

乱れの燃焼状態におよぼす影響

田中義弘*・浜崎和則**・石神重男***

(受理 昭和45年5月31日)

THE EFFECT OF TURBULENCE ON COMBUSTION

Yoshihiro TANAKA, Kazunori HAMASAKI
and Shigeo ISHIGAMI

The ignition delay time and the flame propagation velocity are studied in butane-oxygen mixture with and without turbulence.

The results are obtained as follows:

(1) In the case of no turbulence, the ignition delay time is maximum at a little rich mixture ratio, while in turbulence, the ignition delay time is minimum at the same mixture ratio.

(2) The flame propagation velocity is maximum at a little rich mixture ratio regardless of turbulence.

(3) The turbulent scale and intensity can be represented inclusively by the turbulent velocity.

(4) As the turbulent velocity increases, the ignition delay time decreases and the flame propagation velocity increases.

1. ま え が き

ガス体が燃焼するさいガス中の気流の乱れが燃焼状態を左右することはすでに早くから知られており、特に内燃機関のシリンダ中の燃焼状態との関連について数多くの研究が発表されている¹⁾。このさいエンジンを発火運転して直接実際の燃焼を研究した例²⁾³⁾も多いが、基礎的研究として特定の容器中のガス、あるいはバーナー炎に特定の乱れを与え、その燃焼を研究した例、たとえば角筒形容器内で格子または多孔板を移動して乱れをおこしたばあい、およびブンゼン炎に超音波を与えて乱れをおこしたばあい⁴⁾、等がある。しかしなお不明な点が多く、特に乱れの程度を数量的に表示する試みについての研究は以外に少ない。

本研究はエンジン燃焼室に相当する単軸円筒形燃焼室の中で、断面一ばいの多孔板を急速に移動し、内部ガスに乱れを発生し、これに点火したときの燃焼状態を研究したもので、このさい熱線風速計によつて乱れの程度を整理し、乱れと燃焼との関係を明らかにした。

2. 実験装置および方法

図1(a)に実験装置本体をしめす。1が直柱面にとりつけた鑄鉄製燃焼室本体で、燃焼室は直径100mm、高さ12mm、内容積86.5ccの短軸円筒形で、内部に乱れ発生のための多孔板2を駆動ロッド3で支持してある。4は多孔板駆動用ピストン・シリンダ機構で、電磁弁5から圧縮空気を送入して作動する。点火プラグは直径6mm、2極、間隙0.7mmで、燃焼室直径上的一端に一個とりつけた。図1(b)は点火プラグおよび火炎伝播測定用イオンギャップ配置図である。イオンギャップは間隙0.7mm、印加電圧DC180Vとし、伝播の方向性をもしらべるため点火プラグ位置を通る燃焼室直径線上およびこれと30度の角度方向線上に図のごとく合計10個とりつけた。火炎面がギャップに到達すると回路が通ずる。この変化を増幅器を経てブラウン管オシロスコープに入れ記録する。図2はその電気回路である。火炎伝播を記録するさいオシロのトリガ入力には点火プラグに放電したときのパルスとした。乱れ発生用多孔板は直径98mm、厚さ1mmの黄銅板で板上の孔の配置を図3の9種類とした。点火プラグおよびイオンギャップの場所はこれらと接触しないよう孔をあけたが、その孔の

