

ディーゼルエンジン用シリンダヘッドガスケットの 燃焼ガスシール部の特性評価に関する実験的研究

若林 克彦*・児玉 知明**・西原 公*
長谷 高秀***・門倉 俊介***

An Experimental Study on the Characteristics Evaluation of Combustion Gas Seal Parts of Cylinder Head Gaskets for High-Speed Diesel Engines

Katsuhiko WAKABAYASHI*, Tomoaki KODAMA**, Tadashi NISHIHARA*,
Takahide NAGAYA***, Shunsuke KADOKURA***

Abstract: Static and dynamic experiments on a small, one-cylinder high-speed diesel engine were performed by changing the material and configuration of the cylinder head gaskets. Three kinds of cylinder head gaskets were used for the experiments. The load distribution ratio, the characteristics of compression and reversion and the condition of the gas leakage of the combustion gas seal part have become clear on the basis of these experimental results.

Keywords: Diesel Engine, Seal, Gasket, Experiment/Cylinder Head Gasket, Characteristics Evaluation, Static and Dynamic Characteristics, Combustion Gas Seal

要 旨: シリンダヘッドガスケット (以下, ヘッドガスケットと呼ぶ) は, エンジン部品として重要な役割を果たすシール部品である。近年, ヘッドガスケットを取り巻くシール環境は, エンジン剛性の低下および最高燃焼圧力の増加などにより, 厳しさを増す傾向にある^{[1]-[3]}。そこで本研究では, 3種類の構造・寸法および材質の異なるヘッドガスケットを対象とし実機装着実験を行い, 静的特性評価および動的特性評価を行う。静的特性評価のために, 面圧分布測定, 圧縮復元特性測定, 鉛弾片を用いた厚さ測定およびシリンダライナのひずみ測定を行う。また, 動的特性評価のために, ヘッドボルトの軸力測定, 最高圧力の測定およびガス漏れの確認実験を行う。これらの実験結果より, ヘッドガスケット燃焼ガスシール部がシーリングに関連する物理因子の特性に及ぼす影響について明確にした。

1. はじめに

シリンダヘッドガスケット (以下, ヘッドガスケットと呼ぶ) は, エンジン部品として重要な役割を果たすシール部品である^{[1]-[5]}。ヘッドガスケットは, 構造が単純であるが, 水, 潤滑油および燃焼ガスの漏れを防止する必要がある。近年自動車用ディーゼルエンジンは,

シリンダヘッドおよびシリンダブロックの材質が鋳鉄からアルミニウム合金に換わり, 剛性の低下によるヘッドガスケットの使用環境が過酷になり, ヘッドガスケットの耐久性を低下させている。さらに, ヘッドガスケットは, 締付け時の厚さおよび燃焼ガスシール部, 穴径などの寸法公差を厳しくすることが要求され, ヘッドガスケット締付け時の寸法公差精度を向上させなければならない^{[6]-[15]}。また, 燃焼室形状の変更や直接噴射式ならびに高圧化により最高燃焼圧力が増加している。このため, ヘッドガスケットを取り巻くシール環境は, 厳しさを増す傾向にある^{[16]-[34]}。これらより, ヘッドガスケットにおけるシール環境の悪化の主な要因を取り上げ, その対応策をヘッドガスケットのみでなく, エンジン全体におけるガスシール機構として検討をすることが重要となっている^{[6]-[15]}。そこで本研究では, 3種類の構造, 寸法および材質の異なるヘッドガスケット^{[6]-[15]}を

* 工学部機械情報工学科 教授 工学博士
Professor, Department of Mechanical Engineering and Applied Information Technology, Faculty of Engineering, Dr. of Engineering

** 工学部機械情報工学科 技術職員
Technical Staff, Department of Mechanical Engineering and Applied Information Technology, Faculty of Engineering

*** 大学院工学研究科修士課程機械工学専攻 大学院生
Graduate Student, Program in Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering

対象とし実機装着実験を行い、静的特性評価および動的特性評価を行う。静的特性評価のために、面圧分布測定、圧縮復元特性測定、鉛弾片を用いた厚さ測定およびシリンダライナのひずみ測定を行う^{[6]-[15]}。また、動的特性評価のために、ヘッドボルトの軸力測定、最高圧力の測定およびガス漏れの確認実験を行う^{[6]-[15]}。これらの実験結果より、ヘッドガスケット燃焼ガスシール部の構造、寸法および材質がシーリングに関連する物理因子の特性に及ぼす影響について明確にした。

2. 供試ヘッドガスケットの概要

実験対象とした3種類のヘッドガスケット（グラファイトガスケット（Soft Facing Gasket with Perforated Core）・ソフトラミネートガスケット（Soft Facing Gasket with Flat Core）・メタルガスケット（Metal Gasket）と呼ぶ）のベースシート部と燃焼ガスシール部の構造、主要寸法および材質をTable 1に示す^{[6]-[15]}。なお、グラファイトガスケットは、燃焼ガスシール部およびベースシート部の厚さの差を小さくするように設計・製作した。供試ヘッドガスケットの形状および概略寸法をFig. 1に示す^{[6]-[15]}。以下、供試ヘッドガスケットをベースシート部、燃焼ガスシール部および水・潤滑油穴部に分類して、構造の概略について述べ

る^{[6]-[15]}。

2.1 ベースシート部

(1) グラファイトガスケット

グラファイトガスケットのベースシートは、電気亜鉛めっき鋼板（SECC（Electrolytic Zinc-coated Carbon Steel Sheets））の両面に所定のピッチ（3.0 mm 間隔）でおろし金形状の突起を持つ芯材（フック加工芯材）に非石綿繊維および充てん剤の混合物（EGS）をロールですり込んで一体構造としたヘッドガスケットである。また、特徴として、圧縮性が良いため、シリンダヘッド下面およびシリンダブロック上面に対して、なじみ性のよいヘッドガスケットである^{[6]-[15]}。

