

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

Development of Surface Pressure Measurement Procedures
for Cylinder Head Cover Gaskets and its Application to Evaluation of Sealability

横 山 和 孝*	櫻 原 一 雄*	田 中 征 一*
Kazutaka Yokoyama	Kazuo Sakurahara	Seiichi Tanaka
石 垣 匠*	安 田 治 郎*	平 塚 英 治*
Takumi Ishigaki	Jirou Yasuda	Eiji Hiratsuka

要 旨

シリンダヘッドカバーガスケット(以下ガスケットと略す)のシール性評価基準として、シリンダヘッド接触面に発生するガスケット面圧を考え、実使用環境における面圧を実測する事によりガスケットに要求される長期信頼性保証可能なシール性評価手法を検討した。

従来の面圧測定は、感圧紙を用いて行っていたがこの測定手法では定性的評価しかできず性能評価基準としては不十分であった。本報告は、2種類の動的かつ定量的に測定可能な面圧測定手法を確立し、この測定手法を用いてガスケットの実使用時の各影響因子毎の劣化度合いを定量化し、初期ガスケット面圧値を理論的に設定するものである。またこの手法を応用しシリンダヘッドカバー締結部位・本数の最適化およびガスケット材料のシール信頼性確保のための方向性を明らかにしたので報告する。

ABSTRACT

Conventional method of measuring cylinder head surface pressure which uses pressure sensitivity paper is good only for qualitative analysis and therefore is not good for evaluating the durability of gaskets. Thus the two methods of measuring its surface pressure were developed to provide correct quantitative data which can be used to evaluate its sealability. Its initial surface pressure can be set up theoretically with the estimation of the deterioration of the gasket's performance caused by each influence factor during the actual operation. This approach is applied to choose the best gasket materials and the best position and number of bolts to fasten it.

1. まえがき

近年、乗用車のエンジンは高出力・高回転化が追求され、それに伴うエンジンオイル、エンジンルームの高温度によりガスケットの使用環境が厳しくなっている。また乗用車の保証期間延長によりガスケットの長期信頼性へのニーズも高まっている。

この課題を解決するために、ガスケットのシール性評価基準としてシリンダヘッド接触面に発生するガスケット面圧に注目したが、従来の感圧紙による面圧測定方法では定性的評価しかできず、またFEM解析を用いた評価¹⁾においても求められる面圧が推定値のため実使用環

境まで含めた評価手法としては不十分であった。本報告では、面圧評価の問題を解決するため、ひずみおよび電気抵抗検出法で定量的かつ動的に測定可能な2種類の面圧測定手法を確立した。この測定手法を用い実使用時のガスケット面圧挙動を実測し、各因子毎の影響度合いを明確にする事により実使用環境時の面圧劣化係数を定量化し、初期ガスケット面圧を理論的に設定する事を可能とした。

またこの手法を用いてシリンダヘッドカバー締結部位・本数の最適化およびガスケット用ゴム材料のシール信頼性確保のための方向性を提示する事が可能となったので報告する。

* 栃木研究所

2. ガスケットシールのメカニズム

2.1. シール構造

一般的に、シリンダヘッドカバー締結構造は、ヘッド内の飛沫エンジンオイルのシール性確保と動弁系各部品が発生するメカニカルノイズの遮音機能が要求されるため、締結・シール部ともゴム材料を使用したフローティング構造が多く採用されている。

乗用車用エンジンのガスケット部位およびゴム材料使用部位を Fig. 1 に示す。

2.2. シール機構

ガスケットにおけるエンジンオイルのシールメカニズムの概略を Fig. 2 に示す。ガスケット締結時、ボルト軸力によりヘッドカバー～シリンダヘッド間のガスケットによる反発弾性で面圧が発生し、エンジンオイルのシール性を確保している。

これを表すと式 (1) となる。

$$F_o = f_r + f_w \dots\dots\dots (1)$$

F_o : 締結荷重 (N)

f_r : 締結によるガスケット反発弾性力 (N)

f_w : 締結によるヘッドワッシャ反発弾性力 (N)

ここで、ヘッドカバーがフローティング構造を取っているため

$$f_r = f_w$$

となる。

式 (1) にて明らかなように、エンジンオイルをシールする力は全てガスケットおよびヘッドワッシャに使用されているゴム材料の反発弾性力によってのみ発生する事がわかる。

