希釈燃焼エンジンにおける点火エネルギー時間配分制御の効果検証

大畠 英一郎^{*1}, 押領司 一浩^{*1}

Verification of ignition energy time distribution control for a diluted combustion engine

Eiichiro OHATA^{*1} and Kazuhiro ORYOJI^{*1}^{*1} Hitachi Astemo, Ltd.

2520 Takaba, Hitachinaka-shi, Ibaraki 312-8503, Japan

Received: 2 March 2021; Revised: 22 March 2021; Accepted: 29 March 2021

Abstract

Several high energy ignitions have been proposed to improve ignition performance of diluted combustion recently. One of the major issues in the high energy ignition systems is heat generation of an ignition coil due to increase of power consumption. This study proposes a method to reduce electricity consumption by controlling time distribution of discharge energy while keeping the ignition performance. The following conclusions were obtained as results of verification with an actual engine. (1) A concept for reducing the power supply-demand difference that does not inhibit flame core growth was proposed. (2) To reduce the power supply-demand difference, an ignition coil with an additional active coil was fabricated to enable time distribution control of ignition energy. (3) By controlling the time distribution of ignition energy, both energy saving and ignitability of ignition were achieved, and the prospect of net fuel consumption improvement was obtained.

Keywords : Heat engine, Engine component, Control, Ignition coil, Re-strike during discharge

1. 緒 言

地球環境保護の観点より、自動車の燃費規制が強化されている。自動車用ガソリンエンジンにおける、熱効率を向上する技術の一つに、希釈燃焼がある(窪山他, 2016)(菅田他, 2016)(横森他, 2016)。しかし、吸入ガスの希釈に伴い、燃焼が不安定になるため、筒内流動を強化する研究が推進されている(佐々木他, 2017)(今村他, 2018)。筒内の高流速場での着火性確保のため、より着火性の高い点火方法が必要となっており、点火の高エネルギー化が提案されている(緒方, 片岡, 2016)(緒方他, 2016)(堀, 2016)(坪井他, 2019)。しかし、点火の高エネルギー化による電費増大は、正味熱効率の向上を抑制するため、燃費と電費のトレードオフが生じる。これまで筆者は、点火エネルギーの時間配分に関する研究を行い、再放電の発生抑制による点火プラグの電極消耗への影響を確認した(大畠, 藤山, 2020)。その後の継続研究において、収録データの追加調査を行ったところ、再放電の発生抑制により点火性能も向上することを確認した。これは電費抑制と点火性能向上を両立できる可能性を示唆しているが、現象解明の課題が残っているため、本研究では数値シミュレーションによる解析を実施することとした。

図 1～図 3 は、収録データを用いて追加調査した波形例である。図 1 へ定常運転における図示平均有効圧力 $IMEP$ の測定例を示す。測定例には正常燃焼サイクル C と半失火サイクル D があり、それぞれにおける放電電力 W_2 の測定波形例を図 2 と図 3 へ示す。C と D の W_2 波形では、ガス流速に追従した放電経路の伸長と再放電により、放電電力 W_2 が変動している(白石他, 2015)。この変動周期は、D より C の方が短くなっていることから、D の方が低流速であり、これが半失火および燃費低下の一因であると考え(保木本他, 2018)(沢田他, 2016)。本論文では、燃費と電費のトレードオフ解消を目的として半失火抑制に有効な点火エネルギーの時間配分制御を提案する。数値計算を用いた提案手法の現象解明と、実エンジンを用いた検証結果を報告する。

Fig. 1 *IMEP* in constant operation. The measurement example includes normal combustion cycle C and partial combustion cycle D.

Fig. 2 W_2 at point C. The discharge power W_2 fluctuates due to the extent of the discharge path that follows the gas flow rate and the effect of re-strike.

Fig. 3 W_2 at point D. The fluctuation period of the discharge power W_2 is shorter C than D.