* 鹿児島大学工学部機械工学第二学教室・助教授

** 鹿児島大学工学部機械工学第二学教室・助手

*** 鹿児島大学工学部機械工学第二学教室・教授

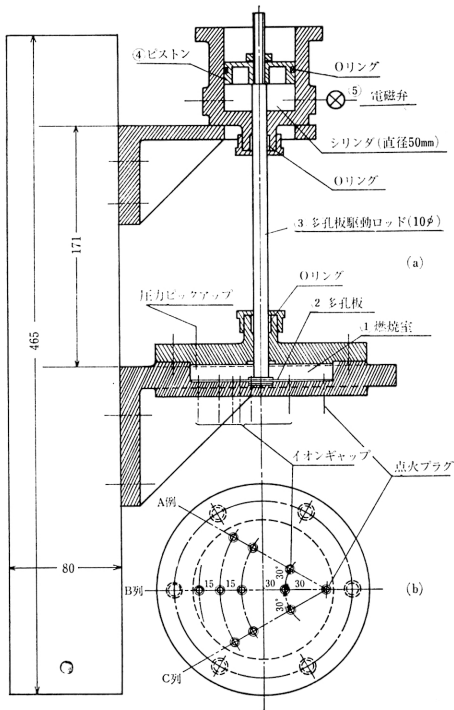


図1 実験装置本体

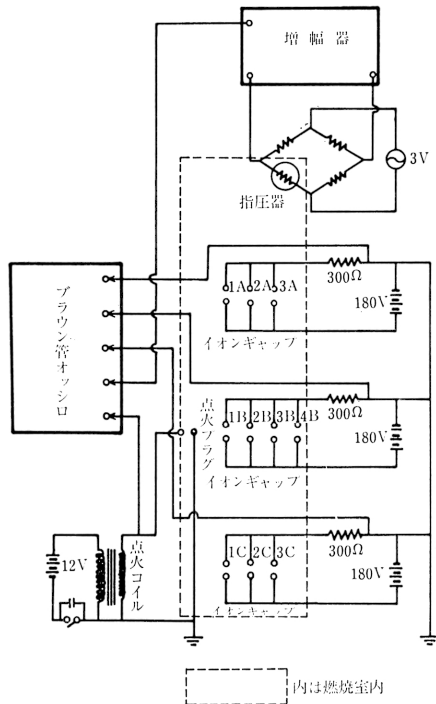
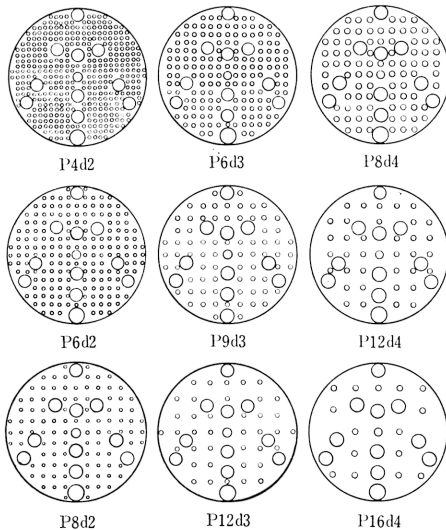


図2 計測回路装置図

大きさおよび配列はすべて同じである。乱れを発生するには多孔板を燃焼室下面から上方に向つて一回急速に移動する。移動速度は本研究では平均 8 m/s 一定とした。乱れの程度の表示のため火花プラグの位置に熱線風速計プローブを挿入し、定温度測定法により電圧変動をとりだしブラウン管オシロスコープに記録し、予め求めた検定曲線によつて速度に換算し、これを“乱れ速度”と名づけた。プローブは直径 5μ 、長さ 1 mm のタングステンメッキ白金線である。乱れ速度の変化は点火しない状態で各乱れ条件ごとに予め求め、燃焼実験のときは同じ条件なら同じ乱れ状態であるとして処理した。乱れ速度測定のおシロ写真のいくつかを図4に示す。乱れは急速に減衰し、最大乱れから静止にいたる時間はわずか 10^{-2} 秒のオーダーであつた。したがつて火花実験のさい乱れ発生後どの時点で点火するかが問題となる。本研究では各乱れ発生条件ごとに乱れ速度最大時点火と $1/2$ 減衰時点火について実験した。前者のシリーズを符号I、後者のそれをIIであらわす。

図3 多孔板
(P: ピッチ, d: 径)

