燃料噴射バルブのCBNホイール研削加工*
(第1報, 油密量と研削加工により創成する形状・精度の関係)

田中武司*¹, 磯野吉正*¹

A Study on CBN Wheel Grinding Characteristics
of Fuel Injection Bulb
(1st Report, Relationship between Gasoline Leakage and
Ground Shape/Preciseness of Bulb)

Takeshi TANAKA*² and Yoshitada ISONO

*² Ritsumeikan University, Dept. of Mechanical Engineering,
1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu-shi, Shiga, 525-8577 Japan

For applying CBN wheel to grind fuel injection bulb, it is essential to clarify what the shape factors of bulb influence to a gasoline leakage. The present paper describes the theoretical treatment on the relationships between a gasoline leakage and the roundness and corner dullness of valve and seat. Those were analyzed in connect with the shape and preciseness of valve-seat in bulb. It is necessary to decrease the roundness and corner dullness of valve, as well as the roundness and average clearance of seat, in order to decrease a gasoline leakage from valve-seat clearance.

Key Words: Fuel Injection Bulb, Gasoline Leakage, Valve-Seat, Roundness, Corner Dullness

1. 結 言

燃料噴射装置は電子制御によって、バルブを動かし、シートとの間にできたすきまからガソリンを噴射する。燃料を噴射しないとき、バルブはシートに押し付けられており、バルブとシートの加工精度などが悪ければ、バルブが閉じた状態のときでもガソリンが漏れたりする。この漏れを油密といい、油密量が多い場合、シリンダー内にガソリンの濃い混合気が吸入された状態となり、不完全燃焼が生じる。それゆえ、HCやCOといった有害物質⁽¹⁾が排出され、環境を悪くするので、油密規格は年々厳しくなっている。

ところで、バルブとシートはエンジンの回転数に応じて高速で開閉し、衝突を繰り返す。そのため焼入れ鋼を用いざるをえない。焼入れ鋼の研削加工は現在GC砥石で行っているが、横川⁽²⁾の

提唱するCBNホイールによる研削加工が主流になりつつある。初期導入コストは高いが、ホイールの寿命が長く、その交換、形状修正などが少なく済み、経済的といわれている。しかし、このCBNホイールをバルブやシートの研削加工に適用しようとする場合、CBNホイールの形が直接工作物に転写されることや、砥粒の工作物への貫入深さも大きく、真円度、粗さなどが大きくなる恐れもある。それゆえ、バルブとシートのどの部分の形状、精度などに留意して研削すべきかを明らかにしておく必要がある。このことは一般砥石を使用する際にも当然明らかにしておくべきことであるが、CBNホイールが長寿命で、ツルーイングとドレッシングがしにくいゆえに、ことさら重要視されねばならないといえる。

そこで、CBNホイールを経済的・精度的観点から導入することを前提として、いままで実用品でなされていなかった油密量と、バルブとシートの形状・精度の関係を本報で明らかにするため、理論的に解析することを目的とした。ここでは、バルブとシートの真円度、平均すきまとバルブの角だ

* 原稿受付 2000年9月11日。

*¹ 正員、立命館大学理工学部(☎525-8577 草津市野路東1-1-1)。

E-mail: ttakeshi@se.ritsumeikan.ac.jp

Fig. 1 Schematic diagram of fuel injection equipment.

れ量が油密量にどのように関係するかを報告するものである。なお、油密量と形状因子の関係を全て理論のみで求めることは困難であるので、実際に使用されている製品から得られるデータも理論解析を行う上で利用した。

2. 用語の定義と試験片の評価法

2.1 試験片の形と真円度およびすきま面積測定法

図1は燃料噴射装置の実物モデルを示し、燃料を噴射しないとき、バルブはシートに押し付けられている。バルブ先端はコーン部と呼ばれ、頂角 100° の円錐と半径 1.6 mm を組み合わせた形状となっている。コーン部がシートと接触している。バルブとシートの真円度(roundness)はそれらの接触部に垂直に、Tarylond250(Rank Taylor Hobson 社製)の真円度測定器を用いて測定した。バルブの案内面とコーン部およびシートの内面とコーン部は同時研削を施している。この真円度の断面図をスキャナーを介してコンピュータに取り込み、画像処理解析ソフトによりすきま面積(後述)を測る。すきま面積を円周接触長さで割って平均すきまを出す。

