

ディーゼル機関の熱発生率

佐々木 啓 介*・岩瀬谷 正 男**

The Rate of Heat Release of the Diesel Engine

Keisuke SASAKI and Masao IWASEYA

要 旨

ディーゼル機関の燃焼解析をするとき、熱発生率を考える必要があるが、本実験は予燃焼室式ディーゼル機関の指圧線図を測定し、これから熱発生率を二種類の計算式により求め、熱発生率とともに燃焼ガス圧力、ガス温度などの変化について、比較、検討をした。

Synopsis

The rate of heat release must be considered, when combustion of the diesel engine is analyzed. We measured the indicator diagram of pre-combustion type diesel engine, calculated the rate of heat release by two kinds of equations and compared the results of them.

1. ま え が き

ディーゼル機関の燃焼過程を解析するための重要な因子として熱発生率があり、この熱発生率の求め方には種々ある。本研究は二種類の計算式により熱発生率を求め、二式を比較、検討をし、負荷、噴射時期、回転数の変化による、圧力、温度その変化点などの影響について考察した。二式の重なる相異点は、指圧線図からの燃焼ガス圧力の計算方法と燃焼ガス温度の変化に対する比熱比、ガス定数の計算方法である。

2. 実験装置, 方法

使用エンジンは予燃焼室式ディーゼル機関(6.5 PS/1200 rpm)で、主燃焼室における指圧線図を測定した。

運転条件は、平均有効圧力 (Pe) 0.2~0.65 MPa, 噴射時期 (I. T) 0°~14° BTDC, 回転数 1000, 1200 rpm と変化させた。

3. 熱発生率の計算方法

熱発生率 ($dQ/d\theta$) は次式で求められる。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{dQ_b}{d\theta} - \frac{dQ_w}{d\theta} = \frac{1}{k-1} \left(kP \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right) \quad (1)$$

圧力変化、体積変化は次式で表わされる。

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{1}{12} (P_{\theta-2} - 8P_{\theta-1} + 8P_{\theta+1} - P_{\theta+2}) \cdots (2)$$

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\pi}{4} D^2 \left(r \sin \theta + \frac{r^2}{2\ell} \sin 2\theta \right)$$

冷却損失は次式より求める。

$$\frac{dQ_w}{d\theta} = \alpha (T_\theta - T_w) F \frac{dt}{d\theta} + 0.362 \left\{ \left(\frac{T_\theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right\} F \frac{dt}{d\theta}$$

α は熱伝達率で次式より求める。

$$\alpha = 265 (C_m \cdot P_\theta)^{0.786} D^{-0.24} T_\theta^{-0.525}$$

燃焼ガス温度は

$$T = \frac{P_\theta V_\theta}{G_\theta R_\theta}$$

より求め、ガス定数は後述のように求めた。

* 教 授 機械工学科

** 技 官 機械工学科

以上を基礎式とし、圧力の計算方法として次のA, Bの二方式を用いた。

$$A) P_\theta = C_1 \times PP_\theta + C_2 \quad (a)$$

$$C_1 = (P_1 - P_2) / (X_1 - X_2)$$

$$C_2 = P_2 - C_1 \times X_2 + 1$$

PP_θ : 指圧線図の読み

P_1 : X_1 における圧力 P_2 : X_2 における圧力

指圧線図の読みから係数 C_1 , C_2 を計算させ (a) 式より圧力 P_θ を求める。

$$B) P_\theta = C_0 (PP_\theta - P_0) + 1 \quad (b)$$

P_0 : 基線の読み C_0 : 較正係数

較正係数を一定として (本計算では 6.03) (b) 式より圧力 P_θ を求める。

以上A, Bよりガス圧力を求め, (2)式により圧力変化を求め, 次の1), 2)の二方式により比熱比 k , ガス定数 R を求め, (1)式より熱発生率を求めた。

1) 比熱比を空気過剰率, 温度より求める。

$$k = \frac{C_p}{C_v} - \frac{0.03745}{\lambda} - \frac{0.00365}{\lambda} T_\theta \cdot 10^{-3} \quad (T_\theta > 700K)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} - \frac{0.03125}{\lambda} - \frac{0.0125}{\lambda} T_\theta \cdot 10^{-3} \quad (T_\theta < 700K) \quad (c)$$

λ : 空気過剰率

$$R = 29.271 - \frac{0.14}{\lambda}$$

2) 比熱を温度の四次式として求める。

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 \quad (d)$$

$$k = \frac{C_p}{C_p - 1.9855}$$

燃焼ガスの成分を CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 として任意のクランク角度における燃焼ガス成分を求め, (d)式より係数 $a \sim e$ を求めることにより, その角度の温度 T_θ より比熱 C_p を求め比熱比を求めた。例として CO_2 の係数を示す。

