

自動車部品の面圧測定 (第1報, ガソリンエンジンのシリンダヘッドガスケット)

高 行男・長谷川達也・井藤賀久岳・杉原申也・岡本安広

1. 緒 言

自動車をはじめとする機械において、その構成要素に作用する面圧を把握する必要性は高い。接触面に生ずる圧力解析法には、有限要素法、境界要素法などの数値解析法¹⁾やX線応力測定法、3次元光弾性法など²⁾の実験的解析法がある。しかしながら、測定精度や測定の簡便さの両面から必ずしも十分とはいえず、実機に対しては、測定が比較的容易な感圧フィルム法³⁾などの一部の方法のみが利用されているのが現状である。

自動車部品のなかでシリンダヘッドガスケット⁴⁾は、エンジンに組み込まれ初めて機能する部品で、エンジンの作動によって生じる高温・高圧の燃焼ガスや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がある。そのため、シリンダヘッドやシリンダブロックの装着面とシリンダヘッドガスケット表面は密着し、さらに所要の締付け荷重を負荷した時、各シール部には適正な面圧の領域が発生していなければならない。この面圧の実態を把握することは、設計上重要な項目となっており、自動車整備士教育においても重要である。

以上の観点より、本稿では、自動車部品の面圧測定の第1歩としてガソリンエンジンのシリンダヘッドガスケットを対象とした。接触面圧、特にボア間の接触面圧に着目し、測定には感圧フィルム法(富士プレスケール)と電着銅薄膜による接触面圧計測法⁵⁾を用い、面圧発生状態を調査した。

2. シリンダヘッドガスケットの概要

面圧測定の対象としたシリンダヘッドガスケットの概要を述べる。本文中に示した図1～図5は、文献⁶⁾より引用したものである。

シリンダヘッドガスケットにおいて、シールの構築と機能が重要である。シール構造はシリンダヘッドガスケット、シリンダヘッド、シリンダブロックの3つの要素の適切なコンビネーションとバランスによって成立する。シリンダヘッドガスケットは燃焼ガス、冷却水、エンジンオイルのような性状、および条件の異なった流体のシールを構成できるように設計される。

図1にはシール面圧発生経過を示した。シール面圧はシール穴周囲に一部分ではなく、図2に示すようにシール帯が構成される。そして各シール部にそれぞれの内圧がかかって各部の液体の

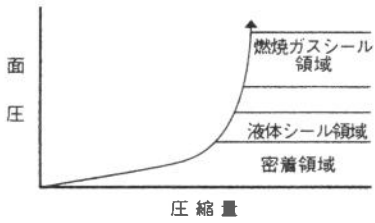


図1 シール面圧発生経過

漏れがなかったとき、シリンダヘッドガスケットのシール構築は完了する。シール帯は締付け荷重の変動、温度変化、および経時的にその状態は変化する。シール帯が切断された場合はその部分から漏れが生じるので、シールの構築はくずれることになる。

シール機能は、シールの構築が完了した後、それを経時的に維持していく能力である。エンジン作動中に当然のことであるが、各シール部は、その条件に応じて必要なシール面圧帯を確保しなければならない。シール機能に大きく影響を及ぼす要因はシール面圧の経時変化である。この変化はエンジンの種類や運転条件などにより大きく異なる。図3にはシリンダヘッドガスケットのシール面圧の経時的な変化を示した。シール面圧がシール限界以下に低下した場合はシール機能を失うことになるので、シール面圧は常にシール限界以上であることが必要である。

エンジンの作動によって生じる高温・高圧の燃焼ガスや潤滑オイルおよび冷却水を同時にシールするシリンダヘッドガスケットに特に求められるのは、図4に示した7つの特性である。

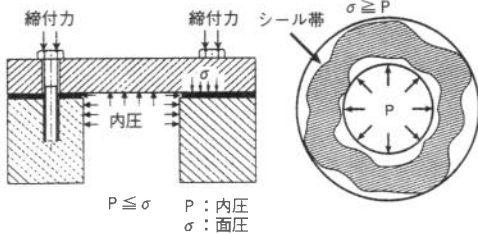


図2 シリンダヘッドガスケットのシール性

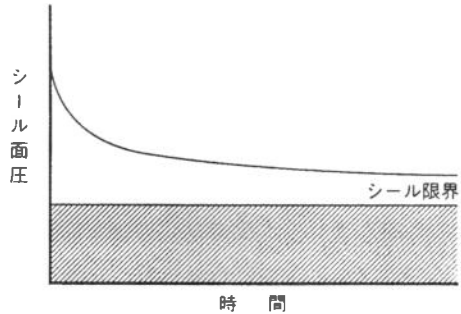


図3 シール面圧の経時変化

① エンジンのシリンダヘッドガスケット装着面（ヘッド下面およびシリンダブロック上面）のうねり、ライナ入りエンジンではライナ突出量、ガスケット自身の凹凸（例えば、シリンダボアのシール部段差）などを、吸収するには圧縮性が必要である。圧縮性は材質、構造、ガスケット厚さなどにより異なる。

