

# エンジン高性能化におけるシリンダヘッドガスケットシーリングの問題点

高 行男・宇田川恒和

## 1. 緒 言

シリンダヘッドガスケットは、エンジンの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同時にシールし、エンジンの性能維持に重要な役割を果たす部品である。ガスケットは一般的に注目されている部品とはいえないが、その役割は重要である。エンジンの高性能化が進展する中で、シリンダヘッドガスケットのシーリングは一段と厳しい環境に直面することになり、従来潜在していたシーリングの弱点が問題となってきた。すなわち、ガス漏れ、水漏れ、オイル漏れが生じ、ガスケットのシーリングに大きな支障をもたらしている<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、シーリングに支障をもたらす代表的な要因と考えられるヘッドの低剛性化、アルミヘッドの膨張・収縮、そして $P_{max}$ （最大燃焼圧力）の上昇を取り上げ、シーリングとの因果関係を検討する。

## 2. ヘッドの低剛性化によるシーリングへの影響

エンジンの軽量化によるヘッドの低剛性傾向は、シーリングへの影響が問題となってきている。特に軽量小型エンジンでは、アルミ材の採用や肉薄化による支障が現れている。中でも、その影響が最も大きい箇所は、シリンダ周囲のガスシール部である<sup>2)</sup>。

### 2.1 ヘッドのシリンダ周囲の部分剛性とシール面圧

エンジンのヘッド下面（ガスケットとの接触面）は、ガスケット装着時にヘッドの部分的な剛性の相違によって波状の変形となる。これは、剛性の強弱が変形に反映するためであると考えられる。図1はヘッドの変形とシール面圧の関連性について中型ディーゼルエンジン（6 L, 6 Cyl.）をモデルに用い、CAEにより解析した結果である。ヘッドの変形の大小と面圧の高低は連動し、また変形の大きい箇所（低剛性箇所）ではシール面圧は低くなっている。

### 2.2 ヘッドのシリンダ周囲の変形

#### 2.2.1 変形の測定方法

変形の測定方法の概要を図2に示す。厚さ1 mmの圧縮体（ガスケットの厚さ相当のピーターシート）をガスケットの平面形状に加工し、第2シリンダ周囲を均等割りした8箇所（図中、A-H）に直径5-6 mmの穴を開け、穴より若干小さい軟質金属チップ（電気用ヒューズをカッ

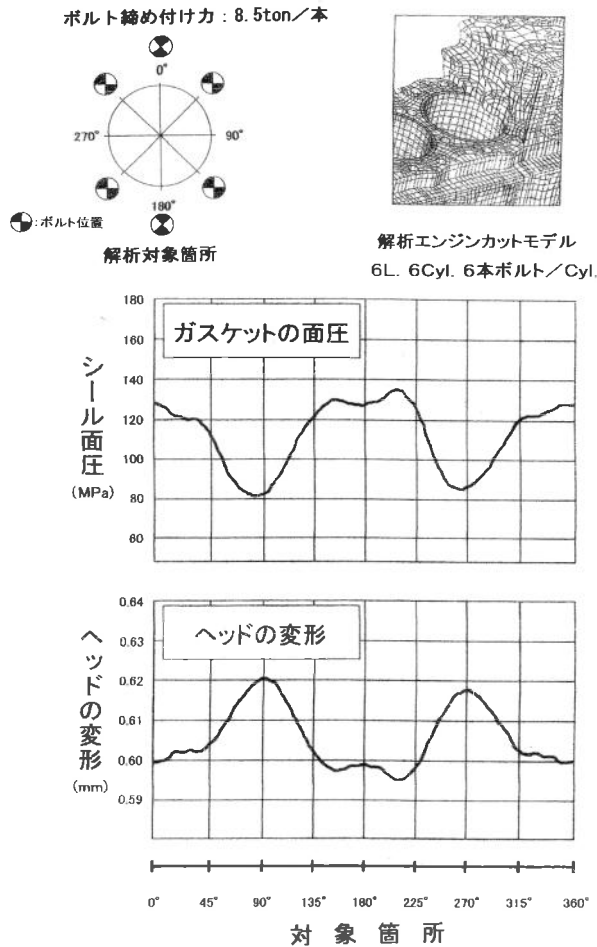


図1 CAEによるヘッドの変形と面圧との関連性

トしたものを)を挿入し、エンジン固有の締め付け力にて装着後、チップの厚さを計測することにより締め付け時のヘッドの変形状態を調査した。本試験にガスケットを用いなかったのは、ガスケットの構造や材質が計測結果に影響するのを避けるためである。また、締め付けに際しては、締め付け力の均等化を図るため、ボルトに歪ゲージを貼り付け、軸力値で管理した。測定に用いたエンジンプロックは、ヘッドのみ実機用のものとし、シリンダブロックには変形が無視できるダミーブロック(鋳鉄製のブロックにボルトネジ穴のみを加工したもの)を採用した。また、ヘッドの長手方向のたわみが計測値に影響するので、両端のシリンダは計測に用いず、中央側のシリンダ(第2シリンダ)を用いた。

### 2.2.2 アルミヘッドと鋳鉄ヘッドの変形比較

同クラスエンジン(2.5L, 4Cyl. ディーゼル)のアルミヘッドと鋳鉄ヘッドの変形状態を同一のボルト締め付け条件(8.5ton/本)で比較した結果を図3に示す。アルミヘッドは、鋳鉄ヘッ

