副室式内燃機関の各室熱発生率の誤差に対する各種因子の影響*

寺 田 耕^{*1}, 松 原 俊 幸^{*2}Influence of Parameters on the Errors of Heat Release Rates
of Internal Combustion Engines with Divided Combustion Chambers

Ko TERADA and Toshiyuki MATSUBARA

Precise indicator diagrams are necessary for correct estimation of heat release rates or progression of combustion in both chambers of an indirect injection (IDI) engine. Many parameters, such as pressure and physical properties of the gas in the chambers, flow coefficient of the connecting passage, engine speed, and crank angle, influence the heat release if they contain errors. The authors have numerically estimated such influence in the form of error sensitivities. Calculations were made for three types of connecting passages of an IDI engine. Wiebe's function was used for fundamental heat release.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Thermodynamics, IDI Engine, Heat Release Rate, Error Estimation, Error Sensitivity

1. 序 論

内燃機関の燃焼経過は熱効率や排気成分に大きな影響を及ぼすが、これを知るには熱発生率を求めなければならない。特に、ディーゼル機関では燃焼期間が長くなるので、その重要性、有用性が大きく、燃焼経過を論じる際に常に参照される。単一燃焼室(直接噴射)の場合にも、もちろん正確な指圧線図に基づく熱発生率が要望されるが、副室式では各室熱発生率を算出するために主副両室の圧力経過を、特に高精度で計測しなければならない。指圧計測系の零点移動、指圧計検定曲線の不正確さ、指圧計継手管内振動などにより、例えば圧縮行程中に副室圧力のほうが主室圧力より高く測定されると、それは副室内で着火以前に大きな熱発生があったり、主室内で想像できないような大量の吸熱があるような熱発生率になってしまう原因となる。また、振動的に両室圧力差が正負に変動すると、熱発生率は極めて大きな振幅で正負に変動したものとなり、まったく利用できなくなる。このようなことは、副室式の中でも渦室式のように連絡孔が太くて両室間圧力差がきん少な場合には特に大きな問題となり、また

連絡孔の細い予燃焼室式でも、低負荷の場合とか燃焼の始めや終わりの圧力差が小さくなる時期には熱発生率の大きな誤差として現れる。

この種の誤差の一端についてはすでに著者が発表した⁽¹⁾⁽²⁾、本論文では、総合的な立場から、各室圧力の測定誤差(微分値も含む)のみならず、連絡孔の流量係数、各室ガスの量と比熱、燃焼室容積、機関回転数、クランク角など誤差原因となる因子の範囲を広く考え、これらが熱発生率に及ぼす影響を絶対感度係数の形で検討し、その影響の仕方を明らかにすることを目的とする。

2. 計 算 方 法

2・1 誤差の感度係数について 本論文では、副室式ディーゼル機関において通常用いられている固定連絡孔(図1)のほかに、排気の浄化に役立つ可能性を秘めているとも考えられている可変連絡孔⁽³⁾の場合についても検討することとした。

用いる記号は次のとおりである。

C_p, C_v : 定圧, 定容比熱

c : 連絡孔流量係数

f : 連絡孔断面積

G : ガス質量

H : エンタルピー

* 原稿受付 平成5年4月16日。

^{*1} 正員, 愛知工業大学 (〒470-03 豊田市八草町)。

^{*2} 正員, 三菱自動車工業(株) (〒616 京都市右京区太秦巽町)。

図 1 固定連絡孔つき(タイプP)燃焼室

図 2 可変断面積可変連絡孔つき
(タイプPA)燃焼室 図 3 固定断面積可変連絡孔つき
(タイプPCF)燃焼室

h : 比エンタルピー

l : 連接棒長さ

n : 毎分回転数

p : ガス圧力

Q : 熱量

R : ガス定数

r : クランク半径

T : ガス絶対温度

U : 内部エネルギー

u : 比内部エネルギー

V : 容積

v : 比容積

α : クランク角

θ : 誤差の絶対感度

x : 比熱比

1: 主室の添字

2: 副室の添字

熱発生率を求める基礎式としては既知の形式⁽⁴⁾⁽⁵⁾のものを可変連絡孔にも適用できる形に変えた次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} dQ_1 &= dU_1 + p dV_1 - dH_1 = C_{v1} G_1 dT_1 \\ &+ p_1 dV_1 + u_1 dG_1 - h dG_1 = \frac{C_{p1}}{R_1} p_1 dV_1 \\ &+ \frac{C_{v1}}{R_1} V_1 dp_1 - C_{v1} T_1 dG_1 \\ &+ u_1 dG_1 - h dG_1 \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} dQ_2 &= dU_2 + p dV_2 - dH_2 = C_{v2} G_2 dT_2 \\ &+ p_2 dV_2 + u_2 dG_2 + h dG_1 = \frac{C_{p2}}{R_2} p_2 dV_2 \\ &+ \frac{C_{v2}}{R_2} V_2 dp_2 - C_{v2} T_2 dG_2 \\ &+ u_2 dG_2 + h dG_1 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ただし、 $p_1 > p_2$ のとき $h = h_1$ 、 $p_1 < p_2$ のとき $h = h_2$ 。

比熱一定の理想気体を想定し、内部エネルギーとエンタルピーの零点を絶対零度とすると、 $u = c_v T$ となり、両式右辺第 3 項と第 4 項は消えて、

$$\frac{dQ_1}{d\alpha} = \frac{C_{p1}}{R_1} p_1 \frac{dV_1}{d\alpha} + \frac{C_{v1}}{R_1} V_1 \frac{dp_1}{d\alpha} - h \frac{dG_1}{d\alpha} \dots (3)$$

$$\frac{dQ_2}{d\alpha} = \frac{C_{p2}}{R_2} p_2 \frac{dV_2}{d\alpha} + \frac{C_{v2}}{R_2} V_2 \frac{dp_2}{d\alpha} - h \frac{dG_2}{d\alpha} \dots (4)$$

