

シリンダーヘッドガスケットの接触面圧計測法

北岡征一郎, 長谷川達也, 高行男, 宇田川恒和

概要

本論文は、排気量 3000cc のディーゼルエンジンに用いられているシリンダーヘッドガスケットの接触面圧に対する新しい測定方法について述べる。この方法は、電着銅薄膜をゲージとして厚さ $26\mu\text{m}$ を使用した。薄膜の表面は微少な粗さを有している。そして、その表面状況を接触面圧測定に適用した。圧力測定は、この銅薄膜ゲージを使って、2 種類のガスケットすなわちワイヤータイプとビードタイプを対象として行った。またワイヤータイプでは、歪み計と富士プレスケールでも測定を行った。さらにまた、FEM 解析では、2 つのタイプで行った。得られた結果に基づいて、新しい測定法の有効性を検討した。

序論

一般に、固体物質間の接触においては、巨視的には滑らかな表面であっても微視的には必ずある粗さを有しているため、2 つの固体間の接触面は作用する圧力によって変化するとされる。このように、巨視的には弾性接触と見なされる場合においても接触部である突起部分では塑性変形が生じる。そして、真実接触面積は作用する圧力により変化する。この観点から、接触面積の変化に着目した接触面の圧力測定法が考案された。この方法は、電着銅薄膜を使い表面状況が圧力によって変化することを利用する。

銅薄膜ゲージ法と称される測定方法において、シリンダーヘッドガスケットを対象とした。接触面圧は特にガスケットのシーリングに重要である。ご存知のように、シリンダーヘッドガスケット（シリンダーヘッドとブロック間の部品）は、3 つの異なる流体、すなわち燃焼ガス、潤滑油と冷却水を十分にシールする圧力を与えなければならない。燃焼ガスのシール性能は最も重要である。筒内圧力に対してシールをするための接触面圧を評価することは、シリンダーヘッドガスケット[1]構築のための基本的な試験のうちの 1 つである。しかし、測定範囲には制限がある。たとえば、圧力測定する方法として富士プレスケールが知られているが、この方法は数百 MPa[2]のような高圧を測定することができない。

銅薄膜ゲージを用いた新しい測定は、2 種類の多層鋼のガスケット（ワイヤータイプとビードタイプ）で、静的状態の常温で実験を行った。各々のガスケットは 3 枚の軟鋼から構成されているが内部構造は異なる。これは、銅薄膜ゲージの正確さを検討するには適している。有効性を確認するため、歪み計と富士プレスケールを用いた方法によってワイヤータイプで得られた結果と比較した。さらに、FEM 解析では両方のタイプで検証した。そし

て、シリンダーヘッドとブロックは剛体として仮定した。得られた結果に基づいて、銅薄膜ゲージ法の有効性を検討した。

電着銅薄膜ゲージ

電着銅薄膜の作製—銅薄膜は、表 1 で示する条件下で、ステンレス円柱直径 40mm に電着させ作製した。ステンレス円柱（硫酸銅浴室内で陰極として使われる）の表面は、バフ研磨により鏡面仕上げを施した。

図 1 に銅薄膜の最終電着面を示す。薄膜表面はある粗さを有する。算術平均粗さ Ra は $2.8\mu\text{m}$ である。この最終電着面が、接触面圧を測定するためのゲージとして使用される。銅薄膜ゲージの厚さは $26\mu\text{m}$ である。

較正—図 2 は、銅薄膜ゲージの較正のために使用した炭素工具鋼製の圧力負荷装置を示す。圧力伝達面となる 5mm の直径部分は上下動をする。そして、接触面は $0.5\mu\text{m}$ のアルミナ粉末で仕上げられている。ベアリングボールは、圧力伝達面に一様な圧縮負荷を与えるために使用した。接触面と同一直径の銅薄膜を挟んで、材料試験装置で圧縮荷重を与え、薄膜の最終電着面の調査をした。図 3 に示すように、薄膜表面（白色の領域が接触面）の平坦な部分は、圧縮圧力が増加するにつれこの領域は増加する。

