

# 金属積層形ヘッドガスケットのシール機能のメカニズムと特性

高 行男・宇田川恒和

## 1. はじめに

金属積層形ヘッドガスケットは、現在最も普及しているガスケットである。特に自動車用エンジンにおいては、小型から大型用エンジンまで機種を問わず使用されている。このガスケットは多くの高性能エンジンの機能を支えてきたが、今後もエンジンの発展に果たす役割の重要性が増すものと考えられる<sup>1)</sup>。

ヘッドガスケットの開発の歴史は、エンジンの進歩と密接に関連し、その時々求められた高度なシール技術に対応したものといえる。近年急速にエンジンの高性能化が進展する中で、ガスケットのシール環境は厳しい状況にある。つまり、エンジンの高出力、高熱効率化は高燃焼圧力化を生み、軽量指向は低剛性化をもたらすが、これらの動向はガスケットのガスシール環境を悪化させる要因となるので、高度なガスケットシーリングの対応が求められる。

金属積層形ガスケットの出現は、その解答であったと考えられる。日本において自動車エンジン用に開発されてから約35年余りであるが、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。この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。しかし、その実態についてはあまり知られていない。

そこで、本報では金属積層形ヘッドガスケットの進化の経緯を概観するとともに、その優れたシール機能のメカニズムと特性について考察する。

## 2. 金属積層形ガスケット開発の背景と推移

1970年代、エンジンの高性能化に伴いより高シール性能のヘッドガスケットが求められるようになった。しかし、この時期のガスケットの主流はアスベスト系ガスケットであったので、エンジンの高性能化に追従できなかった。この主な原因はクリープ・リラクゼーション（へたり）によるシール性の経時的な劣化が大きいことが挙げられる。クリープ・リラクゼーションは、アスベスト系ガスケットの基本的性質に由来するので、改善の余地は少ない。そこで、耐クリープ性の優れたガスケットの出現が切望されることになる。

日本における金属積層形ガスケットの開発は、上記の背景の基に行われた。1970年頃、このガスケットの発想の原点になったのは、当時米国の大手ガスケットメーカーであったピクター社の

1953年の製品カタログに記載されていたソリッドメタルガスケットである<sup>2)</sup>。このガスケットの構造はホールドオーバータイプ（シリンダボア側面を積層板の上板または下板を折り返して積層部を覆う構造）の金属積層形であったが、単に鋼板を積層しただけの構造であったので圧縮性に乏しく、また鋼板表面には、マイクロシールコーティング（エンジンのガスケット装着面の削り跡を埋めるための処置）が施されていないので密着性が悪く、ガスケット装着時に装着面の削り跡が潰れて密着するぐらいの強力な締め付け力を必要とした。したがって、大きな締め付けに耐える高剛性の船用または定置発電用等のヘビーデューティなエンジンに、その使用が限定されていた。

しかし、このガスケットの長所は構成材料が金属であったので、クリープ・リラクゼーションが基本的に少なく、耐久性に優れていることである。そこで長所を生かし短所を補い、軽量でコンパクトな自動車用エンジンに応用できないかが模索された。その焦点になったのが、金属ガスケットの本質的弱点である次の3項目、①圧縮・復元機能の向上、②マイクロシール性の確保、③防錆である。これらの項目が解決された結果、現在用いられている金属積層形ガスケットの原型が出来上がったといえる。

## 2. 1 金属積層形ガスケットのシール機能の改善

金属積層形ガスケットの短所を補ってシール機能を向上させるため、①圧縮復元性の向上と、②マイクロシール性の確保が、最重点課題として検討された。

### 2. 1. 1 ガスケットの圧縮復元機能の向上

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。しかし、通常使用されているガスケットには、圧縮復元性（圧縮率10~20%、復元率40%以上）が求められていた。そこで、金属積層構造に通常のガスケットと同様の圧縮復元機能を持たせることが検討された結果、構成板にビードを付け、その圧縮復元性を利用することにより金属積層形ガスケットの圧縮復元性が保持された。

問題はどの位置にどのようなビードを設けるかであるが、これはガスケットに必要な各シール部（シリンダ穴、冷却水穴、オイル穴）の穴周囲にビードを配置し、ビードの断面形状や寸法を各シール部のシール条件によって選定する。一般的には、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。図1には、各シール部におけるビード配置とビードの断面形状および圧縮復元特性を示した。各シール部の必要条件に応じて、ビードは選択されて配置される。

### 2. 1. 2 ミクロシール性の確保

エンジンのガスケット装着面には、加工時に生じる面の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

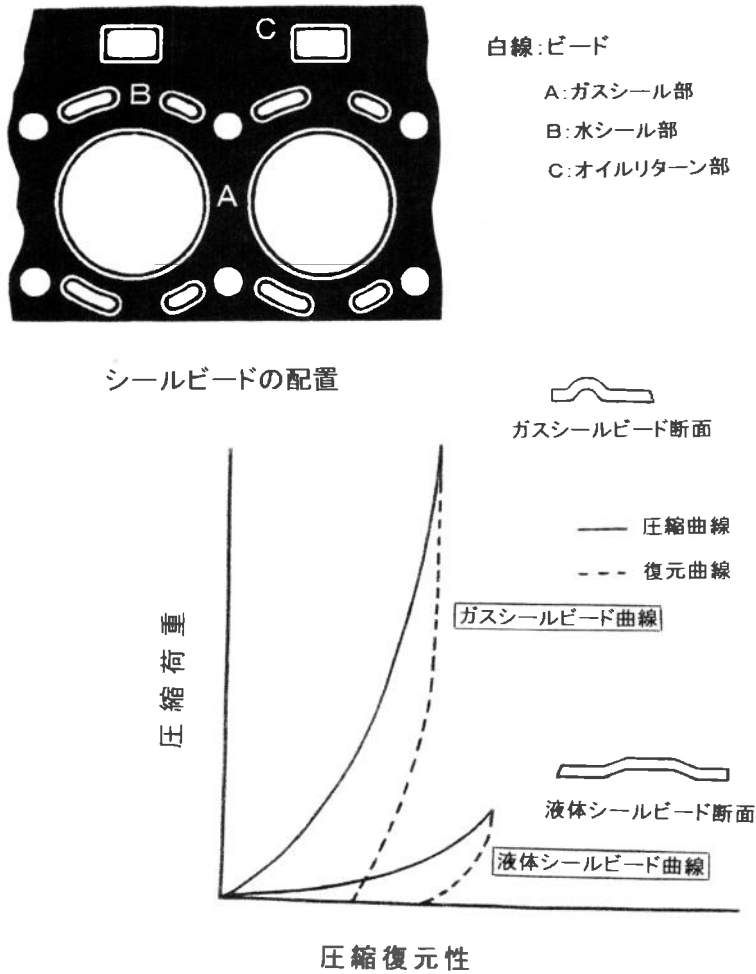


図1 シールドビードの配置と圧縮復元性

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、ガスケットの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ことが考えられた。コーティング膜にはフッ素ゴム系ものが多く用いられる。その密着原理を図2に示したが、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、装着面のカットレースの深さを充分埋めるだけのコーティング膜の厚さが必要である。通常カットレースのエンジン1台中の最大深さは8～15 $\mu\text{m}$ 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 $\mu\text{m}$ 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。

