

超希薄プロパン-空気混合気の燃焼特性に及ぼす点火エネルギーの影響

海老澤, 寧紀 / EBISAWA, Yasunori

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2004 年度

修士論文

超希薄プロパン-空気混合気の燃焼特性に
及ぼす点火エネルギーの影響

The influence of ignition energy on combustion characteristics
for extremely lean propane-air mixtures

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

03R1107 海老沢 寧紀

Yasunori EBISAWA

目次

Abstract

第1章 緒論	1
1.1 環境問題	2
1.1.1 大気汚染	2
1.1.2 地球温暖化	3
1.1.3 酸性雨	4
1.2 気体燃料の燃焼	5
1.2.1 燃焼形態	5
1.2.2 予混合火炎	6
1.2.3 可燃限界 (Flammability limit)	9
1.2.4 点火 (Ignition)	11
1.2.5 火炎伝ば速度 (Flame speed) ・燃焼速度 (Burning velocity)	12
1.2.6 選択拡散理論 (Preferential diffusion)	13
1.2.7 ルイス数効果 (Lewis number effect)	14
1.2.8 素反応	16
第2章 実験装置及び実験方法	19
2.1 実験装置	19
2.1.1 実験装置本体 (Experimental assembly)	19
2.1.2 アクリル製燃焼管 (Combustion tube)	19
2.1.3 点火装置 (Ignition equipment)	19
2.1.4 落下塔 (Drop shaft)	20
2.2 実験方法	21
2.2.1 混合気の作成	21
2.2.2 実験手順	22

第3章 実験結果及び考察	23
3.1 火炎挙動	23
3.1.1 火炎面形状	23
3.1.2 セル状火炎 (Cellular flame)	23
3.2 火炎伝ば速度 (Flame speed)	25
3.2.1 火炎伝ば速度の算出	25
3.2.2 火炎伝ば速度	25
3.2.3 火炎伝ば速度比 (Ratio of flame speed) の算出	26
3.2.4 火炎伝ば速度比	26
3.3 燃焼速度 (Burning velocity)	27
3.3.1 燃焼速度の算出	27
3.3.2 燃焼速度	28
第4章 結論	29
参考文献	30
謝辞	31

The influence of ignition energy on combustion characteristics for extremely lean propane-air mixtures

Yasunori EBISAWA

Graduated student

Abstract

Recently, Influence of exhaust gases from internal combustion engine on the environment is the serious problem in the world. It is well known that the lean burn is very useful method to reduce the emission by control of flame temperature. So experiments on combustion of extremely lean mixtures in vicinity of flammability limits have acquired importance from the viewpoint of development of new kinds of combustion having low fuel consumption and low emissions. Experiments have been carried out with extremely lean, quiescent propane-air mixtures to examine the influence of ignition energy on combustion characteristics. The microgravity technique is achieved in a free falling chamber is employed because the realizations of symmetrical flame propagations in a tube are possible. Experimental condition for the initial mixtures corresponds to room temperature and 0.1MPa, respectively.

The experimental equipment under normal gravity and microgravity consists of a combustion tube (internal diameter: 70mm, length: 400m), video cameras, an igniter, a delay circuit and an exhaust system. The ignition energy is changeable by adjusting the resistance of nichrome wire and electrical operation time. The experiment result in the study is that the flame speed of propane-air mixture is influenced by ignition energy for extremely lean equivalence ratio.

第1章 緒論

燃焼とは発光と発熱を伴う酸化剤と燃料との激しい酸化反応である。人類はこの燃焼を利用し、燃焼から得られるエネルギーを用いてその活動範囲を広げてきた。産業革命以降、社会経済の発展に伴い、エネルギー消費が飛躍的に増加してきた。そこで、エネルギーを得るために、燃焼はさらに広く利用され、現在では人や物資の輸送や、発電など幅広く活用されている。もはや今日、燃焼から得られるエネルギーは、人類の活動になくてはならないものとなっている。しかし、産業が発達するにつれ、人類に大きな利益をもたらしてきた反面、地球的規模での環境問題が深刻化してきた。中でも、自動車などの内燃機関から排出される排気ガスは大気汚染、地球温暖化、酸性雨などの大きな要因の一つとなっている。

これらの問題の解決策としては燃料電池車など内燃機関に変わる新しい技術も開発されているが、技術面、コスト面、インフラ整備などの観点からすぐに使用できる状況ではない。そこで、解決策の一つとして、エンジンにおける新しい技術の開発が行われている。最近実用化された技術としては、ガソリン直噴エンジンやリーンバーン（希薄燃焼; lean burn）エンジンなどが挙げられる。

このような背景から、本研究では、希薄燃焼（Lean combustion）に着目した。希薄燃焼は、自動車の燃費の向上や環境有害物質（NO_x等）の低減に有効である。また、希薄領域における燃焼特性の詳細かつ正確な把握は、安全工学的見地からも重要である。しかしながら、希薄領域における燃焼は、着火性の低下、火炎温度（Flame temperature）の減少、不安定火炎（Irregular flame）のなど多くの問題点を含んでいる。また、希薄可燃限界付近での燃焼は火炎伝ば速度（Flame speed）が遅いために通常重力下における自然対流による浮力の影響を強く受け、その正確な燃焼特性の把握が非常に困難である。

そこで、これまでも、多くの研究者が希薄可燃限界近傍での燃焼特性の把握のため、実験が行われてきたが、本研究ではこれらの研究成果から次の段階として、管内進行火炎伝ば法を用いて、超希薄プロパン-空気混合気の燃焼特性 (Combustion characteristics) に及ぼす点火エネルギー (Ignition energy) の影響を把握するために、手始めとして通常重力下及び微小重力下での、高点火エネルギー (50~100J 程度) を用いた場合の火炎形状、火炎伝ば速度及び可燃限界等を観察することにより、検討を行った。

1. 1 環境問題

ここでは、多くの環境問題のうち燃焼と関係の深い、大気汚染、地球温暖化、及び酸性雨について簡単に述べておく。

1. 1. 1 大気汚染

大気汚染は、人類が社会活動を行うことに伴って引き起こされる。その主な原因としては、工場などが生産活動を行う際に大気汚染物質が排出される場合と物流や人流など自動車の使用によって大気汚染物質が排出される場合がある。わが国では、1960年代から1980年代にかけて工場から大量の二酸化硫黄 (SO_2) 等が排出され、工業地帯など工場が集中する地域を中心として著しい大気汚染が発生した。最近では、大都市を中心に自動車特にディーゼル車から排出される二酸化窒素 (NO_2) 及び浮遊粒子状物質 (SPM) による大気汚染が問題となっており、その対策が急務となっている。これらの大気汚染物質は、呼吸器に望ましくない影響を与えるものとされている。また世界では、アジア地域など急速な工業化をとげつつある諸国を中心に、ますます経済活動の規模が拡大している。それに伴って、交通需要は増大し、窒素酸化物 (NO_x) や二酸化炭素 (CO_2) 等の大気汚染物質の排出量が増大することが予想される。

1. 1. 2 地球温暖化

経済発展に伴い、石油や石炭が大量に消費され、燃料の燃焼により二酸化炭素が大気中に放出されてきた。地球温暖化の原因は人間の活動に起因する二酸化炭素の放出によるものであることが、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）のレポートにより報告され公に認知されることとなった。Fig.1 に過去 140 年の世界の平均気温の推移を示す。地球温暖化を引き起こす物質は温室効果ガスと呼ばれ、主に二酸化炭素、メタンやフロンなどである。地球温暖化の主な原因である二酸化炭素の大気中での濃度が増加することにより、地球から宇宙空間に放出されるはずの熱がとどまってしまい、結果的に平均気温を上昇させる。地球温暖化により、海面上昇による洪水被害、環境条件の変化による作物の生育悪化や世界的な生態系の変化、マラリアなどの分布域の拡大などが引き起こされ、社会に莫大な被害をもたらすことが懸念されている。

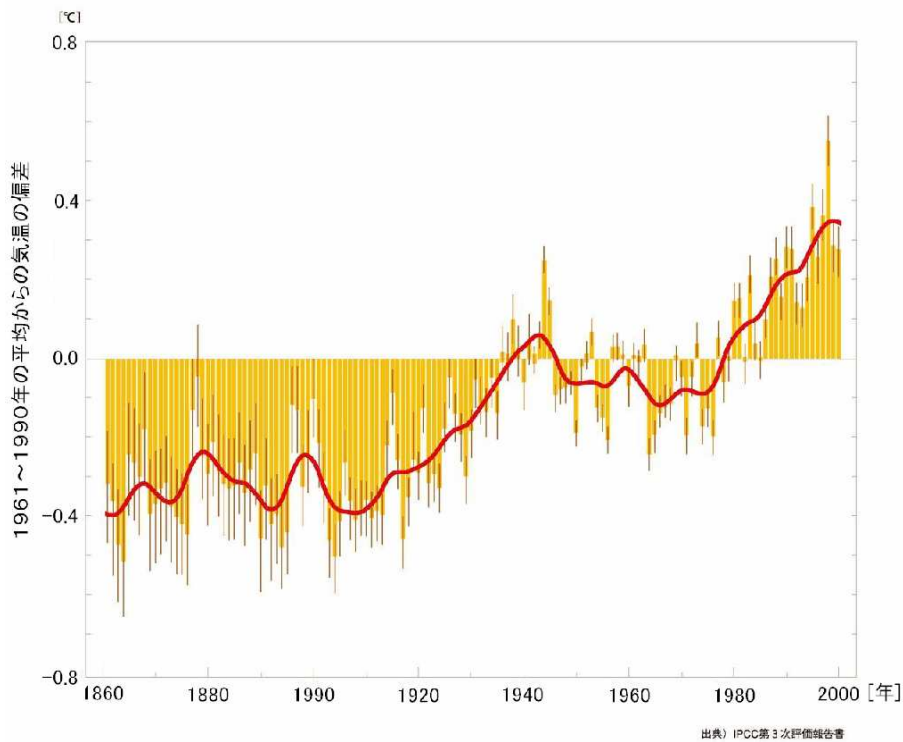


Fig.1 地球の平均気温の変化（地球全体/過去 140 年）

1. 1. 3 酸性雨

酸性雨とは pH5.6 以下に酸化した雨のことであり、工場や自動車などから排出される硫黄酸化物や窒素酸化物がその原因物質である。1960～70 年代から北アメリカやヨーロッパなどで問題となり、やがて国際問題化した。酸性雨の問題点は、原因物質の発生源と酸性雨による被害地とが大きく異なる点にある。石炭や石油などの燃焼に含まれる硫黄成分は、燃焼過程において硫黄酸化物となる。硫黄酸化物が大気中を移動する間に硫酸となり、雨を酸性化する。硫黄酸化物は基本的に燃料が原因である。一方、窒素酸化物はボイラやエンジンなどの燃焼プロセスにおいて、高温で空気中の窒素と酸素が反応して生成する場が主である。すなわち、燃焼反応に伴って不可避免的に発生してしまう。大気中に放出された窒素酸化物は硝酸となり、酸性雨をもたらす。

1. 2 気体燃料の燃焼

1. 2. 1 燃焼形態

1) 分類A 連続燃焼と間欠燃焼

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。

2) 分類B 予混合燃焼と拡散燃焼

また、別の観点から、気体燃料の燃焼形態は予混合燃焼 (Premixed combustion)、部分予混合燃焼 (Partially premixed)、拡散燃焼 (Diffusion combustion) に分類することができる。予混合燃焼は燃料と空気とあらかじめ混合した上で燃焼させるもので、火炎が伝ばするという特徴を有する。それに対して、拡散燃焼は燃料と空気の境界で燃焼が起こるもので、その火炎には伝ば性はない。部分予混合燃焼は予混合燃焼と拡散燃焼とが混在するような燃焼形態であり、家庭用ガスコンロにみられるように、燃焼を促進させるために、あらかじめ適当な量の空気を燃料に混合しておくものである。

3) 分類C 層流燃焼と乱流燃焼

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ることができる。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、火炎の単位面積あたりの燃焼率が増大する。

1. 2. 2 予混合火炎

1) 層流予混合火炎

層流予混合火炎の代表例は乱れのないブンゼン火炎である。ブンゼン火炎が円すい形をしているところからもわかるとおり、層流予混合火炎は通常、流れに対して傾いて形成される。その傾斜火炎付近の流れの様子を Fig. 2(a) に示す。厚みに比べ、火炎の曲率半径が十分大きいとき、火炎を平面とみなすことができる。

