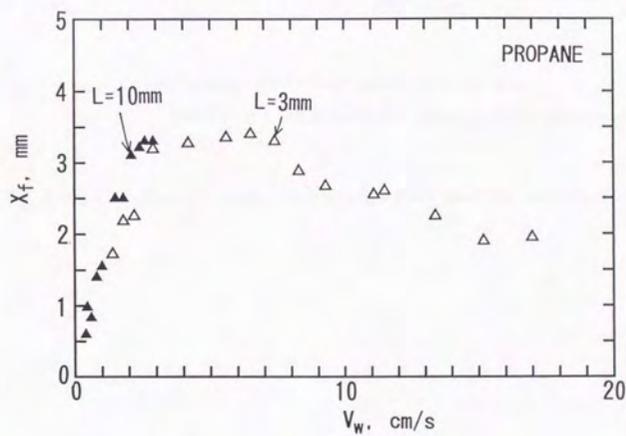


Fig. 5-3. Flow profile above surface.  
( $y = 1.0 \text{ mm}$ )

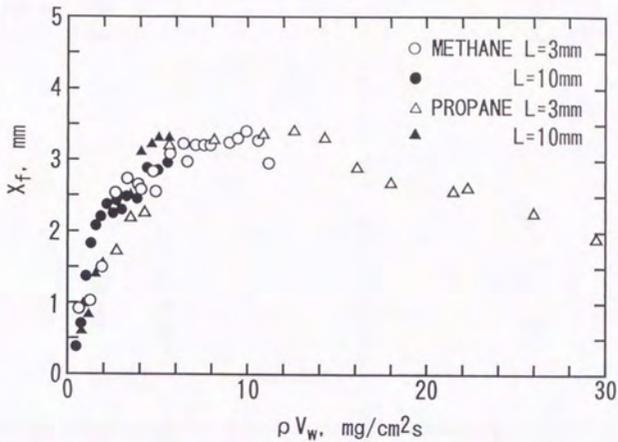


(a)Methane



(b)Propane

Fig. 5-4. Variation of leading flame edge with ejection velocity  $V_w$ .



(c)Arrangement using mass burning rate  
 (Methane  $\rho = 1.8\text{mg}/\text{cm}^3$ , propane  $0.67\text{mg}/\text{cm}^3$  at  $17^\circ\text{C}$ )

Fig. 5-4. Variation of leading flame edge with ejection velocity  $V_w$  .

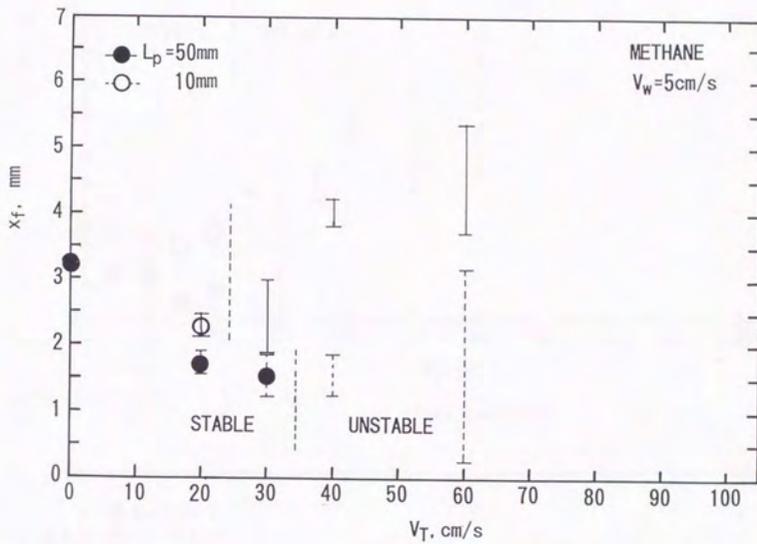
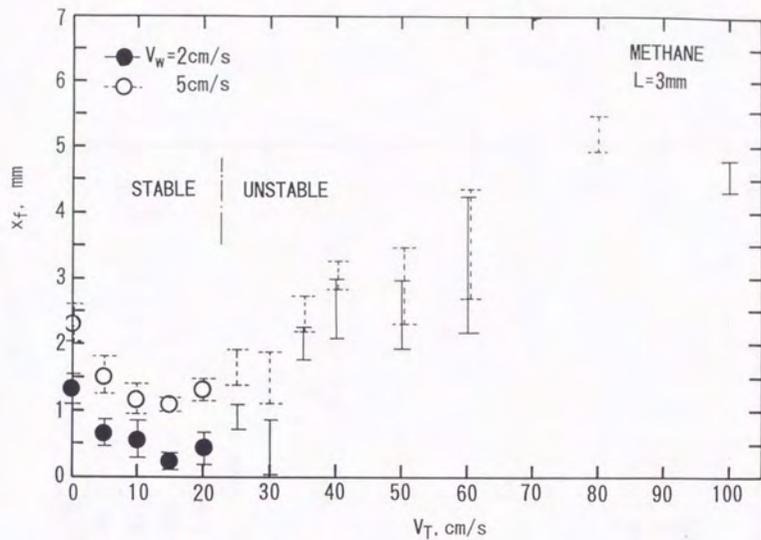
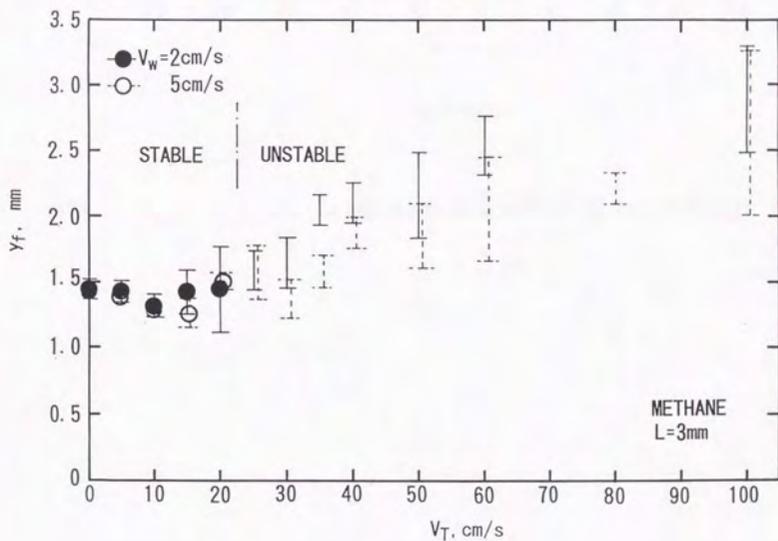