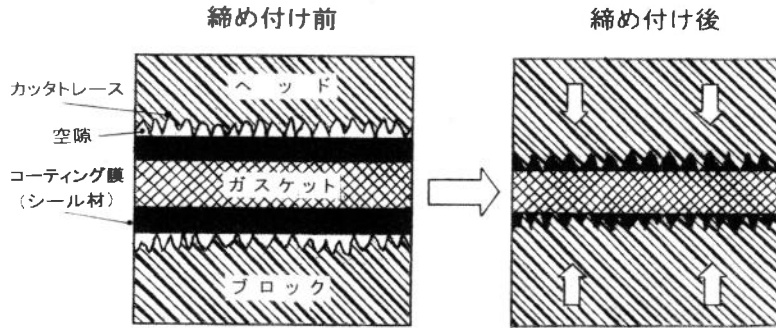


図2 コーティング膜によるマイクロシール（密着性）

## 2. 2 金属積層形ガスケットの普及過程

新しいものを採用するには、何か大きな問題が起こらなければ、実現し難いことは社会の通念である。金属積層形ガスケットの採用もその例外ではなかった。つまり各自動車メーカーの反応は極めて鈍かった。

1970年代、いすゞ自動車が8MA1と呼ばれる大型V8エンジン（18L）の開発に着手した。このエンジンはセパレートヘッド（独立ヘッド）と呼ばれるシリンダ毎にヘッドを分割した構造を採用していたが、エンジン全長の制約上からヘッド幅を切り詰めたため、シリンダと外壁部の幅が狭くなり、ガスケットもヘッドと同様に、この部分のシール幅が狭くなった。したがって、エンジン運転時にガスケットのクリープ・リラクゼーションが促進され、シール面圧が急激に低下してガス漏れが多発することになった。この頃ベンツも同種のエンジンで同様な問題を抱えていたが、これはセパレートヘッドエンジンに起こる特有の現象である。

当時ディーゼルエンジン用として、主に用いられていた金属被覆形ガスケットでは、基本的にクリープ・リラクゼーションが大きいので、種々手を加えたが、上述の狭いシール部からのガス漏れの不具合は解決できなかった。そこで、クリープ・リラクゼーションが少ない金属積層形ガスケットが試され、ダイナモテスト（全負荷運転）の結果、明らかにその性能の違いが明確になった。つまり、従来の金属被覆形ガスケットでは運転開始から30分程度でガス漏れが生じ、その部分のガスケットがバーストして火炎が外部に吹き出したのに比べ、金属積層形ガスケットでは同条件の運転で100時間経過後も外観上何の変化も見られず、試験を300時間まで延長しても問題はなかった。試験結果で高い評価を得た金属積層形ガスケットは、1973年にこのエンジンの標準品に認定された。

その後1976年頃三菱自動車が6D20型と呼ばれる直列6気筒大型（10L）のエンジンを開発したが、このエンジンも上述の8MA1と同様にセパレートヘッドであったため、同様のガス漏れ問題が生じ、その対策として金属積層形ガスケットが採用された。

上述の2機種セパレートヘッドエンジンにおけるガス漏れ箇所とボア間ボルトを見ると、次

の二つの要因を挙げることができる。図3に示すように、①ボア間のシール幅の僅少と②ボア間のボルト締め付け不足である。8MA1エンジンでは、隣接する二つのヘッドを両方にまたがるブリッジを介してボルトを兼用して締め付けている。このブリッジがクリープするとその影響でボルト軸力が減少するので、その部分（ボア間）のシール面圧が低下し、ガス漏れが生じやすくなる。また、6D20の例では、ボア間に配置されているボルト間隔（図中、 $D_2$ ）が他の部分（図中、 $D_1$ ）より長い。そのため、ボア間部が締め難くなるので、その部分のシール面圧が低くなり、ガス漏れの要因になりやすい。そのような厳しいシール条件であっても、金属積層形ガスケット