(例: CO_2 のとき

$$T < 1200 K$$

$$a = 4.4269 \quad b = 19.826 \quad c = -19.3181$$

$$d = 10.484 \quad e = -2.4322$$

$$T > 1200 K$$

$$a = 16.9476 \quad b = -12.9426 \quad c = 31.5939$$

$$d = -40.905 \quad e = 18.7665)$$

4. 計算結果

4.1 計算結果の比較

計算結果の比較をガス圧力, 熱発生率, ガス温度, 比熱比を中心に行ったが, 圧力については (a) 式の係数 C_1 , C_2 の値により (b) 式との差が生じそれが全体的な結果に影響を与えている。比熱比については両式による差はほとんどなかった。以上のことから A-1 ((a) 式と (c) 式), B-1 ((b) 式と (c) 式) の結果について比較, 検討をした。

比較は前項目の他, 冷却損失, および各値の変化点 (クランク角度で表示) について, 負荷, 噴射時期の影響を含めて行った。図1は, 結果の例であり, 以下グラフに示す記号を載せてある。こ

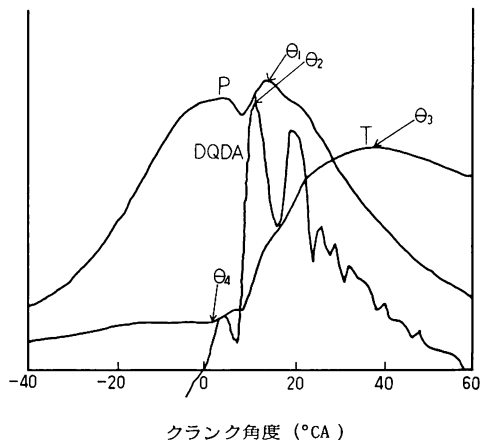


図1(a) 計算結果

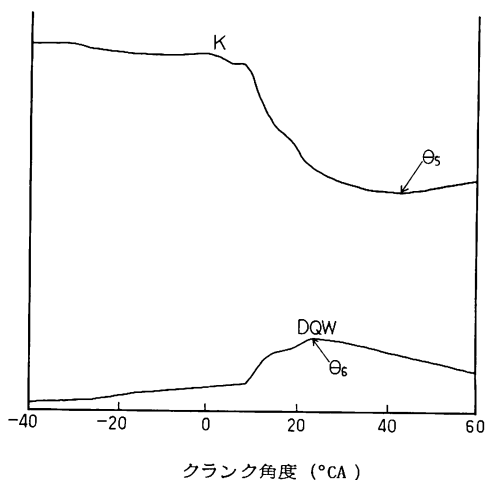


図1(b) 計算結果

これらの記号をまとめて説明しておく。

- I. T: 噴射時期 (°CA)
- $P_{\max}$: 最高ガス圧力 (MPa)
- $T_{\max}$: 最高ガス温度 (K)
- $DQDA_{\max}$: 最高熱発生率 (kJ/kmol)
- $DQW_{\max}$: 最高熱損失 (kJ/kmol)
- θ_1 : 最高ガス圧力点 (°CA)
- θ_2 : 最高熱発生率点
- θ_3 : 最高ガス温度点
- θ_4 : ガス温度上昇点
- θ_5 : 最小比熱比点
- θ_6 : 最高冷却損失点

4.2 噴射時期による影響

図2～図5は、回転数 1000 rpm、平均有効圧力 0.45 MPa における、噴射時期変化に対する結果を示している。最高ガス圧力、ガス温度は、噴射時期が早くなるに従い、着火遅れが長くなり急激燃焼が生じ、両者とも上昇する。また最高熱発生率は噴射時期が遅くなるに従い、圧縮圧力、温度の高い時での噴射のため上昇し、燃焼が効率良く行なわれていることを示している。これらはいずれも A-1 より B-1 の結果の方が高い値となっていて圧力の計算方法の違いにより、熱発生率、ガス温度に差が生じている(図2)。そのガス