未燃混合気は U_u の速度で、火炎面に α の角度をもって流入する。 U_u は火炎面法線方向の速度成分 S_u と接線方向の速度成分 S_p に分けられる。このガスは熱膨張によって法線方向に加速されて、火炎帯出口では S_b の法線方向成分速度をもつようになるが、火炎面に平行な方向には加速要因がないので初期の速度 S_p を保つ。このような火炎は流速 S_u の未燃混合気流中に直交して静止する一次元平面火炎 (Fig. 2(b)) と同じ構造を持つことが知られている。

この等価一次元火炎の構造を模型的に描くと、Fig. 3 のようになる。火炎帯は化学反応のほとんどおこっていない予熱帯 (Preheat zone) と化学反応が盛んに行われている反応帯 (Reaction zone) に分けられる。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。混合気は予熱帯において、反応帯からの熱伝導により温度が上昇し、反応帯で発熱し温度 T_b に達する。

T_b はふく射等による熱損失を除けば、燃焼ガスの断熱平衡温度 (Adiabatic flame temperature) と等しい。また、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。CO, H₂, OH, O, H などの中間生成物の濃度は反応帯の中ほどでピークに達する。生成物は反応物質が減少するに従って増加し、平衡濃度に至る。

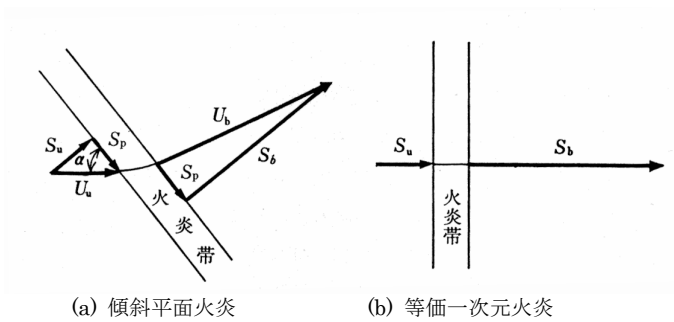


Fig.2 Flow field of premixed laminar flame

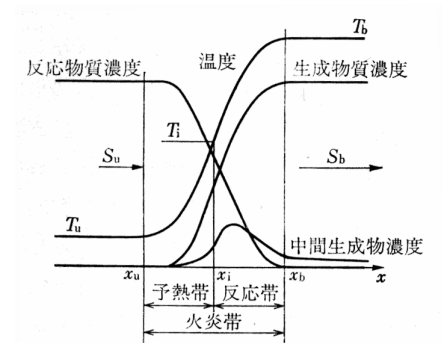


Fig.3 Structure of premixed laminar flame

2) 乱流予混合火炎

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、そのような場を伝ばする予混合火炎を乱流予混合火炎とよび、層流予混合火炎と比較すると以下のことが挙げられる。

- (1) 燃焼速度が層流予混合火炎と比較し数倍から数十倍に達する。
- (2) 0.1~1mm 前後であった火炎の厚みが数 mm から数十 mm に増加する。
- (3) 薄い青色を呈していた火炎が白みを帯び輝度が格段に高くなる。
- (4) 火炎の背後にかなりの未燃分が残存する。

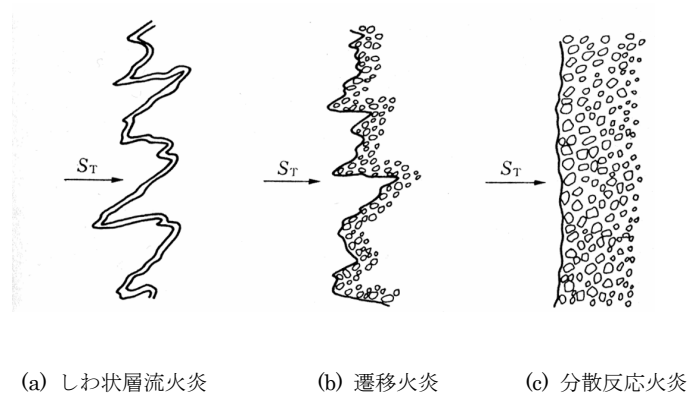


Fig.4 Structure of turbulent flame

(1) において、乱れが燃焼速度を増加させる機構として次のものが考えられる。

- 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（しわ状層流火炎：Fig. 4(a)）、それに比例し燃焼速度が増加する。
- ② 火炎が渦糸の集合体構造をとり、その渦糸に沿って発生する流れに運ばれて、火炎が伝ばする。
- ③ 層流火炎の予熱帯厚み δ 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ば速度が増大する。
- ④ 小さな渦の急峻な速度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懸濁帯を形成し、反応帯厚みを著しく増大させる。そのため熱及び活性化学種の拡散速度増加し、燃焼速度が増加する（分散反応火炎：Fig. 4(c)）

1. 2. 3 可燃限界 (Flammability limit)

混合気中の火炎伝ばは、混合気の状態、すなわち燃料と酸化剤の混合割合、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ばしうる濃度限界を可燃限界という。燃料が濃いときの限界値を上限界 (Rich limit)、薄いときの限界値を下限界 (lean limit) 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火炎伝ば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、防災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。

Table 1 には、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 (Fig. 5) 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 150m、直径 5cm のガラス管中に混合気を入れ、その下端を開放してから点火する。このガラス管中を火炎が上方に伝ばする場合と、下方に伝ばする場合とは重力による浮力の影響によって、当然、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ばする能力の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ばするのを確認するにたただけ長くなら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。

Table 1 Flammability limit

	分子式	下限界(vol%)	上限界(vol%)
メタン	CH ₄	5.00	15.00
エタン	C ₂ H ₆	3.00	12.50
プロパン	C ₃ H ₈	5.00	9.50
ブタン	C ₄ H ₁₀	1.86	8.41
ペンタン	C ₅ H ₁₂	1.40	7.80
ヘキサン	C ₆ H ₁₄	1.18	7.40
ヘプタン	C ₇ H ₁₆	1.10	6.70
オクタン	C ₈ H ₁₈	0.95	-
ノナン	C ₉ H ₂₀	0.83	-
デカン	C ₁₀ H ₂₂	0.77	5.35
エチレン	C ₂ H ₄	2.75	28.60
プロピレン	C ₃ H ₆	2.00	11.10
アセチレン	C ₂ H ₂	2.50	80.00
ベンゼン	C ₆ H ₆	1.40	7.10
トルエン	C ₇ H ₈	1.27	6.75
シクロプロパン	C ₃ H ₆	2.40	10.40
水素	H ₂	4.00	74.20
アンモニア	NH ₃	15.50	27.00
一酸化炭素	CO	12.50	74.20

1. 2. 4 点火 (Ignition)

燃焼が開始するためには、燃料と酸化剤のほかに点火源が必要である。点火とは、混合気の一部にエネルギーを与え、その部分の温度を、その混合気の着火点以上に上昇させ、燃焼状態に移行させることである。

可燃混合気を封入した容器の温度 T_0 を一定に保つと、 T_0 のある値以上では、一定の遅れ時間の後に混合気が自発着火して、爆発を起こす。このような現象を自発着火または爆発、遅れ時間を着火遅れと呼ぶ。それに対して電気火花、高温表面、パイロット火炎などによって、混合気の一部にエネルギーを与えて火炎核を形成させ、それから混合気全体に火炎を広らせる方法を強制点火、または単に点火と呼ぶ。強制点火には、以下のような方法がある。

- (1) 火花点火；電気火花によって火炎核を作る。
- (2) 熱面点火；電熱線などの赤熱表面を混合気と接触させる。
- (3) トーチ点火；混合気中に火炎を挿入する。
- (4) プラズマ点火；混合気中に高温ガスやプラズマを吹き込む。
- (5) フューズ点火；針金を大電流で蒸発させてできる金属蒸気を用いて点火する。

本研究では超希薄プロパン-空気混合気を用いるため、火花点火では点火が困難であると考えられ、また点火エネルギーを比較的簡便に調整できることから、ニクロム線による熱面点火を用いた。

1. 2. 5 火炎伝ば速度(Flame speed)・燃焼速度(Burning velocity)

混合気をある一点で点火した場合、燃焼ガスの体積膨張により点火点から半径方向に流れが誘起され、火炎はこの流れに乗って半径方向に伝ばして行く。静止観察者から見た見掛けの伝ば速度のことを火炎伝ば速度と呼ぶ。また、火炎前方の未燃混合気から見た伝ば速度のことを燃焼速度とよぶ。球状伝ば火炎では、半径方向のガスの流速と燃焼速度とを加えたものが火炎伝ば速度である。また、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る。火炎伝ば速度がガスの流動や火炎形状の影響を受けるのに対し、層流予混合火炎の燃焼速度は燃料の種類と混合気の組成、温度、圧力に対応した固有の値をもち、これを層流燃焼速度と呼ぶ。一般的な層流燃焼速度の測定法として、以下の3つが挙げられる。

(1) ノズルバーナー法

バーナー火炎の直接写真などから算出した火炎の全表面積と未燃混合気の体積流量から燃焼速度を決定することができる。しかし、実際には火炎表面積の算出は難しく、平均的な値を求めるための簡易的な手法として用いられる。

(2) 平面火炎法

混合気の流れを調整し、形成された平面火炎に対して直角に流入する混合気の流入速度が燃焼速度となる。しかし、実際には平面火炎の作成が困難であるほか、多穴板を用いるため熱損失が大きくなってしまったといった問題点がある。

(3) シャボン玉法

シャボン玉の中に混合気を充填させ、中心点火によって、球状火炎の成長速度から燃焼速度を決定する手法である。しかし、シャボン玉に含まれる水分の影響を受けてしまったといった問題点がある。

1. 2. 6 選択拡散理論 (Preferential diffusion)

ここでは、セル状火炎の主な発生原因とされる選択拡散理論について説明する。火炎で反応によって消滅してゆく2種類以上の気体分子（酸化剤、燃料）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拡散の効果が現れやすい。

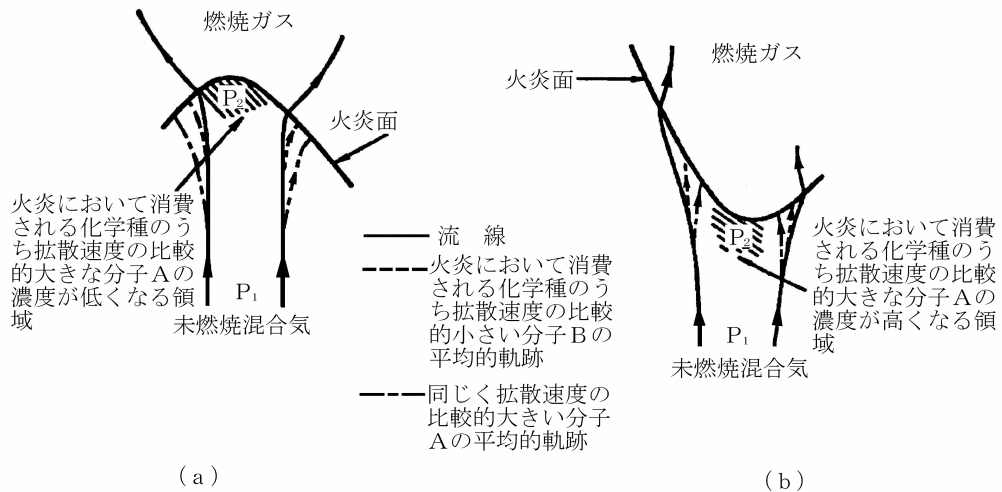


Fig.6 Outline of preferential diffusion

選択拡散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拡散の方向の変化が異なる場合である。例えば、Fig. 6 に示すように、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。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 地点から P_2 地点に向かう間に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 地点におけるAとBの比は、 P_1 地点におけるそれとは異なる比率になっているはずである。火炎面に曲率や火炎面付近の流れによって火炎面に沿って加速される伸張流れ場であったりすると、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より大きい、すなわち気体燃料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の拡散速度が、燃料の拡散速度より大きい状況のほうが、その逆よりも選択拡散の効果が大きく現象に現れる。燃料の気体分子が過剰であるから、酸化剤分子の拡散速度のほうが大きいため、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ためである。当量比が1より小さい場合には、気体燃料の分子の拡散速度が酸化剤の拡散速度より大きいような状況で、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の拡散速度がもう一方より大きいとき、顕著な効果が観測される。

1. 2. 7 ルイス数効果 (Lewis number effect)

