

自動車部品の面圧測定

(第2報, ディーゼルエンジンのシリンダヘッドガスケット)

高 行男・長谷川達也

1. 緒 言

自動車をはじめとする機械において、その構成要素に作用する面圧を把握する必要性は高い。接触面に生ずる圧力解析法には、有限要素法、境界要素法などの数値解析法¹⁾やX線応力測定法、3次元光弾性法²⁾などの実験的解析法がある。しかし、測定精度や測定の簡便さの両面から必ずしも十分ではないため、実機に対する測定には、比較的容易な感圧フィルム法³⁾などの一部の方法が利用されているのが現状である。

シリンダヘッドガスケットは、エンジンの作動によって生じる高温・高圧の燃焼ガスや潤滑オイルおよび冷却水を同時にシールする重要な役割を果たす部品である⁴⁾。そのため、シリンダヘッドやシリンダブロックの装着面とシリンダヘッドガスケット表面は密着し、さらに所要の締付け荷重を負荷した時、ガスケットの各シール部には適正な面圧の領域が発生していなければならない。この面圧の実態を把握することは、メーカーにとって設計上重要な項目と同時に、自動車整備士にとっても認識すべき重要な事柄である⁵⁾。

以上のことより、前報⁶⁾においては、自動車部品の面圧測定の第1歩としてガソリンエンジンのシリンダヘッドガスケットの面圧発生状態を接触面圧、特にボア間の接触面圧に着目し、感圧フィルム法(富士プレスケール)と電着銅薄膜による接触面圧計測法⁷⁾を用いて調査した。その結果、感圧フィルム法では、「圧力を色で、数字で、一目でキャッチ」というキャッチフレーズ通り、容易に圧力を測定できた。また、電着銅薄膜による接触面圧計測法では、400 MPa程度までの高い圧力(シリンダ外周近傍)を測定でき、感圧フィルム法に比べ、より微小な領域でより大きな圧力を測定できることが確認された。シリンダヘッドガスケット全体の面圧については、感圧フィルム法を用いてボアの周囲とシリンダヘッドボルト穴の周囲の発色が集中など、面圧の発生状態を把握できた。特に重要なボア間の面圧については、高圧用プレスケールの測定可能範囲の上限値である130 MPa以上の箇所が存在や、ボア間の中央付近では圧力がほとんど生じていないことが確認できた。

本報告では、一般に同排気量においてガソリンエンジンよりも燃焼時に発生する筒内圧力が高いディーゼルエンジンのシリンダヘッドガスケットを対象とし、その面圧の実態を把握することを目的とする。接触面圧、特にシール性にとって重要なボア間の接触面圧に着目する場合、感圧

フィルム法や前報で用いた電着銅薄膜による接触面圧計測法では、面圧発生状態を正確に把握できない恐れがある。つまり、市販されている感圧フィルム法では、130MPa までの圧力しか測定ができない。これは測定可能範囲の上限値のためである。また、電着銅薄膜による接触面圧計測法の電着により作製した四角錐形状の微小な突起を利用する銅薄膜（銅薄膜ゲージⅠ）では、400MPa 程度の圧力までしか測定ができない。これは四角錐形状の微小な突起が400MPa 程度でつぶれてしまうためである。そこで、今回は新たに開発された電着銅薄膜による接触面圧計測法⁸⁾を用い、900MPa 程度まで測定可能な電着面に生ずる表面粗さを利用した電着銅薄膜（銅薄膜ゲージⅡ）によって面圧発生状態を調査した。

2. 実験方法

2.1 測定エンジン

エンジンの諸元を表1に示す。ディーゼルエンジンは、いすゞ・エルフに搭載されている4JG2エンジンといすゞ・ビッグホーンに搭載されている4JX1エンジンである。それらのシリンダヘッドガスケットの構造を図1に示す。4JG2エンジンで使用されているシリンダヘッドガスケットは、スチールラミネート（積層構成）で、シリンダボアのシール部の構造は、ステンレス板を4枚重ね合わせ、補強として内側にワイヤリングを入れ更に全体をステンレス板で包みこんだタイプである。4JX1エンジンで使用されているシリンダヘッドガスケットは、4JG2エンジンと同様にスチールラミネート（積層構成）であるが、シリンダボアのシール部の構造は、ステンレス板を3枚重ね合わせ、補強として内側に帯状のステンレスリングを入れ更に全体をステンレス板で包みこんだタイプである。

ガソリンエンジンは、トヨタ・スターレットに搭載されている4E-FTEエンジンで、使用されているシリンダヘッドガスケットは、スチールベスト（金属と非金属との複合で構成）である。シリンダボアのシール部の構造は、非金属を金属で挟み、補強として金属の内側にワイヤリングを入れたタイプである。