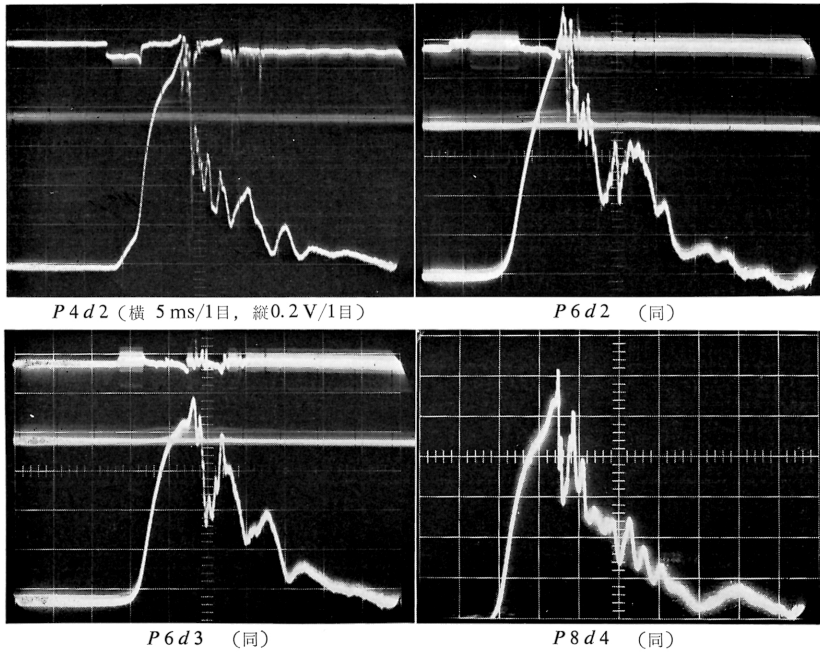


図 4 乱 れ の 変 化

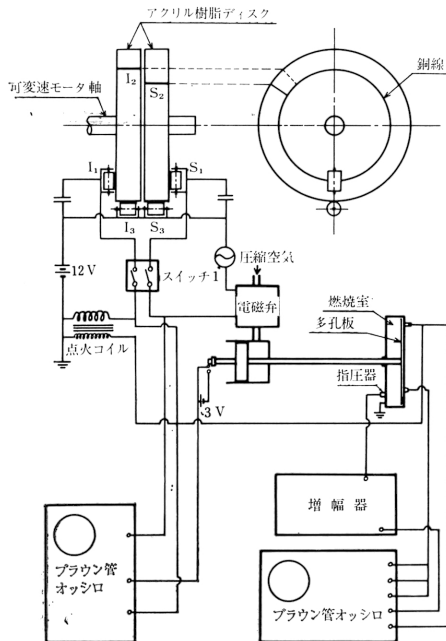


図 5 タイムラグ制御回路

乱れ発生機構駆動のための圧縮空気導入電磁弁の作動時から乱れ速度最大あるいは $1/2$ 減衰となるときまでの間にはある時間がかかる。この時間を図 4 から求め求めておき、燃焼実験のさい電磁弁作動を起点として上記時間後に点火するようにした。このための装置および回路を図 5 にしめす。図上部にしめすように合成樹脂製の二つの円板が可変速モータで駆動される一本の軸上に固定されており、それぞれの周上に電磁弁回路および点火回路の接点 S_2, I_2 があり、両者の位置は所定の時間間隔に相当する角位相だけずらしてある。スイッチ 1 によつて両回路を同時に通ずると $S_1-S_2-S_3$ 回路が通じたとき電磁弁が作動し、その後所定時間後 $I_1-I_2-I_3$ 回路が通じて点火がおこる。設定す

表 1 ブタンガスの性質

分 子 量	式 量	C_4H_{10}
分 子 重	kg/cm ² gauge	58.12
沸 点	°C	2.62
蒸 気 密 度	kg/m ³	-0.5
ガ ス 熱 容	kcal/kg	2.45
発 火 点	°C	11,850
燃 焼 比 熱	60°F { C_p	91
着 火 温 度	°C	0.396
		0.363
		480~540

る時間間隔はブラウン管オシロを見ながらモータの
 変速により正確に合わせることができる。このさいト
 リガ入力は電磁弁作動時のパルスをとつた。燃料とし
 て純度 98% のブタンガス、助燃剤として酸素を使用
 した。実験した混合気ブタン濃度範囲は 9~26% で、
 13% が理論混合比に相当する。ブタンの性質を表 1
 にしめす。ガスは別に用意した内径 82mm, 行程 300
 mm のシリンダ・ピストン機構の容器内に吸入して所
 定の濃度に調合し、のち燃焼室に充填した。燃焼室内
 ガスは実験を通じて大気温度、大気圧とした。実験は
 同一のガス濃度 および 同一の乱れ状態について 10~
 15 回測定をくりかえし、その平均値で整理した。点火
 からつぎの点火まで 4~5 分を要したので燃焼室の初

期温度は毎回ほとんど変わらず、いずれも室温と見るこ
 とができた。以上のほか乱れのないばあいの燃焼につ
 いても実験した。また参考のため点火栓と反対の燃焼
 室直径端に指圧器をとりつけ燃焼室内圧力変化を記録
 した。

3. 実験結果

図 6 は乱れのないとき、図 7 は乱れのあるときのオ
 シロ写真例をしめす。図 8 は乱れのないとき、図 9
 は乱れのあるときの経過時間と火炎伝播距離の係例
 である。図から一般に点火後の経過時間と火炎進行距
 離の関係は点火後ある時間を経て火炎の進行がはじま
 り、進行後 30~60 mm 付近は直線状でさらに終端 75