しかし市場における使用過程においてガスケット反発弾性力は、車の走行時に発生する熱によるガスケット材料の劣化および環境温度 (特に低温時) によるガスケット硬化現象によって低下する。このため、ガスケットに必要な面圧は、初期の面圧に対して先に述べたような劣化因子毎の低下係数を考慮しなければならず、シールに必要なガスケット面圧は式 (2) で表される。

$$P_n \geq P_o \times K_1 \times K_2 \dots\dots\dots (2)$$

P_n : シール必要面圧 (Pa)

P_o : 初期面圧 (Pa)

K_1 : 走行劣化係数

K_2 : 環境温度劣化係数

式 (2) よりシール必要面圧および各劣化係数が正確に把握されるならば初期面圧の設定が可能となる。

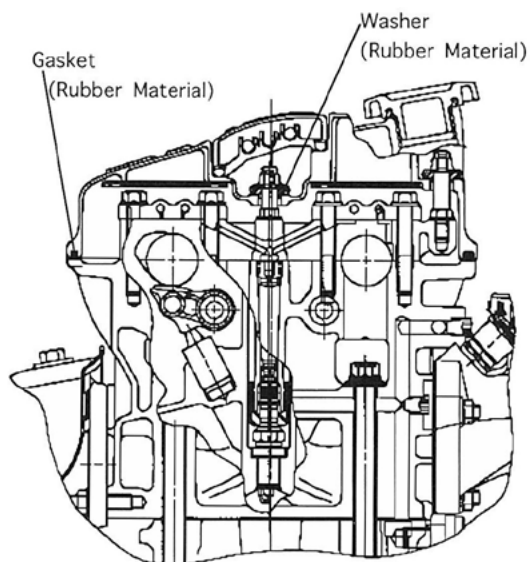


Fig. 1 Gasket Application of Engine

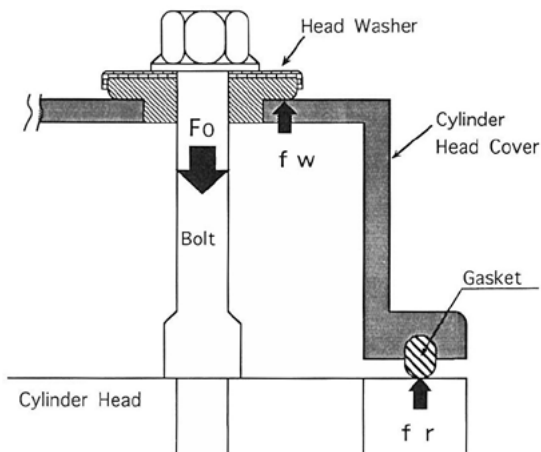


Fig. 2 Seal Mechanism

3. シール面圧測定手法

ガスケットの反発弾性力によってシリンダヘッド面に発生する面圧は、従来は感圧紙を用い測定していたが、この測定手法では締結過程における最大面圧のみしか確認できず、定性的評価に終わっていた。ガスケットの長期シール信頼性を評価するには、この面圧を正確にかつ動的に測定する必要がある。

以下に示す2種類の定量的ガスケット面圧測定手法を説明する。

3.1. ひずみゲージタイプ

Fig. 3 にひずみゲージタイプの構造概略図を示す。この手法は、ガスケットが発生する平均面圧を 30kHz の応答性で測定可能な手法である。この測定計器は本来流体（水、オイル等）の圧力を測定するために使用されて

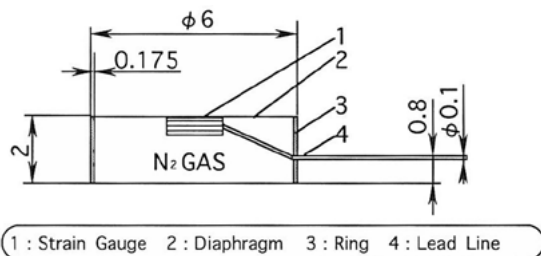


Fig. 3 Structure of Strain Gauge Type Sensor

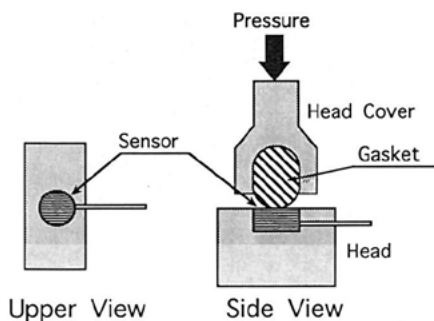


Fig. 4 Attachment of Strain Gauge Type Sensor

いるが、ガスケットに使用されるゴム材料も流体同様にゴム圧縮による面圧発生時にダイヤフラムを变形させることにより、ガスケット面圧測定への利用可能な事が確認された。ガスケット面圧測定時の使用例を Fig. 4 に示す。