表1 エンジン諸元値

車名	いすゞ・エルフ	いすゞ・ビッグホーン	トヨタ・スターレット
形式	4JG2	4JX1	4E-FTE
排気量 cm ³	3059	2999	1331
シリンダ数及び配置	直列4気筒・縦置き	直列4気筒・横置き	直列4気筒・横置き
燃焼室形状	渦流室式	渦流室式	ペントルーフ型
気筒当たり吸排気弁数	各1	各2	各2
弁機構	OHV	DOHC	DOHC
ボア×ストローク mm	95.4 × 107	95.4 × 104.9	74.0 × 77.4
圧縮比	20.1	19.0	8.2
最高出力 kW	94 (3600min ⁻¹ 時)	160 (3900min ⁻¹ 時)	99 (6400min ⁻¹ 時)
最大トルク N・m	20.6 (1800min ⁻¹ 時)	30.4 (2000min ⁻¹ 時)	57.9 (4800min ⁻¹ 時)

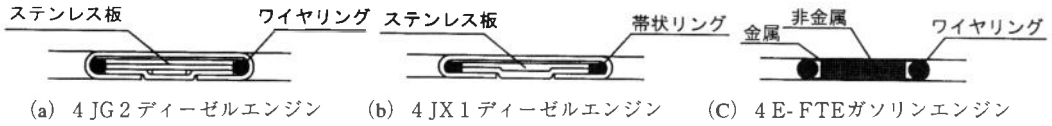


図1 シリンダーガスケットの断面模式図

2.2 測定方法

測定には、新たに開発された電着銅薄膜による接触面圧計測法の電着面に生ずる表面粗さを利用した電着銅薄膜（銅薄膜ゲージⅡ）⁸⁾と、前報で述べた電着により作製した四角錐形状の微小な突起を利用する銅薄膜（銅薄膜ゲージⅠ）を使用した。測定条件は常温とし、シリンダヘッドガスケット、シリンダヘッドボルトは共に新品を使用した。

2.2.1 電着銅薄膜による接触面圧計測法の概要

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、その接触は微小な突起部分で行われる。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、接触面積は作用する圧力によって変化する。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。その一つは、電着により作製した四角錐形状の微小な突起を利用する銅薄膜（銅薄膜ゲージⅠ）であり、もう一つは、電着面に生ずる表面粗さを利用した電着銅薄膜（銅薄膜ゲージⅡ）である。この2種類の銅薄膜ゲージを負荷圧力の大きさと測定面の粗さの違いによって使い分けた。

2.2.2 電着銅薄膜の作製法

銅薄膜ゲージⅠの作製は以下の通りである。まず、# 800 の耐水研磨紙により研磨したステンレス板の表面（厚さ1 mm，中心線平均粗さ $Ra = 0.41 \mu\text{m}$ ）にマイクロビッカース硬さ計（荷重9.8 N）を用いて、四角錐形状の圧痕を間隔 $100 \mu\text{m}$ で $37 \times 40 \text{ mm}$ の範囲に規則的に打ち込む。次に、このステンレス板を陰極として硫酸銅水溶液を用いて銅めっきを施し、銅薄膜の電着面に生ずるくぼみを耐水研磨紙（# 320～# 800）により研磨を行って平滑面とし、電極より剥離して銅薄膜ゲージⅠとする。銅薄膜ゲージⅠの表面状況を図2に示す。銅薄膜ゲージⅠの平坦部の

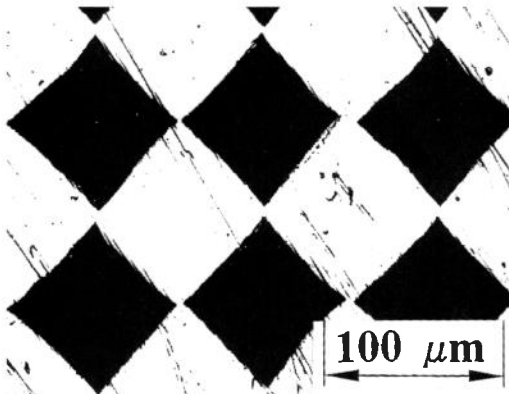


図2 銅薄膜ゲージⅠの表面状況

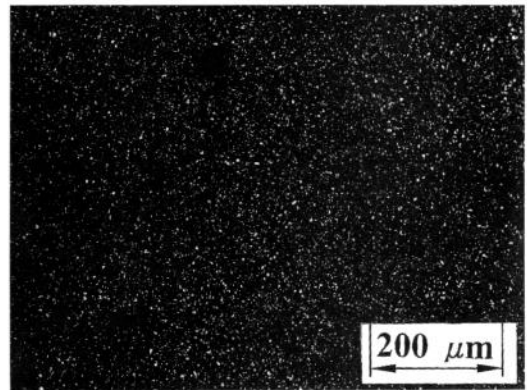


図3 銅薄膜ゲージⅡの表面状況

厚さは12 μm, 突起部の高さは14 μmで, この突起の変形量を利用する。

銅薄膜ゲージⅡは, ステンレス円柱(直径42 mm, 長さ200 mm)の表面をバフ研磨により鏡面仕上げを行い, 銅めっきを施して, 電極より剥離したものである。銅薄膜ゲージⅡの表面状況を図3に示す。銅薄膜ゲージⅡの厚さは約26 μmで, 電着面に生ずる表面粗さの変化を利用する。

