

89 燃料噴射系の電子制御時の熱発生率解析

機関動力部 *張 潔, 高杉喜雄, 石村恵以子, 菅 進

1. はじめに

船用ディーゼル機関の排ガス特性の改善を目的として、我々は実験用ディーゼル機関の燃料噴射系を油圧駆動電子制御方式に改造し、A重油および乳化燃料を使用した運転試験を実施した¹⁾²⁾³⁾。この結果、A重油使用の場合、低負荷では排ガス特性と燃料消費率を同時に改善できる着火時期を選ぶことができ、燃料噴射系の電子制御化が排ガス特性の改善に有効であることを実証した。しかし、最適な噴射時期（着火時期）と噴射圧の組み合わせは、燃料によっても負荷によっても異なっており、制御パラメーターの最適な組み合わせを実験によって探し出すことは容易ではない。このため、広範な運転条件に対して最適条件を探索する方法として、数値解析法の適用が望まれる。ディーゼル機関の実サイクルの数値解析については多くの研究が行われているが、我々は比較的簡便な計算法を用いて、計測された圧力から熱発生率および温度分布の解析を行った。計算結果は電子制御化で得られた実験結果を定性的によく説明するものであり、本計算法は最適燃焼設計の研究に有用と思われるので、特徴的な適用例について報告する。

2. 解析の方法

燃料噴射系の噴射特性（噴射時期、噴射圧パターン等）と噴霧特性はディーゼル機関の排気特性と燃料消費率に大きな影響を与える。燃料噴射特性から機関特性までを関連づけて検討するためには、燃焼過程での熱発生率と筒内温度・圧力の詳細を知る必要がある。ここでは広い範囲での最適化条件について考察するために、計算には簡略化した方法を採用することにした。

圧縮行程から燃焼、膨張行程までの筒内熱発生率 $dQ/d\theta$ は（1）式から、筒内温度 T は完全ガスの式（2）から求めることができる。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\kappa}{\kappa-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\kappa-1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (1)$$

$$T = pV / MR \quad (2)$$

ここで、気筒圧力 p は計測値を用い、気筒容積

V は機関寸法からクランク角 θ の関数として求める。計算の簡略化のため、比熱比 κ とガス定数 R は一定と仮定する。 dQ は燃焼による熱発生や壁面からの伝熱の総和であるが、ここでは単に作動ガスへの入熱と見なす。

計算式（2）で必要な筒内ガス質量 M は、吸気弁が閉じたクランク角（-145度）における気筒体積に、吸気管で測定した過給圧および中間冷却器出口における空気温度を筒内圧力および筒内温度として計算した。燃料噴射後の燃料による質量の増加は無視した。比熱比は1.35とし、ガス定数 R は30とした。なお、排気弁が開いたあとは（2）式は成り立たないが、温度計算値が急激に変化する点から排気弁が開いたクランク角を知ることができる。

3. 実験結果の解析

最適燃焼を実現するためには、燃料や負荷に応じて、噴射時期、噴射圧、噴射率等の適切な組み合わせが必要である。これまでに我々が実施した実験では、装置の制限などもあって最適化条件に至らなかった場合もあるが、電子制御で得られた種々の噴射特性に関して熱発生率解析を行い、機関性能と関連づけて考察することは、最適化条件を明確にする上で重要である。以下に特徴的な例についての検討結果を示す。

実験は表1に示す3気筒4サイクルディーゼル機関（定格出力257kW、回転速度420rpm）を用いて行った。負荷は船用特性とし、25%、50%、75%、100%負荷の機関速度はそれぞれ260rpm、330rpm、380rpm、420rpmとなる。燃料はA重油および乳化燃料を使用した。

