

自動車とシーリング

(第1報, シリンダヘッドガスケットのガスシーリング)

高 行男

1. はじめに

工学では、シール (seal) は密封装置を意味し、その役割は流体の漏れまたは外部からの異物の侵入を防止するというのが一般的である。シールは静的シール(ガスケット)と動的シール(パッキン)に大別されている。密封装置は隙間や割れ目を埋めて流体の出入りを防ぐものやデバイスとも言われている。シールの構築や仕組みの意味を含む概念で、シーリングという用語を使用し、その視点から、広範囲なシール対象から自動車を取り上げその実態を考えてみたい。

自動車のシーリングのうちエンジンについて見ると、シリンダヘッドガスケットやピストンリングに代表されるシーリングは、エンジン性能の維持や向上に大変重要な役割を持っている。前者のガスケットは静止面の密封に用いられる固定用シールであり、後者のピストンリングはパッキンに分類され、運動面の密封に用いられる運動用シールである。運動用シールには、回転運動用のオイルシールやメカニカルシールと、往復運動用シールであるピストンリングがある。

本稿で取り上げるシリンダヘッドガスケットは、シリンダヘッドとブロック間に装着され、エンジンの運転によって生じる高温・高圧の燃焼ガスや高温の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。エンジンの高性能化に伴い、特にシリンダボア間のガス漏れが問題となっているので、その技術的問題などを報告してきた^{1)~5)}。ヘッドガスケットを取り巻く様々な問題を克服して現在の主流の位置を獲得した金属積層形ヘッドガスケット無くしては今日の自動車用エンジンの高性能化は実現できなかったと言っても過言ではないが、その実態についてはあまり知られていない。そこで、本稿ではそのシール機能のうち最も重要なガスシールの要点を整理し、検討する。

2. 金属積層形ヘッドガスケット

ヘッドガスケットの構成はエンジンの高性能化に深くかかわって変遷してきたが、金属積層形が主流になっている。このガスケットは1973年に大型ディーゼルエンジンに採用され、1979年以降には中型、小型ディーゼルエンジンそして1988年にはガソリンエンジンに拡大してきた。

金属積層形ヘッドガスケットは、2-5枚程度のステンレス鋼板を重ね、シール状況に応じて板厚や材質の異なったものを組み合わせたものである。図1には、金属積層形ガスケットの代表

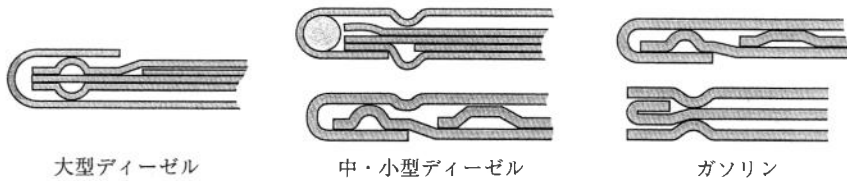


図1 金属積層形ガスケットのエンジン別ガスシール部

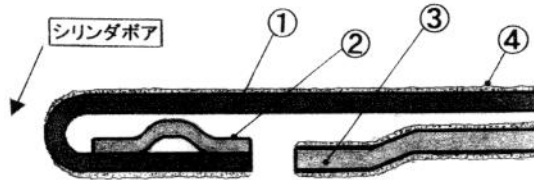
的なガスシール部の断面構造を示した。金属積層形ガスケットの代表的なタイプは2種類ある。一つはホールドオーバータイプと呼ばれるもので、図示のように、大型ディーゼルから小型ディーゼルおよびガソリンエンジンまで、その使用範囲は広い。今一つはノンホールドオーバータイプと呼ばれるもので、そのガスシール構造から日本においてはガソリンエンジンに多用されている。

ホールドオーバータイプガスケットは、その名が示すように、ガスケットのシリンダボア部を積層材の上板または下板の何れかをガスケットの燃焼室穴において相対する外板の上に折り返す構造になっている。この折り返し板は、燃焼室穴側面において、高温、高圧の燃焼ガスが積層部に侵入しないように保護する役割を果たす。ホールドオーバータイプガスケットの積層構造は、通常2-3枚構成のものは主に小型エンジン用、3-4枚構成は中型エンジン用、4-5枚構成は大型エンジン用に多く用いられている。エンジンにより積層枚数が違うのは、ガスケットの圧縮性に関係する。つまり、小型エンジンでは乾式ライナ（スリーブ）を採用しており、トップデッキは平坦に仕上げられているので、ガスケットに大きな圧縮性は必要としない。一方、中型、大型エンジンでは湿式ライナを用いている関係上、トップデッキのライナの突出量（0.05-0.1mm）がある。そのため、これを吸収する目的で、ガスケットの圧縮性を大きくする必要があるので、積層枚数を増やし対応している。

