

①

接 触 境 界 面 の ト ラ イ ボ ロ ジ ー
現 象 評 価 に 関 す る 研 究

尾 田 雅 文

新 潟 大 学 大 学 院 自 然 科 学 研 究 科

生 産 科 学 専 攻

目 次

第 1 章	緒 論	1
第 2 章	接触境界面における超音波の特性	12
第 2.1 節	緒 言	12
第 2.2 節	波動方程式	13
第 2.3 節	音波の反射及び透過	18
第 2.4 節	超音波を利用した摺動状態の評価	24
2.4.1	AE と測定システム	24
2.4.2	超音波顕微鏡と物性評価	27
第 2.5 節	超音波を利用した接触圧力の測定	34
2.5.1	接触圧力測定の原理	34
2.5.2	接触圧力とエコー高さ比の関係	39
2.5.3	接触端部の反射波特性	50
第 2.6 節	時間一周波数 2 次元解析を利用した応力測定	61
2.6.1	ウィグナ分布	61
2.6.2	接触圧力とウィグナ分布の関係	62
2.6.3	音弾性の性質	78
2.6.4	ウェブレット変換	84
2.6.5	応力と音速の関係	90
第 2.7 節	結 言	94
第 3 章	AE を利用した摺動面損傷評価	96
第 3.1 節	緒 言	96
第 3.2 節	硼化处理鋼の摩擦特性	99
3.2.1	摩耗実験と AE 発生特性	99
3.2.2	焼き付き性実験と AE 発生特性	120
第 3.3 節	TiN 薄膜の付着力評価	124

3.3.1 試験片と実験方法	126
3.3.2 結果および考察	132
第 3.4 節 結 言	145
第 4 章 ゴム摺動面におけるアブレーションパターン形成機構の解析	147
第 4.1 節 緒 言	147
第 4.2 節 非摺動時の接触圧力	149
4.2.1 実験装置と実験方法	149
4.2.2 結果及び考察	152
第 4.3 節 摺動時の接触圧力	162
4.3.1 実験装置と実験方法	163
4.3.2 結果及び考察	168
第 4.4 節 結 言	182
第 5 章 鋼—セラミクス摺動時のなじみ過程における摩擦応力の測定	185
第 5.1 節 緒 言	185
第 5.2 節 実験装置と実験方法	188
第 5.3 節 結果及び考察	190
第 5.4 節 結 言	197
第 6 章 結 論	199
謝 辞	203
参 考 文 献	204
付録 (A) ポイントマッチング法による接触圧力解析	221
付録 (B) ゴム摺動時のビデオカメラを用いた観察法	227

第1章 緒 論

超音波に関する研究の歴史はやや古いが、産業分野等への応用は比較的新しい。近年、その応用範囲の急速な拡大に伴い、超音波技術は振興技術の一つとして注目を集めるようになってきている。例えば、漁船の多くは超音波魚群探知機を搭載し、効率よく漁群を探索することに役立てており、大型船舶は超音波測深機を装備して航海の安全に努めている。また、鉄道車両などの車軸は超音波探傷器によって定期的に検査され、折損事故を防止している。さらには、人体に超音波技術を適用し、乳癌や胆石症等の早期発見等の診断へ利用するのみならず、超音波による治療・手術法も開発されている。一般的に、超音波利用技術の多くは、音響伝播特性の変化を利用した物性評価技術⁽¹⁰⁶⁾⁻⁽¹⁰⁸⁾や非破壊検査技術⁽¹¹⁰⁾⁻⁽¹¹¹⁾に利用されている。特に、後者は超音波利用技術の代表例であり、超音波探傷試験¹²⁾とアコースティックエミッション(AE)法⁽¹⁾⁻⁽¹⁷⁾が注目されている。超音波探傷試験では、材料中に超音波を送信し、内部の欠陥などから反射して戻ってきた超音波を受信して、解析を行う。一方、AE法では材料自身が超音波を発生するので受信装置のみで測定が可能である。すなわち、物体に引張荷重、圧縮荷重やせん断荷重等が作用して破壊に至る場合、最初に微少なレベルの破壊、すなわちマイクロクラックが生じ、それらが進行して最終的な破壊である主破壊に至る。このように微少なレベルの破壊過程で生ずる破壊音すなわちAEを検出することによって、破壊の予知や破壊現象の解析が行われる。同様な目的で利用されているx線を利用する手法に比べ被爆の害がなく、その法的な取り扱いも簡易化されており、超音波機器の使用者に対する教育や訓練も煩雑ではない。その一方で、現在の超音波利用技術は測定精度が必ずしも満足しうるレベルに達していない点、さらには超音波探傷試験のように得られた超音波波形を解析するためにはある程度の経験や勘を必要とする等の問題点があげられる。従って、超音波技術が今後さらに発展し、高精度な評価方法を実現し、さらにはニューラルネットワーク等を利用した波形パターン解析法の導入やエキスパ

ートシステムの構築等により簡便な利用が可能になることによって、超音波技術は短期間に利用可能になるとと思われる。

「相対運動しながら相互作用をしあう表面、あるいはそれに関連する実
際の問題を対象とする科学と技術」を扱う分野をトライボロジーと称する。
この用語は、1966年英国で、摩耗・摩擦・潤滑の経済効果への重要性を
まとめた Jost 報告の中で最初に用いられている。機械を正常に駆動させる
ためには、機械の運動を担う機械要素の摺動面の摩擦や摩耗現象を十分に
把握し、これらを考慮した設計を行い、さらにはメンテナンスを必要とす
る。特に、近年生産されている機械の摺動部は非常に精密で高い精度を要
求することから、わずか数ミクロン摩耗したとしても、性能を十分に発揮
できない場合も考えられることから、摩擦や摩耗対策は、機械の寿命に関
わるキーテクノロジーとして認識されている。

一方、工業技術や産業の発展に伴い、使用される材料の機能特性，例えば耐蝕性，耐摩耗性などの向上は，ますます厳しく要求されるようになっている．このため，材料表面を改質することによってバルクの性質を生かした上で，さらに新しい表面の機能や性質を付加した高機能材料が盛んに利用されている．しかしながら，表面改質層のトライボロジー特性は未だ十分に解明されておらず，このような観点から表面処理材の摩耗特性に関する研究例^{(118)～(119)}が多く見られる．また，摺動面の多くは潤滑油等を用いて，摩擦・摩耗特性を改善しているが，このような場合，ストライベック曲線に示されるように作動油の粘度，摺動速度，作用荷重等の影響により潤滑状態は変化する．例えば「流体潤滑」や「混合潤滑」と呼ばれる接触状態で摺動する．摩耗を極めて少なくするためには流体潤滑状態を維持可能な摺動条件を保つことが重要であるが，例えば機械の運転開始直後等は潤滑油の粘度が変化しやすく定常状態に移行するまで，混合潤滑状態のような過酷な状態で摺動される場合も少なくない．このような観点から，流体潤滑及び境界潤滑の異なる状態に於いて，金属同士の摩擦について数多く研究がなされている．中原⁽¹²⁰⁾⁽¹²¹⁾及び久門等^{(65)～(68)}は，表面粗さと摩擦特性の関係及び摩耗粉生成機構を接触電気抵抗等を利用し，流体潤滑時に於いても表面状態によって摩擦係数が変化すること，また境界潤

滑状態に於ける摩耗量は摩耗粉の生成頻度の増減に起因することを明らかにしている。

エンジニアリングプラスチックの性能向上に伴って、摺動を伴う機械要素に高潤滑性プラスチック等の固体潤滑剤を用いる傾向が見られる。山口⁽¹²³⁾・⁽¹²⁴⁾は各種プラスチックの摩擦係数を求め、乾燥状態に於いても比較的高速で中低軸圧程度に於いては $\mu = 0.02 \sim 0.1$ 程度の摩擦係数で運転が可能であることを示している。一方、高分子材料の一種であるゴム材料の摺動面には、摺動方向に対して直角にアブレーションパターン^{(125) - (128)}と呼ばれる波状模様がしばしば見られる。このパターンの間隔は接触相手の表面粗さ、ゴムの弾性係数及び負荷の大きさ等によって変化する。車両用ゴムタイヤにおいては、周期的な異常摩耗痕を生ずる場合もあり、事故防止の観点からこの様なゴム表面に現れるアブレーションパターンの特性を調べることは重要である。これに対して、Zhang⁽¹²⁹⁾等は半球状ゴム試験片がガラス円板上を摺動する場合のパターン生成過程を観察し、パターン生成時におけるき裂進展角度や平均接触圧力とパターン間隔の関係を明示している。その他、接触圧力に基づいてパターンの生成機構を論じた研究例⁽¹³⁰⁾は比較的多く見られるが、いずれにおいても接触圧力の評価方法が十分ではないようであり、より具体的なアブレーションパターン生成機構の解明が待たれている。

「固体材料内部の微少な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」であるアコースティックエミッション(AE)としての最初の研究は Kaiser によって金属材料の引張試験時に発生する「雑音」として報告されている。さらに、1960年代に圧力容器やロケットの耐圧試験に適用されて以来、多くの研究者に注目され、例えば、切削加工を行う工作機械に AE センサを取り付け、軸受け部の摺動時や加工時に発生する AE 信号を測定し、摺動面の危険予知や工具の寿命検知等を扱った研究^{(131) - (17)}等、数多くの報告が見られる。この中で、稲崎等^{(3)・(8) - (7)}や Kannatey-Asibu⁽¹⁾はエンドミル工具の損傷監視技術を確立するために、AE センサを用いたエンドミル工具切れ刃欠損検知法及び小径ドリル折損検知法を提案している。さらに、Domfeld 等⁽²⁾は AE 法を研削加工時

のモニターに適用し、異常研削加工の検出に適用可能であることを示している。この AE 法を滑り軸受等の摺動部に適用すれば、摺動状態の評価に関する多くの知見が得られると考え、摺動時の AE 発生挙動に関する研究⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁷⁾が多く報告されている。例えば、和田ら⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾は摩耗試験時に得られる AE 信号を評価し、潤滑油膜の状態や摩擦係数の推定が可能であることを示している。また、久門ら⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁸⁾はセラミクス繊維強化金属とセラミクスの組み合わせを対象とした摩耗試験を行い、その際に発生する AE 信号のリングダウン計数率を求めることにより、AE 計数率と摩耗率の関係を定量的に示すとともに、表面損傷と潤滑状態の変化を評価するにあたって AE 法が有効であることを示している。一方、Au-Yang⁽¹¹⁾⁽¹²⁾はチェックバルブのモニタリングシステムに AE センサのみならず超音波探傷器を組み入れて、良好な診断が可能であることを示している。

機械の摺動部の様にすべりを伴う接触状態を対象とした接触圧力測定法の確立は、工学的応用面では計り知れない程重要な意味を有している。特に、機械の起動時は潤滑剤が十分供給されないまま摺動すると要素部品の接触面は最も過酷な接触状態になる。従って、この様な状態の接触圧力を測定することは機械や構造物の最適設計を行う上で有益な知見を得ると共に、例えばすべり軸受けの軸受けブシュの交換時期を知らせるワーニングシステム等への応用が可能となる。摺動時の接触圧力を測定するためには摩耗の影響を如何に考慮するかが問題となり、接触部材の状態を含めた評価が必要不可欠であると思われる。実際の摺動面に於いてもこの種の接触に伴う摩擦に対して、トライボロジー的研究が多数なされており、得られた知見が機械の安全設計等に生かされている。この様な観点から、Hertz が弾性接触問題を扱って以来、接触圧力評価法に関する研究は今日までに多くの人々によって行われている。これまでに提案された方法では弾性論に基づく理論解析法⁽⁴⁹⁾⁻⁽⁵³⁾やコンピューターの発達に基づく有限要素法⁽⁵⁴⁾⁻⁽⁵⁸⁾、境界要素法、ポイント・マッチング法⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾等の数値計算法が知られている。また、静的接触時を対象とした研究例のみならず、摺動時を対象とした計算例⁽⁶¹⁾⁻⁽⁶³⁾も示されている。特にスーパーコンピューターの出現と共にこれらの数値計算法の進展は目覚ましく、従来困

難とされた問題も扱うことが可能になっており、ニューラルネットワーク、逆問題等の数値解析法が提案されている。しかしながら、実際の接触メカニズムを解明するためには上述の方法に於ける境界条件の考慮方法等で未解決の問題が多く残されており、接触圧力の正確な評価法に関する研究の必要性が強く指摘されている。

この様な観点から実地的な接触圧力の評価法、すなわち実験的な接触圧力測定法に関する研究が種々行われている。静的な接触状態の接触圧力と取り扱った研究例⁽²⁹⁾⁽⁶⁹⁾⁻⁽⁸⁸⁾も多く、Plock⁽⁷³⁾らは感圧紙法を用いて主にボルト締結体の接触圧力を測定し、その簡便さを示している。この方法は、無色染料及び発色材を充填した微小カプセルをそれぞれ塗布した2枚のシートを重ね合わせると共にこれを接触面間に挿入する方法である。荷重が作用すれば無色染料と発色材が化学反応して無色染料が発色する。この発色濃度を専用の濃度計で測定すれば接触圧力が決定出来る。しかしながら、測定対象面に挿入するフィルムの厚さは2枚で200 μm 程度あり、介在物としての影響を無視しえないこと、負荷過程において接触圧力の最大値のみ測定可能であることから対象とする状態の接触圧力を測定し得ないこと、また、測定面が曲面である場合は測定が困難である等の問題点がある。一方、Backofenは接触面に歪ゲージを装着したピンを埋め込み、このピンのたわみから接触圧力を測定する方法を示し、水口⁽⁷⁰⁾はこの測圧ピン法を利用してフランジ継ぎ手に代表されるボルト締結体に作用する接触圧力の測定を行っている。小島⁽⁷¹⁾はパイプ型ひずみゲージを用いて簡単な接触圧力が測定できるように測定位置でのひずみの値をその位置での圧力に換算する方法を提案し、四角柱を塑性圧縮する際の2次元圧力分布を求めるとともに、その妥当性を示している。しかしながら、圧力をセンシングするピンが接触面よりも僅かに突出しているため正確な圧力測定は困難である。一方、加藤ら⁽⁷²⁾⁻⁽⁷⁴⁾は接触によって生ずる表面突起の塑性変形に着目し、これにより接触圧力の定量的測定法を示している。更には、これら表面突起の変形と反射光の散乱現象を利用した測定法⁽⁷⁵⁾についても示している。しかしながら、二物体の接触に於ける表面突起の変形は弾性変形及び塑性変形の双方から成り立っているのに対し、この方法で

は塑性変形のみが圧力評価の対象となるため実際の接触の状態を対象とした測定は困難である。尾田ら⁽¹⁷⁶⁾は圧電セラミックスのピエゾ効果を利用して接触圧力測定用システムを開発し、円筒側面、球面及び平面等をセンサー表面に押し付けた場合の圧力分布を測定した。そして、この方法を用いればかなり精度の良い測定が可能であることを示しているが、圧力センサーの厚さ及びメッシュの粗さに改良すべき点があることも指摘している。この様に、接触圧力を直接測定する方法は種々示されているがいずれの方法にも解決すべき多くの問題点が残されている。

他方、より現実的な観点から、摺動時の接触圧力を取り扱った研究例も見られる。流体潤滑状態に於ける接触圧力は古くからマノメーター等を利用して主にすべり軸受けを対象とした測定が行われている。これに対して、混合潤滑及び境界潤滑状態に於いては、前述のマノメーター等による測定法は使用困難であり、また摩耗等の影響があるために十分な解析は行われていない様である。摺動時の接触圧力を測定した例⁽¹⁸⁴⁾として、接触応力場の亀裂の応力拡大係数を扱った一連の研究の中で尾田ら⁽¹²⁸⁾は光弾性を利用して摺動時の応力状態を解析している。光弾性に使用したエポキシ系樹脂の耐摩耗性が低く、接触面で生ずる熱や摩耗によって接触状態は時間と共に刻々と変化するが、摺動時に於ける等色線パターンは垂直方向荷重及び接線方向荷重を静的に与えた時とほぼ同様な傾向を示す。このことから摺動時の接触状態は単に静的に垂直荷重及び接線荷重を接触面に与えた場合と等価と見なせることを示した。しかしながら、摺動時の熱的効果等を考慮しておらず、実際の接触圧力分布はこれとは異なるものと思われる。また、小山⁽¹⁸⁵⁾は、マンガンンを蒸着したフィルム状の圧力センサーを用いて、主に転がり軸受け等の転がり接触を対象とした接触圧力を測定し良好な結果を得ている。しかしながら、温度の変化が大きい場合や接触圧力の小さい場合は温度補正等を必要とすること、またセンサーは耐久性に乏しく、永続的な測定が困難であること、特に境界潤滑状態に於いて生成される摩耗粉もしくはゴミ等の混入によってセンサーが破損し、測定が不可能になってしまうこと等改良されるべき点は多い様である。

これに対して、超音波接触圧力測定法⁽¹⁸¹⁾⁻⁽¹⁸³⁾は無負荷時と負荷時の

真実接触面積の変化量を超音波により調べ、接触圧力を測定する方法であり、従来の方法には見られない種々の特徴を有する。例えば、測定対象面に特別な加工を要しないことや測定対象となる接触状態を変えずに測定が可能であること等がその最大の特徴である。Tabor⁽¹⁸³⁾等は、超音波を利用して摺動時の接触圧力の測定を試みたが被測定物である有機ガラスの摩耗が激しく、正しい圧力測定をするまでには到らなかった。伊東・益子ら⁽¹⁸⁴⁾⁽¹⁸⁵⁾は超音波による接触圧力の測定原理について言及すると共に工作機械の案内面への適用結果を示している。そして、20～30MPa程度の比較的低い接触圧力状態に於いても測定が可能であることを示している。また、伊藤⁽¹⁸⁴⁾らは焦点型探触子を用いてシリンダボアと開口リングのコンタクトパターンを測定し、通常の垂直型探触子と比べてその分解能が高いことを示している。しかしながら、超音波による接触圧力測定法はその測定原理より任意の測定範囲中に存在する真実接触面積の確率密度を圧力評価基準としていることから、微少面積の一点に於ける接触圧力測定は誤差が生じやすい。従って、最適な超音波投射面積を決定することは精度の高い接触圧力評価を行う上で非常に重要であるが、詳細に検討した研究は見当たらない様である。一方、水口ら^{(186)～(188)}は被測定物と同一状態を有する校正ブロックを用いて予め接触境界面に於ける超音波特性と平均接触圧力の関係を調べ、定量的な接触圧力の測定を試みると共にフランジ継手に代表されるボルト締結体について測定を行い、理論結果とよく一致することを示している。また、斜角型探触子を用いた場合も垂直型探触子による実験結果とかなり一致することを示し、測定条件や状況に応じて斜角型探触子の利用について提案している。なお、この場合は横波を利用することになる。Kendall⁽¹⁸⁹⁾らは超音波による接触圧力測定法に於いて被測定物が高分子化合物の様な非金属物質に対しても有効であることを示唆し、同様に原・大石⁽¹⁹⁰⁾らは金属・非金属間の定量的な接触圧力の測定を行い、良好な測定結果を得た。

表 1.1 は超音波技術を摺動面のトライボロジー特性の評価に適用した研究例であるが、摺動時の摩耗現象や接触圧力を統一的に扱った研究例は見当たらないようである。そこで、本論文では、摺動時に発生する AE の発

表 1.1 超音波によるトライボロジー現象評価の研究

	AE 法	AE 以外の超音波法
静的評価		伊東 ⁸¹ , Tabor ⁸³ 水口 ⁸⁵ , 堤 ⁹³ 小倉 ⁹⁴ , Daponte ¹⁰¹ Toyoda ⁹⁸ , 野中 ¹⁰⁰ King ⁴² , Blinka ⁸¹ , Allen ⁴⁵
動的評価	Kannatey ¹ , Domfeld ² 稲崎 ^{3, 5} , 武藤 ⁴ 自念 ⁸ , 木田 ⁹ Liu ¹⁰ , Au-Yang ^{11, 12} 和田 ^{13, 14} , 久門 ^{15, 16} Forrest ¹⁷ , Pao ⁴⁵	Pao ⁴⁶ , 済木 ^{104, 105} 飯田 ¹⁰⁹

生量等を利用して、試験材料の摺動面の損傷状態を統一的に評価可能であることを示す研究の一環として、TiN 薄膜をプラズマ CVD 装置を用いて蒸着した鋼材ならびに硼化处理した鋼材の摩耗試験時に発生する AE を測定することにより、表面処理薄膜の付着力評価や硼化处理等の表面処理層の剥離過程を簡便に評価できることを示す。さらに、ゴム材料の摺動時の接触圧力を超音波法を用いて測定し、その挙動を検討することにより、ゴム材料の摺動面に形成されるアブレーションパターンの生成過程に接触圧力の変動がどの様に影響を及ぼすかを明らかにするとともに、超音波法による接触圧力値の測定精度向上のために、接触域端部での超音波伝播特性を考慮した補正方法及び時間・周波数 2 次元解析法の一手法であるウィグナ分布^{(18) - (24)}を利用して反射波形を解析する方法を提案する。また、摺動時の物体内を伝播する超音波波形をウェブレット解析^{(25) - (27)}することにより音速を決定し、これに音弾性の法則^{(30) - (48)}を適用して摺動時に作用する摩擦応力を評価可能であることを明らかにする。

本論文の要点は以下の通りである。

第1章「緒論」では超音波を利用した従来の研究を総括した後、超音波を利用した研究の意義及び研究の背景に加えて、本論文の目的と構成を述べた。

第2章「超音波を利用した摺動面損傷評価システム」では、表面処理層を有する摺動面の損傷評価及び機能性薄膜の付着力評価に用いるAEの測定方法、ならびに超音波法による接触圧力測定方法について詳述し、これらの手法の基本的原理を述べる。すなわち、境界面における音波の反射、透過及び減衰特性について述べるとともに、摩耗試験機及びAEの測定システムの概要及び超音波顕微鏡を用いた物性評価の基本原則について示す。また、接触圧力の測定時において接触面から得られる反射波の第1エコー高さの変化を利用する方法及びエコー波形のウィグナ分布を利用する方法について、その測定原理を述べる。さらに、水平解像度を向上するために測定対象物にピンを挿入し、この中を伝播する超音波を利用した接触圧力評価方法を示すとともに、この方法において超音波の反射特性に及ぼす影響を示す。次いで、接触面から反射してくる超音波の分布を求める簡便な計算方法を提案するとともに、これを基にしてエコー高さ及び測定位置の補正を行い、接触域端部での接触圧力値の測定精度向上方法を示す。更には、摺動している試験片内を伝播する超音波を2対の縦型探触子を用いて測定し、得られた超音波波形にウェブレット解析を適用して音速を求め、音弾性の性質を基に摩擦応力を評価する方法について示す。

第3章「AEを利用した表面処理鋼のトライボロジー特性評価」では、AEセンサを設置したピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用いて、硼化処理鋼のアルミナセラミクスに対するトライボロジー特性を明らかにするとともに摩耗試験時に放出されるAE信号を解析し、超音波顕微鏡を利用した摺動面の観察結果と比較検討することにより、硼化処理層の脱落機構に関する考察を行う。また、セラミクス薄膜と基板の付着力を簡便に評価可能な方法を提案するとともにその有効性を検討するために、プラズマCVD法を利用してSKD11鋼とSKH51鋼に蒸着したTiN薄膜の付着力を検討する。ここでは、蒸着時の高周波電力を変えることによって、数種の異な

る特性を有する薄膜を成膜し、付着力の測定結果と成膜条件の関係をも示す。すなわち、ピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用いてピン押し付け荷重を一定とした場合の摩耗量と AE 発生特性の関係を明らかにする。さらに、ピンの押し付け荷重を一定の割合で増加した場合における摩耗量と AE 発生特性を測定し、薄膜の付着力を評価した後、現在、薄膜の付着力を評価する一般的な手法として利用されているスクラッチ試験の結果を比較対象として、本法の特徴を明らかにする。

第 4 章「ゴム摺動時のアブレーションパターン形成機構解析」では、接触域端部における超音波の反射特性を考慮することで、測定精度を向上した接触圧力の測定方法を非摺動時におけるアクリルプレート-ゴム円柱間の接触圧力測定に適用するとともに、付録 (A) に示すポイントマッチング法を利用した接触圧力の数値計算解と比較検討することで、本測定法の実用性を示す。また、従来、超音波接触圧力測定法ではあまり論じられてこなかった除荷時及び再負荷時の接触圧力測定法について検討する。さらに、ピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用いて回転するアクリル円板上に天然ゴム試験片を押し付け、この時生ずる接触圧力の測定に、これらの手法を適用し、その有効性を論じるとともに、接触圧力の変化曲線より得られる Root Mean Square 値とアブレーションパターンの分布相関性を示す。次いで、反射波信号のウィグナ分布を利用した接触圧力測定法に、多点同時測定システムを併用すれば、振動を伴って接触する二面間の接触圧力を評価する上で極めて有用であることを示し、本法を回転するゴムシート上にアクリル試験片を押し付けた時の接触圧力測定に本法を適用し、接触圧力の変化パターンとアブレーションパターンの生成機構との関連性を示す。更には、付録 (B) に示す様にゴム材が摺動する時の摺動面をビデオカメラを用いて直接観察し、これらの結果をもとにして、アブレーションパターンの生成機構解析に関する検討を行う。

第 5 章「摺動時の摩擦応力評価」では、音弾性の性質ならびにウェーブレット変換を利用した超音波による摩擦応力の評価手法を、アルミナセラミクスプレート上を摺動する SKD11 試験片に作用する摺動初期の摩擦応力評価に適用する。摺動面に作用する摩擦応力とともに摩擦係数、摺動時に

発生する AE 及び各摺動距離における接触表面の 3D トポグラフィー等を併せて計測し、これらの測定結果と摩擦応力を比較検討することで、なじみ過程における摺動面形状と摩擦応力の関係を示す。

第 6 章「結論」では、本論文の各章で得られた結果を総括する。

第2章 接触境界面における超音波の特性

第2.1節 緒言

超音波利用技術の中で非破壊検査法として、以下に示す2つの手法が一般に利用されている。すなわち、自ら超音波を発信し、測定対象物の中を伝播してきた音波の波形を解析し測定物中の介在物等の検出を行う超音波探傷法や固体中の作用応力・弾性係数等の実測が可能となる方法と、材料の破壊現象等に起因して発生するAE波を受信し、その現象の状態を知り得たり、危険予知に役立てる方法が現在一般的に利用されている。いずれの手法においても、正確に物理現象を評価するためには、固体内の超音波伝播特性を十分に把握しておく必要がある。

超音波を利用した接触圧力測定法^{(8.1) - (9.8)}は超音波探傷装置を利用して接触圧力を測定する方法であり、摺動面にセンサーを挿入する必要がな

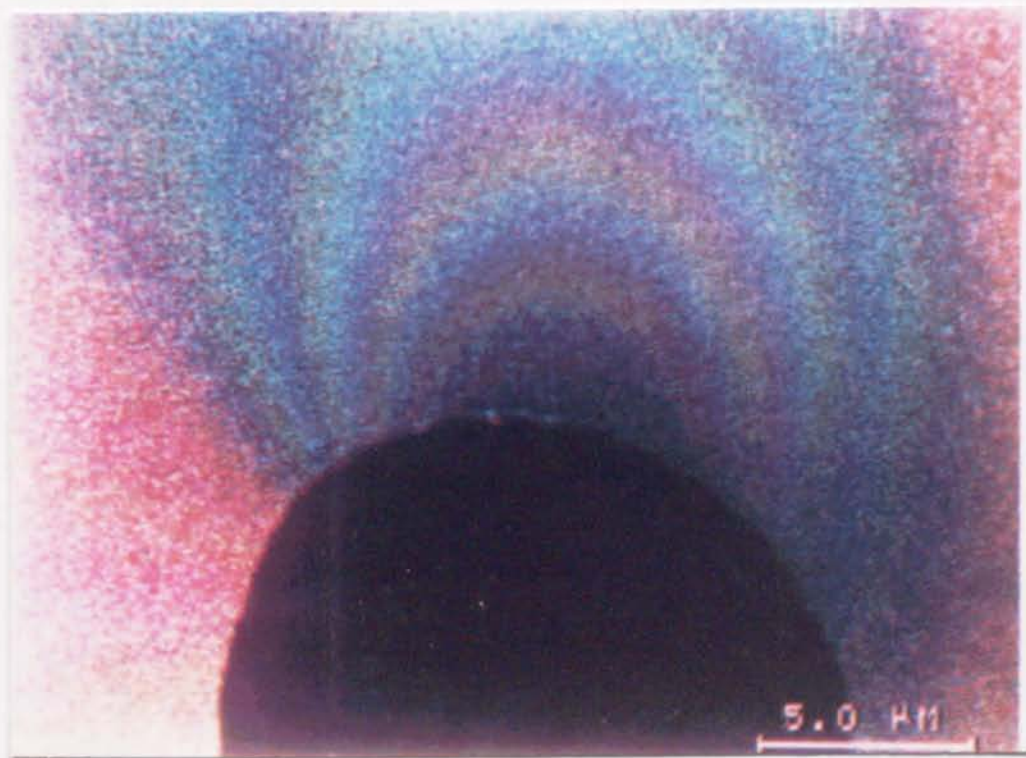


図 2.1 超音波顕微鏡による観察例

く、動的な接触状態においても適用可能であるという特徴を有する。しかしながら、接触端部での測定は、指向性の影響を含む超音波伝搬特性等を十分に考慮する必要があること等、現状では克服しなければならない問題点も上げられる。また、固体内を伝播する超音波の伝播特性は、介在物、結晶粒及び固体内に作用する応力等の影響を受ける。例えば図 2.1 に示す様に、左右から圧縮荷重を負荷した切欠きを有する平板を超音波顕微鏡で観察した場合、試験片内を伝播する超音波の干渉により平板内に作用する応力に応じた縞模様が観察される。このような音弾性の性質を利用することは固体内に作用する応力を評価する上で有効な手段となりうる。このような観点から本章では、表面処理層ならびに機能性薄膜の摺動面の状態を AE 法⁽¹⁾⁻⁽²⁰⁾を利用して正確に評価する方法、ならびに超音波探傷装置を用いた接触圧力測定方法についてその測定方法及び特徴を論じ、この手法に基づく基本的原理を取り扱う。章の前半には、音波の境界面における反射・透過特性及び減衰特性について述べるとともに、AE の測定システムの概要及び超音波顕微鏡を用いた物性評価の基本原則について示す。

章の後半には超音波法を利用した応力測定方法、すなわち接触面からの第 1 エコー高さの変化を利用した接触圧力測定法、反射波のウィグナ分布⁽²⁰⁾⁻⁽²⁴⁾を利用した接触圧力測定法、音弾性⁽³⁰⁾⁻⁽⁴⁸⁾とウェブレット解析法⁽²⁵⁾⁻⁽²⁷⁾を利用した摩擦応力測定法についての測定原理について示す。さらに、接触面から反射してくる超音波の分布を求める簡便な計算方法を提案するとともに、これを基にしてエコー高さ及び測定位置の補正を示し、これらを適用し接触域端部において正確な接触圧力評価を行うことが可能であることを示す。次いで、接触圧力測定時の水平解像度を改良するために試験片中に同一材料で作成したピンを挿入し、この中を伝播する超音波を利用して、接触圧力を測定する方法を示すとともに、ピンを用いた場合の超音波反射特性への影響を明らかにする。

第 2.2 節 波動方程式

音波は媒質中の弾性振動が他の部分に伝搬する波動現象である。従って、

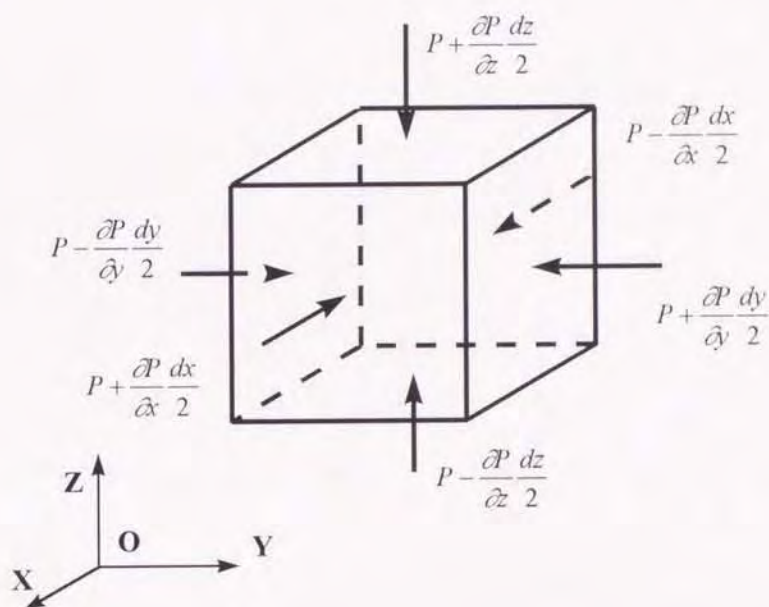


図 2.2 微小直方体要素に作用する圧力

その現象を解析する場合、波動方程式を利用する。固体媒質中の波動方程式を導くために図 2.2 に示す様な直角直交座標系を採用し、一辺の長さがそれぞれ dx, dy, dz の微小な直方体要素を考える。

微小要素の中心 (x, y, z) に於ける圧力を P 、 $i (= x, y, z)$ 軸方向の変位を $\xi_i (i = x, y, z)$ と置く。微小要素が一体となって動くと共にその内部に於ける密度 ρ の変化が小さいものとすれば、 x 軸方向に於ける運動方程式は次式の様になる。

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_x}{\partial t^2} dv = - \frac{\partial P}{\partial x} dv \quad \cdots (2.1)$$

ここで、 $dv = dx \, dy \, dz$ である。上式はまた次式で表すことが可能である。

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_x}{\partial t^2} = - \frac{\partial P}{\partial x} \quad \cdots (2.2)$$

$i (= x, y, z)$ 軸方向の振動速度を

$$V_i = \partial \xi_i / \partial t \quad (i = x, y, z)$$

として次式を得る.

$$\rho \frac{\partial V_i}{\partial t} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (i = x, y, z) \quad \dots (2.3)$$

ところで、式 (2.2) 及び式 (2.3) に於ける振動速度 V_i 及び圧力 P を求めるために体積変化と圧力の関係を求める必要がある. 図 2.2 で、 $i (= x, y, z)$ 軸方向の体積変化は中心での変位が ξ_i ($i = x, y, z$) であることを考慮して次式で示される.

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial t} dv \quad (i = x, y, z) \quad \dots (2.4)$$

従って、直方体全体としての体積変化 dV は次式で示される.

$$dV = - \sum_i \frac{\partial \xi_i}{\partial t} dv \quad (i = x, y, z) \quad \dots (2.5)$$

更に、触媒の体積弾性率を κ として、圧力変化が $P = - \kappa dV / V$ であることから、式 (2.5) より次式を得る.

$$P = - \kappa \frac{dV}{V} = - \kappa \sum_i \frac{\partial \xi_i}{\partial t} \quad (i = x, y, z) \quad \dots (2.6)$$

式 (2.6) の両辺を時間 t で微分すれば次式を得る.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \kappa \frac{\partial}{\partial t} \sum_i \frac{\partial \xi_i}{\partial t} = - \kappa \sum_i \frac{\partial V_i}{\partial t} \quad (i = x, y, z) \quad \dots (2.7)$$

更に両辺を t で微分すれば次式を得る.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = - \kappa \frac{\partial}{\partial t} \sum_i \frac{\partial V_i}{\partial t} \quad (i = x, y, z) \quad \dots (2.8)$$

式 (2.3) を x, y, z で微分して式 (2.8) に代入すれば、 P に関する波動方程式は次式で表せる.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = - \frac{\kappa}{\rho} \nabla^2 P \quad (i = x, y, z) \quad \dots (2.9)$$

ここで、 ∇^2 は Laplace の演算子であり、次式で定義される.

$$\nabla^2 = \sum_i \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \quad (i = x, y, z)$$

式 (2.9) より P を求め、その結果を式 (2.3) に代入すれば次式を得る。これにより軸方向の振動速度を求めることが出来る。

$$V_i = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial P}{\partial t} dt \quad (i = x, y, z) \quad \cdots (2.10)$$

ここで、音圧 P は時間 t と位置 (x, y, z) で決定される関数である。いま、速度ポテンシャルを ϕ で表し、音波が伝播する際の粒子速度 V_i ($i = x, y, z$) を次式で定義する。

$$V_i = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (i = x, y, z) \quad \cdots (2.11)$$

式 (2.11) を式 (2.3) に代入し、 i ($= x, y, z$) に関して積分すれば、速度ポテンシャル ϕ と音圧 P の関係は次式で与えられる。

$$P = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + C_1 \quad \cdots (2.12)$$

なお、積分定数 C_1 は静圧であることならびに波動に無関係であることから、省略出来る。式 (2.11) をそれぞれ i ($= x, y, z$) で微分するとともに式 (2.12) を t で微分し、式 (2.8) に代入すれば ϕ に関する波動方程式を次式の様に得る。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\kappa}{\rho} \nabla^2 \phi = C^2 \nabla^2 \phi \quad \cdots (2.13)$$

ここで、 C は次式で定義され、物質中の音波の伝搬速度を示す。

$$C = \sqrt{\kappa/\rho} \quad \cdots (2.14)$$

式 (2.14) から速度ポテンシャル ϕ を求めれば、式 (2.11) 及び式 (2.12) より粒子速度 V_i 及び音圧 P がそれぞれ得られる。 x 方向のみに伝搬する平面波の波動方程式は、式 (2.13) に於ける y, z 方向の速度ポテンシャル ϕ を一定と仮定すれば、次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \cdots (2.15)$$

次に、 ω を角周波数、 Φ_m を振幅の複素最大値として

$$\phi = \Phi_m e^{i\omega t}$$

と置けば、式 (2.15) より次式を得る。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{C^2} \Phi_m = 0 \quad \dots (2.16)$$

これを解いて Φ_m を求めれば次式を得る.

$$\Phi_m = Ae^{-ikx} + Be^{ikx} \quad \dots (2.17)$$

ここで, A, B は共に境界条件から定まる定数であり, k は位相定数あるいは波長定数と呼ばれ, 次式で与えられる.

$$k = \frac{\omega}{C} = \frac{2\pi f}{C} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

ここで, λ は波長であり, 次式で表示される.

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

なお, Φ_m の瞬間値は式 (2.17) の両辺に時間の要素 $e^{i\omega t}$ を乗じて次式で与えられる.

$$\Phi = \Phi_m e^{i\omega t} = Ae^{-i(kx - \omega t)} + Be^{i(kx + \omega t)} \quad \dots (2.18)$$

また, 右辺の第一項に於いて距離 x と時間 t の変化に対して位相 ($kx - \omega t$) が一定条件にある場合, 両辺を全微分して次式を得る.

$$k\partial x - \omega\partial t = 0$$

これより, 次式を得る.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\omega}{k} = C$$

式 (2.18) の初項は一定位相の波が速度 C で x の正方向に伝搬する進行波であることを意味しており, 第 2 項についても同様にして

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\omega}{k} = -C$$

であることから, この場合の波は逆方向に伝搬する反射波を示す. 次に速度ポテンシャルの定義によって音圧 P 及び粒子速度 V を求めれば次式のようになる.

$$\left. \begin{aligned} P &= \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = i\omega\rho \left\{ Ae^{-i(kx - \omega t)} + Be^{i(kx + \omega t)} \right\} \\ V &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} = i\kappa \left\{ Ae^{-i(kx - \omega t)} + Be^{i(kx + \omega t)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.19)$$

上式で $B = 0$ と置けば、正方向のみに伝搬する音波、すなわち平面進行波を表す次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} P &= i\omega\rho A e^{-i(\kappa x - \omega t)} \\ V &= i\kappa A e^{-i(\kappa x - \omega t)} \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.20)$$

式 (2.20) より任意点での音圧と粒子速度の比を求め、固有音響インピーダンス Z_0 を示せば次式の様になる。

$$Z_0 = \frac{P}{V} = \frac{\omega\rho}{\kappa} = \rho C \quad \dots (2.21)$$

平面波以外の音波では任意の点の音圧と粒子速度の比、すなわち音響インピーダンス密度は一般に複素数となる。音場内の仮想面上で粒子速度の垂直成分を面積積分すれば体積速度が得られ、この体積速度はその面が単位時間に排除する媒質の体積に相当する。なお、体積速度でその面の平均音圧を除した値が音響インピーダンスであり、一般に複素数で表される。進行方向に垂直な音波が存在する面積を S 、その面上の粒子速度を V とすれば体積速度は SV で与えられる。従って、音圧を P で示せば平面波の音響インピーダンス Z_c は次式で表される。

$$Z_c = \frac{P}{SV} = \frac{\rho C}{S} = \frac{Z_0}{S}$$

第 2.3 節 音波の反射及び透過

図 2.3 に示す様に境界面の左側を媒質 1、右側を媒質 2 として入射波を x 軸の正方向に進む平面進行波とすれば、媒質 1 内を進行する入射波は図中で示す境界部で一部は反射し、一部は透過する。従って、媒質 1 内には入射波と境界面の反射波が共存するが、媒質 2 内には入射波と同方向の透過波のみが存在する。媒質 1 及び媒質 2 の固有音響インピーダンスは式 (2.21) より、それぞれ次式で与えられる。

$$Z_1 = \rho_1 C_1, \quad Z_2 = \rho_2 C_2$$

入射波、反射波及び透過波の速度ポテンシャルの瞬間値をそれぞれ ϕ_i 、 ϕ_r 及び ϕ_t とすれば、媒質 1 及び媒質 2 内の速度ポテンシャルの瞬間値

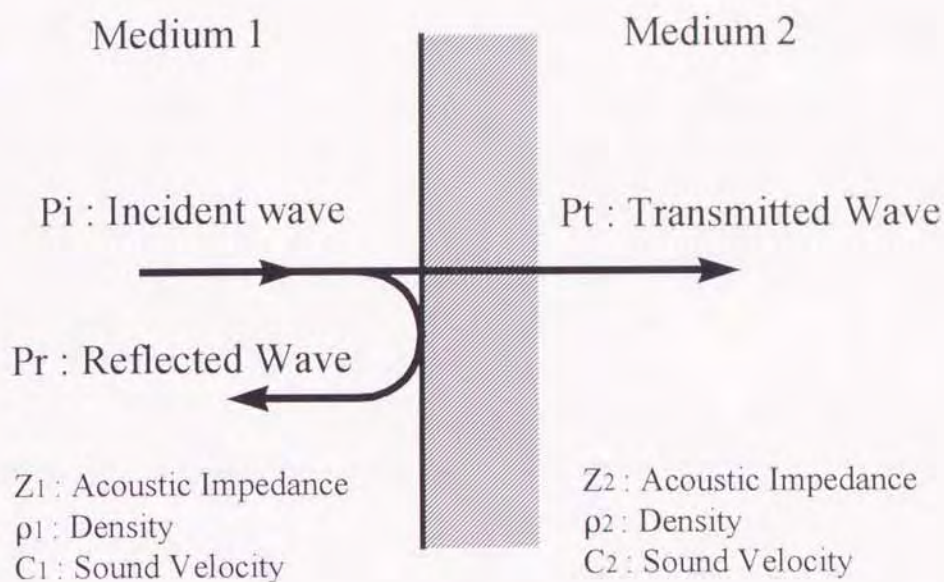


図 2.3 境界面に於ける平面波の反射及び透過

ϕ_1 及び ϕ_2 は式 (2.18) より次式で表せる.

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 = \phi + \phi_r &= A_1 e^{-i(\omega t - \kappa_1 x)} + B_1 e^{i(\omega t + \kappa_1 x)} \\ \phi_2 = \phi &= A_2 e^{i(\omega t - \kappa_2 x)} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.22)$$

ただし, x は媒質 1 内では負, 媒質 2 内では正の値である. 従って, 媒質 1 及び媒質 2 内の音圧の瞬間値 P_1 及び P_2 , 粒子速度の瞬間値 V_1 及び V_2 はそれぞれ速度ポテンシャルの定義から次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= i\omega\rho_1 \left\{ A_1 e^{i(\omega t - \kappa_1 x)} + B_1 e^{i(\omega t + \kappa_1 x)} \right\} \\ P_2 &= i\omega\rho_2 A_2 e^{i(\omega t - \kappa_2 x)} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.23)$$

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= i\kappa_1 \left\{ A_1 e^{i(\omega t - \kappa_1 x)} + B_1 e^{i(\omega t + \kappa_1 x)} \right\} \\ V_2 &= i\kappa_2 A_2 e^{i(\omega t - \kappa_2 x)} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.24)$$

また, 媒質境界面では式 (2.23) 及び式 (2.24) に於いて $x = 0$ とすることにより, 次式で表せる.

$$\left. \begin{aligned} (P_1)_{x=0} &= i\omega\rho_1 (A_1 + B_1) e^{i\omega t} \\ (P_2)_{x=0} &= i\omega\rho_2 A_2 e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.25)$$

$$\left. \begin{aligned} (V_1)_{x=0} &= i\kappa_1(A_1 - B_1)e^{i\omega t} \\ (V_2)_{x=0} &= i\kappa_2 A_2 e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.26)$$

そして、次式で示す境界面上の音圧及び粒子速度に関する次式に示す連続条件を考慮する。

$$\left. \begin{aligned} (P_1)_{x=0} &= (P_2)_{x=0} \\ (V_1)_{x=0} &= (V_2)_{x=0} \end{aligned} \right\}$$

さらに、式 (2.25) 及び式 (2.26) を考慮すれば次式に示す関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \rho_1(A_1 + B_1) &= \rho_2 A_2 \\ \kappa_1(A_1 - B_1) &= \kappa_2 A_2 \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.27)$$

また、境界面での媒質 2 側の音響インピーダンス密度、すなわち

$$(P_2)_{x=0} / (V_2)_{x=0} = 0 (= ZS_2 = \rho_2 C_2)$$

は、媒質 1 側の音響インピーダンス密度 $(P_1)_{x=0} / (V_1)_{x=0}$ と等しくなければならぬことから次式を得る。

$$\frac{(P_1)_{x=0}}{(V_1)_{x=0}} = \rho_1 C_1 \frac{A_1 + B_1}{A_1 - B_1} = \frac{(P_2)_{x=0}}{(V_2)_{x=0}} = ZS_2 = \rho_2 C_2 \quad \cdots (2.28)$$

式 (2.25) 及び式 (2.26) より、境界面での入射波と反射波音圧の振幅比である音圧反射率 R_p 及び入射波と透過波音圧の振幅比である透過率 T_p はそれぞれ次式で与えられる。

$$R_p = \frac{i\omega\rho_1 B_1}{i\omega\rho_1 A_1} = \frac{B_1}{A_1} \quad \cdots (2.29)$$

$$T_p = \frac{i\omega\rho_2 A_2}{i\omega\rho_1 A_1} = \frac{\rho_2 A_2}{\rho_1 A_1} \quad \cdots (2.30)$$

同様に、粒子速度の反射率 R_v 及び粒子速度の透過率 T_v は次式で与えられる。

$$R_v = \frac{-i\kappa_1 B_1}{i\kappa_1 A_1} = -\frac{B_1}{A_1} \quad \cdots (2.31)$$

$$T_v = \frac{i\kappa_2 A_2}{i\kappa_1 A_1} = \frac{\kappa_2 A_2}{\kappa_1 A_1} \quad \cdots (2.32)$$

ここで、式 (2.27) あるいは式 (2.28) から

$$\kappa_1 = \omega / C_1$$

$$\kappa_2 = \omega / C_2$$

と置いて、 B_1/A_1 、 B_2/A_2 を求めれば次式を得る。

$$\begin{aligned}\frac{B_1}{A_1} &= \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \\ \frac{B_2}{A_2} &= \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2}\end{aligned}\quad \cdots (2.33)$$

式 (2.33) を式 (2.29) から式 (2.32) に代入して

$$\begin{aligned}\rho_1 C_1 &= Z_1 \\ \rho_2 C_2 &= Z_2\end{aligned}$$

と置けば

$$\left. \begin{aligned}R_P &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \\ T_P &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \\ R_V &= \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = -R_P \\ T_V &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_1}{Z_2} T_P\end{aligned}\right\} \quad \cdots (2.34)$$

となり、すべての反射率及び透過率は各媒質の固有音響インピーダンスによって表示される。次に音波の強さに関する反射率 R_I は境界面での入射波と反射波の強さの比で定義され、それらの強さはそれぞれ音圧の 2 乗に比例して次式で表される。

$$R_I = |R_P|^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad \cdots (2.35)$$

ここで、音波の強さは進行方向に垂直な単位面積を単位時間内に通過する音のエネルギーを示す。強さの透過率 T_I はエネルギー保存則より次式で決定される。

$$T_I = 1 - R_I = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad \cdots (2.36)$$

なお、式 (2.28)、式 (2.30) 及び式 (2.33) より、 R_P 及び R_V は絶対値が等しく符号が異なるのみである。従って、式 (2.22) 及び式 (2.33) に於いて $i\omega\rho_1 A_1$ を P_{10} 、 $i\kappa_1 A_1$ を V_{10} 、 κ_1 を κ でそれぞれ置き換えることにより、媒質 1 内の音圧及び粒子速度は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned}P_1 &= P_{10}(e^{-i\kappa x} + R e^{i\kappa x})e^{i\omega t} \\ V_1 &= V_{10}(e^{-i\kappa x} - R e^{i\kappa x})e^{i\omega t}\end{aligned}\right\} \quad \cdots (2.37)$$

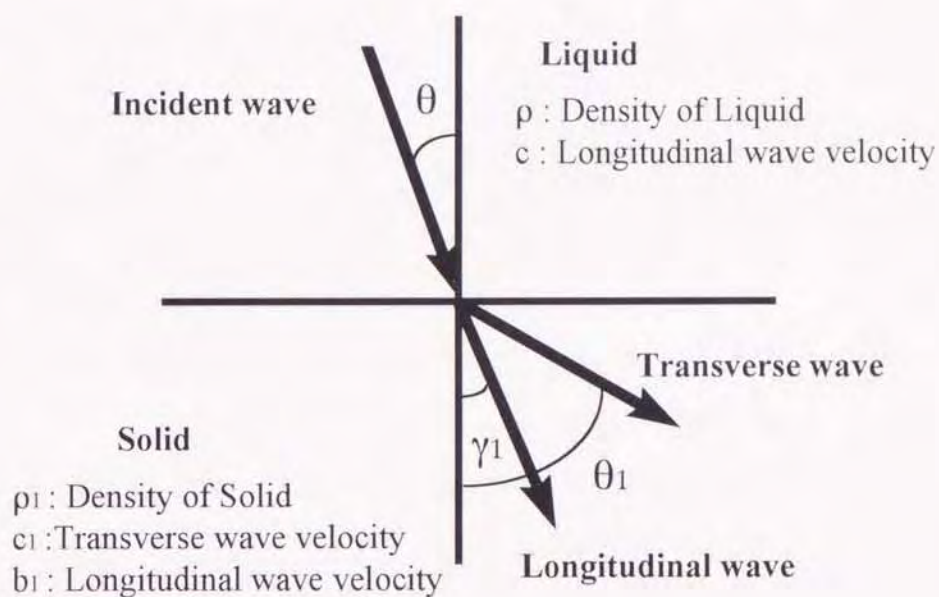


図 2.4 固体液体界面での超音波の反射と屈折

式 (2.37) より音圧の反射率 R を求めれば、媒質 1 内の任意の位置における音圧を知ることが出来る。

図 2.4 に示す様に反無限大の等方弾性体の表面に液体中の平面波超音波が入射角 θ で入射する場合を考える。界面で変位の連続と応力の相等の境界条件のもとで、それぞれの媒質中での波動方程式を解き、媒質中の粒子速度に対する音圧振幅の比として定義される音響インピーダンスは次式のように示される。

$$\left. \begin{aligned} Z &= \frac{\rho c}{\cos \theta} \\ Z_l &= \frac{\rho_1 c_1}{\cos \theta_1} \\ Z_b &= \frac{\rho_1 b_1}{\cos \gamma_1} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.38)$$

ここで、 Z は液体中での縦波に対する音響インピーダンス、 Z_l は固体中の縦波に対する音響インピーダンス、 Z_b は固体中の横波に対する音響イ

インピーダンスである。また、 ρ は液体の密度、 C は液体中の縦波音速、 ρ_1 は固体の密度、 C_1 は縦波音速及び b_1 は横波音速を示す。なお、 θ_1 と γ_1 は縦波と横波の屈折角で、それぞれ次式で表される Snell の法則を適用し決定する。

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_1 &= \frac{C_1}{C} \sin \theta \\ \sin \gamma_1 &= \frac{b_1}{C} \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.39)$$

ここで、独立変数は液体から固体への入射角 θ で音響インピーダンスは入射角の関数として変化する。このことから、反射率 R は入射波の振幅に対する反射波の振幅比として定義され、次式で示される。

$$R = \frac{Z_1 \cos^2 2\gamma_1 + Z_2 \sin^2 2\gamma_1 - Z}{Z_1 \cos^2 2\gamma_1 + Z_2 \sin^2 2\gamma_1 + Z} \quad \cdots (2.40)$$

反射率 R は反射波の入射波に対する位相遅れ ϕ がある場合には複素数になり、次式で示される。

$$R = |R| e^{i\phi}$$

固体中の横波音速 b_1 が液体中の縦波音速 C より大きい場合、

$$(b_1/C) \sin \theta_1 = 1$$

となる入射角 θ_1 が存在し、これより入射角が大きい場合では

$$|R| = 1$$

となる。すなわち、透過波は存在せず全反射することを示している。 θ_1 は横波の臨界角と呼ばれる。 R の位相は多くの入射角 θ の値に対してはほぼゼロを示すものの、 θ_1 よりやや大きい Rayleigh の臨界角 θ_R の近傍において位相遅れを生ずる。入射角が増加すると位相は 0 度から次第に遅れ、-350 度遅れる状態で定常に達する。このような位相遅れが存在するのは、漏洩弾性表面波が励起されることに起因し、固体液体界面での粒子変位の連続性と音圧の相等性を保つ必要があることを示している。