ここで、 $p_1 > p_2$ のとき

$$\begin{aligned} \frac{dG_1}{d\alpha} &= -\frac{dG_2}{d\alpha} = -\frac{cf}{6n} \left[\frac{2x_1 G_1 p_1}{(x_1 - 1) V_1} \right. \\ &\times \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa_1} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa_1 + 1)/\kappa_1} \right\} \right]^{1/2} \dots (5) \end{aligned}$$

$p_1 < p_2$ のとき

$$\begin{aligned} \frac{dG_1}{d\alpha} &= -\frac{dG_2}{d\alpha} = \frac{cf}{6n} \left[\frac{2x_2 G_2 p_2}{(x_2 - 1) V_2} \right. \\ &\times \left\{ \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{2/\kappa_2} - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{(\kappa_2 + 1)/\kappa_2} \right\} \right]^{1/2} \dots (6) \end{aligned}$$

可変連絡孔の形として図 2 のものを想定すると、各変数は次のようになるが、 D_2 、 D_{20} 、 D_3 を等しくすれば連絡孔断面積一定で、特別な場合として図 3 の固定断面積のものを考えることができ、各部寸法の記号は図 2 と比較して対応関係を知ることができる。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \left\{ \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi}{12} (D_{20}^2 + D_{20} D_L + D_L^2) \right\} L \\ \frac{dV_1}{d\alpha} &= \frac{dV}{d\alpha} - \frac{dV_2}{d\alpha}, \quad \frac{d^2 V_1}{d\alpha^2} = \frac{d^2 V}{d\alpha^2} - \frac{d^2 V_2}{d\alpha^2} \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= \frac{\pi D_1^2}{4} L_1 - \frac{\pi}{12} (D_L^2 + D_L D_3 + D_3^2) \\ &\times (L_0 - L) \\ \frac{dV_2}{d\alpha} &= \left\{ \frac{\pi}{12} (2D_L + D_3) \frac{D_2 - D_3}{L_0 - L_2} (L_0 - L) \right. \\ &+ \frac{\pi}{12} (D_L^2 + D_L D_3 + D_3^2) \left. \right\} \frac{dL}{d\alpha} \\ \frac{d^2 V_2}{d\alpha^2} &= -\frac{\pi}{6} \left(\frac{D_2 - D_3}{L_0 - L_2} \right) \\ &\times \left\{ \frac{D_2 - D_3}{L_0 - L_2} (L_0 - L) + (2D_L + D_3) \right\} \left(\frac{dL}{d\alpha} \right)^2 \\ &+ \left\{ \frac{\pi}{12} (2D_L + D_3) \frac{D_2 - D_3}{L_0 - L_2} (L_0 - L) \right. \\ &+ \frac{\pi}{12} (D_L^2 + D_L D_3 + D_3^2) \left. \right\} \frac{d^2 L}{d\alpha^2} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} L &= L_2 + r \left\{ 1 + \cos \alpha + \frac{r}{4l} (1 - \cos 2\alpha) \right\} \\ D_L &= \frac{(D_2 - D_3)(L_0 - L)}{L_0 - L_2} + D_3 \\ \frac{dL}{d\alpha} &= r \left(\sin \alpha + \frac{r}{2l} \sin 2\alpha \right) \\ \frac{d^2 L}{d\alpha^2} &= r \left(\cos \alpha + \frac{r}{l} \cos 2\alpha \right) \\ V &= V_c + \frac{V_h}{2} \left\{ 1 - \cos \alpha + \frac{r}{4l} (1 - \cos 2\alpha) \right\} \\ \frac{dV}{d\alpha} &= \frac{V_h}{2} \left(\sin \alpha + \frac{r}{2l} \sin 2\alpha \right) \\ \frac{d^2 V}{d\alpha^2} &= \frac{V_h}{2} \left(\cos \alpha + \frac{r}{l} \cos 2\alpha \right) \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

$$\dots (10)$$

ここで、 $p_1' = dp_1/d\alpha$, $p_2' = dp_2/d\alpha$ とし、 $h_i = u_i + p_i v_i$, $dh_i = c_{pi} dT_i = c_{pi} (p_i dv_i + v_i dp_i)/R_i$, ($i=1, 2$) を考慮して絶対感度係数を求める。以下に $dQ_1/d\alpha$ に対する各要因の絶対感度係数の諸式を示すが、 $dQ_2/d\alpha$ については添字を入れ換えたり、符号を逆にすればよいものが多く、式の形も前者と類似するので省略する。

(1) まず $p_1 > p_2$ のとき、

$$A_1 = \{2x_1/(x_1 - 1)\}^{1/2}/6n, Q_1' = dQ_1/d\alpha,$$

$dG_1' = dG_1/d\alpha$ とし、また式(5)の圧力をまとめて

$$P_{12} = p_1^{-(2-\kappa_1)/\kappa_1} p_2^{2/\kappa_1} - p_1^{-1/\kappa_1} p_2^{(\kappa_1+1)/\kappa_1} \dots (11)$$

式(6)の圧力をまとめ、微分値も次のようにおく。

$$P_{21} = p_2^{-(2-\kappa_2)/\kappa_2} p_1^{2/\kappa_2} - p_2^{-1/\kappa_2} p_1^{(\kappa_2+1)/\kappa_2} \dots (12)$$

$$B_{12} = \frac{\partial P_{12}}{\partial p_1} = -\frac{2-x_1}{x_1} p_1^{-(2-\kappa_1)/\kappa_1-1} p_2^{2/\kappa_1} + \frac{1}{x_1} p_1^{-1/\kappa_1-1} p_2^{(\kappa_1+1)/\kappa_1} \dots (13)$$

$$B_{21} = \frac{\partial P_{21}}{\partial p_2} = \frac{2-x_2}{x_2} p_2^{-(2-\kappa_2)/\kappa_2-1} p_1^{2/\kappa_2} + \frac{1}{x_2} p_2^{-1/\kappa_2-1} p_1^{(\kappa_2+1)/\kappa_2} \dots (14)$$

$$C_{12} = \frac{\partial P_{12}}{\partial p_2} = \frac{2}{x_1} p_1^{-(2-\kappa_1)/\kappa_1} p_2^{2/\kappa_1-1} - \frac{x_1+1}{x_1} p_1^{-1/\kappa_1} p_2^{(\kappa_1+1)/\kappa_1-1} \dots (15)$$

$$C_{21} = \frac{\partial P_{21}}{\partial p_1} = \frac{2}{x_2} p_2^{-(2-\kappa_2)/\kappa_2} p_1^{2/\kappa_2-1} - \frac{x_2+1}{x_2} p_2^{-1/\kappa_2} p_1^{(\kappa_2+1)/\kappa_2-1} \dots (16)$$

