

電着銅薄膜による

接触面圧計測法に関する研究

A Research on Measurement Method of Contact  
Pressure by Electrodeposited Copper Foil

2006年 7月

長谷川 達也

# 目 次

本論文で使用する主な記号	v
<b>第 1 章 緒 論</b>	<b>1</b>
1・1 接触面圧測定の実験的必要性	1
1・2 本論文の目的および概要	2
参考文献	4
<b>第 2 章 電着銅薄膜による接触面圧計測法<sup>(1)</sup>の概要</b>	<b>7</b>
2・1 緒 言	7
2・2 実験方法	7
2・2・1 圧力負荷装置	7
2・2・2 電着銅薄膜の作製	8
2・2・3 実験方法	8
2・3 実験結果（成長粒子発生密度 $D$ の圧力繰返し数依存性）	9
参考文献	12
<b>第 3 章 微小突起を有する電着銅薄膜による 静圧測定法<sup>(1)</sup>の概要</b>	<b>14</b>
3・1 緒 言	14
3・2 実験方法	14
3・2・1 微小突起を有する電着銅薄膜の作製	14
3・2・2 圧力負荷装置	15
3・2・3 実験方法	17
3・3 実験結果および考察	17

3・3・1	微小突起の変形の静圧依存性	17
3・3・2	$A_r/A$ と静圧 $p_s$ の関係の定式	20
3・3・3	微小突起の変形を利用した静圧分布の測定	21
	参考文献	24

<b>第4章</b>	<b>エンジンのシリンダヘッドガスケットに対する 新たな面圧測定法<sup>(1)</sup></b>	<b>26</b>
4・1	緒言	26
4・2	測定方法	27
4・2・1	測定エンジン	27
4・2・2	電着銅薄膜による接触面圧計測法	28
4・2・2・1	電着銅薄膜ゲージ	28
4・2・2・2	電着銅薄膜の測定範囲と測定精度	29
4・2・3	電着銅薄膜の測定箇所および測定方法	30
4・3	測定結果および検討	32
4・3・1	自動車整備書に基づく締付け塑性域回転角度法 におけるボア間の面圧	32
4・3・1・1	ガスシール構造がワイヤタイプの場合	32
4・3・1・2	ガスシール構造がビードタイプの場合	33
4・3・2	自動車整備書の規定以外のボルトの軸力を 7t (68.6kN)とした締付けにおけるボア間の面圧	34
4・3・3	FEM 解析によるボア間の面圧	37
4・4	結言	38
	参考文献	39

<b>第5章</b>	<b>微小突起を有する電着銅薄膜による</b>	
	<b>繰返し圧力の測定<sup>(1)</sup></b>	<b>40</b>
5・1	緒言	40
5・2	実験方法	41
5・2・1	微小突起を有する電着銅薄膜の作製	41
5・2・2	圧力負荷装置および試験機	42
5・2・3	実験項目	42
5・3	実験結果および考察	44
5・3・1	微小突起の変形の繰返し圧力依存性	44
5・3・2	$A_p/A$ の平均圧力および圧力振幅による定式化	48
5・3・3	微小突起の変形を利用した動圧分布の測定	51
5・4	結言	56
	参考文献	57
<b>第6章</b>	<b>電着銅薄膜による接触面圧計測法</b>	
	<b>粒子成長と表面粗さを利用した測定<sup>(1)</sup></b>	<b>58</b>
6・1	緒言	58
6・2	実験方法	59
6・2・1	電着銅薄膜の作製	59
6・2・2	圧力負荷装置および試験機	59
6・2・3	表面粗さおよび成長粒子発生密度の測定	60
6・2・4	実験方法	60
6・3	実験結果および考察	61
6・3・1	薄膜の表面粗さに及ぼす繰返し圧力の影響	61
6・3・2	薄膜の表面粗さに及ぼす繰返し数の影響	63
6・3・3	成長粒子発生密度の繰返し圧力依存性	63

6・3・4	平均圧力が成長粒子発生密度に及ぼす影響	68
6・3・5	平均圧力および圧力振幅の計測	69
6・4	結 言	70
	参考文献	71
 <b>第 7 章 回転ローラ間に生ずる接触圧力の測定への 微小突起を有する金属薄膜の適用</b>		 <b>72</b>
7・1	緒 言	72
7・2	実験方法	72
7・2・1	めっき基板の作製	72
7・2・2	微小突起を有する電着銅薄膜の作製	73
7・2・3	実験方法	74
7・2・3・1	静圧試験	74
7・2・3・2	繰返し圧力	75
7・2・3・3	ローラ試験	76
7・3	実験結果および考察	77
7・3・1	突起先端部の塑性変形量と静圧の関係	77
7・3・2	繰返し圧力試験	78
7・3・3	ローラ試験	81
7・4	結 言	85
	参考文献	85
 <b>第 8 章 結 論</b>		 <b>87</b>
 <b>謝 辞</b>		 <b>91</b>

## 本論文で使用する主な記号

$A$	：突起先端の平坦部の面積（真実接触面積）
$A_r$	：微小突起の底面積
$\alpha$	：接触面の半幅
$D$	：成長粒子発生密度
$d$	：圧痕間隔
$dD/dN$	：成長粒子発生密度の増加速度
$E$	：縦弾性係数（＝ヤング率）
$f$	：周波数
$H$	： $p_{mdr, \epsilon}/p_{mdr, i}$
$k$	：圧力負荷治具の接触面積/突起部の総底面積
$N$	：繰返し数
$n$	：ローラの回転数
$P$	：圧縮荷重（＝ローラの単位幅あたりの荷重）
$P_d$	：荷重振幅
$P_d^*$	：実際に負荷した荷重振幅
$P_E$	：全圧
$P_m$	：静荷重
$P_m^*$	：実際に負荷した静荷重
$p_d$	：繰返し圧力（圧力振幅）
$p_{dr}$	：真実圧力振幅
$p_{dr, i}$	：試験開始時に作用する真実圧力振幅
$p_{d0}$	：平均圧力振幅

$p_m$	： 平均圧力
$p_{max} (=2p_d)$	： 繰返し数 $N$ における最大圧力
$p_{mdr}$	： $p_m$ に $p_d$ が重畳する場合の最大真実接触圧力
$p_{mdr,e}$	： 試験終了時点の $p_m$ に $p_d$ が重畳する場合の 最大真実接触圧力
$p_{mdr,i}$	： 試験開始時点の $p_m$ に $p_d$ が重畳する場合の 最大真実接触圧力
$p_{mean}^*$	： ローラの接触面に作用する圧力
$p_{mr}$	： 真実接触圧力
$p_r$	： 真実接触面に作用する圧力
$p_s$	： 静圧
$p_0$	： 公称圧力 ( $= \text{負荷 } P / \pi r_0^2$ )
$R$	： 応力比
$R_a$	： 算術平均粗さ
$R_y$	： 最大高さ
$r$	： 円柱の中心からの距離
$r_0$	： 円柱の半径
$T$	： 雰囲気絶対温度
$\nu$	： ポアソン比
$W$	： クロスヘッドの荷重
$w$	： ローラの接触幅
$\gamma$	： 圧力負荷治具と銅薄膜との接触面積割合
$\sigma$	： 繰返し応力

# 第 1 章 緒 論

## 1. 1 接触面圧測定の必要性

工作機械のボルト締結部をはじめ，各種の機械要素間の接触面においては，静圧（平均圧力）に繰返し圧力が重畳して作用する場合が多く<sup>(1)</sup>，これらの静圧や繰返し圧力は，要素間の摩擦や摩耗に関連し，機械の剛性や疲労強度などに影響を与える．一方で，近年，各種の機械，構造物は機能性と経済性の向上を目的として軽量化，高速化，精密化が進み，これに伴ってより過酷な条件下で使用される要素が多くなってきている．このような要素が安全性を有し，なおかつ必要とされる機能を発揮するには，接触面に作用する静圧や繰返し圧力の大きさをより正確に評価することが要求される．

接触面の圧力を求めるには，弾性論を用いた理論解析<sup>(2)</sup>，さらに近年では複雑な形状に適用できる有限要素法などの数値解析<sup>(3)</sup>が行われてきている．しかしながら，このような数値解析法では，実際には複雑な現象を種々の仮定の下に単純化して推論するため，すべての場合に対しても有効であるというわけではない．例えば，機械・構造物の稼働時において各構成要素に作用する外力は，他の多数の要素と互いに影響を及ぼしあうため，その推定が困難な場合が少なくない．したがって，実際の要素に対し，実験的手法によって接触面の圧力を測定することが不可欠であり，種々の実験的測定法が考案されてきた．

この実験的測定法には，三次元光弾性法<sup>(4)</sup>，感圧フィルム法<sup>(5)</sup>，表面粗さ法<sup>(6)～(8)</sup>，超音波法<sup>(9)(10)</sup>，側圧ピン法<sup>(11)</sup>，パイプ型ひずみゲージ法<sup>(12)</sup>，圧電セラミックス法<sup>(13)</sup>などがある．しかしながら，測定精度や測定の簡便さの点において，各測定法ともまだ十



分とはいえず，実機に応用することは必ずしも容易ではない．また，実機においては工作機械のボルト締結部に見られるように，平均圧力に繰返し圧力が重畳して作用する場合も多いが<sup>(1)</sup>，これらの測定では静圧の測定は可能であっても，これらを分離して測定できるものは少ない．

## 1. 2 本論文の目的および概要

前述したように，実機の接触面に多く見られる平均圧力（静圧）に繰返し圧力が重畳して作用する場合に，これらは機械の剛性や疲労強度などに影響を与えることから，その大きさを正確に評価することが重要となる．しかしながら，従来の実験的測定法で静圧と繰返し圧力の両者を分離して計測できるものは殆ど見当たらない．

以上の観点から，本研究では平均圧力（静圧）と繰返し圧力の両者の計測を可能とする圧力ゲージの開発を主たる目的とする．すなわち，電着により製作した微小突起を有する銅薄を種々の平均圧力に繰返し圧力が重畳して作用する固体接触面に適用し，突起先端部の変形量に着目した平均圧力（静圧）および繰返し圧力の測定の可能性を検討する．また，平均圧力（静圧）および繰返し圧力をより簡便に測定することを目的として，電着銅薄膜の成長粒子の発生現象と薄膜の表面粗さ変化を併用した測定法を検討する．さらに，微小突起を有する電着銅薄膜による接触面圧測定法の実機への適用例として，ディーゼルエンジンのシリンダヘッドガスケットの締付けによる圧力測定を実施し，従来の実験的応力解析法と比較してその有効性を実証する．実機においてはこの適用例とは異なり，接触面が回転を伴う場合も多い．そこで，試作したローラ試験機により回転を伴う接触面への微小突起を有

する銅薄膜の適用の可否も検討する．

本論文はこれらの内容に緒論・結論を併せて８章より成っている．

第１章は緒論であって，本論文の目的および概要を述べている．

第２章では，第６章に記述する平均圧力に繰返し圧力が重畳する圧力計測の基礎となる電着銅薄膜を用いた接触面圧計測法の基礎実験<sup>(14)</sup>について概説する．

第３章では，第４章，第５章でその測定原理が利用されるピラミッド状の微小突起を有する電着銅薄膜による静圧測定法<sup>(15)</sup>について概説する．すなわち，突起部の変形の度合いを容易に把握できるピラミッド状の微小突起が多数規則的に配列する電着により作製した銅薄膜に作用する静圧と突起部の変形量の関係を利用した接触面の静圧測定法の概要と測定精度について述べる．

第４章では，第３章の結果を踏まえて，微小な凹凸を有する電着銅薄膜による静圧測定法の実機への応用例について述べる<sup>(16)</sup>．すなわち，ディーゼルエンジンの２つのタイプのシリンダヘッドガスケットを対象とし，その面圧の実態をこの薄膜により把握することを目的とする．

感圧フィルム法では，測定可能な圧力の上限が低いため，シール性にとって重要なボア間の接触面圧の発生状態を正確に把握できない恐れがある．そこで，上述の電着銅薄膜によりその面圧発生状態を測定するとともに，有限要素法による結果と比較してこの方法の有効性を検証する．

第５章では，ピラミッド状の微小突起を有する電着銅薄膜による平均圧力および繰返し圧力の測定の可能性について検討する<sup>(17)</sup>．すなわち，種々の平均圧力  $p_m$  と圧力振幅  $p_d$  の組合せに対して突起先端

部の変形量を調査し，平均圧力による突起部の加工硬化と繰返し圧力による加工軟化に着目し，突起先端部の変形量と  $p_m$  および  $p_d$  の関係を定式化するとともに，その測定精度を調査し，この手法の有効性を実証する．

第6章では，電着銅薄膜の粒子成長現象<sup>(18)</sup>と表面粗さ変化を利用した固体接触面に作用する平均圧力と圧力振幅の測定の可能性について検討する<sup>(19)</sup>．すなわち，平均圧力  $p_m$  と圧力振幅  $p_d$  を種々に設定し，繰返し数  $N$  を変えて片振圧縮試験を実施し，薄膜に発生する成長粒子の発生密度と薄膜の表面粗さに及ぼす  $p_m, p_d$  および  $N$  の影響を調査する．さらに，各現象と  $p_m, p_d$  および  $N$  の関係の定式化を試みる．

第7章では，微小突起を有する電着銅薄膜による回転を伴う接触面の面圧測定の可否を検討する．すなわち，試作したローラ試験機のローラ接触部における接触面圧を測定し，接触問題の弾性解<sup>(20)</sup>と比較してその妥当性を検証する．

第8章は結論であり，各章で得られた結果を総括する．

## 参考文献

- (1) 加勢晋司，深田茂生，機械要素（ねじ）の研究と手法，精密工学会誌，**60-1**, (1994), 27-30.
- (2) 宮本 博，弾性接触の理論，塑性と加工，**12-124**, (1971), 360-368.
- (3) 香川博之，市川昌弘，高松 徹，桑野博喜，球圧子押し込みによる薄膜・基板接合体の弾塑性有限要素解析(薄膜の破壊強度評価を目的として)，日本機械学会論文集（A 編），**60-570**, (1994), 409-415.

- (4) 川田雄一 他, 材料強度工学ハンドブック, (1976), 248, 朝倉書店.
- (5) 小川欽也, 感圧紙を用いた衝撃力の可視化, 日本材料学会, **1**-47, (1998), 20-25.
- (6) 加藤 仁, 山口勝美, 加藤隆雄, 表面あらさ変化による金属接触面の圧力分布測定法 (第 1 報, 基礎実験), 日本機械学会論文集 (C 編), **44**-381, (1978), 1742-1751.
- (7) 加藤 仁, 山口勝美, 加藤隆雄, 表面あらさ変化による金属接触面の圧力分布測定法 (第 2 報, 円環圧子の接触面圧分布), 日本機械学会論文集 (C 編), **46**-404, (1980), 438-444.
- (8) 加藤 仁, 山口勝美, 加藤隆雄, 表面あらさ変化による金属接触面の圧力分布測定法 (第 3 報, ランダムなあらさをもつ金属面の場合), 日本機械学会論文集 (C 編), **48**-427, (1982), 408-413.
- (9) Quinn, A.M., Drinkwater, B.W. and Dwyer-Joyce, R.S., The measurement in machine elements using ultrasound, *Ultrasonics*, **39**-7 (2002), 495-502.
- (10) Quinn, A. M., Drinkwater, B. W. and Dwyer-Joyce, R. S., The measurement of contact pressure in machine elements using ultrasound, *Ultrasonics* , **39**-7, (2002), 698-704.
- (11) 大橋義夫, 偏光流性実験法の塑性加工への応用, 塑性と加工, **8**-83, (1967), 678-685.
- (12) 小島之夫, パイプ形ひずみゲージを用いた接触面圧の測定機論, 日本機械学会論文集 (A 編), **59**-567, (1993), 2599-2604.
- (13) 尾田十八, 品田智宏, 井上二郎, 花本康二, 電圧セラミックを用いた接触圧力分布の測定用センサシステムの開発, 日本機械学会

- 論文集 (A 編), **54**-498, (1988), 399-404.
- (14) 北岡征一郎, 間宮武司, 電着銅薄膜による接触面圧計測法 (第1報 基礎実験), 日本機械学会論文集 (A 編), **60**-573, (1994), 1288-1293.
- (15) 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 (第2報 微小突起を有する薄膜による静圧測定), 日本機械学会論文集 (A 編), **64**-619, A (1998), 689-695.
- (16) Ko, H.N., Hasegawa. T., Kitaoka, S. and T,Udagawa, A method of Measuring Contact Pressure of Cylinder Head Gasket, Small Engine Technology Conference & Exposition, SAE International, 2004-32-0068 (2004).
- (17) 北岡征一郎, 長谷川達也, 電着銅薄膜による接触面圧計測法 (第2報 微小突起を有する薄膜による静圧測定), 日本機械学会論文集 (A 編), **68**-670, (2002), 930-935.
- (18) 北岡征一郎, 小林聡宏, 大嶋和彦, 御厨照明, 電着銅の粒子成長過程に着目した応力測定法 (第1報, 粒子生成と粒子成長), 日本機械学会論文集 (A 編), **53**-487, (1987), 646-652.
- (19) Tatsuya Hasegawa and Seiichiro Kitaoka, Measurement of Contact Pressure by Electrodeposited Copper Foil (Measurement of Cyclic Pressure Using Grain Growth and Surface Roughness of Electrodeposited Copper Foil), Review of Automotive Engineering JSAE, **26** (2005), 327-333.
- (20) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, 3rd Ed., (1970), 418, McGraw-Hill.

## 第2章 電着銅薄膜による接触面圧計測法<sup>(1)</sup>の概要

### 2.1 緒言

実験的応力解析法の一つである銅めっき応力測定法<sup>(2)</sup>は、繰返し荷重を受ける要素表面に生ずる局所せん断応力振幅やその面分布を計測するのに極めて有効な測定法である。すなわち、自由表面を有する要素に電着により作製した薄膜を接着し、要素に作用する繰返し応力によって薄膜に発生する成長粒子を利用して、応力振幅を測定する。

測定手法としては、成長粒子の発生繰返し数と作用応力の関係<sup>(2)</sup>、電着層における成長粒子の発生密度と作用応力の関係<sup>(3)</sup>、成長粒子の成長速度と作用応力の関係<sup>(4)~(6)</sup>のいずれかが利用される。

ところで、この測定法の基礎となる電着層の成長粒子の発生は、これに作用する3次元最大せん断応力振幅に支配されるから、従来の適用例とは異なって薄膜表面に繰返し負荷が作用しても、同様に成長粒子の発生が期待できる。この観点から、電着銅薄膜による接触面圧計測法<sup>(1)</sup>が開発された。

本章では、銅めっき法を基礎としたこの電着銅薄膜による接触面圧計測法の概要について述べる。

### 2.2 実験方法

#### 2.2.1 圧力負荷装置

繰返し圧力の作用による電着銅薄膜の成長粒子の発生状況を調査するための圧力負荷装置の概観を図1に示す。図示のように、炭素工具鋼 SK-5 製の同一直径を有する円柱が2個使用された。圧力伝達面となる端面は、旋削、研削の後、 $0.05\mu\text{m}$  のアルミナ粉末により研磨が施

されている．また，接触面に垂直に負荷が作用して，一様に圧力が発生するように，装置の一端にはベアリング用ボールを埋め込み，点接触による一様な負荷の伝達を可能にしている．

### 2. 2. 2 電着銅薄膜の作製

電着銅薄膜は，硫酸銅を主体とする常温浴を用い，鏡面仕上げを施したステンレス円筒を陰極として従来と同一の条件<sup>(1)</sup>により作製され，その厚さは約  $15\mu\text{m}$  である．

### 2. 2. 3 実験方法

図 1 の圧力負荷装置の端面間に，これと同一直径に切り出した銅薄膜を挟み，これを MTS 材料試験装置（50Hz）に装着し，繰返し圧力  $p_d$  を種々に設定して片振り圧縮試験（応力比  $R \div 0.05$ ）を実施し， $p_d$  と成長粒子発生密度  $D$  および繰返し数  $N$  の関連が調査された．また，

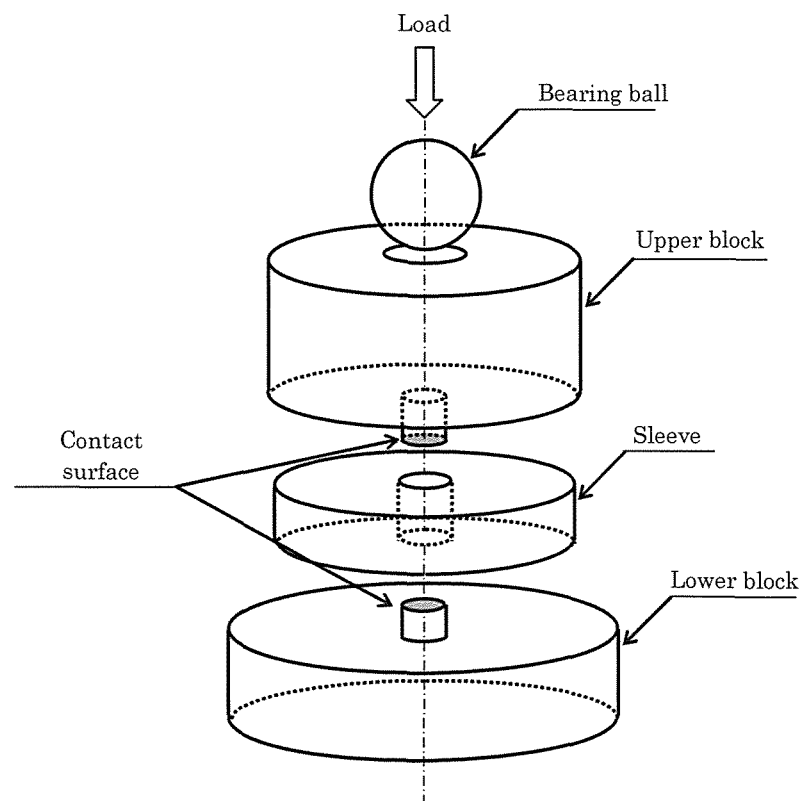


Fig.1 Apparatus for measuring pressure distribution

繰返し圧力の作用による薄膜表面の粗さ変化の測定には，触針式表面粗さ測定器（小坂研究所製 SE-3H 型）が，成長粒子の観察には倍率 200 倍の光学顕微鏡が使用された．

### 2. 3 実験結果（成長粒子発生密度 $D$ の圧力繰返し数依存性）

図 2 に得られた圧力繰返し数  $N$  の増加に伴う成長粒子の発生状況の変化の観察例を示す．図 2 からわかるように， $N$  の増加につれて黒

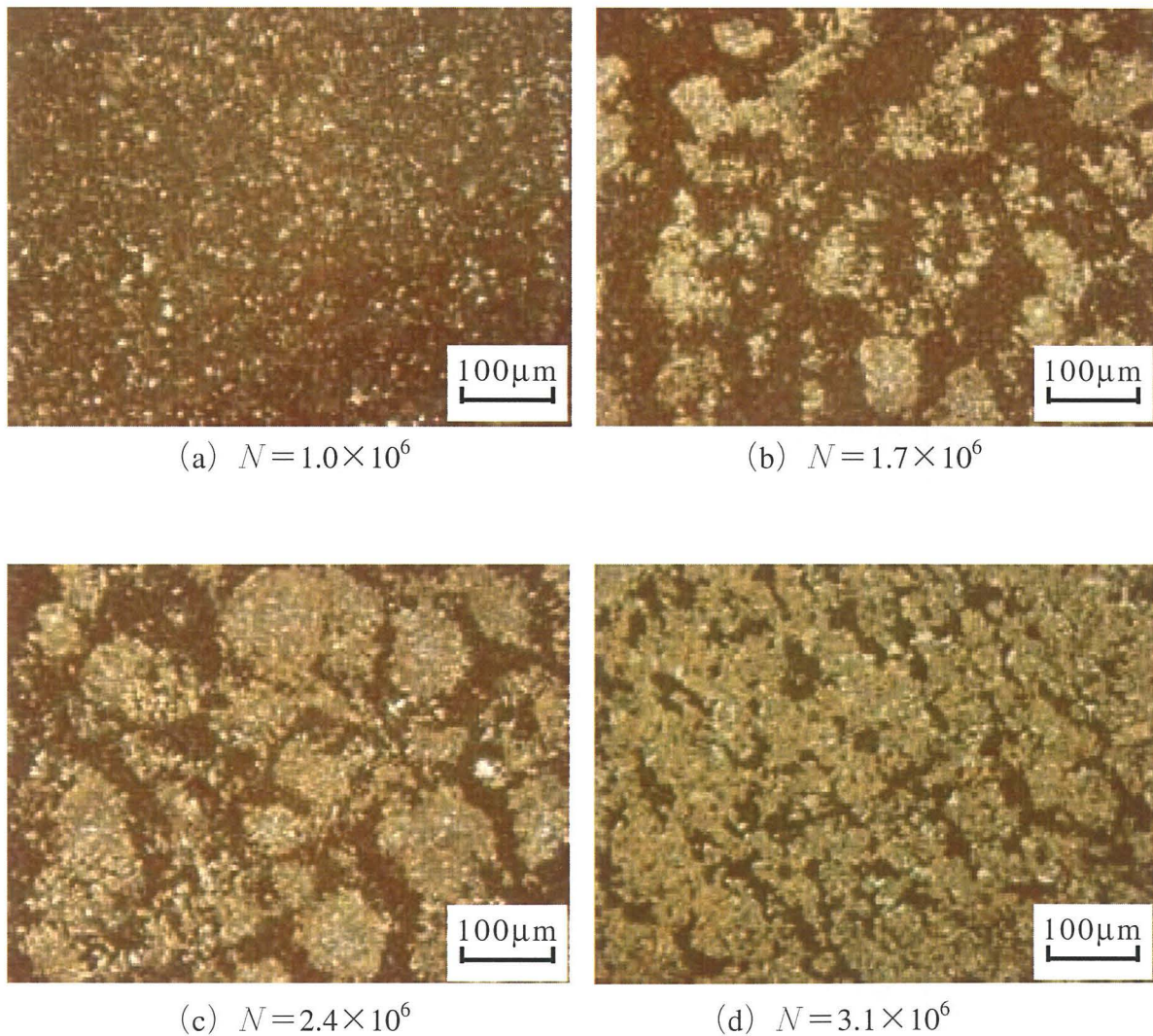


Fig.2 Change of grown grain occurrence with the increase of the number of cycles

( $p_d = 63 \text{ MPa}$ )



色部分が多くなることより，成長粒子の発生密度が増加することがわかる．

種々の  $p_d$  に対して得られた成長粒子の発生密度  $D$  と繰返し数  $N$  の関係を図3に示す．図3より，成長粒子発生初期段階では， $N$  の増加に対する  $D$  の増加割合が大きく，その後  $D$  の増加割合は次第に一定値に近づき， $D-N$  関係は明確な圧力依存性を示す．

この現象が生ずる要因として，銅薄膜の表面に存在する凹凸が繰返し圧力により塑性変形し，表面の粗さが減少して負荷治具と銅薄膜の真実接触面積が変化することが考えられた．すなわち，繰返し圧力が作用すると，まず薄膜表面の凸部において負荷治具との接触が生じ，この部分に高い繰返し圧力が作用して塑性変形が進行する．この結果，