2.2 角だれ量の定義と測定法

バルブの加工精度は図1のA部に示すバルブのコーン終端部の角がどの程度、丸みを帯びているかによっても評価されると思われる。角の丸みが大きい場合、油密量は多くなることも考えられる。そこで、A部のバルブの曲率半径 r を角だれ量(corner dullness)と定義する。

樹脂に埋め込んだバルブを、中心線を通る面まで研削盤で削る。サンドペーパーとバフにより断面の

表1 記号および定数

q_z	体積流量	mm^3/min
Q	油密量	mm^3/min
p	油圧	$0.3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
L	円周長さ	7.22 mm
η	絶対油粘度	$9.07 \times 10^{-10} \text{ N s/mm}^2$
w	接触幅	μm
h	油膜厚さ	μm
S	すきま面積	μm^2
C	平均すきま	μm
C'	修正平均すきま	μm
I	干渉面積	μm^2
T'	干渉平均高さ	μm
F	フレアレス比	%
R	真円度	μm
r	角だれ量	μm

SI単位でないが、慣用でmm, μm , min も用いた。

Fig. 2 Analysis model for quantity of leakage.

表面を研磨する。研磨面を走査型レーザ顕微鏡で観察し、画像処理解析ソフトにより画像上に円を描いて、角だれ量 r を測定する。

2.3 油密量の定義とその測定法

図2に油密量測定の様式を示す。油密量は燃料噴射装置のバルブを、2.7 N の一定の荷重でシートに押し付けた状態で、燃料圧力を 0.3 MPa 掛けたとき、バルブとシートのシール面から燃料が単位時間当たり漏れ出す流量と定義される。油密量は噴射口の油の盛上がり陰影として観測し、その体積として求める。なお、油密量測定用マスターとして、真円度 $0.19 \mu\text{m}$ と角だれ量約 $50 \mu\text{m}$ のバルブおよび真円度 $0.18 \mu\text{m}$ と平均すきま $0.091 \mu\text{m}$ のシートを用いた。現在実用されているシートとバルブの中から 28 個を任意に取り出し、真円度と油密量を測定し、理論解析に利用した。(実用品の研削ではGC

Fig. 3 Profile and load curve of valve and seat.

砥石を用いており、研削条件を詳細に記述すべきであるが、目的は CBN ホイールの適用であるので、その研削条件を次報で明らかにしたい。）

3. 油 密 量 の 解 析

本解析で用いた記号、定数を表 1 に示す。以後、記号の添え字 v はバルブ、s はシートを意味する。

3.1 油密度と真円度および平均すきまの関係

本節で用いた解析モデルを図 2 に示す。研削加工はバルブとシートの円周方向になされ、研削方向に直角の粗さは大きい。研削方向の粗さの影響は真円度のそれに含まれ、真円度の方がより油密度に影響を及ぼすと思われる。そこで、バルブとシートの真円度と平均すきまを考慮した油密度 Q の推定式を理論的に解析する。さらに、バルブの角だれ量が油密度に及ぼす影響を検討する。

本解析では、以下の仮定を設けた⁽³⁾。①流体は非圧縮性であり、粘度は一定である。②油膜厚さ方向の速度成分は流出速度成分より十分小さい。③円周方向の流れは無視できる。④一様な圧力勾配をもつ。⑤油膜内の流れは層流である。これらの仮定の下で、静圧状態におけるバルブとシート間の流体のレイノルズ方程式は次式となる。

$$\delta^2 p / \delta^2 x + \delta^2 p / \delta^2 z = 0 \quad (1)$$

ここで、 x は油膜厚さ方向、 z は流体の流れ方向である。

一方、粘性流体理論により z 方向の体積流量 q_z は次式で示される⁽⁴⁾。

$$q_z = (h^3 \delta x / 12 \eta) \times (-\delta p / \delta z) \quad (2)$$

仮定 ② より、 x 方向への流れはないので、 $\delta^2 p / \delta^2 x$ は 0 である。(1) 式を積分すると、 $p = A z + B$ となる。境界条件を、 $z = 0$ で $p = p_1$ 、 $z = w$ で $p = p_2$ とすると、

