
燃焼により誘起されるボルテックス・ ブレイクダウン現象の解明

16360106

平成16年度～平成18年度科学研究費補助金

(基盤研究(B)) 研究成果報告書



平成19年5月

研究代表者 石塚 悟

広島大学大学院工学研究科教授

〈はしがき〉

可燃性ガスの渦流中で燃焼が行われると、燃焼でできた高温燃焼ガスが未燃ガスの渦芯中に引き込まれ、火炎が高速で伝播する。この現象は、天空から竜巻が降りてきて地上を襲ったり、超音速機のデルタ翼が突然揚力を失って落下したり、また高速走行自動車が背後の気流の乱れでハンドルをとられたりする現象と類似した、ボルテックス・ブレイクダウンの現象と本質的に類似しているが、密度がほぼ一定と見なせる場とは異なり、燃焼によって密度変化が起こることにより必然的に誘起されるボルテックス・ブレイクダウン（ボルテックス・バースティングとも呼ばれる）として、非常に特異な現象となっている。そこで、この燃焼により誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象についてその詳細を明らかにすることを目的とする。具体的には、渦輪発生装置で作られる可燃性混合気の渦に対し、PIV（画像粒子流速計）による流れ場の測定と光増幅装置を装着した高速ビデオカメラによる火炎形状の測定を同時に行い、両者の関係を詳しく調べるほか、実用上重要となる高圧雰囲気における両者関係も調べ、燃焼により誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象の全容を明らかにする。

〈研究組織〉

研究代表者：石塚 悟（広島大学大学院工学研究科教授）

研究分担者：西田恵哉（広島大学大学院工学研究科助教授）

研究分担者：張玉 銀（東京電機大学工学部講師）

〈交付決定額〉

（金額単位： 円）

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	9,500,000	0	9,500,000
平成17年度	3,100,000	0	3,100,000
平成18年度	1,600,000	0	1,600,000
総計	14,200,000	0	14,200,000

〈研究発表〉

(1)学会誌

- 1) 神先省吾, 木田浩平, 張玉銀・石塚悟, 渦輪による密閉容器内燃焼の高速化 (第二報), 第42回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 463-464, 2004.
- 2) 神先省吾, 合田茂生・張玉銀・石塚悟, 渦輪による密閉容器内燃焼の高速化 (第三報), 第43回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 380-381, 2005.
- 3) 合田茂生・城野寛・張玉銀・石塚悟, PIVと高速度ビデオカメラの同期測定による渦輪内火炎伝播現象の解明, 第43回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 382-383, 2005.
- 4) 城野寛・合田茂生・張玉銀・石塚悟, 渦輪による密閉容器内燃焼の高速化 (第四報), 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 402-403, 2006.
- 5) 合田茂生・城野寛・張玉銀・石塚悟, PIVと高速度ビデオカメラの同期測定による渦輪内火炎伝播現象の解明 (第二報), 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, p. 404-405, 2006.

(2)口頭発表

- 1) S. Ishizuka, Combustion Triggered Vortex Breakdown and the Subsequent Occurrence of Unsteady Flame Propagation, presented at the Russia-Japan Joint Seminar on Turbulence and Instability, September 21-25, 2004, Moscow, Russia, 2004.
- 2) S. Ishizuka, "Combustion Induced Vortex Breakdown," Abstracts Proceedings of JSPS-CNRS Joint Seminar on Direct Numerical Simulations and Analytical Experiments for Constructing Detail Turbulent-Combustion Model, May 24-27, 2005, Mont Saint Michel, France, 2005.
- 3) S. Ishizuka, S. Gouda, S. Kanzaki, Y-Y. Zhang, Experimental Evidence for the Axial Flow Induced by Combustion-Triggered Vortex Breakdown, Abstracts of Work-In-Progress Posters, Thirty-first International Symposium on Combustion, Aug. 6-11, Heidelberg, Germany, p. 414, 2006

(3)出版物

- 1) S. Ishizuka, "Combustion Phenomena: Selected Mechanisms of Flame Formation, Propagation and Extinction," Eds. Jozef Jarosinski, & Bernard Veyssiere, Taylor and Francis, Chap. 4, 4.4. "Flame Propagation in Vortices, Propagation Velocity along a Vortex Core," (in print 2007).

研究成果

燃焼により誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象の解明

目 次

1. まえがき	1
2. 実験装置および実験方法	2
2-1 渦輪発生装置	2
2-2 光増幅光学装置および高速度ビデオカメラ	4
2-3 PIV (粒子画像流速測定法)	5
2-4 燃焼容器	6
3. 実験結果および考察	9
3-1 大気開放下での実験	9
(1) ボルテックス・ブレイクダウンにより誘起される火炎速度	9
(2) ボルテックス・ブレイクダウンにより誘起される流れ場	13
3-2 密閉容器内での実験	22
(1) 容器の長さ・着火位置の影響	22
(2) 初期雰囲気圧力の影響	27
4. まとめ	41
付録：研究発表	42

1. まえがき

本研究では、デルタ翼や高速走行自動車の背後のような等密度場とは異なり、燃焼により、したがって、密度変化により、誘起されるボルテックス・ブレイクダウン（ボルテックス・バースティングとも呼ばれる）現象について、実験的に調べることにする。

そもそも、燃焼場におけるボルテックス・ブレイクダウン現象とは、図1に示すように、可燃性ガスの渦流中で燃焼が行われると、燃焼ガス側では高温により密度が小さくなるため、中心軸上の圧力が周囲の圧力とさほど変わらなくなり、結果的に、圧力の高い燃焼ガスが、渦芯上の圧力の低い未燃ガスに向かって噴出する現象で、条件が許せば、火炎が持続的に高速で移動する。

過去に行われた一連の実験により、火炎の移動速度（火炎速度）が渦の最大周速度（回転速度）にほぼ比例して増大することなど、その概容は明らかになっているが、最大周速度 20m/s 以上の強回転流中では突然消滅したり、また、実用上重要な高圧雰囲気場での挙動を調べた例はいままでにない。

そこで、本研究では、可視化画像流速計を用いて正確な渦の最大周速度や渦核直径の測定を行うほか、これに同期させて、高速ビデオカメラに光増幅装置を装着して火炎速度や火炎形状を撮影し、火炎速度と最大周速度の関係を厳密に求めるばかりでなく、火炎近傍に誘起される軸流速などの流れ場について詳細に測定を行うことにした。さらにまた、耐圧燃焼器を設計・製作し、実用上重要となる高圧雰囲気における挙動も調べ、燃焼により誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象の実用燃焼器への応用、すなわち、渦という流体力学的な要素を用いて、内燃機関内の燃焼の高速化・高出力化を図ったり、円滑な火炎移動操作により異常燃焼であるノッキングを抑制したりするなど、実用燃焼器への適用の可能性をも探ることをも目的とする。

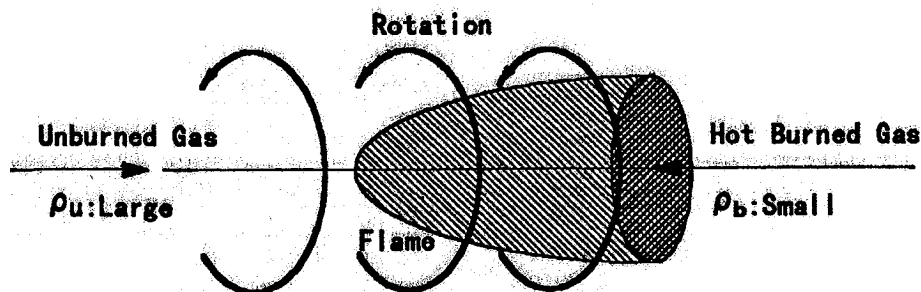


図1 燃焼により誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象

2. 実験装置および測定装置

本実験では、代表的な渦として渦輪を取り上げ、燃焼で誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象を実験的に調べることにした。したがって、まず渦輪発生装置で可燃性ガスの渦輪を作り、これを着火した時に渦輪内を伝播する火炎をイメージインテンシファイア (I. I. : Image Intensifier) (以下 I. I. と記す) 付きの高速度ビデオカメラで撮影し、一方、その時、火炎まわりに誘起される流れ場を粒子画像流速計 (PIV : Particle Image Velocimetry) (以下 PIV と記す) で測定する。また、大気圧下のみならず、火花点火機関やガスタービン燃焼器のように高圧雰囲気下での知見を得るため、高圧燃焼器を設計・製作し、渦輪発生器に装着して実験を行った。

以下に、それぞれの実験装置・計測装置について個々に説明する。

2-1 渦輪発生装置

図2に渦輪発生装置の概略を示す。ここでは、圧力駆動型ピストンで可燃性ガスをオリフィスから瞬間的に押し出すことで渦輪を作った。駆動のための空気は、高圧ボンベから減圧弁、蓄圧器 (アキュムレータ) に所要の駆動圧で蓄えられ、電磁弁 (セレックスバルブ) を介して瞬間的に駆動用シリンダー1に供給され、ピストン1を駆動させる。ピストン1にはピストン2が連結されており、これによりシリンダー2に蓄えていた可燃性ガスをオリフィスから瞬間的に噴き出し、ドーナツ状の渦輪を作る。

なお、大気圧下では、周囲空気による希釈を防ぐため、シリンダー2はフードで密閉されており、この開閉をシリンダー2の動きと同期させることによって、渦輪を大気中に形成させた。

また、オリフィス直径 D_0 、ピストンの駆動圧 P 、およびピストンのストローク L を変えることによって異なる強さの渦輪を作った。

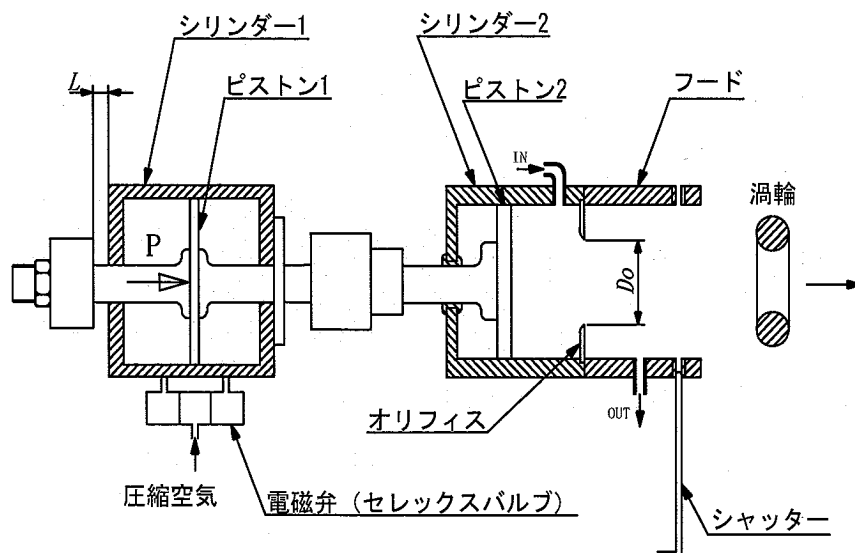


図2 渦輪発生装置

今回は、大気圧下での実験には内径 160mm のものを、高圧雰囲気の実験には、内径 100mm の渦輪発生装置を使用した。それぞれ外観を図 3、図 4 に示す。内径 160mm の渦輪発生装置では、オリフィス直径 D_o として、40, 50, 60, 70mm の 4 種類のオリフィス板を、内径 100mm の渦輪発生装置の場合、オリフィス直径 D_o としては、30, 40, 50mm の 3 種類のオリフィス板を準備し、取り替えて使用した。また、ピストンストローク L としては、は 0~100mm の範囲で調節可能であるが、比較的短い 5, 10, 15mm の長さで使用した。

また、渦輪の着火は、自動車用の誘導火花を用いた。

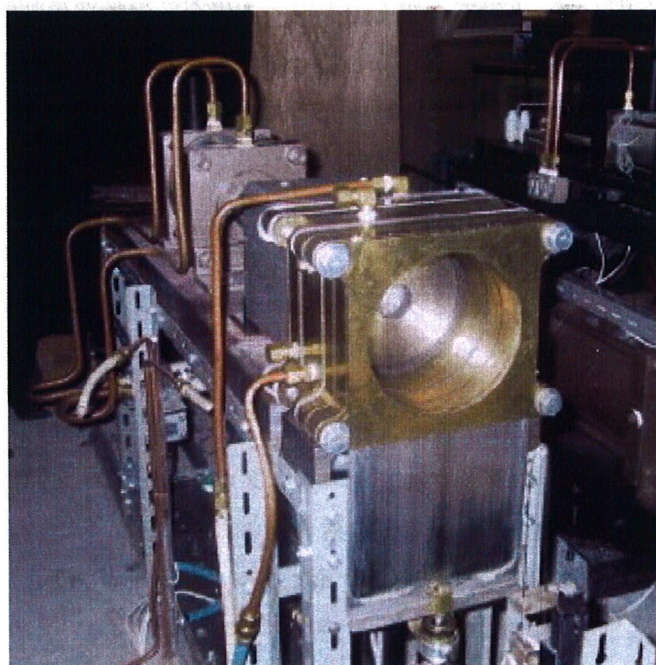


図 3 渦輪発生装置 (内径 : 160 mm)



図 4 渦輪発生装置 (内径 : 100 mm)

2-2 光増幅光学装置および高速度ビデオカメラ

渦輪内を移動する火炎を撮影する方法として、直接撮影の他、シュリーレン光学系を用いる方法がある。しかし、シュリーレン法では、透過物質の密度変化を利用して可視化するため、本当に火炎が形成され密度変化が起きて撮影されているのか、それとも、他のところで生成された高温燃焼ガスが検知され火炎の形成とは直接関係なく可視化されているのか区別がつかない。そこで、反応による自発光を捉える必要があるが、予備実験の結果、毎秒 500 コマ以上の高速度撮影においては、光量不足により渦輪内を伝播する火炎を直接撮影することができないことがわかった。そこで本研究では光増幅光学装置 (I.I.: Image Intensifier) を用いて燃焼光を増幅 (可視化) することとした。この方法はシュリーレン光学系を組んで撮影する場合、渦輪発生装置を避けて光学系を組む必要から、光軸が渦輪の進行方向に対しどうしても斜めとなるのに対し、垂直方向から直接撮影できるという長所もある。本実験で用いた光増幅光学装置、および、それを装着する高速度ビデオカメラの外観を図 5、図 6 に、諸元を以下に記す。

光増幅光学装置 (ナック社製 ILS-3)

タイプ: マイクロチャンネルプレート内蔵第二世代改良型

解像度: 28lp/mm

光増幅ゲイン: 100000 倍

高速度ビデオカメラ (コダック社製 エクタプロ モーションアナライザ HS-4540)

撮像方式: 固体撮像素子

画素数: 256×250 dot (フルフレーム方式)

録画速度: 30~4500 コマ/秒

録画時間: 0.22 秒 (フルフレーム方式)

記録枚数: 1024 枚

なお、燃焼光の撮影にあたっては、バンドパスフィルターを用いて、OH、CH ラジカルからの光を選択し、また、高速度ビデオカメラの画像は、デジタルビデオカメラレコーダー (SONY, DCR-TRV900) を介してビデオテープに保存した。

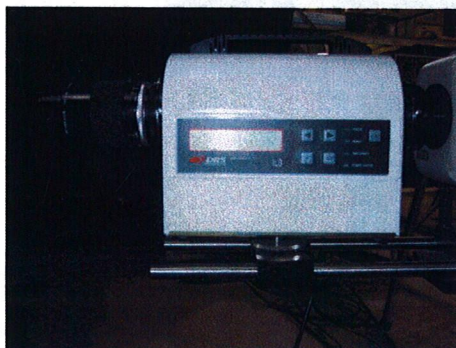


図 5 光増幅光学装置

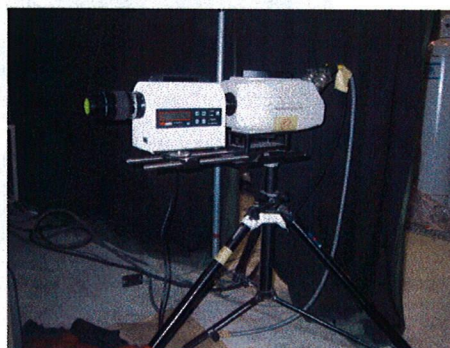


図 6 高速度ビデオカメラ
(光増幅光学装置をマウントしたところ)

2-3 PIV (粒子画像流速測定法)

燃焼により誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象では、その流れ場の把握が重要となる。PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速測定法) では、ある時間差でレーザーシート光を測定対象に対し照射し、可視化されたトレーサー粒子の画像を相関法によって処理することによって粒子群の速度ベクトルを広範囲で測定できるという特徴を持つ。そこで、本実験ではこの PIV を用いて詳しく流れ場を調べることにした。なお、本方法の長所として、渦輪の最大周速度 $V_{\theta max}$ のほかに、渦輪の移動速度 U 、渦輪直径 D 、および渦核直径 d_c を同時に算出することができる。したがって、この PIV と高速度ビデオカメラを同期させれば、火炎速度と流れ場の正確な相互関係が求められる。以下に、本実験で使用した粒子画像流速計の諸元を記す。レーザー光源であるダブルパルス Nd:YAG レーザの外観を図 7 に、撮影系の CCD カメラの外観を図 8 に示す。

粒子画像流速計 (TSI 社製 Y-120)

レーザー光：ダブルパルス Nd:YAG レーザ、

出力エネルギー：120mJ/パルス (532 nm)、

発振周波数：532nm、

繰り返し周波数：15Hz (最大)、

冷却方式：空冷

撮影系：CCD カメラ (TSI, 13-8 クロスコリレーションカメラ)

有効ピクセル：1280×1024 ピクセル、

ピクセルフォーマット：6.7 μ m スクエア、

フレーム転送速度：8 コマ/秒、

時間分解能：4VectorMap/S (フレームストラドリング時)、

最小ストラドリング時間：200 nm、

諧調：12Bit、

感度：170mA/W (532 nm)、

シンクロナイザ：TSI 社製 610034、



図7 ダブルパルス Nd:YAG レーザ

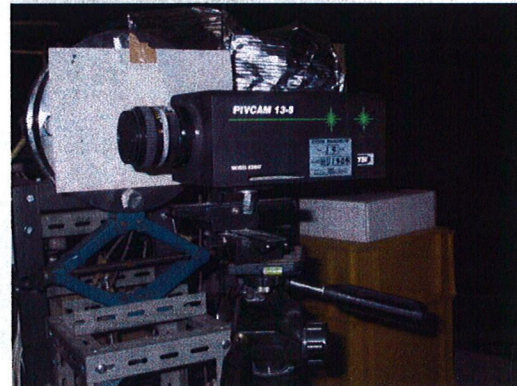


図8 P I V 用 C C D カメラ

なお、シート光と撮影系の同期には、ディレイパルスジェネレーター (Stanford Research Systems 社製, Four Channel Digital Delay/Pulse Generator) を用い、撮影にあたっては、バンドパスフィルター: 532nm を装着し、トレーサー粒子としては、非燃焼場・燃焼場ともに使用するため、酸化マグネシウムを用いた。