以上から感度係数を次のように得る。

$$\Theta_{1c} = \frac{\partial Q_1'}{\partial c} = -h_1 \frac{\partial G_1'}{\partial c} = A_1 h_1 f G_1^{1/2} V_1^{-1/2} P_{12}^{1/2} \dots (17)$$

$$\Theta_{1f} = \frac{\partial Q_1'}{\partial f} = -h_1 \frac{\partial G_1'}{\partial f} = A_1 h_1 c G_1^{1/2} V_1^{-1/2} P_{12}^{1/2} \dots (18)$$

$$\Theta_{1G_1} = \frac{\partial Q_1'}{\partial G_1} = \frac{1}{2} A_1 h_1 c f G_1^{-1/2} V_1^{-1/2} P_{12}^{1/2} \dots (19)$$

$$\Theta_{1p_1} = \frac{\partial Q_1'}{\partial p_1} = \frac{C_{p1}}{R_1} \left(\frac{dV_1}{d\alpha} - \frac{V_1 G_1'}{G_1} \right) - h_1 \frac{\partial G_1'}{\partial p_1} \dots (20)$$

$$\Theta_{1p_2} = \frac{\partial Q_1'}{\partial p_2} = -h_1 \frac{\partial G_1'}{\partial p_2} \dots (21)$$

$$\Theta_{1p_1'} = \frac{\partial Q_1'}{\partial p_1'} = \frac{C_{v1}}{R_1} V_1 \dots (22)$$

$$\Theta_{1p_2'} = \frac{\partial Q_1'}{\partial p_2'} = 0 \dots (23)$$

$$\frac{\partial G_1'}{\partial p_1} = -\frac{A_1}{2} c f G_1^{1/2} V_1^{-1/2} \frac{B_{12}}{P_{12}^{1/2}} \dots (24)$$

$$\frac{\partial G_1'}{\partial p_2} = -\frac{A_1}{2} c f G_1^{1/2} V_1^{-1/2} \frac{C_{12}}{P_{12}^{1/2}} \dots (25)$$

$$\Theta_{1V_1} = \frac{\partial Q_1'}{\partial V_1} = \frac{C_{v1}}{R_1} \frac{dp_1}{d\alpha} - \frac{C_{p1}}{R_1} \frac{p_1 G_1'}{G_1} - h_1 \frac{\partial G_1'}{\partial V_1} \dots (26)$$

$$\frac{\partial G_1'}{\partial V_1} = \frac{A_1}{2} c f G_1^{1/2} V_1^{-3/2} P_{12}^{1/2} \dots (27)$$

$$\Theta_{1V_2} = \frac{\partial Q_1'}{\partial V_2} = 0 \dots (28)$$

$$\Theta_{1V_1'} = \frac{\partial Q_1'}{\partial V_1'} = \frac{C_{p1}}{R_1} p_1 \dots (29)$$

$$\Theta_{1V_2'} = \frac{\partial Q_1'}{\partial V_2'} = 0 \dots (30)$$

$$\Theta_{1x_1} = \frac{\partial Q_1'}{\partial x_1} = -\frac{C_{p1}}{R_1 x_1^2} V_1 \frac{dp_1}{d\alpha} - h_1 \frac{\partial G_1'}{\partial x_1} \dots (31)$$

$$\frac{\partial G_1'}{\partial x_1} = -\frac{\sqrt{2}}{12n} c f G_1^{1/2} V_1^{-1/2} S_1^{-1/2} \frac{\partial S_1}{\partial x_1} \dots (32)$$

$$S_1 = \frac{x_1}{x_1 - 1} P_{12} \dots (33)$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial x_1} = -\frac{1}{(x_1 - 1)^2} P_{12} + \frac{1}{x_1(x_1 - 1)} \times \left\{ p_1^{-(2-\kappa_1)/\kappa_1} p_2^{2/\kappa_1} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^2 - p_1^{-1/\kappa_1} p_2^{(\kappa_1+1)/\kappa_1} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \right\} \dots (34)$$

$$\Theta_{1x_2} = \frac{\partial Q_1'}{\partial x_2} = 0 \dots (35)$$

$$\Theta_{1n} = \frac{\partial Q_1'}{\partial n} = -\frac{1}{n} A_1 h_1 c f G_1^{1/2} V_1^{-1/2} P_{12}^{1/2} \dots (36)$$

$$\Theta_{1c p_1} = \frac{\partial Q_1'}{\partial C_{p1}} = \frac{1}{R_1} \left(p_1 \frac{dV_1}{d\alpha} + \frac{1}{x_1} V_1 \frac{dp_1}{d\alpha} - \frac{p_1 V_1 G_1'}{G_1} \right) \dots (37)$$

$$\Theta_{1c p_2} = \frac{\partial Q_1'}{\partial C_{p2}} = 0 \dots (38)$$

$$\Theta_{1\alpha} = \frac{\partial Q_1'}{\partial \alpha} = \frac{C_{p1}}{R_1} \left(\frac{dp_1}{d\alpha} \frac{dV_1}{d\alpha} + p_1 \frac{d^2 V_1}{d\alpha^2} \right) + \frac{C_{v1}}{R_1} \left(\frac{dV_1}{d\alpha} \frac{dp_1}{d\alpha} + V_1 \frac{d^2 p_1}{d\alpha^2} \right) - \frac{dh_1}{d\alpha} \frac{dG_1}{d\alpha} - h_1 \frac{d^2 G_1}{d\alpha^2} \dots (39)$$