3. ガスシーリング

金属積層形ヘッドガスケットは、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、鋼板の厚さ、材質および鋼板に加工されるビードの幅、高さ、断面形状などを選択し、各鋼板に役割を分担させ、必要に応じて組み合わせを変えることによって、種々のシール条件に対応している。鋼板に施されるコーティングもシーリングには重要な要素となっているので、金属積層形ヘッドガスケットは、材料の複合化によりシール機能を果たしていると言える⁶⁾。

シール機能を発揮させるため、エンジンに装着されたガスケットのガスシール部には、適正な面圧が発生する必要がある。エンジンに設定されるシール面圧は、小型ディーゼルでは120MPa、中型ディーゼルでは140MPa、大型ディーゼルでは160MPa、そしてガソリンでは80MPa程度である。設定面圧の違いは、エンジンの燃焼圧力の大きさによる。シール面圧はシリンダボア周りの領域（3-5mmのシール帯）で発生するように、積層板厚を平坦部の積層板厚より厚く積層



使用箇所		材 質
①	上板	鈍し鋼板 SUS304 0H
②	中板	ばね鋼板 SUS301 3/4H
③	下板	ばね鋼板 SUS301 4/4H
④	コーティング	フッ素ゴム系

図2 ホールドオーバータイプガスケットのガスシール部断面構造と材質

する。また、所要の鋼板にビードと称される球状の形状が加工される。単純に鋼板を重ね合わせた構造では、ガスケットに必要な圧縮復元性が殆んど得られないためである。

3.1 鋼板とその積層

(1) 鋼板

鋼板にはステンレス鋼板が使用されているが、積層板の材質配置に関し、独特の構成がある。図2には、一例として、代表的なガスシール部の構造とステンレス鋼板の材質を示した。シリンダボア部を覆う板（通常は上板）には、ステンレス鋼板の代表的な材料であるSUS304が多く用いられる。これはシリンダボア部のバリリング加工をしやすいするための配慮であり、また、クラッキング防止のためでもある。ビード板（中板）にはビードの復元性を保持するため、下板は主に2次シール部や液体穴のシールビード板として使われるので、ばね性のあるSUS301が用いられている。

(2) ガスシール部の積層板厚段差

図3には、ガスシール部の発生面圧の様子を示したが、ガスシール部の構築はシール部に高面圧を発生させることから

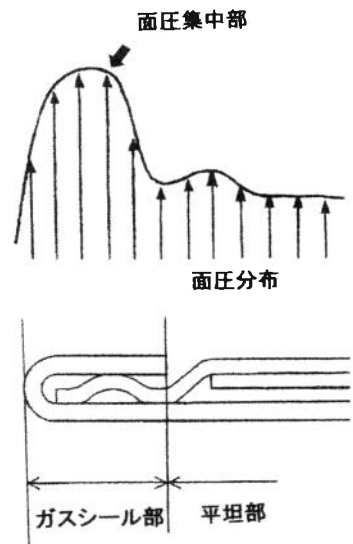


図3 ガスケットのガスシール部への面圧集中

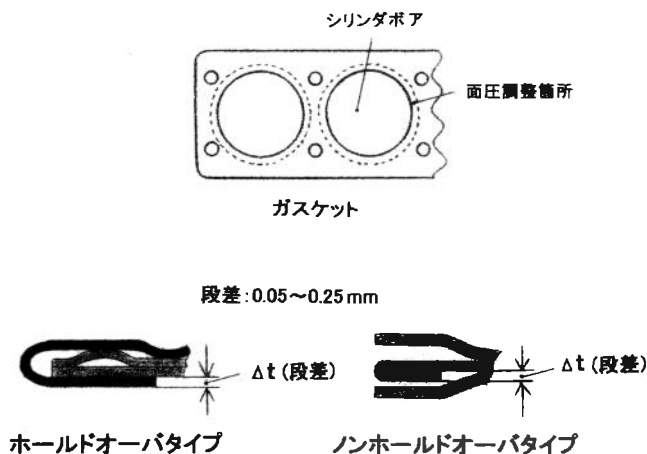


図4 ガスシール部における段差調整方法

始まる。設定されるシール面圧は、燃焼圧力をシールするために必要な面圧であるので、最大燃焼圧力を基準にガスケットのガスシール設計時の初期面圧として設定される。設定値は通常、ガソリンエンジンでは最大燃焼圧力の7-8倍、ディーゼルエンジンでは最大燃焼圧力の8-10倍の値である。

ガスシール面圧は、エンジンの最大燃焼圧力、ガスケットのシール構造、ボルト締め付け力などの関係において決められるが、設定面圧を達成するため、シール部における構成板厚と平坦部との積層板厚との段差の大きさを調整し、面圧の集中度合いが決められる。図4には、金属積層形ガスケットの代表的なホールドオーバータイプとノンホールドオーバータイプのガスシール部における積層段差の調整方法を示した。その基本は、ホールドオーバータイプではボア部折り返し板の厚さを変え、ノンホールドオーバータイプでは中板の厚さを変えることによって段差 (Δt) を調整する。段差はガスシール部の所要面圧により異なるが、0.05-0.25mmの段差が用いられる。一般的にシール面圧が大きいディーゼルエンジンでは段差は大きく採り、シール面圧が小さいガソリンエンジンでは小さく採る。段差が大きすぎると、過剰面圧となってエンジンやガスケットに支障をもたらす。