この面圧測定手法によるガスケット面圧の計算値と実測値を Fig. 5 に示す。この結果より、測定器の構造上ゴム硬度が上がるに従って精度は悪化してくるが、通常ガスケット材として使用されているゴム硬度においては実用上問題ないと考える。

Fig. 6 に、実際のシリンダヘッドとガスケットを用いてひずみゲージタイプ面圧測定手法にて測定した結果を、ガスケット面圧値と測定部位にて示す。この測定は、全周で 22 ポイントの測定部位で実施しているが、図より各部位の面圧を定量的に確認できることが判る。

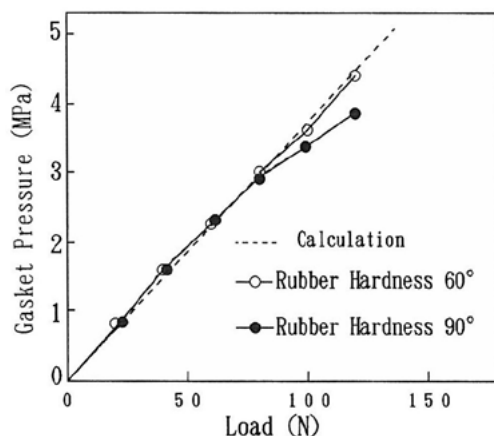


Fig. 5 Measure Correlation

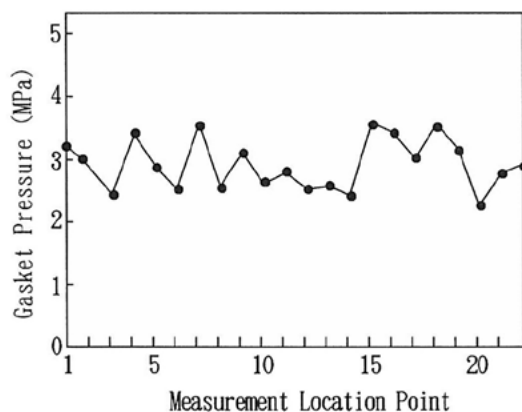


Fig. 6 Example of Pressure Measurement

3.2. 電気抵抗タイプ

センサ部の概略構造図を Fig. 7 に示す。この測定法は、圧縮力により上下2枚に設置されている電極が接触し、電気抵抗が変化することより面圧を検出する手法となっているため、面圧が3次的に確認でき接触範囲内の面圧分布の把握が可能である。先に述べたひずみゲージタイプと異なり、測定素子が 0.1mm と薄いフィルム状であり、折り曲げが自由なことから測定時の加工が不要となる、また屈曲部の測定が可能である。シリンダヘッド・ガスケット間測定時の使用例を Fig. 8 に示す。