Fig. 5-5. Variation of leading flame edge with  $V_T$  .  
(Influence of front plate,  $L_p$  )

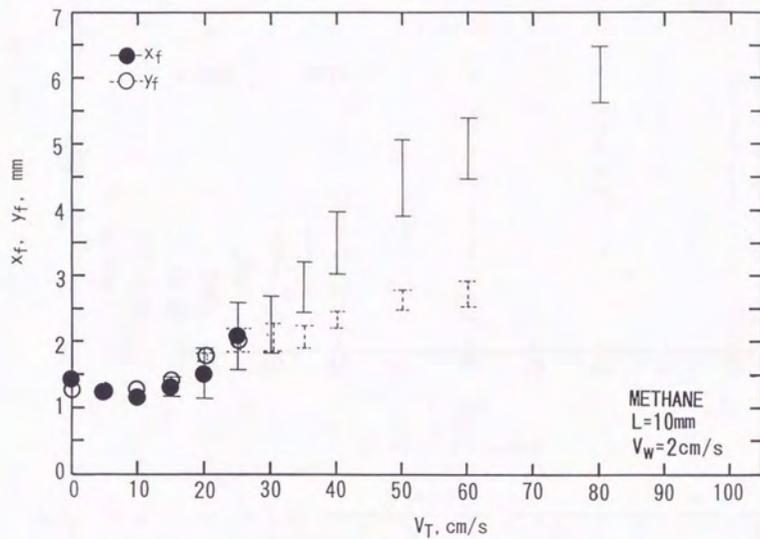


(a)  $L=3$  mm, x direction



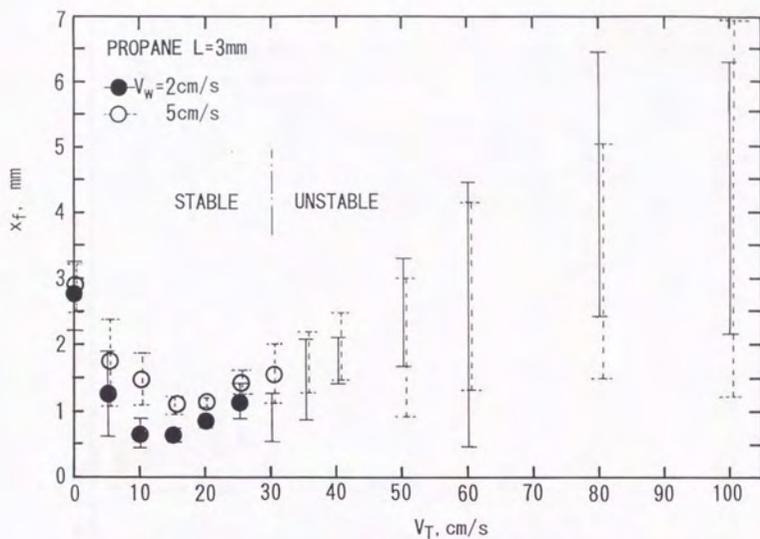
(b)  $L=3$  mm, y direction

Fig. 5-6. Variation of leading flame edge with  $V_T$  (Methane).

