

### 管内進行火炎の気体燃料噴射による燃焼改善効果について

須磨, 健太郎 / SUMA, Kentaro

---

(発行年 / Year)

2009-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2009-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

平成 20 年度  
修士論文

管内進行火炎の気体燃料噴射による  
燃焼改善効果について

The effect of combustion improvement for tube flame  
by using injection of fuel gas

指導教授 川上 忠重

法政大学大学院 工学研究科  
機械工学専攻 修士課程

07R1114 須磨 健太郎

Kentaro SUMA

The effect of combustion improvement for tube flame  
by using injection of fuel gas

Kentaro SUMA  
Graduate student

Abstract

Recently, the restriction to combustion products is becoming severe from the viewpoint of environmental problems such as global warming. In this study, experiments have been carried out with lean propane-air mixtures to examine the influence of using injection of mixtures on flame shape and flame speed in a combustion tube. The experimental results in this study are as follows:

- 1) Increase rate of the flame speed near flammability limit is more effective by lean mixture injection.
- 2) The increasing rate of flame speed decreases with decreasing of ambient oxygen concentration.
- 3) The dropping rate of ionization probe voltage is depended on the ambient oxygen concentration at same equivalence ratio of injection mixtures.

## 目次

Abstract	1
目次	2
1. 緒論	5
2. 環境問題	6
2-1 地球温暖化	
2-2 地球温暖化とは何か	
2-3 地球温暖化による影響	
2-4 地球温暖化への対策	
2-5 日本での温室効果ガス排出	
2-6 大気汚染	
3. 内燃機関における排出ガス	14
3-1 自動車の排出ガス問題	
3-2 排出ガスの成分と影響	
3-2-1 窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )	
3-2-2 硫黄酸化物( $\text{SO}_x$ )	
3-2-3 未燃炭化水素(Hydrocarbon: HC)	
3-2-4 粒子状物質(Particulate Matter: PM)	
3-2-5 一酸化炭素(CO)	
3-2-6 二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )	
3-3 自動車排出ガス規制	
3-4 排出ガス低減手法	
4. 気体燃料の燃焼	22
4-1 気体燃料の燃焼形態	
4-2 予混合火炎の基本的な構造	
4-3 可燃限界	
4-4 乱流予混合火炎の構造と伝播機構	
4-5 火炎における特異現象	
4-5-1 火炎中のイオン	
4-5-2 選択拡散	
4-6 火炎における乱れの増幅	
4-7 着火と消炎	
4-7-1 着火	
4-7-2 消炎	

5.	実験装置及び実験方法	38
5-1	本研究の目的	
5-2	実験装置	
5-2-1	実験装置概要	
5-2-2	燃焼管	
5-2-3	点火装置	
5-2-4	タイマー、遅延回路	
5-2-5	バッテリー	
5-2-6	ビデオカメラ	
5-2-7	電磁弁	
5-2-8	イオンプローブ	
5-2-9	オシロスコープ	
5-2-10	燃料混合容器	
5-2-11	ケースファン	
5-2-12	体積流量計	
5-2-13	コンプレッサー	
6.	実験方法	44
6-1	実験手順	
6-2	実験試料	
6-3	実験条件	
6-4	混合気作成方法	
6-4-1	当量比の定義	
6-4-2	雰囲気酸素濃度の調節	
6-4-3	混合気噴射による総括当量比の計算	
6-4-4	プロパン噴射による総括当量比 $\Phi$ の計算	
6-4-5	総括当量比 $\Phi = 0.55$ 、管内当量比 $\phi = 0.50$ の場合の計算例	
6-5	火炎挙動の観察	
6-6	火炎伝播速度の算出	
6-7	断熱火炎温度の算出	
7.	実験結果と考察	64
7-1	希薄混合気噴射による影響	
7-1-1	火炎挙動	
7-1-2	噴射タイミングによる影響	
7-1-3	噴射混合気の当量比による影響	
7-1-4	雰囲気酸素濃度による影響	
7-1-5	イオンプローブによる電圧降下	

7-2	燃料直接噴射による影響	
7-2-1	火炎挙動	
7-2-2	噴射圧力による影響	
7-2-3	イオンプローブによる電圧降下	
7-3	燃料直接噴射と混合気噴射との比較	
8.	結論	74
	参考文献	75
	謝辞	76
	実験結果	77

# 1. 緒論

近年、地球温暖化、大気汚染等の環境問題の観点から、燃焼生成物に対する規制は年々厳しくなりつつある。

自動車エンジンなどの内燃機関から排出されるガスに含まれる環境汚染物質として、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、HC、PM、CO 及び  $\text{CO}_2$  等がある。特に都市部に関しては、これらの排出される物質の中でも  $\text{NO}_x$  の排出が深刻な問題となっている<sup>1)</sup>。また、内燃機関に使用される燃料の大部分は化石燃料を使用している。しかし、人口の増加や他国の消費量増加等によって、化石燃料は枯渇の恐れがあり、環境問題同様に内燃機関において深刻な問題となっている。そのため内燃機関には、これらの燃焼生成物に含まれる環境汚染物質の低減、資源の有効活用、高効率化などの燃焼改善が求められている。

内燃機関の燃焼改善の手法としては、希薄燃焼や排気ガス再循環方式(EGR)等の火炎温度低減による手法<sup>2)</sup>が挙げられる。しかしこれらの手法では、過度の希薄化による着火性の低下、不規則火炎の発生、燃焼時間の増大等の問題がある。

そこで本研究では、新たな燃焼改善手法の確立の観点から、管内進行火炎伝播法<sup>3)</sup>を用いて実験を行い、進行する火炎に対して希薄予混合気を直接噴射し、火炎挙動、火炎伝播速度に及ぼす混合気噴射の影響を調べ、併せて、燃焼促進効果に及ぼす最適噴射時期の検討を行った。

## 2. 環境問題

### 2-1 地球温暖化

私たちが生活している地球が誕生したのは今から約 46 億年前であり、太陽系の惑星では唯一生命体が多数存在している惑星である。その地球が今、環境問題という大きな問題に直面している。環境問題の中でも、特に 20 世紀後半から盛んに叫ばれている地球温暖化については、今後の地球に生息している生命にとって非常に重要な問題となっている。地球温暖化が国際的に大きく取り上げられたのは、1985 年オーストリアのフィラハで地球温暖化を議題として科学者や政策担当者が一堂に会したときが最初である。1988 年には G7 サミットで気候変動問題が国際政治の課題として取り上げられ、1990 年代になると、各国が条約に基づいて温暖化問題の解決にむけて協力して取り組むことになった。1997 年には京都議定書が作られ、現在、各国ではこの議定書を基に地球温暖化に対しての対策が行われている。では、この地球温暖化とはいったいどのようなものだろうか。

### 2-2 地球温暖化とは何か

地球温暖化とは、20 世紀後半以降に見られる世界規模での気温の上昇のことである。そして、この地球温暖化の主な原因として、人間活動による温室効果ガスの急激な増加が挙げられている。

温室効果ガスとは、温室効果のある気体のことを示し、主な例として水蒸気や二酸化炭素などが挙げられる。これらの気体は、赤外線を吸収し、再び放出する性質がある。この性質のために、太陽で暖められた地球の表面から地球の外に向かう赤外線の多くが、再び地球の表面に戻り、戻ってきた赤外線によって地球の表面付近の大気を暖めることができる。これを温室効果と呼び、この温室効果の性質をもつ気体のことを温室効果ガスという。地球の大気には二酸化炭素など、この温室効果ガスがわずかに含まれている。仮に、温室効果が無い場合の地球の表面の温度は、氷点下 19℃と見積もられており、この温室効果によって世界の平均気温はおおよそ 14℃となっている。



よって、これらの自然のメカニズムにより、地球表面が今日のような水が液体で存在できる温度に保たれ、多様な生物の存在が可能になっている。Fig.2-1に温室効果の模式図を示す。

代表的な温室効果ガスの例として水蒸気と二酸化炭素を挙げたが、そのほかの温室効果のある気体として、メタン、一酸化二窒素、オゾン、フロンガスなどのハロカーボン類が挙げられる。しかし、地球上の大気中の大半を占める窒素(78%)と酸素(21%)には温室効果はほとんどなく、これら温室効果ガスをすべて加えても大気中の気体としては全体の 1%程度の濃度しかない。つまり、今日の温暖な気候は、わずかな量の温室効果ガスによって実現されていることがわかり、これら温室効果ガスの増加は地球上の安定した生命活動に非常に大きな影響を及ぼすことがわかる。では、この温室効果ガスの増加はどのようにして発生したのだろうか。

温室効果ガスの増加の要因としては、近年の人間活動の飛躍的な増大が挙げられる。Fig.2-2に人間活動の増大について、人口及び1人当たりの活動(生産、消費、廃棄)をパラメータとして示す。この図から明らかなように、18世紀の産業革命の開始を境に一人当たりのエネルギー消費量は増加し、さらに20世紀から21世紀への約100年間で、人口とエネルギー消費の急激な増加がわかる。次に、Fig.2-3に西暦0年から2005年までの主な温室効果ガスの大気中の濃度の変化を示す。この図から明らかなように、二酸化炭素の大気中の濃度は過去数百年にわたって280ppm程度だったのに対し、18世紀半ばから上昇を始め、特にここ数十年で急激に増加しているのがわかる。これは、Fig.2-2の傾向と酷似しており、産業革命以降に発達した動力等に石炭や石油が大量に使われるようになったためである。また、二酸化炭素以外の温室効果ガス(メタン、一酸化二窒素など)も、同様に18世紀半ばから急激に増加している。これは、増加した人口を支えるための農業や畜産などの活発化にともなう、耕地の拡大、肥料の使用の増加、家畜の増加などによるものと考えられる。

つまり、大気中の温室効果ガスの濃度は、産業革命の開始以降の人間活動による化石燃料の使用や森林の減少などによって急激に増加したのである。また、2007年に発表された「IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change : 気候変動に関する政府間パネル、1988年設立 (以下 IPCC))」第4次評価報告書統合

報告書」においても同様の報告がなされている。

以上のことから、近年の人間活動による温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出の増加が温室効果を強め、地球温暖化を引き起こしている大きな原因となったのである。



Fig.2-1 温室効果の模式図<sup>4)</sup>

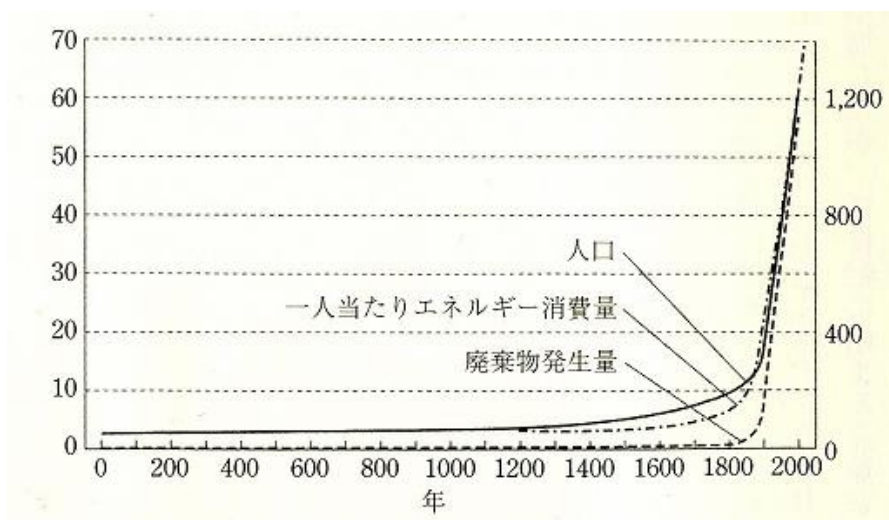


Fig.2-2 人間活動の増大<sup>5)</sup>

人口(左軸、単位:億人)、1人当たりエネルギー消費量(右軸、単位: MJ/人・日)  
※2004年は約1800MJ/人・日、廃棄物発生量(左軸、単位:100万t/年)の変化

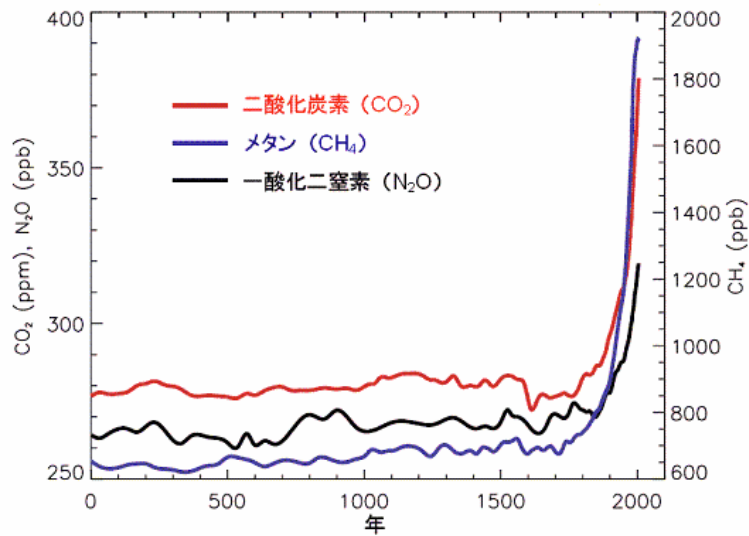


Fig.2-3 西暦 0 年から 2005 年までの主な温室効果ガスの大気中の濃度の変化<sup>6)</sup>

### 2-3 地球温暖化による影響

近年の人間活動の急速な発展による温室効果ガスの増加が地球温暖化の原因とわかったが、この地球温暖化による影響は、IPCC による「第 4 次評価報告書統合報告書」にまとめられた世界中の研究機関の気温の予測結果をもとに以下のことが予想される<sup>8)</sup>。

#### ①さらなる気温の上昇

21 世紀末の地球の平均気温は 20 世紀末と比較して 1.1~6.4°C 上昇し、気温の上昇の程度は地域によって異なり、陸上や北半球の高緯度で大きくなるとされている。さらに、これら気温の上昇は、今後の温室効果ガスの排出量が多いほど気温の上昇が大きいと予測している。

#### ②海面の上昇

気温上昇により、海水が膨張し、北極・南極の氷の融解が起こるため、今後 100 年の間に海面水位は 18~59cm の上昇と予測している。ちなみに、2080 年までに海面水位が 40cm 以上上昇した場合、沿岸の高潮により被害を受ける世界の人口は、年平均で 7500 万人から 2 億人と予測している。さらに、北極海の氷が夏季には完全に溶けてしまうという予測もしている。また、極端な高温や

大雨の頻度が増加する可能性が高いと予測している。

## ②食糧危機

熱帯地域では、わずかな気温上昇でも農作物の生産量が減少すると予測している。人口増加に伴い、食糧増産が求められるのに反して農作物の生産量が減少し、食糧価格が高騰し、低収入の開発途上国ではさらに飢餓人口が増加すると考えられる。

## ③生態系への影響

20 世紀末の時点で既に多くの野生生物の種が危機的状況にあるとされているが、この地球温暖化によって 21 世紀には、現在「深刻な危機に曝されている」と分類されている一部の種は絶滅すると予測している。さらに、「危機に曝されている、または脆弱である」と分類されているものの大多数は、希少種となり、やがて絶滅種になるとも予測している。

## ④健康への影響

生物、植物、水などによって媒介する伝染病の多くは、わずかな気候変動によっても発生する。IPCC によると、マラリアとデング熱は、現在、世界人口の 40～50%に影響を与えているが、温暖化が進むとその伝染する地域が拡大すると予測している。

また、熱波の発生により死亡や疫病が急増し、頻繁に起こる洪水により溺死、下痢、呼吸器疾患、とくに開発途上国では栄養失調になる人口が増加すると予測している。

## 2-4 地球温暖化への対策

地球温暖化による影響は、世界規模的に考えても非常に大きなものである。そのため、早急に地球温暖化を食い止める必要があり、中でも人為的に排出されている温室効果ガス(特に二酸化炭素)の排出を抑制することが重要である。IPCC は、1992 年の地球サミットでの条約に示された安定化濃度の問題を早くから取り上げている。その中では、大気中の温室効果ガスの安定化には数百年

かかり、現在の濃度で安定させるには直ちに排出量 50～70%の削減が必要という見解を述べている。

このように、現状においても直ちに温室効果ガスの削減が必要とされているが、地球温暖化の防止策の鍵として期待されるものが、1997年京都で開催された第3回締約国会議（温暖化防止京都会議）で採択された京都議定書である。京都議定書の主な内容として、

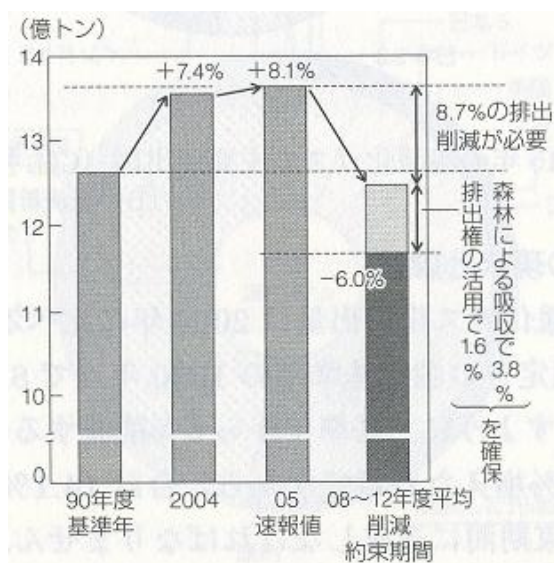
- ① 先進国は第1約束期間（2008～2012年）までに、温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、HFC、PFC、SF6）を1990年より5.2%削減する（日本、アメリカ、EUの削減量は各6%、7%、8%）。
- ② 温室効果ガス吸収源の変化の算定は、1990年以降の植林、再植林、伐採に限定する
- ③ 先進国は協力することによって削減目標を達成することができる
- ④ 先進国間の排出権取引と共同実施を導入する
- ⑤ クリーン開発メカニズムで途上国の持続可能な発展を支援し、先進国の削減目標の達成を助ける

がある<sup>10)</sup>。この京都議定書は2005年2月に発効され、日本では2012年までに温室効果ガスを90年比で6%削減することが求められている。

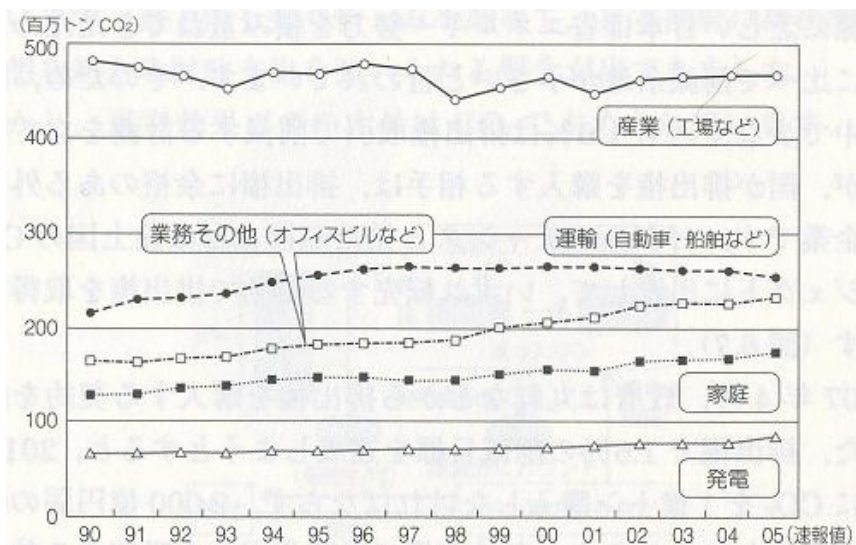
## 2-5 日本での温室効果ガス排出

京都議定書により、日本は2012年までに温室効果ガスを6%削減することが必要となった。そこで、Fig.2-4に日本における温室効果ガスの排出割合を示す。この図から明らかなように、現在の日本における温室効果ガスの排出量は、京都議定書基準とされる1990年よりも二酸化炭素の排出量はよりも約8%増大しており、森林による吸収や排出権の活用を考慮した場合でも9%近く削減しな

ければならない。そして、排出量割合の最も多い二酸化炭素の部門別排出量を見ると、工場から排出されることの多い産業部門が最も多く、トラックや自動車から排出される運輸部門が続く結果となっている。いずれの部門も、燃料の大半を化石燃料から賄っていることから、二酸化炭素の削減にはこれら化石燃料を使用している内燃機関などの各機関の排出の抑制が早急に必要となってくる。



(a) 温室効果ガスの総排出量の推移 (CO<sub>2</sub> 換算)



(b) 二酸化炭素の部門別排出量の推移

Fig.2-4 日本における温室効果ガスの排出割合<sup>7)</sup>

## 2-6 大気汚染

地球温暖化と共に、20世紀以降の急速な人間活動の拡大によって発生したもう一つの環境問題として、大気汚染が挙げられる。

日本において大気汚染が深刻な問題として取り上げられたのは、第二次世界大戦後、1960年代から1970年代にかけての高度成長期における、工業地域から排出された物質、モータリゼーションの急速な普及が原因による産業公害型汚染がある。

大気汚染対策について見ると、1967年に公害対策基本法が始まり、汚染者負担の原則や環境基準が定められた。翌70年には大気汚染防止法が成立し、工場や事業場から排出する汚染物質、施設・規模ごとに排出基準などが定められ、硫酸酸化物を中心に公害型大気汚染の対策が取られた。(現在の排気ガス規制は、一酸化炭素、炭化水素、窒素酸化物、粒子状物質がある。) 1970年代後半から大都市を中心にした新たな大気汚染が問題となり、その発生源は、ボイラーなどの固定発生源、自動車等の移動発生源など多岐にわたっており、全国各地で大気環境測定所と自動車排出ガス測定所が設置された。Fig.2-5は、全国の測定局における二酸化窒素及び一酸化窒素濃度の年平均の推移を示したものであるが、1972年をピークに一酸化窒素、二酸化窒素濃度共に急激に減少していることがわかる。

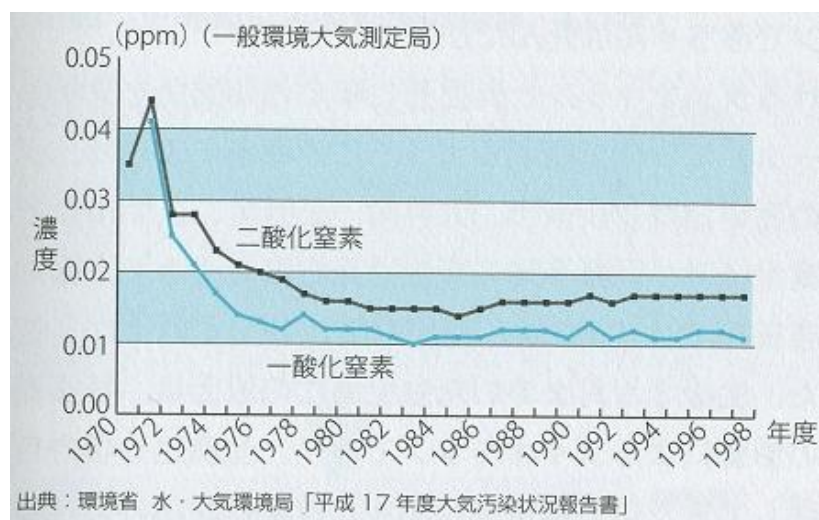


Fig.2-5 全国の測定局における二酸化窒素及び一酸化窒素濃度の年平均値の推移<sup>9)</sup>

## 3. 内燃機関における排出ガス

### 3-1 自動車の排出ガス問題

18世紀の産業革命以降、今日では温室効果ガスの増大による地球温暖化、工場や自動車などから排出される物質による大気汚染などの環境問題が非常に深刻となっている。これら地球温暖化防止及び大気環境改善に対する関心が世界的に高まるなか、2005年にはこれら環境問題の改善の鍵と期待される京都議定書が発効され、地球温暖化防止に対する動きがより活発化している。

自動車などの内燃機関から排出される排出ガスに関して、日本、アメリカ、EUの先進国においては、今後の排出ガス規制値が決定し、2005年から2008年にかけて排出ガス規制が強化され、都市大気汚染低減に向けての仕組みが整いつつある。自動車による大気汚染問題が顕在化してきたのは、モータリゼーションの急速な進展以降のことであり、ヨーロッパ、アメリカでは1960年代に、日本では1970年代、発展途上国では1990年代以降である。都市交通起因の環境問題に対し、各国でさまざまな取り組みがなされてきた。アメリカでは環境保護庁(Environmental Protection Agency: EPA)が1970年に、日本では環境庁(現:環境省)が1971年に設立され、これらの環境関連省庁はさまざまな環境問題に対処すべく、多くの政策を打ち出してきた。その代表例として挙げられるのが、通称「マスキー法」と呼ばれる1970年に成立したアメリカの大気浄化法(Clean Air Act: CAA)である。その後、先進諸国においては排出ガス規制が時代と共に強化されていったのである。

このように、地球環境問題と都市環境問題に対する自動車関連の燃費・排出ガス規制などの環境規制は、ますます厳しくなる方向にある。CO<sub>2</sub>排出抑制は温室効果ガスの主因として世界的な課題であり、NO<sub>x</sub>などの環境汚染物質の排出抑制は、都市環境という局地環境問題であり、両者とも自動車の排出ガスと非常に大きく関わっている<sup>11),12)</sup>。



## 3-2 排出ガスの成分と影響

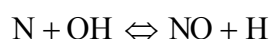
自動車エンジンなどの内燃機関から排出されるガスに含まれる環境汚染物質として、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、HC、PM、CO 及び CO<sub>2</sub> 等がある。これら環境汚染物質について、以下にまとめた<sup>13)</sup>。

### 3-2-1 窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)

一般に NO<sub>x</sub> とは NO (一酸化窒素)、NO<sub>2</sub> (二酸化窒素)、N<sub>2</sub>O (一酸化二窒素)、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (三酸化二窒素)、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (五酸化二窒素) などが含まれ、通常 NO<sub>x</sub> として表される。健康上問題となるのは、NO および NO<sub>2</sub> である。NO は血液中のヘモグロビンと結合して酸欠症状を呈する。一方、NO<sub>2</sub> は刺激性が強く、気管や肺の障害を招く。窒素の起源と生成機構によって Thermal NO<sub>x</sub>、Prompt NO<sub>x</sub>、Fuel NO<sub>x</sub> に分けられる。なお、N<sub>2</sub>O は温室効果が高いといわれている<sup>8)</sup>。

#### 1) Thermal NO<sub>x</sub>

空気中の酸素を起源とし、1800K 以上の高温で生成されることからこの名で称されている。Thermal NO<sub>x</sub> の反応機構は Zeldovich によって提案され、拡大 Zeldovich 機構の反応によって生成される。



#### 2) Prompt NO<sub>x</sub>

層流予混合火炎で NO の生成過程を観察すると、燃料希薄火炎では火炎帯下流で緩やかに NO が生成されるのに対し、燃料過濃火炎ではほとんどの NO が火炎帯内で生成されてしまう。そのとき、火炎帯前半部で HCN の生成が見られ、後半部でそれが減少するにつれて NO が生成されている。希薄火炎では反応式(上)の拡大 Zeldovich 機構によって NO が生成されると見てよいが、過濃火炎では燃焼の連鎖反応の中で、NO が生成されているようである。このように空気中の窒素を起源としながらも、拡大 Zeldovich 機構以外の経路で急速に生成される NO<sub>x</sub> のことを Prompt NO<sub>x</sub> という。その生成濃度は当量比 1.2~1.4

で最大となり、ベンゼンの 100ppm、アセチレンの 300ppm を除いては、大体 60～80ppm である。

### 3) Fuel NO<sub>x</sub>

空気中の窒素ではなく、燃料中に含まれる窒素酸化物による NO の生成は Fuel NO と呼ばれ、化石燃料のほとんどに窒素化合物が含まれている。例として、石炭中の窒素含有率は約 0.2～3.4%で、C 重油は約 0.1～0.4%である。Fuel NO<sub>x</sub>は、主に HCN、CN、と NH<sub>3</sub>を経由して NO を生成する。Fuel N から NO への変換は非常に速く、温度依存性は Prompt 機構と Thermal 機構よりはるかに低い。

#### 3-2-2 硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)

ディーゼルエンジンで使用する軽油や重油は、硫黄分を多く含んでいる。その硫黄分が燃焼により酸化され、SO<sub>x</sub> (SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>)が発生する。対策として、低硫黄燃料を使用するか、脱硫機能を備えた排気浄化装置が必要となるが、大型で高価なため、自動車には不適である。したがって、前者の方法に依存することになるが、規制強化が行われており、サルファフリー燃料への切り替えが進んでいる。現在、環境中の最大の原因は工場排出煙で、自動車によるものは少ない。SO<sub>x</sub>は酸性雨の原因であり、雨に溶解する。

#### 3-2-3 未燃炭化水素(Hydrocarbon:HC)

燃料中の炭素の不完全燃焼、つまり酸素（空気）不足時に発生するが、ある程度以上、酸素過多の状態になると燃焼が不確実になり、かえって増加する。急冷や低温空気との混合により反応が凍結されると、中間生成物が未燃のまま排出される。また、液体燃料の噴霧燃焼で微粒化特性が悪いと、巨大油滴が蒸発を完了しないまま、高温領域を通過してしまうこともある。火花点火機関においては、燃焼室壁面の消炎作用によって熱分解や酸化反応の遅れたガスがそのまま排気されることがあり、未燃炭化水素排出の主要原因の一つとなっている。直接人体への影響は少なく、呼吸器、眼への刺激が生じる程度であるが、太陽光を受けると、大気中の NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>、アルデヒド等と反応して、光化学スモ

ッグの発生原因となる。

#### 3-2-4 粒子状物質(Particulate Matter: PM)

昔はすすと呼ばれ、現在は大気汚染物質のひとつであるマイクロメートル単位の粒子のことである。PM の排出は不完全燃焼によるものであり、燃焼効率の低下を意味している。よって、燃料の燃焼においては、PM の排出を極力抑える必要があり、なかでも、粒径  $10\mu\text{m}$  以下の粒子は大気中での沈降速度が遅く、比較的長時間浮遊していることから、浮遊粒子状物質(SPM)と呼ばれている。さらに、粒径の小さい  $2.5\mu\text{m}$  以下のものは微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)と呼ばれ、呼吸器を通して肺胞にまで達することから健康への影響も大きいと考えられている。

#### 3-2-5 一酸化炭素(CO)

燃料中の炭素の不完全燃焼、つまり酸素（空気）不足時の燃料の不完全酸化によって発生する。したがって、理論混合比よりも希薄側では、CO 生成量は少なくなる。対策としては、希薄燃焼を行わせることは当然であるが、できるだけ混合を良くし、かつ反応が凍結しないようにガス温度を緩やかに下げなければならない。強い毒性の気体で、血液中のヘモグロビンとの親和性が強く、体内組織へ酸素を運搬する機能を阻害する。程度により、呼吸障害、中毒症状、酸欠症状、致死等の症状が出る。

#### 3-2-6 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)

炭素が酸化して得られるも物質の中で、二酸化炭素は燃焼による最終生成物として得られる。また、人間の体内でエネルギーを得た場合にも排気される。燃焼プロセスで消費するエネルギー源の多くは化石資源であり、すべての化石資源は炭素を含有していると言っても過言ではなく、燃焼排出物の気相成分には二酸化炭素が含まれることになる。二酸化炭素は、前述の通り温室効果を持つ気体として地球温暖化の元凶の一つとされ、排出量を低減することが求められている。大気中の二酸化炭素濃度は Fig.2-3 に示すように、1700 年代に約 280ppm を維持していたものの、1940 年代から急速に増加し、現在では約 360ppm

まで至っている。この傾向は、高度経済成長に伴うエネルギー消費速度の増加傾向と一致しており(Fig.2-2)、二酸化炭素問題の主因が化石資源の消費に依存する根拠となっている。

### 3-3 自動車排出ガス規制

自動車などの内燃機関から排出される環境汚染物質による大気汚染が昭和40年代以降のモータリゼーションの急速な進展から問題となり、大気汚染問題への対策を求められるようになった。最初の自動車排出ガス規制は、昭和41年のガソリン自動車に対するCO規制である。Table3-1にガソリン乗用車における排出ガスの規制値、Table3-2にガソリン車における排出ガス規制の動向を示す。昭和47年には、CO規制に10モード測定によるHC、NO<sub>x</sub>の規制値を加えた「昭和48年排出ガス規制基準」が告知される。その後、日本版マスキー法とされ、当時としては世界で一番厳しい排出ガス規制である「昭和53年規制」が実施された。この規制のクリアには、当時の技術の延長上では対応が困難であったが、無鉛ガソリンの市場への導入と共に、三元触媒方式や希薄燃焼方式によって、世界一厳しいとされる53年規制を自動車各社は成果をあげていったのである。自動車排気浄化触媒技術は、大気環境保全のために必要不可欠な技術である。よって、これら排出ガス技術の確立と度重なる排出ガス規制の強化により、日本は自動車保有台数が増加傾向にあるにもかかわらず、大気汚染は改善傾向にある。

昭和53年規制が実施されて以降、自動車利用の拡大に伴って規制対象排出ガスも逐次追加され、ガソリン自動車に関してはCO、HC及びNO<sub>x</sub>が、ディーゼル自動車についてはさらにPM及び黒鉛が規制対象となっている。平成12年規制以降は、これまで確立された技術に基づいて排出ガス規制が決められていたのに対し、可能性のある技術に基づいて決められるようになった。したがって、これまではエンジンモディフィケーションで環境汚染排出ガスの低減を実現してきたが、これ以降は排気後処理が必要となってきたのである。

最近では、ガソリン車に対しては、平成12年、13年、14年規制(新短期規制)としてCO、HC、NO<sub>x</sub>の排出基準の強化、排気後処理装置の性能劣化を監視する車載診断システム(OBD)の装置義務付けなどを実施し、平成17年にはガソリ

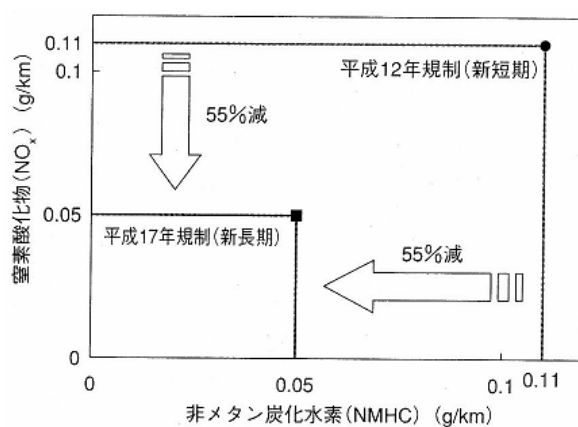
ン・ディーゼル車とも排気ガス試験法を見直すとともに、世界一厳しい排出基準の強化(新長期規制)を実施し、自動車の排出ガス低減を図っている。Fig.3-1にガソリン乗用車の排出ガスレベルを示す<sup>12)</sup>。

Table3-1 ガソリン乗用車における排出ガスの規制値

規制(年)	モード	平均基準値		
		CO(g/km)	HC(g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)
昭和48年規制	10モード	18.4	2.94	2.18
昭和50年規制	10モード	2.1	0.25	1.2
昭和51年規制	10モード	2.1	0.25	0.6
昭和53年規制	10・15モード	2.1	0.25	0.25
平成12年規制	10・15モード	0.67	0.08	0.08

Table3-2 ガソリン車における排出ガス規制の動向

排出ガス規制	主な規制内容
昭和50年規制	昭和47年に、アメリカのマスキー法と同程度の規制をすべきだという結論から昭和49年に設定された規制
昭和51年規制	昭和50年規制に対して、さらにNO <sub>x</sub> を低減させるものとして設定された規制
昭和53年規制	昭和51年規制に対して、さらにNO <sub>x</sub> を低減させるものとして設定された規制(日本版マスキー法であり、当時としては世界一厳しい規制)
平成12年規制	昭和53年規制に対して、CO、HC、NO <sub>x</sub> を約70%低減させるものとして設定された規制



注)排出ガス値は、平成17年排出ガス基準に係る試験モードで換算などを行っている。

Fig.3-1 ガソリン乗用車の排出ガスレベル

### 3-4 排出ガス低減手法<sup>14),15)</sup>

1970年代の大気汚染以降、乗用車の排出ガスは年々厳しく規制されていったが、今後もさらに規制は強化されていくと予想される。排気ガス規制の中で、都市部において深刻な問題になっている物質としてはNO<sub>x</sub>があげられる。ここでは、主にNO<sub>x</sub>の低減を目的とした排出ガスの主な低減手法として、希薄燃焼と排気ガス再循環方式(EGR: Exhaust Gas Recirculation)について述べる。

希薄燃焼とは、理論空燃比より薄い混合気を燃焼させることでNO<sub>x</sub> (Thermal NO<sub>x</sub>)を低減することを目的としている。希薄燃焼を用いたガソリン機関はリーンバーン型エンジンと呼ばれ、燃焼下限界に近い希薄混合気の燃焼により成立する。ガソリン機関については、燃費がディーゼル機関よりも悪いとされているが、その原因として空気量を調整するスロットル弁での絞り損失が大きいこと、予混合燃焼のために空気過剰率の高い条件で運転できないことにより、結果として燃焼温度が高く比熱が増加する一方、冷却水損失が増大することによるものである。そこでリーンバーン型ガソリン機関は、この欠点を改善して空燃比25以上で燃焼させることを目的として開発されたのである。リーンバーン型エンジンを最初に実用化させたのは、1984年のトヨタ・リーンバーン・システム(T-LCS: Toyota Lean Combustion System)である。その後1990年代には自動車各社でリーンバーン型エンジンが発表されていった。希薄燃焼については、最近ではディーゼル機関の噴射技術を利用した筒内噴射(直噴)による希薄燃焼の開発も進められている。直噴ガソリンエンジンの主な目的は、予混合希薄燃焼では達成し得ない空燃比30以上の超希薄燃焼を実現し、さらなる燃費改善を目指すことであり、また直接筒内に燃料を噴射、霧化させることで筒内の温度を低下させ、体積効率やノックの発生を改善し出力の向上を図ることができる。

排気ガス再循環方式(以下:EGR)とは、排気の一部を吸気に吸入させるもので、排気中のCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oのような比熱の大きな不活性ガスを吸入させて燃焼温度を下げることを目的としている。NOの低減効果は吸入ガス量によって低下するのではなく、シリンダー内の熱容量の増加に起因している。なお、EGRの供給率は負荷および回転数に対して制御されているが、エンジンの運転性を考える

と、全吸入ガス量の15%位が限界となる。これは酸素不足による燃焼の悪化を起こさないためであるが、この場合の燃焼改善を目的として、吸入スワールの増大や、2プラグ式、あるいは高エネルギー一点火方式などが実用化されている。

しかしこれらの手法については、過度の希薄化による着火性の低下、不規則火炎の発生、燃焼時間の増大等の問題があり、さらなる研究開発が求められている。また排出ガス低減以外にも、化石燃料自体を使用せずに、代替燃料を使用して環境汚染物質を排出しない方式についても研究が進められている。主な例としては、水素を利用した燃料電池及び水素エンジン(内燃機関)、バイオエタノール車、電気自動車などがある。