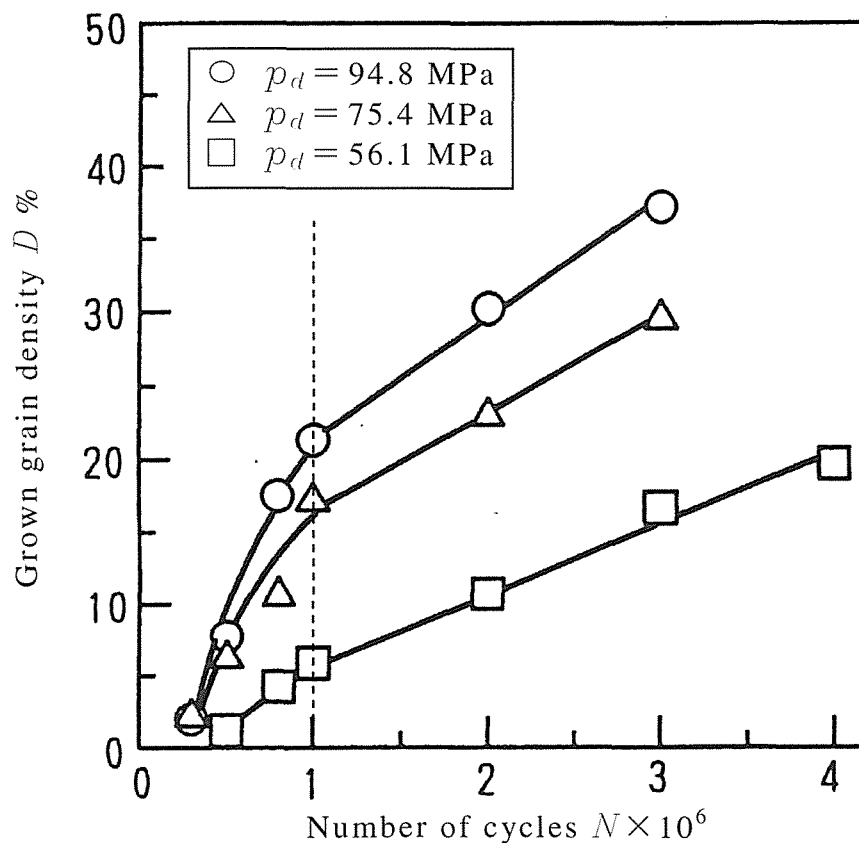


Fig.3 Relationship between grown grain density and number of cycles

真実接触面積は繰返し数とともに次第に増加し，真実接触部の繰返し圧力が低下して薄膜の変形は進行を停止し，繰返し圧力が一定値になることにより，図3の  $D-N$  関係が生じたものと推定された<sup>(4)</sup>．

そこで上述の現象の生起を確認するため，圧力負荷治具の表面および初期電着面に比べて粗さが格段に大きい銅薄膜の最終電着面の試験前および  $p_d = 75.4 \text{ MPa}$ ， $N = 1.0 \times 10^6$  を与えた後における粗さが調査された<sup>(4)</sup>．ここで，図4に初期電着面と最終電着面の模式図を示す．この結果，薄膜の算術平均粗さ  $R_a$  および最大高さ  $R_y$  はいずれも試験後に減少していることが確かめられ，上述の推論が裏付けられた．

図3において，成長粒子発生密度の増加速度は  $N = 1.0 \times 10^6$  ではほぼ一定とみなせる．そこで，この領域に対し  $dD/dN$  を求め， $p_d$  との関係を図5に示す．

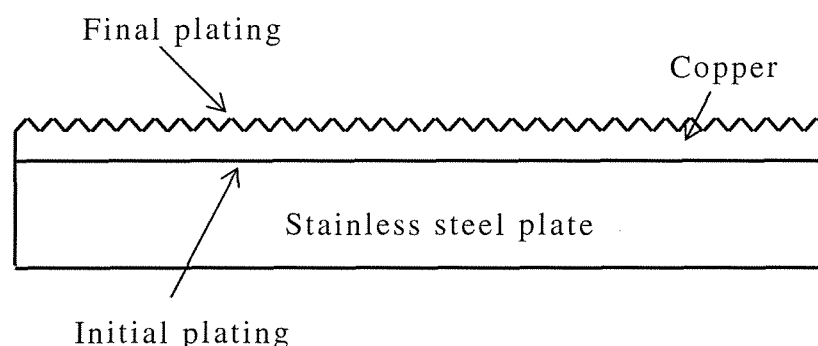


Fig.4 Schematic diagram of initial plating surface and final plating surface

また，粒子成長速度が速度過程<sup>(6)</sup>であることから，図5において  $p_d$  と  $dD/dN$  の間にはほぼ次式が成立する．

$$p_d = \alpha \log dD/dN + \beta \quad \dots\dots\dots (1)$$

この関係を利用して接触面の微小な領域に作用する繰返し圧力の測定が実施できることが示唆された．

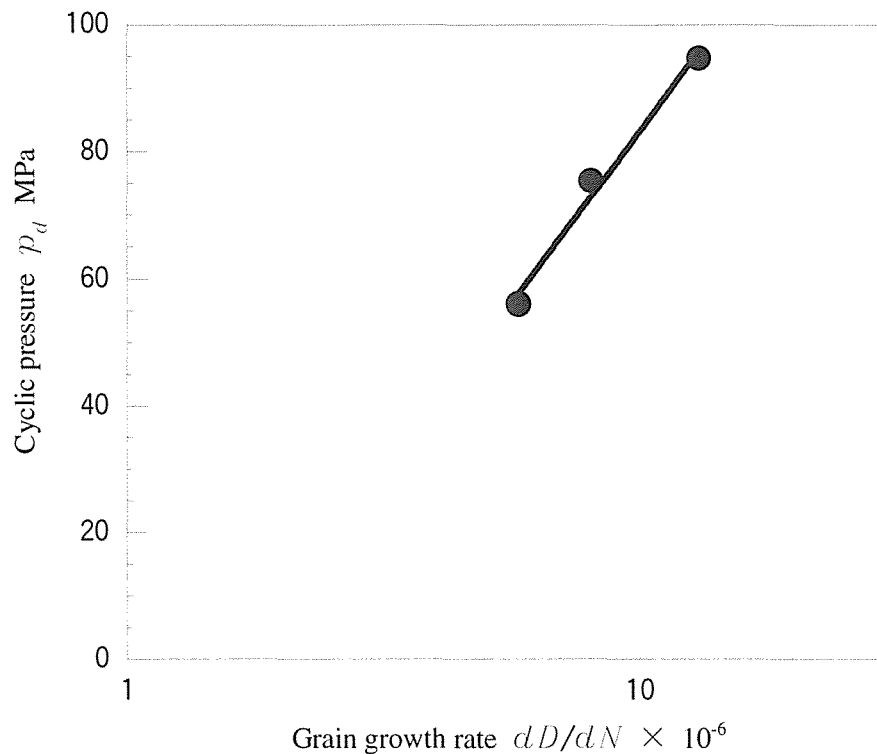


Fig.5 Relationship between grain growth rate and cyclic pressure

## 参考文献

- (1) 北岡征一郎, 間宮武司, 電着銅薄膜による接触面圧計測法 (第1報 基礎実験), 日本機械学会論文集 (A 編), **60**-573, (1994), 1288-1293.
- (2) 大久保 肇, 銅めっき応力測定法, (1965), 朝倉書店.
- (3) 北岡征一郎, 御厨照明, 細野喜久雄, 電着銅の成長粒子発生密度変化を利用した応力測定法(画像処理の適用), 日本機械学会論文集 (A 編), **57**-534, (1991), 442-447.
- (4) 北岡征一郎, 小林聡宏, 大嶋和彦, 御厨照明, 電着銅の粒子成長過程に着目した応力測定法 (第1報, 粒子生成と粒子成長), 日本機械学会論文集 (A 編), **53**-487, (1987), 646-652.
- (5) 北岡征一郎, 大嶋和彦, 電着銅の粒子成長過程に着目した応力測定法

(第2報, 予加熱処理と予ひずみ処理), 日本機械学会論文集 (A 編), **54**-498, (1988), 385-392.

- (6) 北岡征一郎, 大嶋和彦, 電着銅の粒子成長過程に着目した応力測定法  
(第3報, 粒子成長速度を利用した応力測定法の低温下への適用), 日本機械学会論文集 (A 編), **55**-520, (1989), 2503-2509.

## 第3章 微小突起を有する電着銅薄膜による 静圧測定法<sup>(1)</sup>の概要

### 3.1 緒 言

第2章においては、銅めっき応力測定法<sup>(2)</sup>を利用した二物体間の接触面に生ずる繰返し圧力の計測法<sup>(3)</sup>の概要を紹介した。すなわち、成長粒子発生密度の増加速度と繰返し圧力の関係が定式化され、この構成式を利用すれば、接触面の微小な領域に作用する繰返し圧力の計測が可能になることが示された。しかしながら、成長粒子は荷重が変動する場合にのみ発生するから、第2章の方法では静圧を測定することは不可能である。

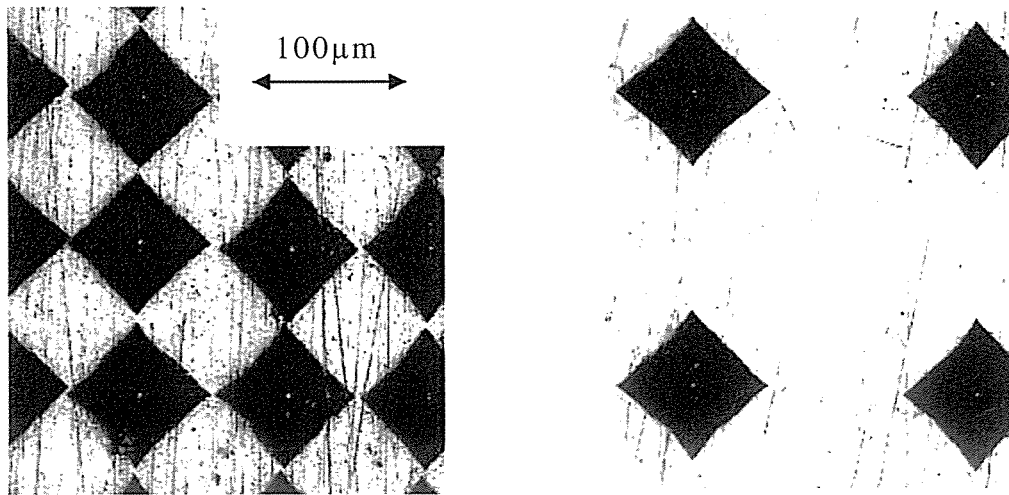
この観点から、規則的に配列したピラミッド状の微小な突起を有する薄膜を電着により作製し、 $0.1\text{ mm}^2$  オーダの微小な領域に作用する静圧を測定する手法<sup>(1)</sup>が開発された。

本章では、この微小突起を有する電着銅薄膜による静圧測定の概要について述べる。

### 3.2 実 験 方 法

#### 3.2.1 微小突起を有する電着銅薄膜の作製

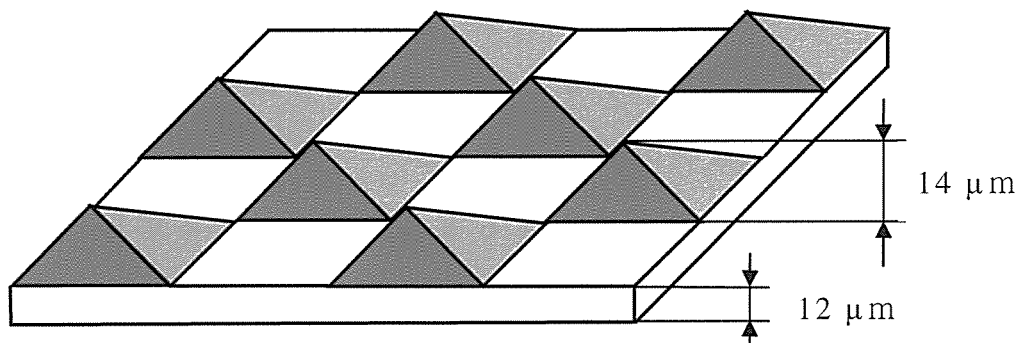
微小突起を有する電着銅薄膜は、陰極となるステンレス板に対し、#800のペーパー仕上げを施した後、マイクロビッカース硬さ計(9.8 N)により、圧痕の間隔  $d$  を (1)  $d \div 100\mu\text{m}$ , (2)  $d \div 200\mu\text{m}$  にとって圧痕を打ち込み、これに従来と同一の条件<sup>(3)</sup>でめっきを施して作製された。図1 (a), (b) にこの銅薄膜の表面状況を示す。



( i )  $d \doteq 100 \mu\text{m}$

( ii )  $d \doteq 200 \mu\text{m}$

(a) Configuration of micro projections



(b) Schematic of micro projections ( $d \doteq 100 \mu\text{m}$ )

Fig.1 Copper foil with micro projections

圧力測定には，この銅薄膜とこれに大気中で  $150^{\circ}\text{C}$ ，2 h の焼なましを施した銅薄膜が使用された．以後，電着銅薄膜および焼なまし銅薄膜をそれぞれ I，II，圧痕間隔  $d \doteq 100 \mu\text{m}$ ， $d \doteq 200 \mu\text{m}$  をそれぞれ (1)，(2) で表示する．

### 3. 2. 2 圧力負荷装置

較正試験には，炭素工具鋼 SK-3 製の圧力負荷装置を用いられた．

図 2 に，平面底円柱と平面との圧力分布測定用の負荷装置の概観を示す．平面底円柱には上述の SK-3 を，平面には直径 40mm，高さ 35mm の黄銅および焼なましを施した SK-3 が用いられた．

表 1 に黄銅および焼なましを施した SK-3 の機械的性質を示す．

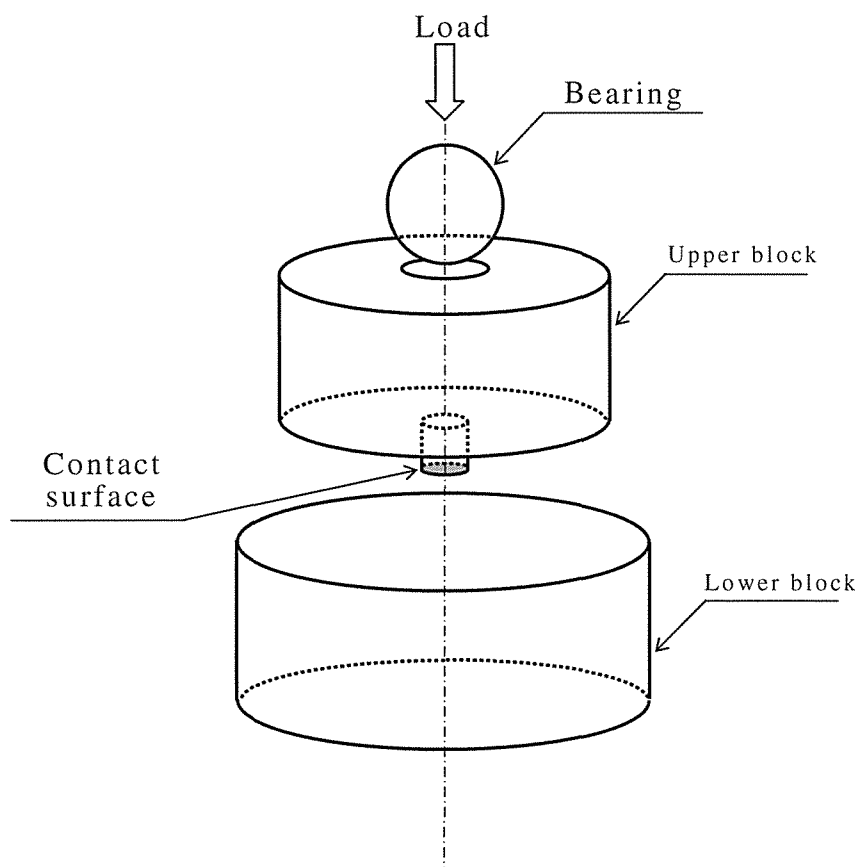


Fig.2 Apparatus for measuring pressure distribution

Table 1 Mechanical property of materials

	Brass	SK-3 annealed	SK-3 quenched
E GPa	108	206	206
G GPa	41	80	80
Hv	126	211	961

### 3. 2. 3 実験方法<sup>(1)</sup>

図2の圧力負荷装置の端面間に、これと同一直径に切り出した銅薄膜を挟み、これをMTS材料試験装置に装着し、種々の負荷を与えて微小突起の変形の度合いと静圧  $p_s$  との関係が調査された。さらに、この結果に基づき、図2の負荷装置の接触面の静圧分布が調査された。なお、突起部の変形量は、走査形レーザ顕微鏡（オリンパス製 OLS 1000 形）により測定された。

## 3. 3 実験結果

### 3. 3. 1 微小突起の変形の静圧依存性

図3に、圧縮負荷により変形した薄膜 I - (1) の突起先端部の観察例を示す。静圧  $p_s$  が増すにつれて突起部の変形が進行し、圧力負荷治具との真実接触面となる突起先端の平坦部の面積  $A_r$  が増加し、両者の間には固有の関係が成り立つことから、 $A_r$  を測定することにより接触面の圧力測定を行うことが可能になる。

図4に、薄膜 I - (1) および II - (1) に対して得られた圧力の負荷時間と真実接触面積  $A_r$  を微小突起の底面積  $A$  で無次元化した  $A_r/A$  の関係を示す。ここに、 $A_r$  は接触面の任意の4～5箇所における16～20個の突起より得られた値の平均より決定されている。負荷開始直後において突起部の変形が容易に進行し、接触面積が急激に増加するが、その後徐々に一定値に近づいていく。したがって、 $A_r$  に基づいて圧力測定を行うには負荷時間  $t$  を設定しておくことが必要であり、図4より  $A_r$  の変化が穏やかとなる  $t=30s$  が以後の実験において採用された。

各薄膜に対して得られた静圧  $p_s$  と  $A_r/A$  の関係を図5に示す。これ



らの関係を利用すれば、 $A_r$ を測定することにより接触面の圧力分布を計測することが可能となる。

また、図5の各測定点は16～20個の微小突起より求められるから、本手法では固体接触面の $0.1\text{mm}^2$ オーダの微小な領域に作用する圧力を計測できる。

また、図5から明らかなように、圧痕間隔 $d$ の相違や熱処理の有無により $p_s$ と $A_r/A$ の関係が異なることから、圧痕間隔や薄膜に対する熱処理操作により、圧力計測の感度を制御することが可能であるといえる。

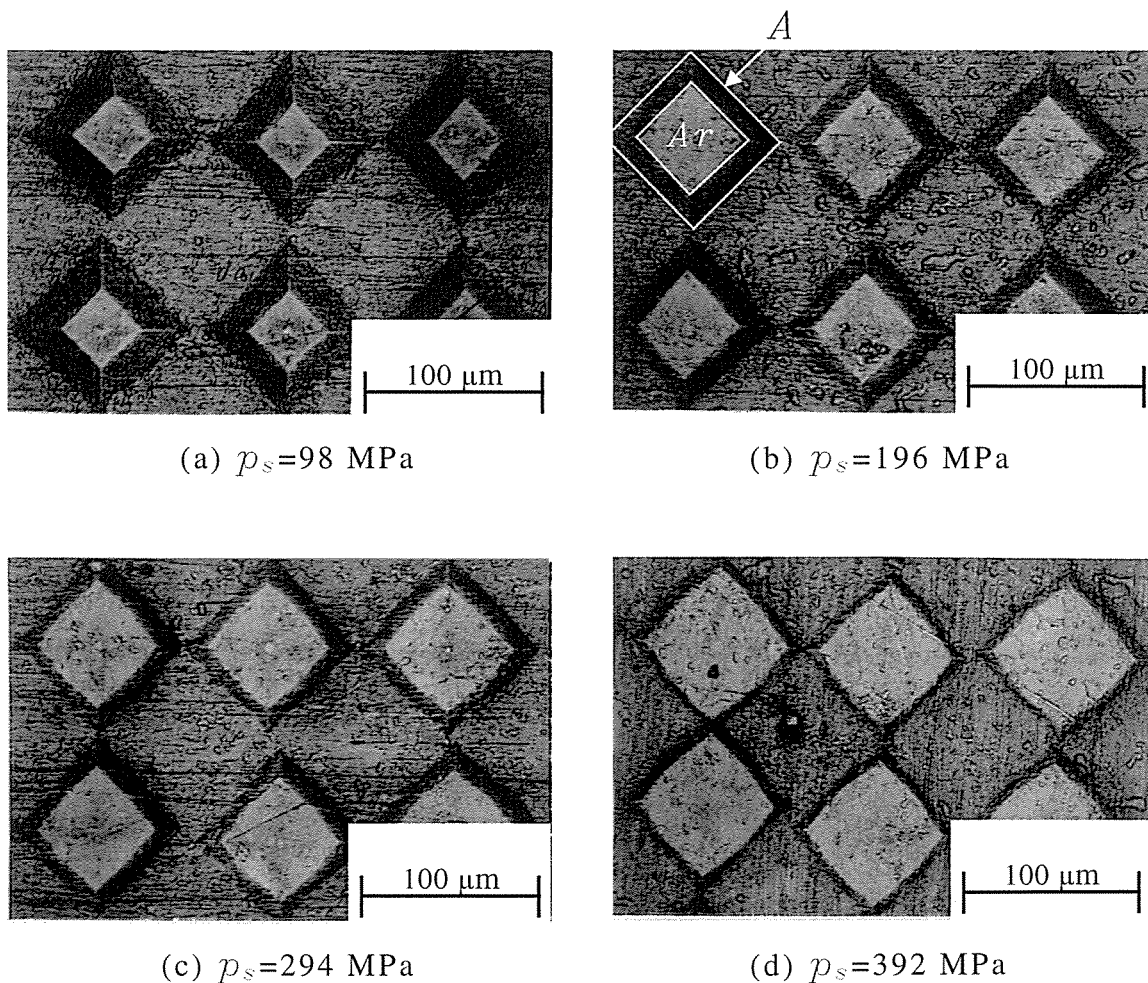


Fig.3 Configuration of micro projections deformed by static pressure [I-(1)]

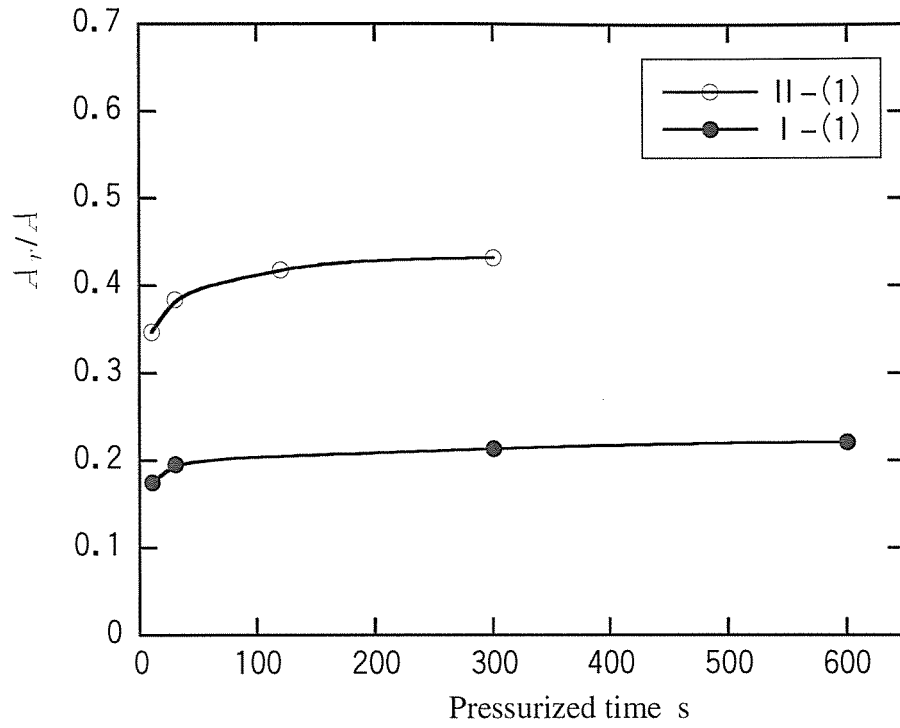


Fig.4 Relationship between pressurized time and contact area ( $p_s = 98\text{MPa}$ )

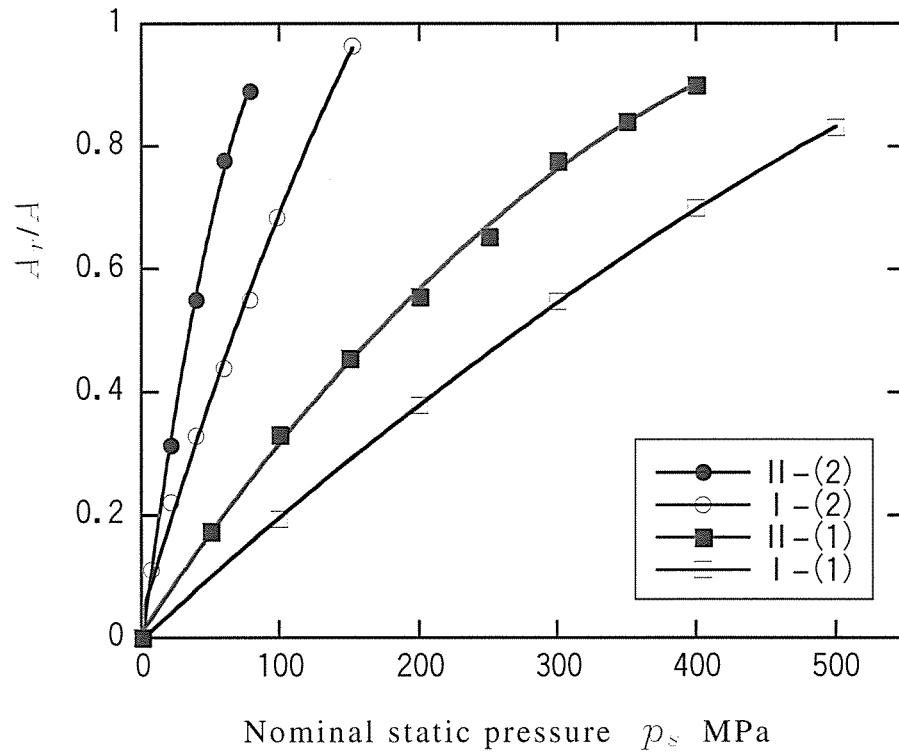


Fig.5 Relationship between nominal static pressure and contact area

### 3. 3. 2 $A_r/A$ と静圧 $p_s$ の関係の定式化

図 5 より,  $A_r/A$  は  $p_s$  の関数となるから, これを次式で表示する.

$$A_r/A = f(p_s) \cdots \cdots \cdots (1)$$

最小二乗法を用い, 図 5 の曲線を次式の二次曲線で近似する.

$$f(p_s) = a p_s^2 + b p_s + c \cdots \cdots \cdots (2)$$

表 2 に係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  の値を示した.

また, 図 1 において薄膜の突起部の総底面積と圧力負荷治具の接触面積の割合を  $1:k$ , 薄膜の突起先端部の真実接触面に作用する圧力を  $p_r$  とすれば, 力の釣り合いより, 次式が成立する. なお,  $k$  は微小突起の間隔より, 薄膜 (1), (2) に対し, それぞれ  $k \doteq 2.13$ ,  $k \doteq 7.41$  となる.

$$p_r = \frac{k p_s}{A_r/A} \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$p_r = k p_s / (a p_s^2 + b p_s + c) \cdots \cdots \cdots (4)$$

この関係は, 後述の圧力分布の測定に利用された.

