

連続噴霧の時間的および空間的
不均一性が着火性に及ぼす影響

平成 15 年度

寺島 幸士

目次

記号表

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本研究に関連する過去の研究	2
1.2.1 液滴の着火に関する研究	2
1.2.2 液滴間の火炎伝ばに関する研究	3
1.2.3 燃料噴霧の着火に関する研究	3
1.2.4 燃料噴霧の燃焼に関する研究	4
1.2.5 噴霧の不均一性に関する定性的研究	5
1.2.6 燃料噴霧の不均一性の定量的評価方法に関する研究	5
1.3 研究目的	6
1.4 本研究の必要性	6
1.5 本研究の内容および構成	7
1.6 本研究で定義する用語	8
1.6.1 着火の定義	8
1.6.2 燃料噴霧に関する言葉の定義	8
1.6.3 単分散噴霧の定義	9
1.6.4 燃料噴霧の不均一性	9
第 1 章参考文献	10
第 2 章 実験装置および実験方法	13
2.1 はじめに	13
2.2 実験装置	13
2.2.1 実験装置概要	13
2.2.2 単分散噴霧生成装置	13
2.2.3 燃料蒸気生成装置	14
2.2.4 燃料供給用シリンジポンプ	15
2.2.5 混合室	15
2.2.6 点火装置	15
2.3 測定装置および測定方法	16
2.3.1 PDPA による燃料噴霧濃度測定の検定と校正	16
2.3.2 時間平均的な噴霧特性の測定	17
2.3.3 瞬間撮影による点火の瞬間における燃料噴霧の濃度および空間的な分散状態の測定	

	18
2.3.4 燃料噴霧中に存在する燃料蒸気の時間平均的な濃度の測定	19
2.3.5 火炎の計測および分類と目視による着火判定	20
2.3.5.1 マルチチャンネルイオンプローブによる火炎の伝ば状態の観察	20
2.3.5.2 噴霧火炎の撮影	21
2.3.5.3 着火判定	22
2.4 実験方法の概要	23
2.4.1 点火位置の決定	23
第2章参考文献	24
第3章 燃料噴霧の時間平均的な特性と着火性の関係	38
3.1 はじめに	38
3.2 実験装置および実験方法	38
3.2.1 実験方法概要	38
3.2.2 時間平均的な燃料蒸気濃度の測定法	38
3.3 結果および考察	39
3.3.1 総燃料濃度による着火性の变化	39
3.3.2 燃料噴霧混合気燃料蒸気を添加した場合の着火性の变化	39
3.3.3 燃料噴霧濃度による着火性の变化	40
3.3.4 燃料噴霧および燃料蒸気の着火性への影響	40
3.3.5 時間的濃度分布に起因する燃料噴霧の確率的な着火モデル	41
3.4 本章のまとめ	43
第3章参考文献	45
第4章 燃料噴霧の不均一性評価法の検討	58
4.1 はじめに	58
4.2 燃料噴霧の不均一性の評価方法	58
4.2.1 燃料噴霧濃度の標準偏差および相対標準偏差を用いた空間的不均一性の評価方法	60
4.2.2 CZAINSKI らによる空間的な不均一性の評価方法	61
4.3 各評価手法の比較方法	62
4.3.1 乱数を用いた不均一性評価手法の比較	62
4.3.2 実噴霧による不均一性評価手法の比較	62
4.4 実験装置および実験方法	62
4.5 結果および考察	63
4.5.1 乱数を用いた場合の不均一性評価指標の変化	63

4.5.2 実噴霧による評価	63
4.6 本章のまとめ	64
第4章参考文献	65
第5章 点火の瞬間の噴霧特性と着火性の関係	77
5.1 はじめに	77
5.2 実験装置および実験方法	77
5.2.1 実験方法概要	77
5.2.2 実験条件	77
5.2.3 時間平均的な燃料蒸気濃度の測定方法	78
5.2.3.1 クロマトグラム面積と燃料蒸気濃度	79
5.2.3.2 ガスサンプリングプローブの吸引速度による燃料蒸気濃度測定結果の変化	79
5.2.4 発生した火炎の分類	80
5.2.5 燃料噴霧特性と着火性の関係の評価方法	80
5.3 結果および考察	80
5.3.1 瞬間の燃料噴霧濃度による着火性の変化	80
5.3.2 燃料噴霧特性と着火性の相関	80
5.3.3 燃料噴霧の空間的な不均一性の影響	81
5.4 まとめ	82
第5章参考文献	83
第6章 燃料噴霧の不均一性が着火性におよぼす影響	90
6.1 はじめに	90
6.2 実験装置および実験方法	90
6.2.1 実験方法概要	90
6.2.2 火炎形態の分類と着火判定	90
6.3 結果および考察	90
6.3.1 燃料噴霧の不均一性評価	90
6.3.2 放電の瞬間の燃料濃度と着火性の関係	91
6.3.3 火炎形成過程の計測	91
6.3.4 燃料噴霧の不均一性と着火性の関係	92
6.4 本章のまとめ	93
第6章参考文献	93
第7章 燃料噴霧の不均一性と点火により形成される火炎の形状の関係	100
7.1 はじめに	100

7.2 実験装置および実験方法	100
7.2.1 実験方法概要	100
7.2.2 PDPA の捕集率検定	101
7.2.3 燃料蒸気濃度の測定	101
7.3 結果および考察	101
7.3.1 燃料噴霧の不均一性	101
7.3.2 放電の瞬間における燃料噴霧特性と着火性の関係	102
7.3.3 放電の瞬間の燃料噴霧濃度と形成された火炎の関係	103
7.3.4 燃料噴霧の不均一性と、形成された火炎の関係	103
7.4 本章のまとめ	104
第 8 章 本研究のまとめ	115
8.1 本研究で得られた結論のまとめ	115
8.2 燃料噴霧の不均一性が着火性に影響を及ぼす機構に関する一考察	117
8.3 本研究分野の今後の展望	118
謝辞	
投稿論文および講演前刷の一覧	

記号表

A	面積
C	試料の体積濃度
C_{dd}	蒸発に関する修正係数
D	直径
d	粒子径
d_{30}	体積個数平均粒子径
f	周波数
F	体積流束
G	群燃焼指数
G'	修正群燃焼指数
H	不均一指数
h	不均一度
k	セル数
L	液滴間距離
l	厚さ
Le	ルイス数
m	質量
m	平均値からの偏差の二乗和
M	試料 1 mol あたりの質量
N	数密度
n	液滴個数
P	確率
Q	流量
Re	レイノルズ数
RSD	粒子数の相対標準偏差
S	無次元液滴間距離
Sc	シュミット数
SD	粒子数の標準偏差
t	時間
T	温度
v	速度
V	体積
W	濃度

X	体積分率
	PVC 補正率
	捕集率
	液柱に与える振動の波長
	密度
	(相当)当量比

添え字

0	初期
analysis	解析
cluster	クラスタ内
collect	直接捕集による測定
g	気相（蒸気）
g0	標準状態における気相の状態
glycerin	グリセリン
i	i 番目
j	液柱
l	液相（噴霧）
o	オリフィス
opt	最適
pdpa	PDPA による測定
phase	相変化による
random	ランダムな状態
ref	基準
sampler	サンブラ内
std	標準
temperature	温度変化による
vacuum	吸引プローブ
water	水

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 本研究に関連する過去の研究.....	2
1.2.1 液滴の着火に関する研究.....	2
1.2.2 液滴間の火炎伝ばに関する研究.....	3
1.2.3 燃料噴霧の着火に関する研究.....	3
1.2.4 燃料噴霧の燃焼に関する研究.....	4
1.2.5 噴霧の不均一性に関する定性的研究.....	5
1.2.6 燃料噴霧の不均一性の定量的評価方法に関する研究.....	5
1.3 研究目的.....	6
1.4 本研究の必要性.....	6
1.5 本研究の内容および構成.....	7
1.6 本研究で定義する用語.....	8
1.6.1 着火の定義.....	8
1.6.2 燃料噴霧に関する言葉の定義.....	8
1.6.3 単分散噴霧の定義.....	9
1.6.4 燃料噴霧の不均一性.....	9
第 1 章参考文献.....	10

第 1 章 序論

1.1 研究背景

人間は燃焼により発生するエネルギーを動力として用いることを学び、以来、我々の生活は、過酷な肉体労働から開放され快適なものとなった。しかし現在、我々はこの快適さを維持するため、たくさんの燃料を燃やし、有害排出物により生活環境や自然環境を破壊している。また大量の燃料消費の結果、エネルギー枯渇が取りざたされている。このような問題を解決するため、自然との調和を図り、限りある資源を有効に活用する方向に人々の意識が転換しはじめている。我々工学者も、この問題にどう対処するか真剣に考えなくてはならない。

現在、貯蔵や輸送などの容易さや、発熱量の高さなどから、輸送機器など定置型でない燃焼器には液体燃料が一般に利用されている。液体燃料を効率よく燃焼させる方法である噴霧燃焼法は、予混合燃焼領域と同時に拡散燃焼領域を持ち、高負荷燃焼が可能な一方、総当量比的にみれば希薄燃焼が可能であるなど、工業目的によく適合しているため、広く利用されている。この、燃料を燃やすという目的において、着火現象は、燃料が燃焼に至る過程として確実に達成される必要があるため、古くより研究の対象となっている。しかしその過程はさまざまな要因が複雑に影響しあい形成されているため、今なお不明な点も多い。

噴霧着火現象に関する研究は、希薄着火限界や、最小点火エネルギーなどといった、燃料噴霧のもつ平均的な特性にのみ着目した研究⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾が多い。これは燃料噴霧の着火現象において着火の成否は確率的であり現象が複雑であるため、時間平均的には同一な条件の燃料噴霧においても、火炎が発生したり(着火)、しなかったり(不着火)、また火炎が発生してもすぐに消滅してしまうといったさまざまな結果が起き、またこのような現象を確率的にとらえることで工学的には有用な結論が得られるという理由による。しかしこのような研究は、工学的に有用な、噴霧着火現象をマクロ的に表す各種特性値を求めることは可能であるが、噴霧着火現象の根本である、どの様に噴霧が着火に至るのかという点を明らかにすることはできない。

また一方で、このような確率的な要因を除き、詳細な現象解明を目的として、噴霧中の個々の液滴に着目した単一液滴を用いた着火および燃焼に関する研究⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁵⁾や、液滴列を用いて火炎伝ば機構を明らかにする研究⁽¹⁷⁾など、燃料噴霧の着火および燃焼を簡素にモデル化した研究が行われている。これらの研究は噴霧の持つさまざまな不確定要素を排除することが可能なため、詳細かつ有効な研究成果が得られている。しかし、噴霧中の粒子は互いに影響しあい、群として蒸発、燃焼し、周囲へ火炎が伝ばする特性をもつため、噴霧着火現象を確率的にとらえる現在の研究では、このような研究から得られた知識を直接、噴霧の着火現象に応用することは難しい。

また今日では、噴霧着火現象の数値計算も行われるようになっているが、燃料噴霧の空

間的な分散性を計算空間に再現し、解析するためには、膨大な計算資源が必要なため、液滴が相互に干渉しないなどの仮定を用いるか、噴霧のもつ不均一さを無視し規則的に配置して液滴の取扱いを簡素化したものなど⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾が多く、反対にその様な仮定を除いて厳密な数値計算を行う場合には、液滴の数を極端に減らし、数滴程度で計算を行っているもの⁽¹⁸⁾がほとんどである。

現時点では確率的であるととらえられている噴霧着火現象について、液滴の着火に関する多くの知見を応用するためには、液滴が集合することで噴霧着火現象がどの様に変化するか、また集合状態が変化することで、噴霧着火現象がどの様に変化するかについて詳細に観察し明らかにする事が重要である。

1.2 本研究に関連する過去の研究

燃料噴霧の着火現象は、大きく火炎の発生と伝ばの段階に分類することができる。火炎の発生は大きく自己着火と強制着火に分けられるが、いずれも局所的な現象であり、火炎が発生するごく近傍の状態を詳細に測定することで解明することが可能である。このため単一液滴を用いた着火・燃焼実験による知見が参考となる。一方、火炎伝ばの過程においては、無数の燃料液滴が集合した噴霧としての燃焼現象を取り扱う必要があるが、各時刻における場の状態を詳細に把握することが難しく、そのため火炎形状の変化を時系列的に観察した例はあるが、詳細な考察がなされているものは少ない。ただし噴霧燃焼においては、燃料粒子がグループとなり燃焼する現象を群燃焼と呼び、群燃焼挙動に関する研究が行われるようになっている。本研究においても、火炎が伝ば・拡大し、最終的には群となって燃焼に至る点では関連性の高い分野ではある。

また着火の過程を特に分類することなく、総括的に扱った実験も行われている。このような手法で行われた研究は、比較的燃焼初期のものが多く、多くが最小点火エネルギーや、希薄可燃限界が噴霧特性によりどの様に変化するかといった、マクロ的な特性の解明を目的とした、工学的な研究が多い。

1.2.1 液滴の着火に関する研究

液滴の着火および燃焼を扱った初期の代表的な研究としては、小林ら⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾による、懸垂系により保持された単一液滴の高温空気中における蒸発、燃焼過程および自然着火の機構に関する研究が挙げられる。この研究において、小林らは、定常的な液滴の蒸発および着火による燃焼過程の観察と共に、液滴の自然着火から定常燃焼への過程を観察した。液滴の着火過程においては、蒸発により液滴周囲に形成されている可燃な混合気層がはじめに着火し、予混合的な燃焼が液滴周囲全体について起きる。その後、火炎による熱で促進された液滴からの蒸発による蒸気が拡散燃焼するという結論を得た。

また落下塔などを用い、発生した火炎による自然対流の影響を排した、無重量状態における着火過程の研究も行われている。液滴の蒸発過程において、 D^2 則が成り立たない燃焼

過程においては、非定常性が重要な役割を持つといった結果が得られている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁴⁾が、本研究との関連性が低いため、詳しい解説は省く。

一方、液滴の着火過程のモデル化と数値計算も以前から行われている。特に詳細な結果が得られるようになった近年では、液滴の着火現象を素反応にまで分割し数値解析を行う例⁽¹⁵⁾も見られる。この様な研究によると、高温気流中における液滴の自然着火現象では、着火に至る限界液滴径の存在が示されており、その値は1000K程度の高温場において400 μ m程度との結果を得ている。ただし本研究の様に、火花点火を用いた強制着火の場合、火花は数千-数万Kという高温のプラズマ領域を局所的に形成すること、噴霧粒子が集合することで単一液滴に比べ濃い蒸気層を液滴周囲に形成することより、この研究より得られる様な限界粒径よりもさらに小さな液滴からなる燃料噴霧においても着火に至る。また火花からわずかに遠ざかると温度は急激に低下するため、火炎の発生は放電近傍の液滴の粒子径だけではなく、放電火花と液滴の位置関係に依存し、さらに放電によりラジカルの発生や、放電の衝撃による液滴の分裂なども考えられる。放電による火花周囲の温度分布および変化を研究した論文も見受けられる⁽¹⁶⁾が、液滴が存在した場合について詳細に調べられてはいないため、この点において参考になる研究は少ない。

1.2.2 液滴間の火炎伝ばに関する研究

燃料噴霧中における火炎の伝ばを詳細に観察するためにモデル化を行うと、最終的には2または複数液滴からなる液滴列における火炎の伝ばというモデルに到達する。2液滴間における火炎の伝ば、特に液滴間距離により、個々の粒子周囲に形成される火炎がどの様に干渉するかに関しては、三上らにより研究がなされている⁽¹⁹⁾。この報告によると、液滴間隔の減少に伴い、燃焼形態が単独燃焼から集団燃焼に遷移し、その支配要因は個々の液滴が利用できる酸素量および火炎の消滅の原因ともなる液滴と周囲ガスの相対速度の二つであると説明されている。

1.2.3 燃料噴霧の着火に関する研究

先にも述べた様に、燃料噴霧の着火現象は、火炎の発生と、その後の火炎伝ばによる火炎の成長の段階に整理できるが、過去には、この様に着火過程を分類するのではなく、総合的に着火現象を扱った研究も多く存在する。このような研究は、比較的古い研究に多く見受けられる。例えば LEFEBVRE らによる最小点火エネルギーの測定と解析⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、AGRAWAL と SIRIGNANO による噴霧の粒度分布による着火性の変化に関する数値計算⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾、DIETRICH, CERNANSKY, SOMASHEKARA, NAMER による二分散噴霧の着火性に関する研究⁽⁹⁾、SINGH と POLYMERPOULOS、あるいは DANIS, NAMER, CERNANSKY による最適着火粒径に関する研究^{(7),(23)}、吉田らによる最適気相/液相燃料濃度比に関する研究⁽²⁴⁾⁻⁽²⁶⁾など、平均粒径、粒度分布、燃料噴霧/燃料蒸気濃度といった時間平均的なパラメータの影響を着火遅れや最小点火エネルギーなどを用いて評価した研究が多い。これらのパラメー

夕はいずれも工学的には重要なものではあるが、着火現象は本来時間的に非定常な現象であるため、このような時間平均的なパラメータを用いても、現象を正確に解明することはできない。また時間平均的には定常な燃料噴霧においても、瞬時的、局所的には不均一な構造をとり、この構造は燃料噴霧の生成条件や、周囲気流の特性などに左右されるため、噴霧生成装置の差異によって各研究で得られる結果は異なると考えられる。

1.2.4 燃料噴霧の燃焼に関する研究

研究背景でも触れたとおり、燃料噴霧は液滴径や数密度にばらつきを持つ。さらに周囲のガスの状態や、液滴間の相互影響なども一様でない。このため燃料噴霧中においては、局所的にさまざまな燃焼状態をとる領域が複雑に入り混じり存在している。よって燃料噴霧中の火炎伝ばは不均一となり、空間的に不均一な、複雑な燃焼構造となる。このため、前項の様な単一液滴や、複数滴における火炎伝ばにおいては、火炎の伝ばが隣り合う 2 液滴間の問題となるため、実噴霧において起きていると考えられる複数液滴が同時に影響を及ぼしあう場における火炎の伝ば機構を明らかにするという目的との間には大きな隔たりが存在する。

この点に関しては、CHIU らによる群燃焼仮説の提唱⁽²⁰⁾と、これに基づいた噴霧火炎の構造観察^{(32),(21)}が行われるようになってきている。群燃焼仮説とは、燃料噴霧の噴霧特性によって噴霧群がどのような燃焼形態をとるか理論的に解析したものである。噴霧群に含まれる液滴の蒸発と拡散による液滴群内外の酸素の供給のバランスによって、個々の液滴が単独で燃焼する単滴燃焼から、噴霧群周囲に火炎が形成されるが、噴霧群内部には十分な熱が届かず蒸発もしない外殻燃焼までの 4 段階の燃焼形態をとると結論付けている。この群燃焼仮説の概念は一般的に受け入れられているものだが、CHIU らによる群燃焼仮説は、一般的な噴霧燃焼を考察する上で、いくつかの問題点を持つ。この問題点のうち、特に噴霧数密度が一様ではない点に着目し、噴霧粒子が、微粒化および混合過程において周囲気流の渦の影響を受け、階層的な渦構造をとり、その結果火炎も同様の構造をとると考え、群燃焼理論をより実噴霧に適用できるよう改良することを目的として中部らは火花点火による噴霧中の球状火炎について⁽²⁷⁾⁻⁽²⁹⁾、赤松らは時間平均的に定常燃焼を行っている噴霧火炎について⁽³⁰⁾⁻⁽³²⁾、それぞれ実験的に噴霧燃焼構造を調べている。その結果、点火直後の火炎では、予混合的な燃焼を示す青炎が先行し、その背後に燃料噴霧の濃度むらに対応する拡散火炎片が発生するとの結論を得た。さらに不均一な噴霧中において、火炎が燃焼性の高い領域を選択的に伝ばし、その結果噴霧クラスタが形成され、各クラスタの燃焼状態は、個々の群燃焼数にほぼ依存しているという結論を得た。ただし選択的な火炎伝ばは、不均一に噴霧が存在することに起因するため、彼らの言う様に、燃焼により噴霧クラスタが形成されるのではなく、噴霧中にあらかじめ存在していた濃度分布が、選択的な火炎伝ばにより強調され、より明確なクラスタへと成長するものであると思われる。

またごく最近、実噴霧を用いることによる不確定要素を排し、群燃焼挙動を観察するた

め、複数の細線により三次元的に配置した場合の燃料粒子群の燃焼挙動に関する研究⁽²²⁾が行われている。

1.2.5 噴霧の不均一性に関する定性的研究

燃料をシリンダ内に直接噴霧し燃焼させるディーゼル機関では、不均一な燃料噴霧の構造が噴霧の燃焼状態に直接影響を及ぼすため、ディーゼル噴霧の様な間欠式の非定常噴霧の噴霧構造とその形成過程については、噴霧の貫通距離などと共に比較的多くの報告⁽³³⁾⁻⁽³⁵⁾がある。これらの報告によると、静止した雰囲気中に高速で燃料を噴射した場合、噴霧の周囲において渦が発生し、この渦が、噴霧流との相互作用により次第に成長して、より大規模な構造となると共に、噴霧中に枝状の高濃度領域（クラスタ）を形成する。このクラスタにおいては、遠心力によって、中心部は微小な液滴が集まり、また外周部には大きな液滴が存在する。さらに大きな粗大粒子は、渦構造による影響を受けにくくなるため、噴霧中に広く分散して存在する。

一方、固体粒子についても、粒子群の流動とむらの形成に関する研究が報告されている。さらには鉛直上向きに流れる固気二相流の 2 次元数値シミュレーションを行い、固体粒子の粒径や粒子濃度が形成されるクラスタにどのような影響を与えるか⁽³⁷⁾を調べている。この報告によると、固気二相流においては、主としてひも状のクラスタが形成され、このクラスタが複雑につながりあって V 字、逆 V 字形の構造をとる。またクラスタサイズは粒子径に依存し、粒子径の拡大と共にクラスタサイズも大きくなる。しかし一般的に固体粒子による研究では噴霧に比べ高密度な場合が研究の対象とされており、この場合には固体粒子同士の直接的な接触がクラスタ形成に強く影響を及ぼす。したがって固体粒子のクラスタ形成は、液体噴霧におけるクラスタ形成とは異なる現象であると考えられる。

1.2.6 燃料噴霧の不均一性の定量的評価方法に関する研究

前述のとおり、不均一噴霧構造の形成は定性的には表現されているが、噴霧の不均一性を定量的に評価した研究は少ない。これは不均一性の表現方法が研究段階であり、表現方法が定まっておらず、不均一性の表現方法から研究者が独自に開発する必要があるためである。湯山ら⁽³⁶⁾は噴霧の幾何学的な分散状態を統計力学的な概念に基づいたエントロピを用いた不均一度という指標で表現している。エントロピに基づいて不均一性を評価する点において、着眼点は非常に面白いと評価できるが、ここで求めている不均一度は変化を強調する数学的処理が行われているため、不均一度の絶対値に関して特に物理的意味を持たず、したがって定量的な比較が難しいという問題点を持つ。

一方、噴霧ではないが、分散相の分散状態の評価という視点では、CZAINSKI らにより 2 次元平面内について報告されている⁽³⁸⁾。CZAINSKI らは、分散相の不均一性を、ランダムな状態を基準とした相対強度として、表現することを提案している。また不均一性を評価する際の、評価スケールを変化させることで、むらのスケールを表現できる。この方法で

最も重要な点は、ランダムな状態を基準とすることにより、分散相の数密度によらずその不均一性を一意に表現することができる点である。

1.3 研究目的

噴霧の着火および燃焼に関する研究の多くが、燃料噴霧の不均一性を考慮せず行われている。これは、燃料噴霧の空間的な分散状態を任意に設定する実験手法が確立されていないことと、実噴霧への着火を確率的にとらえることで工学的には有用な結論が得られるためである。しかし、燃料噴霧の不均一性を考慮しない研究では、噴霧が着火に至る過程を明らかにすることはできない。そこで本研究では、燃料噴霧中では噴霧粒子が空間的に不均一に存在するという視点に立ち、燃料噴霧の不均一性が、火炎の発生や伝ばといった着火へ至る過程にどの様に影響を与えているかを明らかにすることを目的とした。しかしながら燃料噴霧の不均一性を任意に設定することは非常に難しく、このため本研究においては不均一性のもつ影響を定性的に明らかにすることとした。

この目的を達成するため、噴霧および蒸気として存在する燃料の平均濃度の合計である総燃料濃度が、燃料がすべて気体となり空気と完全に均一に混合した場合の希薄着火限界濃度を下回るような、噴霧着火現象において確率的特性が特に明確に現れる条件を本研究の実験対象とし、火花放電による強制点火実験を行った。試料にはメタノールおよび n デカンを用い、噴霧の空間的な不均一性以外の要因を除くため、粒子径が均一な噴霧が非常に緩やかな気流中に分散している場を用いて点火試験を行うこととした。

はじめに、多くの研究と同様に、液滴径や、噴霧として存在する燃料の平均濃度である燃料噴霧濃度、および蒸気として存在する燃料の平均濃度である燃料蒸気濃度といった、平均的な噴霧混合気の実験条件による着火率の変化を求め、この結果を燃料噴霧濃度の時間的な不均一性の影響を考慮して、着火に影響を及ぼす領域と、その領域内に存在する燃料噴霧濃度の確率密度分布を用いた着火モデルで近似することで、噴霧着火現象を支配する要因について明らかにした。

次に、放電の瞬間の燃料噴霧濃度を実際に測定し、着火率との関係について調べると共に、燃料噴霧の空間的な不均一性の定量的な評価方法を定め、点火の瞬間における燃料噴霧の空間的な不均一性と着火率の関係より、空間的な不均一性が着火性におよぼす影響を定性的に評価した。

さらに点火によって発生する火炎について、その火炎形状が不均一性にどのように影響を受けているか定性的に明らかにした。

1.4 本研究の必要性

本研究の目的は実噴霧を用いた噴霧着火現象に関する応用的な研究と、単一滴や液滴列を用い極限までモデル化した噴霧着火現象に関する基礎的な研究の間の橋渡しとなることである。単一滴や液滴列での実験は、非常にモデル化されているため、粒子間距離や液滴

径，燃料種，周囲気流の影響など，液滴に起きるさまざまな現象の影響を詳細に観察可能である点において重要であり，必要とされている．しかし実際にはこのようにして得られた知見は実噴霧に応用することは難しい．これは，噴霧が空間に不均一に分散して存在しているため，噴霧の着火現象が液滴単位でなく，液滴群単位で起きるからである．本研究は，この噴霧の不均一な分散の着火特性への影響について定性的にはあるが明らかにしたものである．この目的のため，本研究は粒度分布の狭い単分散噴霧を用いて粒度分布の影響を取り除き，さらに流れが弱く，乱れが低い周囲気流を用いるという2点についてモデル化を行い，点火試験を行った．これらは燃料噴霧の不均一性ととも，選択的な火炎伝ばに影響を及ぼす要因であり，それぞれが火炎の伝ばにどの程度影響を及ぼすかといった点については，明らかにすることはできない．ただしこのようなモデル化された実験においても，粉塵や燃料噴霧の滞留による爆発危険性など，流れの非常に弱い場の現象や，噴霧流と気流のスリップの小さい，乱れの弱い場に関する現象の解明のためには，工学的，実用的な必要性が存在すると考えられる．

1.5 本研究の内容および構成

本論文は第1章から第8章までで構成した．第1章は序論であり，本研究の研究対象である，燃料噴霧の着火現象における不均一性の影響を解明することが，重要な意義をもつことについて述べた．また研究背景として，燃料噴霧の着火現象に関する従来の研究を簡潔に説明し，あわせて本研究の目的と必要性を説明した．

第2章は，燃料噴霧の点火試験装置および粒径，粒子速度といった噴霧特性の測定装置である位相ドップラ式粒子解析器や瞬間画像撮影装置といった，本研究において使用した測定装置に関する説明と，燃料噴霧混合気中に噴霧として存在している燃料の濃度である燃料噴霧濃度や，蒸気として存在している燃料の濃度である燃料蒸気濃度，燃料噴霧の空間的な不均一性などの測定方法についての説明である．

本研究で行った実験と，その結果および考察は第3章以降に示した．本研究では，燃料噴霧のもつ不均一性が着火性に与える影響を明らかにするため，第3章においてまず多くの研究と同様に，燃料噴霧，燃料蒸気および空気が混在する燃料噴霧混合気の着火性における，液滴径，燃料噴霧濃度および燃料蒸気濃度といった時間平均的な特性の影響を測定した．この測定より得た燃料噴霧濃度に対する着火率の変化を，点火栓付近の燃料噴霧が，点火の瞬間にとる濃度の確率密度分布を考慮し，累積二項分布を用いて近似することで，燃料噴霧の着火性に強く影響する領域の大きさ（基準体積）および燃料噴霧の希薄着火限界（基準濃度）の2指標で表現し，燃料噴霧の時間的な不均一性による噴霧着火現象への影響について考察した．さらにこれらの指標が，燃料噴霧液滴径および燃料蒸気濃度によりどのように変化するか明らかにすることで，これらの時間平均的な特性が噴霧着火現象へ与える影響について考察した．

このモデルにおいては，燃料噴霧が空間中に，ランダムに分散して存在していることを

前提としているが、実際には空間的不均一性がランダムであるか明らかでない。そこで第 4 章において燃料噴霧の空間的不均一性を評価する指標について検討を行った。さらに第 3 章において求めた基準体積のように、燃料噴霧の着火の可否に影響を及ぼしていると考えられる領域を定めた後に、前述の不均一指数が噴霧の着火性の評価に適用出来るか検討を第 5 章において行った。また第 6 章においては、実際に不均一指数を用いて噴霧の空間的不均一性と着火性の関係について考察した。

第 7 章においては、第 6 章まで試料として用いたメタノールが、揮発性が比較的高いことより、燃料を低揮発性の n デカンに変更し揮発性の影響について考察した。

第 3 章から第 7 章において得られた知見より、第 8 章において燃料噴霧の空間的不均一性が着火性に及ぼす影響について総括した。

1.6 本研究で定義する用語

1.6.1 着火の定義

高温高压化などで燃料噴霧が自然に自着火することも、また火花点火などで点火され火炎が発生することも、英語では「IGNITE」で表されるが、一般には前者を「着火」、後者を「点火」とする人が多い。本研究は火花点火による火炎の発生を研究の対象としているため、この定義にしたがえば本研究では点火に関する研究ということになる。しかし点火といっても、その定義は研究者によって異なり、局所的に燃焼反応領域が形成されるまでとする場合もあれば、点火に用いたエネルギー以上のエネルギーが発生した場合や、目視可能な火炎が発生した場合などと定義する場合もあり、その定義は曖昧である。そこで本研究においては、火炎を強制的に発生させようとする行為を点火、火炎が発生してから定常燃焼状態に移行したことを着火と呼ぶことと定義した。したがって本研究における定義の下では、発生した火炎が周囲へ伝ばし、論理的には、一様な噴霧中においては、連続的に周囲への伝ば拡大を続ける場合を着火成功と考える。しかし、実際には無限に一様な燃料噴霧場を生成することは不可能なため、第 2 章以降で述べる通り、本研究においては、点火により発生した火炎が、さらに周囲へ伝ばして、最終的に形成される火炎の大きさを元に着火判定を行った。

1.6.2 燃料噴霧に関する言葉の定義

一般に燃料噴霧といえば、液体で、噴霧として分散して場に存在する燃料のことを表すが、噴霧が分散している領域に蒸気となって存在している燃料や、さらに空気を含めた混合気全体を表している場合も多い。そこで本研究では、液体で、噴霧として存在している燃料を燃料噴霧、また蒸気として燃料噴霧の周囲に存在している燃料を燃料蒸気と定義した。したがってそれぞれの濃度は燃料噴霧濃度および燃料蒸気濃度と呼ぶ。さらに燃料噴霧および燃料蒸気として存在している燃料の合計の濃度を総燃料濃度と定義した。また燃料噴霧、燃料蒸気および空気が同時に混在したものを噴霧混合気と定義し表した。

1.6.3 単分散噴霧の定義

言葉の本来の意味にしたがえば，単分散噴霧とは，すべての液滴の粒径が完全に均一である状態の噴霧を指すが，実際には，すべて均一径の粒子を生成することは不可能であると同時に，液滴はその飛行過程において合体や蒸発するため，点火位置における噴霧を構成する個々の液滴が完全に均一である状態を形成することは不可能である．このため一般に単分散噴霧とは，特に何も工夫せず，自然な微粒化によって発生した噴霧群より，液滴径が均一に近いものすべてをさすことが多い．本研究では，全噴霧体積の 80%以上が最頻粒径 $\pm 10\%$ の範囲に含まれる粒子群を単分散噴霧と定義した．

1.6.4 燃料噴霧の不均一性

噴霧中において，液滴は均一に存在しているわけではなく，ある瞬間，ある領域を観察すると，局所的には燃料噴霧粒子が多数存在する過濃領域や，反対に燃料噴霧粒子がほとんど存在しない希薄領域が形成されている．また確率的には非常に均一に分散している状態や，反対に噴霧粒子すべてが一箇所に集合している状態もとり得る．この様な，さまざまな分散状態を総称して燃料噴霧が不均一性と呼ぶ．ランダムな分散状態とは不均一な噴霧粒子群がとりえる分散状態のひとつで，空間中において時間的，空間的な不均一さの存在は許容するが，粒子は時空間中において等確率で存在している状態を示す．この状態においては，燃料噴霧中のある局所的な空間内に存在しうる粒子数の確率密度分布は二項分布にしたがう．

また本研究で用いた燃料噴霧は，平均的には一様に流動しているため，時間的な不均一性は大規模な空間的不均一性と同じ意味となる．ただし本研究は火花点火による火炎の発生，伝ばを研究対象としており，その速度は噴霧の流動に比べ速い．そこで点火の瞬間に，点火栓周囲に存在する燃料噴霧粒子の不均一性を燃料噴霧の空間的な不均一性ととらえ，また火花点火ごとの点火栓周囲における燃料噴霧濃度の変化を燃料噴霧の時間的な不均一性ととらえ，解析を行った．

第 1 章参考文献

- (1) Rao,K.V.L. and Lefebvre,A.H., Minimum Ignition Energies in Flowing Kerosine- Air Mixtures, Combustion and Flame, 27 (1976) , p.1-20
- (2) Ballal,D.R. and Lefebvre,A.H., Ignition of Liquid Fuel Sprays at Subatmospheric Pressures, Combustion and Flame, 31 (1978), p.115-126
- (3) Ballal,D.R. and Lefebvre,A.H., Ignition and Flame Quenching of Flowing Heterogeneous Fuel- Air Mixtures, Combust and Flame, 35 (1979), p.155-168
- (4) Ballal,D.R. and Lefebvre,A.H., A General Model of Spark Ignition for Gaseous and Liquid Fuel- Air Mixtures, Eighteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute (1981), p.1737-1746
- (5) Aggarwal,S.K. and Sirignano,W.A., Ignition of Fuel Sprays: Deterministic Calculations for Idealized Droplet Arrays, Twentieth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute (1985), p.1773-1780
- (6) Aggarwal,S.K. and Sirignano,W.A., Ignition of Polydisperse Sprays: Importance of D20, Combustion Science and Technology, vol.46 (1986), p.289-300
- (7) Danis,A.M., Namer,I., and Cernansky,N.P., Droplet Size and Equivalence Ratio Effects on Spark Ignition of Monodisperse n-Heptane and Methanol Sprays, Combustion and Flame , 74 (1988) , p.285-294
- (8) Danis,A.M., Namer,I., and Cernansky,N.P., Fuel Pre-Vaporization Effects on the Minimum Ignition Energy of N-Heptane Spray/Vapor Mixtures, Winter Annual Meeting, ASME, 1986
- (9) Dietrich,D.L., Cernansky,N.P., Somashekara,M.B., and Namer,I., Spark Ignition of a Bidisperse n-Decane Fuel Spray, Twenty-third Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute (1990), p.1383-1389
- (10) 小林 清, 液滴の蒸発および燃焼に関する研究(第 1 報 蒸発しつつある液粒の表面温度とその測定), 日本機械学会論文集(第 2 部), 20-100(1954), p.826-831
- (11) 小林 清, 液滴の蒸発および燃焼に関する研究(第 2 報 蒸発速度), 日本機械学会論文集(第 2 部), 20-100(1954), p.831-837
- (12) 小林 清, 液滴の蒸発および燃焼に関する研究(第 3 報 燃焼), 日本機械学会論文集(第 2 部), 20-100(1954), p.837-843
- (13) Hara,H. and Kumagai,S., Experimental Investigation of Free Droplet Combustion Under Microgravity, Twenty-Third Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute (1990), p.1605-1610
- (14) 原 人志, 熊谷 清一郎, 単一微小液滴の燃焼に関する研究, 第 30 回燃焼シンポジウム

- 講演論文集，日本燃焼学会(1992)，pp.334-336
- (15) 斎藤 武雄，等々力 宏，素反応過程を考慮した単一燃料液滴の微視的着火過程の数値解析，日本機械学会論文集(B編)，61-589(1995-9)，pp3338-3346
 - (16) 天川 浩一，持田 孝明，青木 敦，野村 浩司，津江 光洋，氏家 康成，河野 通方，火花点火過程の素反応を考慮した数値解析，自動車技術会論文集，29-4(1998)，pp17-22
 - (17) Roth,N., Karl,A., Anders,K., and Frohn,A., Flame Propagation in Planar Droplet Arrays and Interaction Phenomena Between Neighboring Droplet Streams, Twenty-Sixth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute (1996), p.1697-1703
 - (18) Dwyer,H.A., Stapf,P., and Maly,R., Unsteady Vaporization and Ignition of a Three-Dimensional Droplet Array, Combustion and Flame ,121 (2000) , p.181-194
 - (19) 三上 真人，加藤 秀輝，佐藤 順一，河野 通方，燃料液滴の干渉燃焼に及ぼす重力の影響，日本機械学会論文集(B編)，61-582(1995-2)，p.731-737
 - (20) Chiu,H.H., Kim,H.Y., and Croke,E.J., Internal Group Combustion of Liquid Droplets, Nineteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute (1982), p.971-980
 - (21) 河原 伸幸，池田 祐二，中島 健，ガンタイプバーナにおける噴霧のレーザ計測(噴霧クラスタと群燃焼構造)，日本機械学会論文集(B編)，67-655(2001-3)，p.253-260
 - (22) 紺屋 智之，磯村 潤，徳村 博行，長田 仁，榎本 啓士，瀬川 大資，角田敏一，微小重力下における大規模燃料粒子群の火炎形状に及ぼす粒子間隔と粒子直径の影響，第39回燃焼シンポジウム講演論文集，日本燃焼学会，(2001)，p.211-212
 - (23) Singh,A.K. and Polymeropoulos,C.E., Spark Ignition of Monodispersed Aerosols, Fall Technical Meeting, Eastern Section of the Combustion Institute, (1985), p.27.1-27.4
 - (24) 吉田 肇，新井 雅隆，廣安 博之，燃料噴霧が混在する可燃混合気の点火特性，日本機械学会論文集(B編)，56-528(1990-8)，p.2483-2489
 - (25) 吉田 肇，新井 雅隆，廣安 博之，燃料噴霧が混在する可燃混合気の火炎形成過程，日本機械学会論文集(B編)，56-528(1990-8)，p.2490-2496
 - (26) 吉田 肇，新井 雅隆，廣安 博之，横谷昌道，燃料噴霧が混在する可燃混合気中を伝ばする火炎の構造，日本機械学会論文集(B編)，57-539(1991-7)，p.2416-2420
 - (27) 中部 主敬，水谷 幸夫，藤岡 知之，赤松 史光，分光可視化画像処理による噴霧火炎の構造観察，日本機械学会論文集(B編)，58-546(1992-2)，p.635-641
 - (28) 中部 主敬，水谷 幸夫，淵端 学，赤松 史光，財前 雅隆，S.H. EL-EMAM，油滴群中を伝ばする火花点火球形火炎の構造観察，日本機械学会論文集(B編)，58-548(1992-4)，p.1337-1342
 - (29) Mizutani,Y., Nakabe,K., Fuchihata,M., Akamatsu,F., Zaizen,M., and El-Emam,S.H., Spark Ignited Spherical Flames Propagating in a Suspended Droplet Cloud, Atomization and Sprays, Vol3 (1993). p.125-135
 - (30) Akamatsu,F., Nakabe,K., Mizutani,Y., and Katsuki,M., Group Combustion Behavior of

- Droplets in a Premixed Spray Flame, Proceedings of Iclass-94, Institute for Liquid Atomization and Spray Systems, (1994), p.696-703
- (31) 赤松 史光, 中部 主敬, 水谷 幸夫, 香月 正司, 田畑 敏克, 油滴群中を伝ばする火花点火球形火炎の構造観察(第2報), 日本機械学会論文集(B編), 61-582(1995-2), p.752-758
- (32) 赤松 史光, 水谷 幸夫, 香月 正司, 津島 将司, 趙 庸大, 予混合噴霧流の油滴群燃焼挙動と群燃焼数, 日本機械学会論文集(B編), 62-596(1996-4), p.342-348
- (33) 段 智久, 大石 直己, 千田 二郎, 藤本 元, ディーゼル噴霧の微粒化機構に関する一考察, 日本機械学会論文集(B編), 60-577(1994-9), p.3192-3197
- (34) Yeom, J.K., Ashida, K., Tanaka, T., Senda, J., and Fujimoto, H., The Structure Analysis of Diesel Free Spray with Phase Change, 2000 FISITA World Automotive Congress, (2000), Pp1-7
- (35) 木村 真, 松井 幸雄, LES による非定常噴霧の数値解析, 自動車技術, vol55 No6(2001), p.46-51
- (36) 湯山 亮, 近久 武美, 菱沼 孝夫, 噴霧内の拡散現象のミクロ構造と空気導入, 第16回内燃機関シンポジウム講演論文集, 2000, p.235-240
- (37) 米村 茂, 田中 敏嗣, 辻 裕, 固気 2 相流中のクラスタ形成の数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 61-590(1995-10), p.3671-3678
- (38) Czainki, A., Grancarek, Z., and Piasecki, R., Quantitative Characterization of Inhomogeneity in Thin Metallic Films Using Grancarek's Method, J. Phys. D: Appl. Phys. 27(1994), p.616-622
- (39) Berglund, R.N. and Liu, B. Y., Generation on Monodisperse Aerosol Standards, Env. Sci. & Tec., 7-2(1973), p.147-153

第 2 章 実験装置および実験方法	13
2.1 はじめに.....	13
2.2 実験装置.....	13
2.2.1 実験装置概要.....	13
2.2.2 単分散噴霧生成装置.....	13
2.2.3 燃料蒸気生成装置.....	14
2.2.4 燃料供給用シリンジポンプ.....	15
2.2.5 混合室.....	15
2.2.6 点火装置.....	15
2.3 測定装置および測定方法.....	16
2.3.1 PDPA による燃料噴霧濃度測定の検定と校正.....	16
2.3.2 時間平均的な噴霧特性の測定.....	17
2.3.3 瞬間撮影による点火の瞬間における燃料噴霧の濃度および空間的な分散状態の測定.....	18
2.3.4 燃料噴霧中に存在する燃料蒸気的时间平均的な濃度の測定.....	19
2.3.5 火炎の計測および分類と目視による着火判定.....	20
2.3.5.1 マルチチャンネルイオンプローブによる火炎の伝ば状態の観察.....	20
2.3.5.2 噴霧火炎の撮影.....	21
2.3.5.3 着火判定.....	22
2.4 実験方法の概要.....	23
2.4.1 点火位置の決定.....	23
第 2 章参考文献.....	24

第 2 章 実験装置および実験方法

2.1 はじめに

本章では、本研究を通じて用いた実験装置および実験方法について説明する。

2.2 実験装置

2.2.1 実験装置概要

図 2-1 に、本研究で用いた実験装置の概要図を示す。混合管の上部に単分散噴霧生成用の噴射弁が設置されており、噴射弁から定常的に噴射されている燃料噴霧は、混合気生成系により供給された燃料蒸気および空気の均一な予混合気と混合管内で混合され、点火試験のため、点火部において火花放電による強制点火される。

実験装置はその役割により、混合気生成部（単分散噴霧生成装置、燃料蒸気生成装置）、混合室、点火装置、および測定装置(位相ドップラ式粒子測定装置、瞬間および連続画像撮影装置、燃料蒸気濃度測定装置)に分類できる。

図 2-2 に実験装置の流路系統図を示す。コンプレッサにより圧送された空気は、レギュレータにおいて所定の圧力に調圧した後、サージタンクに導かれ、圧力変動を取り除いた。その後、シリンジポンプにより任意の流量に調節された液体燃料と混合し加熱部に送り、任意の濃度の均一予混合気とした。均一予混合気は冷却部において室温まで冷却した後、単分散噴射弁、混合室およびスワラにそれぞれ供給した。各流量は、ニードルバルブ付き浮子式流量計を用いて調節した。

単分散噴霧生成用の液体燃料は、ストップバルブとフィルタを通して噴射装置へ供給した。単分散噴霧生成装置において生成された燃料噴霧と、均一予混合気は、混合室を流れ点火電極を通過する。未燃混合気および燃焼ガスはブロワにより回収され、そのうち液体燃料は廃液タンクに回収した。

2.2.2 単分散噴霧生成装置

本研究では粒度分布幅の狭い単分散噴霧の生成が可能な振動オリフィス式噴射装置を用いた。一般に噴射弁より噴射された液柱はさまざまな微小乱れを持ち、このうち特定の波長のものは、時間と共に拡大して、ついには液柱が分裂に至る。単分散噴霧の生成装置はこの原理を応用し、特定周波数の振動を液柱に与えることで均一な大きさの液滴を形成することが可能である。生成される液滴径が均一の場合、噴射装置に供給する試料流量を Q 、信号周波数を f とすると、単分散噴霧が生成される際の粒子径 d_0 は幾何学的に次式で表せる。

$$d_0 = \left(\frac{6Q}{\rho f} \right)^{1/3} \quad (1)$$

液柱に与える振動の波長を λ , 液柱径を D_j とした場合, Rayleigh ら⁽¹⁾は解析的に均一な液滴を生成する最適な波長を

$$\lambda_{opt}=4.508D_j \quad (2)$$

と求めている．また実験的には, Schneider and Hendricks⁽²⁾により

$$3.5D_j < \lambda < 7D_j \quad (3)$$

と求められている．液柱径はノズル直径 D_o に影響を受けるため, 均一に生成可能な噴霧液滴径は, 噴射弁のノズル径によって制限される．液柱径とノズル径を同一と仮定すると, 単分散噴霧の液滴径は

$$1.74D_o < d_0 < 2.19D_o \quad (4)$$

となる．

本研究で用いた単分散噴射弁を図 2-3 に示す．この噴射弁の動作原理は Berglund ら⁽³⁾が開発した物と同様, 液柱の Rayleigh 分裂を用いている．噴射弁にはピエゾ振動子を取り付けてあり, 試料と同軸に気流を噴射する構造となっている．ピエゾ振動子に電気信号を印加することで噴射弁を振動させ, 液柱に一定周波数の乱れを与えることができる．気流は液柱の不安定性を増大させることで液柱の分裂を補い, かつ分裂した液滴が再合体しないよう分散を促進させる効果をもつ．空気流速を大きくすることで噴霧を広く拡散することが可能であるが, しかし同時に気流の乱れが液柱の分裂に影響を及ぼすため, 単分散噴霧の均一性が低下する．

本噴射弁は, 液滴径を調整するため, ノズル交換が可能となるよう, 厚さ 0.1mm のステンレス円板上に円孔を形成し, オリフィスフォルダおよびオリフィスキャップにより噴射弁先端に取り付け, ノズルとした．燃料噴霧の粒子径および粒子数密度を厳密に制御する必要があるので, ステッピングモータを用いたシリンジポンプにより正確な流量の燃料を定期的に噴射装置に供給した．

2.2.3 燃料蒸気生成装置

点火位置での燃料蒸気濃度を任意に変化させるため, 図 2-4 に示す燃料蒸気生成装置を用いた．

燃料蒸気生成装置は, 液体燃料を空気と混合し加熱, 蒸発させることで均一予混合気を生成する加熱部と, 均一予混合気を室温に戻す冷却部から成る．振動オリフィス式噴射装置と同様に, シリンジポンプにより燃料を供給することで任意の濃度の均一予混合気生成できる．液体燃料と空気の混合部はニードルを用いることで, シリンジポンプへの空気の逆流と, 液体燃料が注入口付近に留まることを防いだ．生成した均一予混合気は単分散噴射弁, 混合室, スワラにそれぞれ供給した．

2.2.4 燃料供給用シリンジポンプ

本研究では、液体燃料を定常的に噴射装置および燃料蒸気生成装置に供給する必要がある。本研究ではステッピングモータ駆動の1軸ステージによりピストンを一定速度で駆動することが出来るシリンジポンプを試料供給装置として用いた。ステージの移動速度はステッピングモータの駆動周波数により精密に制御することができるため、任意の流量の燃料を定常的に供給することが可能である。

2.2.5 混合室

燃料噴霧と均一予混合気の混合を促進する混合室は、上部は内径 94mm のアクリルパイプ製で、噴射装置の設置場所および均一予混合気の流入口を設けてある（図 2-5 参照）。また側面には周囲空気速度測定用のトレーサを供給するための穴を、噴射弁下方には噴霧拡散空気用スワラを設けてある。

混合室下部は交換および分離可能で、噴霧の噴射条件に応じて長さが調節できる。瞬間撮影を行わない場合は、混合室上部と同様のアクリルパイプで、また瞬間撮影を行う場合は、一辺 150mm の正方形断面で、乱反射を防ぐため内部を黒く塗装され、点火栓付近に一辺 80mm の観測窓を 4 面に持つアクリルパイプとした。

混合室は下端が点火電極先端より下になるよう設置した。ただし燃料噴霧測定の際は光路を遮らないよう混合室長を短くした。混合室内において混合気の混合が促進し、点火電極付近でほぼ一様に流れ込むように、各系統から流入する均一予混合気の量を調節した。

2.2.6 点火装置

本研究で用いた点火電極の形状および設置位置の概略図および点火装置概要を図 2-6 に示す。電極は噴射装置の下方に、混合気の流れる方向に対して垂直に火花が飛ぶように設置した。電極には直径 1mm の耐熱鋼を用い、電極間距離は放電時にエネルギー損失が少なくなるよう 3mm とした⁽⁴⁾。電極は八の字型に設置し、付着する燃料が先端にたまることを防いだ。

本研究では燃料噴霧特性以外の影響を極力小さくするため、上で述べた電極形状は一定とした。また点火スイッチはソリッドステート型のリレーを用い、タイマにより通電時間を制御した。図 2-7 に、予備実験として行った、燃料噴霧の着火率の放電時間による変化を示す。また点火の瞬間の燃料噴霧濃度と着火率の関係を図 2-8 に示す。燃料噴霧の試料にはメタノールを用い、液滴径 100 μm で時間平均濃度が 0.005 kg/m^3 の単分散噴霧を生成し着火率を測定した。着火率は放電時間の増加に伴いわずかつ増加したが、その変化は緩やかであった。また点火の瞬間の燃料噴霧濃度に対する着火率は、点火の瞬間の燃料噴霧濃度が等しい場合には放電時間の増加によりわずかに増加するが、点火の瞬間の燃料噴霧濃度の増加に対する着火率の増加の傾向は、放電時間が異なる場合においてもほぼ同様のものとなった。そこで本研究においては、点火エネルギーは、燃料噴霧の濃い条件においても放電時に火花を通過するすべての液滴を蒸発、発火するに十分な値となるよう、放電時間は 50ms、点火エネルギー 0.8J で一定とし点火試験を行った。