3.2 鋼板の加工

(1) ビードの役割

初期の金属積層形ガスケットは単純に鋼板を重ね合わせた構造であったので、圧縮復元性が殆んどなかった。通常使用されるガスケットには、圧縮復元性 (圧縮率10-20%, 復元率40%以上) が求められる。そこで、金属積層構造の構成板にビードを付け、通常ガスケットと同様の圧縮復元機能を持たせている。ビード本来の機能は圧縮復元性であるが、面圧を高める機能も有している。圧縮性はシール部のうねり、突出部 (特に湿式ライナの突出部や傾き)、ガスケット自体の段差などを吸収する機能を、復元性はヘッドの動的変位に追従してシール機能を果たす。

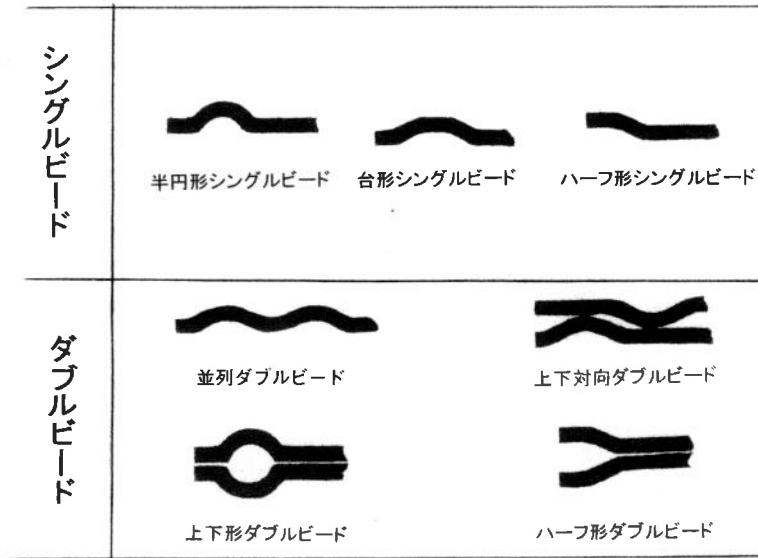


図5 代表的なビード構造

(2) ビードの構造

ビードはガスケットの各シール部（シリンダ穴，冷却水穴，オイル穴）の穴周囲に配置され，ビードの断面形状や寸法は各シール部のシール条件に適合させる。通常，ガスシール部には圧縮抵抗が高い低圧縮低復元性ビード，液体シール部（水，オイル）には圧縮抵抗が低い高圧縮高復元性ビードが用いられる。これはガスシールと液体シールでは，内圧の関係でシール面圧が大きく異なり，ガスシール面圧は液体シール面圧の約10倍以上になるためである。

ガスシール部のビード構造を図5に示す。図示のように，当初はシングルビード（フルビード）構造であったが，後に，わずかな面圧でも簡単に圧縮される特性を持つハーフビードと呼ばれるクランク型をしたものが現れる。ハーフビード構造は，シール面圧の低い液体穴シールに多用され，またノンホールドオーバガスケットではガソリンエンジンのガスシール部にも使用される。

シングルビード構造やハーフビード構造は，ライナの突出がなく，ガスケット装着面がうねりの小さい小型エンジンでは問題はないが，小型でも剛性が低くうねりが大きいエンジンや中型，大型ディーゼルエンジンになると，ライナの突出（0.05-0.1mm）があり，その突出量にもばらつきがあるため，これを吸収できない不都合がある。上下ダブルビード構造は，ビード部が上下重なっているので圧縮性が大きくなり，ライナ突出量が多少大きくても容易に吸収できる。

エンジンの高性能化が進展すると，シール部の変形量や変形の範囲が増加し，また，動的変位が増大した。中でも，ヘッドの垂直方向の動きは，ビードのクリープ・リラクゼーション（へた）を促進させ，ビード本来の機能（圧縮復元性）を低下させる。これに対応するビード構造が，並列ダブルビードおよび上下対向ダブルビードである。

並列ダブルビードは、ガスシール部においてビードに掛かる圧縮荷重を二つのビードで受けるため、一つのビードに比べクリープ・リラクゼーションに有利であることと、ビードによる高面圧シール部が2列になるのでシール性が向上することである。しかし、ビードを形成している板が共用であるため、二つのビードのどちらかの圧縮性を変えたい場合には一方のビードの高さまたは幅を変えて対応するが、ビードの付けられている板が同一であるので大きな圧縮性の変化は期待できない。一方、上下対向ダブルビードは、上下板のビード位置をずらしてビードを配置した構造で、二つのビードそれぞれに幅、板厚、材質を変えることができるので、ビードの圧縮復元性を広範囲に調整することができる。このように、ビード構造は様々なニーズに対応すべく改善されている。