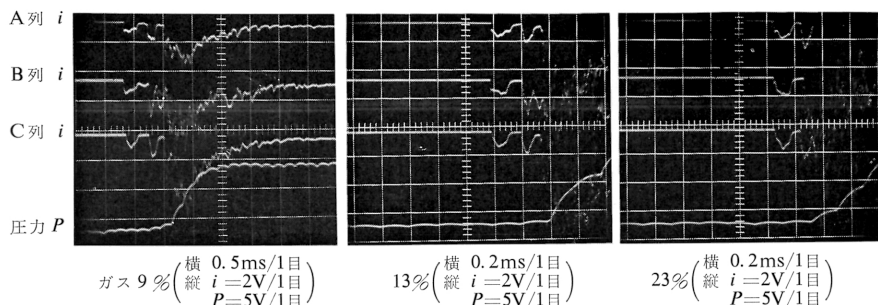


図 6 乱れのないときの火炎伝播

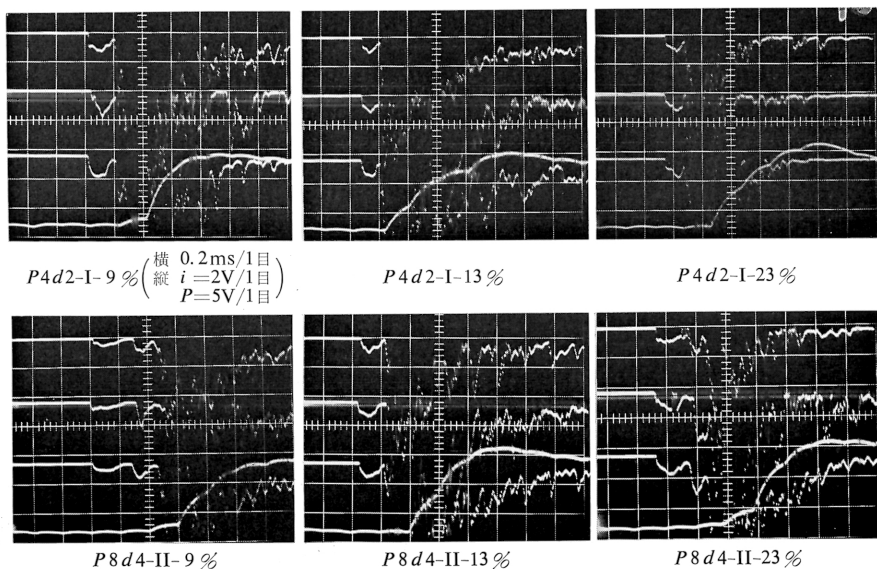


図 7 乱れのあるときの火炎伝播

mm 付近後では曲線となり、その傾きはゆるやかとなる。よつて 30 mm 点から 60 mm 点の間を直線とみなし、その延長が時間軸と交る点を求め、O 点すなわ

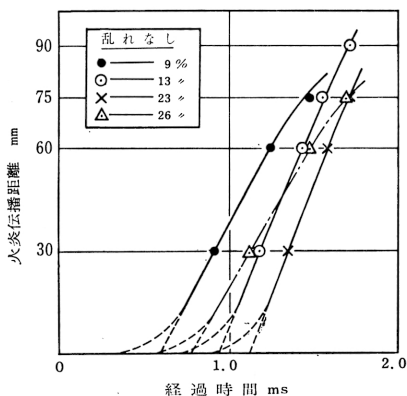


図 8 乱れのないときの火炎伝播

ち点火プラグ作用時からこの点までの時間を“点火おくれ時間”，30～60 mm 間の傾きを“火炎伝播速度”とみることができる。いま v_0 ：乱れのないばあいの火炎伝播速度， v_t ：乱れのあるばあいの火炎伝播速度， t_0 ：乱れのないばあいの点火おくれ時間， t_t ：乱れのあるばあいの点火おくれ時間， V_t ：乱れ速度とし、これ等の値を各燃焼条件ごとに求め一括してしめたのが表 2，表 3，表 4，各多孔板によって発生する乱れ速度を表 5 にしめす。

表 2 乱れのないときの火炎伝播

ガス 濃度 %	経 過 時 間 ms				火炎伝 播速度 v_0 m/s	点 火 遅 延 t_0 ms
	30mm 進行点	60mm 進行点	75mm 進行点	90mm 進行点		
9	0.92	1.25	1.49	—	91	0.59
13	1.19	1.43	1.55	1.72	125	0.94
23	1.36	1.59	1.71	—	130	1.12
26	1.12	1.48	1.70	—	83	0.78