2.3 測定装置および測定方法

本研究では、以下に示す様な検定および測定を行った。

- 位相ドップラ式粒子測定装置 (PDPA) による燃料噴霧濃度測定の検定と校正
- PDPA を用いた燃料噴霧の時間平均的な噴霧特性の測定
- 瞬間撮影による点火の瞬間における燃料噴霧の濃度および空間的な分散状態の測定
- 吸引プローブを用いた噴霧混合気中の時間平均的な燃料蒸気濃度の測定
- 火炎の計測、目視による分類と着火判定

2.3.1 PDPA による燃料噴霧濃度測定の検定と校正

位相ドップラ法による噴霧測定装置は、その測定点を通過した噴霧粒子個々の粒径および粒子速度を求めることができ、さらに測定点の面積および測定時間を用いて測定点における燃料噴霧流速および濃度を求めることが可能である。しかし本装置は、その原理から、レーザの光強度およびその分布、光学系のセッティング、受光器の感度により測定領域の大きさが変化する。また測定された粒子径および粒子の通過位置により散乱光強度が変化し、粒子径が小さいほど受光器が感知できる測定領域が狭くなる。このような原因に基づく測定感度の変化は、測定対象である噴霧が一般には大きささまざまな大きさの液滴に構成されており、また各液滴の通過位置もさまざまであるという特性から、確率的考察を元に補正することが可能で、本装置もこの機能を備えている。ただしその補正精度はあまり高く無く、また本研究では粒度分布の狭い単分散噴霧を用いるため、燃料噴霧濃度の測定精度は本研究で求めるほどに達していない。そこで本研究においては PDPA による自動補正は用いず、粒径による測定感度の相対的な変化は PDPA の制御プログラムが持つ標準的な設定条件における標準的な相対感度表 (図 2-9) を用いて、また測定面積による測定感度は、あらかじめ図 2-10 に示す捕集器を用いて行った直接捕集による測定結果と比較することで、捕集率を求めそれぞれ補正した。また直接捕集の際に試料の気化が無視できない場合は、捕集率測定用の試料としてグリセリン水溶液を用い、不揮発成分であるグリセリンの捕集量より捕集率を得た。

直接捕集の際の試料の気化が無視できる場合、体積流束 $F_{l,collect}$ は以下の様に求めることができる。

$$F_{l,collect} = \frac{m_{l,collect}}{r_{l,collect}} \cdot \frac{1}{A_{collect}} \cdot \frac{1}{t_{collect}} \quad (5)$$

また PDPA により測定された体積流束は、以下の式より求めることができる。

$$F_{l,pdpa} = \frac{1}{A_{pdpa} t_{pdpa}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\rho d_i^3 e(d_i)}{6} \quad (6)$$

したがって捕集率は以下の式で表される．

$$h = \frac{F_{l,pdpa}}{F_{l,collect}} \quad (7)$$

また直接捕集の際の気化が無視できない場合は，捕集器に補集された噴霧中に含まれるグリセリン体積流束 $F_{glycerin,collect}$ は，実際に補集した噴霧の総質量 $m_{l,collect}$ とその密度 $r_{l,collect}$ ，捕集器の補集面積 $A_{collect}$ ，補集時間 $t_{collect}$ より，

$$F_{glycerin,collect} = \frac{m_{l,collect}}{r_{l,collect}} \cdot \frac{C_{collect}}{100} \cdot \frac{1}{A_{collect} t_{collect}} \quad (8)$$

となる．ただし，

$$C_{collect} = \frac{100(r_{l,collect} - r_{water})}{r_{glycerin} - r_{water}} \quad (9)$$

また試料の初期グリセリン体積濃度を C_0 ，初期粒径を d_0 とすると，捕集位置において PDPA で測定した粒径 d から，捕集位置における噴霧中のグリセリン濃度 C_{pdpa} は，

$$C_{pdpa} = \left(\frac{d_0}{d} \right)^3 \cdot C_0 \quad (10)$$

となる．したがって捕集位置において PDPA が示した体積流束を $F_{l,pdpa}$ とすると，測定点での噴霧中に含まれるのグリセリン体積流束 $F_{glycerin,pdpa}$ は次の式で求められる．

$$F_{glycerin,pdpa} = F_{l,pdpa} \cdot \frac{C_{pdpa}}{100} \quad (11)$$

ここで実際に補集した噴霧の濃度を基準として，粒子測定装置の補集率 [-] は，

$$h = \frac{F_{glycerin,pdpa}}{F_{glycerin,collect}} \quad (12)$$

として求められる．捕集器は内径 8mm の円筒状で，シリンジ先端は肉厚を薄くしてあり，液滴が先端部分に溜まることを防ぐと同時に，混合気の流れを乱すことなく液滴を補集できるようにしてある．

2.3.2 時間平均的な噴霧特性の測定

前述の捕集率を用いて PDPA の指示値を補正し時間平均な燃料噴霧濃度を求めた．PDPA は前方散乱 30 度方向に受光器を設置し，本研究で用いる燃料噴霧中に存在する最も大きい粒子の液滴径を考慮して測定レンジを 7.1-250 μ m とした．本研究における実験ではこれら

の使用条件を一定として噴霧粒子の測定を行った。

本実験では位相ドップラ粒子測定器を用いて得られたデータを利用して局所における液体燃料濃度を以下の計算式に基づき求めた。

$$W_l = \frac{1}{h} \cdot r_l \cdot W_{l,pdpa} \quad (13)$$

$$W_{l,pdpa} = \frac{1}{A_{pdpa} \cdot t_{pdpa}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{p d_i^3 e(d_i)}{6 v_i} \quad (14)$$

ここで $e(d_i)$ は位相ドップラ式粒子測定装置が原理的に持つ粒径に対する測定感度の相対補正值で、また h は前述の捕集率である。

2.3.3 瞬間撮影による点火の瞬間における燃料噴霧の濃度および空間的な分散状態の測定

本研究では、点火の瞬間における燃料噴霧粒子の空間的な分布と、燃料噴霧濃度の測定のため、PDPA による時間平均的な燃料噴霧濃度測定とは別に、パルスレーザを用いて瞬間噴霧画像を撮影し、その画像より瞬間の噴霧濃度を求めた。本研究では単分散燃料噴霧を用いたため、燃料噴霧中に存在する液滴の粒径は均一性が高い。このため、瞬間撮影より液滴の個数を算出し、液滴径は PDPA で測定した。この際、燃料噴霧液滴径が完全に均一であれば、平均粒径などの概念を用いる必要もなく、液滴径を求めることが可能であるが、実際には、一般の噴霧に比べ狭いとはいえ、単分散噴霧も粒度分布を持つ。そこで PDPA で測定した体積個数平均液滴径 d_{30} を代表粒子径として用いた。

図 2-11 に、本実験で用いた燃料噴霧の瞬間撮影をする撮影システムの概要を示す。本装置は、パルスレーザおよびレンズ系を用いた瞬間シート状光源と CCD カメラおよびフレームグラバを用いた散乱光画像撮影系、光源と撮影系および点火装置を連動させる遅延回路、および制御コンピュータからなる。またこの撮影システムは、もう一台の CCD カメラを取り付けることで、点火栓周囲の連続した画像を取得し、点火により発生した火炎の連続画像を得ることも可能である。

図 2-12 に瞬間撮影装置および点火栓の動作タイミングを示す。CCD の撮影タイミングの終了直前にパルスレーザが、また終了とほぼ同時に放電が発生するよう、ディレイタイマを適切に調整した。パルスレーザはシリンドリカルレンズとスリットにより厚さ約 3mm のシート光とした。このシート光は、あらかじめ設置されている点火電極が断面内中央に位置するよう、混合管側面の光学窓を通して横方向から照射した。粒子による散乱光を光路に直角方向に設置した CCD カメラで撮影した。CCD カメラは回転および上下、左右方向の微動が可能なステージに固定され、放電電極が撮影画像内の中央下部に位置し、レーザシートと焦点面が一致するよう微調整した。写真撮影を行う領域は、おおよそ電極直上の水平方向 77mm × 垂直方向 72mm に決定した。CCD カメラの焦点は、放電電極に合わせて固定し、絞りは一定とすることで撮影条件を同一にした。この様にして得られた画像を瞬間噴霧画像とよぶ。

瞬間噴霧画像は画像解析装置(Sharp Gpb-j)を搭載したコンピュータにより、512*480 ピクセルの 256 色グレースケール画像として取得した。取得された画像はハードディスクに保存されると共に二値化処理し、この二値化処理後の画像より孤立点を抽出することで液滴を検出した。各液滴について、その大きさと重心の X および Y 方向位置を求めた。ハードディスクに保存した画像を再処理することにより、異なったしきい値による二値化処理、液滴検出などを行うことが可能である。

以下に瞬間の燃料噴霧濃度の算出方法を述べる。

瞬間撮影画像内の解析領域の面積 $A_{analysis}$ 、瞬間撮影画像より検出された、解析範囲内に存在する粒子数 n および撮影画像に対し垂直方向の液滴取得範囲(解析領域厚さ) $l_{analysis}$ とすると、噴霧の数密度 N は次式で表される。

$$N = \frac{n}{A_{analysis} l_{analysis}} \quad (15)$$

さらに位相ドップラ式粒子測定装置による測定結果より求めた平均粒径 d_{30} 、噴霧した試料の密度 ρ とすると瞬間の噴霧濃度 W_l は

$$W_l = \frac{\rho r_l d_{30}^3 n}{6A_{analysis} l_{analysis}} \quad (16)$$

となる。ただし解析領域厚さは、レーザシート厚さや、レーザ光強度分布、焦点深度、撮影画像から液滴を検出する際に行う二値化処理のしきい値により影響を受ける。このため本研究では、解析領域厚さがレーザシート用光学系にあるスリットの幅に等しい 3mm とし、瞬間撮影により得られた瞬間の噴霧濃度の平均値が、次項において説明する PDPA による時間平均的な測定により得られた噴霧濃度と等しくなるよう、二値化処理のしきい値を調整した。

2.3.4 燃料噴霧中に存在する燃料蒸気の時間平均的な濃度の測定

燃料噴霧中に存在する燃料蒸気の濃度を測ることは非常に難しく、現時点においてもその測定法が研究の対象となる程であるが、本研究の第一の目的は燃料噴霧の粒径、濃度や、濃度の空間的な不均一性といった、噴霧特性が着火性へ与える影響の解明のため、燃料蒸気濃度の測定は時間平均的に比較的簡易な方法で行うこととした。

燃料噴霧中の燃料蒸気濃度を比較的簡易に測定する方法として、本研究では以下の様な複数の方法を適宜用いることとした。

- 吸引プローブ等により燃料蒸気だけを採取し、測定する直接吸引法
- 複数の吸引条件において、燃料噴霧および燃料蒸気を同時に吸引、完全に気化させた混合気中に含まれる燃料の量を測定し、その変化より燃料蒸気濃度を求める気液同時吸引法⁽⁵⁾

燃料蒸気濃度の測定には、濃度が既知のメタノール均一予混合気を用いて校正した FID 式ガスクロマトグラフィを用いた。具体的な測定方法は各章で異なるため、各章においてそれぞれ示す。

2.3.5 火炎の計測および分類と目視による着火判定

本研究では、点火により発生した火炎を目視により分類し、着火判定を行うと共に、必要に応じてマルチチャンネルイオンプローブや、輝炎の撮影を行った。図 2-13 に、本実験を行うにあたりあらかじめ行ったメタノール噴霧の点火、火炎の発生を経て着火にいたる過程の例を直接撮影およびシュリーレン撮影画像を示す。また同様に図 2-14 に試料を n デカンとした場合の直接撮影による画像を示す。これらの撮影は着火判定の参考とするため行ったものであり、撮影時の噴霧特性等は特に定めなかった。また直接撮影は特に火炎の撮影を目的としたためレーザシート等による噴霧粒子の可視化などは行わなかった。

燃料をメタノールとした場合、火炎の発光が弱く目視では判断可能であるが直接撮影による測定ではほとんど捕らえることができなかった。シュリーレン画像からは、火炎がある程度大きく成長すると流れの影響などを受け火炎の形状が多少変形するが、火炎が複数に分裂するなどの様子は見られなかった。このためメタノール噴霧火炎の状態は目視による分類と、イオンプローブによる測定を行うこととした。一方、試料を n デカンとした場合は小さく孤立しおそらく単一滴で燃えているであろう部分や、集合して輝炎を形成し強い発光を伴う領域などが複数存在し、集合して燃焼していることがわかる。またこのような燃焼状態が点火試験ごとに不確定に変化するため、空間分解能の測定を行う必要がある。このため n デカン噴霧火炎の測定は、目視による分類とともに、CCD カメラによる火炎発光の直接撮影を行うこととした。

2.3.5.1 マルチチャンネルイオンプローブによる火炎の伝ば状態の観察

目視による最終的な火炎直径の評価と共に、複数のイオンプローブを用いた火炎の伝ば速度を行うことで、火炎の伝ば状態を観察した。炭化水素系燃料を燃焼させた場合、化学イオン化反応により燃焼反応領域近傍にイオン濃度の非常に高い領域が形成される。このため、火炎中に電極を設置し電位差を与えると、燃焼反応領域付近に存在する正負イオンにより電極間に電流が流れる。イオンプローブはこの現象を利用したものである。電極間に流れる電流は、火炎の燃焼強度や移動速度のほか電極表面積や表面状態などに依存するため、本研究の様な液体噴霧が定常的にプローブに付着しその状態を管理することが難しい場においては、イオンプローブの指示値から火炎の有無以上の情報について解析を行うことは難しい。そこで本研究では、この様なイオンプローブを噴霧中に複数本設置し、各イオンプローブにおける火炎の検出タイミングの変化から火炎の伝ばの状態を測定した。図 2-15 は本研究で用いたマルチチャンネルイオンプローブの概要図である。マルチチャンネルイオンプローブは各プローブが等間隔に縦 4 列 × 横 4 列に並んでおり 図 2-16 に示す通り、

瞬間撮影を行う領域に、プローブの先端が瞬間撮影に影響を及ぼさないよう、プローブの先端を CCD の反対側に 10mm オフセットして設置した。各イオンプローブは 1 対の電極を持ち、電極間には 20V の電位差を与え、イオン電流を測定した。検出電流の絶対的な測定は行わないため、電極には加工性の良いステンレス線を用いた。素線の受感部以外は細い磁性管(3)で被覆し、防水性を高めるため、その外部をシリコンで被覆した。イオン電流は電流-電圧変換回路により電圧出力に変換した後、データロガー(Keyence NR-2000)を用いてコンピュータに記録した。放電装置への放電開始信号をイオンプローブの検出開始トリガとして用い、放電と同期して測定することが可能である。本測定では、測定結果は各チャンネルごとに 5ksps で 2 秒間記録した。

図 2-17 に、本実験において用いたイオンプローブによる火炎の測定波形の例を示す。プローブを燃焼反応領域が通過した場合にはイオンプローブからの出力値が高くなり、火炎の通過を検出することができる。測定開始から約 50ms の間に見られる高い周波数の波形は、放電によるノイズを拾ったものであり、火炎の観測とは異なるため、解析する段階において削除した。また電源性のノイズが測定結果に影響を与えるため、解析の段階において周波数フィルタをかけ取り除いた。火炎を検出すると、測定波形において出力値が高くなる。ここで、放電開始から、最初に火炎を検出するまでの時間を火炎検出時間と定義した。また、複数のピークを持つ波形が観測された場合は、各ピーク波形の観測開始までの時間を、それぞれのピークの検出タイミングと定義した。さらに、火炎の大きさを評価するため、測定期間中の各時刻において火炎を検出しているプローブの全プローブ本数(16本)に対する割合を火炎検出率と定義し、また測定時間中の各時刻までに火炎を検出したイオンプローブの全プローブに対する割合を累積火炎検出率と定義し、それぞれ測定した。

2.3.5.2 噴霧火炎の撮影

燃料噴霧の瞬間濃度と形成される火炎の関係について調べた。噴霧火炎においては、燃料噴霧中に存在する何らかの原因となり空間的に燃焼性が異なる。その結果、噴霧火炎は選択的に伝ぱし、噴霧中にクラスタが階層的に形成され、階層的な群燃焼現象が現れるといった特徴をもつ。また火炎中には輝炎および青炎の部分が存在する。本研究では、燃料噴霧の不均一性により、形成される火炎も不均一に燃焼する点に着目し、不均一性と形成される火炎形状の関係を明らかにすることを目的としている。燃料噴霧の濃度は空間的に連続に変化するため、輝炎の周囲に青炎が形成されるため、輝炎のみを観察することで、燃焼状態を評価できると考え、輝炎のみを観測した。噴霧中に形成された火炎中の輝炎片の数、最大輝炎片の面積、および輝炎の総面積を測定の対象とした。

図 2-18(a)は本実験において撮影された画像である。この画像全体に存在するノイズを画像処理によって取り除き火炎図 2-18(b)に示す様な解析画像を得、これより各輝炎片の面積を計測した。画像の処理はつぎの手順で行った。

- (1) 画像全体をはっきりとさせるために、CCDカメラによって撮影された画像をグレースケールに変換し、輝度を二乗した。
- (2) ノイズを除去するためにメディアンフィルタを画像全体にかけた。
- (3) 輝炎片と背景の境界を強調するために、画像を先鋭化した。
- (4) 先鋭化した画像において、輝炎のみを取り出すようにしきい値を設定し画像を二値化した。図 2-19 に図 2-18(b)の線上の輝度値の分布を示す。着火試験全体を通して、輝度値 254 をしきい値とし、この値を越える領域を輝炎として観測した。

上の基準にしたがって得た輝炎の画像を図 2-20 に示す。中央にある最も大きな輝炎片 1 がこの画像における最大の輝炎片である。個々の輝炎片の数を数えたものを輝炎の数とする。図 2-20 の場合は 5 個の輝炎片が存在していることになる。またそれらの面積を足し合わせたものを輝炎片の総面積とした。ただし、 1mm^2 以下の輝炎片はノイズとして除去した。

2.3.5.3 着火判定

本研究では、概念的には一様な燃料噴霧混合気中において、火炎が発生し、周囲へ伝ばしつづける条件を着火と考えるが、しかし燃料噴霧の空間的な分散は有限であるため、この定義を実際に適用することは難しい。そこで発生した火炎を大きさにより以下の 4 形態と火炎が発生しなかった場合の 5 形態に分類し、目視観察によってそれぞれの発生する確率を求めた。図 2-21 にその模式図を示す。

- (1) 火炎が発生、伝ばし、火炎直径が 50mm を超えた場合。
- (2) 火炎が発生、伝ばし、火炎直径が 30mm を超えた場合
- (3) 火炎が発生、伝ばし、火炎直径が 30mm 程度に達した場合
- (4) 初期火炎は観察されるが、放電終了とともに消滅する火炎
- (5) 火炎の発生が認められない場合

後に述べるが、本研究では直径 30mm の範囲における燃料噴霧の時間平均的な濃度の一様性を保証しているため、蒸気の基準のうち火炎形態(1)-(3)を着火と判定し、着火率を求めた。また火炎形態(4)は放電火花に反応して火炎を生じたにもかかわらず、その火炎自身のもつ発生熱エネルギーの不足、また周囲の混合気の状態により、その後の伝ばには至らなかったものと考えられる。そこでこの火炎形態(4)で見られるような火炎を初期火炎とよび、初期火炎の発生率((1)-(4)の発生率)を初期火炎発生率として着火率とともに求めた。

図 2-22 および図 2-23 に、本研究で行った着火判定とイオンプローブの火炎検出の比較の典型例を示す。これらは第 6 章において行ったメタノール噴霧 (Condition 1) の点火試験の結果である。横軸は目視により分類した火炎形態で、縦軸はそれぞれイオンプローブ

の火炎検出率と累積火炎検出率である。また中抜きのプロットはその大きさが各プロットに含まれる点火試験の回数を示し、中実のプロットは各火炎形態における火炎検出率および累積火炎検出率の平均値を示す。目視による分類では、判定者の主観や基準の揺らぎにより、またイオンプローブは火炎の形状が不定なことから火炎を検出できない場合の存在により、測定精度が低下するが、両測定結果は非常に高い相関性を持ち、本実験においてはこれらの測定誤差の要因の影響が低く、これらの測定方法が十分に機能している。

2.4 実験方法の概要

本研究では、比較的粒度分布の整った単分散噴霧を用いて、燃料噴霧の不均一性を含むさまざまな噴霧特性により燃料噴霧の着火性がどの様に変化するかを多数回の着火試験を行うことで求めた。本研究では確率的には時間的・空間的に一様な燃料噴霧場を用い着火試験を行うべきであるが、しかし燃料噴霧は必ず中心から周囲へと拡散していくため、空間的な濃度分布を完全に排除することは難しい。そこで本研究では、空間的には時間平均燃料噴霧濃度が直径30mm以上にわたりその最大値の80%以上である場合を一様な噴霧場と定義し、燃料噴霧の噴射条件(噴射方向、拡散空気量)や、混合管への混合気供給量を調整することで、この条件を満たす噴霧場を調整した。

燃料噴霧を噴射し、自由落下させているため液滴と気流は速度差を生じるが、速度差による着火性の変化を最小限にするために、点火位置での液滴速度を抑え、各条件で揃うよう、周囲空気の供給系統の流量比を調節した。また点火条件はすべて一定とし、点火間隔は着火した場合と不着火の場合で多少異なるが、混合室内の燃焼ガスを一掃するに十分で、かつ点火電極が液体燃料で湿らない範囲で着火試験を繰り返した。

2.4.1 点火位置の決定

燃料噴霧の濃度分布を前述の基準を満たすよう調整した上で、その中心において着火を行った。一様性の確認および測定には位相ドップラ式粒子測定装置を用いた(図2-24参照)。電極に付着した液体燃料が測定に影響を与えないように、放電電極の3mm上の水平断面上の、直交する2軸上に沿って5mm間隔で粒子速度、液体燃料濃度、粒子径、粒度分布を測定し、燃料噴霧場の中心に点火電極を設置した。

第2章参考文献

- (1) Rayleigh,L., Proc.Lond. Math.Soc., 10 (1878), p.4-13
- (2) Schneider,J.M. and Hendricks,C.D., Rev.Sci. Instrum.,35(10), 1964, p.1349-50
- (3) Berglund,R. and Liu,B., Environmental Science & Technology, Vol.7, No.2, 1973, p.147-153
- (4) 内燃機関ハンドブック, 朝倉書店(1960), p.42-44,
- (5) Hiromitsu,N., Evaporation of spray, The First Symposium on Atomization(in JAPANESE), 1992, p.213-216

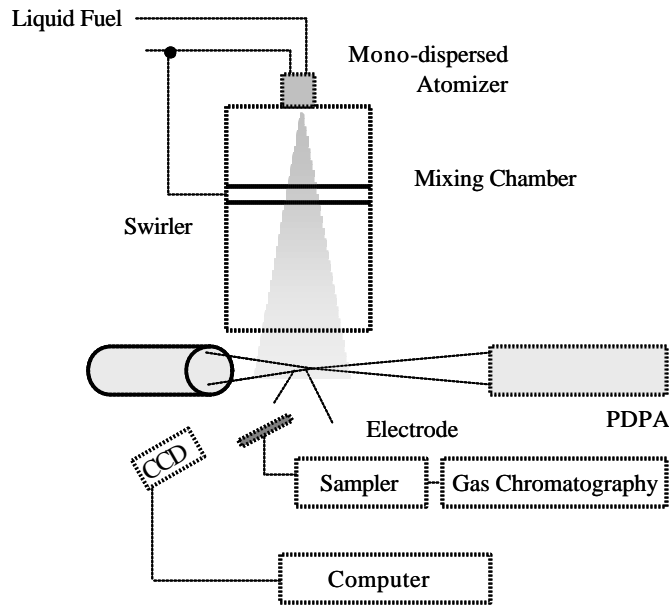


图 2-1 实验装置概要图

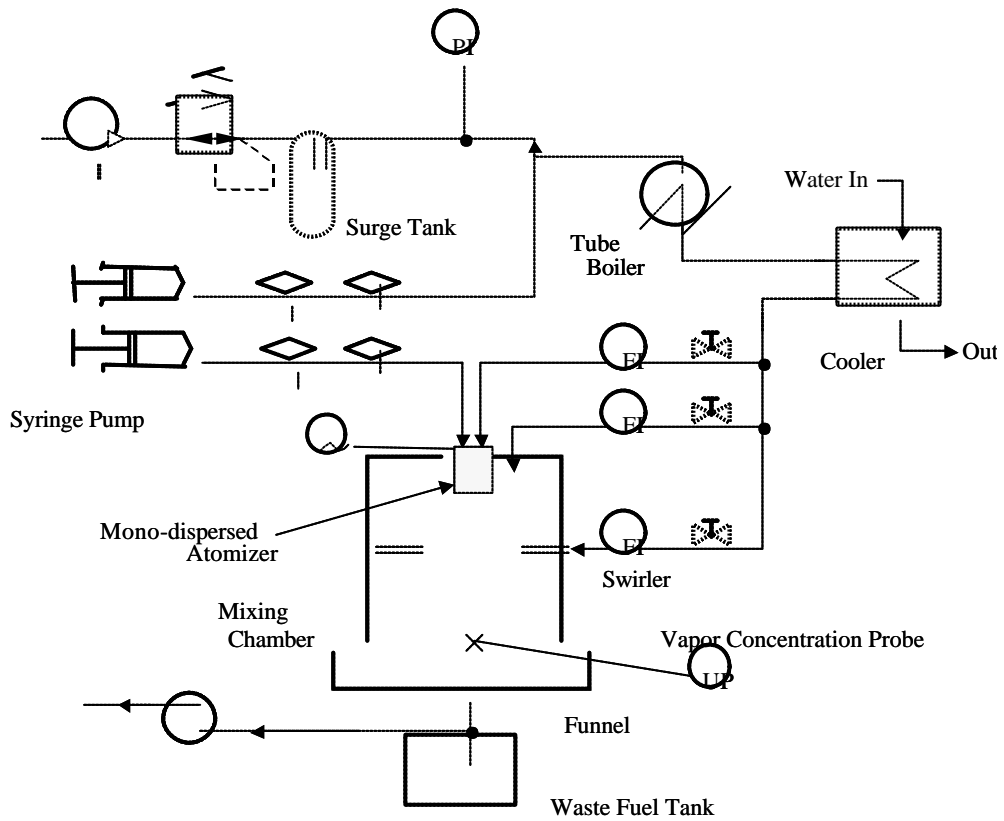


图 2-2 实验装置流路系统图

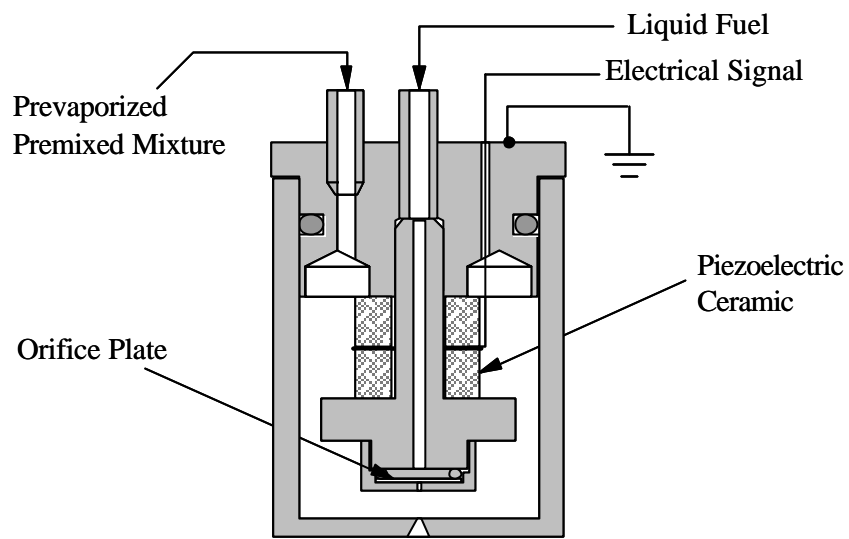


图 2-3 单分散喷雾生成用振动オリフィス式喷射弁

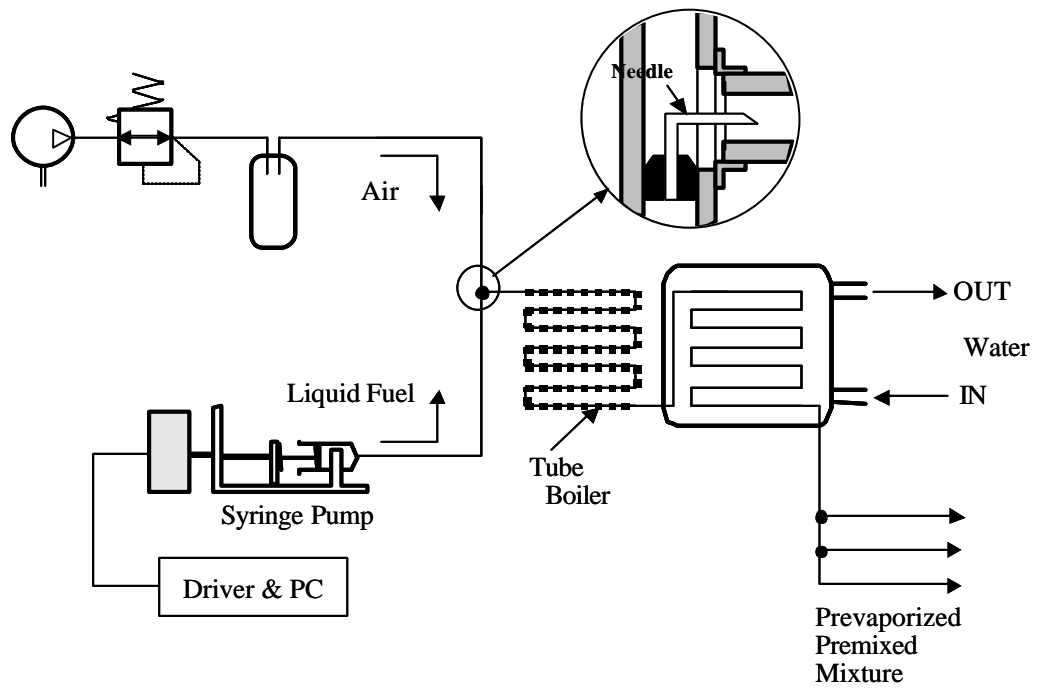


图 2-4 燃料蒸气生成装置

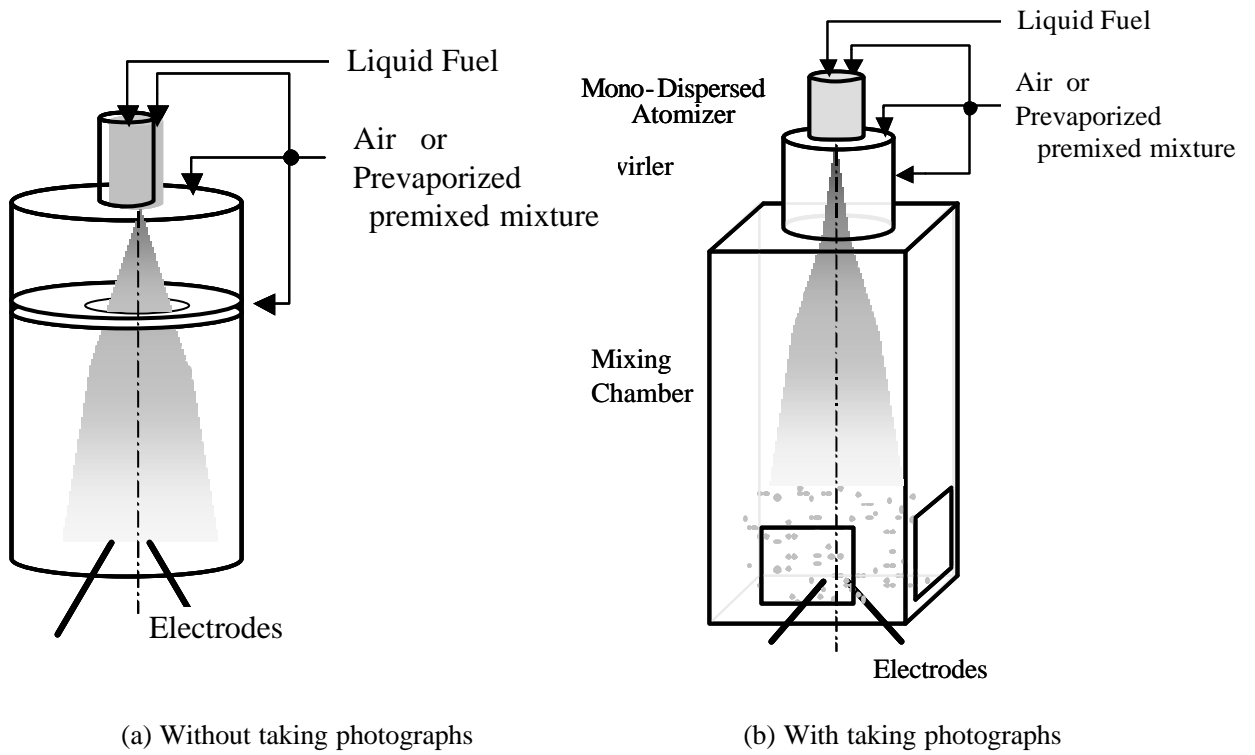


图 2-5 混合室

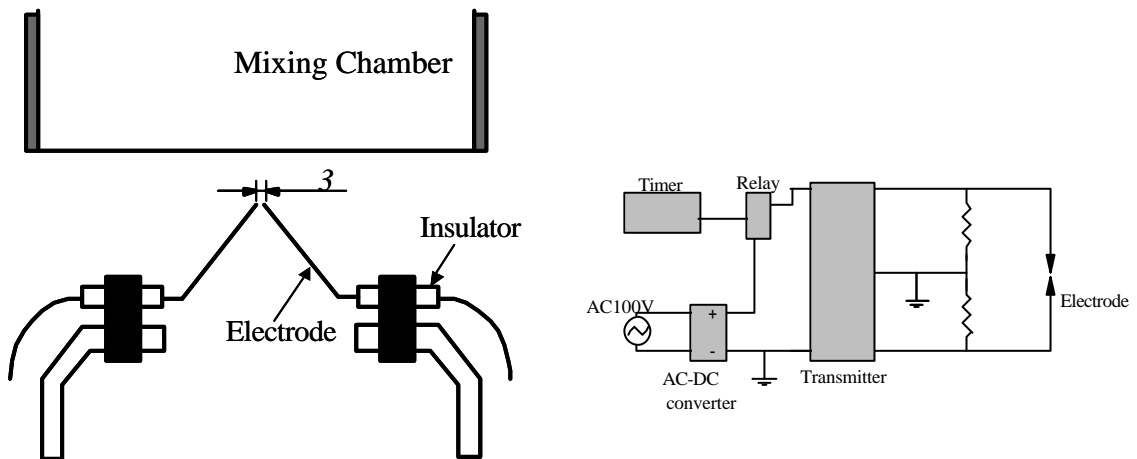


图 2-6 点火装置

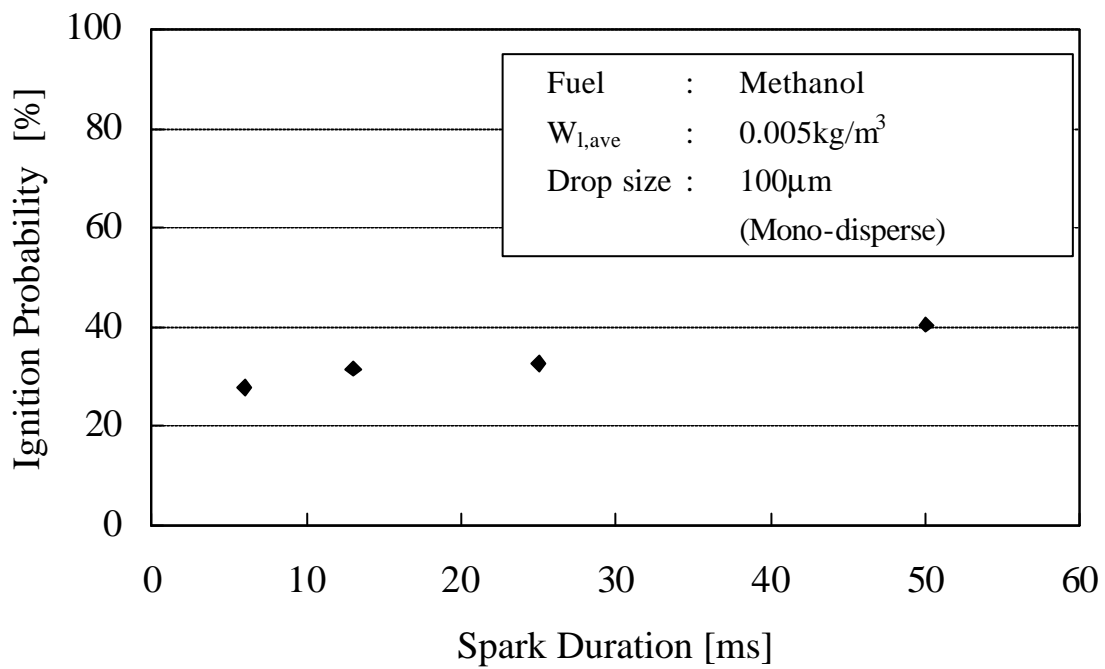


図 2-7 放電時間による時間平均的な着火率の変化

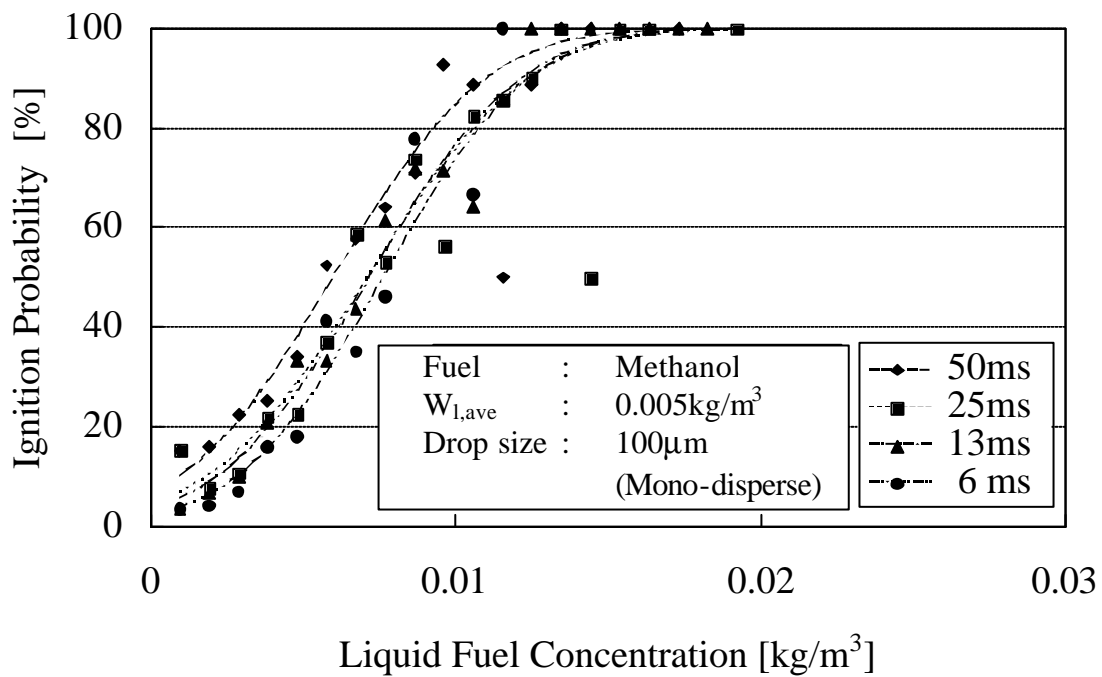


図 2-8 放電時間が異なる場合の点火の瞬間の燃料噴霧濃度と着火率の関係の変化

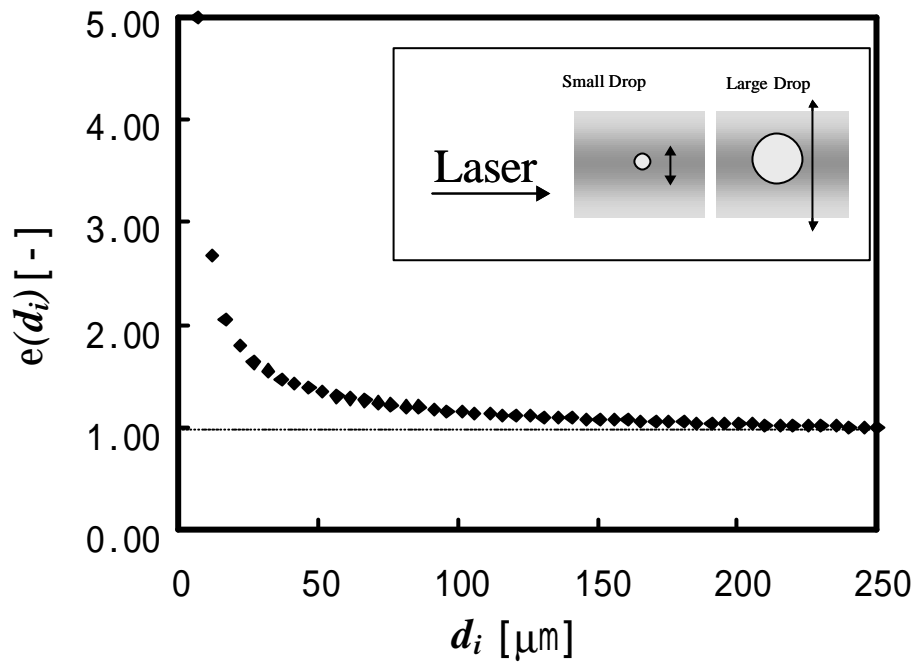


図 2-9 位相ドップラ式粒子測定装置の標準的な PVC 補正曲線

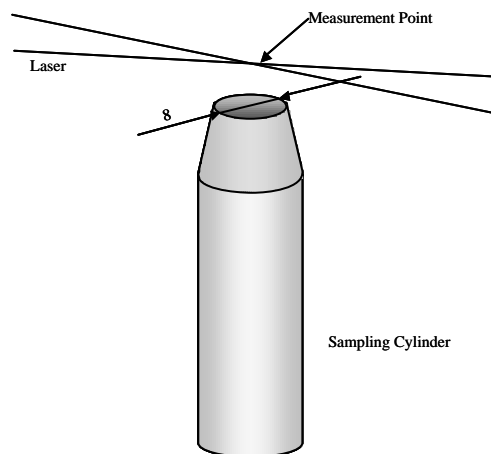


図 2-10 捕集率検定用サンプリングプローブ

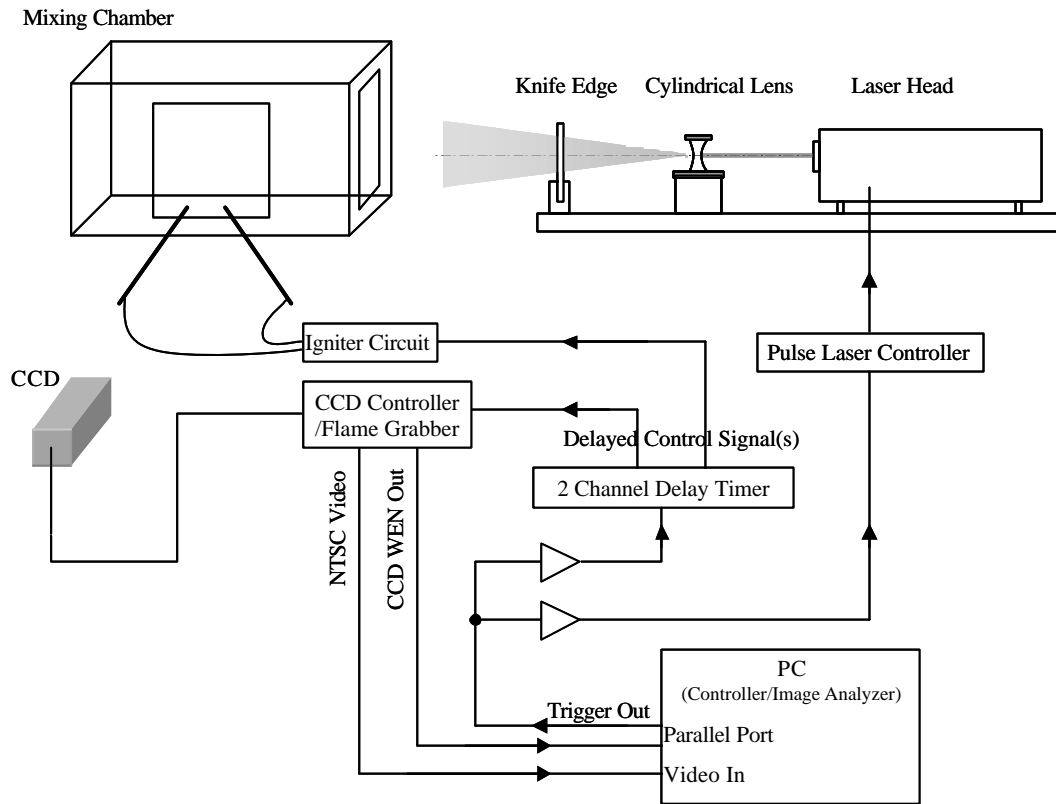


図 2-11 瞬間画像撮影装置

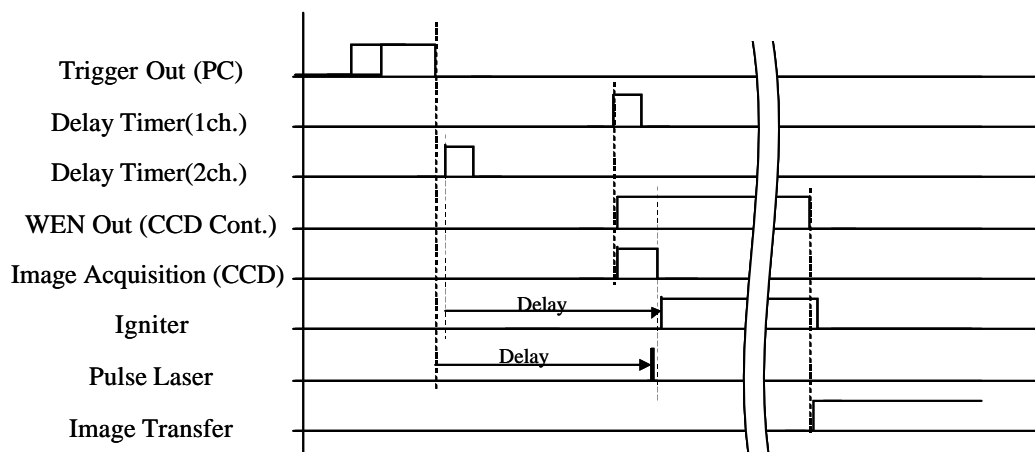


図 2-12 点火試験撮影装置の動作タイミング

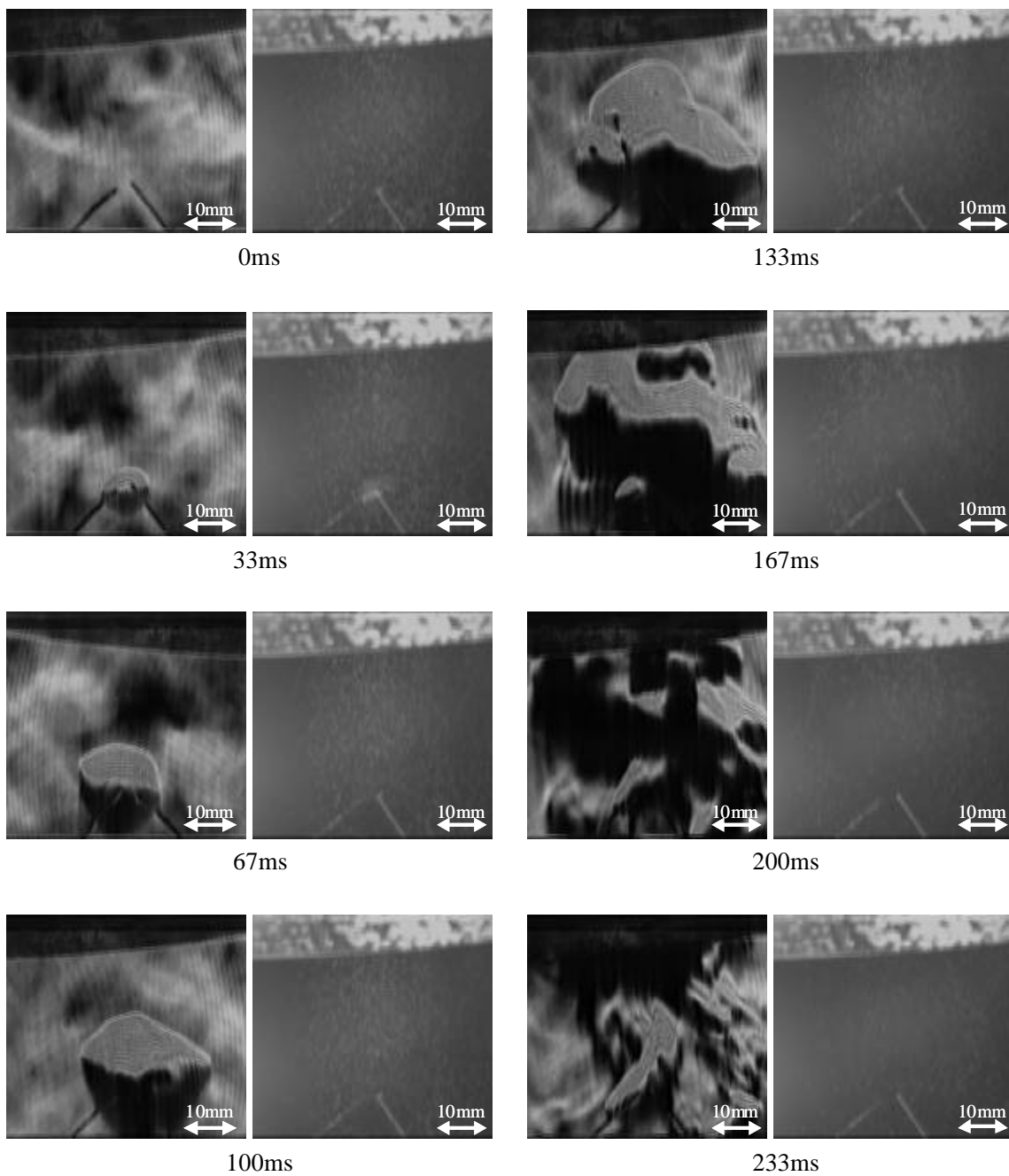


図 2-13 メタノール噴霧中における火炎の発生と伝ば
(左:シュリーレン画像 右:直接撮影画像)