電気抵抗タイプの測定精度を Fig. 9 に検出荷重と付加荷重として示す。この測定器は測定前に一定荷重におけるキャリブレーションが必要で、キャリブレーション

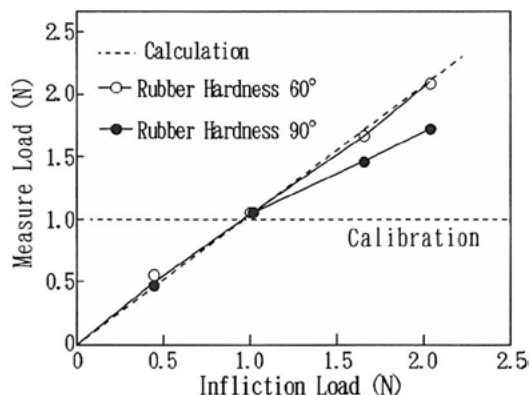


Fig. 9 Measure Correlation

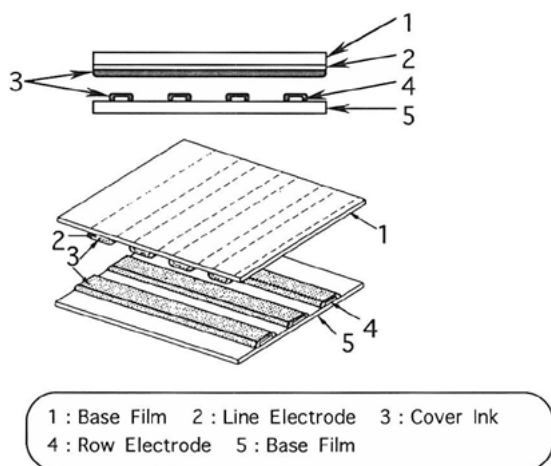


Fig. 7 Structure of Electric Resistance Type Sensor

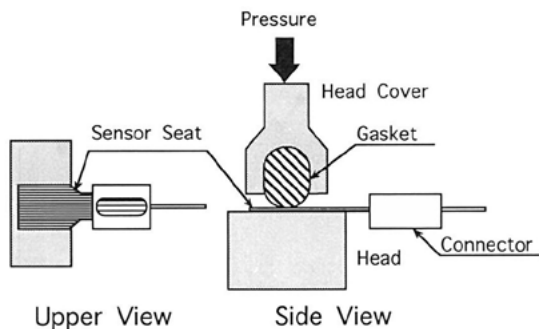


Fig. 8 Attachment of Electric Resistance Type Sensor

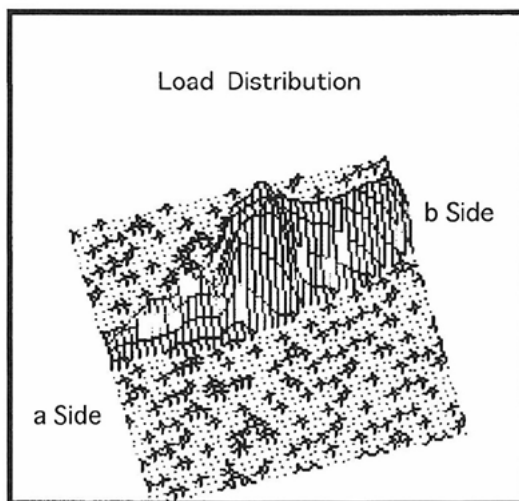
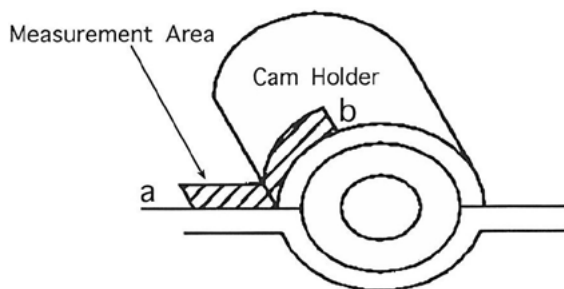


Fig. 10 Example of Pressure Measurement

近辺における測定精度は良いが、測定領域がキャリブレーションより離れる程測定精度が悪化するので注意を要する。

この測定器を使用した実際のガスケットにおけるカムホルダ部の屈曲部での測定結果を Fig. 10 に示すが、ガスケットの接触部における面圧分布がビジュアルに確認可能である。

本報告はこの2種類の面圧測定手法を用い、ガスケットの長期シール性保証の観点より、シール必要面圧の確認および各劣化因子毎の低下係数を明らかにして、初期設定面圧値を導き出す手法の検討を行った。

4. ガスケットのシール性に影響する主要因子

4.1. ガスケットの市場走行による劣化

アクリルゴムをガスケット材料として使用している市場走行車のガスケット回収を実施し、ガスケット圧縮永久ひずみを調査した。結果を Fig. 11 に車の走行距離との関係で示す。図より、アクリルゴムを用いたガスケットは市場走行 160000km とした場合、最大約 70% の圧縮永久ひずみを考慮しなければならない。また単体熱劣化テストに基づき熱頻度解析手法を用いて計算した結果を図中に示すが、市場回収品との良い一致が得られる事が確認された。このことより、市場走行劣化を単体熱劣化テストにて再現することが可能である。