$$p = z (p_2 - p_1) / w + p_1$$

ただし、バルブとシート接触部において、 p_1 は入口、 p_2 は出口での油圧である。

ゆえに、 $\delta p / \delta z = (p_2 - p_1) / w$ となる。(2) 式に代入すると、

$$q_z = h^3 (p_1 - p_2) \delta x / 12 \eta w$$

油密度 Q は上式を $x = 0$ から $x = L$ まで積分し、 $\delta p = p_1 - p_2$ とおいて、

$$Q = \int q_z dx = (\delta p L h^3) / (12 \eta w) \quad (3)$$

Q を求めるには、バルブとシートの接触幅 w を求める必要があるが、実測は難しい。そこで、図 2 の接触モデルで、有限要素法により解析結果を求めたところ、接触幅は約 $16 \mu m$ であった。この場合、バルブとシート間の見かけの接触面圧力は 23 MPa で、焼入れ鋼の微小硬さは 700 である。微小突起の塑性変形も考えられるが、真円度曲線に現れる大きなうねりのマクロな接触では弾性変形と考えられる。別途、図 2 のモデルで、バルブを円筒、シートを平面とみなし、ヘルツの弾性接触理論から接触幅を求めたところ、それは $14.6 \mu m$ で、ほぼ有限要素法による値に近かった。そこで、ここでは w を $16 \mu m$ とした。表 1 の p 、 L 、 η の値を (3) 式に代入すると、油密度は次式で与えられる。

$$Q = \{ (0.3 - 0.1) \times 7.22 \times h^3 \times 10^{-9} \times 60 \} / \{ 12 \times 9.0710^{-10} \times 0.016 \} = 497.5 h^3 \text{ (mm}^3/\text{min)} \quad (4)$$

油密度を計算するには、油膜厚さ⁽⁴⁾ h を知る必要がある。 h はバルブとシートの加工精度に関係するので、加工精度の関数として定式化を試みた。

図 3 にバルブとシートの接触部断面形状の模式図と負荷曲線を示す。 S_v はバルブとバルブ外接円とのすきま面積で、 S_s はシートとシート内接円とのすきま面積とする。 S_v と S_s を円周接線長さ L で割っ

Fig. 4 Conditions of contact between valve and seat presented by load curve.

た値をバルブ平均すきま C_v とシート平均すきま C_s とする。

バルブとシートの接触面に燃料が流入するとき、燃料が S_v および S_s を全て満たすとして、バルブ・シート間のすきまと油膜厚さ h の関係は、負荷曲線により図4のように表されるとすると、 C_v と C_s の和 C は次式で表され、 h に等しくなると思われる。

$$C = C_v + C_s = S_v / L + S_s / L = h \quad (5)$$

この関係を検証するため、予め求めた油密度 Q を(4)式に入れ、油膜厚さ h を計算し、平均すきま C との関係をもとめるところ、図5に示すように、 C は h よりも大きくなった。したがって、(5)式は成立しなくなる。実際には、バルブとシートのすきま部分にそれぞれバルブとシートの一部が食い込んだ状態となっている。それゆえ、実際のバルブ・シート間のすきまは互いに食い込む分だけ、 C よりも小さくなると思われる。この食い込みを考慮したバルブ・シート間のすきまを補正平均すきま C' と定義し、油膜厚さ h と等しくなる C' を求めてみた。

バルブとシートが食い込み合う量を食い込み面積 I とし、この I をシートとバルブが接触している円周長さ L で割った値を、平均食い込み厚さ T' とすると、補正平均すきま C' は $C - T'$ に等しい。平均すきま C が大きくなると、バルブとシートは食い込みやすくなり、平均食い込み厚さは増加するはずである。また、平均すきま C は真円度 R が大きくなるにともない増加する。したがって、真円度 R が大きくなるにともない、平均食い込み厚さ T' は増すといえる。

そこで、バルブ平均すきま C_v はバルブの真円度 R_v の関数、シート平均すきま C_s はシートの真円度 R_s の関数と考え、負荷曲線に基いたそれぞれの食い込み厚さを $T_v' = F_v \times R_v$ 、 $T_s' = F_s \times R_s$ とおく。こ

Fig. 5 Relationship between thickness of oil film and clearance

Fig. 6 Relationship between flareless ratio and C_v/R_v .

