

シリンダヘッドガスケットにおけるボア間のガス漏れ対応

高 行男・宇田川恒和

1. はじめに

シリンダヘッドガスケットは、エンジン運転時に生じる高温・高圧の燃焼ガス、潤滑オイルおよび冷却水を共にシールし、エンジンの性能維持に重要な役割を果たす部品である。エンジンの性能維持を妨げる代表的事例がガス漏れである。ヘッドガスケットは、シリンダヘッドとシリンダブロックの間にボルトによって締結され、シリンダボア周囲にガス漏れ防止を行うシール面圧を発生させるが、シール面圧が適正でないと、ガス漏れなどシーリングに不具合が生じる。特に問題となるのは、シリンダボア間のガス漏れである。

前報¹⁾では、最大燃焼圧力の上昇とエンジンの低剛性化が進む中で、シリンダボア間部からのガス漏れが顕著に見られるようになった要因として、アルミヘッドの低剛性に起因するヘッド下面のたわみとボア間の波状変形の増加によるシール面圧の低下があり、剛性が弱いとボアシール面圧の不均等化が増幅されることを明示した。

自動車エンジン用ヘッドガスケットとして、主流となっている金属積層形ガスケットのガス漏れ対応は多岐にわたるが、その認識度は低い。そこで本稿では、金属積層形ヘッドガスケットがエンジン高性能化に伴うガスシール環境の悪化にどのように対応しているかの概要を述べるとともに、主なガス漏れ箇所であるシリンダボア間のガスシーリングの構築における具体的な面圧補強の対応例を紹介する。

2. エンジン高性能化によるシール環境の悪化

エンジン高性能化によりヘッドガスケットのシーリングは厳しい環境に直面する。その主因は、エンジンの高出力化に伴う燃焼圧力の上昇と軽量指向に伴う低剛性化である²⁾。これらの要因はガスケットのシール環境を悪化させ、ガス漏れなどシーリングに支障をもたらす。ガス漏れは従来からヘッドガスケットのシーリングにおいて重要な課題の一つであるが、エンジンの高性能化に伴って潜在していたシーリング構築の弱点が露呈する。

燃焼圧力上昇について見ると、燃焼圧力上昇によりヘッドリフトが増加するため、ガスケットのガスシール部に作用する繰り返し衝撃荷重が大きくなり、クリープ・リラクゼーション（へた）りは促進され、ガスシール面圧が大きく低下する現象がある。つまり、燃焼圧力が上昇すると、

ガスシール性は急激に悪化し、ガス漏れを起こしやすくなる。

図1には、燃焼圧力上昇に関連するガス漏れ事例として、中型ディーゼルエンジン（6.5 L, 6 Cyl. ボルト締め付け力118 kN/本）のターボチャージャの有無によるガスシーリングの様子を示した。同一の金属積層形ヘッドガスケットを使用し、冷熱サイクル条件におけるダイナモ試験（台上試験、運転パターン4/4負荷、3000rpm）を行った結果である。供試エンジンにおいて、ターボ機関の最大燃焼圧力は12 MPa、ノンターボ機関の最大燃焼圧力は10 MPaである。

図示のように、試験過程のヘッドボルトの軸力を25時間ごとに計測するとともにガス漏れの様子を調査した結果では、ノンターボ機関は300時間運転してもガス漏れはなかった。一方、ターボ機関では120時間頃から気泡が確認され、時間の経過に伴って漏れ量が急激に多くなり、試験を中断している。ターボ機関のガス漏れ発生時のヘッドボルトの軸力低下率は、ノンターボ機関では約30%であるのに対し約70%に達している。

エンジンの軽量化に関して見ると、エンジンの軽量化に伴う低剛性化は、ガスケットシーリングに大きな支障を与えるが、特にシリンダヘッドの低剛性化の影響が大きい。前報¹⁾で述べたように、ヘッドの剛性はガスケット装着時の発生面圧に深い関係がある。つまり、ガスケット装着時のヘッド下面の変形がシール面圧を不均等化する。主な変形の一つはヘッドの長手方向に生じ

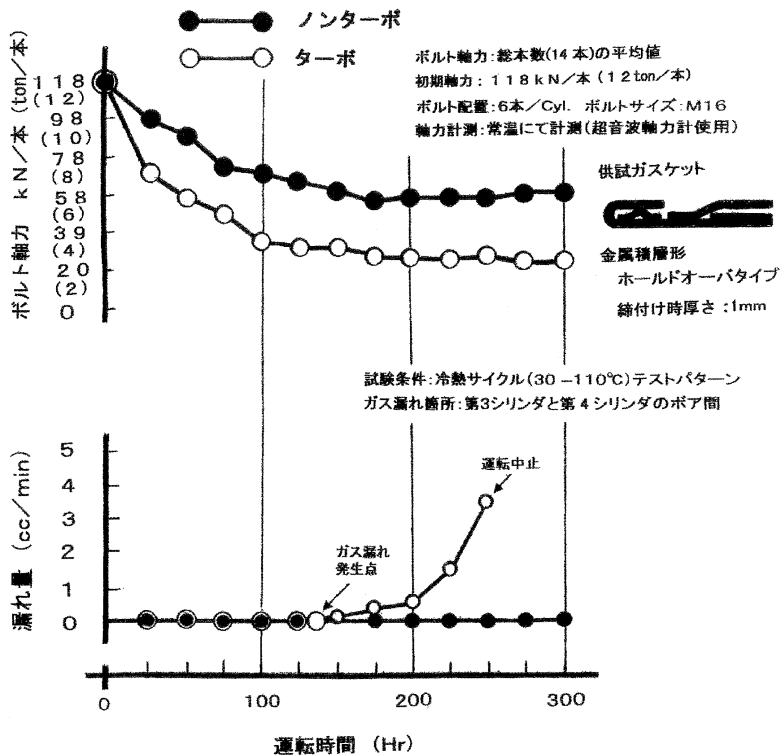


図1 最大燃焼圧力の上昇によるガス漏れ事例

るたわみであり、今一つはヘッドの構造（リブの配置, 大きさ）による部分的な剛性の違いによって生じるシリンダ周囲の波状の変形である。これら二つの変形の相乗によって、シリンダボア間の低面圧がもたらされる。この現象はアルミヘッドのような低剛性ヘッドで顕著に現れる。