表面粗さの測定には、走査型レーザー顕微鏡を用い銅薄膜表面の $0.6\text{mm}\times 0.8\text{mm}$ の領域を観察した。すなわち、5 箇所の領域で電解研磨およびエッチングを施した薄膜表面に対し画像処理ソフトを用い光学顕微鏡を介して二値処理を行って測定した。図 4 は、静圧 P と接触面積割合 r の関係を示す。接触面積割合 r は静圧 P が増加するとともに一様な平坦な領域が増加することを意味する。図の曲線は最小二乗法によって二次近似を行ったものであり $r=a/P^2+b/P+c$ で、 $a=-4.839\times 10^{-5}$ 、 $b=1.256\times 10^{-1}$ 、そして、 $c=6.182$ で表される。この特性曲線から、銅薄膜は 100MPa から 900MPa までの圧力を測定するゲージとして使用することが可能である。曲線は上へ凸となり静圧が増加して加工硬化が進行する。この曲線は P が 0 の時、接触面積割合 r は 0 でない。これは最終電着面が負荷前の状態であっても平坦になっている部分があると考えられる。

測定方法

シリンダーヘッドガスケット—測定対象に積層構造のガスケットを選んだ。2 種類のガスケット（すなわちワイヤータイプとビードタイプ）は、銅薄膜ゲージ法の有効性を検討するために用いた。これらの石川ガスケットから提供されたシリンダーヘッドガスケットは、同じ寸法であるため、同じ 3 リットルディーゼルエンジンで使うことができた。各々のガスケットは 3 枚の軟鋼板で構成され内部構造は異なる。シリンダーヘッドガスケットのボア間の構造を図 5 に示す。ワイヤーリングはガスケットにワイヤーを入れ、シールを

する重要な役割を果たしている。ビードを施したプレートは、ビードタイプガasketのシールの役割を果たしている。

圧力測定—図 5 に示すように、銅薄膜ゲージをガasketの上面と下面に置き、圧力測定は、常温で行った。自動車整備書に基づき「締付け塑性域回転角度法」により、ボルトの締付けは 3 段階で行った。すなわち、最初にシリンダーヘッドボルトを 49Nm のトルクで締め、次に回転角度で 60 度締め、さらに 60 度締付けた。

この他に、圧力測定は、歪み計と富士プレスケールで、ワイヤータイプガasketを用いて行った。図 6 は、歪み計を用いた圧力測定の概要を示す。ガasketと同じ形の軟鋼板は厚さ 6mm で、歪み計を貼ったピンを挿入するための穴がある。挿入するピンは、プレートと同じ厚みでなければならない。測定を行う時、プレートとガasketはシリンダーヘッドとブロック間に一緒に挟み込んだ。

FUJIFILM 製の富士プレスケールは、加圧に反応し発色するフィルムである。フィルムは、図 5 で示す銅薄膜ゲージ法と同じ方法で挟み込んだ。加圧されたフィルムには明るい領域と暗い領域が現れる。高圧部分（濃い赤色の領域）はすぐに判断できる。そして、静圧は FUJIFILM 製の圧力値解析システム[2]によって分析される。

実験結果および考察

銅薄膜ゲージ法—ガasketシールで最も重要な領域はボア間である。それぞれ、図 7, 8 に銅薄膜ゲージで測定されたワイヤータイプとビードタイプガasketの接触面圧の結果を示す。ボア間の幅は 9.1mm である。圧力測定位置はボア間の中央を基準とした距離で表し、ガasketの上下面の圧力を同一グラフ上に表した。測定領域は第 1 と第 2 シリンダのボア間、第 2 と第 3 シリンダのボア間の圧力を調査した。

圧力分布は、ボア間中央の基準に対してほぼ左右対称を示した。ワイヤータイプとビードタイプの圧力分布は異なるが 200 MPa 以上の高圧は両タイプで確認できた。この結果は、ガasket構造の違いによることを示す。圧力分布の傾向が似ているのは、ボルトにより同じ軸方向で同じ荷重を負荷した状態であるからと考えられる。最高圧力は、ビードタイプよりワイヤータイプの方が高く検出された。正確な圧力分布が必要な時、測定点は増やす必要がある。銅薄膜ゲージ法は、ディーゼルエンジンのガasketに発生する高い接触面圧を測定することに有効と考えられる。