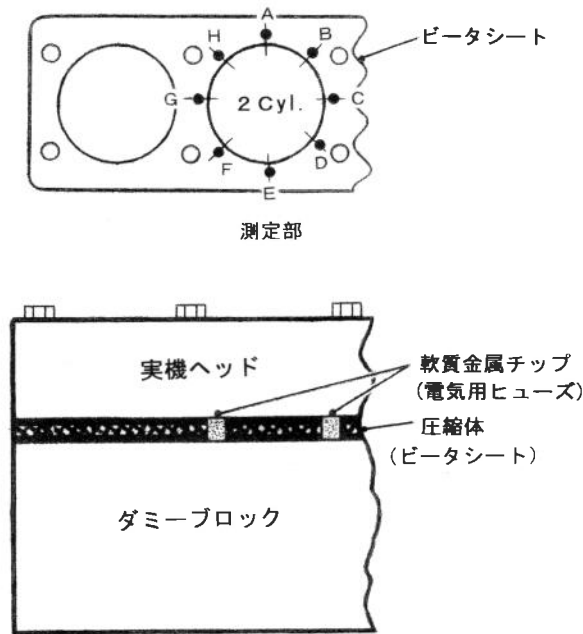


図2 ボア周囲におけるヘッド下面変形の測定方法

ドに比べボルト間で変形が大きく、特に、剛性の低いボア間（図中、C、G）における変形が顕著であり、剛性の強弱による影響が認められる。

### 3. アルミヘッドの膨張・収縮による液体シーリングへの影響

アルミヘッドはエンジンの軽量化の手段の一つである。エンジンの軽量化に貢献しているが、温度変化に鋭敏に反応するアルミ材の伸縮の大きい性質は、液体流通穴（冷却水、オイル）のシーリングに大きな影響を及ぼす。その代表的現象がヘッドの口開きである。

#### 3.1 口開き現象

ヘッドの口開きは、図4にその様子を示したが、エンジンの温度が上昇すると、ヘッドは膨張する。垂直方向の膨張によって口開き部近傍のボルト軸力が急激に増加するため、ボルト近傍部は一時的に強く圧縮され、ヘッドは同時に水平方向に膨張するので、ヘッドの反りが発生すると考えられる。

口開き現象を冷熱サイクルシミュレータで調査した結果を図5に示す。ガスケットを装着した実機のエンジンプロック（1.5 L, 4 Cyl.）に冷熱サイクル装置を接続し、ガスケットを挟んでいるヘッドとブロック間にギャップセンサを取り付け、冷熱サイクル（常温から+100℃ と-25℃、各ステップ10分）におけるギャップの変動を計測したものである。図示のように、ギャップは、エンジンプロックの冷熱温度（水出口温度）に連動して変化するが、温度変化との間にタイムラ