## 4. 気体燃料の燃焼

### 4.1 気体燃料の燃焼形態

本研究では、気体燃料を用いた実験を行ったため、気体燃料に関するいくつかの事項をまとめた。

気体燃料の燃焼形態は連続燃焼（バーナ燃焼）と間欠燃焼（容器内燃焼）に大別される。前者はバーナを使って流れの中に静止した火炎を作るもので、できるだけ変動の少ない連続した燃焼を行わせる。後者は、容器内に閉じ込めた可燃混合気に点火するか、容器内に閉じ込めた高温空気中に燃料を噴射して着火させることにより、間欠的に燃焼を起こさせる。なお、高温の容器内に閉じ込められた可燃混合気が自発的に着火する現象を爆発と呼び、点火源からの火炎伝播や噴射燃料の自己着火による間欠燃焼と区別することもある。

また、別の観点から気体燃料の燃焼形態を分類すると、予混合燃焼、部分予混合燃焼、拡散燃焼に分けられる。

予混合燃焼は燃料と空気とをあらかじめ混合してからバーナや燃焼室に供給する方法で、どの部分をとっても燃料と空気との混合比が変わらず、同じような燃え方（均一燃焼）をし、火炎が伝播するという特徴を持つ。それに対して、拡散燃焼は燃料流と空気流の境界で拡散と混合が生じ、燃焼可能な混合比になったところから燃焼する不均一燃焼で、その火炎に伝播性はない。部分予混合燃焼は、拡散燃焼を加速するために、火炎の伝播性が高くない程度の空気を燃料に混合しておくものである。ブンゼンバーナで十分な空気を取り入れながら燃料を燃焼させると、きれいな円錐形の青炎が形成され、燃焼負荷率（単位体積あたりの熱発生率）の高い燃焼状態が実現されるが、これが予混合燃焼である。この状態から空気口を閉じてゆくと、火炎は内炎と外炎に分割し、次第に長さが伸びてゆく。そして、混合気濃度が下限界に近づくと内炎が消滅し、揺らいだ火炎が長く延びてゆく。空気口を全開にした状態が拡散燃焼で、火炎は青色から黄色または黄赤色に変わり、先端からすすを排出することもある。内炎が消滅するのは火炎に伝播性がなくなったからであり、このあたりの状態が部分予混合燃焼である。



さらに、火炎付近のガスの流れが層流か乱流かによって、層流燃焼と乱流燃焼に分けられる。流れが層流から乱流に変わると、火炎の性質が大きく変化し、火炎の厚みが増すとともに、予混合燃焼では火炎の単位面積当たりの燃焼率が增大する。ブンゼンバーナで流速を上げて量論混合比に近づけると、ゴーという燃焼音（燃焼ごう音と呼ぶ）がして火炎が白味を帯び、円錐状からブラシ状に変わるの、層流燃焼から乱流燃焼への遷移が生じたためである。

Table4-1 に、以上3種類の分類をまとめた燃焼形態の分類を示す。分類A, B, Cは任意の組み合わせが得られる。なお、燃焼という言葉用火炎に置き換えると、この表は火炎の分類表になる。なお、上記より、本研究で取り扱う火炎は予混合燃焼に分類でき、関連する事項について述べる。

Table4-1 燃焼形態の分類<sup>16)</sup>

分類法	分類 A	分類 B	分類 C
名称	連続燃焼	予混合燃焼 部分予混合燃焼	層流燃焼
	間欠燃焼	拡散燃焼	乱流燃焼

#### 4-2 予混合火炎の基本的な構造<sup>1),16)</sup>

Fig.4-1 に予混合火炎の構造を模式的に示す。混合気は速度  $S_u$  で火炎帯に入り、反応・膨張して、速度  $S_b$  で出てゆく。 $T_b$  は燃焼ガスの断熱平衡温度に近い。この温度曲線には変曲点があるが、その上流側では反応による発生熱量以上の顕熱上昇があり、その熱は下流側から熱伝導で供給されるものであるから、変曲点の上流側を予熱帯、下流側を反応帯と呼ぶ。一方、反応物質（燃料と酸素）は予熱帯では主として分子拡散によって、反応帯では反応と分子拡散によって濃度が低下し、出口までに消滅する。中間生成物（CO、H<sub>2</sub>、OH、H など）の濃度は温度変曲点の上流で立ち上がり、その後、反応帯の中ほどでピークを持ち、最後は平衡濃度に漸近する。また、生成物は反応物質が減少するにしたがって増加し、平衡濃度に漸近する。

予熱帯と反応帯の境界の温度  $T_i$  は着火温度と呼ばれることがあるが、同じ燃

料に対しても火炎毎に異なる値を持ち、その火炎で反応が盛んになる温度と理解すべきである。 $S_u$ と $S_b$ はごく近い亜音速であるので、火炎上・下流の圧力差は1%以下とほとんどない。ふく射によるわずかな熱損失を除けば、火炎の上流と下流で比エンタルピーは等しいが、火炎帯の内部では複雑に変化する。すなわち、予熱帯ではほとんど反応を伴わずに温度が上昇するので、顕熱上昇分だけ比エンタルピーは増加しようとする。ところが、たとえ反応はなくとも、拡散によって生成エンタルピーの高い反応物質の濃度は低下し、生成エンタルピーの低い燃焼生成物の濃度は上昇するので、顕熱の上昇が生成エンタルピーの減少で相殺され、比エンタルピーはほとんど変化しない。同じことが反応帯についても言えるので、比エンタルピーは熱伝導、分子拡散、化学反応の競合によって複雑に変化することになる。この構造の火炎は、それぞれを原動力として、自力で伝播する性質を持っている。また、火炎は複雑な形状を持ち、自分で誘起した流れに乗って火炎各部の法線方向に伝播するが、静止観察者から見た見掛けの伝播速度のことを火炎伝播速度と呼ぶ。

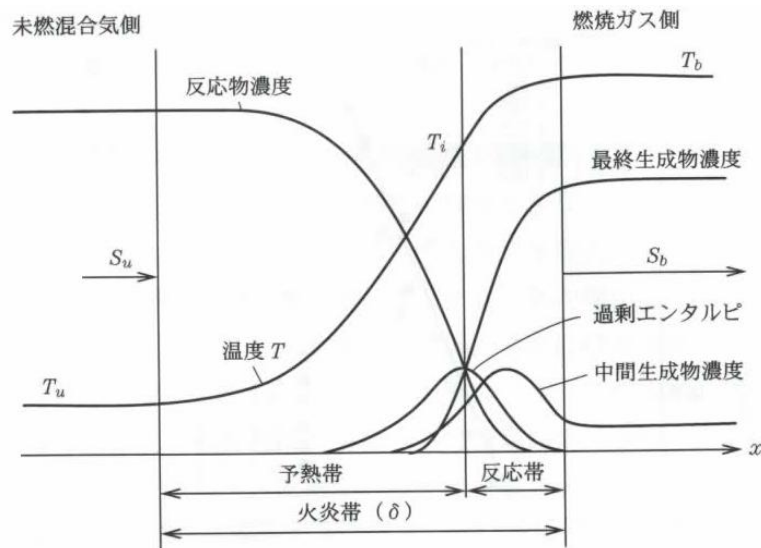


Fig.4-1 層流1次元予混合火炎の構造<sup>16)</sup>

#### 4-3 可燃限界<sup>1)</sup>

混合気中の火炎伝播は、混合気の状態、すなわち燃料と酸化剤の混合割合は、温度、圧力などがある範囲にあるときのみ可能である。火炎が混合気中を伝播

しうる濃度の限界を可燃限界といい、しばしば爆発限界とも呼ばれる。燃料が濃いときの限界値を上限界、薄いときの限界値を下限界という。この両限界の範囲を可燃範囲という。可燃限界は、通常、容器壁における消炎効果や伝播の方向などの影響も受けるので、表示されている値は相対的な意味しか持たないが、防犯上の点からその値の概略を知ることは極めて重要である。

Table4-2 燃料空気混合気可燃限界<sup>1)</sup> (大気圧、室温)

燃 料	分子式	下限界 [vol%]	上限界 [vol%]
メタン	CH <sub>4</sub>	5.0	15.00
エタン	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.0	12.50
プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.12	9.50
ブタン	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.86	8.41
ペンタン	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1.4	7.80
ヘキサン	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	1.18	7.40
ヘプタン	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	1.10	6.70
オクタン	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0.95	—
ノナン	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	0.83	—
デカン	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	0.77	5.35
エチレン	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.75	28.60
プロピレン	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	2.00	11.10
アセチレン	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2.50	80.00
ベンゼン	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1.40	7.10
トルエン	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	1.27	6.75
シクロプロパン	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	2.40	10.40
メチルアルコール	CH <sub>4</sub> O	6.72	36.50
エチルアルコール	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	3.28	18.95
メチルエチルエーテル	C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> O	2.00	10.00
ジエチルエーテル	C <sub>2</sub> H <sub>10</sub> O	1.85	36.50
アセトン	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2.55	12.85
水素	H <sub>2</sub>	4.00	74.20
アンモニア	NH <sub>3</sub>	15.50	27.00
一酸化炭素	CO	12.50	74.20

Table4-2 に、標準化した装置を用いて測定された可燃限界の値を示す。この標準装置はアメリカ鉱山局 (U.S. Bureau of Mines) により開発されたもので、長さ 150cm、直径 5cm のガラス管中に混合気を入れ、その下端で火花点火させ、火炎が上端まで伝播するときの混合気組成の限界を求めるもので、大気圧下の実験では、下端を開放してから点火を行っている。このガラス管中を火炎が上方に伝播する場合と、下方に伝播する場合とでは、重力による浮力の影響によって前者のほうがその可燃限界は広くなる。この測定で重要なことは、発生し

た火炎が自力で伝播する能力があることの確認であり、そのためには管径が十分に太く、管長も点火源の影響なしに火炎が伝播することを確認するにただけ長くなければならないこと、さらに点火が十分に強く行われることが必要である。一般に管径が 5cm 以上では可燃限界に及ぼすその影響はほとんどなく、また点火に火花点火が用いられる場合、そのエネルギーは 1~20mJ 程度が適当であるといわれている。

この標準化された装置での測定値は、可燃限界の概略値を知るうえで効果的であるが、希薄および過濃側混合気においてはその燃焼速度は極めて小さく、そのため火炎形状をはじめ、その伝播に及ぼす自然対流の影響はまぬがれず、その対流の効果을把握しておくことは可燃限界を正確に理解するうえで重要である。

Fig.4-2 は、通常重力環境および微小重力環境下におけるプロパン - 空気混合気の当量比  $\phi:0.52$  での十分に発達した円管（直径 5cm、管長 150cm）内火炎伝播の写真である。通常重力下における可燃限界近傍での円管内を進行する火炎は、自然対流の影響を強く受け、著しく上方にひずめられながら伝播していることがわかる。一方、同様の条件で微小重力環境下における火炎は、円管中心軸に対して放物線状のほぼ対称形を呈して伝播していることがわかる。

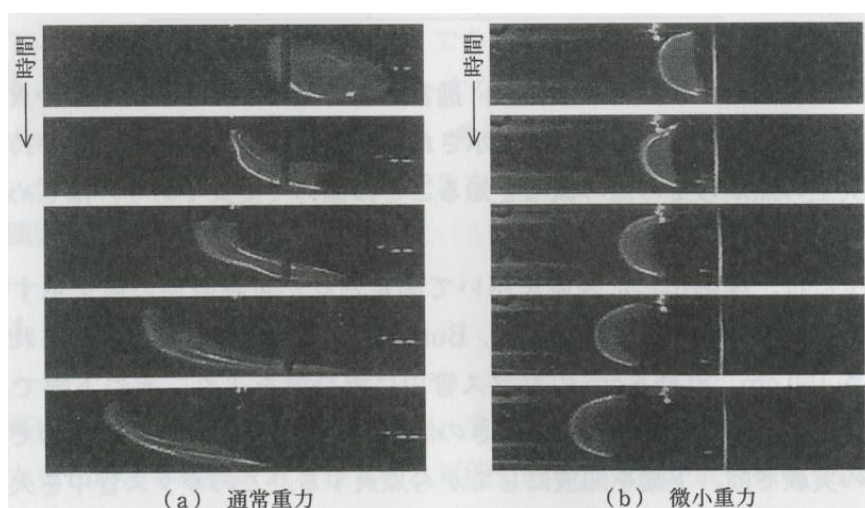


Fig.4-2 通常重力及び微小重力環境下における円筒内火炎伝播の直接写真<sup>1)</sup>  
 (当量比  $\phi:0.52$ 、温度:20°C、圧力:0.1MPa)

Table4-3 に、通常重力環境および微小重力環境下における円管内火炎伝播において得られた可燃限界での当量比 $\phi$ を示す。微小重力環境下での可燃限界の決定においては、実験回数 30 回のうち、円管内全長にわたって複数回（最低でも 2 回以上）の火炎伝播の完了が確認された当量比として決定される。火炎の発生は確認されたが、火炎伝播中に火炎が消炎あるいは消滅し、その伝播の完了が確認されなかったものについては除外している。微小重力環境下において得られた可燃限界は、通常重力環境下の場合よりも希薄側に移動している。これは、通常重力環境下および微小重力環境下での火炎形成の変化、すなわち微小重力環境下では火炎は半回転楕円体形状を呈して伝播するのに対し、通常重力環境下では浮力の影響のために火炎は著しく上方に持ち上げられ、同時に管壁近傍での火炎表面積も増大するために、火炎面から管壁での熱損失が増大することによって、この差が生じるものと考えられている。

Table4-3 プロパン - 空気混合気の可燃限界<sup>1)</sup>（下限界、20°C、0.1MPa）

	条 件	下限界
U. S. BUREAU OF MINIES	通常重力 (上向き火炎伝ば)	0.51
Okajima et al.	微小重力	0.49(プロパン) 0.48(メタン)

#### 4-4 乱流予混合火炎の構造と伝播機構

実用燃焼装置における流れは、ほとんどの場合、乱流であるが、そのような場を伝播する予混合火炎は、次の点で層流予混合火炎とは異なっている。

- (1) 燃焼速度が層流予混合火炎の数倍から、ときには数十倍に達する。
- (2) 0.1~1.0mm 前後であった火炎の厚みが数 mm から、ときには数十 mm に達する。
- (3) 薄い青色を呈していた火炎が白味を帯び、輝度が格段に高くなる。
- (4) 火炎の背後に多量の未燃分が残存する。

乱流予混合火炎と層流予混合火炎の最も顕著な差異は、前者の燃焼速度が後者に比べて格段に高いということである。乱れが燃焼速度を増加させる機構と

しては、次のものが考えられ、Fig.4-3 に各種乱流火炎の構造を示す。

- ① 乱れが層流火炎をひずませて凹凸を作り、火炎面積を増加させる（しわ状層流火炎）。乱流燃焼速度  $S_T$  と層流燃焼速度  $S_L$  (これまで  $S_u$  と表記してきたもの) の比  $S_T/S_L$  は火炎面積の増加率に比例して増加する (燃焼速度の第2定義による)。
- ② 火炎要素が大きな渦によって運ばれて、速度が  $S_L$  から  $S_T$  に加速される。取り残された火炎部分は谷となるが、両側から火炎が伝播してきて、谷は自然に埋められる。
- ③ 層流火炎の予熱帯厚み  $\delta$  と同程度か、それ以下の小さなスケールの渦によって、熱や活性化学種の拡散速度が増し、それだけ火炎要素の伝播速度が増加する。
- ④ 小さな渦の急峻な流速こう配のために層流火炎が不安定化して、燃焼ガス塊と未燃ガス塊の頭濁体を形成し、反応帯の厚みを著しく増大させる。この場合、火炎の背後に多量の未燃ガス塊が取り残され、高温の燃焼ガスに囲まれて燃焼する (分散反応火炎)。

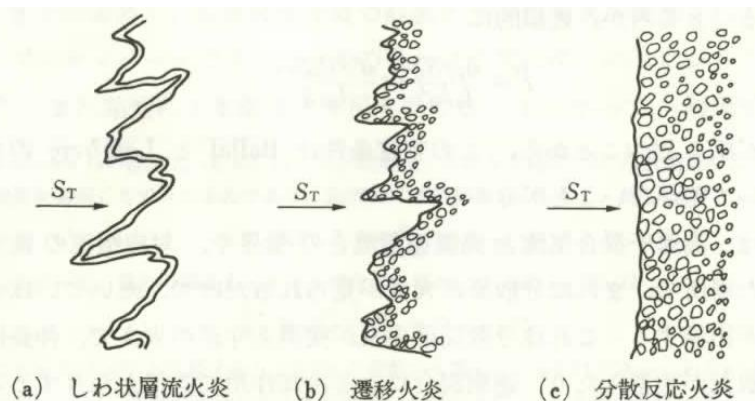


Fig4-3 各種乱流火炎の構造<sup>17)</sup>

#### 4-5 火炎における特異現象<sup>1)</sup>

##### 4-5-1 火炎中のイオン

炭化水素火炎においては、化学イオン化反応によりイオンが発生する。このイオンは、再結合反応により急激に減少するので、イオン濃度の高い領域は、火炎近傍に限られる。

Fig.4-4 に火炎付近のイオン濃度分布の測定結果を示す。ここでイオン濃度は、静電探針を用いて得られる電流 - 電圧特性から探針理論の結果を適用して求めたものであり、探針理論における仮定などに疑問があるために、そのままの値を利用することはできない<sup>19)</sup>。しかし、求めたイオン濃度の相対的な関係は正しいものに近いと考えられる。この結果から、イオン濃度の高い領域が火炎付近に限られていることがわかる。

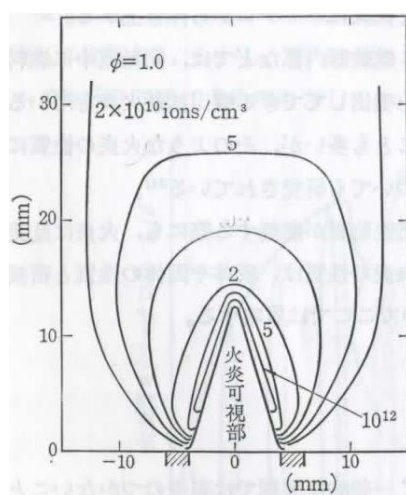
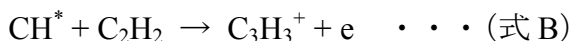
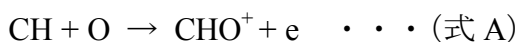


Fig.4-4 プロパン - 空気の 2 次元ノズルバーナ火炎付近の陽イオン濃度分布<sup>18)</sup>  
(バーナ出口流速 : 1.3m/s)

炭化水素火炎において、化学イオン化反応により最初に発生するイオンとして通常考えられているのは、 $\text{CHO}^+$ であり、場合によっては $\text{C}_3\text{H}_3^+$ であることもある。それらの発生機構としては、種々の説もあるが、



が妥当とされている。これらの最初に発生する 1 次イオンから種々の過程により 2 次イオンが発生し、最後に  $\text{H}_3\text{O}^+$  になってゆく。可燃性気体の種類によって多少異なるが、可燃性気体の種類が同一であれば、可燃性気体中の炭素の数に対して発生するイオンの数は一定の割合になっている。

化学イオン化反応により発生するイオンが火炎付近に限られていることおよ

び発生するイオンの数が可燃性気体の濃度に比例することの2つが、火炎中のイオンを利用するときの重要な性質である。前者の性質に基づいて、静電探針が火炎の検出に用いられ、後者の性質に基づいて、火炎イオン検出装置がガス分析に用いられている。

また、火炎中のイオンに外部から電場あるいは磁場をかけて、燃焼現象を抑制する試みが行われている。実験室規模ではあるが、高電圧の電場により火炎の安定性の増大、すすの発生の抑制、熱伝達量の促進に成功している。

#### 4-5-2 選択拡散

火炎の反応によって消滅してゆく2種類以上の気体分子が、同じ方向から火炎に向かってゆくとき、それらの全体的な移動速度に差ができる。これが、選択拡散と呼ばれる現象であり、気体分子の種類が異なると、一般に拡散速度が異なることに起因している。

種類の異なる気体分子が含まれていて、それらの間で拡散速度の差が大きいときには、予混合火炎においても、拡散火炎においても、このような選択拡散の効果が表れやすい。選択拡散の効果が現象として現れるのは、全体的な流れの方向と分子の拡散の方向の変化が異なる場合である。

Fig.4-5 に選択拡散の概要説明図を示す。この図より例として、火炎で反応する分子 A および B を含む気体の流れが火炎面に、ある角度をなして向かっているとすると、A の拡散速度が B の拡散速度より大きいとすると、全体の流れが  $P_1$  から  $P_2$  に向かう間に A の火炎面への平均速度のほうが B のそれより大きく、 $P_2$  地点では、 $P_1$  地点における A と B の比とは異なる比率になっているはずである。火炎面に曲率が生じたり、火炎面の流れ場が火炎面に沿って加速される伸長場流れであったりすると、初期の気体の組成が同一でも、火炎面に沿って組成の異なる気体の反応が起こることになる。

予混合火炎の場合には、火炎に向かう気体中に可燃性気体と酸化剤の分子が含まれている。当量比が1より大きく、すなわち可燃性気体過剰の火炎においては、選択拡散により混合気中の酸化剤の分子が先に減少してゆくような状況に作用するほうが、その逆よりも選択拡散の効果が大きく現象に現れる。可燃性気体分子の数のほうが過剰であるから、酸化剤分子が先に減少してゆくと、



それにより上流における火炎付近では酸化剤の濃度が高くなり、下流における火炎付近においては酸化剤分子が少なくなるからである。当量比が1より小さい場合には、可燃性気体の分子が先に減少してゆくような状況で選択拡散の効果が大きく、現象に現れる。つまり、予混合気中の少ないほうの成分が少なくなるように作用するとき、選択拡散の顕著な効果が観測される。

たとえば、バーナ火炎の先端は、火炎面の曲率の大きな部分がある。プロパン-空気の予混合火炎でプロパン過剰のとき、空気中の酸素は、拡散速度がプロパンより大きいので先に火炎面に達し、火炎先端においてはバーナに供給した初期の混合比よりさらにプロパン過剰となる。その結果として、当量比1.3程度になると火炎先端が開いてしまう。

選択火炎の効果により、火炎が乱れやすくなり、不安定性が生じやすくなることも、しばしば指摘されており、多くの解析結果や実験結果がある。セル状火炎、ポリヒドラル火炎などは、しばしばそれらの例として示されてきた。

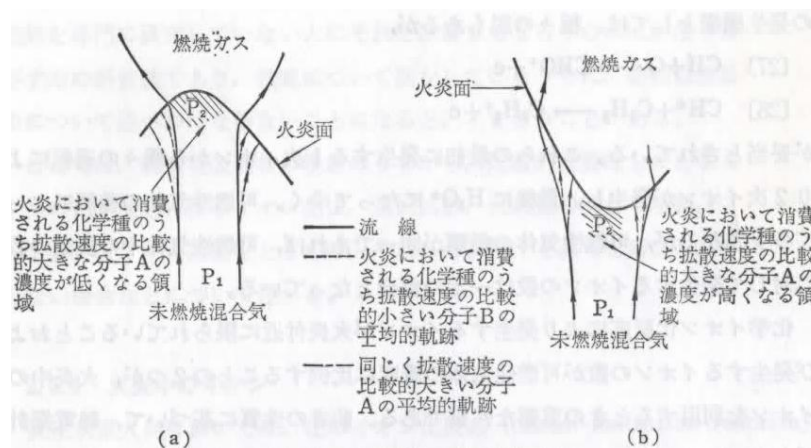


Fig.4-5 選択拡散の概要説明図<sup>18)</sup>

(通常の可燃性気体=空気火炎のように不活性気体の濃度が高い場合)

#### 4-6 火炎における乱れの増幅

予混合火炎における乱れは、可燃性気体あるいは酸化剤の流れの乱れによるものと、火炎の熱流体力学的性質により発生し増幅するものがある。ここでは、後者の火炎の熱流体力学的性質により発生し増幅する乱れについてその概要を述べる。

Fig.4-6 に火炎面における乱れの増幅機構を示す。火炎における燃焼反応によ

り、未燃焼の気体は、燃焼ガスとなる。予混合火炎の場合、未燃焼の混合気と燃焼ガスを隔てている境界が火炎面である。未燃焼の混合気の密度は、燃焼ガスの密度の数倍であり、火炎面において加速が起こっている。

火炎面が湾曲していたとすると、この火炎面における加速により、火炎面に沿って圧力の微小な差が生ずる。この火炎面に沿っての圧力差は、火炎面に沿って Fig.4-6 に示したような流れの成分が発生する原因となり、その湾曲を増大させる。このような現象により、いったん火炎に小さな湾曲が生ずるとそれが成長するという、テイラー - マークシュタイン (Taylor - Markstein) の不安定性が火炎面に生じ、火炎面が乱れ始めることになる (Fig.4-7 参照)。また、乱流火炎の湾曲した火炎の曲率が未燃焼側に凸の部分では小さく、既燃焼側に凸の部分では大きくとがっている、という火炎面の形状 (Fig.4-6(b)) も、この火炎面に沿った流れの成分による変形に帰着させることができる。



Fig.4-6 火炎面における乱れの増幅機構<sup>18)</sup>

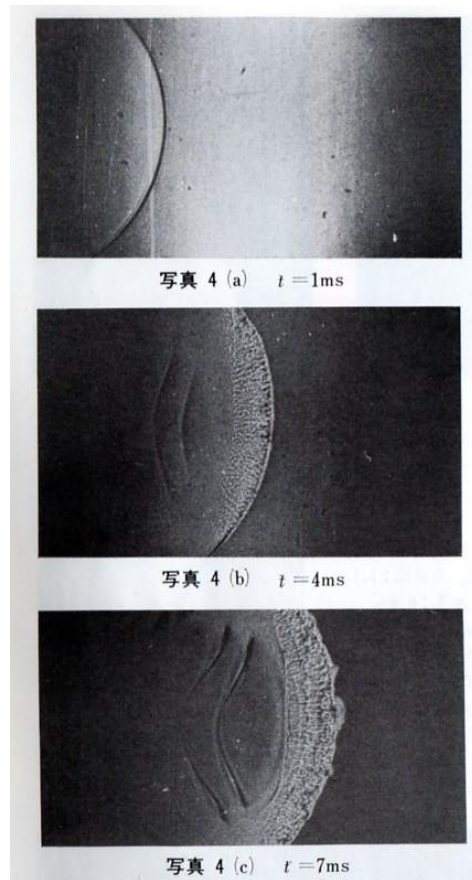


Fig.4-7 伝播するメタン - 空気層流予混合火炎の火炎面における  
乱れの発生および成長の様子<sup>16)</sup>

(t:最初の圧力波（希薄波）通過時の時間、当量比:0.92、撮影速度:6000コマ/sec)

乱れの成長速度は、乱れのスケールが小さくなるほど速くなるが、スケールが小さくなると、熱、物質、運動量の拡散の効果が大きくなり、乱れの成長が抑制される。このように、火炎面においては特定のスケールの乱れが選択的に成長し、そのスケールの乱れが火炎面に現れることになる。この火炎面の乱れのスケール  $l_c$  は、近似的に次式で予測できる。

$$l_c \approx \frac{15\lambda}{C_p \rho_u S_L} \dots \text{(式 C)}$$

乱れの成長速度は、乱れのスケールのほかに、乱れ強さ、全体的な流れの加速などに依存する。それらへの依存性を数値解析により予測した結果によると、乱れの強さが大きくなるとともに乱れの成長速度が速くなり、全体的な流れが

火炎の伝播方向に加速しているときには流れの成長速度は速くなるが、減速しているときには乱れは抑制される。

## 4-7 着火と消炎

### 4-7-1 着火

着火とは、燃焼反応による発生熱量が混合気温度を上昇させ、それが反応速度を加速させるという正のフィードバック機構によって引き起こさせる暴走現象である(※熱爆発を前提とする)。着火するためには、自然に発熱して温度上昇することがないかぎり、可燃条件にある物質への外部からのエネルギー付加が必要であり、この外部からのエネルギーの付加の原因となる物質または現象を着火源という。仮に着火源が何れの場合であっても、燃焼反応が開始し、持続するようになることが着火であることには違いないが、着火源によってそれぞれの着火過程に特徴があり、その性質は画一的ではない。そのため、しばしば着火源をその特長により分類する。例としては、火炎、電気火花、高温固体という分類がそれである。ここでは、本研究に用いられた高温固体について述べる。

可燃性物質を着火させるのに用いる高温固体として、電気加熱した金属線があり、このような目的に用いる金属線として知られているものは、ニクロム線または鉄クロム線がある。加熱した線の周囲の温度分布は気体中の化学反応を考えなければ単純な熱移動の問題で、基礎方程式(連続/運動/エネルギー/化学種の連続方程式、反応速度式、状態方程式)を適切な境界条件を満足するように解けば求まる。その概要として、Fig.4-8に熱線による発火の過程を示す。

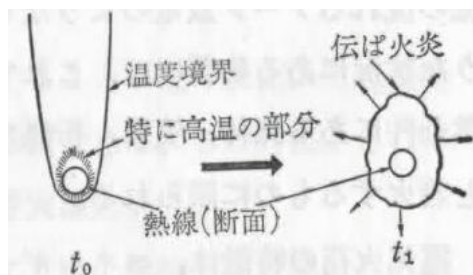


Fig.4-8 熱線による発火の過程<sup>18)</sup> (時間:  $t_0 \rightarrow t_1$ )

高温の固体面（初期温度  $T_{w0}$ ）に可燃条件にある気体、例えば可燃性混合気（初期温度  $T_{u0}$ ）が接触した場合の固体表面付近の温度分布は、Fig.4-9 のようになると考えられる。

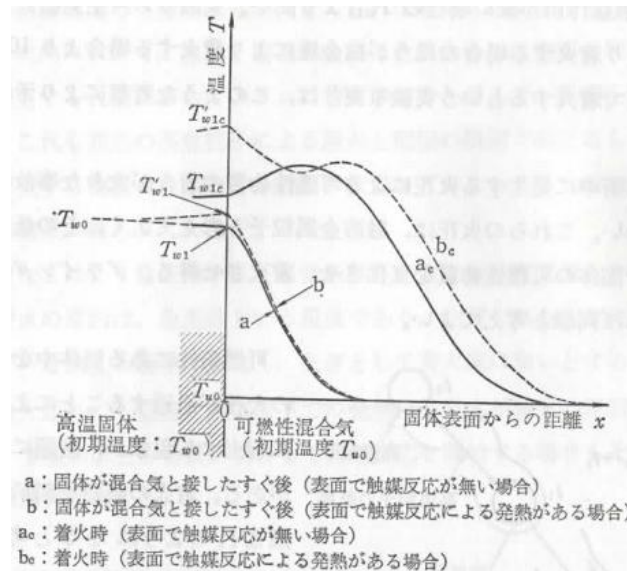


Fig.4-9 混合気と接する高温固体表面付近の温度分布

まず、固体と混合気が接触した直後には、固体から混合気側に熱が流れ、実線 a に示したような温度分布になる。固体表面では温度がいく分下がり  $T_{w1}$  となる。その後、固体から混合気へ熱移動が続き、固体表面付近の混合気の温度の高い層が厚くなると同時に、混合気の温度の高い部分での発熱反応が始まり、実線 a<sub>c</sub> で示したような温度分布になる。固体表面から離れた位置では、混合気の温度のほうが固体表面の温度より高くなり、混合気から固体へ熱移動が起こるようになる。固体表面の温度はいく分上昇し  $T_{w1c}$  となる。それと同時に、混合気中での反応が持続し、着火することになる。

#### 4-7-2 消炎

消炎については、気相燃焼には火炎を伴うが、その火炎が消滅する現象であり、いいかえると気相中で燃焼が継続できなくなる現象である。木材などの燃焼において消炎が起こっても、場合によっては、炭化した部分が表面燃焼を続けていることがある。このように消炎は、必ずしも燃焼の停止すべてを包含す

る現象ではないが、燃焼の停止あるいはそれに至る過程の現象として、燃焼学上重要なものである。ここでは、消炎過程の概要について述べる。

それまで存在していた火炎が消滅する主な理由として次の2つが考えられる。

- ① 燃焼に必要な可燃性気体または酸化剤の火炎反応帯への供給が、そこでの燃焼の継続に不十分となる。
- ② 燃焼反応に不可欠な熱や活性気の火炎から未燃焼物質へのフィードバックが、燃焼の継続に不十分となる。

このわけ方には幾分問題があるが、現象を理解するのに役立つと考え、このように分類している。いろいろな原因で消炎が起こるが、いずれも①または②、ときに、両方が原因で起こる。

予混合火炎の場合には、可燃性気体または酸化剤の火炎反応帯への供給が燃焼の継続に不十分となるというのは、未燃焼混合気中の可燃性気体または酸化剤の濃度が低下する、あるいはどちらかが多くなりすぎるということを意味する。予混合火炎の未燃焼混合気側で、空気が混入して可燃性気体の濃度が燃焼範囲下限界以下になること、不活性気体が混入して、その濃度がピーク値以上になること、可燃性気体の濃度が増大して燃焼範囲上限界以上になることなどが原因で消炎が起こる。

拡散火炎の場合には、火炎への可燃性気体および酸化剤の供給が拡散律速であるので、それらの火炎反応帯への供給が燃焼の継続に不十分になる原因として、それらの拡散による移動速度の低下をもたらすものを考えればよい。酸化剤が酸素と不活性気体によりなるとき、酸素濃度が低下したり、可燃性気体が大量の不活性気体で希釈されたりすれば消炎が起こる。また、拡散速度は拡散する物質の濃度勾配にほぼ比例するので、拡散層の厚さが大きくなり、火炎付近での濃度勾配が低下すると、火炎への可燃性気体や酸化剤の供給が減少する。火炎での発熱速度が周囲へ熱ふく射などによる熱損失の速度より小さくなり、消炎することになる。この例は、火炎から未燃焼の気体への熱のフィードバックも併せて考慮すべき場合であると同時に、拡散層の厚さが流れの場に依存することから、拡散火炎の消炎を論ずるのに流れの場の検討が必要である場合もある。

火炎が予混合火炎であっても拡散火炎であっても、燃焼反応に不可欠である

熱や活性基が十分にフィードバックされなければ消炎することは用意に理解できる。①の可燃性気体または酸化剤不足による消炎も、消炎するときの現象としては、熱や活性基のフィードバックが不十分になるわけであり、広い意味では②に含めてもよい。

可燃性気体や酸化剤の濃度は通常の燃焼を行い、火炎を形成するのに十分ではあるが、熱や活性基のフィードバックが不十分で消炎に至る原因は、広義の冷却による。広義の冷却の中には、冷壁によるもの、可燃性気体または酸化剤中に混入した微粒子によるもの、火炎伸長によるものがある。

## 5. 実験装置及び実験方法

### 5-1 本研究の目的

本研究では、新たな燃焼改善手法の確立の観点から、管内進行火炎伝播法<sup>3)</sup>を用いて実験を行い、進行する火炎に対して希薄予混合気を直接噴射し、火炎挙動、火炎伝播速度に及ぼす混合気噴射の影響を調べ、併せて、燃焼促進効果に及ぼす最適噴射時期の検討を行った。

### 5-2 実験装置

#### 5-2-1 実験装置概要

Fig.5-1 に本研究における実験装置の概略図を示す。装置内には、燃焼管、バッテリー (24V)、点火装置、流量計、電磁弁 (通電時開)、遅延回路、タイマー、スイッチ、イオンプローブ、オシロスコープから構成されている。

実験装置寸法は幅 900mm、奥行き 500mm、高さ 500mm で、本体にはアクリル製燃焼管 (長さ 770mm、内径 70mm)、デジタルビデオカメラ、タイマー、点火用バッテリー等が搭載されている。

#### 5-2-2 燃焼管

本研究で使用した燃焼管は、内径 70mm×全長 770mm (燃焼部 670mm) のアクリル製円筒管であり、その内容積は約 2578cm<sup>3</sup> である。これはアメリカ鉱山局、長さ 1500mm、直径 50mm のガラス製燃焼管を使用し決定された可燃限界、火炎伝播速度、及び燃焼速度が本実験で用いたアクリル燃焼管と比較し差異が生じなかった為である<sup>1)</sup>。燃焼管の両端には、ABS 樹脂製の栓が設けてある。点火側の栓には、燃料導入用のバルブとニクロム線を用いた点火装置が設けてあり、他端には、排気用バルブが設けてある。燃焼管本体には、点火端から A:167.5mm、B:335mm、C:502.5mm の位置に混合気噴射口を設けており、噴射口の直径は 2mm である。また、燃焼管の中央部である点火端から 335mm(B 点) の位置に火炎乱れの測定に使用したイオンプローブを設けてある<sup>19),20)</sup>。



### 5-2-3 点火装置

点火装置は、内径 70mm の ABS 樹脂製の栓の二箇所電極を取り付け、それらを結びつける形で OHM 社製 200W のニクロム線を取り付けた。本研究では可燃限界近傍の超希薄炭化水素-空気混合気を用いているので、火花点火では着火が困難であり、そのためニクロム線による熱面点火として使用した。

### 5-2-4 タイマー、遅延回路

本研究で使用したタイマー(遅延回路)は、OMRON 社製の H5CX で、点火装置と噴射装置の作動を制御している。点火装置は、スイッチが作動すると同時に、1.2 秒間連続して点火装置の電極に電流が流れるようにタイマーはセットされている。噴射装置は、スイッチが動作すると同時に任意に設定された遅延時間が経過されたのち、任意に設定された噴射時間内に連続して電磁弁へ電流が流れるようにタイマーはセットされている。

### 5-2-5 バッテリー

本研究で使用したバッテリーは、古河電池製 FT4L-BS (12V、3Ah)である。それぞれ点火装置及びケースファンへの電力の供給を行っている。

### 5-2-6 ビデオカメラ

燃焼管内の火炎挙動は点火端から 300mm、550mm の位置に計 2 台のビデオカメラを設置し、直接撮影法で観察した。本研究に用いたビデオカメラは、SONY 製デジタルビデオカメラ及び Victor 製デジタルビデオカメラであり、実験装置本体に装着・固定され、火炎伝播挙動の撮影・観察に使用した。

### 5-2-7 電磁弁

燃焼管内へ流入させるガス流量の制御に用いた電磁弁は、CKD 社製直動式 2ポート電磁弁 AB31-02-3(通電時開型)を用いた。電磁弁は遅延回路を通じて、任意に設定された遅延時間が経過された後、任意に設定された噴射期間に電磁弁を開くことで燃焼管内へ流入させるガス流量を制御させている。

#### 5-2-8 イオンプローブ

火炎通過に伴う電圧降下の測定には、日本特殊陶業社製 C5HA(スパークプラグ)を使用した。本実験を行うにあたり、上記のスパークプラグの先端にピアノ線を溶接して取り付けた。ピアノ線を用いることについては、測定位置を燃焼管中心から壁面近傍まで調節することができ、火炎の通過に伴う測定ミスを防ぐことを目的とした。本実験で使用したピアノ線は直径 1.5mm、長さ 30mm のものを使用した。Fig5-2 にイオンプローブの概略図を示す。

#### 5-2-9 オシロスコープ

イオンプローブ計測による電圧降下の測定には、Tektronix 社製 2221A Digital Storage Oscilloscope を使用した。

#### 5-2-10 燃料混合容器

燃焼管に気体を導入する際、燃料・乾燥空気・窒素の 3 種類の気体を同時に導入した場合、火炎伝播速度に大きなばらつきが見られた。これは気体がバランスよく導入されていなかったか、燃焼管の圧力が上がりすぎてしまうことが原因として考えられた。そこで、本実験では燃焼管に気体を導入する前に、内部にケースファンを設けたアクリル管（長さ 280mm、内径 70mm）で、予め燃料・乾燥空気・窒素を混合してから導入した。Fig.5-3 に燃料混合容器の概略図を示す。

