

汎用小型ガソリン機関の燃焼特性に及ぼす雰囲気酸素濃度の影響

新海, 達也 / SHINKAI, Tatsuya

(発行年 / Year)

2006-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2006-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2005 年度 修士論文

論文題目 **汎用小型ガソリン機関の燃焼特性に及ぼす
雰囲気酸素濃度の影響**

*INFLUENCE OF OXYGEN CONCENTRATION IN INTAKE AIR ON COMBUSTION
CHARACTERISTICS FOR STANDARD TYPE OF SMALL GASOLINE ENGINE*

指導教員 川上 忠重

大学院工学研究科
機械工学専攻修士課程

学籍番号 *04R1127*

氏名 シンカイ タツヤ
新海 達也
Tatsuya SHINKAI

目次

Abstract

第 1 章 緒論	-1-
1-1 背景	
1-2 研究目的	
1-3 燃焼概論	
1-3-1 火炎伝ば速度	
1-3-2 燃焼過程	
1-3-3 燃焼に影響を及ぼす因子	
1-3-4 希薄燃焼	
第 2 章 実験装置および方法	-9-
2-1 実験装置	
2-1-1 供試機関	
2-1-2 点火栓、イオンプローブ	
2-1-3 点火コイル	
2-1-4 圧力センサ	
2-1-5 オシロスコープ	
2-1-6 実験装置概略図	
2-1-7 フィルター	
2-2 実験方法	
2-2-1 実験手順	
2-2-2 燃料濃度	
2-2-3 吸入空気性状	
2-2-4 動力計負荷	
2-2-5 実験条件	

2-3 計算方法

2-3-1 火炎伝ば速度

2-3-2 標準偏差、算術平均値

2-3-3 平均圧力上昇率

2-3-4 スモーク濃度

2-4 予備実験

2-4-1 空燃比

2-4-2 イオンプローブ

2-4-3 電圧から圧力への単位変換

2-4-4 断熱火炎温度

第3章 実験結果および考察

-29-

3-1 火炎伝ば速度

3-1-1 吸入空気酸素濃度

3-1-2 減少割合

3-1-3 動力計負荷

3-2 平均圧力上昇率

3-2-1 吸入空気酸素濃度

3-2-2 動力計負荷

3-3 スモーク濃度

第4章 結論

-113-

参考文献

謝辞

INFLUENCE OF OXYGEN CONCENTRATION IN INTAKE AIR ON COMBUSTION CHARACTERISTICS FOR STANDARD TYPE OF SMALL GASOLINE ENGINE

By

Tatsuya SHINKAI

Graduate student

Abstract

Experiments have been carried out to examine the influence of oxygen concentration in intake air and fuel concentration on flame speed for small gasoline engine. The travel time of flame front is measured using ionization probes located at different positions from the ignition point of cylinder head.

Practical internal combustion engines are required to reduce the emissions for improvement of the environmental problems. These engines are operated at high temperature and pressure conditions. To achieve the low emissions and low fuel consumption, the researches about combustion characteristics in such conditions are so important. Therefore, many studies about combustion characteristics by large-sized, medium-sized engines have been carried out for it. Where, the studies by the small-sized engines (25-125cc), it is very important from viewpoint of spread of demand in the world. Therefore, the research about small gasoline engines to achieve low emissions and low fuel consumption must be done, but because of the restriction of combustion chamber, the experimental studies by small gasoline engines are extremely difficult. In this study, it is used ionization probes to measure the travel time of flame front in the small-sized engine.

Experimental set up consists of a small gasoline engine (Honda A-C50: single cylinder, 50cc, 4stroke). The oxygen concentration in intake air can be changeable from 17vol.% to 21vol.% by connecting the portable air bag and fuel concentration is regulated by changing the needle jet in a carburetor (#42, #52, #65 and #72). The travel time of flame front is measured using ionization probe located at different positions from the ignition point of cylinder head (probe 1 (length of flame propagation from ignition point: 6mm), probe 2 (10mm), probe 3 (12mm)). The flame speed was obtained from the electrical signal of ionization probes by using oscilloscope. The flame speed is measured by a unit of 25times, and the arithmetic average value was used as data.

The main results are as follows:

- 1) By using ionization probes, it is possible to determine the flame speed of small gasoline engine with high accuracy.
- 2) The flame speed monotonically increases with increasing the engine rotation at any oxygen concentration in intake air.
- 3) The effect of oxygen concentration on flame speed under high engine rotations seems to get nullified for low oxygen concentration under high oxygen concentration.

第 1 章 緒論

1-1. 研究背景

多くの内燃機関における燃焼は、高温・高圧下で行われており、例えば自動車工学や燃焼工学的見地からも高温・高圧下でのガソリン - 空気混合気の燃焼特性を把握することは極めて重要である。内燃機関は燃焼熱などの熱エネルギーを機械的にエネルギー変換することで仕事を行う機関であるが、使用目的に応じたエンジンの評価を行うことが必要である。

人がエネルギーを取り出すために燃焼という方法をとってから、化石燃焼の枯渇というエネルギー供給問題、窒素酸化物などの公害物質による大気汚染、酸性雨などが問題とされ続けてきた。近年、さらに二酸化炭素増加による地球規模の温暖化が問題視されている。このような公害問題や地球温暖化減少を解決するためには、燃焼によって生成される二酸化炭素や窒素酸化物などを減らす必要があり、水素、メタノール、およびバイオマス燃料などの新種燃料の開発や、電気自動車などの新たな動力源、燃料電池の研究・開発が日々行なわれている。

しかしながら、これらの技術が社会に普及するまでには、インフラの整備など数多くの問題を抱えており、多くの時間を要すると予想される。そのため、これらの技術が社会に普及するまでは、内燃機関の燃焼改善が急務である。内燃機関の燃焼に対する要求は主として、環境問題を考慮しての排気ガス対策であり、また同時に経済的な観点からの省エネルギー対策である。前者においては、燃焼生成物低減に対する規制が年々厳しくなる傾向にあり、後者においては、石油資源の枯渇によるガソリン燃料の値段の高騰という問題があり、更なる技術の進歩が望まれている。

これらの要求に応える一つの方法として希薄燃焼法があり、この燃焼法を用いることによって得られる熱エネルギーを有効に活用することができる。希薄燃焼とは、空

気に対し燃料を少なめに供給し燃焼させる方法である。燃料が少ないので省エネルギーであり、さらに二酸化炭素の生成を抑えることが出来る。さらに、希薄燃焼は燃焼温度も低下するので窒素酸化物の生成量も少ない。

また、内燃機関の排気ガスの浄化を達成する技術として、触媒装置の改良などが有力視されているが、内燃機関の燃焼現象を能動的に制御することも重要な課題である。この能動的な制御や自動車工学、燃焼工学的見地からも、燃焼室内(高温、高圧下)の燃焼特性に関する詳細な知見が必要となる。

今日、内燃機関は日常生活にとって一日も欠くことができない熱機関として重要な位置を占めている。しかし内燃機関の使用による、多量の化石燃料の燃焼の結果として、燃焼生成物による大気汚染、化石燃料の枯渇化などの問題が深刻化している。化石燃料から熱エネルギーを取り出すことが燃焼の目的である以上、二酸化炭素や水蒸気の発生は避けられないものではあるが、不完全燃焼によって発生する人体に有害な一酸化炭素、未燃炭化水素、また燃焼により大気中や燃料中に含まれる窒素と反応し、発生する窒素酸化物は排出を抑制するための対策が必要である。窒素酸化物の排出濃度を低減する立場からみると、燃焼室内における希薄燃焼による低い火炎温度の実現はその生成量を大幅に抑制する見込みがあり、また一酸化炭素および未燃炭化水素の低減にもつながる。^{1),2),3)}

1-2. 研究目的

このような背景や汎用性及び需要台数の観点から、内燃機関の燃焼生成物低減に関する研究は、中型・大型の内燃機関を対象とした希薄燃焼法(リーンバーン、EGR など)を利用した機関開発、燃焼生成物低減及び燃料消費率低減の指針を得るための研究が、これまでに多くの研究者によって盛んに行われ、その研究成果も数多く報告されている。

しかしながら、自然環境に与える負荷が小さく、経済性に優れた小型機関(25cc ~ 125cc 程度)に関する研究に着目すると、小型機関の需要は世界的に著しく拡大しつつあり、更なる燃焼生成物低減および燃料消費率低減に関する研究が求められているにもかかわらず、それを対象とした研究報告例は極めて少ない。

小型内燃機関の特徴としては、燃焼室の形状が極めてコンパクトな為、火炎伝ば進行距離が短縮され、それにより異常燃焼(Knock)の発生を制御することが知られている。しかし、小型内燃機関の機関及び燃焼室の形状制約から、その機関内の燃焼特性を観察することは極めて困難である。⁴⁾

そこで本研究では、小型ガソリン機関の詳細な燃焼特性を把握する手法として、新たにエンジン内に極小イオン電流検知針(イオンプローブ)を設け、各運転条件での火炎伝ば速度を観察することにより、燃焼室内の火炎挙動を把握した。そして、小型ガソリン機関における火炎伝ば速度に及ぼす、吸入空気性状、燃料濃度の影響について検討を行った。さらに、燃焼室内の燃焼状況を把握するために、新たに燃焼室内に圧力センサを設置し、各運転条件での燃焼圧力を観察した。そして、各機関回転数における無負荷及び部分負荷での平均圧力上昇率の変化割合に及ぼす吸入空気酸素濃度及び燃料濃度の影響についても考察を行った。

1-3. 燃焼概論

1-3-1. 火炎伝ば速度

火炎は、熱伝導、分子拡散、化学反応を原動力として、自力で伝ばする性質を持っている。火炎は複雑な形を持ち、自分で誘起した流れに乗って火炎各部の法線方向に伝ばするが、静止観察者から見た見かけの伝ば速度のことを火炎伝ば速度と呼ぶ。⁵⁾

火炎伝ば速度に対して、火炎前方の未燃混合気に相対的な火炎伝ば速度の火炎面法線方向の分速度を燃焼速度と呼ぶ。燃焼速度は、単位面積の火炎面が単位時間に消費する未燃混合気の体積と定義することもでき(数値は変わらない)、複雑な形状の火炎にはこの方が便利である。

1-3-2. 燃焼過程

実際のガソリンエンジン(火花点火)のシリンダー内の正常燃焼は、火炎が熱伝達あるいは拡散により順次隣の分子に伝わる、すなわち温度波により伝ばする場合で、火炎が毎秒数 m ないし数十 m の速さで伝ばして全ての混合気が燃焼することである(ノックは末端部の圧縮点火による異常燃焼)。

吸入された混合気は圧縮行程で圧縮点火され 600 ~ 700K(圧縮比、負荷などのより異なる)に加熱されて気化する。そして緩慢な酸化を起こし過酸化物、アルデヒドなどが生成し、わずかながら熱を発生する。これらの生成物を含んだ混合気は着火しやすくなっているが、点火プラグにより点火してもすぐには自ら伝ばする火炎を発生しないで、点火後しばらくしてから火炎が発生する。この遅れを点火遅れ(Ignition Delay)と言う。正常な燃焼状態では燃焼過程は次の二つに分けられる。

(1)点火遅れ:

着火した小部分の混合気が燃焼して拡大し、自分で伝ばするだけの火炎の核を形成している期間であって、この期間に長さは燃料の性質、空燃比、温度、圧力などによって変化する。この期間の燃焼質量は非常に小さいため熱の発生はわずかであり、圧力の上昇は認められない。

(2)熱発生期間:

この期間になって火炎面は混合気の乱れの影響を受け急激に拡大し、圧力上昇が現れる。圧力最大のところでもまだ熱発生は完全には終わらず、膨張行程まで続く。通常のカソリンエンジンにおける熱発生期間は、クランク角度で $40 \sim 60^\circ$ であり、そのパターンはほぼ二等辺三角形である。熱効率が最大となる点火時期におけるシリンダー内圧は、上死点後 $15 \sim 20^\circ$ で最大となる。このとき最大熱発生を得るのは上死点後 $5 \sim 10^\circ$ になる。⁶⁾

1-3-3 . 燃焼に影響を及ぼす因子

点火遅れ期間の火炎が燃焼室壁面近く(境界層領域、混合気の乱れは比較的弱い)を進行するため、火炎温度が高いほど火炎速度は速い。このため、点火遅れは主に空燃比の影響を受け、過濃または希薄混合気では大きくなる。エンジン性能を支配するのは熱発生期間(燃焼期間)であり、一般に燃焼期間を短くするほど熱効率は向上し、燃焼安定性の改善(サイクル変動の低減)が得られる。この燃焼期間に影響を及ぼす因子は下図のようになる。

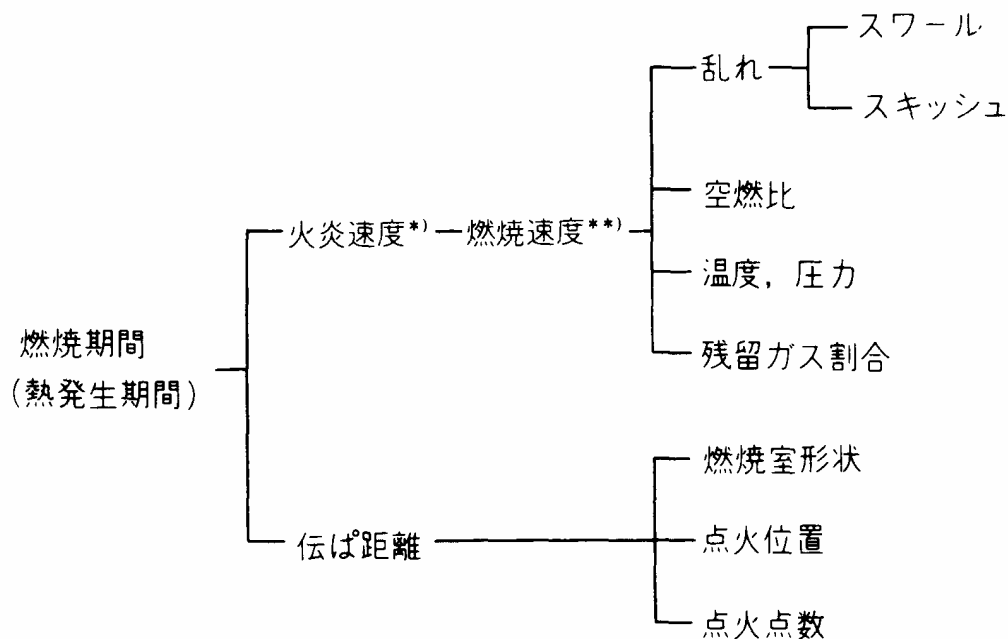


Fig.1 Influence Factor

(a) 乱れの影響

燃焼の速度、つまり火炎速度は、そのときの混合気の乱れの強さが最も影響する。乱れは火炎先端の反応面を増加させ未燃部への熱伝達、拡散を助けるため、火炎の伝ば速度を大きくできる。一般のエンジンでは、負荷が低いと吸気行程で生じたシリンダー内の乱れは圧縮行程には減衰してしまうため、リーンバーンや高 EGR 時など乱れにより燃焼速度を速めたい場合には、吸入時に生じるスワールやピストンにより圧縮時に生じるスキッシュなど強制的なガスを用いている。

なお、エンジン回転数が増大すると乱れも強くなり、燃焼に要する時間が短縮される。これがエンジンを高速で運転できる理由である。

(b) 空燃比

前述のように点火遅れに対しては空燃比の影響が支配的である。また、空燃比によって燃焼速度は変わり、一般に最大出力空燃比(空燃比 = 13 前後)付近で燃焼温度が最高となり、燃焼速度も最大となる。

このためリーンバーンエンジンでは、そのままでは燃焼期間が増大してしまうため、前述の乱れの強化などによる燃焼期間の短縮を行っている。

(c) 温度、圧力

温度の上昇とともに反応速度は増し、燃焼速度は速くなる。圧力の影響は燃料により異なるが、一般にガソリン燃料では圧力の上昇とともに燃焼速度は増大する。

(d) 残留ガス割合

吸入負圧の大きい低負荷運転時は燃焼速度が遅くなる。これは、残留ガスの割合が大きくなり、燃焼温度が下がるためである。この遅れを補正するため吸入負圧が大きくなるとともに点火時期を進める必要がある。

EGR は強制的に残留ガスを増大させたことになるため、燃焼温度が低下し燃焼速度が遅くなる。このため、リーンバーンと同様に乱れの強化や多点点火により燃焼速度を速める必要がある。

(e) 燃焼室形状と点火位置(数)

火炎の伝ば距離を短縮して燃焼期間を短くするためには、コンパクトな燃焼室形状 + 中心点火、または多点点火が有効である。最近の燃焼室形状としては吸排気 4 弁化が進んでいるため、点火プラグ位置はほぼ燃焼室中心に設けられており、火炎伝ばの面からは有利である。

しかし、4 弁化した場合には吸気ポート状だけではスワールの生成が難しいため、リーンバーンなどでは強制的な乱れの強化などが行われている。⁷⁾

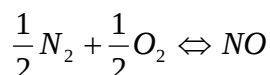
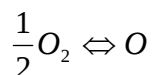
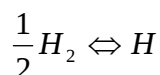
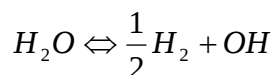
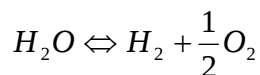
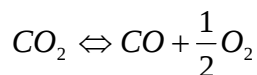
1-3-4.希薄燃焼

希薄燃焼とは、空気に対し燃料を少なめに供給し燃焼させる方法である。燃料が少ないので省エネルギーであり、火炎温度が低いために熱解離* (Thermal Dissociation) の影響が少なく、燃料のもつ化学エネルギーをほぼ完全に熱エネルギーに変換することができる。さらに燃焼生成物中の CO、NO_x などの汚染物質の生成を抑えることができる。また、希薄燃焼は燃焼温度も低下するので高温で多く生成されるサーマル NO_x が抑制される。

しかし、希薄燃焼には燃料が少ないため失火などを起こし、安定した燃焼ができないという欠点がある。

*熱解離

炭化水素と空気を用いる場合の燃焼ガスでは、一般に高温になると次のような熱解離が起こる。



つまり、CO₂、H₂O などのガスは高温になるとそれぞれ CO と O、OH と H と O に分離し、温度が低下するともとの分子にかえる。このような現象を熱解離と呼ぶ。⁸⁾

第 2 章 実験装置および方法

2-1 実験装置

本研究に使用された実験装置は、供試機関、動力計(東京メータ EA-10-L)、動力計制御器(東京メータ BTE5)、点火コイル、イオンプローブ、オシロスコープ、アンプ、圧力センサによって構成される。

本実験においては、通常の手法では測定が極めて困難である小型ガソリン機関の火炎伝ば速度を精度よく測定し、それにより小型機関内の燃焼状況を把握することが必要である。例えば、燃焼室に観察用ガラス窓やピストンを鏡面加工し、内部の燃焼状況を把握する手法は、実際の機関とは条件の異なった燃焼を評価している可能性があり、また、燃焼室形状の制約から、燃焼の可視化のためには大掛かりな加工が必要となる。

そこで本研究では、機関自体にさほどの加工をしなくとも燃焼を把握することができ、また実際の機関に近い状態で燃焼特性を評価することが可能であるイオンプローブ法を用いて、火炎伝ば速度を観察した。

2-1-1 供試機関

供試機関は、本田技研工業製「スーパーカブ」用 C50E 4 サイクル単気筒ガソリン機関である。本供試機関の諸元を Table 1 に示す。

Table 1 Engine Specifications

Engine Type	C50E 4-Stroke Cycle 1 Cylinder
Ignition System	Spark Ignition
Cooling System	Air Cooled
Bore × Stroke	39.0 × 41.4 mm
Displacement	49cc
Valve System	OHC
Compression Ratio	10.0
Normal Jet Number	#72
Maximum Output	3.3kW / 7000rpm
Maximum Torque	5.1Nm / 4500rpm

2-1-2 点火栓、イオンプローブ

本実験で使用された供試機関は、通常のスパークプラグ(NGK 製 CR6HSA)が点火栓として用いられ、シリンダーヘッド部の加工により、点火栓と対面する位置に極小イオン電流検知針(イオンプローブ)が設置されている。Fig.2 に、イオンプローブが装着された時のシリンダーヘッドを示す。



Fig.2 Cylinder Head (Ionization Probe)

本イオンプローブは、実験に使用される機関(50cc)のコンパクトな燃焼室形状に対応させるため、市販されている中で最も小さいスパークプラグ(NGK 製 ER9EH)を改良して使用した。極小イオンプローブの中心電極直径は1mmとした。イオンプローブの概略図を Fig.3 に示す。

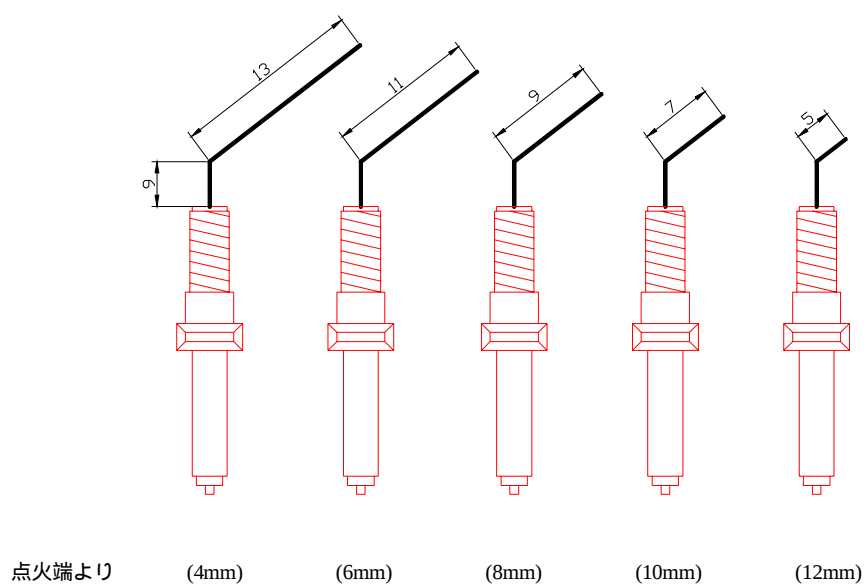


Fig.3 Ionization Probe

2-1-3 点火コイル

通常の点火コイルを用いた場合には、点火信号と火炎伝ば開始の同期を取ることが困難であったため、点火コイルとして、4サイクル4気筒エンジン用の2気筒に同時に火花点火可能なものを採用した。本点火コイルを用いることにより、点火と火炎伝ば履歴の走査を高い精度で同時に行うことが可能である。

2-1-4 圧力センサ

圧力センサを用いて、燃焼室内の燃焼圧力の観察を行った。これは、イオンプローブ法と同様に機関自体に加える加工を最小限に抑えることができ、また実際の機関に近い状態での燃焼特性を評価することができるためである。圧力センサは、キスラー社製の水冷式ピエゾ型圧力変換器を使用した。圧力センサを Fig.4 に示す。



Fig.4 Pressure Transducer

圧力センサの装着場所は、イオンプローブと同様の位置とした。これは供試機関が 50cc の小型ガソリン機関であるため、物理的にカムやタイミングチェーンなどに干渉しない位置が、特定されてしまうためである。Fig.5 に、圧力センサが装着された時のシリンダーヘッドを示す。



Fig.5 Cylinder Head (Pressure Transducer)

2-1-5 オシロスコープ

(1) 火炎伝ば速度:

点火から生じた火炎核からの火炎には正イオンと負イオンの両方が存在する。本研究では火炎の負イオンを検知するためオシロスコープを介して極小イオンプローブに 4mV の電圧を負荷し、火炎の負イオン履歴をオシロスコープを用いることによって行った。

(2) 燃焼圧力:

燃焼室内で生じた圧力は、圧力センサで電気信号となって、アンプを介してオシロスコープの液晶画面に表示される。アンプを介したのは、圧力センサからの電気信号が微弱なためである。

2-1-6 実験装置概略図

本実験での火炎伝ば観察用制御系を Fig.6 に示す。

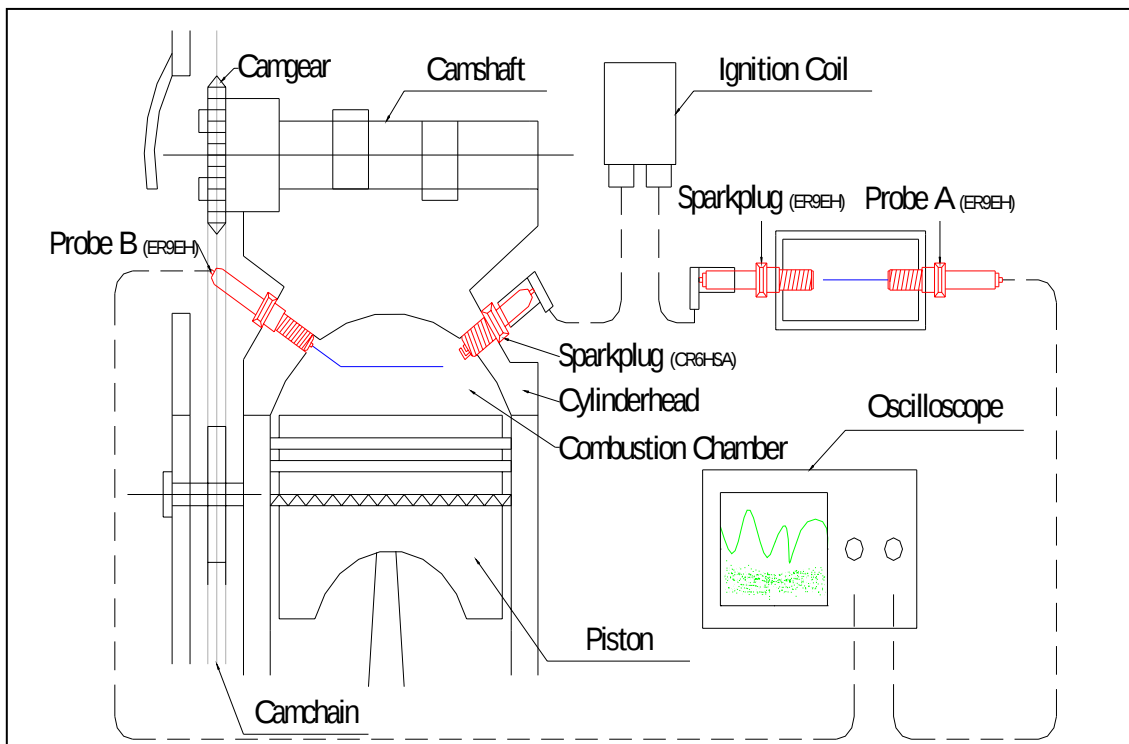


Fig.6 Control System (Flame Speed)

続いて、本実験での燃焼圧力観察用制御系を Fig.7 に示す。

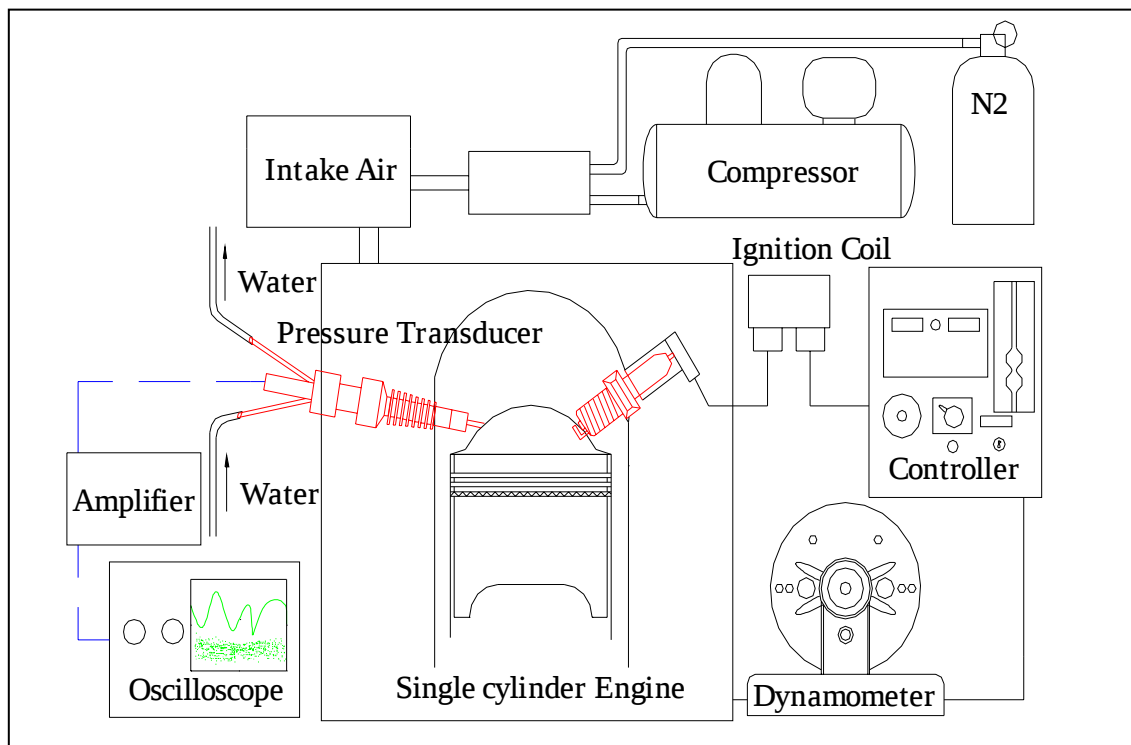


Fig.7 Control System (Burning Pressure)

2-1-7 フィルター

燃焼室から排出される PM の排出状況を観察するために、Whatman International 社製の Quartz Microfibre Filters を、それ専用に改良したマフラーの燃焼室出口後方 780mm に設置した。

2-2 実験方法

2-2-1 実験手順

実験に際してまず、供試機関の回転数が一定になるまで、通常酸素濃度状態(21vol.%)、無負荷状態で十分に暖気運転を行う。その後、機関を各実験条件下にしてから、機関の絞り弁を調節して機関回転数を所定の回転数に固定する。次にオシロスコープの履歴用観察スイッチを投入し、点火から火炎伝ば検知までの時間や、燃焼圧力・燃焼時間を計測した。

2-2-2 燃料濃度

燃料濃度に対する影響を検討するため、4種類のメインジェット(#42,#52,#65,#72)を使用した。本実験では、キャブレターによる燃料供給法を採用したため、空燃比を変化させる場合にはメインジェット番数の変更によってのみ行った。Fig.8に、メインジェット装着時のキャブレターを示す。



Fig.8 Carburetor & Main Jet

2-2-3 吸入空気性状

本実験は、吸入空気性状の影響について検討を行うため、機関の吸入空気酸素濃度を変化させた。吸入空気酸素濃度 21vol.%の場合は、通常の雰囲気空気を吸入させて実験を行った。低酸素濃度空気(19vol.% , 17vol.%)の場合は、圧縮空気と窒素で作成し、予め溜めておいた容器から機関吸入口を通して吸入させた。低酸素濃度空気(19vol.% , 17vol.%)の作成は、圧縮空気と窒素を吸入空気酸素濃度 19vol.%又は 17vol.%になるような体積流量割合で、それぞれを流量計を介して容器に溜めた。

2-2-4 動力計負荷

本実験では、東京メーター社製の動力計を用いて機関に部分負荷をかけた。動力計負荷は、供試機関(50cc)の作動範囲と動力計の制限から 0 ~ 3.9Nm の範囲とした。また、本実験範囲内では動力計負荷をかけることにより、低回転域では回転数を維持することが困難であったため、3000 ~ 5000r.p.m の範囲で実験を行った。

2-2-5 実験条件

本研究での実験条件は、各機関回転数を 1500 ~ 5000r.p.m と設定し、各メインジェット(4種)、各イオンプローブ(3種)、各酸素濃度状態(3条件)、無負荷状態または部分負荷状態での火炎伝ば時間、燃焼圧力・燃焼時間を測定し、火炎伝ば速度や平均圧力上昇率を算出した。測定回数は、火炎伝ば速度の場合は、1条件につき 1 セット 15 回測定し、6 セット行い、平均圧力上昇率の場合は、1条件につき 30 回測定を行った。燃焼室から排出される PM の排出状況を観察する場合は、フィルターを上記の実験条件下で、10 分間排気ガスにさらした。

2-3 計算方法

2-3-1 火炎伝ば速度

スパークプラグのアース電極における熱損失を考慮するため、異なる 2 種類のイオンプローブを使用し、点火端からプローブ先端までの距離と火炎到達時間の差異から火炎伝ば速度を算出した。

2-3-2 標準偏差、算術平均値

内燃機関の火炎挙動は、不規則であるため得られた火炎伝ば速度の標準偏差を導き、ばらつきの少ない領域をデータ範囲として各回転数ごとに表記した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\chi_k - \bar{\chi})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n \chi_k^2 \right) - \bar{\chi}^2} \quad (\because n=15)$$

σ : 標準偏差

$\bar{\chi}$: 平均値

そして、得られたデータ範囲内で、その平均を算術平均値として示した。

2-3-3 平均圧力上昇率

平均圧力上昇率は、最高燃焼圧力から圧縮後の初期圧力を引いた値を全燃焼時間で除して算出された値である。

2-3-4 スモーク濃度

ディーゼル機器株式会社製の SMOKE-METER を用いて、PM の濃度を光透過法(完全黒体の透過度を 0%)にて測定した。

2-4 予備実験

2-4-1 空燃比 Air Fuel Ratio A/F

内燃機関の試験、評価をする場面において、混合気の状態を示す指標として空燃比が一般的に用いられる。本研究においても、各条件での火炎伝ば速度を検討する際、空燃比を用いることは有効な手段であったため、その算出を試みた。以下にその算出方法を示す。

$$\frac{A}{F} = \frac{G}{(\gamma_f \times B_v \times 10^{-3})}$$

A = 単位時間あたりエンジン内に供給される空気の質量

F = 単位時間あたりエンジン内に供給される燃料の質量

$$G = \alpha \times \varepsilon \times \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \times \sqrt{2 \times g \times \gamma_a \times \Delta P} \quad (kg/s)$$

G: 吸入空気量

$\alpha = 0.822$ (流量係数)

$\varepsilon = 1.0$ (圧縮性による補正係数)

$d = 6(mm)$ (ノズルの開口直径)

$\gamma_a = 1.2(kgf/m^3)$ (ノズル入口空気の比重量)

ΔP : 空気流量計差圧(mmHg)

$\gamma_f = 732(kgf/m^3)$ (ガソリンの比重量)

B_v : 燃料消費量(cm^3/s)

Fig.9に予備実験で得られた機関回転数に対する空燃比を、メインジェット番数をパラメータとして示す。この図より、#72 と#42 には明らかな違いはあるものの、それ以外(#52,#65)はさほどの差異は確認できなかった。本実験では、小型ガソリン機関を用いたため、詳細な空燃比の検討はノズルの制約により困難であった。そのため火炎伝ば速度を検討する際、燃料濃度の指標はメインジェット番数を用いることにした。

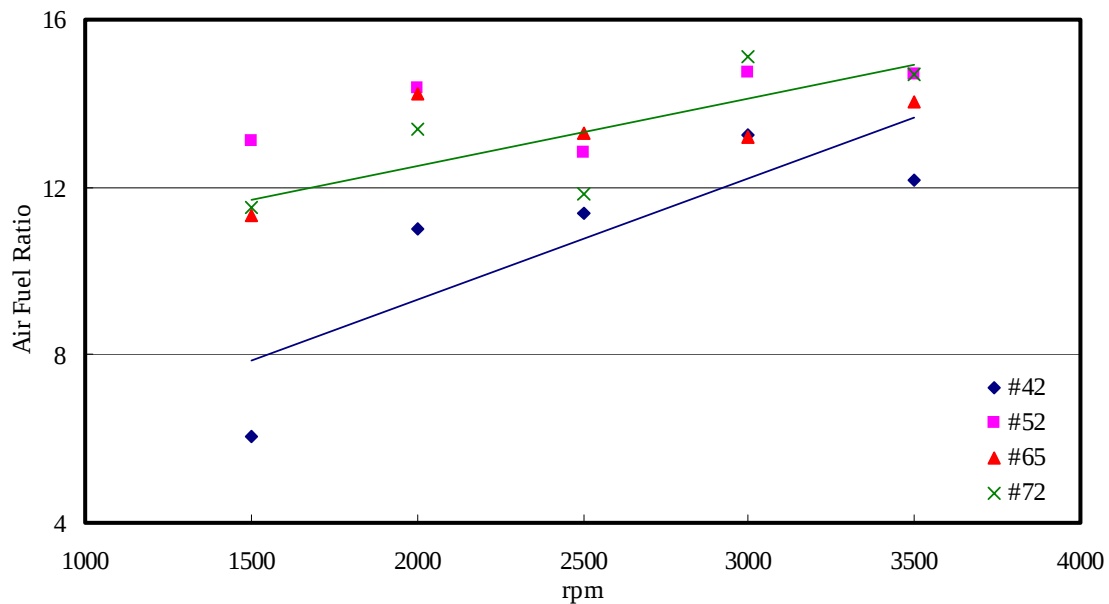


Fig.9 Air Fuel Ratio A/F

2-4-2 イオンプローブ

火炎面到達の信号を検知する際、点火端からの最適な距離を決定させるため、2-1-3 で示した点火端からの距離の異なるイオンプローブ 4 種類(4,6,8,10,12mm)を使用し、火炎伝ば速度を導いた。算出方法は 2-3-1 に従って行い、10 個のパラメータについて検討した。

Fig.10 に機関回転数に対する火炎伝ば速度をイオンプローブ挿入位置をパラメータとして示す。この図から明らかなように、点火端から 6mm と 10mm の位置(以後:Probe6-10)また、点火端から 6mm と 12mm の位置(以後:Probe6-12)で得られた火炎到達時間の差異から算出された火炎伝ば速度が、その他の条件より比較的良好な火炎伝ば速度は得られた。その結果を踏まえ、以後の本研究では Probe6-10 と Probe6-12 の 2 条件を採用することにした。

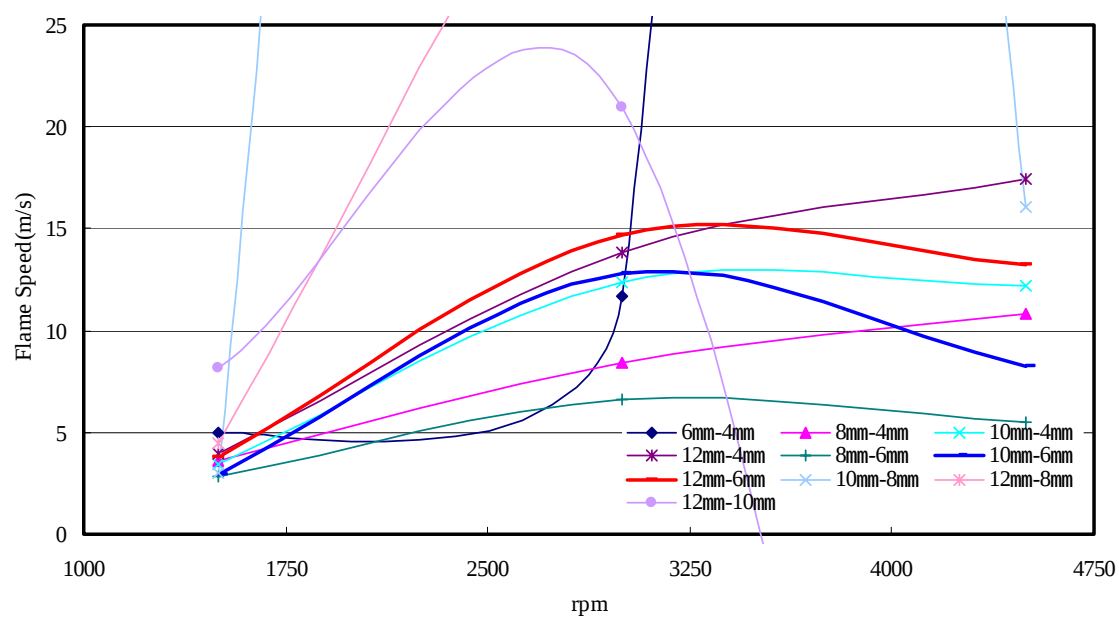


Fig.10 Flame Speed

その 2 条件で使用したイオンプローブを Fig.11 に示す。



Fig.11 Ionization Probe

2-4-3 電圧から圧力への単位変換

圧力センサで得られる燃焼圧力の値は、オシロスコープでは出力が電圧で表示されるため、圧力での考察が望まれるため、キャリブレーションが必要となる。そのため、基準重鎮型圧力計を用いて、圧力換算が行われた。

基準重鎮型圧力計は、株式会社 品川製作所 基準重鎮型圧力計(型式 WT-2, 器物番号 NO.4660, 最高限界圧力 $100\text{kg}/\text{cm}^2$, 最低限界圧力 $1\text{kg}/\text{cm}^2$, ラム断面積 $1/4\text{cm}^2$, 昭和 45 年 10 月)を使用した。Fig.12 に基準重鎮型圧力計を示す。



Fig.12 Standard Pressure Gauge of Leading Figure Type

上図より、右側の先端に圧力センサを装着させ、左側の皿の上には重りを載せる。中はオイルが充填されており、左側の取手を回すことにより重りが自由落下し、同時に、充填された中のオイルが重りに押されて右側に移動することによって圧力が発生する。その圧力がオイルを伝わって右側の圧力センサに伝える。その時の重りの圧力が圧力センサを介して、オシロスコープにて電圧で観察される。ひとつの重りに対し

て20回程度測定し、その算術平均値をもちいて線形近似を求めた。線形近似は一次関数の式で表すことが出来るので、その式を電圧 - 圧力変換式として用いる。

基準重鎮型圧力計の重りを、 6kg/cm^2 から5刻みで 31kg/cm^2 まで変えて計測を行った。 $1\text{kgf/cm}^2=9.80665\times 10^4\text{N/m}^2$ より、 $6\text{kg/cm}^2\times 9.80665\times 10^4=588399\text{N/m}^2$ 、 $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ より、 $588399\text{N/m}^2=0.588\text{MPa}$ となる。Fig.13 に結果を示す。

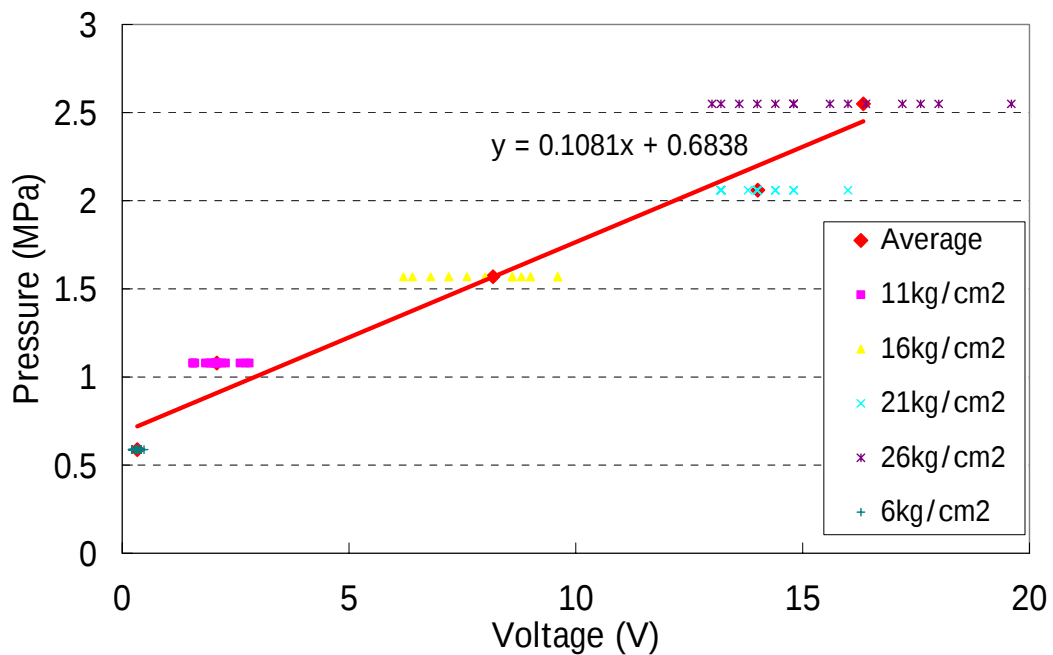


Fig.13 Pressure Calibration Equation

求められた線形近似の一次関数の式は、 $y=0.1081x+0.6838$ となった。ここでxは電圧(V)、yは圧力(MPa)となる。この式に電圧値を代入することで、圧力値を求めた。

2-4-4 断熱火炎温度

断熱燃焼温度:

燃焼過程の間に、炉壁への熱伝達や、ふく射による熱損失がないときの燃焼ガスの最終温度を断熱燃焼(ガス)温度(もしくは断熱火炎温度)と呼ぶ。この場合、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反応を起こして、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燃焼(ガス)温度(理論断熱火炎温度) T_{bt} と呼ぶ。実際には完全燃焼は起こらず、せいぜい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} と呼ぶ。⁹⁾

理論断熱燃焼温度を計算する方法についての説明:

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_i [kJ/kg] だけが解放される。燃焼が断熱的に行われるならば、この熱はすべて湿り燃焼ガス(質量 G_w [kg/kg]) 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 ($=298\text{K}=25^\circ\text{C}$)、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} [kJ/kg·K] とする (298K→3000K 変化で炭酸ガスや水蒸気の c_p は 1.66～1.68 倍に増加する)。熱のバランスから

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

$$T_{bt} = H_i / G_w c_{pm} + T_0$$

気体燃料の場合は燃料 1m^3_N 当たりの低発熱量 H_i [kJ/ m^3_N] が与えられることが多いが、この場合は 0、1atm における燃料の密度 ρ_{f0} [kg/ m^3_N] を使って、1kg 当たりの低発熱量 H_i [kJ/kg] に換算すればよい。あるいは上式を湿り燃焼ガス体積 V_w [m^3_N / m^3_N] と、燃焼ガス 1m^3_N 当たりの熱容量と定義される定圧比熱 c_{pm}' [kJ/ $\text{m}^3_N \cdot \text{K}$] を使って書き直す。

$$T_{bt} = H_i / V_w c_{pm}' + T_0$$

式 を計算するに当たっての問題は、 c_{pm} 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_{pm} の見積もりに必要となる温度 $T_0 (=298K)$ と $T[K]$ の間の完全燃焼ガス成分の平均定圧比熱を表 に示しておく。

計算に当たっては、 T_{bt} を適当な値に仮定して、表 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 (必要なら内挿を行う)。そして、これをその成分の質量分率 $m_i [kg/kg]$ で荷重平均することにより、燃焼ガスの平均定圧比熱を求める。すなわち、

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

この c_{pm} を用いて式 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。

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 $c_{pu} [kJ/kg \cdot K]$ として、式 を次のように書き直せばよい。

$$T_{bt} = H_f + G_w c_{pu} (T_u - T_0) / (G_w c_{pm}) + T_0$$

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。

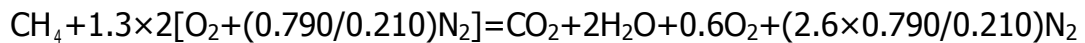
なお、空気比が 1 以下の過濃混合気に対しては、理論燃焼温度という概念は適用できず、したがって T_{bt} の値は計算できない (酸素不足分だけ二酸化炭素が一酸化炭素に変わると仮定して、理論燃焼温度の定義を拡張することができる)。また、燃焼温度が 2000K を超えると熱解離の影響が目立つようになり、それまで 20K 以内に収まっていた理論燃焼温度と平衡燃焼温度との差が急増し始める。このような場合には化学平衡計算によって燃焼温度を決定するのが最良である。

表 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

完全燃焼ガス成分の平均低圧比熱

T(K)	O ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂
	kJ/(kg*K)	kJ/(kg*K)	kJ/(kg*K)	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

一例として、メタン (CH₄) を空気比 1.3 で燃焼させた場合の T_{bt} を計算してみる。簡単のために、酸素以外の乾き空気成分を窒素と見なすと、完全燃焼反応は、



とりあえず、 $T_{bt} = 2000\text{K}$ と仮定する。上の完全燃焼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[kg/kg]を計算すると、

表 理論断熱燃焼温度の計算表

項目	単位	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
生成量	kg/kg _{CH4}	2.74	2.246	1.197	17.084
G_w	kg/kg _{CH4}	23.270			
質量分率 m_i	kg/kg	0.1179	0.0965	0.0514	0.7342
c_{pi} (298K ~ 2000K)	kJ/kg·K	1.221	2.374	1.087	1.178
$\sum_i (c_{pi} m_i)$	kJ/kg·K	1.294			

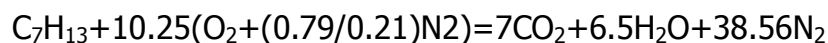
表 の第 1 欄のようになる。その総和をとると第 2 欄の湿り燃焼ガス質量 G_w が得られる。各成分の質量を G_w で割れば、質量分率 m_i がでる。各成分の 298K ~ 2000K の間の平均定圧比熱 c_{pi} を表 から読み取る。式 に基づいて m_i と c_{pi} の積の総和をとると、 $c_{pm} = 1.294 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ が得られる。これらの計算結果をメタンの低発熱量 $H_f = 50.01 \text{ MJ/kg} = 50.01 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ とともに式 に代入すると、

$$T_{bt} = 50.01 \times 10^3 / 23.27 \times 1.294 + 298 = 1959 \text{ K}$$

この値は仮定値 2000K と一致しないので、 $T_{bt} = 1959 \text{ K}$ と仮定して計算をやり直すと、 $T_{bt} = 1964 \text{ K}$ が得られる (c_{pi} の読み取りは内挿による)。さらに $T_{bt} = 1964 \text{ K}$ として計算を繰り返すと、 $T_{bt} = 1964 \text{ K}$ となって収束する。

ガソリン(C₇H₁₃)における理論断熱火炎温度 T_{bt} :

そこで、ガソリン(C₇H₁₃)における理論断熱火炎温度 T_{bt} を求めた。低発熱量は 43.7MJ/kg とし、完全燃焼反応を、



また雰囲気酸素濃度を 21vol.% をとした。¹⁰⁾

上記のように計算を繰り返し行くと、最終的に $T_{bt} = 2448 \text{ K}$ が得られる。次に、雰囲気

気酸素濃度をパラメーターとして計算を行い、Fig.14 に結果を示す。図から明らかなように、雰囲気気酸素濃度が 1vol.% 違うと、約 80K の差異が観察された。また、実際は燃料の完全燃焼はありえず、ふく射などの損失があり、実際の燃焼温度とは異なる。さらに 2000K ぐらいからは熱解離の影響が出てくるので、実際の吸入空気酸素濃度 21 vol.% と 19 vol.% では大きな差異が生じないと予測出来る。しかし、実際の吸入空気酸素濃度 21 vol.% と 17 vol.% においては、多少の差異が生じると考えられるので、吸入空気酸素濃度の影響を検討する際には、この 2 条件を用いるようにした。

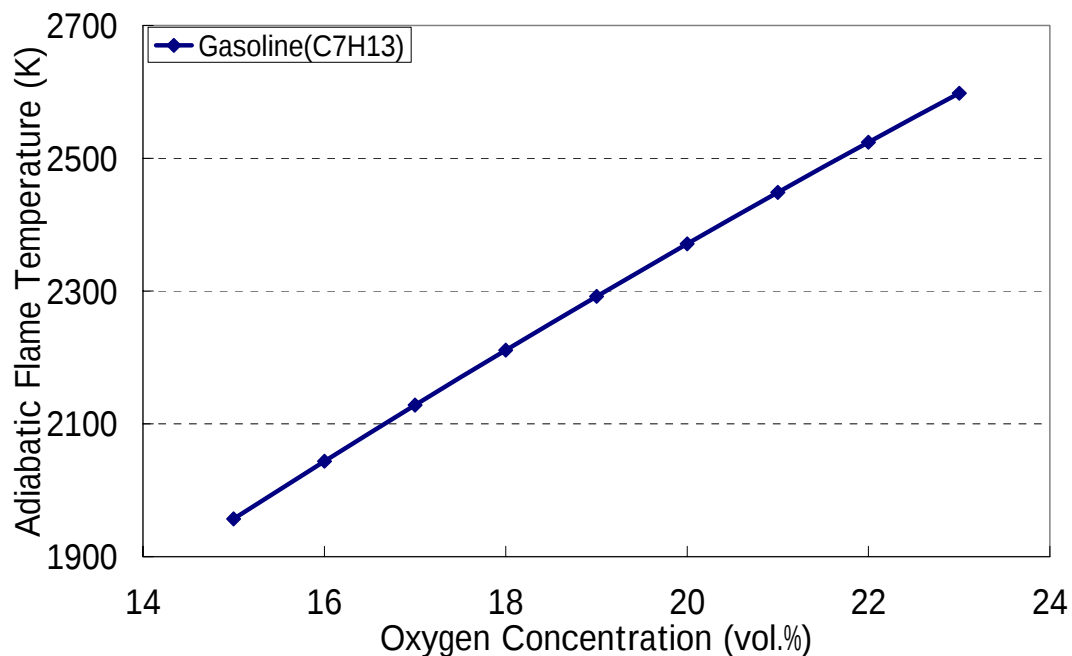


Fig.14 T_{bt} (15 ~ 23vol. %)

第 3 章 実験結果および考察

3-1 火炎伝ば速度

3-1-1 吸入空気酸素濃度

通常酸素濃度状態：

Fig.15 ~ Fig.30 に本実験で得られた各メインジェット番数(#42,#52,#65,#72)を用いた場合の無負荷条件における、吸入空気酸素濃度 21vol.%での機関回転数に対する火炎伝ば速度を示す。ここでの火炎伝ば速度とは Probe6-10 また Probe6-12 で得られた火炎到達時間の差異から算出されたものであり、各回転数での実測値、また各回転数でのデータ範囲およびその算術平均値を併記した。この図から明らかに、機関回転数の増大に伴い火炎伝ば速度の平均値は増大し、機関回転数が約 3000 ~ 3500r.p.m で最大になった後、その値は減少傾向にある。小型ガソリン機関では、多用される中速回転で容積効率が大きくなるように、吸気・排気弁の開閉時期が設計されているため、3000 ~ 3500r.p.m 程度で最も良好な空燃比状態が実現されている。したがってこれにより、火炎伝ば速度の最大値が 3000 ~ 3500r.p.m 程度で観察されたと思われる。また、本実験で得られた火炎伝ば速度は、中型機関で得られている火炎伝ば速度と比較すると、若干変動は増大しているがほぼ一致する結果となった。すなわち、小型ガソリン機関の火炎伝ば速度の測定にはイオンプローブ法が極めて有効であると考えられる。つぎに火炎伝ば速度に及ぼすイオンプローブ挿入位置の影響を検討するため、同じメインジェット番数において Probe6-10 と Probe6-12 を使用時の火炎伝ば速度の比較を行った。この結果、Probe6-12 の方が Probe6-10 を用いた場合よりも、各回転数での火炎伝ば速度が増大した。またその増大割合は、高回転領域に行くほど高くなり、燃料濃度に強く影響した。これは、Probe6-12 を用いた場合は、Probe6-10 を用いた場合よりも火炎伝ばが進行している

ため、未燃混合気の初期温度、初期圧力が増大し、それにより残留ガスの影響が減少、また火炎伝ばにおいては圧力上昇よりも温度上昇の方が支配的であるためだと考えられる。増大割合に関しては、高回転領域に進むにつれ、また燃料濃度が高くなるにつれ、より最適な空燃比(理論空燃比)が実現されたためだと考えられる。

21vol. %

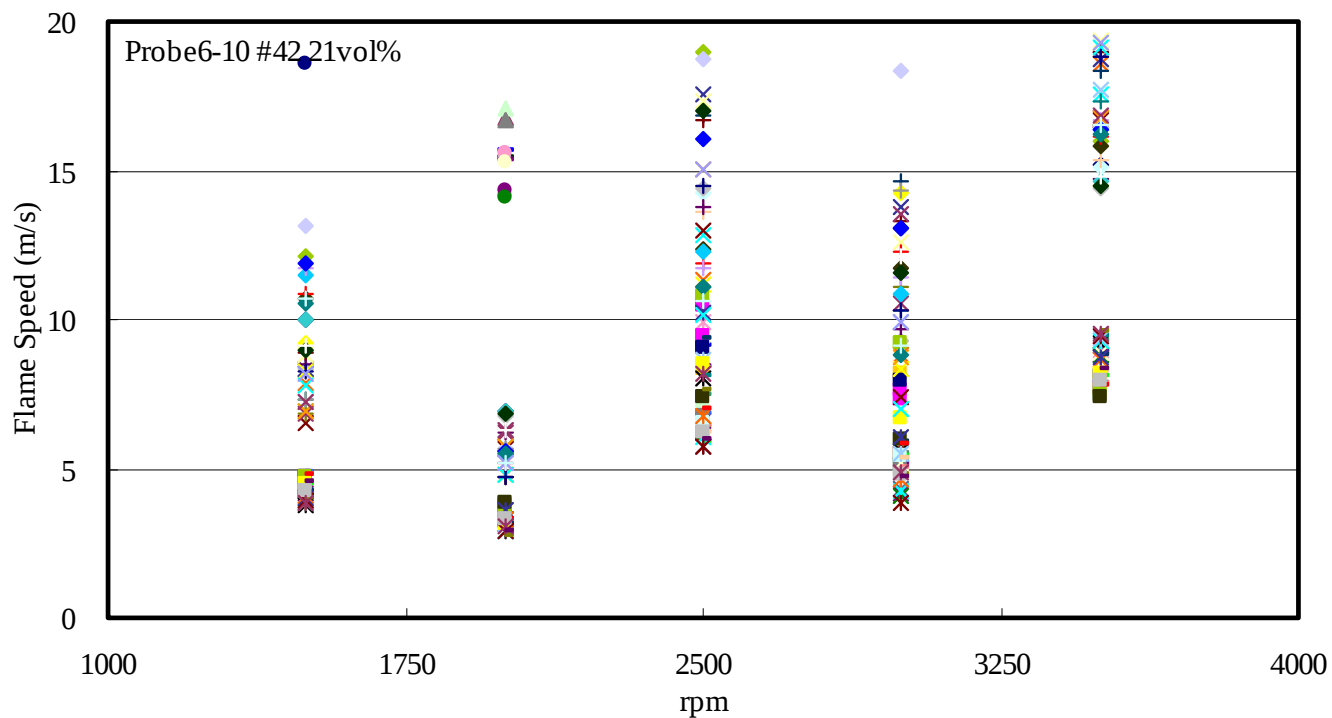


Fig.15 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

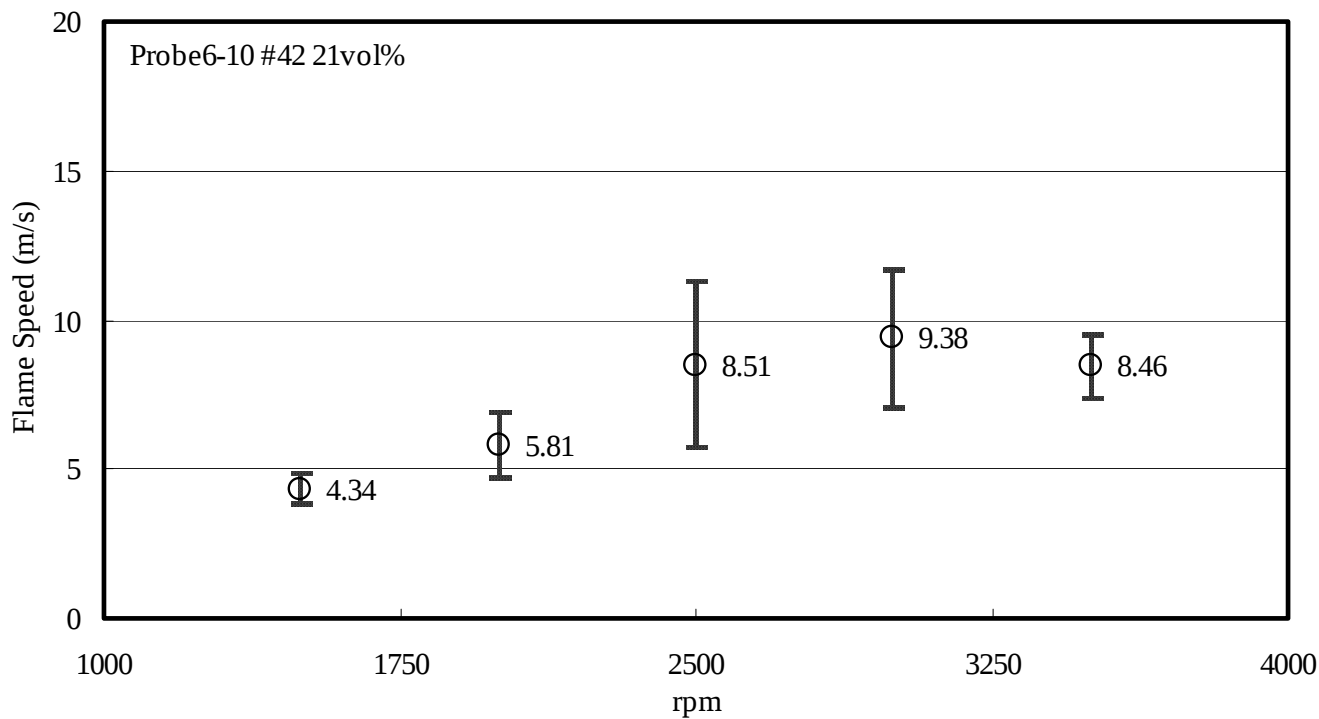


Fig.16 Flame Speed (Average, Data Range)