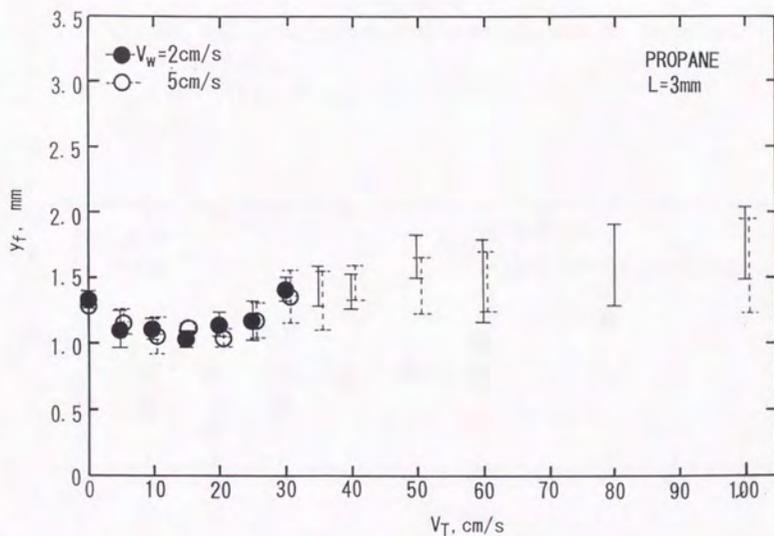


(c)L=10mm

Fig. 5-6. Variation of leading flame edge with  $V_T$  (Methane).

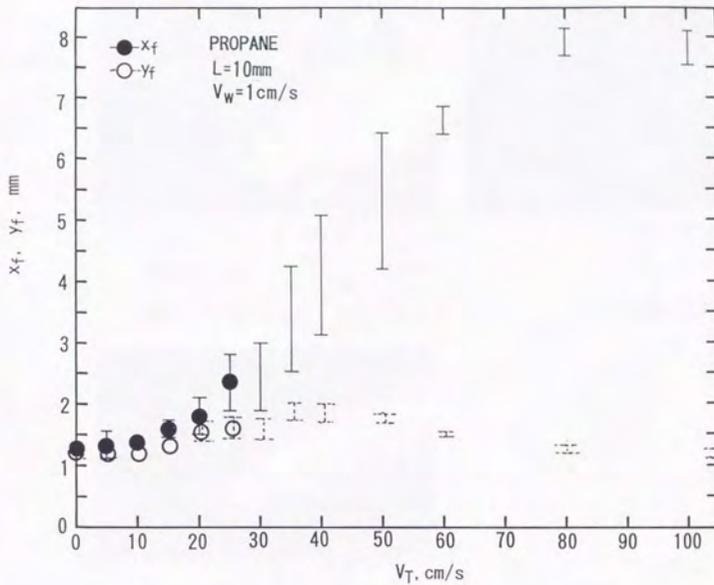


(a)  $L=3\text{mm}$ , x direction



(b)  $L=3\text{mm}$ , y direction

Fig. 5-7. Variation of leading flame edge with  $V_T$  (Propane).



(c)  $L=10\text{mm}$

Fig. 5-7. Variation of leading flame edge with  $V_T$  (Propane).

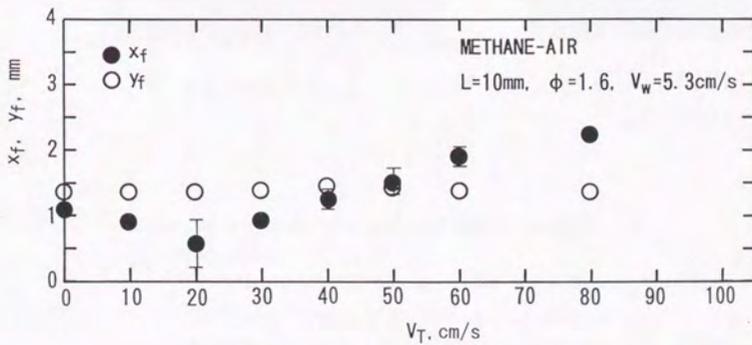


Fig. 5-8. Variation of leading flame edge with  $V_T$  .  
 (Methane - air premixed).

$V_T=20\text{cm/s}$   
 $V_W=2\text{cm/s}$



$\leftarrow V_T$   $\uparrow V_W$  1mm  
 (a)PARTICLE (1/180s)

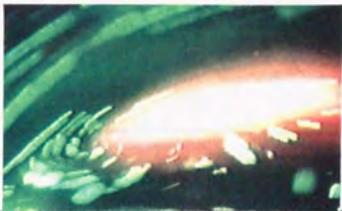


(b)SMOKE

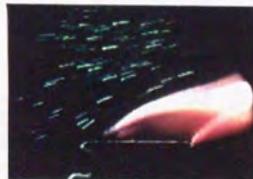
$V_T=80\text{cm/s}$   
 $V_W=10\text{cm/s}$



(c)PARTICLE



(d)PARTICLE



(e)PARTICLE  
 (1/250s)

Fig. 5-9. Aspects of flow field observed with moving system.

(Methane)

(a)Particles tracer, interval 1/180s,  $V_T=20\text{cm/s}$ ,  $V_W=2\text{cm/s}$ .

(b)Paraffin smoke,  $V_T=20\text{cm/s}$ ,  $V_W=2\text{cm/s}$ .

(c)Particles tracer, interval 1/180s,  $V_T=80\text{cm/s}$ ,  $V_W=10\text{cm/s}$ .