なお、シートと火炎の相対位置を正確に知るため、PIV とさらに同期させてシート光を撮影したが、これには、ICCD カメラ (AndorTechnology I-Star, 有効ピクセル: 1024×1024, 最大ゲイン: 1000 (cts/pe), ゲート速度: 2nm 以上, I. I. 分解能: 25 μ m) を用いた。

2-4 燃焼容器

ボルテックス・ブレイクダウン現象に及ぼす雰囲気圧力の影響を調べるために、大気圧下の他に、燃焼容器内に渦輪を形成され実験した。まず、はじめに、内径138mm, 長さ100, 200, 300 mmの3種類の円筒フードを用いて、容器の大きさの燃焼挙動に及ぼす影響を調べ、次に、その実験結果に基づいて高圧燃焼容器 (耐圧50気圧) を設計・製作して実験を行った。内径138mmのフードでは、一端に石英のガラス窓を装着し、火炎の観察を行った。長さ100mm, 300mmの燃焼容器の外観をそれぞれ図9, 図10に示す。一方、高圧燃焼容器は、PIVによる流れ場の測定と伝播火炎同時測定を可能にすべく3方向に石英ガラスの窓を装着した矩形断面のものとし、その大きさは140mm×140mm, 長さは290mmである。これら燃焼容器は内径100mmの渦輪発生装置に連結して使用した。その外観を図11, 図12, 図13 に示す。なお、定容燃焼では、理論混合気では、10倍近く圧力が上昇する。そこで、初気圧としては燃焼時では3気圧まで、また、非燃焼時の渦輪の特性は4気圧まで昇圧して実験した。この昇圧は、可燃性混合気を予め別の容器内に満たし、これをピストンにより所定の圧力まで加圧して押し出して渦輪発生器内に供給することによって行った (図14参照)。

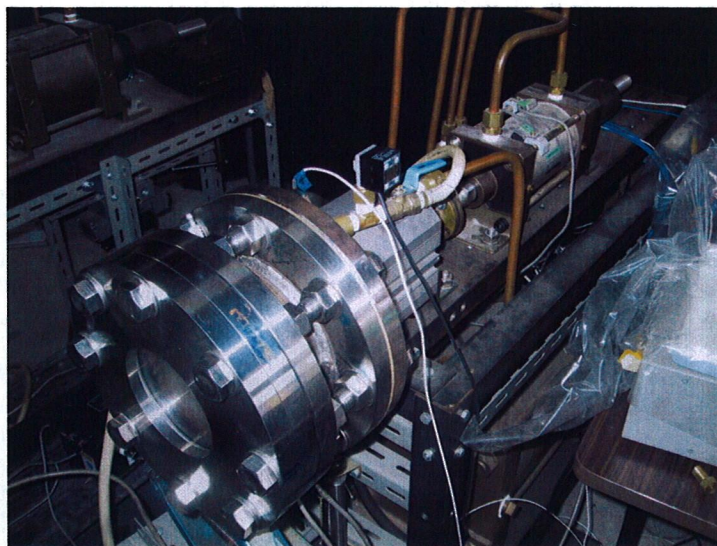


図9 燃焼容器 (内径: 138mm, 長さ: 100mm, 石英窓付き)

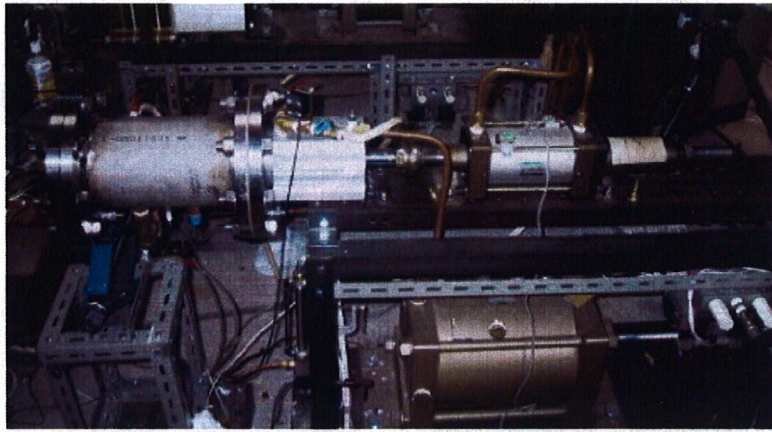


図10 燃焼容器（内径：138mm，長さ：300mm，石英窓付き）

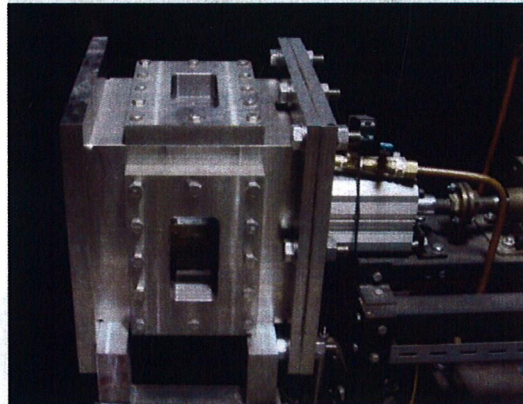


図11 耐圧燃焼容器（矩形断面：140mmx140mm，長さ：290mm，3つ窓付き）

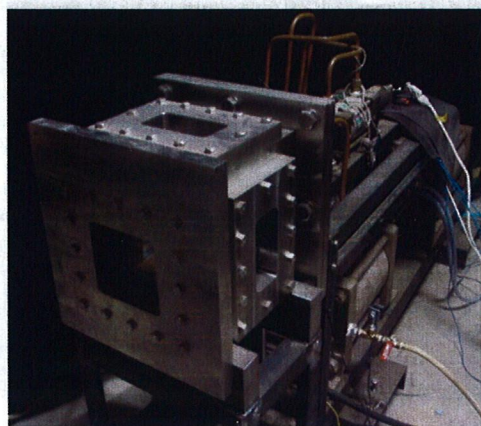


図12 耐圧燃焼容器（矩形断面：140mmx140mm，長さ：290mm，3つ窓付き）

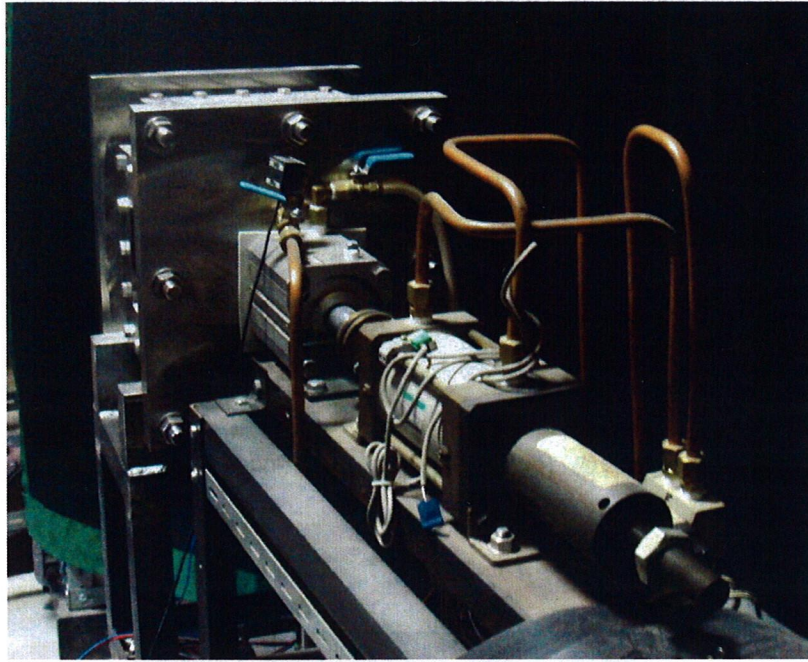


図 13 耐圧燃焼容器（矩形断面：140mmx140mm，長さ：290mm，3つ窓付き）

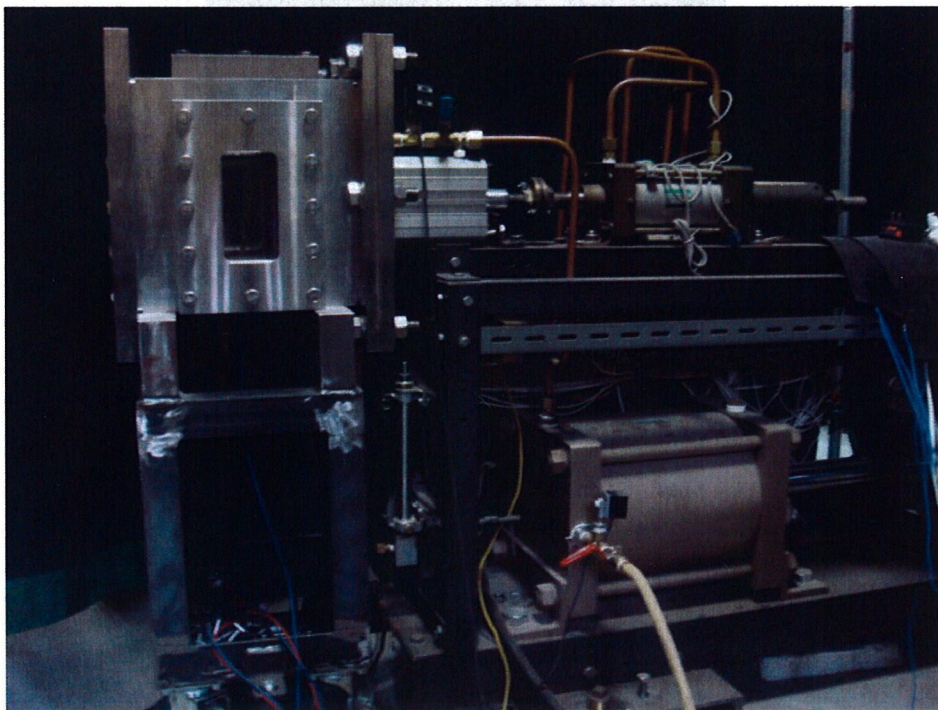


図 14 耐圧燃焼容器（矩形断面：140mmx140mm，長さ：290mm，3つ窓付き）

3. 実験結果および考察

3-1 大気開放下での実験

(1) ボルテックス・ブレイクダウンにより誘起される火炎速度

[まえがき]

燃焼により誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象においては、渦の最大周速度と回転軸上に誘起される軸流速度の把握が必要不可欠である。そこで、大気開放下において両者の関係を求めることにした。

[実験方法]

本実験の概略を図15に示す。本実験では、渦輪の進行方向に対し、側面にPIVを、正面にイメージインテンシファイア付き高速ビデオカメラを設置して行った。ここでは、内径160φの渦輪発生装置を用い、オリフィス直径 D_o として、40, 50, 60, 70mm, ピストン駆動圧 P として0.6, 0.8 MPaに設定し、渦の強さを変え、つまり、最大周速度を変えたときに、移動する火炎速度がどのように変化するかを求めた。

はじめに、当量比 $\Phi=1.0$ のメタン・空気混合気およびトレーサ粒子（酸化マグネシウム）をシリンダ内に供給した後、ピストンを駆動させて渦輪を形成させる。その渦輪に対し、オリフィスから190mm離れた位置にPIVのシート光を設定し、渦輪内における速度分布を測定した。また、そのシート光通過後、オリフィスから220mmの位置で誘導火花により渦輪を着火し、移動する火炎の自発光をイメージインテンシファイアを用いて燃焼光を増幅可視化し、高速ビデオカメラ(4500コマ/秒)で撮影した。これらの動作は、デジタルパルスジェネレータを用いて同期させて行った。

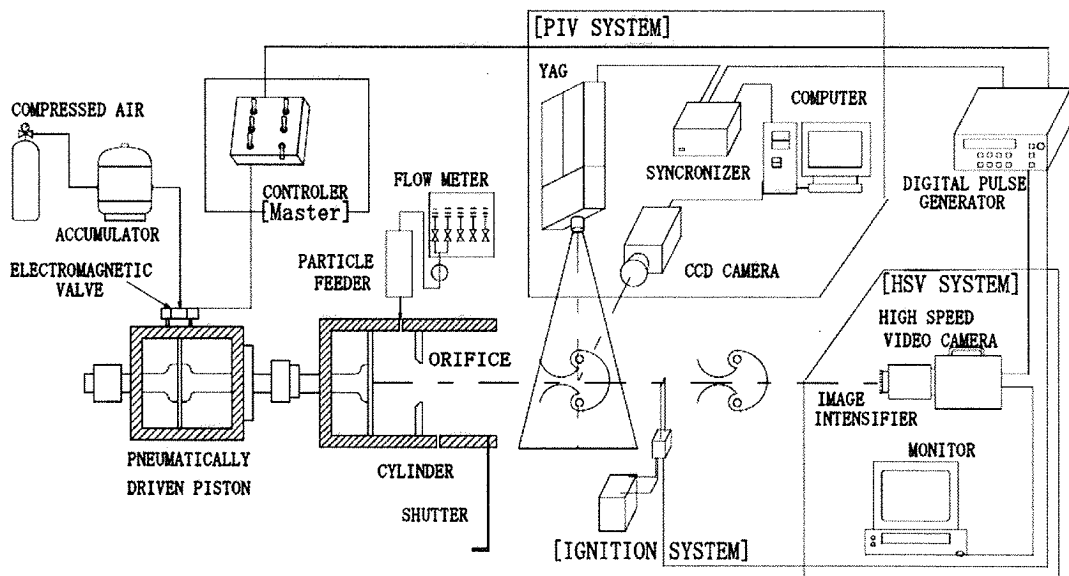


図15 火炎速度と最大周速度の同時測定

[実験結果]

図 16 に PIV で得られた速度分布を示す。ここで、 X 、 Y は水平、鉛直方向座標、 U 、 V はそれぞれの速度成分である。 V の水平方向分布のピーク値は最大周速度 $V_{\theta max}$ に対応する。また、 U の鉛直方向の 2 つのピーク値は、それぞれ、渦輪の移動速度を U とすると $U + V_{\theta max}$ 、 $U - V_{\theta max}$ に対応するので、この両者を加算し 2 で割ることで U を求めることができるほか、減算して 2 で割ることで $V_{\theta max}$ の値を求めることもできる。また、ピーク間距離から、渦核直径 d_c および渦輪直径 D も求められることがわかる。

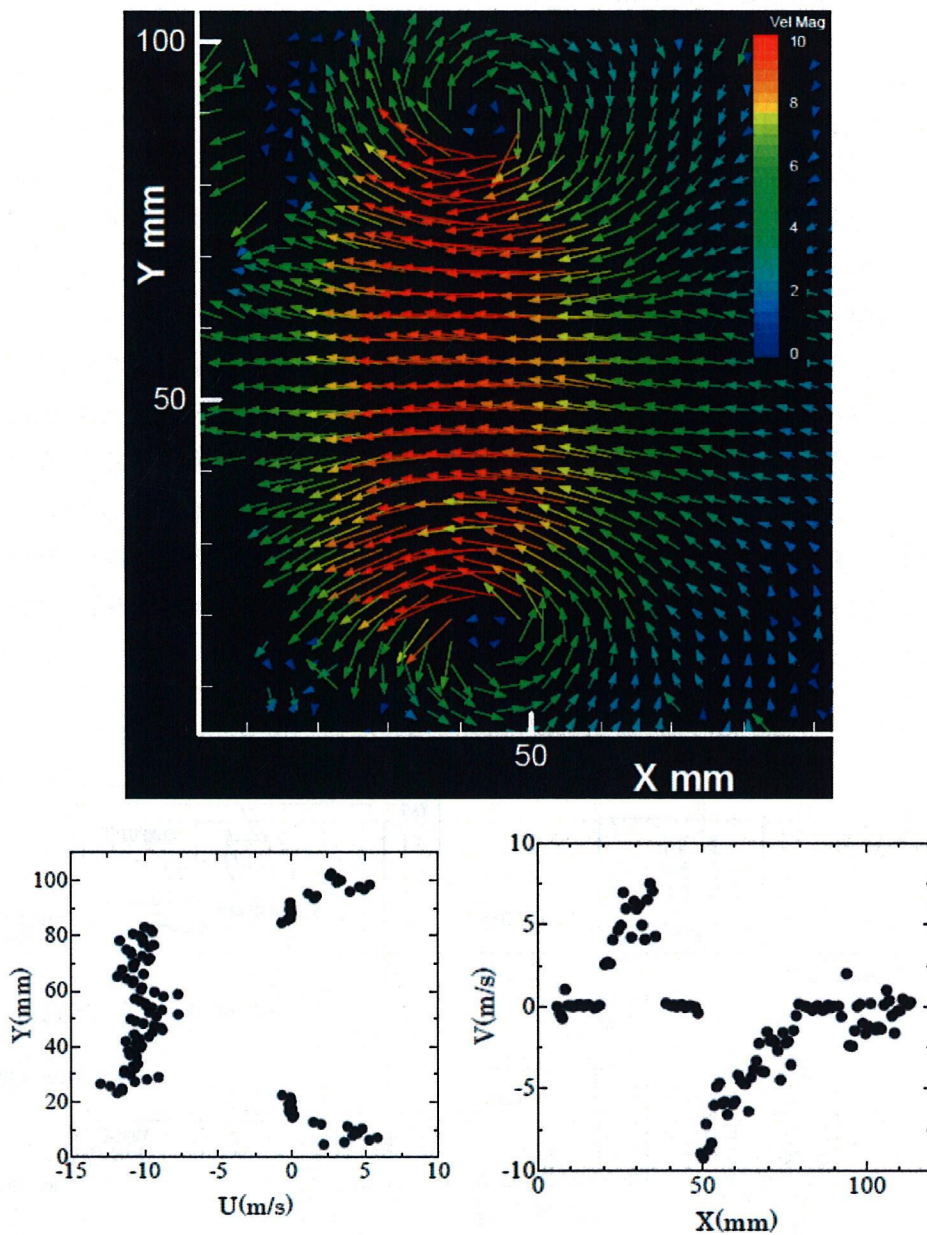


図 16 PIV により得られる速度ベクトルおよび速度分布 ($D_o = 60\text{mm}$, $P = 0.6\text{MPa}$)

