

44 燃料噴射系の電子制御時の熱発生率解析 (その2)

— 燃焼パターンのモデル化による解析 —

環境・エネルギー研究領域

大気環境保全研究グループ

張潔、*高杉喜雄、石村恵以子、菅進

1. まえがき

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および吸排気弁系を油圧駆動電子制御方式に改造して運転試験を実施し、各弁の動作時期を適切に制御することによって排ガス特性と燃料消費率を同時に改善できることを示した^{1)、2)}。しかし、電子制御機関ではすべての弁開閉時期など制御対象を自由に設定できる一方、設定数が多く、これらの最適な組み合わせを実験的に求めることは容易ではない。従って制御の最適化をはかるために、数値解析を効果的に適用することが望まれる。我々は先に、燃料噴射系を電子制御化した機関のシリンダ内圧力から、簡便な手法で熱発生率とサイクル温度を計算し、着火時期や噴射圧と機関性能や排ガス特性との関係を考察した結果について報告した³⁾。

本報告では、実験で得られた熱発生率分布をWiebeの式で近似し、式の係数を変化させることによって、燃焼過程に与える影響を考察する方法について述べる。一般に実験では装置の性能による制限によって燃料噴射開始時期等の可変範囲は制限されるが、計算では燃料噴射開始時期や噴射量分布などを広い範囲で変えて、燃焼過程を模擬することが可能になる。

2. 計算の方法

シリンダ内圧力と燃焼過程における温度と熱発生率の関係は次の式で表す³⁾。ここでは、解析を簡易化するため、完全ガスを仮定し、ガスと壁面の熱の移動は考えない。

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

本報告では、実験から得た熱発生率分布を以下に述べるように近似式で表示した後、式のパラメータを変えて燃焼過程での温度・圧力の計算を行う。

燃焼過程の熱発生率は文献4)、5)にならって次のWiebeの式により近似した。Wiebeの式はa、mの2つのパラメータによって、複雑な内燃機関の熱発生率曲線をよく表現できるとされている。

$$\frac{Q}{Q_z} = 1 - \exp\left[-a\left(\frac{\theta}{\theta_z}\right)^{m+1}\right] \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{d\theta} = a \frac{Q_z}{\theta_z} (m+1) \left(\frac{\theta}{\theta_z}\right)^m \exp\left[-a\left(\frac{\theta}{\theta_z}\right)^{m+1}\right] \quad (3)$$

ここで

Q: 燃焼開始からの発熱量

Q_z: 1サイクルの総発熱量

θ: 燃焼開始からのクランク角

θ_o、θ_e: 燃焼開始及び終了時期 (クランク角)

θ_z: 燃焼持続時間 (クランク角) = θ_e - θ_o

a、m; 曲線の形状を決めるパラメータ

aとmを変えた場合の式(3)の変化を図1に示す。mは主に最大熱発生率の高さと位置に関係する。すなわちmが大きくなると発熱量のピークが低くなりピーク位置は後退する。一方、aが主にピークの高さに関係し、ピークの位置はあまり変わらない。また、θ/θ_z=1におけるQ/Q_zはaによって決まる。文献4)、5)では、aはQ/Q_z=0.999となる6.9に固定しているが、ここでは自由なパラメータとして扱う。