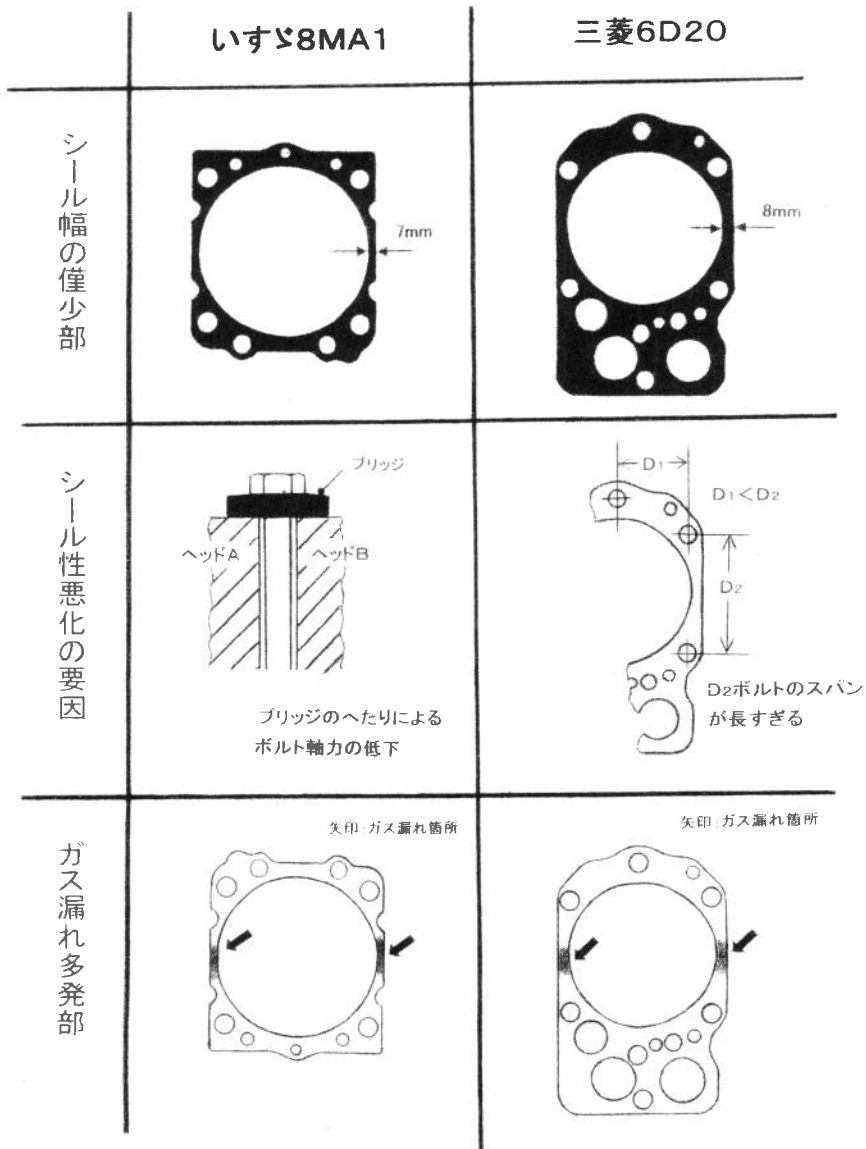


図3 セパレートヘッドエンジンにおけるガスケットのガスシールの問題点

を用いれば対応できることが立証されたともいえる。

しかし、当時のディーゼルエンジンの主流は金属被覆形ガスケットであったので、一般的なディーゼルエンジンには採用されていなかった。金属積層形ガスケットが普及する契機は、1976頃いすゞ自動車に既に量産していた6, 8, 10気筒のV型シリーズの大型ディーゼルエンジンへの採用である。このエンジンは、いすゞの大型のメインエンジンであり、当初は金属被覆形のガスケットが採用されていたが、ガスケットの耐久性向上を目指し、通常では考えられない量産中のエンジンを金属積層形ガスケットにランニングチェンジすることになった。これは、多分8MA1エンジンの実績が評価されたものと考えられる。それ以降、各ディーゼルエンジンメーカーは、次々とメイン機種に金属積層形ガスケットを採用することになった。

一方、ガソリンエンジンについては、当時、メタルコア・アスベストガスケット（スチールベア）が主流であった。このガスケットは構造が簡単で、生産性に優れ、低コストであったので、大量生産が主体であるガソリンエンジンに適していたと思われる。しかし、クリープ・リラクゼーションが大きい短所があり、シール条件の厳しいディーゼルエンジンにはあまり用いられなかった。

1978年、米国のデイトナで開かれた24時間耐久レースにスズキが大型オートバイGS1100（1100cc）を参加させたが、レース途中でガスケットのトラブルで完走できない事態が起こった。オートバイのエンジンは軽量、小型、高出力の最先端を行くもので、ガスケットにとっては極めて厳しいシール条件であったが、レース用エンジンともなれば更に過酷な条件である。過酷なシール条件を克服するため、ガスケット開発の過程では様々な問題が起こったが、満足できるガスケットが完成された。このガスケットによりスズキGS1100オートバイはデイトナ24時間耐久レースを完走し、しかも優勝したのである。そしてレース用エンジンに使用されたガスケットは、一般市販車用に改良されたエンジンに採用され、1980年頃に発売された。このガスケットが日本で初めてガソリンエンジンに採用された金属積層形ガスケットである。

自動車のガソリンエンジン用ガスケットについては、ディーゼルエンジンに比較してシール条件が緩いため、コストの安いメタルコア・アスベストが依然多く使われていた。しかし1980代、米国でアスベスト公害問題が起こり、やがて日本にもその影響により、アスベスト系ガスケットは徐々に減少し始め、それに代わりメタルコア・グラファイトやメタルコア・人造繊維ガスケットが使われるようになった。しかし、過給エンジンが増加してくると、そのシール対応に満足すべき結果が出せなかった。そのような状況の中で自動車ガソリンエンジンに最初に採用したのもスズキであった。その後、マツダ、ホンダと続き、2年程遅れて、トヨタと日産が採用したのを契機に残るメーカーもこれに追随した。

金属積層形ガスケットが採用された一連の経過を年代で整理すると、図4のようになるが、これが日本における金属積層形ガスケットの採用の歴史でもある。金属積層ガスケットが一般的に受け入れられるまでには、長い年月が費やされたことがわかる。

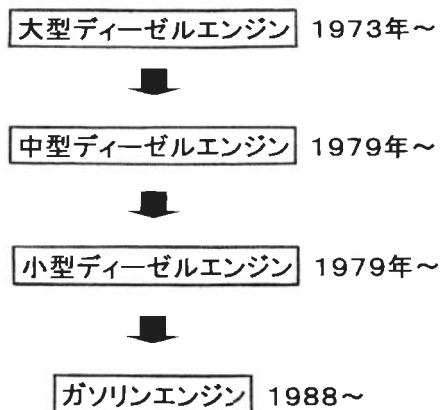


図4 金属積層形ガスケットの自動車用エンジン採用の経緯

### 3. 金属積層形ガスケットのシール機構

金属積層形ガスケットのシール機構は、各積層板に役割を分担させているので、構造的には複雑であるが、それぞれ特長ある機能を持っている。

#### 3.1 ガスシール部のシール構造

##### 3.1.1 ガスシール部の機能分担

金属積層形ガスケットは、その積層板によって機能を分担してシール構築をしている特徴がある。このことが、このガスケットの広範囲なシール対応性を可能にしている根源となっている。その機能分担にはビードによる圧縮復元機能と板厚段差構造がある。

ビードは圧縮復元性の機能を担当し、図5に示すように、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。

燃焼ガスをシールするためには高面圧が必要であるので、ガスシール部に面圧を集中しなければならない。その手段としては、図6に示すように、ガスシール部と平坦部の積層板厚の段差構造を用いて面圧を増強し、ガスシール性を確保している。段差(図中、 $\Delta t$ )を大きく採ればシール面圧は高くなる。逆に小さく採れば面圧は低くなる。勿論、ボルト締め付け力との関係を考慮し、適正な面圧を設定する。段差の大きさはガスシール部の積層厚さ(図中、 $T_1$ )と平坦部積層厚さ(図中、 $T_2$ )の差を調整して行うが、段差は0.05~0.25mmが用いられる。通常、大きなシール面圧を必要としないガソリンエンジンでは小さい方の値(0.05~0.1mm)を、大きなシール面圧を必要とするディーゼルエンジンでは大きい方の値(0.15~0.25mm)を選定する。

金属積層形ガスケットの構造は、エンジンの高性能化とともに大きく進化して複雑化してきたが、上述した機能分担は基本的に変わっていない。今後の課題は、それらの機能を適正に組み