一方、伝播する火炎の代表的な写真を図17に示す。ここに示すA～Eは、後述する図18に対応している。さて、火炎は、着火後、渦芯に沿って二手に分かれて伝播し、反対側で合体する。ここでは、着火直後、ほぼ1/4周、1/2周、3/8周、そして、反対側で両火炎が出会ったところでの火炎の様子を示す。ほぼ火炎は一定速度で伝播するが、少し振動しながら進行するので、このような火炎撮影結果をもとに、ここでは、火炎が左右に40度から160度まで伝播する平均値（局所平均火炎伝播速度 $V_{f,mean}$ ）を求めた。また、代表的な火炎の太さ d_f として、火炎先端が左右90度に達したときの40度における発光帯太さで定義した。以上の定義に基づき求めた局所平均火炎伝播速度 $V_{f,mean}$ 、火炎太さ d_f と渦核直径 d_c の比 d_f/d_c と同時に行われたPIVの測定結果をもとに最大周速度 $V_{\theta max}$ をもとめ、両者の関係を求めた結果を図18に示す。ここで、黒く塗りつぶした点（A：◆、B：●、C：▼、D：▲、E：■）が今回の実験点であり、他に示す点は、過去に渦輪の移動速度と最大周速度の関係を非燃焼の渦輪に対して予め求め、推測で得られた火炎速度と最大周速度の関係を示す。また、 d_f/d_c の値も、推測された渦核の直径を元に得られたものである。また、参考に、背圧駆動型火炎伝播モデルの半径方向のみの膨張を仮定した理論式を実線で示す。

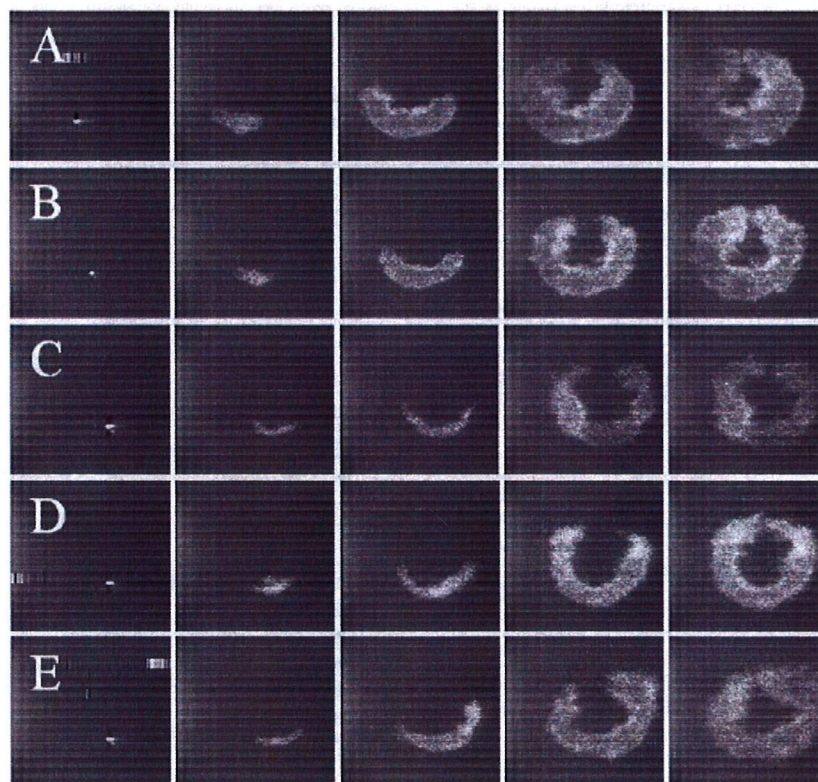


図 17 渦輪内を移動する火炎の外観

まず、 $V_{\theta max}$ と $V_{f,mean}$ の関係を見ると、 $V_{\theta max}$ が 10m/s までは理論式と一致しているが、それより大きくなると理論式から離れていく。しかし、 $V_{\theta max}$ が 15m/s 付近まで理論式との一致が良好である。但し、 $V_{\theta max}$ が 15m/s を越えると、 $V_{\theta max}$ の値が同じであるにも関わらず、 $V_{\theta max}$ の値は大きいときと小さい場合が観察される場合がある(D 点, E 点)。

この D, E 点に対応する火炎写真図 17 の D, E を注意深く観察すると、D では火炎が左右対称に正常に伝播していくのに対し、E の場合、片方の伝播が阻害され正常に伝播していないことがわかる。そのため、火炎速度が低下したと考えられる。このような変則的な伝播火炎を除外して再び $V_{\theta max}$ や d_f/d_c の変化を調べると、 $V_{\theta max}$ が大きくなるにつれて、 d_f/d_c は減少し、1 以下となると、 $V_{f,mean}$ の値が背圧駆動型火炎伝播モデルで予測される火炎速度より低くなるという事実が明らかになった。

従来の測定では、渦核直径 d_c は Lamb の関係式などをもとに推測されるに過ぎず不正確であり、なかなか、 d_f/d_c の値を正確に把握できなかったが、今回の測定で、はじめて、厳密に、 d_f/d_c の値が 1 以下となる、すなわち、燃焼範囲が強制渦内に限定されると、 $V_{f,mean}$ の値が背圧駆動型火炎伝播モデルで予測される火炎速度より低くなることが確かになった。

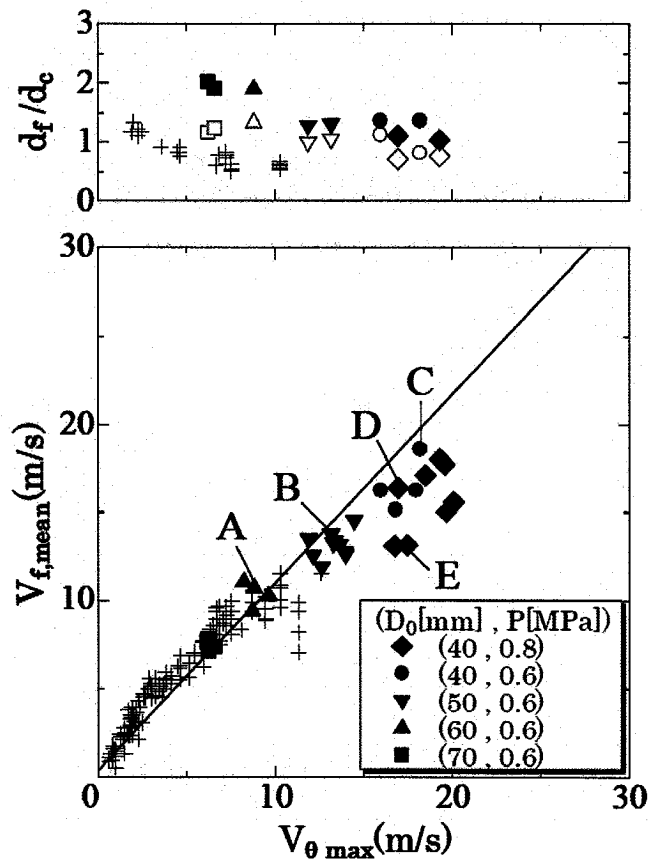


図 18 最大周速度による火炎速度，火炎太さの変化

(2) ボルテックス・ブレイクダウンにより誘起される流れ場

[まえがき]

次に、ボルテックス・ブレイクダウンにより誘起される火炎移動に大きく係わる流れ場がどのように変化するかを、引き続いて詳しく測定した。

[実験方法]

本実験の概略を図19、図20に示す。まず、渦芯を含む断面内における流れ場を測定するため、渦輪の進行方向に対し、正面に同時撮影光学系を用いて光路をふたつに分け、それぞれPIVおよびイメージンテンシファイア付き高速度ビデオカメラに導き、それぞれ、速度ベクトルと火炎の自発光分布を同時に撮影した(図19)。さらに、厳密に測定するために、側面にはICCDカメラ(Andor Istar DH734-18F-63)を配置し、渦輪内の速度分布を測定するためのPIVレーザシート光を測定し、火炎と測定している速度場との相対位置を厳密に把握できるようにした。

なお、着火はオリフィスから220mmの位置で行い、オリフィスから243mmの位置にPIVのレーザシート光を配置して撮影を行った。なお、同時撮影光学系を用いて得られたPIVおよび高速度ビデオカメラの画像はパソコン上で重ね合わせ、火炎先端まわりの流れ場を詳しく解析した。実験条件として、ここでは、オリフィス直径 $D_o = 60\text{mm}$ 、ピストン駆動圧 $P = 0.6\text{MPa}$ 、燃料にメタンを用い、代表的な当量比 $\Phi = 0.8$ (希薄混合気)、 1.0 (量論混合比)、 1.2 (過濃混合気)の3通りについて測定した。

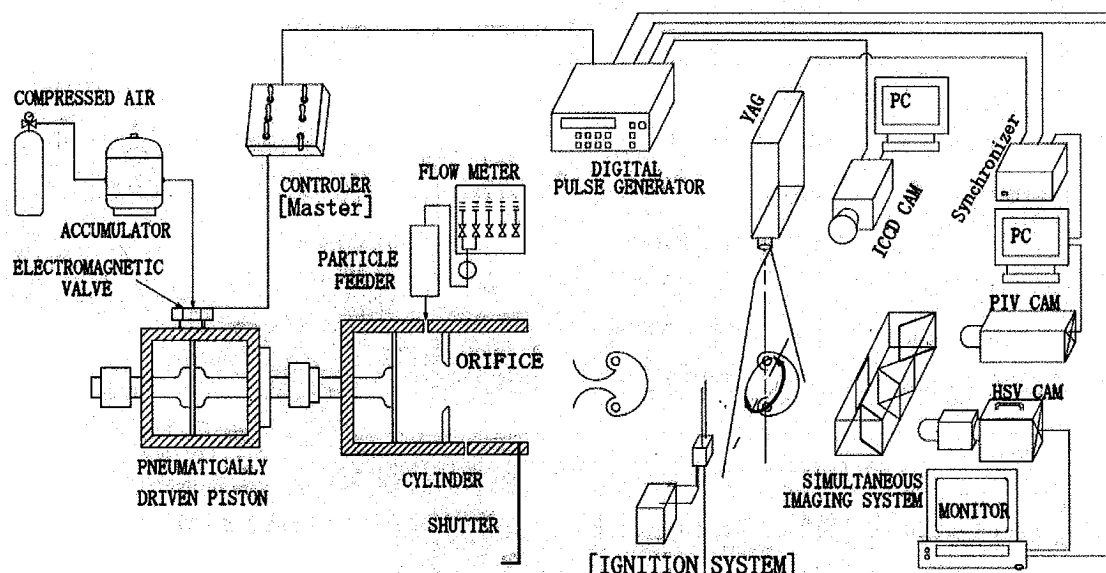


図19 ボルテックス・ブレイクダウンにより誘起される流れ場の測定(渦芯を含む断面内の速度場の測定)

次に、渦芯に垂直な断面内における流れ場を測定するため、渦輪の進行方向に対し垂直方向にPIVのレーザシート光を照射し、速度場を計測すると同時に、渦輪の進行方向正面からイメージインテンシファイア付き高速度ビデオカメラで火炎を撮影し、火炎先端位置とPIVシート断面の相対位置を正確に把握できるようにし、パルスジェネレータを用いて、着火時間をずらし、火炎がPIVの測定断面内に到達する前、到達した後の速度場も詳しく調べた（図20）。

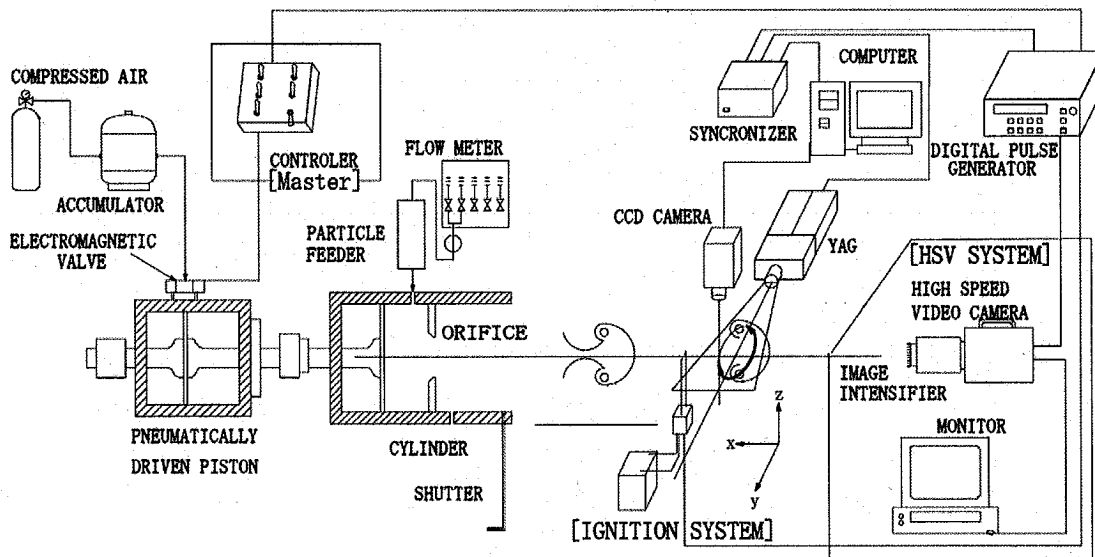


図 20 ボルテックス・ブレイクダウンにより誘起される流れ場の測定（渦芯に垂直な断面内の速度場の測定）

[非燃焼場での渦輪の渦芯を含む断面内での速度分布]

まず、着火しない場合に得られる渦輪の渦芯を含む断面内での速度ベクトルを求めた ($D_o = 60\text{mm}$, $P = 0.6\text{ MPa}$, $V_{o\text{max}} = 9\text{ m/s}$). このとき、渦輪は発光しないため、渦輪とレーザシート光の相対位置は特定できない。しかし、パルスジェネレータのパルスを正確に制御することにより、レーザシートが渦核の中心を通過する直前、通過直後、そして、まさに通過した時点で求めた速度ベクトル線図がそれぞれ図21、図22、図23である。

通過直前（図21）では、右の模式図に示されているように、レーザシート断面上では、渦輪の中心から外側に向かって速度成分があるため、測定された速度ベクトルはすべて外側に向かっている。一方、渦輪の通過直後（図22）では、レーザシート断面では、渦輪の中心から内側に向かって速度成分があるため、測定された速度ベクトルはすべて内側に向かっている。そして、丁度レーザシートが渦核の中心を通過する場合（図23）、レーザシート断面上では、ほとんど速度成分が算出されていないことがわかる。つまり、渦核をよぎる断面では、この断面を垂直に過ぎる速度成分はあっても、この断面内を移動する速度成分はないことがわかる。

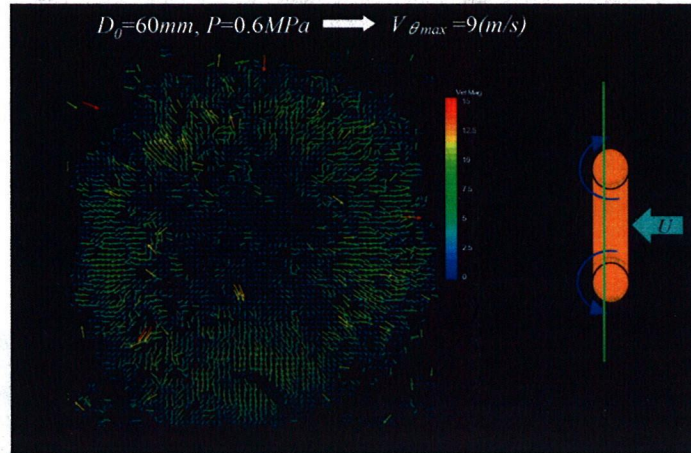


図 21 非燃焼時に渦芯を含む断面から渦輪の進行方向前方にわずかにずれた断面内での速度ベクトル

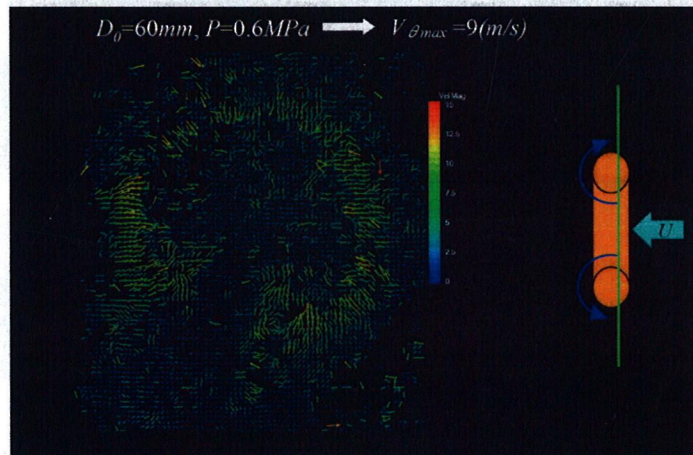


図 22 非燃焼時に渦芯を含む断面から渦輪の進行方向後方にわずかにずれた断面内での速度ベクトル

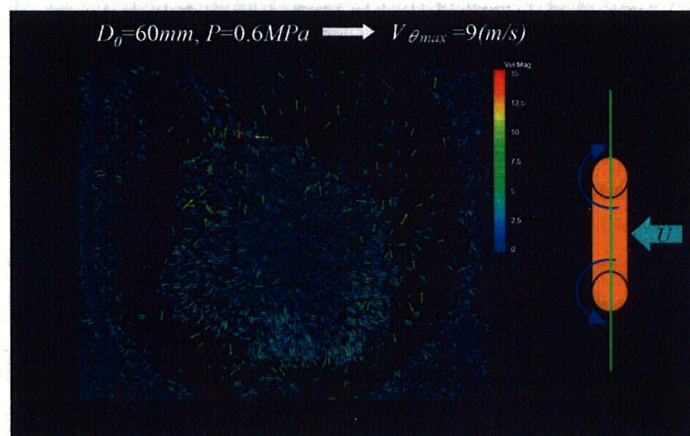


図 23 非燃焼時に渦核を含む断面内での速度ベクトル

[燃焼場での速度分布]

引き続き、渦輪を着火し、渦輪内を移動する火炎の先端付近における流れ場を測定した。当量比 $\Phi=1.0$ の結果を図24に示す。左は正面に設置したPIVおよび高速度ビデオカメラの画像を重ね合わせたもので、右は側面に設置したICCDカメラで撮影された画像であり、図中の線はレーザーシートの位置を示す。