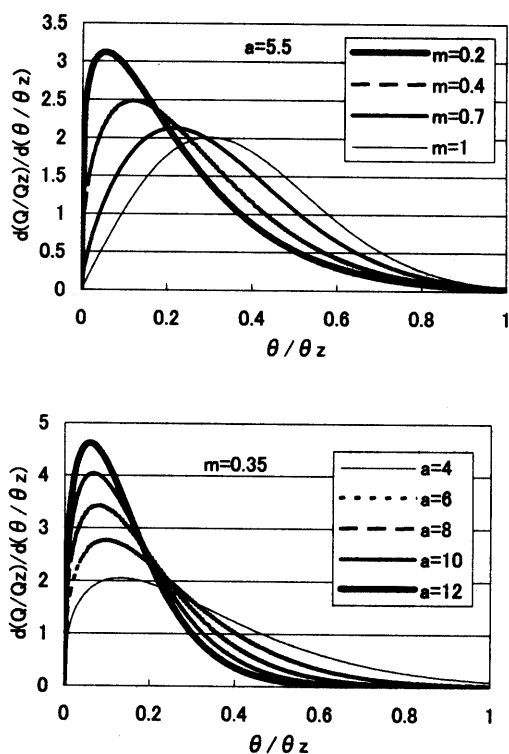


図1. パラメータaとmの特徴

3. 計算の結果

3. 1 実験結果への近似式の適用

負荷25~100%での運転、および負荷25%で着火時期を変更した場合の運転に対して近似式の適用を試みた。 Q_z は1サイクルの間に噴射された燃料の発熱量であり、計算では既定値として与える。 θ_o 、 θ_e は実測値と一致するように決める。 a 、 m の数値は、最大熱発生率の高さと位置（クランク角度）が一致することを重点において、曲線の全体形状がほぼ一致するような組み合わせを選ぶ。しかし、 a と m の組み合わせを一義的に決めることは難しく、近似の重点をどこに置くかによって異なった数値の組み合わせを選ぶこともできる。また燃焼終了時期は明確には定まらない場合も多く、燃焼持続時間 θ_z にも数度の任意性が残っている。このように a 、 m 、 θ_z を確定的に決めることはできないが、ここではほぼ妥当と思われる数値の組み合わせをえらび、全体的な傾向を把握することにした。

図2に25%と75%までの発熱量分布とWiebeの式の

近似結果を比較して示す。負荷25%の場合、近似式では燃焼の終わり近くで差がでるが、負荷が高くなると実際の発熱量分布がよく表現される。

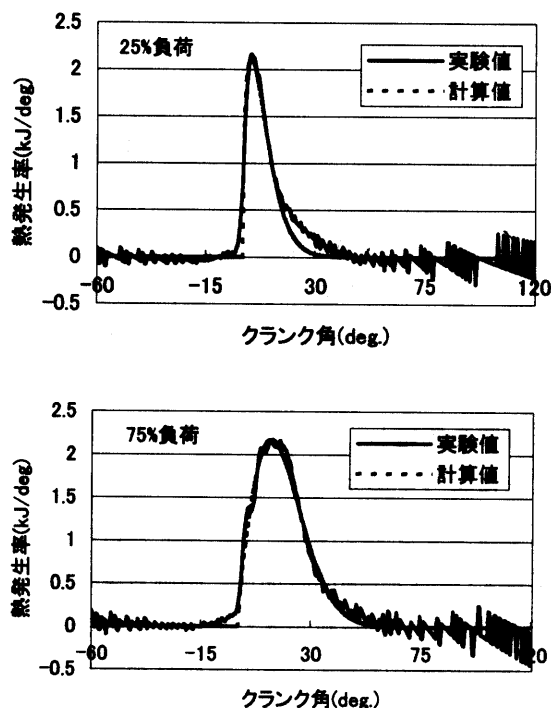


図2. 実験値と計算値の比較

図3 a, bにカム駆動と電子制御時の負荷率を変えた場合の a 、 m と燃焼持続時間 θ_z の変化を示す。電子制御の場合、 θ_z は負荷の増加と共に直線的に増加する。また a 、 m も一様に変化して、 a は12~7まで減少し、 m は0.4~0.9まで増加する。カム駆動の場合、 θ_z および a の負荷に対する傾向はやや不明瞭になるが、計測の不確かさによる可能性もある。 m は電子制御の場合より数値が大きく0.7~1.1となって燃焼の立ち上がりが電子制御より緩やかであることを示している。

図3cに25%負荷で着火時期を変えた場合について示す。曲線の形状を表す a 、 m はほとんど変わらない。着火時期8度までは、燃焼終了時間はほとんど変わらない。着火時期をさらに遅らせると、燃焼終了が遅れはじめ、燃料消費率は増加に転じる。

3. 2 近似式パラメータの変更による数値実験

燃料噴射系をカムで駆動する従来の方式では、定

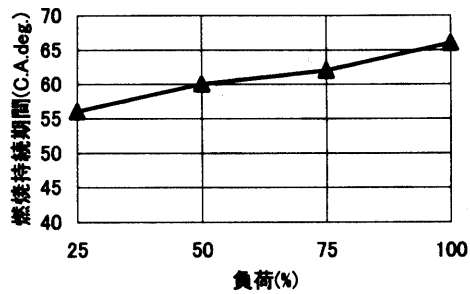
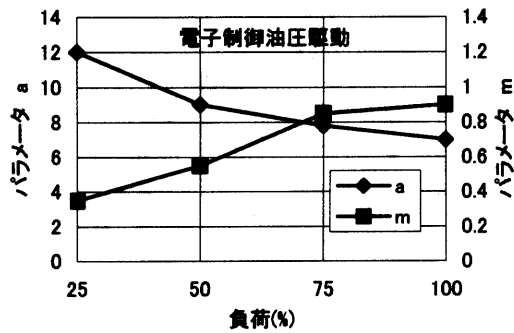