4.2. 圧縮永久ひずみとガスケット面圧の関係

初期面圧の異なる2種類のアクリルゴムガスケットを用いて単体熱劣化テストを行い、ガスケット面圧と圧縮

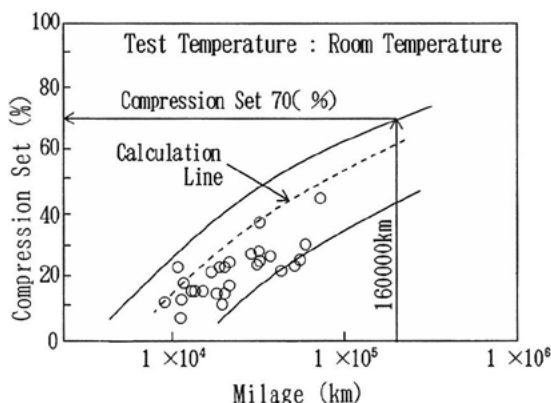


Fig. 11 Compression Set of Used Gaskets in Market

永久ひずみの関係を Fig. 12 に示す。この結果より、ガスケットの圧縮永久ひずみ 70% 時 (市場走行 160000km 走行相当) の面圧低下率は初期面圧の異なる2種類のガスケット共にほぼ同一の約 80% となることが判った。

4.3. 環境温度による面圧への影響

全世界における乗用車の使用環境を考えた場合、カナダ・北欧等の寒冷地区におけるガスケットのシール性も考慮しなければならない。現在ガスケット用ゴム材料として最も多用されているアクリルゴムは、耐熱特性は優れているが低温域でのゴム物性低下が大きく、低温時におけるガスケット反発弾性減少による面圧低下が懸念される。