(d)Particles tracer, interval 1/180s,  $V_T=80\text{cm/s}$ ,  $V_W=10\text{cm/s}$ .

(e)Particles tracer, interval 1/250s,  $V_T=80\text{cm/s}$ ,  $V_W=10\text{cm/s}$ .

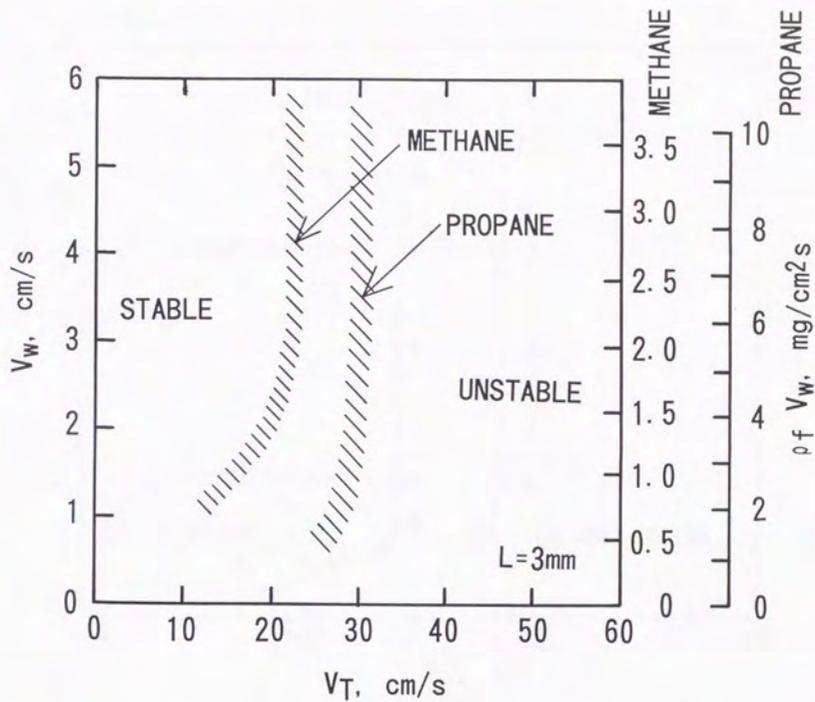


Fig. 5-10. Stability of leading edge with  $V_T$ .  
( $L=3\text{mm}$ )

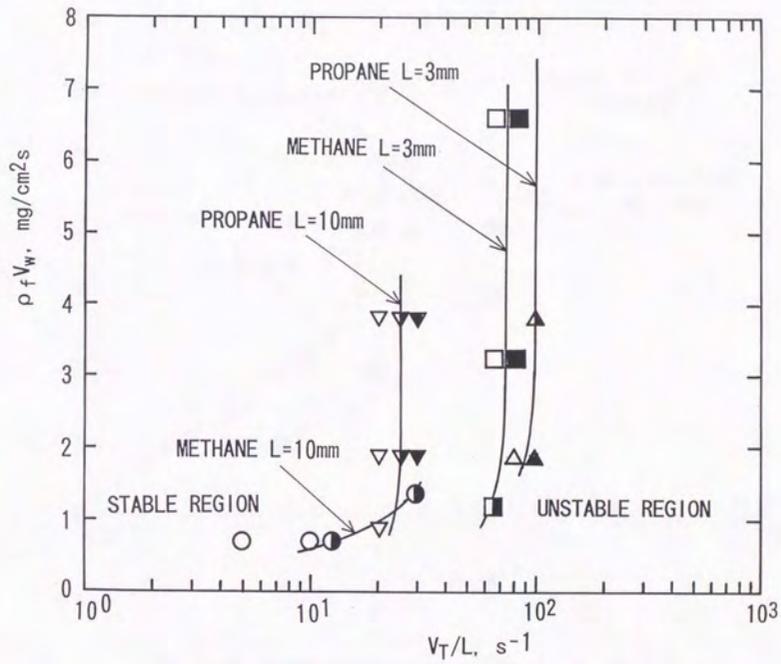


Fig. 5-11. Relation between  $\rho_f V_W$  and  $V_T/L$  for stability.

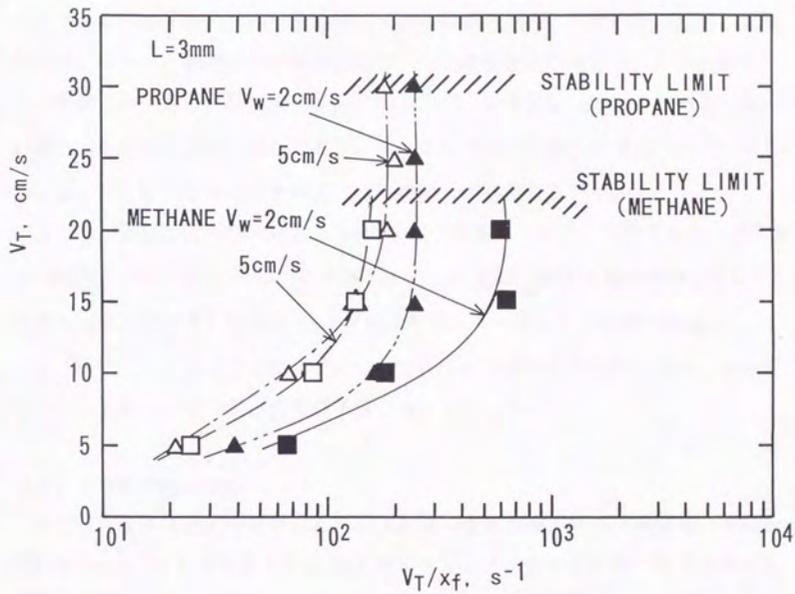


Fig. 5-12. Relation between  $V_T$  and  $V_T/x_f$  for stability.