② シリンダヘッドガスケットの復元性は、爆発圧力や熱膨張によってシリンダヘッドとガスケット、シリンダブロックとガスケットの間で生じた隙間を埋めるために必要となる。この隙間は、シリンダヘッドが爆発圧力によって上方にリフトしたり、シリンダヘッドボルトの締付け力の弱いシリ

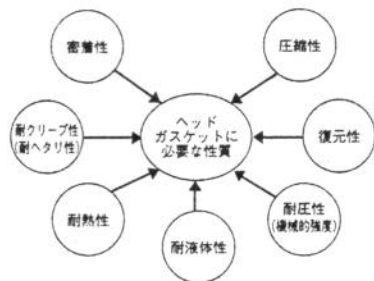


図4 シリンダヘッドガスケットの7つの特性

ンダヘッドボルト間が変形したり、熱膨張により上方に反ったり（口開き現象と呼ばれる）した場合にできる。このような隙間によって生じる圧縮漏れや潤滑油と冷却水の漏れを、ガスケットは防がなければならない。シリンダヘッドの爆発圧力や熱膨張による動きは場所によって異なるが、数 μm から数十 μm の値である。通常シリンダ周囲は数 μm 、エンジン外壁付近では数十 μm である。最近の小型軽量エンジンにおいては、その値は大きくなる傾向にある。

- ③ 耐圧性を必要とする場所は、シリンダボアのシール部のような高圧がかかる部分である。従来シリンダヘッドガスケットの耐圧性が問題となった例はあまり見られなかったが、最近、特にディーゼルエンジンにおいては最大燃焼圧 P_{max} が上昇する傾向にあるため、シール部が高圧に耐え得る構造となっている。現在、実用において $P_{\text{max}}=18\text{MPa}$ の実績がある。
- ④ 耐液体性については、エンジン運転中にシリンダヘッドガスケットの液体穴を流れる液体に、シリンダヘッドガスケット構成材が侵されないことが必要である。主にシリンダヘッドガスケットに塗付されているコーティング材の耐液体性である。エンジンに用いられる冷却水やエンジンオイルに対して化学的に安定していなければならない。冷却水中に含まれる不凍液は、マイクロシールの目的でシリンダヘッドガスケット表面にコーティングしてある塗膜を溶解させ、シール性を失わせる。また、不凍液が作用して塗膜を剥離させ、剥離した膜片が冷却水と共に流出して、水路の狭い部分に詰まり、冷却水の通りが悪くなる場合がある。また、エンジンオイルにおいては、オイル中にコーティング材を溶かし込みオイルの潤滑性が劣化する場合がある。
- ⑤ 高温部であるシリンダボアのシール部温度はエンジンによって異なるが、 250°C 前後であると言われている。シリンダヘッドガスケット本体は主にステンレス鋼板であるので、耐熱性は問題とならないが、マイクロシールに用いられているコーティング材が問題となる。シリンダボアのシール部付近の熱により軟化して流れ、ガス漏れの原因となる。フッ素系、シリコン系、NBR系など、エンジンの条件に適したコーティング材が選定されている。
- ⑥ 耐クリープ性は、シリンダヘッドガスケットの耐久性に深いかかわりがある性質である。耐クリープ性が悪いと耐久性が劣り、時間の経過に伴いシール面圧が減少しシール性が低下する。
- ⑦ 密着性は、シリンダヘッドやシリンダブロックの加工面のミクロ的凹凸を埋めるマイクロシールに必要なものである。通常シリンダヘッドガスケット表面にシール材（主にフッ素系、シリコン系、NBR系）を塗布して対応している。

なお、シリンダヘッドガスケットの評価は、図5に示すように、マッチングと機能に分けて行われている。まずエンジンとのマッチングを評価し、適正と判断された後に、機

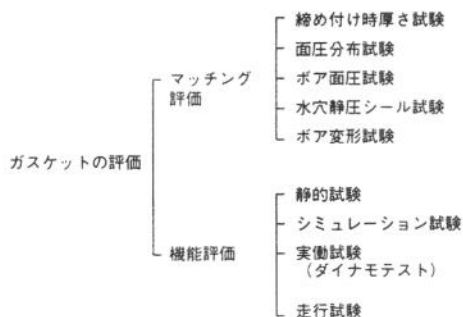


図5 シリンダヘッドガスケットの評価

能を評価する。機能評価には、シミュレーション試験（冷熱サイクル試験，ヘッドリフトの動きを調べるための繰返し荷重変動試験），実働試験，走行試験がある。

3. 実験方法

3.1 測定エンジン

測定に使用したエンジンは、トヨタ・スターレットに搭載されている4E-FTEエンジンである。このエンジンの諸元を表1に示す。使用されているシリンダヘッドガスケットは、図6に示すように、複合形（金属と非金属との複合で構成）で、シリンダ・ボア・シール部の構造は、非金属を金属で挟み、補強として金属の内側にワイヤリングを入れたタイプである。