$$\frac{dG_1}{da} = -A_1 cf G_1^{1/2} V_1^{-1/2} P_{12}^{1/2} \dots\dots\dots (40)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 G_1}{da^2} = & -A_1 cf \left(\frac{1}{2} G_1^{-1/2} \frac{dG_1}{da} V_1^{-1/2} P_{12}^{1/2} \right. \\ & - \frac{1}{2} V_1^{-3/2} \frac{dV_1}{da} G_1^{1/2} P_{12}^{1/2} \\ & \left. + \frac{1}{2} P_{12}^{-1/2} \frac{dP_{12}}{da} G_1^{1/2} V_1^{-1/2} \right) \dots\dots\dots (41) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{12}}{da} = & \left(-\frac{2-x_1}{x_1} p_1^{-(2-\kappa_1)/\kappa_1-1} p_2^{2/\kappa_1} \right. \\ & + \frac{1}{x_1} p_1^{-1/\kappa_1-1} p_2^{(\kappa_1+1)/\kappa_1} \left. \right) \frac{dp_1}{da} \\ & + \left(\frac{2}{x_2} p_2^{2/\kappa_1-1} p_1^{-(2-\kappa_1)/\kappa_1} \right. \\ & - \frac{x_1+1}{x_1} p_2^{(\kappa_1+1)/\kappa_1-1} p_1^{-1/\kappa_1} \left. \right) \frac{dp_2}{da} \\ = & P_{P12} \frac{dp_1}{da} + Q_{Q12} \frac{dp_2}{da} \dots\dots\dots (42) \end{aligned}$$

(2) また $p_1 < p_2$ のときは,
 $A_2 = \{2x_2 / (x_2 - 1)\}^{1/2} / 6n$, $G'_2 = -G'_1 = dG_2/da$ として

$$\Theta_{1c} = \frac{\partial Q'_1}{\partial c} = h_2 \frac{\partial G'_2}{\partial c} = A_2 h_2 f G_2^{1/2} V_2^{-1/2} P_{21}^{1/2} \dots\dots\dots (43)$$

$$\Theta_{1f} = \frac{\partial Q'_1}{\partial f} = h_2 \frac{\partial G'_2}{\partial f} = A_2 h_2 c G_2^{1/2} V_2^{-1/2} P_{21}^{1/2} \dots\dots\dots (44)$$

$$\Theta_{1G1} = \frac{\partial Q'_1}{\partial G_1} = \frac{1}{2} A_2 h_2 c f G_2^{-1/2} V_2^{-1/2} P_{21}^{1/2} \dots\dots\dots (45)$$

$$\Theta_{1P1} = \frac{\partial Q'_1}{\partial p_1} = \frac{C_{P1}}{R_1} \frac{dV_1}{da} - h_2 \frac{\partial G'_1}{\partial p_1} \dots\dots\dots (46)$$

$$\Theta_{1P2} = \frac{\partial Q'_1}{\partial p_2} = -\frac{C_{P2}}{R_2} \frac{V_2 G'_1}{G_2} - h_2 \frac{\partial G'_1}{\partial p_2} \dots\dots\dots (47)$$

$$\Theta_{1P1'} = \frac{\partial Q'_1}{\partial p'_1} = (22), \quad \Theta_{1P2'} = \frac{\partial Q'_1}{\partial p'_2} = 0 \dots\dots\dots (48)$$

$$\frac{\partial G'_1}{\partial p_1} = \frac{A_2}{2} c f G_2^{1/2} V_2^{-1/2} \frac{C_{21}}{P_{21}^{1/2}} \dots\dots\dots (49)$$

$$\frac{\partial G'_1}{\partial p_2} = \frac{A_2}{2} c f G_2^{1/2} V_2^{-1/2} \frac{B_{21}}{P_{21}^{1/2}} \dots\dots\dots (50)$$

$$\Theta_{1V1} = \frac{\partial Q'_1}{\partial V_1} = \frac{C_{V1}}{R_1} \frac{dp_1}{da} \dots\dots\dots (51)$$

$$\Theta_{1V2} = \frac{\partial Q'_1}{\partial V_2} = -\frac{C_{P2}}{R_2} \frac{p_2 G'_1}{G_2} - h_2 \frac{\partial G'_1}{\partial V_2} \dots\dots\dots (52)$$

$$\frac{\partial G'_1}{\partial V_2} = -\frac{A_2}{2} c f G_2^{1/2} V_2^{-3/2} P_{21}^{1/2} \dots\dots\dots (53)$$

$$\Theta_{1V1'} = \frac{\partial Q'_1}{\partial V'_1} = (29), \quad \Theta_{1V2'} = \frac{\partial Q'_1}{\partial V'_2} = 0 \dots\dots\dots (54)$$

$$\Theta_{1\kappa 1} = \frac{\partial Q'_1}{\partial x_1} = -\frac{C_{P1}}{R_1 x_1^2} V_1 \frac{dp_1}{da} \dots\dots\dots (55)$$

$$\Theta_{1\kappa 2} = \frac{\partial Q'_1}{\partial x_2} = -h_2 \frac{\partial G'_1}{\partial x_2} \dots\dots\dots (56)$$

$$\frac{\partial G_1}{\partial x_2} = -\frac{\sqrt{2}}{12n} c f G_2^{1/2} V_2^{-1/2} S_2^{-1/2} \frac{\partial S_2}{\partial x_2} \dots\dots\dots (57)$$