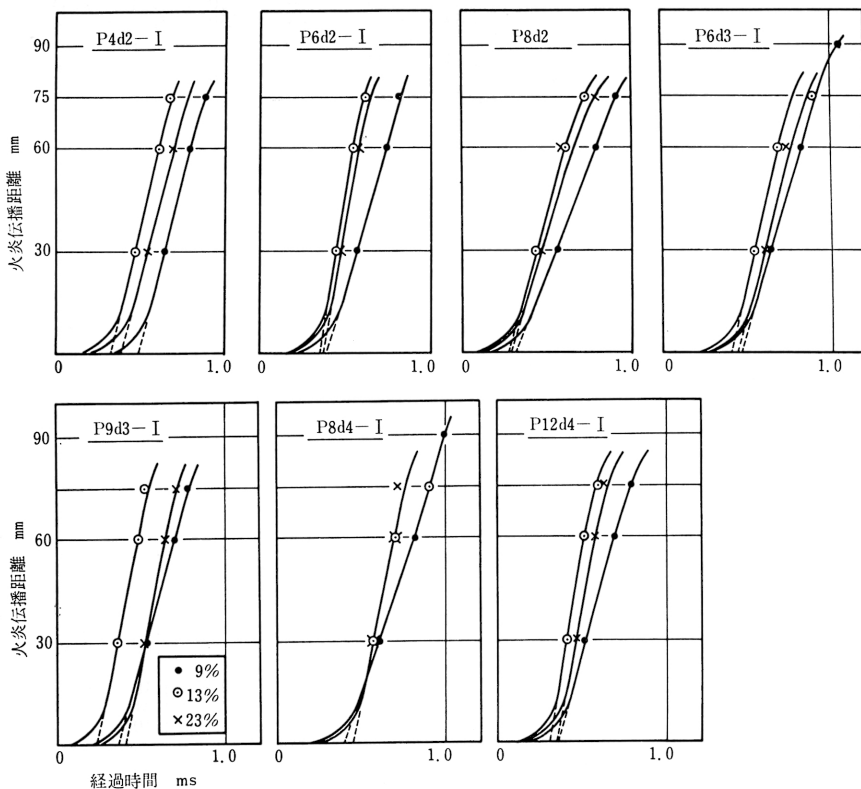


図 9 乱れのあるときの火炎伝播

表 3 最大乱れ点点火のときの火炎伝播

点火条件	多孔板符号	ガス濃度 %	経 過 時 間 ms				火炎伝播速度		点 火 遅 れ	
			30 mm 進行点	60 mm 進行点	75 mm 進行点	90 mm 進行点	v_t m/s	v_t/v_0	t_t ms	t_t/t_0
I	P 4 d 2	9	0.64	0.79	0.88	—	200	2.20	0.50	0.85
		13	0.47	0.61	0.66	—	214	1.71	0.34	0.36
		23	0.55	0.69	—	—	200	1.54	0.40	0.36
	P 6 d 2	9	0.56	0.73	0.80	—	176	1.93	0.38	0.64
		13	0.44	0.54	0.61	—	300	2.40	0.34	0.36
		23	0.46	0.57	—	—	272	2.09	0.36	0.32
	P 8 d 2	9	0.55	0.79	0.90	—	125	1.37	0.33	0.56
		13	0.44	0.60	0.72	—	187	1.50	0.27	0.29
		23	0.46	0.58	0.78	—	150	1.15	0.28	0.25
	P 6 d 3	9	0.63	0.83	0.91	1.05	150	1.65	0.46	0.78
		13	0.54	0.69	0.91	—	200	1.60	0.40	0.43
		23	0.61	0.74	—	—	187	1.44	0.44	0.39
	P 9 d 3	9	0.53	0.69	0.77	—	187	2.05	0.36	0.61
		13	0.35	0.48	0.52	—	230	1.84	0.23	0.24
		23	0.52	0.65	0.71	—	230	1.77	0.40	0.35
	P 8 d 4	9	0.60	0.82	0.89	0.98	126	1.38	0.39	0.66
		13	0.56	0.69	—	—	230	1.84	0.44	0.47
		23	0.56	0.69	0.70	—	230	1.77	0.44	0.39
	P 12 d 4	9	0.51	0.68	0.79	—	176	1.93	0.36	0.61
		13	0.41	0.51	0.58	—	300	2.40	0.30	0.32
		23	0.46	0.57	0.62	—	272	2.09	0.35	0.31

表 4 1/2 減衰点点火のときの火炎伝播

点火条件	多孔板符号	ガス濃度 %	経 過 時 間 ms				火炎伝播速度		点 火 遅 れ	
			30 mm 進行点	60 mm 進行点	75 mm 進行点	90 mm 進行点	v_t m/s	v_t/v_0	t_t ms	t_t/t_0
II	P 4 d 2	9	0.82	1.18	1.34	1.42	83	0.99	0.50	0.85
		13	0.59	0.82	0.90	—	130	1.04	0.36	0.38
		23	0.59	0.83	0.95	—	125	0.96	0.38	0.34
	P 6 d 2	9	0.71	0.96	1.08	1.13	120	1.32	0.46	0.78
		13	0.50	0.73	0.83	0.98	130	1.04	0.28	0.30
		23	0.62	0.81	0.89	—	130	1.00	0.38	0.34
	P 8 d 2	9	0.59	0.82	0.93	1.07	130	1.43	0.36	0.61
		13	0.45	0.60	0.65	—	200	1.60	0.29	0.31
		23	0.50	0.70	0.82	—	150	1.15	0.31	0.28
	P 6 d 3	9	0.80	1.05	1.14	1.24	130	1.43	0.59	1.00
		13	0.64	0.78	0.83	—	214	1.71	0.50	0.53
		23	0.69	0.88	0.98	—	158	1.22	0.50	0.45
	P 9 d 3	9	0.84	1.08	1.25	1.53	125	1.37	0.60	1.02
		13	0.39	0.53	0.71	—	214	1.71	0.26	0.28
		23	0.66	0.80	0.85	—	214	1.66	0.52	0.46
	P 8 d 4	9	0.61	0.89	1.04	1.18	107	1.18	0.36	0.61
		13	0.45	0.62	0.75	—	176	1.41	0.28	0.30
		23	0.54	0.75	0.86	—	143	1.10	0.34	0.30
	P 12 d 4	9	0.66	1.00	1.18	—	88	0.97	0.33	0.56
		13	0.46	0.66	0.81	—	150	1.20	0.26	0.28
		23	0.62	0.76	0.93	—	150	1.15	0.38	0.34

表 5 乱れ速度

乱れ発生条件 (使用多孔板)	I		II	
	最大乱れ速度 (m/s)	1/2 減衰時乱れ 速度 (m/s)	最大乱れ速度 (m/s)	1/2 減衰時乱れ 速度 (m/s)
P4d2	4.30		2.15	
P6d2	5.80		2.90	
P8d2	6.20		3.10	
P6d3	4.45		2.23	
P9d3	8.20		4.10	
P8d4	5.80		2.90	
P12d4	10.60		5.30	

4. 実験結果の検討

1) 乱れのないときの燃焼

燃料濃度の変化に対する火炎伝播速度および点火おくれ時間の変化を 図 10 にしめす。火炎伝播速度は過薄混合気でも過濃混合気でも小さく、理論混合比よりやや濃混合気（約 18 % 点）で最大となる。このことは一般に知られている傾向と同じで、最大速度付近の濃度で現実燃料分子が酸素分子と化合するチャンスが最も多いためである。点火おくれ時間の変化曲線はその形は火炎速度曲線と類似して中凸であるが意味する内容は過薄側でも過濃側でもおくれ時間は少なく、最大火炎伝播速度付近でおくれ時間が最も長いことをしめす。つまりここでは火炎伝播のはじまりはおそく、一度伝播がはじまるとその速度は早い。この原因はつぎのように考えられる。本実験を通じ火花エネルギーは一定としたが、いまその一定エネルギーの作用する空間容積も一定とし、乱れがないからエネルギー伝達は主として熱伝導によると考えると、過薄ガスまたは過濃ガスのときは一定容積中に存在する化合可能な燃料分子、酸素分子の組合わせ数は少なく、（前者は燃料