3. シール環境悪化に対する金属積層形ヘッドガスケットのガスシール対応

金属積層形ヘッドガスケットのシール条件に対する広範囲な対応性は、このガスケットが持つ積層構造にある。その構成は薄いステンレス鋼板（板厚0.2-0.35mm）を必要に応じて2-5枚積層し、所要の鋼板にビードと称される凸または凹形状の突起が加工されているが、各積層板の材質や板厚、ビードの高さ、幅、断面構造、ビードの個数やその組み合わせなどにより、ガスケットの機能に必要な圧縮・復元性の高低をシール条件に合わせて調整できる。

図2には、エンジン高性能化の進展に伴うシール環境の悪化に対応するため、金属積層形ヘッドガスケットにおいて検討されているガスシーリングの概要を示した。図示のように、ガスシーリングには多岐にわたる課題があり、ガス漏れ対策は単純でない。

3.1 エンジン高燃焼圧力化に対するガスシール対応

エンジン運転時、シリンダヘッドは燃焼圧力により上に押し上げられる。この現象は、ヘッドリフトと称されるが、シール面圧を低下させ、シーリングの悪化をもたらす³⁾。

その対応の概要を以下で述べるが、内容が若干多岐にわたる。そこで、ヘッドリフトによるシール面圧低下に対するガスケットの復元性の改善策とガスシール部傾斜軽減対策の内容は次章の4

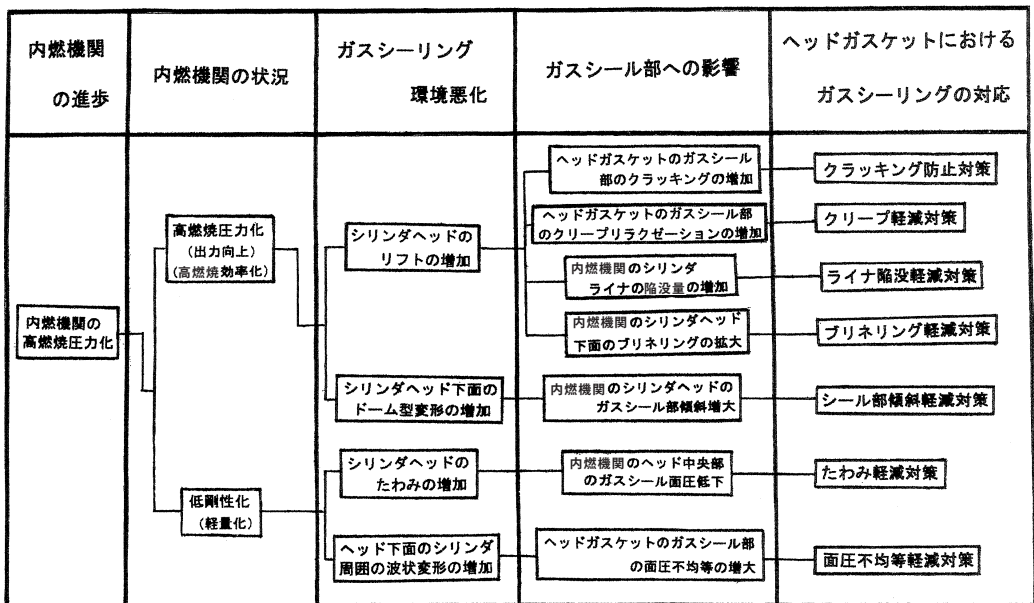


図2 エンジン高性能化によるシール環境悪化の因果関係とその対応

章で述べ、5章で面圧不均等軽減対策としてシリンダボア間のガス漏れ対策の具体例を紹介する。

(1) ガスケットのガスシール部のクラッキング

エンジン運転中、シリンダヘッドは燃焼圧力により垂直方向に繰り返しリフトするため、ヘッドガスケットは繰り返し衝撃荷重を受けることになる。燃焼圧力が上昇すると、ヘッドリフトは大きくなるので、繰り返し衝撃荷重の作用が強力になり、ガスケットは大きなダメージを受ける。その一つがシリンダボアシール部(ガスシール部)のクラッキングである。従来、ヘッドガスケットのクラッキングによる支障例は少なかったが、近年ディーゼルエンジンにおいて燃焼圧力の上昇に伴って顕在化した問題である。

クラッキングは疲労により生じるので、一瞬にしてできることは少ない。クラッキングが生じると、高温、高圧の燃焼ガスがガスケット内に浸入し吹き抜けるため、ガスケットのガスシール部が損傷されて破損に至る。つまり、クラッキングが生じると、ガス漏れ量が急激に増加するためシーリング上致命的な問題となる。

ガスシール部のクラッキングは、図3に示すように、積層構造に起因する応力集中箇所から生じる場合が多いので、その緩和構造を採用してクラッキングを防止する。

(2) ガスケットのクリープ・リラクゼーションの促進

前章の2章で述べたように、燃焼圧力が上昇してヘッドリフトが増加すると、ガスケットのガスシール部においてクリープ・リラクゼーション(へたり)が促進され、シール面圧は大きく低下する。

金属積層形ヘッドガスケットは、従来のメタルコア・グラファイト形ガスケットに比べクリープ・リラクゼーションは少ない特性を持っているが、昨今の高性能エンジンにおいてはその改善がさらに求められる。