表1 エンジン諸元値

車名	トヨタ・スターレット
型式	EP82
排気量 (cm ³)	1331
シリンダ数及び配置	直列4気筒・横置き
燃焼室形状	ペントルーフ型
気筒当たり吸排気弁数	各2個
弁機構	DOHC ベルト駆動
ボア×ストローク (mm)	74.0×77.4
圧縮比	8.2
最高出力 KW (6400min ⁻¹)	99
最大トルク N·m (4800min ⁻¹)	57

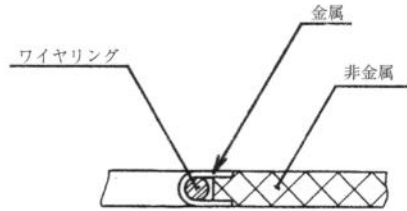


図6 ガスケット断面の構造

3.2 測定方法

測定には市販の感圧フィルム法（富士プレスケール）と新たに開発された電着銅薄膜による接触面圧計測法を用いた。測定条件は、常温としシリンダヘッドガスケット，シリンダヘッドボルトは共に新品を使用した。

3.2.1 感圧フィルム法

感圧フィルム法（富士プレスケール）は既に実用されている方法で、その内容については補足の欄に後述する。測定方法は以下の通りである。

- ① 図7に示すように、シリンダヘッドガスケットと同じ形にカットしたプレスケールを、シリンダブロック，プレスケール，シリンダヘッドガスケット，プレスケール，シリンダヘッドの

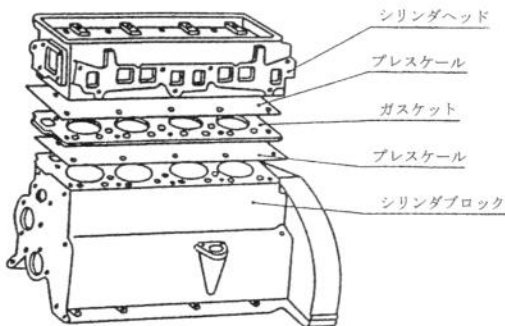


図7 プレスケール測定場所

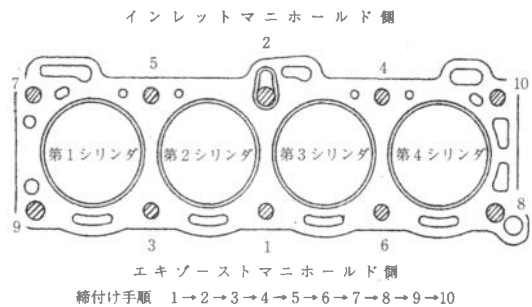


図8 シリンダヘッドボルト締付け手順

順に挟み込む。次に図8に示すように、自動車整備書に基づきインレットマニホールド側にM9（ピッチ1.25）、長さ85mmのシリンダヘッドボルト5本（図中の7，5，2，4，10）と、エキゾーストマニホールド側にM9（ピッチ1.25）、長さ100mmのシリンダヘッドボルト5本（図中の9，3，1，6，8）を、2回に分けて締付け手順に従い締付ける。1回目は30N・mで仮締めし、2回目は45N・mで本締めをする。30分経過後、取り外し手順に従い、プレスケールを取り出す。

② 加圧発色されたプレスケールを圧力画像解析システム本体（FPD-901）内蔵のスキヤナで読み込む⁷⁾。読み込むまでの時間は、加圧発色後10分以内とした。加圧発色は化学反応により起こることから発色後、時間経過に伴い湿度によって濃度が変化するので、スキヤナで読み込むのは一定時間後に行うことが望ましいからである。

③ 読み込んだ圧力分布を解析する。

3.2.2 電着銅薄膜による接触面圧計測法

一般に固体物質同士の接触においては、巨視的には滑らかな表面であっても微視的には必ずある粗さを有しているため、その接触は微小な突起部分で行われる。巨視的には弾性接触と見なされる場合においても真実接触部である突起部分では、塑性変形が生じ真実接触面積は作用する圧力より変化する。この観点から、接触面積の変化に着目した接触面の圧力測定法が考案された⁵⁾。すなわち、電着により作製した四角錐形状の微小な突起を有する銅薄膜を用いて、その突起先端部に生ずる塑性変形量を反映する真実接触面積を測定することにより、固体接触面に作用している圧力を求めることである。本測定法の利用に際し、鳥取大学工学部機械工学科北岡征一郎教授に多大なるご助力をいただいた。

