

## 密閉容器を用いた微小重力環境下での炭化水素-空気混合気の燃焼特性

桑原, 竜太 / KUWAHARA, Ryuta

---

(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)

平成 17 年度（2005 年度）

修士論文

**密閉容器を用いた微小重力環境下での**

**炭化水素 空気混合気の燃焼特性**

**Influence of Oxygen Concentration on**

**Burning Velocity of Hydrocarbon-Air Mixtures**

指導教官 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

桑原 竜太

## 目次 (Contents)

Abstract	1
1. 緒論	2
1-1. 背景	2
1-2. オゾン層の破壊	3
1-3. 酸性雨	4
1-4. 窒素酸化物	5
1-5. 可燃限界	8
1-6. 純物質の性質	10
1-7. 断熱火炎温度	12
1-8. 浮力の計算	21
1-9. 研究目的	23
2. 実験装置	24
2-1. 装置概要	24
2-2. 燃焼容器	25
3. 実験方法	27
3-1. 混合気の作成方法	27
3-2. 通常重力実験	28
3-3. 微小重力実験	28
4. 結果と考察	29
4-1. 火炎形状 (微小重力)	29
4-2. 火炎伝播速度	30
4-2-1. 通常重力環境	30
4-2-2. 微小重力環境	32
4-3. 断熱火炎温度	33
4-4. 浮力の影響	33
5. 結論	34
謝辞	35
参考文献	36

# Abstract

## Influence of Oxygen Concentration on Burning Velocity of Hydrocarbon Air Mixtures

By  
Ryuta KUWAHARA

This experiment has been conducted to observe the combustion characteristics of propane-air mixtures under normal and microgravity achieved in a freely falling chamber at an initial temperature of 298K and pressure 0.1MPa. The mixtures of 79 to 81% nitrogen and 19 to 21% by volume are used as a substitute for air (Oxygen concentration: 19vol% and 21vol%).

The main conclusions are as follows:

- 1) The flame propagation speed of the propane-air mixtures under normal gravity near the flammability limits is subjected to a marked influence of the propagation direction.
- 2) The effect of oxygen concentration on flame speed is much larger for fuel rich side than that of fuel lean side.

# 1. 緒論

## 1 - 1 背景

産業革命以後、社会経済の発展が進むにつれてエネルギー消費が飛躍的に増加しつつある。また、人口もますます増加する傾向にある。特に、今後経済発展が見込まれるアジア諸国や発展途上国では、将来的に大きな人口増加も予想されている。その結果もたらされる地球への影響は、地球の生態系の自律的な調整能力を上回り始めたと考えられ、様々な地球環境問題として現れてきている。<sup>1)</sup> Fig.1 に大気汚染物質の大気中における挙動と地域環境、地球環境に及ぼす影響をまとめて示す。<sup>2)</sup>

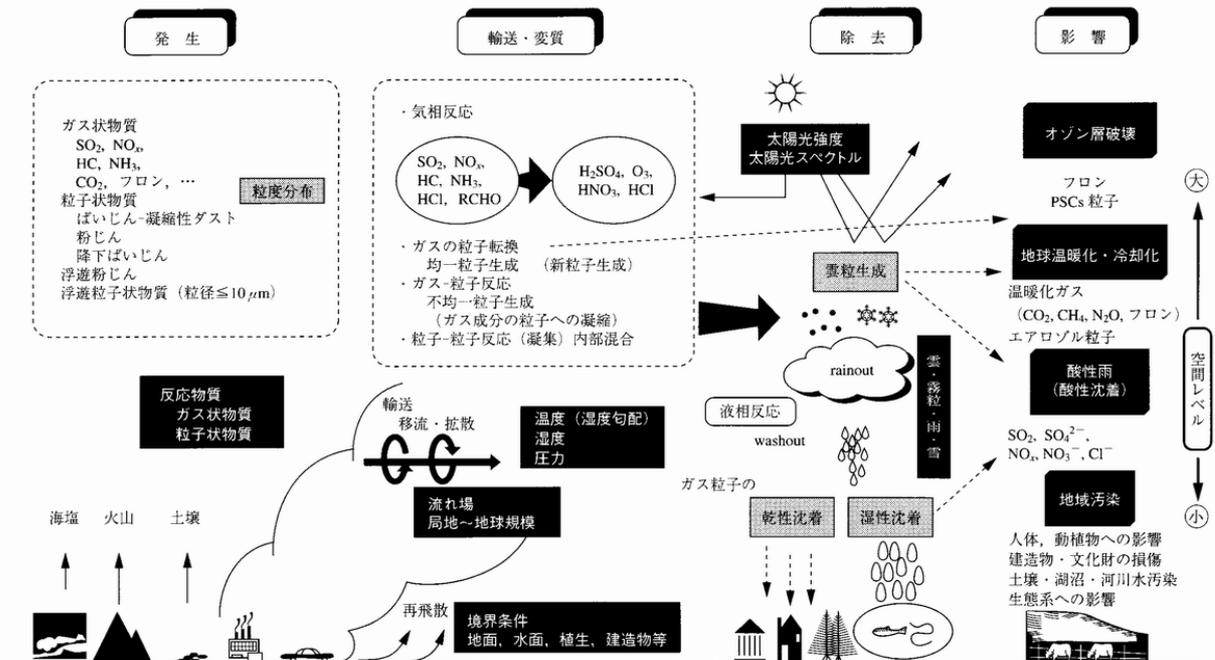


Fig.1 The Action and Earth Environment of an Air Pollution Substance in the Atmosphere

## 1 - 2 オゾン層の破壊

地球の周囲（高度 15～35km）にはオゾン層がとりまいており、太陽の紫外線が直接地表に届くのを防いでいる。1980 年代に南極の上空においてこのオゾン層が大きく減少しているオゾンホールが観測され、オゾン層保護の問題が持ち上がった。この原因物質はクロロフルオロカーボン（CFC）であることが特定され、CFC の生産を段階的に削減することが国際的に取り決められた。大気に放出されたフロンは安定な物質であるため途中で分解されることなく、やがて成層圏に到達し、そこで紫外線によって分解されて塩素原子を放出する。それが反応してオゾンを分解する。オゾン層が破壊されると紫外線が地上まで照射されるため、皮膚がんや白内障の発生が増えると予想されている。また作物や生物の生育にも影響すると考えられている。このため、CFC に代わる代替フロンの開発が進められ、ハイドロクロロフルオロカーボン（HCFC）やハイドロフルオロカーボン（HFC）など塩素の含有量を低減したあるいは含まないフロンに移行した。しかしながら、HCFC についても 2004 年から生産削減を開始し、2020 年に廃止することが合意された。なお、代替フロンは地球温暖化の効果を持つことが指摘されており、放出削減対象物質としてあげられている。

### 1 - 3 酸性雨

酸性雨とは pH5.6 以下に酸性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料に含まれる硫黄分は、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合が主である。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。生成メカニズムが違うため対策もそれぞれでことなる。硫黄酸化物対策としては燃料中の硫黄分除去または排煙脱硫装置を取り付けることで行われる。また、窒素酸化物対策については後述する。<sup>3)</sup>

## 1 - 4 窒素酸化物

窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )の多くは燃焼に起因し、その主成分は一酸化窒素( $\text{NO}$ )と二酸化窒素( $\text{NO}_2$ )である。 $\text{NO}_x$ の発生機構には燃料中の窒素が酸化して発生するフューエル $\text{NO}_x$ と、空気中の窒素が酸素と反応して発生するサーマル $\text{NO}_x$ とがあるが、多くはサーマル $\text{NO}_x$ である。高温燃焼の過程では、ほとんどが $\text{NO}$ の形で生成され大気中に放出されるが、大気中でオゾンなどにより酸化されて $\text{NO}_2$ となり、平均的には大気中の $\text{NO}_x$ の約60%が $\text{NO}_2$ である。 $\text{NO}_x$ の発生源としては、工場のボイラなどの固定発生源と自動車などの移動発生源があるが、環境への影響は、排出源が生活環境により近い自動車の方がはるかに大きい。一般に、 $\text{NO}_x$ 生成抑制と熱効率向上とは相反する条件にあるため、 $\text{NO}_x$ 対策では一酸化炭素、炭化水素など未燃物の低減や $\text{NO}_x$ の発生抑制とのバランスが重要になっている。 $\text{NO}_x$ 対策にはボイラー、工業炉、自動車などへの個別対策と税制的優遇、排出量規制、交通システム変革などの組織的対策とがある。前者はこれまで大気汚染対策に適用され、一層の技術開発が要求されている $\text{NO}_x$ の排出防止技術である。後者はクリーンエネルギー利用やその合理的利用に関連してエネルギー利用形態、社会構造やライフスタイルの変革を要し、個別対策が限界近く進んでいる場合、特に重要である。

これら因子の影響を少なくするのが $\text{NO}_x$ 生成抑制技術であり、連続燃焼と間欠燃焼に分けて要素技術を要約するとTable.1のようになる。二段燃焼は燃焼炉内で還元および酸化雰囲気に分けて燃焼させ $\text{NO}_x$ 発生を低減し、全体として空気比を等量にする方法である。一段目で酸化的(還元的)雰囲気とし、二段目で還元的(酸化的)雰囲気で燃焼させる方法や酸化的-還元的-酸化的雰囲気の三段燃焼などの方法もあり、窒素分の多い重油や微粉炭燃焼に用いられる。炉内脱硝も生成 $\text{NO}_x$ に二次的に炭化水素燃料を補給して窒素に還元する方法である。排ガス再循環は、一部排ガスを燃焼室に戻し、不活性ガス増加による熱容量増加と酸素濃度低下で、最高火炎温度を低下させ $\text{NO}_x$ 発生量を抑制する。

また、燃焼炉内を改造し燃焼ガスの内部循環を行う方法も有効である。この方法は、サーマル NO<sub>x</sub> に対して効果的だが、フューエル NO<sub>x</sub> 低減には効果は少ない。燃焼帯の空気比低減、熱負荷軽減などの運転条件変更は未対策燃焼炉に有効である。既存工業炉やボイラーでは、燃焼管理、特に空気比管理が極めて重要である。理論空気比に近い低空気比で完全燃焼を行うと、炉温の過剰上昇を防止し NO<sub>x</sub> 発生が抑制され燃料経済性も向上する。

Table1 Generation Control of NO<sub>x</sub>

連続燃焼	効果	間欠燃焼
	( )	点火(噴射)時期遅延
二段燃焼		副室付、パイロットとメイン燃焼
排ガス再循環		排ガス再循(EGR)
燃焼ガス自己再循環		バルブタイミング変更、内部 EGR
空気温低減		インタークーラー
低酸素燃焼・触媒燃焼		超希薄燃焼
非理論空気比燃焼		
		スワール比・圧縮比低減
低 NO バーナー		吸気・燃料系・燃焼室の改善
蒸気・水噴射		蒸気・水噴射
水エマルジョン燃料		水エマルジョン燃料

:燃焼温度低下 :燃焼域酸素濃度低下 :高温域滞留時間短縮

低 NO<sub>x</sub> バーナーには、燃料ガスの高速噴出により円錐状の薄膜火炎を形成する薄膜燃料バーナー、燃料筒に取り付けた多孔性セラミックスで火炎が分散するセラミックスバーナーなど様々な工夫がある。広い火炎表面積や排ガスの自己再循環効果に基づく燃焼温度低下もあるが、最高温域での滞留時間の短縮に着目している。日本の工業炉燃料のほとんどが液体、気体燃料であるため、排ガス自己再循環方式、多段燃焼式などの低 NO<sub>x</sub> バーナーが普及してい

る。非理論空気比燃焼は、燃焼過剰および空気過剰の複数のバーナーを組み合わせ、濃淡燃焼を可能にする。燃料過剰域では酸素濃度低下、空気過剰部分では温度低下により  $\text{NO}_x$  生成が抑制され、双方の火炎の混合で未燃物も減少する。

触媒燃焼は、希薄燃焼で燃焼温度を下げ、 $\text{NO}_x$  発生を抑制するもので、灰分などの堆積が起きない燃料に限られ、耐高温性触媒材料開発が実用化の鍵である。

点火（噴射）時期遅延は、燃料着火時期を圧縮工程後半にまで遅らせ、エンジンの初期燃焼短縮および緩慢な燃焼により燃焼最高温度を低下させる。直噴式では出力が低下し、すすと炭化水素排出が増加する。機関の改善は着火時期遅延との関連が強く、吸気系、燃焼室形状、圧縮比、スワール比、噴射法などを変更し  $\text{NO}_x$  低減と燃費向上を図っている。<sup>4)</sup>

## 1 - 5 可燃限界

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の限界を可燃限界といい、ときには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。

Table2 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、火炎が上端まで伝ばするときの混合気組成の限界を求めるもので、大気圧力下での実験では、下端を開放にしてから点火する。このガラス管を火炎が上方に伝ばする場合と、下方に伝ばする場合とでは重力による浮力の影響によって、前者の方がその可燃限界は広がる。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。

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上で効果的であるが、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、その伝ばに及ぼす自然対流の影響はまぬがれ得ず、その対流の効果を把握しておくことは、可燃限界を正確に理解する上で重要である。<sup>5)</sup>

Table2 Flammability Limits

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

## 1 - 6 純物質の性質

化学組成がどこでも均一な物質は純物質と呼ばれる。純物質について知っておくことはこの後の発熱量についての説明に関わってくるのでここで簡単に触れておく。

純物質の相は、固相・液相・気相に分かれる。純物質のエントルピーは相変化に伴って変化する（潜在エネルギー）。また同じ相であっても、相がおかれている状態（例えば温度・圧力）によってもエントルピーが変化する（顕在エネルギー）。

本実験では、液相・気相についてのみ関係してくるので、そこに重点をおいて述べることとする。また以下では定圧状態で水を用いて相変化に関する基本原理を解説していくが、すべての純物質は同じような一般的挙動を示す。Fig2 に水におけるさまざまな圧力に対する定圧相変化過程の T-v 線図を参考のため示す。

### ）圧縮液と飽和液

液相が圧縮液（サブクール液ともいう）の時、水は液相の状態にあり、気化が始まろうとしていない。この液体に熱を与えていくと飽和液という状態になる。この状態は気化が始まりかけている液体を指す。水は  $P = 1 \text{ a t m}$  において  $100$  でこの状態になる。

### ）飽和蒸気と過熱蒸気

沸騰が始まると液体が完全に気化するまで温度上昇しなくなる。最後には蒸気（気相）のみになる。液体がすべて気化したときの状態を飽和蒸気といい、このことから沸騰中の温度一定の状態を飽和液・蒸気混合物もしくは湿り蒸気という。

飽和蒸気にさらに熱を加え続ければ温度がさらに上昇していくことになる。この状態を過熱蒸気という。

### ）飽和温度と飽和圧力

圧力が与えられた時に、純物質が沸騰し始める温度は、飽和温度（Saturation temperature） $T_{\text{sat}}$  と呼ばれる。同じように、温度が与えられた時、純物質が沸騰を始める圧力は、飽和圧力（Saturation pressure） $P_{\text{sat}}$  と呼ばれる。

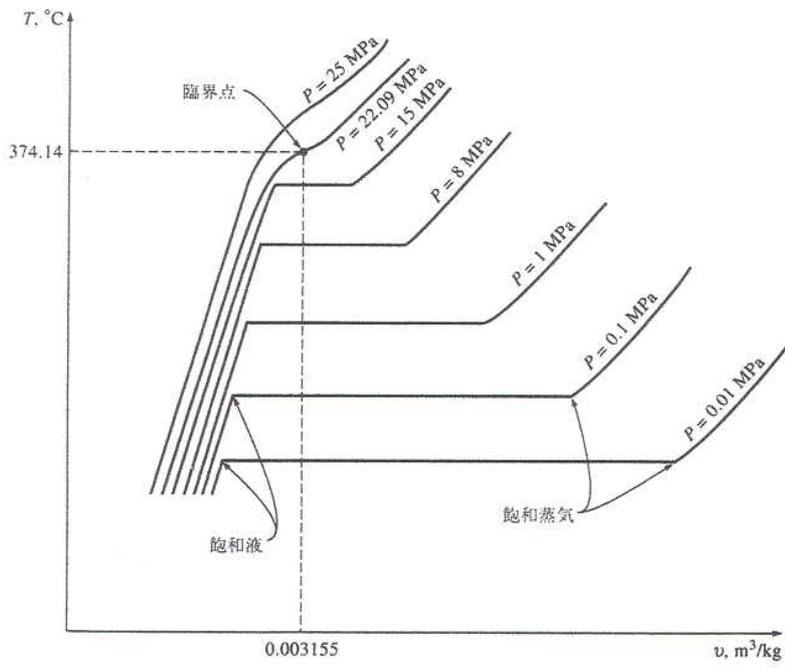


Fig2. 水におけるさまざまな圧力に対する定圧相変化過程の T-v 線図

## 1 - 7 断熱火炎温度

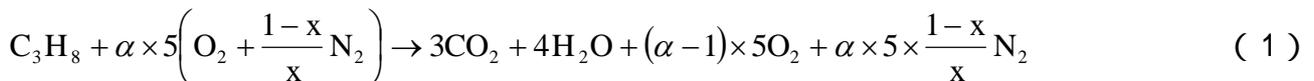
断熱火炎温度を計算するに当たっては化学エネルギーによる発熱量の計算が欠かせなくなり、生成エンタルピーから低位発熱量を出していく。燃烧エンタルピーの絶対値（つまり高位発熱量：HHV）から蒸発潜熱を引くことによって低位発熱量：LHVを求めることも出来るが、生成エンタルピーから算出する事は、実際の生成物中のCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの量を理論から求めた生成量と比べることにより詳細に低位発熱量を導くことを可能にするからである。

以下に飽和水蒸気表を温度基準の場合（Table3）<sup>6)</sup>と圧力基準の場合（Table4）<sup>7)</sup>で示す。また、25℃、1気圧における生成エンタルピー、生成ギブス関数及び絶対エンタルピー表をTable5<sup>8)</sup>に、25℃、1気圧における燃烧エンタルピーと蒸発エンタルピー表をTable6<sup>9)</sup>に示す。

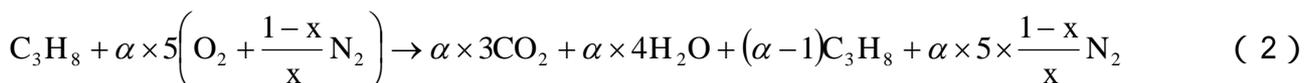
この表を用いて断熱火炎温度の計算をしていく。

）低位発熱量を求める。

まず今回実験で用いたプロパンの化学反応式を以下に示す。



ここで  $\alpha$  は空気比、 $x$  は雰囲気酸素濃度である。式（2-1）は当量比が希薄側のときにのみ使用できる。



上式（2）は過濃側当量比の時に使用できる。このように反応式を変化させて記述する必要があるのは、後に定圧比熱を求める時に生成物が重要であるからである。また、生成エンタルピーから低位発熱量を求める時にもこのような式から考えていく必要がある。また、この方法は二酸化炭素と水の発生割合を考慮したい時にも有効であり、二酸化炭素と水の係数を変化させることで対応できる。

Table3 飽和水蒸気表 温度基準

温度 °C $T$	飽和 圧力 kPa $P_{sat}$	比容積 $m^3/kg$		内部エネルギー kJ/kg			エンタルピー kJ/kg			エントロピー kJ/(kg·K)		
		飽和液 $v_f$	飽和 蒸気 $v_g$	飽和液 $u_f$	蒸発 $u_{fg}$	飽和 蒸気 $u_g$	飽和液 $h_f$	蒸発 $h_{fg}$	飽和 蒸気 $h_g$	飽和液 $s_f$	蒸発 $s_{fg}$	飽和 蒸気 $s_g$
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
<b>飽和 圧力 MPa</b>												
100	0.101 35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.120 82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.143 27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.169 06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.198 53	0.001 060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001 096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001 102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001 108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001 114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001 121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001 127	0.194 05	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001 134	0.174 09	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001 141	0.156 54	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001 149	0.141 05	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698

温度 °C T	飽和 圧力 MPa P <sub>sat</sub>	比容積 m <sup>3</sup> /kg		内部エネルギー kJ/kg			エンタルピー kJ/kg			エントロピー kJ/(kg·K)		
		飽和液 v <sub>f</sub>	飽和 蒸気 v <sub>g</sub>	飽和液 u <sub>f</sub>	蒸発 u <sub>fg</sub>	飽和 蒸気 u <sub>g</sub>	飽和液 h <sub>f</sub>	蒸発 h <sub>fg</sub>	飽和 蒸気 h <sub>g</sub>	飽和液 s <sub>f</sub>	蒸発 s <sub>fg</sub>	飽和 蒸気 s <sub>g</sub>
200	1.5538	0.001157	0.12736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001164	0.11521	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001173	0.10441	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001181	0.09479	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001190	0.08619	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001199	0.07849	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001209	0.07158	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001219	0.06537	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001229	0.05976	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001240	0.05471	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001251	0.05013	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001263	0.04608	1104.28	1506.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001276	0.04221	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001289	0.03877	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001302	0.03564	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001317	0.03279	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001332	0.03017	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001348	0.02777	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001366	0.02557	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001384	0.02354	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001404	0.02167	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001425	0.01994	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3638	5.6643
310	9.856	0.001447	0.01835	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001472	0.01686	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001499	0.01548	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001561	0.01299	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001638	0.01079	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001740	0.00881	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001893	0.00694	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.3	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002213	0.00492	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6885	4.7971
374.14	22.09	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Table4 飽和水蒸気表 圧力基準

圧力 kPa P	飽和 温度 °C T <sub>sat</sub>	比容積 m <sup>3</sup> /kg		内部エネルギー kJ/kg			エンタルピー kJ/kg			エントロピー kJ/(kg·K)		
		飽和液 v <sub>f</sub>	飽和 蒸気 v <sub>g</sub>	飽和液 u <sub>f</sub>	蒸発 u <sub>fg</sub>	飽和 蒸気 u <sub>g</sub>	飽和液 h <sub>f</sub>	蒸発 h <sub>fg</sub>	飽和 蒸気 h <sub>g</sub>	飽和液 s <sub>f</sub>	蒸発 s <sub>fg</sub>	飽和 蒸気 s <sub>g</sub>
0.6113	0.01	0.001 000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
<b>圧力 MPa</b>												
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001 057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001 061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001 064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5708	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001 067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	655.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001 118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001 121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001 124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001 127	0.1944	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001 133	0.1775	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2781.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001 139	0.1633	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001 144	0.1512	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

圧力 MPa $P$	飽和 温度 °C $T_{sat}$	比容積 $m^3/kg$		内部エネルギー $kJ/kg$			エンタルピー $kJ/kg$			エントロピー $kJ/(kg \cdot K)$		
		飽和液 $v_f$	飽和蒸気 $v_g$	飽和液 $u_f$	蒸発 $u_{fg}$	飽和蒸気 $u_g$	飽和液 $h_f$	蒸発 $h_{fg}$	飽和蒸気 $h_g$	飽和液 $s_f$	蒸発 $s_{fg}$	飽和蒸気 $s_g$
1.40	195.07	0.001 149	0.140 84	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001 154	0.131 77	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001 166	0.113 49	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001 177	0.099 63	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001 187	0.088 75	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001 197	0.079 98	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001 217	0.066 68	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001 235	0.057 07	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001 252	0.049 78	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001 286	0.039 44	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001 319	0.032 44	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001 351	0.027 37	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001 384	0.023 52	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001 418	0.020 48	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6722
10	311.06	0.001 452	0.018 026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001 489	0.015 987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001 527	0.014 263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.3	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001 567	0.012 780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001 611	0.011 485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001 658	0.010 337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001 711	0.009 306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001 770	0.008 364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001 840	0.007 489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001 924	0.006 657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002 036	0.005 834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002 207	0.004 952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002 742	0.003 568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Table5 2 5 、1 気圧における生成エンタルピー、生成ギブス関数及び絶対エンタルピー表

物質名	化学式	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{g}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
炭素	C(s)	0	0	5.74
水素	H <sub>2</sub> (g)	0	0	130.68
窒素	N <sub>2</sub> (g)	0	0	191.61
酸素	O <sub>2</sub> (g)	0	0	205.04
一酸化炭素	CO(g)	-110,530	-137,150	197.65
二酸化炭素	CO <sub>2</sub> (g)	-393,520	-394,360	213.80
水蒸気	H <sub>2</sub> O(g)	-241,820	-228,590	188.83
水	H <sub>2</sub> O(l)	-285,830	-237,180	69.92
過酸化水素	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	-136,310	-105,600	232.63
アンモニア	NH <sub>3</sub> (g)	-46,190	-16,590	192.33
メタン	CH <sub>4</sub> (g)	-74,850	-50,790	186.16
アセチレン	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	+226,730	+209,170	200.85
エチレン	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	+52,280	+68,120	219.83
エタン	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	-84,680	-32,890	229.49
プロピレン	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)	+20,410	+62,720	266.94
プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	-103,850	-23,490	269.91
n-ブタン	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	-126,150	-15,710	310.12
n-オクタン	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	-208,450	+16,530	466.73
n-オクタン	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)	-249,950	+6,610	360.79
n-ドデカン	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> (g)	-291,010	+50,150	622.83
ベンゼン	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	+82,930	+129,660	269.20
メチルアルコール	CH <sub>3</sub> OH(g)	-200,670	-162,000	239.70
メチルアルコール	CH <sub>3</sub> OH(l)	-238,660	-166,360	126.80
エチルアルコール	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(g)	-235,310	-168,570	282.59
エチルアルコール	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(l)	-277,690	-174,890	160.70
酸素	O(g)	+249,190	+231,770	161.06
水素	H(g)	+218,000	+203,290	114.72
窒素	N(g)	+472,650	+455,510	153.30
水酸基	OH(g)	+39,460	+34,280	183.70

Table6 25、1気圧における燃焼エンタルピーと蒸発エンタルピー表

物質名	化学式	$\Delta \bar{h}_c^\circ = -\text{HHV}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{fg}$ kJ/kmol
水素	$\text{H}_2(g)$	-285,840	
炭素	$\text{C}(s)$	-393,520	
一酸化炭素	$\text{CO}(g)$	-282,990	
メタン	$\text{CH}_4(g)$	-890,360	
アセチレン	$\text{C}_2\text{H}_2(g)$	-1,299,600	
エチレン	$\text{C}_2\text{H}_4(g)$	-1,410,970	
エタン	$\text{C}_2\text{H}_6(g)$	-1,559,900	
プロピレン	$\text{C}_3\text{H}_6(g)$	-2,058,500	
プロパン	$\text{C}_3\text{H}_8(g)$	-2,220,000	15,060
n-ブタン	$\text{C}_4\text{H}_{10}(g)$	-2,877,100	21,060
n-ペンタン	$\text{C}_5\text{H}_{12}(g)$	-3,536,100	26,410
n-ヘキサン	$\text{C}_6\text{H}_{14}(g)$	-4,194,800	31,530
n-ヘプタン	$\text{C}_7\text{H}_{16}(g)$	-4,853,500	36,520
n-オクタン	$\text{C}_8\text{H}_{18}(g)$	-5,512,200	41,460
ベンゼン	$\text{C}_6\text{H}_6(g)$	-3,301,500	33,830
トルエン	$\text{C}_7\text{H}_8(g)$	-3,947,900	39,920
メチルアルコール	$\text{CH}_3\text{OH}(g)$	-764,540	37,900
エチルアルコール	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(g)$	-1,409,300	42,340

Table5 より  $\text{CO}_2$  の生成エンタルピーは - 393520(kJ/kmol)、 $\text{H}_2\text{O}(l)$  の生成エンタルピーは - 241820(kJ/kmol)、 $\text{C}_3\text{H}_8$  の生成エンタルピーは - 103850(kJ/kmol)であるので、プロパン 1kmol あたりの低位発熱量は

$$\text{LHV} = \left| \bar{h}_c \right| - \bar{h}_{fg\text{H}_2\text{O}} = 3 \times 393520 + 4 \times 241820 - 1 \times 103850 = 2043990(\text{kJ} / \text{kmol}) \quad (3)$$

ここで単位質量あたりのプロパンの低位発熱量が知りたいので、プロパンのモル質量 44.0962(kg/kmol) で除して、46.35(MJ/kg) を得る。この値は、希薄側でのみ適用できる。過濃側においては、不足の酸素分は燃焼していないものとして、計算した。つまり

$$\text{LHV} = \alpha \times 46.35(\text{MJ} / \text{kg}) \quad (4)$$

である。

) 比熱を調べる。

比熱に関しては以下の表(Table7)を用いた。

ただし、表で与えられていない値に関しては補間法を用いて計算した。

ここで過濃側を計算する時にプロパンの定圧比熱が必要になる。そこで以下

で与えられた式(5)と表を用いて求めた。(Table8)<sup>10)</sup>

$$C_{p,av} = \sum_{T=298}^{T_{bt}} C_p(T) \div (T_{bt} - 298) \quad (5)$$

上式(5)はプロパンの平均定圧比熱を計算するために一度ずつ比熱を足し合わせて、仮定した断熱火炎温度(T<sub>bt</sub>)と初期温度の差で除している。

Table7 完全燃焼ガス成分の T<sub>0</sub>(=298.15K) ~ T[K]間の平均定圧比熱

T [K]	O <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		H <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O		CO <sub>2</sub>		SO <sub>2</sub>	
	kg*	m <sup>3</sup> N*	kg*	m <sup>3</sup> N*	kg*	m <sup>3</sup> N*	kg*	m <sup>3</sup> N*	kg*	m <sup>3</sup> N*	kg*	m <sup>3</sup> N*
1000	1.011	1.443	1.092	1.364	14.62	1.315	2.056	1.653	1.081	2.123	.7658	2.189
1200	1.031	1.472	1.113	1.391	14.74	1.326	2.124	1.707	1.121	2.200	.7870	2.249
1400	1.048	1.496	1.132	1.415	14.89	1.340	2.191	1.761	1.153	2.263	.8036	2.297
1600	1.063	1.517	1.149	1.436	15.07	1.355	2.256	1.813	1.179	2.316	.8169	2.335
1800	1.075	1.535	1.164	1.455	15.25	1.372	2.317	1.862	1.202	2.360	.8278	2.366
2000	1.087	1.551	1.178	1.472	15.43	1.388	2.374	1.908	1.221	2.397	.8370	2.392
2200	1.097	1.566	1.189	1.486	15.62	1.405	2.427	1.951	1.237	2.429	.8449	2.415
2400	1.107	1.580	1.200	1.499	15.80	1.421	2.476	1.990	1.252	2.458	.8517	2.434
2600	1.116	1.594	1.209	1.511	15.97	1.436	2.520	2.026	1.264	2.482	.8576	2.451
2800	1.125	1.606	1.217	1.522	16.13	1.451	2.562	2.059	1.275	2.504	.8630	2.466
3000	1.134	1.618	1.225	1.531	16.29	1.465	2.600	2.090	1.285	2.524	.8677	2.480

\* kg 欄の単位は kJ/(kg·K), m<sup>3</sup>N 欄の単位は kJ/(m<sup>3</sup>N·K).