#### 5-2-11 ケースファン

混合気導入中に僅かな旋回流を与え、攪拌するために、任意の回転数の制御可能な ADDA 社製のケースファン(品番：CF-60VR、60mm×60mm×25mm)を使用した。回転数は 1300rpm～4400rpm まで任意の回転数に変更可能である。

#### 5-2-12 体積流量計

本実験で使用した混合気の作成と、燃焼管へ流入する混合気の流量制御について、以下の体積流量計を使用した。各種気体の流入制御は、体積流量計の直前にバルブを設置し、バルブの開度を調節することにより制御した。各種気体

に使用した体積流量計の仕様を Table5-1 に示す。

Table5-1 Property of mass flow meter

混合気作成用	
空気	Aera 製 FM-391、RO-100
プロパン	Aera 製 FM-391、RO-100
窒素	HORIBA STEC 製、SEF-21A
噴射制御用	
混合気	azbil 製 CMS-0050

### 5-2-13 コンプレッサー

コンプレッサーは、日立製作所製小型空気圧縮機を使用した。その仕様を Table 5-2 に示す。

Table5-2 Property of Air Compressor

型式(Model)	8P - 10T
出力(Power)	2.2(kW)
最高使用圧力(Maximum working pressure)	10(kgf/cm <sup>2</sup> )
回転数(Revolution)	1200(rpm)
吐出量(Discharge rate)	235(l/min)
径×数×行程(Diameter×Number×Stroke)	60(mm)×3×45(mm)

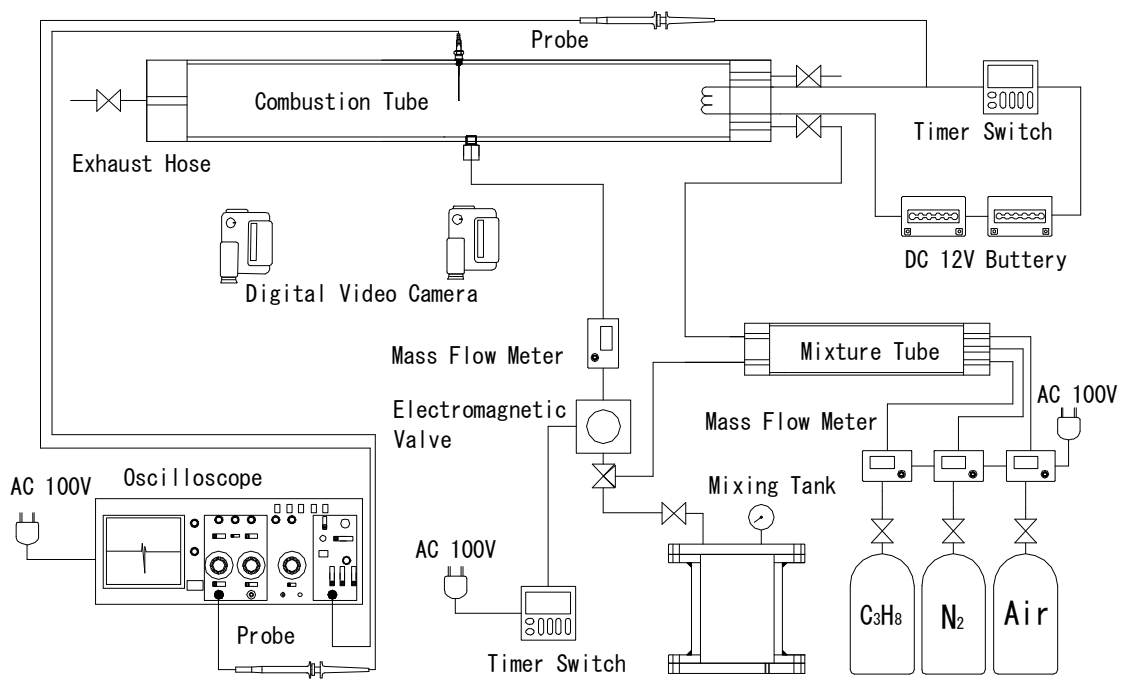


Fig.5-1 Experimental apparatus (A)

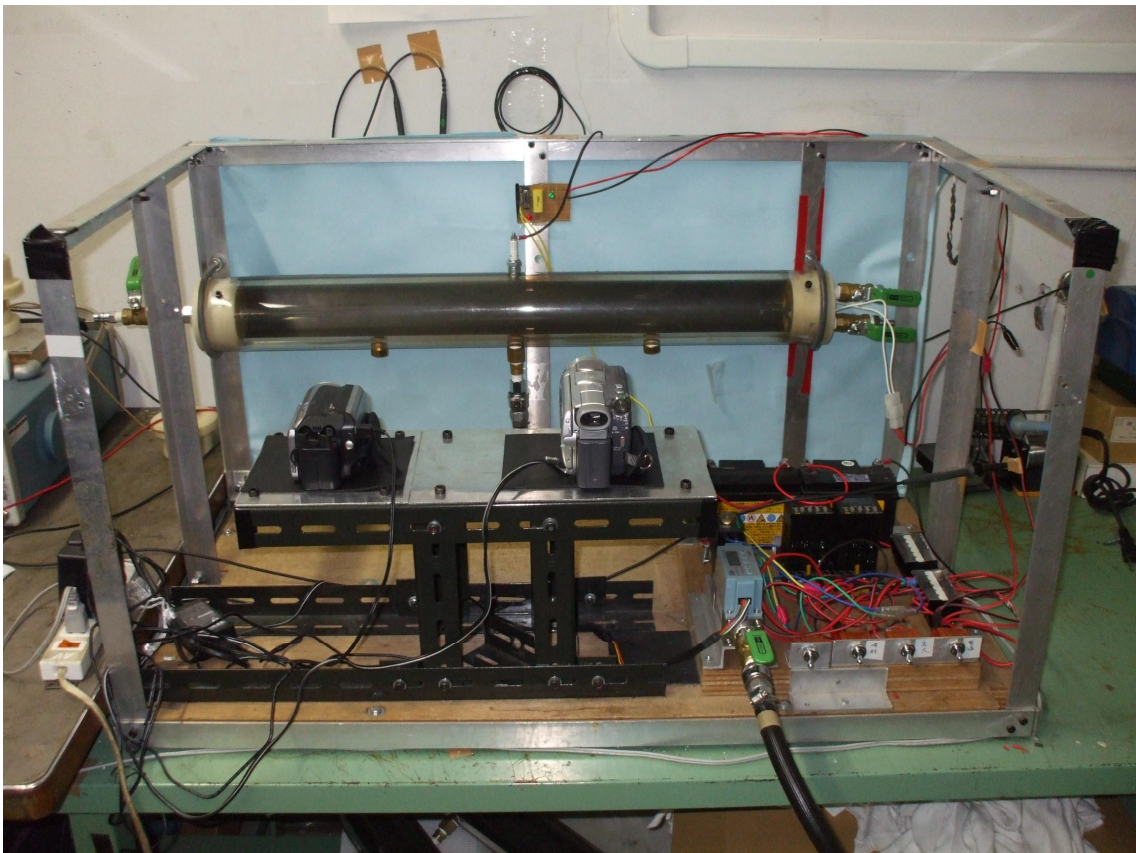


Fig.5-1 Experimental apparatus (B)

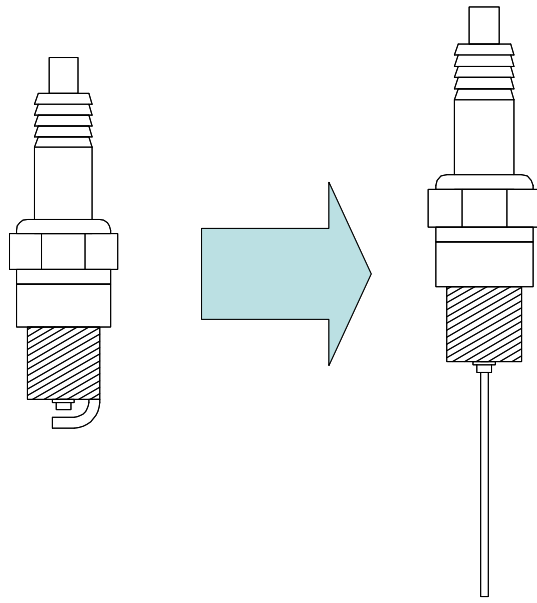


Fig.5-2 Ionization probe



Fig.5-3 Premixed tube

## 6. 実験方法

### 6-1 実験手順

本研究は管内進行火炎伝播法を用いた。本実験における実験手順を以下に示す。

- 1) 流量計を介して、乾燥空気、燃料および、窒素を 5 分間燃焼管へ流入する。
- 2) 5 分間燃焼管へ各種気体を流入した後、バルブを閉じ、気体の流動を沈めるために一定時間（5 分以上）待機する
- 3) 一定時間が経過した後、電気を消して部屋を暗くし、バルブを開きスイッチをいれ、電流を流し、ニクロム線を用いて熱面点火を行う。噴射燃料はスイッチを入れた後、任意の遅延時間後に燃焼管内へ流入される。
- 4) その過程で発生した火炎を取り付けてある Digital Video Camera で撮影する。電圧降下測定は火炎がイオンプローブを通過した際にオシロスコープが行う。
- 5) 撮影した火炎画像を PC 内に取り込み、ノギスを用いて火炎伝播速度を算出する。

なお、本実験の可燃限界の定義として、5 割以上の確率で燃焼管の点火端から終了端まで火炎の伝播が確認された当量比を可燃限界として定義した。そして各 12 回以上実験を行い、算術平均値を用いて、火炎伝播速度を算出した。

## 6-2 実験試料

本実験に使用した実験試料を以下に示す。

プロパン : 住友精化株式会社製、純度 99.9%

窒素 : 東邦酸素株式会社製、純度 99%

空気 : 大陽日酸株式会社製、純度 99.9%

## 6-3 実験条件

本研究における実験条件を Table6-1 に示す。

Table6-1 Experiment

Fuel	Propane (Purity 99.9%)
Equivalence Ratio	$\phi = 0.50, 0.55, 0.60, 0.65$
Oxygen Concentration	17, 19, 21 (vol%)
Pressure	0.10 (MPa)
Initial Temperature	293 (K)
Humidity	0 (%RH)
Ignition Method	Thermal Surface Ignition
Delay Time from Ignition	0.50 ~ 1.40 (sec)
Injection Time	0.50, 0.75, 1.00 (sec)
Calorific Value	200 (J)

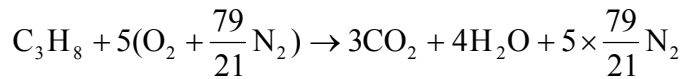
## 6-4 混合気作成方法

混合気の実験方法は、まず燃焼管内に燃料導入用バルブ及び排気用バルブを開放した状態で、燃料・窒素・乾燥空気を、それぞれ体積流量計を介して5分間導入する。次に、バルブを閉じ密閉された燃焼管内の混合気が安定するように、5分間放置する。混合気の当量比、雰囲気酸素濃度の調節は、混合気の流量を15.0(L/min)とし燃料・窒素・空気それぞれの体積流量を変化させることで、各当量比・各雰囲気酸素濃度となるようにした。

#### 6-4-1 当量比の定義

本研究での燃料はプロパン(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)で、雰囲気酸素濃度の調節には窒素を使用した。当量比の定義を以下に示す。

プロパンが理論量論比で完全燃焼する際の化学反応式は、



本研究では、燃料の作成に体積流量計を用いるため、上記した総括反応式からプロパンが完全燃焼する際の空気とプロパンの体積比を示すと、

$$1 : \left(1 + \frac{79}{21}\right) \times 5 = 1 : 23.8$$

これより  $\phi = 1$  でのプロパン 1(mol) 当たりに対する空気量は 23.8(mol) となる。よって、実際の当量比を  $\phi$  とし、プロパンの流量を  $Q_p$  とすると、空気の体積流量  $Q_{\text{air}}$  は次式のようになる。

$$Q_{\text{air}} = Q_p \times \frac{23.8}{\phi}$$

#### 6-4-2 雰囲気酸素濃度の調節

雰囲気酸素濃度を調整する際の窒素の流量は

$$(\text{酸素の量} / \text{空気の量}) \times 100 = \text{酸素濃度}$$

から、空気流量を  $Q_{\text{air}}$ 、窒素流量を  $Q_N$ 、実際の酸素濃度を  $O_C$  (%) とすると次式のようになる。

$$\left(\frac{0.21 \times Q_{\text{air}}}{Q_{\text{air}} + Q_N}\right) \times 100 = O_C$$

$$21 \times Q_{\text{air}} = (Q_{\text{air}} + Q_N) \times O_C$$

$$Q_N \times O_C = 21 \times Q_{\text{air}} - Q_{\text{air}} \times O_C$$

$$Q_N = \frac{(21 - O_C) \times Q_{\text{air}}}{O_C}$$

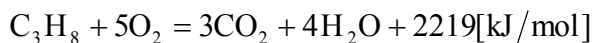
#### 6-4-3 混合気噴射による総括当量比の計算

本実験では、プロパン-空気混合気に任意の当量比のプロパン-空気混合気



を噴射し燃焼しているため、総括当量比という考え方をを用いた。燃焼管内に導入するプロパン-空気混合気の発熱量と、噴射したプロパン-空気混合気の発熱量を足したものがプロパン-空気混合気のみ発熱量と同じになるようにし、その時のプロパン-空気混合気の当量比を総括当量比として定義した。以下に、その算出方法を示す。

まず、プロパンの総括反応式を以下に示す。



上式より、1molのプロパンを完全燃焼させるのに5molの酸素が必要であることが分かる。よって、酸素5molを含む乾燥空気は比の計算より、

$$x = 5 \times \frac{100[\text{vol}\%]}{21[\text{vol}\%]} = 23.81[\text{mol}]$$

となり、約23.81molの乾燥空気が必要である。よって、プロパン-空気混合気は24.81molということになる。今回使用した燃焼容器の体積は2.578lのため、標準状態での1molの体積は22.4lなので、容器内のプロパン-空気混合気のmol数は、比の計算より、

$$Y = \frac{2.578}{22.4}[\text{mol}]$$

となる。また、容器内のプロパン-空気混合気内に含まれるプロパンのmol数は、比の計算より、

$$Z = \frac{2.578}{22.4} \times \frac{1}{24.81}[\text{mol}]$$

よって、当量比 $\phi=1$ の時のプロパン-空気混合気発熱量は、

$$Q_c = \frac{2.578}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 10.2936 [\text{kJ}] \quad (6)$$

となる。本実験で使用した燃焼管内に導入されたプロパン-空気混合気の当量比  $\phi=0.5$ 、 $0.55$ 、 $0.6$ 、 $0.65$  における発熱量は(6)式より、

$$Q_{c0.50} = 0.50 \times \frac{2.578}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 5.1468 [\text{kJ}]$$

$$Q_{c0.55} = 0.55 \times \frac{2.578}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 5.6615 [\text{kJ}]$$

$$Q_{c0.60} = 0.60 \times \frac{2.578}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 6.1762 [\text{kJ}]$$

$$Q_{c0.65} = 0.65 \times \frac{2.578}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 6.6908 [\text{kJ}]$$

次に本実験で噴射したプロパン-空気混合気は一定であるため体積は  $0.18751$  である。標準状態での  $1\text{mol}$  の体積は  $22.41$  なので、容器内のプロパン-空気混合気の  $\text{mol}$  数は、比の計算より、

$$y = \frac{0.1875}{22.4} [\text{mol}]$$

となる。また、容器内のプロパン-空気混合気内に含まれるプロパンの  $\text{mol}$  数は、比の計算より、

$$z = \frac{0.1875}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}]$$

よって、当量比  $\phi=1$  の時のプロパン-空気混合気発熱量は、

$$Q_i = \frac{0.1875}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 0.7487 [\text{kJ}] \quad (7)$$

となる。本実験で噴射したプロパン-空気混合気の当量比  $\phi = 0.5$ 、 $0.55$ 、 $0.6$ 、 $0.65$  における発熱量は(7)式より、

$$Q_{i0.50} = 0.50 \times \frac{0.1875}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 0.3744 [\text{kJ}]$$

$$Q_{i0.55} = 0.55 \times \frac{0.1875}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 0.4118 [\text{kJ}]$$

$$Q_{i0.60} = 0.60 \times \frac{0.1875}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 0.4492 [\text{kJ}]$$

$$Q_{i0.65} = 0.65 \times \frac{0.1875}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] = 0.4867 [\text{kJ}]$$

となる。以上の結果より任意の燃焼管内当量比及び噴射当量比の総和での発熱量から総括当量比を算出した。

$$X = (Q_i + Q_c) \div \left( \frac{0.1875 + 2.578}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2219 [\text{kJ/mol}] \right)$$

Table6-2 に燃焼管・噴射共にプロパン-空気混合気を用いた場合の総括当量比を示す。

Table6-2 Overall equivalence ratio (mixture-mixture)

		Equivalence ratio of combustion tube ( $\phi$ )			
		0.50	0.55	0.60	0.65
Equivalence ratio of injection mixture ( $\phi$ )	0.50	0.5000	0.5466	0.5932	0.6398
	0.55	0.5034	0.5500	0.5966	0.6432
	0.60	0.5068	0.5534	0.6000	0.6466
	0.65	0.5102	0.5568	0.6034	0.6500

#### 6-4-4 プロパン噴射による総括当量比 $\Phi$ の計算

本研究における実験は、前節で記した方法により管内当量比を決定し、導入したプロパン - 空気混合気に燃焼管端よりニクロム線にて点火、管内を伝播する火炎へ噴射口からプロパンを噴射し燃焼改善効果を調べるというものである。ここでは、管内に噴射されたプロパンが、予め導入されていたプロパン - 空気混合気と十分に混合し、系を平衡状態とみなした混合気の当量比を“総括当量比 $\Phi$ ”と定義し、その算出方法を述べる。

前述と同様に、プロパン 1 mol を完全燃焼させるのに必要な、乾燥空気内の酸素量は、

$$5 \times \frac{100[\text{vol}\%]}{21[\text{vol}\%]} \approx 23.81 \text{ mol}$$

である。

このとき、プロパン - 空気混合気の全モル数は(23.81+1)mol.

燃焼管の体積は 2.578l であるから、燃焼管内のプロパンのモル数は

$$\frac{2.578[\text{l}]}{22.4[\text{l}/\text{mol}]} \times \frac{1[\text{mol}]}{(23.81+1)[\text{mol}]}$$

したがって、管内当量比  $\phi=1$  のときの、気体燃料噴射前に管内に存在するプロパン - 空気混合気の発熱量  $Q_{1,\phi=1}$  は、

$$Q_{1,\phi=1} = \frac{2.578}{22.4} \times \frac{1}{24.81} [\text{mol}] \times 2291 \quad [\text{kJ} / \text{mol}]$$

$$\approx 10.6276 \quad [\text{kJ}]$$

同様にして、

燃焼管内のプロパン－空気混合気が  
当量比 $\phi = \alpha$ のときの発熱量  $Q_1$ は、

$$Q_{1,\phi=\alpha} = 10.6276\alpha [\text{kJ}]$$

また、総括当量比 $\Phi = \beta$ のときの発熱量 $Q_2$ は

$$(Q_1 + Q_2)_{\Phi=\beta} = 10.6276\beta [\text{kJ}].$$

$\beta$ を仮定し、

$$Q_{1,\phi=\alpha} + Q_2 = (Q_1 + Q_2)_{\Phi=\beta}$$

より $Q_2$ を算出する。

以上の手順で、総括当量比 $\Phi$ をあらかじめ決定した上で、噴射するプロパンの発熱量を算出し、噴射量を決定した。6-4-5 に具体的な計算法を記した。

#### 6-4-5 総括当量比 $\Phi = 0.55$ 、管内当量比 $\phi = 0.50$ の場合の計算例

総括当量比  $\Phi = 0.55$  管内当量比  $\phi = 0.5$  より

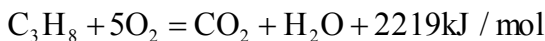
$$\text{総括発熱量} : (Q_{1,\phi=0.5} + Q_2)_{\Phi=0.55} = 10.6276 \times 0.55 = 5.84518[\text{kJ}]$$

$$\text{管内混合気発熱量} : Q_{1,\phi=0.5} = 10.6276 \times 0.5 = 5.31380[\text{kJ}]$$

$$Q_{1,\phi=\alpha} + Q_2 = (Q_1 + Q_2)_{\Phi=\beta} \cdots (*) \text{なので}$$

$$\text{噴射プロパンの発熱量} : Q_2 = 0.53138[\text{kJ}]$$

ここでプロパンの総括 反応式



に注意すると、発熱量  $Q_2$  だけ得るのに必要なプロパンのモル数  $x$  は

$$x = \frac{Q_2[\text{kJ}]}{2219[\text{kJ} / \text{mol}]} = \frac{0.53138}{2219} = 2.3946 \times 10^{-4}[\text{mol}]$$

$\therefore \Phi = 0.55, \phi = 0.5$  の場合噴射するプロパンの体積  $x_1$  は、

$$x_1 = 22.4[\text{l} / \text{mol}] \times 2.3946 \times 10^{-4}[\text{mol}] = 5.3640 \times 10^{-3}[\text{l}]$$

したがって、実験時に噴射するプロパンの流量  $X$  は、

$$\text{噴射期間} \Delta t_{\text{inj}} = 0.75[\text{sec}]$$

$$X = \frac{60 \times x_1}{\Delta t_{\text{inj}}} = \frac{60 \times 5.3640 \times 10^{-3}[\text{l}]}{0.75[\text{sec}]} \approx 0.43[\text{l} / \text{min}]$$

となる。

実験装置に設置した流量計は  $0.11 / \text{min}$  刻みなので小数第2位を四捨五入した。

Table6-3 に各当量比におけるプロパン流量を示す。

**Table6-3 Flow rate of Overall equivalence ratio (mixture-propane)**

Overall equivalence ratio ( $\phi$ )	Equivalence ratio of combustion tube ( $\phi$ )	Flow rate (L/min)
0.55	0.50	0.40
0.60	0.50	0.85
0.60	0.55	0.40
0.65	0.50	1.30
0.65	0.55	0.85
0.65	0.60	0.40
0.70	0.55	1.30
0.70	0.60	0.85
0.75	0.60	1.30

#### 6-5 火炎挙動の観察

混合気作成後、火炎伝播中の燃焼管内の圧力上昇を防ぐため、吸気バルブを開放した後ニクロム線により点火を行い、その火炎挙動を観察する。火炎伝播・火炎挙動の記録には、デジタルビデオカメラを使用して、点火端から 300mm、500mm 程度の位置で行う。本実験は、各当量比、雰囲気酸素濃度において 12 回以上の測定を行い、データはその算術平均値を用いた。

## 6-6 火炎伝播速度の算出

管内進行火炎における火炎伝播速度の算出は、デジタルビデオカメラで録画した映像を、動画編集ソフトでパーソナルコンピュータに取り込み、ノギスを用いて火炎が1コマ(1/30秒)に伝播した距離を測定した。ビデオ編集ソフトはUlead Video Studio 7 MPEG SE 及び Cyberlink Power Director Express を使用した。以下に算出式を示す。

$$\text{火炎伝播速度 } S_b = \frac{\text{実際の管径}}{\text{映像中の管径}} \times \text{映像中の火炎伝ば距離 } L \times \frac{1}{t}$$

ここで、 $S_b$  : 火炎伝播速度

$L$  : 1コマあたりの映像上の火炎の移動距離

$t$  : 1コマの時間 (1/30秒)

である。

## 6-7 断熱火炎温度の算出

燃焼過程の間に、炉壁への熱伝達や、輻射による熱損失が無いときの燃焼ガスの最終温度を断熱火炎温度、または断熱燃焼(ガス)温度という。この時、どのような燃焼反応を考えるかによって最終温度が違ってくるが、燃料中の可燃成分が完全燃焼を起こして、二酸化炭素・水蒸気・二酸化硫黄を生成するときの最終温度を理論断熱火炎温度  $T_{bt}$ 、または理論断熱燃焼ガス温度という。実際には完全反応は起こらず、起こっても化学平衡までしか反応は進まないが、そのときの最終温度を平衡断熱燃焼(ガス)温度  $T_{be}$  という。

燃料 1kg が完全燃焼して水蒸気が凝縮しなければ、低発熱量  $H_l(\text{kJ/kg})$  だけが解放される。燃焼が断熱的に行われるならば、この熱は全て湿り燃焼ガス(質量  $G_w$ )の温度上昇に使われ、その顕熱に変わる。燃焼前の温度を  $T_0(=298\text{K})$ 、温度  $T_0$  と  $T_{bt}$  の間での燃焼ガスの定圧比熱  $c_p$  の平均値を  $c_{pm}$  とする。熱のバランスから



$$G_w c_{pm} = (T_{bt} - T_0) = H_1$$

$$\therefore T_{bt} = \frac{H_1}{G_w c_{pm}} + T_0 \dots \dots \dots (A)$$

気体燃料の場合は、燃料 1m<sup>3</sup>N 当たりの低発熱量 H<sub>1</sub>(kJ/m<sup>3</sup>N)が与えられることが多いが、この場合は 0°C、1atm における燃料の密度 ρ<sub>0</sub>(kg/m<sup>3</sup>N)を使って、1kg 当たりの低発熱量 H<sub>1</sub> に換算させればよい。あるいは、湿り燃焼ガス体積 V<sub>w</sub> (m<sup>3</sup>N/m<sup>3</sup>N) と、燃焼ガス 1m<sup>3</sup>N 当たりの熱容量と定義される定圧比熱 c<sub>pm</sub>(kJ/m<sup>3</sup>N・K)を使って書き直す。

$$T_{bt} = \frac{H_1}{G_w c_{pm}} + T_0 \dots \dots \dots (B)$$

(A)を計算するに当たっての問題は、c<sub>pm</sub> が燃焼ガスの組成と温度によって変化することである。c<sub>pm</sub> の見積もりに必要となる温度 T<sub>0</sub>(=298K)と T の間の完全燃焼ガス成分の平均定圧比熱を Table 6-4 に示す。

Table6-4 完全燃焼ガス成分の  $T_0 (=298.15\text{K}) \sim T (\text{K})$  間の平均定圧比熱

T(K)	O <sub>2</sub> kJ/(kg · K)	N <sub>2</sub> kJ/(kg · K)	H <sub>2</sub> O kJ/(kg · K)	CO <sub>2</sub> kJ/(kg · K)
1000	1.011	1.092	2.056	1.081
1200	1.031	1.113	2.124	1.121
1400	1.048	1.132	2.191	1.153
1600	1.063	1.149	2.256	1.179
1800	1.075	1.164	2.317	1.202
2000	1.087	1.178	2.374	1.221
2200	1.097	1.189	2.427	1.237
2400	1.107	1.200	2.476	1.252
2600	1.116	1.209	2.520	1.264
2800	1.125	1.217	2.562	1.275
3000	1.134	1.225	2.600	1.285

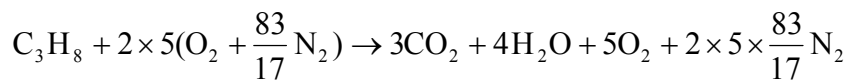
計算するに当たっては、 $T_{bt}$ を適当な値に仮定して、Table 6-4 から  $i$  番目の燃焼ガス成分の温度  $T_0 \sim T_{bt}$  における平均定圧比熱  $c_{pi}(T_0 \sim T_{bt})$  を読み取る。その後、これをその成分の質量分率  $m_i(\text{kg/kg})$  で乗し総和を取ることで、燃焼ガスの平均定圧比熱を求める。

すなわち、

$$c_{pm} = \sum_i (c_{pi} m_i) \dots \dots \dots (C)$$

この  $c_{pm}$  を用いて式(A)から  $T_{bt}$  を計算し、それが先に仮定した値と一致すればよい。一致しなければ、算出された  $T_{bt}$  の値を新しい仮定値として、 $c_{pi}$  の読み取りからやり直す。

一例として、プロパン  $C_3H_8$  を当量比  $\phi = 0.5$ 、雰囲気酸素濃度 17vol% で燃焼させた場合の  $T_{bt}$  の計算結果を示す。簡単の為に、酸素以外の空気の成分を窒素とみなすと、反応式は



となる。

ここで、 $T_{bt} = 1400K$  と仮定する。この反応式を用いて燃料 1kg から発生する湿り燃焼ガス成分の質量を計算すると、 $CO_2 = 2.74$ 、 $H_2O = 2.25$ 、 $O_2 = 4.00$ 、 $N_2 = 34.1$  [kg/kg $C_3H_8$ ] となる。その総和を取ると、湿り燃焼ガス質量  $G_w = 43.08$  が得られる。各成分の質量を  $G_w$  で割れば、質量分率  $m_i$  が得られる。各成分の 298K ~ 2000K の平均定圧比熱  $c_{pi}$  を Table6-4 から読み取る。式(C)に基づいて  $m_i$  と  $c_{pi}$  の積の総和を取ると  $c_{pm} = 1.19$  kJ/(kg · K) が得られる。これらの計算結果をプロパンの低発熱量  $H_l = 46.34$  MJ/kg とともに、式(A)に代入すると、

$$T_{bt} = \frac{46.34 \times 10^3}{43.08 \times 1.19} + 298 = 1293K$$

となる。

この値は仮定値 1400K と一致しないので、 $T_{bt} = 1293K$  として仮定して計算をやり直すと、 $T_{bt} = 1311K$  が得られる。さらに  $T_{bt} = 1311K$  として計算を繰り返すと、 $T_{bt} = 1309K$  となって収束する。

燃焼前の温度が  $T_0$  以外の温度  $T_u$  であるときは、未燃混合気の比熱を  $c_{pu}$  として、式(A)を次のように書き直す。

$$T_{bt} = \frac{H_l + G_w c_{pm} (T_u - T_0)}{(G_w c_{pm})} + T_0$$

この式は  $T_0$  を基準温度とする未燃混合気の顕熱が低発熱量に加わるとして作

られている。

以上により得られたプロパン—空気火炎の断熱火炎温度を Fig.6-1 から Fig.6-5 に示す。

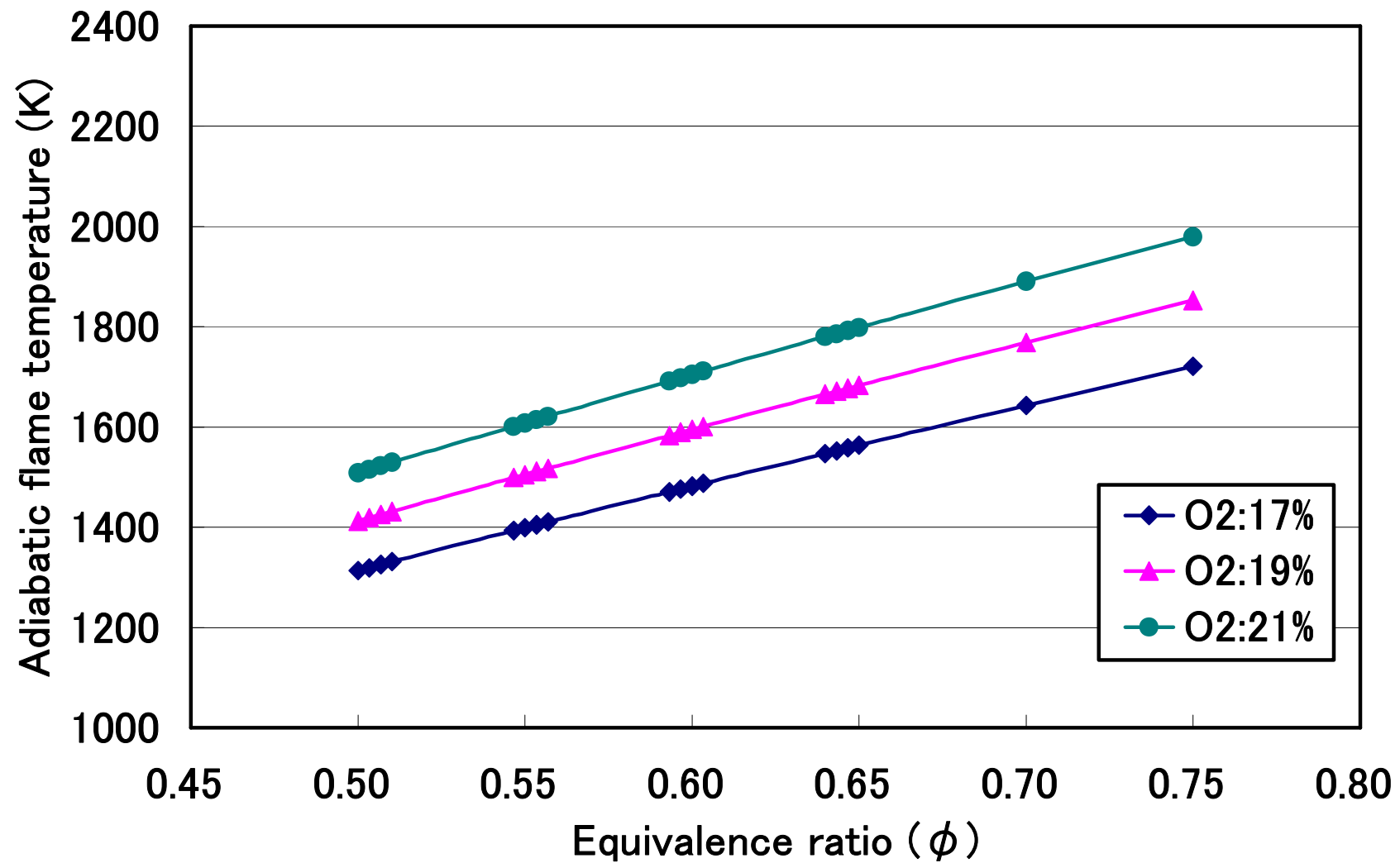


Fig.6-1 Adiabatic flame temperature (mixture)

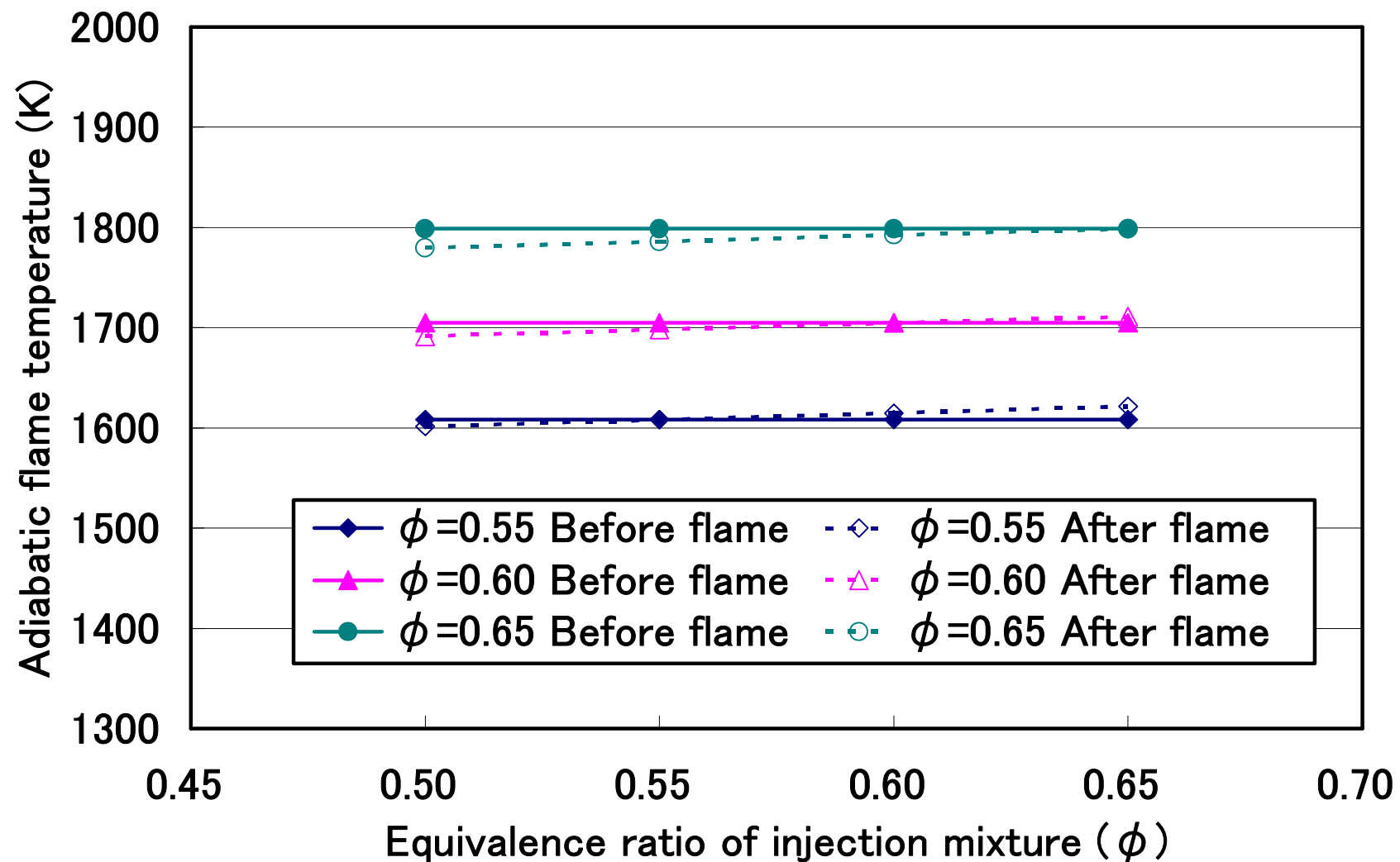


Fig.6-2 Adiabatic flame temperature (O<sub>2</sub> Concentration 21 vol%)

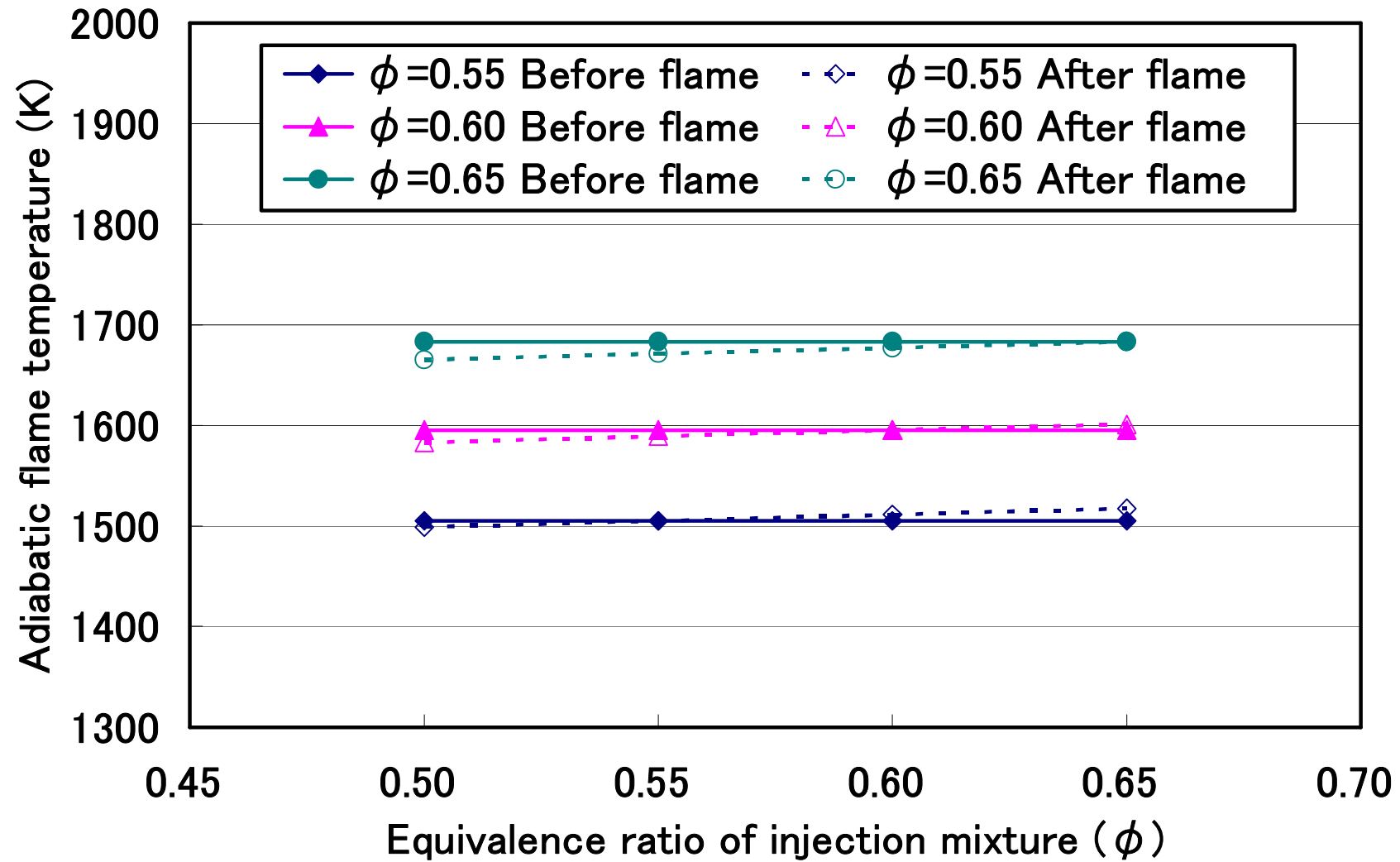


Fig.6-3 Adiabatic flame temperature (O<sub>2</sub> Concentration 19vol%)