歪み計測法—図 9 に、ワイヤータイプガasketのシリンダボアのまわり 6 箇所歪み計測法で測定された接触面圧の結果を示す。ボア間の位置の圧力が他の位置と比較して低く検出された。これは、ボルトの締付けによると考えられる。それぞれ、第 1 と第 2 シリンダボア間、そして、第 2 と第 3 シリンダボア間の位置の値は、77, 74MPa と 120, 151 MPa となった。各々の値は、3mm×5mm の四角い領域での平均圧力を示す。この値は、銅薄膜

ゲージ法によって得られた $0.6\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ の領域を測定した値より低く検出された。歪み計測法は、ボルトを締付けていく過程において発生する接触面圧を知ることは有効であり重要である。

富士プレスケール法—図 10 は富士プレスケール法で測定したワイヤータイプガスケットの接触面圧の結果を示す。この方法は、圧力分布を知る際に重要な役割がある。しかし、圧力 130 MPa 以上は検出できない。したがって、富士プレスケール法は銅薄膜ゲージの測定と組合わせて使うことが、圧力測定に有効となる。

FEM 解析—上記のように、銅薄膜ゲージ法で測定したガスケットに発生する接触面圧は、ワイヤータイプとビードタイプで異なった。このことを確認するため、FEM 解析は、ANSYS 5.7 を使用した。ガスケットボア間の断面は、モデルの半分とし二次元解析を行った。そして、シリンダーヘッドとブロックは剛体と仮定した。図 11, 12 は計算結果を示す。そして、ワイヤータイプとビードタイプのガスケットに決められた厚みにする。圧力負荷は 2 つのガスケットタイプで異なる。したがって、銅薄膜ゲージ法によって得られた圧力分布とは異なる。この値は、相対的に計算された結果である。したがって、シリンダーヘッドガスケット構築には測定結果が類似した FEM 解析と銅薄膜ゲージ法を使用することは有効であり、測定点を増やすことで銅薄膜ゲージ法での測定は微小な領域で最大圧力を明らかにすることができる。

結言

2 種類のガスケット（すなわちワイヤータイプとビードタイプ）の接触面圧は、銅薄膜ゲージ法と称される新しい方法で測定した。ボア間の領域で測定した圧力は、高压である 200 MPa 以上の圧力分布が両方のタイプで異なることを明らかにした。これらの結果は、ガスケット構造と類似を示した。この傾向は、FEM 解析によって得られる結果で確認された。銅薄膜ゲージ法は、シリンダボア周囲の微小な領域で発生する高い接触面圧を測定することはシリンダーヘッドガスケットの構築のために重要であると考えられた。

参考文献

1. 宇田川恒和, 内燃機関用シリンダーヘッドガスケット, エンジンテクノロジー, 8 巻 23 号 (2000), p.82
2. <http://www.fujifilm.co.jp/prescale>

A Method of Measuring Contact Pressure of Cylinder Head Gasket

H. N. Ko and T. Hasegawa
Nakanihon Automotive College

S. Kitaoka
Tottori University

T. Udagawa
Ishikawa Gasket Co., Ltd.

Copyright © 2004 SAE International and Copyright © 2004 Society of Automotive Engineers of Japan, Inc.

ABSTRACT

This paper describes the new measuring method dealing with the contact pressure of a multi-layer cylinder head gasket for a diesel engine with the displacement of 3 liters. This method uses the electrodeposited copper foil with the thickness of 26 μm as a gauge. The foil surface has small irregularities and the surface appearance corresponds to the applied pressure. Using the foil gauge, the pressure measurement was performed on two kinds of gaskets, i.e., wire type and bead type. The measurement was also performed on wire type by the methods of strain gauge and Fuji Prescale. Furthermore, FEM analysis was performed on two types. Based on the results obtained, the validity of the present method was discussed.

INTRODUCTION

In general, a contact surface between two solid bodies is believed to change due to the applied pressure, since the surface of a solid body has irregularities even though it appears to be smooth. Thus even elastic contact causes a plastic deformation to some region in a contact surface, and this deformed region seems to be related to the applied pressure. As for the aspect, the new method of measuring contact pressure was devised. This method uses the electrodeposited copper foil whose surface appearance corresponds to the pressure.