Table8 プロパンの定圧比熱を求める際に使用した表

$$\bar{c}_{p,0} = a + bT + cT^2 + dT^3$$

[T in K,  $\bar{c}_{p,0}$  in kJ/(kmol·K)]

物質名	化学式	a	b	c	d	% 誤差	
						最大値	平均値
窒素	N <sub>2</sub>	28.90	-0.1571 × 10 <sup>-2</sup>	0.8051 × 10 <sup>-5</sup>	-2.873 × 10 <sup>-9</sup>	0.59	0.24
酸素	O <sub>2</sub>	25.48	1.520 × 10 <sup>-2</sup>	-0.7155 × 10 <sup>-5</sup>	1.312 × 10 <sup>-9</sup>	1.19	0.28
空気		28.11	0.1867 × 10 <sup>-2</sup>	0.4802 × 10 <sup>-5</sup>	-1.966 × 10 <sup>-9</sup>	0.72	0.33
水素	H <sub>2</sub>	29.11	-0.1816 × 10 <sup>-2</sup>	0.4003 × 10 <sup>-5</sup>	-0.8704 × 10 <sup>-9</sup>	1.01	0.26
一酸化炭素	CO	28.16	0.1875 × 10 <sup>-2</sup>	0.5372 × 10 <sup>-5</sup>	-2.222 × 10 <sup>-9</sup>	0.89	0.37
二酸化炭素	CO <sub>2</sub>	22.26	5.981 × 10 <sup>-2</sup>	-3.501 × 10 <sup>-5</sup>	7.463 × 10 <sup>-9</sup>	0.57	0.22
水蒸気	H <sub>2</sub> O	32.24	0.1923 × 10 <sup>-2</sup>	1.055 × 10 <sup>-5</sup>	-3.595 × 10 <sup>-9</sup>	0.53	0.24
一酸化窒素	NO	29.34	-0.08395 × 10 <sup>-2</sup>	0.9747 × 10 <sup>-5</sup>	-4.187 × 10 <sup>-9</sup>	0.97	0.36
亜酸化窒素	N <sub>2</sub> O	24.11	5.8632 × 10 <sup>-2</sup>	-3.562 × 10 <sup>-5</sup>	10.59 × 10 <sup>-9</sup>	0.59	0.26
二酸化窒素	NO <sub>2</sub>	22.9	5.715 × 10 <sup>-2</sup>	-3.52 × 10 <sup>-5</sup>	7.87 × 10 <sup>-9</sup>	0.46	0.18
アンモニア	NH <sub>3</sub>	27.560	2.5050 × 10 <sup>-2</sup>	0.98072 × 10 <sup>-5</sup>	-6.0909 × 10 <sup>-9</sup>	0.91	0.36
硫黄	S <sub>2</sub>	27.21	2.216 × 10 <sup>-2</sup>	-1.626 × 10 <sup>-5</sup>	3.995 × 10 <sup>-9</sup>	0.99	0.38
二酸化硫黄	SO <sub>2</sub>	25.78	5.795 × 10 <sup>-2</sup>	-3.812 × 10 <sup>-5</sup>	8.612 × 10 <sup>-9</sup>	0.45	0.24
三酸化硫黄	SO <sub>3</sub>	16.40	14.58 × 10 <sup>-2</sup>	-11.20 × 10 <sup>-5</sup>	32.42 × 10 <sup>-9</sup>	0.29	0.13
アセチレン	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	21.8	9.2143 × 10 <sup>-2</sup>	-6.527 × 10 <sup>-5</sup>	18.21 × 10 <sup>-9</sup>	1.46	0.59
ベンゼン	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-36.22	48.475 × 10 <sup>-2</sup>	-31.57 × 10 <sup>-5</sup>	77.62 × 10 <sup>-9</sup>	0.94	0.20
メタノール	CH <sub>3</sub> O	19.0	9.152 × 10 <sup>-2</sup>	-1.22 × 10 <sup>-5</sup>	-8.039 × 10 <sup>-9</sup>	0.18	0.08
エタノール	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	19.9	20.90 × 10 <sup>-2</sup>	-10.38 × 10 <sup>-5</sup>	20.05 × 10 <sup>-9</sup>	0.40	0.22
塩化水素	HCl	30.33	-0.7620 × 10 <sup>-2</sup>	1.327 × 10 <sup>-5</sup>	-4.338 × 10 <sup>-9</sup>	0.22	0.09
メタン	CH <sub>4</sub>	19.89	5.024 × 10 <sup>-2</sup>	1.255 × 10 <sup>-5</sup>	-11.01 × 10 <sup>-9</sup>	1.33	0.57
エタン	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.900	17.27 × 10 <sup>-2</sup>	-6.406 × 10 <sup>-5</sup>	7.255 × 10 <sup>-9</sup>	0.93	0.28
プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-4.04	30.48 × 10 <sup>-2</sup>	-15.72 × 10 <sup>-5</sup>	31.74 × 10 <sup>-9</sup>	0.40	0.12
n-ブタン	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3.96	37.15 × 10 <sup>-2</sup>	-18.34 × 10 <sup>-5</sup>	35.00 × 10 <sup>-9</sup>	0.54	0.24
i-ブタン	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-7.913	41.60 × 10 <sup>-2</sup>	-23.01 × 10 <sup>-5</sup>	49.91 × 10 <sup>-9</sup>	0.25	0.13
n-ペンタン	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	6.774	45.43 × 10 <sup>-2</sup>	-22.45 × 10 <sup>-5</sup>	42.29 × 10 <sup>-9</sup>	0.56	0.21
n-ヘキサン	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6.938	55.22 × 10 <sup>-2</sup>	-28.65 × 10 <sup>-5</sup>	57.69 × 10 <sup>-9</sup>	0.72	0.20
エチレン	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.95	15.64 × 10 <sup>-2</sup>	-8.344 × 10 <sup>-5</sup>	17.67 × 10 <sup>-9</sup>	0.54	0.13
プロピレン	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	3.15	23.83 × 10 <sup>-2</sup>	-12.18 × 10 <sup>-5</sup>	24.62 × 10 <sup>-9</sup>	0.73	0.17

) 断熱火炎温度を求める。

後は、プロパンに対するおのこのの生成物質の質量比を求めて、その生成物質の仮定した断熱火炎温度における定圧比熱にかけて燃焼生成物全ての結果を足し合わせる事で、燃焼生成物の比熱を求める。

$$C_{pm} = \sum C_{pi} \times m_i = C_{p_1} \times m_1 + C_{p_2} \times m_2 + C_{p_3} \times m_3 \quad (6)$$

$$T_{bt} = \frac{LHV}{G_w \times C_{pm}} + T_0 \quad (7)$$

式(6)が断熱火炎温度を求める式である。ここで、 $T_{bt}$  は断熱火炎温度であり、 $T_0$  は混合気初期温度である。また  $G_w$  はプロパン 1kg あたりの生成物の質量である。

## 1 - 8 浮力の計算

断熱火炎温度を用いて火炎伝播中の密度を算出し、それによる浮力の影響を物理的に計算した。

$$v_{d,av} = \frac{1}{2}(v_{d1} + v_{d2}) \quad (8)$$

$v_{d,av}$  : イオンプローブ法で算出された火炎伝播速度

$v_{d1}$  : 反応帯が中心側のイオンプローブに触れたときの火炎伝播速度

$v_{d2}$  : 反応帯が二本目のイオンプローブに触れたときの火炎伝播速度

ここで  $v_{d2}$  は (9) 式によっても表現できる。

$$v_{d2} = v_{d1} - a(t_{d2} - t_{d1}) \quad (9)$$

ここで  $a$  は浮力による加速度を示しており以下の式から表すことが出来る。



: 空気比

$x$  : 雰囲気酸素濃度

本計算条件では理想気体を想定しているので、理想気体に対する状態方程式を用いることが出来る。また混合気組成の分圧はモル数と等しくなるので、未燃混合気に対しては、以下の式が成立する。

$$\frac{P_{C_3H_8}}{1} = \frac{P_{O_2}}{5\alpha} = \frac{P_{N_2}}{5\alpha(1-x)/x} \quad (11)$$

同様に、既燃ガスに対しては以下の式が成立する。

$$\frac{P_{CO_2}}{3} = \frac{P_{H_2O}}{4} = \frac{P_{O_2}}{(\alpha-1) \times 5} = \frac{P_{N_2}}{5\alpha(1-x)/x} \quad (12)$$

$$\frac{P_{CO_2}}{3\alpha} = \frac{P_{H_2O}}{4\alpha} = \frac{P_{C_3H_8}}{1-\alpha} = \frac{P_{N_2}}{5\alpha(1-x)/x} \quad (13)$$

ここで (12) 式は希薄側において使用でき、(13) 式は過濃側において使用できる。

この分圧を用いて (14) 式から密度を求める。

$$\rho = \sum_i \frac{P_i}{R_i T} \quad (14)$$

ここで  $\rho_{sys}$  を既燃ガスの密度、 $\rho_{surr}$  を未燃ガスの密度とすると、浮力による既燃ガスの加速度は以下の式 (15) となる。

$$a = (\rho_{surr} - \rho_{sys}) g v_{sys} \quad (15)$$

$v_{sys}$  : 既燃ガスの比容積

$a$  : 浮力による加速度

ここで (9) 式を (8) 式に代入すると  $v_{d1}$  が求まる。つぎに、反応帯が中心側のイオンプローブに触れるまでの時間 ( $t=t_{d1}$ ) を計算するために (16) 式を示す。

$$S_{d1} = v_0 t_{d1} - \frac{1}{2} a t_{d1}^2 \quad (16)$$

(16) 式に  $t_{d1}$  を求めるために (17) 式を代入すると、(18) 式が得られる。

$$v_{d1} = v_0 - a t_{d1} \quad (17)$$

$$S_{d1} = v_{d1} t_{d1} + \frac{1}{2} a t_{d1}^2 \quad (18)$$

ここで (18) 式から  $t_{d1}$  を求めると、

$$t_{d1} = \frac{1}{a} \left( -v_{d1} + \sqrt{v_{d1}^2 + 2a \frac{S_1}{1000}} \right) \quad (19)$$

ここで火炎移動距離は (20) 式で表す。

$$S = \frac{1}{2} \alpha \{ (t_{d2})^2 - (t_{d1})^2 \} \quad (20)$$

$S$  : 火炎移動距離

ここでの火炎移動距離とは、火炎伝播速度観察時間 (第一イオンプローブから第二イオンプローブ通過まで) の間に浮力により、火炎が伝播方向とは反対方向 (この場合鉛直上方向) に持ち上げられた距離と定義した。

## 1 - 9 研究目的

上述のように環境問題、特に燃焼生成物に対する規制は著しく厳しくなる傾向にあり、それに伴い希薄燃焼を利用した機関開発及び燃焼生成物低減に関する研究が盛んに行われている。希薄燃焼には、当量比を下げることにより最高火炎温度をサーマル $\text{NO}_x$ の発生が顕著になる1800Kに抑えられることや、使用燃料の低減につながるなどの利点がある。しかし、希薄燃焼を利用した場合、その使用燃料により火炎伝ば速度が遅くなり火炎自身に不安定性が生じたり、セル状火炎が発生し、これらの火炎の発生が機関性能に及ぼす影響も指摘されている。<sup>11)</sup>

そこで本研究では、通常重力下及び微小重力下において、球状火炎伝ば法を用いてプロパン - 空気予混合気の火炎挙動及び燃焼特性（火炎伝ば速度及び浮力の影響）を観測し、また酸素濃度を变化させた状態と比較を行うことにより、浮力の発生の割合を解明することを目的としている。

## 2. 実験装置

### 2 - 1 装置概要

本実験で使用した実験装置の概略図を Fig.3 に示す。実験装置本体の寸法は、縦 380mm、横 550mm、高さ 360mm であり、総重量は約 24kg である。実験装置は主に燃焼容器 (Combustion Chamber)、デジタルビデオカメラ (Video Camera)、ニクロム線の赤熱を制御するためのタイマー (Timer)、点火用スイッチ (Switch)、バッテリー (Battery)、燃焼容器中心のニクロム線 (Nichrome Wire)、により構成されている。

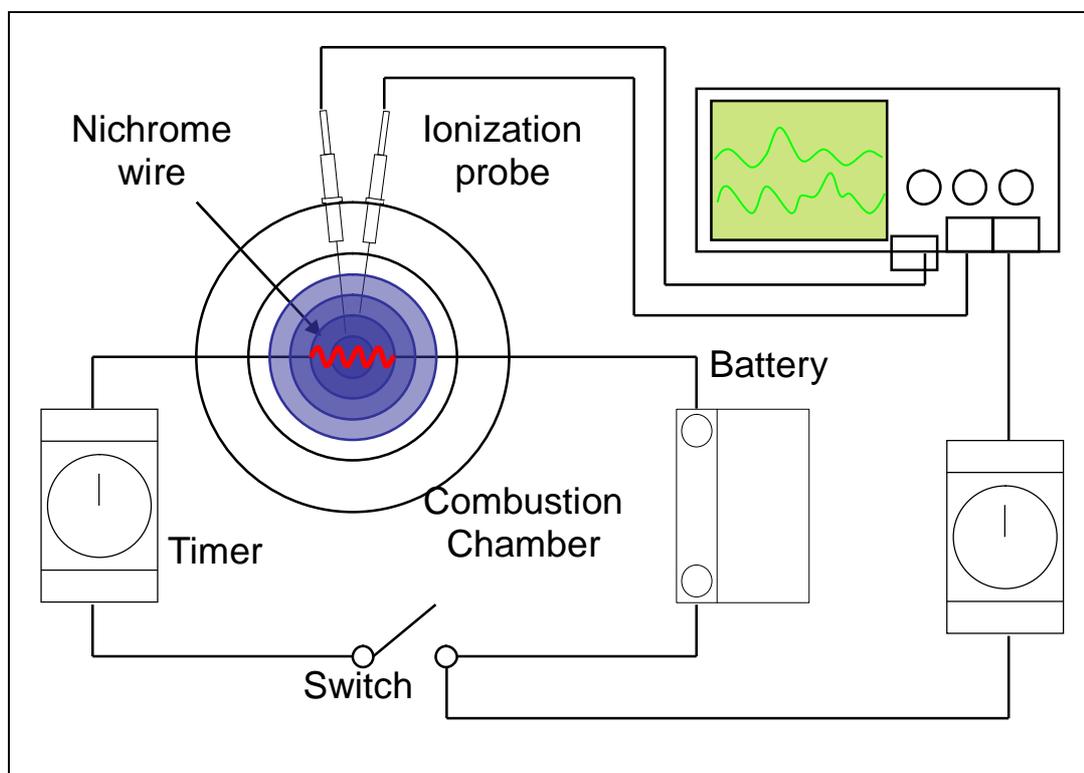


Fig.3 Experimental Equipment

## 2 - 2 燃焼容器

燃料は、燃焼容器上部に取り付けられているバルブを使用し、攪拌貯蔵タンク内に作成した混合気の入れ替えを行う。本体は主に円筒型燃焼容器(内容積約 1245cc:内直径 115mm)、オシロスコープ(Tektronix 2211)、イオンプローブ、トリガー用タイマー、点火用タイマーおよびバッテリーから構成されている。燃焼容器中心には点火用ニクロム線(直径 0.5mm、長さ 10mm)が配置され、点火は熱面点火方式が用いられた。燃焼容器にはイオンプローブが2本設置されており、イオンプローブ先端は燃焼容器中心からそれぞれ 7.8mm と 23.3mm で、その差は 15.5mm である。火炎到達時間の差異から火炎伝播速度が算出された。また燃焼容器には直径 100mm 観測用のガラス窓(Observation Window)が取り付けられており、そこからデジタルビデオカメラ(SONY:DCR-TRV70K)を用いて火炎挙動を撮影する。

## 2 - 3 落下塔

本実験では、微小重力環境での実験において落下塔を使用した。落下塔の概略図を Fig.4 に示す。落下塔は、高さ約 5m、断面積が縦 0.7m、横 0.9m であり実験装置本体の有効落下距離は約 4m である。本落下塔を使用することにより、約 0.9 秒間の微小重力環境を実現することが可能である。

また、落下の際に生じる空気抵抗による落下速度の減少をできるだけ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 475mm の直方体で、落下中実験装置本体と空気抵抗遮断箱が接触しないように注意を図った。

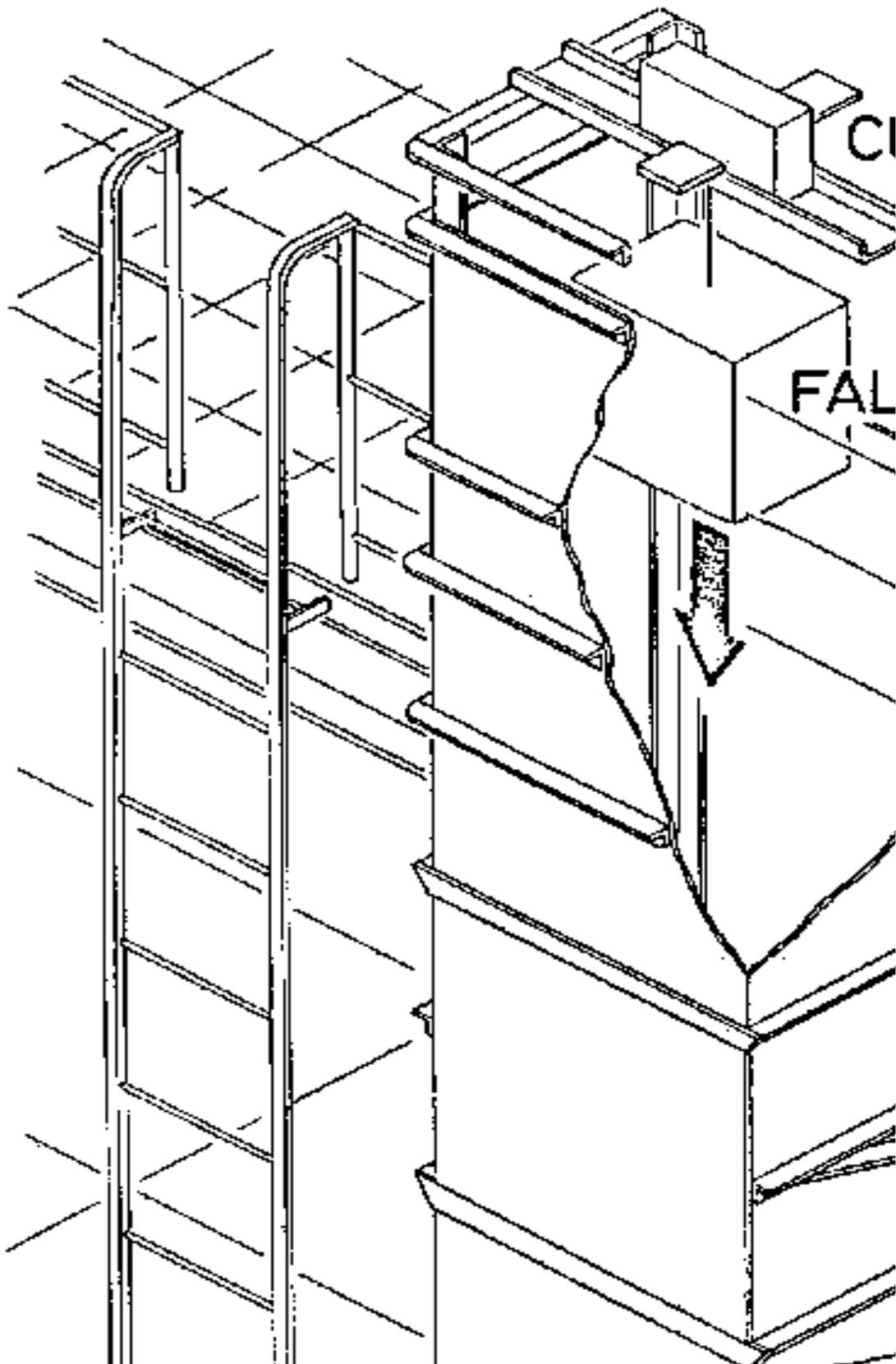


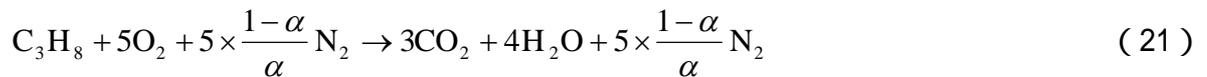
Fig.4 Falling Tower

### 3. 実験方法

#### 3-1 混合気の作成方法

本実験では、雰囲気酸素濃度 21vol% における実験に関しては、純度 99.9% のプロパン (Propane) と乾燥空気 (窒素 79vol%、酸素 21vol%) を用い、雰囲気酸素濃度を 21vol% 以外で実験する場合は、乾燥空気の代わりに純窒素と純酸素の順番に別々に攪拌貯蔵タンクに入れて混合気を作成する。

プロパンが雰囲気酸素濃度  $\alpha$  % においては、量論比で完全燃焼する時の化学反応式は、次式で表される。



プロパン - 空気混合気の理論燃空比は、一般には質量基準で表現され、燃焼過程に対しては燃料の質量に対する空気比として定義される。このことは理論空燃比 (理論燃空比の逆比) に対しても同様にいうことができ、質量基準である。

しかし本実験では、燃料のモル数に対する空気のモル数比としてモル基準で表現することも出来ることから、モル数基準の空燃比を採用している。モル基準で考える時は体積比や圧力比で考えるのと理想気体においては同等であり、燃料作成において使用される状態量の範囲は臨界点近傍ではないので、体積比で考えている。このことより次式(3)を用いる。

$$\left( \frac{N_f}{N_a} \right)_{\text{ideal gas}} = \frac{V_f}{V_a} = \frac{1}{\{5 + 5 \times (1-\alpha) / \alpha\}} \quad (22)$$

ここで  $V_f$  はプロパン容積、 $V_a$  は空気容積である。

また、燃空比はドルトンの分圧の法則より、 $P_f / (P_t - P_f)$  で表わされる。ここで  $P_f$  はプロパンの分圧、 $P_t$  は混合気全圧である。よって、当量比は(燃空比) / (理論燃空比) で求められるから次式で表される。

$$\phi = \frac{P_f / (P_t - P_f)}{V_f / V_a} \quad (23)$$

よって、プロパン分圧は式(23)より次式となる。

$$P_f = \frac{\left(\frac{V_f}{V_a}\right)\phi}{1 + \left(\frac{V_f}{V_a}\right)\phi} P_t \quad (24)$$

式(24)より各当量比に対するプロパンの分圧がわかり、混合気の作成が行われる。

混合気の作成は、まず攪拌貯蔵タンクを真空にし、空気・燃料を各ボンベからそれぞれの分圧で充填する。その後、タンク内に装備されているファンで約30分間攪拌を行う。そして、真空にした燃焼容器内に、攪拌貯蔵タンクから十分に攪拌された混合気を充填して実験を行う。

### 3-2 通常重力実験

通常重力下の実験においては、燃焼容器内のイオンプローブを用いて、ここから出力された信号をオシロスコープにて測定した。またデジタルビデオカメラを用いて通常重力下の火炎挙動を撮影し、火炎伝ば速度を測定した。データとしては各条件における測定値の10回程度の算術平均値が用いられた。

実験した当量比の範囲は以下の通りである。

当量比 : 0.6 ~ 0.8 (希薄側)・1.2 ~ 1.5 (過濃側)

雰囲気酸素濃度 : 17% ~ 21%

### 3-3 微小重力実験

微小重力下の実験においては、落下塔を用いて実験装置本体を自由落下させることにより、浮力の影響を受けない微小重力環境をつくりだし、デジタルビデオカメラを用いて微小重力下の火炎挙動を撮影し、火炎伝ば速度を測定した。

実験した当量比の範囲は以下の通りである。

当量比 : 0.5 ~ 0.6 (希薄側)・1.5 ~ 1.6 (過濃側)

雰囲気酸素濃度 : 17% ~ 21%

## 4. 結果と考察

### 4-1 火炎形状（微小重力）

Fig.5 ~ Fig.28 に本実験で得られたプロパン - 空気混合気の微小重力環境における火炎挙動の代表例を示す。

この図から明らかなように、微小重力下における火炎伝播では、球状火炎伝播の進行が確認でき、良好な微小重力環境が実現されていることがわかる。

同一雰囲気酸素濃度において比較をすると、理論両論比から希薄側もしくは過濃側への移行に伴って 1/30 秒における火炎伝播速度が目に見えて遅くなっていることが分かる。

つぎに同一当量比において比較をする。

希薄側において、特に、当量比 0.5 においては雰囲気酸素濃度の影響をあまり受けていないように見える。当量比 0.6 になると雰囲気酸素濃度の影響の低下を受けて火炎伝播速度が低下している。

過濃側においては、当量比 1.5 ~ 1.6 の範囲内において雰囲気酸素濃度の低下に伴う火炎伝播速度の減少が希薄側に比べて著しくなる。この影響は過濃側においては雰囲気酸素濃度の低下に伴い、火炎温度が著しく減少したものと考えられる。