分子数、後者は酸素分子数が少ないから）したがって一組あたり受けとるエネルギーは大きく、それがため早く火炎伝播状態に移行し、点火おくれは短い、理論混合比あるいはそれよりやや濃い混合気では燃料・酸素の組合わせ数は多く、その一組あたり受けとるエネルギーは少なく、したがって火炎伝播状態になるまでの準備時間は長くかかる。伝播状態に移ると多くの組合わせの準備が完了しているから燃焼は早い。

2) 乱れのあるときの燃焼

i) 火炎伝播速度

ガス濃度に対する火炎伝播速度の変化を 図 11 にしめす。図中に乱れのないばあいも記入した。伝播速度は乱れのないときと同じように過薄ガスでも過濃ガスでも小さく、理論混合比よりやや濃混合気で最大値に達する。その最大値は乱れのないときよりはるかに高く 2.5 倍にも達した。図 12 は乱れ速度 V_t に対する火炎伝播速度 v_f の変化例、図 13 は V_t に対する v_f/v_0 値の変化例をしめす。両図中には最大乱れ時点火（符号 I）および乱れの半減時点火（符号 II）のデータをすべて乱れ速度で整理してプロットした。乱れという現象の再現の困難性や乱れの減衰が急激で点火時期の条件に不同の起り得る可能性が多い等のため測定点のばらつきは大きい、平均的に図中の曲線の傾向と見ることができる。これからガス濃度一定のばあい乱れ条件を変えると火炎伝播速度は乱れ速度の増加とともに増加し、その上昇ははじめ急で、乱れ速度がいちぢるしく大きくなると次第にゆるやかとなるといえる。図 14 は乱れ速度と火炎伝播速度変化率をガス濃度をパラメータとして図示したものである。乱れの影響に