(2) ソフトラミネートガスケット

ソフトラミネートガスケットのベースシートは、突起を持たない芯材に冷間圧延鋼板（SPCC（Cold Rolled Steel Plates Sheet and Strip in Cut Length））を用い、非石綿繊維、ニトリルブタジエンゴム（NBR）および充てん剤を混合した表面剤を圧着して一体構造としたヘッドガスケットである^{[6]-[15]}。

(3) メタルガスケット

メタルガスケットのベースシートは、3枚のニトリルブタジエンゴム（NBR（Acrylonitrile-Butadiene-Rubber））コーティングされたステンレス鋼板（3020 IBU）に2枚のステンレス鋼板（SUS 304（Stainless Steel））を挟み込んだ5枚構成の積層構造のヘッドガスケットである。これは、シリンダヘッド下面およびシリンダブロック上面ならびに芯材同士が直接金属接触することを防止し、密着性を確保するためである。また、厚さがほとんど変位しない特徴を持っている^{[6]-[15]}。

2.2 燃焼ガスシール部

供試ヘッドガスケットの燃焼ガスシール部は、ステンレス鋼（SUS 304）のアーマ（Armor）の中にワイヤリング（SWM-G1（Steel Wire Mild）またはSUS 304）を入れて補強した形状で、グラファイトガスケットとソフトラミネートガスケットおよびメタルガスケットの形状、寸法は異なっている。また、ワイヤリングにより発生する局所的な面圧（線圧）により燃焼ガスをシールしている^{[6]-[15]}。


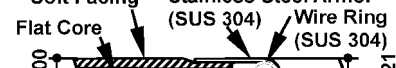
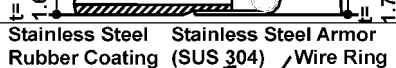
2.3 水・潤滑油穴部

グラファイトガスケットの水・潤滑油穴シール部は、ベースシートを打ち抜いた加工のままの構造である。ソフトラミネートガスケットおよびメタルガスケットは、水・潤滑油穴シール部にラバーリング（VMQ）をはめ込む構造である^{[6]-[15]}。（Fig. 1 参照）

3. 実験装置および方法

本研究で使用した供試エンジンは、単シリンダ横型直接噴射式ディーゼルエンジンで、最高出力は5.58 kW/2600 r/min である（Table 2 参照）。この供試エンジン

Table 1 Cross Section Constructions of Test Cylinder Head Gaskets

Name of Gaskets	Base Sheet and Combustion Gas Seal
Soft Facing Gasket with Perforated Core	Soft Facing Perforated Core (SUS 304), Stainless Steel Armor (SUS 304), Wire Ring (SWM-G1) 
Soft Facing Gasket with Flat Core	Soft Facing Flat Core, Stainless Steel Armor (SUS 304), Wire Ring (SUS 304) 
Metal Gasket	Stainless Steel Rubber Coating (SUS 304), Stainless Steel Armor (SUS 304), Wire Ring (SUS 304) 

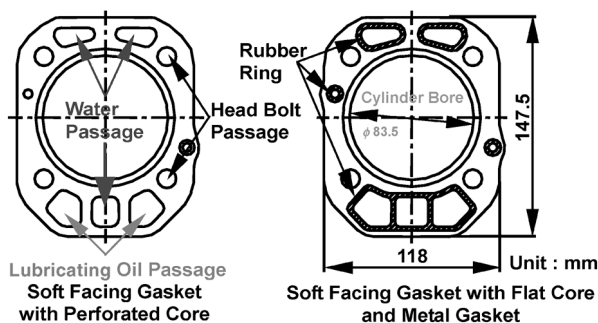


Fig. 1 Shape and Dimension of Test Cylinder Head Gaskets

Table 2 Main Specifications of Test Engine

Items	Specifications
Type of Engine	High-Speed Diesel Engine, Direct Injection, 4 Stroke Cycle, Horizontal, Water Cooled
Number of Cylinder	Single
Bore and Stroke	mm $\phi 78 \times 80$
Displacement	Litter 0.382
Compression Ratio	18.1
Maximum Power	kW/r/min 5.58 / 2600
Material of Cylinder Head	Cast Iron
Material of Cylinder Block	Aluminum Alloy

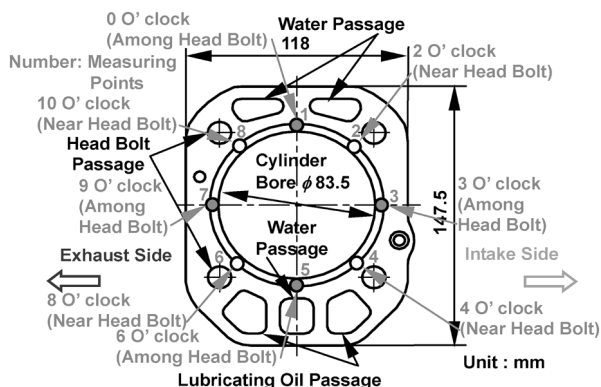


Fig. 2 Shape, Dimensions and Measuring Points of Test Cylinder Head Gasket

に 3 種類 の 供 試 ヘッド ガスケット を 装 着 し、 静 的 お よ び 動 的 特 性 評 価 試 験 を 行 っ た。

3.1 静的特性評価試験

供試ヘッドガスケットの面圧測定は、専用の圧力測定用紙（以下、感圧紙と呼ぶ）をシリンダヘッドとガスケット間に挟み込み、発色状態から面圧を測定した。燃焼ガスシール部の圧縮荷重試験は、圧縮試験機により一定速度で圧縮荷重を与え、荷重と変位の関係を求めた^[1]。鉛弾片試験は、燃焼ガスシール部の外周部に穴をあけ、その中に鉛弾片を挿入して、ヘッドガスケットを締付ける。締付け時の厚さの変化を見るために、締付け後の鉛弾片の厚さを測定した。