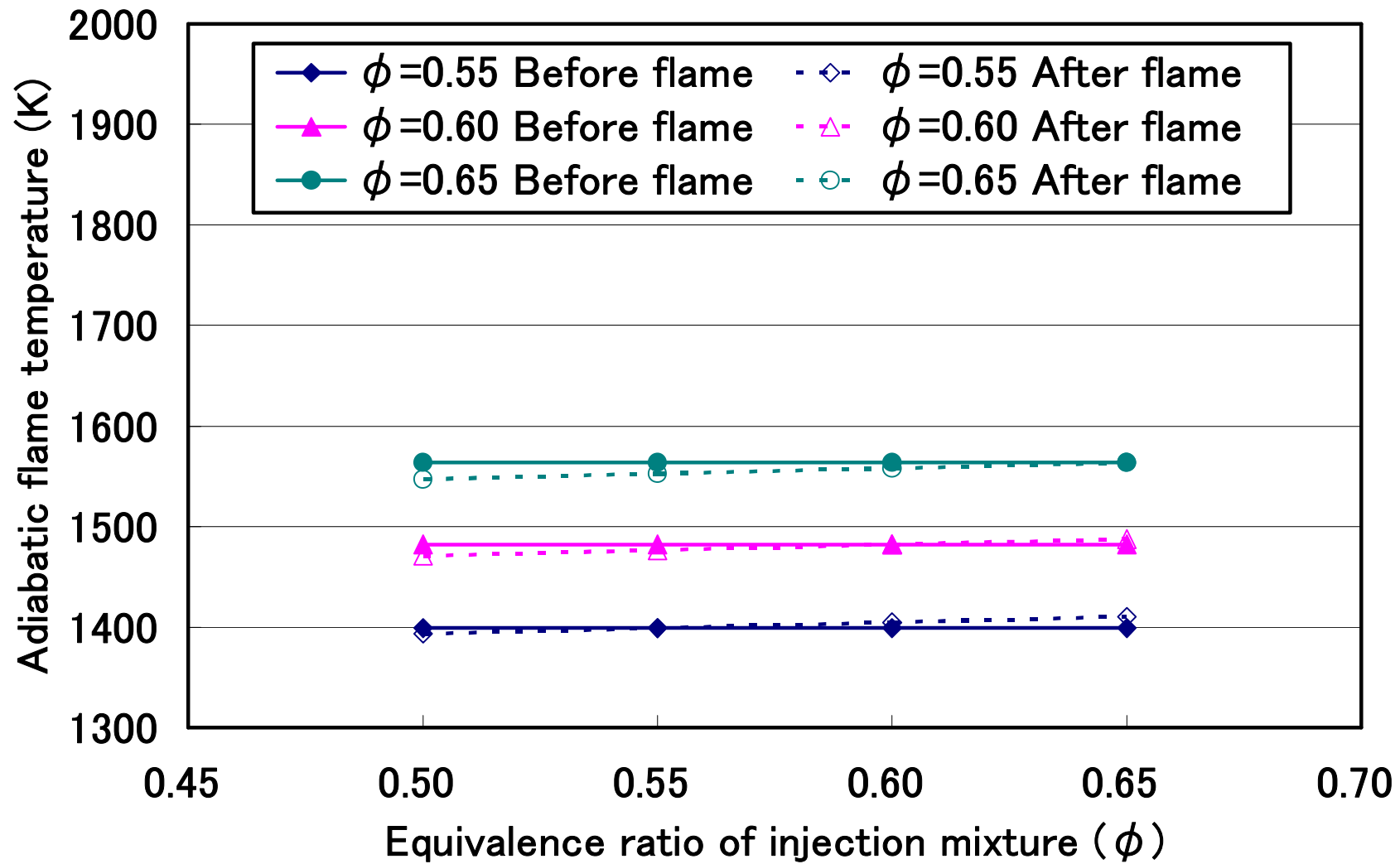


Fig.6-4 Adiabatic flame temperature (O<sub>2</sub> Concentration 17vol%)



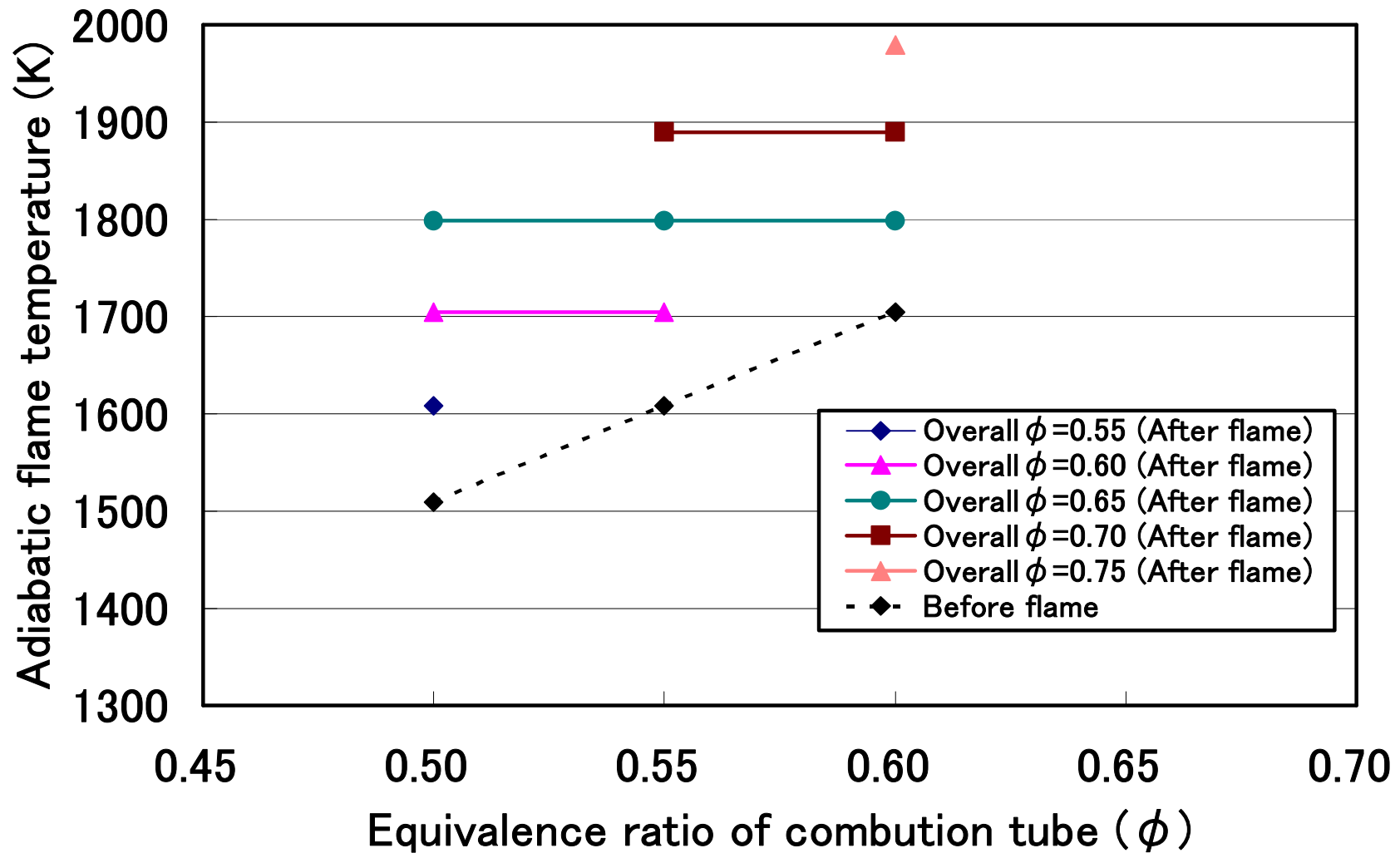


Fig.6-5 Adiabatic flame temperature (O<sub>2</sub> Concentration 21 vol%)

## 7. 実験結果と考察

### 7-1 希薄混合気噴射による影響

#### 7-1-1 火炎挙動

Fig.7-1～7-3 に雰囲気酸素濃度 21vol%、燃焼管・噴射共に当量比  $\phi=0.65$  のプロパン-空気混合気の火炎面への混合気噴射前と噴射後の火炎伝播挙動の代表例を、点火から噴射までの遅延時間をパラメータとして示す。噴射期間はそれぞれ 0.50s、0.75s、1.00s となっている。この図から明らかなように、予混合気噴射前の火炎形状は、ほぼ同一形状であり、浮力の影響を受けて、上方向に持ち上げられながら伝播している。噴射後の火炎形状に着目してみると、遅延時間 0.5s～1.2s の場合には、火炎先端付近が分割された形状となっている。これは、混合気の噴射により火炎面に乱れが発生したためと考えられる。しかし、遅延時間 1.3s～1.4s の場合には、火炎面形状に及ぼす噴射の影響は確認されなかった。これは、噴射するタイミングが噴射口を通過直後に噴射しているために、火炎面に対して影響を及ぼすことが無かったためと考えられる。

Fig.7-4・5 に雰囲気酸素濃度 21vol%、燃焼管・噴射共に当量比  $\phi=0.60$ 、0.55 のプロパン-空気混合気、噴射期間 0.75s の火炎面への混合気噴射前と噴射後の火炎伝播挙動の代表例を、点火から噴射までの遅延時間をパラメータとして示す。この図から明らかなように、予混合気噴射前の火炎形状は、ほぼ同一形状であり、浮力の影響を受けて、上方向に持ち上げられながら伝播しているが、当量比が低下するに従って火炎の輝度が減少しているのが確認される。噴射後の火炎形状に着目してみると、噴射タイミングに関しては、Fig.7-1～7-3 共に同様の結果となった。

Fig.7-6～7-8 に燃焼管・噴射混合気の当量比をそれぞれ変化させた場合のプロパン-空気混合気、噴射期間 0.75s、噴射タイミング 1.00s の火炎面への混合気噴射前と噴射後の火炎伝播挙動の代表例を、燃焼管・噴射混合気の当量比をパラメータとして示す。なお、同一混合気を用いていないため、総括当量比は変化していることを明記しておく。この図から明らかなように、噴射後の火炎形状に着目してみると、どの当量比においても火炎先端付近が分割された形状と

なっており、当量比及び雰囲気酸素濃度が低下するに従って火炎の輝度が減少しているのが確認された。

### 7-1-2 噴射タイミングによる影響

Fig.7-9 に、雰囲気酸素濃度 21vol%、燃焼管・噴射共に当量比  $\phi=0.65$  のプロパン-空気混合気における噴射タイミングに対する火炎伝播速度を、噴射期間をパラメータとして示す。ここで、Before flame 及び After flame は、噴射口通過前・後の火炎伝播速度をそれぞれ示している。この図から明らかなように、どの噴射タイミングにおいても噴射前より噴射後の火炎伝播速度が増加している部分があり、噴射による燃焼促進効果が現れていることがわかる。

Fig.7-10 に、雰囲気酸素濃度 21vol%、燃焼管・噴射共に当量比  $\phi=0.65$  での、噴射タイミングに対する火炎伝播速度の増大率を、噴射期間をパラメータとして示す。ここでの火炎伝播速度の増大率は、噴射前後の火炎伝播速度の差の割合から算出された。この図から明らかなように、点火からの遅延時間が 0.7~1.1s の範囲では、噴射期間 0.75s 及び 1.00s において著しく火炎伝播速度は増大しており、その最大増加率は噴射期間 1.00s において約 70%にも達している。これは、火炎面への混合気噴射による燃焼促進効果を意味している。また、噴射期間 0.50s においては、どの噴射タイミングにおいても火炎伝播速度の促進効果はほとんど観察されなかった。

Fig.7-11 に、混合気噴射による火炎伝播速度に及ぼす、当量比の影響を検討するために、噴射タイミングに対する火炎伝播速度を、当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように、噴射口通過前の火炎伝播速度は、どの噴射タイミングでもほぼ同一の値となり、噴射の影響は発生しておらず、当量比の希薄側への移行に伴って単調に減少している。一方、噴射口通過後の火炎伝播速度に着目してみると、 $\phi=0.65$  において著しく火炎伝播速度が増大していることがわかる。 $\phi=0.60$  及び  $\phi=0.55$  においては、どの噴射タイミングにおいてもほぼ同一の値となり、噴射の影響はほとんど観察されなかった。

Fig.7-12 に、雰囲気酸素濃度 21vol%、噴射期間 0.75s、燃焼管・噴射共に同一当量比での、噴射タイミングに対する火炎伝播速度の増大率を、当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように、 $\phi=0.65$  において点火からの

遅延時間が 0.7~1.1s の範囲では、約 40%の火炎伝播速度の増大が確認された。一方、 $\phi=0.60$  及び  $\phi=0.55$  においては、どの噴射タイミングにおいても火炎伝播速度の増大は観察されなかった。これは、混合気噴射による燃焼促進効果にはある程度の火炎温度の維持が必要であり、可燃限界近傍での混合気噴射は、火炎面への混合気流入による冷却効果が支配的となり、著しい火炎伝播速度の増加が観察されなかったものと考えられる。よって、火炎面への混合気噴射による燃焼改善には、最適な噴射期間ならびに噴射タイミングが存在していることを示唆している。

### 7-1-3 噴射混合気の当量比による影響

Fig.7-13 に、混合気噴射の燃焼促進効果に及ぼす、噴射混合気の当量比の影響を検討するために、噴射混合気の当量比に対する火炎伝播速度を、あらかじめ燃焼管内に導入されている混合気の当量比をパラメータとして示す。なお、ここでの噴射期間は 0.75s、噴射タイミングは 1.00s であり、雰囲気酸素濃度は 21vol%である。また、同一混合気を用いていないため、総括当量比は変化していることを明記しておく。この図から明らかなように、噴射前・噴射後共に火炎伝播速度は、当量比の低下に伴って単調に減少しているのが確認された。

Fig.7-14 に、噴射混合気の当量比に対する火炎伝播速度の増大率を、あらかじめ燃焼管内に導入されている混合気の当量比をパラメータとして示す。なお、ここでの噴射期間は 0.75s、噴射タイミングは 1.00s であり、雰囲気酸素濃度は 21vol%である。また、同一混合気を用いていないため、総括当量比は変化していることを明記しておく。この図から明らかなように、希薄可燃限界近傍においても混合気噴射による著しい火炎伝播速度の減少は観察されず、平均 15~20%程度の火炎伝播速度の増加が観察された。

Fig.7-15 に、あらかじめ燃焼管内に導入されている混合気の当量比に対する火炎伝播速度の増大率を、噴射混合気の当量比をパラメータとして示す。なお、ここでの噴射期間は 0.75s、噴射タイミングは 1.00s であり、雰囲気酸素濃度は 21vol%である。この図から明らかなように、希薄可燃限界近傍においても、噴射混合気の当量比が増大することにより平均 15~20%程度の火炎伝播速度の増加が観察された。

#### 7-1-4 雰囲気酸素濃度による影響

混合気噴射における雰囲気酸素濃度の影響を検討するために、Fig.7-16・19に雰囲気酸素濃度 19、17vol%における、噴射混合気の当量比に対する火炎伝播速度を、あらかじめ燃焼管に導入された当量比をパラメータとして示す。噴射期間は 0.75s、噴射タイミングは 1.00s である。この図から明らかなように、噴射前の火炎伝播速度に着目すると、どの雰囲気酸素濃度においても、燃焼管内の当量比が低下するに伴って火炎伝播速度は単調に減少しており、その傾向は雰囲気酸素濃度 21vol%の結果(Fig.7-13)と類似している。噴射後について、雰囲気酸素濃度 19vol%については、燃焼管の当量比  $\phi=0.65$ 、 $0.60$  は噴射前より火炎伝播速度は著しく増大しているものの、燃焼管の当量比  $\phi=0.55$  については大きな増大は確認されなかった。17vol%については、噴射前と比較してほとんど変化がないか、逆に低下するという結果となった。

Fig.7-17・20 に雰囲気酸素濃度 19vol%、17vol%における、噴射混合気の当量比に対する火炎伝播速度増大率を、あらかじめ燃焼管に導入された当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように、雰囲気酸素濃度 19vol%については、燃焼管の当量比  $\phi=0.65$ 、 $0.60$  は噴射前より火炎伝播速度は著しく増大しているものの、燃焼管の当量比  $\phi=0.55$  については大きな増大は確認されなかった。また、増大率は 5~15%程度と低下しており、雰囲気酸素濃度 21vol%と比較すると増大率の減少が確認された。雰囲気酸素濃度 17vol%については、燃焼管の当量比  $\phi=0.65$  に火炎伝播速度の増大が確認されたが、さらに希薄可燃限界近傍付近では火炎伝播速度の増大は確認されなかった。

Fig.7-18・21 に雰囲気酸素濃度 19vol%、17vol%における、あらかじめ燃焼管に導入された当量比に対する火炎伝播速度増大率を、噴射混合気をパラメータとして示す。この図から明らかなように、噴射混合気の当量比から検討しても、雰囲気酸素濃度の低下に伴って全体の火炎伝播速度の増大は減少しており、雰囲気酸素濃度 17vol%においては噴射による火炎伝播速度の増大は確認されなかった。これは、雰囲気酸素濃度の低下に伴う火炎温度の低下が、混合気噴射による火炎面への冷却効果をより支配的にしたためであると考えられる。

Fig.7-22~7-24 に燃焼管内に導入された混合気の当量比  $\phi=0.65\sim0.55$  における、噴射混合気の当量比に対する火炎伝播速度を、雰囲気酸素濃度をパラメー

タとして示す。噴射期間は 0.75s、噴射タイミングは 1.00s である。この図から明らかなように、同一噴射混合気の当量比の比較においては、雰囲気酸素濃度の低下に伴って、火炎伝播速度の増大率は単調に減少しており、雰囲気酸素濃度 17vol%についてはどの当量比においても混合気噴射による火炎伝播速度の増大は確認されなかった。さらに、燃焼管内の当量比  $\phi=0.55$  について、雰囲気酸素濃度 17vol%及び 19vol%の場合には、混合気噴射のいずれの当量比においても、火炎伝播速度の増大はほとんど観察されなかった。

以上の結果より、火炎面への混合気噴射による燃焼促進効果には、希薄可燃限界近傍において雰囲気酸素濃度が大きな影響を及ぼすことがわかった。

#### 7-1-5 イオンプローブによる電圧降下

本実験では、火炎面への気体直接噴射に伴う火炎乱れの観察を行っているが、火炎乱れの効果の定量的に評価を行うべく、イオンプローブを利用した火炎乱れ効果について考察を行った。なお、イオンプローブによる観察のため、直接的な乱れ評価は定量的には困難であるが、火炎面乱れを含めた予熱帯の高温層の定性的評価は可能である。

Fig.7-25 に雰囲気酸素濃度 21vol%における当量比に対する、イオンプローブに火炎が通過したときのオシロスコープの電圧降下と反応時間を示す。ここでの噴射タイミングは 1.00s であり、混合気の噴射は行っていない。反応時間は火炎通過に伴うイオンプローブの反応時間を示す。この図から明らかなように、当量比が増加するに伴い、イオンプローブの電圧降下が増大し、反応時間が短くなっている。

Fig.7-26 に雰囲気酸素濃度 21vol%における噴射混合気の当量比に対する、イオンプローブに火炎が通過したときのオシロスコープによる電圧降下を、あらかじめ燃焼管内に導入されている混合気の当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように、可燃限界近傍では燃焼管内に導入された混合気の当量比の減少に伴って電圧降下量はほぼ単調に減少しており、燃焼管内の当量比  $\phi=0.65$  及び  $\phi=0.60$  においては、ほぼ一定の電圧降下量を示している。燃焼管内の当量比  $\phi=0.55$  については、噴射混合気の当量比が  $\phi=0.60$  以上のときに、約 20%の急激な電圧降下量の増加が表れた。この現象は Fig.7-14 の火炎伝播速

度の増大率の推移と酷似した傾向となっている。

Fig.7-27 に雰囲気酸素濃度 19vol%における噴射混合気の当量比に対する、イオンプローブに火炎が通過したときのオシロスコープによる電圧降下を、あらかじめ燃焼管内に導入されている混合気の当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように、可燃限界近傍では燃焼管内に導入された混合気の当量比の減少に伴って電圧降下量はほぼ単調に減少しており、傾向は雰囲気酸素濃度 21vol%(Fig.7-26)と類似した結果となった。電圧降下量自体についてはどの当量比についても 20%以上の低下が見られ、さらに燃焼管内の当量比  $\phi=0.60$ 、 $0.55$  については、降下量の幅が狭くなったことが確認された。

Fig.7-28 に雰囲気酸素濃度 17vol%における噴射混合気の当量比に対する、イオンプローブに火炎が通過したときのオシロスコープによる電圧降下を、あらかじめ燃焼管内に導入されている混合気の当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように、どの当量比においても電圧降下量に大きな違いは確認されなかった。電圧降下量自体についても雰囲気酸素濃度 19vol%と比較してさらに減少していることが確認された。

Fig.7-29 に燃焼管内に導入された混合気の当量比  $\phi=0.65$  における、噴射混合気の当量比に対するイオンプローブに火炎が通過したときのオシロスコープによる電圧降下を、雰囲気酸素濃度をパラメータとして示す。この図から明らかなように、雰囲気酸素濃度が低下するにしたがって電圧降下量は単調に減少していることが確認された。また、その最大電圧降下量は雰囲気酸素濃度 21vol%において約 1.6V であった。

Fig.7-30 に燃焼管内に導入された混合気の当量比  $\phi=0.60$  における、噴射混合気の当量比に対するイオンプローブに火炎が通過したときのオシロスコープによる電圧降下を、雰囲気酸素濃度をパラメータとして示す。この図から明らかなように、雰囲気酸素濃度が低下するにしたがって電圧降下量は単調に減少していることが確認され、 $\phi=0.65$ (Fig.7-29)の電圧降下量の傾向と類似した結果となった。しかし、その最大電圧降下量は雰囲気酸素濃度 21vol%において約 1.15V であり、燃焼管内の当量比  $\phi=0.65$  と比較すると約 30%の減少となった。

Fig.7-31 に燃焼管内に導入された混合気の当量比  $\phi=0.55$  における、噴射混合気の当量比に対するイオンプローブに火炎が通過したときのオシロスコープに

よる電圧降下を、雰囲気酸素濃度をパラメータとして示す。この図から明らかのように、雰囲気酸素濃度が低下するにしたがって電圧降下量は単調に減少しているものの、Fig.7-29 と比較すると電圧降下量は全体的に小さく、雰囲気酸素濃度 19vol%及び 17vol%に大きな変化は確認されなかった。この時の最大電圧降下量は、雰囲気酸素濃度 21vol%において約 1.0V であり、燃焼管内の当量比  $\phi=0.65$  と比較するとさらに大きな減少が確認された。

以上の結果より、イオンプローブを利用した電圧降下量による火炎乱れ評価を行うことによっても、超希薄混合気中に混合気を噴射した場合において、噴射期間の制御により燃焼促進効果の可能性を示唆している。

今後、低雰囲気酸素濃度については、最適な噴射タイミングを含め、より詳細な検討を行うと共に、可燃限界以下の混合気中に混合気を噴射した場合についても検討を行う予定である。また、イオンプローブを用いた火炎乱れ評価については、現段階で電圧降下量に対する定量的な火炎特性の評価には至っていないが、乱れの評価を含めて今後詳細に検討を行う予定である。



## 7-2 燃料直接噴射による影響

### 7-2-1 火炎挙動

Fig.7-32・33 に、雰囲気酸素濃度 21vol%、点火から燃料噴射までの遅延時間 1.00s、噴射期間 0.75s における気体燃料を直接噴射した場合での噴射前、噴射後の火炎形状の代表例を、あらかじめ管内の導入されているプロパン - 空気混合気の当量比  $\phi$  および気体燃料噴射圧力をパラメータとして示す。この図から明らかかなように、気体燃料噴射前の火炎形状は、浮力の影響を受けて上方に持ち上げられながら伝播している。一方、気体燃料噴射後の火炎形状はどの場合においても、複数の火炎面が観察された。これは、気体燃料噴射による乱れの影響によるものである。ここで、気体燃料噴射後の火炎形状に及ぼす、あらかじめ管内に導入されているプロパン - 空気混合気の当量比  $\phi$  と噴射圧力の影響に着目してみると、本実験では希薄混合気を用いているため、 $\phi$  の影響はほとんど観察されなかったが、噴射圧力の増大により、火炎の燃焼管中心軸に対する火炎形状の対称性の増加が観察された。これは、噴射圧力の増大により乱れ強さが増加し、浮力の影響が減少したためと思われる。

### 7-2-2 噴射圧力による影響

Fig.7-34・36 に、気体燃料噴射による燃焼促進効果を検討するために、あらかじめ燃焼管内に導入されているプロパン - 空気混合気の当量比に対する火炎伝播速度を、総括当量比をパラメータとして示す。この図から明らかかなように、どの総括当量比においても噴射後の火炎伝播速度は著しく増大している。また、同一総括当量比においても、燃焼管内当量比の理論量論比側への移行に伴って、噴射後の火炎伝播速度は増大している。これは、燃焼促進効果に及ぼす均質性の影響を示すものであり、雰囲気酸素濃度の影響を含めて今後詳細に検討を行う予定である。

Fig.7-35・37 に、あらかじめ燃焼管内に導入された混合気の当量比に対する火炎伝播速度の増大率を、総括当量比をパラメータとして示す。この図から明らかかなように、どの総括当量比においても火炎伝播速度は著しく増大し、さらに同一総括当量比においては、燃焼管内の当量比の希薄側への移行に伴って火炎伝播速度の増大率は増加する傾向が観察された。これは気体燃料噴射による燃

焼改善効果には、最適な噴射条件が存在することを示唆している。すなわち、超希薄領域では、噴射前における燃焼管内の当量比の希薄側への移行に伴って、気体燃料の噴射から実際に火炎が通過するまでの時間が増大し、それにより噴射直後の混合気の予混合の均質性が増加したためと考えられる。

Fig.7-38 に噴射圧力による影響を検討するために、あらかじめ燃焼管内に導入された混合気の当量比に対する火炎伝播速度の増大率を、総括当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように、噴射圧力の低下に伴って火炎伝播速度の増大率が減少している部分が確認された。これは、噴射圧力の低下より、通過する火炎面に対する乱れの影響が弱まったためであると考えられる。

### 7-2-3 イオンプローブによる電圧降下

Fig.7-39～7-40 に、燃焼管内にあらかじめ導入された混合気の当量比に対するイオンプローブに火炎が通過した時のオシロスコープによる電圧降下を噴射圧力ごとに示す。なお、イオンプローブによる観察のため、直接的な乱れ評価は定量的には困難であるが、火炎面乱れを含めた予熱帯の高温層の定性的評価は可能である。この図から明らかなように、どの両噴射圧力、総括当量比においても噴射前の火炎通過時の電圧降下量と比較して、噴射後の電圧降下量は著しく増大している。

現段階では、7-1-5 項と同様に、電圧降下量に対する定量的な火炎特性の評価には至っていないが、低雰囲気酸素濃度の領域における燃料直接噴射、乱れの評価を含めて検討を行う予定である。

### 7-3 燃料直接噴射と混合気噴射との比較

気体燃料噴射による燃焼促進効果における、燃料直接噴射と混合気噴射の影響を比較検討するために、Fig.7-41～7-43 に結果を示す。

Fig.7-41 に雰囲気酸素濃度 21vol%、総括当量比=0.65、噴射タイミング 1.00s、噴射期間 0.75s の場合での、あらかじめ燃焼管内に導入された混合気の当量比に対する火炎伝播速度を、燃料直接噴射と混合気噴射をパラメータとして示す。なお、混合気を噴射した場合のパラメータについては、それぞれの総括当量比が異なることを明記しておく (Table6-2 参照)。この図から明らかなように、噴射側の当量比における火炎伝播速度について、混合気噴射より燃料直接噴射の方が著しく増大していることが確認された。

Fig.7-42 に雰囲気酸素濃度 21vol%、総括当量比=0.65、噴射タイミング 1.00s、噴射期間 0.75s の場合での、あらかじめ燃焼管内に導入された混合気の当量比に対する火炎伝播速度の増大率を、燃料直接噴射と混合気噴射をパラメータとして示す。この図から明らかなように、混合気噴射より燃料直接噴射の増大率のほうが大きく、混合気噴射に比べて約 100%の増大が確認された。これは、気体燃料噴射によって火炎表面積が増大し燃焼反応が促進される効果が、噴射による火炎温度低下よりも支配的であり、燃料直接噴射の方がより支配的であったことが原因であると考えられる。

Fig.7-43 に雰囲気酸素濃度 21vol%、総括当量比=0.65、噴射タイミング 1.00s、噴射期間 0.75s の場合での、あらかじめ燃焼管内に導入された混合気の当量比に対するイオンプローブに火炎が通過した時のオシロスコープによる電圧降下を、燃料直接噴射と混合気噴射をパラメータとして示す。この図から明らかなように、電圧降下量についても混合気噴射より燃料直接噴射の方が、降下量が大きく、Fig.7-42 と酷似した傾向となった。また、混合気噴射と燃料直接噴射の電圧降下量の差は、約 1.0V 燃料直接噴射のほうが大きいことが確認された。

以上の結果より、希薄可燃限界近傍において、気体燃料噴射による燃焼促進効果の影響については気体燃料直接噴射の方がより支配的であることがわかった。しかしながら、イオンプローブによる火炎乱れ評価を含め、気体燃料に関する定量的な評価に至っていないため、今後より詳細に検討を行っていく予定である。

## 8. 結論

本研究では、管内進行火炎を用いて、プロパン-空気混合気の燃焼特性に及ぼす、希薄混合気噴射を用いた燃焼改善について検討を行った。以下に結果を示す。

- 1) 希薄可燃限界近傍での混合気の火炎伝播速度の増大には、希薄混合気噴射が極めて有効である。
- 2) 希薄混合気噴射を用いた場合の火炎伝播速度の増大率は、雰囲気酸素濃度の減少に伴って単調に減少する。
- 3) イオンプローブによる電圧降下割合は同一噴射混合気の当量比において、雰囲気酸素濃度に依存する。

## 参考文献

- 1) 新岡嵩他、燃焼現象の基礎、オーム社、2001、pp.36-39、122-147、259-291
- 2) 日本機械学会、燃焼工学ハンドブック、丸善、pp.85-87、89-93、1995
- 3) 川上忠重、日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集、pp.3-4、2004
- 4) 気象庁 HP/温室効果とは(最終アクセス日 2009.2.8)  
〈[http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/portal/chishiki\\_ondanka/p03.html](http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/portal/chishiki_ondanka/p03.html)〉
- 5) 御園生誠、持続可能社会へ向けた温暖化と資源問題の現実的解法、丸善、2008、pp.32
- 6) 気象庁 HP/温室効果ガスの濃度の変化(最終アクセス日 2009.2.8)  
〈[http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/portal/chishiki\\_ondanka/p06.html](http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/portal/chishiki_ondanka/p06.html)〉
- 7) 吉田邦夫、クリーンエネルギー社会のおはなし、日本規格協会、2008、pp.164-165
- 8) 長山勲、自動車エンジン基本ハンドブック、山海堂、2007、pp.217-231
- 9) 安井至、図解雑学 環境問題、ナツメ社、2008、pp.34-35、38-41
- 10) 矢沢潔、地球温暖化は本当か？ -宇宙から眺めたちょっと先の地球予測-、技術評論社、2007、pp.15-46
- 11) 村沢義久、手にとるように地球温暖化がわかる本、かんき出版、2008、pp.42
- 12) 小林英夫他、環境対応 進化する自動車技術、日刊工業新聞社、2008、pp.1-15、122-130
- 13) 榎本啓士、高橋周平、燃焼副読本、(株)テクノシステム、2002、pp.55-59
- 14) 金子靖雄、ガソリン筒内直噴エンジン、山海堂、2002、pp.40-45、63-98
- 15) 杉本和俊、ディーゼル自動車がよくわかる本、山海堂、2006、pp.7-25
- 16) 水谷幸夫、燃焼工学入門-省エネルギーと環境保全のための-、2003、pp.60-76
- 17) 水谷幸夫、燃焼工学第2版、森北出版、1997、pp.76-79、94-95、
- 18) 平野敏右、燃焼学～燃焼現象とその制御～、海文堂、1991、pp.83-90、93-107、124-127
- 19) 平野敏右他、伝ば火炎の探針測定 1、日本機械学会、1970
- 20) 柴田洋輔、法政大学大学院修士論文、2007

## 謝辞

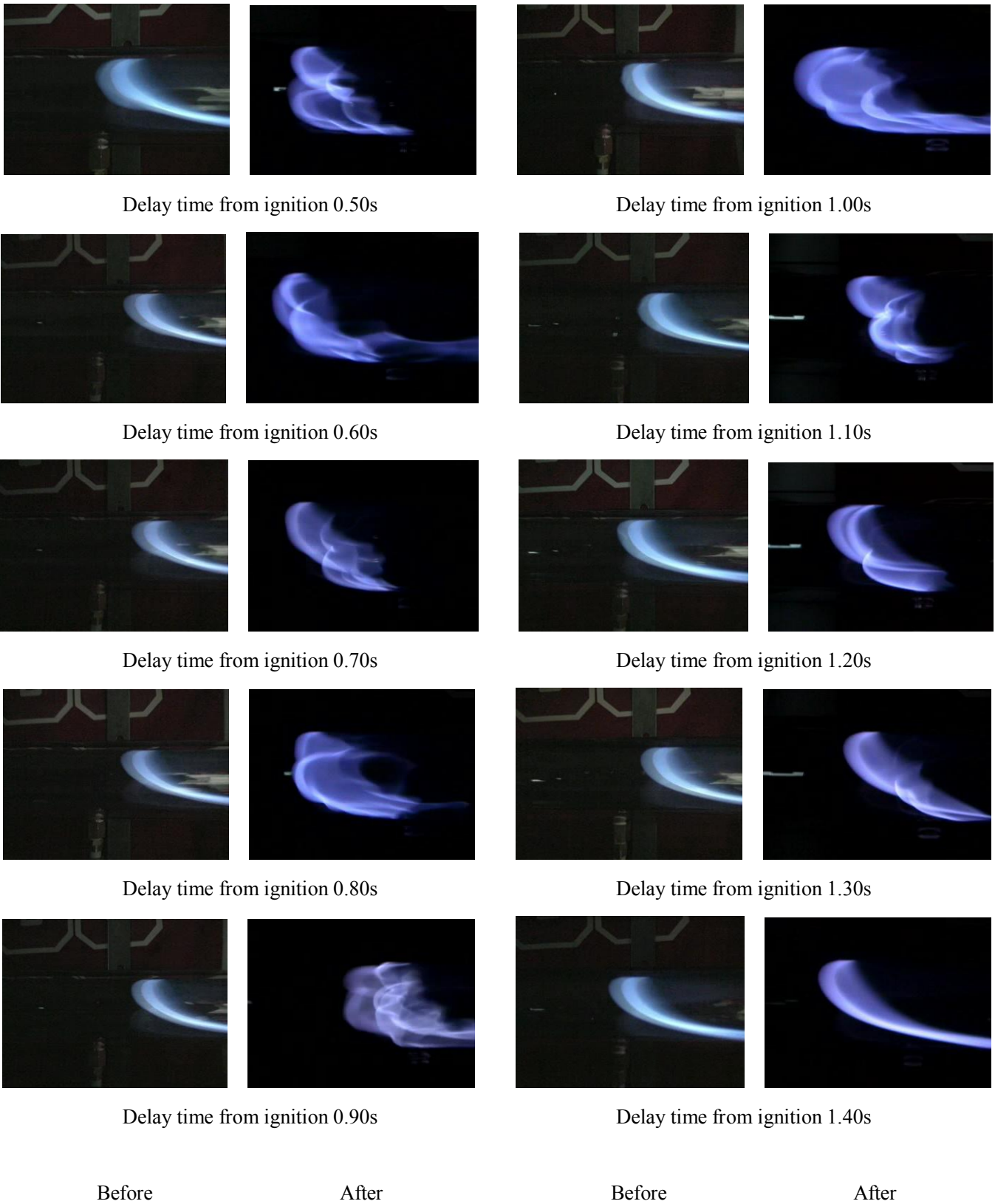
最後になりましたが、本研究を遂行するにあたって、終始御指導・御鞭撻をくださいました、川上忠重教授に感謝とお礼を申し上げます。また実験を進めるにあたって、共同研究者の齋藤隆博氏、中田徹氏、多くの助言と共に協力くださいました、同研究室の大学院生並びに学部生の皆様にも感謝とお礼を申し上げます。

2009年2月

法政大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

修士課程 07R1114

須磨 健太朗

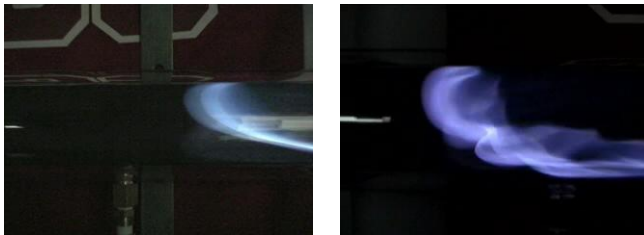


**Fig.7-1 Flame shape**  
(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Equivalence ratio:  $\phi = 0.65$ , Injection time 0.50s)