表 - 1 実験機関の要目

型式	4サイクルディーゼル機関
シリンダー	230φ×380、3気筒
最大出力×回転数	257kW×420rpm
圧縮比	13.7

筒内圧力はYSK Systems社製のディーゼルエンジン分析計（NH-X分析計）を用いて測定した。圧力センサーは実験機関の構造上の制約から、気

筒内壁から機関外部に引き出された圧力計測管の先端に取り付けた。No.1, No.2気筒の計測管の長さは約250mmで、No.3気筒ではやや短い。圧力は計測管内部で発生する振動波が重なって計測されるため、デジタルローパスフィルターで振動成分を和らげる処理を行った。

3. 1 A重油使用時の実験結果の解析

A重油使用、25%負荷における実験結果と熱解析結果を図1 a～eに示す。着火時期を遅くすると熱発生率（図1 c）の最大値は高くなるが、最高温度（図1 d）および最高圧力（図1 e）は下がり、図1 aに示す実験結果のNO_x低下とよく対応する。着火時期を10度とした場合、図1 dでは膨張後半で筒内温度が高くなり、燃焼が遅れた様子を表わしており、図1 aの燃料消費率の増加と対応する。

負荷が増加した場合でも燃焼終了が遅れ過ぎない条件で着火時期を遅らせることによって、NO_xと燃費に関しての最適条件が得られる。しかし、負荷が増加すると噴射持続時間は増加し、着火時期の制御範囲は限定されたものになる。図2に負荷を75%にした場合の解析結果の一例を示す。

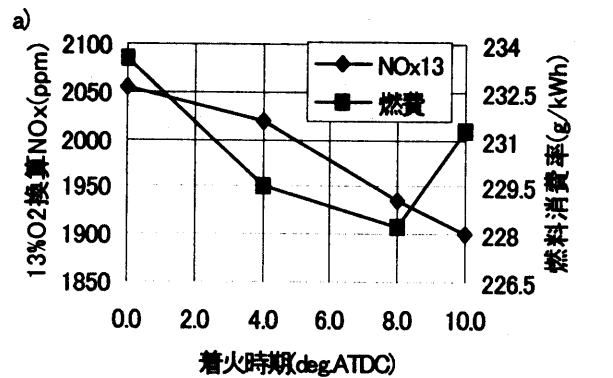
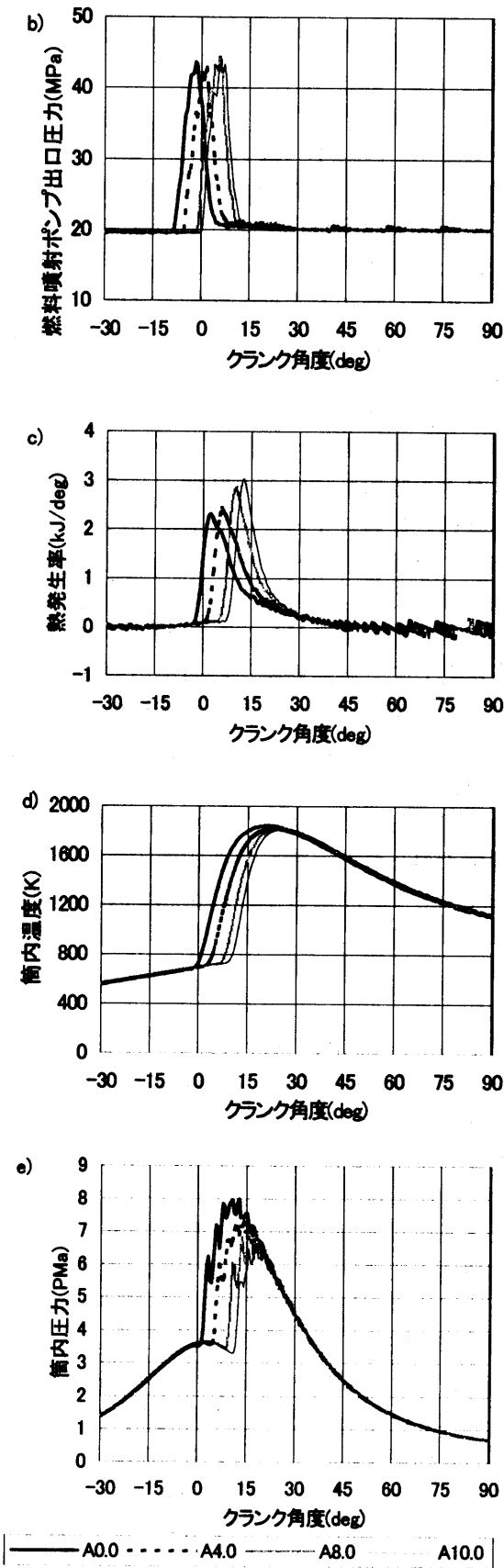