2.2.3 電着銅薄膜の測定範囲と測定精度

まず, 圧力の測定範囲について述べる。図4には銅薄膜ゲージⅠの静圧 P_s と突起の接触面積割合 Ar/A の関係を示した。 Ar は測定物と銅薄膜間でできた接触面積, A は突起の底面積である。この関係は1に収束する関数となると考えられるので, 測定結果から式(1)のように近似してある。測定結果と式(1)の曲線はほぼ一致しているので, Ar/A から静的接触圧力の測定が可能である。式中の係数 α , β , γ を表2に示す。図4より, 突起間隔が100 μmの銅薄膜ゲージⅠでは, 0~400 MPa程度の圧力が測定可能であるといえる。

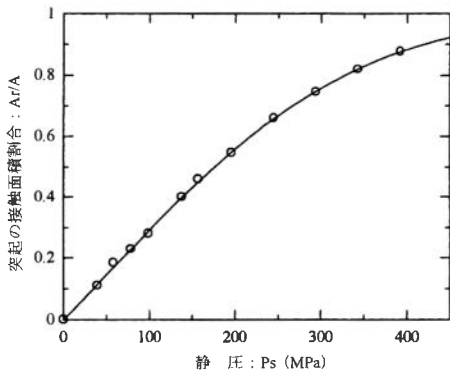


図4 静圧 P_s と突起の接触面積割合 Ar/A の関係 (銅薄膜ゲージⅠ)

$$Ar/A = 1 - \exp(\alpha P_s^2 + \beta P_s + \gamma) \dots\dots (1)$$

$$P_s = \frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha \ln(1 - Ar/A)}}{2\alpha}$$

表2 式(1)の係数

α	-6.390×10^{-6}
β	-2.812×10^{-6}
γ	0

図5には銅薄膜ゲージⅡにおいて, 四角錐形状の微小な突起を利用する銅薄膜(銅薄膜ゲージⅠ)の場合と同様に, 電着銅薄膜の最終電着面に生ずる凸凹を利用して静圧測定をした結果であ

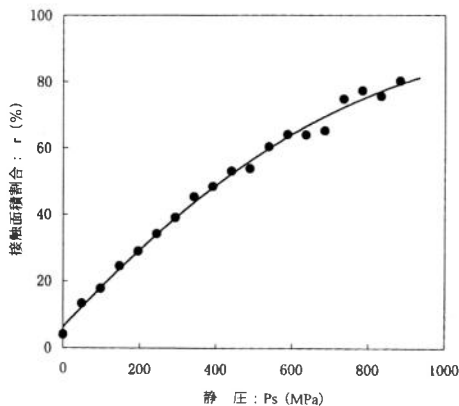


図5 静圧 P_s と接触面積割合 r の関係 (銅薄膜ゲージⅡ)

$$r = a P_s^2 + b P_s + c \dots\dots (2)$$

表3 式(2)の係数

a	-4.839×10^{-5}
b	1.256×10^{-1}
c	6.182

る。静圧 P_s と接触面積割合 r の関係を示した図中の曲線は、最小二乗法を用いて二次近似を行ったものであり、式 (2) で表される。この曲線では、 $P_s = 0$ の時 $r = 0$ でない。これは銅薄膜表面の結晶粒子が、負荷前の状態であっても平坦になっている部分があるためと考えられる。式中の係数 a , b , c を表 3 に示す。図 5 より、銅薄膜ゲージ II は 100 ~ 900 MPa 程度の圧力が測定可能であるといえる。

次に圧力の測定精度について述べる。銅薄膜ゲージ I について、図 6 は作用させた静圧とその静圧に対する測定値のばらつき（それぞれの A_r から式 (1) を用いて求めた圧力と作用圧力の差）との関係を示したものであり、図 7 は作用させた静圧と測定値に対する誤差率の関係を表したものである。図 6 より、測定値のばらつきは作用静圧の大きさによらず最大で ± 25 MPa 程度である。図 7 より、誤差率は $P_s = 100$ MPa 以下において大きくなっており、測定圧力が低いと精度が悪くなる傾向がみられる。作用させた静圧が低い場合を除けば誤差率は最大で $\pm 10\%$ 、平均で $\pm 5\%$ 程度となるので、銅薄膜ゲージ I の測定精度は高いといえる。

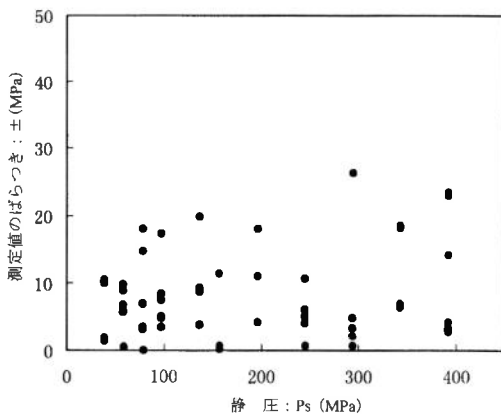


図 6 静的圧力に対する測定値のばらつき
(銅薄膜ゲージ I)