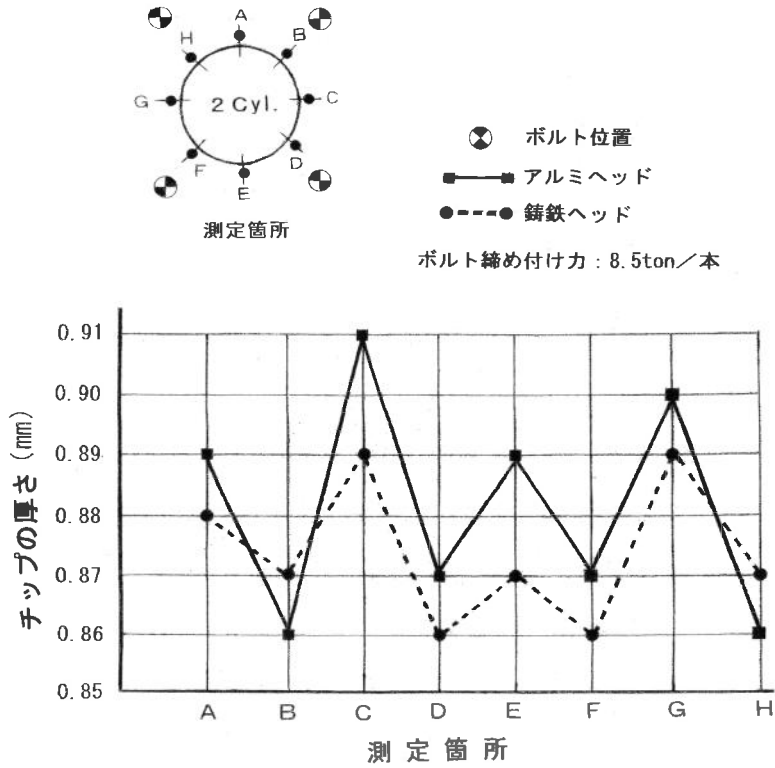


図3 アルミヘッドと鋳鉄ヘッドのボア周囲におけるヘッド下面の変形比較

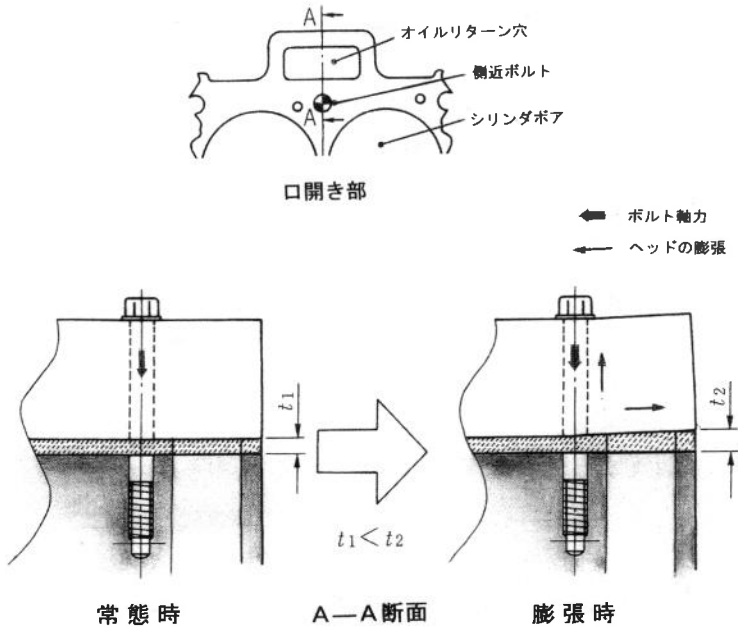


図4 ヘッド膨張時の口開きの挙動

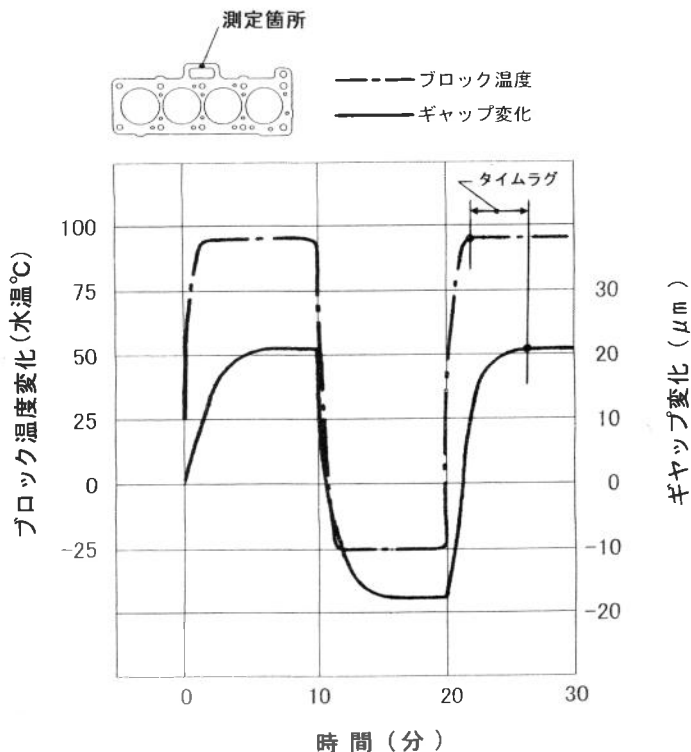


図5 ブロック温度変化に連動するギャップ変化

グが認められる。

また、ギャップはボルト位置からの距離に関係していることが、図6に示したダミーエンジンモデル(アルミヘッド、鋳鉄ブロック)に対するCAEの解析結果からわかる。この結果によると、ギャップはボルト位置から徐々に大きくなり、口開きの先端に行くほど大きくなる様子が認められる。これは口開き部先端に行くほどボルト締め付け力の影響が弱くなるためと考えられる。

### 3.2 口開きとシール面圧低下

ヘッドの口開きがシール性を阻害する要因を確認するため、前節で述べた冷熱サイクル条件において口開きとシール面圧の関連を調査した。面圧の測定には、図7に示すように、ガスケットと同形の板厚5mmの鋼板製の面圧測定板をガスケットの下側に配置し、また、面圧測定板とシリンダブロックとの接面から液体が漏れないように流通穴周囲に液体パッキンなどのシール材をブロック側に塗っておき、ガスケットと面圧測定板を共にエンジンプロックにセットする。面圧測定板には、所要の箇所に歪ゲージを側面に貼り付けた面圧感知素子が埋め込まれている<sup>3)</sup>。

図8に示した測定結果からわかるように、ギャップはヘッドの温度に連動して変化するが、面圧とギャップは連動していない。ギャップが大きくなっても面圧は著しく低下していないので、ギャップの変化量そのものは面圧に鋭敏に関与していないと考えられる。注目したいのは、温度