3.3 鋼板のコーティング

コーティングはマイクロシール性の確保のためである。エンジンのガスケット装着面には、加工時に生じるカッタトレースと呼ばれるカッタの削り跡がある。これを埋め、ガスケットとエンジンのガスケット装着面との密着を図り、両者の接面をシールする機能をマイクロシールという。マイクロシールは、金属ガスケットでは装着面において金属同士の接触となるので、通常不可能である。そこで、ガスケット表面に耐熱性シール剤(200℃程度)のコーティングを施し、そのコーティング膜の密着作用によりマイクロシールを達成する。コーティングにはフッ素ゴム系ものが多く用いられる。

図6に示すように、マイクロシールはコーティング膜とガスケット装着面との密着を図るため、装着面のカッタトレースの深さを充分埋めるだけのコーティング厚さが必要である。通常カッタトレースのエンジン1台中の最大深さは8-15 μm 程度であるが、装着面の小さいうねりなどを考慮し、採用されている膜厚は25-30 μm である。コーティング膜が厚過ぎると、クリープ・リラクゼーションが大きくなるので、コーティング厚さは必要最小限に留める。膜厚の誤差は $\pm 5\mu\text{m}$ 程度で大きな誤差は許されないので、高度のコーティング技術が要求される。

コーティング方法には、①ガスケットに用いる鋼板にコーティングした後、ガスケットの形状

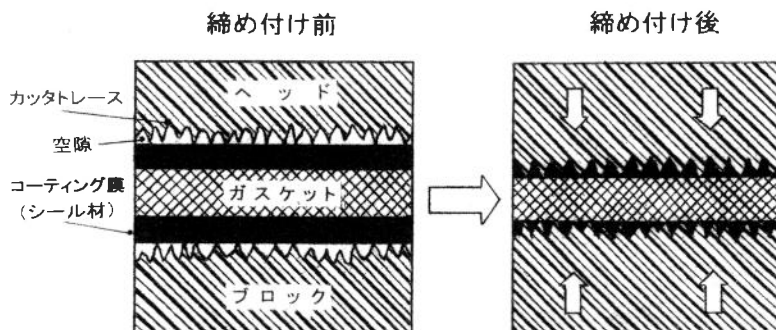


図6 コーティング膜によるマイクロシール(密着性)

に加工してからガスケットを組み立てる方法、②ガスケットの形状に加工してコーティングしてからガスケットを組み立てる方法、③中板のみを①または②の方法でコーティングしたものをガスケットに組み立て、その表面を後からコーティングする方法がある。各方法には一長一短があり、シール機能や生産性などを考慮して選択される。

4. エンジンとヘッドガスケット

ヘッドガスケットは、エンジンの高性能化に対応してきたが、単にシール性能の向上のみではなく、エンジンにもたらす支障についても考慮すべき問題点がある。ガスシーリングの視点からエンジンとヘッドガスケットの関連事項について述べる。

4.1 ガスシール環境

エンジンの高性能化、特にエンジンの高出力化による最大燃焼圧力の上昇と、軽量指向に伴う低剛性化は、小型・軽量エンジンのガスシーリングを悪化させ、ガス漏れなどの漏れ現象が顕在化する要因となっている。

(1) 最大燃焼圧力

最大燃焼圧力（Pmax）の推移を図7に示したが、ディーゼルエンジンでは、最大燃焼圧力の上昇が顕著であり、排気量が大きくなるに伴い、最大燃焼圧力は急激な上昇が認められる⁵⁾。これはターボ過給エンジンの普及とその過給率の増加が関係している。一方ガソリンエンジンでは、直噴エンジンの出現により最大燃焼圧力は一気に上昇し、中には従来のディーゼルエンジンに匹敵する最大燃焼圧力のエンジンも出現している。

燃焼圧力が上昇すると、圧力によるヘッドの変形とボルトの伸びが大きくなり、ヘッドリフト（上方向に押し上げられる現象）が増加する⁷⁾。この現象はシール面圧を低下させ、ガスシーリン