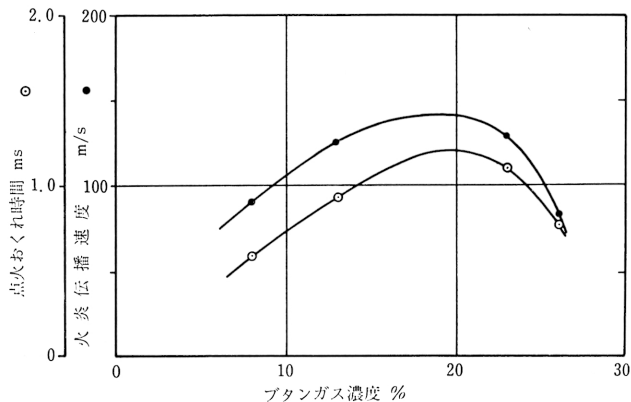


図 10 乱れなしの火炎伝播速度と点火おくれ時間

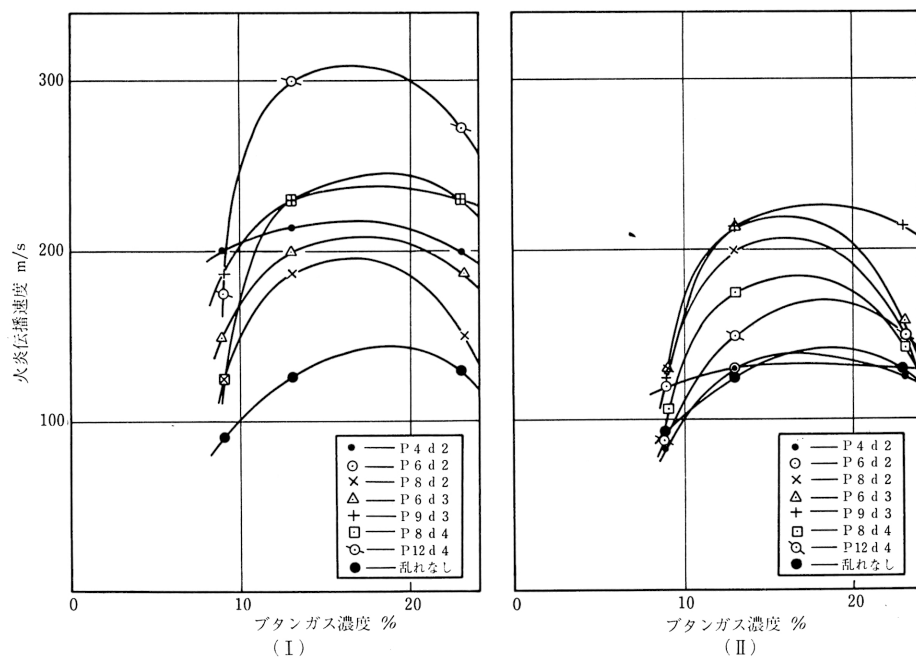


図 11 濃度と火炎伝播速度

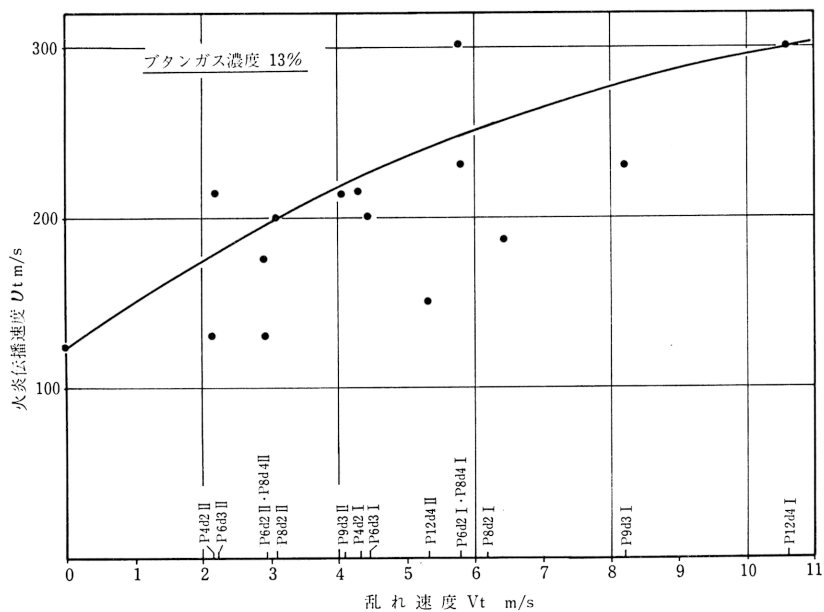


図 12 乱れ速度と火炎伝播速度

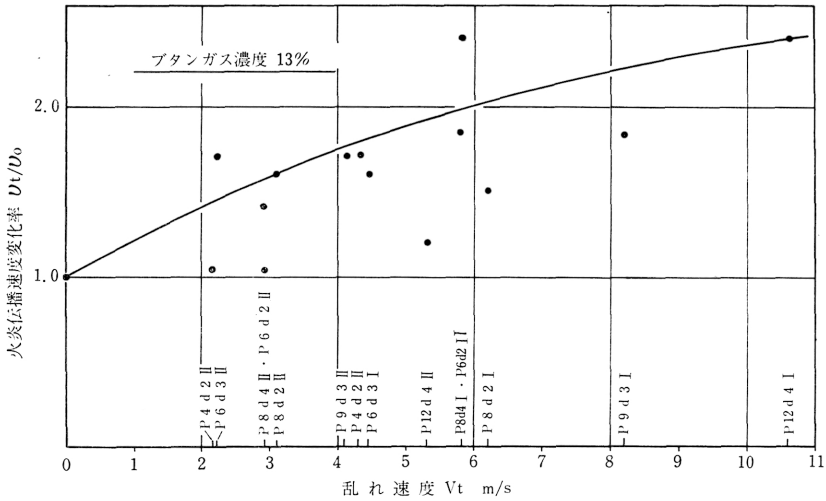


図 13 乱れ速度と火炎伝播速度変化率

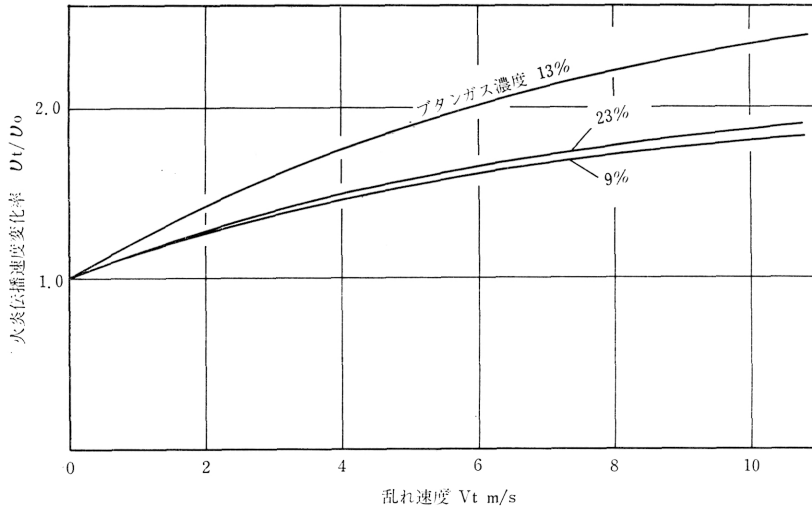


図 14 乱れ速度と火炎伝播速度変化率

よる火炎伝播速度の増大は過薄，過濃混合気では小さく理論混合気あるいはやや濃混合気で大い。

ii) 点火おくれ時間

ガス濃度の変化に対する点火おくれ時間の変化を，図 15 にしめす。図中に乱れないときの曲線も記入したが，曲線は乱れないときは中凸に，乱れのあるときは中凹に，両者全く反対の傾向となつた。すなわち乱れがあると理論混合比よりやや濃混合ガスで点火

おくれ時間はもつとも短かく，しかもここで火炎伝播速度は速い。このように乱れないときと反対になるのは火花エネルギーの混合ガスへの伝達が熱伝導のみでなく，乱れのための対流によつて促進されることと，活性化される燃料と酸素との組合わせ数が多いためであらう。図 16 は混合比をパラメータとし乱れ速度に対する t_1/t_0 比をとつた図である。乱れ速度が増大するにつれ t_1/t_0 ははじめ急に減少し後次第に水平に近