In studying the application of the present method which is referred to as the foil gauge method, a cylinder head gasket is chosen as the subject, since the contact pressure is important for the gasket sealing. As is well known, the cylinder head gasket, fastened between the cylinder head and the block, must provide adequate sealing pressure for three different fluids i.e., combustion

gas, lubricating oil and coolant. The sealing performance of combustion gas is the most important. Evaluating the contact pressure for sealing against cylinder pressure is one of basic test items for the design of a cylinder head gasket [1]. However, measuring techniques are limited. Although Fuji Prescale method, for instance, is known as a technique for measuring pressure, this method cannot measure high pressures such as several hundred MPa [2].

In the present study, using the new experimental method by the foil gauge, two kinds of multi-layer steel gaskets, i.e., wire type and bead type, were tested at room temperature under a static condition. Each gasket is composed of three steel plates, but the inside structure is different. This is favorable for considering the accuracy of the foil gauge. The measured values were compared with the results obtained on wire type by the methods of strain gauge and Fuji Prescale. In addition, FEM analysis was performed on both types, assuming both the cylinder head and the block as rigid bodies. Based on the results obtained, the validity of the foil gauge method was discussed.

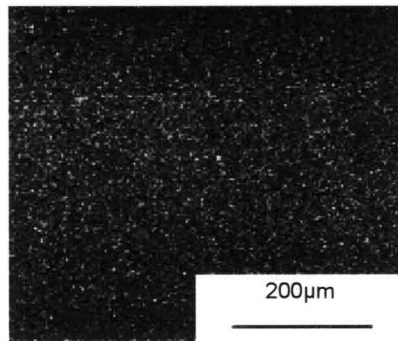
ELECTRODEPOSITED COPPER FOIL GAUGE

FOIL PRODUCTION - The plating for the electrodeposited copper foil was performed on a stainless steel column with the diameter of 40 mm under the conditions shown in Table 1. The column, used as the cathode in the copper sulfate bath, was polished with emery paper of # 800 and then finished with alumina powder of 0.5 μm before plating.

Figure 1 shows the final electrodeposited surface of the copper foil. The foil surface has small irregularities; the arithmetical mean roughness, R_a is 2.8 μm . This surface is used as a gauge for measuring contact pressure. The thickness of the foil gauge is 26 μm .

Table 1 Plating conditions

Cupric sulfate 5hydrate $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	250 g
Sulfuric acid H_2SO_4	80 g
Distilled water H_2O	1000 g
Bath temperature	23 °C
Bath voltage	1.5 V
Current density	305 A/m ²
Plating duration	20 min



P = 0 MPa

Figure 1 Appearance of foil surface

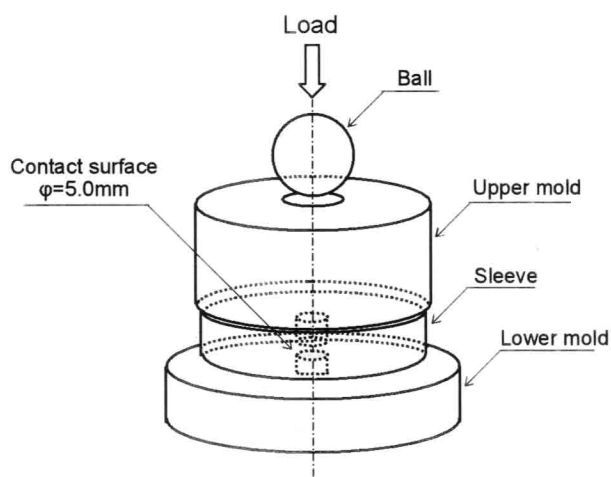
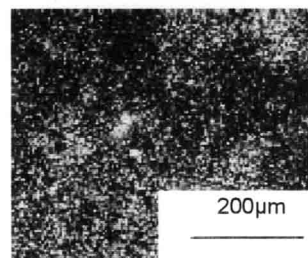
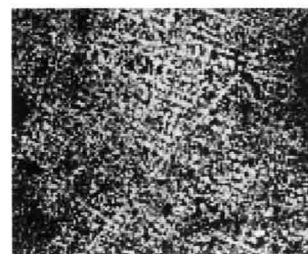