一方、物質の超音波減衰定数を α 、厚さを t 、入射音波の強さを A_0 とすると透過音波の強さ A は次式で示される。

$$A = A_0 e^{-\alpha t} \quad \cdots (2.41)$$

減衰は当然のことながら式 (2.38) の反射率にも影響を及ぼす。金属やセラ

ミスクでは、 α は粒径や格子欠陥により敏感に変化し透過距離に影響する。一方、超音波顕微鏡で減衰を計測することにより材料の評価が可能である。

表面に波長やビーム経程度の大きさの凹凸が存在すると超音波が散乱されて、平面での反射と異なる複雑な挙動を示す。波長より十分小さい物体による散乱すなわち Rayleigh 散乱は、超音波を減衰させることから吸収と同等に扱うことが可能である。しかしながら、周波数依存性は、真の減衰とは異なる場合が多い。

第 2.4 節 超音波を利用した摺動状態の評価

2.4.1 AE と測定システム

「アコースティックエミッション (Acoustic Emission, AE)」とは、固体材料の変形や破壊に伴う急激なエネルギー解放によって発生する音波すなわち弾性波を示す。たとえば、すず合金の双晶変形にともなう AE は「すず鳴り」として良く知られている。さらには、ガラスや磁器が壊れるときに大きな衝撃音が発生するのは一般的な AE の一例である。直接人間の耳に感知できるほど強大でなくとも、種々の材料の変形や破壊、さらには相変態及び凝固融解等の現象に伴い AE が発生することが報告されている。多くの場合、その音波の周波数は可聴周波数域のみにとどまらず、数 MHz 程度の高周波域にまで広く分布していると考えられる。よって、これらの音波を「応力波」と呼ぶ。一般的に、AE は入力信号の真の実効電圧に比例した直流出力が得られる交流出力計を用いて記録する。時間によって変動する電圧 $v(t)$ の実効電圧は、次式で与えられる。

$$V_{RMS} = \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T v(t)^2 dt / T \right)^{1/2} \quad \cdots (2.42)$$

実際の測定に際して、平均化時間 T を無限大にすることは困難であることから、AE の測定ではこの平均化時間を 0.1 ~ 1sec に設定した電圧計を用いることが多く、本研究においても平均化時間を 0.5sec に設定した。検出

する周波数に比べ平均化時間が十分大きい場合には、アンプの内部雑音などによって形成される検出系における雑音の実効電圧 V_N は、ほぼ一定値とみなすことが可能である。なお、単発のバースト型の AE 信号に対しては、実効電圧の測定に用いる電圧計の平均化時間によって、その指示に変化を生ずる。

本研究では AE センサーを図 2.5 に示すピン-オン-ディスク型摩耗試験機 (高千穂精機 TRI-S500) に取り付け、摺動時に発生する AE を測定した。ピン型試験片 (以下, 「ピン」と示す) の押し付け力はエアシリンダー内の空気圧力を圧力調整弁で制御する方式を採用しており、任意の荷重での保持や連続的な荷重の増減が可能である。一方、ディスク型試験片 (以下, 「ディスク」と示す) を固定したターンテーブルは、AC サーボモータにより任意の速度で回転可能である。表 2.1 に使用した摩耗試験機の諸元を示す。

実験には、図 2.6 に示す音響特性を有する AE センサー (NF 回路設計プロ

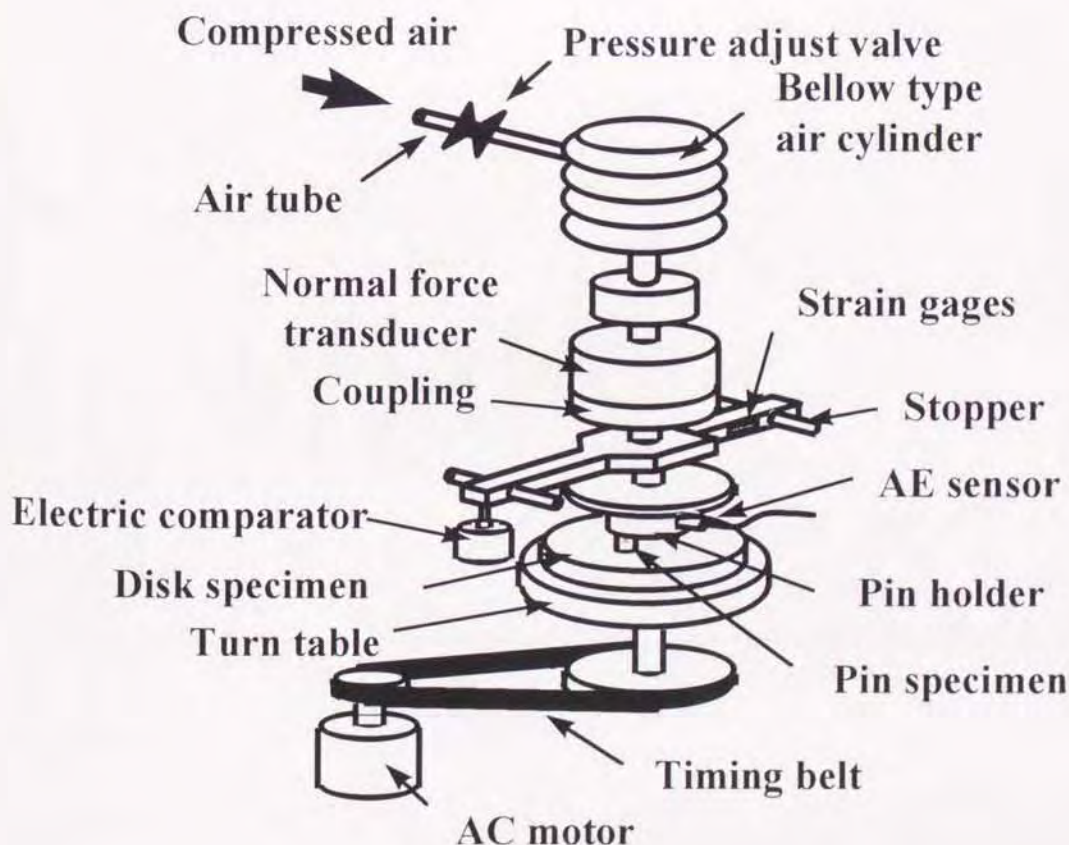


図 2.5 摩耗試験機概略図

表 2.1 摩耗試験機の諸元表

加圧装置	方式	空気シリンダ式
	形式	縦型垂直軸式
	加圧力	196 - 4900 N
	加圧設定	自動弁による
試料回転装置	滑り速度範囲	30 - 450cm/sec (15 - 1500 r.p.m)
	駆動方式	AC サーボモータ
潤滑	オイルバス	750 ml
	潤滑油温度	冷却水温 ~ 120 °C
測定装置	加圧力	圧縮型ロードセル
	摩擦力	ベンディング型ロードセル
	変位検出	差動トランス

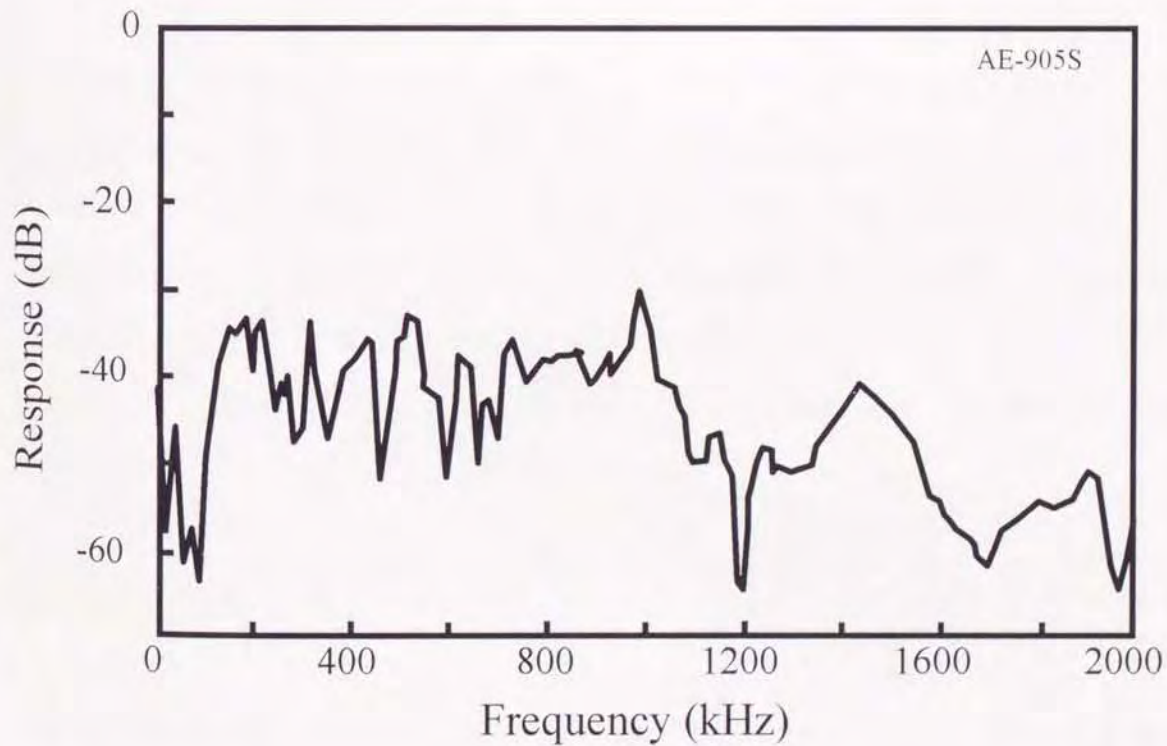


図 2.6 AE センサーの特性

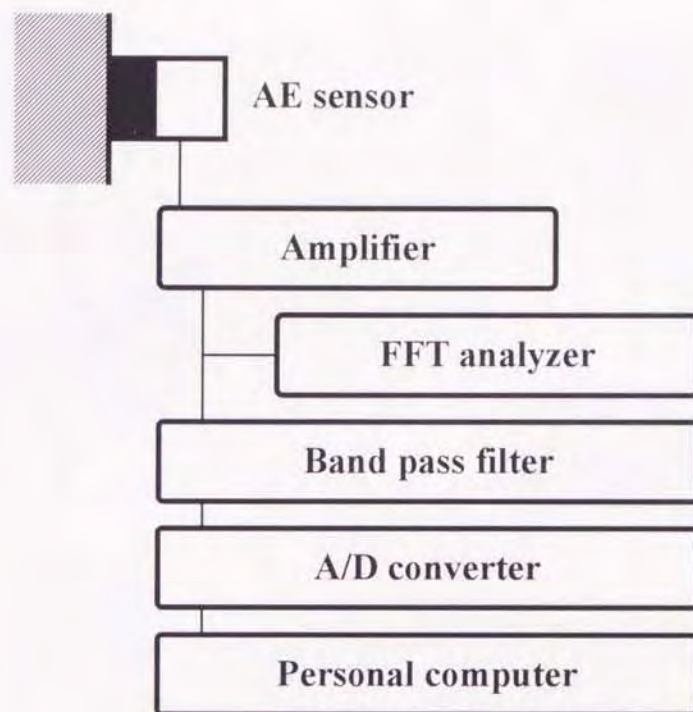
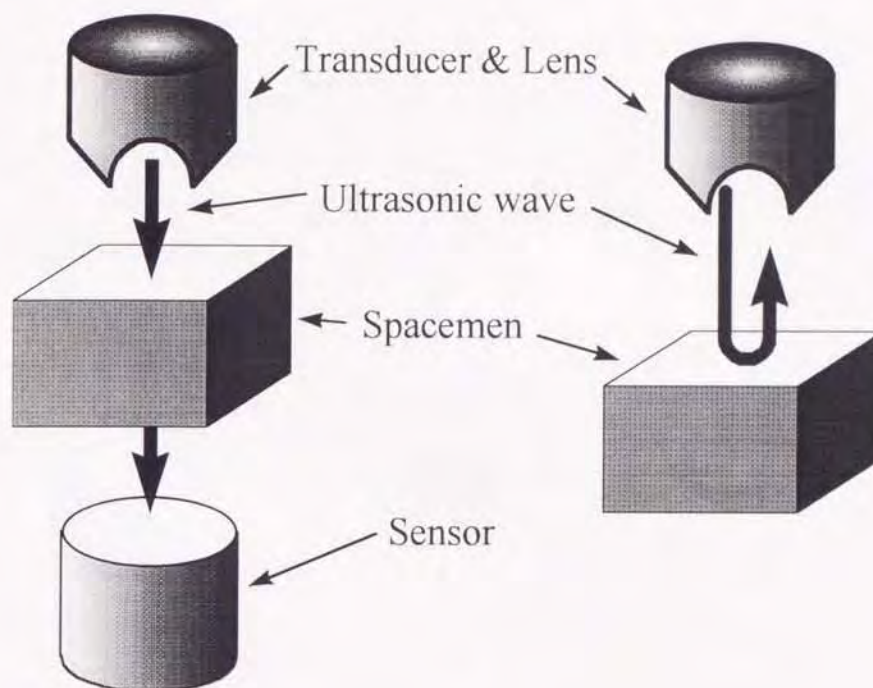


図 2.7 AE 信号測定システム

ック AE-905S) をピンホルダーに設置した。同図より明らかなように、公称共振周波数は 1MHz である。AE センサーで検出した信号は図 2.7 に示すようにアンプで 70dB 増幅した後に FFT アナライザーを用いて、そのスペクトルを求めた。また、バンドパスフィルターを用いて、測定する AE 信号の周波数を限定した後に、AD コンバータを介してパーソナルコンピュータに入力し、AE 信号が有するエネルギーの相対的な値である Root Mean Square 値 (R.M.S. 値) を利用して解析を行った。

2.4.2 超音波顕微鏡と物性評価

超音波顕微鏡は、細く絞った高周波超音波ビームによって試料面を機械的に操作し、試料で反射、透過及び散乱した超音波ビームを検出して電気信号に変換し、この振幅や位相の分布を CRT に画像として表示する。超音波顕微鏡は図 2.8 に示すような透過型と反射型があり、前者は送信レン



(a) 透過型超音波顕微鏡

(b) 反射型超音波顕微鏡

図 2.8 透過型と反射型

ズから試料に入射し、試料内で散乱あるいは減衰しながら透過してきた超音波ビームを送信レンズに対向して共焦点に配置された受信レンズで検出するものであり、後者は試料表面又は表面下の物体から反射もしくは散乱してきた超音波を送信レンズによって検出する。超音波顕微鏡で用いられる超音波の波形はバースト波及びパルス波があり、前者は主に 10MHz 以上、後者はそれ以下の周波数で用いられる。

本研究では図 2.9 及び図 2.10 に示す反射型超音波顕微鏡 (オリンパス UH3) を使用した。圧電トランスデューサで発生した平面波の超音波は超音波レンズで球面波に変換され、カップラントを介して試料上に伝播される。反射波は同じ経路を逆に通り返電トランスデューサに達し、反射波の振幅に比例した圧電信号に変換されて信号処理系に送られる。ここでは、レンズ反射波を除くため試料反射波のみにゲートを設定する。その後、増幅した波形を検出し、反射波振幅の値が画像メモリに記憶され CRT に表

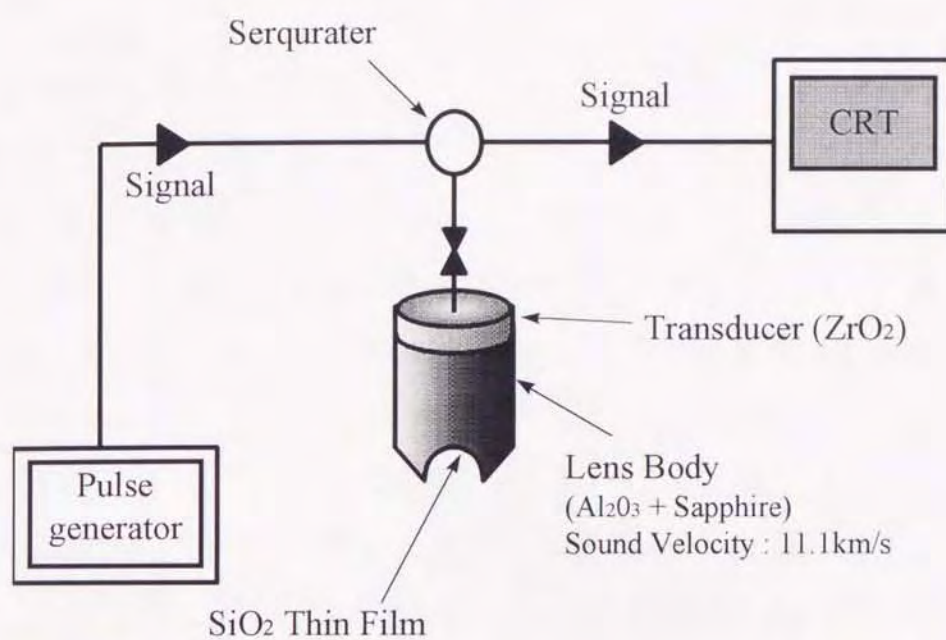


図 2.9 超音波顕微鏡の構成



図 2.10 超音波顕微鏡の外観

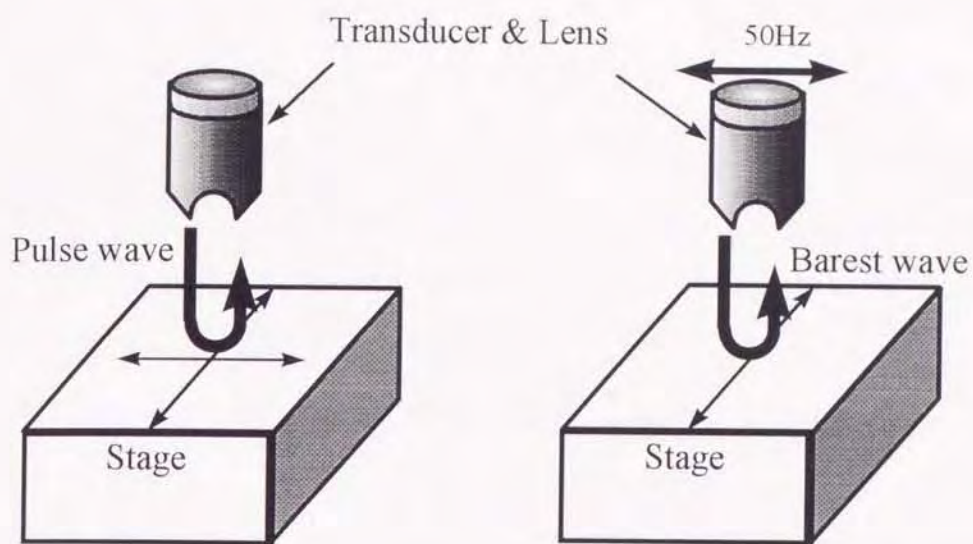
示される。

試料表面の走査は、図 2.11 に示すように試料及び音響レンズを機械的に移動させて行う。カップラントには水平解像度を改善するために水銀等を用いることもあるが、本研究では簡便に観察が可能であること等の理由から蒸留水を用いた。

超音波顕微鏡は試料表面の一部、あるいは全体をカップラントに浸して音響レンズから超音波を放射した場合、試料表面には漏洩表面波や漏洩クリープ波が発生する。これらの波と試料表面から鏡面反射する波との干渉で生じる $V(z)$ 曲線と呼ばれる干渉波形を受信し、漏洩表面波や漏洩クリープ波の音速が測定される。なお $V(z)$ 曲線はバースト波モードの音響レンズを用い、音響レンズの水平方向の走査せずに、図 2.12(a) に示すように試料表面を音響レンズ焦点面の内側に配置し、試料表面から音響レンズの焦点面までデフォーカス量 Z を変化させて反射波を測定する。この時、得られる反射波の振幅を縦軸に、デフォーカス量を横軸に示して記録した反射波強度の振幅曲線を $V(z)$ 曲線と呼ぶ。このような $V(z)$ 曲線の測定には、超音波の減衰等を考慮して通常 200MHz の振動子を用いる。

超音波顕微鏡の音響レンズには、一点にビームが収束する点集束型レンズ(球面レンズ)と直線上にビームが集束する線集束型レンズ(円筒レンズ)がある。点集束型レンズでは、360 度の全方向に伝播する漏洩表面波や漏洩クリープ波の平均音速が測定される。なお、測定の水平分解能は直径 100 ~ 200 μm の円形領域である。これに対し、線集束型レンズでは単一方向に伝播する漏洩表面波や漏洩クリープ波の音速が測定される。したがって、このレンズを回転し、数方向の音速測定を行うことにより、試料の組織異方性を評価可能である。なお、線集束型レンズを使用した場合の漏洩表面波や漏洩クリープ波のビームの幅は約 1000 μm 、伝播距離は約 200 μm であり、この長方形領域での平均音速が測定される。

図 2.13 は 200MHz の線集束型レンズで測定した摺動面の $V(z)$ 曲線の一例である。この曲線は $z < 0$ の領域で、周期的な変動がある。この周期的な変動は図 2.12 において経路 $E \rightarrow O' \rightarrow E$ を伝播する鏡面反射波と試料に漏洩表面波の臨界角 θ_R で入射して漏洩表面波にモード変換され、音響レン



(a) パルス波モード

(b) バースト波モード

図 2.11 レンズの走査方法

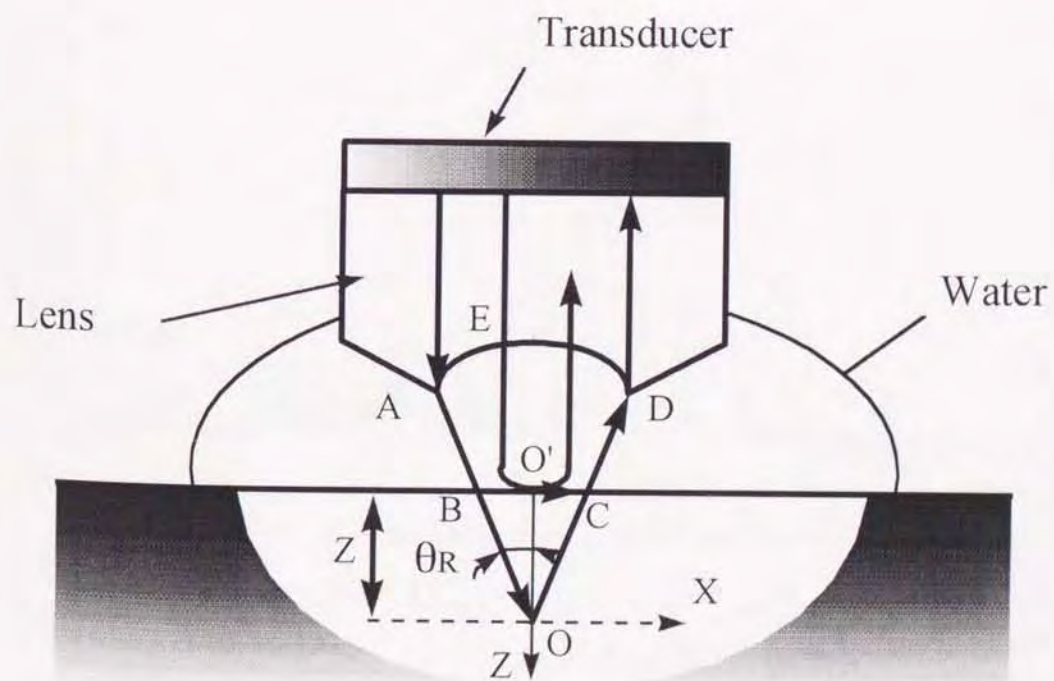


図 2.12 音響レンズの超音波伝播経路

ズ軸に関して対称な位置から漏洩する経路 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ を伝播する漏洩表面波との干渉によって生ずる。 $V(z)$ 曲線に生ずる振幅変動の周期 ΔZ から漏洩表面波の位相速度は次式で計算される。

$$\frac{V_W^2}{V_R^2} = 1 - \left(1 - \frac{V_W}{2F\Delta Z} \right)^2 \quad \cdots (2.43)$$

ここで、 V_W はカップラント中の音速、 V_R は漏洩表面波の位相速度及び F は超音波の周波数である。なお、 ΔZ よりも小さい周期の変動が見受けられるが、これは図 2.12 に示した音響レンズの底面の E で反射する波と O' で反射する波の干渉で生ずる波形である。

このようにして得られた $V(z)$ 曲線の周期を高精度に求めるために、 $V(z)$ 曲線の FFT 解析を行う。図 2.14 にその解析例を示す。さらに、図 2.15 に示すように $V(z)$ 曲線の前波形から曲面反射波のみの強度変化に相当するバックグラウンドの除去を行い、干渉波形の交流成分のみを抽出すると、周期の解析精度が向上する。

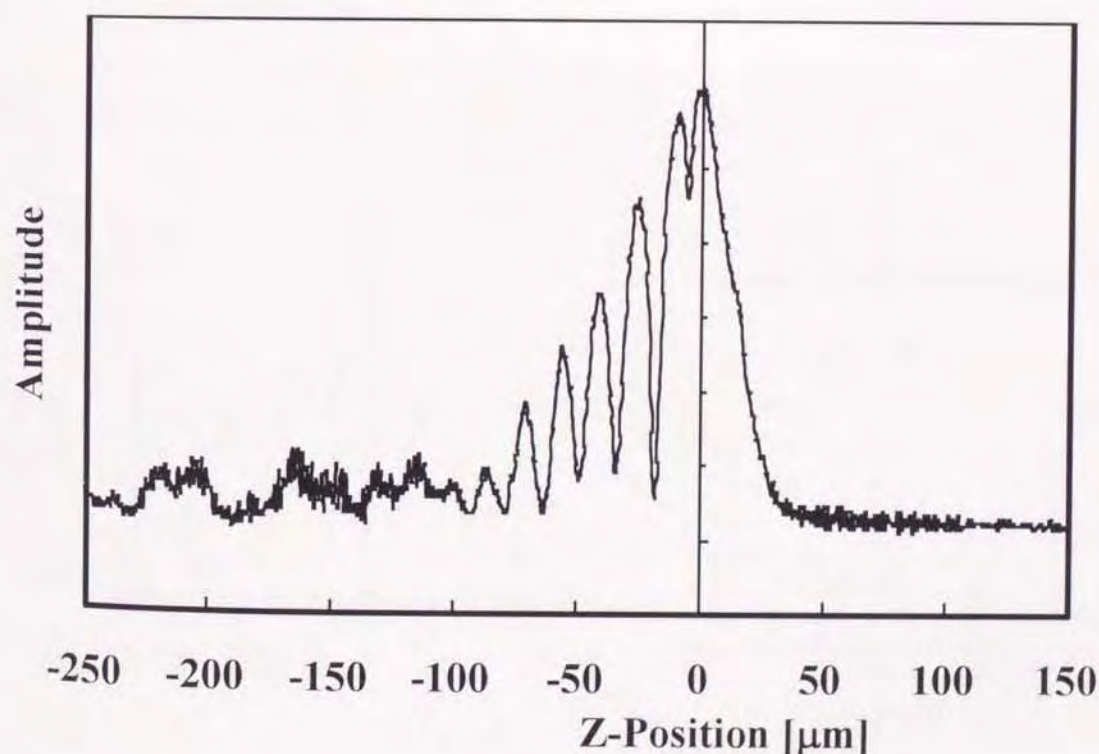


図 2.13 $V(z)$ 曲線の測定例

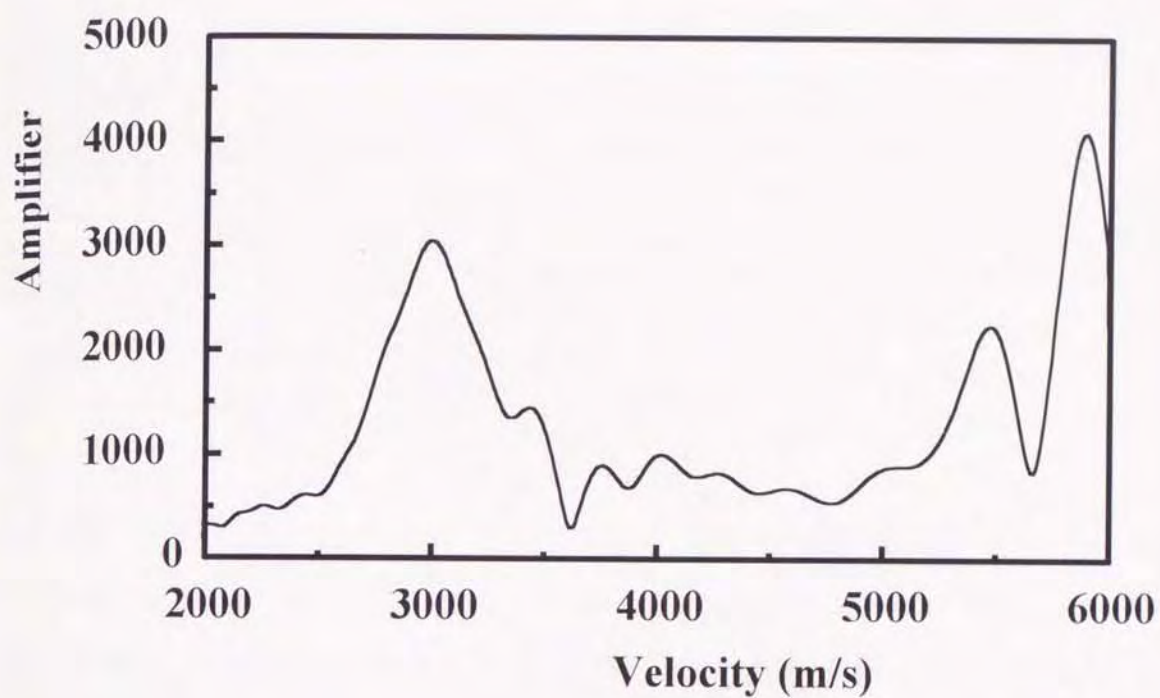


図 2.14 $V(z)$ 曲線の FFT 解析結果

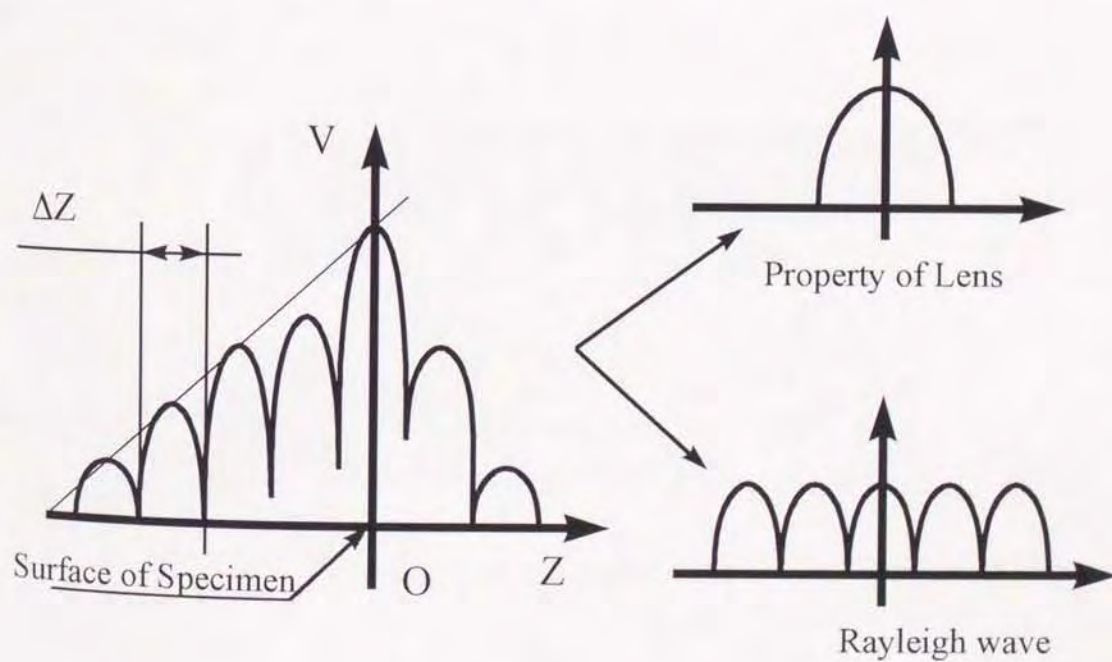


図 2.15 $V(z)$ 曲線の特性

超音波顕微鏡では、位相干渉法でカップラントとの相対音速差が求められる。例えば、カップラントに水を適用すれば、この音速は 1490m/s 程度である。このように、カップラントの音速が既知であれば試料の音速が直接的に測定できる。すなわち、超音波の伝播距離の測定が必要ない等、伝播時間から音速を求める間接測定法にはない特徴を有する。

第 2.5 節 超音波を利用した接触圧力の測定

2.5.1 接触圧力測定の方法

一般に、機械加工した平面であってもうねりや表面粗さが存在し、現在の加工精度ではこれらを完全に取り除くことは非常に困難である。このような加工面同士の接触状態は図 2.16 に示す様に接触境界の全面が接触するわけではなく、真実接触部分と空隙部分が存在すると考えられる。音波の接触境界部に於ける反射波音圧 P_r と入射波音圧 P_i との関係は次式で与え

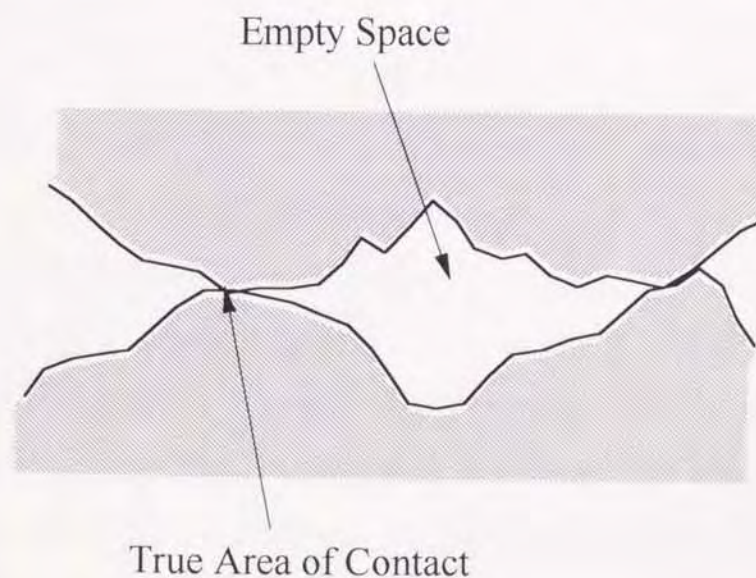


図 2.16 機械加工された二平面の接触状態

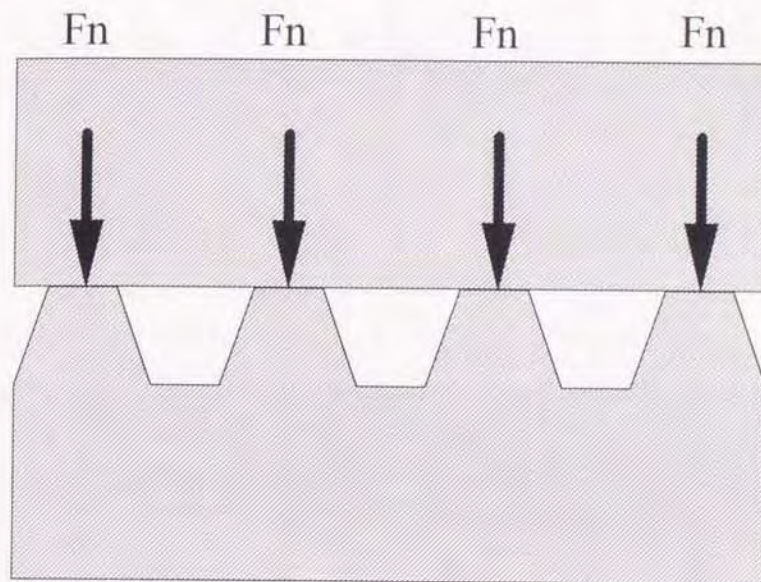


図 2.17 二平面接触状態の簡略図

られる。

$$P_t = R_P P_i \quad \dots (2.44)$$

ここで、 R_P は式 (2.34) で与えられる音圧反射率である。固有音響インピーダンスが共に等しい固体同士が接触する場合の音圧反射率は接触境界部に於いて真実接触部で $R_P = 0$ 、非接触部で $R_P < 1$ となる。従って、一方の部材から伝播する超音波は真実接触部分では透過するが、空隙部分でほぼ全反射する。 $R_P = 0$ となる真実接触部の面積と接触部に作用する垂直荷重の間には比例あるいは $2/3$ 乗に比例関係が成り立つ。特に、物体同士が静的に接触する場合については、以下に示す様に考えられる。図 2.17 の様に接触部表面の状態を単純化して考え、同一高さの突起部が n 個あるものと仮定する。突起部全面に作用する荷重と変位の関係は x 軸方向圧縮力を F 、1つの突起に作用する荷重を F_n として各突起部分が均一に荷重を受けるものとするれば次式の関係が成立する。

$$F_n = F / n$$

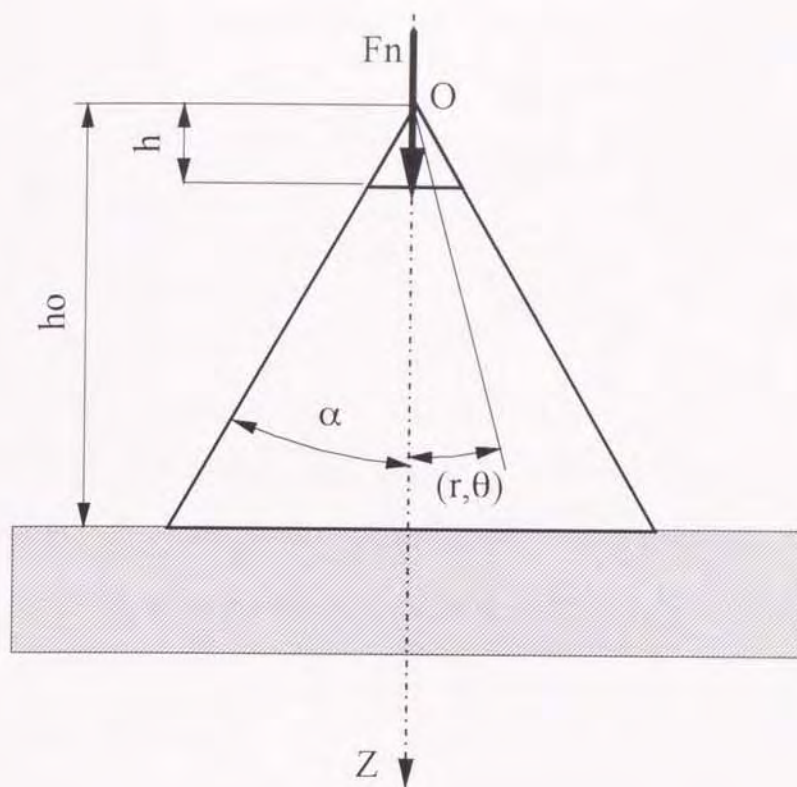


図 2.18 角錐のモデル

各突起部分を図 2.18 の様な単位幅の梁の弾性圧縮状態と等価であると仮定すれば、任意の一点 (r, θ) に於ける応力は次の様になる.

$$\sigma_r = \frac{F_n \cdot 2 \cos \theta}{r(\sin 2\alpha + 2\alpha)}$$

$$\sigma_\theta = 0$$

$$\tau_{\theta} = 0$$

ここで、 α は図 2.18 中に示す梁先端の角度を示す. よって、 r 方向の変位 U_r は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} U_r &= \int \varepsilon_r dr = \int \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta) dr \\ &= \frac{2}{E} \frac{F_n \cos \theta}{\sin 2\alpha + 2\alpha} \int \frac{1}{r} dr \end{aligned}$$

ここで、 ε_r は半径方向ひずみ、 ν はポアソン比である. 従って、突起の高さ方向の変位 U_z は次式によって与えられる.

$$\begin{aligned} U_z &= (U_r)_{\theta=0} = \frac{2F_n}{E(\sin 2\alpha + 2\alpha)} \int_h^{h_0} \frac{1}{Z} dz \\ &= \frac{2F_n}{E(\sin 2\alpha + 2\alpha)} \log \frac{h_0}{h} \end{aligned} \quad \dots (2.45)$$

また、荷重 F_n による接触面積の増加を ΔS とすれば式 (2.45) より次式を得る。

$$\Delta S = 2nU_z \tan \alpha = \frac{4nF_n \tan \alpha}{E(2\alpha + \sin 2\alpha)} \log \frac{h_0}{h} \quad \dots (2.46)$$

ここで、接触部の表面状態及び材質が一定ならば

$$\Delta S = A \cdot F_n \quad (A = \text{const.})$$

となる。これより、式 (2.46) に従って ΔS が増加すれば $R_P = 0$ となる完全密着部分と $R_P = R_{P0}$ となる半密着部分が増し、音波の透過量は増えて反射波の量は減少する。ここで、 R_{P0} は半密着部の反射率を示し、 $0 \leq R_{P0} \leq 1$ である。従って、超音波を用いて接触面積の変化を測定すれば接触面圧の測定が可能となる。

接触面の状態を簡略化して考えるために、以下の様に仮定する。

- ① 接触境界面は完全密着または非接触のいずれかの状態にあり、 $R_P < 1$ または $R_P = 0$ となる部分のみから構成される。
- ② 接触境界面に垂直方向の負荷による真実接触面積の増加は初期接触点のみが関係し、その後接触点は生じないものとする。
- ③ 媒質中を通過する音波の減衰は無視する。

以上の仮定を基にして接触面に於ける音波の入射量を考えれば反射波の音圧波高値は次式で求められる。

$$P_{rm} = P_{im} \frac{(S_0 - S_i) - \Delta S}{S_0} = P_{im} \left(1 - \frac{S_i + \Delta S}{S_0} \right) \quad \dots (2.47)$$

ここで、

P_{im} : 入射音圧波高値

P_{rm} : 反射音圧波高値

S_0 : 表面粗さ零の理想化した接触面での超音波存在面積

S_i : 初期接触面積

ΔS : 垂直荷重の増加による真実接触面積の微小増加量

式 (2.47) より

$$\frac{P_{rm}}{P_{im}} = 1 - \frac{1 + \Delta S / S_i}{S_0 / S_i} \quad \dots (2.48)$$

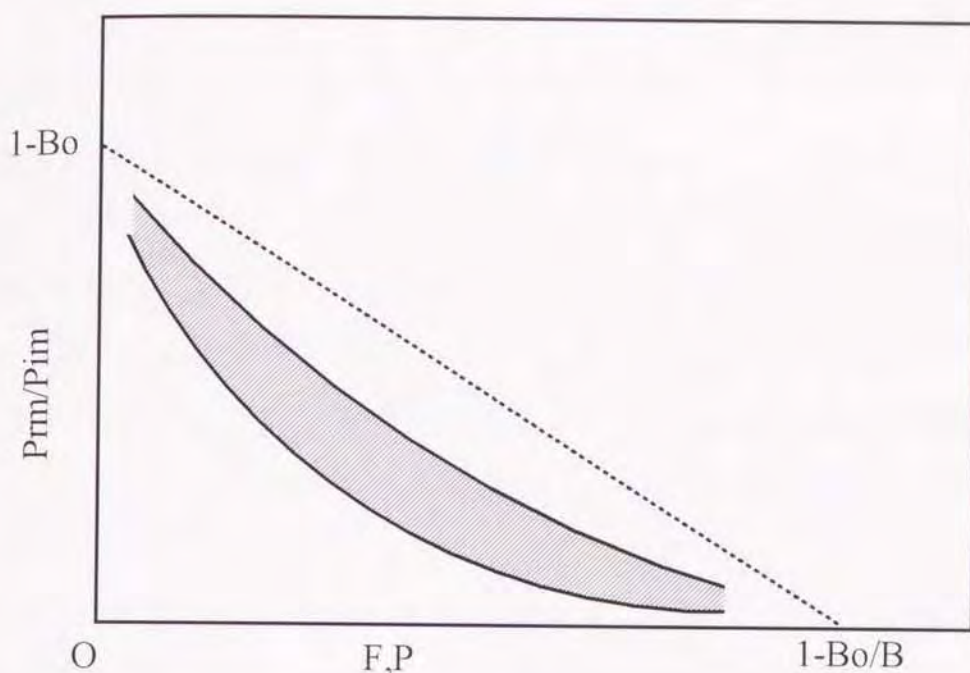


図 2.19 反射波音圧と接触圧力の定性的な関係

となり、振動子の接触状態、振動子電圧及び接触面積の初期表面状態等が一定であるとすれば、次式が成立する。

$$\Delta S/S_i = B_1 F, \quad P_{im} = \text{const.}$$

従って、式 (2.48) より $S_i/S_0 = B_0$, $B_1 B_0 = B_2$ と置けば次式を得る。

$$\frac{P_{rm}}{P_{im}} = 1 - (1 - B_0) - B_2 F \quad (2.49)$$

さらに、 $B_2 F = B_0 B_1 F = B_3 P$ と置けば次式が得られる。

$$\frac{P_{rm}}{P_{im}} = 1 - (1 - B_0) - B_3 P \quad (2.50)$$

ここで、 P は接触圧力、 B_0, B_1, B_2 及び B_3 は定数である。なお、 $B_0 = S_i/S_0$ は初期真実接触面積であり、 F を自重と考えれば通常 $B_0 \ll 1$ である。

式 (2.50) より、理想的な場合の反射波音圧と接触圧力の関係は図 2.19 の破線で示す様な直線であたえられる。しかしながら、実際にはこの様な直線的な関係を得るのは困難であり、次の様な理由によって図 2.19 の斜線範

冊内にこれらの関係曲線は存在すると考えられる。

- ① 荷重 F または圧力 P を非常に大きくしても空隙部に存在する空気がのこり、接触面全体は密着の状態とはならない。このため、局所的な非接触部分すなわち、 $R_p = 1$ の部分が存在する。
- ② 式 (2.49) の $B_0 = S_i / S_0$ は初期真実接触面積であり、 $B_0 < 1$ であることから、近似的に $1 - B_0 < 1$ と見なせる。従って、接触圧力が零の場合は反射波音圧比は近似的に 1 となる。
- ③ 式 (2.49) は仮定 ② を条件としているが、実際には F または P の増加に伴って接触面に於ける表面粗さ及びうねりにより新しい接触部等が生じる。このために音波の透過量は増大し反射波音圧は双曲線状に減少する。
- ④ 超音波は物質内を透過することによって散乱及び内部摩擦等を誘起し、減衰する。

2.5.2 接触圧力とエコー高さ比の関係

超音波による接触圧力測定法では、超音波探傷器を用いて真実接触面積の変化を図 2.20 に示すように反射波音圧の変化として検出する。

超音波法を用いて接触圧力を定量的に評価するために、予め接触圧力と接触面における超音波反射特性の関係の把握を行った。まず、静的にゴム試験片とアクリルプレートが接触する場合について示す。なお、表 2.2 に使用したゴム試験片 A の物性値を表 2.2 に押し込み荷重と変形量との関係をそれぞれ示す。本研究では同図に示す様に押し込み量と変形量との関係

表 2.2 ゴム試験片 A の物性値

	20 ° C	100 ° C
Hardness (JIS)	59	52
Elongation of Breaking (%)	467	302
Tnsile Strength of Breaking (kPa)	23.1	10.4
Toughness (J)	438.3	132.7

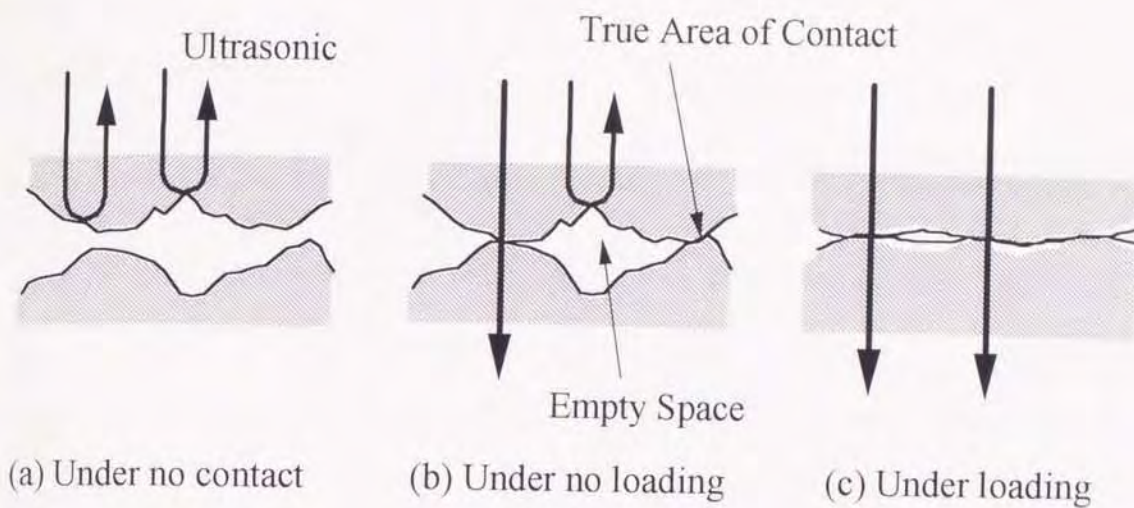


図 2.20 機械加工された 2 層平板の接触部近傍

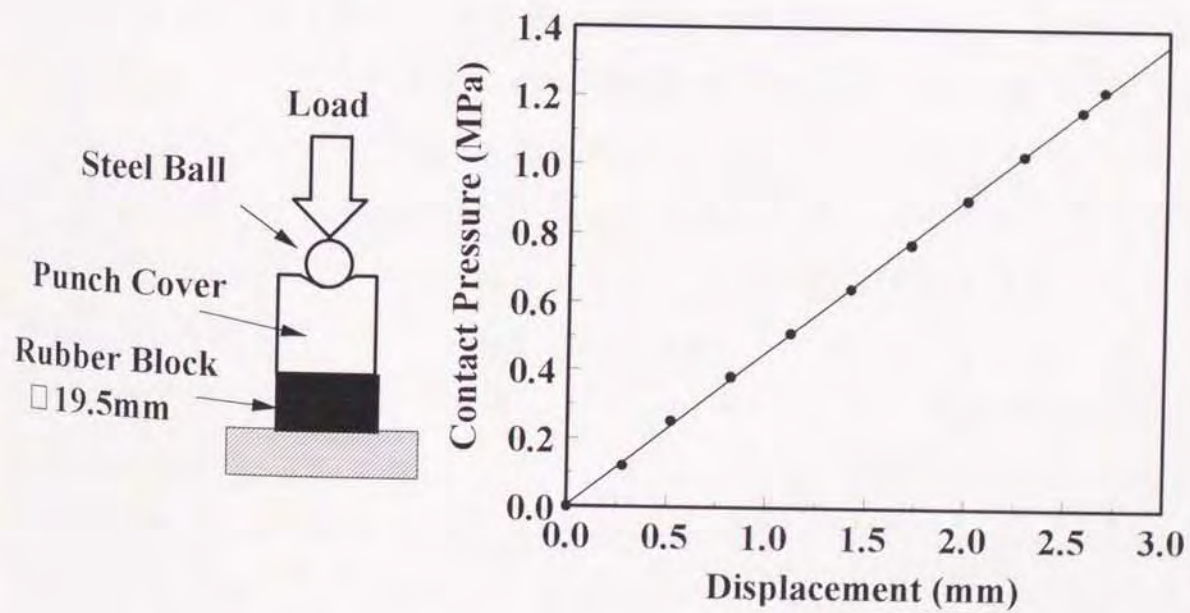


図 2.21 ゴム試験片の押し込み荷重と変形量の関係

が比例関係で与えられる範囲内で実験を行った。一方、プレートに用いたアクリル材は準静的に引張試験を行った状態での縦弾性係数は 2.65GPa である。

図 2.22 に示すように公称周波数 5MHz、振動子直径 6.4mm の縦波型探触子を探触子ホルダーに固定し、アクリルブロック上に設置した。なお、ギャップ法を適用し、探触子とアクリルブロック間は水平かつ 0.2mm 間の隙間を設けた。試験片への押し込み荷重は出来るだけ均一に負荷するためにこのホルダー上から鋼球を介して加えた。負荷速度を一定の条件に保つために万能試験機（島津製作所、オートグラフ）のコラムの移動速度を 0.5mm/s に設定し負荷した。この時の接触面からの第 1 エコー高さを超音波探傷器の A スコープ出力より検出し、パソコンに入力するとともにデータ解析及び記録を行った。接触媒質にはグリセリン（日合アセチレン、ソニコート -BS）を用いた。探触子の傾きや接触媒質の厚さ等による影響を除去するために、エコー高さを式 (2.51) で無次元化し、エコー高さ比 E_R^* を求めた。

$$E_R^* = 1 - h_e / h_{eo} \quad \dots (2.51)$$

h_e : 負荷時のエコー高さ

h_{eo} : 非接触時のエコー高さ

図 2.23 に示すように、反射波特性は接触表面の表面粗さの影響を受けることが知られている。すなわち、接触表面の粗さが大きいほど、垂直方向負荷が作用する場合においても空隙部が残りやすくなることから、このような場合のエコー高さ比 E_R^* は滑らかな接触面同士が接触する場合に比べ小さな値を示す。よって、超音波法を利用して接触圧力を測定する場合には接触面の表面粗さを十分考慮に入れて測定する必要がある。このため、アクリルブロックの接触表面はラップ加工を施し、中心線平均粗さ R_a で $1.2 \mu m$ の均一な表面を得た。一方、ゴムブロックは表面粗さ R_a が $0.6 \mu m$ の射出成形面をそのまま利用した。また、実験に際し両試験片の接触表面をエチルアルコールを用いて十分脱脂した。図 2.24 に得られた測定結果を示す。横軸は押し付け荷重を見掛けの接触面積で除して求めた公称応力を、縦軸にはエコー高さ比 E_R^* をそれぞれ示す。図に示すように負荷時及