ルイス数 Le は (1) 式で表されるとおり、熱の拡散速度と物質 (ここでは化学種) の拡散速度の比で表され、熱と物質の拡散速度の釣り合いを表すものである。またシュミット数 Sc とプラントル数 Pr の比で表すこともできる。

$$Le = \alpha / D = Sc / Pr \quad (1)$$

α : 熱拡散速度

D : 物質拡散速度

Sc : シュミット数 = ν (動粘性係数) / D

Pr : プラントル数 = α / ν

ルイス効果とは、熱拡散率と物質拡散係数の相対的大きさに依存して、熱と物質の輸送が異なるために生じる現象である。そして、ルイス数効果は火炎面方向に速度こう配があるときに顕著に火炎に影響を及ぼし、特に予混合火炎において観察されやすい。

ここで、ルイス数効果を説明するために、例として、よどみ流中に形成される予混合火炎の模式図を Fig. 7 に示す。

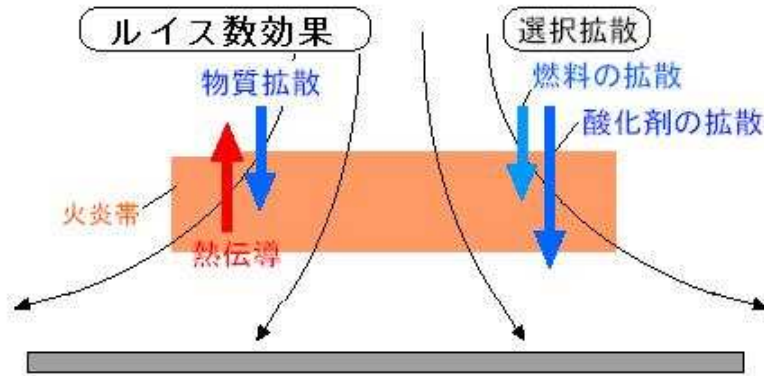


Fig.7 Outline of premixed flame in velocity gradient

図のように伸張を受けた火炎では、火炎面の接線方向に速度こう配が存在するため、火炎面と流線は直交せず、流管壁面を通して熱伝導及び分子拡散による熱と未燃成分の輸送が行われる。予混合気のルイス数が1以外では、熱伝導により火炎面から失われる熱エンタルピーと、分子拡散によって火炎面に流入する予混合気の化学エンタルピーは釣り合わず、よって火炎温度が変化する。それに伴って化学反応速度が変化し、単位火炎面積あたりの発熱速度が変化することによって燃焼速度が変化する。ルイス数が1の場合、すなわち熱及び物質の移動速度が等しい場合には、温度こう配に起因する熱拡散、濃度こう配に起因する物質拡散の効果は相殺され、流管内の全エンタルピーは保存されることになる。しかし実際の混合気ではルイス数は1とは限らず、例えば希薄メタン-空気混合気のようにルイス数1より小さい場合、熱及び物質の輸送のうち、物質輸送のほうが勝ることになる。すなわち、流管に向かって、流管壁を通してエンタルピーが流入することを意味している。そうするとルイス数の効果によって、この流管内の全エンタルピーは上昇したことになる。従って、この場合には火炎は強化され実際に火炎温度が上昇する。また、反対に希薄プロパン-空

気混合気のようなルイス数が1より大きい場合には、この流管内の全エンタルピーが減少した結果、火炎温度を低下させる作用が働くことになる。

このように、ルイス数効果によって火炎は強化されたり、反対に弱められたりし、その効果として、局所的な消炎を引き起こす原因になるなどルイス数効果は特徴的な現象を引き起こす。

1. 2. 8 素反応

水素が完全燃焼するときの反応式として



のような式が与えられている。ところが、この式は反応のはじめと終わりの状態を等号で結んだだけのもので、途中でどのような現象が起こるのか、全く表されていない。このような反応式のことを総括反応式と呼ぶ。実際には燃焼過程には、さまざまな素反応が存在し、水素-空気の燃焼反応は約数十個程度であるが、プロパン-空気の燃焼反応は数百個にも達する。

燃焼反応の主体は燃料と酸化剤ではなく、燃焼過程に一時的に存在する中間活性基である。火炎の発光もエネルギー状態の高い活性基（活性化学種；OH、CH、C₂など）によるものである。Fig. 8のように活性基は最初に反応物の

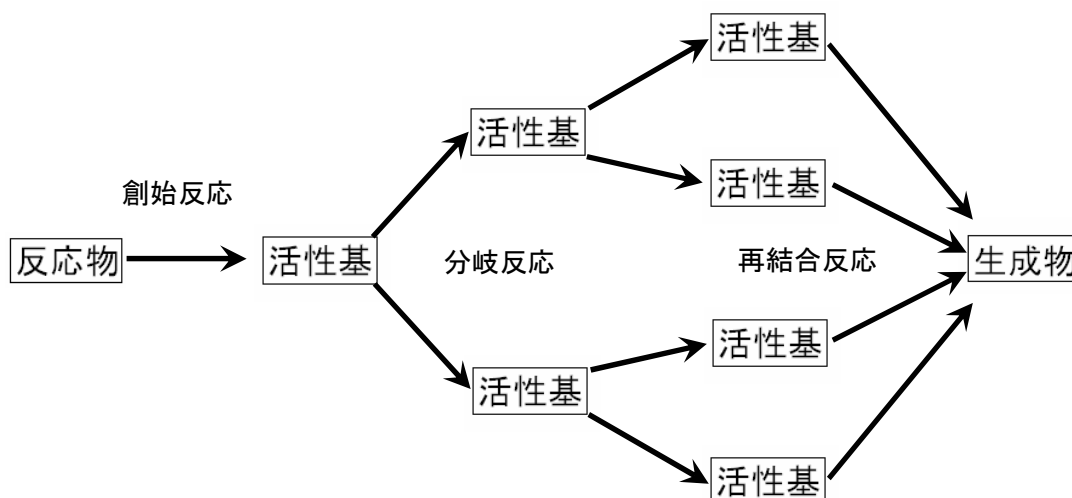
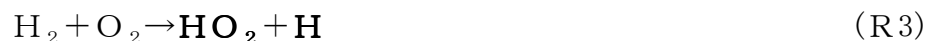


Fig. 8 燃焼反応の概念図

連鎖創始反応によって生成される。その後、生成された活性基と反応物の間には連鎖分岐反応が起こり、活性基の数は急激に増加する。この急激な活性基の増加現象は分岐爆発と呼ぶ。さらに、可燃性反応物の消費に伴い、活性基は再結合反応（連鎖停止反応）によって失活し、反応物を生成する。この際結合反応によって、活性基の励起エネルギーが反応熱として放出され、反応系の温度は急激に増加する。この現象は熱爆発とも呼ばれる。ここでは、例として最も簡単な燃料である水素を取り上げる。Table 2に水素の燃焼の素反応機構を示す。

H_2 、 OH 、 O 、 HO_2 と H_2O_2 は活性基である。

まず、連鎖創始反応として、



のような反応により、活性基である H や HO_2 が生成される。

さらに、分岐反応



などにより、活性基の数が急激に増加する。そして活性基の増加につれて、活性基間の再結合反応が発生する。



再結合反応により活性基は失活し、これにより励起エネルギーは反応熱として放出される。

Table 2 H₂/O₂ 素反応機構 (Stahl and Warnatz, 1991)

	<i>A</i> (cm/mol-s)	<i>n</i>	<i>E</i> (cal/mol)
(1) O ₂ + H → OH + O	2.5 E+14	0.0	0.16794 E+5
(2) OH + O → O ₂ + H	1.72 E+13	0.0	0.841 E+3
(3) H ₂ + O → OH + H	5.06 E+4	2.67	0.628 E+4
(4) OH + H → H ₂ + O	2.222 E+4	2.67	0.437 E+4
(5) H ₂ + OH → H ₂ O + H	1.E+8	1.6	0.3297 E+4
(6) H ₂ O + H → H ₂ + OH	4.312 E+8	1.6	0.1827 E+5
(7) OH + OH → H ₂ O + O	1.5 E+9	1.14	0.1003 E+3
(8) H ₂ O + O → OH + OH	1.473 E+10	1.14	0.698 E+5
(9) H + H + M → H ₂ + M	1.8 E+18	-1.0	0.0
(10) H ₂ + M → H + H + M	7.26 E+18	-1.0	0.1044 E+6
(11) OH + H + M → H ₂ O + M	2.2 E+22	-2.0	0.0
(12) H ₂ O + M → H + OH + M	3.83 E+23	-2.0	0.193 E+6
(13) O + O + M → O ₂ + M	2.9 E+17	-1.0	0.0
(14) O ₂ + M → O + O + M	6.55 E+18	-1.0	0.1184 E+6
(15) O ₂ + H + M → HO ₂ + M	2.3 E+18	-0.8	0.0
(16) HO ₂ + M → O ₂ + H + M	3.19 E+18	-0.8	0.4668 E+5
(17) HO ₂ + H → OH + OH	1.5 E+14	0.0	0.1003 E+4
(18) OH + OH → HO ₂ + H	1.5 E+13	0.0	0.4081 E+5
(19) HO ₂ + H → H ₂ + O ₂	2.5 E+13	0.0	0.6928 E+3
(20) H ₂ + O ₂ → HO ₂ + H	7.27 E+13	0.0	0.5837 E+5
(21) HO ₂ + H → H ₂ O + O	3.0 E+13	0.0	0.172 E+4
(22) H ₂ O + O → HO ₂ + H	2.95 E+13	0.0	0.5841 E+5
(23) HO ₂ + O → OH + O ₂	1.8 E+13	0.0	-0.4061 E+3
(24) OH + O ₂ → HO ₂ + O	2.3 E+13	0.0	0.5535 E+5
(25) HO ₂ + OH → H ₂ O + O ₂	6.0 E+13	0.0	0.0
(26) H ₂ O + O ₂ → HO ₂ + OH	7.52 E+14	0.0	0.7264 E+5
(27) HO ₂ + HO ₂ → H ₂ O ₂ + O ₂	2.5 E+11	0.0	-0.1242 E+4
(28) OH + OH + M → H ₂ O ₂ + M	3.25 E+22	-2.0	0.0
(29) H ₂ O ₂ + M → OH + OH + M	1.692 E+24	-2.0	0.4833 E+5
(30) H ₂ O ₂ + H → H ₂ + HO ₂	1.7 E+12	0.0	0.3751 E+4
(31) H ₂ + HO ₂ → H ₂ O ₂ + H	1.32 E+12	0.0	0.204 E+5
(32) H ₂ O ₂ + H → H ₂ O + OH	1.0 E+13	0.0	0.3583 E+4
(33) H ₂ O + OH → H ₂ O ₂ + H	3.34 E+12	0.0	0.7458 E+5
(34) H ₂ O ₂ + O → OH + HO ₂	2.8 E+13	0.0	0.6402 E+4
(35) OH + HO ₂ → H ₂ O ₂ + O	9.51 E+12	0.0	0.2071 E+5
(36) H ₂ O ₂ + OH → H ₂ O + HO ₂	5.4 E+12	0.0	0.1003 E+4
(37) H ₂ O + HO ₂ → H ₂ O ₂ + OH	1.802 E+13	0.0	0.3224 E+5

M=6.5 H₂O + 0.4 O₂ + 0.4 N₂

第2章 実験装置及び実験方法

2. 1 実験装置

2. 1. 1 実験装置本体 (Experimental assembly)

Fig. 9 に本実験の通常重力及び微小重力環境において用いた実験装置の概略を示す。その寸法は幅 600mm×奥行き 410mm×高さ 230mm で、本体にはアクリル製燃焼管 (Combustion tube)、8mm ビデオカメラ (8mm Video camera)、点火装置 (Ignition equipment)、遅延回路及び点火用バッテリー (Buttery) 等が搭載されている。

2. 1. 2 アクリル製燃焼管 (Combustion tube)

燃焼管はアクリル製で、外径 90mm、内径 70mm、長さ 400mm 及び火炎伝ば可能距離が約 330mm である。燃焼管の両端にABS樹脂製の栓が設けられており、点火端側の栓には、燃料注入用および吸気用バルブ、点火装置 (ニクロム線) が、他端には排気用バルブがそれぞれ設けられている。

2. 1. 3 点火装置 (Ignition equipment)

本実験での点火は、ニクロム線を用い、熱面点火にて行った。本研究では通常重力下及び微小重力下において燃焼特性に及ぼす高点火エネルギーの影響を検討するために、点火用のバッテリー電圧を 24V 一定とし、ニクロム線抵抗を 2~4 Ω 、通電時間を 0.2~1.0sec の範囲で変化させることにより、簡易的に点火エネルギーの調整が可能となっている。本実験で通常重力及び微小重力環境において用いた点火エネルギーの詳細を Table 3 に示す。