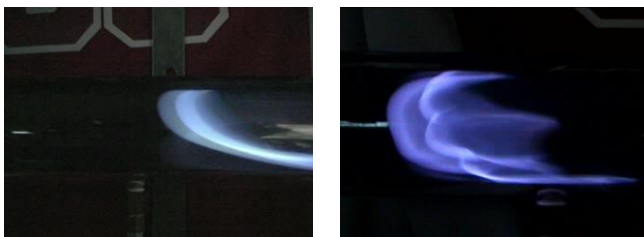
Delay time from ignition 0.50s

Delay time from ignition 1.00s



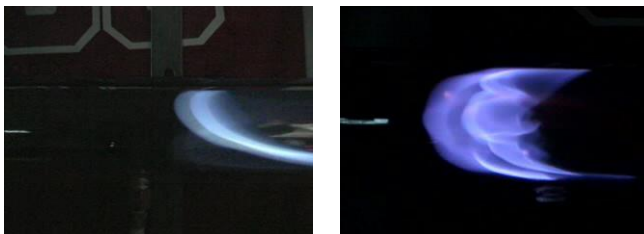
Delay time from ignition 0.60s

Delay time from ignition 1.10s



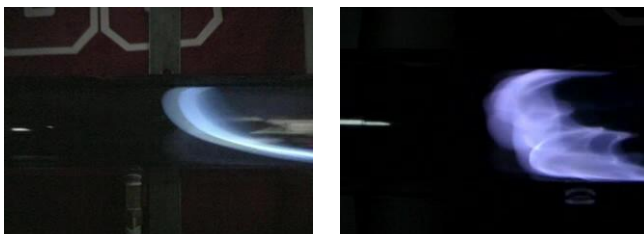
Delay time from ignition 0.70s

Delay time from ignition 1.20s



Delay time from ignition 0.80s

Delay time from ignition 1.30s



Delay time from ignition 0.90s

Delay time from ignition 1.40s

Before

After

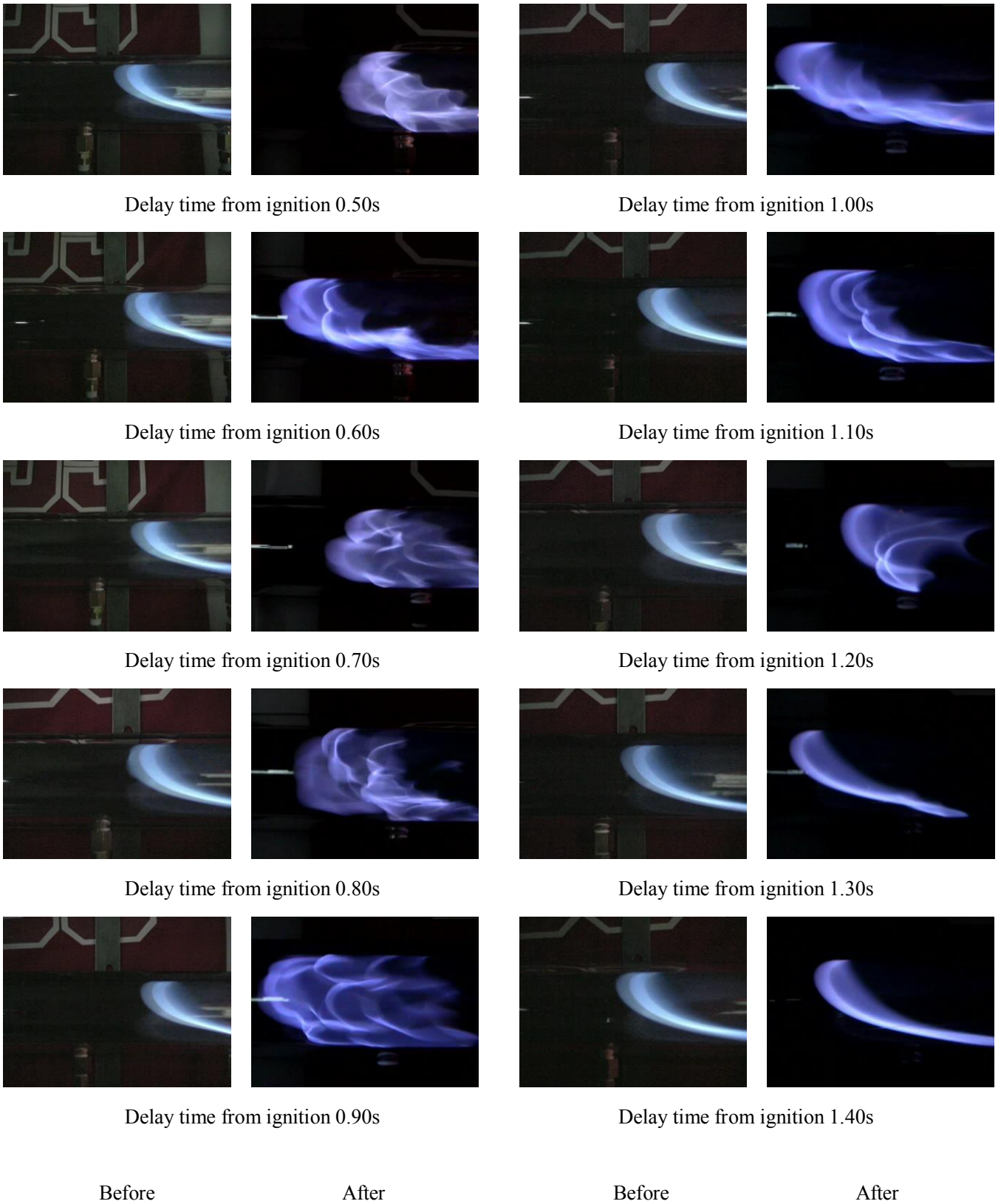
Before

After

**Fig.7-2 Flame shape**

**(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Equivalence ratio:  $\phi = 0.65$ , Injection time 0.75s)**

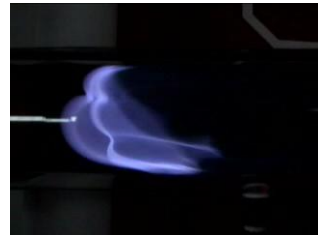
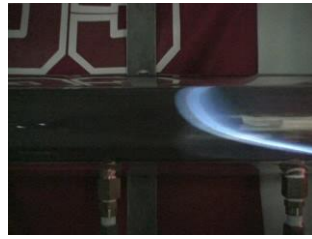




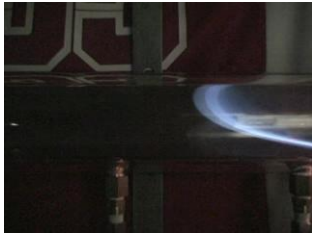
**Fig.7-3 Flame shape**  
(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Equivalence ratio:  $\phi = 0.65$ , Injection time 1.00s)



Delay time from ignition 0.50s



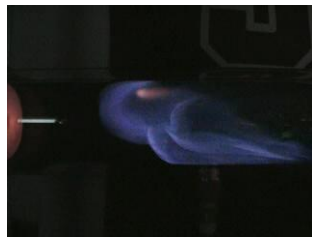
Delay time from ignition 1.00s



Delay time from ignition 0.60s



Delay time from ignition 1.10s



Delay time from ignition 0.70s



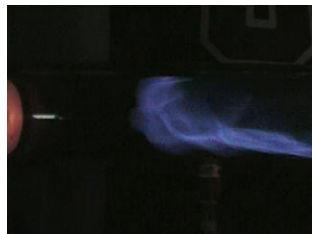
Delay time from ignition 1.20s



Delay time from ignition 0.80s



Delay time from ignition 1.30s



Delay time from ignition 0.90s



Delay time from ignition 1.40s

Before

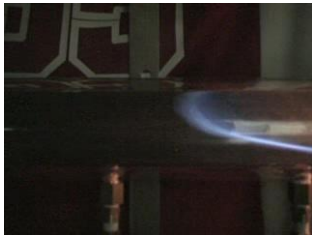
After

Before

After

**Fig.7-4 Flame shape**

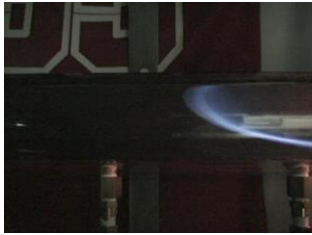
**(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Equivalence ratio:  $\phi = 0.60$ , Injection time 0.75s)**



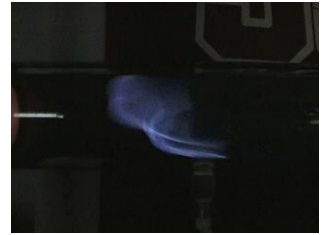
Delay time from ignition 0.50s



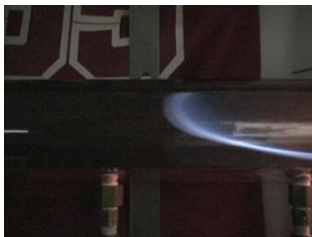
Delay time from ignition 1.00s



Delay time from ignition 0.60s



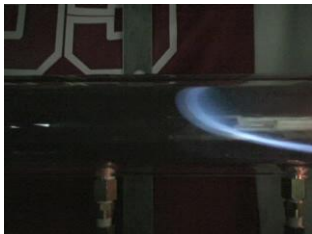
Delay time from ignition 1.10s



Delay time from ignition 0.70s



Delay time from ignition 1.20s



Delay time from ignition 0.80s



Delay time from ignition 1.30s



Delay time from ignition 0.90s



Delay time from ignition 1.40s

Before

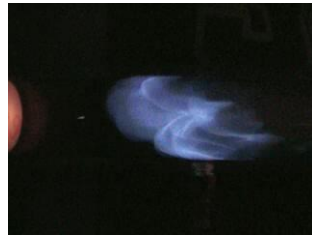
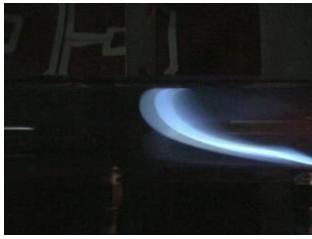
After

Before

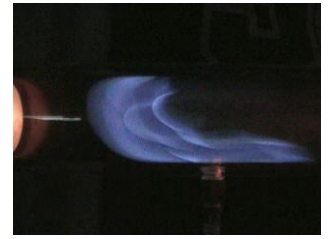
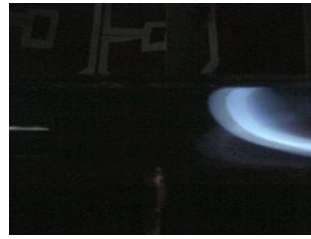
After

**Fig.7-5 Flame shape**

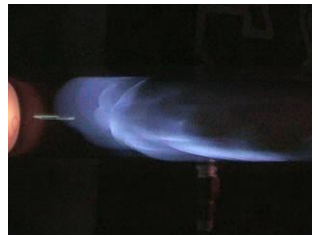
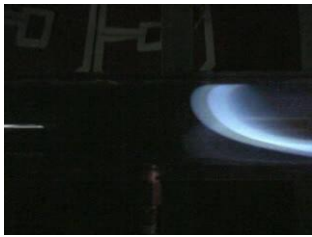
**(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Equivalence ratio:  $\phi = 0.55$ , Injection time 0.75s)**



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



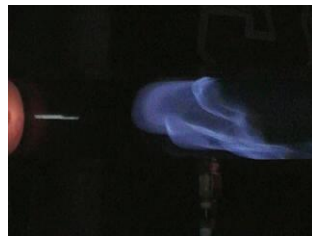
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$

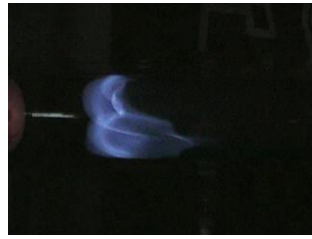
Before

After

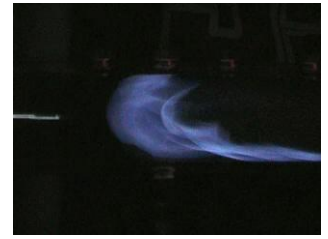
Before

After

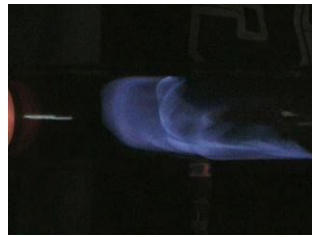
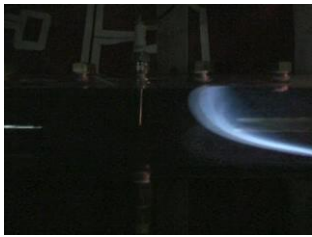
**Fig.7-6 (A) Flame shape**  
**(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Injection time 0.75s)**



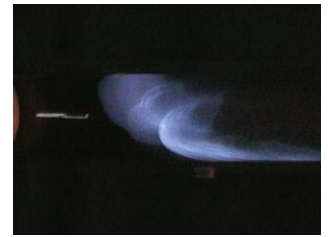
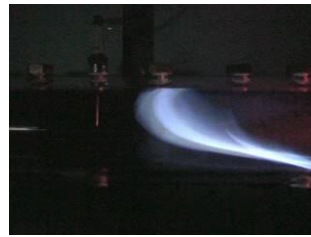
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$



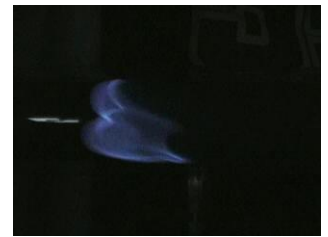
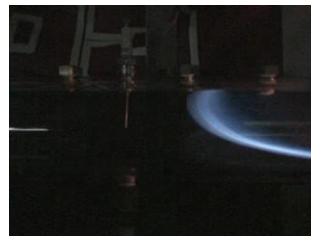
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$

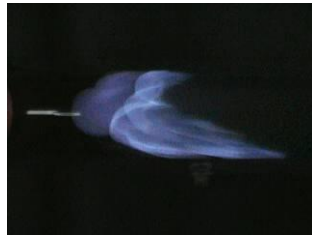
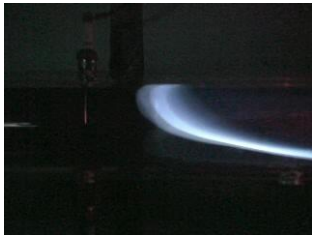
Before

After

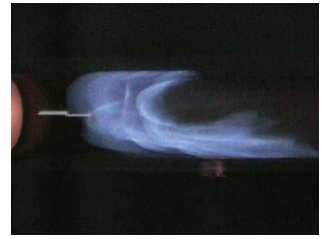
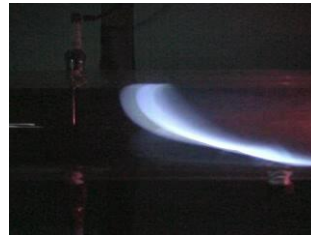
Before

After

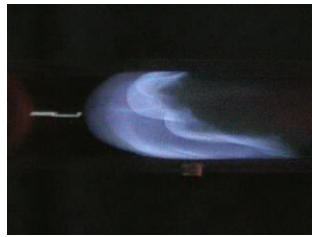
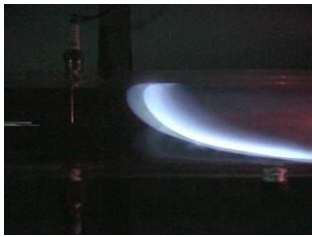
**Fig.7-6 (B) Flame shape**  
**(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Injection time 0.75s)**



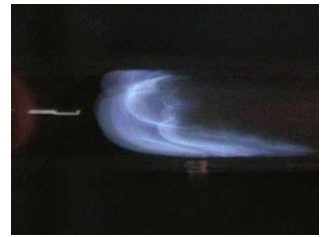
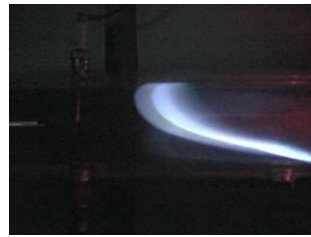
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



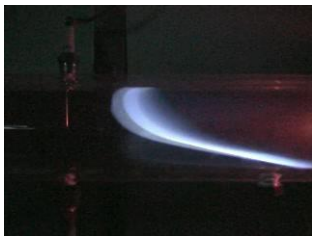
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$



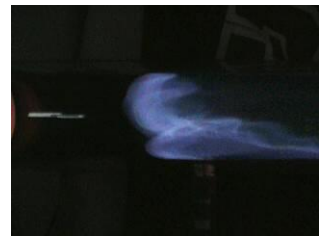
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$

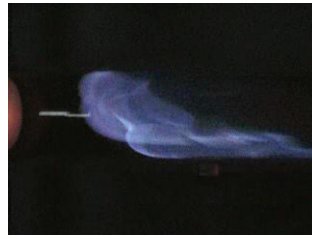
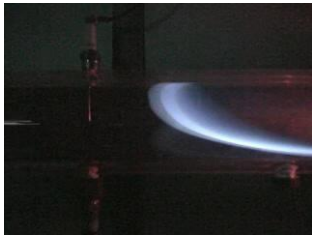
Before

After

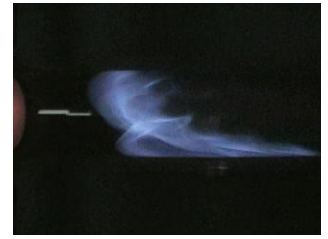
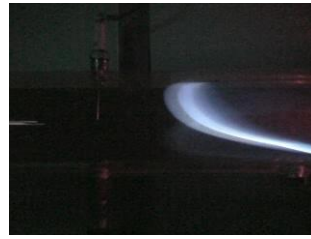
Before

After

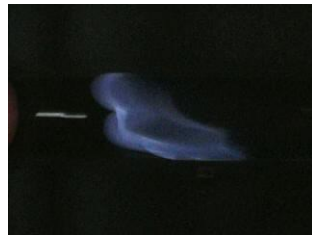
**Fig.7-7 (A) Flame shape**  
**(O<sub>2</sub> Concentration 19vol%, Injection time 0.75s)**



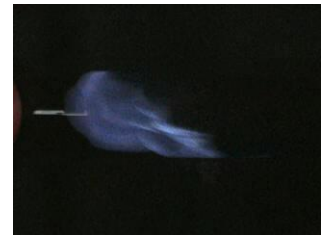
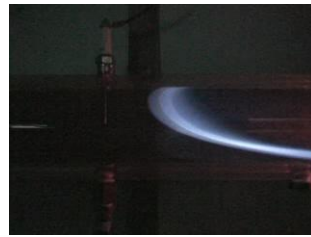
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



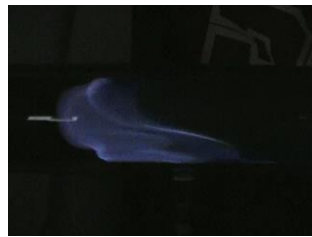
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$



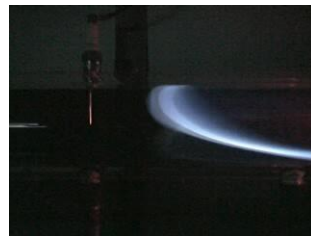
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$

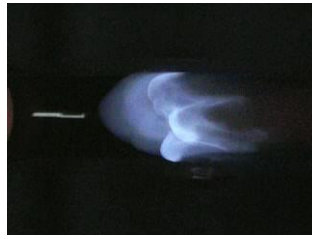
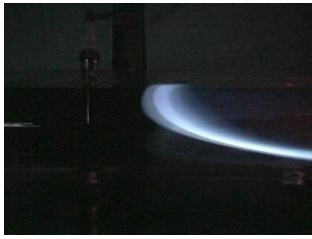
Before

After

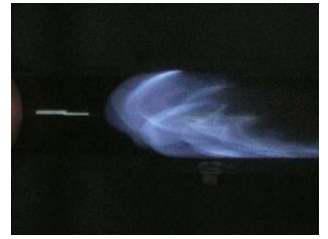
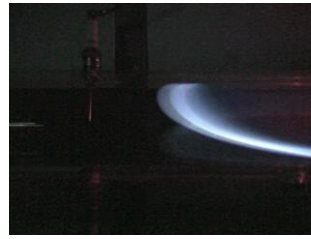
Before

After

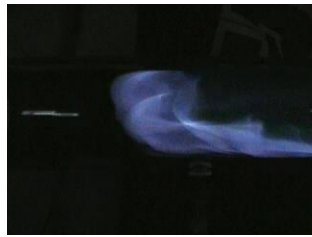
**Fig.7-7 (B) Flame shape**  
**(O<sub>2</sub> Concentration 19vol%, Injection time 0.75s)**



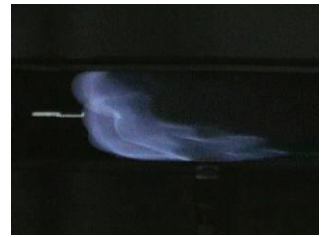
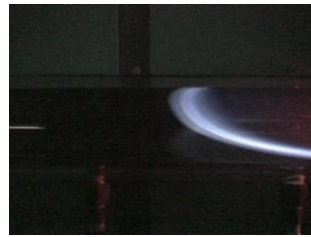
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$



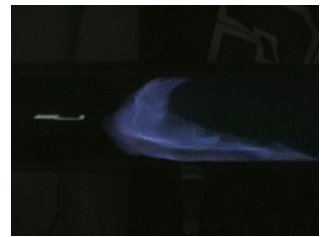
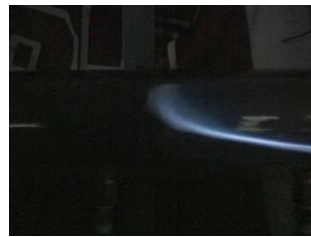
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
 Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$

Before

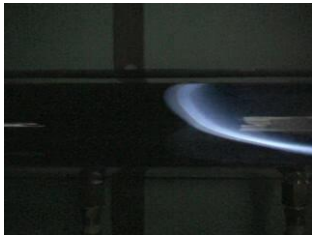
After

Before

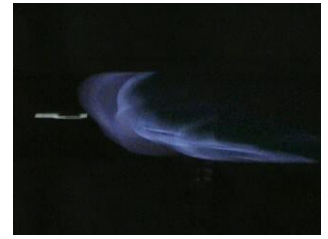
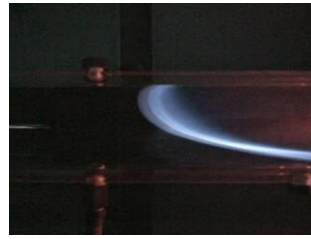
After

**Fig.7-8 (A) Flame shape**  
**(O<sub>2</sub> Concentration 17vol%, Injection time 0.75s)**

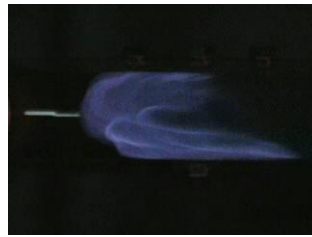
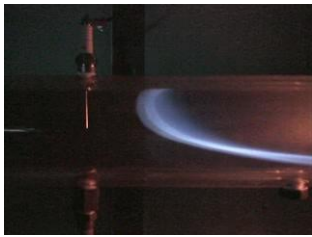




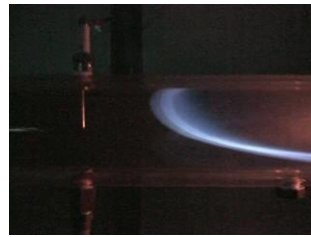
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



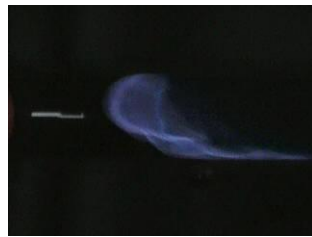
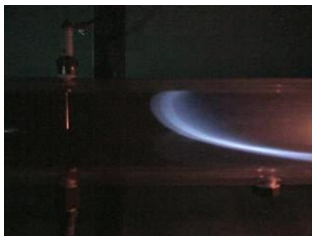
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$   
Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$



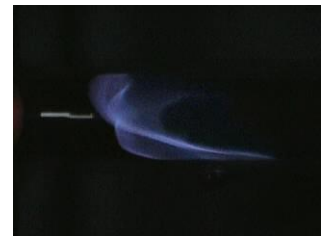
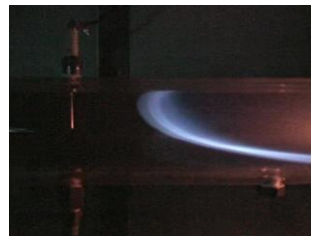
Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.65$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.60$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.55$



Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$   
Equivalence ratio of injection mixture  $\phi = 0.50$

Before

After

Before

After

**Fig.7-8 (B) Flame shape**  
**(O<sub>2</sub> Concentration 17vol%, Injection time 0.75s)**

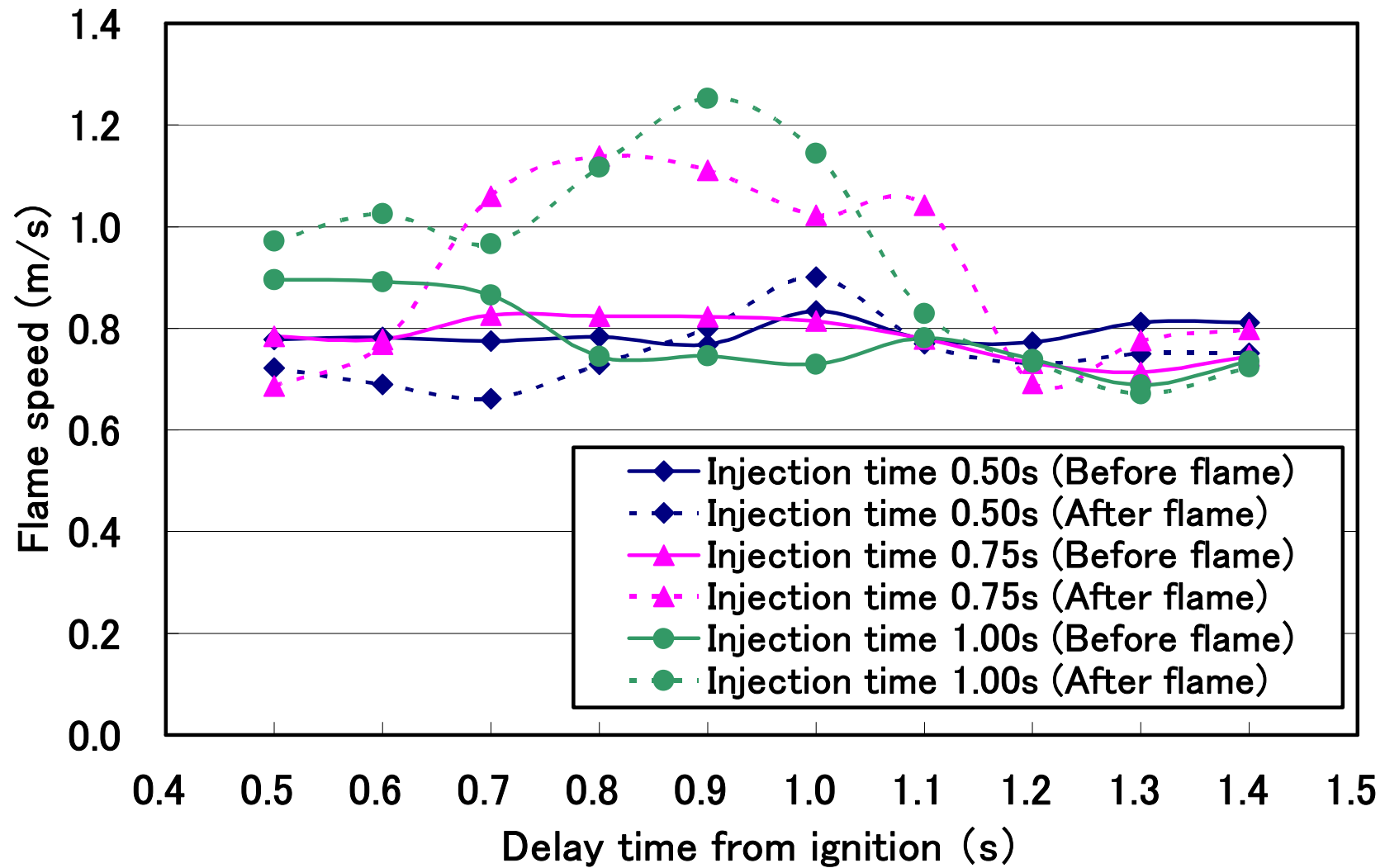


Fig.7-9 Flame speed ( $O_2$  Concentration 21vol%, Equivalence ratio:  $\phi = 0.65$ )

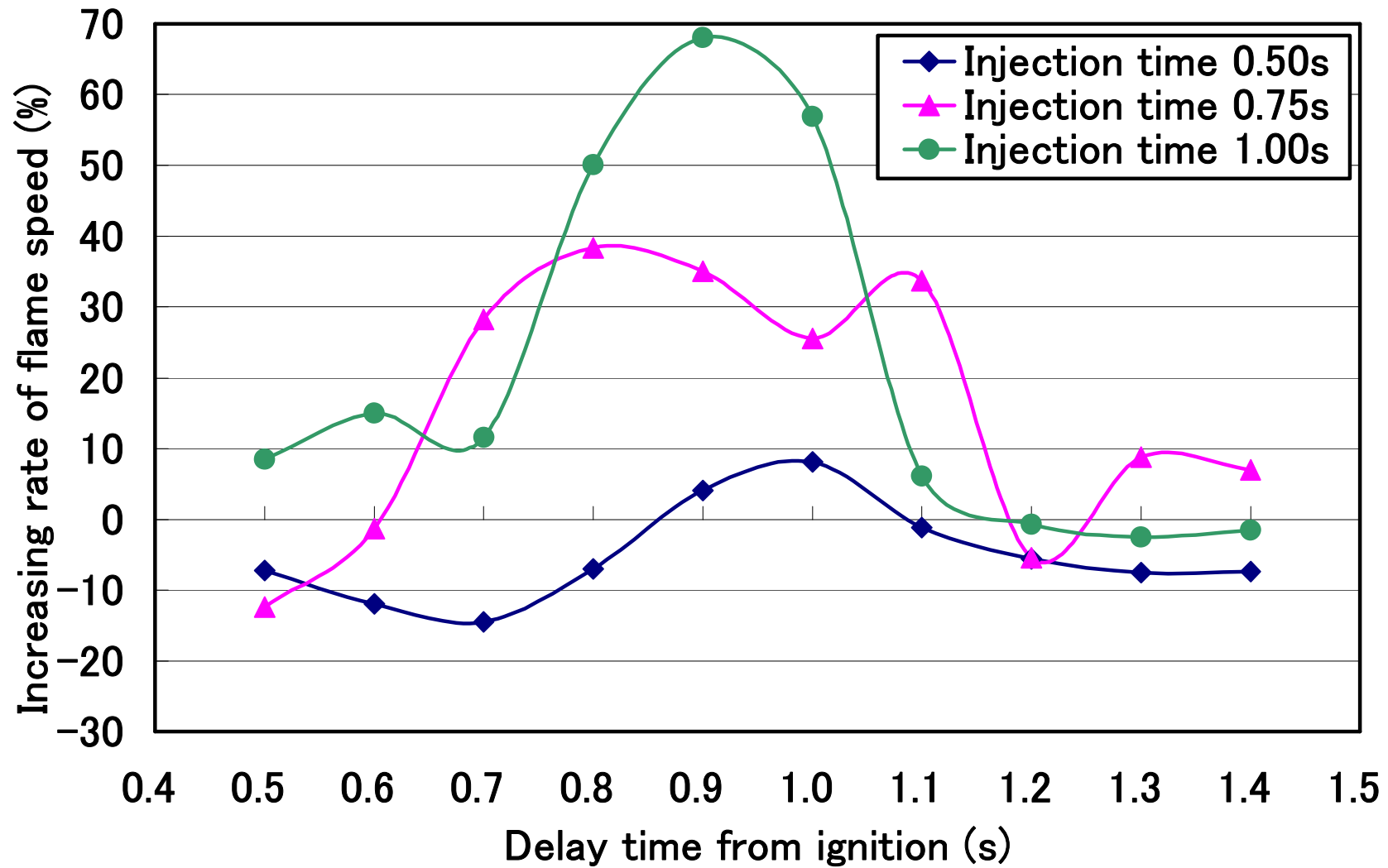


Fig.7-10 Increasing rate of flame speed ( $O_2$  Concentration 21vol%, Equivalence ratio:  $\phi = 0.65$ )

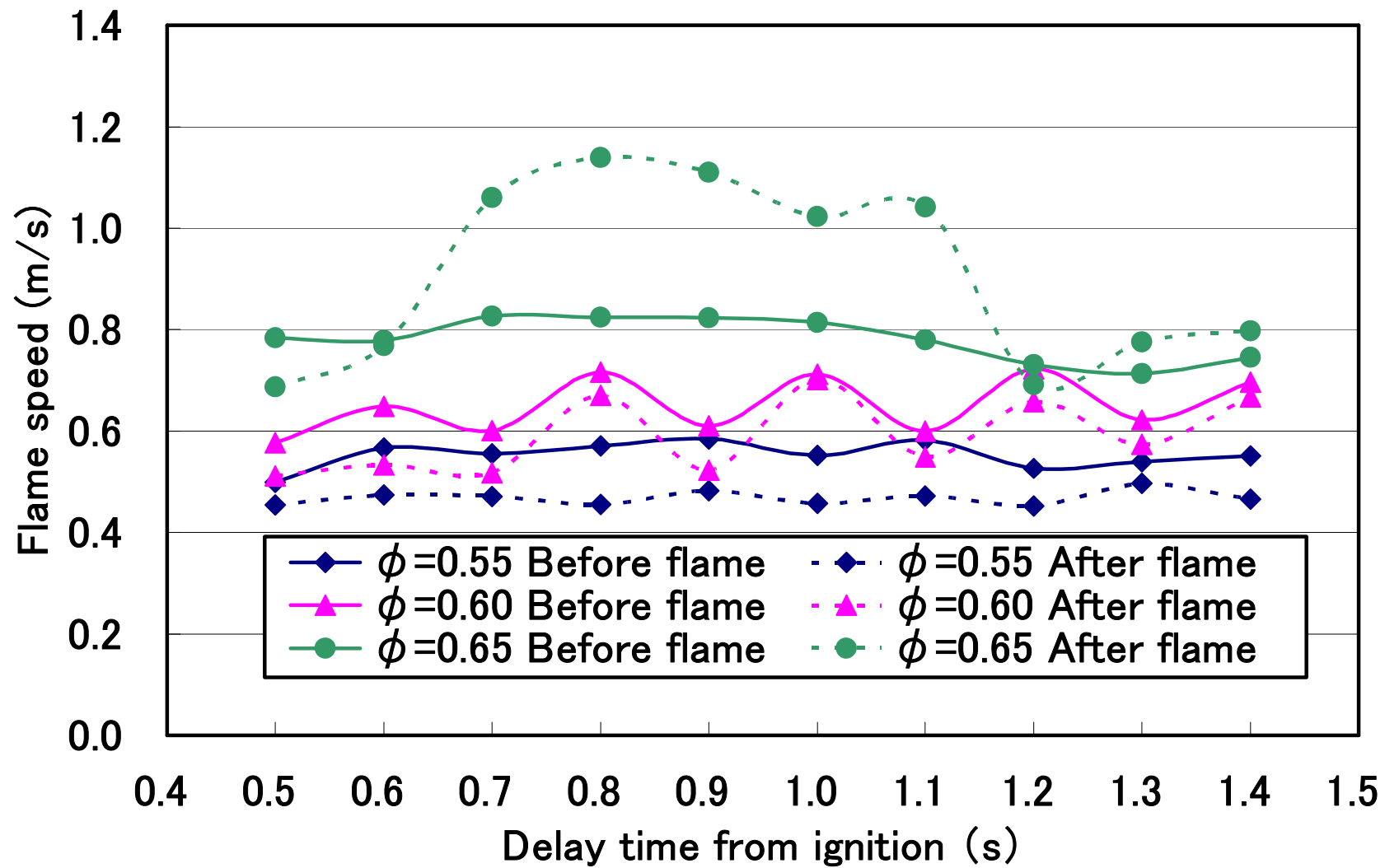


Fig.7-11 Flame speed ( $O_2$  Concentration 21vol%, Injection time 0.75s)

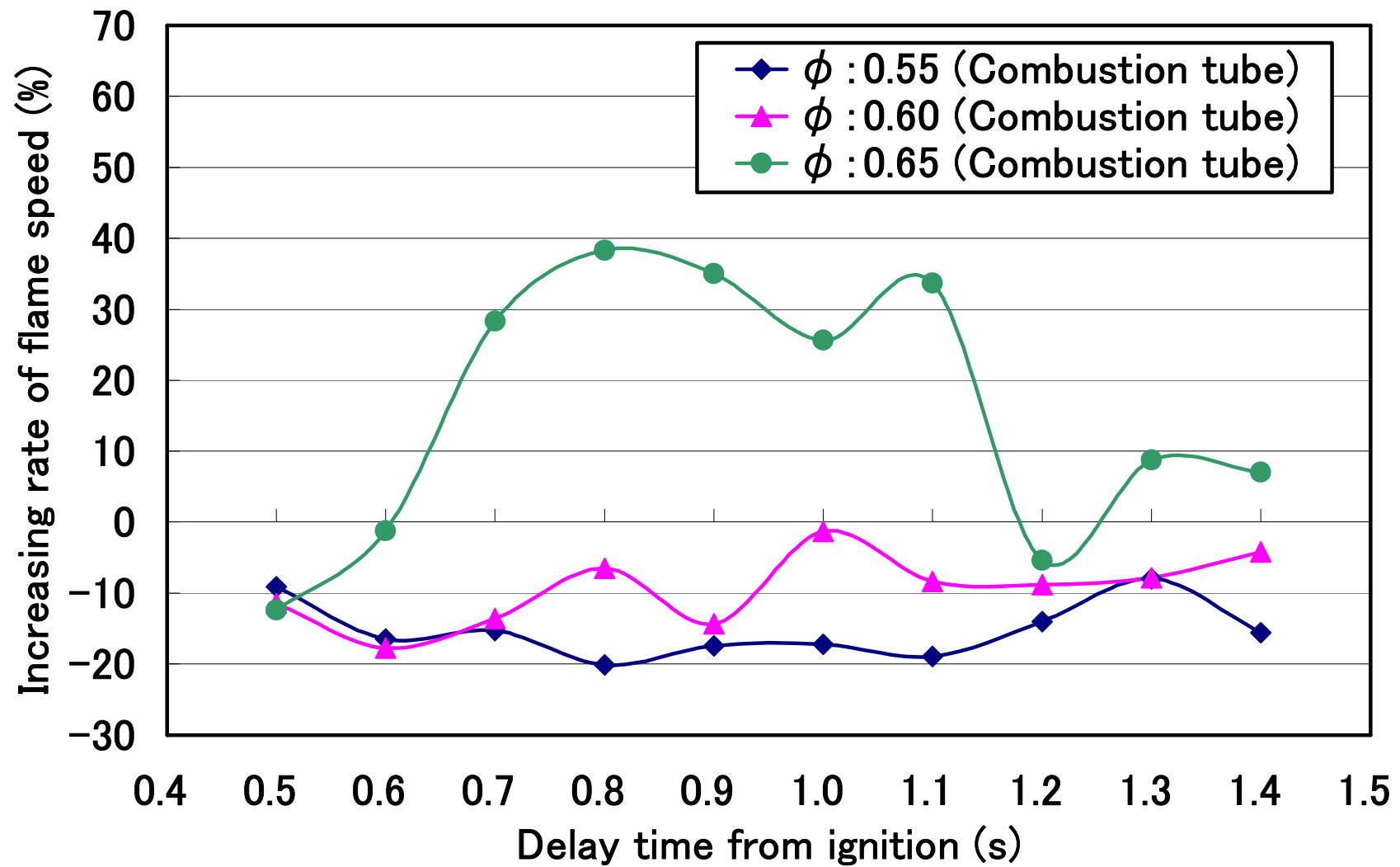


Fig.7-12 Increasing rate of flame speed ( $O_2$  Concentration 21 vol%, Injection time 0.75s)