## 第6章 伝ば火炎の可燃性物質移動への追従性

### 6.1 凝縮相内の熱移動

この章の実験環境は、図6-1に示した通りである。3章から5章の実験と異なり、凝縮相内の未燃焼方向の低温領域への熱移動は拘束されていないため、火炎が伝ばしなくとも凝縮相内の前方低温部への熱移動が進行できる。可燃性物質全体が移動しない場合、熱が速度 $V_{F0}$ で伝わるが、定常状態における気相と凝縮相の時間的な現象はほぼ一致しており、 $V_{F0}$ が燃え拡がり速度に相当する。つまり、この速度で可燃性気体の発生領域（気化領域）が移動していく。

ここで、強制的に可燃性物質を $V_T$ の速度で移動させると、可燃性気体の発生領域の移動には静止時の $V_{F0}$ に $V_T$ が加わることになる。静止空間座標から見ると、可燃性気体の発生する位置は $V_T + V_{F0}$ で移動しているというわけである。

この章では、このような環境下において、下記の事柄を考慮し、固体と液体凝縮相の熱移動と火炎の伝ばの関係を調べることにした。

#### (a) 可燃性固体の場合

PMMA板やろ紙に代表される可燃性固体の水平の燃え拡がり速度は、一般的に0.01~1cm/s程度である[7]。燃え拡がり定常状態であれば、その火炎の伝ば速度と同じ速度で、固相内の前方未燃焼部分への熱伝導が伴う。可燃性固体を人為的、強制的に移動させるとその移動による火炎の挙動とともに、人為的に制御していない固相内の熱移動に依存する火炎の挙動も示すはずである。可燃性固体表面上で火炎が伝ばせずに定在（停止）している場合でも、固体内部の熱移動（伝導）がある。

#### (b) 可燃性液体の場合

可燃性液体表面に沿った燃え拡がりの場合と可燃性固体表面に沿った場合の明らかな違いは、液相内において流動（対流）が可能であるということである。一概に可燃性液体表面上に沿った燃え拡がりといっても、液相の状態によって流動性が異なるため、燃え拡がり速度が大きく異なることが明らかになっている[126]。従って、伝ば機構を検討するためには、火炎の伝ばと液相内の流動の関係

を明確にする必要があるように思われる。

可燃性液体表面に沿った燃え拡がりにおいては、大きく分けると、可燃性予混合気層の存在の有無によって火炎の伝ば機構が異なる [127]。可燃性予混合気層が形成される場合、火炎先端が予混合火炎の性質を持つので、その性質である自己伝ば性に支えられ、火炎が伝ばするという様相を示す。この機構に基づく火炎の伝ばは、液相内の流動に依存しないと説明されることが多い。

しかし、十分な可燃性予混合気層が形成されていない場合には、Akita [142] の説明では、予熱型の伝ばの様相として、火炎の伝ばは液相内の対流熱移動性に依存することになる。

## 6.2 実験装置および実験方法

### 6.2.1 可燃性固体と固定装置

使用した可燃性固体はろ紙とPMMAである。本実験では、強制的な可燃性固体の移動速度に対する燃え拡がり速度を検討するため、ろ紙は厚さ  $d = 0.274$  mm から  $0.7$  mm まで、PMMA板は厚さ  $1$  mm から  $20$  mm までのものを使用した。使用したろ紙はすべて東洋ろ紙製 (密度  $0.54$  g/cm<sup>3</sup>) で、PMMA板は三菱レイヨン製 (密度  $1.0$  g/cm<sup>3</sup>) である。

図6-2は、ろ紙を固定した台である。ろ紙は水平に、両側からアルミニウム板で挟んで設置した。ろ紙の幅  $w$  は、予備実験において  $30$  mm 幅を調べた結果、側端の影響を受け、火炎先端 (あるいは炭化面) が上方から見て明らかな湾曲を呈したことから、火炎先端が2次元的になるように広くし、 $40$  mm とした。火炎は紙の上下面に形成して燃え拡がることになるが、主に上面の火炎を観察した。

図6-3は、PMMA板を固定した台である。PMMA板下面からの熱損失を極力抑えるため、PMMA板は断熱材の上に置き、両側からアルミニウム板で挟んだ。幅  $w$  は  $30$  mm である。また、板の先端は流れのはく離を抑えるように、鋭角的に仕上げた。火炎は上面にのみ形成される。