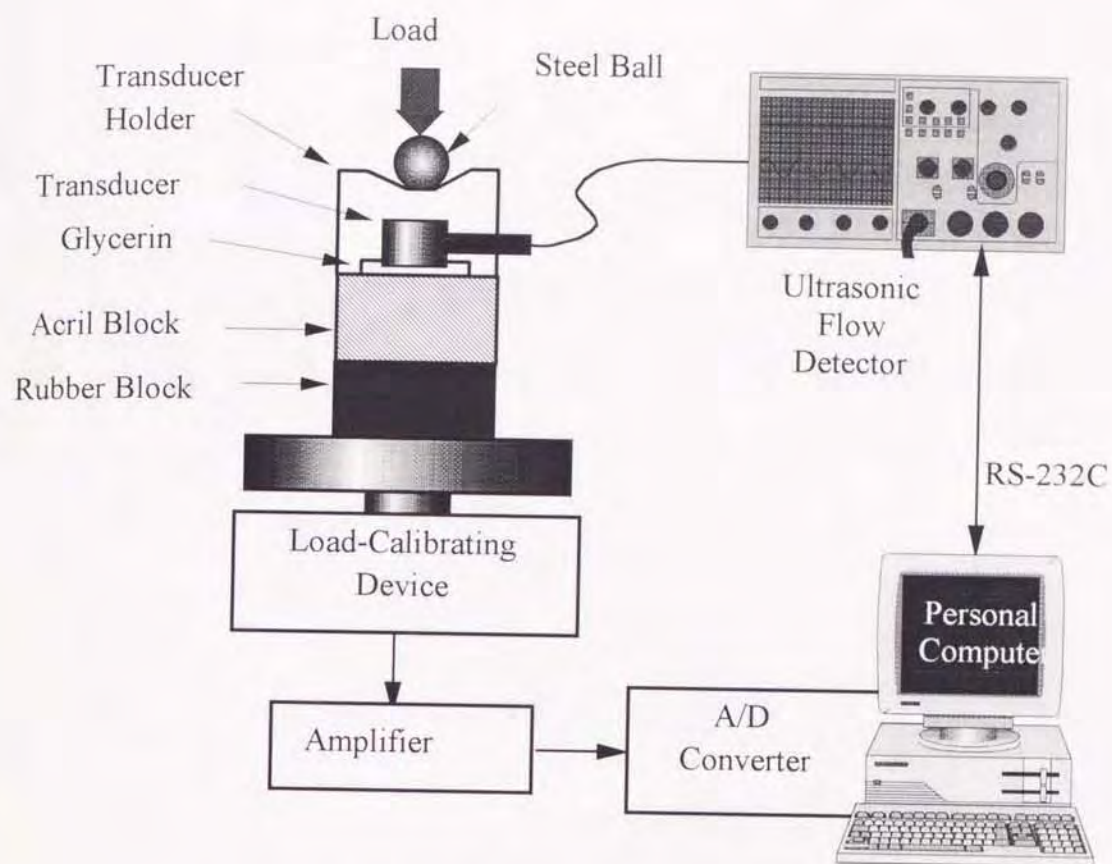


図 2.22 校正実験装置概略

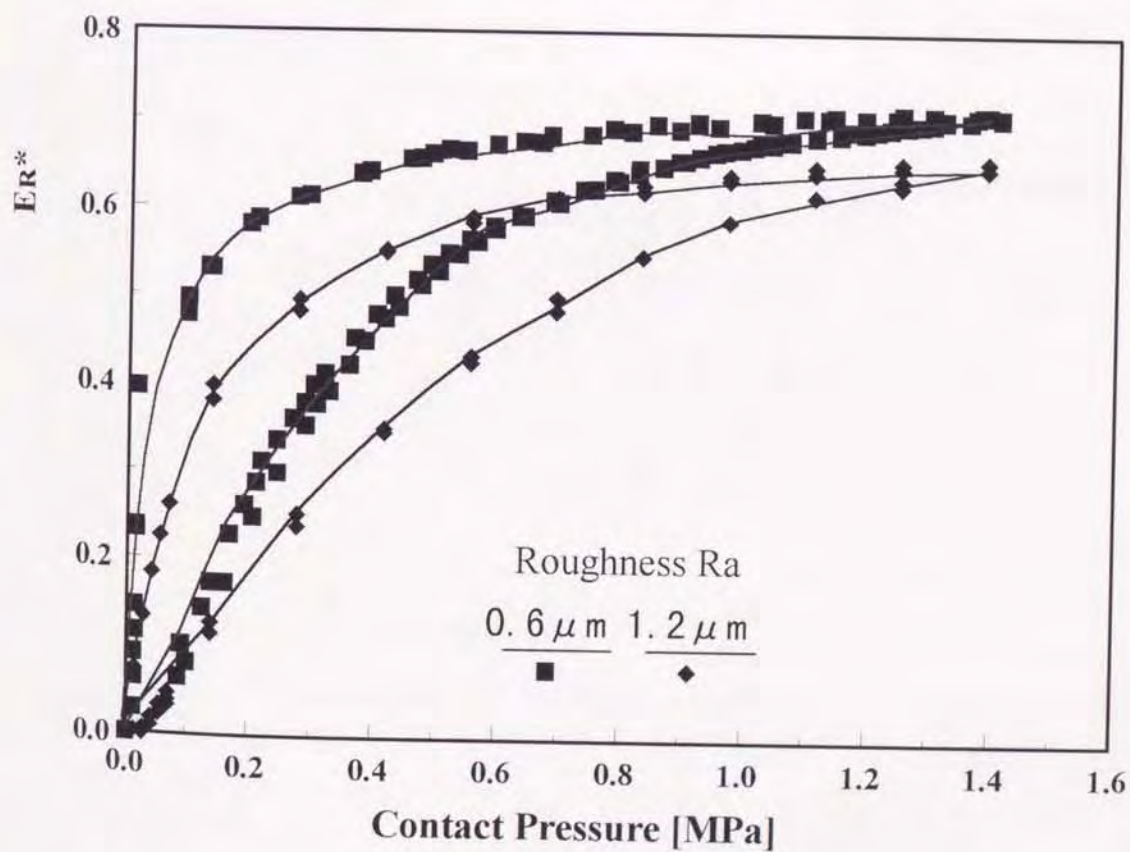


図 2.23 表面粗さの影響

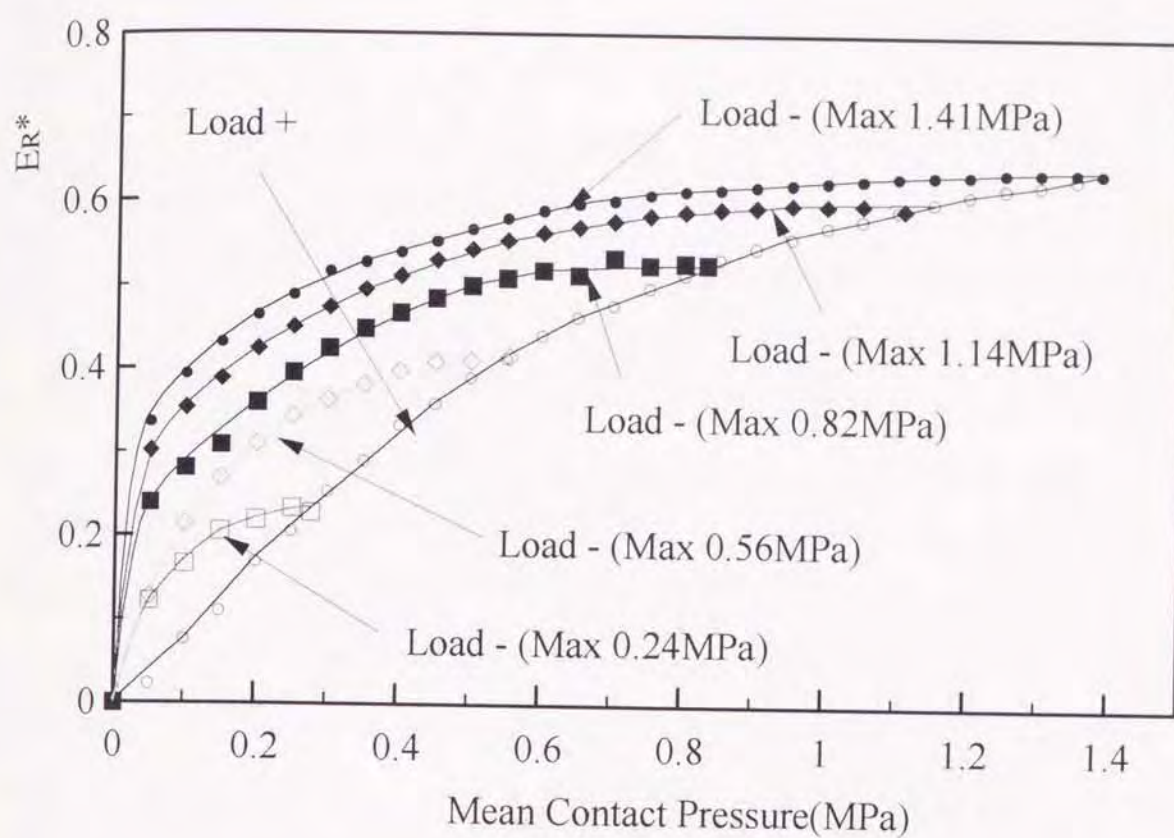


図 2.24 最大負荷値の除荷過程への影響

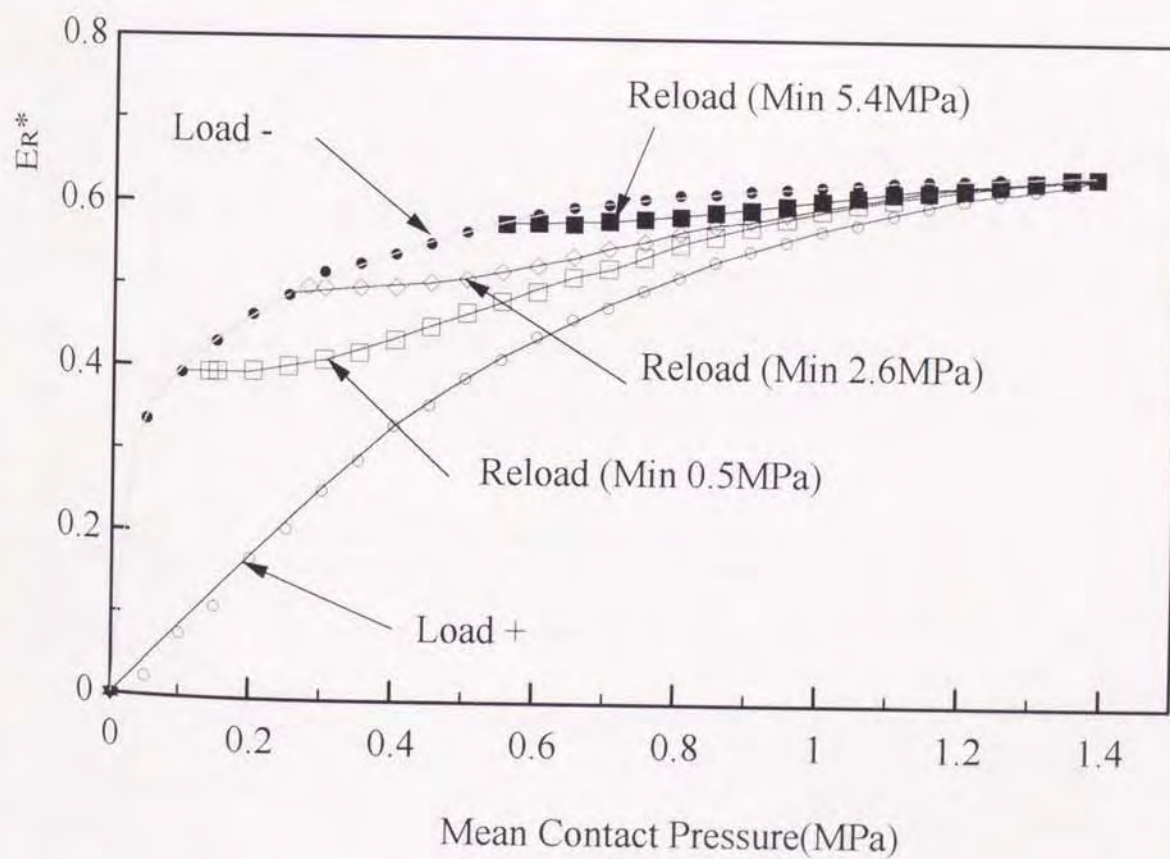


図 2.25 最小負荷値の再負荷過程への影響

び除荷時の接触圧力と E_{R^*} の関係は上に凸の曲線で与えられるものの、両者は異なる履歴を示す。すなわち、負荷時に示すエコー高さ比 E_{R^*} の値は同一接触圧力の除荷時の E_{R^*} の値に比べ、小さな値を示す。これは、両試験片が密着状態にあり、除荷過程において剥離しにくい状態にあるためと考えられる。また、除荷時の E_{R^*} は最大負荷に依存し、最大負荷が大きい程 E_{R^*} は大きな値を示す。一方、図 2.25 より、再負荷時の接触圧力と E_{R^*} の関係は緩やかな S 字曲線で与えられ、再負荷開始荷重が大きい程 E_{R^*} は大きな値を示す。また、表 2.3 に示す B₁ から B₆ のゴム試験片の様に硬度の異なる試験片で接触圧力と E_{R^*} の関係を求めた場合、図 2.26 に示す様に反射波特性はゴムの硬度に依存することが解る。

ゴム等の高分子材料はクリープ特性を示すことから、一定の押し込み荷重を与えていても応力緩和の作用により、その変位量は時間とともに変化する。接触境界面近傍においても同様に考えられ、真実接触面積も時間とともに増加することから、接触面における超音波の透過量が増加し、このため超音波探傷器で得られるエコー高さは減少する。このため、接触圧力を一定値に保持したとしても、図 2.27 に示すようにエコー高さ比 E_{R^*} の値は時間の経過とともに増加傾向を示す。よって、押しつけ力が動的に変化する場合の接触圧力の測定を定量的に評価するためには、接触圧力の増加速度の影響を考慮した接触圧力とエコー高さ比 E_{R^*} の関係をあらかじめ調べておく必要がある。本研究では、図 2.22 に示す装置を用いてゴム材料 A で作成した直径 ϕ 30mm、厚さ 10mm の天然ゴム製較正ブロックに上方から直径 ϕ 30mm、厚さ 20mm のアクリル製較正ブロックを表 2.4 に示す条件

表 2.3 ゴム材料 B の物性値

Rubber Number	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
Hardness (JIS)	67	65	60	64	64	62
Elongation of Breaking (%)	517.0	539.0	541.8	570.8	565.3	602.5
Tensile Strength of Breaking (kPa)	30.6	32.5	27.0	29.0	30.4	27.3
Toughness (J)	775.3	877.7	662.5	783.0	763.0	742.3
Res (J)	47.7	57.5	52.2	51.3	57.7	51.6

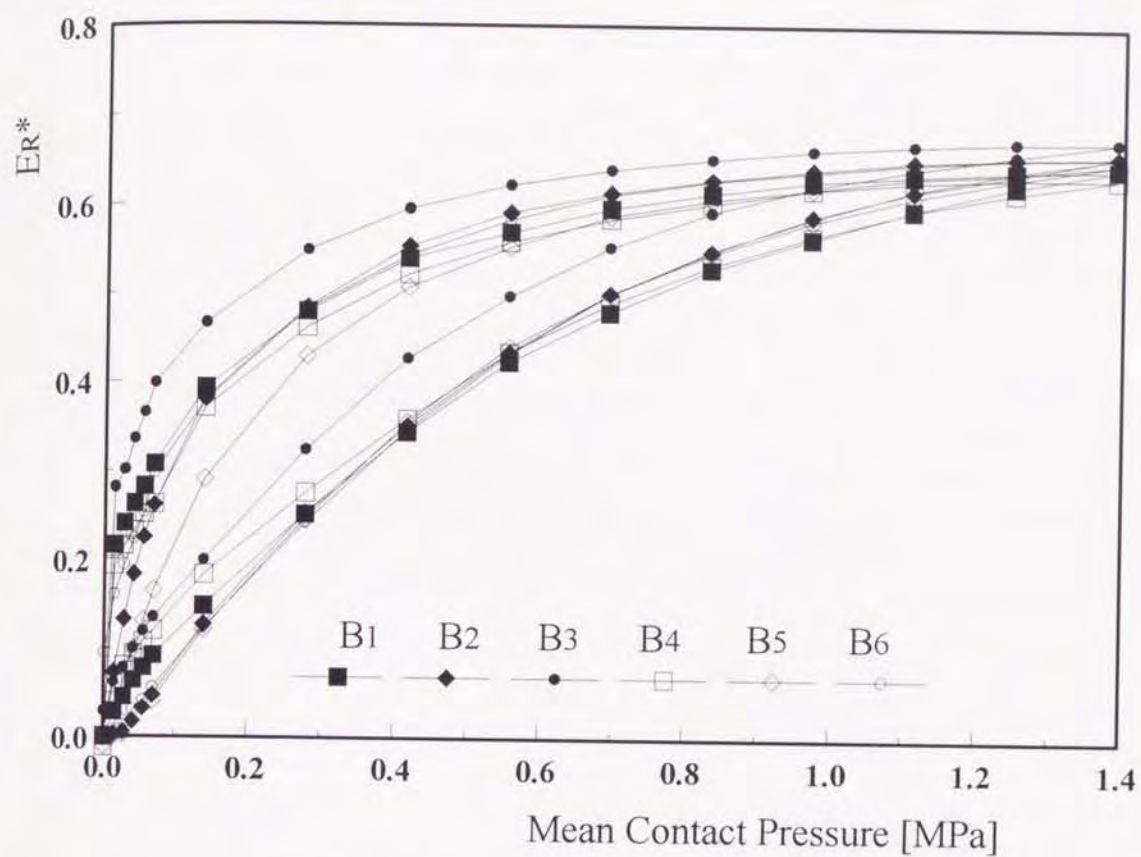


図 2.26 ゴム試験片の硬度による影響

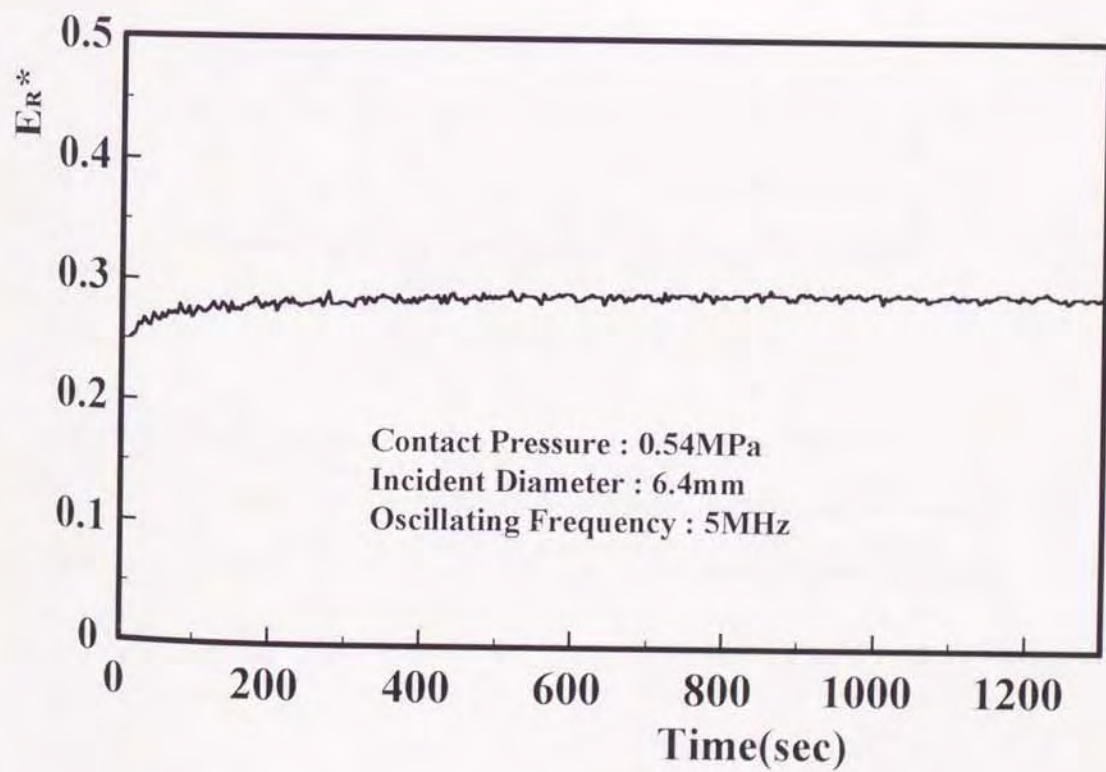


図 2.27 エコー高さ比の経時的変化

で押し付け、この時の周波数 5MHz、振動子直径 ϕ 6.4mm の垂直型探触子から発せられた超音波の接触面からの第 1 エコー高さを測定した。また、押し付け荷重をロードセルを用いて検出し、パーソナルコンピュータを用いて両者の記録及び解析を行った。なお、アクリルブロックの接触面にはラップ加工を施し、ゴムブロックは射出成形面を用いた。表 2.5 に両試験片の表面粗さを示す。

図 2.28 に得られた E_R^* と接触圧力の関係を示す。横軸は接触圧力、縦軸は E_R^* をそれぞれ示している。図に示す様に負荷速度が大きくなるに従い、較正曲線の勾配は小さくなり同負荷値における E_R^* の値は小さくなる。しかしながら、接触圧力測定時において E_R^* の値のみならず変化速度を考慮することにより、定量的な接触圧力の測定が可能であると考えられる。

表 2.4 負荷条件

No.	Cross head speed (mm/min)
1	0.1
2	0.5
3	1.0
4	5.0
5	10.0

表 2.5 試験片の表面粗さ

	Acrl	Rubber
Roughness Ra (μ m)	1.30	0.77

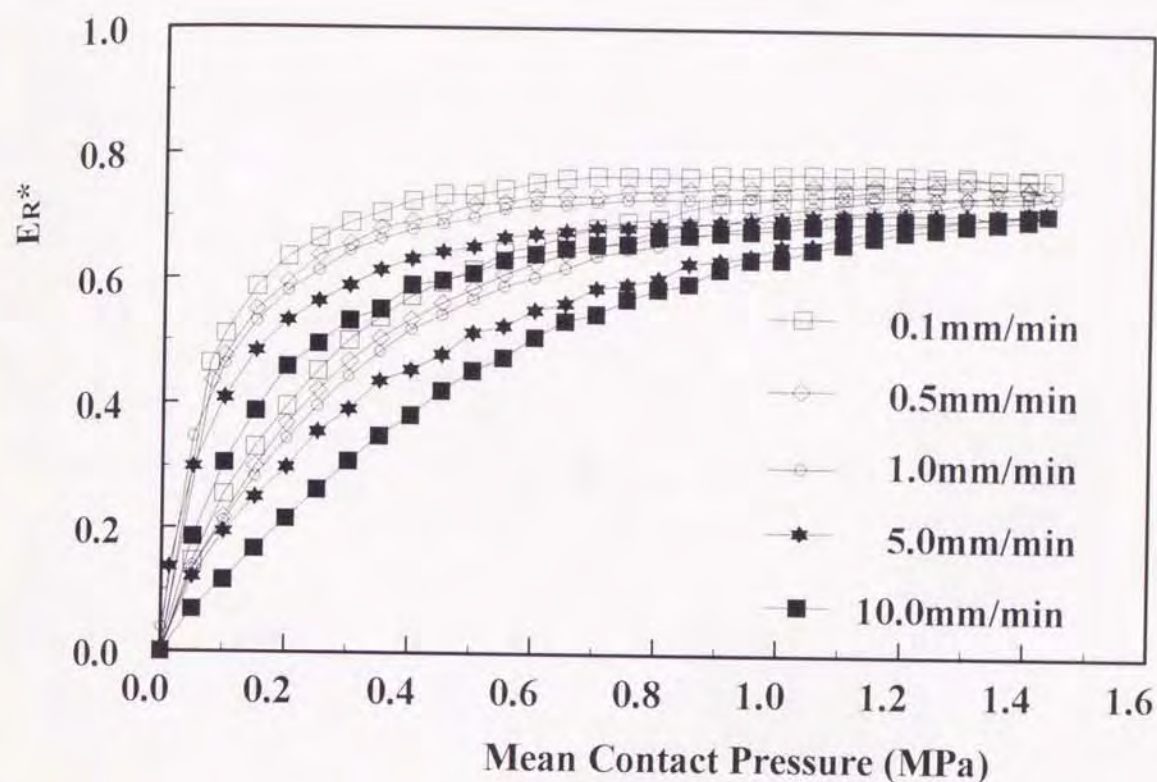


図 2.28 負荷速度の影響

次に、摺動時のエコー高さ比 ER^* と接触圧力の関係を示す。図 2.29 及び図 2.30 に示す様にピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用い、大気中・室温で摺動させる。図 2.31 に試験片の形状を示す。ゴム材料 A で作成した天然ゴム試験片の形状は厚さ 10mm、直径 10mm の円柱であり、接触圧力分布が出来るだけ一様になるように角部の面取りを行った。反射波特性は接触面の表面粗さの影響を受けることから、再現性を有しかつ精度の良い測定を行うためには、接触面の表面粗さを明らかにしておく必要がある。よって、アクリル円板はラップ加工し、ゴム試験片は射出成形面を初期摺動面とした。両試験片の初期表面粗さは中心線平均粗さ Ra で、それぞれ $0.4 \mu m$ と $0.77 \mu m$ であった。なお、実験は無潤滑で行うために実験前に各試験片の接触表面をエチルアルコールを用いて、充分脱脂した。アクリル円板の中心より 118mm の位置にゴム試験片を押し付け、その点でのアクリル円板の平均摺動速度を 10.79mm/s になるように設定した。この時、錘を用いてゴム試験片に最大 108N までの負荷を与え、接触面での反射波

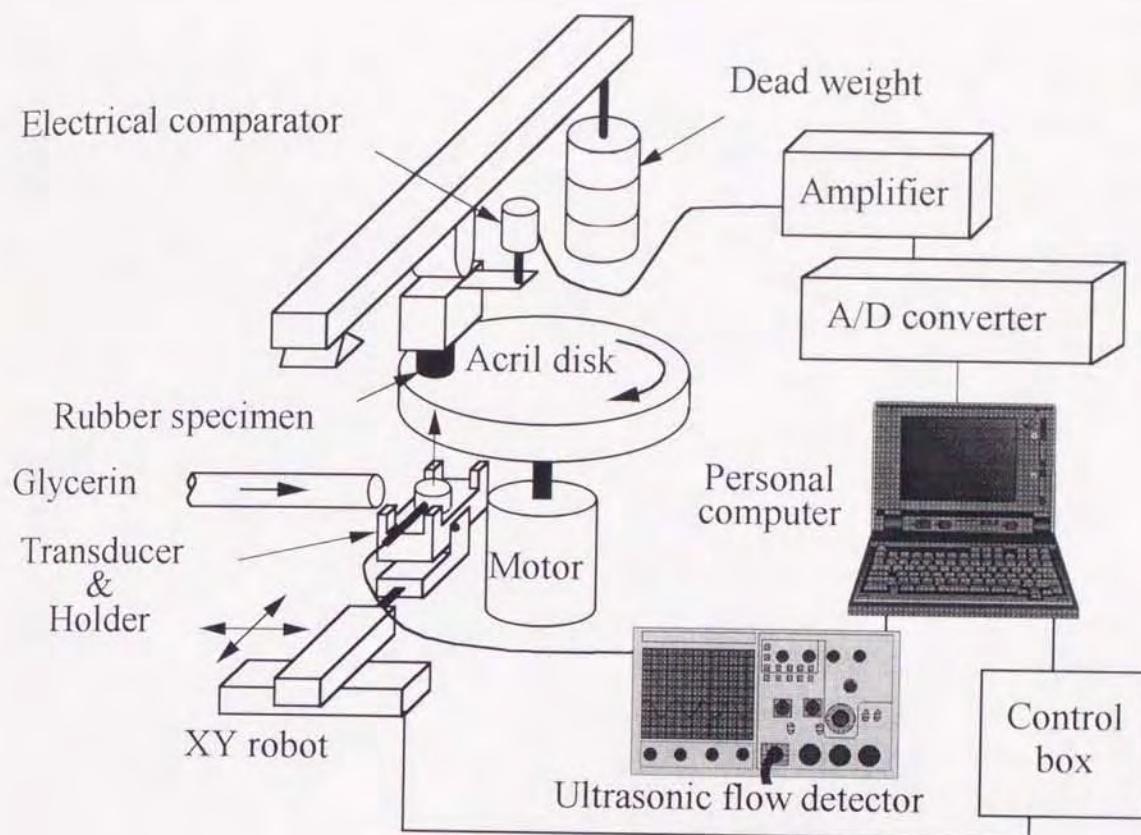


図 2.29 実験装置概略図

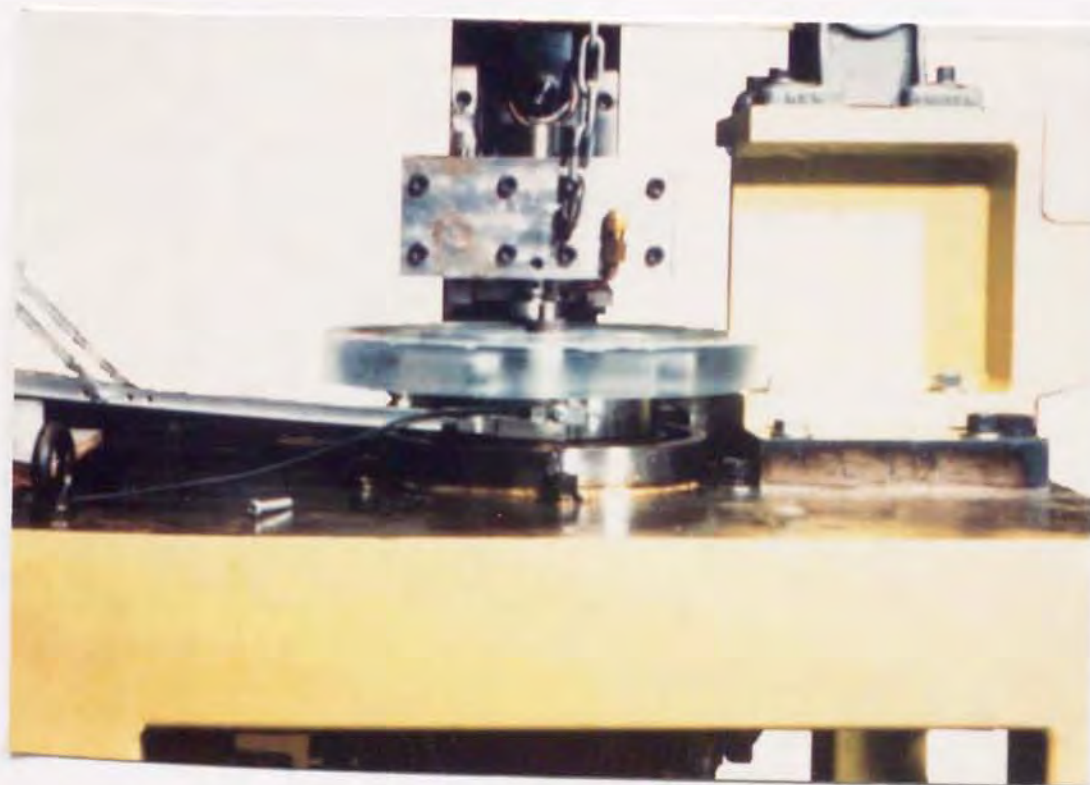


図 2.30 実験装置外観

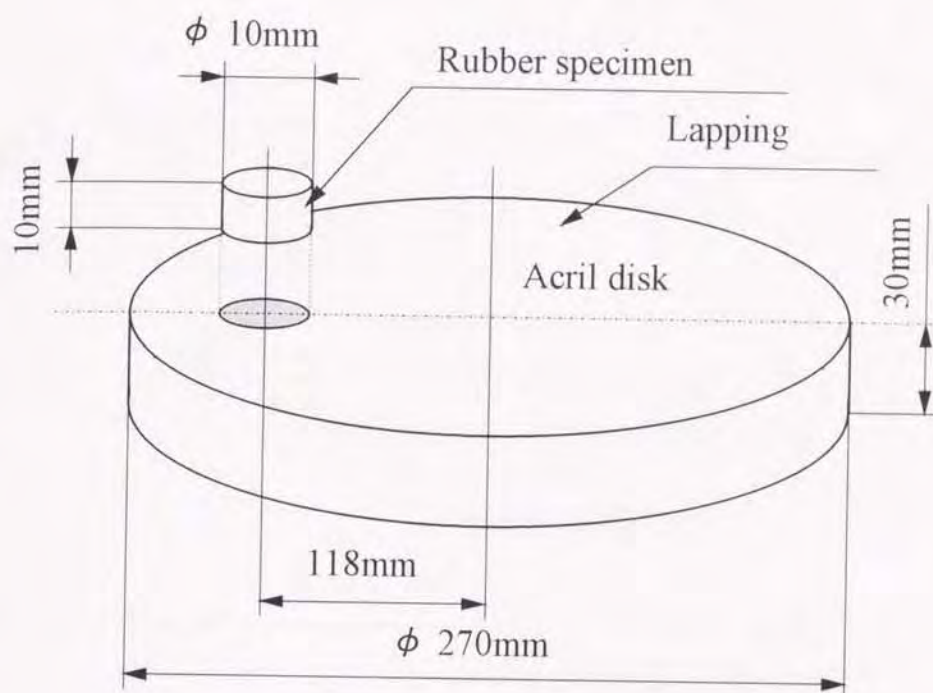


図 2.31 ゴム試料とアクリル円板の形状

をアクリル円板下面の接触領域中心軸上に設置した中心周波数 $f = 5\text{MHz}$ 、振動子直径 $d = \phi 6.4\text{mm}$ の垂直型探触子により測定した。なお、超音波探傷器に表示される接触面のエコー高さが、非接触時の値が 100% になるよう超音波探傷器のゲインを設定した。この様にして検出したエコー高さをパソコンに入力して解析した。また、探触子の摩耗を防止し、かつ安定な設置状態を得るために四隅に突起を有する探触子ホルダーを用いるとともに、探触子とアクリル円板間に 0.2mm の隙間を設けるギャップ法を適用した。この時、探触子が走査面に平行であることを確認し、接触媒質としてグリセリンを用いた。なお、試験時においては常にグリセリン膜が探触子設置面に存在するように随時補給した。通常、摺動開始直後においては摩耗量は非常に多く、初期摩耗と呼ばれる状態になる。その後、摺動距離の増加に従い、定常摩耗と呼ばれる比較的安定した状態に移行する。本研究では定常摩耗状態に移行した後の接触圧力を測定する。定常摩耗への移行の確認は電気マイクロメータを用いて行った。

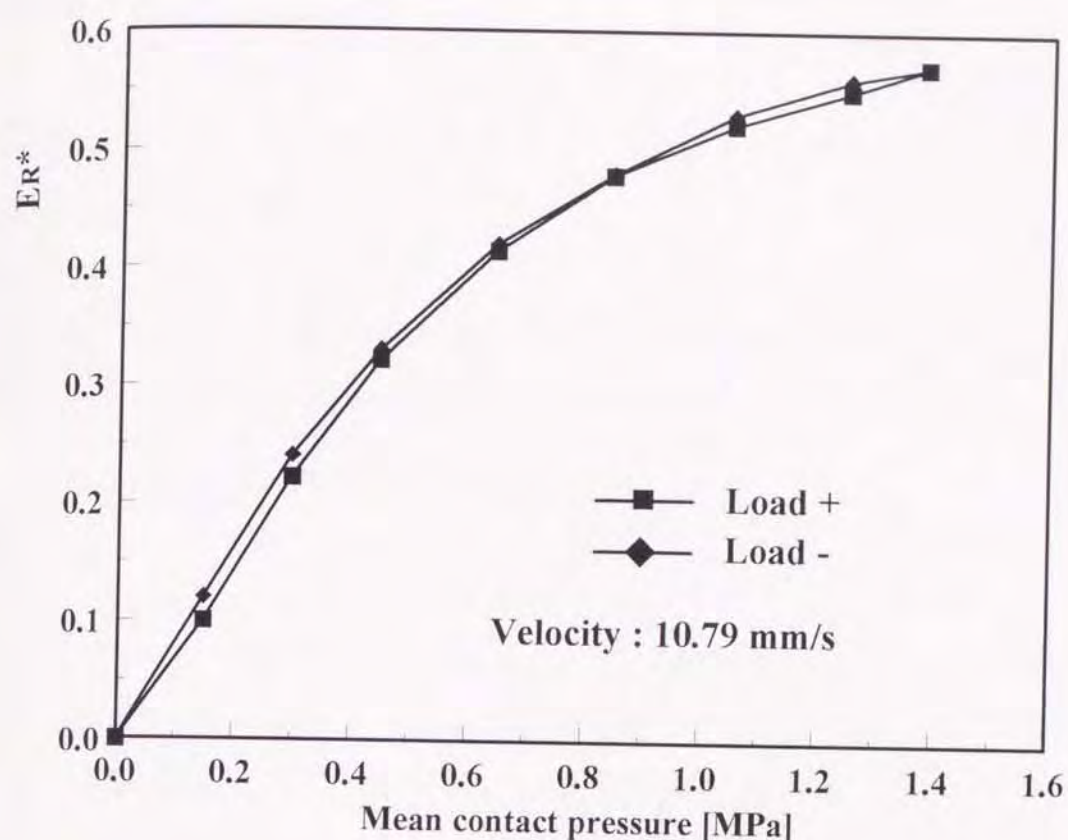


図 2.32 接触圧力とエコー高さ比の関係

図 2.32 に校正実験の結果を示す，断面の寸法を考慮してゴム試験片の接触面圧が一様に分布しているとみなし，作用荷重をゴム試験片の接触面積で除した公称応力値との関係を示した．0.4MPa 以下では，これらの関係はほぼ直線で与えられるが，それ以上の公称応力では上に凸の曲線で表示される．特に，後者においては空隙部に残存する空気等によって完全密着状態が得られないこと等から，やや非線形の関係になるものと思われる．また，負荷時及び除荷時においてほぼ同一の履歴過程が認められた．

2.5.3 接触端部の反射波特性

接触圧力測定時の測定対象領域における超音波の分布は一様ではなく，図 2.33 に示すように半径 a ，面積 S の円盤が周波数 f ，速度 U_0 でピストン運動している時，時刻 t における遠方の任意の一点での音圧は次式で与えられる (1.02)．

$$P(R, \theta) = \frac{2U_0 f s J_1(ka \sin \theta)}{Rka \sin \theta} \sin(\omega t - kR) \quad \dots (2.52)$$

ここで、 J_1 は第1種 Bessel 関数であり、媒質の音速を c とおけば、波長定数 k と角振動数 ω はそれぞれ

$$k = \omega / c, \quad \omega = 2 \pi f$$

で示される。一方、円筒座標系で与えられる近距離音場内の任意の一点 (ρ, θ, z) での音圧 p は次式で与えられる⁽¹⁾⁽³⁾。

$$p(\rho, \theta, z) = \sigma \omega_0 e^{i(\omega t - kz)} \left[1 - \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^{-ik(R-z)} d\theta \right] \quad \dots (2.53)$$

ここで、 σ は媒質密度、 ω_0 は音源の速度振幅をそれぞれ示す。図 2.34 に式 (2.52) 及び式 (2.53) を基にして得られた接触面における音圧分布を示す。なお、音源である振動子の直径は ϕ 6.4mm、周波数 5MHz とし、アクリル板中を超音波が伝播するものとし、アクリル板の板厚は 30mm とし、数値計算した。横軸には伝播する音波の中心軸からの距離、縦軸には中心軸上の音圧で無次元化した音圧比をそれぞれ示す。実際にはこのような条件

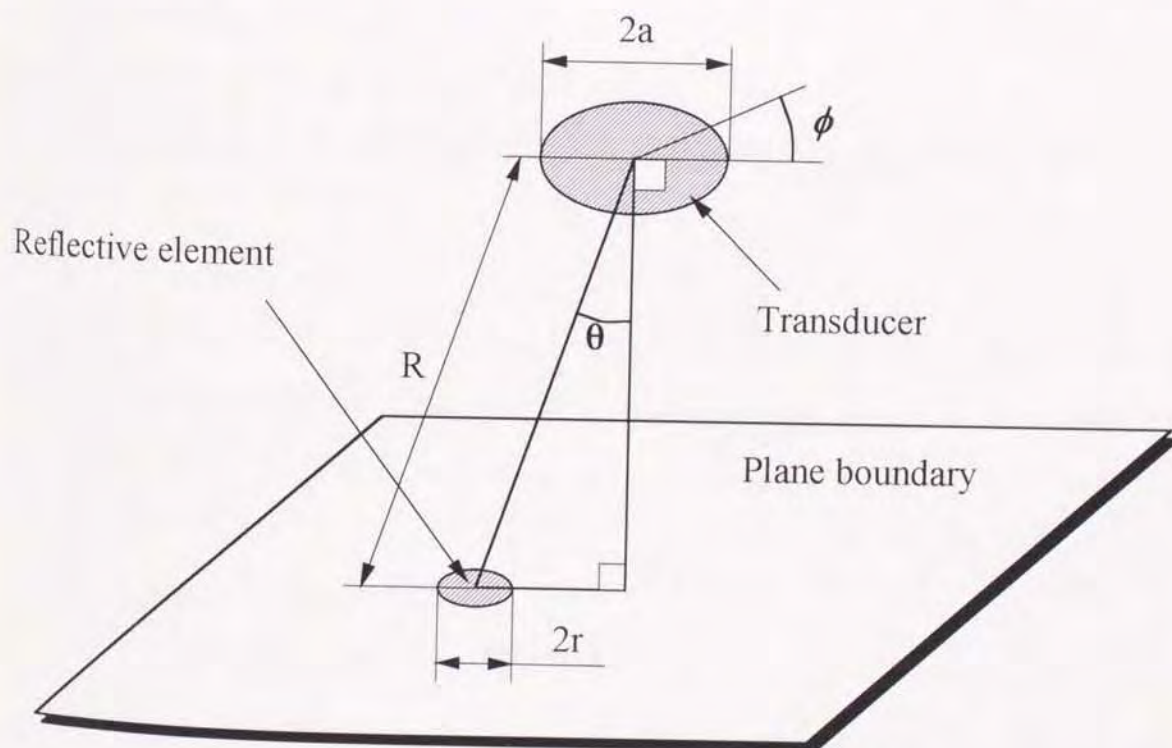


図 2.33 音場解析モデル

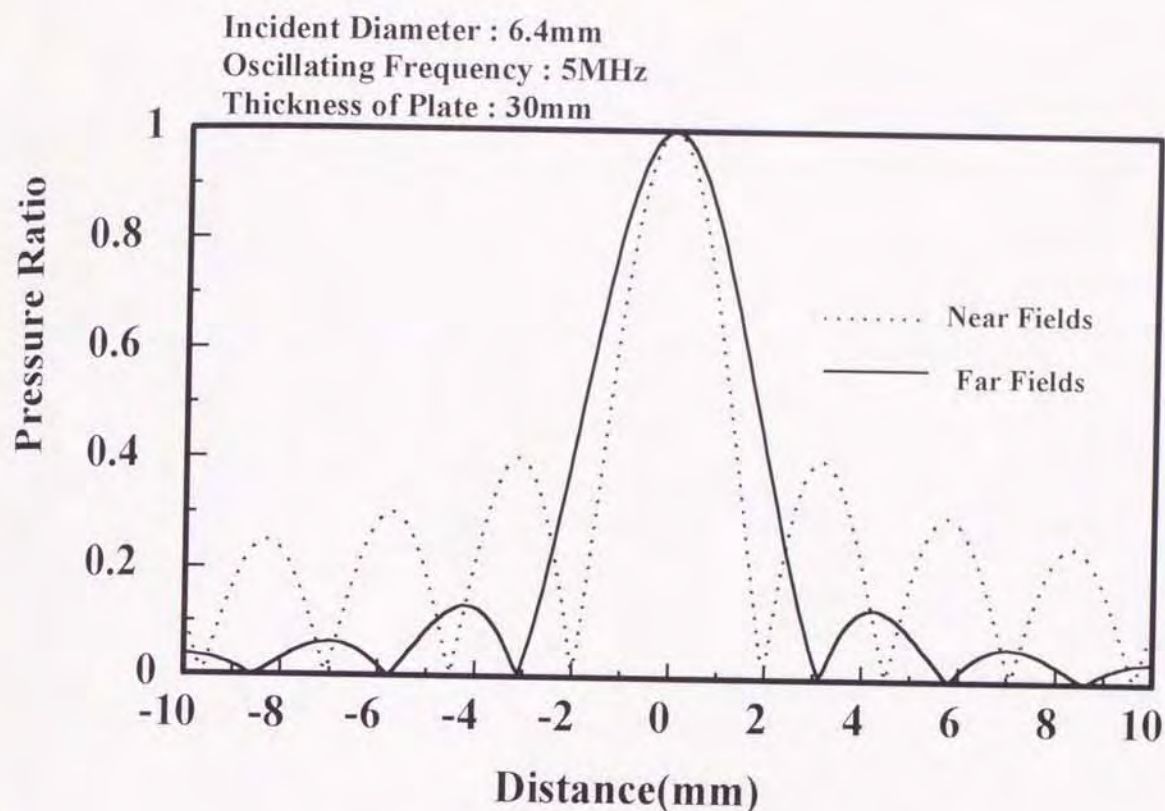


図 2.34 近距離音場と遠距離音場

では遠距離音場と考えられるので、接触面における音圧分布は実線で示した様な分布形状になるものと思われる。

一方、 θ だけ傾いた半径 r の微小円形反射面の反射指向性係数⁽¹⁰²⁾は次式で示される。

$$Dr(\theta) = J_1(2kr \sin \theta) \cot \theta / kr \quad \cdots (2.54)$$

ピストン音源から放射された音波が遠方の境界面で反射し、再び音源に戻ってくる場合、境界面上の位置における微小円形反射面での反射波係数 Pr は、境界面での全反射音圧を P_A とすれば式 (2.52) および式 (2.54) より次式で示される。

$$Pr(R, \theta, \phi) = P(R, \theta) Dr(\theta) / P_A \quad \cdots (2.55)$$

よって、式 (2.55) を利用して図 2.35 に示す反射音圧分布が得られる。図の縦軸はピストン音源の中心軸での音圧で無次元化した音圧比、横軸は中心軸からの距離をそれぞれ示している。なお、振動子直径 6.4mm、周波数 5MHz の探触子を、板厚 30mm のアクリルプレートに設置した場合の計算例

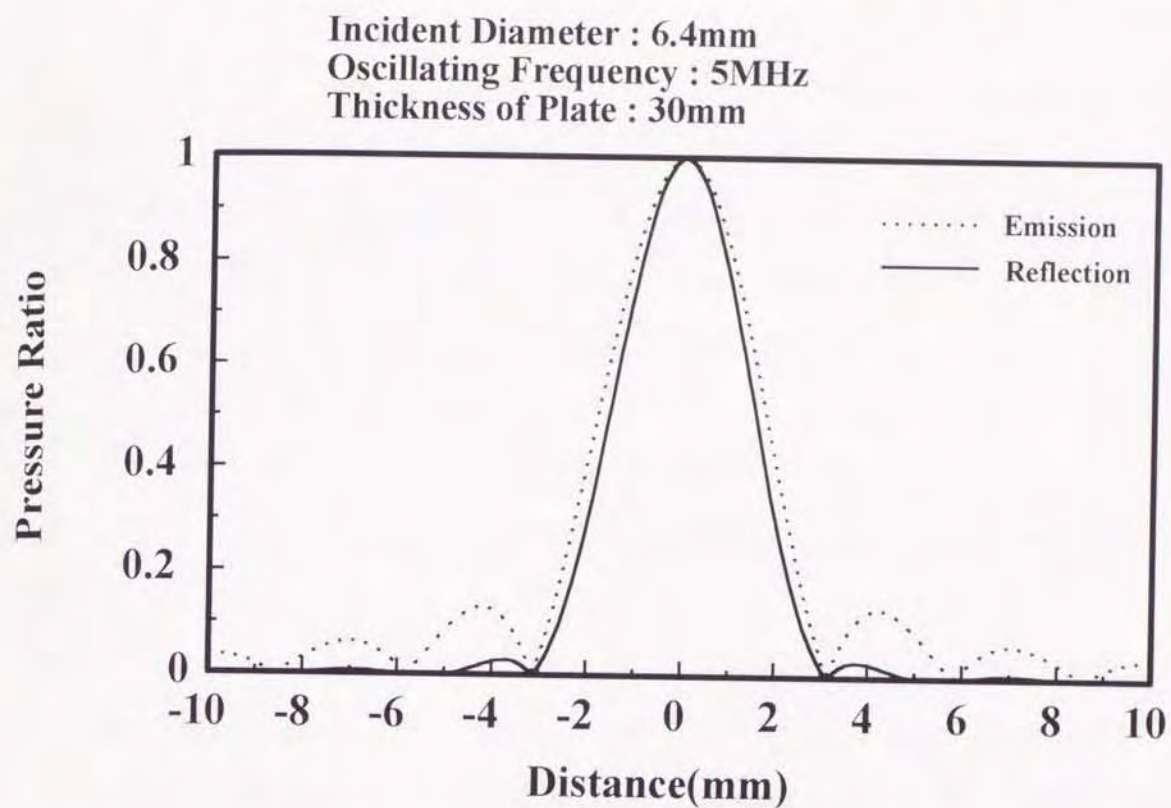


図 2.35 反射音圧分布と到達音圧分布

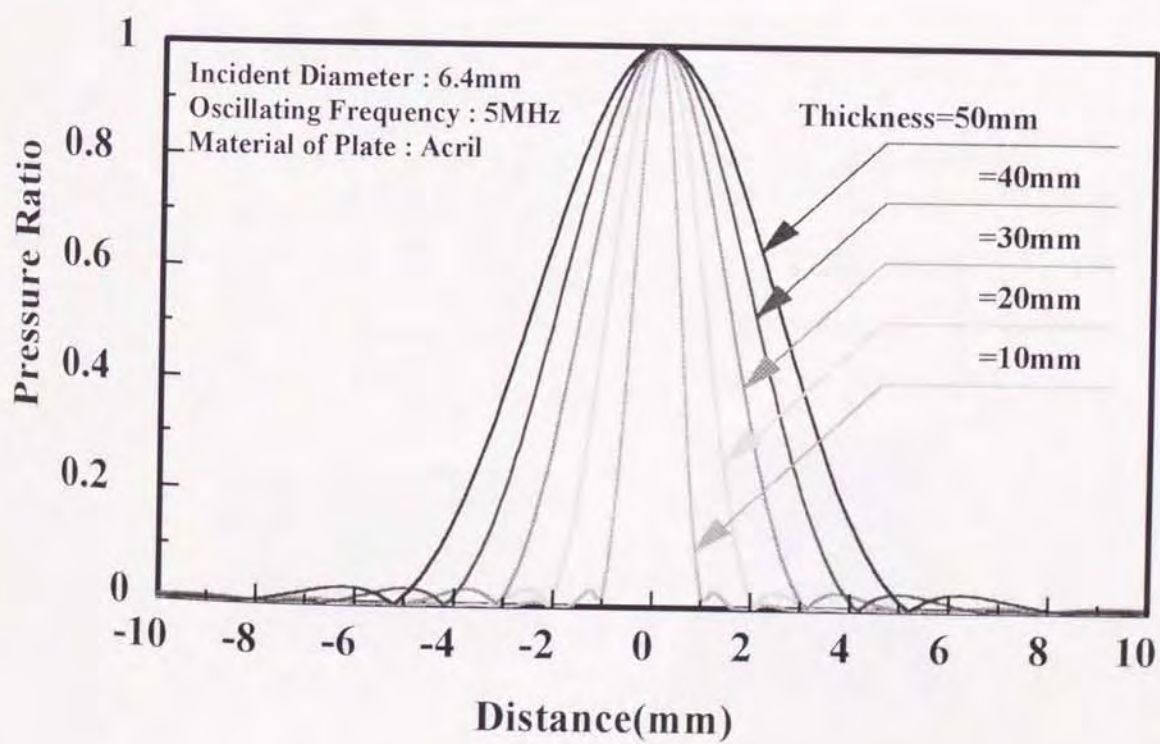


図 2.36 プレーットの厚さと反射音圧分布

であり、図中の波線は底面における音圧分布、実線は反射波の分布を示している。図より、前述の条件で接触圧力を測定する場合、その測定領域は接触面上の半径約 3mm の円形領域であり、また、音波が伝播する中心軸上の接触圧力が最も感度よく評価されるものと考えられる。

図 2.36 は同様に式 (2.55) を利用して得られたアクリル板厚と底面に於ける音圧分布の関係である。振動子直径 6.4mm、周波数 5MHz とし、板厚を 10mm、20mm、30mm、40mm 及び 50mm の場合の数値計算を行った。縦軸は各々の板厚での中心軸上の音圧で無次元化した音圧比、横軸は中心軸からの距離をそれぞれ示している。図より、板厚が厚くなるに従って、反射波の分布形状はなだらかになるとともに、接触圧力の測定領域の面積が増加することがわかる。

これらの特性を図 2.37 に示す装置を用いて実験的に評価する。段部厚さ T が 10mm、20mm、30mm 及び 40mm の段付きアクリルブロック上面において、図 2.38 に示す探触子ホルダーに固定した公称周波数 5MHz と 10MHz の垂直型探触子（振動子直径 $d = \phi 6.4\text{mm}$ ）を 2 軸制御のロボットを用いて走査し

