

光の反射特性を用いた固体間の接触状態測定法

打田元美

光の反射特性を用いた固体間の接触状態測定法

和 1253582

打田元美

目 次

1.	序 論	1
2.	表面粗さ変化を用いた圧力分布の測定	11
2.1	測定原理と基礎実験	11
2.1.1	緒言	11
2.1.2	測定原理および理論的考察	11
2.1.3	基礎実験	18
	(a) 反射光強度分布測定装置	18
	(b) 校正試験の方法	19
2.1.4	表面と反射光分布との関係	22
2.1.5	校正試験結果	23
2.1.6	圧力分布の測定	26
	(a) 測定方法	26
	(b) 圧力分布	27
2.1.7	本測定方法の適用性について	33
2.1.8	結言	34
2.2	圧力分布測定装置の開発	35
2.2.1	緒言	35
2.2.2	基礎実験	35
2.2.3	接触面圧力分布測定装置の試作	36
	(a) 接触面圧力分布測定装置	36
	(b) 校正試験結果	38
2.2.4	接触面圧力分布の測定	40
2.2.5	結言	44

2.3	表面腐食の効果	45
2.3.1	緒言	45
2.3.2	実験方法	45
2.3.3	腐食の効果	46
	(a) 研削面の表面反射特性	46
	(b) 腐食の方法	48
	(c) 腐食による表面の変化	48
	(d) 腐食後の表面反射特性	51
	(e) 研削面と腐食した面の接触前後の表面変化	53
2.3.4	接触面圧力分布測定	54
	(a) 測定装置及び測定方法	54
	(b) 接触面圧力分布測定例	54
2.3.5	結言	56
3.	移着油膜による接触面圧力分布測定法	57
3.1	緒言	57
3.2	測定原理	58
3.3	油膜厚さの設定と測定面の光反射特性	61
3.4	実験方法および校正試験	64
3.5	表面接触点の観察	65
3.6	圧力分布測定装置および測定結果	66
3.7	結言	72

4.	油の移着による表面形態の把握	73
4.1	緒言	73
4.2	表面形態の測定原理	75
4.3	油膜厚さの設定	76
4.4	各種仕上げ方法と表面接触状態	77
4.5	材料の組織と表面形態	83
4.6	負荷曲線の推測	89
4.7	結言	94
5.	結 論	95
	謝 辞	97
	参 考 文 献	98

第 1 章

序 論

工作機械のボルト結合部をはじめ，各種機械要素間の金属接触面における圧力分布は，結合部の剛性などに関連し，機械の挙動さらには工作精度に大きな影響を与える．また，表面あらさをもった各種接触面における接触状態，特に圧力分布を知ることは，摩擦，摩耗，潤滑および接触電気抵抗，熱伝導などの問題を考えるうえで重要である．したがって，古くから弾性体の接触応力を求める研究は，数多く行われてきた．

解析的には，Hertz⁽¹⁾の古典的な研究に始まり，以後，弾性論に基づき Bous-sinesq⁽²⁾，Sneddon⁽³⁾，Greenwood⁽⁴⁾らによって解かれてきたが，単純な形状についての軸対称，あるいは二次元問題といった非常に限られた場合の解しか求められていない．また最近では，電子計算機の発達に伴い，有限要素法⁽⁵⁾などを用いて，接触面の圧力分布を求める試みもなされているが，計算における境界条件の設定に問題があり，接触相手材の材料特性が決定できないような場合の圧力分布の算定はできないなどの問題点がある．

また，実験的に接触面の圧力分布を求める方法としては，これまでに各種の分野で工夫，開発されてきた．そのうち主なものとして，三次元光弾性法⁽⁶⁾，コースティックス実験法⁽⁷⁾⁽⁸⁾，超音波を使って反射波の強さから求める方法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾，埋め込みピンによる方法⁽¹¹⁾，感圧紙法⁽¹²⁾，表面粗さ変化を用いる方法⁽¹³⁾，⁽¹⁷⁾などの測定法が試みられているが，測定の簡便さや精度の点でまだ多くの問題が残されているようである．

そこで，これまで行われてきた各測定法を概観してみると以下のようなようである．

光弾性法は，ガラスやプラスチック等の等方質な透明体に力を加えるとき，光

学的な異方性を生じ、結晶体と同様に複屈折性を呈し、力を除くと再びもとの立方体にもどる。この一時的複屈折現象を利用して材料内部の応力を測定するものである（図 1-1 参照）。

この実験法は、本質的にはモデルによる実験であり、被測定物体の材料が特殊な光弾性材料に限られ、その機械的特性、特に弾性率、降伏条件などは実際に使用される材料のそれとは非常に異なるため、この方法で得られたデータを実際の材料の場合に適応するには問題がある。また、特別の実験装置が必要であり、三次元体の接触では試料をスライスするなど測定に非常に手数のかかるのも難点である。ただし、この方法は他の方法と異なり、接触境界面の圧力ばかりでなく、接触物体内部の種々の応力の分布状態をも知ることができる利点をもっている。

コースティックス実験法は、この方法に似たもので基本原理を図 1-2 に示す。これはクラックを有するエポキシ板のような透明な物体に光を入射させたものである。クラック近傍では著しい応力勾配が存在する。これは大きな屈折率の変化が生じていることを表す。光は一般に屈折率の変化がある所を通過すると進行方向が曲げられる。この現象を基本的原理として用いるものである。

この実験法は、金属のような不透明な材料にも適用できる特徴がある。これは厚さの変化によって生じる表面の変形を利用した表面反射によっても像が形成されることによる。この方法も光弾性法と同じようにモデルを用い実験に大変手間がかかる上、実際の三次元の接触に適応するには問題が多い。

超音波法の測定原理を図 1-3 に示す。これは接触部の真実接触面積が荷重により変化すると、それにより超音波の反射特性が変わることに着目した圧力測定法で、図に示すように真実接触面では、超音波は通りぬけることができるが、接触していないところでは反射される。この原理から反射される超音波の強さを測定することで圧力分布がもとめられる。実物の接触面を用い、その状態や性質をそのまま保持し、負荷状態のまま接触圧力の測定ができるという大きな利点を持っている。しかし、1回の測定で得られる接触圧力は検出器の直径程度の範囲（ $\phi 5 \sim 20$ ）か、超音波を絞る方法により $\phi 2 \sim 3$ の圧力の平均値が得られるもので測定対象の大きい場合には問題ないが、微小な接触部分あるいは圧力変化の

著しい部分の測定に適用できない。また、この方法は接触部の表面あらさや表面性状が測定値に大きな影響をおよぼすので、被測定物と全く同一の表面条件での較正実験があらかじめ必要である。そして現状では、定量的な圧力分布の測定には必ずしも精度が十分でなく、したがって定性的な接触パターンの測定に利用されている。

埋め込みピンの測定原理は、図 1-4 に示すように接触面の一部に穴を空けてピンを挿入し、そのピン部にかかる力を測定するものである。その方法はピンの中に歪計が入れてある構造になっている。負荷圧力によりピンが押され、その強さによりピンが圧縮歪を生じ、その際、歪計から出力される電気値から圧力を求めるものである。

この方法は主に塑性加工の圧延の分野で古くから盛んに使用されているが、精巧な実験装置を作る必要がある上、ピンと工具のピン穴のすきまやピンの突出し量の設定が難しく、測定精度や再現性に問題がある。また、測定のために工具にピン穴を設け、接触面の状態や性質（摩擦条件、剛性など）を変化させる上、その近傍で材料の変形を伴ってしまうので、特に弾性接触においては、本来求めようとする接触圧力を測定できない。さらに、ピンの径に相当する面積の圧力の平均値を求めているため、比較的広い接触部分の測定には適しているが、応力集中部などの圧力変化の激しい部分での測定には向かない。

感圧紙法の測定原理は、図 1-5 に示す様に、これは二枚のフィルムから構成されている。一枚目には発色剤が入ったマイクロカプセル構造の層になっており、もう一枚が顕色剤層になっている。これらの層がそれぞれ支持体の表面に均一に塗布されている。負荷圧力により発色剤の入ったカプセルが壊され、もう一枚の顕色剤が塗布されているフィルムとのあいだに酸性反応が起こり赤く発色するものである。

このフィルムを接触二物体間へ挿入して、実際に圧力が負荷された所だけに色が付く。この色の濃淡によって圧力の分布を知るものである。この方法は、圧力の分布を簡単に目で確かめることができる利点がある。しかし、二物体間にフィルム状の物体を挟むことにより、負荷された力が 0.1 mm 程度のフィルム状の物

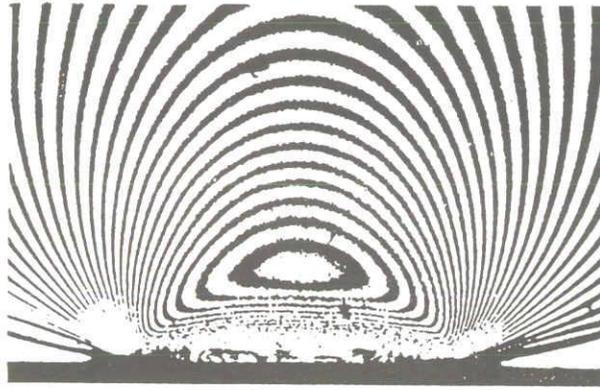


図 1-1 光弾性実験法

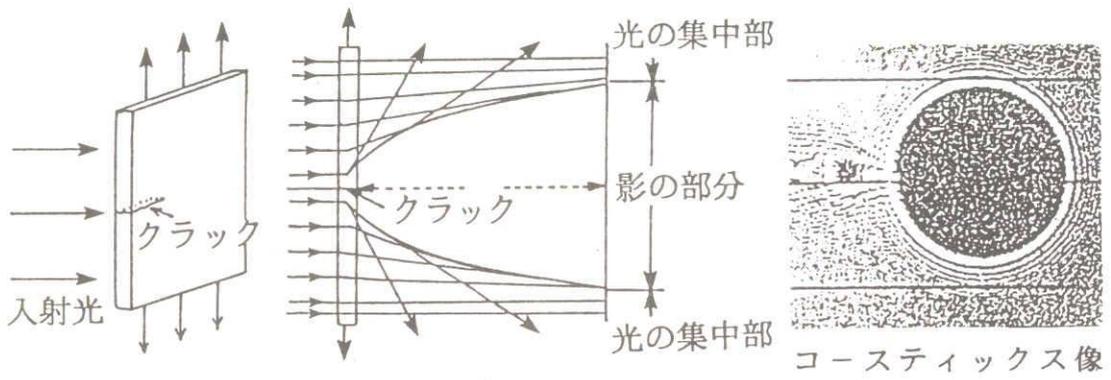


図 1-2 Caustics実験法

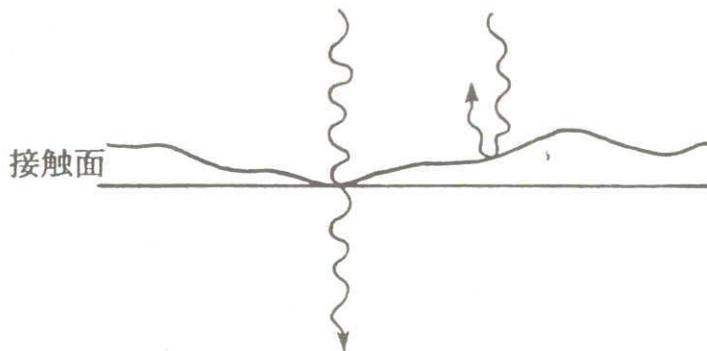


図 1-3 超音波法

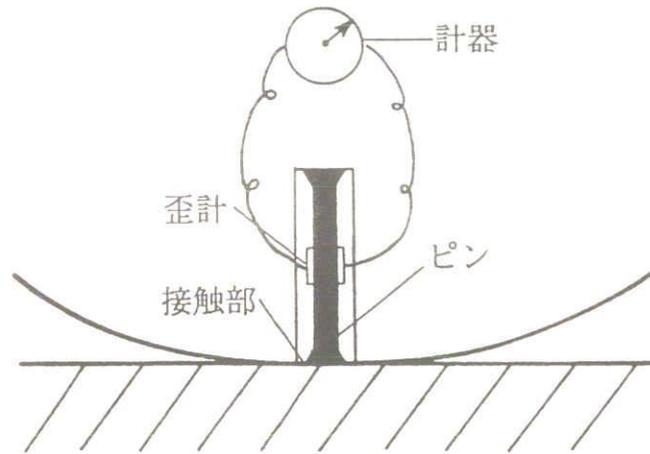
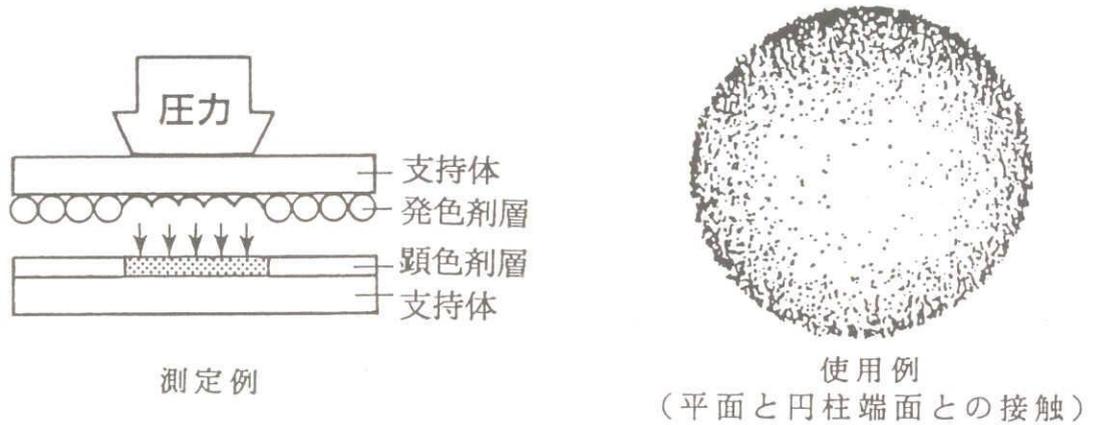


図 1-4 埋め込みピンによる方法



測定例

使用例
(平面と円柱端面との接触)

図 1-5 感圧紙法

を介して他方に伝わるため、実際の接触がそれにより乱されてしまうという大きな欠点がある。また、この方法は高压の測定には不適であり、定量的な測定には向かない。さらに、このフィルムにより、測定力の使用範囲が指定されており、実際に負荷される荷重をあらかじめ推定する必要があるなど問題が多い。

表面粗さ変化を用いる方法は、金属表面の微細突起が負荷圧力の大きさによって塑性変形し除荷後表面粗さが変わる。この接触前後の粗さの違いから表面に働いた圧力分布を求めるものである。この方法は表面の微細な突起をセンサーとしており突起の変形は圧力によって起こるものであり圧力が直接測定できるという

特徴がある。しかし、この方法は、統計量である粗さを測るという点に問題があり、これをさけるためには表面に規則的な三角形状粗さをつける必要があり、実物試験に応用することには問題が多かった。

一方、これら接触圧力分布を知る上で特に重要な、真実接触点の分布を実験的手法により明らかにする方法について過去の報告を調べてみた。しかし、その例は非常に少なく、そのうち主なものとして電気抵抗変化で知る方法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾、プリズムを用い光の反射で知る方法⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、先に述べたが超音波を用いる方法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、放射性物質を用いる方法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾、感圧箔による方法⁽²²⁾などがある。また、熱伝導を用いる方法なども考えられるが、この場合、多くは熱エネルギー的な見地から討論されているのが殆どであり、直接接触点の測定を問題にしているものではない。以下に、これらの測定原理を簡単に述べる。まず、電気抵抗変化で知る方法の原理を示したものが図 1-6 である。すなわち接触している部分のみに電流が流れ、この接触面積が小さくなるに従って電流が流れ難くなり電気抵抗が増すことを利用するものである。プリズムを用いる方法の原理を図1-7 に示す。プリズムと光透過性と物体との接触を考えた場合、接触している部分では、光は通過、あるいはその表面で散乱し、プリズムの入射角に対して90 度に反射される

光は減少する。しかし、接触していない部分では、光はそのまま全反射され殆ど

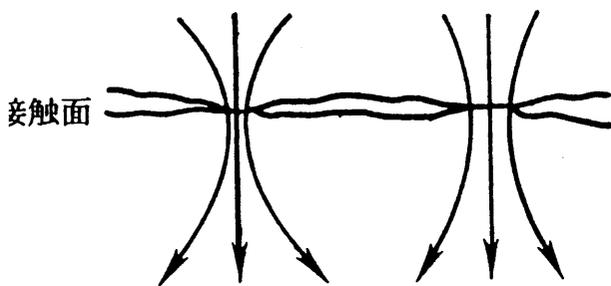


図 1-6 電気抵抗変化法

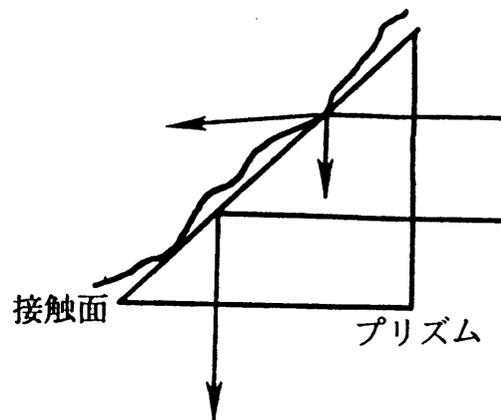


図 1-7 プリズムを用いる方法

ど減少しない。このことにより接触部を検出するものである。超音波を用いる方法は原理的には先に示したものと同様であるので省略する。放射性物質を用いる方法は、片方の面に放射性物質を塗り、もう一方の面に接触させると、接触した部分のみに放射性物質が付着する。この放射性物質を検出することにより接触部を知るものである。感圧箔による方法は、微視的な表面突起の押しつぶし現象を応用したものであり、原理的には先に示した表面粗さ法と類似したもので、主に塑性加工のような高い面圧における測定に用いられる。熱伝導を用いる方法については、接触していない部分と、接触部における接触面積の大小に応じて、その部分の熱伝導率が変化することを利用するものであることがうかがえられる。

これら接触点を求める方法は、殆どの場合、圧力分布の測定と深く関係し、その測定原理の長所、短所も先の圧力分布測定で述べた事柄と類似しているのが現状である。

そこで本研究では、表面の微小な突起が接触で塑性変形あるいは弾性変形をする性質を利用して、二固体間の接触の圧力分布を正確で、しかも簡単に測定しようとするものである。その原理は後に述べるが、すべて接触後の表面に残る接触点の様子を光の表面反射を用いてとらえ、それから圧力分布を求めるものであり、上述の特性をもった各種の測定法に比べて、大がかりな特別の実験装置を必要とせず、比較的簡単に接触圧力を測定することができる。また、これは光弾性法のような模型実験でなく、実際に使用される材質の物体そのものについて測定でき、しかもその物体表面にもともと存在する表面の微小突起を利用するので、埋め込みピン法のように圧力測定のために、なんらかの形で接触面の状態や性質を変化させることなく測定でき、また、光を使って表面形状変化を非接触でとらえ圧力を求めるものであるため測定の際、測定面に傷をつけることがないという長所をもつ。さらに、表面における比較的狭い部分の圧力測定が可能であるという特徴をもっている。

つぎに、本研究の概要について以下に述べる。

実際の金属表面を真に平らな面に仕上げることは非常に難しいことである。ど

んなに注意深くみがいた面でも、かなり大きな凹凸が残っている。このような面はごく軽い荷重をかけた場合でさえも、真実の接触点での圧力は非常に高いはずである。このような実際の金属二面が比較的軽荷重で接触するとき、金属の母材内部が弾性変形の状態であっても、接触面内に存在する表面の微小突起は負荷荷重に応じて塑性流動し、その先端に永久変形を残す。

まず一番目の測定方法として、その接触前後の表面の微細突起の形状変化が光の表面反射特性を変化させることを利用して表面形状変化をとらえ、圧力分布を求める手法を試みた。その結果、本方法で圧力分布が測定できることを明らかにした。

ついで二番目の方法として、接触二物体間の一方の表面に10nmオーダの油膜を塗布し、もう片方の面へ接触させると、その面に油が移着する。この移着油膜のある面を光の反射を利用してとらえることで、接触状態を把握できると共に、接触圧力分布が表面の仕上げ方法にかかわらず簡単に測定できる方法を提示する。

本論文に述べる研究内容を要約すると、以下のとおりである。

2章の 2.1 項 では、まず一番目の方法の測定原理について述べる。この実験では平坦な硬い表面と測定試料面を接触させる。接触後に微細突起が平坦化される接触面について、負荷された圧力と接触率 R （接触によって平坦化された割合）との関係から、圧力が求められることを理論的に検討すると共に、一般工業用に加工された面について、荷重の増加と反射光強度の分布を調べ、圧力と反射光強度との関係をもとめた検定試験より、圧力分布が求められることを示すと共に、本測定法の妥当性について述べる。

ついで 2.2 項では、先で述べた測定原理をもとに、簡単な方法で自動的に圧力分布が測定できる圧力分布測定装置の開発を目的とし、装置の試作を行った。

光源にはレーザ光を用い、まずラッピング仕上げされた面について圧力分布を測定した。

実際の測定にあたり不安定な要素を取り除くため、測定面から反射された反射光の分布特性を調べ、正反射方向の光の強度の増分と、正反射方向からの振れ角

θ における反射光強度の増分との比をとることを考察し、この比の値を得るために新たに割り算回路を作製した。また、試料を載せる載物台の動きは二次元運動を可能にし、送りはモータを用いて行った。そして、この装置で簡単に圧力分布が三次元表示できることを示すことができた。また、この装置を用い一般工業用における測定例をあげることによって、本測定法が実際の接触面に応用できることを確かめた。

2.3 項では、これまでの方法で研削面のように表面がバニッシュされ、強度の光沢を有する面などの測定において非常に難があった。そこでこれらの面について測定する方法を述べたものである。このような面について圧力分布を測定する方法の一つとして、腐食による表面処理を行う方法を試みた。その結果、強度の光沢を有する面でも腐食による表面処理を行うことで容易に圧力分布を測定することがわかった。そして、この手法を用いていろいろな接触面について圧力分布を測定し、それを三次元表示することで本手法を圧力分布測定法の一つとして確立することを示した。

3 章では、圧力分布を求める二番目の方法として、片方の面に nm オーダの極薄油膜を塗布し、もう一方のなめらかな面に接触させると、その面に油が移着する。この油が付着したところを光の反射を用いて検出し、その接触面積と圧力が比例することを実験により明らかにした。この結果を用いて圧力分布測定装置を試作し、ラップ、研削仕上げ面、また形状として平面、球との接触について測定できることを示した。このことより、本方法で仕上げ方法、形状に関係なく圧力分布が測定できることを明かにした。また、その他二、三の接触例についても測定できることを示した。

4 章は、油の平面への移着を利用し、この油が付着したところを光学的な方法で検出することにより、実際に圧力を伝える真実接触面の分布状況を簡単に把握できる方法を提示したものである。そして、ラップ面、研削面などの接触点の状況を示すと共にバフ研磨された面に金属組織の nm オーダの凹凸が浮き出ることを発見することができた。

第5章は、本論文の結論である。

以上により，提案した手法が接触する二物体間の接触圧力分布を測定する方法として、第5章に述べてあるような従来の手法にない優れた手段となることを明らかにした。

第 2 章

表面粗さ変化を用いた圧力分布測定法

2.1 測定原理と基礎実験

2.1.1 緒言

接触前後の表面粗さの変化から接触圧力を測定する方法として、過去に表面粗さ法^{(13)～(17)}が行われている。この方法は接触前の表面粗さと接触後の表面粗さの違いから表面に働いた圧力分布を求めるものである。しかし、この方法では表面に規則的な三角形状粗さをつける必要があるなどの制約が多く、特に研削面やラップ面には適用できなかった。精密な機械要素の接触面の多くは、研削面であることを考えると、実物試験に応用するには大変難がある。

本章では、接触前後の表面の微細突起の変化が光の表面散乱反射特性を変化させることを利用して表面形状をとらえ、圧力分布を求める新しい方法をを試みたもので、極めて簡便で、精度よく圧力分布が測定できることが明らかにされたので、その測定方法について述べる。

2.1.2 測定原理および理論的考察

いま一方が硬さが大きく平滑な表面を持ち、他方が硬さが小さくある粗さを持った金属表面の接触を考える。負荷状態のとき、接触荷重は突起先端のみを通して一方から他方に伝えられるため、接触点の圧力は突起の降伏応力に達していると考えられる。このため図 2-1(a) に示すように、硬さの小さいほうの母材が弾性変形状態にあっても、表面の突起の先端は降伏応力 p_{11} (ほぼ硬さ値 H_1 と考

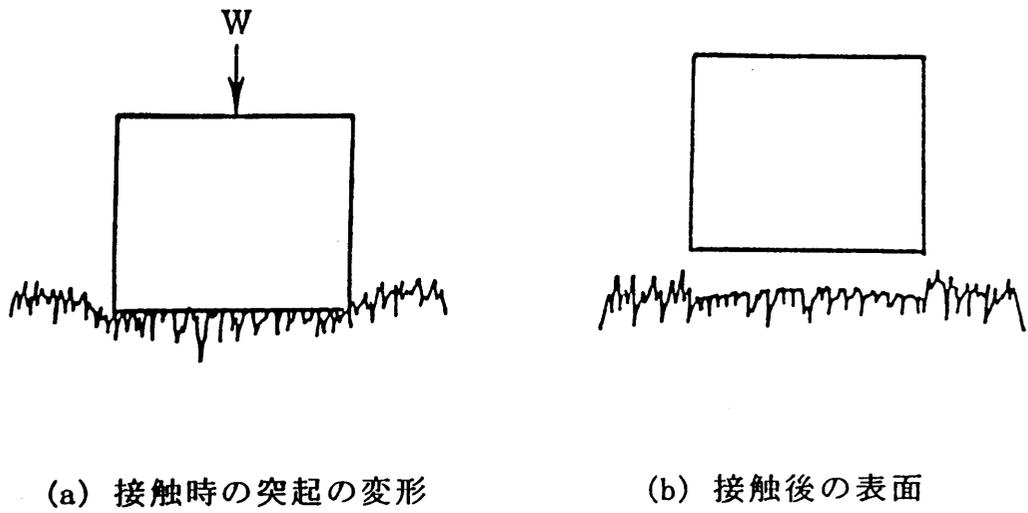


図 2-1 表面状態

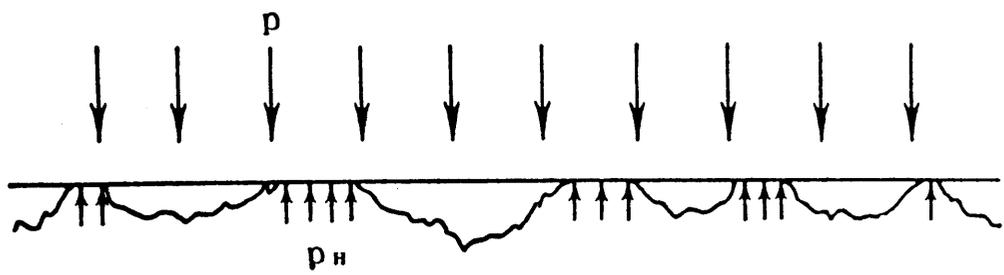


図 2-2 表面の応力状態

えてよい) に達して塑性変形する。一方、除荷後における表面は図 2-1(b) に示すように母材は弾性回復するが、表面の突起には永久変形が残る。このとき硬さの大きい方の表面が十分滑らかであれば、突起の先端のつぶれた部分にはその平滑面が写しとられる。すなわち、作用した荷重に応じて表面あらさは修正され、その分、表面粗さ形状の中で平滑な面によって構成される部分が多くなると考えることができる。この平滑面の面積に占める割合は、作用する荷重に比例するはずであるから、その面積率（以降これを接触率 R と呼ぶことにする）を測定することにより逆に、作用した圧力が測定できることになる。この関係を図 2-2 に参