### 6.2.2 可燃性液体と容器

使用した可燃性液体は、エタノール、1-プロパノール（以降、単にプロパノールと記述する）そして、デカンである。また、容器内液相の流動を小さくした場合の実験をおこなうために、ガラスビーズ（0.2 mm径）に液体を浸潤させたものも使用した。

図6-4は、可燃性液体を入れた容器である。容器はアルミニウム製、幅30mm、長さ400 mm、深さ10 mmである。容器は保温槽上に設置し、初期液温を制御するとともに、容器底面の温度を一定になるようにした。保温槽内には水が入っており、管を通してタンクからポンプにより一定温度の水が循環できるようにした（図6-5）。

容器中央は、液相内の流動も観測できるように、その範囲100 mmを手前側と奥側、2枚の光学ガラスにしている。また、燃焼時の温度上昇とともに液体の体積膨張があり液体が容器からあふれるので、それが平板上に拡がり観測に支障をきたさないように、容器幅30 mmの外側、アルミニウム板厚1 mmを隔て、1mmの排液溝を設けた。また、容器移動とともに液体が少しこぼれ、その流出を最小限に抑えて容器内の流動が安定するように、容器の400 mmの長手側両端部には厚さ0.1 mm、長さ10 mmの板を取り付けた。

本実験では、さらに150 mm長さの短い容器も併せて製作し、使用した。これにも400 mm長さ容器と同様、中央に100 mmの液相内の流動観測用の光学ガラスが取り付けてある。

### 6.2.3 実験手順

固体、液体とも可燃性物質の端部で着火し、観測領域まで定常的に火炎を伝ばさせてから、可燃性物質を移動させた。この一連の実験時間内、火炎の挙動をビデオカメラで記録することで、可燃性物質静止時と移動時の火炎の挙動の違いを調べた。なお、メタノールははじめアルコール系可燃性液体は燃え拡がり実験中に燃焼生成物である水を吸収しやすいので、3回から4回ですべての液体を交換するようにした。

## 6.3 可燃性固体を移動させた場合の実験結果および考察

### 6.3.1 試料厚さと燃え拡がり速度

図6-6は、静止時の水平燃え拡がり速度をろ紙とPMMA板の厚さを変えて調べたものである。ろ紙は、紙の上面と下面に火炎が形成するので半分の厚さとして整理した。PMMA板の場合は、板を断熱材に置いているので上面にのみ火炎が形成している。

これらの結果から、厚さの増加とともに燃え拡がり速度が減少し、次第にその速度変化が小さくなることがわかる。このような様相は、Fernandez-pelloら [7] はじめ他の研究結果と同様である。

### 6.3.2 静止時の気相の流れの場

図6-7は流れの場の可視化の一例として、厚さ1mmのPMMAに沿って燃え拡がる際の火炎先端付近の流れの場を微粒子追跡法を用いて撮影した様子である。火炎は左方に移動している。この1mm厚さの薄いPMMA板は、燃え拡がりに伴う熱の影響から、未燃焼部の表面が盛り上がることもあり、そのことがこの図からの火炎先端下のPMMA表面で見られる（注意：PMMA表面付近の白い発光領域は、ここでは焦点距離よりも向こう側に堆積した微粒子である）。露出時間が1/8秒、燃え拡がり速度が0.01cm/s程度であるので、流れの速度よりも十分に小さく、火炎は、この露出時間内では静止しているとみてよい。

火炎先端はPMMA表面から約0.9mm離れて形成しており、表面厚さの減少する熱分解領域と未分解領域の境にある。このような流跡線から、火炎付近には火炎が誘起する流れ（自然対流）があり、左から右方向への表面に水平な流れが火炎に近づくにつれ上方へ、加速される流れとなることがわかる。火炎帯を通過する流れを見ると、火炎帯に対し傾いて近づく流れは、加速されながら火炎帯の通過時やや火炎帯方向へ傾き（火炎帯法線方向に加速）、通過後、上向きに加速される。この流跡の間隔からすると、火炎先端付近を通過する流れの速度は6cm/s程度である。

この消炎領域の流れから、火炎先端を境に火炎帯を通過する流れと燃焼反応に関わらないで消炎領域を通過する空気流れがあることがわかった。

### 6.3.3 ろ紙移動時の火炎先端の挙動

紙の一端で着火し、中央付近まで燃え広がったとき、速やかにろ紙の移動を開始させ、火炎先端の位置を時間経過に対して表したものが図6-8である。ここで(相対)移動距離 $x$ は、ろ紙上にある移動座標から測定したものである。静止空間を移動する距離は2章、式(2.8)で表されるが、観測を移動座標でおこなった便宜上、以下、移動座標でみた移動距離で説明する。併せて示した点線は、静止時に一定速度で燃え広がっているとしたときの移動経過を示したものである。