$$S_2 = \frac{x_2}{x_2 - 1} P_{21} \dots\dots\dots (58)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_2}{\partial x_2} = & -\frac{1}{(x_2 - 1)^2} P_{21} + \frac{1}{x_2(x_2 - 1)} \\ & \times \left\{ p_2^{-(2-\kappa_2)/\kappa_2} p_1^{2/\kappa_2} \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^2 \right. \\ & \left. - p_2^{-1/\kappa_2} p_1^{(\kappa_2+1)/\kappa_2} \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right\} \dots\dots\dots (59) \end{aligned}$$

$$\Theta_{1n} = \frac{\partial Q'_1}{\partial n} = \frac{1}{n} A_2 h_2 c f G_2^{1/2} V_2^{-1/2} P_{21}^{1/2} \dots\dots\dots (60)$$

$$\Theta_{1cP1} = \frac{\partial Q'_1}{\partial C_{P1}} = \frac{1}{R_1} \left(p_1 \frac{dV_1}{da} + \frac{1}{x_1} V_1 \frac{dp_1}{da} \right) \dots\dots\dots (61)$$

$$\Theta_{1cP2} = \frac{\partial Q'_1}{\partial C_{P2}} = -\frac{p_2 V_2 G'_1}{G_2 R_2} \dots\dots\dots (62)$$

$$\begin{aligned} \Theta_{1a} = & \frac{\partial Q'_1}{\partial a} = \frac{C_{P1}}{R_1} \left(\frac{dp_1}{da} \frac{dV_1}{da} + p_1 \frac{d^2 V_1}{da^2} \right) \\ & + \frac{C_{V1}}{R_1} \left(\frac{dV_1}{da} \frac{dp_1}{da} + V_1 \frac{d^2 p_1}{da^2} \right) \\ & - \frac{dh_2}{da} \frac{dG_1}{da} - h_2 \frac{d^2 G_1}{da^2} \dots\dots\dots (63) \end{aligned}$$

$$\frac{dG_1}{da} = A_2 c f G_2^{1/2} V_2^{-1/2} P_{21}^{1/2} \dots\dots\dots (64)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 G_1}{da^2} = & A_2 c f \left(\frac{1}{2} G_2^{-1/2} \frac{dG_2}{da} V_2^{-1/2} P_{21}^{1/2} \right. \\ & - \frac{1}{2} V_2^{-3/2} \frac{dV_2}{da} G_2^{1/2} P_{21}^{1/2} \\ & \left. + \frac{1}{2} P_{21}^{-1/2} \frac{dP_{21}}{da} G_2^{1/2} V_2^{-1/2} \right) \dots\dots\dots (65) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{21}}{da} = & \left(-\frac{2-x_2}{x_2} p_2^{-(2-\kappa_2)/\kappa_2-1} p_1^{2/\kappa_2} \right. \\ & + \frac{1}{x_2} p_2^{-1/\kappa_2-1} p_1^{(\kappa_2+1)/\kappa_2} \left. \right) \frac{dp_2}{da} \\ & + \left(\frac{2}{x_1} p_1^{2/\kappa_2-1} p_2^{-(2-\kappa_2)/\kappa_2} \right. \\ & - \frac{x_2+1}{x_2} p_1^{(\kappa_2+1)/\kappa_2-1} p_2^{-1/\kappa_2} \left. \right) \frac{dp_1}{da} \\ = & B_{21} \frac{dp_2}{da} + C_{21} \frac{dp_1}{da} \dots\dots\dots (66) \end{aligned}$$

可変連絡孔の形状については図2と図3の諸寸法に
 それぞれ表1と表2の数値を当てはめ、固定連絡孔で

表1 タイプPAの諸元

	PA7-4	PA7-6	PA10-4	PA10-6
D_1 (mm)	20.0	20.0	20.0	20.0
D_2 (mm)	18.7	18.7	17.3	17.3
D_{20} (mm)	20.0	20.0	20.0	20.0
D_3 (mm)	10.0	10.0	10.0	10.0
L_0 (mm)	15.0	15.0	15.0	15.0
L_1 (mm)	40.0	57.4	39.4	56.7
L_2 (mm)	2.94	1.96	2.93	1.96

表2 タイプPCFの諸元

	PCF7-4	PCF7-6	PCF10-4	PCF10-6
D_1 (mm)	20.0	20.0	20.0	20.0
D_2 (mm)	18.7	18.7	17.3	17.3
H_{10} (mm)	12.0	13.0	12.0	13.0
H_2 (mm)	44.2	61.9	42.7	60.2
H_3 (mm)	2.93	1.96	2.91	1.94

は図1の寸法を用いた。前者の場合、連絡孔断面積としてはシリンダヘッド平たん面のレベルの断面積を称することとした。表1と表2の名称でPA7とPCF7のものおよびPA10とPCF10のものは、それぞれ固定連絡孔の直径7mmおよび10mmの場合と同断面積を最小断面としている。また最後の記号4,6は、それぞれ圧縮時の副室容積比0.4および0.6を示す。連絡孔流量係数はいずれの場合にも0.7の一定値として計算した。

2・2 熱発生率のモデル 誤差の感度係数を求めるには、まず熱発生率モデルを設定し、次にこれに対する圧力経過を各連絡孔形式に対し、式(3)～(6)で逆算し、その結果に対して各誤差要因の感度係数を数値計算した。ここで相対感度係数を用いず、絶対感度係数を用いることとしたのは、要因の中には値が零となり得るものがあることを考慮したものである。

各連絡孔形式に図4のヴィーベの熱発生関数⁽⁶⁾を適用した。この場合、両室熱発生率の合計が式(67)のヴィーベの関数となるようにしたが、これは1cycle当たり発熱量が1047 J {250 cal} になり、噴射量で約25 mgに相当する。上死点から20° ATDCまでは全熱発生率に対する副室分の割合が、クランク角に直線的に比例して1から零まで減少すると仮定した。

$$\frac{dQ}{d\alpha} = 12.69(\alpha+10)^{0.5} e^{-0.0080814(\alpha+10)^{1.5}} \dots\dots (67)$$