照して式で表せば、圧力 p は

$$P = R \cdot P_H \quad (2-1)$$

で表されることになる。

本研究では、この接触率 R を表面反射特性から求めようとするものである。以下にその方法について説明する。

図 2-3(a) のような初期粗さをもつ面が接触後、表面先端が押しつぶされて、図 2-3(b) のような面になったとする。双方の面に光を照射した場合、初期粗さの面では図 2-3(a) に示すように光は広角度にわたり反射される。しかし、接触後の面を見ると、表面粗さが変化していない部分では接触前と同様に光は広角度に反射するが、接触によって表面粗さが平滑になった部分は図 2-3(b) に示すように正反射の方向に集中して反射される。この光の反射分布を測定してやれば、塑性変形した部分の面積すなわち接触率を求めることができる。

いま、初期表面に照射した光の反射光強度の正反射方向に対する角度 θ に関する分布を $q(\theta)$ とする。

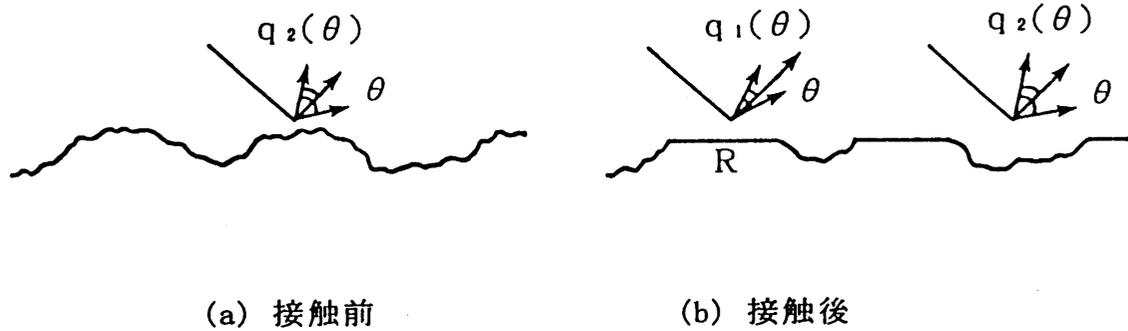


図 2-3 接触前後の光の反射

ここで、 $q(\theta)$ はガウス分布に従うと仮定する。平滑な接触面からの反射分布を $q_1(\theta)$ とし、初期表面粗さ部分からの反射分散を $q_2(\theta)$ とすると、これらは以下のように表される。

$$q_1(\theta) = \frac{SRI\varepsilon}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\theta^2/2\sigma_1^2} \quad (2-2)$$

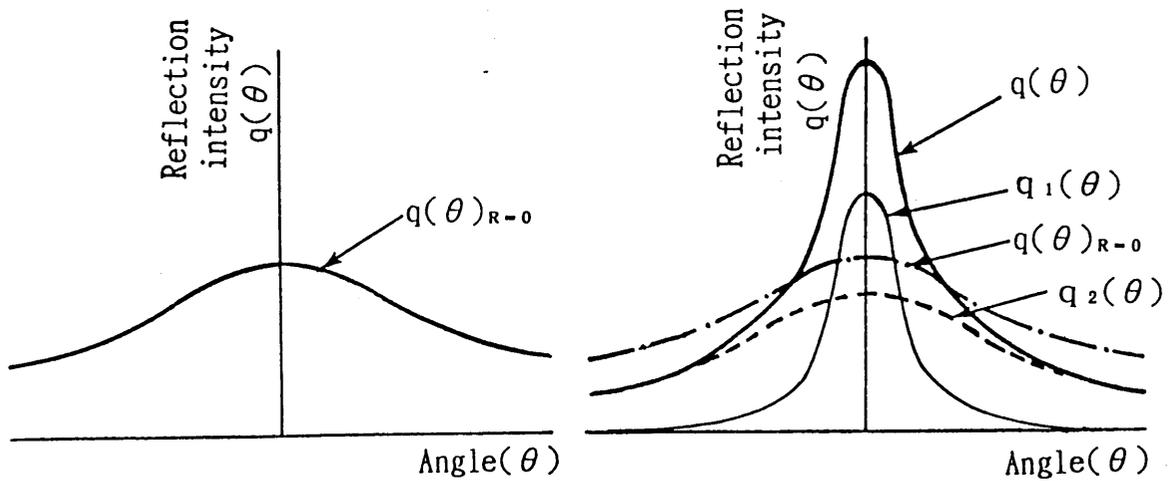
$$q_2(\theta) = \frac{S(1-R)I\varepsilon}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\theta^2/2\sigma_2^2} \quad (2-3)$$

S : 照射面積, ε : 反射率, I : 単位面積への入射光強度

σ_1, σ_2 : 表面粗さによって定まる定数

したがって接触後の表面の反射光の分布特性は、

$$\begin{aligned}
 q(\theta) &= q_1(\theta) + q_2(\theta) \\
 &= \frac{SRI\varepsilon}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{S(1-R)I\varepsilon}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_2^2}}
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$



(a) 接触前

(b) 接触後

図 2-4 接触前後の反射光強度分布

で表される。この関係を示したのが図 2-4 である。すなわち、 $R=0$ で表される接触前の反射光の分布特性は式 (2-4) の第 2 項で、またその反射光強度の分布を図で表すと図 2-4(a) のようになる。接触後は式 (2-4) の第 1 項 $q_1(\theta)$ と第 2 項の $q_2(\theta)$ の和として図 2-4(b) のように表され、その反射光強度の分布は中央で高くなる傾向を示す。

いま、式 (2-1) のように R は負荷に比例して増加すると仮定し、負荷の前と後で正反射光強度の増分 $\Delta q(0)$ は

$$\begin{aligned} \Delta q(0) &= q(0)_R - q(0)_{R=0} \\ &= \frac{SRI\varepsilon}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} + \frac{S(1-R)I\varepsilon}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} - \frac{SI\varepsilon}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} \\ &= \frac{SI\varepsilon}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) R \\ &= \frac{SI\varepsilon}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) \frac{P}{P_H} \end{aligned}$$

(2-5)

で表される。 R は圧力に比例するので正反射方向の反射光強度の増分 $\Delta q(0)$ を測定すれば圧力 p の大きさが求められることになる。ただし係数には S 、 I および ε が含まれており、これらは光源の強さの変動、あるいは表面の汚れやくもりなどによって著しく変動することにより、測定がみだされる恐れがある。

そこで、第二の方法として正反射光強度 $q(0)$ と任意のある定められた角度 θ_1 における反射光強度 $q(\theta_1)$ との比をとり、負荷前後の $q(0)/q(\theta_1)$ の増分を考えると、

$$\begin{aligned} \Delta \left\{ \frac{q(0)}{q(\theta_1)} \right\} &= \frac{q(0)_R}{q(\theta_1)_R} - \frac{q(0)_{R=0}}{q(\theta_1)_{R=0}} \\ &= \frac{R \{ 1 - e^{-\frac{\theta_1^2}{2} (1/\sigma_2^2 - 1/\sigma_1^2)} \}}{R e^{-\frac{\theta_1^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} (1-R) e^{-\frac{\theta_1^2}{2\sigma_2^2}}} \end{aligned} \quad (2-6)$$

で表される。また、初期粗さに比べ接触後の粗さは非常に小さいので $\sigma_1 \ll \sigma_2$ と考えることができる。また θ_1 を $\sigma_1 \ll \theta_1$ にとれば、式 (6) は

$$\Delta \left\{ \frac{q(0)}{q(\theta_1)} \right\} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} e^{\frac{\theta_1^2}{2\sigma_2^2}} \frac{R}{1-R} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} e^{\frac{\theta_1^2}{2\sigma_2^2}} \frac{p}{p_H - p} \quad (2-7)$$

と表すことができる。ここで、もし $p \ll p_H$ のような条件の場合には

$$\Delta \left\{ \frac{q(0)}{q(\theta_1)} \right\} = \frac{\sigma_2}{p_H \sigma_1} e^{\frac{\theta_1^2}{2\sigma_2^2}} \cdot p \quad (2-8)$$

となる。R は圧力に比例するので、正反射方向と任意のある定められた角度方向の反射光強度との比の増分 $\Delta \{q(0)/q(\theta_1)\}$ を測定すれば、式 (2-7) 又は式 (2-8) で示されるように p と $\Delta \{q(0)/q(\theta_1)\}$ は、一対一で対応するので圧力の大きさが求められることになる。この式には、係数の S, I および ϵ が含ま

れていないため、 $\Delta\{q(0)/q(\theta_1)\}$ を用いると、光源の変動や反射率には無関係に圧力が求められることになる。

本章では、この原理を用いて接触面圧力分布を求めることにする。

2.1.3 基礎実験

(a) 反射光強度分布測定装置

本実験における反射光分布の測定には、微小スポットに絞りがやすく、しかも明るい部屋でも計測できるようにレーザ光を用いた。その装置の概要を図 2-5 に示す。

光源の He-Neレーザ装置（出力：20 mW）から発せられたレーザ光（波長：633 nm）は絞りで直径 1 mm に絞られ、ミラーによって反射され、試料の測定面に照射される。測定面からの反射光はフォトダイオード（浜松フォトニクス，G-1117）に入り光電変換され、反射光強度は電圧計（mV）において電圧値として表される。正反射方向からの振れ角 θ の方向の反射光強度の測定は、測定点を中心としてフォトダイオードを回転させることにより行う。

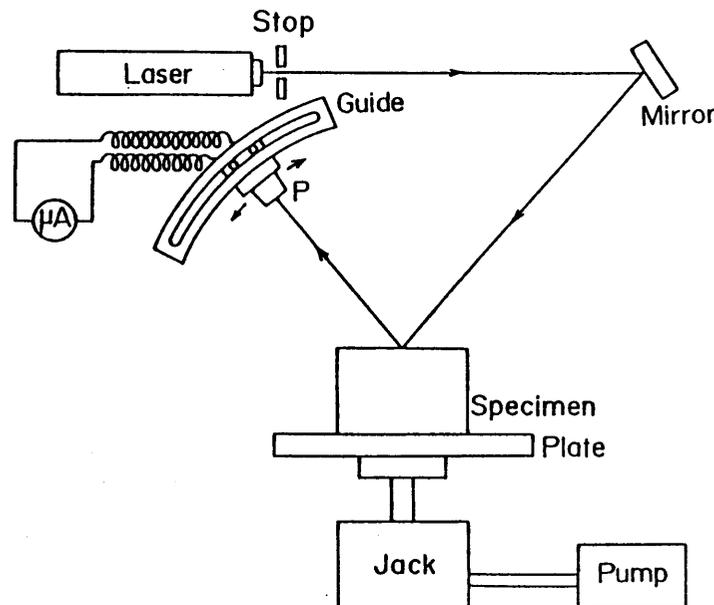


図 2-5 反射光強度分布測定装置

(b) 校正試験の方法

一定の面圧を加えたとき表面の接触率を前述の方法で測定し、圧力と $\Delta\{q(0)/q(\theta_1)\}$ の関係を求める。使用する表面は、工業的に使われているいろいろの仕上げ面を用いて行うとよいが、その代表的なものとして、ほぼランダムな面であるブラスト仕上げ面とラップ仕上げ面、それと方向性をもつ面である研削仕上げ面、およびペーパー仕上げ面の4種類を選んで用いた。これらの表面に一樣な圧力を加えるため、硬い滑らかな圧子と上記試料端面を同じ形状の円柱に作製し、その端面を押しつけて圧力を加えた。圧子と試料の諸元を表 2-1 に示す。

実験に用いた圧子の表面は、#8000 GC の砥粒でラッピングして表面粗さ $R_a = 0.052 \mu\text{m}$ 程度の平滑な表面に仕上げた。

また、試料の表面仕上げ方法について述べると、ブラスト仕上げは、#240 WA 砥粒を 490 kPa (500 kgf/mm^2) の噴射空気圧で約 20 cm の距離から数十秒吹きつけるという加工を3回繰り返すことにより均一な粗さの面に仕上げた。ラップ仕上げ面は、#320 WA 砥粒を用いて湿式法により鑄鉄製定盤の上でランダムな方向にラッピングを行い均一な粗さの面に仕上げた。研削仕上げ面は、#60 WA 砥石で平面研削をして仕上げた。ペーパー仕上げ面は、#240 GC 耐水研磨紙を定盤の上に置き、一方向に湿式研磨して仕上げた。図 2-6 および図 2-7 に圧子と試料の表面粗さ形状を示す。

表 2-1 圧子と試料

	Indentor	Specimen
Size	$\phi 40 \times 40 \text{ (mm)}$	$\phi 40 \times 40 \text{ (mm)}$
Material	SKD (Quenching)	S55C
Hardness(HV)	570	230

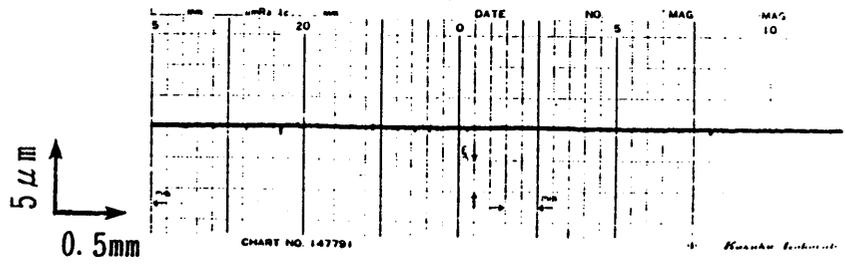
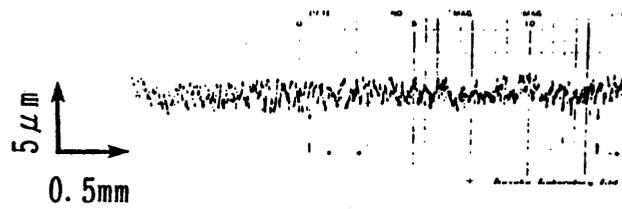
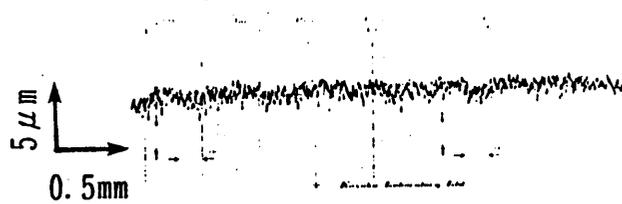


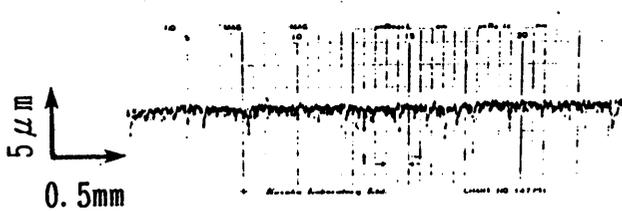
図 2-6 圧子の表面粗さ



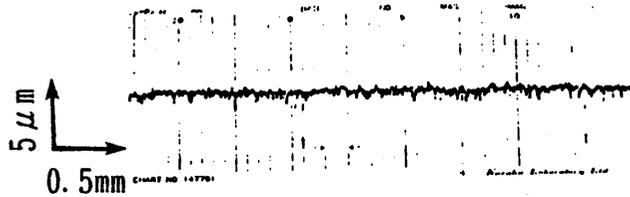
(a) サンドブラスト仕上げ面



(b) ラップ仕上げ面



(c) 平面研削仕上げ面



(d) サンド・ペーパー仕上げ面

図 2-7 試料の表面粗さ

図 2-8 に加圧方法の概略図を示す。負荷は油圧式圧縮試験機〔東京衡機製造所製、最大荷重 1.96 MN (2,000,000 kgf)〕によって静的に行った。等しい径をもつ円柱の圧子と試料とを接触させ、圧縮荷重をかければ接触面の巨視的圧力、すなわち見かけの圧力は外端部から中心部にかけて、ほぼ一定値をとると考えられる。このような方法で圧力 p をさまざまに変化させ、表面反射光分布の測定は試料面上の各所で行った。

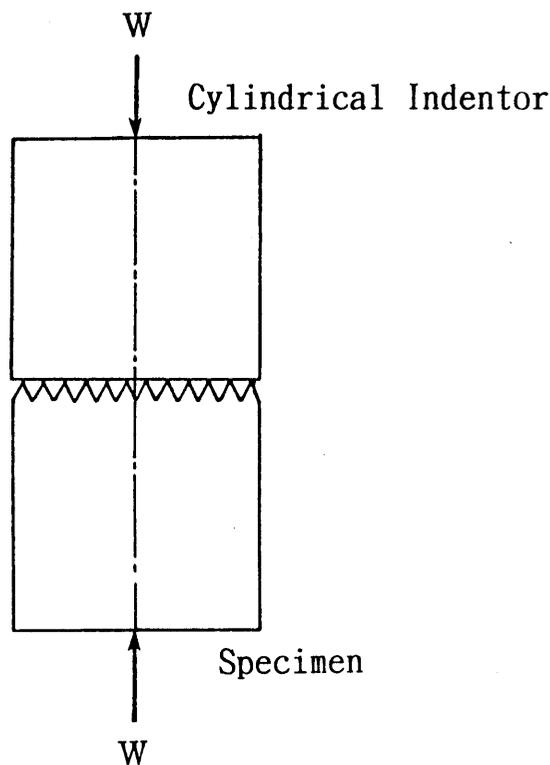


図 2-8 校正試験方法の概略

2.1.4 表面と反射光分布との関係

まず、反射光が各方向にどのように分布するかについて調べてみた。この実験では、試料面に 0, 156, 312 MPa および 468 MPa の四種類の圧力を負荷した。そして負荷された表面の反射光強度分布を測定した。

荷重を加えたときの表面粗さ形状変化の様子を図 2-9 に示す。この場合、面はラップ仕上げ面である。荷重の増加につれて突起先端のつぶれ量が増して、表面粗さはそれとともに減少している。

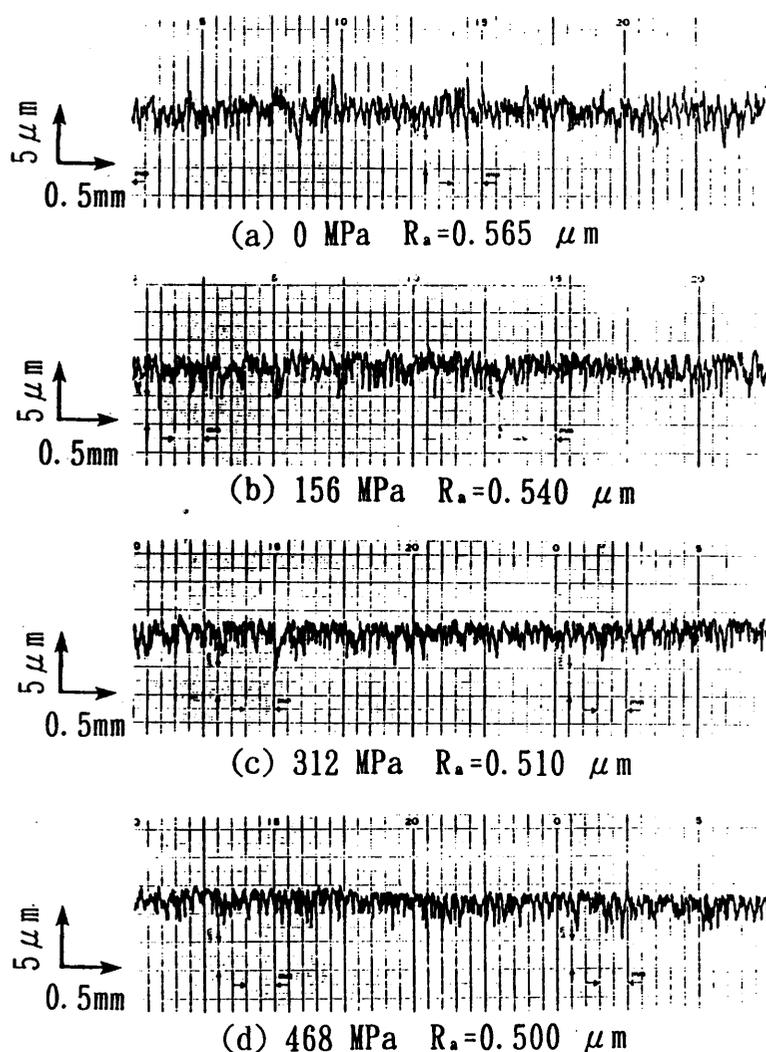


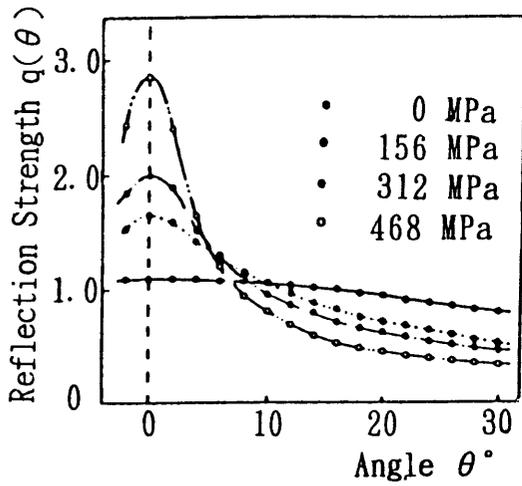
図 2-9 ラップ仕上げ面における形状変化

これらの面について、反射光強度分布を測定した結果が図 2-10 である。この図において、横軸は反射光の正反射方向に対する角度を示す。正反射方向に対して片側だけ示したのは、反対方向へもほぼ同じ特性を示したからである。縦軸は、各方向への反射光強度に応じてフォトダイオードによって光電変換された電圧の大きさを表す。図 2-10 を見て明らかなように、無荷重状態すなわち初期粗さ状態では反射光の分布は広く分布するが、荷重が増すにつれて正反射方向、すなわち $\theta = 0$ の反射光強度が増加し、逆に正反射方向よりずれた方向への反射光強度は減少している。これらの面のうち、ランダムな表面粗さ形状をもつプラスト仕上げ面、ラップ仕上げ面は、先の理論的検討で示した式に非常に近い形になっていることがわかる。表面粗さ形状において方向性をもつ研削仕上げ面およびペーパー仕上げ面の測定においては、仕上げ方向と直角な面内で求めたものである。この場合も、その分布はやはり先に仮定した式でよく表されることがわかる。しかしながら仕上げ方向に沿った測定においては、表面がバニッシュされ、これによる光沢の影響を受け易いことが考えられ、本方法では、このような方向性をもつ面を測定するには少し難がある。

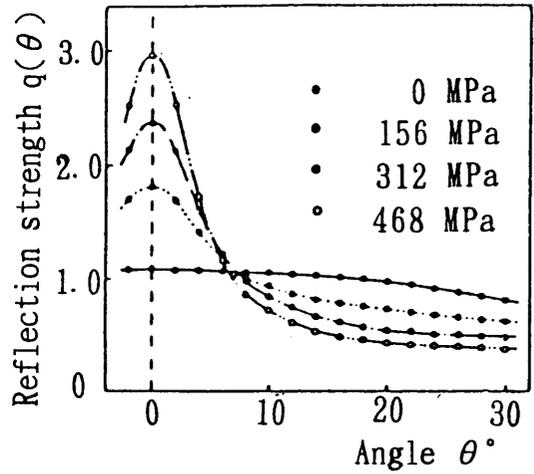
2.1.5 校正試験結果

圧力と先の理論で示した $\Delta \{q(0)/q(\theta_1)\}$ の関係を求める。 θ_1 は大きすぎると $q(\theta_1)$ の値が小さいために誤差が入りやすくなり、逆に θ_1 が小さすぎると、 $q(\theta_1)$ と $q(0)$ の差が小さくなってしまふ。そのため、本章では θ_1 として 図 2-10 における反射光の分布曲線が交わる近辺の値が経験的に最も適していると考えられたので、以後 θ_1 として 8° を用いることにした。

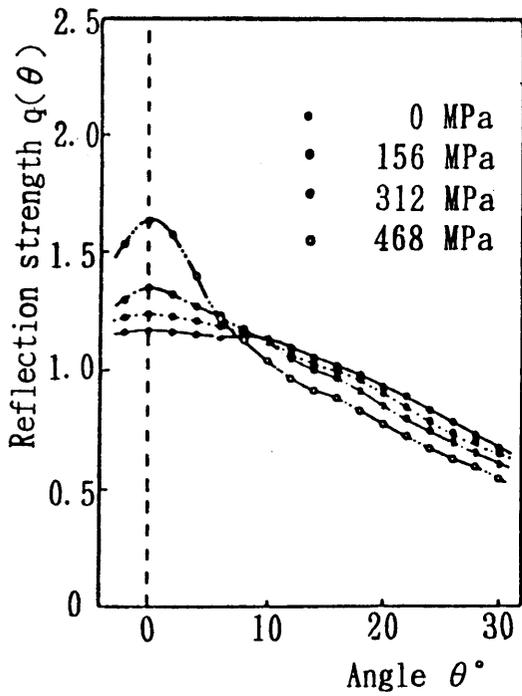
この方向における反射光強度と正反射光強度との比を測定し、その結果を図 2-11 に校正曲線として示す。この図の横軸は、圧力 p を試料の降伏応力 p_H で割って無次元化した値であり、縦軸は、前述の反射光強度の比を示す。図 2-11 から、圧力 p/p_H と反射光強度の比 $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ の関係は、先の式で予想されたように、ほぼ直線とみなすことができるような一つの曲線で示されることがわか



