

## 1. 目的

バーナー火炎は最も身近な燃焼形態の一つであるが、その形や温度分布は流体力学と化学反応の複雑な相互作用によって決まり、それを理解することは流れや化学反応、熱伝達や物質輸送などのすべてを理解することにつながる。

本実験では、予混合バーナーによって形成される層流火炎および乱流火炎について、形・色・動き・音などを目視観察し、シュリーレン法による可視化観察により瞬間的な火炎形状をそれぞれ観察する。つぎに層流燃焼速度を角度法を用いて計測する。また、層流火炎の温度分布について熱電対を調べる。

## 2. 装置と器具

層流火炎用バーナー、乱流火炎用バーナー、シュリーレン法による撮影装置、白金-白金ロジウム 13% 熱電対、記録計

[層流火炎用バーナーの諸元]

燃料：メタン ( $\text{CH}_4$ )

酸化剤：標準空気 ( $\text{O}_2$  20.76%,  $\text{N}_2$  79.24%)

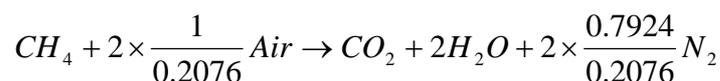
バーナー：予混合式、ノズル内径 5 mm

流量：フロート式流量計で調整

空気流量： $Q_a=1.06$  l/min

燃料流量： $Q_f=0.124$  l/min

実際空気量： $A = \frac{Q_a}{Q_f} = 8.55$



理論空気量： $A_{th} = 2 \times \frac{1}{0.2076} = 9.64$

空気比： $\alpha = \frac{A}{A_{th}} = 0.887$

当量比： $\phi = \frac{1}{\alpha} = 1.13$

[乱流火炎用バーナーの諸元]

燃料：プロパン  $\text{C}_3\text{H}_8$

酸化剤：空気

バーナー：実験用ブンゼンバーナー

### 3. 実験内容

- 層流・乱流の両バーナー火炎の目視観察
- シュリーレン法を用いた、バーナー火炎の光学的観察
- 層流燃焼速度の導出
- 層流火炎の温度分布

### 4. 実験および測定

#### 4.1 バーナー火炎の目視観察

層流火炎用バーナーと乱流火炎用バーナーの2バーナーを用いて、予混合バーナー火炎の形・色・動き・音などを目視観察する。

##### (1) 両火炎のスケッチ

図1(a),(b)にそれぞれ、層流火炎・乱流火炎のスケッチを示す。

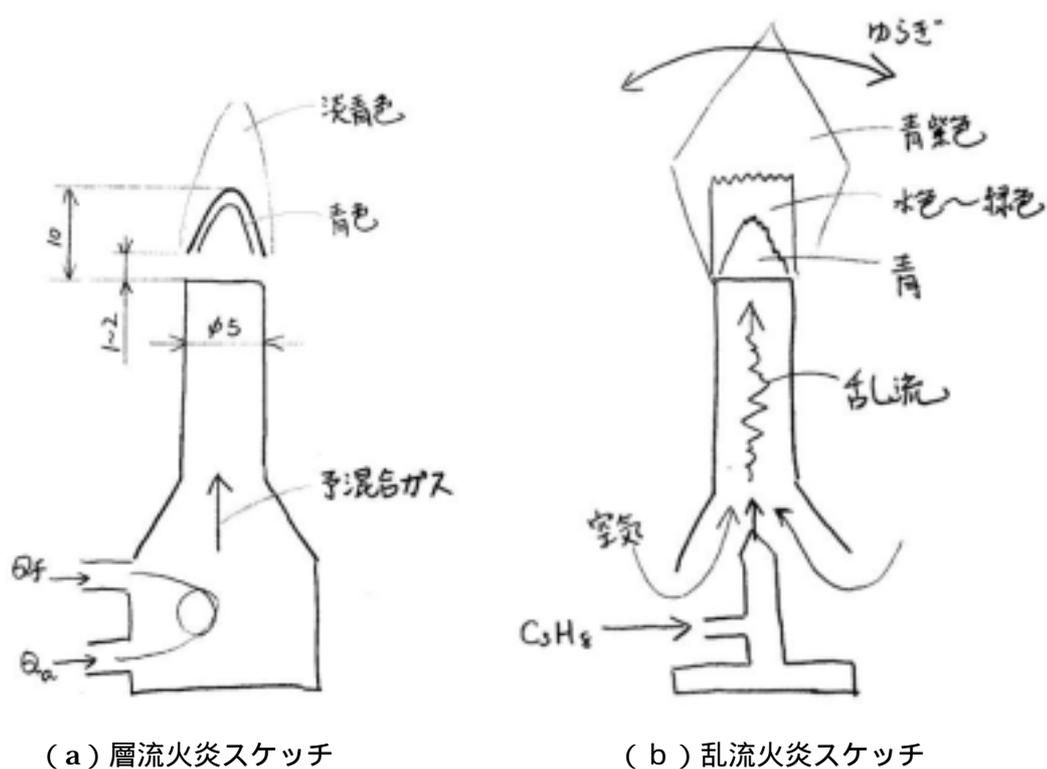


図1 層流火炎・乱流火炎のスケッチ

##### (2) 火炎の観察

###### (a) 層流火炎

- 炎が定常
- 火炎が円錐形

###### (b) 乱流火炎

- 火炎が非定常で左右に揺らぐ
- 燃焼の際、低い音が聞こえる

## 4.2 シュレーリン法によるバーナー火炎の光学的観測

シュレーリン法を使ってバーナー火炎内の密度変化の様子を調べる。バーナーは層流火炎用および乱流火炎用バーナーを使用する。乱流火炎形状の時間変動を記録するため、2時刻のシュレーリン像を写真撮影する。

### (1) シュレーリン法の原理

シュレーリン法は気体や液体、固体の中にできる工学的なむら調べる方法である。シュレーリン法の基本構成要素を図2に示す。ここで光源  $S$  は第1主レンズ  $L_1$  の焦点に置く。したがって、第1主レンズ  $L_1$  と第2主レンズ  $L_2$  の間にある観測部  $T$  では、平行光線が通過する。第2主レンズ  $L_2$  の焦点  $K$  に光源  $S$  の像が結ばれる。さらに、カメラレンズ  $G$  は観測部  $T$  の中にある点  $Q$  の像をスクリーン上の点  $P$  に結ぶ。もし、観測部において密度が  $x$  方向あるいは  $y$  方向に変化しなければ、実線で示すように  $Q$  を通る光線も  $Q'$  を通る光線も焦点  $K$  上で完全に一致して、光源のくっきりした像を結ぶ。ところが、観測部の中で、 $Q$  のところだけが他の点 ( $Q'$  など) と密度勾配が異なると、 $Q$  を通る光線は点線のように屈折し、 $Q'$  などを通る光線が結ぶ像とは幾分かずれて像を結ぶこととなる。そのズレ量はほぼ  $F_2 \theta_y$  となる。ここで  $F_2$  は第2主レンズの焦点距離で、 $\theta_y$  は  $Q$  を通る光線が観測部で  $y$  方向に屈折する角度である。

ここで光源  $S$  に四角形の光源を用いる場合を考える。観測部に光学的な乱れ (局所的な密度勾配) が無いときに、光の一部をさえぎるように光源の像の中間にナイフエッジ  $K$  を調整することでスクリーン上の明るさは全面一様に幾分暗くなる。

ここで、もし  $Q$  に光学的乱れが生じて、そこを通る光線が点線で示すように屈折するとスクリーン上の点  $Q$  の像の明るさは、図3 (P.5) に示すようにナイフエッジ上を通過してくる光量が増す分だけ他の点 ( $P'$  など) より明るくなる。もちろん、 $Q$  における屈折がこの図と逆の向きになれば  $P$  の明るさは暗くなる。このようなときの  $P$  の光度  $I$  の変化量  $\Delta I$  は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{F_2 \theta_y}{a} \quad (1)$$