Table 3 Ignition energy

		点火エネルギー				
		115J	100J	85J	70J	55J
通常 重力	通電時間	0.8s	0.7s	0.6s	0.5s	0.4s
	ニクロム線抵抗	4Ω	4Ω	4Ω	4Ω	4Ω
微小 重力	通電時間	0.4s		0.3s		0.3s
	ニクロム線抵抗	2Ω		2Ω		3Ω

2. 1. 4 落下塔 (Drop shaft)

Fig. 10 に本実験において微小重力実験に使用した落下塔の概略図を示す。落下塔は縦約 0.7m、横約 0.9m、高さ約 5m、実験装置の有効落下距離は約 4m であり、塔内下部には衝撃吸収用クッションが敷かれている。微小重力観測時間は約 0.9 秒である。

また、落下の際に生じる空気抵抗によっておこる落下加速度の減少を最小限に抑えるために、空気抵抗遮断箱を使用した。空気抵抗遮断箱は縦 480mm、横 650mm、高さ 500mm であり、落下中に実験装置本体と空気抵抗遮断箱が接触しないよう落下させた。

2・2 実験方法

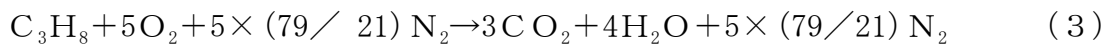
2. 2. 1 混合気の実験

本実験は室温、大気圧の下で行い、燃料として純度 99.9%プロパン (C₃H₈) を使用した。混合気の実験には熱線式体積流量計を使用した。

当量比 (Equivalence ratio) の定義を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{当量比 } \phi &= (\text{実際の燃空比}) / (\text{理論燃空比}) \\ &= (F / A)_{\text{real}} / (F / A)_{\text{stoichiometric}} \end{aligned} \quad (2)$$

プロパンが理論量論比で完全燃焼するときの化学反応式を(3)式に示す。



(3)式より、プロパン-空気混合気の理論燃空比は、次式となる。

$$F / A = 1 / \{5 \times (1 + 79/21)\} = 0.042 \quad (4)$$

(2)式と(4)式より

$$\text{実際の燃空比} = \text{当量比 } \phi / 0.042 \quad (5)$$

となり、プロパンの体積流量を 0.5l/min 一定とすると、任意の当量比 ϕ に必要な空気の体積流量 Q_{air} は、

$$Q_{\text{air}} = 11.9 / \phi \quad (6)$$

となる。

本実験での混合気の実験は、(6)式により求められた空気の体積流量 Q_{air} に従って、プロパンと空気を、それぞれ熱線式体積流量計を通して燃焼管に流入させた。プロパンと空気は燃焼管に設けられた注入用バルブからそれぞれ燃焼管に流入され、燃焼管の他端の排気用バルブから流出された。混合気は燃焼管で一様になるよう、5分間流入し、両端のバルブを閉じ、安定時間として15分間放置した後、実験を行った。本実験は当量比 $\phi = 0.35 \sim 0.55$ の範囲で行った。

2. 2. 2 実験手順

まず、所定の点火エネルギーとなるよう、ニクロム線抵抗と通電時間を設定する (Table 3)。そして先に述べた方法で、流量計を通して混合気を燃焼管に導入し、15分間の安定時間を設けた後、燃焼管に設けられた点火端側の圧力開放用バルブをあげ、先に設定した通電時間だけ電流を流し、ニクロム線による熱面点火を用いて燃焼させた。また、火炎伝ぱの様子は8mmビデオカメラを用いて直接撮影を行った。この手順に従い、各当量比、各エネルギーにおいて15回以上の実験を行った。

また、微小重力環境下での実験においては、落下塔を使用した。前述の手順で、燃焼管を混合気に導入した後、空気抵抗遮断箱の中に実験装置を設置した。そして、二つが接触しないように、ポリプロピレンリボンを使用して落下塔内でつるされた状態で、通常重力実験同様、15分間の安定時間をとった。その後、実験装置本体と空気抵抗遮断箱に外乱を与えないよう、静かに圧力開放用バルブをあげ、8mmビデオカメラのスイッチを入れ、実験装置等をつるしているポリプロピレンリボンを切断し、落下させた。落下中に実験装置が微小重力状態になると、実験装置に取り付けられているマイクロスイッチがオンになり、ニクロム線に電流が流れ、燃焼が開始する仕組みとなっている。本実験で利用した落下塔での微小重力観測可能時間は約0.9秒であり、本実験で設定した通電時間(0.3~0.4秒)での通電は落下中に終了する。

なお、本実験での火炎形状の写真や、火炎伝ぱ速度の算出は、8mmビデオカメラで撮影した映像をパソコンに取り込み、画像編集ソフト (Ulead Video Studio 7) を使用して行った。

第3章 実験結果及び考察

3. 1 火炎挙動

3. 1. 1 火炎面形状

Fig. 11 に通常重力及び微小重力環境における点火エネルギー85J、当量比 $\phi = 0.40 \sim 0.55$ での火炎面形状の代表例を示す。高点火エネルギーを用いた場合には、アメリカ鉱山局によって確認された、室温・大気圧で観察されるプロパン-空気混合気の希薄可燃限界、当量比 $\phi = 0.50$ (1. 2. 3 可燃限界) より希薄領域においても火炎の発生が観察された。これは、高点火エネルギーを用いたことにより混合気の温度が上昇し、反応創始に至る活性化学種の発生が促進されたことによるものと思われる。また、この図から明らかなように、通常重力下での火炎は、浮力による自然対流の影響を強く受け、著しく上方にゆがめられながら伝ぱしていることがわかる。それに対し、微小重力下での火炎は、燃焼管中心軸に対してほぼ対称の楕円形を呈していることがわかる。また、通常重力下では当量比 $\phi = 0.50$ 以上で、微小重力下では $\phi = 0.55$ で、火炎先端部が複数に分割されたセル状火炎の発生が確認された。

3. 1. 2 セル状火炎 (Cellular flame)

Fig. 12 に微小重力下におけるセル状火炎の伝ぱ挙動を示す。左から右へ、上から下へと順に時間が経過している。この図から明らかなように、点火直後、先端部が複数に分割されたセル状火炎が発生し、火炎伝ぱの進行に伴い、分割された火炎の成長に差異が生じ始め、比較的大きな火炎が他の小さな火炎を吸収し、最終的に一つの火炎に近い状態で伝ぱしていく様子がわかる。微小重力下において、火炎が伝ぱするにつれ火炎形状に差異が生じる現象は興味深い。それぞれの火炎の伝ぱ速度の違いによる、火炎面に流入する活性種の量の差異

によるものと考えられるが、今後、管内進行火炎伝ば法でのセル状火炎の伝ば挙動については、更なる詳細な検討が必要である。

Fig. 13 及び Fig. 14 に、通常重力及び微小重力環境における点火エネルギー 115J、85J、55J での点火直後の火炎面形状の代表例をそれぞれ示す。この図から明らかなように、両重力下において、当量比 $\phi = 0.55$ では本実験での点火エネルギー全範囲において点火直後にセル状火炎の発生が確認されたが、当量比 $\phi = 0.40$ では著しいセル状火炎の発生は確認されなかった。

通常、セル状火炎の発生メカニズムは、何らかの原因により火炎面に乱れが生じたとき、燃料と酸化剤の移動速度の差により、混合気の局所的な当量比が変化し、セル状火炎が発生するという選択拡散効果によって説明される。しかし、プロパン-空気混合気は、プロパンの拡散速度が酸素の拡散速度より小さいため、選択拡散効果は可濃側において顕著に現れ、希薄側でのセル状火炎の発生は選択効果の説明に矛盾する。

選択拡散効果では希薄プロパン-空気混合気のセル状火炎の発生が説明できないため、我々はレイス数に注目した。レイス数は熱拡散速度と物質の拡散速度の比であり、混合気に固有の値である。希薄プロパン-空気混合気は $Le > 1$ であり、つまり、熱拡散速度のほうが物質拡散速度に比べ大きい。そのため、火炎へのエネルギーと物質 (CH, OH, Hなどの活性種) の輸送関係が崩れ、火炎が不安定な状態になったものだと考えられる。また、 $\phi = 0.40$ でセル状火炎が観察されなかったのは、セル状火炎の発生には、ある程度以上の火炎温度を持つ火炎の発生が必要であり、それ以下の火炎温度ではレイス数効果の影響が減少したためだと思われる。

3. 2 火炎伝ば速度 (Flame speed)

3. 2. 1 火炎伝ば速度の算出

本実験における火炎伝ば速度は次式により算出される。

$$S_b = d \cdot X / s \quad (7)$$

ここで、 S_b : 火炎伝ば速度

d : ビデオカメラの映像上の1コマ分の火炎の移動距離

X : ビデオカメラの映像の寸法と実際の寸法の縮尺

s : ビデオカメラの1コマの時間 (1 / 30 秒)

である。

実験は、両重力下において15回以上行い、計算された値の中で最大値と最小値を除いたものの平均値を評価した。

3. 2. 2 火炎伝ば速度

Fig. 15 及び Fig. 16 に、通常重力及び微小重力環境での各当量比に対する火炎伝ば速度を、点火エネルギーをパラメータとして示す。まず、この二つの図を比べると、通常重力下の火炎伝ば速度に比べ微小重力下の火炎伝ば速度は50%以上減少していることがわかる。これは、通常重力下では、浮力の影響により火炎面積が増大し、火炎面へ流入する混合気の量が増加したためだと思われる。

Fig. 15 から明らかなように、通常重力下におけるプロパン-空気混合気の可燃範囲内 ($\phi = 0.50 \sim 0.55$) では、火炎伝ば速度に及ぼす著しい点火エネルギーの影響は観察されなかった。一方、超希薄領域 ($\phi = 0.35 \sim 0.45$) においては、先と同様に点火エネルギー55J~85J においては著しい点火エネルギーの影響は観察されなかったが、点火エネルギー100J、115J を用いた場合においては火炎伝ば速度の増加が確認された。

さらに、Fig. 16 から明らかなように、微小重力下においても通常重力下と同様の傾向が確認された。これは可燃範囲内では、本実験で用いた点火エネルギーの最小の値 55J でも、反応創始に至る活性種が十分に生成され、それ以上の点火エネルギーでは、与えた点火エネルギーがすべて混合気に伝わる前に火炎が発生し伝ばしたため、火炎伝ば速度に差が見られなかったと思われる。それに対し、超希薄領域においては、反応創始に至る活性種が著しく不足しているため点火エネルギーの影響を大きく受けたものと考えられる。

3・2・3 火炎伝ば速度比 (Ratio of flame speed) の算出

火炎伝ば速度に及ぼす点火エネルギーの影響を再評価するために、火炎伝ば速度比を求めた。ここで火炎伝ば速度比とは点火エネルギー55Jでの火炎伝ば速度を基準とし、各当量比での他の点火エネルギーを用いた場合の火炎伝ば速度を点火エネルギー55Jの火炎伝ば速度で割ったものであり、火炎伝ば速度の増大率を示したものである。火炎伝ば速度比は次式で算出される。

$$R = S_x / S_{55J} \quad (8)$$

ここで、R : 火炎伝ば速度比

S_x : 55 J 以外の点火エネルギーを用いたときの火炎伝ば速度

S_{55J} : 点火エネルギー55 J を用いたときの火炎伝ば速度

3. 2. 4 火炎伝ば速度比

Fig. 17 及び Fig. 18 に通常重力及び微小重力環境下での火炎伝ば速度比を示す。これらの図から明らかなように、当量比が希薄になるにつれて火炎伝ば速度比は一様に増加し、その増大率は点火エネルギーに依存していることがわかる。つまり、プロパン-空気混合気における火炎伝ば速度に及ぼす点火エネルギーの影響は、プロパンが希薄なほど大きくなることがわかる。

また、微小重力下及び通常重力下での点火エネルギー85J、115Jに着目すると、通常重力下と比較して、微小重力下の火炎伝ば速度の増大率の方が超希薄領域では大きいことがわかる。すなわち微小重力環境においては積極的に超希薄領域での燃焼利用が可能であることが示唆される。

3. 3 燃焼速度 (Burning velocity)

3. 3. 1 燃焼速度の算出

微小重力下でのセル状火炎が観察されない、 $\phi = 0.40 \sim 0.50$ において燃焼速度を算出した。単位時間に火炎面に流入する混合気の体積と、単位時間に消費される混合気の体積は等しく、燃焼速度は流入する未燃混合気の火炎面に対する直角方向の速度成分であるから、

$$A_t \times S_b = A_f \times S_u \quad (9)$$

ここで、 A_t : 燃焼管の断面積 (半径 35mm)