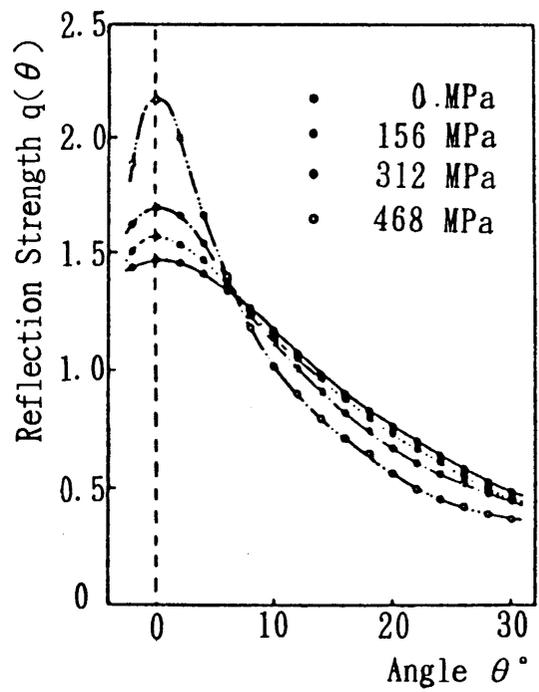
(a) サンドブラスト仕上げ面



(b) ラップ仕上げ面

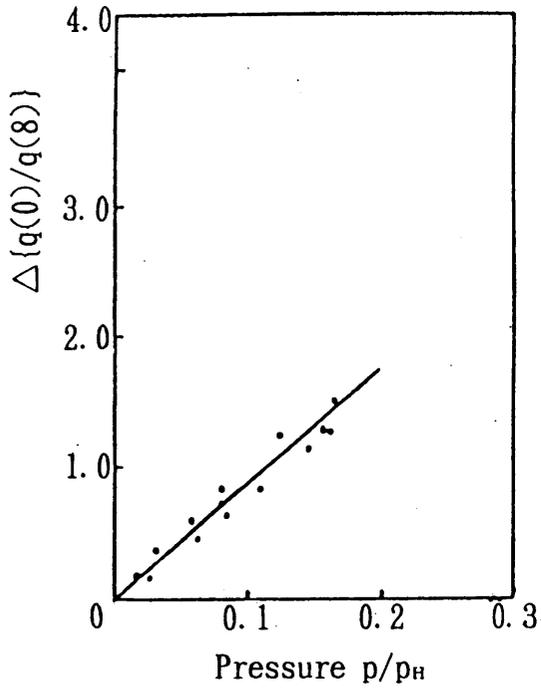


(c) 平面研削仕上げ面

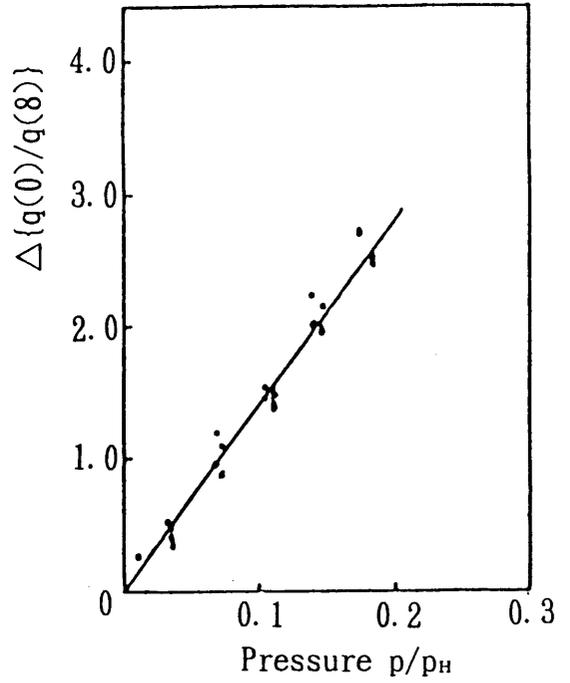


(d) サンド・ペーパー仕上げ面

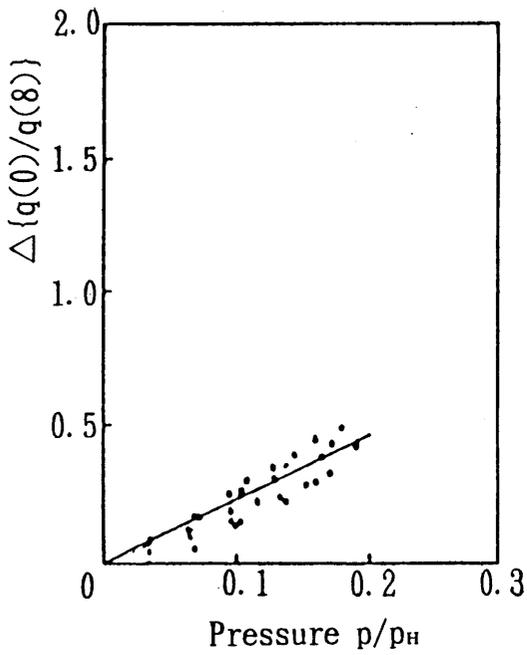
図 2-10 反射光強度分布



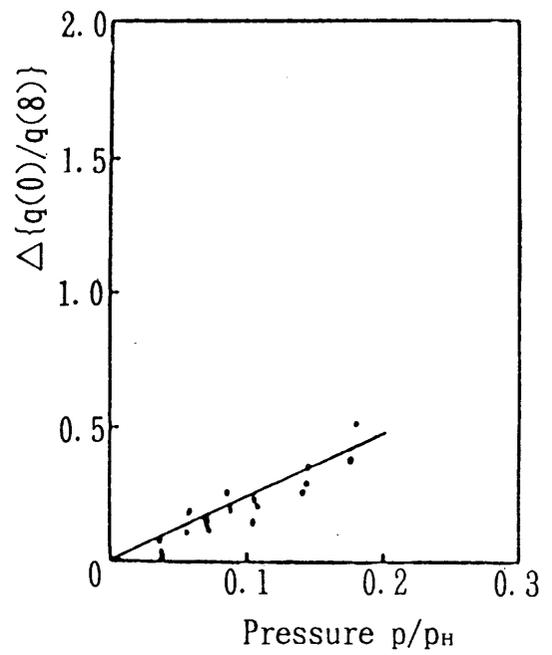
(a) サンドブラスト仕上げ面



(b) ラップ仕上げ面



(c) 平面研削仕上げ面



(d) サンド・ペーパー仕上げ面

図 2-11 $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ と p/p_H との関係

った。次項では、これらの曲線を使って実際の圧力分布を求める。

2.1.6 圧力分布の測定

(a) 測定方法

本章では実際の接触の代表として、図 2-12 のように十分大きい径と高さをもつ試料面に、円柱圧子および球圧子を接触させて圧縮荷重をかけ、接触面の圧力分布を求めた。円柱圧子と球圧子を用いたのは、これらの接触は実際の接触の典型的な形であり、これらの接触面の圧力分布を測定できれば他のいろいろな接触においても圧力分布が測定できると考えられるからである。

使用した円柱圧子と試料の諸元は、先の基礎実験で示したものと同一である。球圧子の材質は SKD で、焼き入れ（ビッカース硬度 $H_v = 750$ ）をしたものを用いた。その表面形状（曲率 $R = 1600$ ）を図 2-13 に示す。

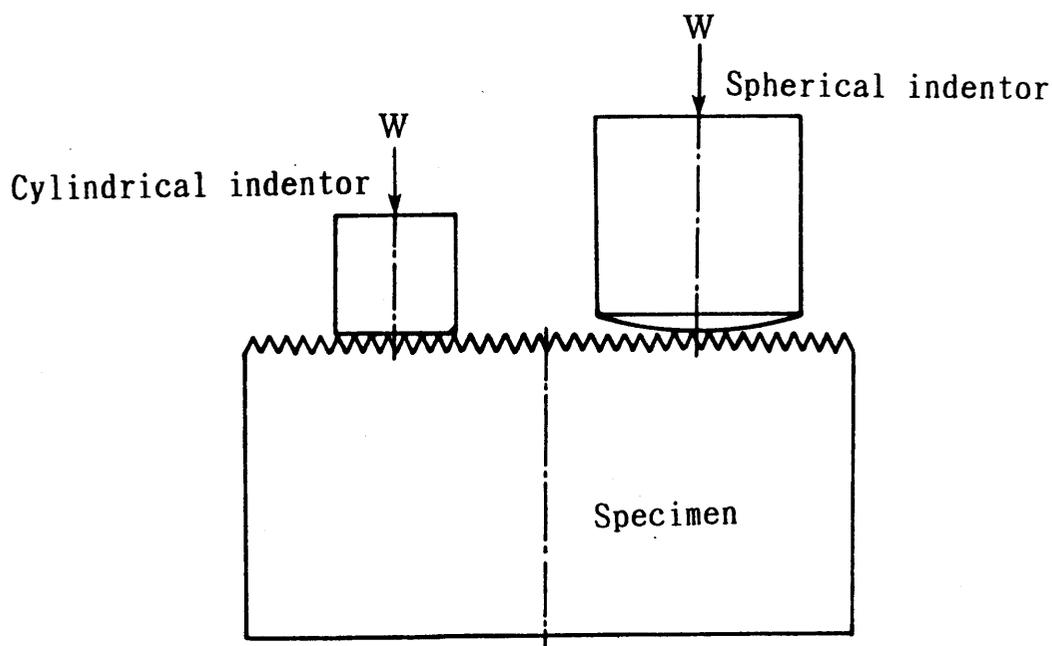


図 2-12 実験方法の概略

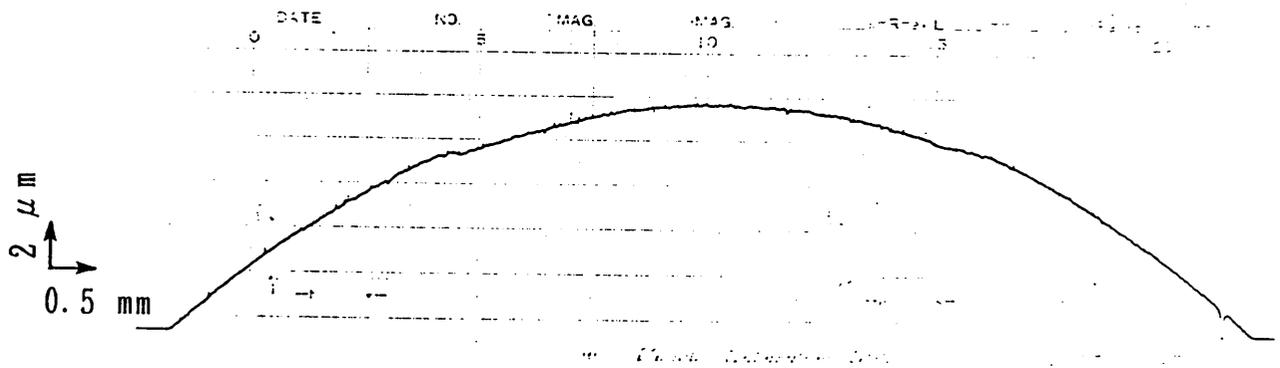


図 2-13 球圧子の形状

試料の端面を、ラップ仕上げ、研削仕上げおよび旋削仕上げの三種類の仕上げをした面について実験した。

(b) 圧力分布

まず、上述した仕上げ面と円柱圧子とを接触させて圧力分布を求めた。荷重は、392 kN (40,000 kgf) であり、平均の圧力は、312 MPa である。接触後の表面粗さ形状の変化を半径方向に測定したものの一例を図 2-14 に挙げた。この場合、面はラップ仕上げ面である。

この図より、接触面の中心部はあまり変形していないが、外端部に近づくにつれ、急激に変形が大きくなっている様子がよくわかる。

次に、それぞれの試料面についての反射光強度の比 $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ を各半径について測定した。これを前項で求めた校正曲線を用いて圧力分布を求めると、図

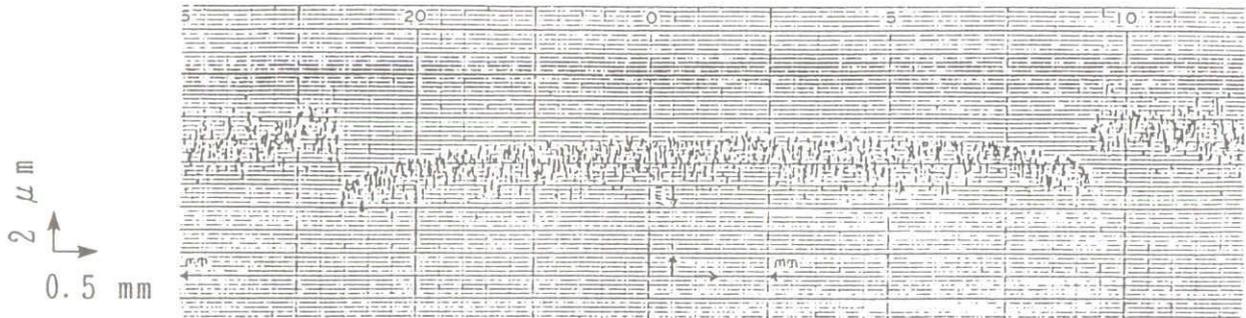
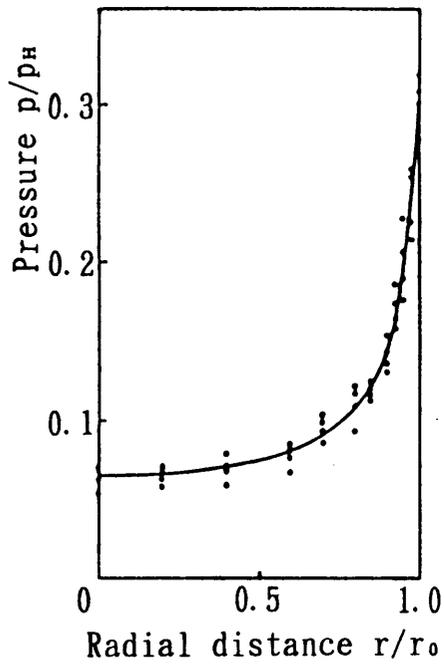


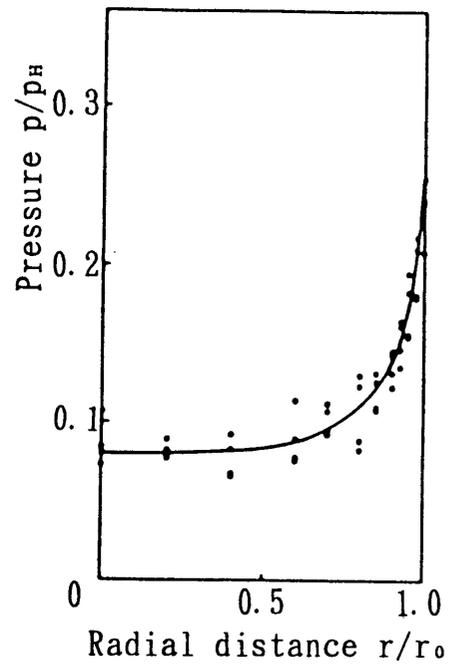
図 2-14 旋削仕上げ面の形状変化

2-15 になる。この図の横軸は、中心からの半径上の距離を無次元で表示し、縦軸は、校正曲線によって求めた圧力/降伏応力の値である。この図から明らかなように、圧力の変化は中心部では小さく、周辺部にいくにしたがって急激に大きくなっていて、応力集中が顕著に存在している様子がよく測定されている。

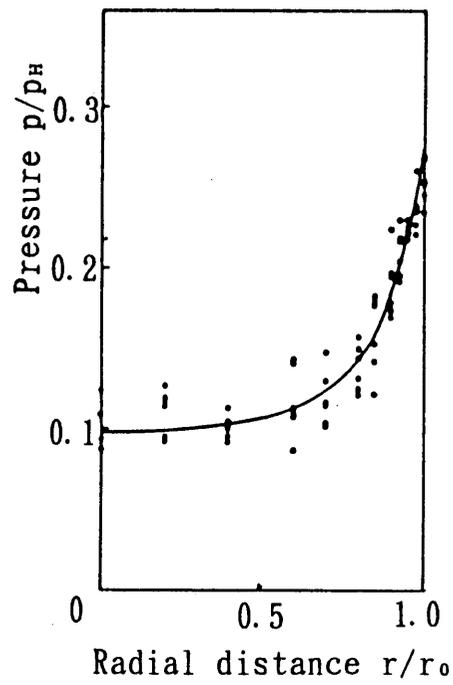
さて、この結果を剛体円柱の端面と半無限大の接触における Boussinesq の式⁽²⁾と比較してみる。Boussinesq の式は、 $p/p_m = 1/2\sqrt{1-(r/r_0)^2}$ で表され、ここで p_m は円柱圧子に作用する平均圧力である。 r_0 は円柱圧子の半径である。図 2-16 にその結果を示す。この図には、本実験によって求められた三種類の値の平均値と、過去に行われた方法、すなわち表面粗さの変化量から圧力分布を求める方法^{(13)~(16)} (Roughness method)、および滑らかな表面に散布された粉体によってつけられた圧痕の大きさから圧力を求める方法⁽¹⁷⁾ (Powder method) の結果とを比較したものである。本実験の結果によると Boussinesq の値を比較すると大略において、よく一致している。しかし、周辺部で多少差異が生ずる。この差異は、Boussinesq の式では、円柱圧子を剛体と仮定しているのに対し、実



(a) ラップ仕上げ面



(b) 平面研削仕上げ面



(c) 旋削仕上げ面

図 2-15 圧力分布曲線

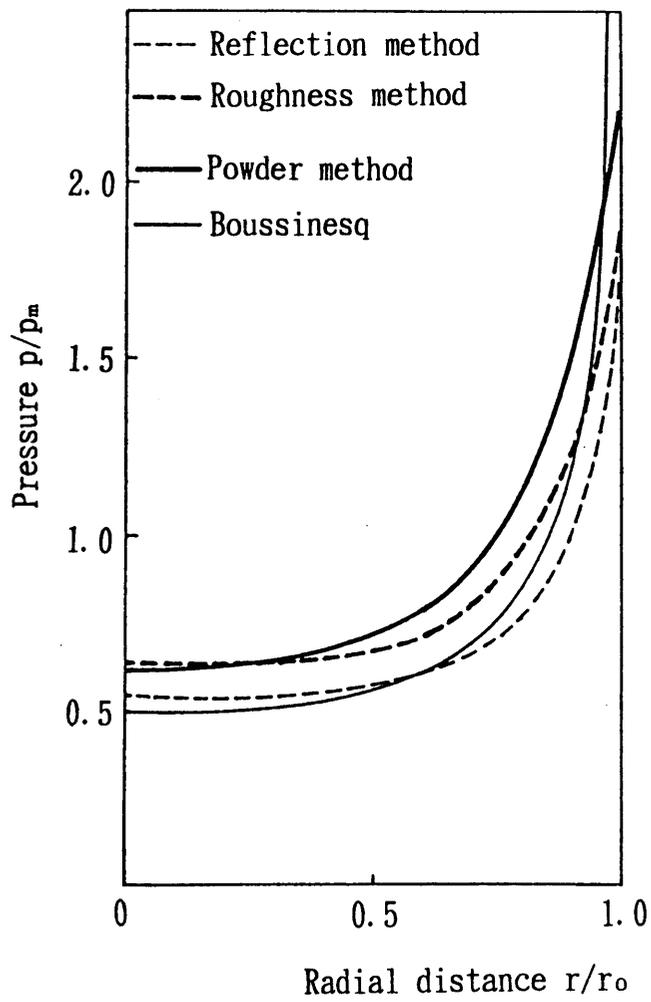


图 2-16 压力分布曲线

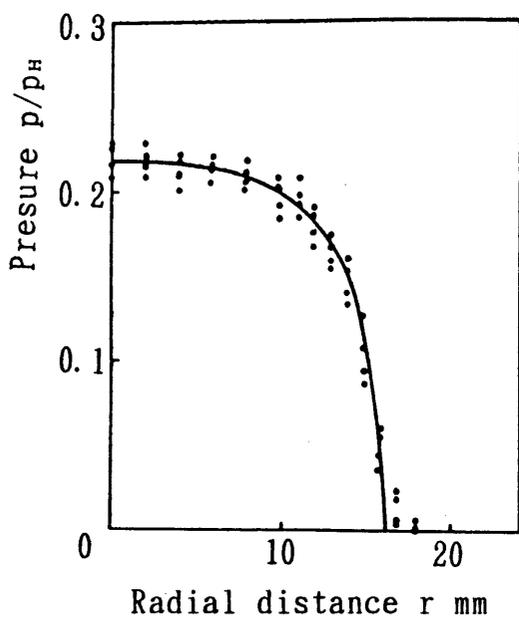
際は弾性体であること、ならびに、わずかであるが表面粗さ変化が実際にかかる圧力を緩和することの2点が原因するものと考えられる。

次に、他の二方法によって得られた結果と比較すると、本実験のほうが Bous-sinesq の値に近くなっている。

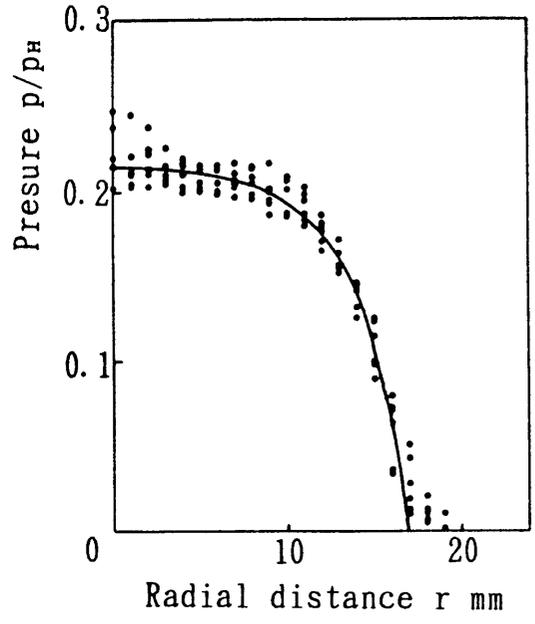
次に、球圧子と平面との接触における圧力分布を求めてみた。荷重は、392 kN {40,000 kgf} である。図 2-17は、その結果である。これを Hertz の式と比較してみる。Hertz の式は、 $r^* = 1.11(WR/E)^{1/3}$ 、 $p^* = 1.5W/\pi r^{*2}$ 、ここで、 r^* は接触半径、 p^* は接触円の中心における最大圧力である。実験による結果を Hertz と比較するために、接触円の中心からの距離 r と圧力 p をそれぞれ r^* と p^* に対する比で無次元化し、圧力分布を示したのが図 2-18 である。圧力は当然、接触円の中心部で高く、周辺部にいくに従って減少しており、また、その曲線の傾向は大略において一致している。しかし、最大圧力は測定値のほうが幾分小さな値をとっており、また、接触面積はわずかだが大きくなっている。このずれの原因は、実験に用いた面は両方とも表面がなめらかでないため、突起の先端が塑性変形し、その分だけ平面の突起底部の母材の弾性変形量が減少し、圧力を緩和したためである。しかしながら、注意しなければならないのは、この実験で得られる圧力分布は平面と円柱端面の接触にしる、平面と球の接触にしても、表面に突起の存在する実際の接触面の圧力分布を正確に表しているものであるということである。

一方、粗さのない理想平面と比較する立場にたって実験を検討した場合でも、現実に球面と平面の接触で本実験で用いた表面粗さは、 $\phi 16$ の球での接触でいえば、 $0.025 \mu\text{m}$ の粗さをもった表面の接触を扱ったことに相当し、このような粗さ以上の表面は工業上、ほとんど使用されていない。したがって、実際の圧力分布は Hertz のような分布をせず、本実験で測定されるような圧力分布をしているものと考えられる。

以上のことより、円柱圧子および球圧子を用いた実験を通して、本測定法は十分な精度で接触面の圧力分布を測定できるものと考えられる。



(a) ラップ仕上げ面



(b) 平面研削仕上げ面

図 2-17 圧力分布曲線

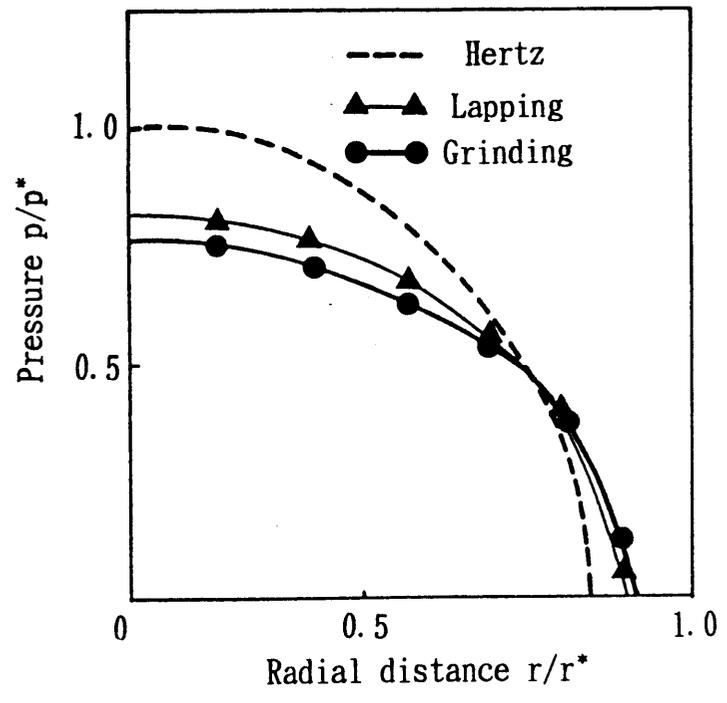


図 2-18 圧力分布曲線

2.1.7 本測定方法の適用性について

測定可能な負荷圧力は、反射光強度の比の増分 $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ と、圧力との比例関係を示した図 2-11 より $p/p_H = 0 \sim 0.2$ の範囲において測定できることがわかる。また、図より、圧力が $p/p_H > 0.2$ の場合においては比例関係にならない。もし比例関係がなりたたない場合、校正試験さえ行えば、この方法で $p/p_H > 0.2$ においても適用することができる。もし、試料の降伏応力 p_H が $p/p_H > 1/3$ の条件下では、試料は塑性変形してしまう。このような場合の圧力を測定するには、図 2-19 に示すような形状のテストシートを使用することを提案する。

すなわちテストシートは、試料より硬く強い材料を使い、そのシート上に表面粗さをつけておく。すると圧子により試料が塑性変形してもテストシートは全体として塑性変形せず、表面粗さの突起部のみ圧力分布に応じて塑性変形が残る。このテストシート上の表面突起の変化を先のレーザ光を用いて測定すればバルクが塑性変形する増分の端面の圧力分布が測定できることになる。

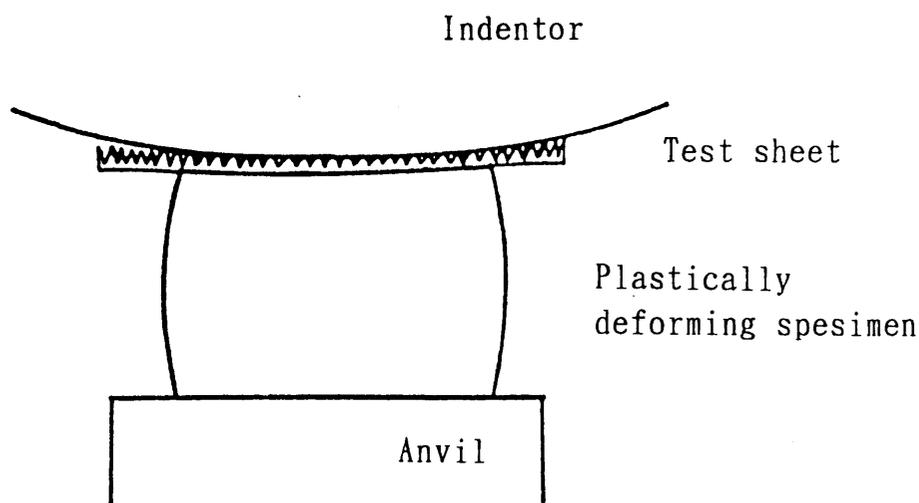


図 2-19 本測定法の応用例

2.1.8 結 言

- (1) 表面微小突起が接触によって塑性変形し、平坦化することに着目し、その平坦面の面積を表面に照射した光の反射の分布から求めることにより、実際に面に働く圧力分布を簡単に精度よく測定できる方法を開発できた。
- (2) 基本的な接触状態である円柱端面と平面、球と平面の接触面の圧力分布を測定し、本測定法の妥当性を示した。
- (3) 本測定法を用いれば、表面仕上げ方法の制約を受け難く、簡便に圧力測定できることがわかった。したがって、任意の接触面の圧力分布測定に、より適用しやすい手法であると考えられる。

2.2 圧力分布測定装置の開発

2.2.1 緒言

次に、先の 2.1 で述べた原理を用いて、接触時に作用した圧力分布を簡単に測定し、三次元表示する”接触面圧力分布測定装置”の開発を目的にし、その装置を試作することにした。その結果について述べる。

2.2.2 基礎実験

ここでは、ラッピングされた面を代表として選び、その面で測定することにする。ここで用いた圧子と試料の諸元は先の表 2-1 で示したものと同一である。その測定面となる試料の端面は #320 のアルミナ砥粒を用い、ラップ定盤上で湿式ラップをして仕上げた。

そして、まずラップ仕上げされた面について、反射光強度分布の測定をすることにした。測定は先の図 2-5 に示した装置を用い、同じ方法で測定した。その結果を図 2-20 に示す。

この結果より、先の 2.1 の理論的検討で示した式、および図によく一致していることがここでも確かめられた。以後、 $\Delta\{q(0)/q(\theta_1)\}$ を測定して接触面に負荷された圧力の値を求めることにする。

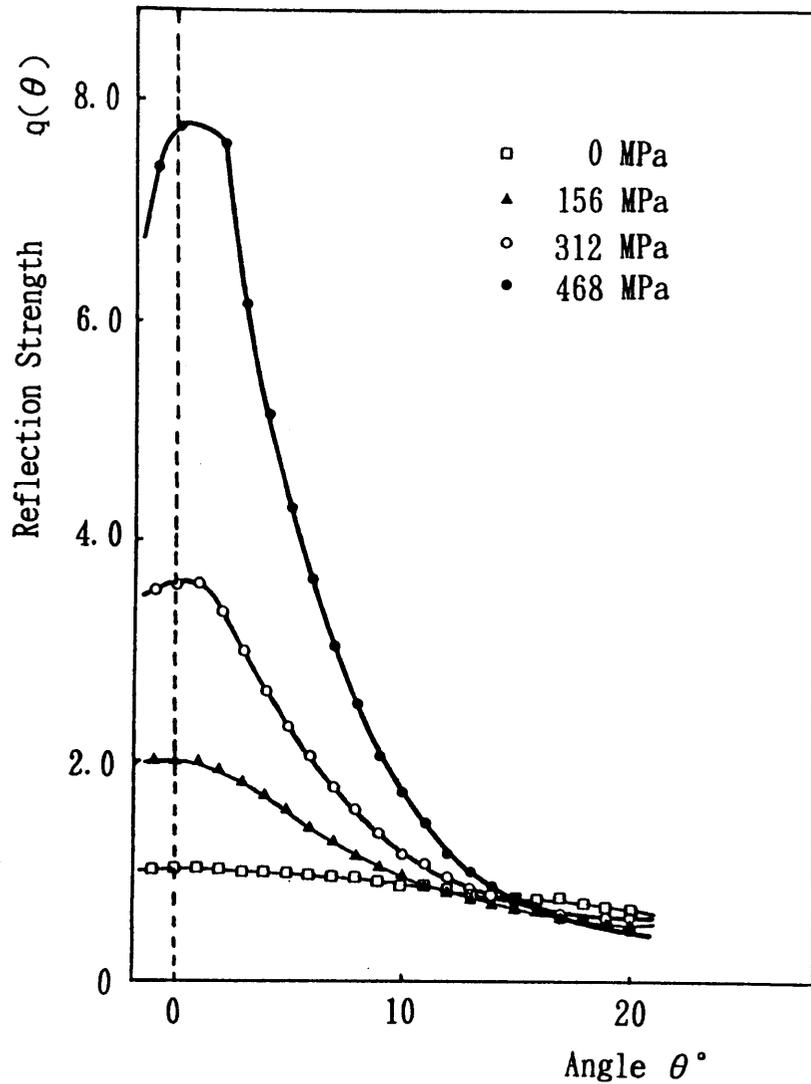


図 2-20 反射光強度分布

2.2.3 接触面圧力分布測定装置の試作

(a) 接触面圧力分布測定装置

本研究で開発した接触面圧力分布測定装置の概略図および写真を図 2-21 , 図 2-22 に示す.