2. 解決策

2・1 供給電力増強コンセプト

点火コイルの供給可能電力が C と D で同じであると仮定した場合の、電力需給関係の模式図を表 1#B へ示す。消炎抑制のための着火性向上手段には、放電経路から混合気（未燃ガス）への伝熱量を増大する必要がある（押領司他，2018）。伝熱量の増大手段には、放電経路から混合気への伝熱面積を増やす方法があり、放電経路の伸長と持続が有効である（押領司他，2018）。ここで、放電経路が伸長すると、電極間抵抗が増大するため、必要電力が増大する。よって、電極間のガス流動下における、放電維持に必要な電力は、経時増加する。しかし、表 1#B へ示すように、一般的な受動式点火コイルにおいては、コイルへ蓄積された磁気エネルギーが、通電開始からの消費に伴い経時低下するため、出力可能な電力は放電開始後から経時低下する。そして、出力可能な電力と電極間の電力が一致する時点（需給一致時点）で放電経路の伸長停止後、再放電する。この過程における必要電力の時間積分（緑の面積）が伝熱量であり、希釈率が同じであれば着火に必要な伝熱量が一定と仮定する。

電極間ガス流速の違いにより、放電経路の伸長差が生じて、放電経路とガスの接触面積が異なる。そのため、D は C に比べて、伝熱速度が低く、着火に必要な伝熱量へ到達する前に、点火コイルからの供給可能電力が不足してしまう可能性がある。この伝熱時間不足により、失火等が生じて、*IMEP* が低下しているものとする。即ち、電極間の流速が小さいサイクルにおける失火等を抑制するためには、放電期間後半の供給電力増強が有効であるとする。

Table 1 Electric power hypothesis.

Index	High flow rate	Low flow rate		
	Base(#B)	High energy(#H)	Assist(#A)	
General view				
Size	90 [ml]	180 [ml]	110 [ml]	
Electric power hypothesis	<p>Point C</p>	<p>Point D</p>	<p>1st-strike</p>	<p>1st-strike</p>

放電期間後半の供給電力増強には、表 1#H へ示すように、点火コイルの大形化による伝熱時間の延長で対処できる。しかし、点火コイルの充電エネルギー増大により、電費が増大する。さらに、巻き線の電流と発熱が増大し、熱設計上の目標温度超過という問題が生じる。

ここで、電力需給差（赤の面積）の変化へ着目し、電極間の流速が小さいサイクルにおいては放電期間前半の電力需給差が十分に大きいことから、放電期間前半は供給電力を増強せず、電力需給差が小さくなる放電期間後半のみ供給電力を増強することで、コイルの発熱低減と燃焼安定化の両立を考えた。以下、放電期間前半の電力需給差の削減を課題とし、解決策の一例として考案した表 1#A の制御方法について検討した。

2・2 効果の見積り

放電期間後半の供給電力増強による着火性向上効果の仮説を検証するため、電極間の電圧のモデル式を用いた放電経路の時間変化の検討と、電流波形を入力し火炎形成過程を予測する数値シミュレーションにより火炎形成に対する効果を検討した。数値シミュレーションにおいては、流体解析用のオープンソースソフトウェアである OpenFOAM を用いた。本検討にあたっては、乱流燃焼モデルの一種である HTA (Hyperbolic Tangent Approximation) モデルと、ラグランジュ粒子を用いた AKTIM モデルを組み込むことで、点火から燃焼までの現象予測を可能とした OpenFOAM を用いた (Hosaka et al., 2019)。

まず、再放電による放電経路抑制が可能な電力波形を、Kim らの式 (Kim and Anderson, 1995) を用いて検討した。Kim らの式は、式 (1) のとおりである。

$$V_{\text{gap}} = A \left(\frac{I_2}{1000} \right)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51} l_{\text{dis}} \quad (1)$$

ここで、 V_{gap} kV は電極間の電圧、 A は定数、 I_2 mA は 2 次電流、 p MPa は圧力、 l_{dis} m は放電経路長さである。また、 p_0 は定数であり、0.1 MPa である。図 4 へ示すように、点火プラグ周囲に流れがある場合、放電経路長さは流れによって変化する。流れによる放電経路長さの変化は式 (2) でモデル化できる。

$$l_{\text{dis}} = d_{\text{gap}} + 2Cu_{\text{gap}}t \quad (2)$$

ここで、 d_{gap} m は電極間(中心電極と接地電極の間)の距離、 C は流速に対する放電経路の変化の追従性を示すモデル定数、 t s は放電開始からの経過時間、または、再放電後からの経過時間、 u_{gap} m/s は混合気の流速、である。式 (1) と式 (2) より電極間の電圧は、式 (3) で与えることができる。

$$V_{\text{gap}} = A \left(\frac{I_2}{1000} \right)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51} (d_{\text{gap}} + 2Cu_{\text{gap}}t) \quad (3)$$