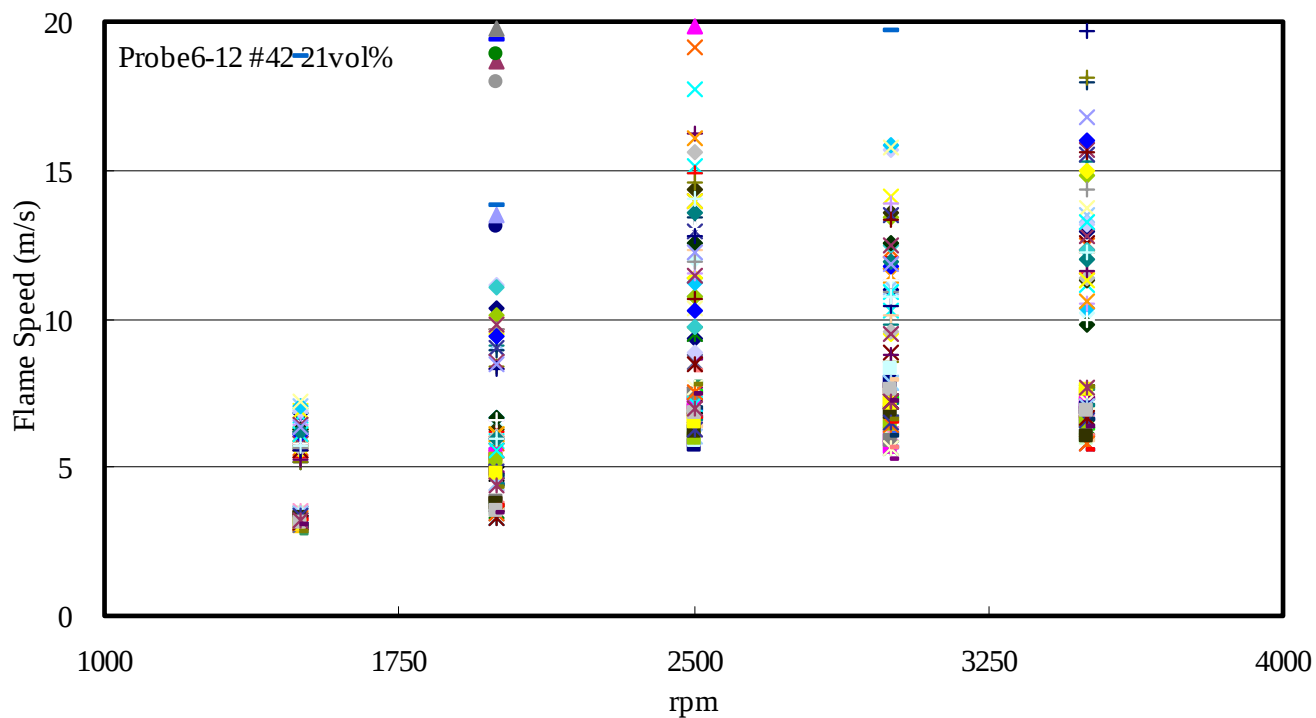


Fig.17 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

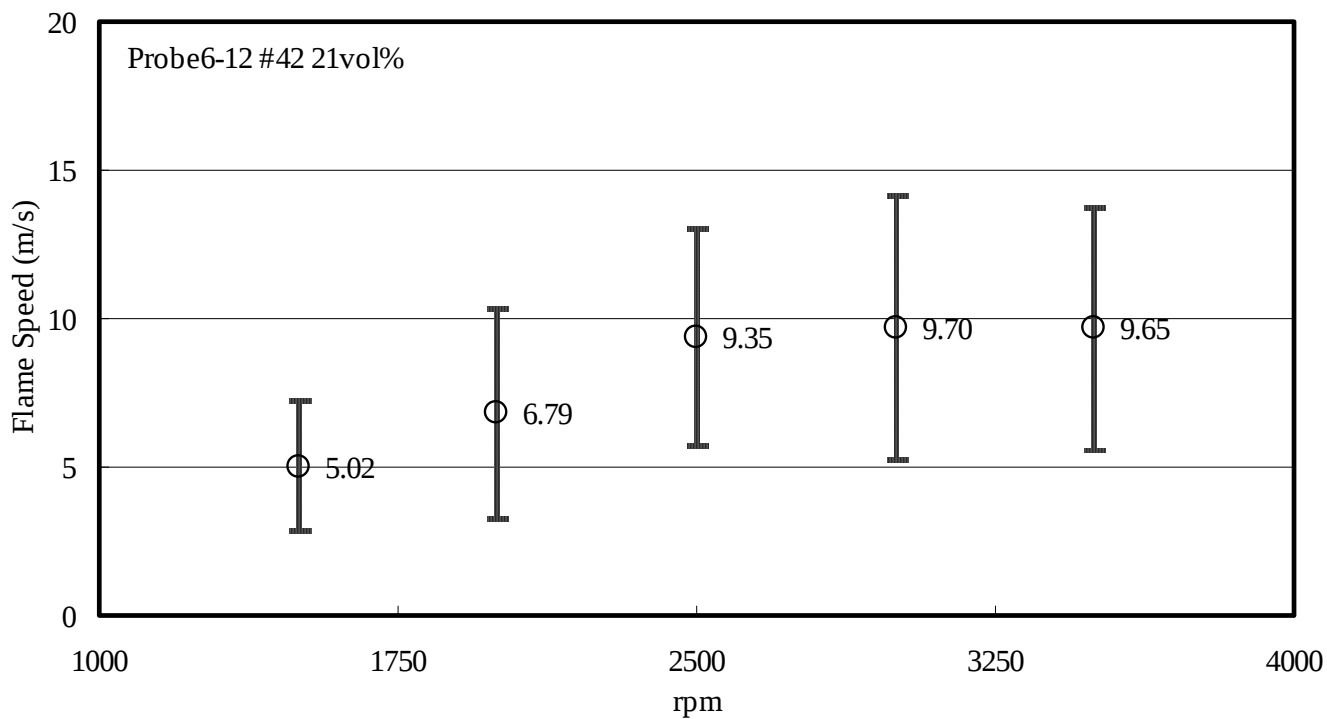


Fig.18 Flame Speed (Average, Data Range)

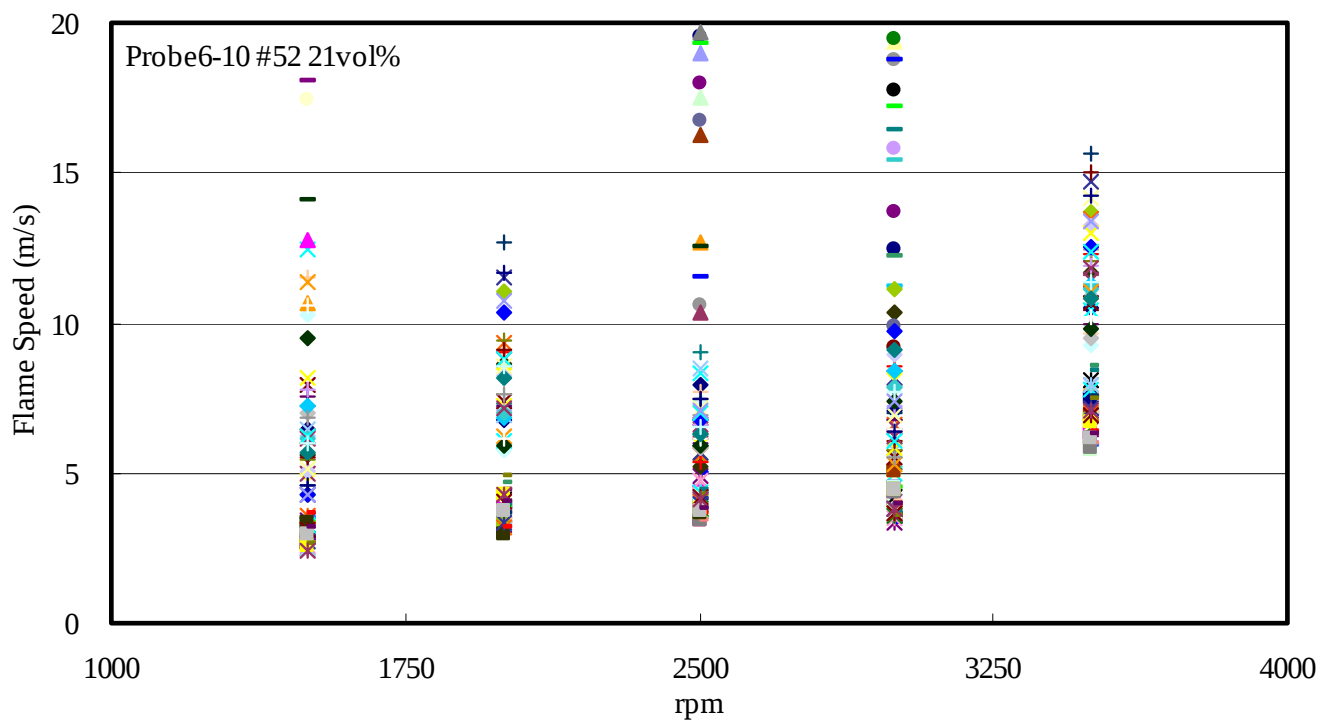


Fig.19 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

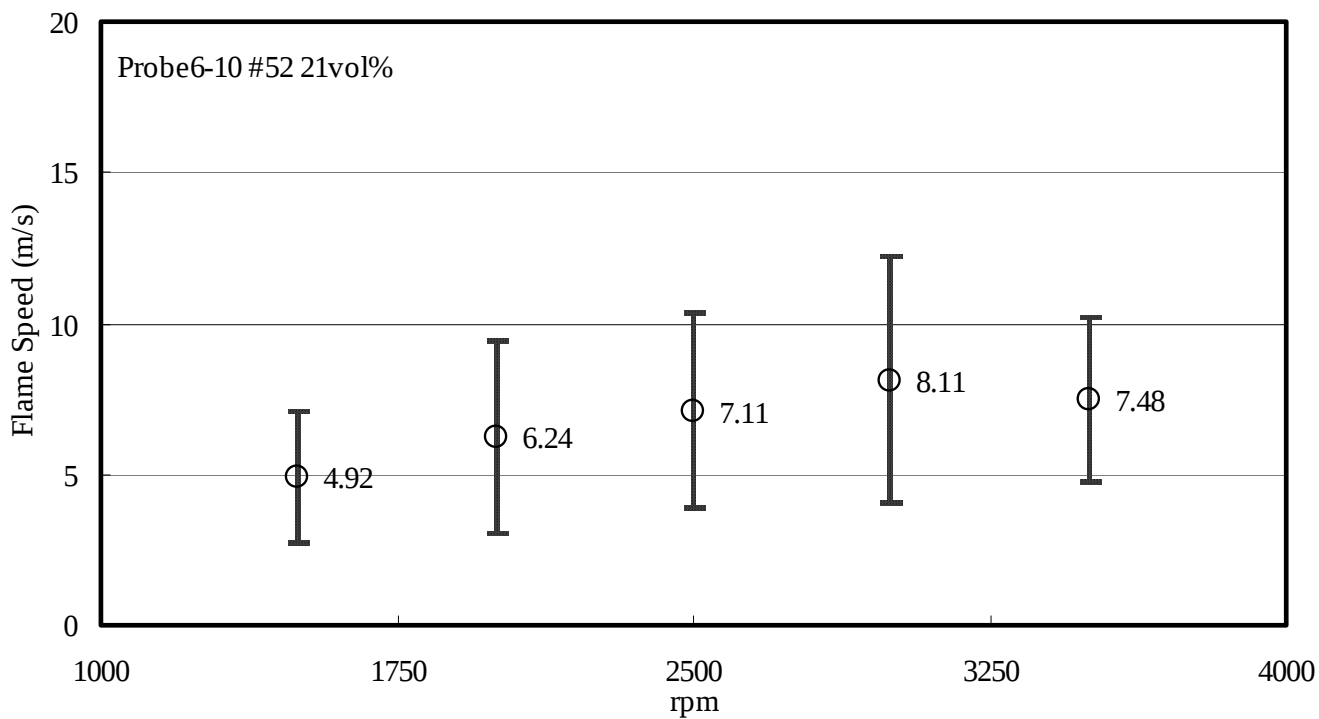


Fig.20 Flame Speed (Average, Data Range)

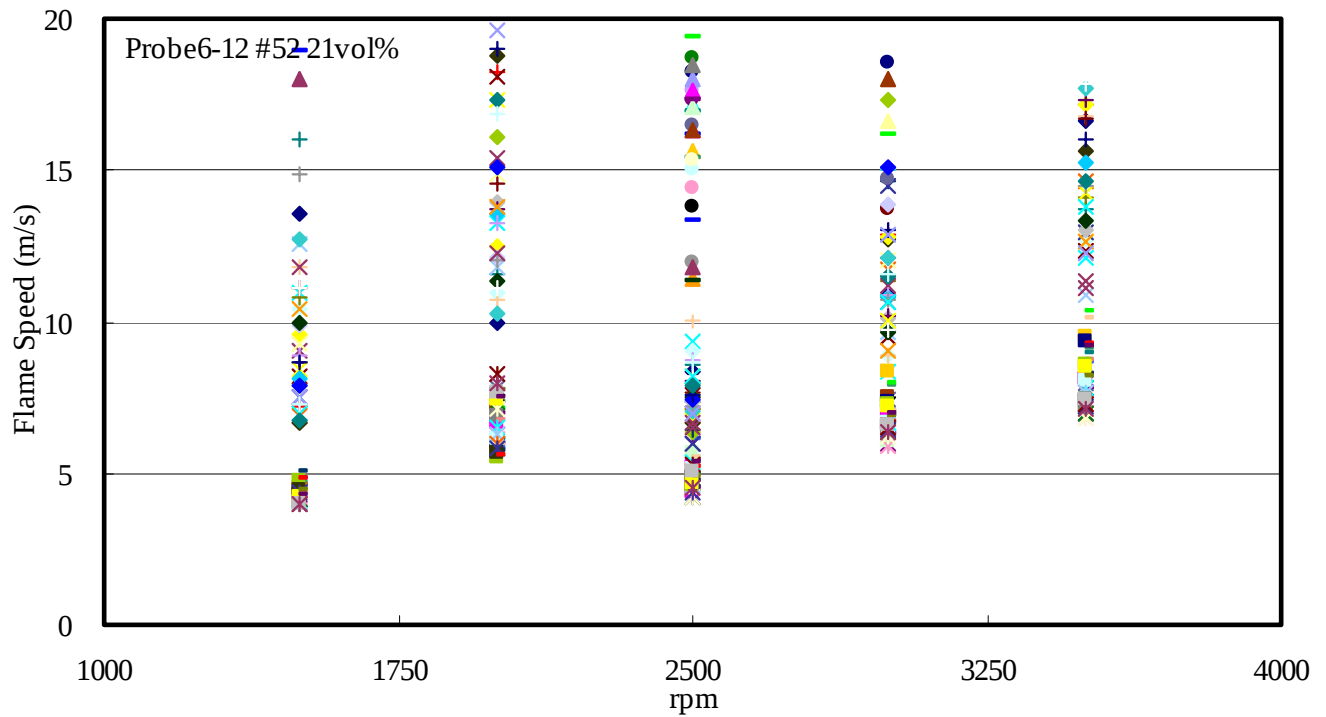


Fig.21 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

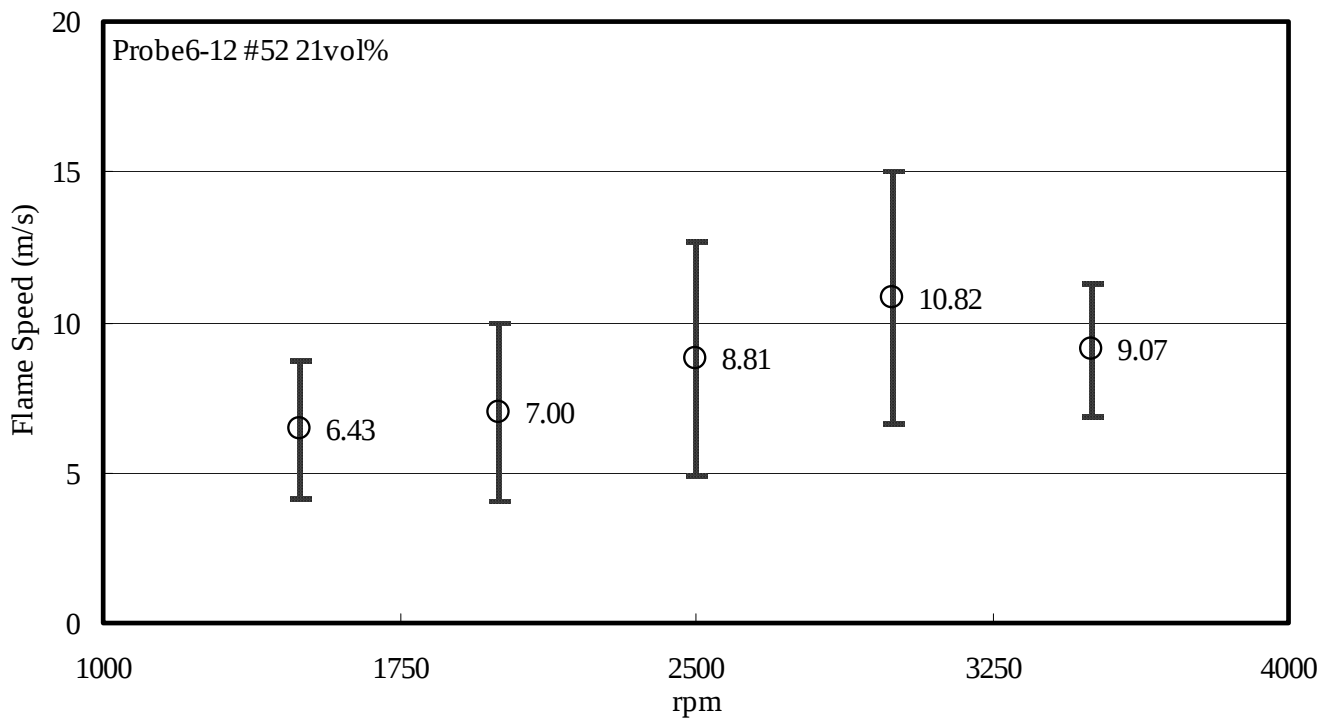


Fig.22 Flame Speed (Average, Data Range)

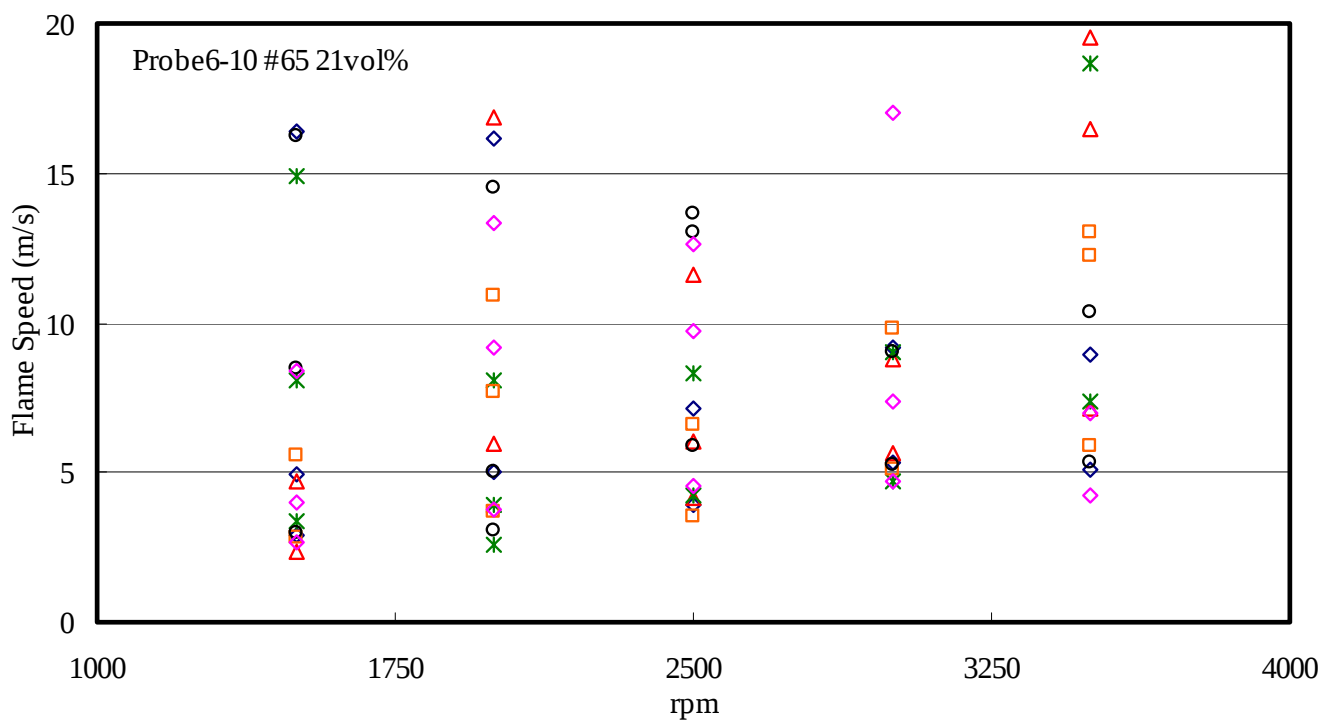


Fig.23 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

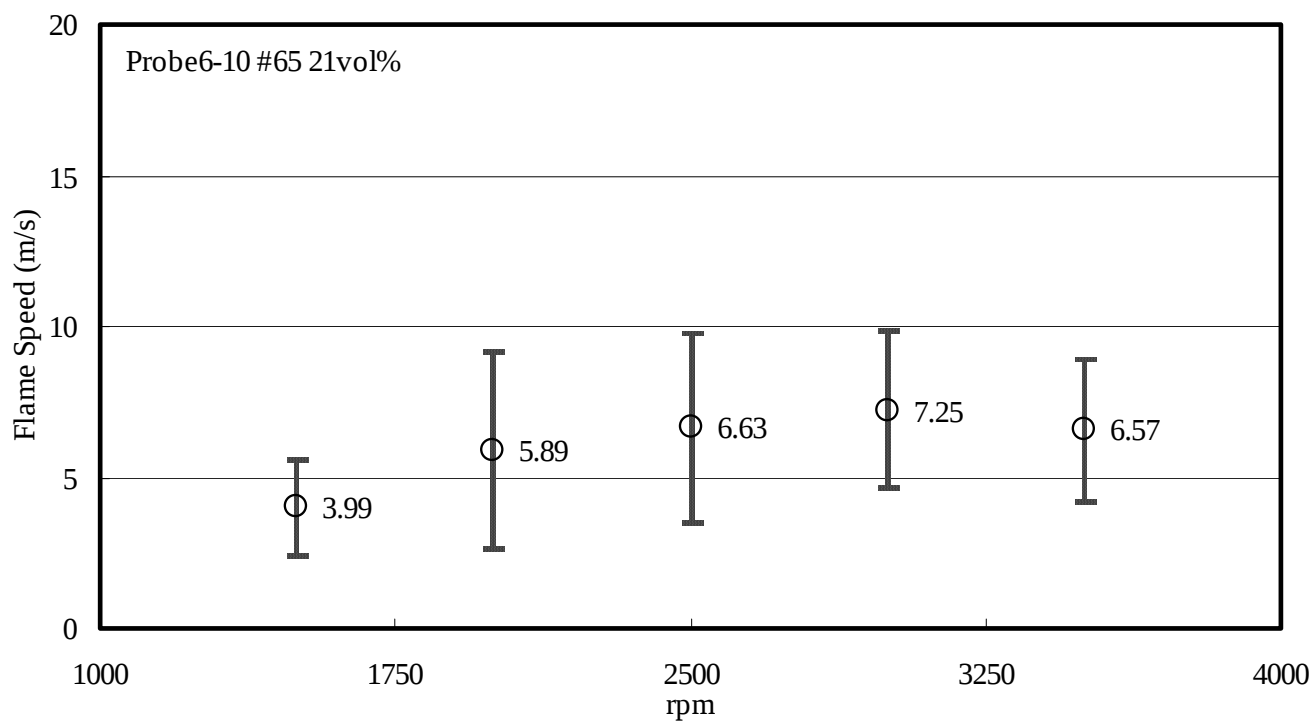


Fig.24 Flame Speed (Average, Data Range)

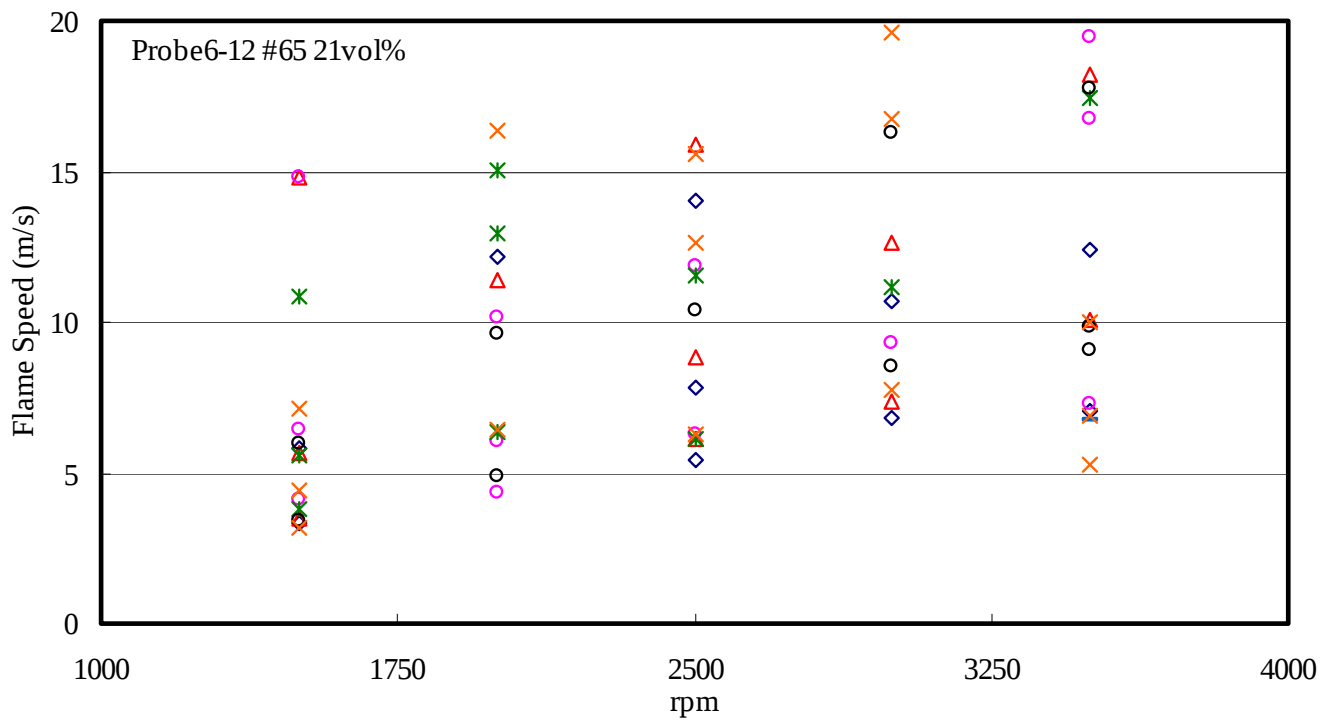


Fig.25 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

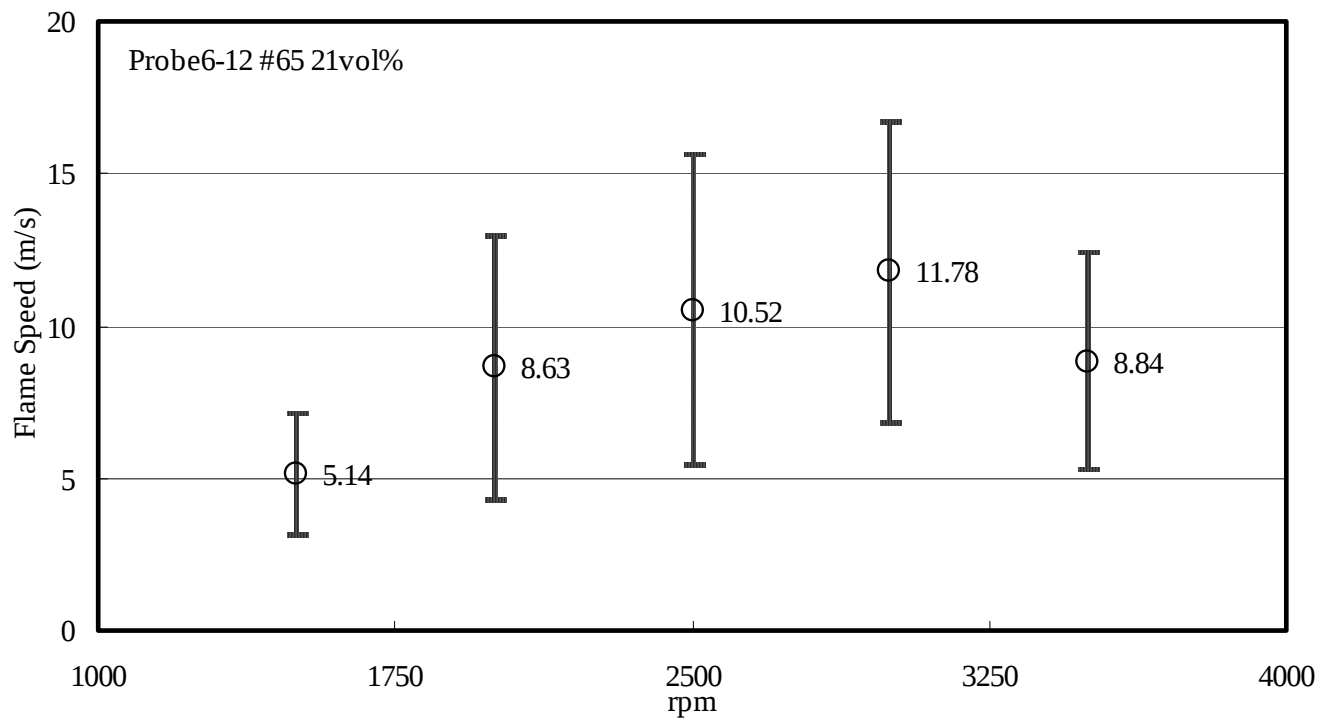


Fig.26 Flame Speed (Average, Data Range)

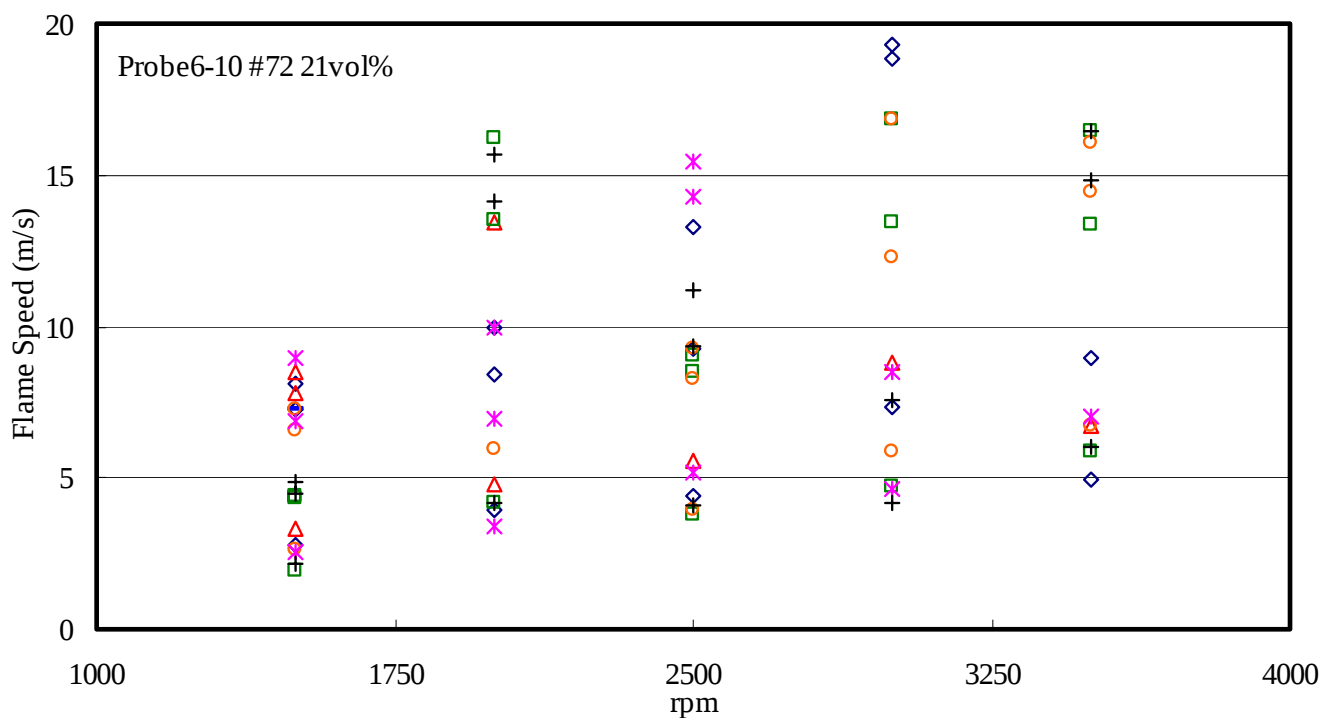


Fig.27 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

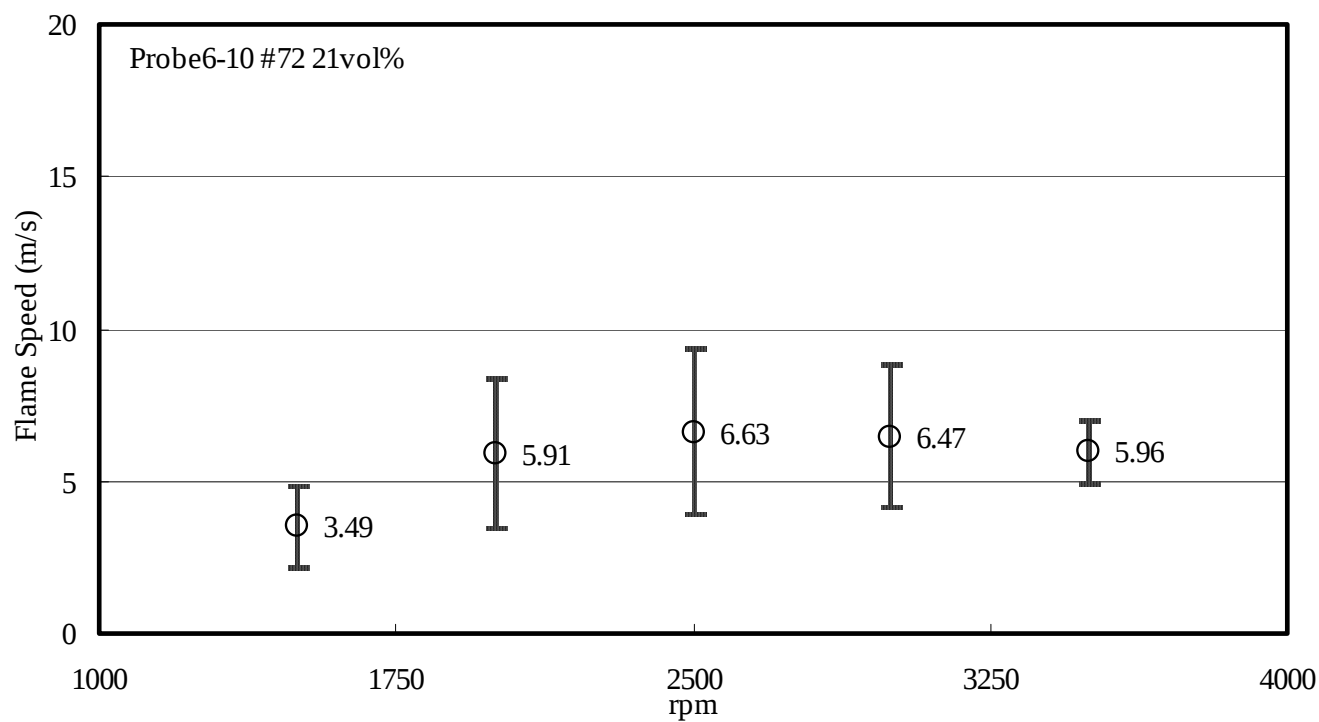


Fig.28 Flame Speed (Average, Data Range)

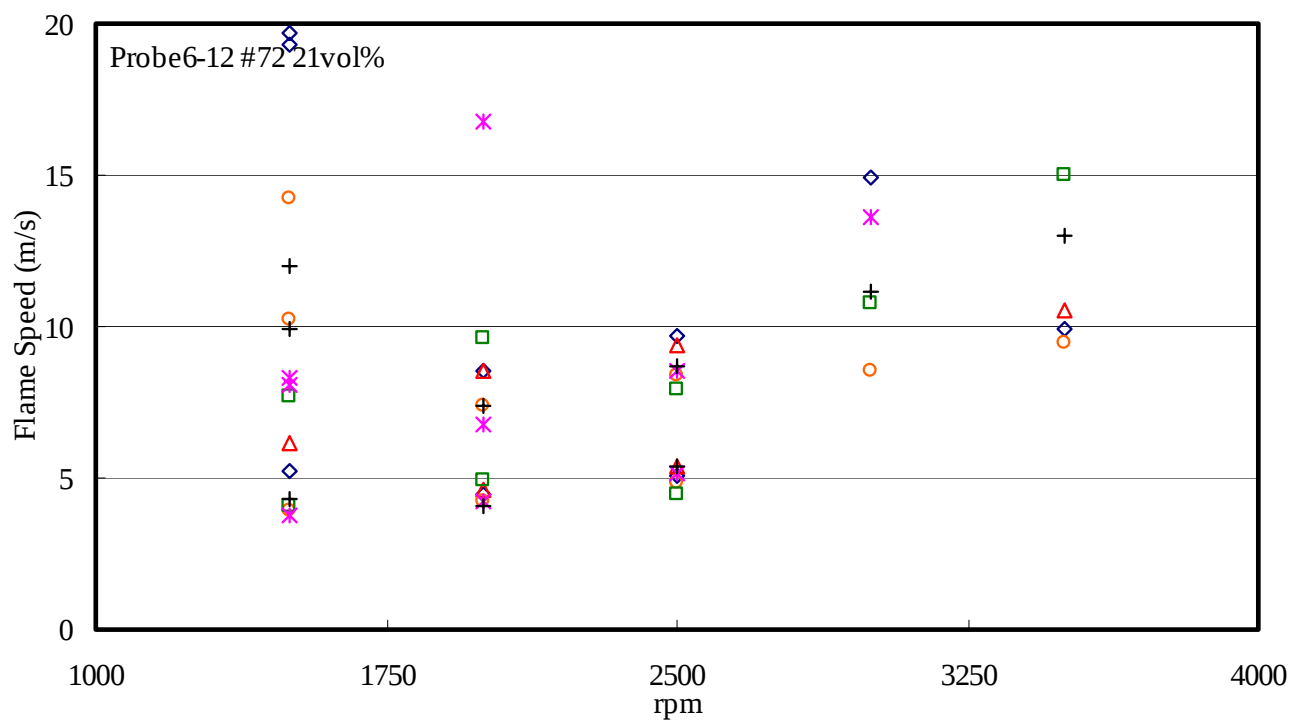


Fig.29 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

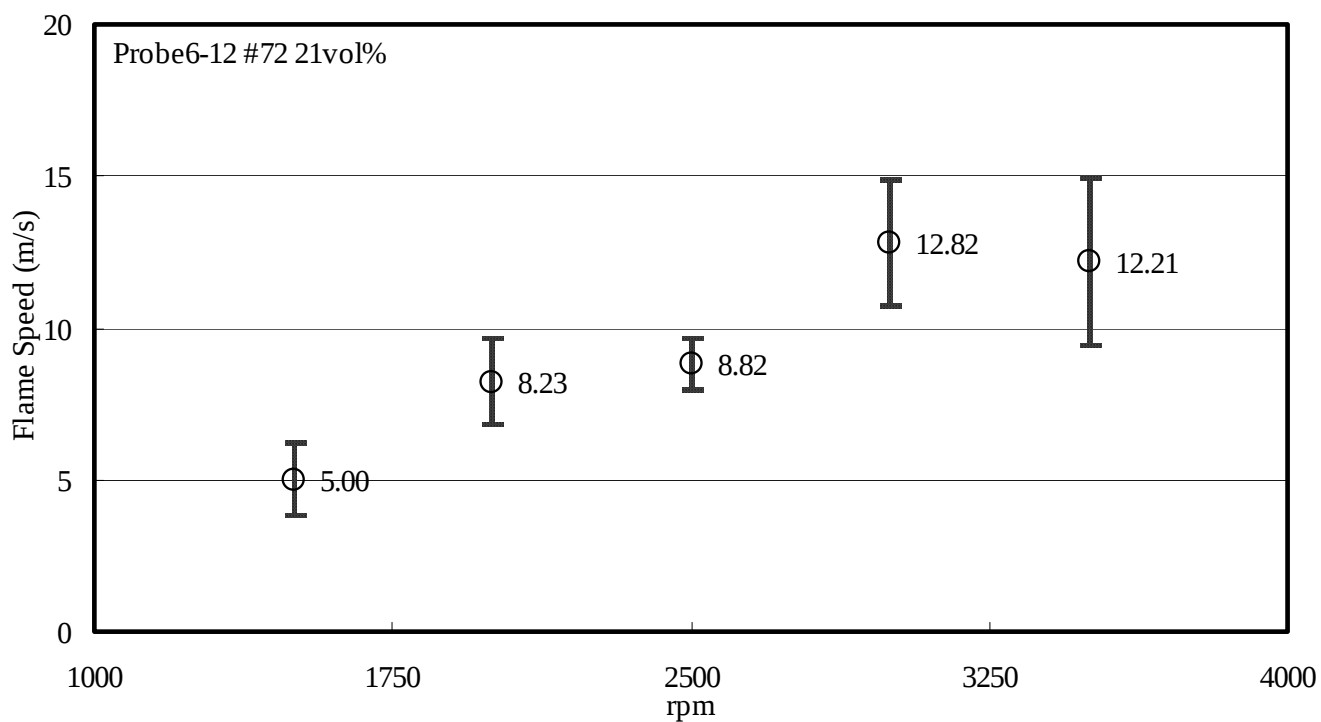


Fig.30 Flame Speed (Average, Data Range)

低酸素濃度状態：

Fig.31 ~ Fig.62 に本実験で得られた各メインジェット(#42,#52,#65,#72)を用いた場合の無負荷条件における、吸入空気酸素濃度 19vol.%,17vol.%での機関回転数に対する火炎伝ば速度を示す。これらの図から明らかなように、先ほどの結果と同様に機関回転数の増大に伴い火炎伝ば速度の平均値は増大したが、機関回転数が3000 ~ 3500r.p.m 以上での火炎伝ば速度の減少傾向の確認は取れなかった。これは、吸入空気酸素濃度の低下により 3000 ~ 3500r.p.m 付近では、燃焼に必要な酸素が十分供給されず、火炎伝ば速度の減少傾向がより高回転領域に移行したと考えられる。

19vol. %

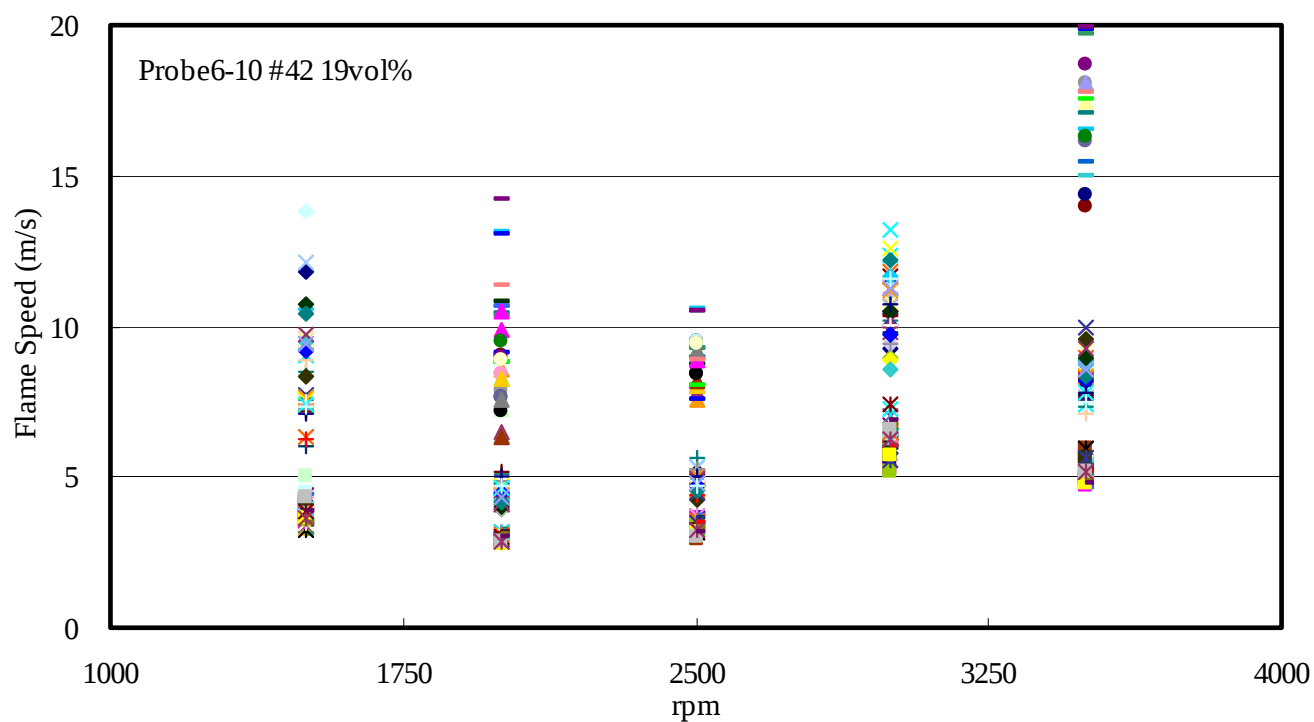


Fig.31 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

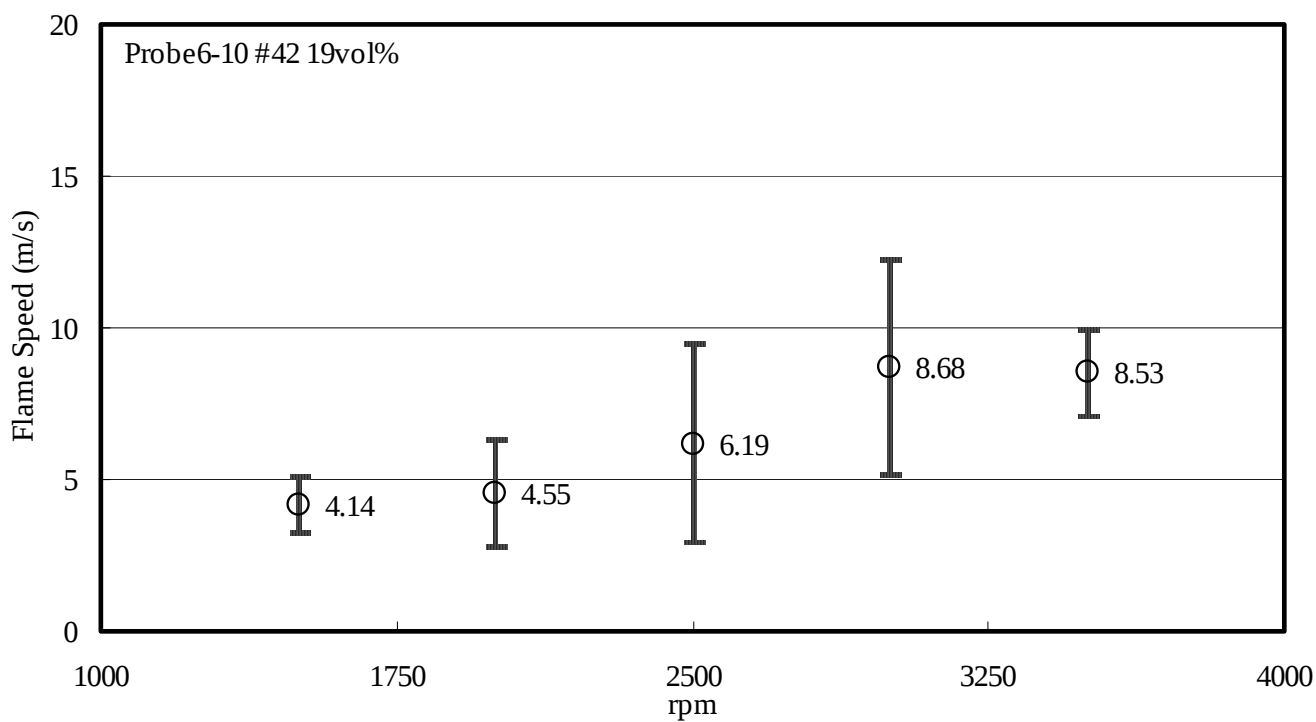


Fig.32 Flame Speed (Average, Data Range)

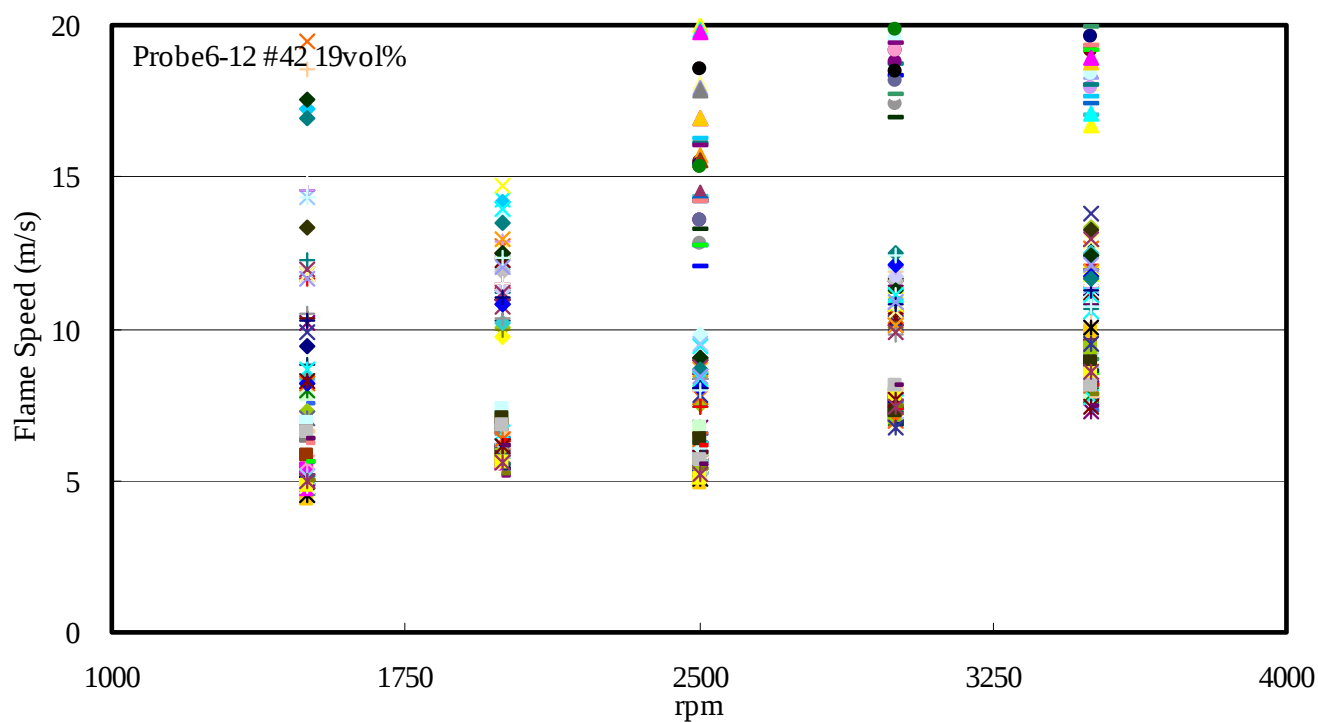


Fig.33 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

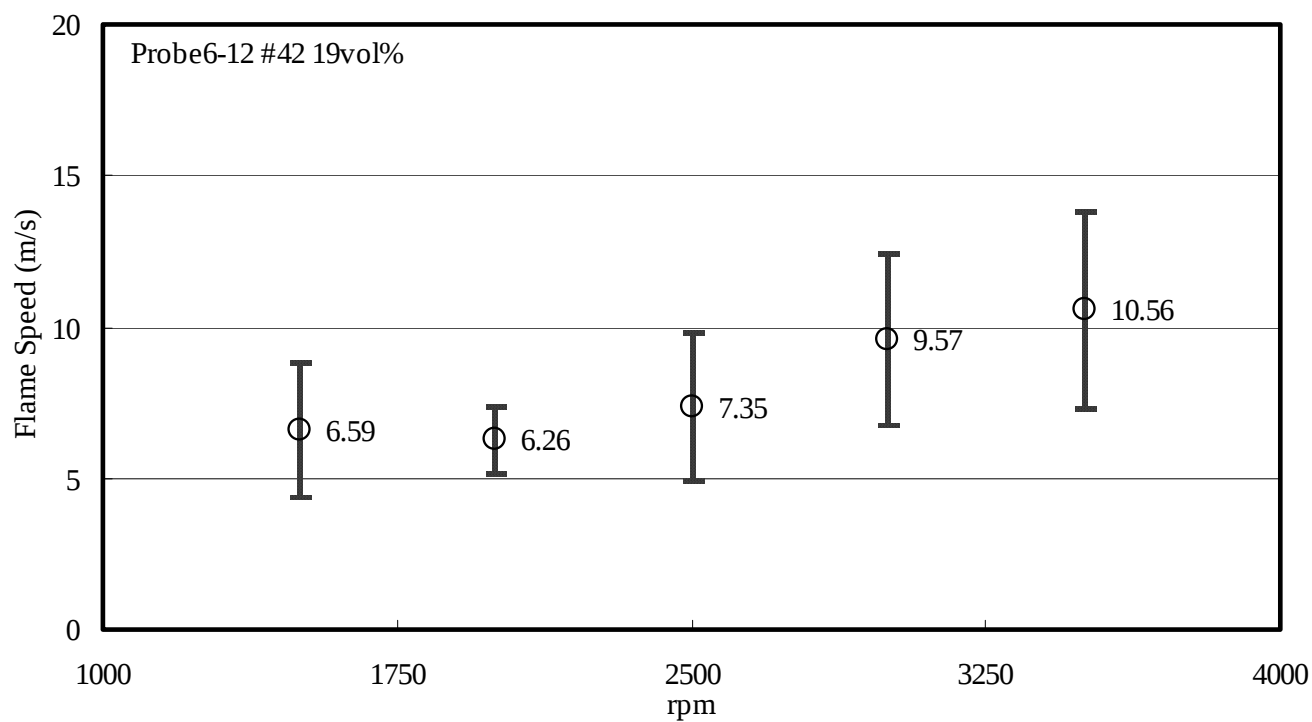


Fig.34 Flame Speed (Average, Data Range)

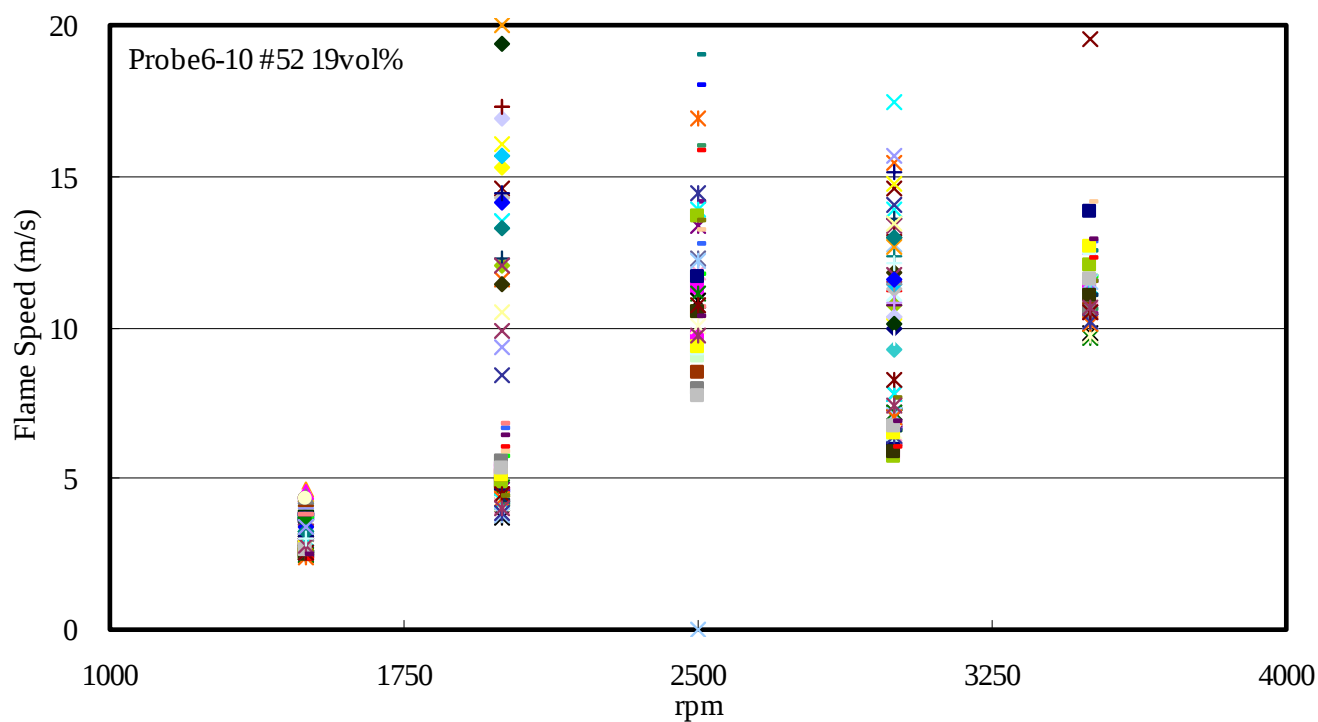


Fig.35 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

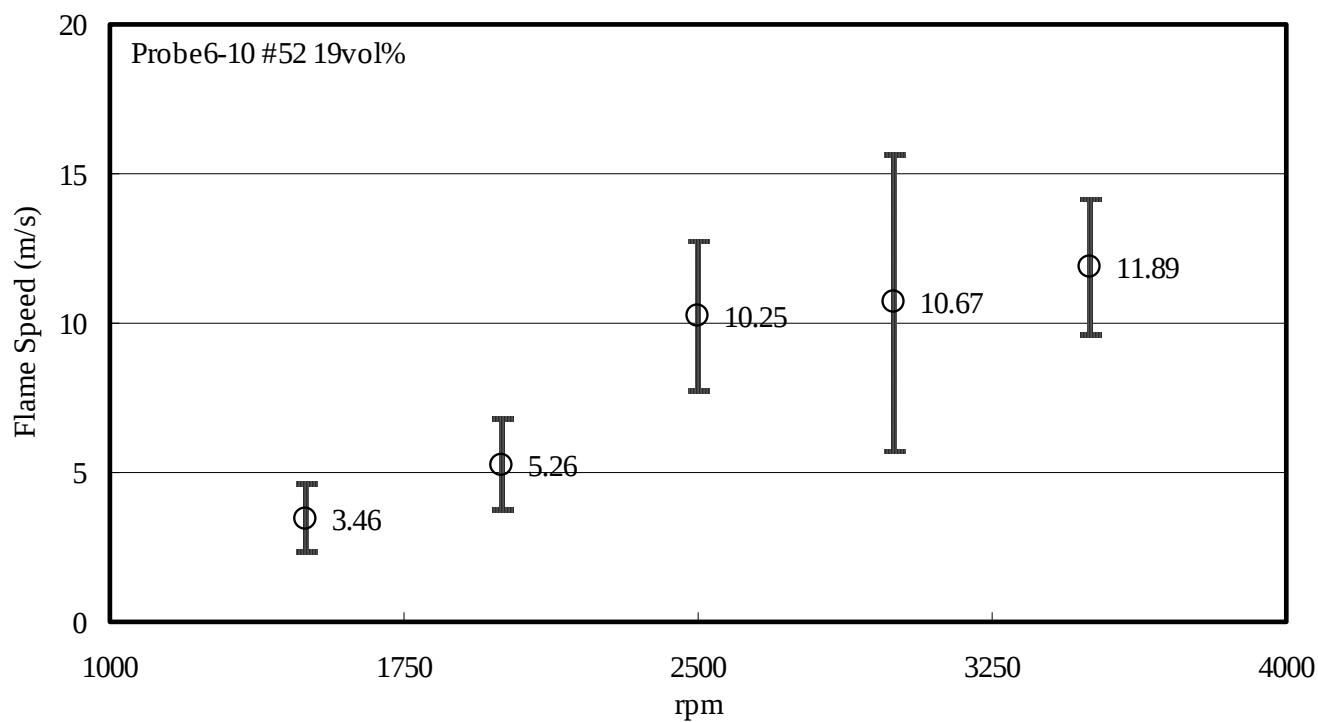


Fig.36 Flame Speed (Average, Data Range)