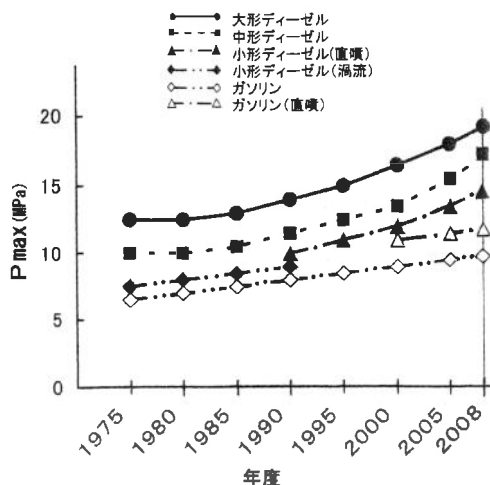


図7 日本の自動車用エンジンにおけるPmax上昇の推移

グに不具合をもたらす。

(2) アルミヘッド

エンジンの軽量化指向に伴う低剛性化は、ガスシーリングに不具合をもたらすが、特にヘッドの低剛性化による影響が大きい。その要因は、ガスケット締め付け時に生じるヘッド下面の変形によるシール面圧の低下である⁸⁾。ヘッド下面の変形の主なものは、ヘッドの長手方向に生じるたわみと、シリンダ周囲のヘッド下面に生じる波状の変形である。これらの大きい部分がシール面圧の低下に影響する。この現象はアルミヘッドのような低剛性ヘッドに顕著に現れる。

小型ディーゼルエンジン (2.3L, 4 Cyl.) のアルミと铸铁ヘッドの2機種におけるシリンダ周囲8箇所 (図中a-h) の発生面圧を面圧測定板で測定した結果を図8に示す。双方共に面圧は波状に発生している。最も発生面圧の低い箇所はシリンダボア間部 (図中c, g) で、次に吸・排気ポート付近 (図中a, e) の面圧が低い。これはヘッドの構造やヘッドボルトの配置およびヘッドの部分的な剛性の強弱の影響と考えられる。特に、シール上問題なのは、アルミヘッドの発生面圧の高低の差 G_1 (図中) が、铸铁ヘッドの G_2 (図中) より大きいことであり、ガスシーリングに不具合をもたらす大きな要因となる⁵⁾。

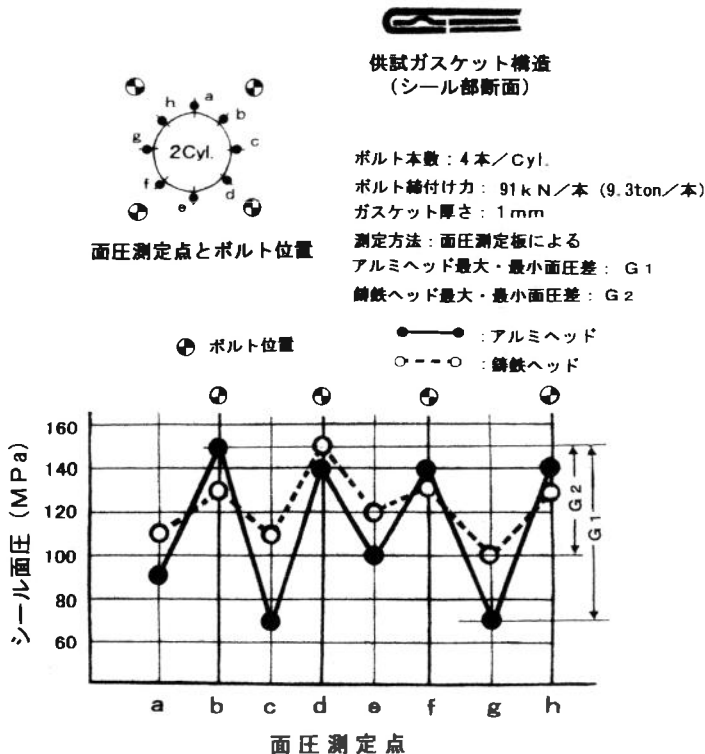


図8 アルミおよび铸铁ヘッドの発生面圧

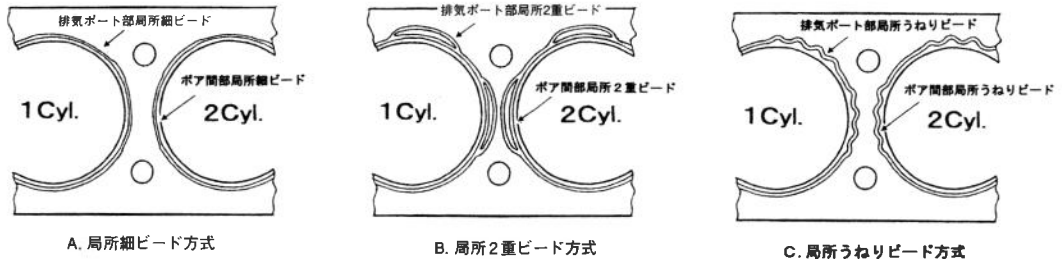


図9 ビード形状によるクリープ・リラクゼーションの緩和対策

(3) シリンダボア周囲の温度

エンジンの運転によって生じる温度の分布は均等であることが理想であるが、実際には箇所により高低の差があり不均等である。ガスケットのガスシール部において、温度が特に高い箇所はシリンダブロックのボア間部とヘッド下面の排気ポート付近である。したがって、これに接するヘッドガスケットは高温の影響を受ける。つまり、シリンダ周囲の高温部においてガスケットのクリープ・リラクゼーション（へたり）が促進され、シール面圧が局所的に降下する⁹⁾。降下の様相は各エンジンに共通するものと、エンジン構造に関する固有のもの⁹⁾とがあり、その影響の度合いもエンジンのサイズや種類により異なる。したがって、高温におけるガスシーリングへの対応は、その置かれた状況により異なるので複雑である。