Figure 2 Apparatus for calibration of foil gauge

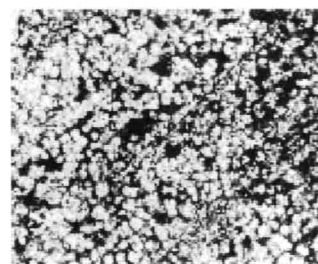
CALIBRATION - Figure 2 shows the apparatus made of tool steel for calibration of the foil gauge. A contact piece with the diameter of 5 mm is worked upon pair of upper and lower parts, and the contact surface is finished with alumina powder of 0.5 μm . A bearing ball is used for transmitting a compressive load uniformly from upper to lower parts. Sandwiching the copper foil with the same size as the contact surface and applying a compressive load by a hydraulic testing machine, the surface appearance of the foil was examined. As shown in Figure 3, the flat part of the foil surface, seen as a white region indicating the contact area, expands with increasing of the applied pressure.



P = 176 MPa



P = 245 MPa



P = 392 MPa

Figure 3 Appearance of foil surface due to applied pressure

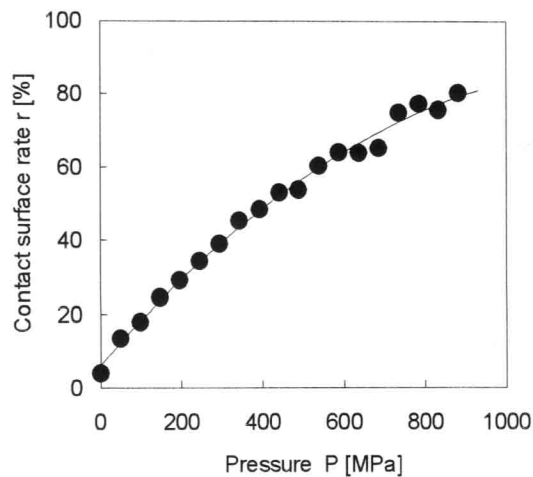
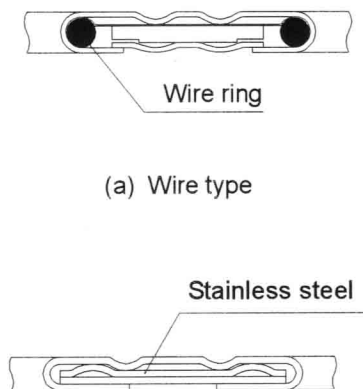
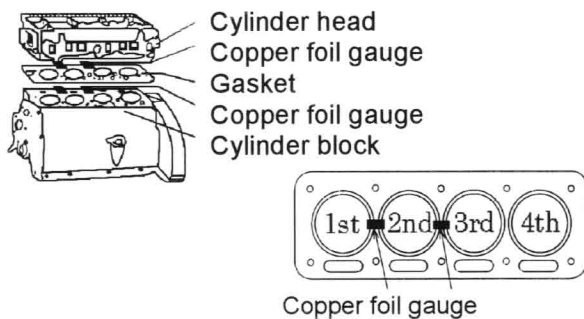


Figure 4 Relationship between ratio of contact area, r and applied pressure, P



(a) Wire type

(b) Bead type

Figure 5 Pressure measurement by foil gauge method and cross section of gas sealing structure

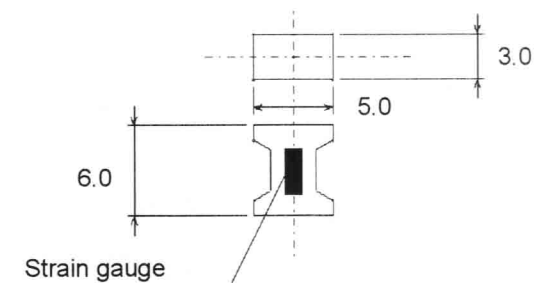
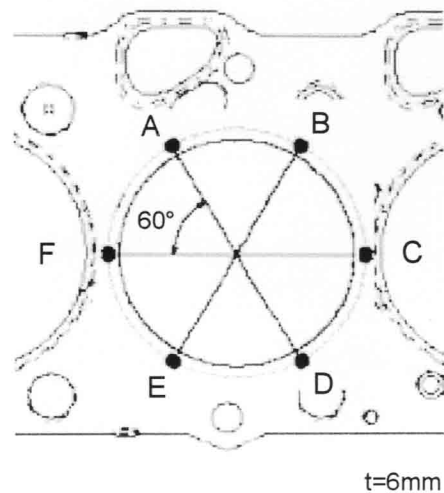