式 (4) より各薄膜について  $p_r$  と  $p_s$  の関係を求めた結果を図 6 に示す.  $p_r$  は  $p_s$  の上昇につれて増加し, 加工硬化が進行する. また, 熱

Table 2 Corfficients a,b and c

	I -(1)	I -(2)	II -(1)	II -(2)
a	$-7.2007 \times 10^{-5}$	$-9.1887 \times 10^{-6}$	$-2.8206 \times 10^{-6}$	$-7.9214 \times 10^{-7}$
b	0.017148	0.007456	0.0033598	0.0020662
c	-0.00442	0.0392	0.0085103	-0.0022143

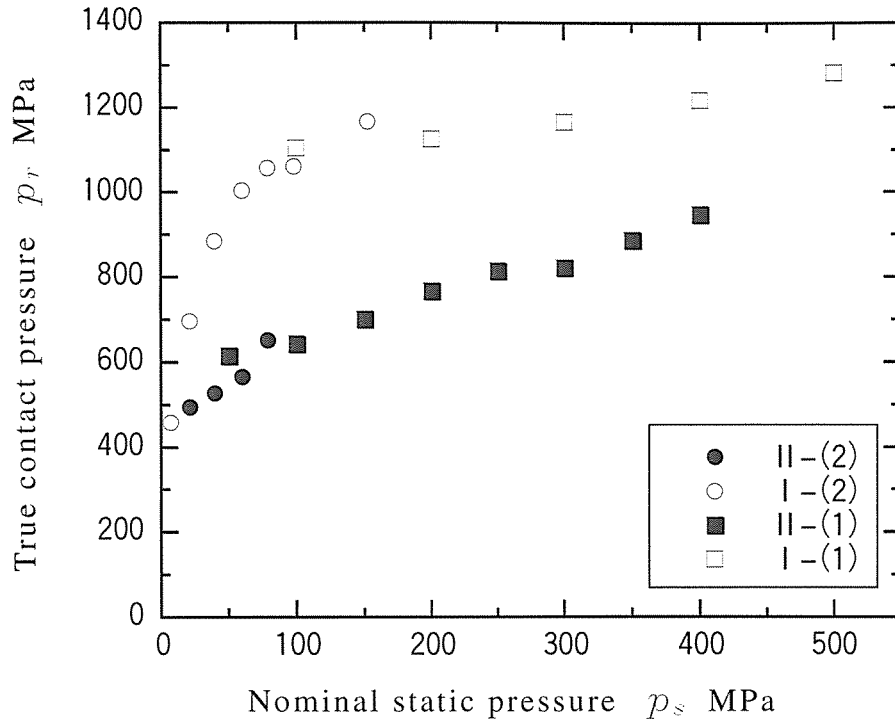


Fig.6 Relationship between nominal static pressure  $p_s$   
and real contact pressure  $p_r$

処理の有無によって  $p_r$  と  $p_s$  の関係は変化するが、圧痕間隔によらず薄膜に固有のものとなる。したがって任意の圧痕間隔の薄膜に対する  $A_r/A$  と  $p_s$  の関係を予測できる。

### 3. 3. 3 微小突起の変形を利用した静圧分布の測定

図 7 に薄膜 I - ( 1 ) を用い、SK-3 製の平面底円柱を黄銅製の平面に押付けて得られた  $A_r$  の測定例を示す。なお、図は得られた  $A_r/A$  と円柱の中心からの距離  $r$  を円柱の半径  $r_0$  で無次元化した  $r/r_0$  の関係を表す。ここに、図 7 中の各測定点は円柱の中心を通り互いに直交する二直線上の個々の微小突起より得られた値である。

図 7 の測定結果から式 ( 1 ), ( 2 ) を用いて各箇所の静圧  $p_s$  を求めた。ついで、圧縮荷重  $P$  を円柱の底面積  $\pi r_0^2$  で除した公称圧力  $p_0$

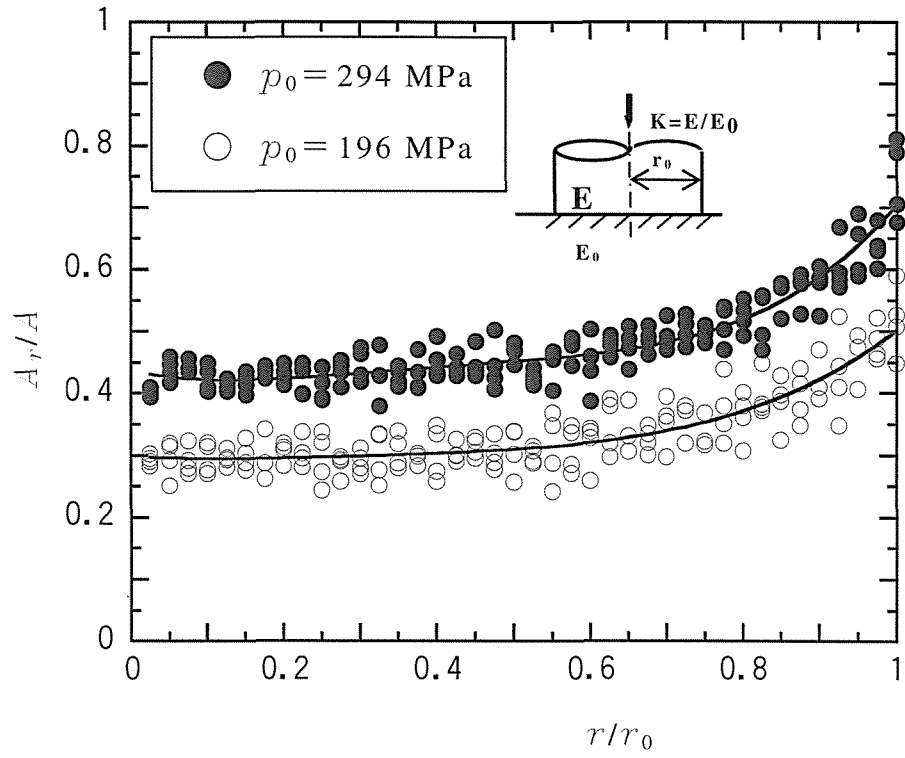


Fig.7 Relationship between  $A_r/A$  and  $r/r_0$  [I-(1)]  
(Combination of steel and brass)

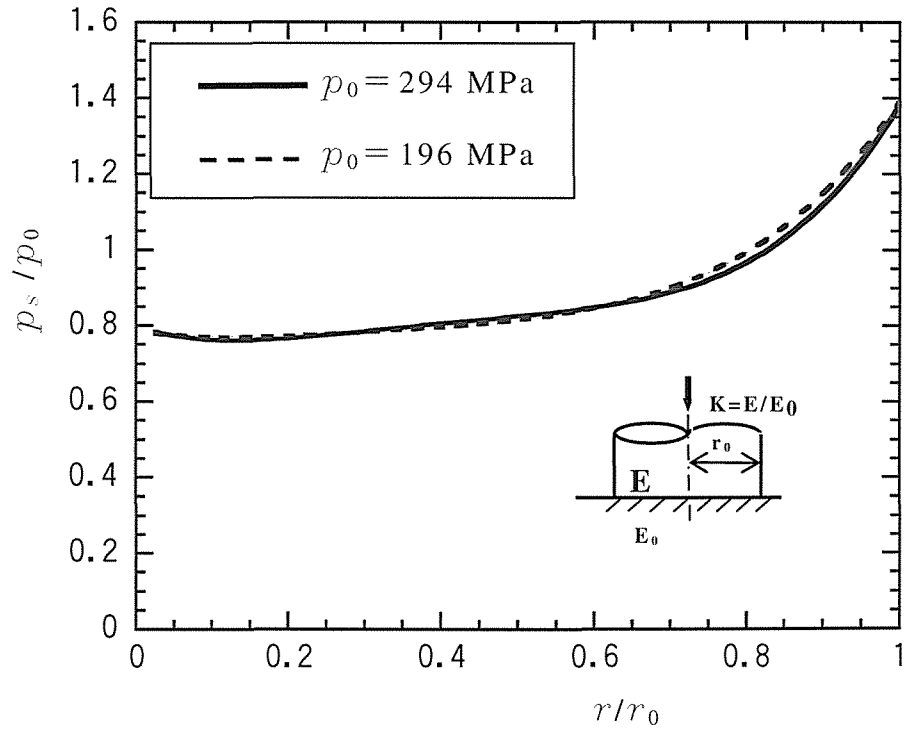


Fig.8 Pressure distribution at the bottom of circular cylinder  
compressed to flat surface

Table 3 Corfficients  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $c^*$ ,  $d^*$  and  $e^*$

	$a^*$	$b^*$	$c^*$	$d^*$	$e^*$
$p_0=294$ MPa	3.7079	-5.8482	3.3432	-0.24032	0.78432
$p_0=196$ MPa	2.0059	-2.5147	1.3565	-0.24032	0.78432

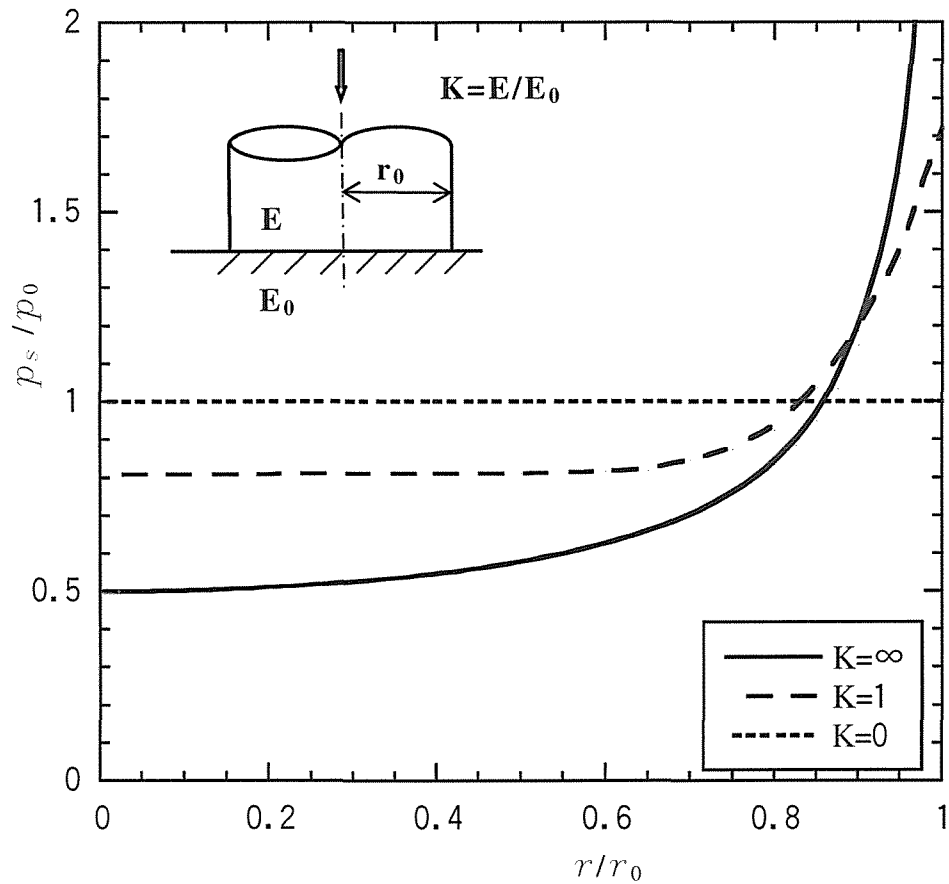


Fig.9 Theoretical value and calculated value of pressure distribution

により  $p_s$  を除して無次元化し,  $r/r_0$  の関係を求め, これを最小二乗法により次式の四次曲線で近似すれば, 図 8 となる.

$$p_s / p_0 = a^* (r/r_0)^4 + b^* (r/r_0)^3 + c^* (r/r_0)^2 + d^* (r/r_0) + e^* \dots\dots\dots (5)$$

Table 4 Ratio of  $P_E$  to  $P$ 

$p_0$ MPa	196	294
$P_E / P$	1.02	0.96

ここに、係数  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $c^*$ ,  $d^*$ ,  $e^*$  は表 3 の値となる。

図 9 には、剛体円柱を半無限体に押付けた場合の理論解<sup>(4)</sup>および弾性円柱を押付けた場合の数値解<sup>(5)</sup>を示した。

図 8 において、公称圧力  $p_0$  を変えても圧力分布の形状はほぼ一致する。また、円柱縁近傍の測定値は理論解や計算値に比較して低くなる。対象とする要素の形状の相違も圧力分布に影響するが<sup>(5)</sup>、この結果は、主としてこの領域において平面を形成する黄銅に塑性変形が生じることが要因になっている。

測定値の妥当性を検証する一方法として、得られた圧力分布から全圧  $P_E$  が求められた。 $p_s$  と  $P_E$  の間には次式が成立する。

$$\int_0^{r_0} 2\pi r p_s dr = P_E \quad \dots\dots\dots (6)$$

式 (5), (6) より  $P_E$  を求め、実際に与えた負荷  $P$  との比をとり、表 4 に示した。 $P_E / P$  は 1 に近い値となり、ほぼ妥当な圧力分布が得られたものと考えられる。

## 参考文献

- (1) 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(第 2 報 微小突起を有する薄膜による静圧測定), 日本機械学会論文集 (A 編), **64**-619, (1998), 689-695.
- (2) 大久保 肇, 銅めっき応力測定法, (1965), 朝倉書店.
- (3) 北岡征一郎, 間宮武司, 電着銅薄膜による接触面圧計測法(第 1 報 基

礎実験), 日本機械学会論文集 (A 編), **60**-573, (1994), 1288-1293.

(4) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, (1970), 408,  
Mcgraw-Hill.

(5) 相原民彦, 円柱平端面と弾性体平面との弾性接触応力 (第 1 報  
中実円柱と半無限体との軸対象接触), 日本機械学会論文集,  
**40**-333, (1974), 1287-1297.



## 第4章 エンジンのシリンダヘッドガスケットに 対する新たな面圧測定法<sup>(1)</sup>

### 4.1 緒言

種々の機械において，その構成要素に作用する面圧を把握する必要性は高い．

自動車のシリンダヘッドガスケットは，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を果たす部品である<sup>(2)</sup>．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，さらに所定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，設計上重要な項目であるとともに，自動車整備の観点からも認識すべき重要な事柄であるが，面圧の実測には感圧フィルム法<sup>(3)</sup>などの一部の方法が利用されているのが現状である．

本章では，前章の電着銅薄膜による接触面圧計測法<sup>(4)</sup>の実機への応用例として，ディーゼルエンジンの2つのタイプのシリンダヘッドガスケットを対象とし，その面圧の実態を把握することを目的とした．

接触面圧，特にシール性にとって重要なボア間の接触面圧に着目する場合，感圧フィルム法では，面圧発生状態を正確に把握できない恐れがある．すなわち，市販の感圧フィルムでは，測定可能な圧力の上限値がシリンダヘッドガスケット表面に発生する最大圧力を下回る可能性があるためである．そこで，電着銅薄膜による接触面圧計測法により，その面圧発生状態を比較するとともに，FEM解析を行ってその有効性を検証した．

## 4. 2 測定方法

### 4. 2. 1 測定エンジン

ディーゼルエンジンは、いすゞ・ビッグホーンに搭載されている4JX1エンジンである。そのエンジンの諸元を表1に示し、シリンダヘッドガasketの構造を図1に示す。現行のシリンダヘッドガasket（ワイヤタイプ）は、スチールラミネート(積層構成)である。シリンダボアのシール部の構造は、中材の軟鋼板の上下にステンレス板を重ね、補強として軟鋼線のリングを入れ、リングと中材をステンレス板で包みこんだタイプである。また、新タイプ（ビードタイプ）は、スチールラミネートで、シリンダボアのシール部の構造は、ステンレス板を3枚重ね合わせ、補強としてリングを用いないでステンレス板をプレスでビード（凸凹）を形成し、上板のステンレス板を折り返した構造である。

Table 1 Main specification of test engine

Car name	ISUZU・BIG HORN
Form	4JX1
Displacement      cm <sup>3</sup>	2999
Cylinder arrangement	4 Cylinder in line
Combustion chamber	Direct injection
Valve mechanism	DOHC
Bore Stroke      mm	95.4×104.9
Comperession ratio	19
Maximum power      kW	160    (at 3900 min <sup>-1</sup> )
Maximum torque    N・m	30.4    (at 2000 min <sup>-1</sup> )

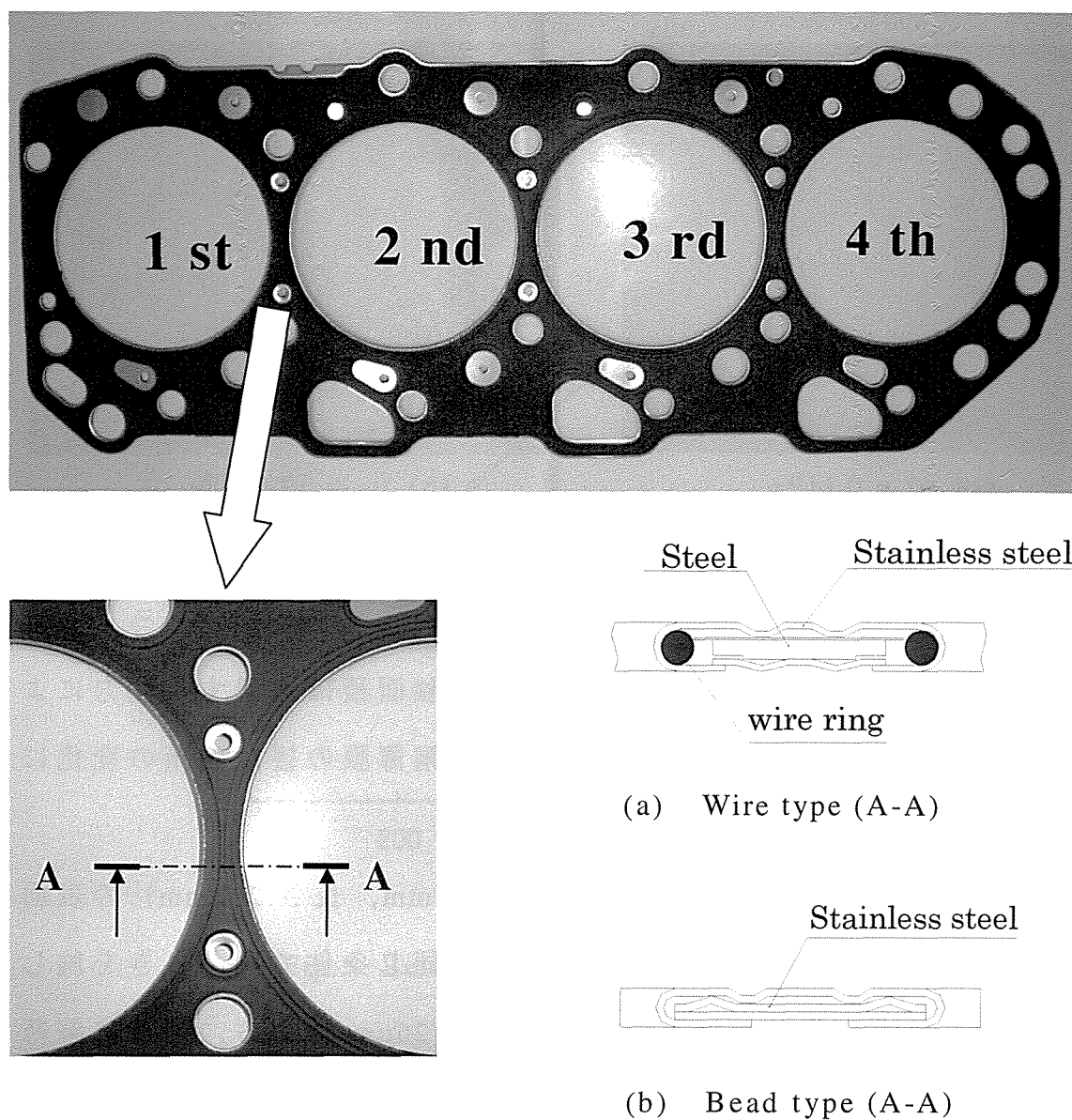


Fig.1 Cross section of cylinder head gasket

#### 4. 2. 2 電着銅薄膜による接触面圧計測法

##### 4. 2. 2. 1 電着銅薄膜ゲージ

銅薄膜はある粗さを有しているため、これを固体接触面に挟んで圧力を作用させれば、その接触は微小な突起部分で行われる。したがって、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

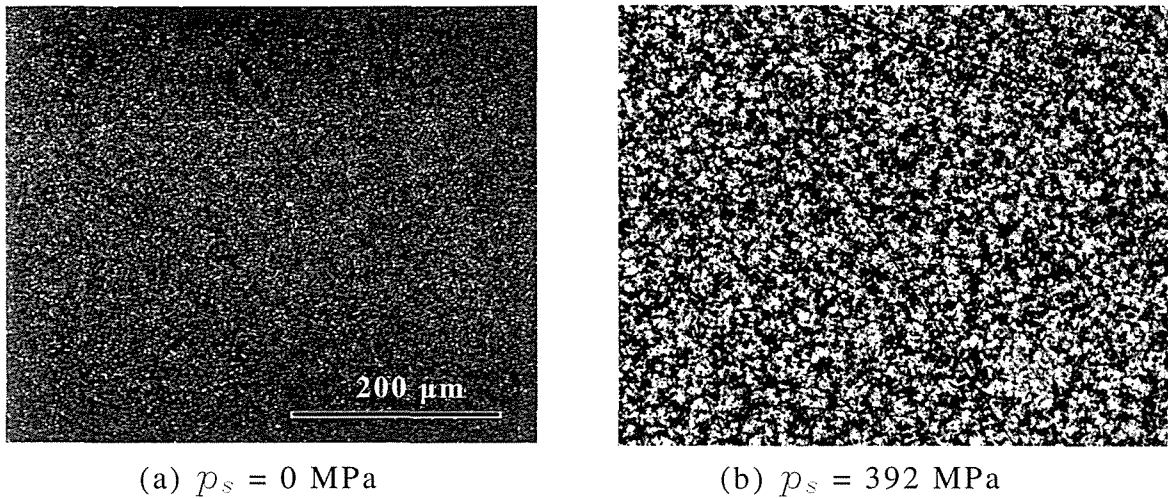


Fig.2 Copper foil gauge with unevenness

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により変化すると考えられる．この観点から，銅薄膜の接触面積の変化に着目して接触面の圧力測定を行った．

銅薄膜ゲージは，ステンレス棒（直径 42mm，長さ 200mm）の表面をバフ研磨により鏡面仕上げし，第 2 章と同じ条件で銅めっきを施して電極より剥離したものである．厚さは約 26 $\mu$ m である．図 2 に銅薄膜ゲージの加圧前後の表面状況を示す．

#### 4. 2. 2. 2 電着銅薄膜の測定範囲と測定精度

図 3 には，電着銅薄膜の最終電着面に生ずる凸凹を利用して静圧測定をした結果を示した．圧力負荷治具と銅薄膜との接触面積割合を  $r$  として，静圧  $p_s$  と  $r$  の関係を表している．図中の曲線は，最小二乗法を用いて二次近似を行ったものであり，次式で表示される．

$$r = a p_s^2 + b p_s + c \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここに，係数  $a, b, c$  はそれぞれ  $a = -4.839 \times 10^{-5}$ ,  $b = 1.256 \times 10^{-1}$ ,  $c = 6.182$  となる．この曲線において， $p_s = 0$  のとき  $r = 0$  とはならない．これ

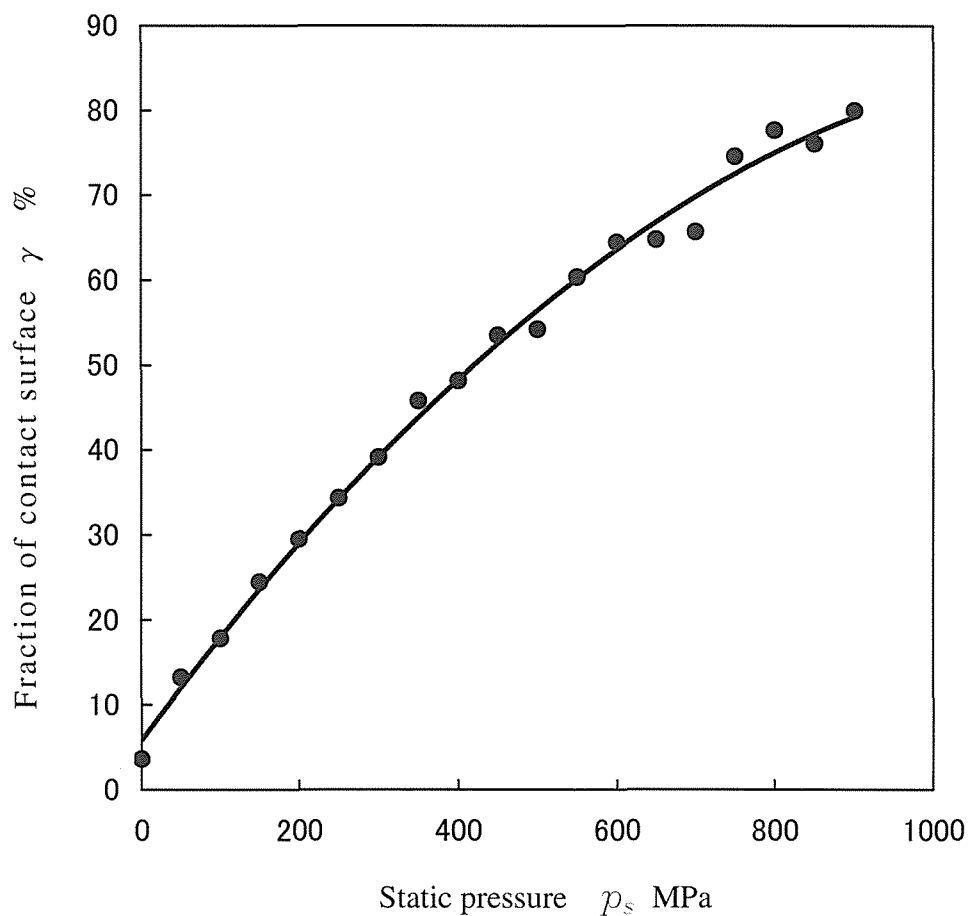


Fig.3 Relationship between  $r$  and  $p_s$

は、銅薄膜表面の結晶粒子が負荷前の状態であっても平坦になっている部分があるためと考えられる。図3より、この銅薄膜ゲージは900 MPa程度の圧力が測定可能であるといえる。ただし、測定値のばらつきは作用させた静圧の増加に伴い増大するが、ばらつきを作用させた静圧で除した比率は、静圧が低い場合のほうが悪くなる傾向が見られた。作用させた静圧が低い場合を除けば、誤差は最大で $\pm 20\%$ 、平均で $\pm 10\%$ 程度となる。

#### 4. 2. 3 電着銅薄膜の測定箇所および測定方法

図4にはボア間の測定箇所と銅薄膜ゲージによる測定場所を示した。

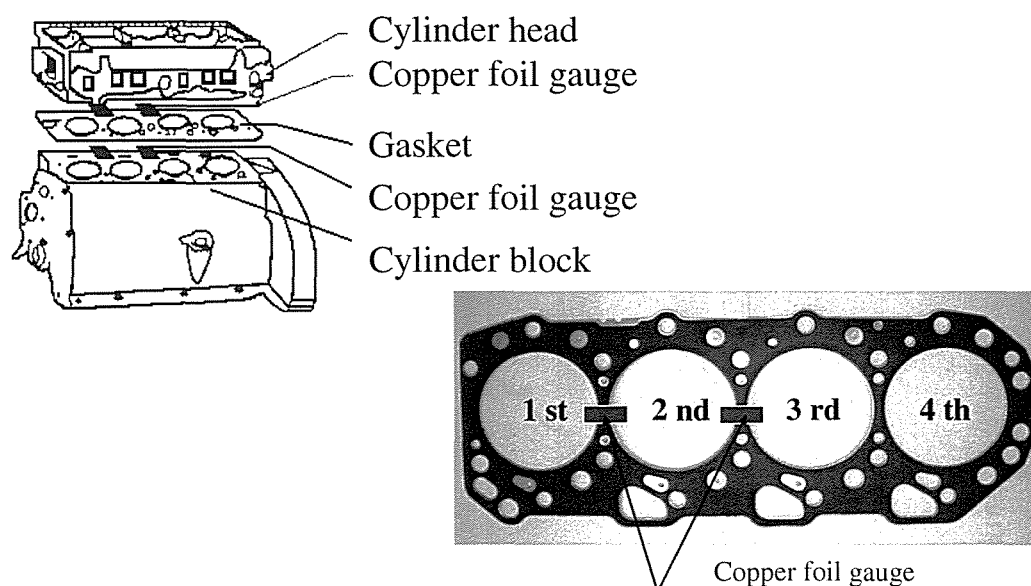


Fig.4 Measured position and inserting place of gauge

銅薄膜ゲージを挟む箇所はシリンダボア間で、挟む順序はシリンダブロック、銅薄膜ゲージ、シリンダヘッドガスケット、銅薄膜ゲージ、シリンダヘッドである。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。

① 締付け手順は、自動車整備書に基づき締付け塑性域回転角度法を用いて3段階に分けて締付ける。1回目は  $49\text{N}\cdot\text{m}$  (トルク法) で締め、2回目は  $60^\circ$  (角度法)、そして3回目も  $60^\circ$  (角度法) で締付ける。10min 経過後、取り外し手順に従い銅薄膜ゲージを取り出す。

② 上記の締付け方とは異なったボルトの軸力による締付けも行った。これは、ボルト穴のある付近のシリンダヘッドやシリンダブロックの構造による剛性の違いによりボルトのひずみ方が違うためである。使用したボルト1本の寸法が  $\text{M}11 \times 1.5$  のためボルトの軸力を  $7\text{t}$  ( $68.6\text{kN}$ ) とした。締付け順序は、1回目は  $2\text{t}$  ( $19.6\text{kN}$ ) で締め、2回目は  $7\text{t}$  ( $68.6\text{kN}$ ) で締付ける。

③ 締付け後ステンレス棒に接した銅薄膜面を走査型共焦点レーザ顕微鏡（オリンパス OLS 1000 型）により観察し，粒子解析ソフトにより接触面積割合を算出して図 3 より圧力を求めた．