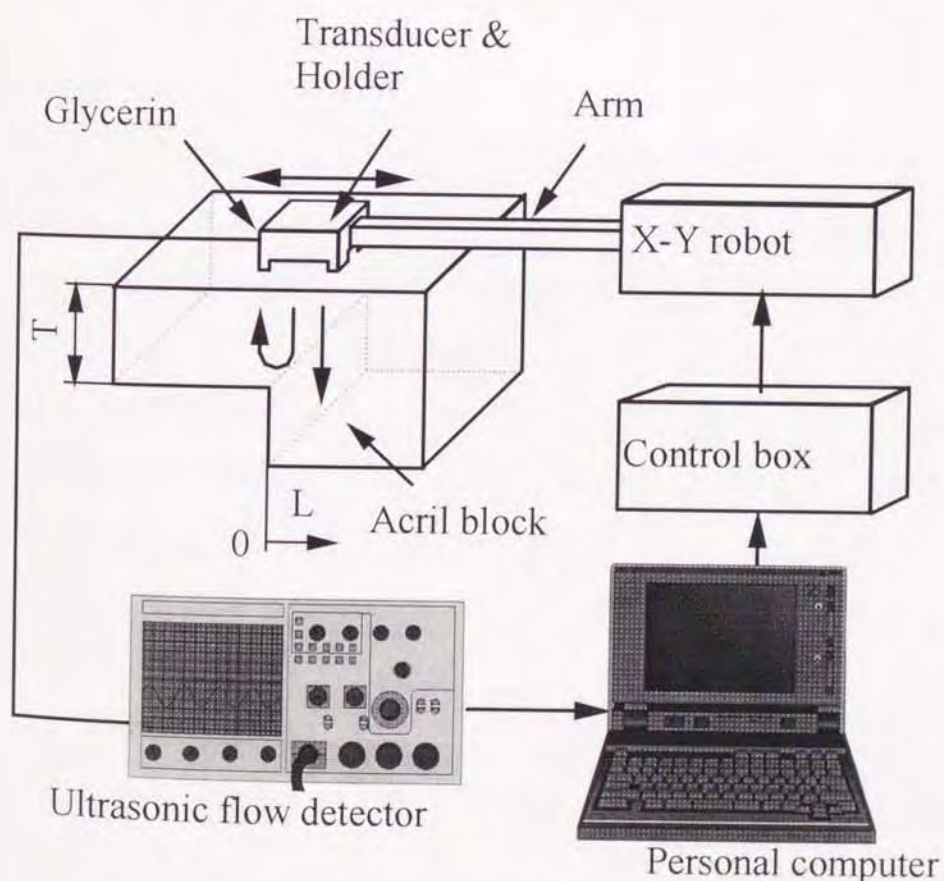


図 2.37 音圧分布測定実験装置概略

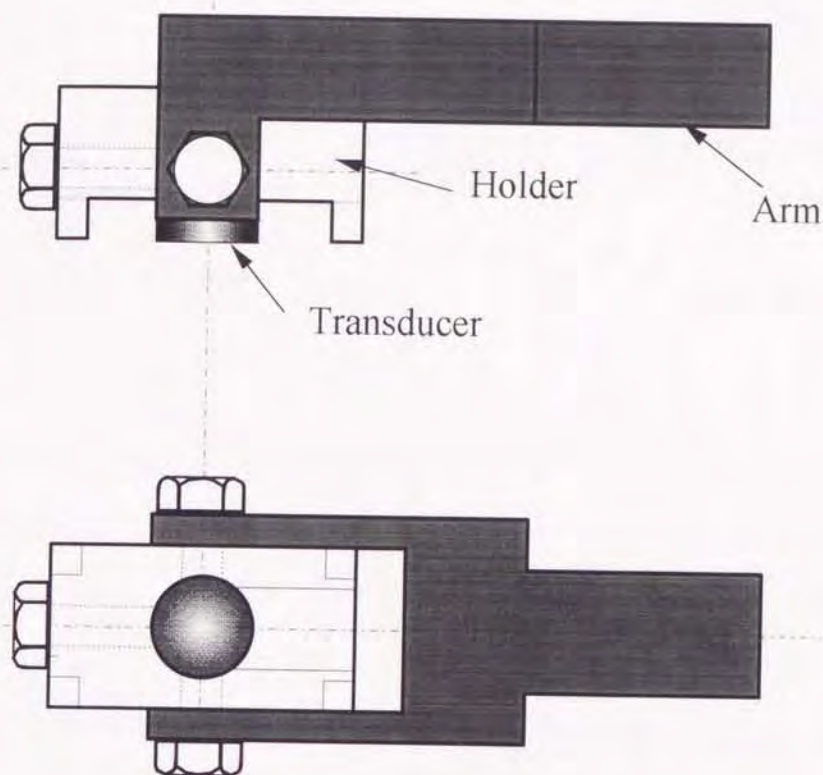


図 2.38 探触子ホルダー詳細図

た、この時、段部の厚さ T の位置のエコー高さを測定し、段部からの距離 L との関係調べた。すなわち、段部の厚さは接触圧力測定時における測定対象部材の厚さであり、加工面から超音波が反射する状態は非接触状態を想定した。走査時の探触子表面の摩耗を防止するために、探触子の固定はギャップ法を採用し、走査面と水平に 0.2mm の距離が生ずるようにボルトで探触子ホルダーに固定した。接触媒質としてはグリセリン溶液を使用した。反射波音圧は探触子の傾き並びに接触媒質の厚さ等の影響を受けることから次式によってエコー高さ比 R_h を定義し、解析を行った。なお、エコー高さは反射音圧と比例関係にあることから、エコー高さ比は反射音圧比と等価である。

$$R_h = h / h_a \quad \dots (2.56)$$

ここで、 h_a は超音波が段部反射面で全反射する時のエコー高さ、 h は測定点 L でのエコー高さを示す。

一方、式 (2.54) から得られるエコー高さ比を R_{hc} とすれば、次式を得る。

$$Rhc(L) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^L Pr(x, y, T) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Pr(x, y, T) dx dy} \quad \dots (2.57)$$

ここで、 $Pr(x, y, T)$ は式 (2.55) で示す $Pr(R, \theta, \phi)$ を直角直交座標系で定義した関数であり、

$$\begin{aligned} x &= R \sin \theta \cos \phi, & y &= R \sin \theta \sin \phi \\ z &= R \cos \theta = T \end{aligned}$$

である。

図 2.39 から図 2.43 に式 (2.57) を基にして得られるエコー高さ比の計算値 Rhc と実測値 Rh を比較した。縦軸は Rh 及び Rhc の値を、横軸は段部から探触子までの距離 L をそれぞれ示す。図 2.39 から図 2.42 は用いた探触子が振動子直径 6.4mm、周波数 5MHz であり、それぞれ板厚を 10mm, 20mm, 30mm, 40mm とした場合の結果である。板厚が 10mm の場合は実験結果は近距離音場を考慮して計算した値と良く一致している。一方、20mm 以上の板厚では遠距離音場を考慮して計算した値と実験結果は良く一致している。

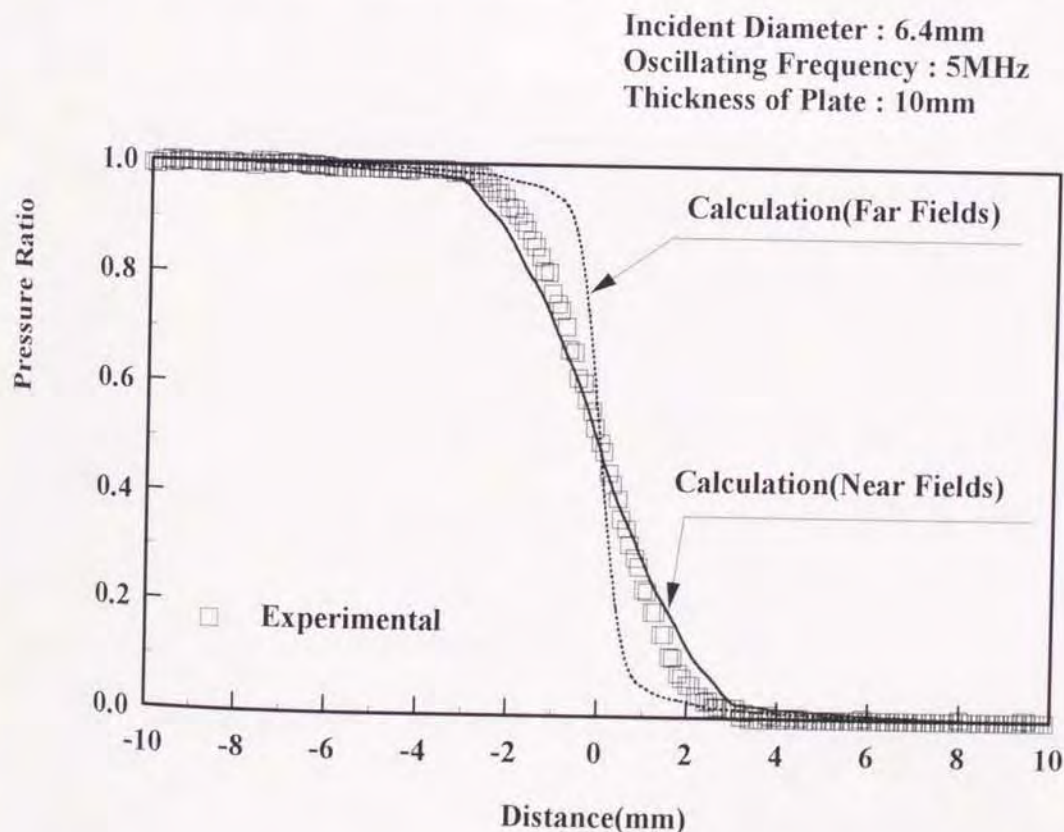


図 2.39 エコー高さ比の実験結果及び計算結果 ($f=5\text{MHz}$: $T=10\text{mm}$)

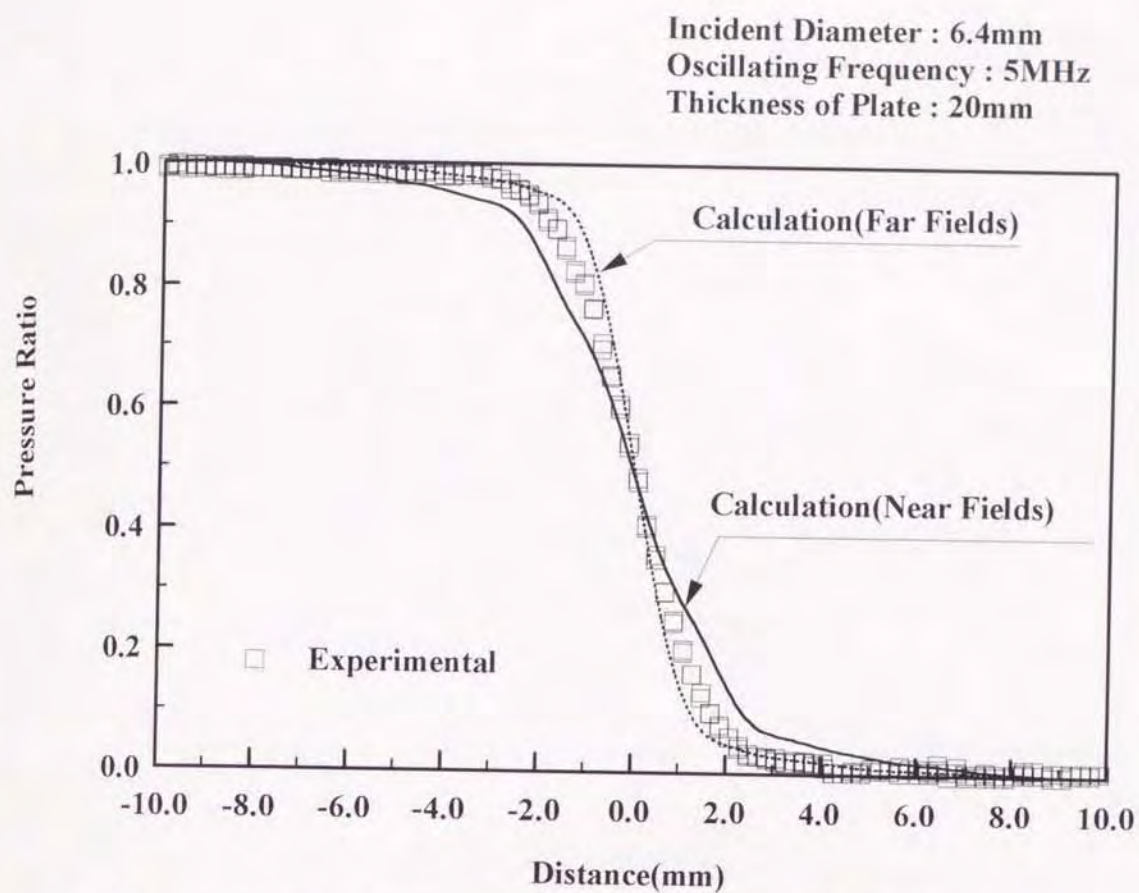


図 2.40 エコー高さ比の実験結果及び計算結果 ($f = 5\text{MHz}$: $T = 20\text{mm}$)

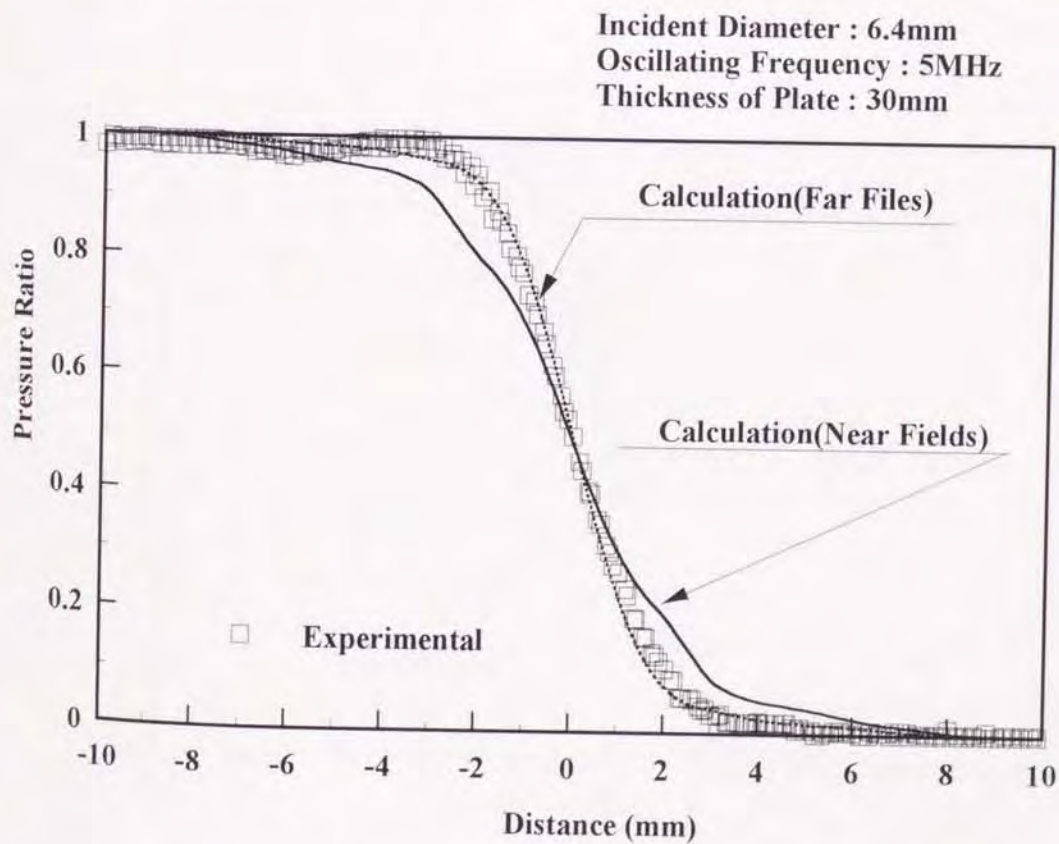


図 2.41 エコー高さ比の実験結果及び計算結果 ($f = 5\text{MHz}$: $T = 30\text{mm}$)

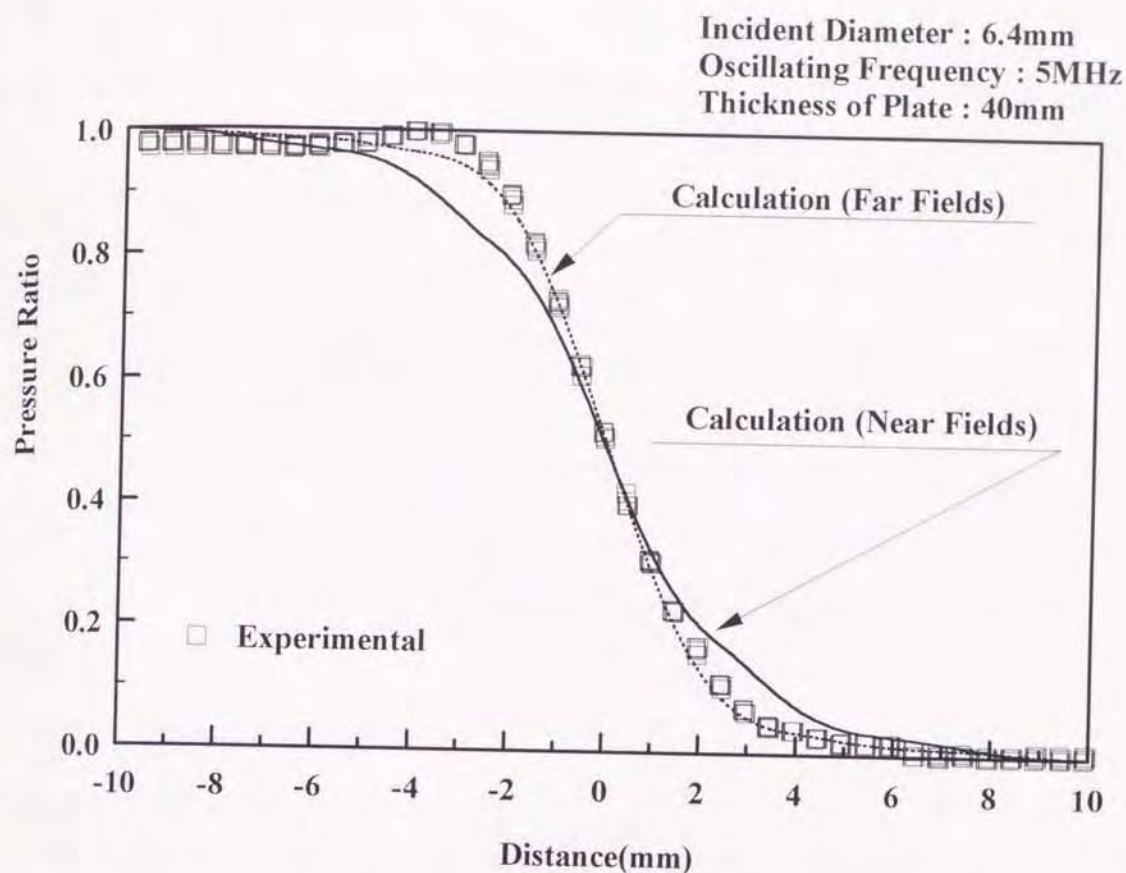


図 2.42 エコー高さ比の実験結果及び計算結果 ($f = 5\text{MHz}$: $T = 40\text{mm}$)

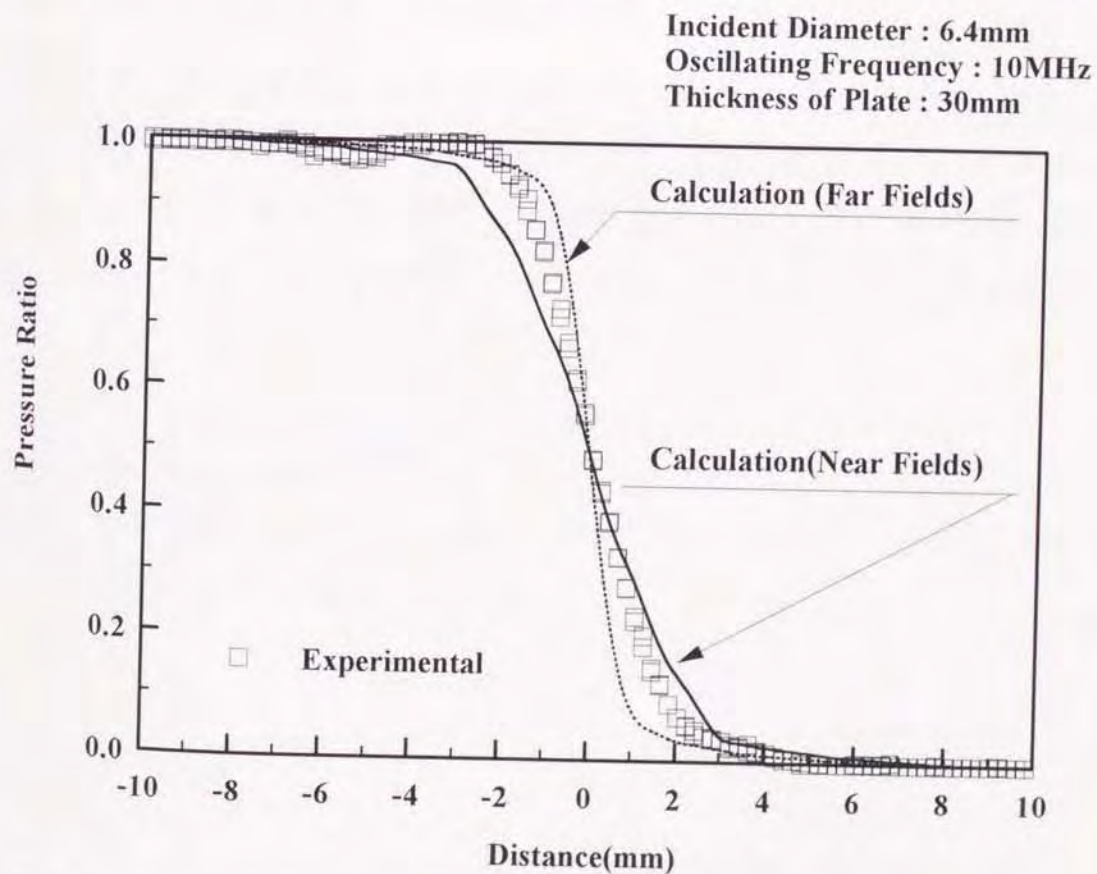


図 2.43 エコー高さ比の実験結果及び計算結果 ($f = 10\text{MHz}$: $T = 30\text{mm}$)

また、図 2.43 は振動子直径 6.4mm、周波数 10MHz、アクリル板厚 30mm の場合の結果である。図より異なる周波数においても本手法が適用可能であることがわかる。いずれの場合においても、計算値と実験結果は良く一致し、接触域端部の反射波特性を求める上で示した実験的手法は十分有効で、合理性を有すると考えられる。

図 2.44 はアクリル円盤上に接触するゴム試験片を示しているが、このような状態に本法を適用するに当たっては、アクリル円盤下面に探触子を設置し、接触圧力を測定する。そこで、接触端部の接触圧力を正確に測定するために、図 2.44(b) に示す超音波到達領域を非接触部 C と接触部 M に分割し、さらに接触部 M を音圧分布の重心を通る直線によって領域 A と B に分割して考える。すなわち、これらの分割領域から反射する超音波のエネルギーが等しくなるようにアクリル板の厚さを T として次式を利用する。

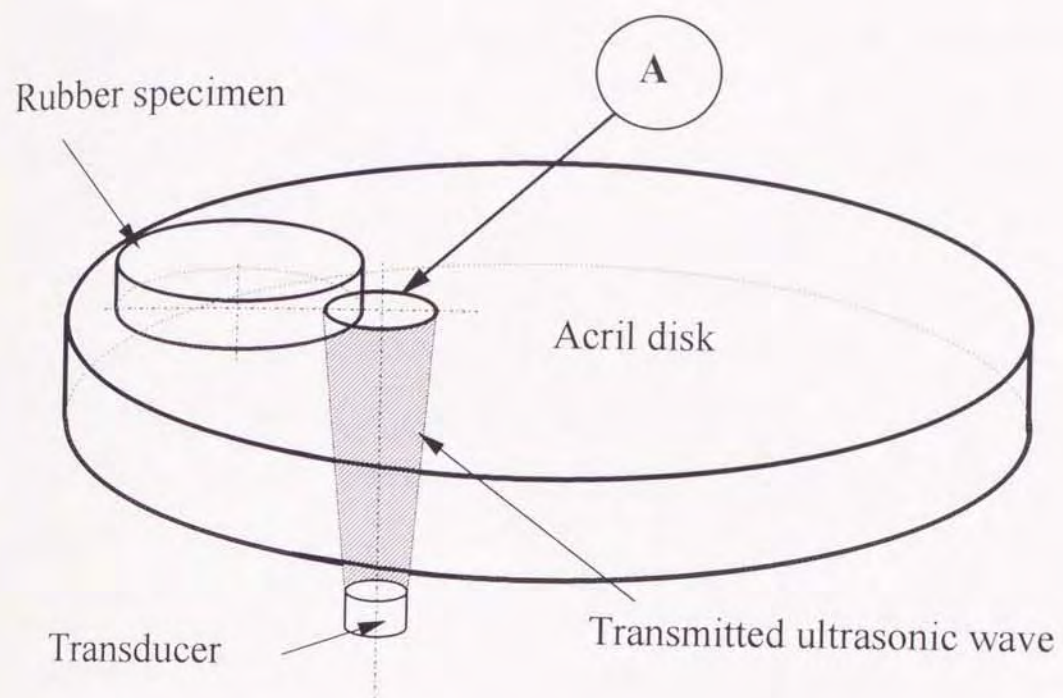
$$\iint_A \text{Pr}(x, y, T) dx dy = \iint_B \text{Pr}(x, y, T) dx dy \quad \cdots (2.58)$$

式 (2.58) を利用して探触子中心と音圧分布の重心の半径方向距離 L_c を求め、測定位置の補正を行う。

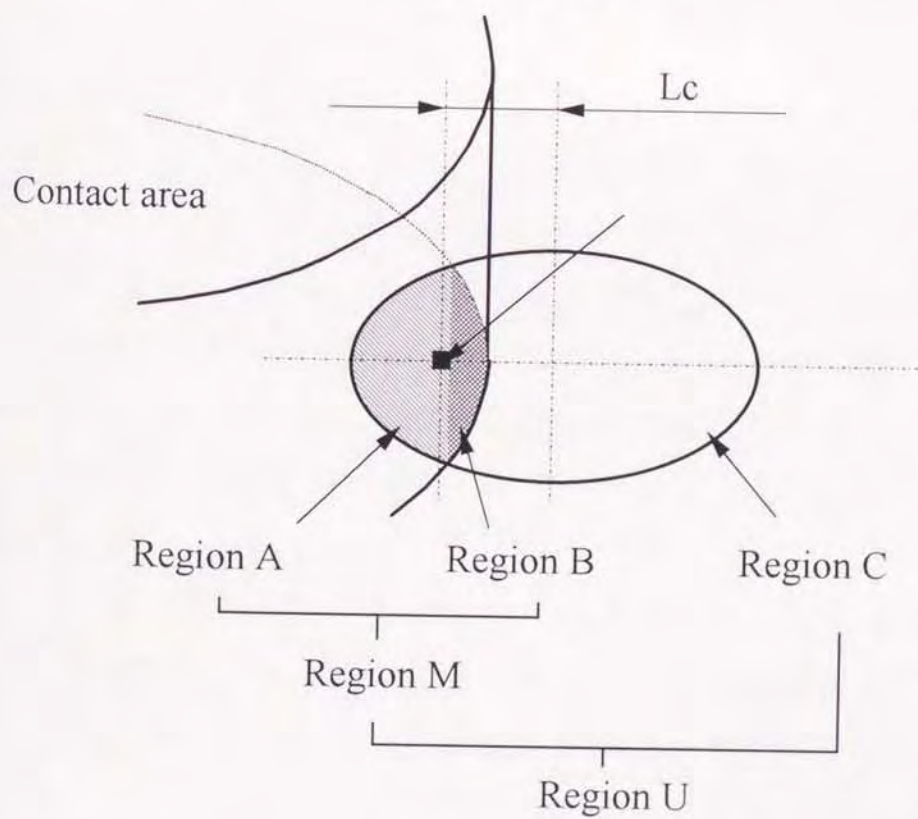
一方、超音波到達領域 U 内の非接触領域 C から得られる反射波音圧は、接触領域 M における接触圧力の増減に関わらず不変である。すなわち、実測可能なエコー高さの変化量は、領域 M での反射波音圧の変化を示している。よって、領域 C においても領域 M と同様に反射率が変化し、領域 U の全域で反射率が一樣である場合のエコー高さの変化量は次式で求めることが出来る。

$$\Delta he_U = \frac{\iint_U \text{Pr}(x, y, T) dx dy}{\iint_M \text{Pr}(x, y, T) dx dy} \cdot \Delta he \quad \cdots (2.59)$$

よって、接触域端部の接触圧力測定では式 (2.59) で得られる補正された第 1 エコーの変化量 Δhe_U を利用して接触圧力を評価する。



(a) 全体図



(b) A 部拡大図

図 2.44 接触域端部における超音波

第2.6節 時間－周波数2次元解析を利用した応力測定

接触面からの反射波が有する情報をより有効に評価するために、時間－周波数2次元解析(t-f解析)の手法の一つであるウィグナ分布を利用した接触圧力測定法を以下に示す。超音波法で接触圧力を測定する場合、その測定領域は超音波の指向性の影響を受ける。良好な水平解像度を得るための手法としては、音響レンズを用いて被測定面における超音波の領域を絞り、できる限り小さい領域で接触圧力を測定する方法^(8.4)が考えられるが、できる限り細かい測定位置の水平間隔を短くし、かつ多点を同時に測定するために、測定対象試験片に試験片と同一材料で作成したピンを挿入する手法を用いた。

本節ではこれらの2つの手法を併用する、新しい超音波接触圧力測定法を提案するとともに、その有用性について検討を行う。

2.6.1 ウィグナ分布

ウィグナ分布の定義式を次式に示す。

$$W_{xx}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2j\pi f\tau} d\tau \quad \cdots (2.60)$$

ここで、 $W_{xx}(t, f)$ は auto-Wigner 分布であり、 x^* は x の複素共役、 $x(t)$ は測定した計測信号波形をそれぞれ示す。ウィグナ分布の時間 t 及び周波数 f に関する体積積分値で定義する WDE は反射波が有するエネルギーと等価であり、これにより接触圧力を評価する。

$$WDE = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_{xx}(t, f) dt df \quad \cdots (2.61)$$

なお、反射波のエネルギーは探触子の傾きならびに接触媒質の厚さ等の影響を受けることから、式(2.62)で定義する WDE_R^* を利用して接触圧力を評価する。

$$WDE_R^* = 1 - WDE / WDE_0 \quad \cdots (2.62)$$

ここで、 WDE_0 及び WDE はそれぞれ無負荷時及び負荷時に得られる反射波のウィグナ分布を時間と周波数に関して体積積分した値である。

一方、音弾性法則より粘弾性材料に音波が伝播する方向に単軸応力 σ が作用する場合、音速は周波数の関数として表され、かつその部材内を伝播する周波数 ω の超音波の縦波音速 V_L は次式に示す周波数 ω と応力 σ の関数で与えられる⁽³⁰⁾。

$$V_L(\sigma, \omega) = V_0(\omega) + \theta(\omega)\sigma + \chi(\omega)\sigma^2 + \psi(\omega)\sigma^3 \quad \cdots (2.63)$$

ここで、 $V_0(\omega)$ 、 $\theta(\omega)$ 、 $\chi(\omega)$ 、 $\psi(\omega)$ は任意の ω の関数であり、音弾性実験から決定される。よって、周波数 ω を利用して、応力 σ の評価が可能となる。

2.6.2 接触圧力とウィグナ分布の関係

ウィグナ分布を利用して接触圧力を測定する際においても、接触域端部の接触圧力を測定する際には第 2.5 節に示したように反射してくる超音波の音場特性を考慮する必要がある。そこで、接触圧力とウィグナ分布の関係を求める一方で、図 2.37 に示した装置を用い第 2.5 節と同様な手順で反射波を測定した。この様にして得られた反射波のウィグナ分布を求め、接触域端部における反射波特性を調べる。また、同一反射波を FFT 解析しスペクトルを求め、両者の比較を行った。さらに、探触子は中心周波数 5MHz 及び 10MHz の縦波探触子を用い、周波数特性の異なる探触子を用いた場合の影響を把握する。いずれの場合も振動子直径は $\phi 6.4\text{mm}$ である。

図 2.45 に周波数 5MHz の場合の接触域端部における反射波特性を示す。縦軸はウィグナ分布のピークを示す周波数、横軸は段部からの距離をそれぞれ示す。試験片の段部に超音波の存在領域の一部でも含まれるように探触子の位置を設定した場合、反射波のウィグナ分布のピークを示す周波数は試験片の段部の厚さにより多少異なるものの、段部からの水平距離にかかわらず、ほぼ一定値を示す。一方、超音波の存在領域の全てが段部にならない場合、すなわち、反射波が段部の厚さの位置で得られない場合、ピーク周波数は急激に変化する。図 2.46 は 10MHz の探触子を用いた場合の結果で

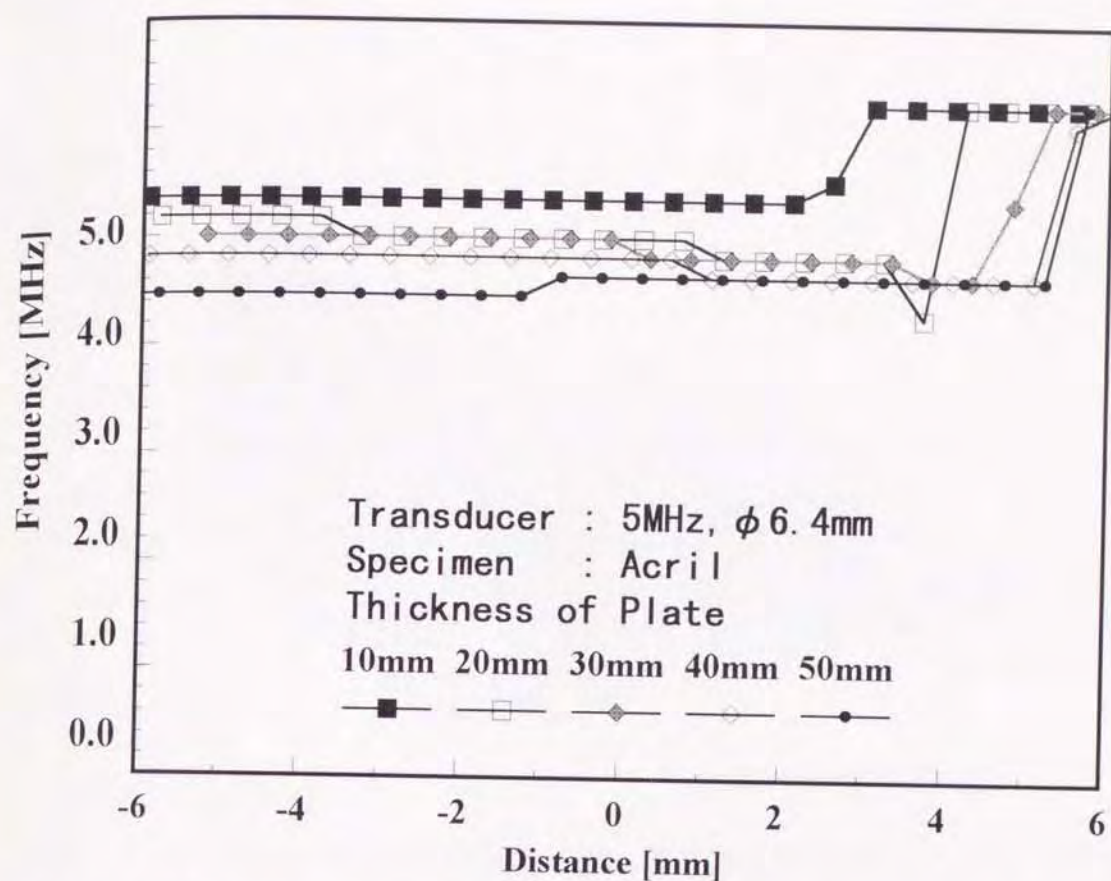


図 2.45 接触域端部における超音波反射波特性 (F:5MHz ウィグナ分布)

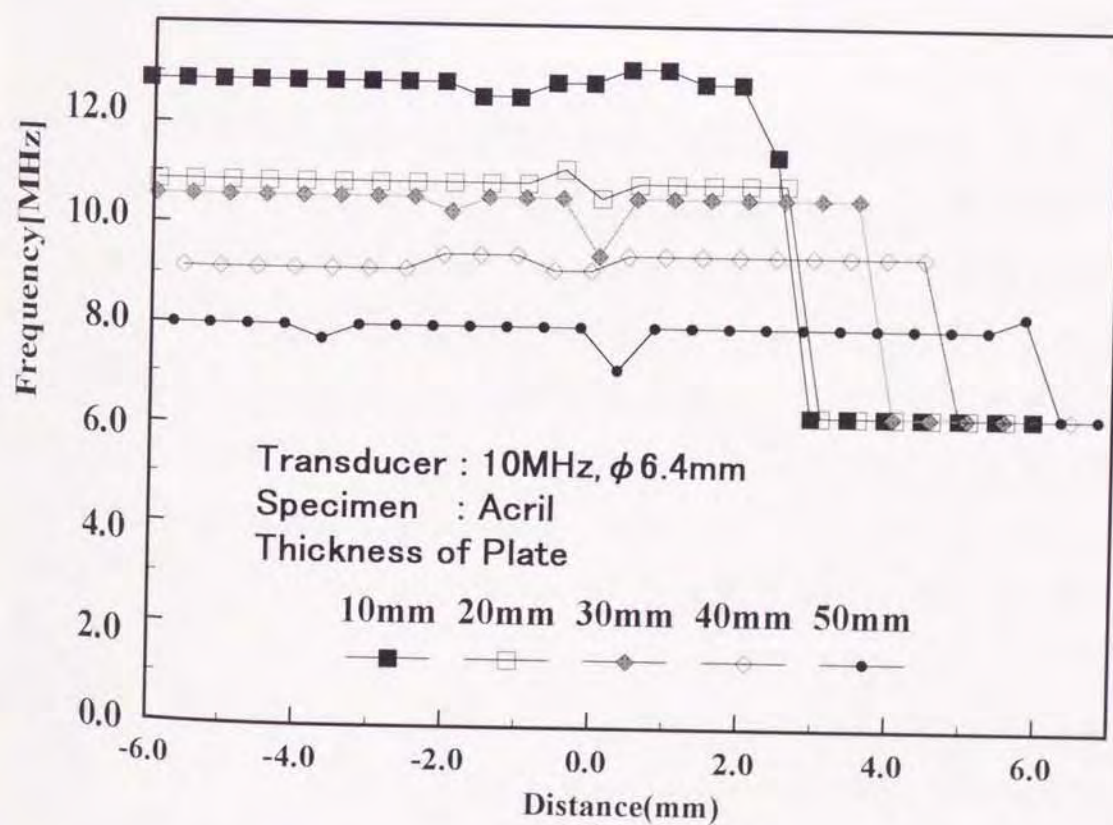


図 2.46 接触域端部における超音波反射波特性 (F:10MHz ウィグナ分布)

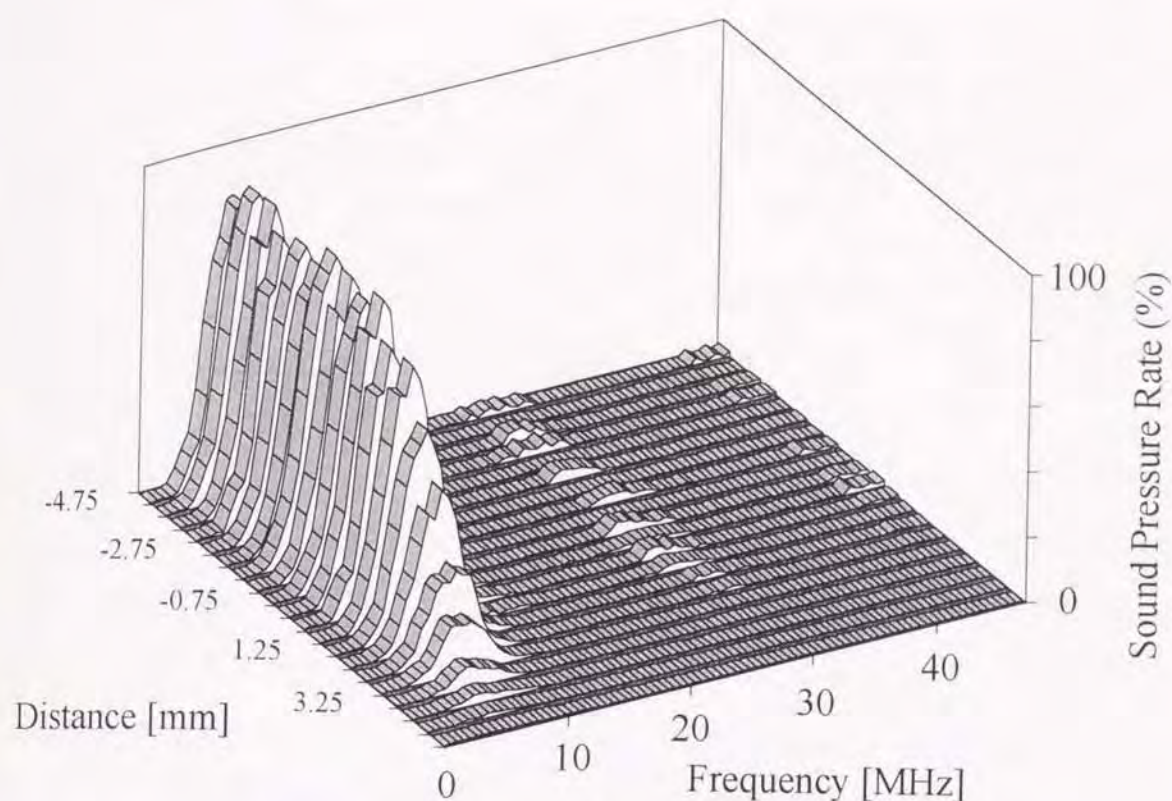


図 2.47 接触域端部からの反射波のスペクトル

ある。ピーク周波数の挙動は 5MHz の探触子を用いた場合とほぼ同様な傾向を示す。よって、これらのことから反射波のウィグナ分布を求め、このピーク周波数を接触圧力の評価基準とした場合、接触域端部での測定では第 2.5 節に示した第 1 エコー高さの変化を利用した接触圧力測定のように、エコー高さやスペクトル特性の補正を必要としないことが解る。一方、図 2.47 に同じ反射波を FFT 解析し、求めたスペクトルの分布を示す。図の横軸は周波数、縦軸は得られたスペクトルをピーク値で除して求めた音圧比、奥行きは段部からの水平距離を示す。段部から探触子を遠ざけるに従い反射超音波量は減少し、反射波のスペクトル量も減少する。またこの様な場合、そのスペクトルのピークを示す周波数が低い周波数へ移行していることがわかる。

図 2.48 及び図 2.49 はスペクトルのピーク周波数と探触子の設置位置の関係を示しており、前者は 5MHz の探触子、後者は 10MHz の探触子を用いて得られた測定結果をそれぞれ示している。試験片の段部に超音波の存在領域が全て含まれるように探触子の位置を設定した場合、反射波のピーク

周波数は用いた試験片の段部の厚さにより多少異なるものの、段部からの水平距離にかかわらず、ほぼ一定値を示す。一方、超音波の存在領域が段部以外にも存在する様に探触子を設置した場合、反射波のスペクトルのピーク周波数は低い周波数へ移動する。これらのことから、ウィグナ分布を利用して接触圧力することは、前述のように接触域端部で反射波特性に補正を施す必要が無く、エコー高さを利用した測定法に比べ簡便に接触圧力の評価が可能であることが推測される。

反射超音波のウィグナ分布と接触圧力の関係を明らかにするために、図 2.22 に示した実験装置を用いて較正実験を行った。探触子は公称周波数 5MHz 及び 10MHz の 2 種類の垂直型探触子を用い、探触子の特性による影響も合わせて明らかにした。なお、それぞれの周波数の探触子ともに振動子直径は $\phi 6.4\text{mm}$ である。探触子をギャップ法を適用してホルダーに固定し、アクリルブロック上に設置した。また、試験片への押し込み荷重は万能試験機のコラムの移動速度を 0.5mm/s に設定した。接触媒質にはグリセリン溶液を用い、アクリルブロックの接触表面はラップ加工を施し、中心

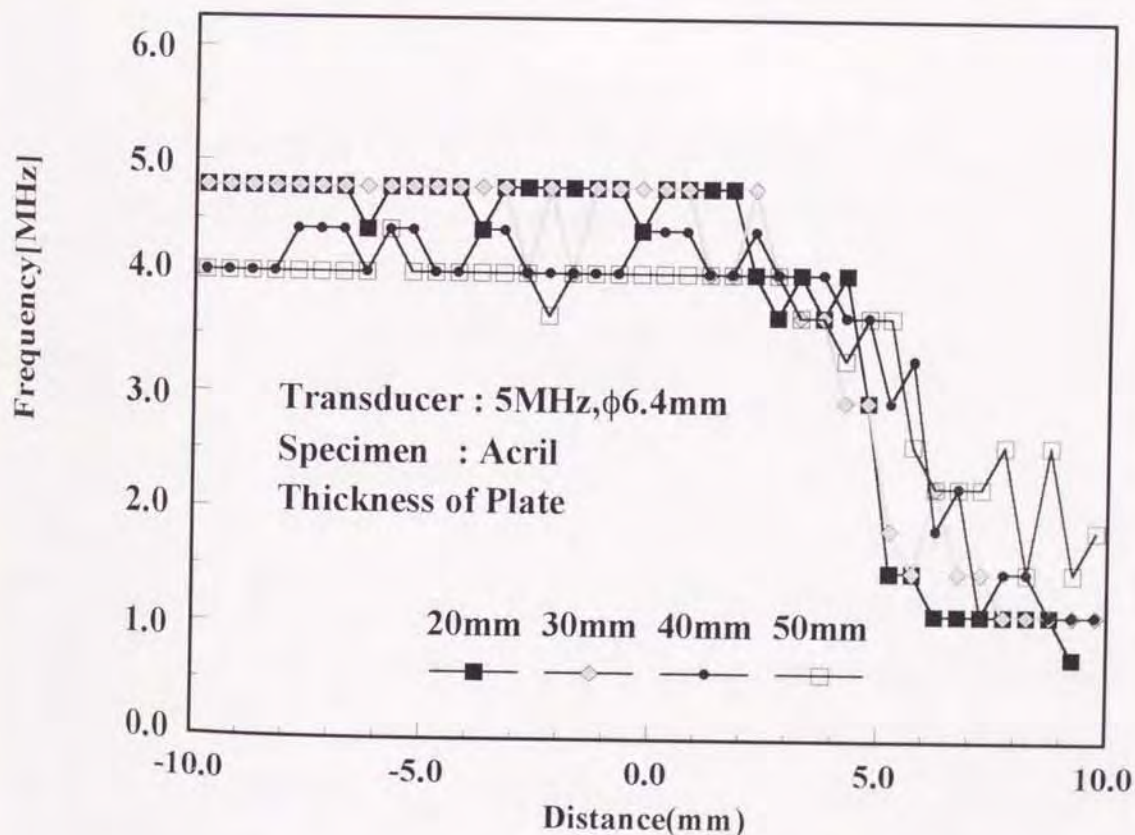


図 2.48 接触域端部における超音波反射波特性 (F:5MHz FFT 解析)

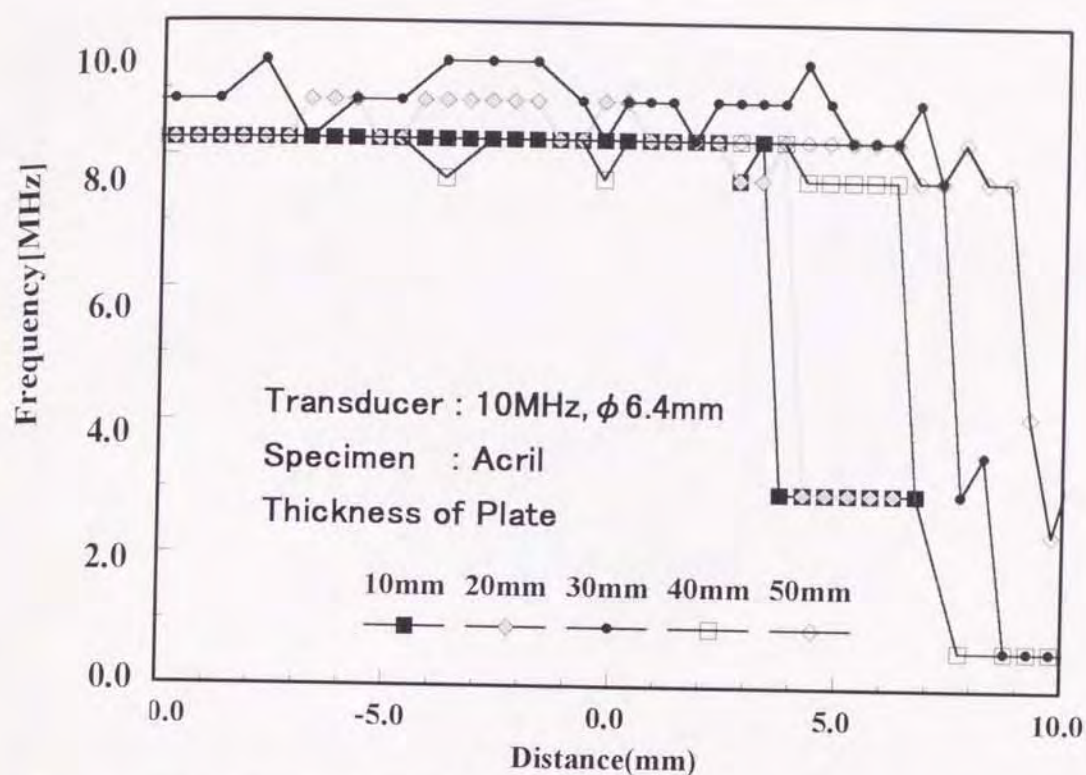


図 2.49 接触域端部における超音波反射波特性 (F:10MHz FFT 解析)

線平均粗さ R_a で $1.2 \mu m$ の均一な表面を得た。一方、ゴムブロックは射出成形面をそのまま利用し、表面粗さは R_a で $0.6 \mu m$ であった。なお、実験に際して両試験片の接触表面はエチルアルコールで充分脱脂した。探触子で測定されたエコー波形は超音波探傷器の A スコープ出力より検出し、パソコンに入力した。得られた波形の FFT 解析を行うとともに、ウィグナ分布を求めた。図 2.50 から図 2.52 に 5MHz の探触子を用いて得られた波形のウィグナ分布を示す。それぞれ、接触圧力を 0MPa、0.8MPa 及び 1.3MPa とした場合のウィグナ分布であり、図中の軸は超音波探傷器ディスプレイ上に示される深さ、すなわち超音波の伝播時間、周波数及び音圧レベルをそれぞれ示している。各接触圧力作用時において深さ 20mm の位置に 5MHz 程度のピークが現れている。これは第 1 エコーに対応している。このピークの大きさは接触圧力が増加するに従い減少すると共に、ピークを示す周波数は低い周波数に移行している。

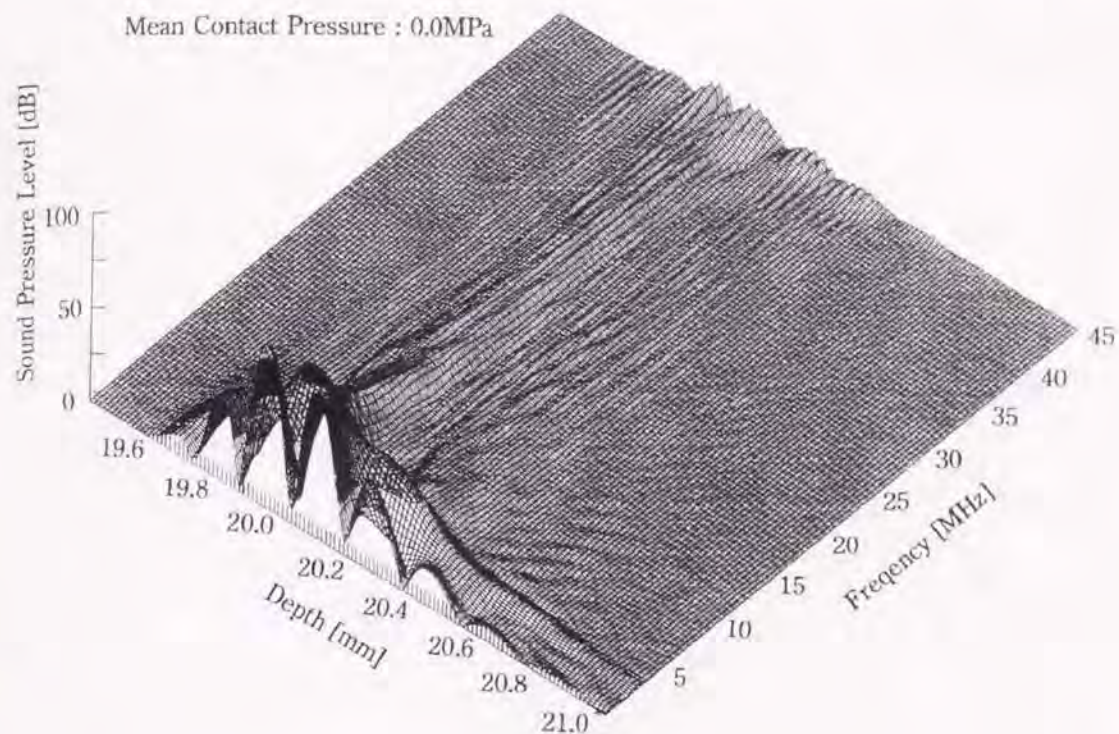


図 2.50 0MPa 負荷時のウィグナ分布 (5MHz)