図4 ヴィーベの関数による熱発生率

3. 計算結果

3・1 主室熱発生率への影響 前掲の諸式により、熱発生率誤差に影響する各要因の絶対感度係数を各連絡孔形式につき数値計算した。図の数が多く、ここで全部は示せないで、以下にはその代表的な結果についてのみ記す。連絡孔形式の呼称は、表1, 2に対するものはそれぞれPAおよびPCFとし、固定連絡孔に対してはPとする。

まず、主室熱発生率 $dQ_1/d\alpha$ に対する主室圧力 p_1 と副室圧力 p_2 の感度係数をPCFタイプについて調べたのが図5と図6であり、 p_1 と p_2 の誤差の影響は符号が逆になるだけで、絶対値は同じとみてよい。また、連絡孔断面積の大きいほうが、 p_1 , p_2 の両方ともその影響が大きく出る。これは断面積の大きいほうが両室圧力差が最初から小さいので、圧力のわずかな差が熱発生率の大きな差を生じることによる。図で上死点以後には連絡孔の太いPCF10-6の場合に感度係数がおよそ40のほぼ一定値で、これは指圧計測の圧力誤差0.1 barあたり4 J/°CAに対応し、図4によると最大熱発生率の10%以上の誤差が生じることがわかる。また、ほぼ8° BTDCは両者とも熱発生開始時点であり、ここで連絡孔を通じてのガスの流れが逆転し、その間に式(11)の P_{12} と式(12)の P_{21} が零となる瞬間があり、式(24), (25)が無大となり、感度係数も無大になる。他の連絡孔形式でもこれらの傾向はいずれも認められた。

図5は副室容積比0.6の場合で、上死点後の感度係数は図6の副室容積比0.4の場合よりかなり小さい。これは、副室が小さいと吹出し開始後すぐに室間圧力差が減少することによって考えられる。PCF10-4では20° ATDC付近で感度係数は110程度となり、指圧誤差0.1 barにつき図4の最大熱発生率の約3分の1の大きな熱発生率誤差を生じる。これは、実機エンジンの実験でも経験している。

別の計算で固定連絡孔(Pのタイプ)で容積比0.6の場合は図5と酷似した結果を得たが、上死点以後には

図5 絶対感度係数 θ_{1p1} と θ_{1p2}

図6 絶対感度係数 θ_{1p1} と θ_{1p2}

図7 絶対感度係数 θ_{1p1} と θ_{1p2}

さらに少し小さくなった。可変連絡孔可変断面面積の場合(PA)では、図7のように(副室容積比0.6)PCFとPのタイプに比べて特に上死点以後の感度係数が、クランク角とともに大幅に増大し、その絶対値は30°ATDCで約160 J/°CA・barとなる。図示はしないが、副室容積比0.4の場合ではこれが約450 J/°CA・barとなった。これは、クランク角とともに連絡孔断面面積が急増し両室圧力差が急減することによる。このように、熱発生率に対する ϕ_1 , ϕ_2 の影響は、主として室間圧力差が小さくなるときに大きくなるといえる。

式(3), (4)の中には圧力の微分値が含まれている。実際の計測では、例えばクランク角1°ごとに圧力を測定してA/D変換し、微分値を数値計算で求めるので、当該クランク角での真の微分値とは異なる可能性がある。さらに、これらのデジタル化のbit数に応じた変換誤差も考えられる。また、サンプリング間隔による誤差もあり、著者らは、圧力の変化状況と指圧誤差に応じて最適な時間刻みがあることを別に検討している。一般に微分するたびに誤差は増大し、式(3), (4)は圧力の微分値を含むので、その係数が誤差の感度係数となり、式(22), (23)のように表される。これを式(22)について示せば図8のように主室容積に比例する。したがって、熱発生率の大きい上死点付近ではその影響は小さく、後燃え時期で熱発生率誤差は増大するので、特に燃焼終了期を特定するのに大きな障害となる。実験では多数サイクルのデータを採って、ばらつきを減らすのが望ましい。この感度係数は副室容積比の小さいほうが少し大きくなっているが、これは式(22)の V_1 による。すなわち、上死点で副室容積の小さい分だけ主室は大きいからである。

連絡孔流量係数は一般に0.7程度と考えられているが、これが真の流量係数でない場合が当然あり得る。この流量係数についての主室熱発生率の感度係数は、計算の結果PCFのタイプでは図9のようになり、副室容積比0.4と0.6の場合の差は比較的小さい。連絡孔断面面積による差はほとんどなく、1本の線に含まれ

てしまう。両室圧力が等しくなる8°BTDC付近ではガスの室間移動がないので、断面面積誤差は影響せず、感度係数が大きいところは、ガス流量の大きい時期に当たる。副室が小さいと、燃焼の激しい上死点前後で、同じ熱発生率に対して副室の圧力も温度も高くなることから、式(43)の P_{21} が増大し、主室へ吹き出るガス流量が増すので、流量係数の影響を受けやすいが、副室が小さいと流量はすぐに減少し、上死点を過ぎると間もなく、副室の大きい場合の流量のほうが多くなり、前記の関係が逆になる。図示はしないがPAのタイプについてもほとんど同じ結果が得られた。また、Pのタイプでも曲線は酷似し、連絡孔の太さによる差異は線の太さ以内であった。

連絡孔断面面積 f は、流量係数と同じ影響を熱発生率に対して与えるので、ここでは省略する。また、 cf を有効断面積として一括してもまったく同様である。実際には f の誤差より c の設定誤差が大きいであろう。

エンジン回転速度の誤差の感度係数は、式(36), (60)でわかるように、連絡孔流量係数の場合と類似で逆符号となっており、かつ $1/n$ がかかるので、絶対値が小さい。PCFの場合を図10に示す。このように回転数の影響は他の要素に比べて極めて小さい。ここに示すのは回転数が1200 min⁻¹の場合である。