A_f : 火炎面積

S_b : 火炎伝ば速度

S_u : 燃焼速度

となり、燃焼速度は、

$$S_u = (A_t / A_f) \times S_b \quad (10)$$

で、算出することができる。

ここで、火炎面積は、燃焼管断面の内径 (70mm) を長軸 (または、短軸) とする半楕円球と近似し、それぞれの面積を求め、その平均値を火炎面積として使用した。Fig. 19 に微小重力下での、各点火エネルギーにおける各当量比の火炎面積を示す。

3. 3. 2 燃焼速度

Fig. 20 に(10)式により算出された、微小重力環境下での燃焼速度を示す。この図から明らかなように、点火エネルギー55 J の燃焼速度は若干減少しているものの、当量比の減少に伴い燃焼速度はほとんど変化していないことがわかる。また、点火エネルギーの増加に対しても燃焼速度は変化が見られなかった。つまり、微小重力下での希薄プロパン-空気混合気の点火エネルギーが及ぼす燃焼速度への影響はほとんどないといえる。

第4章 結論

本研究では希薄予混合気での燃焼特性に及ぼす点火エネルギーの影響を調べるために、通常重力下及び微小重力環境下において、管内進行火炎伝ば法を用い、燃料にプロパンを用いて検討を行った。以下に結果を示す。

- 1) 高点火エネルギーを用いた場合においても、プロパン-空気混合気の希薄側においてセル状火炎が発生する。
- 2) 希薄可燃限界近傍においては、火炎伝ば速度に及ぼす点火エネルギーの影響に差異が発生し、その影響は希薄側へ移行するほど大きくなる。
- 3) 超希薄領域において、微小重力下では通常重力下と比較して火炎伝ば速度の増大率は増加する。

参考文献

- 1) 新岡嵩ら、燃焼現象の基礎、(2001)、オーム社
- 2) 水谷幸夫、燃焼工学、(2002)、森北出版
- 3) 川上・岡島 他2名、機論(B)、64-626、1998、357-362
- 4) 川上・岡島 他1名、機論(B)、67-656、2001、215-219
- 5) 天内将、「管内進行火炎を用いた超希薄炭化水素—空気混合気の燃焼特性及び不安定火炎伝播挙動に関する研究」、(2003)、法政大学工学部
- 6) 西本琢、「火炎伝ば限界近傍におけるセル状火炎発生機構に関する研究」、(2002)、法政大学工学部
- 7) Zabetakis, M. G.: Flammability Characteristics of Combustible Gases Vapours, Bulletin 627, Bureau of Mines (1965)