Figure 6 Steel plate and pin for strain gauge method

The quantitative analysis was performed observing on the foil surface with the region of 0.6 mm x 0.8 mm by a laser microscope. Namely, binary images of five optional regions were obtained by the image processing method and the flat part was evaluated. Figure 4 shows the relationship between the ratio of contact area, r and the applied pressure, P . The value of r means the average ratio of the flat part to the measured region. The curved line shown in the figure, obtained from the experimental values by the least square method, can be expressed by the formula, $r = aP^2 + bP + c$, where a is -4.839×10^{-5} , b is 1.256×10^{-1} and c is 6.182. Using this characteristic curve, the foil can be used as a gauge detecting the pressures from 100 MPa up to 900 MPa. The curved line becomes convex upward and thus work hardening seems to progress as the applied pressure increases. The ratio of contact area, r has a positive value when P is 0, since the final electrodeposited surface has some flat part in itself.

TEST PROCEDURE

CYLINDER HEAD GASKET - Multi-layer steel head gaskets were chosen as the subject of the measurement. Two kinds of gaskets, i.e., wire type and bead type, were tested considering the accuracy of the foil gauge. These cylinder head gaskets, obtained from Ishikawa Gasket (Japan), have the same size, and are practically used in a diesel engine with the displacement of 3 liters. Each gasket is composed of three steel plates, but the inside structure is different. The cross section between bores are shown in Figure 5. The wire ring, inserted in wire type gasket, plays an important role in the sealing. On the other hand, the beaded plate acts as a sealing part in bead type gasket.

PRESSURE MEASUREMENT - As shown in Figure 5, setting the foil gauge on upper and lower sides of a gasket, the pressure measurement was performed at room temperature under a static fastening condition. According to a "torque and angle" method defined by a manufacturer, the fastening is performed in the three steps. Namely, the cylinder head bolt is first tightened to a torque of 49 Nm, and then a 60 deg. turn and a next 60 deg. turn are applied.

In addition, the pressure measurement was performed on wire type gasket by the methods of strain gauge and Fuji Prescale. Figure 6 shows the pressure measurement by strain gauge method. The steel plate with the thickness of 6 mm has the same shape as the gasket and has the hole for a pin with strain gauge. The inserted pin must be worked to have the same thickness as the plate. Both the plate and a gasket are set together between the cylinder head and the block when performing the pressure measurement.

Fuji Prescale, obtained from FUJIFILM (Japan), is the film having a color former sensitive to the pressure. The film is set as the same manner as the foil gauge shown in Figure 5. Light and shade areas, depending on the pressure, are seen in the tested film. The high pressure part, seen as a deep red area, can be easily detected, and the applied pressure is evaluated by FUJIFILM pressure analysing system [2].

RESULTS AND DISCUSSION

FOIL GAUGE METHOD - The region between bores is the most important part for the gasket sealing. Figures 7 and 8 show contact pressures, measured by the foil gauge method, for wire type and bead type gaskets, respectively. The region between bores is 9.1 mm wide. The measuring position is represented as the distance from the center between bores, and the pressures in upper and lower sides of a gasket are plotted together. The regions between 1st and 2nd cylinder bores and between 2nd and 3rd cylinder bores are selected for the measurement.