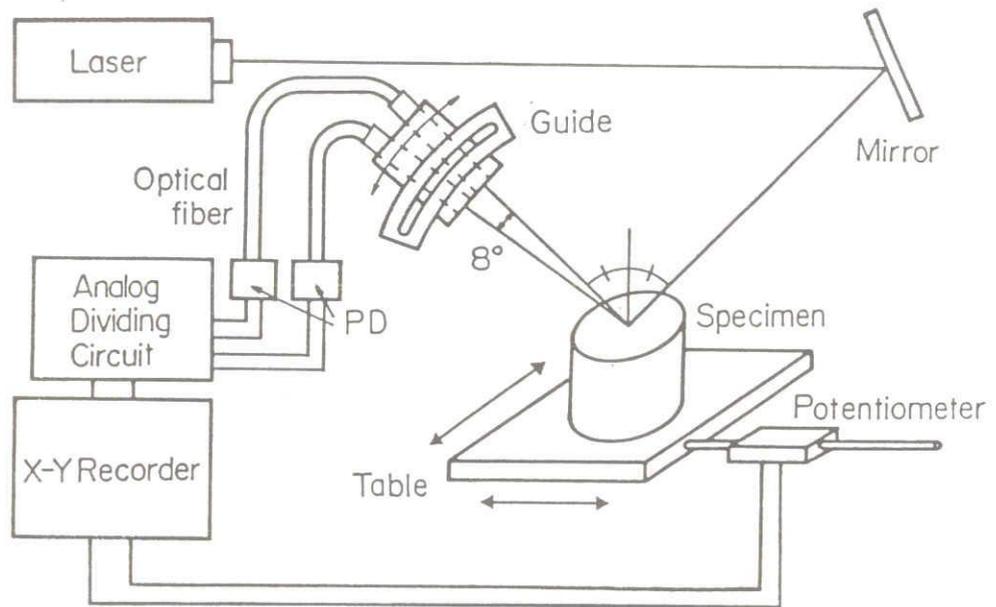


図 2-21 測定装置の概略

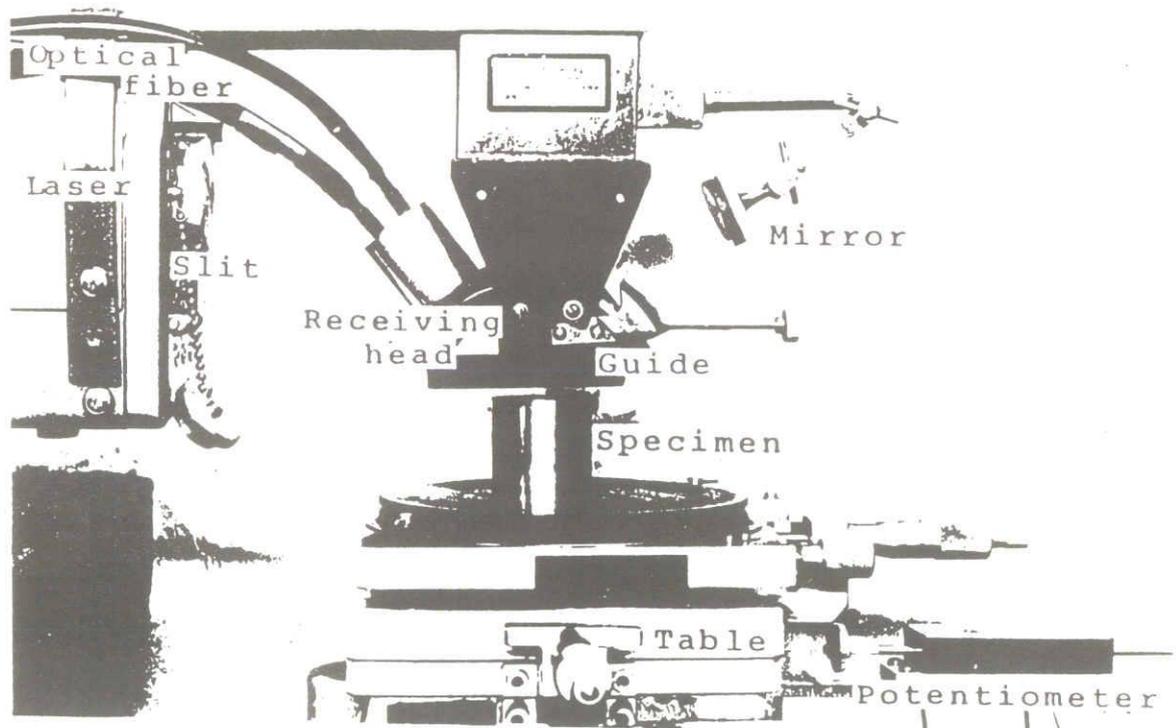


図 2-22 測定装置の写真

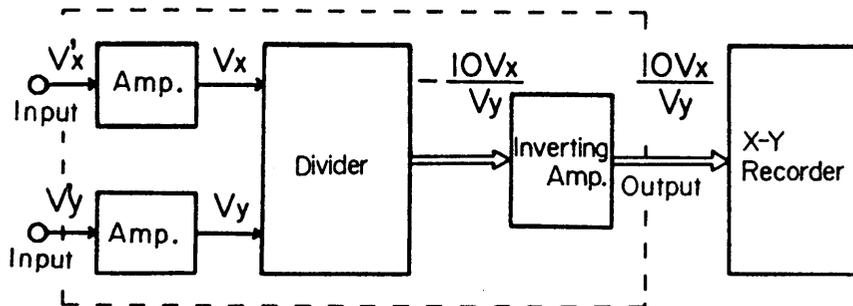


図 2-23 割り算回路の概略

前述した反射光強度分布測定装置に加え，正反射方向，および正反射方向に対して 8° の角度をもつように製作した受光ヘッドを取り付ける。

受光した正反射方向，および 8° の方向の光は，それぞれ光ファイバ（ $\phi 4 \text{ mm}$ ステップインデックス型）でフォトダイオードに導かれ，フォトダイオードで光電変換した後，割り算回路に入力され電圧値として $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ が得られる。

割り算器は $\mu \text{ PC132D}$ (NEC) の素子を用いて製作したものである。この回路の概略を図 2-23 に示す。

この割り算器によって得られた $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ の電圧出力は X-Yレコーダの Y 軸へ入力される。また，試料の置かれた X-Y テーブルに取り付けられたポテンショメータにより，軸方向の動きを電圧に変換し，X-Yレコーダの X 軸へ入力する。

(b) 校正試験結果

接触面圧力分布測定装置を用いた場合，負荷された圧力と $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ の値，すなわち X-Yレコーダの Y 軸方向への増加量との関係を求めた。

圧子，試料および加圧方法等の試験方法は先に示した 2.1 と同様である。その結果を図 2-24 に示す。横軸は圧力 p を試料の降伏応力 p_H で割って無次元化し

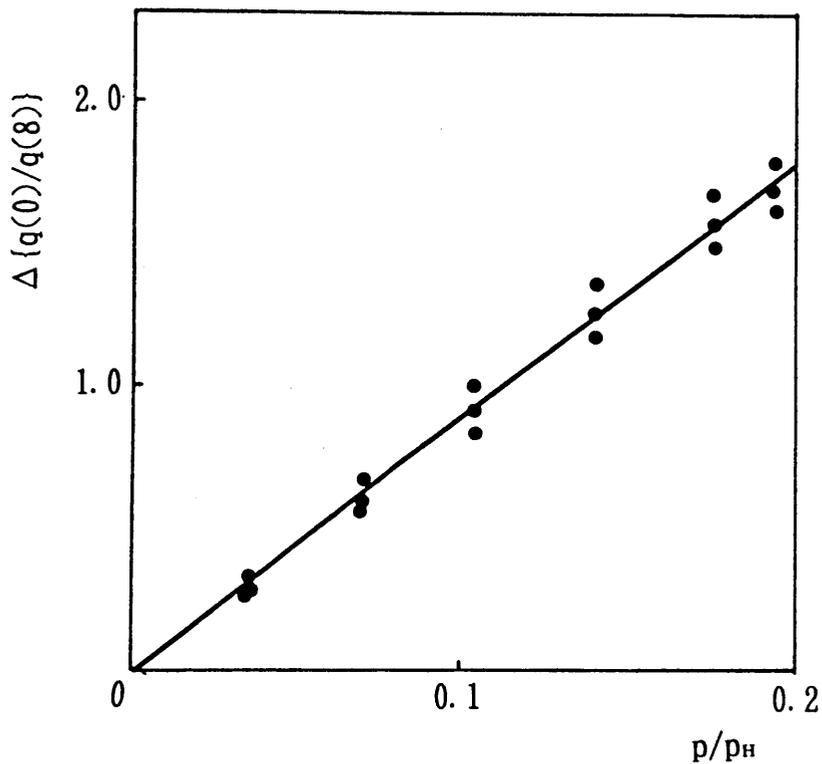


図 2-24 $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ と p/p_H との関係

た値であり、縦軸はX-YレコーダのY軸方向への増加量、すなわち $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ の値である。この結果より、 $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ と圧力とは p/p_H の値が 0.2 以下の場合において、ここでも先の 2.1 で示した測定理論の式 (2-8) で表されるような比例関係が成立することが確認された。

以下この関係を利用して接触面圧力分布を求める。

2.2.4 接触面圧力分布の測定

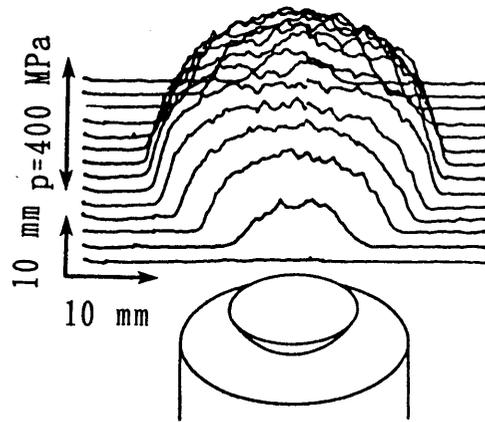
この接触面圧力分布測定装置を用いて各種の接触面，接触状態における圧力分布の測定を行った．測定方法を以下に示す．

この測定装置のX-Yテーブル上に試料を置き，テーブルをマイクロメータによって，X軸方向に送る．このようにするとX座標を横軸とし圧力の分布を示す二次元グラフが書ける．次に，テーブルをY軸方向に一定量動かし，同様のグラフを記録させる．この操作を繰り返すことによって接触面圧力分布が三次元表示される．測定に用いた試料および圧子の材質，表面仕上げならびに加圧方法は前記と同様である．圧子の形状は，球面，円柱，中心に穴のあいた円柱，切り欠きのある円柱，四角柱，中心に穴のあいた六角柱の6種類の形状のものを用いた．

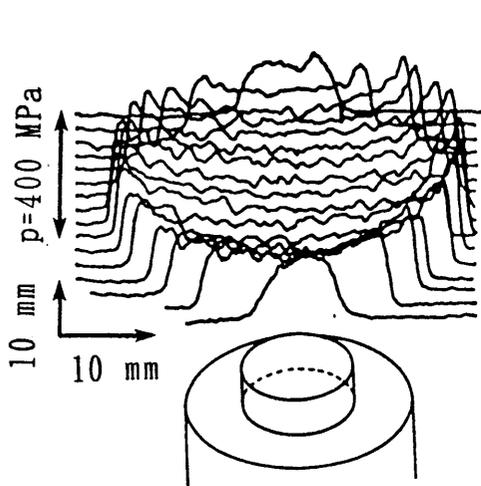
その結果を図2-25に示す．この図から，圧力の分布は，球面圧子の接触においては，圧力はHertzの楕円分布の様子がよく測定されることがわかる．また平面の圧子の接触では，縁の部分にいくにしたがい圧力は大きくなり，特に圧子の角の部分では圧力は急激に大きくなっており，Boussinesqの式⁽²⁾で表されるような分布をすることがわかる．

次に，接触状態のもう一つの例として，試料の表面に油を塗布した場合の接触について調べた．圧子は，球面，円柱，四角柱を用い，試料の表面にシリンダ油（JIS #1200相当品）を塗布して接触させた結果を図2-26に示す．この図から，球面の場合でも円柱端面の場合でも油を塗布することにより，金属表面に金属接触を介して負荷される圧力は大きく減少し，特に中央部分では圧力はほとんど加わっておらず，縁の部分のみに圧力が負荷されている様子がよくわかる．先の図2-25の場合とこの図2-26の分布の圧力差は，油を介して伝えられる圧力ということになる．

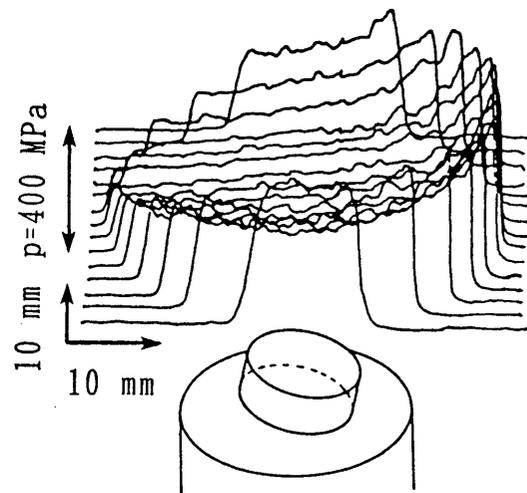
以上のことより，本測定装置を用いて圧力の分布が接触面全体にわたりよく測定され，また，本測定装置を用いることにより様々な接触面，接触状態における圧力分布が測定できることがわかった．



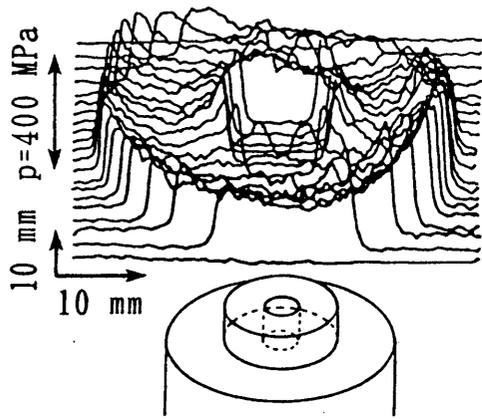
(a) 球と平面との接触



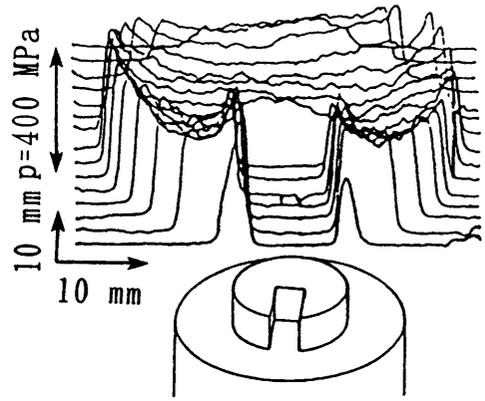
(b) 円柱端面と平面との接触



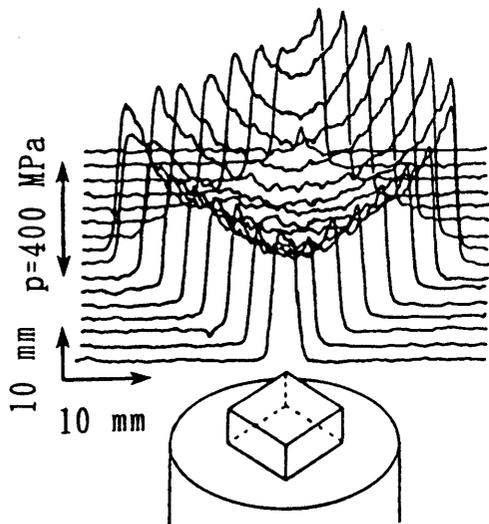
(c) 円柱端面と平面との接触
(偏心荷重)



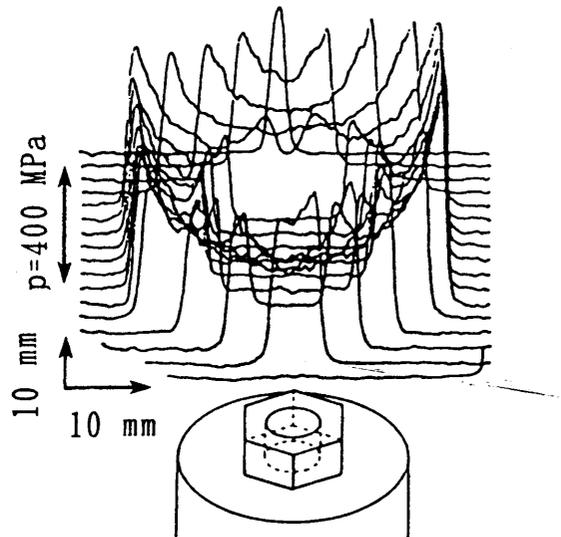
(d) 穴あき円柱端面と平面との接触



(e) 切り欠き円柱端面と平面との接触

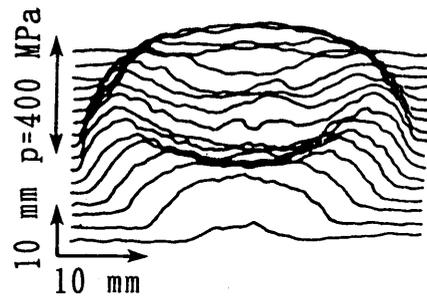


(f) 四角柱端面と平面との接触

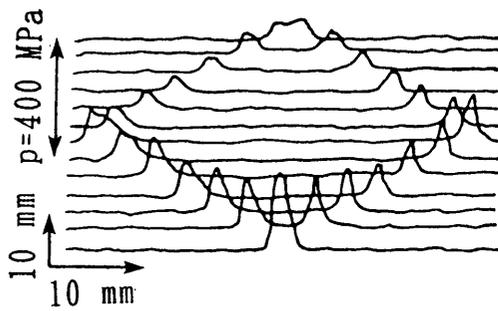


(g) 六角穴あき端面と平面との接触

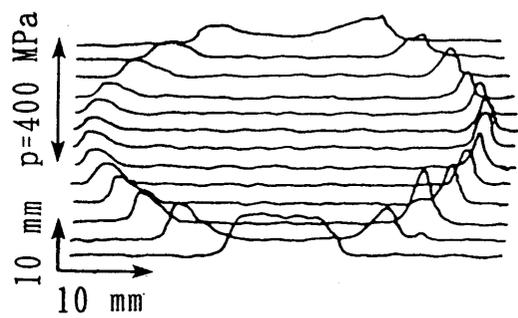
図 2-25 圧力分布測定



(a) 球と平面との接触



(b) 円柱端面と平面との接触



(c) 四角柱端面と平面との接触

図 2-26 圧力分布測定 (油を介した場合)

2.2.5 結言

- (1) 接触面圧力分布測定装置を作製し，簡単な操作で接触面圧力分布を自動的に測定し，三次元表示することができた．
- (2) 工業上の実用例として，各種の接触面，接触状態における圧力分布を表すことができた．

2.3 表面腐食の効果

2.3.1 緒言

先の 2.2 では、ラッピング仕上げされた面について圧力分布を測定し、それを三次元表示した。しかし、仕上げ面において方向性を持ち、かつ表面がバニッシュされ、強度の光沢を有する研削面などの接触については、表面がバニッシュ作用ですでに平坦化され、この面に圧力を負荷しても表面形状の変化があまり顕著にあらわれないため、これらの測定には問題があった。

そこで、ここではこのような面について圧力分布を測定する一つの方法として、腐食による表面処理を行う方法を試みた。その結果、強度の光沢を有する面であっても、腐食による表面処理を行うことで容易に圧力分布を測定できることがわかった。そして、この手法を用いていろいろな接触面について圧力分布を測定し、それを三次元表示することで本手法を圧力分布測定法の一つとして確立することができた。

2.3.2 実験方法

はじめに研削面とそれを腐食した面について、接触前後どの様な反射特性を示すかを調べるために反射光強度分布の測定をすることにする。測定には先の 2.1 で示したのと同じ装置を用いて行う。

つぎに研削面とそれを腐食した面について一定の面圧を加えた時、表面反射特性がどのように変化するかを調べるために校正試験を行う。方法および使用する圧子、試料の諸元は先の 2.1 で示したのと同じである。

試料の表面は #46 WA 砥粒の砥石（クレノートン社製）を用い、研削仕上げを行い $Ra=0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 程度の粗さに仕上げた。そして、その面と、その表面を腐食した面について調べることにする。そして、荷重と $\Delta\{q(0)/q(\theta_1)\}$ との関係を求める。

2.3.3 腐食の効果

(a) 研削面の表面反射特性

まず研削面について、一定荷重を負荷したとき表面からの散乱反射光が各方向にどの様に分布するかを調べるため、反射光強度分布を測定した。その結果を図 2-27 示す。

横軸は反射光の正反射方向に対する角度を示す。縦軸は各方向への反射光強度に応じてフォトダイオードで光電変換された電圧の大きさを示す。

この図より、無負荷状態すなわち初期粗さ状態では反射光は広く分布する傾向を示すが、荷重が増すにつれて正反射方向すなわち $\theta = 0^\circ$ の反射光強度は、一部増加傾向を示すが正反射方向よりずれた方向への反射光強度は、荷重の増加と電圧値の増加との関係が明確に表れていない。

この結果より、 $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ と負荷荷重との関係を求めると図 2-28 のようになる。横軸は圧力 p を試料の降伏応力 p_H で割って無次元化した値であり、縦軸は $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ の値である。この校正曲線より $\Delta \{q(0)/q(8)\}$ の値が 0 近辺の値を示し、これから圧力を求めることは不可能である。

この結果に対し先の 2.1 での研削面における結果と違っているのは、前回の場
合では研削縞に対し 90° の方向から光を照射して測定したものであり、この方向
がわずかでもずれると測定できないことに問題があった。

そこで、ここでは方向に関係なく測定できる方法を試みたものである。

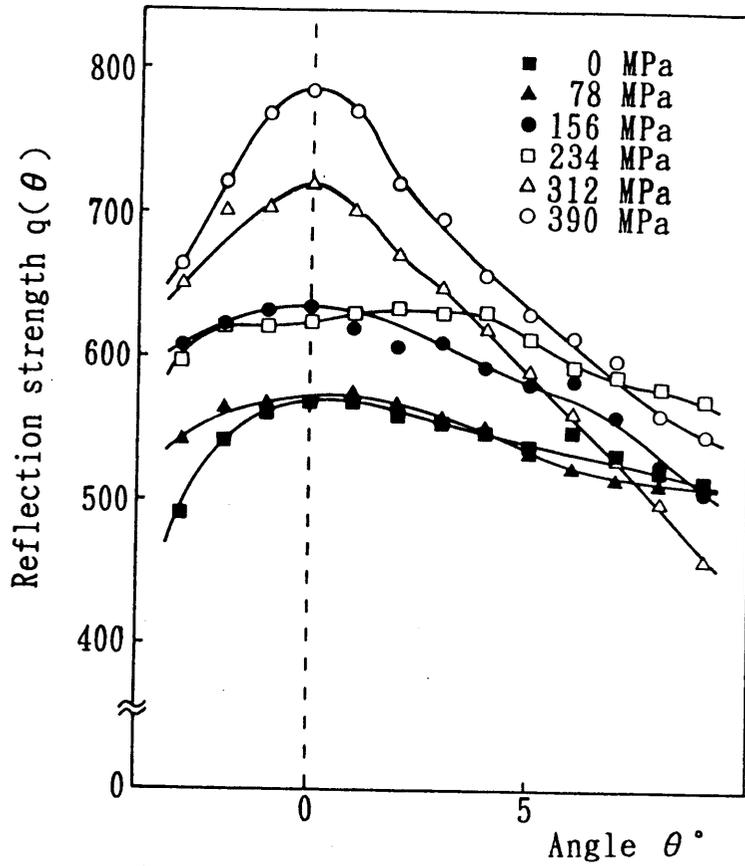


図 2-27 反射光強度分布

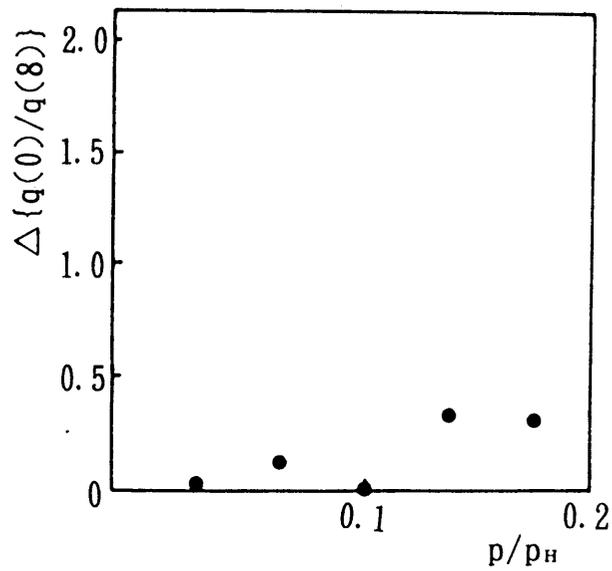


図 2-28 $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ と p/p_H との関係

(b) 腐食の方法

そこで研削面の突起先端のバニッシュされた表面を腐食する。

腐食する方法はいろいろあるが、本実験では、今回使用する試料である炭素鋼の表面組織の観察などに使われるエッチング液を用いて腐食をすることにする。

このなかでも、ピクリン酸のような有色のものはこの着色分子が表面を覆うため、接触時にこの影響が生じることも考えられる。このため無色透明であるナイトル

(3%) を使用することにした。液温は 20℃ 一定として、この液中に試料の表面全体を漬ける方法で腐食時間を 30 秒、1 分、2 分、5 分、10 分と変えて、そのときの表面の形状変化及び表面反射特性を調べることにする。

(c) 腐食による表面の変化

まず研削面の表面を腐食することによりその表面変化を調べる。

この結果腐食時間が進むとともに光沢が少なくなり、また研削縞も少なくなり次第に消失していく。このことは図 2-29 に示す腐食による表面変化の電子顕微鏡写真からも明らかである。この図より研削縞が腐食時間とともに徐々に消され