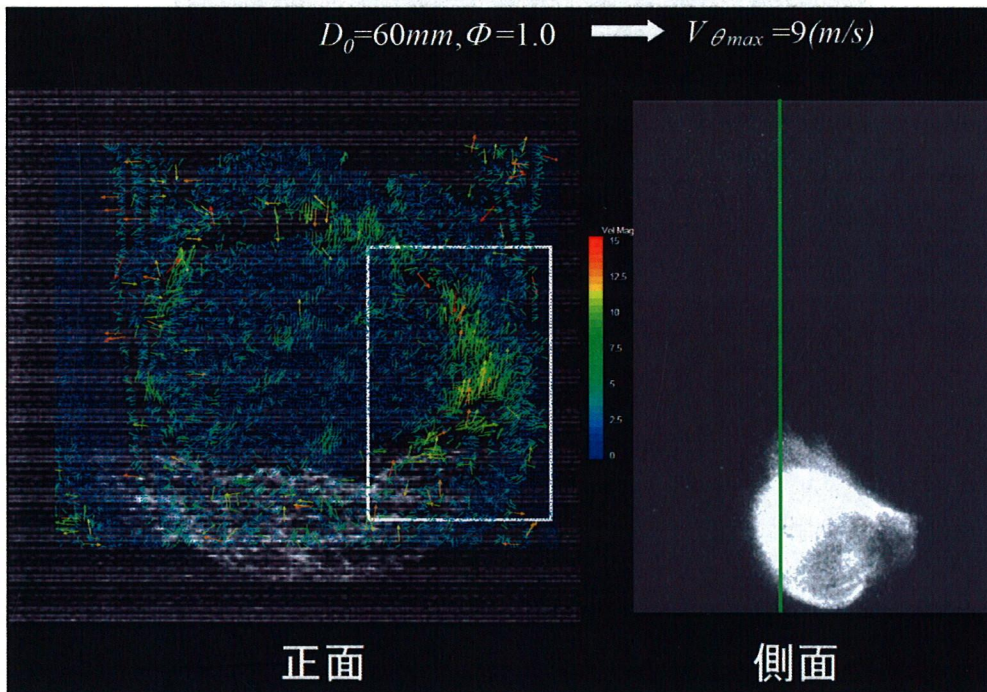


図24 燃焼時に渦核を含む断面内での速度ベクトル

まず、右の写真から、レーザーシートが火炎先端を丁度通過していることが確認できる。また、左の速度ベクトルを見ると、非燃焼時には全く観察されなかった速度成分が火炎先端付近で存在し、その方向は渦芯に沿って燃焼側から非燃焼側に向かっていることがわかる。すなわち、火炎先端部の未燃ガスは静止しておらず、前方へと移動する。また、その速度の大きさは10m/s程度であることもわかる。この実験条件では、この渦輪の $V_{\theta,max}$ および $V_{f,mean}$ は約10m/sであり、これから、火炎先端部で存在する、既燃ガス側から未燃ガス側に移動する速度ベクトルの大きさが、 $V_{f,mean}$ とほぼ同じ速度であることがわかる。

同様の実験を希薄、過濃混合気についても行い、特に、火炎先端近傍付近を拡大して示したものを理論混合気の結果とともに図25、図26、図27に示す。図25は理論混合気の結果であるが、図24とは違う実験番号のものであり。図26、図27はそれぞれ希薄、過濃混合気の結果である。ここでは、5~13m/sのベクトルだけを示した。

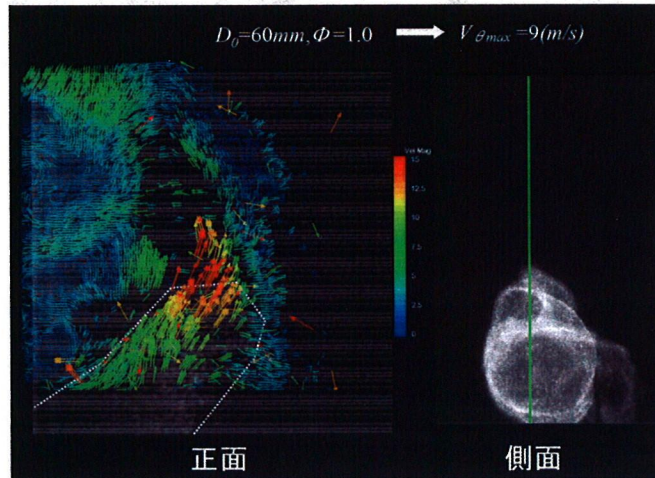


図 25 燃焼時に渦核を含む断面内での速度ベクトル ($\Phi = 1$)

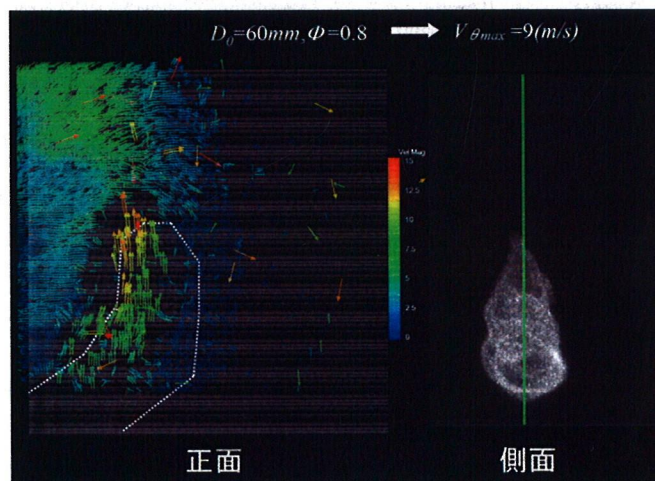


図 26 燃焼時に渦核を含む断面内での速度ベクトル ($\Phi = 0.8$)

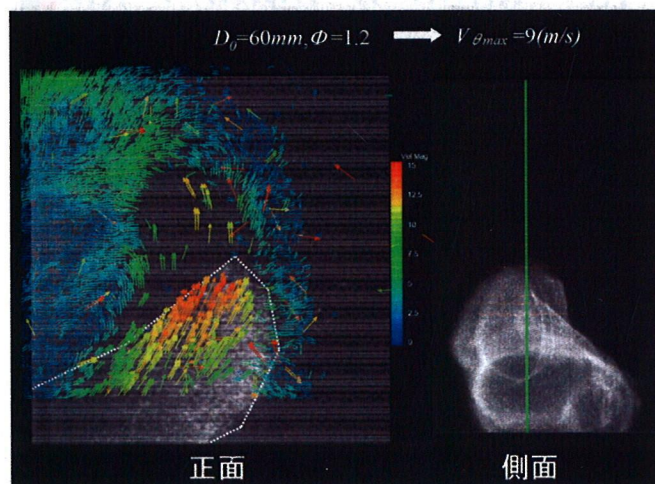


図 27 燃焼時に渦核を含む断面内での速度ベクトル ($\Phi = 1.2$)

当量比 $\Phi=0.8$ では、火炎は細く、一方、 $\Phi=1.2$ では、周囲空気との拡散燃焼を伴うため火炎は太くなっているが、 $\Phi=1.0$ と同様に、火炎先端部では既燃ガス側から未燃ガス側に渦芯に沿って軸速度が誘起されていることがわかる。また、その速度も、過濃側にやや大きく、希薄側にやや小さいものの、だいたい $V_{f,mean}$ の値に等しく10m/sとなっていることがわかる。

ところで、背圧駆動型火炎伝播モデルは、軸方向の運動エネルギー保存より軸方向の運動量保存を重視し、角運動量保存の結果誘起される火炎面前後の圧力差で燃焼ガス側から未燃ガス側へ軸流が発生し(バースティング)、これに乗って火炎が移動するというものである。結果として、このバースティングの軸流速度と渦の最大周速度はほぼ等しくなる。今回、火炎速度が最大周速度とほぼ等しいこと、また、火炎先端の未燃ガスも最大周速度とほぼ等しい速度で軸方向に移動するという測定結果が得られたが、これらの結果は、背圧駆動型火炎伝播モデルの妥当性を強く裏付けている。

[火炎前後での最大周速度と渦核直径]

次に、渦芯に垂直断面内の速度ベクトルを測定した結果を図28、図29に示す。ここで、X、Yはそれぞれ渦輪の進行方向、およびそれに垂直方向の方向座標であり、図28は非燃焼時、図29は火炎先端がレーザシート断面にまさに到達した時の速度ベクトルである。また、図29の挿絵はPIVと同じタイミングに高速度ビデオカメラで撮影された渦輪の火炎伝播の様子であり、図中の線はPIVのレーザシートの位置を示している。挿絵により、本速度ベクトルの測定がまさに火炎先端での測定になっていることが確かめられる。

さて、図28と図29を比べると、図28では回転軸付近の粒子のほとんど存在しない領域は小さいが、図29では非常に大きくなることがわかる。

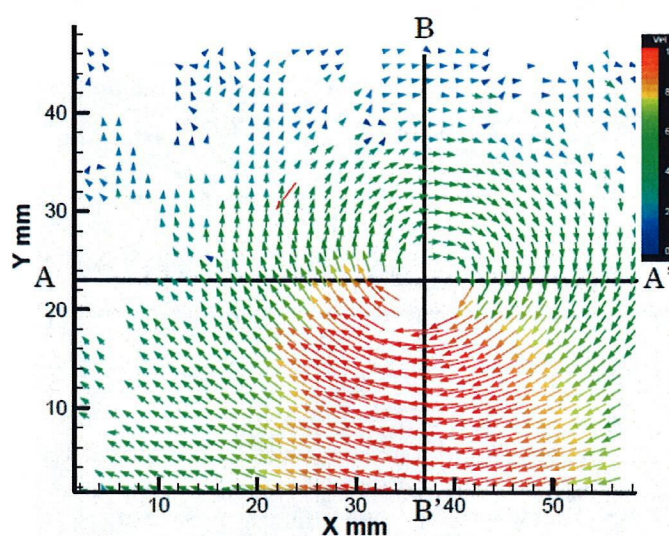


図 28 非燃焼時に渦核を含む断面内での速度ベクトル ($\Phi=1.2$)

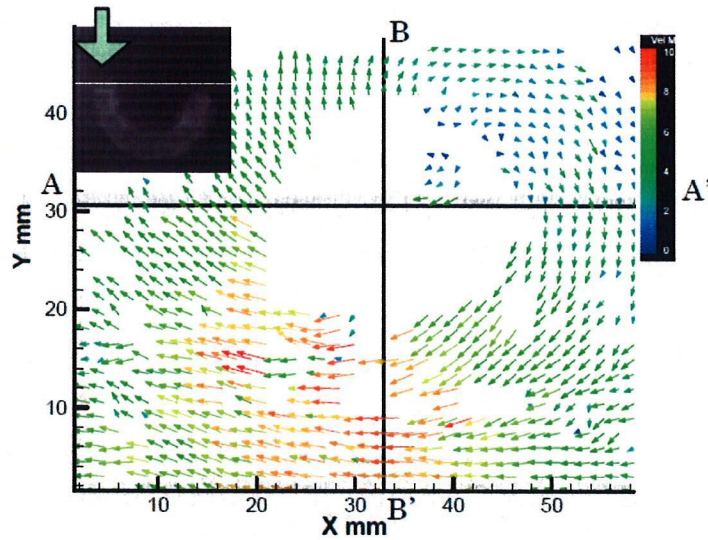


図 29 燃焼時に渦核を含む断面内での速度ベクトル ($\Phi=1.2$)

この時の速度分布を図 30 に示す。また、 U 、 V はそれぞれ X 、 Y の速度成分である。渦輪は移動速度があるため、 Y - U 速度分布は周速度と移動速度の合成速度となるが、ここでは、移動速度を差し引き、周速度のみの分布を示した。また、これらのピーク値から最大周速度 $V_{\theta max}$ を、ピーク間距離から渦核直径 d_c を求めた。 $V_{\theta max}$ は、非燃焼場では約 8m/s であるのに対し、火炎先端がレーザシートに到達した断面では約 5.5m/s に減少している。また、渦核直径 d_c は、前者では約 14mm であるのに対し、後者では約 32mm と約 2 倍程度増大していることがわかる。

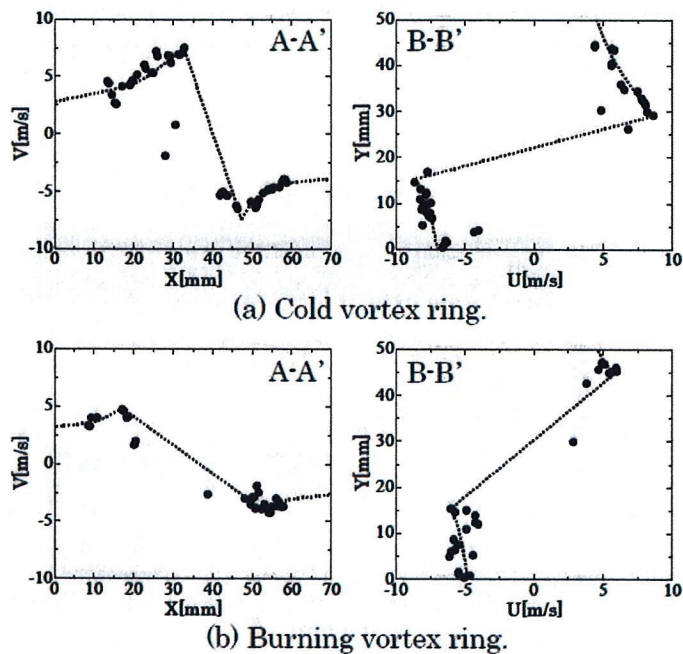


図 30 (a)非燃焼と(b)燃焼時に渦核を含む断面内での速度ベクトル ($\Phi=1.2$)

次に、火炎先端より前方，後方断面における速度分布を調べることにした．測定上，本実験では，レーザシートを固定し，渦輪の着火位置を前後させてタイミングをずらし，PIV のレーザシート位置に対して火炎先端が到達する前，到達した後の速度分布を測定し，最大周速度 $V_{\theta max}$ ，渦核直径 d_c の変化の様子を求めた．その結果を図 31，図 32 に示す．ここで，横軸は渦輪下端を 0° としたときの火炎先端位置を角度で示し，レーザシートの位置は 90° である．●および△はそれぞれ V-X および Y-U 速度分布から求めた結果である．

まず，最大周速度 $V_{\theta max}$ を調べると，火炎前方(たとえば，火炎先端位置 60°)における最大周速度 $V_{\theta max}$ の値は，非燃焼場(0°)での値とほぼ同じであるが，火炎先端がレーザシート(90°)に近づくにつれて， $V_{\theta max}$ は大きく減少している．そして，火炎後方(火炎先端位置 120°)での $V_{\theta max}$ さらに減少し，その後一定となる傾向がある．

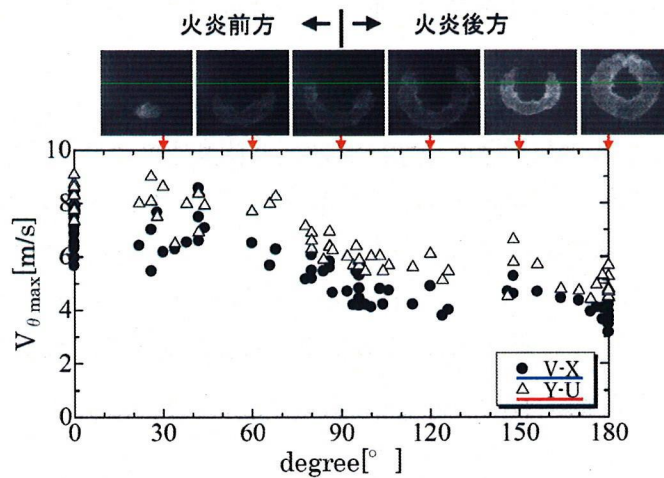


図 31 火炎先端からの相対位置による最大周速度の変化 ($\Phi = 1.2$)

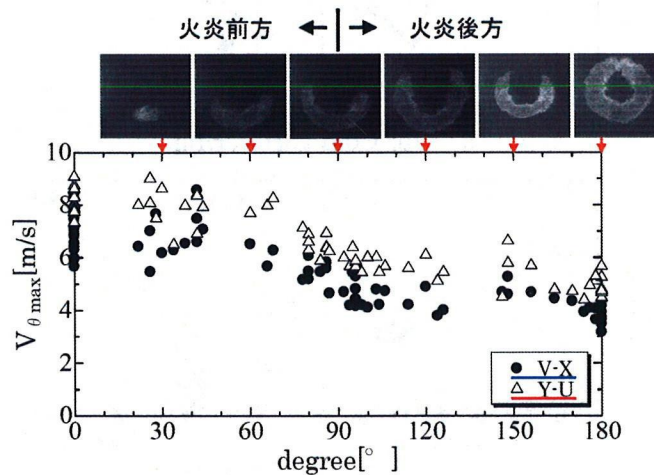


図 32 火炎先端からの相対位置による渦核直径の変化 ($\Phi = 1.2$)

次に、渦核直径 d_c を調べると(図 32), d_c は火炎先端がレーザシートに到達する以前(火炎先端位置 60°)から徐々に増大し、火炎後方(火炎先端位置 120°)でさらに増大した後、一定になる傾向があることがわかる。

最後に、V-X 速度分布から角運動量を計算した。図33その結果を示す。ここで、横軸は渦核中心からの距離 r 、縦軸は角運動量であり、角運動量は渦核中心からの距離と周速度の積で算出した。また、(a)は非燃焼場(0°)、(b)は火炎先端がレーザシートに到達した時(90°)、(c)は火炎後方(火炎先端位置 120°)での結果である。まず、(a)を見ると、角運動量は r が増加するにつれて増加するが、 $r=12\text{mm}$ より外周では約 $0.09\text{m}^2/\text{s}$ の値をとり、一定になる傾向がある。次に、(b)、(c)の場合では、 $r=20\text{mm}$ より外周ではやはり約 $0.09\text{m}^2/\text{s}$ の値をとり、一定になる傾向が見られる。ところで、渦輪の速度分布をランキンの組み合わせ渦と仮定し、角速度を Ω とすると、角運動量は、剛体渦中では Ωr^2 となり r の値とともに増加するが、一方、自由渦中では Ωr_c^2 で一定となる(r_c :渦核半径)。今回、剛体渦中が全て未燃ガスで閉められている場合(a)、火炎が到達し、一部が燃焼ガスで占められている場合(b)、火炎通過後ほとんど燃焼ガスのみで占められている場合(c)、それぞれについて角運動量を計算したが、いずれの場合でも角運動量は外周部で約 $0.09\text{m}^2/\text{s}$ で一定になるという結果が得られた。肝心の渦核内での角運動量を測定するには至らなかったが、背圧駆動型火炎伝播モデルをはじめ多くのモデルで仮定されている角運動量の保存は、少なくとも、渦輪の燃焼中、渦核の周囲では成立することが確認できた。

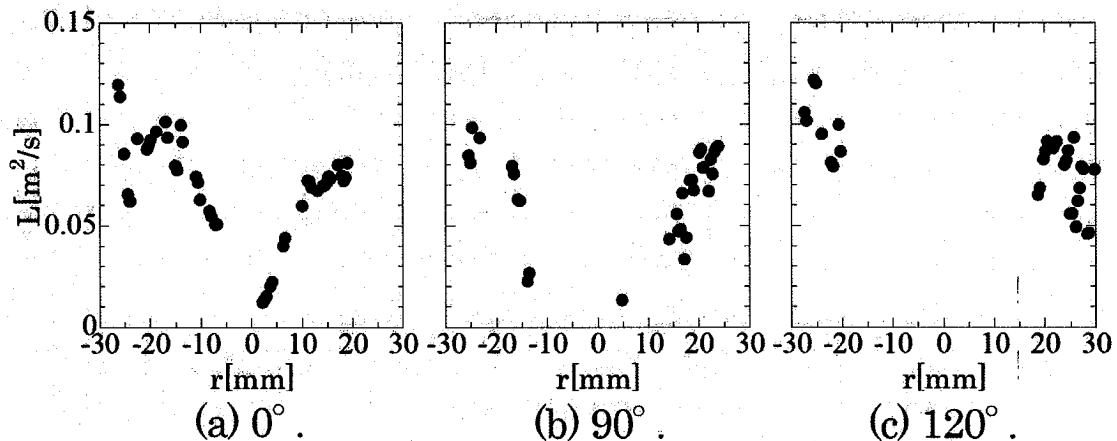


図 33 渦芯に垂直断面内での角運動量の半径方向分布 ($\Phi = 1.2$)