式 (3) から、プラグ周囲に流れがある場合、時間の経過とともに放電経路が伸長し、この結果、ギャップ間の電圧が増加する。ギャップ間の電圧が増加すると中心電極と接地電極の間で新たな放電経路が形成されることがある。これが再放電である。ここでは、電極間の電圧が所定値 V_{rs} V を超えると再放電が発生すると仮定する。再放電を防ぐためには、 V_{gap} が V_{rs} よりも小さい状態を保てばよい。これは式 (4) となる。

$$V_{\text{rs}} \geq A \left(\frac{I_2}{1000} \right)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51} (d_{\text{gap}} + 2Cu_{\text{gap}}t) \quad (4)$$

ここで、再放電が発生する要件は、式 (4) における左辺と右辺が等しくなることである。式 (4) における等式から式 (4) を用いて、再放電時期 t_{rs} s を算出できる。

$$t_{rs} = \frac{1}{2Cu_{gap}} \left\{ \frac{V_{rs}}{A \left(\frac{I_2}{1000} \right)^{-0.32} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.51}} - d_{gap} \right\} \quad (5)$$

流速 7 m/s における放電経路長さの変化を推定し、効率的に放電経路長さを大きくできる電力波形を検討した。計算に当たっては、圧力 p を 0.65 MPa、再放電電圧 V_{rs} を 2.25 kV、 C を 0.8 と設定した。ここで電力波形としては、供給可能電力が時間経過とともに徐々に減少するプロファイル (Case1)、放電開始直後から電力アシストにより供給可能電力が増強されるプロファイル (Case2)、放電開始後 0.5 ms から電力アシストにより供給可能電力が増強されるプロファイル (Case3)、を想定した。図 5 へ同状態を再現するための入力値とした電流波形 (Case1 ~3) と、放電経路の維持に必要な要求値 (REQ) を示す。図 5 の REQ は、式 (5) を I_2 で整理したものである。

この結果、与えた流速により放電経路が伸長した結果、図 6 へ示す波形が結果として得られた。ここで図 6 の REQ は、図 5 の REQ へ V_{rs} を乗じた値である。図 6 において、Case 2 と Case 3 の再放電時期は同じであるが、2 次電力は Case 2 よりも Case 3 の方が低くなっている。この結果から、放電後半において電力アシストにより供給可能電力を増加させることは、流速の遅いサイクルにおいて、2 次エネルギーを低減 (赤色部の面積) させるために有効であることを確認できた。

Fig. 4 Discharge model. When there is a flow around the spark plug, the discharge path length varies with the flow.

Fig. 5 Secondary current. Define the secondary current waveform and the required values to maintain the discharge path.

Fig. 6 2nd electricity. Although the re-strike times for Case 2 and Case 3 are the same, the secondary power is lower Case 3 than Case 2.

図 7 へ式 (2) と式 (5) を用いて算出した放電経路長さの時間変化を示す。図 6 Case 1 の電力波形の場合、Case 2、Case 3 と比べて早いタイミングで、初回の再放電が発生することと、Case 2 と Case 3 の放電経路の長さの変化が一致することが示された。Case2 および Case3 では、放電開始後 0.8ms のタイミングにおいて、コイルが発生している電流は、再放電抑制のために要求される電流を下回るため、再放電が生じることが分かる。再放電のタイミング以前では、Case2 および Case3 の電流値は再放電抑制のために要求される電流値以上であり、かつ、再放電のタイミングでは同一値となっていることから、再放電までの放電経路長さの履歴が同一になったと考える。この結果から、放電後半において電力アシストにより供給可能電力を増加させることが、流速の遅いサイクルにおいて、放電経路の長さを延長させるために有効であることを確認できた。

続いて、図 6 Case1~3 の電力波形を入力し、火炎核形成過程の算出結果を示す。本計算においては一様流の条件下へ点火プラグを設置した体系で計算を実行した。流速の遅い条件の電圧挙動を再現したことから流速を 7 m/s と設定した。また、雰囲気圧力 p は 0.65 MPa、雰囲気温度は 300 K、EGR 率 30% を想定条件とした。火炎各形成過程の推定に用いた式を示す (Duclos and Colin, 2001)。

$$\rho \frac{dr_{FK}}{dt} = \rho_u (s_{DC} + s_T) \quad (6)$$

$$s_{DC} = \frac{\eta Q_{gap}}{4\pi r_{FK}^2 B} \quad (7)$$

$$B = \rho_u(u_{FK} - h_u) + 10^6 p \frac{\rho_u}{\rho_{FK}} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{gap} = \left(\frac{I_2}{1000} \right) V_{gap} \quad (9)$$