3.2 動的特性評価試験

供試エンジンの運転パターンは、供試エンジンを始動させ、暖機運転後（800 r/min）、1/2 負荷（1400 r/min）一定で運転し、以下に示す動的特性評価試験を行った^{[2]-[4]}。供試ヘッドガスケットの形状と測定点を Fig. 2 に示す。ヘッドボルトの軸力測定は、吸気側および排気側のヘッドボルトにひずみゲージを貼り付けて行った。

4. 実験結果と検討

4.1 ヘッドガスケットの面圧分布

ヘッドガスケットの初期締付け時の面圧分布特性を檢

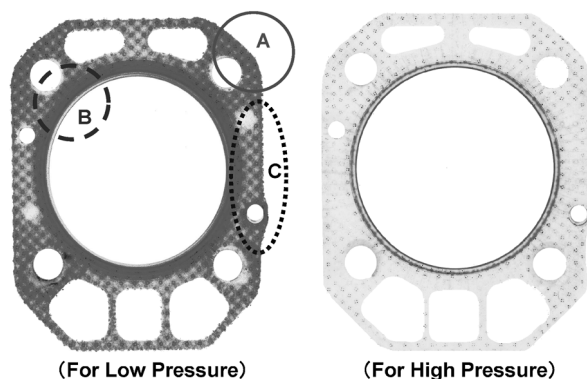


Fig. 3 Surface Pressure of Soft Facing Gasket with Perforated Core

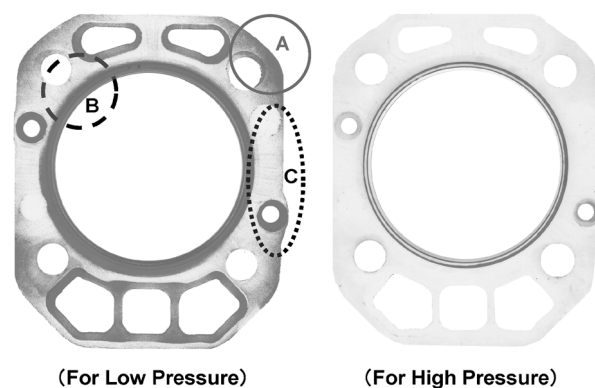


Fig. 4 Surface Pressure of Soft Facing Gasket with Flat Core

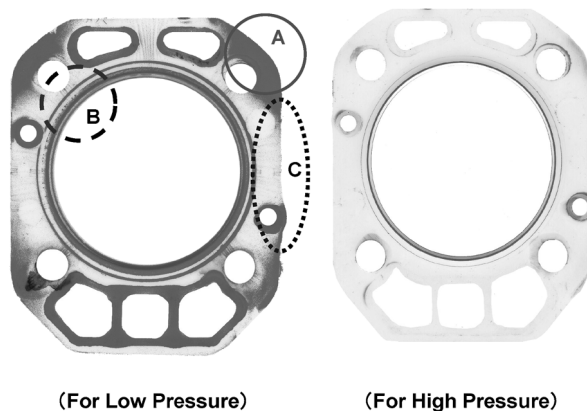


Fig. 5 Surface Pressure of Metal Gasket

討 する ため に、 感 圧 紙 を 使 用 し て 各 ヘッド ガスケット の 面 圧 分 布 を 測 定 し た。 実 験 結 果 の 一 例 と し て、 供 試 エンジン の 各 ヘッド ボルト を 規 定 締 付 け 軸 力（ 40 kN ） で 締 付 け た 際 の ヘッド ガスケット の 面 圧 分 布（ 低 圧 お よ び 高 圧 ） を Fig. 3 ~ Fig. 5 に 示 す。 Fig. 3 に 示 し た グラフ ェ イ ト ガスケット の 面 圧 分 布 の 特 性 と し て は、 ヘッド ボルト 近 傍 お よ び ヘッド ボルト 間 に 着 目 す る と、 ヘッド ボルト 近 傍 の 側 壁（ A 領 域 ）、 アーマ 部 と ヘッド ボルト 間（ B 領 域 ）、 ヘッド ボルト 間（ C 領 域 ） は 中 程 度 の 面 圧

(10~40 MPa)であったが、水・潤滑油部の面圧は10 MPa程度である。他のベースシート部は0~10 MPa程度の低い面圧が発生している。また、燃焼ガスシール部の面圧はアーマ部全体に高い面圧が発生し、ワイヤーリング直下部は局所的に100 MPa以上の面圧が発生している。メタルガスケットの面圧分布 (Fig. 5 参照) は、ヘッドボルト近傍 (燃焼ガスシール部より離れている位置) および水・潤滑油穴を形成しているラバーリングで10~20 MPa程度の面圧が発生している。他のベースシート部ではより低い面圧分布になっている。メタルガスケットは、燃焼ガスシール部とベースシート部の厚さの差が大きいため、ベースシート部 (ヘッドボルト間および燃焼ガスシール外周部) の面圧が低く発生したと考えられる。また、燃焼ガスシール部の面圧は、シール幅も極めて狭く、ワイヤーリング直下部のみで局所的な高い面圧 (100 MPa 以上) が発生している。したがって、メタルガスケットのシール特性として、ヘッドガスケット全体ではなく、主に燃焼ガスシール部で燃焼ガス、厚さを厚くしたラバーリング部で水・潤滑油をシールしている。