3-2 密閉容器内での実験

(1) 容器の長さ・着火位置の影響

[まえがき]

燃焼によりボルテックスブレイクダウンを誘起し、火炎を高速で移動させることを利用できれば内燃機関の燃焼を高速化でき、結果的に高出力化が図られる。しかし、大気開放化と密閉性のある内燃機関では燃焼場がかなり異なる。そこで、密閉容器内で渦輪の燃焼を行い、その効果を調べることにした。

[実験方法]

本実験の概略を図34に示す。実験は渦輪発生装置の出口に円筒フードを取り付け、めくらフランジで塞いで密閉容器とすることで行った。渦輪発生装置の内径は100mm、一方、燃焼室となる円筒フードは、内径138mm、長さは300、200、100 mmの3種類を用意した。なお、めくらフランジには石英ガラスの窓が取り付けられるようになっている。

一方、混合気の着火は、オリフィス(直径 $D_o = 40\text{mm}$)の後方に電極を設置し、渦輪の進行に同期させて行った。点火後、容器内の圧力上昇によりピストンが押し戻されるのを防ぐため、ピストンには0.4MPaで駆動させた後、電磁弁を介して1.0MPaの圧力がかかるようになっている。これらの動作は、パルスジェネレーターを用いて0.01秒のタイミングまで制御した。燃焼室内の圧力は、デジタル圧力センサー(Keyence, AP-33A, 最大圧1MPa, 応答時間2.5 msec)の出力をデジタルオシロスコープ(IWATU, Wave Runner, 64 kwords x 4 channels, 最小サンプリングレート: 500 MS/s)で記録して行った。また、火炎伝播の様子はイメージインテンシファイア(Nac, GIB-10M, 平均蛍光面最大輝度 3.0 ft-L, 解像力 231 p/mm)を用いて燃焼光を増幅可視化し、高速度ビデオカメラ(コダック HS-4540, 4500コマ/秒)で撮影した。オリフィスからの着火位置等の実験条件をまとめて表1に示す。

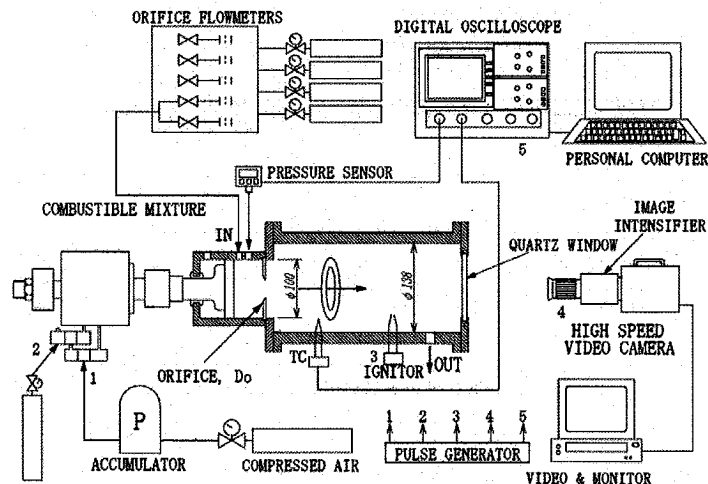


図34 密閉容器内燃焼概要

表 1 実験条件

Fuel	CH ₄			CH ₄		
Hood Length (mm)	100	200	300	100		
Ignition Distance (mm)	100	200	220	28	100	150
Piston Stroke (mm)	10			10	15	
Maximum Tangential Velocity of Vortex Ring (m/s)	5.5			5.5	11	
Translational Velocity of Vortex Ring (m/s)	2			2	4	

[実験結果]

まず、長さの影響を調べた。3種類の容器に対し、渦輪に着火した場合(○印)と渦輪無し
の静止混合気に着火した場合(●印)の最高圧力に到達するまでの時間 t_c および、最高到
達圧力 P_{max} を測定した。その結果を図 35 に示す。

はじめに、長さ 300mm と 200mm の容器を比較する。渦輪を用いた場合、渦輪を用い
ない場合に比べ 300mm, 200mm とともに P_{max} の値は 5%程度増加している。また、 t_c の値
は、300mm ではあまり変化は見られないが、200mm では 15%程度短縮している。これ
より容器長を 300mm から 200mm に短くすることで、渦輪を用いる効果が顕著に現れる
ことがわかる。これはひとえに、容器内燃焼に占める渦輪の燃焼範囲が相対的に大きくな
ったためと考えられる。

次に、さらに体積の小さい長さ 100mm の容器で実験を行った結果を考察する。上記の
結果を踏まえると、渦輪を用いることによる燃焼時間の短縮化が一層顕著になるものと期
待される。しかし、 P_{max} の値は 200mm の場合と比べ、渦輪ありとなしの差は縮まり、ま
た、 t_c の値も渦輪ありと渦輪なしの差は 200mm の場合と大差ないかむしろ縮まっている。

したがって、単純に容器を小さくすれば渦輪燃焼の効果が顕著になるというものではな
いことがわかる。考えるに、容器長さ 100mm の場合、着火後渦輪が容器内を進行する距
離が十分とれず、初期に渦芯に沿って火炎を伝播させて大きな面積の火炎核を作り、これ
をもとに急速な火炎面積の拡大を図るという構図が効果的に作れないためと思われる。

以上より、単純に密閉容器の体積に対する渦輪の割合を大きくすればするほど渦輪を用
いる効果が表れるというわけではなく、渦輪に適した容器の大きさというものがあること
が明らかになった。

次に、着火位置の影響を調べた。代表的な渦輪として、図 36 に示すように、オリフィ
ス通過直後の発達中の渦輪、定常進行中の渦輪、そして、対向壁に衝突後の渦輪を選び、
その位置に点火プラグを設置して調べた。

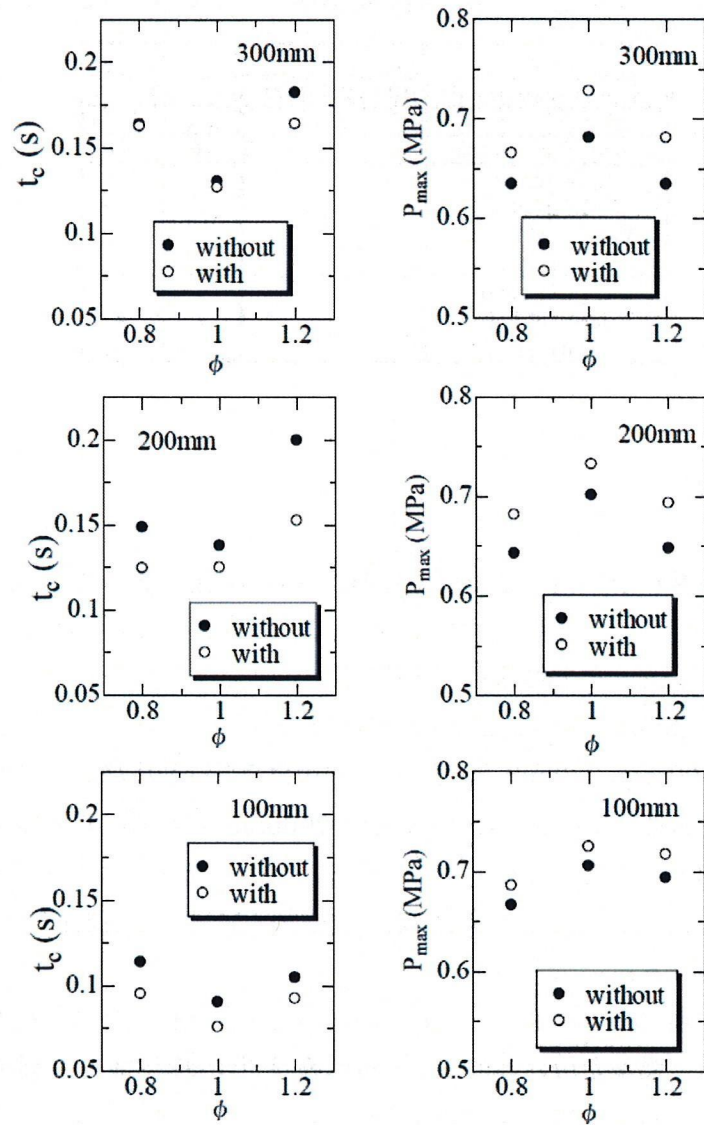


図 35 最大到達圧力 P_{max} およびその到達に要する時間 t_c の燃焼室長さによる変化

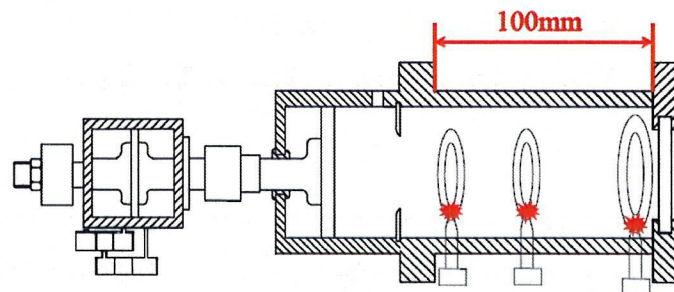


図 36 代表的な着火位置

図 37 に長さ 100mm の密閉容器を用いて、 $\Phi=1.2$ のメタン空気混合気中で、渦輪を対向壁に衝突させた後に着火した場合 (End Wall), オリフィス直後の渦輪に着火した場合 (Behind Orifice), 定常進行の渦輪に着火した場合 (Steady VR) それぞれの火炎伝播の様子を示す。画像は、着火後に二手にわかれて渦芯上を伝播する火炎が、左から順に、1/4 周した時、火炎が着火点の反対側で出会う前後、火炎が密閉容器の断面をほぼ覆った時、密閉容器内の圧力がピーク値に達した時のもので、画像下の数値は火炎に着火してからの経過時間を示している。これより、壁に衝突した渦輪に着火すると、面全体に火炎が広がること、オリフィス直後に着火した場合、非定常性の強い渦輪にもかかわらず定常進行渦輪と同様、火炎が渦芯に沿って伝播することなどがわかる。

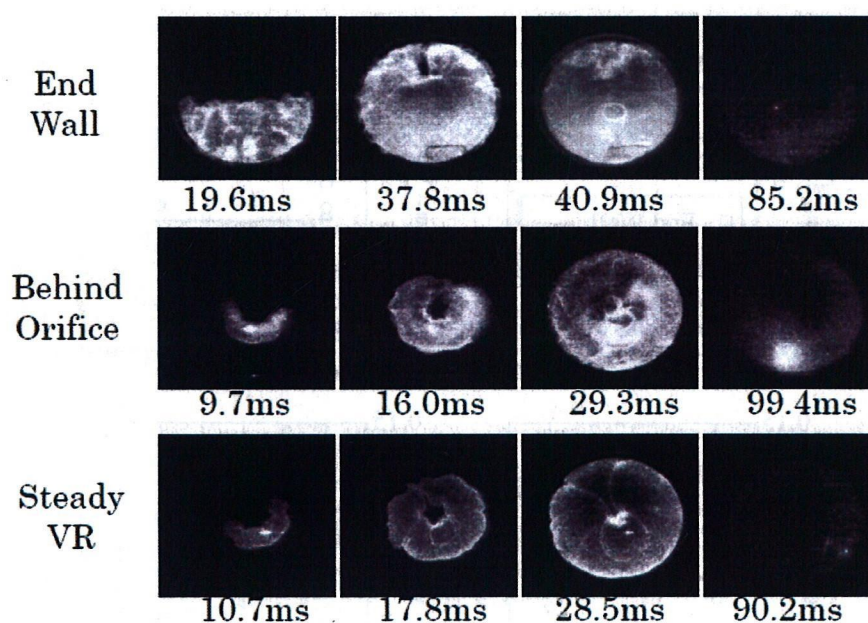


図 37 着火位置を変えた場合の火炎伝播外観

この着火位置を変更した場合の t_c の値 (渦輪に着火してから最高圧力に到達するまでの時間) および、 P_{max} の値 (最高到達圧力) を強さの異なる 2 つの渦輪 ($V_{\theta max} = 5.5 \text{ m/s}$, 11 m/s) について測定した。その結果を図 38 に示す。ここで、□印は対向壁に衝突させた後に渦輪に着火した場合、△印はオリフィス直後の渦輪に着火した場合、○印は定常進行の渦輪に着火した場合、●印は渦輪を用いなかった場合の結果である。

一見して、渦輪を用いなかった場合に比べ、どの位置で渦輪に着火しても t_c の値は小さくなり燃焼時間が短縮化され、最大到達圧力 P_{max} も大きくなることがわかる。また、 $V_{\theta max} = 5.5 \text{ m/s}$ よりも $V_{\theta max} = 11 \text{ m/s}$ の方がその差が顕著になり、すなわち、渦が強くなる程燃焼時間の短縮化と高出力化が期待できることがわかる。

また、着火位置による違いを詳しく調べると、壁に衝突した渦輪に着火した場合、定常移動の渦輪に着火した場合と同程度の燃焼時間の短縮化と最大到達圧力が得られるのに対し、オリフィス出口近傍の非定常渦輪に着火した場合は、さほどの短縮化・最大到達圧力が得られないことがわかる。したがって、実用上、渦輪と対向位置の壁面上で渦輪を着火すると、効率的に燃焼の短縮化や高出力化（最大到達圧力の高圧化）が図られるという知見が得られた。なお、壁面に衝突した場合の渦輪の燃焼については、安里ら[Asato, K., Hiruma, T., Wada, H., Proc. 2nd Intern. Symp. on Scale Modeling, pp.257-269(1997).]により実験され、渦輪が伸張されることにより火炎伝播速度が増加することが見出されており、この伸張による高速化と壁面近傍での火炎面の拡大により燃焼時間の短縮化・高出力化が達成されたものと考えられる。

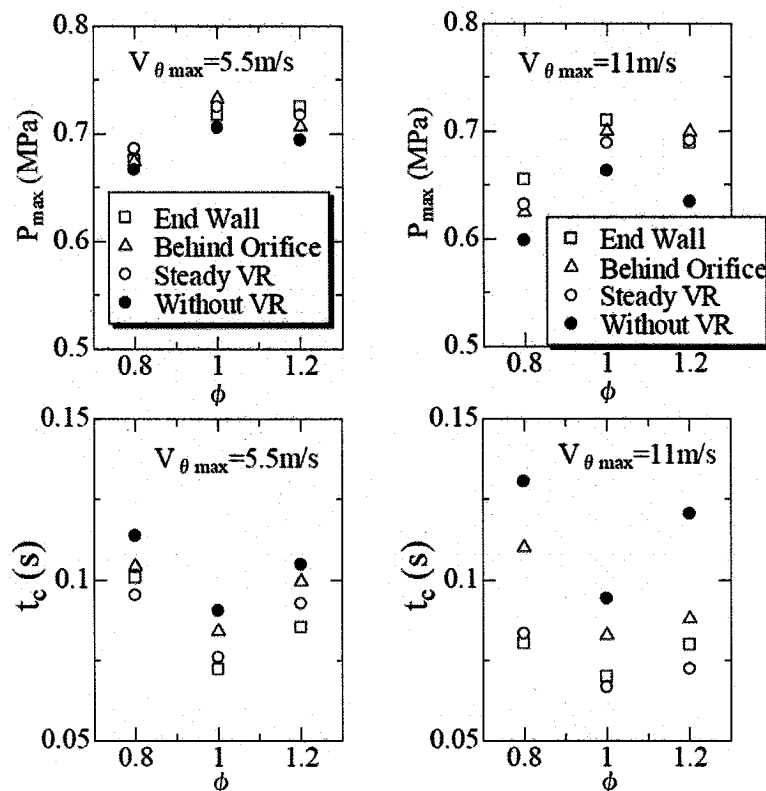


図 38 着火位置を変えた場合の最大到達圧力 P_{max} およびその到達に要する時間 t_c の変化

以上、渦輪による密閉容器内燃焼の高速化を図るべく、渦輪に対する密閉容器の相対的大きさや渦輪に対する着火位置の影響を調べ、その結果、(1) 単純に、相対的大きさを大きくすれば高速化が図られるというわけではなく、ある最適な相対的大きさがある、また、(2) 定常進行の渦輪、オリフィスから押し出された直後の渦輪、壁に衝突させて広がった渦輪のどれに着火しても、渦輪を用いない場合に比べて、最高到達圧力が大きくなり、到達時間も短くなるが、衝突渦輪を用いると渦輪の強度に無関係に良好な結果が得られるという、実用上有用な知見が得られた。

(2) 初期雰囲気気圧の影響

[まえがき]

次に実用燃焼器への適用で問題となるのは、初期圧力の影響である。たとえば、火花点火機関では、圧縮して 10 気圧程度まで高圧にしてから点火する。そこで、ここでは、まず、第一段階として、簡易的な円筒フードを用い、非燃焼実験で雰囲気気圧を 4 気圧まで上げて渦輪の特性の変化を把握し、また、容器の耐圧の問題もあるので、雰囲気気圧を 2 気圧まで上げるに留めて燃焼実験を行った。しかる後に、これらの経験をもとに、耐圧燃焼器を設計し、雰囲気気圧 3 気圧までの燃焼実験を行った。円筒フードは、内径 138mm、長さは 100 mm、耐圧燃焼器は、140mm x 140mm の矩形断面、長さ 290mm の直方体である。

[円筒フードを用いた実験]

まず、円筒フードを用いた実験結果について述べる。混合気の着火は、オリフィス(直径 $D_o = 30\text{mm}$)の後方に電極を設置し、渦輪の進行に同期させて行った。点火後、容器内の圧力上昇によりピストンが押し戻されるのを防ぐため、ピストンには駆動後、電磁弁を介して必要な圧力がかかるようになっている。これらの動作は、パルスジェネレーターを用いて 0.001 秒のタイミングまで制御した。燃焼室内の圧力は、圧力センサー(PCB, HM102A06, 最大圧 68.95MPa, 応答時間 $1.0 \mu\text{sec}$)の出力をデジタルオシロスコープ(IWATU, Wave Runner, 64 kwords x 4 channels, 最小サンプリングレート: 500 MS/s)で記録して行った。また、火炎伝播の様子はイメージインテンシファイア(Nac, ILS-3, 解像力 28 lp/mm)を用いて燃焼光を増幅可視化し、高速度ビデオカメラ(コダック HS-4540, 4500 コマ/秒)で撮影した。初期圧の設定は、オリフィス流量計と密閉容器間にピストン・シリンダを設置し、混合気を圧縮することで行った。実験条件をまとめて表 2 に示す。