ここで、 ρ kg/m³ は密度、 r m は火炎核半径、 t s は時間、 s_T m は乱流燃焼速度、 s_{DC} m は初期火炎核の膨張速度、 Q_{gap} J/s は電極間へ形成される放電路の発熱率、 η は放電エネルギーの伝達係数、 u J/kg は比内部エネルギー、 h J/kg は比エンタルピー、 p MPa は圧力、である。また、添え字については、FK は火炎核または火炎核内部の物理量であることを示し、 u は未燃ガスの物理量であることを示す。式 (6) ~ (9) からなるサブモデルを OpenFOAM へ導入し、推定した結果を図 8 と図 9 へ示す。図 8 には、推定したコイルエネルギーのガスへの伝達割合（エネルギー伝達割合）を示し、図 9 には推定した火炎核体積の結果を示す。ただし、図 8、図 9 に示す値は、Case1 の値を用いて正規化した値とした。

図 8 において、放電経路の伸長が同等であった Case2 と Case3 のエネルギー伝達割合は Case1 に比べて大きい。よって、低流速条件において放電後半の電力供給増加は、ガスへのエネルギー供給量を効率的に増加させることへ寄与することを確認できた。図 9 において、火炎核の大きさは、放電開始直後から電力アシストにより供給可能電力を増加させた Case2 で最も大きくなった。また、放電開始後 0.5 ms から電力アシストにより供給可能電力を増加させた Case3 の電力波形を用いた場合も、Case1 の電力波形に比べて火炎核増大へ寄与することが確認できた。

以上の検討から、放電後半の出力可能な電力を増加させる Case3 の波形は、火炎核の増大に対して効果があり、同条件における燃焼状態の改善につながる可能性が示唆された。図 9 へ示すように、Case3 の電流波形を用いることで、従来(Case1 相当)に比べて火炎核成長を促進し、安定燃焼に繋がる見込みを得た。ただし、エンジンの安定燃焼に必要な火炎核の増大要求（図 9 では仮に 102%を REQ と想定）の推定は困難であるため、表 1#A の仕様に基づいた点火コイルを試作し、実機評価を行うこととした。

Fig. 7 Spark channel. The change in the length of the discharge path is consistent between Case 2 and Case 3.

Fig. 8 Energy transfer rate. The energy transfer ratio of Case 2 and Case 3 is larger than that of Case 1.

Fig. 9 Flame kernel. The power waveforms of Case 2 and Case 3 contribute to the increase of flame core compared to Case 1.

2・3 解決策

表 1#A の電力波形を実現するには、経時低下する放電電力の後半で放電電力を増加させる必要がある。しかし、従来の 1 次コイルへ蓄積したエネルギーの放出のみで実現させることは困難である。そこで本研究では、従来方式の点火コイル#B へ 3 次コイルを追加し、このコイルへ蓄積したエネルギーを電力補助に使用する方式を考案した(大島, 藤山, 2020)。

(1) 試作した点火コイルの構成。

図 10 へ試作した点火コイルの構成を示す。3 次コイルは 1 次回路と同様に、通電制御用 IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) と制御回路を備える。2 次電流の補助を制御するための補助信号線が制御回路へ入力され、制御回路からは IGBT を駆動するためのゲート信号が出力される。

(2) 試作した点火コイルの動作原理。

図 11 へ試作した点火コイルの動作原理を示す。1 次コイルの通電が遮断されたことに伴い、2 次コイルで生じた電圧を受けて、点火プラグの電極間が通電する。通電期間中に補助信号を ON にすると、3 次コイルで生じた電流変化が 2 次コイルの電流を増幅する。通電期間中であれば、補助の期間を自由に設定できるため、放電エネルギーの時間配分制御が可能となる。

Fig. 10 Configuration of prototype ignition coil. The tertiary coil is equipped with an IGBT for current control and a control circuit as in the primary circuit.

Fig. 11 Timing chart of ignition coil. The current change generated in the tertiary coil amplifies the current in the secondary coil.

(3) 試作点火コイルの動作確認結果

図 10 の試作品を動作させた結果の W_2 波形例を図 12 へ示す。Case1, 2, 3 それぞれへ相当する放電方法として Not assist (#N), Full assist (#F), Half assist (#H) を設定し、電力補助機能による電力の増加を確認できた。放電電力補助機能の応答遅延は約 0.1 ms であり、放電期間に対して十分小さいため問題無いと判断した。

Fig. 12 W_2 waveform. The power assistance function was confirmed to be equivalent to each of Cases 1 to 3.