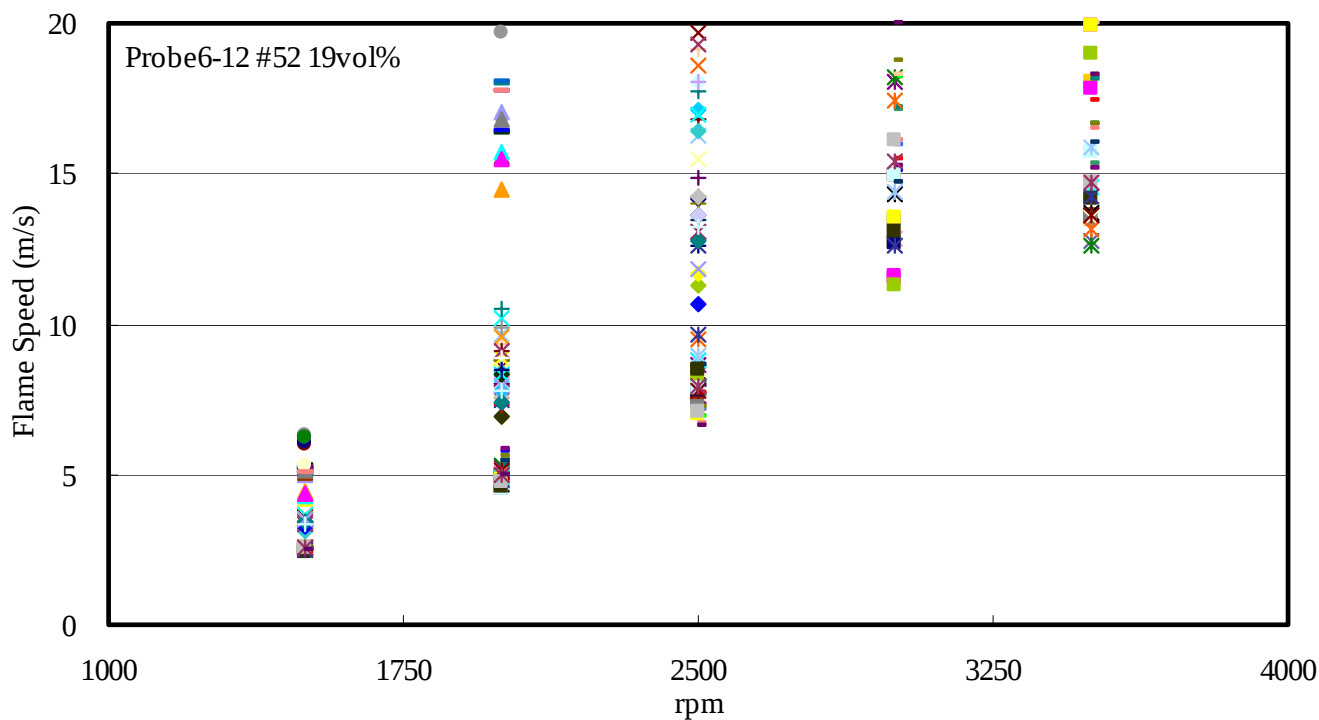


Fig.37 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

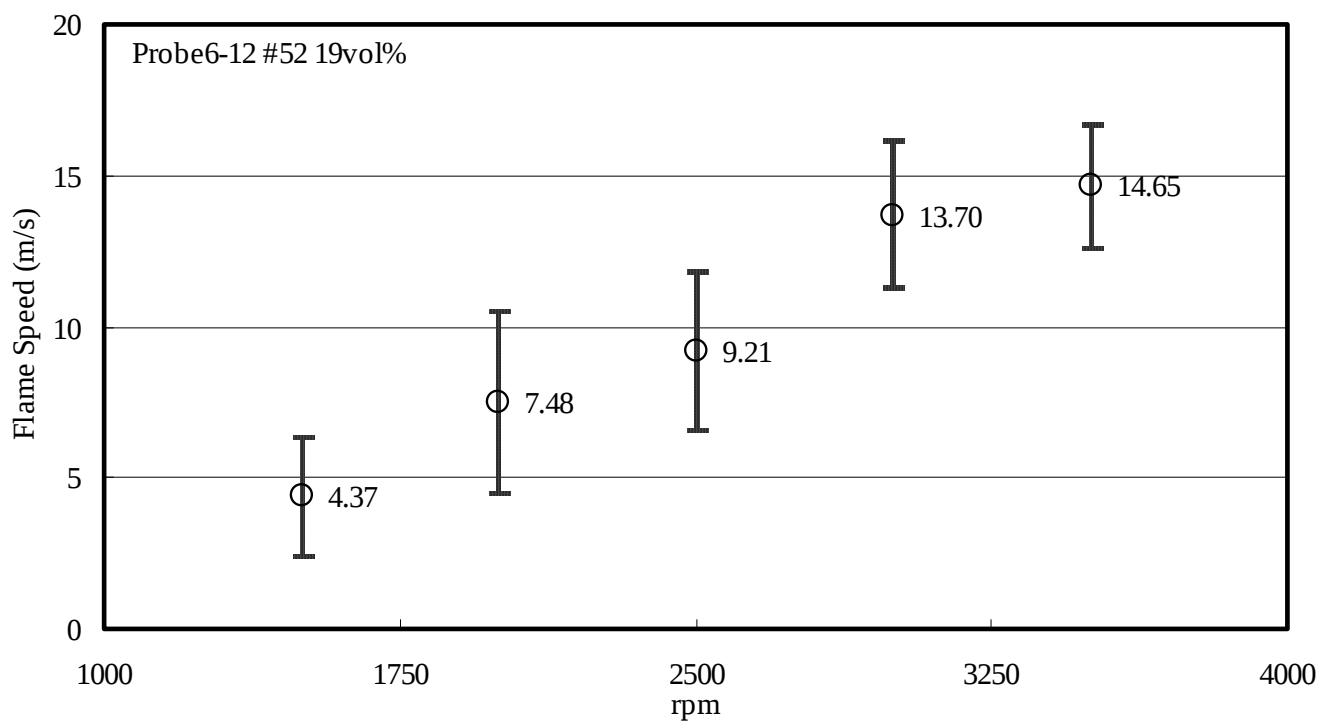


Fig.38 Flame Speed (Average, Data Range)

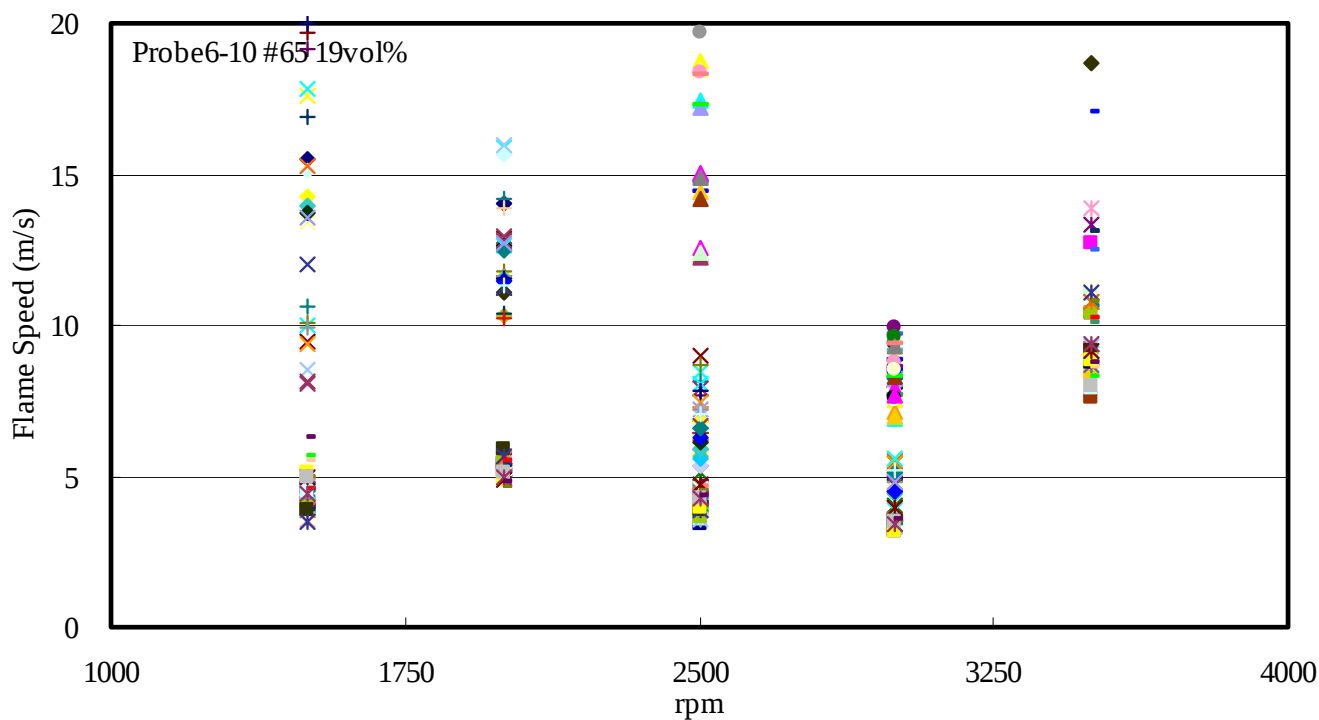


Fig.39 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

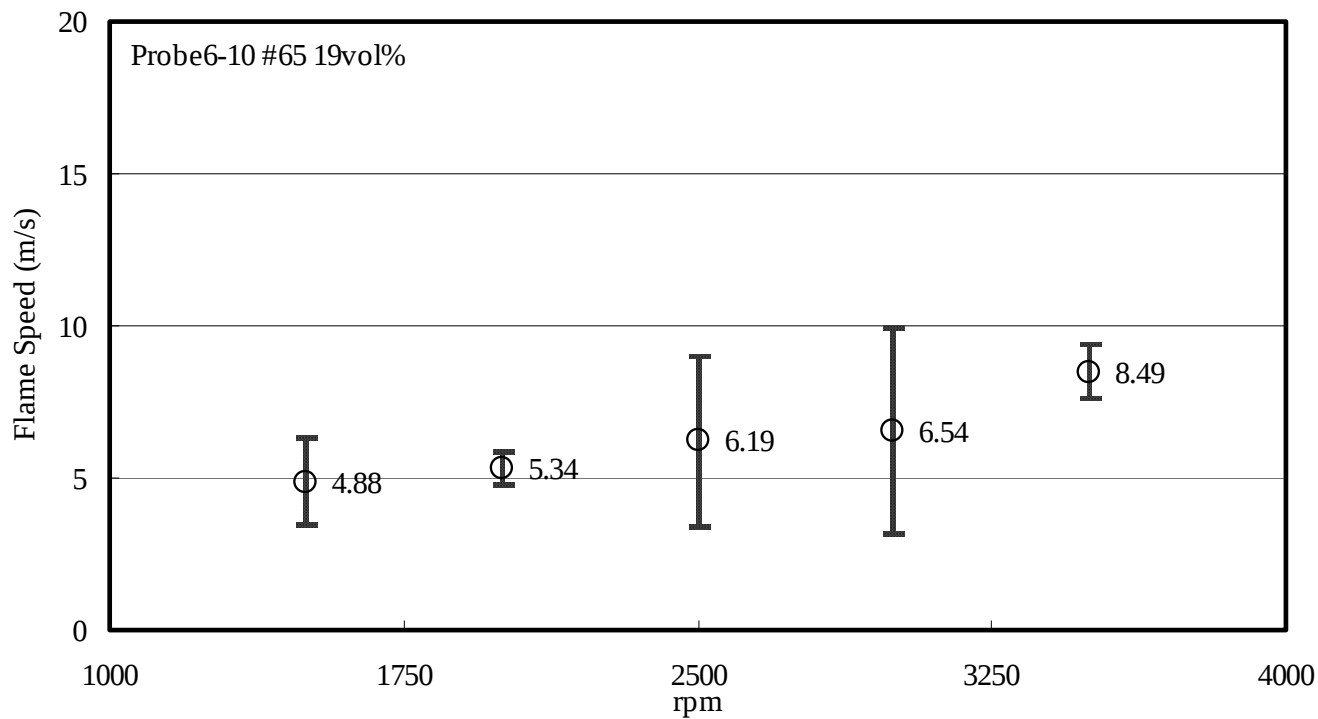


Fig.40 Flame Speed (Average, Data Range)

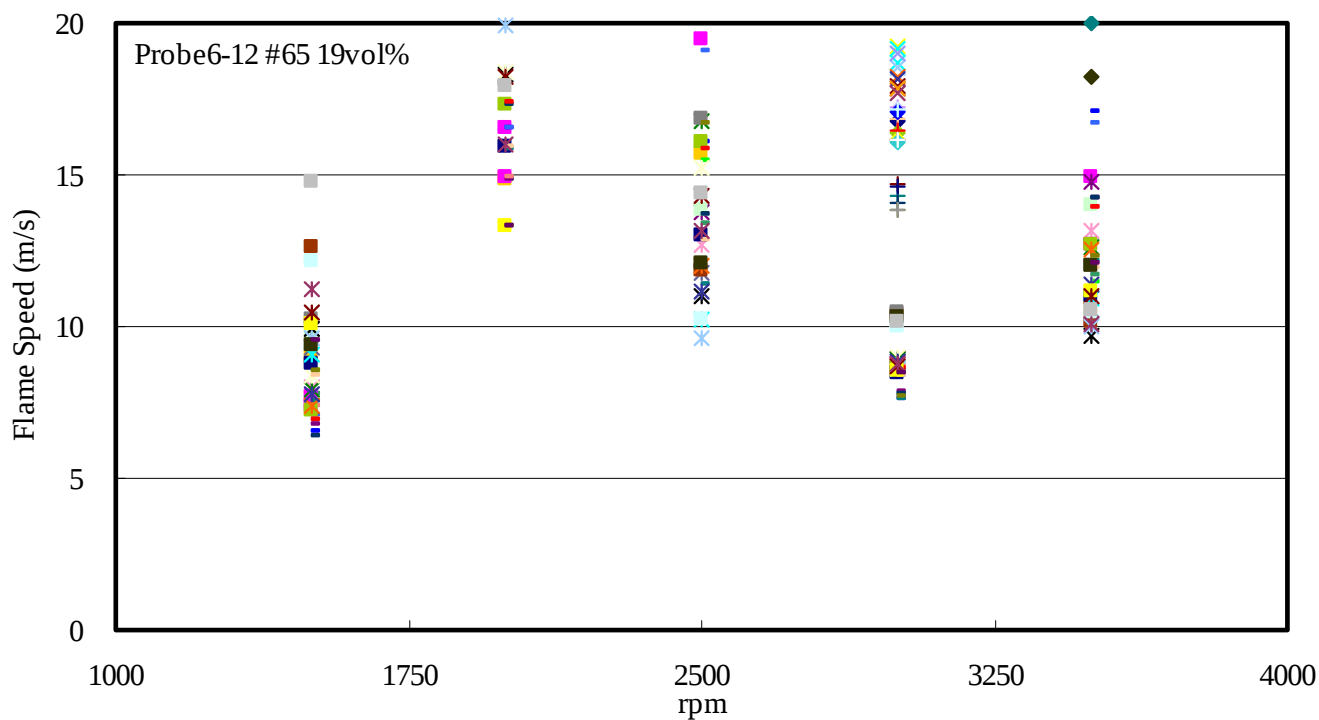


Fig.41 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

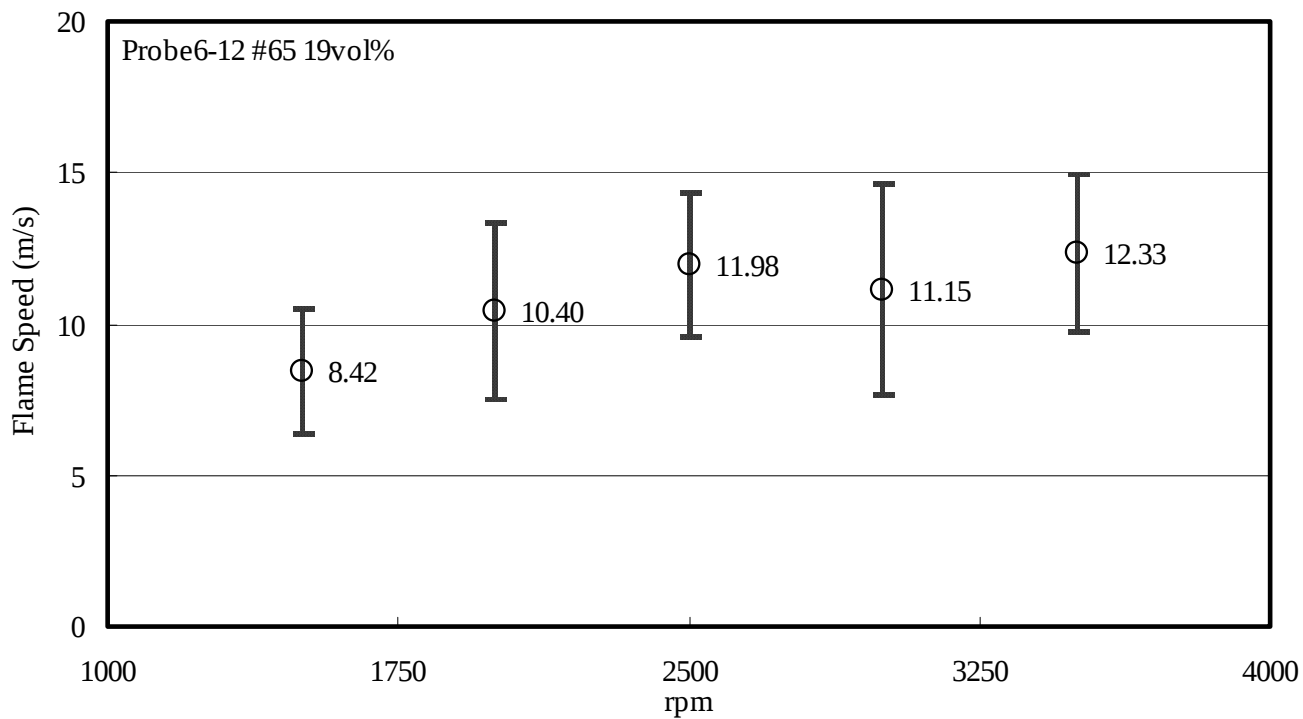


Fig.42 Flame Speed (Average, Data Range)

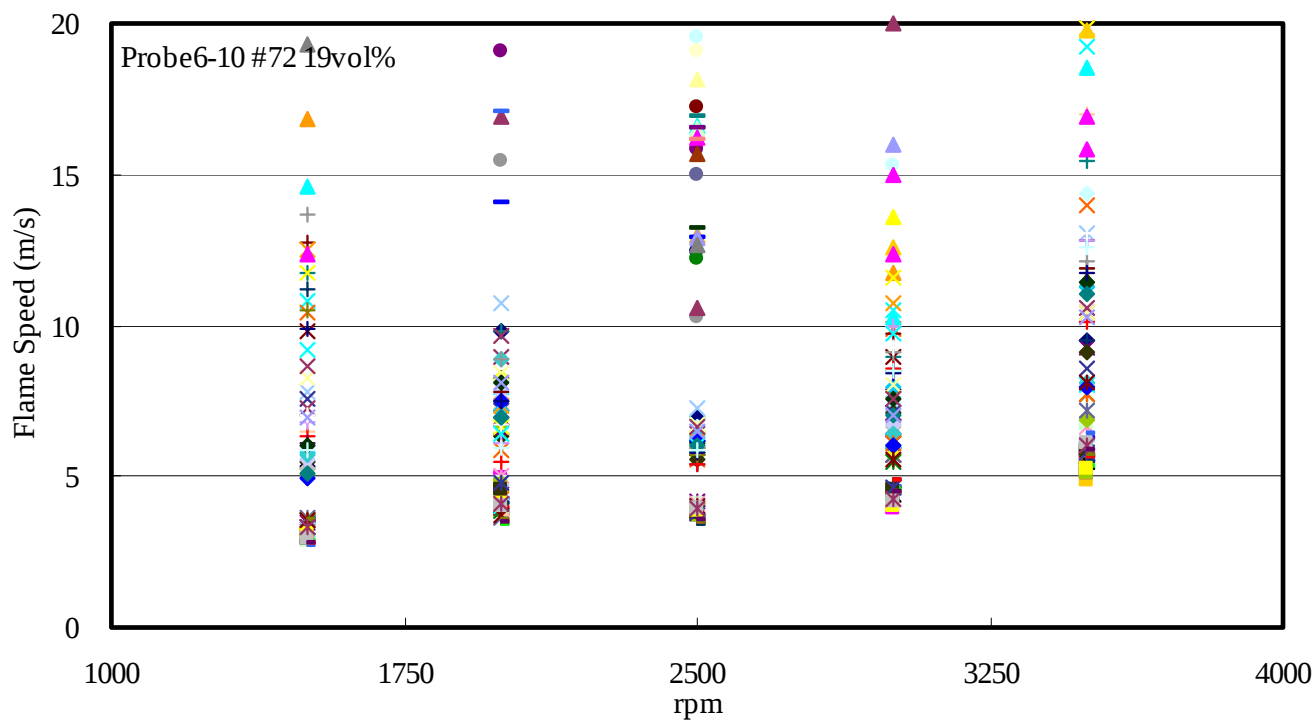


Fig.43 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

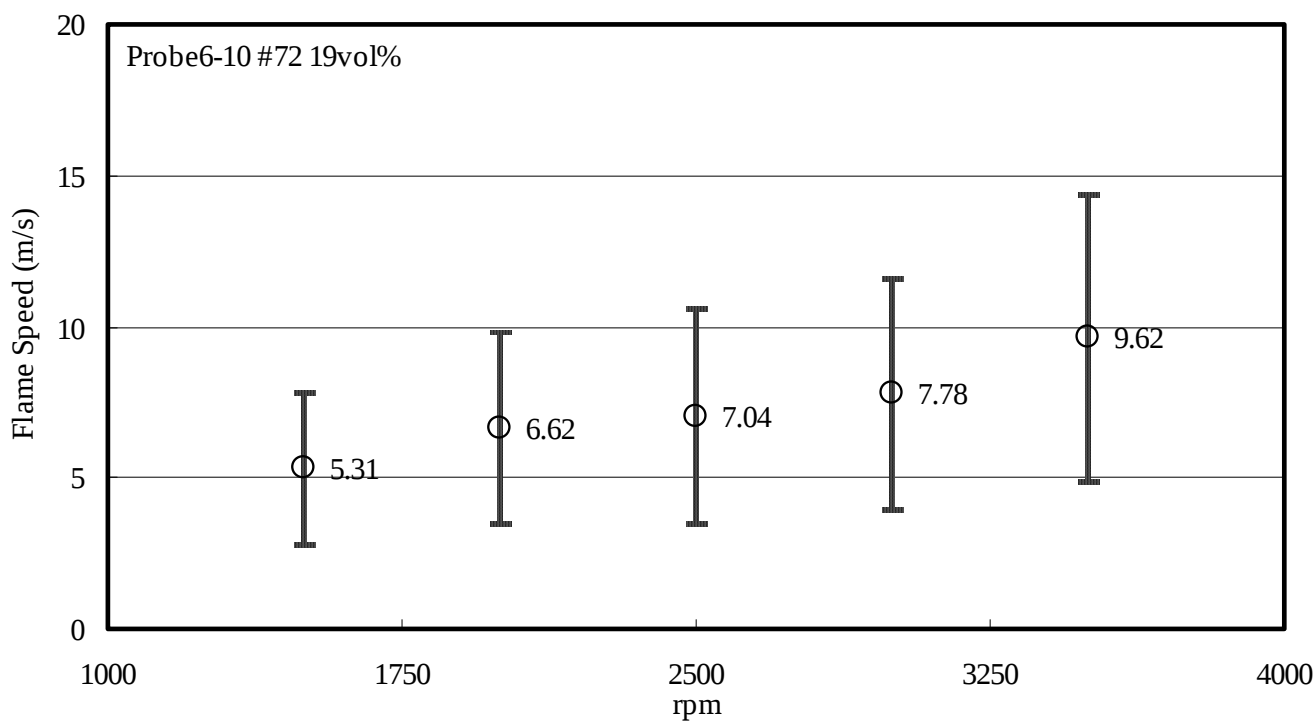


Fig.44 Flame Speed (Average, Data Range)

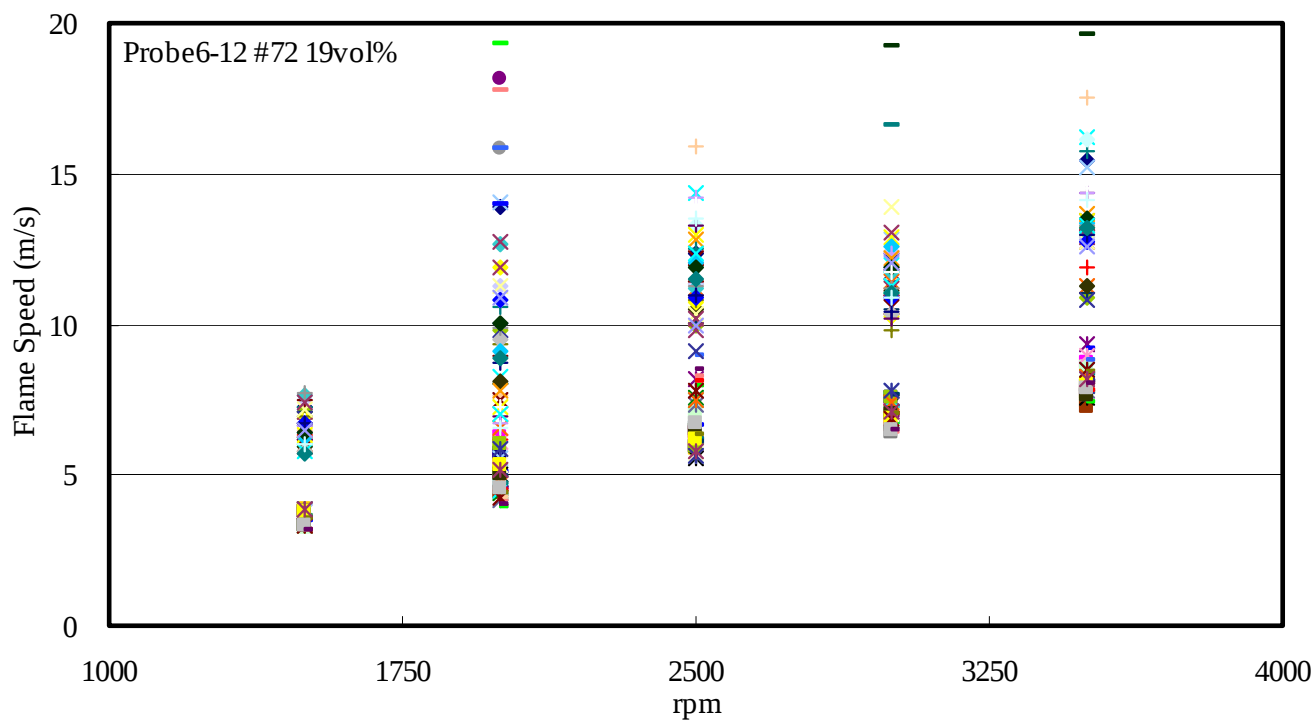


Fig.45 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

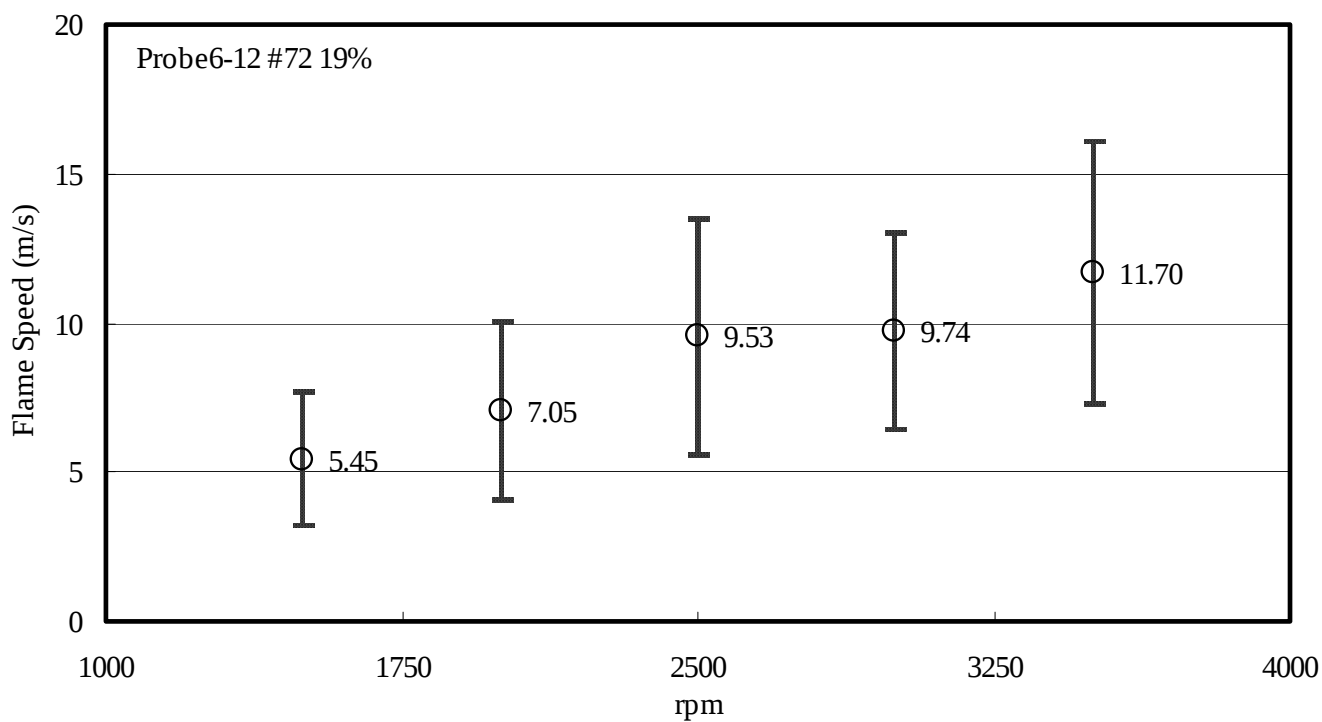


Fig.46 Flame Speed (Average, Data Range)

17vol. %

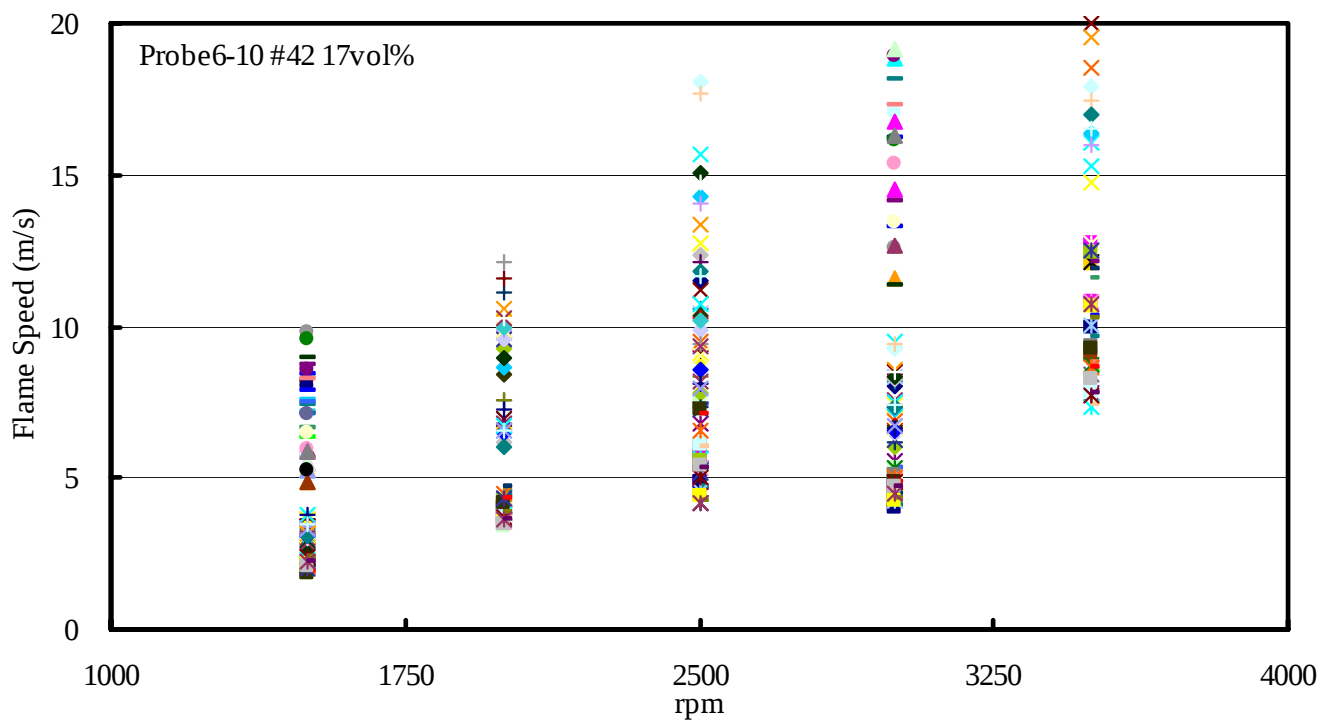


Fig.47 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

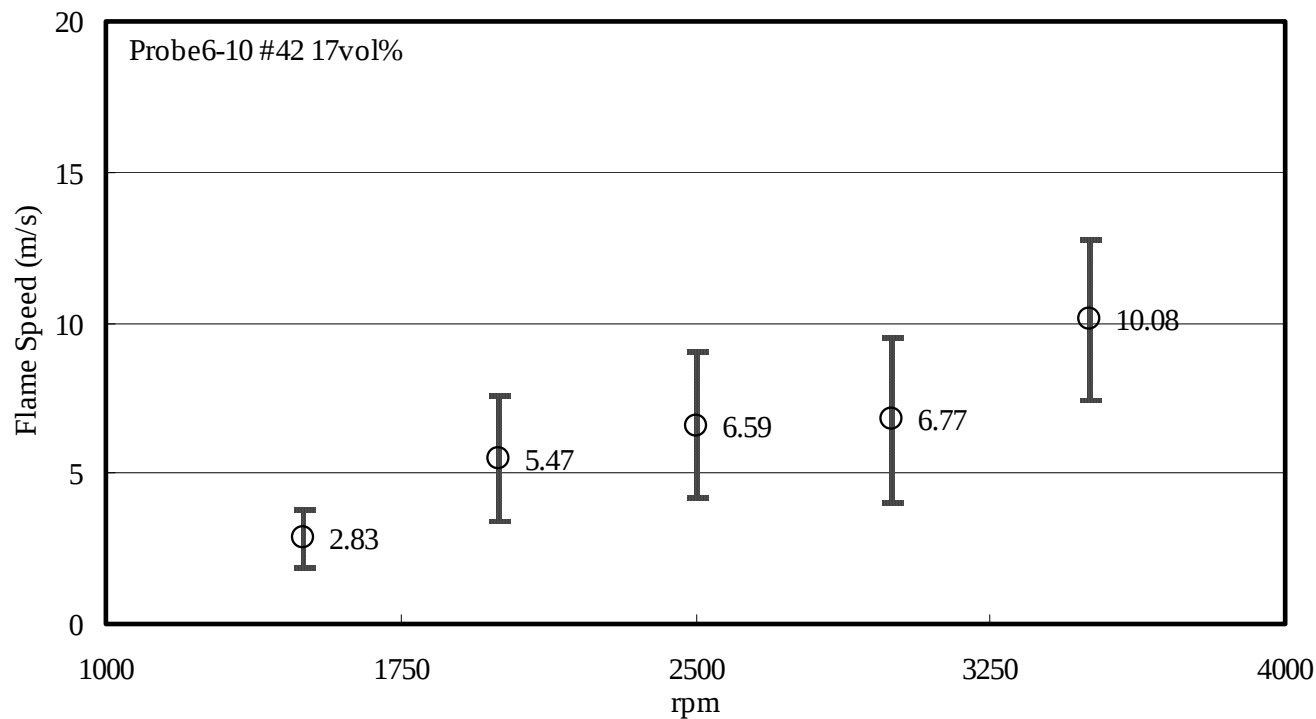


Fig.48 Flame Speed (Average, Data Range)

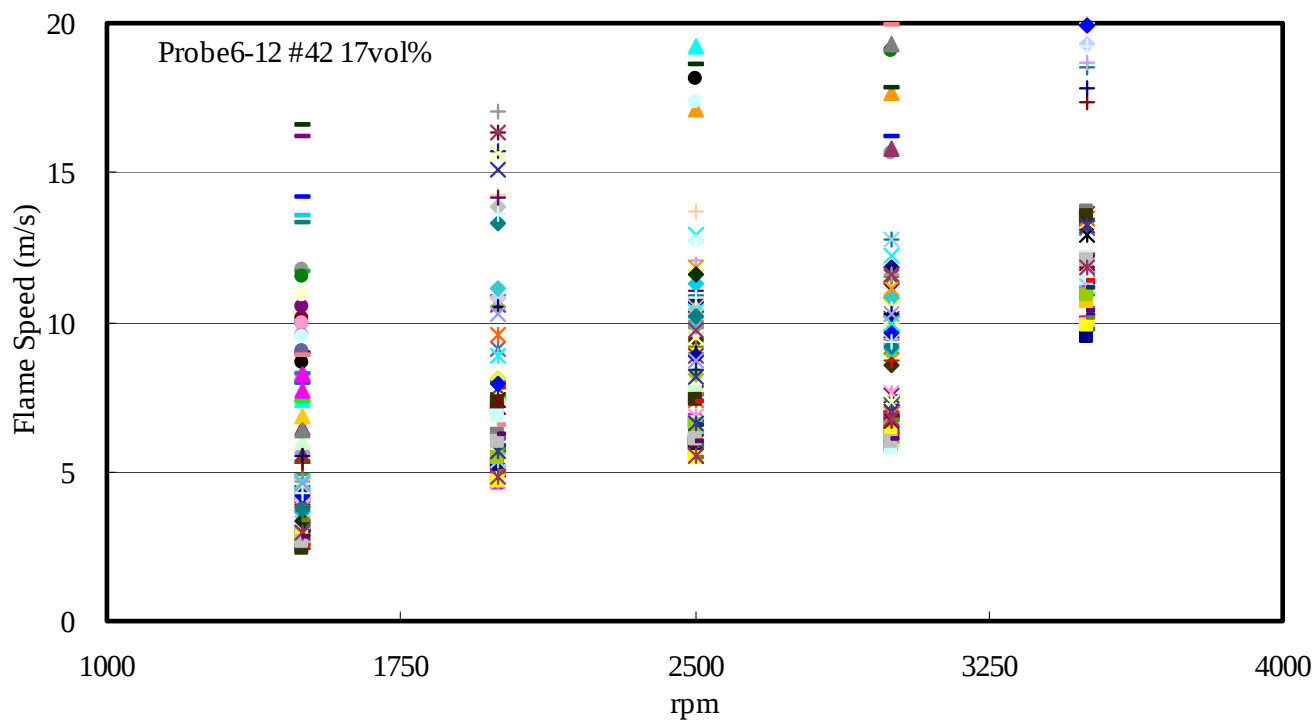


Fig.49 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

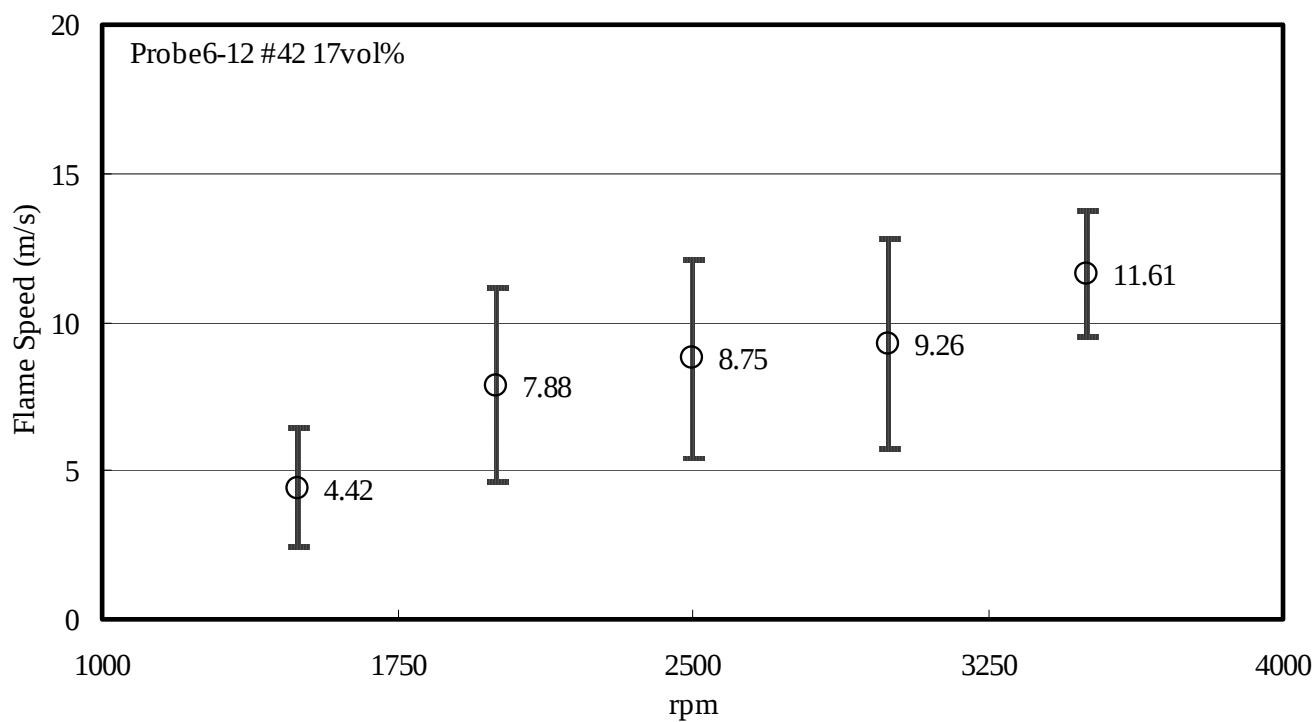


Fig.50 Flame Speed (Average, Data Range)

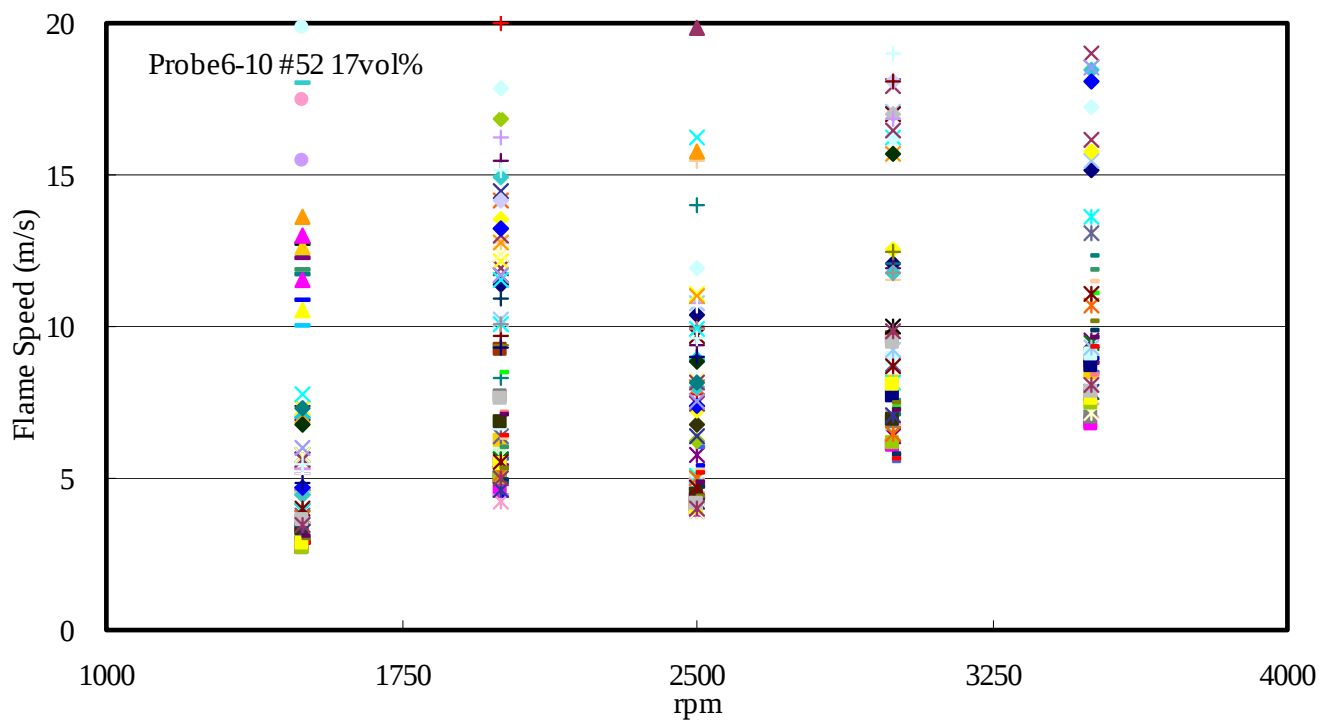


Fig.51 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

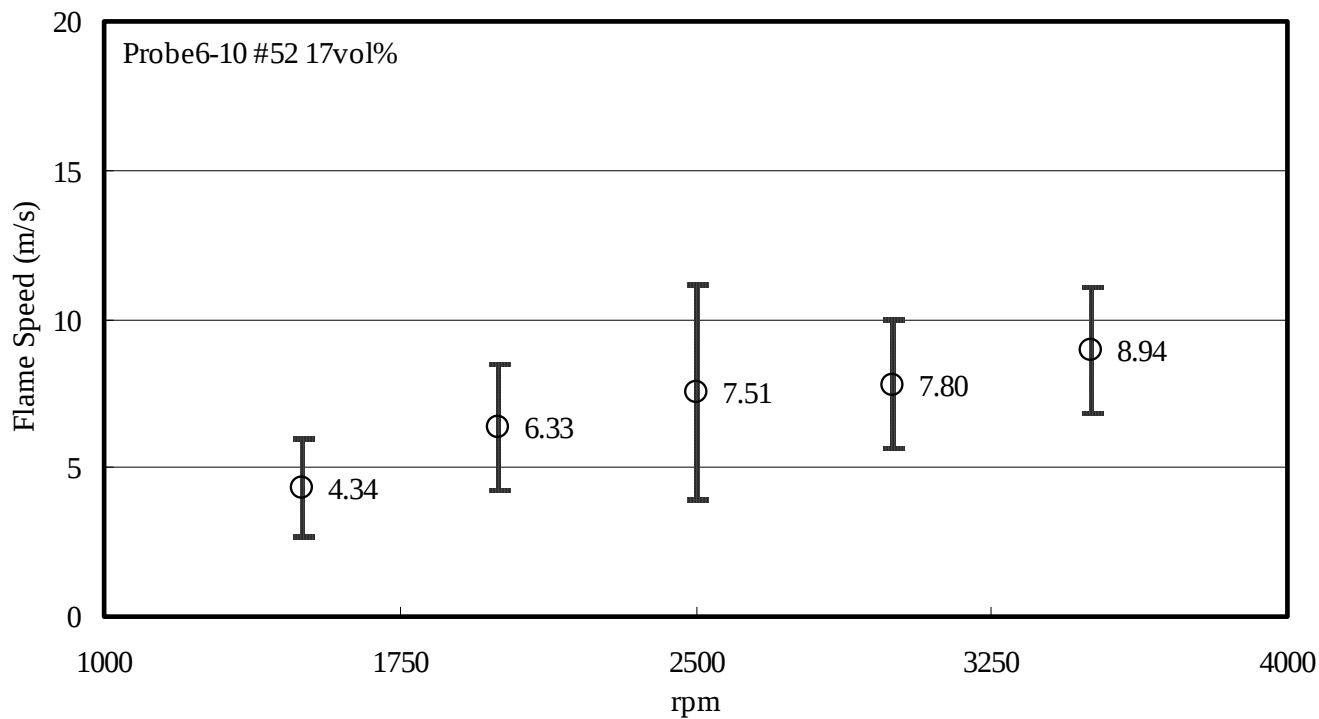


Fig.52 Flame Speed (Average, Data Range)

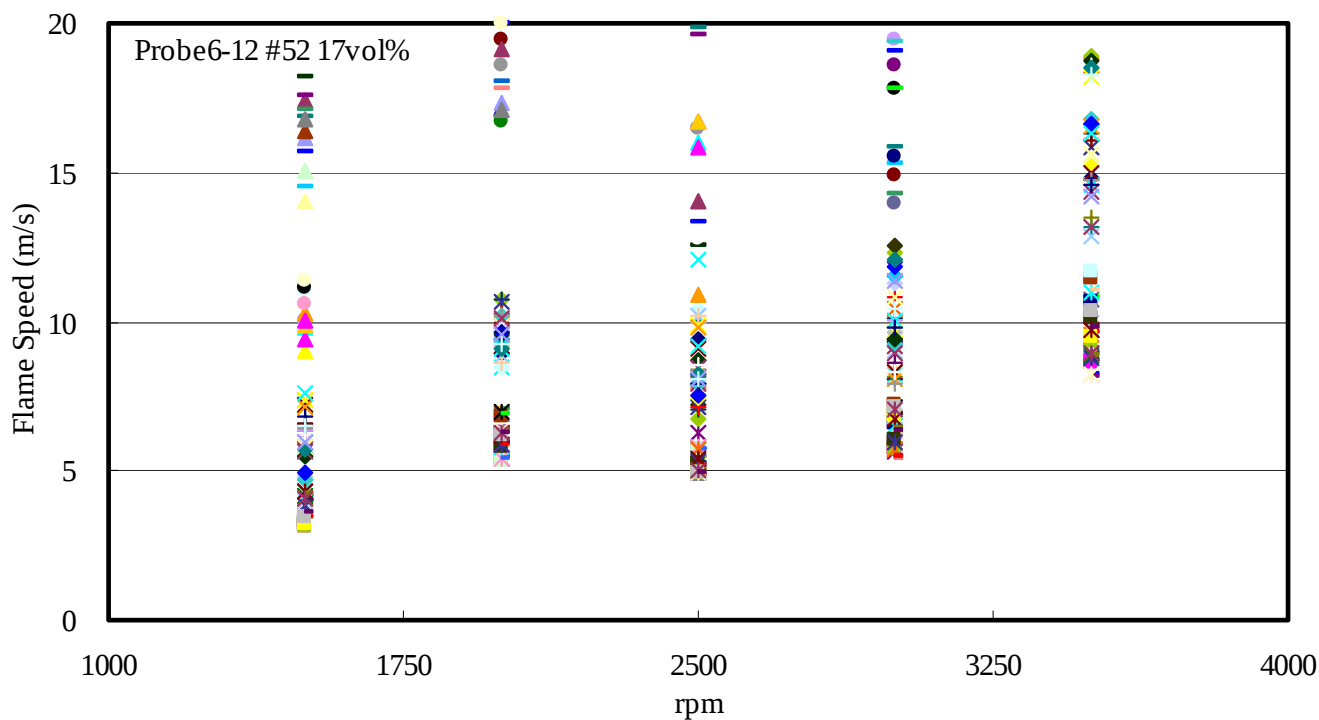


Fig.53 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

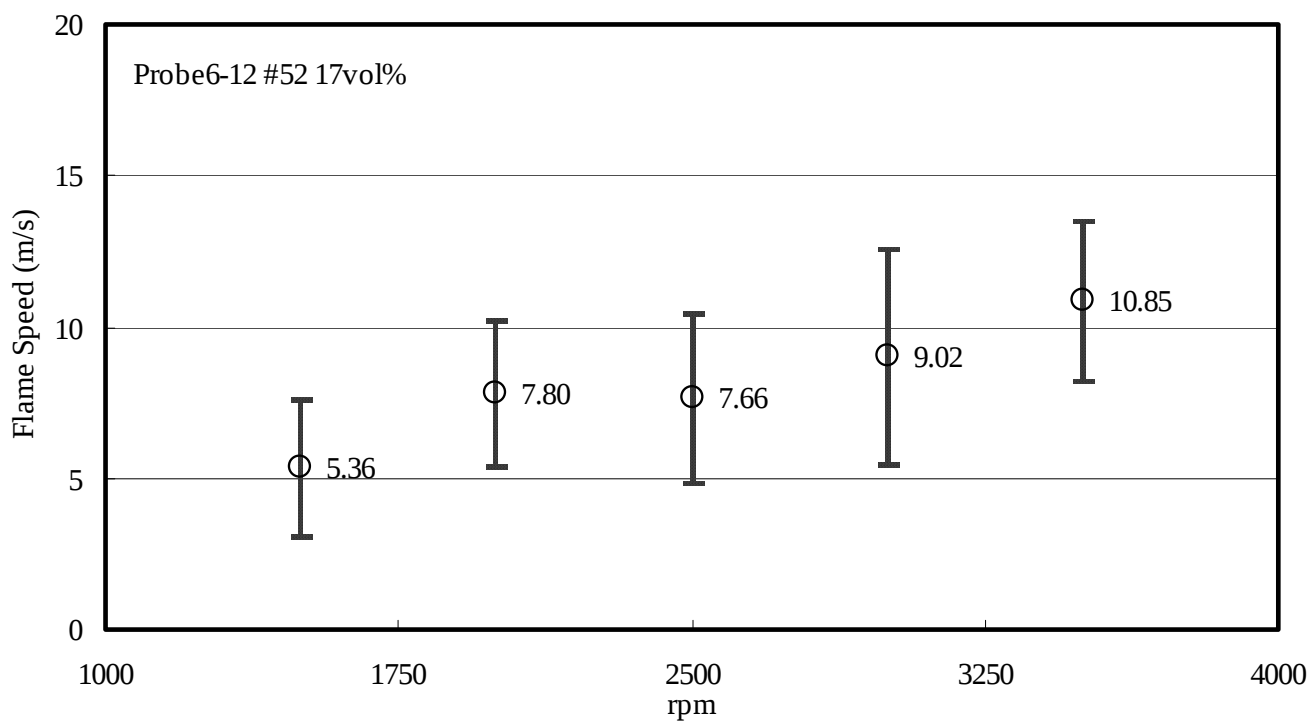


Fig.54 Flame Speed (Average, Data Range)

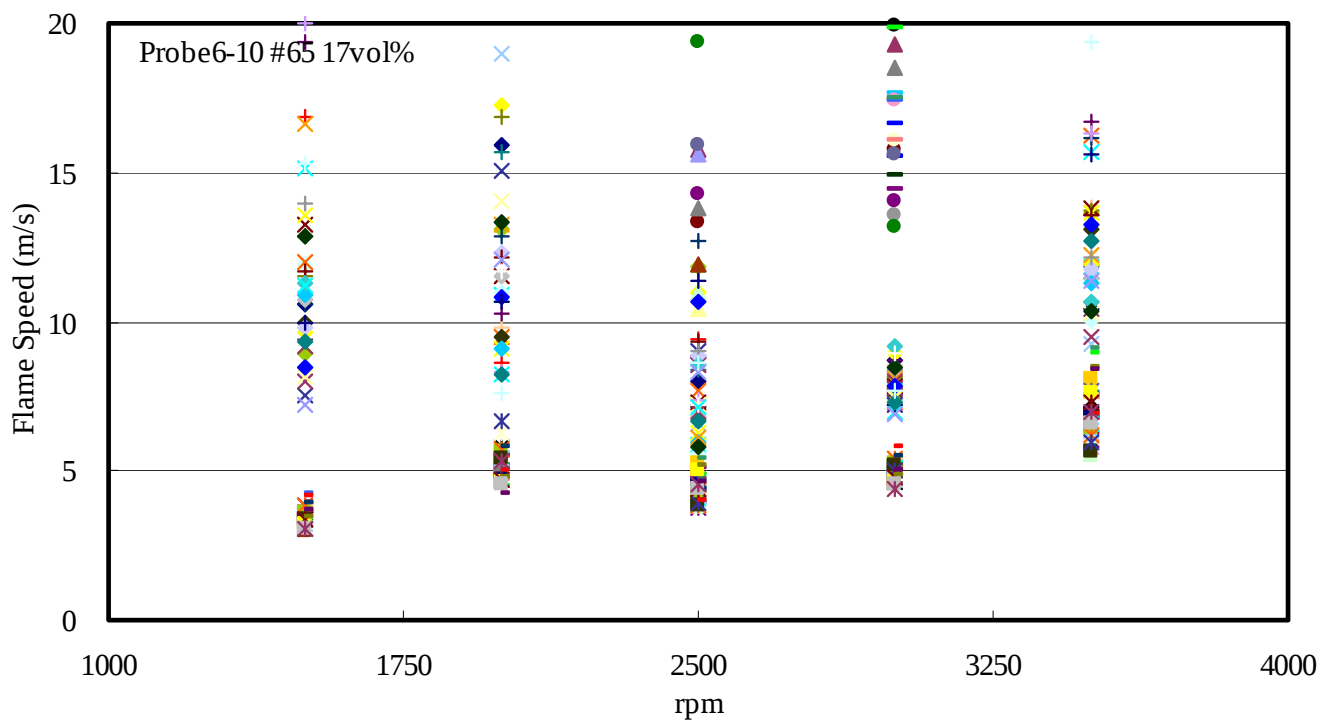


Fig.55 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

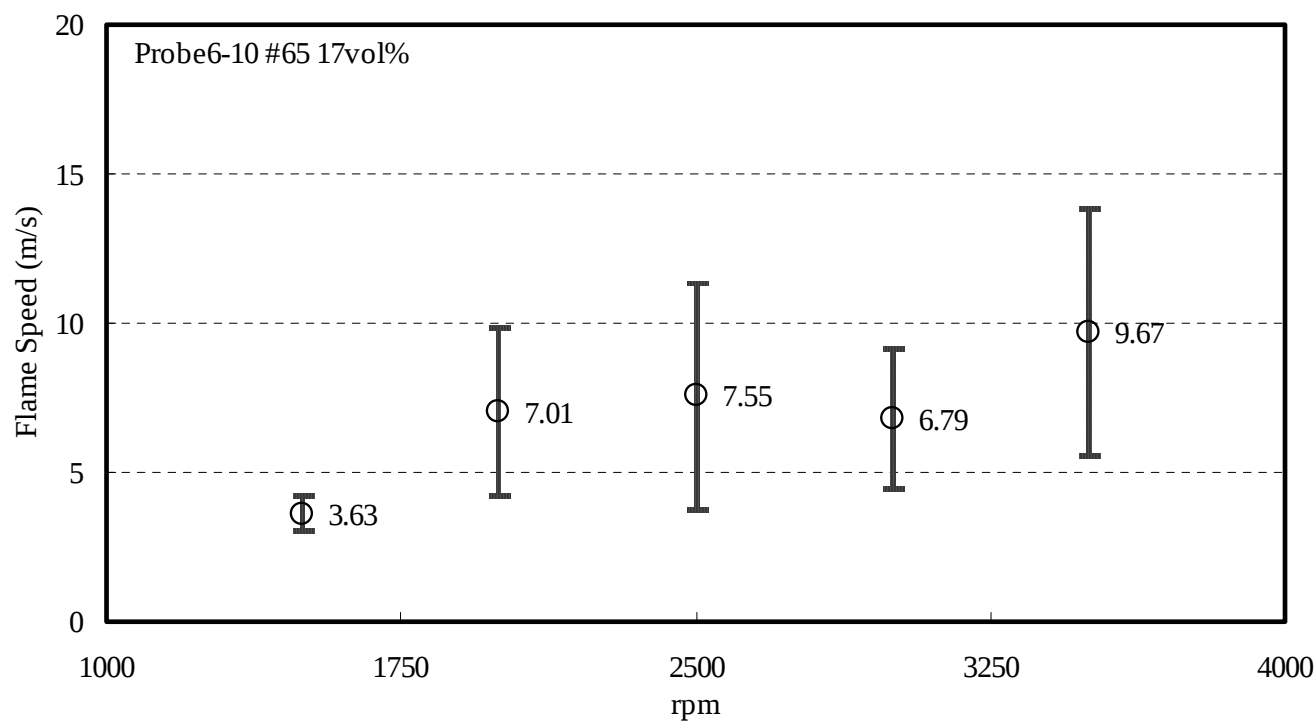


Fig.56 Flame Speed (Average, Data Range)

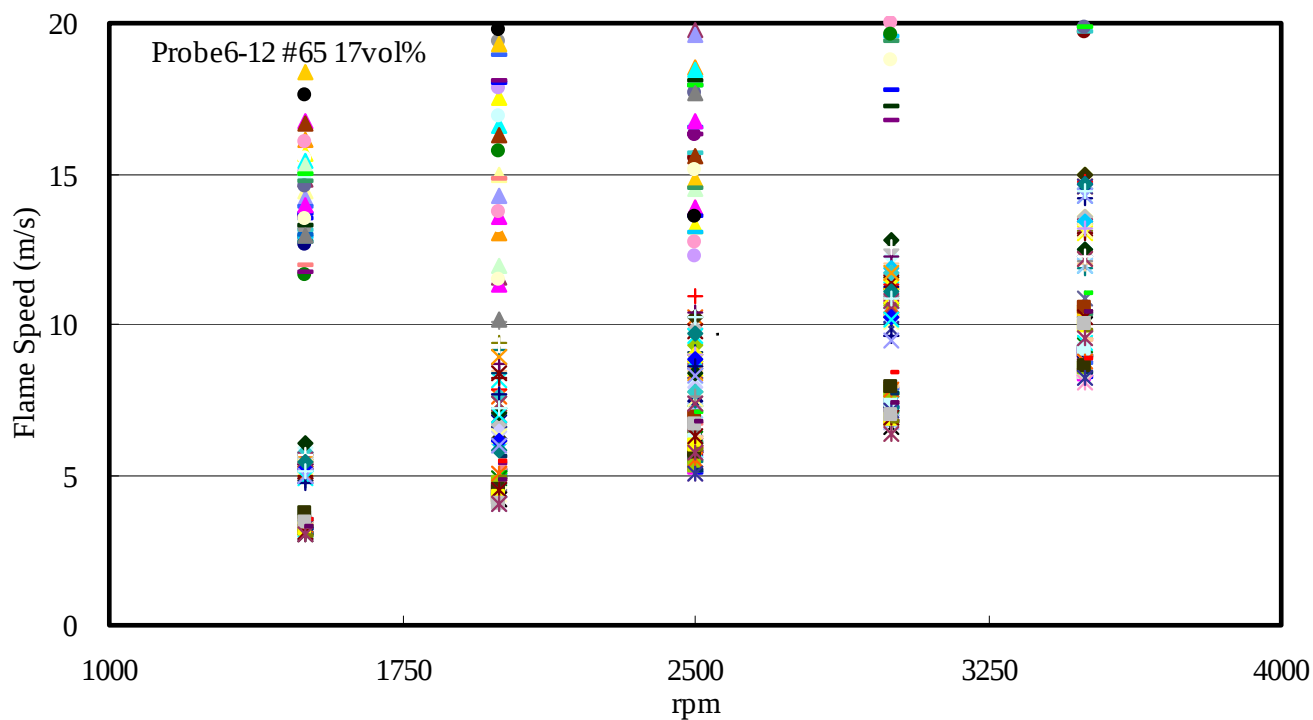


Fig.57 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

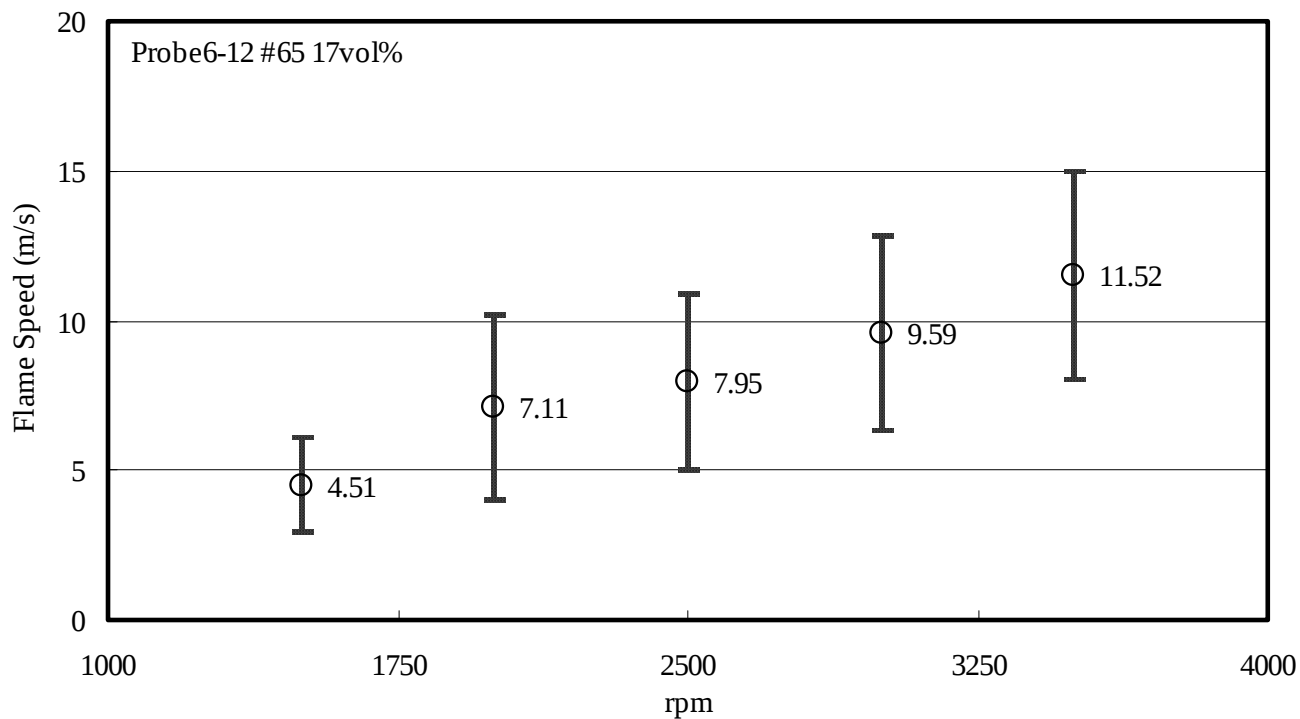


Fig.58 Flame Speed (Average, Data Range)