金属積層形ガスケットにおいて、クリープ・リラクゼーションの主要因としてビードとコーティング膜の二つを挙げることができるが、ガスケットの構成材において非金属材料であるコーティング膜(フッ素ゴム系)は、マイクロシールの達成に必要不可欠のものである⁴⁾。

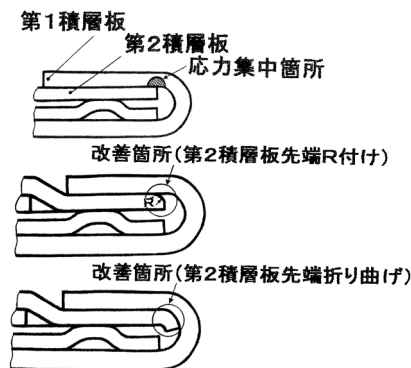


図3 ガスケットのガスシール部のクラッキング対策

そこで、コーティング膜をシールに必要な部分（シール穴の周囲）のみに施す。その一例を図4に示すが、従来行われているガスケットの全面コーティングを部分コーティングに変更してコーティング材の絶対量を削減してクリープ・リラクゼーションを抑制する。図示した部分コーティングにおけるボルト軸力の低下は、全面コーティングの場合に比べ30%程度少なく、クリープ・リラクゼーションの抑制効果を示す結果が得られている。

(3) シリンダライナの陥没

シリンダにライナが挿入されているエンジンにおいて、エンジンの運転によりライナが陥没する現象がある。陥没量が $20\mu\text{m}$ 程度になるとシール性が急激に悪化し、ガス漏れの恐れがある⁵⁾。陥没の程度はエンジンの種類、ライナの形式および挿入方法、シリンダブロックの材料などによって異なるが、特にライナ頭部とトップデッキが平坦に仕上げられている小型エンジンでは、ガスシーリングに及ぼすライナの陥没の影響は大きい。

ライナの陥没要因は種々あるが、ガスケットのガスシール部に面圧を集中すると、ライナの陥没が大きくなる傾向がある³⁾。そこで、図5に示すように、ガスケットの高面圧部がシーリングに支障のない程度にライナ（スリーブ）頭部にかかる領域を小さくし、ライナの陥没を軽減する。

(4) プリネリング

プリネリングは、エンジンの運転によりガスケットの高面圧部（ガスシール部）が接触するヘッド下面やブロック上面（トップデッキ表面）にできる圧痕（くぼみ）である。

通常、プリネリングはシリンダヘッド下面に発生するケースが多く、ガスケットのガスシール部に面圧を集中すると、プリネリングが発生する可能性が高くなるとともにその深さも増加する。エンジンのサイズなどにより状況は異なるが、 $20\mu\text{m}$ 程度の深さになるとガス漏れの恐れがある³⁾。

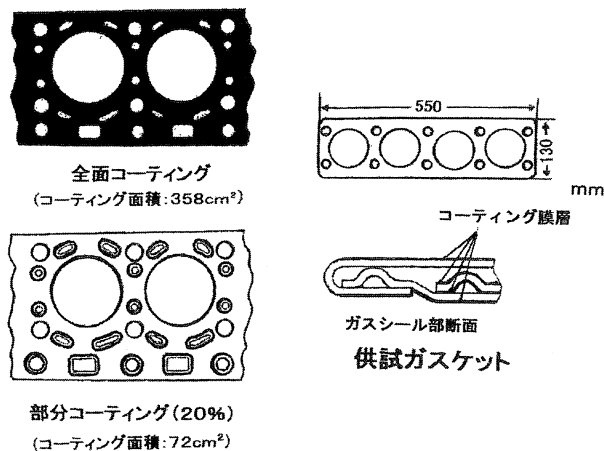


図4 ガスケットのコーティング方法によるクリープ・リラクゼーション対策

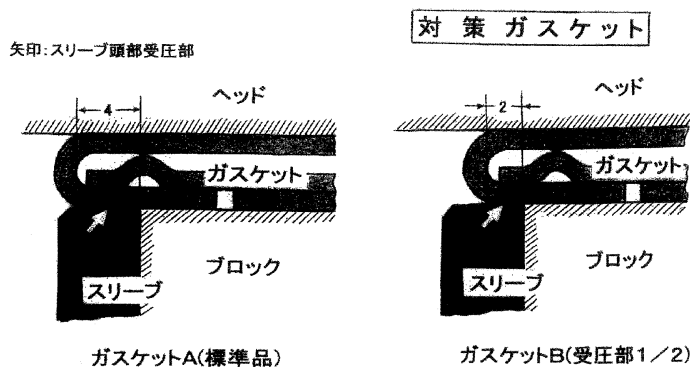


図5 シリンダライナ（スリーブ）の陥没対策用ガスシール部の一例

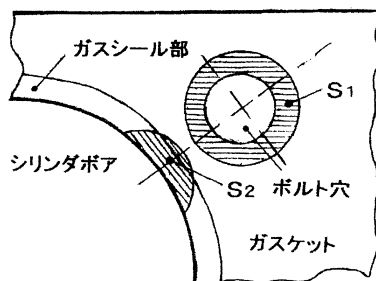


図6 ガスケットのボルト穴周囲の面圧調整による隣接ガスシール部の面圧軽減対策

その対策として、プリネリングはシリンダ周囲においてボルト近傍の筒所が深くなるので、図6に示すように、ガスケットのボルト穴周囲の面圧（図中 S_1 ）を適度に強めて隣接するガスシール部の面圧（図中 S_2 ）を適度に抑え、プリネリングの深さを抑制する。