微小突起を有する電着銅薄膜の作製は以下の通りである。

ステンレス板の表面を#800の耐水研磨紙により研磨する。そして、ステンレス板（厚さ1mm、中心線平均粗さ $Ra=0.41\mu\text{m}$ ）の表面にマイクロビッカース硬さ計（荷重9.8N）を用いて四角錐形状の圧痕を間隔 $100\mu\text{m}$ で、 $37\times 40\text{mm}$ の範囲に規則的に打ち込む。図9に圧痕の形状寸法を示す。

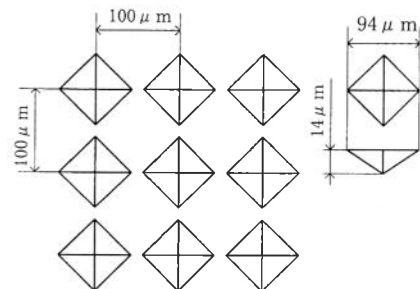


図9 圧痕の形状寸法

次に、このステンレス板を陰極として銅めっきを施し、銅薄膜の最終電着面に生ずるくぼみを耐水研磨紙（#320～#800）により研磨を行って平滑面とし、電極より剥離する。図10に得られた銅薄膜の表面状況を示す。銅薄膜の平坦部の厚さは約 $12\mu\text{m}$ 、突起部の高さは $14\mu\text{m}$ である。圧力測定には面圧感度を上げるためと残

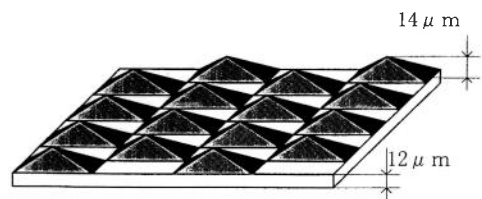


図10 銅薄膜の表面状況

留応力を除去するために焼きなまし（150℃、2h保持後、除冷）を施した。

電着銅薄膜による接触面圧計測方法は以下の通りである。

- ① 銅薄膜を挟む箇所は、プレスケールの場合（図7）と同様でシリンダブロック、銅薄膜、シリンダヘッドガスケット、銅薄膜、シリンダヘッドの順に挟み込む。
- ② 締付け手順もプレスケールの場合（図8）と同様で、1回目は30N・mで仮締めし、2回目は45N・mで本締めをする。10分経過後、取り外し手順に従い銅薄膜を取り出す。
- ③ 加圧された銅薄膜の突起表面を走査型共焦点レーザ顕微鏡（オリンパス OLS1000型）により観察し、突起先端部の塑性変形量を調査し、圧力を求める。

4. 実験結果

シリンダヘッドガスケット全体の面圧を把握するため、感圧フィルム法の中圧および高圧用プレスケールを用いて測定した。特に重要なボア間の面圧の把握には、感圧フィルム法と微小突起を有する電着銅薄膜を用いて測定した。また、自動車整備書に基づいた締付けトルク外での面圧を把握するために、感圧フィルム法を用いて測定した。なお、以下に述べるシリンダヘッドガスケットの面圧は、締付け時の静圧状態における結果である。

4.1 感圧フィルム法（富士プレスケール）

4.1.1 シリンダヘッドガスケット全面における面圧分布

図11に、中圧用プレスケールをシリンダヘッドガスケットと同じ形にカットし、シリンダヘッドガスケットの上面に挟み、加圧発色後圧力画像解析システム本体内蔵のスキヤナで読み込んだ全体の圧力分布を示す。ボアの周囲とシリンダヘッドボルト穴の周囲に発色が見られ、それ以外の箇所にはほとんど発色が見られない。特にボアの周囲に強い発色が見られるが、第1と第4シリンダの周囲の発色は第2と第3シリンダの周囲に比べ強い発色となっている。

図12には、高圧用プレスケールによるガスケット全体の圧力分布を示した。中圧用に比べ、ボアの周囲とシリンダヘッドボルト穴の周囲に発色が集中している。これは、高圧用では50MPa以下の領域が発色しないことによる。また、中圧用と同様