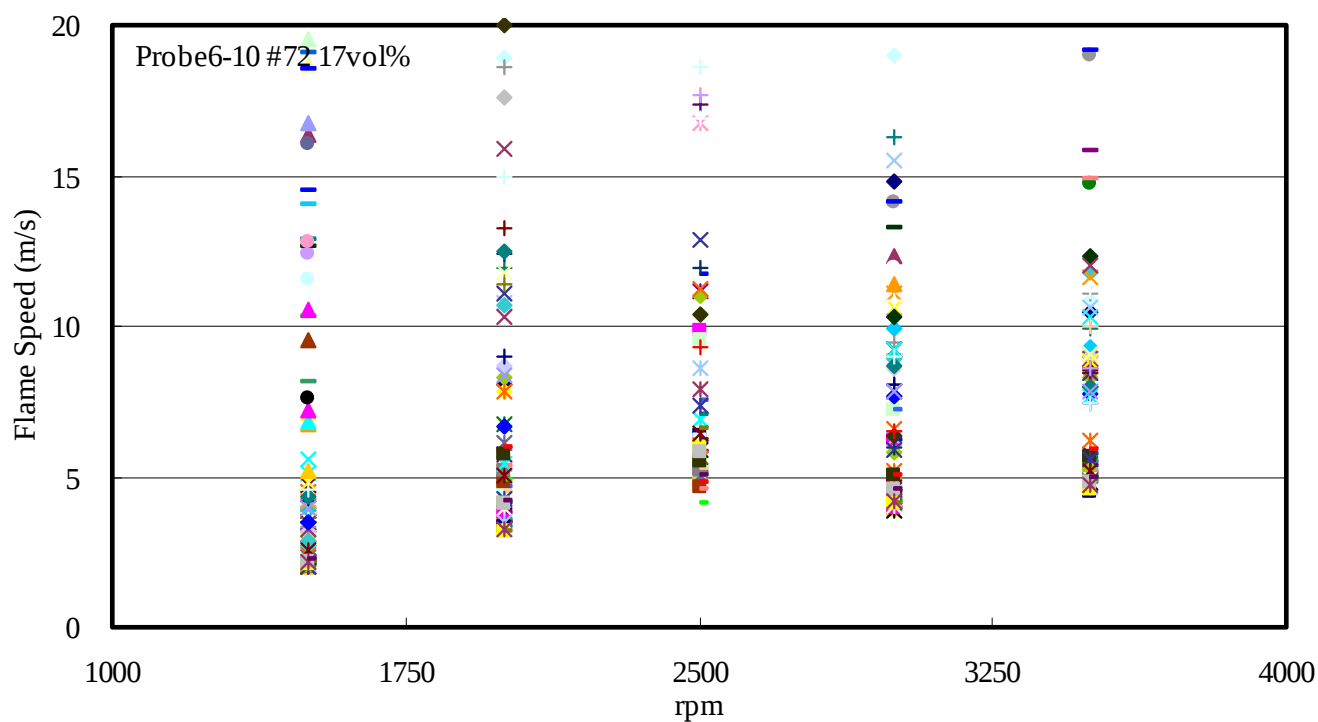


Fig.59 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

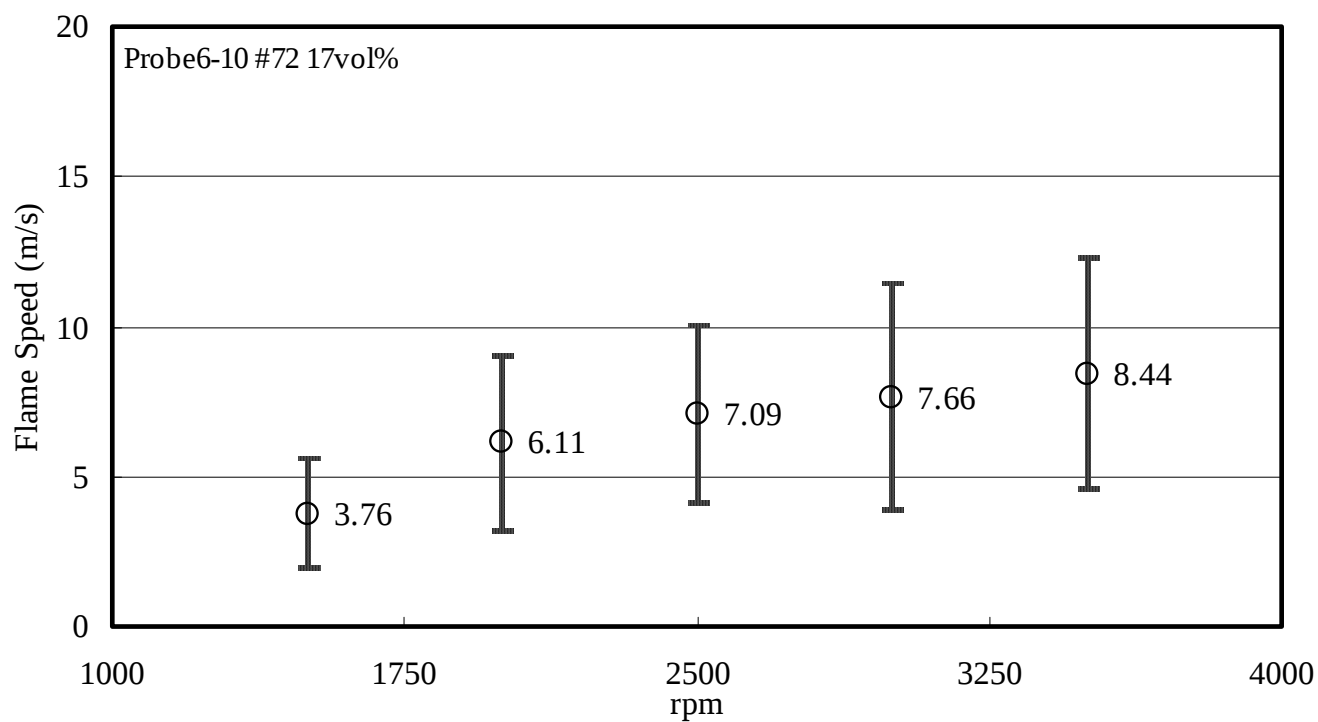


Fig.60 Flame Speed (Average, Data Range)

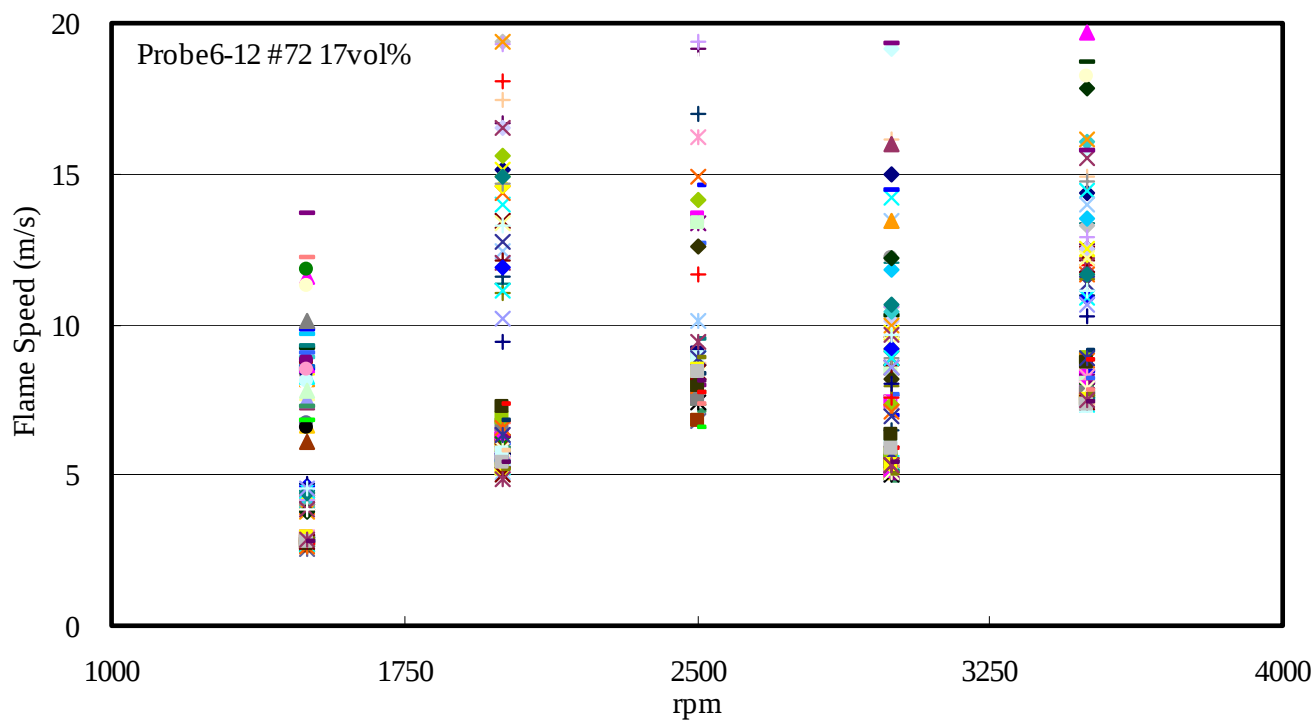


Fig.61 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

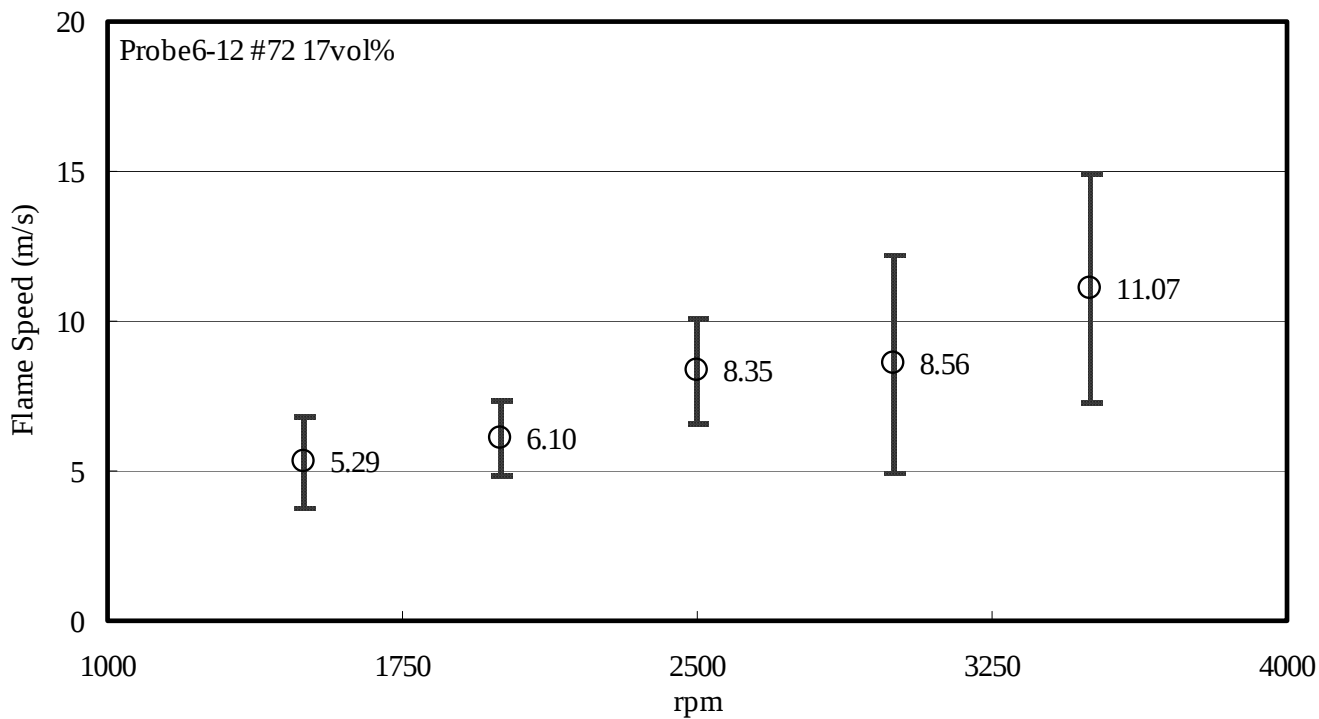


Fig.62 Flame Speed (Average, Data Range)

比較(吸入空気酸素濃度一定):

火炎伝ば速度の及ぼす燃料濃度の影響を検討するために、Fig.63～Fig.68 に本実験で得られた無負荷条件における、吸入空気酸素濃度一定(21vol.%,19vol.%,17vol.%)での機関回転数に対する火炎伝ば速度をメインジェット番数をパラメータとして示す。これらの図から明らかなように、吸入空気酸素濃度17vol.%(Fig.65, Fig.66)と21vol.%(Fig.61, Fig.62)または19vol.%(Fig.63, Fig.64)を比較すると、どのメインジェットを用いた場合においても、機関回転数の増大に対する火炎伝ば速度の増大割合は減少し、また、各回転数における燃料濃度(メインジェット番数)の影響に大きな差異は観察されない。これは、雰囲気酸素濃度の減少に伴って著しく火炎温度が低下したためと考えられる。また吸入空気酸素濃度19vol.%,17vol.%においては機関回転数の増大に伴い、メインジェット番数の火炎伝ば速度に及ぼす影響が燃焼室内の充てん効率の低下により顕著になっていることがわかる。¹¹⁾

以上のことから、低酸素濃度領域においては燃料濃度の影響は小さいことがわかる。

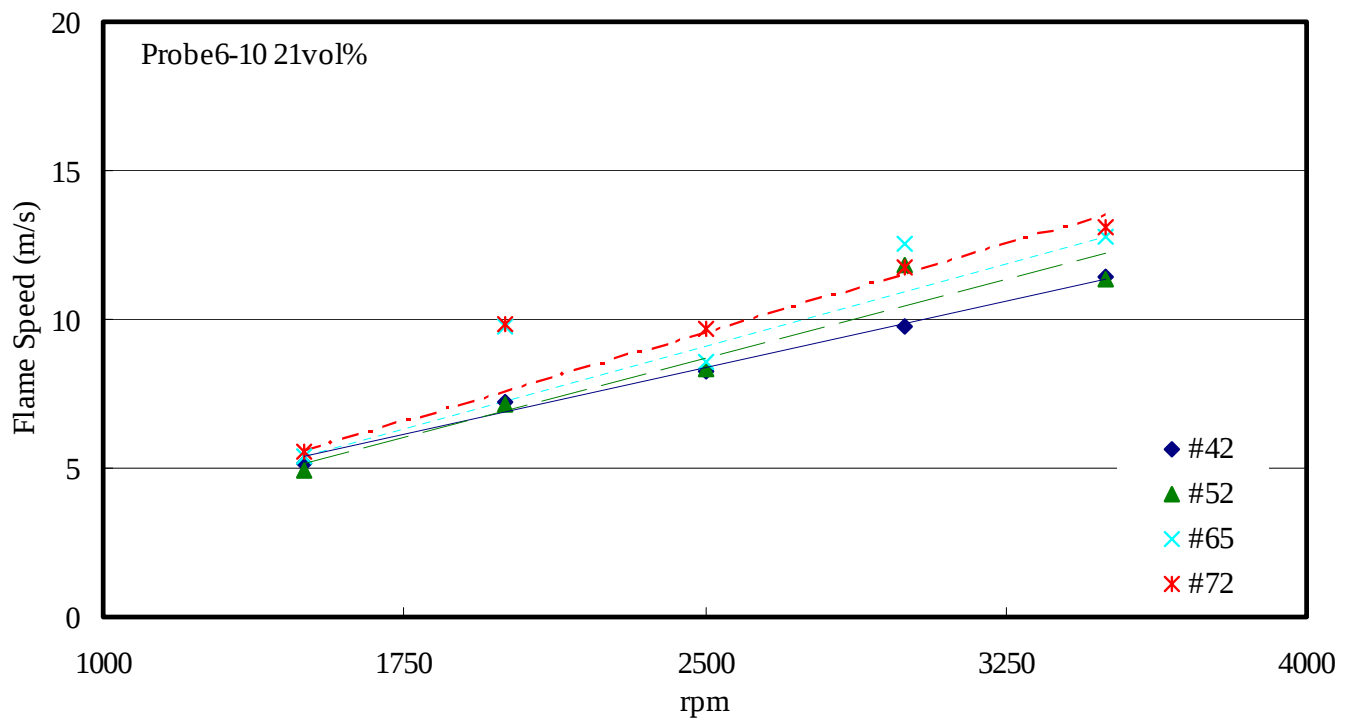


Fig.63 Flame Speed (Comparison)

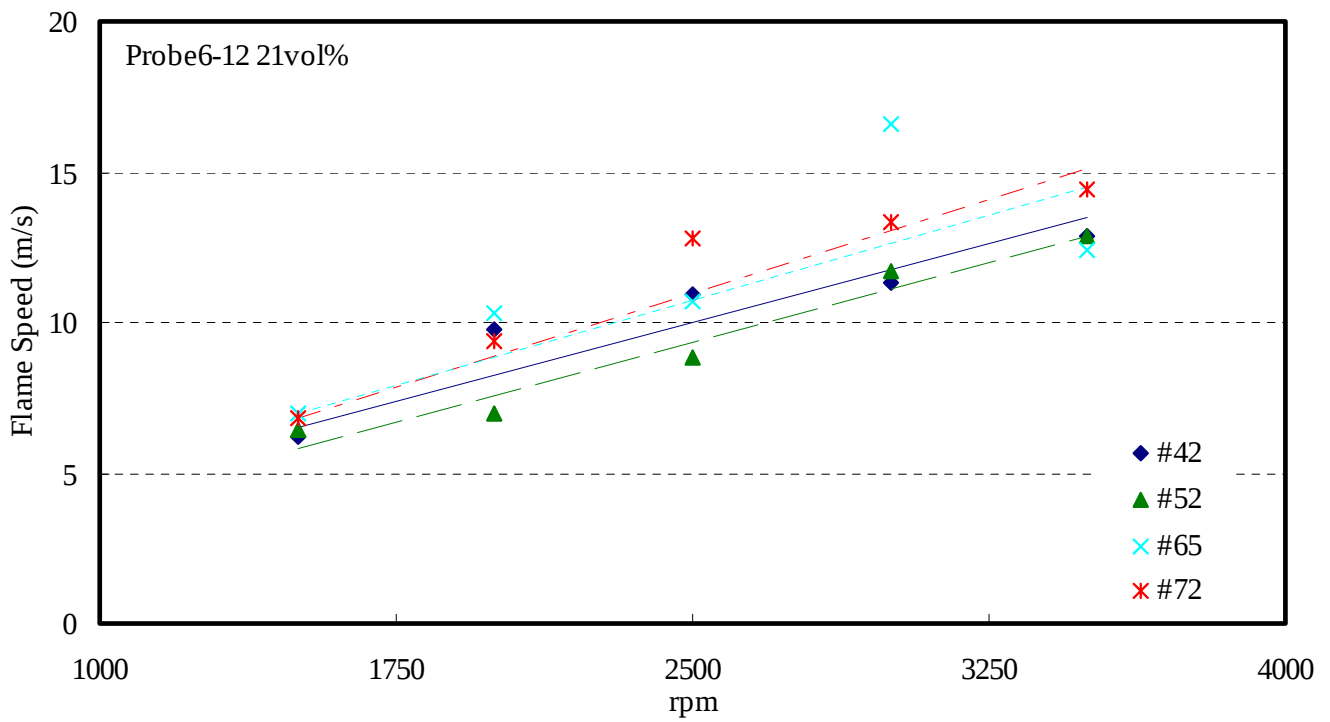


Fig.64 Flame Speed (Comparison)

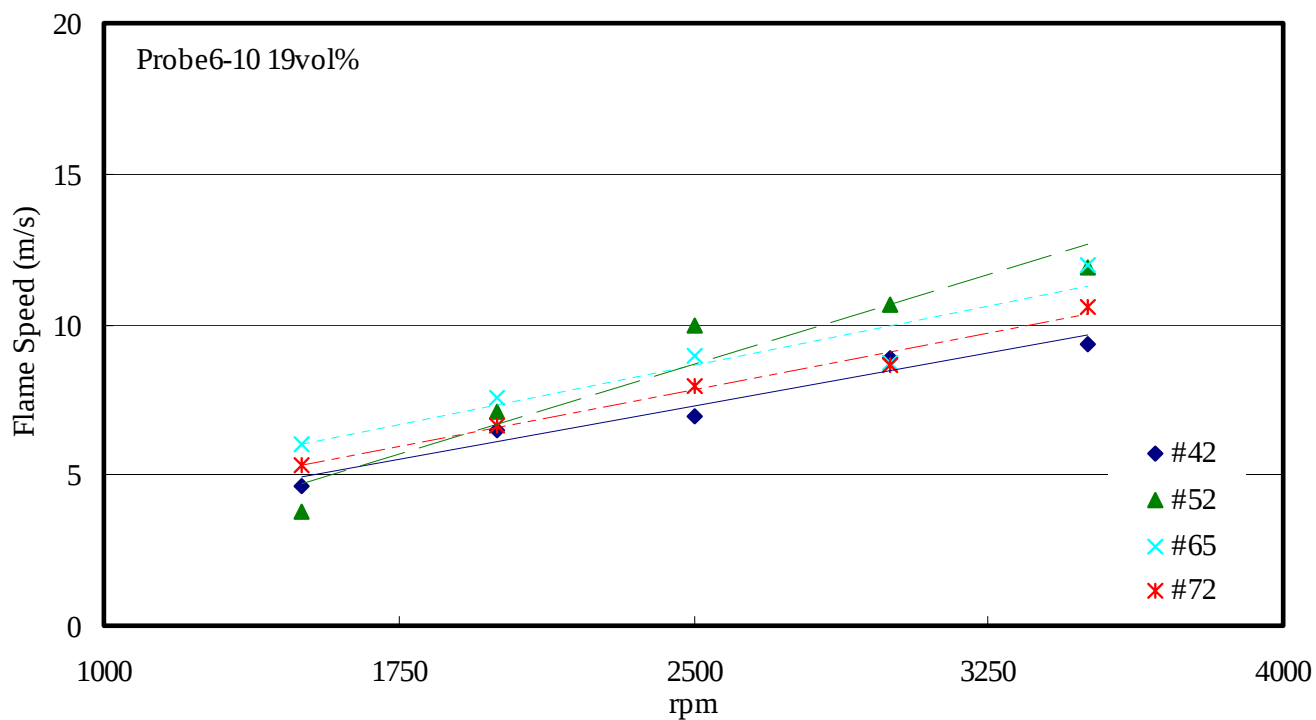


Fig.65 Flame Speed (Comparison)

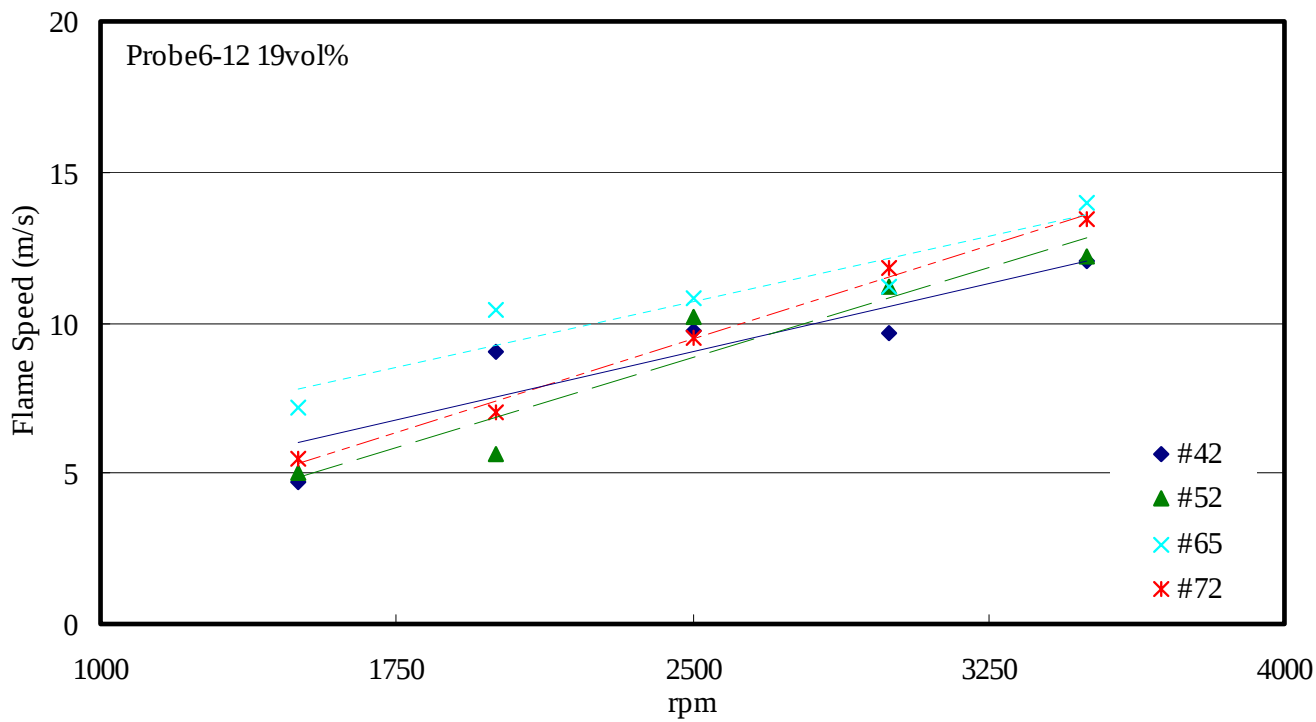


Fig.66 Flame Speed (Comparison)

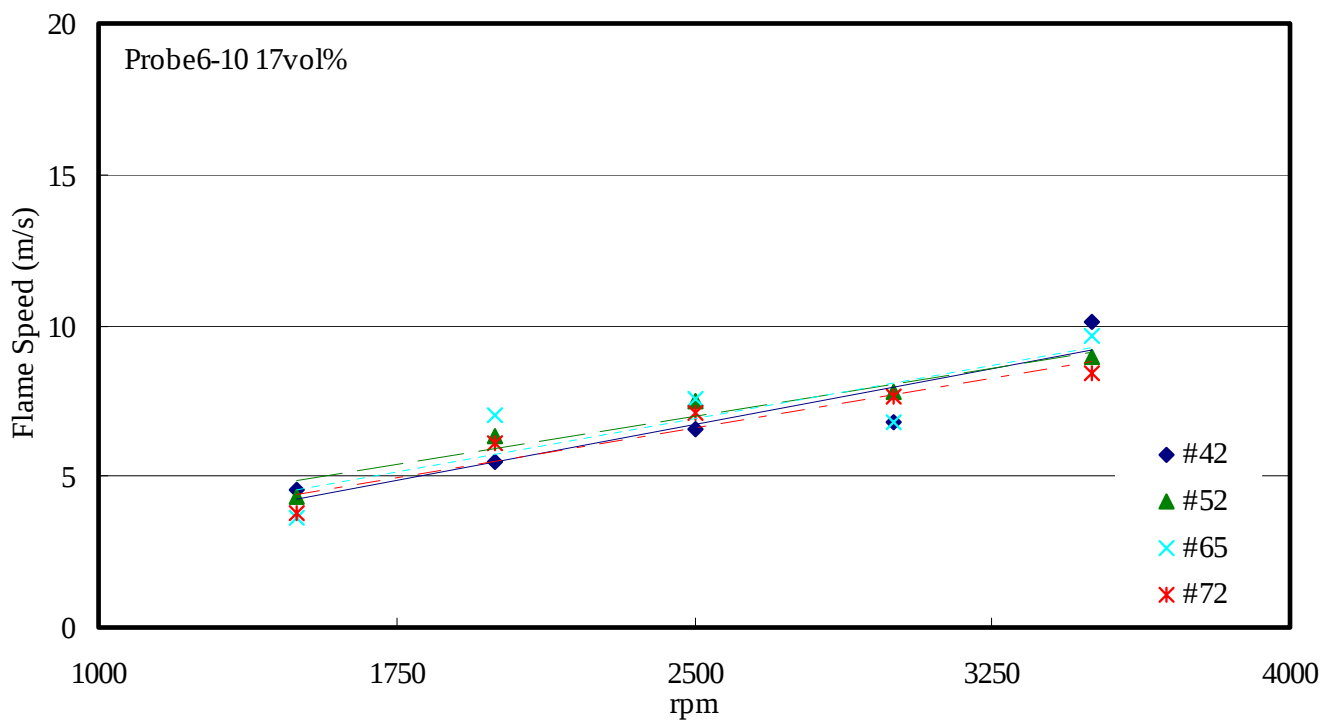


Fig.67 Flame Speed (Comparison)

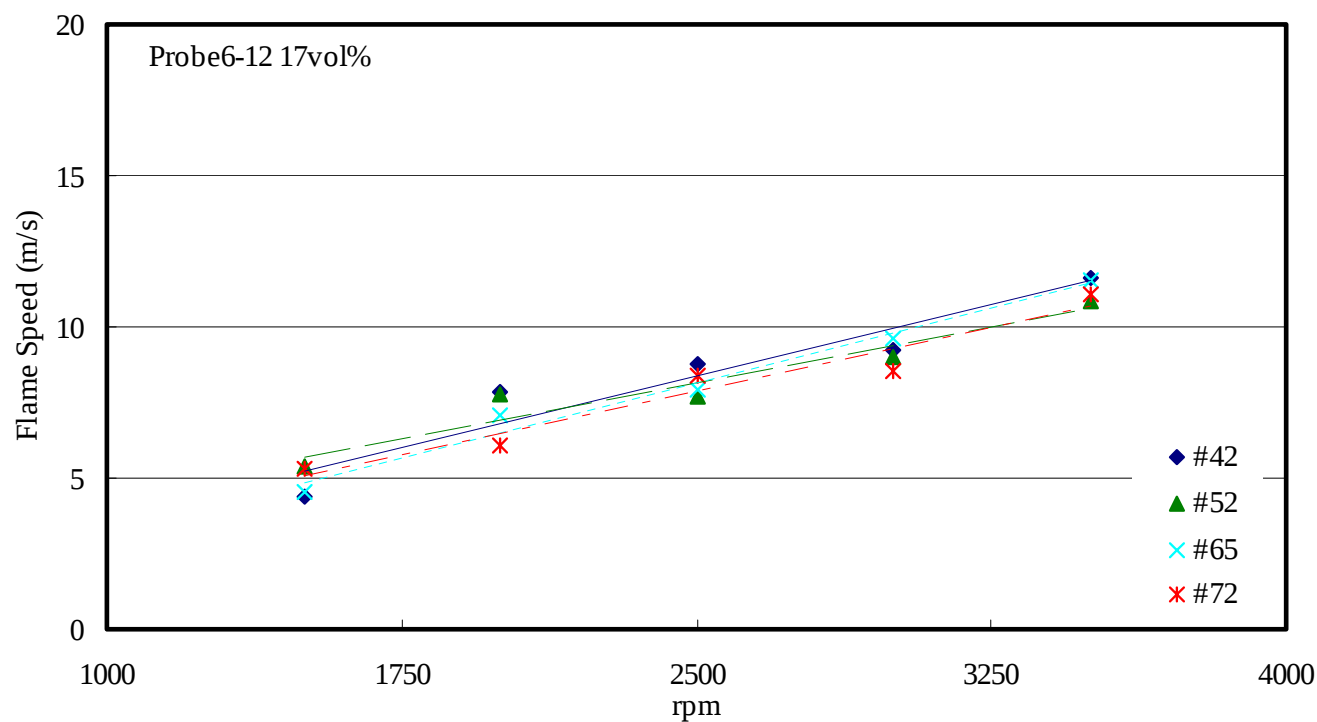


Fig.68 Flame Speed (Comparison)

比較(燃料濃度一定):

火炎伝ば速度の及ぼす吸入空気酸素濃度の影響を検討するために、Fig.69 ~ Fig.76 に燃料濃度一定(#42, #52, #65, #72)の場合の各回転数での吸入空気酸素濃度の影響を検討するために、無負荷状態における機関回転数に対する火炎伝ば速度を、吸入空気酸素濃度をパラメータとして示す。これらの図から明らかなように、過濃燃料濃度領域(メインジェット番数#72)での各回転数における火炎伝ば速度は若干変動は観察されるものの、吸入空気酸素濃度の増大に伴って増加しており、火炎温度の影響を示した結果となっている。また、どの吸入空気酸素濃度においても機関回転数の増大に伴って火炎伝ば速度は増加している。さらに吸入空気酸素濃度の火炎伝ば速度に及ぼす影響は高回転領域ほど増大している。すなわち、小型ガソリン機関においても、ある程度の機関回転数の維持が可能であれば、吸入空気酸素濃度による燃焼制御が可能であることが示唆される。また、希薄燃料濃度領域(メインジェット番数#42)においても吸入空気酸素濃度を 17vol.%程度まで減少させた場合には、吸入空気酸素濃度 21vol.%の場合と比較して 30%程度の火炎伝ば速度の減少が観察された。

以上のことから、比較(吸入空気酸素濃度一定)の考察と併せて検討すると、機関回転数に対する火炎伝ば速度の増大割合は、低燃料濃度化への移行に伴って減少する。よって、火炎伝ば速度に及ぼす影響は、燃料濃度よりも吸入空気酸素濃度の方が大きいことがわかる。

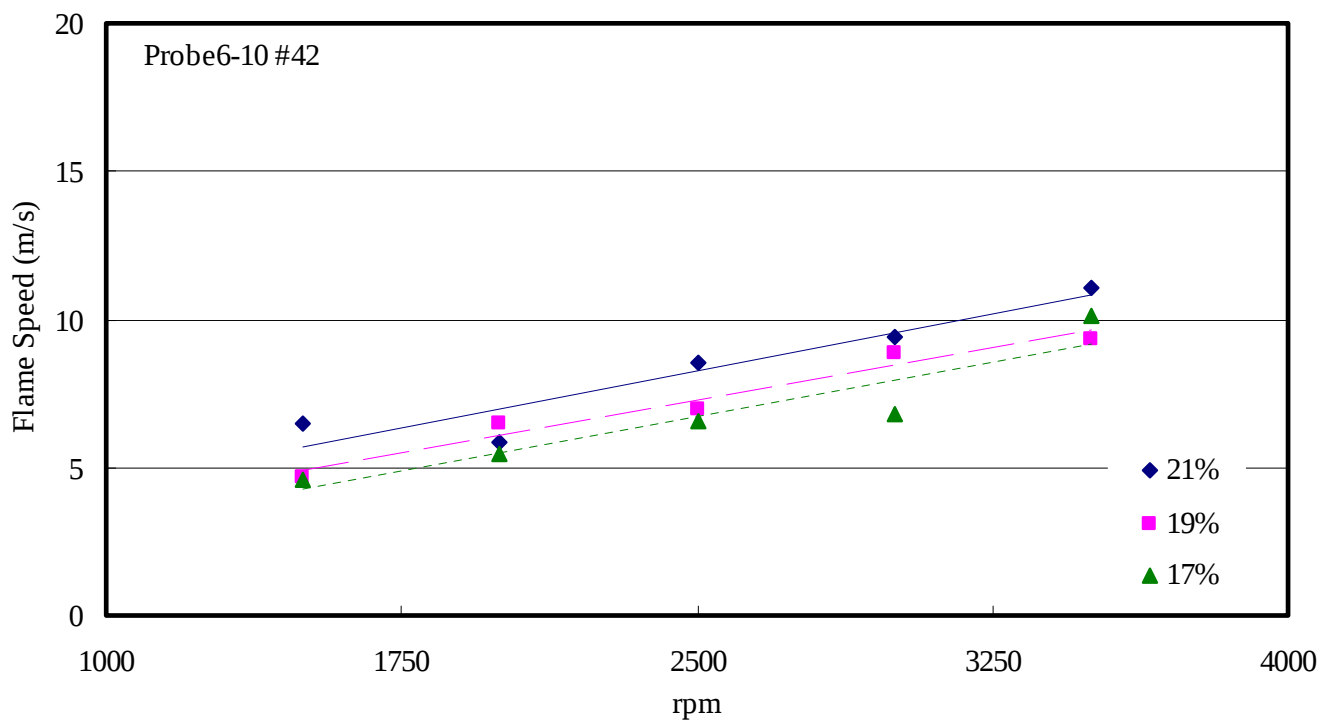


Fig.69 Flame Speed (Comparison)

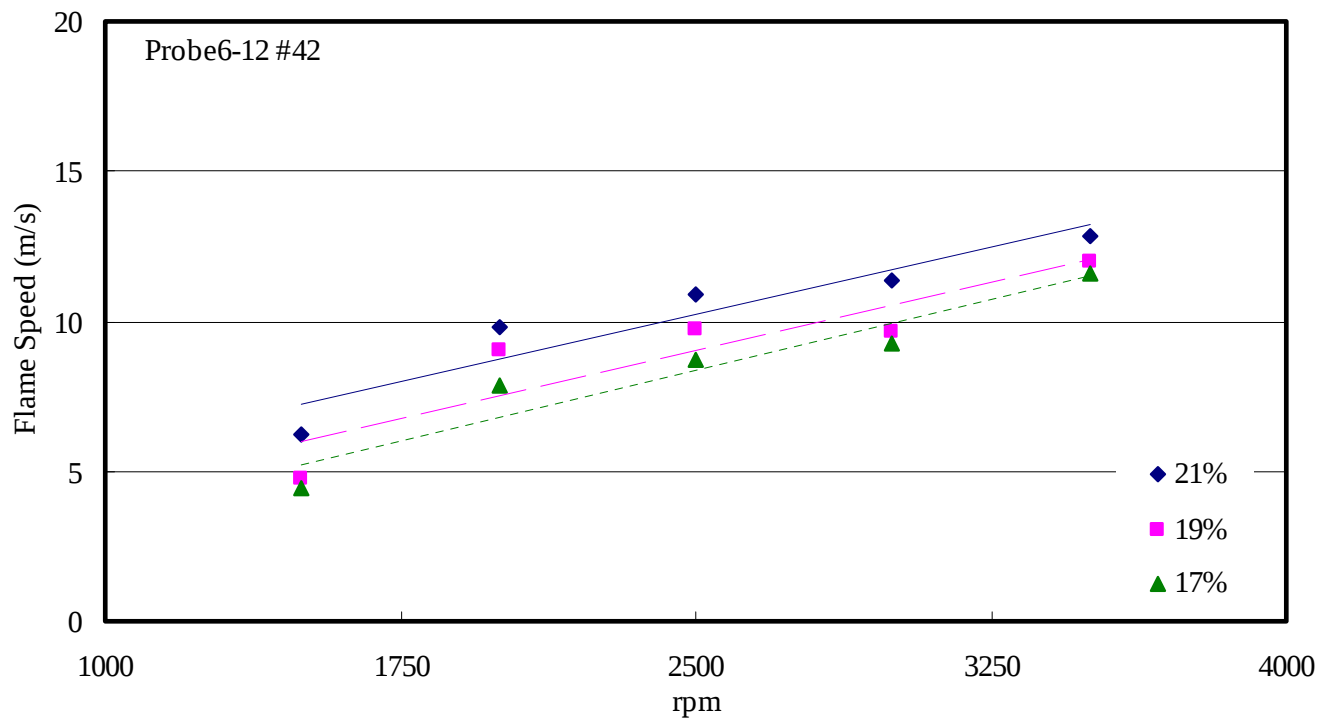


Fig.70 Flame Speed (Comparison)

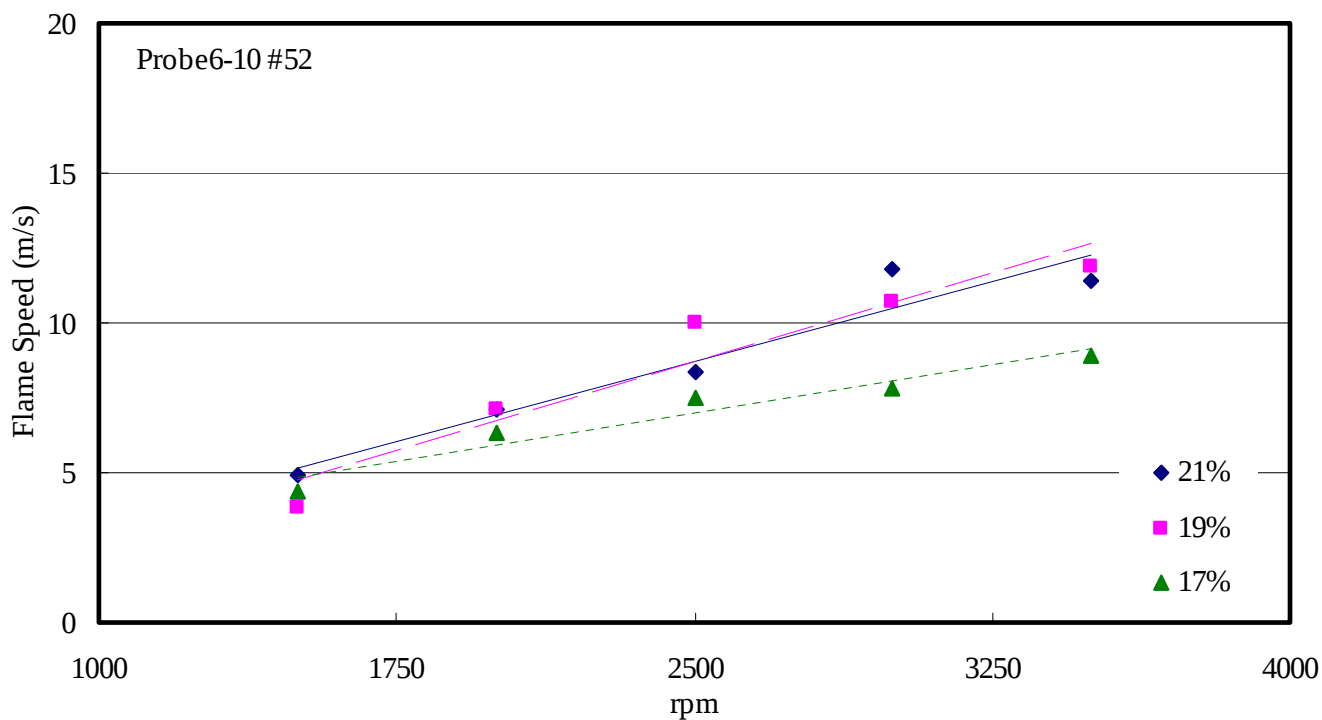


Fig.71 Flame Speed (Comparison)

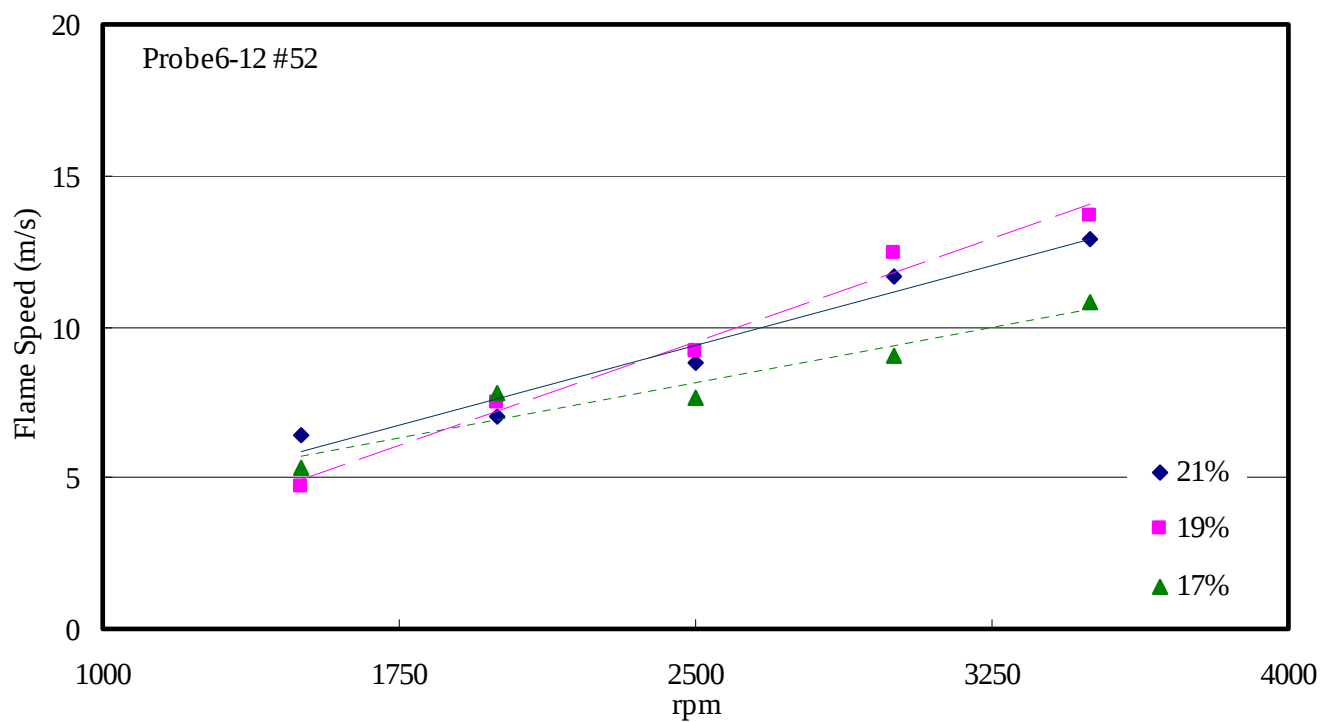


Fig.72 Flame Speed (Comparison)

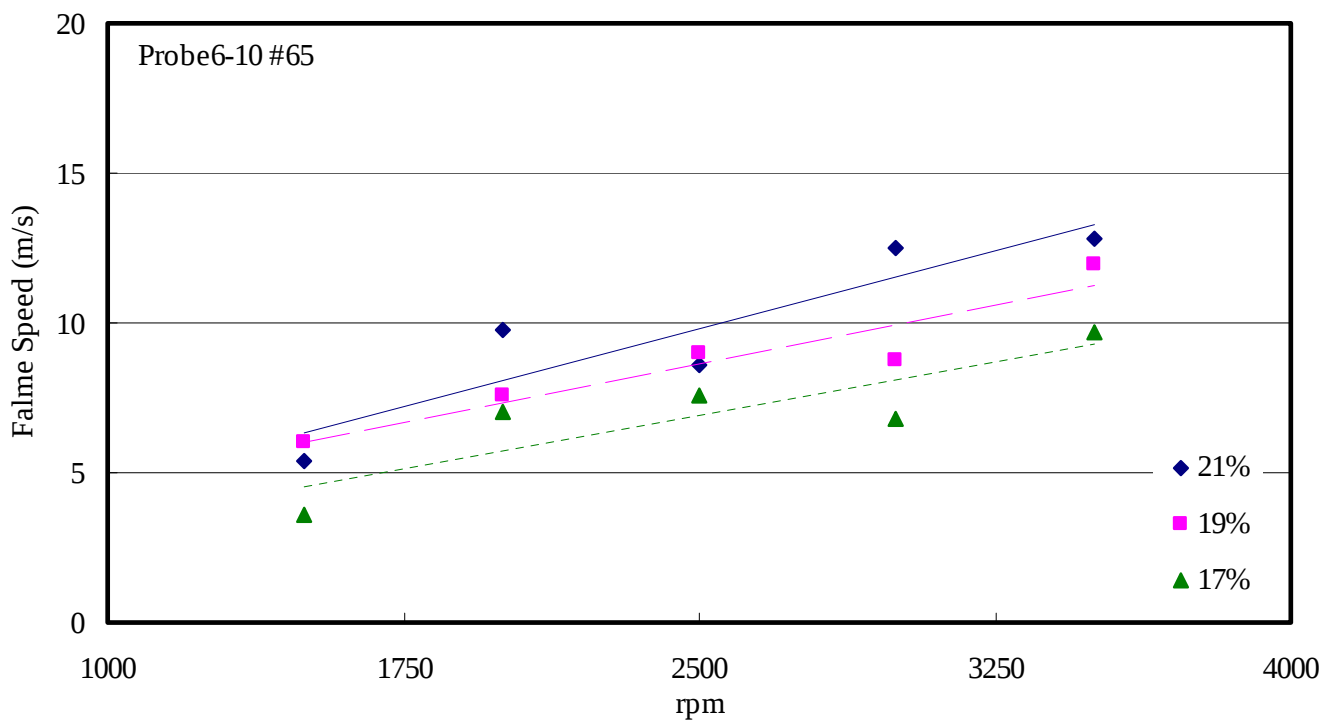


Fig.73 Flame Speed (Comparison)

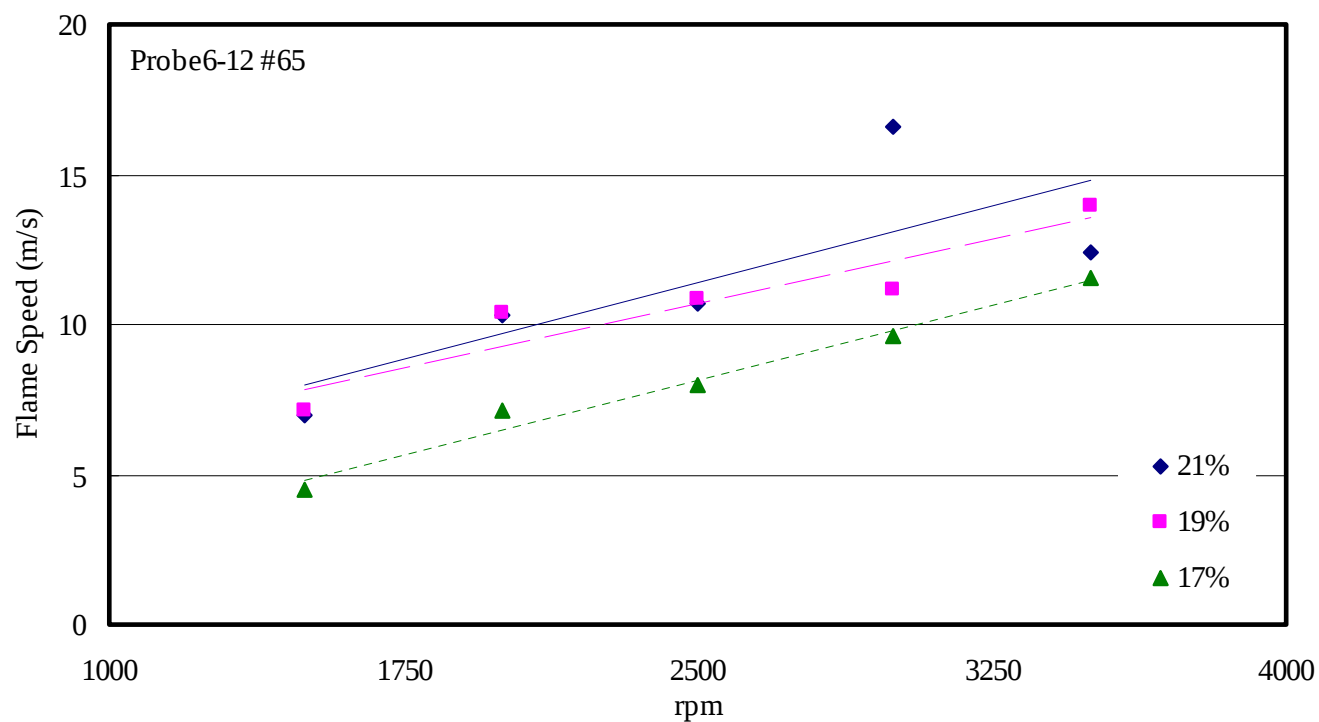


Fig.74 Flame Speed (Comparison)

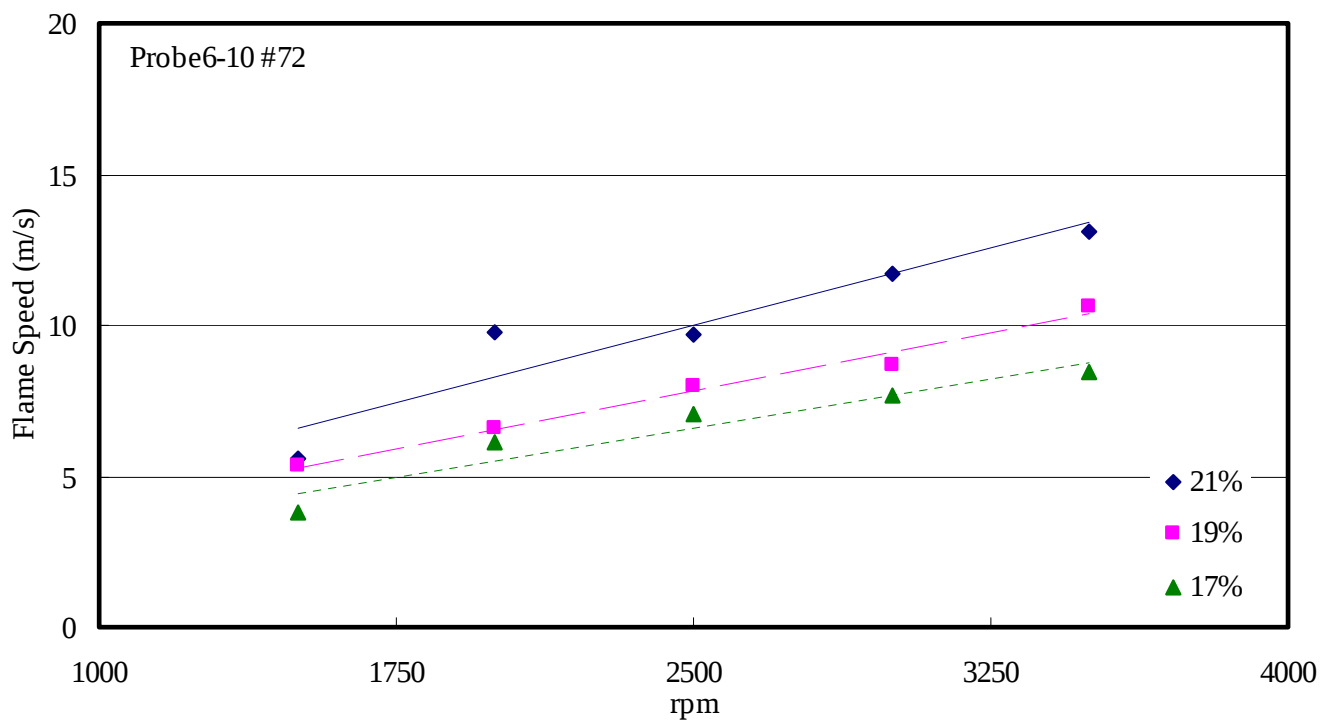


Fig.75 Flame Speed (Comparison)

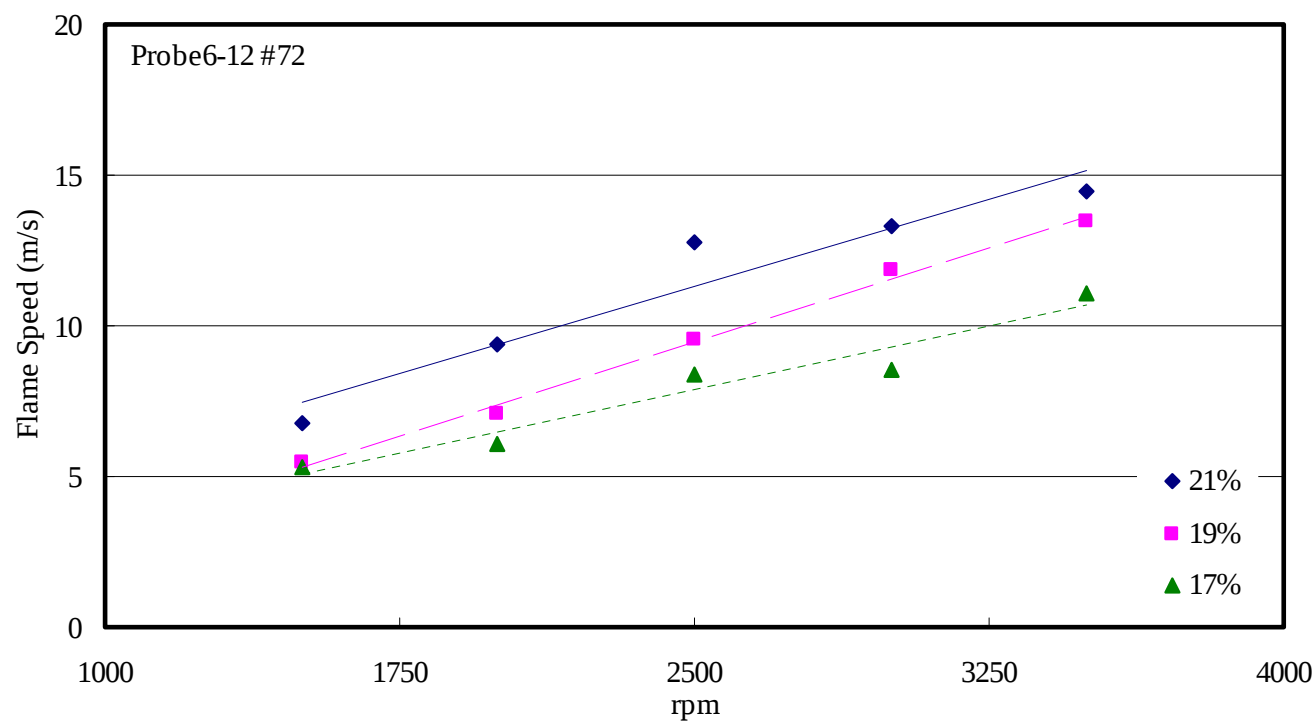


Fig.76 Flame Speed (Comparison)

3-1-2 減少割合

Fig.77(Probe6-10を使用)、Fig.78(Probe6-12を使用)に同一機関回転数での火炎伝ば速度の減少割合に及ぼす燃料濃度の影響を検討するために、吸入空気酸素濃度に対する火炎伝ば速度比を代表機関回転数と燃料濃度をパラメータとして示す。ここでの代表回転数としては機関アイドリング(1500r.p.m)及び実走行回転数域(3500r.p.m)とした。また、火炎伝ば減少率は同一回転数の各雰囲気酸素濃度での火炎伝ば速度を雰囲気酸素濃度 21vol.%の場合の火炎伝ば速度で除した値と定義した。この図から明らかなように、本実験範囲内ではアイドリング状態では、雰囲気酸素濃度の減少に伴う火炎伝ば速度の減少割合は希薄燃焼(メインジェット#42)の場合の方が、理論量論付近で燃焼させた場合(メインジェット#72)よりも大きくなっている。一方、実走行回転領域においては、理論量論付近で燃焼させた場合の方が、その減少割合は増大している。ここで実走行回転領域における火炎伝ば速度の減少割合は雰囲気酸素濃度 19vol.%においては 30%以下であり、十分実走行可能な火炎伝ば速度が得られている。これは当然、アイドリング状態では吸気圧力の影響により新気がどの機関回転数においても十分供給されず、また、実走行回転領域においては吸入空気圧力の減少により、希薄燃焼領域では酸素濃度の火炎伝ば速度に及ぼす影響が低下したためと考えられる。