ここで、 $a$  は光源像の高さである。

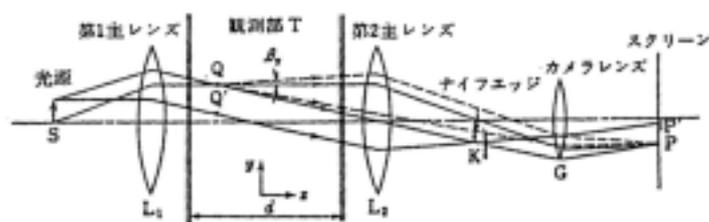


図2 シュレーリン法の基本構成

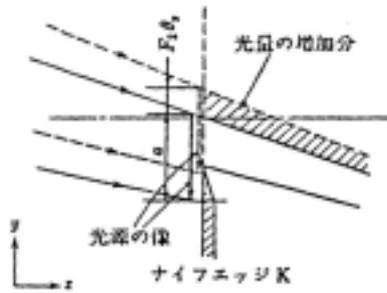


図3 ナイフエッジ部詳細

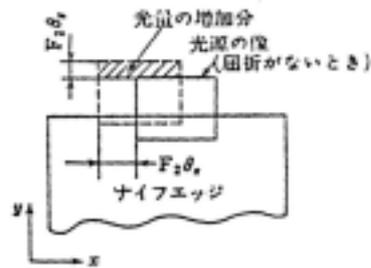


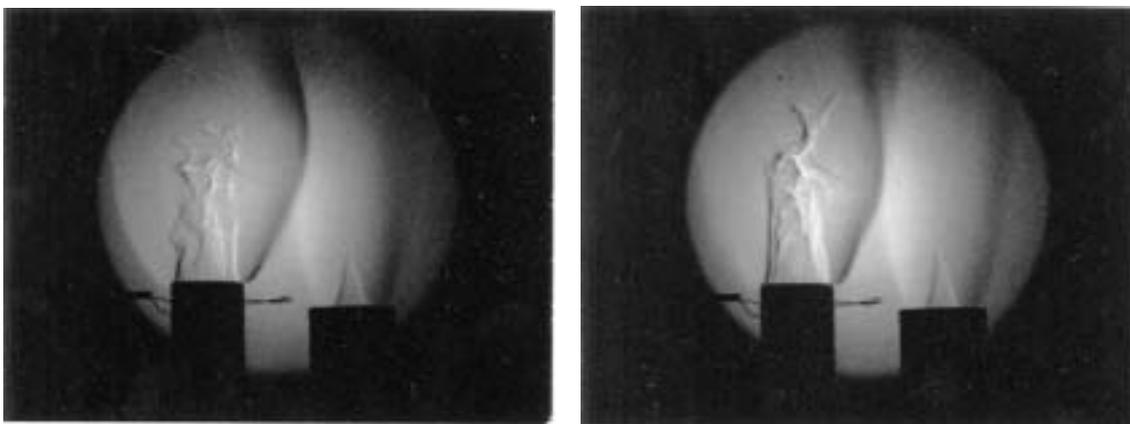
図4 ナイフエッジと光量

図4からもわかるように、x-y 面内の二次元的流れに対しては、ナイフエッジに平行な方向の光線の像の動きは光度に影響がなく直角な方向の動きのみが式(1)で示す光度の変化を与える。

今回、この実験で使用するシュリーレン装置は光源としてキセノンフラッシュランプを使用する。この光源の発行時間は  $20 \mu\text{s}$  である。

## (2) 撮影写真

シュリーレン装置で得られた2枚のシュリーレン写真を図5に示す。各写真内、左の火炎が乱流火炎、右の火炎が層流火炎を写している。



(a)

(b)

図5 シュリーレン写真

## 4.3 目視観察およびシュリーレン写真の観察における考察

4.1節での目視観察で予想した通り、図5の2枚の写真から層流火炎は定常、乱流火炎は非定常であることがわかる。また、乱流火炎は時間変化で火炎の高さも変化していることがわかる。

乱流火炎は火炎の流れが直流の直角方向に不規則な変動をする速度成分を持ち(火炎の乱れ)これに起因して燃焼速度が層流の場合に比べて著しく増加するのが特徴である。流れが層流から乱流に変わると、火炎の性質が大きく変化し、火炎の厚みが増すとともに、予混合燃焼では火炎伝播速度が加速され、拡散燃焼では火炎の単位面積当たりの燃焼率が増大する。そのため、ブンゼンバーナーで流速を上げるとゴォという燃焼音がして火炎が白みを帯びて、円錐状からブラシ状に変わるのは、層流燃焼から乱流燃焼への遷移が生じたためである。

図6は、天然ガス-空気のブンゼン火炎における温度測定の実例である。平均温度変動  $\bar{T}$  (温度変動分の2乗平均値)は、火炎の各断面にわたって火炎帯の中央で最高値を示し、火炎帯の外側では零または最小値を取る。さらに遠ざかると平均温度  $\bar{T}$  が減少するのは逆に、 $\bar{T}$ は再び大きくなる。また下流に向かって  $\bar{T}$ は徐々に大きくなっている。

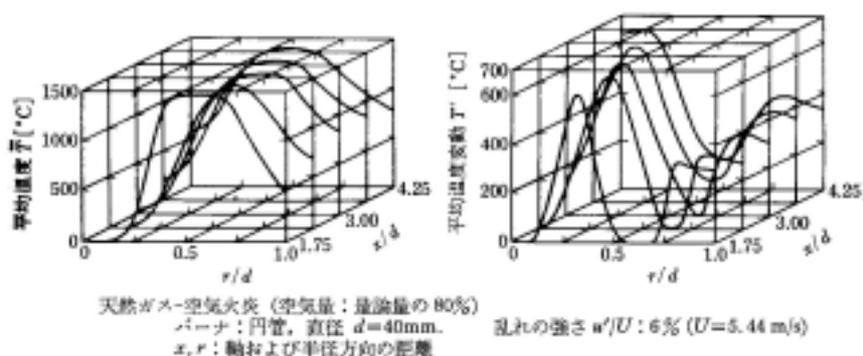


図6 乱流予混合火炎の平均温度、平均温度変動<sup>1)</sup>

これらを参考にして、図7のような乱流予混合火炎の模型が提案されている。火炎下部は全く燃焼ガスにより囲まれているが、火炎上部では外側の大気との混合影響が火炎内部にまで及び現象が複雑になっている。

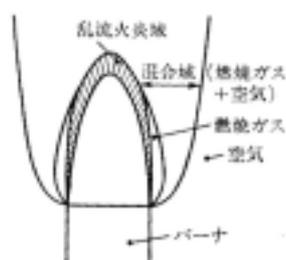


図7 乱流予混合火炎の模型図<sup>1)</sup>

さて、メタンガスやプロパンガスを燃焼させると炎は青色となる。

炎は火炎中の化学反応により直接電子的に励起された状態の原子や分子が生じ、それがふく射を出す場合がある。この現象は化学発光と呼ばれ、炭化水素火炎の反応領域に現れる

C<sub>2</sub> や CH の可視部のふく射、OH の近紫外におけるふく射などが代表的な例である。いずれも明瞭な帯構造をもつ反応領域に特有なふく射であり、このうち C<sub>2</sub> ふく射はスワン帯と呼ばれる 5165 に帯頭をもつものが最も強く、また CH ふく射は 4315 と 3872 に帯頭をもった 2 つの顕著な帯系から成り立っている。両者とも各帯は短波長側でぼけるが、炭化水素火炎の内炎が青色や青緑色に見えるのは、これらのふく射のためで、ふつつ燃料過剰の混合気では C<sub>2</sub> ふく射が支配的になるため緑が濃くなり、空気過剰で酸素が増すにつれて CH ふく射の青が強くなってくる。一方、OH ふく射もいくつかの帯系をもつが、最も強いのは 3064 と 2811 に帯頭をもつもので、これらは C<sub>2</sub> ふく射や CH ふく射とは違い長波長側にぼけている。このふく射は波長領域が紫外に属するため火炎の色に影響を与えない。

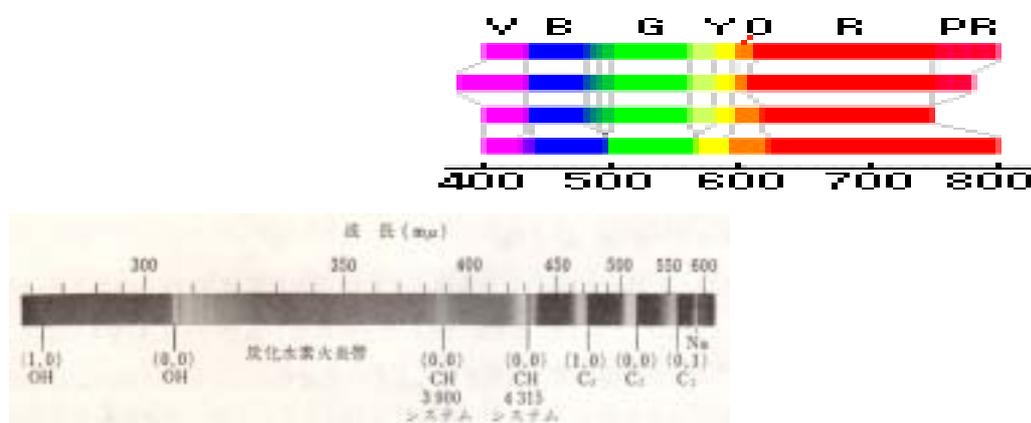


図8 光の波長とブンゼン予混合火炎の可視・紫外ふく射<sup>2)</sup>

図8に前述の火炎のふく射と波長のグラフ図を示し、参考までに色と波長のグラフ図も示す。CH ふく射は 4315 = 431.2 nm と 3900 = 390 nm に帯頭をもつが、波長が 400 nm 以下では紫外光であるので可視光としては 430 nm の波長のみである。C<sub>2</sub> ふく射がどの程度であったかは分からないが、実験で観測したメタンの火炎もプロパンの火炎も 500 nm 前後の波長であることが観察結果（火炎の色の観察）より確認できる。

メタンの火炎に比べプロパンの火炎の方が炎が緑がかった見えしたのは、メタンとプロパンの炭素数の違いによるためであろう。炭素数が多いほど C<sub>2</sub> ふく射が支配的になるため緑が濃くなると考えられる。

余談だが、アメリカン・モータースポーツの CART や Indy で燃料に引火した車両が炎上した際に炎が見えないのは、使用している燃料のメタノールが炭素数の少ない物質であるため、燃焼の際のふく射される波長が可視領域ギリギリであること。そして、屋外や明るい部屋など白色光下では短波長光が吸収されてしまうことが原因であろう。