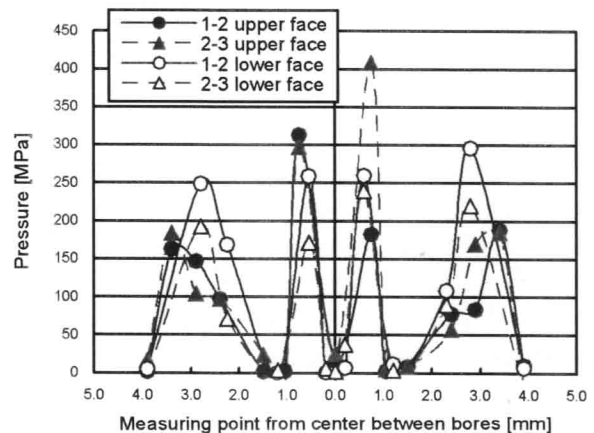


Figure 7 Pressure distributions between bores for wire type

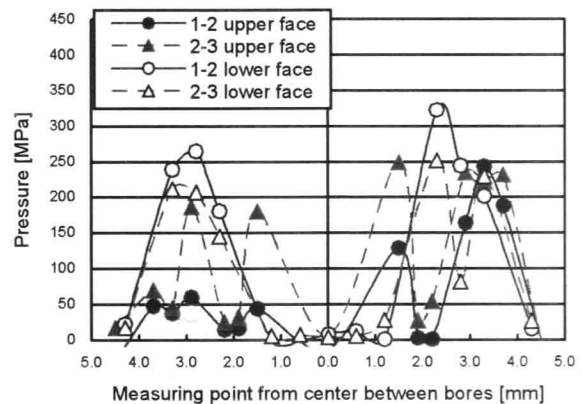


Figure 8 Pressure distributions between bores for bead type

The pressure distribution exhibits symmetry with respect to the center and natural results are obtained. The high pressures more than 200 MPa are detected at wire and bead positions, and the pressure distribution is different in both types. These results show the correspondence to the gasket structure. The similar tendency is confirmed in the results under a certain fastening condition with bolts having the same axial load. The peak pressure seems to be higher in wire type than in bead type. When the accurate pressure distribution is required, the measuring points must be increased. The foil gauge method is believed to be useful for measuring the high contact pressure generated in a gasket for a diesel engine.

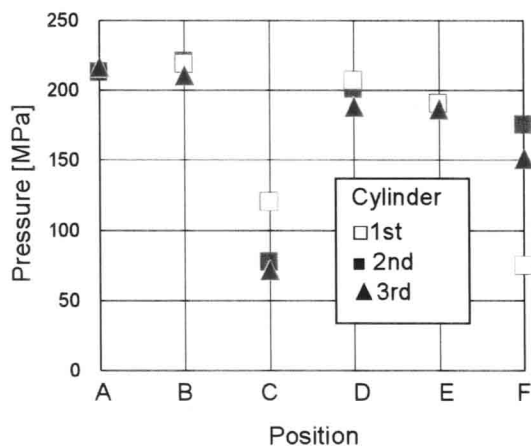


Figure 9 Pressure around cylinder bore for wire type by strain gauge method : positions A-F are shown in Figure 6

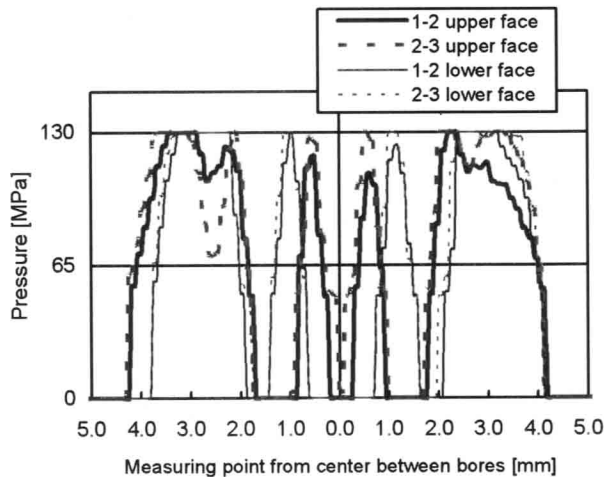


Figure 10 Pressure distributions between bores for wire type by Fuji Prescale method

STRAIN GAUGE METHOD - In Figure 9, contact pressures, indicating compressive stresses measured by strain gauge method, are shown at six positions around a cylinder bore for wire type gasket. It is seen that the pressure at the position between bores is low compared with other positions; this is due to the tightening effect of a bolt. The values at the positions between 1st and 2nd cylinder bores and between 2nd and 3rd cylinder bores are 77, 74 MPa and 120, 151 MPa, respectively. Each value indicates the average pressure in the square area of 3 mm x 5 mm, and thus the measured value is naturally low compared with the value obtained by the foil gauge method measuring the area of 0.6 mm x 0.8 mm. The strain gauge method should be emphasized to be also useful for knowing the contact pressure generated in the fastening process.