2 分程度ではまだ少し研削縞が残っているものの 5 分以上では研削縞は消失して過度の腐食した様子がよくわかる。また、このときの腐食時間の推移による表面粗さ形状の変化を図 2-30 に示す。この図より研削面はバニッシュされた表面が次第に腐食され粗くなっていく様子がよくわかる。ここで、この表面粗さの形状を詳しく調べてみると、腐食時間 30 秒では研削面の形状と比べ微小な突起がわずかにみられるがあまり変化していない。1 分についても微小な突起が増加するが研削面特有の平坦化された面が残っている。しかし、2 分のものについては平坦化された面はほとんどみられず、微小突起がはっきりと表れている。これは 30 秒、1 分の表面粗さ形状に比べ違いがはっきりとわかる。また 5 分、10 分については、2 分でみられる形状が腐食時間と共に大きくなっていくことがわかる。



腐食なし（研削面）

腐食時間 30 秒

腐食時間 1 分



腐食時間 2 分

腐食時間 5 分

腐食時間 10 分

25 μ m

図 2-29 腐食時間の推移による表面の変化

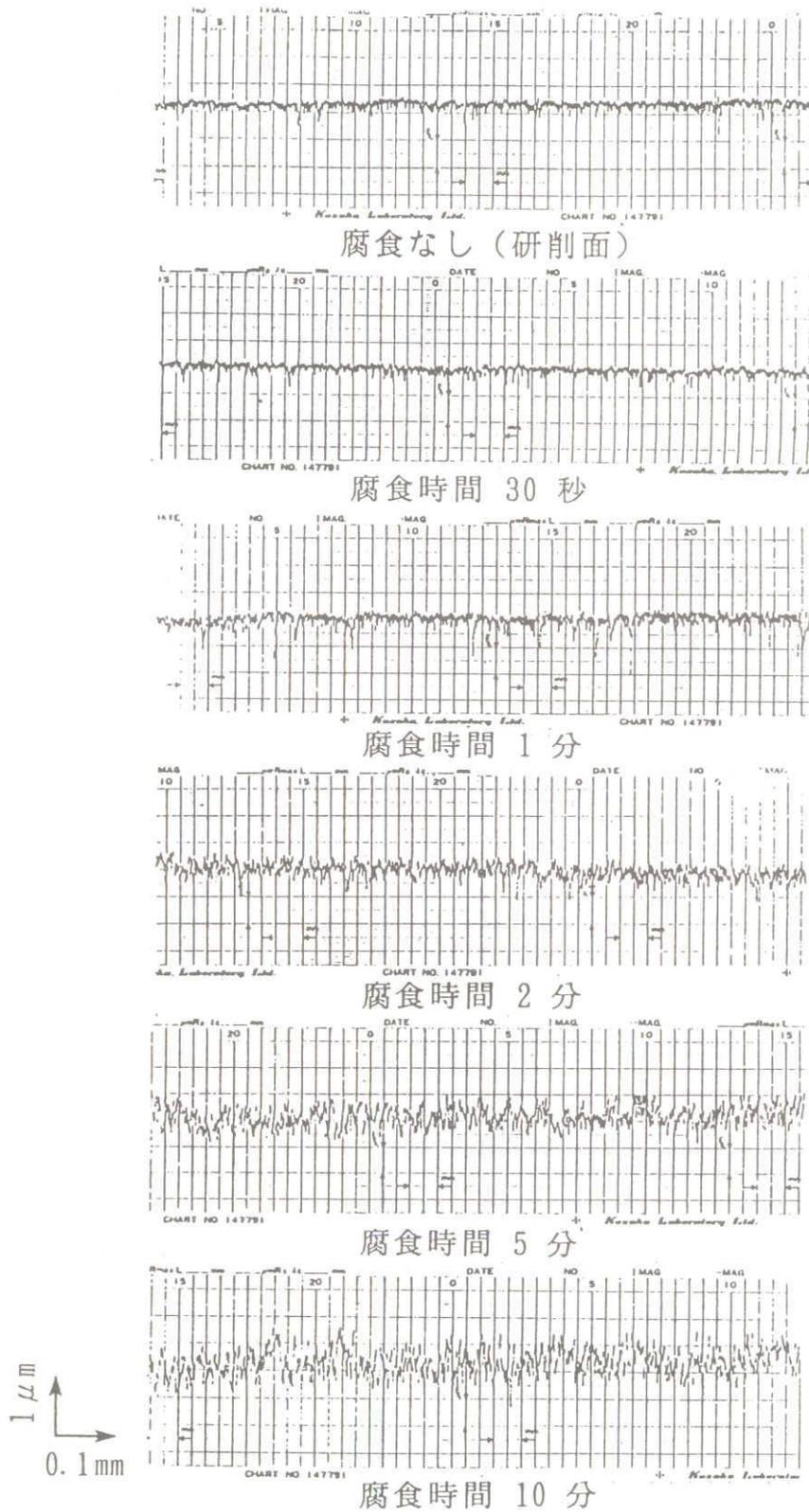


図 2-30 腐食時間の推移による表面粗さの変化

以上のことから、この図より表面粗さ形状が腐食時間分程度から著しく変化し始め、微小突起がはっきりとみられるようになる。

(d) 腐食後の表面反射特性

研削面の腐食時間を 30 秒、1 分と変えて研削面同様、反射光強度分布を測定した。しかし、この程度の腐食時間では図 2-29, 図 2-30 から明かなように研削面同様の平坦化された面が残り、この影響により研削面同様の反射光強度分布を示し精度良く測定できないことがわかった。

そこで、つぎに図 2-30 より表面粗さ形状が腐食時間 2 分程度から著しく変化し始め、微小突起がはっきりとみられるようになる腐食時間 2 分について反射光強度分布を測定してみた。その結果を図 2-31 に示す。

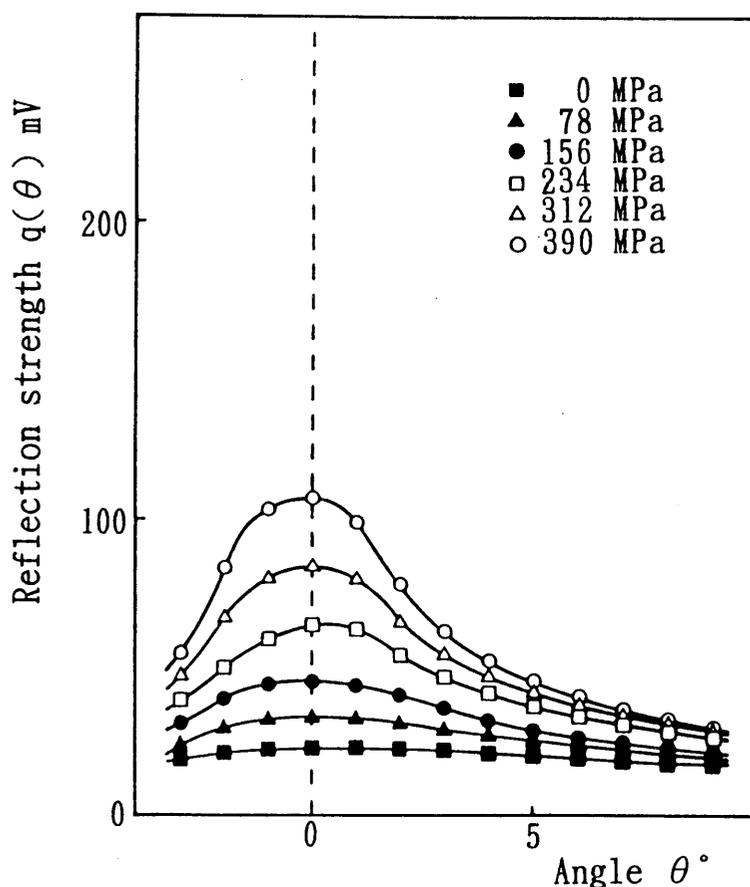


図 2-31 反射光強度分布

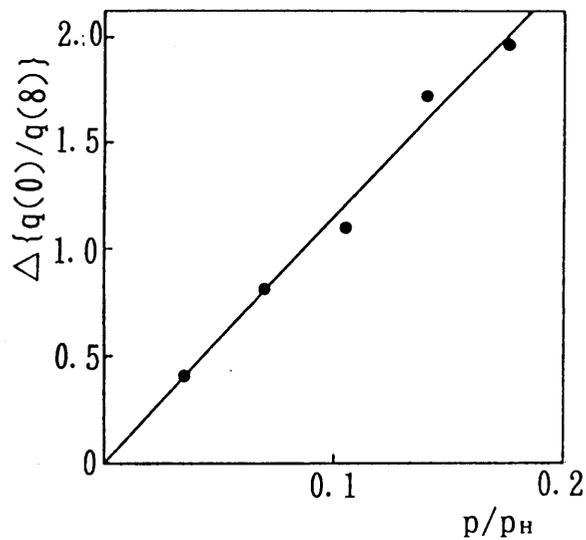


図 2-32 $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ と p/p_H との関係

この図より荷重の増加につれて正反射方向の反射光強度は増加し、逆に正反射方向とずれた方向への反射光強度は減少している。この結果より $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ と圧力との関係を求めたのが図 2-32 である。この検定試験の結果より p/p_H の値が 0.2 以下の場合、先の 2.1 の式 (2-8) で表せるような比例関係が成立することが確認された。

以上のことより、2 分程度の腐食時間であれば表面を粗くする過度の腐食をしなくても精度良く測定できることがわかった。そこで、以下に圧力分布は腐食時間を 2 分として求めることにする。

(e) 研削面と腐食した面の接触前後の表面変化

つぎに、研削面と腐食した面の接触前後の表面変化について調べた。図 2-33(a) は研削面に円柱圧子を接触させた接触部分と接触していない部分との境界近傍を拡大して撮影した電子顕微鏡写真である。この写真からは表面の突起先端がバニッシュ作用で表面が平坦化され、接触圧により平坦化された様子を判断することができない。しかし、図 2-33(b) は腐食時間 2 分のものについて同様に撮影したものである。しかし、この写真から無接触の部分では微小な突起がはっきりとみられ、境界の右側の接触部分では接触により微小な突起がつぶされた様子が判断できる。

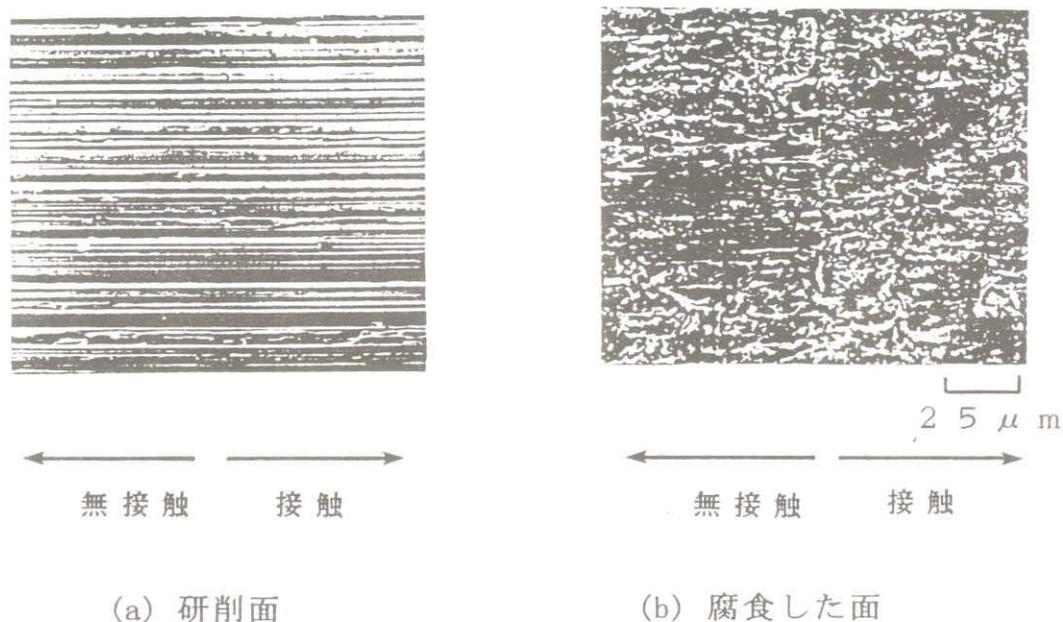


図 2-33 研削面と腐食した面の圧下後の境界部分の電子顕微鏡写真

2.3.4 接触面圧力分布測定

(a) 測定装置及び測定方法

測定方法は 2.2 で述べた接触面圧力分布測定装置を用い、同じ方法で行った。

(b) 接触面圧力分布測定例

測定に用いた試料および圧子の材質、表面仕上げは前記と同様である。

図 2-34(a) は円柱端面をもつ圧子と研削面との接触について $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ を三次元表示したものである。しかし、この図から圧力分布はほとんど測定できないことがわかる。

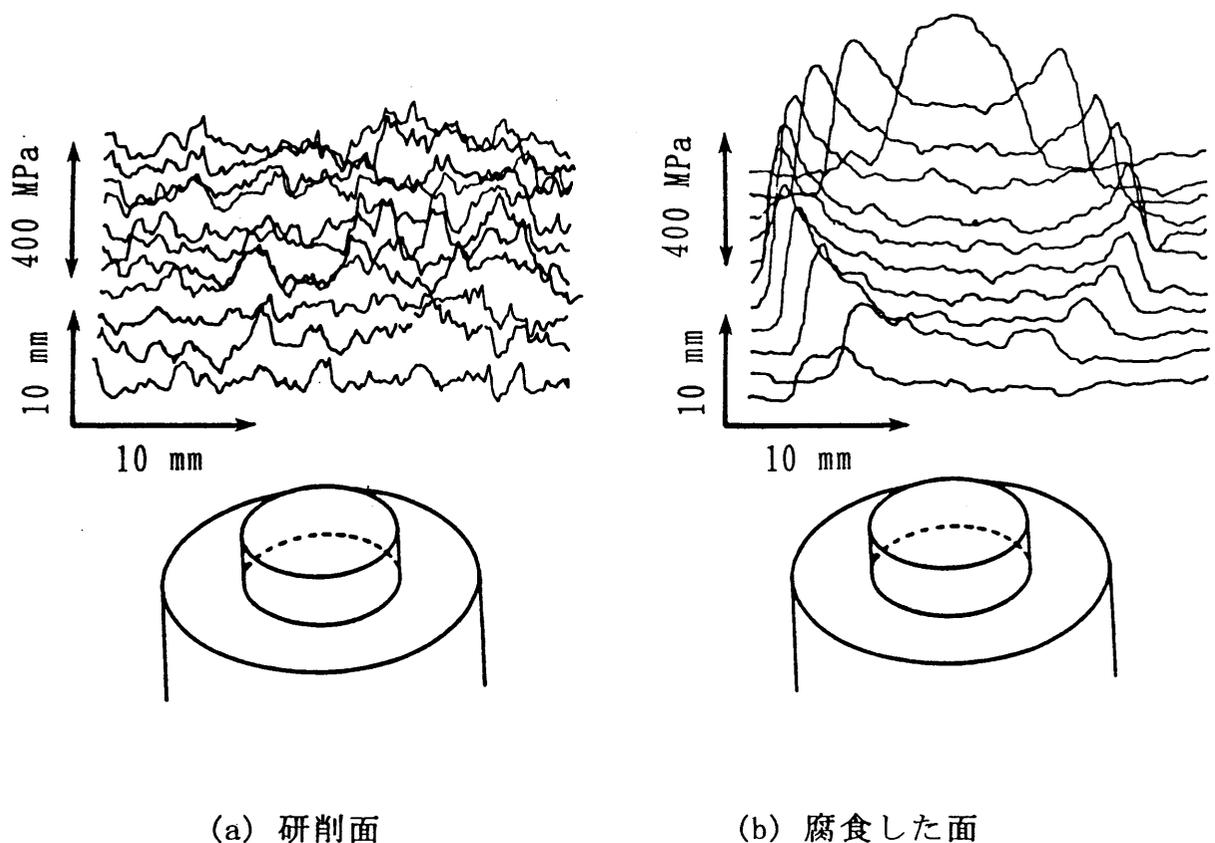
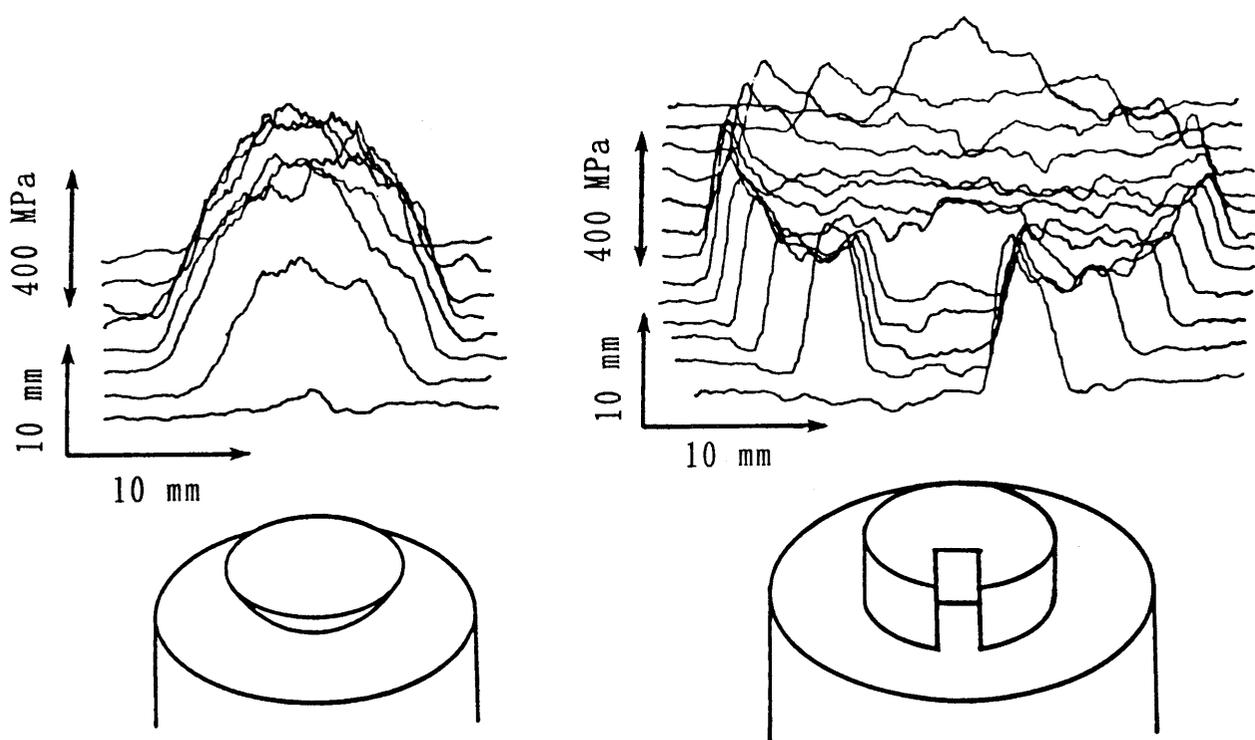


図 2-34 腐食の効果

図 2-34(b) は腐食した表面との接触で接触面全体にわたり $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ を測定し、前項で示した検定曲線を用いて圧力値に換算した値を縦座標に記入したものである。この場合、接触面全体に圧力分布の様子がうまく測定され、縁の部分にいくに従い圧力は大きくなり、特に圧子の角の部分では圧力は急激に大きくなって Boussinesq の式⁽²⁾で表されるような分布をすることがわかる。

つぎに、腐食した平面と球面圧子との接触を図 2-35(a) 示す。この図から Hertz の楕円分布の様子が良く測定されていることがわかる。

また図 2-35(b) は、切り欠き円柱圧子と腐食した面との接触を示す。この結果からも切り欠きの部分及び周辺部に大きな圧力が負荷された様子が良く測定されている。



(a) 球と平面との接触

(b) 切り欠き円柱端面と平面との接触

図 2-35 圧力分布測定

2.3.5 結言

光の散乱反射特性を用い金属接触面に働く圧力を求める一つの方法として、表面が平坦化され強度の光沢を有する研削面に対し、腐食による表面処理を行うことで容易に圧力分布が測定でき、それを三次元表示することで、本手法を圧力分布測定法の一つとして確立することができた。

第 3 章

移着油膜による接触面圧力分布測定法

3.1 緒言

接触面に面圧が負荷されると表面の微小突起が弾性又は塑性変形し、接触状態が負荷圧力によって変わる。この現象を論じた研究は、先に述べたように Archard⁽²³⁾ や Greenwood⁽²⁴⁾ など極めて多くの研究がある。しかし逆にこの接触状態の変化を調べることから圧力分布を求めようとする研究は殆どない。著者は、先にこの接触状態を微小突起の塑性変形による表面粗さ変化又は平坦化された表面積の変化が光の反射特性を変化させることを利用して、圧力分布を求める方法を前章で提示してきた^{(25)~(27)}。この方法は実際の表面を使って簡単に圧力分布を測定できる長所はあるが、表面の微小突起がなだらかで塑性変形が生じ難く弾性変形によって接触するような表面、すなわち研削面や長く使用してなじんだ表面などではそのままではうまく測定できないという欠点があった。

本章では表面に10 nm オーダーの油膜を塗布し、接触後油膜の平面への付着を利用して接触面の状況を把握し、同時に、それによって接触圧力分布を表面仕上げ方法にかかわらず簡単に測定できる方法を提示しようとするものである。

3.2 測定原理

一方がある粗さをもった試料表面を平坦な硬い（接触で塑性変形が生じない）面に接触させる場合を取り扱う。いま試料面に極めて薄い油膜（10 nm オーダを想定）を付着させてから平坦な面（測定面として使用）に接触させると二面は図 3-1 に示すように油膜を介して接触する。

圧力は接触面を介して上下に伝えられるが、除荷後は接触点のみ油膜の一部が測定面に移着する。いま二面の実際の接触面はどこかを定義するのは難しいが、ここでは油膜厚さまで二面が接近したところ、すなわち図 3-1 で a の領域（a よりやや広がる）を接触面と考えると油膜の付着した所が接触面となる。事実このような 10 nm オーダの油膜厚さでは油の分子量から考え、油は流動的と云える程のものではないので上下に力が伝えられると考えることができ、このような接触においては力の伝達という意味で真実接触面と考えることができる。

いま、この真実接触面の分布の様子が把握できれば応力分布と対応すると考えられるので、その点を検討する。図 3-2 のように圧力 p の一様な負荷の下で微小突起が弾性変形で接触しているとき、真実接触面の面積 A がどのようなかについて Archard は Hertz の弾性球面接触の考えから、接触面積と負荷 W の関係において $A \propto W^{4/4.5}$ となるとしている⁽²³⁾。一方、もし突起が錐形で剛塑性変形でつぶされるとすれば $A \propto W$ となる。実際の面では表面微小突起の形状、分布状態、接触面の材質等により、弾・塑性変形が入りまじった状態になる。しかし上記のことを考慮して、後に実験で確かめているが、接触面積と荷重の関係は $A \propto W$ となると考えてよいので以後このような仮定のもとに圧力分布を考える。

いま、ある領域 A_0 の圧力を p とすると荷重は $W = pA_0 = p_0 A$ で表され

$$p = \frac{p_0 A}{A_0} \quad (3-1)$$

の関係より A/A_0 の値すなわち接触率を測定すれば圧力 p が求められることにな

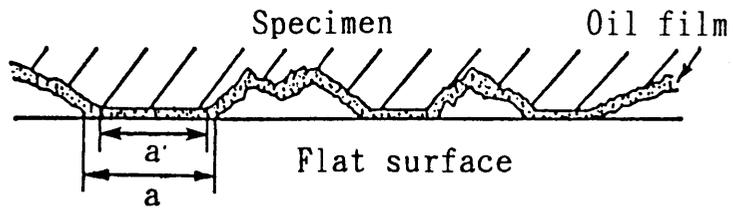
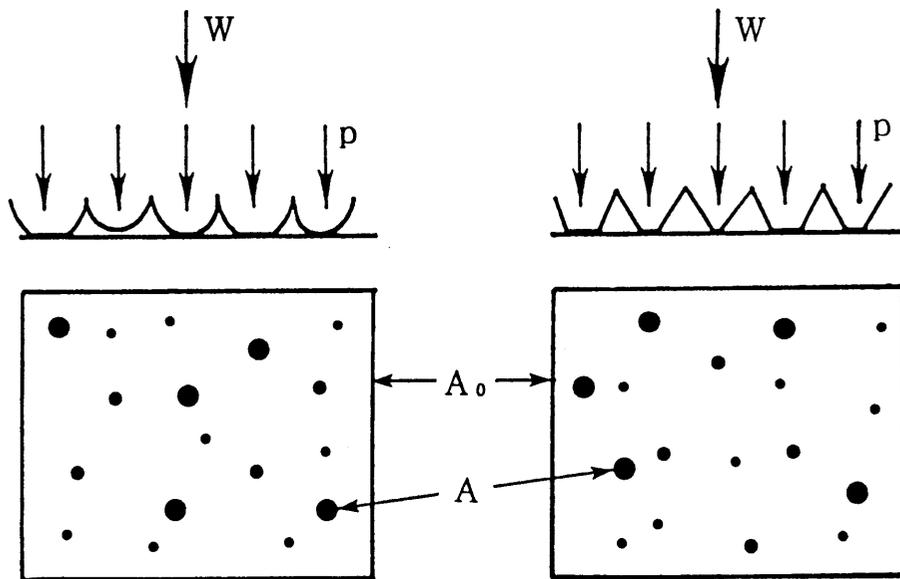


図 3-1 接触のモデル図



(a) 弾性変形による接触

(b) 塑性変形による接触

図 3-2 圧力と真実接触面

る。ここで p_0 は、真実接触面上の平均圧力である。上述の $W \propto A$ の場合 p_0 が一定と考えることができる。したがって圧力 p の分布は、各場所の接触率を測定すれば各場所における圧力の分布が求められることになる。

つぎに接触率の測定法であるが、接触率は油膜の付着した面の割合を測定することになる。この測定は図 3-3 に示すように油膜の付着した面は後の実験で示されるように正反射強さが低下する。このため、接触後表面に光を照射してみると正反射光強度が油膜の付着面の割合が多くなるにしたがい低下する。この正反射光の強度低下から接触率が測定できることになる。

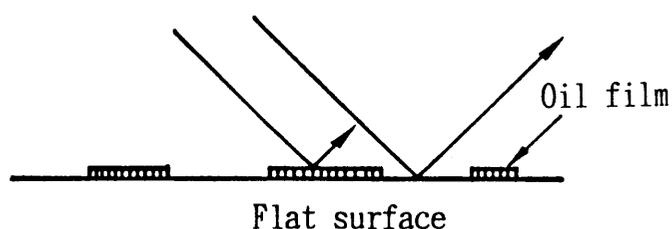


図 3-3 油が付着した面からの反射光

3.3 油膜厚さの設定と測定面の光反射特性

この実験で第一に問題となるのが油膜厚さの設定である。

本実験では使用した油はスピンドル油を使用したか、その場合の油膜厚さの設定は以下のように行った。

まず最初に医療用の注射器に油を入れ一滴ずつたらし、その数をかぞえることから一滴の体積を見積った。本実験では一滴の体積は約 2.1 mm^3 であった。

いまなめらかな広い表面を準備し、その上に一滴だけ油をたらし、ポリエチレンフィルムで覆った指を使ってその面に広げられる限り塗り広げてみたところ、約 1100 (鋼の研削面) $\sim 1700 \text{ cm}^2$ (ガラス面) に塗り広げることができた。(その面の様子は光の反射の様子から目で確認できる)。表面の凸凹による実際の表