面圧の強め方は、ボルト穴にグロメット（環）を嵌め込む方法や積層板の上板または下板を折り返し、平坦部との積層段差を設ける。所要形状の板をボルト穴近傍にレーザ溶接して積層段差を設ける方法もある。ボルト穴周囲の面圧を強めすぎると、隣接部のガスシール部の面圧は低下し、シール性に影響を及ぼすので注意を要する。

3.2 エンジンの軽量化に伴う低剛性化に対するガスシール対応

エンジンの軽量化に伴い低剛性化が進行する。低剛性化によるシリンダヘッド下面の変形の増加は、ガスシリングの支障の要因になるが、中でもヘッド下面のたわみの増大とシリンダ周囲の波状変形の増加は大きな問題になる。ここでは前者のたわみ対策について述べ、後者の波状変形に関する内容は5章で述べる。

シリンダヘッドの長手方向に生じるたわみは、ヘッドの剛性（アルミヘッドか铸铁ヘッド）やヘッド長さ、ガスケットの厚さなどにより異なり、シール面圧に影響を与える。例えば、両端部シリンダのガスシール性は良好であっても、たわみにより中央部シリンダのガスシール面圧が不十分になり、中央部のシリンダボア間でガス漏れが生じる事例がある。

その対策として、図7に示すように、ガスケットの長手方向の両端部（たわみ対策ゾーン）に圧縮抵抗構造を設け、両端部の圧縮性を抑制してヘッドのたわみを軽減する。つまり、両端部シリンダと中央部シリンダのシール面圧の違いを少なくする。

圧縮抵抗構造には、ガスケット両端部のたわみ対策ゾーンにおいて積層板厚を平坦部より若干厚くするかビードをつけ、その部分の圧縮抵抗を強くしてシリンダヘッドのたわみを抑制する構造など、いくつかのタイプがある。両端部の抑制を強めすぎると、近傍のボアシール部のシール性に影響を及ぼすことがあるので注意を要する。程度の差はあるが、図示した圧縮抵抗構造（図

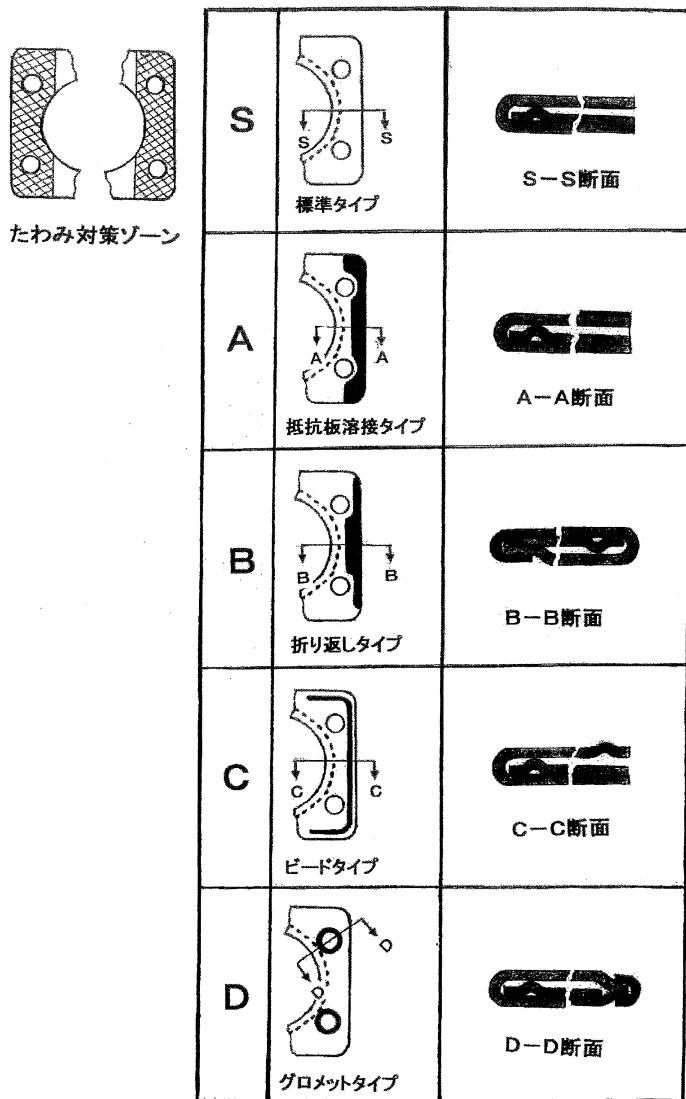


図7 シリンダヘッドにおけるたわみ補正の実施例

中 A-D) を設けたガスケットは、標準タイプのガスケット (図中 S) に比べ、たわみ補正の効果を有する⁶⁾。

4. シリンダヘッドのリフトとドーム型変形対策

従来、ヘッドガスケットのガスシーリングの構築には、装着部は変動しないあるいは変動してもシールには影響を与えないことを前提としている。つまり、ガスケットとは静止面の密封に用いられる固定用シールを意味し、運動面の密封に用いられる運動用シール (パッキン) と区別されている⁷⁾。しかし、エンジンによっては、高燃焼圧力化によるヘッドリフトの増加やドーム型変形によるシール部の傾斜など、ガスケット装着部の動的変化を考慮したシーリング構築が求められる。

4.1 ヘッドリフト対策

燃焼圧力の上昇によりヘッドリフトが増加すると、シール面圧の低下をもたらすので、ガス漏れが生じやすくなる⁸⁾。ヘッドガスケットのガスシール部は、その復元機能でヘッドのリフトに追従してシールを保持するので、ヘッドリフトが大きいエンジンでは、リフト時の追従性不足が問題となる。