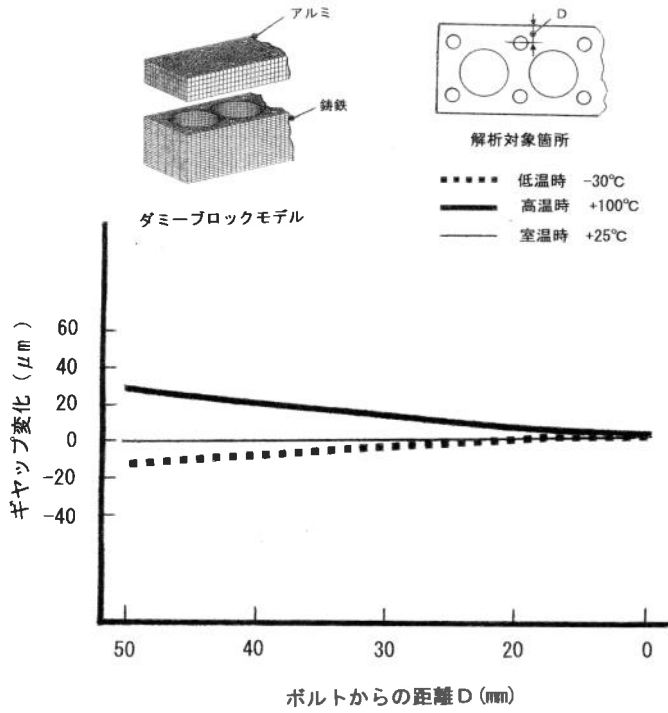


図6 CAEによる側近ボルトからの距離と口開き

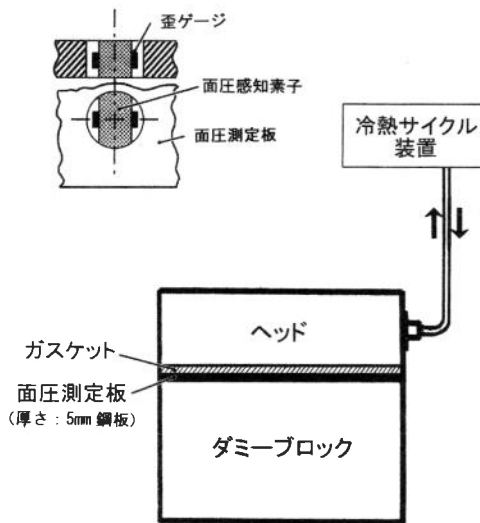


図7 冷熱サイクル条件によるヘッドの口開き時の面圧測定

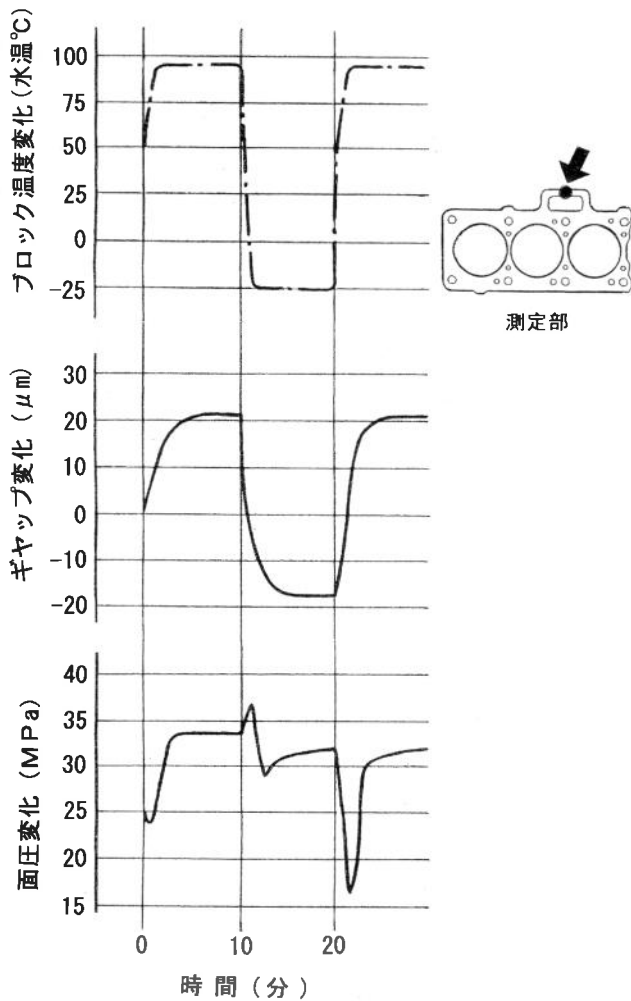


図8 温度，ギャップ，面圧の関連性

変化とギャップ変化の関連である。最高温度(+100℃)から最低温度(-25℃)の移行におけるギャップは緩やかな変化であるのに対し、最低温度から最高温度に移行するときのギャップは急激な変化を示す。この急激なギャップ変化時に大きな面圧降下が瞬時発生している。つまり、面圧低下は単なるギャップ変化量が大きいためだけでなく、変化の状態が関係している。このことは、変化量が大きくても、緩やかなギャップ変化にはガスケットは追従できるが、急激なギャップ変化には追従できないことを示している。これが口開きによる液体漏れの要因であると考えられる。

### 3.3 口開きと液体漏れ

ヘッドの口開きはその箇所にある液体流通穴よりの漏れ(冷却水、オイル)を生じさせるが、図9に各種エンジンに共通する漏れ箇所を示した。

一般的に口開きによる漏れは、締結ボルトの位置から離れ、締め付け力の影響が弱く、ヘッドやブロックの部分的な剛性が低い箇所が生じやすい。また、冷熱温度の差が大きい場合に発生しやすく、特にアルミヘッドでは漏れ件数が増える傾向がある。漏れはエンジンの運転初期段階で発生することは少な

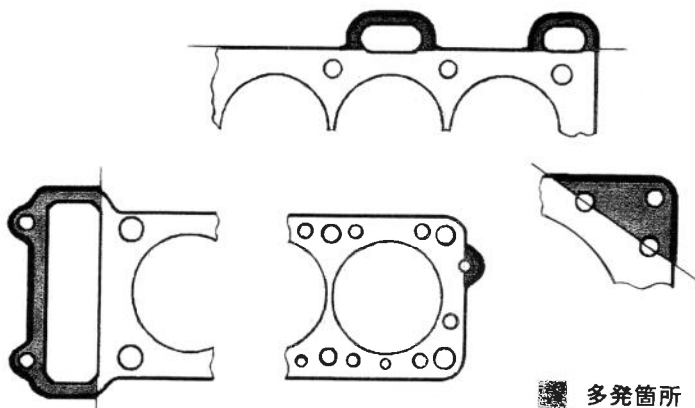


図9 ヘッドの口開きによる液体漏れ多数箇所

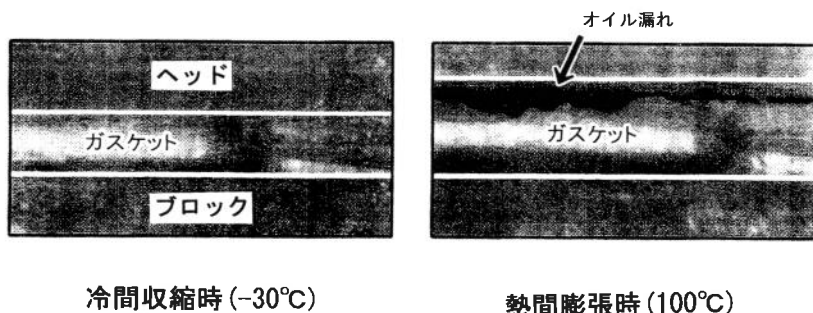


図10 マイクロスコープによる口開き時の漏れの観察

く、時間の経過に伴い現れる場合が多い。この傾向は各種エンジンに共通して認められるが、漏れ時期は各エンジンの持つシールに対する条件の相違やガスケット構造の違いにより若干異なる。

冷熱サイクルシミュレータを用い、オイルリターン穴のオイル漏れを調査した結果を図10に示す。調査には実機のアルミヘッド (1.5 L, 4 Cyl. エンジン) を用い、シリンダブロックは液体穴のないダミーブロックである。ヘッド側に冷熱サイクル装置を接続し、ヘッドのオイルリターン通路にオイルを満たし、冷熱サイクル (+100°C と -30°C, 各ステップ10分) において、ガスケット装着側面近くにマイクロスコープを設置してオイルの漏れ状況を観察したが、漏れは冷間時には認められないが、熱間時には認められた。つまり、オイル漏れはヘッドの膨張時 (口開き時) に起こり、冷熱サイクルに同調して間歇的に生じる現象であるといえる。