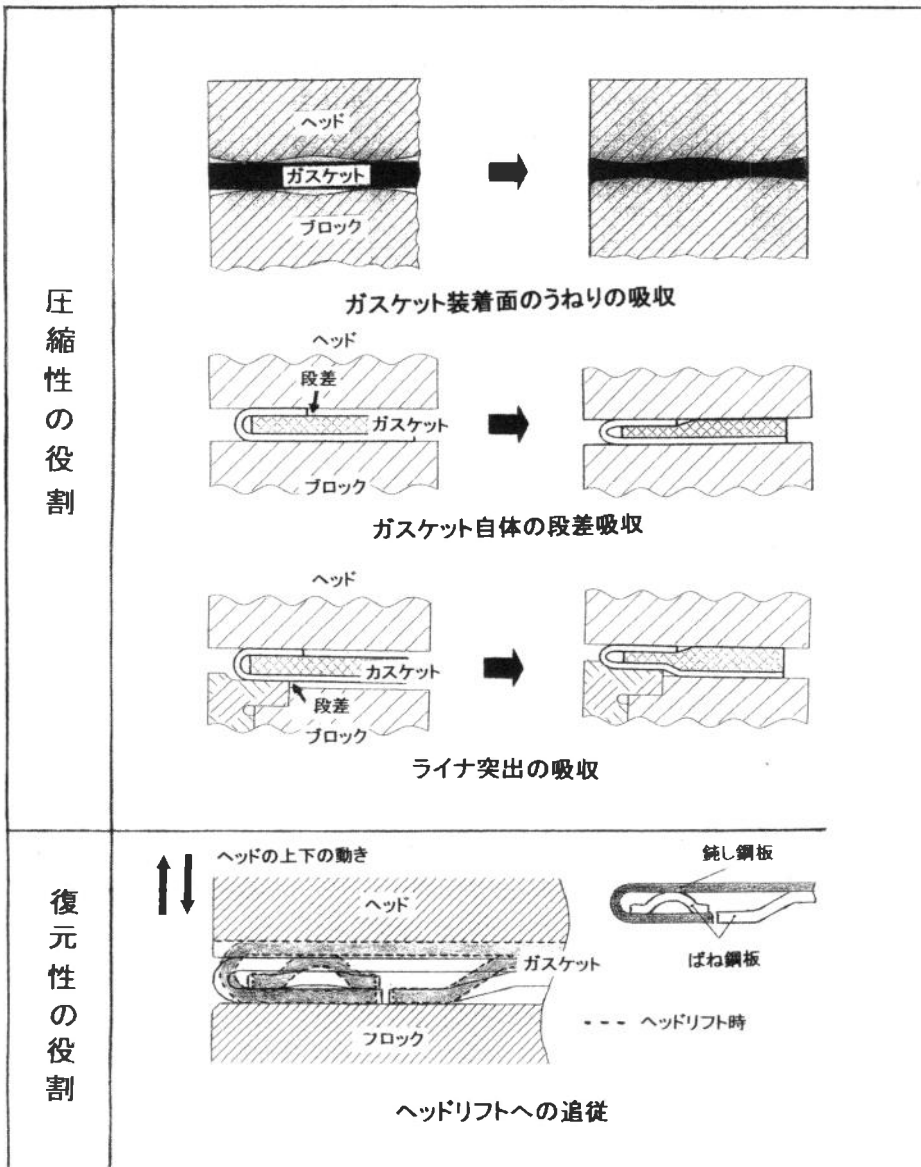


図5 ガスケットの圧縮復元性の役割

合わせ、厳しいシール環境に対応できるガスケット構造の構築である。

### 3. 1. 2 ガスシール部のビード構造

初期の金属積層形ガスケットのシール部断面構造は、積層板を下板で燃焼室穴側面に折り返した単純なものであったので、エンジンのガスケット装着部のうねり、ライナの突出量や傾きを吸収できない欠陥があった。したがって、その欠陥を補うための強力なボルト締め付け力を持つ、ヘビーデューティな船用エンジンや定置発電用エンジンなど、限られた用途に使用された。



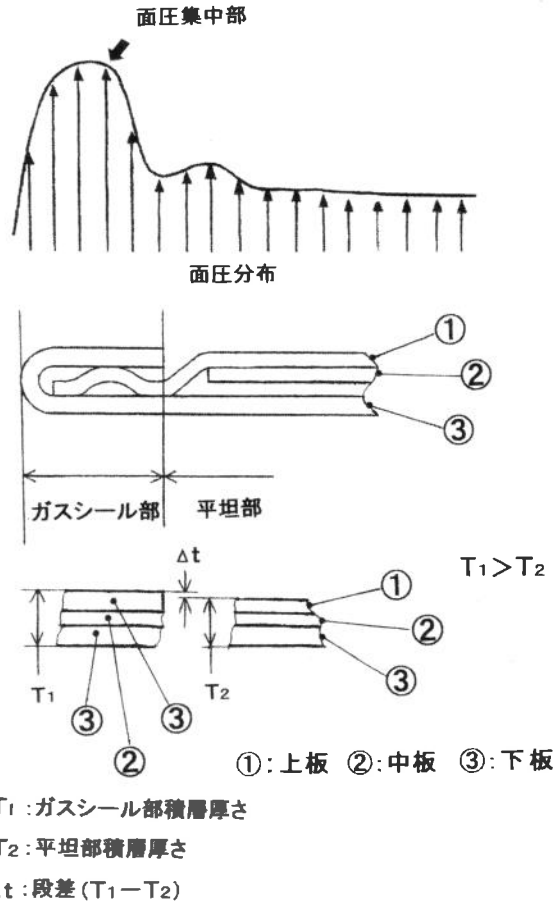


図6 ガスケットのガスシール部への面圧集中方法

初期の金属積層形ガスケットの欠陥を補い、自動車用エンジンに使えるように改善努力が払われた。試行錯誤の結果が、シール部にビードを設けて圧縮復元機能を付加することであった。当初はシングルビード構造であったが、後に、ハーフビードと呼ばれるクランク型をしたものが現れた。このビードはわずかな面圧でも簡単に圧縮される特性を持っていたので、シール面圧の低い液体穴シールに多く用いられた。また、ディーゼルエンジンに比べ締め付け力が小さいガソリンエンジンが主な用途であった。ノンホールドオーバガスケットではガスシールにも使用された。

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かった。しかし、小型でも剛性が低くうねりが大きいエンジンや中、大型ディーゼルエンジンになると、ライナの突出 (0.05~0.10mm) 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った。そこで考案されたのが、上下ダブルビード構造である。この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た。

しかし、時代とともに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（へたり）を促進させ、ビード本来の機能（圧縮復元性）を低下させた。そこで、これに対応するために考案されたのが、並列ダブルビードおよび上下対抗並列ダブルビードである。並列ダブルビードの利点は、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。

そこで考案されたのが、上下対向ダブルビードである。この構造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、図7に示すように、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。本構造は著者の一人（宇田川）が1988年に考案したもので、世界主要国のパテントを取得しているとともに多くの金属積層形ガスケットに採用されている。

