スワール・タンブルによる乱流生成と燃焼特性*

漆原友則^{*1}, 村山太一^{*2}
李奇衡^{*3}, 高木靖雄^{*1}Turbulence and Cycle Variation of Mean Velocity Generated
by Swirl and Tumble Flow, and Their Effects on CombustionTomonori URUSHIHARA, Taichi MURAYAMA,
Ki-Hyung LEE and Yasuo TAKAGI

Combinations of swirl flow and tumble flow generated by 13 types of Swirl Control Valves were tested using both an impulse swirl meter and LDV. The LDV used in this study was developed especially for engine research to realize stable beam crossing at very narrow beam waists to achieve high spatial resolution measurement. It is shown that tumble flow generates turbulence in the combustion chamber more effectively than swirl flow, and that swirl reduces the cycle variation of mean velocity in the combustion chamber. Performance tests are also carried out to determine the combustion characteristics under the condition of homogeneous charge. Tumble flow promotes combustion to a greater extent than expected from its turbulence intensity. It is also shown that the lean-limit air/fuel ratio is not strongly related to cycle variation of mean velocity but to turbulence intensity.

Key Words: Gasoline Engine, Swirl, Tumble, Flammability Limit, LDV, Turbulence Intensity, Cycle Variation of Mean Velocity, Combustion Period

1. ま え が き

エンジンの燃費改善のためのおもな方策の一つである希薄燃焼のためには、シリンダ内に強い乱れを作る必要があることが知られている。一方、シリンダ内ガス流動のサイクル変動は同じランダム変動でありながら、希薄空燃比下の燃焼の安定化にとっては有害であると予想される。

本研究では吸気ポート端面に十数種類のスワールコントロールバルブを適用することによってさまざまなスワール比・タンブル比の組合せを得ると同時に、燃焼室内にはさまざまな乱れ・サイクル変動の組合せを生成した。

さらに、これらの仕様について均質予混合気にて性能実験を行い、定常流特性値と駆動運転時燃焼室内ガス流動の関係、および燃焼室内ガス流動とエンジン性能の関係について考察を加えた。研究概念を図1に示

す。

一方、乱れと流動のサイクル変動の分離周波数について従来よりいくつかの議論が行われてきているが、流動の側面だけでは分離周波数を決めることができないことを既報⁽¹⁾で報告した。本研究では、流動と燃焼の両測定結果から分離周波数に関する考察を行った。

2. 供試機関と計測法

2・1 供試機関 供試機関はペントルーフ形燃焼室を有する四弁機関である。表1にこのエンジンの主要諸元を示す。さまざまな強さのスワールおよびタンブルを形成するために、図2に示すような吸気ポート

図1 研究概念

* 原稿受付 平成5年11月24日。

*1 正員、日産自動車(株)動力機構研究所 (〒237 横須賀市夏島町1)。

*2 日産自動車(株)第1パワートレイン実験部 (〒230 横浜市鶴見区大黒町6-1)。

*3 正員、漢陽大学工学部 (〒425-791 韓国安山市大学洞396)。

端面のスワールコントロールバルブを使用した。

本研究では均質混合気の条件において乱れとサイクル変動がどのように燃焼に影響を与えるかを解明することを目的としている。そこで、各燃焼特性を測定するための性能実験では、ポート燃料噴射方式よりもより均質な混合気が得られると考えられるスロットル直上での燃料噴射とトーナメントタイプのインテークマニホールドとの組合せを選択した。さらに、燃料の気化を促進するためにスロットル下流に電気ヒータを設けたほか、後述する運転条件にて燃料の気筒分配が最適となるようインテークマニホールドの形状を調整した。

一方、LDV によるガス流動測定実験では、性能実験を行ったエンジンのシリンダヘッドと同一のシリンダヘッドを共通のシリンダ内径をもつ単気筒エンジンに取付けて駆動運転を行った。

2.2 流動測定法

2.2.1 回転回折格子式 LDV による燃焼室内ガス流動測定 エンジンに適用する LDV に望まれる条件として次のような項目が挙げられる。

(1) 長焦点の後方散乱方式であること。実用的燃焼室形状を保ったまま吸入行程および圧縮行程のシリンダ内ガス流動を測定するには透明なピストンヘッドを通して計測できることが望ましいからである。

