

# 特集 火花点火機関における点火・着火解析手法の開発\*

## Development of Ignition Analysis Method in Spark Ignition Engine

頼田 浩

Hiroshi YORITA

岡部 伸一

Shinichi OKABE

三輪 哲也

Tetsuya MIWA

With recently developed engines, good ignitability needs high ignition energy. Mixture conditions affect ignition/firing materially. Clarification of the relationship between mixture conditions and required ignition energy is useful in developing the ignition systems. We developed a method for studying the required ignition energy.

It is the feature that this method measures mixture conditions (A/F, velocity, pressure, temperature) and calculates the income and outgo of energy at the ignition from the measurement results. This method shows which mixture conditions need much ignition energy and makes clear the effect of ignition systems improvement. This method is utilized for ignition system development in DENSO.

**Key words** : Spark ignition engine, Ignition, Analysis / Ignition energy, Initial combustion, Measurement of mixture condition, Calculation of combustion

### 1. まえがき

近年の火花点火エンジンは、燃費向上、排気エミッション低減のためEGR率増加、希薄燃焼、ガソリン筒内直噴<sup>1)2)</sup>などが数多く見られるようになってきた。それに伴い点火エネルギーが増加する傾向にある。

点火・着火には混合気状態の各種要因が複雑に影響しているが、点火プラグ部の混合気状態と着火に必要な点火エネルギー（以後、必要点火エネルギーと称す）との関係を明確にすることができれば、新規なエンジンに対して点火装置の開発に役立てることができる。

そこで、必要点火エネルギー解析手法について検討を行なった。

### 2. 必要点火エネルギー解析手法の開発

#### 2.1 必要点火エネルギー解析の考え方

火花点火エンジンの着火の成否は点火時の点火プラグ部のエネルギー収支で決まると考えている（Fig. 1）点火プラグ部のエネルギー収支とは火炎核へのエネルギーの授受の合計である。火炎核が受け取るエネルギー密度が奪われるエネルギー密度を上回れば火炎核は成長を続け、着火に至る。

火炎核が受け取るエネルギーは点火で投入されるものと燃焼によって発生するもの、火炎核から奪われるエネルギーは点火プラグ部以外の混合気や点火プラグ電極、燃焼室壁面の冷却によるものである。上記のエネルギーのうち点火で投入されるもの以外はいずれも混合気状態（A/F、流速、圧力、温度）および点火プラグと燃焼室の形状によって決まる。

したがって、点火時の点火プラグ部の混合気状態、および点火プラグ・燃焼室形状とエネルギー収支との関係がわかればあらゆる燃焼条件において混合気状態と必要点火エネルギーの関係が解明できると考えられる。