上述のように、ビード構造は様々なニーズに対応すべく改善されてきた。図8には、ビードの

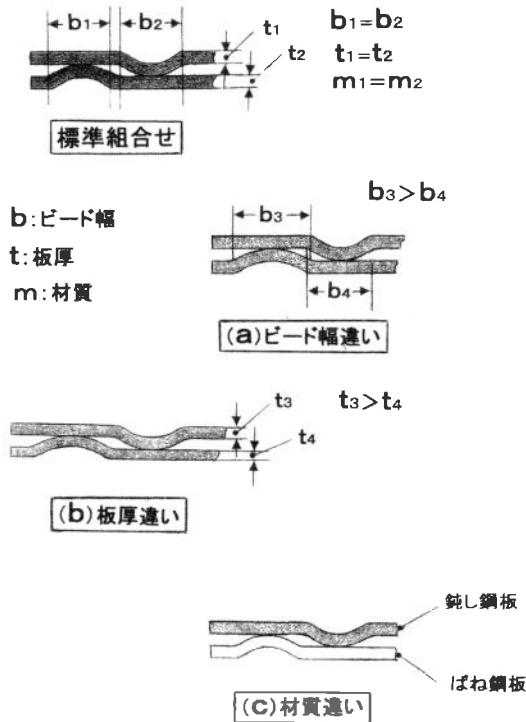


図7 上下対向ビードの組合せの種類

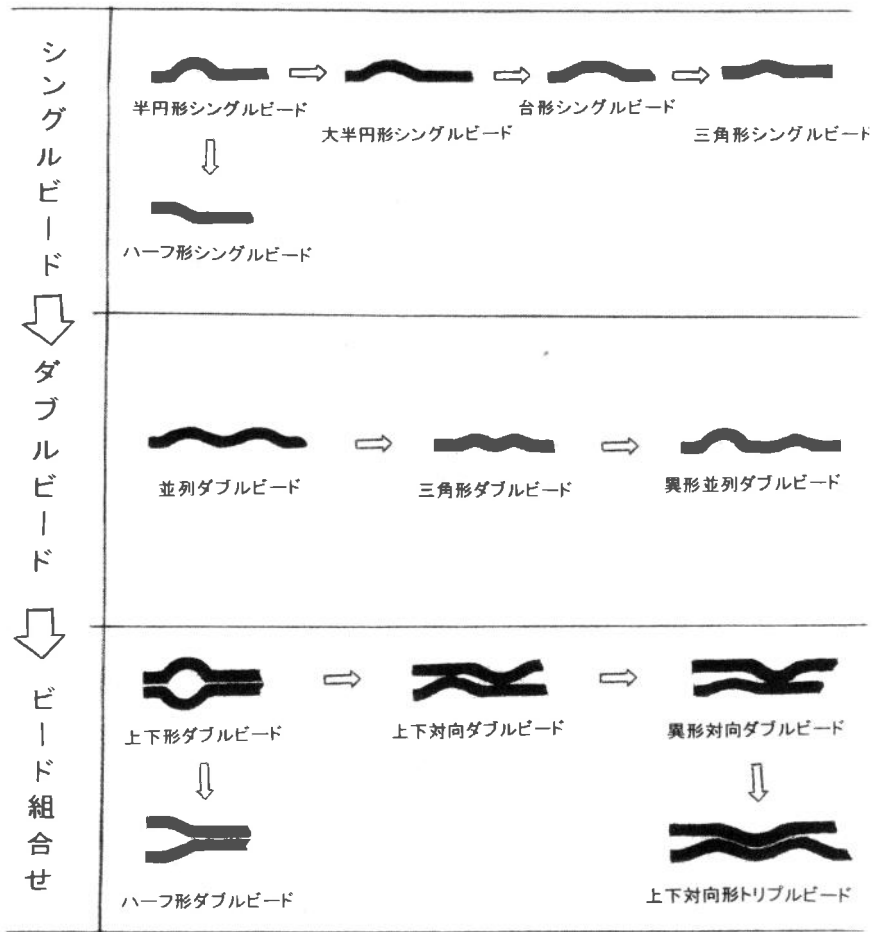


図8 ビードの進化過程

進化過程の概要を示した。

### 3. 1. 3 ガスシール部の積層板厚段差の調整方法と構造

ガスシール部の構築はシール面圧を設定し、シール部に高面圧を発生させることから始まる。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設計時の初期面圧として設定する。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倍の値であり、この数値はガスケットのガスシール設計時に用いられている。

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、面圧の集中度合いを決定する。図9には、ガスシール

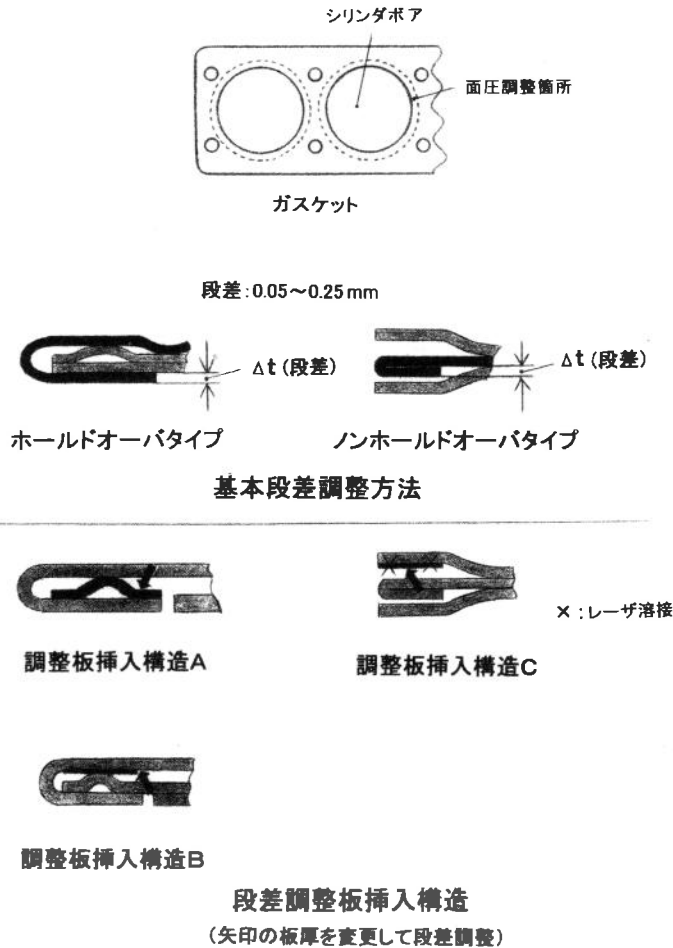


図9 段差の調整方法と主な事例

部における主な積層板段差調整方法について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。ホールドオーバータイプでは基本的に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 ( $\Delta t$ ) を調整する。しかし、シール上の都合により基本構造のみでは設定した段差の値が得られない場合がある。その場合には、図中A, B, Cに示すように、段差調整板を挿入する方法を併用あるいは単独で用いる。段差は、ガスシール部の必要面圧により異なるが、0.05~0.25 mm の範囲の値が用いられている。一般的にシール面圧が大きなディーゼルエンジンでは段差値は大きく採り、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ので、留意する必要がある。