(2) 乱れとサイクル変動を分離するための十分なデータレートが安定的に得られること。

(3) 測定体積が十分に短く、空間的速度こう配が乱れとして過って計測されないこと。図3に測定体積の長さが乱れの測定に及ぼす影響を示す。

項目(1)については光学系のレイアウトとレンズ焦点距離の選択により、また近年登場した光ファイバカップリングの後方散乱 LDV を利用することにより実現できる。

しかしながら、項目(1)～(3)を同時にすべて満足させることは容易ではない。著者の経験では光学的 SN 比と空間分解能を向上させる目的で測定体積におけるビームウエスト径を小さくすると、特に長焦点距離のフロントレンズを使用する場合には、2本のレーザービームをビームウエストで恒常的に交差させることが困難であった。また著者の経験では、ブラッグセルにより電氣的な周波数シフトを行った場合フォトマルで検出されるドップラーバースト信号には周波数シフトに起因する電氣的ノイズが重なり、このノイズを完全に取り除くことはできなかった。この現象は受光できる散乱光強度が小さい長焦点の後方散乱方式 LDV においては測定に悪影響を及ぼす。

これらの困難を根本的に解決するために回転回折格子式 LDV を製作した。この方法は比較的古くから存在し⁽²⁾、次のような特徴を有する。

(1) 測定体積でのレーザービームの交差が原理的に保証されること (self-aligning であること)。このことはビームウエスト径が小さく、かつ、長焦点のフロントレンズを使用する場合重要となる。

(2) ビームウエスト径を1枚のレンズの交換により任意に選択できること。

(3) 偏光についてまったく考慮する必要がないこと。

表 1 供試機関の諸元

Engine Type	4-Stroke, 4-Cylinder, 4-Valve, S.I. Engine
Bore×Stroke	Φ82.5×86mm
Displacement	460cm ³
Compression Ratio	9.5
Combustion Chamber	Pentroof

図 2 スワールコントロールバルブの形状例

図 3 LDV の測定体積長が乱れの測定に及ぼす影響

(4) 周波数シフトに起因する電氣的ノイズがないこと。本研究のために製作した LDV ではさらに、

(5) フォトマルピンホールをレンズ系と同軸に配する後方散乱方式のレイアウトを採用した。

(6) 穴あき集光レンズを使用し可能な限り受光 F 値を小さくした。

以上の工夫を行い SN 比の向上をはかった。図 4 に実験に使用した LDV の構造を示す。表 2 にはこの LDV の諸元を示す。

データの処理は図 5 に示す概念に基づき、ミニコンピュータで行った(図 5 中 C. B. C. V. はサイクル変動 Cycle By Cycle Variation の意)。

乱れと平均流速を分離するためのフィルタには 10°

表 2 供試 LDV の諸元

Front Lens Focal Length	450mm
Intersection Half-Angle	4.85 deg.
Beam Expansion Ratio	4.5
Measuring Volume	$\Phi 0.05 \times 0.59 \text{ mm}$
Fringe Spacing	$3.04 \mu\text{m}$
Light Collection F#	3.0
Frequency Shift	13.1 MHz

図 4 供試 LDV の構造

図 5 乱れの定義

CA の移動平均法を用いた。このとき 1400 rpm の機関回転数に対して、370 Hz のカットオフ周波数となる。

2・2・2 定常流特性の測定 エンジンの燃焼特性に深く関係する定常流特性値として、スワール比とタンブル比がある。これらの特性値を正確に測定するためにハニカムを内蔵したインパルススワールメータとインパルスタンブルメータを製作し使用した。詳細は既報⁽³⁾に述べたので省略する。

なお、シリンダ内に存在する角運動量のうち、タンブル成分の角運動量はシリンダヘッドに対してどの方向を向いているか事前にはわからないため、タンブル比を測定する際にはシリンダヘッドを回転して、タンブル成分角運動量が最も大きく検出される向きを選んだ。

3. 実験結果および考察

3・1 スワール比・タンブル比の存在領域 図 6 は定常流実験に用いた 23 種類のスワールコントロールバルブによって生成される流動場の定常流特性を示したものである。スワール比・タンブル比の存在領域は図 6 中斜線で示す三角形領域となり、純粋な横スワールは得られていない。シリンダ中心軸に対して対称な吸気系を使用しない限りタンブル成分を含まない純粋な横スワールは形成できないため、一般的に、シリンダ内流動場はいわゆる斜めスワールとタンブルに大別される。