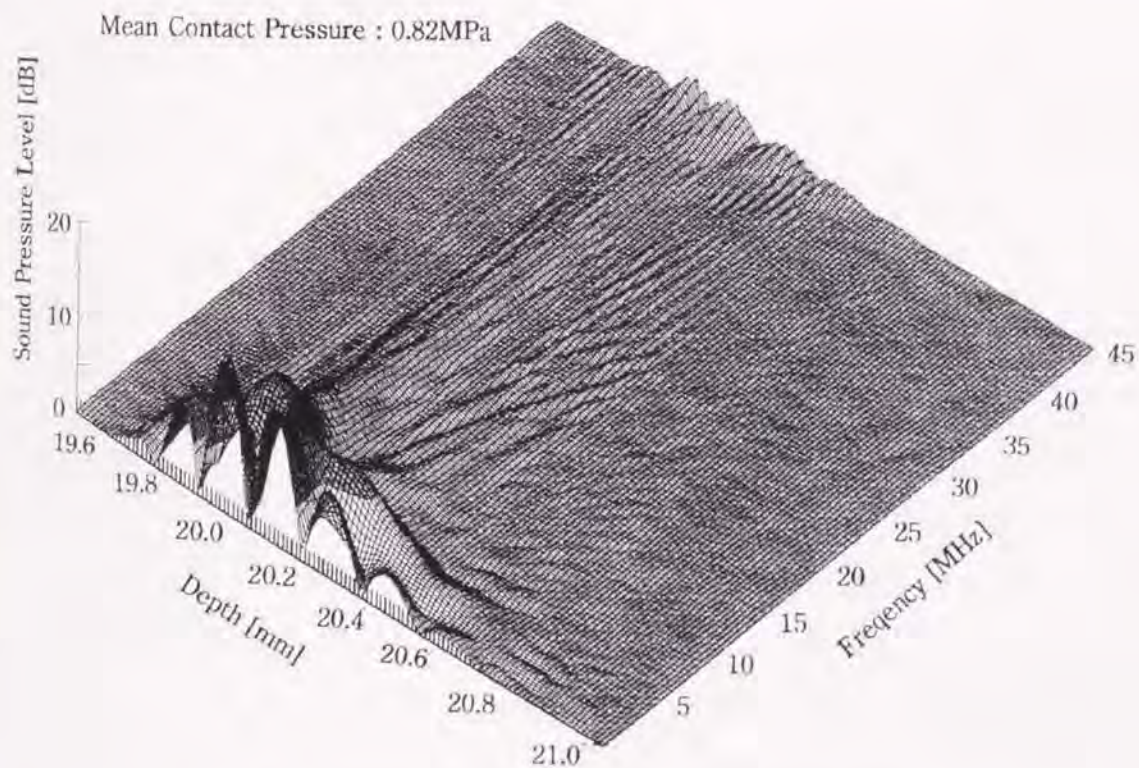


図 2.51 0.82MPa 負荷時のウィグナ分布 (5MHz)

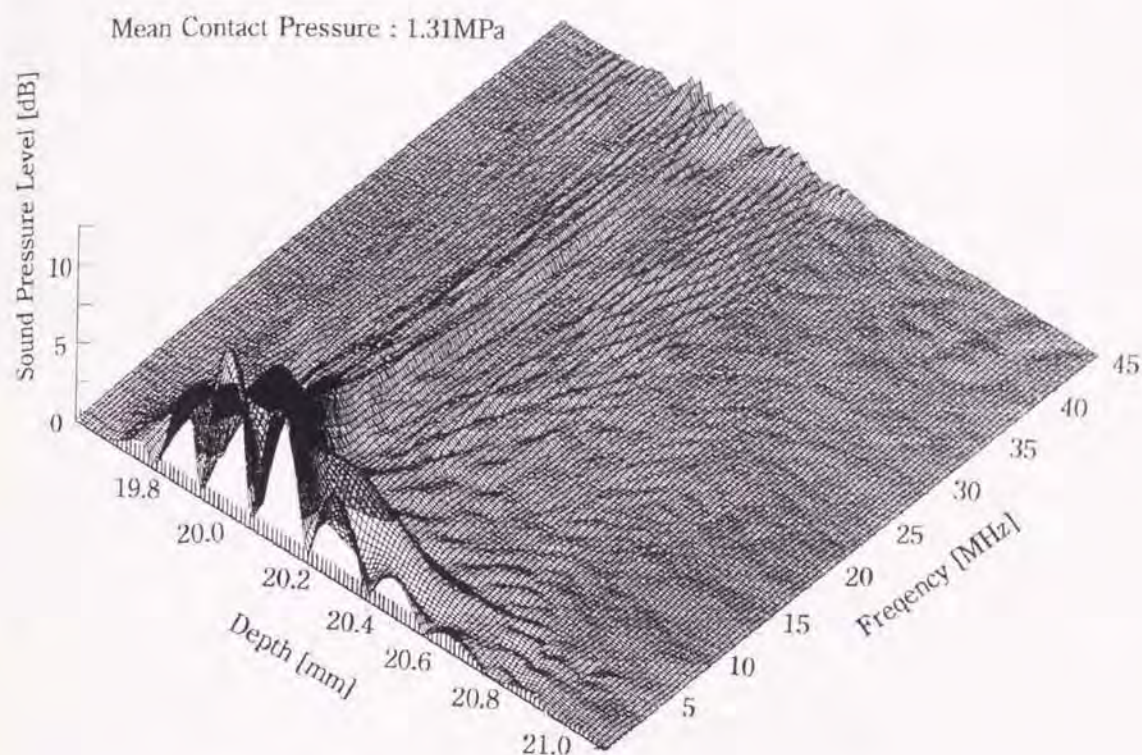


図 2.52 1.36MPa 負荷時のウィグナ分布 (5MHz)

図 2.53 にこれらの解析結果をもとにして得られた接触圧力と反射波特性の関係を示す。横軸は接触圧力、縦軸はウィグナ分布及び FFT 解析で求められた反射波のピーク周波数をそれぞれ示す。前者の方法を利用して求めたピーク周波数は中心周波数が 5MHz 及び 10MHz の 2 種類の探触子を用いて得られた結果を示しており、後者の方法により求められたピーク周波数は 10MHz の探触子を用いた値である。図中の白抜きは負荷時、黒塗りは除荷時の値を示す。FFT 解析により得られたピーク周波数は無負荷時には 10MHz 程度であるものの、接触圧力の増加に従い減少し、1.4MPa では約 6MHz 程度の値を示す。また、除荷時と負荷時で異なる履歴を示す。一方、ウィグナ分布を利用して求めたピーク周波数は 10MHz の探触子を用いた場合、0.5MPa 負荷時まではほとんど周波数の変化は見受けられないものの、それ以上の接触圧力が作用する領域では、ピーク周波数は減少することが解る。FFT 解析による方法に比べ減少量は小さいものの、負荷時と除荷時の履歴はほぼ同一であることから、接触圧力評価時にピーク周波

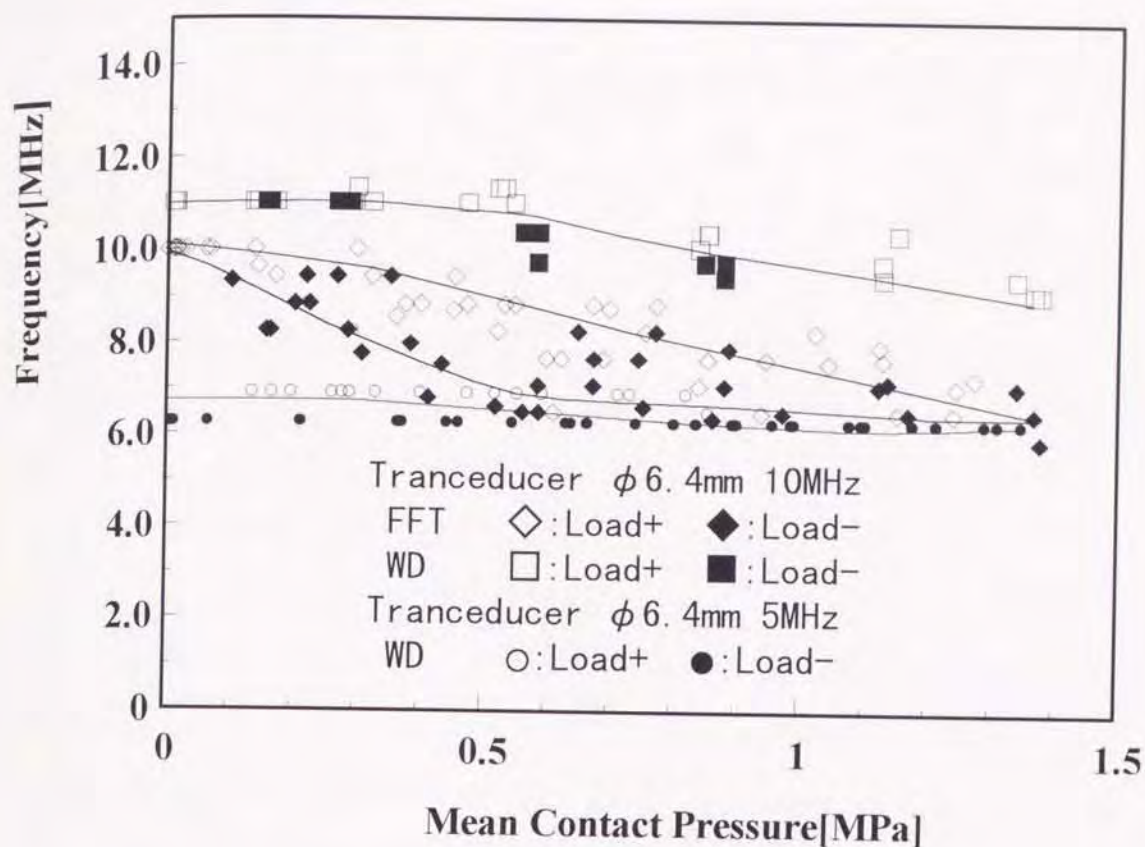


図 2.53 接触圧力と反射波特性の関係

数を接触圧力に換算する場合に接触面に作用する接触圧力の履歴を考慮する必要がない等，簡便に測定可能であることが推測される．一方，5MHzの探触子を用いた場合，ピーク周波数の変化量は小さく，接触圧力の評価時にこれを用いた場合，測定値に誤差を生じやすいものと考えられる．

振動を伴う摺動部の接触圧力を測定する上で多点同時測定が可能な測定手法を用いることは極めて有用である．本研究では16個の探触子を試験片に設置し，マルチプレクサを用いて高速に切り替えを行う測定システムを利用し，これにより多点同時測定を行った．一方，超音波法を用いて接触圧力を測定する場合，図2.54(a)に示すように超音波は指向性に基づいて放射状の広がりを示すため，この広がり領域が小さくなるほど水平解像度は向上する．従って，良好な水平解像度を得るためには，音響レンズを用いて被測定面における超音波の領域を絞り，できる限り小さい領域で接触圧力を測定することも考えられるが，ここでは，音響レンズの設置が困難であることから，測定対象試験片に同一材料で作成したピンを挿入する

手法を用いた。すなわち、グリセリンを封入したテーパ管内を超音波が伝播するようにして、被測定面での超音波伝播領域をできるだけ小さくなるようにした。

ピンを用いて接触圧力を測定する場合の接触面上の超音波伝播領域の広さを測定するために、図 2.54 に示す装置を用いた。中心周波数 10MHz、振動子直径 6.4mm の垂直型縦波探触子を、図 2.54(a) 及び (b) に示すようにアクリルブロックに設置し、両者における超音波存在領域の大きさを比較した。すなわち、同図中 (a) ではグリセリンを介して直接アクリルブロック下面に探触子を設置するのに対し、同図中 (b) においてはアクリルブロック中央部に挿入した直径 0.9mm のアクリルピンとグリセリンを封入したテーパ管を介して探触子を設置した。これにより、後者では探触子から放出された超音波はテーパ管内のグリセリンおよびアクリルピンの内部を伝播する。この様な両試験片を同図中 (c) に示す測定システムに取り付け、アクリルブロック下面から 20mm を残してエンドミルで切削加工した。ここで、切削後の厚さ 20mm は接触圧力測定実験に用いる試験片の厚さに相当する。すなわち、加工面は接触圧力測定時における接触面であり、切削加工前と加工後を完全密着状態および非接触状態としてそれぞれ想定した。探触子設置位置を示す中心軸から水平方向距離 L の任意位置で 20mm 深さからの反射波を超音波探傷装置で測定し、 L と式 (2.64) によって定義されるエコー高さ比 RH の関係を図 2.55 に示す。この結果を用いて、反射波存在領域の大きさを評価するとともに反射波のウィグナ分布を解析し、アクリルピンが反射波の周波数特性へ及ぼす影響を検討した。なお、図中の縦軸の値はエコー高さ比 RH を横軸は水平方向距離 L をそれぞれ示している。

$$RH = h / h_a$$

… (2.64)

ここで、 h_a は加工終了時、すなわちブロックの厚さがすべて 20mm の場合のエコー高さであり、 h は任意の距離 L で図 2.54(c) に示す面 A から得られるエコー高さをそれぞれ示す。超音波存在領域の一部を切削加工すると、超音波探傷器ディスプレイ上の 20mm の位置にエコーが現れる。切削部がさらに増加するとエコー高さも大きくなり、加工域が超音波存在領域の全域に達した場合には $RH = 1$ となる。このことは、接触圧力測定時における

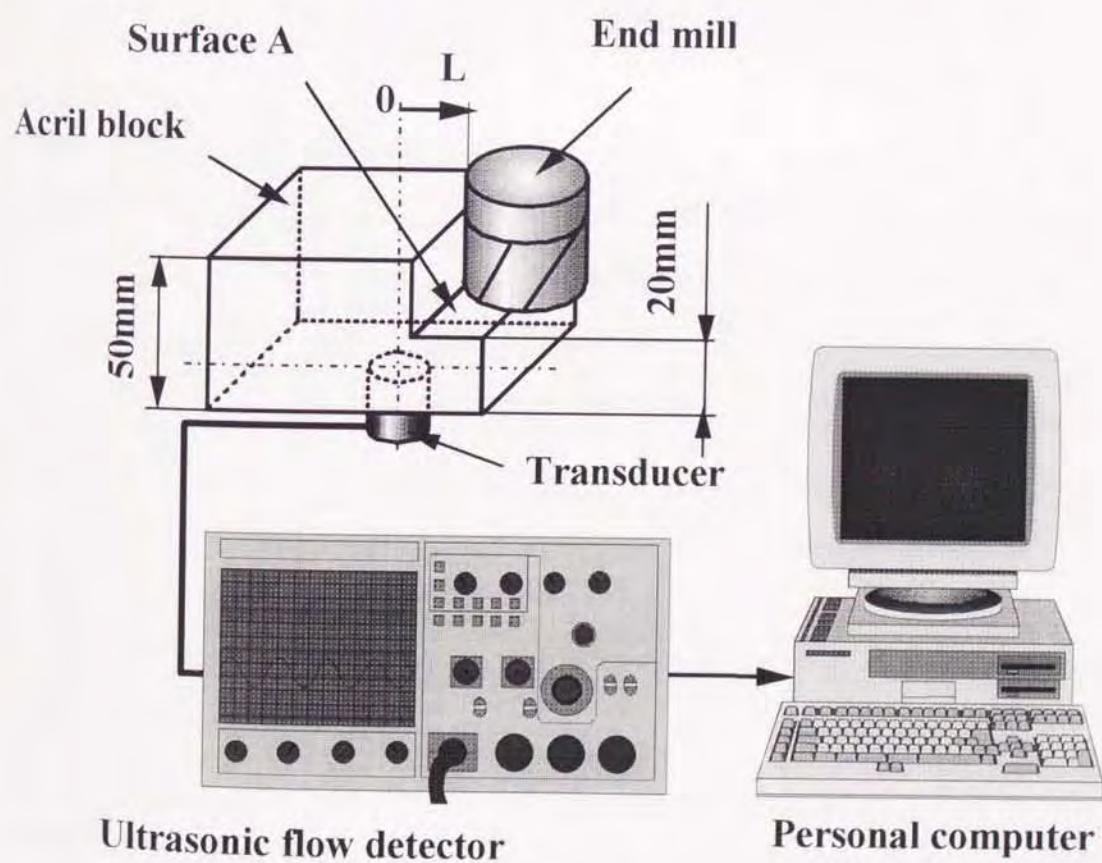
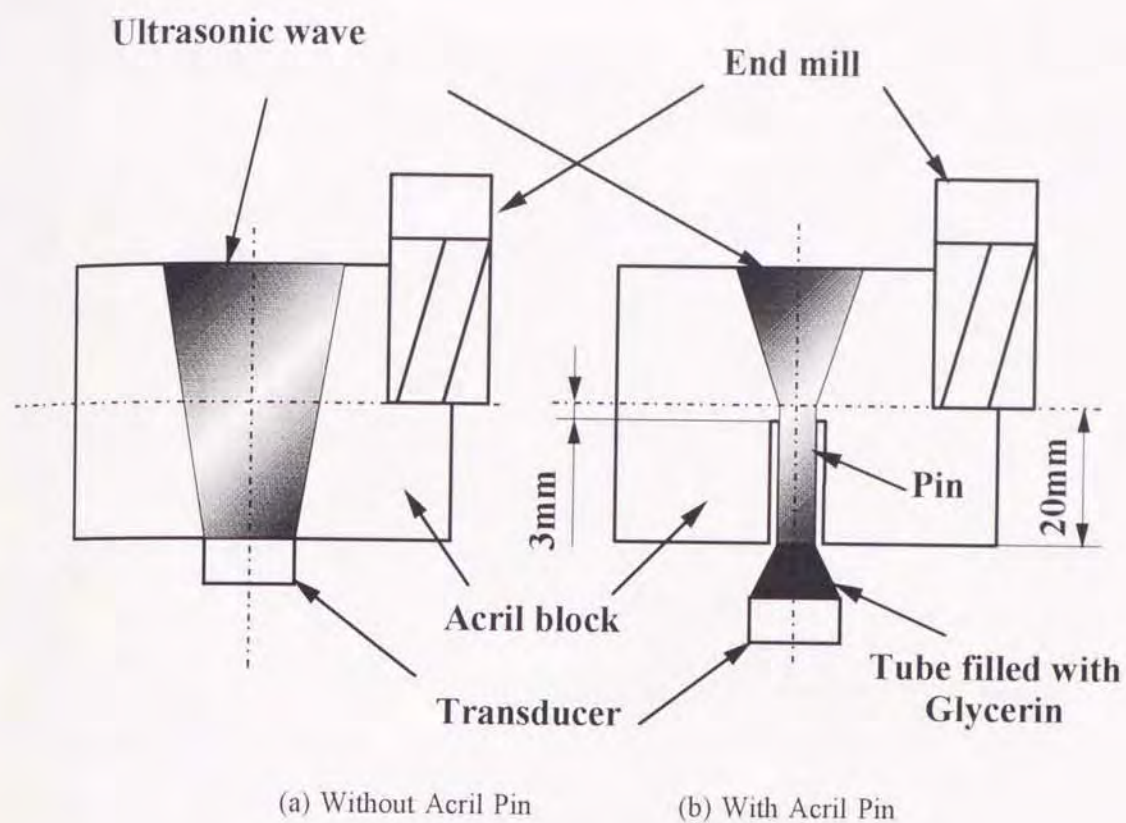


図 2.54 音場分布測定装置

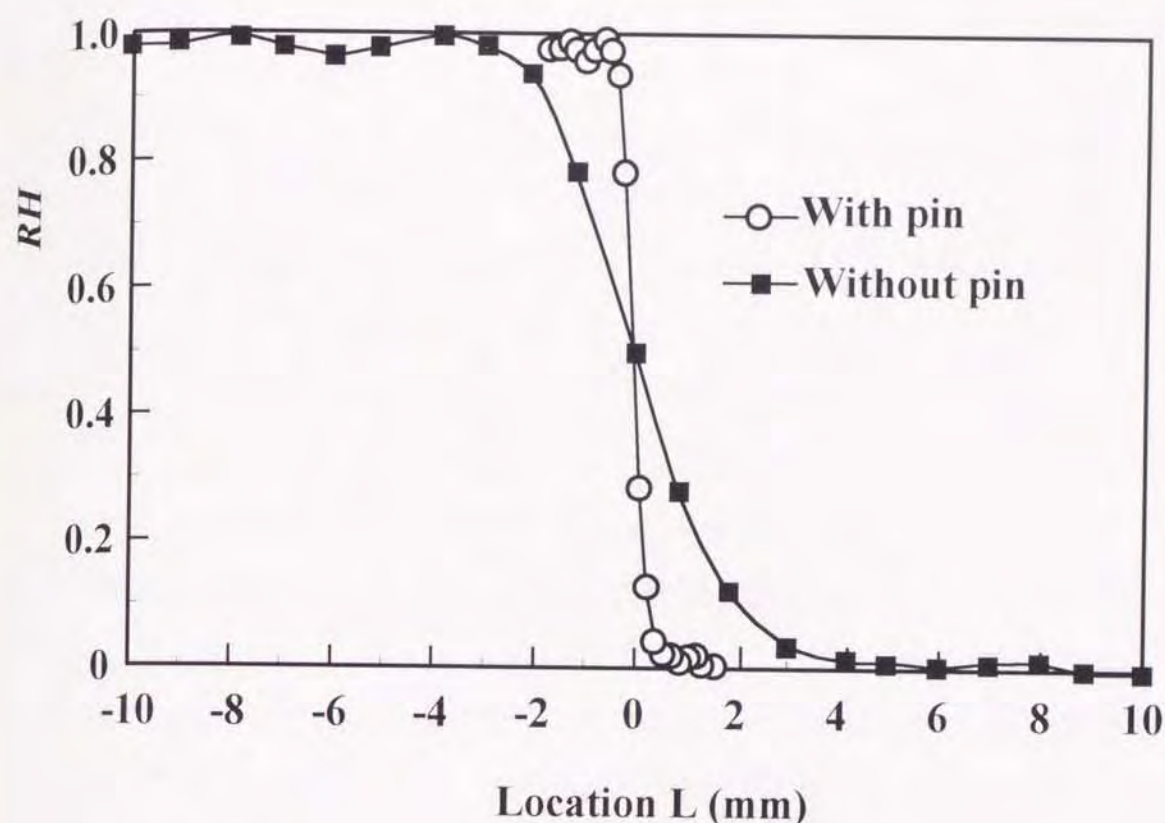


図 2.55 アクリルブロック切削時のエコー高さ比の分布

反射超音波の存在領域の直径は RH が 0 から 1 へ増加する間のエンドミルの移動量より、評価が可能であることを示している。以上のことから、探触子を直接アクリルブロックに設置した場合の接触面における超音波の存在直径は 7.8mm 程度であることがわかる。これに対して、アクリルピンを用いた場合、ピン内を超音波が伝播することから、接触面における超音波の存在直径は 1mm 程度に絞り込まれていることがわかる。これらのことから、アクリルピンを用いることにより接触圧力測定時の水平解像度が改善されていることが示された。

一方、図 2.56 は反射音波のウィグナ分布で求めたピーク周波数と切削量の関係を示している。横軸は探触子設置位置から切削位置までの水平方向距離 L を、縦軸は反射波のピーク周波数をそれぞれ示す。アクリルピンの有無に関わらずエコーのピーク周波数は 9.8MHz 程度であり、ピンを挿入することによる反射波の周波数特性への影響は無視することが可能である。また、エコーが得られない領域でピーク周波数は大きく変動するのに対し、

エコーが存在する領域でエコー高さ比が増減してもピーク周波数は、ほとんど変化しないことがわかる。

超音波法を用いて接触圧力を定量的に評価するためには、予め接触圧力と接触面における超音波反射特性の関係を明らかにしておく必要がある。そこで、図 2.57 に示す様にピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用い両者の関係を明らかにした。この時、大気中・室温で、摺動速度は 0.79mm/s であり、ゴム表面に対し垂直にアクリル試験片を錘を用いて押し付けた。これにより、任意の押し付け荷重に基づく接触圧力の超音波特性を調べた。

図 2.58 は探触子を組み込んだアクリル試験片の詳細図である。中心周波数 10MHz 、振動子直径 6.4mm の垂直型縦波探触子をグリセリンを封入したテーパ管を介して、アクリル試験片中央部の直径 0.9mm に挿入したアクリルピンに接続した。なお、アクリル試験片の接触端部を極めて僅かに面取りし、端部における接触圧力の特異分布を可能な限り無くするようにして、分布圧力の一様化を心掛けた。また、反射波特性は表面粗さの影響を

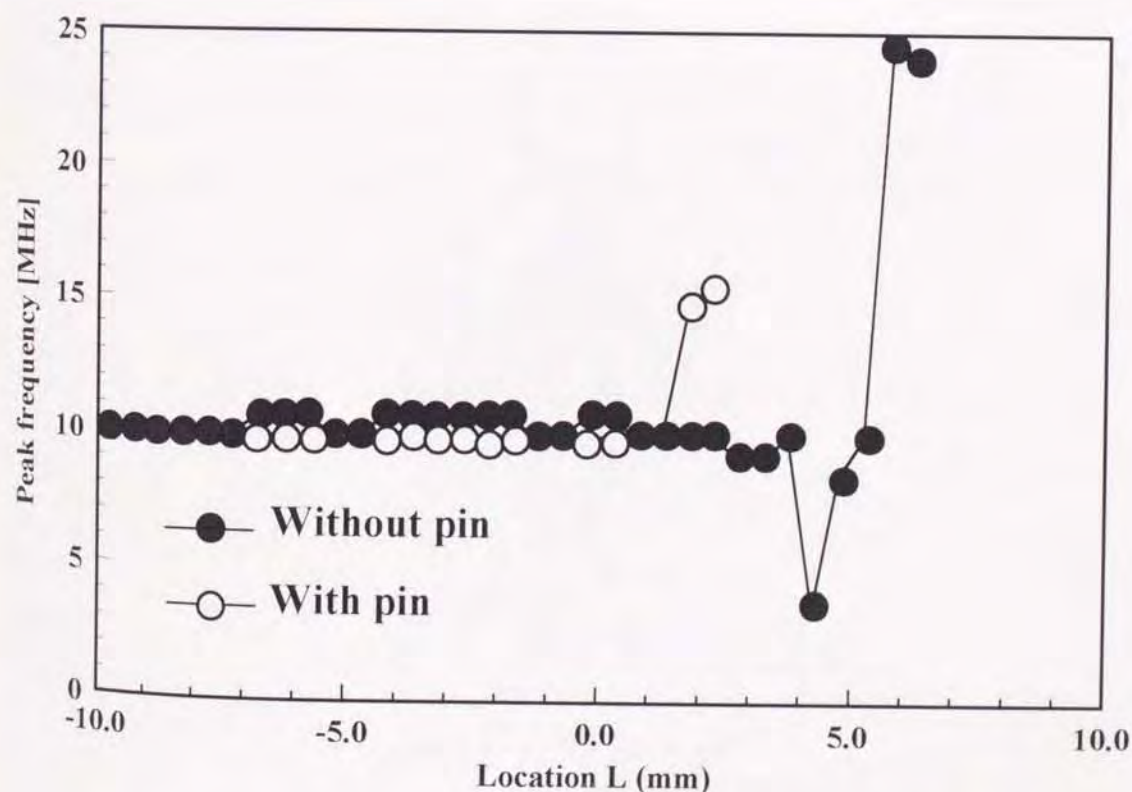


図 2.56 アクリルブロック内を伝播する超音波の周波数特性

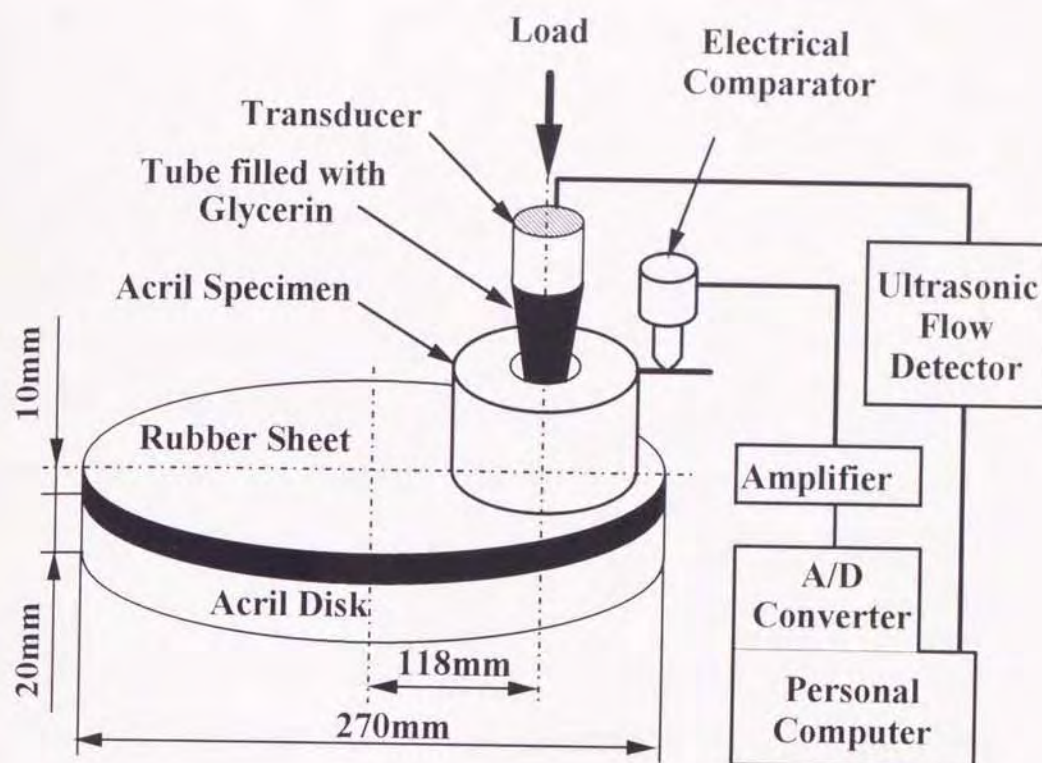


図 2.57 較正実験装置概略図

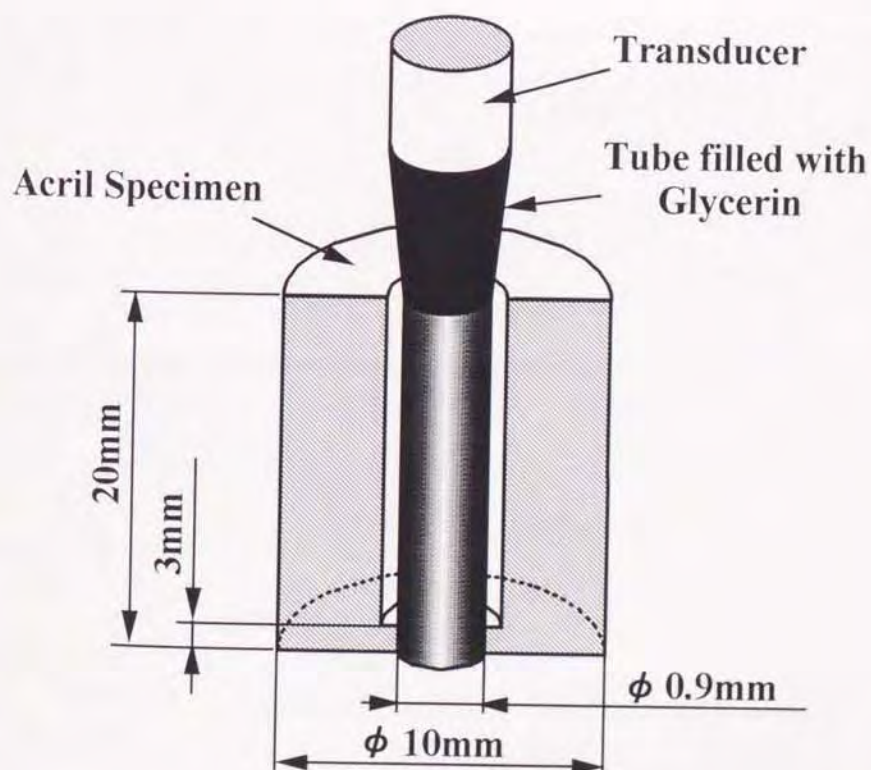


図 2.58 アクリル試験片形状

受けることから初期摺動面の表面粗さを一定に保つためにアクリル試験片をラップ加工した。一方、ゴムシートは射出成形面を初期摺動面とし、中心線平均粗さ R_a がアクリル試験片で $1.2 \mu m$ 、ゴムシートで $0.77 \mu m$ の均一な表面粗さを得た。実験前にアクリル試験片及びゴムシートの接触表面をエチルアルコールで脱脂した。さらに、電気マイクロメータを用いて定常摩耗に移行したことを確認した後、接触面からのエコーを超音波探傷装置を用いて検出し、パソコンに入力して記録及び解析を行った。

図 2.59 は接触面から測定されたエコーの一例を示す。荷重と共に真実接触部は増加することから、エコー高さは減少する。さらに、アクリル試験片の変形及び音弾性の影響により、例えば $1.3MPa$ の接触圧力が作用する場合には、荷重が作用しない場合よりもエコーは前方に位置する。これらの信号波形を式 (2.60) に適用してウィグナ分布を求めた結果を図 2.60 から図 2.62 に示す。図中の軸は超音波探傷器ディスプレイ上の深さ、すなわち伝播時間、周波数及び音圧レベルをそれぞれ示している。図 2.60 は無負荷時のウィグナ分布であり、深さ $20mm$ 、周波数 $10MHz$ にピークを有する

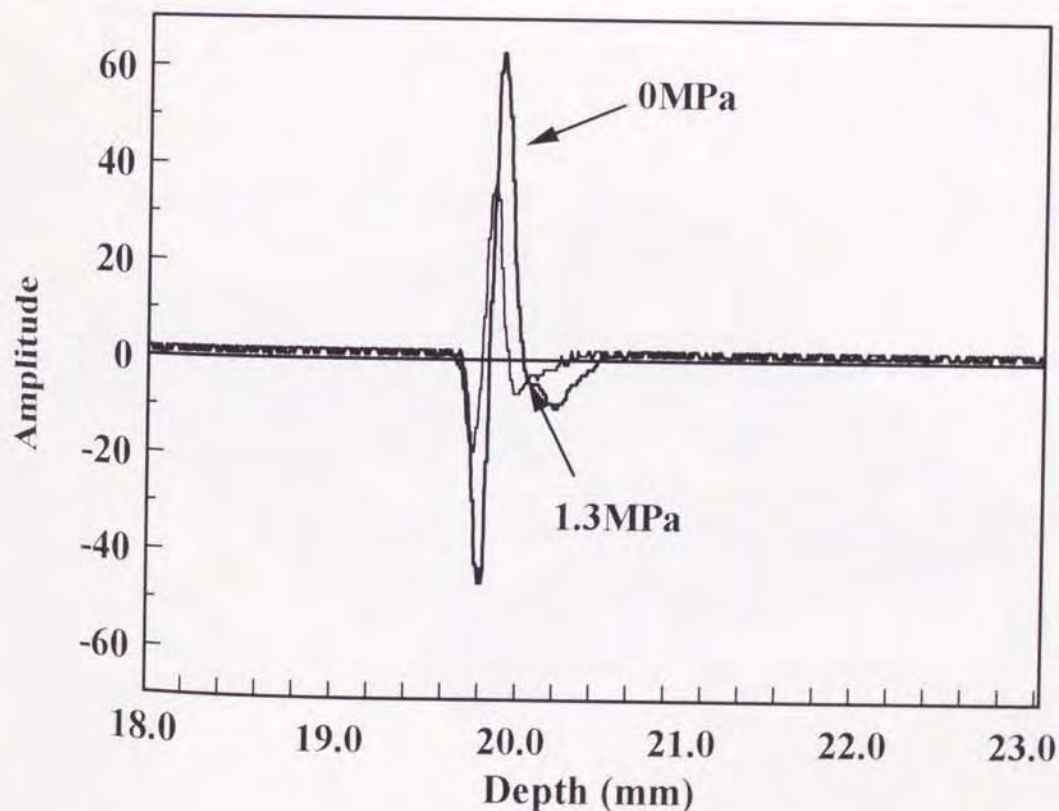


図 2.59 エコーの一例

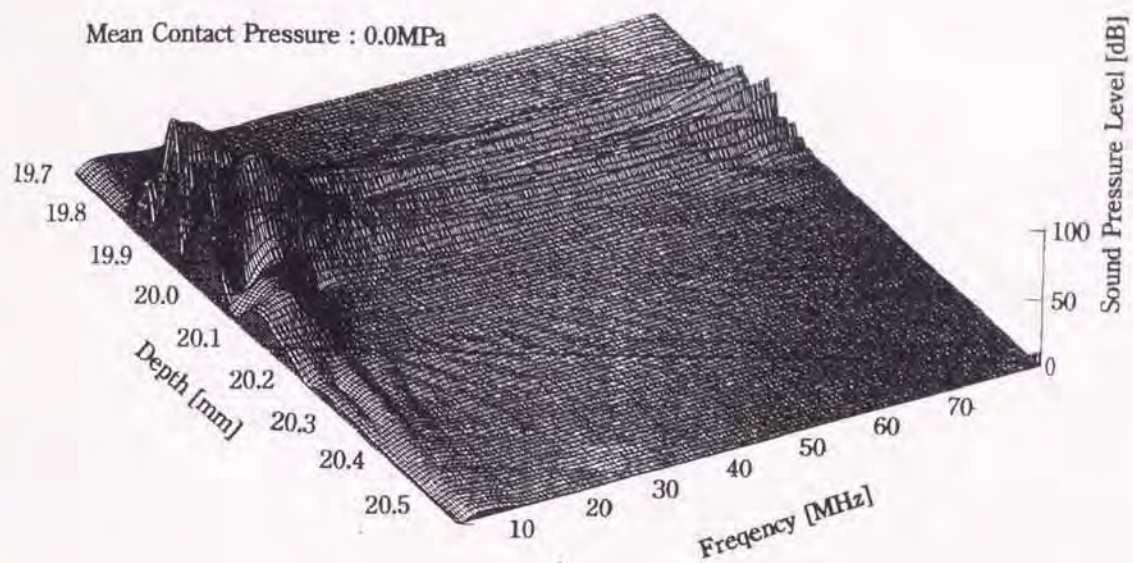


図 2.60 0MPa 負荷時におけるエコーのウィグナ分布

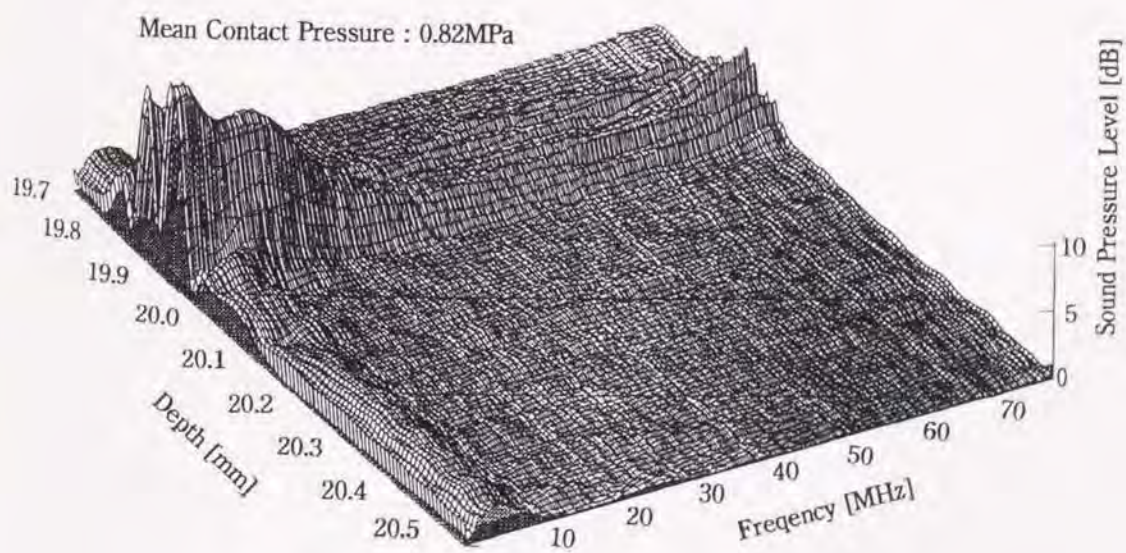


図 2.61 0.82MPa 負荷時のエコーのウィグナ分布

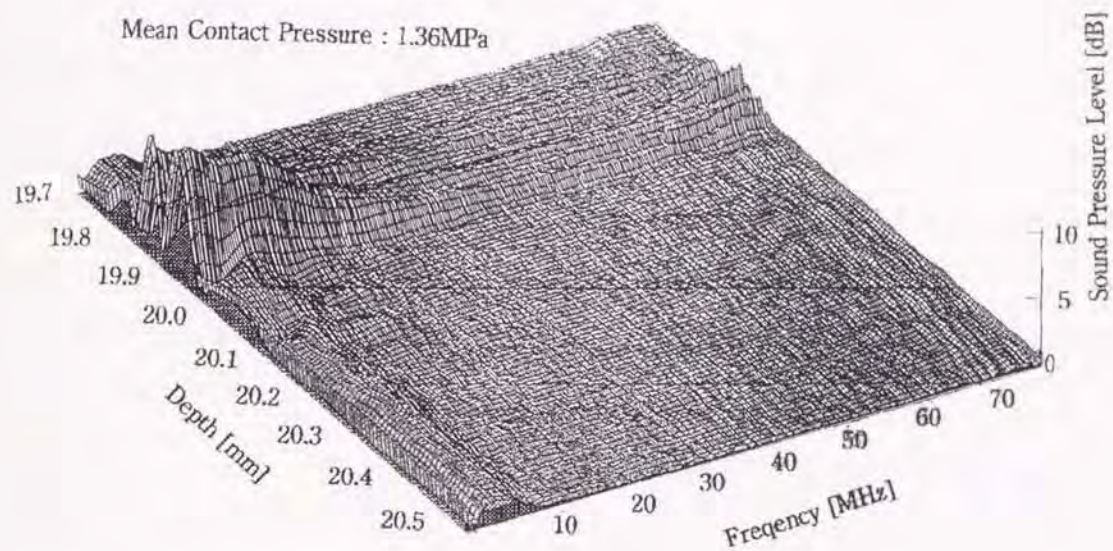


図 2.62 1.36MPa 負荷時のエコーのウィグナ分布

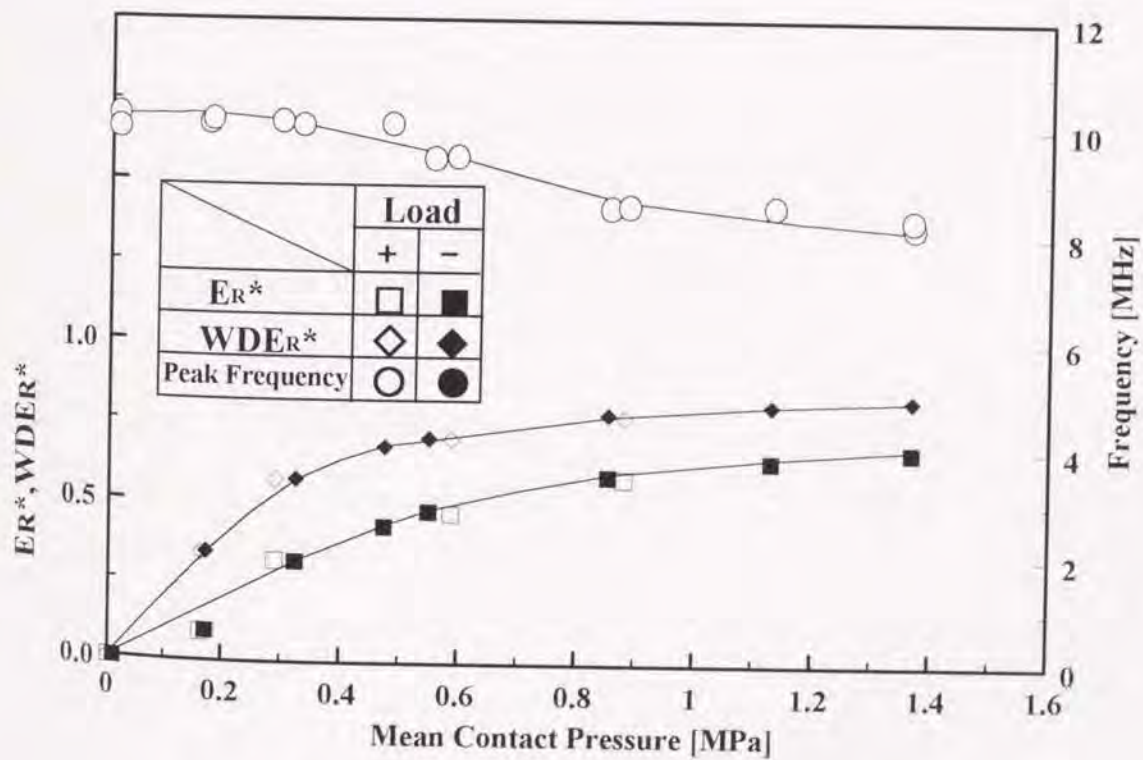


図 2.63 接触圧力と反射波特性の関係

分布を示しており、これは反射波に対応している。また、図 2.61 及び図 2.62 はそれぞれ 0.82MPa 及び 1.36MPa 負荷時のウィグナ分布であり、0MPa 負荷時に比べて 1.36MPa 負荷時のピーク周波数は 10MHz より低い周波数に移行していること、かつピークの音圧レベルが減少していることが解る。さらに、エコーの後方の分布形状に着目すると無負荷時に深さ 20.1mm、周波数 5MHz 付近に存在する小さなピークは 1.36MPa 負荷時においてはほぼ消失している。この様に、両負荷時のウィグナ分布を比較すると低周波数成分においても顕著な差異が認められる。

図 2.63 はこの解析結果を基にして得られた WDE_r^* 、ピーク周波数の移動量および E_r^* と公称応力の関係を示している。 WDE_r^* 及び E_r^* は上に凸の曲線で表示され、また負荷時と除荷時ではほぼ同じ履歴を示す。接触圧力が 0.4MPa 以下では WDE_r^* は E_r^* に比べ、接触圧力の増減に対する変化率が大きい。すなわち、 E_r^* を利用した接触圧力評価法に比べ、感度の良い測定が可能である。一方、0.4MPa 以上では WDE_r^* と E_r^* の変化量は共に小さく、測定感度の低下が予測される。これに対してウィグナ分布により求めたピーク周波数は徐々に低い周波数に移行していることがわかる。比較的大きな接触圧力の測定時では、 E_r^* の変化量が小さくなることから、 E_r^* から接触圧力へ換算する際に誤差を生じやすく、測定精度の低下を招き易い。よって本研究では、 WDE_r^* の値が 0.6 以上の場合には、ピーク周波数を利用して接触圧力値を決定する。

2.6.3 音弾性の性質

図 2.64 に示すように応力が作用する材料に超音波が伝播する場合、その伝播速度は応力の影響を受け僅かながら変化する。線形弾性論におけるひずみ及び応力の定義式、運動方程式及び応力-ひずみ関係式に対応する非線形の関係で置き換えて基礎式を得る。これより初期変形による応力を受けた弾性体における弾性波の伝播速度を求める。弱い直行異方性を有する圧延板に x あるいは y 方向に振動し、厚さ z 方向に伝播する横波を入射するとき、この板が x 及び y 方向にそれぞれ主応力 σ_x 、 σ_y が作用する

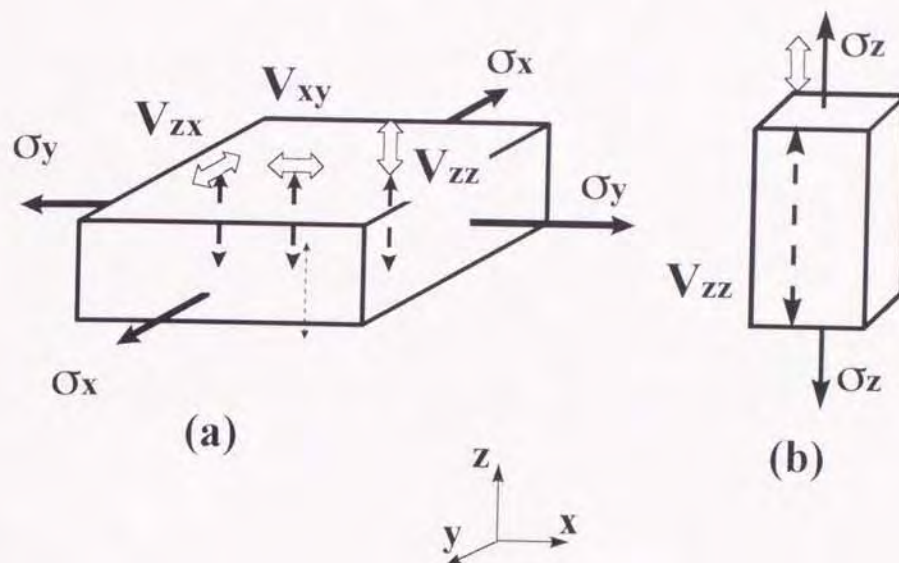


図 2.64 各種音弾性法則における応力状態と伝播速度

平面応力状態 ($\sigma_z = 0$) であれば, 横波の伝播速度は式 (2.65) 及び式 (2.66) で, それぞれ示される.

$$\rho V_{zx}^2 = \mu + \Delta C_{55} + 2(\mu + \Delta C_{55})(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + (\gamma_x + 2\gamma_z + \Delta C_{551})\varepsilon_x + (\gamma_y + \Delta C_{552})\varepsilon_y + (\gamma_y + 2\gamma_z + \Delta C_{553})\varepsilon_z \quad \dots (2.65)$$

$$\rho V_{zy}^2 = \mu + \Delta C_{44} + 2(\mu + \Delta C_{44})(\varepsilon_y + \varepsilon_z) + (\gamma_y + \Delta C_{441})\varepsilon_y + (\gamma_z + 2\gamma_x + \Delta C_{442})\varepsilon_z + (\gamma_z + 2\gamma_x + \Delta C_{443})\varepsilon_x \quad \dots (2.66)$$

ここで, ε_x , ε_y , ε_z は主応力 σ_x , σ_y による主ひずみ, ν_y , ν_z は ν_x とともに等方性弾性体の 3 次の弾性定数, ΔC_{551} などは弱い直行異方性材料の 3 次の弾性定数の等方体の値からの微小変化量である. 式 (2.65) と式 (2.66) の左辺及び右辺のそれぞれの差を求め, 弾性定数における等方体からの変化と初期ひずみを微小な量と考え, 高次の微小量を省略することにより次式が得られる.

$$\rho(V_{zx}^2 - V_{zy}^2) = \Delta C_{55} - \Delta C_{44} + (2\mu + \nu_z)(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \quad \dots (2.67)$$

また,

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = (\sigma_x - \sigma_y) / (2\mu)$$

を適用することにより, 次式に示す副屈折音弾性法則が求められる.

$$\frac{V_{zx} - V_{zy}}{V_T} = \frac{\Delta C_{55} - \Delta C_{44}}{2\mu} + \frac{1}{2\mu} \left(1 + \frac{\gamma_z}{\mu} \right) (\sigma_x - \sigma_y) \quad \cdots (2.68)$$

ここで、右辺第1項が組織効果、第2項が応力効果である。このようにして測定される応力は超音波が伝播する経路に作用する応力の平均値である。

$$(1 + \gamma_z / \mu) / (2\mu)$$

は副屈折における音弾性定数で C_A の記号で表される。式 (2.68) の左辺の相対速度差は測定より求められる量であり、これを音響副屈折と呼ぶ。しかしながら、実際に測定されるのは横波の伝播時間 t_{zx} , t_{zy} である。伝播距離を L とすると次式より明らかなように、板厚を測定することなく音響副屈折量が求められる。

$$\frac{V_{zx} - V_{zy}}{V_T} = \frac{L/t_{zx} - L/t_{zy}}{(L/t_{zx} + L/t_{zy})/2} = \frac{t_{zy} - t_{zx}}{(t_{zx} + t_{zy})/2} \quad \cdots (2.69)$$

ここで、10万分の1程度の測定精度が要求されることを考えられると、副屈折法は板厚の測定が不要であることから、測定精度上極めて有利である。

副屈折音弾性法則の他に、縦波の音速変化を利用する音弾性法則を次式に示す。

$$\frac{V_{zz} - V_{zz}^0}{V_{zz}} = C_L (\sigma_x + \sigma_y) \quad \cdots (2.70)$$

一方、横波の平均速度の変化を利用する音弾性法則は、次式で示される。

$$\frac{V_T - V_T^0}{V_T} = C_T (\sigma_x + \sigma_y) \quad \cdots (2.71)$$

ここで V_{zz}^0 及び V_T^0 はそれぞれ、無応力状態における縦波及び横波の平均速度である。また、縦波の速度と横波の平均速度の比より、次式で示される音速比音弾性法則が得られる。

$$\frac{V_{zz}}{V_T} = R_0 + C_R (\sigma_x + \sigma_y) \quad \cdots (2.72)$$

ここで、 R_0 は無応力状態での音速比、 C_R は音速比法の音弾性定数である。以上の4種の音弾性法則は板状試料の面内に存在する平面応力を、板厚方向に伝播する横波あるいは縦波を用いて測定する場合に全て適用可能であ

