

エンジンガスケット取り付け状態の AE 法による評価

多田 和希*, 結城 宏信**, 薬師寺正人***, 中島 大****

Evaluation of the Mounting Condition of Engine Gaskets Using Acoustic Emission Technique

Kazuki TADA*, Hironobu YUKI**, Masato YAKUSHIJI*** and Hiroshi NAKAJIMA****

Abstract

The Effects of the clamping force of the bolts of engine gaskets on acoustic emission (AE) signals caused by gas leaks from a cylinder were investigated in order to evaluate the gasket mounting condition. Leaks were caused by increasing the pressure of nitrogen gas injected into the cylinder. A proportional relationship was shown between the clamping force and the threshold pressure, the critical pressure for increasing the average signal level (ASL) of AE due to a leak, so that the clamping force could be evaluated based on AE monitoring. The threshold pressure was revealed to depend on the clamping force by application of a pre-clamping force on the gasket, while that indicates nearly a constant value for the gasket was shown without pre-clamping. It was also found that the increase ratio of ASL becomes larger by applying the pre-clamping force, and the coefficient of the relationship between the clamping force and the threshold pressure increases when using the gasket to apply the pre-clamping force. Therefore, the sealability of gaskets can be evaluated quantitatively by determining the coefficient of the proportional relationship.



Key Words

Acoustic emission, Engine gasket, Leakage, Clamping force, Average signal level

1. 緒言

エンジンガスケットは、エンジンシリンダ内から燃焼ガスがリークしないようエンジンヘッドブロックの気密性を保持するために用いられる自動車部品である。ガスケットの取り付け時に不具合の有無を確認するには、一般にエンジンヘッドブロックとガスケットのすきまに側面から発泡液を塗布し、シリンダの内圧を上昇させたときの気泡の発生を確認するという手法がとられている。しかし、目視に頼っているため、リーク発生のタイミングを正確に捉えることは難しく、発泡液の塗り方の影響も受けるため、結果に対する定量的な比較ができない。

アコースティック・エミッション (AE) 法は、タンクや配管からのリークの評価に有効であることが知られており、リークに伴う AE を計測することでリーク挙動を評価可能なことが報告されている^{1)~4)}。ガスケットからのリークにおいても連続型の AE が計測され、その平均信号レベル (ASL) に注目することで単位時間あたりのリーク量の評価が可能である⁵⁾。しかし、リークの発生や挙動を左右するガスケットの取り付け状態を AE パラメータから評価することについては議論されていない。

本研究では、実際の自動車用エンジンヘッドブロックを用いた模擬実験を行いガスケットを取り付けるボルトの締付け力の変化がリークに伴って発生する AE にどのような影響を与えるかを調べた。

2. 実験方法

Fig.1 に示す自動車用ディーゼルエンジンヘッドブロック (日野自動車, J05D) のシリンダからのリークに伴ってガスケットに発生する AE の計測を行った。本研究ではエンジンを作動させる燃焼ガスの代わりに Fig.2 に示すようにボンベから窒素ガスを注入することで実験を行った。

ガスケット (SUS304-CSP-H, 厚さ 0.5mm) はシリンダヘッドとシリンダブロックの間に挟み鋼製ボルト (M12 × 1.5 × 126, 頭部高さ 10mm) によって締め付けることによってシリンダの気密性を保持しているため、本研究では、ボルトの締め付け力を超音波ボルト軸力計 (萩原電気, M9000) を用いて指定の値に緩め、4つある内の 1つのシリンダに窒素ガスを内圧を上昇させながら注入していきリークを発生させた。なお、12MPa を超える内圧に上げる場合は昇圧機 (千代田精機, CH-N350) を介して注入を行った。

本研究では、Fig.3 に示したようにエンジンヘッドブロックの外壁面から 20mm 延長した部分があるガスケットを特別に用意して実験に用いた。このエンジンヘッドブロックにお



Fig.1 Overview of the engine head block used for the experiments

原稿受付: 平成 27 年 5 月 25 日 掲載決定: 平成 28 年 3 月 8 日

* 電気通信大学大学院 (東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)
Graduate School, The University of Electro-Communications