表 2 密閉容器内燃焼の実験条件

Fuel	CH ₄		
Hood Length (mm)	100		
Ignition Distance (mm)	100		
Piston Stroke (mm)	15		
Orifice Diameter (mm)	30		
Initial Ambient Pressure(MPa)	0.1	0.15	0.2
Driving Pressure for Piston (MPa)	0.6	0.65	0.7
Equivalence Ratio, ϕ	0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.3		

[非燃焼時の渦輪の特性の雰囲気気圧による変化]

初期圧を 1,2,3,4 気圧とした時の渦輪の速度ベクトル、速度分布の結果をそれぞれ図 39-52 に示す。なお、ピストンの駆動圧は初期圧力に比べ 0.5MPa 大きい圧力を用いた。

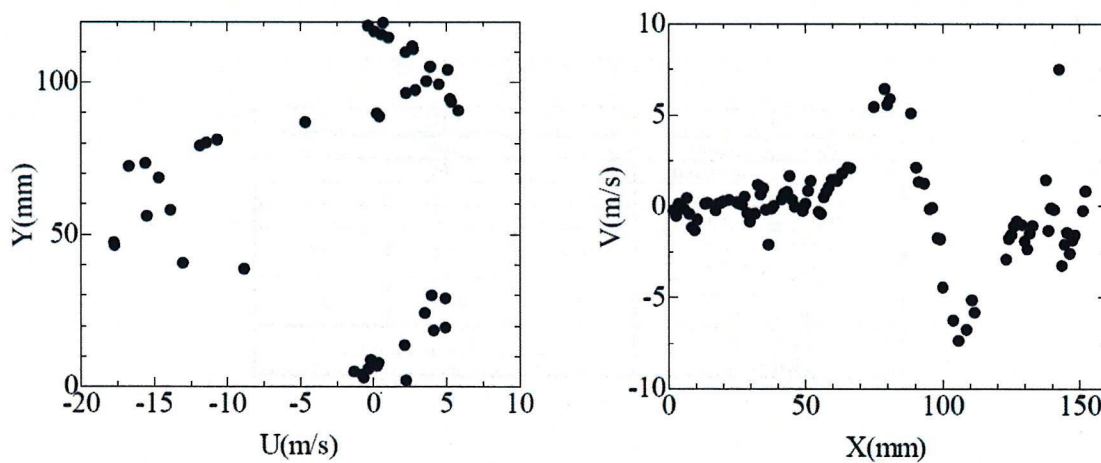
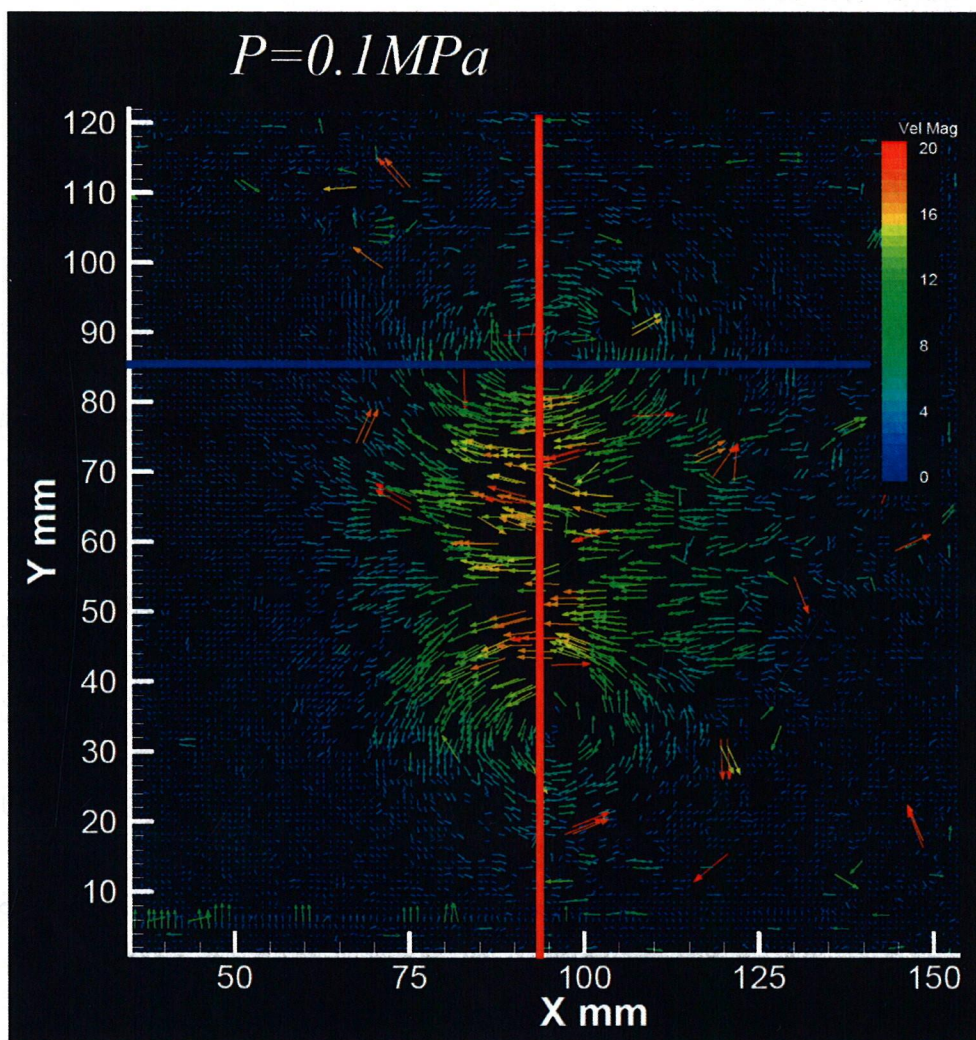


図 39 非燃焼時の渦輪の速度ベクトル，および，速度分布（初気圧：0.1MPa）

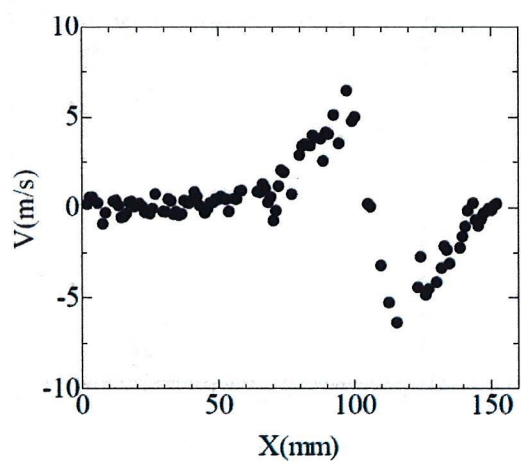
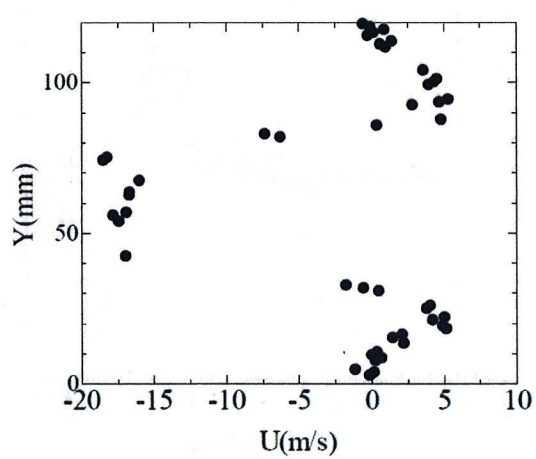
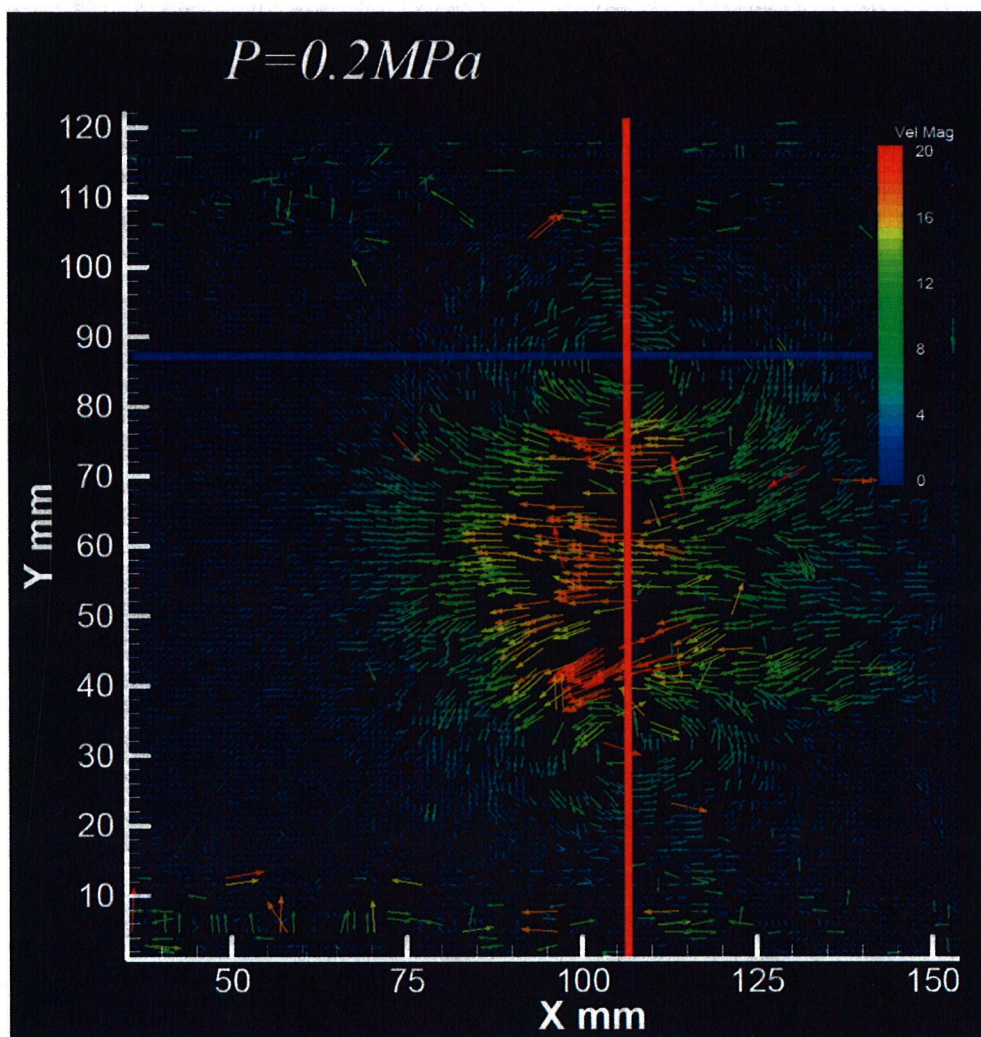


図 40 非燃焼時の渦輪の速度ベクトル, および, 速度分布 (初気圧 : 0.2MPa)

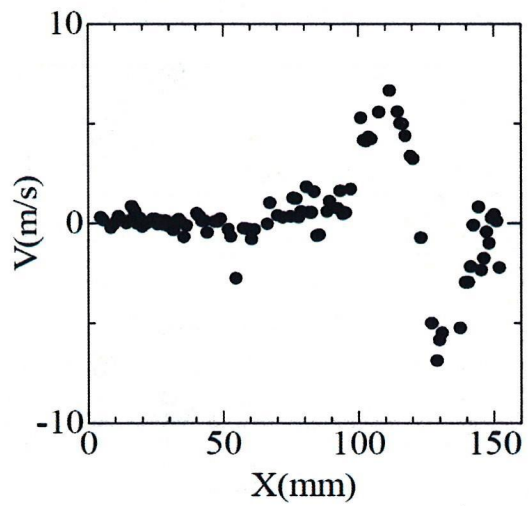
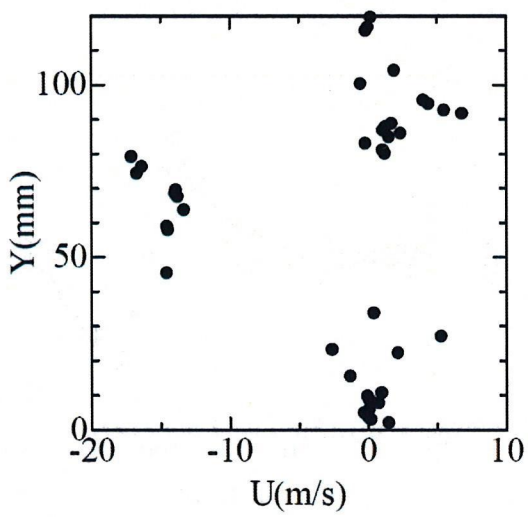
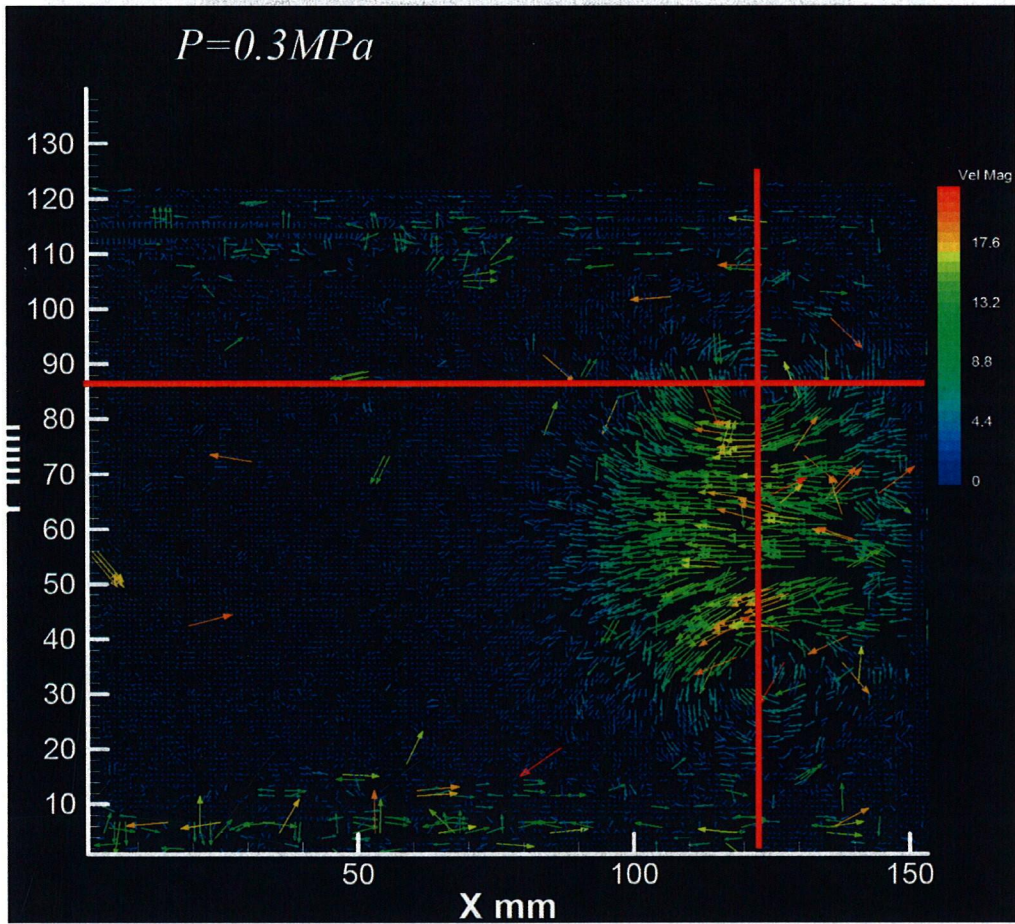


図 41 非燃焼時の渦輪の速度ベクトル，および，速度分布（初気圧：0.3MPa）

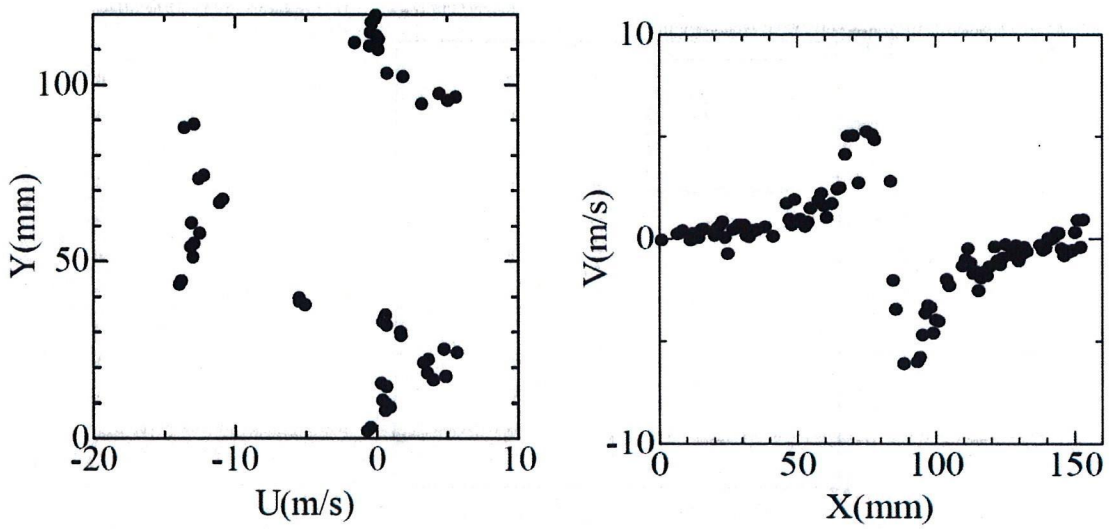
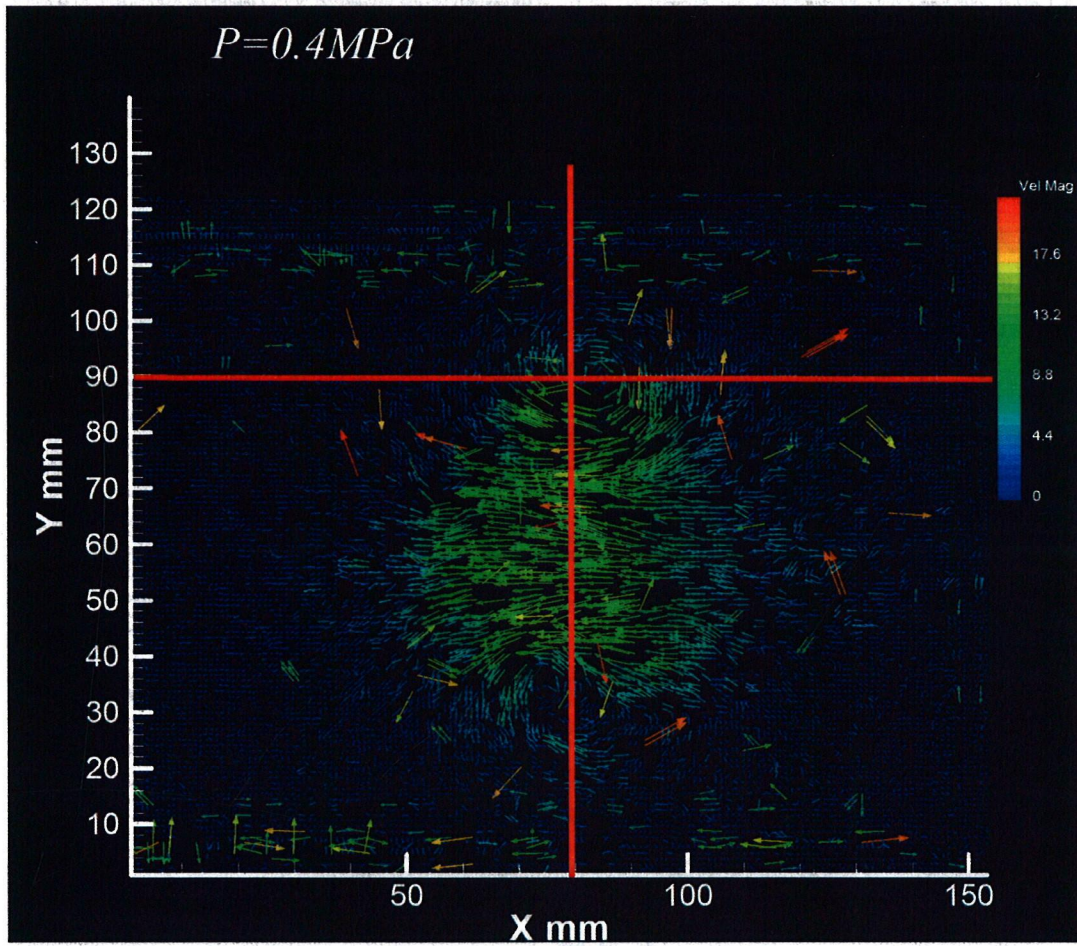