3・2 定常流特性値と乱れおよび流動のサイクル変動の関係 定常流実験を行ったスワールコントロールバルブの中から、図 6 に示したスワール比・タンブル比平面上で、ほぼ一様に広く分布するように 13 種類のスワールコントロールバルブを選び、先に述べた LDV を用いてモータリング時の燃焼室内ガス流動測定を行った。表 3 に実験条件を、図 7 に流動の測定点

図 6 供試スワールコントロールバルブの定常流特性

位置を示す。図示の9点にて2方向の流動測定を行い、計18回の計測で得られた乱れおよび流動のサイクル変動を空間的に算術平均して代表値とし、定常流特性値との比較を行った。

3・2・1 定常流特性値と乱れの関係 図8に定常流特性値と乱れとの関係を示す。だ円で囲まれた数字はおおのこのスワールコントロールバルブにおいて計測された燃焼室内の乱れ強さの空間平均値である。また、これらの数字をもとに、おおよその等乱れ線を破線で書き加えてある。スワール比とタンブル比が大きくなるほど乱れ強さは大きくなる傾向がある。定常流試験にて計測される角運動量が同じ場合にはタンブルのほうがスワールよりも燃焼室内に生成される乱れが強いことがわかる。したがって、タンブルはスワールよりも乱れの生成効率が高いといえる。

3・2・2 定常流特性値と流動のサイクル変動の関係

図9に定常流特性値と流動のサイクル変動との関係を示す。だ円で囲まれた数字はおおのこのスワールコントロールバルブにおいて計測された燃焼室内の流動の

サイクル変動の空間平均値である。また、おおよその等サイクル変動線を書き加えてある。タンブル比が大きくなるほど流動のサイクル変動は大きくなる。一方、同一のタンブル比にてスワール比を変化させた場合、スワール比が大きくなるほど流動のサイクル変動は小さくなる。したがってスワールは流動のサイクル変動を抑制する効果をもつといえる。

図8 定常流特性値と駆動運転時の乱れ強さの関係

図9 定常流特性値と駆動運転時の流動
サイクル変動の関係

	LDV Measurement (motoring)	Performance Test	
		Combustion Period Test	Lean Limit Test
Engine Speed	1400rpm	2000 rpm	2000 rpm
Volumetric Eff.	40%	—	—
Pme	—	196kPa	196kPa
A/F	—	14.1	—
Ignition Timing	—	30deg. BTDC	MBT

表3 実験条件

図7 LDV計測における測定点

図10 供試スワールコントロールバルブで得られた
乱れとサイクル変動の関係

3・2・3 乱れと流動のサイクル変動の関係 図10に供試した17種類のスワールコントロールバルブについて得られた乱れと流動のサイクル変動の関係を示す。高周波の変動である乱れの大きさと低周波の変動であるサイクル変動の大きさは必ずしも比例しない。また、純粋なタンブルを形成した場合には乱れ強さの割りに流動のサイクル変動が大きい。

3・3 乱れおよび流動のサイクル変動と機関の燃焼特性 ここでは機関の燃焼特性を表すものとして燃焼期間と希薄燃焼限界を取りあげる。表3に性能実験時の実験条件を示す。

図11は初期燃焼期間と主燃焼期間の関係を、供試した17種類のスワールコントロールバルブについて示したものである。初期燃焼期間と主燃焼期間の間には強い直線関係があるため、本研究では両者を加えて燃焼期間とし流動特性との相関を調べた。

3・3・1 乱れおよび流動のサイクル変動と燃焼期間の関係 図12は乱れ強さと燃焼期間との関係を示したものである。乱れ強さが大きいほど燃焼期間が短

図11 初期燃焼期間と主燃焼期間の関係

図12 乱れ強さと燃焼期間の関係

いという全体的傾向の中で、タンブルグループは実線で示した相関線の下に位置している。タンブルを強化した仕様では乱れ強さがそれほど強くないにもかかわらず、燃焼が最も速くなっている。タンブル場では平均流速場、ことに圧縮上死点近くで形成される強いせん断流場が火炎面の拡大に寄与しているとも解釈できる。

図13に流動のサイクル変動と燃焼期間の関係を示す。流動のサイクル変動が大きいほど燃焼期間が短いという現象が現れている。流動のサイクル変動が最も大きいのはタンブルグループであり、また、このグループは燃焼期間が最も短い。タンブルグループの燃焼が速い理由が、先に述べた強いせん断流場にあるとすれば、そのような流動場が低周波の流速変動を生み出しているといえる。