4.2 ベースシート部の面積割合

各ヘッドガスケットの面圧分布を0~10 MPa, 10~40 MPa, 40~70 MPaに区分し、規定締付け軸力 (40 kN) で締付けた際、それぞれの面積割合を Fig. 6 に示す。各ヘッドガスケットは、ベースシート部の面圧が約60%から85%までが低面圧 (0~10 MPa) である。また、ベースシート部に着目すると、低面圧の面積割合は、グラファイトガスケットが73%、ソフトラミネートガスケットが86%、メタルガスケットは94%であり、これらの結果から判断して、規定締付け軸力で締付けてもベースシート部の大部分の面積において面圧は低い。したがって、ベースシート部を含めたヘッドガスケット全体で燃焼ガスをシールしていないことがわかる。さらに、シール面積割合の小さい燃焼ガスシール部の面

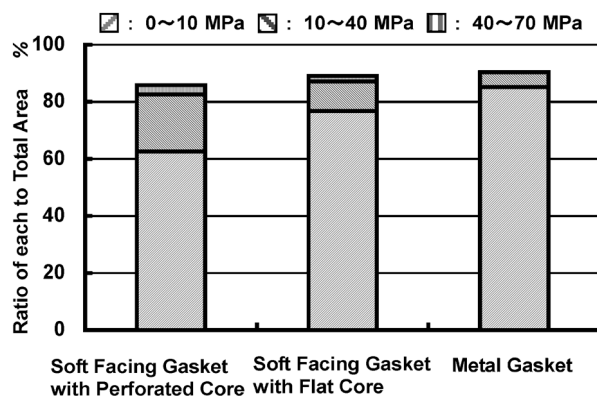


Fig. 6 Ratio of Surface Pressure of the Cylinder Head Gaskets (Base Sheet)

圧を調査すると、特にグロメットとワイヤーリングの直下では約100 MPa以上の面圧が確保されている。

4.3 荷重分担割合

感圧紙による面圧分布測定結果から判断して、各ヘッドガスケットは、ベースシート部、水・潤滑油穴および燃焼ガスシール部の面圧分布および荷重分担割合が異なる。そのため、ヘッドガスケットを締付けた際の荷重分担率を調査する必要がある。各ヘッドガスケットのベースシート部および水・潤滑油穴部の全ての荷重を面圧測定結果から求め、ヘッドボルト締付け全荷重からこれら全ての荷重の総和を差し引いて、燃焼ガスシール部の荷重を求めた。Table 3 および Table 4 は、燃焼ガスシール部ならびにベースシート部、水穴シール部および潤滑油穴シール部全体における荷重分担割合を示す。この結果から、メタルガスケットは、グラファイトガスケットおよびソフトラミネートガスケットと比較して、燃焼ガスシール部の荷重分担割合が大きい。また、各ガスケットの燃焼ガスシール部の有効面積は、ヘッドガスケット総面積の約10%~15%の範囲内にある。以上の結果より、メタルガスケットは燃焼ガスシール部に重点が置かれた設計になっていることがわかる。

4.4 ガス漏れ限界の検討

実機運転中に、強制的にヘッドボルトの軸力を変化させ、ガス漏れが生じた際のヘッドボルトの軸力をガス漏れ限界締付け軸力と定義し、ガス漏れの限界点の検討を行った。ガス漏れの判定は、専用のテスト、カーボンの付着の有無および目視で判断した。式(1)でガス漏れ限界係数を定義する。また、Table 5 および Fig. 7 は、ガ

Table 3 Load Distribution Ratio of Base Sheet and Water and Lubricating Oil Passage

Name of Gaskets	Surface Pressure MPa	Load Area mm ²	Ratio of Area %	Ratio of Load Distribution %
Soft Facing Gasket with Perforated Core	00~10	6719	62.6	21.0
	10~40	2150	20.0	33.6
	40~70	307	2.9	10.6
Soft Facing Gasket with Flat Core	00~10	8540	76.6	26.7
	10~40	1190	10.7	18.6
	40~70	180	1.6	6.2
Metal Gasket	00~10	9550	84.9	29.8
	10~40	600	5.3	9.4

Table 4 Load Distribution Ratio of Combustion Gas Seal Parts

Name of Gaskets	Load Area mm ²	Ratio of Area %	Ratio of Load Distribution %	Surface Pressure MPa
Soft Facing Gasket with Perforated Core	1557	14.5	34.8	36
Soft Facing Gasket with Flat Core	1233	11.1	48.5	63
Metal Gasket	1100	9.8	60.8	88

ス漏れ限界係数の値の比較を示す。

$$G_L = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \quad (1)$$

ここで、 G_L ：ガス漏れ限界係数、 F_0 ：ヘッドボルトの初期締付け軸力、 F_1 ：ガス漏れ限界締付け軸力である。各ヘッドガスケットは、構造、寸法および材質の違いから、ガス漏れ限界係数が異なる。メタルガスケットはグラファイトガスケットおよびソフトラミネートガスケットよりガス漏れ限界係数が大きいので、ガス漏れの限界締付け軸力は小さくなる。また、ソフトラミネートガスケットのガス漏れ限界係数を基準（100%）とすると、グラファイトガスケットは76%に減少しているため、ヘッドボルトの軸力が低下した際にソフトラミネートガスケットよりガス漏れが発生しやすい。また、メタルガスケットは22%に増加しているため、ガス漏れが発生しにくい。Fig. 8は、各ヘッドガスケットを装着し、初期締付け軸力を変化させて求めた燃焼ガスシール部の面圧とヘッドボルト軸力との関係を示す。ヘッドボルトの同じ軸力に対して、グラファイトガスケット燃焼ガスシール部の面圧は低く、メタルガスケット燃焼ガスシール部の面圧は高い。また、実機運転中に、強制的に締付け軸力を下げて、ガス漏れを発生させた際に、ガス漏れの起きた締付け軸力は、グラファイトガスケットでは1本当たり25.0 kN、ソフトラミネートガスケットでは