#### 4.4 熱電対による火炎温度分布の測定

熱電対によって層流バーナー火炎の温度分布を測定する。4.1, 4.2で観察した通り、層流火炎は定常でほぼ軸対称と考えられるので、中心を通る断面内の温度分布を測定する。得られた温度分布データからバーナー火炎の温度分布を描く。

今回測定するのは、図9に示すように、バーナー口より高さ4.0mmでの火炎温度分布と火炎のトップ(バーナー口より高さ10.0mm)の2ヶ所である。バーナーの中心点から12mmの位置から5mmの位置までは1mm刻みで、5mmから中心点までは0.5mm刻みで温度を測定していく。

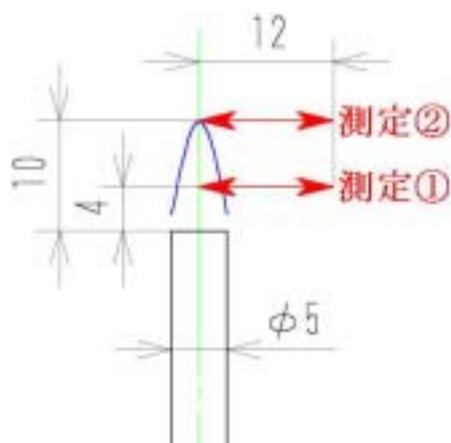


図9 温度分布の測定位置

##### (1) 熱電対の原理

図10のように、それぞれ均質で、相互に性質を異にする2種類の金属AとBとを接合し、両接合点間に温度差を与えると、この回路内にゼーベック効果によって一定の方向に電流が流れる。このとき生ずる起電力  $E$  [mV] の大きさは、金属AとBの種類と接合点間の温度差 ( $T_2 - T_1$ ) のみによって決まる。逆に、発生した電圧  $E$  [mV] を計測すれば、接合点間の温度差を知ることができる。これが、「熱電対」の計測原理である。

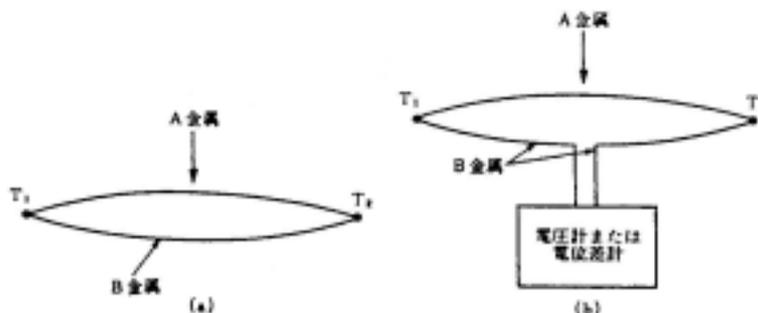


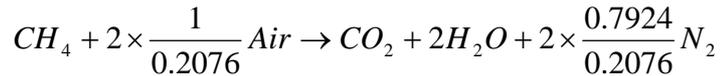
図10 熱電対の構成図

(2) 燃焼温度の概略値

はじめに、今回使用する燃料であるメタンガス ( $\text{CH}_4$ ) を燃焼させた際の理論上の燃焼温度の概略値を求めてみることにする。

まず、理論燃焼温度  $T_{th}$  を求める。

燃焼の反応式は、



また、燃焼ガス中  $\text{H}_2\text{O}$  は水蒸気の状態にあるので、 $\text{CH}_4$  の反応熱は低発熱量を用いる。表 1 (P.10) より  $\text{CH}_4$  の低発熱量は  $H_l = 802.3 \text{ MJ/kmol}$  である。今、 $T_{th}$  が、2200K と 2400K の間にあると仮定して、それぞれの温度における燃焼ガスの各成分の平均比熱を表 2 より読み取る。ただし、常温を 298K とする。

したがって、2200K における燃焼ガスの全エンタルピー変化は、

$$\left( 1 \times 0.05446 + 2 \times 0.04366 + 2 \times \frac{0.7924}{0.2076} \times 0.03332 \right) \times (2200 - 298) = 753.5 \text{ [MJ/kmol]}$$

同様に、2400K における燃焼ガスの全エンタルピー変化は、

$$\left( 1 \times 0.05509 + 2 \times 0.04454 + 2 \times \frac{0.7924}{0.2076} \times 0.03361 \right) \times (2400 - 298) = 842.4 \text{ [MJ/kmol]}$$

よって、 $2200 < T_{th} < 2400 \text{ [K]}$  であることがわかった。したがって、理論燃焼温度は直線内挿より、

$$T_{th} = 2200 + \frac{802.3 - 753.5}{842.4 - 753.5} \times (2400 - 2200) = 2310 \text{ [K]}$$

と求められる。

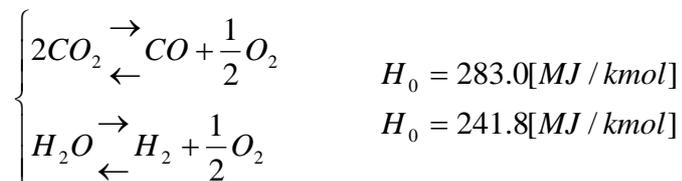
表1 気体燃料の発熱量<sup>3)</sup>

燃料名	分子式	状態	標準生成熱*		高発熱量*		低発熱量*		沸点** [°C]
			[MJ/ kmol]	[MJ/ kg]	[MJ/ kmol]	[MJ/ kg]	[MJ/ kmol]	[MJ/ kg]	
水素	H <sub>2</sub>	気体	0.000	0.000	285.8	141.8	241.8	119.9	-252.7
グラファイト	C	固体	0.000	0.000	393.5	32.76	393.5	32.76	
イオウ	S	〃	0.000	0.000	296.8	9.258	296.8	9.258	
一酸化炭素	CO	気体	-110.5	-3.946	283.0	10.10	283.0	10.10	-192
メタン	CH <sub>4</sub>	〃	-74.84	-4.665	890.3	55.51	802.3	50.01	-161.6
エタン	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	〃	-84.66	-2.816	1559	51.87	1428	47.48	-88.9
プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	〃	-103.8	-2.355	2220	50.35	2043	46.35	-42.1

表2 平均定圧比熱 ( 1 atm ) [MJ/kmol · K]<sup>3)</sup>

T [K]	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
298	.02914	.03713	.02937	.02884	.03358	.02912	.03987
400	.02924	.03935	.02973	.02904	.03385	.02914	.04170
600	.02963	.04277	.03062	.02930	.03476	.02947	.04486
800	.03025	.04546	.03156	.02929	.03584	.02999	.04725
1000	.03090	.04760	.03235	.02947	.03702	.03057	.04905
1200	.03153	.04932	.03300	.02971	.03823	.03117	.05041
1400	.03207	.05074	.03355	.03000	.03943	.03171	.05148
1600	.03255	.05191	.03401	.03036	.04059	.03219	.05233
1800	.03297	.05289	.03441	.03073	.04169	.03261	.05303
2000	.03334	.05373	.03479	.03110	.04271	.03299	.05362
2200	.03366	.05446	.03513	.03147	.04366	.03332	.05412
2400	.03394	.05509	.03544	.03184	.04454	.03361	.05456
2600	.03420	.05564	.03574	.03219	.04534	.03388	.05494
2800	.03442	.05614	.03603	.03252	.04608	.03411	.05528
3000	.03462	.05658	.03631	.03284	.04677	.03432	.05559
3200	.03481	.05697	.03657	.03315	.04740	.03452	.05586
3400	.03497	.05734	.03683	.03344	.04799	.03469	.05612

しかし、燃焼温度が高温になると（1400 以上）、燃焼生成物中の安定分子；CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>Oの一部はそれぞれ CO および O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> および O<sub>2</sub> に熱解離し始める。



解離反応(右向き反応)はいずれも吸熱を伴うので、高温になるほど解離度は大きくなり、それに応じて燃焼温度を低下させる方向に働く。このように、完全な断熱系で燃焼反応が起こり、解離が平衡に達した状態で到達しうる燃焼温度を断熱平衡燃焼温度といい T<sub>eq</sub> で記す。断熱平衡燃焼温度は、理論燃焼温度よりも低くなるのが一般的であるが、燃焼ガスの温度が冷却すると逆反応が起こり発熱を起こす。したがって燃焼全過程では発熱量は保存され、損失はない。

解離前のモル数に対する解離したモル数の割合を解離度 とする。表3に の例を示す。

表3 解離度 [%]<sup>3)</sup>

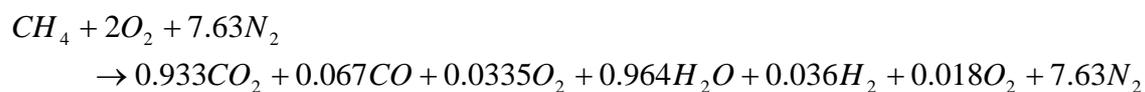
T [K]	CO <sub>2</sub> の 分 圧				H <sub>2</sub> O の 分 圧			
	0.03	0.05	0.10	0.20	0.03	0.05	0.10	0.20
1600	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1800	1.1	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
2000	3.7	3.2	2.5	2.0	1.4	1.2	0.9	0.7
2200	9.9	8.4	6.7	5.4	3.4	2.9	2.3	1.8
2400	20.9	18.1	14.7	11.9	7.2	6.1	4.9	3.9
2600	36.6	32.2	26.9	22.3	13.2	11.3	9.1	7.3
2800	54.0	48.9	42.2	35.8	21.5	18.6	15.2	12.3
3000	69.4	64.6	57.7	50.7	31.7	27.8	23.0	18.9
3200	80.6	76.8	70.9	64.3	43.0	38.3	32.3	27.0
3400	87.9	85.1	80.6	75.2	54.1	48.9	42.2	35.9