謝辞

本研究を行うにあたり、終始ご指導、ご鞭撻いただきました川上忠重教授、
ならびに、お忙しい中副査をしていただいた岡島敏教授に深く感謝しお礼を申
し上げます。

また、実験を進めるにあたり、多くのご協力を賜りました、中央工作室の
島貫貞三氏ならびに石井俣嗣氏、誠に有難うございました。

そして、実験作業等にあたり、ご協力くださいました原動機研究室ならびに
熱工学研究室の皆様にご深く感謝いたします。

平成 17 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

海老沢 寧紀

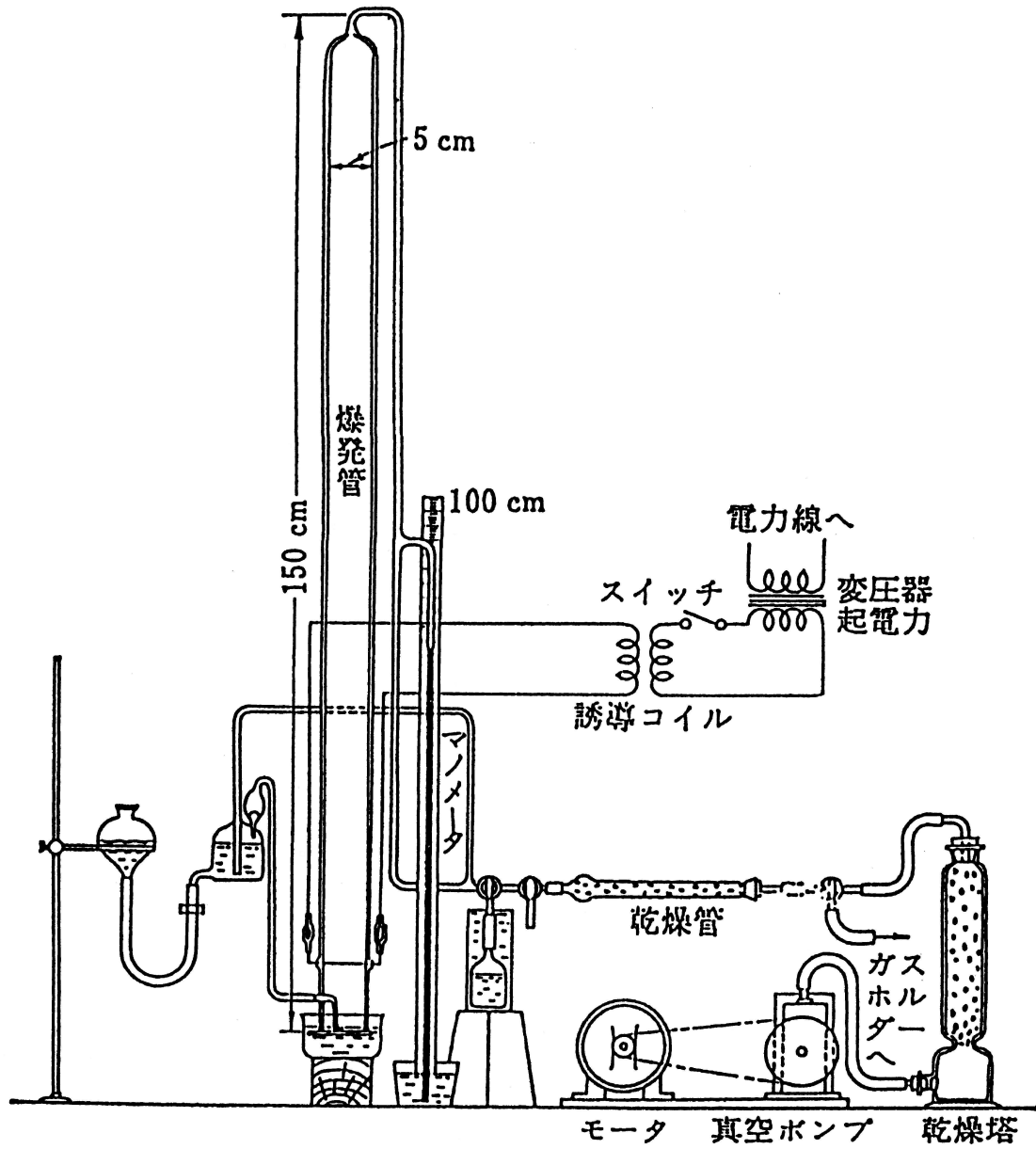


Fig.5 Experimental apparatus of U.S.Brueau of Mines

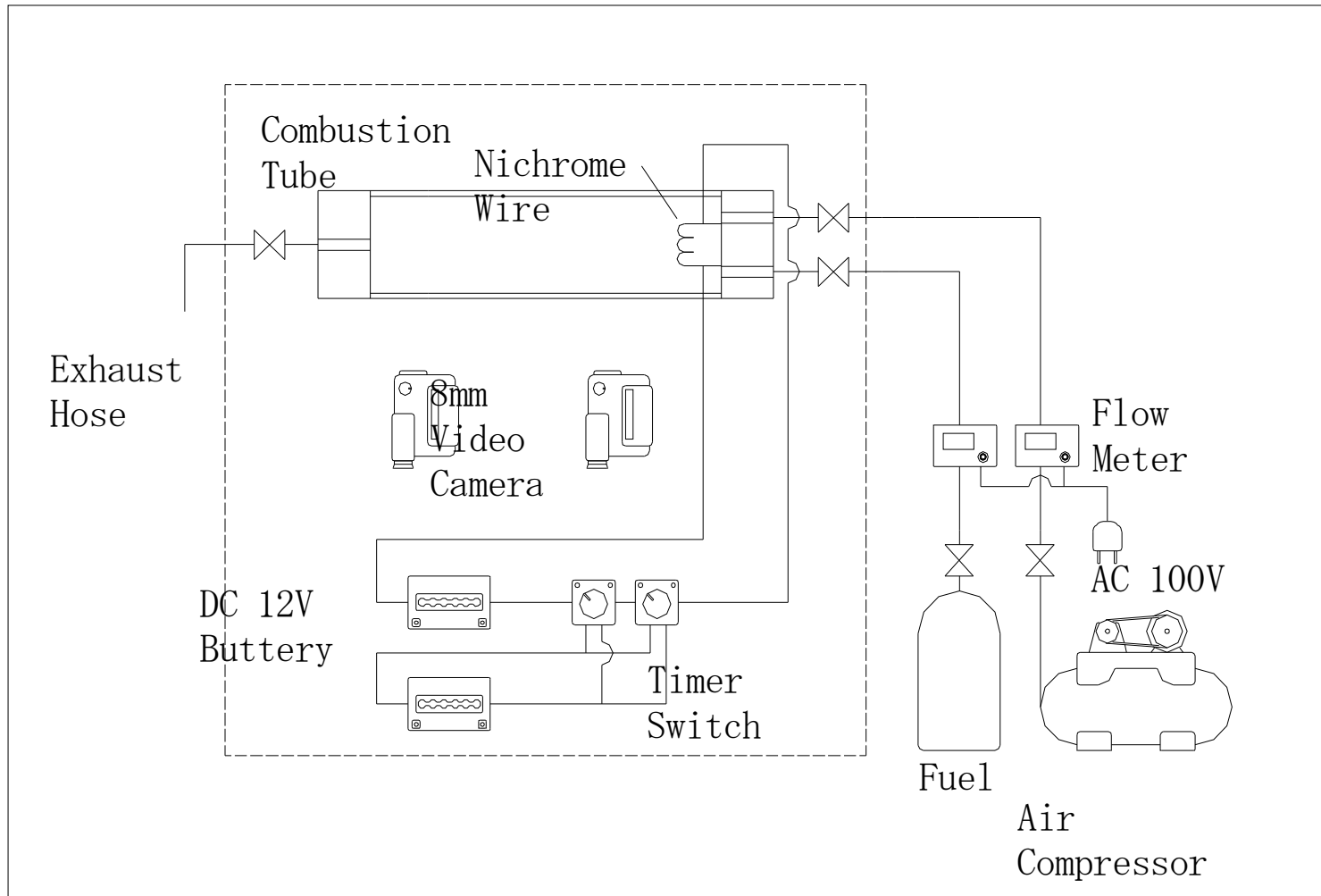


Fig.9 Schematic diagram of experimental

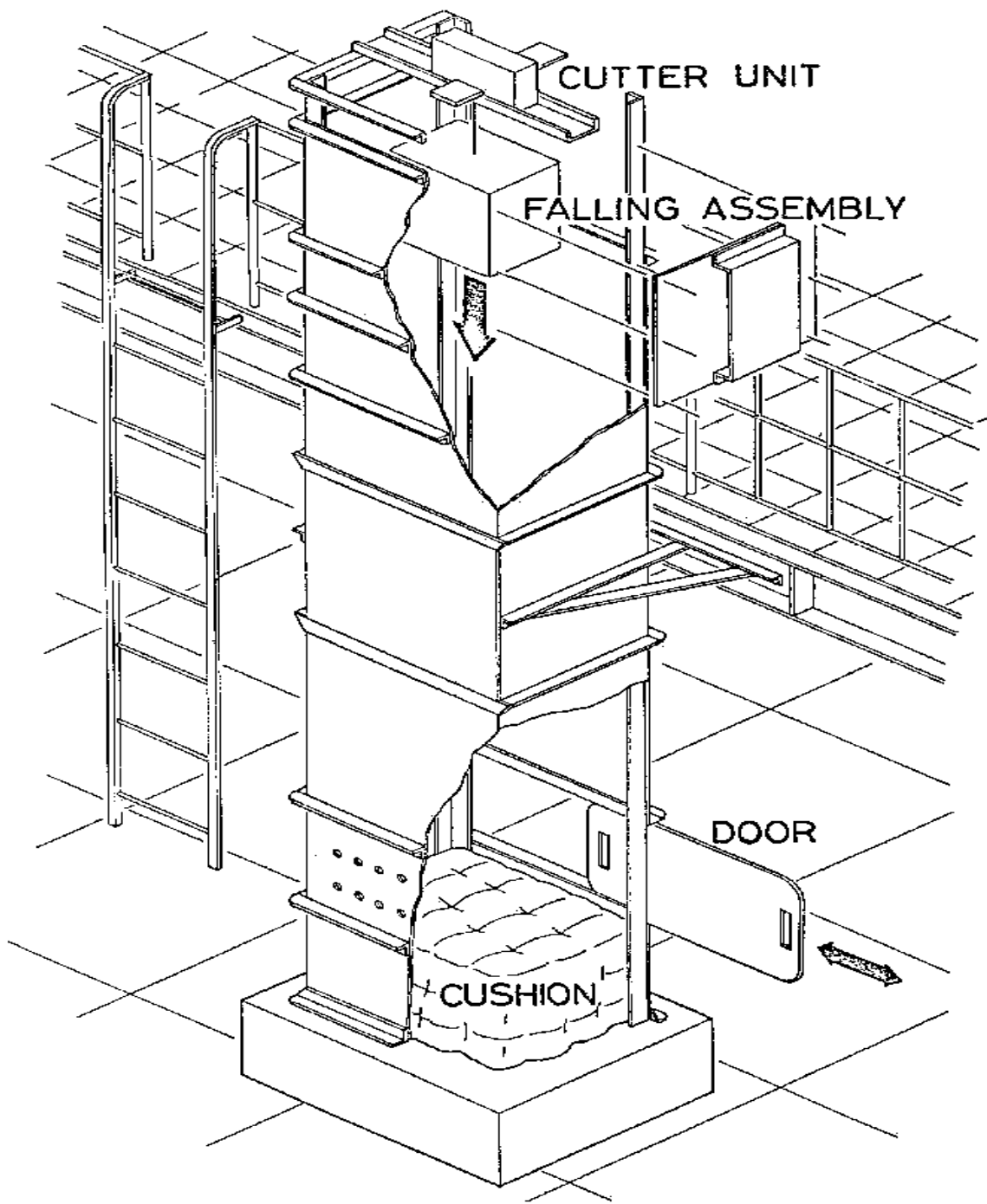


Fig.10 Falling shaft

Equivalence ratio ϕ








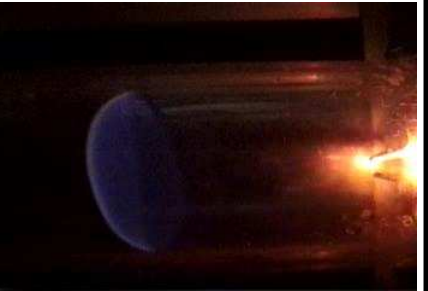
	0.55	0.50	0.45	0.40
Normal gravity				
Microgravity				

Fig.11 Flame shapes (Ignition energy 85J)

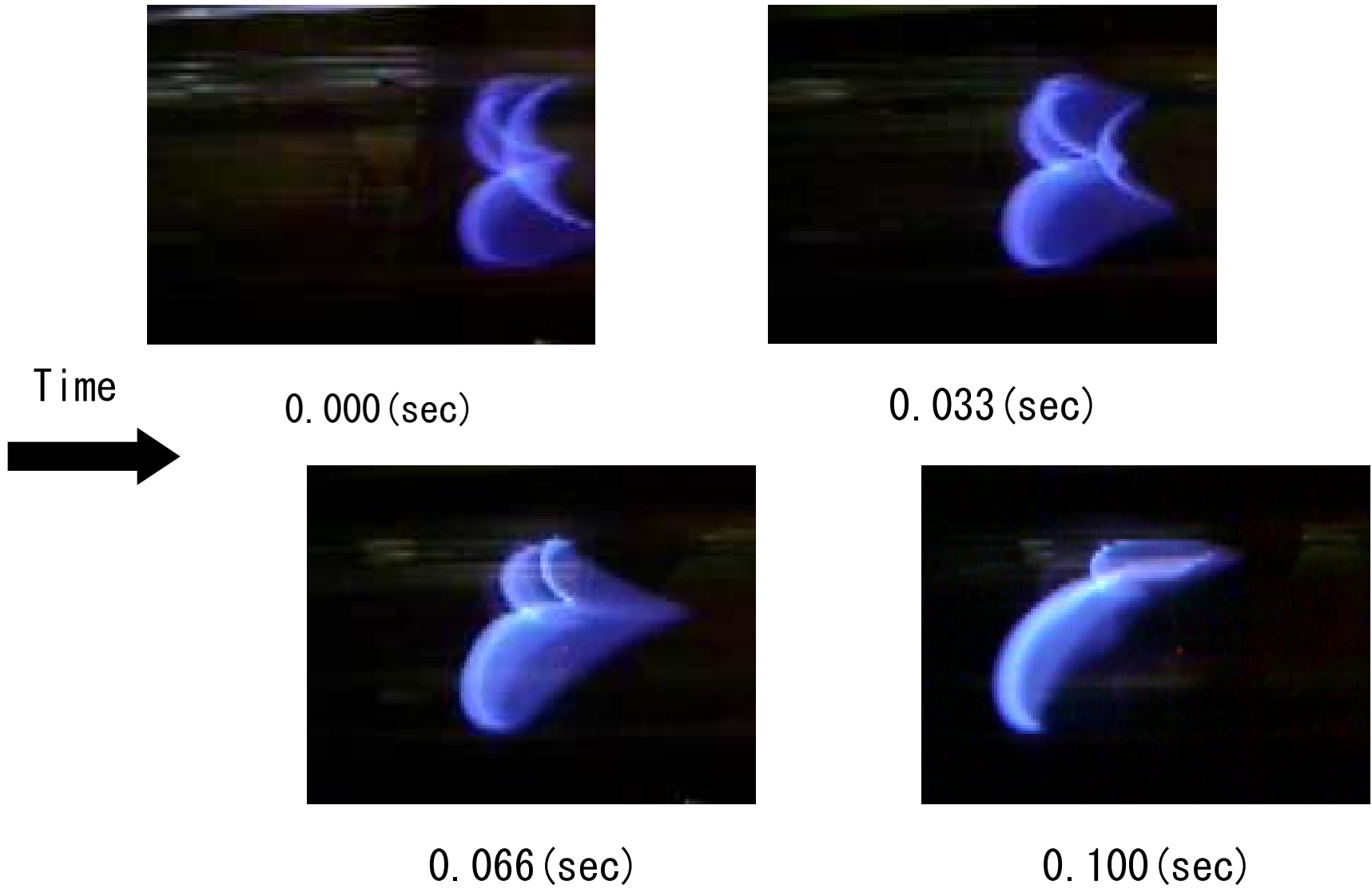


Fig.12 Flame propagation behavior (Microgravity)