#### 4. 3 測定結果および検討

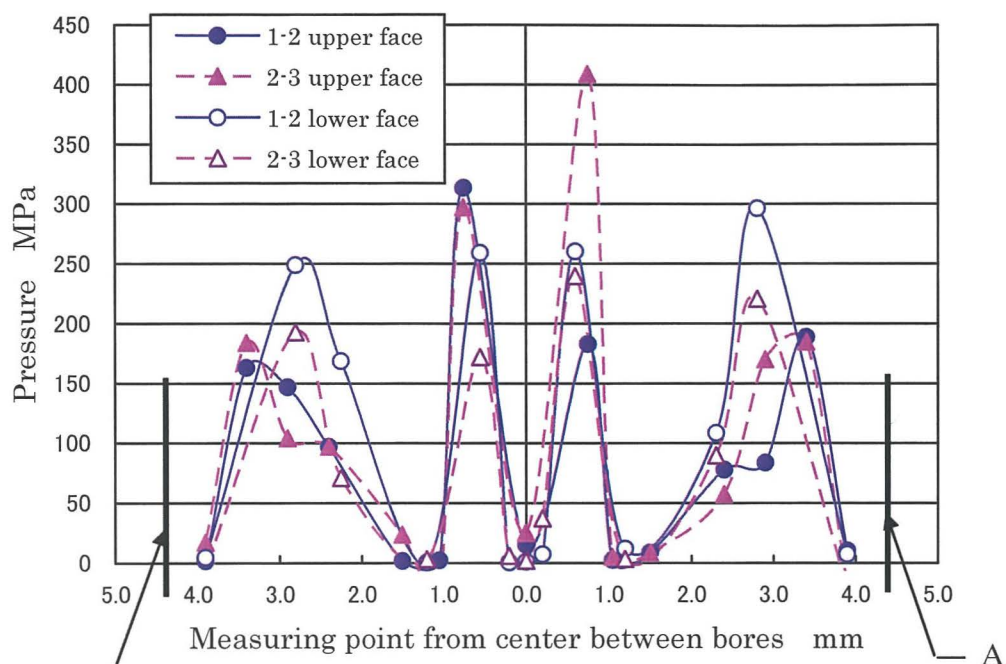
シリンダヘッドガスケットの面圧の把握で特に重要なボア間において，新たに開発された銅薄膜ゲージを用いてシリンダヘッドガスケットの接触面圧の測定結果を述べる．シリンダヘッドガスケットの構造やガスケットの締付け条件を変えてそれぞれ接触面圧を測定し，その結果を比較検討した．

##### 4. 3. 1 自動車整備書に基づく締付け塑性域回転角度法におけるボア間の面圧

###### 4. 3. 1. 1 ガスシール構造がワイヤタイプの場合

図 5 には，シリンダ 1-2 間と 2-3 間のボア間の圧力を調査した結果を示した．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，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．上面において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，シリンダ外周から 3.5mm と 0.8mm 付近の 2 箇所の圧力は高くなり，ボア間の中央と 1.2mm 付近ではほとんど圧力が生じていないことがわかる．下面において，ボア間中央の基準を中心に左右ほぼ対称で，シリンダ外周から 2.8mm と 0.8mm 付近の 2 箇所の圧力は高くなり，ボア間の中央と 1.2mm 付近では圧力がほとんど生じていないことがわかる．

圧力のかかる位置が上面も下面もシリンダ外周から 0.8mm 付近で



A: Cylinder circumference

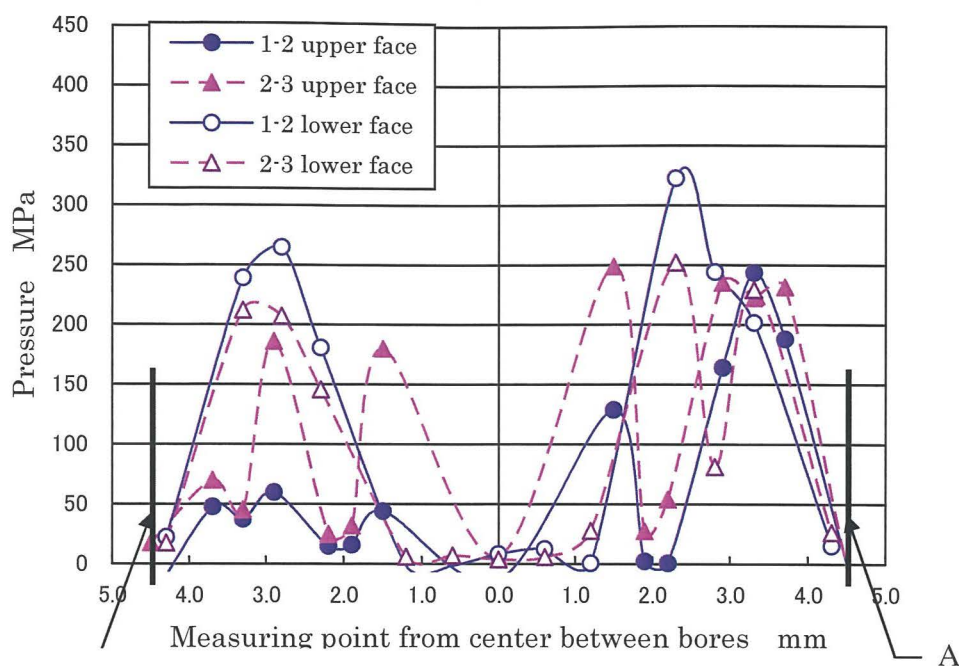
Fig.5 Pressure distributions between bores (Wire type)

高くなっている．これは，シリンダヘッドガスケットの断面模式図（図 1 (a)）からもわかるように，シリンダボアのシール部の構造が，鋼板を 3 枚重ね合わせ，補強として内側にリングを入れ更に全体をステンレス板で包んでいることによる．補強されたリングの上下方向はシリンダヘッドとシリンダブロックの接触方向となり，円形の断面のリングが押しつぶされて長方形となったことから帯接触となり端部に圧力が集中したため，圧力が最も高くなったと考えられる．

#### 4. 3. 1. 2 ガスシール構造がビードタイプの場合

図 6 からわかるように，上面において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，シリンダ外周から 3.5mm と 1.5mm 付近の 2 箇所の圧力は高くなり，ボア間の中央付近ではほとんど圧力が生じていない．下面において，ボア間中央の基準を中心に左右ほぼ対称で，シリンダ外周から 3.0mm 付近の圧力は高くな





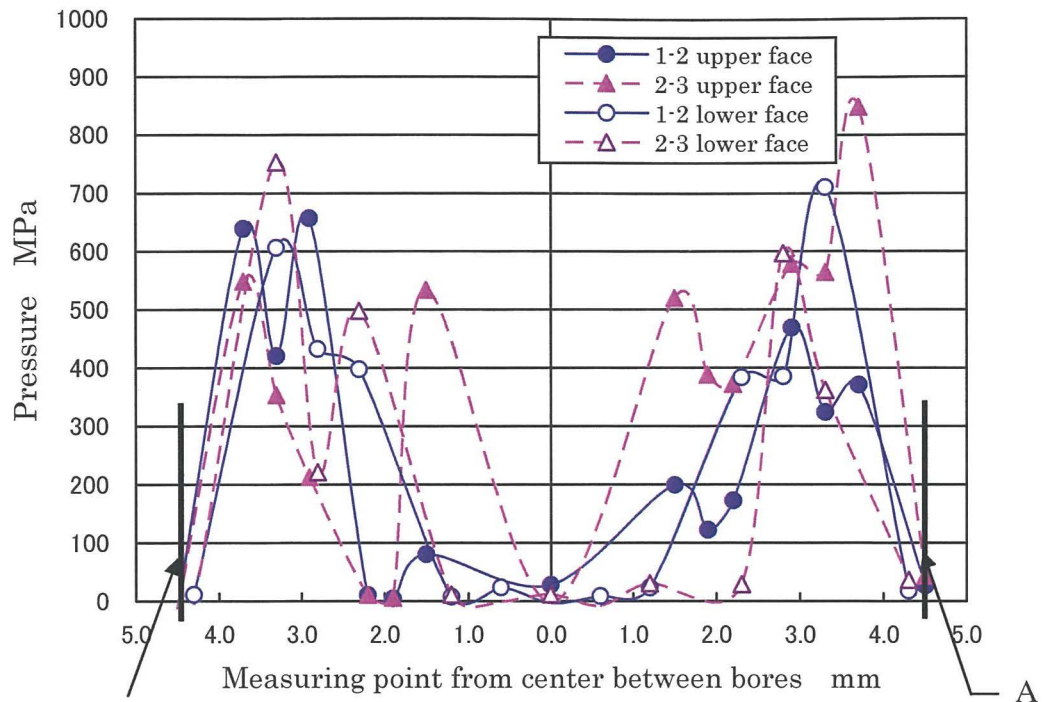
A: Cylinder circumference

Fig.6 Pressure distributions between bores (Bead type)

り、ボア間の中央付近では圧力がほとんど生じていないことがわかる。圧力のかかる位置は上面と下面を合わせるとシリンダ外周から 1.5～3.5mm 付近で高くなっている。これは、シリンダヘッドガスケットの断面模式図（図 1 (b)）からもわかるように、シリンダボアのシール部ピーク面圧が下がって接触面が広がるが、図はその様子を反映した結果を示している。

#### 4. 3. 2 自動車整備書の規定以外のボルトの軸力を 7t (68.6kN) とした締付けにおけるボア間の面圧

図 7 はガスシール構造がワイヤタイプの場合の圧力分布を表し、図 8 はビードタイプの場合の圧力分布を表している。図 7 に示すワイヤタイプの場合、図 5 と比較すると発生面圧に違いがあることがわかる。上面において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



A:Cylinder circumference

Fig.7 Pressure distributions between bores (Wire type)

に左右ほぼ対称で，シリンダ外周から 3.5mm と 0.8mm 付近の 2 箇所の圧力は高くなり，ボア間の中央と 1.2mm 付近ではほとんど圧力が生じていないのは，自動車整備書に基づいて締付け塑性域回転角度法で締付けたボア間の面圧と同様であるが，発生した面圧は 1.5 倍程度大きくなっていることがわかる．下面において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，シリンダ外周から 2.8mm と 0.8mm 付近の 2 箇所の圧力は高くなり，ボア間の中央と 1.2mm 付近では圧力がほとんど生じていないことも同様であるが，特にシリンダ外周から 0.8mm 付近においては発生した面圧が 3 倍程度大きくなっていることがわかる．これは，ボア間中央付近のステンレス板に形成したビード部分がつぶれてフラット状態に近くなり，補強されたリングの上下方向に圧力が集中したことによると考えられる．

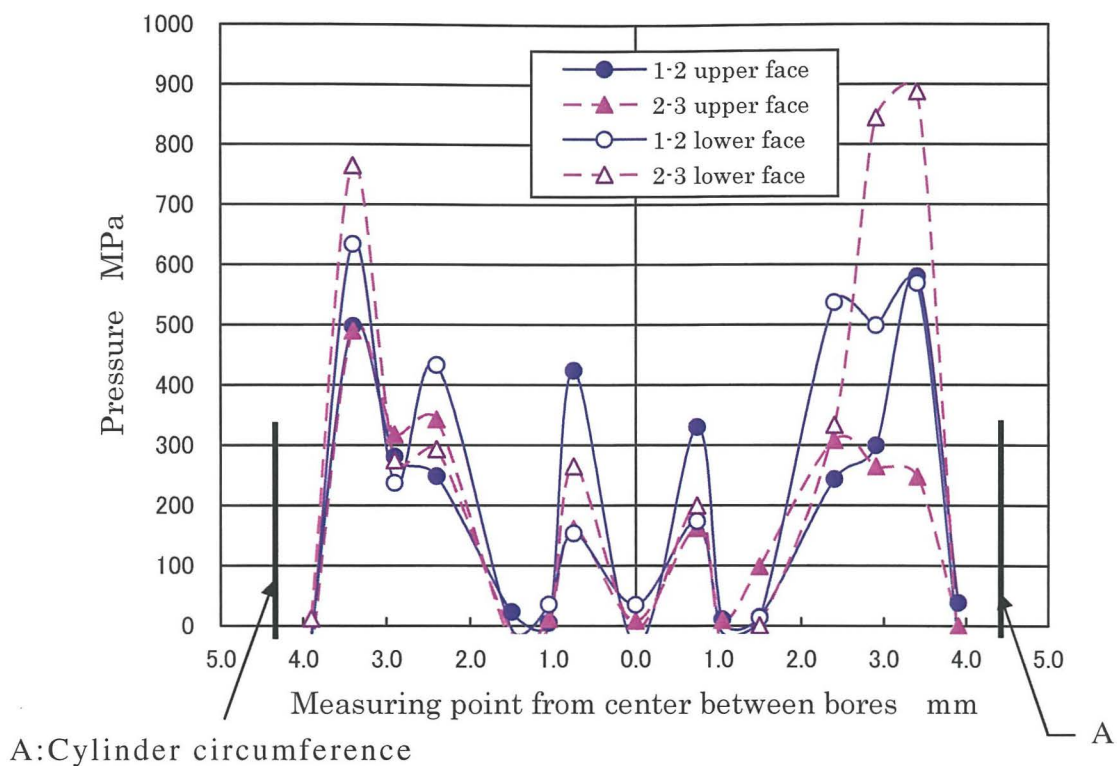


Fig.8 Pressure distributions between bores (Bead type)

図 8 に示すビードタイプの場合も、図 6 と比較すると発生面圧に違いがあることがわかる。上面において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、シリンダ外周から 3.5mm と 1.5mm 付近の 2 箇所の圧力は高くなり、ボア間の中央付近ではほとんど圧力が生じていないのは同様であるが、発生した面圧は 2 倍程度大きくなっている。下面において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、シリンダ外周付近の圧力は高くなり、ボア間の中央付近では圧力がほとんど生じていないことも同様であるが、特にシリンダ外周から 0.8mm 付近においては発生した面圧が 3 倍程度大きくなっていることがわかる。これは、ステンレス板に形成したビードの凸部に圧力が集中することで、さらに圧力が高くなったと考えられる。

#### 4. 3. 3 FEM 解析によるボア間の面圧

ガスケット断面構造の 2D 解析としては解析ソフト ANSYS 5.7 を用

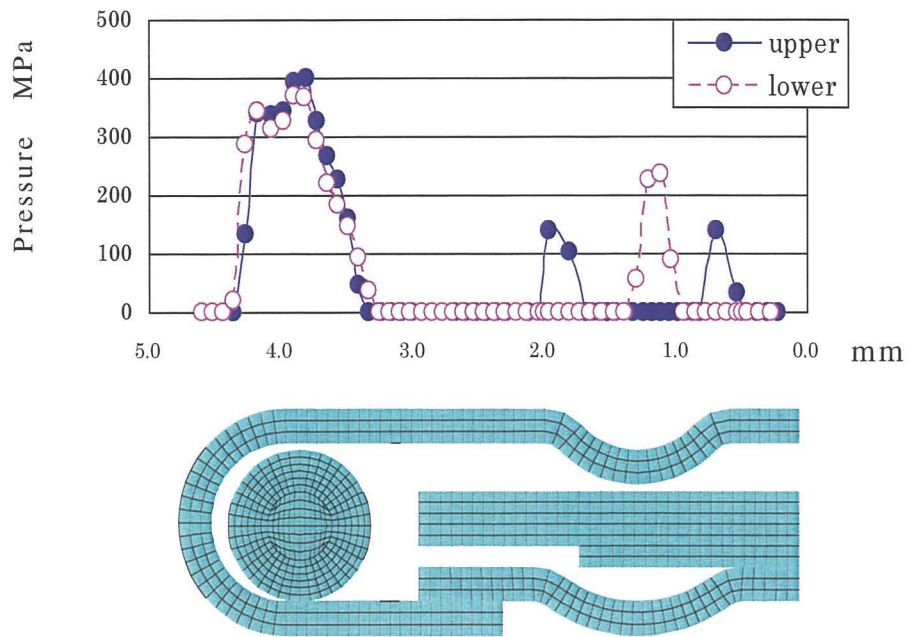


Fig.9 FEM analysis for wire type

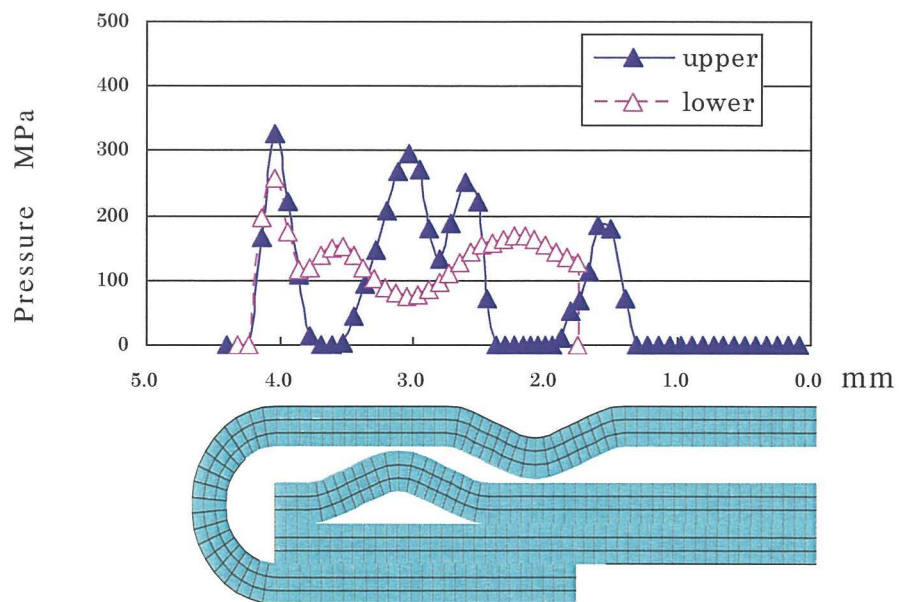


Fig.10 FEM analysis for bead type

いて行った。ガスケットモデルはガスケットボア間断面部の1/2モデルとし、対称境界条件を設定し、シリンダヘッドおよびシリンダブロックは剛体と仮定した。図9には、ガスシール構造がワイヤタイプで、シリンダヘッドガスケットのボア部が規定締付け時厚さまで圧縮された時の面圧分布を示し、図10にはビードタイプの場合の面圧分布を示した。ガスシール構造がワイヤタイプとビードタイプにより発生面圧の分布が異なることがわかる。

FEM 解析による面圧分布データと電着銅薄膜表面の変形量を利用して接触面の圧力を測定する新たな測定法による実測データは類似しているので、本測定法は高面圧の実測法として有効であると考えられる。

#### 4. 4 結 言

電着銅薄膜表面の変形量を利用して接触面の圧力を測定する新たな測定法により、ディーゼルエンジンの2つのタイプのシリンダヘッドガスケット締付け時のボア間の面圧測定を行った。主な結果は以下の通りである。

(1) 自動車整備書に基づき締付けた塑性域回転角度法において、ワイヤタイプの発生面圧は、ビードタイプのそれに比べ若干高く検出された。これはシリンダヘッドガスケットの構造の違いによるが、両タイプとも250MPa程度以上の圧力が発生していることが確認された。

(2) ボルトの軸力規定で締付けた場合の面圧発生状態は、ワイヤ、ビード両タイプとも自動車整備書の塑性域回転角度法より発生面圧が高く検出された。本測定法では、900 MPa程度の圧力を測定できることが確認された。



(3) 電着銅薄膜表面の変形量を利用して接触面の圧力を測定した結果は、FEM 解析の結果とほぼ同様であることから面圧測定に有効であることが確認できた。

(4) 電着銅薄膜による接触面圧計測法では、ガスケットの構造により発生する面圧が異なることを精度良く把握できることが FEM 解析結果からも確認された。しかし、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なケースがあること、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ことに留意する必要がある。

## 参考文献

- (1) Ko, H.N., Hasegawa, T., Kitaoka, S. and T, Udagawa, A method of Measuring Contact Pressure of Cylinder Head Gasket, Small Engine Technology Conference & Exposition, SAE International, 2004-32-0068 (2004).
- (2) 宇田川恒和, エンジン軽量化とガスケットシーリング, ガスケットシール技術シンポジウム, **34-426**, (1995), 39-45.
- (3) 執行雅夫, 話題の製品と技術, 圧力画像の解析 FPD-901 シリーズ, 画像ラボ (1996), 52-56.
- (4) 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(第2報 微小突起を有する薄膜による静圧測定), 日本機械学会論文集 (A 編), **64-619**, (1998), 689-695.

## 第 5 章 微小突起を有する電着銅薄膜による 繰返し圧力の測定<sup>(1)</sup>

### 5. 1 緒 言

第 3 章においては，固体接触面に生ずる静圧分布を測定することを目的として開発されたピラミッド状の微小な突起を有する銅薄膜を圧力ゲージとして用いる方法について述べた．

すなわち，圧力伝達面に挟んだ薄膜の突起部先端に生ずる変形量と静圧の関係から以下の結果が得られることが明らかにされた．

①変形量の尺度となる圧力伝達面と突起部先端との真実接触面積  $A_r$  と静圧  $p_s$  の間には薄膜に固有の関係が存在する．

②真実接触面に作用する真実接触圧力  $p_r$  を媒介として  $A_r$  と  $p_s$  の関係を定式化することが可能となる．

③上述①②の関係を利用して測定して得られた平面底円柱を平面に押しつけた場合の圧力分布はほぼ妥当な結果となる．

ところで，機械の剛性や要素の疲労強度などには，要素間の接触面に作用する平均圧力のみならず，繰返し圧力が影響を与えることから，実機に対してはこの両者を測定することが重要となる．

以上の観点から，本章では第 3 章で考案した微小突起を有する電着銅薄膜による繰返し圧力の測定の可能性を検討してみた．すなわち，種々の平均圧力  $p_m$  と圧力振幅  $p_d$  の組合せに対して突起先端部の変形量を調査した．この結果に基づいて，真実接触面積  $A_r$  と  $p_m$  および  $p_d$  との関係を微小突起の変形部の加工硬化および繰返し軟化特性に着目して定式化することにより，固体接触面に作用する圧力振幅の測定を試みた．

## 5. 2 実験方法

### 5. 2. 1 微小突起を有する電着銅薄膜の作製

微小突起を有する電着銅薄膜は,第3章と同じ方法により作製した.

Table 1 Composition of plating solution and plating condition

Distilled water $\text{H}_2\text{O}$	1000 g
Copper sulfate 5 hydrate $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	250 g
Sulfuric acid $\text{H}_2\text{SO}_4$	80 g
Bath temperature	20 °C
Current density	300 A/m <sup>2</sup>
Bath voltage	1.0 V
Plating time	30 min

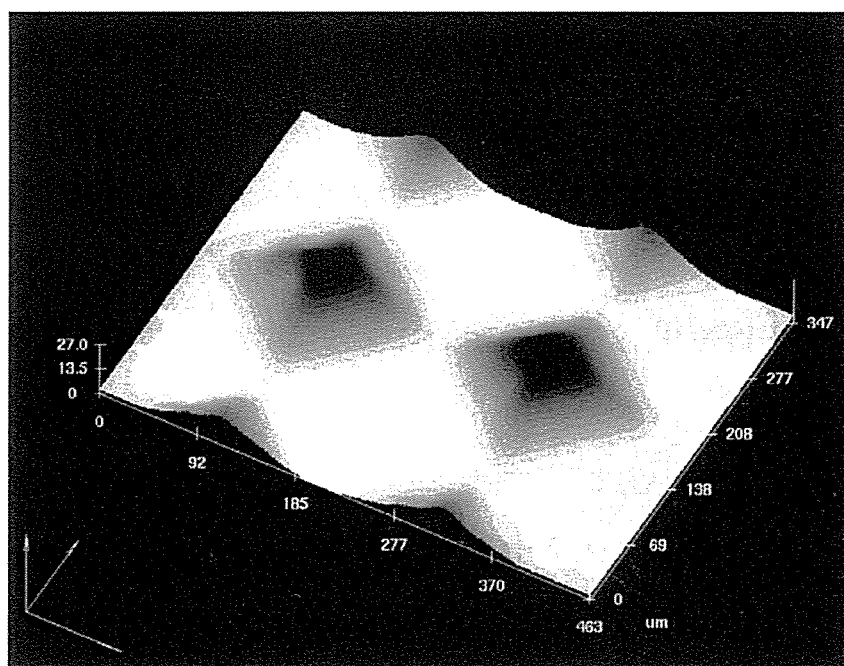


Fig.1 Configuration of copper foil with micro projections observed by scanning microscope



表 1 にめっき液の組成とめっき条件を，図 1 に使用した微小突起を有する電着銅薄膜の表面状況を示す．ここに，圧痕間隔  $d$  は  $d=100\mu\text{m}$  とした．なお，突起部の裏側の最終電着面には若干の窪みが生ずるため，#1000 の研磨紙により研磨を施して平滑面とし，実験に供した．薄膜の平坦部の厚さはほぼ  $12\mu\text{m}$ ，突起部の高さは  $14\mu\text{m}$  である．繰返し圧力と突起先端部の変形の調査には，この電着銅薄膜に  $150^\circ\text{C}$ ，2 h の焼なましを施した再結晶化銅薄膜〔薄膜Ⅱ〕を使用した．

### 5. 2. 2 圧力負荷装置および試験機

静圧および繰返し圧力と突起部の変形量の関係を求める炭素工具鋼 SK-3 製の圧力負荷装置の概観を図 2 に示す．図示のように，同一直径を有する円柱が 2 個使用されている．圧力分布測定用の負荷装置の概観を図 3 に示す．Upper block となる平面底円柱には上述の SK-3 を，Lower block となる平面には直径 40mm，高さ 35mm の黄銅および焼なましを施した SK-3 を使用した．

また，圧力伝達面となる端面は， $0.05\mu\text{m}$  のアルミナ粉末により鏡面仕上（算術平均粗さ  $R_a=0.4\mu\text{m}$ ）を施した．試験には MTS 材料試験装置を，突起部の変形量の測定には走査型レーザ顕微鏡（オリンパス製 OLS 1000 型）を使用した．

### 5. 2. 3 実験項目

#### 1) 静圧試験

圧力負荷装置の圧力伝達面（直径 6.0mm）にこれと同一直径に切り出した微小突起を有する銅薄膜を挟み，MTS 材料試験装置に装着し，静圧  $p_s$  と  $A_r$  との関係を調査した．ここに，圧力負荷時間は第 3 章の結果に基づいて 30s とした．