3. 試験方法と試験装置

3・1 試験方法

本研究においては、次の手順で試験を行う。

- ・自動車用多気筒ガソリンエンジンの各気筒へ、放電電力補助機能付き点火コイルを装着。
- ・気筒ごとに放電電力補助機能無しと有りで分け、「燃費」「電費」「発熱」の比較評価を行う。

3・2 試験エンジン

試験用エンジンの仕様と運転条件を表2、表3へ示す。低圧 EGR 付エンジンへ、排気絞り弁を追加することで排圧を上げて EGR 率を上昇させ、点火時期を進角することで、タンブルが崩壊する前の筒内流速が速い期間へ点火時期を設定した。

Table 2 Engine specification.

No.	Index	Spec.
1	Engine	Four-cylinder
2	Bore	79.7 mm
3	Stroke	81.1 mm
4	Compression ratio	10.4
5	Displacement	404.6 ml
6	S/B	1.0
7	Con.rod length	139.0 mm
8	EGR loop	Low pressure

Table 3 Operating conditions.

No.	Index	Spec.
1	Ne	2400 rpm
2	IMEP	1.0 MPa
3	Ignition timing	32 deg. BTDC
4	A/F	14.7
5	EGR Ratio	28 %
6	Fuel	100 RON
7	Intake temp.	25 deg.C
8	Intake Humidity	60 %

3・3 筒内流速の向上策

筒内流速の向上を目的として、吸気ポートへ流速向上デバイスを追加した。図13へ示すようなノズルアダプタを吸気ポートへ設置した。流体解析 (CFD) の結果、図14へ示すとおり、点火時期における流速は約 8 m/s となった(南波他, 2019)。

Fig. 13 Intake device. The nozzle adapter was installed in the air intake port.

Fig. 14 Flow velocity estimation. As a result of CFD analysis, the flow velocity at the ignition time was about 8 m/s.

3・4 点火デバイス

試験用点火プラグと点火コイルの仕様を表4と表5へ示す。点火コイルは一般市販品と比べて、高エネルギー品を基に、放電電力補助機能を追加し、追加した制御信号配線へ補助信号を与えることにより、放電電力補助の有無や期間を設定できる。点火プラグは特殊な電極形状のものではなく、市販品の中から中心電極と接地電極へ貴金属チップが採用されているものを用いた。

Table 4 Spark plug.

No.	Index	Spec.
1	Electrode gap	1.1 [mm]
2	Tip material	Iridium
3	Tip diameter ϕ	0.8 [mm]

Table 5 Ignition coil.

No.	Index	Spec.
1	Secondary energy E_2	160 [mJ]
2	Initial current I_{2Peak}	160 [mA]
3	Discharge time	1 [ms]

3・5 効果検証方法

本稿では、「燃費」と「電費」のトレードオフと、「発熱」抑制効果について評価する。

評価対象ごとの評価指標と計測方法を示す。

- ・燃費：燃費要因に失火等による出力低下があるため，変動係数 COV of IMEP を評価指標とする。
燃焼圧力とクランク角度から $IMEP$ を算出し，各気筒 68 サイクル分の変動係数を算出する。
- ・電費：点火コイルの充電エネルギー E_I を評価指標とする。（気筒別のサイクル平均）
プローブを用いて I_I と V_I を測定，乗じた上で，時間積分して， E_I を算出。
- ・発熱：点火コイル内部の温度を評価指標とする。
点火コイル内部へ熱電対を埋設し，温度計測する。

以下，放電に関わる計測や評価に用いる記号と単位は次のとおりとする。

1 次電流 I_1 A, 2 次電流 I_2 mA, 3 次電流 I_3 A, 1 次電圧 V_1 V, 2 次電圧 V_2 kV, 3 次電圧 V_3 V, 1 次電力 W_1 W, 2 次電力 W_2 W, 3 次電力 W_3 W, 1 次エネルギー E_1 mJ, 2 次エネルギー E_2 mJ, 3 次エネルギー E_3 mJ

3・6 実験装置

点火放電と燃焼の状態を確認するために収録した項目を表 6 へ示す。点火放電は微小時間に生じるため，計測器と収録器には高い時間分解能と短い収録周期が要求される。本研究においては，ベースクロック確度が 50 ppm の計測装置を用いて，2.5 μ s 周期で全ての信号を同時に収録した。

表 6 に基づき，構成した試験装置を図 15 へ示す。全ての計測信号を収録器へ接続し，全気筒分をリアルタイムで PC へ計測データを保管する。収録データは PC にて，燃焼解析などの後処理を行う。点火プラグの取り付け方向は，接地電極をクランク軸方向に統一した。再放電回数について，ベースの点火方法では気筒差が無いことを予め確認した。

Table 6 Measurement items.