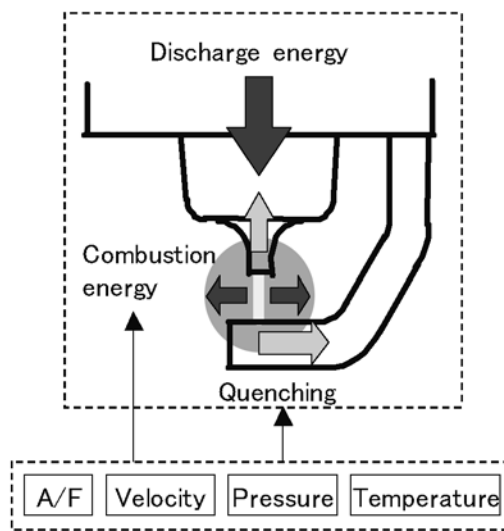


Fig. 1 Ignition mechanism

#### 2.2 必要点火エネルギー解析手法の概要

上記の考え方に基づいて混合気状態の計測とエネルギー収支の計算を組み合わせた必要点火エネルギー解析手法を開発した。（Fig. 2）

これは、A/F、流速、圧力、温度の混合気状態を計測して求め、計測の困難なエネルギー収支を混合気状態の計測結果を基に主に計算して求めることが特徴で

\*（社）自動車技術会の了解を得て、第17回内燃機関シンポジウム講演論文集より一部加筆して転載

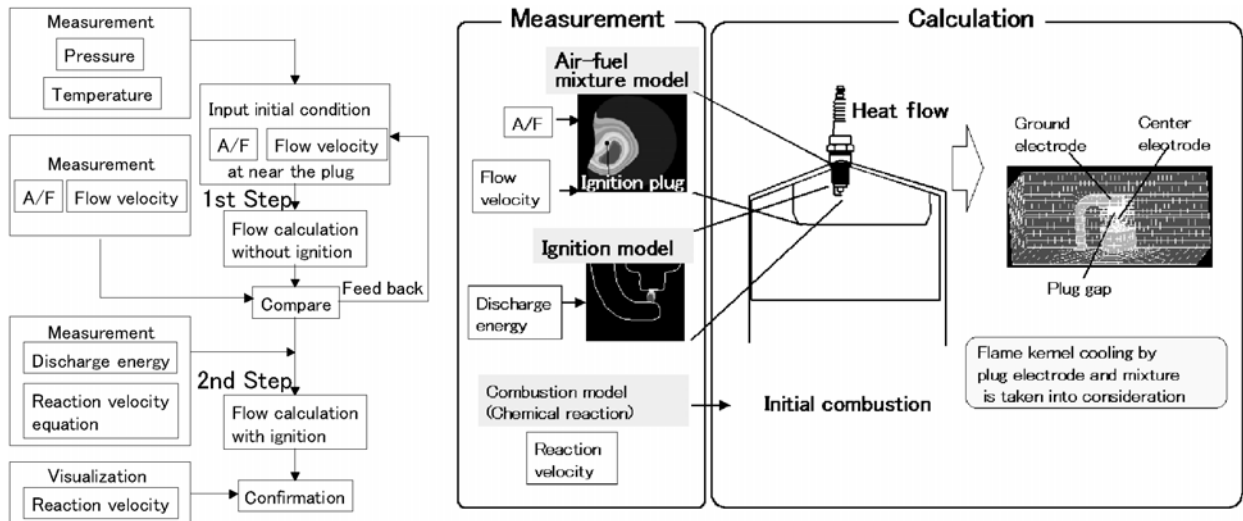


Fig. 2 Ignitability analysis

ある。なお、エネルギー収支のうちの点火で投入されるエネルギーと燃焼速度式（燃焼によって発生するエネルギーを計算するために用いる）は計測して求めた。

これら計測と計算を組み合わせるために、計算は点火を伴わない流れ計算と点火・着火計算の2段階に分けて行った。1段階目の計算による点火プラグ部 A/F、混合気流速の結果を計測結果に合わせ込むことで2段階目の点火・着火計算の初期条件が計測値と一致するようにした。

実際の着火の成否は実機エンジンの可視化<sup>3)</sup>により確認したが投入した点火エネルギーと着火の成否の関係を上記計算の結果と可視化の結果を突き合わせることで燃焼条件に対して必要点火エネルギーを解明することができる。以下に上記の着火確認と主な計測、および計算について詳細を説明する。

2.3 着火確認、混合気状態等の計測

実機エンジンの着火確認、混合気流速計測、点火エネルギー分布計測はエンジン可視化<sup>3)</sup>にて(Fig. 3)、A/F 計測は高速サンプリング<sup>4)</sup>にて行った。

2.3.1 着火確認

着火確認は超高感度・高速度カメラで点火後の火炎の直接観察でおこなった。これにより着火、着火遅れ、初期燃焼速度が分かる。(Fig. 4)