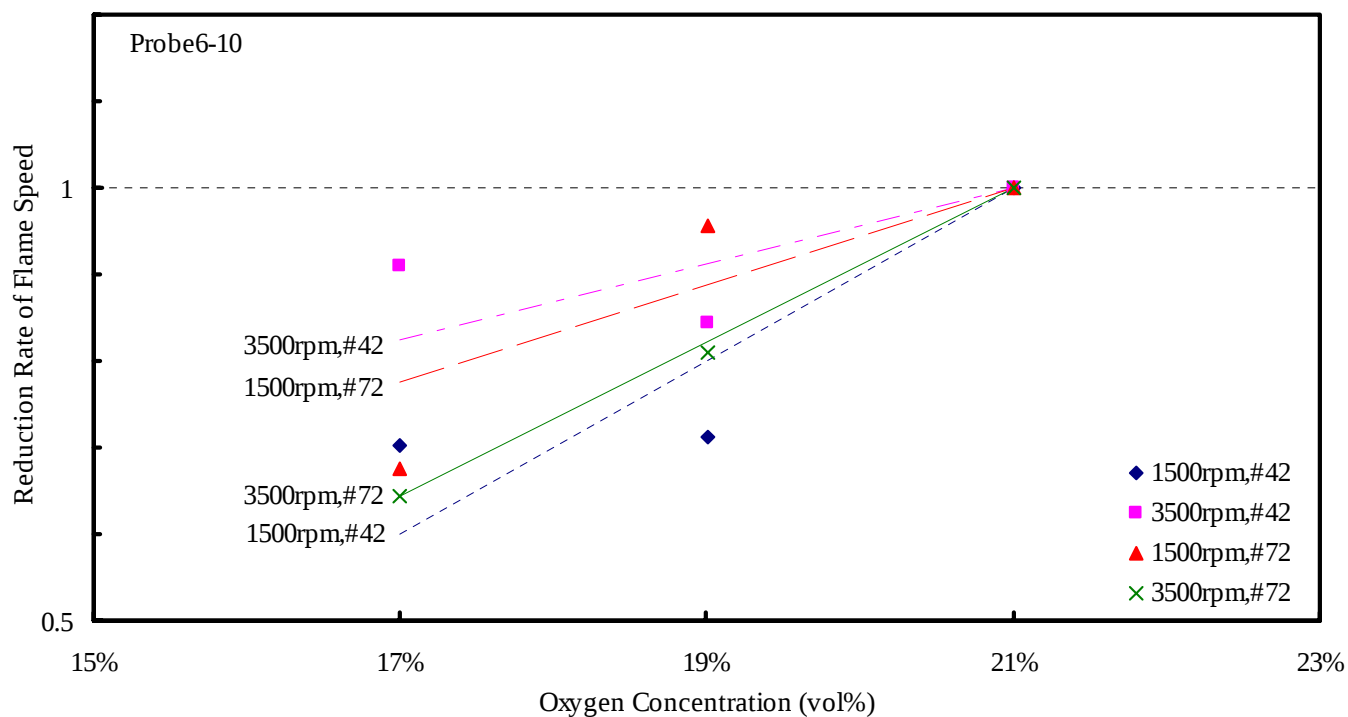


Fig.77 Reduction Rate of Flame Speed

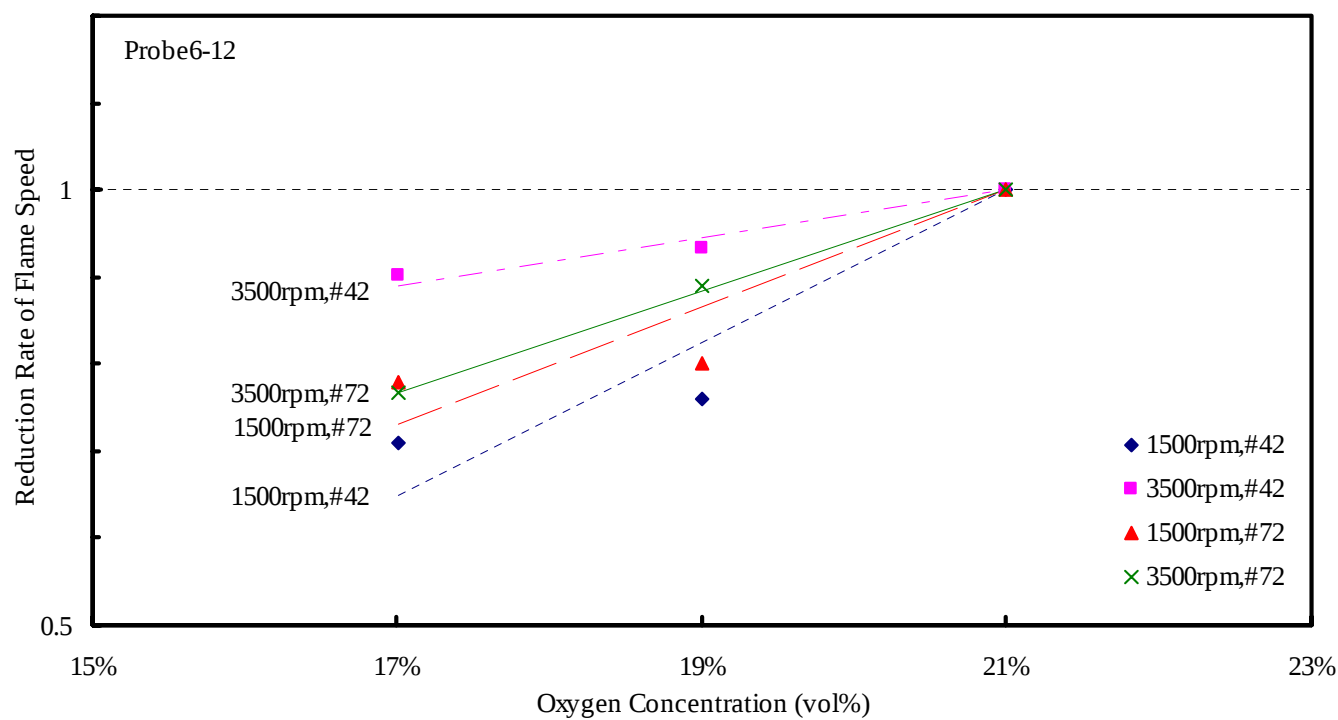


Fig.78 Reduction Rate of Flame Speed

3-1-3 動力計負荷

通常酸素濃度状態:

Fig.79 ~ Fig.110 に本実験で得られた各メインジェット番数(#42,#72)を用いた場合の吸入空気酸素濃度 21vol.%における、無負荷(0Nm)または部分負荷(0.78Nm,1.30Nm,1.82Nm)条件での機関回転数に対する火炎伝ば速度を示す。本実験での動力計負荷は、小型ガソリン機関(50cc)の作動範囲と動力計の制限から0 ~ 1.82Nm の範囲とした。また、本実験範囲内では動力計負荷をかけることにより、低回転域では回転数を維持することが困難であったため、2750 ~ 3500r.p.m の範囲で実験を行った。

これらの図から明らかなように、どの機関回転数においても、機関負荷を加えることにより変動割合は増加し、また、同一機関回転数において、無負荷状態の場合よりも、得られた火炎伝ば速度は増加している。これは機関負荷を加えた場合には、絞り弁開度が無負荷状態よりも増加し、それにより、機関内で得られている空燃比が理論空燃比側に移行したためと考えられ、本実験での予備実験で得られている吸入空気圧力の結果と一致する。PROBE6-10とPROBE6-12を全体的に比較すると、PROBE6-12の方が火炎伝ば速度の測定範囲が安定している傾向が観察された。これは、機関に部分負荷をかけることにより、絞り弁開度が増加し、それによって燃焼室に吸入される混合気の乱れが増大されたため、点火源付近の火炎伝ばの不安定さに拍車をかけるためである。そのため、点火源からより離れた場所で測定されたPROBE6-12の方が、火炎伝ば速度の測定範囲が安定している傾向が得られた。

今回、測定範囲が機関回転数 2750 ~ 3500r.p.m、動力計負荷条件 0 ~ 1.82Nm といった狭い範囲であったため、メインジェット番数や部分負荷の違いによる、燃焼室内の空燃比の顕著な影響は観察されなかった。これはキャブレターの構造上、今回の研究範囲では大きな差異が生じないためである。

#72 21vol.% 0Nm

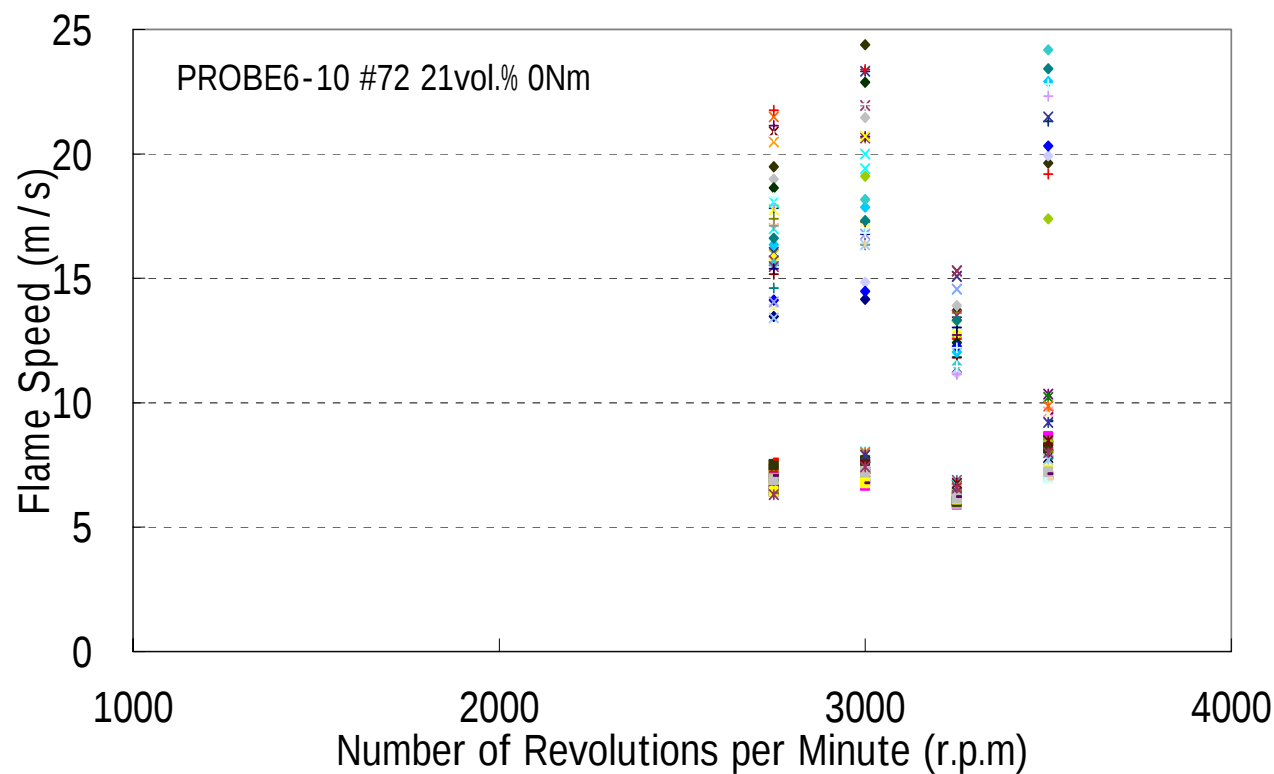


Fig.79 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

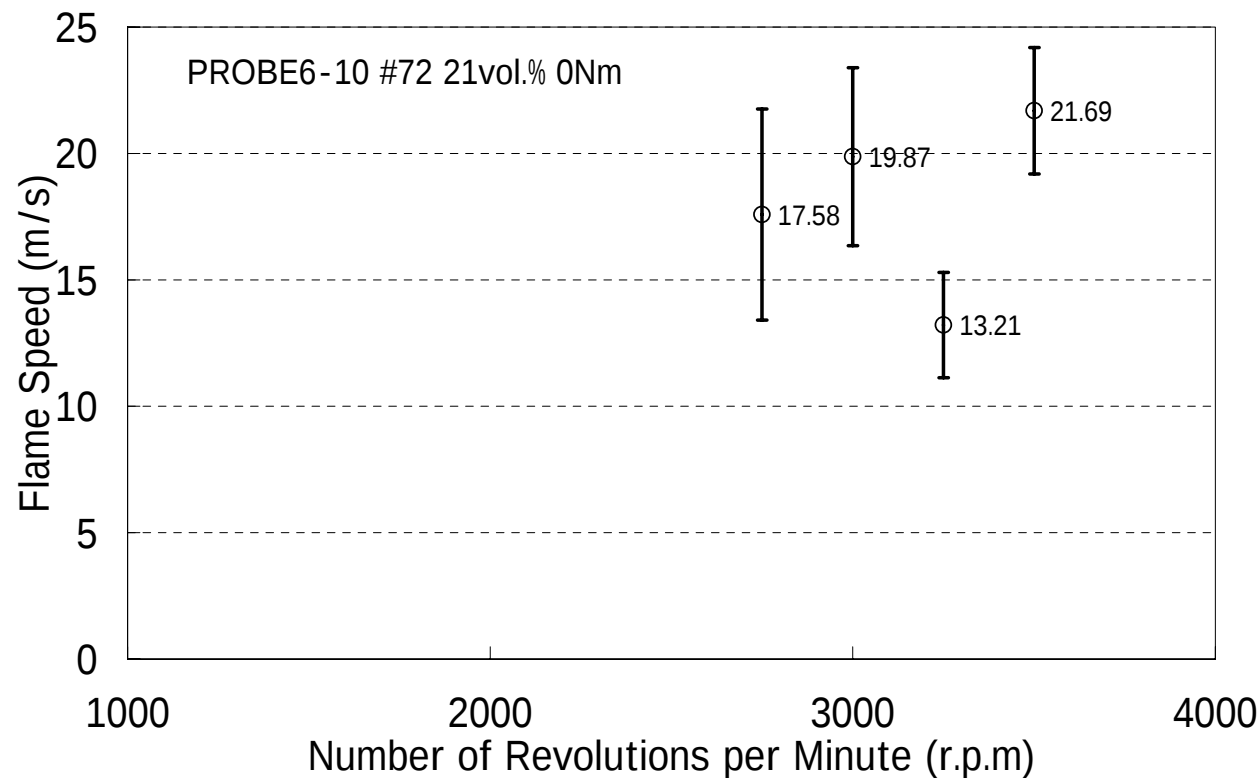


Fig.80 Flame Speed (Average, Data Range)

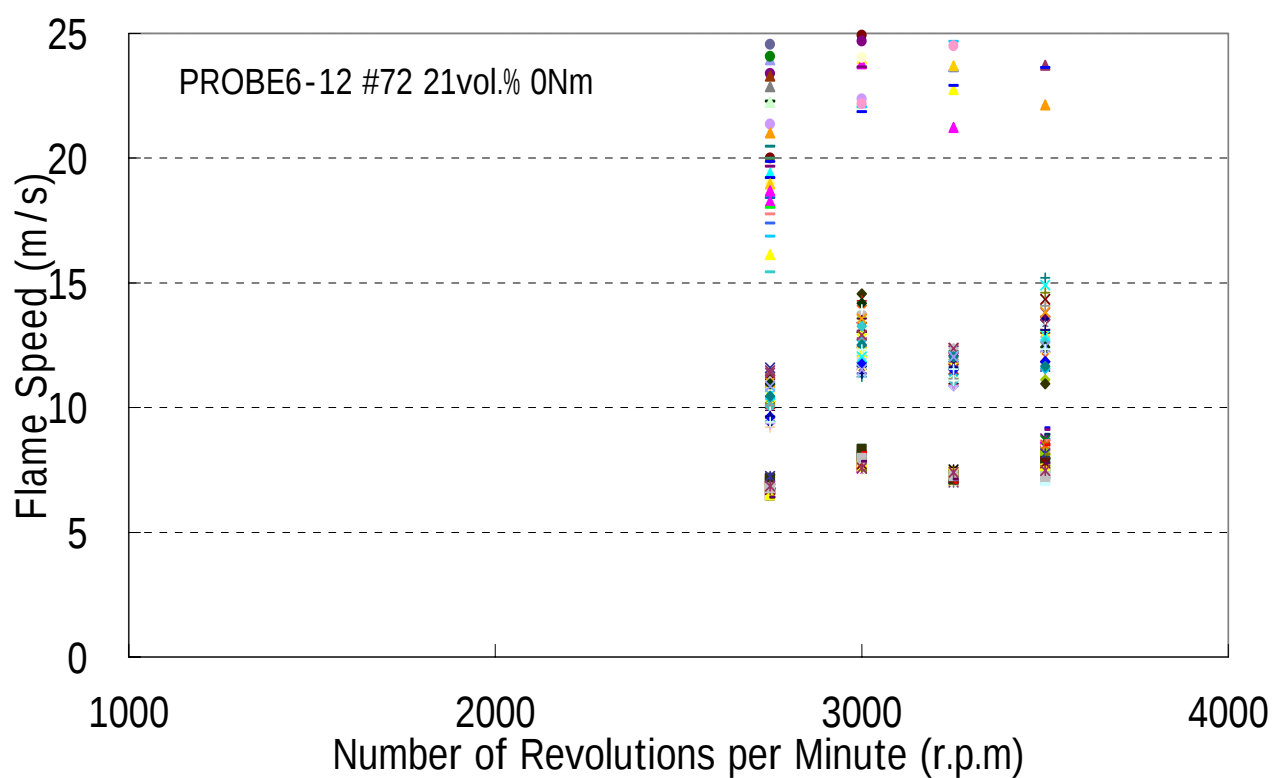


Fig.81 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

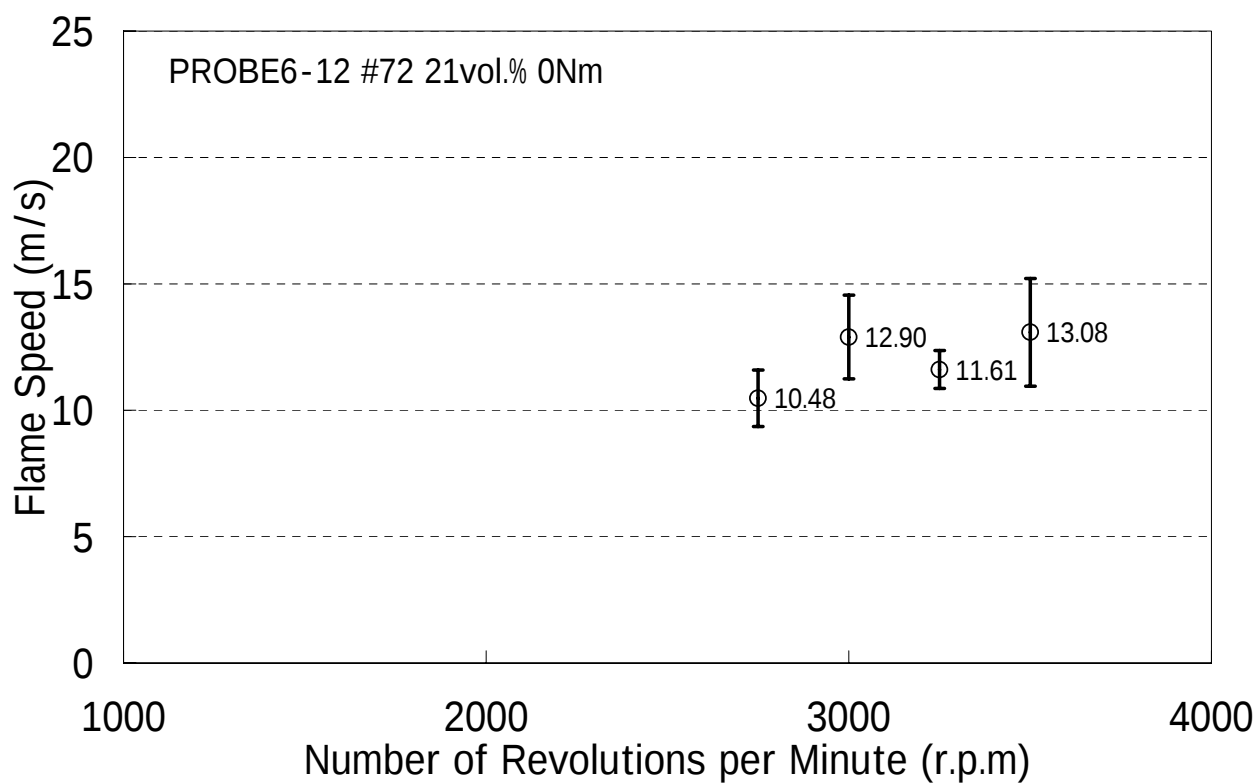


Fig.82 Flame Speed (Average, Data Range)

#72 21vol.% 0.78Nm

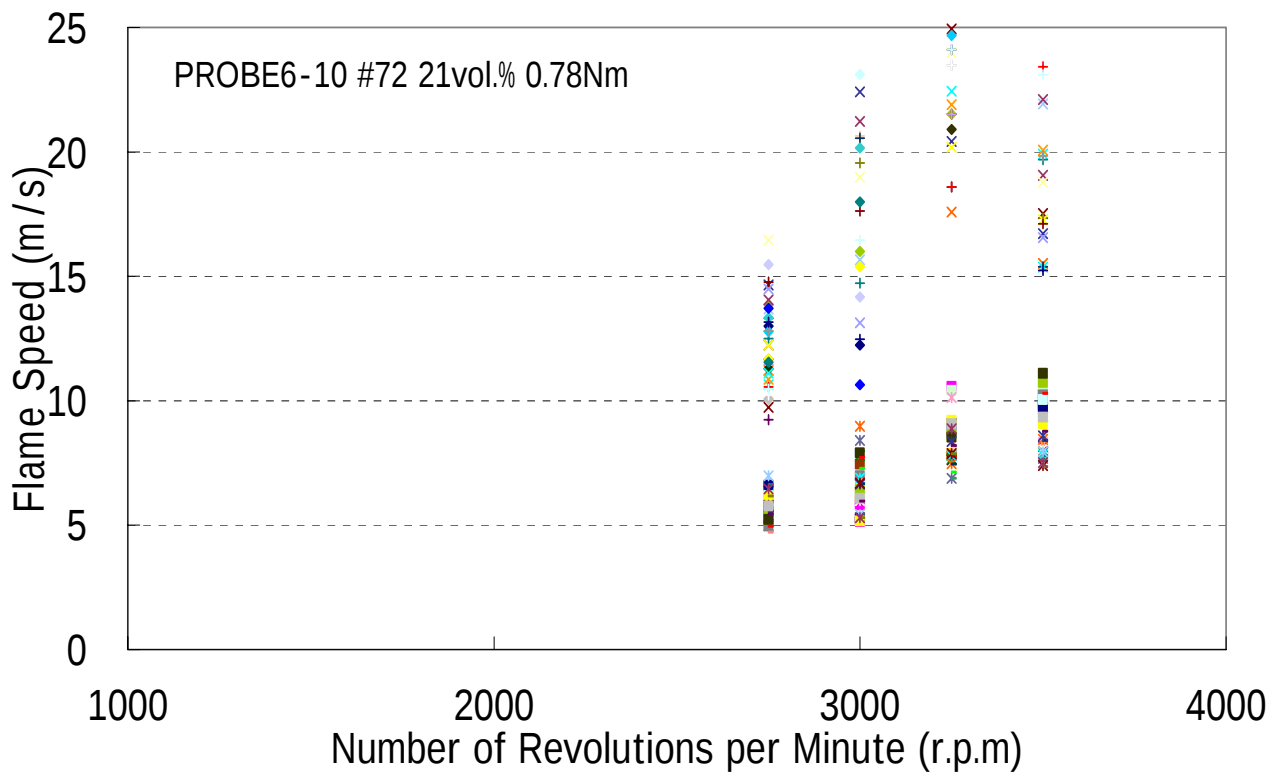


Fig.83 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

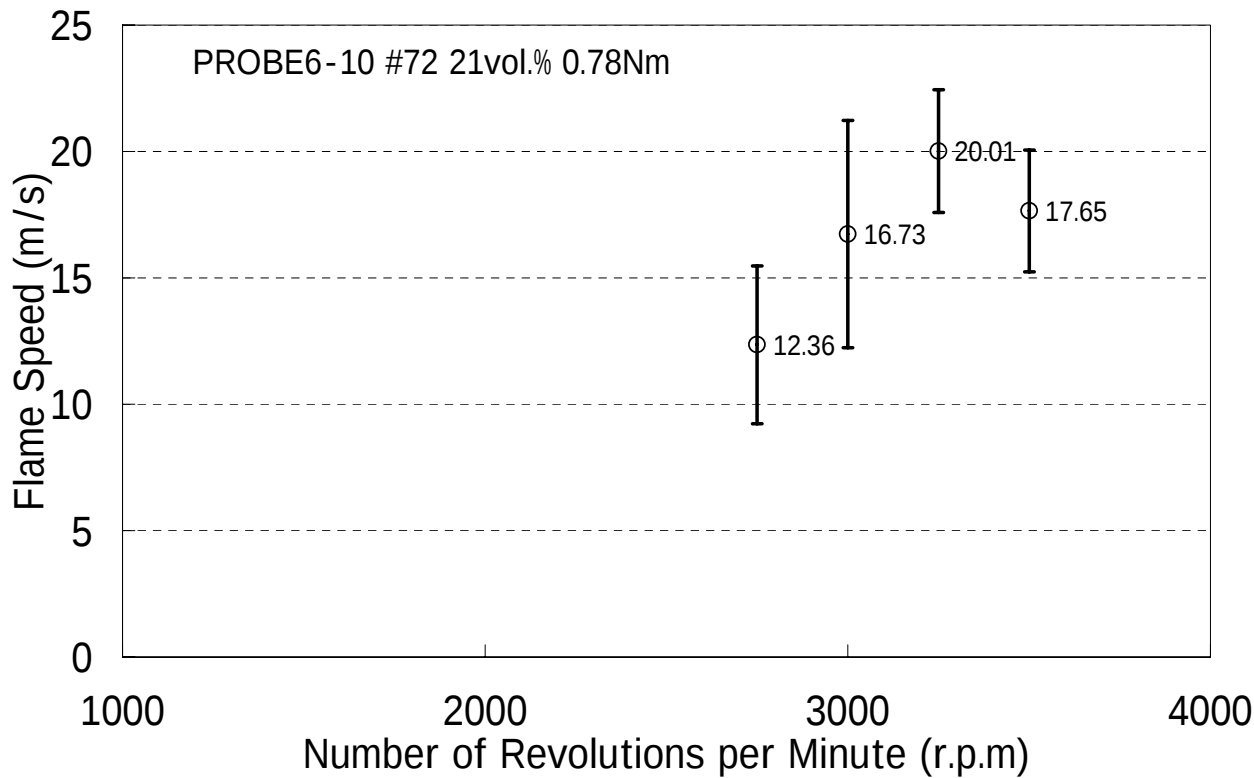


Fig.84 Flame Speed (Average, Data Range)

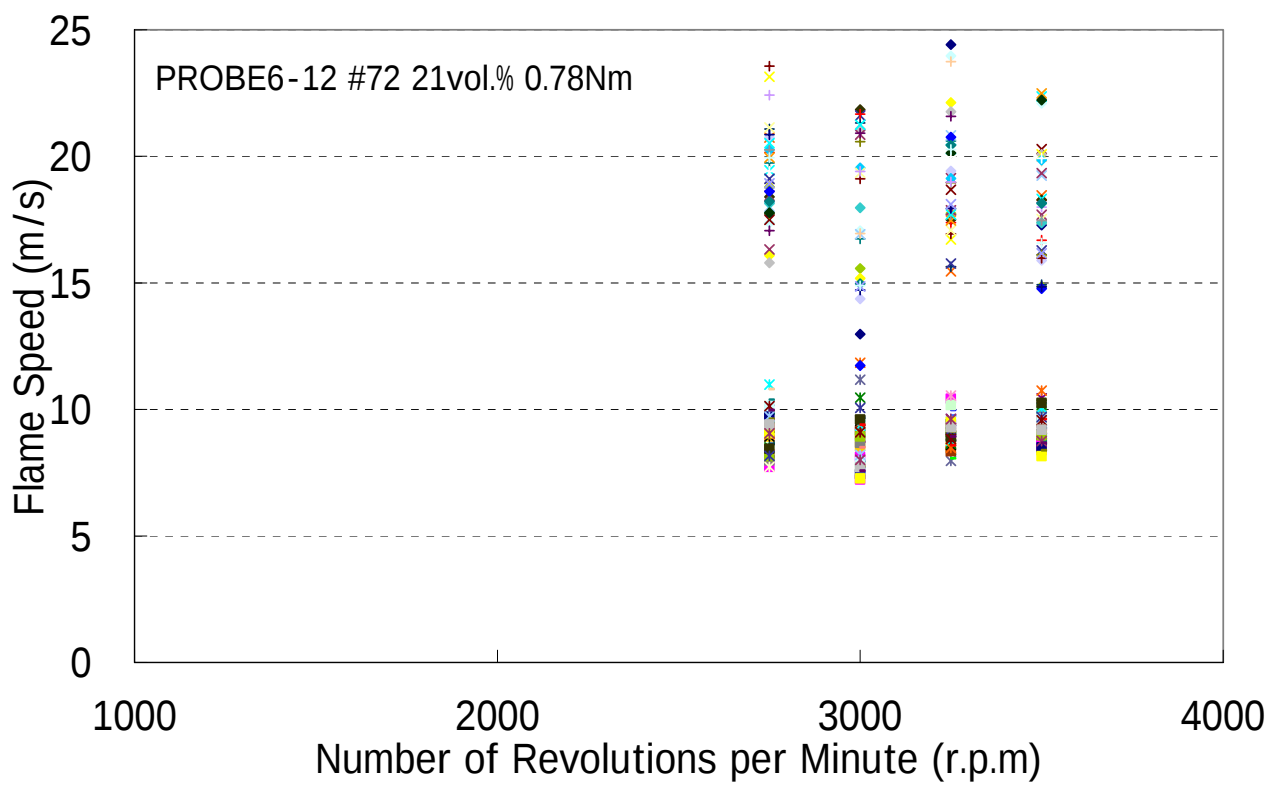


Fig.85 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

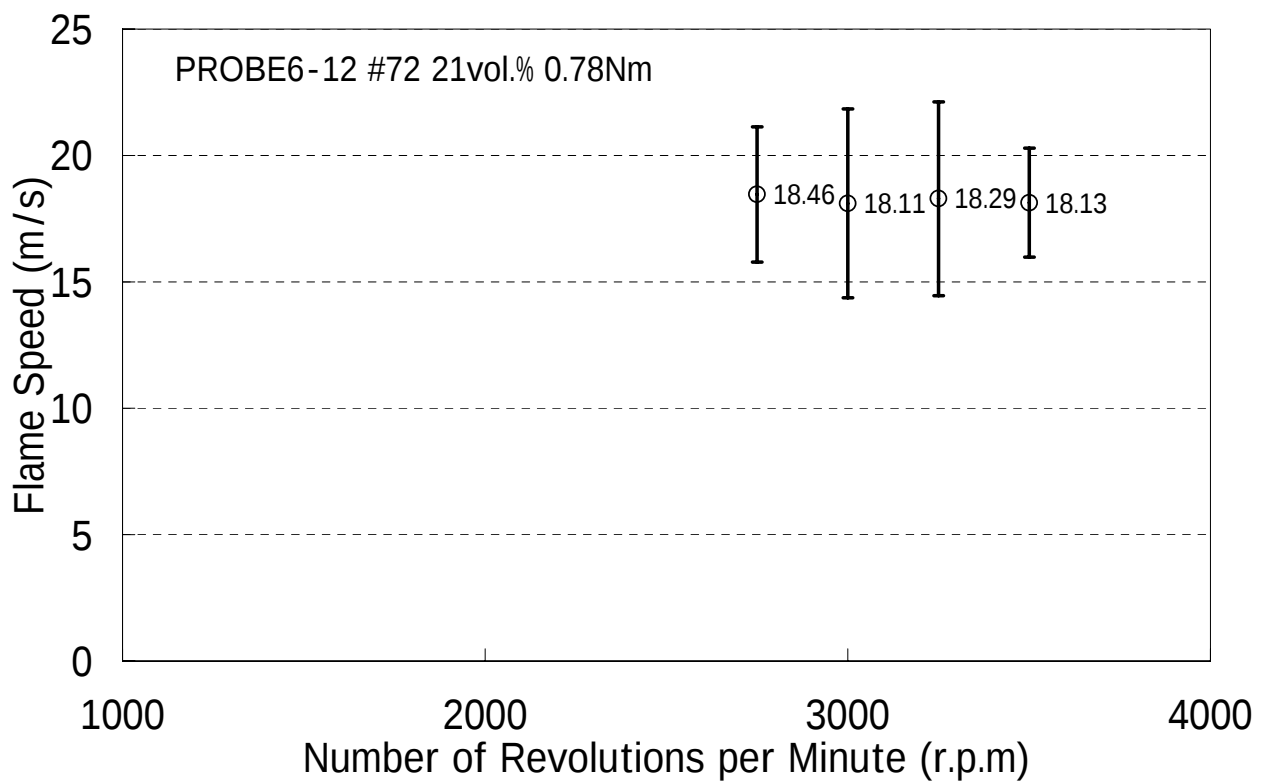


Fig.86 Flame Speed (Average, Data Range)

#72 21vol.% 1.30Nm

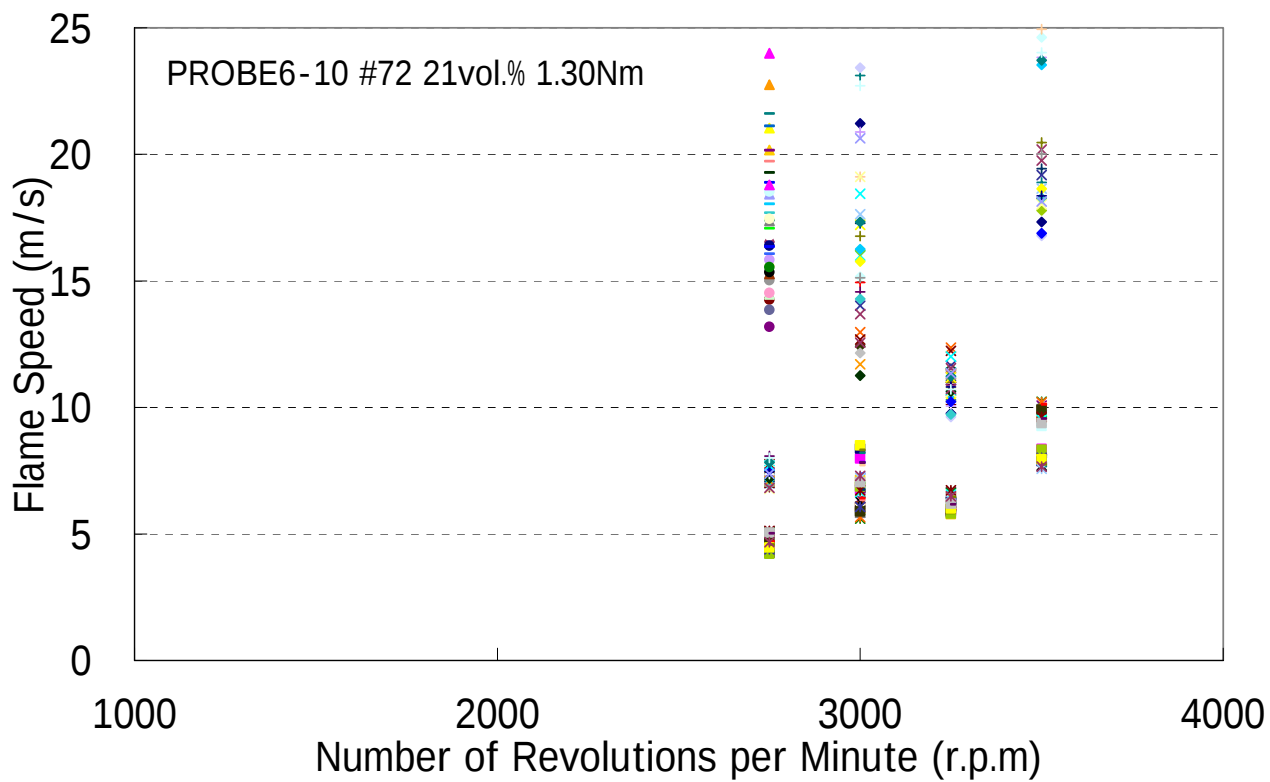


Fig.87 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

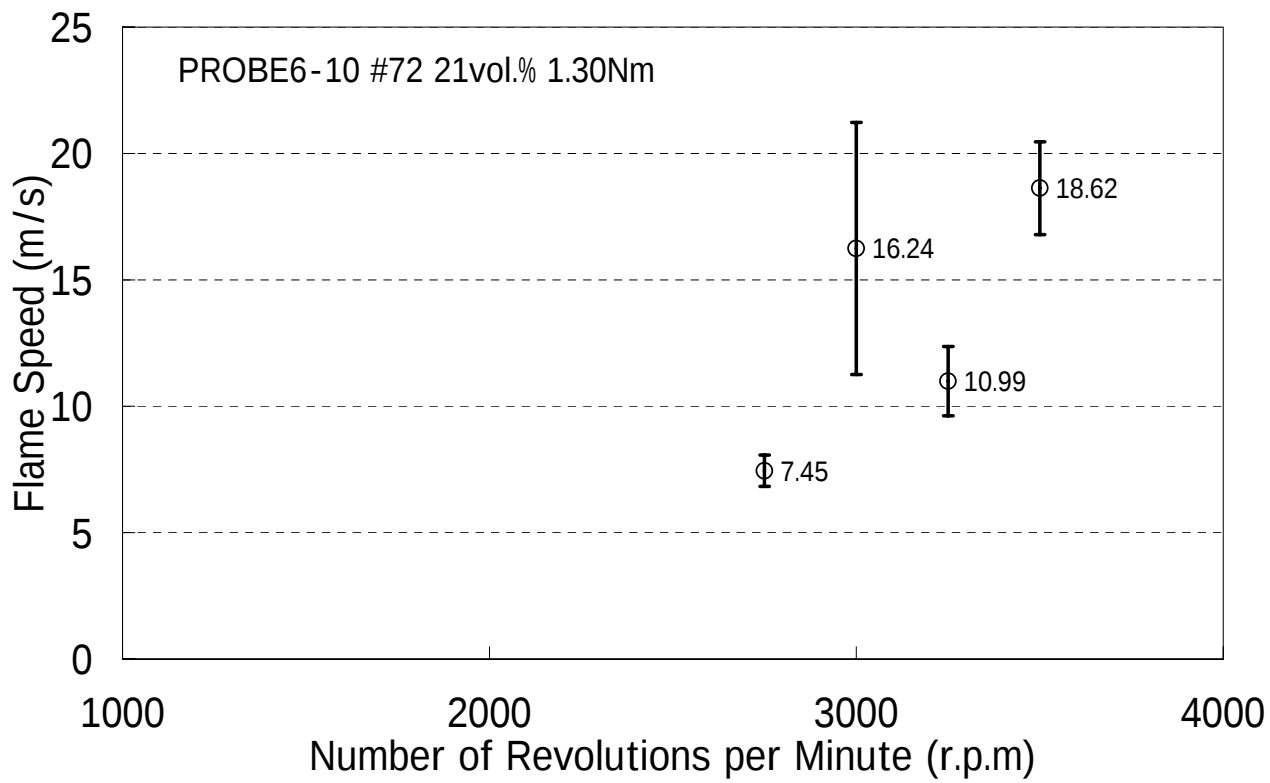


Fig.88 Flame Speed (Average, Data Range)

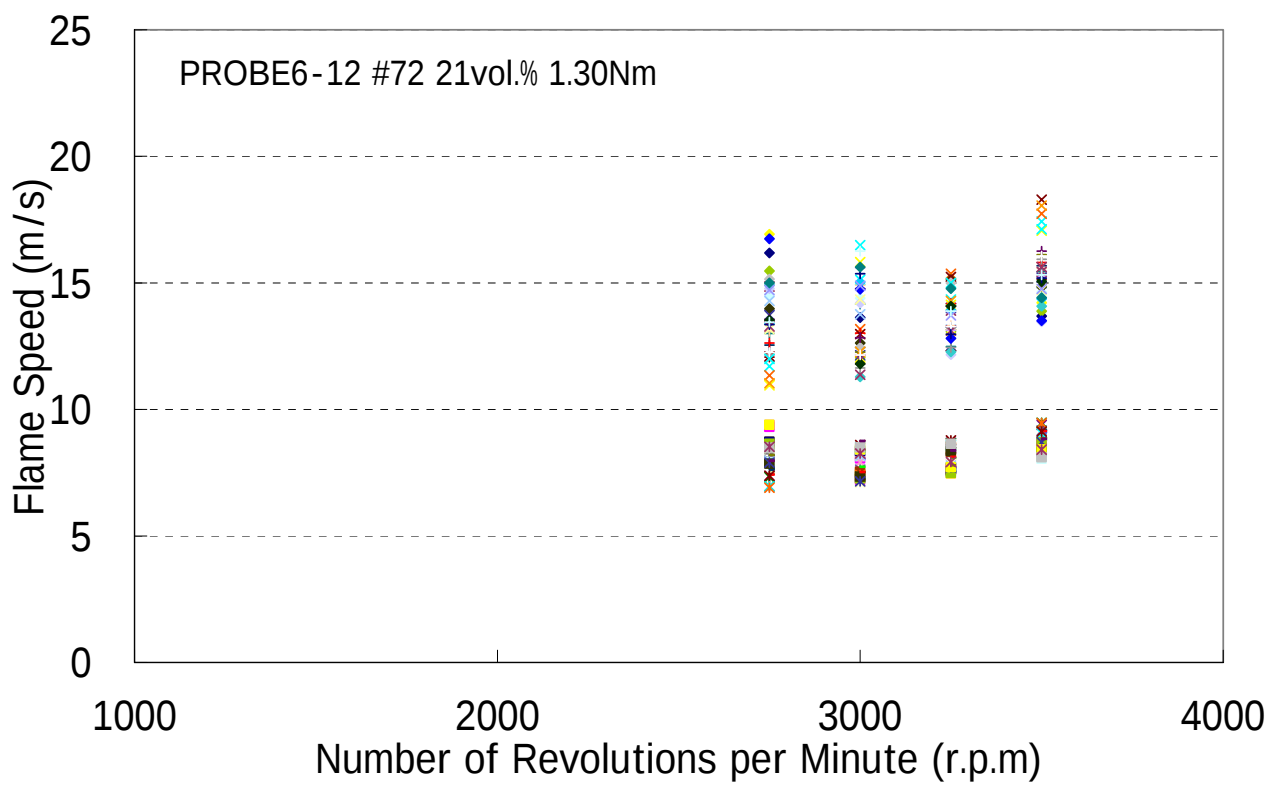


Fig.89 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

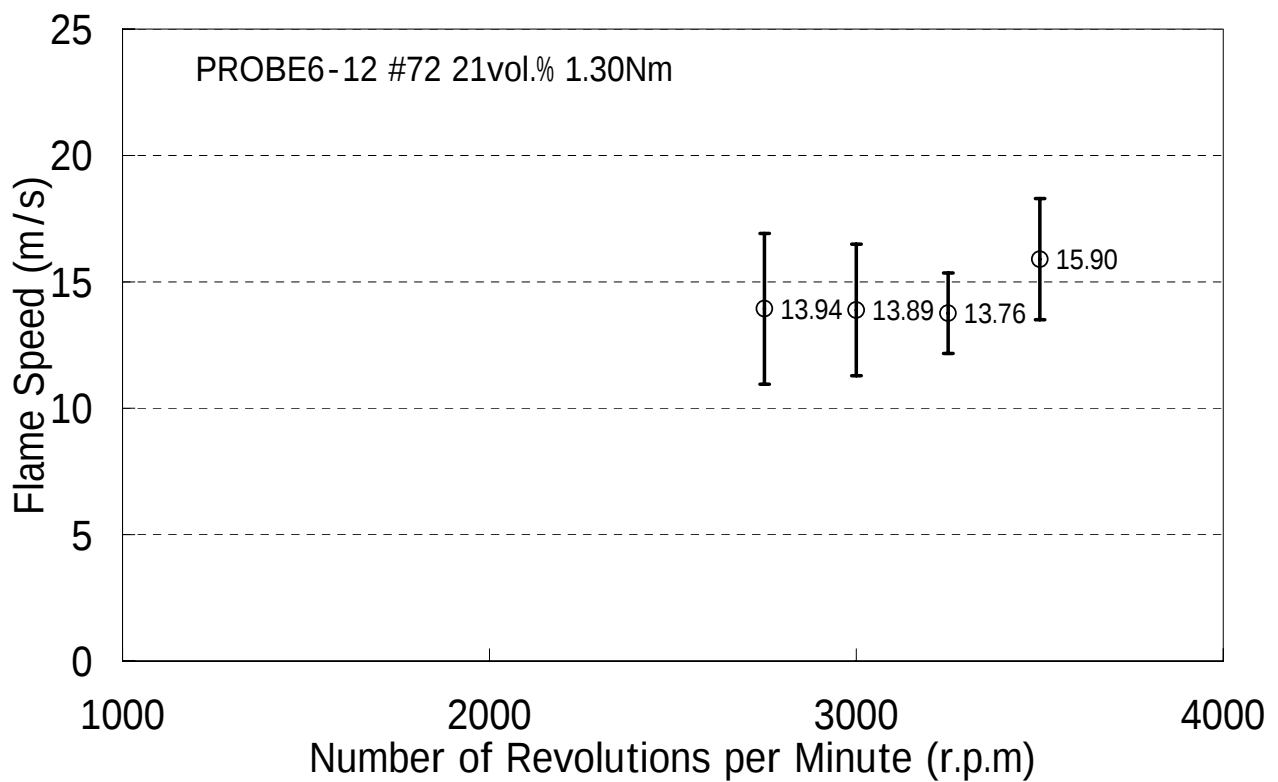


Fig.90 Flame Speed (Average, Data Range)

#72 21vol.% 1.82Nm

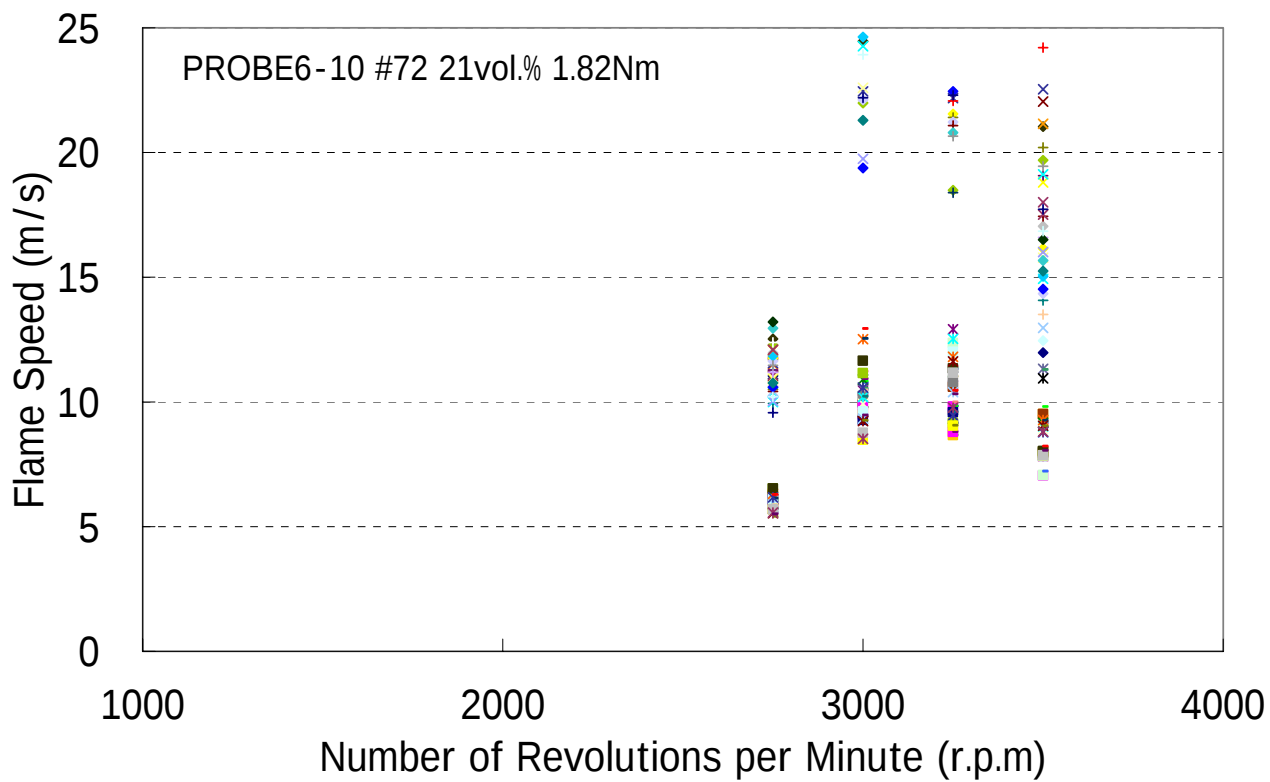


Fig.91 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

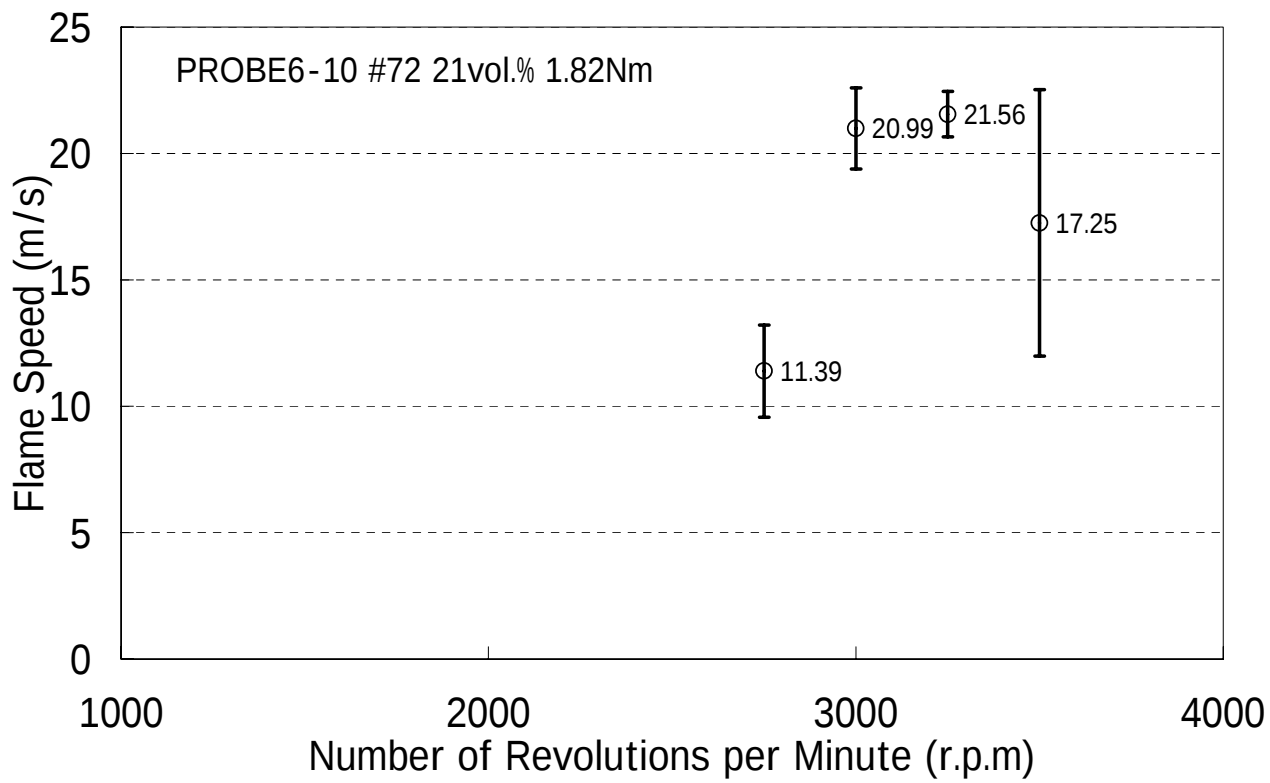


Fig.92 Flame Speed (Average, Data Range)

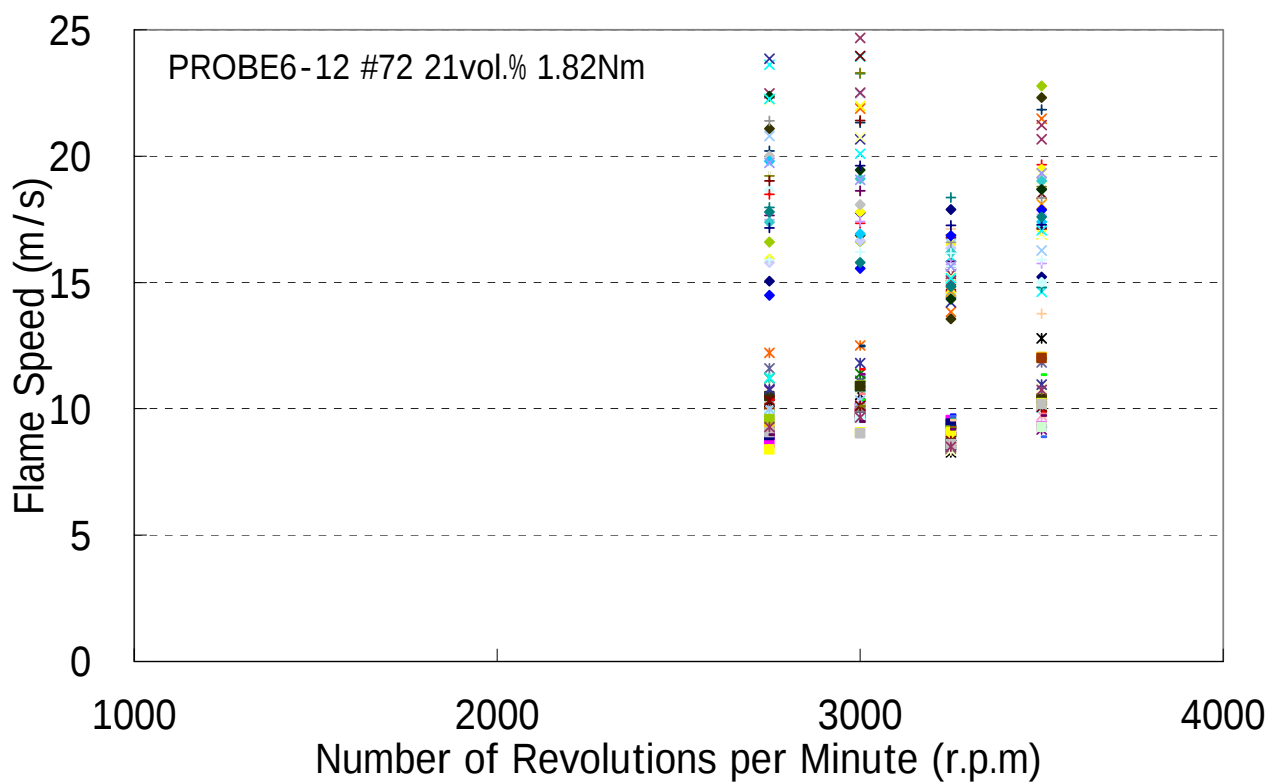


Fig.93 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

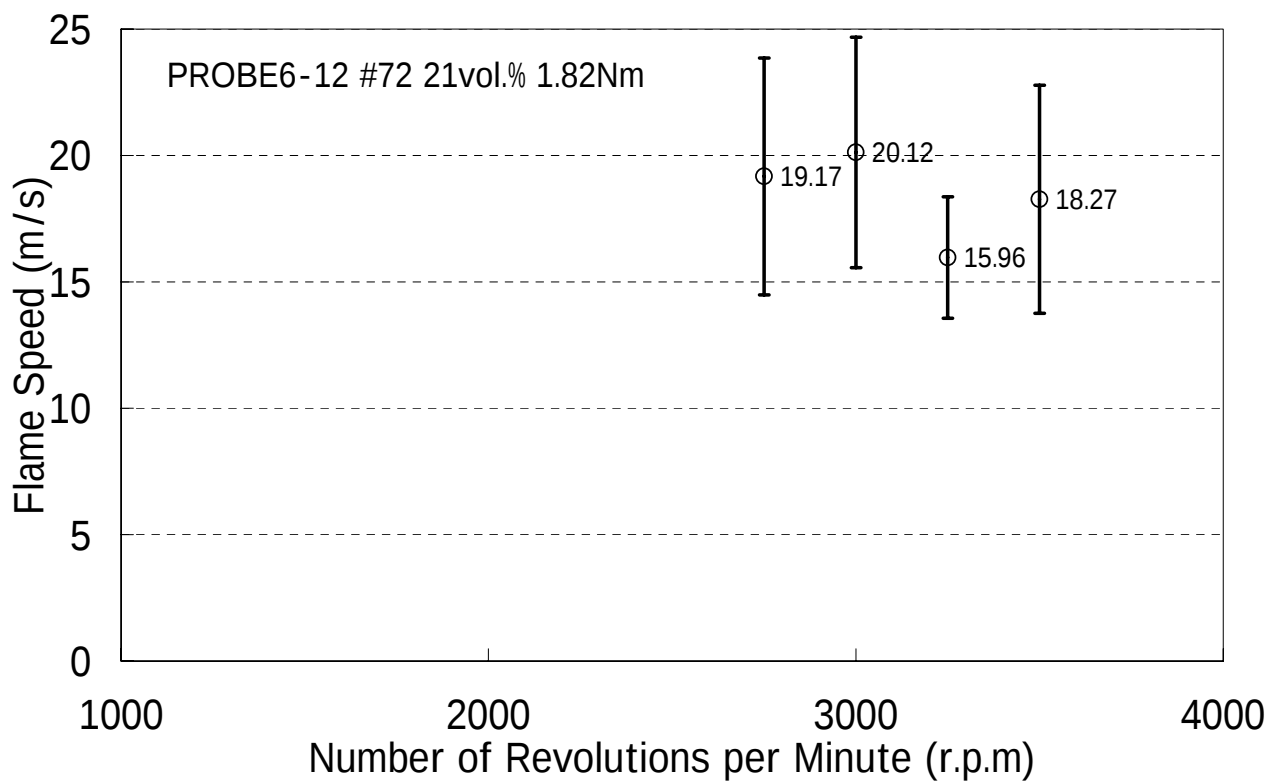


Fig.94 Flame Speed (Average, Data Range)

#42 21vol.% 0Nm

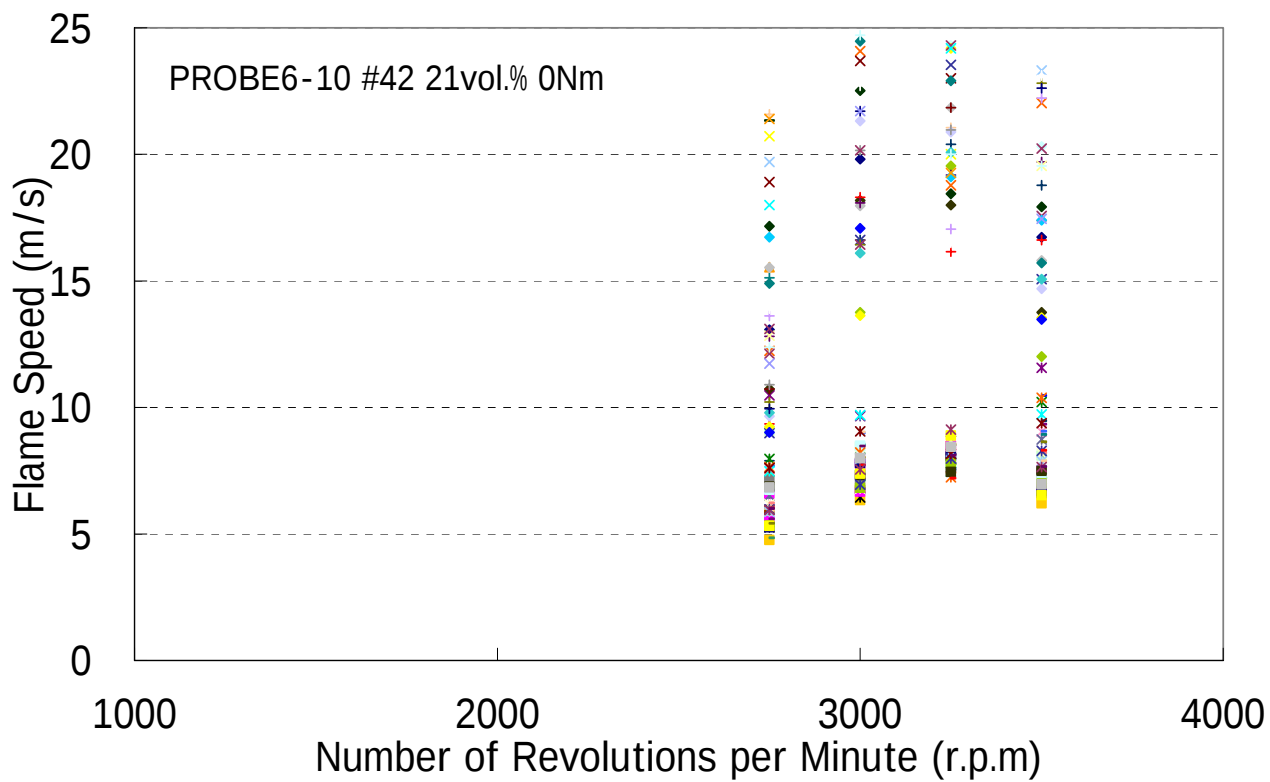


Fig.95 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

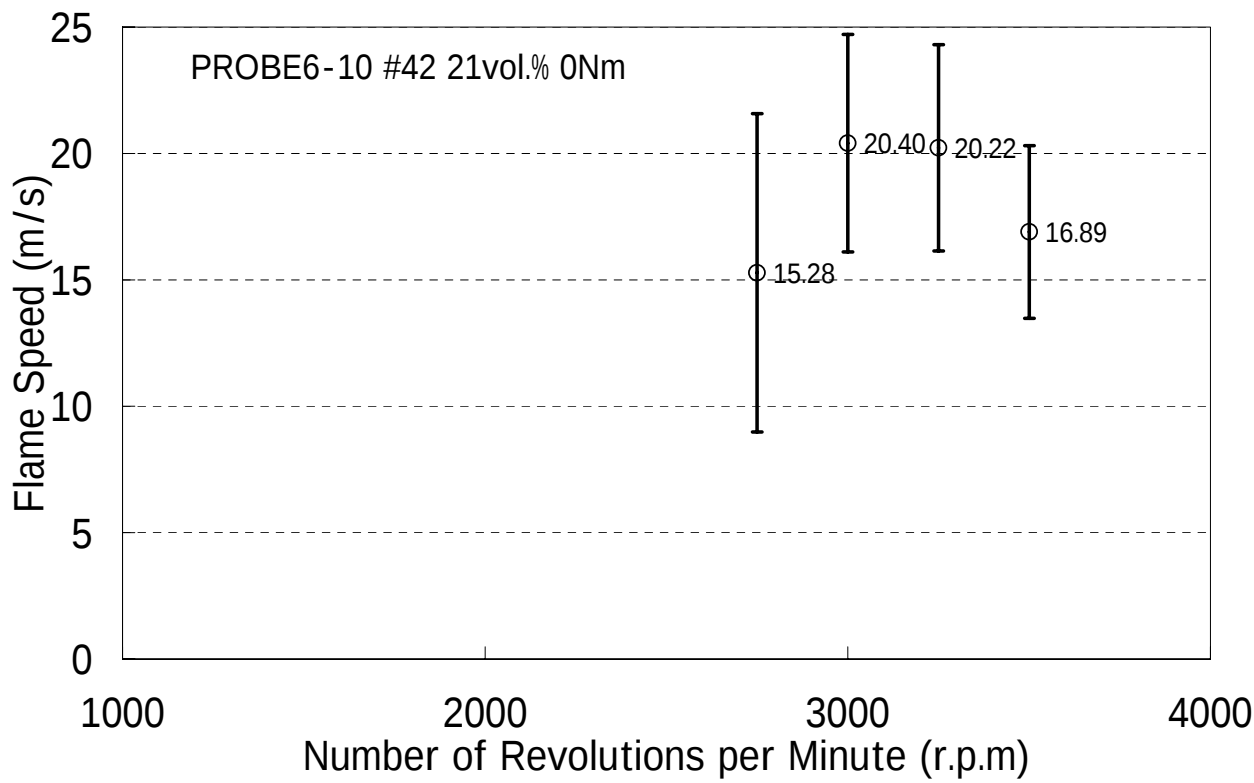


Fig.96 Flame Speed (Average, Data Range)