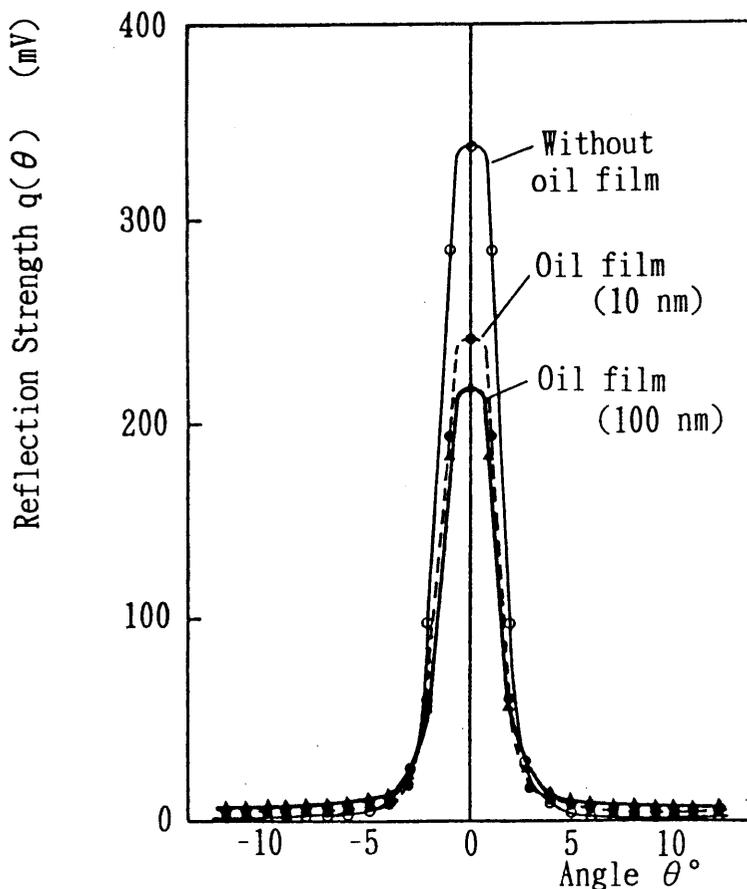


図 3-4 油が無い面と付着した面についての反射光強度分布

の面の様子は光の反射の様子から目で確認できる)。表面の凸凹による実際の表面積の増加を無視して見かけの表面積から鋼の研削面の場合について油膜厚さを計算すると 19 nm と見積られる。このように塗り広げられた面の一部として試料面を準備したので、その膜厚は 20 nm 前後のものが設定されたと考えた。従って図 3-3 に示された移着油膜の厚さは 10 nm 程度であることが見当づけられる。

次に、この 10 nm の油膜が平坦な表面（測定面としてブロックゲージを使用）一面に付着した場合、その表面からの反射特性がどの様になるかを調べた。その結果を図 3-4 に示す。この図から油膜の付着した表面は、多少分布特性が変わるようであるが、主に正反射強さが減少した。試しに 100 nm の油膜の場合について反射特性を示すが油膜厚さによる影響は少ない。

ここで、このような接触面を使って接触面 A を求める方法を理論的に検討してみる。いま図 3-3 において入射光強さ I_0 に対し、油膜のない表面の反射率を α とし、油膜のついている表面の反射率を β とする。

また、ビームの照射面において領域 A_0 の中で油膜の全くない表面からの反射光強度を I とし油膜が一部 (A/A_0) だけ付着している表面からの反射光強度を I' とすると

$$I = I_0 \alpha \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} I' &= I_0 \beta \frac{A}{A_0} + I_0 \alpha \frac{A_0 - A}{A_0} \\ &= I_0 \left\{ (\beta - \alpha) \frac{A}{A_0} + \alpha \right\} \end{aligned} \quad (3-3)$$

故に

$$\frac{I'}{I} = \frac{A}{A_0} \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) + 1 \quad (3-4)$$

又は

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{\alpha}{\alpha - \beta} \right) \left(1 - \frac{I'}{I} \right) \quad (3-5)$$

(1) に代入し

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\alpha}{\alpha - \beta} \right) \left(1 - \frac{I'}{I} \right) \quad (3-6)$$

が得られる。よって、光の反射強度比 I' / I を測定すれば接触率 A/A_0 は(3-5)式から又いいかえると圧力 p/p_0 が (3-6) 式から求められることになる。

3.4 実験方法および校正試験

実験は、平坦面（測定面）として清浄にした市販ブロックゲージ（表面粗さ $Ra = 0.005 \sim 0.02 \mu m$ ）を用い、試料面として S55C を用いた。その試料をラップ仕上げ（# 320 WA 砥粒による湿式ラッピング： $Ra = 0.6 \mu m$ ）した面と前章でそのままではあまりうまく測定できなかつた研削仕上げ（# 60 WA 砥粒による湿式平面研削： $Ra = 0.6 \mu m$ ）をした面を用いることにした。また、使用した油はスピンドル油（# 60）である。

校正方法として、まずブロックゲージを準備し、それと同じ寸法のいろいろの仕上げ面に仕上げられた試料面に油膜をつけてブロックゲージに一定荷重で押し付けた後ブロックゲージ表面に光を当てそこから反射してくる光の強度 I' と参照用の清浄なブロックゲージから反射してくる光の強度 I の比を求め $1-(I'/I)$ の値を計算した。使用した装置は後に圧力分布測定の所で示す。校正試験の結果は図 3-5 に示す。ここで p は、試料の降伏応力 P_H で割って無次元で表してあるが、圧力と $1-(I'/I)$ は、式 (3-1) で示されるように、直線関係で表されることがわかる。

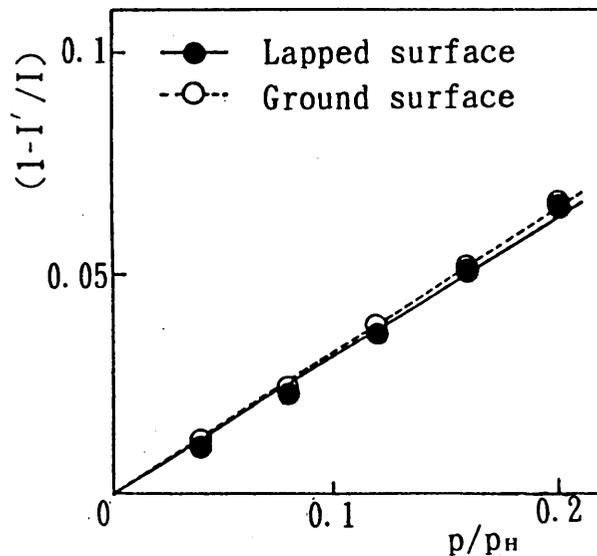
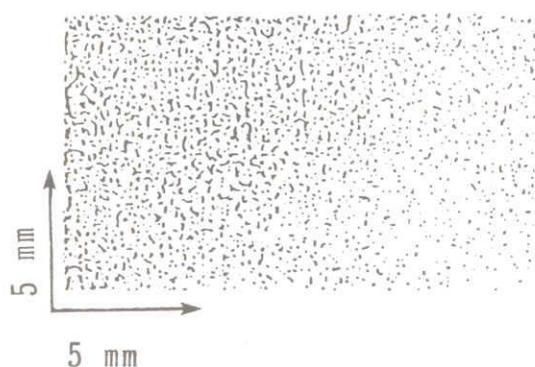


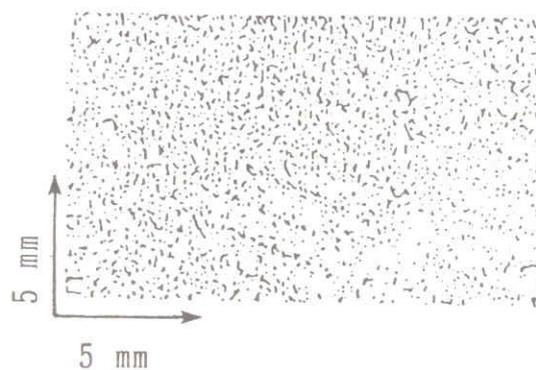
図 3-5 $1-(I'/I)$ と圧力との関係

3.5 表面接触点の観察

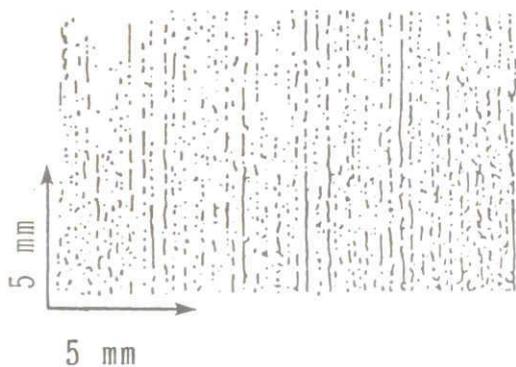
上記の校正試験と同じ方法で各仕上げ面に油を塗布し、275 MPaの圧力で測定面に接触させた。その接触後の測定面に油が付着した様子を真上から光を当て、真上から撮影した顕微鏡写真を各仕上げ面について図 3-6 (a~d) に示す。この写真より黒い部分が接触により油が付着した部分であり、真実接触点である細かい点々が明確に確認することができる。また、仕上げ方法により真実接触点の大きさと分布の違いがよくわかる。



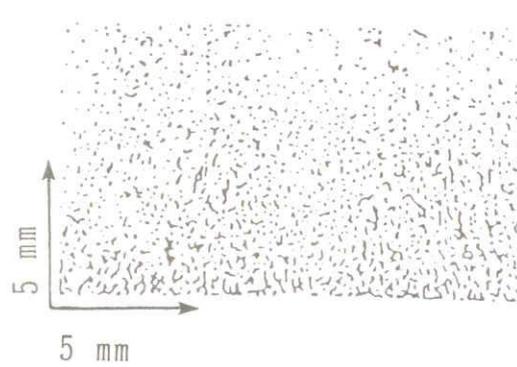
(a) ラップ仕上げ面



(b) サンドブラスト仕上げ面



(c) 平面研削仕上げ面



(d) カップ研削仕上げ面

図 3-6 油が移着した表面の顕微鏡写真

3.6 圧力分布測定装置および測定結果

圧力は図 3-7 に示すように接触点を介して上下に伝えられるが、その接触点では圧力は p_0 で突起が塑性変形する場合で示せば、これはこの部分の降伏応力の値 p_H であり、接触していない場所では 0 である。ある領域 A_0 で伝えられる平均の圧力 p は p_0 の領域と 0 の領域の面積荷重平均を意味する（図中 Case.1 で示す）。領域 A' を A_0 より小さくとりその領域の平均圧力を A_0 全体にわたってプロットすれば Case.2 で示されるような圧力分布が測定できる。 A' を小さくしていき 0 に近づければ p_0 と 0 を測定することになる（Case.3）。

本研究で用いた圧力分布測定装置を図 3-8 に示す。使用した光は He-Ne レーザでハーフミラーを通して光の半分を測定面（ブロックゲージ）に照射し残りの半分を参照用ブロックゲージにあてて X-Y テーブルを動かして接触面を走査させる。それぞれの正反射光を検出し $1 - (I' / I)$ の値を計算するものである。ビーム径は 1 mm の場合と、レンズで絞ることにより 20 μm の場合の二種類用いた。これはちょうど図 3-7 において A' を 1 mm と 20 μm にした場合に相当し、それぞれ Case.2 と Case.3 に近い測定に対応すると考えられる。

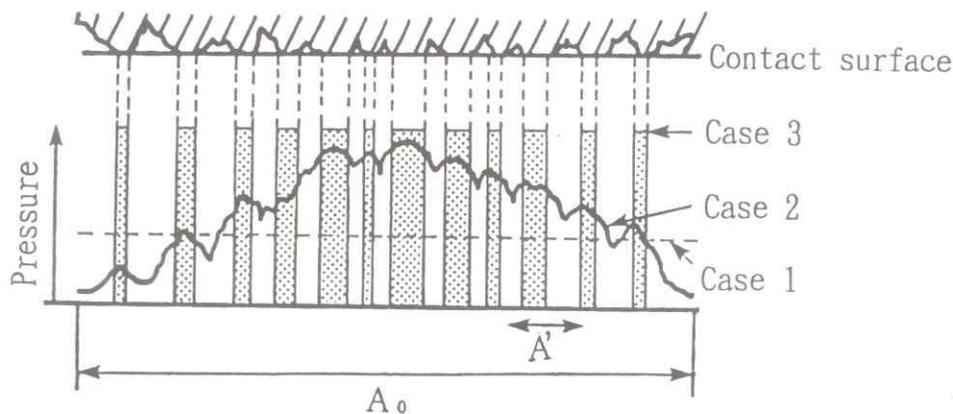


図 3-7 接触面における圧力分布のモデル図

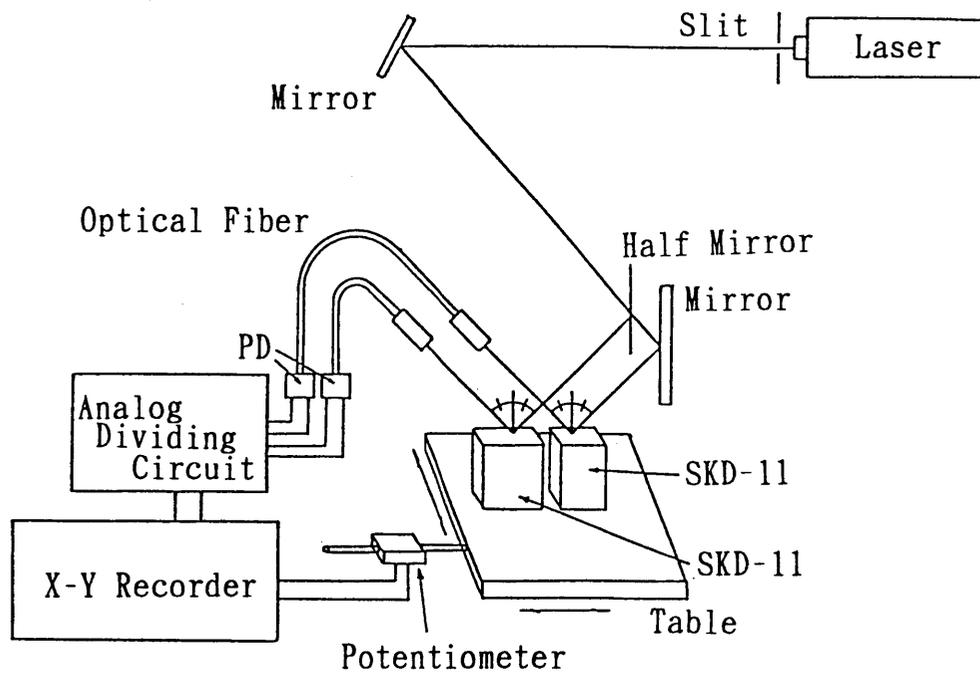
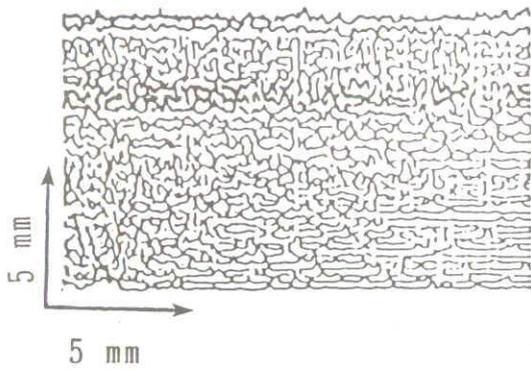
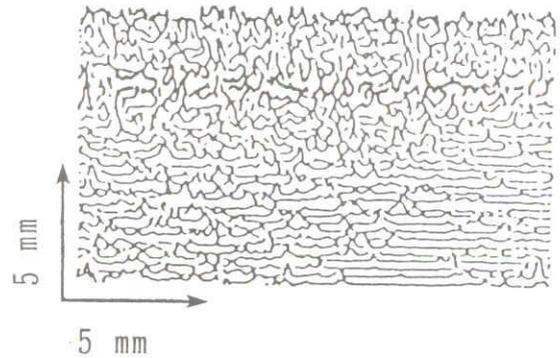


図 3-8 圧力分布測定装置の概略

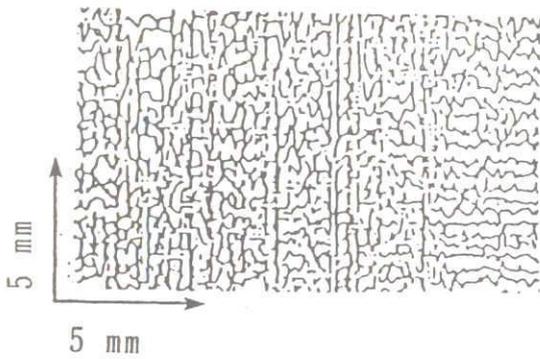
まず、最初に $20 \mu\text{m}$ のビームで測定した結果を図 3-9 に示す。それぞれの仕上げ面上を光を走査し $1 - (I' / I)$ の値を示す。これは接触点の分布の様子を表しているともいえるし $20 \mu\text{m}$ 径内部の平均圧力の分布の形態を示すことにもなる。



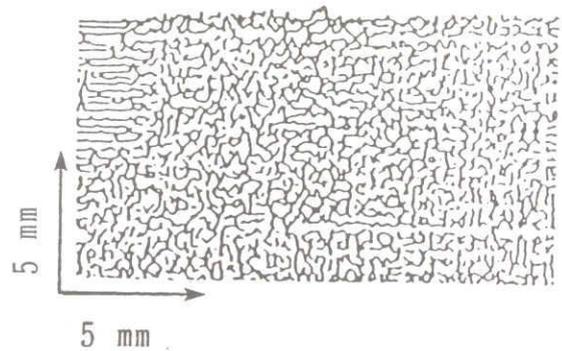
(a) ラップ仕上げ面



(b) サンドブラスト仕上げ面



(c) 平面研削仕上げ面

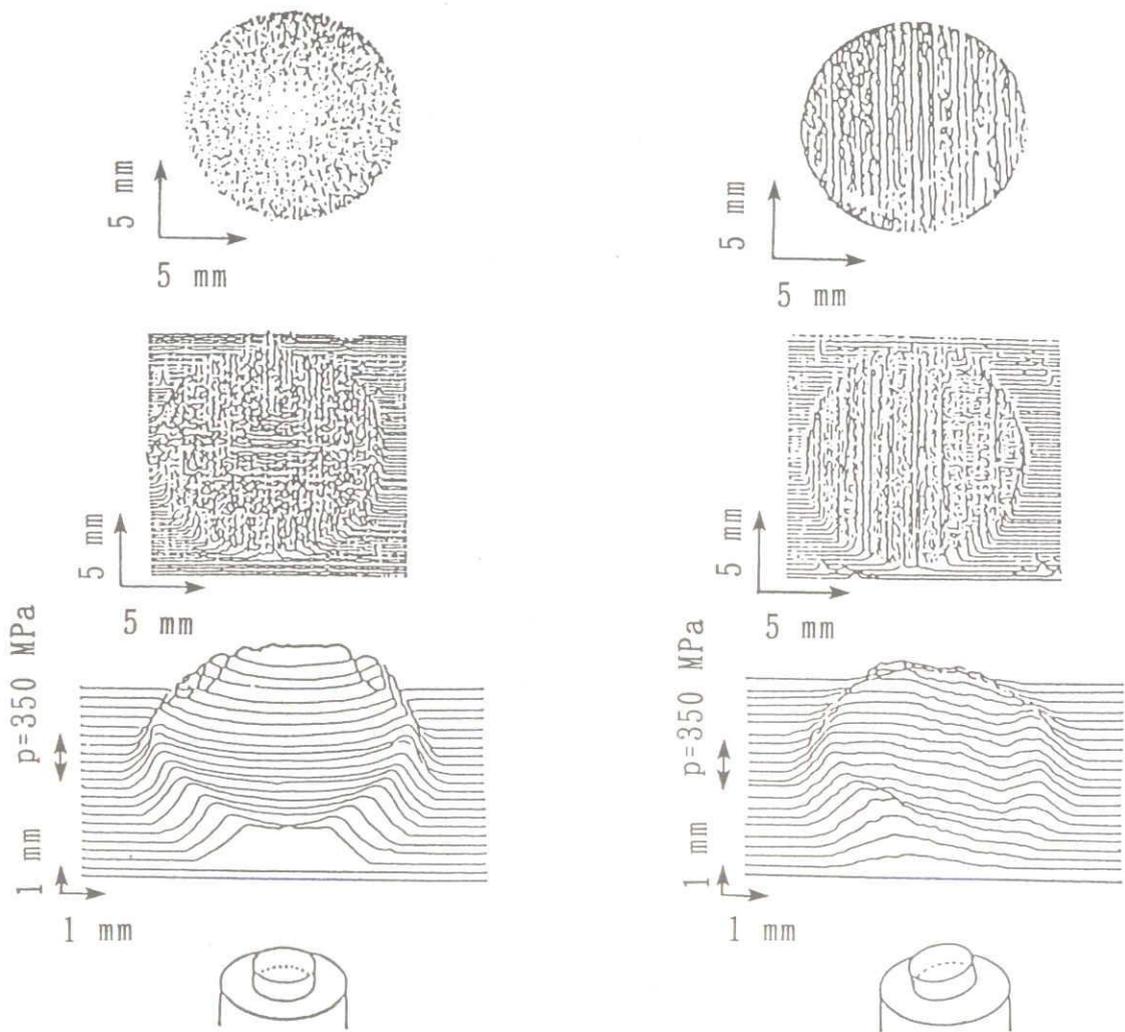


(d) カップ研削仕上げ面

図 3-9 油が移着した表面からの反射光分布

つぎに、図 3-10 (a)はラップ仕上げをした円柱端面と平面との接触について圧力分布を測定した結果である。上図は油の付着した様子を真上から撮影した顕微鏡写真である。その下の図は $20 \mu\text{m}$ のビーム径で測定したものである。さらにその下の図は、ビーム径が 1mm のものを使用して測定したもので、この場合は先に求めた校正曲線を使って縦軸は圧力の値で示した。

また、(b)は研削仕上げされた円柱端面との偏荷重での接触について示したものである。



(a) ラップ仕上げされた円柱端面と平面との接触

(b) 研削仕上げされた円柱端面と平面との偏心荷重による接触

図 3-10 接触面の圧力分布測定

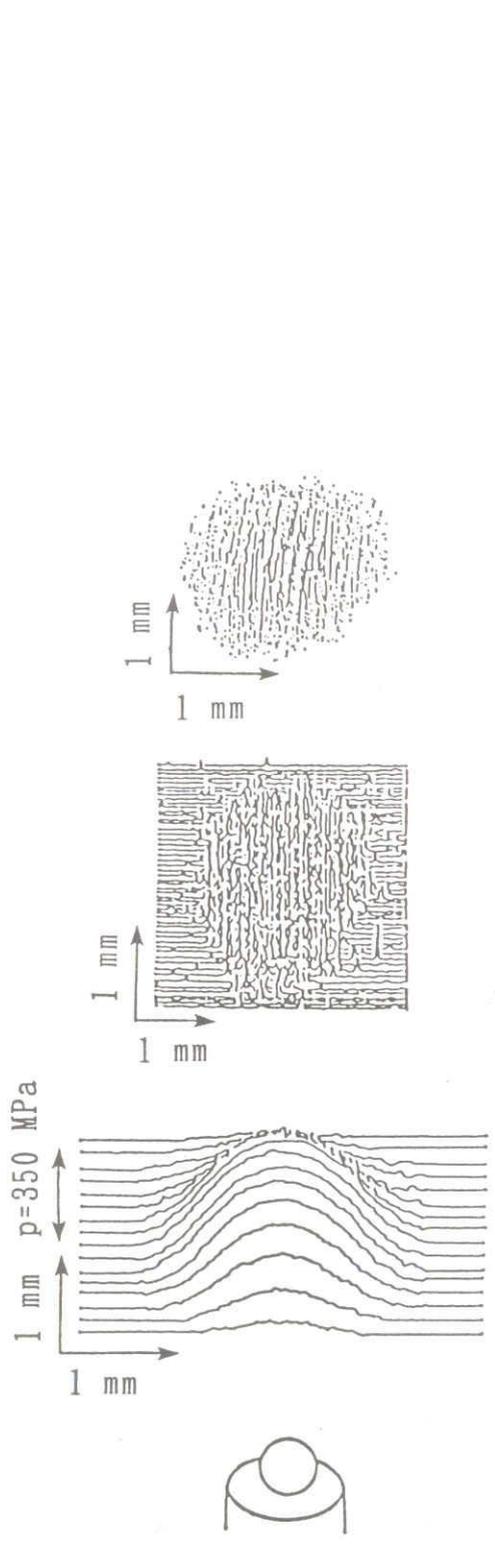


図 3-11 球と平面との接触における
圧力分布測定

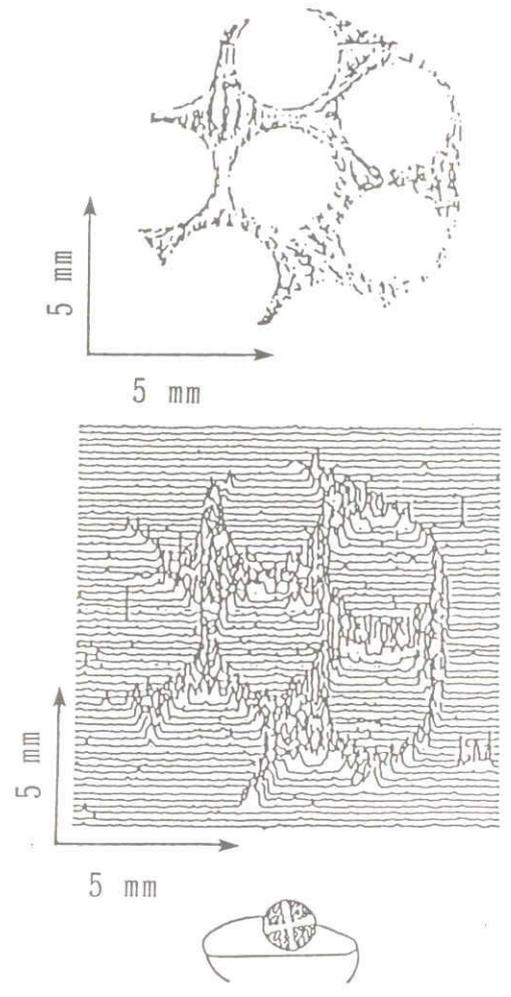


図 3-12 ゴルフボールと
平面との接触

これらの図から、圧力の分布は、Boussinesq の式⁽²⁾で表されるような分布をしている様子がよく測定できる。

つぎに、既製で仕上げ方法は不明であるが球面（曲率半径 $R = 1600 \text{ mm}$ ）と平面との接触について、同様に圧力分布を測定した結果を図 3-11 に示す。この結果においても Hertz の楕円体の分布が、すこしくずれたように表され Greenwood⁽²⁴⁾ が示すような圧力分布がうまく測定されていることがわかる。

図 3-12 は、今までと違った接触例としてゴルフボール（D社製）を平面に衝突させた場合について調べた結果である。上の図は接触部を真上から撮影した写真である。下の図はビーム径を小さくして測定したものである。これらの図からディンプルの形などが確認することができ接触状態がうまくとらえられることがわかった。

ついで、この様な測定の一つであるが、指と平面との接触からもたらされる指紋の様子をビーム径 $20 \mu\text{m}$ で測定した結果を図 3-13 に示す。この図も接触点の様子を示すと共に圧力分布の様子を示していると云えるものである。

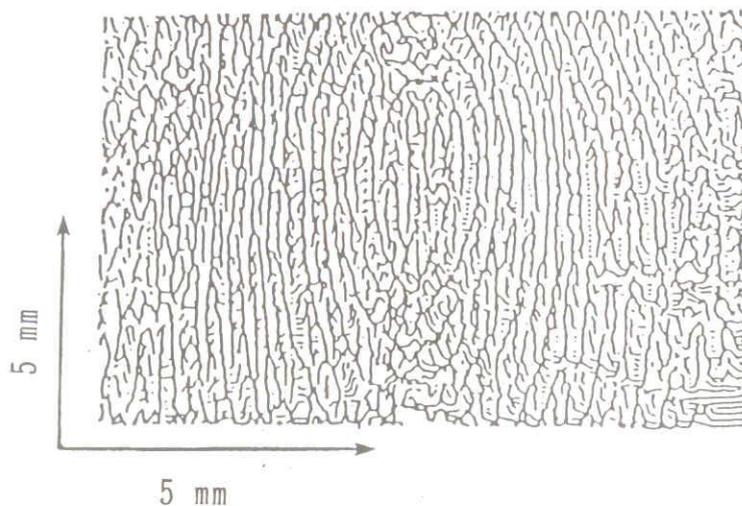


図 3-13 指と平面との接触

3.7 結言

本章で得られた結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 圧力分布測定装置の試作をし，この装置を用い油の移着を検出することから接触圧力分布が測定できることを示した。
- (2) 本測定法を用いれば，仕上げの方法に関係なく圧力分布を測定できることがわかった。