実験ではクランク角の測定誤差がしばしば問題となり、これは例えばロータリエンコーダの取付誤差によって生じる。この感度係数は式(39), (63)のように多くの要素を含み、図11のように主として副室容積比により曲線の経過が変わる。しかし、よく問題にされる割にはあまり大きくない。図11はPCFの場合であるが、PAでも酷似した曲線が得られ、Pでは図11の副室容積比0.6の場合によく似た経過となったが、ここには図示しない。いずれも上死点前後で感度係数の絶対値が大きくなる。これは、この時期に圧力変化が大きいので、クランク角が少しずれると圧力値が大きく変わるためであり、着火前と燃焼終了後には、図11のように感度係数が下がる。

図8 絶対感度係数 ϕ_{p1}

図9 絶対感度係数 ϕ_{1c}

図10 絶対感度係数 ϕ_{1n}

主室容積の誤差による主室熱発生率誤差の感度係数は、PCFのタイプでは図12のようになる。副室で燃焼が始まり主室より圧力が高くなった後は、式(51)により主室圧力上昇率に比例し、最高圧力以後は負となる。燃焼開始以後は連絡孔の太さと副室容積比に関係なく、曲線はほとんど線の太さ以内におさまリ、差が明らかに認められるのは、着火前の圧縮行程中に限られ、連絡孔の細いほうが低い値を示す。この傾向はPAのタイプでも同様で、曲線はPCFの曲線にほとんど重なり、ここでは図示を省略する。また、図示はしないがPでは、両連絡孔径の曲線が、全域でほとんど重なり、着火の前後でわずかに差が認められた。

圧縮開始時の各室ガス量の正確な推定は困難なため、その後の各室ガス量に誤差が生じることが考えられる。主室ガス量 G_1 による主室熱発生率の誤差の感度係数はPCFのタイプでは図13のようになる。これは $k_1 < k_2$ が成り立つ燃焼開始後には、主室熱発生率は式(45)から副室が小さくて G_2 が少ない場合に大きくなる。またこれには、副室が小さいと同じ熱発生率に対して k_2 が大きくなり、 P_{21} が増大することも影響する。副室容積比が同じものは、ほとんど同様な経過を示す。図示はしないが、固定連絡孔(Pタイプ、副室容積比0.6)では、PCFの同じ副室容積比のものと類似の経過となり、PAでもほとんどPCFと重なる曲線となった。PCFで副室容積比0.4の場合をみると、ここで用いているヴィーベの関数は、行程容積が500 cm³ 程度のエンジンに相当するので、吸気量を0.5 gと仮定し、その誤差が1%の0.005 gとした場合には、

熱発生率の誤差は概略最大値で0.4 J/°CA 程度になることがわかる。

熱発生率に対してガスの特性値が重要な役割をなすことは容易に推測されるが、特に比熱比 κ_1 の影響は大きい。その感度係数をPCFのタイプの主室について調べたのが図14であるが、PAでもほとんど同様の結果となり、副室容積比の同一のものは一つの曲線に乗る。燃焼開始後は式(55)により、最高圧力点で圧力上昇率が正から負に転じるまでは感度係数は負の値をもつ。副室が小さいと主室が大きいので、感度係数の絶対値も大きい。固定連絡孔では副室容積比が0.6なので、図14の同じ副室容積比の場合とほとんど一致するが、図示は省略する。副室ガスの比熱比 κ_2 の影響に触れておけば、副室の着火以前は副室ガスの比熱比の影響を受けず、着火後に副室ガスが主室へ流入し始めると、式(56)により感度係数が零ではなくなるが、その値は小数点以下2けたのオーダーであり、図14に示す主室ガスの比熱比についてのものと比較して無視できることが別にわかっている。

ガスの等圧比熱はエンタルピーに直接的な影響を有し、感度係数の式中の随所に現れて影響を及ぼし、その程度も大きいことは、PCFのタイプで図15に例示するとおりである。式(61)は着火後 $k_1 < k_2$ なる場合であり、第2項には比熱比が含まれているので、等圧比熱の影響を受ける。曲線は熱発生率の大きい部分に最高値を有し、副室容積比によって相違を生じ、その原因は主室容積 V_1 が異なることにあると考えられる。式中ではこれに圧力上昇率がかかっており、感度係数

図 11 絶対感度係数 $\theta_{1\alpha}$

図 12 絶対感度係数 θ_{1V1}

図 13 絶対感度係数 θ_{1G1}

図 14 絶対感度係数 $\theta_{1\kappa1}$

図 15 絶対感度係数 θ_{1cp1}

図 16 絶対感度係数 θ_{1cp2}

の差は圧力上昇率の大きいときに大きく、これが零となる最高圧力のところで交差している。PA でも図 15 と酷似の関係となり、P では副室容積比が 0.6 の場合とほぼ似た曲線となる結果を別に得ている。

副室着火後に主室へのガス流入が始まると、副室ガスの等圧比熱値で流入エンタルピーが決まるので、主室熱発生率も影響を受ける。これを調べたのが図 16 で、この場合も副室容積比のみに依存して異なる曲線が得られたが、感度係数は負である。図 16 は PCF のものであるが、他の形式もこれと酷似した曲線になる。

3・2 副室熱発生率への影響 副室熱発生率に対する諸要因の誤差の感度係数も調べたが、一部の図を省略し要点のみ述べたい。

副室熱発生率に対する主室圧力と副室圧力の感度係数は、主室に対する曲線が逆立ちしたような形で示され、絶対値も図では差が認められないので図示を省略する。したがって、図 5 の Θ_{1p1} を Θ_{2p2} とみ、 Θ_{1p2} を Θ_{2p1} とみればよい。このことから、例えば p_1 に誤差が生じたときには、主室熱発生率とちょうど逆の変化が副室熱発生率に生じると考えてよい。式でいえば、燃烧開始後には Θ_{2p2} は式(46)、 Θ_{2p1} は式(47)の添字 1, 2 を入れ換えたものになり、 Θ_{2p2} については上死点付近では $dV_2/d\alpha \approx 0$ となり、 Θ_{2p1} については第 1 項の V_2 が V_1 となる。上死点付近では $dV_1/d\alpha$ も零に近い値となり、また V_1 と V_2 はほぼ同程度の容積となる。これらから上記の結果となり、両室の合計熱発生率の誤差はごく小さいと考えられる。