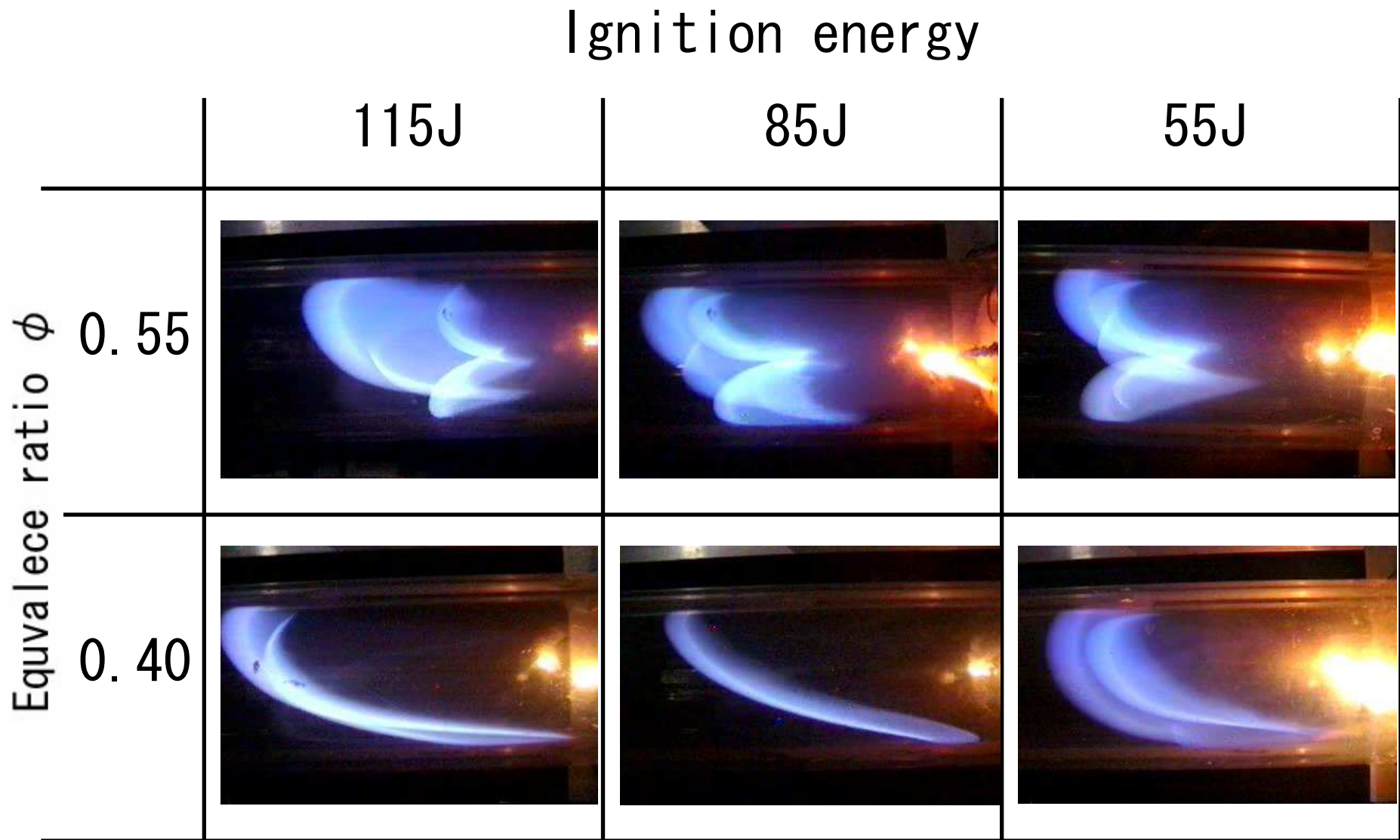


Fig.13 Flame shapes under Normal gravity

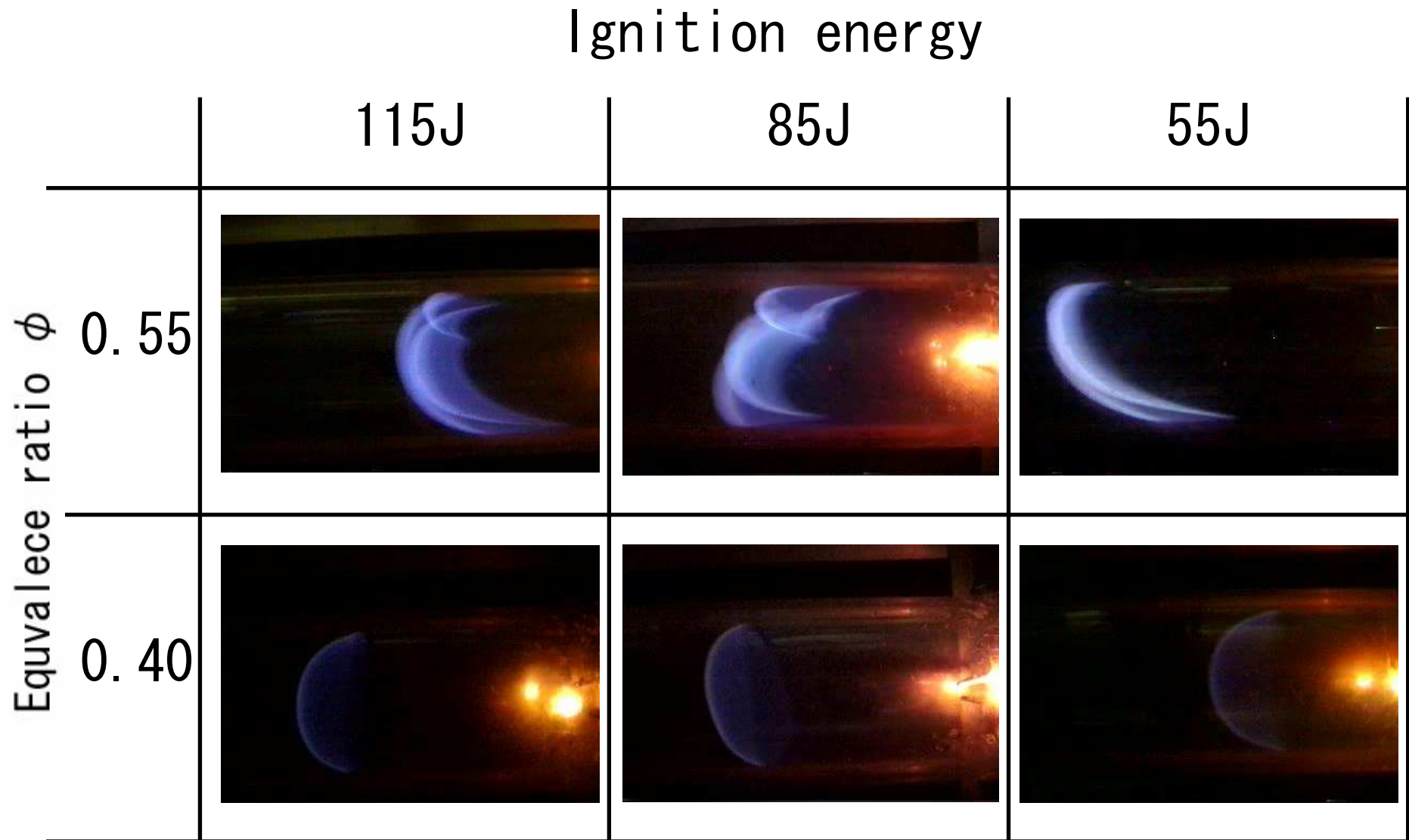


Fig.14 Flame shapes under Microgravity

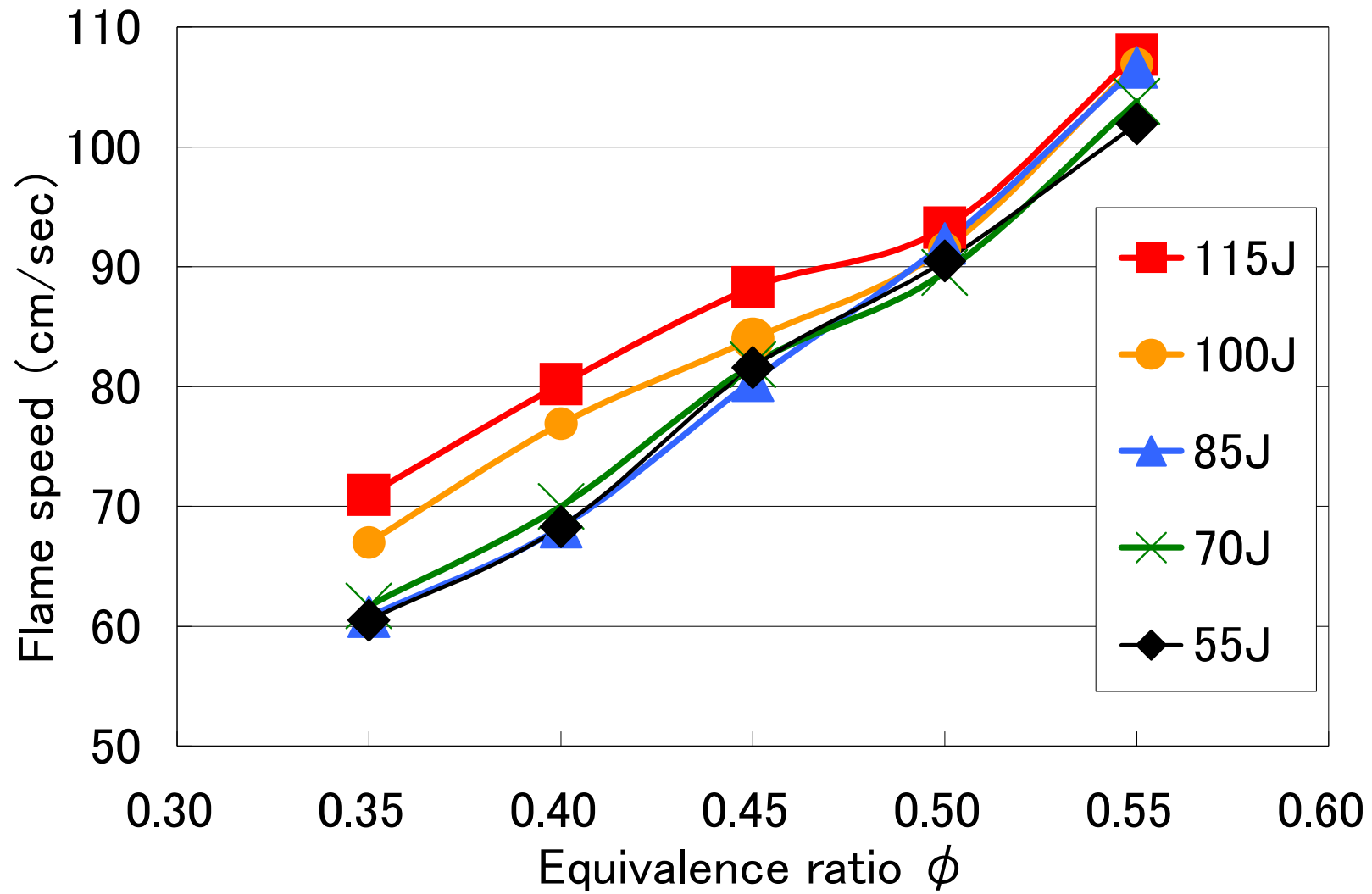


Fig.15 Flame speed under Normal gravity

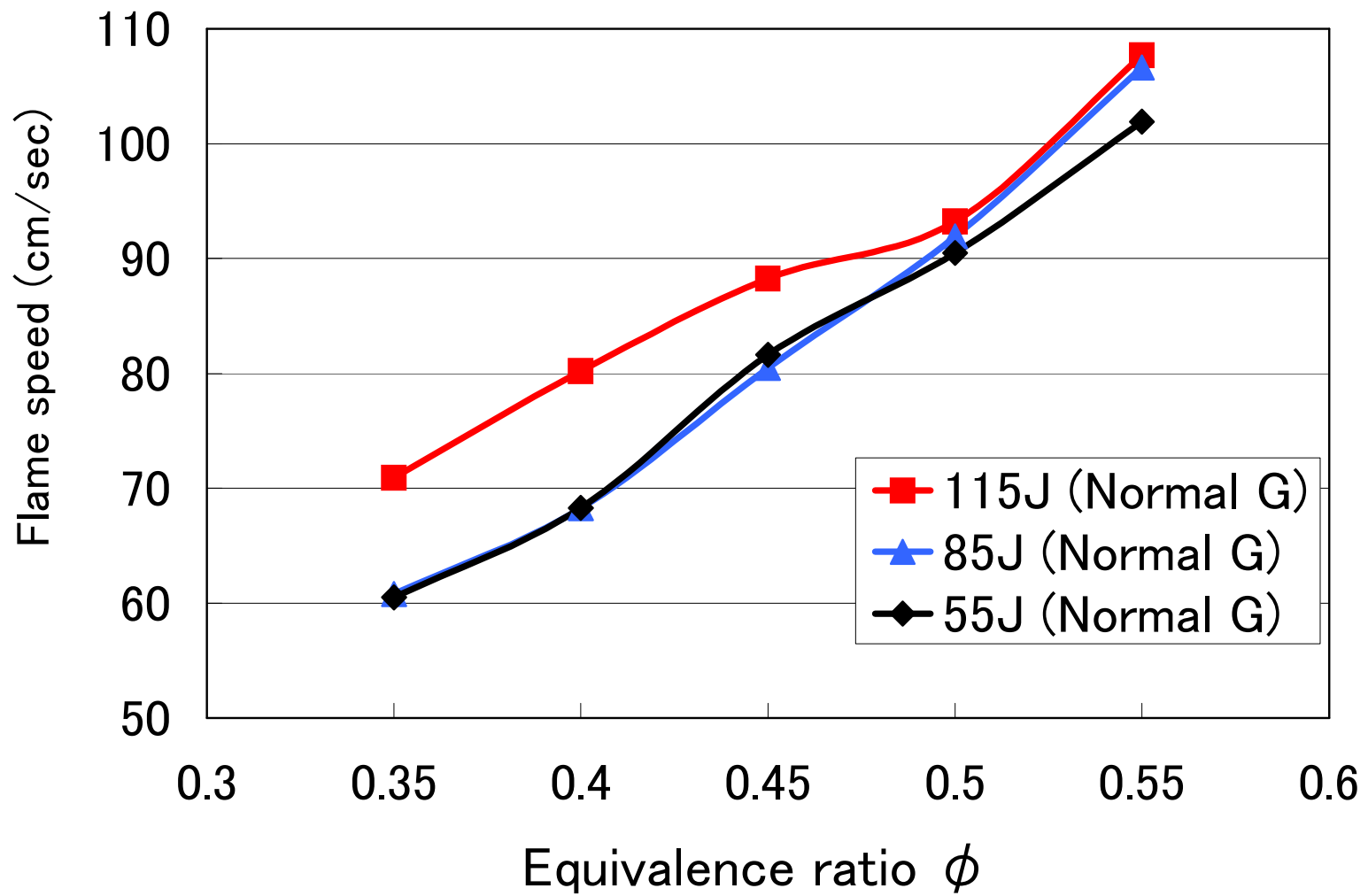


Fig.16 Flame speed under Microgravity