ガスケットの対応には、ガスケットのガスシール構造を改良することにより、高温部における耐クリープ・リラクゼーション性を改善する事例がある。その一つがビードによるクリープ・リラクゼーション対策である。この対策はビードの形状や組合せを変えて耐クリープ・リラクゼーション性を高め、高温部のクリープ・リラクゼーションを緩和するものである。

図9には、ボア間部および排気ポート付近の対策に用いられる代表的なビード構造（図中、A-C）を示した。A構造はビード幅をボア間部と排気ポート付近を細くし、その部分の面圧を予め高くしておく方法である。B構造はビードの断面形状は変えず、ボア間部および排気ポート付近にビードを2本に分岐し、並列に配置して二重ビード構造とし、その部分のクリープ・リラクゼーションを緩和するものである。C構造はビードに部分的にうねりを持たせた形状にし、そのうねりの大小によって面圧の強弱を調整し、ボア間部および排気ポート付近に配置することによって、クリープ・リラクゼーションを緩和する。

4.2 エンジンへの支障

従来、ガスケットの設計にはシール性の構築が重点的に考えられてきたが、シール性に加えてガスケットがエンジンに与える支障を考慮する必要がある。つまり、ガスシーリングのためガスシール部に面圧を集中させるが、シール面圧が過剰になると、エンジンに支障をもたらす。その代表的な現象は、①シリンダボア変形の増幅、②シリンダヘッド下面に発生するブリネリング（圧痕）の拡大、③シリンダライナの陥没である。

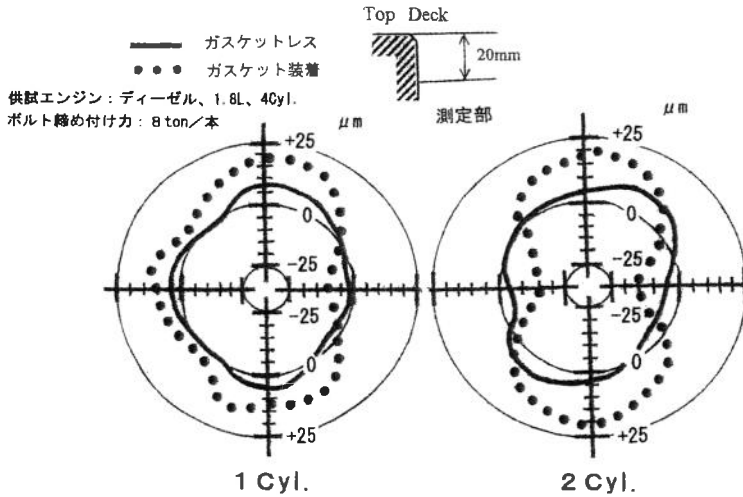


図10 ガスケットによるボア変形の増幅

(1) シリンダボア変形

ガスケット装着時、シリンダボア周りの面圧の集中のため、シリンダボアは変形する¹⁾。その実態の一例を図10に示す。小型ディーゼルエンジン(1.8L、4Cyl.)に対し、ガスケット装着の有無によるボア変形の状態をインコメータ(シリンダボア変形測定装置)で調査した結果であるが、ガスケット装着によりボア変形が増幅される。ボア変形が大きくなると、オイル上がりやシリンダのスカuffingの原因になり、ピストンやピストンリングの摺動抵抗とも関係するので、ガスシーリングはシール機能だけでなくシリンダボア変形の増幅にも対処することが求められる¹⁰⁾。

(2) プリネリング

プリネリングとは、エンジン運転中、ヘッドリフトの上下運動による繰り返し衝撃荷重によってガスケットの高面圧部(ガスシール部)が接触するシリンダヘッドの下面やシリンダブロックの上面に発生する圧痕(凹み)である。通常、図11に示すように、ガスケットとの接面における高面圧部のシリンダヘッド下面に生じることが多い。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が、プリネリングは深くなるとガスシーリングに不具合をもたらす⁵⁾。ガスケット装着面を調査して見ると、プリネリングの深さが20-30μm以上になると、ガス漏れの痕跡であるカーボンの付着が認められる事例がある。

(3) シリンダライナの陥没

シリンダライナの陥没の増大は、ガス漏れに直結するので重大である。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が集中すると、ライナの陥没は大きくなる。陥没量はライナの嵌め込み形式などにより異なるが、最大値で0.2-0.4mmである。湿式ライナではトッ