## 4-2 火炎伝播速度

### 4-2-1 通常重力環境

Fig.29、Fig.30 及び Table9 は雰囲気酸素濃度 21% における火炎伝播速度、火炎伝播速度比を表したものであり、火炎伝播速度比は水平方向を基準としている。これらの図・表から明らかなように、鉛直上方向の火炎伝播速度は著しく増大している。これは浮力の影響による。また希薄側及び過濃側への移行に伴って鉛直上方向への火炎伝播速度、火炎伝播速度比共に増大している。

Fig.31 及び Table10 は雰囲気酸素濃度 19% における火炎伝播速度、火炎伝播速度比を表したものであり、火炎伝播速度比は水平方向を基準としている。これらの図・表から明らかなように、鉛直上方向の火炎伝播速度は著しく増大している。これは浮力の影響による。また雰囲気酸素濃度の低下は火炎温度の減少を招くことから、雰囲気酸素濃度 21% と比較して浮力の影響が各当量比で増大している。

Table11 は雰囲気酸素濃度 17% における水平方向を基準とした火炎伝播速度比を表したものである。この表からも明らかなように、雰囲気酸素濃度の低下によってさらに浮力の影響を受けていることが Table10 と比較することからも伺える。

Fig.32、Fig.33 は当量比 0.8 及び 0.7 における各方向の火炎伝播速度が受ける雰囲気酸素濃度の変化を示している。雰囲気酸素濃度の低下に伴いどの火炎伝播方向への火炎伝播速度も単調に減少していることが分かる。

Table12、Table13、Table14 はそれぞれ当量比 0.8、1.2、1.3 における雰囲気酸素濃度 21% と 19% での火炎伝播速度と、雰囲気酸素濃度 21% を基準とした比率を表している。= 0.8 においては雰囲気酸素濃度低下の影響をほとんど受けていないことが分かる。それに対して = 1.2 と 1.3 を比較すると = 1.3 のほうがよりか円伝播速度が遅くなっており、また雰囲気酸素濃度 21% に対する雰囲気酸素濃度 19% の火炎伝播速度は理論量論比から離れるほど遅くなっている。

Table15、Table16 は当量比 0.7 における、雰囲気酸素濃度 21% の火炎伝播速度に対する雰囲気酸素濃度 18% 及び 17% の火炎伝播速度および火炎伝播

速度比を表したものである。雰囲気酸素濃度低下は同一当量比においても火炎伝播速度を低下させることが分かる。

Fig.34 は鉛直上方向火炎伝播速度を当量比に対して雰囲気酸素濃度をパラメータとして示している。この図からも明らかなように当量比の希薄側及び過濃側への移行に伴って火炎伝播速度が単調に減少していることが分かる。また、希薄側においては雰囲気酸素濃度の影響をほとんど受けていないように観察された。これはこの図が鉛直上方向火炎伝播をグラフにしたためと考えられる。このため浮力の影響が出やすくなり、希薄側においては雰囲気酸素濃度による火炎伝播速度の影響よりも浮力の影響が大きくなっていると考えられる。

Fig.35 及び Fig.36 は当量比 0.7 に固定した時の雰囲気酸素濃度に対する火炎伝播速度もしくは火炎伝播速度比を、火炎伝播方向をパラメータとして示したものである。なお、火炎伝播速度比は斜め 45 度方向を基準にした。この図から明らかなように、雰囲気酸素濃度の低下に伴って、鉛直上方向及び鉛直下方向の火炎伝播速度は単調に減少している。斜め 45 度方向は雰囲気酸素濃度の影響をあまり受けておらず、浮力の影響が示唆される。

## 4-2-2 微小重力環境

Fig.37 及び Fig.38 は希薄側及び過濃側の雰囲気酸素濃度に対する火炎伝播速度を示したものである。この図から明らかなように酸素濃度の減少に伴って火炎伝播速度が単調に減少していることが分かる。また過濃側においては雰囲気酸素濃度の影響を希薄側よりも受けることが分かる。

Fig.39 ~ Fig.42 は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したものである。この図から明らかなように、希薄側では火炎伝播速度が雰囲気酸素濃度の影響をあまり示さない。反対に、過濃側では火炎伝播速度は雰囲気酸素濃度に多大に影響される。

Fig.43 及び Fig.44 はビデオカメラで観察できる最小単位（1 / 30 秒）で圧力上昇の影響がなるだけ無いように中心付近で観察された火炎伝播に対する伝播速度である。先程と同じように当量比の希薄側もしくは過濃側への以降に伴って火炎伝播速度が単調に減少していることが分かる。また雰囲気酸素濃度の低下に伴って火炎伝播速度が単調に減少していることが分かる。Fig.45 ~ Fig.47 は Fig.43 において引くことが出来なかったグラフ線を引くために再度作成されたものであり、雰囲気酸素濃度 21% 比較されるように作成されている。

### 4-3 断熱火炎温度

Fig.48 及び Fig.49 は断熱火炎温度の計算結果を示している。計算方法については先に述べたとおりである。この結果から明らかなように、当量比の希薄側もしくは過濃側への移行に伴って断熱火炎温度は単調に減少している。また、断熱火炎温度は雰囲気酸素濃度の低下と共に減少しておりこれらは先に得られたとおり実験結果と一致するものである。ここで過濃側の断熱火炎温度が希薄側の断熱火炎温度に比べて若干高くなっているのは熱解離の影響を考慮しない計算であるということをも明記しておく。

### 4-4 浮力の影響

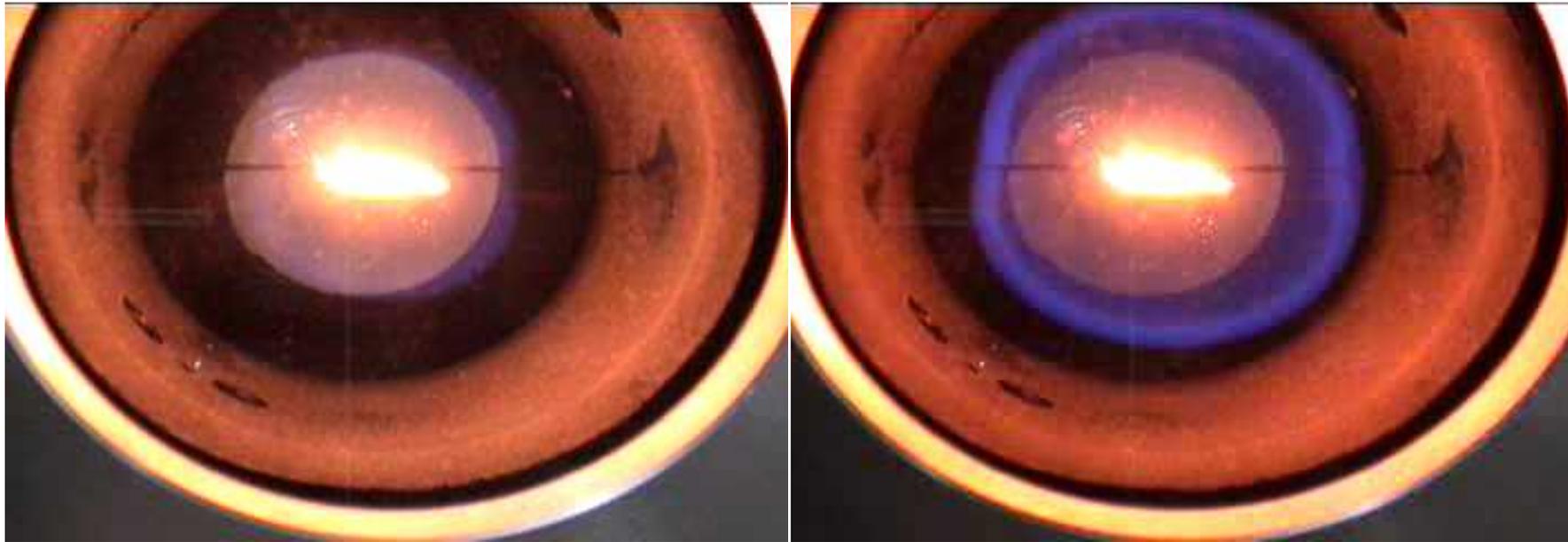
Fig.50 及び Fig.51 は先の断熱火炎温度を参考に浮力による加速度を計算したものである。このグラフから明らかなように、当量比の希薄側もしくは過濃側への移行に伴って浮力による加速度は単調に減少している。また、浮力による加速度は雰囲気酸素濃度の低下と共に減少していることも分かる。

Fig.52 は雰囲気酸素濃度 21%、鉛直下方向火炎伝播における、浮力の影響による鉛直上方向への火炎移動距離を示す。ここでの火炎移動距離とは、火炎伝播速度観察時間（第一イオンプローブから第二イオンプローブ通過まで）の間に浮力により、火炎が伝播方向とは反対方向（この場合鉛直上方向）に持ち上げられた距離と定義した。なお、その算出は、断熱火炎温度を用いて火炎伝播中の密度を算出し、それによる浮力の影響を物理的に計算した。したがって本移動距離は定性的な意味しかないことを明記しておく。この図から明らかなように、火炎伝播速度観察範囲における浮力による火炎移動距離は、希薄側では当量比の希薄側への移行に伴って、著しく増大している。これは、先の断熱火炎温度の計算結果とも一致している。

## 5. 結論

密閉容器を用いて炭化水素 空気混合気の火炎伝播速度に及ぼす浮力及び雰囲気酸素濃度の影響について検討を行った。以下に結果を示す。

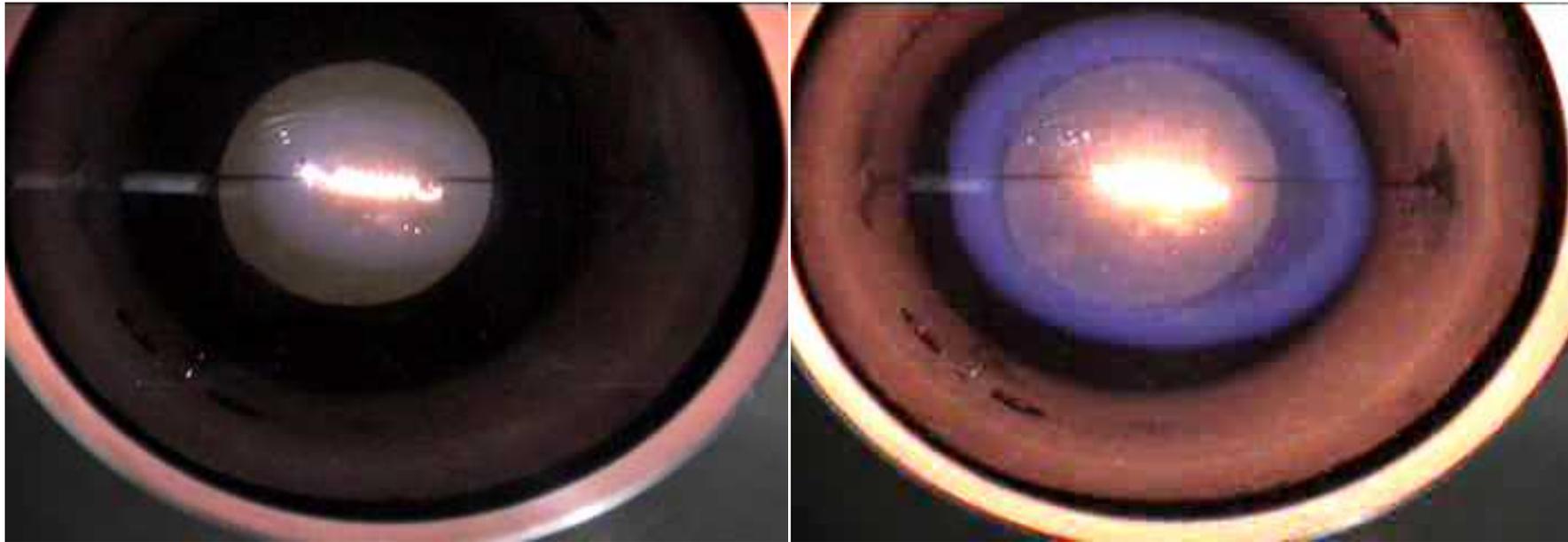
- 1) 通常重力下での火炎伝播速度に及ぼす浮力の影響は、火炎の伝播方向により著しく差異が発生する。
- 2) 微小重力下での火炎伝播速度に及ぼす雰囲気酸素濃度の影響は希薄側より過濃側の方が顕著である。



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

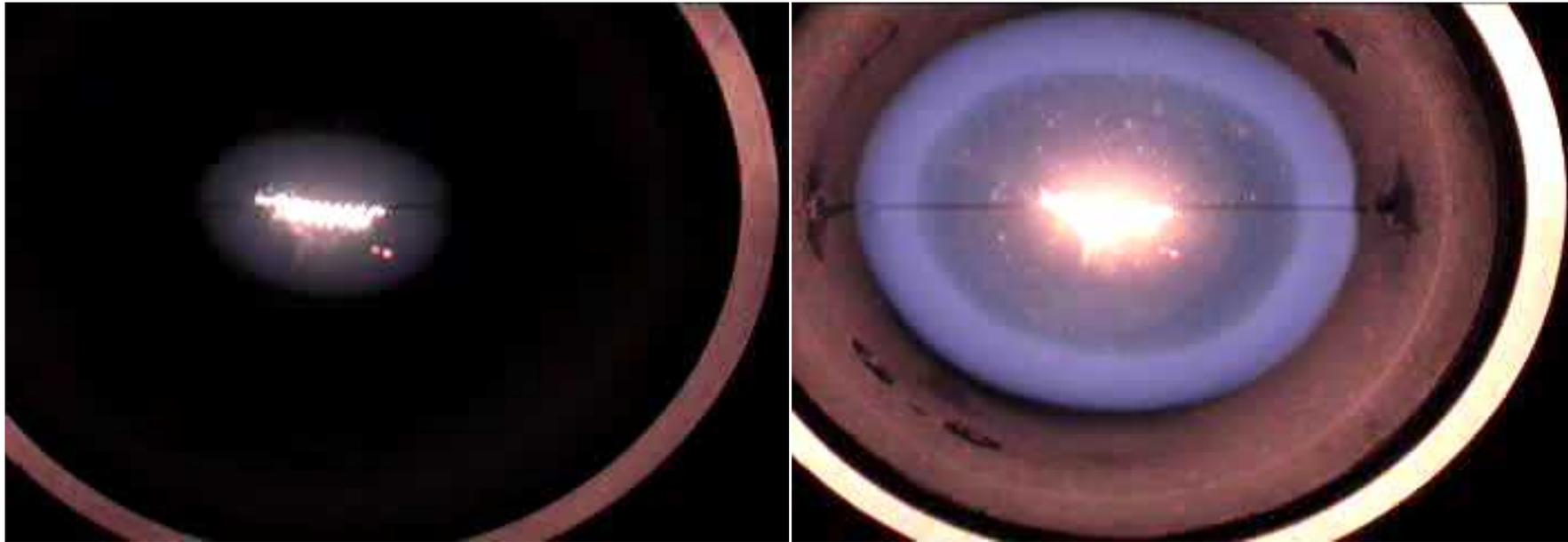
Fig.5 Flame shape( $O_2 = 21\%$ ,  $\phi = 0.5$ , microgravity)



t = 0 ( s )

t = 1/30 ( s )

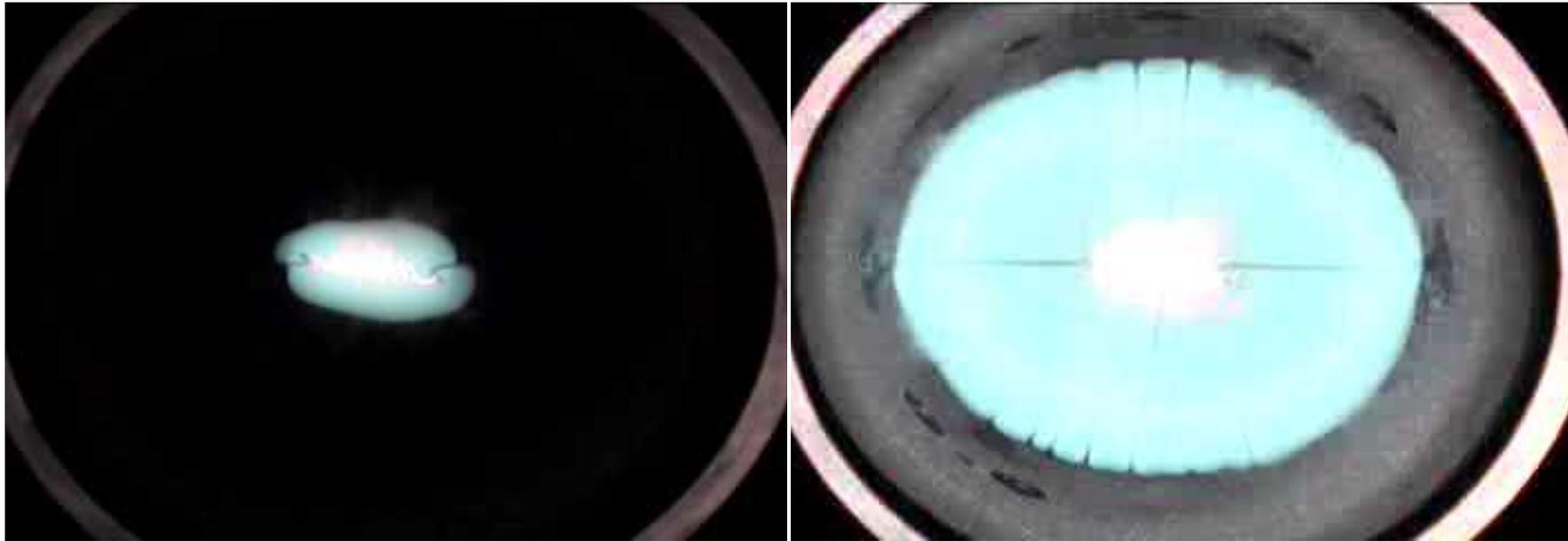
Fig.6 Flame shape( $O_2 = 21\%$  ,  $\phi = 0.55$  , microgravity)



$t = 0 ( s )$

$t = 1/30 ( s )$

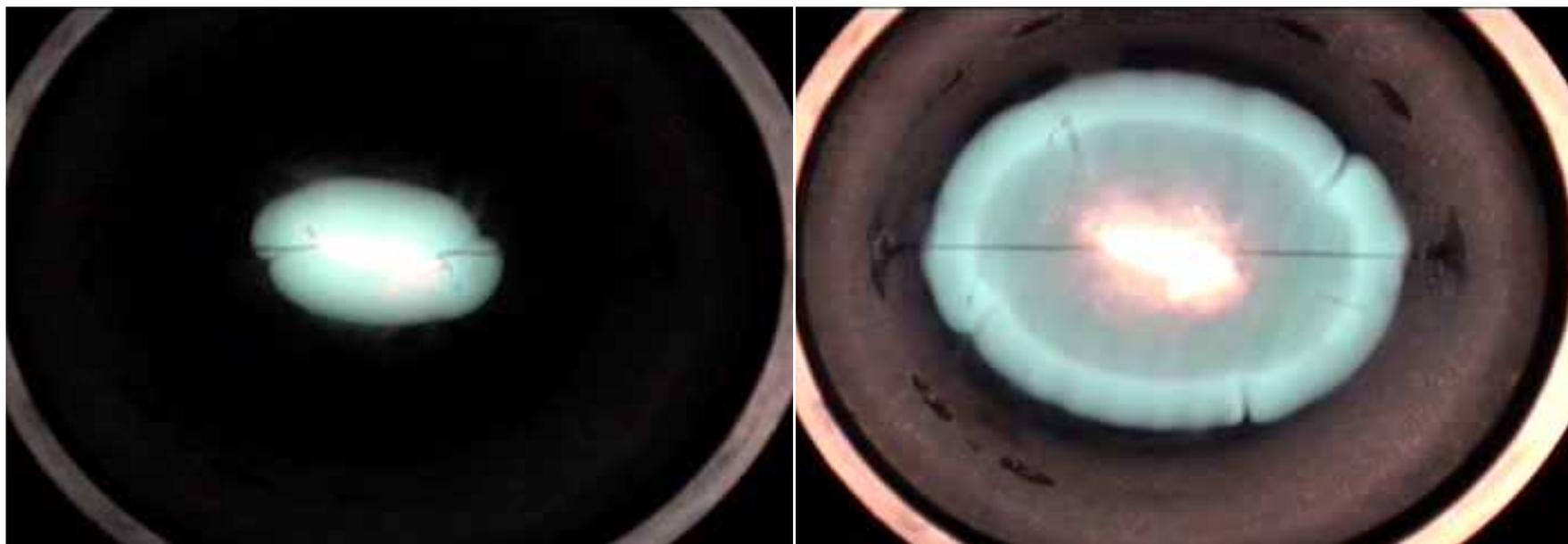
Fig.7 Flame shape( $O_2 = 21\%$  ,  $\phi = 0.6$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

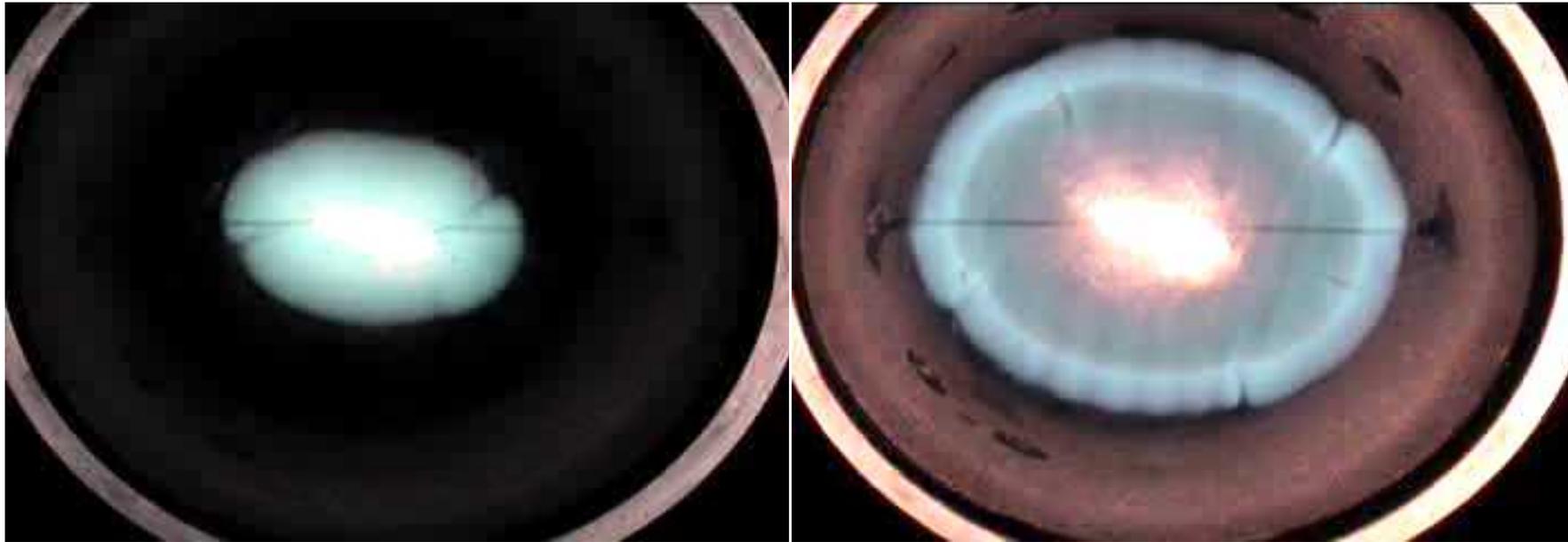
Fig.8 Flame shape( $O_2 = 21\%$ ,  $\rho = 1.5$ , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

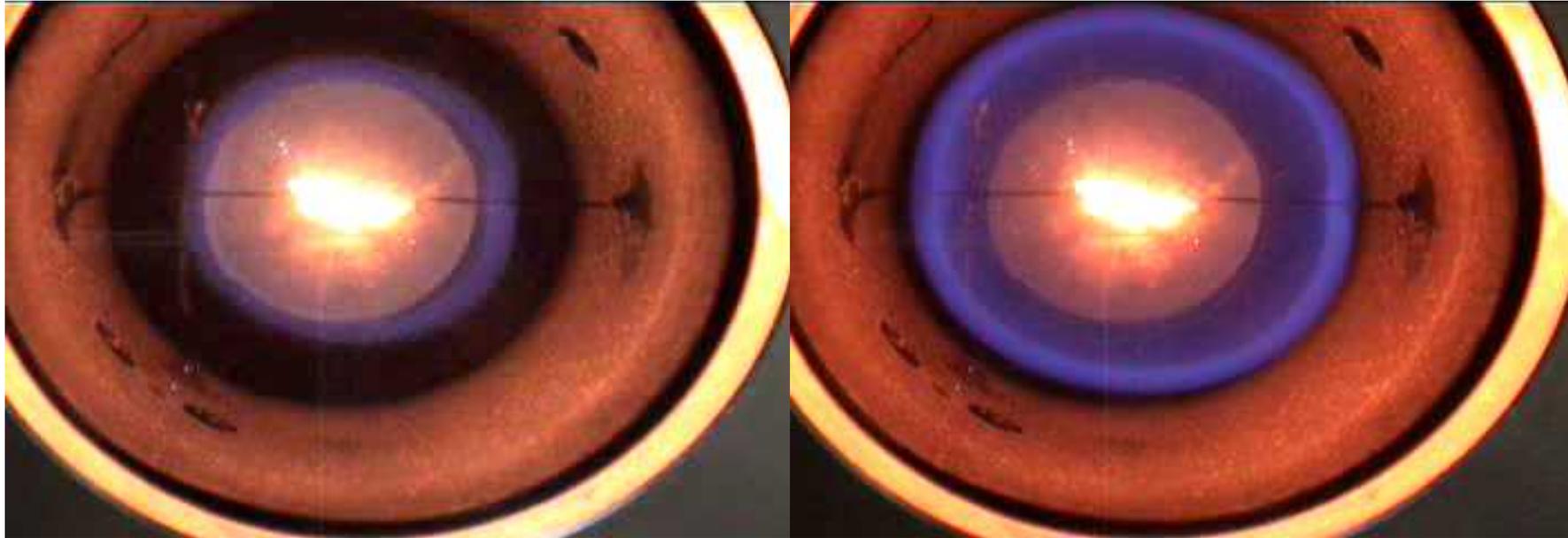
Fig.9 Flame shape( $O_2 = 21\%$ ,  $Sc = 1.55$ , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

Fig.10 Flame shape( $O_2 = 21\%$ ,  $Sc = 1.6$ , microgravity)