図3a. 電子制御時のパラメータ変化

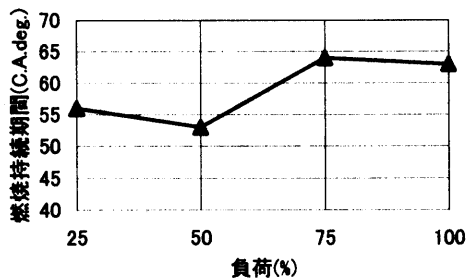
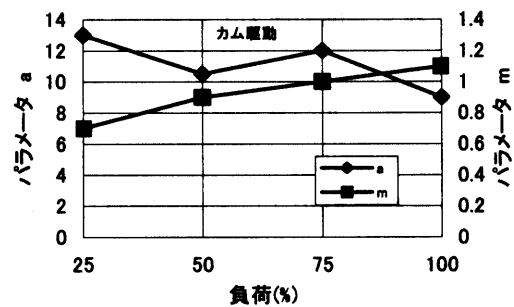


図3b. カム駆動時のパラメータ変化

格負荷近くで最適値をとるように設計されるため、低負荷では最適設定からのずれが大きくなり、電子制御による最適化の効果は大きい。しかし、中・高負荷では既定の設定を越える最適化条件を実験的に示すことは、実験装置と機関要素自体の制限もあって困難である。

そこで、75%負荷を対象にして、熱発生率特性を

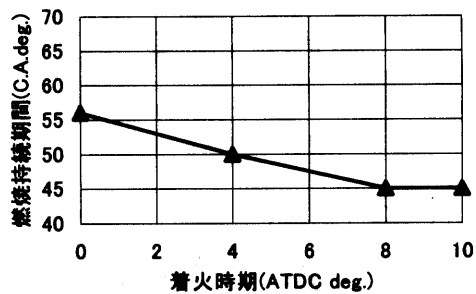
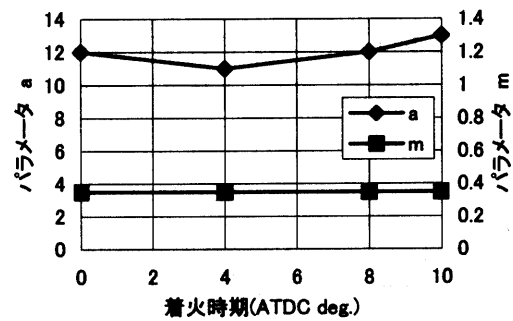


図3c. 着火時期によるパラメータの変化

大きく変化させた場合の計算を行い、燃焼開始から排気弁開までの温度圧力を調べた。計算では図3aに示した75%負荷時の分布 ($a=7.8$ 、 $m=0.85$ 、 $\theta_z=62$ 度、 $\theta_o=0$ 度) を基本にして、 θ_z を31度に短縮した場合、および93度に延長した場合を仮定した。 a と m はすべて同一とした。

図4に $\theta_z=62$ 度で、着火時期を0~8度まで変えた場合のシリンダ内圧力・温度を示す。この計算から機関の排ガス特性や燃料消費率を直ちに評価することは困難であるが、最高圧力・最高温度および排気弁開時の圧力・温度は重要な関係があると思われるので、図5にこれらの比較を示す。排気弁開時期は130度(クランク角)とした。

図5a、bから分かるように燃焼持続時間を長くすると、最高圧力・最高温度は下がり、 NO_x 排出特性の改善が期待できるが、排気弁開の圧力と温度は高くなり、燃料消費率も増加することが予想される。また、排気弁開時期を制御して、燃料消費率を改善できる可能性が考えられる。

燃焼持続時間を短くした場合($\theta_z=31$ 度)、25%負荷時と同様に、着火時期を遅らせると最高温度と圧力が下がり、 $\theta_z=31$ 度の範囲で噴射時期の最適化は

可能と思われる。しかし $\theta z=62, 93$ 度と比較した場合、最高圧力・温度は高く、排ガス特性は噴射時期の最適化によって改善されても、全体としては高い水準にとどまると推測される。