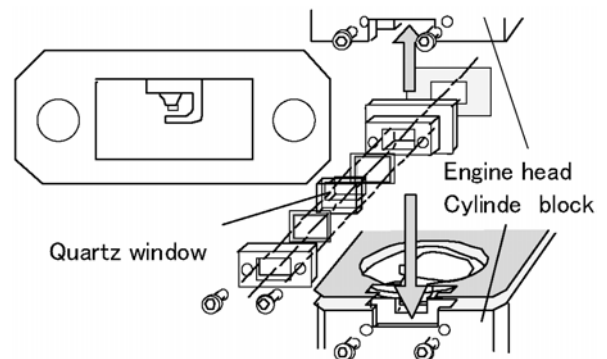


Fig. 3 Visible engine

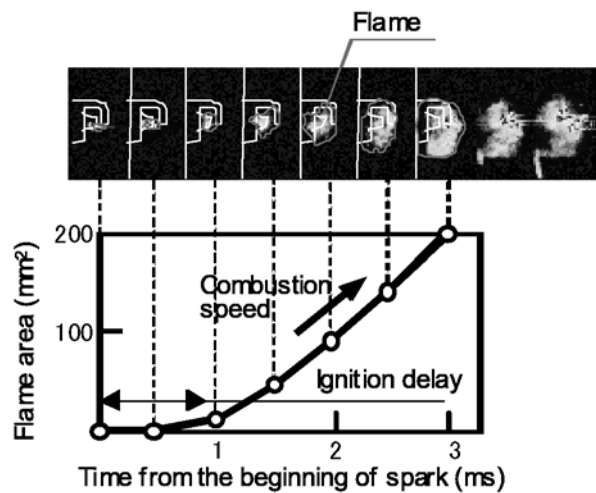


Fig. 4 Example of flame visualization

### 2.3.2 混合気流速計測

混合気流速は点火プラグの放電を利用した火花追跡法<sup>5)</sup>により計測した。Fig. 5 はガソリン筒内直噴エンジンの混合気流速を計測した例である。点火後0.3msから0.4msの0.1msの間に火花の位置が0.7mm移動したことから、この時の混合気流速は約7m/sであったことが分かる。

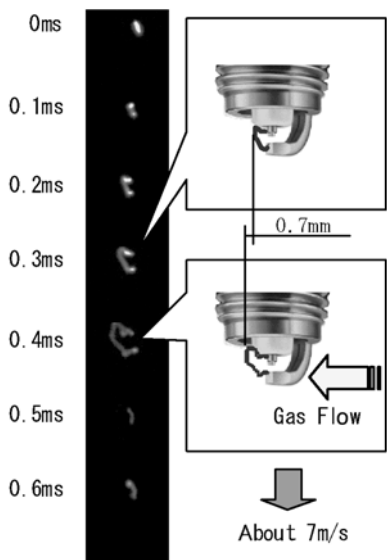


Fig. 5 Measurement of flow velocity

### 2.3.3 点火エネルギー分布計測

点火エネルギー分布は点火エネルギーの密度と火花の発光強度が比例すると仮定して、火花の発光強度の分布を計測し、発光強度に応じた点火エネルギーの密度分布に置き換えた。(Fig. 6)

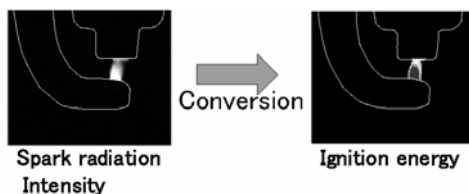


Fig. 6 Measurement of ignition energy distribution

### 2.3.4 A/F 計測

A/F は超高速筒内サンプリング HC 計測<sup>4)</sup>を用いて計測した。(Fig. 7)

点火プラグ部の混合気はサンプリングパイプを介して超高速 FID (応答4ms) に導かれている。

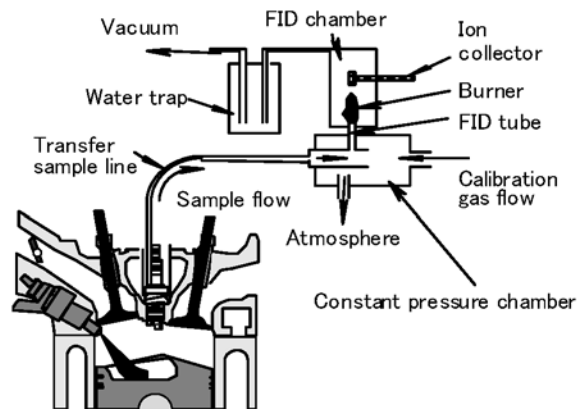


Fig. 7 FID in-cylinder sampling apparatus

### 2.4 エネルギー収支の計算

エネルギー収支は、点火プラグ部を物理モデルとして、3次元圧縮性流体の計算コードに燃焼モデルを加え、点火プラグ電極、混合気による冷却を考慮して計算した。燃焼モデルは『着火には点火プラグ部の混合気濃度が支配的な要素である』と考えてArrheniusモデルを用いた。(Fig. 8)

燃焼反応は数多くの段階の素反応からなり、燃焼段階に応じて燃焼速度が刻々と変化するが、点火・着火の解析のため初期燃焼のみに注目して



の1段階反応として計算した。

この時の燃焼速度式の係数は燃焼容器を用いた可視化計測にて合わせ込んだ。上記計算は点火・着火のみに注目し、1段階反応として扱っていることから以下の制約があるので注意が必要である。