15.5 kN、メタルガスケットでは7.5 kNである。これらの結果から、強制的に締付け軸力を変化させた場合に、ガス漏れが生じる燃焼ガスシール部の局所的な面圧は約80 MPa以下であると予測される。つぎに、10時間運転後にヘッドボルト4本の総締付け荷重が初期締付け状態から、グラファイトガスケットは約6.5%、ソフトラミネートガスケットは約6.0%、メタルガスケットは約5.1%低減した。また、初期総締付け軸力からガス漏れの限界係数を用いてガス漏れ限界締付け軸力を求めた値を Table 6 に示した。これらの値と10時間運転後の総締付け軸力を比較すると、グラファイトガスケットは、他のヘッドガスケットより両者の値の差が非常に小さい。前述したように、ベースシート部と燃焼ガスシール部との厚さの差を小さく設計したので、耐久性に問題がある。長時間実機運転し、ヘッドボルト軸力の変化特性を求めると Table 5 に示したガス漏れ限界係数を用いて耐久性についての検討が可能である。

4.5 ヘッドガスケットの圧縮復元測定結果

燃焼ガスシール部の構造および材料の種類による圧縮性、復元性を把握するために、圧縮復元特性試験を行った。Fig. 9は各ヘッドガスケットの燃焼ガスシール部の

Table 5 Critical Coefficient of Gas Leakage

Name of Gaskets	Initial Tightening Load F_0 kN	Leakage Axial Tension F_1 kN	Critical Coefficient of Gas Leakage
Soft Facing Gasket with Perforated Core	40.0	33.9	0.12
Soft Facing Gasket with Flat Core	40.0	19.5	0.51
Metal Gasket	40.0	12.9	0.62

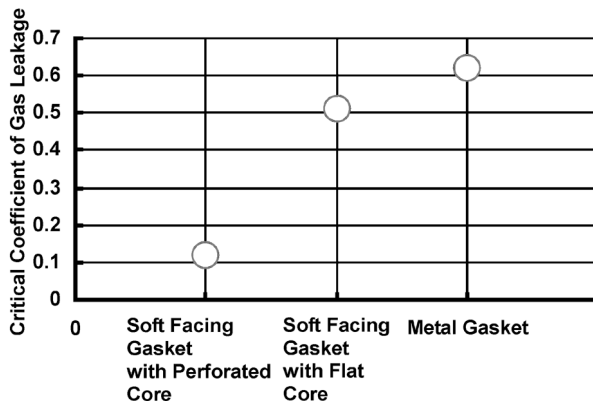


Fig. 7 Critical Coefficient of Gas Leakage

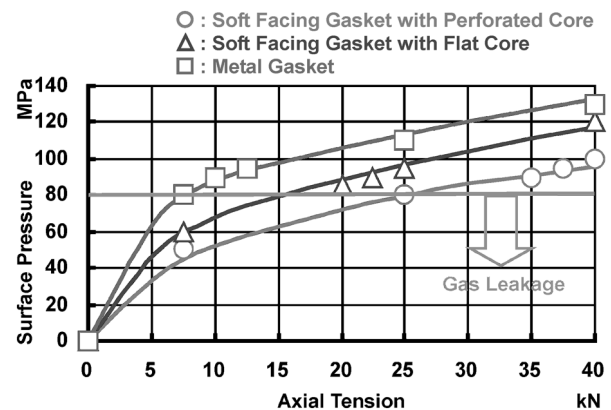


Fig. 8 Relationship between Maximum Surface Pressure and Axial Tension (Combustion Gas Seal Parts)

Table 6 Tightening Load after 10 Hour Durability Test

Name of Gasket	Initial Tightening Load kN	Tightening Load of After 10 Hour kN	Ratio of Tightening Load (After 10h) %	Leakage Tightening Load by Critical Coefficient of Leakage kN
Soft Facing Gasket with Perforated Core	153	143	93.6	135.0
Soft Facing Gasket with Flat Core	150	141	94.4	73.5
Metal Gasket	156	148	95.2	59.3

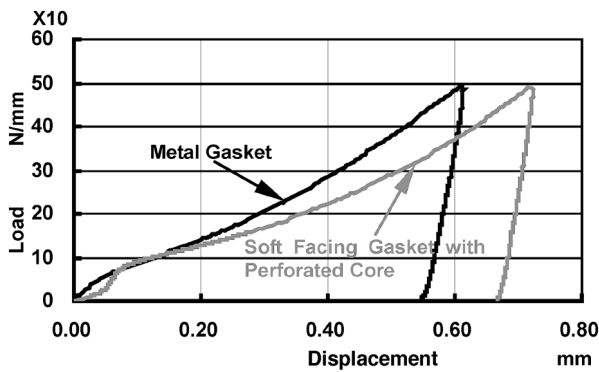


Fig. 9 Characteristic of Compressibility and Recovery (Combustion Gas Seal Parts)

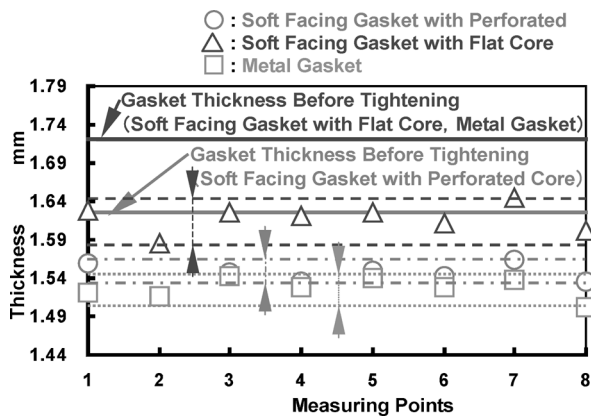


Fig. 10 Characteristic of Gasket Thickness by Lead Pellet (Difference of Thickness, 40 kN)