$t = 0 ( s )$

$t = 1/30 ( s )$

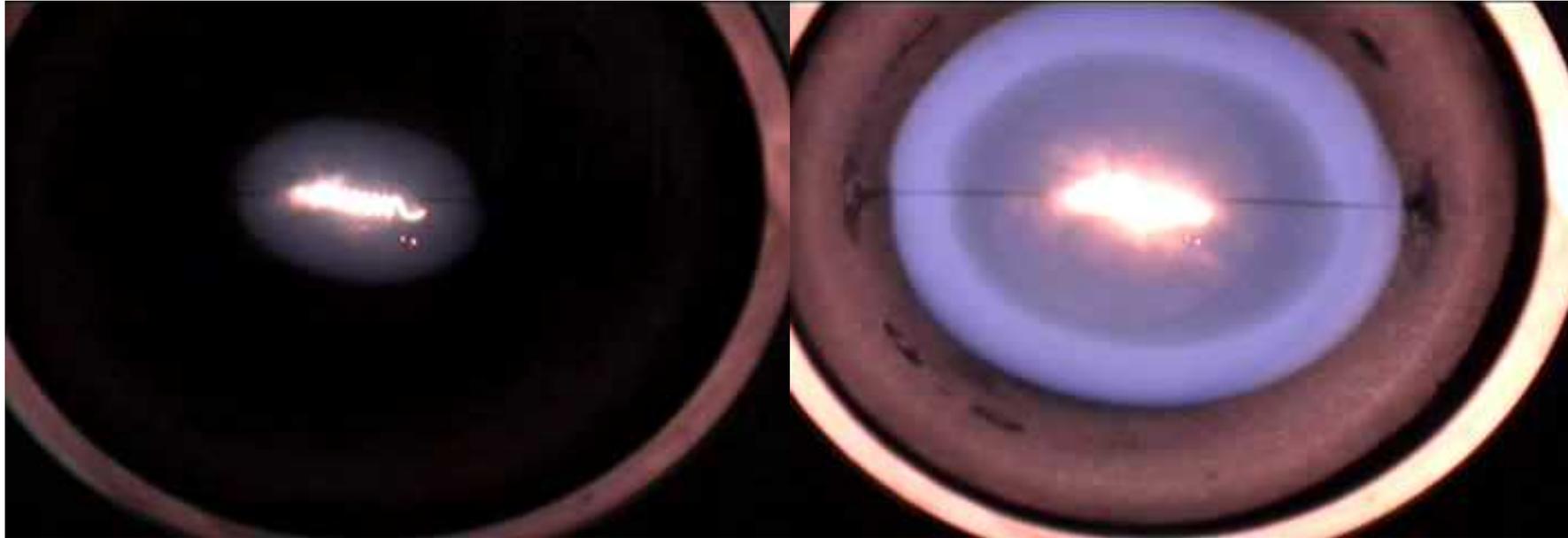
Fig.11 Flame shape( $O_2 = 20\%$  ,  $\phi = 0.5$  , microgravity)



t = 0 ( s )

t = 1/30 ( s )

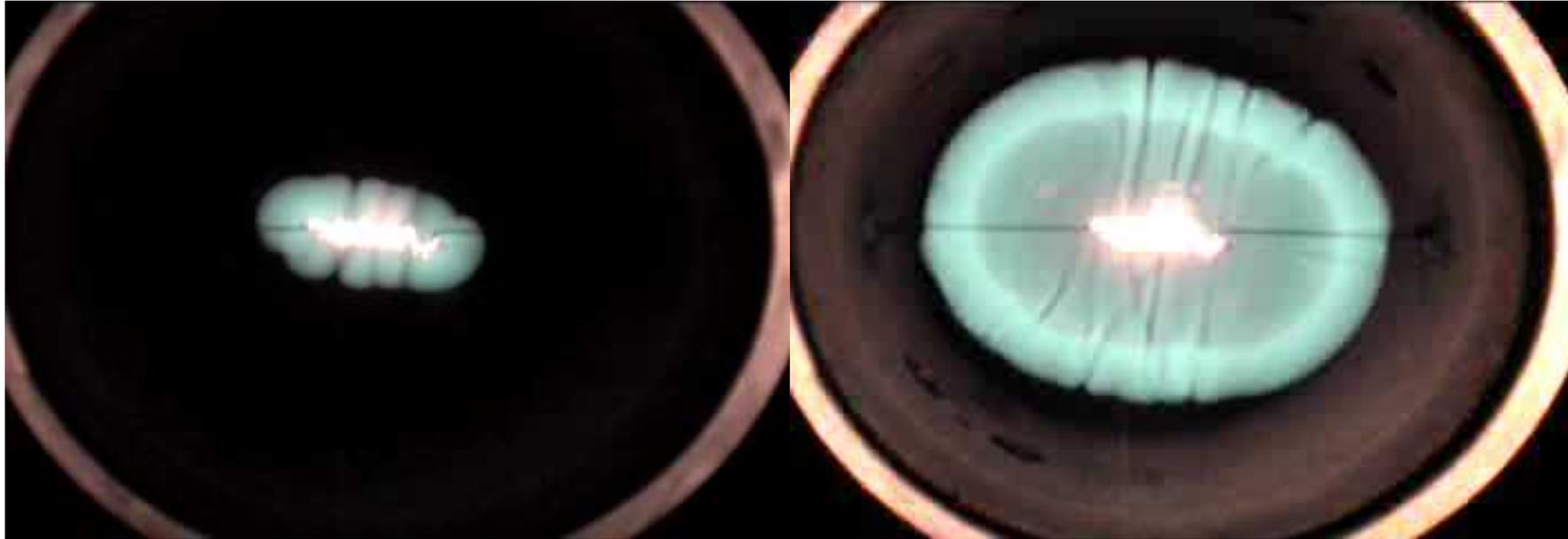
Fig.12 Flame shape( $O_2 = 20\%$  ,  $\rho = 0.55$  , microgravity)



$t = 0 ( s )$

$t = 1/30 ( s )$

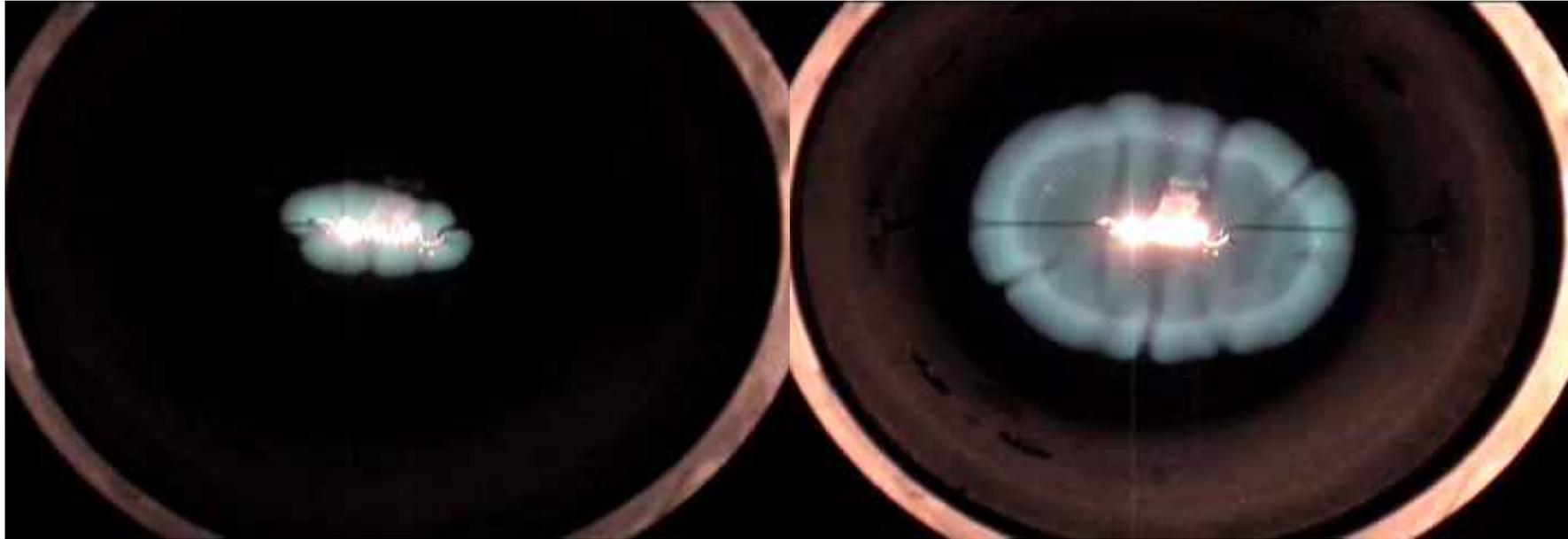
Fig.13 Flame shape( $O_2 = 2.0\%$  ,  $\phi = 0.6$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

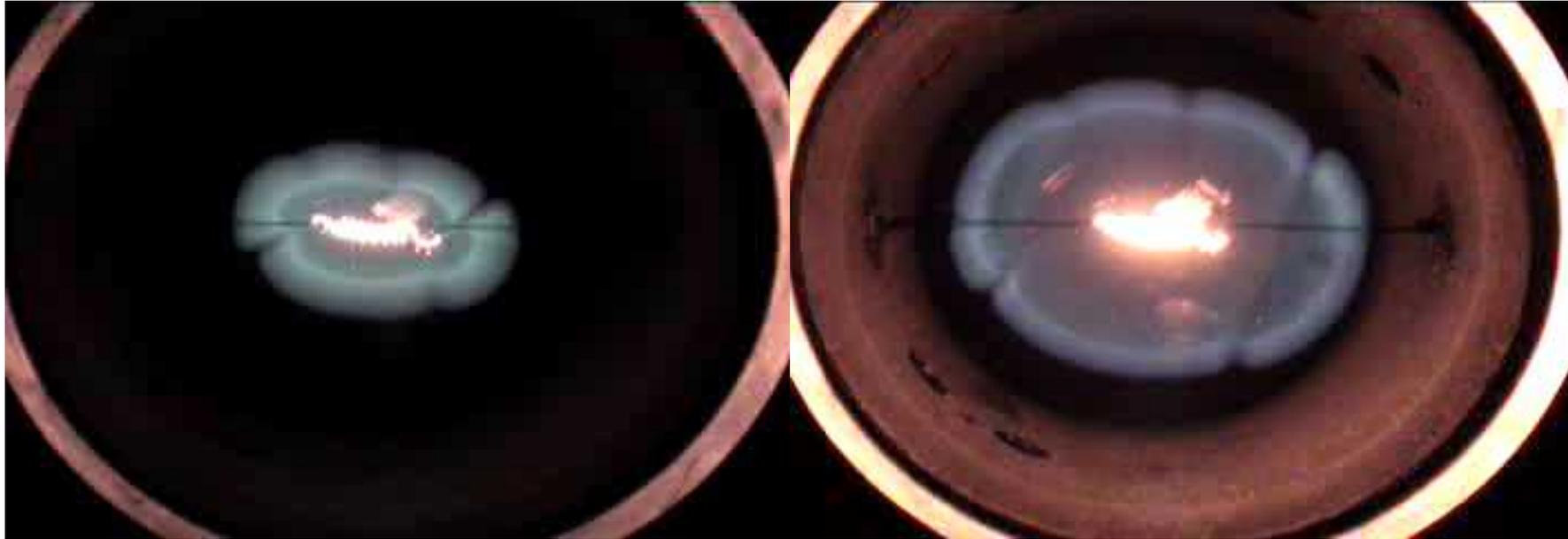
Fig.14 Flame shape( $O_2 = 2.0\%$  ,  $U = 1.5$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

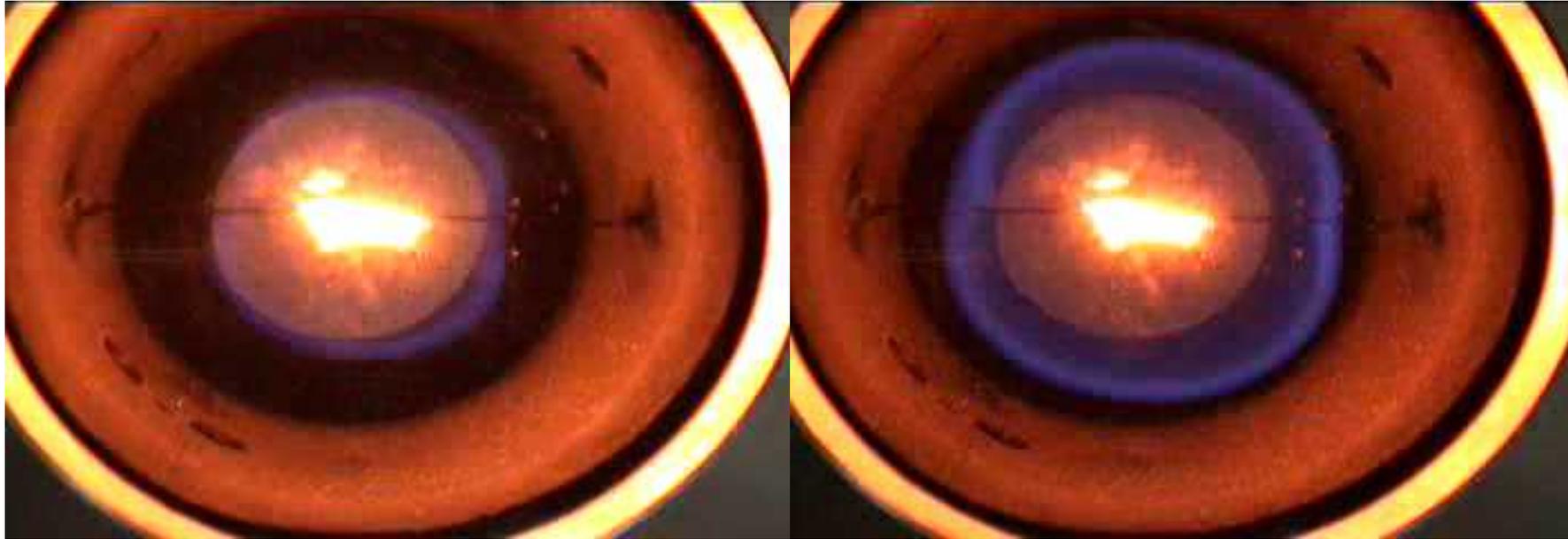
Fig.15 Flame shape( $O_2 = 2.0\%$  ,  $u = 1.55$  , microgravity)



$t = 0 ( s )$

$t = 1/30 ( s )$

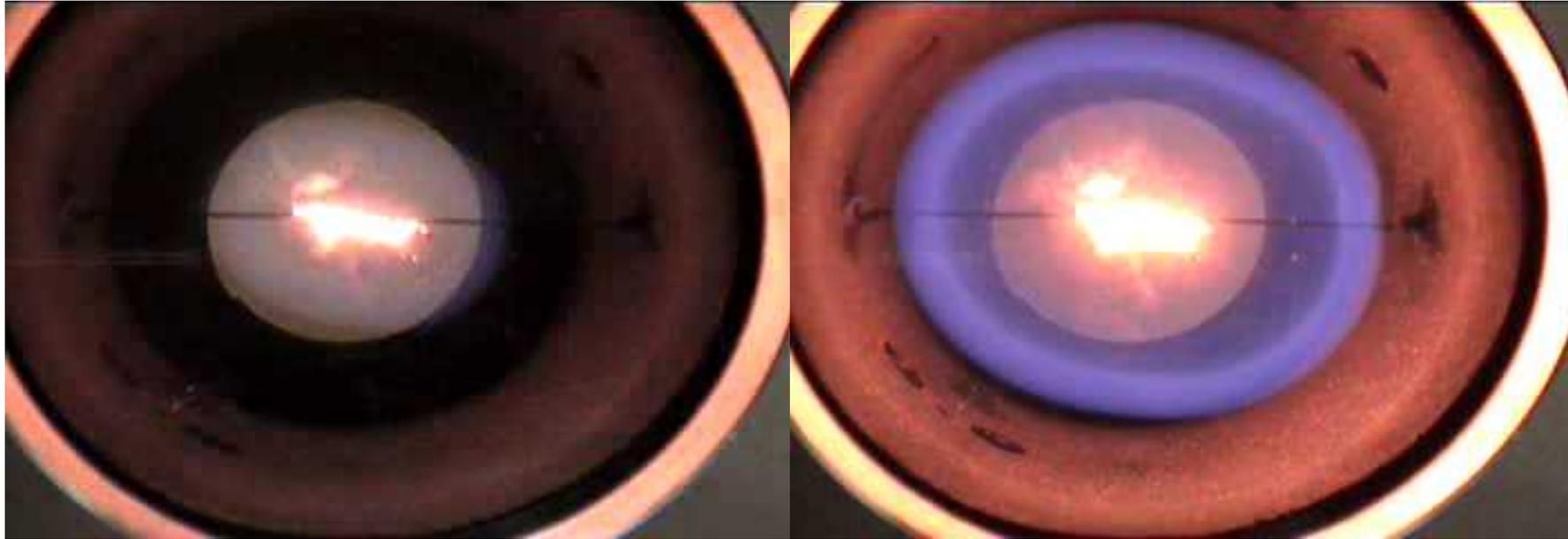
Fig.16 Flame shape( $O_2 = 2.0\%$  ,  $Sc = 1.6$  , microgravity)



$t = 0 ( s )$

$t = 1/30 ( s )$

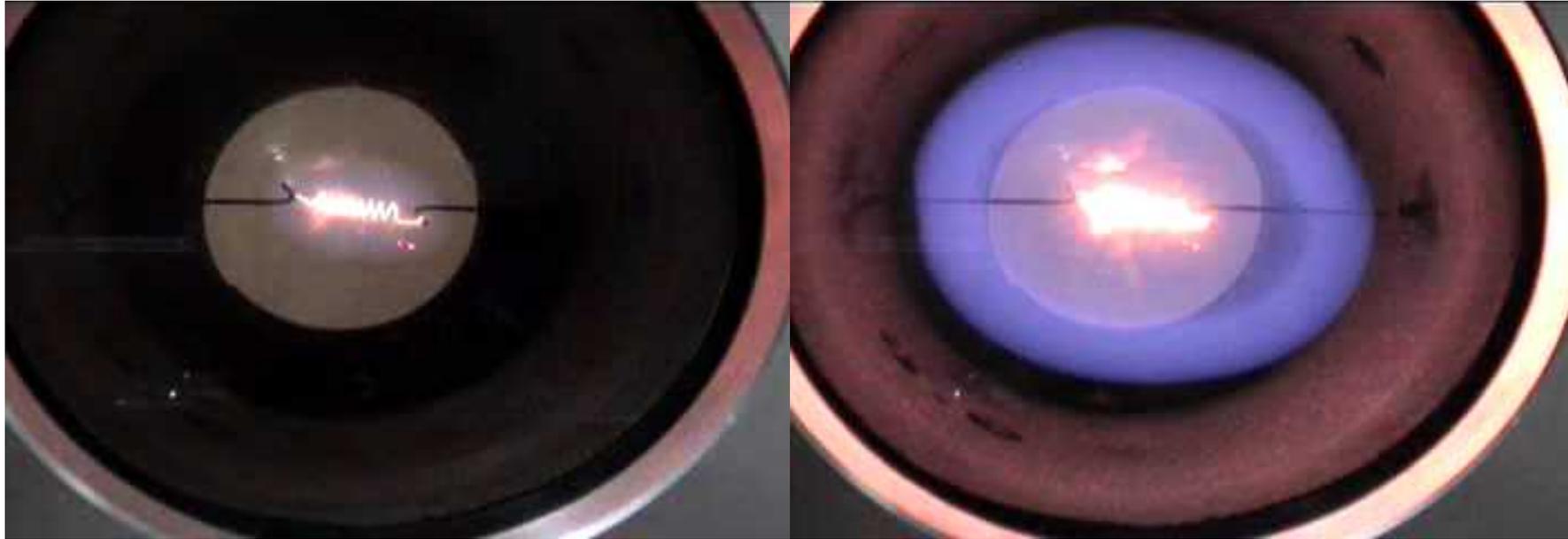
Fig.17 Flame shape( $O_2 = 19\%$  ,  $\rho = 0.5$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

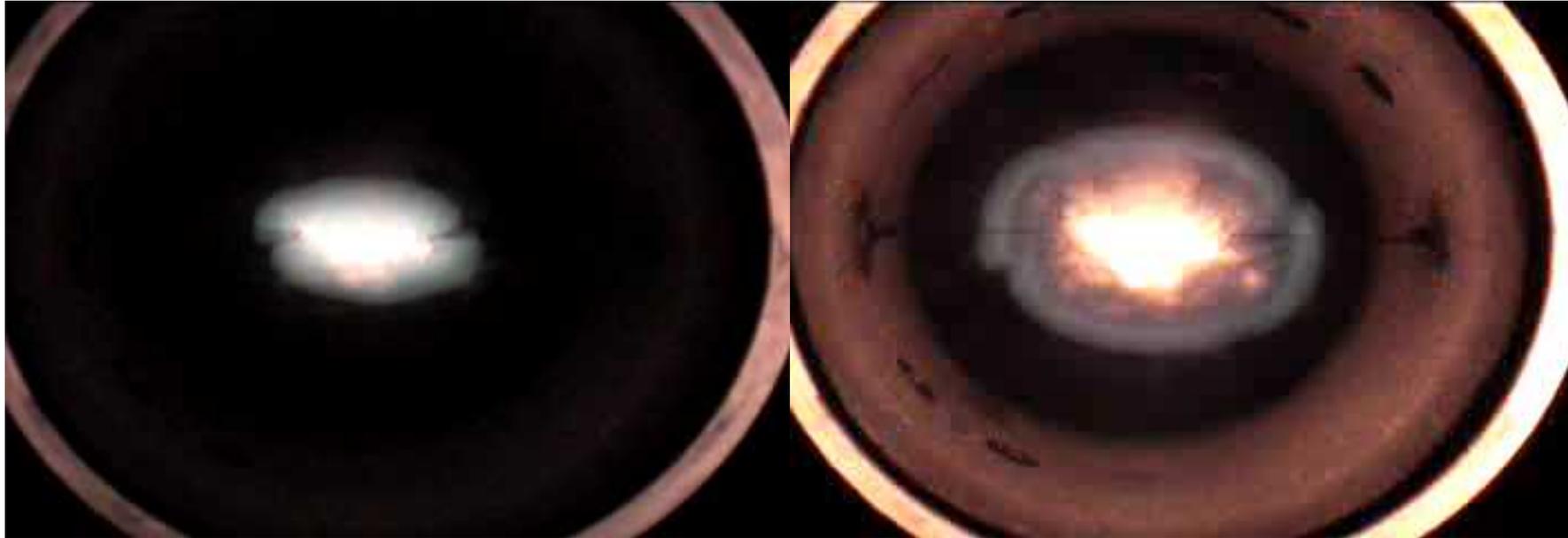
Fig.18 Flame shape( $O_2 = 19\%$  ,  $\phi = 0.55$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

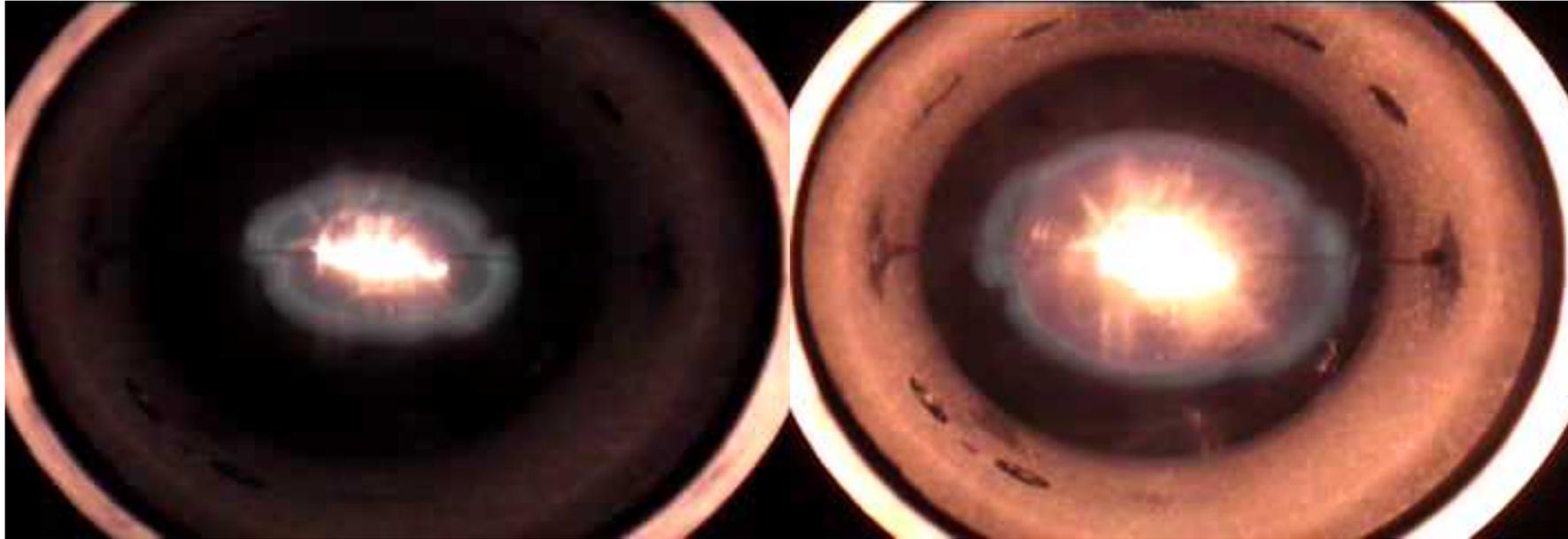
Fig.19 Flame shape( $O_2 = 19\%$  ,  $\phi = 0.6$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

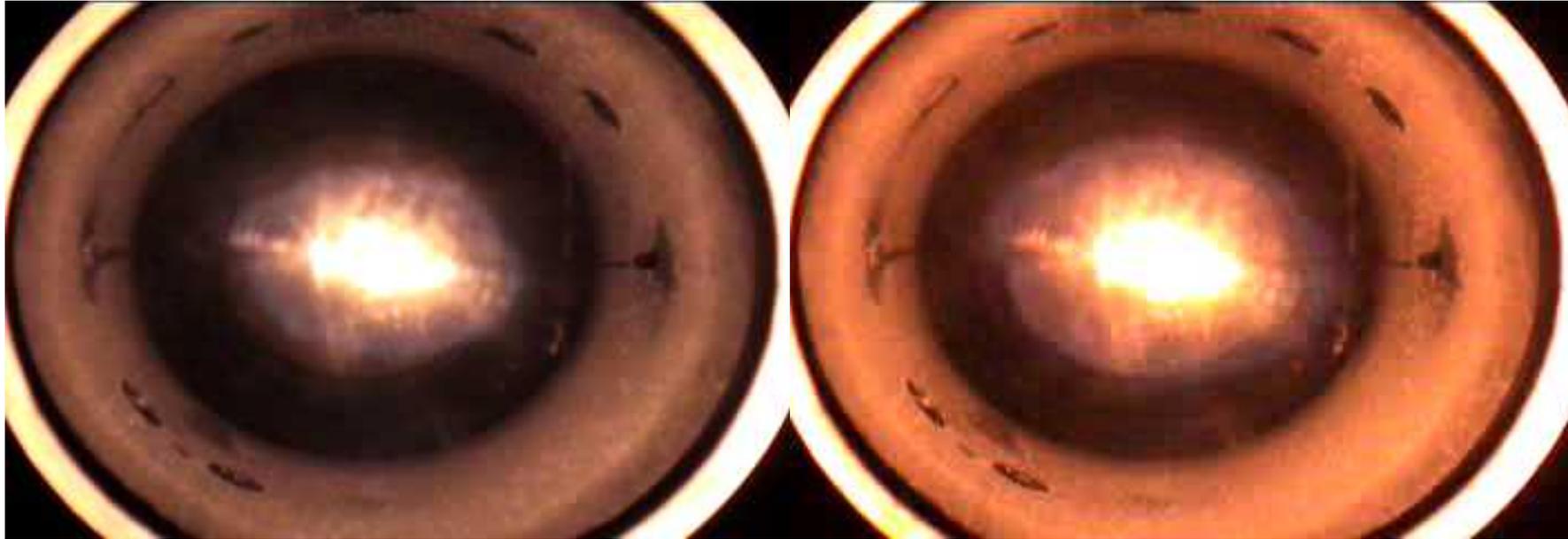
Fig.20 Flame shape( $O_2 = 19\%$  ,  $U = 1.5$  , microgravity)