- (1) 点火から着火，初期燃焼までの計算に限定
- (2) 過濃混合気では精度低い(不完全燃焼の素反応を計算していない)
- (3) 自着火は計算不能
- (4) 燃料性状の影響の解析不能。言い換えれば、燃料が変わった場合には、その都度、燃焼速度の合わせ込みが必要
- (5) また、燃料はすべて気化していると仮定しているので燃料の液滴を含んだ状態の混合気、例えば極低温時の点火に対しては精度が低い

2.5 燃焼速度計算の検証

ガソリン筒内直噴エンジン（4気筒，2000cm<sup>3</sup>）において燃焼速度を計算し，可視化計測と突き合わせてその精度を検証した．(Fig. 9)

このエンジン条件における点火時期の適合範囲はBTDC30°～BTDC10°であるが，可燃混合気が点火プラグ部に到達する前に点火を開始するBTDC31°点火と混合気が拡散して希薄になった後に点火するBTDC9°点火で比較した．

いずれも着火のタイミング，燃焼速度が計算と可視

化でよく合っていた．

BTDC31°点火では計算，可視化ともに点火してから着火が遅れ，可燃混合気が点火プラグ部に到達してから着火し，火炎が成長する様子が再現，観察できた．

BTDC9°点火では計算，可視化ともに点火プラグ部の混合気が希薄なので火炎の成長が遅い様子が再現，観察できた．

以上より上記計算が燃焼速度解析に適用できることがわかった．よって，上記計算と各種計測と組み合わせて必要点火エネルギー解析に適用した．

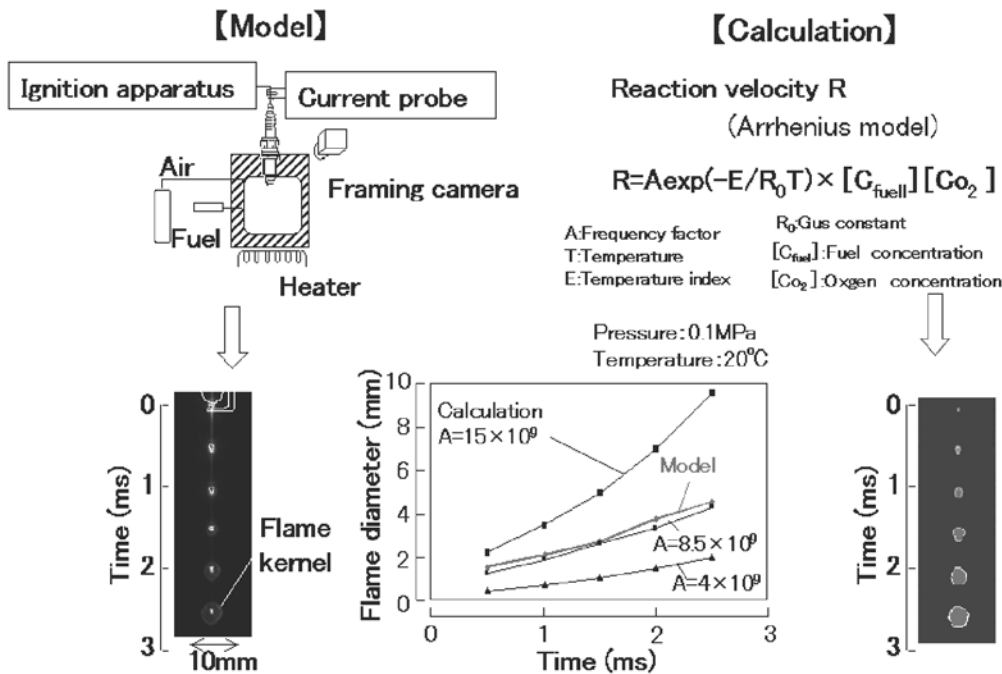


Fig. 8 Adapting of reaction velocity equation

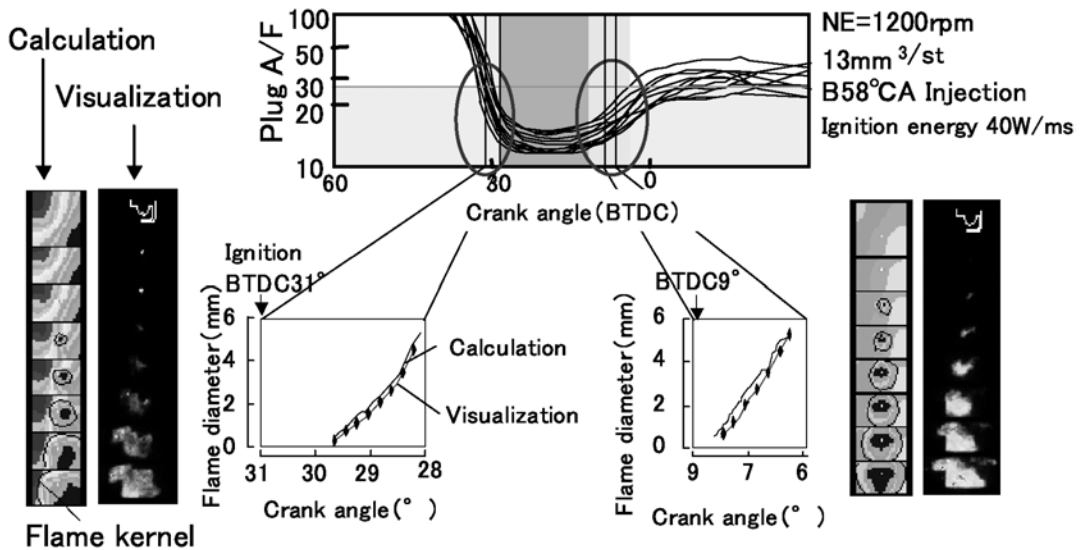


Fig. 9 Flame kernel growth with calculation and visualization