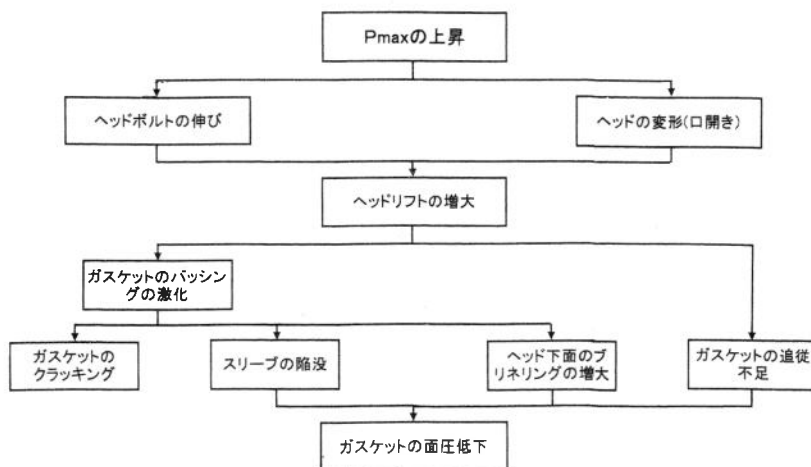


図11 Pmax 上昇によるシーリング環境悪化



#### 4. Pmax 上昇によるガスシーリングへの影響

エンジンの高性能化に伴い Pmax（最大燃焼圧力）は高くなる傾向がある<sup>4)</sup>。Pmax が上昇すると、ボルトの伸びが大きくなると共にヘッドの変形が増加するため、ヘッドリフトが増大し、シーリングに重大な影響を及ぼす。その程度はエンジンの種類により異なるが、特に、ディーゼルエンジンでは一般的に Pmax が高いので大きな影響を受ける。中でも小型エンジンでは通常、シリンダ当たりのボルト本数は少なく（4本）、ボルトが細く伸びやすいことと、ヘッドの剛性が弱いので下面の変形が大きくなり、ヘッドリフトが大きいためガスケットシーリングに支障が生じやすくなる。図11には、各エンジンに共通する Pmax 上昇によるシーリングへの影響を系統的に示した。

##### 4.1 Pmax 上昇とガスケットのシール性

ディーゼルエンジン（4L, V6 Cyl.）を用い、Pmax のみを変えて同一運転条件（4/4 負荷、3000rpm, フラット運転）で300時間のダイナモテストを行い、ガスケットのシール性を調査した。図12に示すように、Pmax が15MPa（本エンジンの通常の条件）では300時間の運転においてもガス漏れは認められなかったが、18MPa の高 Pmax 条件では150時間を過ぎるあたりからガス漏れが始まり、時間の経過に伴い漏れ量が急速に増加することが認められた。この事例は、高 Pmax 化がシール性へ大きな影響を及ぼしていることを明瞭に示している。

##### 4.2 ヘッドリフトの増大とシール面圧低下

Pmax の上昇はヘッドリフトを増加させ、シール面圧を低下させる。Pmax の上昇によるヘッドリフトとシール面圧との関係を、大、中、小のカテゴリからディーゼルエンジン各1基を選定し調査した。試験には、ヘッドは実機のもの、ブロックはダミーブロックを用いている。ガスケットの第2シリンダボアにヘッドのノズル穴より窒素ガスを圧入し、内圧を徐々に上げてヘッドリフトとシール面圧を計測する。ヘッドリフト測定の詳細を図13に示したが、ボア周囲8箇所を計測し、その平均値を求めた。シール面圧の計測は、3.2節で述べた面圧測定板によって行った。

3つの内圧条件（16, 18, 20MPa）について試験した結果を図14にまとめた。これによれば、内圧（Pmax）とヘッドリフトの関係は、Pmax が上昇するに伴ってヘッドリフトは増加するが、その変化は Pmax が高くなるほど急激に大きくなることが認められる。この傾向はエンジンが小型化するほど顕著に現れている。また、シール面圧はその影響で大きく低下することがわかる。シール面圧の低下は、ヘッドリフトの増大にガスケットが追従できなくなっていることを示している<sup>2)</sup>。

##### 4.3 ヘッドリフトの増大とシール部へのパッシングアタック

エンジンの Pmax が上昇すると、ヘッドリフトが増大する。パッシングはシリンダ内の爆発圧力によりヘッドが上下運動するために起こる現象で、Pmax が上昇すると、ヘッドのガスケットに対するパッシングが強力になり、ガスケットシーリングに支障をもたらす。

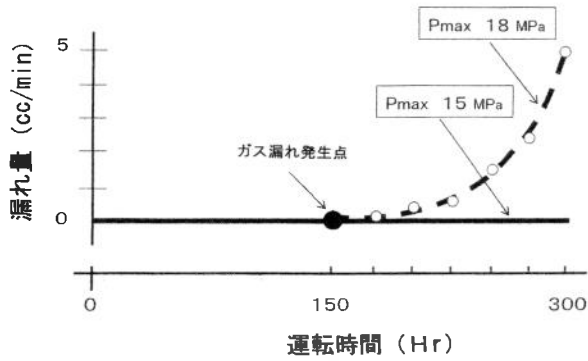
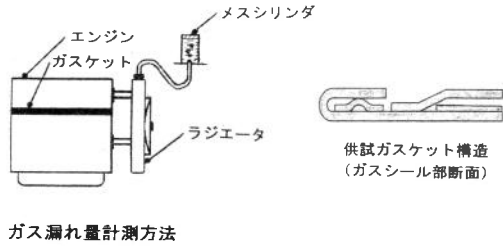