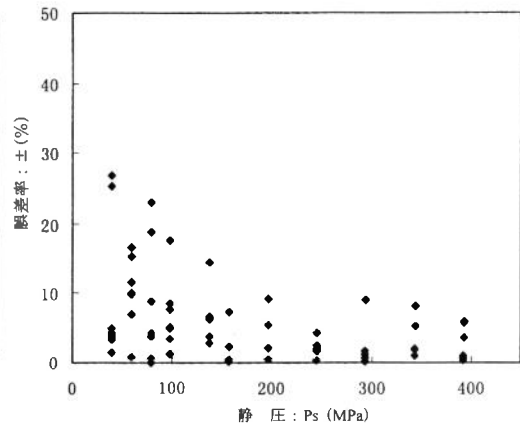


図 7 測定圧力と誤差率の関係
(銅薄膜ゲージ I)

銅薄膜ゲージ II の測定精度について、図 8 は作用静圧とその静圧に対する測定値のばらつきの関係を、図 9 は作用静圧と測定値に対する誤差率の関係を示している。図 8 より、測定値のばらつきは作用させた静圧の増加に伴い増大している。図 9 より、誤差率は作用させた静圧が低いと精度が悪くなる傾向がみられるが、静圧が低い場合を除けば誤差率は最大で $\pm 20\%$ 、平均で $\pm 10\%$ 程度となる。銅薄膜ゲージ I の誤差率、平均値と比較すると、銅薄膜ゲージ II の精度は若干劣るといえる。

2.2.4 電着銅薄膜の測定箇所および測定方法

図 10 にはボア間の測定箇所を、図 11 には銅薄膜ゲージの測定場所を示した。銅薄膜ゲージによる接触面圧計測方法は以下の通りである。

- ① 銅薄膜ゲージを挟む箇所は、シリンダボア間である。挟む順序は、シリンダブロック、銅

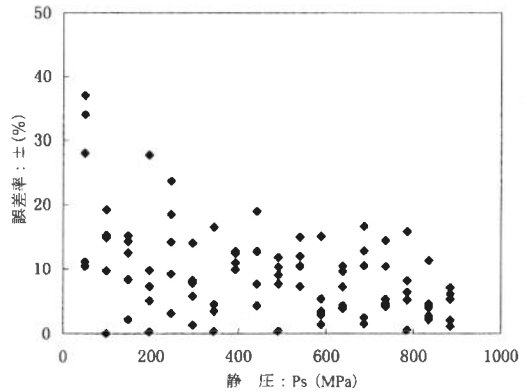
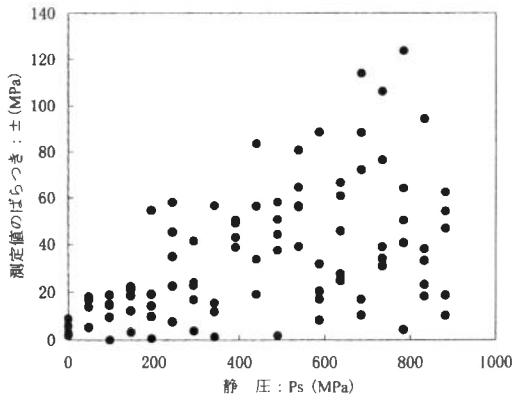


図8 静的圧力に対する測定値のばらつき(銅薄膜ゲージⅡ) 図9 静的圧力と誤差率の関係(銅薄膜ゲージⅡ)

薄膜ゲージ, シリンダヘッドガスケット, 銅薄膜ゲージ, シリンダヘッドである。

② 締付け手順は, 測定に使用したエンジンによって異なる。

4E-FTE ガソリンエンジンでは, 自動車整備書に基づき 30 Nmで仮締めし, 45 Nmで本締めをする。10分経過後, 取り外し手順に従い銅薄膜ゲージを取り出す。

4JG2 ディーゼルエンジンでは, 自動車整備書に基づき締付け塑性域回転角度法を用いて3段階に分けて締付ける。1回目は45 Nm (トルク法)で締め, 2回目は70° (角度法), そして3回目も70° (角度法)で締付ける。10分経過後, 取り外し手順に従い銅薄膜ゲージを取り出す。

4JX1 ディーゼルエンジンでは, 自動車整備書に基づき締付け塑性域回転角度法を用いて3段階に分けて締付ける。1回目は49N・m (トルク法)で締め, 2回目は60° (角度法), そして3回目も60° (角度法)で締付ける。10分経過後, 取り外し手順に従い銅薄膜ゲージを取り出す。

③ 締付け後, 銅薄膜ゲージⅠの場合は, 突起表面を走査型共焦点レーザ顕微鏡 (オリンパスOLS 1000型)により観察し, 突起先端部の塑性変形量を調査して圧力を求める。銅薄膜ゲージⅡの場合は, 陰極 (めっき時のステンレス棒)に接した面を走査型共焦点レーザ顕微鏡 (オリンパスOLS 1000型)により観察し, 粒子解析ソフトにより表面粗さの割合を算出して較正式に基づいて圧力を求める。