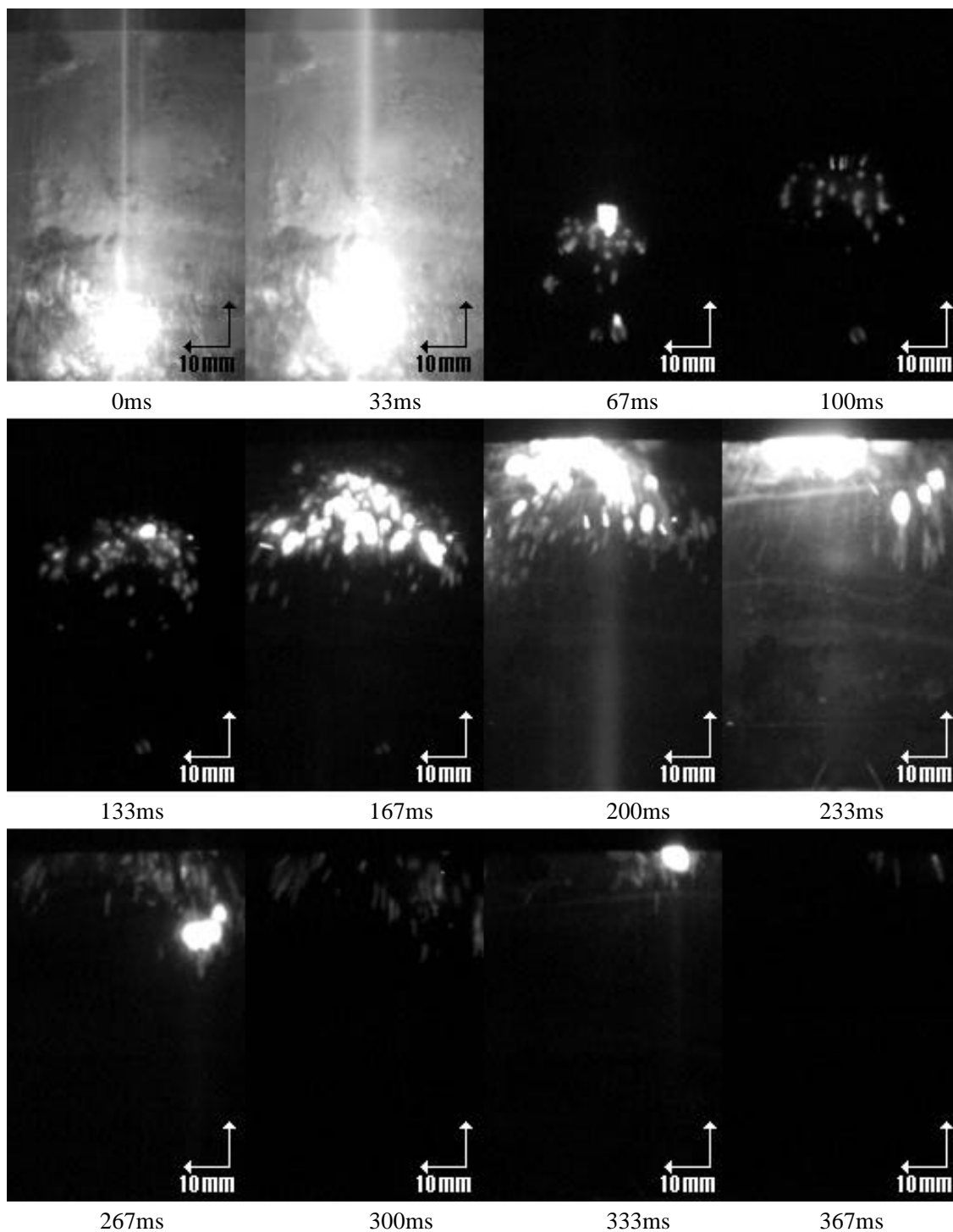


図 2-14 n デカン噴霧中における火炎の発生と伝ば

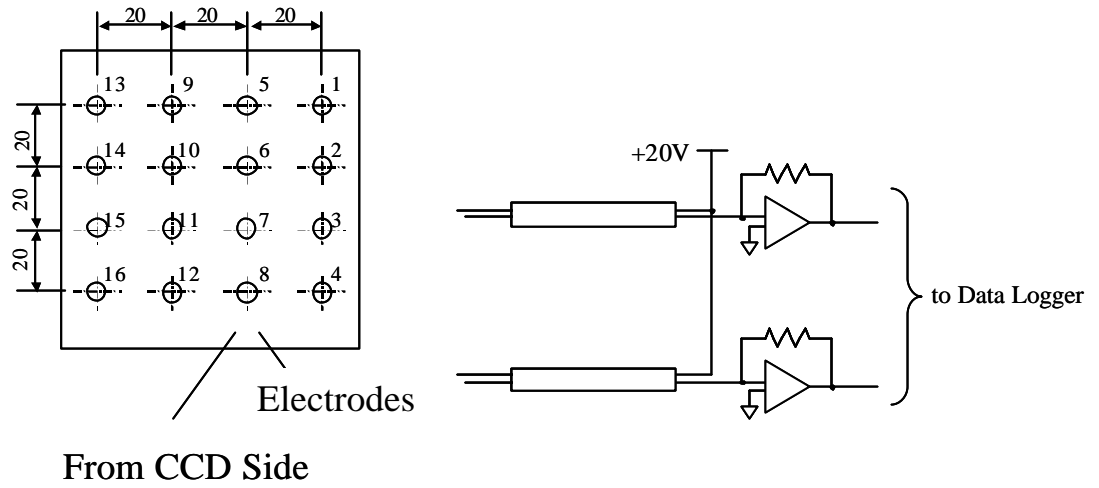


図 2-15 マルチチャンネルイオンプローブ

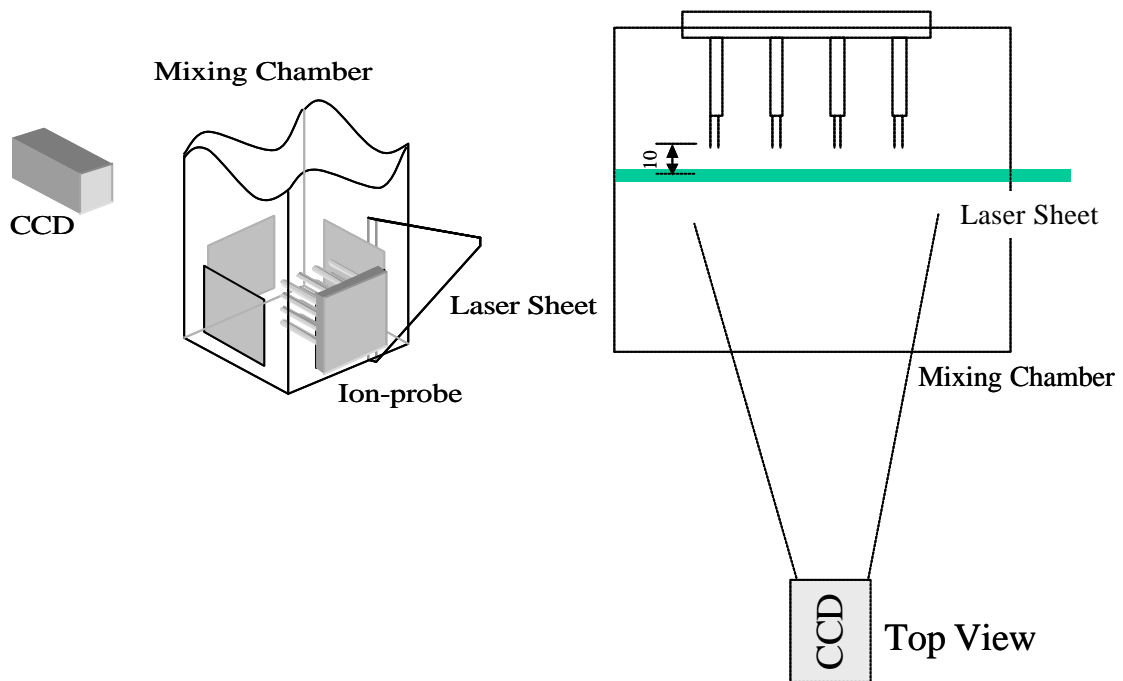
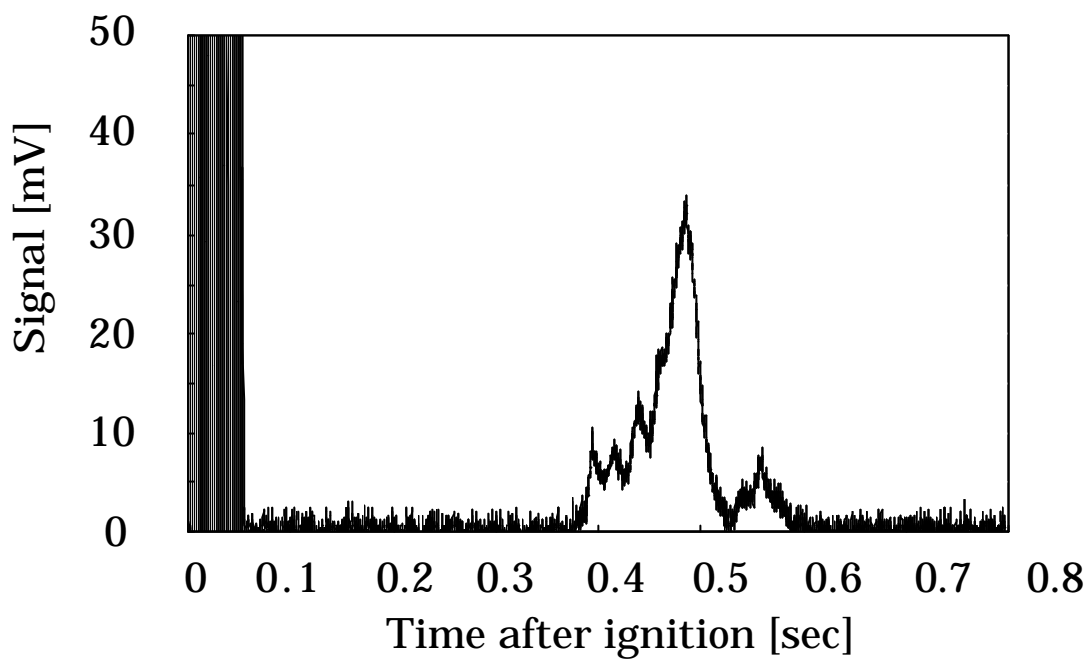
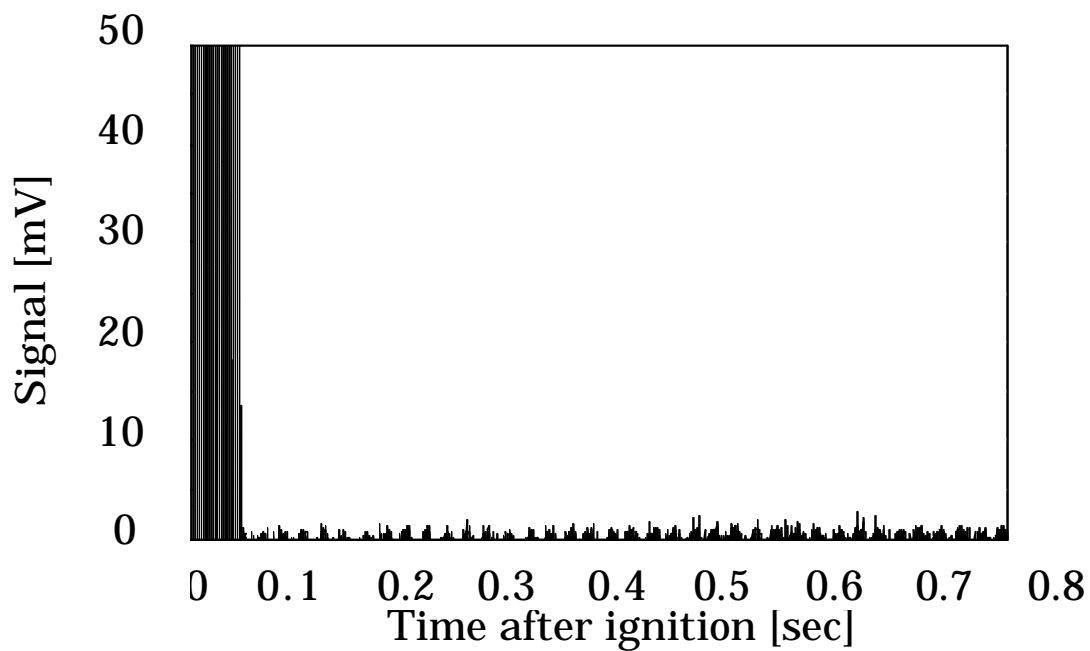


図 2-16 マルチチャンネルイオンプローブの設置概要図

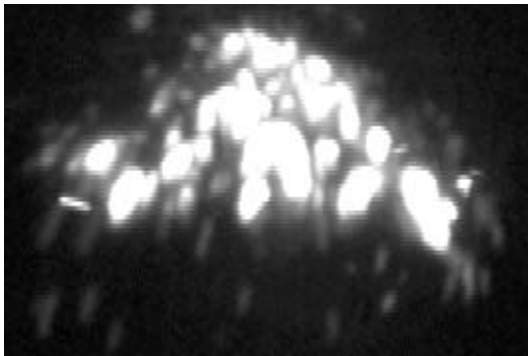


(a) 火炎を検出した場合

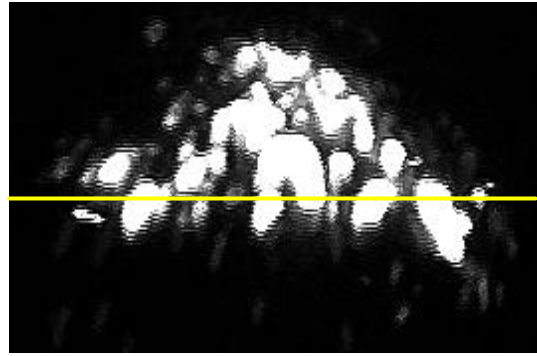


(b) 火炎を検出しなかった場合

図 2-17 イオンプローブによる火炎の観察例



(a) 撮影画像



(b) 解析画像

図 2-18 火炎の撮影

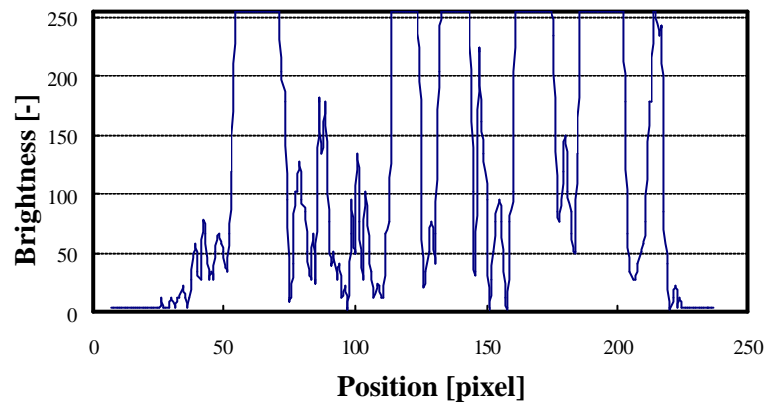


図 2-19 解析画像の輝度分布



図 2-20 解析画像の処理

Successful Ignition Cases

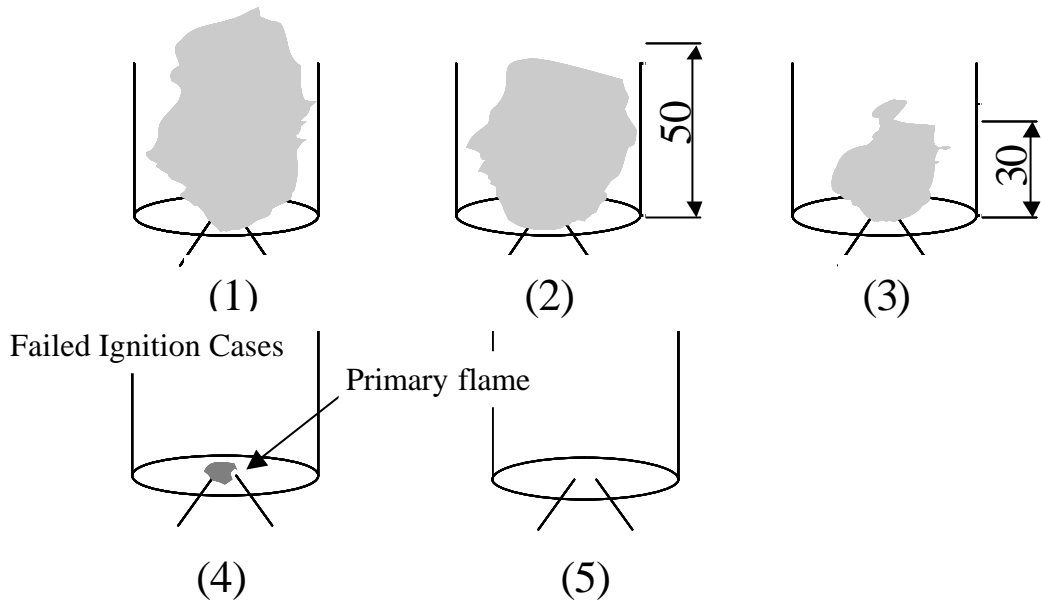


図 2-21 着火判定基準

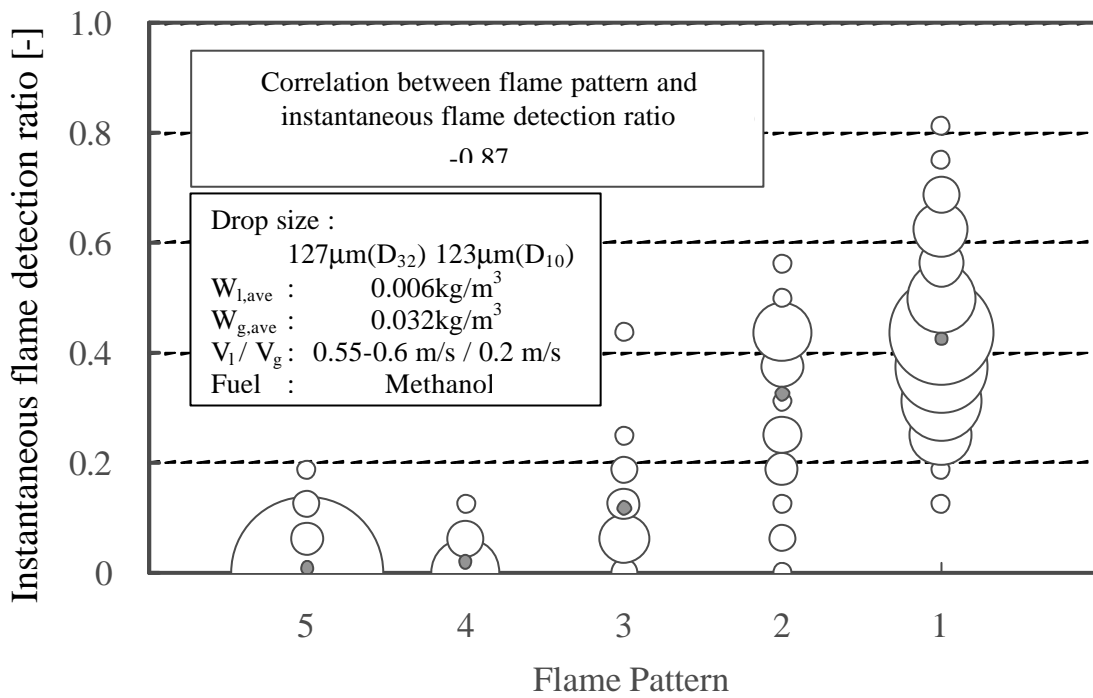


図 2-22 イオンプローブの火炎検出率と目視による火炎の分類の比較

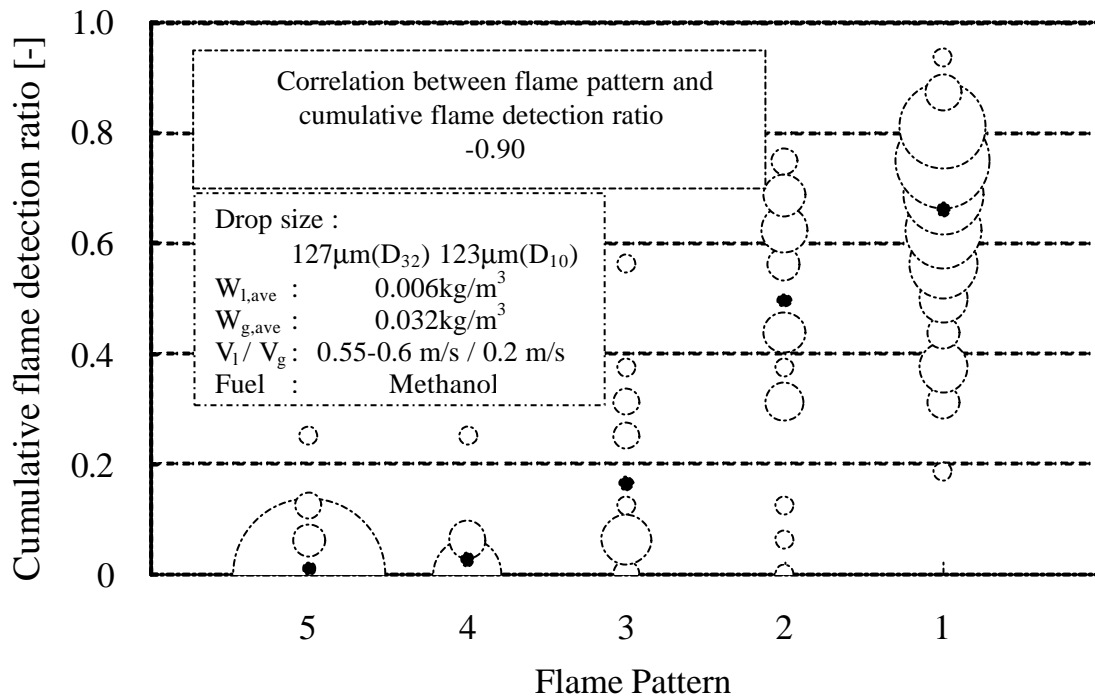


図 2-23 イオンプローブの累積火炎検出率と目視による火炎の分類の比較

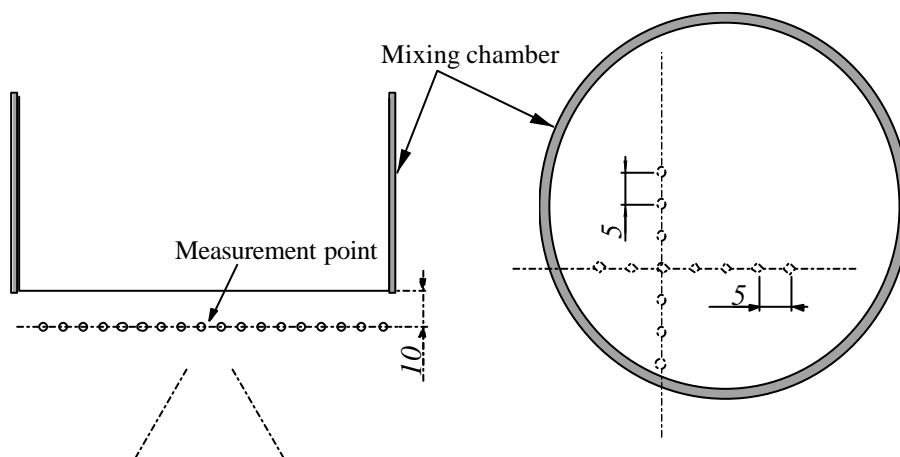


図 2-24 点火位置の決定

第 3 章 燃料噴霧の時間平均的な特性と着火性の関係	38
3.1 はじめに.....	38
3.2 実験装置および実験方法.....	38
3.2.1 実験方法概要	38
3.2.2 時間平均的な燃料蒸気濃度の測定法	38
3.3 結果および考察.....	39
3.3.1 総燃料濃度による着火性の变化	39
3.3.2 燃料噴霧混合気に燃料蒸気を添加した場合の着火性の变化	39
3.3.3 燃料噴霧濃度による着火性の变化.....	40
3.3.4 燃料噴霧および燃料蒸気の着火性への影響.....	40
3.3.5 時間的濃度分布に起因する燃料噴霧の確率的な着火モデル	41
3.4 本章のまとめ.....	43
第 3 章参考文献.....	45

第 3 章 燃料噴霧の時間平均的な特性と着火性の関係

3.1 はじめに

燃料噴霧の希薄着火限界や最小点火エネルギーなど，時間平均的な特性は，燃料噴霧の着火性を明らかにする目的で測定される事が多く，それぞれに指標としての重要な意味を持つ．しかし燃料噴霧の着火現象において，着火および不着火が確率的に起こるといった特性がどのような噴霧特性に支配されているかについて，これらの指標からは何らかの解答を得ることはできない．燃料噴霧の確率的な着火現象を解明するためには，確率的な現象であるという視点に立った指標が必要である．そこで本研究では，第 1 章に示したとおり，噴霧着火現象において確率的特性が特に明確に現れる様な，総燃料濃度が予混合気の希薄着火限界濃度を下回る燃料噴霧の着火現象を実験対象とし，火花放電による強制点火実験を行った．本章では，まず多くの研究と同様に，液滴径，燃料噴霧濃度および燃料蒸気濃度といった時間平均的な噴霧混合気の実験による着火率の変化を求めた．このようにして得た燃料噴霧濃度に対する着火率の変化を燃料噴霧の時間的な不均一性の結果であるとして確率論的考察に基づいて累積二項分布により近似することで，燃料噴霧の着火性に強く影響する領域（基準体積）および燃料噴霧の希薄着火限界（基準濃度）を求めた．燃料噴霧の時間平均的な特性による基準体積および基準濃度の変化より燃料噴霧の着火現象を考察した．

3.2 実験装置および実験方法

3.2.1 実験方法概要

表 3-1 に本実験における実験条件を示す．本実験では，メタノールを試料とした単分散噴霧を用い，その時間平均的な燃料噴霧濃度の分布を第 2 章に示したとおりに調整した後，多数回の点火試験を行った．本実験においては瞬間撮影を行わないため，円筒形の混合室を用いた．燃料噴霧より自然蒸発によって発生する燃料蒸気が燃料噴霧の着火性に影響を及ぼすため，燃料蒸気濃度による着火性の変化も合わせて測定した．

図 3-1 に，本実験において用いた平均粒径が 120，145 および 175 μm の単分散噴霧の粒度分布を示す．各粒度分布において，最頻粒径の約 1.3 倍の位置に液滴の合体によると思われる第 2 ピークが存在するが，いずれも第 1 章において定義した通り，最頻粒径の $\pm 10\%$ 以内に噴霧全体積の 80% 以上が含まれている．

3.2.2 時間平均的な燃料蒸気濃度の測定法

点火位置における燃料蒸気濃度は図 3-2 に示した燃料蒸気濃度測定装置を用いて行った．噴霧中に挿入するプローブは付着した液滴によるサンプル混合気の冷却効果，付着液滴から生ずる蒸発蒸気の吸引を最小限とするために二重管構造としてある．これらの影響を最小限とするプローブ入口での内管と外管の吸引流速を求める検定を行った．検定は実験で

使用するもっとも濃い燃料濃度に相当する噴霧を実際に生成した中にプローブを挿入し、負圧ポンプを用いて内管および外管からの吸引流速を独立して変化させ、測定されるクロマトエリア値を計測した。結果を図 3-3、図 3-4 に示す。本測定法の誤差要因として燃料噴霧のプローブ先端への付着および燃料噴霧の吸入が考えられる。これらの場合、指示値は高くなる。したがって指示値が最小となる吸引条件が、プローブに付着する液滴および液滴の直接吸引などの影響を最小限するものとしてできる。本実験においては、それぞれ外管を 0.88m/s、内管を 0.73m/s とした。

3.3 結果および考察

3.3.1 総燃料濃度による着火性の変化

点火位置における時間平均的な燃料濃度による着火率および初期火炎発生率の変化を均一予混合気の着火率の測定結果とともに図 3-5 に示す。実験では燃料噴霧のみを空気と混合し、燃料蒸気は添加しなかったが、燃料蒸気は噴霧からも自然蒸発により発生するため、燃料噴霧濃度と自然蒸発により液滴から生じた燃料蒸気濃度を合計した総燃料濃度を用いて燃料濃度を表した。均一予混合気は、濃度むらの原因である噴霧粒子を含まないため均一な混合気である。このため着火率の変化が急激で、着火率が 0%と 100%になる燃料蒸気濃度の差がほとんど無い。一方、燃料噴霧の着火現象では、均一予混合気に比べ総燃料濃度がかなり下回った場合においても着火に至る場合があり、また着火に至らずとも、放電により初期火炎が発生する可能性も存在する。総燃料濃度に対する着火率および初期火炎発生率の変化は緩やかな勾配をもつ曲線となる。この点は、燃料噴霧の着火性が、燃料蒸気濃度が均一な予混合気の着火性と大きく異なる点である。

液体噴霧による希薄着火限界の拡大および着火率変化については、過去の研究報告⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾と同様に、着火率は同一総燃料濃度を比較すると液滴径の小さい燃料噴霧の方が高くなる結果が得られた。また本実験の範囲では、総燃料濃度に対して、着火率は徐々にその勾配を増すのに対し、初期火炎発生率は比較的低い総燃料濃度で急激に増加した後、徐々に勾配が小さくなる変化となった。この点に関しては、初期火炎が比較的総燃料濃度が低くても形成されるのに対し、初期火炎が伝ばし、着火に至るためには高い総燃料濃度が必要であるためと考えられる。しかし図中の各条件において総燃料濃度に占める燃料蒸気濃度の割合が異なるため、これらに関する詳細な考察は後の項に譲る。

3.3.2 燃料噴霧混合気に燃料蒸気を添加した場合の着火性の変化

燃料噴霧濃度を一定に保ちつつ、完全に均一な予混合気を混合気中に添加した場合の着火率の変化を図 3-6 に示す。着火率は燃料蒸気濃度の増加と共にその増加率を増し、またこの傾向は液体燃料濃度が低いほど強い。燃料噴霧濃度が低い場合は、噴霧数密度も低いいため、高い場合に比べ液滴からの自然蒸発によって形成される燃料蒸気濃度の高い領域が狭く、比較的均一な燃料蒸気層が形成される。よって燃料蒸気濃度が低い範囲では燃料蒸

気濃度が増加しても火炎が発生，伝ぱしにくく，着火率の増加も小さい．一方，燃料蒸気濃度が高い範囲では火炎の発生，伝ぱが急激に改善され，着火率の増加が大きいものと考えられる．

3.3.3 燃料噴霧濃度による着火性の変化

燃料噴霧濃度による着火性の変化を厳密に評価するために，均一予混合気を添加することにより燃料蒸気濃度を一定に保った状態で，燃料噴霧濃度のみを変化させた場合の着火率の変化を求めた．図 3-7 および図 3-8 にその結果を示す．図 3-7 は燃料噴霧の液滴径を変化させた場合で，図 3-8 は液滴径が $145\mu\text{m}$ の場合の火炎形態の出現頻度を示す．(a)(b) はどちらも燃料蒸気予混合気の希薄着火限界以下であるが，(a) は燃料蒸気濃度が比較的低い (0.028kg/m^3 $f_g=0.15$) 場合で，(b) は比較的高い (0.056kg/m^3 $f_g=0.3$) 場合である．燃料蒸気濃度が一定なため，総燃料濃度の変化は燃料噴霧濃度の変化に等価である．液滴径によって着火性が異なり，総燃料濃度が等しい場合では液滴径が小さいほど着火率は高く，また燃料噴霧濃度に対する着火率の変化は大きくなる．これは，液滴径が小さいほど，火花放電や，発生した火炎からの熱による液滴の蒸発が速やかに行われることで着火性の促進効果が高いためである．また燃料蒸気濃度が高い場合は，着火率が増加し始める総燃料濃度は高くなり，総燃料濃度に対する着火率の変化は大きくなる．すなわち，燃料蒸気濃度が高い場合は，燃料噴霧濃度が低いため着火率は低くなり，着火率が増加し始める総燃料濃度は高くなる．しかし，燃料蒸気濃度が高いため，液滴周囲に形成される可燃な蒸気層が拡大し，少量の燃料噴霧の添加により着火率が急激に増加すると考えられる．また火炎形態の出現頻度変化をみると，燃料濃度の増加とともに，はじめに初期火炎発生率が増加し，その後徐々に着火率が増加する．初期火炎のみが発生する場合は，それ自身のもつ熱エネルギーの不足や周囲の混合気の状態によりその後の伝ぱに至らなかったものと考えられる．さらに燃料噴霧濃度を増加することにより，初期火炎発生率が増加するとともに，火炎の伝ぱ性が向上して結果的に着火率も増加する．

3.3.4 燃料噴霧および燃料蒸気の着火性への影響

図 3-6(a)-(c) の着火率変化を示した曲線をもとに，着火率が 25% , 50% , 75% および 99% の等着火率曲線を求めた．図 3-9(a)-(c) にその結果を示す．図中の縦軸，横軸はそれぞれ燃料噴霧濃度，燃料蒸気濃度で，破線が等着火率曲線であり，各数値は着火率を示す．各プロットは実験結果を外挿および内挿して求めたが，外挿によるプロットはその信頼性が低いため，括弧をつけて示した．図中右側の灰色の領域は，総燃料濃度が燃料蒸気予混合気の希薄着火限界(着火率 50% の濃度)を越える領域で，またその境界線は均一予混合気の希薄着火限界と総燃料濃度が等しい等総燃料濃度線である．均一予混合気は，着火率が 0% および 100% となる条件が希薄着火限界のごく近傍に存在することから，図中破線で示した右下がりの傾向にある等着火率曲線は，予混合気の希薄着火限界付近でその傾向を強め

ると考えられる．またこのため，ある着火率を達成するために最も多くの燃料を必要とする最悪条件が存在することがわかる．等着火率曲線の傾きが急に大きくなる様な，燃料蒸気濃度が予混合気の希薄着火限界にごく近い場合は，等着火曲線の傾きが等総燃料濃度線より急なため，燃料噴霧濃度よりも燃料蒸気濃度の変化により着火率は大きく変化する．これは燃料蒸気濃度が高いことにより，着火性が予混合気のそれに近いためで，ごく少量の燃料蒸気の添加によって混合気中の多くの部分に可燃な混合気層が急激に形成され，その様な領域を火炎が伝ばすると考えられる．一方，本研究の範囲では，この様な燃料蒸気濃度が高い領域を除けば，等着火率曲線の傾きが緩やかなことから，燃料蒸気濃度よりも燃料噴霧濃度の変化により着火率が大きく変化する事がわかる．これは燃料蒸気濃度が低く蒸気の添加では可燃な混合気層の形成が促進されにくいためである．この場合，火炎は近傍の粒子を蒸発させ，可燃な蒸気層を形成しながら伝ばすると考えられる．ただし120 μ m(図 3-9(a))において，さらに燃料蒸気濃度が低い条件となった場合，各等着火率曲線はその傾きが急になる傾向があるようである．これは，吉田ら⁽²⁾⁻⁽⁴⁾がプロパン 灯油混合気において得た燃焼速度を最大にする混合比と同様に最適な着火性を有する混合割合が存在していることを示唆していると思われるが，本研究においてはその値を得るには至らなかった．

また燃料蒸気濃度が高い範囲では総燃料濃度が燃料蒸気予混合気の希薄着火限界以上(図中の灰色の領域)でも，着火率が100%とならない条件が存在する．これは時間平均的な総燃料濃度が希薄着火限界を超えていても，瞬間的には着火に至らない様な希薄な条件が存在するためである．

3.3.5 時間的濃度分布に起因する燃料噴霧の確率的な着火モデル

燃料噴霧の着火現象は，時間平均的に同一の条件においても着火および不着火が不規則に発生する確率的な現象である．また着火率は燃料噴霧濃度や燃料蒸気濃度の増加とともに緩やかに上昇する．これは燃料噴霧に不規則に変化する要因が存在するためで，この要因として燃料噴霧の時間的な不均一性(むら)があげられる．図 3-5 から図 3-9 で見られる着火率および初期火炎発生率の変化は，燃料噴霧粒子の蒸発，燃焼といった要因で定まる決定論的な特性と，確率的に形成される噴霧群の不均一性による不確定性に依存した特性の両者により定められていると考えることができる．そこで確率論的な考察の元，着火率の変化を累積二項分布曲線により近似し，そのパラメータを評価した．

燃料噴霧滴がランダムに存在する場において，点火栓周囲のある領域(基準体積)が，初期火炎の形成に必要な燃料噴霧濃度を超過している場合は，火花放電により初期火炎を形成し，また着火に必要な燃料噴霧濃度を超過している場合は，火炎が周囲へ消炎することなく伝ばし着火に至ると仮定すると，初期火炎発生率および着火率は，燃料蒸気濃度が一定のもとでは放電時に基準体積に存在する燃料噴霧濃度が基準燃料噴霧濃度以上となる確率として表せる．また液滴径が均一な場合には，基準体積中の粒子数が基準粒子数 $N_{ref}V_{ref}$ 以上

となる確率として次式の様に表せる．

$$P = 100 \sum_{i=N_{ref}V_{ref}}^{N_{ave}V_{std}} C_i \left(\frac{V_{ref}}{V_{std}} \right)^i \left(1 - \frac{V_{ref}}{V_{std}} \right)^{N_{ave}V_{std}-i} \quad (1)$$

ただし，

$$N_{ave} = \frac{6W_l}{\rho r_l d^3} \quad (2)$$

$$N_{ref} = \frac{6W_{ref}}{\rho r_l d^3} \quad (3)$$

ここで標準体積 V_{std} は基準体積に対して十分に大きい領域で，本研究では 1m^3 とした．また $N_{ave} V_{std}$ は標準体積中に存在する粒子数を意味する．基準体積とは，燃料噴霧の着火性に影響を及ぼす領域の大きさを示し，一方，基準燃料噴霧濃度とは，基準体積内で噴霧粒子がランダムに分散している場合において，最低限，着火に至るため基準体積内に必要な燃料噴霧濃度である．実験結果より図 3-7 や図 3-8 の様な，蒸気濃度が一定の場合の燃料噴霧濃度と着火率の関係を元に，式(1)-(3)を用いて，各燃料蒸気濃度および液滴径について，基準燃料噴霧濃度および基準体積を求めた．

図 3-7 および図 3-8 の実線は，上記の方法で各パラメータの値を求め近似した結果である．累積二項分布による近似は実験より得られた着火率および初期火炎発生率の変化とよく一致していることより，有効であると考えられる．

初期火炎の発生および着火に至る基準燃料噴霧濃度と基準体積を燃料蒸気濃度について整理した結果をそれぞれ図 3-10 および図 3-11 に示す．燃料蒸気濃度の増加にともない基準燃料噴霧濃度は低下し，また反対に基準体積は増加している．これは燃料蒸気濃度の増加にともない，液滴周囲に形成される燃料蒸気濃度の高い領域が拡大し，燃料噴霧がより低濃度でも着火に至るためである．またこの燃料蒸気濃度が高い領域は燃料噴霧の状態に依存するため，燃料噴霧が低濃度な場合，噴霧や燃料蒸気のむらのスケールが大きく，火炎が安定して伝ばできるようになる大きさも増加するために，基準体積が増大すると考えられる．これらの傾向は初期火炎および着火の両方に共通するが，初期火炎の場合は，着火の場合に比べ基準体積も基準燃料噴霧濃度も低い値となる．初期火炎は放電エネルギー等の補助により発生するため，火炎伝ばに至らない様な希薄な条件においても初期火炎の発生は可能であり，基準体積も小さくなる．

また着火に至る場合について，液滴径による基準体積および基準燃料噴霧濃度の変化を図 3-12 に示す．基準燃料噴霧濃度および基準体積は，液滴径の低下とともに減少する．これは，液滴径の低下により，燃料噴霧の着火性，火炎伝ば性が向上するためと考えられる．

さらに、基準体積中に含まれる燃料噴霧の総量の変化を図 3-13 に示す。前述のように、本研究の範囲においては液滴径の低下と共に着火性は向上する。このため着火に至った場合については、燃料噴霧の液滴径が低下するとともに、基準体積内に含まれる燃料噴霧の総量も低下する。一方、放電エネルギー等により補助されている初期火炎に関しては、着火に至る場合に比べ、基準体積内の燃料噴霧総量は低く、液滴径による変化も少ない。このような違いが起きる原因を明らかにするため、基準燃料噴霧濃度において、基準体積内に存在する燃料噴霧の濃度を図 3-14 に、液滴数を図 3-15 にそれぞれ示した。本解析を行った実験条件の様な総燃料濃度が均一予混合気の希薄着火限界を下回る様な範囲においては、着火の場合には、液滴径によらず、基準体積内に存在する粒子数はほぼ等しく、一方、初期火炎の場合には、基準体積内に存在する液体燃料の総量がほぼ等しい結果となった。これは、初期火炎の形成に関しては、放電エネルギーが大きいことより、液体燃料は容易に気化されるため、液体燃料の総量が現象を支配するのに対し、着火の場合には、火炎が液滴を蒸発させつつ伝ばする必要があるため、液滴として存在する液体燃料の総量よりも、液滴からの蒸気の発生と、発生した蒸気中を火炎が伝ば出来ること、つまり、火炎が伝ば可能な状態に液滴が分散していることが重要であることを示す。

3.4 本章のまとめ

本章においては、まず多くの研究と同様に、燃料噴霧の着火性を着火率という形で確率的に表現し、液滴径、燃料噴霧濃度および燃料蒸気濃度といった時間平均的な噴霧混合気の実験条件の特性による着火率の変化を求めたうえで、さらに確率論的考察に基づき、着火率の変化を確率モデルにしたがって整理した。着火率がどのような要因によって定められているか、またその要因は燃料噴霧の特性によってどのように変化するかについて明らかにした。

燃料噴霧の時間平均的な特性と、着火性の関係より、次の知見を得た。

- (1) 燃料噴霧は、均一予混合気の希薄着火限界を大きく下回った場合にも着火に至る可能性が存在し、また着火に至らない場合においても、放電により伝ば性を有しない火炎（初期火炎）を形成する可能性がある。燃料噴霧の着火率は、燃料噴霧濃度の増加に伴い徐々に増加する。
- (2) 燃料噴霧に燃料蒸気を添加し、混合気中の燃料蒸気濃度を一定にした場合、燃料噴霧液滴径が小さいほど着火性は高く、また燃料噴霧濃度の増加による着火率の増加も大きくなる。
- (3) 総燃料濃度が予混合気の希薄着火限界を上回る場合でも、着火率が 100% とならない条件がある。
- (4) 燃料噴霧および燃料蒸気の濃度比において、ある着火率を達成するために最も多くの燃料を必要とする最悪条件および最も少ない燃料を必要とする最適条件が存在する。

また、確率モデルを用いて着火率の変化を近似し、そのパラメータである基準体積および基準燃料噴霧濃度で着火性を評価した結果、次の知見を得た。

- (5) 放電の瞬間の燃料噴霧濃度の変化に着目し、累積二項分布関数にしたがって近似することにより、燃料噴霧の時間平均的な特性を用いて着火性を評価することができる。
- (6) 本研究の実験範囲においては、着火の場合には、液滴径によらず、基準体積内に存在する粒子数はほぼ等しく、一方、初期火炎の場合には、基準体積内に存在する液体燃料の総量がほぼ等しかった。

しかし噴霧着火現象の根本的な理解のためには、時間平均的なパラメータでは表せない、放電の瞬間における不確定な混合気の状態を測定し、着火性と関連付けて評価する必要がある。

第3章参考文献

- (1) Dietrich,D.L., Cernansky,N.P., Somashekara,M.B., and Namer,I., Spark Ignition of a Bidisperse n-Decane Fuel Spray, Twenty-Third Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute (1990), p.1383-1389
- (2) 吉田 肇, 新井 雅隆, 廣安 博之, 燃料噴霧が混在する可燃混合気の点火特性, 日本機械学会論文集(B編), 56-528(1990-8), p.2483-2489
- (3) 吉田 肇, 新井 雅隆, 廣安 博之, 燃料噴霧が混在する可燃混合気の火炎形成過程, 日本機械学会論文集(B編), 56-528(1990-8), p.2490-2496
- (4) 吉田 肇, 新井 雅隆, 廣安 博之, 横谷昌道, 燃料噴霧が混在する可燃混合気中を伝ばする火炎の構造, 日本機械学会論文集(B編), 57-539(1991-7), p.2416-2420
- (5) 中部 主敬, 水谷 幸夫, 淵端 学, 赤松 史光, 財前 雅隆, El-Emam,S.H. , 油滴群中を伝ばする火花点火球形火炎の構造観察, 日本機械学会論文集(B編), 58-548(1992-4), p.1337-1342

表 3-1 実験条件

Item	Value
Fuel	Methanol
Droplet size	145,175,120 μm (more than 80wt% within $\pm 10\%$ of dia.)
Average spray velocity	0.5 ~ 0.6m/s (145,120 μm), 0.9 ~ 1.0 m/s (175 μm)
Average air velocity	0.15 ~ 0.20 m/s
Time-average fuel spray concentration	0 ~ 0.06 kg/m ³
Time-average gaseous fuel concentration	0.006 ~ 0.12 kg/m ³
Temperature/Pressure	Atmospheric temperature / Atmospheric pressure
Igniter	High-frequency discharged spark system (25KHz, 50ms, 0.8J)
Electrode	Gap: 3mm, Tip: slant-cut
Ignition trial	About 200-1000 times for each condition

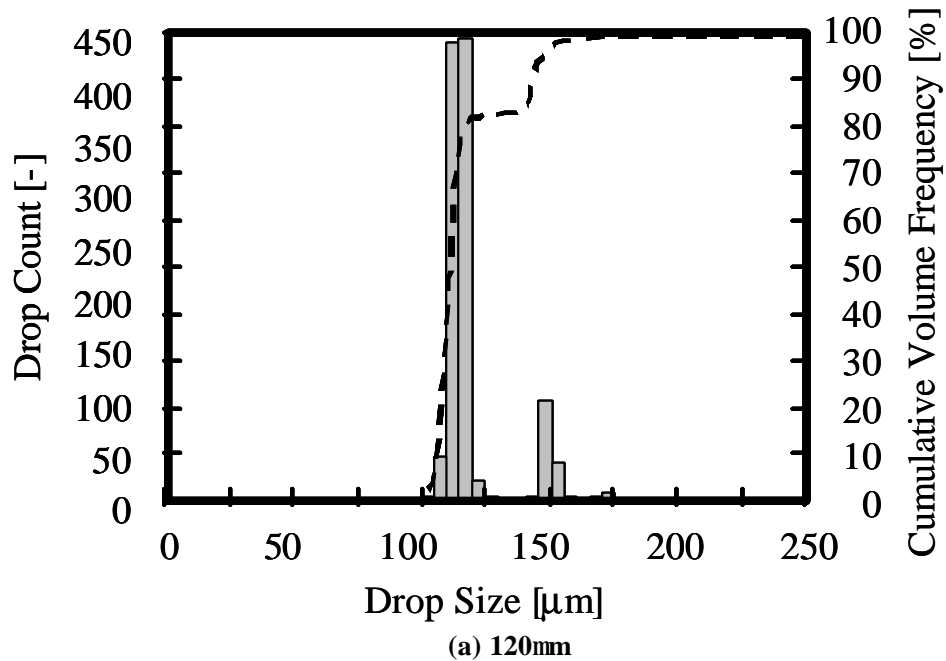


图 3-1 单分散噴霧粒度分布

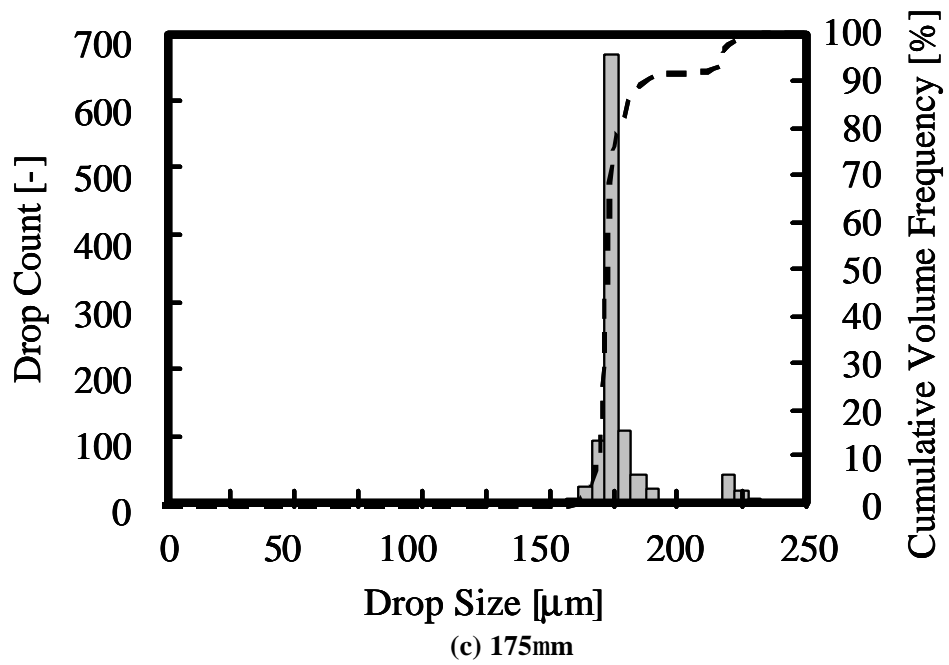
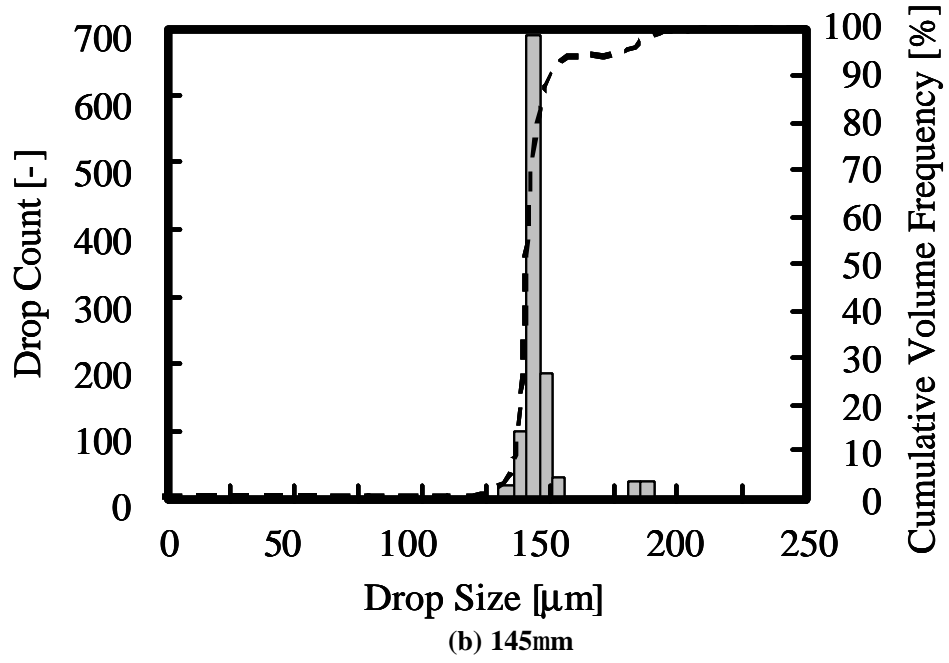