ろ紙の移動を開始すると、火炎はすぐ表面へ傾き、火炎全体が表面に近づくような挙動を示す。図からわかるように、 $V_T$ が増加するとはいえ、火炎先端の時間あたりの移動距離は増加する。約0.3秒まではこのように、燃え広がり速度が増加し、 $V_T$ の時間変化が低下し、一定速度になるに従い、火炎先端は進行-停止-進行という挙動を示し、ろ紙とともに移動する。移動座標上で火炎先端が停止している場合も、火炎先端は $V_T$ の速度で静止空間中を伝ばしている。火炎先端が後退せずろ紙全体の移動速度に追従していることから、火炎先端はろ紙全体の移動速度 $V$ とろ紙上の火炎先端の速度 $V_{FT}$ を加えた相対速度を持つ気流中を伝ばしていることになる(2章、式(2.7))。

白丸で示したような振動的な火炎先端の動きも、平均的な燃え広がり速度を考慮すれば、静止時の燃え広がり速度(点線の勾配) $V_{F0}$ とほぼ同じであることが特徴的である。つまり、気相中の火炎は対向気流を受け、振動的に伝ばするものの、凝縮相内の熱伝導があるために、火炎が伝ばできることがわかる。このとき、火炎の変動が、紙面から凝縮相内への熱伝達の変動になるが、その変動速度よりも凝縮相内の熱移動速度が大きいため、平均的にみると後退せずに連続的に火炎が進行できる。

### 6.3.4 PMMA板移動時の火炎先端の挙動

図6-9は、厚さ1mmのPMMA板を移動させたときに火炎先端の挙動である。静止時の燃え広がり速度 $V_{F0}$ は小さく、この場合、0.0104 cm/sである。PMMA板の移動を開始すると火炎先端は見かけ上すぐに後退し、しかし、移動前の位置から0.6 mm後方でその後退は停止し、保持され、前後に変動しつつ平均的には少

しずつ前方へ移動する。PMMA板の移動中、対向気流を受けてはいるものの、やはり、平均的な燃え拡がり速度は点線に示した静止時の燃え拡がり速度とほぼ等しい。

ろ紙の場合には、移動開始とともに火炎先端がすぐに前方へ移動するが、PMMA板の場合、すぐに後退する様相が異なる。このような違いは、場の変化という非定常性、具体的には対向流れにより火炎形状が変化し、火炎から表面への熱伝達の変化にともなう温度変化に対する熱分解反応の速度、可燃性気体の発生速度の違い [64, 65] として比較できるものと思われる。静止時の燃え拡がり速度がろ紙とPMMA板でそれぞれ、0.3 cm/sと0.01 cm/sという違いは、本研究では気化領域の移動速度の大きさの違いと同義であるが、それは熱分解反応速度、気化速度の大きさの違いともいえる。

### 6.3.5 火炎先端の安定性

#### (a) 厚さの影響

図6-10は、PMMA板の厚さ $d$ と移動速度 $V_T$ に対する火炎先端の安定性を示したものである。 $V_T$ の増加とともに火炎先端が変動するようになること、厚さが薄くなるほど、火炎先端はその移動速度に対してやや安定的になることなどがわかる。

火炎先端が安定である範囲には限界があり、ろ紙を使った垂直下方燃え拡がりでは [19]、対向気流速度が80cm/sに達する頃に不安定になる結果を得ているが、本実験のような水平燃え拡がりにおいては、火炎先端が安定である速度範囲は狭い。これは、火炎先端の流れの場の影響のためと考えられ、水平燃え拡がりでは、浮力の方向と対向気流の方向が異なるものの、垂直下方燃え拡がりでは浮力と対向気流の方向が同一であり、燃え拡がり方向に相対している。

一般的にPMMA板に沿って燃え拡がる場合、図6-7のように熱分解領域の後方が傾き、第3章(図3-7)のような傾きがなく限定された熱分解領域の場合とは異なる。図3-6では、熱分解長さ $L$ と安定性の関係を示しているが、熱分解面の火炎先端への可燃性気体の供給を考えると、3章の実験のような熱分解領域(気化領域)が平板の方が、この章の傾いたものよりも効果的な供給がおこなえる。

板が厚くなると、厚さ方向への温度分布を持つとともに燃え拡がり速度が減少し、板厚下方への燃え拡がりや水平表面に沿った燃え拡がりや併せて進行するので、熱分解面の傾きが顕著になる。このとき、熱分解領域面が傾くことで、火炎先端への可燃性気体の供給の効果が減少し、その影響が図6-10のように $V_T$ の増加とともに変動的になり、火炎が追従できなくなるものと考えられる。

### (b) 凝縮相内の熱移動の影響

図6-10を3章でおこなった1 mm厚さのPMMA片の実験における火炎先端の安定性(図3-6)と比較すると、1 mmに近い1.5 mm厚さの薄い場合には、 $V_T = 40$  cm/sに安定限界があるが、図3-6からわかるように40 cm/sではすでに不安定となり、変動を始めているというような違いが見られる。このことから薄いPMMA上で水平方向に燃え拡がりをおこなっている場合(本章)とおこなっていない場合(3章)では火炎先端の挙動が異なることがわかり、火炎先端の安定性に対する凝縮相内の未燃焼領域への熱移動(熱伝導)の影響が見られる。