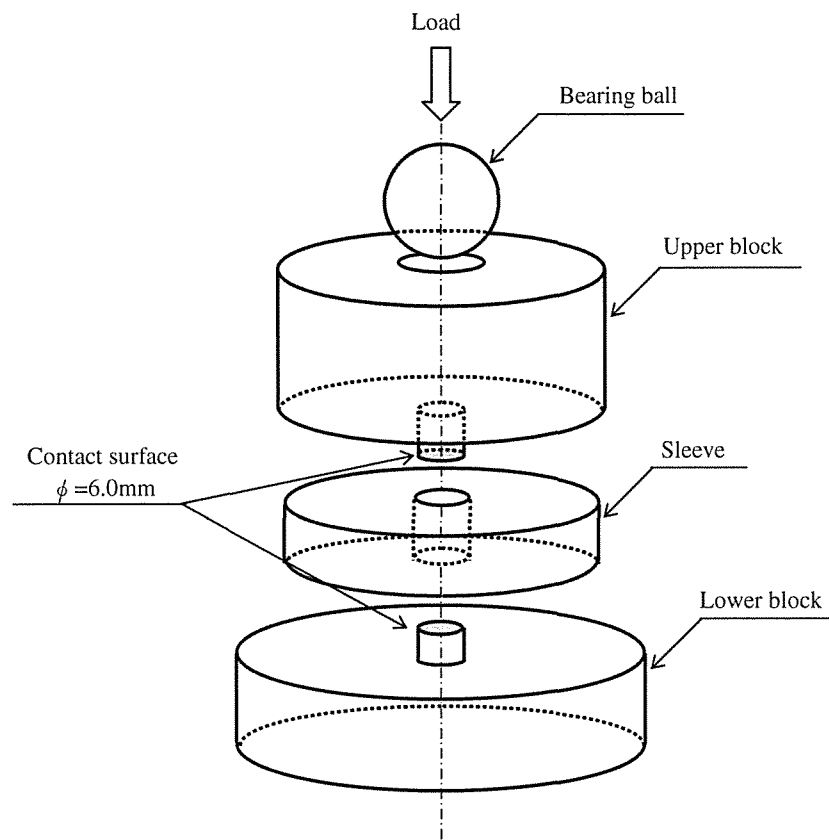


Fig.2 Apparatus for calibration tests

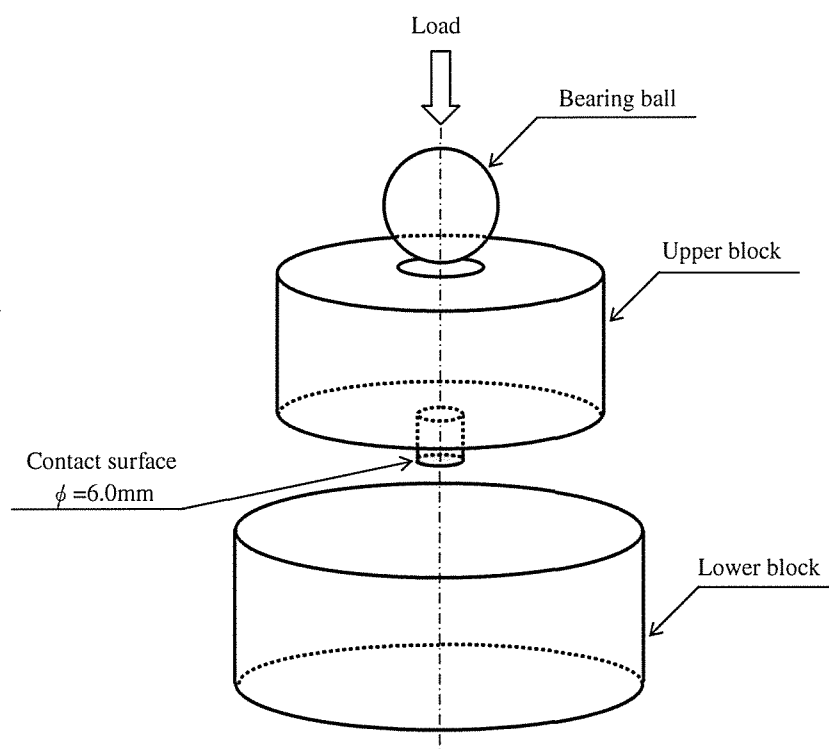


Fig.3 Apparatus for measuring pressure distribution

## 2) 繰返し圧縮試験

平均圧力  $p_m$  と圧力振幅  $p_d$  を種々に設定し，正弦波形により圧力比  $R (= \text{最小圧力}/\text{最大圧力})$  を変えて片振圧縮試験 (10Hz) を実施し，突起変形量  $A_r$  と  $p_d$ ， $p_m$  の関係を調査した．ここに，繰返し数  $N$  を  $N = 5 \times 10^3$  とした．

## 3) 圧力分布の測定

前項までの結果に基づき，繰返し圧縮負荷を受ける図 3 の負荷装置の接触面の圧力分布を調査した．

# 5. 3 実験結果および考察

## 5. 3. 1 微小突起の変形の繰返し圧力依存性

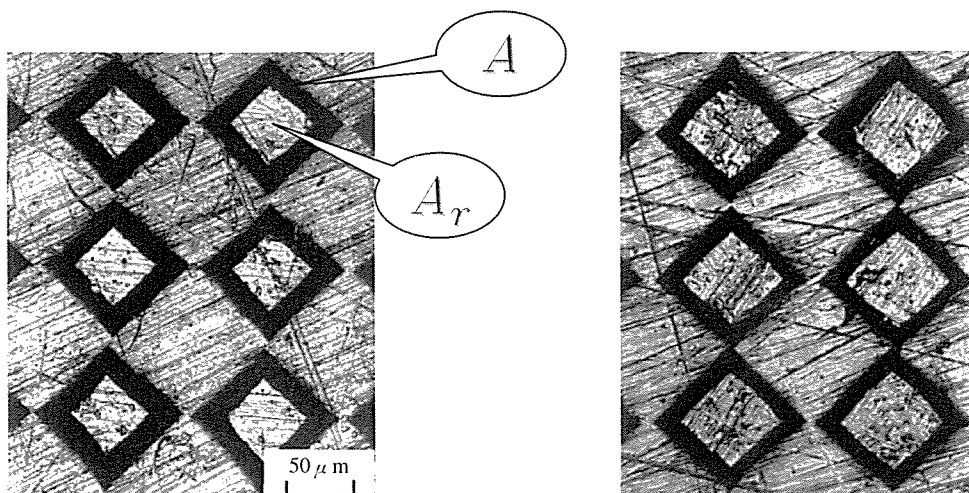
図 4 (a)，(b) に静圧および繰返し圧縮負荷により変形した突起先端部の状況例を示す．図 4 中の  $A_r$  (白色の部分) は圧縮負荷装置と一つの微小突起との接触面積である．

$A$  を圧力負荷前の微小突起の底面積 ( $4.4 \times 10^3 \mu\text{m}^2$ ) とし，図 5 に  $A_r/A$  と  $p_m$  の関係を示す．ここに， $A_r$  は接触面の任意の 4 ～ 5 箇所においてそれぞれ 4 個 (総数 16 ～ 20 個) の突起より得られた値の平均より決定した．なお，測定個所による  $A_r$  の相違は特に認められなかった．また，各  $p_m$  における  $A_r$  の標準偏差を表 1 に示す． $p_m$  の増加につれて両者の関係は上に凸の曲線となることから，静圧の増加とともに加工硬化が進行することがわかる．

ここで  $A_r/A$  と  $p_m$  の関係を次式で表示する．

$$A_r/A = f_1(p_m) \cdots \cdots \cdots (1)$$

後述するように，静圧および繰返し圧力の測定に対して式 (1) を用いる．したがって，両者の関係を図 5 の結果に基づいて精度良く近似



(a)  $p_m = 98 \text{ MPa}$ ,  $p_d = 0 \text{ MPa}$       (b)  $p_m = 98 \text{ MPa}$ ,  $p_d = 39.2 \text{ MPa}$

$N = 0$

$N = 5 \times 10^3$

Fig. 4 Configuration of deformed micro projections

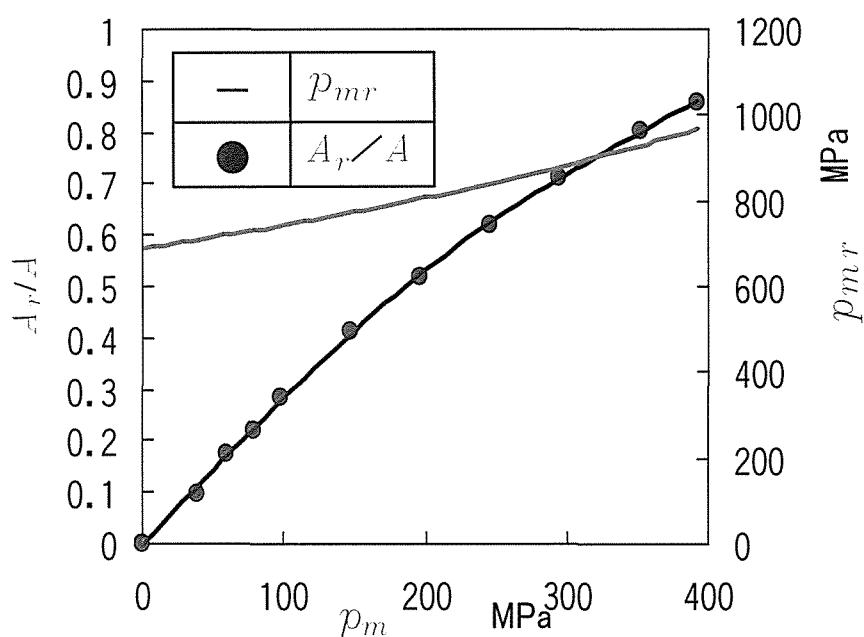


Fig.5 Relationship between static pressure and contact area and that  
between static pressure and real contact pressure

似しておく必要がある．そこで，測定値を最小二乗法により 4 次の関数として近似し， $f_1(p_m)$  には次の多項式を採用した．

$$f_1(p_m) = \alpha p_m^4 + \beta p_m^3 + \gamma p_m^2 + \delta p_m \cdots \cdots (2)$$

Table 1 Standard deviation of  $A_r$ 

$p_s$ MPa	$A_r$ $\mu\text{m}^2$	Standard deviation of $A_r$ $\mu\text{m}^2$
39.2	425	32
58.8	762	76
78.4	973	88
98	1260	121
147	1820	165
196	2280	198
245	2720	243
294	3130	320
352.8	3541	335
392	3781	360

Table 2 Coefficients

$\alpha$	$2.276 \times 10^{-11}$
$\beta$	$-1.782 \times 10^{-8}$
$\gamma$	$1.953 \times 10^{-6}$
$\delta$	$2.800 \times 10^{-3}$

ここに、係数  $\alpha$  ,  $\beta$  ,  $\gamma$  ,  $\delta$  は表 2 の値となる.

図 4 より、突起部の総底面積と薄膜の面積の割合を  $1:k$  とおけば、突起の配列間隔より  $k$  はおよそ  $k \doteq 2.12$  となる. 突起先端部の真実接触面に作用する真実接触圧力  $p_{mr}$  は次式により求められる.

$$p_{mr} = \frac{k p_m}{A_r / A} \dots\dots\dots (3)$$

式 (1), (3) より  $p_{mr}$  を求め、図 5 に併記した.

種々の平均圧力  $p_m$  と圧力振幅  $p_d$  の組合せに対して得られた  $A_r/A$  と

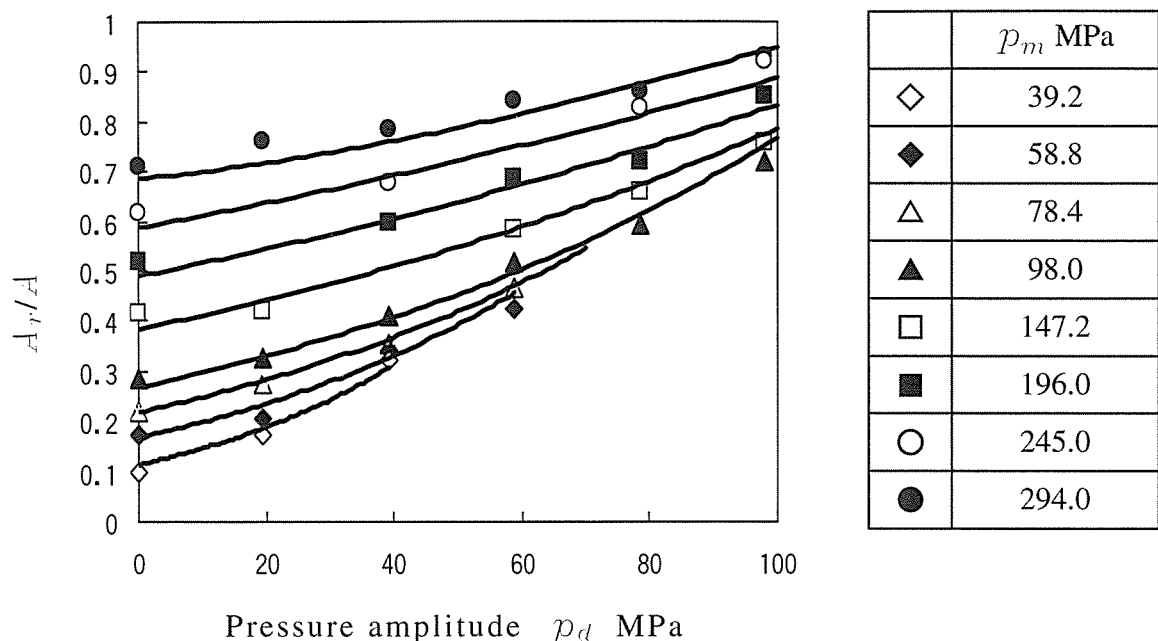


Fig.6 Relationship between pressure amplitude  
and contact area ( $N = 5 \times 10^3$ )

$p_d$  の関係を図 6 に示す．なお，図 6 中の曲線は後述の 5 . 3 . 2 の方法により得られたものである．

$p_m$  に  $p_d$  が重畳する場合の最大真実接触圧力  $p_{mdr}$  は式 ( 3 ) と同様に次式により求められる．

$$p_{mdr} = \frac{k(p_m + p_d)}{A_r / A} \dots\dots\dots ( 4 )$$

繰返し負荷により，材料に加工硬化あるいは加工軟化のような材質的变化が生ずれば， $p_{mdr}$  が変化することが予測される．そこで，図 6 より試験開始（1 サイクル目）および終了の各時点において突起先端部の真実接触面に作用した最大真実接触圧力  $p_{mdr,i}$  と  $p_{mdr,e}$  の値を調査した．

$p_m$  に  $p_d$  が重畳する繰返し圧縮試験における最大圧力は  $p_m + p_d$  である．そこで，試験開始の時点（1 サイクル目）では，この大きさ

Table 3 Effect of  $p_d$  and  $p_m$  on  $H(=p_{mdr,e}/p_{mdr,i})$ 

$p_d$ MPa	$p_m$ MPa							
	39.2	58.8	78.4	98.0	147.0	196.0	245.0	294.0
19.6	0.989	1.117	1.018	1.018	1.065	—	—	0.976
39.2	0.705	0.816	0.933	0.929	—	0.988	1.021	0.988
58.8		0.778	0.815	0.821	0.917	0.929	—	0.956
78.4				0.797	0.879	0.936	0.920	0.967
98.0				0.717	0.817	0.835	0.860	0.922

の静圧が作用していると仮定した．この場合  $A_r/A$  は負荷時間が短い  
ため，図 5 の値よりも小さくなると考えられるが<sup>(2)</sup>，その値は求ま  
っていない．そこで，便宜上  $p_{mdr,i}$  は静圧試験に対して得られた図  
5 において， $p_m$  に  $p_m + p_d$  を代入して求めた．一方， $p_{mdr,e}$  は試験  
終了の時点で得られた図 6 の  $A_r/A$  の値を式 (4) に代入して決定で  
きる．

$p_{mdr,e}/p_{mdr,i}$  ( $=H$ ) と圧力振幅  $p_d$  および  $p_m$  の関係を表 3 に示  
す． $p_d$  が増加するにつれて  $H$  値が低下することから，試験開始の時  
点で加工硬化した薄膜の突起先端部は繰返し圧力の作用により軟化し，  
その軟化の程度は圧力比が小さくなるにつれて顕著となることがわか  
る．このような繰返し負荷による軟化現象は加工硬化した銅の疲労試  
験においても認められている<sup>(3)</sup>．

### 5. 3. 2 $A_r/A$ の平均圧力および圧力振幅による定式化

$A_r$  に基づいて固体接触面の動圧分布を測定するには， $A_r$  と  $p_d$  およ  
び  $p_m$  の関係を明らかにしておく必要がある．そこで， $p_m$  と  $p_d$  によ  
る  $A_r/A$  の定式化を試みた．

式 (1)，(3) より  $p_m$  と  $p_{mr}$  の関係は次式となる．

$$p_{mr} = k p_m / f_1 (p_m) \dots\dots\dots (5)$$

繰返し負荷による軟化の主たる支配因子は、突起先端部の真実接触面に作用する真実圧力振幅  $p_{dr}$  であると考えられる。  $p_d$  = 一定の試験条件では、  $p_{dr}$  は軟化の進行につれて低下することになるが、軟化の程度は主として試験開始時に作用する  $p_{dr,i}$  に支配されると考えられる。ここに、  $p_{dr,i}$  は式 (3) と同様に次式となる。

$$p_{dr,i} = \frac{k p_d}{A_r / A} \dots\dots\dots (6)$$

そこで、軟化の尺度となる前述の  $H$  と  $p_{dr,i}$  との関係を求め、図 7 に示す。図 7 より両者の間には  $p_m$  の値の如何によらず、ほぼ固有の関係が成立することがわかる。すなわち、繰返し負荷による軟化には、試験開始の時点で作用する真実圧力振幅が主に関与するとした上述の推論がほぼ妥当であることが裏付けられた。

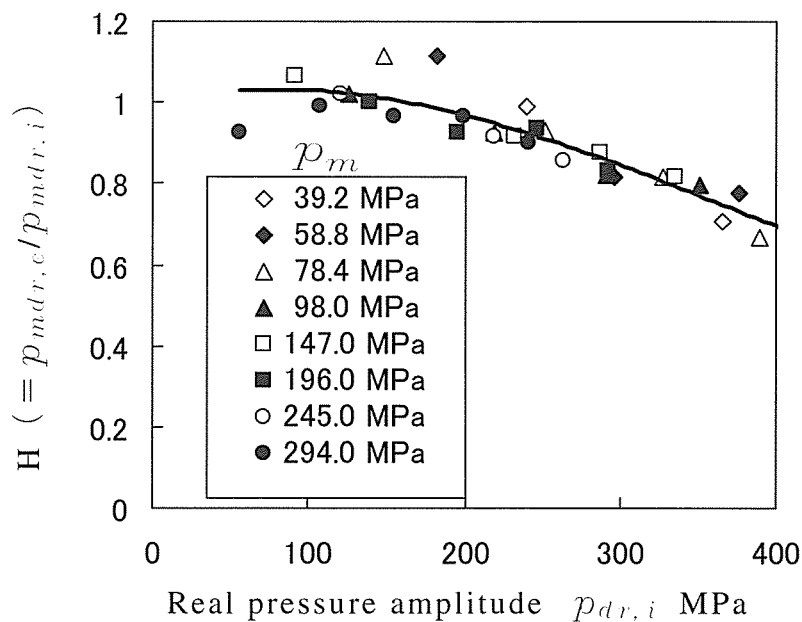


Fig.7 Relationship between work softening and real contact pressure amplitude



なお，図 7 において  $H > 1$  となる場合があるのは，前述のように負荷時間が短いときの  $A_r/A$  は実際には図 5 の値より小さくなっていることによるものと考えられる．

図 7 の関係を次式で近似する．

$$\frac{p_{mdr,e}}{p_{mdr,i}} = g(p_{dr,i}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに，

$$g(p_{dr,i}) = G p_{dr,i}^3 + J p_{dr,i}^2 + L p_{dr,i} + M \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに， $M$  は理論的には 1 と考えられるから，この値を 1 に固定して最小二乗近似を行った．表 4 にこれらの係数の値を示す．ここに， $p_{mdr,i}$  は前述のように式 (5) の  $p_m$  を  $p_m + p_d$  で置き換えることにより得られ，次式となる．

$$p_{mdr,i} = \frac{k(p_m + p_d)}{h_1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに，

$$h_1 = \alpha (p_m + p_d)^4 + \beta (p_m + p_d)^3 + \gamma (p_m + p_d)^2 + \delta (p_m + p_d) \quad \dots\dots\dots (10)$$

また， $p_{dr,i}$  と  $p_{mdr,i}$  の間には次式が成立する．

$$p_{dr,i} = p_{mdr,i} \frac{p_d}{p_m + p_d} \quad \dots\dots\dots (11)$$

Table 4 Coefficients G,J,L and M

G	$5.405 \times 10^{-9}$
J	$-6.267 \times 10^{-9}$
L	$8.793 \times 10^{-9}$
M	1.000

$p_d / (p_m + p_d) = N$  とおけば、式 (7), (11) より、

$$p_{mdr,e} = p_{mdr,i} (G p_{mdr,i}^3 N^3 + J p_{mdr,i}^2 N^2 + L p_{mdr,i} N + M) \dots\dots\dots (12)$$

式 (9), (10), (12) により  $p_{mdr,e}$  を  $p_m$  と  $p_d$  により表示することができる。

試験終了の時点においては、式 (4) より

$$A_r / A = \frac{k(p_m + p_d)}{p_{mdr,e}} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、式 (13) の右辺は次式となる。

$$\frac{k(p_m + p_d)}{p_{mdr,e}} = \frac{h_1^4}{Gk^3 p_d^3 + Jk^2 p_d^2 h_1 + Lk p_d h_1^2 + Mh_1^3} \dots\dots\dots (14)$$

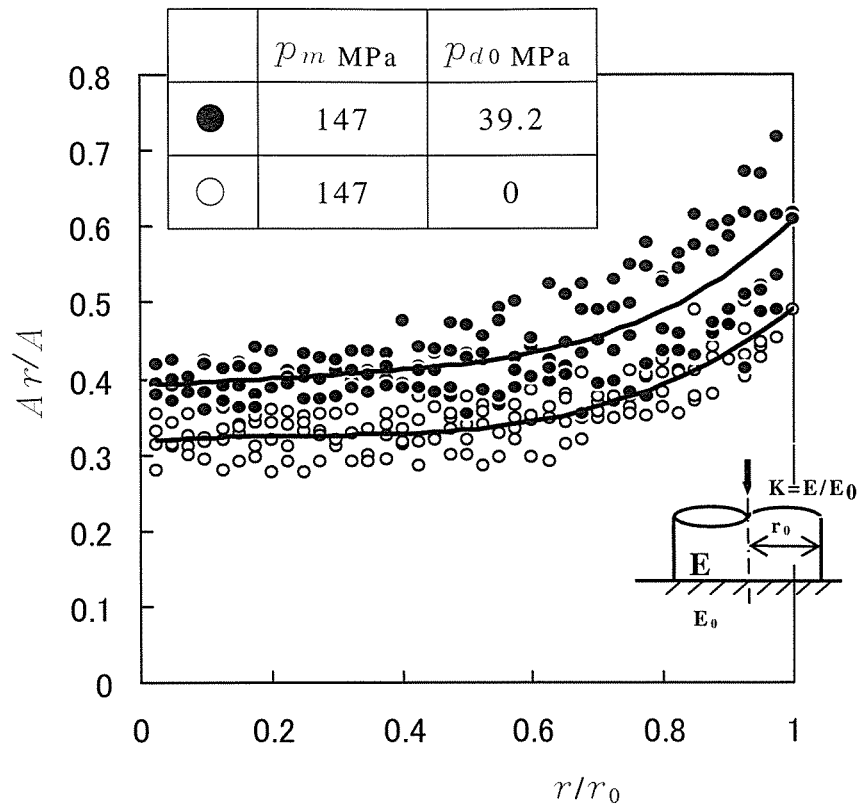
式 (13) より  $A_r / A$  と  $p_m$  および  $p_d$  の関係を求めれば、図 6 の曲線となり、実験値と良好な一致を示す。

固体接触面の所定の箇所に作用する圧力振幅  $p_d$  は以下の手順により検出できる。

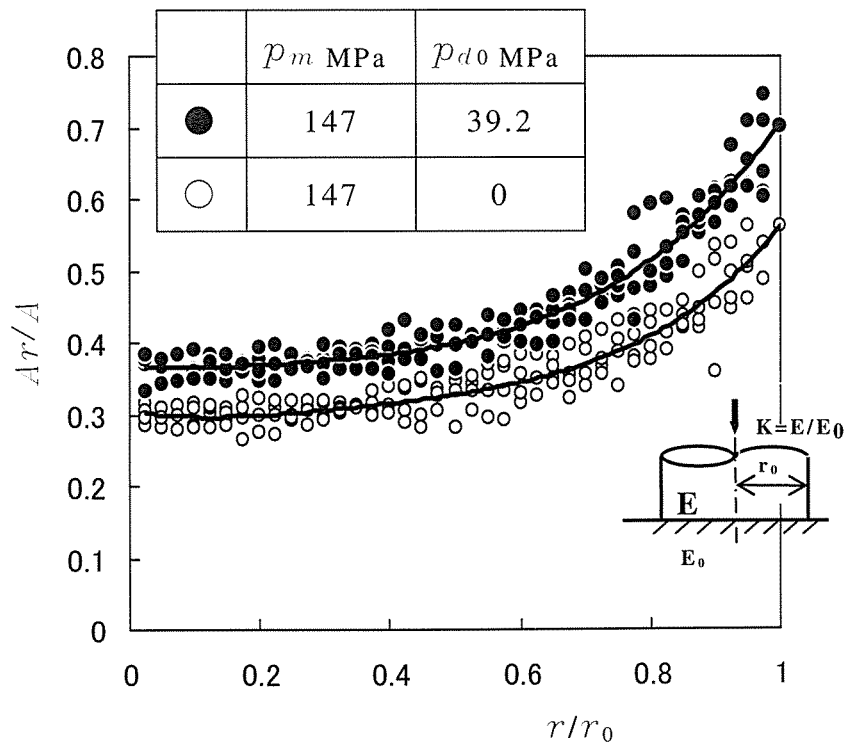
まず接触面に薄膜を挟み、繰返し負荷を受ける前の  $A_r$  を測定し、式 (1), (2) により  $p_m$  を定める。次いで、再度薄膜を挟み、所定の繰返し数だけ圧縮負荷を与えた後、同一箇所の  $A_r$  を測定し、これらの値を式 (14) に代入すれば、 $p_d$  を決定することができる。

### 5. 3. 3 微小突起の変形を利用した動圧分布の測定

本手法の妥当性を検証するため、平均圧力  $p_m = 147 \text{ MPa}$ 、圧力振幅  $p_d = 39.2 \text{ MPa}$  に設定し、SK-3 製の平面底円柱を黄銅製および銅製平面に押しつけ、接触面の圧力振幅の分布を測定した。なお、繰返し数は  $N = 5 \times 10^3$  とし、測定は円柱圧子の中心から直交する 2 方向に行った。



(a) Combination of steel and steel



(b) Combination of steel and brass

Fig.8 Relationship between  $A_r/A$  and  $r/r_0$

静圧および動圧負荷後の  $A_t/A$  と円柱の中心からの距離  $r$  を円柱の半径  $r_0$  で無次元化した  $r/r_0$  の関係を図 8 (a), (b) に示す. 図 8 中の黒印および白印はそれぞれ静圧および繰返し圧力負荷後における測定値である. また, 曲線は測定値を最小二乗法により 4 次の関数として近似したものである.

静圧のみを負荷した場合の  $A_t/A$  の値から, 式 (1) および (2) により求められる  $p_m$  を公称圧力  $p_0 (= \text{負荷 } P / \pi r_0^2)$  で除した  $p_m/p_0$  と  $r/r_0$  の関係を求め, これを最小二乗法により次式の 4 次曲線で近似すれば, 図 9 となる.

$$p_m/p_0 = a (r/r_0)^4 + b (r/r_0)^3 + c (r/r_0)^2 + d (r/r_0) + e \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに, 係数  $a, b, c, d, e$  は表 5 の値となる.

また, 繰返し圧力負荷後に得られた上述の  $A_t/A$  を式 (14) に代入して求められる  $p_d$  を平均圧力振幅  $p_{d0}$  で除した  $p_d/p_{d0}$  と  $r/r_0$  の関係を図 10 に示す.

ここに, 両者の関係は次式で表示した.

$$p_d/p_{d0} = a^* (r/r_0)^4 + b^* (r/r_0)^3 + c^* (r/r_0)^2 + d^* (r/r_0) + e^* \quad \dots\dots\dots (16)$$

係数  $a^*, b^*, c^*, d^*, e^*$  の値を表 6 に示す.

静圧および繰返し圧力分布の半径方向変化は類似している. また, いずれも黄銅 ( $E = 108 \text{ GPa}$ ) と SK-3 ( $E = 206 \text{ GPa}$ ) の組合せのほう急勾配となる. これは円柱と平面を構成する材料の縦弾性係数の差が大きくなることに起因している<sup>(4)</sup>と考えられる.