図 42 非燃焼時の渦輪の速度ベクトル, および, 速度分布 (初気圧 : 0.4MPa)

以上のデータをまとめたのが図 43, 図 44 である。初期圧の増加とともに、渦輪の移動速度はわずかではあるが、徐々に減少し、また、最大周速度も減少する傾向がある。一方、渦輪の直径および渦核の大きさは、ほとんど雰囲気圧力に対して変化していない。

高圧になる程、動粘性係数が小さくなるため、渦核や最大周速度が変化することが予想されたが、4気圧程度までであれば、その影響がないということが確認された。また、今回の測定では、ピストンの駆動圧を雰囲気圧力に対し一定値 0.5MPa だけ高く設定したが、雰囲気圧力が大きくなると密度が増加するので、このため、駆動力不足となって最大周速度の値が低下したものと考えられる。ただし、その程度は、1気圧と4気圧を比較すると、2割程度と少ないことが明らかとなった。

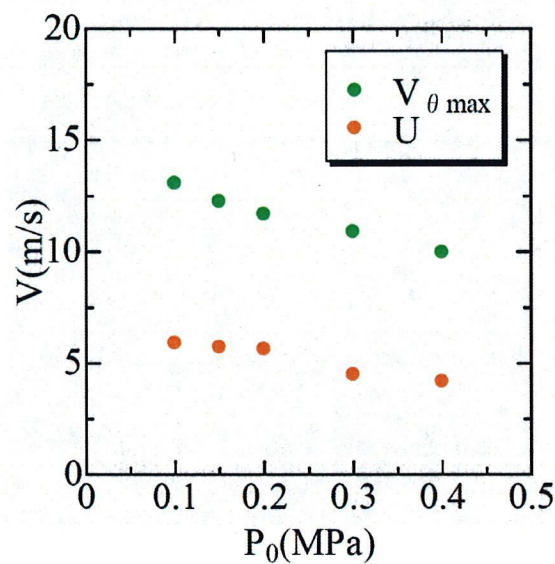


図 43 初期圧力による最大周速度の変化

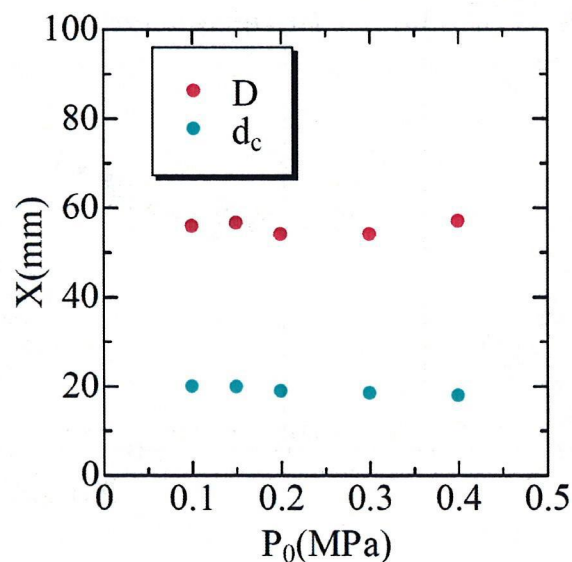


図 44 初期圧力による渦輪直径Dおよび渦核直径 d_c の変化

[伝播火炎外観]

次に、燃焼実験を行った。図 45 に、 $\Phi=1.0$ のメタン・空気混合気中において、初期圧力がそれぞれ(a) $P_0 = 0.1\text{MPa}$, (b) $P_0 = 0.15\text{MPa}$, (c) $P_0 = 0.2\text{MPa}$ の場合の、渦輪に着火後の火炎伝播の様子を示す。画像は、着火後に二手にわかれて渦芯上を伝播する火炎が、左から順に、 $1/4$ 周した時、火炎が着火点の反対側で出会う前後、火炎が密閉容器の断面をほぼ覆った時、密閉容器内の圧力がピーク値に達した時のものである。画像下の数値は火炎に着火してからの経過時間を示している。

画像(a), (b), (c)より、初気圧力を増加させた場合でも、大気圧下と同様に、渦芯に沿って火炎が伝播している様子が伺える。時間経過を見ても、ほぼ同じような値を示すことがわかる。また、初期圧力を増加させるにつれて、渦芯に沿って伝播する火炎が太くなっていることが確認できる。さらに、火炎が着火点の反対側で出会う前後の経過時間を見ると、 $P_0 = 0.1\text{MPa}$ では約 7ms であるのに対し、 $P_0 = 0.2\text{MPa}$ では約 9ms となり、伝播速度が遅くなっていることがわかる。これは、今回の実験では、ピストンの駆動圧を未燃ガスに対し一定値 0.5MPa 高く設定したため、密度の大きい初期圧 0.2MPa の場合、駆動力不足で渦輪の最大周速度の値が小さくなったことに起因していると考えられる。

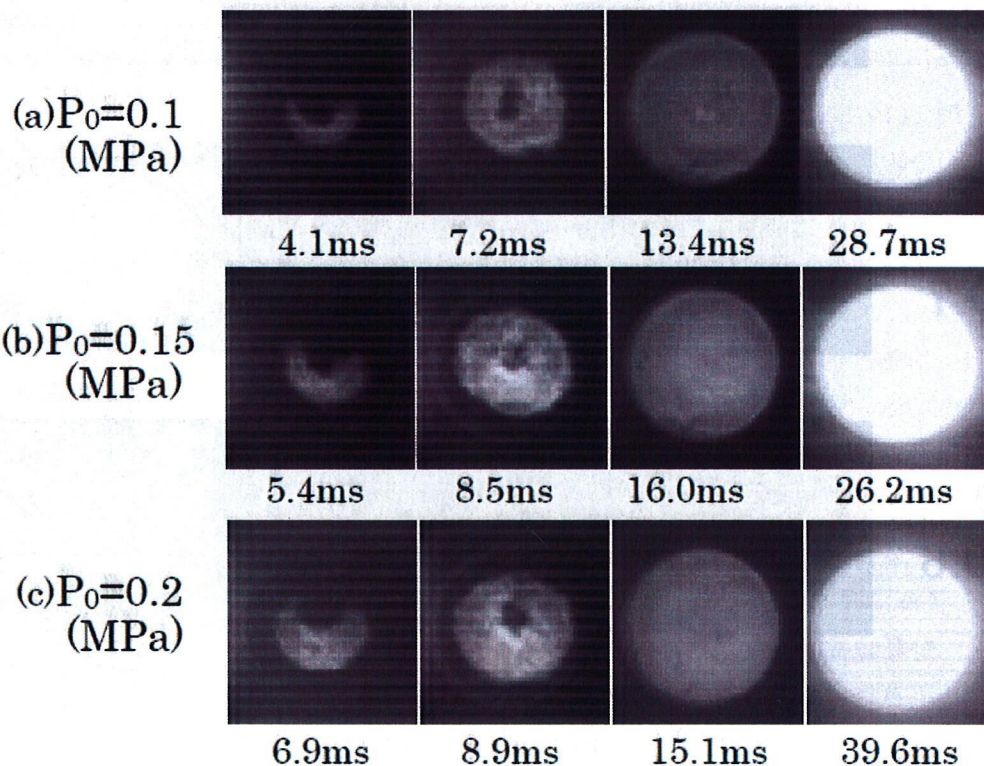


図 45 初期圧力による伝播火炎外観の変化

次に、図 46 に、初期圧力 0.2[MPa]の条件下で、それぞれ、(d) $\Phi=1.3$ 、(e) $\Phi=1.2$ 、(f) $\Phi=0.7$ 、(g) $\Phi=0.6$ の場合の、渦輪に着火後の火炎伝播の様子を示す。画像の詳細は、Fig. 2 と同様である。これより、(e)、(f)では、(e)と同じよう火炎伝播の様子を示すのに対し、可燃限界に近い(d)、(g)では、渦輪に着火後、渦輪の直径が拡がりながら火炎が伝播している様子が伺える。これは、火炎伝播速度が遅いため、渦芯に沿って火炎が伝播している途中、渦輪が対向壁に衝突していることに起因している。

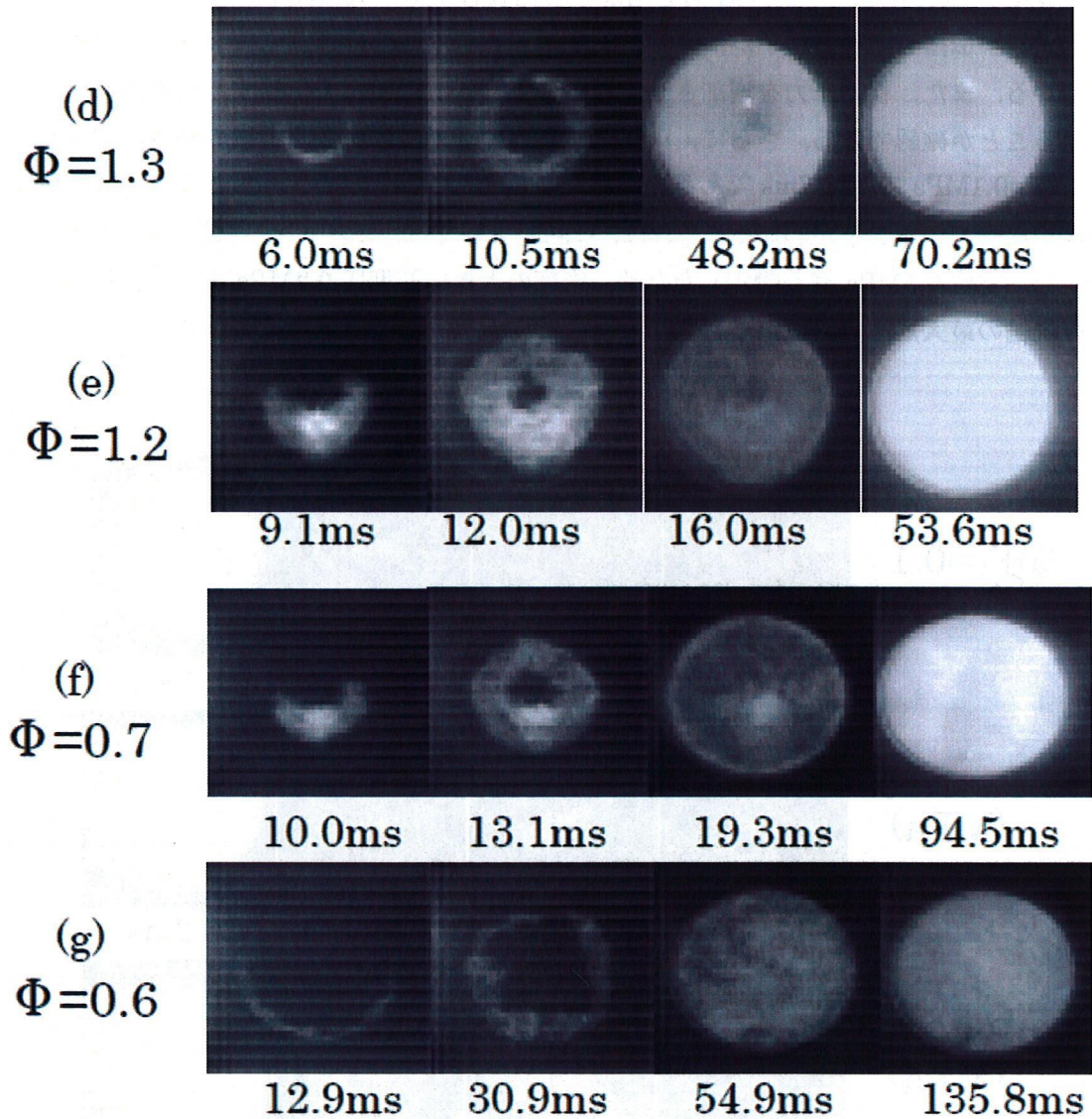


図 46 初気圧 0.2MPa における当量比による伝播火炎外観の違い

[密閉容器内圧力の時間変化, および, 最高到達圧力と到達時間]

表 2 に示した各実験件について, 着火後の容器内圧力の時間変化を求めた結果を図 47 に示す. ここでは, $\Phi=0.7$ における, 渦輪を用いなかった場合 (Without) と渦輪を用いた場合 (With) の圧力の時間変化を初期圧力をパラメータとして示す.

まず, 渦輪を用いなかった場合(図 47(a)), $P_0=0.2\text{MPa}$ の時, 伝播速度が遅くなるため t_c の値は非常に大きくなる. 一方, 渦輪を用いた場合(図 47(b)), 初期圧力に関わらず, t_c はほぼ一定となっている. これらより, 圧力が 1MPa を超えるような高圧燃焼の場合, 渦輪を用いると, 高圧希薄燃焼においも著しく燃焼を高速化でき, 且つまた, 燃焼時間を一定に制御することができるという可能性が明らかになった

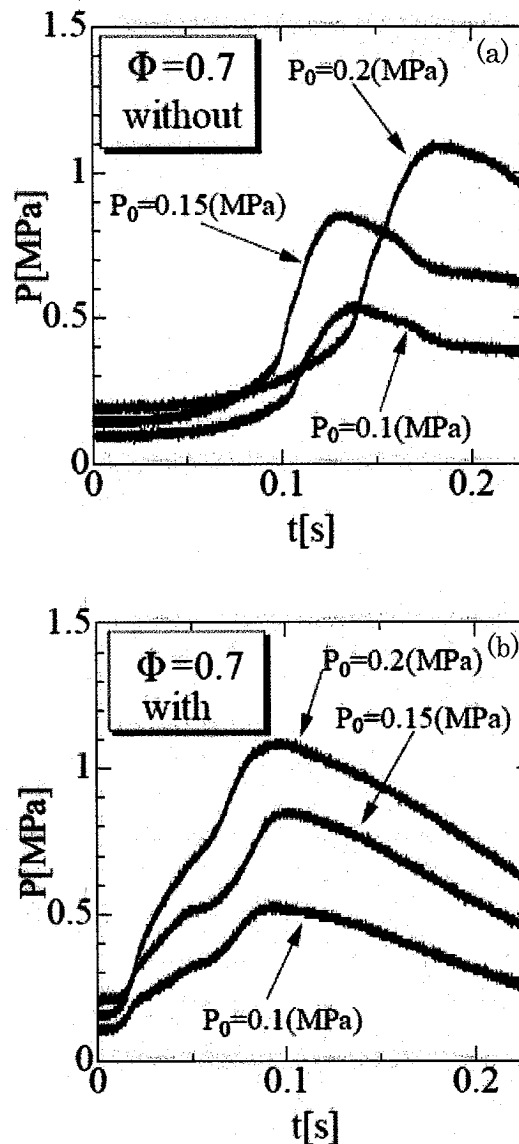


図 47 容器内圧力の時間変化に及ぼす初期雰囲気圧力の影響 ((a)渦輪無, (b)渦輪有)

次に、最高到達圧力に達するまでの時間 t_c を測定した結果を図 48 に示す。上のグラフが、渦輪を用いなかった場合(Without), 下のグラフは渦輪を用いた場合(With)のもので、当量比をパラメータとして示す。まず、渦輪を用いない場合[図 48(a)], $\Phi=0.8, 0.7, 0.6$ の燃料希薄領域側では、 $P_0=0.2\text{MPa}$ の時、 t_c の値が大きくなっている。特に可燃限界に近い $\Phi=0.6$ では初期圧力増加による変化が著しい。これに対し、渦輪を用いた場合[図 48(b)], 初気圧 P_0 が増加しても、各当量比における t_c の値に、それほど変化はなく、ほぼ一定である。したがって、渦輪を用いると、幅広い当量比の範囲で、燃焼時間を一定に制御できることがわかる。