No.	Index	Signal	Sensor	Bandwidth	Rise time
1	In-cylinder pressure [MPa]	Analog	Piezoelectric (KISTLER 6052C31)	160 [kHz] (Natural frequency)	
2	I_1 [A]		Current probe (Yokogawa Electric 701917,701933)	50 [MHz]	7 [ns]
3	I_2 [mA]				
4	I_3 [A]				
5	V_2 [kV]		Voltage probe (Tektronix P6015A)	75 [MHz]	4 [ns]
6	Crank angle	Rotary encoder (AVL 365C)	50 [MHz]		
7	Ignition signal	Digital	Direct wiring		
8	Assist signal

Fig.15 Structure of evaluation system. All measurement signals are connected to the recorder, and the measurement data for all cylinders are stored in the PC in real time.

4. 試験結果および考察

4・1 実験結果

放電電力の補助機能無し (#N) と補助機能有り (#F) (#H) それぞれについて, θ_{IG-10} と $IMEP$ の測定結果を図 16 と図 17 へ示す. 点火性能を評価するための一般的な指標として θ_{IG-10} deg. があり, これは放電開始から燃焼質量割合 10% へ至るまでのクランク角度である. 図 16 において #F と #H の θ_{IG-10} は, #N と比べて短縮しており, 点火性能の向上を確認できた. さらに, #F と #H の θ_{IG-10} は同等である. 筆者らによる過去の試験では, #F と #H は #N と比べて, 再放電が抑制されることを確認している(大島, 藤山, 2020). これらのことから, 数値計算により示されたように, 放電経路が伸長した際の再放電を抑制することで, 点火性能が向上したものと考えられる. その結果, 図 17 において #F と #H は #N と比べて $IMEP$ の低下抑制を確認できた.

Fig. 16 θ_{IG-10} for each combustion cycle. The θ_{IG-10} of #F and #H was shorter than that of #N, confirming the improvement in ignition performance.

Fig. 17 $IMEP$ for each combustion cycle. #F and #H inhibited $IMEP$ decrease compared to #N.

放電電力の補助機能無し (#N) と補助機能有り (#F) (#H) それぞれについて, I_2 , V_2 , W_2 の測定結果を表 7 へ示す. 表 7 の W_2 は, I_2 と V_2 を乗じることで算出した. (#F) (#H) の I_2 , W_2 , については, I_3 , W_3 , が含まれた値である. I_2 波形において, #H は #N と比べて, 放電期間後半に電流が増加していることから, 実エンジン環境において, 放電電力補助機能が有効に動作し, エネルギーの時間配分制御が可能であることを確認できた. W_2 波形において, #H は #N と比べて, 放電期間後半の電力が低下していない. このことから, #F と #H は #N と比べて, 放電期間後半においても放電経路が伸長し, 着火性の改善が期待できる. 一方, W_2 の積分 (赤色面積) は, #N および #H と比べて #F が大きくなっていることから, #F の発熱増大が懸念される.

Table 7 Experimental result

No.	General view	Not assist(#N)	Full assist(#F)	Half assist(#H)
1	I_2 Measurement example
2	V_2 Measurement example
3	W_2 Measurement example

4・2 考察

上記の効果検証方法に基づき、燃費、電費、発熱についての評価結果を図 18 と図 19 へ示す。

Fig. 18 COV of IMEP. #H has the same ignition energy as #N and the same combustion stability as #F, so it has the potential to resolve the trade-off.

Fig. 19 Coil temperature. The ignition coil temperatures of #H and #N are almost the same, and much lower than #F.