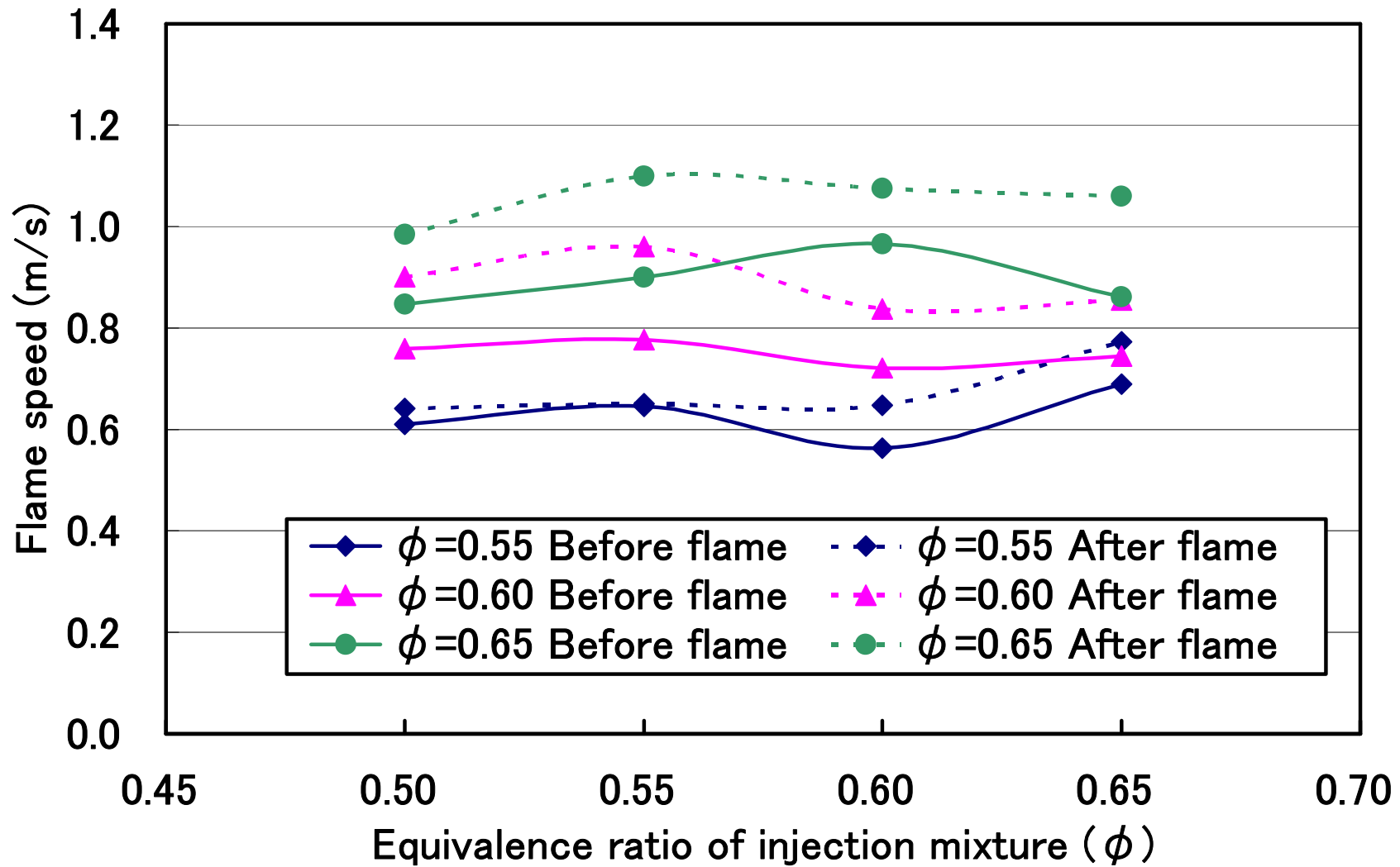


Fig.7-13 Flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

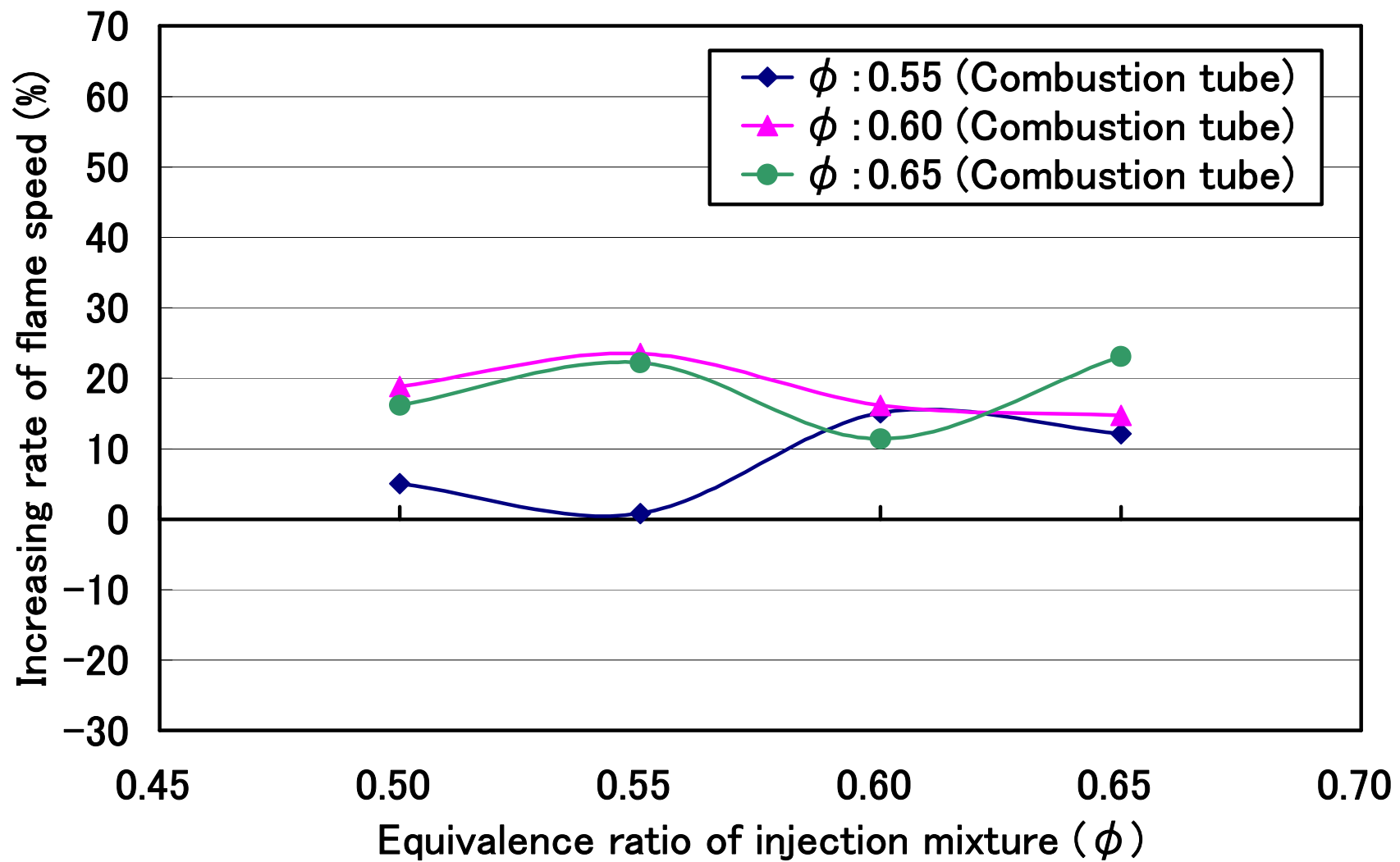


Fig.7-14 Increasing rate of flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

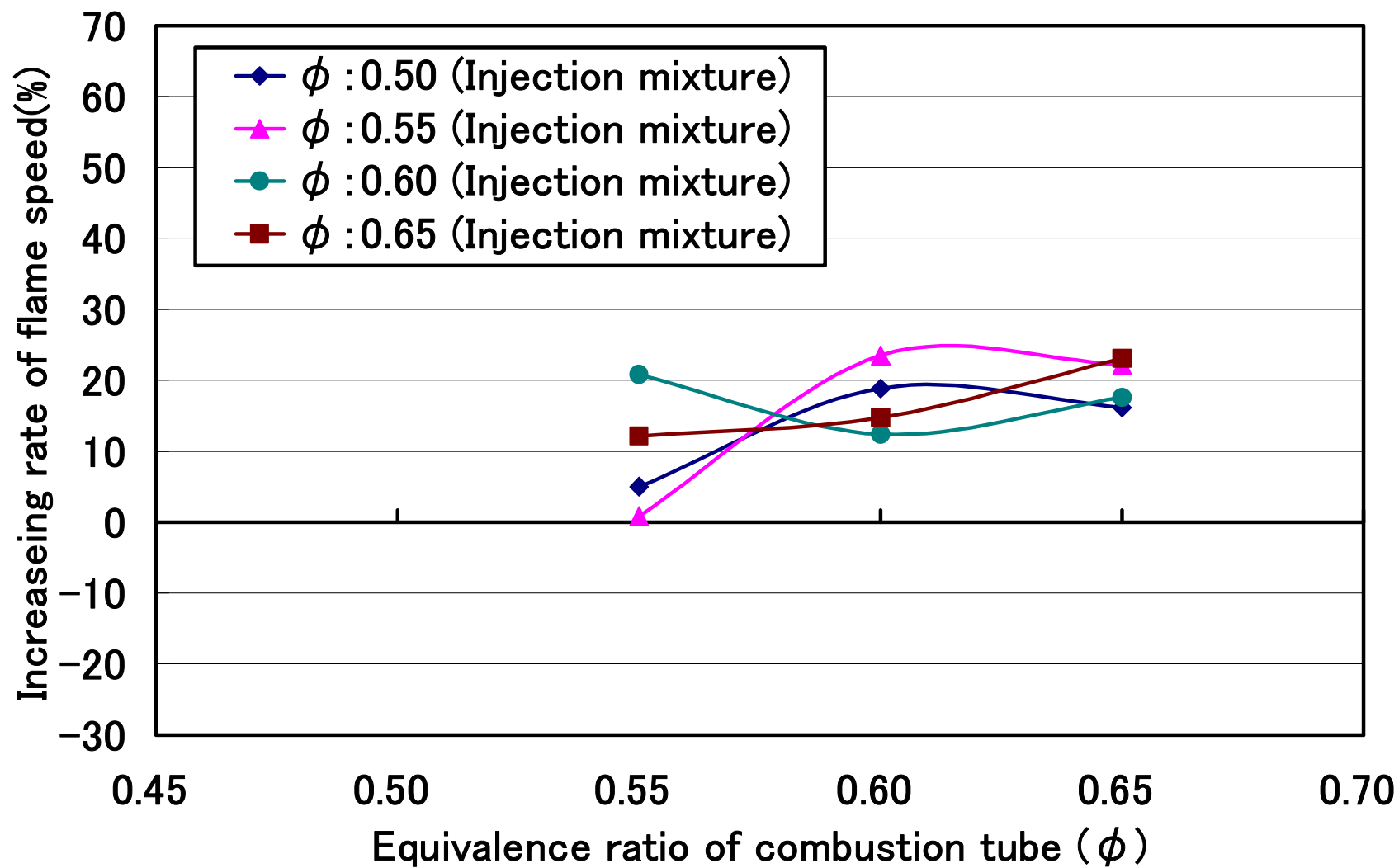


Fig.7-15 Increasing rate of flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)



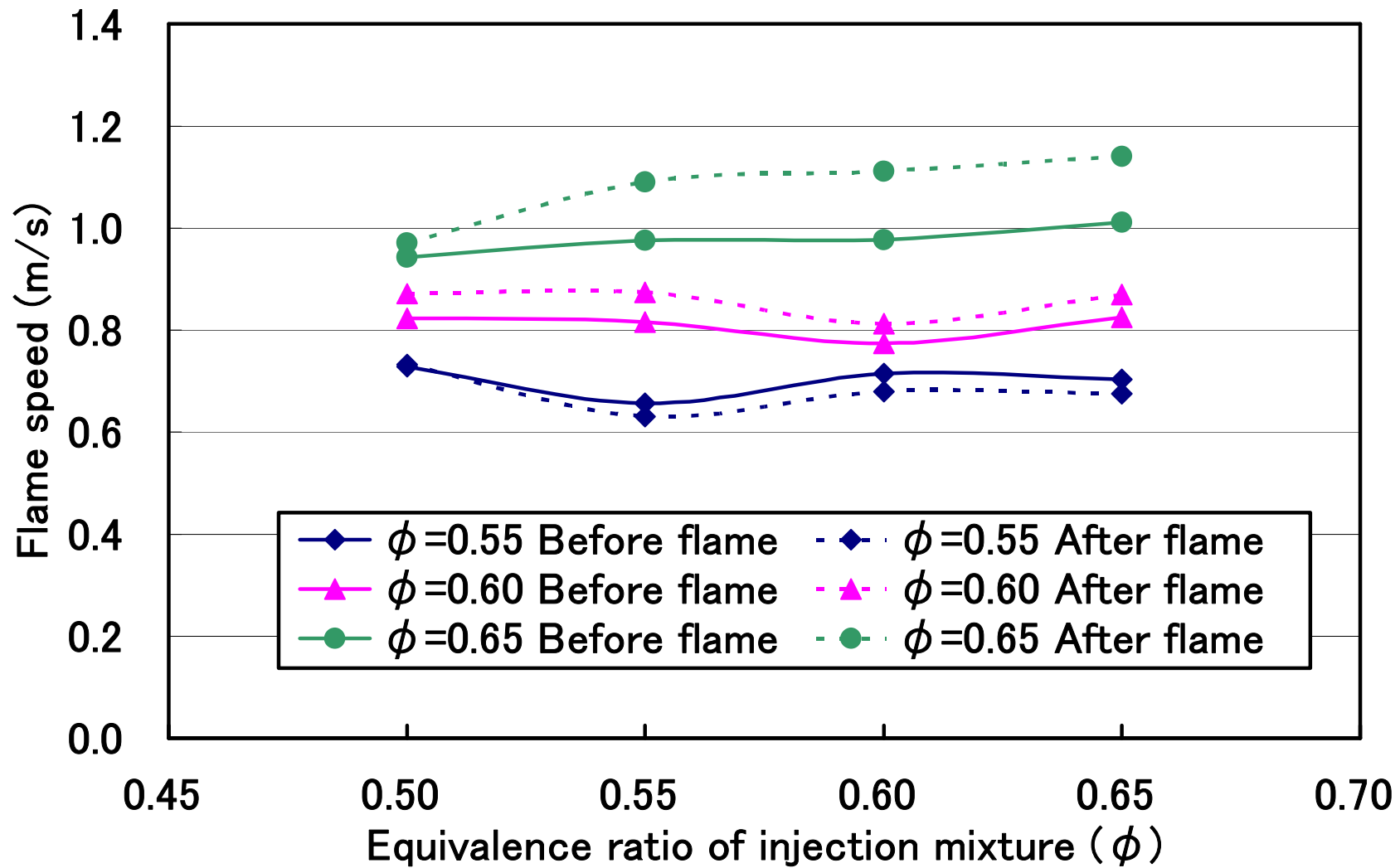


Fig.7-16 Flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 19vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

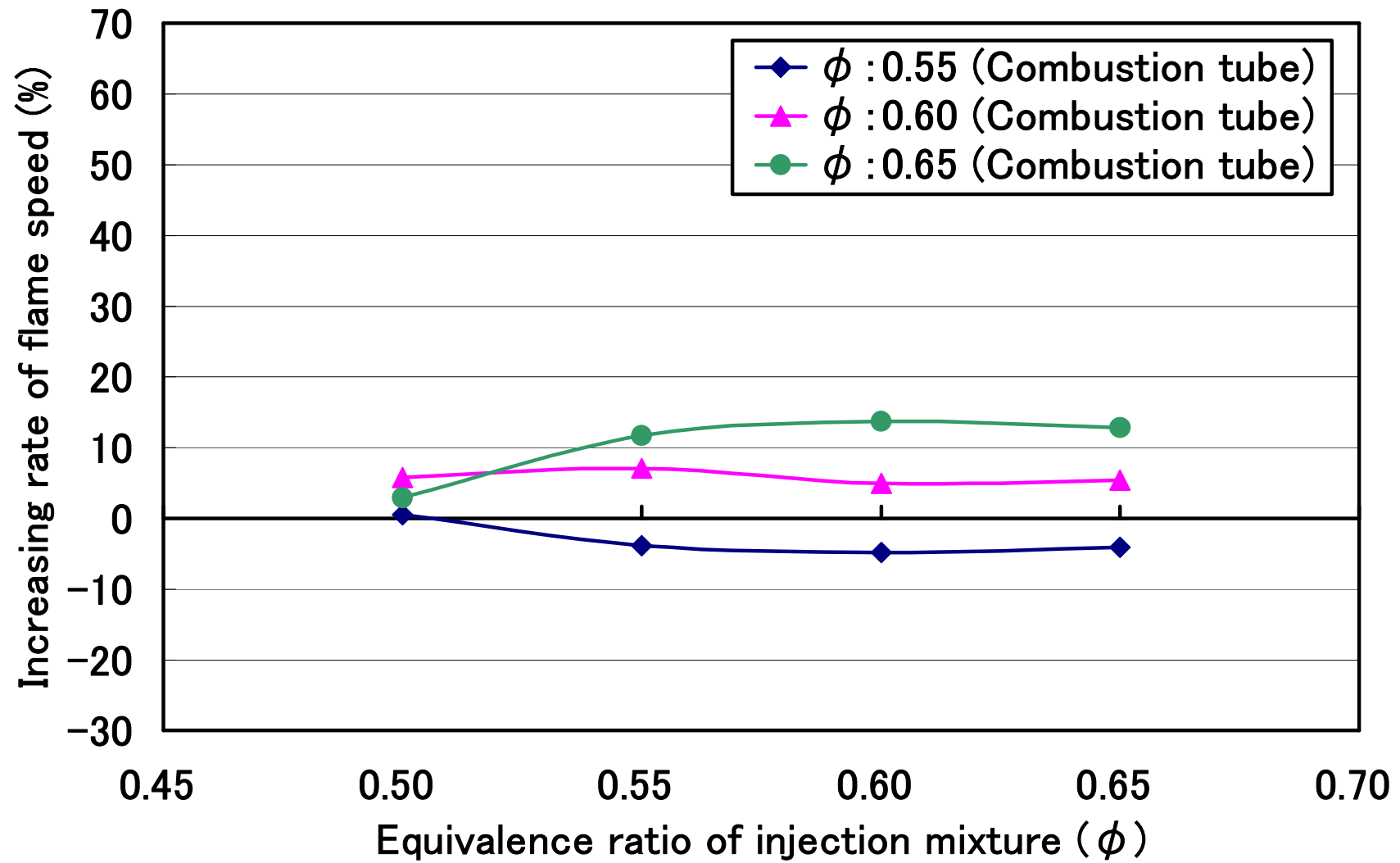


Fig.7-17 Increasing rate of flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 19vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

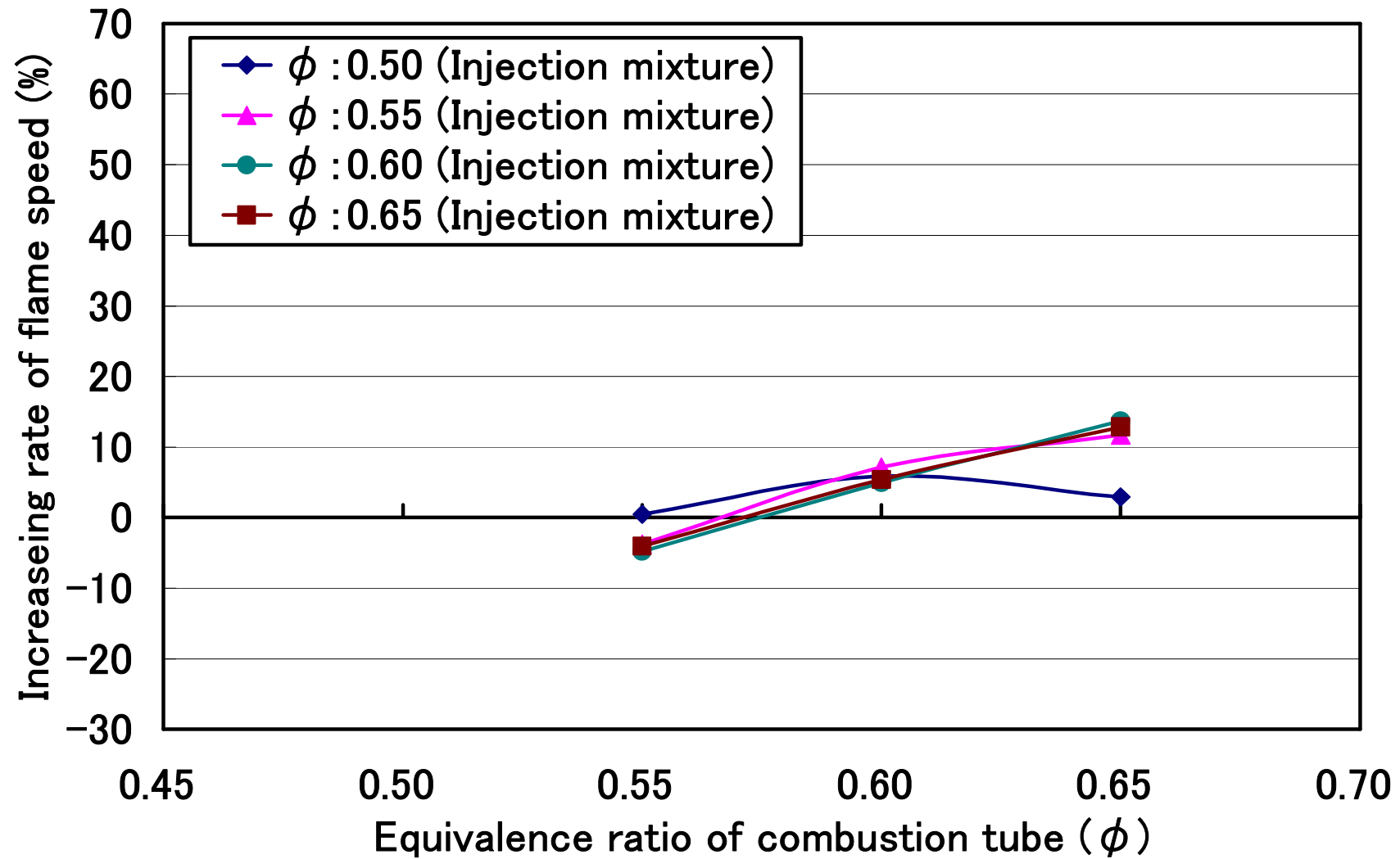


Fig.7-18 Increasing rate of flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 19vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

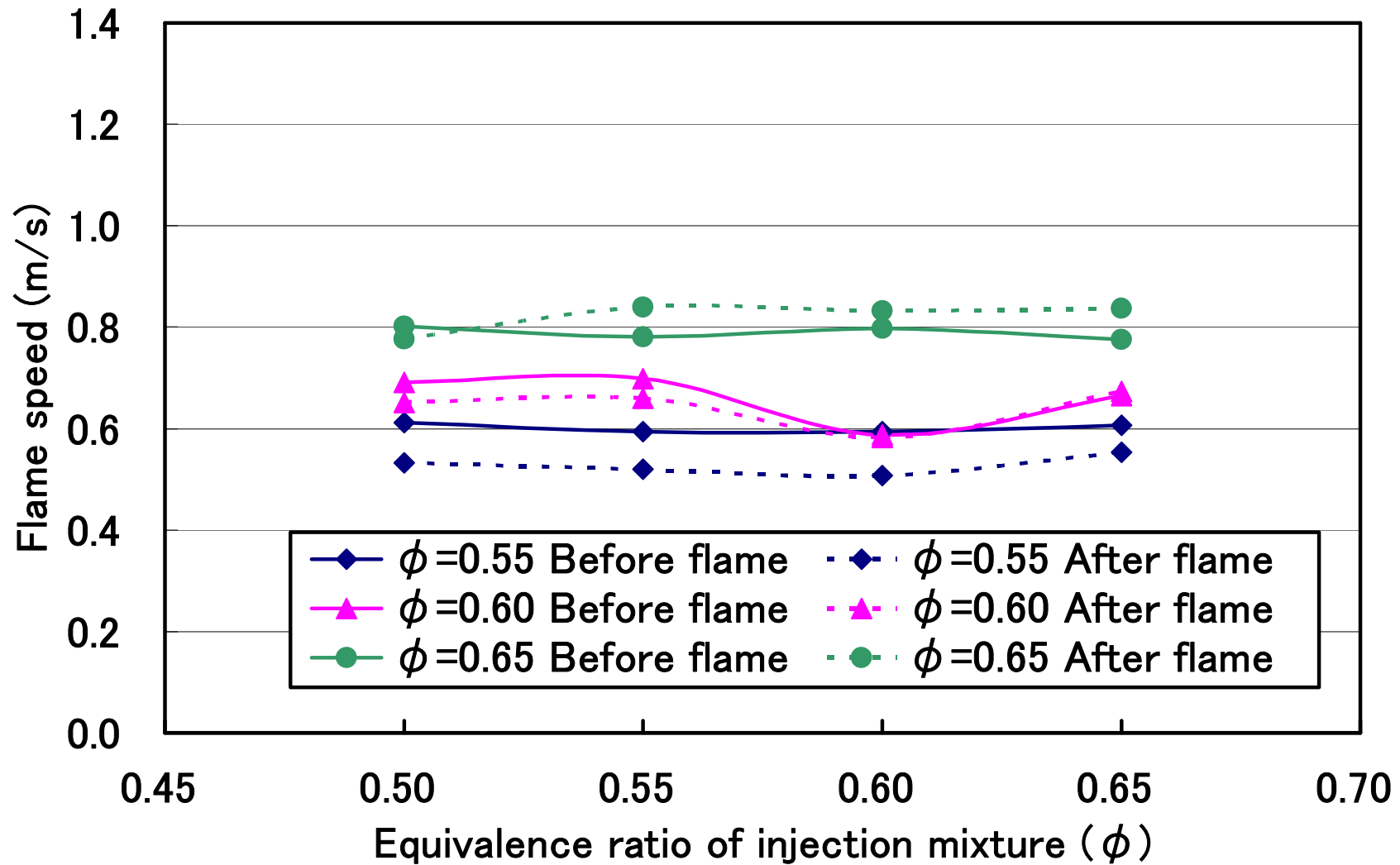


Fig.7-19 Flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 17vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

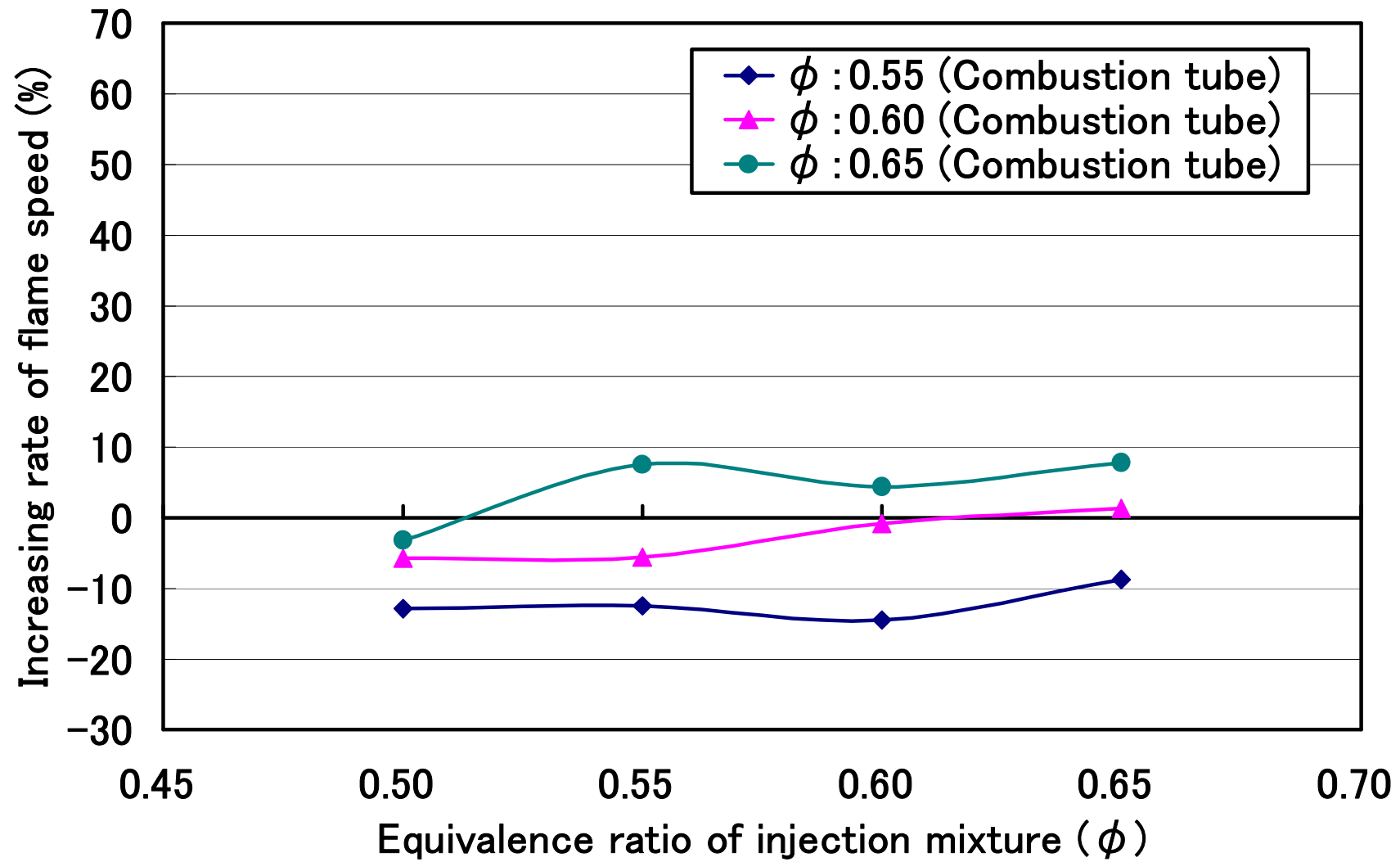


Fig.7-20 Increasing rate of flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 17vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

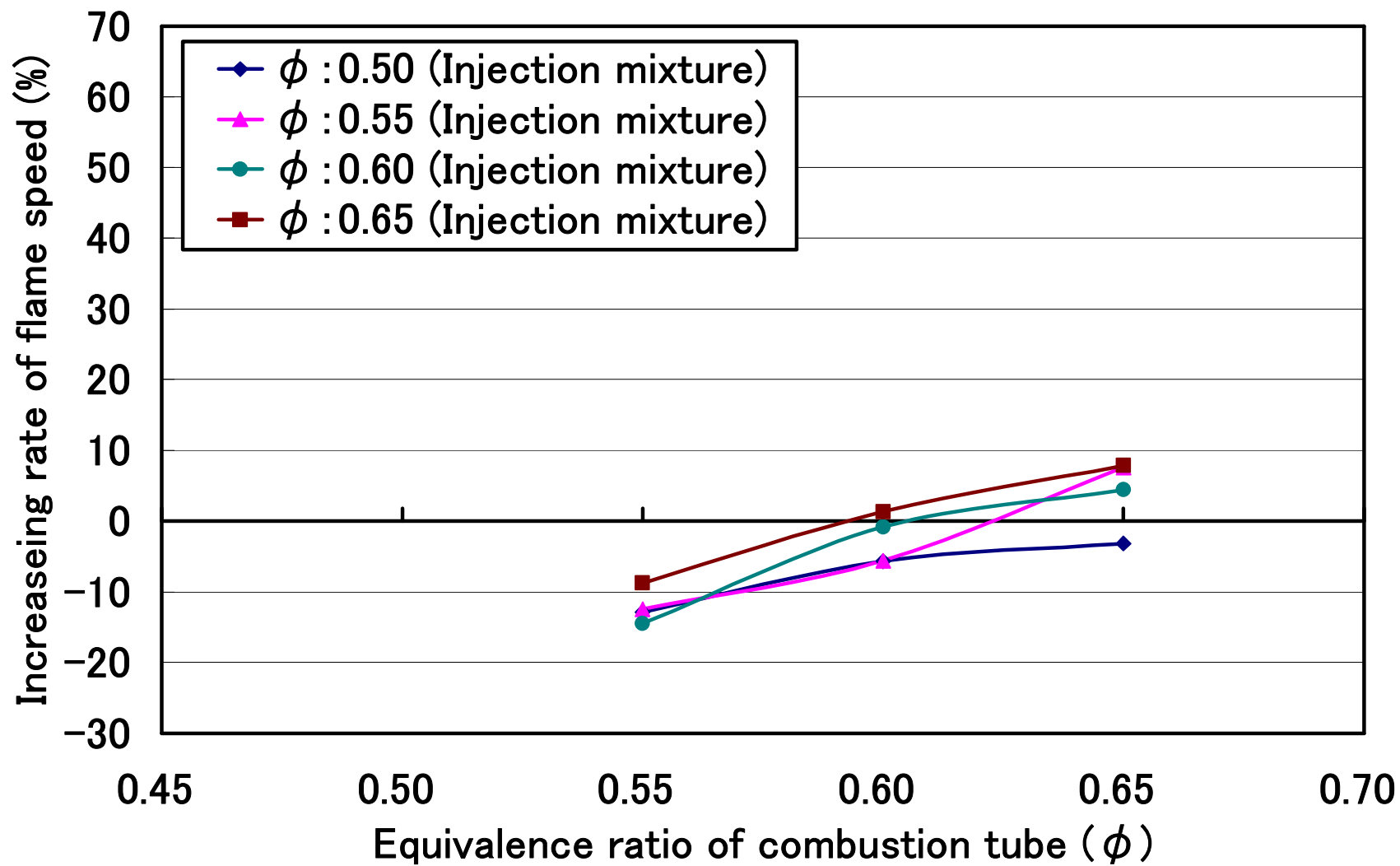


Fig.7-21 Increasing rate of flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 17vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

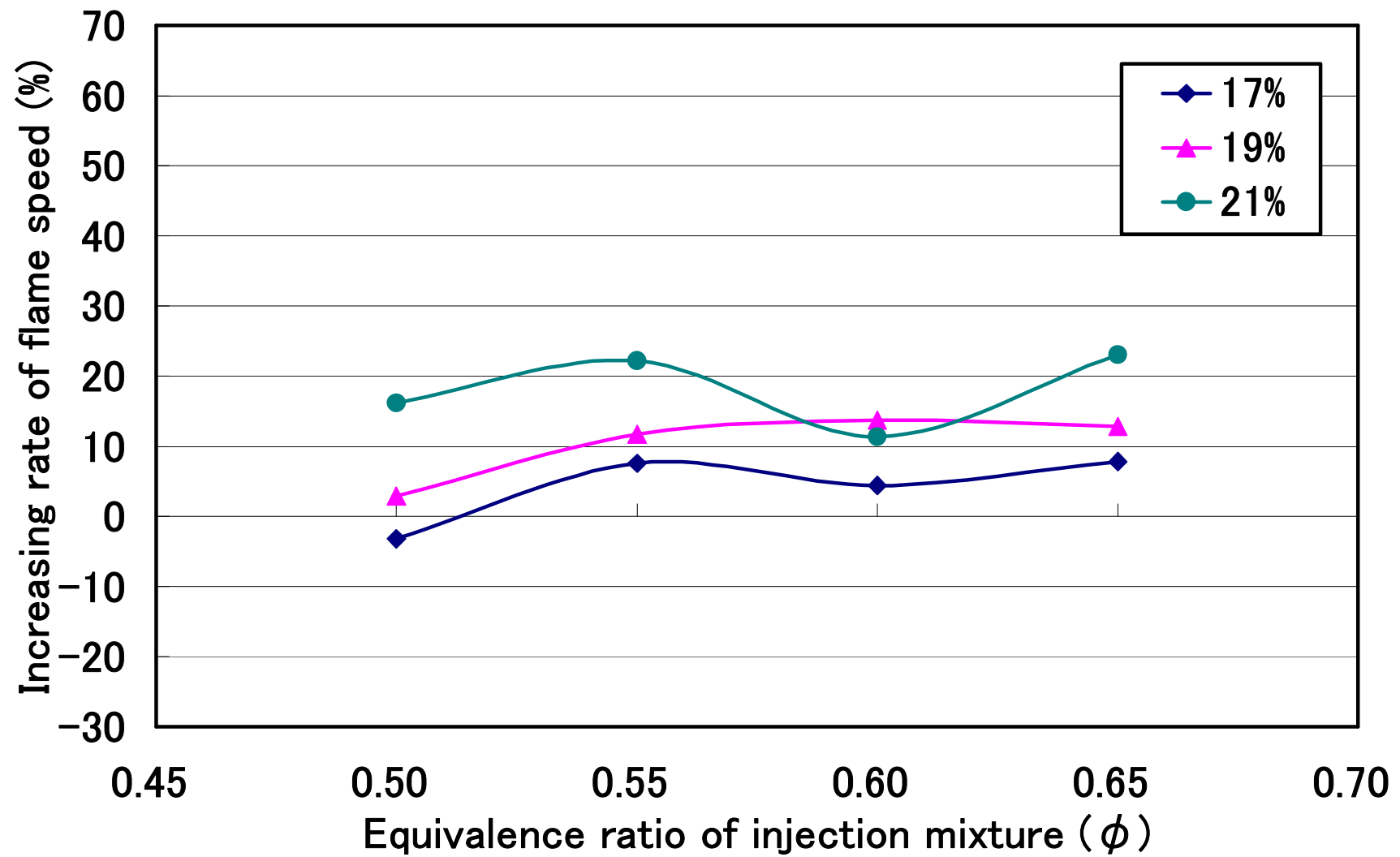


Fig.7-22 Increasing rate of flame speed

(Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$ , Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