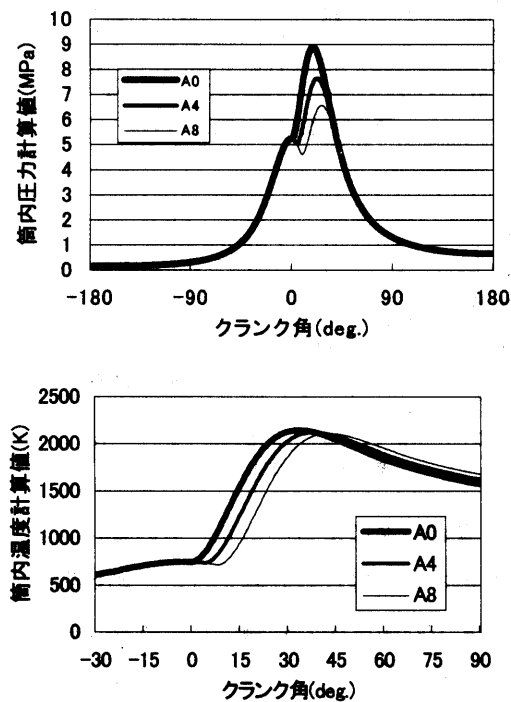


図4. 着火時期による筒内圧力・温度の計算値

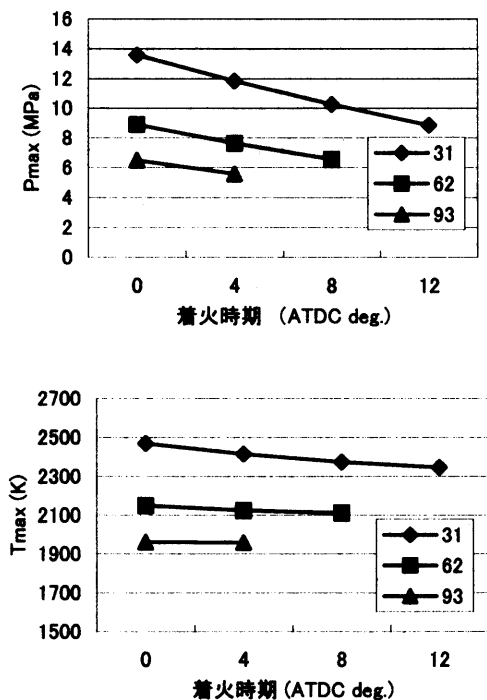


図5a. 最高圧力と最高温度の変化

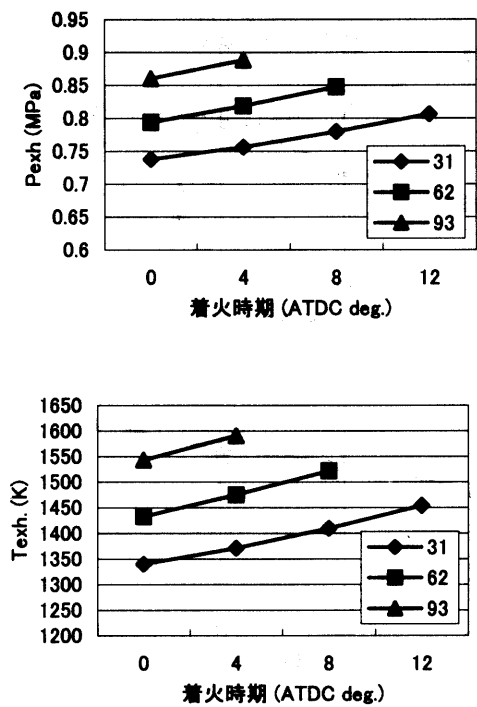


図5b. 排気弁開の圧力と温度の変化

4. まとめ

- (1) 燃料噴射系を電子制御化した機関の熱発生率分布をWiebeの式によって近似し、負荷条件や着火時期と近似式パラメータの関係を調べた。Wiebeの式は特に高負荷域で実際の熱発生率分布をよく近似することができる。
- (2) 熱発生率分布を大きく変えた場合をWiebeの式のパラメータを変えて模擬し、75%負荷を例にして熱発生率分布がシリンダ内圧力や排ガス温度に及ぼす影響を調べた。熱発生率分布をフラットにすることでNO_x低減は期待できるが、熱効率改善に対しては排気弁開時期の制御も考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 張他、日舶誌、Vol. 35、No. 12、2000、P841-847
- 2) 高杉、日舶誌、Vol. 36、No. 12、2001、P16-24
- 3) 張他、海技研 研究発表会講演集2001
- 4) G. Woschni etc、SAE paper 740086
- 5) 藤井他、日舶誌、1991、Vol. 26、No. 27、P44-51