ガスケットの復元性 (追従性) の向上を図る有効な手段は、ビード板 (ビードを付けてある鋼板) にばね鋼を用いてビードの復元性を高めることである。しかし、従来使われているステンレスなまし鋼板をステンレスばね鋼 (フルハード) にする方法では、ビード部にクラッキングが生じやすい。そこで、ばね性は若干劣るが、フルハードのばね鋼 (4/4 H) より若干軟質の 1/2 H や 3/4 H の材質のものが検討された。

検討事例の一例として、ビード板の材質によるヘッドリフト時のガスシール性について調査した結果を図 8 に示す。試験に用いたガスケットは、4/4 H、3/4 H、1/2 H、0 H の材料をビード板に使用した 1 シリンダの試験用ガスケットである。試験では、1 シリンダ用のダミーヘッドとブロックによってヘッドリフトと内圧の関係を求めた後、水槽を利用してガス漏れを調査した。ガス漏れの調査には、ガスケットの両面にマイクロシールコーティングを施し初期のシール性を確保し、ガスケットのシリンダボアに 4 条件の内圧 (12, 14, 16, 18 MPa) を加圧する。そして、それぞれの加圧条件においてガスケットの取り付け箇所から最初の気泡が確認された時点をシール限界とする。

図示のように、どのガスケットも内圧が高くなるに従ってヘッドリフトが増加するので、シール性 (シール限界) は低下する傾向が認められるが、ばね性の高い鋼板を用いているガスケットほど低下は少ない。つまり、ばね性が最も高い 4/4 H 鋼板を用いたガスケットの追従性が最も優れている。クラッキングの問題を考慮すると、1/2 H 鋼板のビード板の選定が、従来の 0 H 鋼板 (なまし鋼板) のガスケットに不足していたヘッドリフト時のシール性の改善に役立つものと考えられる。

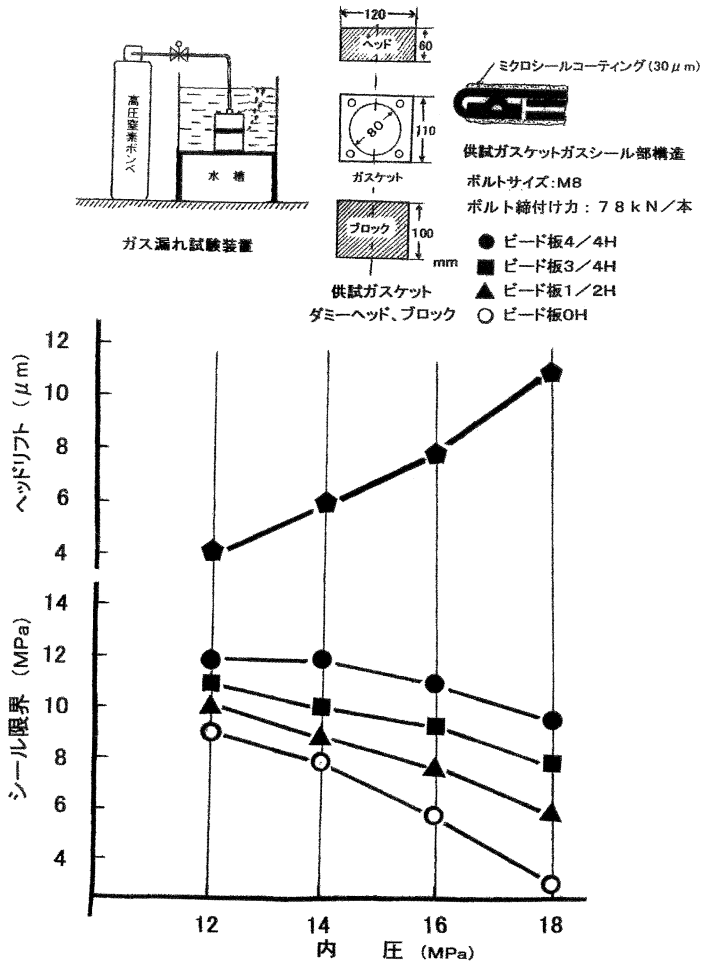


図8 ビード板の材質によるヘッドリフト時のガスシール性

4.2 ドーム型変形対策

ガスケットのシーリング構築には、シール面（ガスケット装着面）は水平であると考えるのが通常であるが、燃焼圧力の上昇により生じるヘッドのドーム型変形によるガスシール部の傾斜についても留意する必要がある。ガスケットのガスシール部は、通常シリンダボアの縁から3-5mmの幅でボア周囲にメインシール帯（1次シール部）が形成されているので、シール部の傾斜が大きくなるとガスシール性に影響を及ぼす。

図9には、小型ディーゼル（2 L, 4 Cyl.）のエンジンブロックに対し、燃焼圧力上昇によるガスシール部の傾斜について調査した結果を示した。試験にはシリンダヘッド（アルミ製）、ヘッドガスケット、ヘッドボルトは実機の標準品を用いたが、シリンダブロックは鋳鉄製のダミーブロックである。その外形は概略シリンダヘッドに合わせた直方体（130×530×300mm）で、シ