放電電力補助機能を用いた点火エネルギーの時間配分制御による、燃焼安定性、点火コイルの充電エネルギー、点火コイルの発熱への影響について確認する。図 18 において、#N と #F は、点火エネルギーが増大すると、燃焼が安定しており、トレードオフの関係にある。一方 #H は、#N と同等の点火エネルギーで、かつ #F と同等の燃焼安定性であり、トレードオフ解消のポテンシャルがある。ここで、#N と #F と #H の燃焼安定性は、点火エネルギーに対して線形関係になく、図 9 の傾向と異なる。これは、失火等の抑制に必要な火炎核体積 (図 9 の REQ) があると仮定すれば、#H と #F で生成した火炎核体積が、要求火炎核体積を満足したものと考える。その結果、#H と #F で失火等が抑制され、燃焼が安定したものとする。また、図 19 へ示すとおり、#H と #N の点火コイル温度はほぼ同等であり、#F より大幅に低下していることから、提案した点火エネルギーの時間配分制御による発熱抑制効果を確認

認できた。以上の実エンジン検証結果は、数値計算による現象解明結果と傾向が一致していることから、提案した点火エネルギーの時間配分制御により電費抑制と点火性能向上を両立する現象を解明できた。

5. 結 言

希釈燃焼の着火性向上を目的とした、筒内ガスの高流動化における、点火の省エネルギー化を目的として、放電中の電力需給差削減を検討し、実エンジンで検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 火炎核成長を阻害しない、電力需給差削減コンセプトを提案した。
- (2) 電力需給差削減のため、能動式コイルを追加した点火コイルを試作し、点火エネルギーの時間配分制御を可能とした。
- (3) 点火エネルギーの時間配分制御により、点火の省エネルギー化と着火性を両立し、正味燃費改善の見通しを得た。

文 献

- Duclos, J.M. and Colin, O., Arc and kernel tracking ignition model for 3d spark-ignition engine calculations, The proceedings of COMODIA 2001 (2001), pp. 343-350.
- 保木本聖, 窪山達也, 森吉泰生, 孕石三太, 渡辺敬弘, 飯田実, 高速 PIV 計測および初期火炎伝播可視化による低負荷運転時における燃焼サイクル変動の解析, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.865 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.18-00051.
- 堀司, 火花点火機関における放電経路伸長と再放電のモデリング, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20166386(2016), pp.2019-2024.
- Hosaka, T., Oryoji, K., Ishii, E. and Sukegawa, Y., Combustion simulation for gasoline engine using lagrangian ignition model, Proceedings of the 14th OpenFOAM Workshop (2019), pp.1-8.
- 今村宰, 文絃太, 岩田和也, 秋濱一弘, 小型風洞を用いた高速気流中における火花放電の放電特性に関する研究, 自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.2018614(2018), pp.1-5.
- Kim, J. and Anderson, R. W., Spark anemometry of bulk gas velocity at the plug gap of a firing engine, SAE paper 952459(1995), pp.187-197.
- 窪山達也, 鐘ヶ江優, 森吉泰生, 金子誠, 過給リーンバーンガソリン機関の希薄限界における燃焼解析, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.2 (2016), pp.351-355.
- 南波昇吾, 草壁亮, 林智敏, 直噴エンジンの希薄限界の向上(第 1 報), 第 30 回内燃機関シンポジウム, 講演番号 1(2019).
- 緒方健一郎, 片岡徹夫, EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.2 (2016), pp.357-362.
- 緒方健一郎, 片岡徹夫, 鈴木俊靖, 窪山達也, 森吉泰生, EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討(第 2 報), 自動車技術会論文集, Vol.47, No.5 (2016), pp.1073-1078.
- 大畠 英一郎, 藤山 幸雄, EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討, 自動車技術会論文集, Vol.51, No.4 (2020), pp.669-674.
- 押領司一浩, 赤城好彦, 内勢義文, 周玉宇, 窪山達也, 森吉泰生, 筒内可視化を用いた希薄燃焼の限界空燃比制御因子の分析, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.863 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.18-00002.
- 佐々木耕作, 鄭棟元, 菅田健志, 横森剛, 飯田訓正, SI エンジンにおける強タンブル流動下での火花放電特性が着火および燃焼のサイクル間変動に及ぼす影響, 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.20175194(2017), pp.1076-1081.
- 沢田龍作, 小池竜治, 西野耕一, モータリングエンジン筒内気流のサイクル間変動に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.3 (2016), pp.711-716.
- 白石泰介, 寺地淳, 森吉泰生, スパーク放電チャンネル形成に関する点火環境および放電波形特性の影響解析, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.2 (2015), pp.283-288.
- 菅田健志, 李世竣, 横森剛, 飯田訓正, 乱流燃焼ダイアグラムを用いたスーパーリーンバーン SI エンジンにおける燃焼形態の検討, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20166383(2016), pp.2003-2007.
- 坪井星磨, 御代川慎司, 松田昌祥, 横森剛, 飯田訓正, 火花放電特性がスーパーリーンバーン SI エンジンの着火及び燃焼過程に与える影響, 自動車技術会 2019 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.20195405(2019), pp.1-6.
- 横森剛, 松田昌祥, 飯田訓正, 浦田泰弘, 横尾望, 中田浩一, 高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.20165267(2016), pp.1413-1418.