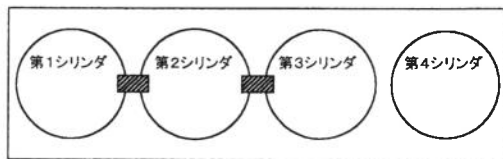


図10 ボア間の測定箇所

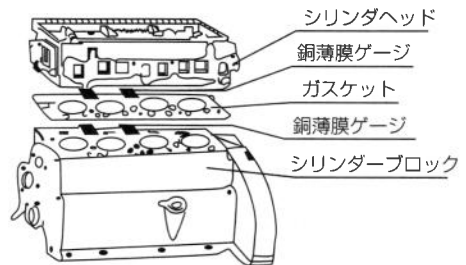


図11 銅薄膜ゲージの測定場所

3. 実験結果

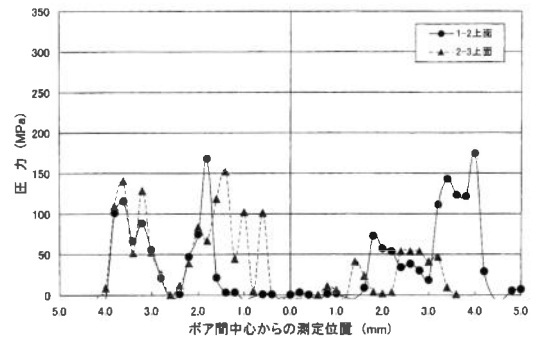
シリンダヘッドガスケットの面圧の把握で特に重要なボア間の接触面圧の測定結果を述べる。ディーゼルエンジンでは前報で使用した銅薄膜ゲージⅠと新たに開発された銅薄膜ゲージⅡを用いた。銅薄膜ゲージⅡを用いた理由は、生じる接触面圧が高いと推測したためである。また、ガソリンエンジンでは銅薄膜ゲージⅠとⅡによる結果を比較し、両ゲージの特性を検討した結果を述べる。

3.1 ディーゼルエンジンのボア間の面圧 (4JG2 ディーゼルエンジン)

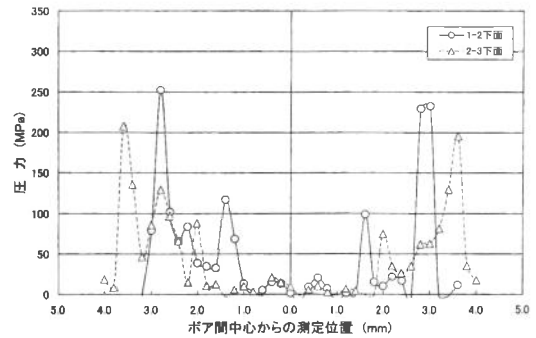
4JG2 ディーゼルエンジンに対し、銅薄膜ゲージⅠを用いた場合、シリンダヘッドとブロックの測定面が機械加工（フライス加工）の加工傷により粗いため、測定できなかった。そこで、今回は新たに開発された電着銅薄膜による接触面圧計測法で900MPa程度まで測定可能な銅薄膜ゲージⅡを用いて、面圧発生状態を調査した。

図12 (a)–(c)には、シリンダ1-2間と2-3間のボア間において、表面粗さを利用して接触面積割合と静圧の関係から粒子の塑性変形量を求め、圧力を調査した結果を示す。各シリンダ中心を結ぶ線上において、1-2間と2-3間の中央を基準として、シリンダヘッドとガスケット間を上面、ガスケットとシリンダブロック間を下面として圧力分布を表している。図(a)はシリンダ1-2間と2-3間のボア間の上面、図(b)はシリンダ1-2間と2-3間のボア間の下面、図(c)は図(a)と図(b)を重ね合わせた結果である。

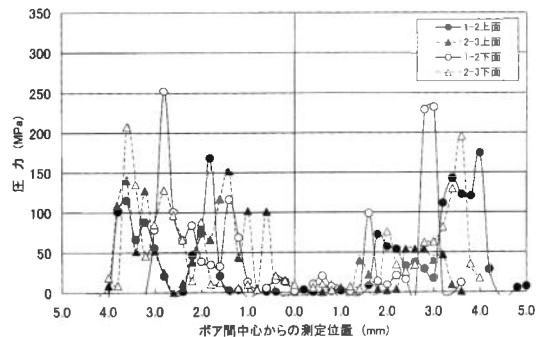
図12 (a), (b)ともボア間における圧力の生じ方は、ボア間中央の基準を中心に左右ほぼ対称で、シリンダ外周から3.0mmと1.5mm付近の2箇所の圧力は高くなり、ボア間の中央付近ではほとんど圧力が生じていないことがわか