### 3. 必要点火エネルギー解析の応用

#### 3.1 必要点火エネルギーの定義

必要点火エネルギーの量は、電流と電圧の積であるエネルギー密度をどれだけの時間投入し続けられればよいのかで決まる<sup>3)</sup>と考えている。(Fig. 10)

したがって、解析は各条件に対して必要エネルギー密度を明らかにし、そのエネルギー密度に対して必要放電時間を明らかにするという手順を取った。

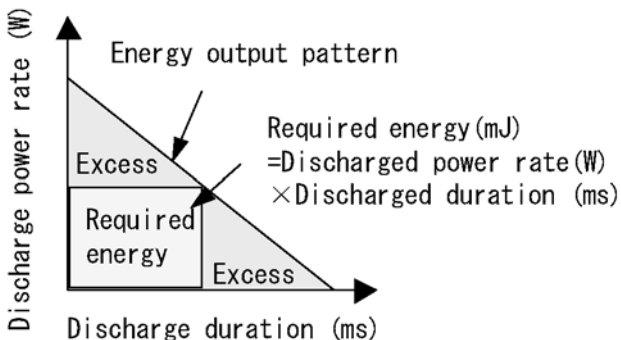


Fig. 10 Required energy and normal energy output

#### 3.2 必要点火エネルギーの要因解析

ここでは、ガソリン筒内直噴エンジンの成層燃焼領域における混合気状態と必要点火エネルギーとの関係の解析の例を説明する。

エンジン実機の可視化による着火確認で必要点火エネルギーを調査した。(Fig. 11) 必要点火エネルギーは軽負荷、高速回転で大きくなる傾向があることが分かった。しかし、1200rpm、30N・mにもピークがあった。

そこで上述の計測、計算でその原因を解析した。(Fig. 12) 必要点火エネルギーの小さかった1000rpm、50N・mを基準として、1000rpm、50N・mおよび1200rpm、30N・mの点火時、点火プラグ部の混合気濃度、流速、圧力、酸素濃度 (EGR率) を計測、それを基にエネルギー収支を計算し、必要点火エネルギーを解析した。また、混合気濃度、流速、圧力、酸素濃度の各条件の影響度合いを明らかにするために、特定の条件のみが変化した場合の必要点火エネルギーを仮想的に計算した。

必要点火エネルギーは酸素濃度 (EGR率)、圧力を変化させた時の変化が大きかった。すなわち、1600rpm、30N・mではEGR率と圧力の影響で必要点火エネルギーが大きくなることが確認できた。