燃焼反応式の CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O の分圧は、

$$P_{CO_2} = \frac{1}{1+2+7.63} = 0.0941 \text{ atm}, \quad P_{H_2O} = \frac{2}{1+2+7.63} = 0.188 \text{ atm}$$

燃焼温度を 2200K で仮定すると、表3より、CO<sub>2</sub> の 6.7%、H<sub>2</sub>O の 1.8%と求められる。すなわちメタン 1 kmol あたり CO<sub>2</sub> は 0.067kmol、H<sub>2</sub>O は 0.036kmol 解離する。

したがって燃焼反応式は、



常温における CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub> の低発熱量は表 1 ( P.10 ) より、

CH <sub>4</sub> の低発熱量	802.3 MJ/kmol
CO の低発熱量	283.0 MJ/kmol
H <sub>2</sub> の低発熱量	241.8 MJ/kmol

よって 2200K における反応熱は、

$$802.3 - 0.067 \times 283.0 - 0.036 \times 241.8 = 774.6 \quad [\text{MJ/kmol}]$$

また、表 2 ( P.10 ) の平均比熱を用いてエンタルピー変化を求めると、

$$\begin{aligned} & (0.933 \times 0.05446 + 0.067 \times 0.03366 + 0.0335 \times 0.03513 + 1.964 \times 0.04366 \\ & + 0.036 \times 0.03147 + 0.018 \times 0.03513 + 7.63 \times 0.03332) \times (2200 - 298) \\ & = 753.2 \quad [\text{MJ/kmol}] \end{aligned}$$

エンタルピー変化量より反応熱の方が大きいので、今度は燃焼温度を 2400K と仮定して再度計算をする。

反応熱は、

$$802.3 - 0.147 \times 283.0 + 0.078 \times 241.8 = 741.8 \quad [\text{MJ/kmol}]$$

エンタルピー変化は、

$$\begin{aligned} & (0.853 \times 0.05509 + 0.147 \times 0.03394 + 0.0735 \times 0.03544 + 1.922 \times 0.04454 \\ & + 0.078 \times 0.03184 + 0.039 \times 0.03544 + 7.63 \times 0.03361) \times (2400 - 298) \\ & = 841.9 \quad [\text{MJ/kmol}] \end{aligned}$$

	2200 K	2400 K
反応熱	774.6 MJ/kmol	741.8 MJ/kmol
エンタルピー変化	753.2 MJ/kmol	841.9 MJ/kmol

したがって、断熱平衡燃焼温度は両者の温度の間に存在する。直線補間によって求めると、2つの温度での反応熱を結ぶ直線と、2つのエンタルピー変化を結ぶ直線の交点が求める温度となるので、

$$T_{eq} = 2200 + \frac{774.6 - 753.2}{(841.9 - 753.2) - (741.8 - 774.6)} \times (2400 - 2200) = 2235 \quad [\text{K}]$$

よって、断熱平衡燃焼温度は 2235 K ( 1962 ) である。

さらに、実際の燃焼温度ではバーナーでの管内損失や熱伝導、燃焼の不完全さなどの影響により断熱燃焼温度よりさらに低い温度を示すこととなる。逆を言えば、理論上得られる最高温度が、この今求めた温度となる。

### (3) 使用する熱電対金属の検討

次に、(1) で得られた温度をもとに熱電対での温度測定に際して、使用する金属の選定をしなければならない。表4に一般的に火炎の温度測定に用いられる熱電対金属の組み合わせを示す。

表4をみると Pt-Rh-Pt 熱電対では、1600 までしか使用できないことになっているが、炎の温度が 1800 としても、電流補償をしなければ光や熱の放射によってエネルギーが失われるため、熱電対の温度は 1600 以下にとまる。こうして熱電対温度を求めた上で Kaskan の補正法を用いることによって正しい温度を知ることができる。

したがって今回の実験では、白金 白金ロジウム熱電対 (直径 50  $\mu\text{m}$ ) を用い、基準接点 (一方の端) を水の凝固点温度 (0 ) に保つ。そして、もう一方の接合点を検査領域に設置し、そのときの電圧を読み取り、その点における温度を測定する。

表4 熱電対金属と最高温度<sup>4)</sup>

熱電対金属	使用最高温 (°C)	最高温 e. m. f. (mV)	注意事項
Pt 87-Rh 13-Pt	1600	18.736	水蒸気、金属蒸気を避ける
Pt 90-Rh 10-Pt	1600	16.791	〃
Chromel-Alumel	1200	48.828	亜硫酸ガス、酸化水素を避ける
Ir-Ir 60-Rh 40	2100	—	非常に脆い、1100°C 以下で用いる
W 95-Re 5*-W 74-Re 26	3000	—	酸性のガスを選ける

\* タングステン 95%, レニウム 5%

### (4) 温度の測定方法

Pt-Pt-Rh13 熱電対の一方の接合点を基準接点とし水の凝固点温度 (0 ) に入れ、もう一方に端で炎の温度を測定する。測定位置はバーナー口より高さ 4.0mm の位置とトップ (バーナー口より高さ 10.0mm) の位置の 2ヶ所である。バーナーの中心点から 12mm の位置から 5 mm の位置までは 1 mm 刻みで、5 mm から中心点までは 0.5mm 刻みで測定していく。熱電対によって生じた電圧をレコーダーで読み取り記録する。熱電対の起電力と温度に関係を表5 (P.14) に示す。表5を用いて温度を決定するが、表中の値の間に求めたい値がある際は、直線補間によって計算する。

ここで注意する点は、前述の通り、炎の温度を測定する際に熱電対の探針が熱放射するため、測定される温度は炎の温度ではなく熱電対の探針の温度である。

表5 白金 白金ロジウム 13%熱電対の基準熱起電力

温度 [°C]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1110	1200	1300	1400	1500	1600	1700
0	0.9000	0.6452	1.4643	2.2939	3.3974	4.4564	5.5635	6.7172	7.9180	9.1657	10.458	11.792	13.158	14.549	15.952	17.353	18.736	20.081
	541	754	888	974	1036	1086	1133	1180	1227	1273	132	135	139	140	140	139	136	131
10	0.0541	0.7206	1.5531	2.4913	3.5010	4.5650	5.6768	6.8352	8.0407	9.2930	10.590	11.927	13.297	14.689	16.092	17.492	18.872	20.212
	568	770	898	982	1041	1090	1137	1184	1231	1277	132	136	138	140	141	139	136	131
20	0.1109	0.7976	1.6429	2.5895	3.6051	4.6740	5.7905	6.9536	8.1638	9.4207	10.722	12.063	13.435	14.829	16.233	17.631	19.008	20.343
	592	786	908	988	1048	1096	1142	1189	1236	1282	132	136	139	140	140	139	136	130
30	0.1701	0.8762	1.7337	2.6833	3.7097	4.7836	5.9047	7.0725	8.2874	9.5489	10.854	12.199	13.574	14.969	16.373	17.770	19.144	20.473
	615	800	918	995	1052	1100	1147	1194	1241	1287	133	136	138	140	140	139	136	129
40	0.2316	0.9562	1.8235	2.7878	3.8149	4.8936	6.0194	7.1919	8.4115	9.6776	10.987	12.335	13.712	15.109	16.513	17.909	19.280	20.602
	639	815	926	1001	1057	1105	1151	1198	1245	1290	133	136	139	141	141	139	134	129
50	0.2955	1.0377	1.9181	2.8879	3.9206	5.0041	6.1345	7.3117	8.5360	9.8066	11.120	12.471	13.851	15.250	16.654	18.048	19.414	20.731
	660	829	936	1007	1061	1109	1156	1203	1250	1296	134	137	140	140	138	135	128	127
60	0.3615	1.1206	2.0117	2.9886	4.0267	5.1150	6.2501	7.4320	8.6610	9.9362	11.254	12.608	13.991	15.390	16.794	18.186	19.549	20.859
	680	841	943	1013	1067	1115	1161	1208	1255	1298	134	137	139	141	140	138	133	127
70	0.4295	1.2047	2.1060	3.0899	4.1334	5.2265	6.3662	7.5528	8.7865	10.066	11.388	12.745	14.130	15.531	16.934	18.324	19.682	20.986
	701	854	952	1019	1072	1118	1166	1213	1260	131	134	138	140	140	138	134	134	—
80	0.4996	1.2901	2.2012	3.1918	4.2406	5.3383	6.4828	7.6741	8.9125	10.197	11.522	12.883	14.270	15.671	17.074	18.462	19.816	—
	719	866	960	1025	1078	1124	1170	1217	1263	130	135	138	139	140	139	137	132	—
90	0.5715	1.3267	2.2572	3.2943	4.3482	5.4507	6.5968	7.7958	9.0388	10.327	11.657	13.021	14.409	15.811	17.213	18.599	19.948	—
	737	876	967	1031	1082	1128	1174	1222	1269	131	135	137	140	141	140	137	133	—
100	0.6452	1.4643	2.2939	3.3974	4.4564	5.5635	6.7172	7.9180	9.1657	10.458	11.792	13.158	14.549	15.952	17.353	18.736	20.081	—