図 3-1 単分散噴霧粒度分布 (続き)

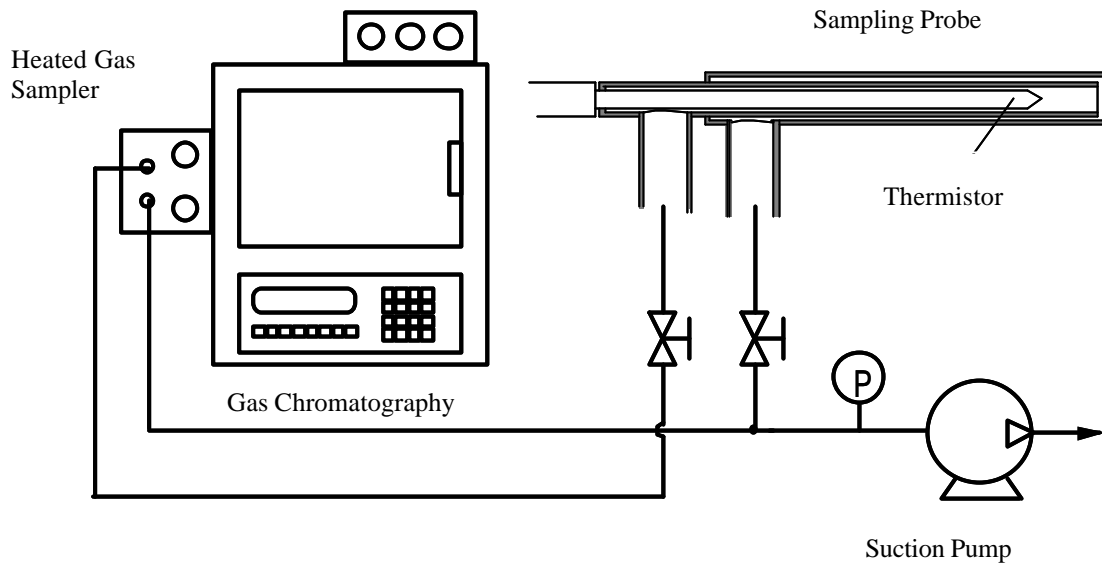


図 3-2 燃料蒸気濃度測定装置

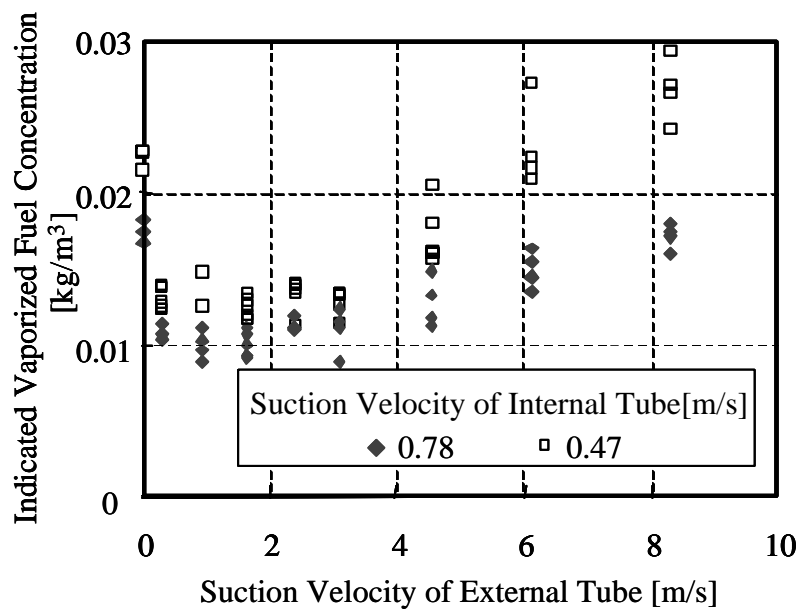


図 3-3 燃料蒸気濃度測定用吸引プローブの測定値に及ぼす外管吸引速度の影響

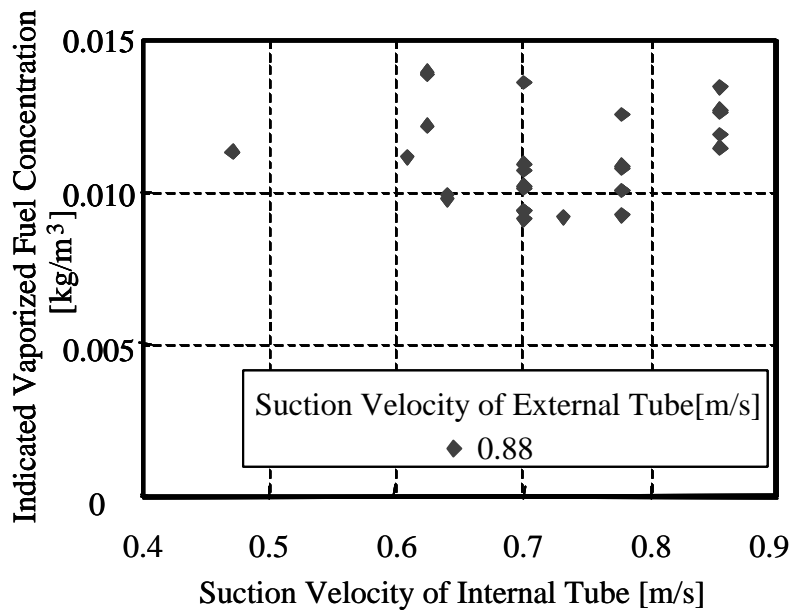


図 3-4 燃料蒸気濃度測定用吸引プローブの測定値に及ぼす内管吸引速度の影響

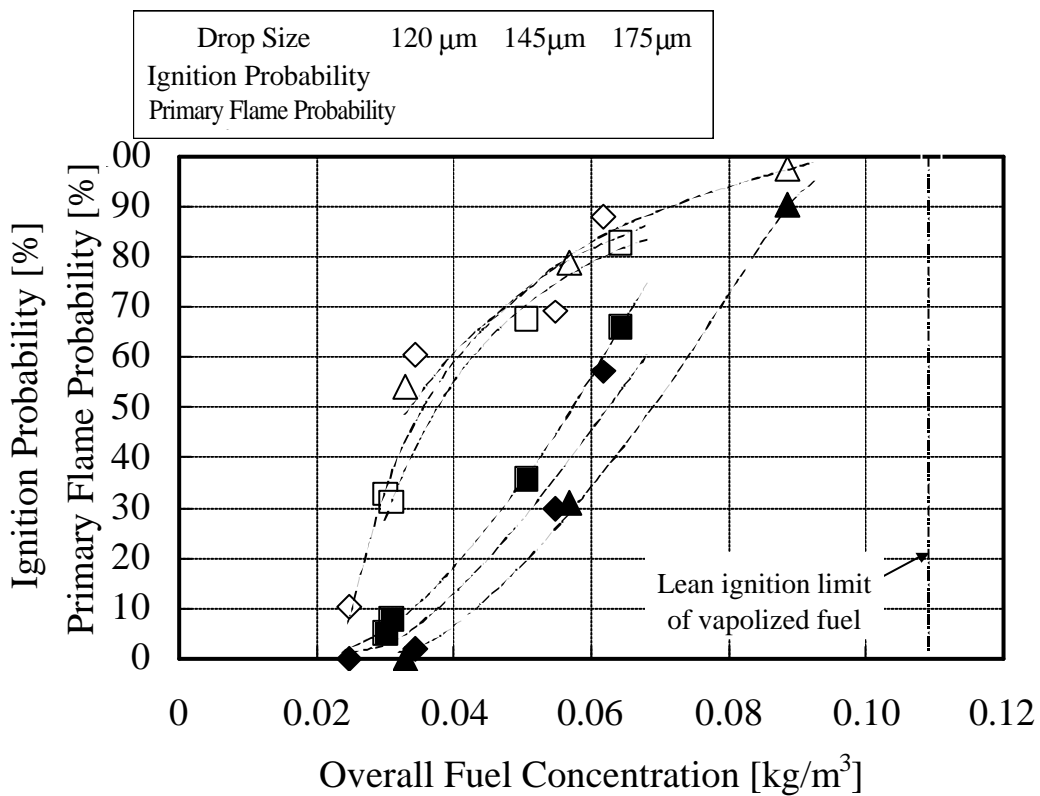
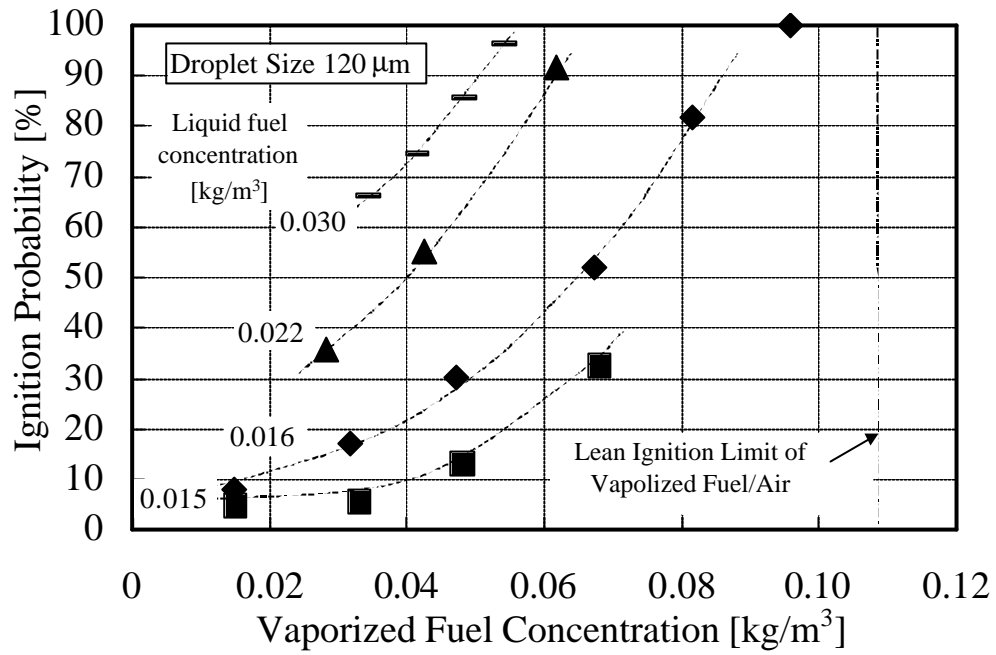
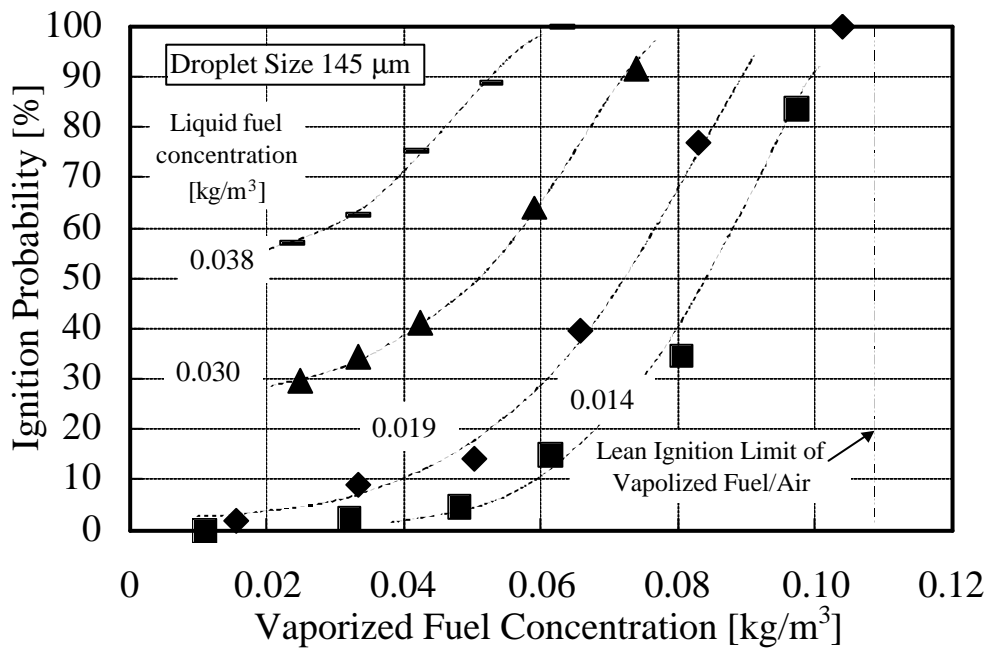


図 3-5 総燃料濃度による着火率および初期火炎発生率の変化

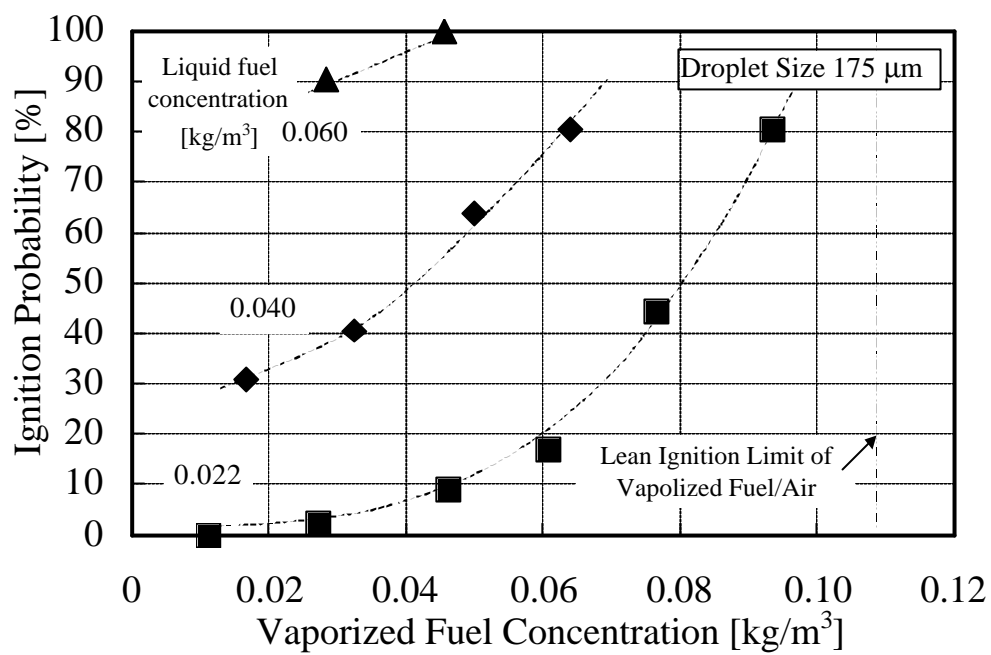


(a) 120mm



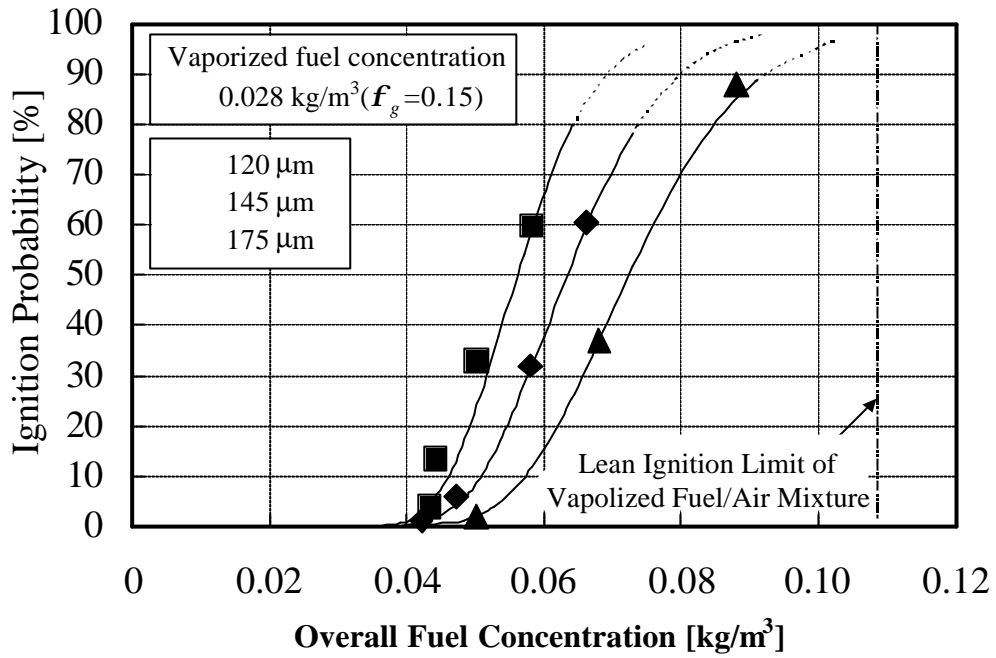
(b) 145 mm

図 3-6 燃料噴霧濃を一定に保ち燃料蒸気濃度を変化させた場合の着火率の変化

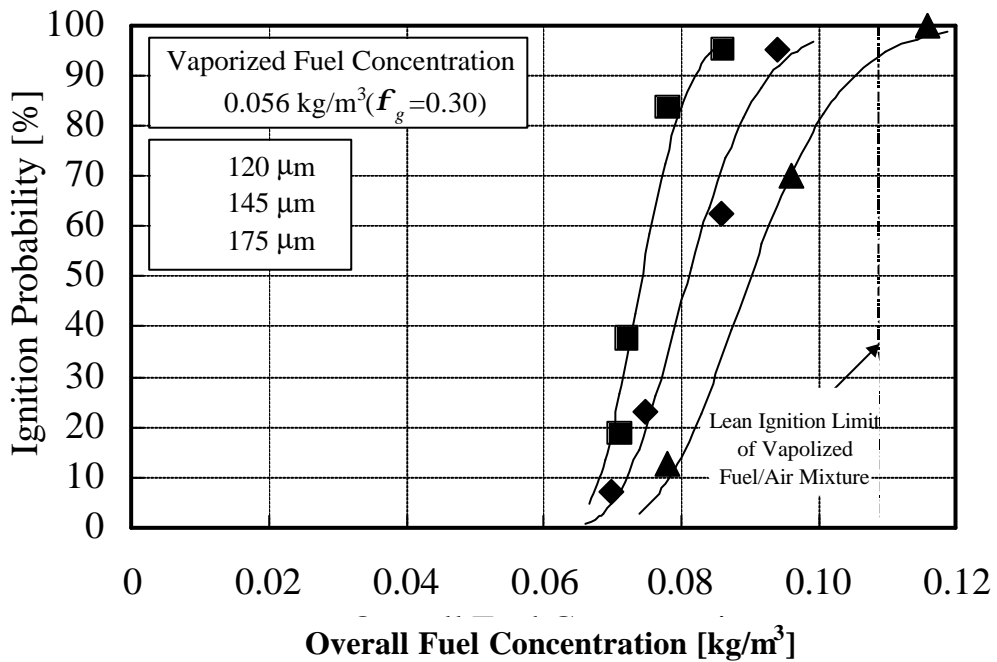


(c) 175 mm

図 3-6 燃料噴霧濃を一定に保ち燃料蒸気濃度を変化させた場合の着火率の変化 (続き)

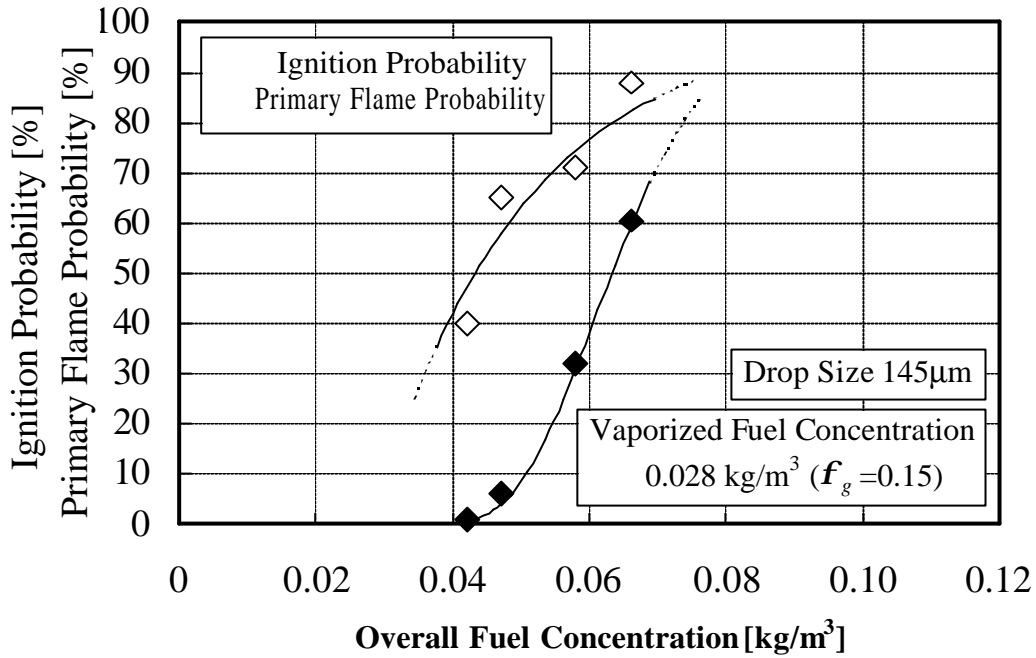


(a) $W_g = 0.028 \text{ kg/m}^3$ ($f_g = 0.15$)

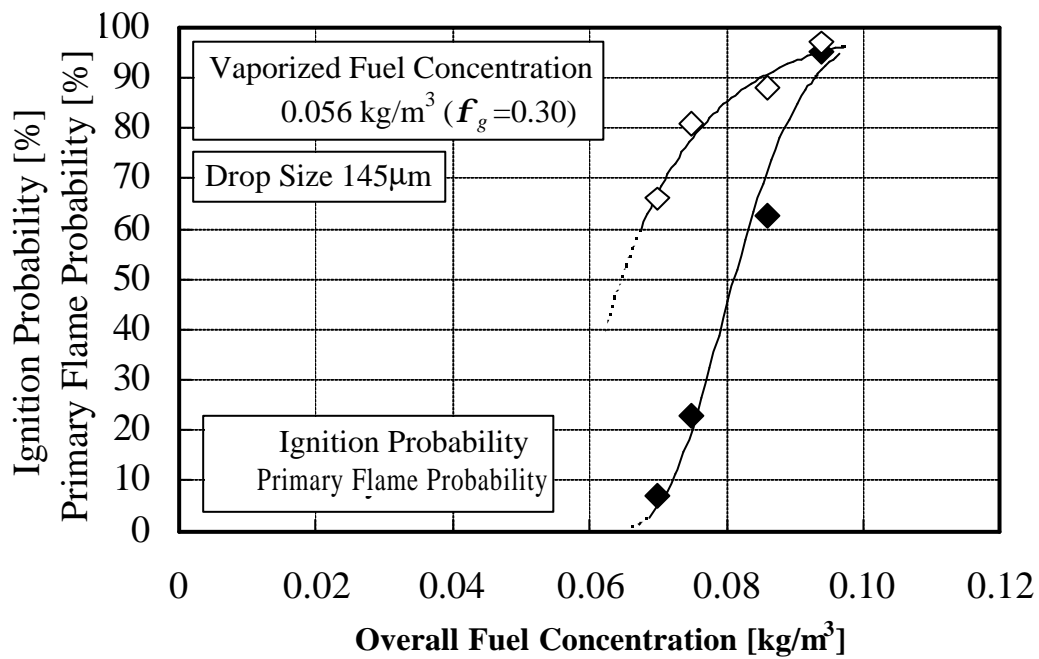


(b) $W_g = 0.056 \text{ kg/m}^3$ ($f_g = 0.30$)

図 3-7 等燃料蒸気濃度における着火率の変化

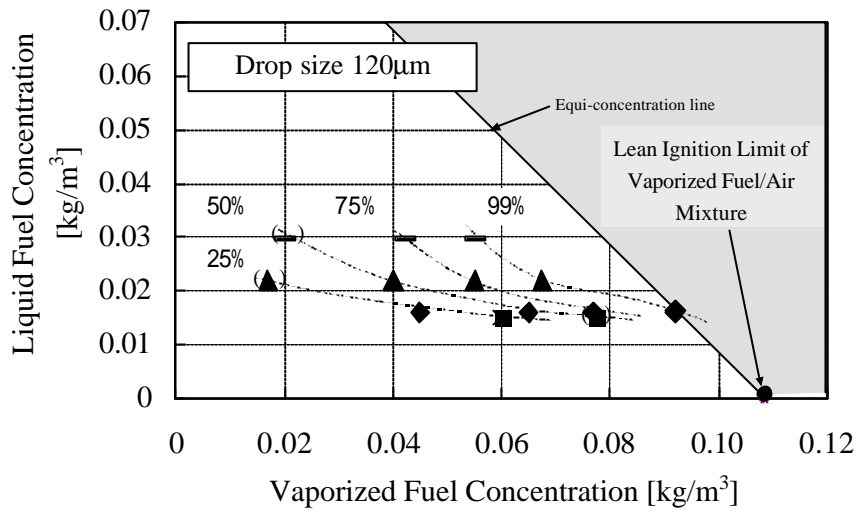


(a) $d=145\text{mm}$ and $W_g=0.028\text{kg/m}^3$

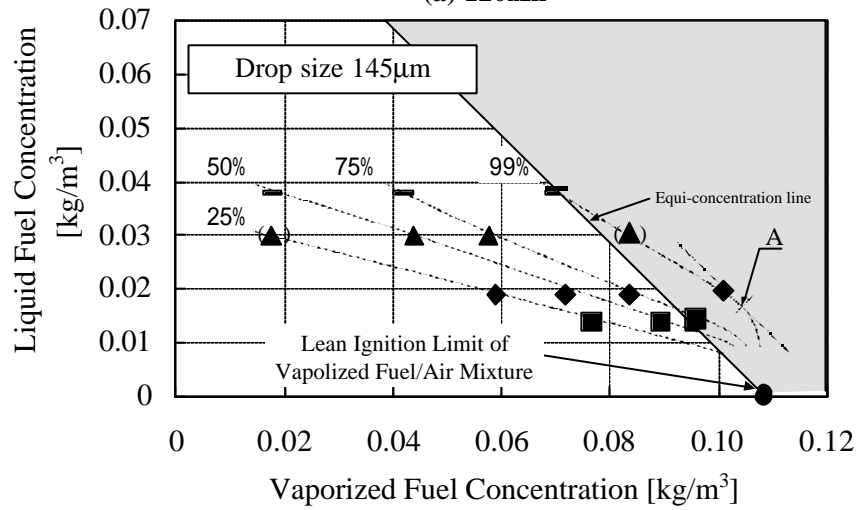


(b) $d=145\text{mm}$ and $W_g=0.056\text{kg/m}^3$

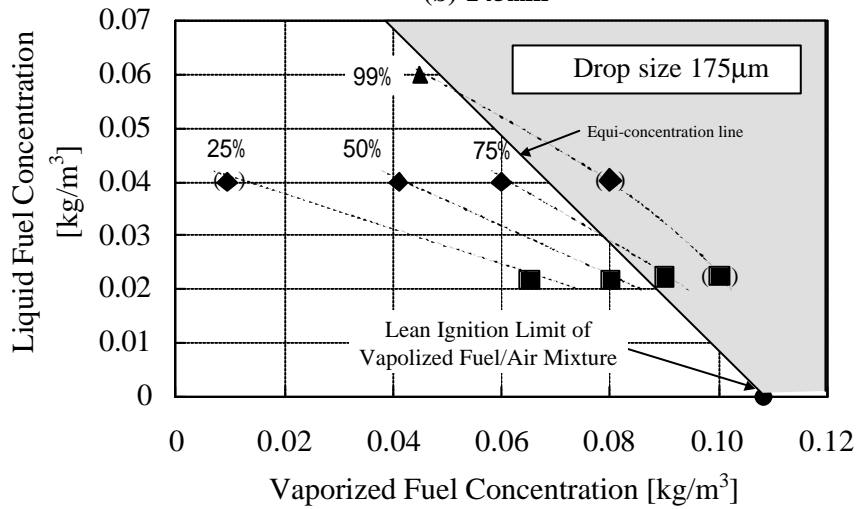
図 3-8 着火率および初期火炎発生率の変化



(a) 120mm



(b) 145mm



(c) 175mm

図 3-9 燃料噴霧濃度および燃料蒸気濃度の影響

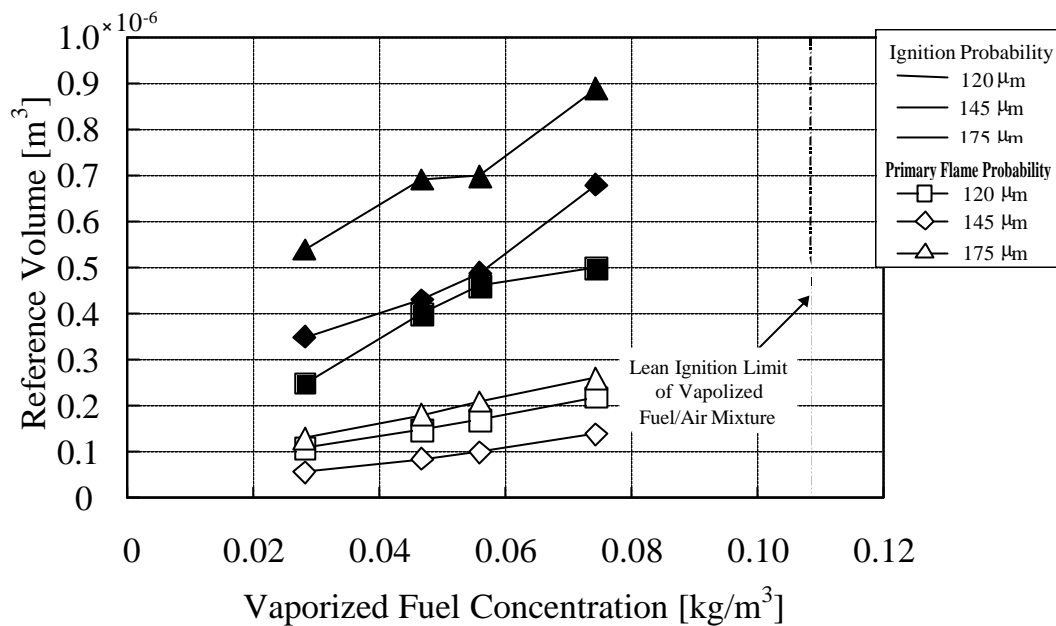


図 3-10 基準体積の変化

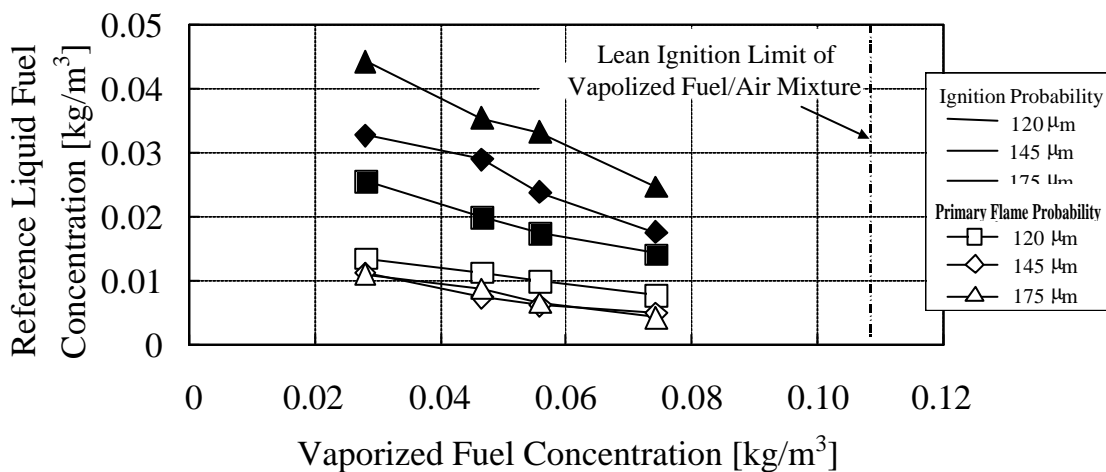


図 3-11 基準燃料噴霧濃度の変化

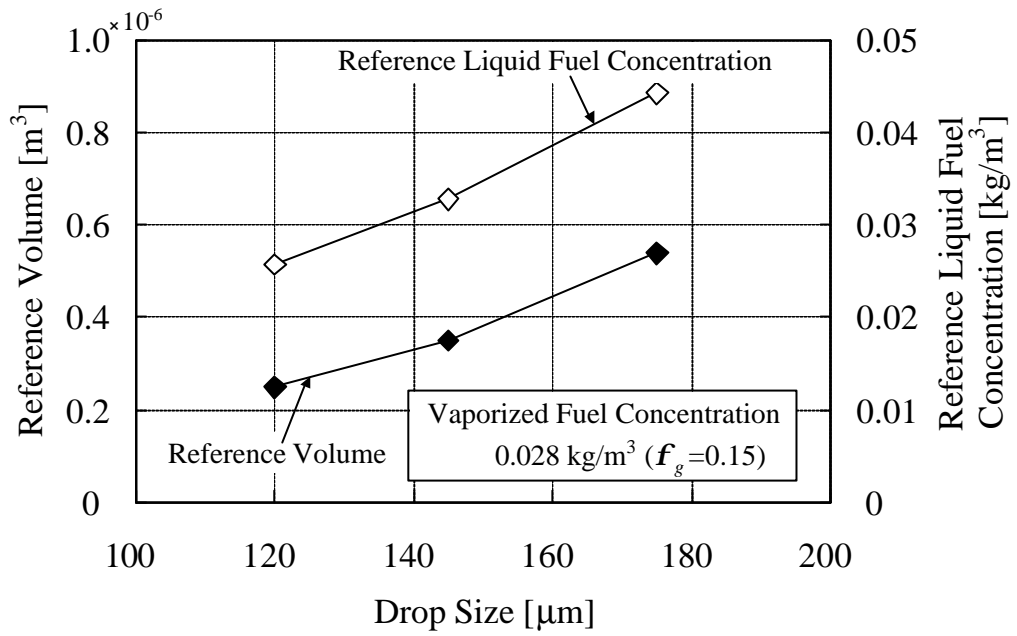


図 3-12 液滴径の影響

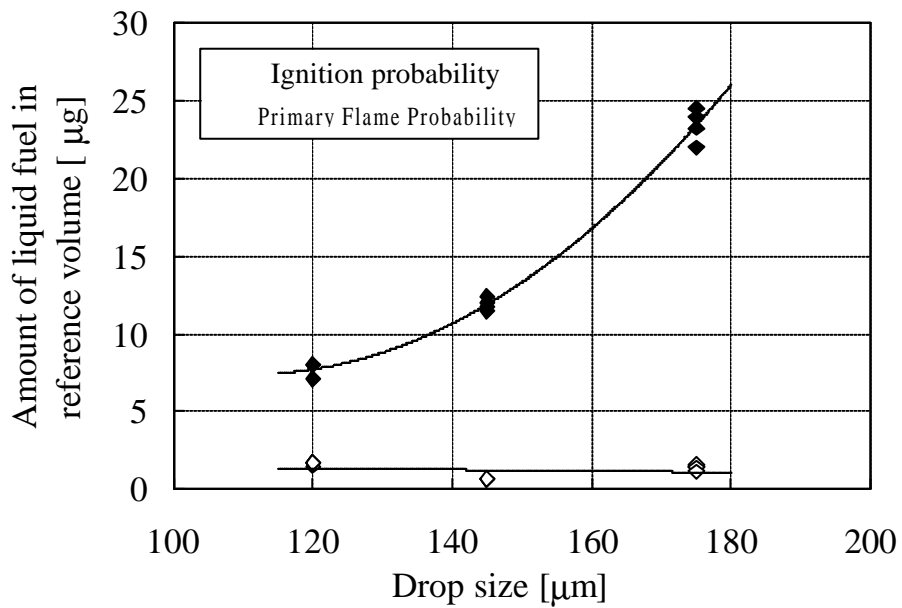


図 3-13 着火および初期火炎の形成に必要な基準体積中の燃料噴霧量の変化

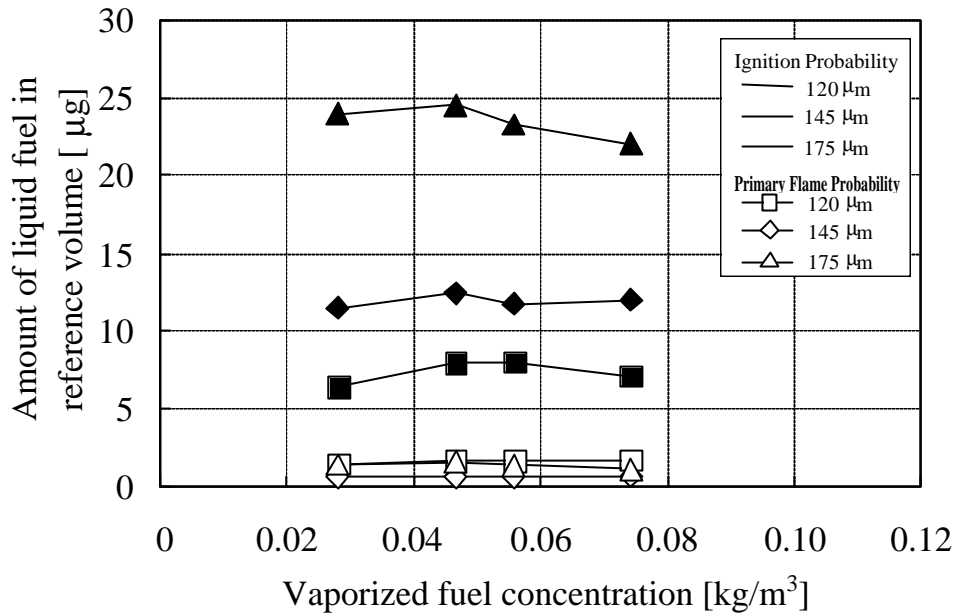


図 3-14 基準燃料噴霧濃度において基準体積内に存在する液体燃料の総量

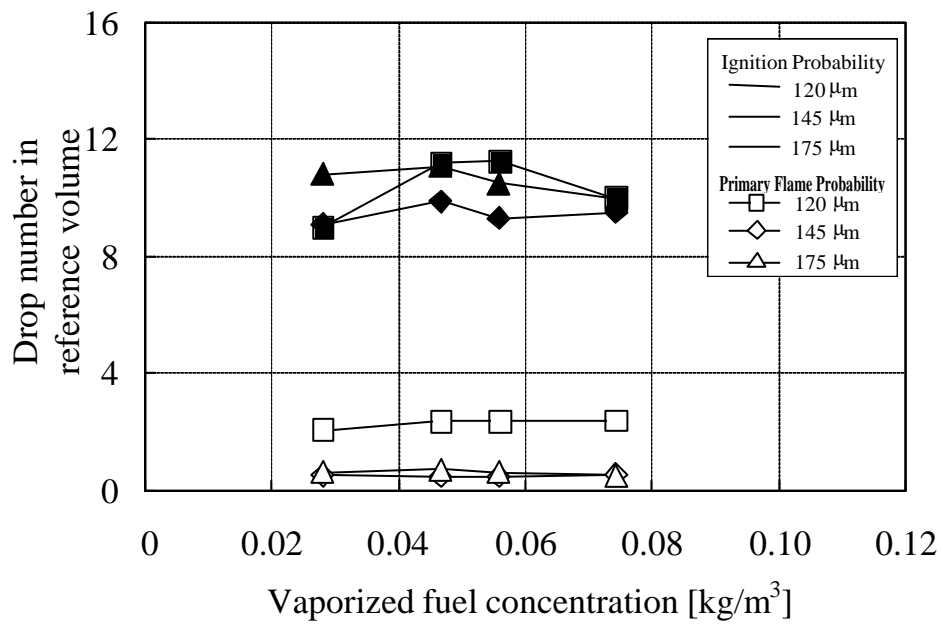


図 3-15 基準燃料噴霧濃度において基準体積中に存在する液体燃料噴霧の総粒子数

第 5 章 点火の瞬間の噴霧特性と着火性の関係	77
5.1 はじめに.....	77
5.2 実験装置および実験方法.....	77
5.2.1 実験方法概要.....	77
5.2.2 実験条件.....	77
5.2.3 時間平均的な燃料蒸気濃度の測定方法.....	78
5.2.3.1 クロマトグラム面積と燃料蒸気濃度.....	79
5.2.3.2 ガスサンプリングプローブの吸引速度による燃料蒸気濃度測定結果の変化	79
5.2.4 発生した火炎の分類.....	80
5.2.5 燃料噴霧特性と着火性の関係の評価方法.....	80
5.3 結果および考察.....	80
5.3.1 瞬間の燃料噴霧濃度による着火性の変化.....	80
5.3.2 燃料噴霧特性と着火性の相関.....	80
5.3.3 燃料噴霧の空間的な不均一性の影響.....	81
5.4 まとめ.....	82
第 5 章参考文献.....	83

第 5 章 点火の瞬間の噴霧特性と着火性の関係

5.1 はじめに

第 3 章において、燃料噴霧の時間平均的な噴霧特性と、その際の平均着火率を元に、確率論的な解析により、燃料噴霧の着火特性について考察を行った。しかしこの解析では、燃料噴霧の時間的な不均一性についてのみ考慮しており、点火の瞬間に、点火栓周囲に存在し、各点火試験の可否に影響をおよぼしているような、燃料噴霧粒子の空間的な不均一性については、ランダムであるとの仮定に基づいている。しかし実際には前章でも触れた通り、燃料噴霧の空間的な不均一性は、必ずしもランダムであるわけではない。そこで燃料噴霧の空間的な不均一性が着火性にどのような影響を与えるか明らかにするため、実際の燃料噴霧を用いて点火の瞬間を撮影し、各点火試験における燃料噴霧の空間的な不均一性と着火の可否より、燃料噴霧の空間的な不均一性と着火性の関係を調べた。点火の瞬間の噴霧画像より、第 3 章で求めた基準体積のような、着火性に影響をおよぼしていると考えられる領域を求めた。さらにこの領域を含む点火栓周囲の画像より、第 4 章において説明した不均一指数を算出し、燃料噴霧の不均一性が着火性にどのような影響を与えているか考察した。

5.2 実験装置および実験方法

5.2.1 実験方法概要

点火の瞬間の燃料噴霧濃度と着火性の影響の解明を目的とするため、時間平均的な燃料噴霧濃度が一定の単分散メタノール噴霧を用い、燃料蒸気濃度を測定した後、点火試験を繰り返し行った。燃料蒸気濃度は、後に述べる気液同時吸引法を簡略化した方法で、あらかじめ時間平均的に測定した。PDPA は、第 4 章と同様、第 2 章に示したグリセリン水溶液を用いる捕集率検定法により校正した。点火試験では、点火によって発生した火炎を前述の定義にしたがい目視により分類した。また火花点火と同期して、放電の直前に瞬間撮影を行うことで、各点火試験における、放電の瞬間の燃料噴霧濃度を測定した。さらに点火の瞬間における噴霧粒子の配置から燃料噴霧の不均一性を求め、燃料噴霧の不均一性が着火性にどのように影響しているか考察した。

5.2.2 実験条件

本章における実験条件を表 5-1 に、また実験を行った燃料噴霧の粒度分布の一例を図 5-1 にそれぞれ示す。試料としては、第 3 章と同様にメタノールを用いた。本章においては、各点火試験について、点火の瞬間の燃料噴霧画像を測定しているため、燃料噴霧の一様性は必ずしも必要ではないが、燃料噴霧の分散状態を第 2 章に示したとおり調整し、時間平均的な燃料噴霧濃度の水平方向分布が、点火栓を中心に直径 30mm の範囲内において、その最も高い濃度の 80% 以上となる様調整した。

5.2.3 時間平均的な燃料蒸気濃度の測定方法

燃料噴霧中の燃料蒸気濃度は気液同時吸引法⁽¹⁾を簡略化して用いることにより時間平均的に測定を行った。

気液同時吸引法とは、捕集条件を変えつつ噴霧混合気を燃料噴霧ごと捕集し、捕集物に含まれる総試料量より噴霧混合気中に含まれる気相試料濃度を求める方法である。噴霧混合気の流れと同方向上流向きにサンプリングプローブを設置し、噴霧混合気を吸引する。捕集された噴霧混合気は加熱、気化され、ガスクロマトグラフィによって捕集物中に含まれる総試料量を求める。吸引速度を変えた場合、総吸引量は増加するが、液滴は慣性を持つため、噴霧粒子の運動与える影響は小さく、液相試料の総捕集量の変化は少ない。よって吸引による液相捕集量に変化がないと仮定すると、不定な値は液相および気相の燃料濃度の2値なので、最低2種類の吸引速度による測定を行い、連立方程式を解くことで解を得ることが出来る。ここで本研究では簡略化のため、連立方程式を解くのではなく、液相燃料濃度はあらかじめ補正された PDPA によって求めた値を用い、捕集物中に含まれる試料より、PDPA で得た濃度分の指示値を差し引くことで気相試料濃度を求めた。

吸引プローブによる吸引は緩やかで、サンブラ内に圧力の低下は無く、また完全気化混合気は理想気体であると仮定し、混合気温度 T 、サンブラからガスクロマトグラフィに導入された完全気化混合気の温度を $T_{sampler}$ 、混合気中に存在する燃料蒸気の体積分率を $X_{sampler}$ 、そのうち燃料噴霧由来分を $X_{l,sampler}$ および燃料蒸気由来分を $X_{g,sampler}$ とすると、完全気化混合気中に存在する燃料蒸気の体積分率 $X_{sampler}$ は以下の様に求めることが出来る。

$$X_{g,sampler} = X_{sampler} - X_{l,sampler} \quad (1)$$

ここで導入器内での噴霧分燃料蒸気体積分率 $X_{l,sampler}$ は、光学測定により得た燃料噴霧体積流束 F_l 、吸引プローブの面積を A_{vacuum} 、燃料噴霧が気化し $T_{sampler}$ まで温度上昇した際の体積膨張率を B 、サンブラにおける混合気体積流量を $Q_{sampler}$ とすると、

$$X_{l,sampler} = \frac{A_{vacuum} B F_l}{Q_{sampler}} \quad (2)$$

と表せる。ここで、サンブラにおける混合気体積流量 $Q_{sampler}$ は、吸引プローブによって、場より吸引した体積速度 Q_{vacuum} より、

$$Q_{sampler} = A_{vacuum} B F_l + Q_{vacuum} \quad (3)$$

として求めた。ただし B は相変化および温度上昇による体積変化の積で、温度変化による液相の体積変化は小さいため無視し、燃料の液相密度 r_l 、試料 1 mol あたりの質量 M より、次のとおり求めた。

$$B = B_{phase} B_{temperature} \quad (4)$$

$$B_{phase} = \frac{22.4 \times 10^{-3} r_l}{M} \quad (5)$$

$$B_{temperature} = \frac{T_{sampler}}{273.15} \quad (6)$$

ここで噴霧混合気中において、噴霧の占める体積は小さく無視すると、噴霧混合気中の燃料蒸気体積分率 X_g は、温度上昇によって変化しないことより、

$$X_g = \frac{X_{g,sampler}}{1 - X_{l,sampler}} \quad (7)$$

となる。よって噴霧混合気中の燃料蒸気濃度 W_g は、

$$W_g = \frac{273.15}{T} r_{g0} X_g \quad (8)$$

と求めることができる。ただし r_{g0} は以下の式より求めた。

$$r_{g0} = B_{phase} r_l \quad (9)$$

ガスクロマトグラフィに導入した完全気化混合気中の燃料蒸気体積分率 $X_{sampler}$ は、第2章においてに説明したとおり、ガスクロマトグラフィの指示値より求め、場より吸引した体積流速 Q_{vacuum} は吸引流量より、温度変化を考慮して求めた。

5.2.3.1 クロマトグラム面積と燃料蒸気濃度

導入された気体中に含まれる試料質量 $W_{sampler}$ は、あらかじめ行った検定により得た、ガスクロマトグラフィに導入された試料質量と指示値の関係より求めることができる。この値は、サンプル中に含まれる全試料質量に等しい。ここで、サンプル内からガスクロマトグラフィに導入された試料の温度 $T_{sampler}$ および、標準温度、サンプル温度での燃料蒸気密度をそれぞれ r_{g0} および $r_{sampler}$ とそれぞれ定義すると、(8)式において必要なガスクロマトグラフィに導入した完全気化混合気中の燃料の体積分率は、以下の様に求めることができる。

$$X_{sampler} = \frac{W_{sampler}}{r_{sampler} V_{sampler}} \quad (10)$$

$$r_{sampler} = \frac{273.15}{T_{sampler}} r_{g0} \quad (11)$$

ただし r_{g0} は(9)式より求めた。

5.2.3.2 ガスサンプリングプローブの吸引速度による燃料蒸気濃度測定結果の変化

上記の計算は吸引プローブによる噴霧混合気の吸引が噴霧混合気中の噴霧粒子の運動に影響を与えないという仮定に基づいたものであるが、吸引速度が周囲空気速度と異なれば、液滴は必ず吸引の影響を受け、その運動は変化し、燃料蒸気濃度の測定値の誤差要因となる。本実験では、同一条件下で吸引速度を変化させて燃料蒸気濃度を測定した結果、本測

定装置で用いる吸引速度の範囲では 吸引速度の影響は小さく無視できることを確認した。

5.2.4 発生した火炎の分類

点火により形成された火炎を第2章にしたがい各火炎形態に分類し、着火性を評価した。また着火判定基準により着火性の变化する傾向が異なるか明確にするため、本実験においては火炎形態(1)-(3)について、それぞれを着火判定基準とした場合の結果をそれぞれ求め比較した。

5.2.5 燃料噴霧特性と着火性の関係の評価方法

燃料噴霧の不均一性の影響を明らかにするために、不均一性を評価する適切な解析領域を定める必要がある。燃料噴霧中のある領域が着火性に影響をおよぼす場合、その領域の燃料噴霧濃度により着火性は変化し領域内の噴霧による影響が強いほど、着火率は点火の瞬間の燃料噴霧濃度変化に対して急激となる。そこで、燃料噴霧濃度を求める領域の大きさを变化させて、その領域内の、瞬間燃料噴霧濃度と着火性の関係を求めた。図 5-2 に示す様に着火率と、瞬間燃料噴霧濃度の関係を累積正規分布曲線で近似し、その標準偏差を用いて影響の強さを表した。標準偏差が大きい程、点火の瞬間の燃料噴霧濃度に対して着火率は緩やかに変化するため、その領域が着火性におよぼす影響は小さいといえる。