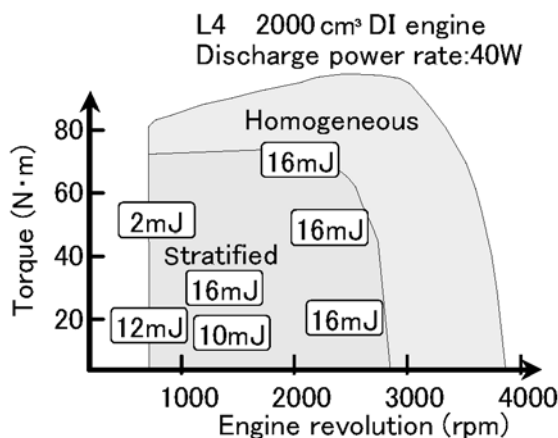


Fig. 11 Required energy by visualization

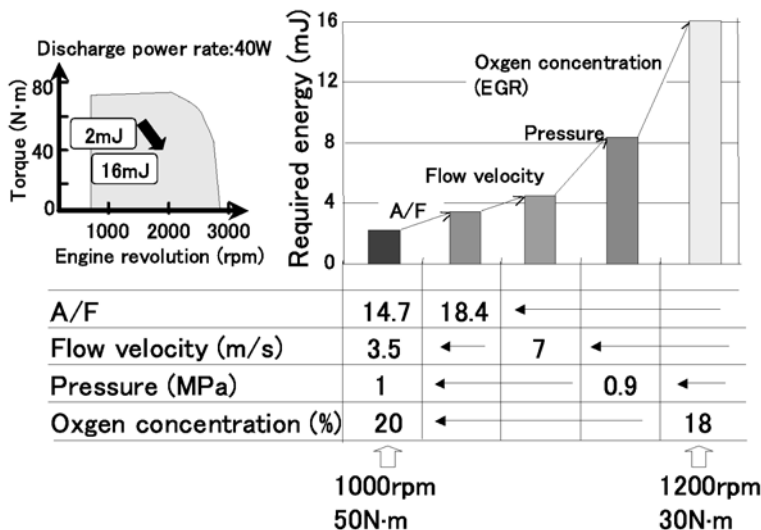


Fig. 12 Required energy by calculation

### 3.3 点火プラグ形状の影響解析

なお、本解析手法は点火装置改良や新規点火装置の効果解析にも適用できる。

前述のように、点火時には点火プラグ電極による冷却で多くのエネルギーを奪われている。それを補うために必要点火エネルギーが高くなっている。そこで点火プラグ電極形状と冷却によって奪われるエネルギーの関係を解析した。(Fig. 13)

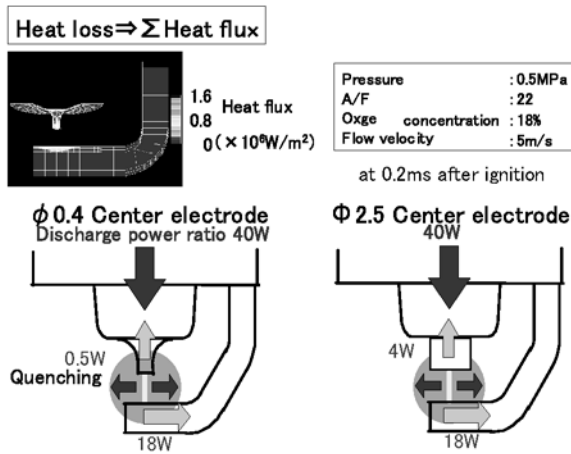


Fig. 13 Influence of plug shape to required energy

電極による冷却で奪われるエネルギーを求めするために中心電極、接地電極のそれぞれの表面を通過する熱流束の総和を計算した。

0.4mm中心電極点火プラグは40Wの点火エネルギー投入時、中心電極によって奪われるエネルギー密度は0.5Wと 2.5mm中心電極点火プラグの4Wに比べ小さかった。すなわち、電極径を細くすることでプラグギャップ部の混合気や火炎核に加えるエネルギーを損なうことなく必要点火エネルギーを低減できることが確認できた。

さらに同じエネルギーを投入した時の、電極径を細くすることによる着火性改善効果を初期燃焼速度の違いで評価した。(Fig. 14) 燃焼速度は 0.4中心電極点火プラグが 2.5中心電極点火プラグよりも速く、火炎径が1mmを超えたあたりから差が出始め、点火開始後1.5msで火炎径が約30%大きかった。すなわち、電極を細くすることで燃焼速度を速められそれだけ燃焼を改善できることが確認できた。