測定値の妥当性を検証する一方法として, 得られた  $p_m$  および  $p_d$  の分布から静荷重  $P_m$  と荷重振幅  $P_d$  を求め, これらと実際に負荷し

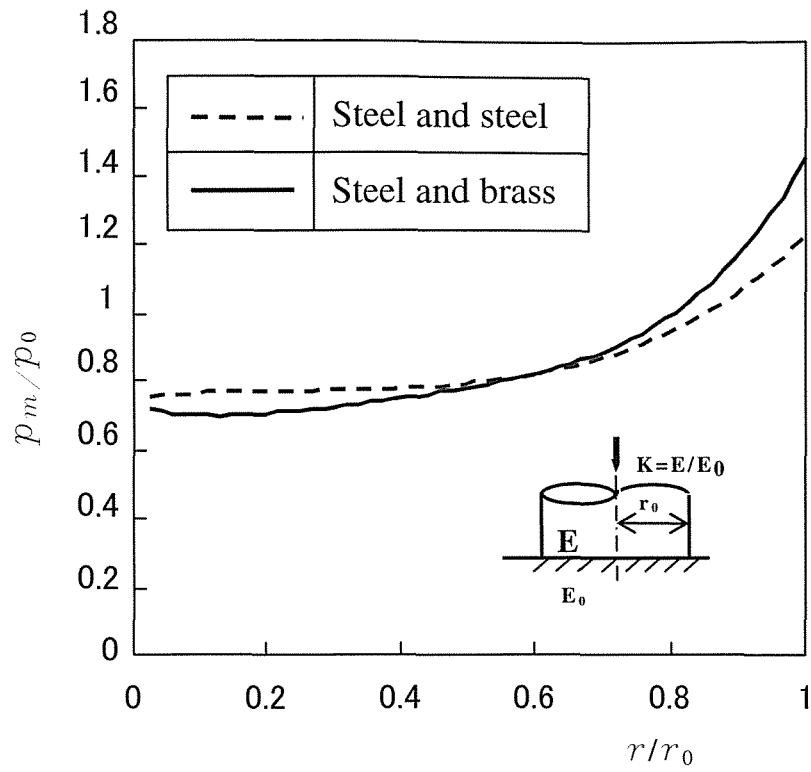


Fig.9 Relationship between  $p_m/p_0$  and  $r/r_0$

Table 5 Coefficient a,b,c,d, and e

Material	Steel	Brass
a	0.4476	2.9786
b	0.2491	-4.399
c	-0.3604	2.6273
d	0.1396	0.4795
e	0.7574	0.7299

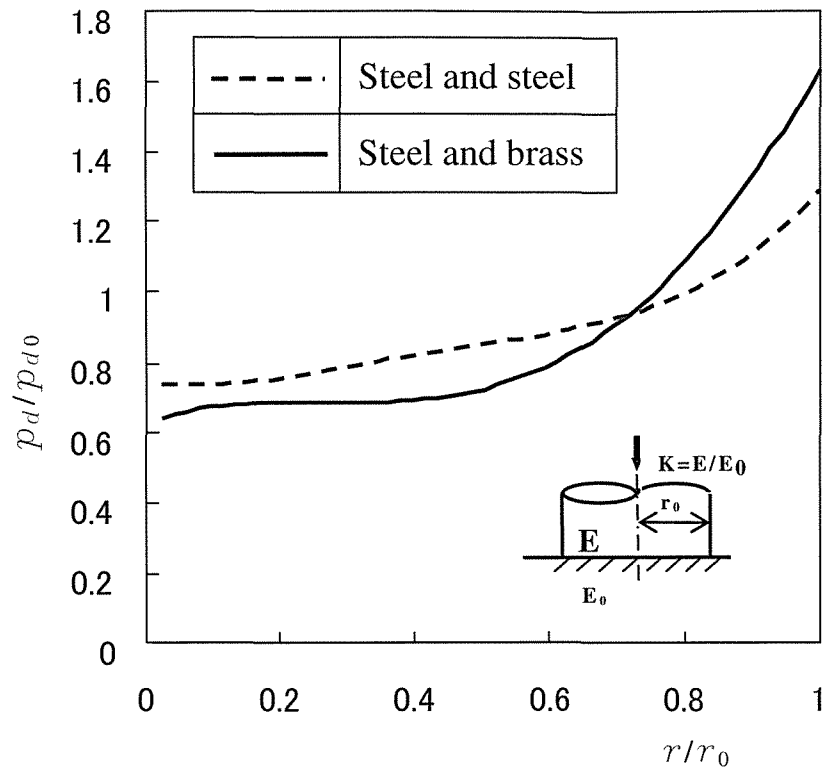


Fig.10 Relationship between  $p_d/p_{d0}$  and  $r/r_0$

Table 6 Coefficients  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $c^*$ ,  $d^*$ , and  $e^*$

Material	Steel	Brass
$a^*$	2.5516	-1.0003
$b^*$	-4.1453	4.1187
$c^*$	2.412	-2.8068
$d^*$	0.2677	0.693
$e^*$	0.7403	0.6367

Table 7 Value of  $\mu$  and  $\mu^*$

Material	Steel	Brass
$\mu$	0.92	0.96
$\mu^*$	0.96	1.00

た静荷重  $P_m^*$  および荷重振幅  $P_d^*$  を比較してみた．力の釣合いよりそれぞれ次式が成立する．

$$P_m = \int_0^{r_0} 2\pi r p_m dr = \mu P_m^* \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$P_d = \int_0^{r_0} 2\pi r p_d dr = \mu^* P_d^* \quad \dots\dots\dots (18)$$

係数  $\mu$  ,  $\mu^*$  の値をそれぞれ表 7 に示す． $\mu$  ,  $\mu^*$  はいずれも 1 に近い値となる．

以上の結果から，静圧の作用によって微小突起先端部に生ずる加工硬化と繰返し圧力による加工軟化特性に着目して  $A_r/A$  と  $p_m$  および  $p_d$  の関係を定式化する方法により，固体接触面に作用する繰返し圧力分布を求めることが可能となる．

#### 5. 4 結 言

電着により作製した微小突起を有する銅薄膜の突起先端部の変形の度合いと静圧および繰返し圧力の関係を調査し，これらの関係を利用して平均圧力に繰返し圧力が重畳する固体接触面に作用する繰返し圧力の測定の可能性を検討した．

得られた結果を要約すれば，以下のようなになる．

- (1) 突起先端部は静圧の増加とともに加工硬化が進行する．
- (2) 静圧により加工硬化した突起先端部は繰返し圧力の作用により軟化し，その軟化の程度は圧力比が小さくなるほど顕著となる．
- (3) 試験開始および終了の時点における真実接触圧力の割合と試験開始の時点において作用した真実圧力振幅の間には，平均圧力および圧力振幅の如何に係わらず，ほぼ固有の関係が成立する．
- (4) したがって，繰返し負荷による軟化には，主として試験開始の時点で作用する真実圧力振幅が主に関与する．

(5) 突起先端部と圧力伝達面との真実接触面積  $A_r$  を突起の底面積  $A$  で無次元化した  $A_r/A$  と静圧の関係を多項式で表示し、結言(4)を利用すれば、試験終了の時点において  $A_r/A$  と  $p_m$  および  $p_d$  の関係を定式化することが可能となる。

(6) この構成式により得られた繰返し圧力の分布は静圧分布と傾向が一致し、構成式に基づいて得られた荷重振幅と負荷した荷重振幅の相違は4%以内となった。

## 参考文献

- (1) 北岡征一郎, 長谷川達也, 電着銅薄膜による接触面圧計測法(第3報 微小突起を有する薄膜による繰返し圧力の測定), 日本機械学会論文集(A編), **68**-670, (2002), 930-935.
- (2) 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(第2報 微小突起を有する薄膜による静圧測定), 日本機械学会論文集(A編), **64**-619 (1998), 689-695.
- (3) Landgraf, R.W., Morrow, J. and Endo, T., Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve. *J. Mater.*, **4**-1 (1969), 176.
- (4) 相原民彦, 円柱平端面と弾性体平面との弾性接触応力(第1報, 中実円柱と半無限体との軸対称接触) 日本機械学会論文集, **40**-333 (1974), 1287-1297.



## 第6章 電着銅薄膜による接触面圧計測法 [粒子成長と表面粗さを利用した測定]<sup>(1)</sup>

### 6.1 緒言

第5章までにおいて、電着により作製したピラミッド状の微小な突起を有する銅薄膜の突起先端部の変形の度合いと静圧および繰返し圧力の関係を調査し、平均圧力に繰返し圧力が重畳する固体接触面に作用する静圧のみならず繰返し圧力をこれらの関係を利用して測定し得るか否かを検討した<sup>(2)(3)</sup>。

すなわち、静圧により加工硬化した突起先端部は繰返し圧力の作用により軟化し、軟化を支配する主要な因子が試験開始の時点で突起部に作用する真実圧力振幅であることを明らかにした。さらに、この点に着目して繰返し圧力を受けた突起先端部の真実接触面積  $A_r$  と平均圧力  $p_m$  および圧力振幅  $p_d$  の関係を定式化した。この結果、静圧が作用する固体接触面に挟んだ薄膜の  $A_r$  とこれに繰返し圧力が重畳した後の  $A_r$  を測定すれば、接触面の繰返し圧力の分布を十分な精度で求めることができることを明らかにした。

ところで、電着により作製した銅薄膜では、これに繰返し圧力が作用すると電着結晶粒の成長が生じ、成長粒子の発生密度  $D$  と圧力振幅  $p_d$  の関係は薄膜に固有なものとなり、この関係を利用して固体接触面に作用する圧力振幅の測定が可能となることが示唆されている<sup>(4)</sup>。

また一般に、粗さを有する薄膜の表面に圧力が作用して局所的に塑性変形が生じれば、その表面粗さは平均圧力  $p_m$  や圧力振幅  $p_d$  により変化するものと考えられる。

したがって、成長粒子の発生密度と  $p_m$  および  $p_d$  の関係、さらに

は表面粗さと  $p_m$  および  $p_d$  の関係を定量化できれば，成長粒子の発生密度と表面粗さを測定し，これらの関係に基づいて接触面に生じる平均圧力と圧力振幅を求めることが可能になるものと考えられる．

ところで，微小突起を用いる第 5 章の方法で圧力振幅を求めるためには，静圧および静圧と繰返し圧力が重畳する各場合に対して  $A_r$  を測定することが不可欠であった<sup>(3)</sup>．これに対し，本報告で提案する手法が可能になれば，このような二段階測定は必要がなく，より簡便で実用的な測定法となることが期待される．

以上の観点から，第 6 章では電着銅薄膜の粒子成長現象と表面粗さ変化を利用した固体接触面に作用する平均圧力と圧力振幅の測定の可能性を検討した．すなわち， $p_m$  と  $p_d$  を種々に設定し，繰返し数  $N$  を変えて片振圧縮試験を実施し，薄膜に発生する成長粒子の密度と薄膜の表面粗さに及ぼす  $p_m$ ， $p_d$  および  $N$  の影響を調査した．さらに，各現象と  $p_m$ ， $p_d$  および  $N$  の関係の定式化を試みた．

## 6. 2 実験方法

### 6. 2. 1 電着銅薄膜の作製

電着銅薄膜は，鏡面仕上げを施したステンレス板を陰極とし，硫酸銅浴を用いて既報<sup>(4)</sup>のめっき条件により作製した．ここに，薄膜の厚さはおよそ  $20\mu\text{m}$ ，最終電着面の算術平均粗さ  $R_a$  は  $2.31\mu\text{m}$  となった．

### 6. 2. 2 圧力負荷装置および試験機

圧力負荷装置は炭素工具鋼 SK-3 製であり，第 4 章で使用したものと同一である．図 1 に圧力負荷装置の概観を示す．また，圧力伝達面となる端面は， $0.05\mu\text{m}$  のアルミナ粉末により鏡面仕上（算術平均粗さ  $R_a=0.4\mu\text{m}$ ）を施した．試験に MTS 材料試験装置を使用した．

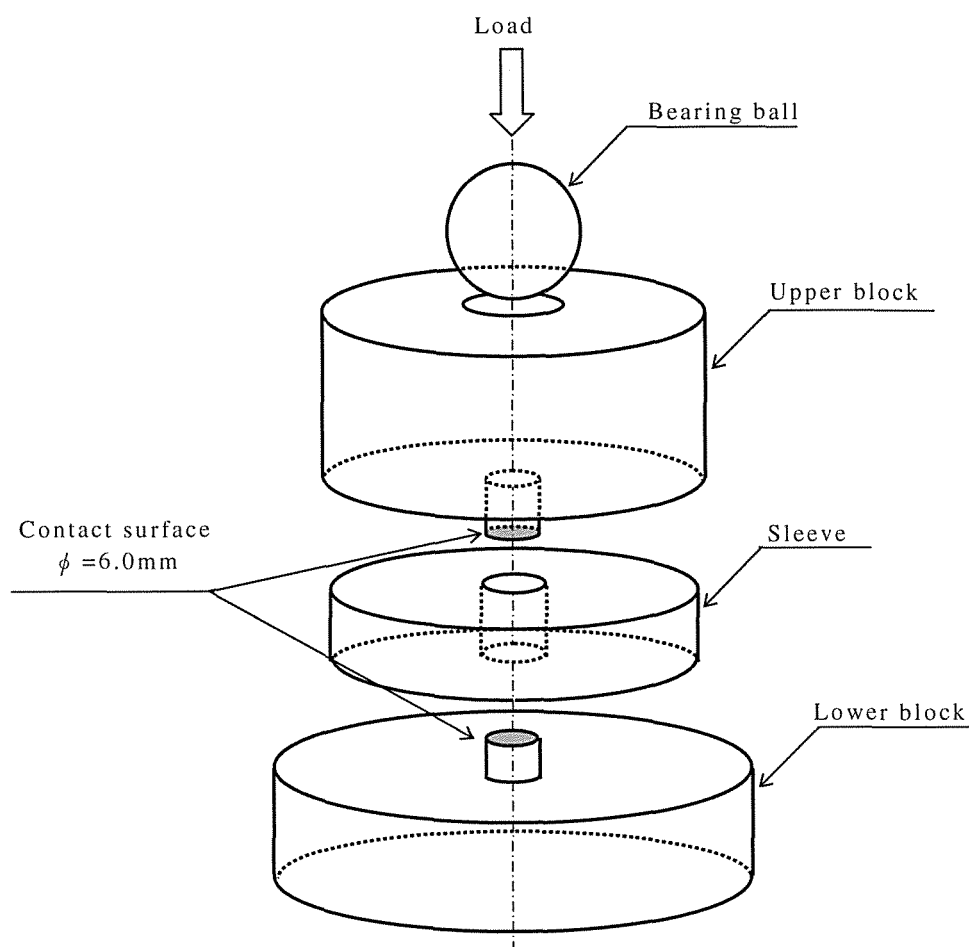


Fig.1 Geometry and dimensions of apparatus

### 6. 2. 3 表面粗さおよび成長粒子発生密度の測定

表面粗さの測定には、走査型レーザ顕微鏡（オリンパス製 OLS 1000 型）（150 倍）を使用した．ここに、測定領域は  $0.9\text{mm} \times 1.0\text{ mm}$  とした．また、成長粒子の発生密度は表面粗さを測定した後、電解研磨およびエッチングを施した薄膜表面に対し、画像処理ソフト（フォトロン社製 FD98-1）を用い、光学顕微鏡（50 倍）を介して二値化処理を行って測定した．なお、画像処理の手順は従来の報告と同一であり<sup>(5)</sup>、測定領域は  $0.9\text{mm} \times 1.1\text{ mm}$  である．

### 6. 2. 4 実験方法

圧力負荷装置の端面間にこれと同一直径（ $\phi = 6.0\text{mm}$ ）に切り出した銅薄膜を挟み、これを MTS 材料試験装置に装着して種々の平均圧力

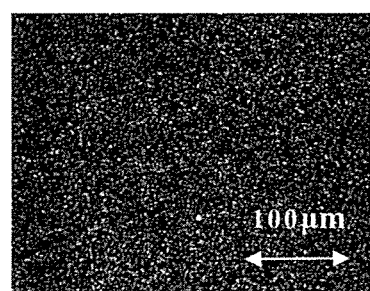
$p_m$  と圧力振幅  $p_d$  に対し，正弦波形により圧力比  $R$ （＝最小圧力/最大圧力）を変えて片振圧縮試験を実施し，薄膜の最終電着面の表面粗さと成長粒子の発生密度を調査した．また繰返し速度は 50Hz とした．

### 6. 3 実験結果および考察

#### 6. 3. 1 薄膜の表面粗さに及ぼす繰返し圧力の影響

図 2 に，銅薄膜の最終電着面とこれに繰返し数  $N = 3 \times 10^6$  とし，種々の平均圧力  $p_m$  のもとで  $p_d = 137.2\text{MPa}$  を与えて得られた最終電着面の表面状況を示す．図の白色の領域が圧力負荷装置との真実接触面であり， $p_m$  が増加するにつれてこの領域の占める割合が増加することがわかる．

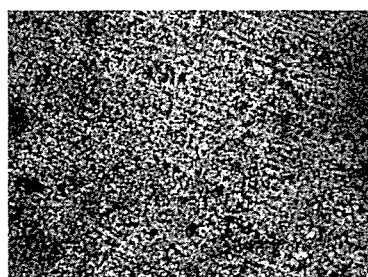
図 3 に，繰返し数  $N = 3 \times 10^6$  において，種々の平均圧力と圧力振



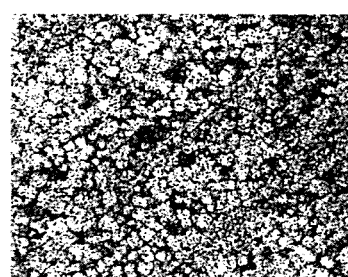
(a)  $p_m = 0\text{ MPa}$      $p_d = 0\text{ MPa}$



(b)  $p_m = 176.0\text{ MPa}$      $p_d = 137.2\text{ MPa}$



(c)  $p_m = 245.0\text{ MPa}$      $p_d = 137.2\text{ MPa}$



(d)  $p_m = 392.0\text{ MPa}$      $p_d = 137.2\text{ MPa}$

Fig.2 Surface of copper foil deformed by cyclic pressure ( $N = 3 \times 10^6$ )

幅の組合せに対して得られた算術平均粗さ  $R_a$  と圧力比  $R$  の関係を示す．なお，図 3 中の各測定点は薄膜表面の任意の 4 ～ 5 箇所における粗さの平均値より得られたものである． $p_d$  および  $R$  の増加に伴って粗さは次第に減少し， $R_a$  と  $R$  の関係はほぼ直線となる．また，その勾配は  $p_d$  にはほとんど依存しない．

そこで図より， $R_a$  と  $R$  の関係を次式で近似する．

$$R_a = aR + b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに，係数  $a$  は各圧力振幅に対して得られた直線の勾配の平均値を取り， $a \doteq -0.695$  とした．また， $b$  は  $p_d$  の関数となる．

図 3 より， $b$  と  $p_d$  の関係を求めれば図 4 となり，両者の関係は次式で表示できる．

$$b \doteq cp_d + d \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに， $c = -0.01$ ， $d = 2.54$  となる．

したがって，式 (1)，(2) より表面粗さ  $R_a$  と圧力比  $R$  および圧力振幅  $p_d$  の関係は次式となる．

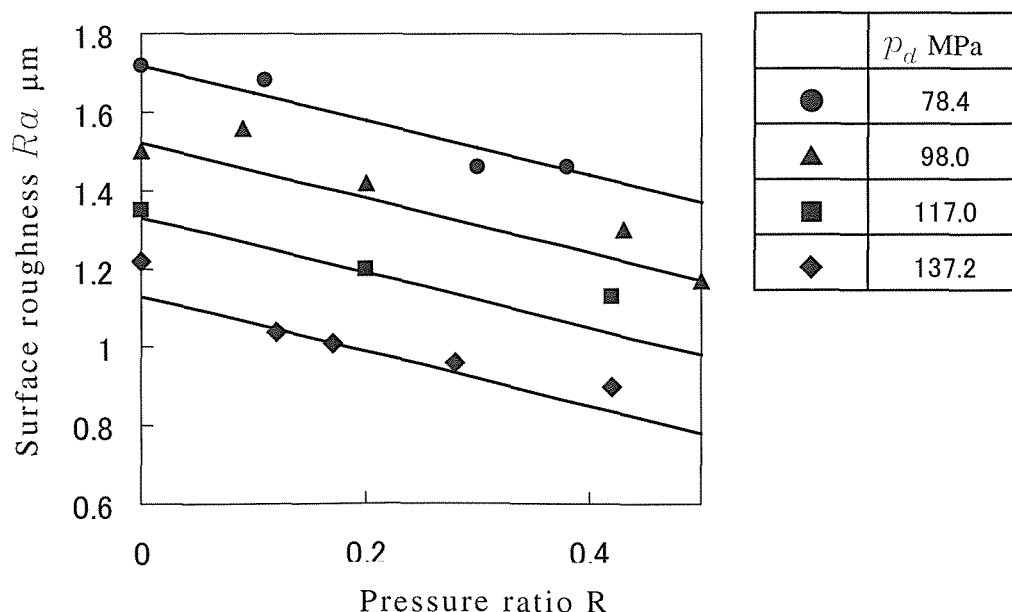


Fig. 3 Relationship between surface roughness  $R_a$  and pressure ratio  $R$

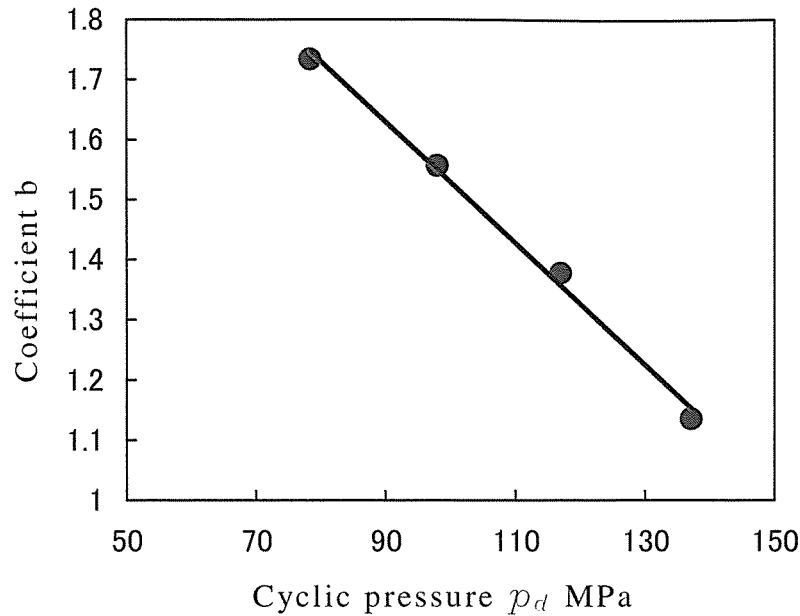


Fig.4 Relationship between coefficient  $b$  and  $p_d$

$$R_a = -0.695R - 0.01p_d + 2.54 \dots\dots\dots (3)$$

図 3 の直線は，式 (3) により得られたものであり，測定値とほぼ一致する．

### 6. 3. 2 薄膜の表面粗さに及ぼす繰返し数の影響

図 5 に  $p_d = 78.4$  MPa および  $137.2$  MPa に対し，それぞれ圧力比  $R \div 0$  に対して得られた薄膜の表面粗さ  $R_a$  と繰返し数  $N$  の関係を示す．また，表 1 には繰返し数  $N$  と  $R_a$  の標準偏差の関係を示す．図に認められるように，繰返し数  $N$  の増加につれて  $R_a$  は減少し， $N \geq 1 \times 10^5$  ではほぼ一定値となり，その値は  $p_d$  に依存する．また  $R_a$  の標準偏差も  $N$  とともに減少する．したがって，式 (3) は  $N \geq 1 \times 10^5$  では  $N$  に依存しないものと考えられる．

### 6. 3. 3 成長粒子発生密度の繰返し圧力依存性

薄膜表面に発生した成長粒子（白色の領域）とこの二値化画像を図 6 に示す．

Table 1 Relationship between standard deviation of  $R_a$  and number of cycles

$N(\times 10^6)$	Standard deviation	
	$p_d = 137.2 \text{ MPa}$	$p_d = 78.4 \text{ MPa}$
0.002	0.339	
0.004	0.409	
0.01	0.284	0.193
0.02	0.120	0.122
0.05	0.135	
0.1	0.142	
0.2	0.092	0.117
0.3	0.082	0.119
0.4	0.098	0.093
0.5	0.079	

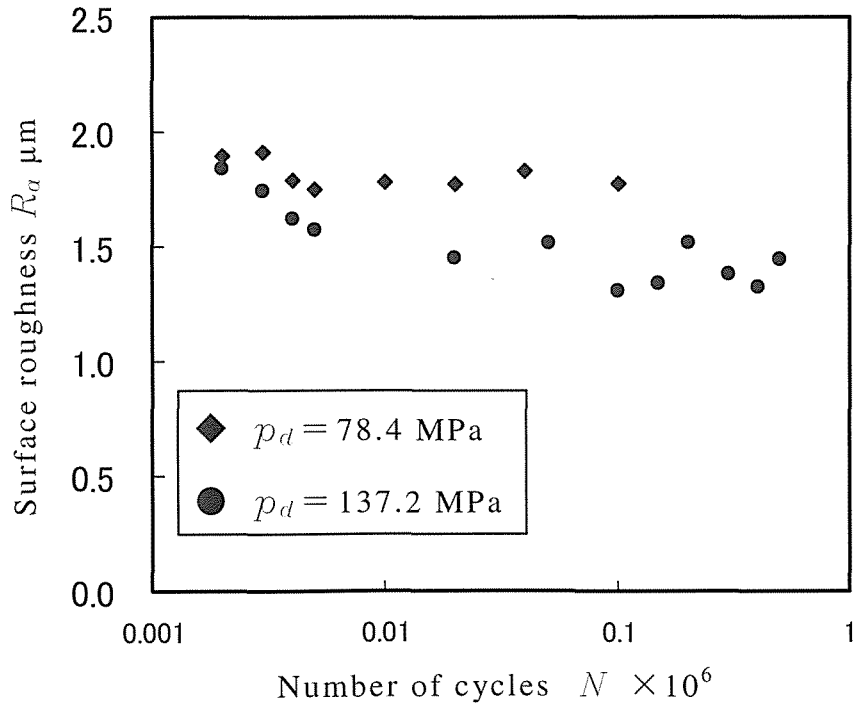
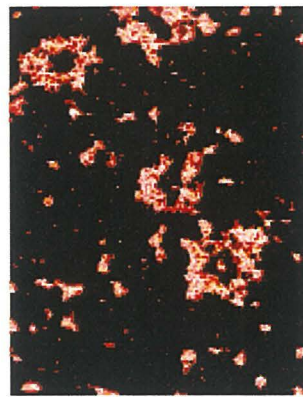
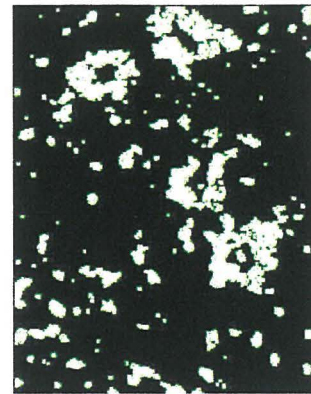


Fig. 5 Effect of number of cycles on the surface roughness of the copper foil

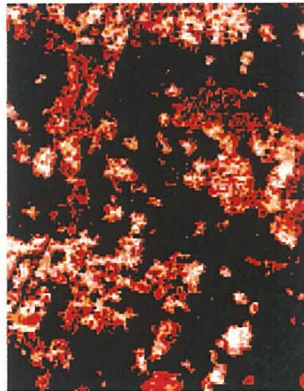


Original picture

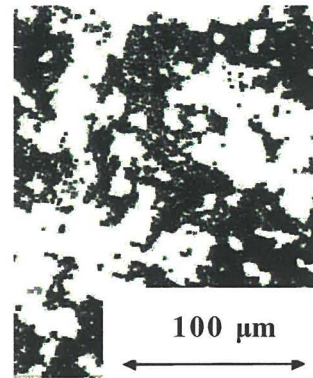


Binary image

(a)  $p_m=78.4$  MPa,  $p_d=78.4$  MPa,  $N=3 \times 10^6$



Original picture



Binary image

(b)  $p_m=117.6$  MPa,  $p_d=117.6$  MPa,  $N=3 \times 10^6$

Fig.6 Grown grains appeared in copper foil

図 7 に圧力比  $R \doteq 0$  に対し, 種々の圧力振幅  $p_d$  で得られた成長粒子発生密度  $D$  と繰返し数  $N$  との関係を示す. ここに, 各測定値は 5 箇所の測定領域に対して得られた値の平均値を表し, 図中の実線は測定値を最小二乗法により 1 次線形近似したものである.

成長粒子の発生は再結晶化現象の一種であり, 成長粒子発生密度の増加速度  $dD/dN$  と繰返し応力  $\sigma$  および雰囲気絶対温度  $T$  の間には次式が成立する<sup>(4)</sup>.