References

- Duclos, J.M. and Colin, O., Arc and kernel tracking ignition model for 3d spark-ignition engine calculations, The proceedings of COMODIA 2001 (2001), pp. 343-350.
- Hokimoto, S., Kuboyama, T., Moriyoshi, Y., Haramiishi, S., Watanabe, T. and Iida, M., Analyses of cycle-to-cycle variation of combustion at low load condition by using high-speed piv and direct photographing of early flame propagation, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 84, No. 865 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.18-00051.
- Hori, T., Modeling of spark channel elongation and restrike in si engine, The proceeding for 2016 JSAE Congress (Autumn), No.20166386 (2016), pp.2019-2024 (in Japanese).
- Hosaka, T., Oryoji, K., Ishii, E. and Sukegawa, Y., Combustion simulation for gasoline engine using lagrangian ignition model, Proceedings of the 14th OpenFOAM Workshop (2019), pp.1-8.
- Imamura, O., Bun, G., Iwata, K. and Akihama, K., A study on spark discharge characteristics in high velocity gas flow using small wind tunnel, The proceeding for 2018 JSAE Congress (Autumn), No.2018614(2018), pp.1-5 (in Japanese).
- Kim, J. and Anderson, R. W., Spark anemometry of bulk gas velocity at the plug gap of a firing engine, SAE paper 952459(1995), pp.187-197.
- Kuboyama, T., Kanegae, Y., Moriyoshi, Y. and Kaneko, M., Analysis of combustion characteristics and lean limit of a supercharged lean burn gasoline engine, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.47, No.2 (2016), pp.351-355 (in Japanese).
- Namba, S., Kusakabe, R. and Lin, Z., Improvement of lean limit in the di gasoline engine (1st report), 30th Internal Combustion Engine Symposium, No.1 (2019) (in Japanese).
- Ogata, K. and Kataoka, T., A high energy ignition system for egr combustion engine, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.47, No.2 (2016), pp.357-362 (in Japanese).
- Ogata, K., Kataoka, T., Suzuki, T., Kuboyama, T. and Moriyoshi, Y., A high energy ignition system for egr combustion engine (second report), Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.47, No.5 (2016), pp.1073-1078 (in Japanese).
- Ohata, E. and Fujiyama, Y., Investigation of a high energy ignition system for egr combustion engine, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.51, No.4 (2020), pp.669-674 (in Japanese).
- Oryoji, K., Akagi, Y., Uchise, Y., Zhou, Y., Kuboyama, T. and Moriyoshi, Y., Analysis on control factors of air-fuel ratio limit by using in-cylinder optical measurement, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 84, No. 863 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.18-00002.
- Sasaki, K., Jung, D., Sugata, K., Yokomori, T. and Iida, N., Effects of discharge characteristics under the high tumble flow on cycle-to-cycle variations of ignition and combustion in si engine, The proceeding for 2017 JSAE Congress (Spring), No.20175194(2017), pp.1076-1081 (in Japanese).
- Sawada, R., Koike, R. and Nishino, K., Study on cycle-to-cycle variations of in-cylinder flows in a motored engine, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.47, No.3 (2016), pp.711-716 (in Japanese).
- Shiraishi, T., Teraji, A. and Moriyoshi, Y., The effects of ignition environments and discharge waveform characteristics on spark channel formation, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.46, No.2 (2015), pp.283-288 (in Japanese).
- Sugata, K., Lee, S., Yokomori, T. and Iida, N., Investigation of combustion regime in super lean-burn si engine using turbulent combustion diagram, The proceeding for 2016 JSAE Congress (Autumn), No.20166383(2016), pp.2003-2007 (in Japanese).
- Tsuboi, S., Miyokawa, S., Matsuda, M., Yokomori, T. and Iida, N., Effects of spark discharge characteristics on ignition and combustion process in super lean-burn si engine, The proceeding for 2019 JSAE Congress (Spring), No.20195405(2019), pp.1-6 (in Japanese).
- Yokomori, T., Matsuda, M., Iida, N., Urata, Y., Yokoo, N. and Nakata, K., Research on super lean burn concept for gasoline engines with high thermal efficiency, The proceeding for 2016 JSAE Congress (Spring), No.20165267(2016), pp.1413-1418 (in Japanese).