る。さらには、単軸応力をその応力軸の方向に伝播する縦波を用いて測定する場合、例えば超音波を用いてボルトに作用する軸力を測定する場合等は、応力の存在による縦波の音速変化を与える音弾性法則、すなわち次式を利用する。

$$\frac{V_{zz} - V_{zz}^0}{V_{zz}} = C_B \sigma_z \quad (2.73)$$

通常、音速測定には絶対音速測定と相対音速測定が、一般的に利用されている。前者は音速を直接測定するのに対し、後者は何らかの比較する参照波との相対的な音速差を測定する。絶対音速測定法には、シングアラウンド法、パルス・エコーオーバーラップ法、パルス重畳法、時間間隔平均法などが一般的に利用されている。一方、相対音速測定には位相干渉法、スペクトル解析法などが利用されている。これらの測定法はいずれも高精度で優れており、音弾性測定に十分適用できる。以下に、スペクトル解析法について示す。

図 2.65 に示す様に一般的なせん断波が平行 6 面体中を伝達し、パルスエ

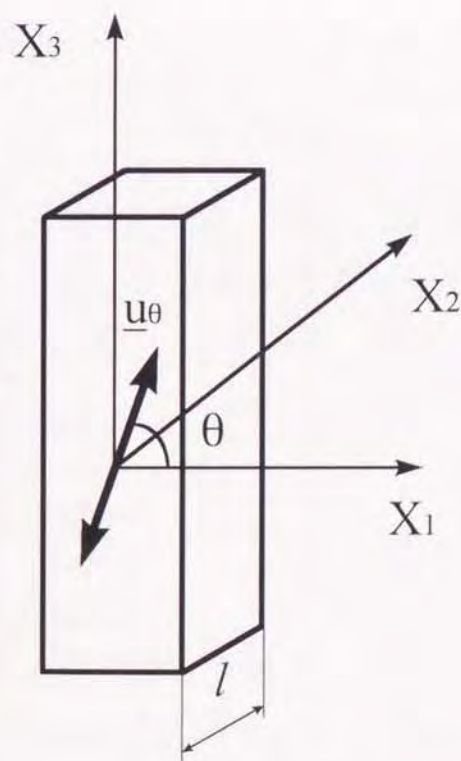


図 2.65 試験片の座標系

コーモードで受信するとみなす。なお、ここではスペクトルに特徴を有する周波数に着目したことから、解析には試験片によるせん断波の減衰は無視する。 θ によって部分的な偏向を示すせん断波を放出する広域探触子を試験片の $x_2 = 0$ なる位置に設置する。音波は x_1, x_3 軸と平行に振動し、早い要素と遅い要素をもつせん断波は x_2 方向に伝播する。もし、探触子を

$$u_\theta = f(t) \quad \cdots (2.74)$$

のように設置し、波の速度をそれぞれ c_3 及び c_1 とすれば、 x_2 軸の正方向に伝播する波の変位は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u_3 &= f(x_2 - c_3 t) \sin \theta \\ u_1 &= f(x_2 - c_1 t) \cos \theta \end{aligned}$$

超音波は試験片の底面から反射し、音源に戻る。ここで、 θ 方向に平行の波の要素の和は探触子によって受信され、次式に示す様な時間の関数として表される。

$$u_\theta(t) = -f(t) \sin^2 \theta - f(t - \Delta\tau) \cos^2 \theta \quad \cdots (2.75)$$

ここで、 $\Delta\tau$ は2つのせん断波の到着時刻の差であり、次式で示される。

$$\Delta\tau \equiv \frac{2l}{c_3} - \frac{2l}{c_1} \quad \cdots (2.76)$$

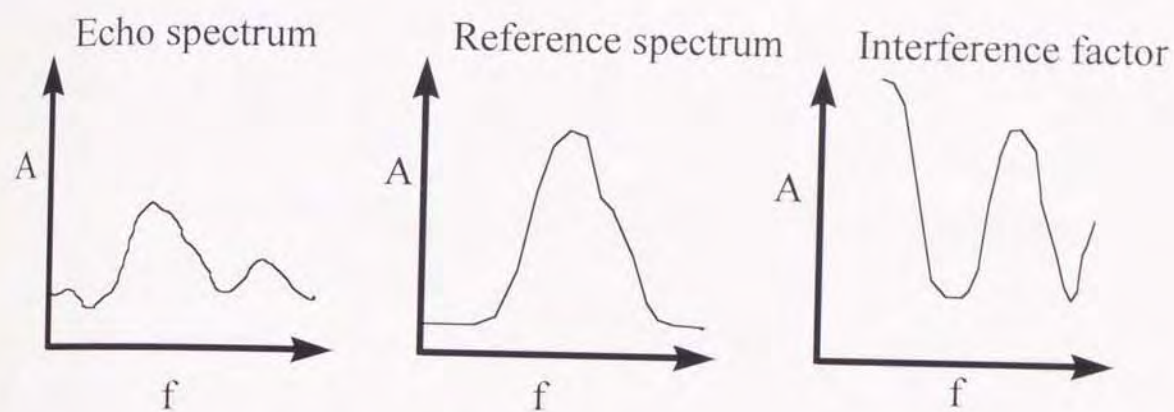
ここで、 l は超音波の伝播距離を示す。オシロスコープ上に表示される信号は、この変位が一定値であることを仮定する。さらに、パワースペクトルを計算し、信号として $u_\theta(t)$ を得る。 $u_\theta(t)$ と $f(t)$ の複素フーリエ変換として $U(\omega)$ 、 $F(\omega)$ を、また、 U と F を変換関数としてそれぞれ定義すると、変換式 (2.77) が得られる。

$$U(\omega) = -F(\omega) \sin^2 \theta - F(\omega) \cos^2 \theta e^{-i\omega\Delta\tau} \quad \cdots (2.77)$$

三角関数法を用いて式 (2.77) を変換することにより、 $U(\omega)$ は次式のように簡単に表せる。

$$U = F \left[1 + 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta (\cos \omega \Delta\tau - 1) \right]^{1/2} \quad \cdots (2.78)$$

物理的に、 U は早い波と遅い波の要素を含むエコーのパワースペクトルであり、 F は早い波か遅い波のどちらかのエコーのパワースペクトルである。従って、 F は標準スペクトルとして用いる。残りの要素は早い波と遅い波の干渉の総量に関する情報を有し、干渉係数と呼ぶ。



$$\text{Echo spectrum} = \text{Reference spectrum} \times \text{Interference factor}$$

図 2.66 エコーのスペクトルと標準スペクトルおよび干渉係数の関係

図 2.66 は式 (2.78) を図示したものである。また、干渉は周期 $1 / \Delta \tau$ で周期的である。従って、測定精度は次式によって得られる。

$$f_{\min} = \frac{(2n-1)}{2\Delta\tau} \quad n=1,2,3,\dots \quad \dots (2.79)$$

音弾性測は試験片の応力状態により音波の速度が変化することを利用する。応力状態が平面応力状態の試験片では次式で示される

$$c_1 - c_3 = \kappa(\sigma_1 - \sigma_3) + \Delta c_0 \quad \dots (2.80)$$

ここで、 Δc_0 は材料及び接触媒質の影響を示す。 κ は応力や音速の影響を受けない。式 (2.79) に式 (2.76) 及び式 (2.80) を適用することにより、次式が得られる。

$$f_{\min} = \frac{(2n-1)c_1c_3}{4[\kappa(\sigma_1 - \sigma_3) + \Delta c_0]} \quad n=1,2,3,\dots \quad \dots (2.81)$$

式 (2.81) を用いることにより、直接音速測定法で得た音速と超音波スペクトル法で得られた音速の比較が可能である。

2つの波の干渉のパワースペクトルの最小単位は2つの主応力間の応力の差に逆比例する。なお、これは作用応力に依存した音波速度の変化や作用応力によって変形した音波の伝播距離の変化を含む。しかしながら、これらの変化は音弾性係数や主応力差にくらべとても小さい。従って、精度良く評価するためには式(2.81)は次式のように変形して用いる。

$$f_{\min} = \frac{K}{(\sigma_1 - \sigma_3) + \delta} \quad \text{for } n=1 \quad \dots (2.82)$$

ここで、 δ は初期速度差の関数であり、試料-探触子間の接触媒質や初期の試料の状態の影響を受ける。

2.6.4 ウェブレット変換

図2.67のように物体内に単純応力 σ_x が作用する場合、次式で示される縦波の音弾性則が成立する。

$$\frac{V_{xx} - V_{xx}^0}{V_{xx}^0} = C_B \cdot \sigma_x \quad \dots (2.83)$$

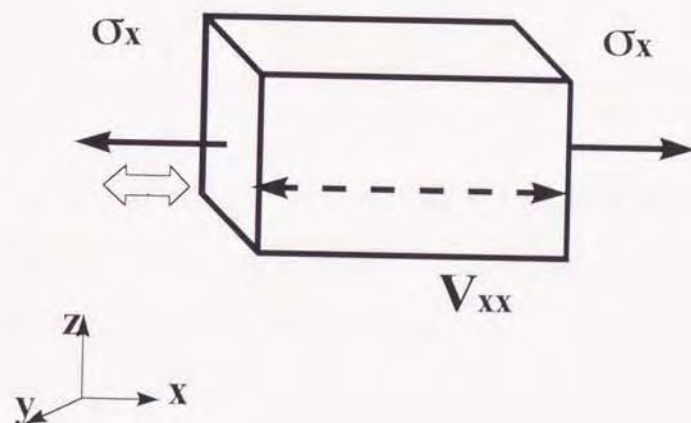


図 2.67 縦波の音弾性則

ここで、 V_{xx} は縦波の音速で、 V_{xx}^0 は無負荷時を示している。 σ_x は x 方向の垂直応力、 C_B は音弾性定数を示している。本法では音速度を決定する際に、測定感度を向上するために次式で示す積分ウェーブレット解析の手法を適用した。

$$(W\phi f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad \cdots (2.84)$$

ここで、 $f(t)$ は測定した超音波波形、 a は周波数、 b は時間を変数であり $a > 0$ である。また、 $\overline{}$ は複素共役を示す。次式は関数 $\phi(t)$ の許容条件である。

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\phi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad \cdots (2.85)$$

本研究では基本ウェーブレットとして次式で示す Gabor 関数を採用した。

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_p}{\gamma}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_p t}{\gamma}\right)^2 + i\omega_p t\right] \quad \cdots (2.86)$$

$$\hat{\phi}(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_p}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma}{\omega_p}\right)^2 (\omega - \omega_p)^2\right] \quad \cdots (2.87)$$

Gabor 関数は許容条件、すなわち式 (2.85) を厳密には満足しないが、

$$\gamma = \pi \sqrt{2/\ln 2} \approx 5.336$$

とすれば近似的に満足し、基本ウェーブレットとして使用できることが知られており^{〔26〕〔27〕}、本研究においてもこの値を採用した。また、 ω_p/a が角周波数に一致するように、

$$\omega_p = 2\pi$$

とした。

ウェーブレット変換を利用した波動の時間-周波数解析の特徴を理論的に示すために、異なる2つの角周波数 ω_1 と ω_2 を有する成分からなる次式で示される x 方向に伝播する調和進行波を考える。

$$\begin{aligned} u(x, t) &= e^{-i(k_1 x - \omega_1 t)} + e^{-i(k_2 x - \omega_2 t)} \\ &= 2 \cos(\Delta k x - \Delta \omega t) e^{-i(k_c x - \omega_c t)} \end{aligned} \quad \cdots (2.88)$$

ここで、 k_1 と k_2 は各成分の波数であり、

$$k_c = (k_1 + k_2)/2, \quad \omega_c = (\omega_1 + \omega_2)/2 \quad \cdots (2.89)$$

$$\Delta k = (k_1 - k_2)/2, \quad \Delta \omega = (\omega_1 - \omega_2)/2 \quad \cdots (2.90)$$

である。 $\Delta \omega$ が十分に小さいとき、角周波数 ω_c における位相速度 c_p と群速度 c_g は次式により与えられる、

$$c_p = \omega_c / k_c, \quad c_g = \Delta \omega / \Delta k \quad \cdots (2.91)$$

一方、調和進行波 $u(x, t)$ のウェーブレット変換の絶対値は次式で表される、

$$|(Wu)(x, a, b)| = \sqrt{a} \left\{ [\hat{\phi}_g(a\omega_1)]^2 + [\hat{\phi}_g(a\omega_2)]^2 + 2\hat{\phi}_g(a\omega_1)\hat{\phi}_g(a\omega_2)\cos(2\Delta kx - 2\Delta \omega b) \right\}^{1/2} \quad \cdots (2.92)$$

$\Delta \omega$ が十分に小さく、

$$\hat{\phi}_g(a\omega_1) = \hat{\phi}_g(a\omega_2) = \hat{\phi}_g(a\omega_c)$$

と見なせる場合には、式 (2.92) は次式のように近似できる、

$$|(Wu)(x, a, b)| \cong \sqrt{2a} \hat{\phi}_g(a\omega_c) [1 + \cos(2\Delta kx - 2\Delta \omega b)]^{1/2} \quad \cdots (2.93)$$

式 (2.93) より、ウェーブレット変換の絶対値は $a = \omega_0 / \omega_c$ 及び $b = (\Delta k / \Delta \omega)x = x / c_g$ において極大となることがわかる。すなわち、ウェーブレット変換の絶対値は時間-周波数平面上で、群速度 c_g で伝播する角周波数 ω_c の波動が x なる位置に到達した時刻 b において極大となる。この時刻 b を利用して、波動のデータを時間-周波数解析することにより、波動の角周波数成分の群速度が同定可能であるのみならず、分散関係を調べることも可能である。

摺動時の試験片には、図 2.68 に示すように摺動面に対して鉛直方向、すなわち Z 方向及び水平方向、すなわち X 方向の 2 方向の荷重が作用し、試験片内を伝播する音速の変化は両者の影響を受ける。そこで、摺動時の音速のみならず、静的かつ鉛直方向に試験片を押し付けた場合の音速を予め測定し、摺動時に測定された音速との差を考慮することにより z 方向の応力 σ_z による影響を分離し、水平方向に作用する応力 σ_x のみを評価対象とすることが可能となる。一方、式 (2.68) より測定される音速は左辺の複屈折量であり、未知の量は右辺第 1 項の組織効果と第 2 項の応力効果による影響を受ける。一般には無応力状態での測定は困難であるので、1つの測定量よりこれらの 2 つの未知量を分離することはできないが、前述のように鉛直方向のみに荷重が作用する場合及び摺動時の音速を測定し、両者

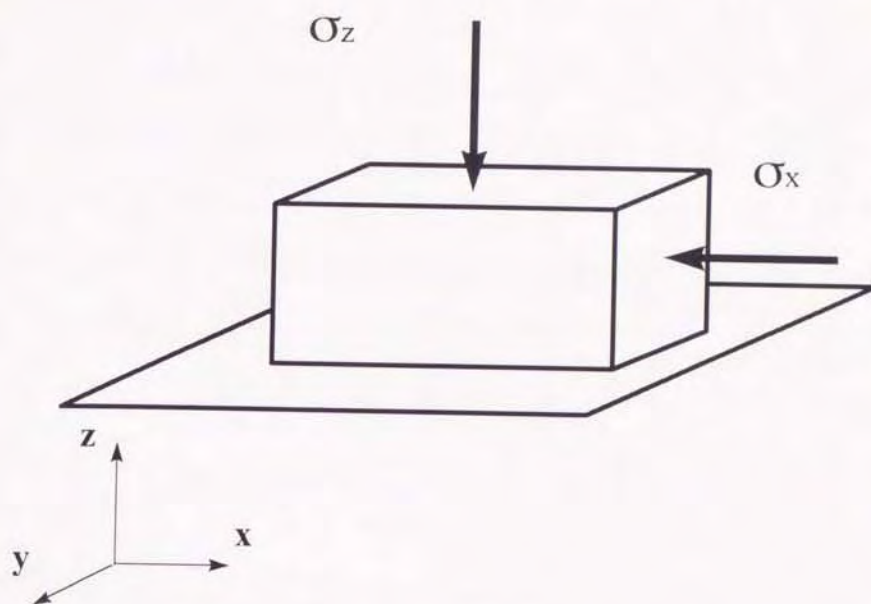


図 2.68 摺動時の試験片に作用する応力

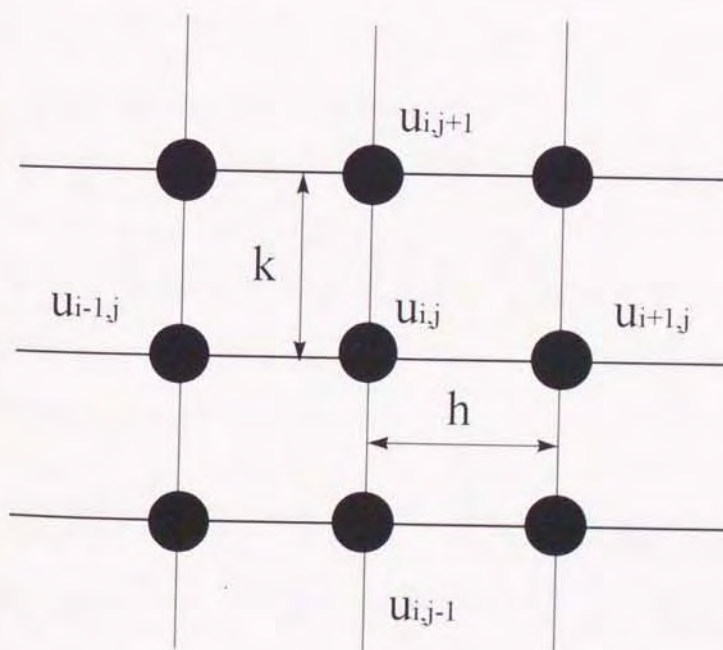


図 2.69 中心差分における 5 点スター格子

を比較することにより，組織効果を分離し，作用応力のみを評価することが可能である。

一方，測定される音速の変化は超音波の伝播経路で作用する平均応力に依存すると考えられる．よって，摺動面に作用する摩擦応力 σ_x を求めるために，差分法を適用した．すなわち，摺動面に作用する応力 σ_x が次式のラプラスの方程式を満足するものと仮定する．

$$\nabla^2 u = \partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2 = 0 \quad \cdots (2.94)$$

ここで，図 2.69 に示す格子上の $u = f(x, y)$ なる表示式において， $x = x_i$ ， $y = y_j$ に対応する u の値を $u_{ij} = f(x_i, y_j)$ とする．それぞれ x ， y 方向に一定間隔の微小距離 h ， k で中心の差分表示をすると次式のように示される．

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{ij} &= \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2h} \right) \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{ij} &= \left(\frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2k} \right) \\ \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{ij} &= \left(\frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{h^2} \right) \\ \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{ij} &= \left(\frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{k^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2.95)$$

さらに，ラプラスの式を差分表示すると次式のように示される．

$$k^2(u_{i+1,j} + u_{i-1,j}) + h^2(u_{i,j+1} + u_{i,j-1}) = 2(h^2 + k^2)u_{i,j} \quad \cdots (2.96)$$

ここで，格子点が正方形であれば， $h = k$ であるから，次式で与えられる．

$$u_{i,j} = (u_{i-1,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j-1} + u_{i,j+1}) / 4 \quad \cdots (2.97)$$

これは u_{ij} 点における関数値がその周りの 4 点の平均値であることを示している．一方，格子点が座標 $(a, 0)$ ， $(0, b)$ ， $(-c, 0)$ ， $(0, -d)$ で与えられるときは，次式のような差分表示を用いる．

$$\left(\frac{1}{ac} + \frac{1}{bd} \right) u_{ij} = \frac{1}{a(a+c)} u_{i+1,j} + \frac{1}{b(b+d)} u_{i,j+1} + \frac{1}{c(a+c)} u_{i-1,j} + \frac{1}{d(b+d)} u_{i,j-1} \quad \cdots (2.98)$$

なお，本研究では解析に際し，長方形格子を用いたことから $a = c$ ， $b = d$ となり，次式を用いて差分法を適用した．

$$u_{i,j} = \frac{b^2(u_{i+1,j} + u_{i-1,j}) + a^2(u_{i,j+1} + u_{i,j-1})}{2(a^2 + b^2)} \quad \cdots (2.99)$$

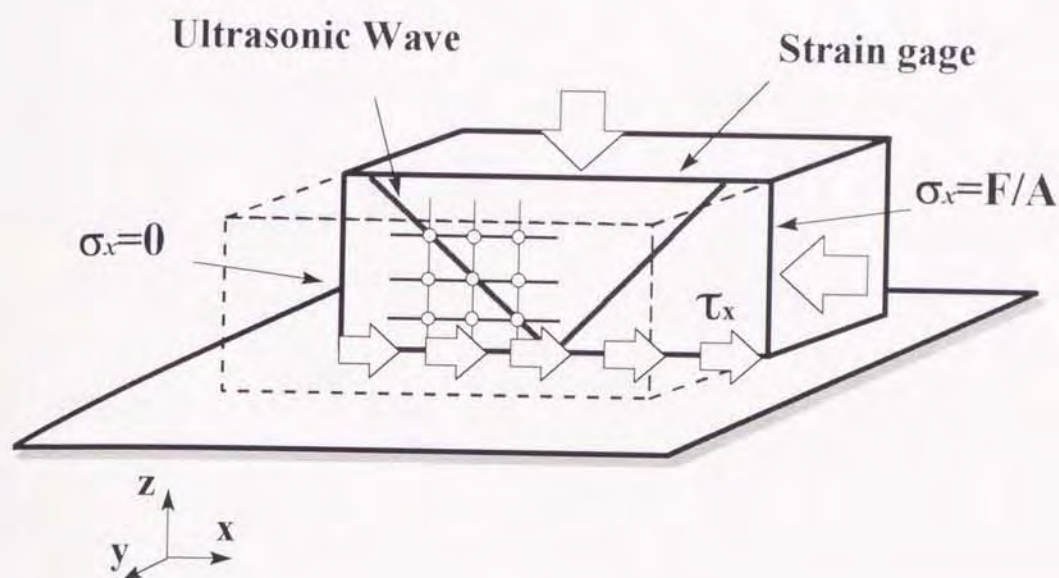


図 2.70 差分法の適用方法

さらに図 2.70 に示すように、測定位置は試験片の摺動方向中心軸上とし、この部分における摺動方向に対し垂直方向に作用する応力 σ_y が 0 であると仮定した。よって解析対象となる応力は x 方向の応力 σ_x のみとなる。差分法を適用するにあたり、以下に示す境界条件を設定した。

- (1) リーディングエッジ側面の垂直応力 σ_x は 0。
- (2) トレッディングエッジ側面の σ_x は摺動に要した力 F を面積 A で除した値。
- (3) 試験片上面の σ_x は歪みゲージを用いた実測値を代入。
- (4) ウェブレット変換により求められる音速の変化は、超音波の伝播経路上のすべての格子点で作用する σ_x の影響を受ける。

これにより、摺動面に作用する摺動方向垂直応力は決定される。

さらに、得られた垂直応力 σ_x に次式を適用し、摺動面に作用する摩擦応力を求めた。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \quad \cdots (2.100)$$

2.6.5 応力と音速の関係

試験片に作用する応力と音速の関係すなわち音弾性係数を明らかにするために、図 2.71 に示す装置を用いた。断面寸法が 19mm × 20mm の SKD11 試験片に公称周波数 10MHz、振動子直径 ϕ 5mm 及び ϕ 6.4mm の 2 対の垂直型縦波探触子を 45 度の斜面を有するアタッチメントを介して取り付け、 ϕ 5mm で発信した超音波を ϕ 6.4mm の探触子で受信した。試験片に 3kN までの圧縮荷重及び引張荷重を与え、この時の探触子設置面の対称となる底面からの反射波を超音波探傷器で検出し、パソコンで記録、解析を行った。なお、金属組織による音速の影響を考慮し、SKD11 試験片の長手方向を圧延方向と一致させた。

図 2.72 に得られた反射波形の一例を示す。また、この波形のウェーブレット変換結果を図 2.73 に示す。横軸は時間、奥行きは周波数及び縦軸はウェーブレット積分値 $W_\psi f$ をそれぞれ示す。図の中心付近に見られる大きなピークは反射波に対応しており、そのピーク周波数は約 8MHz である。

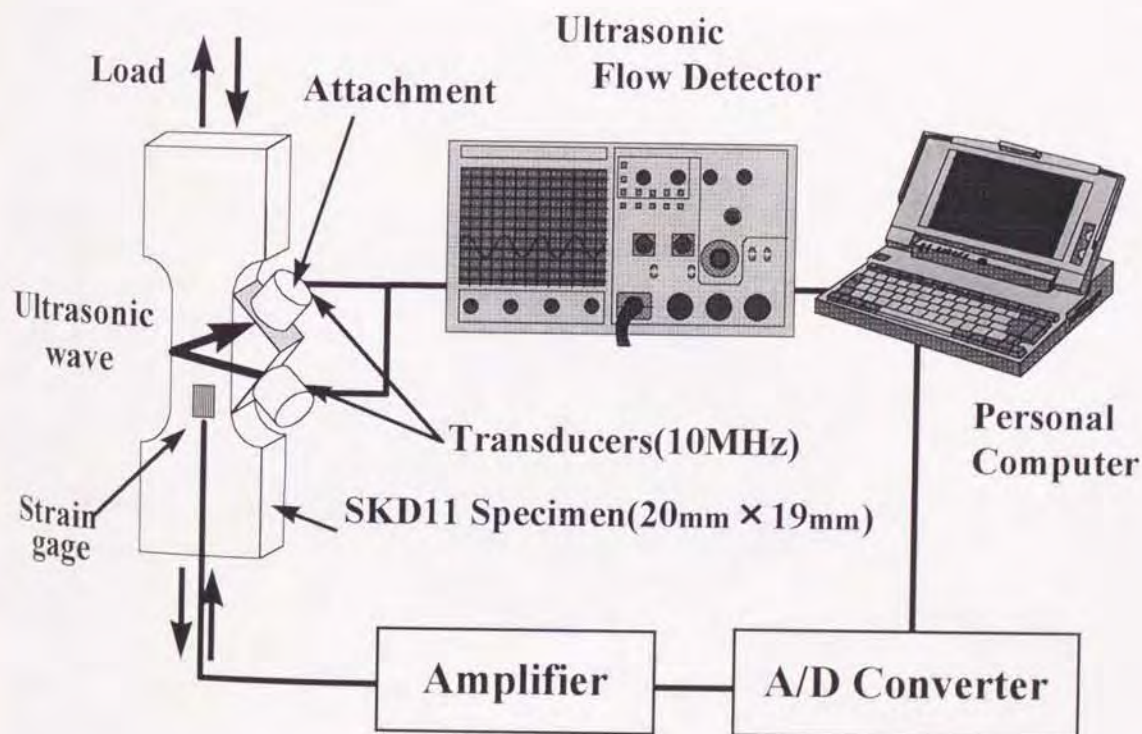


図 2.71 較正実験装置

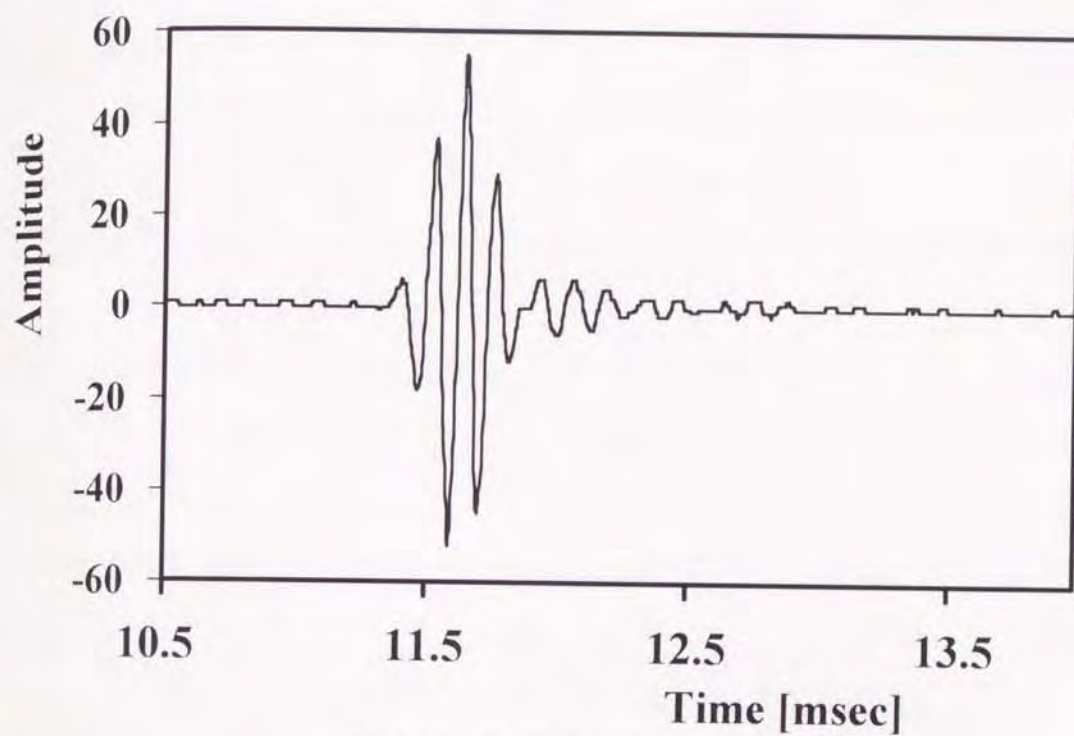


図 2.72 反射波形の一例

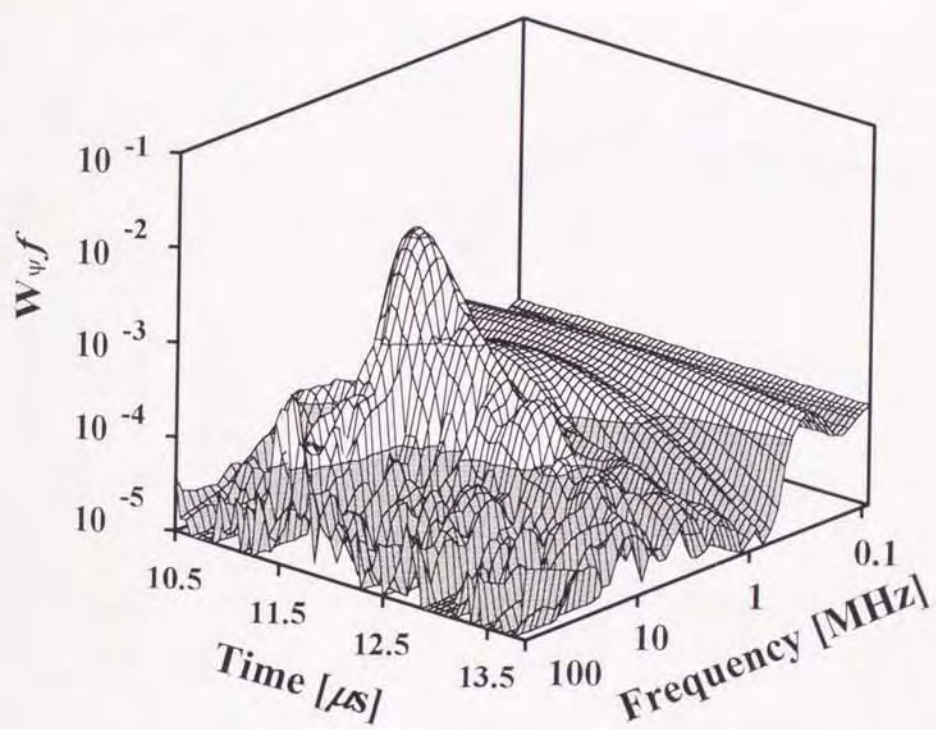


図 2.73 反射波のウェブレット変換結果の一例

図 2.74 にそれぞれの周波数で $W \cdot f$ が最大となる時刻を求め、両者の関係を求めた結果を示す。横軸は周波数、縦軸は 8MHz の成分の $W \cdot f$ が最大値を示す時刻を基準とし、その時刻と各周波数に於いて $W \cdot f$ が最大値を示す時間差 Δt をそれぞれ示す。図より、無負荷時、引張及び圧縮時において、5MHz 付近では他の周波数よりも早く $W \cdot f$ は最大値を示すことがわかる。また、この差は試験片に作用する応力に依存する。すなわち、引張荷重が作用する場合においては時間差 Δt は減少し、圧縮荷重が作用する場合に於いては増加することが解る。 $W \cdot f$ が最大値となる時刻はそれぞれの周波数の音が到達した時刻と考えられることから、5MHz 及び 8MHz における時間差 Δt をそれぞれの周波数における音波の到着時間差と考え、これより群速度差 ΔV を求めた。

図 2.75 は速度差 ΔV と試験片に作用する応力の関係を示す。引張応力が大きくなるに従って ΔV は減少傾向を示す。一方、同図中には反射波形をフーリエ解析し反射波のパワースペクトルを求め、試験片に作用する応力とピーク周波数の関係を求めた結果を併記して示している。引張応力

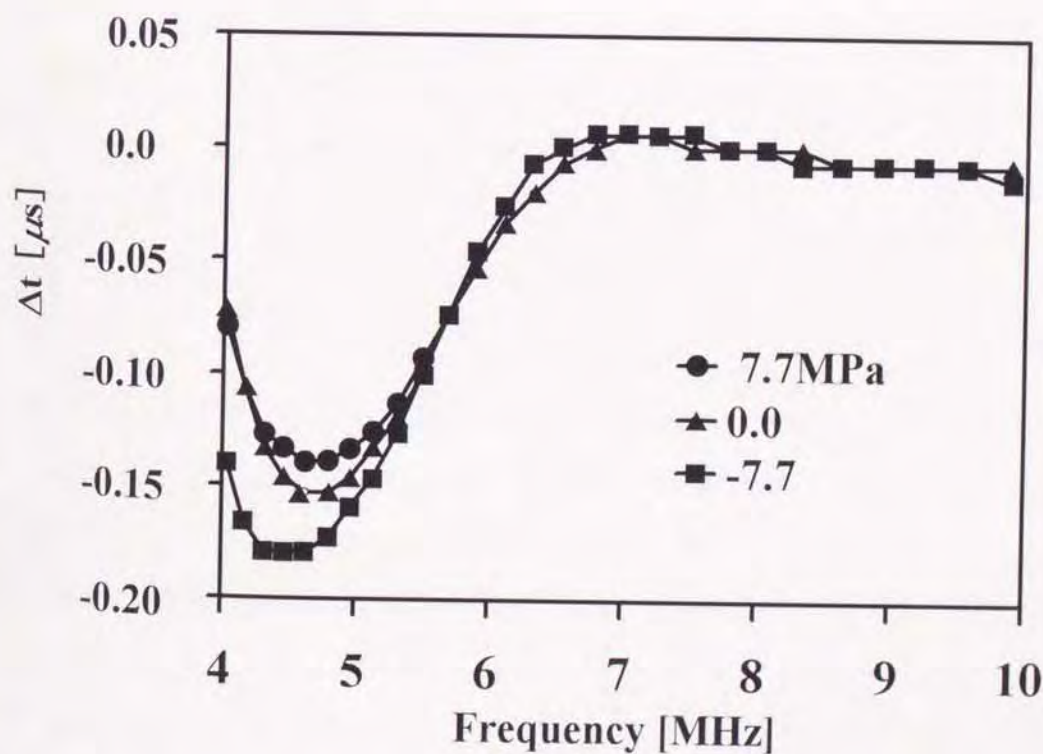


図 2.74 周波数と Δt の関係

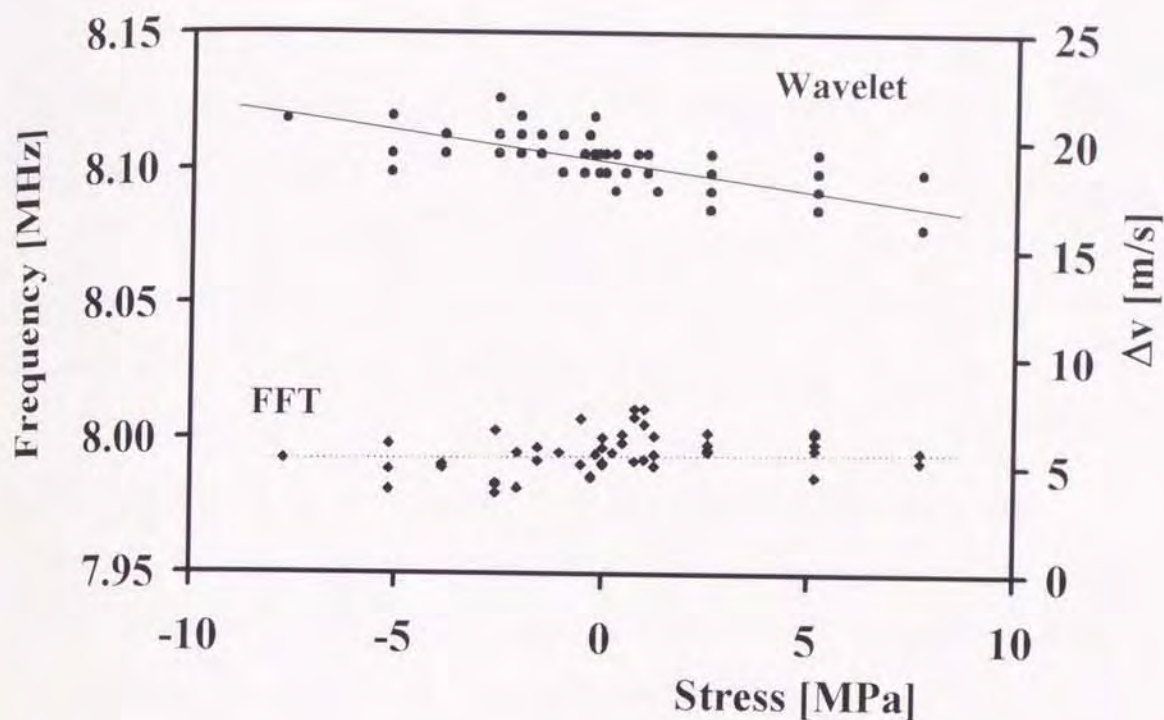


図 2.75 ΔV と応力の関係

が増加するに従い、フーリエ解析より求めたピーク周波数は増加するものの、その差はきわめてわずかである。よって、ウェブレット解析を利用することは、フーリエ解析に比べ、測定感度の点から有利と考えられる。

第 2.7 節 結 言

本章では、境界面における音波の反射・透過特性及び減衰特性について示すとともに AE の測定システムの概要及び超音波顕微鏡を用いた物性評価の基本原則について示した。また、超音波法を利用した応力測定方法、すなわち接触面からの第 1 エコー高さの変化を利用した接触圧力測定法、反射波のウィグナ分布を利用した接触圧力測定法及び音弾性とウェブレット解析法を利用した摩擦応力測定法についての測定原則について示した。さらに、接触圧力等の定量的な測定を行う上で必要である、接触圧力とエコー高さ比の関係、接触面からの第 1 エコーのウィグナ分布を利用して求

めたピーク周波数及びウィグナ分布の積分値と接触圧力の関係、及び音弾性係数をそれぞれ明らかにした。なお、エコー高さの変化を利用する方法においては、除荷時、再負荷時ならびに負荷速度による影響についても明らかにした。また、ウィグナ分布を利用する方法においては、水平解像度を改良するために用いたアクリルピンによる反射波特性への影響等を明らかにした。さらに、接触面から反射してくる超音波の音圧分布を求める簡便な計算方法を提案するとともに、これを基にしてエコー高さ及び測定位置の補正方法を示し、以下に示す結論を得た。

- (1) エコー高さ比 E_R^* と接触圧力の関係は摺動時及び非摺動時に関わらず負荷過程においては上に凸の曲線で与えられる。前者においては負荷過程及び除荷過程においてほぼ同じ履歴を示す。一方、後者の除荷過程においては接触面が密着し、その状態が接触圧力が極めて小さくなるまで保持されることから、エコー高さ比 E_R^* は負荷過程における値に比べ大きな値を示す。また、再負荷過程においては E_R^* は負荷時と除荷時で得られる値の間の値を示す。
- (2) エコー高さ比 E_R^* と接触圧力の関係は負荷速度が大きくなるに従い、校正曲線の勾配は小さくなり、同じ負荷が作用する場合においても E_R^* の値は小さくなる。
- (3) エコー高さ比 E_R^* を利用した接触圧力測定法では、(1) 及び (2) より、 E_R^* の値及び履歴を考慮し、適宜変換に要する校正曲線を選択することによって、負荷過程のみならず除荷及び再負荷過程の定量的な接触圧力測定が可能である。また、ゴム材料のようにクリープ特性を有する材料の接触圧力を測定を行う場合は、作用荷重が動的に変化する場合であっても、 E_R^* の値のみならず、その変化速度を考慮することにより、定量的な接触圧力の測定が可能である。
- (4) 接触面から反射してくる超音波の分布を求めるために簡易的な数値計算法を示すとともに、実際に音圧分布を測定し両者の比較検討を行った。計算値と実験結果は良く一致し、接触域端部の反射波特性を求める上で示した実験的手法は十分有効で、合理性を有すると考えられる。

(5) 接触面からの第1エコーのウィグナ分布を時間及び周波数に関して体積積分し、これに基づく WDE_R^* を定義した。0 から 0.4MPa の範囲では荷重の増減に対する WDE_R^* の変化は、 E_R^* の変化に比べて顕著であることから、本領域の接触圧力測定において、 WDE_R^* を接触圧力の評価に利用することにより、良好な測定感度を得られることが示された。一方、接触圧力が 0.4MPa 以上の領域では WDE_R^* 及び E_R^* の増加率は減少するものの、ウィグナ分布より得られたエコーのピーク周波数は、接触圧力の増加に伴い、低い周波数に移行する。よって、この様な領域では、ピーク周波数を評価基準とすることにより、比較的精度よく測定することが可能である。

(6) 音弾性の性質を利用する摩擦応力測定法を提案した。また、本法に基づいて、応力の測定時に必要となる音弾性係数を求めるためにウェブレット変換を利用し、反射波の時間-周波数2次元解析を行った結果、従来のフーリエ解析にはない特徴が示された。即ち、SKD11 試験片に作用する引張応力が増加するに従い、5MHz 及び 8MHz における群音速差は減少傾向を示す。この変化はフーリエ変換を利用して求めたピーク周波数の変化よりも顕著であり、測定感度の点からウェブレット変換を利用する測定法は有利であることが示された。

第3章 AEを利用した摺動面損傷評価

第3.1節 緒言

セラミクス材料は一般に金属材料に比べ硬度及び耐熱性が高く，さらに耐蝕性が優れていることから寸法精度に対する要求が厳しい摩耗部材に適している⁽¹³⁶⁾⁽¹³⁹⁾．しかしながら，摺動面にセラミクス材料とともに金属材料を用いた場合，セラミクス材料の熱伝導率が小さいことから，摺動面から摩擦熱が十分に拡散されず，このため金属材料が焼き付き現象を生ずる等の問題点が指摘されている⁽¹³⁶⁾．この点に関連して，宇佐美ら⁽¹³⁾は各種セラミクスとS45C鋼との摩耗試験を行い，接点点がS45C鋼の融点に達するような条件下で急激にS45C鋼の摩耗量が増大する等の摩耗特性を明らかにしている．またその一方で，この様にセラミクス材料と金属

表 3.1 摩耗試験に用いた試験片の種類

Specimen	Material	Process
Pin	Si ₃ N ₄	
	Al ₂ O ₃	
	ZrO ₂	
	SKD11	TD process (VC)
		Boronizing
		Hardened
		Nitriding
	S45C	Boronizing
		Hardened
		Nitriding
Disk	SK3	Hardened
	Al ₂ O ₃	

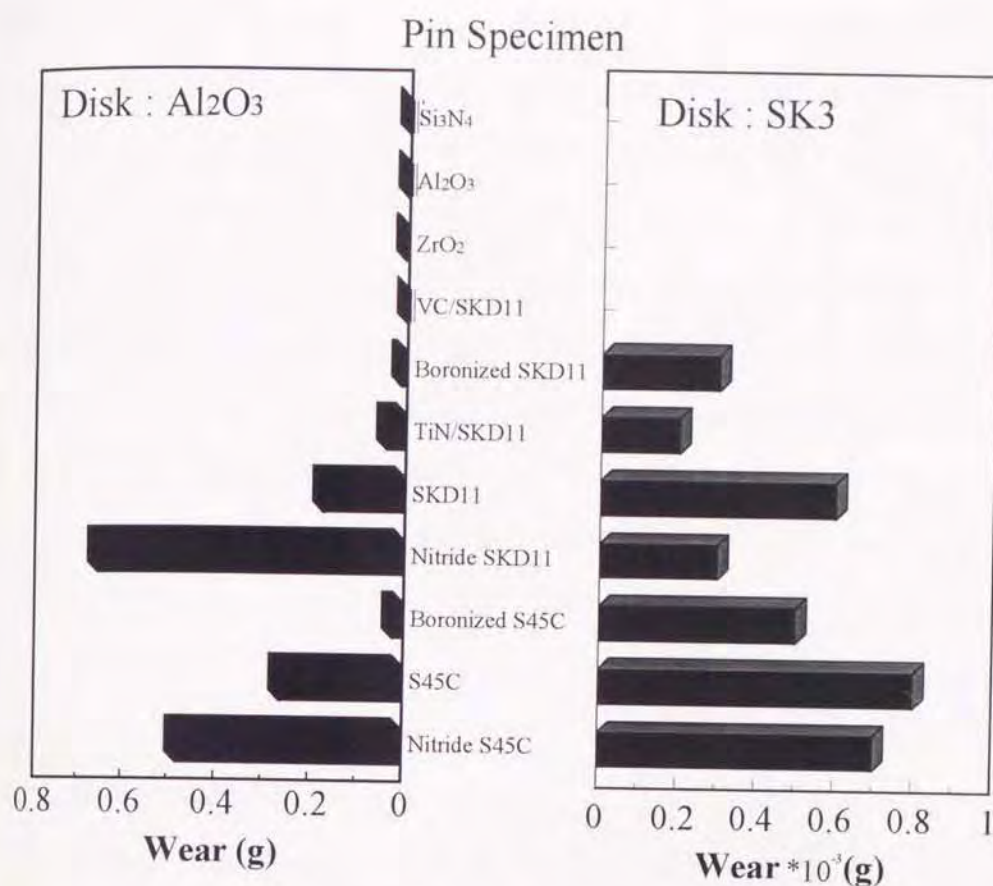


図 3.1 各種表面処理方法と摩耗量

材料の摺動面で、焼き付き現象を回避するためには金属材料の摺動面に表面改質層を設けることが、最も簡便かつ有効であると考えられる。例えば、表 3.1 に示す数種の表面処理を施した SKD11 鋼材及び S45C 鋼材の摩耗特性は、図 3.1 に示す様に未処理の材料に比べ、良好な摩耗特性が得られている。なお、図に示す摩耗試験の結果はピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用い、接触圧力 5.78MPa、摺動速度 1.31m/s で 60℃ のタービン油 (#32) を 200cc/min で滴下し、2500m 摺動させた後に計測した摩耗重量を示している。しかしながら、その摩耗特性は相手摺動材料が SK3 材である場合とアルミナセラミクス材を用いた場合で異なる。例えば、窒化処理等のように金属材料の表面を硬化させるものの、同時に脆化させるような表面処理法を適用した鋼は相手摺動材料がアルミナセラミクス材の様に硬い材料である場合、未処理の鋼よりも摩耗特性は劣る。一方、ほう素を金属材料の表面に拡散浸透させる硼化処理は、このような摺動条件下においても比較的良好的な摩耗特性を示すのみならず、近年、硼化処理法は処理時の環境汚染問題

等の解決方法⁽¹⁴²⁾が実用化され、耐摩耗性、耐酸化性及び耐焼き付き性が優れていることから、熱間鍛造金型や各種動力伝達装置等への応用が期待されている。硼化処理鋼に関する研究例の中で摩耗特性を示した例^{(143) - (146)}も見受けられるが、その多くは相手摺動面が金属材料であり、前述のようなセラミクス材を用いた例はあまり見受けられないようである。

一方、産業機械の要素部材や金型等にセラミクス薄膜を利用する場合は少なくない。このような薄膜利用部材は機械や構造物の摺動部にもしばしば利用され、その利用価値が注目されている。しかしながら、合理的かつ安全な設計を行うためにも、薄膜の密着性や機械的特性を如何にして評価するかが重要であり、これらに関する種々の研究^{(112) - (119)}が行われている。たとえば、栗津ら⁽¹¹⁹⁾はTiCとTiNを被覆したSKD鋼の摩擦摩耗試験を行い、薄膜の寿命について詳細に調べた。その結果より、高荷重下における薄膜の摩耗は、摩擦方向に対して直角方向に生ずるうろこ状のき裂によって薄膜が剥離され、このプロセスが繰り返されることに起因すると指摘している。

薄膜の付着力を評価するために、ASTM C633-79等では接着剤を用いて薄膜を母材からはがすのに要する力を利用する方法⁽¹¹⁷⁾やスクラッチ試験法等が提案されている。特に、薄膜の付着力が接着剤の接着強度よりも大きい場合に前者の適用は困難であるため、セラミクス薄膜の付着力を測定する場合には主として、スクラッチ試験法が利用されている。しかしながら、母材上では一様な薄膜付着力を得ることはかなり困難であり、スクラッチ試験法のように微小領域での付着力測定値には、かなりばらつきを生じやすいものと思われる。また、実際に薄膜を摺動面に適用した場合、付着力の弱い部分から剥離を生じ、剥離部分の周辺に応力が集中することにより、さらに剥離が進行する傾向が見られることから、実際の摺動面での測定結果は必ずしもスクラッチ試験のそれに対応しないことも考えられる。

ところで、塑性変形や破壊時に発生するAEは塑性変形の状態や破壊の形態に対応した発生特性を示すことから、切削プロセスの監視等への利用が有望視されている^{(1) - (7)}。和田ら^{(13) (14)}や久門ら^{(15) (16)}は摩耗試験を行い、その際に発生するAE信号のリングダウン計数率を求めること

により、AE計数率と摩耗率の関係を定量的に示すとともに、表面損傷と潤滑状態の変化を評価するにあたり、AE法の適用が有効であることを示している。

本章ではAEセンサを設置したピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用い、摺動時に発生するAEを利用した表面処理鋼のトライボロジー特性評価法の実用性を検討する。すなわち、摩耗試験の際に発生されるAE信号を測定するとともに試験後の摺動面を電子顕微鏡や超音波顕微鏡を用いて観察し、硼化処理鋼のアルミナセラミクスに対するトライボロジー特性を明らかにする。さらに、両者の結果を比較することにより、硼化処理層の脱落機構に関する考察を行う。また、セラミクス薄膜のトライボロジー特性の評価方法を検討するために、セラミクス薄膜と母材の付着力を簡便に評価可能な方法を提案するとともに、その有効性を検討するために、プラズマCVD法でSKD11鋼とSKH51鋼に蒸着したTiN薄膜の付着力と、成膜条件の関係を明らかにした。さらに、現在薄膜の付着力測定に一般的に利用されているスクラッチ試験等に対する本法の特徴を示した。

第3.2節 硼化処理鋼の摩擦特性

3.2.1 摩耗実験とAE発生特性

摩耗特性及びAEの測定には第2.4節に示したピン-オン-ディスク型摩耗試験機(高千穂精機 TRI-S500)を用いた。試験片として図3.2に示すような直径8mm、長さ30mmのピン型試験片及び直径80mm、厚さ10mmのディスク型試験片を用いた。なお、ディスクの一端をディスクとディスクホルダー間の回り止めのために2mmの切り欠き加工を施した。試験機に取り付けた場合、ピンはディスクの中心から30mmの位置で摺動する。また、初期摺動面の表面粗さはその後の摩耗特性に大きな影響を及ぼすことが知られている。よって、初期摺動面の表面粗さを各試験片で一定に保つために、摩耗試験前にピン及びディスクの初期摺動面はラップ加工し、両者と

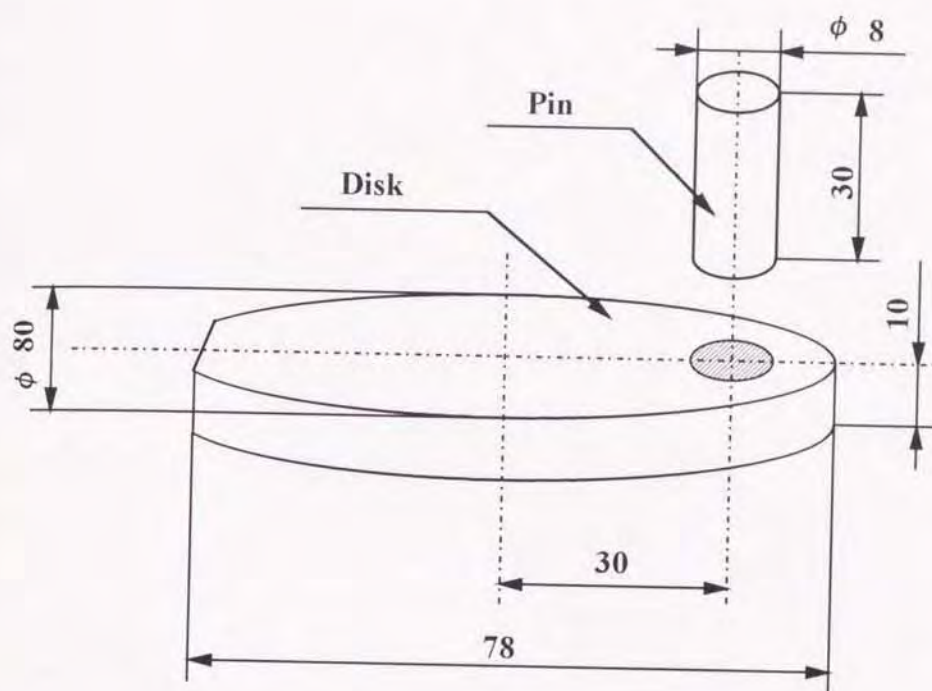


図 3.2 ピン及びディスクの形状

もに中心線平均粗さ R_a で $0.7 \mu m$ の均一な表面を得た。

鉄鋼材料の硼化処理は、硼素を鉄をはじめとする多くの遷移金属の表面に拡散浸透させ、化合物層を生成する方法である。一般に遷移金属の硼化物の結合は金属結合と共有結合の両方からなっており、金属的性質及び非金属的性質を兼ね備えている。すなわち、電導性、熱伝導性、熱電子放射性、半導体特性及び硬い硬度を有する。また、塑性変形が小さく、脆性破壊を起こしやすいものの耐摩耗性に優れ、耐酸化性及び耐焼き付き性が良好であることから、各種機械の耐摩耗性部品や治具に適用されている。現在、一般的に利用されている硼化処理の方法を図 3.3 に示す。本研究では各種硼化処理方法の中で、特別な設備が必要でなく操作が簡単で、かつ処理終了と同時に焼き入れが出来るという特徴を有する熔融塩浸漬法を利用して硼化処理を行った。同方法は硼砂 (NaB_4O_7) と塩化バリウム ($BaCl_2$) と塩化ナトリウム ($NaCl$) などの混合熔融塩に、促進剤として B_4C 及び $NaBF_4$ を添加した塩浴中で $800 \sim 1000^\circ C$ に加熱して処理する方法である。