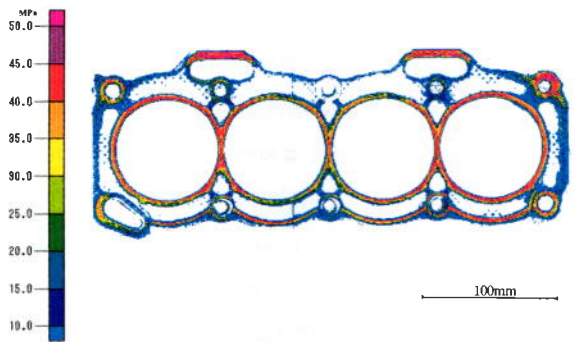


図11 中圧用プレスケールによる全体の圧力分布

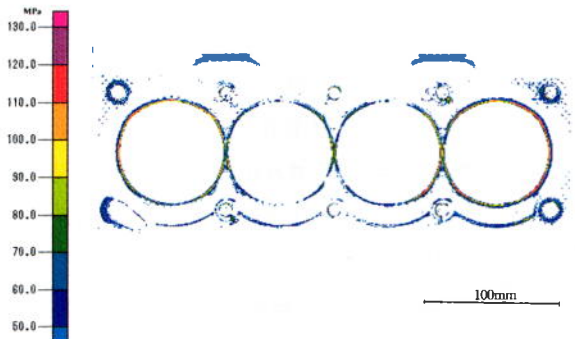


図12 高圧用プレスケールによる全体の圧力分布

に、第1と第4シリンダの周囲は、第2と第3シリンダの周囲に比べ発色が強くなっている。これは、シリンダヘッドとシリンダブロックのガスケットに接触する加工面が、フライス加工の際、第1と第4シリンダより第2と第3シリンダの方が若干多く削られていることによると推定される。

4.1.2 ボア間の面圧

図13には、第1と第2シリンダのボア間A-A'箇所と第2と第3シリンダのボア間B-B'箇所を示す。以下では、第1と第2シリンダのボア間A-A'箇所を1-2間、第2と第3シリンダのボア間B-B'箇所を2-3間と称す。

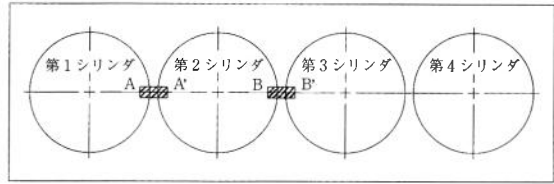


図13 ボア間測定箇所

図14, 図15には、プレスケールの発色状態を解析システムにより解析した圧力分布の結果を示した。1-2間と2-3間の中央を基準とし、シリンダヘッドとガスケット間を上面、ガスケットとシリンダブロック間を下面として圧力分布を表している。

まず、図14の中圧用プレスケールの圧力分布を見ると、加圧された箇所の面圧は、50MPaでほぼ一定となっていることがわかる。これは、中圧用プレスケールの場合、測定できる最高圧力が50MPaであるため、それ以上の面圧が測定されていないことによる。

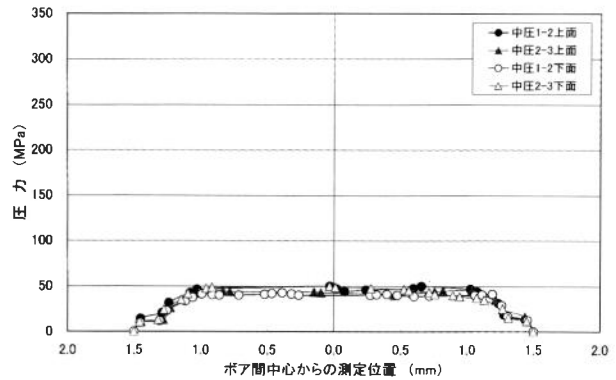


図14 中圧用プレスケールによるボア間の圧力分布

次に、図15の高圧用プレスケールの圧力分布を見ると、1-2上面、2-3下面は面圧が130MPa程度で一定となっているのに対し、1-2下面、2-3上面の面圧は80MPa程度で一定となっている。1-2下面、2-3上面

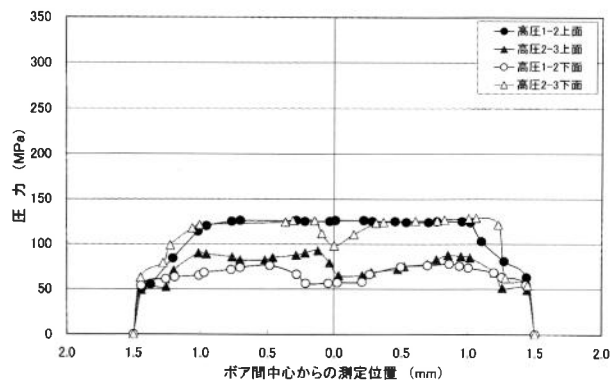


図15 高圧用プレスケールによるボア間の圧力分布

の面圧が1-2上面、2-3下面より低い値を示したのは、ガスケットに対してプレスケールの発色面の置き方にある。つまり、プレスケールの発色面がガスケット側に直に接触すると、ガスケット表面のコーティング材（シリコンなど）に発色剤が溶け込み、発色剤が吸収されるためで