部単独の圧縮復元試験結果を示す。また、ソフトラミネートガスケットとメタルガスケットは、燃焼ガスシール部の構造および材質が同じであるため、メタルガスケットで代表して示す。同一荷重が作用した場合における変位は、メタルガスケットの方がグラファイトガスケットより小さい。

4.6 鉛弾片による初期締付け時のヘッドガスケット燃焼ガスシール部の厚さ測定結果

各ヘッドガスケット燃焼ガスシール部の初期締付け時の厚さおよび面圧バランスを把握するために、鉛弾片を用いて初期締付け時の燃焼ガスシール部の厚さ測定を行った。Fig. 10は、ヘッドガスケットを締付けた際の燃焼ガスシール部各測定点における厚さの変化を示す。さらに、この図にはヘッドガスケット締付け前の燃焼ガスシール部の厚さと、ヘッドガスケットの初期締付け時の燃焼ガスシール部各測定点の厚さの比較を示す。Fig. 10より各ヘッドガスケットの初期締付け時の燃焼ガスシール部の厚さは、ヘッドボルト近傍よりヘッドボルト間の方が大きい。また、初期締付け時の燃焼ガスシール部の変位量の最大値と最小値の差は、グラファイトガスケットが0.048 mm、ソフトラミネートガスケットが

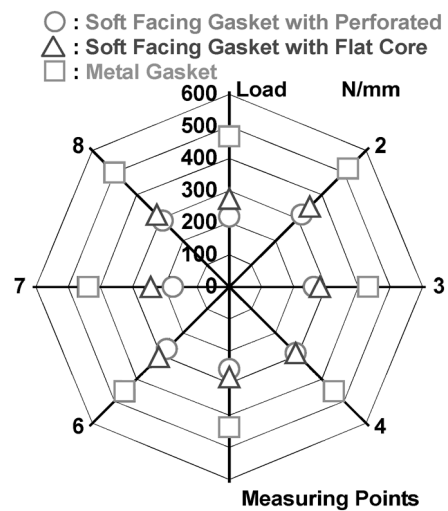


Fig. 11 Characteristic of Load per Unit Length (Combustion Gas Seal Parts)

0.060 mm、メタルガスケットが0.040 mmであり、初期締付け時の燃焼ガスシール部の厚さにバラツキがある。初期締付け時の厚さの減少量は、メタルガスケットの方がグラファイトガスケットおよびソフトラミネートガスケットよりも大きい。Fig. 10よりグラファイトガスケットは、前述したように燃焼ガスシール部とベースシート部との厚さの差が0.026 mmと小さく設計されているので、初期締付け時における厚さの差は小さい。また、ソフトラミネートガスケットの厚さの差は、0.112 mmである。しかし、メタルガスケットは、ベースシート部 (1.500 mm) と燃焼ガスシール部の厚さ (1.721 mm) の差が大きいため、燃焼ガスシール部の厚さが最も減少した。また、水および潤滑油穴部のラバーリングの影響を受けたと考えられる測定点4と6では、ヘッドボルト近傍にも関わらず測定点2と8と比較して厚さの変位量が少ない。

4.7 初期締付け時の燃焼ガスシール部の荷重

燃焼ガスシール部は、非常に高い面圧 (線シールに近い状態) であるから、感圧紙で定量的に精度良く測定することは困難である。そこで、鉛弾片による初期締付け変位と圧縮復元特性の関係より、単位長さ当りの荷重を定義し、定量的に調査する。初期締付けによる変位は式 (2) より求まる。

$$L = L_g - L_{L.P.} \quad (2)$$

ここで、 L : 初期締付けによる変位、 L_g : ヘッドガスケット燃焼ガスシール部の締付け前厚さ、 $L_{L.P.}$: ヘッドガスケット燃焼ガスシール部の締付け後の鉛弾片厚さである。Fig. 11は、式 (2) より算出された変位量から、燃焼ガスシール部の荷重-変位線図 (Fig. 9 参照) をもとに、各測定点における荷重を算出した結果を示す。メタルガスケットはグラファイトガスケットおよびソフトラミネートガスケットより荷重は大きい。ヘッドボルト間の方

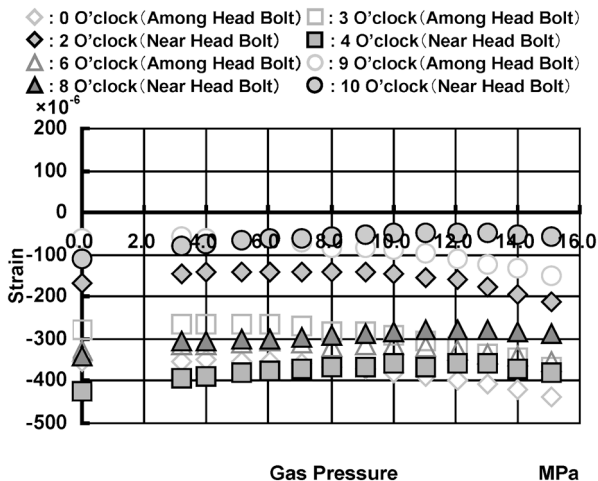


Fig. 12 Relationship of Strain and Gas Pressure in Combustion Chamber (Soft Facing Gasket with Perforated Core)