### 3.2 液体穴 (水, オイル穴) シール構造

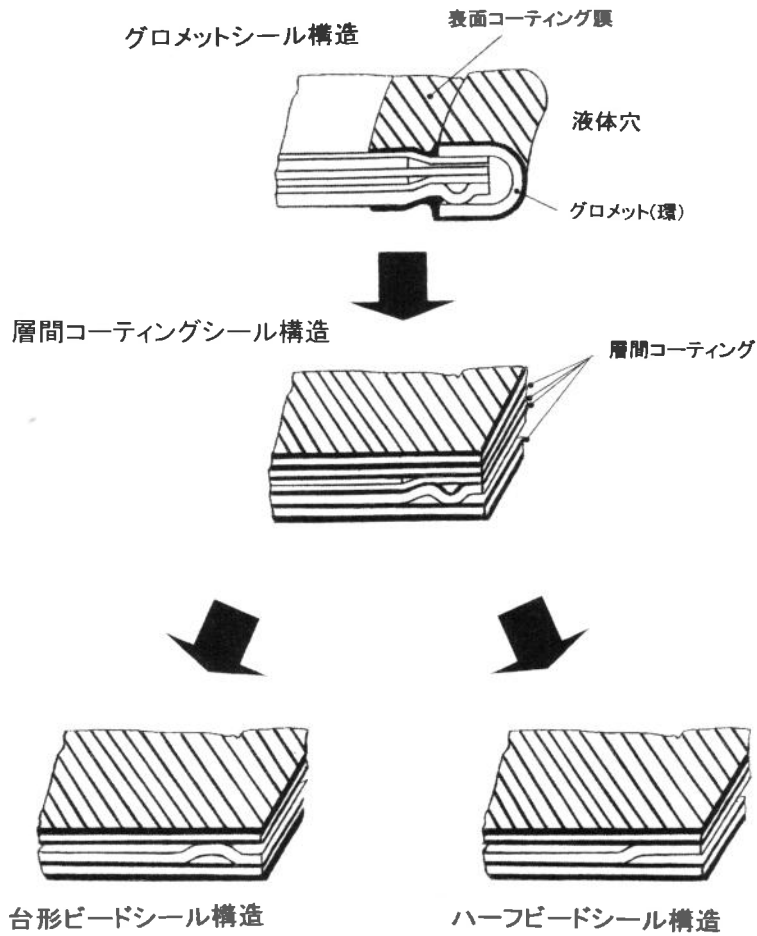


図10 液体シール構造の進化過程

液体シールは、ガスシールに比べ内圧が小さいので、シール面圧も0.1～1 MPa程度で充分シール可能である。初期段階では積層板間にシールコーティングを施していなかったため、積層間に液体が浸透するのを防ぐため、穴にグロメットと呼ばれる銅製の環を嵌め込んで側面を覆い、液体穴側面からの侵入を防ぐ構造を採用していた。しかし、穴にいちいちグロメットを挿入することは生産性が悪いこと、円や楕円形状ではグロメットを使用できるが、それ以外の異型の穴には使用できないことなどの不都合があった。

そこで考案されたのが、積層間にシールコーティングを施し、層間漏れを防ぎ、穴周囲にビードを設けて相応のシール面圧を発生させるシール構造である。このシール構造は、穴の形状に関係なくシールが可能のために利用範囲が広く、現在、液体シールの基本的構造になっている。図10には、液体シール構造の進歩の過程を示した。時代とともにシリンダボアシール部に面圧を集中するシール構築方法が採用されるようになり、必然的に液体シール面圧は減る傾向があるため、

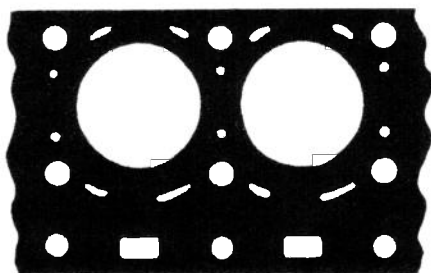
低い面圧でもシール可能な構造が開発され、構造も簡素化されてきたことがわかる。

### 3.3 ミクロシールコーティング

マイクロシールコーティングは、エンジンのガスケット装着面とガスケット表面の密着を補うために用いられる。開発当初はシリコン系のコーティング剤が用いられたが、コーティング膜が硬く密着性が悪いため、フッ素ゴム系に代えられた。

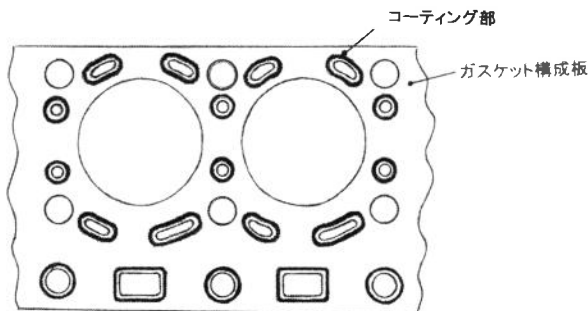
コーティング方法も当初は吹き付け方法であったが、コーティング剤が飛散して無駄が多く衛生的にもよくないため、一時期、ロールコーティング方法やフローコータ方法に代えられた。しかし、必要な部分のみにコーティング（部分コーティング）ができない不都合があり、全面および部分をコーティングできるスクリーンコーティング方法が多く用いられるようになっている。図11には、全面コーティングと部分コーティングの概要を示した。

コーティング順序には、いくつかの方法がある。①ガスケットに用いる板にコーティングした後にガスケットの形状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



全面コーティング

コーティング厚さ:  $30 \pm 5 \mu\text{m}$   
 コーティング材質: フッ素又はシリコン



部分コーティング

図11 コーティング方法

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。

金属積層形ガスケットにとってコーティングは重要な役割を果たすが、その膜厚は接面の面粗度の程度によって選定される。通常、表面で20~30 $\mu\text{m}$ 、層間では15 $\mu\text{m}$ 以下であるが、誤差は±5 $\mu\text{m}$ 程度で大きな誤差は許されないので、高度の製造技術が要求される。つまり、薄ければミクロシールに支障が生じ、厚ければクリープ・リラクゼーションを促進する要因となるので、膜厚は微妙さが要求される。コーティングはシール性能に直結するので慎重な配慮が必要である。特に、細かいごみなど、異物の混入や付着は禁物である。

#### 4. 金属積層形ガスケットの開発のニーズ

金属積層形ガスケットの開発はエンジンの進歩とともに行われてきたが、その過程を見ると、その時々ニーズが浮上してくる。つまり、エンジンの種類による要求やガスケットの使用環境変化への対応、材料使用における社会的要請など様々なニーズである。