5.3 結果および考察

5.3.1 瞬間の燃料噴霧濃度による着火性の变化

点火の瞬間における撮影領域内の燃料噴霧濃度の発生頻度と、各濃度での着火率を図 5-3 に示す。図中の各記号は、それぞれ前述の判定基準(1)、(2)および(3)を用いて求めた着火率である。本研究のように、時間平均的には燃料噴霧濃度が希薄な条件においても、瞬間的には噴霧濃度が高い場合もあり、その様な場合は、燃料噴霧は着火に至りやすい。また瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合でも、着火の可否は確率的である。着火判定基準を変えて着火率を求めると、着火の判定基準とする、火炎の到達範囲が広いほど、同一の瞬間燃料噴霧濃度における着火率は低くなる。これは、燃料噴霧の不均一性によって火炎の伝ば経路が確率的に形成されることから、着火判定基準の拡大により、着火に至るまでに必要な火炎の伝ば距離が増加するため 結果的に着火判定基準に至らず消炎する確率が増加するためと考えられる。つまり燃料噴霧の着火性は、点火の瞬間の燃料噴霧濃度だけで決まるものではなく、点火の瞬間における噴霧粒子の幾何的配置など、他の確率的な要因に影響を受けるといえる。

5.3.2 燃料噴霧特性と着火性の相関

燃料噴霧中のどの領域が着火性に強く影響を与えているかを知るために、燃料噴霧濃度の解析領域を図 5-4 の様に、上下および左右方向に配置し、各領域の燃料噴霧濃度と着火性の関係を求めた。図 5-5 にその結果を示す。横軸は解析領域の放電電極からの距離を表し、縦軸は点火の瞬間の燃料噴霧濃度変化による着火率の変化を累積正規分布で近似した際の標準

偏差を表す。解析領域が放電電極より遠くなると、標準偏差は連続的に増加する。すなわち、解析領域中の燃料噴霧特性との相関が低下する。これは解析領域が放電電極から離れるほど火炎が解析領域に達するまでの伝ば過程の影響が強くなるため、燃料噴霧の不均一性によって不確定に形成される火炎伝ば経路における噴霧特性が重要であることを示す。また上下方向では、水平方向に比べ着火性との相関はあまり低下しないが、これは、発生した熱が浮力により上方に広がり、火炎の伝ば経路が比較的容易に形成される事が影響していると考えられる。

次に、図 5-6 の様に、放電によって直接エネルギーを供給されると考えられる放電体積を中心に、放電体積と撮影領域を基準に解析領域を設定し、解析領域の広さによる燃料噴霧特性と着火性の関係を求めた。図中の A の領域は放電体積を示し、領域 E は撮影領域を示す。また図 5-7 にその結果を示す。図中の各記号は、着火判定基準を変えた場合である。解析領域が広いほど標準偏差が低下し、解析領域がある面積を超えると標準偏差はほぼ一定となる。これは初期の火炎発生よりも、その後の火炎伝ばの過程が強影響するためと考えられる。本研究では放電火花により燃料噴霧を点火しており、放電体積内は、放電エネルギーが十分に供給されるため、放電体積近傍の燃料噴霧特性の影響が低くなると考えられる。標準偏差が一定値となる解析領域の大きさは、本実験においては放電電極周囲の $0.6 \times 10^{-3} \text{m}^2$ から 1.010^{-3}m^2 程度(25mm-30mm 四方)であったことより、燃料噴霧特性と着火性の関係を得る場合は少なくともこれ以上の解析領域をとる必要があるといえる。また着火判定基準を変えた場合も標準偏差が多少増加するが傾向は同じであったため、第 2 章に示した通り判定基準 3 を超えた場合、すなわち、火炎直径が 30mm 程度以上になった場合を着火成功とした。

5.3.3 燃料噴霧の空間的な不均一性の影響

点火試験のすべての点火の瞬間の燃料噴霧について、着火した場合と不着火の場合に分類し求めた、評価スケールと不均一指数の変化を図 5-8 に、また点火の瞬間の燃料噴霧濃度により分類したものを図 5-9 に示す。着火判定は前述の様に判定基準 3 を用いたが、判定基準を 1(火炎直径が 50mm を超えた)としても、傾向に変化が無いことを確認した。不均一指数は最大で解析領域の半分の評価スケールについてまで評価可能なため、解析領域を十分広くとる必要があることから、前述の領域 E(撮影領域全体)を解析の対象とした。横軸は評価スケールで、縦軸は不均一指数である。評価するスケールが大きくなるほど、噴霧中に存在する大きさまざまむらの内、大規模なもののむらの強度を示す。また、最も特徴的なむらのスケールに評価スケールが一致した場合、不均一指数が最大値を示すと考えられることから、着火および不着火の場合に、不均一指数が最大値を示すスケールの確率分布を図 5-10 に示す。着火した場合は、評価スケールが 15mm 程度で不均一指数が最大値を示す確率が最大となる。一方、不着火の場合は 30mm 前後で最大値をとると予想されるが、本実験の撮影領域が十分でないこともあり、最大値の測定にはいたっていない。この傾向は、図 5-9 にも示されるとおり、最大値が瞬間燃料噴霧濃度によらず観察されたことより、本実験では着火した場合の特徴スケールは、不着

火の場合に比べ小さいといえる。しかし、特徴スケールが非常に小さくなるような配置を考えた場合、噴霧粒子は多数の小さなクラスタや単滴で孤立した粒子として存在するため、局所的な過濃領域と共に希薄な領域が広く形成される。燃料噴霧は平均燃料噴霧濃度よりも濃い領域が存在し、その様な部分を選択的に火炎が伝ばする⁽²⁾とすれば、広い希薄領域の形成は、本研究の様な希薄な燃料噴霧においては、火炎の伝ば性を低下させ、瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合は、着火性は低下すると考えられる。この点を考慮すると、本実験の結果は着火に最適なむらのスケールが存在することを示唆している。本実験においては、着火に成功した点火試験における燃料噴霧の平均的なむらのスケールはおよそ 15mm 程度で一定となった。

不均一指数の瞬間燃料噴霧濃度による変化を図 5-11 に示す。不着火の場合の最大値は測定範囲を超えていると予想されるため、評価スケールが約 15mm の場合の不均一指数について比較した。瞬間燃料噴霧濃度の高い領域でグラフにばらつきがあるのは、瞬間燃料噴霧濃度の高い点火試験回数が少ないためである。着火/不着火にかかわらず、不均一指数は瞬間燃料噴霧濃度の増加とともに増加し、瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合を比較すると、不着火の場合のほうが着火の場合に比べて不均一指数が大きい傾向にある。点火試験の全平均を示した図 5-8 においては、不均一指数は、着火した場合のほうが不着火の場合より大きい。これは瞬間燃料噴霧の濃度が高いほど着火する確率は高く、また前述のとおり本実験で用いた燃料噴霧の特性として不均一性も強くなる傾向があるためである。本研究の様な希薄な燃料噴霧においては、不均一性が強いと、局所的な過濃領域と共に希薄な領域が広く形成されるため火炎の伝ば性が低下し、瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合は不着火の場合の不均一指数が大きくなると考えられる。また反対に不均一指数が小さくなるような、むらの弱い粒子配置をしていた場合は、近接粒子間距離の増大による着火性の低下が起きると考えられることより、噴霧のむらの強さにも最適値が存在すると考えられる。

5.4 まとめ

希薄着火限界付近の燃料噴霧の火花点火による着火現象について、燃料噴霧の着火性におよぼす不均一性の影響に着目し、着火試験を行った。燃料噴霧の着火性は、点火の瞬間の燃料噴霧濃度だけで決まるものではなく、燃料噴霧の不均一性などに起因した、他の確率的な要因によって影響を受ける。また放電による初期の火炎発生よりも、その後の火炎伝ばの過程が着火の可否に強く影響することが明らかになった。また点火の瞬間の燃料噴霧粒子の空間分布を瞬間撮影により測定し、不均一指数を用いて表現した結果、着火に最適なむらのスケールおよび強度の存在が示唆された。本実験においては、着火に成功した点火試験における燃料噴霧の平均的なむらのスケールはおよそ 15mm 程度で一定となった。また瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合を比較すると、不着火の場合のほうが着火の場合に比べて不均一指数が大きい傾向にあった。

第 5 章参考文献

- (1) Hiromitsu, N., Evaporation of spray, The First Symposium on Atomization (in JAPANESE), 1992, p.213-216
- (2) 赤松 史光, 中部 主敬, 水谷 幸夫, 香月 正司, 田端 敏克, 油滴郡中を伝ばする火花
点火球形火炎の構造観察(第 2 報), 日本機械学会論文集(B 編), 61-582(1995), p.394-400

表 5-1 実験条件

Item	Value
Fuel	Methanol
Representative Drop size	100 μ m(more than 80wt% within $\pm 10\%$ of dia.)
Average spray velocity	0.38 m/s
Average air velocity	0.16 m/s
Instantaneous fuel spray concentration	0-0.005 kg/m ³
Time-average gaseous fuel concentration	0.024 kg/m ³
Temperature/Pressure	Atmospheric temperature / Atmospheric pressure
Igniter	High-frequency discharged spark system (25KHz, 50ms, 0.8J)
Electrode	Gap: 3mm, Tip: slant-cut
Laser sheet	Vertical plane, Thickness: 2mm, Pulse-width: <25nsec
Image / Analysis area	76 \times 71 / 60 \times 60(W \times H mm) , Upper side of electrodes
Ignition trial	1000 times

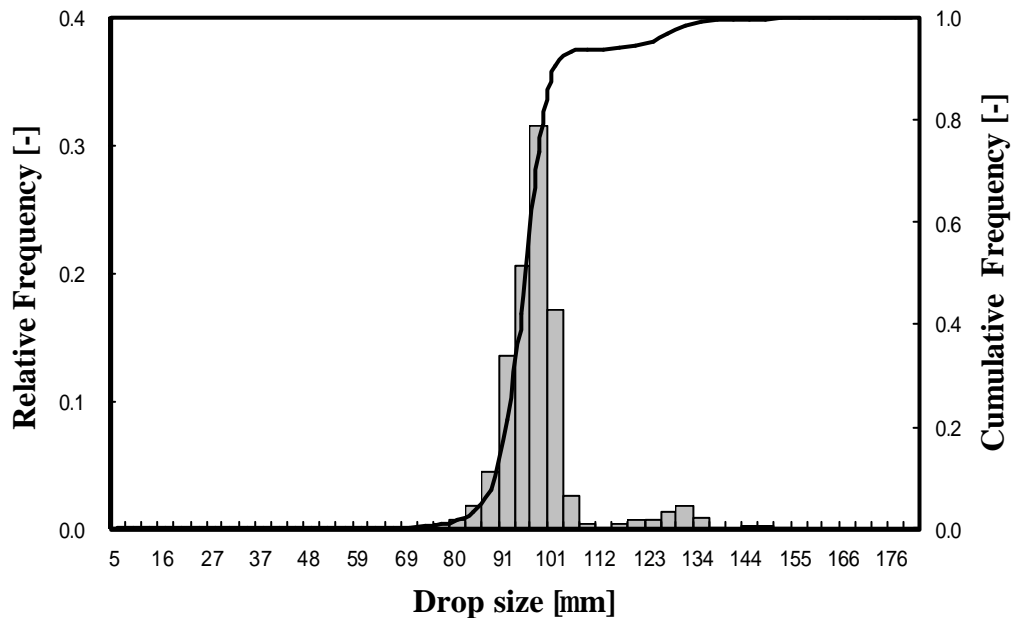


図 5-1 粒度分布の例

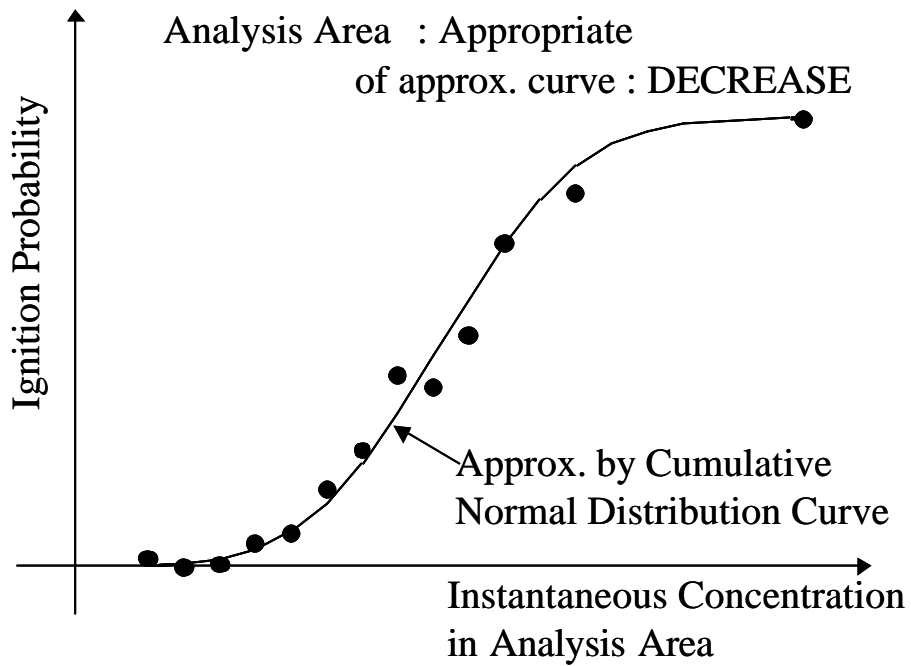


図 5-2 着火率変化の近似

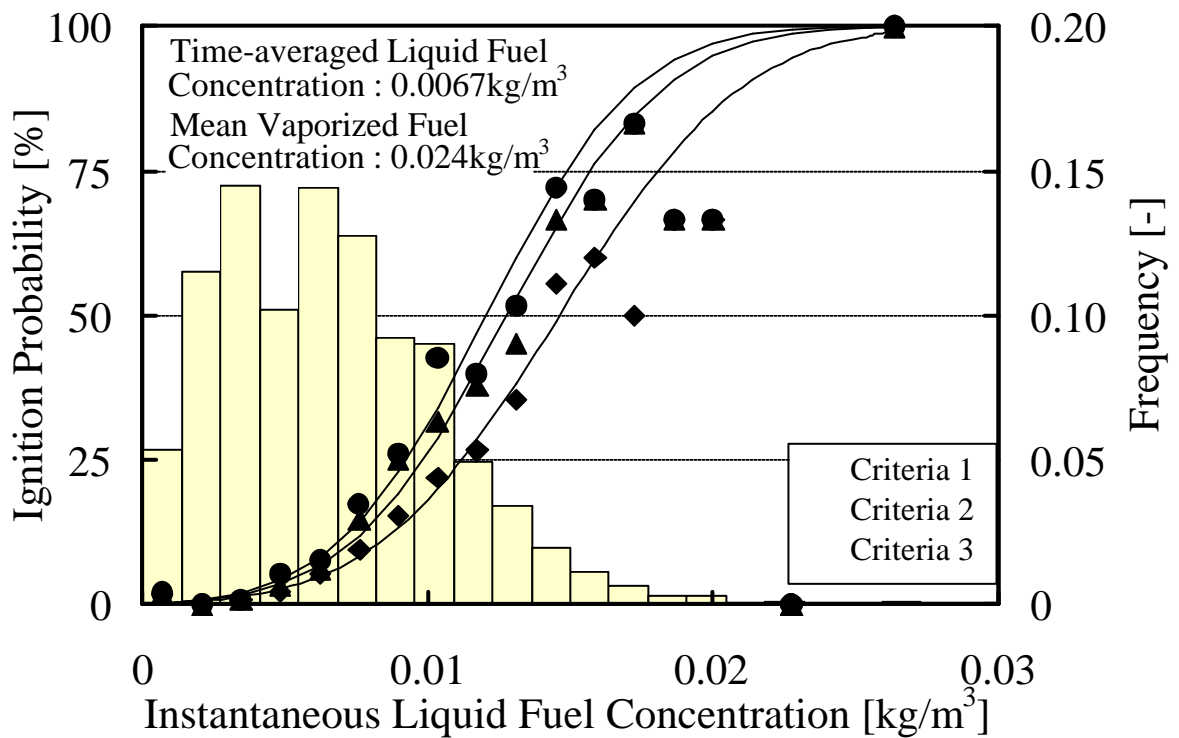


図 5-3 点火の瞬間の燃料噴霧濃度と着火性の関係

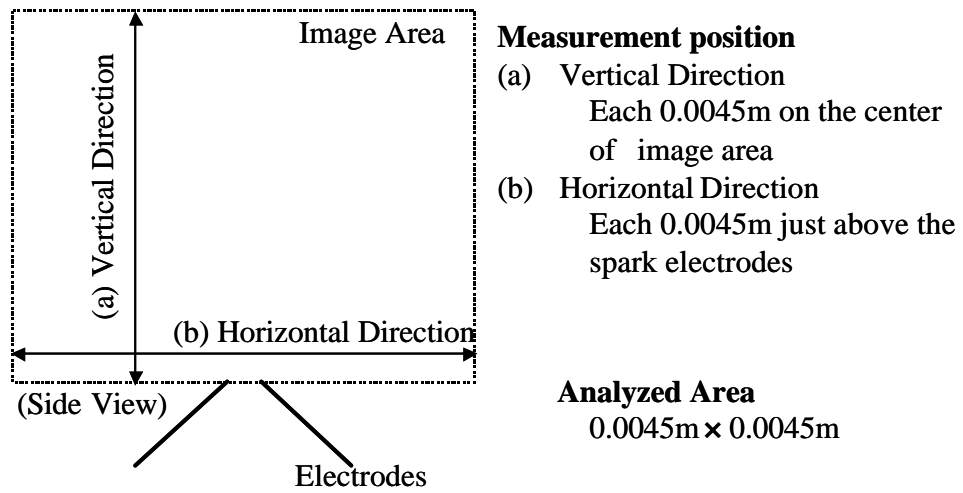


図 5-4 解析領域の位置（解析領域の位置の影響）

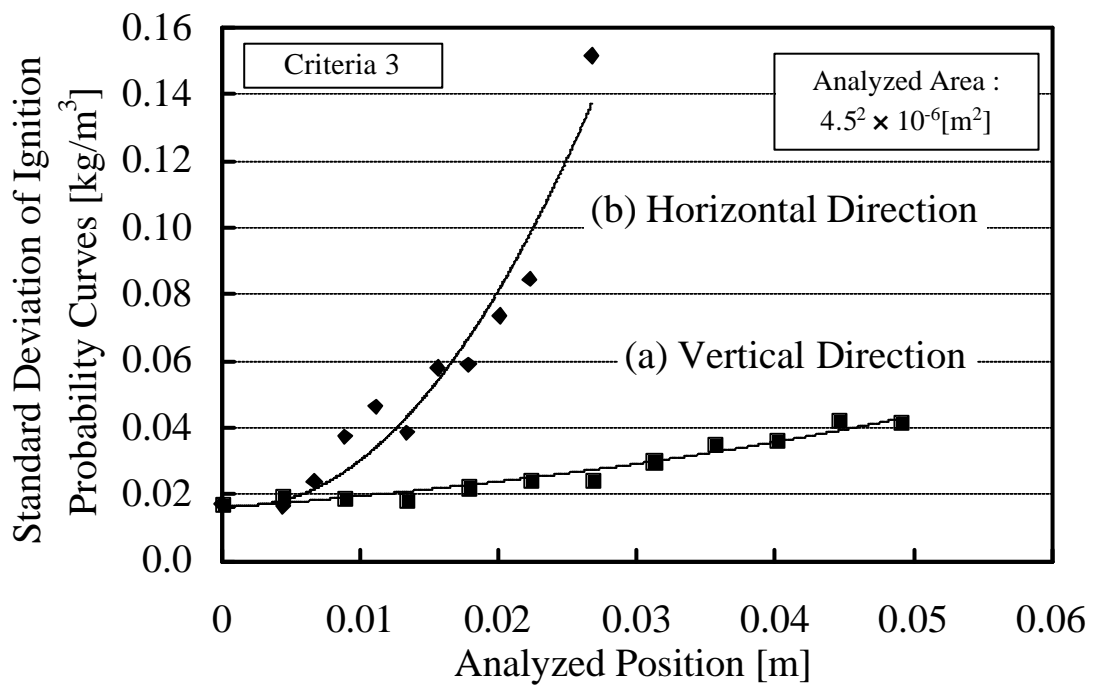
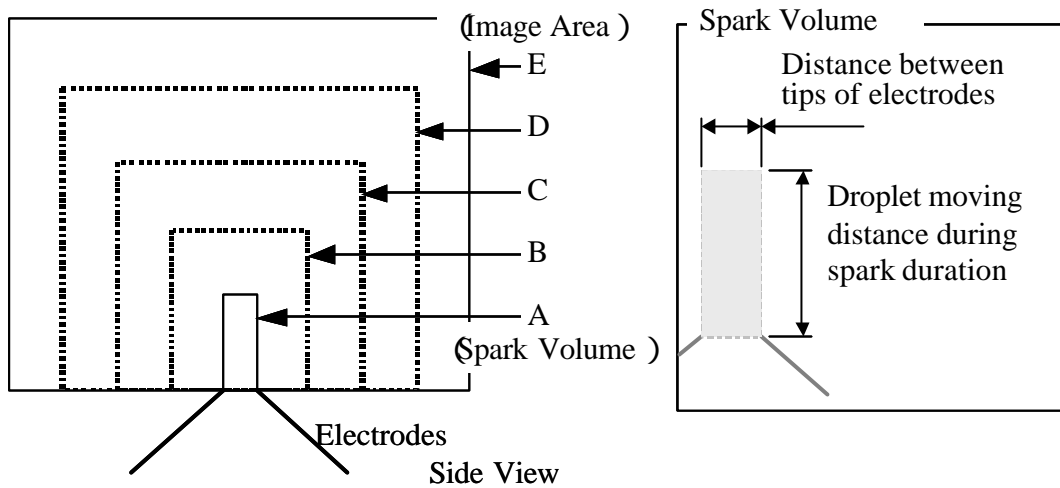


図 5-5 解析領域の位置による解析領域内の燃料噴霧濃度と着火率の変化の関係



Analysis Area	W[m]	H[m]	Area [m ²]
A	0.0046	0.014	64.4 × 10 ⁻⁶
B	0.019	0.024	456 × 10 ⁻⁶
C	0.034	0.034	1156 × 10 ⁻⁶
D	0.049	0.045	2205 × 10 ⁻⁶
E	0.063	0.055	3465 × 10 ⁻⁶

図 5-6 解析領域の位置(解析領域の面積の影響)

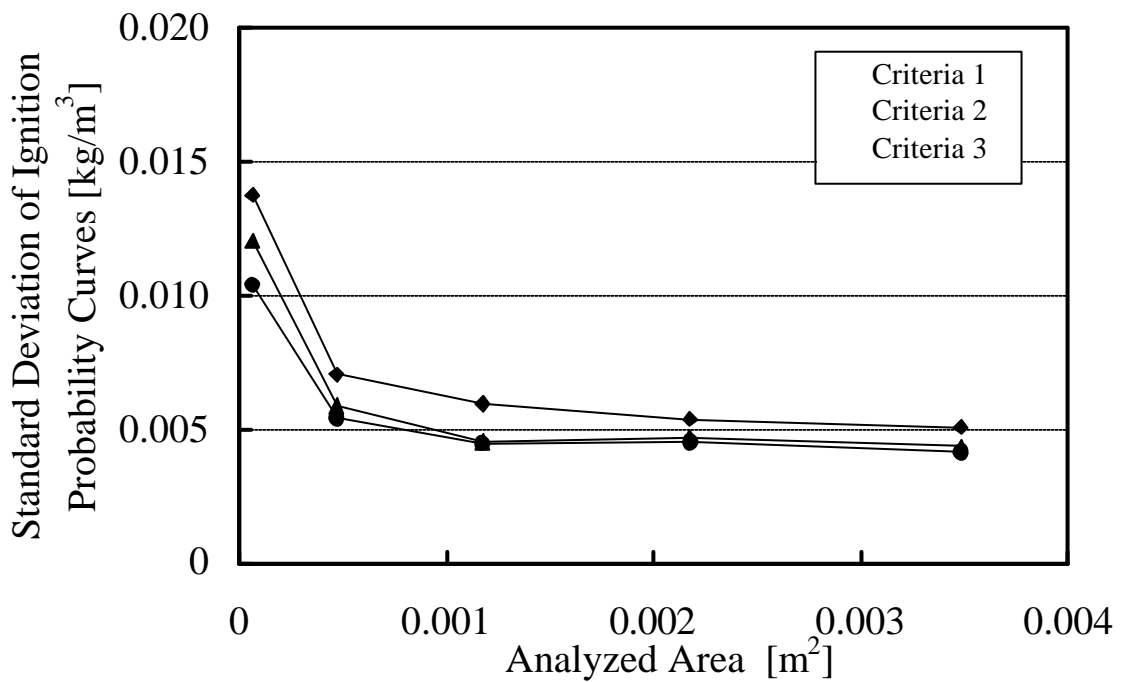


図 5-7 解析領域の面積による解析領域内の燃料噴霧濃度と着火率の変化の関係

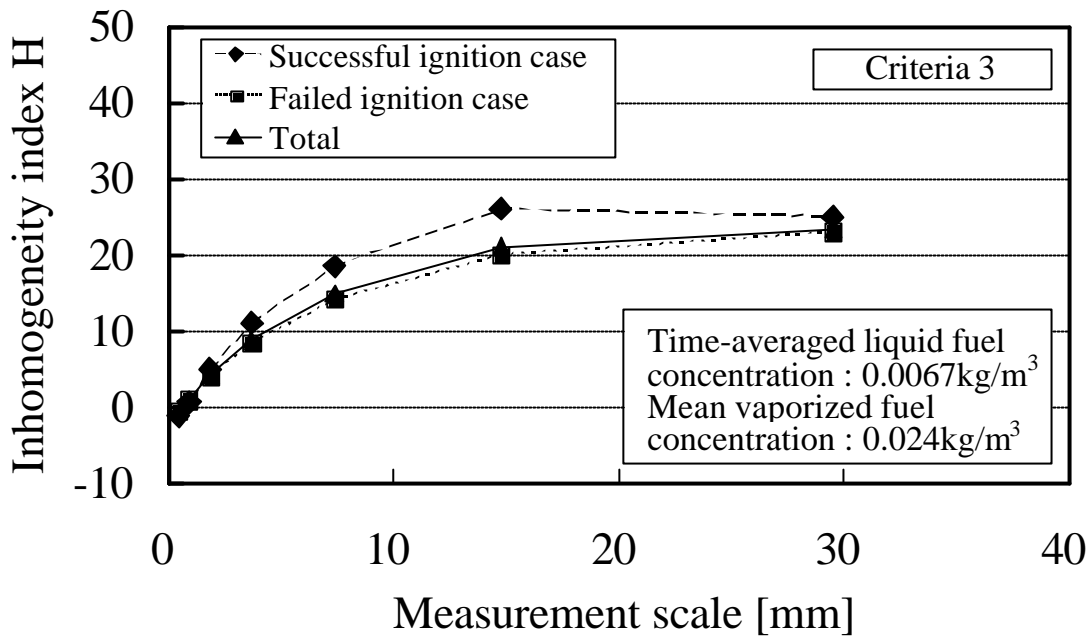


図 5-8 点火試験の結果と燃料噴霧の不均一性の関係

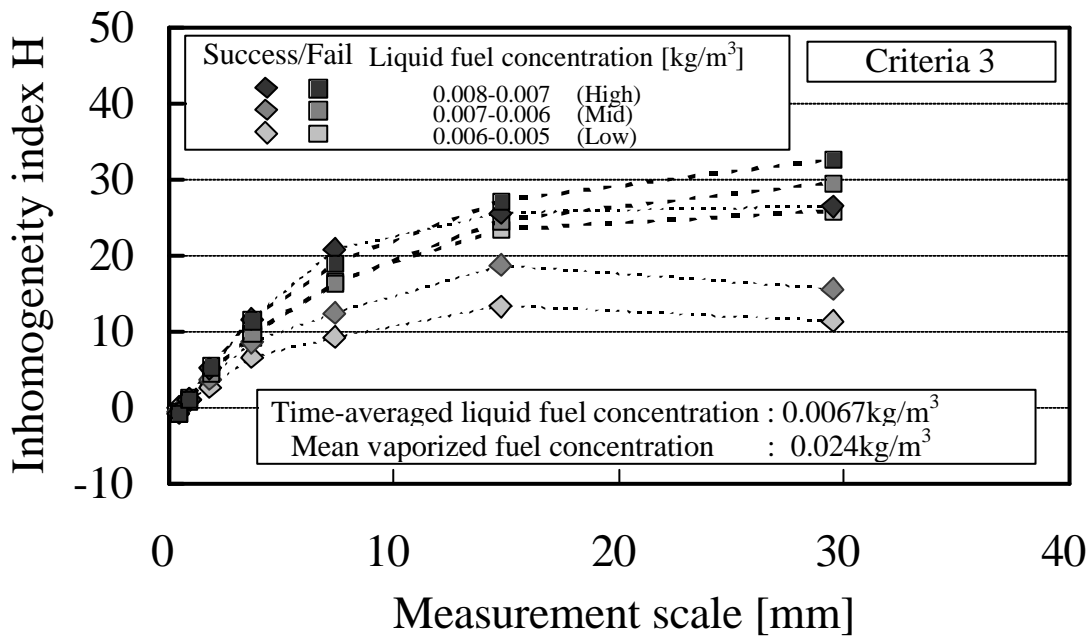


図 5-9 点火の瞬間の燃料噴霧濃度と不均一性および着火性の関係

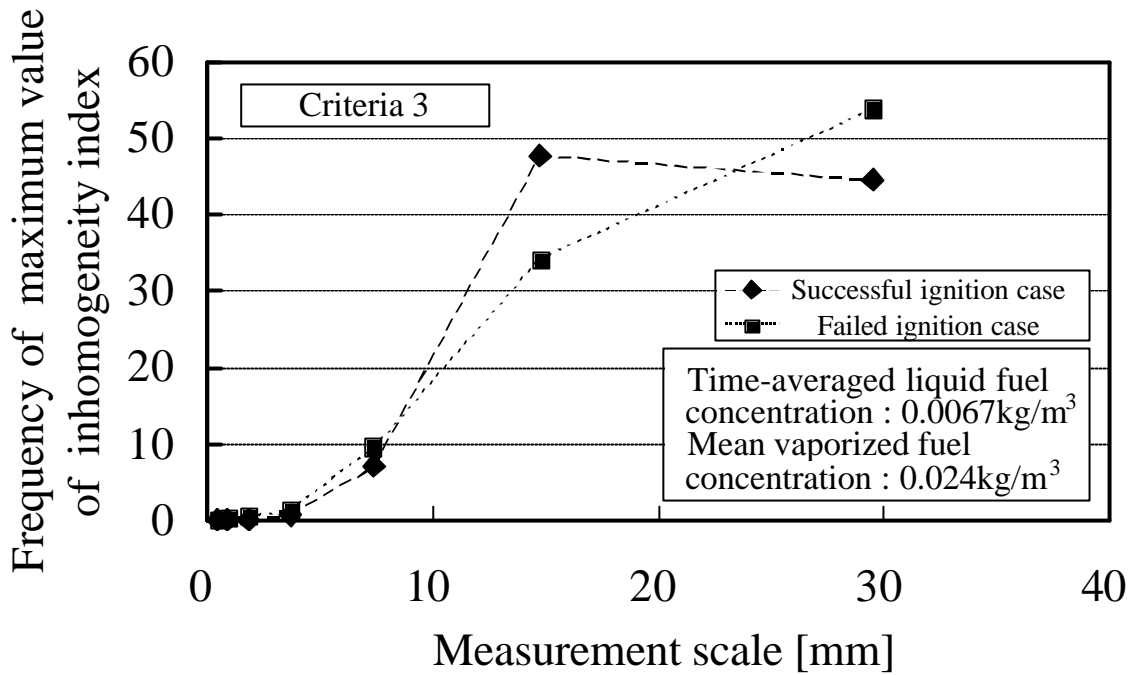


図 5-10 点火試験の結果による燃料噴霧の特徴スケールの違い

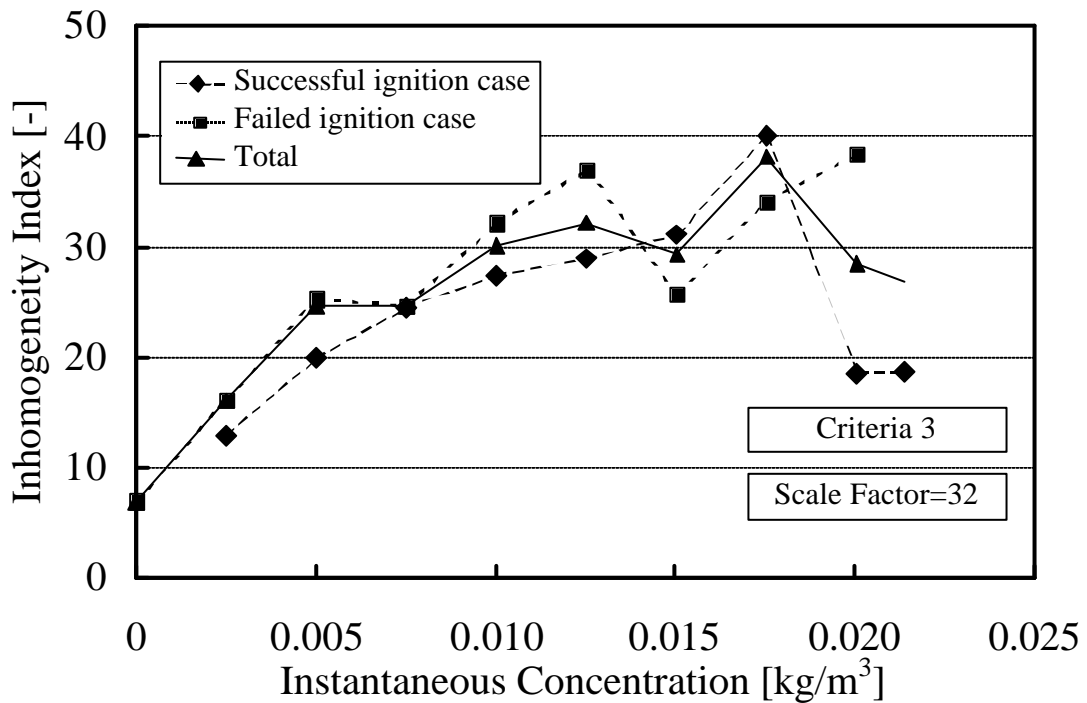


図 5-11 点火の瞬間の燃料噴霧濃度による不均一性の変化

第 4 章 燃料噴霧の不均一性評価法の検討	58
4.1 はじめに.....	58
4.2 燃料噴霧の不均一性の評価方法.....	58
4.2.1 燃料噴霧濃度の標準偏差および相対標準偏差を用いた空間的不均一性の評価方法.....	60
4.2.2 CZAINSKI らによる空間的な不均一性の評価方法.....	61
4.3 各評価手法の比較方法.....	62
4.3.1 乱数を用いた不均一性評価手法の比較.....	62
4.3.2 実噴霧による不均一性評価手法の比較.....	62
4.4 実験装置および実験方法.....	62
4.5 結果および考察.....	63
4.5.1 乱数を用いた場合の不均一性評価指標の変化.....	63
4.5.2 実噴霧による評価.....	63
4.6 本章のまとめ.....	64
第 4 章参考文献.....	65

第 4 章 燃料噴霧の不均一性評価法の検討

4.1 はじめに

燃料噴霧の着火性が確率的であることは、前章においても述べたとおりであるが、この確率的な着火の原因のひとつと考えられる燃料噴霧の空間的な不均一性の影響を明らかにするために、まず燃料噴霧の点火直前の瞬間写真を元に、燃料噴霧の空間的な不均一性を評価する方法を検討した。

4.2 燃料噴霧の不均一性の評価方法

第 1 章においても示したが、近年、Chiu ら⁽¹⁾による群燃焼仮説が、燃料噴霧の燃焼現象を記述する仮説として議論されている。本研究は燃料噴霧の燃焼現象でなく着火現象を取り扱ってはいるが、放電により火炎が形成された後の、火炎伝ばの過程においては、噴霧燃焼現象と同様に群燃焼仮説を考慮する必要がある。群燃焼仮説においては、噴霧塊(クラスタ)に発生した火炎がその後に至る燃焼形態を群燃焼指数 G を用いて分類することが可能である。

$$G = 0.15Le \cdot n_{cluster}^{2/3} / S \quad (1)$$

$$S = (L/10d)/(1+0.276Sc^{1/3} Re^{1/2}) \quad (2)$$

ただし

- $n_{cluster}$: クラスタに含まれる液滴の総数
 S : 無次元液滴間距離
 L : 液滴間距離

また群燃焼理論は以下の様な仮定に基づいている。

- ・噴霧クラスタは球形で、静止雰囲気中に存在する(噴霧液滴は一樣な速度を持つ)。
- ・噴霧クラスタにおいて、噴霧液滴径は均一である。
- ・群火炎は非常に薄いシート状に形成される(化学反応速度が十分速い)。

この様に、群燃焼仮説は非常にモデル化された場における理論なため、現実の燃焼場にそのまま適用出来るわけではない。このため実験的見地との比較が行われており、近年、赤松らの実験結果に基づき⁽²⁾、蒸発に関する修正係数 C_{dd} を導入した修正群燃焼指数 G' も提案されている。

$$G' = C_{dd} G \quad (3)$$

この修正係数は、燃料噴霧の蒸発時における相互干渉による蒸発抑制効果を考慮するものである。 C_{dd} は Chiu らにより解析的に定められている⁽³⁾が、本研究ではその概念を元に不均一性を評価する指標を定める事を目的とし、群燃焼仮説をそのまま解析法として採用するのではないため、 C_{dd} に関する詳細な説明は省く。

群燃焼指数は、 $Le=1$ で、噴霧と周囲空気との相対速度が無いと仮定した場合、以下の様に簡略化することが可能である。

$$G = \frac{1.5n_{cluster}^{2/3}}{L/d} \quad (4)$$

さらに、クラスタ内の噴霧数密度 $N_{cluster}$ およびクラスタ体積 $V_{cluster}$ をそれぞれ定義すると、式(4)は以下の様に変換することが出来る。

$$G = 1.5V_{cluster}^{2/3} dN_{cluster} \quad (5)$$

または、燃料噴霧濃度 W_l を用いれば、

$$G = \frac{9}{\rho r_l} \cdot \frac{V_{cluster}^{2/3} W_l}{d^2} \quad (6)$$

ただし、

$$n_{cluster} = V_{cluster} N_{cluster} \quad (7)$$

$$W_l = \frac{\rho r_l d^3 N_{cluster}}{6} \quad (8)$$

したがって、空間的な不均一性にしたがってクラスタが形成され、個々のクラスタが群燃焼に至るとすれば、クラスタの燃焼状態を考慮する上で、噴霧クラスタの濃度と表面積が重要であるといえる。本研究の様に単分散噴霧を用いれば、濃度は液滴の数密度に比例するため、数密度で考慮することが出来る。またクラスタ間で火炎が伝ばしていくため、クラスタ間の距離や配置が問題となる。ただし噴霧中には大小さまざまなスケールの空間的な不均一性が存在し、ひとつの火炎を形成するクラスタを噴霧の分散状態から求めることは容易ではない。そこで本研究では個々のクラスタの状態を定義するのではなく、対象としている噴霧場全体としての空間的な不均一性の度合いを評価することとした。不均一性の評価法の都合から、対象とする場（解析領域）を燃料噴霧の着火性と最も相関性が高いと考えられる点火栓上方の垂直断面とし、この解析領域を均等に分割した複数の領域（セル）の、ある瞬間における粒子数密度の空間的なばらつきを元に不均一性を算出した。この方法を用いることで、ある瞬間に、点火栓近傍に分散しているクラスタの数密度は、不均一性の強さとして表現することが出来る。また特徴的なクラスタの表面積は、燃料噴霧の不均一さを最もよく表すセルの面積で表される。さらにその2倍の面積は、噴霧中に含まれる特徴的な不均一性の周期を表すと考えられるため、平方根を取ることでクラスタ間距離を求めることが出来る。また噴霧粒子の分散状態は不確定でさまざまな分散状態をとり得るため、時間平均的に同一の燃料噴霧においても、粒子数密度の空間的なばらつきはある程度のばらつきを持つが、このような値を時間平均的に同一の燃料噴霧において多数

取得し、平均化することで、燃料噴霧の平均的な空間的不均一性を求めることができる。

燃料噴霧の不均一性は、噴霧と周囲空気との混合によって形成されるため、空間的な不均一性はある特徴的なスケールをもったものになると考えられる。しかし噴霧燃焼などの数値計算では、さまざまな制約条件から、噴霧の空間的な分散が確率的に一樣(ランダム)であるとした場合が多い。そこで、ランダムな状態を基準として、不均一な度合いを定量的に表現する手法が必要である。

4.2.1 燃料噴霧濃度の標準偏差および相対標準偏差を用いた空間的不均一性の評価方法

燃料噴霧の空間的な不均一性を燃料噴霧の解析領域を等しく分割した場合の各分割領域(セル)内の燃料噴霧粒子数の標準偏差および相対標準偏差を用いて評価する。本研究の場合は粒度分布が狭いため、以下の式で、各点火試験ごとの標準偏差 SD および相対標準偏差 RSD を計算し解析を行った。

$$RSD = \frac{SD}{n/k} \quad (9)$$

$$SD = \sqrt{\frac{m}{k-1}} \quad (10)$$

$$m = \sum_{i=1}^k \left(n_i - \frac{n}{k} \right)^2 \quad (11)$$

ただし、

- | | | |
|-------|---|-----------------------------------------|
| m | : | 解析領域内において各セル内に存在する粒子数の、
平均値からの偏差の二乗和 |
| n | : | 解析領域内の総粒子数 |
| n_i | : | i 番目のセルに含まれる粒子数 |
| k | : | セルの総数 |

また、本研究で評価の対象とする噴霧の不均一性のスケールは、液滴径に比べ十分大きいため、液滴を点として取り扱った。

上記の式は、各セルに含まれる粒子数を元に、相対標準偏差を求めており、粒子数密度の標準偏差および相対標準偏差ではないが、両者は共に、粒子数の相対標準偏差に比例する。また本実験の場合は液滴径の均一度が高いため、燃料噴霧濃度の標準偏差および相対標準偏差についても、噴霧粒子数の相対標準偏差にほぼ比例する。

相対標準偏差はセルの大きさによって変化するため、燃料濃度の不均一性と共に評価したスケール(セルの大きさ)も示す必要がある。この評価法を用いた場合、すべての噴霧粒子が等距離で分散し、完全に一樣に分散している様な完全に均一な状態を基準として、どの程度不均一かを示すことができる。

4.2.2 CZAINSKI らによる空間的な不均一性の評価方法

燃料噴霧に限らず自然現象は必ず不均一性を持ち，確率的に一様な状態（ランダム）に帰結するため，完全に一様な状態を基準として考えることが適当でない．そこで本研究では，CZAINSKI らが提案した，分散相の 2 次元的な分散状態をランダムな状態を基準として噴霧粒子の空間的な分散性を示す不均一指数 $H^{(4)}$ を利用して評価を行った．本来，本評価指標は，評価領域を分散層の大きさに関係なく小さく分割し各セル内に存在する分散層の面積を用いて評価するため，液滴を点として扱うことは，本来は正しくないが，前項と同様に，分割するセルの大きさに対して液滴が十分小さく，また液滴径は等しいため，液滴を点として扱い，液滴の個数を用いて以下の様に不均一指数を求めた．

$$H = \frac{h-1}{s_{h,random}} \quad (12)$$

$$h = \frac{m}{m_{random}} \quad (13)$$

$$m_{random} = n(k-1)/k \quad (14)$$

$$s_{h,random} = \sqrt{\frac{2(n-1)}{n(k-1)}} \quad (15)$$

ただし，

- h : 不均一度（ランダムな状態においてとりえる粒子数の分散の幅を考慮しない）
- m : 解析領域内の各セル内に存在する粒子数の，平均値からの偏差の二乗和(4.2.1における m と等しい)
- $s_{h,random}$: 粒子が二項分布にしたがい，ランダムに分散している場の h の標準偏差
- m_{random} : 粒子が二項分布にしたがい，ランダムに分散している場合の m の理論値

不均一指数は概念的には，解析領域内において各セルに含まれる粒子数の平均粒子数からの偏差の二乗和を噴霧粒子がランダムに分散している場合における偏差の二乗和の平均値および標準偏差により，粒子が解析領域内にランダムに分散している場合，多数回の測定を行うと不均一指数の平均値は 0 となり，標準偏差は 1 となるように標準化したものである．ランダムな分散状態においては，各セル内に含まれる粒子数の確率密度分布は二項分布にしたがうため，偏差の二乗和の平均値および標準偏差を確率論により解析的に求めることができる．

このように不均一指数は，ある瞬間における粒子の空間的な不均一性の強度をランダムな場合を基準として標準化して示すため，解析領域内の粒子数に依存せず，ある瞬間における解析領域内の粒子の分散状態がランダムとみなせる状態の場合は，不均一指数は 0 となり，

またある瞬間、噴霧粒子が局所的に密集しており、解析領域内の分散状態がランダムに比べ不均一な場合は0より大きく、反対に非常に一様に拡散しておりランダムに比べ均一な場合は0より小さくなる(図 4-1 参照)。不均一指数も相対標準偏差と同様にセルの大きさが評価スケールとなるが、各評価スケールにおいてランダムな状態を基準として不均一性の強度を示すため、評価スケールによらず不均一性の強度を比較することができる。図 4-2 に示すとおり評価スケールが噴霧粒子群のスケールと一致すると、不均一指数は最大値をとる。

4.3 各評価手法の比較方法

4.3.1 乱数を用いた不均一性評価手法の比較

噴霧粒子がランダムに分散した状態を評価した場合、燃料噴霧濃度の標準偏差や、相対標準偏差を用いた場合、評価スケールを定めるとその結果としてどのような値をとるかは、解析的に求めることが可能である。また不均一指数は、ランダムな場においては0という値をとると定義されているが、この点を確認するため、ランダムな場において各評価法によって得られる値を比較した。ただし実現象においてランダムな状態を得ることは非常に困難である。そこで乱数を用い、数値計算的に噴霧濃度の空間的な分散状態がランダムな場を設定し、各評価法により評価した。

4.3.2 実噴霧による不均一性評価手法の比較

実際に生成した単分散燃料噴霧の不均一性を評価した。混合管内において噴霧された単分散メタノール噴霧の瞬間撮影結果を元に、空間的な不均一性を前述の SD (噴霧数密度の標準偏差)、 RSD (噴霧数密度の相対標準偏差)、および H (不均一指数)を用いて表現した。本研究においては、実験装置上の都合から、解析対象は噴霧群中の奥行き 3mm のシート状断面とし、2次元的な不均一性の評価を行った。

4.4 実験装置および実験方法

実験装置は瞬間撮影を行うため、正方形断面で4面に観測窓を持つ混合管を用いた(図 4-3 参照)。噴霧の時間平均燃料噴霧濃度は PDPA を、任意の瞬間における噴霧の濃度および空間的な分散状態は瞬間画像撮影装置を用いてそれぞれ測定した。本実験では燃料噴霧濃度をより精密に測定するため、第2章に示したグリセリン水溶液を用いた PDPA の捕集率検定を行った。本実験では噴霧の点火を行う必要が無いことから、実験装置下方に点火電極は設置したままであるが、点火は行わなかった。

第2章に示した通り噴霧場を調整した後、燃料噴霧の瞬間撮影を行った。本研究における実験条件を表 4-1 に、また粒度分布を図 4-4 にそれぞれ示す。これらは第6章において点火試験に用いた燃料噴霧の生成条件に等しい。本実験で使用した単分散噴霧は第1章で定義した単分散噴霧の基準を満たしており、完全に均一では無いものの、同じ条件において振動子の振動を停止させた場合に比較すると、粒子径の均一性は非常に高い。

4.5 結果および考察

4.5.1 乱数を用いた場合の不均一性評価指標の変化

各評価指標の特性を調べる基準として、解析範囲に確率的に様に液滴が分散した状態を、乱数を用いて数値計算的に再現し、その結果を各評価指標で示した。図 4-5 は、粒子がランダムに分散した状態を SD を用いて評価した結果で、図 4-5(a)は横軸に評価スケールをとり、解析領域内の総粒子数別に示したもので、図 4-5(b)は、横軸に総粒子数をとり、各評価スケールごとに示したものである。また SD のばらつきを標準偏差を用いて同様に図 4-6 に示す。さらに RSD について同様に図 4-7 および図 4-8 に示す。

式(10)で表される SD は、粒子がランダムに分散している場合には式(14)より

$$SD_{random} = \sqrt{\frac{n(k-1)/k}{k-1}} = \sqrt{n/k} \quad (16)$$

したがって SD_{random} は粒子数の平方根に比例し、また解析領域内の分割数である k は評価スケールの 2 乗に反比例するため、 SD_{random} は評価スケールに対して比例して増加し、またその際の SD のばらつきは中央値を SD_{random} とした正規分布となると考えられるため、 SD_{random} と同様に、粒子数の平方根および評価スケールに比例して増加すると考えられる。

また同様に RSD は式(9)より、

$$RSD_{random} = \frac{SD_{random}}{n/k} = \sqrt{n/k} \cdot k/n = \sqrt{k/n} \quad (17)$$

となる。したがって RSD_{random} は、粒子数および k の平方根に反比例する評価スケールに対して反比例する。また RSD_{random} のばらつきは SD_{random} を n/k で除したものとなる。図 4-5 から図 4-8 において、 SD および RSD は前述のとおり変化している事がわかる。

次に不均一指数で粒子がランダムに分散している場合を評価した結果を図 4-9 および図 4-10 に示す。ランダムな分散状態では、粒子数や評価スケールにかかわらず、不均一指数 0 の値をとり、またそのばらつきも一定で 1 となっている。このことは、 SD および RSD がランダムな分散状態というものを考慮しないためであるが、不均一指数が他の指標に比べ、ランダムな状態を基準として場の不均一性を表現するのに適切であることを示している。

4.5.2 実噴霧による評価

表 4-1 に示した 時間平均燃料噴霧濃度が異なる条件 1(Condition1)および条件 2(Condition2) についてそれぞれ不均一性を求め、評価した。全測定について平均した SD (各セル内の粒子数の標準偏差) および RSD (各セル内の粒子数の相対標準偏差) を図 4-11 に、不均一指数を図 4-12 にそれぞれ示す。図の横軸は評価スケールで、分割したセルの一辺の長さを表している。評価スケールが大きくなるにしたがい、各セルに含まれる粒子数が増加し平均値が高くなるため、それに伴い SD は増加する。 RSD はその様な影響を平均値で除すことで取