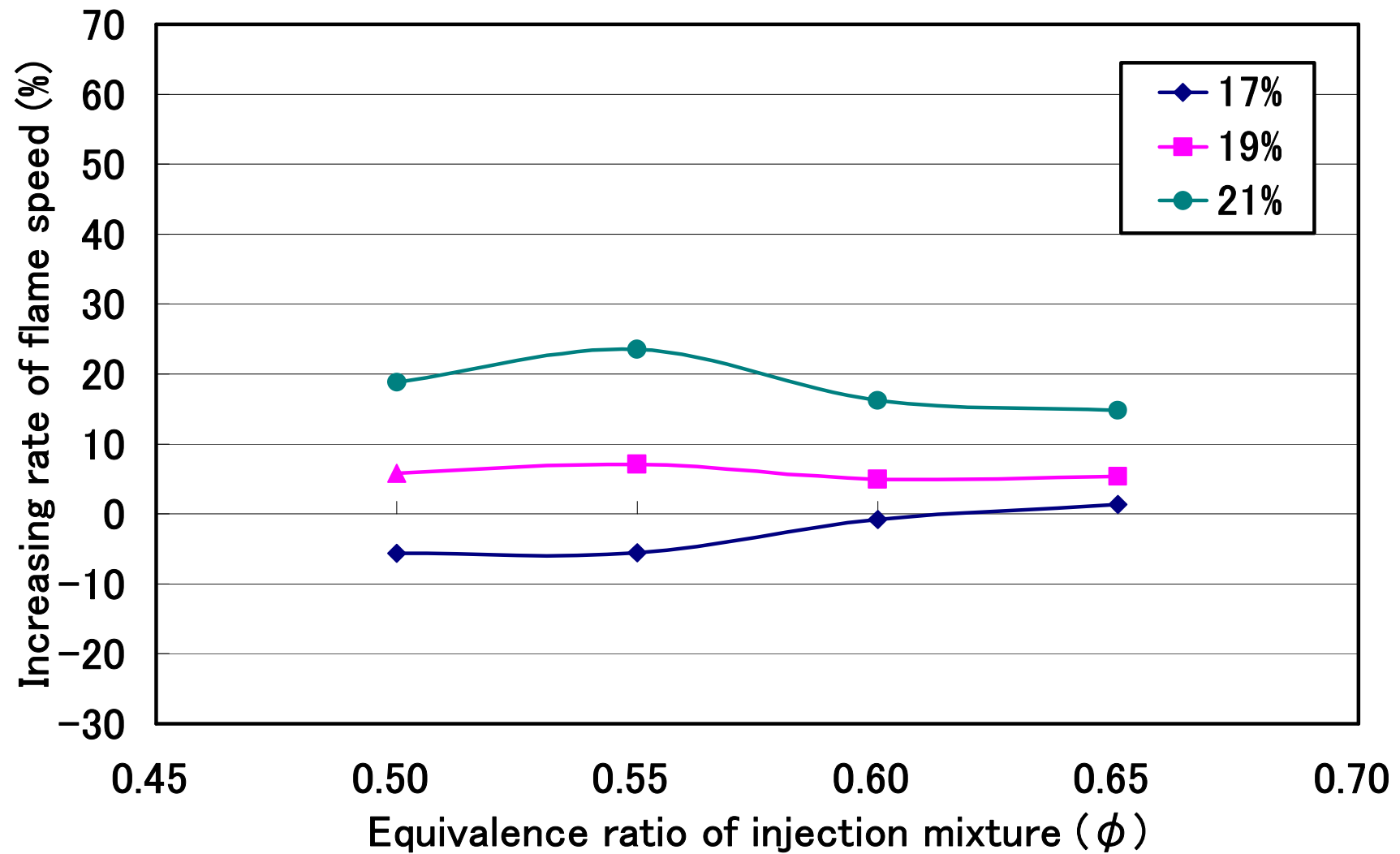


Fig.7-23 Increasing rate of flame speed

(Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$ , Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)



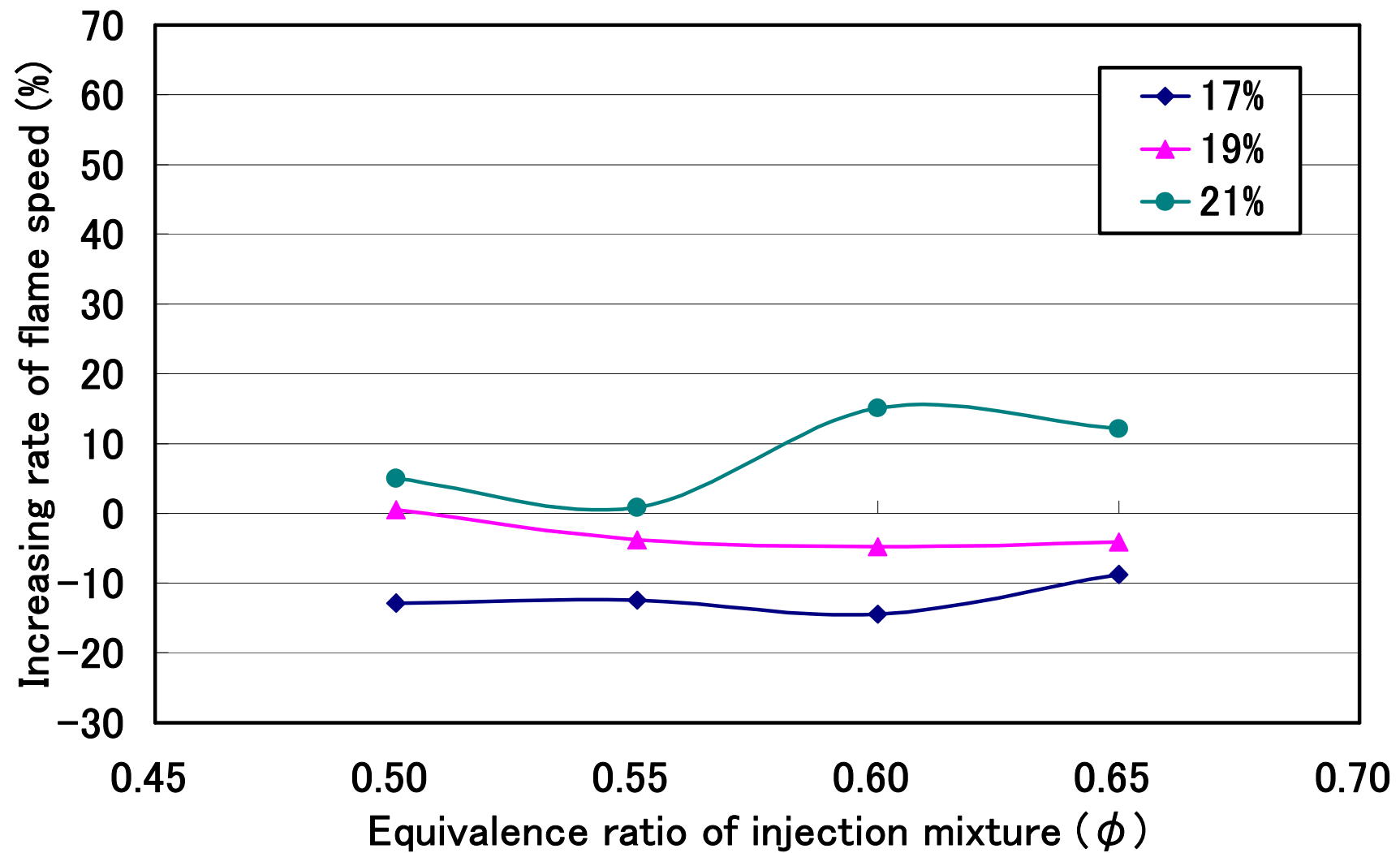


Fig.7-24 Increasing rate of flame speed

(Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$ , Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

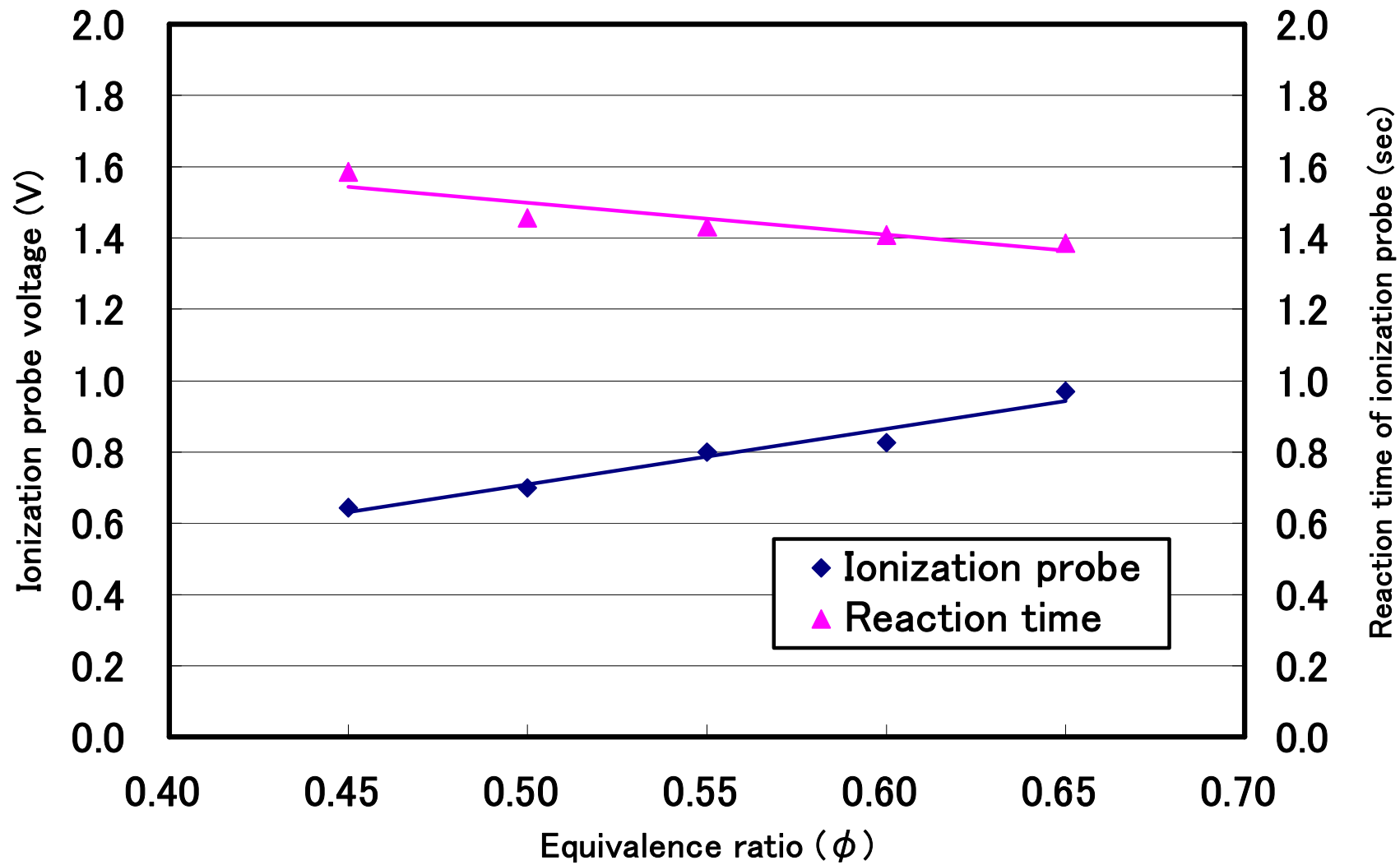


Fig.7-25 Ionization probe voltage

(O<sub>2</sub> Concentration 21 vol%, Non injection, Delay time from ignition 1.00s)

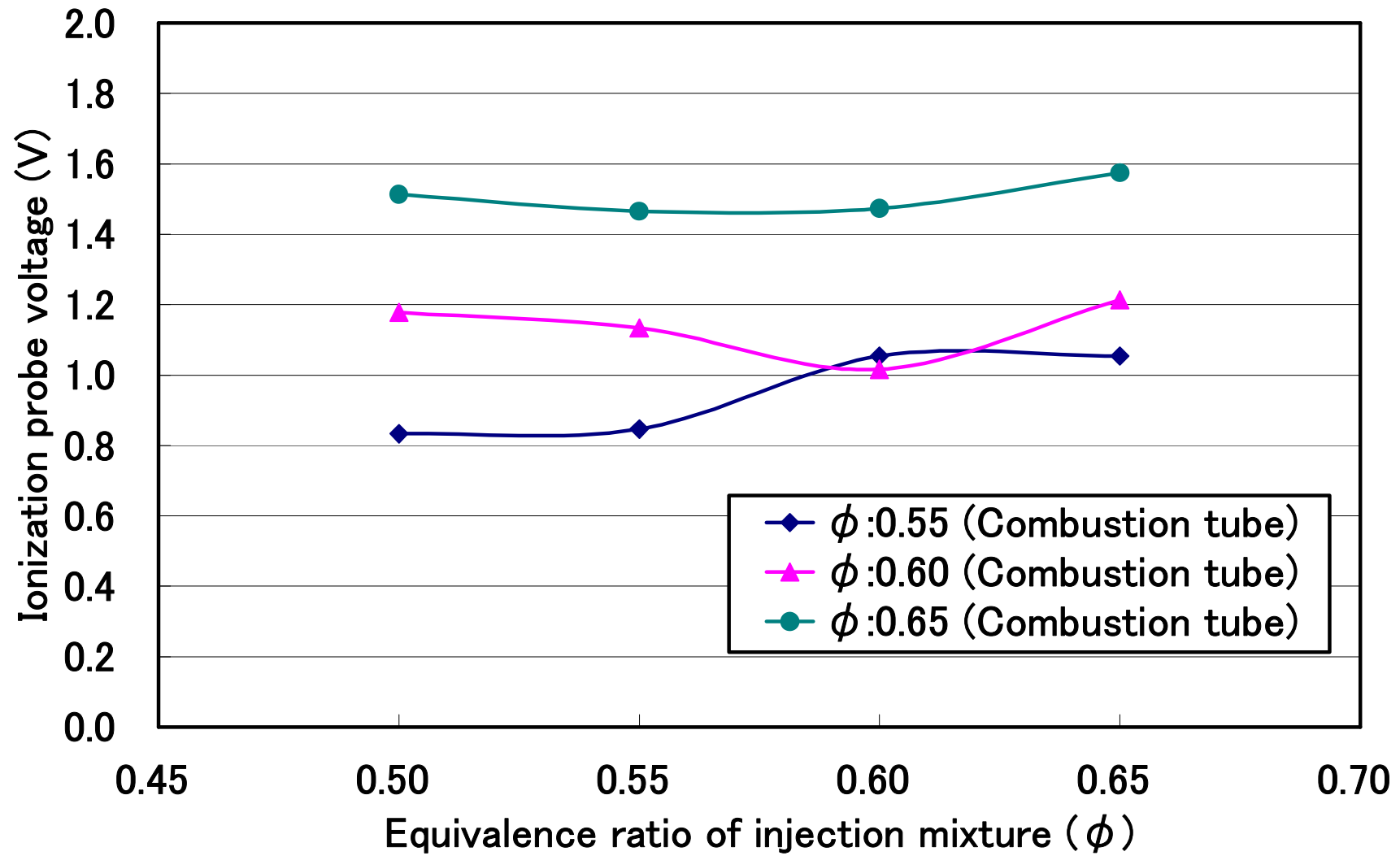


Fig.7-26 Ionization probe voltage

(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

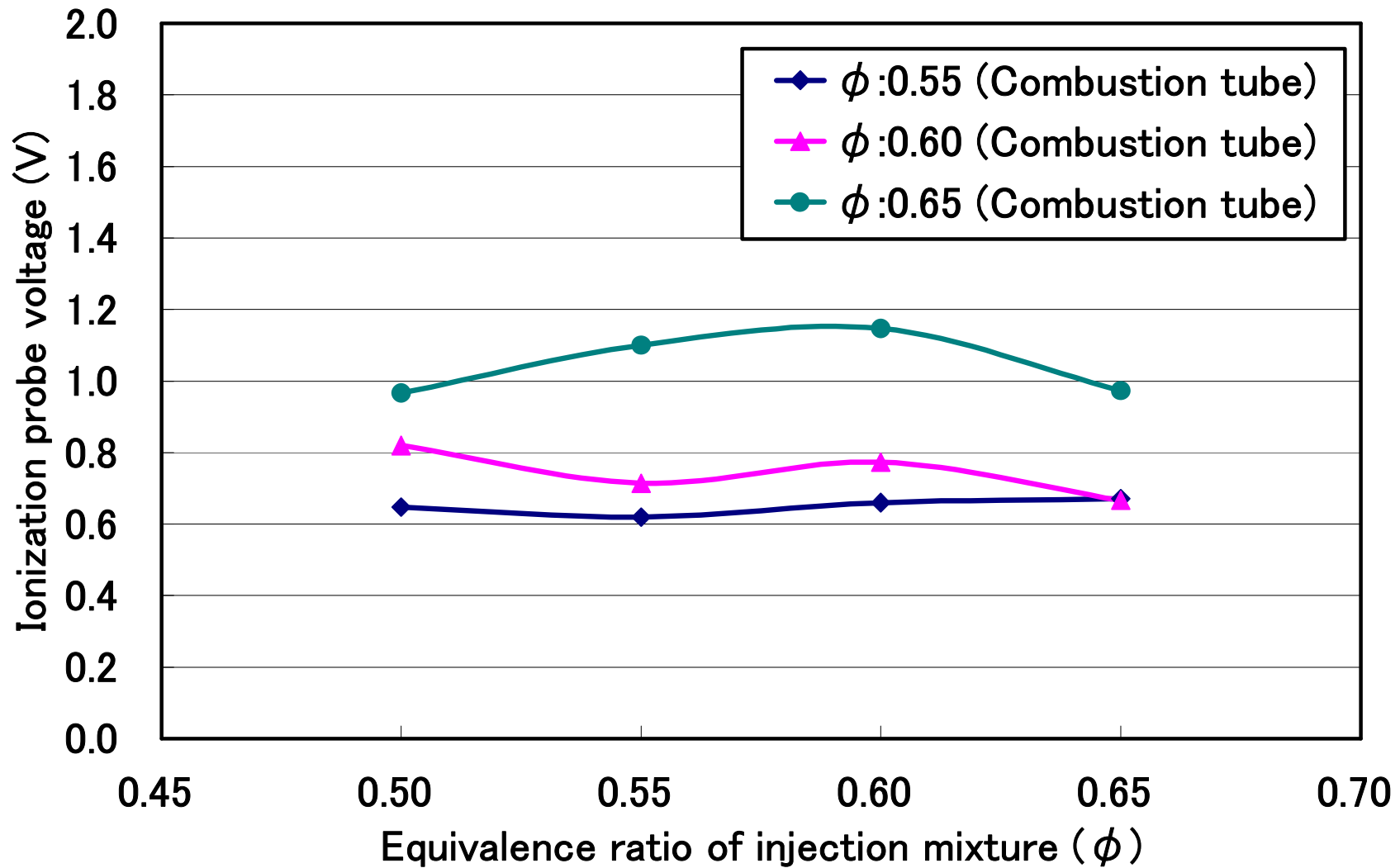


Fig.7-27 Ionization probe voltage

(O<sub>2</sub> Concentration 19vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

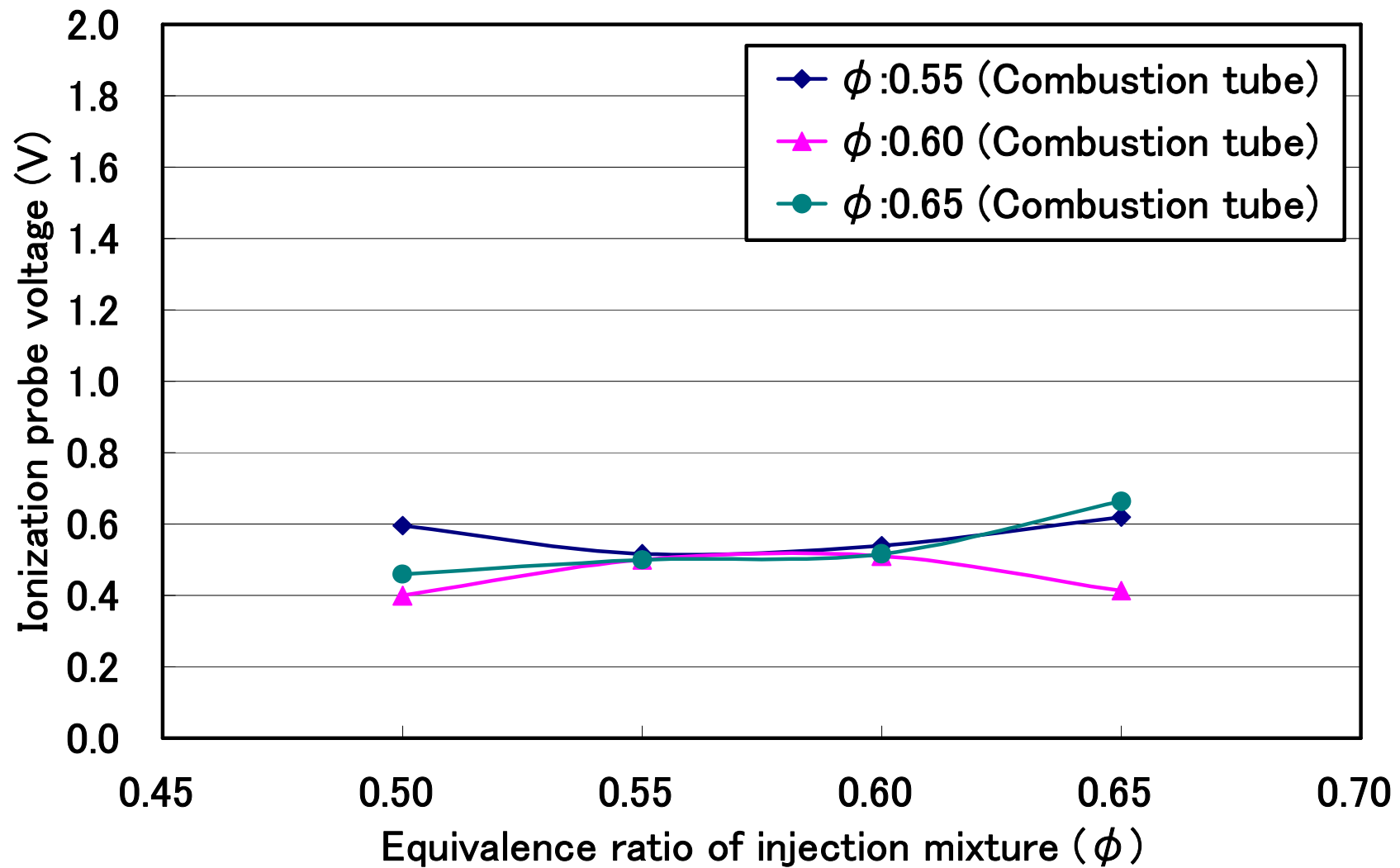


Fig.7-28 Ionization probe voltage

(O<sub>2</sub> Concentration 17vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

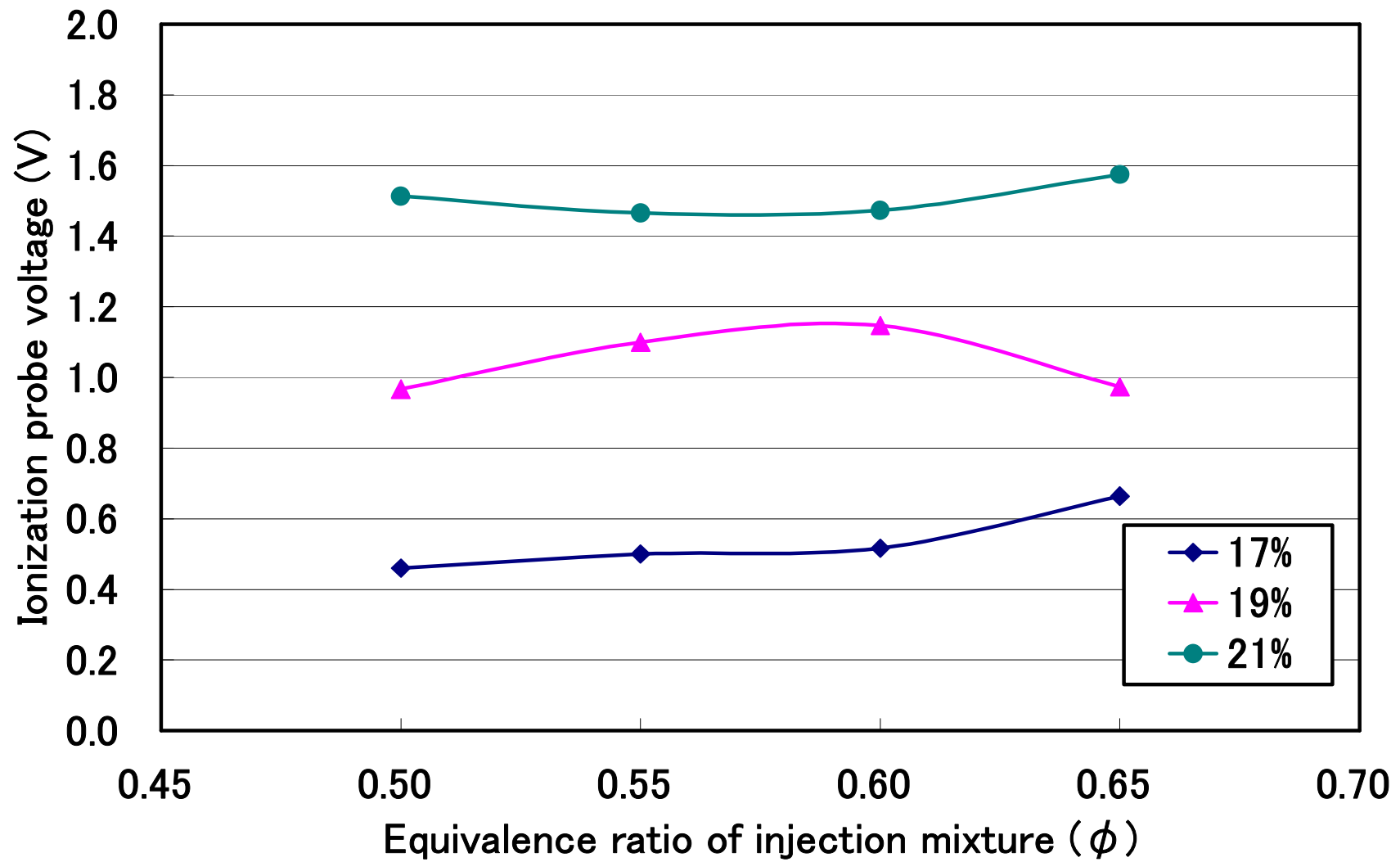


Fig.7-29 Ionization probe voltage

(Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.65$ , Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

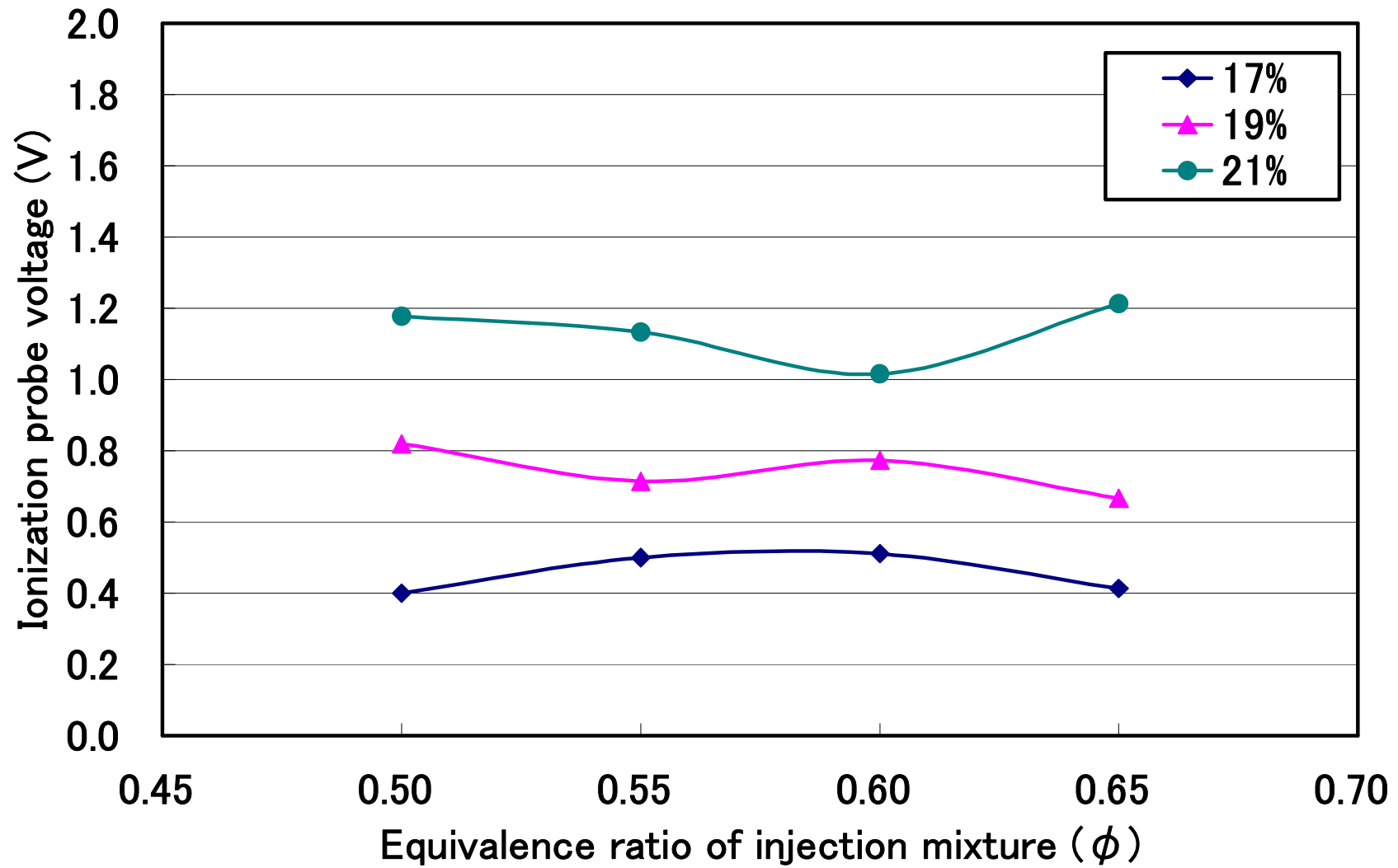


Fig.7-30 Ionization probe voltage

(Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.60$ , Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

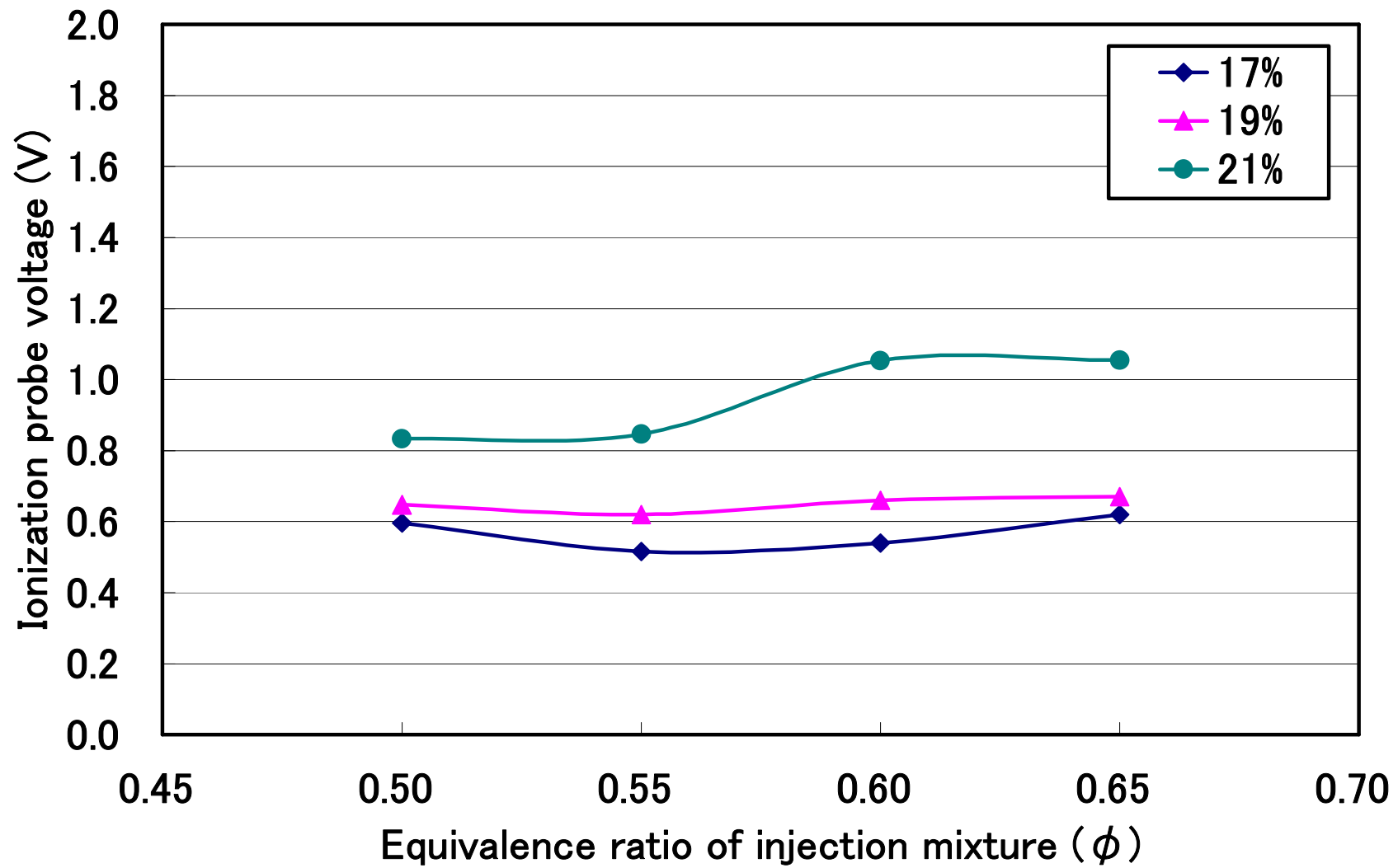
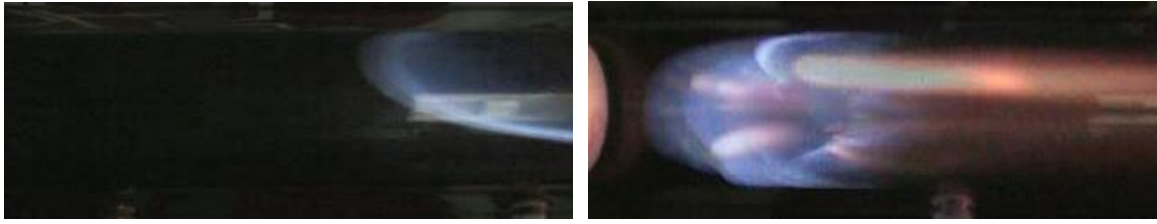


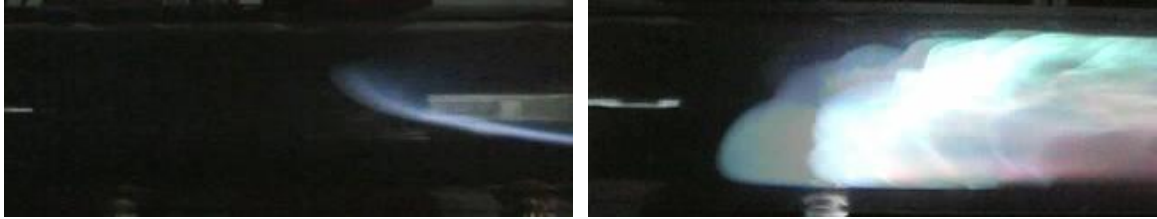
Fig.7-31 Ionization probe voltage

(Equivalence ratio of combustion tube  $\phi = 0.55$ , Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

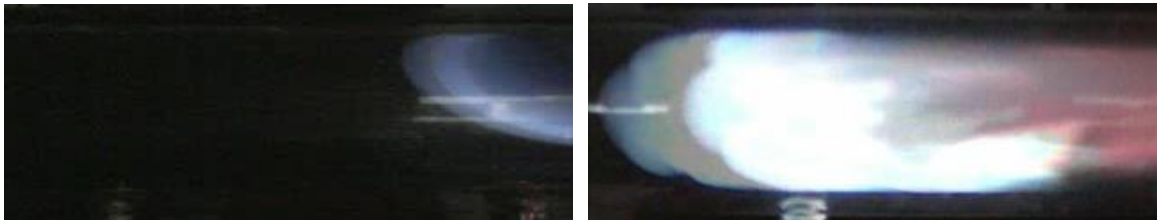




Overall  $\Phi=0.55$ ,  $\phi =0.50$



Overall  $\Phi=0.60$ ,  $\phi =0.50$



Overall  $\Phi=0.60$ ,  $\phi =0.55$



Overall  $\Phi=0.65$ ,  $\phi =0.50$



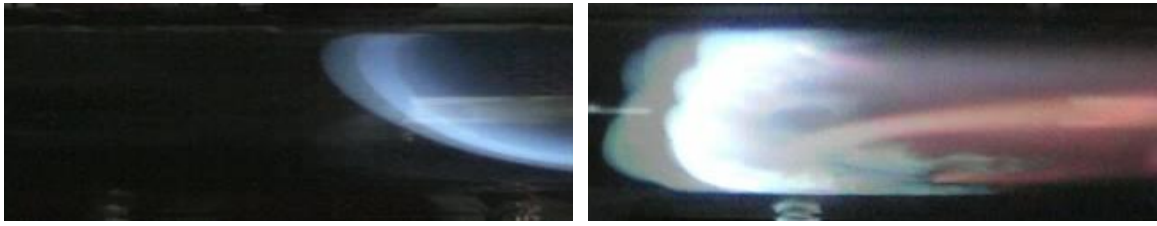
Overall  $\Phi=0.65$ ,  $\phi =0.55$

Before

After

Fig.7-32 (A) Flame shape

(Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s, Injection pressure 0.15MPa)



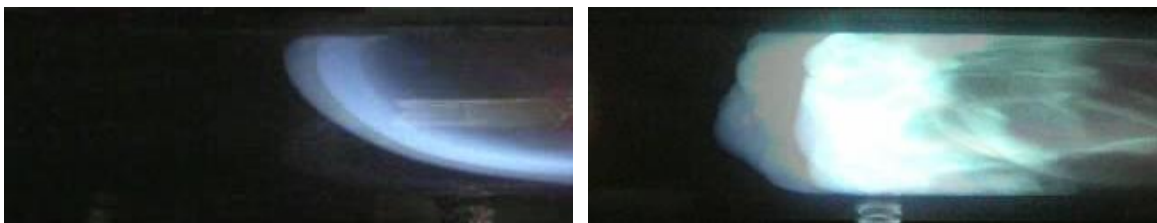
Overall  $\Phi=0.65$ ,  $\phi=0.60$



Overall  $\Phi=0.70$ ,  $\phi=0.55$



Overall  $\Phi=0.70$ ,  $\phi=0.60$



Overall  $\Phi=0.75$ ,  $\phi=0.60$

Before

After

Fig.7-32 (B) Flame shape

(Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s, Injection pressure 0.15MPa)



Overall  $\Phi=0.55$ ,  $\phi =0.50$



Overall  $\Phi=0.60$ ,  $\phi =0.50$



Overall  $\Phi=0.60$ ,  $\phi =0.55$



Overall  $\Phi=0.65$ ,  $\phi =0.50$



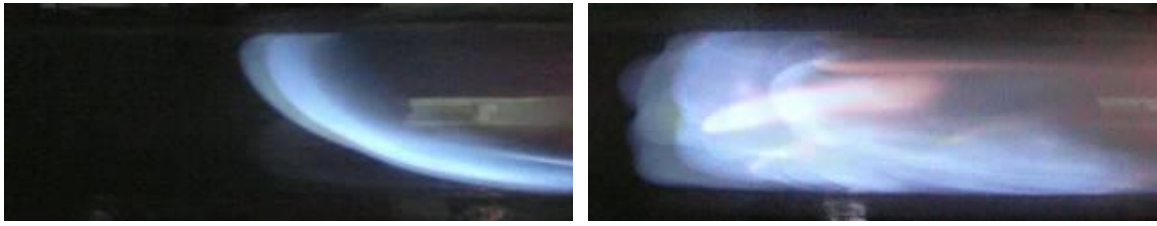
Overall  $\Phi=0.65$ ,  $\phi =0.55$

Before

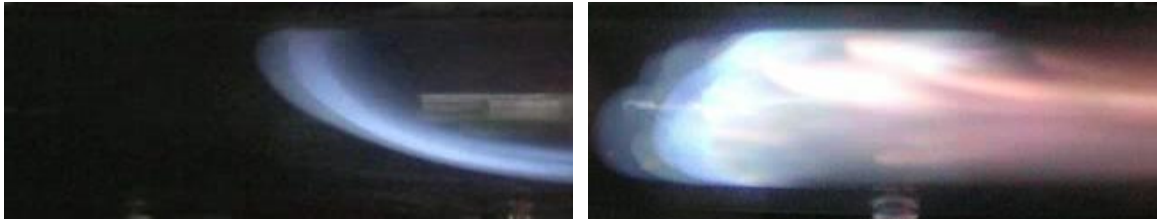
After

Fig.7-33 (A) Flame shape

(Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s, Injection pressure 0.10MPa)