$p_d$ MPa	58.8	78.4	98.0	117.0	137.2	156.0	176.0
	+	●	▲	■	◆	○	□

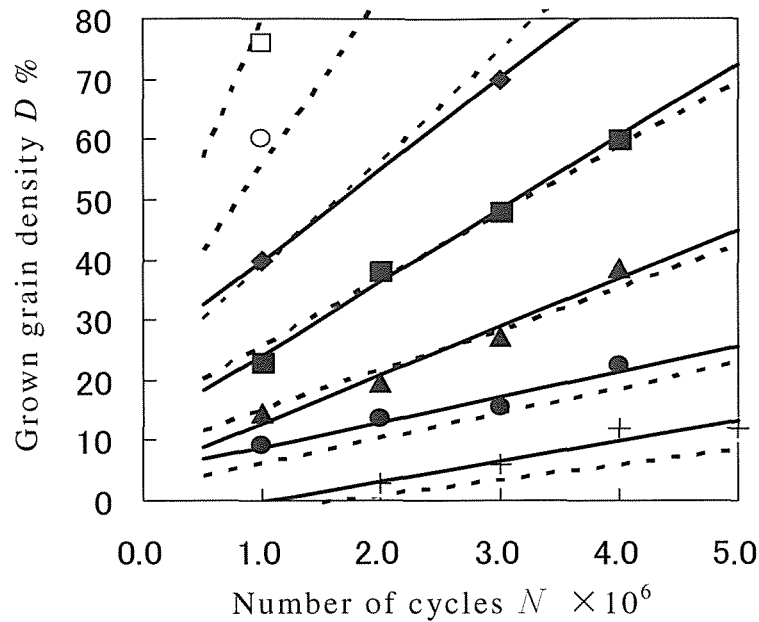


Fig.7 Relationship between grown grain density and  $N$

$$dD/dN = \alpha \exp \{ (\beta \sigma - \gamma) / T \} \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$D = N \alpha \exp \{ (\beta \sigma - \gamma) / T \} + C \cdots \cdots \cdots (5)$$

式 (4), (5) が成立するのは粒子成長速度が速度過程<sup>(6)</sup>であることに起因すると考えられる.

本実験のように, 薄膜表面に繰返し圧力が作用する場合にも同様の関係が成立するとすれば,  $T = \text{一定}$ であるから,  $D$  は次式となる.

$$D = N \exp(\delta p_d - \zeta) + C \cdots \cdots \cdots (6)$$

図 7 の測定結果から  $D$  と  $N$  は線形関係となり, 式 (6) が成立するといえる. ここに,  $\exp(\delta p_d - \zeta)$  は実線の勾配,  $C$  は切片となる.

図 7 より  $C$  と  $p_d$  の関係を求めれば, 図 8 となる.

図 8 より両者の関係は次式で表示できる.

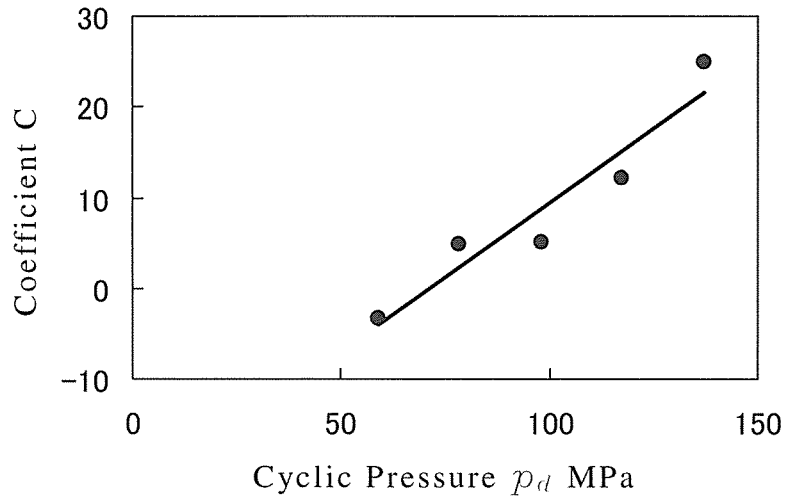


Fig.8 Relationship between coefficient  $C$  and  $p_d$

Table 2 Coefficients  $\delta$  ,  $\zeta$  ,  $e$  and  $f$

$\delta$	$2.463 \times 10^{-2}$
$\zeta$	$4.981 \times 10^{-1}$
$e$	$3.237 \times 10^{-1}$
$f$	-23.36

$$C = e p_d + f \quad \dots\dots\dots (7)$$

式 (6), (7) より,  $D$  は次式となる.

$$D = N \exp(\delta p_d - \zeta) + e p_d + f \quad \dots\dots\dots (8)$$

係数  $\delta$  ,  $\zeta$  ,  $e$  および  $f$  の値を表 2 に示す. 式 (8) より各  $p_d$  に対して  $D$  と  $N$  の関係を求めれば, 図 7 の破線となり, 測定値とほぼ一致する. これは, 繰返し応力の作用による粒子成長速度が速度過程<sup>(6)</sup>であることに起因し, 本実験のように, 薄膜表面に繰返し圧力が作用

する場合の粒子成長速度も同様に速度過程であることを示唆している。  
したがって任意の  $N$  に対して  $D$  を測定すれば、その箇所に作用した  
 $p_d$  を式 (8) により求めることができる。

#### 6. 3. 4 平均圧力が成長粒子発生密度に及ぼす影響

図 9 (a), (b) にそれぞれ  $N = 1 \times 10^6$  および  $N = 3 \times 10^6$  において  
種々の圧力比  $R$  と圧力振幅  $p_d$  の組合せに対して得られた成長粒子発  
生密度  $D$  と  $R$  の関係を示す。

銅めっき法を繰返し負荷を受ける機械要素の表面応力の測定に用い  
る場合のように、薄膜の表面が自由表面となる場合には、成長粒子の  
発生密度は応力振幅にのみ依存し、平均応力の影響を受けない<sup>(7)</sup>。

しかしながら、これらの図に認められるように、薄膜表面に繰返し  
圧力が作用する場合には、平均圧力が増加するにつれて成長粒子の発  
生密度は低下するという新たな知見が得られた。したがって、従来の

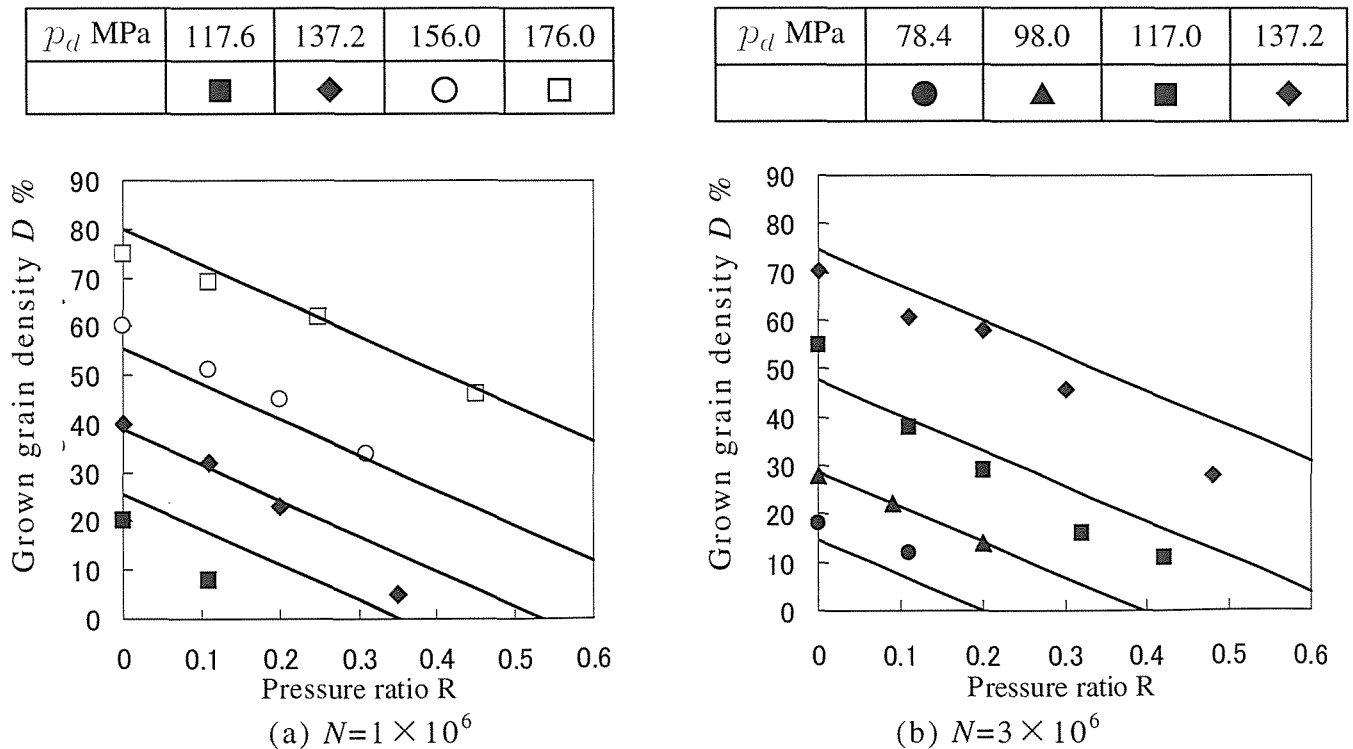


Fig.9 Effect of pressure ratio on the occurrence of grown gain

銅めっき法とは異なり，特定の圧力比に対して得られた較正曲線（成長粒子発生密度  $D$ — $p_d$ —繰返し数  $N$  の関係）を他の圧力比にそのまま適用することはできない．これは，図 2 に示したように，平均圧力とともに圧力伝達面となる真実接触面積が増加し，これに伴って真実接触圧力振幅が次第に低下することがその要因の一つになっているものと考えられる．

図 9 の結果に基づいて，成長粒子の発生密度  $D$  と圧力比  $R$  の関係の定式化を試みた．図より  $D$  と  $R$  の関係は次式で表示できる．

$$D = AR + B \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

ここに，傾き  $A$  は  $p_d$  に依らず一定とみなすことができ，図 9 より， $A \div -72.9$  となる．また， $B$  は  $p_d$  の関数となる．

式 (9) より  $R \div 0$  に対する  $B$  は  $D$  と等しくなるから，式 (8) より次式で表示される．

$$B = N \exp(\delta p_d - \zeta) + e p_d + f \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

式 (9)，(10) より成長粒子発生密度  $D$  を圧力比  $R$  および圧力振幅  $p_d$  により表示すれば次式となる．

$$D = AR + N \exp(\delta p_d - \zeta) + e p_d + f \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

ここに式 (11) は  $N \geq 1 \times 10^6$  で成立する．式 (9) より  $D$  と  $R$  の関係を求めれば，図 9 の実線となり，測定値とほぼ一致する．

### 6. 3. 5 平均圧力および圧力振幅の計測

前述のように， $N \geq 1 \times 10^5$  では  $R_a$  は  $N$  によらずほぼ一定値をとり， $R_a$  は圧力比  $R$  および圧力振幅  $p_d$  により次式で表示できた．

$$R_a = -0.695R - 0.01p_d + 2.54 \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

また，成長粒子発生密度  $D$  は  $R$  および  $p_d$  により次式で表示できた．

$$D = AR + N \exp(\delta p_d - \zeta) + e p_d + f \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

したがって、 $R_a$  および  $D$  を  $N \geq 1 \times 10^6$  において測定し、これらの値を式 (3) および式 (11) に代入することにより、圧力振幅  $p_d$  と圧力比  $R$  が決定でき、平均圧力  $p_m$  も求めることが可能となる。

#### 6. 4 結 言

電着により作製した銅薄膜に繰返し圧力の作用によって生ずる成長粒子の発生密度と薄膜の表面粗さの変化を利用した固体接触面に作用する平均圧力と圧力振幅の測定法を検討した。得られた結果を要約すれば、以下のようなになる。

(1) 薄膜の表面粗さ  $R_a$  は圧力振幅  $p_d$  や圧力比  $R$  の如何にかかわらず、繰返し数  $N$  が  $1 \times 10^5$  回以上ではほぼ一定値となる。

(2)  $R_a$  は  $p_d$  および  $R$  の増加に伴って減少し、この繰返し数範囲においてこれらの間には次式の関係が成立する。

$$R_a = aR + b p_d + c$$

ここに、 $a$ 、 $b$  および  $c$  は定数である。

(3) 圧力比  $R \div 0$  に対し、成長粒子の発生密度  $D$  と圧力振幅  $p_d$  および繰返し数  $N$  の間には次式の関係が成立する。

$$D = N \exp(\delta p_d - \zeta) + e p_d + f$$

ここに、 $\delta$ 、 $\zeta$ 、 $e$  および  $f$  は定数である。

(4) 繰返し圧力によって発生する成長粒子の発生密度は圧力比の増加につれて減少する。

(5) したがって、従来の銅めっき法とは異なり、特定の圧力比  $R$  に対して得られた  $D$  と  $p_d$  の関係を他の  $R$  に適用できない。

(6)  $D$  と  $p_d$  および  $R$  の間には、 $N \geq 1 \times 10^6$  において次式の関係が成立する。

$$D = AR + N \exp(\delta p_d - \zeta) + e p_d + f$$

(7) したがって、 $N \geq 1 \times 10^6$ において薄膜の表面粗さと成長粒子発生密度を測定し、結言(2)および(6)の構成式を利用すれば、固体接触面に作用する平均圧力  $p_m$  と圧力振幅  $p_d$  を検出できる。

## 参考文献

- (1) Tatsuya Hasegawa and Seiichiro Kitaoka, Measurement of Contact Pressure by Electrodeposited Copper Foil (Measurement of Cyclic Pressure Using Grain Grain Growth and Surface Roughness of Electrodeposited Copper-Foil), Review of Automotive Engineering JSAE, **26** (2005), 327-333.
- (2) 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(第2報 微小突起を有する薄膜による静圧測定), 日本機械学会論文集(A編), **64**-619 (1998), 689-695.
- (3) 北岡征一郎, 長谷川達也, 電着銅薄膜による接触面圧計測法(第3報 微小突起を有する薄膜による繰返し圧力の測定), 日本機械学会論文集(A編), **68**-670, (2002), 930-935.
- (4) 北岡征一郎, 間宮武司, 電着銅薄膜による接触面圧計測法(第1報 基礎実験), 日本機械学会論文集(A編), **60**-573, (1994), 1288-1293.
- (5) 北岡征一郎, 御厨照明, 細野喜久雄, 電着銅の成長粒子発生密度変化を利用した応力測定法(画像処理の適用), 日本機械学会論文集(A編), **57**-534, (1991), 442-447.
- (6) 横堀武夫, 材料強度学, (1971), 154, 岩波全書.
- (7) 大久保 肇, 銅めっき応力測定法, (1965), 16, 朝倉書店.

## 第7章 回転ローラ間に生ずる接触圧力測定への 微小突起を有する金属薄膜の適用

### 7. 1 緒 言

機械要素間の接触面の中には回転しながら接触圧力が作用する接触面が多数存在し，その接触面に生ずる圧力が局所的であるばかりでなく高圧力となる場合も少なくない．したがって実験的にこの圧力を測定することは，機械要素の摩耗や疲労を検討するうえでも重要な課題となる．しかも，回転要素間の接触圧力測定に関する研究は必ずしも多くない．

以上の観点から，本章では回転要素間の接触圧力測定に第3章で考案した微小突起を有する電着銅薄膜による接触圧力計測法の適用の可否を検討してみた．すなわち，回転するローラ間の接触面には繰返し圧力が作用するため，微小突起先端部には加工硬化とこれに引き続き繰返し軟化が生ずることが予測される．そこで，突起先端部の塑性変形量と周波数および繰返し数との関係を調査し，静圧を負荷した場合との比較を行った．さらに，得られた結果から塑性変形量と荷重の較正曲線を利用して，自作したローラ試験機の接触面に生ずる繰返し圧力を測定した．また，得られた結果を接触問題の弾性解<sup>(1)</sup>と比較し，本手法の妥当性を検証した．

### 7. 2 実験方法

#### 7. 2. 1 めっき基板の作製

めっき基板となるステンレス板は，#800の耐水研磨紙で研磨し，

さらにバフ研磨により鏡面仕上げを施した後，メタルプリンタ (METAZA Metal printer MPX-70 Roland 製)により 70 mm×70 mm の領域に打刻を行って微小な円錐状の圧痕を規則的に作製した．

図 1 に作製しためっき基板を示す．ここに，打刻痕の間隔は 約 100  $\mu\text{m}$  である．

#### 7. 2. 2 微小突起を有する電着銅薄膜の作製

第 5 章と同じ方法により，めっき基板に銅めっきを施した．最終電着面にはステンレス板の圧痕に沿って微小な窪みが残るため，これを # 800 の耐水研磨紙により除去して平滑にした．その後，基板からめっき膜を剥離してこの薄膜を円錐微小突起を有する電着銅薄膜とした．図 2 に作製した微小突起を有する電着銅薄膜の表面状況を示す．突起部の高さは約 28  $\mu\text{m}$  であり薄膜の厚さは約 65  $\mu\text{m}$  である．

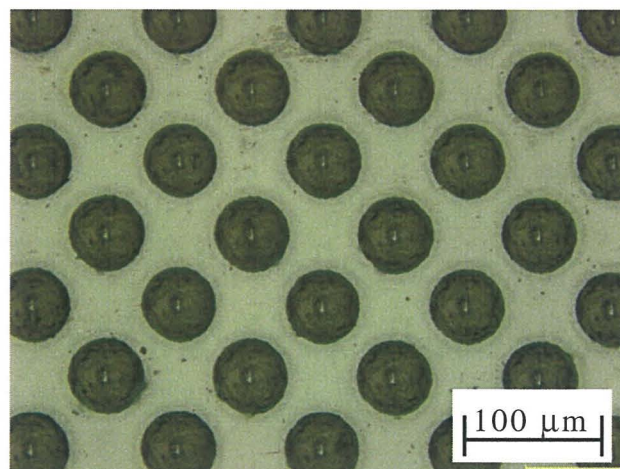


Fig.1 Plating plate with micro indentations



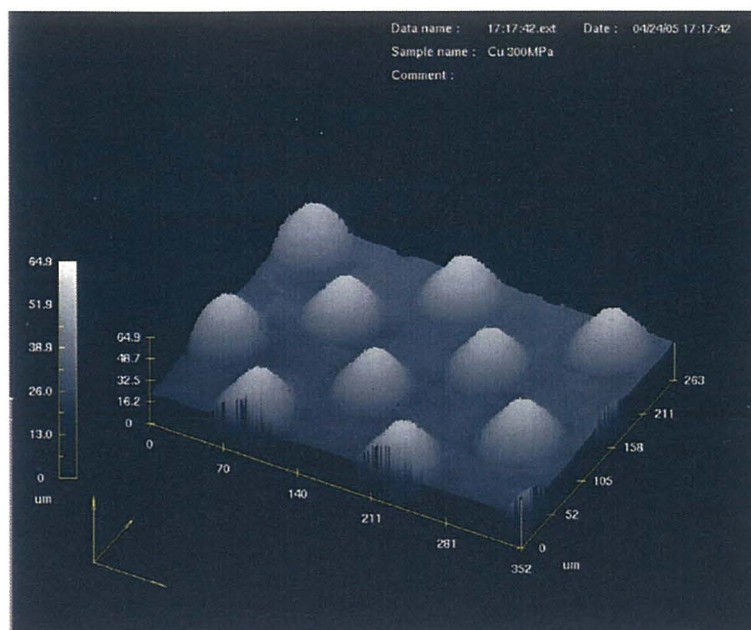


Fig.2 Configuration of conical micro projections

### 7. 2. 3 実験方法

#### 7. 2. 3. 1 静圧試験

第6章において使用した圧力負荷装置の圧力伝達面（直径 6.0 mm）にこれと同一直径に切り出した円錐微小突起を有する銅薄膜を挟み、

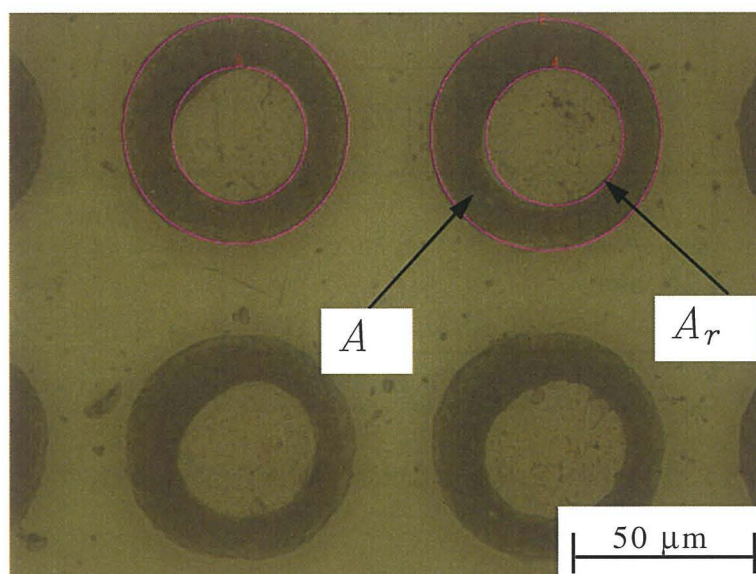


Fig.3 Configuration of micro projection deformed by static pressure

MTS 材料試験装置に装着し,種々の静圧  $p_m$  を加えて試験を実施した. 静圧負荷後, 図 3 に示すように高深度画像観察システムを有する光学顕微鏡を使用し, 画像解析ソフトを用いて圧力負荷装置との真実接触面となる突起先端部の平坦部の面積  $A_p$  を求めた. ここで, 負荷時間は 30 s とした.

### 7. 2. 3. 2 繰返し圧力

回転ローラの接触面には, 1 回転毎に図 4 の実線で示すような分布の圧力が生ずる<sup>(1)</sup>. これと同じ圧力波形を MTS 材料試験機では再現できないため, 図中に破線で示したような正弦波形でこれを近似し, 前節の静圧試験と同様の圧力負荷装置を用いて, 表 1 に示す種々の周波数  $f$  と繰返し数  $N$  において最大圧力  $p_{max}$  ( $=2p_d$ ) を, 50, 100, 150 MPa と設定しそれぞれに対して片振り圧縮試験を実施した.

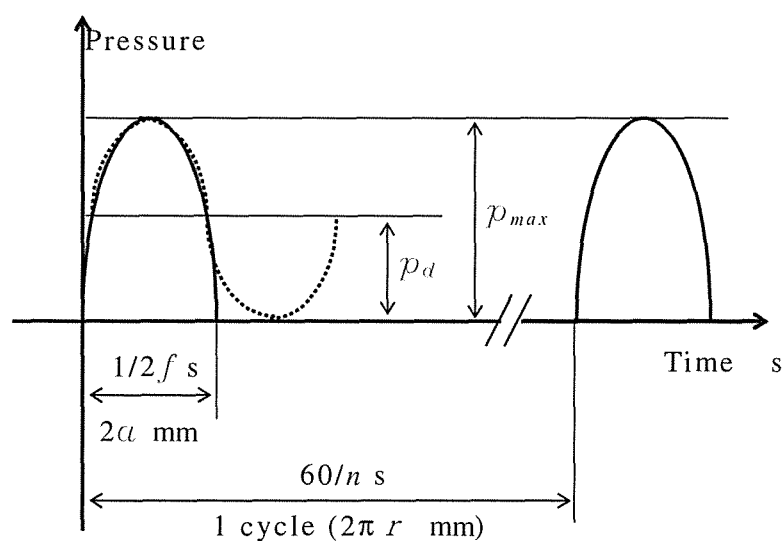


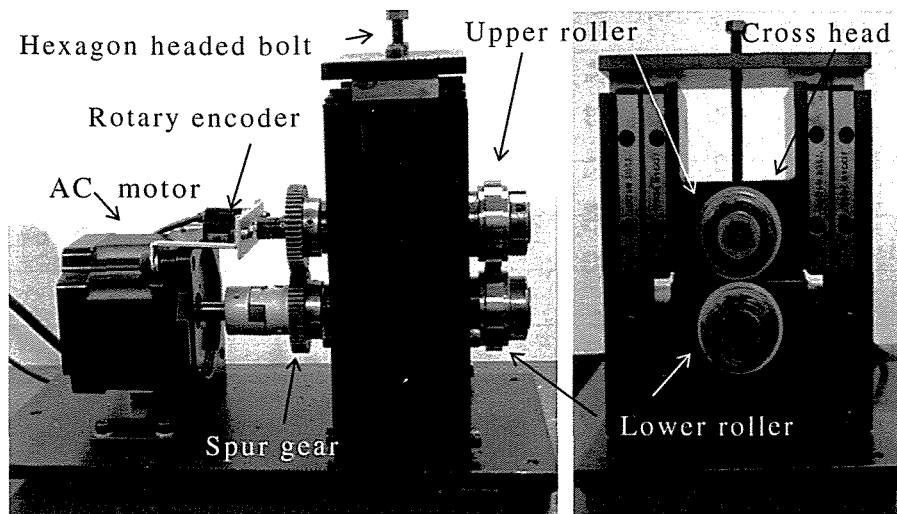
Fig. 4 Pressure pattern of rolling cylinder

Table 1 Experimental condition

$f$ Hz $N$	1	10	100
$1 \times 10$	○	—	—
$1 \times 10^2$	○	○	—
$1 \times 10^3$	○	○	○
$1 \times 10^4$	○	○	○
$1 \times 10^5$	—	○	○
$1 \times 10^6$	—	—	○

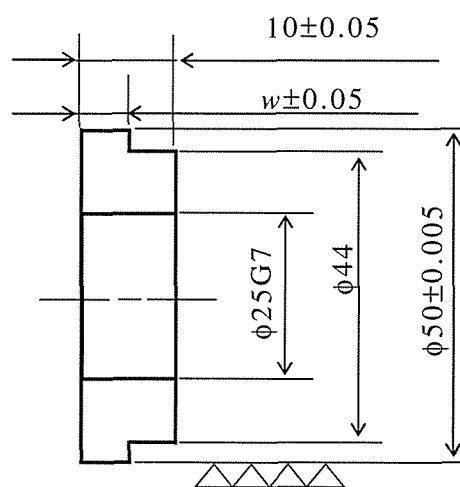
### 7. 2. 3. 3 ローラ試験

図 5 (a), (b)には，自作したローラ試験機を，(c)にはローラの形状を示す．AC モータの回転が，ギア比 1 の平歯車を介して上下ローラに伝わる構造となっている．クロスヘッドに取り付けられた六角ボルトを緩めることにより，上ローラが徐々に下降して下ローラに接触する．さらに六角ボルトを緩めれば，ローラ間にクロスヘッドの荷重が負荷される．ローラの接触面には研磨が施してあり，ローラの接触幅  $w$  はそれぞれ 2.5, 5.0 mm として試験を実施した．なお，ローラの材質は SNCM439（ヤング率  $E=204$  GPa，ポアソン比  $\nu=0.3$ ）である．円錐微小突起を有する電着銅薄膜のローラへの固定は，ローラ幅  $w \times 30\text{mm}$  の薄膜の両端を粘着テープで施した．ローラ間に生ずる圧力を上述の較正試験の結果から求めた．また，ロードセルにより，上下ローラ間に作用する静荷重を計測し，接触問題の弾性解から得られる接触圧力を求め，その妥当性を検証した．



(a) Side view

(b) Front view



(c) Geometry and dimensions of test roller

Fig.5 Roller testing machine

### 7. 3 実験結果および考察

#### 7. 3. 1 突起先端部の塑性変形量と静圧の関係

図 6 に静圧試験により得られた  $p_s$  と  $A_r/A$  との関係を示す．なお， $A_r/A$  は薄膜の任意の 8 箇所より得られた画像の 30 個の突起の平均値である．図から， $p_s$  の増加とともに  $A_r/A$  も増加し，上に凸の曲線と