第 4 章

油の移着による表面形態の把握

4.1 緒言

あらゆる表面は、その表面が作られたプロセスの経緯によって異なった表面形態をしている。例えば同じ材料でも、旋削で仕上げられた表面では送りマークが、フライス加工された表面にはカッターマークが残る。このような加工における工具と被削材の相対運動で定まる幾何学的な表面形態の他に、工具との接触による材料の塑性流動による盛り上がりや、微小破壊など予測しがたい現象が表面粗さ形態を定めている。また、電解研磨された面も研磨むらのように材料のもつ電気化学的不均質や、そのプロセスで生じた泡や液の濃度むらなど偶発的に生じる加工むらによる表面粗さ形態が入ってくる。また研磨加工では、表面に硬さむらがあると、場所により研磨量が異なり表面に凹凸が残される。

このように準備された表面は、その加工プロセスの経緯によって異なった表面の様相を程しているが、その表面を把握する方法は、ほとんどの場合、触針式表面粗さ計や、光学的な方法を用いた非接触表面粗さ計によって行われている。しかし、それにはそれぞれ用途により一長一短がある。最近では STM（走査形トンネル顕微鏡）や AFM（原子間力顕微鏡）によって極めて微細な表面の凹凸状況が把握できるが、広い領域の表面状況の把握には必ずしも向いているとは云いがたい。

そこで本章では、最小で 10 nm オーダーの油膜を使って、二つの表面を接触させたとき、圧力分布の基となる接触状態がどのようなになっているかを把握するこ

とを試み、その結果から加工された各種表面の形態を把握する方法を明かにしたので報告するものである。

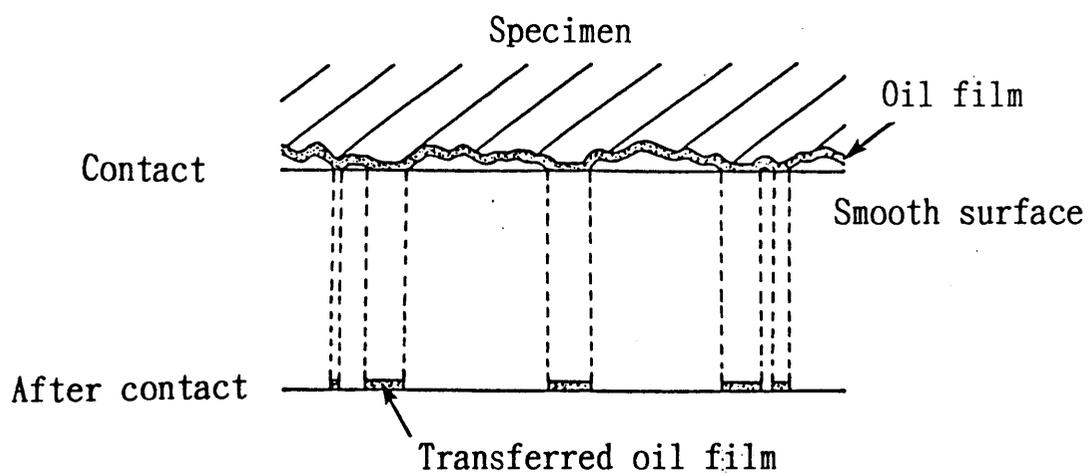


図 4-1 接触のモデル図

4.2 表面形態の測定原理

ある粗さをもった試料表面を、粗さの小さいなめらかな面に接触させる場合を考える。いま試料面に極めて薄い油膜（10 nmオーダーを想定）を付着させてから、なめらかな面（測定面として使用）に接触させると二面は図 6-1 に示すように油膜を介して接触する。

接触後、表面を引き離すと両表面間で油膜厚さに接近した所の油膜の一部が測定面に移着する。この油の移着した表面を観察すると、その点の大きさと分布とが、表面が互いに油膜厚さ以下に接近した場所の状況を表している。先にも述べたように二面間の実際の真実接触面はどこかを定義するのは難しいが、高い負荷を受けている表面で表面粗さに比べ充分薄い油膜を使えば、移着した油の存在する所が荷重負担をするという意味で真実接触面積を表すことにもなる。一方が平坦な面を使った場合、この移着油膜の状況は、試料の表面微細凹凸形状を油膜厚さで切断した表面の状況を表しているとも言える。その意味で本方法は、接触面積の測定、あるいは圧力分布の測定にも使える⁽²⁸⁾し、表面の解析にも使えることになる。

4.3 油膜厚さの設定

この実験で第一に問題となるのが油膜厚さの設定である。油膜厚さの設定は前章に述べた方法と同様に行った。

ここで、油の種類を変えて実現できた最小油膜厚さを測定した結果を表 4-1 に示す。

本実験では、主にスピンドル油を使って準備された 20 nmの油膜を用いたが、油膜厚さを厚くする場合は粘度の高い油を使用しないと一様に油を塗布しにくくなる。本実験では特に厚い油膜を用いていないので、全てスピンドル油を用いて塗り広げる範囲を狭くして厚さを設定し実験した。

表 4-1 油の種類による油膜厚さ

Type of oil	Viscosity (Cst) 50°C	Thickness (nm)
Silicon #50	9~	10
Spindle #60	3.7~	20
Turbine #90	20	20
Machine #120	20	25
Cylinder #90	160	35

4.4 各種仕上げ方法と表面接触状態

実験は平坦面で行ったが、その場合測定側の平坦面として A級のブロックゲージを使った。その仕様を表 4-2 に示す。

まず、最初の実験として各種機械加工された仕上げ面の表面について調べることとする。ここで使用した試料は S55C で表面を (a)ラップ仕上げ (b)サンドブラスト仕上げ (c)平面研削仕上げ (d)カップ研削仕上げの 4 種類の仕上げをした。その表面の仕上げを表 4-3 に示す。

表 4-2 ブロックゲージの仕様

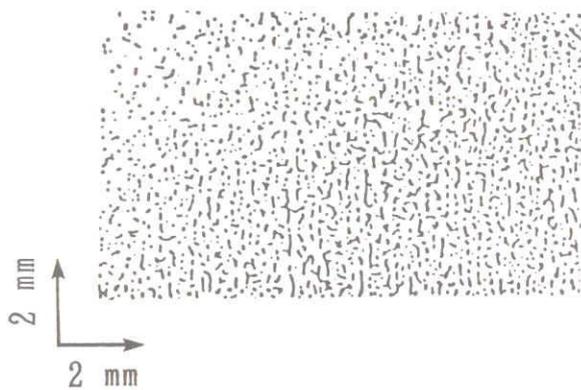
	Flat Surface
Material	Block gauge
Hardness(HV)	570
Surface Roughness	Ra=0.005 ~0.02 μm

表 4-3 表面仕上げ状態

Surface Finishing	Surface Roughness	Finishing Method
Lapping	Ra=0.6 μm	#320WA powder
Blasting	Ra=1.0 μm	#60A powder
Surface-grinding	Ra=0.6 μm	#60WA grinding wheel
Cup-grinding	Ra=0.7 μm	#40WA grinding wheel

そして、各仕上げ面に油を塗布し、300 MPaの圧力で測定面に接触させ、接触点の様子を観測した。図 4-2 は接触後の測定面に油が移着した様子を真上から光を当て、真上から撮影した顕微鏡写真を各仕上げごとに (a)～(d)に示す。この写真より黒い部分が接触により油が移着した部分であり、接触点である細かい点々が明確に確認することができる。また、仕上げ方法により真実接触点の大きさと分布の違いがよくわかる。この測定は前章で示したものと全く同じものである。

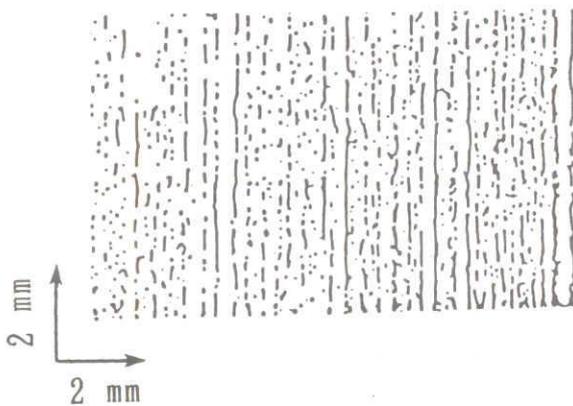
研削面についてさらに詳細に観察した結果を図 4-3 に示す。(a)は通常の研削面の一例であり、(b)はややびびり振動を起こした場合で表面の微妙な違いが認められる。



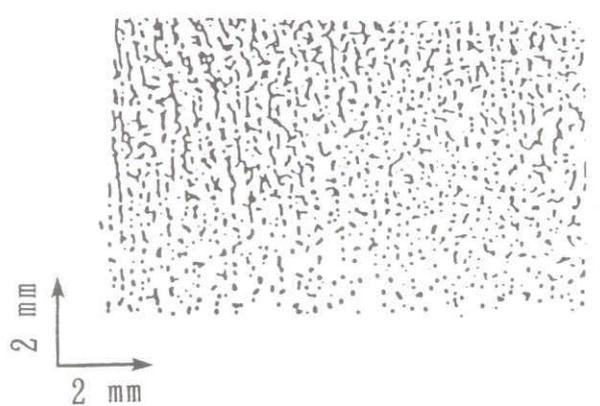
(a) ラップ仕上げ面



(b) サンドブラスト仕上げ面



(c) 平面研削仕上げ面



(d) カップ研削仕上げ面

図 4-2 油が移着した表面の顕微鏡写真

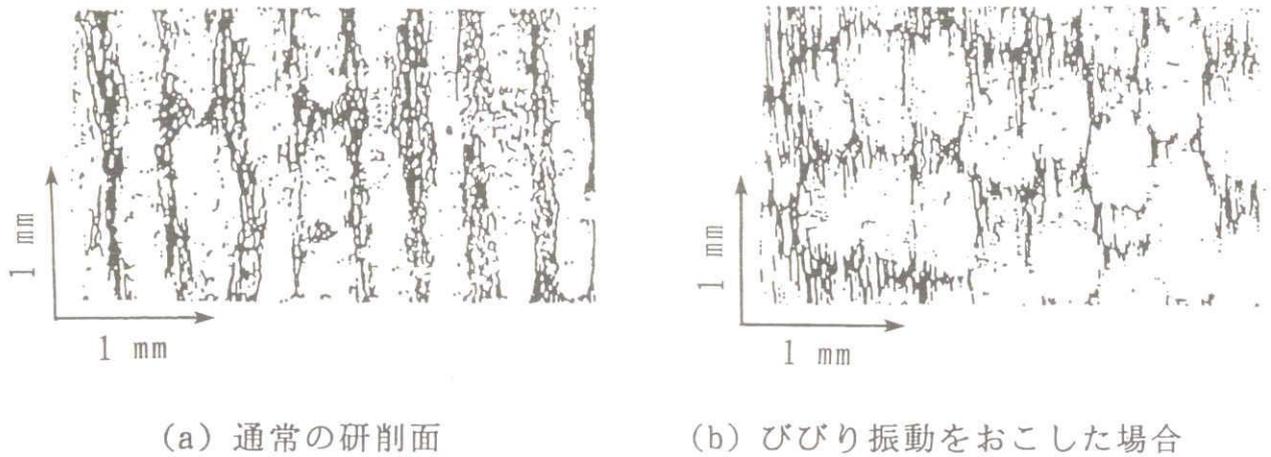
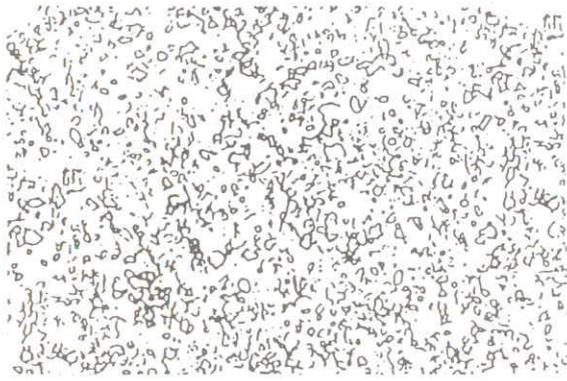


図 4-3 研削面

図 4-4(a) は、山口ら⁽²⁹⁾が開発した SiC ウィスカ砥石の使用前の顕微鏡写真である。(b) はその表面について調べたものである。この図から直径 1μ のウィスカが突出している様子とその分布がよくわかる。図 4-5 は、この砥石の表面が使用後どのようになっているかについて調べてみたものである。(a) はその面の顕微鏡写真である。(b) は油が付着した写真である。この写真から表面に筋状のパターンが存在することがわかり、初期面に比べて表面が荒れている様子が確認できる。図 4-6 は、この砥石を使用して研削した面 ($R_a = 0.01 \mu\text{m}$) を調べたものである。この写真よりカッターマークらしき筋が確認できる。

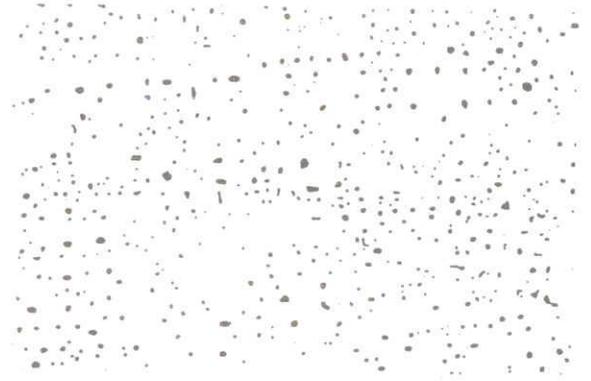
第 2 に超精密切削した面について調べた。図 4-7 は純アルミニウムを超精密切削仕上げをしたものであり、(a) は位相干渉式非接触表面粗さ計で測定した粗さ形状を示すが、この面について荷重 0.5 MPa 程度で軽く押した場合の接触面の状態を (b) に示す。この図より黒い部分が油の付着した部分で、旋盤の送りの様子と切削方向に沿った接触面の様子がよくわかる。

ついで図 4-8 は、既製で仕上げ方法は不明であるが、球 ($R = 1600$) との接触について同様に調べたものである。



0.02 mm

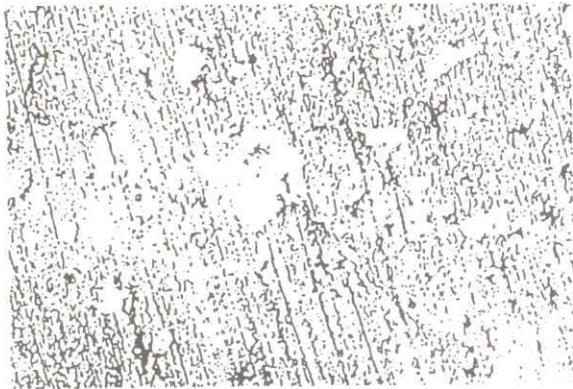
(a) 砥石の表面の顕微鏡写真



0.02 mm

(b) 油が移着した様子

図 4-4 SiCウイスカ砥石の使用前



0.2 mm

(a) 砥石の表面の顕微鏡写真



0.2 mm

(b) 油が移着した様子

図 4-5 SiCウイスカ砥石の使用後

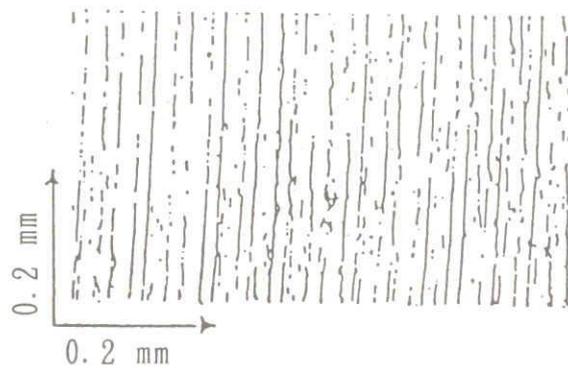


図 4-6 SiCウイスカ砥石を使用して研削した面

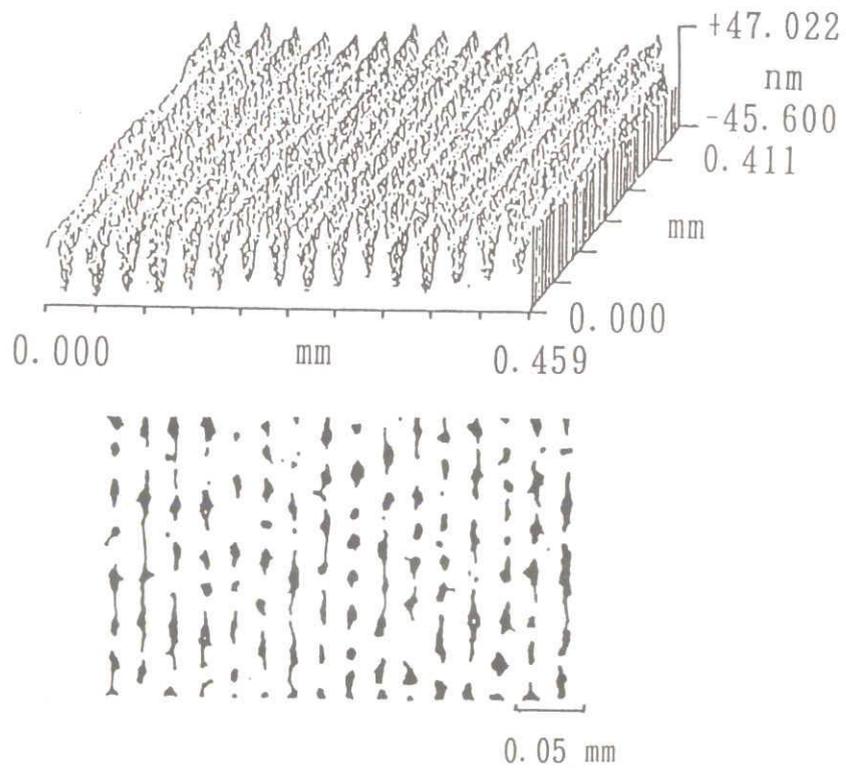


図 4-7 純アルミニウムの超精密切削仕上げ

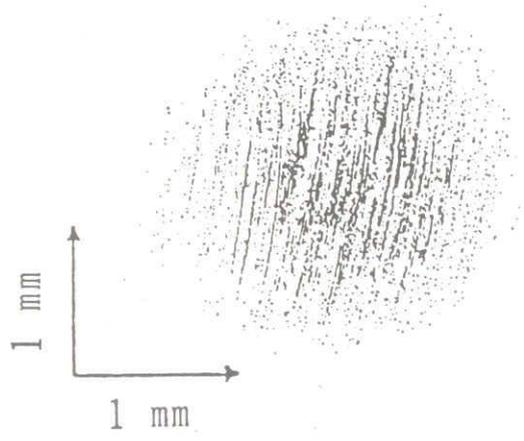


図 4-8 球 ($R = 1600$) との接触

4.5 材料の組織と表面形態

Al-Si(25%)合金の表面をバフ研磨(アルミナ粒子 $0.05\ \mu\text{m}$ 使用)し、極めてなめらかな鏡面と見られる表面の観察を行った。30~40 nmの油膜を使い、0.5 MPa程度の軽荷重の下で観察された、接触点の様子を図 4-9 に示す。

この図において、黒い部分が油が移着したところである。この図の接触面の形態は、丁度シリコンの結晶の形と一致している。このことは図 4-10 のモデルで示すように、バフ研磨によりシリコンより柔らかいアルミの方が削られ易く、シリコンの結晶の部分が突出し、その部分が接触面として検出されたものである。この様に表面仕上げを行うと、材料の硬い組織と、軟い組織により加工の程度が

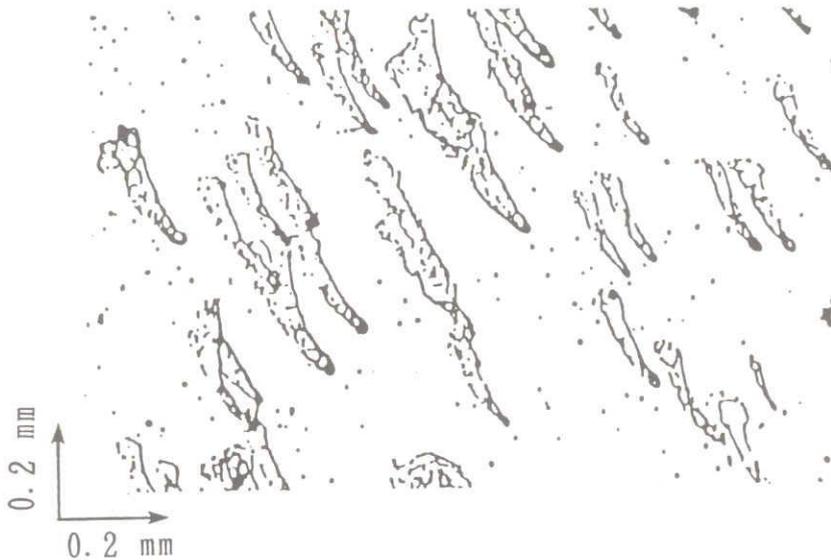


図 4-9 Al-Si(25%)合金をバフ研磨した面についての油の移着パターン

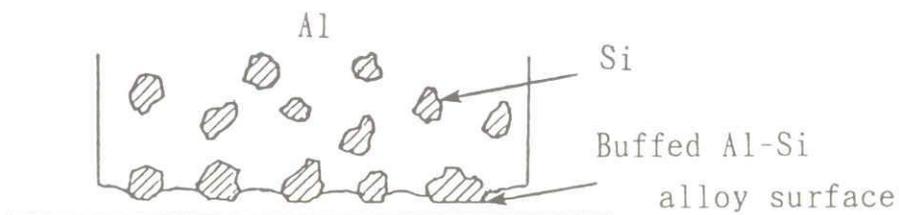


図 4-10 バフ研磨のモデル

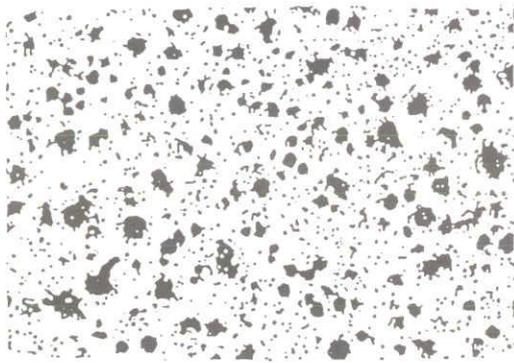
第2の例として、球状黒鉛鑄鉄（黒鉛 3.5 %）の表面を、上記したものと同様にアルミナ粒子 $0.05 \mu\text{m}$ を使用し、バフ仕上げをしたものについて表面の様子を調べた顕微鏡写真を図 4-11 に示す。(a) は、その仕上げされた表面の写真である。(b) は同様に油が付着した様子を示したものである。この場合、バフの砥粒により黒鉛が脱落した様子を確認することができる。また、図 4-12 はアルミナ粒子 $0.5 \mu\text{m}$ を用いバフ仕上げしたものである。(a) はその仕上げ面の顕微鏡写真である。(b) は、その表面について調べたものである。

これら二つの図から、アルミナ粒子 $0.05 \mu\text{m}$ を使用して仕上げたものは、球状黒鉛が油の移着パターンから確認できる。また、粗い粒径のアルミナで仕上げたものは、バフ研磨によるすじが存在する様子もはっきりと確認でき、 $0.05 \mu\text{m}$ で仕上げたものではそれが殆ど認められない。また、これらの図の (a) から、一般の光学顕微鏡では殆ど仕上げ面の状態の違いを把握することができないことがわかる。しかし、本方法ではそれを見い出すことができる。

ついで、凝片状黒鉛鑄鉄（黒鉛 3.5 %）について、表面を同様にアルミナ粒子 $0.05 \mu\text{m}$ を使用して、バフ仕上げをした面について調べてみた。その結果の顕微鏡写真を図 4-13 に示す。

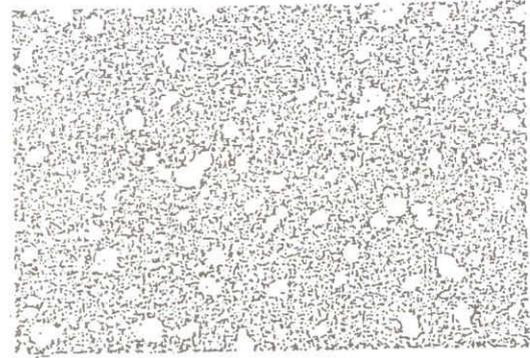
次に、S25C の材料を同様にバフ研磨したものについて エッチングによって観察された材料の組織の顕微鏡写真を図 4-14 の (a) に示す。(b) が 0.5MPa の負荷で移着油膜を調べた結果である。この写真から黒い縞のパーライトと白いフェライトの様子がよく観察される。すなわち硬いセメンタイトがバフ研磨により突き出して表面が作製されてしまい組織パターンの凸凹が表面に存在することを示す。

ここで、この表面において表面粗さ形状を測定してみた。図 4-15 (a), (b) はそれぞれ AFM と位相干渉式非接触表面粗さ計により測定を行った結果である。AFM の場合、測定範囲は、先の図に比べ $1/6$ 程度であり、非接触粗さ計の場合は殆ど同じである。この図から、このような表面をスキャンさせて測定する方法では表面の微妙な結晶パターンはうまく測定できない。



0.2mm

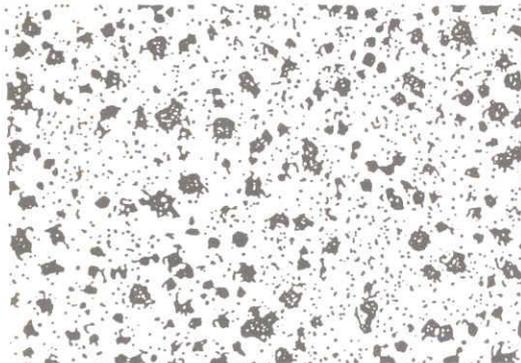
(a) 表面の顕微鏡写真



0.2mm

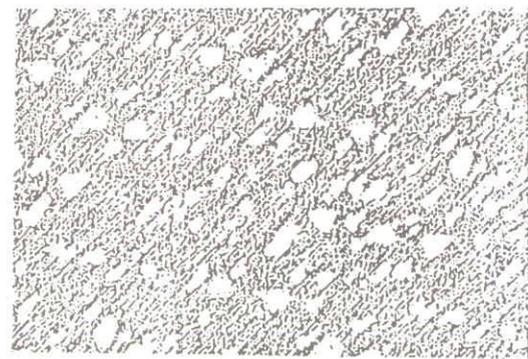
(b) 油の移着した顕微鏡写真

図 4-11 球状黒鉛鑄鉄をバフ仕上げした面（アルミナ粒子 $0.05 \mu\text{m}$ を使用）



0.2mm

(a) 表面の顕微鏡写真



0.2mm

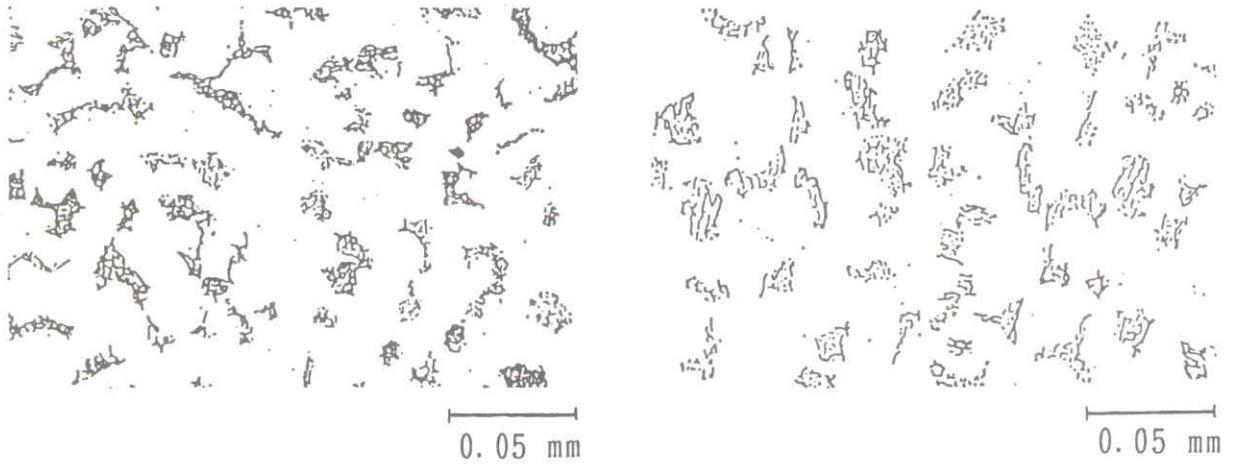
(b) 油の移着した顕微鏡写真

図 4-12 球状黒鉛鑄鉄をバフ仕上げした面（アルミナ粒子 $0.5 \mu\text{m}$ を使用）



図 4-13 油の移着した顕微鏡写真

(凝片状黒鉛鑄鉄をバフ仕上げした面, アルナ粒子 $0.05 \mu\text{m}$ を使用)