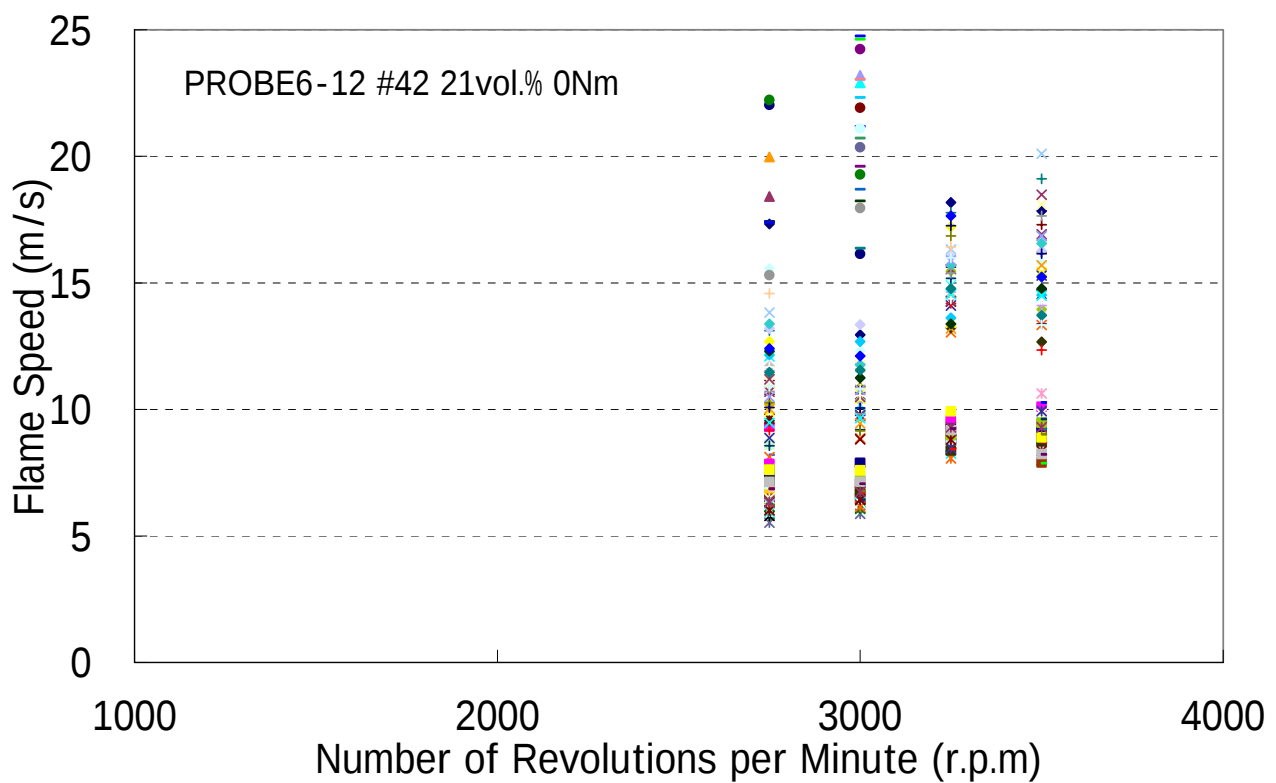


Fig.97 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

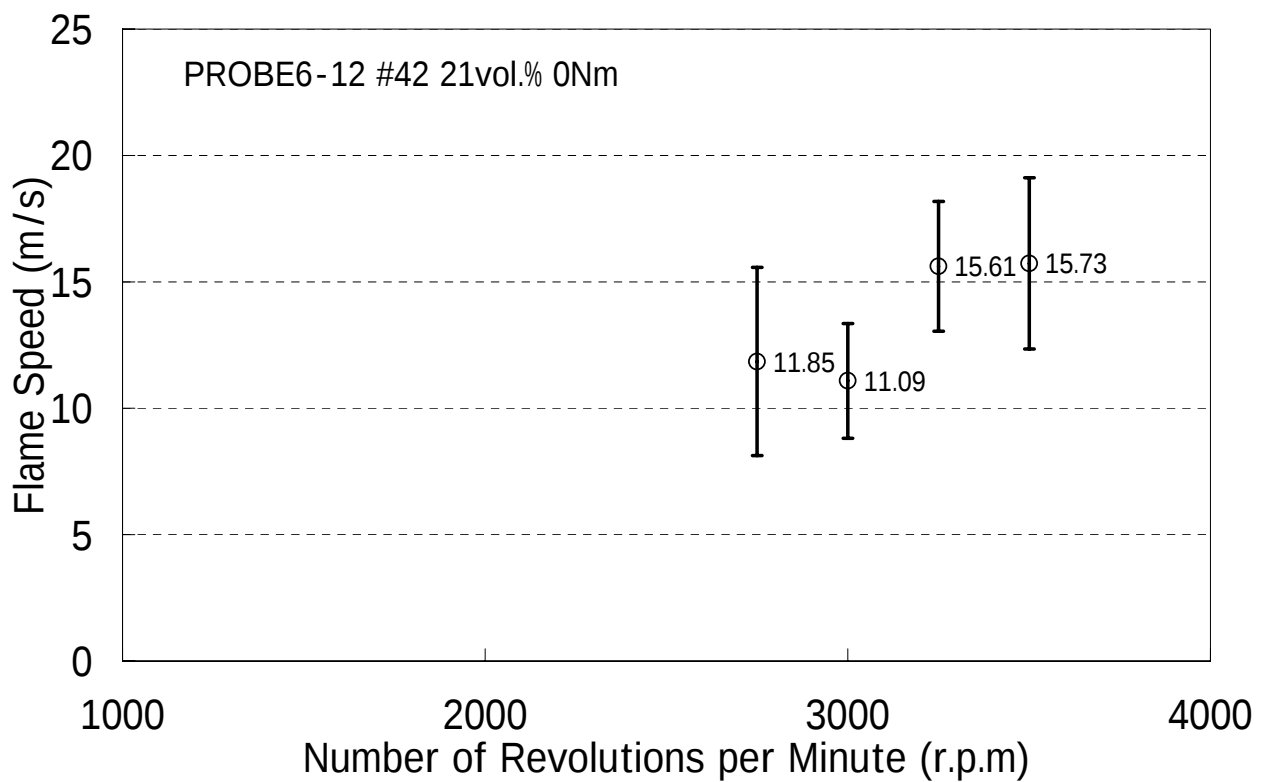


Fig.98 Flame Speed (Average, Data Range)

#42 21vol.% 0.78Nm

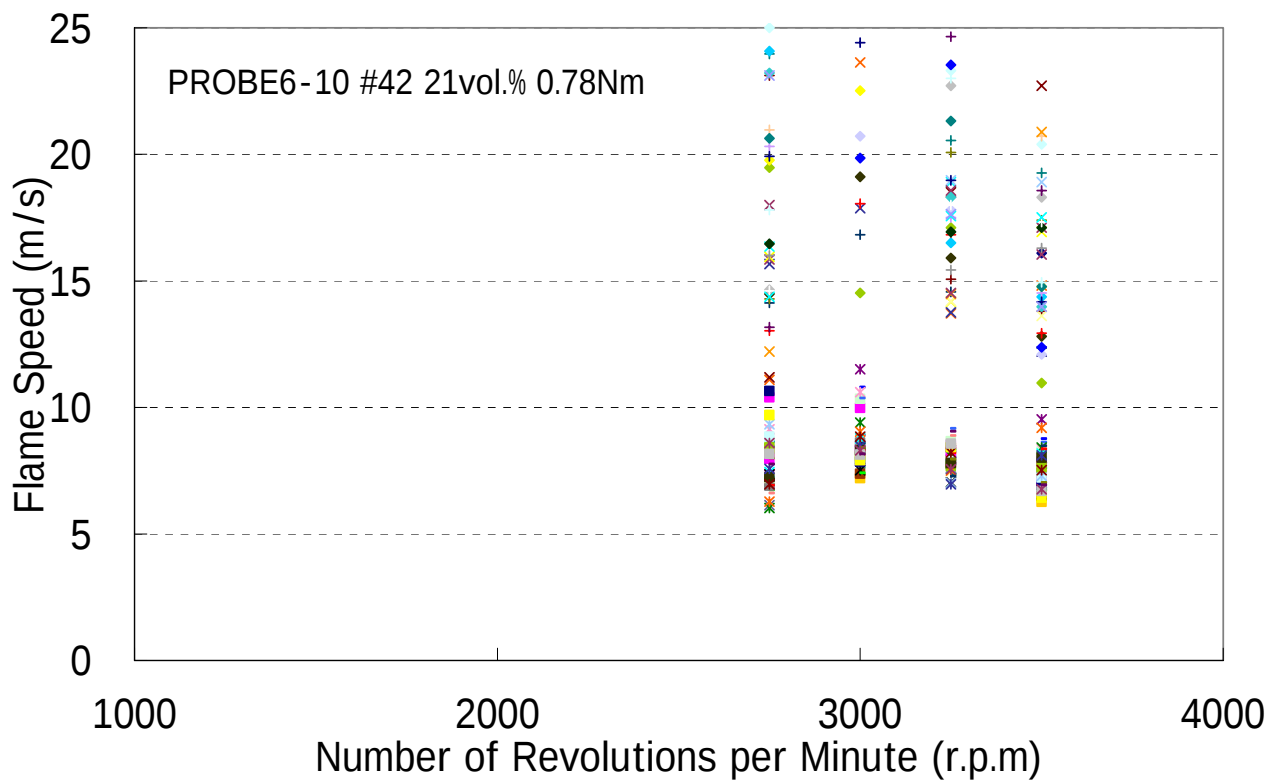


Fig.99 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

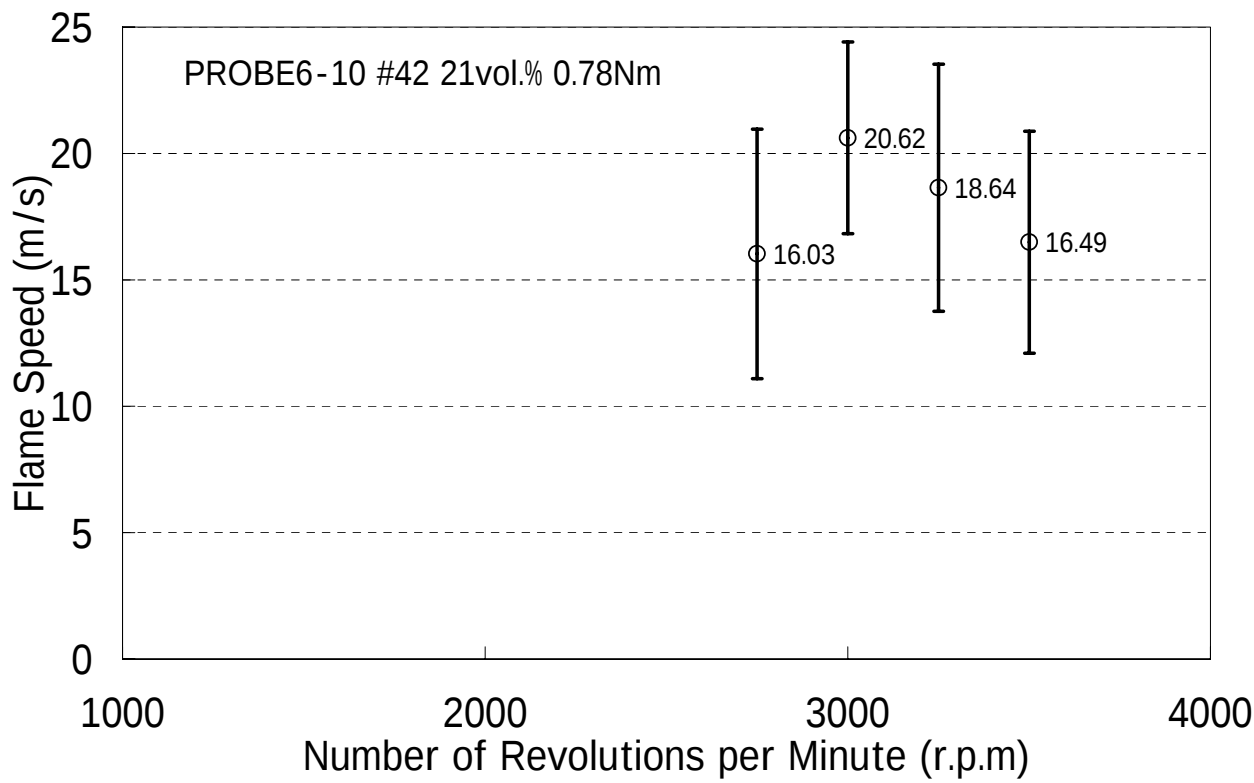


Fig.100 Flame Speed (Average, Data Range)

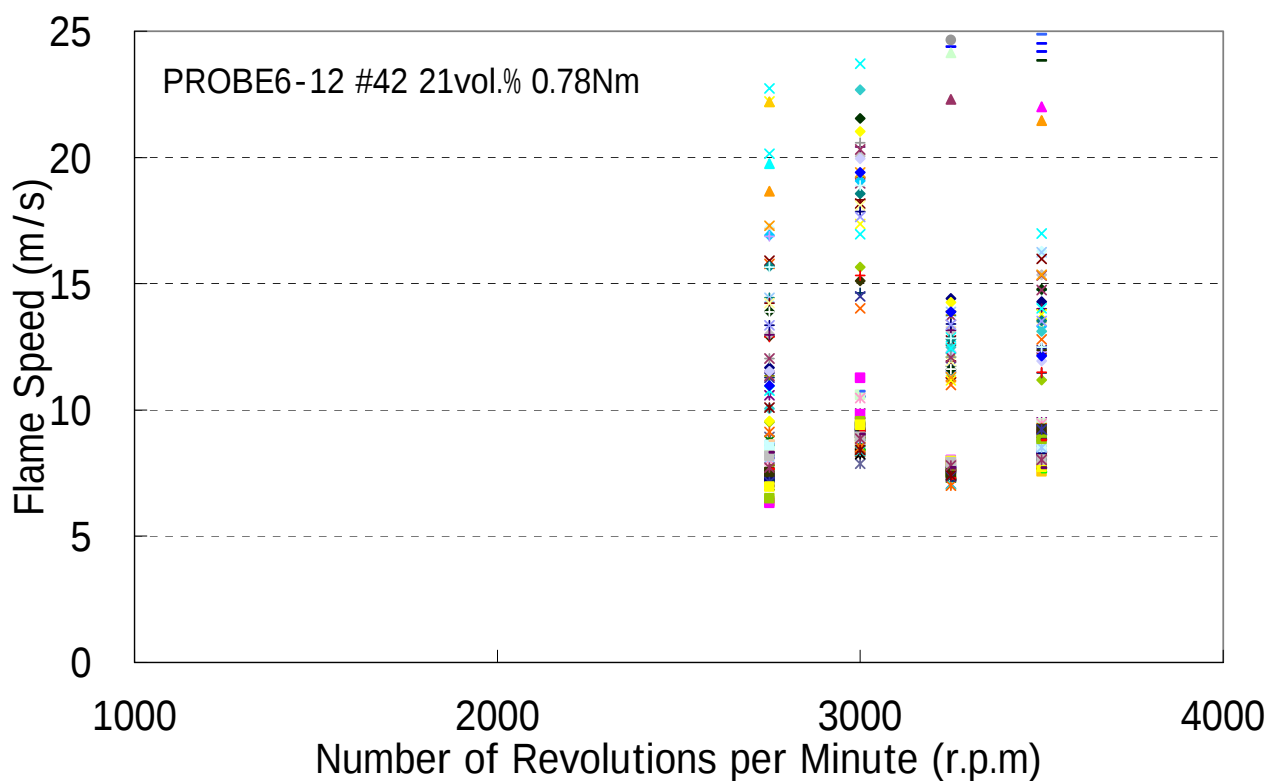


Fig.101 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

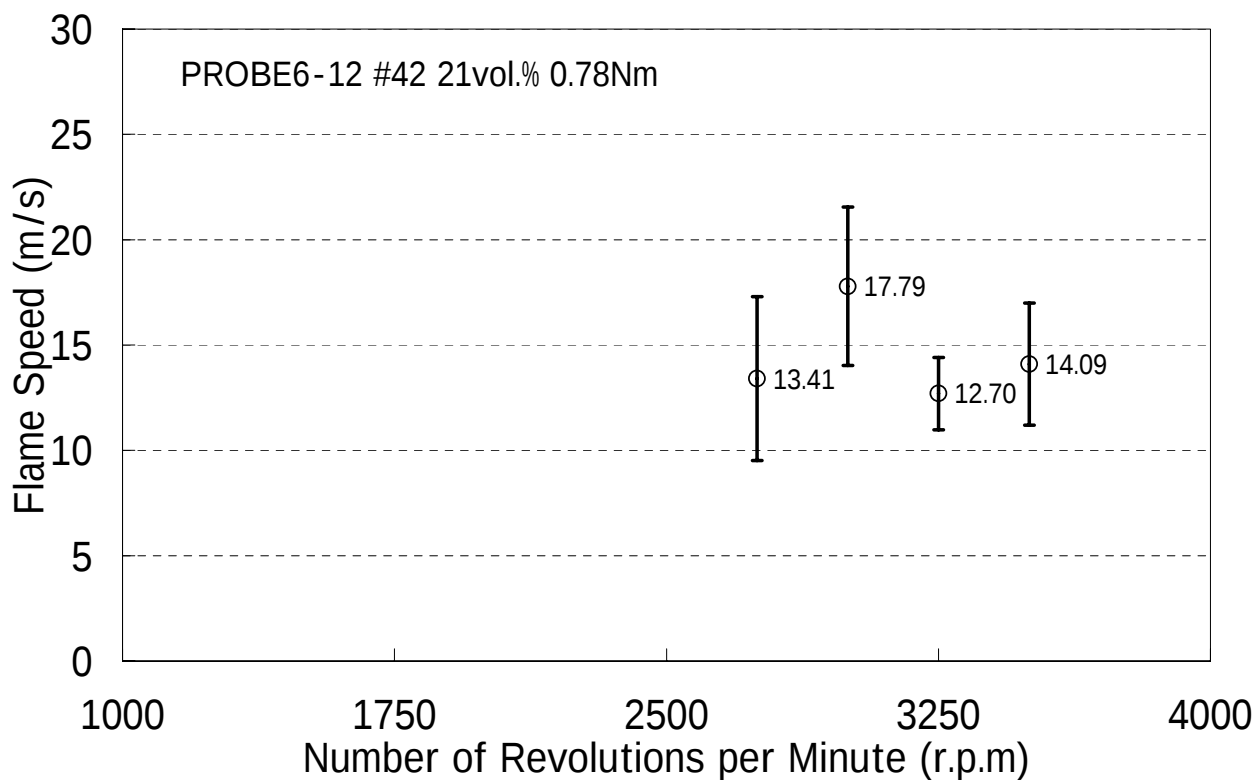


Fig.102 Flame Speed (Average, Data Range)

#42 21vol.% 1.30Nm

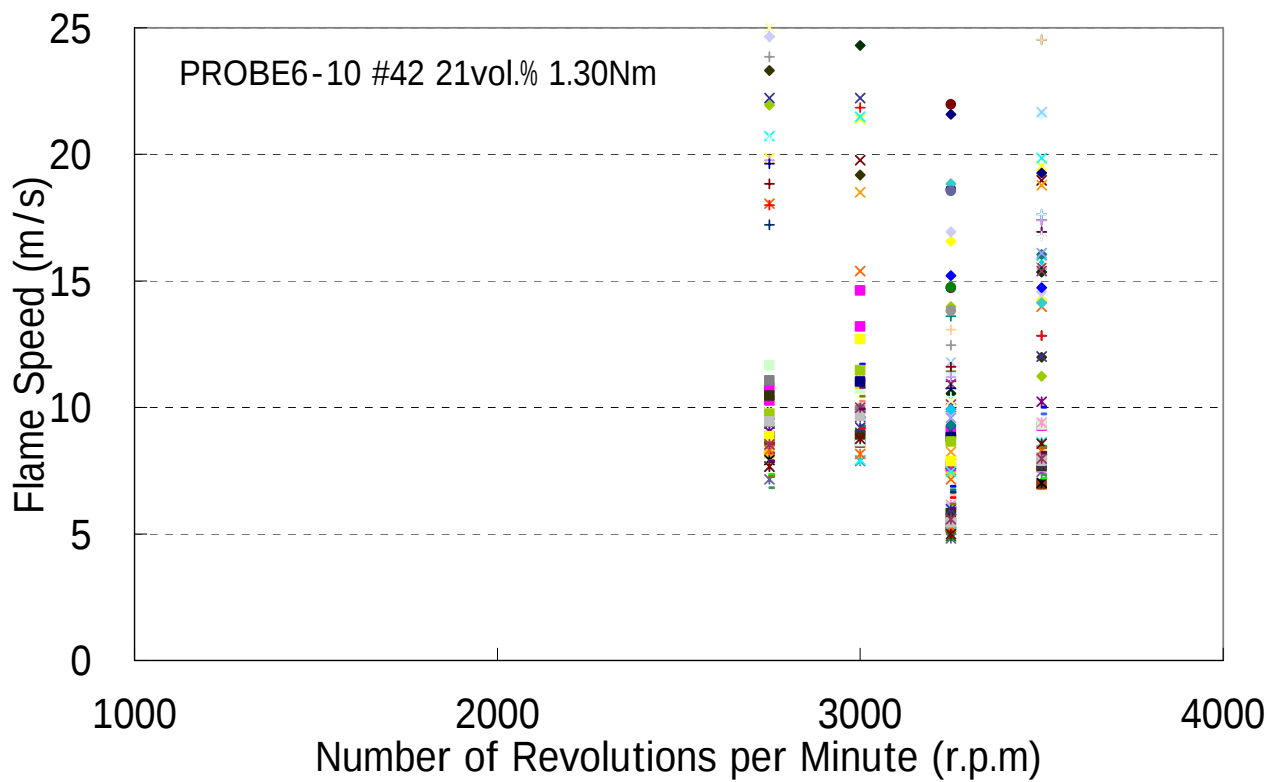


Fig.103 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

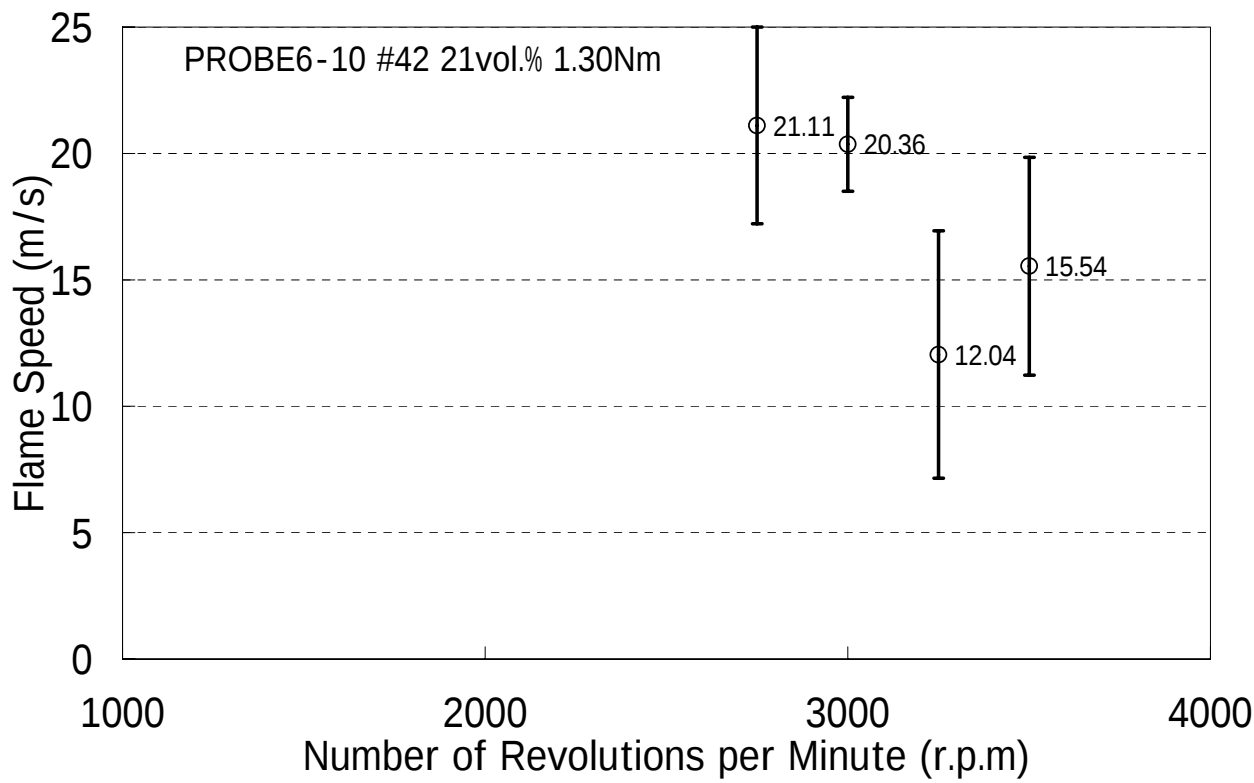


Fig.104 Flame Speed (Average, Data Range)

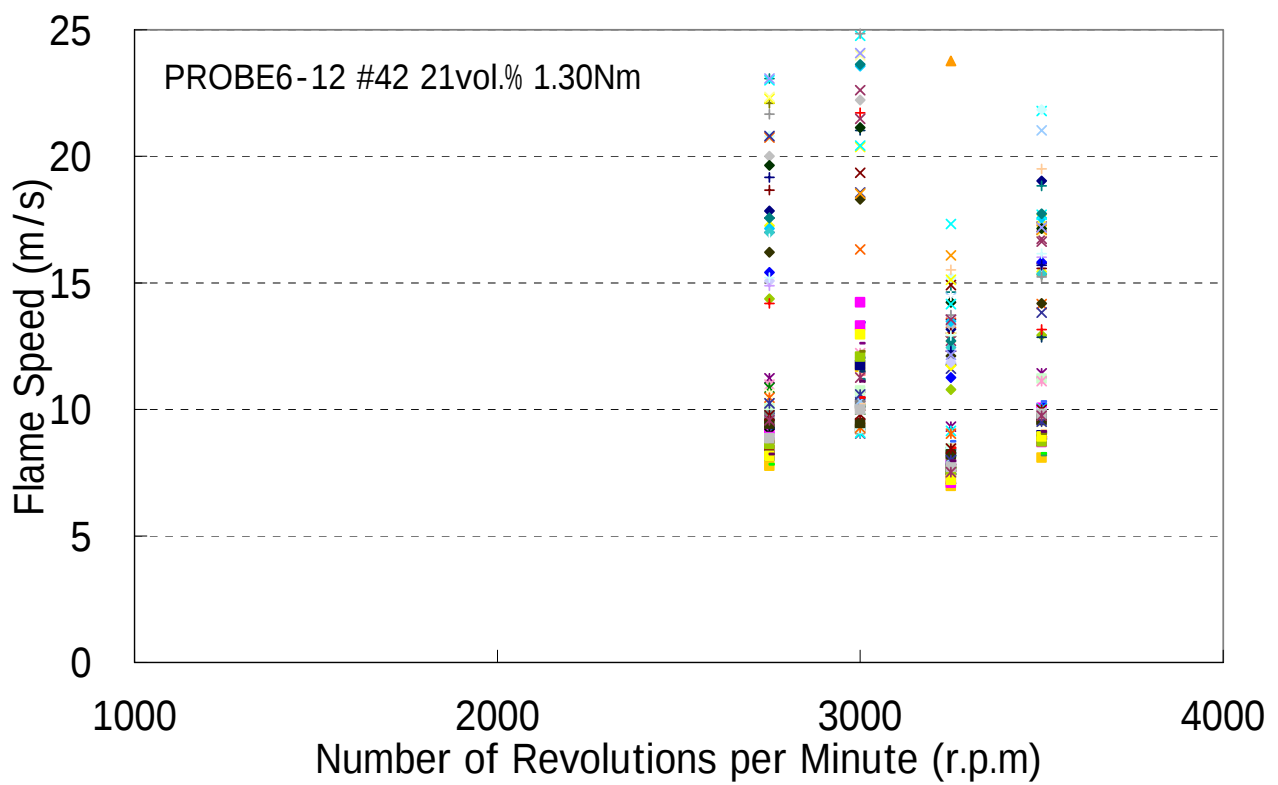


Fig.105 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

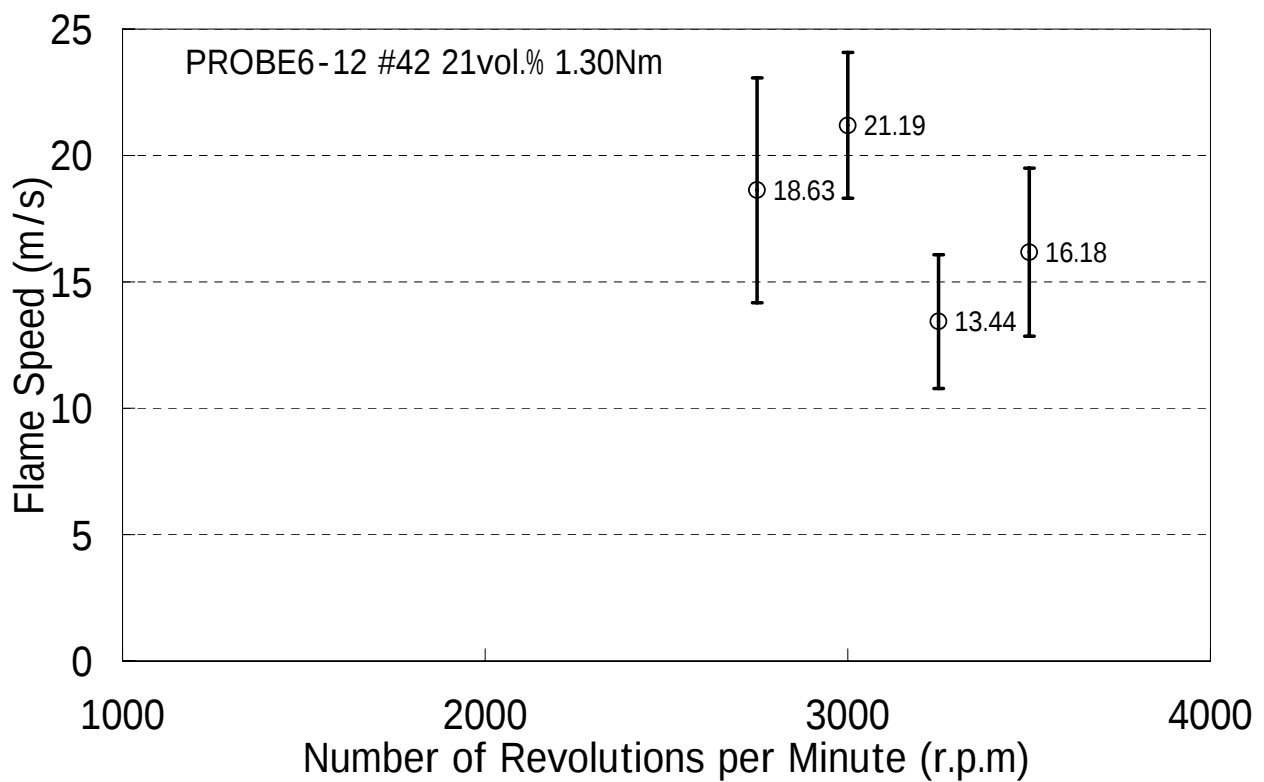


Fig.106 Flame Speed (Average, Data Range)

#42 21vol.% 1.82Nm

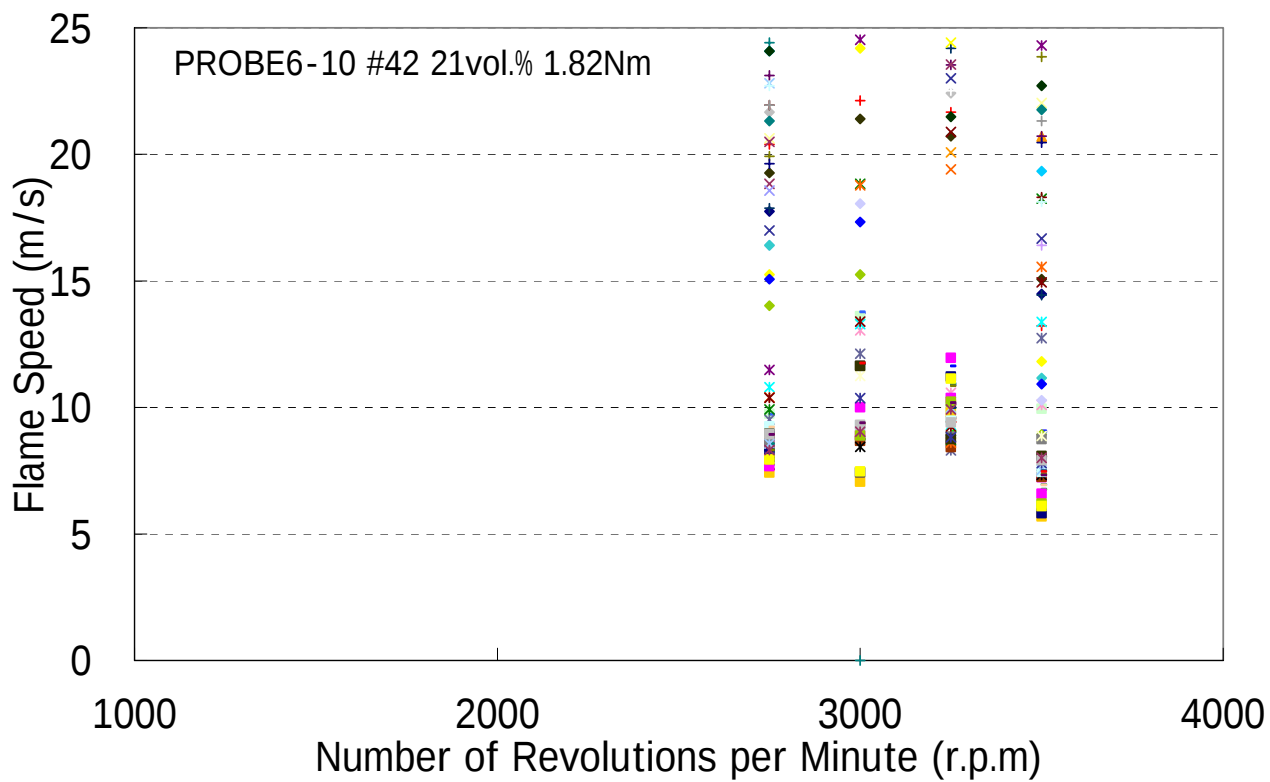


Fig.107 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

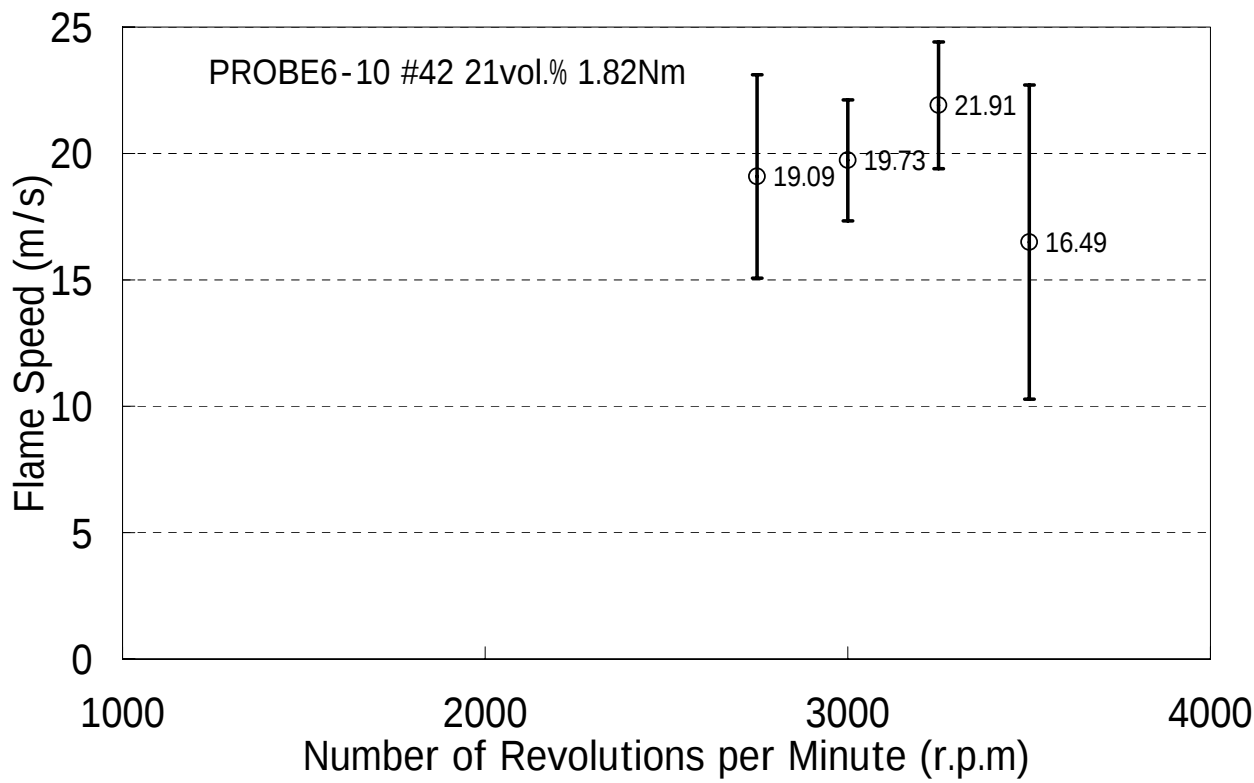


Fig.108 Flame Speed (Average, Data Range)

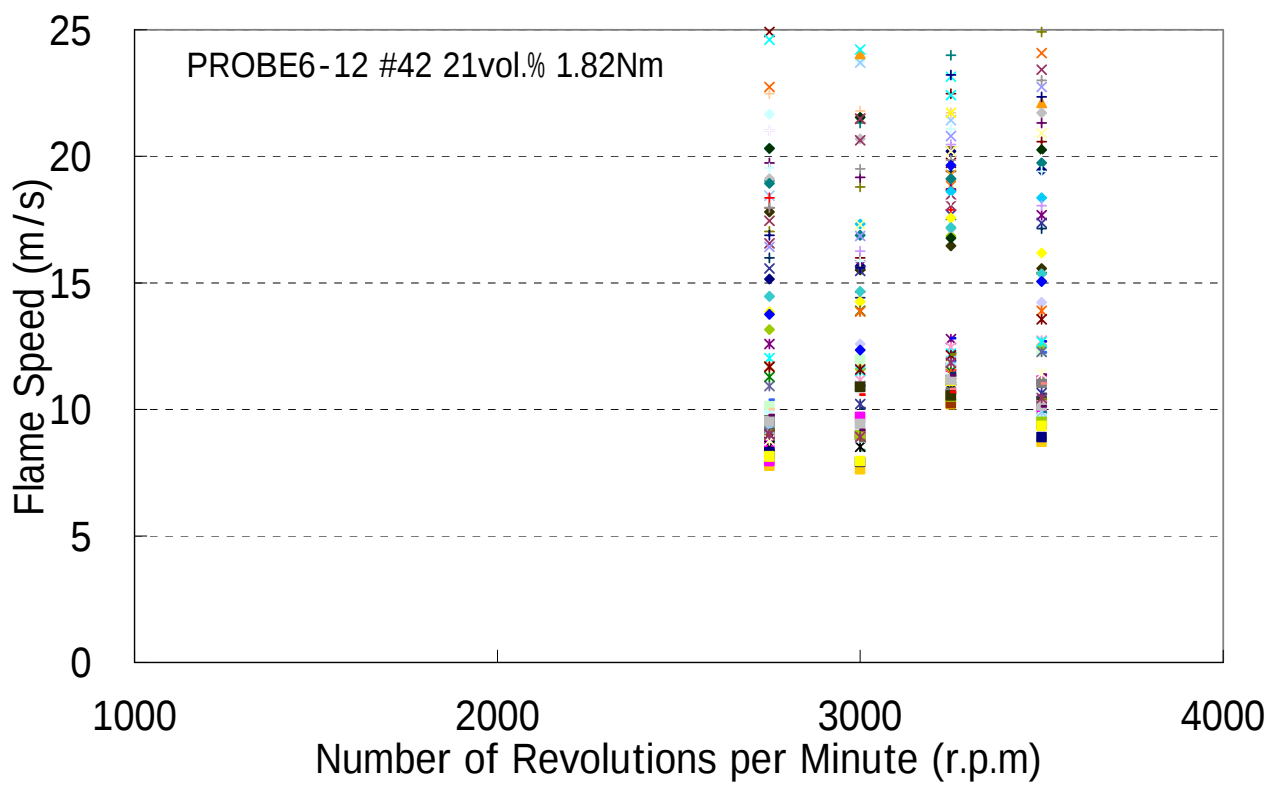


Fig.109 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

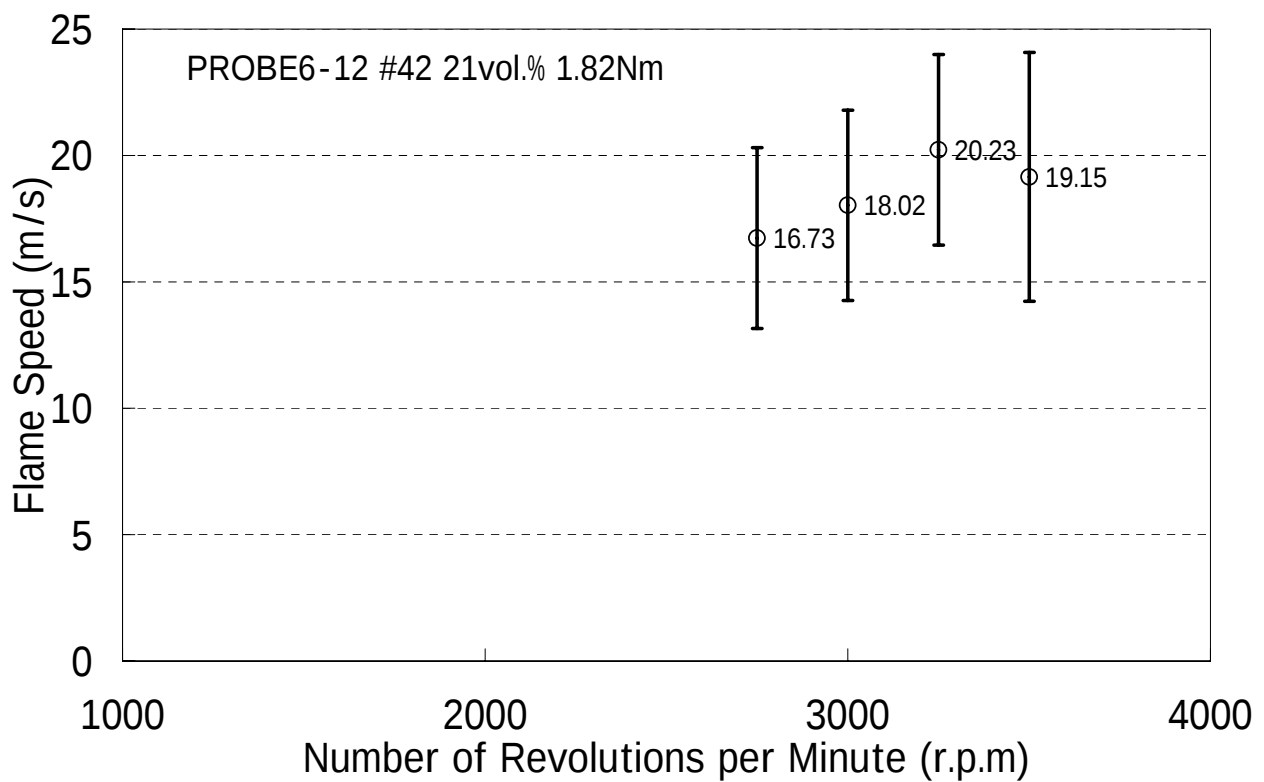


Fig.110 Flame Speed (Average, Data Range)

低酸素濃度状態：

Fig.111 ~ Fig.126 に本実験で得られたメインジェット番数#72(標準)を用いた場合の吸入空気酸素濃度 19vol.%における、無負荷(0Nm)または部分負荷(0.78Nm,1.30Nm,1.78Nm)条件での機関回転数に対する火炎伝ば速度を示す。

これらの図から明らかなように、どの機関回転数においても、機関負荷を加えることにより変動割合は増加し、また、同一機関回転数において、無負荷状態の場合よりも、得られた火炎伝ば速度は増加していて、吸入空気酸素濃度 21vol.%の場合と同様な傾向が観察された。

吸入空気酸素濃度 21vol.%の場合と同様に、機関に負荷をかけることにより、乱れが及ぼす火炎伝ばへの影響が増大するため、吸入空気酸素濃度 21vol.%と19vol.%とでの差異の観察は困難であった。

また若干ではあるが、吸入空気酸素濃度 21vol.%と比べると、吸入空気酸素濃度 19vol.%の火炎伝ば速度の測定範囲には、不安定性が見られた。これは酸素濃度低下による火炎温度減少によって、火炎が若干不安定になったものと考察される。

#72 19vol.% 0Nm

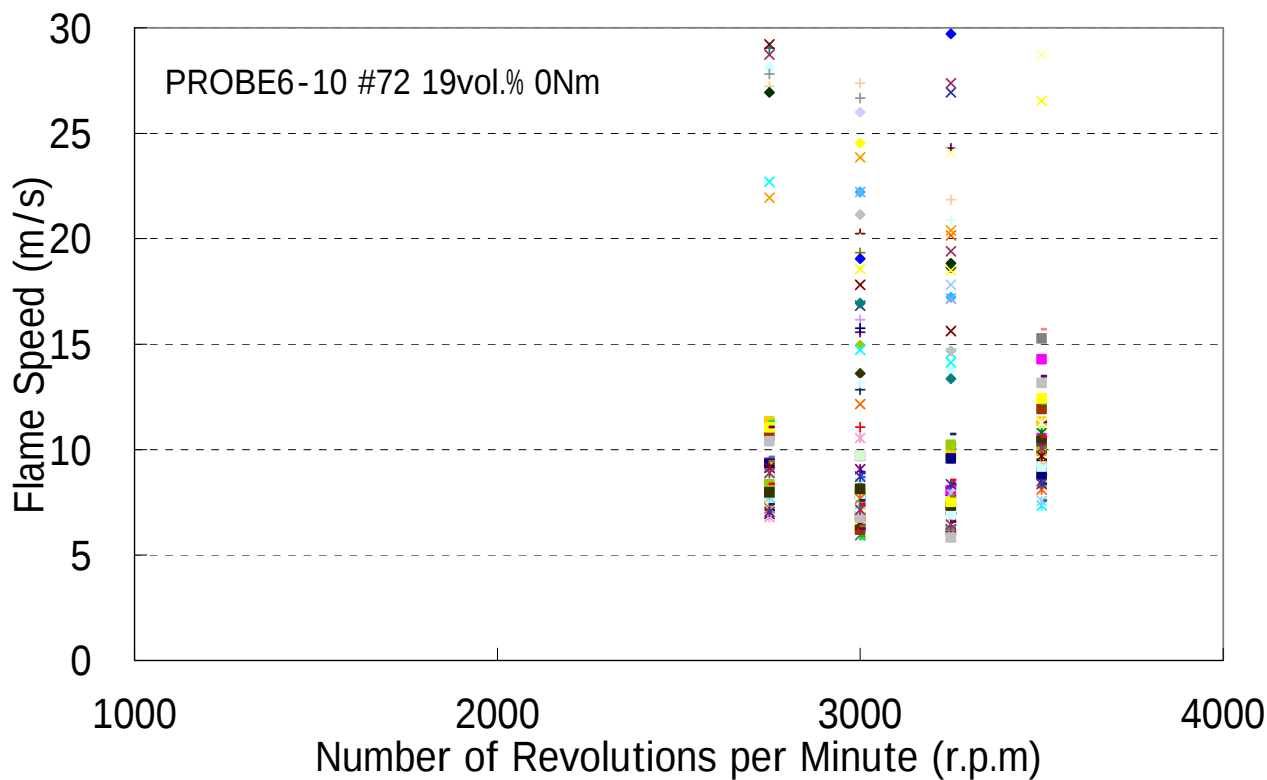


Fig.111 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

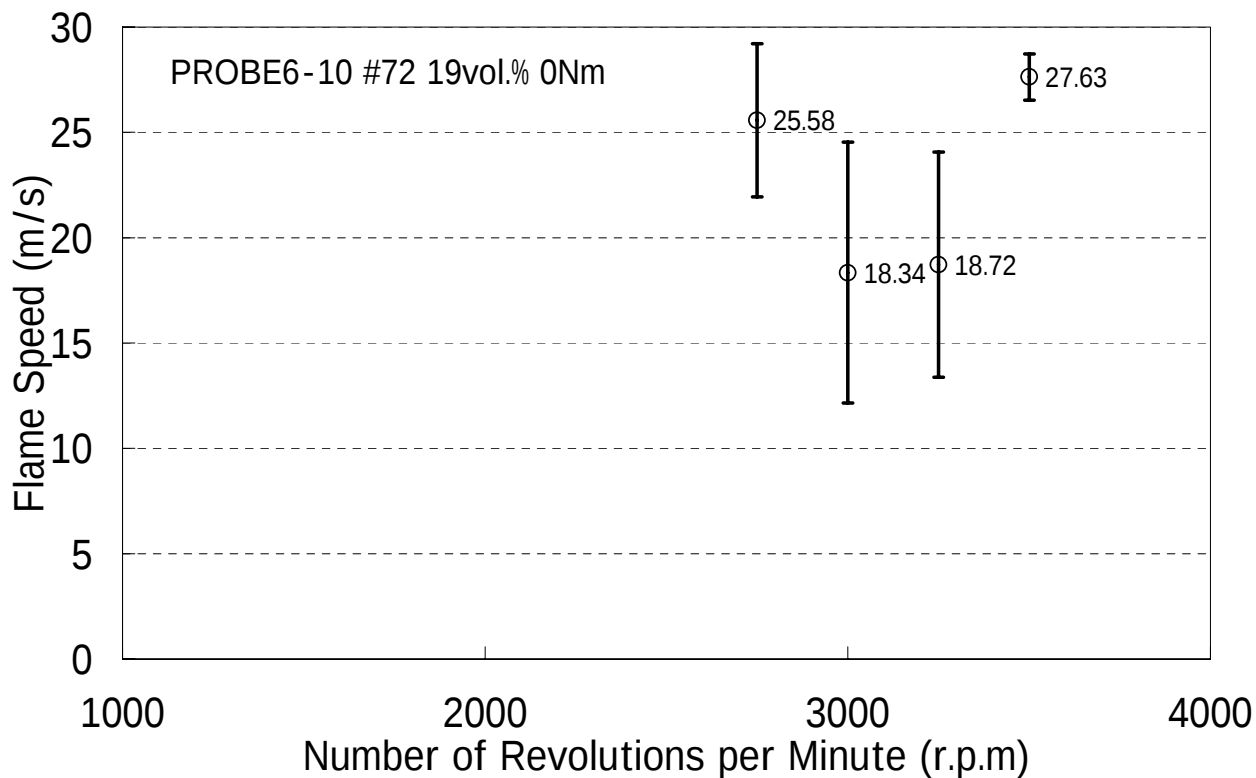


Fig.112 Flame Speed (Average, Data Range)

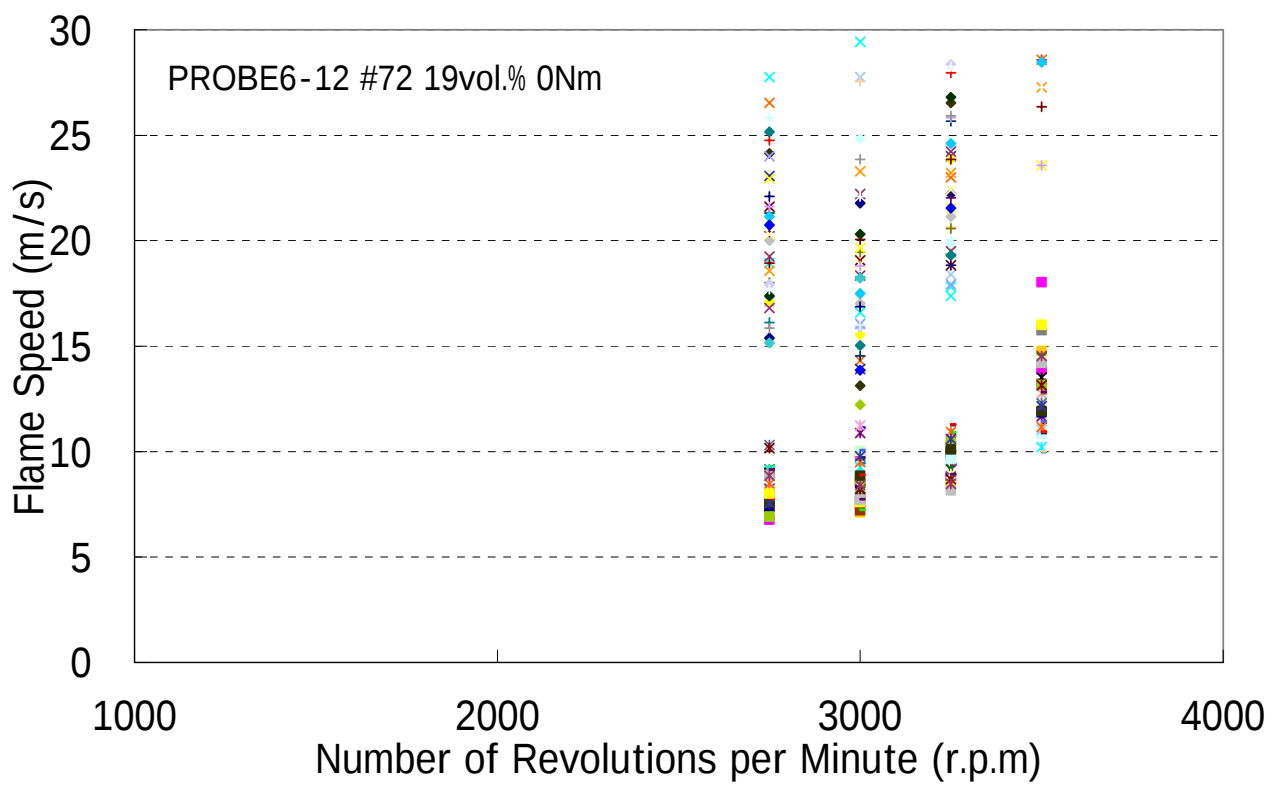


Fig.113 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

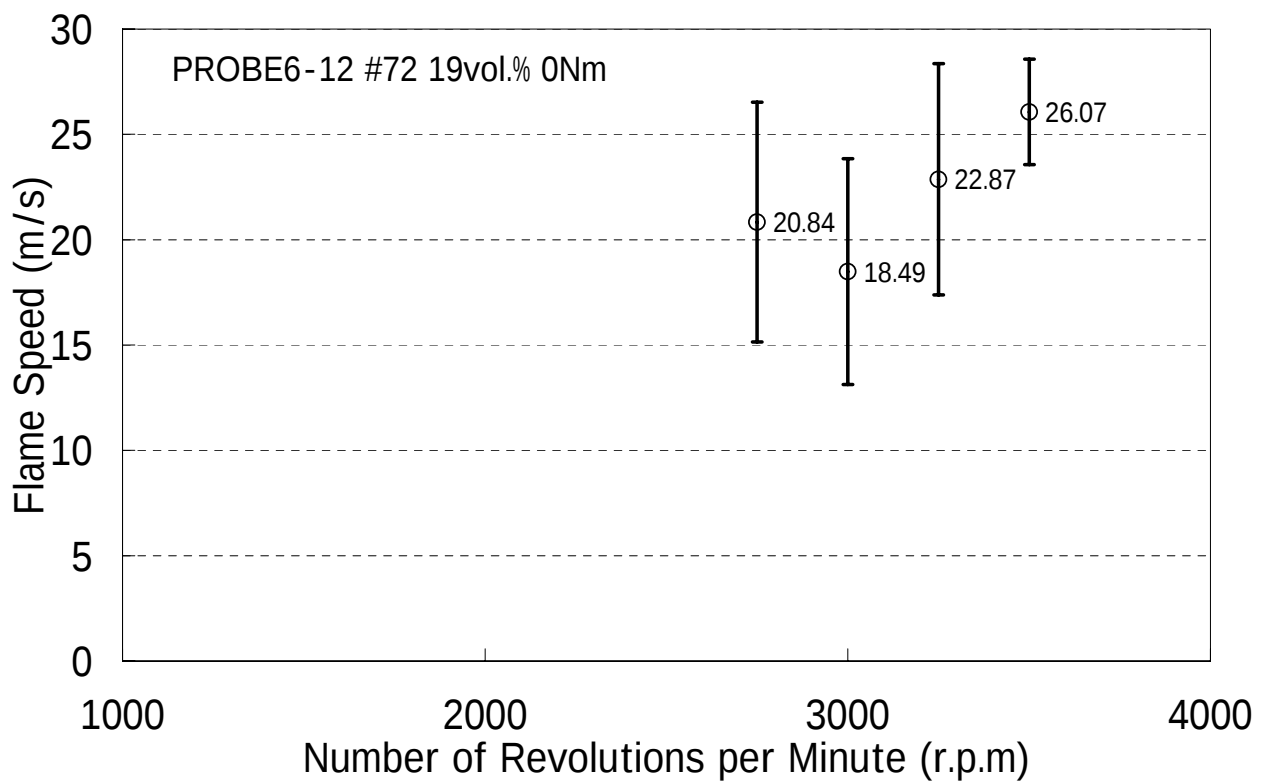


Fig.114 Flame Speed (Average, Data Range)

#72 19vol.% 0.78Nm

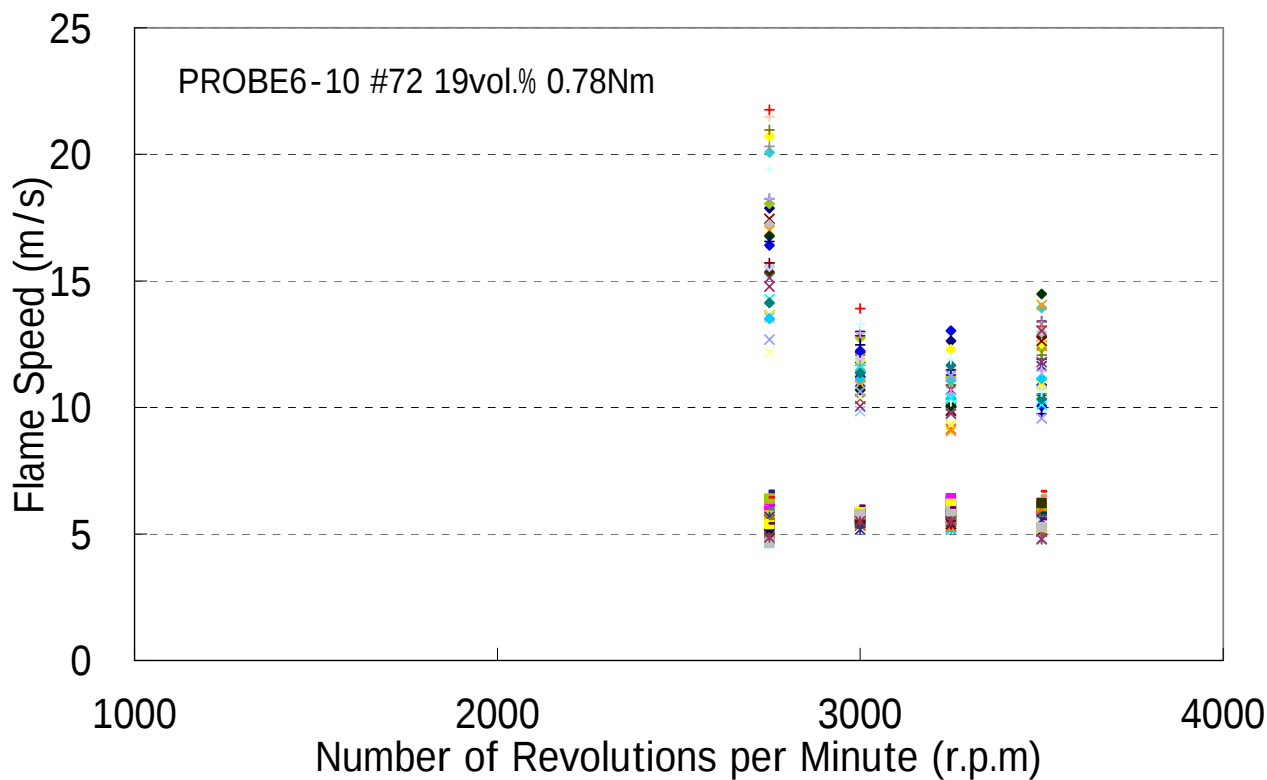


Fig.115 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

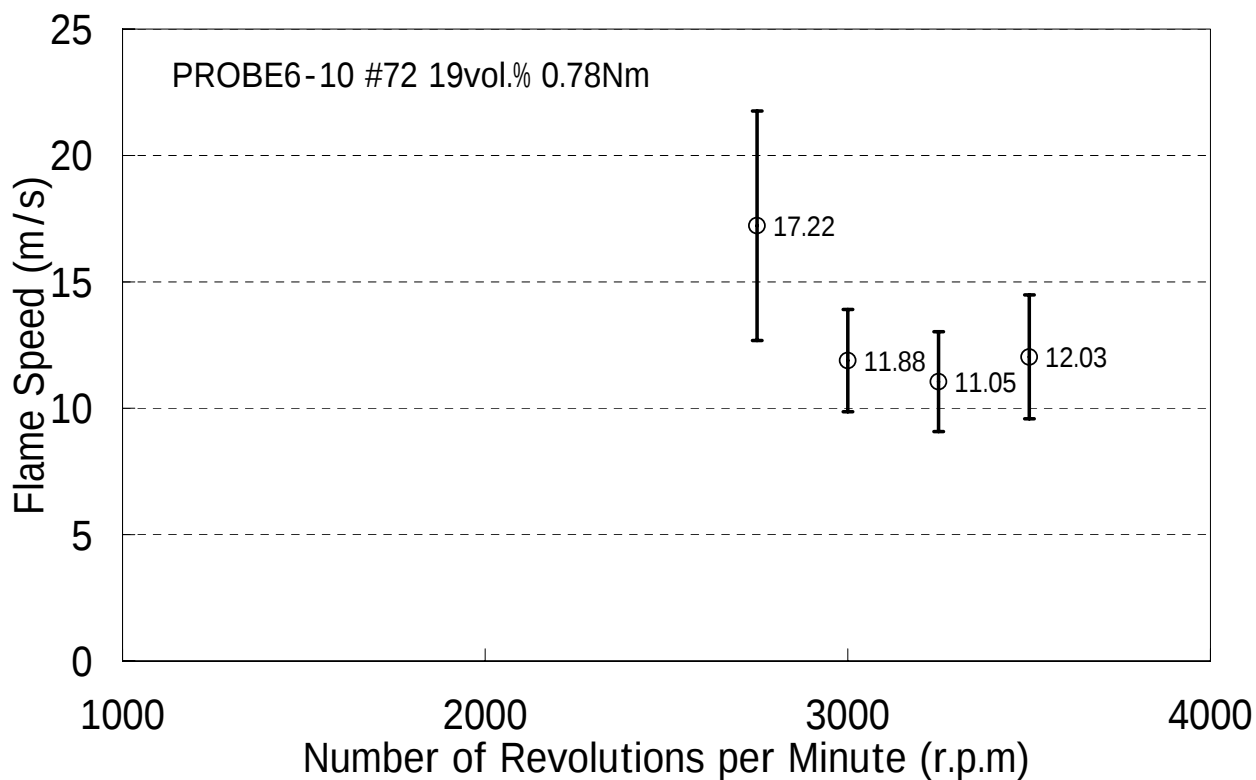


Fig.116 Flame Speed (Average, Data Range)