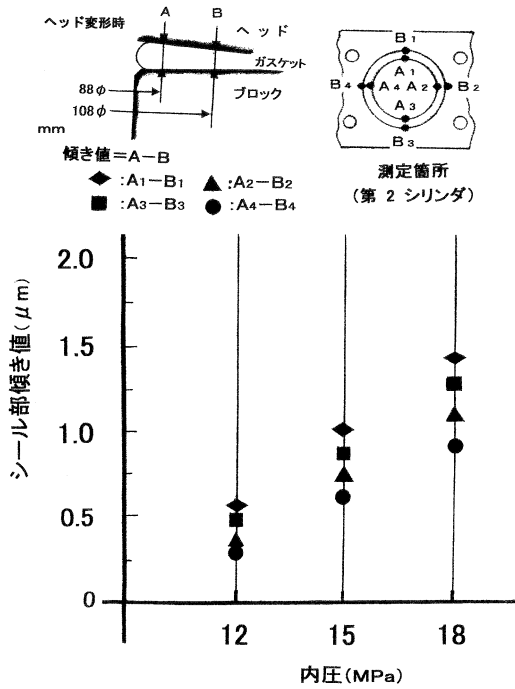


図9 内圧上昇によるガスシール部の傾斜

リンダヘッドのボルト位置に合わせてボルトのねじ穴そしてリニアゲージの計測用穴が設けてある。

リニアゲージ使用によるガスシール部傾斜測定の詳細を図10に示す。図中、シリンダに該当するA円周上(A₁ - A₄)とその外側のB円周上(B₁ - B₄)のシリンダヘッド下面の変形を計測し、その差をシール部傾き値と称する。本試験では測定対象に第2シリンダを選択し、直径88mmのA円周上と直径108mmのB円周上に等間隔で4箇所のシール部傾き値を計測してその平均値を求めた。

図示のように、最大燃焼圧力を想定した3条件の内圧(12, 15, 18 MPa)をヘッドの第2シリンダの噴射ノズル用穴から窒素ガスを加え、シール部傾き値を求めた結果は、内圧の上昇に伴い傾斜が大きくなることを示している。

ガスシール部が傾斜することを考慮した新たなガスシーリングの構築は、2次シール部の面圧を強化してシール幅を広く設ける考え方である⁹⁾。ガスシール部が水平であることを前提としている従来のシール方式では、1次シール部のみをメインシールとし、シール幅は3 - 5 mmである。一方、新たなシール方式では、1次シール部と2次シール部を合わせてメインシールとし、シール幅は6 - 8 mmと広い。これは、高燃焼圧力時にガスシール部が傾斜し、1次シール部のシール面圧が低下しても2次シール部の面圧で補うという考え方である。

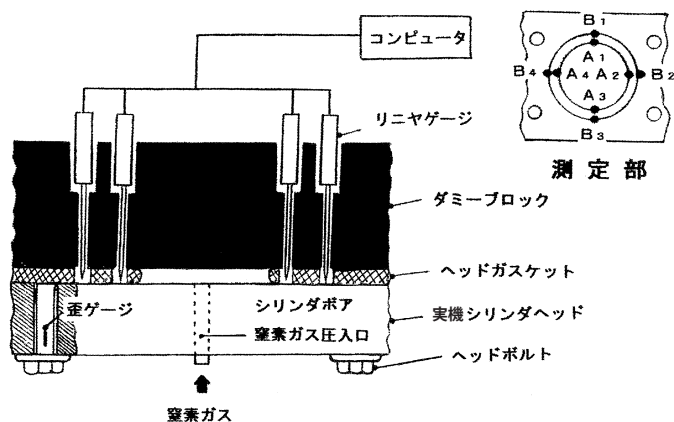
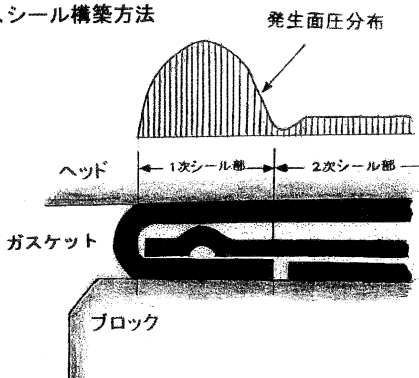


図10 ガスシール部の傾斜測定装置

1) 旧ガスシール構築方法



2) 新ガスシール構築方法

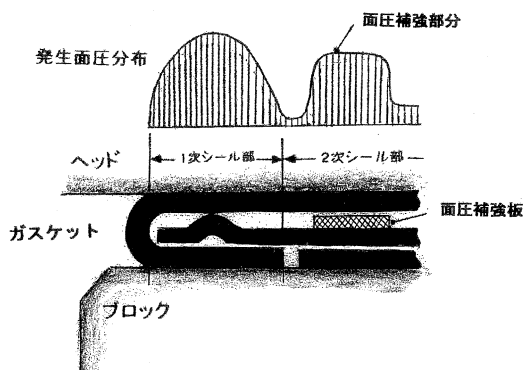


図11 新旧ガスシール部構築における発生面圧の様子

図11には、両シール方式におけるメインシール部のシール面圧発生状況を模式的に示した。従来のガスケットの2次シール部は、1次シール部の外側に隣接し、その面圧は1次シール部の5

-10%程度である。つまり、2次シール部はガスシール部としてほとんど機能していない。新たな方式では、2次シール部の面圧を1次シール部のシール性を損なわないように1次シール部の面圧の70-80%程度に増強する。このシール構造により、高燃焼圧力によるヘッド変形時のシール部傾斜において、1次シール部の面圧が低下しても2次シール部がシール機能を補い、ガス漏れを防止する。

2次シール部の面圧補強方法には種々のものがある。図示したものは、2次シール部にドーナツ型の平らな面圧補強板を挿入したもので、面圧の調整は板厚を変えることによって行う。補強板自体が平板であるので、クリープ・リラクゼーションがほとんどなく面圧の経時変化は少ないが、シール部の変形や動きに対する追従性が乏しい。そこで、2次シール部にビードを配置し、所要の面圧を得るとともにビードが持つ圧縮・復元性によってシール部の変形や動きに追従させる補強方法がある。また、ガスケットの積層板の中板の1枚（ばね鋼）を2次シール部で折り返し、面圧を高めるとともにばね性を持つ折り返し部がシール部の変形や動きに追従する補強方法などもある。それぞれの補強構造には一長一短があるので、シール条件に適合した補強方式が選択される。