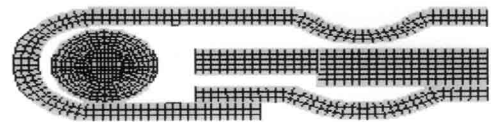
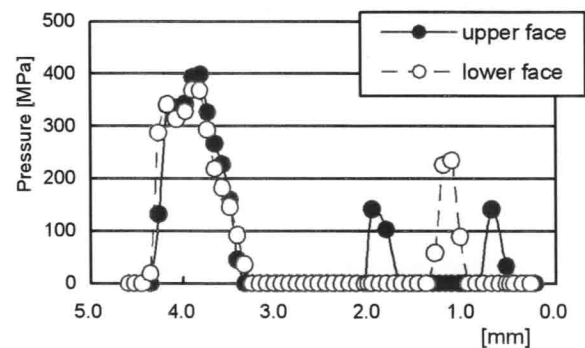


Figure 11 FEM analysis for wire type

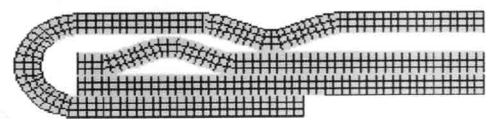
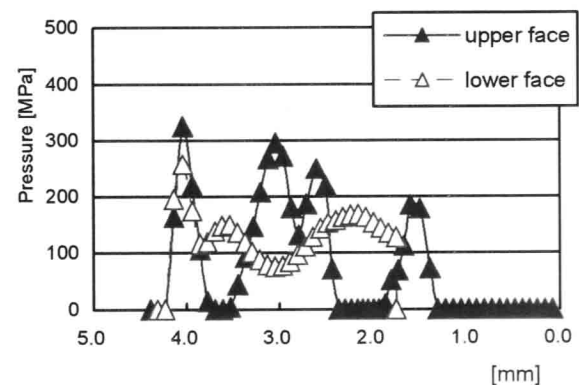


Figure 12 FEM analysis for bead type

FUJI PRESACLE METHOD - Figure 10 shows contact pressures, measured by Fuji Prescale method, for wire type gasket. This method has a distinctive feature in knowing the pressure distribution. The pressure more than 130 MPa, however, cannot be detected. Therefore, it is useful for the pressure measurement that Fuji Prescale method is used in combination with the foil gauge method.

FEM ANALYSIS - As mentioned above, the contact pressure generated in a gasket, measured by the foil gauge method, was different in wire and bead types. In order to inquire this matter, FEM analysis was carried out using ANSYS 5.7. The cross section of a gasket part

between bores was taken as a half model and two dimensional analysis was carried out, assuming both the cylinder head and the block as rigid bodies. Figures 11 and 12 show the results calculated, giving the thickness of a fastened gasket, for wire and bead types, respectively. The pressure occurrence is different in two gasket types, and thus the difference in pressure distributions obtained by the foil gauge method is natural. The measured values agree relatively with the calculated results. Therefore, it is useful for the construction of a cylinder head gasket to use FEM analysis and the foil gauge method in parallel according to demand, since the foil gauge method can determine the maximum pressure in a small region when increasing the measuring points.

CONCLUSION

The contact pressures of two kinds of gaskets, i.e., wire type and bead type, were measured by the new method referred to as the foil gauge method. The pressures, measured in the region between bores, showed the high pressure more than 200 MPa and the pressure distribution was different in both types. These results showed the correspondence to the gasket structure. The similar tendency was confirmed in the results obtained by FEM analysis. The foil gauge method was believed to be useful for measuring the high contact pressure generated in the small region surrounding a cylinder bore and for the construction of a cylinder head gasket.

REFERENCES

1. T.Udagawa, 'Cylinder Head Gasket for Internal Combustion Engines, Engine Technology, 23 (2000) 82
2. <http://www.fujifilm.co.jp/prescale>

CONTACT

H.N.Ko

Doctor of Engineering

Professor of Nakanihon Automotive College

Sakahogi-cho, Kamo-gun, Gifu-ken, JAPAN 505-0077

ko@nakanihon.ac.jp

TEL.+81-574-26-7121

FAX.+81-574-26-0840