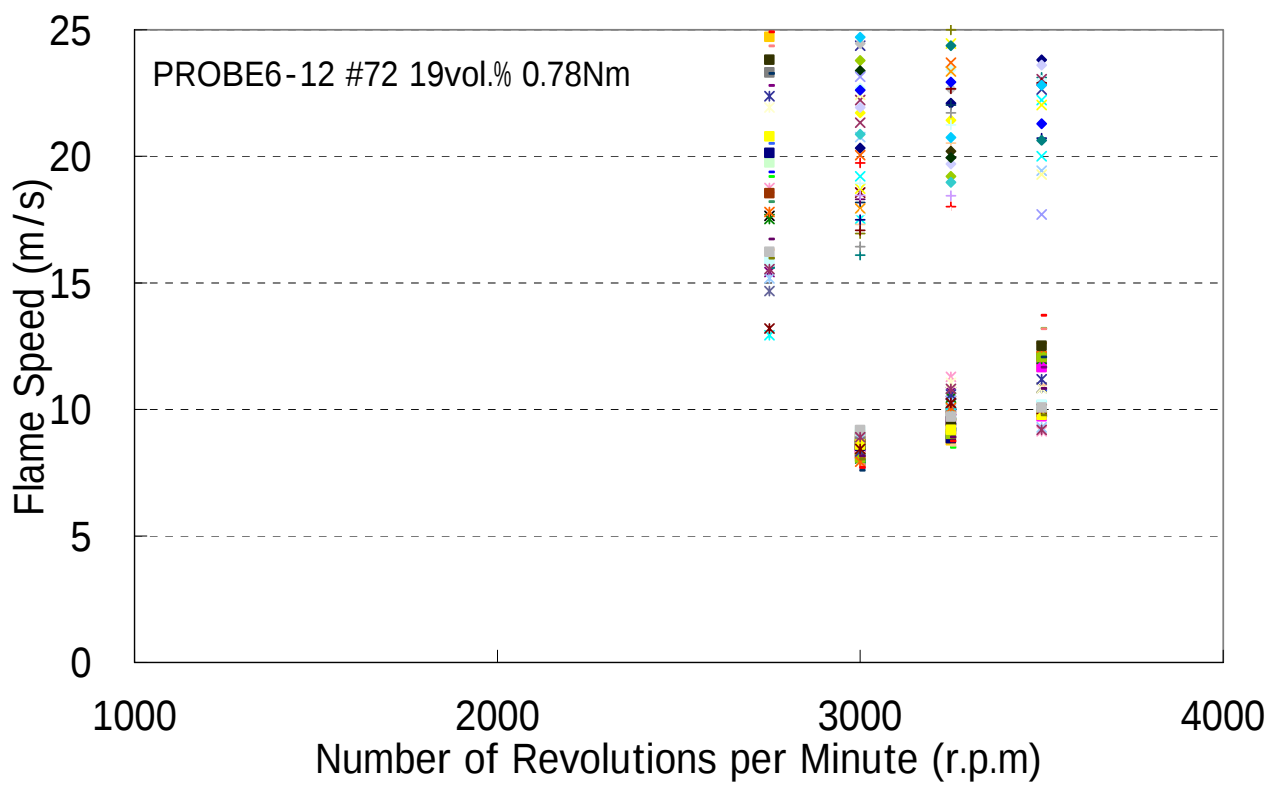


Fig.117 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

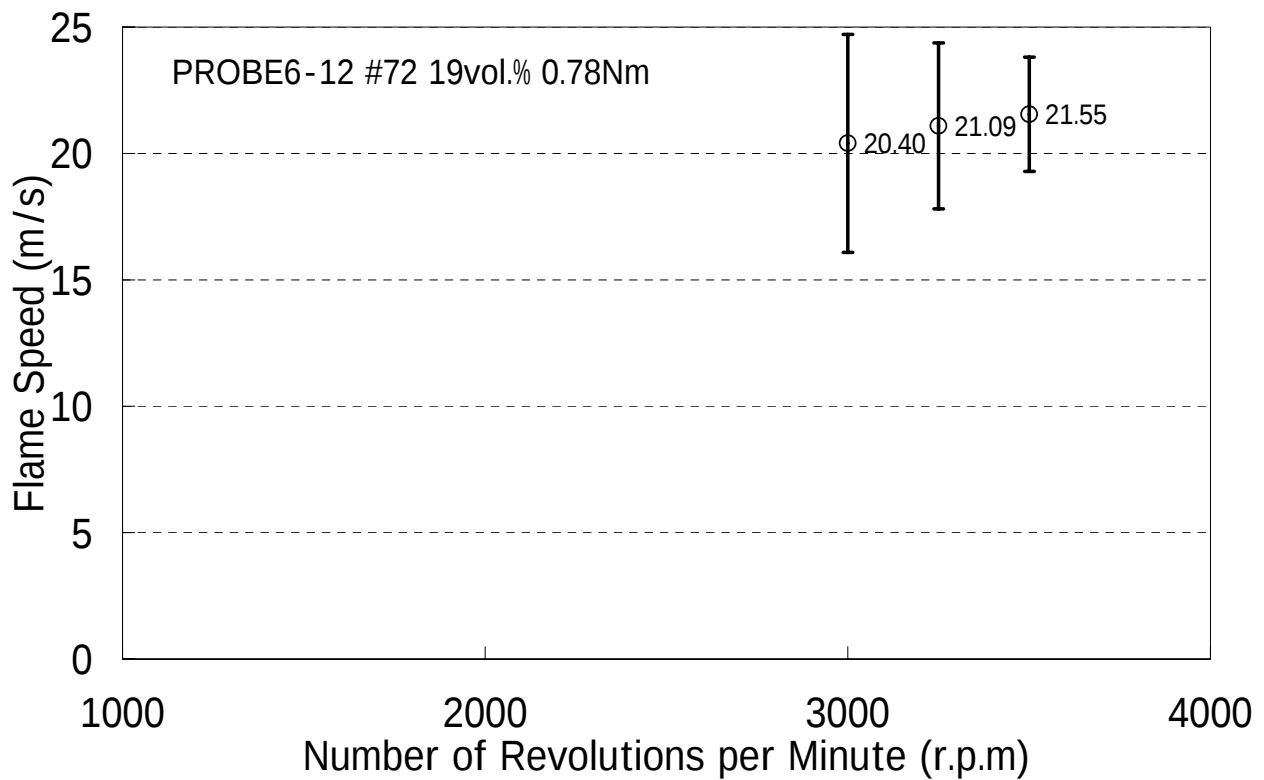


Fig.118 Flame Speed (Average, Data Range)

#72 19vol.% 1.30Nm

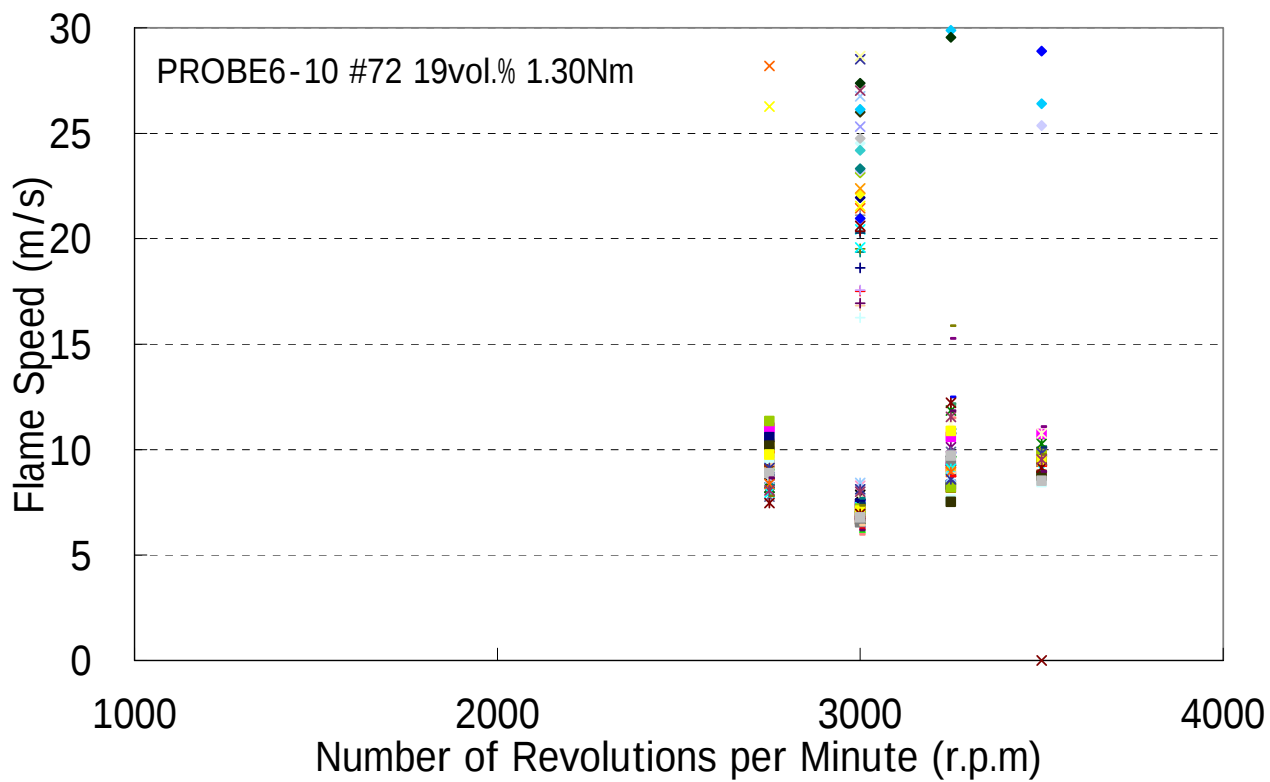


Fig.119 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

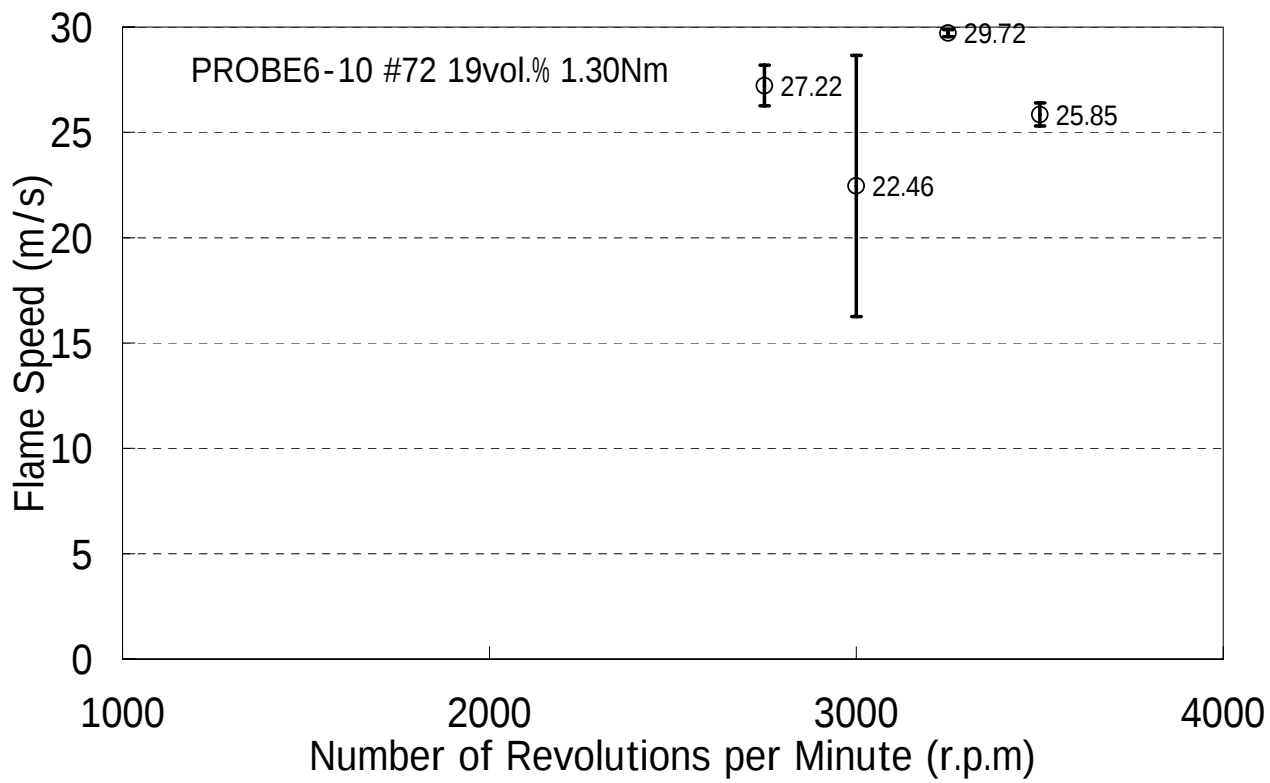


Fig.120 Flame Speed (Average, Data Range)

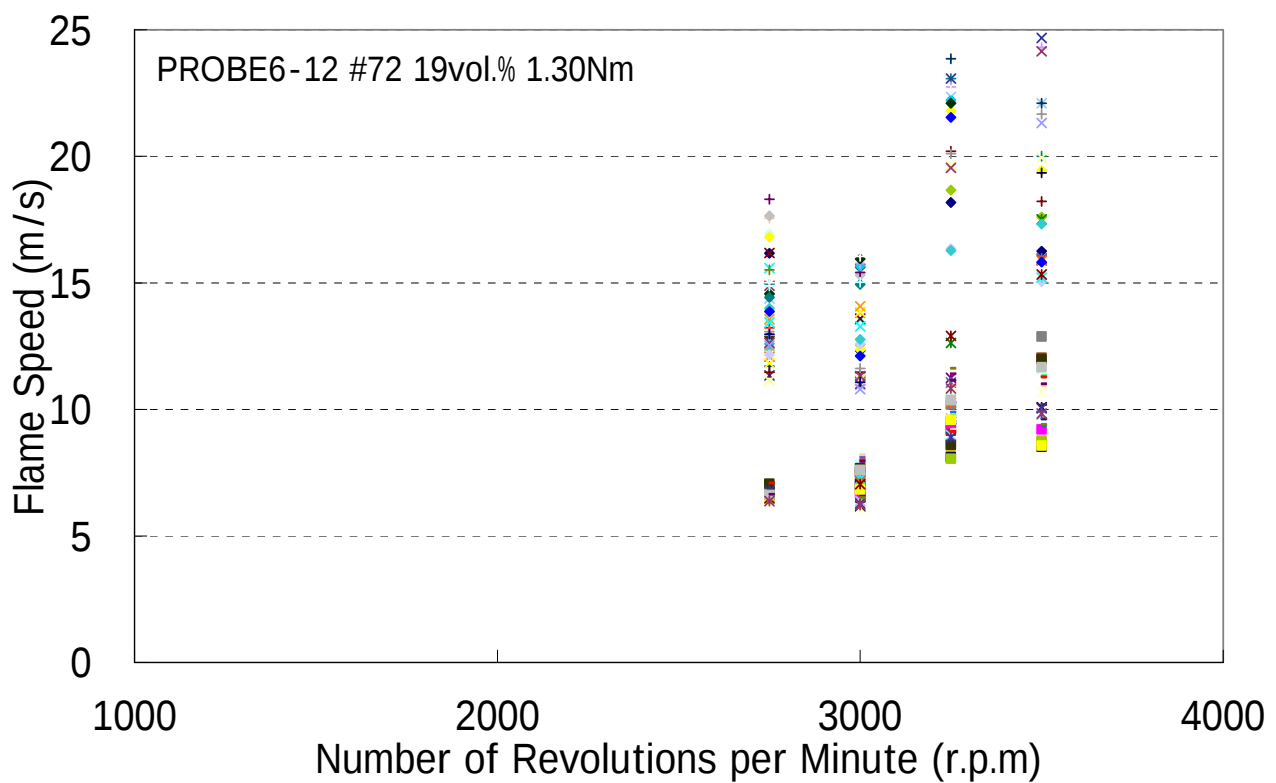


Fig.121 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

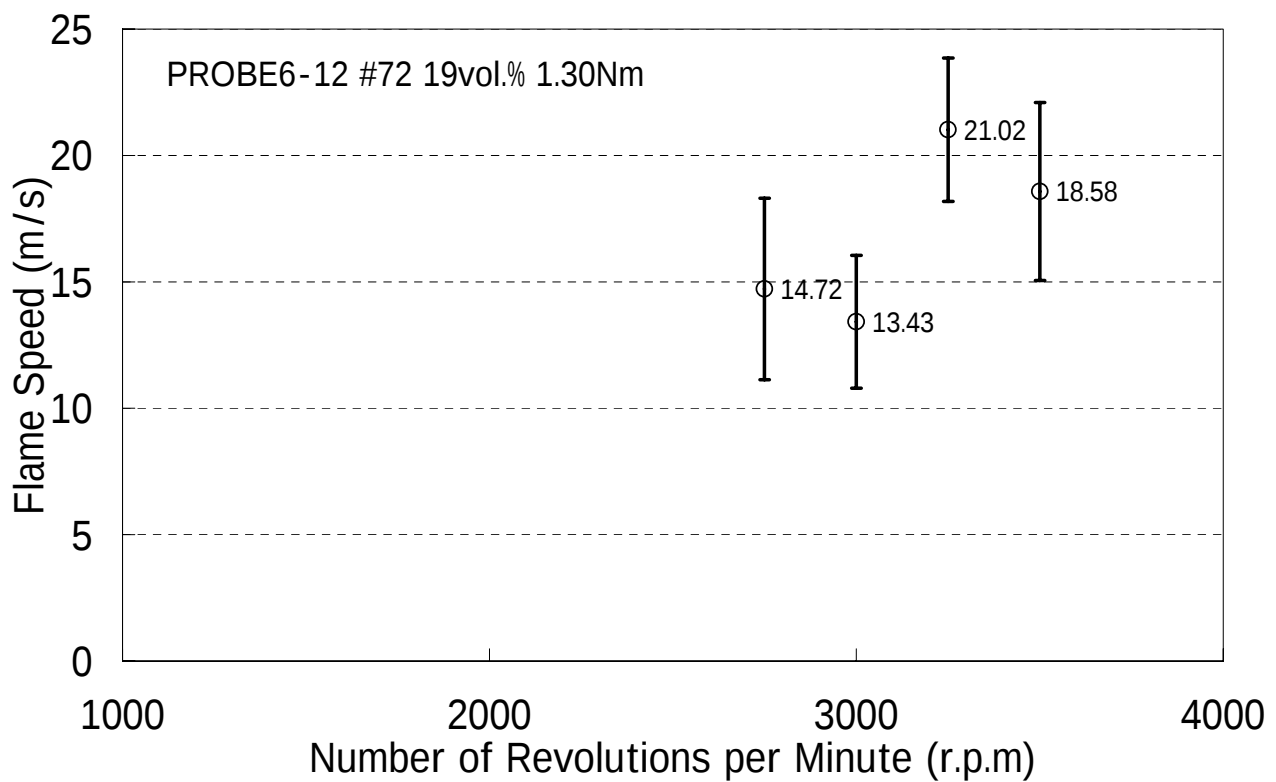


Fig.122 Flame Speed (Average, Data Range)

#72 19vol.% 1.82Nm

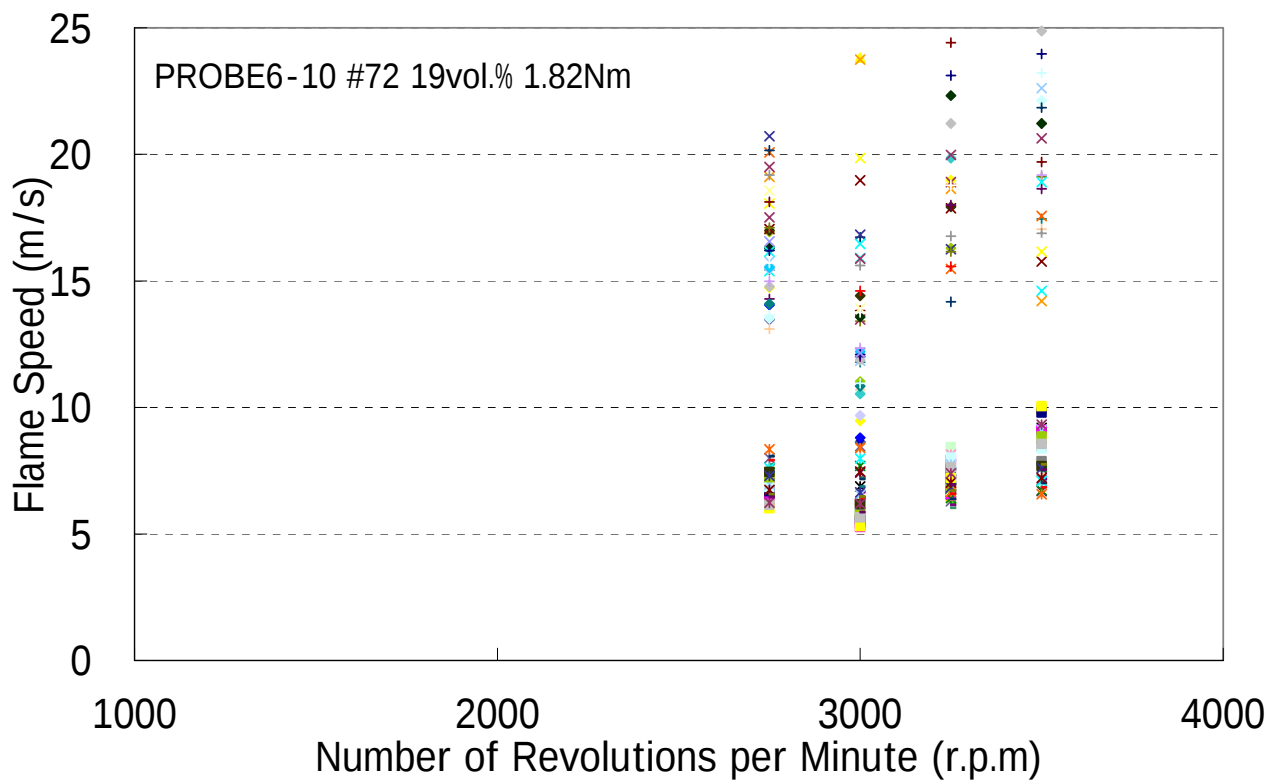


Fig.123 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

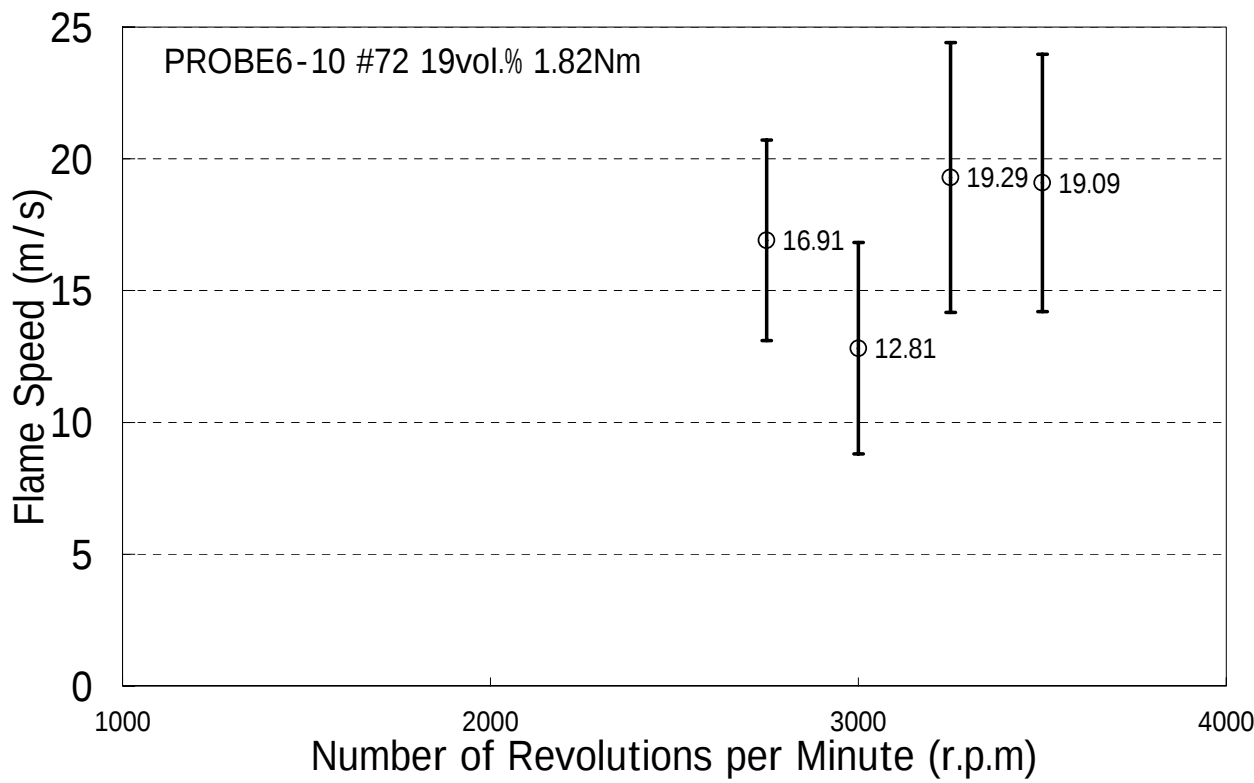


Fig.124 Flame Speed (Average, Data Range)

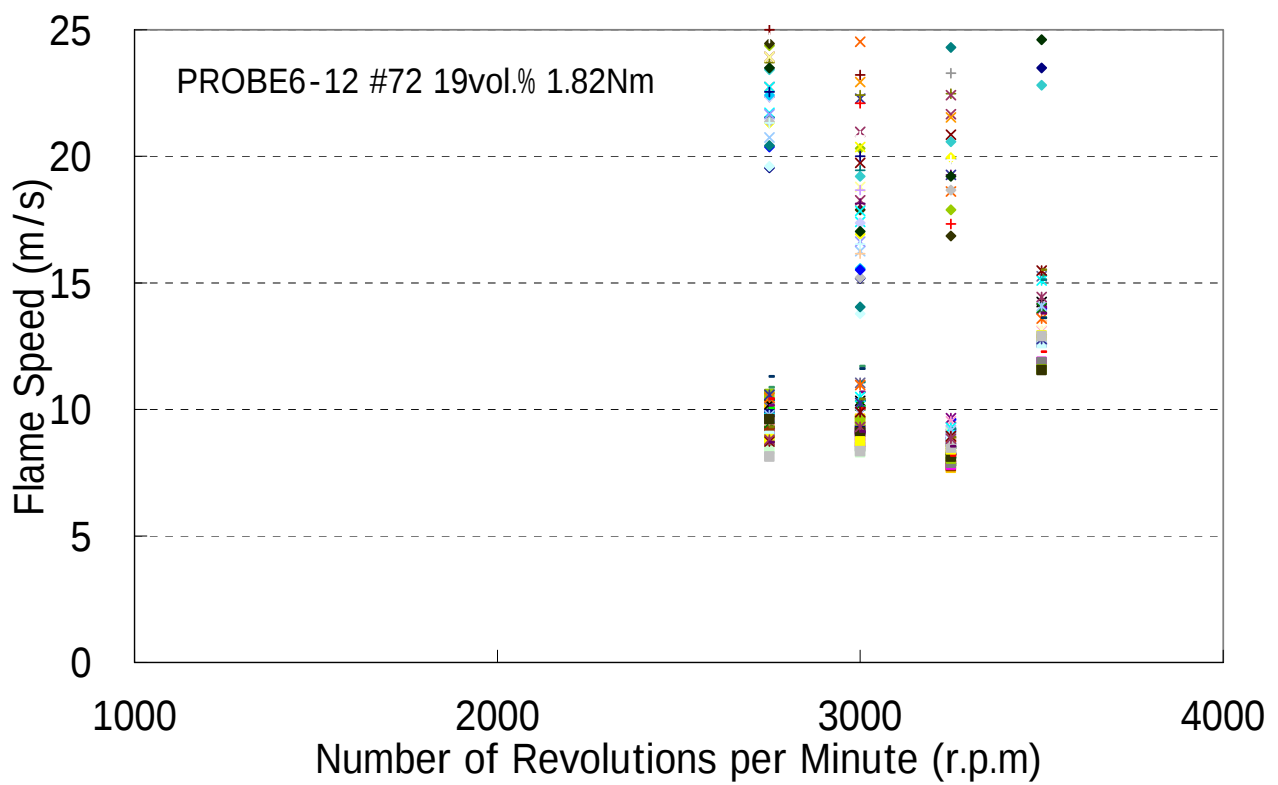


Fig.125 Flame Speed (Measurement, Standard Deviation)

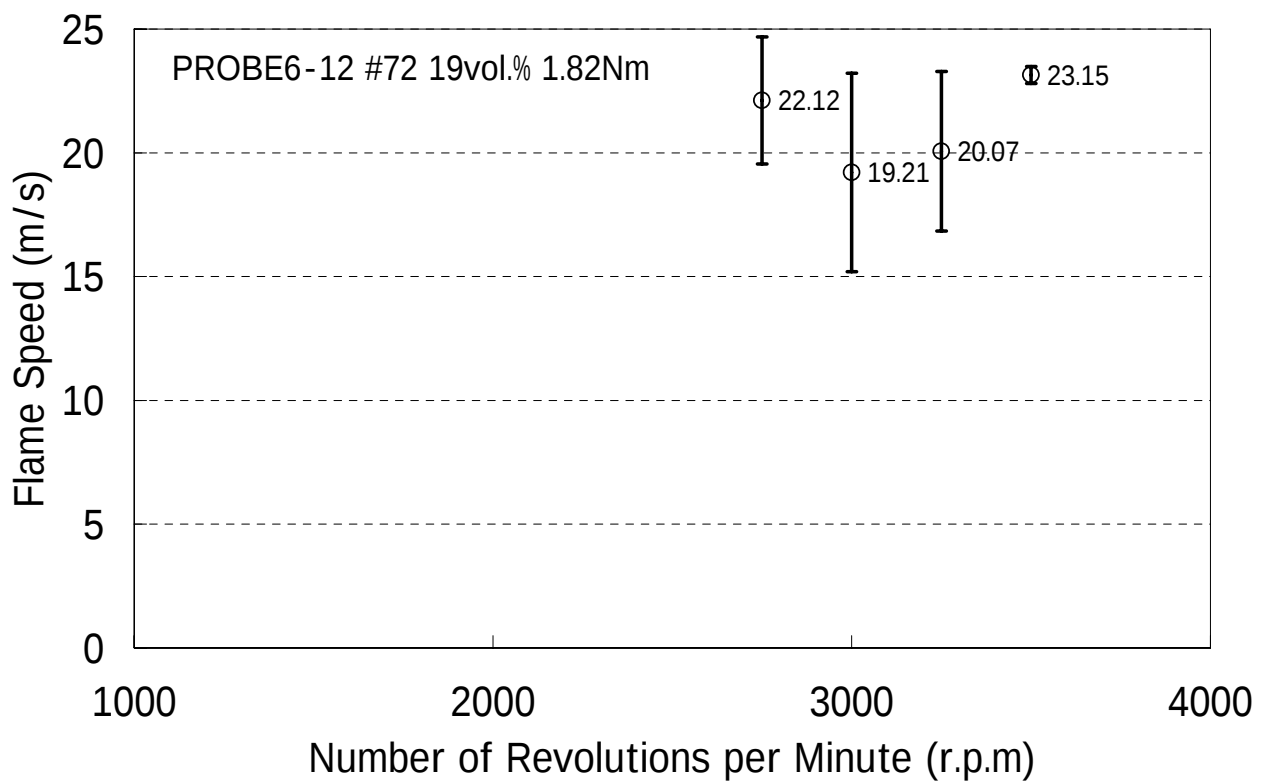


Fig.126 Flame Speed (Average, Data Range)

比較:

Fig.127 ~ Fig.132 に本実験で得られたメインジェット番数 (#72, #42) を用いた場合の吸入空気酸素濃度 21vol.%, 19vol.% における、機関回転数に対する火炎伝ば速度を、部分負荷 (0 ~ 1.78Nm) をパラメータとして示す。

これらの図から明らかなように、部分負荷による火炎伝ばに及ぼす乱れの影響のために変動が大きく観察されるものの、機関回転数の増加に伴い火炎伝ば速度は増大し、同一機関回転数においては部分負荷の増大に伴い、火炎伝ば速度は増大している傾向が観察された。また、吸入空気酸素濃度 21vol.% と 19vol.% との間や、メインジェット番数 #72 と #42 との間での傾向の違いを観察することは、乱れの影響が大きいことや機関回転数の測定範囲が狭いため、困難であった。

また同様に、Fig.133 ~ Fig.140 には本実験で得られたメインジェット番数 #72 (標準) を用いた場合の無負荷 (0Nm) または部分負荷 (0.78Nm, 1.30Nm, 1.78Nm) における、機関回転数に対する火炎伝ば速度を、吸入空気酸素濃度をパラメータとして示す。

これらの図から明らかなように、どの吸入空気酸素濃度の場合やどの部分負荷条件においても、機関回転数の増加に伴い火炎伝ば速度は増大している。吸入空気酸素濃度の影響について観察すると、低吸入空気酸素濃度 (19vol.%) の場合のほうが、高い火炎伝ば速度の値が得られた。理論断熱火炎温度の計算において、吸入空気酸素濃度を 21 から 19vol.% に低下させると、 T_{bt} は約 150K 減少した。このことから、吸入空気酸素濃度の低下は火炎伝ば速度の低下が予測されたが、実験結果より、燃焼室内は吸入空気酸素濃度 19vol.% の方が良好な空燃比が得られていると考えられる。今後、部分負荷時における詳細な低吸入空気酸素濃度の影響について検討を行う予定である。

#72 21vol. %

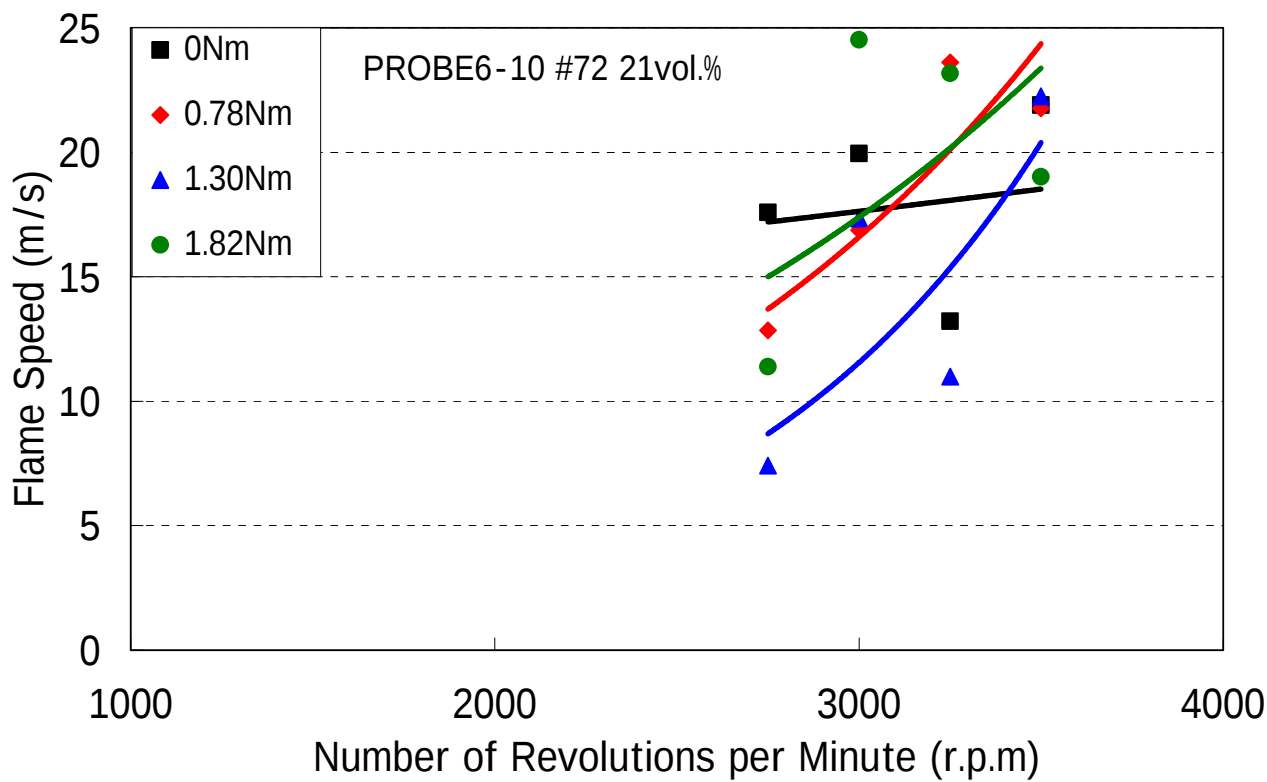


Fig.127 Flame Speed (Comparison)

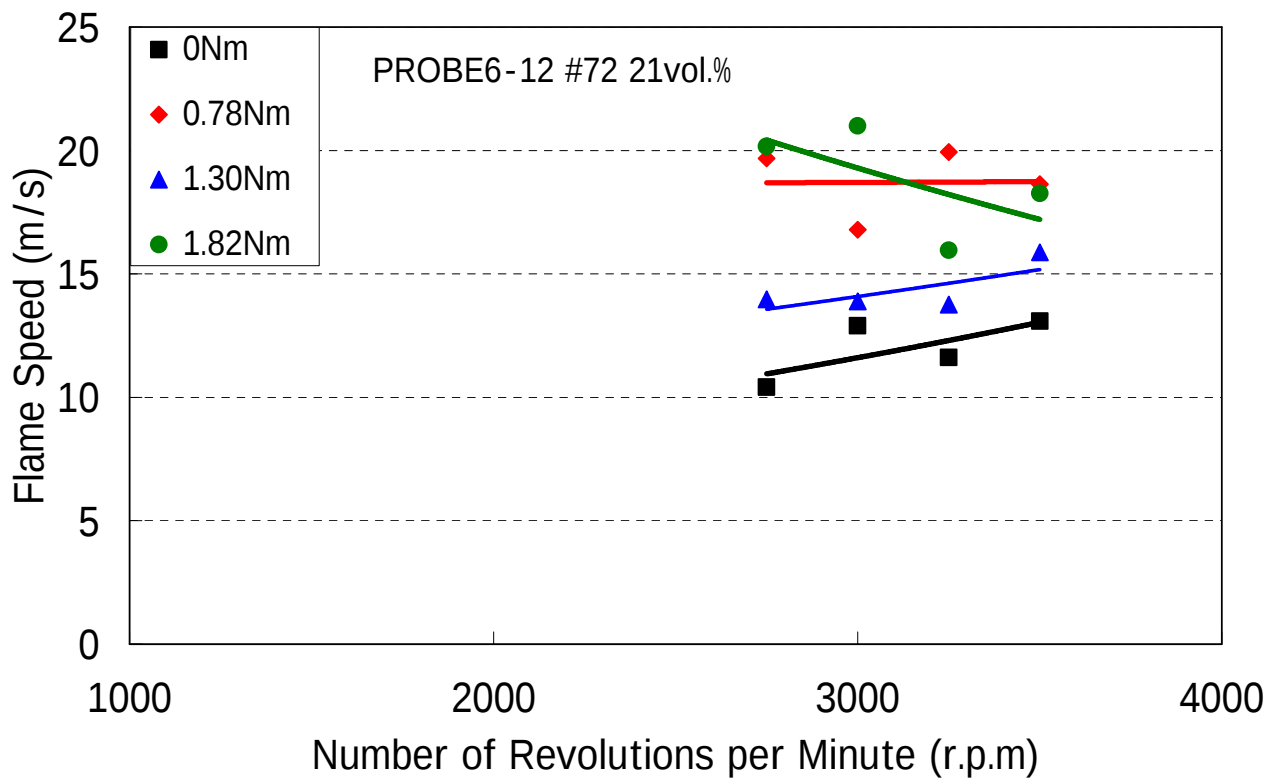


Fig.128 Flame Speed (Comparison)

#72 19vol. %

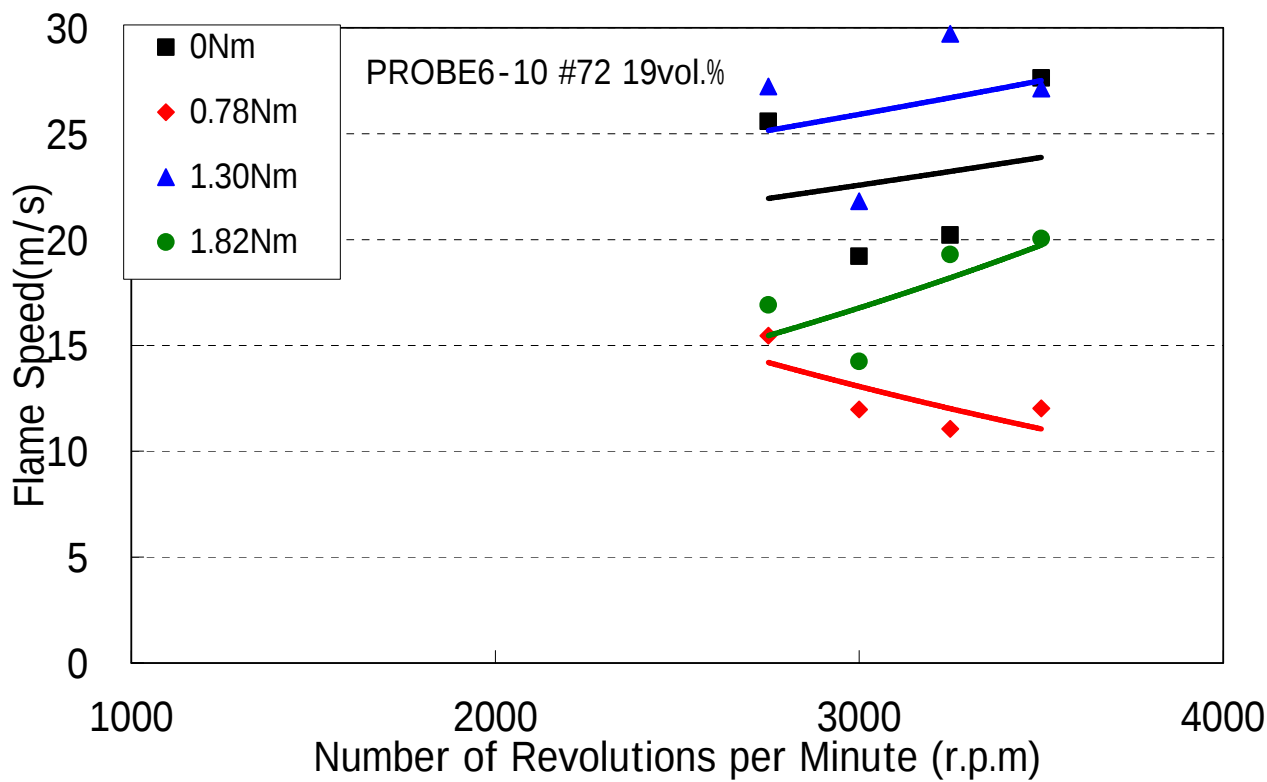


Fig.129 Flame Speed (Comparison)

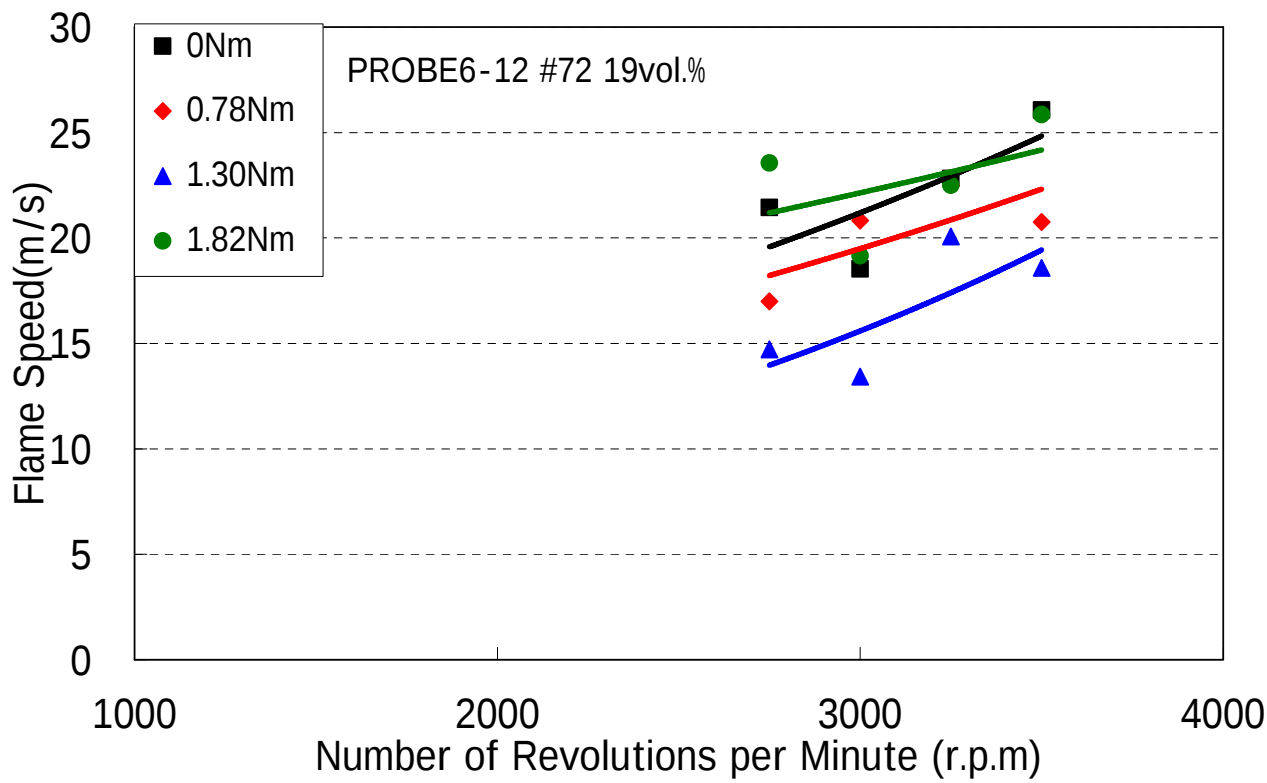


Fig.130 Flame Speed (Comparison)

#42 21vol. %

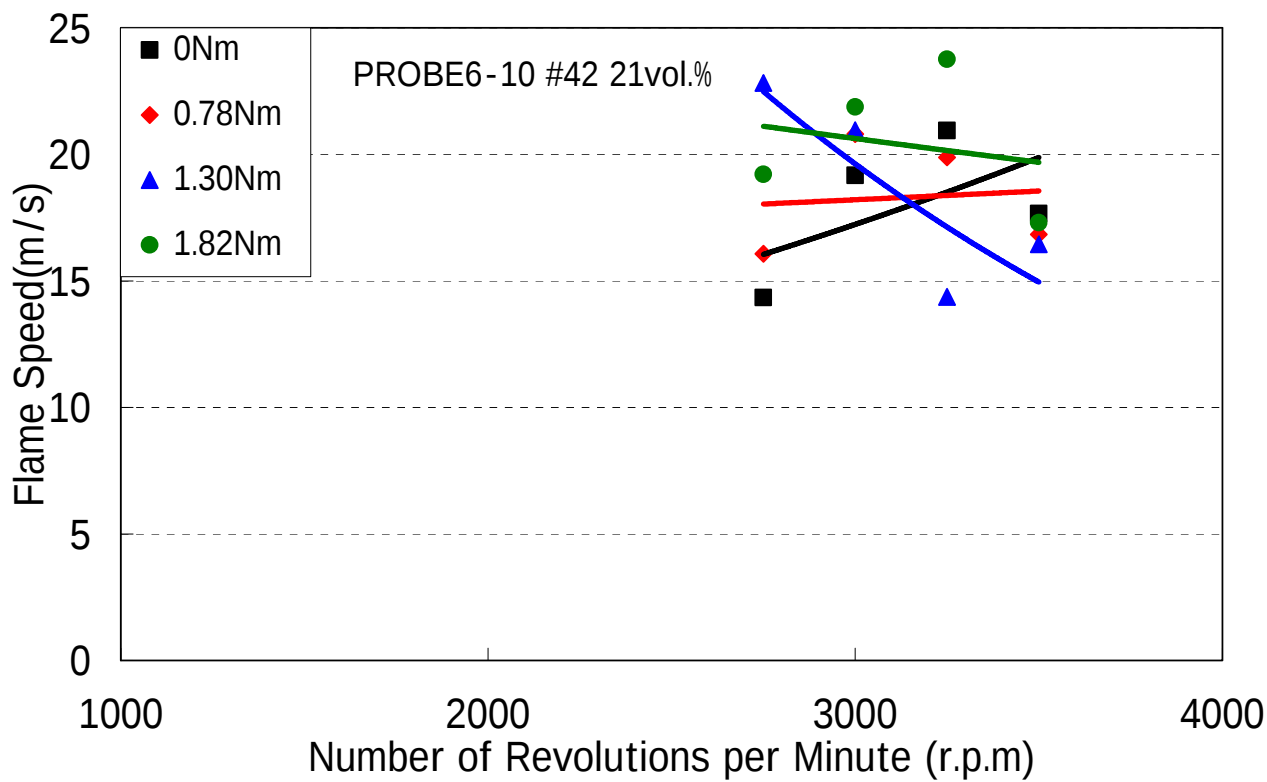


Fig.131 Flame Speed (Comparison)

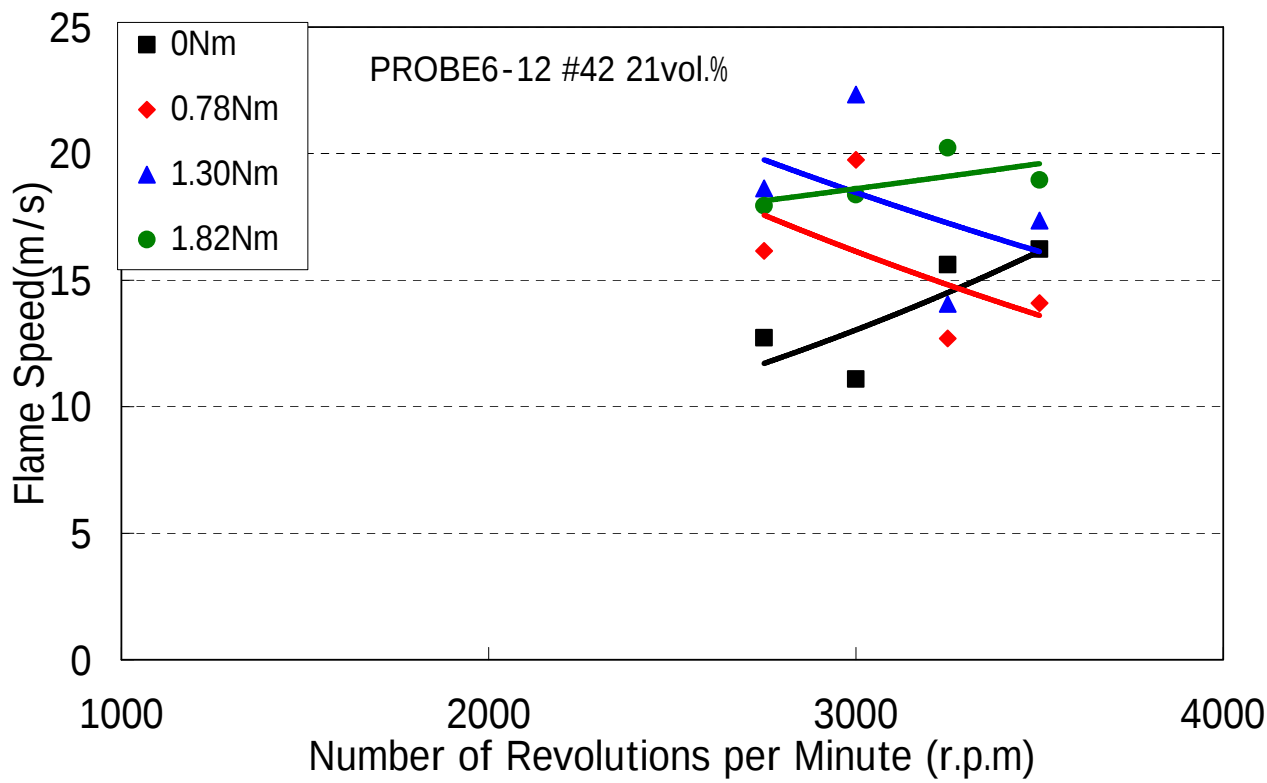


Fig.132 Flame Speed (Comparison)

#72 0Nm

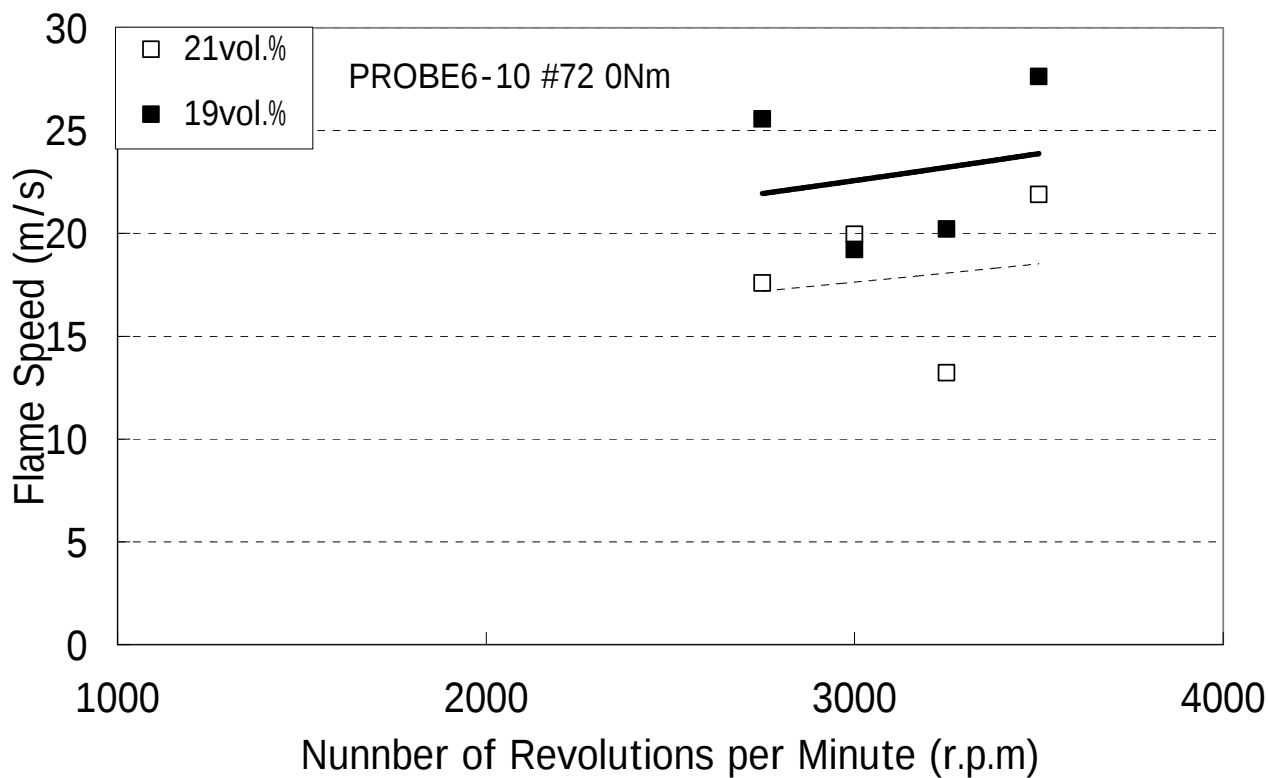


Fig.133 Flame Speed (Comparison)

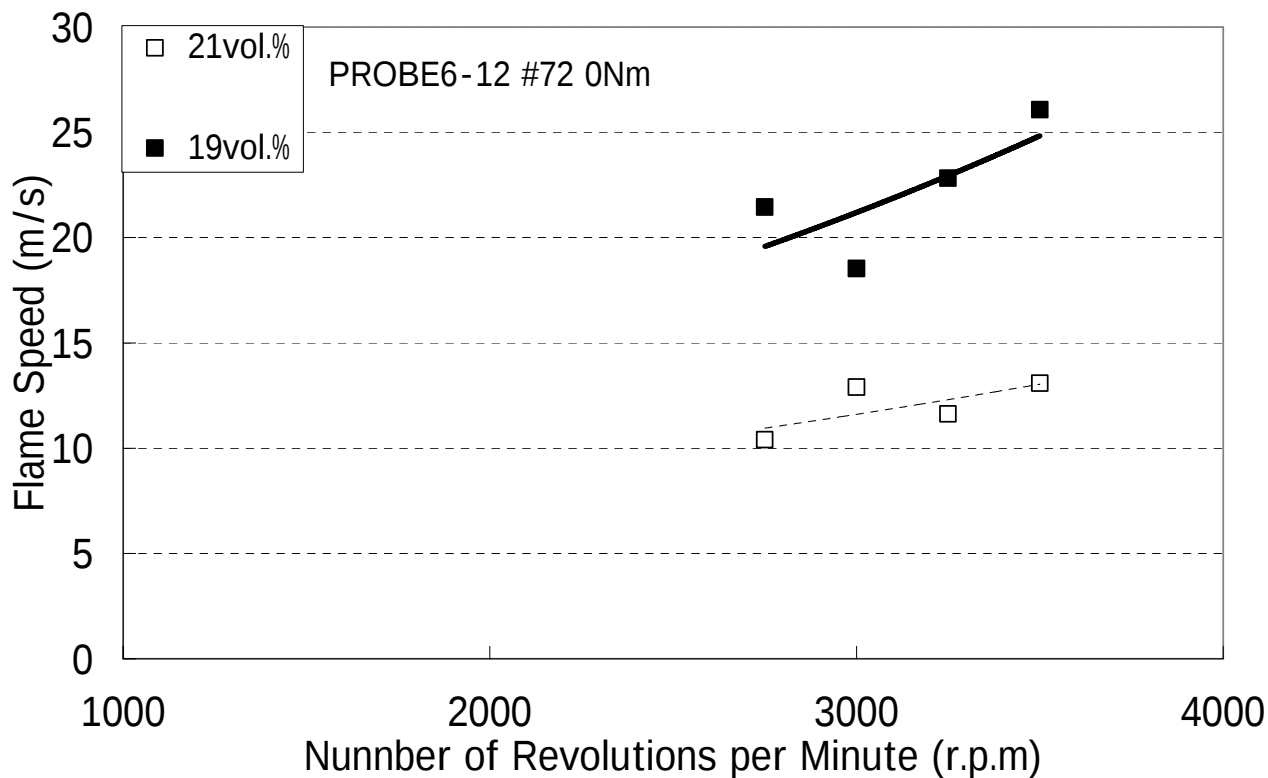


Fig.134 Flame Speed (Comparison)

#72 0.78Nm

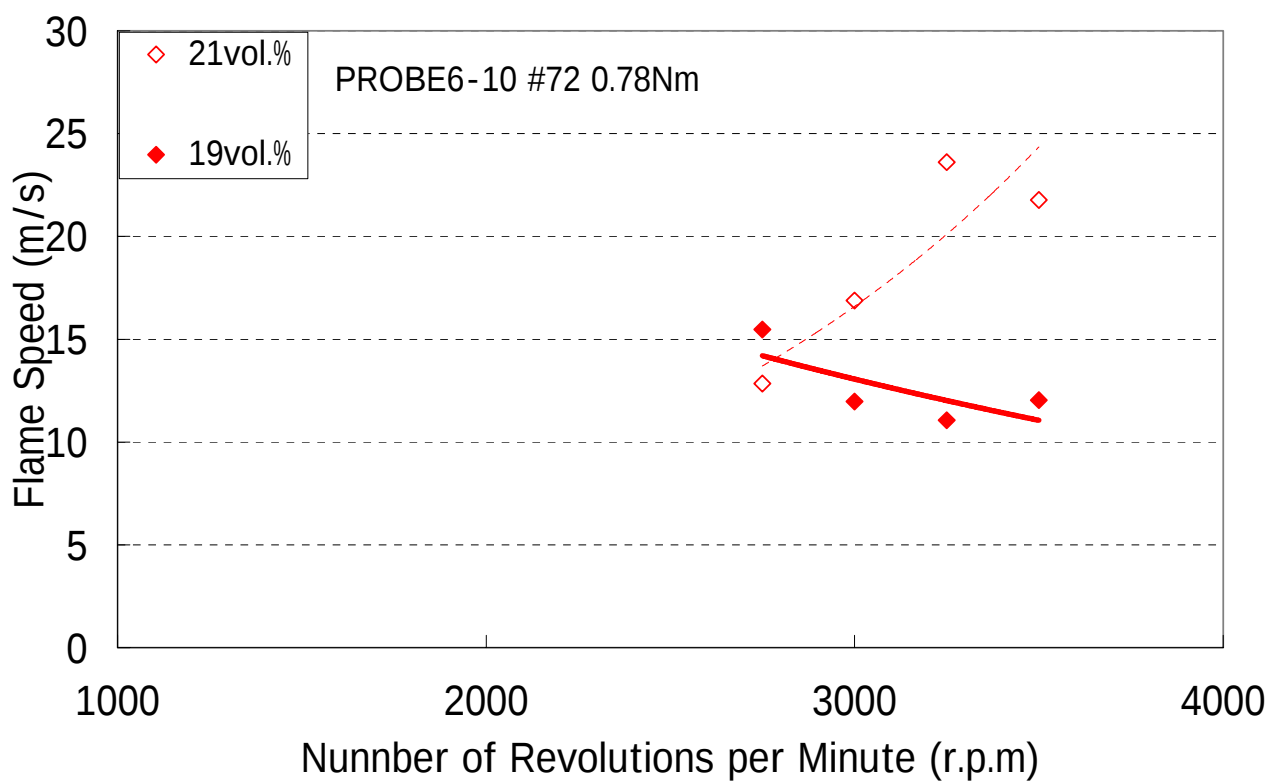


Fig.135 Flame Speed (Comparison)