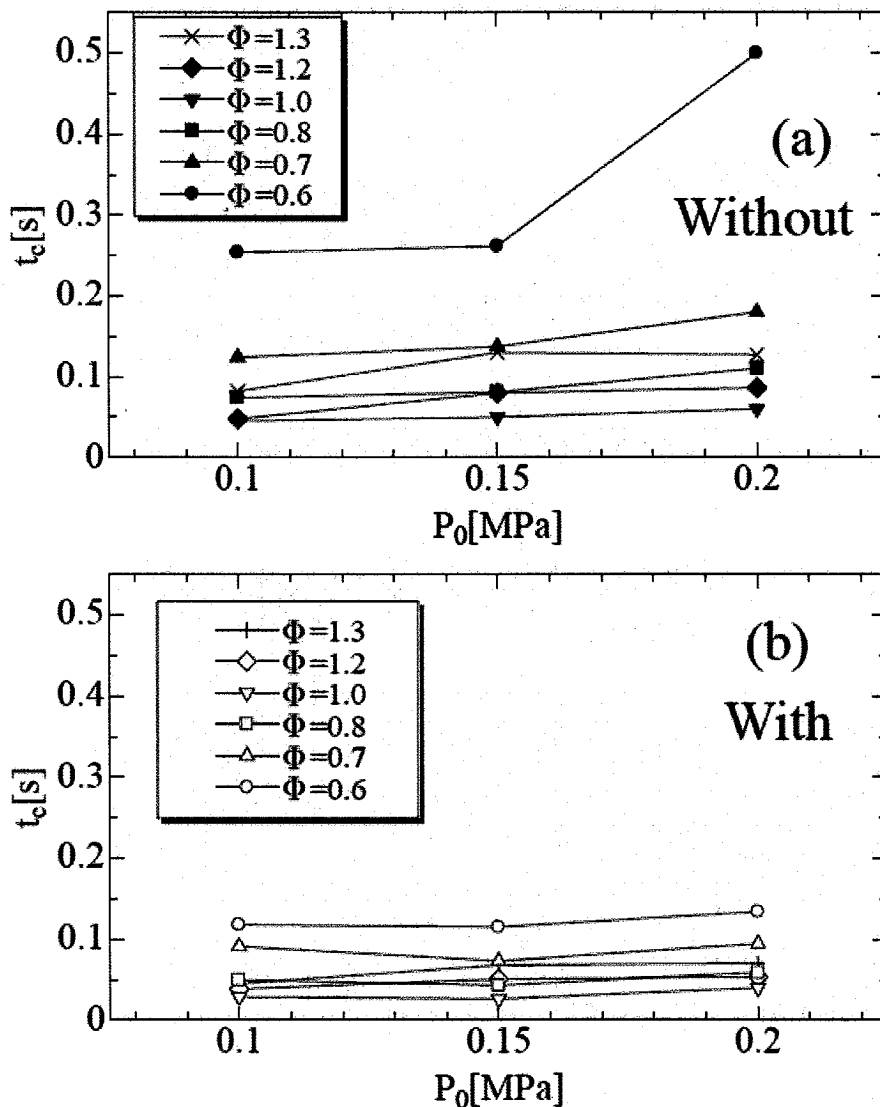


図 48 初気圧による最高圧力到達時間 t_c の変化 ((a)渦輪無, (b)渦輪有)

[耐圧容器を用いた実験]

次に、耐圧燃焼器を渦輪発生装置の出口に取り付け、実験を行った。渦輪発生装置の内径は 100mm、一方、密閉容器は、高さ、幅とも 140mm、長さ 290mm の直方体である。実験条件を表 3 にまとめて示す。初期圧力として 0.3MPa まで上げて実験した。

表 3 耐圧燃焼器を用いた実験の条件

Fuel	CH ₄		
Hood Length (mm)	290		
Ignition Distance (mm)	232		
Piston Stroke (mm)	15		
Orifice Diameter (mm)	30		
Initial Ambient Pressure (MPa)	0.1	0.2	0.3
Driving Pressure for Piston (MPa)	0.4	0.5	0.6
Equivalence Ratio, Φ	0.8, 1.0, 1.2		

[渦輪を用いない場合]

まず、初期圧が 0.3MPa の時に、渦輪を用いないとどのように火炎が伝播するかを調べた。図 49 は、メタン・空気混合気中において、初期圧が 0.3MPa の時のそれぞれ(a) $\Phi=1.0$ 、(b) $\Phi=0.8$ の場合の、着火後の火炎伝播の様子を示す。画像下の数値は火炎に着火してからの経過時間を示している。これより $\Phi=1.0$ の場合は着火後、火炎は球状に伝播し、容器内に均一に広がっていくことがわかる。しかし、 $\Phi=0.8$ の場合、浮力の影響を大きく受けるため、火炎伝播開始直後から火炎が上方へと押し上げられ、容器下方への火炎伝播が困難になっていることがわかる。そして、かなりの時間を経て、火炎は容器上半分を覆い尽くした後に容器下部へ徐々に下がってくる

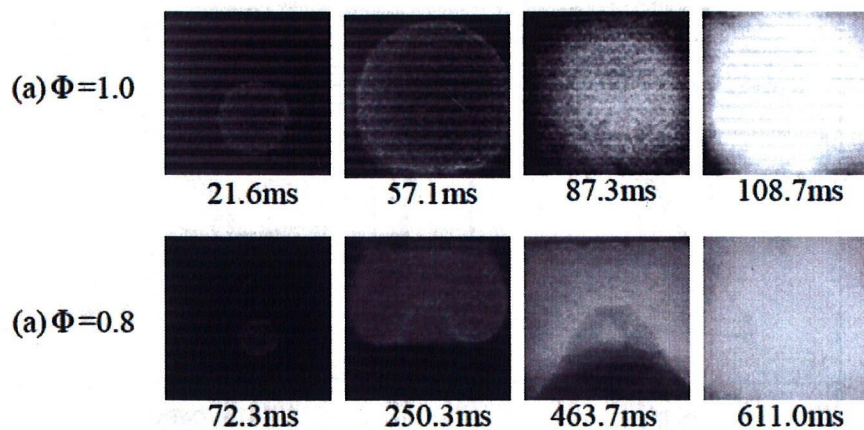


図 49 伝播火炎外観 (渦輪なし, (a) $\Phi=1.0$, (b) $\Phi=0.8$, $P_0=0.3\text{MPa}$)

次に、図50に、(a) $\Phi=1.0$ と(b) $\Phi=0.8$ のメタン空気混合気の燃焼時の圧力の時間変化を初期圧をパラメータとして示す。希薄混合気では燃焼速度が遅いため、初期圧が増加すると浮力の影響を受けやすくなるため、最高到達圧力に達するまでかなりの時間がかかることがわかる。

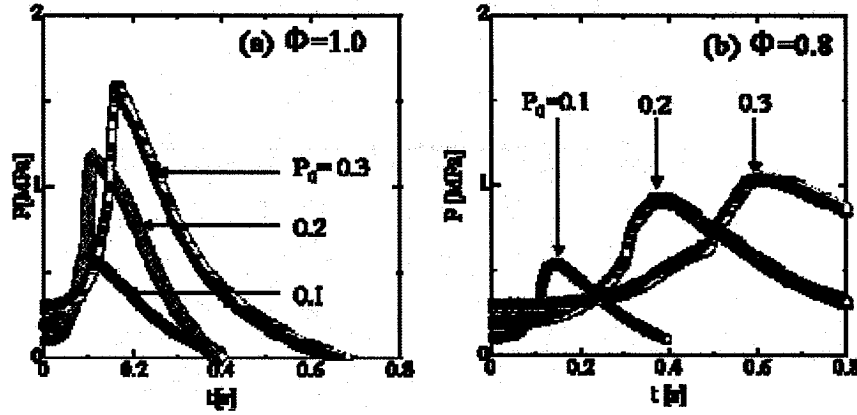


図 50 圧力の時間変化 (渦輪なし, (a) $\Phi=1.0$, (b) $\Phi=0.8$, $P_0=0.3$ MPa)

図 51 に、初期圧を変化させた場合の最高到達圧力に達するまでの時間 t_c を当量比をパラメータとして測定した結果を示す。これより、初期圧の増加に伴い、 t_c の値が大きくなっていることがわかる。特に燃料希薄領域側の $\Phi=0.8$ では、初期圧力による増加が著しい。

また、図 52 には、初期圧を変化させた場合の最高到達圧力 P_{max} を示す。図中の破線は化学平衡計算結果(GORDON のプログラムにより、初期温度 298.15K、定容断熱燃焼を仮定して求めた計算結果)である。希薄混合気では、初期圧が増加すると P_{max} の値が理論値よりかなり小さくなるが、これは燃焼時間の増加に伴う熱損失増加のためと考えられる。

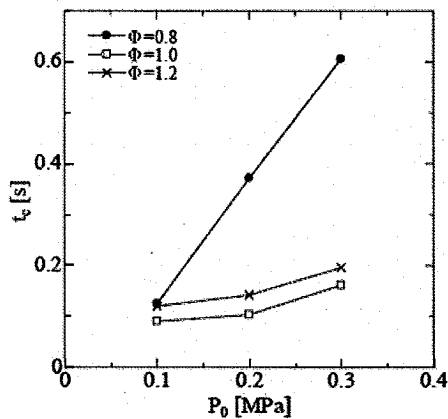


図 50 初期圧力による最大圧力到達時間 t_c の変化 (渦輪無)

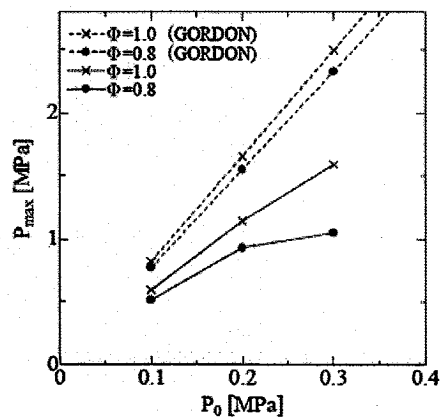


図 51 初期圧力による最大到達圧力 P_{max} の変化 (渦輪無)

[渦輪を用いた場合]

図 52 に、 $\Phi=1.0$ のメタン・空気混合気中において、初期圧がそれぞれ(a) $P_0=0.1\text{MPa}$ 、(b) $P_0=0.2\text{MPa}$ 、(c) $P_0=0.3\text{MPa}$ の場合、(d) $\Phi=0.8$ 、 $P_0=0.3\text{MPa}$ の場合の、渦輪に着火後の火炎伝播の様子を示す。画像は、着火後に二手にわかれて渦芯上を伝播する火炎が、左から順に、1/4 周した時、火炎が着火点の反対側で出会う前後、火炎が密閉容器の断面をほぼ覆った時、密閉容器内の圧力がピーク値に達した時のものである。

画像(a), (b), (c)より、初気圧力を増加させた場合でも、大気圧下と同様に、渦芯に沿って火炎が伝播している様子が伺える。時間経過を見ると、火炎が着火点の反対側で出会う前後の経過時間は、 $P_0=0.1\text{MPa}$ では約 5ms であるのに対し、 $P_0=0.2\text{MPa}$ では約 7ms となり、若干ではあるが、伝播速度が遅くなっていることがわかる。また、初期圧力を増加させるにつれて、渦芯に沿って伝播する火炎が太くなっていることも確認できる。今回の実験では、事前に各条件での渦輪の最大周速度を調べており、それはほぼ一定の値、約 8.6m/s を示していた。したがって、伝播速度の低下は、2 次的に影響する燃焼速度が初期圧の増加により低下することに起因するものと考えられる。また、実用上重要なことは、燃料希薄の場合(d)でも浮力の影響を受けずに、火炎が円滑に伝播していることである。

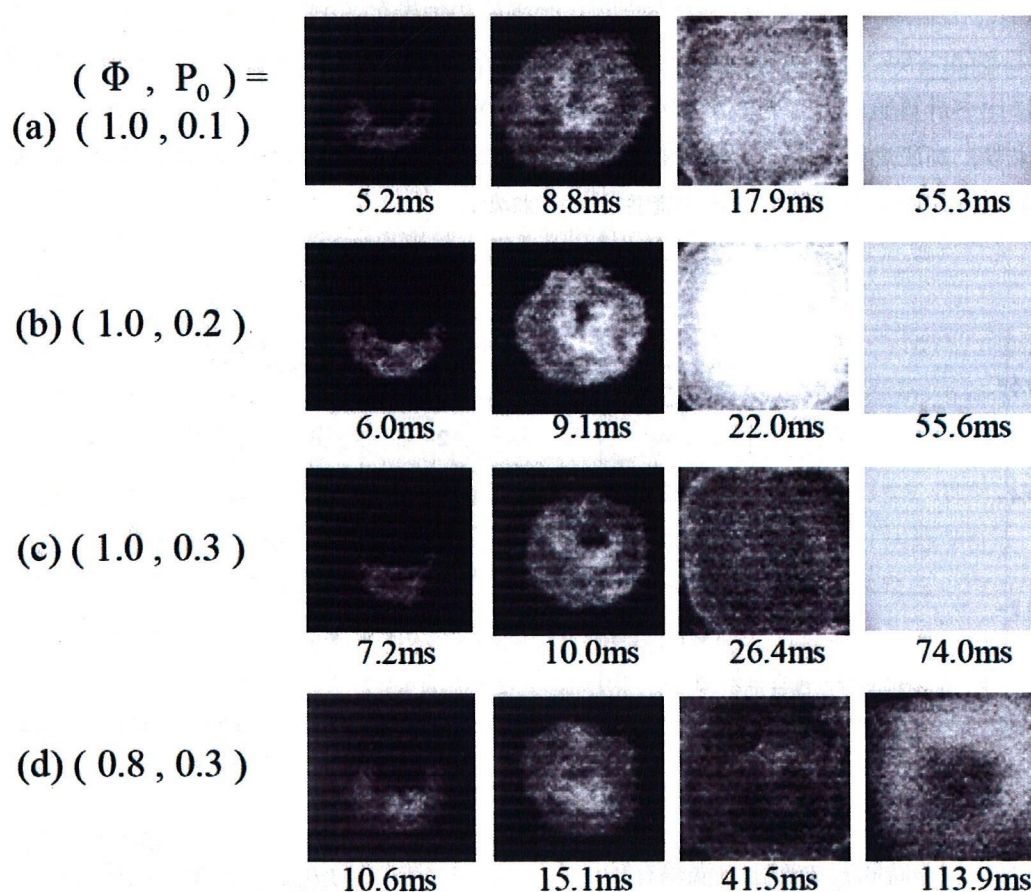


図 52 伝播火炎外観 (渦輪あり)

次に、図 53 に、それぞれ(a) $\Phi=1.0$, (b) $\Phi=0.8$ におけるメタン・空気混合気の圧力の時間変化を、初期圧をパラメータとして示す。これより、燃料希薄時でも、火炎伝播が円滑に行われるため、初期圧の増加による t_c の値の変化があまりないことがわかる。

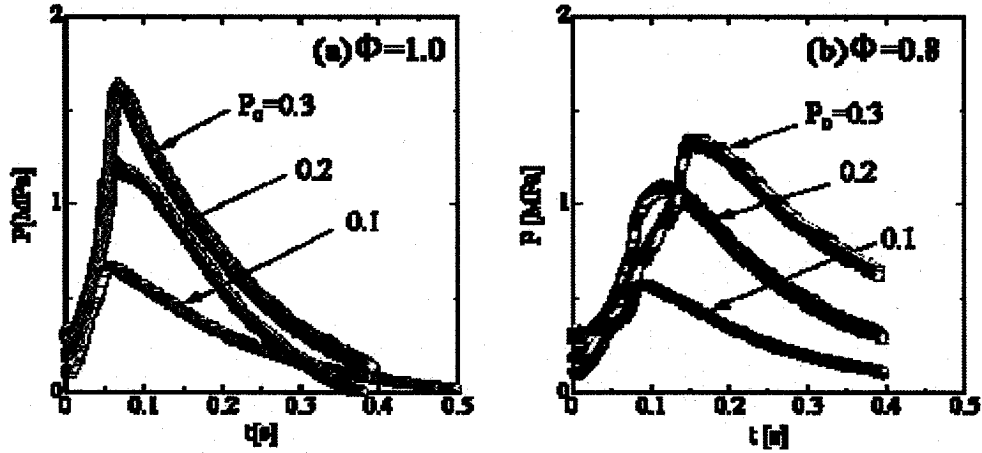


図 53 圧力の時間変化 (渦輪あり, (a) $\Phi=1.0$, (b) $\Phi=0.8$, $P_0 = 0.3 \text{ MPa}$)

実際に最高到達圧力に達するまでの時間 t_c を求めた結果を図 54 に示す。希薄混合気でもほぼ一定となっている。また、最高到達圧力 P_{max} の値を調べると (図 55), 渦輪を用いない場合に比べ計算値に近づき、かなり改善されていることがわかる。

これより、高圧燃焼の場合、渦輪を用いることにより燃焼速度の遅い希薄混合気の燃焼時間や最大到達圧力を改善できる可能性が示された。

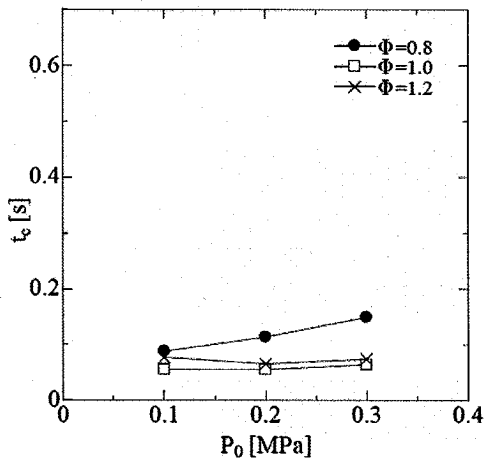


図 54 初期圧力による最大圧力到達時間 t_c の変化 (渦輪有)

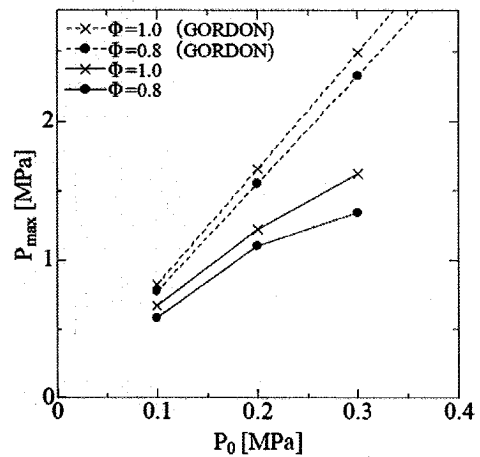


図 55 初期圧力による最大到達圧力 P_{max} の変化 (渦輪有)

4. まとめ

本研究では、燃焼により誘起されるボルテックス・ブレイクダウン現象について、PIVと光増幅光学装置付き高速度ビデオカメラの同時測定を行い、その詳細を実験的に調べた。渦としては渦輪を用い、大気圧下での実験と密閉容器内での実験の二つに分けて系統的に行った。

大気圧下での実験では、特に厳密に火炎速度と最大周速度の関係を求め、火炎速度は概ね最大周速度に等しいがものの、最大周速度の増加に伴い火炎直径は減少し、渦核直径より小さくなると、火炎速度が最大周速度を下回るようになること、火炎先端には渦芯に沿って軸速度が誘起され、その速度は最大周速度にほぼ等しいこと、を明らかにした。また、渦核の直径が、火炎が到達する以前から徐々に増加し、火炎通過後は理論混合気で2倍程度増加すること、また、それに伴って最大周速度は減少すること、なども明らかになった。

一方、内燃機関など実用燃焼器に供するための基礎的知見を得ることを目的に密閉容器内で渦輪の燃焼を行い、渦輪の燃焼を用いると、渦輪を用いない場合に比べ、点火から最大圧力に達するまでの時間が短縮され、かつまた、その最大到達圧力も定容燃焼の理論値に近づくこと、初期圧が高くなっても、浮力による火炎伝播の阻害にうち勝って、渦芯に沿って火炎が円滑に移動し、燃焼速度の遅い希薄混合気でも最大圧力に達するまでの時間が一定に制御できること、また、その最大到達圧力も定容燃焼の理論値に近づけることができること、などが明らかになった。

以上、本研究により、渦という流体力学的な要素を用いて、内燃機関の燃焼の高速化・高出力化を図ったり、円滑な火炎移動操作により異常燃焼であるノッキングを抑制したりするなどの可能性があることが裏付けられた。