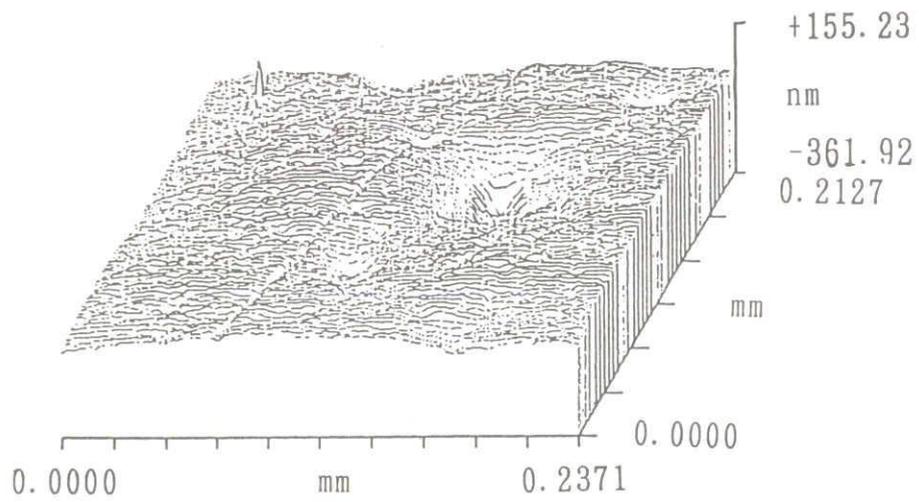
(a) 組織の顕微鏡写真 (腐食)

(b) 油の移着した顕微鏡写真

図 4-14 S25C のバフ研磨仕上げ (アルミナ粒子 $0.05 \mu\text{m}$ を使用)



(a) AFM による測定



(b) 位相干渉式非接触表面粗さ計による測定

図 4-15 S25C のバフ研磨仕上げ

しかし著者らの油膜による検出方法ではそれが明確にパターン化されて検出できることがよくわかる。

さらに、S55C 材を粒径 $1\ \mu\text{m}$ のアルミナ粒子を使って定盤の上でラッピング加工を行い、表面を観察した。その油膜のパターンを図 4-16 に示す。この図からもパーライト部の様子が認められ、驚くべきことにラッピング仕上げですら材料内部の結晶組織が表面に現れることが確認された。

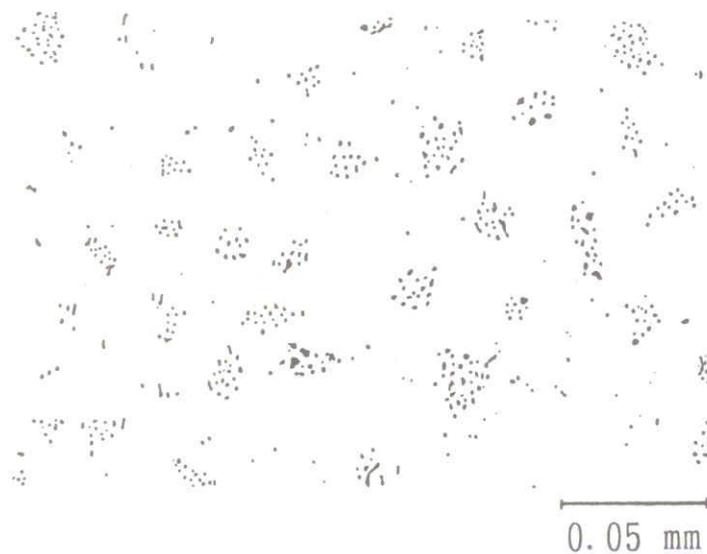


図 4-16 S55C のラッピング仕上げ
(粒径 $1\ \mu\text{m}$ アルミナ粒子を使用)

4.6 負荷曲線の推定

油膜厚さを変えて接触させることにより，凹凸断面の測定を試みた．つまり，表面粗さに比べ油膜がかなり小さい場合には，接触後移着油膜の占める割合は，粗さ曲線を油膜厚さだけ下方で切断したアボットの負荷率に対応すると考えることができる．実験は，アルミナ粒子 $0.05 \mu\text{m}$ を用い S25C をバフ研磨仕上げした面について，移着した油膜の分布を調べた結果を図 4-17 の(a)～(f)に示す．

この図より，70 nm の油膜で結晶パターンがくずれてしまうことから，セメンタイトの硬い組織がマトリックス（フェライト）より 50 nm 程度浮き上がっている様子が推定できる．また，これらのデータより接触点の面積割合から粗さ曲線を中心線で平行に切断した面を表すアボット負荷曲線に類似する曲線を求めてみたものを図 4-18 に示した．

また同様に，S55C を $40 \mu\text{m}$ のアルミナ粒子でラッピング仕上げした表面について調べてみた．その結果を図 4-19, 20 に示す．これらの結果より，本方法で特に接触で重要となる負荷面積が 10 % 以下の常に接触に関与する部分の曲線の様子が粗さ曲線から算出する方法より，より明確に測定できることがわかる．

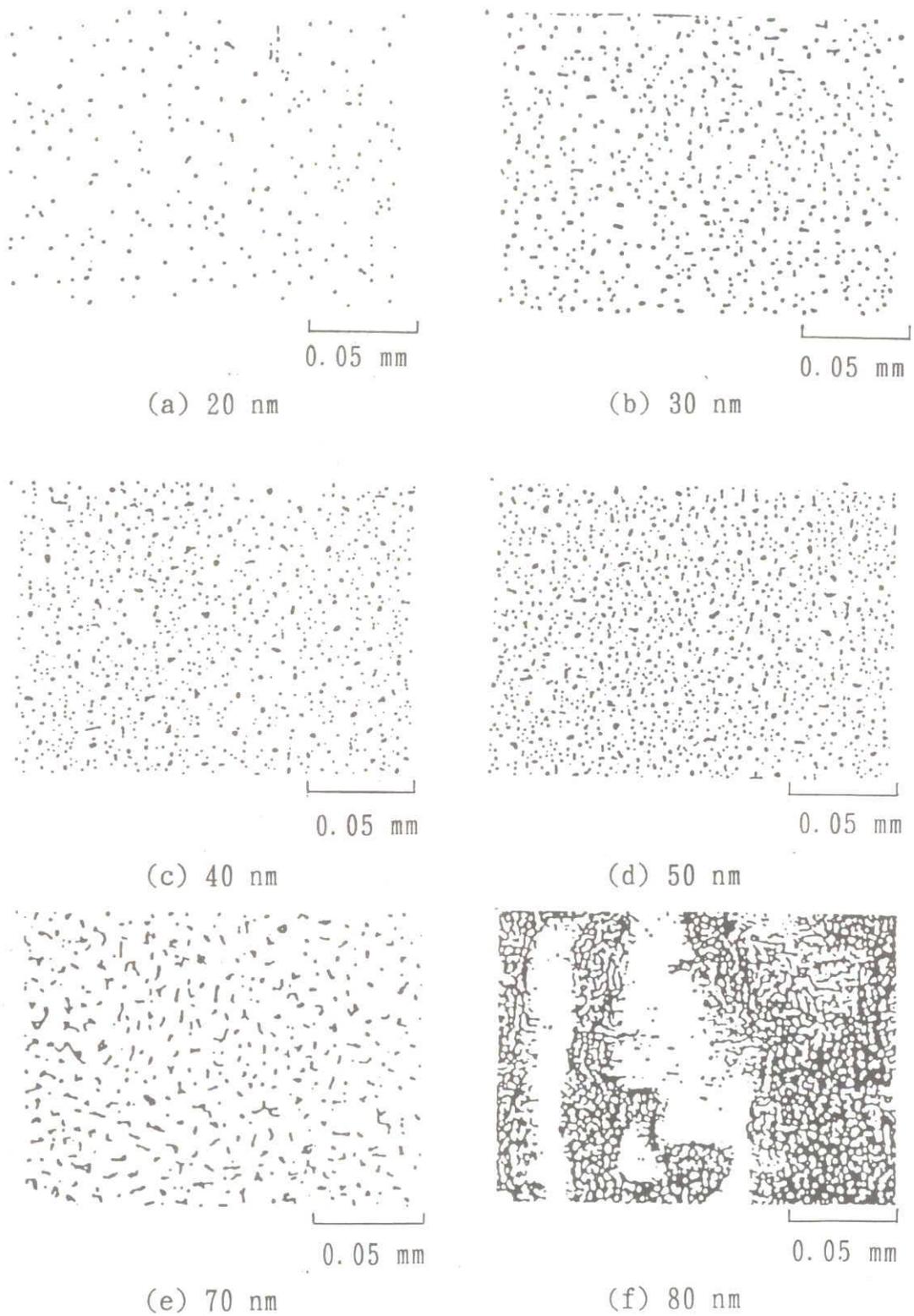


図 4-17 油膜厚さ変化による移着油膜の顕微鏡写真
 (S25C のバフ研磨仕上げ, アルミナ粒子 $0.05 \mu\text{m}$ を使用)

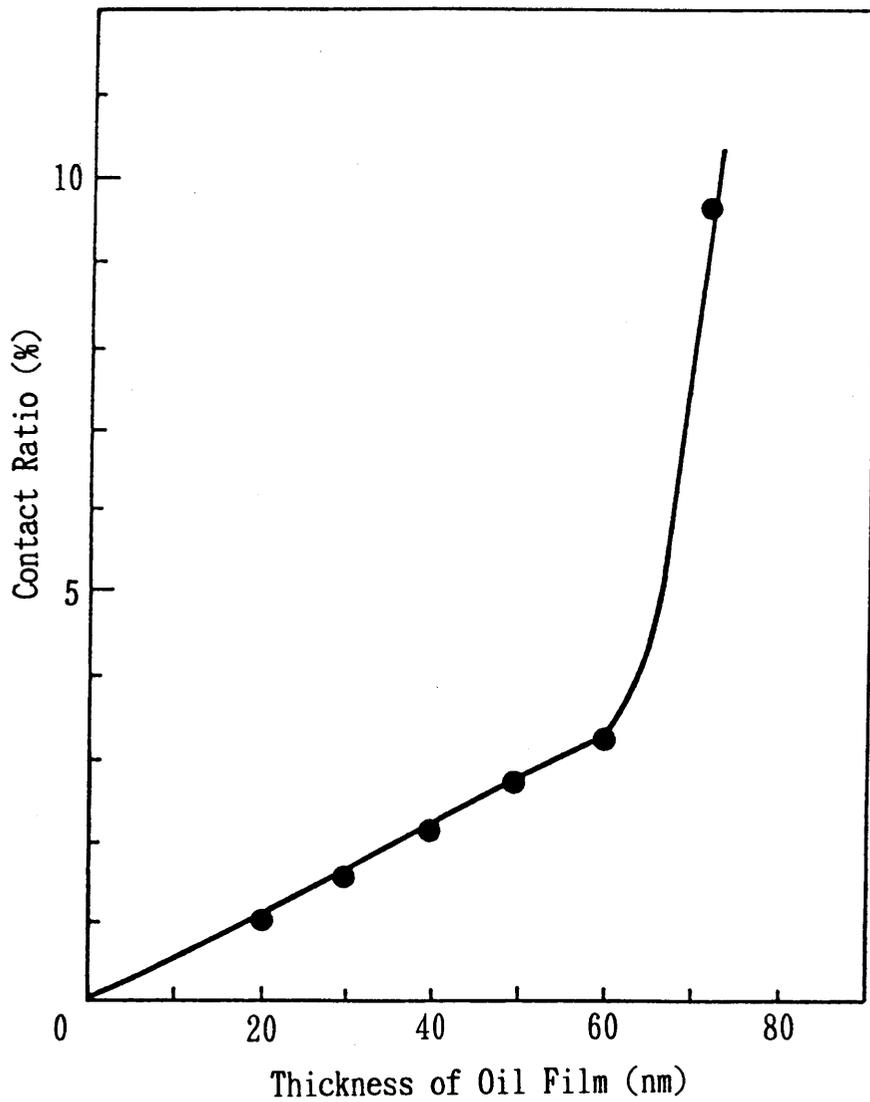


図 4-18 バフ仕上げ面における油膜厚さによる接触率の変化
 (S25C のバフ研磨仕上げ, アルミナ粒子 0.05 μm を使用)

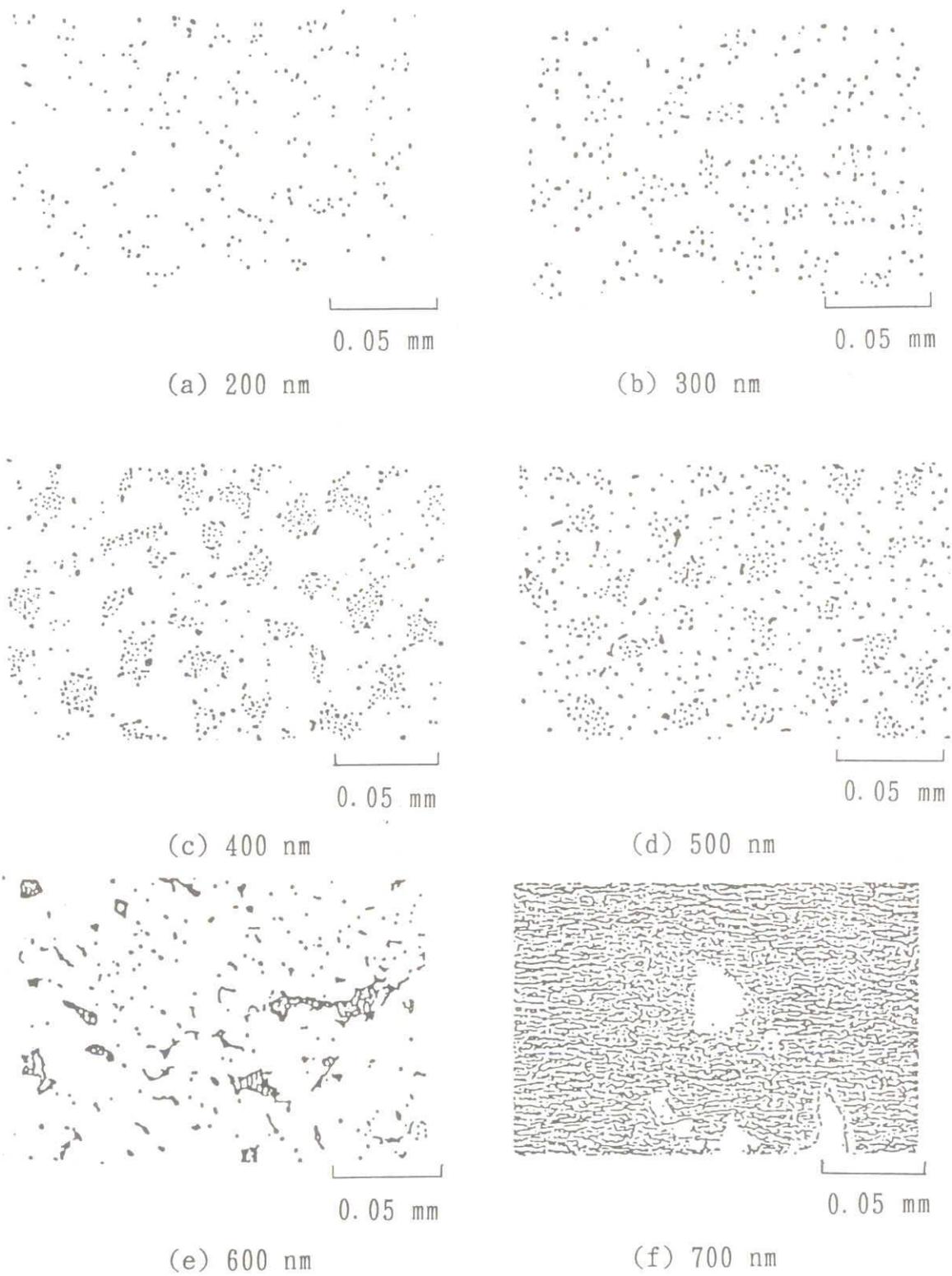


図 4-19 油膜厚さ変化による移着油膜の顕微鏡写真
 (S55C のラッピング仕上げ, アルミナ粒子 40 μm を使用)

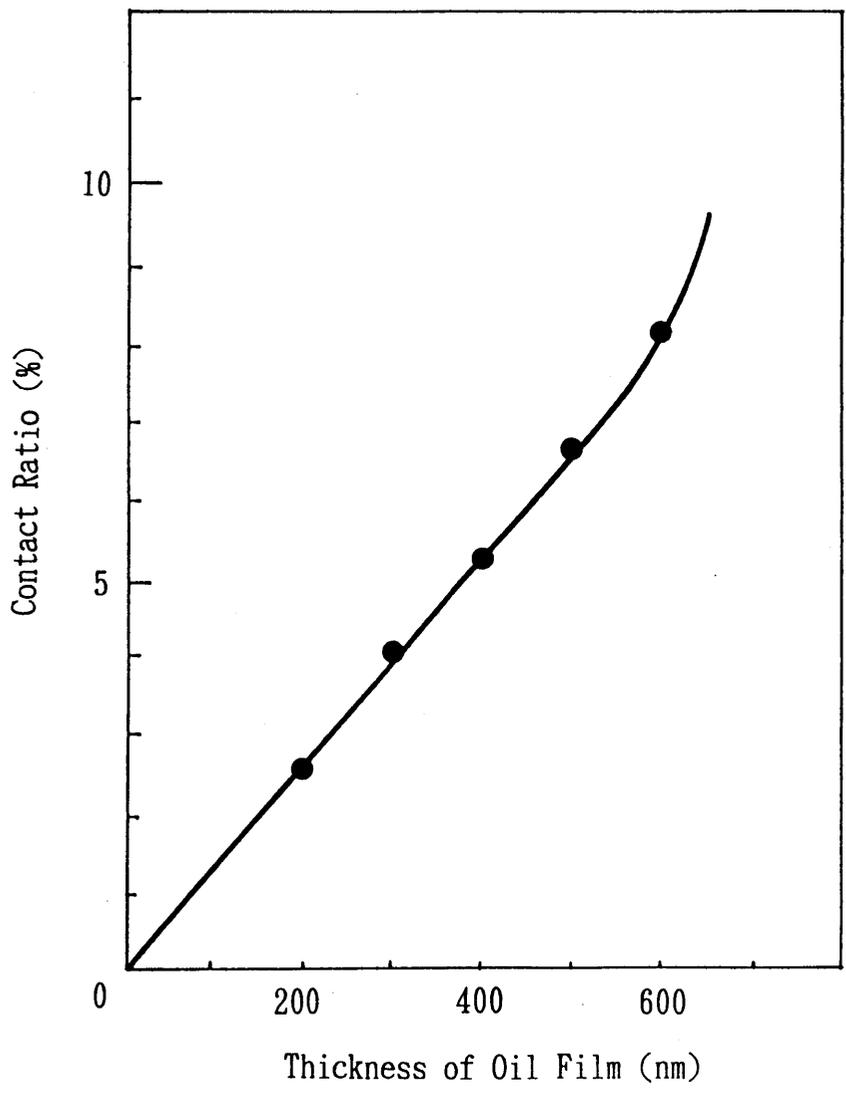


図 4-20 ラッピング仕上げ面における油膜厚さによる接触率の変化
(S55C のラッピング仕上げ, アルミナ粒子 40 μm を使用)

4.7 結言

- (1) 接触面の一方に付着性の物質を塗布し接触させることで、接触点の分布状況ひいては表面粗さ形態が容易に調べられることを示した.
- (2) バフ仕上げ及びラッピングで仕上げられた表面において、その表面は材料内部組織の状態を反映した表面形態になっている様子が鮮明に観測することができた.
- (3) ここで提案した表面状態の検出方法で表面負荷曲線が推測できることを示した.

第 5 章

結 論

本研究では、接触面の圧力分布を光の反射を用いて求める方法を試み、まず、接触前後の表面の微細突起形状変化が光の表面散乱反射特性を変化させることを利用して求める方法を開発した。さらに、油の移着を利用して求める新しい方法を開発した。

この開発にあたって本研究で得られた結論をまとめると、以下のようである。

(1) 接触における表面微小突起の変化を、表面の光の散乱反射特性を用いて調べることにより圧力分布が簡単に測定できることを示した。

(2) 接触面圧力分布測定装置を作製し、簡単な操作で接触面圧力分布を自動的に測定し、三次元表示することができた。

(3) 光の散乱反射特性を利用し、金属接触面に働く圧力を求める一つの方法として、表面が平坦化され強度の光沢を有する研削面に対して、腐食による表面処理を行うことで容易に圧力分布を測定でき、それを三次元表示することで、本手法を圧力分布測定法の一つとして確立することができた。

(4) 接触面の一方に付着性の物質を塗布し接触させることで、圧力を伝える接触点の分布が明確に把握できることを示した。そして、圧力分布測定装置を試作し、この装置を用いて油の移着を検出することから接触圧力分布が測定できることを示した。

(5) 本論文で示した二つの圧力分布測定法の特徴をまとめると以下のである。

- (a) 過去に報告された各種測定法と比べて、大がかりな特別の実験装置を必要とせず、比較的簡単に接触圧力を測定することができる。
- (b) 本方法は光を使って表面形状変化を非接触でとらえ、圧力を求めるものであるから、測定の際、測定面に傷をつけることがないという利点をもつ。
- (c) 表面における微小突起の間隔と同程度以下の測定もレーザ光を微小に絞り、分解能を上げることによって、比較的狭い部分の圧力測定が可能であるという特徴をもっている。

(6) ナノメータオーダの油膜を使って実際の加工された表面を解析する方法ができた。その中でラッピングされた鋼の表面に結晶組織が浮き出ることを見出すことができた。

謝 辞

終わりに、本研究を通じて終始懇切なる御指導とご鞭撻を賜りました名古屋大学工学部 山口勝美教授に心より感謝いたします。また本論文をまとめるにあたり、多大な御教示と御助言を賜りました名古屋大学工学部 近藤一義教授ならびに佐藤一雄教授に厚く御礼申し上げます。

さらに、実験を遂行するに当たり適切なる御助言と惜しみない御協力を頂きました名古屋大学工学部 古橋利保技官，布目清成技官および，元名古屋大学工学部助手 鬼頭武彦様に深く感謝いたします。また同じく実験を遂行するにあたり多大な御協力を頂きました当時大学院博士前期課程 水振文浩氏〔現在 本田技研（株）勤務〕に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N.,
Theory of Elasticity, 3rd ed.,
McGraw-Hill, New York, N. Y., 1970.
- (2) Love, A. E. H.,
A Treatise on The Mathematical Theory of Elasticity,
Dover Publications, Inc. 180 Varick Street, New York 14, N. Y.,
1944.
- (3) Sneddon, I. N. and Elliott, H. A.,
Nonuniform Pressure Within an Elliptical Hole,
Quart. Applied Math., Vol. 4, (1946), 262.
- (4) Greenwood, J. A. and Williamson, J. B. P.,
Contact of Nominally Flat Surfaces,
Proc. Roy. Soc. Lond., A295 (1966), 300.
- (5) Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C. and Topp, L. J.,
Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures,
J. Aero. Sci., 23, (1956), 805.
- (6) Durelli, A. J. and Riley, W. F.,
Introduction to Photomechanics
PRENTICE-HALL, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1965.

- (7) Theocaris, P. S.,
Stress Singularities Due to Uniformly Distributed Loads Along
Boundaries,
Int. J. Solid Structures, Vol. 9, (1973), 655.
- (8) 高橋賞・清水紘治,
材料力学と強度評価の基礎,
山海堂, 1989.
- (9) Ito, Y., Toyoda, J., and Nagata, S.,
Interface Pressure Distribution in a Bolt-Flange Assembly,
ASME, J. of Mechanical Design, Vol. 101, No. 2, (1979), 330.
- (10) Polijaniuk, A and Kaczmarek, J.,
Novel Stage for Ultrasonic Measurement of Real Contact Area Between
Rough and Flat Parts Under Quasi-Static Load,
Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 21, No. 3, May,
(1993), 174.
- (11) Rooyen, G. T., and Bockofen, W. A.,
Friction in Cold Rolling,
J. of Iron and Steel Inst., Vol. 186, No. 6, (1957), 235.
- (12) Plock, R.,
Die Übergangsteifigkeit von Schraubenverbindungen,
Ind. Anz., Vol. 93, No. 27, (1971), 571.

- (13) 加藤・山口・加藤（隆），
表面あらさ変化による金属接触面の圧力分布測定法（第一報），
機械学会論文集（第3部），44巻381号（1978），1742.
- (14) 加藤・山口・加藤（隆），
表面あらさ変化による金属接触面の圧力分布測定法（第二報），
機械学会論文集（C編），46巻404号（1980），438.
- (15) 加藤・山口・加藤（隆），
表面あらさ変化による金属接触面の圧力分布測定法（第三報），
機械学会論文集（C編），48巻427号（1982），408.
- (16) 加藤・山口・加藤（隆），
表面あらさ変化による金属接触面の圧力分布測定法（第四報），
機械学会論文集（C編），48巻433号（1982），1482.
- (17) 山口・加藤（清），
粉体を用いた金属接触面の圧力分布測定法，
精密工学会誌，50巻10号（1984），116.
- (18) Bowden, F. P. and Tabor, D.,
The Friction and Lubrication of Solids,
Oxford University Press, Clarendon Press, Oxford, (1950), 25.

- (19) Bowden, F. P. and Tabor, D.,
The Friction and Lubrication of Solids,
Oxford University Press, Clarendon Press, Oxford, (1954-Part 1),
(1964-Part 2).
- (20) Dyson, J. and Hirst, W.,
The True Contact Area between Solids,
Proc. Rhys. Soc. (London), 67B, (1957), 309.
- (21) Kraghelsky, I. V. and Demkin N. B.,
Determination of the True Contact Area,
Published in Friction and Wear in Machinery, Translated
by the ASME, New York, 14, (1960), 30.
- (22) 池 浩,
感圧箔による接触面圧分布測定,
塑性と加工, 33巻, (1992), 1394.
- (23) Archard, J. F.,
Elastic Deformation and the Laws of Friction,
Proc. Roy. Soc. (London), A243, (1957), 190.
- (24) Greenwood, J. A., and Tripp, J. H.,
The Elastic Contact of Rough Spheres,
Trans. ASME, Ser. E, 34-1 (1967), 153.

- (25) 山口勝美・打田元美・和田直敏・五十君清司,
光の表面反射特性を用いた接触圧力分布測定装置の開発,
精密工学会誌, 54巻3号 (1988), 536.
- (26) Yamaguchi, K., Uchida, M., and Abraha, P.,
Measurement of Pressure Distribution on Contact Surface
by Reflection of Light (Effect of Surface Etching),
Proc. of Japan Int. Tribology Conf., Nagoya (1990), 1271.
- (27) K. Yamaguchi, M. Uchida, and F. Mondori,
Measurement of Pressure Distribution Between Contact Surfaces
by Light Reflection,
Trans. ASME, J. Engng. Industry, Vol. 118-1 (1996), 37.
- (28) 山口勝美・打田元美,
移着油膜による接触面圧力分布の測定法,
精密工学会誌, 61巻3号 (1995), 372.
- (29) 山口勝美・洞口 巖
方向をそろえた炭化けい素ウイスカ砥石の開発
-レジノイド砥石の製作と仕上げ面粗さ-,
精密工学会誌, 59巻5号 (1993), 791.