ある。したがって、1-2上面、2-3下面の測定値は、1-2下面、2-3上面に比べプレスケール測定での本来の値に近いと思われる。このことから、プレスケールの測定では、プレスケールの発色面側に保護フィルム等を使用するか、あるいは発色面をシリンダヘッド側にして面圧測定を行うのがよいことが確認された。

ところで、図15に示した1-2上面、2-3下面の面圧を比較してみると、ボア間の中央付近以外は同じ傾向が見られるが、ボア間の中央付近だけ違いが見える。2-3下面の面圧は130MPa程度からボア間の中央付近になると100MPa程度となっている。これに対し1-2上面の面圧は130MPa程度で一定のままとなっている。ガスケットのボア間中央付近の構造を見ると、ガスケットはシリンダヘッドやシリンダブロックと接触していない。しかし面圧が検出されたのは、プレスケールのフィルム表面に均一に塗布されている種々のサイズのマイクロカプセルが加圧により割れて、カプセル内の発色剤が顕色剤と反応したとき、発色剤の量により発色領域が広がったことと、今回使用した圧力画像解析システム（後述の補足2）では、 $254\mu\text{m} \times 254\mu\text{m}$ 領域を測定領域の最小としていることによると推定される。なお、面圧が130MPa程度でほぼ一定となっているのは、高圧用プレスケールの場合、測定できる最高圧力が130MPaであるため、それ以上の面圧が測定されていないことによる。

4.1.3 規定トルク外による締付け

ガスケットのシーリングには、ガスケットを適正に締付け、各シール部に必要な面圧を配分することが重要である。シーリングを自動車整備の観点から見ると、シリンダヘッドボルトの締付け力の違い、整備における締付け手順の違い等によりシリンダヘッドガスケットへの面圧が変化するか否かである。そこで、今回はシリンダヘッドボルトの締付け力の違いによる結果を調査した。

図16に、シリンダヘッドガスケットを規定トルク以下（ $30\text{N}\cdot\text{m}$ ）で締付けた時の中圧用プレスケールの圧力分布を示す。前項のボア間の面圧について述べたように、ガスケット本体の構造から、ボア周囲が他の箇所比べて面圧が高くなっている。しかし、シリンダヘッドボルトの締付け力が規定トルク以下（ $30\text{N}\cdot\text{m}$ ）のため、

ボア周囲全体には圧力が生じていないことがわかる。このことから規定トルクの重要性が確認された。なお、図17には、ガスケットを規定トルク以上（ $50\text{N}\cdot\text{m}$ ）で締付けた時の中圧用プレスケールの圧力分布を示した。図から、ボア周囲が他の箇所に比べて面圧が高くなっていることがわかる。また、シリンダヘッドボルト穴の周囲にも発色が強く見られる。

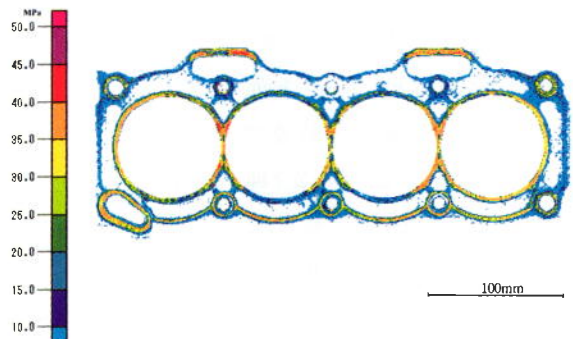


図16 規定トルク以下（ $30\text{N}\cdot\text{m}$ ）で締付けた時の中圧用プレスケールの圧力分布

4.2 微小突起を有する電着銅薄膜

図18には、シリンダ1-2間と2-3間のボア間において、電着銅薄膜の突起先端部の塑性変形量を求め、圧力を調査した結果を示す。各シリンダ中心を結ぶ線上において、1-2間と2-3間の中央を基準として、シリンダヘッドとガスケット間を上面、ガスケットとシリンダブロック間を下面として圧力分布を表している。

ボア間における圧力の生じ方はボア間中央の基準を中心に左右ほぼ対称で、シリンダ外周近傍(シリンダ外周から0.4mm以内)の圧力は高くなり、ボア間の中央付近ではほとんど圧力が生じていないことがわかる。シリンダ外周近傍の圧力が高いのは、シリンダボアのシール部の構造が、非金属を金属で挟み、金属の内側にワイヤリングを入れ補強されていることによる。つまり、補強箇所は変形しにくいので、圧力が高くなったと考えられる。