こで、 F_v 、 F_s は食い込み率で、真円度 R_v 、 R_s に対する食い込み厚さの増加割合である。補正平均すきま $C' = (C_v - F_v \times R_v) + (C_s - F_s \times R_s)$ となる。

特定のシートに対して C_v/R_v の値を取り出し、図5中にプロットした。 C_v/R_v 値はバルブの負荷曲線において平均すきま割合を意味している。図中の4つのプロットで示すように、 C_v/R_v 値が大きくなると、 C の値が大きくなっている。つまり、平均すきま C の値が油膜厚さ h の値より大きければ大きいほど、食い込み率 F_v は大きくなり、また、 C_v/R_v 値が大きくなると、食い込み率は大きくなることを示している。

油密度 Q の測定値を(4)式に代入して油膜厚さ h を求め、 h が補正平均すきま C' に等しいとする。マスターとして用いたシートの平均すきま C_s が既知なので、 C_v' が求まり、 $C_v' = C_v - F_v \times R_v$ から、食い込み率 F_v を計算した。そして、求めた F_v と平均すきま割合 C_v/R_v の関係を図示すると、図6の○印で示され、この関係は次式で表される。

Fig. 7 Relationship between thickness of oil film and corrected average clearance.

$$F_V = 1.03 C_V / R_V - 0.31 \quad (6)$$

シートについても、同様の計算を行い、 F_S と平均すきま割合 C_S/R_S の関係を求めたところ、図6の●印で示され、この関係は次式で表される。

$$F_S = 1.43 C_S / R_S - 0.48 \quad (7)$$

したがって、バルブとシートの補正平均すきま C_V' と C_S' はそれぞれ次式で示される。

$$\begin{aligned} C_V' &= C_V - F_V \times R_V \\ &= C_V - (1.03 C_V / R_V - 0.31) R_V \\ &= 0.31 R_V - 0.03 C_V \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_S' &= C_S - F_S \times R_S \\ &= C_S - (1.43 C_S / R_S - 0.48) R_S \\ &= 0.48 R_S - 0.43 C_S \end{aligned} \quad (9)$$

(8), (9)式より、バルブとシートの食込みを考慮した補正平均すきま C' 、油膜厚さ h は次式となる。

$$\begin{aligned} C' &= C_V' + C_S' = (0.31 R_V - 0.03 C_V) \\ &\quad + (0.48 R_S - 0.43 C_S) = h \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式の関係が成立するかを、(4)式で求めた油膜厚さ h と補正平均すきま C' の実測値から検証したところ、図7に示すように、それらの値は約30%の範囲内で一致していることが見られる。

(10)式の第1項 $(0.31 R_V - 0.03 C_V)$ はバルブの項、第2項 $(0.48 R_S - 0.43 C_S)$ はシートの項である。平均すきまはすきま面積をバルブとシートが接触している円周長さで割った値で、真円度 (R_V と R_S) が大きくなれば、平均すきま (C_V と C_S)

Fig. 8 Relationship between contact width and corner dullness.

も大きくなるはずである。しかし、バルブの平均すきま C_V の係数は、バルブの真円度 R_V とシートの平均すきま C_S の係数に比べて非常に小さい。また、 R_S と C_S の係数はほぼ等しい。それゆえ、第1項は第2項に比べて、油膜厚さ h に及ぼす影響ははるかに大きいといえる。つまり、バルブの精度はシートの精度に比べて、油膜厚さに及ぼす影響は大きい。

3.2 油密度とバルブ角だれ量の関係

油密度はバルブとシートの真円度と平均すきまにより影響を受けるが、図8に示すバルブとシートの接触状態において、バルブの角だれ量 r_1 の場合の接触幅 w_1 は、小さい r_2 の場合の w_2 よりも小さくなるはずである。それゆえ、角だれ量 r は接触幅 w に影響し、油密度 Q に影響することが予想される。