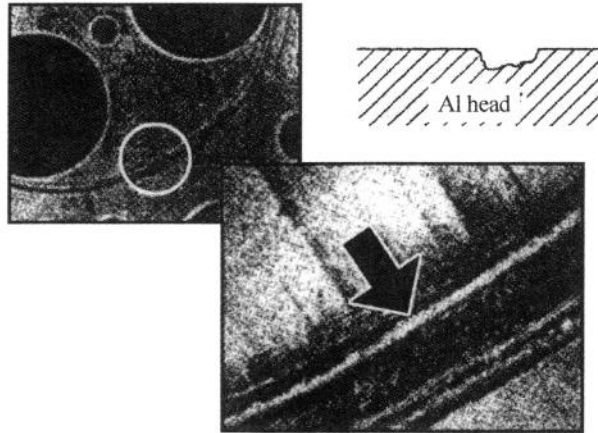
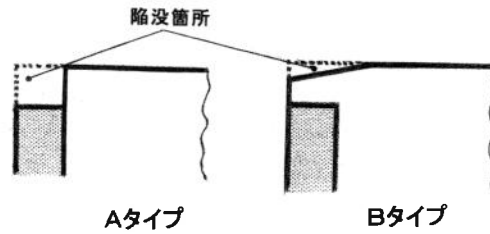


図11 ヘッド下面のブリネリング



陥 没 量

エンジン	ガソリン	ディーゼル		
	1.4L, 4Cyl.	1.3L, 4Cyl.	1.5L, 4Cyl.	
最大燃焼圧力	8	15	18	MPa
Aタイプ	15.8	30.1	40.1	μm
Bタイプ	12.0	26.2	31.2	

図12 アルミシリンダブロックエンジンにおけるスリーブの陥没例

プデッキからの突出量が0.05-0.1mm程度であるので、通常の陥没量ではシール性には影響は小さい。一方、乾式ライナ（スリーブ）ではトップデッキは平坦に仕上げられているので、陥没がシール性に及ぼす影響は大きい。

図12には、アルミシリンダブロックエンジンにおけるスリーブ陥没の様子を示した。陥没量は最大燃焼圧力（Pmax）が大きくなると、燃焼圧力の上昇によりヘッドリフトが増大して、スリーブの頭部に掛かる動圧（繰り返し衝撃荷重）が大きくなるため増加する傾向を示す。一般に陥没量が20μm以上になると、ガスシーリングに不具合をもたらす³⁾。

4.3 エンジンのダウンサイジング

最近、自動車の低燃費指向に伴い、エンジンのダウンサイジングの傾向がある。エンジンのダウンサイジングは出力の減少を来すが、そこを過給で補うことは燃焼圧力の上昇につながり、ヘッドやヘッドボルトの負荷を大きくする。また、シリンダブロックのオープンデッキ化は、剛性の面でクローズドデッキに比べ劣る。エンジンのダウンサイジングについてガスシーリングの視点から留意すべき基本的事項を述べる。

(1) ターボ過給機付きエンジン

ターボエンジンは、ノンターボエンジンに比べ最大燃焼圧力が20-30%程高くなるが、高過給エンジンではさらに高くなるケースもある。燃焼圧力が上昇すると、一般的にガスケットのシーリング性は低下する。つまり、ターボエンジンは高燃焼圧力であるので、燃焼圧力の上昇によりヘッドのリフトが増大し、ガスケットのガスシール部の口開きが増大するので、そこに掛かる繰り返し衝撃荷重が増加してガスケットのクリープ・リラクゼーションを促進し、シール面圧を急激に低下させる。

(2) オープンデッキエンジン

オープンデッキシリンダブロックのトップデッキは、シリンダの周囲がウォータージャケットに囲まれ、シリンダ上部を支える連結部がない。一方、クローズドデッキシリンダブロックのトップデッキでは、シリンダ周囲の水穴は部分的に数個が開いている程度である。また、シリンダ上部は外壁やボルトボスに連結する部分があり、これが支えになっている。特に、外壁との連結部がないことがオープンデッキにおいてシリンダの横振れをもたらし、ガスシーリングの問題ともなる。

前節で述べたシリンダボア変形は、オープンデッキとクローズドデッキにおいて異なるが、シール面圧はボア変形と密接な関連がある。図13には、小型ディーゼルエンジン（1.5L, 4Cyl）実機用のシリンダブロックを用い、シール面圧を面圧測定板によって調査した結果を示した。本調査では、ヘッドの構造等が面圧発生に影響しないように、ボルト穴のみを設けた剛性の高いソリッド構造の鋳鉄製ダミーヘッドを採用し、オープンデッキエンジンにおいてシリンダ変形が大きく異なる両端部と中央部のシリンダ（第1シリンダと第2シリンダ）を計測対象としている。

図示のように、オープンデッキとクローズドデッキでは面圧の発生状態が大きく異なる。オープンデッキについて見ると、第1シリンダでは面圧発生のパターンはDの字形である。特に、面圧の低い部分は端部に連結がないg点であり、高い部分はシリンダ同士が連結しているc点である。第2シリンダの面圧発生パターンは菱形状であり、面圧の高い部分はc, g点である。一方、クローズドデッキの面圧発生パターンは、第1, 第2シリンダ共に面圧の低い部分はボア間部（c, g点）であり、高い部分はボルト近傍である。このように、オープンデッキとクローズドデッキでは面圧の発生状態が異なるが、これはシリンダの変形状態と関連し、シリンダ上部の変形方向が外向きになっている部分は面圧の発生が低く、内側向きになっている部分は面圧が高い⁴⁾。