(備考) 基準接点の温度は、0°Cとする。

基準接点の温度を 20°C とするときは、上表の数から 0.1109 mV を差し引くものとする。

(5) 測定結果

表6 (P.15)に測定によって得られた起電力と起電力より求めた熱電対の探針の温度を示す。また、得られた温度分布図を高さ 4.0mmを図 11(P.16)に、高さ 10.0mmを図 12(P.16)にそれぞれ示す。

図 11 に示すように、高さ 4.0mmでは火炎中心軸より 3.0~4.0mmの位置で最高温度 (1525 )を示し、それよりも中心に近づくと温度が下がる。図 12 に示す高さ 10.0mm (火炎の頂点)では中心軸より 4.0mmの位置で最高温度 (1600 )を示し、それ以降火炎中心に近づけても温度は変わらず 1600 に近い値を示したままであった。

表6 測定による熱電対の起電力と層流火炎の温度

火炎中心軸からの 距離 [mm]	高さ 4.0mm		高さ 10.0mm	
	起電力E [mV]	温度 T [ ]	起電力E [mV]	温度 T [ ]
12	0.179	31.4	0.260	44.4
11	0.190	33.2	0.290	49.1
10	0.200	34.9	0.580	91.2
9.0	0.700	107.3	1.56	210.8
8.0	1.33	184.6	4.70	522.3
7.0	3.40	400.3	8.80	871.1
6.0	8.70	863.1	13.2	1203
5.0	14.1	1268	17.0	1475
4.5	16.0	1403	18.3	1568
4.0	17.4	1503	18.9	1612
3.5	17.7	1525	19.0	1619
3.0	17.4	1503	19.0	1619
2.5	15.3	1353	18.9	1612
2.0	13.2	1203	18.9	1612
1.5	2.50	310.9	19.0	1619
1.0	1.30	181.1	19.1	1627
0.5	1.40	192.7	19.2	1634
0.0	1.87	244.8	19.1	1627
消火直後	0.290	49.1		

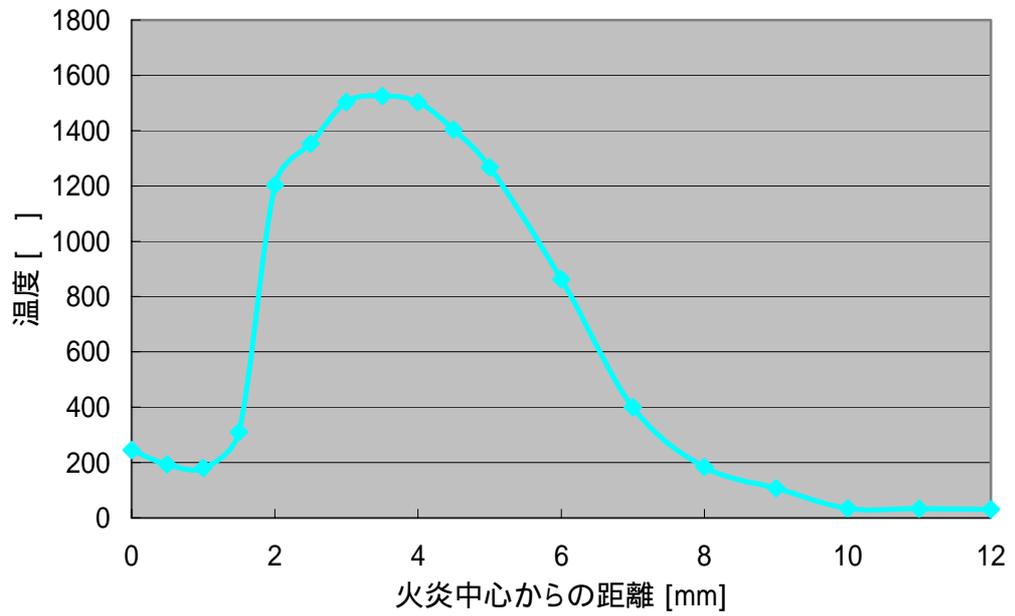


図11 層流火炎の温度分布(高さ 4.0mm)

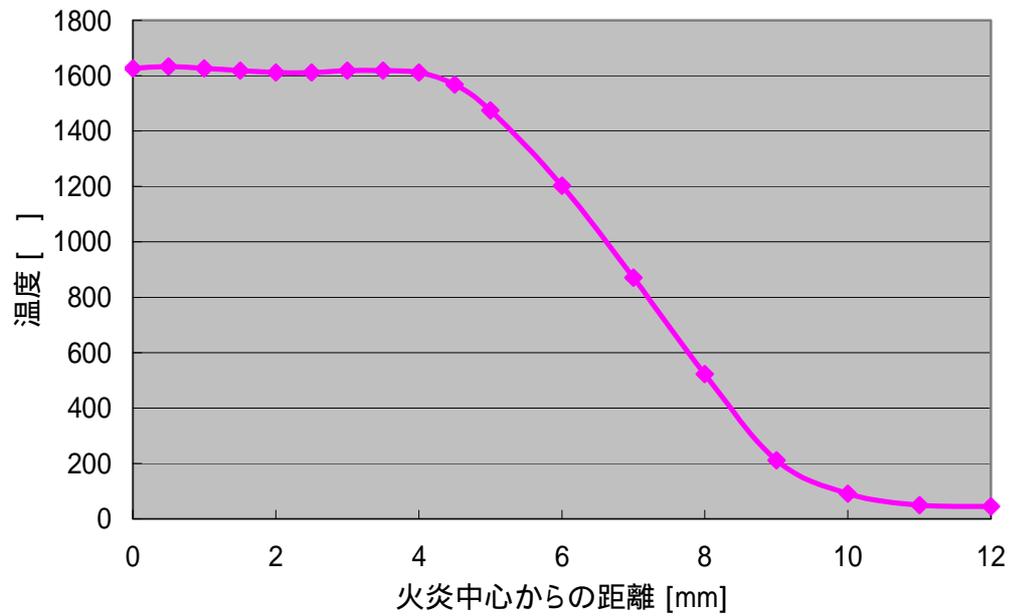


図12 層流火炎の温度分布(高さ 10.0mm)

(6) Kaskan の温度補正

続いて前述の通り、測定で得られた温度を Kaskan の補正公式を用いて、火炎の温度を求める作業を行う。

炎の絶対温度を  $T_f$ 、挿入した探針の絶対温度を  $T$ 、探針直径を  $d$ 、単位長さあたりの表面積を  $S (= \pi d)$  とすると、単位時間に探針が炎から受け取る熱量  $Q$  は単位長さあたり

$$Q = hS(T_f - T) \quad (2)$$

で、 $h$  は熱伝達率である。また、探針からの単位面積あたりの単位時間に放射されるエネルギー  $R$  は Stefan-Boltzmann の法則より

$$R = \sigma T_0^4, \quad \sigma = 5.6699 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

で、 $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数である。また、 $R$  は John Tyndall の実験より

$$R = \varepsilon \sigma T^4$$

なので、式(2)は

$$hS(T_f - T) = \varepsilon \sigma S T^4 \quad (3)$$

となる。ただし、 $\varepsilon$  は熱放射率で固有値であり、今回用いる石英皮膜付白金では  $\varepsilon = 0.22$  である。

いま、 $h$  を Nusselt 数  $Nu$  を用いてあらわしてみる。 $Nu$  は物体の表面を通して熱が出入りする割合を表す無次元数で、流体(炎)の熱伝導率を  $k$  として

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad \Leftrightarrow \quad h = \frac{Nu \cdot d}{k} \quad (4)$$

で示される。また、 $Nu$  とレイノルズ数  $Re$  には

$$Nu = 0.8(Re)^{0.25} \quad (5)$$

の関係がある。ここで、レイノルズ数は、

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu} \quad (U \text{ は流速、 } \nu \text{ は動粘度}) \quad (6)$$

である。

以上、式(4), (5), (6)を式(3)に代入すると、

$$T_f = T + \frac{\varepsilon \sigma \cdot T^4 d}{0.8k} \left( \frac{\nu}{Ud} \right)^{0.25} \quad [\text{K}] \quad (7)$$

これが Kaskan の導いた補正式である。これを適応する際、気体の動粘度  $\nu$ 、熱伝導率  $k$  は表7 (P.18)より読み取り、表中の値の間に求めたい値がある際は、直線補間によって計算する。

ここで問題となるのが、燃焼空気の動粘度と熱伝導率の取り扱いであるが、燃焼空気中に含む乾燥空気の割合が多いこと、燃焼生成物質が気体であるため乾燥空気と粘度や熱伝導率に大差がないこと、などから燃焼空気も乾燥空気と近似して取り扱うものとする。