Fig. 13 に、一般的に使用されているアクリルゴムでできている初期面圧の異なる2種類のガスケットを用い

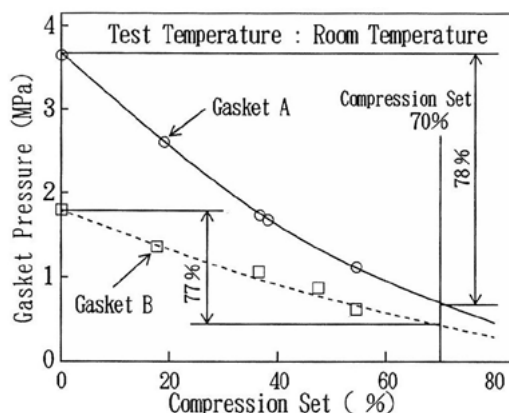


Fig. 12 Compression Set and Gasket Pressure

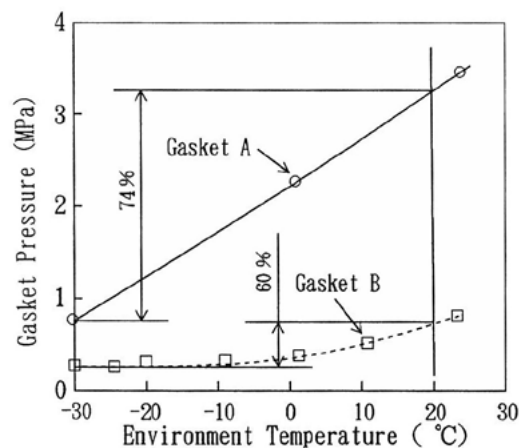


Fig. 13 Temperature and Gasket Pressure

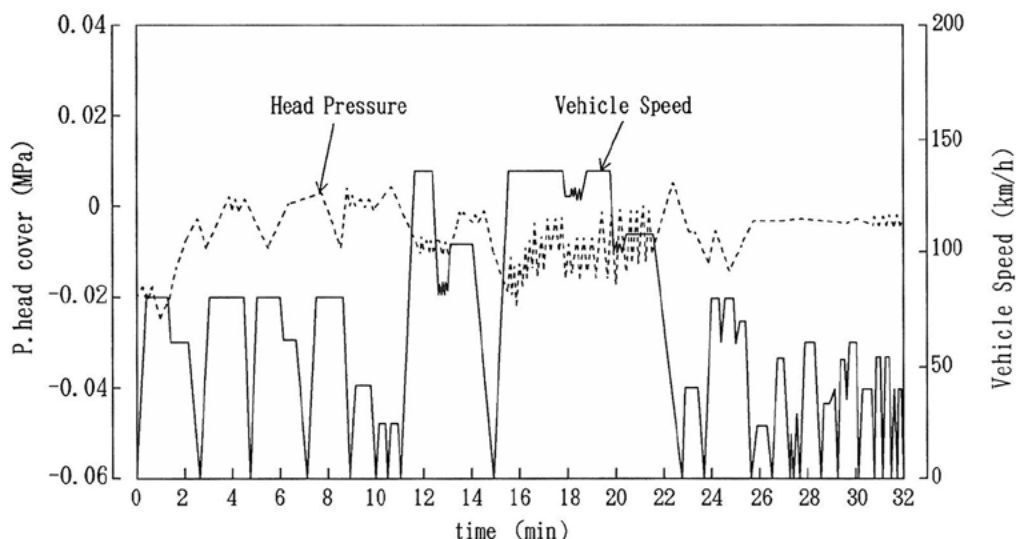


Fig. 14 Measurement of Head Cover Pressure

た、低温域での面圧変化を示す。この結果、低温域においてアクリルゴムの物性変化に伴う、室温からの面圧低下率が約 60～70% と著しい事が判明した。

寒冷地区での車の使用を考えるなら、走行劣化同様にこの面圧低下率も初期より考慮する必要があり、ガスケット材料としての耐熱性向上要求に加え、今後は低温域での物性向上も必要と考える。

4.4. ガスケットの必要シール圧力

ガスケットは、シリンダヘッド～ヘッドカバー間に使用されることより、ガスケットがシールすべき圧力は実車走行時に発生するヘッドカバー内圧力となる。このヘッドカバー内圧力を実測した例を Fig. 14 に示す。

実車走行時のヘッドカバー内圧力測定結果より、自然吸気車においては通常ヘッドカバー内圧力は負圧状態にあり、正圧は最大時においても 0.005MPa の発生しか認められない。したがってガスケットは、ヘッドカバー内圧力 0.005MPa に対してシール可能な面圧が必要となる。

ヘッドカバー内実車圧力測定結果に対して、ガスケットのシール最低必要面圧を導きだすためシール限界圧力を確認した結果を Fig. 15 に示す。2 種類の形状の異なるガスケットを用いてヘッドカバー内圧力を変化させ、洩れ限界面圧を測定した結果、形状の異なる 2 種類のガスケットにおいて圧力が大きくなる程シール限界面圧に差異が生じてくるが、実車における実使用環境時には同一の面圧値となる。

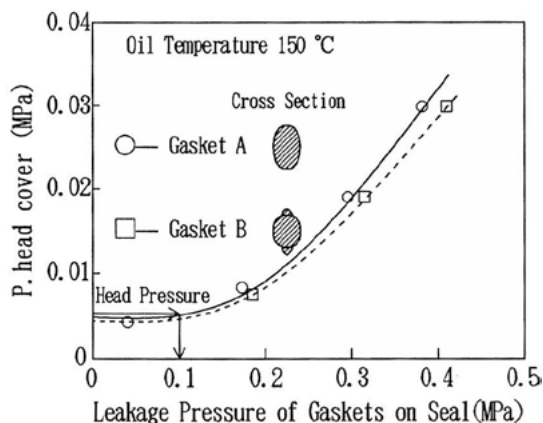


Fig. 15 Leakage Pressure of Gaskets on Seal

4.5. ガスケット必要面圧の設定

今まで検討してきた結果にて、ガスケット各劣化因子毎の劣化係数が明確になり、また実車ヘッドカバー内圧力に基づくシール必要面圧が明らかになった。以上のことより、シールメカニズムを表す式 (2) を用いて設計時のガスケット面圧設定が可能となった。

《面圧設定例》

- ・ 走行保証距離 : 160000km
- ・ シール必要面圧: $P_n = 0.1\text{MPa}$
- ・ 走行地区温度 : -10°C

を想定すると、Fig. 12, 13 より劣化係数は $K_1 = 0.2$, $K_2 = 0.5$ となり、式 (2) を用いる事により初期面圧 $P_o = 1\text{MPa}$ と設定できる。

5. 本評価方法を活用した ガスケット設計応用例

これまで報告してきた面圧評価手法を用いると、以下に述べるガスケット設計への応用が可能となる。

5.1. ガスケット面圧分布の均一化

従来の感圧紙を用いた面圧評価手法では、締結時ピーク面圧が表示されることから、面圧分布の実態を正確に把握することが困難であった。Fig. 16は、2.2ℓ直列4気筒エンジンのガスケット面圧分布を、ひずみゲージタイプを用いて測定した結果を示すが、ベースは面圧分布のバラツキがかなり大きいことが判る。カムホルダコーナ部のガスケット締代調整およびフロント側締代の向上により、かなり均一な面圧分布に改善された。このように、面圧測定手法を用いたガスケット締代の調整により面圧分布の均一化が可能となり、ガスケットのヘタリ性を改善しシール耐久信頼性を向上させることができる。