図 1 a .着火時期による機関性能
(負荷 25%、A重油)

3. 2 乳化燃料使用時の運転結果の解析

図3に乳化燃料を使用した場合の解析結果を示す。乳化燃料の場合、加水による燃料の粘度の増加や質量流量の増加、さらに着火遅れの増加による影響が現れる。25%負荷（図3 a）の場合を見ると、最大熱発生率はA重油に比べて著しく高くなり、燃焼はオートサイクル的になっていることが分かる。これは着火遅れが増加した結果、燃



図－1 b－e . 着火時期による特性
(負荷 25%、A重油)

料噴射が終わってから着火し、燃焼が急激に進むためと思われる。負荷が大きくなると噴射時間が長くなり、着火後も燃料噴射が続いてディーゼル燃焼的な傾向に戻り、 $dQ/d\theta$ の最大値は低下する(図3b)が、加水による燃料流量の増加によって燃焼終了はA重油の場合よりさらに遅れるため、着火時期の可変範囲は一層狭まくなる。

3. 3 カム駆動と電子制御油圧駆動の $dQ/d\theta$ の比較

カムと油圧駆動では最高噴射圧と噴射圧パターンは異なった特性を示す。図4 a、bに75%負荷における噴射圧特性と熱発生率解析結果の一例を、図4 cにはこのときの燃費とNO_x排出率を示す。

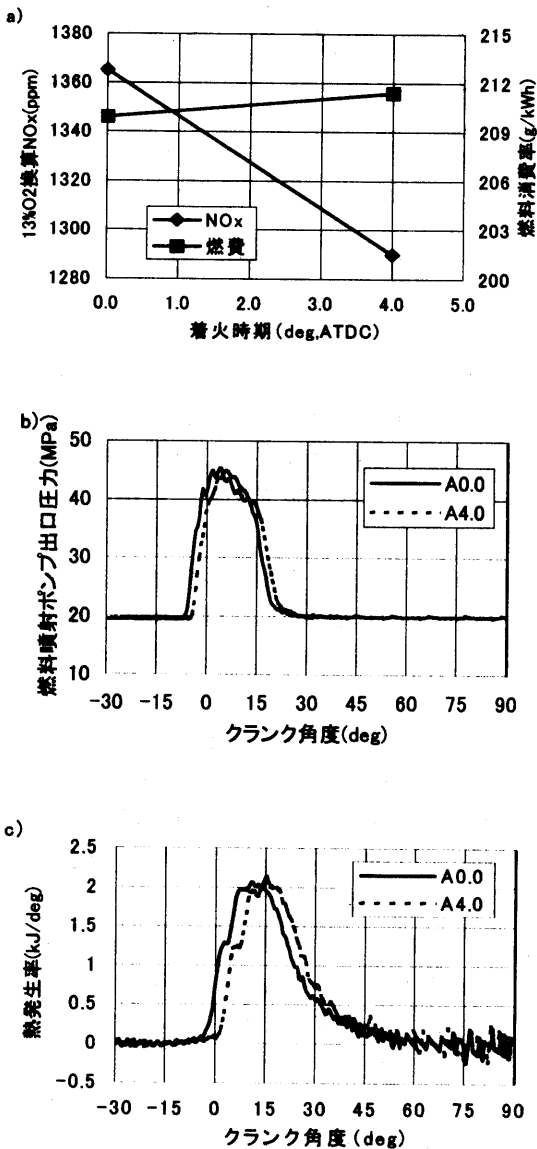
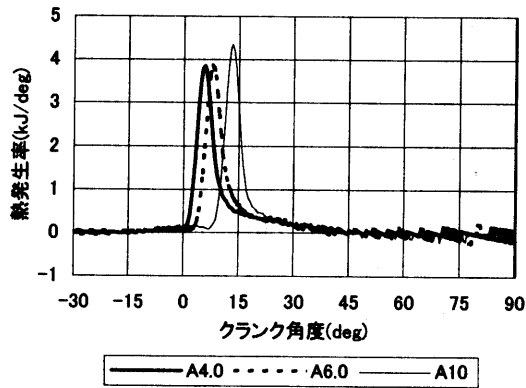
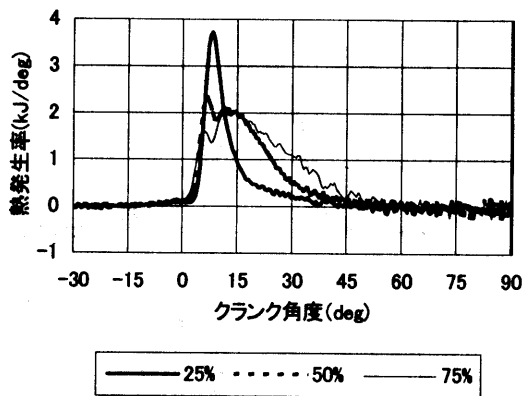