Overall  $\Phi=0.65$ ,  $\phi=0.60$



Overall  $\Phi=0.70$ ,  $\phi=0.55$



Overall  $\Phi=0.70$ ,  $\phi=0.60$



Overall  $\Phi=0.75$ ,  $\phi=0.60$

Before

After

Fig.7-33 (B) Flame shape

(Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s, Injection pressure 0.10MPa)

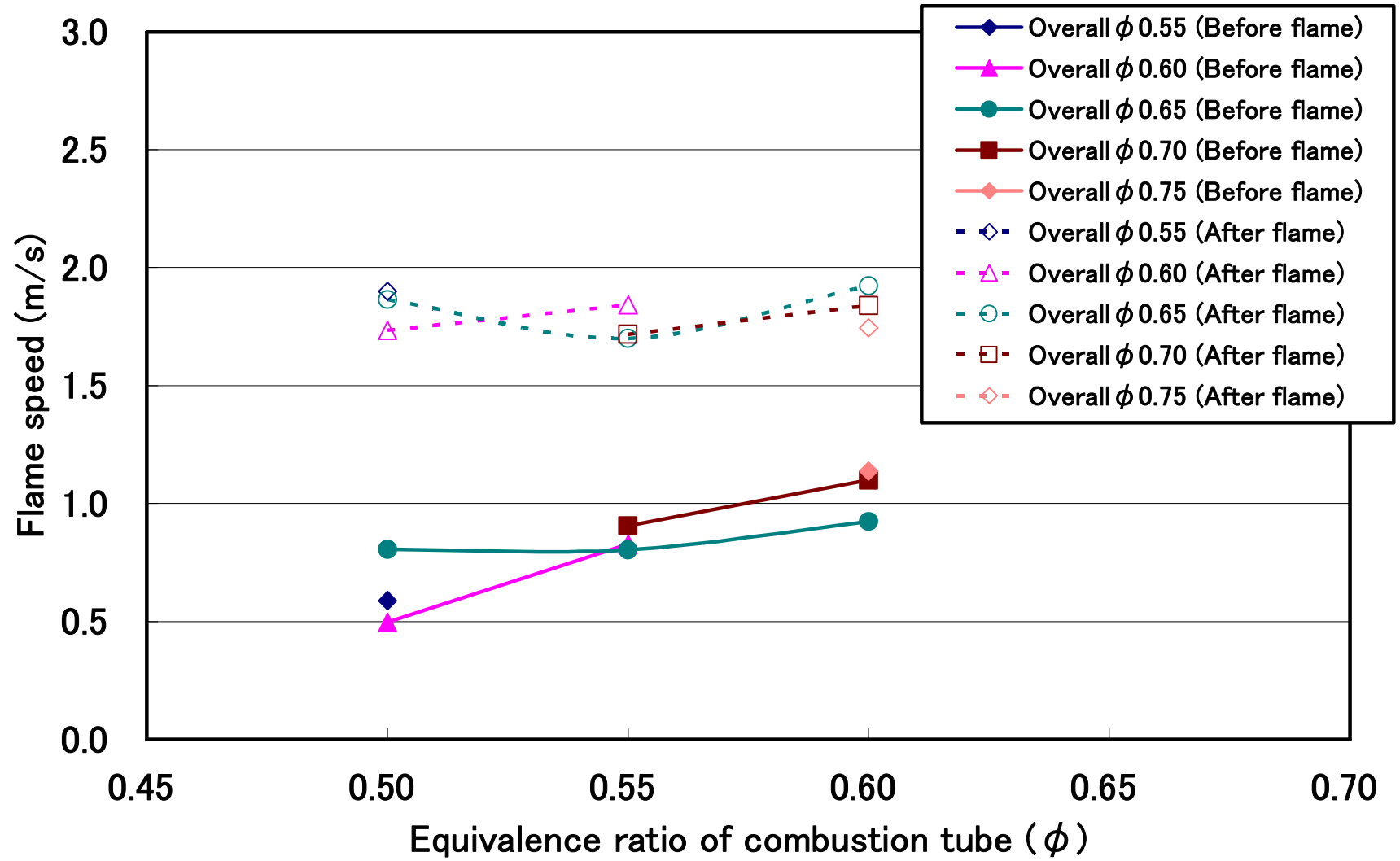


Fig.7-34 Flame speed ( $O_2$  Concentration 21 vol%,

Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s, Injection pressure 0.15MPa)

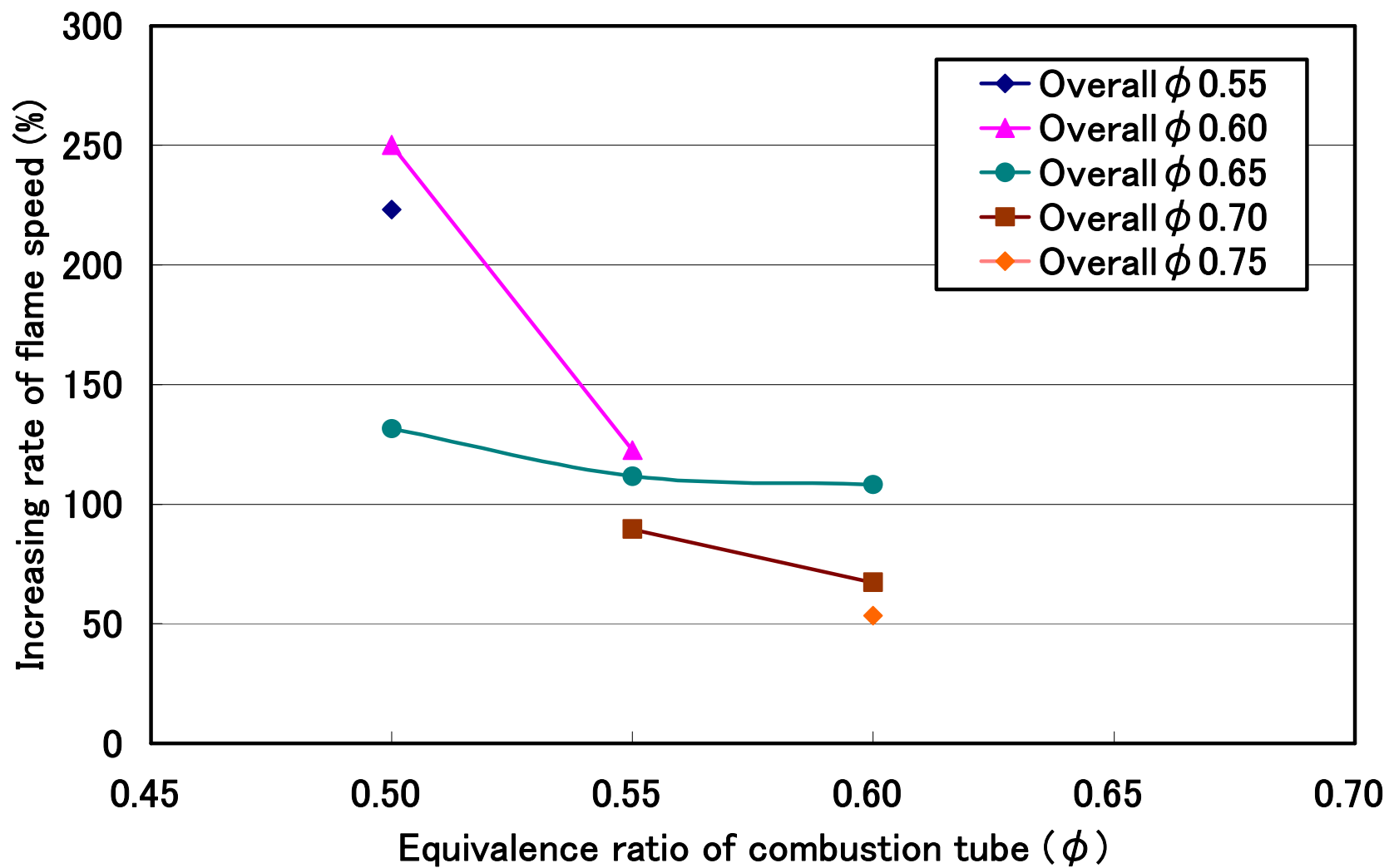


Fig.7-35 Increasing rate of flame speed ( $O_2$  Concentration 21vol%,  
 Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s, Injection pressure 0.15MPa)

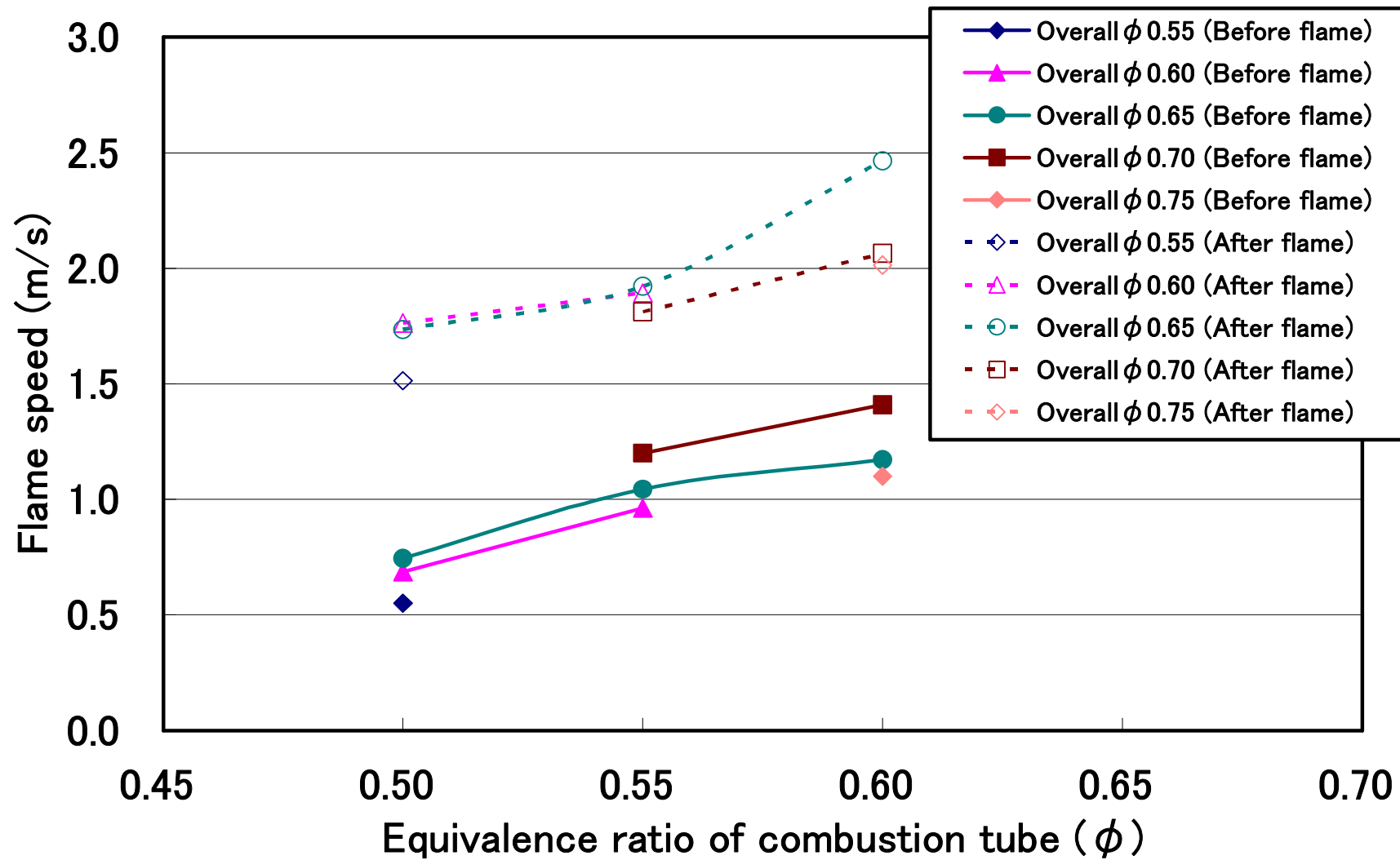


Fig.7-36 Flame speed ( $O_2$  Concentration 21 vol%,

Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s, Injection pressure 0.10MPa)

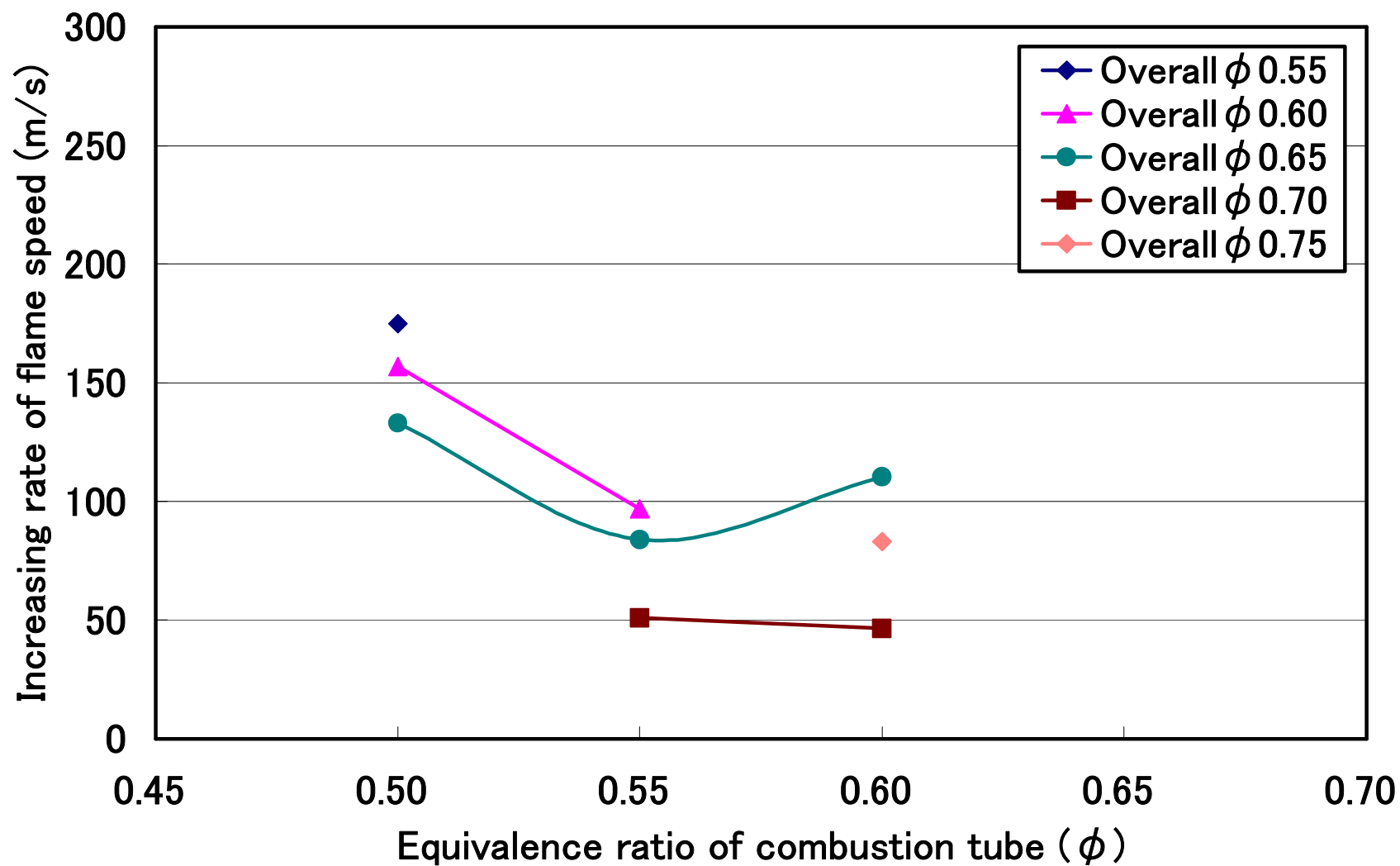


Fig.7-37 Increasing rate of flame speed ( $O_2$  Concentration 21vol%,  
Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s, Injection pressure 0.10MPa)



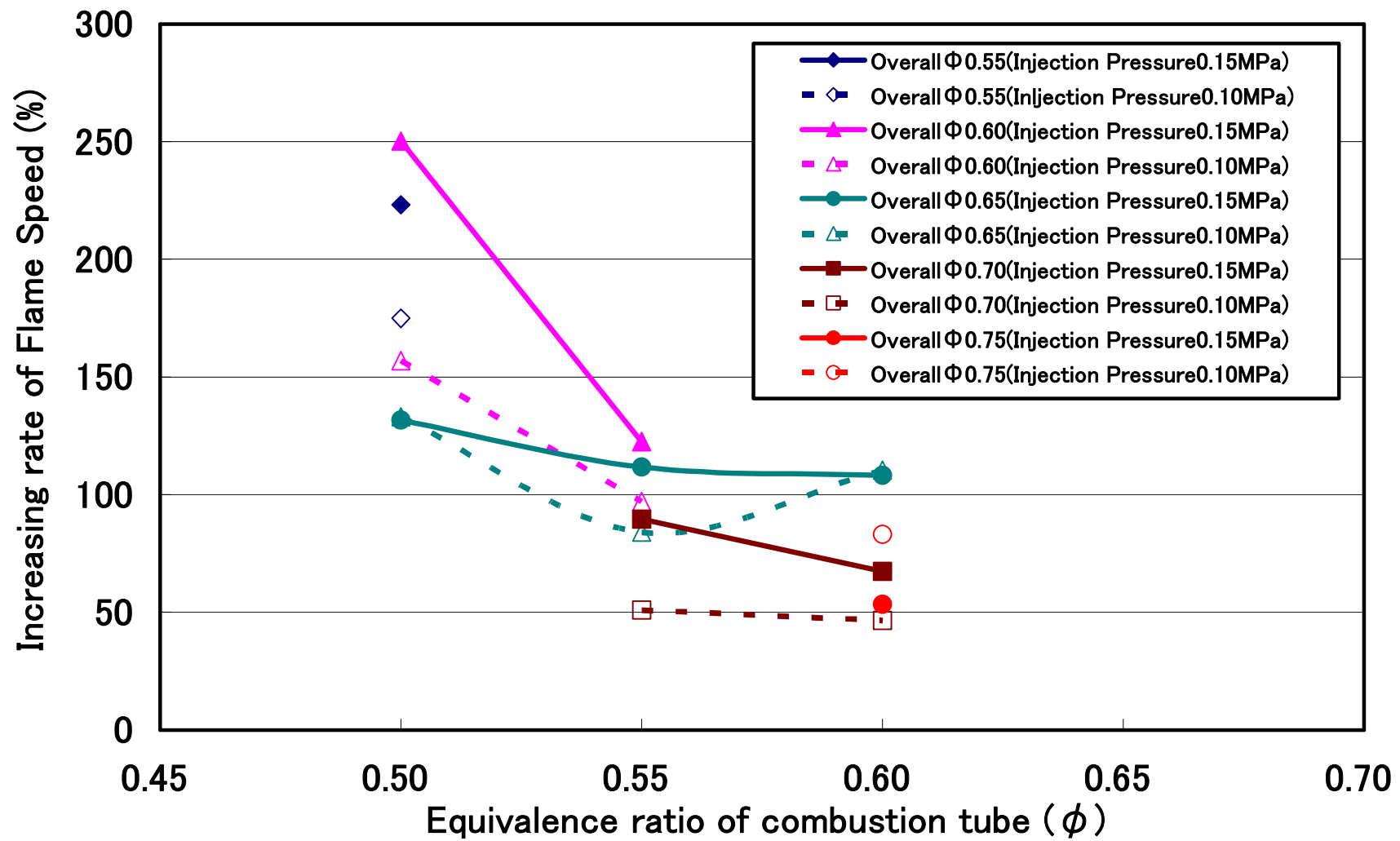


Fig.7-38 Increasing rate of flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

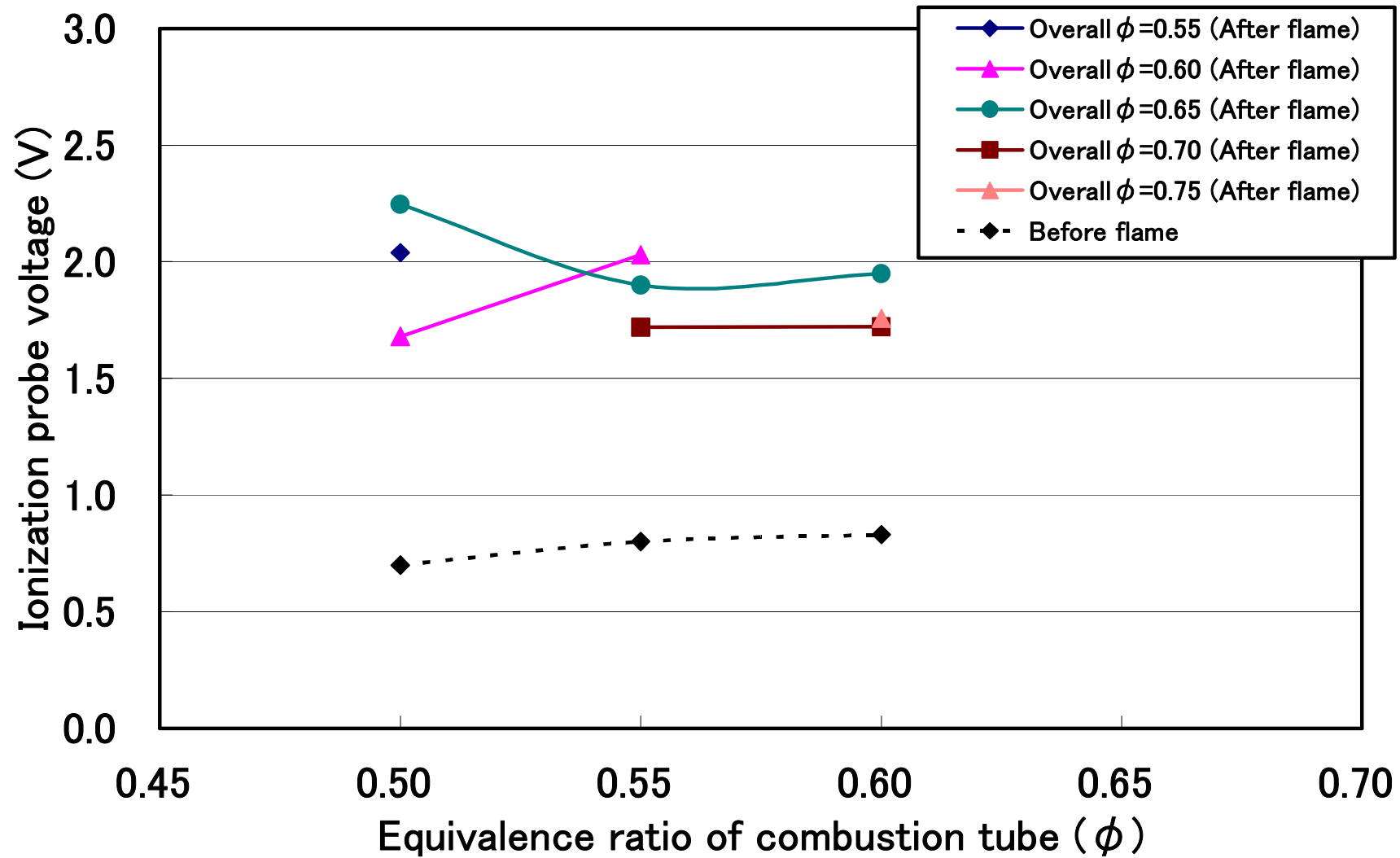


Fig.7-39 Ionization probe voltage ( $O_2$  Concentration 21vol%,

Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s, Injection pressure 0.15MPa)

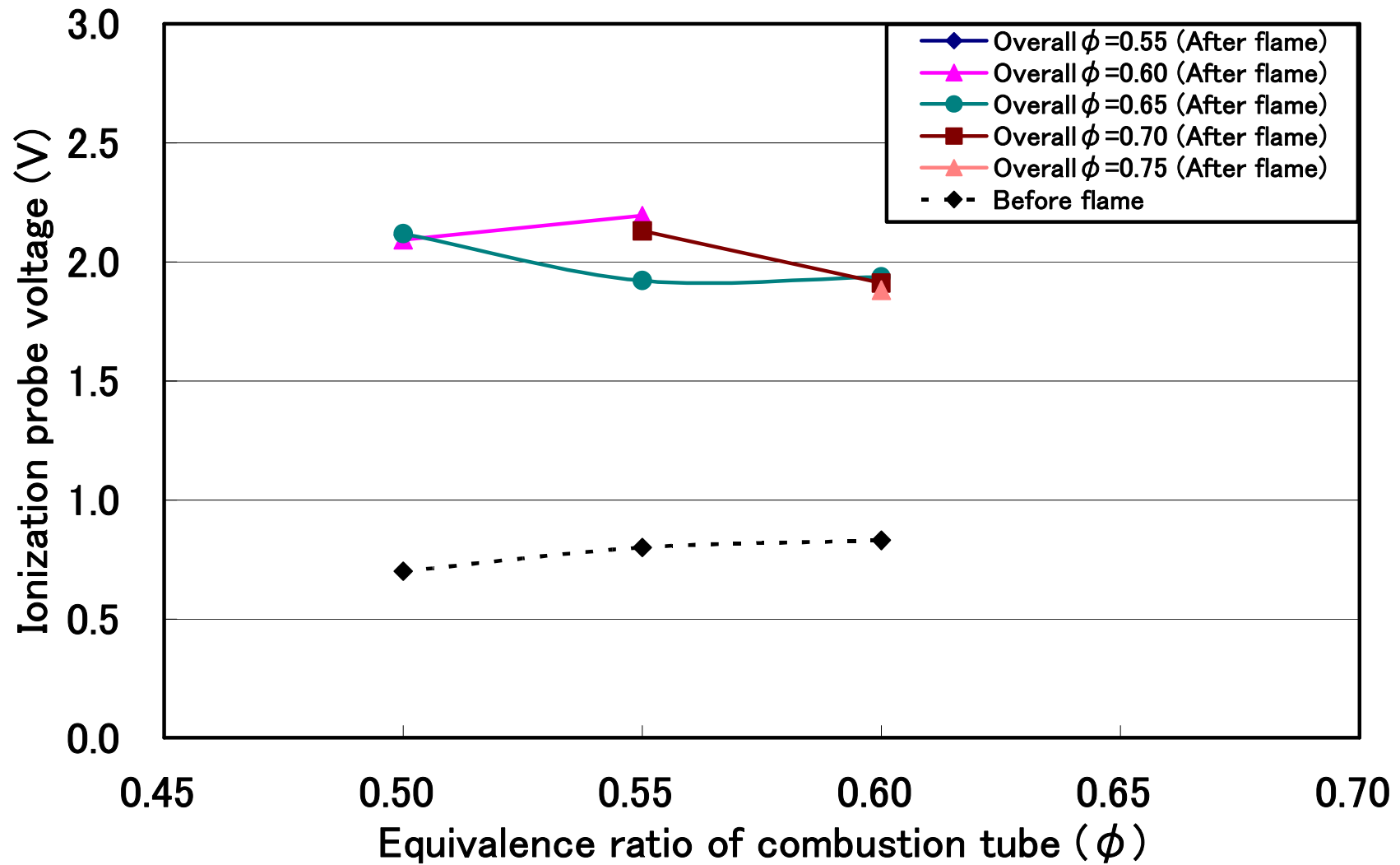


Fig.7-40 Ionization probe voltage ( $O_2$  Concentration 21vol%,

Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s, Injection pressure 0.10MPa)

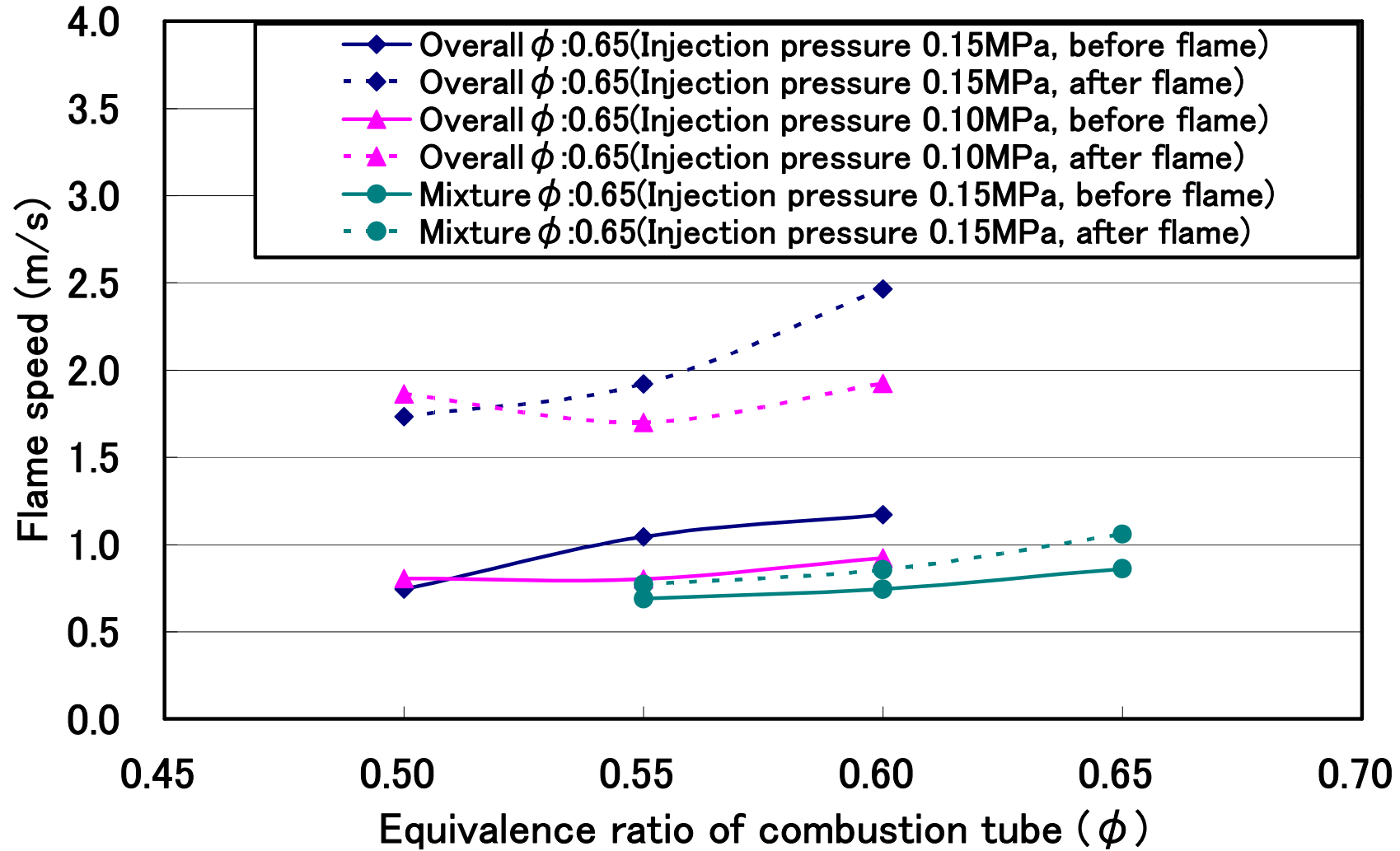


Fig.7-41 Flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s)

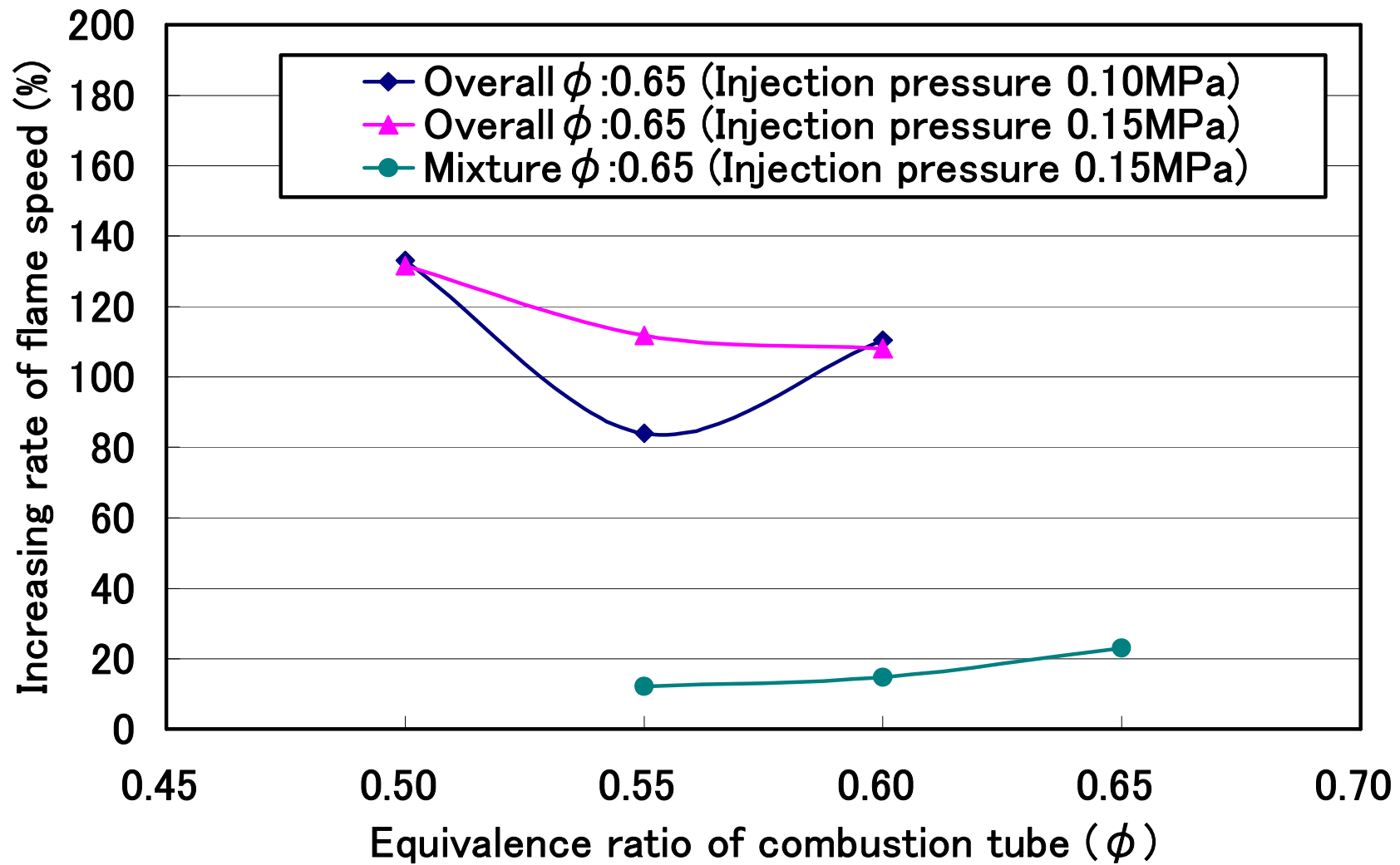


Fig.7-42 Increasing rate of flame speed

(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Injection time 0.75s, Delay time from ignition 1.00s)

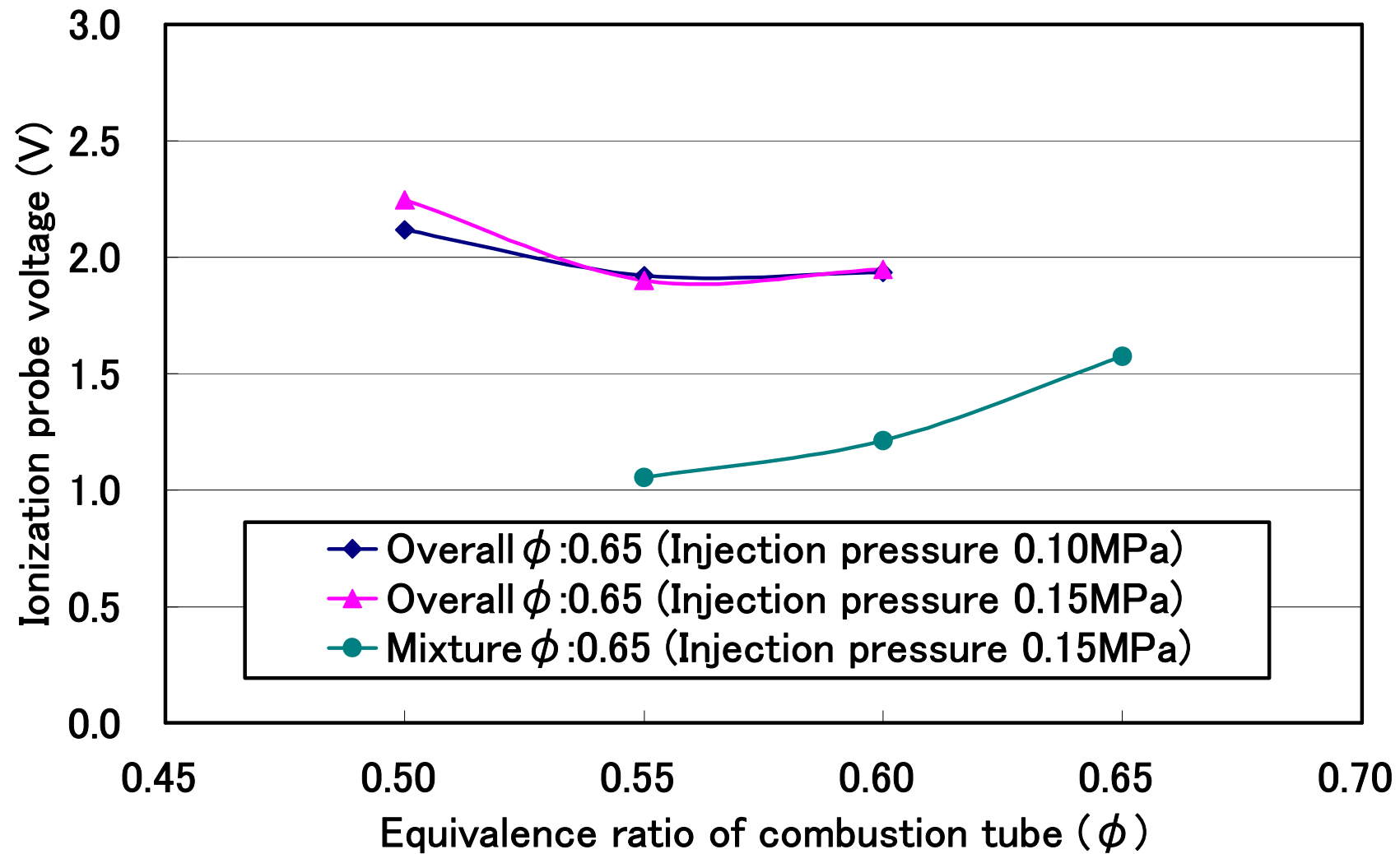


Fig.7-43 Ionization probe voltage

(O<sub>2</sub> Concentration 21vol%, Delay time from ignition 1.00s, Injection time 0.75s)