$t = 0 ( s )$

$t = 1/30 ( s )$

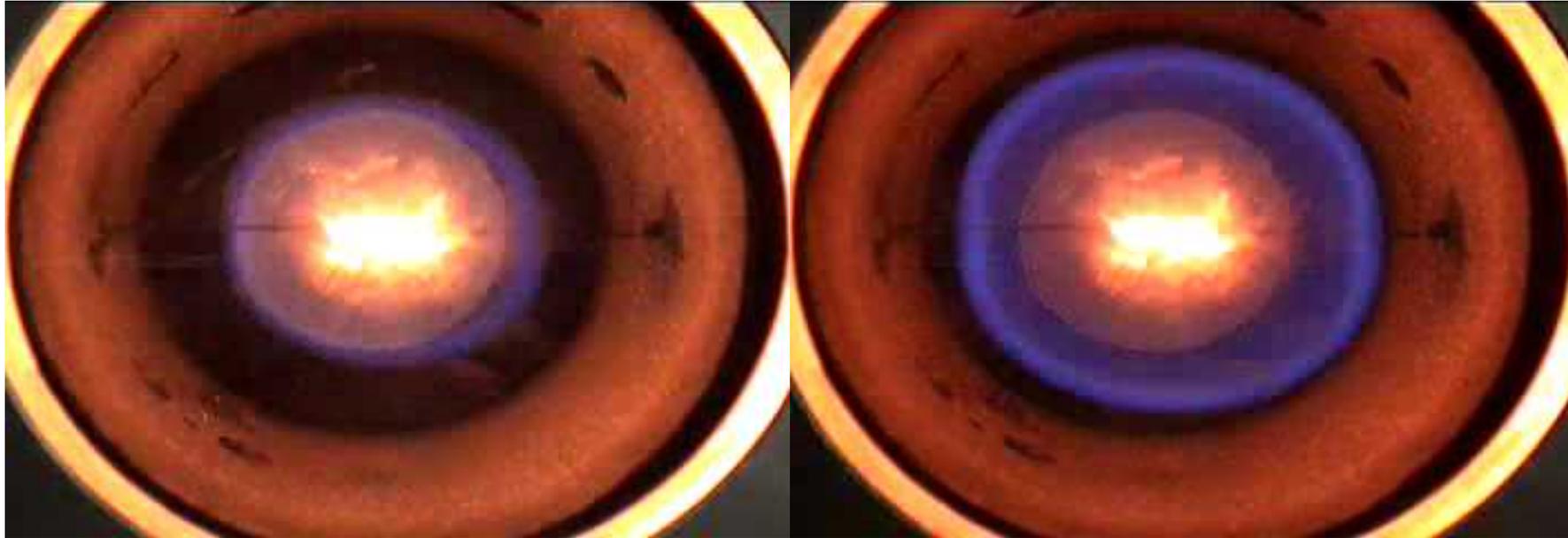
Fig.21 Flame shape( $O_2 = 19\%$  ,  $\rho = 1.55$  , microgravity)



$t = 0$  ( s )

$t = 1/30$  ( s )

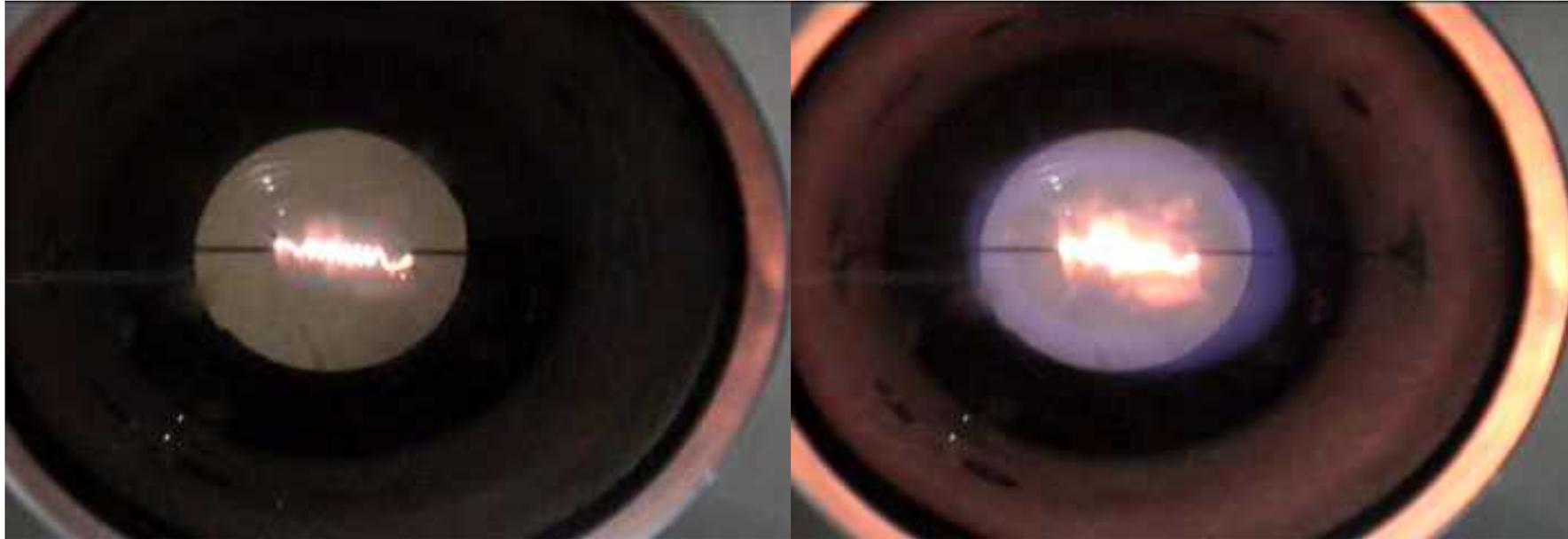
Fig.22 Flame shape( $O_2 = 19\%$  ,  $\rho = 1.6$  , microgravity)



$t = 0 ( s )$

$t = 1/30 ( s )$

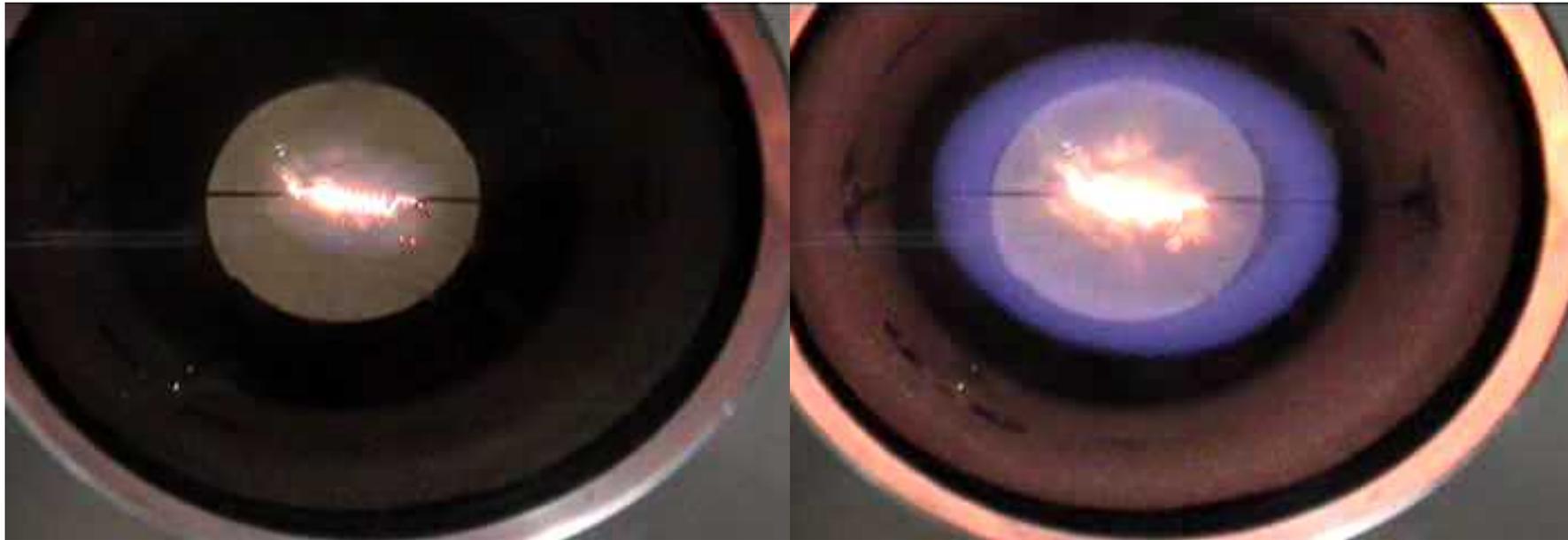
Fig.23 Flame shape( $O_2 = 18\%$  ,  $\phi = 0.5$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

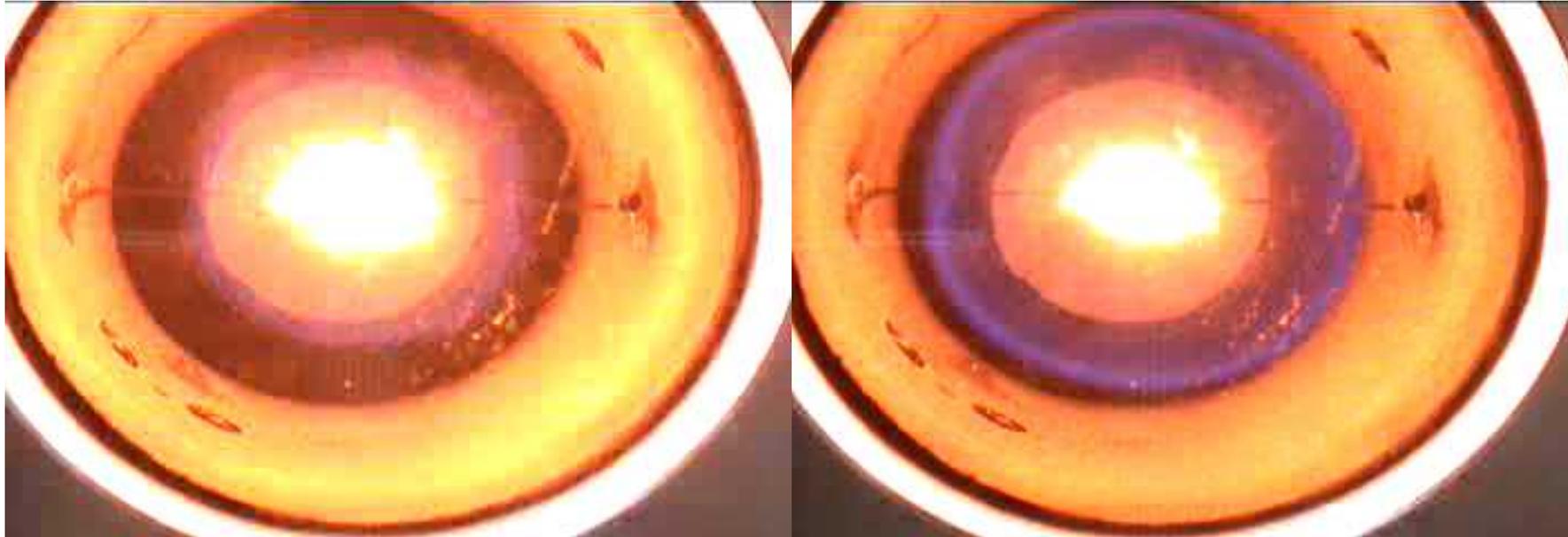
Fig.24 Flame shape( $O_2 = 18\%$  ,  $\rho = 0.55$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

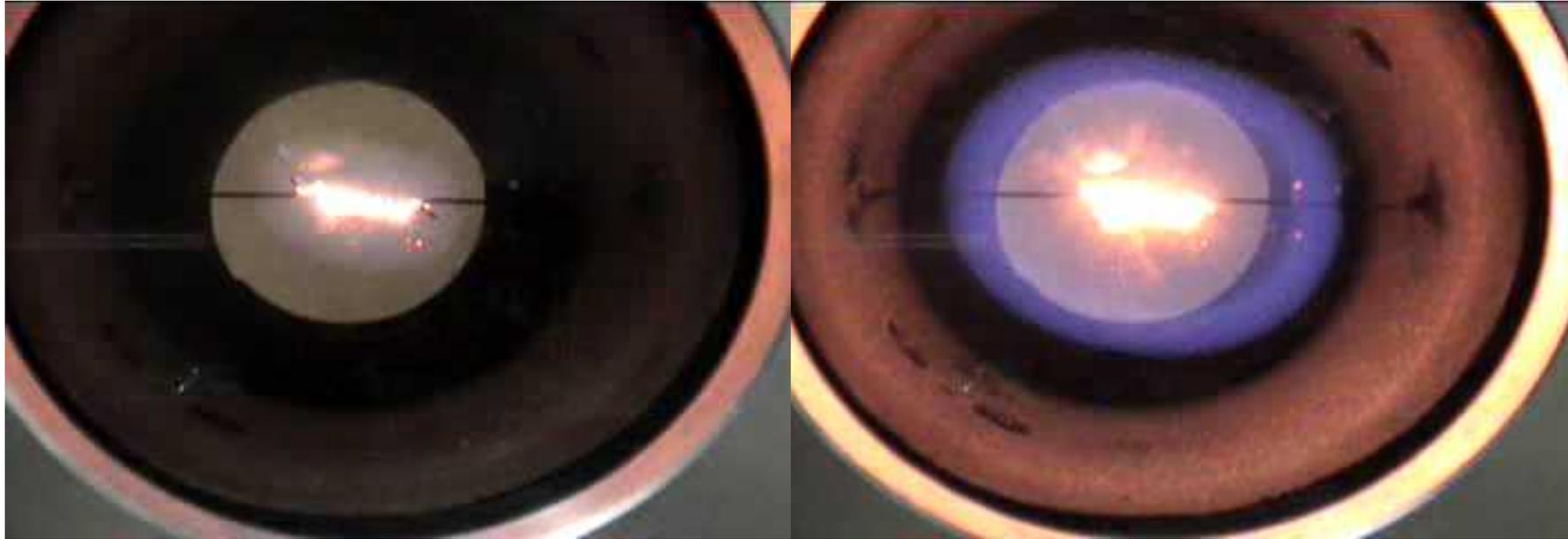
Fig.25 Flame shape( $O_2 = 18\%$  ,  $\rho = 0.6$  , microgravity)



t = 0 ( s )

t = 1/30 ( s )

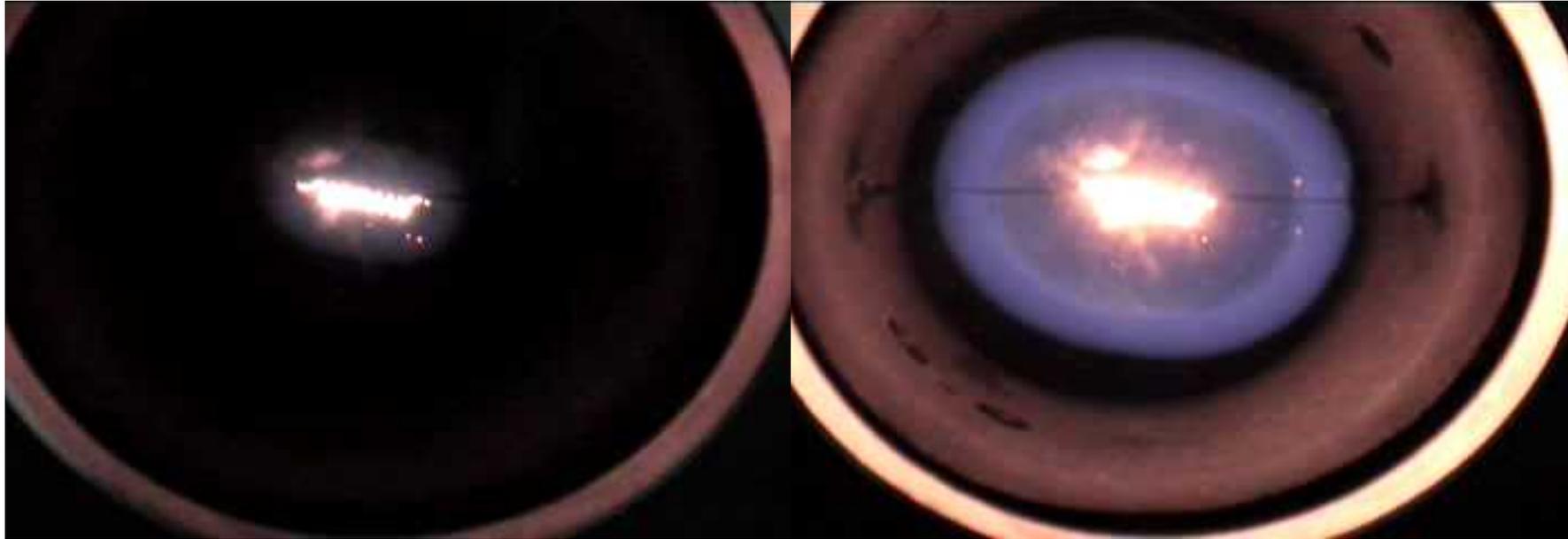
Fig.26 Flame shape( $O_2 = 17\%$  ,  $\phi = 0.5$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

Fig.27 Flame shape( $O_2 = 17\%$  ,  $\phi = 0.55$  , microgravity)



$t = 0 (s)$

$t = 1/30 (s)$

Fig.28 Flame shape( $O_2 = 17\%$  ,  $\rho = 0.6$  , microgravity)

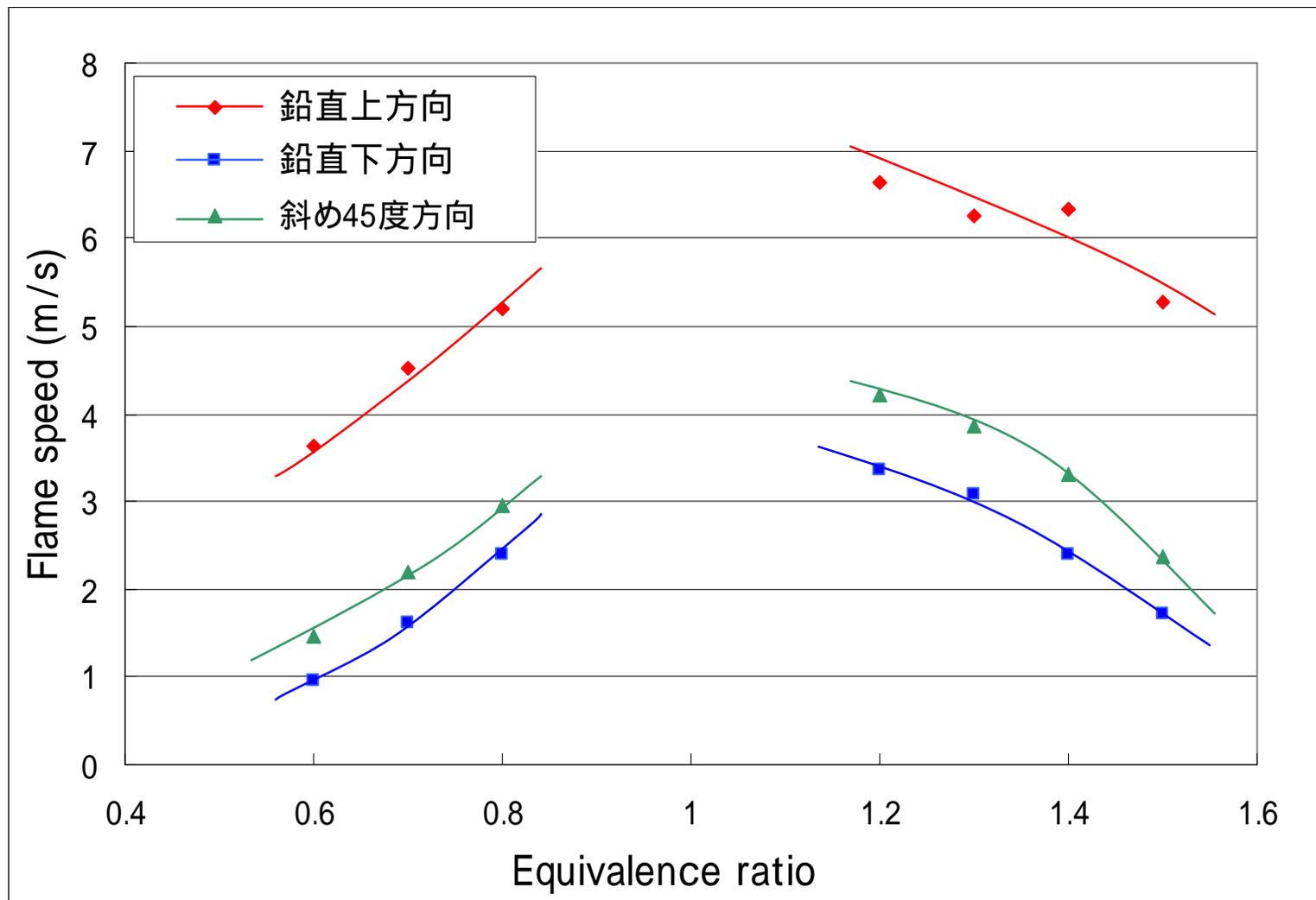


Fig.29 Flame speed (Oxygen concentration 21%)

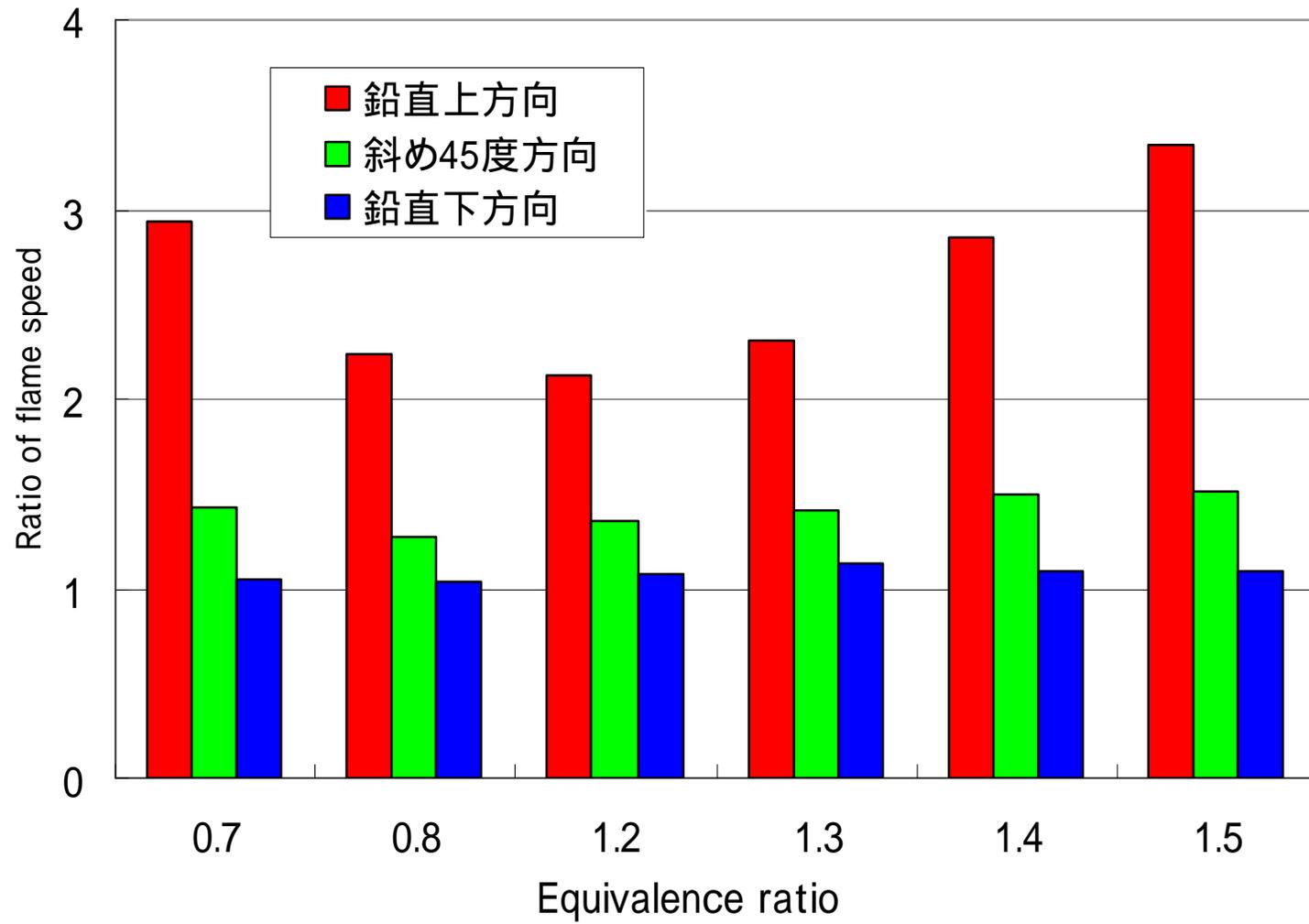


Fig.30 Ratio of flame speed (Oxygen concentration 21%)

Table9 Ratio of flame speed (Oxygen concentration 21%)

	鉛直上方向	斜め 45 度方向	鉛直下方向
= 0.7	2.93	1.42	1.04
= 0.8	2.24	1.27	1.03
= 1.2	2.13	1.35	1.08
= 1.3	2.30	1.42	1.13
= 1.4	2.86	1.49	1.09
= 1.5	3.35	1.51	1.09

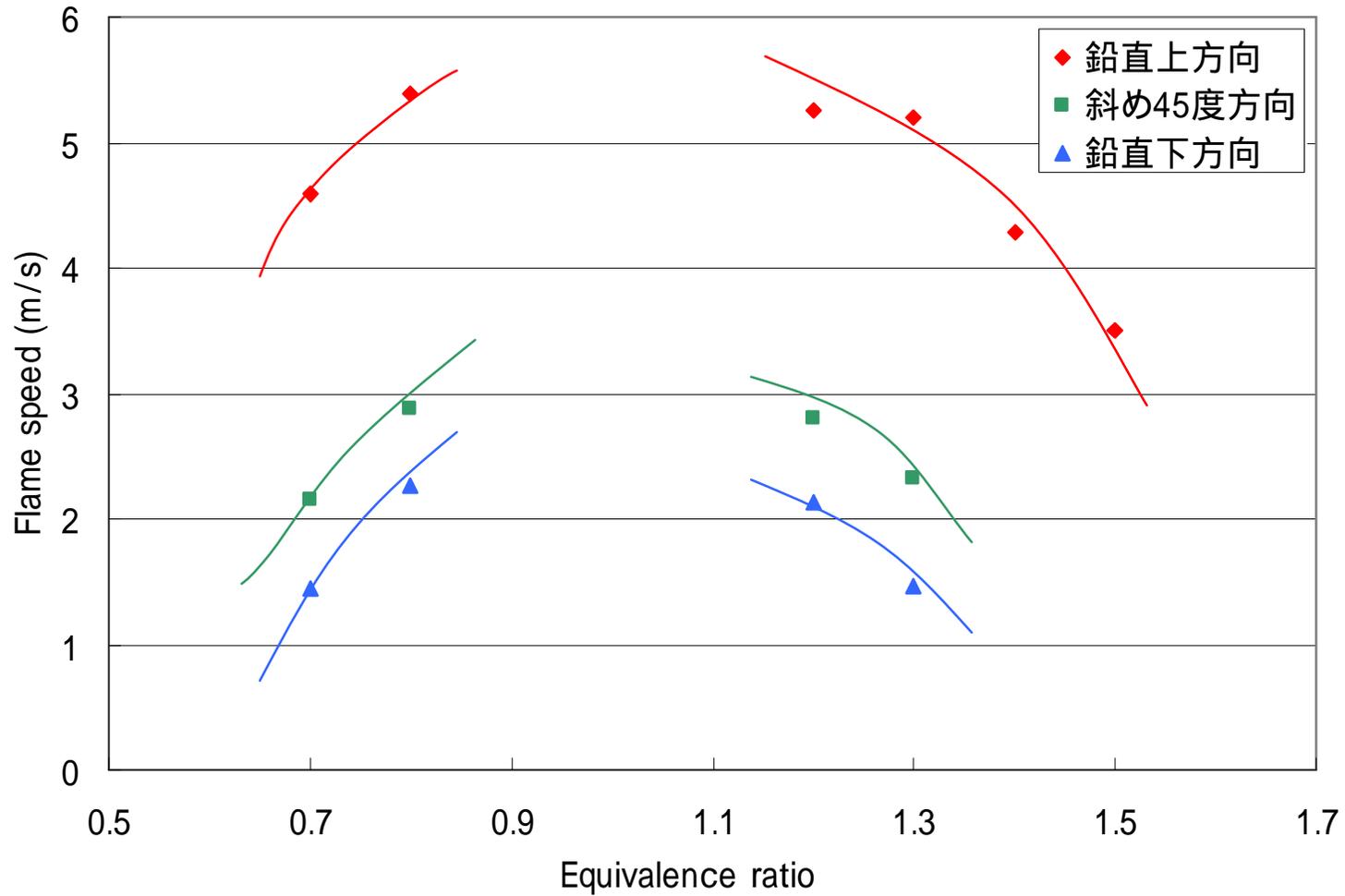


Fig.31 Flame speed (Oxygen concentration 19%)