(a) シリンダー1-2と2-3の上面



(b) シリンダー1-2と2-3の下面



(c) 上面と下面の重ね合わせ

図12 銅薄膜ゲージⅡによるボア間の圧力分布

る。シリンダ外周2箇所の高圧は、以下に述べるようにシリンダボアのシール部の構造に起因する。

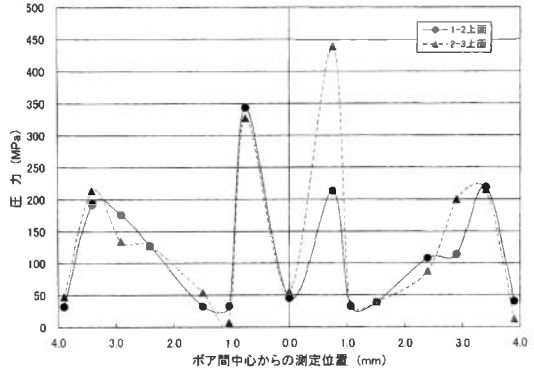
図(c)からわかるように、圧力のかかる位置が上面も下面もシリンダ外周から3.0 mm付近で高くなっている。これは、4JG2ディーゼルエンジンのシリンダガスケットの断面模式図(図1(a))からわかるように、シリンダボアのシール部の構造が、ステンレス板を4枚重ね合わせ、補強として中央にステンレスの帯板を入れ更に全体をステンレス板で包んでいることによる。補強された帯板の上下方向はシリンダヘッドとシリンダブロックの接触方向となり、帯板の断面が長方形であることから端部に圧力が集中するので、圧力が最も高くなったと考えられる。

3.2 ディーゼルエンジンのボア間の面圧 (4JX1 ディーゼルエンジン)

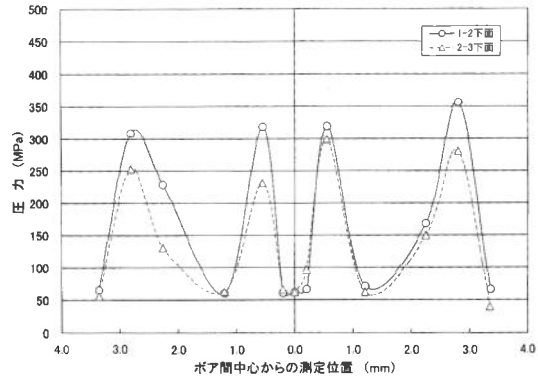
4JX1ディーゼルエンジンに対する測定では、銅薄膜ゲージIによる四角錐形状の微小突起が完全につぶれてしまうため測定ができなかった。これは銅薄膜ゲージIが400 MPa程度の圧力までしか測定できないためである。そこで、銅薄膜ゲージIIを用いて面圧発生状態を調査した。

図13(a)-(c)には、シリンダ1-2間と2-3間のボア間のシリンダヘッドガスケット上面において、表面粗さを利用して接触面積割合と静圧の関係から粒子の塑性変形量を求め、圧力を調査した結果を示した。各シリンダ中心を結ぶ線上において、1-2間と2-3間の中央を基準として、シリンダヘッドガスケットとシリンダブロック間を下面として圧力分布を表している。図(a)はシリンダ1-2間と2-3間のボア間の上面、図(b)はシリンダ1-2間と2-3間のボア間の下面、図(c)は図(a)と図(b)を重ね合わせた結果である。

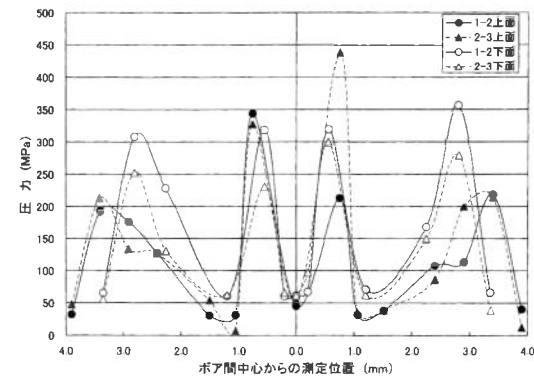
図(a)においてボア間における圧力の生



(a) シリンダ1-2と2-3の上面



(b) シリンダ1-2と2-3の下面



(c) 上面と下面の重ね合わせ

図13 銅薄膜ゲージIIによるボア間の圧力分布

じ方は、ボア間中央の基準を中心に左右ほぼ対称で、シリンダ外周から 3.5 mm と 0.8 mm 付近の 2 箇所での圧力は高くなり、ボア間の中央と 1.2 mm 付近ではほとんど圧力が生じていないことがわかる。シリンダ外周 2 箇所での圧力が高いのは、後述するようにシリンダボアのシール部の構造に起因する。

図 (b) においてボア間における圧力の生じ方は、ボア間中央の基準を中心に左右ほぼ対称で、シリンダ外周から 2.8 mm と 0.8 mm 付近の 2 箇所での圧力は高くなり、ボア間の中央と 1.2 mm 付近では圧力がほとんど生じていないことがわかる。

図 (c) からわかるように、上面も下面もシリンダ外周から 0.8 mm 付近で圧力が高くなっている。これは、4JX1 ディーゼルエンジンのシリンダガスケットの断面模式図 (図 1 (b)) からわかるように、シリンダボアのシール部の構造が、ステンレス板を 3 枚重ね合わせ、補強として内側に帯状リングを入れ更に全体をステンレス板で包んでいることによる。補強された帯状リングの上下方向はシリンダヘッドとシリンダブロックの接触方向となり、リングの断面が長方形であることからリング端部に圧力が集中するので、圧力が最も高くなったと考えられる。