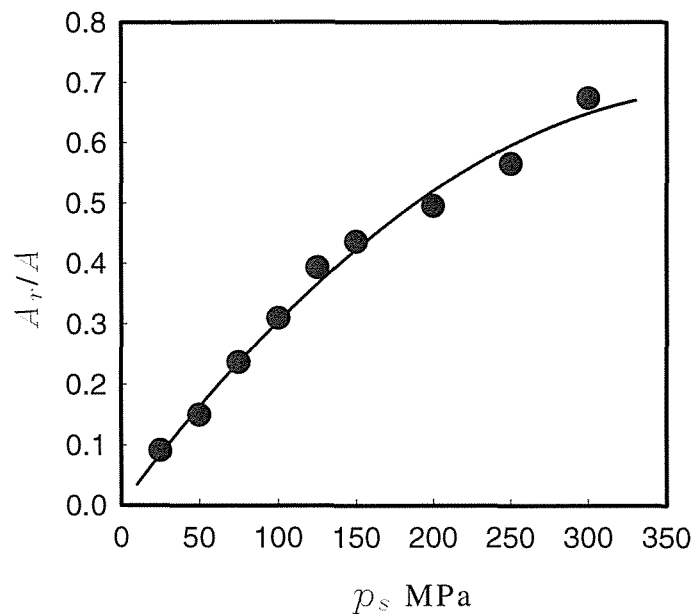


Fig.6 Relationship between  $A_r/A$

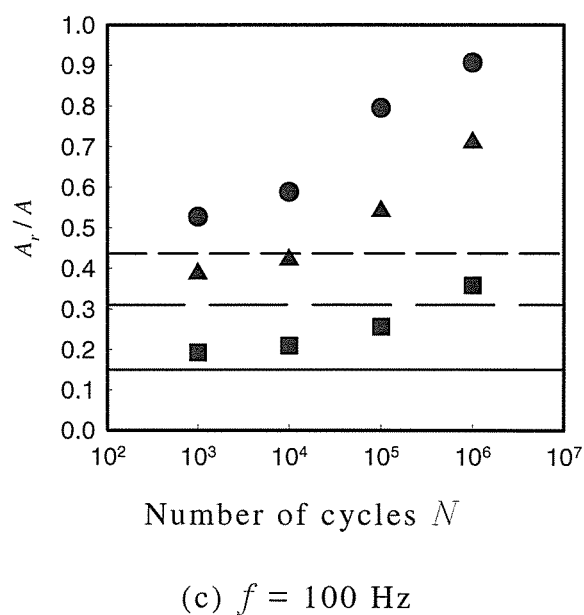
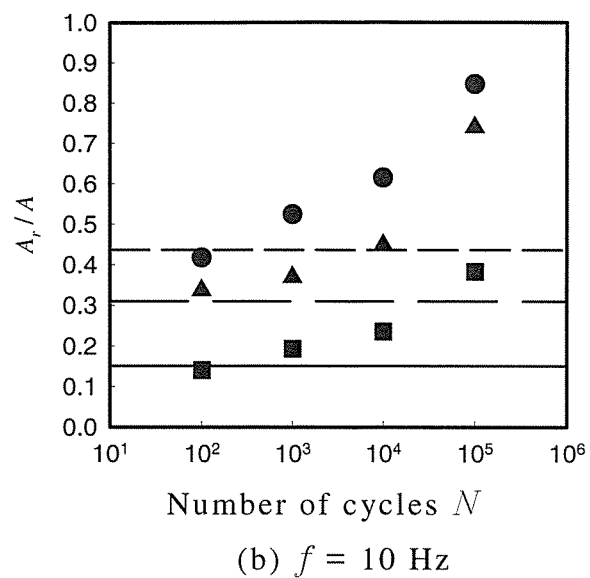
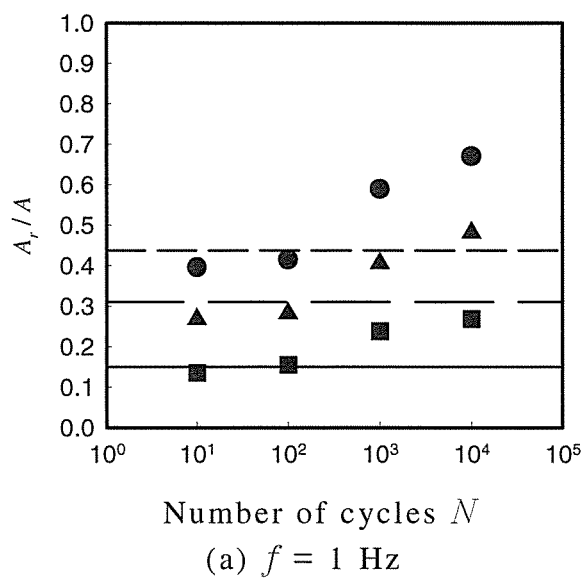
なることから、静圧の増加とともに加工硬化が進行する．また、この薄膜では、最大で 300 MPa 程度の静圧測定が可能となる．両者の関係を最小二乗法を用い、2 次曲線で近似する．

$$A_r/A = s p_s^2 + t p_s \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $s$ 、 $t$  は定数であり、それぞれ  $s = -4.39 \times 10^{-6}$ 、 $t = 3.48 \times 10^{-3}$  となる．

### 7. 3. 2 繰返し圧力試験

図 7 (a)～(c)には、それぞれの周波数  $f$  において得られた  $A_r/A$  と繰返し数  $N$  の関係を片対数紙により示す．図 7 には、 $p_{max} = p_s$  として静圧試験の結果を直線（実線、破線）により表示した．図から、いずれの周波数においても、 $N$  が  $10^2$  回以下では、 $A_r/A$  は静圧試験の結果とほぼ一致する．しかしながら、 $N$  が  $10^2$  回以上では、 $N$  の増加とと



$p_{max}, p_s$	$p_{max}$	$p_s$
50MPa	■	—
100MPa	▲	- - -
150MPa	●	- - - -

Fig. 7 Relationship between  $A_r/A$  and  $N$

もに  $A_r/A$  も増加し，冷間加工された銅に認められるような加工軟化<sup>(2)</sup>が進行していくことがわかる．

図 8 (a)～(c)には， $N=10^2, 10^3, 10^4$  cycle における  $A_r/A$  と周波数  $f$  の関係を片対数紙により示す．図中の直線は，静圧試験結果を示す．

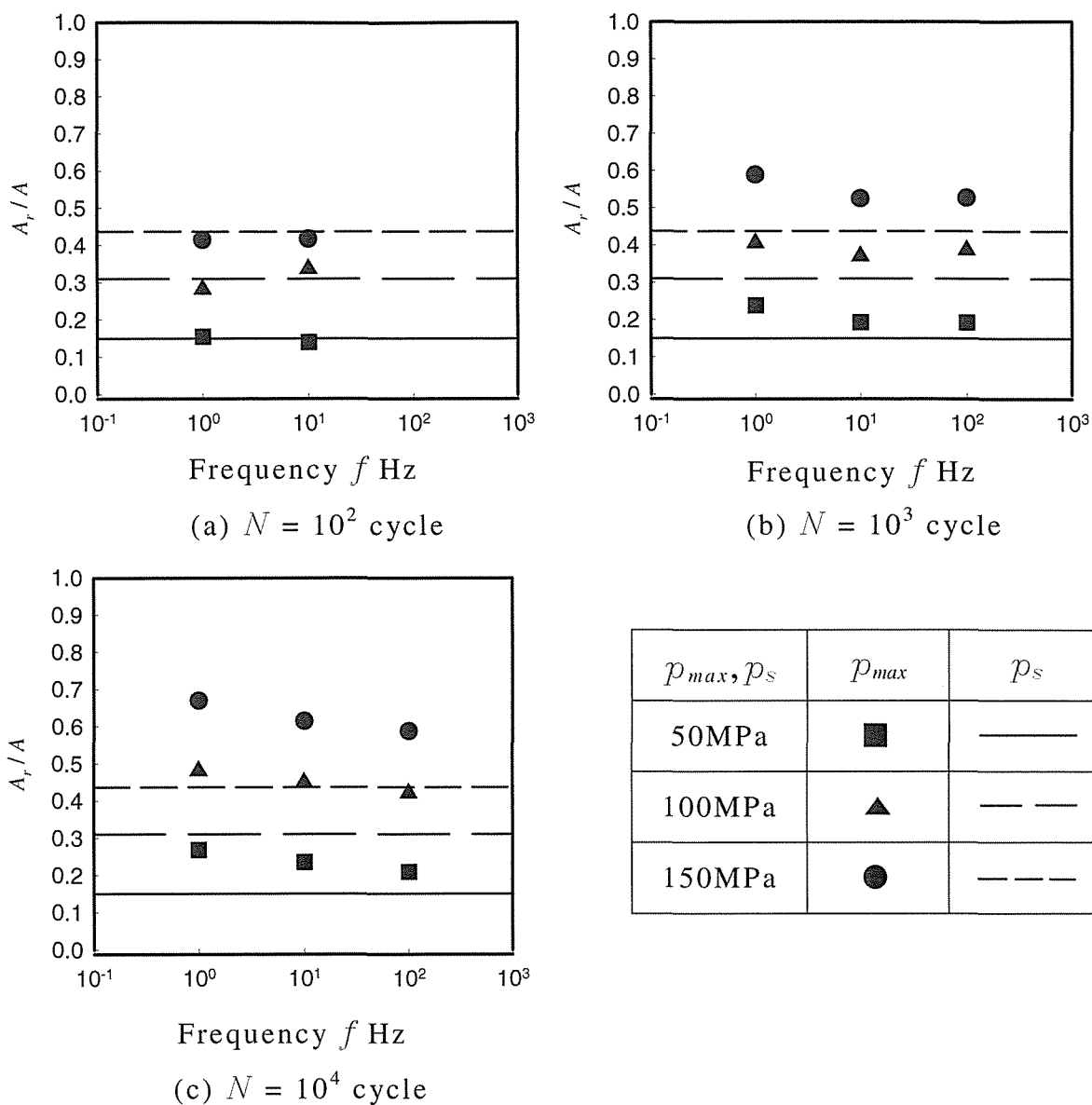


Fig.8 Relationship between  $A_r/A$  and  $f$

図 8 (a) より，加工軟化が顕著に進行しない  $N=10^2$  における  $A_r/A$  は周波数に依存しないが，図 8 (b)，(c) のように軟化の進行とともに  $A_r/A$  の  $f$  依存性が認められ， $f$  の増加とともに  $A_r/A$  は小さくなる傾向が認められる．この要因について考察すると以下のようなになる．

まず，一般に軟鋼などの降伏点にはひずみ速度依存性があることが知られており，ひずみ速度の増加とともに降伏点も上昇する<sup>(5)</sup>．こ

のようなひずみ速度依存性は電着により作製した銅薄膜にも認められている<sup>(6)</sup>ので、本実験においても初期の圧力作用時では、周波数の増加とともに  $A_r/A$  も小さくなるものと考えられる。しかしながら、図 8 (a)に認められるように、加工軟化がほとんど進行しない  $N$  が小さい場合での  $A_r/A$  の周波数依存性はほとんど認められないことから、上述の降伏点のひずみ速度依存性が及ぼす  $A_r/A$  への影響は軽微であると考えられる。一方、 $N$  が一定の場合、 $f$  の増加とともに圧力の作用時間は短くなる。加工軟化は転位が安定な状態に移動することにより生ずるため、圧力の作用時間が減少すれば、この移動に要する時間が十分ではなくなる。このため、軟化の進行が遅れ、図 8 に認められるような結果になったものと考えられる。したがって、銅薄膜の繰返し軟化が進行する  $N$  において本測定法を適用するには、上述の  $A_r/A$  の加工軟化の程度とその  $f$  依存性を考慮する必要がある。

### 7. 3. 3 ローラ試験

図 5 において、クロスヘッドの荷重  $W$  を求めるために上下ローラが接触した位置において下ローラを取り外し、ロードセルを用いて、5 回の計測を行った。 $W=49.2\pm 2.4$  N となった。これを基に、ローラに作用する荷重の周波数を見積ってみた。図 4 に示すように接触面の半幅を  $\alpha$  とすれば、弾性理論により、上下ローラの弾性係数  $E$ 、 $\nu$  および半径  $r$  が等しいとき、 $\alpha$  は次式で表される。

$$\alpha = \sqrt{4\vartheta P r} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\vartheta = (1 - \nu^2) / \pi E \quad \dots\dots\dots (3)$$

であり、 $P$  はローラの単位幅あたりの荷重を表す。したがって、ロー



ラの回転数を  $n \text{ min}^{-1}$  とすれば、図 4 の関係から較正試験の周波数  $f$  は次式となる。

$$f = \pi n r / 120 \alpha \dots\dots\dots (4)$$

$n = 100 \text{ min}^{-1}$ ，ローラの幅  $w$  が 2.5, 5.0 mm の場合， $f$  を式 (4) により求めると，周波数  $f$  は，それぞれ 1240, 1750 Hz となる。このような周波数のもとで前述の繰返し圧力試験を実施することはできない。また，上述の方法により圧力の周波数を求めるには，ローラに作用する荷重を予め求めておく必要がある。このような場合には，実験的圧力測定法によらなくても，後述するような弾性解を用いることでローラの幅方向に作用する接触圧力の平均値を見積ることはできる。しかしながら，実際には，ローラに作用する荷重が未知であるため，接触圧力の計測が必要となる場合がほとんどである。このような場合には，上述のように周波数を求めることはできない。そこで，前節の結果から加工軟化が顕著に表れない繰返し数であれば， $A_r/A$  の周波数依存性もほとんどなく，静圧試験結果を利用できると考えられることから， $N = 10^2$  回と設定して，ローラ試験を実施した。

図 9 (a), (b) にはそれぞれローラ幅  $w$  が 2.5, 5mm の場合に得られたローラの幅方向の圧力分布を示す。ここで， $A_r/A$  の計測は，ローラの幅方向に 3 箇所実施し，その平均値を採用した。また， $A_r/A$  と  $p_{max}$  との関係には静圧試験に対して得られた式 (1) の関係式を用いた。図から，ローラ幅が小さくなると， $p_{max}$  も明らかに大きくなる。得られた結果を弾性解と比較し，その妥当性を検証してみた。図 9 の実験値を最小二乗法により 4 次近似する。

$$p_{max} = Ix^4 + Jx^3 + Kx^2 + Lx + M \dots\dots\dots (5)$$

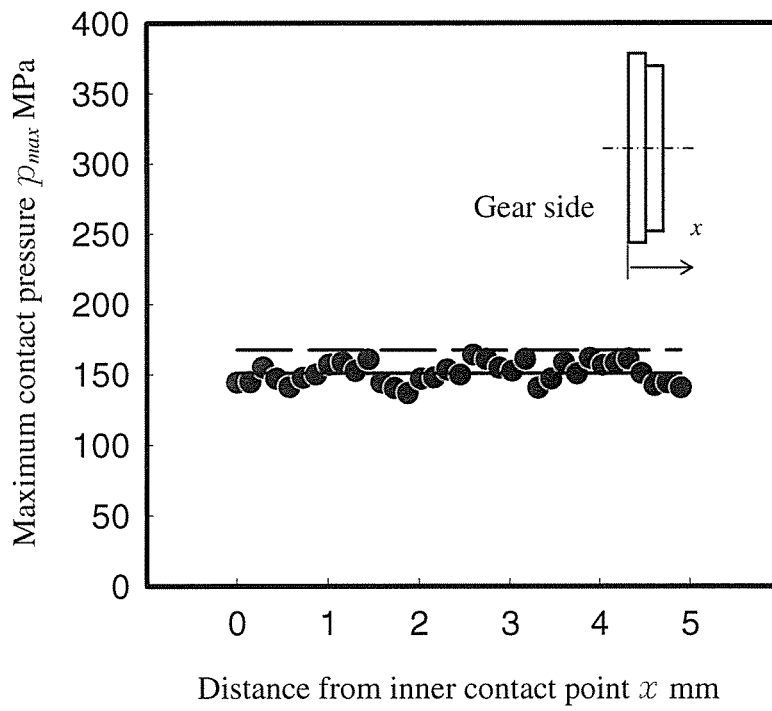
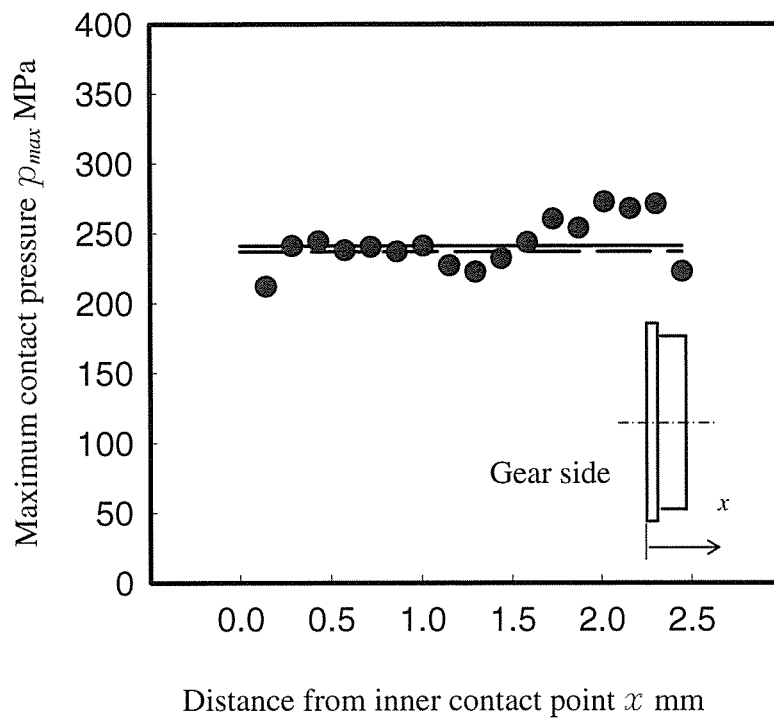


Fig. 9 Pressure distribution to the width direction of a roller

ここで、 $I, J, K, L, M$  は定数であり、その値を表 2 に示す。これより、ローラ幅方向の圧力分布の平均値  $p_{mean}$  は次式で表される。

$$p_{mean} = \frac{\int_0^w p_{max} dx}{w} \dots\dots\dots (6)$$

これにより得られる値を図 9 に実線で示す。また、弾性理論により、ローラの接触面に作用する圧力  $p_{mean}^*$  は、次式で表される<sup>(1)</sup>。

$$p_{mean}^* = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{P}{\partial r}} \dots\dots\dots (7)$$

ロードセルにより得られた荷重  $W$  から、式 (7) により  $p_{mean}^*$  を求めれば、図 9 の破線となる。表 3 にはこれらの値を比較して示す。図 9 と表 3 より、両者は良好な一致を示し、ロードセルにより得られた値を真値とした場合の相対誤差は、それぞれ  $w = 2.5 \text{ mm}$  の場合で 2 %、 $w = 5.0 \text{ mm}$  の場合で 9 %となる。

Table 2 Coefficients of approximate equations

$w$ mm	2.5	5.0
$I$	-78.469	-0.7382
$J$	394.16	6.4753
$K$	-643.46	-18.102
$L$	388.91	19.189
$M$	168.77	143.94

Table 3 Comparison of mean pressure obtained by copper foil and load cell

$w$ mm	Copper foil	Load cell
2.5	241	$237 \pm 6$
5.0	153	$168 \pm 4$

したがって、加工軟化が顕著に現れない繰返し数においては、接触圧力の周波数によらず、本手法によりローラの接触面に作用する圧力分布を計測できるといえる。

#### 7. 4 結 言

微小突起を有する電着銅薄膜を用いた接触圧力計測法を回転するローラ間の圧力測定へ適用可能かどうかを検討するため、まず、種々の周波数と繰返し数の基で片振り圧縮試験を実施し、静圧試験による結果と比較した。得られた結果を基に、回転するローラ間に生ずる圧力測定を実施した。得られた結果を要約すれば、以下のようになる。

(1) 突起部先端の真実接触面積と突起の底面積との比  $A_r/A$  は繰返し数  $N$  が  $10^2$  回以下では、静圧試験の結果とほぼ一致する。

(2)  $N$  が  $10^2$  回を超えると、 $N$  の増加とともに  $A_r/A$  も増加し、加工軟化が進行していく。

(3) 加工軟化が顕著に進行しない  $N=10^2$  回における  $A_r/A$  は周波数  $f$  に依存しない。

(4) 加工軟化の進行とともに  $A_r/A$  の  $f$  依存性が認められ、同一の  $N$  に対する  $A_r/A$  は  $f$  の増加とともに小さくなる傾向にある。

(5) 本手法により回転するローラ間に生ずる繰返し圧力を計測すれば、弾性解とよく一致する。

#### 参考文献

- (1) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, 3rd Ed., (1970), 418, McGraw-Hill.

- (2) 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（第2報 微小突起を有する薄膜による静圧測定），日本機械学会論文集（A編），**64**-619 (1998), 689-695.
- (3) 北岡征一郎，長谷川達也，電着銅薄膜による接触面圧計測法（第3報，微小突起を有する薄膜による繰返し圧力の測定），日本機械学会論文集（A編），**68**-670 (2002), 930-935.
- (4) Ohkubo, H., Copper Electroplating Method of Stress Analysis, *Memoirs Fac. Eng. Nagoya Univ.*, **20**-1 (1968), 1.
- (5) 川田雄一 他，材料強度工学ハンドブック（1966）, .247, 朝倉書店.
- (6) Ralph I. S., Ali F., Robert R. S., and Henry O. F., Metal Fatigue in Engineering, (2001), 100, A Wiley-Interscience Publication.
- (7) 横堀武夫，材料強度学，第3版, (1993), .38, 岩波書店.
- (8) 北岡征一郎，小野勇一，宇田康弘，微小円孔を有する電着銅薄膜による二軸応力検出法（ひずみ感度に及ぼす周波数および波形の影響），日本機械学会論文集（A編），**70**-694 (2004), 837-841.

## 第 8 章 結 論

従来，機械要素間の接触面に作用する圧力を測定する各種の計測法が開発されているが，測定の簡便さや測定精度の点から必ずしも十分とはいえない．また，機械要素には工作機械のボルト締結部に見られるように，平均圧力に繰返し圧力が重畳して作用する場合も多く，繰返し圧力振幅が要素の疲労強度に多大な影響を与える．しかしながら，従来の計測法でこれらを分離して測定できるものは少ない．

以上の観点から本論文では，静圧と繰返し圧力の両者の計測を可能とする圧力ゲージの開発を主たる目的とした．すなわち，固体接触面に電着により作製した微小突起を有する銅薄膜を適用し，突起部の変形量に基づく静圧および繰返し圧力の測定の可能性や繰返し圧力によって薄膜内に生ずる粒子成長現象と薄膜の表面粗さ変化を利用した静圧および繰返し圧力の測定の可能性を検討した．

さらに，微小突起を有する電着銅薄膜による接触面圧測定法の実機への適用例として，ディーゼルエンジンのシリンダヘッドガスケットの締付けによる圧力測定を実施し，従来の実験的応力解析法と比較してその有効性を実証した．さらに，試作したローラ試験機を用い，回転を伴う接触部の面圧計測への適用の可否を検討した．

第 2 章では，第 6 章に記述した平均圧力に繰返し圧力が重畳する場合の平均圧力と圧力振幅の計測の基礎となる電着銅薄膜を用いた接触面圧計測法の基礎実験について概説した．

第 3 章では，第 4 章および第 5 章でその測定原理が利用されるピラミッド状の微小突起を有する電着銅薄膜による静圧測定法について概

説した。

第4章では、第3章の結果を踏まえて、微小な凹凸を有する電着銅薄膜による静圧測定法の実機への適用例について検証した。すなわち、ディーゼルエンジンのタイプの異なる2つのシリンダヘッドガasketを対象とし、その面圧の実態を微小な凹凸を有する電着銅薄膜により検証した。すなわち、特にシール性にとって重要なボア間の接触面圧を測定する場合、感圧フィルム法では、面圧発生状態を正確に把握できない恐れがある。そこで、自動車整備書の規定以外でシリンダヘッドを締付け、上述の電着銅薄膜によりその面圧発生状態を測定するとともに、有限要素法による結果と比較して微小な凹凸を有する電着銅薄膜による方法の有効性を検証した。

この結果、微小な凹凸を有する電着銅薄膜を用いれば、900 MPa程度の圧力の測定が可能であり、ボア間の接触面の圧力分布がFEM解析の結果と同様であることから、この方法が面圧測定に有効であることが確認できた。しかしながら、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となる場合があり、一度加圧すると元に戻ることなく、締付け時の最大圧力が表示されていることに留意する必要があることが明らかとなった。

第5章では、ピラミッド状の微小突起を有する電着銅薄膜による静圧および繰返し圧力の測定の可能性について検討した。すなわち、種々の平均圧力  $p_m$  と圧力振幅  $p_d$  の組合せに対して突起先端部の変形量を調査し、突起先端部の変形量と  $p_m$  および  $p_d$  の関係の定式化を試みた。

この結果、突起先端部は静圧の増加とともに加工硬化が進行するが、

繰返しの作用により軟化し，軟化を支配するのは主として試験開始の時点で作用する真実圧力振幅であることが明らかとなった．この点に着目することにより，突起先端部の変形量と  $p_m$  および  $p_d$  の関係の定式化が可能となり，この構成式を利用して得られた繰返し圧力の分布は静圧分布と傾向が一致し，構成式に基づいて得られた荷重振幅と負荷した荷重振幅の相違は 4 % 以内となった．

第 6 章では，電着銅薄膜の粒子成長現象と表面粗さ変化を利用した固体接触面に作用する平均圧力と圧力振幅の測定の可能性について検討した．すなわち，平均圧力  $p_m$  と圧力振幅  $p_d$  を種々に設定し，繰返し数  $N$  を変えて片振圧縮試験を実施し，薄膜に発生する成長粒子の発生密度と薄膜の表面粗さに及ぼす  $p_m, p_d$  および  $N$  の影響を調査するとともに，各現象と  $p_m, p_d$  および  $N$  の関係の定式化を試みた．

この結果，繰返し圧力によって発生する成長粒子の発生密度は圧力比の増加につれて減少した．また，圧力比  $R \doteq 0$  に対する結果に基づいて成長粒子の発生密度  $D$  と圧力振幅  $p_d$  および繰返し数  $N$  の間の関係を定式化した．これらの結果を利用すれば， $D$  と  $p_d$  および  $R$  の関係の定式化が可能となり，較正試験により得られた薄膜の表面粗さと  $p_d$  および  $R$  の関係式を併用すれば，所定の  $N$  において薄膜の表面粗さと成長粒子の発生密度を測定することにより， $p_m$  および  $p_d$  を検出できることを明らかにした．

第 7 章では，接触回転する要素間の圧力測定に第 3 章で考案した微小突起を有する電着銅薄膜による接触圧力計測法の適用の可否を検討した．すなわち，回転するローラ間の接触面には繰返し圧力が作用することを考慮し，まず，種々の周波数  $f$  に対して，圧力振幅と突起先



端部の塑性変形量および繰返し数との関係を調査するとともに，静圧を負荷した場合に得られる塑性変形量との比較を行った．この結果，突起部先端の真実接触面積と突起の底面積との比  $A_r/A$  は繰返し数  $N$  が  $10^2$  回では，周波数  $f$  の如何にかかわらず，静圧試験の結果とほぼ一致し， $N$  が  $10^2$  回を超えると， $N$  の増加とともに  $A_r/A$  も増加して，加工軟化が進行することが明らかとなった．この結果を踏まえて，自作したローラ試験機の接触面に生ずる繰返し圧力を回転数  $N=10^2$  回に設定して測定し，得られた結果を接触問題の弾性解と比較した結果，本手法の妥当性が確認できた．

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、暖かいご指導をいただきました鳥取大学工学部 教授 北岡征一郎博士に心よりお礼申し上げます。

また、鳥取大学工学部 教授 早川元造博士，田中久隆博士ならびに川添博光博士には貴重なご助言をいただき，ここに厚くお礼申し上げます。さらに，本論の内容につき種々ご検討をいただき，適切なご助言をいただいた鳥取大学工学部 小野勇一助手に厚くお礼申し上げます。

また，このような機会を与えて頂きました中日本自動車短期大学 教授 高行男博士に深く感謝致します。

本研究の共同研究者として様々なご協力をいただきました鳥取大学大学院修了生 島岡俊行氏，吉田雅人氏ならびに甲田昌寛氏に深く感謝いたします。

終始温かく励ましていただきました中日本自動車短期大学の学長を初め皆様に深く感謝いたします。

## 発 表 論 文

題 目	発 表 雑 誌	共同研究者
電着銅薄膜による接触面圧計測法(第3報, 微小突起を有する薄膜による繰返し圧力の測定)	日本機械学会論文集(A 編), <b>68</b> —670(2002), 930—935	北岡征一郎
A Method of Measuring Contact Pressure of Cylinder Head Gasket	Small Engine Technology Conference & Exposition , SAE International , <b>32</b> — 0068(2004)	Ko, H.N Kitaoka, S T,Udagawa
Measurement of Contact Pressure by Electrodeposited Copper Foil (Measurement of Cyclic Pressure Using Grain Growth and Surface Roughness of Electrodeposited Copper Foil)	Review of Automotive Engineering JSAE , <b>26</b> — 3(2005), 327—333	Kitaoka, S