表7 乾燥空気の性質<sup>4)</sup>

温度 [K]	密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	動粘度 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	比熱 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	熱伝導度 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
		$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$		$\times 10^{-1}$
100	3.5985	7.060	1.962	1.028	9.220
150	2.3673	10.38	4.385	1.011	13.75
200	1.7690	13.36	7.552	1.006	18.10
250	1.4119	16.06	11.37	1.003	22.26
263	1.3421	16.70	12.44	1.003	23.28
273	1.2930	17.20	13.30	1.004	24.07
283	1.2473	17.69	14.18	1.004	24.86
293	1.2047	18.17	15.08	1.004	25.63
300	1.1766	18.53	15.75	1.005	26.14
303	1.1650	18.64	16.00	1.005	26.37
313	1.1277	19.11	16.95	1.005	27.09
323	1.0928	19.57	17.91	1.006	27.80
333	1.0600	20.02	18.89	1.007	28.51
343	1.0291	20.47	19.89	1.008	29.21
350	1.0085	20.81	20.63	1.008	29.70
353	1.0000	20.91	20.91	1.008	29.89
363	0.9724	21.34	21.95	1.009	30.58
373	0.9463	21.77	23.01	1.010	31.26
400	0.8825	22.94	26.00	1.013	33.05
450	0.7844	24.93	31.78	1.020	36.33
500	0.7060	26.82	37.99	1.029	39.51
550	0.6418	28.60	44.56	1.039	42.60
600	0.5883	30.30	51.50	1.051	45.60
650	0.5431	31.93	58.80	1.063	48.40
700	0.5043	33.49	66.41	1.075	51.30
750	0.4706	34.98	74.32	1.087	54.10
800	0.4412	36.43	82.56	1.099	56.90
850	0.4153	37.83	91.10	1.110	59.70
900	0.3922	39.18	99.90	1.121	62.50
950	0.3716	40.49	109.0	1.131	64.90
1000	0.3530	41.77	118.3	1.141	67.20
1100	0.3209	44.4	138	1.160	73.2
1200	0.2942	46.9	159	1.177	78.2
1300	0.2715	49.3	182	1.195	83.7
1400	0.2521	51.7	205	1.212	89.1
1500	0.2353	54.0	229	1.230	94.6
1600	0.2206	56.3	255	1.248	100
1700	0.2076	58.5	282	1.266	105
1800	0.1961	60.7	310	1.286	111
1900	0.1858	62.9	339	1.307	117
2000	0.1765	65.0	368	1.331	124
2100	0.1681	67.2	404	1.359	131
2200	0.1605	69.3	432	1.392	139
2300	0.1535	71.4	465	1.434	149
2400	0.1471	73.5	500	1.487	161
2500	0.1412	75.7	536	1.556	175

(7) 補正結果

表7 (P.18) を用い、直線補間によって燃焼空気の動粘度  $[\text{m}^2/\text{s}]$  および熱伝導率  $k[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$  を求めたものを表8に示す。

表8 燃焼空気の動粘度と熱伝導係数

火炎中心軸からの 距離 [mm]	高さ 4.0mm			高さ 10.0mm		
	T [K]	$\nu$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $\times 10^{-6}$	k [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] $\times 10^{-3}$	T [K]	$\nu$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $\times 10^{-6}$	k [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] $\times 10^{-3}$
12	304.6	16.15	26.49	317.6	17.39	27.42
11	306.4	16.32	26.61	322.3	17.84	27.75
10	308.1	16.48	26.74	364.4	22.09	30.68
9.0	380.5	23.84	31.76	484.0	36.00	38.49
8.0	457.8	32.74	36.83	795.5	81.81	56.65
7.0	673.5	62.37	49.763	1144	147.3	75.40
6.0	1136	145.6	75.00	1476	223.3	93.28
5.0	1541	239.7	96.81	1748	295.5	107.9
4.5	1676	275.6	103.8	1841	321.9	113.5
4.0	1776	303.3	109.6	1885	334.7	116.1
3.5	1798	309.5	110.9	1892	336.7	116.5
3.0	1776	303.3	109.6	1892	336.7	116.5
2.5	1626	262.1	101.3	1885	334.7	116.1
2.0	1476	223.3	93.28	1885	334.7	116.1
1.5	584.1	49.29	44.65	1892	336.7	116.5
1.0	454.3	32.31	36.60	1900	339.0	117.0
0.5	465.9	33.75	37.34	1907	341.1	117.5
0.0	518.0	40.35	40.62	1900	339.0	117.0

また、流速  $U[\text{m}/\text{s}]$ 、放射率、Stefan-Boltzmann 定数、熱電対探針直径  $d[\text{m}]$  は次の通りである。

$$U = \frac{Q_a + Q_f}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{1.06 \times 10^{-3} + 0.124 \times 10^{-3}}{60 \times \frac{\pi}{4} \times 0.005^2} = 1.01 \text{ [m/s]}$$

(バーナ管直径 :  $D=0.005 \text{ mm}$ )

$$\varepsilon = 0.22$$

$$\sigma = 5.6699 \times 10^{-8} \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$$

$$d = 50 \times 10^{-6} \text{ [m]}$$

したがって、これらを式(7)に代入すると補正された火炎の燃焼温度がえられる。得られた燃焼温度を表9 (P.20) にまとめ、温度分布を高さごとに図13、図14 (P.21) に示す。

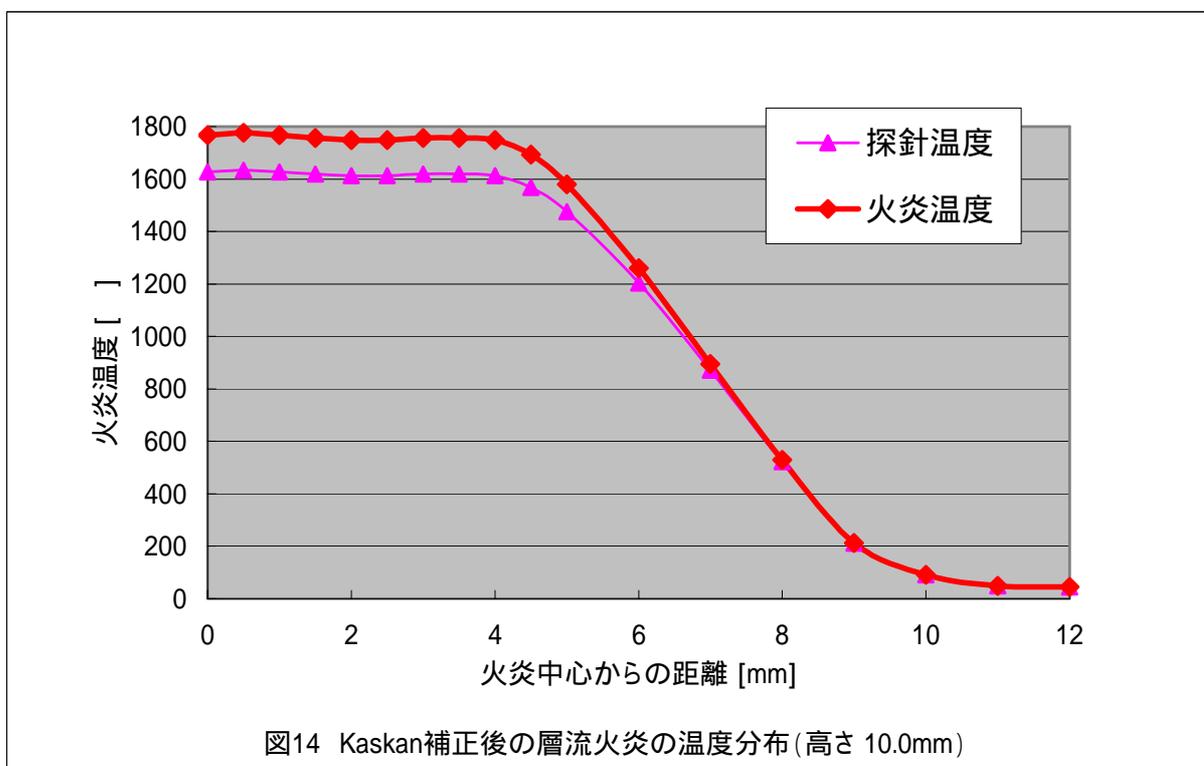
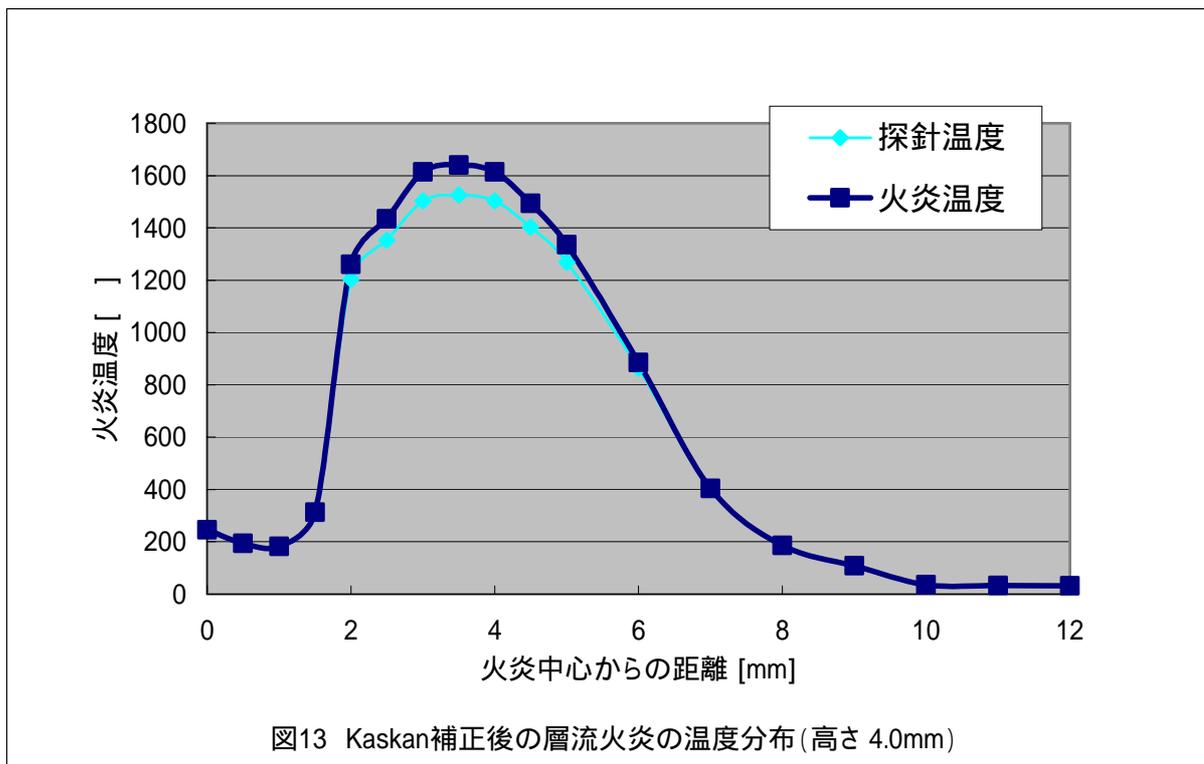
表9 火炎の燃焼温度