** 電気通信大学 (東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)
The University of Electro-Communications

*** エルリングクリング・マルサン (株)
(埼玉県比企郡小川町高谷 2452-17)
Elringklinger Marusan Corp.

**** 日野自動車 (株) (東京都日野市日野台 3-1-1)
Hino Motors, Ltd.

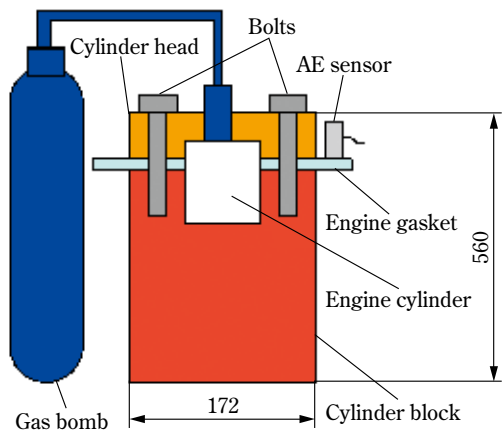


Fig.2 Schematics of the experimental setup



Fig.3 AE sensor attached on the gasket

いてガスケット上で計測したリークに伴う AE は、本研究と同等の範囲の実験条件では主に 100kHz ~ 200kHz 付近の周波数成分が含まれることが調べられているため⁵⁾、共振周波数 140kHz の AE センサ (富士セラミックス, AE144A) を用意し、ガスケットの延長部分に圧縮コイルばねを用いて約 3N で押し付けて取り付けた。センサの取り付け位置は、Fig.4 の No.1 と No.2 の位置である。AE 信号は、汎用 AE 計測装

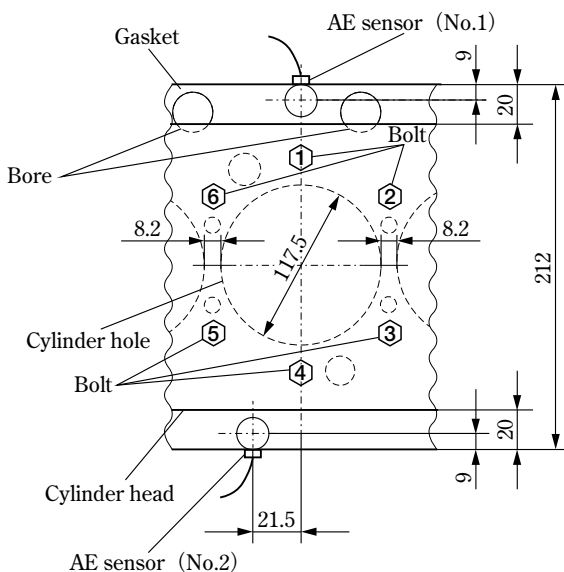


Fig.4 Location of the bolts mounting the gasket and the AE sensors

置 (Physical Acoustics, USB AE Node ; 内蔵プリアンプ利用 40dB, フィルタ通過帯域 20kHz ~ 1MHz) を用い、しきい値を 26dB に設定し記録した。

3. ボルトの締付け力とリークが発生する内圧との関係

ガスケットは、シリンダヘッドとシリンダブロックに挟まれた状態でボルトによって締め付けられているため、ボルトの締め付け力が変化すればリークの挙動が変化する。本研究で使用したエンジンヘッドブロックは Fig.4 に示すように 1つのシリンダの周りに 6本のボルトがあり、それらの締め付け力のわずかなばらつきによりリーク発生位置が変化してしまう⁶⁾。そこで、本研究では、図中の 1 ~ 3, 5, 6 番の 5本のボルトの締め付け力を Table 1 の Set 1 に示したように 29kN 付近に設定し、4 番のボルトの締め付け力だけを変化させた場合のリーク挙動の変化をはじめに調べた。

Table 1 Clamping force of each bolt

Bolt	Clamping force (kN)		
	Set 1	Set 2	Set 3
#1	28.6	33.5	40.5
#2	29.5	33.5	39.7
#3	29.7	34.8	40.8
#4	29.2	35.0	39.9
#5	28.6	33.5	39.9
#6	29.3	34.5	40.9
(Average)	29	34	40

ボルトの締め付け力が 28.8kN, シリンダ内圧が 12.2MPa の状態でリークが発生している時に Fig.4 中の No.2 の位置のセンサで計測した AE 波形の一例を Fig.5 に示す。連続型の AE が計測されており、リークに伴う AE であることが確認できる⁵⁾。ボルトの締め付け力ごとに ASL のシリンダ内圧に対する変化をプロットした結果を Fig.6 に示す。締め付け力 33.7kN の場合に ASL が一度ステップ状の上昇をしているが、これはシリンダ内圧を 12MPa 以上に加圧するときには作動させた昇圧機のノイズによるものである。Fig.6 からそれぞれの締め付け力におけるリークが発生し始める内圧 (以下リーク発生圧力と呼ぶ) を求めることができるので、締め付け力とリーク発生圧力との関係に整理したものが Fig.7 である。締め付け力 33.7kN の