5. シリンダボア間の面圧補強

ヘッドガスケットによるガスシーリングは、ガスケットのシリンダボア周囲に他の部分より面圧が高いドーナツ状のガスシール部を設けてガス漏れを防止する。しかし、前報¹⁾で述べたように、発生面圧はエンジンの剛性によって影響を受け、ガスシール部全体に均等ではない。エンジンの軽量化に伴う低剛性化は、シリンダ周囲の波状変形の増加をもたらし、シール面圧の不均等を増幅させる。シリンダボア周囲の低剛性部であるボア間の低シール面圧に対し、補強板やビードによる局所面圧補強の対策がある。

5.1 面圧補強板

シリンダボア間の低面圧を補う方法として、図12に示すように、ガスケットの該当部に面圧補強板を配置する局所面圧補強法がある。この方法の短所は、面圧補強板の境界部に空隙ができて低面圧部が発生することである⁶⁾。そこからガス漏れが生じる場合があるので、補強板の形状や板厚などを変えて対応するが、時には完全に解決できない場合がある。

その対応の過程で考案されたのは、従来の補強板の短所であった両端部の段差をスロープ（なだらかな傾斜）によって無くし、段差による低面圧の発生を解消する方法である。大型ディーゼルエンジン（13 L, 6 Cyl. ボルト締め付け力118 kN/本）における補強板の一例を図13に示す。所要形状のステンレス鋼板（板厚0.15 mm）の両端部を研削してスロープを付け、ガスケットのシリンダボア間に挿入する。ガスケット装着時の面圧発生状況を感じシート（富士フィルム製中圧シート）で調査したが、積層段差による極端な低面圧発生部は認められず、良好な結果が得られている。





形状	主な用途	材質	板厚
	大型ディーゼル機関用	● 軟銅板 ● ステンレス鋼板	mm 0.05 }
	中型ディーゼル機関用	● 銅板 ● アルミ板	0.15
	小型ディーゼル機関用		
	ガソリン機関用		

図12 局所面圧補強板の主な形状

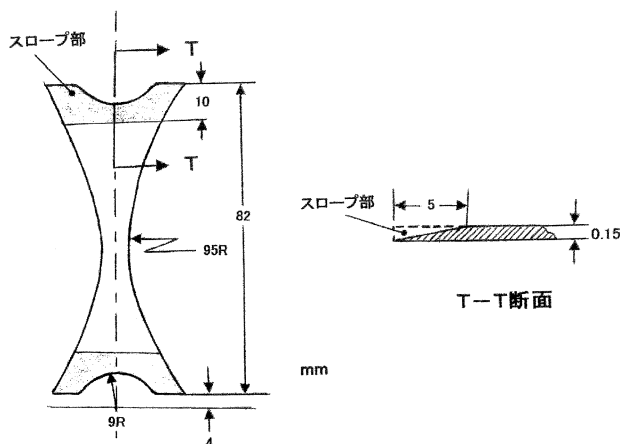


図13 大型ディーゼルエンジンにおける端部スロープ式局所面圧補強板の実例

5.2 うねりビードによる面圧補強

うねりビードによる面圧補強は、シリンダボア間にうねりビード配置して、その高圧縮抵抗性を利用してボア間の低面圧部を補強する方法である。

図14には、小型ディーゼル（1.3 L, 4 Cyl. ボルト締め付け力78kN/本）のエンジンプロックを用い、第2シリンダを測定対象に選んで通常のビードを有するガスケットとうねりビードを有するガスケットのシール面圧を比較した結果を示した。図示のように、うねりビードによるボア間の面圧補強効果が明瞭に認められる。うねりビード方式は、従来の面圧補強板のような境界部の面圧段差が生じないとともに補強構造自体が復元性（ばね性）を有するので、追従性に優れる特徴がある。

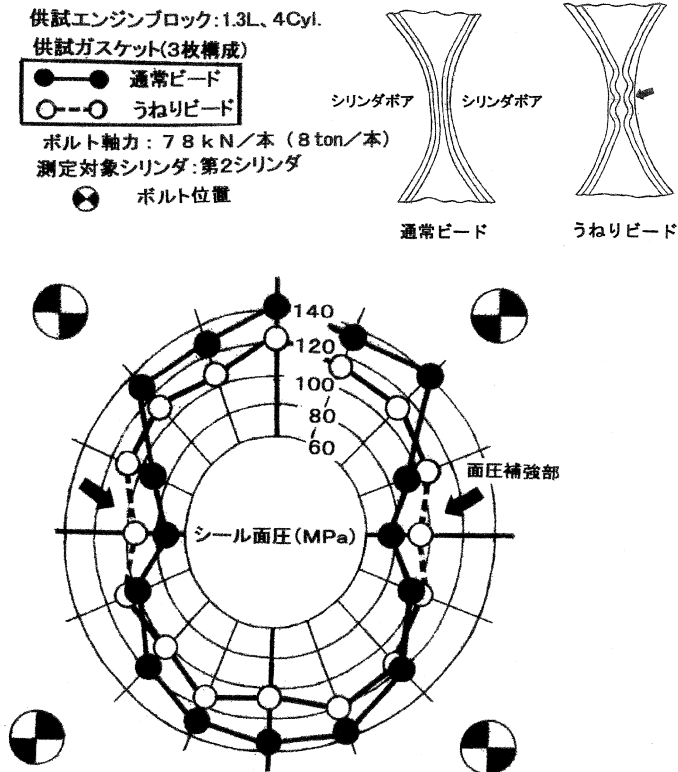


図14 低面圧部における通常ビードとうねりビードの発生面圧

図15には、うねりビードによる面圧補強方式のガスシール性（図中 B）を前述のスロープ補強板（図中 A）と従来の補強板（図中 C）の場合と比較した一例を示した。シリンダヘッドの波状変形が大きい小型ディーゼルエンジン（1.3 L、4 Cyl）の実機アルミヘッドとダミーブロックを用い、4条件の内圧（10、12、14、16 MPa）を加えてガス漏れ試験を行った結果である。図示のように、従来の補強板に比べうねりビード方式とスロープ補強板方式では、シール性が向上していることがわかる。後者のスロープ補強板方式において、内圧が高くなると急激にシール性が低下するのは、補強板が平板で復元性に乏しいので、高圧によるヘッドリフトやヘッドの変形に追従できないためと考えられる。前者のうねりビード方式では、内圧が低い初期段階でシール性は若干低いが、ビードが持つ復元機能によって内圧が増加してもシール性の低下は顕著でない。このように、両者の面圧補強方式の特徴は相違するので、シール条件に適合した補強方式が選択される。