##### 4.1 ディーゼルエンジンのニーズ

ディーゼルエンジンは元来シーリングに厳しい環境のエンジンであるが、その主な要因は高い燃焼圧力にある。ターボ過給機付きエンジンが普及してくると、さらに燃焼圧力の上昇傾向が急激になり、シール環境を一段と厳しいものにした。そのため、このような環境に耐えられるガスケットが要求された。また、小型ディーゼルエンジンの燃焼効率を上げる目的で、ピストン頭部とヘッド下面のトップクリアランスの縮小が推進されたため、ガスケットの締め付け時厚さ精度は従来0.1mm代であったが、0.01mm代が要望されるようになった。この精度を達成できるのは金属ガスケット以外無く、中でも自動車用エンジンの広範囲な用途に対応できるのは金属積層形ガスケットのみであった。

##### 4.1.1 ターボ過給機付きエンジンへの対応

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ル性は低下する。そのメカニズムの概要を図12に示した。ターボエンジンは高燃焼圧力であるので、ヘッドのリフトが増大してガスケットのガスシール部の口開きが増大するため、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、シール面圧が急激に低下してシール性に大きく影響する。

そこで注目されたのが、クリープ・リラクゼーションの少ない金属積層形ガスケットである。このガスケットの採用が従来の金属・非金属組み合わせガスケットに代わって急激に増加したのは、ターボ付きディーゼルエンジン普及の時期と重なるのはそのためである。

##### 4.1.2 小型エンジンのトップクリアランス縮小への対応

小型ディーゼルエンジンにおいて燃焼効率を上げる手段の一つとしてピストン頭部とヘッド下面とのトップクリアランスを縮小する方法がある。しかし、この方法の達成には、エンジン組み

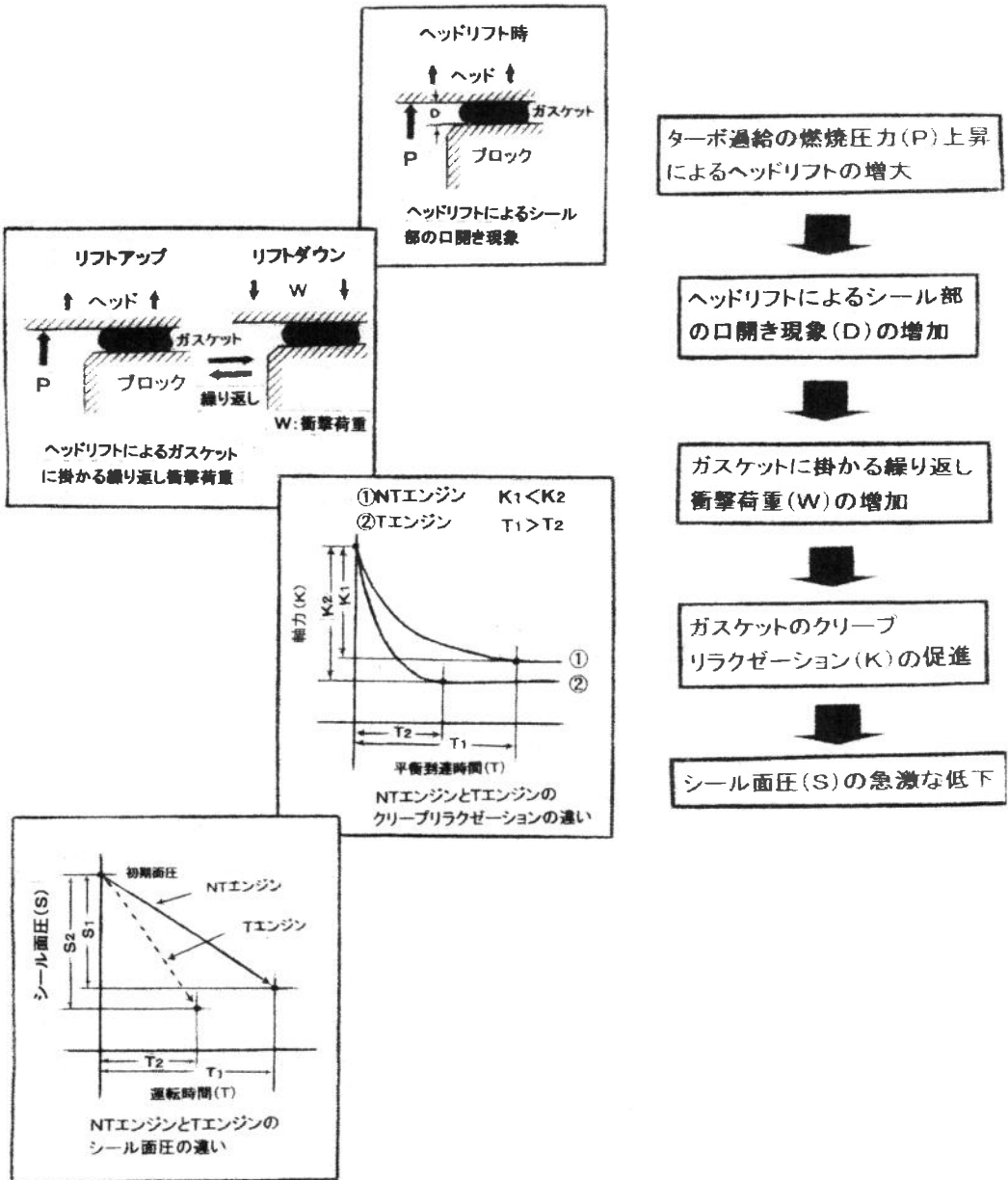


図12 ターボエンジンによるガスケットシール性悪化のメカニズム

立ての誤差を小さく抑える必要があった。対象になっていたエンジンは1.5～3 Lクラスであり、当時の標準的なトップクリアランスは1 mmであったが、縮小目標はこれを0.6mm程度までにするものであった。この達成には、燃焼室を構成している個々の部品の組み立て誤差を小さくするため、部品の仕上げ精度を上げる必要がある。

仕上げ精度は、部品の大部分は切削や研磨加工であるので、当時の技術を駆使すれば困難なこ



とではないが、一つ大きな問題であったのがガスケットの締め付け時厚さであった。当時のガスケットの主流は金属と非金属を組み合わせたタイプのガスケットであったので、非金属材料の密度の関係でガスケット締め付け時厚さの誤差(トレランス)がプラス、マイナス15~25%程度で、かなり大きかった。したがって、トップクリアランスを目標通り縮小すると、トレランスがマイナス側に最大に振れた場合にはピストンの頭部がヘッドの下面を突き上げる可能性があり、またプラス側に振れるとトップクリアランスが増加する方向になって燃焼効率が悪くなり、縮小の目的は達成できないことになる。

そこで注目されたのが、金属積層形ガスケットである。このガスケットはその構造上、締め付け厚さ精度はプラス、マイナス2~3%程度で、従来のガスケットに比べ桁違いに優れている。そのため、上記の用途にも金属積層形ガスケットが使われ始めるようになった。