ところで、シリンダ1-2上面において最高圧力は340MPa程度となっている。シリンダ外周近傍の圧力の測定値が本手法と感圧フィルム法(4.1.2項)で異なっているのは、高压用プレスケールの測定可能な最高圧力は130MPaであるのに対し、微小突起を有する電着銅薄膜は400MPa程度までの圧力を測定できることによる。また、ボア間の中央付近でほとんど圧力が生じていないのは、ガスケットがシリンダヘッドやシリンダブロックと接触していない箇所があることを意味する。これは、プレスケールの測定領域が $254\mu\text{m} \times 254\mu\text{m}$ であるのに対し、微小突起を有する電着銅薄膜の測定領域は $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ であることから、プレスケールに比べ微小な領域まで測定できたことによると考えられる。以上のことより、微小突起を有する電着銅薄膜は、プレスケールに比べより微小な領域でより大きな圧力を測定できると言える。

5. 結 言

自動車部品の面圧測定の第1歩として、ガソリンエンジンのシリンダヘッドガスケット締付け時の面圧測定結果について調査した。シリンダヘッドガスケット全体の面圧については、ボアの

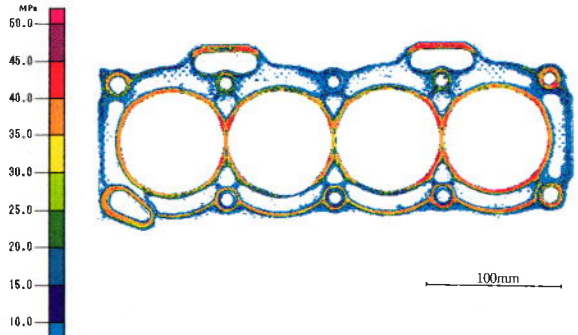


図17 規定トルク以上(50N・m)で締付けた時の中圧用プレスケールの圧力分布

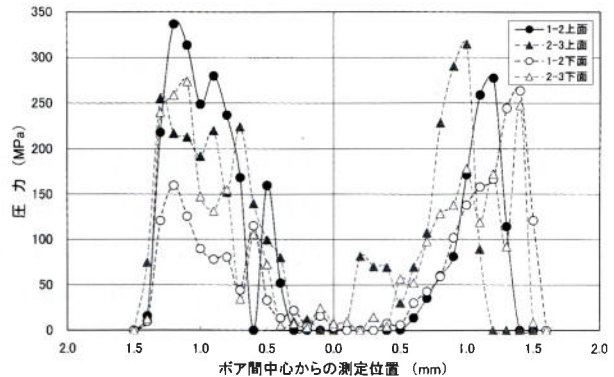


図18 銅薄膜によるボア間の圧力分布

周囲とシリンダヘッドボルト穴の周囲の発色が集中など、面圧の発生状態を把握できた。特に重要なボア間の面圧については、高圧用プレスケールの測定可能範囲の上限値である130MPa以上の箇所やほとんど圧力が生じていない（ボア間の中央付近）箇所の存在が確認できた。また、自動車整備書に基づいた締付けトルク外での面圧において、規定トルク以下（30N・m）で締付けた時はボア周囲全体に発色が見られないので、面圧はボア周囲全体に生じていないことがわかった。規定トルク以上（50N・m）で締付けた時は、規定トルク（45N・m）で締付けた時に比べボアの周囲とシリンダヘッドボルト穴の周囲の発色が多少多い程度で顕著な相違はなかった。

感圧フィルム法（富士プレスケール）では、「圧力を色で、数字で、一目でキャッチ」というキャッチフレーズ通り、容易に圧力を測定できた。電着銅薄膜による接触面圧計測法では、400MPa程度の高い圧力（シリンダ外周近傍）を測定でき、感圧フィルム法に比べ、より微小な領域でより大きな圧力を測定できることが確認された。

留意点として、感圧フィルム法では、シリンダヘッドガスケット表面のコーティング材（シリコンなど）に発色剤が溶け込み、発色剤が吸収されることがあるため、面圧が低く測定される場合がある。電着銅薄膜による接触面圧計測法では、測定対象とする要素の材質や表面粗さによって圧力測定が困難になる場合も考えられる。また、両測定法とも一度加圧すると元に戻ることはなく、締付け時の最大圧力が表示されているにすぎない。

今後、ジーゼルエンジンのシリンダヘッドガスケットの面圧測定を行い、銅薄膜による接触面圧計測法の特性を明らかにするとともに、固体接触面に作用する動圧の測定を可能とする手法を検討していきたい。