このように燃焼期間が乱れ強さによって完全には説明できないこと、物理的に燃焼を促進するはずのない流動のサイクル変動と燃焼期間が見掛け上正の相関をもつことから、乱れの定義、特に乱れと平均流速の分離周波数に関して検討を行った。これについては、3・4節で述べる。

3・3・2 乱れおよび流動のサイクル変動と希薄限界空燃比の関係 図14は乱れ強さと希薄限界空燃比の関係を示したものである。なお、平均有効圧力の変動率が4%となる空燃比を希薄限界空燃比であると定義した。乱れ強さと希薄限界空燃比の間にはよい相関があり、乱れの強化が希薄限界空燃比の拡大に有効であることは従来からいわれているとおりである。

図15は流動のサイクル変動と希薄限界空燃比の関係を示したものである。今回の実験結果では両者の相関は小さい。流動のサイクル変動が希薄限界に影響しないということは大変に意外な結果である。均質混合

図13 流動のサイクル変動と燃焼期間の関係

気下では、各サイクルの燃焼の状態が乱れの強さによって支配され、平均流速のサイクルごとの変動には影響されないといえる。吸気ポートに燃料を噴射する場合にはシリンダ内に混合気の不均質が存在することが知られており、本結果がそのままあてはまらない可能性がある。

3・4 乱れと平均流速の分離周波数に関する検討

3・3節では、乱れ強さのみならず流動のサイクル変動が燃焼期間と強い相関をもつこと、流動のサイクル変動が希薄限界空燃比に対して相関をもたないことを示した。これらの現象は物理的に理解し難い現象であるので、乱れの定義について分離周波数の観点から再検討を行った。

分離周波数は流速データ処理の際の移動平均区間で定まるので、移動平均区間を10～200°CAの範囲で変えて検討を行った。

図 14 乱れ強さと希薄限界空燃比の関係

図 15 流動のサイクル変動と希薄限界空燃比の関係

3・4・1 ガス流動特性値と燃焼期間との相関係数

図 16 は乱れおよび流動のサイクル変動と燃焼期間との相関係数が移動平均区間に対してどのように変化するかを示したものである。移動平均区間が長いほど、乱れと燃焼期間の相関係数は大きく、流動のサイクル変動と燃焼期間の相関は小さくなる。この点では200°CAの移動平均区間が最適であるが、従来の値⁽⁴⁾に比べて長すぎる。

ガス流動と燃焼の関係を論ずるには、流動の変動成分(乱れおよび流動のサイクル変動)だけでなく、平均流動場をも考慮する必要があることがわかる。

3・4・2 ガス流動特性値と希薄限界空燃比との相関係数 図 17 にガス流動特性値と希薄限界空燃比との相関係数が移動平均区間によってどのように変化するを示す。希薄限界空燃比と乱れ強さとの相関係数が最も大きく、流動のサイクル変動との相関は小さい。また、これらの相関係数は移動平均区間によって

図 16 乱れの分離周波数が流動特性値と燃焼期間の相関に与える影響

図 17 乱れの分離周波数が流動特性値と希薄限界空燃比の相関に与える影響

あまり大きく変化しない。

4. ま と め

スワールコントロールバルブによって実現できたさまざまなスワール・タンブル場について定常流試験と駆動運転時の燃焼室内流動測定を行い以下の結論を得た。

(1) 定常流試験での角運動量が同等の場合、タンブルのほうがスワールより燃焼室内に生成される乱れが強い。

(2) スワールは流動のサイクル変動の抑制効果を有する。

さらに、均質な混合気の供給を狙った吸気系を用いて性能実験を行い次の結果を得た。

(3) 燃焼期間は乱れ強さと強い相関をもつ。タンブルはさらに乱れ強さ以外の燃焼促進要素を有する。

(4) 希薄限界空燃比は乱れ強さと強い相関をもち、流動のサイクル変動との相関は小さい。

最後に、本研究にあたり実験を担当していただいた雨森幸雄、寺島隆、山下康彦の各氏に感謝申し上げる。

文 献

- (1) 小木田・漆原・ほか3名, 自動車技術会論文集, 22-1 (1991), 27.
- (2) Wigley, G. and Hawkins, M.G., *SAE Trans.* No. 780060 (1978).
- (3) 季・漆原・ほか3名, 第10回内燃機関合同シンポジウム講論集, (1992), 85.
- (4) 例えば, 松岡・永倉・ほか3名, 機論, 47-422, B (1981), 2074.