火炎中心軸からの 距離 [mm]	高さ 4.0mm		高さ 10.0mm	
	探針の温度 [°C]	火炎の温度 [°C]	探針の温度 [°C]	火炎の温度 [°C]
12	31.4	31.6	44.4	44.6
11	33.2	33.4	49.1	49.3
10	34.9	35.1	91.2	91.6
9.0	107.3	107.7	210.8	211.8
8.0	184.6	185.4	522.3	528.5
7.0	400.3	403.7	871.1	894.3
6.0	863.1	885.7	1203	1261
5.0	1268	1335	1475	1580
4.5	1403	1494	1568	1694
4.0	1503	1614	1612	1748
3.5	1525	1641	1619	1757
3.0	1503	1614	1619	1757
2.5	1353	1434	1612	1748
2.0	1203	1261	1612	1748
1.5	310.9	312.9	1619	1757
1.0	181.1	181.9	1627	1767
0.5	192.7	193.6	1634	1776
0.0	244.8	246.1	1627	1767

(8) 考察

図13、図14(P.21)を見てもわかるとおり高温域ほど測定温度と補正温度の差が大きいことがわかる。600 以下では補正された値との差は1%程度またはそれ未満であるが、1000 を越えたあたりから補正值と測定値の差が大きくなり、1600 では8.5%程度にまでなるため補正の重要さが伺える。

また温度に関しても、理論計算によって求めた最高温度(断熱平衡燃焼温度)は1962 。それに対し、今回実験で測定して得られた最高温度は1770 前後。理論値よりも実験値が200 ほど低い、これは前述の通り、燃焼の不完全さやバーナーでの管内損失や熱伝導などの影響によりものと思われる。



#### 4.5 予混合燃焼の層流燃焼速度の測定

##### (1) 方法・原理

バーナー火炎では予混合火炎の燃焼速度と流れの速度が釣り合っているため、火炎は静止している。シュリーレン法で得られたバーナー火炎の形状から予混合火炎の燃焼速度を求める。

レーザシュリーレン法によって撮影されたバーナー火炎像は密度が急激に変化する火炎面を表している。この火炎面の流れに対する傾きから火炎面の伝播速度を求める。

いま未燃焼混合気が垂直方向に流速  $U$  で流れているとし、これに対して火炎面が傾き角  $\theta$  で存在している場合を考える。火炎の燃焼速度を  $S_L$  とすると、火炎面に垂直に流入する流速成分と火炎の燃焼速度は釣り合っていないといけないので、次の関係式が成り立つ。

$$S_L = U \sin \theta \quad (8)$$

実験で用いるバーナーにおいて、バーナー出口での速度分布が一様であると仮定すれば、流速  $U$  は次式で表される。

$$U = \frac{Q_{air} + Q_{fuel}}{\frac{\pi}{4} D^2} = 1.01 \text{ [m/s]}$$

ここで、 $Q_{air}$  および  $Q_{fuel}$  はそれぞれ空気流量および燃料流量であり、 $D$  はノズル内径である。

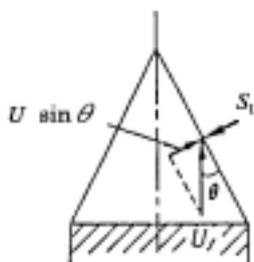


図 15 火炎面における未燃ガス流速と燃焼速度のつりあい

##### (2) 測定

火炎面の傾斜角  $\theta$  は、シュリーレン法で撮影した写真像から読み取る。

図 5 (P.5) のシュリーレン写真の層流火炎より分度器を用いて測定を行う。(a)の写真では  $\theta = 15^\circ$ 、(b)では  $\theta = 10^\circ$  であった。層流火炎は定常であるが、外気の影響(風など)による外乱で非定常状態になったことが考えられる。したがって、今回は(a)、(b)の平均値を取って、 $\theta = 12.5^\circ$  として式(8)に  $U$  と  $\theta$  の値を代入する。これらより燃焼速度は

$$S_L = U \sin \theta = 1.01 \times \sin 12.5 = 0.218 \text{ [m/s]}$$

である。

### (3) 考察・検討

他の文献値との比較を行ってみると、メタンの燃焼速度は当量比  $\phi = 1.1$ 、大気圧、25℃で燃焼速度  $S_L = 0.37 \text{ m/s}$  である。燃焼速度は化学反応速度と直接に関係した量であり、可燃混合気の成分組成と圧力や温度などの状態を決めれば、一義的に定まる燃料の基本的な物性値であるため、文献値と測定値が大きく異なるのには、十分な検討が必要である。

#### 考察 1

まず、管内流れについての考察を行う。

管内流れの速度分布を求めようと思うが、それを行う前に、流体力学的にこの流体が圧縮流れか非圧縮流れかを調べなければならない。表 6 (P.15) より火を消した直後の流体の出口温度は 322 [K]、管への流入温度は室温と同じ 295 [K] である。これらの温度での流体の密度は表 7 (P.18) より 323 [K] で  $\rho = 1.0928 \text{ kg/m}^3$ 、293 [K] で  $\rho = 1.2047 \text{ kg/m}^3$  である。若干の密度差はあるが計算の簡略化のために非圧縮流れを仮定し、密度は両者の平均値を取り  $\rho = 1.1488 \text{ kg/m}^3$  とする。また、管路も実際には図 16 のようにノズルの形をしているがノズル角が  $2^\circ$  と小さいので図 17 のように直管と近似する。



図 16 バーナー管路

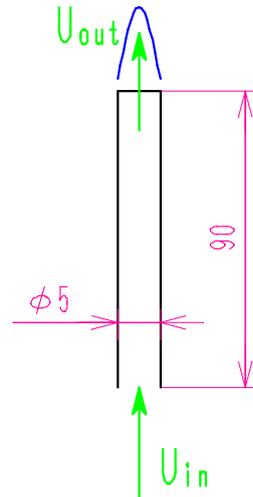


図 17 バーナー管路の近似

二次元・定常・非圧縮性流体の運動方程式は Navier-Stokes の式より

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (9)$$

質量保存則は連続の式より、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

流れが完全発達流と仮定すると、

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

基準線を管の中心軸上にとると、

境界条件は、 $y = \frac{D}{2}$ ,  $-\frac{D}{2}$  で  $u=0$  である。(D は管直径)

これらの条件より速度関数は次のように示すことができる。

$$u = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left( \frac{D^2}{4} - y^2 \right) \quad (12)$$

上式より速度分布は図 18 のような放物線となることが分かり、この流れは管内ポアズイユ流であることが確認できる。

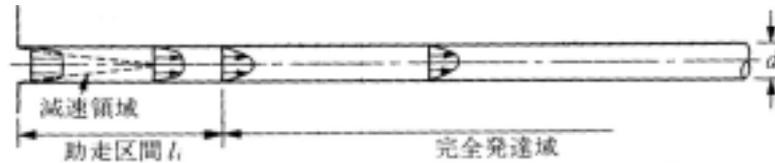


図 18 ポアズイユ流<sup>5)</sup>

また、 $u$  と流量  $Q$  との関係より、

$$\begin{aligned} Q &= \iint_A u dy \cdot y d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{D}{2}} -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left( \frac{D^2}{4} y - y^3 \right) dy \\ &= -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \int_0^{2\pi} \left[ \frac{D^2}{8} y^2 - \frac{1}{4} y^4 \right]_0^{\frac{D}{2}} d\theta \\ &= -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \cdot \frac{D^4}{64} \int_0^{2\pi} d\theta \\ &= -\frac{\pi D^4}{64\mu} \frac{dp}{dx} \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow -\frac{dp}{dx} = 4\pi\mu Q / \left( \frac{\pi}{4} D^2 \right)^2 = \frac{4\pi\mu}{A_p^2} Q \quad (A_p; \text{バーナー管路の断面積})$$