り除いているため、この影響を受けない。しかし評価スケールが大きくなることで各セルに含まれる粒子数は平均値に近くなるため、 RSD は減少する。したがって SD や RSD では、評価スケールが異なる場合の不均一性の強さを比較することは出来ない。一方、不均一指数は前述の通り評価スケールが異なっても比較することが可能である。本研究で用いた燃料噴霧は、評価スケールが小さい場合の不均一指数の値は0に近いこと、小規模なむらはランダムに近い状態で存在しているが、評価スケールが大きい場合は不均一指数の値が高いことより、大規模なむらが、ランダムな状態よりも明確に存在している事がわかる。また評価スケールの大きい範囲では、不均一指数の値の変化が小さく、したがってこの範囲の規模のむらは同程度に存在しているといえる。また、条件2に比べ、条件1の噴霧は不均一指数が大きいことより、条件1の噴霧は条件2に比べより不均一性が高い。

一方、瞬間噴霧濃度による不均一性の変化を調べた結果を図4-13および図4-14に示す。図4-13は、評価スケールを約30mmとした場合の、瞬間噴霧濃度の相対標準偏差の変化を示し、図4-14は不均一指数の変化を示す。図中、グレーの部分は、特にデータ数が少なく信頼性が低いと思われる。濃度別に整理したため、各プロットの値は母集団の減少によりばらつきを持ち、特に瞬間噴霧濃度が高い範囲での比較は難しいが、噴霧濃度の増加とともに相対標準偏差は低下し、不均一指数は増加する傾向にある。これは瞬間噴霧濃度の増加により解析領域内の粒子数が増加するため、絶対的な粒子数は平均化され、したがって相対標準偏差は低下するが、その低下する割合は粒子がランダムな配置の場合に比べ低いことを表しているといえる。

これらの結果より、燃料噴霧中において、液滴は必ずしも一様に分散しているわけではないことが明らかになった。このことは、第3章で行った確率論的な解析の前提が、必ずしも成立するものではないことを意味する。したがって第3章の様なランダムに分散していることを前提とした解析では、燃料噴霧の着火現象を詳細に表すことは出来ず、実際に点火を行う瞬間の燃料噴霧を観察し、本章で示した様な、不均一性を表す新たな指標を導入して、不均一性を評価することが必要である。

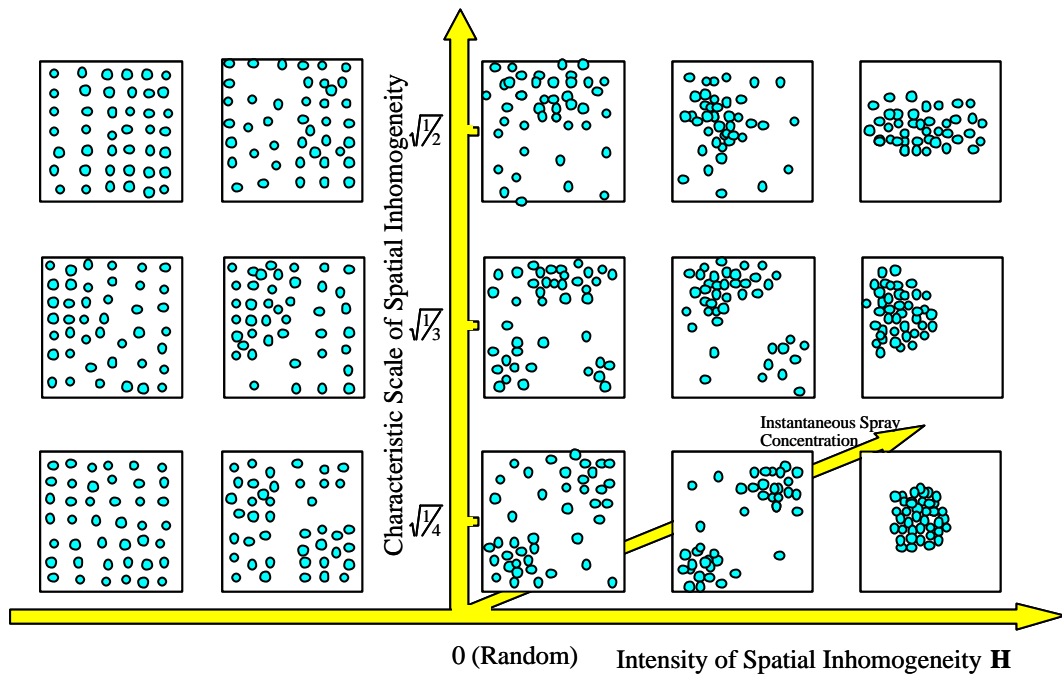
4.6 本章のまとめ

燃料噴霧の着火現象が確率的である原因のひとつとして考えられる燃料噴霧の空間的な不均一性の影響を明らかにするため、燃料噴霧の空間的な不均一性を評価する方法を検討した。群燃焼の仮説を元に、噴霧火炎を評価するためのパラメータを考察し、燃料噴霧の数密度のばらつきと、そのばらつきのスケールから評価することとした。また燃料噴霧は最終的にランダムな分散状態へ遷移することを考え、前述の方法で得た不均一性をランダムな状態を基準として表現する方法を関連研究より定め、合わせて燃料噴霧の不均一性の評価に用いた。

噴霧中において、液滴は必ずしもランダムに分散しているわけではなく、本研究で用いた燃料噴霧はランダムに比べ不均一性が強かった。このことは、前章において行った確率論的な解析の前提が、必ずしも成立するものではないことを意味し、したがって実際に点火を行う瞬間の燃料噴霧を観察し、不均一性を評価する必要があることを示唆している。

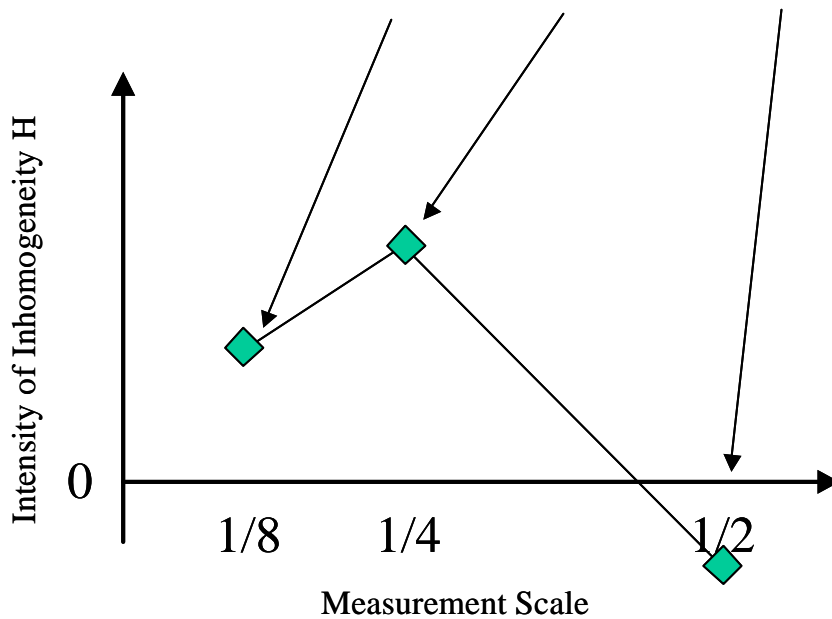
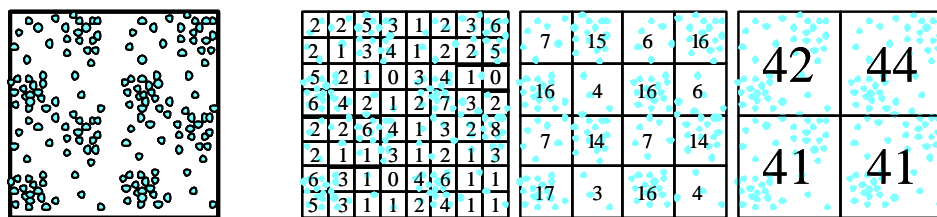
第 4 章参考文献

- (1) Chiu,H.H., Kim,H.Y., and Croke,E.J., Internal Group Combustion of Liquid Droplets, Nineteenth Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute (1982), p.971-980
- (2) 赤松 史光, 水谷 幸夫, 香月 正司, 津島 将司, 趙 庸大, 予混合噴霧流の油滴群 燃烧挙動と群燃烧数, 日本機械学会論文集(B 編), 62-596(1996-4), p,342-348
- (3) Chiu,H.H. and Su,S.P., Theory of Droplets (II): Status, Structures and Laws of Interacting Droplets, Atomization and Sprays, Vol.7 (1997). p.1-32
- (4) Czainski,A., Grancarek,Z., and Piasecki,R., Quantitative Characterization of Inhomogeneity in Thin Metallic Films Using Grancarek'S Method, J. Phys. D: Appl Phys. 27 (1994), p.616-622



Characteristic scale: Measurement scale of when H becomes maximum value.

図 4-1 不均一指数による不均一性の評価



Measurement scale: Side length of each cell

図 4-2 噴霧のむらのスケールと評価スケールの関係による不均一指数の値の変化

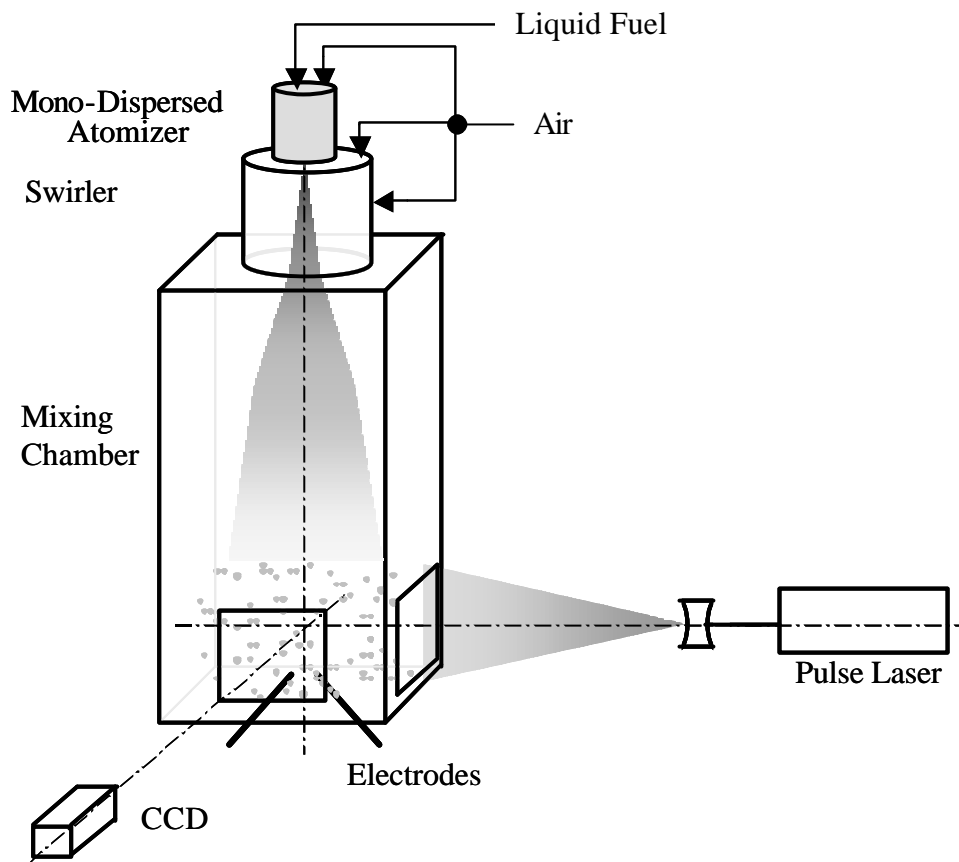


图 4-3 实验装置概要图

表 4-1 实验条件

Ex peri ment	Condition 1	Condition 2
Fuel	Methanol	
Droplet diameter	D_{32} : 127 μm (D_{10} : 123 μm)	
Average spray velocity	0.55-0.6 m/s	
Average air velocity	0.2 m/s	
Time-average fuel spray concentration	0.0060 kg/m^3	0.0042 kg/m^3
Temperature/Pressure	Atmospheric temperature / Atmospheric pressure	
Laser sheet	Vertical plane, Thickness: 2mm, Pulse-width: <25nsec	
Image / Analysis area	76 × 71 / 60 × 60(W × H mm), Upper side of electrodes	
Trial	About 300 times for each condition	

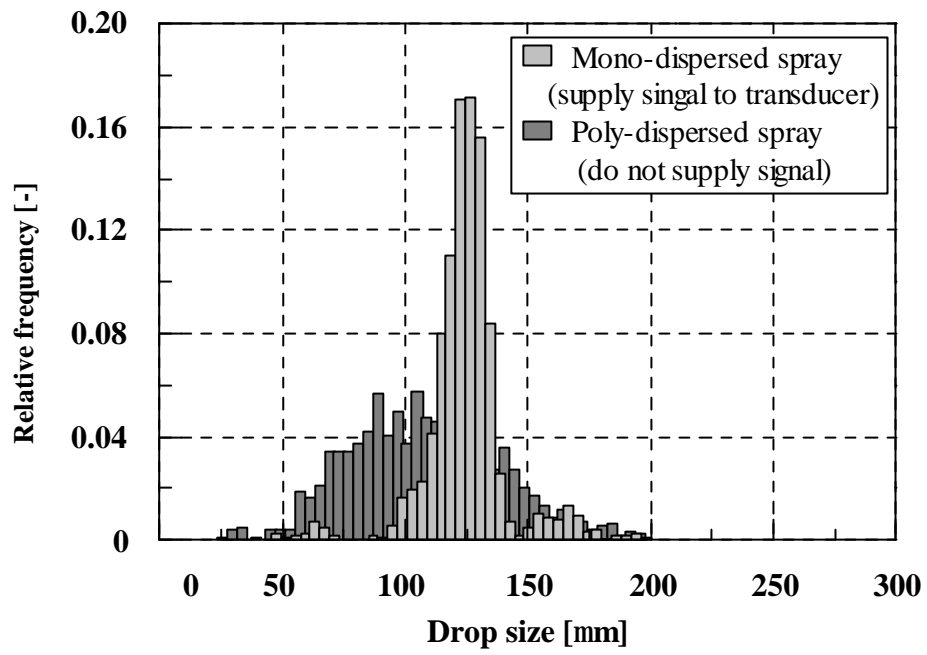
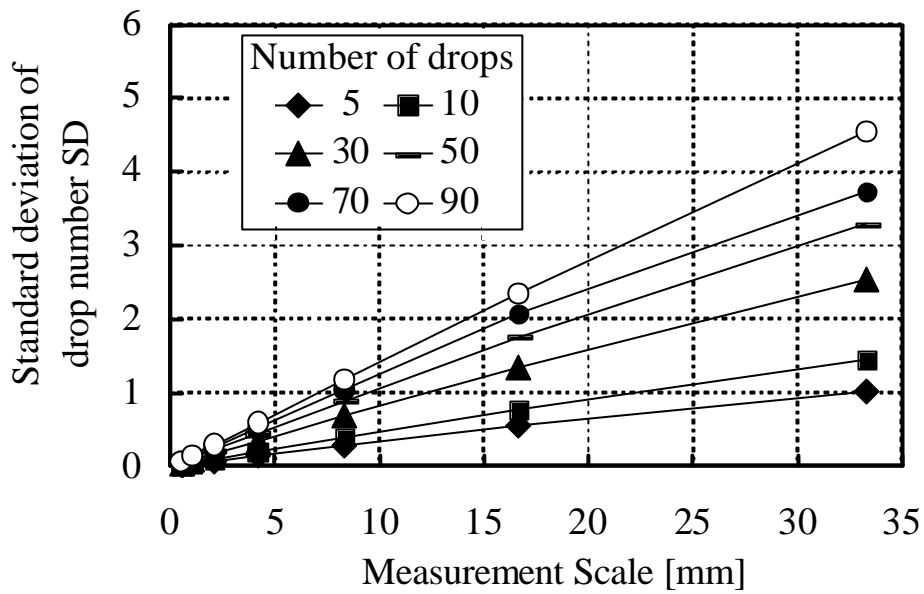
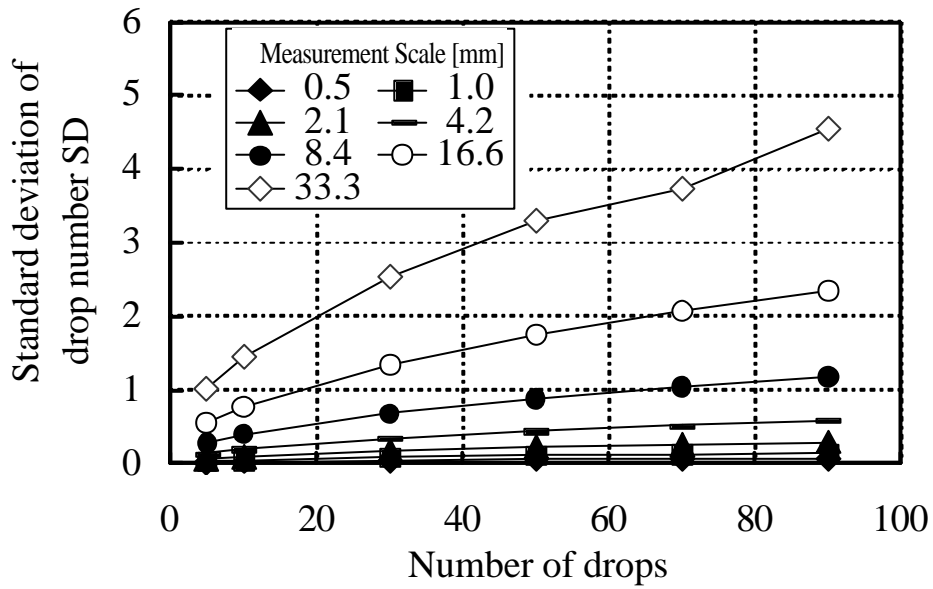


図 4-4 燃料噴霧の粒度分布

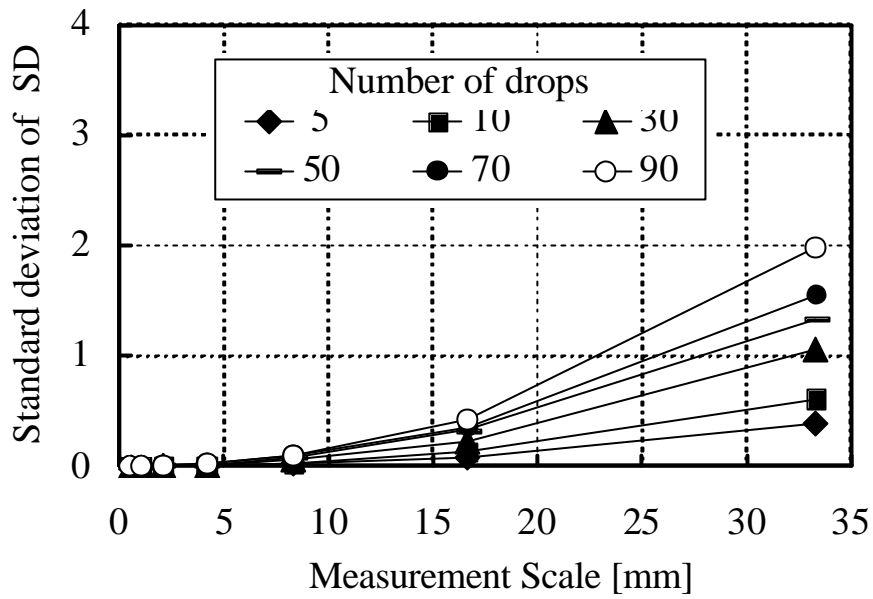


(a) 評価スケールによる変化

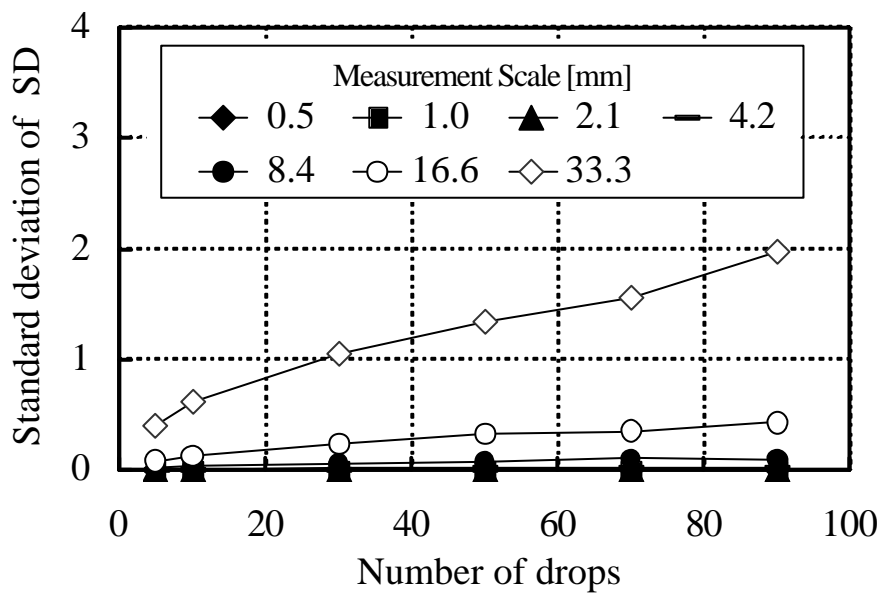


(b) 粒子数による変化

図 4-5 粒子数の標準偏差によるランダムな分散状態の評価

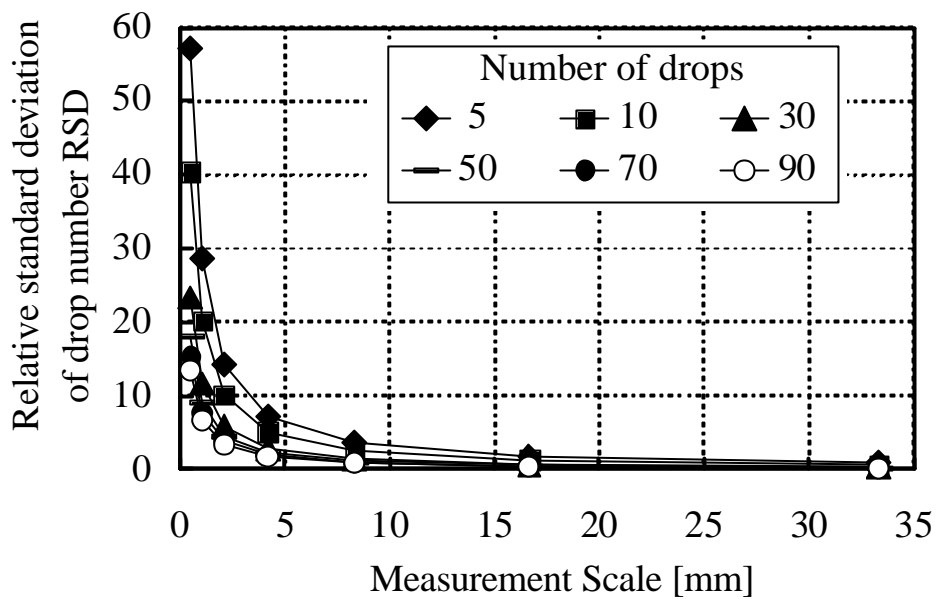


(a) 評価スケールによる変化

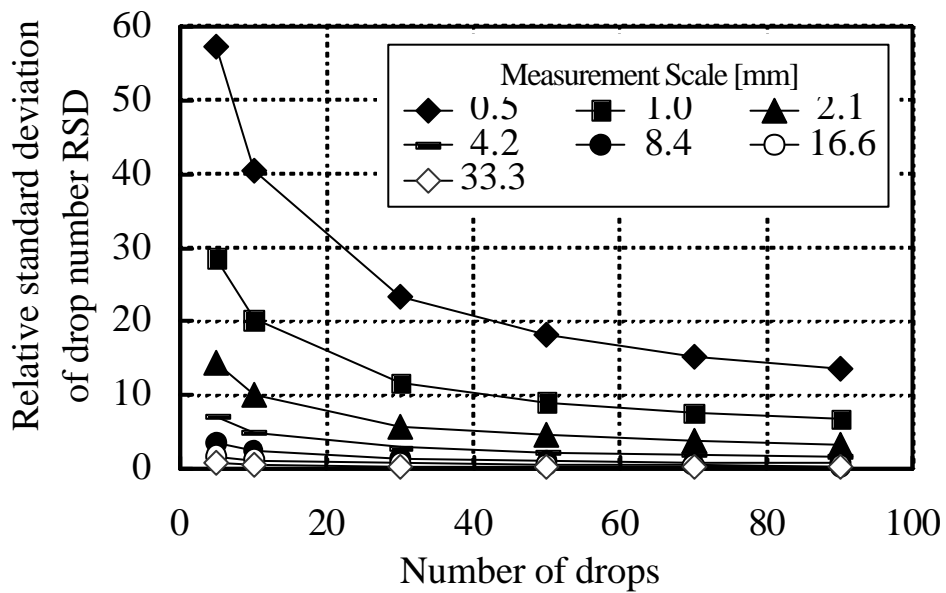


(b) 粒子数による変化

図 4-6 ランダムな分散状態における粒子数の標準偏差のばらつき

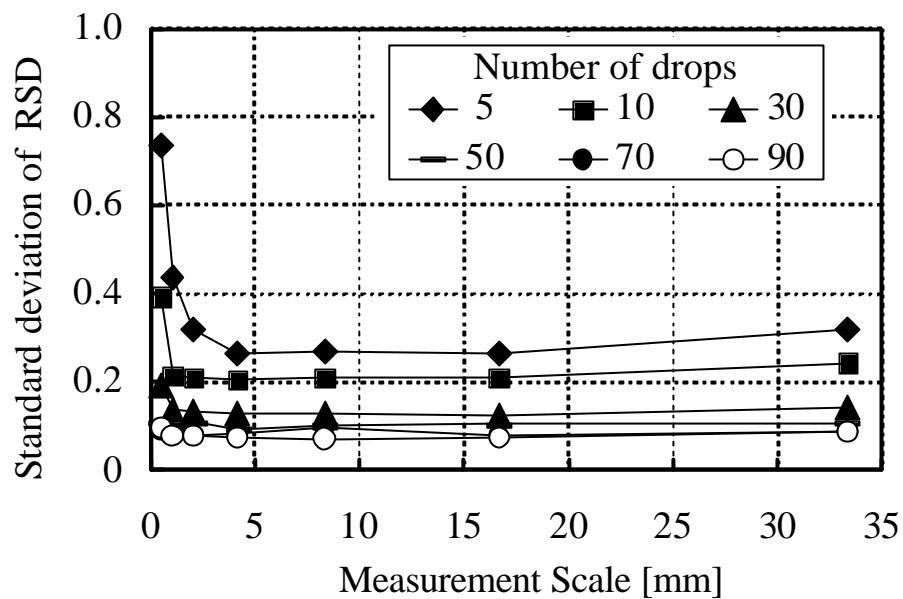


(a) 評価スケールによる変化

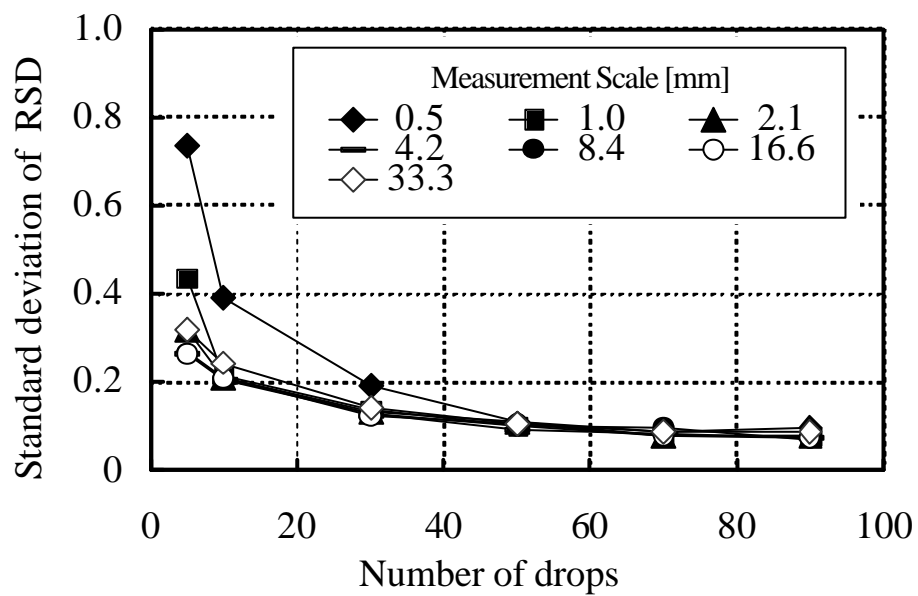


(b) 粒子数による変化

図 4-7 粒子数の相対標準偏差によるランダムな分散状態の評価

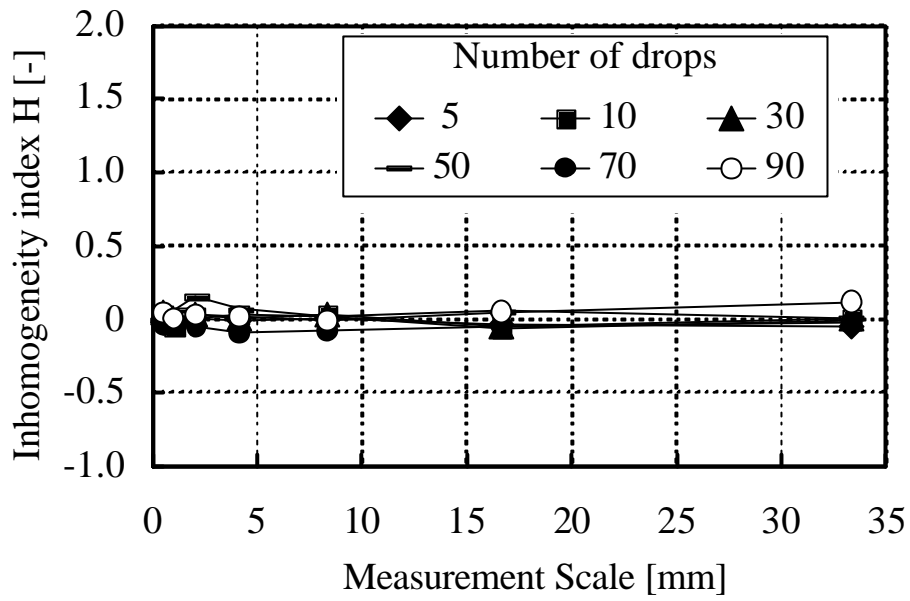


(a) 評価スケールによる変化

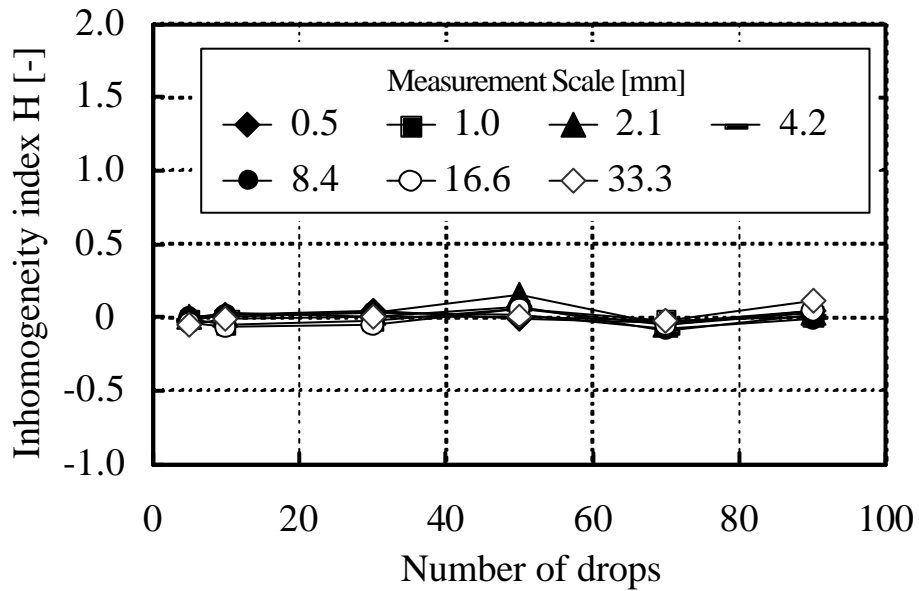


(b) 粒子数による変化

図 4-8 ランダムな分散状態における相対標準偏差のばらつき

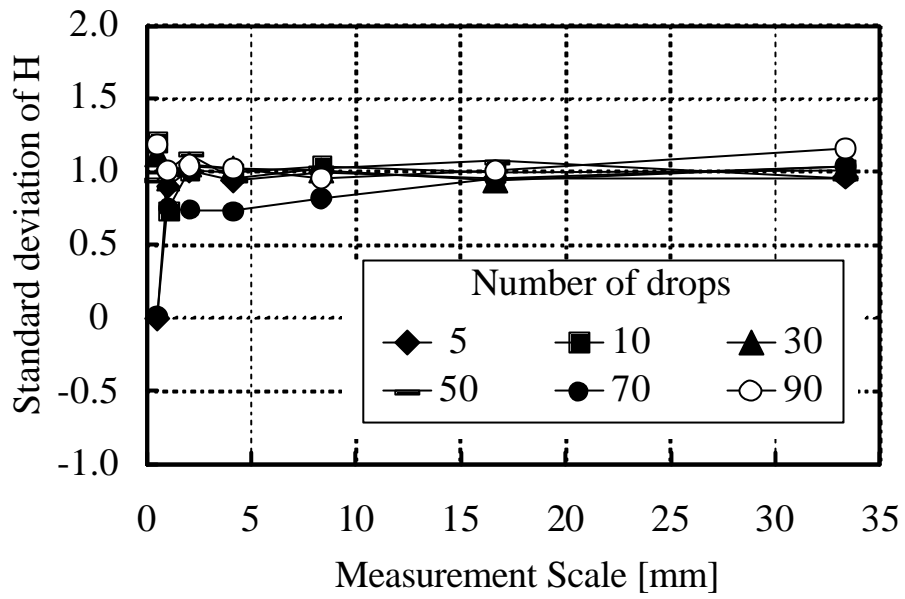


(a) 評価スケールによる変化

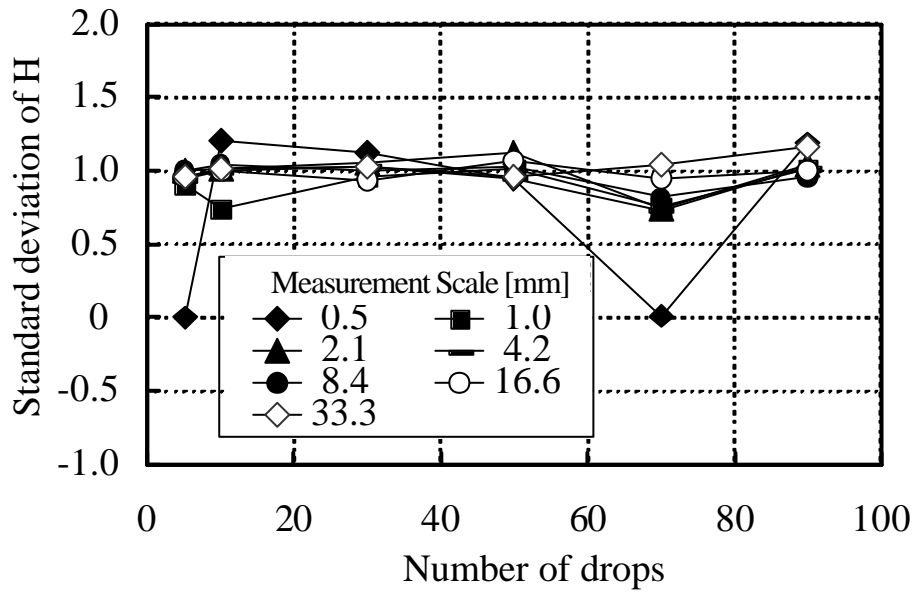


(b) 粒子数による変化

図 4-9 不均一指数によるランダムな分散状態の評価



(a) 評価スケールによる変化



(b) 粒子数による変化

図 4-10 ランダムな分散状態における不均一指数のばらつき

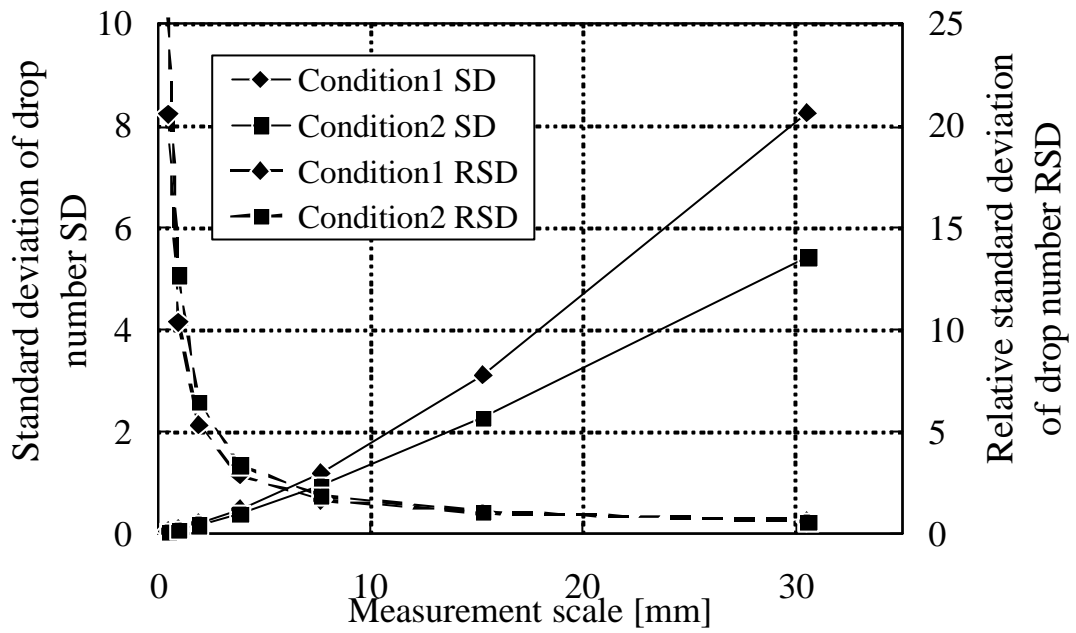


図 4-11 燃料噴霧数密度の標準偏差および相対標準偏差による不均一性の評価

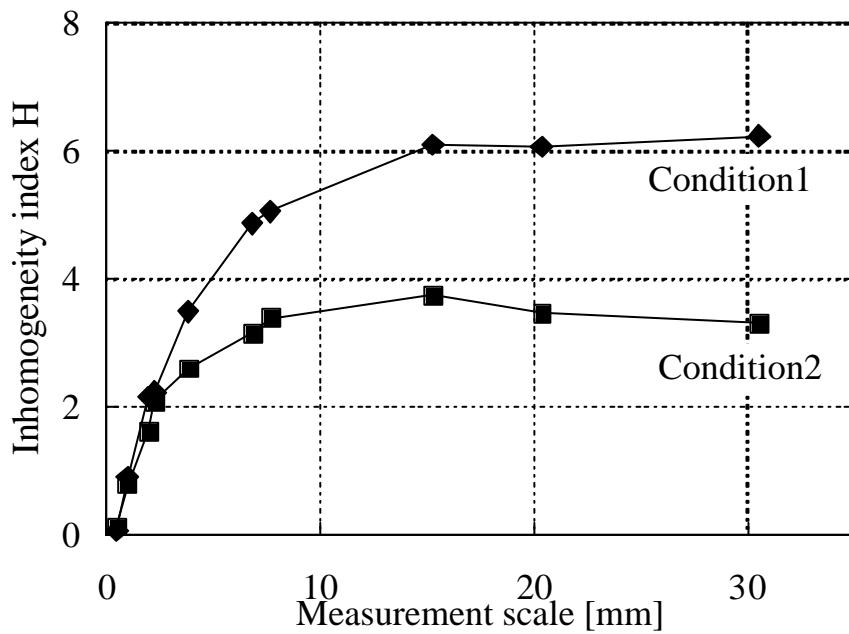


図 4-12 不均一指数による不均一性の評価

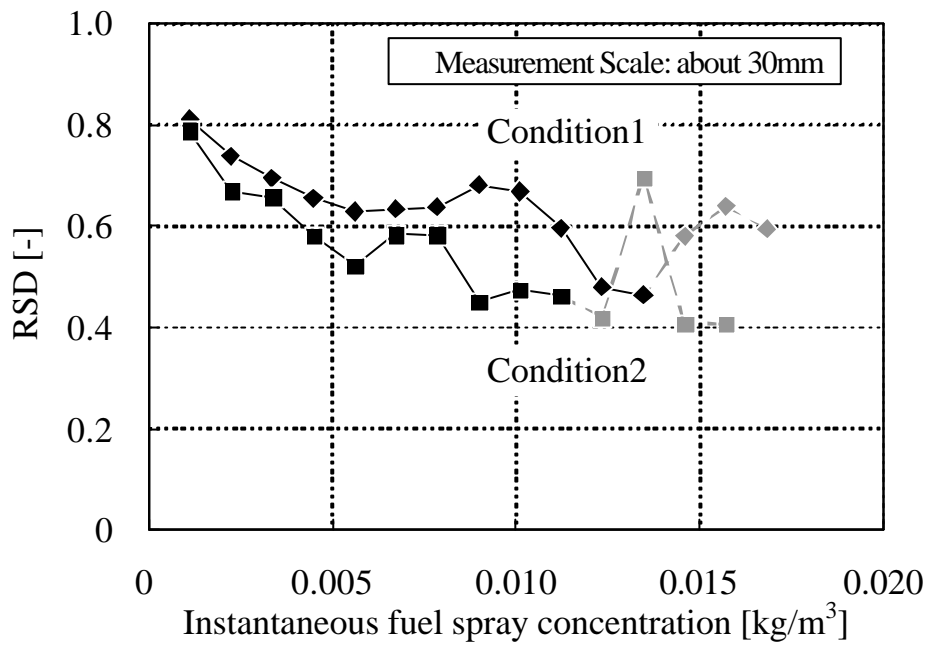


図 4-13 燃料噴霧の瞬間濃度による不均一性の変化(相対標準偏差で表した場合)

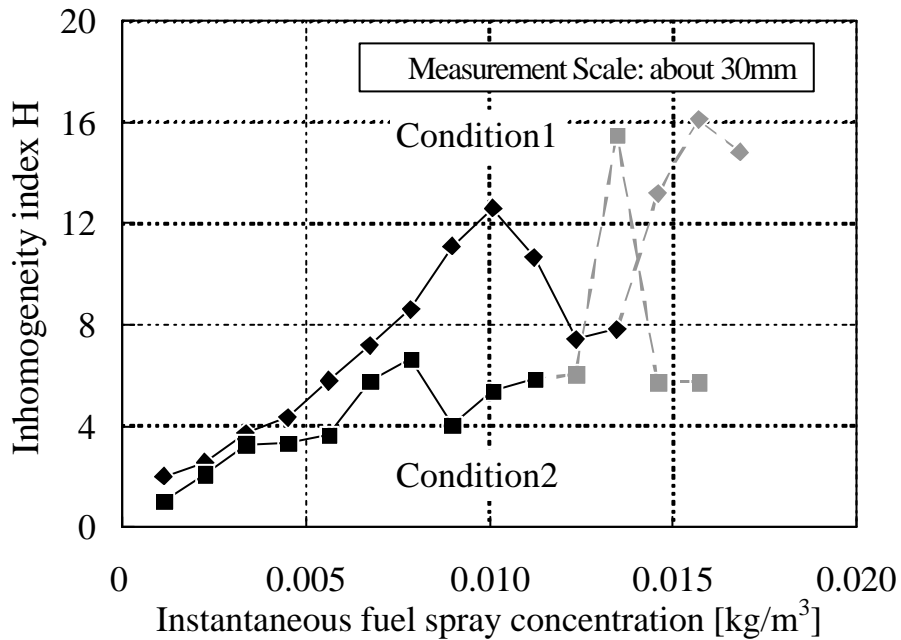


図 4-14 燃料噴霧の瞬間濃度による不均一性の変化(不均一指数で表した場合)

第 6 章 燃料噴霧の不均一性が着火性におよぼす影響.....	90
6.1 はじめに.....	90
6.2 実験装置および実験方法.....	90
6.2.1 実験方法概要.....	90
6.2.2 火炎形態の分類と着火判定.....	90
6.3 結果および考察.....	90
6.3.1 燃料噴霧の不均一性評価.....	90
6.3.2 放電の瞬間の燃料濃度と着火性の関係.....	91
6.3.3 火炎形成過程の計測.....	91
6.3.4 燃料噴霧の不均一性と着火性の関係.....	92
6.4 本章のまとめ.....	93
第 6 章参考文献.....	93

第 6 章 燃料噴霧の不均一性が着火性におよぼす影響

6.1 はじめに

第 5 章において、燃料噴霧の着火性は、噴霧粒子の空間的配置など、放電の瞬間における燃料噴霧の状態に依存することが明らかとなった。また瞬間の燃料噴霧濃度だけでなく、噴霧粒子の空間的な配置なども影響している可能性を示唆した。そこで本章では、前章において定めた空間的な不均一性を表現する不均一指数を用いて着火性におよぼす燃料噴霧の空間的な不均一性の影響を明らかにすることを目的とし、時間平均燃料噴霧濃度の異なる 2 種類の燃料噴霧について、着火試験を行った。また放電により形成された火炎の状態を調べるため、目視と共にマルチチャンネルの静電探針を用いて形成された火炎を測定した。

6.2 実験装置および実験方法

6.2.1 実験方法概要

本実験における実験条件を表 6-1 に示す。本実験では時間平均燃料噴霧濃度の異なる 2 条件の燃料噴霧について点火試験を行った。瞬間撮影により得た画像を解析することで、放電の瞬間における、レーザシート状に存在する噴霧粒子の幾何的な分散状態を第 4 章において説明した不均一指数で評価し、同時に測定した着火の可否と比較することで、燃料噴霧の空間的な不均一性と着火性の関係について明らかにした。またマルチチャンネルのイオンプローブを用い、放電後の火炎の形成過程を観察した。イオンプローブは、第 2 章に示した通り、混合管側面の瞬間撮影装置と反対側の面に設けた観察窓に設置した。

瞬間撮影を行うため、混合管は第 4 および 5 章と同様、正方形断面のものを用いた。また蒸気濃度は第 5 章と同様に、気液同時吸引法を簡略化して用いた。

6.2.2 火炎形態の分類と着火判定

本実験では、第 2 章の火炎形態の分類にしたがい、火炎をその大きさにより目視で分類したが、初期火炎の様な、比較的小さな火炎の存在をイオンプローブが検出できない場合を考慮し、本実験においては着火の可否のみについて着目した。

6.3 結果および考察

6.3.1 燃料噴霧の不均一性評価

条件 1(Condition1)および条件 2(Condition2)の時間平均燃料噴霧濃度が異なる燃料噴霧についてそれぞれ不均一性を求め、評価した。全点火試験について平均した各セル内の粒子数の標準偏差および相対標準偏差を図 6-1 に、不均一指数を図 6-2 にそれぞれ示す。これらの結果は、第 4 章において、噴霧の空間的な不均一性の評価手法を比較するために示したものと同一である。噴霧中に存在する小規模なむらの強度を示す、評価スケールが小さい場合の不均一指数の値は 0 に近いいため、小規模なむらはランダムに近い状態で存在して

いるが、評価スケールが大きい場合は不均一指数の値が高いことより、大規模なむらが、ランダムな状態よりも明確に存在している事がわかる。また評価スケールの大きい範囲では、不均一指数の値の変化が小さく、したがってこの範囲の規模のむらは同程度に存在しているといえる。また、条件2に比べ、条件1の噴霧は不均一指数が大きいことより、条件1の噴霧は条件2に比べより不均一性が高い。

一方 瞬間燃料噴霧濃度の変化に対する不均一性の変化を調べた結果を図6-3および図6-4に示す。図6-3は、評価スケールを約30mmとした場合の、瞬間燃料噴霧濃度の相対標準偏差の変化を示し、図6-4は不均一指数の変化を示す。図中、グレーの部分は、特に点火試験5回以下での平均値で信頼性が低いと思われる部分である。濃度別に整理したため、各プロットの値は母集団の減少によりばらつきを持ち、特に瞬間燃料噴霧濃度が高い範囲での比較は難しいが、燃料噴霧濃度の増加とともに相対標準偏差は低下し、不均一指数は増加する傾向にある。これは瞬間燃料噴霧濃度の増加により解析領域内の粒子数が増加するため、絶対的な粒子数は平均化され、したがって相対標準偏差は低下するが、その低下する割合は粒子がランダムな配置の相対標準偏差に比べ低いことを表しているといえる。

6.3.2 放電の瞬間の燃料濃度と着火性の関係

図6-5に放電の瞬間の燃料噴霧濃度と着火性の関係を示す。全点火試験より求めた平均着火率は、条件1と条件2では時間平均燃料噴霧濃度が異なるため、条件1が65%、条件2が37%と異なった。またこの結果を放電時の瞬間燃料噴霧濃度で整理したところ、どちらの条件においても瞬間燃料噴霧濃度の増加により着火率も増加するが、瞬間燃料噴霧濃度が同一の場合の着火率は異なった。いずれの条件においても、周囲空気特性や燃料蒸気濃度は時間平均的に等しく調整され、また各点火試験は独立なため時間平均的なパラメータが着火率に影響を与えない。したがってこの結果は放電時における燃料噴霧および燃料蒸気の空間的な分散状態などの、不均一さに起因した要因によると考えられる。

6.3.3 火炎形成過程の計測

燃料噴霧の着火現象において燃料蒸気は大きな影響をもつ。また本実験では燃料噴霧からの自然蒸発による燃料蒸気が十分に拡散せず、不均一に混合気中に存在する可能性があるため、平均的な燃料蒸気濃度が希薄着火限界を下回る本研究の様な燃料噴霧混合気であっても燃料蒸気が着火性に影響する可能性がある。この点を確認するため、火炎形成過程を観察した。図6-6(a)(b)に、イオンプローブの出力波形例を示す。(a)は放電電極上方20mmに位置するイオンプローブの計測波形で、(b)は同じく40mmに位置するイオンプローブの計測波形である。また図中の時刻0は放電終了時である。時間の経過とともに、点火栓に近いイオンプローブから遠いプローブへと順に複数のピークを持つ信号が検出された。このうち最初に検出される比較的鋭いピークは、噴霧からの自然蒸発により形成された可燃混合気中を伝ばする予混合燃焼的な火炎を示し、後続のピークは火炎が発する熱によって発生

した蒸気が燃焼した，拡散燃焼的な火炎を示していると考えられる．噴霧燃焼における火炎伝ばに関して，予混合的な燃焼が支配的であるという報告⁽¹⁾をふまえ，本研究では，検出された信号のうち，予混合燃焼的な火炎であると考えられる第1ピークの検出を火炎検出と，またその到達時間を火炎検出時間とそれぞれ定義する．