図-2 着火時期による特性 (75%負荷)



a) 着火時期による特性 (25%)



b) 負荷による特性

図-3 乳化燃料使用時の熱発生率 (加水率 30%)

A重油使用の場合、カム駆動と油圧駆動の熱発生率特性の違いは顕著ではないが、着火時期の最適化によって燃費とNO_x排出特性はカム駆動の場合より改善された。乳化燃料の場合は、前述のように噴射時間が長くなって燃焼終了が遅れ、NO_xは低下するものの燃費が悪化するという機関性能の結果(図4c)を裏づけている。

4. 逆解析例

本法を用いて、任意の熱発生率分布を与える場合のシリンダー内温度、圧力を計算することができる(逆解析)。図5に、A重油使用、25%負荷の実験例に対する熱発生率分布を変えた場合の逆解析結果の一例を示す。ここでは、熱発生率は簡単化のためクランク角に対して一定とし、総熱発生量が変化ないように熱発生持続期間を決めた(図5a)。気筒内の最大圧力は熱発生率の高さに大きく影響される(図b)。着火時期を変える

ことで、最適化が期待できる。

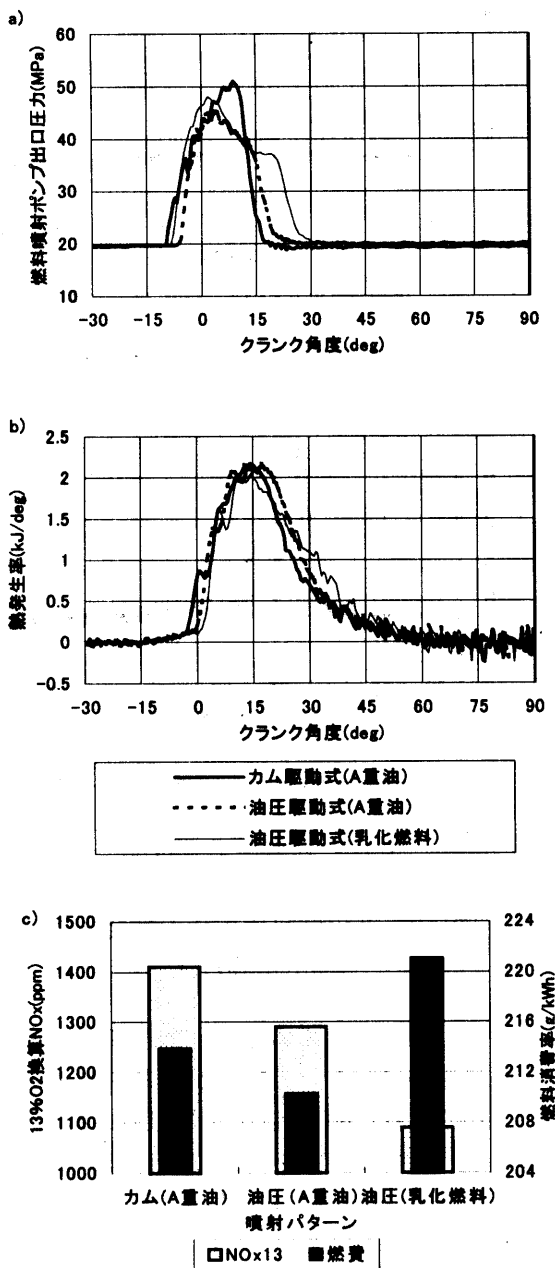


図-4 噴射パターンによる特性
(負荷 75%、加水率 30%)

5. まとめ