Table10 Ratio of flame speed (Oxygen concentration 19%)

	鉛直上方向	斜め 45 度方向	鉛直下方向
= 0.8	2.45	1.31	1.03
= 1.2	2.62	1.39	1.06
= 1.3	3.54	1.58	1.00

Table11 Ratio of flame speed (Oxygen concentration 17%)

	鉛直上方向	斜め 45 度方向	鉛直下方向
= 0.7	2.82	1.47	1.07
= 0.8	2.60	1.34	0.98

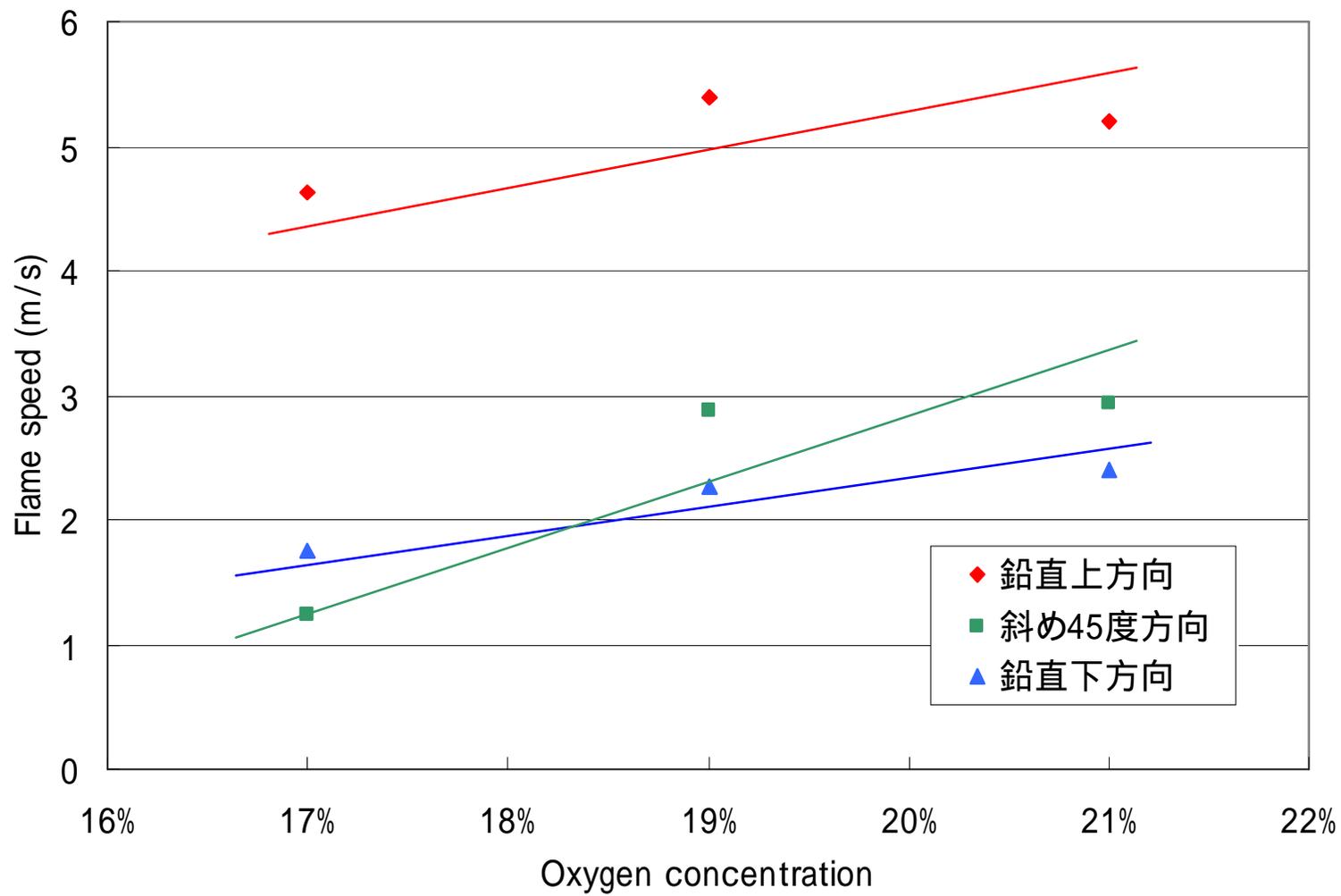


Fig.32 Flame speed (  $\phi = 0.8$  )

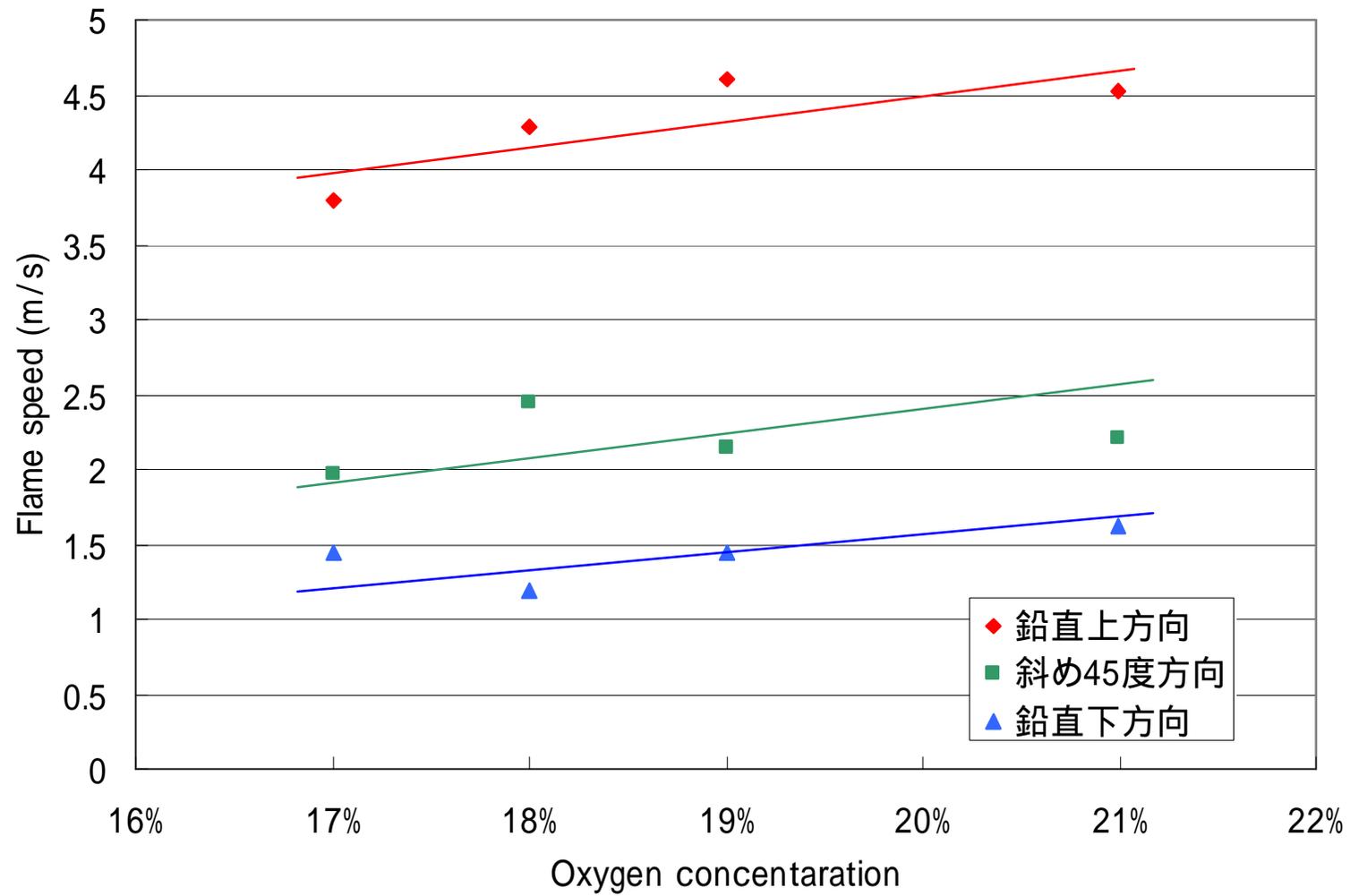


Fig.33 Flame speed (  $\phi = 0.7$  )

Table12 Flame speed

当量比 0.8	酸素濃度		比率
	21%	19%	
鉛直上	5.20	5.39	1.0
45度	2.94	2.88	1.0
水平	2.32	2.20	0.9
鉛直下	2.40	2.27	0.9
	平均		0.98

Table13 Flame speed

当量比 1.2	酸素濃度		比率
	21%	19%	
鉛直上	6.64	5.26	0.79
45度	4.22	2.79	0.66
水平	3.12	2.01	0.64
鉛直下	3.36	2.13	0.63
	平均		0.68

Table14 Flame speed

当量比 1.3	酸素濃度		比率
	21%	19%	
鉛直上	6.25	5.20	0.83
45度	3.86	2.33	0.60
水平	2.72	1.47	0.54
鉛直下	3.08	1.47	0.48
	平均		0.61

Table15 Flame speed

当量比 0.7	酸素濃度		比率
	21%	18%	
鉛直上	4.53	4.29	0.95
45度	2.20	2.44	1.11
水平	1.55	1.57	1.02
鉛直下	1.61	1.19	0.74
	平均		0.95

Table16 Flame speed

当量比 0.7	酸素濃度		比率
	21%	17%	
鉛直上	4.53	3.79	0.84
45度	2.20	0.77	0.35
水平	1.55	2.70	1.75
鉛直下	1.61	1.44	0.89
	平均		0.96

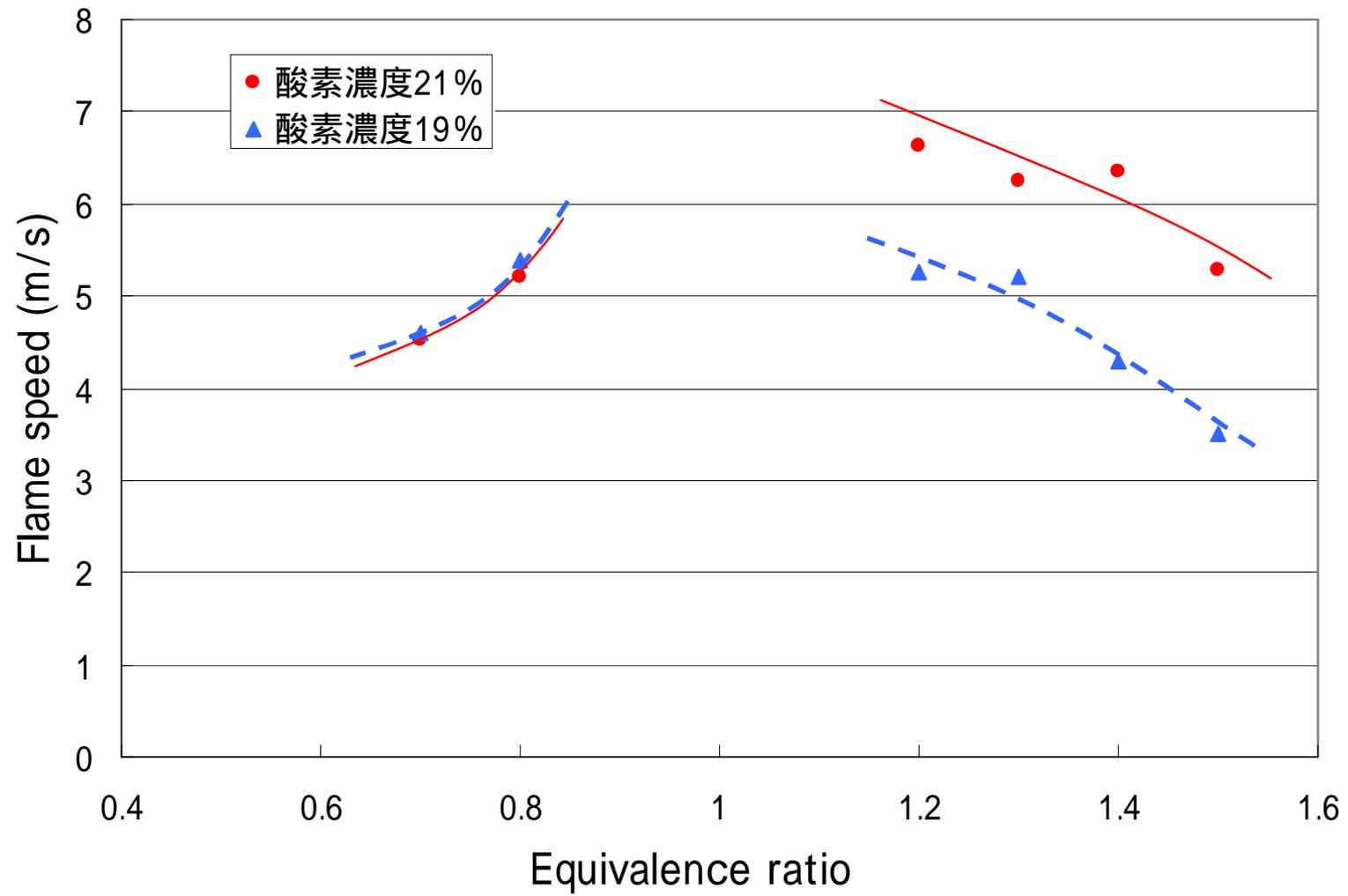


Fig.34 Flame speed (鉛直上方向)

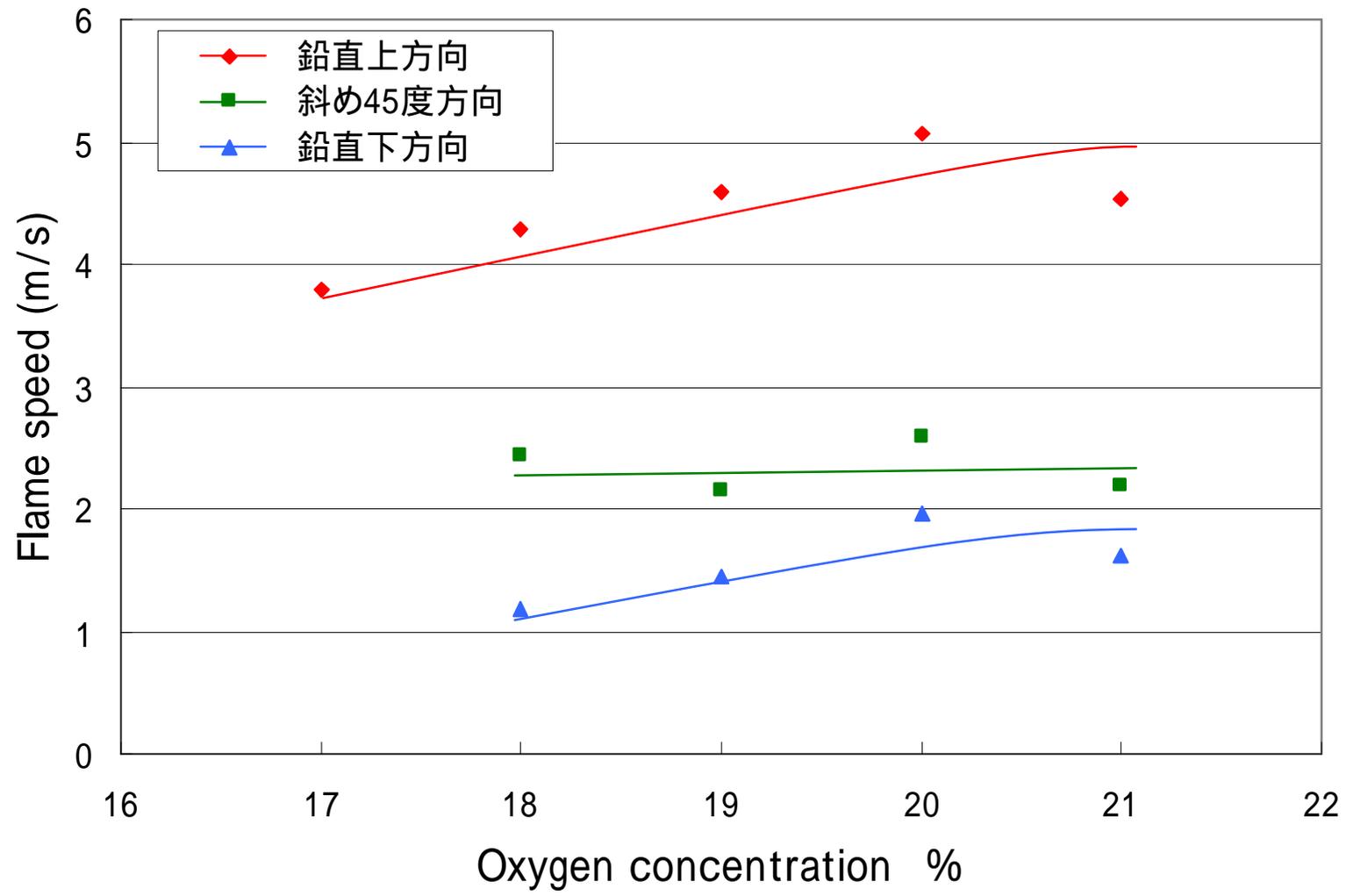


Fig.35 Flame speed (  $\phi = 0.7$  )

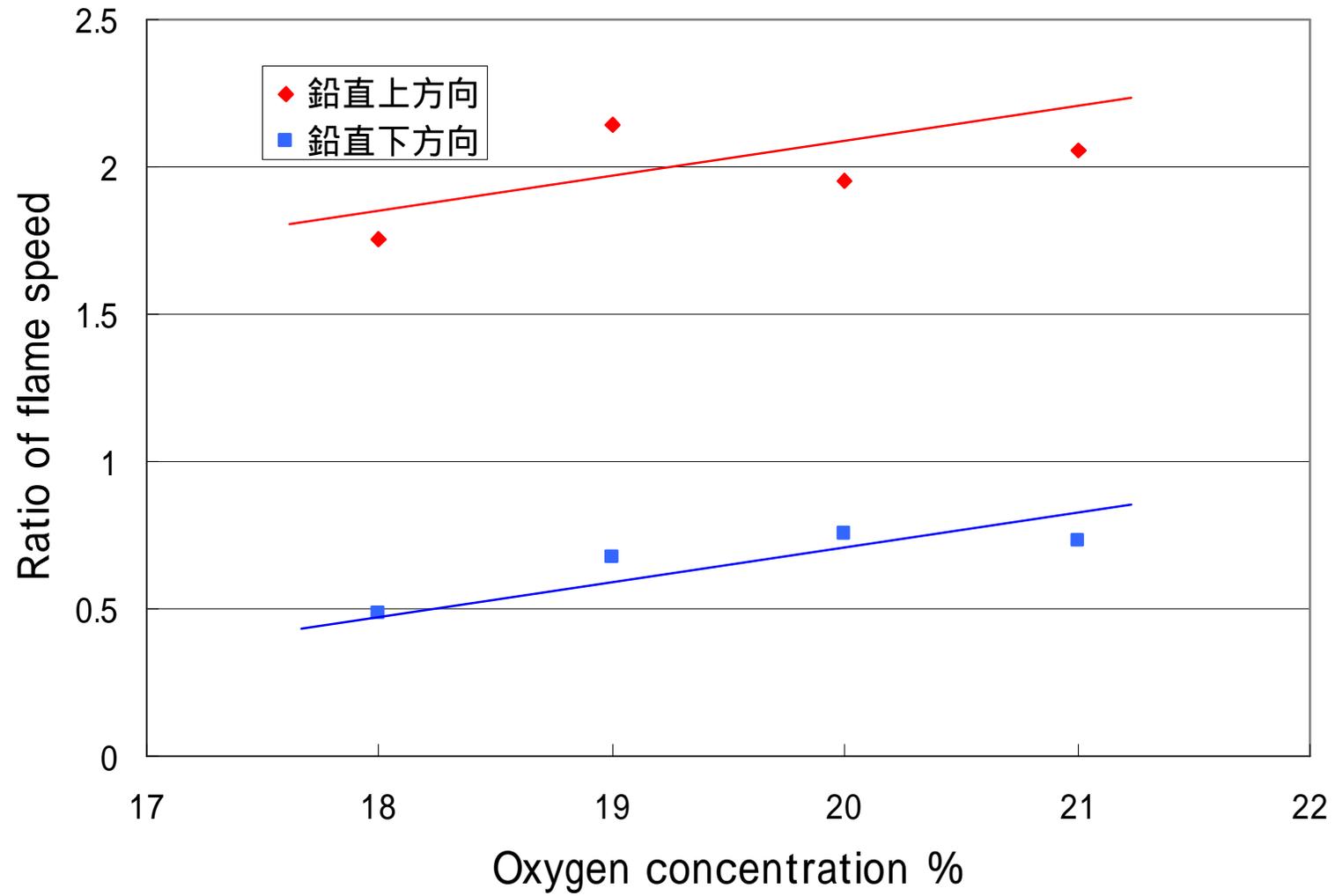


Fig.36 Ratio of flame speed (  $\phi = 0.7$  )