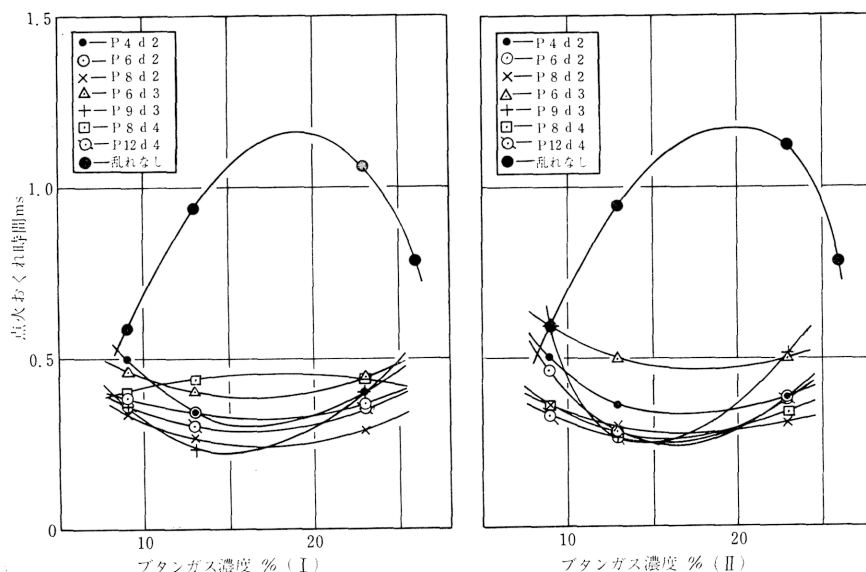


図 15 ガス濃度と点火おくれ時間

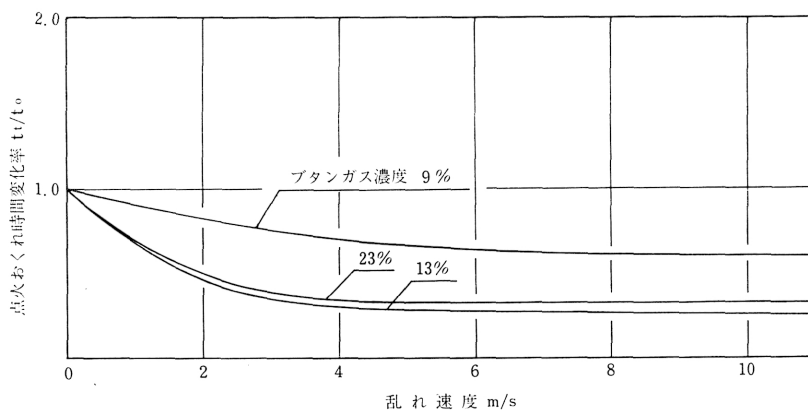


図 16 乱れ速度と点火おくれ時間変化率

づく。減少の程度は理論混合気あるいはやや濃混合気で最も大きく、過薄混合気、過濃混合気では少ない。

3) 火炎伝播速度の方向による差異

本研究では火炎伝播の方向性を検討すべくイオンギャップを A, B, C 列の三方向に配置したが、特に目立つた差異は認められなかった。ただ燃焼室壁の近くでわずかに火炎伝播速度の低下がある。燃焼室直径線上の伝播についてみるとその 60% までの進行は壁のない空間中の火炎面の自由進行と同ようにみること

ができ、伝播速度はほぼ一定である。75% 進行以後で火炎伝播が次第におそくなるが、この附近以後は混合ガスは既燃ガスによる圧縮のため相当に高温、高圧となつてはいるはずであるが、壁面のためガス体の移動が停止するので火炎伝播速度としては小さくなるものであろう。

5. 結 論

短軸円筒形燃焼室内に大気温度、大気圧力のブタン

一酸素混合気を充填し、その中に乱れないときと、多孔板を移動して乱れを生じたときについて点火燃焼し、点火おくれ時間、火炎伝播速度などについて実験した結果つぎの結論を得た。

1) 乱れないばあい点火おくれ時間も、火炎伝播速度も過薄混合気、過濃混合気ときは小さく、理論混合気よりやや濃混合気で最大となる。

2) 乱れがあると点火おくれ時間は短くなる。特に理論混合気よりやや濃混合気では乱れないばあいとは反対に最も短い。

3) 乱れがあると火炎伝播速度は増大する、その増大率は理論混合気よりやや濃混合気るとき最大で、乱れないときより大きく2.5倍にも達する。

4) 乱れの程度を熱線風速計から求めた“乱れ速度”で代表させ整理したが、測定値の分布傾向からみて適当な整理方法であるとみることができる。

6. あ と が き

本研究にあたり、実験に協力した大学院生田島満博、学生前田豊司、水本宏、研究室員鯉坂等の諸君に謝意を表する。

7. 文 献

- 1) Lewis and Von Elbe: “Combustion, Flames and Explosions of Gases” 1951. p. 480. Academic Press Inc.
- 2) 長尾不二夫: “ディーゼル機関における燃焼うず流れの効果” 日本機械学会論文集 25巻160号 (昭34-12), 1315.
- 3) 小笠原光信, 松田宗和: “電気点火ガソリン機関における火炎伝ば遅れの実験的研究” 日本機械学会論文集 33巻245号 (昭42-11), 130.
- 4) 熊谷清一郎: “みだれ燃焼” 日本機械学会誌 55巻406号 (昭27-11), 730.