図12 Pmaxの高低によるガス漏れ

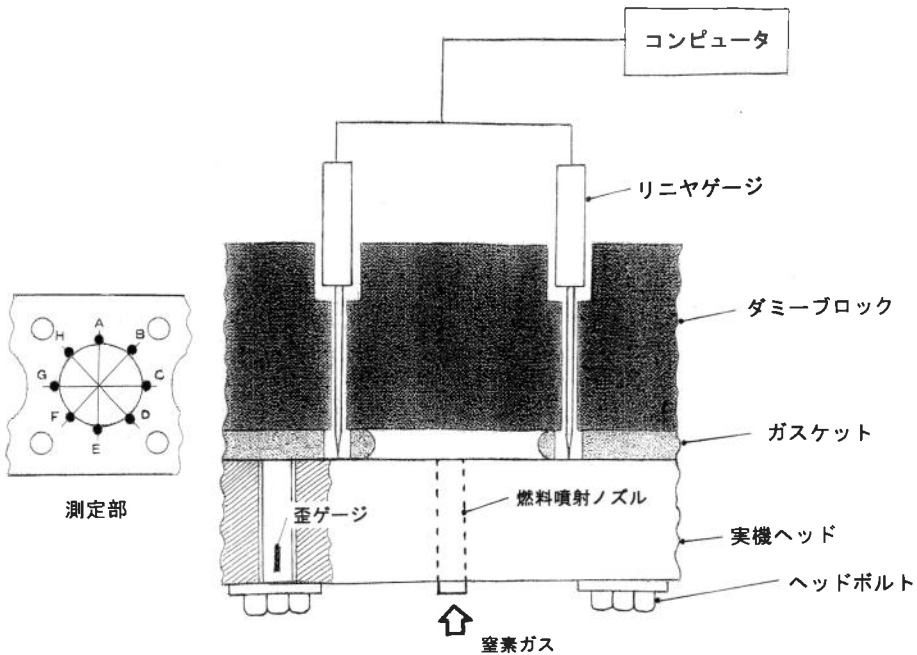


図13 ボア周囲のヘッド下面変形測定装置

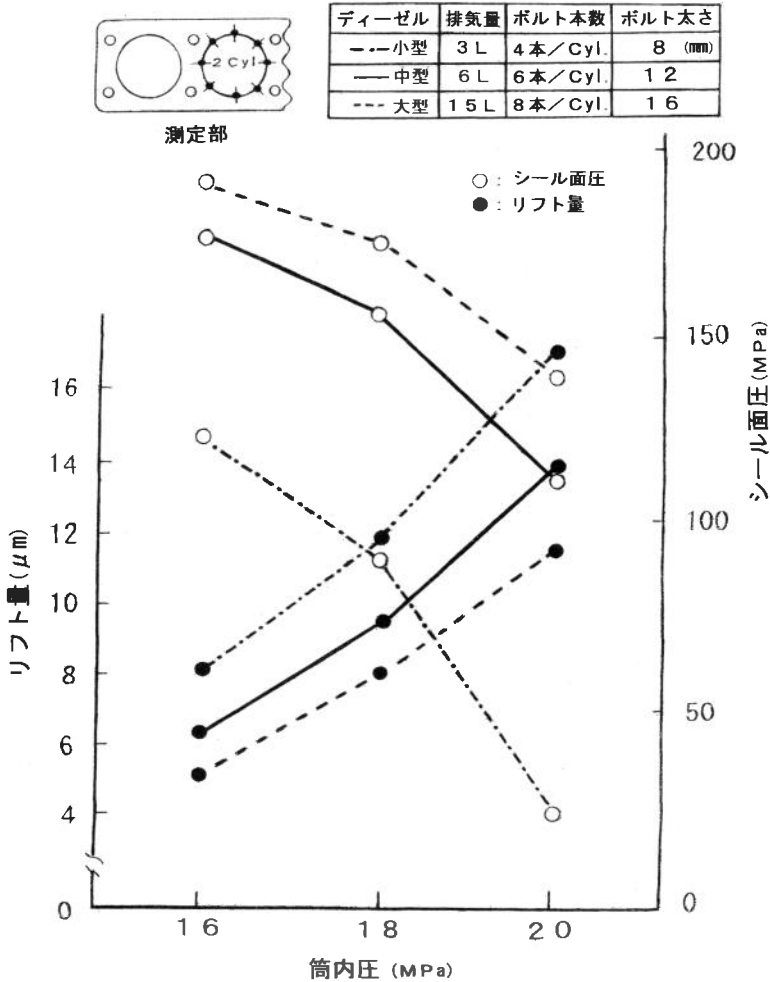
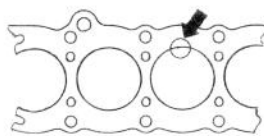


図14 大, 中, 小のエンジンにおけるヘッドリフトとシール面圧の関係

#### 4.3.1 ガスケットのガスシール部のクラッキング

ヘッドのバッシングによるガスケットのガスシール部のクラッキングは、シール部断面の特定の箇所にて起こりやすい。クラッキングは、金属積層形ガスケットにおいて、構成材の鋼板が疲労することにより生じる。図15にダイナモテストで発生したクラッキングの調査例を示す。

ヘッドリフトがクラッキングに及ぼす影響を図16示すバッシングマシンを用いて調査した。図17に示した試験結果からわかるように、クラッキングはリフト量に深く係わり、リフトが大きいと小さな面圧で起こり、リフトが小さい場合でも面圧が大きいと生じる。つまり、クラッキング限界はリフト量とシール面圧に関係するが、リフト量が大きくなるとクラッキングが起こりやすくなる。



クラッキング部



A : 発生が多い箇所  
 B } : 発生が少ない箇所  
 C }

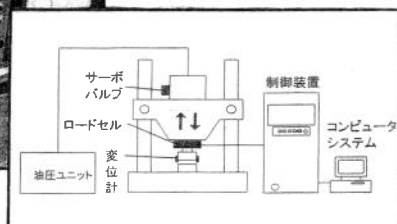
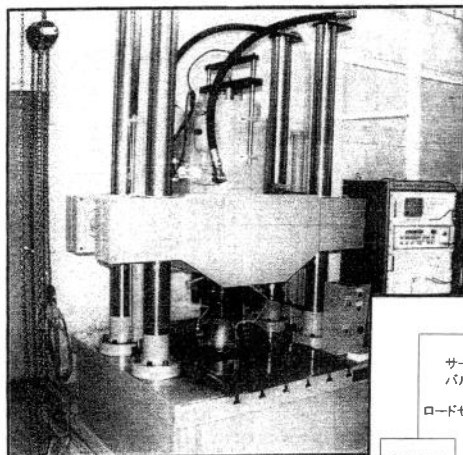
ボアシール部のクラッキング発生箇所