以上のように本解析手法によって必要点火エネルギーを決定する要因の解析が可能になった。

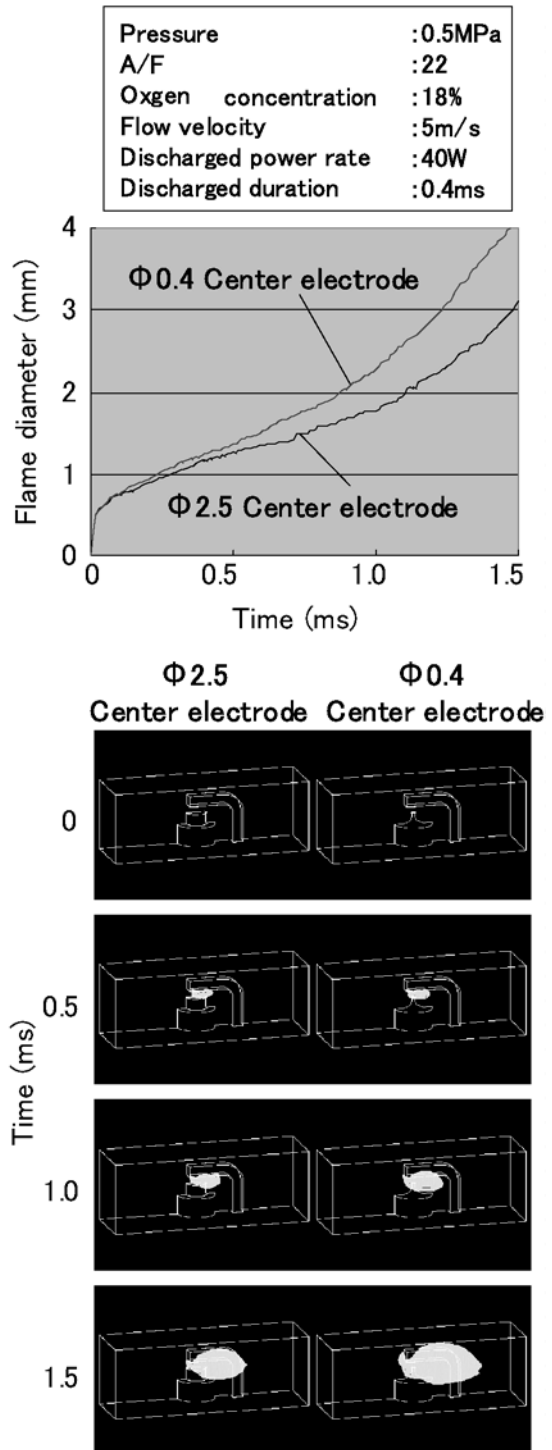


Fig. 14 Improvement of combustion by fine electrode

### 3. まとめ

- (1) 混合気状態計測，エネルギー収支計算を組み合わせ、必要点火エネルギーを解析できる手法を開発した。
  - ・混合気流速，点火エネルギーは可視化にて，A/Fは超高速HC計にて計測，燃焼速度，エネルギー収支は計算にて求めた。
  - ・上記計測と計算を組み合わせるために計算は点火を伴わない混合気流れ計算と点火・着火計算の2段階で行った。
- (2) 本解析手法により必要点火エネルギーの要因分析ができるようになった。
- (3) 本解析手法により点火装置改良，新規点火装置の効果解析も可能になった。
- (4) なお，本解析手法は現在，デンソーにて点火装置開発ツールの一つとして着火性解析・評価に活用されている。

### <参考文献>

- 1) 安部他：自動車技術会学術講演前刷り集，No.3-01（2001），pp.1-4.
- 2) 鈴木他：自動車技術会学術講演前刷り集，No.78-00（2000），pp.1-4.
- 3) 三輪他：自動車技術会学術講演前刷り集，No.77-01（2001），pp.15-18.
- 4) 浅沼：流れの可視化ハンドブック，朝倉書店
- 5) 加納他：自動車技術会学術講演前刷り集，No.976（1997），pp.9-12.

---

### <著 者>



頼田 浩  
(よりた ひろし)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
第4研究室  
点火関連の要素技術開発,解析技術開発に従事



岡部 伸一  
(おかべ しんいち)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
第4研究室  
点火関連の要素技術開発,解析技術開発に従事



三輪 哲也  
(みわ てつや)  
点火技術部  
四輪車用点火装置開発に従事