表 3.2 に使用したピンならびにディスクの材質を示す。ピンは硼化処理した SKD11 鋼ならびに S45C 鋼，さらには硼化処理によるトライボロジー特性の変化を明らかにするために，比較対象として同材料の調質鋼を用いて作製した。一方，ディスクには表 3.3 に示す物性を有するアルミナセラミクス材を用いた。ピンの硼化処理及び熱処理は図 3.4 に示す条件で行った。図中に示す No. A, B, C 及び D は表 3.2 中の試験片番号にそれぞれ対応する。なお，硼化処理時の化学反応は次式のように解離及び置換

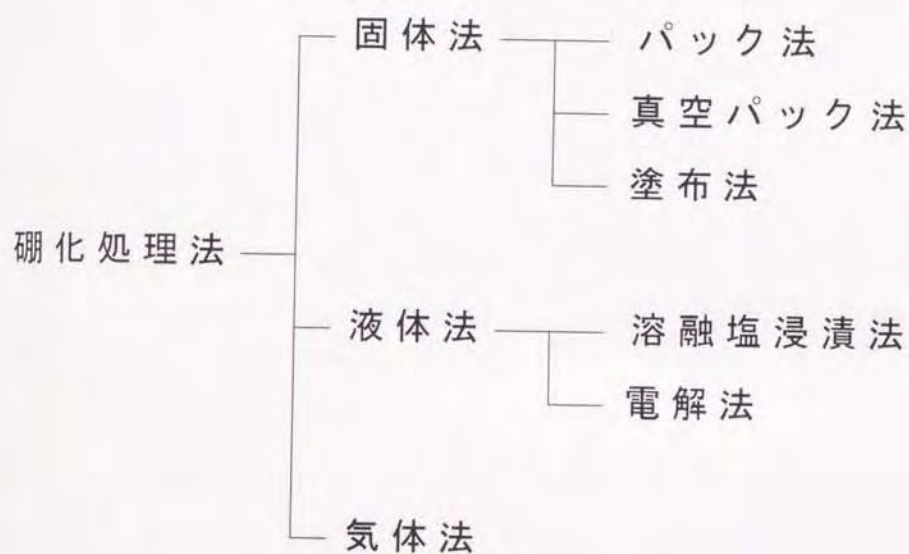


図 3.3 硼化処理方法

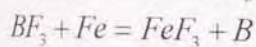
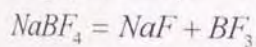
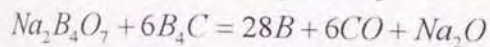
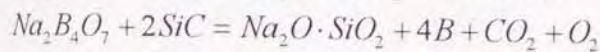
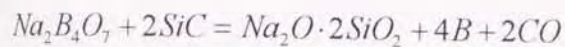
表 3.2 試験片の表面硬度

	No.	Material	Hardness[Hv]
Pin	A	SKD11	802
	B	Boriding SKD11	1532
	C	S45C	703
	D	Boriding S45C	1409
Disk		Al ₂ O ₃	1601

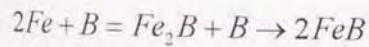
表 3.3 アルミナセラミックスの特性

Al ₂ O ₃ content rate	99.5
Density (g/cm ³)	3.90
Suction rate (%)	< 0.01
Bending strength (MPa)	343
Compressive strength (MPa)	3430
Young's modules (MPa)	35280
Hardness [Hv]	1600

反応する。

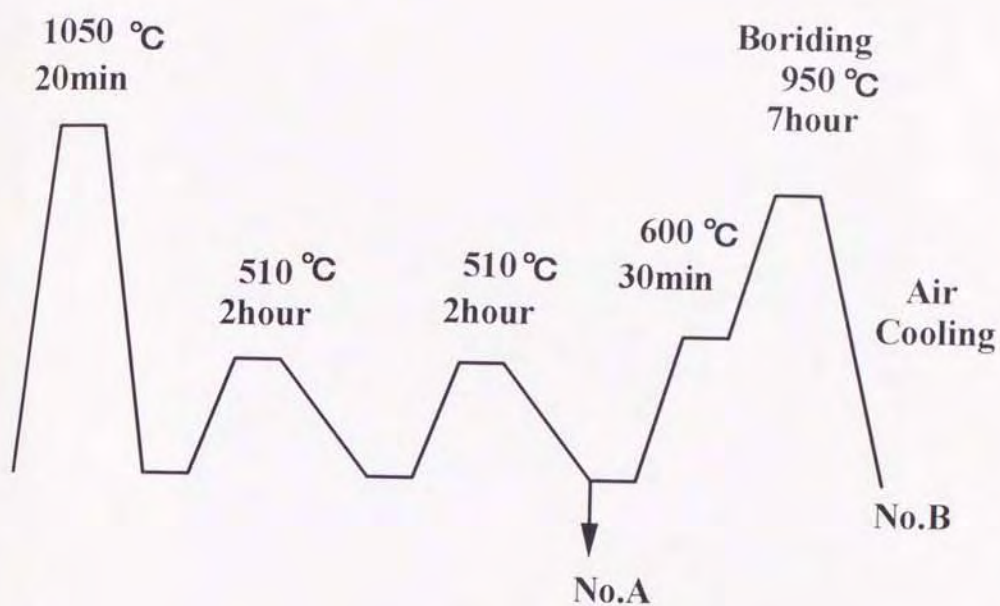


さらに、たとえば次式のように処理が進行する。

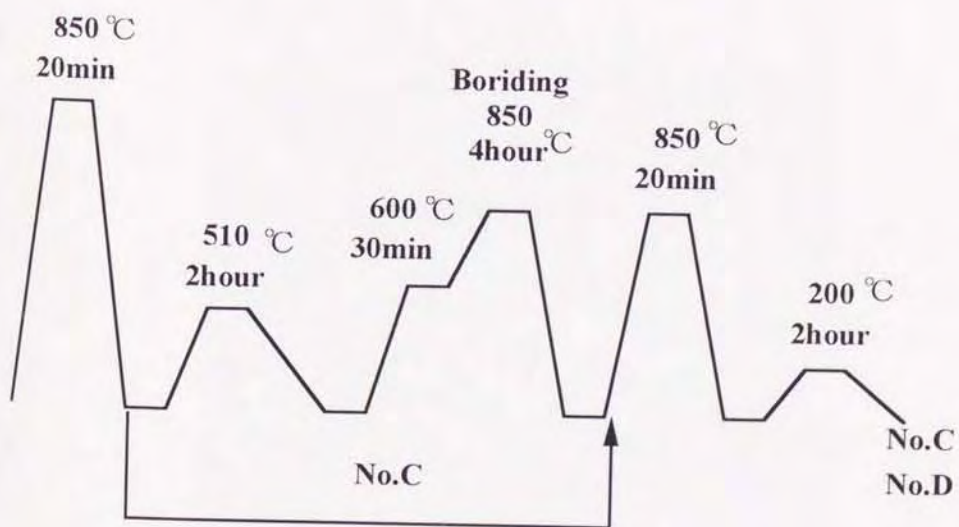


なお、塩浴法での鋼の硼化層の大部分は Fe₂B であるが、そのごく表面には FeB が存在する。すなわち、硼化処理によって得られる層は単一ではなく、処理方法及び処理品の材質によって異なる。鋼の硼化層の中でも、特に FeB 層はもろく割れを生じやすい。さらに、FeB と Fe₂B 層の境界で表面に平行な割れを生ずる。これは両者の熱膨張係数の差が大きいことや、硼化層の内部応力が FeB では引張応力、一方、Fe₂B では圧縮応力が作用しているためと考えられている。

この様にして得られた SKD11 鋼及び S45C 鋼の硼化処理鋼を 2 分割し、断面を研磨した後にナフタール (5% 硝酸アルコール溶液) を用いてエッチングした。図 3.5 及び図 3.6 は、このエッチング面の金属顕微鏡による観察結果を示している。図に示すように、SKD11 鋼で表面から約 45 μm、S45C 鋼で約 50 μm の硼化物層を得た。



(a) SKD11 鋼



(b) S45C 鋼

図 3.4 硼化处理鋼の熱処理履歴

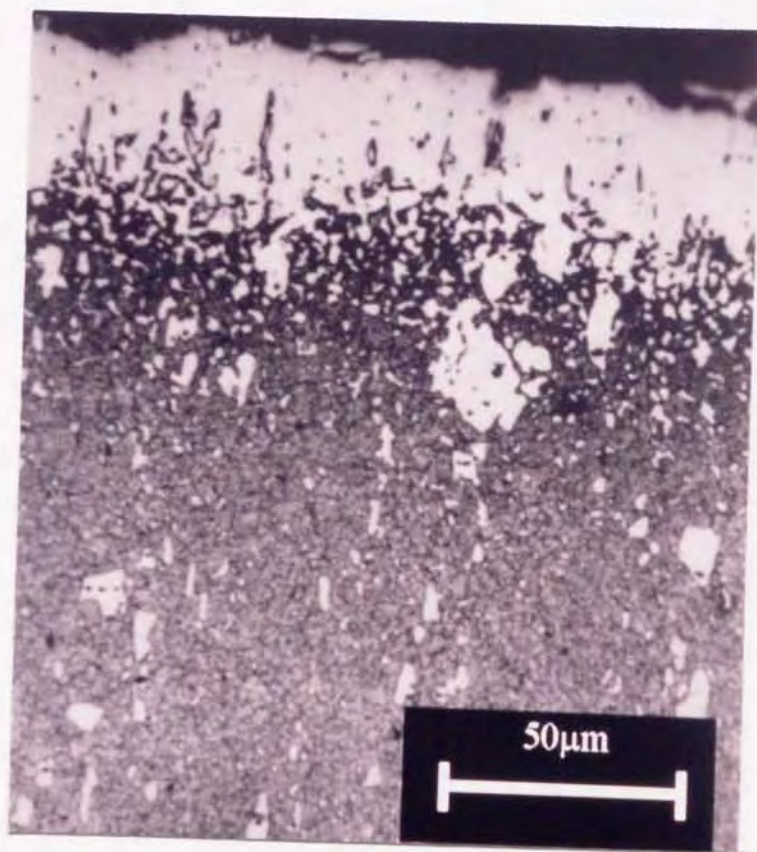


図 3.5 SKD11 鋼の硼化物層



図 3.6 S45C 鋼の硼化物層

図 3.7 に硼化处理鋼の断面硬度分布を示す。硬度の測定はピンを 2 分割した後、加工面を電解研磨し加工による硬化層を完全に除去した後に行った。なお、ダイヤモンド圧子の負荷は 294N であり、圧痕の大きさをマイクロビッカース硬度計を用いて測定した。調質処理のみをほどこした場合、SKD11 鋼と S45C 鋼の硬度分布は垂直断面内で均一であり、表面からの距離に関わらず前者は Hv800、後者は Hv650 程度の値をそれぞれ示す。一方、硼化处理を施すことにより、表面硬度は前者は Hv1532、後者は Hv1409 となる。測定位置が表面から内部へ移動するに従って、硬度の値は減少し表面からの距離が $50\mu\text{m}$ の位置では、両者ともにほぼ調質処理鋼と同様な値を示した。この結果は、図 3.5 及び図 3.6 に示した金属顕微鏡による観察結果と対応するとともに、硼化处理による母材への硬度の影響はほとんど無視し得ることが解る。

本研究では、硼化处理層がアルミナセラミクス材とともに摺動面に用いられた場合のトライボロジー特性を調べるために、摺動速度及び接触圧力を一定に保持した状態で行う摩耗試験、及びピンの押し付け力を一定に増

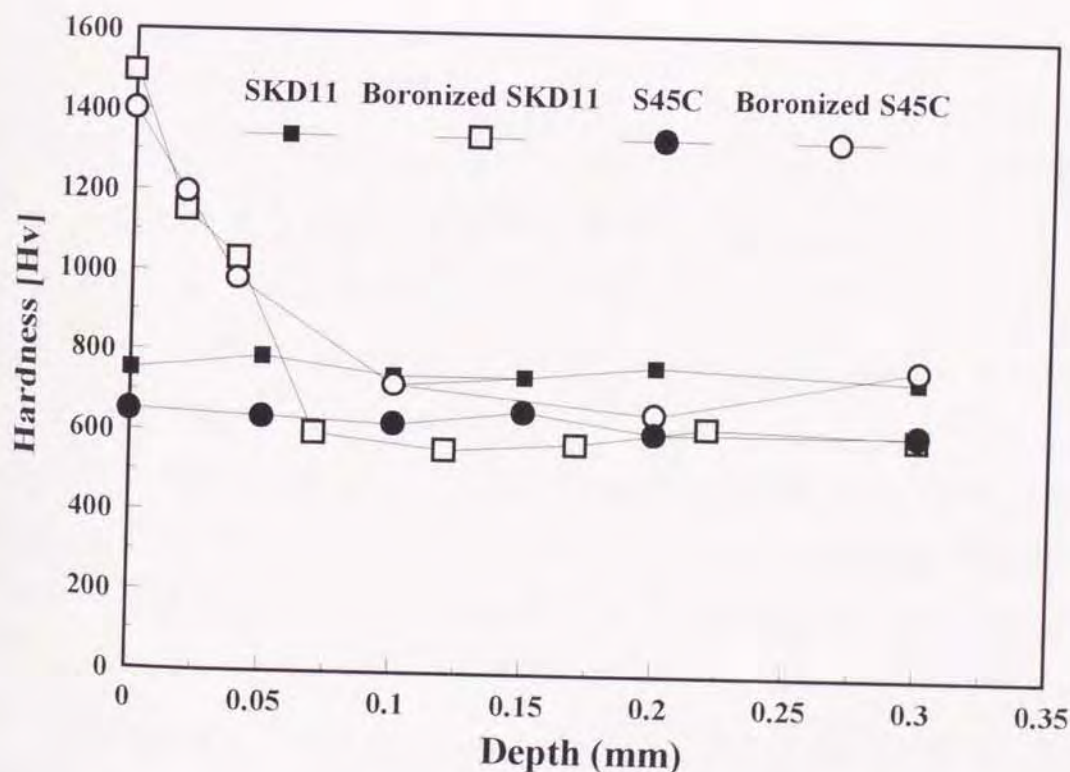


図 3.7 硼化处理鋼の硬度分布

加する摩耗試験を行い、この際に発生するAEを測定しトライボロジー特性を評価する。便宜上、前者を「摩耗実験」、後者を「焼き付き性実験」と呼ぶ。両実験ともに大気中、室温で行い、60℃に加熱したタービン油(#32)を200cc/minで摺動面に滴下した。また、公称共振周波数が1MHzであるAEセンサーをピンホルダーに設置し、検出した信号をアンプで70dB増幅した後にFFTアナライザーを用いてスペクトルを求めた。また、バンドパスフィルターによって測定するAE信号の周波数を限定した後に、A/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに入力し、AE信号が持つエネルギーの相対的な値であるRoot Mean Square値(R.M.S.値)を利用して、解析を行った。

摩耗実験では、トライボロジー特性に対する接触圧力による影響及び摺動速度による影響をそれぞれ調べるために、前者においては摺動速度が1.31m/s、接触圧力が1.86～7.74MPaの範囲内、後者においては接触圧力を5.78MPa、摺動速度を0.17～4.71m/sの条件下で行った。いずれの場合もピンの摩耗量、摩擦係数及びAEを測定した。摩耗量は分解能1 μ mの差動トランスの出力よりピンの長さの減少量を求めた。なお、ディスクの回転による差動トランスの変動量は98N負荷時で約17 μ m/rev、980N負荷時で16 μ m/revであり、わずかながら減少傾向を示すものの、押し付け荷重による変動量はかなり小さく、十分無視し得るものと考えられる。なお、ピンの長さの減少量はこの変動成分を除去した後に算出した。さらに、2500m摺動後のピンの摩耗重量を電子天秤を用いて計測した。ここで計測は、アセトン中でピンの超音波洗浄を行い、試料表面に付着した油脂及び摩耗粉等を取り除き、充分乾燥した後に行った。

一方、焼き付き性実験においては摺動速度を0.47～4.17m/sとし、1.96N/mの割合でピンの押し付け力を増加した。その際に、摩擦係数及びAE発生特性が変化する荷重値を臨界荷重値と定義し、摺動速度と臨界荷重値の関係を求めた。

また、摩耗実験及び焼き付き性実験終了後に走査型電子顕微鏡及び超音波顕微鏡により摺動面の観察を行うとともに、それぞれの試験片に対してスクラッチ試験を行い、摺動時のAE放出特性を検討した。ここで、スク

ラッチ試験はノーズ半径 $0.2 \mu\text{m}$ のダイヤモンド圧子を使用し、 100N/min で荷重を増加しながら 10m/min の速度で圧子を移動し、この時発生する AE を測定した。

図 3.8 に摺動速度が 1.31m/s 、接触圧力が $1.86 \sim 7.74\text{MPa}$ の範囲内で摩耗実験を行ったときの接触圧力と摩耗重量の関係を示す。横軸の接触圧力はピン押し付け荷重を見掛けの接触面積で除して求めた公称応力を、縦軸は摩耗重量をそれぞれ示す。いずれの接触圧力においても硼化処理鋼は、調質鋼に比べ摩耗重量は小さい。すなわち、硼化処理を施すことにより、摩耗特性の改善が可能であることが認められる。しかしながら、いずれの試験片においても、接触圧力が大きくなるに従い摩耗量は増加する。また、接触圧力が 5.6MPa 以上では硼化処理層の一部が試験中に脱落し、母材が完全に摺動面上に現れることから、摩耗重量は大きく増加する。一方、調質鋼においてはこのような試験条件では、SKD11 鋼と S45C 鋼で異なる摩耗特性を示した。すなわち、前者は非常に大きな摩耗重量を示す。これは、相手摺動材料であるアルミナセラミックスの表面粗さが試験前で中心線平均

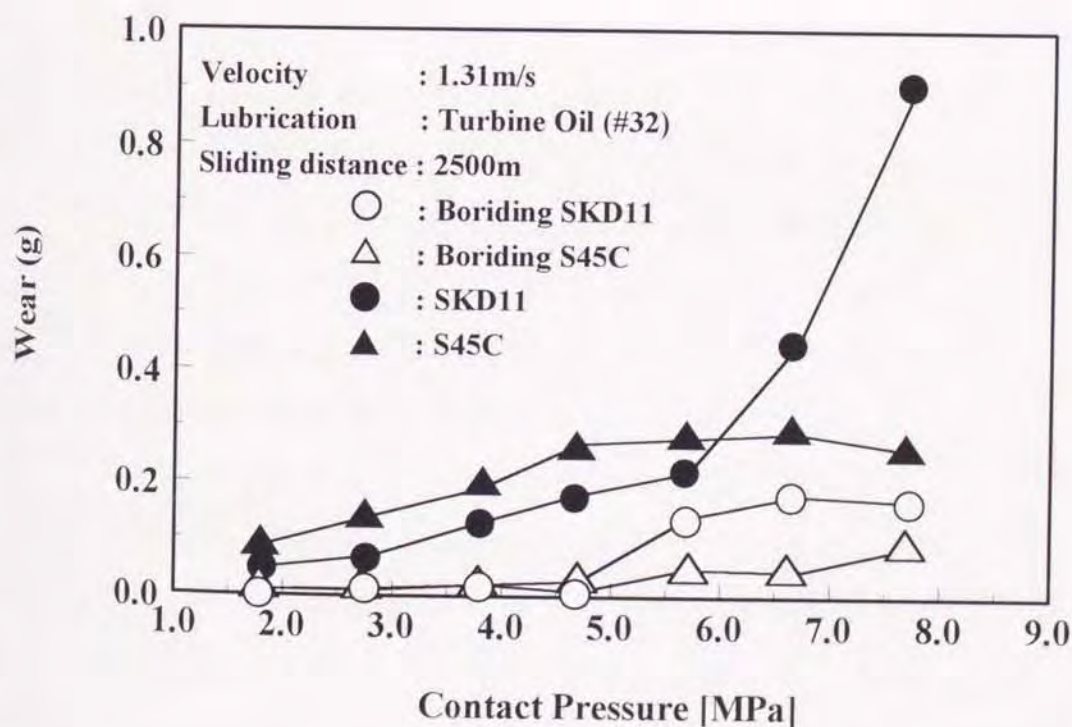


図 3.8 接触圧力と摩耗重量の関係

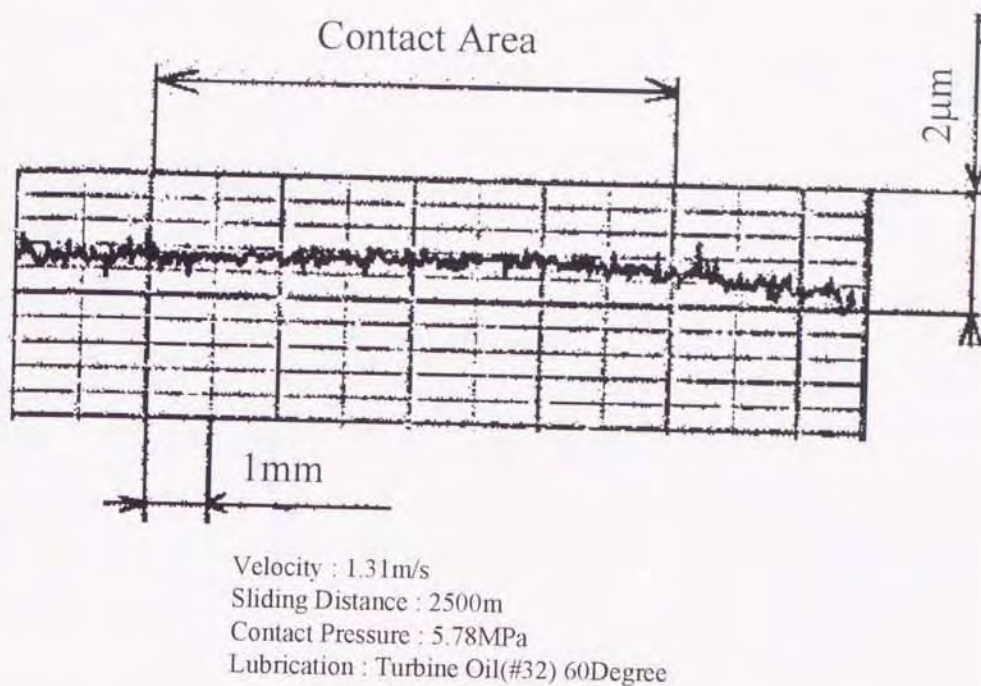


図 3.9 摺動後のセラミクスディスクの表面粗さ

粗さで $0.7 \mu\text{m}$ であったのに対し，試験終了後に於いて，接触圧力が 5.8MPa 以下の場合は，図 3.9 に示すように $0.6 \mu\text{m}$ 以下に減少した．これに対し， 5.8MPa 以上の接触圧力では， $0.8 \mu\text{m}$ 程度に増加した．以上のことから，ピンの摩耗重量の増加は相手摺動面，すなわちアルミナセラミクスディスク摺動面の表面粗さの変化に起因するものと思われる．一方，S45C 鋼は 5.8MPa 以上の接触圧力で，ほぼ同程度の摩耗重量を示す．これは，図 3.10 に示すように S45C 鋼の摺動表面が相手摺動材料であるアルミナセラミクスディスクの摺動面上に移着し，表面突起を覆ったことから非常に平らな面を形成され，良好な潤滑状態を得たためと考えられる．

図 3.11 に摺動速度と摩耗重量の関係を示す．横軸は摺動速度，縦軸は摩耗重量をそれぞれ示す．図より比較的摺動速度が小さい領域，すなわち摺動速度が $0.5 \sim 1.5\text{m/s}$ の場合に摩耗重量は最大値を示すことがわかる．これに対し， 2m/s 以上の摺動速度では摩耗重量は減少傾向を示す．これは図 3.12 から図 3.14 に示すように摺動速度の増加に伴い，ピンの摩耗粉が



図 3.10 実験後のディスク及びピン

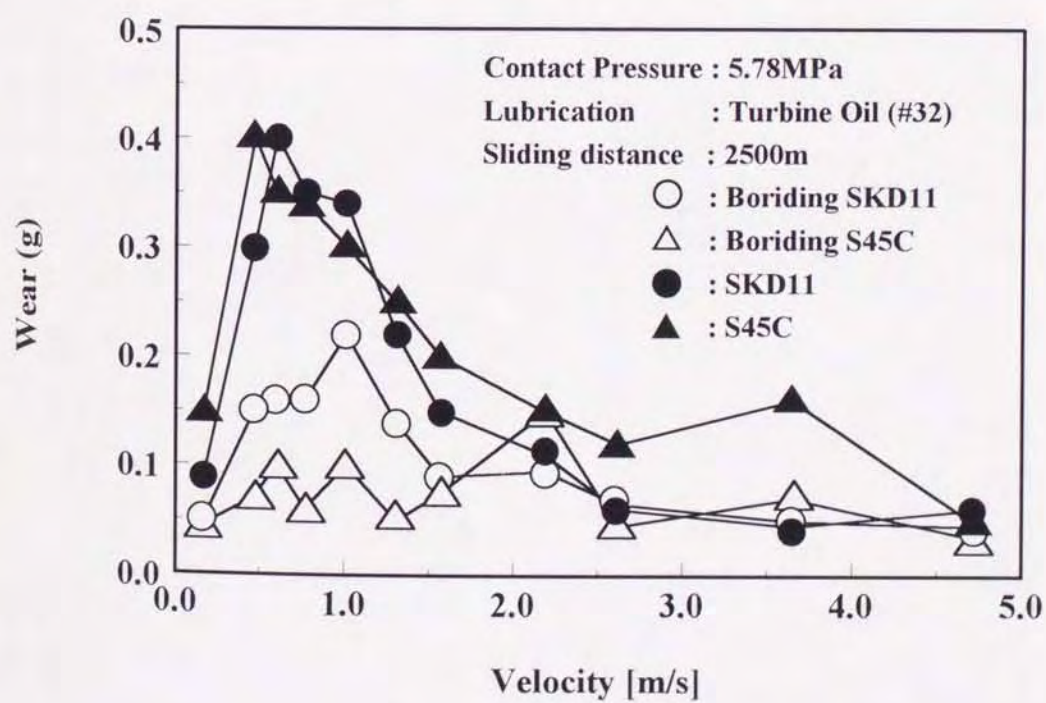


図 3.11 摺動速度と摩耗量の関係

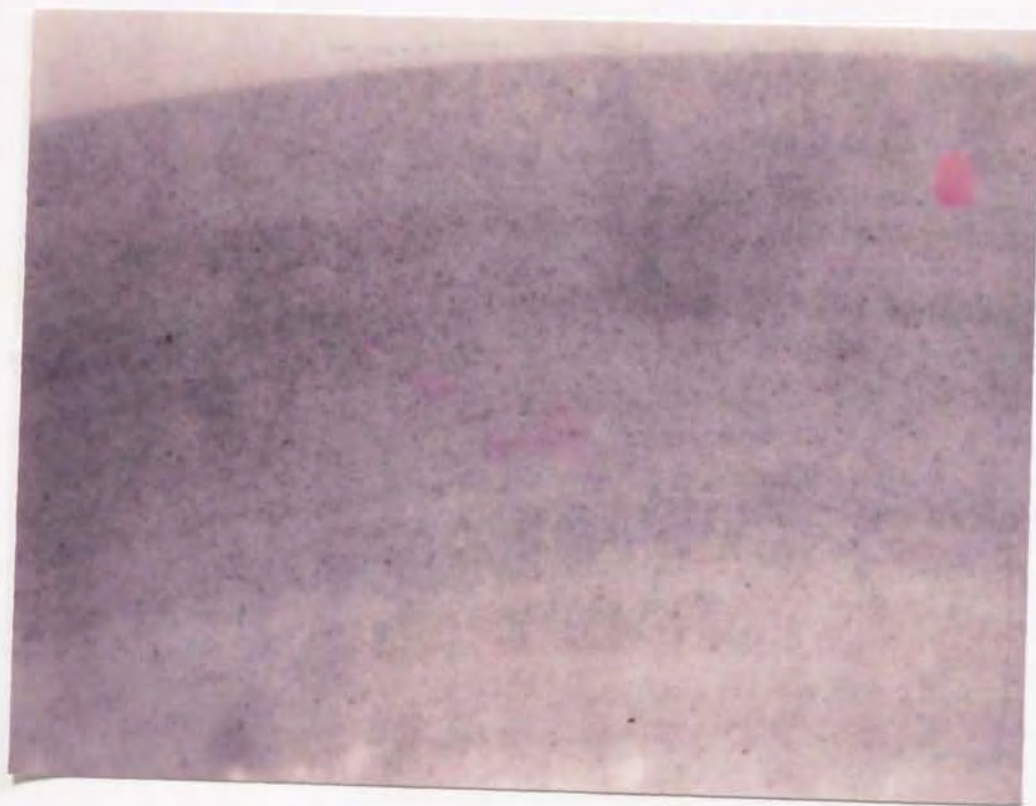


図 3.12 試験後のディスク摺動面 (摺動速度 :0.47m/s 接触圧力 :5.8MPa)

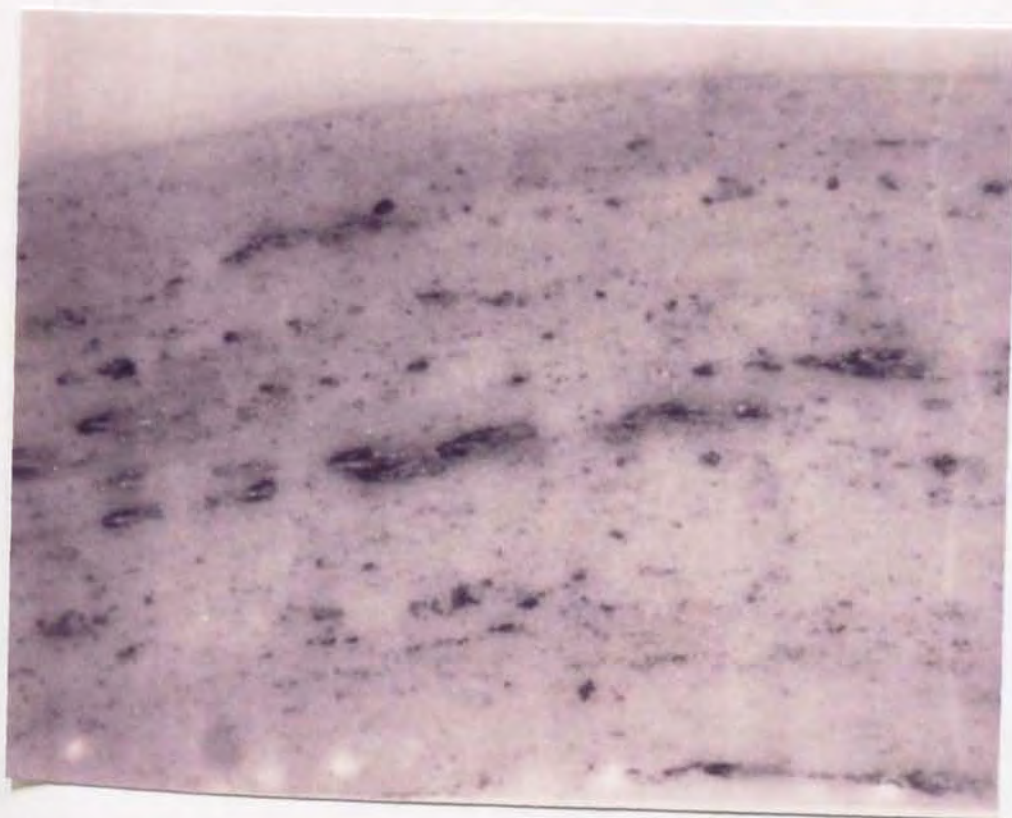


図 3.13 試験後のディスク摺動面 (摺動速度 :1.31m/s 接触圧力 :5.8MPa)



図 3.14 試験後のディスク摺動面 (摺動速度 :4.71m/s 接触圧力 :5.8MPa)

がアルミナセラミクスディスク表面に移着する量が増加し、表面突起を覆うこと、これにより潤滑剤として用いたタービン油による潤滑作用が増大し、境界潤滑状態から完全流体潤滑状態へ移行するためと考えられる。なお、いずれの条件においても硼化処理を施した鋼は調質鋼に比べて摩耗重量は小さく、処理を施すことにより良好なトライボロジー特性が得られる。

図 3.15 に摩耗実験時に発生する AE のパワースペクトルを示す。ピーク周波数は 10KHz および 300KHz であり、前者は摺動音、後者は試験片の破壊音およびき裂の進展時に発生する AE であると考えられる。本研究では 300KHz における AE を測定し、解析した。

図 3.16 は摺動速度 1.57m/s、接触圧力 5.78MPa における摩耗実験時の摩耗量、摩擦係数、AE 出力およびその R.M.S 値の経時的变化を示す。摩耗量の測定結果より摺動距離 250m 程度で初期摩耗から定常摩耗に移行するものと推測される。これにともない、AE 出力は初期摩耗時に 6×10^{-3} V 程度であるが、その後暫時減少する。また、摩擦係数も摺動初期では 0.05 程

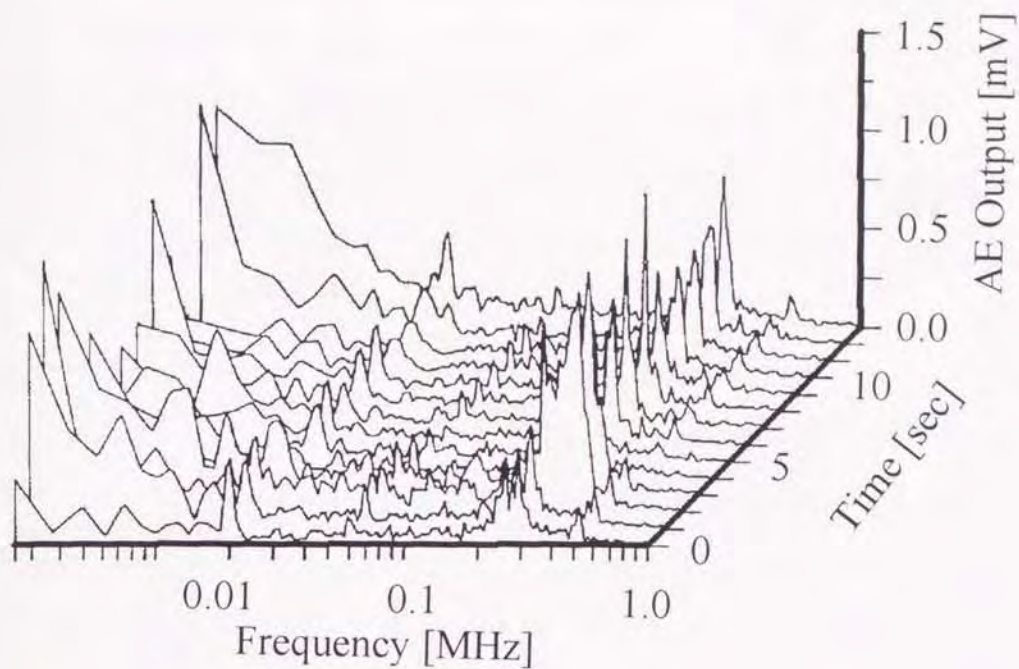


図 3.15 摩耗実験時の AE 信号のパワースペクトル

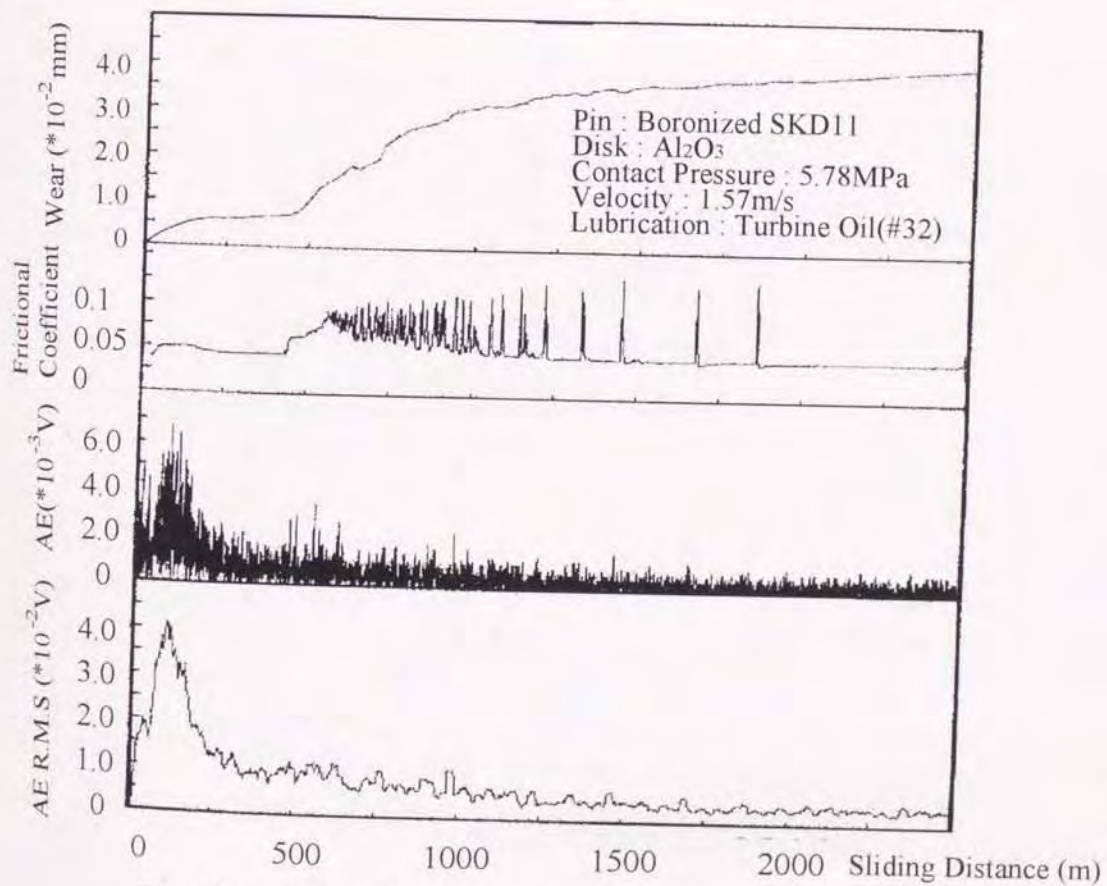


図 3.16 摩耗実験時の摩耗量，摩擦係数および AE

度の値を示すものの、摺動距離の増加に伴い 0.045 に減少する。一方、摺動距離 470m 時において硼化物層が脱落することにより、摩耗量は急激に増加する。同時に摩擦係数は 0.07 程度まで増加し、その後摺動面の摩耗粉の移動に伴い 0.045 ~ 1.2 の範囲内で変化した。これに対し、AE 出力は硼化処理層の完全脱落時に一時的に増加するが、その後は暫時減少する。なお、硼化物層が脱落することによる AE 出力の変化は僅かではあるが摩擦係数の変化よりも早期に現れる。従って、この特性を利用すれば異常摩耗の予知が可能であると考えられる。

図 3.17 に硼化処理した SKD11 鋼の摩耗率と AE の関係を示す。縦軸には得られた AE 出力の R.M.S. 値を、横軸にはピンの摩耗率をそれぞれ示した。なお、AE の R.M.S. 値は試験開始直後の初期摩耗時を除いた試験時間、すなわち摺動距離 300m から 2500m までの測定結果をもとにして算出した。また、摩耗率は 1 分間あたりの差動トランスで測定した試験中のピンの長さの減少量をもとに算出した。AE の発生特性と摩耗率の関係は相関が認められ、緩やかな上に凸の曲線で与えられる。また、図中の表に示す試験

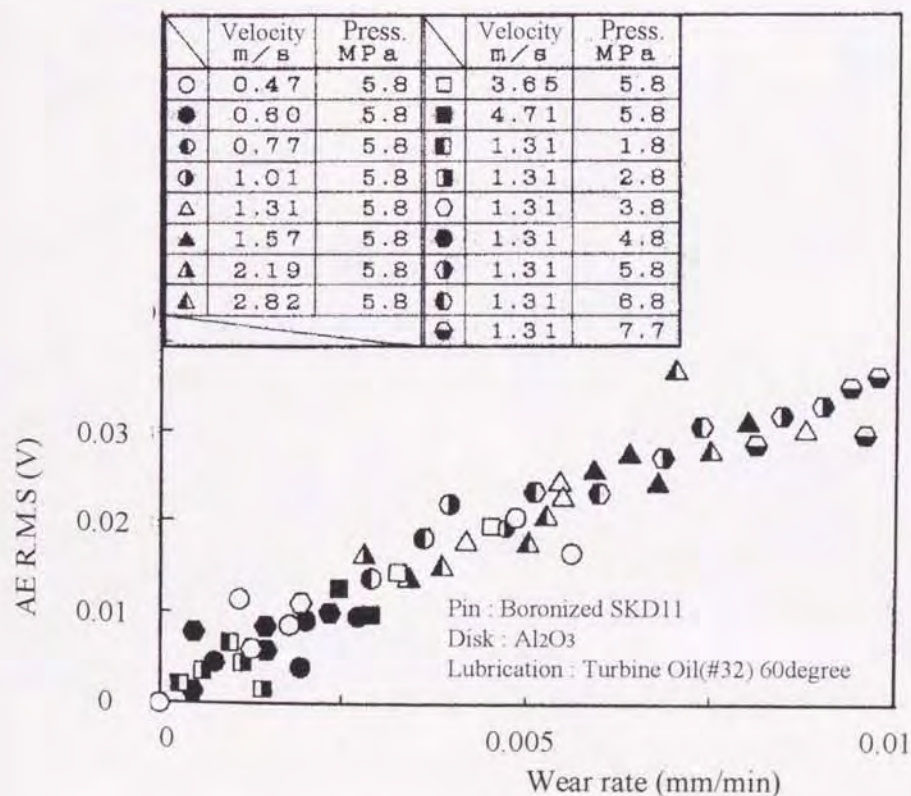
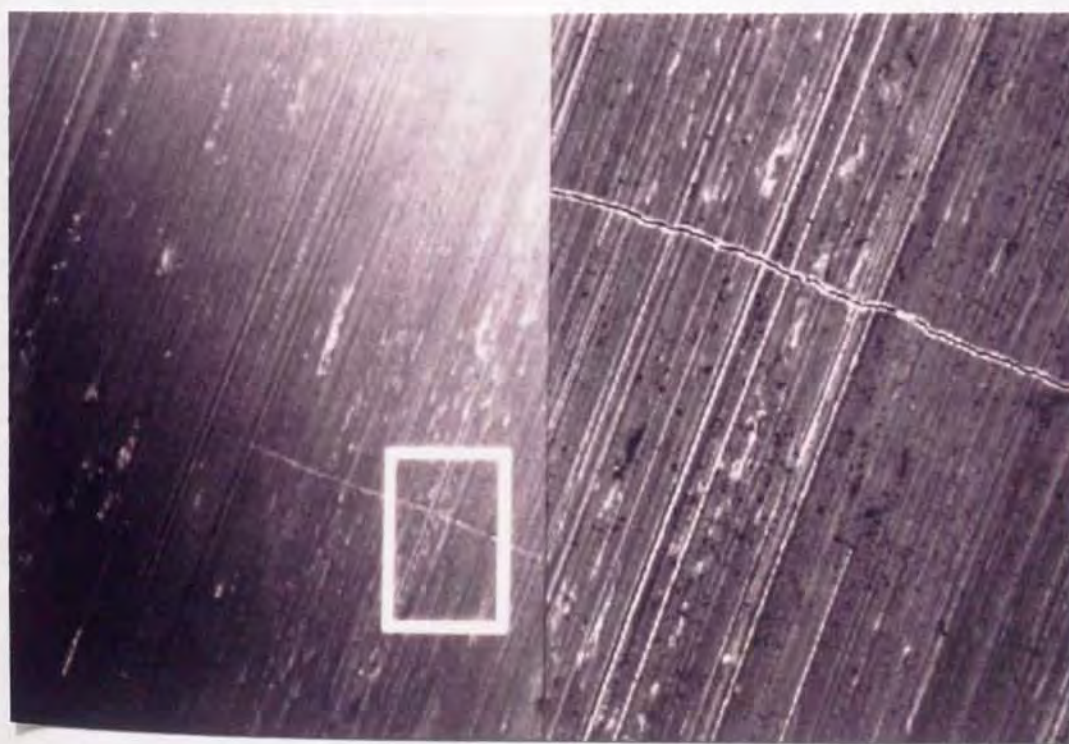


図 3.17 摩耗量と AE 発生特性の関係

条件すべてにおいて、ほぼ同一の曲線で与えられることから、摺動速度や接触圧力等の条件による影響は無視し得ることが解る。

図 3.18 及び図 3.19 に硼化処理した SKD11 鋼の摩耗実験後における摺動面の観察例である。摺動速度 1.57m/s、接触圧力 4.8MPa の条件下で摩耗実験を行っており、摺動距離が 2500m の時の表面を示している。いずれの図も同一箇所の観察結果を示しており、前者は走査型電子顕微鏡、後者は摺動表面から $40\mu\text{m}$ 内部を超音波顕微鏡 (SAM) を用いて観察した結果である。特に図 3.18 において、同図中 (a) の白枠長方形部の拡大写真を同図中 (b) に示した。両図ともに摺動面には、摺動方向に対して垂直方向の直線状のき裂が見受けられる。また、摺動面を超音波顕微鏡で観察した場合には図 3.19 に示す様に表面から $40\mu\text{m}$ 内部で、き裂の近傍に楕円形状の内部き裂が存在し、図 3.18 では見られなかった多数の直線状のき裂が観察された。

図 3.20 も同様に SAM による試験片の観察例を示している。なお、観察



(a) き裂全体

(b) 白枠長方形部の拡大

図 3.18 硼化処理鋼の摺動面の電子顕微鏡写真

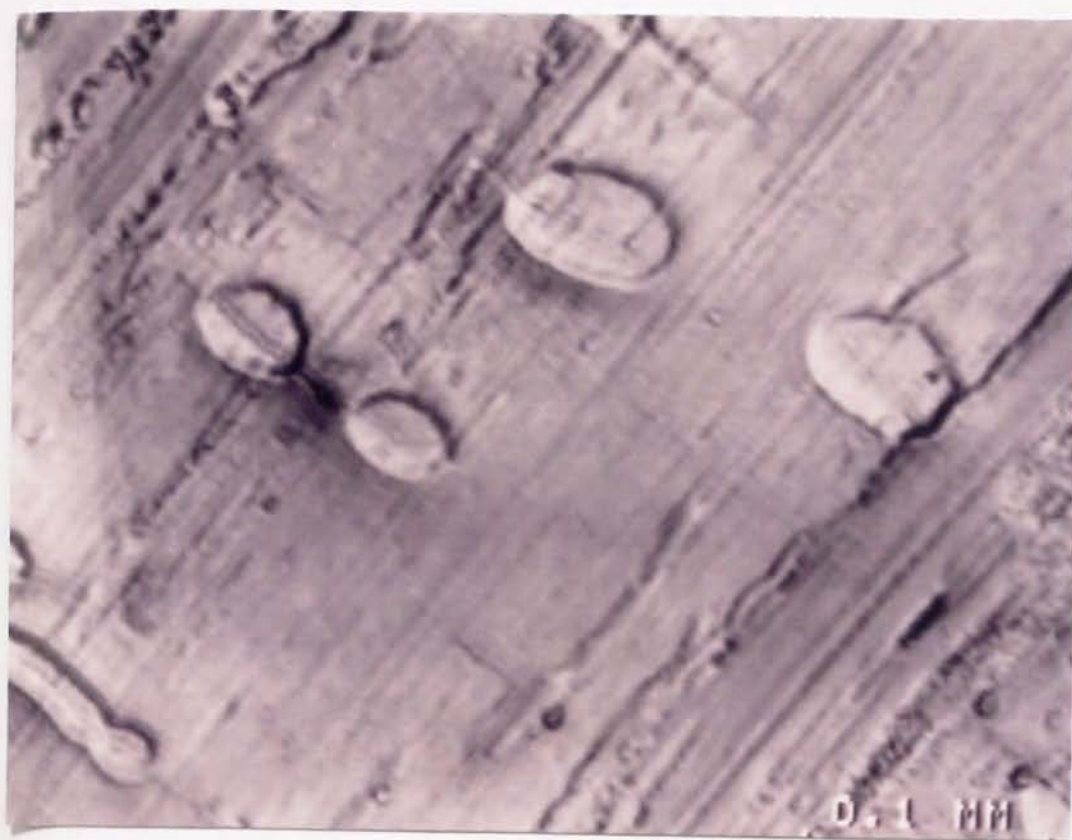


図 3.19 硼化处理鋼の超音波顕微鏡写真

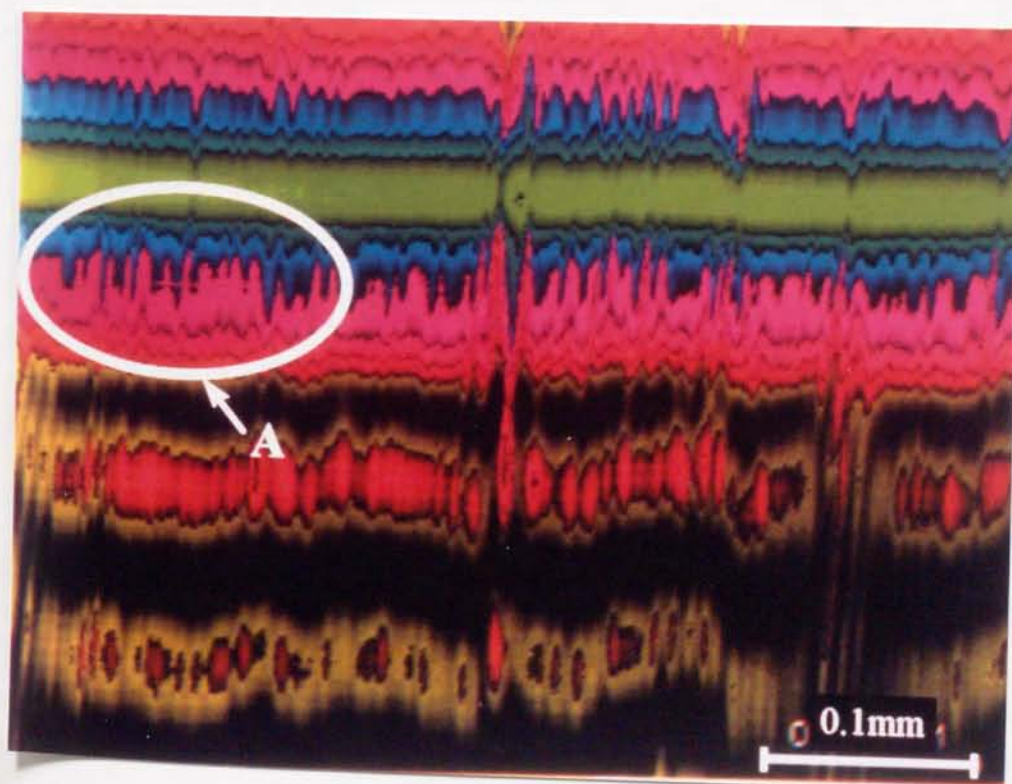


図 3.20 V(z) モードを用いた縦断面の観察例

に際し音響レンズを水平方向、即ち SAM の X 軸方向に 50Hz で走査し、この状態で音波の焦点位置を試験片の表面より $200\ \mu\text{m}$ 内部から試験片表面の $50\ \mu\text{m}$ 上方まで移動した。よって、図は摺動面に対して鉛直方向断面の様子を示しており、図の下端は試験片の $200\ \mu\text{m}$ 内部、上端は試験片表面から $50\ \mu\text{m}$ 上方を示す。図中楕円で囲まれた領域で観察される水平方向の直線は、図 3.19 に示す楕円形状の影に対応する。この直線は母材と表面処理層の境界面の位置とほぼ一致することから、硼化処理層と母材の剥離を示すものと考えられる。

図 3.18、図 3.19 および図 3.20 の観察結果より、硼化物層の脱落過程を図 3.21 のように推測した。すなわち、図 3.21(a) のように硼化物層の厚さは均一でなく、同図中 (b) のように摺動中に硼化物層の薄い部分で母材との界面に直線状のき裂を生ずると考えられる。その後、このき裂が成長し摺動面まで進展し、さらに、同図中 (c) のように硼化物層と母材の境界に内部き裂が進展する。この内部き裂が図 3.19 の楕円形状のき裂であり、このき裂が成長することによって同図中 (d) のように硼化物層が脱落すると予想される。このような母材と硼化物層の境界部でのき裂発生や進展は、両者の熱膨張係数の差異や硼化物層生成時の残留応力等に起因するものと考えられる。なお、ここで示した表面および内部でのき裂進展時に放出された AE を検出するため、前述の図 3.16 における AE 発生特性の変化が摩擦係数の変化よりも先に生じたものと考えられる。