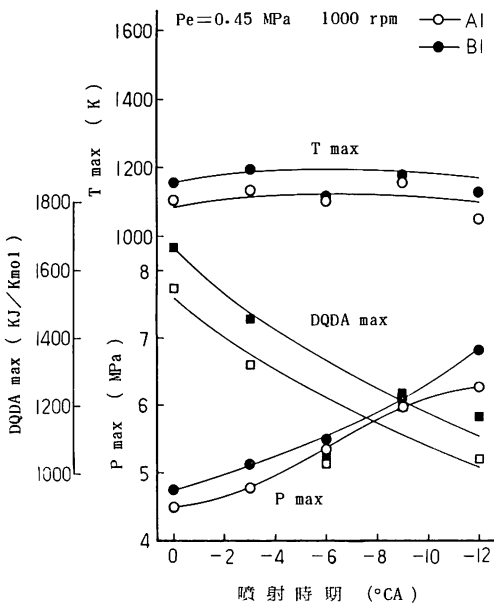


図2 噴射時期と最高熱発生率、圧力、温度

温度の相違により比熱比などに影響がでている。冷却損失は噴射時期が早くなるに従い、温度上昇率の大きさにより増加している。温度上昇点 (θ_4) の温度も噴射時期が早くなるに従い上昇しているが、 -12° では初期燃焼が早く終るため降下している。

これらの値も B-1 の方が高い値を示している。比熱比は燃焼進行に伴い、温度上昇とともに降下しある点で最小になるが、その最小値は噴射時期が早くなるに従い上昇傾向にある。両式による差は等圧比熱、等容比熱とも相対的に大きくなるために、あまりでない(図3)。

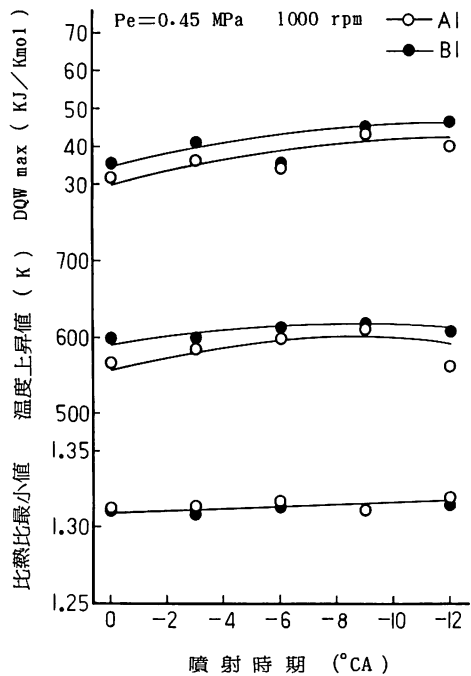


図3 噴射時期と最高冷却損失、比熱比、温度上昇値

図4、図5はガス圧力、温度などの変化点をクラック角度で示したものである。最高温度点 (θ_3) と最小比熱比点 (θ_5) が、圧力-温度-比熱の相互作用により両式の間に相違がでているが、他はほぼ一致した値となっている。ガス温度点、比熱比点に少し変動 (-6° は特に圧力の影響がでた) はあるが噴射時期が早くなるに従い、その時期が早くなっている。熱発生率点 (θ_2) と冷却損失点 (θ_6) を比較すると、ピストン運動 (体積変化) の影響が加わり、冷却損失の方が遅くなって生じている。