終わりに、本研究の遂行にあたり、貴重なご意見をいただいた鳥取大学工学部機械工学科 北岡征一郎教授ならび（株）石川ガスケット専務取締役 宇田川恒和氏に謝意を表す。

付記 筆者の杉原申也および岡本安広は、本学専攻科自動車工学専攻の6期生（1997年度）である。

参 考 文 献

- 1) 香川, 市川, 高松, 桑野, 日本機械学会論文集, 60巻570号A編 (1994), P.409.
- 2) 相原, 日本機械学会論文集, 40巻333号A編 (1974), P.1287.
- 3) 執行雅夫, 圧力画像の解析FPD-901シリーズ, 画像ラボ (1996), P.52.
- 4) 自動車用機関のシリンダヘッドガスケット, 日本工業規格D3105 (1992)
- 5) 北岡征一郎, 坪田淳一郎, 永橋 豊, 岸 武保, 電着銅薄膜による接触面圧計測法, 日本機械学会論文集, 64巻619号A編 (1998), P.145.
- 6) 宇田川恒和, 内燃機関用シリンダヘッドガスケット, エンジンテクノロジー, 8巻23号 (2000), P.82.
- 7) 執行雅夫, プレスケール圧力画像解析システム, 月刊ディスプレイ (1997), P.88.

補 足

感圧フィルム法（富士プレスケール）の概要

1. 原 理

圧力測定フィルム「プレスケール」はそれ自身に力を受けると赤く発色し、受けた力が小さいと薄い赤となり、大きいと濃い赤となる。これは、プレスケールのフィルム表面に種々のサイズのマイクロカプセルが均一に塗布されており、加圧力の大きさに従ってカプセルが割れることによる。小さな力は大きなカプセルのみが、大きな力には大きなものから小さなものまでの多くの種類のカプセルが割れ、カプセル内の発色剤が顕色剤と反応し、発色剤の量に応じて濃度が変わる。

プレスケールには低圧を中心としたツーシートタイプと高圧を中心としたモノシートタイプの2種類がある。今回の測定で使用した中圧用および高圧用プレスケールは、ともにモノシートタイプである。

ツーシートタイプは、AシートとCシートの2種類のフィルムから構成されている。それらの塗布面を合わせて加圧することにより、Aシートに塗布された発色剤のマイクロカプセルが破壊され、カプセル内の染料がCシートの顕色剤と化学反応して赤く発色する。モノシートタイプは、1種類のフィルムから構成される。加圧されることにより塗布された発色剤のマイクロカプセルが破壊され、同じ面上の顕色剤と化学反応して赤く発色する。

2. 特 性

プレスケールの特徴は、結果が可視化でき、均一な厚さ（ツーシートタイプの厚さはA/Cシート2枚合わせた状態で $180 \pm 10 \mu\text{m}$ 、モノシートタイプの厚さは $110 \pm 5 \mu\text{m}$ ）で、厚みの変化も（ツーシートタイプ、モノシートタイプ共に加圧前と後の赤く発色した状態でも）小さい。富士写真フィルム株によれば、 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ の領域にかかった力の大きさの平均値が濃度として表れるが、解析機器の能力のため $254 \mu\text{m} \times 254 \mu\text{m}$ の領域の平均値が検出できる。

プレスケールの特性には、温度依存性、湿度依存性、加圧速度依存性、測定圧力等がある。温度、湿度は特性に大きく影響する。温度依存性とは、温度が高くなるとマイクロカプセルの壁面が柔らかくなり破壊されやすくなることにより赤の濃度が高くなることである。そのため、使用可能温度範囲は $20 \sim 35^\circ\text{C}$ である。湿度依存性とは、湿度が高くなると発色剤が銀色剤に吸着しやすくなり、赤の濃度が高くなることである。そのため、使用可能湿度範囲は $35 \sim 80\% \text{RH}$ である。加圧速度依存性とは、加圧速度が速いほどカプセルの弾力性が応じきれなくなり、割れやすく赤い濃度が高くなることである。測定圧力については、最大圧力値が記録として残り、加圧途中の値は検出できない。

加圧発色は化学反応により起こることから発色後、時間経過に伴い湿度によって濃度が変化するので、スキャナで読み込むのは一定時間後に行うことが望ましい。今回の測定では加圧発色後

10分以内とした。

3. 解析機器

富士フイルムビジネスサプライ(株) 水野正基氏のご好意により、今回の測定に利用させていただいた圧力値の解析システムは、富士フイルムFPD-901と呼ばれ、スキャナ、画像処理、演算処理、などを有する本体、読み込み処理された画像を表示するディスプレイ、各種画像処理の結果を記録するプリンタから構成されている。この解析システムでは、プレスケールの発色状態をそのまま読み取り、圧力分布や圧力値などの情報を容易に入手できる。FPD-901は、A4サイズ5枚分相当のプレスケールを読み取り、画像の拡大、最大圧力値の位置、圧力分布図、任意のライン上の圧力変化図を映し出すことができ、所定のポイントの圧力値もディスプレイ上でマウス操作にて見ることができる。