ホールドオーバータイプ      ノンホールドオーバータイプ

ガスケット構造とクラッキング状態

図15 ガスケットのシール部断面のクラッキング



説明図

図16 バッシングマシン

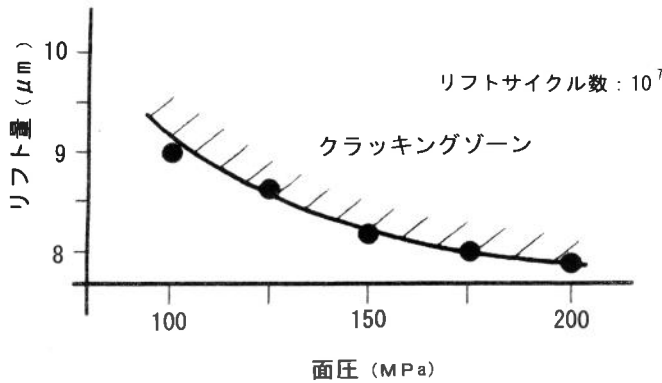


図17 クラッキングにおけるリフト量と面圧の関係

#### 4.3.2 シリンダスリーブの陥没量の増加とシール性

アルミエンジンのシリンダにはスリーブ（乾式ライナ）が挿入されているのが普通である。ブロックのトップデッキは通常平坦に仕上げられているが、ガスケットを装着してエンジンを運転した後にトップデッキを調べると、スリーブが陥没していることがある。陥没が大きくなるとガスシールに支障をもたらす。

図18には、多用されている2種類のスリーブ構造エンジンについて100時間のダイナモテスト（4/4負荷，最高回転，フラット運転）後の陥没状況を調査した結果を示した。ディーゼルエンジンでは、ガソリンエンジンに比べ陥没は顕著に現れるが、高Pmaxになると、陥没量が更に増加する傾向にある。これはPmaxの上昇によるヘッドリフトの増大によってバッシングが強力になるため、陥没量が増加するものと考えられる。エンジンによっても異なるが、一般的に陥没量が20μm程度以上になると、ガス漏れの危険性があるので注意を要する。

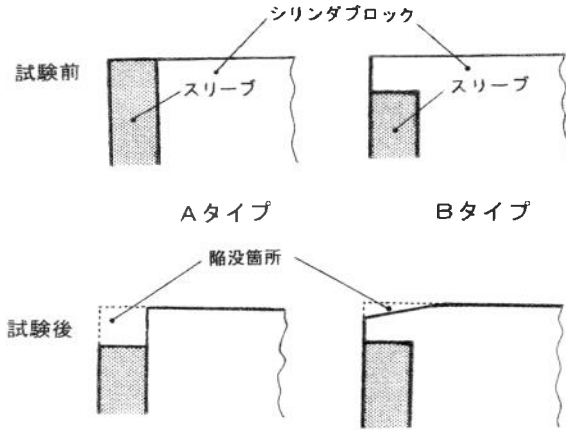
#### 4.3.3 ヘッド下面のブリネリング

エンジン運転後のヘッド下面に部分的に圧痕（凹み）が生じる現象をブリネリングという。ブリネリングは、その様相を図19に示したが、エンジン運転中、ヘッドの上下運動によるバッシングによってヘッド下面の高面圧部で起こる<sup>4)</sup>。

##### (1) アルミヘッドと鋳鉄ヘッドのブリネリングの発生状況

同クラスのディーゼルエンジン（1.5 L, 4 Cyl. ボルト4本/Cyl. Pmax 14MPa）のアルミヘッドと鋳鉄ヘッドの両エンジンに対し、同一構造のガスケット（金属積層形ホルドオーバータイプ）を用い、同一のボルト締め付け条件（8 ton/本）で装着し、同一エンジン運転条件（4/4負荷，4000rpm，フラット運転）で300時間のダイナモテストを行った後にヘッドを取り外し、ヘッド下面のシリンダ周囲のガスシール部についてブリネリングの発生状態を調査した。

両ヘッド共にブリネリングは全シリンダに生じていたが、調査には第2シリンダを選び、表面



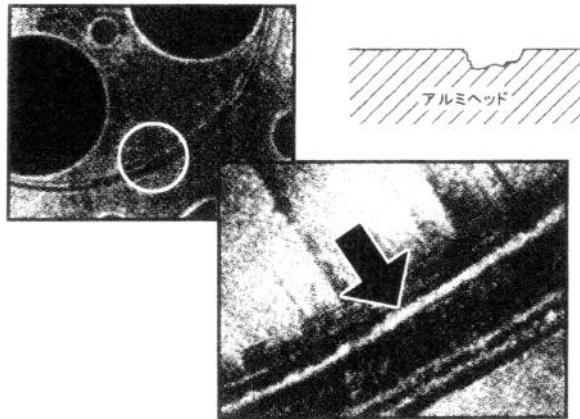
運転時間：100Hr

運転条件：4/4 フラット運転

エンジン	ガソリン	ディーゼル	
	1.4L 4 Cyl.	1.3L 4 Cyl.	1.5L 4 Cyl.
P max	8 (MPa)	15 (MPa)	18 (MPa)
Aタイプ	15.8	30.1	40.1 ( $\mu\text{m}$ )
Bタイプ	12.0	26.2	31.2

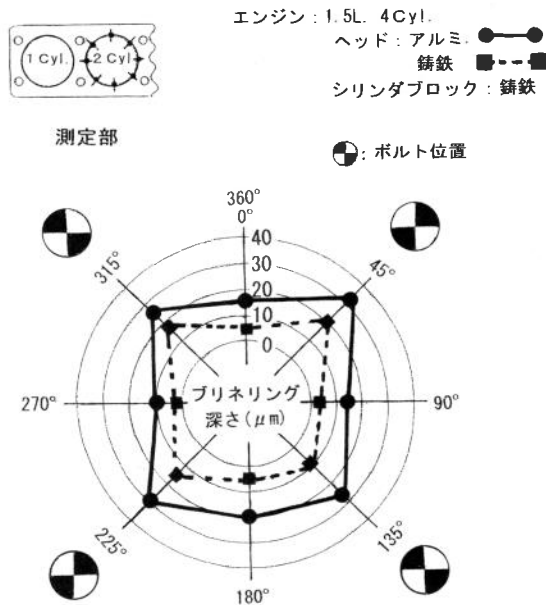
陥 没 量

図18 スリーブの陥没状況



ブリネリング(凹み)