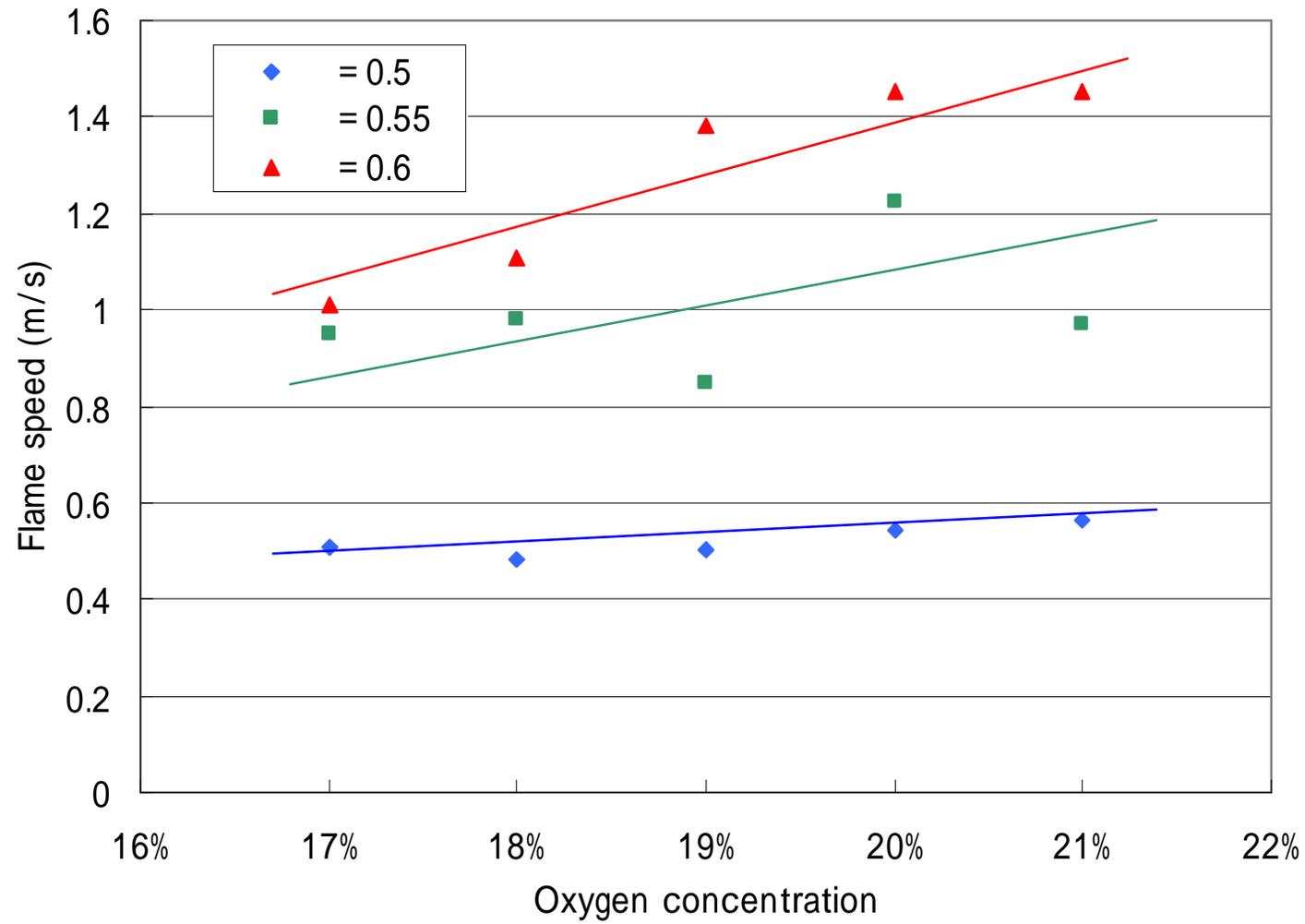


Fig.37 Flame speed

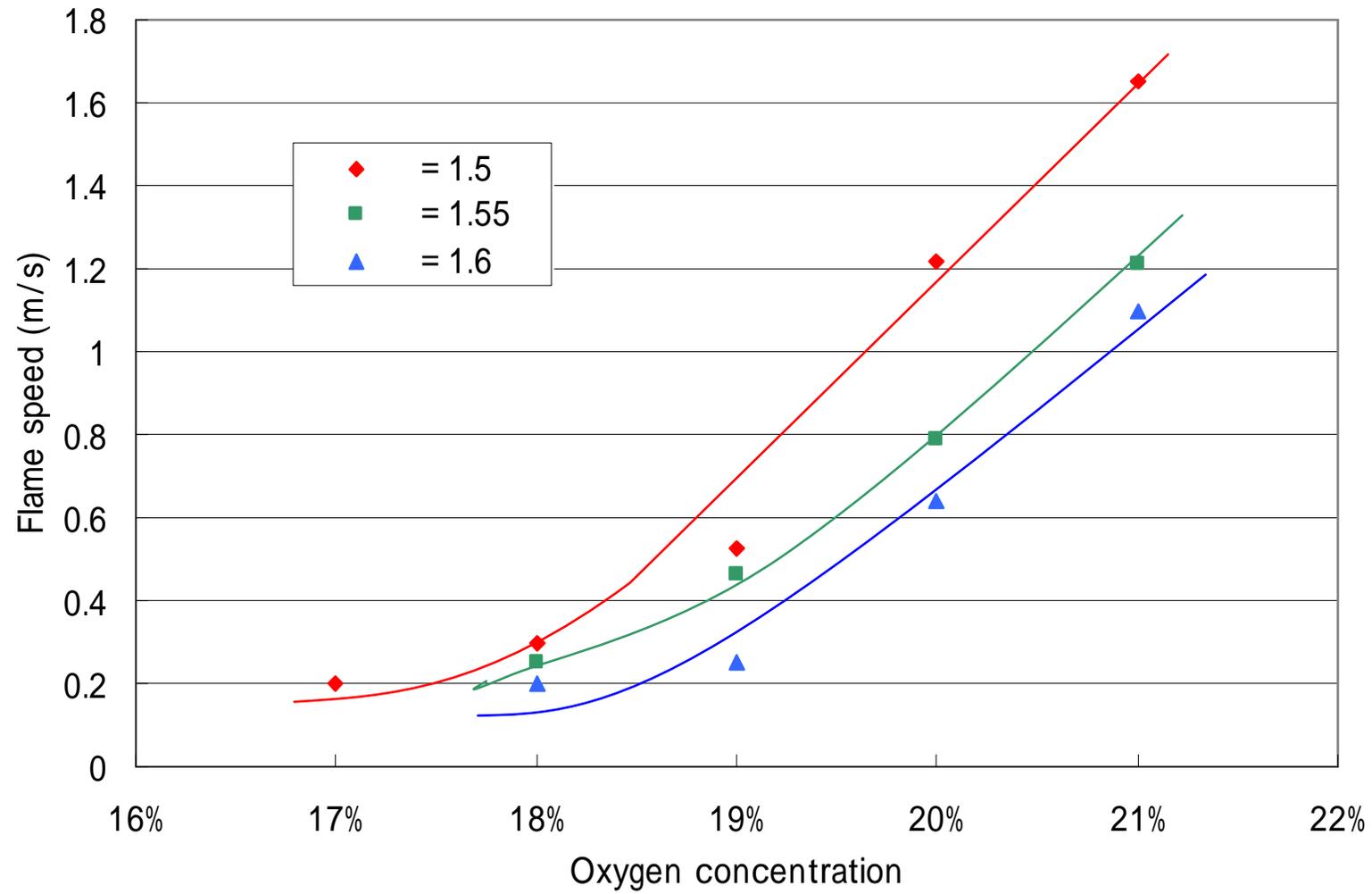


Fig.38 Flame speed

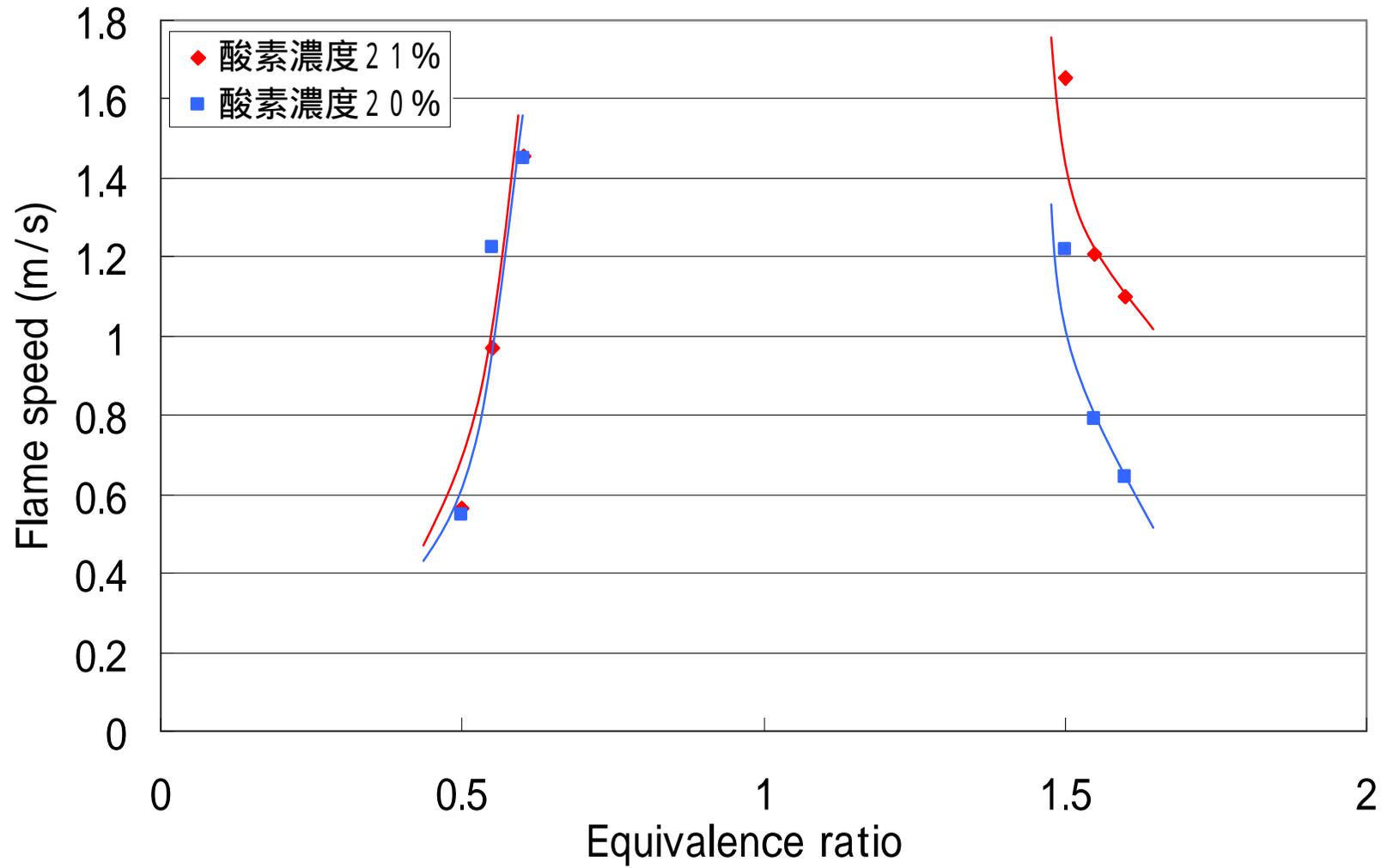


Fig.39 Flame speed

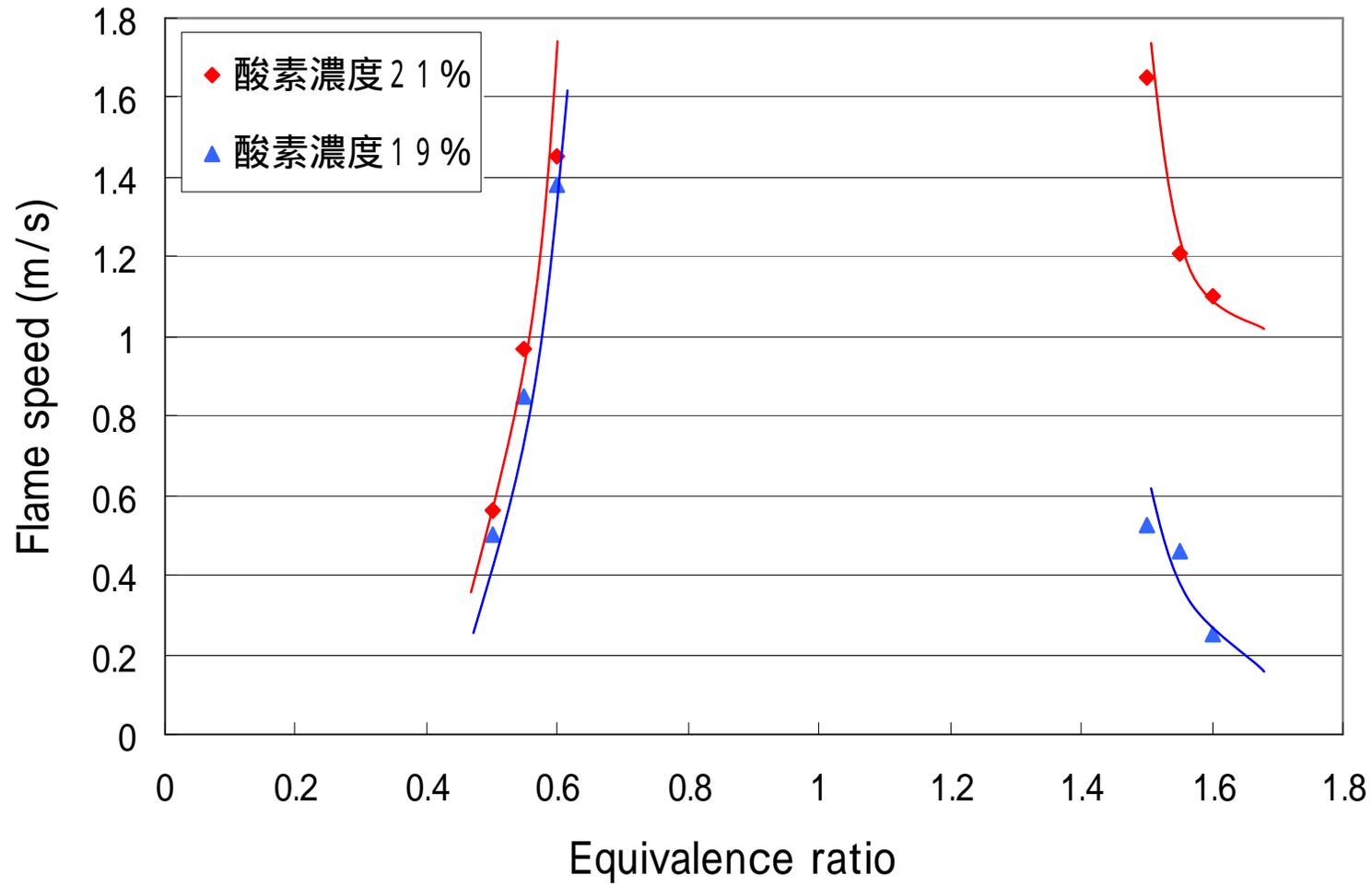


Fig.40 Flame speed

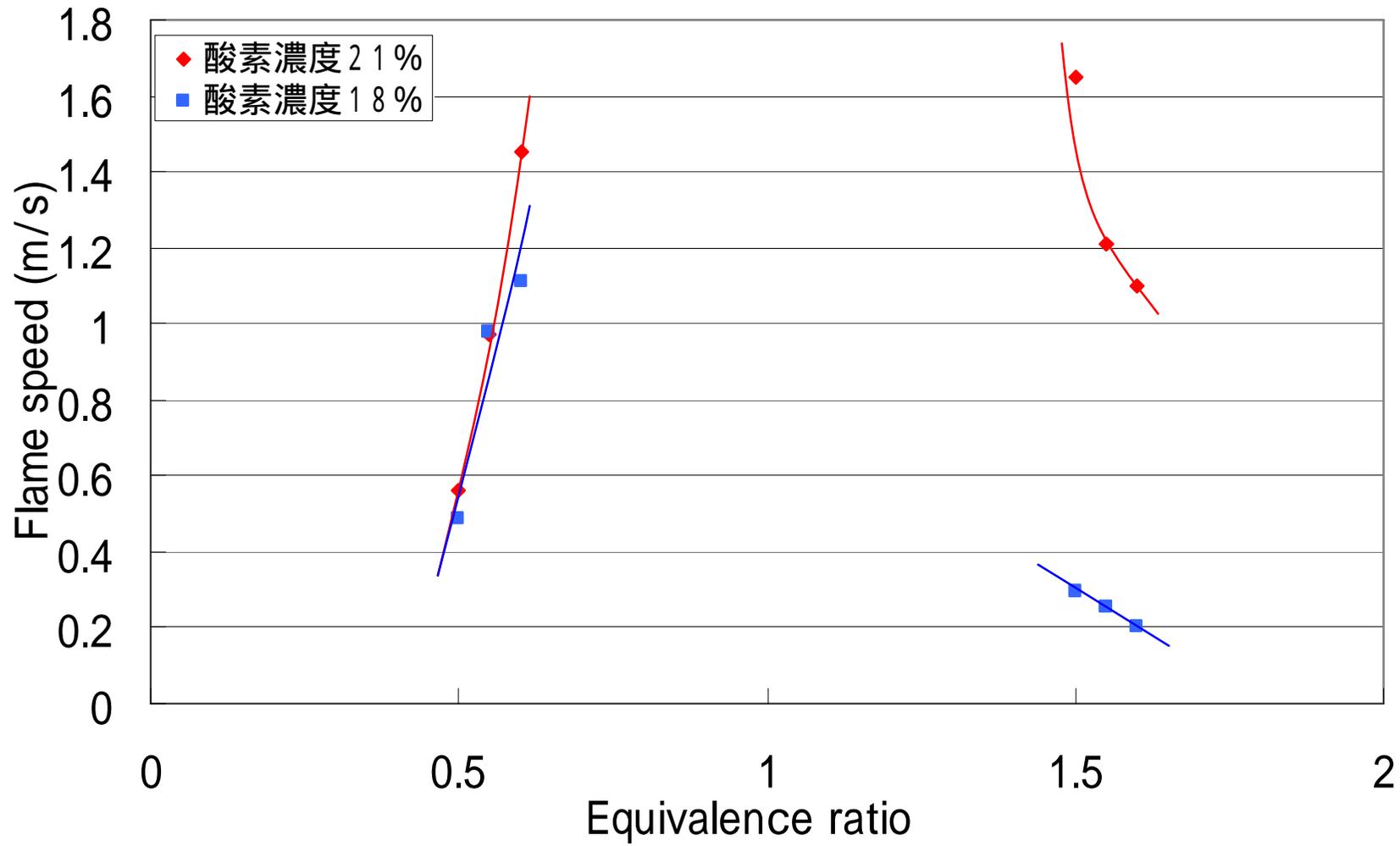


Fig.41 Flame speed

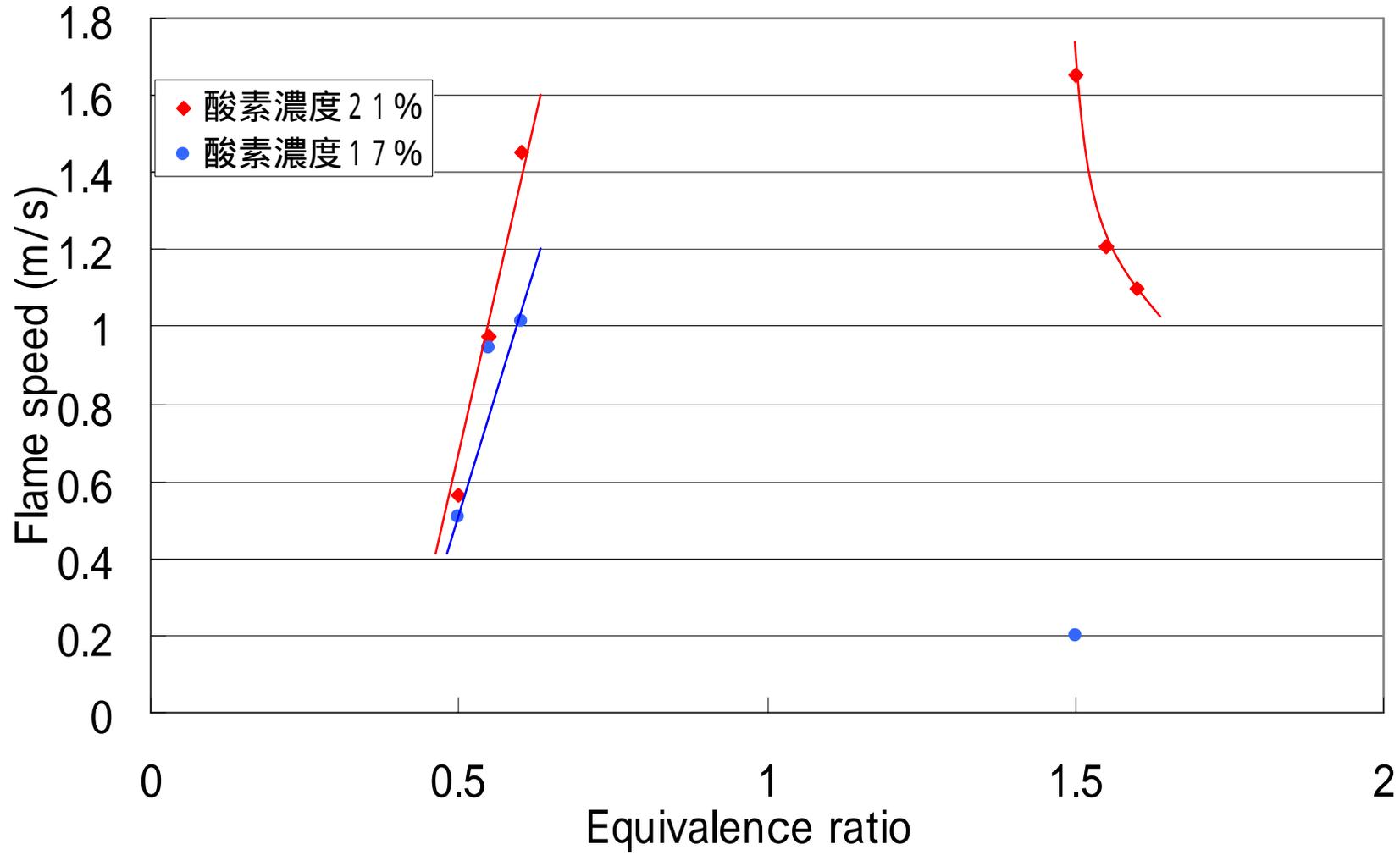


Fig.42 Flame speed

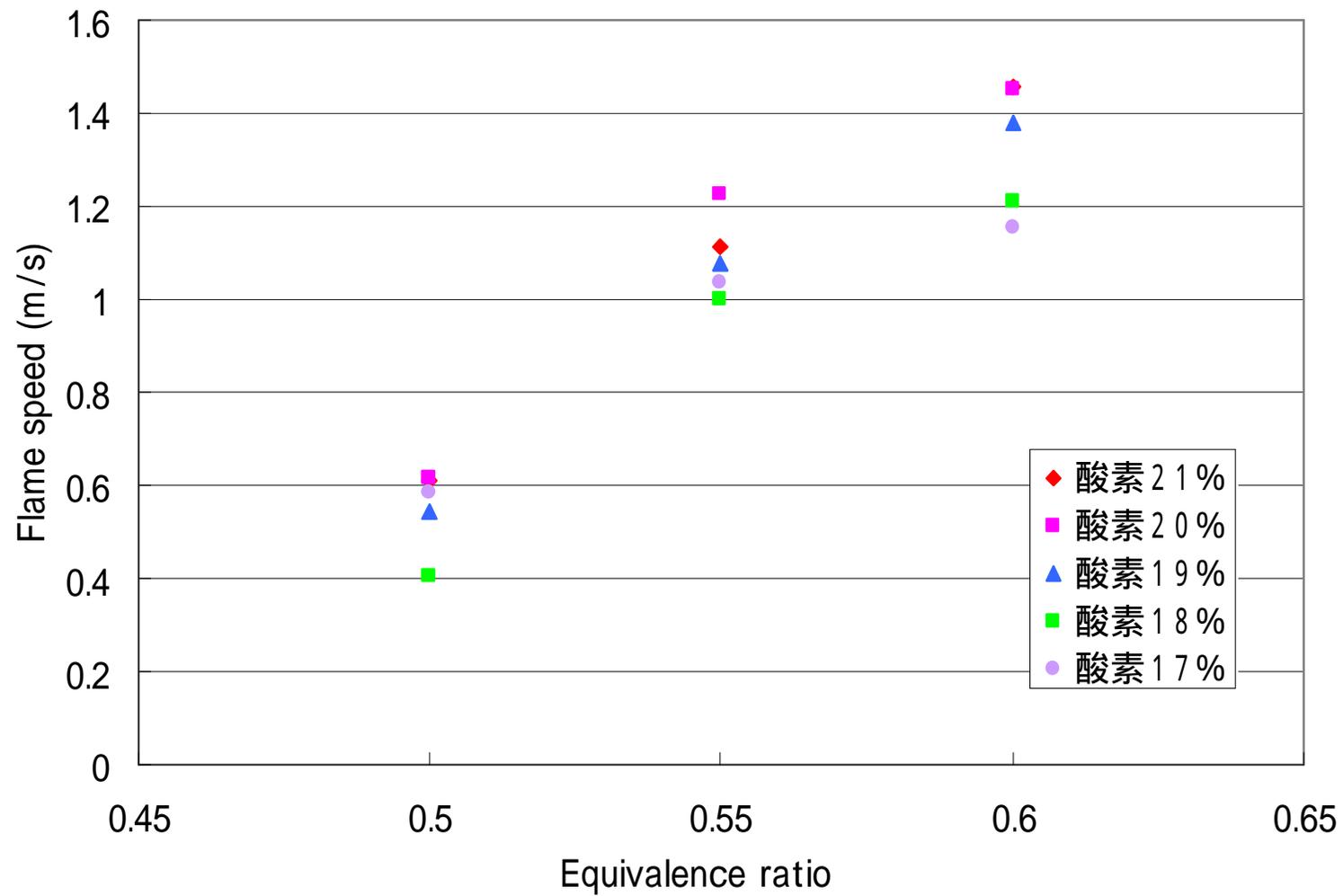


Fig.43 Flame speed

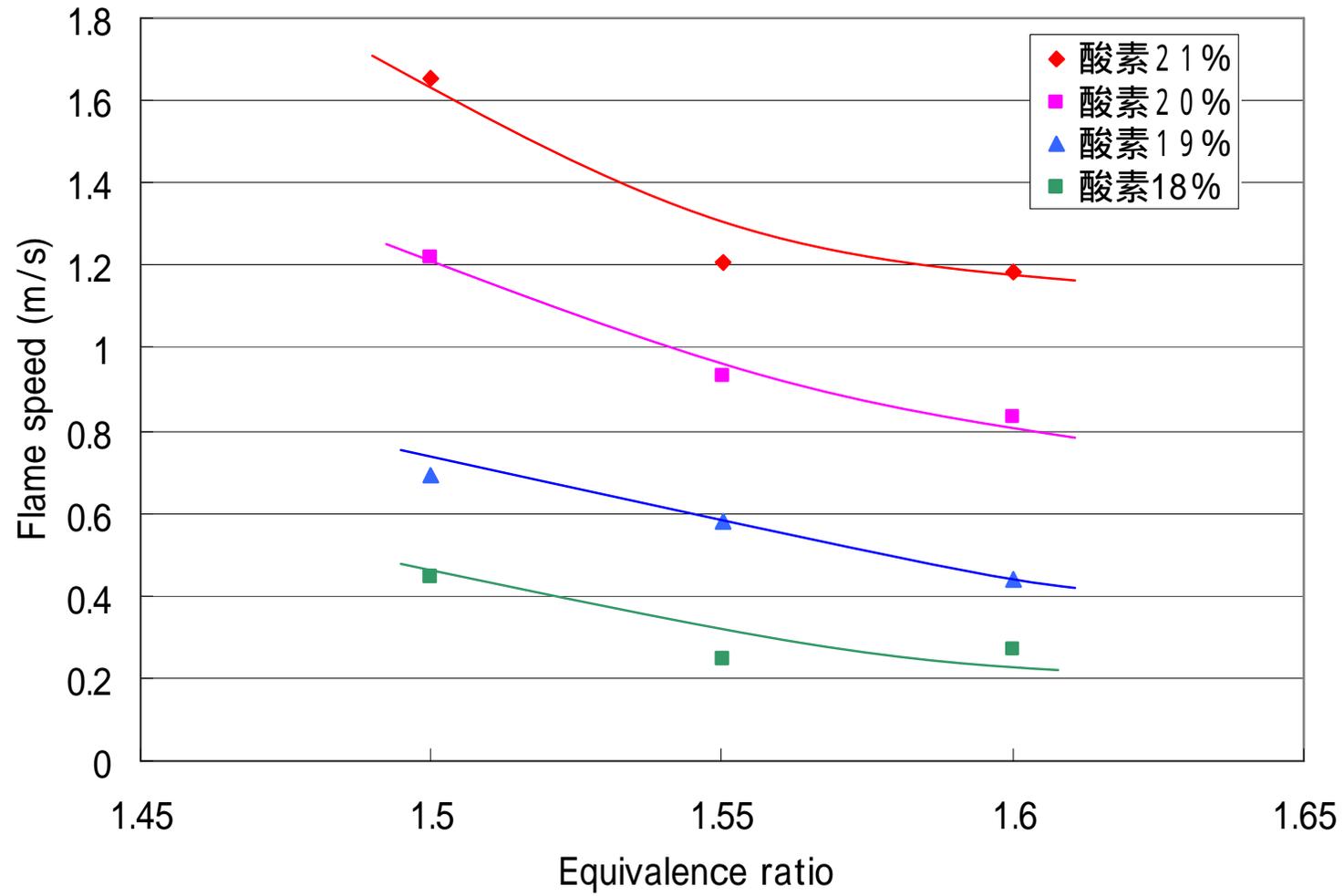


Fig.44 Flame speed

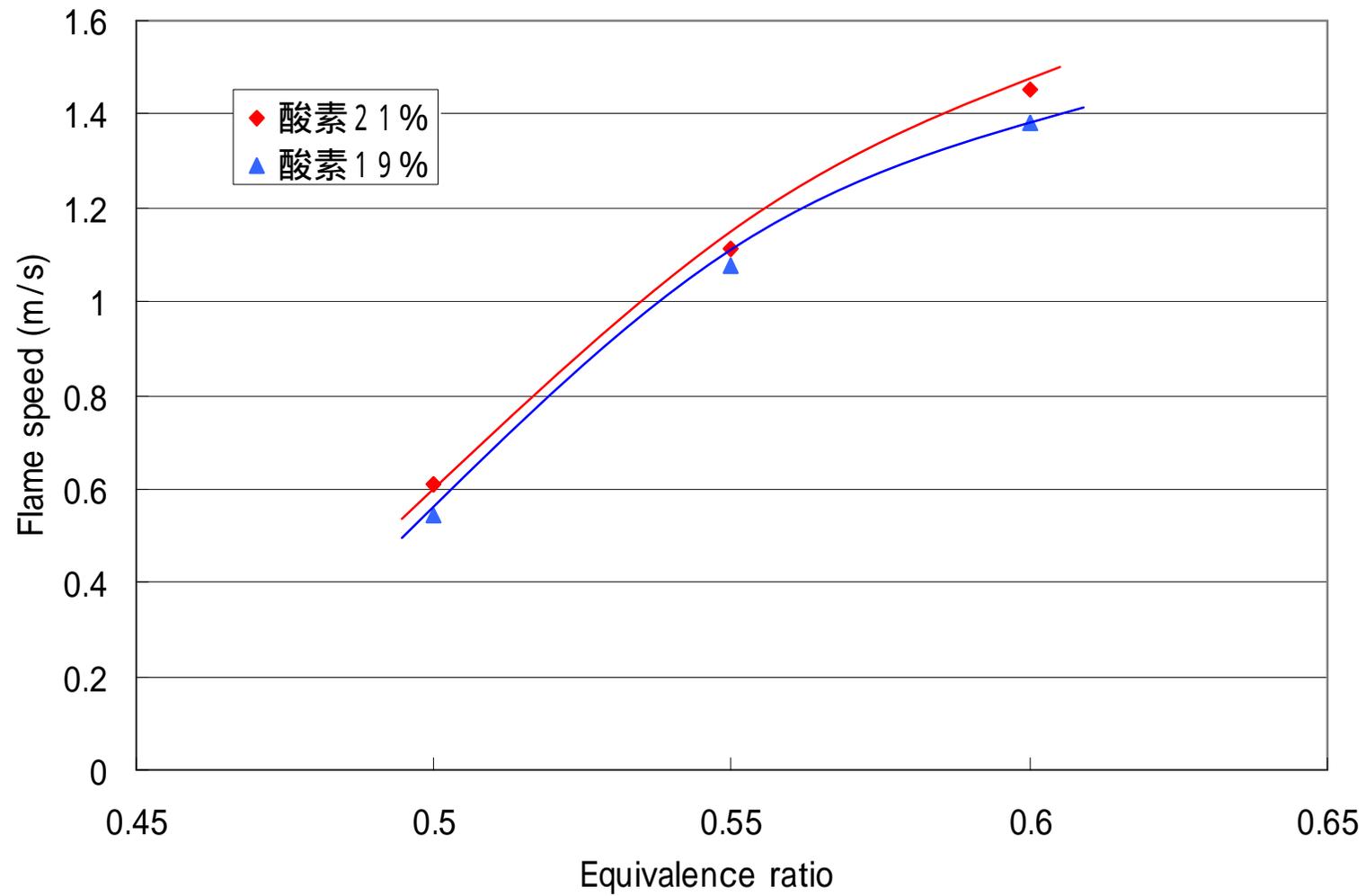


Fig.45 Flame speed

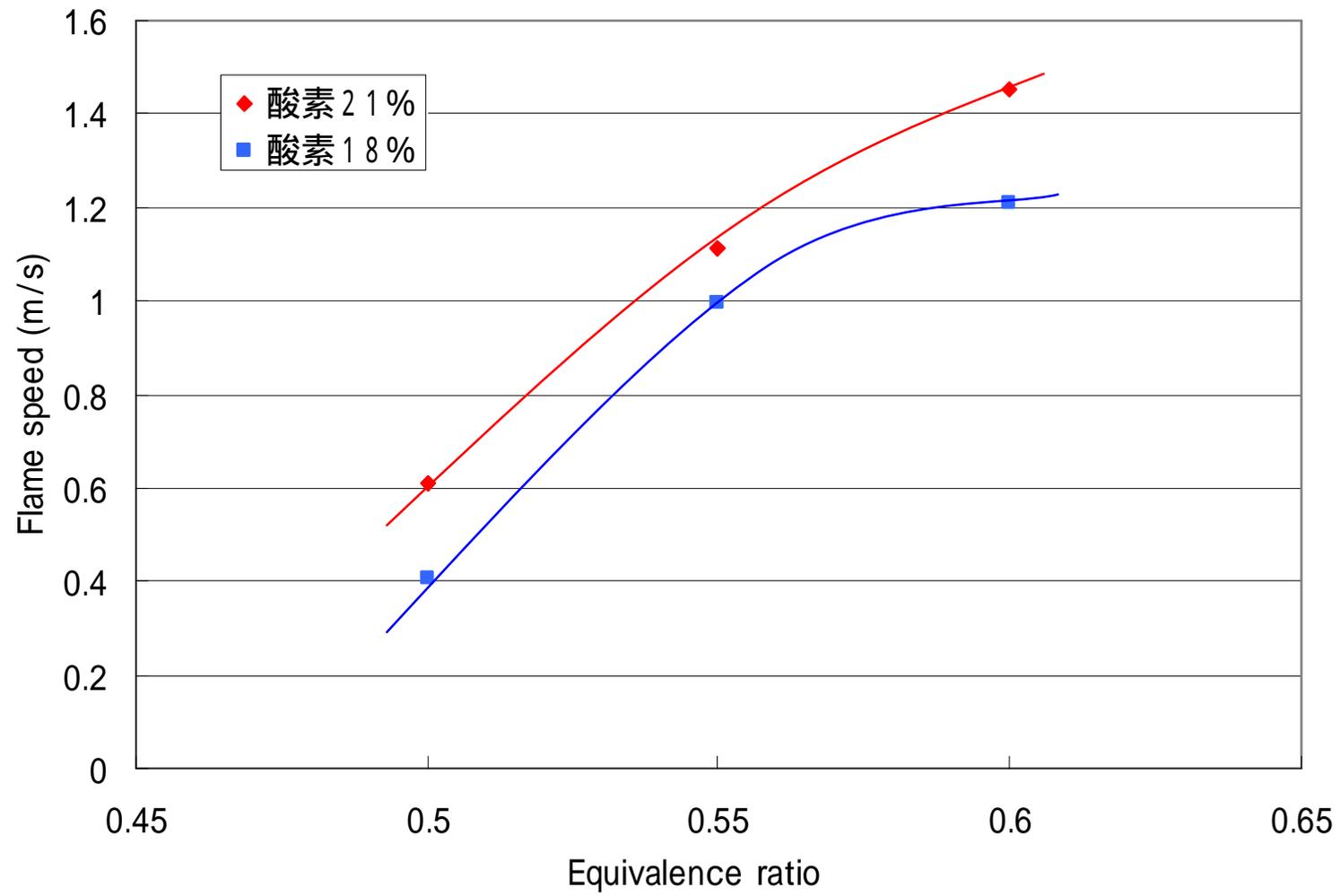


Fig.46 Flame speed

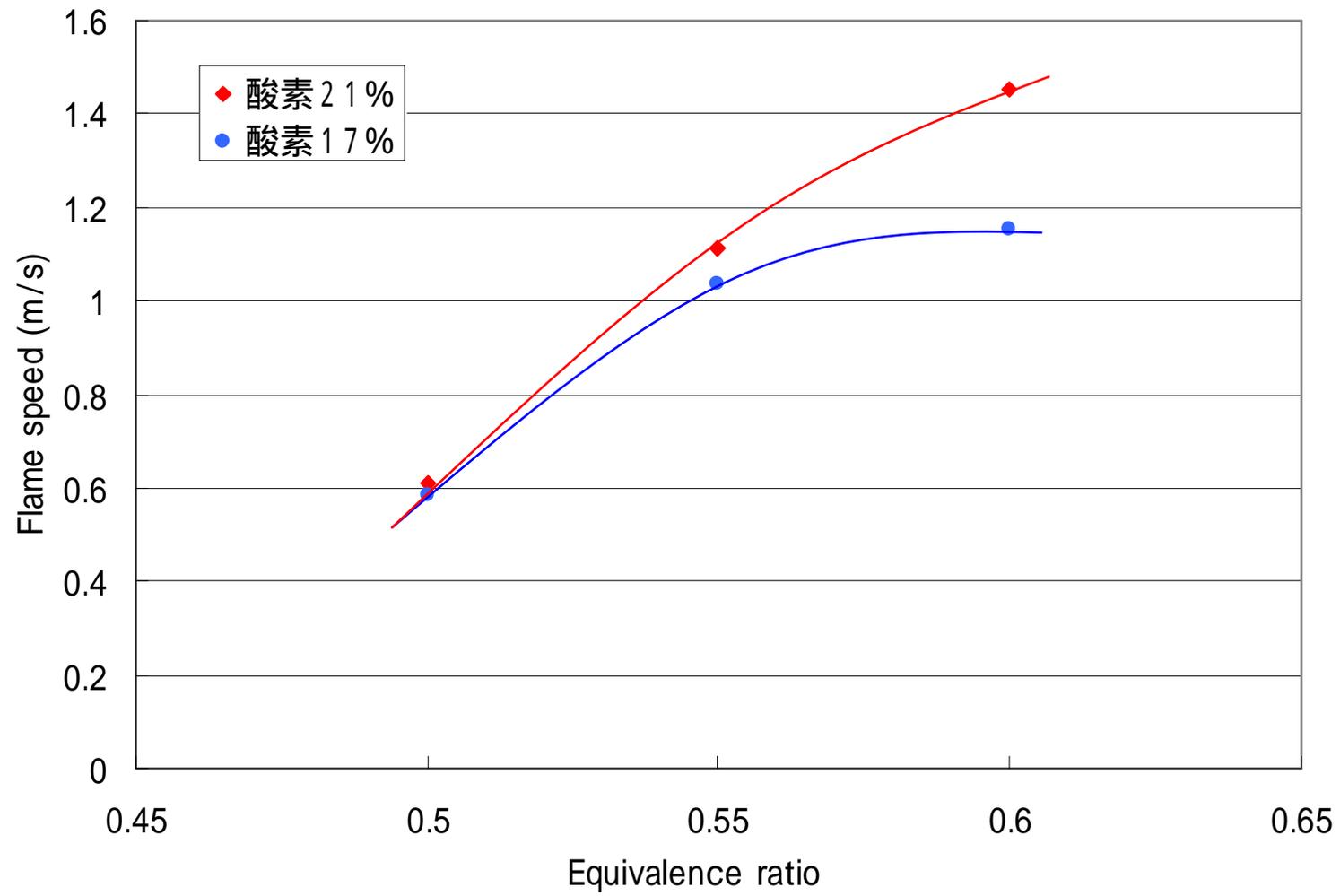


Fig.47 Flame speed

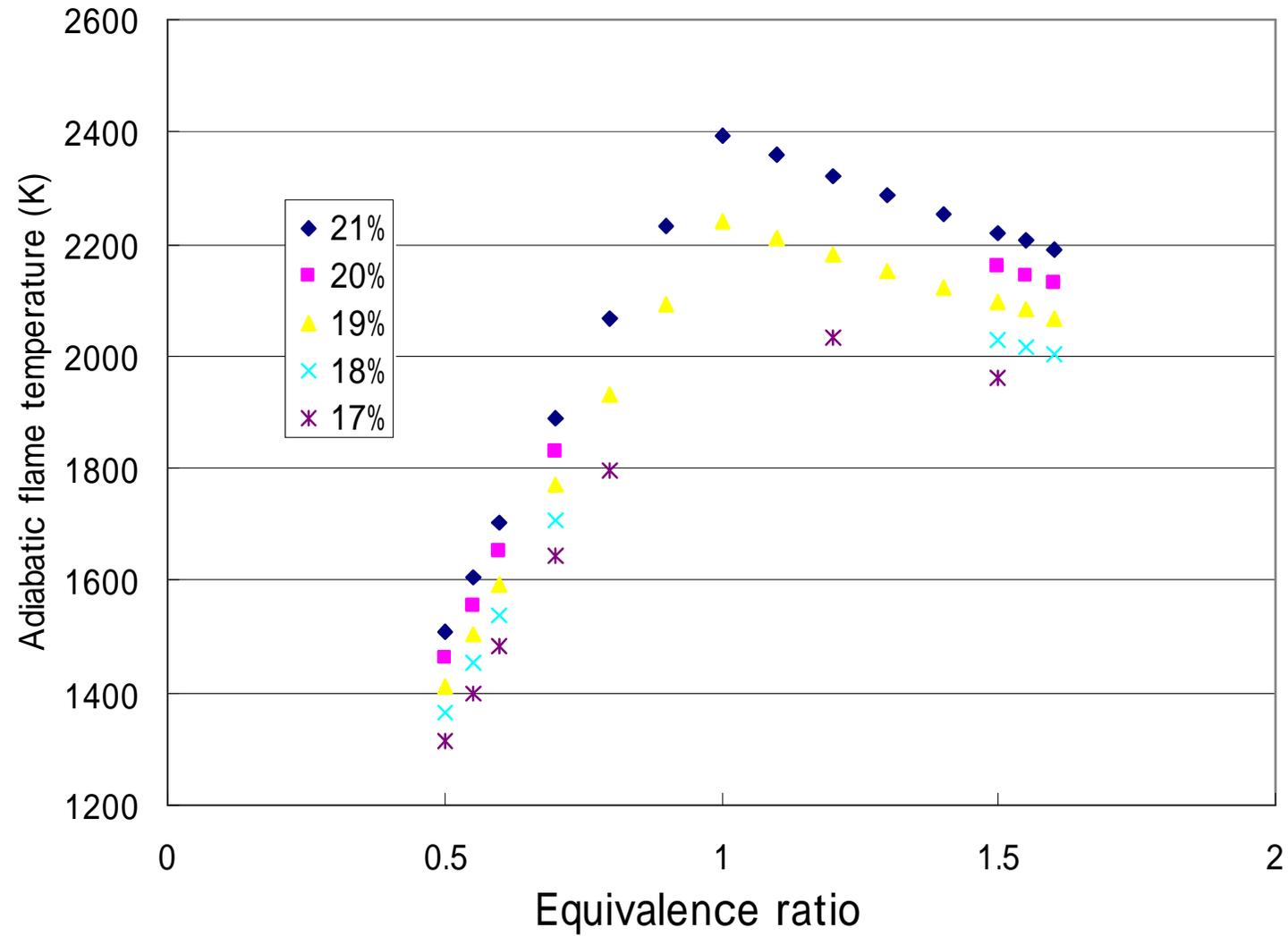


Fig.48 Adiabatic flame temperature

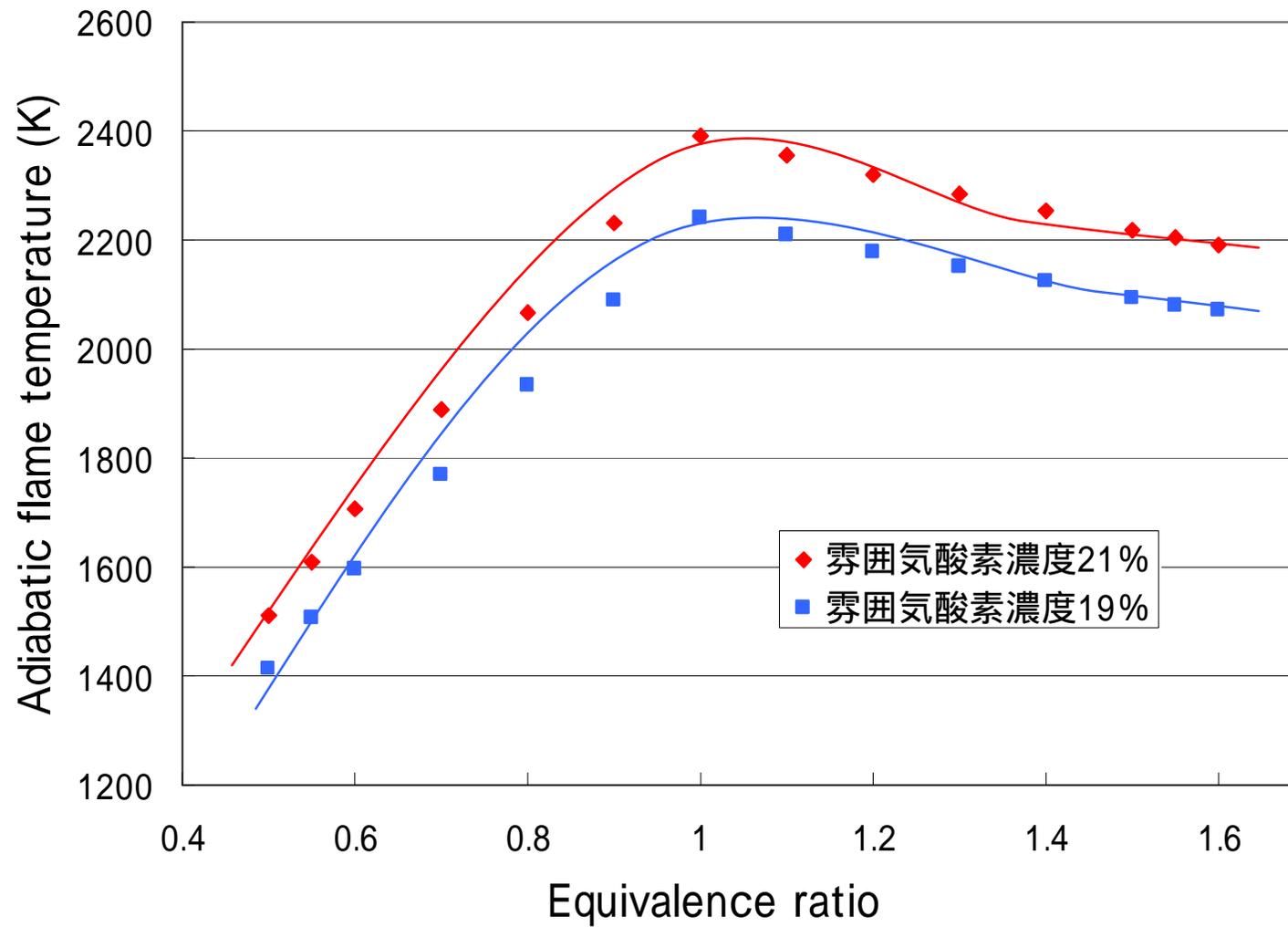


Fig.49 Adiabatic flame temperature

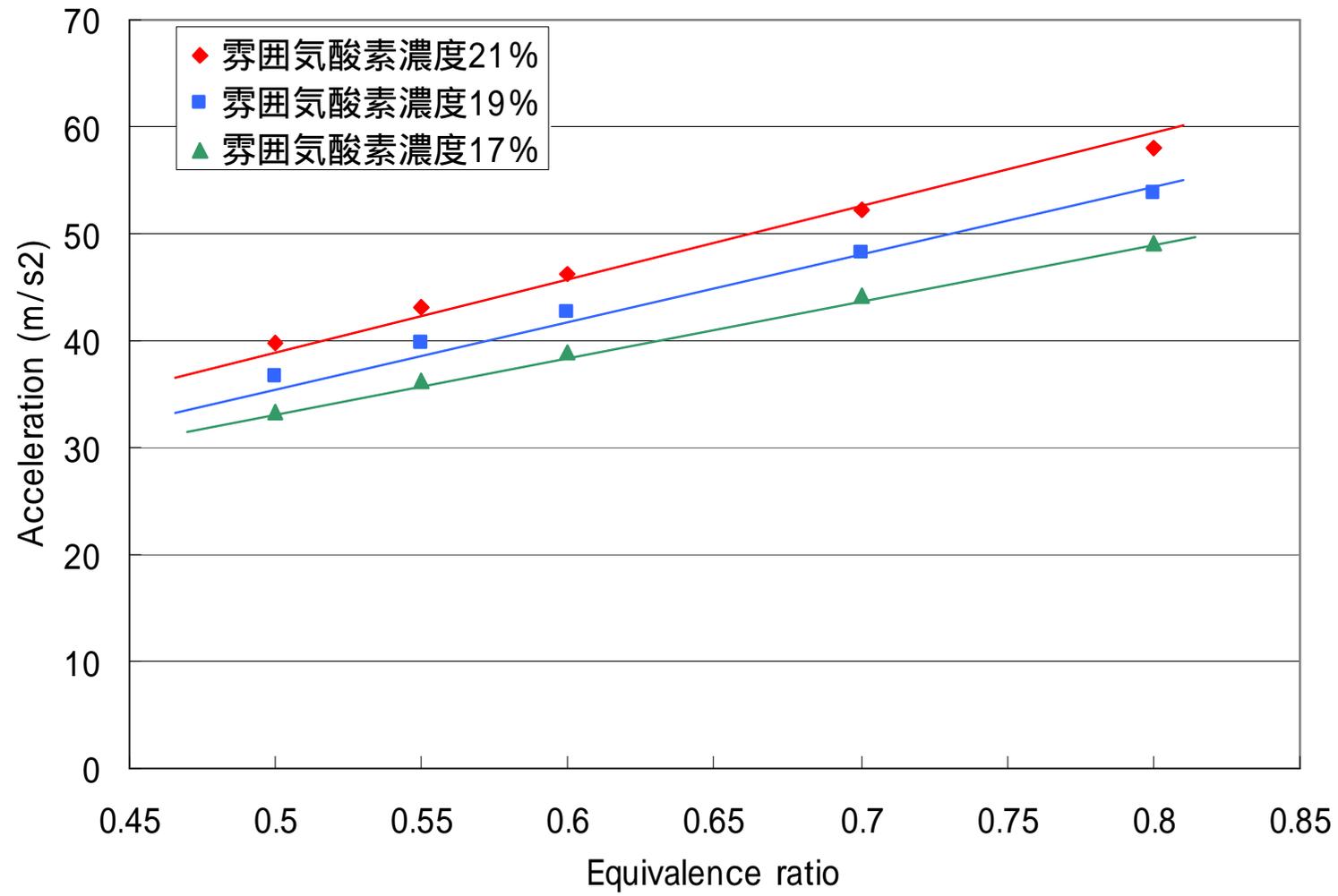


Fig.50 Acceleration

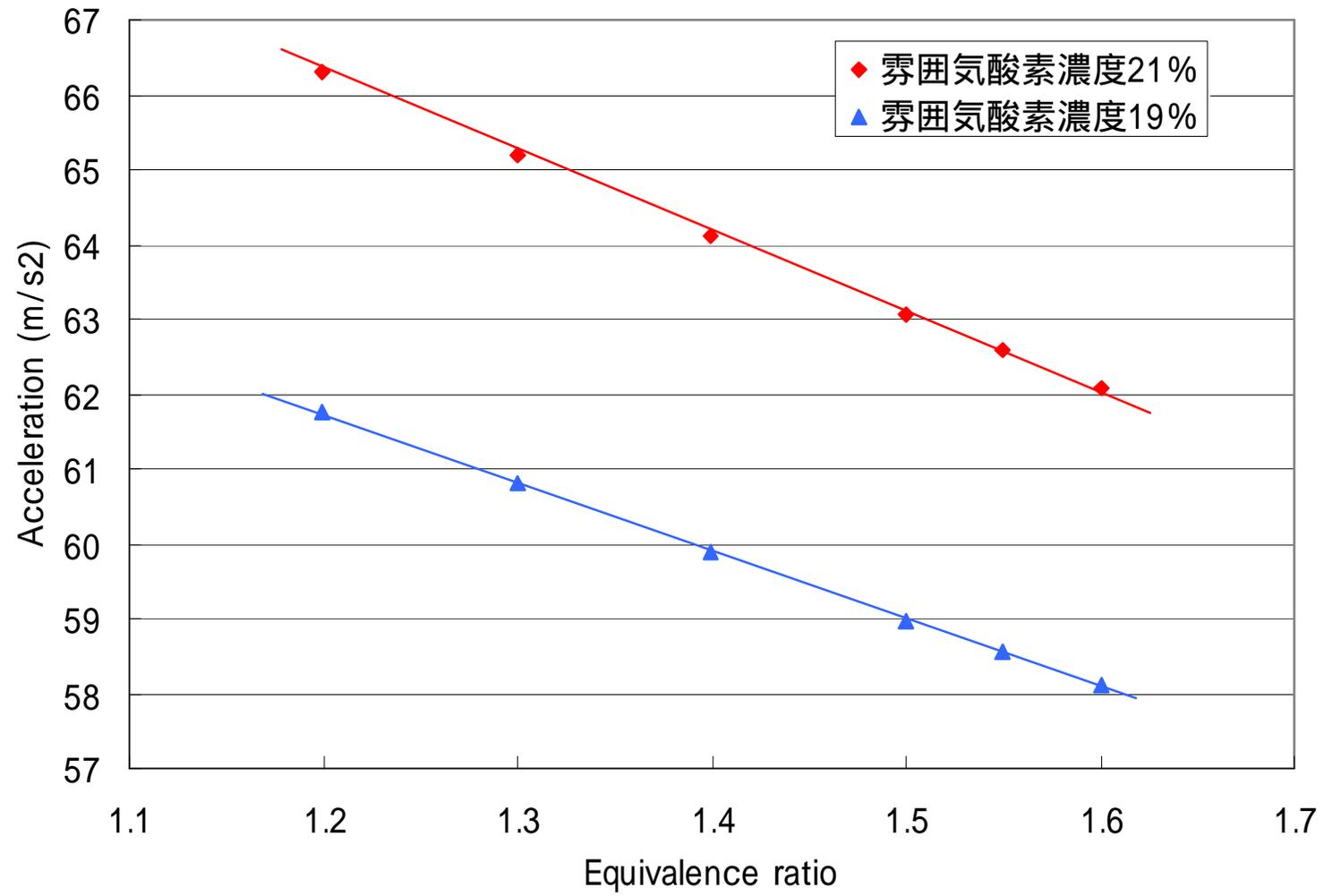


Fig.51 Acceleration