### 6.3.6 追従性に対する気相と凝縮相の関係

燃焼しているろ紙の移動を開始するとすぐに火炎全体が表面に近づき、0.1秒までの短い時間ではあるが、その燃え拡がり速度は静止時の4倍(1.2cm/s)にもなることがわかった。このとき、実際に静止空間を伝ばする速度は50 cm/sから80 cm/sであることからすると、気相中の対向気流速度よりも、凝縮相中の熱移動速度(熱伝導)が重要であることが推測できる。すなわち、ろ紙の移動に火炎先端が追従している場合、対向気流が増加しても、凝縮相内の未燃焼領域への熱移動が継続すれば、それとともに移動するろ紙上で燃え拡がりや継続できる。このような火炎先端の移動には、熱移動とともに熱分解領域(可燃性気体の気化領域)の移動をとまないので、継続的な可燃性気体の供給が可能になる。

熱的に薄い可燃性固体に関する燃え拡がり速度 $V_{f1}$ は、文献[248, p. 65]より、十分ダムケラ数が大きいとして、

$$V_{f1} = l_h \left[ \frac{q_f + q_e - q_{fs}}{\rho_s c_s d (T_p - T_0)} \right] \quad (6-1)$$

と記述することができる。ただし、 $l_h$ は予熱領域の長さ、 $q_f$ は火炎から表面への熱、 $q_e$ は表面外からの輻射熱、 $q_{rs}$ は表面からの輻射熱、 $\rho_s$ は固体の密度、 $c_s$ は固体の熱容量、 $d$ は厚さ、 $T_p$ は熱分解温度、 $T_0$ は雰囲気温度である。

火炎から気相を通した熱伝達を考えると、それが熱伝導によるとして、単位幅、単位長さあたりの表面の熱流束 $q_{f'}$ は、

$$q_{f'} = \lambda_g (\partial T / \partial y)_s \quad (6-2)$$

で表せ、燃え拡がりに寄与する熱流束 $q_{f'}$ は、単位幅あたり、寄与する長さ $l$ として、

$$q_{f'} = \lambda_g (\partial T / \partial y)_s \cdot l \quad (6-3)$$

となる。

継続的な燃え拡がりが進行するには可燃性気体の発生が必要で(4章、式(4.2)の $m$ )、熱分解反応においては、近似的に次式で表せる。

$$\dot{m} = A_s \rho \exp(-E/RT_s) \quad (6-4)$$

燃え拡がり速度が増加するという事は、 $m$ が増加して供給される必要がある。表面温度は熱分解温度 $T_s$ に保たれているので、加熱量の増加した分だけ $m$ の増加が見込まれる。

式(6-1)からすると、燃え拡がり速度が増加するためには、表面への熱流束が増加する必要があること、予熱領域長さ $l$ が増加する必要があることがわかる。熱流束に関しては、火炎が表面に傾くに従い、火炎の伝ばする前方予熱領域への輻射に関する形態係数が減少するので、輻射に対する熱流束よりも火炎から気相を通した熱伝導による熱量が支配的になると考えられる。火炎が傾き、火炎先端付近が表面に近づくと $y$ が減少するため、式(6-3)のように、温度勾配は増加する。しかし、実験結果からわかるように $y$ が減少する量は0.1 mmから0.3 mm程

度と小さいので、この項だけで、静止時に比べ数倍にもなる燃え拡がり速度に相当するだけの温度勾配を形成し、大きな熱流束を得ることはできない。すなわち、予熱領域の長さ  $l$  の増加が考えられる。 $l$  は予熱領域に相当する長さ（気相の熱境界厚さ）と燃え拡がりに寄与する熱分解領域の長さからなる。従って、火炎が傾くことにより、表面への予熱領域と特に熱分解領域（可燃性気化領域）が増加することが、この火炎先端の伝ばを支持しているものと推察される。

また、上記のような定常燃え拡がり速度に基づく考え方とは別に、気相側の現象に着目し、火炎先端が拡散火炎の性質を持つという考え方で非定常現象を説明することもできる。

紙面が動き出すと、火炎先端は表面に傾き、火炎直下と表面の温度勾配と濃度勾配が増加する。そのため、火炎先端を基準にみると可燃性気体の濃度が増加することになり、火炎先端へ拡散流入する可燃性気体の量が増加する。拡散火炎である火炎先端は、燃え拡がる方向から空気（酸化剤）、そして背後から可燃性気体が火炎反応帯へ拡散流入し、燃焼反応が持続するので、化学量論比になる位置（平衡位置）にある [223]。従って、可燃性気体の濃度勾配の増加は火炎先端を酸化剤側へ変位することになり、短い時間に火炎先端は前方へ伝ばできる（第7章）。燃焼反応はある限界までは消炎せずに、むしろ質量燃焼速度が増加するので、火炎先端は吹き飛ばずに紙面に追従できる。そして、火炎先端が紙面の移動に追従することにより、火炎から紙面への連続的な加熱が可燃性気体の発生につながる。加熱に対して可燃性気体の発生しやすい（たとえばBナンバが小さい；第4章）可燃性物質、熱貫通距離が短く熱的に薄い可燃性物質などは、火炎先端が追従、保持されている場合には、これまでの凝縮相内の熱伝達の考え方 [248, 7] を適用して説明できる。