燃料噴射系を電子制御化することによって、燃費と排ガスを同時に改善する事が可能となる反面、制御パラメーターが多くなることから、最適化条件を実験のみによって求めることは難しい。このため、数理的な解析手段を活用することが必要である。本報告では、比較的簡便な計算方法を用いてディーゼル機関の熱発生率解析を行い、実験で得られた機関特性をよく説明できることを示

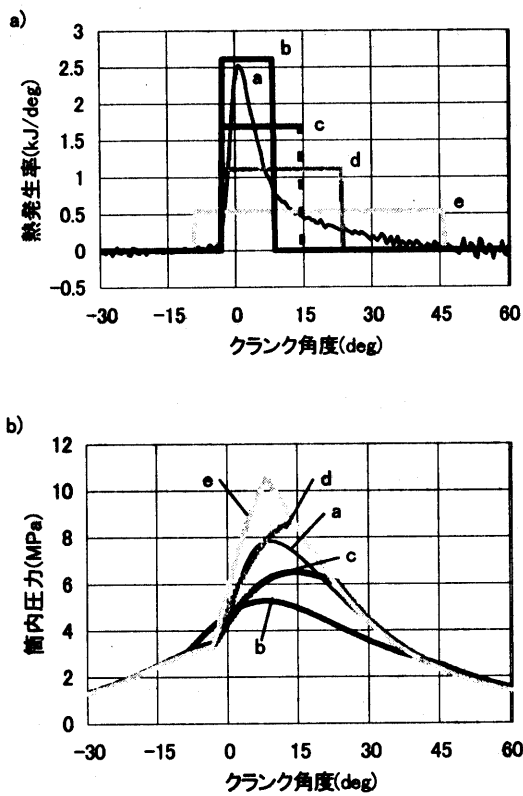


図-5 逆解析予想図

した。

実験機関で採用した油圧駆動電子制御方式は、現状では装置の制限から制御範囲の自由度は限られているが、本計算は実験では困難な条件でのシミュレーションも可能であり、今後、より広範な条件での最適化の検討に役立てることができ。制御の安定性の改善や油圧駆動動力の軽減なども課題であり、今回報告した数値解析を更に改良しつつ、総合的な研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 張他「燃料噴射系の電子制御化による船用ディーゼル機関の排ガスの改善 A 重油使用時の運転結果」、日本船用機関学会誌 第 35 巻 第 12 号 2000-12
- 2) 張他「船用ディーゼル機関の燃料噴射の電子制御化の研究」第 1 報 A 重油使用時の運転試験結果、船舶技術研究所第 74 回研究発表会、2000.6
- 3) 石村他「船用ディーゼル機関の燃料噴射の電子制御化の研究 第 2 報 乳化燃料使用時の運転試験結果」、船舶技術研究所第 74 回研究発表会、2000.6