条件1および条件2で，放電時の瞬間燃料噴霧濃度が $0.004 \sim 0.005\text{kg/m}^3$ の場合のみを抽出して求めた，火炎の大きさの時間変化を火炎検出率および累積火炎検出率を用いて図6-7に示す．点火栓先端と，点火栓に一番近接したイオンプローブ間の距離が約10mmのため，全点火試験のうち，イオンプローブが信号を検出した場合にはほとんどが着火に至った．

両条件において，累積火炎検出率はほぼ同様な増加傾向を示す一方，火炎検出率は500ms程度まではほぼ同じ拡大傾向を示し，その後，それぞれ異なる最大値をとり減少に転じる．ただし，発生した火炎は時間とともに上方へ伝ばし測定領域を外れてしまうため，火炎検出率の減少が必ずしも消炎を示してはいない．また目視判定では，火炎直径が約30mmを超えた場合を着火としたが，これは累積火炎面積が0.1-02程度に相当する．したがって，両条件において，火炎が発生し着火と判定されるまでの間の火炎の変化に大きな差はない．この傾向は，他の燃料噴霧濃度においても同様に観察された．

点火栓の上方40mmに位置するプローブの検出信号中の，第1および第2ピークの時間差の平均を測定し瞬間燃料噴霧濃度で整理した結果を図6-8に示す．横軸が瞬間燃料噴霧濃度で，縦軸が到達時間差である．瞬間燃料噴霧濃度が低い範囲においては，第1，第2ピークを検出する時間差が大きい．これは噴霧が希薄なため，火炎の熱による蒸発で形成された蒸気の連続性が低く，拡散燃焼的な火炎の伝ばが抑制されるためと考えられる．言い換えると，燃料噴霧が希薄な場合は，自然蒸発により形成された可燃蒸気層が存在するなど，拡散燃焼的な火炎による熱エネルギーの供給が弱くても予混合燃焼的な火炎伝ばが可能な状態の場合に着火に至ると考えられる．またこの様に，放電以前に形成された蒸気層の状態が異なる場合は到達時間差が変化すると考えると，図6-8に示すとおり条件1と条件2で到達時間差がほぼ同様な傾向を得られたということは，本研究においては，両者を比較し，燃料噴霧の不均一性の影響を議論するうえで，燃料蒸気の分散状態が影響をおよぼしていないと推定できる．

6.3.4 燃料噴霧の不均一性と着火性の関係

点火試験を瞬間燃料噴霧濃度および結果(着火/不着火)に基づき分類し，解析を行った．放電時の瞬間燃料噴霧濃度が $0.004 \sim 0.005\text{kg/m}^3$ の場合のみを抽出して求めた不均一指数を図6-9に示す．不均一性の高い条件1では着火した場合の不均一性が低く，反対に不均一性の低い条件2においては着火した場合の不均一性が高かった．また両条件での着火した場合の不均一性は，不着火の場合に比べ比較的近い値となった．この結果は，燃料噴霧の着火性において適切な不均一性の強さが存在することを示唆している．これは燃料噴霧濃度が低いため，局所的に形成される燃料噴霧濃度の高い領域が火炎形成および伝

ばに重要な影響を持つ一方、不均一性により燃料噴霧濃度の高い領域とともに低い領域も同時に形成されるため、不均一性が高すぎる場合には放電電極や形成された火炎の周囲に伝ば経路が形成できず、火炎が発生しないか、発生しても伝ばできず消炎に至るためと考えられる。また各瞬間燃料噴霧濃度における不均一指数の最大値の変化を着火および不着火の場合に分類し図 6-10 に示す。燃料噴霧濃度が高い範囲においては、点火試験の回数が少ないこともありばらつきが大きいが、着火に至った際の不均一性は、不着火の場合に比べて低いようである。これは本実験において用いた燃料噴霧では、瞬間燃料噴霧濃度が増加するに伴い不均一性も強くなり、燃料噴霧濃度が十分高い範囲においては、着火に最適な不均一性の強さを超えたためと考えられる。

6.4 本章のまとめ

希薄着火限界付近の燃料噴霧の火花点火による着火現象について、空間的な不均一性の影響に着目し、その影響を解明するため、不均一性が異なる 2 条件の燃料噴霧混合気を生成し点火試験を行った。各点火試験における、放電の瞬間の燃料噴霧粒子の分散状態を不均一指数を用いて評価した結果、時間平均的な燃料蒸気濃度が等しく、かつ放電の瞬間における着火判定を行った領域内の燃料噴霧濃度が等しい場合でも、不均一性が異なれば着火率は異なることが明らかになった。また着火に至った場合の不均一指数の最大値を比較したところ、放電の瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合、ほぼ等しい値となったことより、燃料噴霧の着火現象において、最適な不均一性が存在することが示唆された。

第 6 章参考文献

- (1) 中部 主敬, 水谷 幸夫, 平尾 友之, 火炎発光と油滴ミ-散乱による噴霧火炎と気液混焼火炎の構造観察, 日本機械学会論文集(B 編), 55-516(1989), p.2517-2525

表 6-1 実験条件

Experiment	Condition 1	Condition 2
Fuel	Methanol	
Droplet diameter	D_{32} : 127 μm (D_{10} : 123 μm)	
Average spray velocity	0.55-0.6 m/s	
Average air velocity	0.2 m/s	
Time-average fuel spray concentration	0.0060 kg/m^3	0.0042 kg/m^3
Time-average gaseous fuel concentration	0.032 kg/m^3 (f_g 0.17)	
Temperature/Pressure	Atmospheric temperature / Atmospheric pressure	
Igniter	High-frequency discharged spark system (25KHz, 50ms, 0.8J)	
Electrode	Gap: 3mm, Tip: slant-cut	
Laser sheet	Vertical plane, Thickness: 2mm, Pulse-width: <25nsec	
Image / Analysis area	76 × 71 / 60 × 60(W × H mm), Upper side of electrodes	
Ignition trial	About 300 times for each condition	

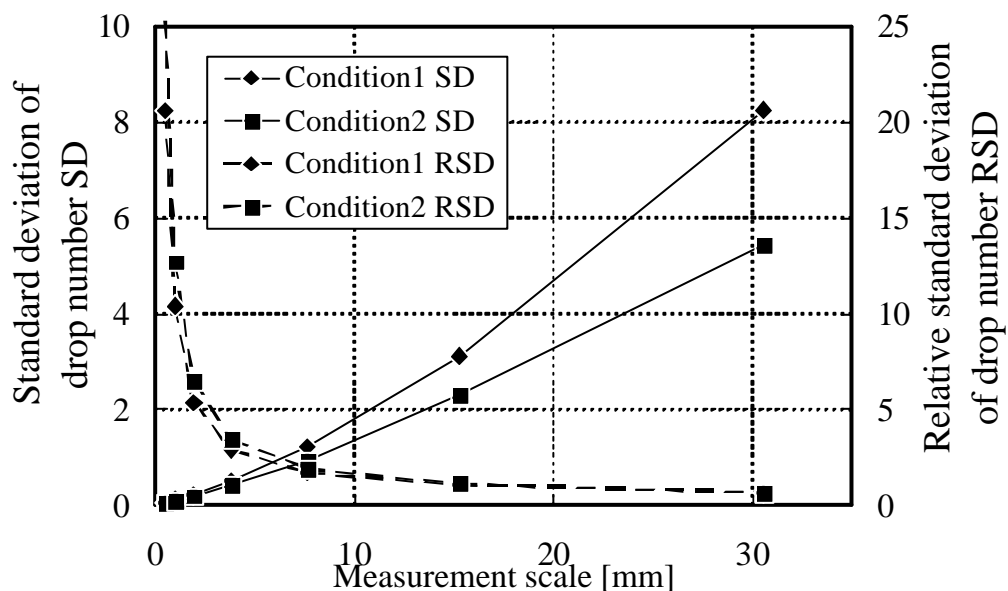


図 6-1 粒子数の標準偏差および相対標準偏差による燃料噴霧の不均一性の解析

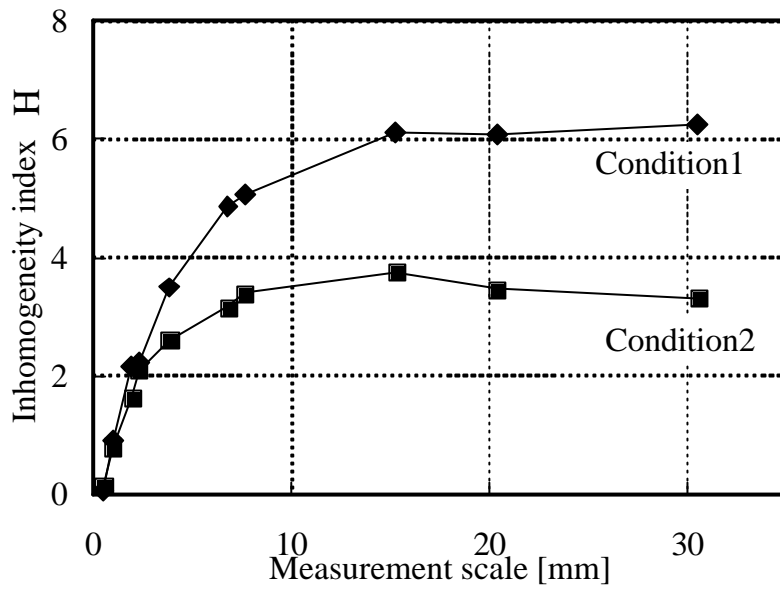


図 6-2 不均一指数による燃料噴霧の不均一性の解析

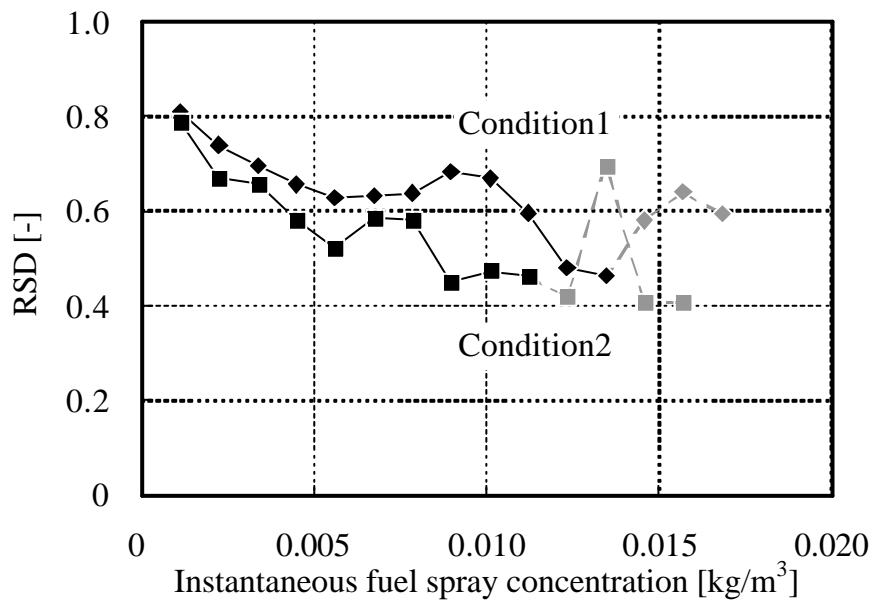


図 6-3 瞬間燃料噴霧濃度による不均一性の変化(標準偏差および相対標準偏差による評価)

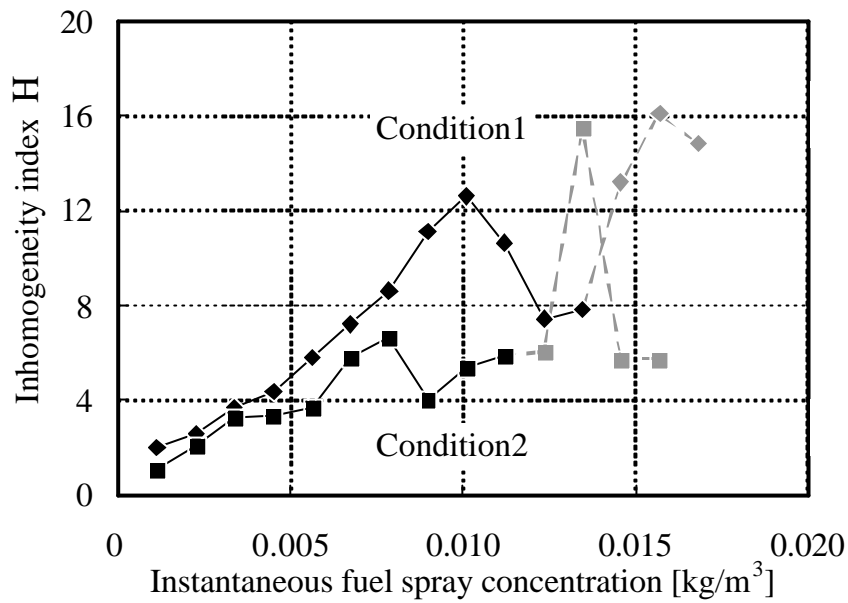


図 6-4 瞬間燃料噴霧濃度による不均一性の変化(不均一指数による評価)

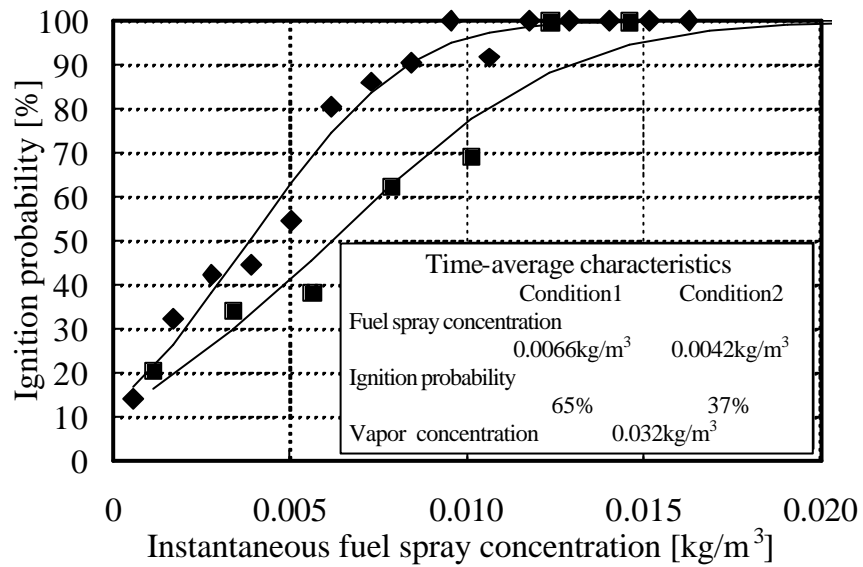
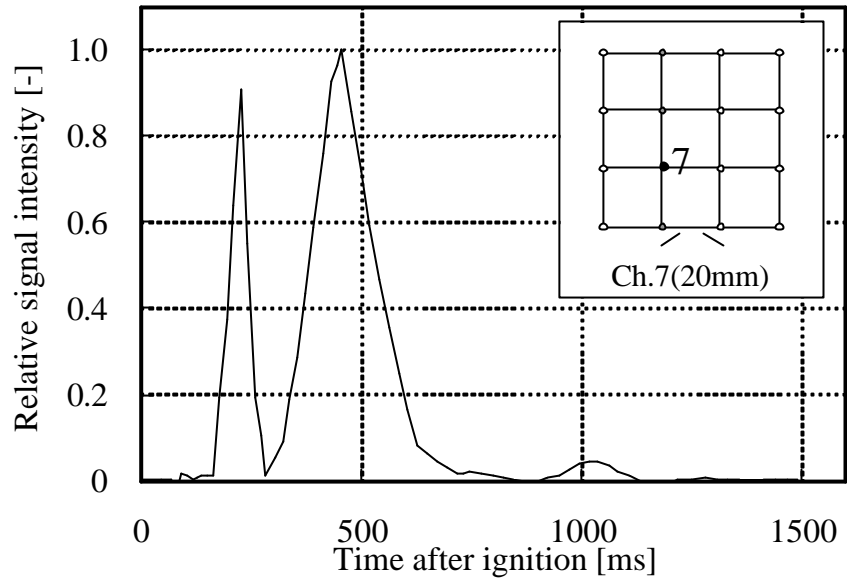
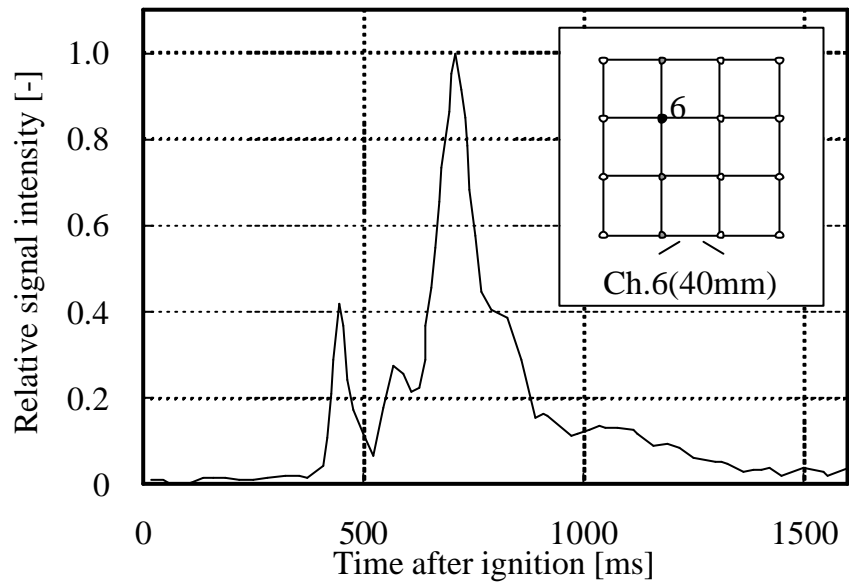


図 6-5 瞬間燃料噴霧濃度による着火率の変化



(a) 20mm



(b)40mm

図 6-6 典型的な検出信号の例

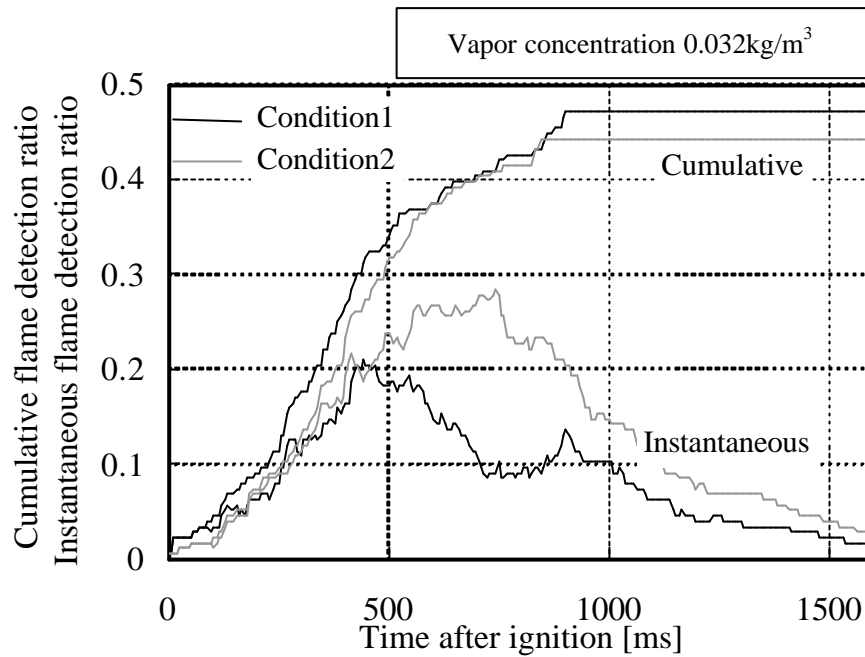


図 6-7 瞬間燃料噴霧濃度 $0.004\text{-}0.005\text{kg/m}^3$ における火炎検出率の時間変化

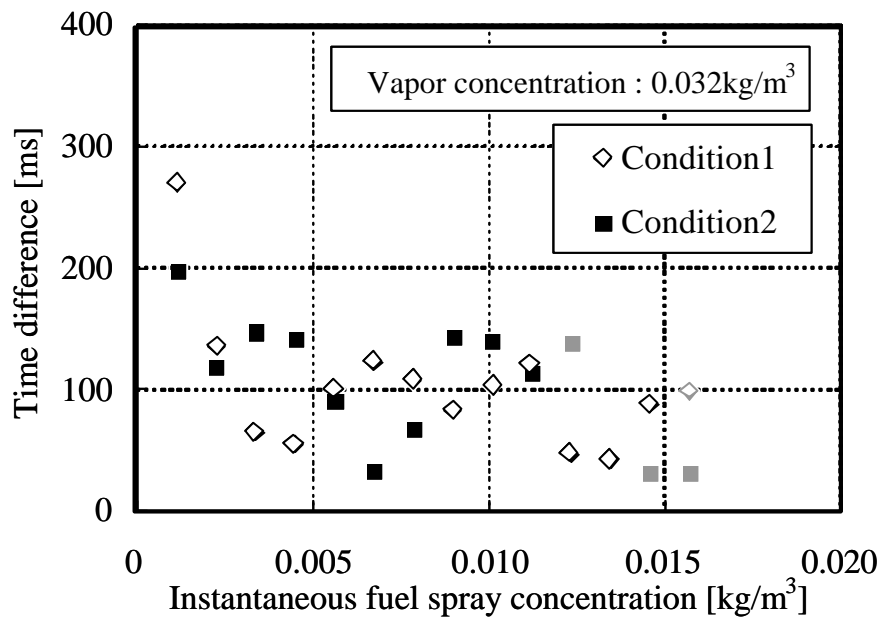


図 6-8 第 1 および第 2 ピークの検出時間差

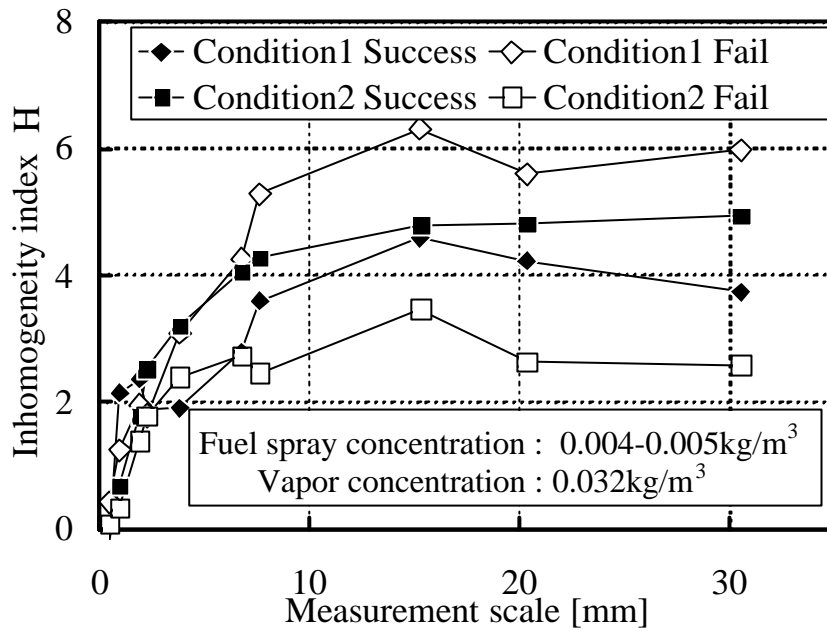


図 6-9 不均一性の比較

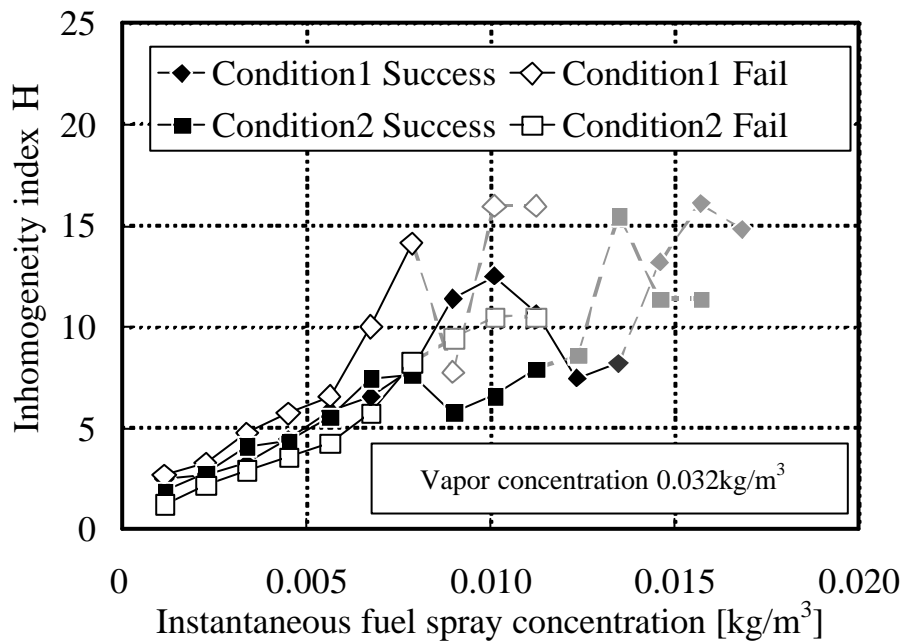


図 6-10 不均一指数の最大値の変化

第 7 章 燃料噴霧の不均一性と点火により形成される火炎の形状の関係	100
7.1 はじめに	100
7.2 実験装置および実験方法.....	100
7.2.1 実験方法概要.....	100
7.2.2 PDPA の捕集率検定.....	101
7.2.3 燃料蒸気濃度の測定	101
7.3 結果および考察.....	101
7.3.1 燃料噴霧の不均一性	101
7.3.2 放電の瞬間における燃料噴霧特性と着火性の関係.....	102
7.3.3 放電の瞬間の燃料噴霧濃度と形成された火炎の関係	103
7.3.4 燃料噴霧の不均一性と、形成された火炎の関係.....	103
7.4 本章のまとめ.....	104

第 7 章 燃料噴霧の不均一性と点火により形成される火炎の形状の関係

7.1 はじめに

前章までにおいて、燃料噴霧の着火現象において、初期の火炎の発生よりもその後の火炎伝ばの過程が着火性に強く影響を及ぼしていることや、燃料噴霧の空間的な不均一性が着火性に影響を及ぼしており、着火に最適な空間的不均一性のスケールおよび強度が存在していることが明らかとなった。これらの知見より、点火により形成された火炎は、点火の直前の、燃料噴霧が未燃な状態における空間的不均一性によって影響を受けるであろうということが推察できる。そこでこの点を明らかにするため、燃料噴霧の点火後に形成される噴霧火炎を撮影し、点火の直前における燃料噴霧の空間的な不均一性との関係を得た。この際、前章まで試料として用いたメタノールは明確な輝炎を形成せず撮影が難しいことや、揮発性が高く自然蒸発により点火以前に形成された燃料蒸気の影響をより明確にする必要があるため、低揮発性の *n* デカンを試料とした。さらに形成される火炎の輝炎部分を観察することで、燃料噴霧の分散状態と燃焼状態の関係も調べた。

7.2 実験装置および実験方法

7.2.1 実験方法概要

本実験における実験条件を表 7-1 に、また本実験で用いた燃料噴霧の粒度分布の一例を図 7-1 にそれぞれ示す。本実験では、低揮発性燃料における燃料噴霧の不均一性と、火炎の発生、伝ばおよび、その結果である着火性との関係を明らかにするという目的から、点火装置特性、および噴霧混合気特性は実験を通して同一条件にした。また、希薄な燃料噴霧濃度における燃料噴霧の着火特性に着目するために、希薄な燃料噴霧濃度の条件で実験を行った。低揮発性燃料として *n* デカンを用い、点火には前章と同じ高周波火花放電を用いた。*n* デカンを用いた場合、比較的小規模の群燃焼や、単一液滴による単滴燃焼が複数、不規則に形成され、前章で用いたマルチチャンネルイオンプローブでは、その空間的な測定解像度の低さより、輝炎片を検出することは困難である。そこで本実験においてはマルチチャンネルイオンプローブによる火炎検出にかわり、輝炎の瞬間撮影を行うこととした。画像処理装置に新たに一台の CCD カメラを接続し、CCD より出力される画像信号を連続的に取り込むことで撮影を行った。

第 2 章においても示したが、火花放電の後に火炎が形成され、伝ばしていく様子の一例を図 7-2 に示す。輝炎片の数や面積は、放電による燃料噴霧の点火からの経過時間により変化する。放電開始から 90msec 後に着火判定基準と同程度の火炎が平均的に形成されているため、本研究においてはそれに最も近い放電開始後約 100ms における画像について解析を行った。

着火判定は第 2 章に示した火炎形態の分類にしたがって行った。

7.2.2 PDPA の捕集率検定

本実験で用いた n デカンは揮発性が低いため、n デカンを検定用試料としても用いることで、前章の様なグリセリン水溶液を用いた検定を行わず、第 3 章と同様に、PDPA と捕集器による受け止め法により得た燃料噴霧体積流束の比較によってその捕集率を求めた。

7.2.3 燃料蒸気濃度の測定

本章の実験で用いる n デカンは揮発性が低く、そのため一般に蒸気の内容を無視することが多い。本研究においては、時間平均的な燃料蒸気濃度の測定をすることで、燃料蒸気濃度が低いことを確認するにとどめ、燃料蒸気濃度を等しくそろえるなどの調整は行わなかった。ただし燃料噴霧を完全に気化させることは難しいため、蒸気濃度の計測において燃料噴霧も含めて吸引し測定する前章の方法は行わず、噴霧混合気中の気相をサンプリング用のシリンジで採取し測定することとした。n デカンを試料とした場合、メタノール噴霧混合気中の蒸気濃度測定の様な、吸引プローブに付着した液滴が気化することによる測定値への影響は低いため、プローブに付着した燃料噴霧がしずくとなって直接プローブに吸引される場合を除いては、吸引量が少なく、吸引速度がより低速なほど液滴の吸引を防ぐことが可能となり、測定誤差を小さくすることができる。

7.3 結果および考察

7.3.1 燃料噴霧の不均一性

図 7-3 に本実験で用いた燃料噴霧の平均的な不均一性を、不均一指数を用いて示す。条件 1 に比べ条件 2 は不均一性は弱く、不均一指数で表現した場合、半分程度の強度を示している。ただし燃料噴霧の不均一性は燃料噴霧濃度と共に高くなる。この点を踏まえ放電の瞬間の燃料噴霧濃度ごとに比較した場合の不均一指数と評価スケールの関係を図 7-4(a)-(f)に示す。瞬間燃料噴霧濃度を等しく分類し、比較した場合は、両者の不均一性の差は縮まり、瞬間燃料噴霧濃度が 0.009kg/m^3 以上の範囲においては、評価スケールが 8mm の付近で反転し、条件 1 に比べ条件 2 の不均一性のほうが高くなった。また評価スケールが約 17mm の場合における、点火の瞬間の燃料噴霧濃度による、不均一指数の変化を図 7-5 に示す。ここで、本来なら不均一指数が最大値を取るスケールである特徴スケールを用いて両者を比較すべきであるが、図 7-4 に示す様に、条件 2 では最大測定可能な評価スケールを超えても、不均一指数の値が増加する傾向を示しているため、特徴スケールが測定できなかった。ただし不均一指数の変化は評価スケールに対し緩やかであるため、特徴スケールにおける不均一指数の値は、条件 1 における特徴スケールでの値と大きく変わらないと考える。燃料噴霧の不均一性は、燃料噴霧濃度の増加と共に増加した。この傾向は、同一の噴霧生成系ではあるが、その操作条件等の異なる第 2 章から第 5 章におけるメタノール噴霧でも同様に観察された。この特徴が形成される原因としては、噴霧が周囲空気との混合、拡散を行い、比較的均一に近づいた状態においては、同時に噴霧も拡散し、希薄とな

ることが考えられる．ただし本研究で用いている噴霧生成装置は，噴霧の拡散を促進する拡散空気を噴霧と同軸に噴射する機構である．一般の単項式圧力噴射弁においても噴霧が誘引することにより同様な気流が発生するが，その速度は噴霧に比べ遅い．一方，拡散空気速度は供給量により可変するため，本実験で得た噴霧の不均一性の形成特性が一般の噴射弁にも同様に適用されるかは明らかでない．

7.3.2 放電の瞬間における燃料噴霧特性と着火性の関係

瞬間燃料噴霧濃度による初期火災発生率，火災の伝ば率，およびそれらの結果となる着火率をそれぞれ図 7-6 - 図 7-8 に示す．ここで，火災伝ば率とは，初期火災が発生した点火試験の内，着火に至った割合である．時間平均的な燃料噴霧濃度は，条件 1 で 0.0082kg/m^3 ，条件 2 で 0.0044kg/m^3 で，全体の着火率はそれぞれ 76% ，66%であった．

燃料噴霧は確率的に着火し，また瞬間燃料噴霧が等しい場合においても着火率が等しくなるわけではない．また初期火災の発生率は，瞬間濃度 0.002kg/m^3 の値を除いてはほぼ等しいのに対し，火災伝ば率は時間平均的な濃度の低い条件 2 の火災伝ば率のほうが高くなっている．これは同一の瞬間濃度でも生成条件の違い等による不均一性の違いによって火災の伝ば性が変化し，結果的に着火性も変化していると考えられる．不均一性の弱い条件 2 では，条件 1 に比べて噴霧粒子が空間に比較的一様に広がっているため，初期火災の発生後に火災が周囲の噴霧粒子が存在する可燃領域へ伝ばする可能性が高く，その結果，火災伝ば率が高くなったと考えられる．しかし噴霧粒子が完全に一様に分布した場合は，本研究の様な粒子数密度が低い条件においては必ず火災の伝ば性が低下し，着火に至らなくなると考えられる．したがって本実験の結果は，火災伝ばに適した不均一性の強さが存在することを示唆している．

また，以下の図 7-9 に瞬間濃度 0.002kg/m^3 の点における粒子配置の一例を示す．条件 1 ，条件 2 での粒子配置は平均的に，条件 1 では点火電極近傍に粒子が多く存在し，条件 2 では全体に粒子が広がった場合が多くみられた．本実験条件において，この瞬間濃度の範囲となった点火試験の回数が低かったため，燃料噴霧の偏りが偶然大きく影響してしまったためであると考えられる．またこのことから，初期火災の発生も，同様に濃度むらの位置に影響を受け，放電電極付近に液滴が存在することが条件となっていると考えられる．

次に，図 7-4 に示した各瞬間燃料噴霧濃度における燃料噴霧の不均一性について，着火および不着火に分類した結果を図 7-10 に示す．ただし図 7-4(e)(f)に対応する，瞬間燃料噴霧濃度が高い場合については，全点火試験が着火に至ったため，図 7-10 に示さなかった．各燃料噴霧濃度について，着火した場合の燃料噴霧の不均一性は，不着火の場合に比べて弱く，より均一に近い．また，瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合に着火率の高い条件 2 のほうが，条件 1 に比べ不均一性が低い（図 7-5）ことから明らかな様に，不均一性の弱い場合のほうが着火に至りやすい．これらの傾向は，第 4 章および第 5 章で示した様な，メタノールを試料として用いた場合の傾向と等しいため，デカンの場合においても着火に最

適な不均一性の強度が存在すると考えられるが、その値はメタノールの場合に比べ低い。これは、デカンの揮発性が低く、自然蒸発においては蒸気層がほとんど形成されないため、火炎が伝ばするためには比較的均一に燃料噴霧が分散している必要があるためであると考えられる。一方、蒸気濃度が比較的高いメタノールで行った着火試験においては、火炎が形成された後の、火炎の伝ばが比較的容易なため、不均一性が高く、燃料噴霧濃度が高く燃焼性の高い部分が形成されているほうが火炎が確実に伝ばするために着火性が高くなったと考えられる。

7.3.3 放電の瞬間の燃料噴霧濃度と形成された火炎の関係

図 7-11 に瞬間濃度と輝炎片の数、図 7-12 に瞬間濃度と最大輝炎片面積、図 7-13 に瞬間濃度と総輝炎面積の関係をそれぞれ示す。両条件において、瞬間濃度が増加により、輝炎の数、最大面積、総面積も瞬間濃度の増加によって増加する。輝炎片の数は燃料濃度の増加と共に徐々に増加し、測定したすべての瞬間濃度において条件 1 に比べ条件 2 が低い値を取る。また最大輝炎片面積、総輝炎面積は燃料噴霧の着火率がほぼ 100%となる時間平均燃料噴霧濃度とほぼ等しい瞬間濃度 0.010kg/m^3 付近で急激に増加し、瞬間濃度 0.010kg/m^3 以下では条件 1 のほうが高い値を示すのに対し、瞬間濃度 0.010kg/m^3 以上では反対に条件 2 が高い値となった。条件 1 に比べ条件 2 は不均一性が低いため、平均的な燃料噴霧濃度が希薄な状態においては、粒子が接近し輝炎を形成する様な領域が狭く輝炎の面積が小さくなると考えられる。また燃料噴霧濃度の増加と共にむらにより周囲に形成された燃料噴霧濃度の高い領域にも輝炎が形成され、輝炎片の数は増えるが、瞬間濃度 0.010kg/m^3 を下回る領域においては燃料噴霧濃度が濃い領域間に存在する希薄な領域の燃料噴霧濃度が低く輝炎の増加に至らない。瞬間濃度 0.010kg/m^3 を超えると、その様な希薄な領域の燃料噴霧濃度においても輝炎が形成されやすくなり、卓越した大きな輝炎片が発生し、その結果最大輝炎片の面積や総輝炎面積が急激に増加する。ただし輝炎のさらに外側においても噴霧が存在し、不均一性のため燃料噴霧濃度が高い領域が存在することから、輝炎片の数は減らないものと考えられる。ただし瞬間濃度が同一の場合においても輝炎片数、最大輝炎片面積、総輝炎面積は変化するため、点火の各瞬間における燃料噴霧の不均一性とその後輝炎の形成をあわせて考察する必要がある。

7.3.4 燃料噴霧の不均一性と、形成された火炎の関係

不均一指数の特徴スケールと輝炎の数、輝炎の最大面積、および輝炎の総面積の関係をそれぞれ図 7-14 から図 7-16 に示す。また、図 7-17 に各特徴スケールを示す点火試験における、点火の瞬間の燃料噴霧濃度を示す。条件 2 の燃料噴霧は条件 1 に比べその燃料噴霧濃度が低いため、輝炎の面積は小さく、輝炎片の数は少ない。図 7-17 より本研究で用いた燃料噴霧は、特徴スケールが 15mm 程度の場合に、瞬間燃料噴霧濃度が高い様である。しかし最大輝炎片面積および総輝炎面積は、特徴スケールが大きい場合ほど高くなるわけで

はなく、条件 1、条件 2 とともに評価スケールが 8.3mm のとき最大値となる。つまり火炎の形成において燃料噴霧のむらのスケールに最適値が存在することを示唆している。ただし輝炎片の数は特徴スケールによって大きな変化はない。これは噴霧中にさまざまなスケールのむらが同時に存在しているためと考えられる。

7.4 本章のまとめ

燃料噴霧の不均一性が着火性および燃焼形態に与える影響を明らかにすることを試みた。時間平均的な n デカンを燃料とした燃料噴霧濃度の異なる 2 種類の単分散噴霧の点火試験を複数回行い、着火および燃焼形態の変化、また点火時の燃料噴霧の様子を撮影した。本実験範囲内で以下の結論を得た。

- ・ n デカン噴霧においても、メタノール噴霧と同様に、同一の瞬間濃度において初期火炎発生後に火炎が伝ばするのに適切な不均一性の強さが存在する。またこの値は、メタノール噴霧に比べ低い。
- ・ 燃料噴霧の着火により噴霧火炎中に形成される輝炎領域は、燃料噴霧濃度が低く確率的に着火に至る範囲では面積にあまり変化はなく、ほぼ確実に着火に至る程度に燃料噴霧濃度が増加すると、急激に拡大する。また燃料噴霧の不均一性が強い場合は輝炎が形成されやすく、同一の瞬間濃度において輝炎の面積を最大とするむらのスケールが存在する。

表 7-1 実験条件

ITEM	Condition 1	Condition 2
Fuel	n-Decane	
Drop Size (D_{32})	113 μ m	115 μ m
Time-averaged fuel spray concentration	8.2×10^{-3} kg/m ³	4.4×10^{-3} kg/m ³
Time-averaged fuel vapor concentration	0.048×10^{-3} kg/m ³	0.013×10^{-3} kg/m ³
Average spray velocity	0.24 m/s	0.21 m/s
Average air velocity	0.11 m/s	0.08 m/s
Temperature / Pressure	Atmospheric Temperature/ Atmospheric Pressure	
Igniter and Discharge duration	Discharged spark system, 50ms (0.8J)	
Ignition trials	500 times	

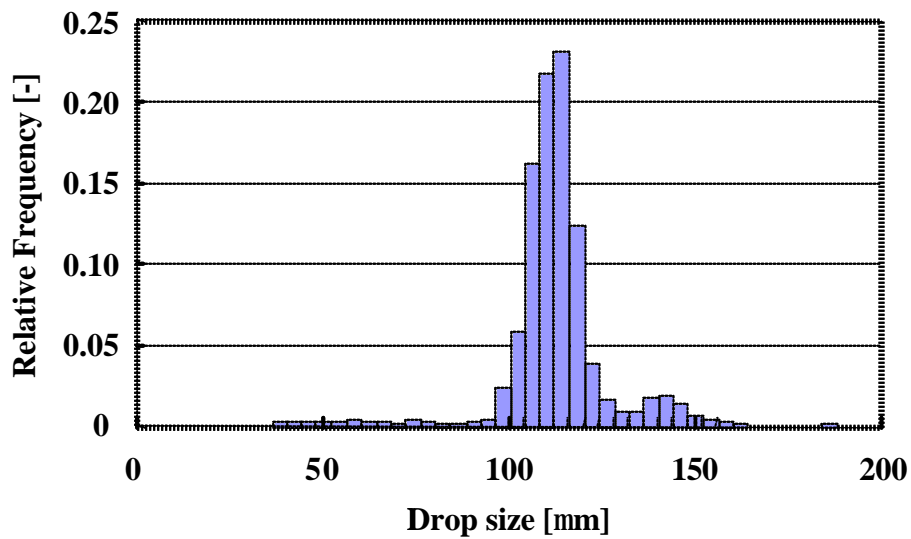


図 7-1 燃料噴霧の粒度分布の一例

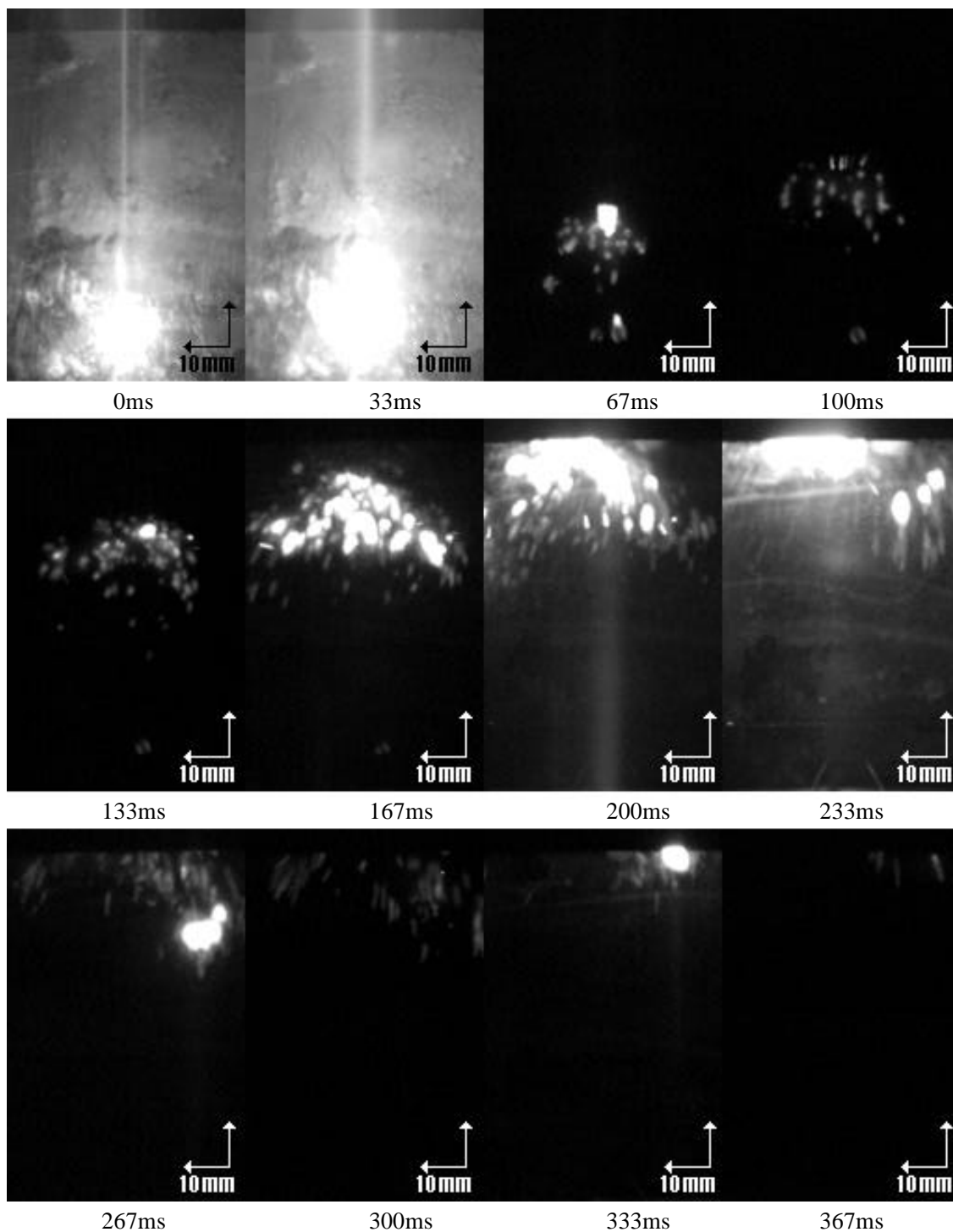


図 7-2 火炎の形成過程の例

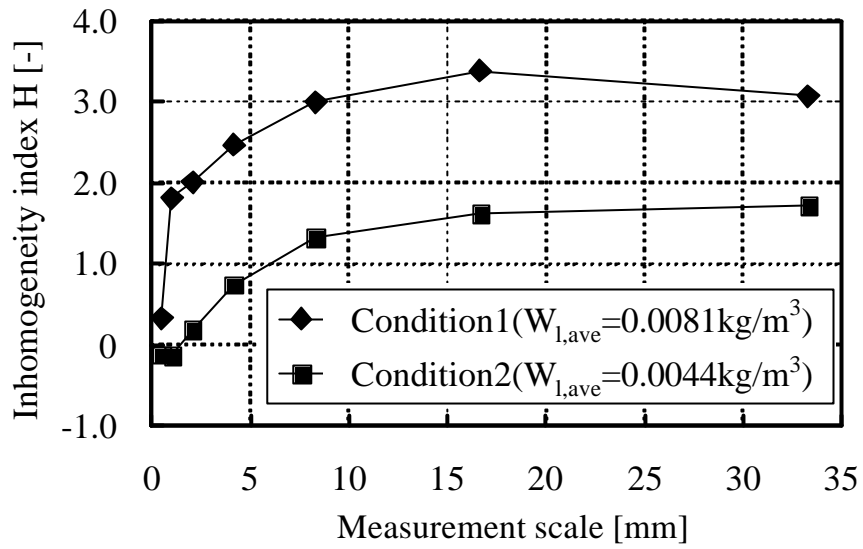
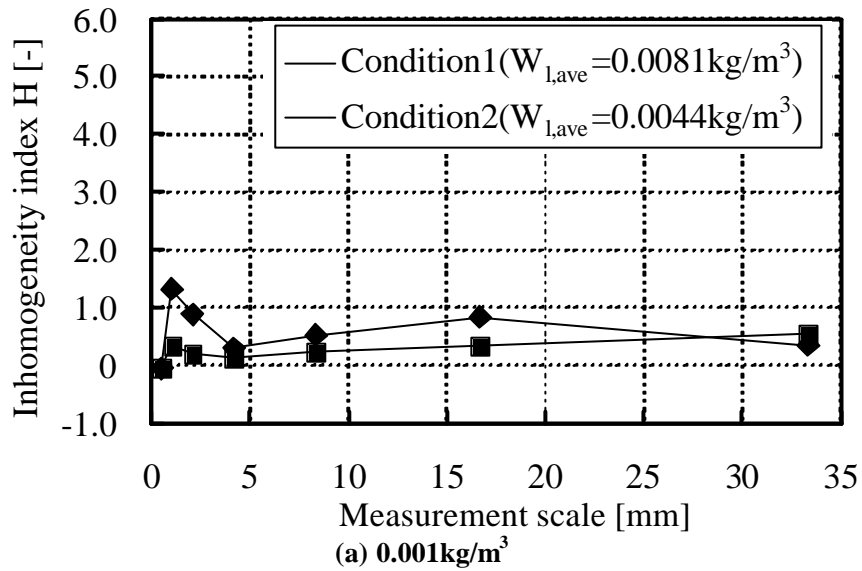
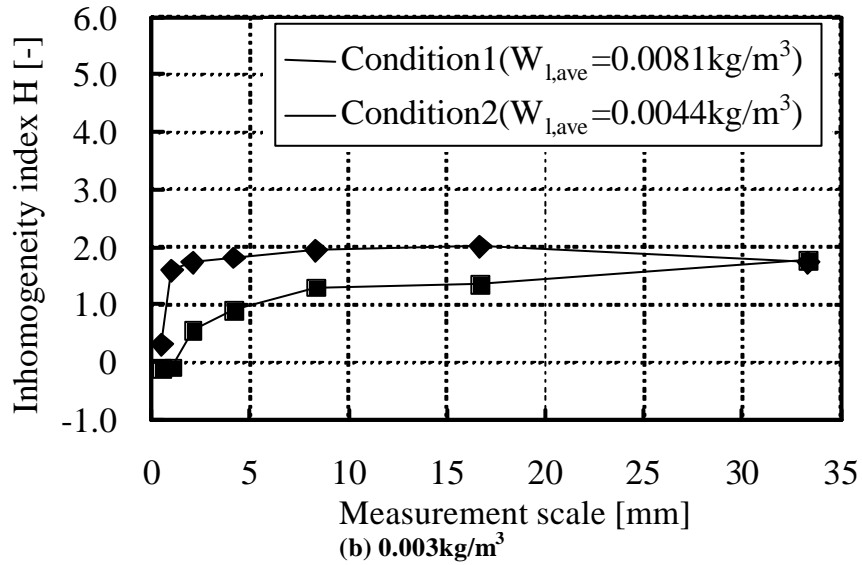