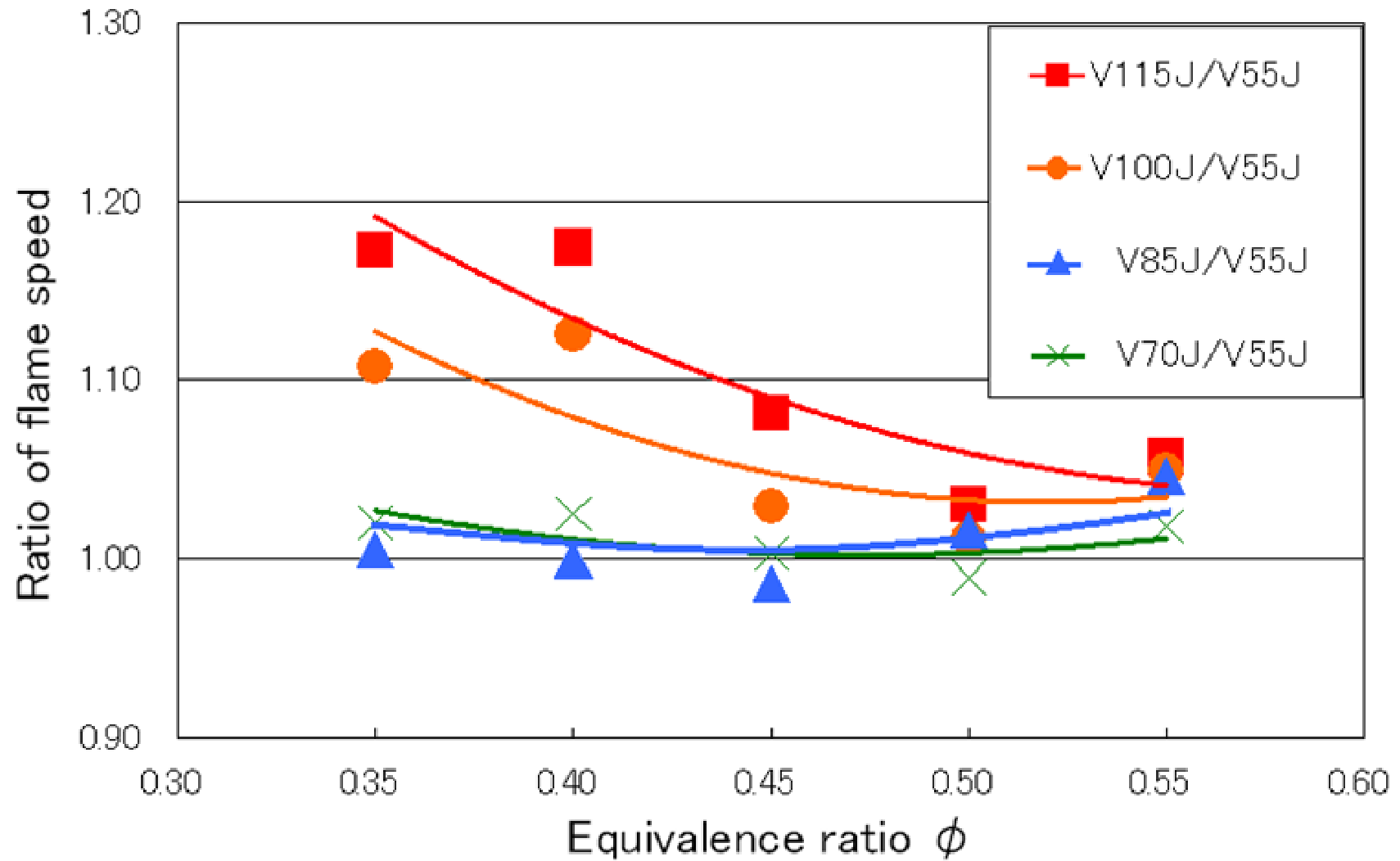


Fig.17 Ratio of flame speed under Normal gravity

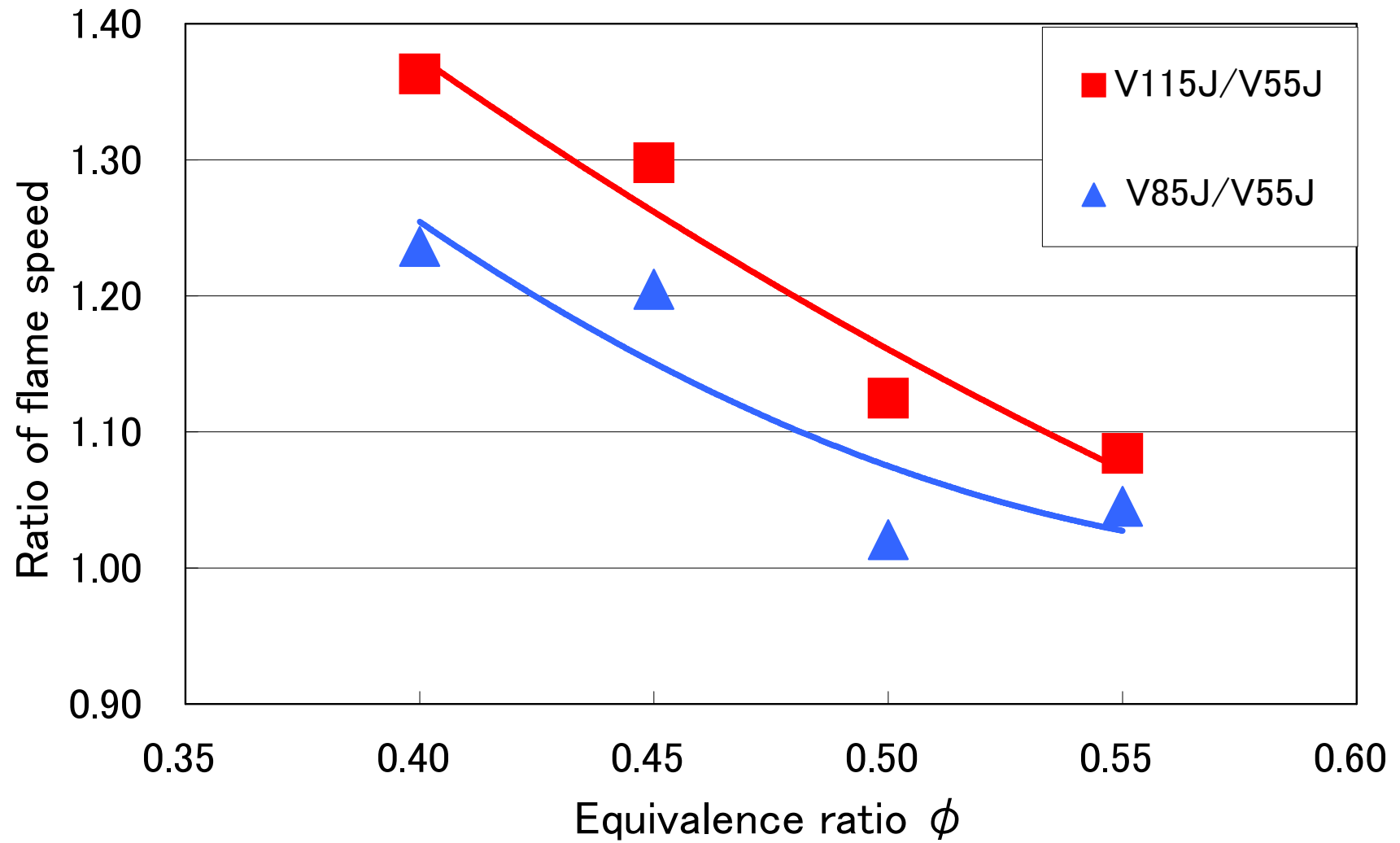


Fig.18 Ratio of flame speed under Microgravity

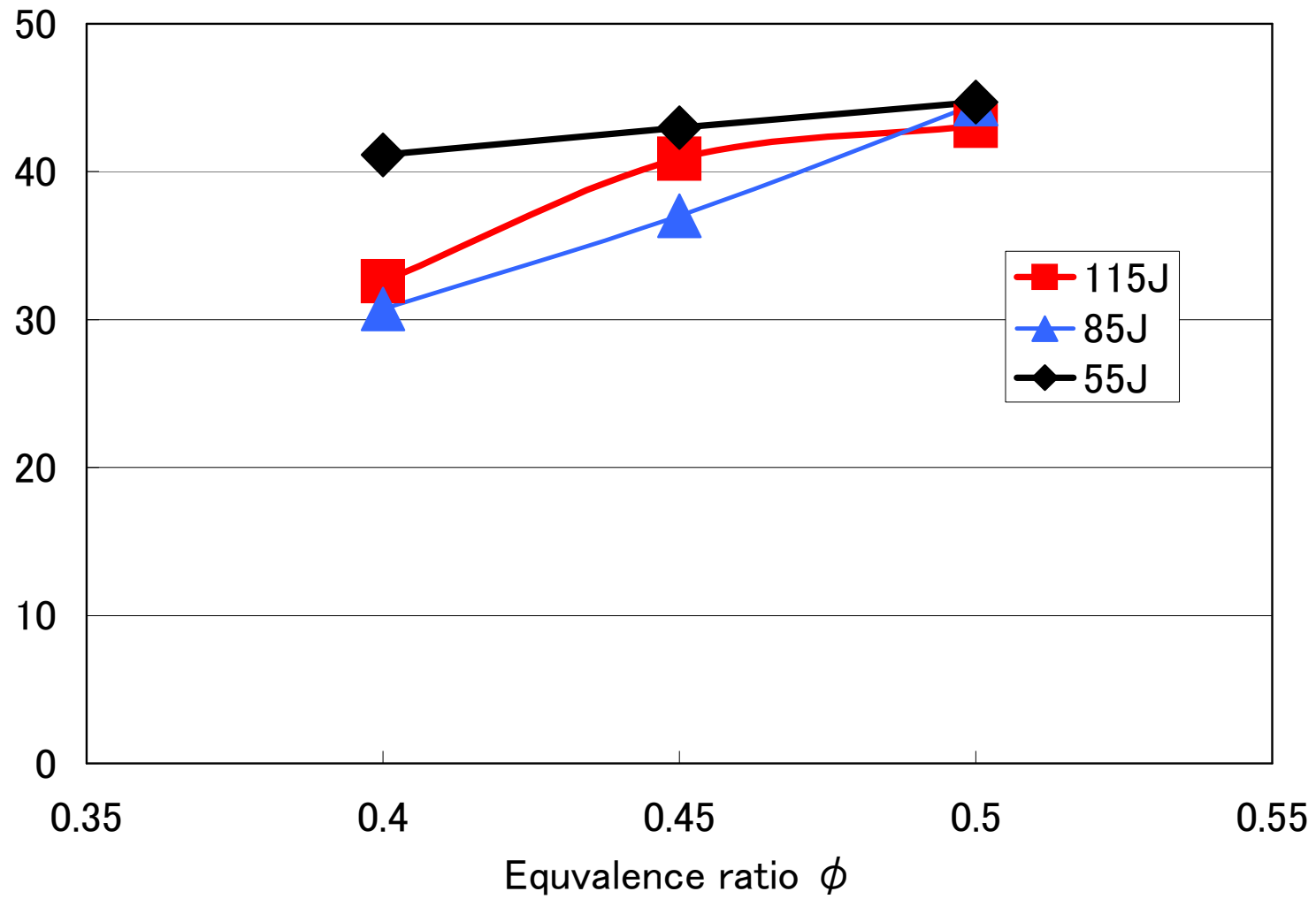


Fig.19 Flame size

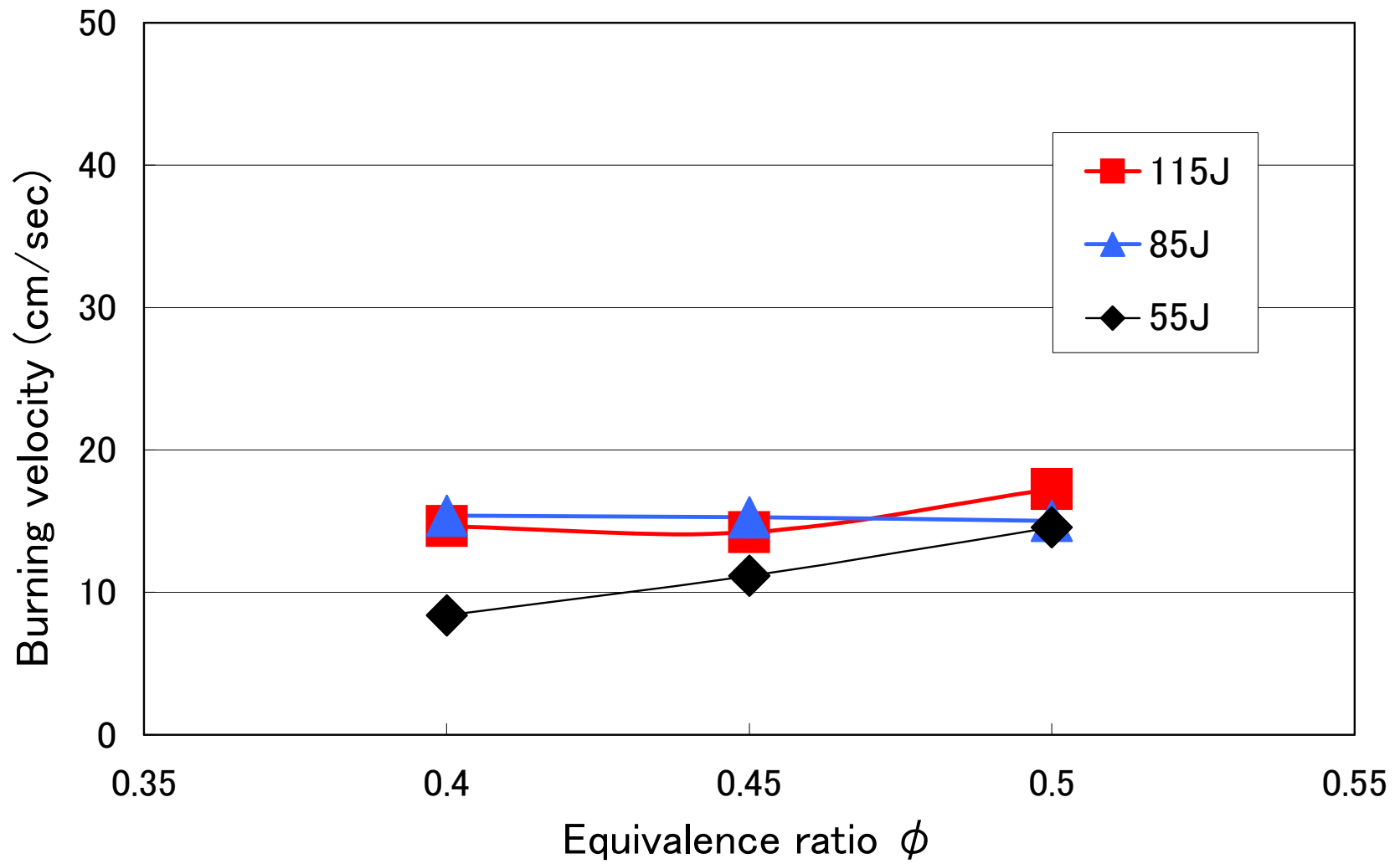


Fig.20 Burning velocity