油密度 Q とバルブ・シートの接触幅 w の関係は(3)式により与えられている。接触幅 w を変数とし、表1に示した定数を代入すれば、 $w = 7960 h^3 / Q$ の式が得られる。

実測した油密度 Q と(10)式から算出した油膜厚さ h を上式に代入して w を求める。他方、角だれ量 r を実測し、 w と r をプロットすると図8に示すようになる。前節では、 w を $16 \mu m$ の一定として(4)式を出したが、実際には接触幅 w は角だれ量 r の関数になり、油密度 Q も角だれ量 r の関数になると思われる。図8より、接触幅 w と角だれ量 r の関係は次式で与えられる。

$$w = e^{-0.00813 r + 3.23} \quad (11)$$

したがって、油密度は次式のように表される。

$$Q = 7960 h^3 e^{0.00813 r - 3.23} \quad (12)$$

Fig. 9 Relationship between quantity of leakage and corrected average clearance.

補正平均すきま C' を油膜厚さ h に等しいとし、(12)式から計算した油密度 Q と実測値の関係を図示すると、図9に示すようになる。実測値は(4)式で示した計算値の付近にばらつく。実測値はバルブやシートのマスターを用いて求めたものであり、通常角だれ量を $56 \mu\text{m}$ 以下にすることは難しく、(12)式は(4)式より実用品の油密度を表す式といえる。また、実測した r と h を(12)式に入れ、油密度 Q を計算したところ、図9の●印 ($12 \text{ mm}^3/\text{min}$ 以上の計算値は省略した) に示すようになる。実測値よりも大きくなるが、油密度が小さいときそれらの値は近づき、(12)式で油密度を推定してもよいと思われる。

(4)式と(12)式より、油膜厚さ h の値が既知のとき、角だれ量 r が油密度 Q に及ぼす影響は図10に示すように計算される。FEM解析から接触幅 w を $16 \mu\text{m}$ としたので、油密度 Q は、角だれ量 r が $56 \mu\text{m}$ 以下では(4)式で表され、 $56 \mu\text{m}$ 以上では(12)式で表される。(12)式の計算値から、角だれ量 r を $120 \mu\text{m}$ 以下、油膜厚さ h を $0.125 \mu\text{m}$ 以下 (真円度はほぼ $0.3 \mu\text{m}$ 以下) に研削すれば、最も厳しい油密規格 $1.5 \text{ mm}^3/\text{min}$ を満たすことができるといえる。

以上から、バルブの真円度、角だれ量およびシートの真円度、平均すきまが油密度に対して影響することが分かった。また、設定された油密規格を満たすために必要なそれらの達成数値を求めることができる。油密度を少なくするには、(10)式と(12)式から特にバルブの真円度 R_v と角だれ量 r を小さくする必要があることが分かる。そのため、CBN

Fig. 10 Effect of corner dullness on quantity of leakage.

ホイールによる研削加工においては、バルブの真円度と角だれ量を小さくするように、その研削条件などを検討しなければならない。また、(12)式のさらなる精査もCBNホイールにより研削した実用品のデータから行う必要もある。

4. 結 論

バルブとシートの形状精度を考慮して、油密度を理論的に解析することを目的とし、どのような形状因子が油密度に影響するかを明らかにしようとした結果、次のような結論が得られる。

- (1) 粘性流体理論により油密度の理論解析を行った結果、油密度 Q は油膜厚さ h とバルブの角だれ量 r の関数で表すことができる。
- (2) バルブとシートの食込み量を考慮して、油膜厚さはバルブとシートの真円度と平均すきまの関数であることを明らかにした。
- (3) 油密度の低減には、特にバルブの真円度と角だれ量を小さくする必要がある。

参 考 文 献

- (1) 古濱庄一, 内燃機関, 森北出版 (1978).
- (2) 横川和彦, 横川宗彦, CBN ホイール研削加工技術—生産革命の起爆材—, 工業調査会 (1988).
- (3) 方 義, 白樫正高, 油圧ポンプモータに用いられるピストン機構の潤滑特性評価, 日本機械学会論文集 (C編), 60, 570 (1994) 254.
- (4) N. Patir and H. S. Cheng, An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication, Trans. ASME, 100, 1 (1978) 12.