5.2. ヘッドカバー締結条件の設定

シール面圧測定手法を用いることにより、ガスケット面圧の均一化と共に締結仕様の最適化が図れ、部品点数の削減、設計レイアウトへのフィードバックが可能とな

り、エンジン仕様の合理化が図れる。

以下に締結仕様の検討を実施した例を紹介する。現行量産エンジン(2.2ℓ直列4気筒)のシール面圧分布を基準とし、締結本数・部位を変更した時の面圧変化率をひずみゲージタイプを用いて測定し Fig. 17 に示す。量産仕様の5本締結(②、③、⑤、⑥、⑦)から1本減らし4本締結(①、④、⑤、⑦)とし、締結部位をヘッドカバーの4隅に設定することにより、ガスケット面圧は量産仕様に対し一部を除き向上することが判明した。低下部位についてはヘッドカバー剛性の影響によるものと考えられるため、剛性向上を行えば面圧は改善可能である。よって、レイアウトが可能であれば4本締結にでも成立する可能性のあることが判った。

6. ガスケット用ゴム材料の評価手法 (低温特性)

ガスケットに用いるゴム材料に要求される材料物性としては、一般的に耐熱特性(特に、耐ヘタリ性)が重要視される傾向にあった。しかし、面圧の定量的評価手法の確立に伴い低温領域における面圧変化が予想より大きいことが判明し、ガスケット材料として必要な低温特性を評価可能なテストピースによる評価手法の確立が必要である。

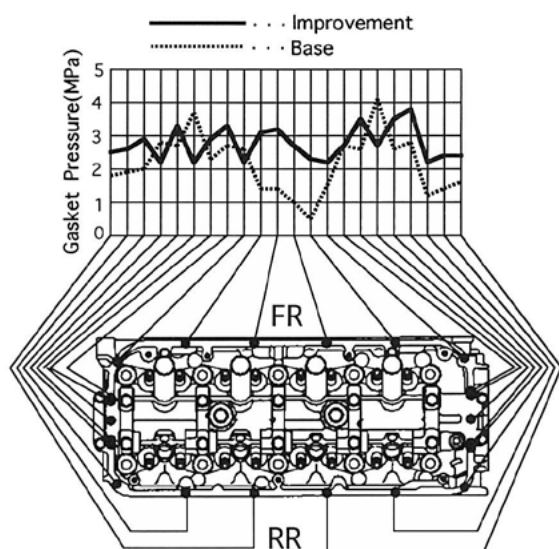


Fig. 16 Example of equalized surface pressure

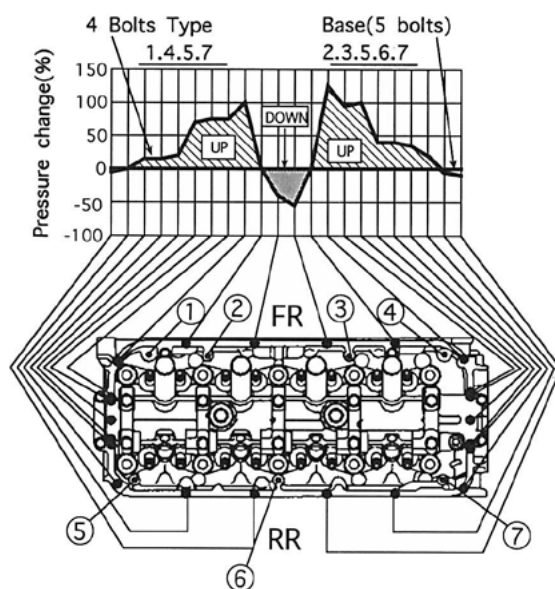


Fig. 17 Example of set up fastening condition

Table 1 Cold Character of Acrylic Rubbers

Material			Acrylic Rubber A	Acrylic Rubber B	Acrylic Rubber C
Item	Unit	Test Condition			
Cold Character					
Brittle Point	℃	—	- 2 4	- 3 9	- 3 9
Hardness in Cold	ΔHs	- 3 0 ℃×2 4 h	+ 3 4	+ 1 9	+ 3 2
Compression Set	%		8 8	3 8	9 3