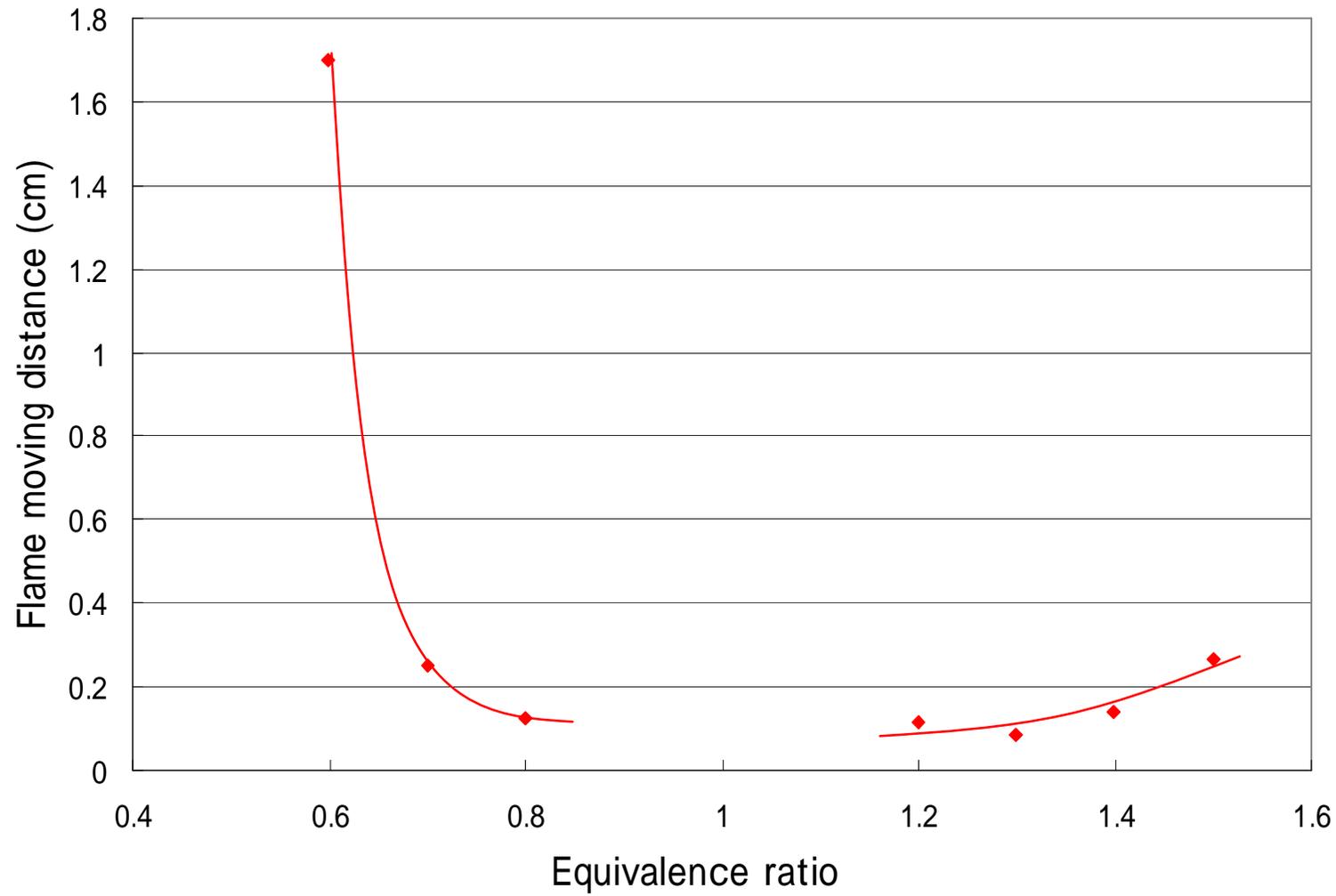


Fig.52 Flame moving distance

## 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、副査をしていただいた岡島敏教授に深く感謝しお礼申し上げます。

また、実験を進めるにあたり多くのご協力を賜った中央工作室の島貫氏ならびに石井氏、また原動機研究室ならびに熱工学研究室の皆様に深く感謝いたします。

平成 18 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  
桑原 竜太

## 参考文献

- 1) 林 大介、Microgravity observation on irregular combustion phenomena near the lean limit mixtures、( 2000 )、 pp.1 -4、 修士論文、法政大学大学院
- 2) 濱川 圭弘 他、エネルギー環境学、( 2001 )、 pp.90 -91、 オーム社
- 3) 平野 陽三 他、エネルギー活用事典、( 1999 )、 pp.80 -84、 産業調査会
- 4) 秋元 肇 他、地球大気環境問題とその対策、( 1993 )、 pp.266 -272、 オーム社
- 5) 新岡 嵩 他、燃焼現象の基礎、( 2001 )、 pp.36 -38、 オーム社
- 6) 浅見 敏彦、図説基礎熱力学、( 2002 )、 pp.374 -375、 オーム社
- 7) 浅見 敏彦、図説基礎熱力学、( 2002 )、 pp.376 -377、 オーム社
- 8) 浅見 敏彦、図説応用熱力学、( 2002 )、 pp.404、 オーム社
- 9) 浅見 敏彦、図説応用熱力学、( 2002 )、 pp.405、 オーム社
- 10) 浅見 敏彦、図説応用熱力学、( 2002 )、 pp.363、 オーム社
- 11) 小沼 義昭 他、Fuel-Lean Premixed Combustion by a Swirl-Flow Combustor、( 1995 )、 pp.1534 -1539、 日本機械学会論文集 ( B 編 )