副室圧力上昇率 $dp_2/d\alpha$ による副室熱発生率誤差の感度係数は、式(22)の添字 1, 2 を入れ換えたものであり V_2 に比例する。しかし、PCF と PA での V_2 のクランク角による変化は V_1 の場合に比べてはるかに小さいので図 17 のようになる。また、P では V_2 が一定のため、 Θ_{2p2} も一定となるので、ここには示していない。

流量係数による誤差の感度係数は、着火前 ($p_1 > p_2$) には主室からのエンタルピー流入だけなので、式(17)

の G_1' を G_2' に入れ換える。すなわち式の符号を逆にすればよい。また、着火後 $p_1 < p_2$ となった後は式(17)の添字 1, 2 を入れ換えたものとなる。結果としては、主室熱発生率の場合の曲線の符号を逆にした形となるが、図示は省略する。

副室熱発生率のエンジン回転数による誤差の感度係数は図では主室熱発生率の場合の曲線を上下逆にした形となり、絶対値も図上では主室の場合と同じと認められるので図示は省略する。感度係数自身も他のものに比してごく小さいが、この場合も両室の合計熱発生率に対する感度係数は極めて小さい。

クランク角 α による誤差の感度係数は式(63)の添字 1, 2 を、 h_2 を除いて入れ換えたものとなる。その結果、PCF のタイプでは図 18 のように、主室熱発生率に対するものの符号を逆にしたのとほぼ同様な曲線となるが、クランク角で約 10° ATDC 以後で絶対値が小さい。他のタイプでも同様なので図示は省略する。

副室容積の誤差による副室熱発生率誤差の感度係数は、PCF のタイプについては図 19 のようになり、図 12 の場合と少し異なった結果となった。圧縮中は副室容積にかかわらず同じ経過をたどるが、燃烧開始後は副室の小さいほうが感度係数が大きい。これは、同容積誤差でも小さい副室に対しては割合が大きいためである。P と PA についてもこれと酷似した曲線となる。

副室内ガス質量の誤差による副室熱発生率誤差の感度係数は、圧縮中は図 13 と似ているが、着火後は主室の場合の図 13 の曲線の符号を逆にしたものに酷似し、目視ではその差が認められない。このことはどのタイプについても当てはまる。図は省略する。

副室ガスの比熱比による副室熱発生率誤差の感度係数は、PCF のタイプでは図 20 のように、主室の場合に比べてクランク角 10° ATDC 付近以後に小さな値を示す。これは主室の場合は、ここでまだかなり高い熱発生率を発揮しており、またガス量も多いので、その x による影響が大きい。副室のほうはこの時期には熱発生が急激に減少し、零に至るからである。他の

図 17 絶対感度係数 Θ_{2p2}'

図 18 絶対感度係数 Θ_{2a}

図 19 絶対感度係数 Θ_{2v2}

表 3 熱発生率誤差の概略推定値

Parameter	p [MPa]	$\frac{d p}{d \alpha}$ [MPa/°A]	c [-]	n [rpm]	α [°A]	V [cm ³]	G [g]	C_p [J/gK]	κ [-]
Error of Parameter E Assumed	0.01	0.1	0.05	10	0.5	0.2	0.01	0.02	0.02
Sensitivity θ	100	10	30	0.02	2	1.5	80	200	20
Ex θ [J/°A]	1	1	1.5	0.2	1	0.3	0.8	4	0.4

図 20 絶対感度係数 $\theta_{2\alpha}$

タイプでも副室容積ごとに図 20 と酷似した曲線を得た。

副室ガスの等圧比熱による感度係数は、PCF タイプでは図 21 のように傾向は似るが主室の場合(図 15)より大きい。これは、着火後には式(37)の添字 1, 2 を入れ換えたものになり、前者の第 3 項が $G_1' > 0$ であるのに対し、後者では $G_2' < 0$ となることにより式全体の値が大きくなるのが最も大きな影響を与えるためである。他のタイプについても、副室容積ごとにこれと類似の曲線が別に得られているが省略する。

絶対感度係数は上記のような結果となるが、各要因に起こり得る誤差の値と単位はすべて異なるので、おもなものに起こりそうな誤差と感度係数の概略値の積を概算すると、表 3 のようになる。ここでは値のオーダーのみ参考とすべきであり、また、絶対感度係数は微分値なので、有限誤差が生じた場合とは異なる。

4. 結 論

以上の計算結果から、次の結論を得た。

(1) シリンダ圧力、連絡孔流量係数その他種々の

図 21 絶対感度係数 θ_{2cp2}

要因が、副室式内燃機関の熱発生率誤差に及ぼす影響につき、絶対感度係数の形で数値計算により検討した。主としてディーゼル機関を念頭においたが、考え方は他の形式にも当てはまるものである。

(2) 各要因の実際に起こりそうな誤差と絶対感度係数の各概略値の積による概算で比較すると、ガス圧力とその上昇率および比熱、連絡孔流量係数、クランク角は比較的大きな熱発生率誤差を生ぜしめやすく、燃焼室容積、回転速度、比熱比は一般に影響が小さい。

(3) 本研究により、副室式機関の熱発生率を指圧値から求めるに当たって重要な、誤差低減のための注意について有用な指針を得ることができた。

文 献

- (1) Terada, K., *Motortech. Z.*, 48-6 (1987), 247.
- (2) 寺田・ほか 4 名, *機論*, 55-514, B(1989), 1754.
- (3) Brisson, B., ほか 2 名, *SAE Paper*, No. 730167 (1973), 1.
- (4) Sitkei, G., *Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren*, (1964), 159, Springer-Verlag.
- (5) 徐, *機論*, 31-225 (1965), 808.
- (6) 文献(4)の 157 ページ.