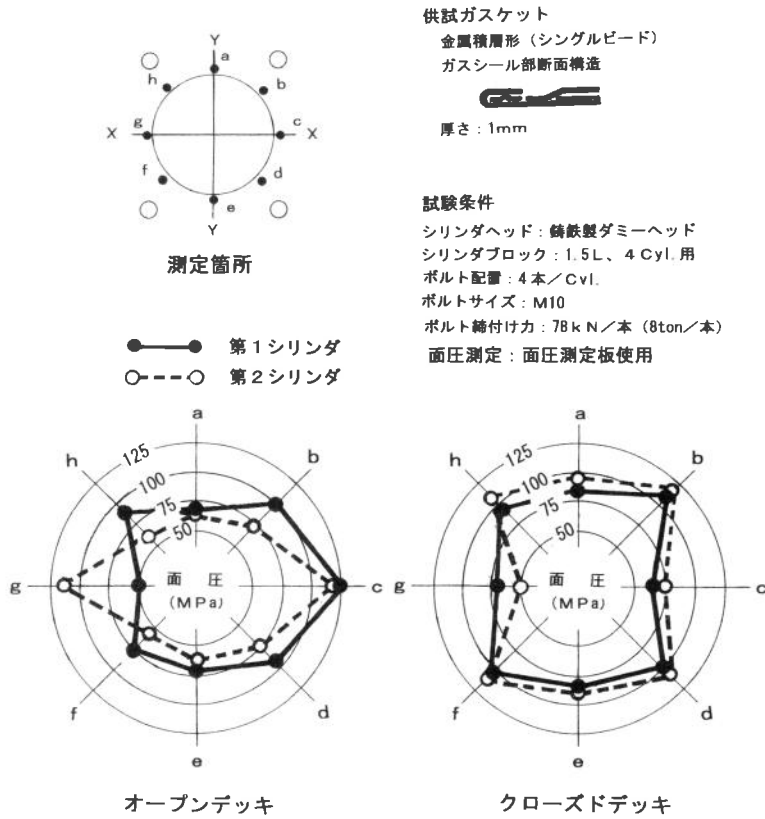


図13 オープンデッキとクローズドデッキエンジンにおけるガスシール部の発生面圧

オープンデッキエンジンのガスシーリングには、シリンダの横振れについても留意する必要がある。オープンデッキ構造はシリンダの上部が吹き抜けになっていてホールドする部分（連結部）がないため、エンジン運転中にシリンダがピストンの側圧を受け、シリンダ上部が横振れするので、それに接しているガスケットが横に揺すられる状態となる。その影響で、接触部のクリープ・リラクゼーションが進行してガス漏れを起こすケースがある。特に問題なのは、湿式ライナを用いているエンジンにおいて、ライナの陥没によりガスケットのシール面圧が低下する現象である⁴⁾。

5. お わ り に

シリンダヘッドガスケットは、エンジンの高性能化を支えてきたエンジン部品の一つである。エンジン高性能化とともにそのシール機能の向上が図られてきたが、今後もエンジンのシール環境に対応して改善されていくものと考えられる。

金属積層形ヘッドガスケットは、その名が示すように、金属材料（鋼板）を積層し、構成板の厚さや材質を変え、また、所要の鋼板にビードを形成し、各構成板に機能を分担させていること

が、ガスシーリングの要点である。本稿ではヘッドガスケットシーリングにおいて最も重要なガスシールに関する事項をまとめて紹介したが、本稿作成にあたり多大なご助力をいただいた宇田川恒和博士（工学）に深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 宇田川恒和, 高 行男, 軽量小型エンジンのシリンダヘッドガスケットによるボア変形の増幅とその抑制, 日本陸用内燃機関協会, LEMA, No.493, P.13-21 (2008)
- 2) 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)
- 3) 宇田川恒和, 高 行男, エンジンのシリンダボア間部の高温がヘッドガスケットのガスシーリングに及ぼす影響とその対策, 日本陸用内燃機関協会, LEMA, No.504, P.47-57 (2011)
- 4) 宇田川恒和, 高 行男, オープンデッキエンジンにおけるヘッドガスケットシーリングの問題点, 日本陸用内燃機関協会, LEMA, No.508, P.73-80 (2012)
- 5) 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)
- 6) 高 行男, 自動車技術と材料, ポリファイル, 47巻, 554号, P.53-55 (2010)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) 宇田川恒和, 高 行男, ヘッドガスケットのガスシール部面圧調整によるシリンダボア変形の抑制, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.2, P.111-116 (2008)