図 7-3 時間平均的な燃料噴霧の不均一性

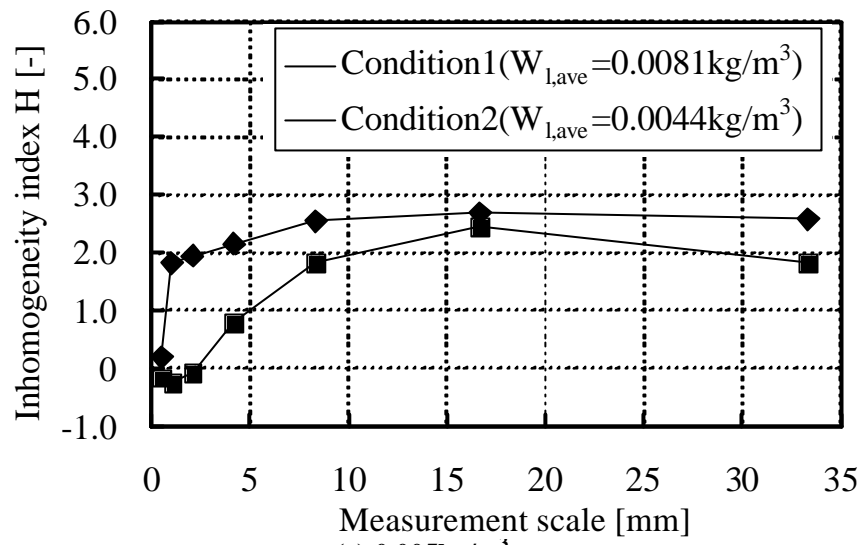


(a) 0.001 kg/m^3

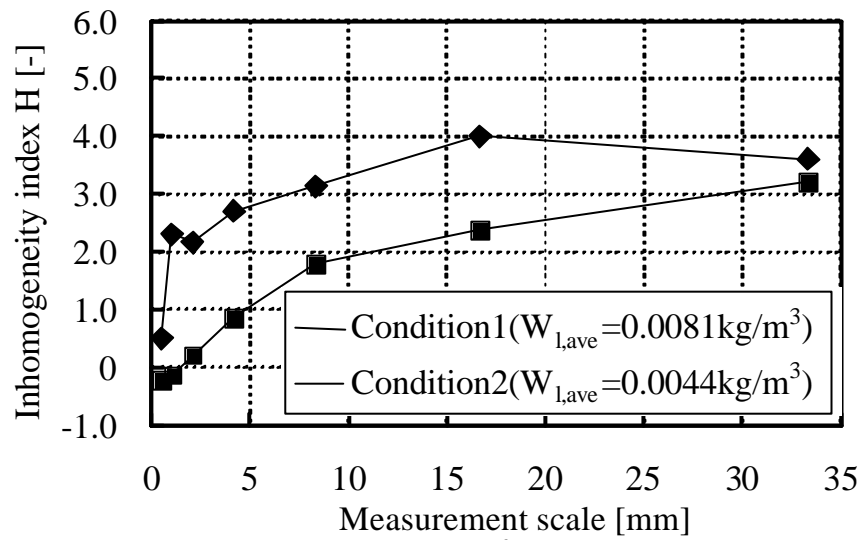


(b) 0.003 kg/m^3

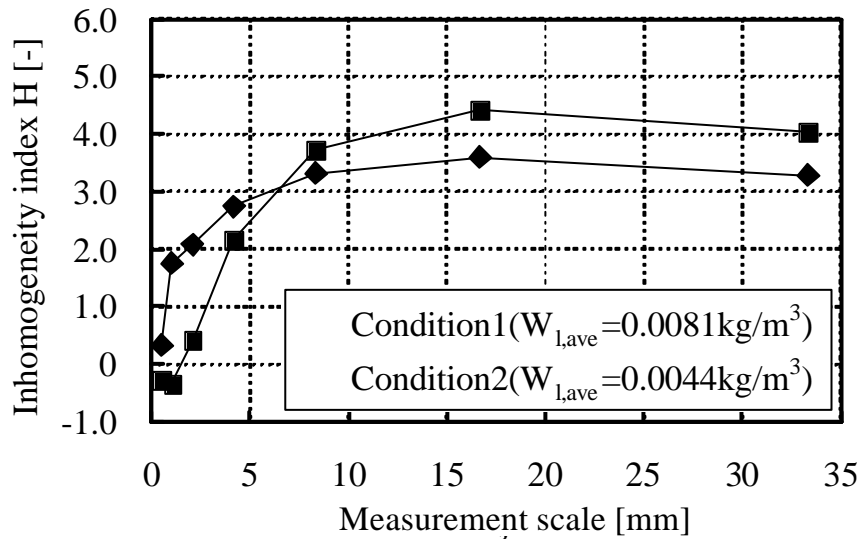
図 7-4 燃料噴霧の不均一性



(c) 0.005 kg/m^3



(d) 0.007 kg/m^3



(e) 0.009 kg/m^3

図 7-4 燃料噴霧の不均一性(続き)

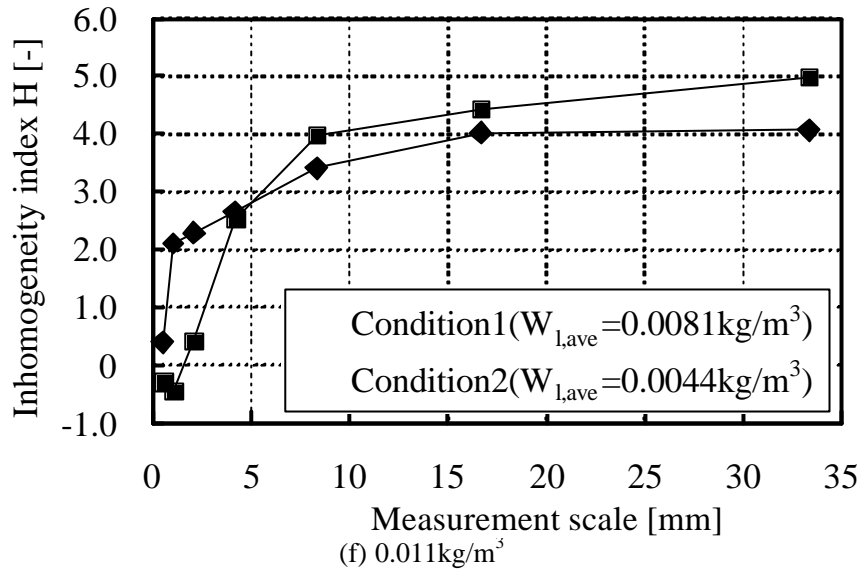


図 7-4 燃料噴霧の不均一性(続き)

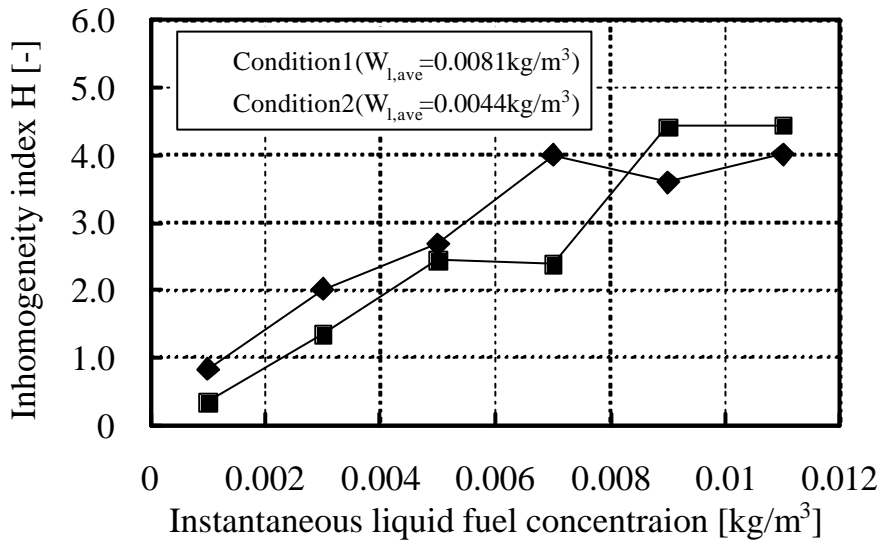


図 7-5 瞬間燃料噴霧濃度による不均一性の変化

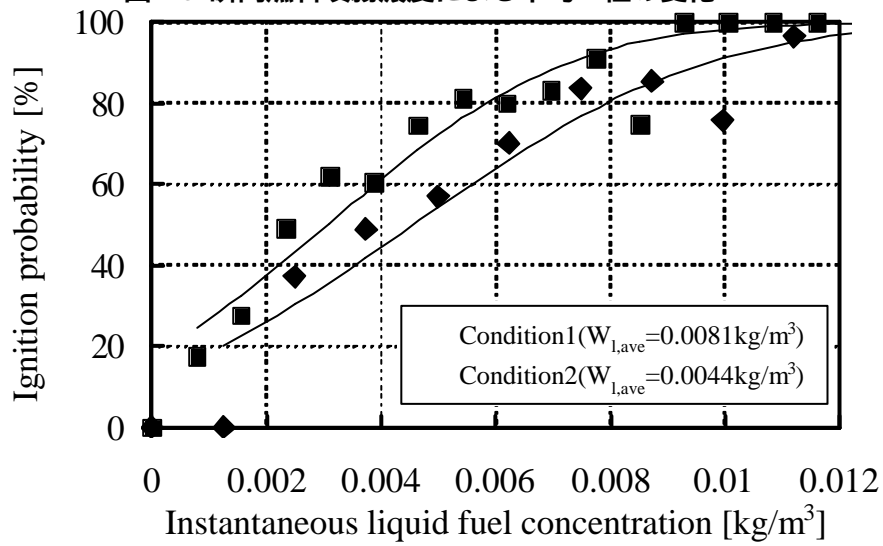


図 7-6 放電の瞬間の燃料噴霧濃度による着火率の変化

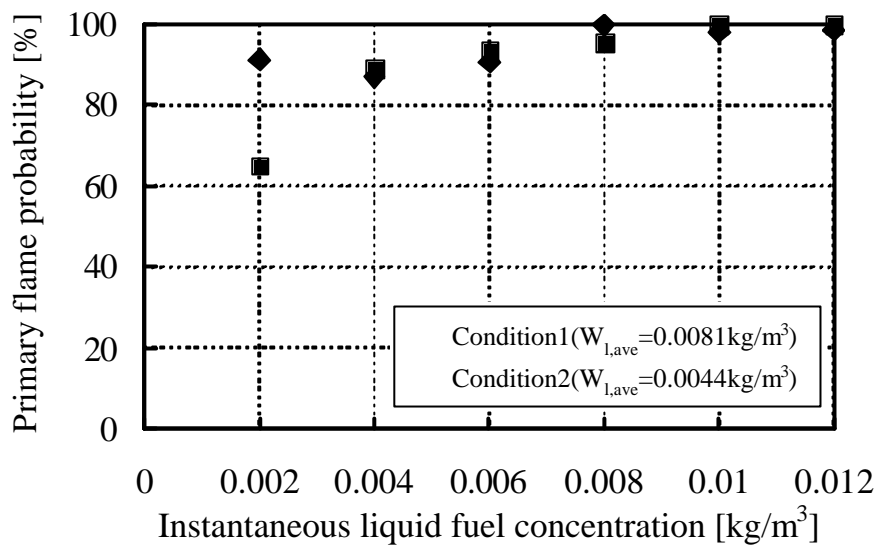


図 7-7 放電の瞬間の燃料噴霧濃度による初期火炎発生率の変化

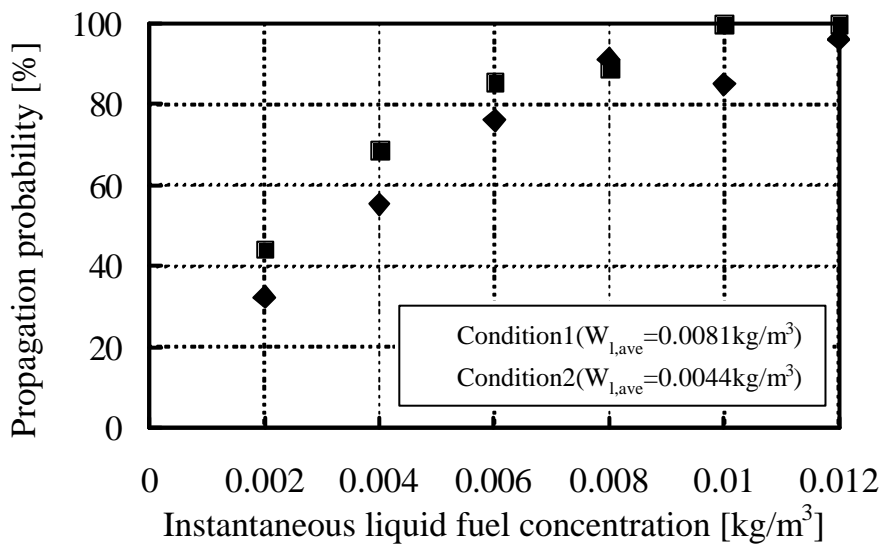
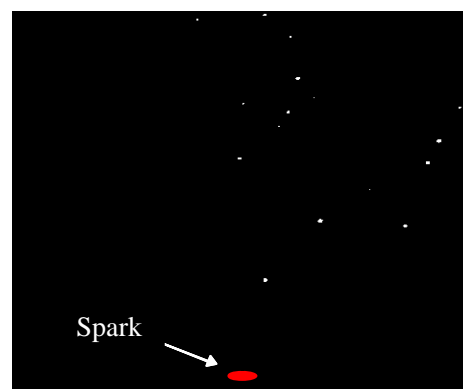
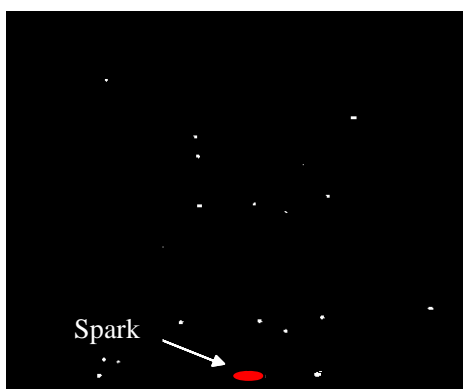


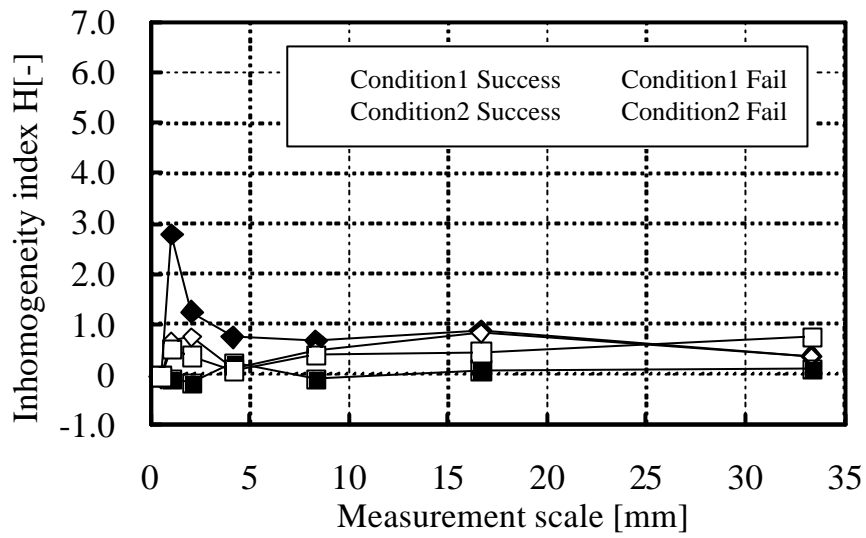
図 7-8 放電の瞬間の燃料噴霧濃度による火炎伝ば率の変化



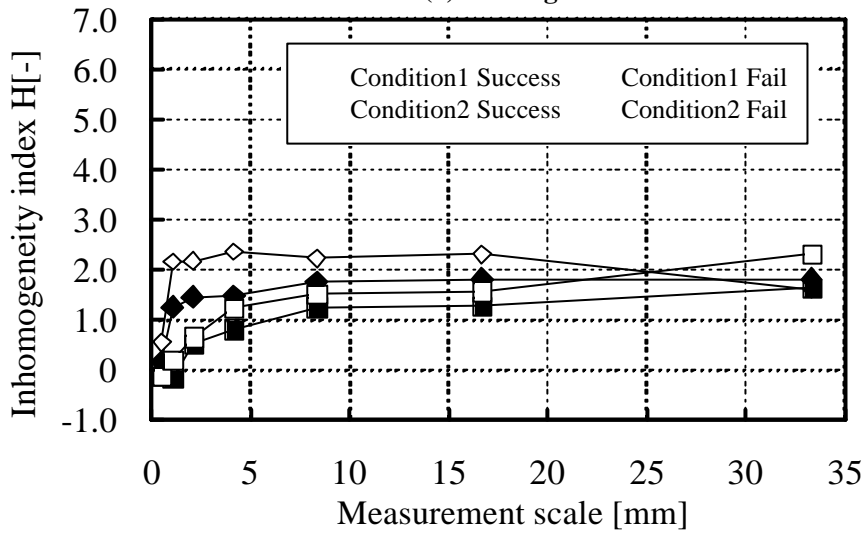
(a)Condition 1

(b)Condition 2

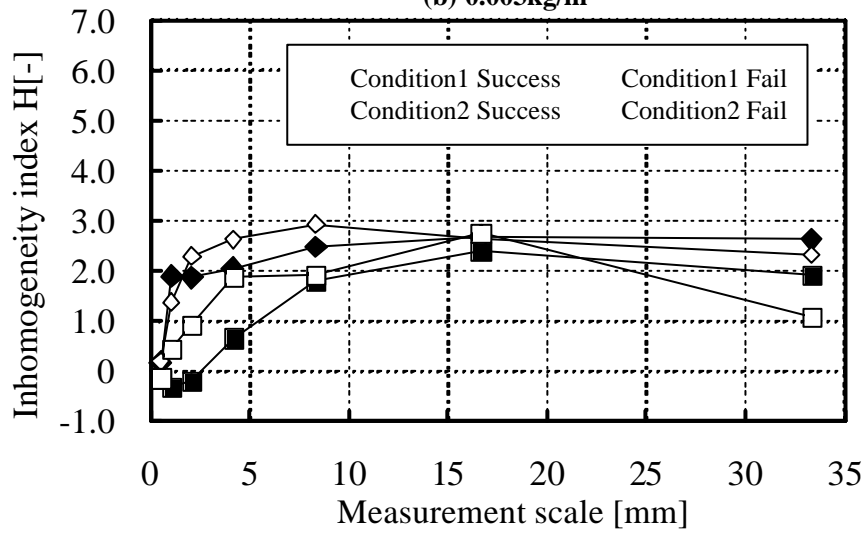
図 7-9 瞬間濃度 0.002kg/m³ の点における粒子配置の一例



(a) 0.001kg/m³



(b) 0.003kg/m³



(c) 0.005kg/m³

図 7-10 燃料噴霧の着火性による不均一性の違い

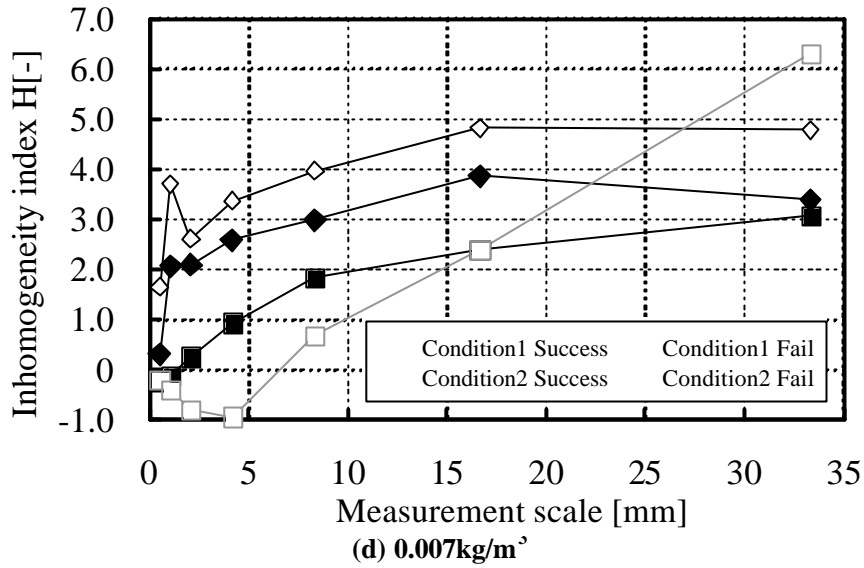


図 7-10 燃料噴霧の着火性による不均一性の違い (続き)

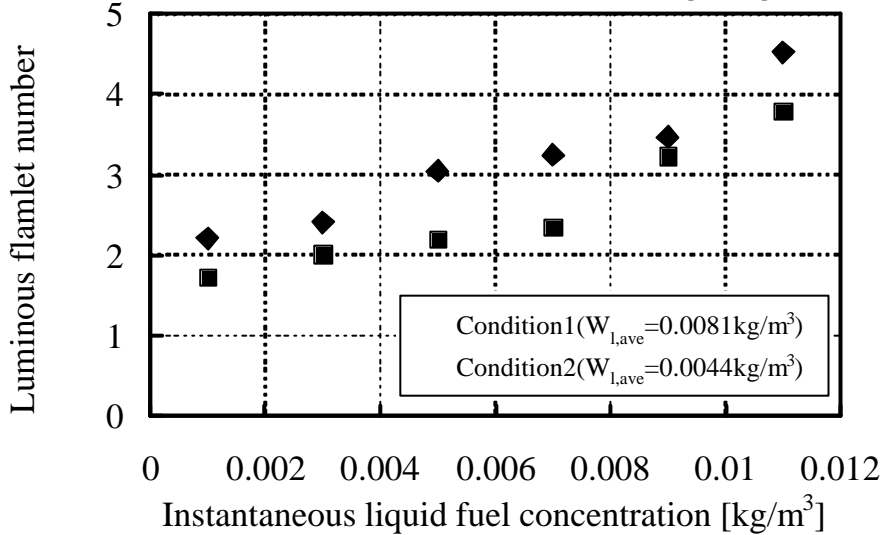


図 7-11 放電の瞬間の燃料噴霧濃度による輝炎片個数の変化

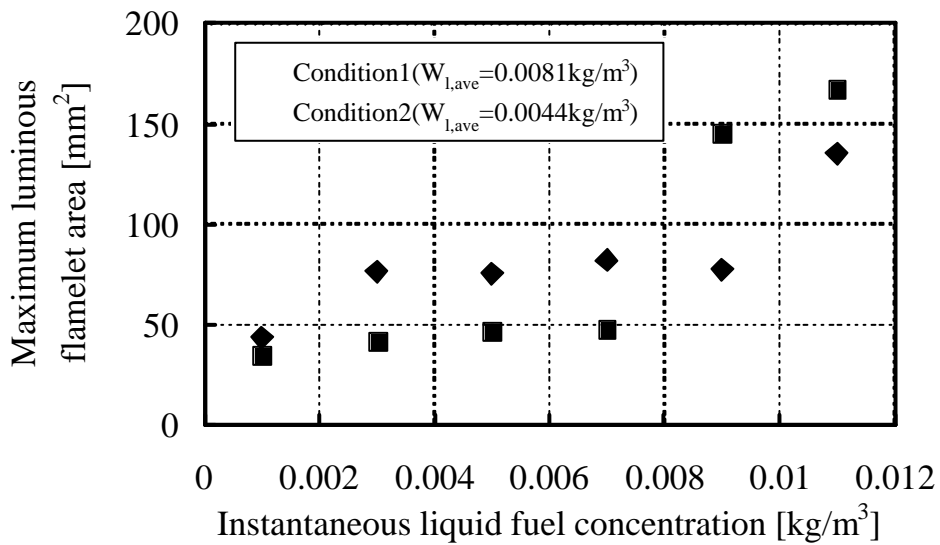


図 7-12 放電の瞬間の燃料噴霧濃度による最大輝炎片面積の変化

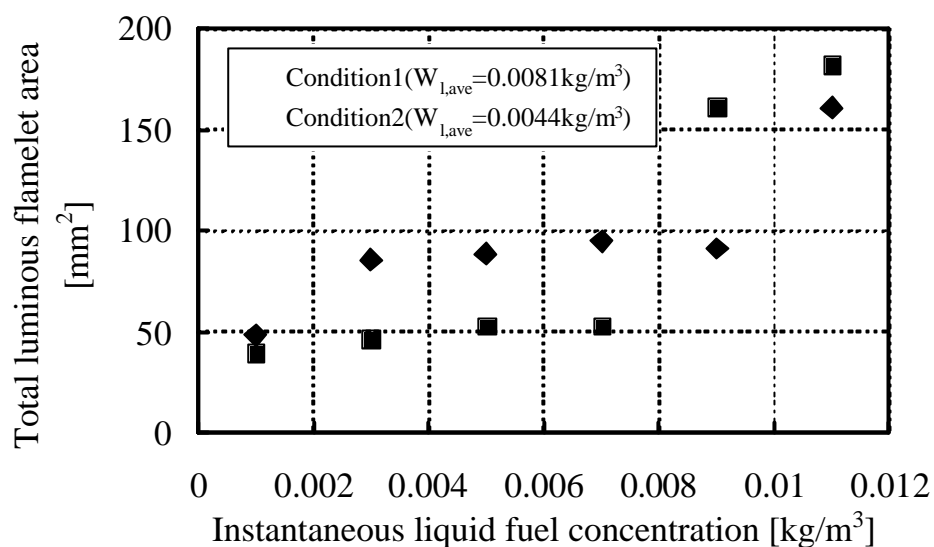


図 7-13 放電の瞬間の燃料噴霧濃度による輝炎片総面積の変化

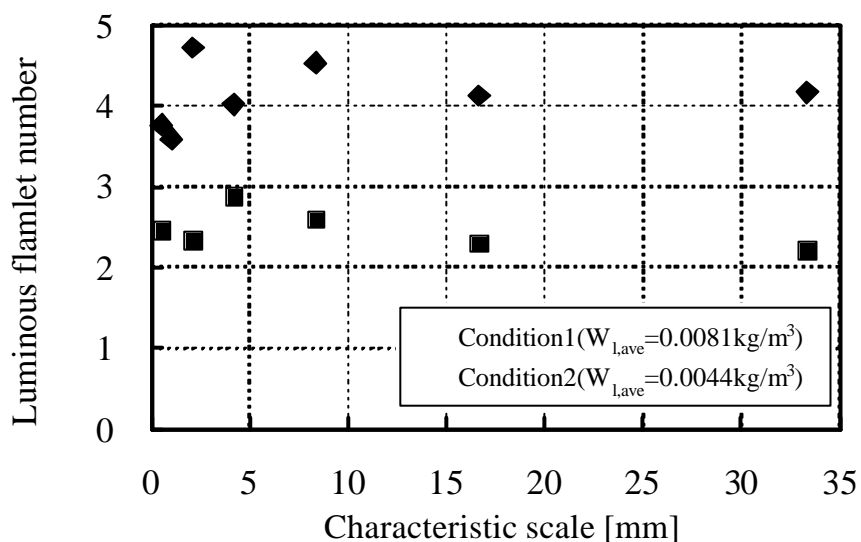


図 7-14 燃料噴霧の特徴スケールによる輝炎片個数の変化

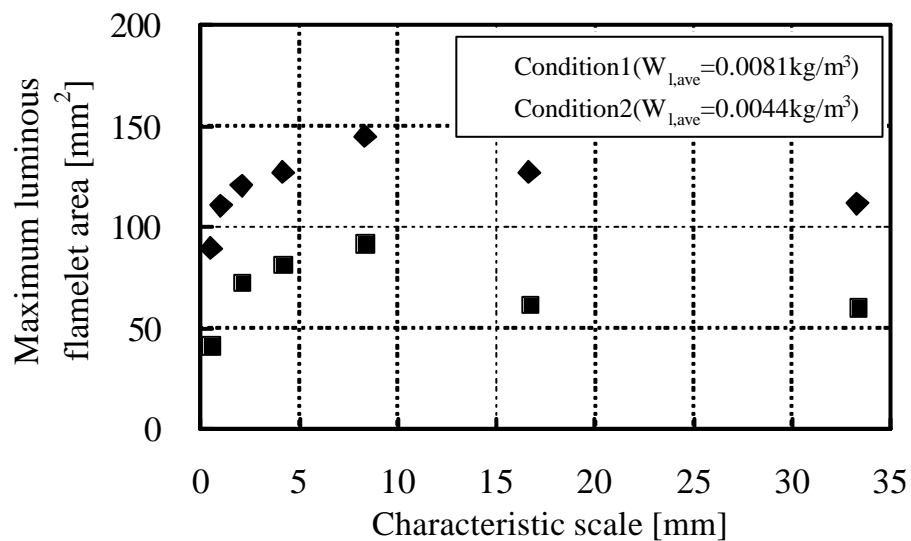


図 7-15 燃料噴霧の特徴スケールによる最大輝炎片面積の変化

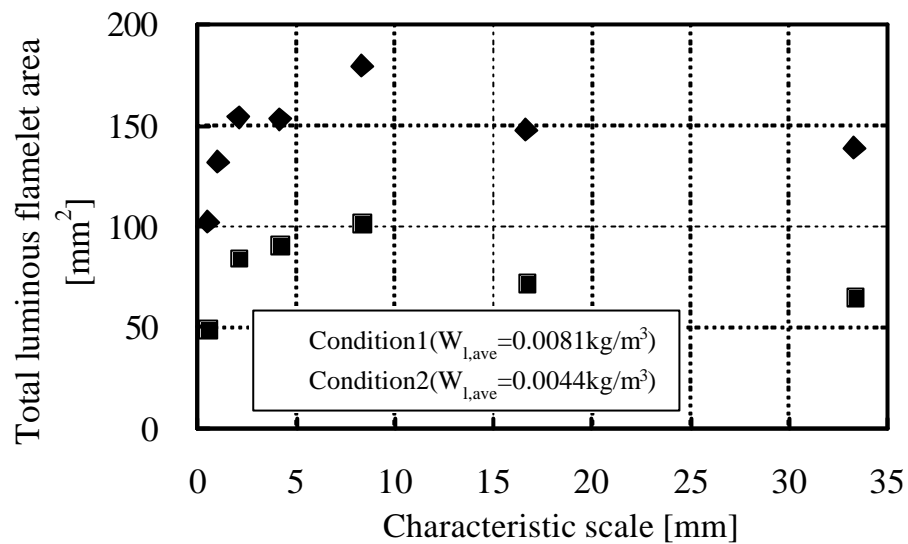


図 7-16 燃料噴霧の特徴スケールによる総輝炎片面積の変化

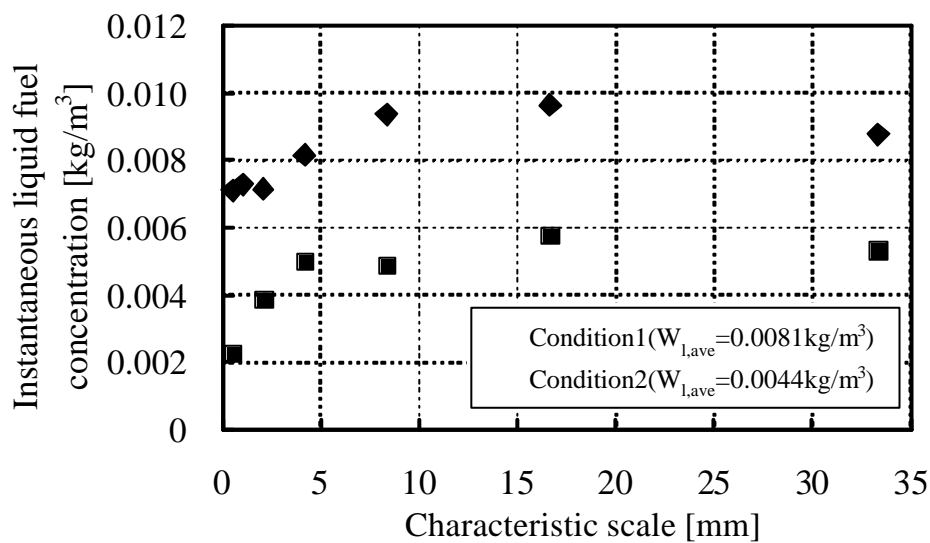


図 7-17 燃料噴霧の瞬間燃料噴霧濃度の特徴スケールによる変化

第 8 章 本研究のまとめ.....	115
8.1 本研究で得られた結論のまとめ.....	115
8.2 燃料噴霧の不均一性が着火性に影響を及ぼす機構に関する一考察.....	117
8.3 本研究分野の今後の展望.....	118
謝辞	
投稿論文および講演前刷の一覧	

第 8 章 本研究のまとめ

8.1 本研究で得られた結論のまとめ

燃料噴霧の着火現象において、火炎の発生および伝ばに大きな影響を与える燃料噴霧の不均一性について、その影響を明らかにするため、メタノールおよびデカンを試料として用い、均一予混合気の希薄着火限界を下回るような希薄単分散噴霧の火花放電点火による強制着火試験を行った。燃料噴霧の着火過程を火炎の発生とその後の伝ばに分類し、それぞれについて影響を調べた。

本研究では、まず基礎的な特性を明らかにする目的で、平均粒子径や平均燃料噴霧および平均燃料蒸気濃度といった、燃料噴霧の時間平均的な特性と、火花放電による火炎の発生およびその結果の着火の可否との関係を確率的に定量的に評価した。さらに、噴霧粒子がランダムに分散していると仮定し、時間平均的な燃料噴霧濃度と着火率の関係を確率論的モデルに基づき累積二項分布で近似し、解析を行った(第 3 章)。次に、放電の瞬間における燃料噴霧の不均一性評価指標を確立するため、燃料噴霧の濃度の不均一性を複数の評価手法により表現し、これらの評価手法の特性を比較した(第 4 章)。さらに、この評価手法を用いて燃料噴霧の着火現象と不均一性の関係を明らかにした(第 5 章および第 6 章)。また、低揮発性のデカンを試料として、燃料噴霧の着火過程において燃料噴霧の不均一性が、火炎の発生状態に与える影響を調べた(第 7 章)。

(1) 燃料噴霧の着火性の時間平均的な評価

燃料噴霧は、均一予混合気の希薄着火限界を大きく下回った場合にも着火にいたる可能性が存在し、また着火に至らない場合においても、放電により伝ば性を有しない火炎(初期火炎)を形成する可能性がある。燃料噴霧の着火率は、燃料噴霧濃度および燃料蒸気濃度の増加に伴い増加する。噴霧混合気中の燃料蒸気濃度を一定にした場合、燃料噴霧液滴径が小さいほど着火性は高く、また燃料噴霧濃度の増加による着火率の増加も大きくなる。ただし総燃料濃度が均一予混合気の希薄着火限界を上回る場合でも、着火率が 100% とならない条件がある。また、燃料噴霧および燃料蒸気の濃度比において、ある着火率を達成するために最も多くの燃料を必要とする最悪条件および最も少ない燃料を必要とする最適条件が存在する。

さらに、放電の瞬間の燃料噴霧濃度の変化に着目し、累積二項分布関数にしたがって近似することにより、燃料噴霧の時間平均的な特性を用いて着火性を評価することができる。

本研究の実験範囲においては、着火の場合には、液滴径によらず、基準体積内に存在する粒子数はほぼ等しく、一方、初期火炎の場合には、基準体積内に存在する液体燃料の総量がほぼ等しかった。

(2)燃料噴霧の空間的不均一性の評価手法

燃料噴霧の数密度のばらつきと、そのばらつきのスケールから不均一性を評価した。さらに燃料噴霧は最終的にランダムな分散状態へ遷移することを考え、前述の方法で得た不均一性をランダムな状態を基準として表現する方法を関連研究より定め、合わせて燃料噴霧の不均一性の評価に用いた。その結果、ランダムな状態を基準とした場合、燃料噴霧の不均一スケールおよび数密度によらず不均一性を評価することが可能であったため、これを不均一指数と定義した。

噴霧中において、液滴は必ずしもランダムに分散しているわけではなく、本研究で用いた燃料噴霧はランダムに比べ不均一性が強かった。このことは、時間平均的な噴霧特性から確率論的に解析を行う際の前提である、燃料噴霧の状態は常にランダムであるという前提が必ずしも成立するものではないことを意味し、したがって実際に点火を行う瞬間の燃料噴霧を観察し、不均一性を評価する必要があることが明らかとなった。

(3)燃料噴霧の不均一性と着火性の関係

燃料噴霧の着火性は、点火の瞬間の燃料噴霧濃度だけで決まるものではなく、燃料噴霧の不均一性などに起因した、他の確率的な要因によって影響を受け、放電による初期の火炎発生よりも、その後の火炎伝ばの過程が着火の可否に強く影響する。時間平均的な燃料蒸気濃度が等しく、かつ放電の瞬間における着火判定を行った領域内の燃料噴霧濃度が等しい場合でも、不均一性が異なれば着火率は異なることが明らかになった。また着火に最適なむらのスケールおよび強度の存在が示唆された。

さらに低揮発性の燃料であるデカンを用いて、同様に着火実験を行ったところ、着火に最適な不均一性はメタノール噴霧に比べより低くなった。またその際に形成された輝炎の状態を観察したところ、燃料噴霧の着火により噴霧火炎中に形成される輝炎領域は、燃料噴霧濃度が低く確率的に着火にいたる範囲では面積にあまり変化はなく、ほぼ確実に着火にいたる程度に燃料噴霧濃度が増加すると、急激に拡大した。また燃料噴霧の不均一性が強い場合は輝炎が形成されやすく、同一の瞬間濃度において輝炎の面積を最大とするむらのスケールが存在することが明らかになった。

8.2 燃料噴霧の不均一性が着火性に影響を及ぼす機構に関する一考察

点火栓により火花点火すると、局所的に高温領域が形成される。この高温領域に液体燃料が存在すると、燃料が蒸発し、燃焼に至る。この際形成される火炎を本研究では初期火炎と呼ぶ。ただし火花点火により形成される高温領域は、火炎よりも高い温度となっているため、初期火炎の発生にかかわらず、周囲の燃料噴霧を加熱、気化させることが可能であり、着火にいたるためには高温領域内において初期火炎を形成するために用いられる燃料噴霧の状態よりも、高温領域のごく近傍に存在し、初期火炎発生の後に火炎が伝ばする領域の燃料噴霧の状態が重要である。高温領域から火炎が伝ば可能な位置に燃料噴霧群が存在していた場合は、火炎はその場所へ選択的に伝ばし、拡大していく。また伝ばした火炎は周囲の液滴を加熱し、可燃な蒸気層を形成していく。可燃な蒸気層によって周囲の可燃な噴霧群へ火炎の伝ばが可能になった場合には、火炎は次の噴霧群へと選択的な拡大を繰り返し、着火へと至る。火炎伝ばの際、本研究で用いたような比較的液滴径の大きい粒子により構成された燃料噴霧は、火炎が粒子に到達するまでに完全に気化するわけではないため、燃料噴霧濃度そのものが直接現象に影響せず、粒子数や粒子間距離など、火炎が伝ば可能な距離に燃料噴霧粒子または粒子群が存在するかどうか火炎の伝ばの可否を決定する。ここで、例えば本研究で用いた燃料噴霧のような、平均粒子間距離が液滴径の数十倍程あり、かつ液滴間に十分可燃な燃料蒸気層が広く分散しているわけではない条件においては、燃料噴霧粒子が完全に均一に分散している場合は液滴間を火炎が伝ばせず、火花放電により強制的に火炎を形成しても周囲に火炎が伝ばし着火にいたることはない。したがって燃料噴霧が着火に至るのは、噴霧粒子が不均一に分散し、近傍粒子間の距離が平均粒子間距離ほど広くなくなるためである。

燃料噴霧中において、噴霧粒子が不均一に分散して存在している場合、近接した噴霧粒子間の距離は粒子個々にばらつきを持ち、非常に密接した領域や、反対に火炎が伝ばしないほど希薄な領域がさまざまなスケールで同時に形成されている。このうち特に粒子が密集した領域をクラスタと呼ぶ。クラスタは大規模なクラスタの中に、小規模なクラスタが複数存在しているといったような階層的な構造をもつため、クラスタ個々に完全に孤立しているわけではない。このため点火によって形成された火炎がクラスタ間を連続的に伝ばしていくことが可能となる。

燃料噴霧濃度および噴霧内に存在する最も特徴的な不均一性の大きさである特徴スケールが一定とすると、燃料噴霧の空間的な不均一性は、ある程度までは、不均一性が高いほどクラスタ内の数密度が増加するため着火性も良好になる。ただし不均一性の増加と共に近接粒子間の距離が低下する一方で、火炎が伝ばできないような希薄な領域も拡大していく。したがって不均一性が高すぎる場合は、クラスタ間の燃料噴霧数密度の連続性の低下により火炎が伝ばできなくなり、着火性も低下する。よって燃料噴霧の空間的な不均一性は、着火性に関して最適値を持つ。

一方、燃料噴霧の空間的な不均一性のスケールも、同一燃料噴霧濃度で、不均一性の度合いが等しいとすると着火性に対して最適値をもつ。これは、特徴スケールが小さい場合には、空間に比較的小さなクラスタが分散して存在するためクラスタ間を火炎が伝ばしにくくなり、ま

た反対に特徴スケールが大きい場合には、クラスタ内において比較的均一に粒子が分散しているため、クラスタ内において火炎が伝ばしにくくなるためであると考えられる。

このように、燃料噴霧の着火性は、その空間的な不均一性に影響を受けるが、その最適値は燃料噴霧の揮発性に影響を受ける。揮発性が低い場合には、燃料噴霧間の燃料蒸気相の濃度が低下するため、火炎が伝ばしにくくなり、特に燃料噴霧の希薄な領域においては火炎が伝ばしなくなる。したがって低揮発性燃料では、高揮発性燃料に比べ、不均一性が高い場合に急激に火炎が伝ばしにくくなり、着火性も低下する。このため、低揮発性燃料の着火に最適な不均一性の強度は高揮発性燃料のそれに比べ弱くなる。

またデカンのように、燃焼時に輝炎が発生するような場合においては、燃料噴霧の不均一性は輝炎の形成にも影響を及ぼし、不均一性が高い場合ほど、局所的な高濃度領域が形成されているため、輝炎の領域が拡大する。また輝炎が最も大きくなるような特徴スケールも確認された。これは、特徴スケールが非常に小さい場合は単一滴の燃焼に近く、本研究で用いたような微小な液滴では青炎が発生し、一方特徴スケールが大きい場合には、小規模なむらが弱くなるため、クラスタ内の近接粒子同士の距離が広くなり、結果的に火炎はクラスタ内において複数に分割してしまい、特徴スケールが小さい場合と同様に青炎が形成されるためである。

8.3 本研究分野の今後の展望

噴霧の着火および燃焼現象には多くの不確定なパラメータが存在し、そのすべてを整理することが難しい。このような影響を排除するために噴霧を極限までモデル化した単一滴や液滴列による着火、燃焼実験が多く行われている。しかしこの知見を噴霧燃焼に定量的に適用するためには、噴霧の空間的な分散状態の影響を明確にする必要がある。本研究では、単分散噴霧を用いることで、燃料噴霧の数密度分布に基づいた時間的、空間的な不均一性が着火性に及ぼす影響のみに絞って研究を行った結果、点火以前の未燃の燃料噴霧の不均一性が火炎の伝ばに影響し、結果的に着火性にも影響を及ぼすことと、着火性に対して最適な不均一性が存在していることを明らかにした。また燃料噴霧の不均一性は必ずしもランダムではなく、本研究で用いた燃料噴霧においては、不均一性の強度はランダムに比べ高かったが、このことはランダムな状態に比べ、局所的な高濃度領域が噴霧中に数多く存在しており、群燃焼現象の発生のトリガとなっていることを示唆している。さらに今後は、噴霧中に存在する噴霧粒子個々の粒子径の測定や、周囲気流の流動を火炎の発生および成長と同時に時系列的に測定することにより、噴霧の粒度分布や気流速度および乱流強度など、本研究では対象としていないパラメータの影響を定量的に明らかにする必要がある。また燃料噴霧の不均一性がどのように形成され推移するか明らかにし、不均一性を制御する技術の開発も興味のある点である。研究が進み、不均一性の影響を定量的に表現することが可能となれば、単一滴や液滴列で得られた非常に精度の高い知見を噴霧着火および燃焼現象に定量的に適用できるようになり、燃焼器の設計、製作が現在のような経験的な要因を元にした試行錯誤的なものから、論理的なものに発展可能と考える。

謝辞

本研究を進めるにあたりご助言，ご助力下さった皆様に深く感謝いたします。

徳岡 直静助教授には，本当に長い間，熱心で，そして暖かなご指導を受け賜り，まことにありがとうございました。ここに深く感謝の意を表します。

慶應義塾大学理工学部川口 修教授，植田 利久教授そして川口 春馬教授には，本研究をまとめるにあたりさまざまご助言，ご指導を受け賜りましたことをここに記し，謹んで心より感謝の意を表します。

研究や学会活動を通して有益なご助言と共に多くの励ましのお言葉を賜った同志社大学の藤本 元教授，千田 二郎教授，群馬大学の新井 雅隆教授，志賀 聖一助教授，天谷 賢児助教授，石間 経章助教授，弘前大学の稲村 隆夫教授，広島大学の西田 恵哉助教授，豊橋技術科学大学の鈴木 孝司助教授，大阪大学の赤松 史光助教授，そして修士課程の学生のころから私の研究活動のよりどころであった日本液体微粒化学会に謹んで心より感謝の意を表します。

そして，私が始めて研究室に配属されたころより，現在まで，研究活動や社会生活の模範としてさまざまな面で私を導いてくださいました，現いすゞ自動車株式会社赤木 三昌さま，現石川島播磨重工業株式会社の廣光 永兆さま，現富士重工株式会社の京徳 信夫さまに，感謝の意を表します。

また，本研究のため共に実験を行った菅 晃歩君，藤井 浩人君，小野 義仁君，野口 泰君，高橋 正文君，古林 崇志君，枝川 真也君，林 潤君，本研究には間に合いませんでしたが，共に研究を行った篠原 大輔君，中川政善君，田中 健一郎君，倉持 慎君，石川 継男君，堤 宗近君，そして，時を同じくして共に学び，研究し，苦勞を分かち合った先輩，同輩，後輩の皆様に感謝の意を表します。

最後に，私の長い博士課程での研究生生活を支え，応援してくれた両親には，心より感謝いたしております。

投稿論文および講演前刷の一覧

【本研究に関する投稿論文】

- [1] 寺島 幸士, 京徳 信夫, 廣光 永兆, 徳岡 直静, 燃料噴霧の着火性に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, 2002,68 巻 668 号, p.p.1266-1272
- [2] 寺島 幸士, 野口 泰, 廣光 永兆, 徳岡 直静, 燃料噴霧の空間的不均一性が着火性におよぼす影響, 日本機械学会論文集 B 編, 2003,69 巻 679 号, p.p.712-717
- [3] 寺島 幸士, 徳岡 直静, 空間的に不均一に分散する燃料噴霧の着火現象, 日本機械学会論文集 B 編, 2003,69 巻 680 号, p.p.932-937

【本研究に関する国内会議】

- [1] 寺島 幸士, 小野 義仁, 廣光 永兆, 徳岡 直静, 燃料噴霧の着火性に関する研究 (燃料噴霧の空間的な不均一性の影響), 第 7 回微粒化シンポジウム, 群馬大学 (群馬), 12 月 21 - 23 日 (1998)
- [2] 寺島 幸士, 篠原 大輔, 徳岡 直静, 燃料噴霧の着火性に関する研究 (燃料噴霧の空間的な不均一性の影響), 第 10 回微粒化シンポジウム, 大阪市立大学 (大阪), 12 月 21 - 22 日 (2001)
- [3] 枝川 真也, 林 潤, 寺島 幸士, 徳岡 直静, 燃料噴霧の着火性に関する研究 - 燃料噴霧の不均一性が着火性に与える影響 -, 第 11 回微粒化シンポジウム, 慶應義塾大学 (神奈川), 12 月 19 - 21 日 (2002)

【本研究に関する国際会議】

- [1] Terashima Koji, Suga Akio, Kyotoku Nobuo, Chuman Hirokatsu, and Tokuoka Naochika, Ignitability of Fuel Spray, The 7th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Seoul Korea, 18 - 22 August (1997)
- [2] Terashima Koji, Fujii Hiroto, and Tokuoka Naochika, Ignitability of Fuel Spray (Prediction of Ignitability by Stochastic Analysis), The Second Asian Conference on Atomization and Spray Systems, Korea, October 11 (1997)
- [3] Terashima Koji, Noguchi Yasushi, Hiromitsu Nagayoshi, and Tokuoka Naochika, Ignitability of Fuel Spray (Effect of Spatial Inhomogeneity on Spray Ignition Phenomenon), 4th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Korea, 1-2 October (1999)
- [4] Terashima Koji, Noguchi Yasushi, Hiromitsu Nagayoshi, and Tokuoka Naochika, The Effect of Spatial Inhomogeneity on Spray Ignition Phenomenon, 16th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Europe, Darmstadt Germany, 11-13 September (2000)
- [5] Terashima Koji, Noguchi Yasushi, Takahashi Masafumi, and Tokuoka Naochika, Ignitability of Fuel Spray : The Effect of Spray Characteristics and Spatial Inhomogeneity, 6th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, Busan Korea, 11-13 October (2001)

- [6] Hayashi Jun, Terashima Koji, Edagawa Shinya, and Tokuoka Naohika, Study on Ignitability of Fuel Spray (Effect of Inhomogeneity on Spray Ignition Phenomenon), The 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Sorrento Italy, 13-18 July (2003)

【その他の国内会議】

- [1] 樺沢 剛志, 寺島 幸士, 梶原 滋人, L E E J, 徳岡 直静, 高温気流中における微小液滴の蒸発, 日本機械学会関西支部定時総会講演会, 大阪産業大学(大阪), 3月21 - 22日(1997)
- [2] 徳岡 直静, 中馬 弘勝, 寺島 幸士, 位相ドップラ法, 回折法および直接写真法による粒度分布の比較, 第8回微粒化シンポジウム, 大阪大学(大阪), 12月20 - 21日(1999)
- [3] 中川 政善, 篠原 大輔, 寺島 幸士, 徳岡 直静, 粒度分布操作方法の開発, 第11回微粒化シンポジウム, 慶應義塾大学(神奈川), 12月19 - 21日(2002)
- [4] 枝川 真也, 寺島 幸士, 林 潤, 徳岡 直静, 燃料噴霧の粒度分布が着火性に与える影響, 第41回燃焼シンポジウム, エポカルつくば(茨城), 12月3 - 5日(2003)

【その他の国際会議】

- [1] Noguchi Yasushi, Terashima Koji, Takahashi Masafumi, and Tokuoka Naohika, Ignitability of Fuel Spray (Effect of Droplet Diameter Distribution on Spray Ignition Phenomenon), 17th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Europe, Zurich Switzerland, September 2-6 (2001)
- [2] Shinohara Daisuke, Nakagawa Masayoshi, Terashima Koji, and Tokuoka Naohika, Development of Drop Size Distribution Control Technique, 7th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, Tainan Taiwan, 14-16 November (2002)
- [3] Terashima Koji, Shinohara Daisuke, Nakagawa Masayoshi, and Tokuoka Naohika, Development of Drop Size Distribution Control Technique, The 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Sorrento Italy, 13-18 July (2003)

【その他の出版物】

- [1] 寺島幸士, EngineSpray (2003年度 ICLASS セッション解説), 微粒化, 2003, 12月号