6. お わ り に

本稿では、シリンダボア間のガス漏れ要因であるヘッドリフトの増大やヘッド下面の変形の増

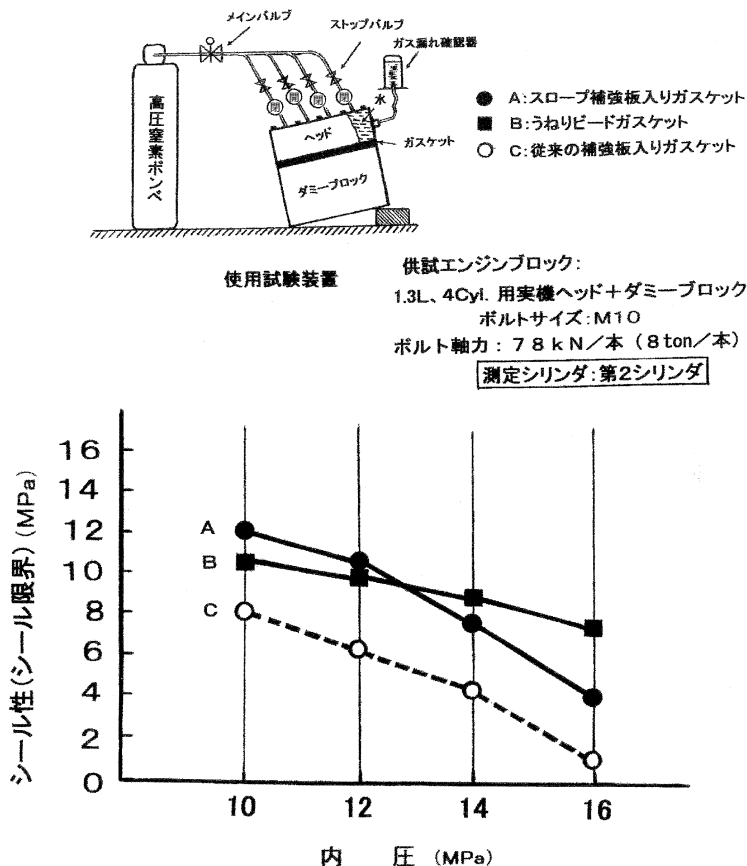


図15 局所面圧補強方式によるガスシール性

加に対するヘッドガスケットサイドの対応について整理するとともに、シール面圧が低いボア間のガスシール対応例として面圧補強の事例を紹介した。

ガス漏れはボア間で起ることが多いが、エンジンによってガスシーリングのウイークポイントが異なるため、ボア間以外でガス漏れが生じる場合がある。ガスケットの設計にはその点を見極める必要があるので、いくつかの現象に対するガスシーリングの概要についても述べた。

本稿が、エンジンの高性能化を支える縁の下の力持ちであるヘッドガスケットの重要性を認識する一助になれば幸いである。

付記：本稿で述べた金属積層形ヘッドガスケットの開発者である宇田川恒和博士（工学）は、一昨年逝去された。特別講義（自動車工学ゼミ）の講師としてご助力いただくとともにガスケットについて多くのご教示をいただいた宇田川博士のご冥福を心からお祈りする。

参 考 文 献

- 1) 高 行男, 宇田川恒和, シリンダヘッドガスケットにおけるボア間のガス漏れ要因, 中日本自動車短期大学論叢, 第45号, P.9-21 (2015)
- 2) 宇田川恒和, 高 行男, エンジン高性能化によるヘッドガスケットのガスシーリングへの影響, ETR, Vol.2, No.1, P.84-91 (2010)
- 3) 宇田川恒和, 高 行男, ディーゼルエンジンのPmax 上昇によるヘッドガスケットシーリングへの影響とその対応, マリンエンジニアリング学会誌, Vol.41, No.6, P.107-113 (2006)
- 4) 高 行男, 自動車技術と材料, ポリファイル, Vol.47, No.554, P.53-55 (2010)
- 5) 宇田川恒和, 高 行男, ヘッドガスケットのガスシーリングに及ぼすエンジン構造の影響, 日本陸用内燃機関協会, LEMA, No.500, P.78-90 (2010)
- 6) 宇田川恒和, 高 行男, シリンダヘッドの変形によるガスケットシーリングへの影響とその対応, マリンエンジニアリング学会誌, Vol.42, No.5, P.122-128 (2007)
- 7) 宇田川恒和, 高 行男, 非金属シートガスケット, ポリファイル, Vol.49, No.583, P.58-63 (2012)
- 8) 宇田川恒和, 高 行男, ディーゼルエンジンの最大燃焼圧力上昇によるシリンダボア間のヘッドガスケットシーリングへの影響とその対応, 自動車技術会論文集, Vol.38, No.6, P.119-124 (2007)
- 9) 宇田川恒和, 高 行男, 高 Pmax エンジンに対応するヘッドガスケットの新たなガスシール方法の構築とその有効性, マリンエンジニアリング学会誌, Vol.45, No.5, P.96-101 (2010)