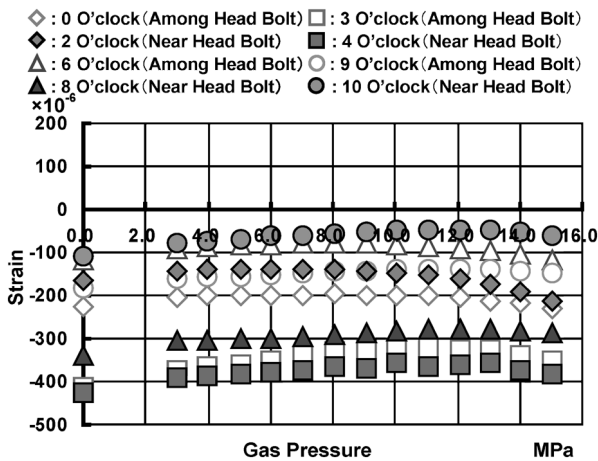


Fig. 13 Relationship of Strain and Gas Pressure in Combustion Chamber (Soft Facing Gasket with Flat Core)

が、ヘッドボルト近傍より荷重が小さい。しかし、ヘッドボルト間である測定点5は、水・潤滑油穴のラバーリングの影響を受け、他の測定点(1, 3, 7点)より、荷重が大きい。

4.8 内圧負荷試験結果

供試ヘッドガasketを装着し、供試エンジンをを用いて、燃焼ガスシール部のワイヤーリング直下のシリンダライナのひずみを把握するために、窒素ガスをシリンダ内に充てんさせ、ガス圧を増加させてシリンダライナ部のヘッドボルト間とヘッドボルト近傍のひずみとガス圧の関係性を求めた。Fig. 12 および Fig. 13 は、それぞれグラファイトガasketおよびソフトラミネートガasketを装着した場合の実験結果である。グラファイトガasketのボルト間の結果では、ガス圧が増加すると、ひずみの絶対値も増加する。また、グラファイトガasketのボルト近傍およびソフトラミネートガasket

の結果ではガス圧が増加すると、ひずみの絶対値は減少し、最小値となった後に、また増加に転ずる。本来ならば、ガス圧の増加に従ってシリンダヘッドを經由してヘッドボルトが伸び、ひずみの絶対値は減少していくものと予測される。しかしながら、ヘッドガスケットの装着位置(特に、ワイヤーリングとシリンダライナとの位置)関係、あるいは燃焼ガスシール部とシリンダヘッドとの間に微小なすき間が生じて、この間に作用するガス圧によってシリンダライナに圧力がかかり、このような結果になったものと推測される。

5. ま と め

構造・寸法および材質の異なる3種類のヘッドガスケットを実機に装着し、静的特性実験および動的特性実験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ヘッドガスケットの燃焼ガスシール部とベースシート部の厚さの差が大きくなるほど燃焼ガスシール部の荷重分担率は増加する。
- (2) ヘッドガスケットのシール特性は、ヘッドガスケットの種類により異なる。主に、グラファイトガスケットおよびソフトラミネートガスケットはヘッドガスケット全体、メタルガスケットは、燃焼ガスシール部でガスシールをしている。また、荷重分担率はそれぞれ異なる。
- (3) 各ヘッドガスケット燃焼ガスシール部を締付けた際、ヘッドボルト間よりヘッドボルト近傍の変位が大きい。そのため、ヘッドボルト近傍燃焼ガスシール部の荷重分担が大きい。また、荷重分担の小さい箇所では、ガス漏れが生ずると予測されるので、燃焼ガスシール部を同一の厚さに設計しないで、荷重の大小により厚さを変えて設計し、燃焼ガスシール部がほぼ等しい荷重にする必要がある。

謝 辞：本研究を遂行するに当たり、ご協力・ご助言をいただいた株式会社マルサンの相沢収氏、薬師寺正人氏、宇野恒男氏および関係者の皆様へ深く感謝致します。

参 考 文 献

- [1] 宇田川恒和：自動車用ヘッドガスケットの現状，自動車技術，Vol. 33, No. 10 (1979) P. 872-879.
- [2] 宇田川恒和：最近の自動車用エンジンのヘッドガスケットシーリング，自動車技術，Vol. 35, No. 2 (1981) P. 192-197.
- [3] 宇田川恒和：ヘッドガスケットの技術的対応の変革，自動車技術，Vol. 55, No. 2 (2001) P. 2-3.
- [4] 相沢 収・尾朝延行：乗用車ディーゼルエンジン用シリンダヘッドガスケットの開発，P. 33-37.
- [5] 清水浩樹・長田裕省：メタルガスケット，内燃機関，Vol. 28, No. 356 (1989) P. 65-69.
- [6] 若林克彦・児玉知明・尾朝延行・宇野恒男：シリンダヘッドガスケットの特性に関する実験的研究，国土館大学工学部紀要，第16号 (1983) P. 46-58.
- [7] 若林克彦・児玉知明・西原 公・本山順朗・長谷高秀・