6.1. 各種ゴム材料の低温時面圧低下

ガスケット用ゴム材料として適用可能な各種アクリル材を用いて、低温時の面圧変化を電気抵抗タイプ面圧測定手法にて評価した。今回評価を実施したゴム材料の一般的に評価される低温特性を Table 1 に示す。ゴム材料の低温特性を評価する手法は各種実施されているが、一般的にテスト手法が簡単なこともあり低温衝撃ぜい化温度が多用されている。

アクリルゴム A 材とアクリルゴム C 材の低温物性を比較すると低温衝撃ぜい化評価においてはアクリルゴム C 材が低温物性において -39℃ と優れていることとなる。しかし、Fig. 18 に示す様に室温より低温域における面圧低下率確認においては、アクリルゴム A 材とアクリルゴム C 材とは同等の低下率である事が判明した。このことから、低温衝撃ぜい化温度によるガスケット材料の低温物性の評価は、困難と判断される。しかし、表中に記載されている低温時のゴム硬度並びに低温圧縮永久ひずみ

はアクリルゴム材 A, B および C の低温域における面圧低下量との相関が確認され、ガスケット用ゴム材料の評価手法として適することが判った。

6.2. 今後のガスケット材料

今回の検討結果より、ガスケット材料は過酷な車の使用環境下においてシール面圧を保持するために、市場走行劣化における面圧低下抑制（耐熱ヘタリ特性の改善）および低温領域における面圧低下抑制（低温圧縮永久ひずみ、または低温硬度低下改善）の両面の特性向上が必要である。この 2 種類の特性を改善することによりガスケットの初期設定面圧を低く設定する事が可能となり、ガスケットのシール長期信頼性確保と動弁系放射音の遮音効果の両立が可能となる。

7. まとめ

高精度面圧測定技術を用いたガスケット評価方法により、従来の感圧紙による評価方法においては不可能であったエンジンオイルのシール性に影響を与える各因子毎の劣化係数が明確になり、これによりガスケット設計が簡素化され、またガスケットのシール長期信頼性確保が確実なものとなった。本報告にて明確になった事項を以下に示す。

- 1) ガスケットのシールに最も重要な要素となる面圧測定手法を、ひずみゲージ法、電気抵抗法の 2 種類確立し、従来手法では不可能であった定量的測定を高精度で可能とした。
- 2) 上記面圧測定手法の確立により、ガスケットのシール性に重大な影響を与える熱劣化と低温時面圧低下率を明確にした。その結果、シール長期信頼性保証を得るための初期設定面圧値が明確化され、テスト工数の大幅な削減を可能とした。

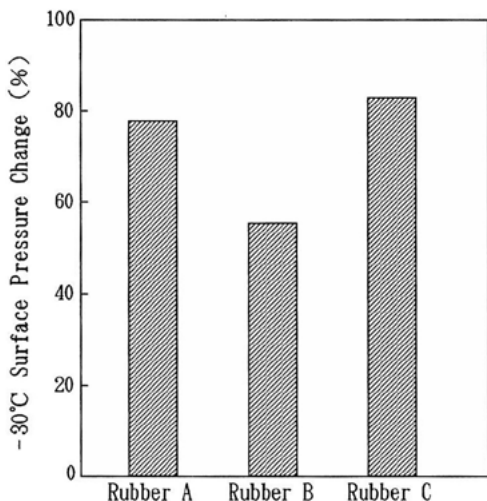


Fig. 18 Surface Pressure Change of Acrylic Rubber

- 3) 本評価手法の応用として、ガスケット設計においてガスケット面圧の均一化・締結本数の最適化・締結部位の最適化ができ、その結果部品点数の削減等によるコストダウンへの展開が容易となった。
- 4) 今回の検討結果より、ガスケット用ゴム材料としての今後の方向性、つまり耐熱ヘタリ特性の改善、低温圧縮永久ひずみおよび低温硬度低下改善の両面における具体的指標の提示が可能となった。

7. 参考文献

- 1) 田井中治、近藤貴之: ガスケットの長寿命化
— FEM を適用した高シール性ガスケットの設計 —
豊田合成技法 Vol.34 No.1 (1992) (27)

■ 著 者 ■



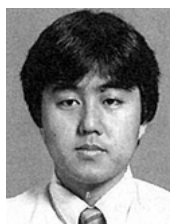
横山 和孝



櫻原 一雄



田中 征一



石垣 匠



安田 治郎



平塚 英治