3.3 ガソリンエンジンのボア間の面圧 (4E-FTE ガソリンエンジン)

4E-FTE ガソリンエンジンにおいては、銅薄膜ゲージ I と新たに開発された銅薄膜ゲージ II による面圧発生状態を調査し、両ゲージの特性を比較した。

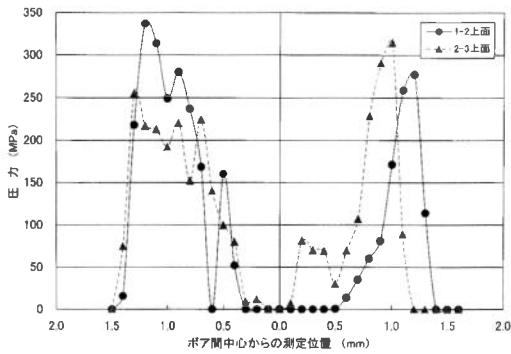
図 14 には、銅薄膜ゲージ I を用いた場合の面圧発生状態を示した。各シリンダ中心を結ぶ線上において、シリンダ 1-2 間と 2-3 間の中央を基準として、シリンダヘッドとガスケット間を上面、ガスケットとシリンダブロック間を下面として圧力分布を表している。

ボア間における圧力の生じ方はボア間中央の基準を中心に左右ほぼ対称で、シリンダ外周近傍 (シリンダ外周から 0.4mm 以内) の圧力は高くなり、ボア間の中央付近ではほとんど圧力が生じていないことがわかる。シリンダ外周近傍の圧力が高いのは、シリンダボアのシール部の構造が、非金属を金属で挟み、金属の内側にワイヤリングを入れ補強されていることによる。つまり、4JG2 ディーゼルエンジンのガスケットと同様に、補強されたワイヤリングの上下方向はシリンダヘッドとシリンダブロックの接触方向となり、ワイヤリングの断面が円形であることから線接触部に圧力が集中する。また、ボア間の中央付近ではほとんど圧力が生じていないのは、ガスケットがシリンダヘッドやシリンダブロックと接触していない箇所があることを意味する。

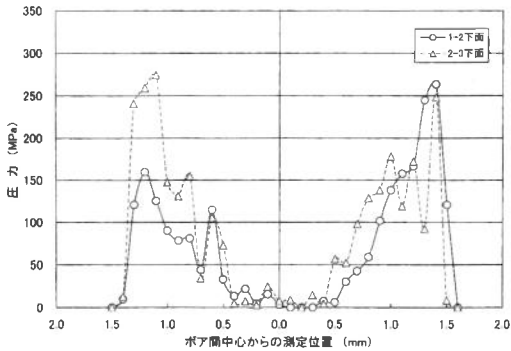
図 15 には、新たに開発された銅薄膜ゲージ II を用いた場合の面圧発生状態を示す。銅薄膜ゲージ I の測定結果と同様に、シリンダ 1-2 間と 2-3 間中央を基準として、シリンダヘッドとガスケット間を上面、ガスケットとシリンダブロック間を下面として圧力分布を表している。ボア間における圧力の生じ方と最高圧力は、銅薄膜ゲージ I を用いた場合とほぼ同様であることがわかる。しかし、ボア間の中央付近の圧力の生じ方は、銅薄膜ゲージ II の精度上の問題 (2.2.3 項) により銅薄膜ゲージ I による測定結果と違いが認められる。

上述のガソリンエンジンと前節で述べたディーゼルエンジンの測定結果を比較すると、両エン

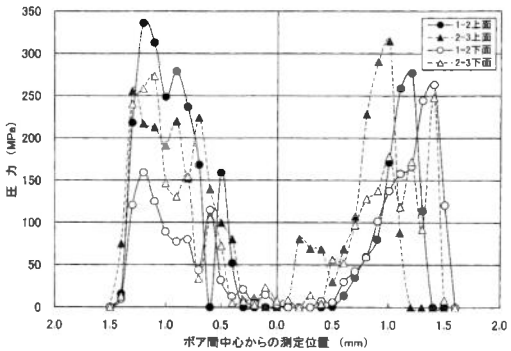
ジンともボア間の中央付近ではほとんど圧力が生じていないことがわかる。しかし、銅薄膜ゲージⅡによる測定結果は、ゲージの測定範囲と測定精度(2.2.3項)により、作用圧力が低いと精度が悪くなる傾向がみられる。測定圧力の最大値を比較すると、4JG2ディーゼルエンジンでは250MPa程度、4JX1ディーゼルエンジンでは450MPa程度となっており、4E-FTEガソリンエンジンでは340MPa程度である。4E-FTEガソリンエンジンの圧力が4JG2ディーゼルエンジンより高く検出されたのは、シリンダヘッドガスケットの材質や構造の違いによるものと考えられる。材質においてはヤング率の違いによることが考えられ、構造においては接触面積の違いが考えられる。