ここで、流量  $Q$  は質量保存則より、 $Q = A_p U = \text{const}$  なので、これと上式より式 (12) は次式のように書き換えることができる。

$$u = 2U \left( 1 - \frac{\pi}{A_p} y^2 \right) \quad (13)$$

さて、ここまで求めてきたものは、あくまでも流れが完全発達流である場合の条件式である。管内ポアズイコ流では、図 18 にも示してある通り、流れが完全発達するまでにかかる助走距離が必要となる。助走区間  $l_i$  は層流の場合 Bender の式より、

$$l_i = 0.0566 \text{Re} \cdot d \quad (d, \text{管直径、Re, レイノルズ数}) \quad (14)$$

今回の場合、助走距離は式 (14) より、

$$l_i = 0.0566 \times \frac{1.01 \times 0.005}{16.48 \times 10^{-6}} \times 0.005 = 0.0866 \text{ [m]}$$

管路の長さは図 17 (P.23) にも示す様に、 $l = 0.09 \text{ m}$  であるので、 $l_i < l$  よりこの流れは仮定式 (11) を満足し、管路出口では式 (13) に示す放物線状の速度分布となっている。(図 19)

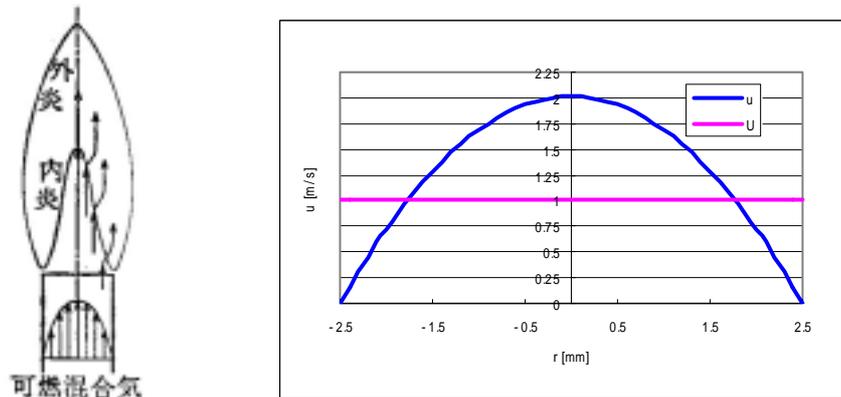


図 19 円錐状予混合火炎の概略図<sup>1)</sup>

繰り返すようだが、燃焼速度は固有値であるため一定である。

しかし、シュリ - レン写真 (p.5 図 5) において、層流火炎のバーナー出口付近で外側にゆがんでいる。これは、壁面粘性条件により壁面付近の流速が中央付近よりも遅くなってしまったため、p.22 式 (8) において  $S_L$  一定で  $U$  が小さくなり  $\sin$  の値が大きくなった、つまり、偏角  $2$  が広角になったためである。

考察2 バーナー火炎面積法

図20に示すように、バーナー火炎法で燃焼速度を測定するためには、火炎面の表面積と傾斜角の測定が必要となる。バーナーより吹き出る混合気の質量と吹き出た直後に初期温度から上昇を始める未燃焼混合気とは質量保存則が成り立つが、シュリーレン像など光学的に得られる火炎面では排気損失や図21に示すような混合気の流出などの影響があるため必ずしも質量保存則は成り立たない。そのため、両火炎面の相違が誤差の要因となってしまう。

$$\text{質量保存則} : \rho_u U_u A_p = \rho_u S_u A_u$$

$$\Leftrightarrow S_u = U_u \frac{A_p}{A_u} = U_u \sin \alpha \quad (15)$$

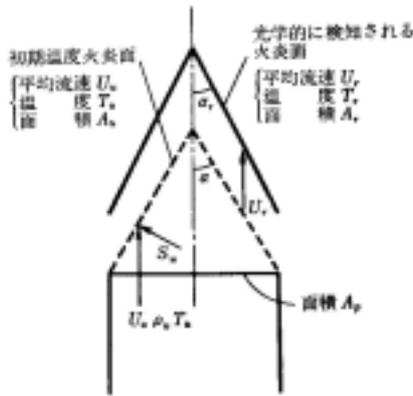


図20 バーナー火炎法の概念図<sup>3)</sup>

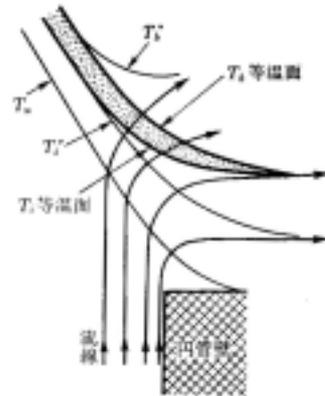


図21 管壁付近のブンゼン火炎<sup>3)</sup>

そこで、円管バーナー面積法で燃焼速度を求めてみる。円管バーナー面積法は、円管バーナーにおいて、図20に示す体積流量 ( $U A_p$ ) と表面  $A_r$  を測定し、燃焼速度が体積流量を  $A_r$  で除して求められる。測定される見かけの燃焼速度  $S_{ur}$  は、

$$S_{ur} = U_u \frac{A_p}{A_r} \quad (16)$$

なので、式(15)より式(16)は、式(17)のように書ける。

$$S_u = \frac{A_r}{A_u} S_{ur} \quad (17)$$

まず、見かけに火炎面表面積  $A_r$  を求める。

図22 (p.27) のようにシュリーレン像で得られた光学的に検知された火炎面を円錐形とすると、表面積  $A_r$  は、

$$A_r = \frac{5\pi}{20\pi} \cdot 100\pi \times 10^{-6} = 7.85 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}$$

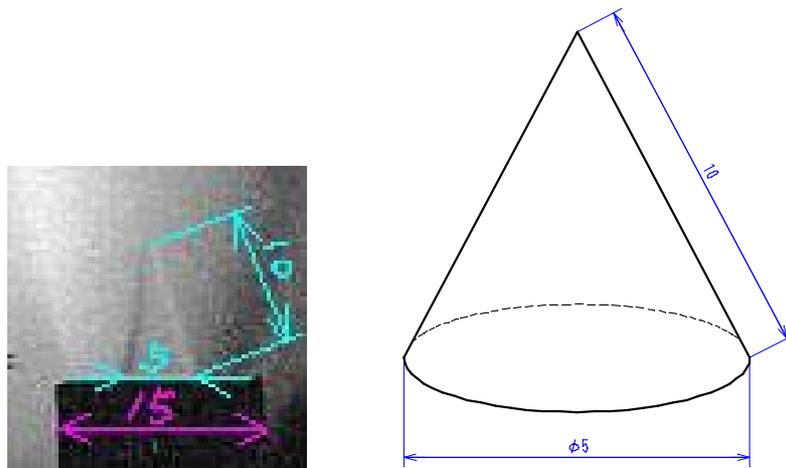


図 22 シュリーレン像の火炎面

また、バーナー円管の面積  $A_p$  は、

$$\text{管路断面積} : A_p = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.005^2 = 1.96 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}$$

したがって、見かけの燃焼速度  $S_{ur}$  は式 (16) より、

$$S_{ur} = U_u \frac{A_p}{A_r} = 1.01 \times \frac{1.96}{7.85} = 0.253 \text{ [m/s]}$$

となり、(2) で得た  $S_L$  の値に近い数値が得られた。この値を用いてシュリーレン写真の偏角を求めると、

$$\theta = \text{Sin}^{-1} \left( \frac{S_{ur}}{U} \right) = 14.6^\circ$$

である。(2) で測定した際は図 5 (p.5)・写真 (a) では  $\theta = 15^\circ$ 、写真 (b) では  $\theta = 10^\circ$  であった。今回、図 22 で使用した写真は写真 (b) であり、(2) では両者の中間値で燃焼速度を得たが、傾斜角  $\theta$  は  $14 \sim 15^\circ$  という値が得られることが分かった。

## 5. まとめ・感想

p.17・4.3(2)で理論計算で求めた断熱燃焼温度は  $T_{eq} = 1962$  [ ]。それに対し p.20・同(7)で求めた測定温度は  $T_{max} = 1776$  [ ]。断熱燃焼温度ではバーナーへの伝熱や燃焼の不完全さなどは考慮していないことを考えると、測定した温度の結果は適当なものではないかと考察する。

また、燃焼速度の測定では実際の燃焼速度を求めることはできなかったが、p.22・4.5(2)で測定した火炎面の傾斜角 および(見かけの)燃焼速度  $S_L$  と円管バーナー面積法で求めた傾斜角 および(見かけの)燃焼速度  $S_{ur}$  が、ほぼ一致したので測定結果には満足している。

実験の感想としては、これまで「炎を観察する」という機会が全くなかったので、じっくり炎を観察できたことは興味深かった。また、この実験では、わりと多くの考察テーマが得られたので調べ学習的な要素も加わり、多くの事を得ることができた。

ただし、実験には付き物の「不確定要素」や「近似する事柄」が多い実験であったので少々とまどいがあった。

### 参考文献

- 1) 小林清志・荒木信幸・牧野敦 共著 燃焼工学 基礎と応用 理工学社
- 2) 疋田強・秋田一雄 共著 燃焼概論 コロナ社
- 3) 架谷昌信・木村淳一 編著 燃焼の基礎と応用 共立出版(株)
- 4) 金原寿郎 気体の燃焼物理 裳華房
- 5) 中林功一・伊藤基之・鬼頭修己 共著 流体力学の基礎(1) コロナ社