- 貴島 敬：ディーゼルエンジン用シリンダヘッドガスケットの温度特性に関する実験的研究—加熱冷却サイクル・定常運転時の特性について—, 国土館大学工学部紀要, 第34号 (2001) P. 32-40.
- [8] Katsuhiko Wakabayashi, Tomoaki Kodama, Tadashi Nishihara et al.: Dynamic Characteristics of Head Bolt Load and Relative Displacement between Cylinder Head and Block by Abruptly Change of Cooling Water, *Transactions of Kokushikan University, Faculty of Engineering*, No. 35 (2002) P. 80-88.
- [9] 貴島 敬・児玉知明・西原 公・若林克彦・宇野恒男・薬師寺正人：シリンダヘッドガスケットの動的特性に関する研究—特に温度特性について—, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 81-98 (1998) P. 1-4.
- [10] 貴島 敬・本山順朗・宇野恒男・薬師寺正人・相沢 収・児玉知明・西原 公・若林克彦：ディーゼルエンジン用シリンダヘッドガスケットの動的特性に関する研究—加熱冷却サイクル導入時の過渡的特性—, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 112-99 (1999) P. 13-16.
- [11] 本山順朗・児玉知明・西原 公・若林克彦・宇野恒男・薬師寺正人・相沢 収：ディーゼルエンジン用シリンダヘッドガスケットの動的特性に関する実験的研究—加熱冷却サイクル導入時の過渡的特性について—, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 56-00 (2000) P. 13-16.
- [12] 本山順朗・児玉知明・西原 公・若林克彦・宇野恒男・薬師寺正人・相沢 収：ディーゼルエンジン用シリンダヘッドガスケットの動的特性に関する実験的研究—加熱冷却サイクル・定常運転時の特性について—, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 86-00 (2000) P. 5-8.
- [13] 長谷高秀・児玉知明・西原 公・若林克彦・宇野恒男・薬師寺正人・相沢 収：ディーゼルエンジン用シリンダヘッドガスケットの特性に関する実験的研究—特に, シリンダヘッドボルトの軸力特性—, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 89-01 (2001) P. 5-8.
- [14] Osamu Aizawa, Tsuneo Uno, Masato Yakushiji, Katsuhiko Wakabayashi, Tadashi Nishihara, Tomoaki Kodama: Effect of Circulating Water Temperature Change on Sealing Performance of Cylinder Head Gaskets of Diesel Engine, *SAE Paper* 2000-01-0529 (2000) P. 1-6.
- [15] Osamu Aizawa, Tsuneo Uno, Masato Yakushiji, Tomoaki Kodama, Tadashi Nishihara, Katsuhiko Wakabayashi, Yoshiaki Motoyama: An Experimental study on the Dynamic Characteristics of Cylinder Head Gaskets for Diesel Engine: Dynamic Characteristics in Heating and Cooling Temperature Cycle by Abrupt Change of Water during Steady Operation, *JSAE Review*, No. 20024003, No. 23 (2002) P. 15-20.
- [16] B. G. J. Williams, M. C. Bannard: Cylinder Head Gasketing Problems in Bi-Metallic Engines, *SAE Paper* 840189 (1984) P. 1-6.
- [17] 別役重尚・大沢浪益・鈴木 敦・土屋厚志：耐熱段差コートメタルガスケットの開発, 自動車技術, Vol. 53, No. 1 (1999) P. 81-86.
- [18] 上野 宏・深瀬慎二・高橋 剛：ディーゼル機関のヘッドガスケット面圧挙動, いすゞ技報, No. 101 (1999) P. 71-75.
- [19] Paul M. Tensor : Computer-Aided Design and Load Analysis of a Cylinder Head Gasket, *SAE Paper* 800071 (1980) P. 1-12.
- [20] Edward Widder and Gary Novak: Development of a Computer Aided Gas Sealability Test System, *SAE Paper* 960213 (1996) P. 41-46.
- [21] Mark H. Robinson, Gavin P. Whitham, Tanguy Tronel, Stephen A. Schulze: Application of Advanced Finite Element Techniques to the Design and Development of Automotive Gaskets, *SAE Paper* 960218 (1996) P. 59-66.
- [22] 宇野恒男・相沢 収・西原 公・若林克彦：Zn-22Al系超塑性合金を用いた複合材料のシリンダヘッドガスケットへの応用, 熱処理, 36巻, 6号 (1996) P. 403-407.
- [23] Brian C. Lehr: Applying Gasket Materials to High-Stress, Dynamic Flange Environments, *SAE Paper* 2001-01-0685 (2001) P. 1-6.
- [24] 内田辰郎・前田民敏・大石和貴：エンジン高出力化に対応するガスケットシール技術, 自動車技術, Vol. 50, No. 12 (1996) P. 24-30.
- [25] 山田好男・粕谷 匡：シリンダヘッドガスケットとシリンダボア変形, 内燃機関, Vol. 32, No. 407 (1993) P. 48-56.
- [26] 内田辰郎・宮應芳男：ヘッドガスケットのシリンダボア部に発生する亀裂, 内燃機関, Vol. 32, No. 407 (1993) P. 57-61.
- [27] 稲村 進・木下裕一・原島真一郎：シリンダヘッドガスケットの評価方法, 内燃機関, Vol. 32, No. 407 (1993) P. 69-75.
- [28] 北島正保：シリンダヘッドガスケット合せ面の挙動について, 日野技報, No. 28 (1980) P. 44-47.
- [29] 横山和孝・櫻原一雄・石垣 匠：面圧測定技術を用いたシリンダヘッドカバーガスケットのシール性評価法, 自動車技術, Vol. 49, No. 10 (1995) P. 57-61.
- [30] 横山和孝・櫻原一雄・田中征一・石垣 匠・安田治郎・平塚英治：高精度面圧測定技術の開発とそれを用いたシリンダヘッドカバーガスケットシール性評価法, *HONDA R & D Technical Review*, Vol. 6 (1994) P. 101-109.
- [31] 石垣 匠・北川淳一・田中 敦・谷内忠司：メタルヘッドガスケットの耐久性単体評価法, 自動車技術, Vol. 49, No. 3 (1995) P. 19-24.
- [32] 久保田義弘：シリンダヘッドボルトの締付け技術, 自動車技術, Vol. 52, No. 12 (1998) P. 69-73.
- [33] 大関 浩・渡部昭光・松野 到・重田文彦・田村 仁・石上英征：ボルト締結技術開発, いすゞ技報, No. 106 (2001) P. 15-20.
- [34] 宇田川恒和・山田好男・稲村 進：最近の自動車用エンジンのガスケットシーリングの問題点, 自動車技術, No. 20024698, Vol. 56, No. 9 (2002) P. 101-105.