図19 ヘッド下面のブリネリング



試験条件：

ボルト締め付け力：8ton/本

エンジン運転：300 (Hr)

4/4 負荷. 回転数 4000rpm. フラット運転

図20 アルミヘッドと鋳鉄ヘッドのシリンダ周囲における  
 プリネリングの発生状況比較

粗さ計でボア周囲の8箇所を測定した結果を図20に示した。アルミヘッド、鋳鉄ヘッド共にボルト近傍箇所のプリネリングは深く、ボルトから離れるにしたがって徐々に浅くなり、ボルト間の中間付近で最も浅くなる傾向にある。また、アルミヘッドは、鋳鉄ヘッドに比べ全体的にプリネリングが深く生じ、深さの最大と最小の差も大きいことがわかる。これは両ヘッド下面の硬度和剛性の違いが影響しているものと考えられる。

## (2) プリネリングとシール性

ダイナモテストにおいてプリネリングが生じた上述のアルミヘッドの第2シリンダ周囲を対象とし、深さ0~40μmの範囲について10μm単位で選別したヘッド、各5個についてシール性を調査した。試験装置の概要を図21に示す。試験には、選別した各ヘッドとガスケット(試験毎に新品使用)をボルトネジ穴のみを設けたダミーブロックに装着(ボルト締め付け力8ton/本)し、ヘッドのウォータージャケットに水を満たし、水出口と水を入れたガラス容器をゴムチューブでつなぎ、ウォータージャケット内に漏れて来た窒素ガスの泡を探知できるようにする。

図22は、ヘッドの第2シリンダの燃焼噴射ノズルより窒素ガスを徐々に圧入し、ガラス容器内に窒素ガスの気泡が最初に確認された時点をもってシール限界として調査した結果である。図示

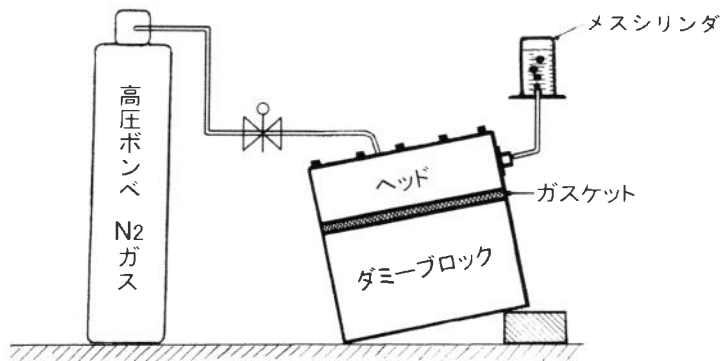


図21 窒素ガスによるシール試験装置

**試験条件**

使用エンジンブロック：1.5L、4 Cyl. 用  
 ボルト締め付け力 8 ton/本  
 試験回数各 5 回

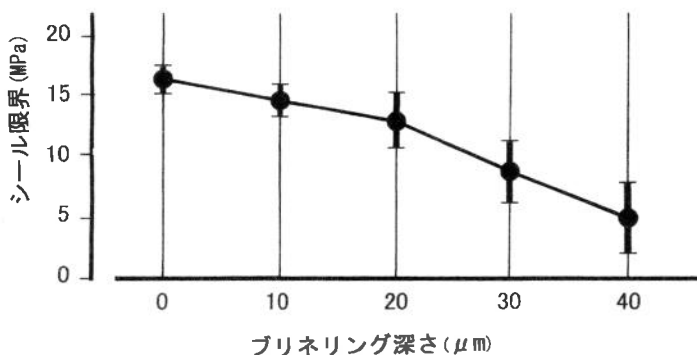


図22 プリネリング深さとシール限界

のように、プリネリングが深くなるに伴ってシール性は低下する傾向がある。特に、深さが20 μmを超えると、シール性は急速に低下し、またシール限界値のばらつきも大きくなっている。このことは、シーリングの不安定性をもたらすことになり、ガスシール上、注視すべき問題である。

**5. 結 言**

本研究で明らかになった要点を集約すると以下のようになる。

- (1) エンジンの低剛性化の中でシーリングに大きな影響を及ぼす要因としてヘッド下面におけるシリンダ周囲の変形がある。特に、アルミヘッドでは変形が大きく、ガスシールに支障が生じやすい。
- (2) アルミヘッドの膨張・収縮による口開き現象は、部分的なシール面圧の低下をもたらす、



その現象の繰り返しにより、シール面圧は経時的に低下し液体漏れが発生しやすい。

(3)  $P_{max}$  の上昇はヘッドリフトを増大させ、シーリング環境を悪化させる。具体的には、①ガスケットの追従不足によるシール面圧の低下、②ヘッドのバッシング激化によるガスケットのガスシール部のクラッキングの発生、③ヘッドのバッシング激化によるアルミエンジンのシリンダスリーブ陥没の増大、④ブリネリングによるガスシール性の低下である。

(4) 上述のエンジン高性能化におけるガスケットシーリングの問題点は、今後益々厳しさが増すシーリング環境の対応において、ガスケット単体だけではなくエンジンを含めたトータルシーリングの視点に立つことの重要性を明示している。

#### 参考文献

- (1) 宇田川恒和, 山田好男, 稲村 進, 最近の自動車エンジンのガスケットシーリングの問題点, 自動車技術, Vol.56, No.9 (2002) P.101-105
- (2) 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 (2007) P.119-124
- (3) H. N. Ko, T. Hasegawa, S. Kitaoka and T. Udagawa, A Method of Measuring Contact Pressure of Cylinder Head Gasket, SETC 20044355, Small Engine Technology, Austria (2004)
- (4) 宇田川恒和, 高 行男, ディーゼルエンジンの  $P_{max}$  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 (2006) P.107-113