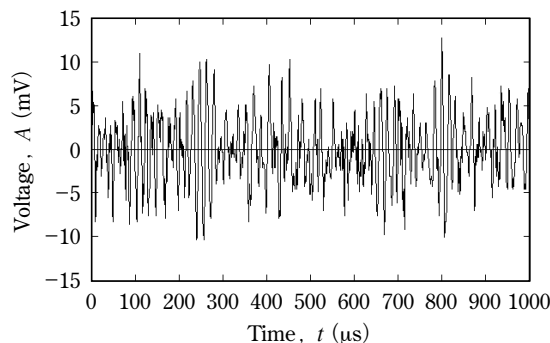


Fig.5 An example of the AE waveforms associated with leaks

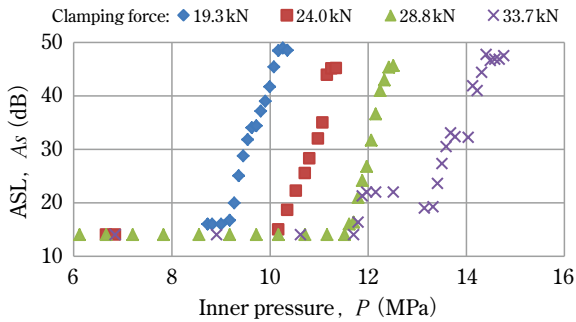


Fig.6 Relationship between the inner pressure of the cylinder and the average signal level (ASL) of AE in the case of varying the clamping force

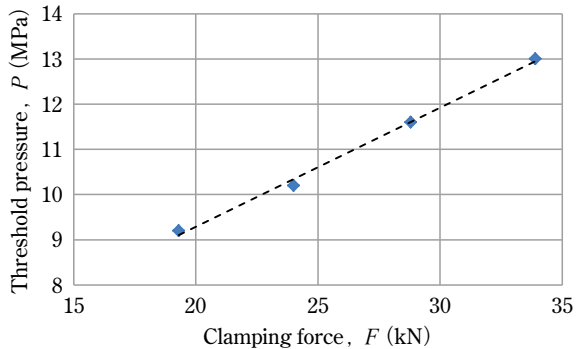


Fig.7 Relationship between the clamping force of the bolt and the threshold pressure

場合は昇圧機のノイズでリーク発生圧力を確認することができなかったため、内圧 13.5MPa 以上の変化を直線近似したものがノイズレベルと交わる点を用いた。両者の間には線形関係が見られ、その傾きは約 0.26kPa/N となっている。ガスケットによってシールされたシリンダ内の流体圧力は、リークが発生しない最低のガスケット締付け圧力と線形関係になることが知られており⁷⁾、この結果は妥当なものといえる。

Fig.8 は、シリンダ周りにある 6 本すべてのボルトの締付け力を Tabel 1 の Set 1 から Set 3 に示したように 29 kN 付近、34kN 付近、40kN 付近の三段階に変化させ、シリンダを挟んだ両側に配置した No.1 と No.2 の位置の 2 つのセンサで AE の計測を行った場合の結果である。一方のセンサでしか計測されていない AE もあったが、これは 6 本のボルトの締付け力のバランスが変化してリークの発生位置が片寄った結果、

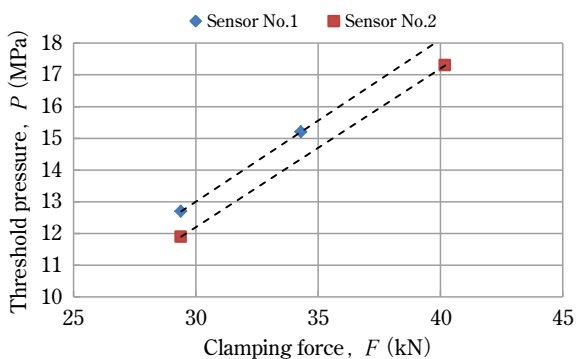


Fig.8 Relationship between the clamping forces of all bolts around the cylinder and the threshold pressure