(a) シリンダー1-2と2-3の下面

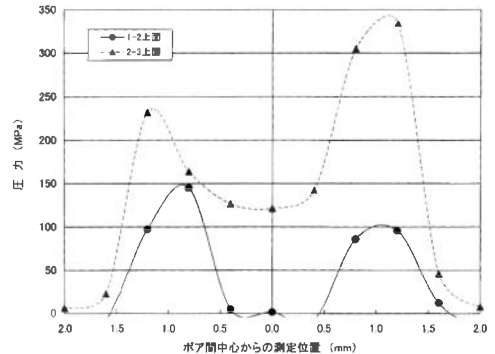


(b) シリンダー1-2と2-3の下面

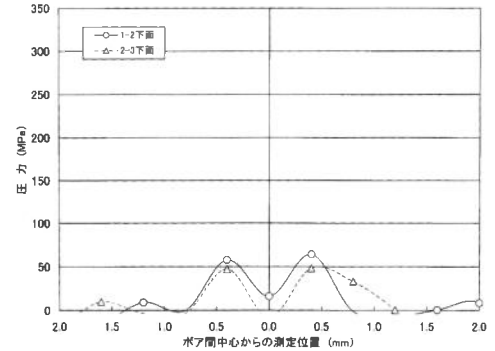


(c) 上面と下面の重ね合わせ

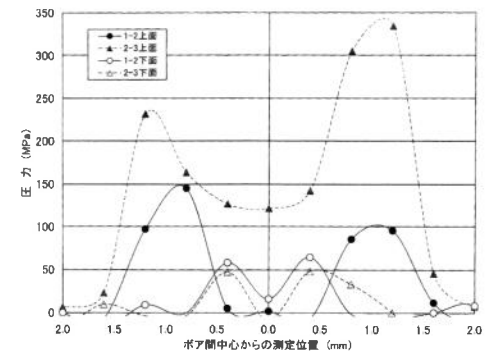
図14 銅薄膜ゲージⅠによるボア間の圧力分布



(a) シリンダー1-2と2-3の下面



(b) シリンダー1-2と2-3の下面



(c) 上面と下面の重ね合わせ

図15 銅薄膜ゲージⅡによるボア間の圧力分布

4. 結 言

電着銅薄膜表面の変形量を利用して接触面の圧力を測定する新たな測定法により、ディーゼルエンジンのシリンダヘッドガスケット締付け時の面圧測定を行い、前報で報告したガソリンエンジンのボア間の面圧結果と比較した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 微小突起を利用する電着銅薄膜（銅薄膜ゲージⅠ）による接触面圧計測法では、400 MPa程度の圧力（シリンダ外周近傍）を測定できた。
- (2) 表面粗さを利用した電着銅薄膜（銅薄膜ゲージⅡ）による接触面圧計測法では、銅薄膜ゲージⅠ比べ、より高い圧力を測定できることが確認された。
- (3) 電着銅薄膜による接触面圧計測法では、ガスケットの構造により発生する面圧が異なることを精度良く把握できる。しかし、測定対象とする要素の材質や表面粗さによって圧力測定が困難なケースがあること、一度加圧すると元に戻ることはなく、締付け時の最大圧力が表示されていることに留意する必要がある。

終わりに、本研究の遂行にあたり、御助言をいただいた鳥取大学 北岡征一郎教授、協力いただいた同大学院 島岡俊行君と吉田雅人君に謝意を表する。また、多大なご助力をいただいた(株)石川ガスケット専務取締役 宇田川恒和氏に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 香川博之, 市川昌弘, 高松 徹, 桑野博喜, 球圧子押込みによる薄膜・基板接合体の応力分布の弾塑性有限要素解析, 機械学会論文集, 60巻570号A編(1994), P.409.
- 2) 相原民彦, 円柱平端面と弾性体平面との弾性接触応力, 日本機械学会論文集, 40巻333号A編(1974), P.1287.
- 3) 執行雅夫, 圧力画像の解析FPD-901シリーズ, 画像ラボ(1996), P.52.
- 4) 自動車用機関のシリンダヘッドガスケット, 日本工業規格D3105(1992).
- 5) 高行男, 長谷川達也, 北岡征一郎, 島岡俊行, 銅薄膜ゲージによるシリンダヘッドガスケットの面圧測定, 自動車技術会2001年春季学術講演論文集, No.70-01(2001), P.17.
- 6) 高行男, 長谷川達也, 井藤賀久岳, 杉原申也, 岡本安広, 自動車部品の面圧測定(第1報, ガソリンエンジンのシリンダヘッドガスケット), 中日本自動車短期大学論叢, 第31号(2001), P.1.
- 7) 北岡征一郎, 坪田淳一郎, 永橋 豊, 岸 武保, 電着銅薄膜による接触面圧計測法, 日本機械学会論文集, 64巻619号A編(1998), P.145.
- 8) 北岡征一郎, 長谷川達也, 島岡俊行, 電着銅薄膜による接触面圧計測法, 日本機械学会中国四国支部講演論文集, Np.015-1(2001), P.3.