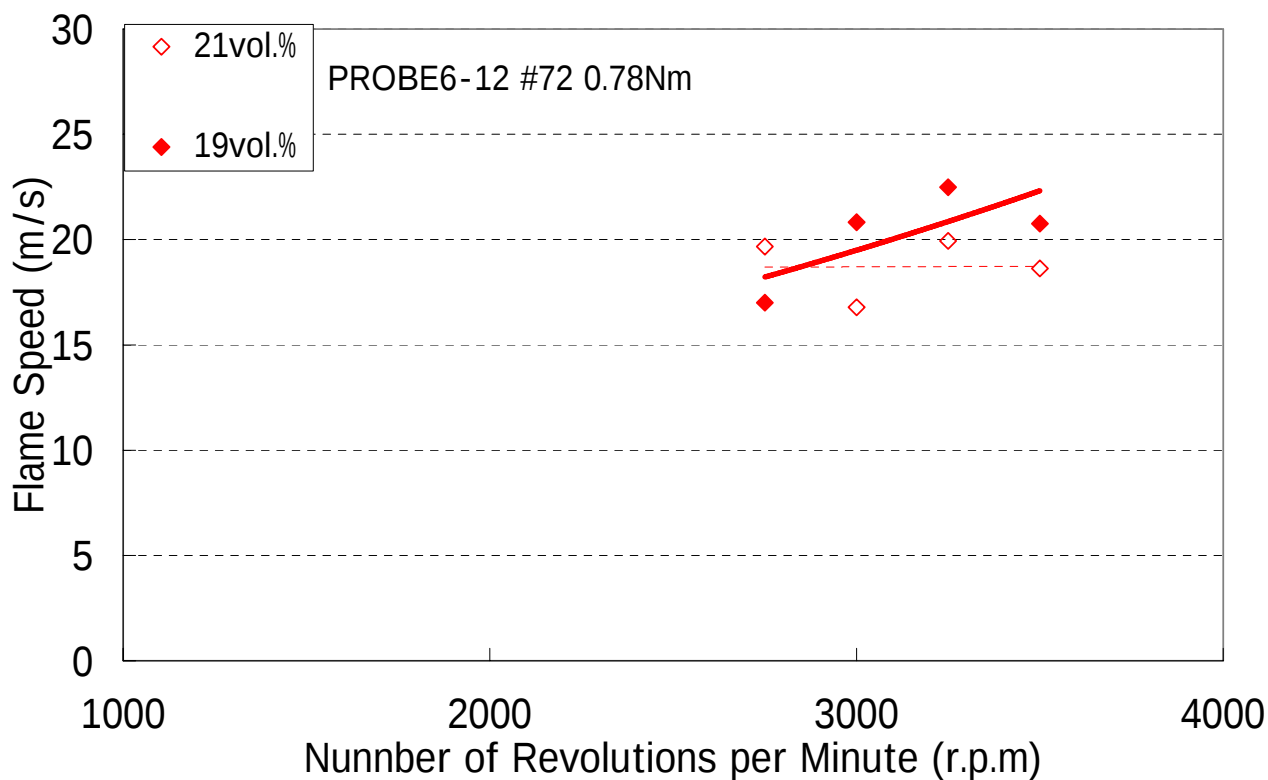


Fig.136 Flame Speed (Comparison)

#72 1.30Nm

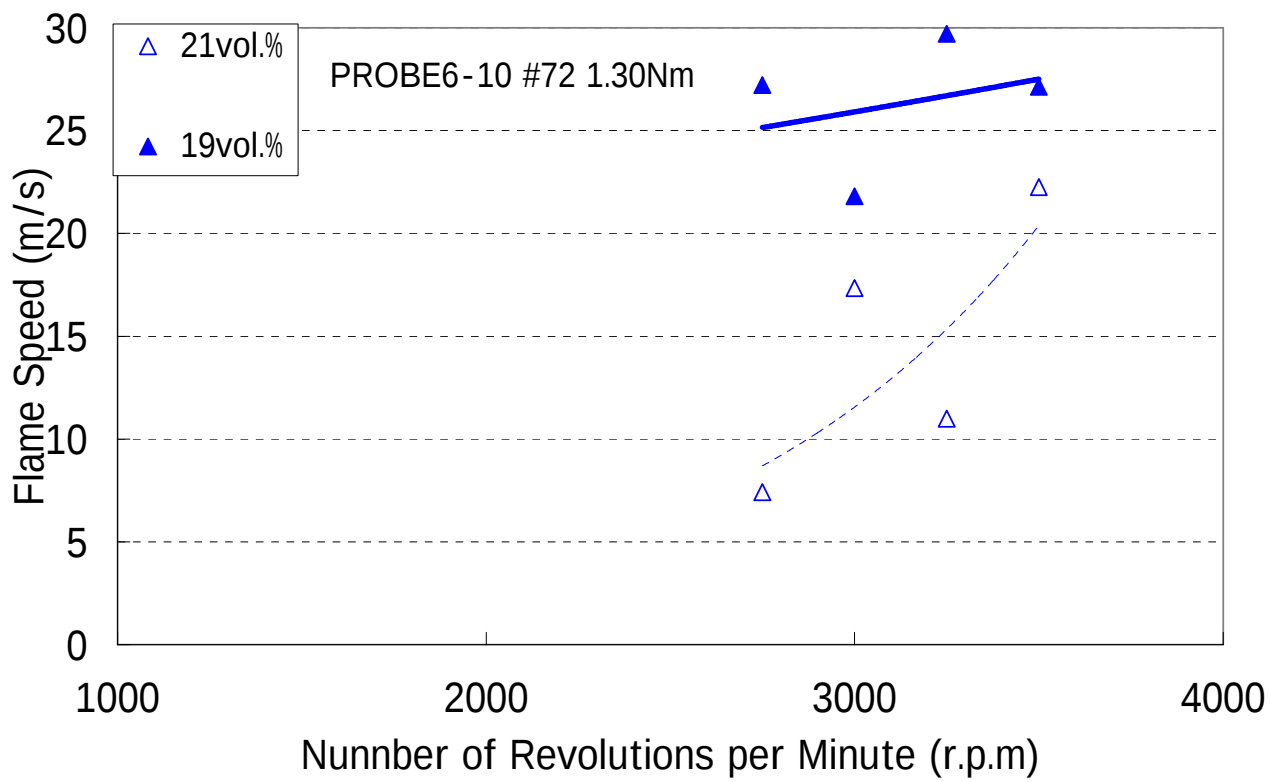


Fig.137 Flame Speed (Comparison)

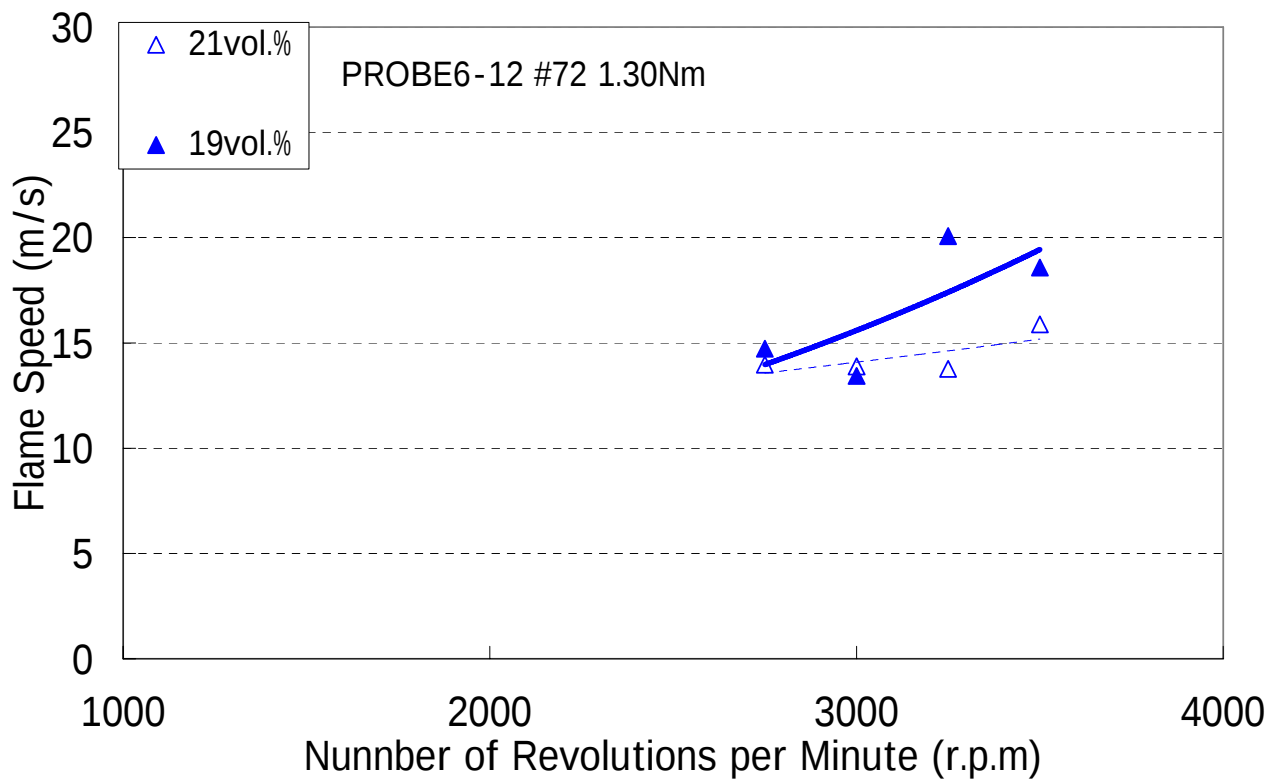


Fig.138 Flame Speed (Comparison)

#72 1.82Nm

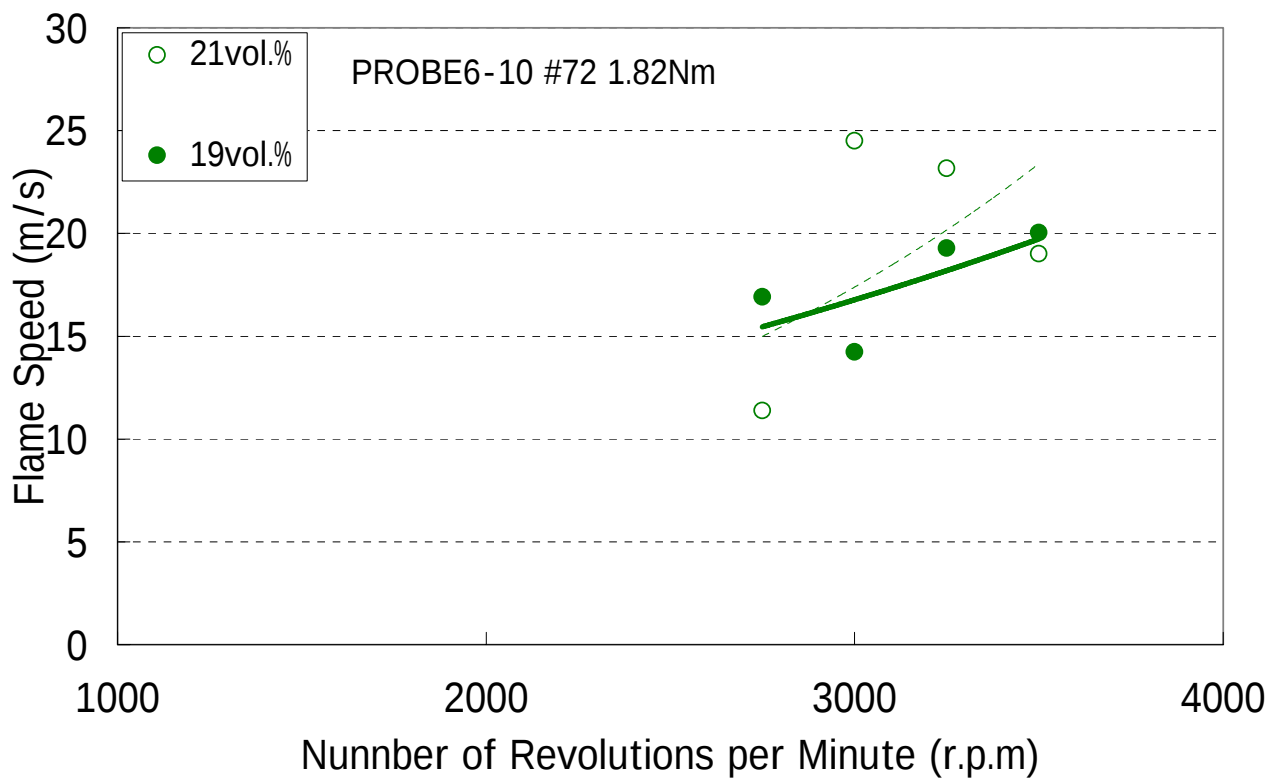


Fig.139 Flame Speed (Comparison)

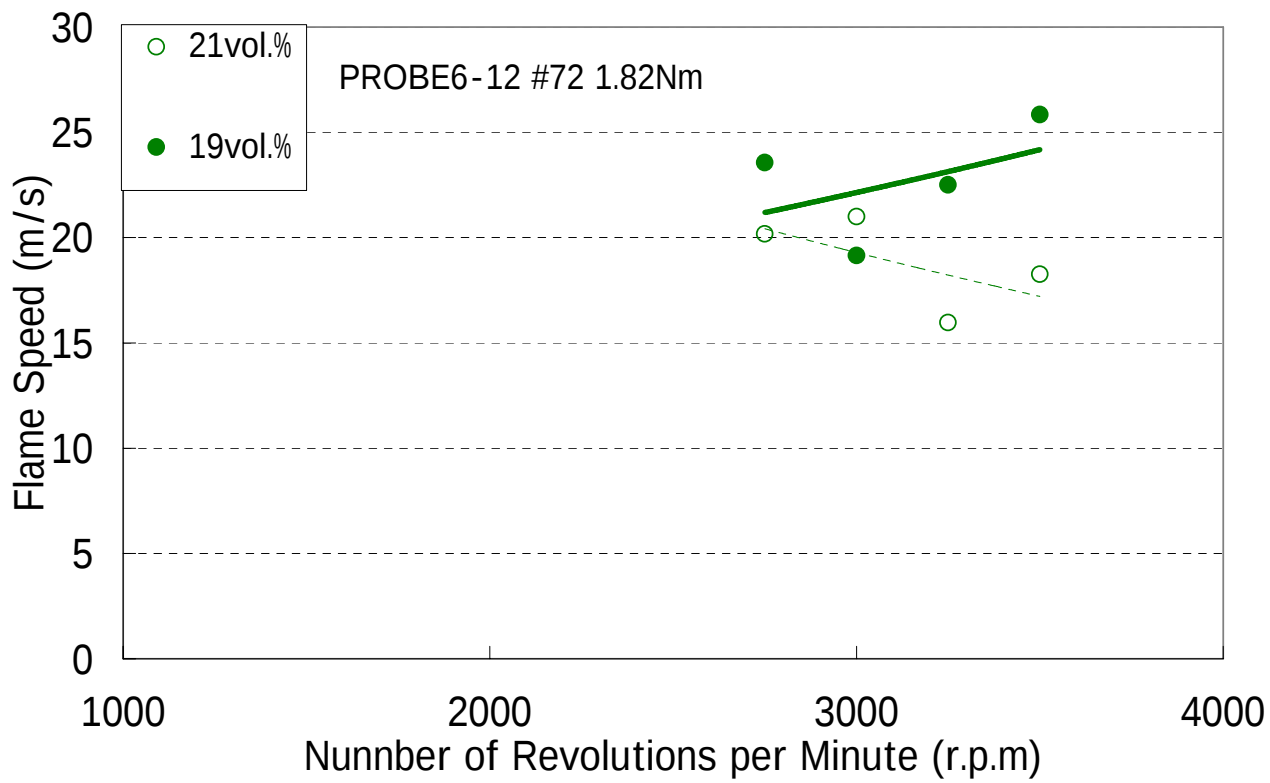


Fig.140 Flame Speed (Comparison)

3-2 平均圧力上昇率

3-2-1 吸入空気酸素濃度

平均圧力上昇率の変化割合に及ぼす各機関回転数における吸入空気酸素濃度の影響を検討するために、Fig.141 に本実験で得られた通常燃料領域(#72)における、無負荷状態での機関回転数に対する平均圧力上昇率を、吸入酸素濃度をパラメータとして示す。ここでの平均圧力上昇率は、最高燃焼圧力から圧縮後の初期圧力を引いた値を全燃焼時間で除して算出された値であり、データとして 30 回程度の算術平均値が用いられた。図から明らかなように、どの吸入酸素濃度においても各機関回転数における平均圧力上昇率は、機関回転数の増大に伴って増加している。また吸入酸素濃度が 21vol.%から 17vol.%へと低下しても各機関回転数における平均圧力上昇率には大きな差異は観察されなかった。

Fig.142 に同様に、希薄燃料濃度領域(#42)における平均圧力上昇率に及ぼす吸入酸素濃度の影響を検討するために、無負荷状態における機関回転数に対する平均圧力上昇率を示す。この図から明らかなように希薄燃料濃度領域(#42)においても機関回転数に対する平均圧力上昇率は、機関回転数の増大と共に増加し、低酸素濃度領域(19vol.%、17vol.%)においても吸入酸素濃度 21vol.%の場合と機関回転数における平均圧力上昇率に大きな差異がないことがわかる。また、Fig.141 と比較すると、どの吸入酸素濃度においても機関回転数に対する平均圧力上昇率に大きな差異はないことがわかる。よって、低酸素濃度領域(19vol.%、17vol.%)かつ希薄燃料濃度領域においても十分実走可能であることがわかる。

Fig.143、Fig.144、Fig.145 に希薄燃料領域(#42)における、動力計負荷(0.78Nm、1.82Nm、3.9Nm)での機関回転数に対する平均圧力上昇率を、吸入酸素濃度をパラメータとして示す。本実験での動力計負荷は、小型ガソリン機関の作動範囲と動力計

の制限から 0 ~ 3.9Nm の範囲とした。また、本実験範囲内では動力計負荷をかけることにより、低回転域では回転数を維持することが困難であったため、3000 ~ 5000r.p.m の範囲で実験を行った。この図から明らかなように動力計負荷をかけた場合においても、各機関回転数に対する平均圧力上昇率は、機関回転数の増大と共に増加し、また、どの機関回転数においても各機関回転数における平均圧力上昇率は低酸素濃度になるにつれて減少しているのがわかる。Fig.142 と比較すると、どの雰囲気酸素濃度においても部分負荷をかけることによって機関回転数に対する平均圧力上昇率は増大している。

以上のことから、機関にあたえる部分負荷が高負荷でないとき、つまり低負荷であるときは、平均圧力上昇率に及ぼす吸入空気酸素濃度の影響に大きな差異が生じないことがわかった。

#72 0Nm

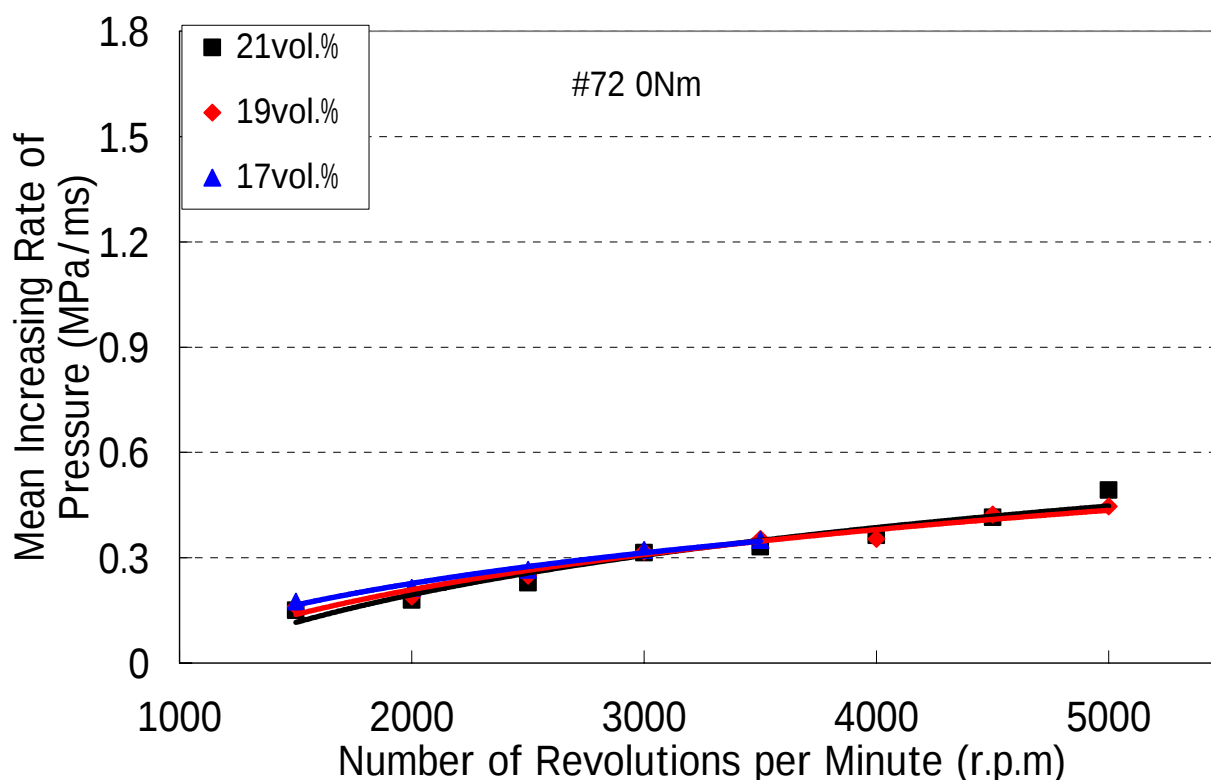


Fig.141 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

#42 0Nm

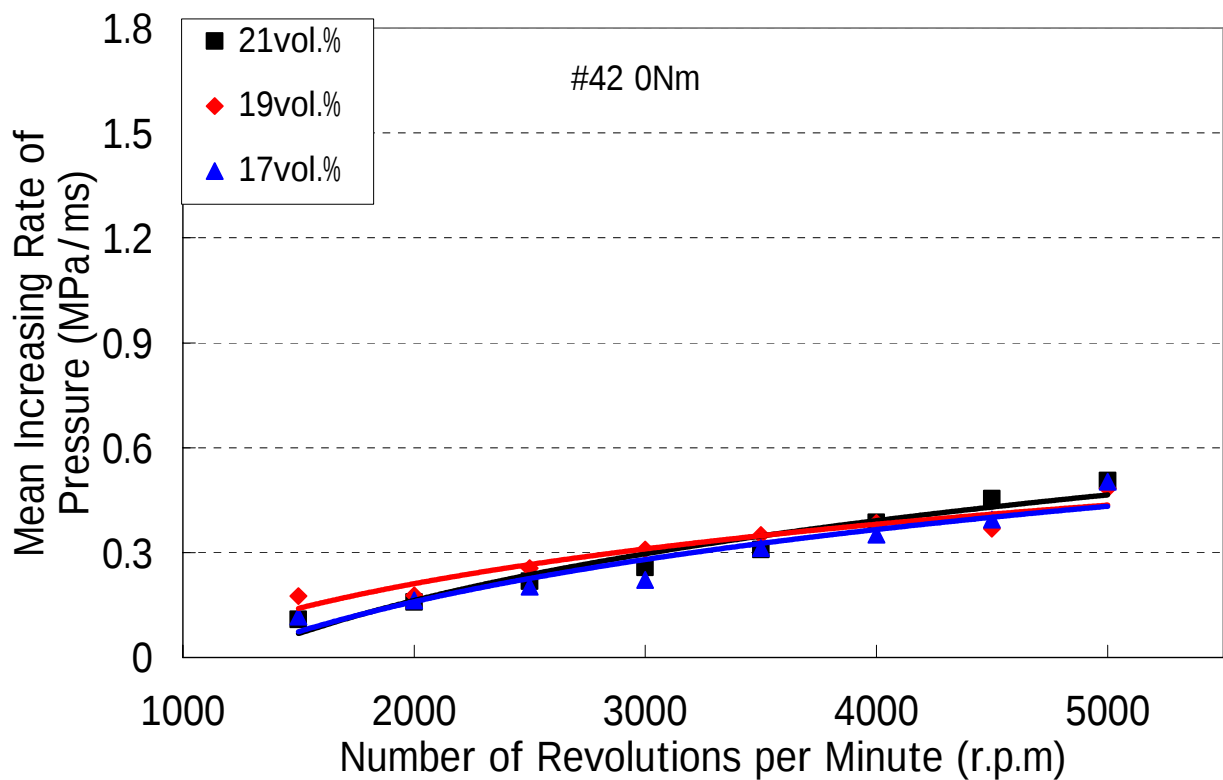


Fig.142 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

#42 0.78Nm

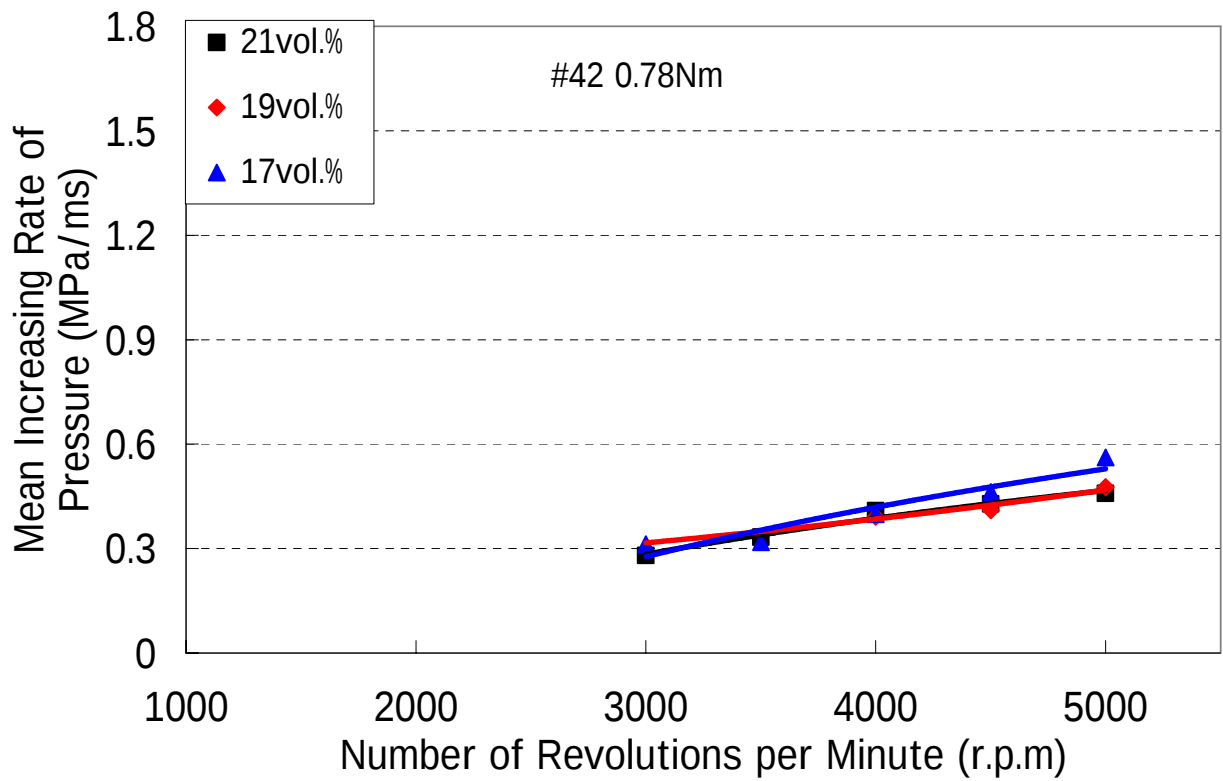


Fig.143 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

#42 1.82Nm

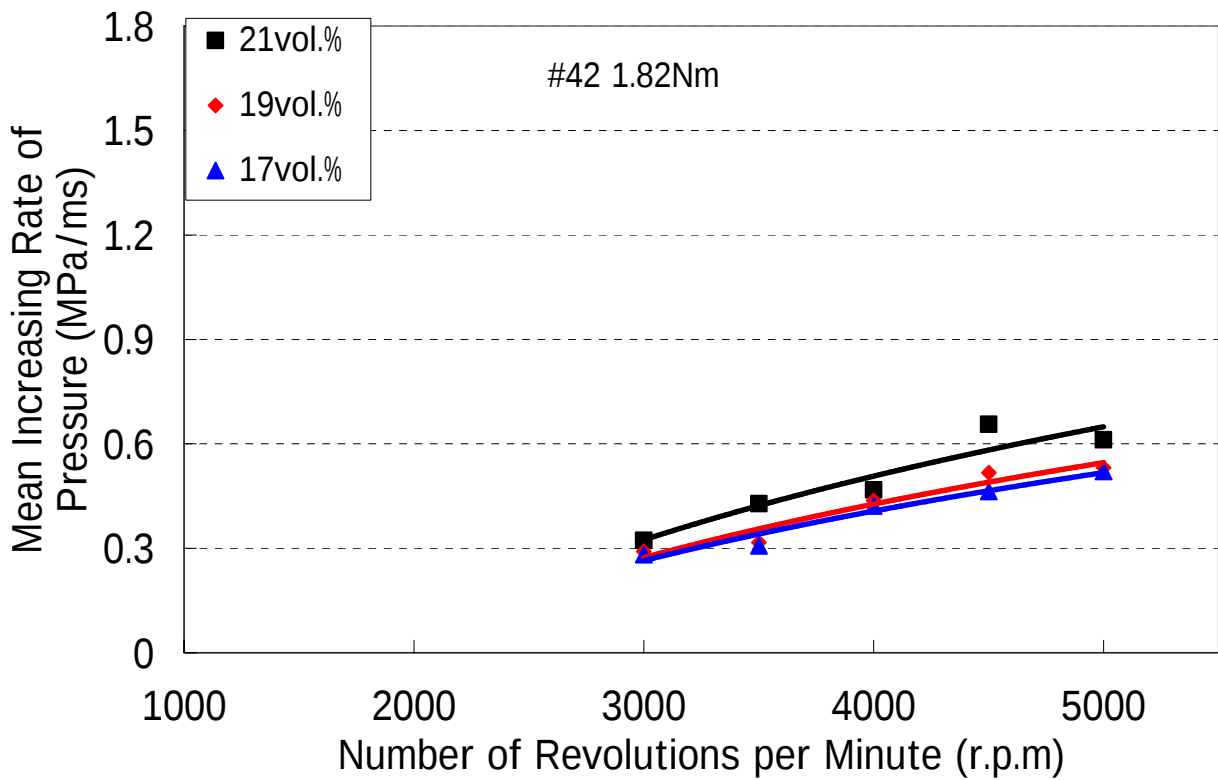


Fig.144 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

#42 3.9Nm

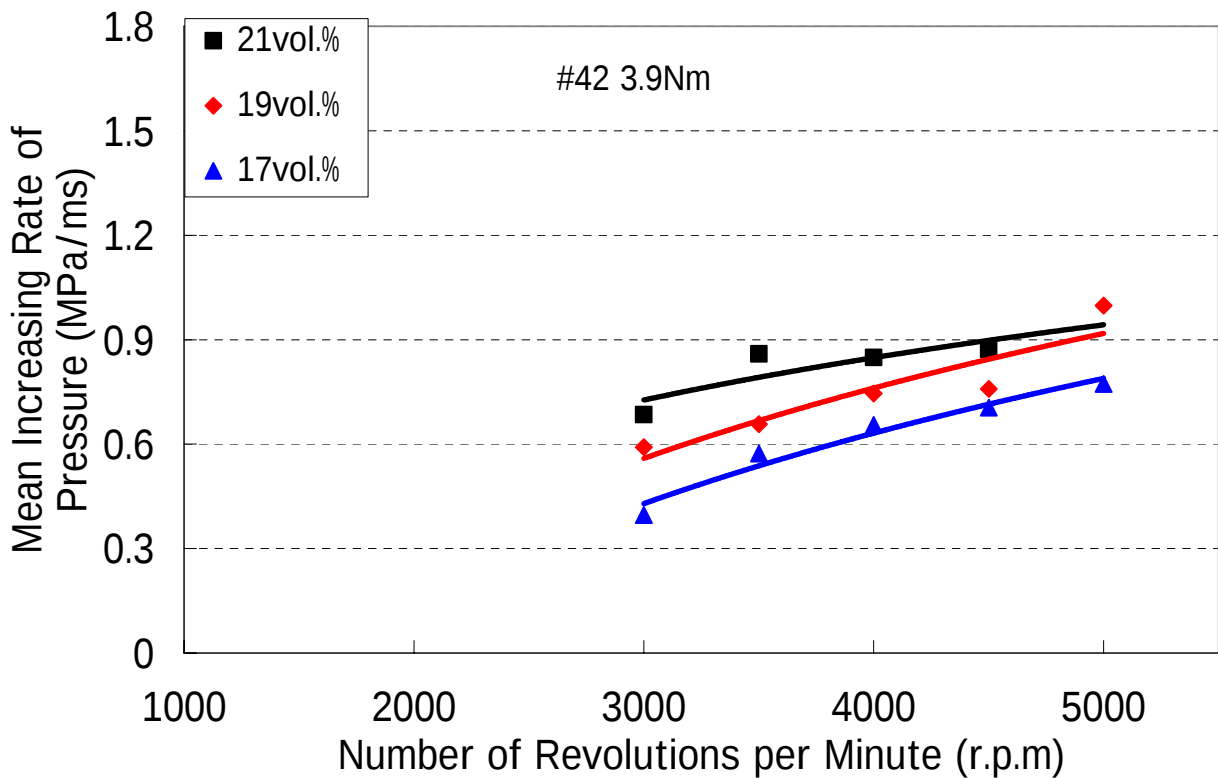


Fig.145 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

3-2-2 動力計負荷

平均圧力上昇率の変化割合に及ぼす各機関回転数における無負荷及び部分負荷の影響を検討するために、Fig.146 に本実験で得られたメインジェット番数#72(標準)における、吸入空気酸素濃度 21vol.%(一定)での機関回転数に対する平均圧力上昇率を、動力計負荷をパラメータとして示す。この図から明らかなように、機関に部分負荷をかけた場合、どの動力計負荷条件においても各機関回転数における平均圧力上昇率は、機関回転数の増大に伴って増加しており、また、同一機関回転数において、機関負荷が増大することにより得られた平均圧力上昇率は増加している。これは、機関に部分負荷をかけることにより、絞り弁開度が増加するためである。部分負荷 3.9Nm での 4500r.p.m 時の平均圧力上昇率の値の低下は、充填効率の低下に伴う燃焼室内の空燃比の悪化によるものである。

Fig.147 に同様に、希薄燃料濃度領域(メインジェット番数#42)における平均圧力上昇率の変化割合に及ぼす無負荷及び部分負荷の影響を検討するために、吸入空気酸素濃度 21vol.%(一定)の場合の機関回転数に対する平均圧力上昇率を示す。この図から明らかなように、希薄燃料濃度領域においても通常燃料濃度領域と比較すると(Fig.146 参照)、同様の傾向が観察される。すなわち、吸入空気酸素濃度 21vol.%において、若干の希薄領域においても十分実走可能であり、この領域における雰囲気酸素濃度の機関性能に及ぼす影響を検討する必要があるが示唆される。また、無負荷状態や低部分負荷時でのメインジェット番数#72 及び#42 の平均圧力上昇率を比較すると(Fig.146 参照)、大きな差異は観察されなかった。

Fig.148、Fig.149 に機関内の圧力上昇割合に及ぼす低吸入空気酸素濃度(19vol.%、17vol.%)の影響を検討するために、希薄燃料濃度領域(メインジェット番数#42)を用いた場合の機関回転数に対する平均圧力上昇率を、動力計負荷をパラメータとして示す。この図から明らかなように、吸入空気酸素濃度の低下に伴いどの

機関回転数においても、部分負荷をかけた場合の平均圧力上昇率の値は減少している。また、どの機関回転数においても吸入空気酸素濃度 21vol.%と比べると (Fig.147 参照)、部分負荷をかけた場合の平均圧力上昇率の値は低下したが、無負荷状態での平均圧力上昇率の低下は観察されなかった。このことから、実走行可能な動力計負荷条件においても小型ガソリン機関を用いた場合には、低吸入空気酸素濃度においても燃焼制御が可能であると示唆される。

#72 21vol. %

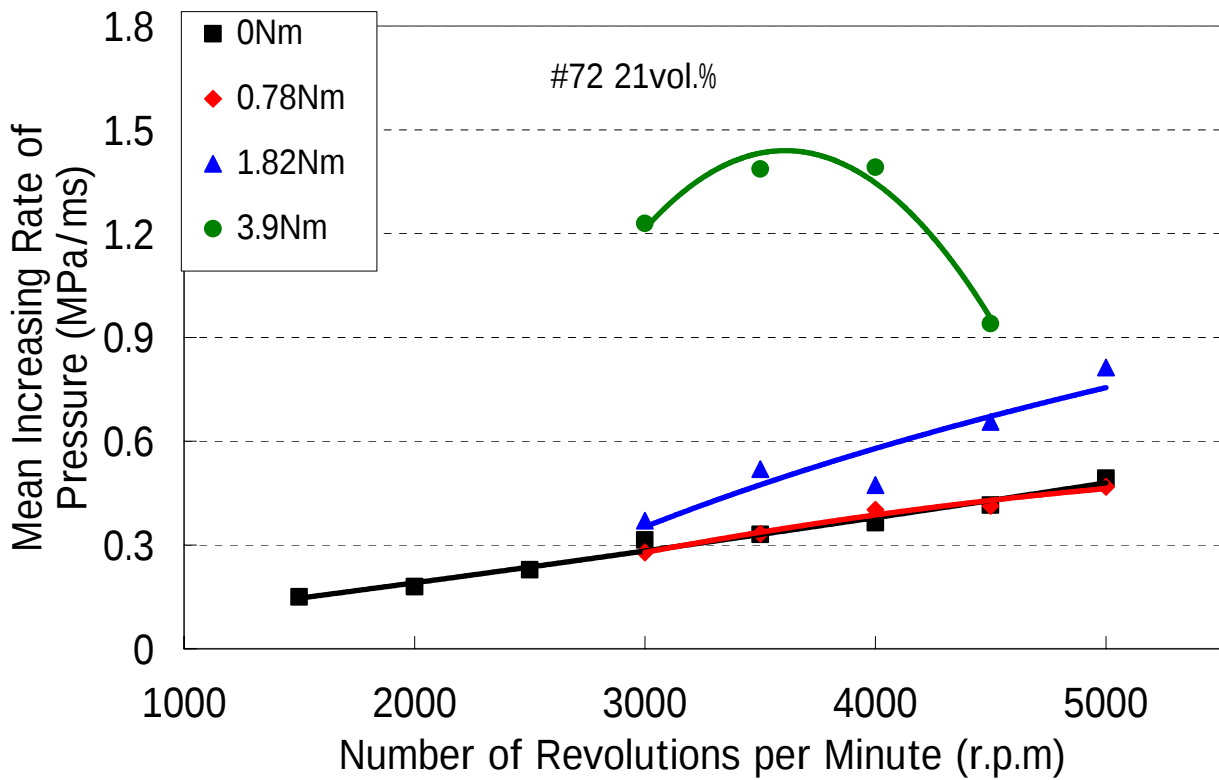


Fig.146 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

#42 21vol. %

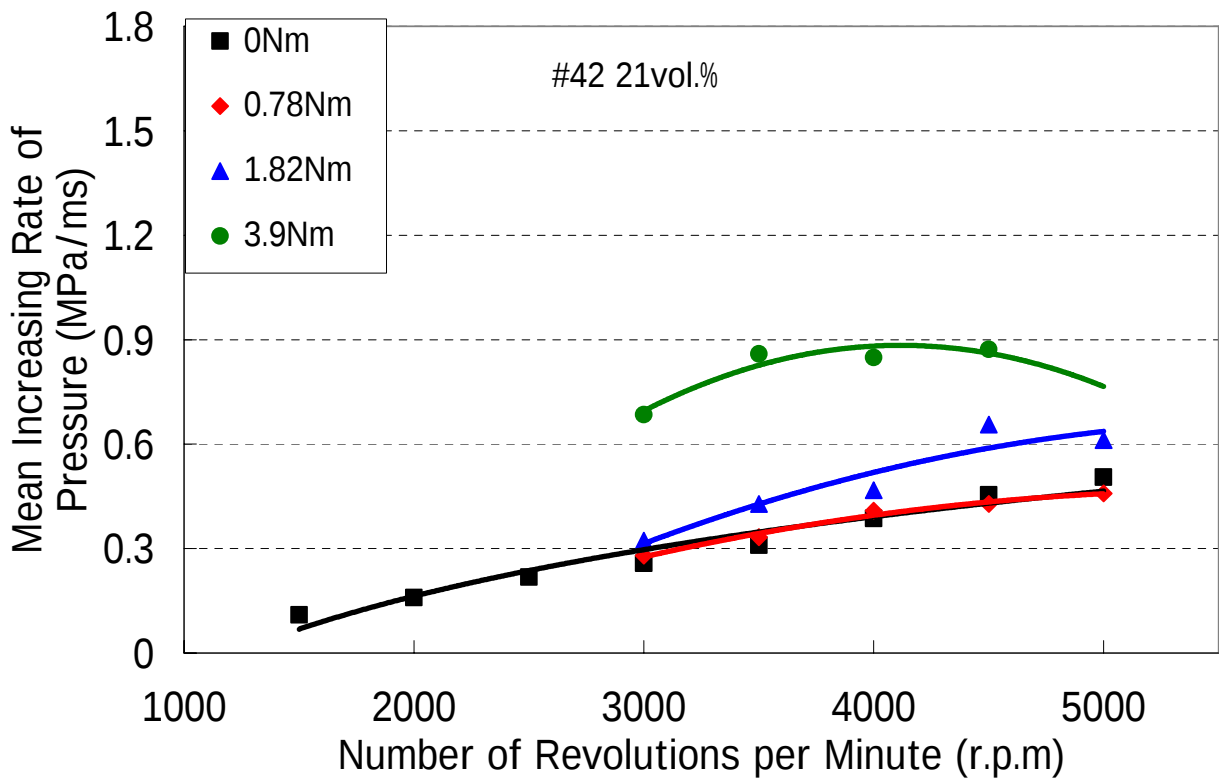


Fig.147 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

#42 19vol. %

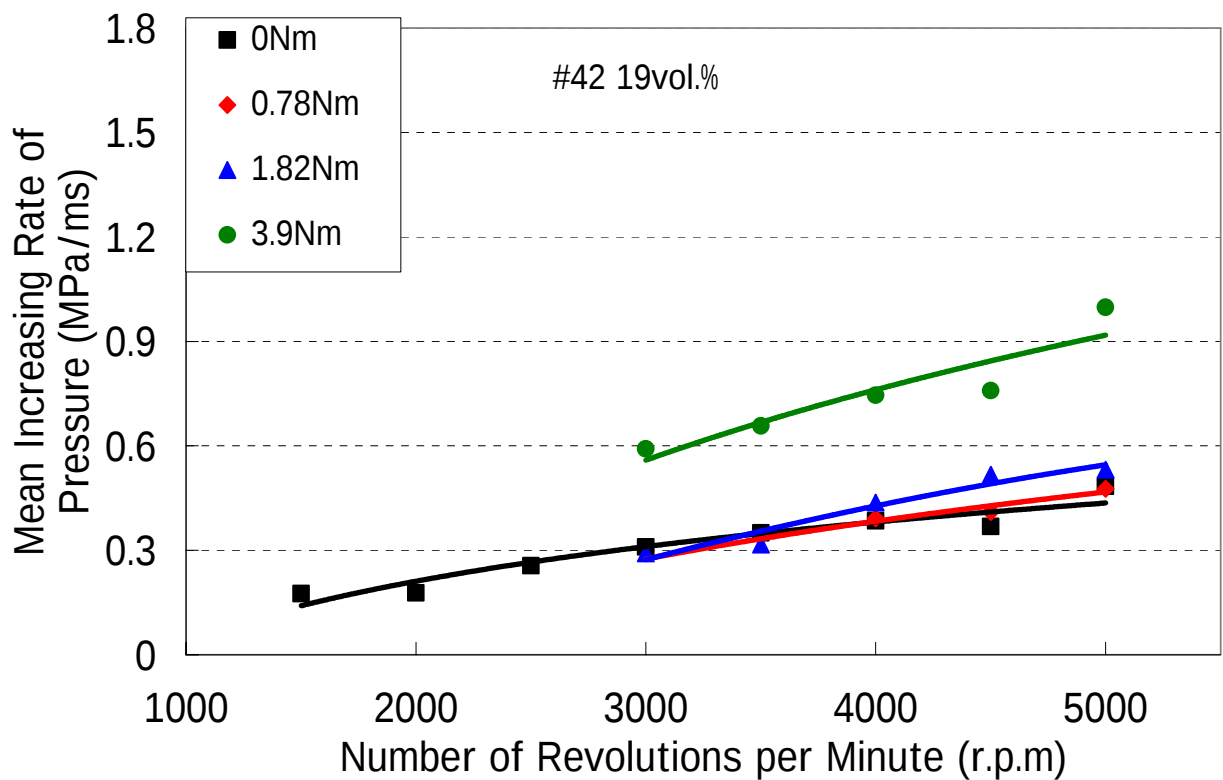


Fig.148 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

#42 17vol. %

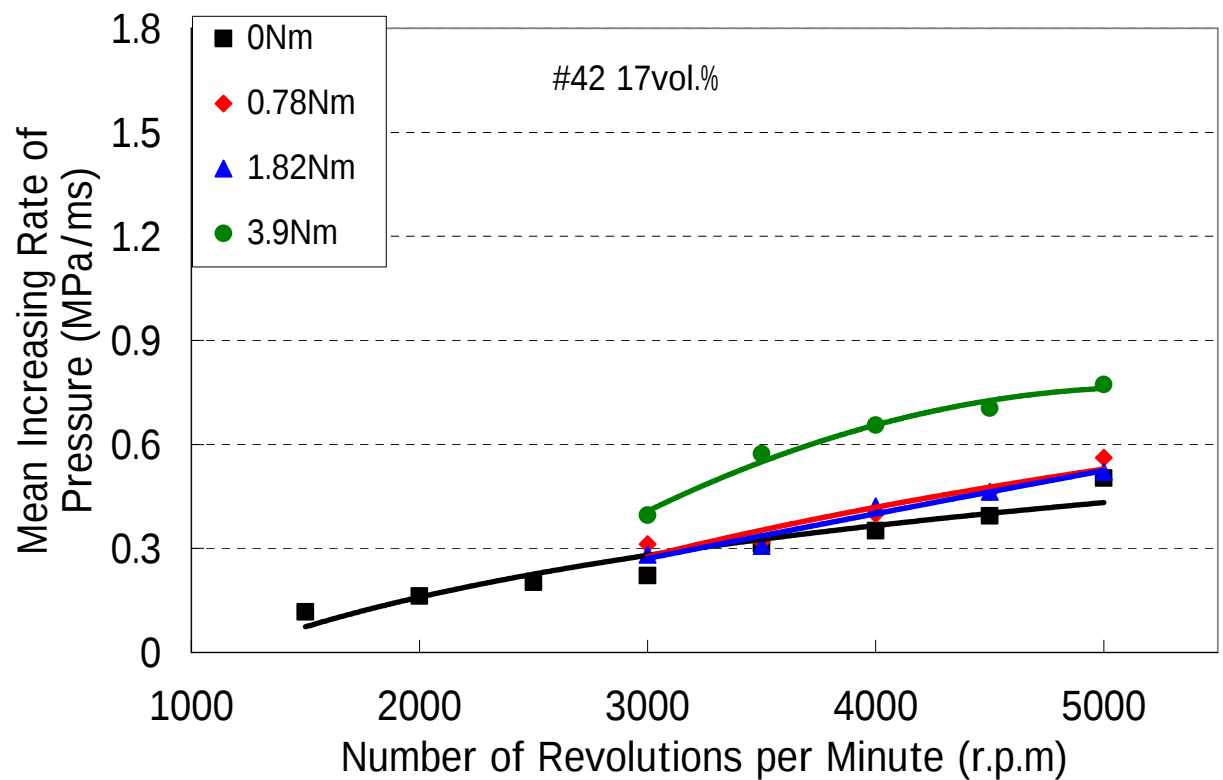


Fig.149 Mean Increasing Rate of Pressure (Comparison)

3-3 スモーク濃度

PM(粒子状物質)と NO_x の排出量は温度に依存し、両者はトレードオフの関係であることに注目し、燃焼室から排出される PM の排出状況を観察するために、燃焼室出口後方 780mm に Whatman International 社製の Quartz Microfibre Filters を設置した。フィルターは各実験条件下で、10 分間排気ガスにさらした。そしてディーゼル機器株式会社製の SMOKE-METER を用いて、PM の濃度を光透過法(完全黒体の透過度を 0%)にて測定した。

Fig.150 に通常燃料濃度領域(メインジェット番数#72)における、無負荷状態でのスモーク濃度(スモークメーター値)を吸入空気酸素濃度をパラメータとして示す。また、Table 4 にフィルターの写真を示す。この図から明らかなように若干の変動は観察されるが、どの機関回転数においても、吸入空気酸素濃度の減少に伴ってスモーク濃度は増大している。これは、吸入空気酸素濃度の減少に伴い火炎温度が低下し、それにより煤の前駆物質が酸素不足の状態で凝集・合体したためと考えられる。

同様に、Fig.151 に希薄燃料濃度領域(メインジェット番数#42)での、無負荷状態でのスモーク濃度(スモークメーター値)を吸入空気酸素濃度をパラメータとして示す。また、Table 5 にフィルターの写真を示す。この図から明らかなように、通常燃料濃度領域(メインジェット番数#72)と比べて(Fig.150 参照)、希薄燃料濃度領域(メインジェット番数#42)においては、顕著なスモーク発生は吸入空気酸素濃度 17～21vol.% では観察されなかった。

Table 6 には、希薄燃料濃度領域(メインジェット番数#42)での、部分負荷 1.82Nm におけるフィルターの写真を示す。この写真から明らかなように、吸入空気酸素濃度 17vol.% の場合では、フィルターは若干黒くなっているのが観察されるが、その他では顕著なスモーク発生は観察されなかった。希薄燃料濃度領域での部分負荷 1.82Nm における吸入空気酸素濃度 17vol.% においては、燃焼室内の空燃比の悪化

によってスモークが発生したと考えられる。

ここで、Table 4～6 の表の空欄での条件においては、10 分間の安定した機関運転が困難なため、測定ができなかった。これは、機関のマフラー部を改造したために、機関状態が改造前とは多少異なったためだと思われる。

以上のことから、通常燃料濃度領域においては吸入空気酸素濃度の低下に伴ってスモーク濃度が悪化するが、希薄燃料濃度領域においては吸入空気酸素濃度を低下させてもスモーク濃度が悪化しなかった。よって、低吸入空気酸素濃度と希薄燃料濃度を併せることによって、有効な燃焼制御が可能であることがわかる。

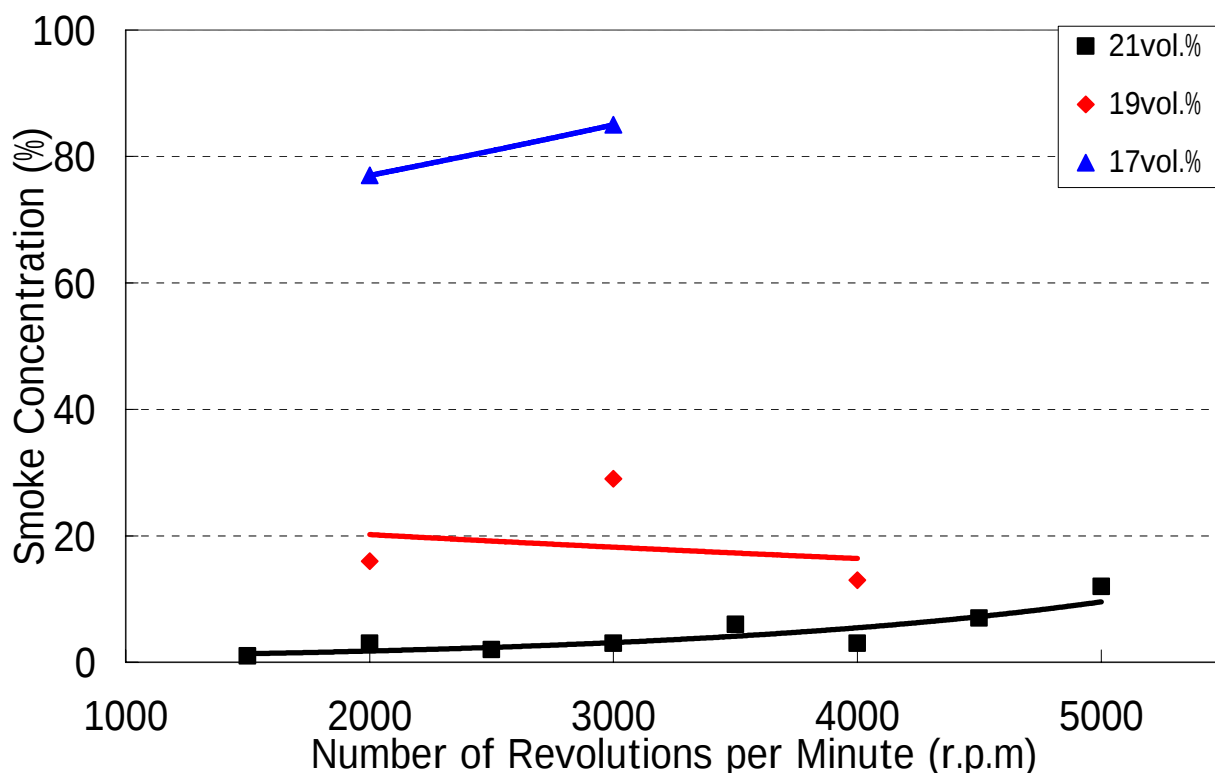


Fig.150 Smoke Concentration (#72 0Nm)

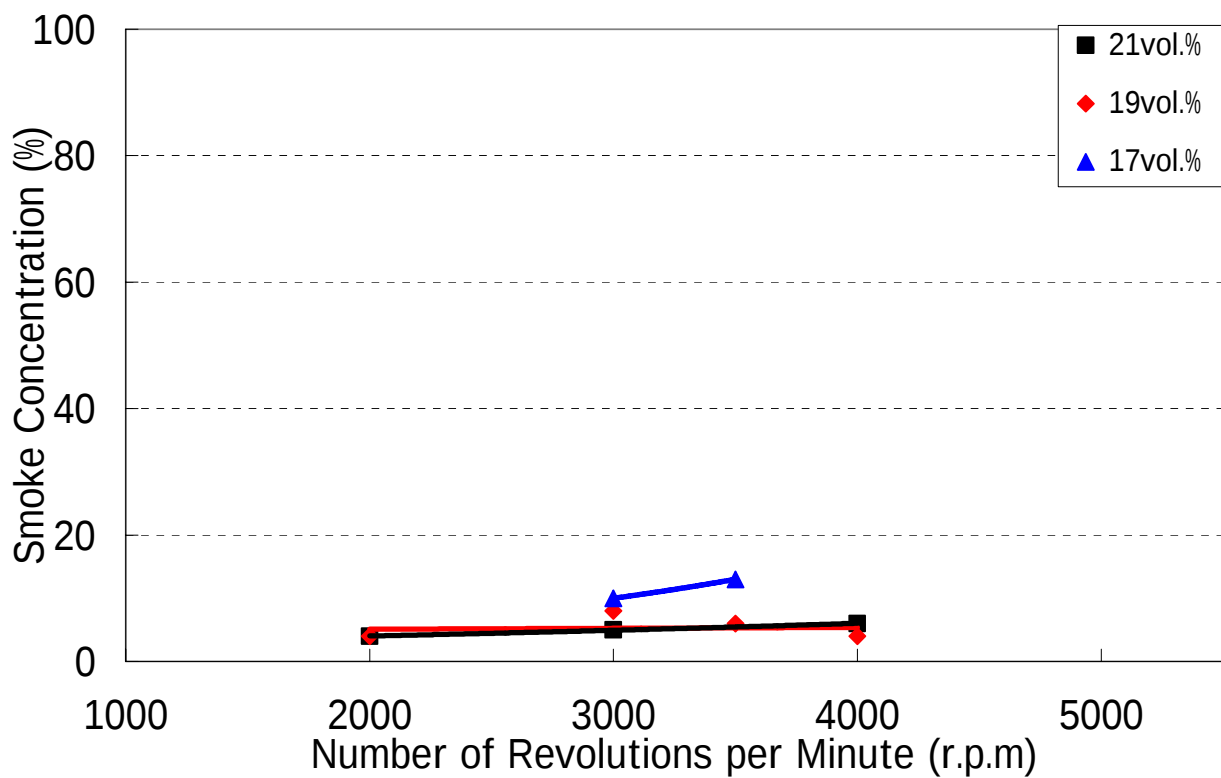


Fig.151 Smoke Concentration (#42 0Nm)

Table 4 PM (#72 0Nm)

	<i>21vol. %</i>	<i>19vol. %</i>	<i>17vol. %</i>
<i>2000</i> <i>r p m</i>			
<i>3000</i> <i>r p m</i>			
<i>4000</i> <i>r p m</i>			

Table 5 PM (#42 0Nm)

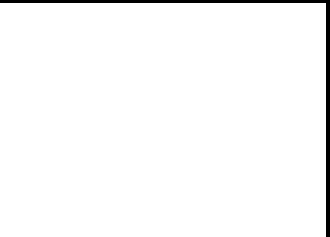
	<i>21vol. %</i>	<i>19vol. %</i>	<i>17vol. %</i>
<i>2000</i> <i>r p m</i>			
<i>3000</i> <i>r p m</i>			
<i>4000</i> <i>r p m</i>			

Table 6 PM (#42 1.82Nm)

	<i>21vol. %</i>	<i>19vol. %</i>	<i>17vol. %</i>
<i>2000</i> <i>r p m</i>			
<i>3000</i> <i>r p m</i>			
<i>4000</i> <i>r p m</i>			

第4章 結論

本研究では、小型ガソリン機関の燃焼特性に及ぼす雰囲気酸素濃度及び燃料濃度の影響について検討を行った。

以下に結果を示す。

1. 小型ガソリン機関内の火炎伝ば速度の測定は、イオンプローブ法を用いることにより可能である。
2. 小型ガソリン機関においても、火炎伝ばの進行に伴い火炎伝ば速度が増大する領域が存在する。
3. 同一機関回転数においては、メインジェット番数の増加に伴い、火炎伝ば速度は増大する。
4. 雰囲気酸素濃度の減少により無負荷状態での火炎伝ば速度の増大割合は減少する。
5. 小型ガソリン機関の吸入酸素濃度の火炎伝ば速度に及ぼす影響は、高機関回転数ほど顕著となる。
6. 希薄燃料濃度領域においても吸入空気酸素濃度による燃焼制御が可能である。
7. 低吸入空気酸素濃度領域においては、機関回転数により火炎伝ば速度に及ぼす酸素濃度減少の影響に差異が発生する。
8. 低吸入空気酸素濃度での火炎伝ば速度に及ぼす燃料濃度の影響は、通常の吸入空気酸素濃度を用いた場合 (21vol.%) よりも著しく減少する。
9. 小型ガソリン機関の同一回転数における平均圧力上昇率は、無負荷状態においては雰囲気酸素濃度の顕著な影響を受けない。
10. 部分負荷時における平均圧力上昇率は、無負荷時の場合よりも雰囲気酸素濃度の影響が増大する。
11. 無負荷時のスモーク濃度は、雰囲気酸素濃度の減少に伴って著しく増大する。

参考文献

- 1) 水谷幸夫、燃焼工学(第二版)、(1989) p.29 ~ p.33、p.214 ~ p.219、森北出版株式会社
- 2) 池田 他 2 名、機論(B)、p.59 ~ p.562、pp2094、(1993)
- 3) 浜本 他 2 名、機論(B)、p.62 ~ p.603、pp3988、(1996)
- 4) 廣安博之 他 2 名、内燃機関、(1986)、p.87 ~ p.88, p.161 ~ p.163、コロナ社
- 5) 新岡嵩 他 2 名、燃焼現象の基礎、(2002) 、p.17、p.61、オーム社
- 6) 中島泰夫、改訂 自動車用ガソリンエンジン、p.45、山海堂
- 7) 中島泰夫、改訂 自動車用ガソリンエンジン、p.47 ~ p.48、山海堂
- 8) 岡島敏 他 1 名、工業熱力学、(1999) 、p.109 ~ p.110、学献社
- 9) 水谷幸夫、燃焼工学(第3版)、p.48 ~ p.51、森北出版株式会社
- 10) 中島泰夫、改訂 自動車用ガソリンエンジン、p.227、山海堂
- 11) 新岡嵩 他 2 名、燃焼現象の基礎、(2002)、p.259 ~ p.276、オーム社

謝辞

最後になりましたが、本研究を行なうにあたり終始御指導、御鞭撻して頂きました川上忠重教授には深く感謝し、御礼申し上げます。

さらに、実験装置製作にあたり、中央工作室の皆様、また実験装置に関して多くの助言を頂いたムサシノホンダサービス様、日本自動車様にも深く感謝致します。

そして、熱工学研究室の皆様方にも多数の御協力を頂き、ここに深く感謝の意を表します。

2006 年 3 月

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

新海 達也