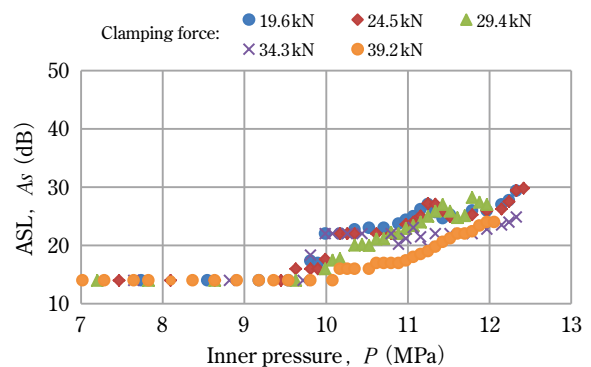
ガスケットを伝搬する AE が減衰してしまったためと考えられる。Fig.8 に示すように、どちらのセンサによる計測結果でもボルトの締付け力の増加に伴いリーク発生圧力が上昇する傾向が見られる。そこで、この場合にも Fig.7 と同様に両者の間に線形関係があるとするならば、その傾きは 0.50kPa/N とセンサの位置によらず同じ値となる。したがって、両者の間の関係は対象とするリークが同じであれば AE の計測位置には依存しないと考えられる。

これらのことから、ASL の変化に注目して求めたリーク発生圧力はガスケットを取り付けているボルトの締付け力と線形関係にあり、その関係を用いることで締付け力の評価が可能といえる。

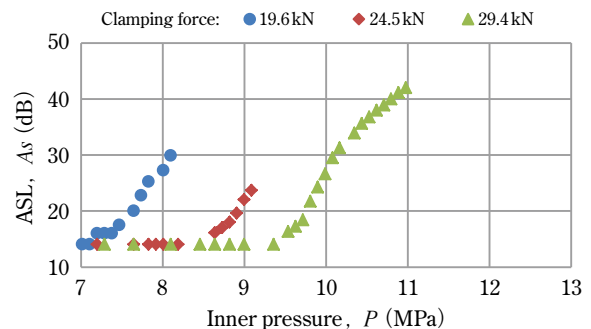
4. ガスケットに与える予荷重の影響

金属製ガスケットは一度大きな力で締め付け、エンジンヘッドブロック表面の微小な凹凸に沿って塑性変形させてから用いられる。この締め付けが不十分だと、ガスケット本来の性能が期待できずシール性が低下する⁷⁾。そこで、前章で用いたものとは別に未使用のガスケットを新たに用意し、それを 29kN 付近のボルト締付け力で取り付けした状態と、実際のガスケット取り付け時にあらかじめ与えるものと同等の 98kN の締付け力を与えてシール性を向上させたあと再び 29kN 付近に戻して取り付けした状態におけるリークに伴う AE を No.1 の位置のセンサで計測した。

ボルトの締付け力ごとに ASL の内圧に対する変化をまとめた結果を **Fig.9** に示す。大きな締付け力を与えずに取り付けた Fig.9 (a) では締付け力の変化に対しリーク発生圧力がほとんど変化していない。これは、ガスケットがヘッドブロック



(a) Before applying the pre-clamping force



(b) After applying the pre-clamping force

Fig.9 Relationship between the inner pressure of the cylinder and the average signal level (ASL) of AE

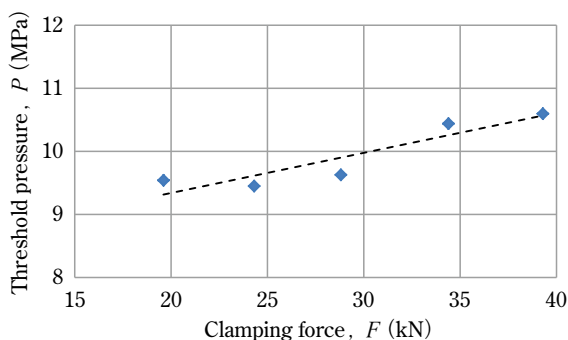
表面の微小な凹凸に密着していないため締付け力の小さな違いが結果に表れてこないためと考えられる。一方、一度 98kN で締め付けを行った Fig.9 (b) では締付け力が大きくなるとリーク発生圧力も大きく増加している。このことから、ガスケットに大きな締付け力を与えると、シール性に影響するガスケットの取り付け状態の良否の程度が大きく変化することが確認できる。

ところで、リーク発生圧力はリーク源とセンサの位置関係や計測系の感度によっても影響を受けるため、Fig.9 (a) と (b) より得られたリーク発生圧力の値をそのまま比較することは適当でない。そこで、ASLの増加の程度を比較した。Table 2 は Fig.9 における ASL の内圧に対する変化を線形近似した場合の傾きを調べた結果である。ガスケットを高荷重で締め付けることにより塑性変形させると、ASLの内圧に対する増加率の値が大きく上昇することがわかる。ただし、その値は締付け力によっても変化しているため、オーダの違いのみに注目することが適当であろう。