#### 4. 2 ガソリンエンジンのニーズ

ガソリンエンジンではディーゼルエンジンに比較してシール条件が緩いこともあり、ディーゼルエンジンよりかなり遅れて金属積層形ガスケットは普及した。初期段階では、レース用エンジンのような過酷なシール環境での使用やエンジン設計上シール条件の厳しいエンジンなど、採用は限定されていた。通常のエンジンに多く採用されるようになったのは、オーバヘッドカムシャフトエンジン(OHCエンジン)が普及し始めたときと、エンジンの使用環境が日本と大きく異なった国への海外輸出が盛んになった時期に概略一致する。ガスケットを取り巻く環境の変化もガスケットを交代させた要因である。

##### 4. 2. 1 OHCエンジンへの対策

自動車用エンジンの大部分がサイドバルブエンジンであった時期では、多くはアスベスト系ガスケットが使用されていた。このガスケットはクリープ・リラクゼーション(へたり)が大きく、ヘッドボルトの軸力低下率が20~30%あるので、エンジン運転中にシール面圧が下がり、ガス漏れなどシーリングの問題が多発した。そのため、新しく使用するエンジンでは、ある程度運転(車に搭載されたものでは、3000~5000km走行)した後に増し締めと称し、再びボルトを締め直す作業が行われていた。これはボルト軸力の低下を補正するもので、エンジンの取り扱い説明書にも記載されていた。しかし、OHCエンジンが普及してくると、ヘッドの上部にOHCの機構があるので、簡単に増し締め作業ができなくなって問題となった。

そこで、増し締めしなくてもよいクリープ・リラクゼーションの少ないガスケットが要求された。この要求に対応できたのが、金属積層形ガスケットである。このガスケットのボルト軸力低下率は7~10%で極めて少なく、増し締めは必要としなかったため、OHCエンジンには積極的に採用されるようになった。

##### 4. 2. 2 アルミヘッドエンジンの寒冷地対策

日本車が欧米に輸出され始めて間もなく、ガスケットのクレームが米国や欧州で起きた。ク

レーム内容の調査によると、発生時期は冬期で、発生場所は寒冷地（外気温 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下）に限定されていたが、その内容はガスケットのガス漏れ、水漏れ、オイル漏れなど、漏れ現象は様々である。この現象はエンジンの製造メーカを問わず発生したので、一時大問題になり新聞紙上でも大きく取り上げられたが、この原因はガスケットのき裂によるものであることが判明した。そのメカニズムは意外なところにあることが後になって解明された。

当時、乗用車に搭載されていたガソリンエンジンは、シリンダヘッドがアルミ製、シリンダブロックは鋳鉄製であった。両者の熱膨張率が大きく違うため、温度差の大きい条件で使用されると、両者の間に挟まれてボルトで強く締め付けられているガスケットは、上下（ヘッドとブロック）の動きが異なる状態に置かれる。つまり、熱膨張率の大きいヘッド側に接しているガスケットの上面は、膨張収縮時に水平方向に擦られる状態で引っ張られることになる。下面はブロックが鋳鉄であるため膨張収縮は少ない。つまり、ガスケットに対しその上下で動きの異なる作用がエンジンの運転、停止時に繰り返し行われる。冬季、寒冷地でのエンジン温度の変化は運転時（約 $80^{\circ}\text{C}$ ）、停止時（外気温 $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$ ）になり、この状況は外気温が低ければ一層厳しい状態となる。

そこで、そのような条件でもき裂が発生しないガスケットが要望された。当時のアスベストと金属を組み合わせたガスケットに比べて引張強度の大きいガスケットが求められ、金属積層形ガスケットが候補に挙げられた。この意図は的中し、ガスケットを金属積層形ガスケットに交換するだけで簡単に解決された。以後、アルミヘッドと鋳鉄ブロックのエンジンには殆んど金属積層形ガスケットが採用されるようになった。この件は派生的なニーズであったが、ガソリンエンジンに金属積層形ガスケットが普及した一つの契機になった。

#### 4. 2. 3 アスベスト公害対策

アスベストは耐熱材として優れた特性を示す。ガスケット材としても、その優れた圧縮性と耐熱性が高く評価され、しかも廉価であったので、古くから主材料として多く用いられてきた。ガスケット用として用いられたものは、主にクリソタイルと呼ばれる種類のアスベストで、カナダ・ケベック州に産するものが多く使われた。鉾山から産出するものは、アスベスト繊維を多量に含んだ岩石で、これを粉砕して繊維を取り出し、繊維の長さ別にグレード化して用途に適したものを使用する。

ガスケット用には、繊維長さ $2\sim 3\text{ mm}$ ものがガスケット材の原料としてシート状にして使われていた。しかし、1970年代後期、米国においてアスベスト公害問題が起き、1980年代には欧米において発がん物質としてその使用が厳しく制限された。その影響を受け、日本でもその取り扱いが厳しく制約されたため、アスベストは次第にガスケット材料として使われなくなって行った。この頃、アスベスト系ガスケットはガソリンエンジン用に多く使われていた。その代替品として、アラミド繊維ガスケットやグラファイトガスケットが一時期使われたが、コストが高いうえに、性能的に満足すべき評価が得られなかったため、その使用は短期間であった。

そのような状況下、コストはアスベスト系ガスケットに比べて高いが、金属積層形ガスケットが注目された。性能向上、構造の簡素化によるコストの削減等ガソリンエンジンを対象としての改善が加えられた結果、その使用度は飛躍的に上昇し、今日ではガソリンエンジンの殆どに金属積層形ガスケットが使用されている。ガソリンエンジンでは、アスベスト公害対策のため、金属積層形ガスケットが採用されるようになったといえる。

## 5. お わ り に

金属積層形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。したがって、その発展もエンジン高性能化とともに歩んできた。今日、自動車用エンジンでは日本において100%、海外でも95%以上が用いられている。この普及状況の根源を考えると、金属積層形ガスケットが他のガスケットに比較して優れている点は、その名が示すように、金属材料を積層して用いたところにある。金属材料を用いることによってガスケットの耐久性が向上することは勿論であるが、本文で述べたように、構成材の個々の板の厚さや材質を変え、また、板別にビードの形状を変えて、各々の構成板に機能を分担させることによってシール対応範囲が拡大したことである。

金属積層形ガスケットが持つ優れた機能によってその採用実績は、エンジンの種類（ガソリン、ディーゼルの大、中、小）を問わず、用途においても自動車用（2輪、4輪）、船用、建設重機用、農業機械用、産業機械用等々である。このような広使用範囲に用いられているガスケットは今まで見当たらない。今後、益々エンジンの高性能化が進展する状況の中で金属積層形ガスケットの果たす役割は一層重要になるものと考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) 高 行男, 宇田川恒和, シール環境の変化におけるシリンダヘッドガスケットの対応, 中日本自動車短期大学論叢, 第39号 (2009)
- (2) 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, P.872~879 (1979)