熱発生率点はガス圧力点 (θ_1) よりわずかに早い

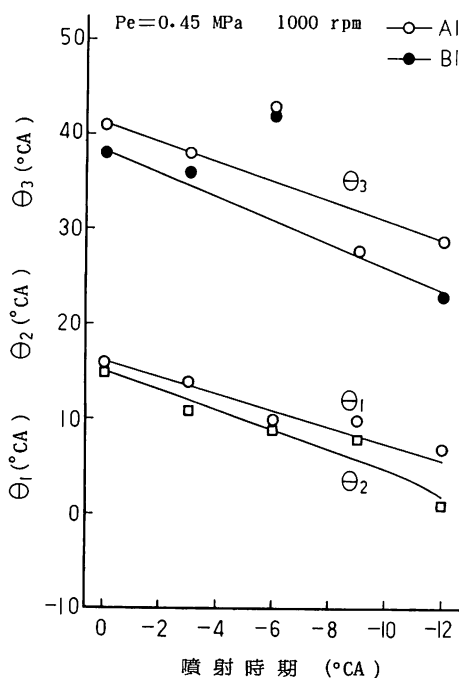


図4 噴射時期と最高熱発生率点, 圧力点, 温度点

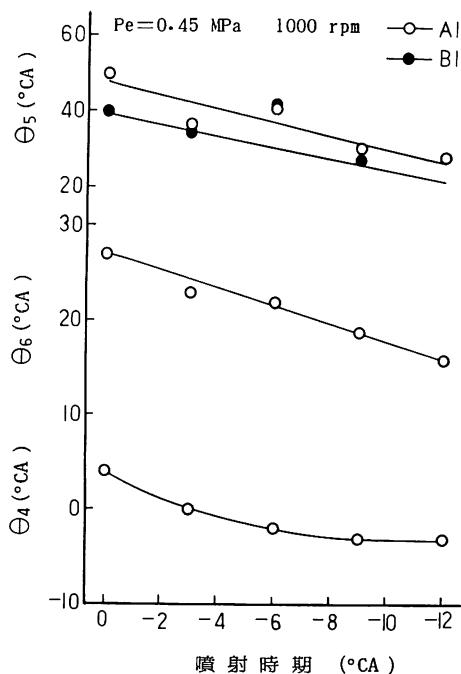


図5 噴射時期と最高冷却損失点, 温度上昇点

時期に生じ, 噴射時期が早くなるに従い少し遅れを増してガス圧力点があるが, これは熱発生率の大きさによるものである。さらに 20° ~ 30° 遅れて

最高温度点がある。ガス温度点が圧力点より遅れて表われるが, これも体積変化の影響が大きくガス定数の変化にもよるためである。

最小比熱比点とガス温度点は, 両式による相異が表われ, B-1の方が早くなっている。これは圧力上昇率の差であり, また圧力が高い方がガス温度点, 比熱比点も早くなっている。両者の変化の傾向はほぼ一致している。

4.3 負荷による影響

図6~図9は, 回転数 1200 rpm, 噴射時期 -10° における, 負荷変化に対する結果を示している。

負荷の増加とともに最高ガス圧力は減少傾向にあり, ガス温度は増加している。圧力については初期燃焼量の影響とディーゼル機関の場合, 等圧燃焼に近い状態で燃焼するためであり, 最高熱発生率がほぼ一定の傾向にあることから理解できる。ガス温度については, 圧力とは逆に, 噴射量, 燃焼量の増加に従って上昇し, その差が 400 度近くになっている。いずれの場合も A-1の方が B-1よりも大きな値となっているが, この場合係数 C_1 , C_2 の計算が 4.2 節の 1000 rpm の場合より小さく計算され, その差が比較的大きく表わ

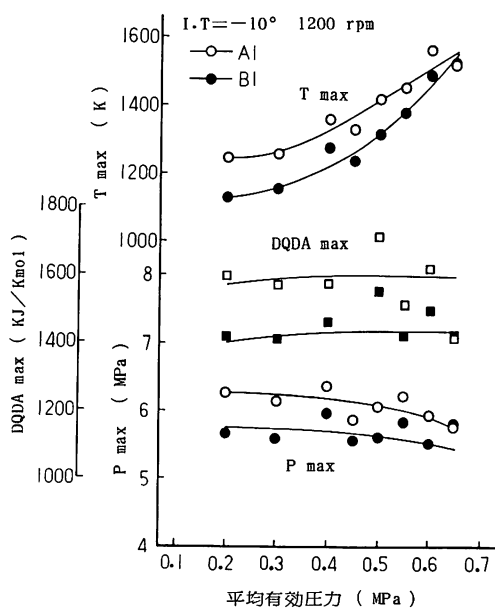


図6 負荷と最高熱発生率, 圧力, 温度

れている。その影響により, 図7に示されているように, 冷却損失は負荷増加により上昇し(温度差の上昇による), 温度上昇点の温度もガス温度と

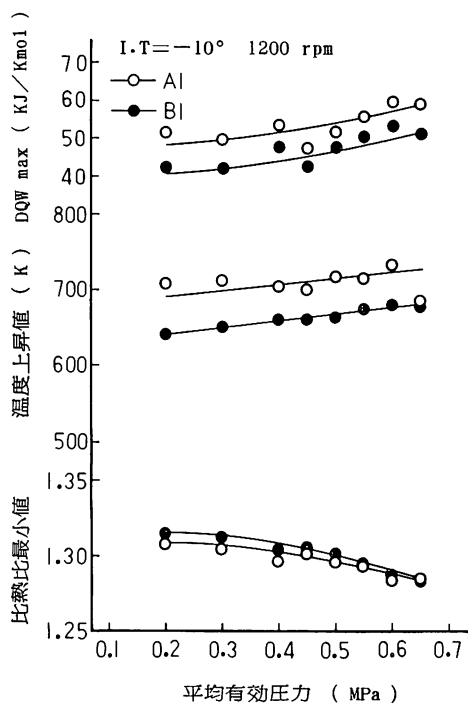


図7 負荷と最高冷却損失, 比熱比, 温度上昇値

同様増加し両者の差約 50 度がそのままガス温度差となり表われている。比熱比も負荷増加により減少し、B-1 の方が大きい値となっているが、これも前記と同様、温度の変化量、大きさに付随している。