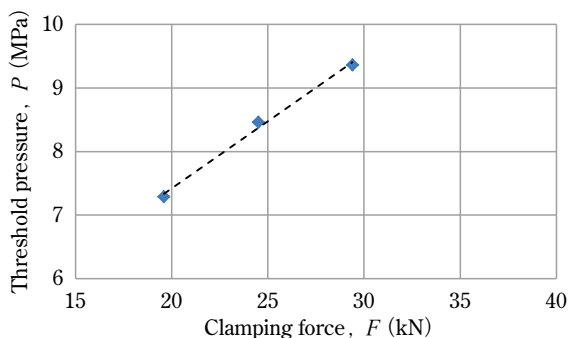
さらに、リーク発生圧力の絶対値によらない評価を行うため、締付け力との関係に注目して比較した。Fig.9 より読み取ったリーク発生圧力を締付け力との関係に整理したものが Fig.10 である。リーク発生圧力は Fig.7 と同様に締付け力

Table 2 Relationship between the clamping force of the bolt and the increase of ASL

Clamping force (kN)		19.6	24.5	29.4
Increase of ASL (dB/MPa)	Before applying the pre-clamping force	3.5	3.3	5.4
	After applying the pre-clamping force	21.4	19.3	27.3



(a) Before applying the pre-clamping force



(b) After applying the pre-clamping force

Fig.10 Effects of the pre-clamping force on the relationship between the clamping force of the bolt and the threshold pressure

に対して線形に変化しており、その傾きは、大きな締付け力を与えていない Fig.10 (a) の場合が 0.06kPa/N なのに対し、98kN で締め付けを行った Fig.10 (b) の場合は 0.21kPa/N と大幅に増加している。したがって、この傾きによってエンジンヘッドブロックとガスケットの密着の程度を評価できるといえる。

これらのことから、ボルトの締付け力を意図的に変化させてリークに伴う AE を計測し、リーク発生圧力と締付け力の関係の傾きを調べることで、ガスケットのシール性に影響するガスケットの取り付け状態の良否の程度が定量的に議論可能といえる。ただし、エンジンヘッドブロックの種類やガスケットの厚さ・材質などが異なるものどうしの比較ではなく、同一条件のガスケットの取り付け状態の比較に適用すべきことに注意が必要である。

5. 結言

本研究では、エンジンガスケットの取り付け状態を AE 法によって評価することを目的に、ガスケットを取り付けているボルトの締付け力がリークに伴う AE に与える影響を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) AE の平均信号レベルの変化に注目して求めたリークが発生し始めるシリンダ内圧はガスケットを取り付けているボルトの締付け力と線形関係にあり、その関係を用いることで締付け力の評価が可能である。
- (2) リークが発生し始めるシリンダ内圧と締付け力の線形関係の傾きを調べることで、ガスケットのシール性に影響するガスケットの取り付け状態の良否の程度が定量的に議論可能である。

参考文献

- 1) 神谷篤志, 諸藤浩一, 江沼数志, 山田 實, 湯山茂徳: 工水タンク模擬漏洩による AE の定量的評価に関する研究, 圧力技術, 40(4), pp.228-236, (2002)
- 2) 明松圭昭, 吉田憲一, 坂巻清司, 堀川敬太郎, 西川充洋: ガス漏洩時の AE 特性に及ぼすピンホール形状およびガス圧力の影響, 非破壊検査, 51(7), pp.432-437, (2002)
- 3) 鈴木哲也, 大津政康, 青木正雄, 中村良太: 老朽化 PC 管路の非破壊モニタリングに基づく漏水現象評価, 構造工学論文集 A, 53, pp.766-773, (2007)
- 4) R. N. Laodeno, H. Nishino and K. Yoshida: Characterization of AE Signals Generated by Gas Leak on Pipe with Artificial Defect at Different Wall Thickness, Materials Transactions, 49(10), pp.2341-2346, (2008)
- 5) 竹内勇貴, 結城宏信, 薬師寺正人, 中島 大: エンジンガスケットにおけるリークの検知と挙動評価への AE 法の適用, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, No.13-8, OS1814, (2013)
- 6) 多田和希, 結城宏信, 薬師寺正人, 中島 大: リークに伴う AE の計測によるエンジンガスケット取り付け状態の評価, 日本設計工学会 2014 年度秋季大会研究発表講演会講演論文集, pp.55-58, (2014)
- 7) 岩浪繁蔵, 近森徳重, 藤島則夫: パッキンとシールの設計, オーム社, (1965)