図 8, 図 9 は、負荷に対するガス圧力, 温度などの変化点を示したものである。

両式による相異は 4.2 節と同じく、ガス温度点と比熱比点において、わずかに表われているようである。また圧力が高い方がガス温度点と比熱比点は早く生じている。その他は両式ともほぼ同じ値となっている。

最高ガス圧力点は、最高ガス圧力の傾向と同じく、ほぼ一定の時期(約 -7°)であり、温度上昇点もほぼ一定(0°)で、噴射時期が一定であれば初期燃焼量の関係から初期温度変化が小さく同一となる。熱発生率点、冷却損失点は、負荷増加に従って遅くなり、冷却損失点の方が遅くなっている。熱発生率点はある負荷まで、主燃焼室において比較的ゆっくり燃焼するためであり、冷却損失点はガス温度点の変化と同一の傾向にある。ガス温度点は負荷増加とともに遅くなり、その変化量(25°)は熱発生率点の変化量(8°)より大きい。これは体積変化の影響と主燃焼室内での燃焼量増

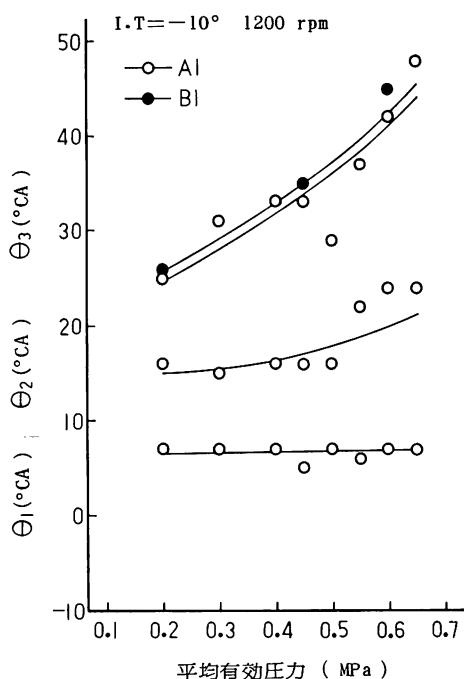


図8 負荷と最高熱発生率点, 圧力点, 温度点

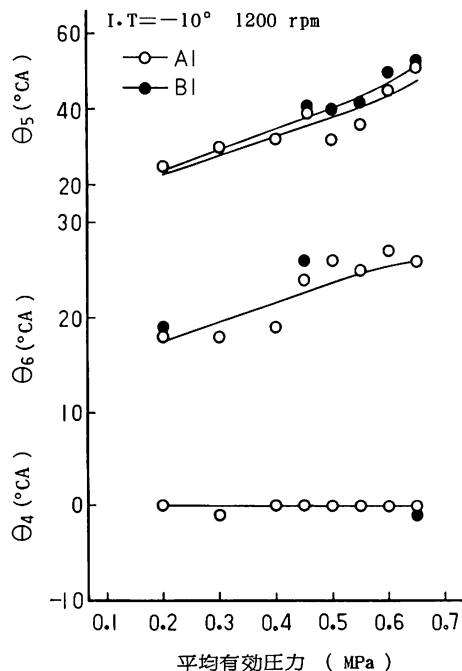


図9 負荷と最高冷却損失点, 温度上昇点

加によるものである。

これらの相対的時期は、ガス圧力点、熱発生率点、冷却損失点、ガス温度点(比熱比点)の順に

なっている。

5. あ と が き

熱発生率を求める二種類の計算方法において、比熱比については大きな差はないが、圧力計算においては差が生じ、A-1ではその指圧線図により比較的大きくなる場合がある。B-1では係数を一定として求めているため、変化の小さい結果が得られるが、その係数の決定が問題となる。A-1においては、今回は一つの指圧線図（各点について）から求めたものであり、データの増加によりその平均的係数を精度良く計算させることにより、より変動の小さい結果が得られると思われる。

これら点の改良とさらに別の因子の影響についても解析を進めていきたい、

参 考 文 献

- 1) 宮本, 佐々木他, 北大工学部研究報告 98 号.
- 2) 佐々木, 岩瀬谷, 苫小牧工業高専紀要 22 号.

(昭和 62 年 11 月 30 日受理)