図 3.22 に SKD11 材、S45C 材の硼化処理鋼ならびに両者の調質鋼の摩耗率と AE 発生量の関係を示す。縦軸には AE 発生量の R.M.S. 値を、横軸には摩耗率をそれぞれ示した。両者の関係は全て上に凸の曲線として得られ、かつ、この曲線は材質及びその硼化処理の有無によりそれぞれ異なる特性を示す。すなわち、同一の AE 発生量に対して SKD11 材の硼化処理鋼、S45C 材の硼化処理鋼、SKD11 材の調質鋼及び S45C 材の調質鋼の順で摩耗率が大きくなる。なお、S45C 材及び SKD11 材の調質鋼における AE の発生は、アブレッシブ摩耗に伴う摺動表面の塑性変形に起因するものと考えられる。一方、硼化処理鋼において SKD11 材と S45C 材で AE 発生特性に差が生じた理由としては図 3.5 及び図 3.6 に示すように S45C 材と SKD11 材で硼

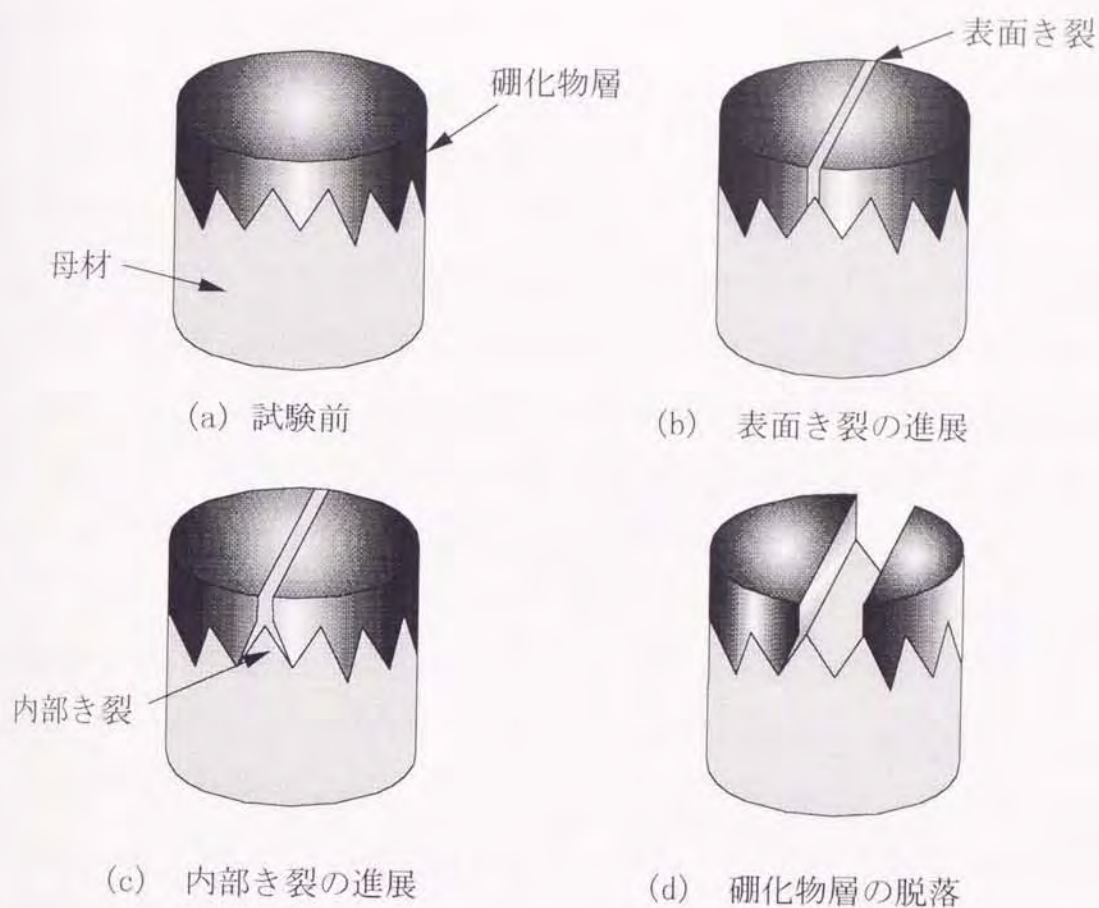


図 3.21 硼化物層の剥離過程

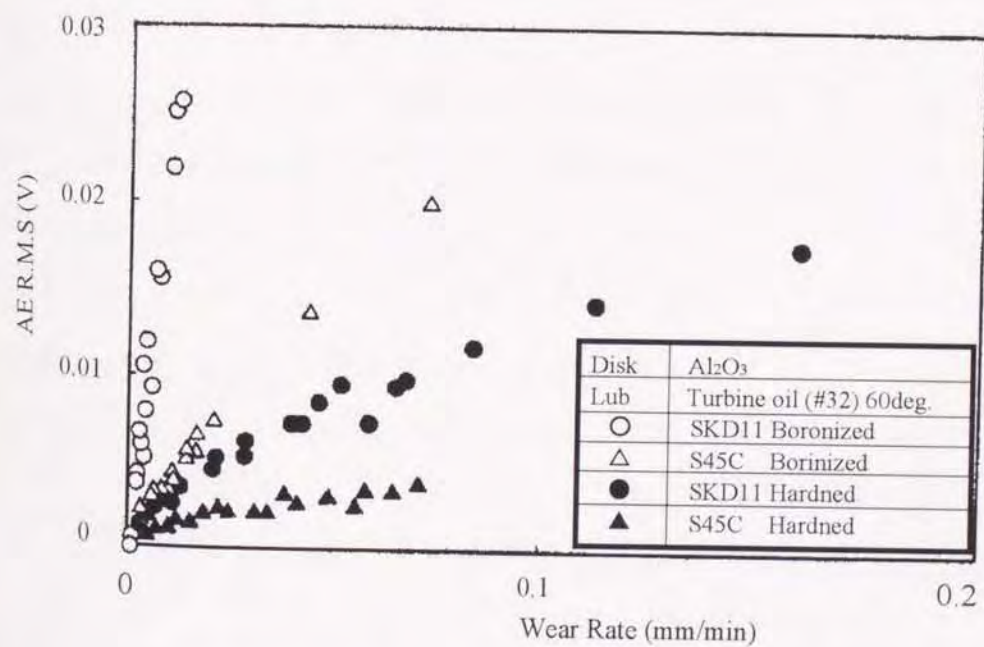


図 3.22 各種試験片の摩耗率と AE 発生特性の関係

化処理層と母材の境界部の形状が大きく異なっており、この形状の差に起因するものと考えられる。これらのことから、摩耗率と AE の発生特性の関係を決定する大きな要因は摺動面の材質であり、摺動速度や接触圧力等の条件はほとんど無視し得ることがわかる。

図 3.23 に硼化処理鋼及び調質鋼のスクラッチ試験時の AE 発生特性を示す。硼化処理した SKD11 鋼は 20N 程度の押し付け荷重で AE 信号の放出量が増加した。また、S45C 材の硼化処理鋼は 15N 程度で AE 信号を放出するが、その発生量は SKD11 鋼の場合よりも小さい。これに対して、調質処理した SKD11 鋼及び S45C 鋼の AE は、ほとんど検出されなかった。このようにスクラッチ試験に発生する AE 信号の特性は図 3.22 に示す摩耗率と AE 放出量の関係と同様な傾向を示しており、摩耗実験時の AE 信号の多くはアブレッシブ摩耗によりき裂が進展したり、接触表面が損傷することによって発生するものと思われる。

図 3.24 は摺動速度 1.31m/s、接触圧力 4.78MPa で SKD11 材の硼化処理鋼を摩耗試験した場合の摺動距離と摺動表面の音速の関係を示す。なお、音速の測定は超音波顕微鏡を用いて $V(z)$ 曲線を求め、さらにこれを FFT 解析することにより求めた。超音波顕微鏡を利用した音速測定は、測定対象エリアが極めて小さく、測定対象材料が金属のように多結晶組織を有する場合、その結晶粒ごとに方位や音速にばらつきを生じやすい。すなわち、測定位置が僅かに変わるだけで、音速が数 m 程度変化することから、測定の再現性や信頼性に問題がある。よって、本研究では、摩耗試験を行う前に予め測定対象位置の四方に 5mm 間隔でマイクロビッカース計測器を用いて圧痕を作り、これをもとに測定位置を正確に再現した。なお、得られた音速は横波の音速であり、測定に際し球面レンズを用いたことから摺動方向及びそれに垂直方向の平均値である。図より摺動距離の増加に従い、音速は減少傾向を示すことが解る。横波の平均速度の変化を利用する音弾性法則は式 (2.71) で与えられており、硼化処理層の音弾性係数 C_T は $-3.83 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ である⁽¹⁴⁷⁾。この値を適用すれば、摺動距離の増加に伴い SKD11 材の硼化処理鋼の摺動表面に作用する引張応力は増加し、2500m 摺動時において 70KPa 程度の引張の残留応力が作用していることが推測される。

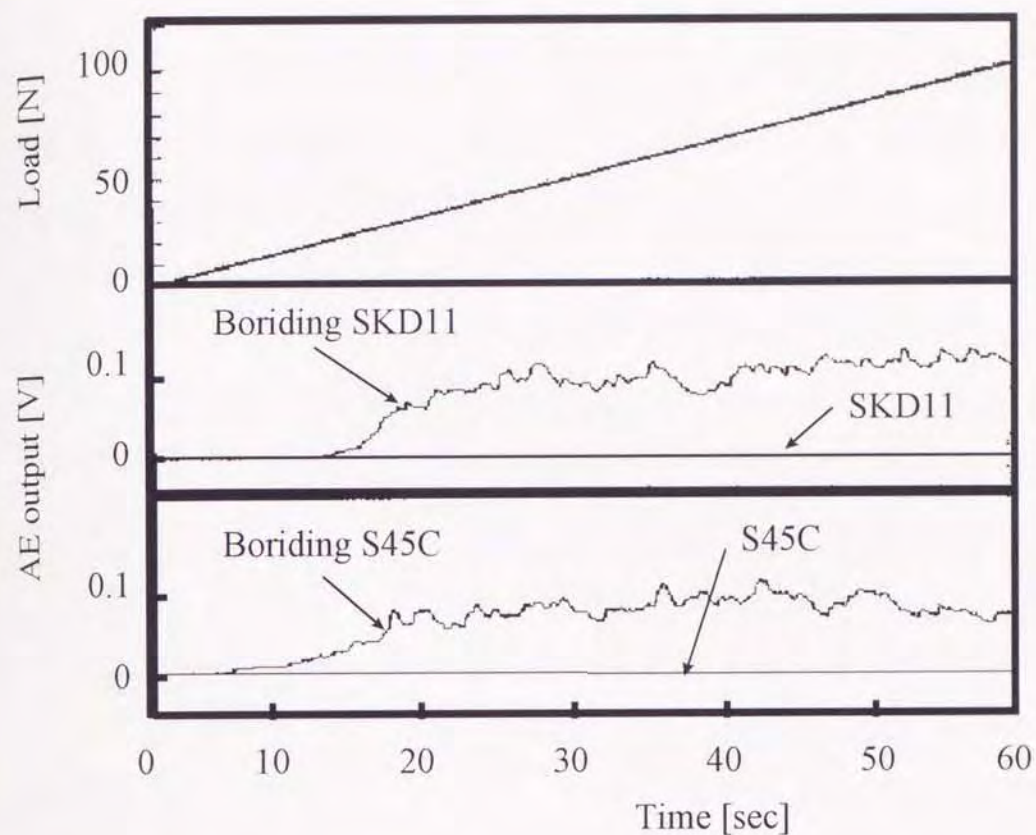


図 3.23 スクラッチ試験における AE 発生特性

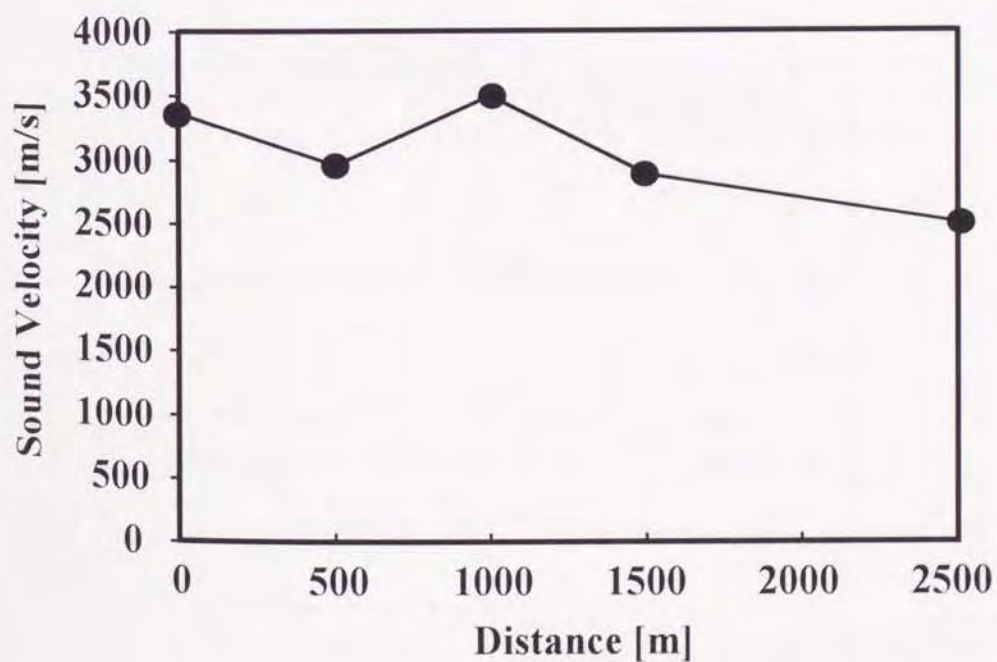


図 3.24 摺動距離と音速変化の関係

3.2.2 焼き付き性実験と AE 発生特性

図 3.25 は焼き付き性実験において発生した AE の一例である。横軸は摺動距離を縦軸には AE の発生量、押し付け荷重、ピンの長さの減少量および摩擦係数をそれぞれ示している。なお、この場合のピンの押し付け力の増加率は 1.96N/m 、摺動速度は 0.79m/s であり、潤滑剤としてタービン油 (#32) を使用した。なお、タービン油は 60°C に加熱した後に 200cc/min で摺動面に滴下した。試験初期において、AE 発生量は押し付け荷重と共に増加する。一方、荷重および摩耗量が共に単調に増加するが試験開始 6 分後で AE 発生量は減少する。図 3.26 から図 3.28 はこの時の摺動表面の観察結果を示している。図 3.28 に示すように硼化物層の一部が欠落し、同一摩耗量に対する AE 発生量の小さい SKD11 鋼が接触表面に現れたため、試験開始 6 分後で AE 発生量が減少したものと考えられる。一方、摩擦係数は硼化物層が完全に脱落する試験開始 11 分後から急激に増加する他は、単調

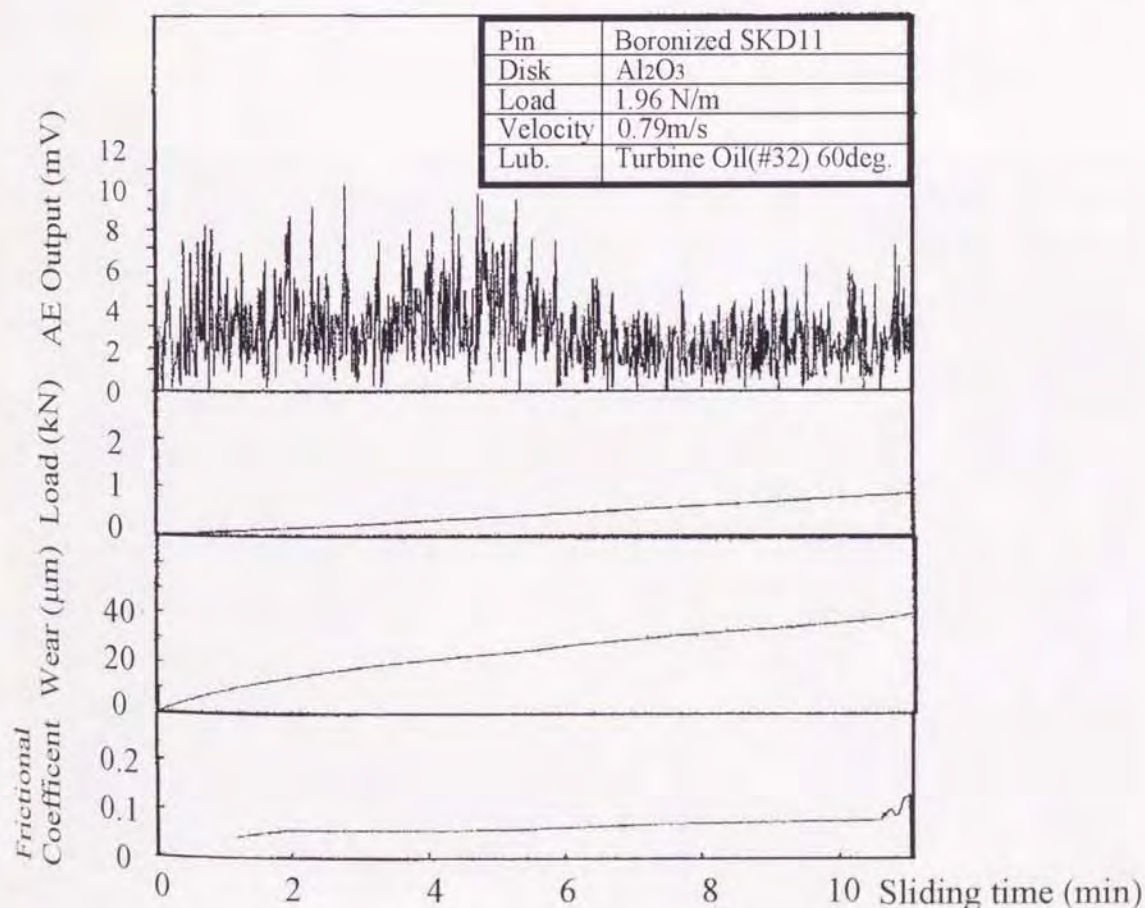


図 3.25 焼き付き性実験時の AE 発生特性の一例

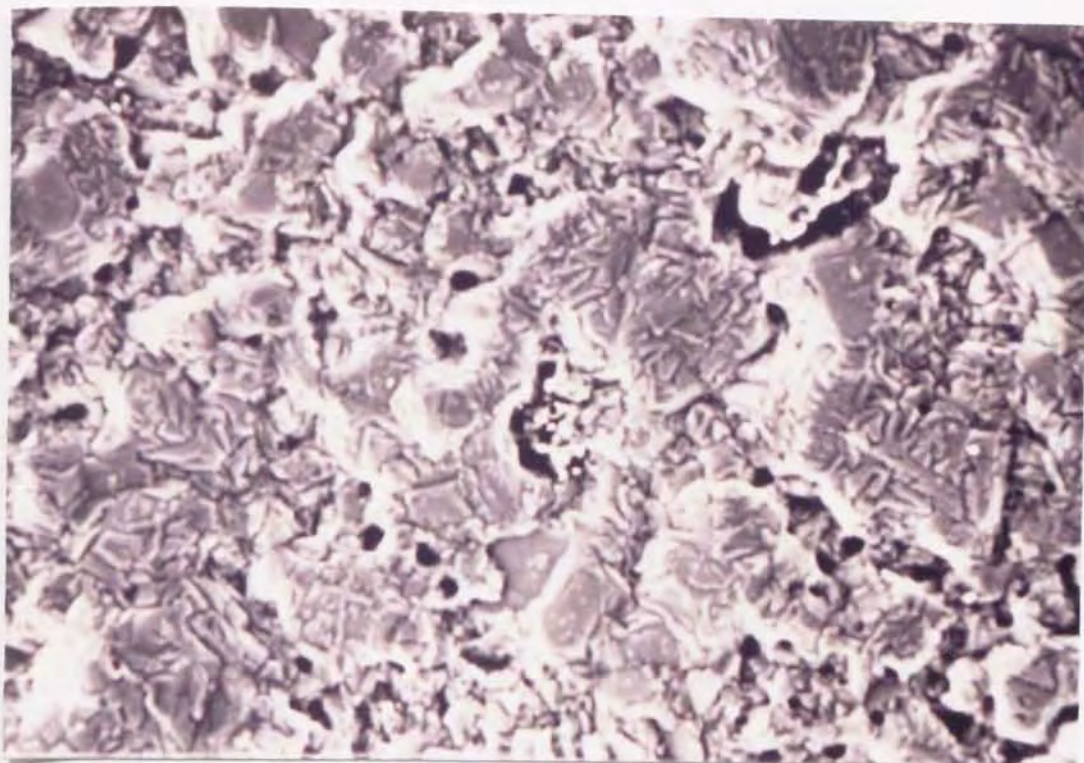


図 3.26 試験前の硼化处理鋼接触表面

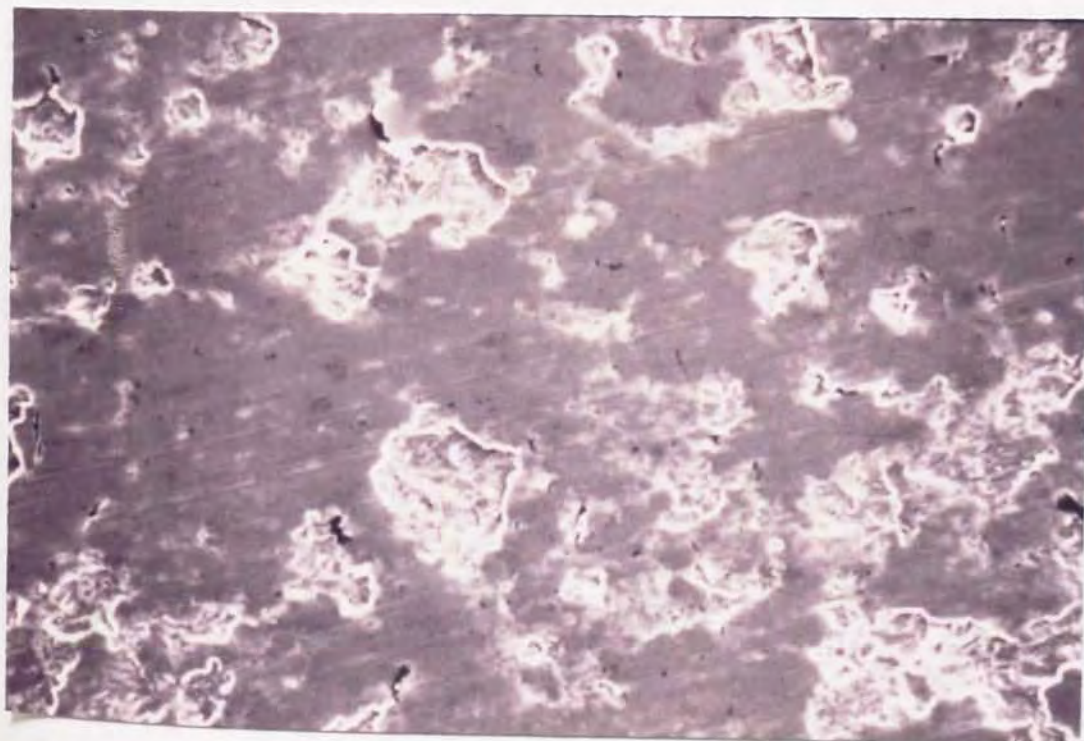


図 3.27 試験開始 6 分後の硼化处理鋼接触表面



図 3.28 試験開始 11 分後の硼化处理鋼接触表面

に増加傾向を示す他はほとんど変化は見受けられない。

押し付け荷重の増加過程において、摩擦係数が急激に増加する臨界荷重値、および AE 信号放出量が減少する臨界荷重値と摺動速度の関係を図 3.29 及び図 3.30 に示す。図 3.29 は SKD11 鋼の硼化处理鋼及び調質鋼、図 3.30 は S45C 鋼の場合の結果であり、横軸と縦軸は摺動速度および臨界荷重値をそれぞれ示している。いずれの場合も摺動速度の増加にともない臨界荷重は減少傾向を示し、摩耗量が増加していることを示している。これは、摩耗実験の場合より接触圧力が大きいこと、さらには遠心力により滴下された潤滑油が速やかに摺動面から排除され、摺動面は乾燥面の状態に近いためと考えられる。このことから、焼き付き性実験では境界潤滑等、過酷な条件下でのトライボロジー特性の評価を行っているものと考えられる。一方、摩擦係数の変化より求めた臨界荷重値は AE 信号の発生特性より求めた値よりも大きい。これは、接触表面に硼化物層が局部的に存在すれば低摩擦係数値が保持されるためである。

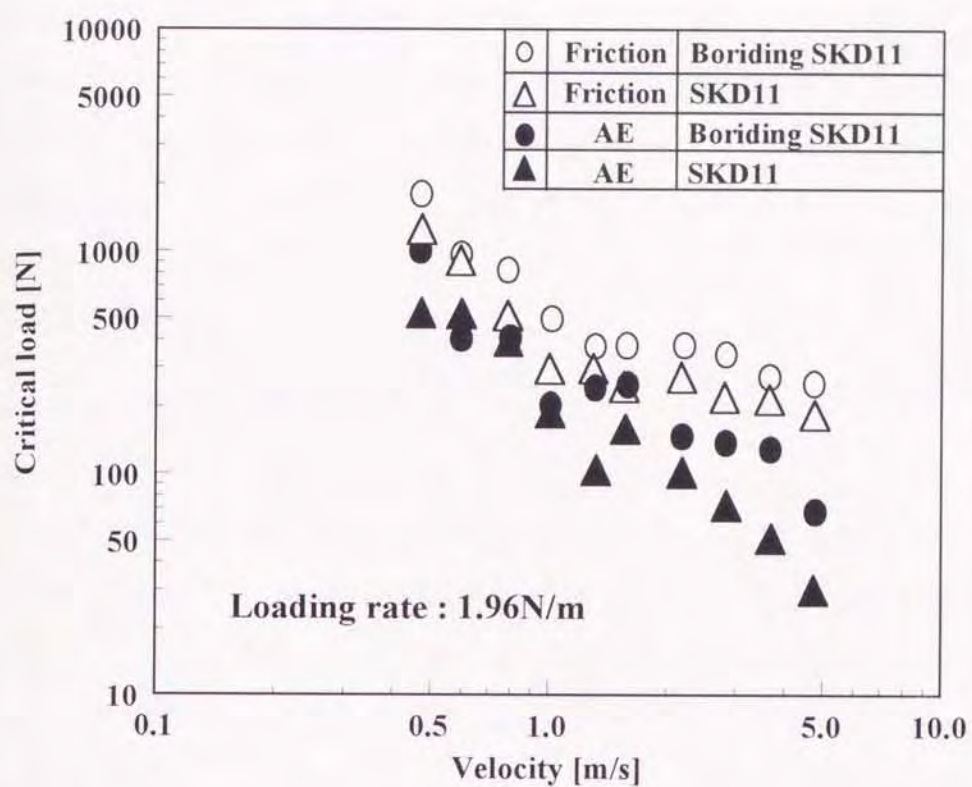


図 3.29 焼き付き性実験結果 (SKD11 鋼)

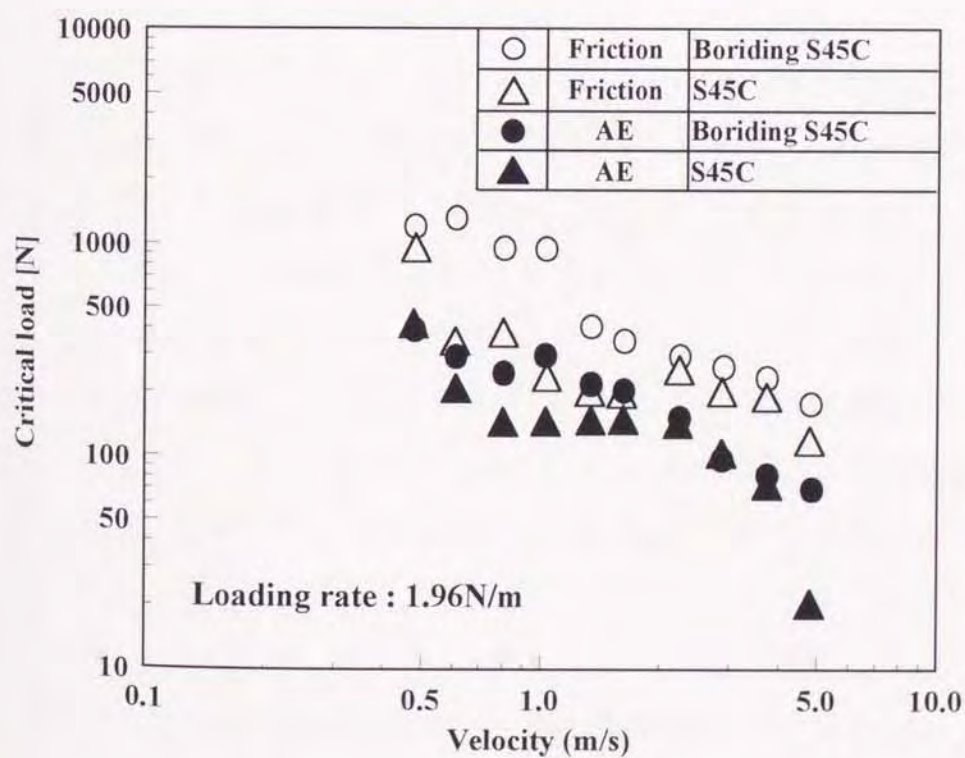


図 3.30 焼き付き性実験結果 (S45C 鋼)

これらのことから、摩耗実験及び焼き付き性実験時の AE 信号測定は単に硼化物層が存在するか否かを把握するのみならず、硼化物層のき裂進展状態や脱落過程を摩擦係数の変化を利用する場合よりも感度良く調べることが可能であり、さらには早期に異常摩耗を予知する上でも極めて有効である。

第 3.3 節 TiN 薄膜の付着力評価

CVD 法は化学蒸着法と言われる気相コーティング法の中の一つである。炉内の加熱された基板すなわち処理品に被覆の成分を含む原料の混合ガスを接触させ、気相反応によって表面に金属、合金、炭化物、窒化物、硼化物及びけい化物など多様な皮膜を生成させる蒸着法である。量産が可能であり応用範囲も広く、機械工業、エレクトロニクス、原子力、宇宙開発、光学及び医療材料などに応用されている。CVD 法は反応系では Hot Wall 方式と Cold Wall 方式に分けられる。また、反応を進行させる手段としては、熱 CVD 法、レーザー CVD 法及びプラズマ CVD 法が一般的に利用されつつある。この中でプラズマ CVD 法は、非平衡プラズマ中で気体分子を反応させ、処理品、すなわち基板上に新しい固体の皮膜を析出させる方法である。すなわち、CVD 法及び PVD 法の 2 つの手法を合わせた技術であり、CVD 法では一般に処理温度が高く 600 ~ 1800 °C 程度まで加熱が必要とするのに対し、プラズマ CVD 法では処理温度を低くすることが可能であり、25 °C ~ 1000 °C での蒸着が可能である。よって、反応熱が基板に及ぼす影響が軽減されることから、プラズマ CVD 法独自の皮膜形成技術分野への進出が期待されている。プラズマ CVD 法には直流グロー放電 CVD 法、高周波放電 CVD 法及びマイクロ波放電 CVD 法等が一般的であるものの、さらに近年熱フィラメント CVD 法、高周波プラズマ CVD 法、マイクロ波 CVD 法及びレーザー励起法等の方法が実用化されている。また、蒸着時に用いる原料ガスの成分を蒸着開始時と終了時で変えることにより、薄膜の表面と内部の特性を変化させることが可能である。このような手法で、傾斜皮膜を基板に蒸着し、例えば基板との親和性を確保しつつ摩耗特性をさら

に改善する等の研究例が示されている。

この様な蒸着膜を金型や切削工具等に用いた場合、その機械的特性等を十分に把握することは合理的な設計を行う上で重要である。この中で、薄膜の付着力を含むトライボロジー特性を把握するために、現在、微小硬さ及び極微小硬さ等の硬さ試験、スクラッチ試験及び摩耗試験が一般的に行われている。この中で、スクラッチ試験はダイヤモンドやサファイヤの様な硬いライダーで薄膜を引っかけて摩擦力や摩耗痕の形状等を計測し、薄膜の引っかかり硬さ、せん断強度及び付着力を調べるもので以下に示す方法が利用されている。

- (a) 一定荷重で引っかけて、摩擦痕の幅や摩擦力などを測定する方法
- (b) 連続的に荷重を増加しながら引っかけて、薄膜が損傷する様子や剥離破壊する臨界荷重を測定する方法
- (c) 先端に硬い圧子を装着した振り子を任意の高さから自由運動させて試料の表面を引っかかり、延性から脆性への遷移の様子や薄膜の変形抵抗を測定する方法

これらの方法は、いずれも試験材料の表面が平らであれば、小さくても任意の形状で測定が可能である。特に (b) による方法は臨界荷重を測定することから薄膜の付着力を評価可能である。すなわち、得られた臨界荷重に次式を適用することにより、付着力を求めることが出来る。

$$F_c = k \sqrt{\frac{W_c H}{\pi R^2}}$$

ここで、 F_c は薄膜と基板との付着力、 H は塑性変形により生じた基板の静水圧、 W_c は薄膜の破壊限界荷重、 R はライダー先端の半径を示す。なお、 k は解析モデルと実際の状態とを補正するための係数であり、通常 $0.2 < k < 1$ の範囲とされる。しかしながら、薄膜及び基板の受ける圧力分布や薄膜の破壊の様式は単純ではない。また、圧子はその形状故、非常に狭い面積の付着力をその測定対象とする。薄膜の付着力はその形成過程より、蒸着面全体で均一な付着力を得ることは困難である。よって、この様な方法で得られる付着力は実際のそれと異なる場合が考えられる。

本節では、AEセンサーを設置したピン-オン-ディスク型摩耗試験機

を利用して、高周波プラズマ CVD 法で蒸着した TiN 薄膜の摩耗特性を明らかにする。さらに、本装置を利用した付着力評価法を提案するとともに、本測定法の実用性を検討する。さらに、数種の条件で薄膜を蒸着し異なる特性を有する薄膜を生成し、蒸着処理条件と薄膜のトライボロジー特性の関係を明らかにする。

3.3.1 試験片と実験方法

図 3.31 は、ピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用いて摩耗試験した際に使用したピンおよびディスク試験片の形状をそれぞれ示す。ディスクの材料は表 3.4 に示す特性を有するアルミナセラミクスを用いた。接触表面を研削およびラップ加工し、中心線平均粗さ R_a で $0.7 \mu\text{m}$ の均一な表面粗さを得た。ピンは SKD11 鋼及び SKH51 鋼を機械加工し、図 3.32 及び図 3.33 に示す熱処理を行った。その後、接触表面をエメリー紙 (#1500) およびバフで研磨し、中心線平均粗さ R_a で $0.03 \mu\text{m}$ の鏡面状態を得た。さら

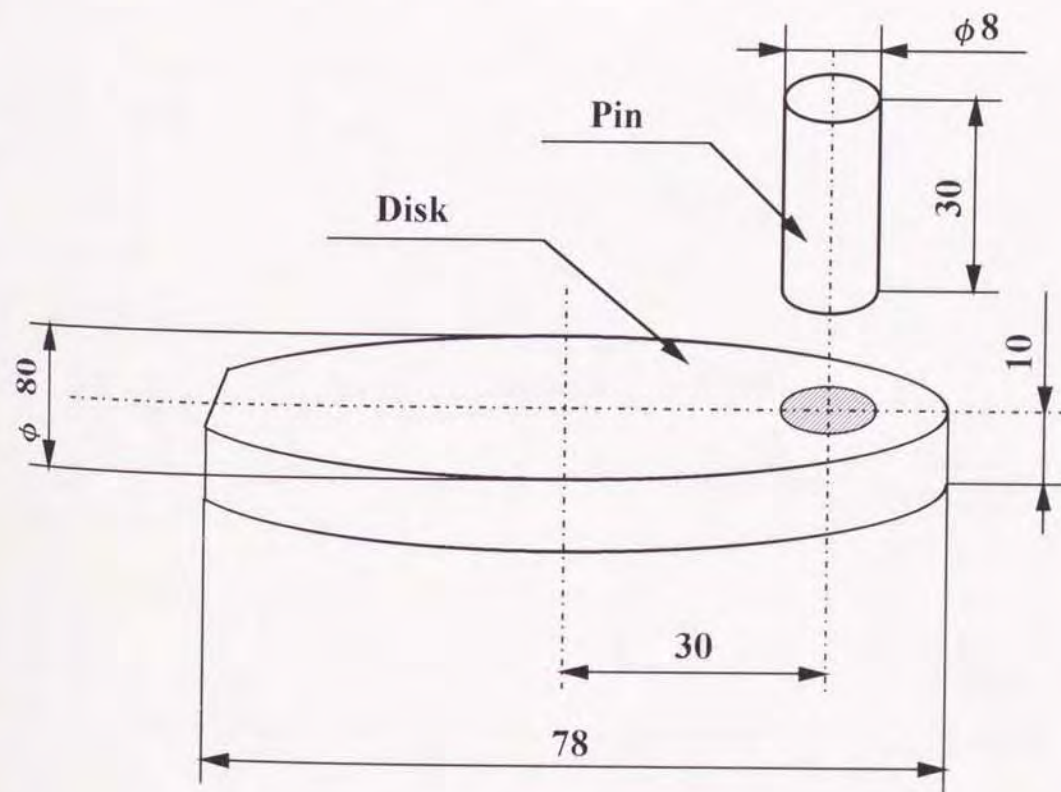


図 3.31 試験片の形状

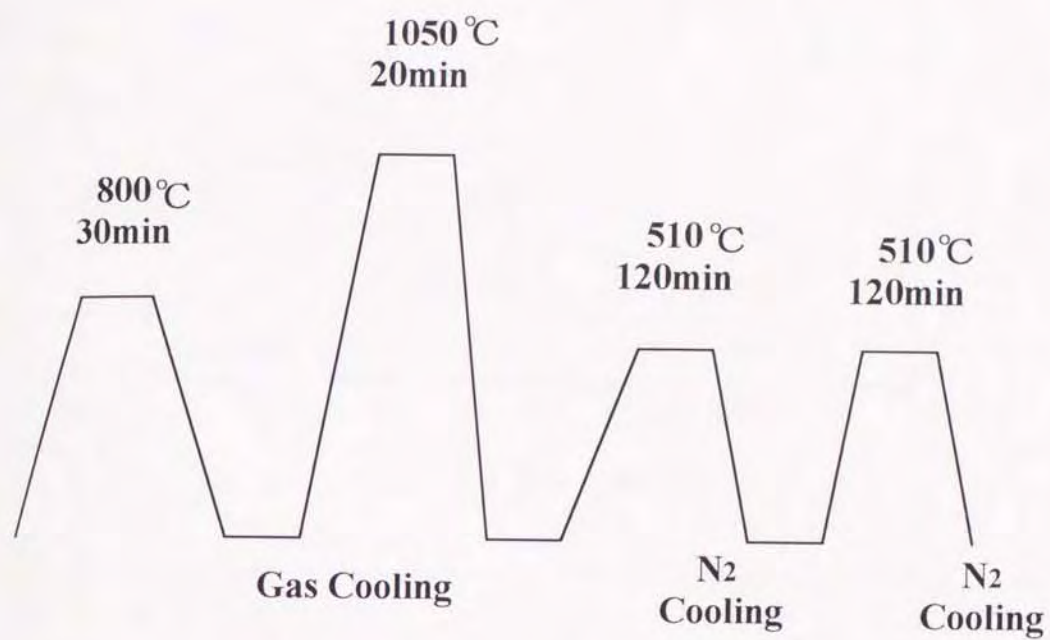


図 3.32 SKD11 試験片の熱処理履歴

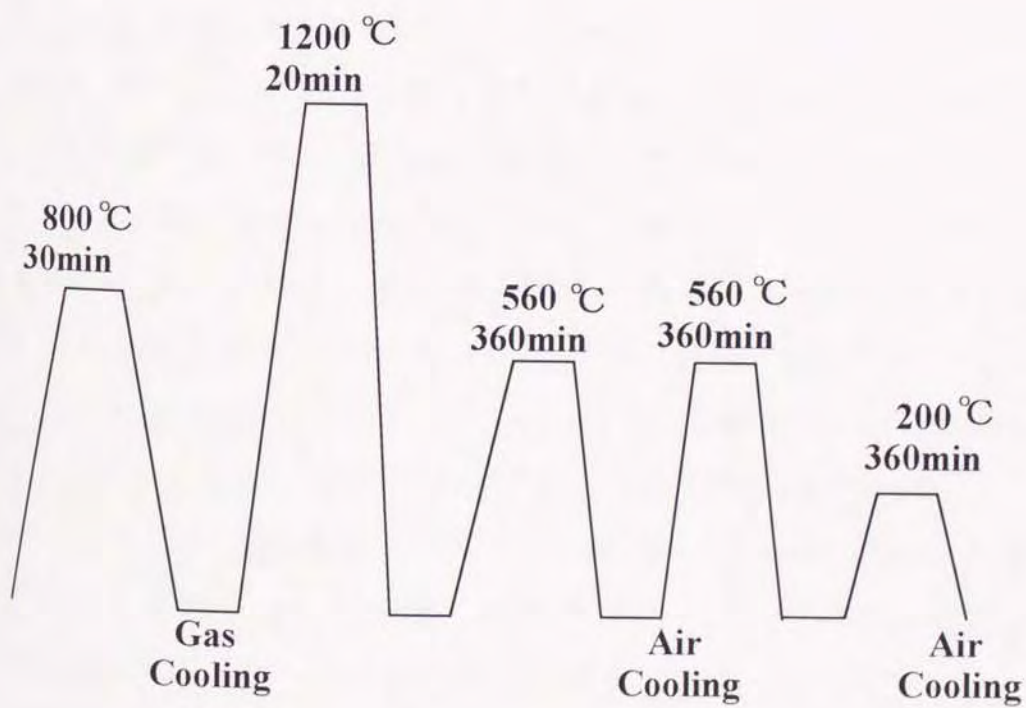


図 3.33 SKH51 試験片の熱処理履歴

表 3.4 アルミナセラミクス材の物理特性

Al ₂ O ₃ content rate	99.5
Density (g/cm ³)	3.90
Suction rate (%)	< 0.01
Bending strength(MPa)	343
Compressive strength(MPa)	3430
Young's modules(MPa)	35280
Hardness [Hv]	1600

表 3.5 TiN 薄膜の物理特性

Density (g/cm ³)	5.44
Melting point (°C)	2900 ~ 3220
Resistance (μΩ·cm)	22 ~ 130
Young's modules (MPa)	249900

に、アセトンによる 5 分間の超音波洗浄を 3 回行い、十分に脱脂した後に図 3.34 に示すプラズマ CVD 装置 (神港精機 ACV660Q) を用いて表 3.5 に示す TiN 薄膜を生成した。ここではピンをプラズマ CVD 装置のチャンバーに入れた後、 10^{-4} Torr 程度まで排気しアルゴンガスボンバート処理を行って表面を洗浄した。この後、再びチャンバー内を 3×10^{-4} Torr まで排気した。水素ガスでバブリングした塩化チタン ($11.3\text{cm}^3/\text{min}$) 及び窒素 ($100\text{cm}^3/\text{min}$) を予め混合し、反応ガスをチャンバー内に供給した。反応時のピンの温度を 500°C とし、バイアス効果を得るためにチャンバーとピンの間にサブ RF パワーを、また電極とチャンバーの間に 13.56MHz のメイン RF パワーをそれぞれ印加した。本研究ではサブ RF パワーを 200V に固定し、 $0.5 \sim 3\text{KW}$ の範囲でメイン RF パワーの設定値を変えることによりそれぞれ特性の異なる厚さ $5\mu\text{m}$ の薄膜を生成した。この時、チャンバー内の反応は以下の通りである。

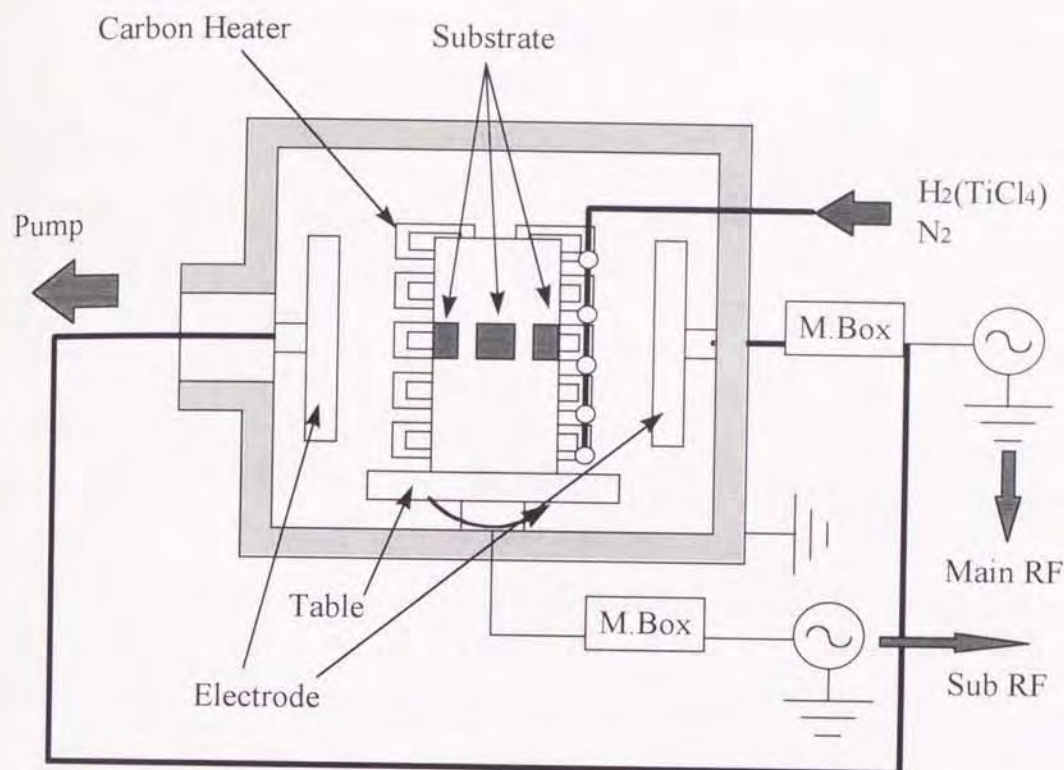
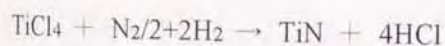


図 3.34 プラズマ CVD 装置概略



なお、簡単のために以後においては、メイン RF パワーを高周波電力、SKD11 鋼と SKH51 鋼に TiN を蒸着した試験片を TiN/SKD11 と TiN/SKH51 によってそれぞれ表示する。

図 3.35 にピンの成膜条件と表面硬度の関係を示す。表面硬度は押付け荷重 0.29N を 20 秒間保持して作成した圧痕をマイクロピッカース硬度計により測定した。0.5KW の高周波電力では TiN/SKD11 で Hv1209, TiN/SKH51 で Hv1485 と低い値を示すが、TiN/SKD11 は高周波電力が増加するとともに硬度は増加する。一方、TiN/SKH51 も高周波電力の増加とともに硬度は増加するものの 2.0KW で最大値を示し、それ以上の高周波電力では減少傾向を示す。しかしながら、2.5KW 以上の高周波電力で両者共に Hv1800 程度の表面硬度を得る。

図 3.36 にスクラッチ試験の結果を示す。試験は先端半径 0.2mm のダイヤモンド圧子を使用し、100N/min で荷重を増加しながら 10mm/min の速度で圧

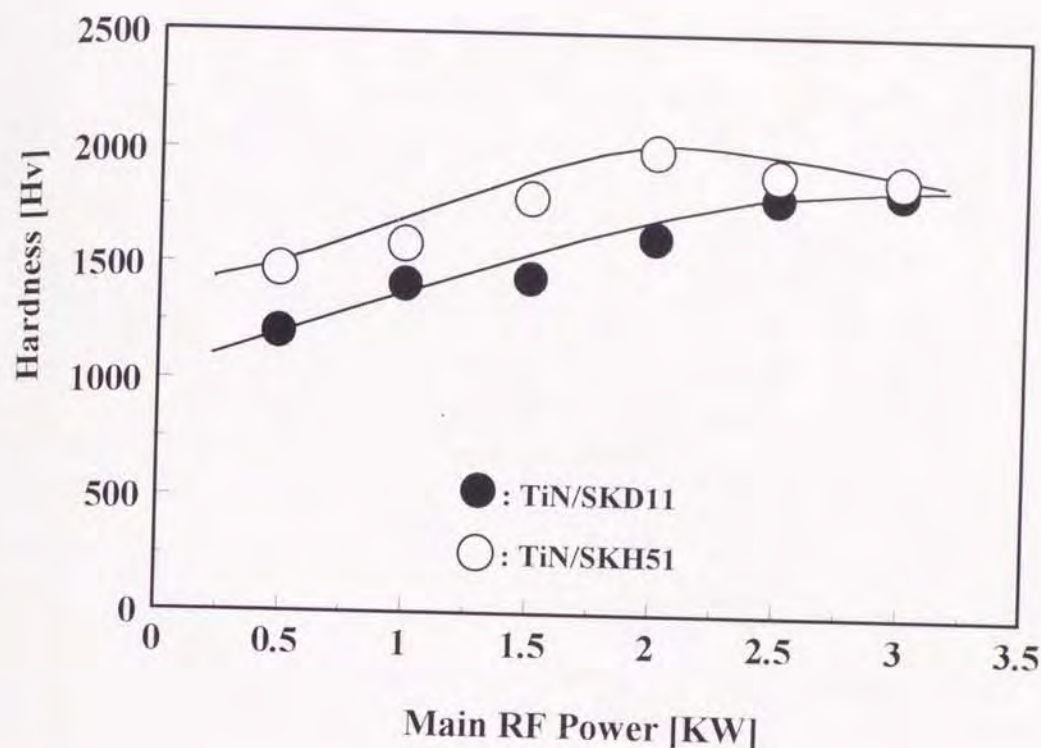


図 3.35 TiN 薄膜の硬さ

子を移動した。その後、図 3.37 に示すようにスクラッチ痕をノマルスキー顕微鏡で観察し、完全に TiN 薄膜が剥離した荷重を臨界荷重と定め、これにより薄膜の特性を評価した。図 3.36 中の縦軸は TiN 薄膜の剥離時の臨界荷重、横軸は成膜時の高周波電力値をそれぞれ示している。高周波電力の増加に従い、TiN/SKH51 の臨界荷重は僅かながら増加する傾向が見受けられる。これに対して TiN/SKD11 は、測定値にばらつきが大きいものの、高周波電力が 1KW から 2.5KW で良好な値を示す傾向が見受けられる。

第 2.4 節で示したピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用いて、以下のように薄膜の付着力評価を行った。公称共振周波数 1MHz の AE センサーをピンホルダーに取り付け、検出信号をアンプにより 70dB 増幅した後に FFT アナライザーを用いてスペクトルを求めた。また、バンドパスフィルターにより信号周波数を限定した後、パーソナルコンピュータに入力して、Root Mean Square 値 (R.M.S) の算出等の解析を行った。摩耗試験はピンの押付け荷重を一定に保持する場合及び一定の割合で増加する場合の二通りの試

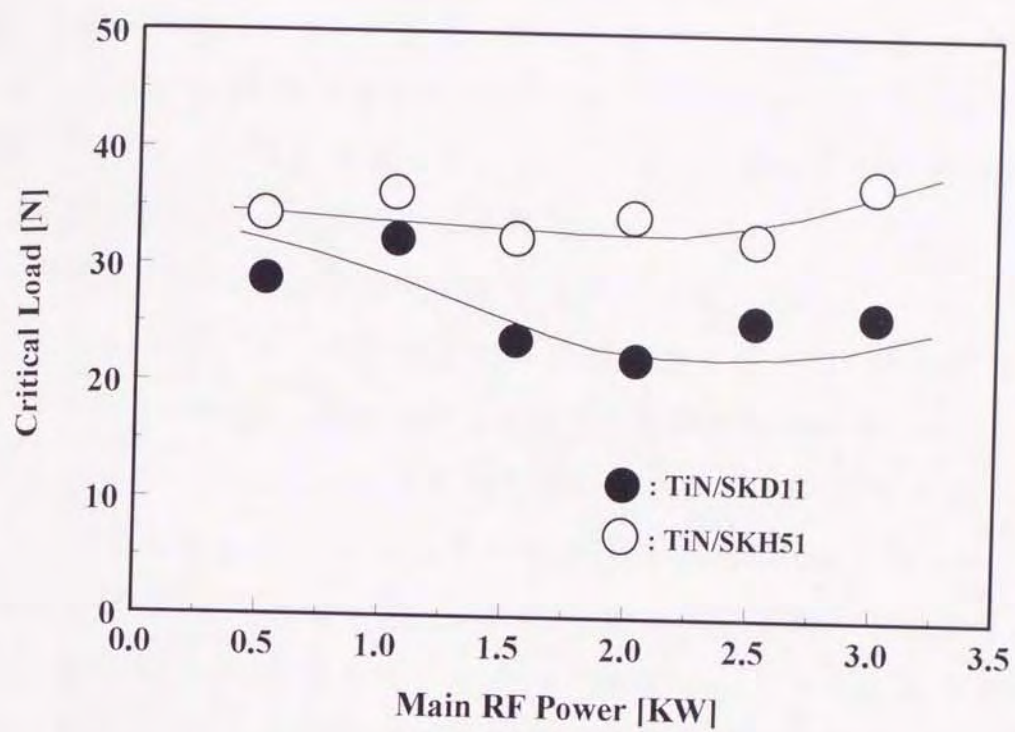


図 3.36 スクラッチ試験結果

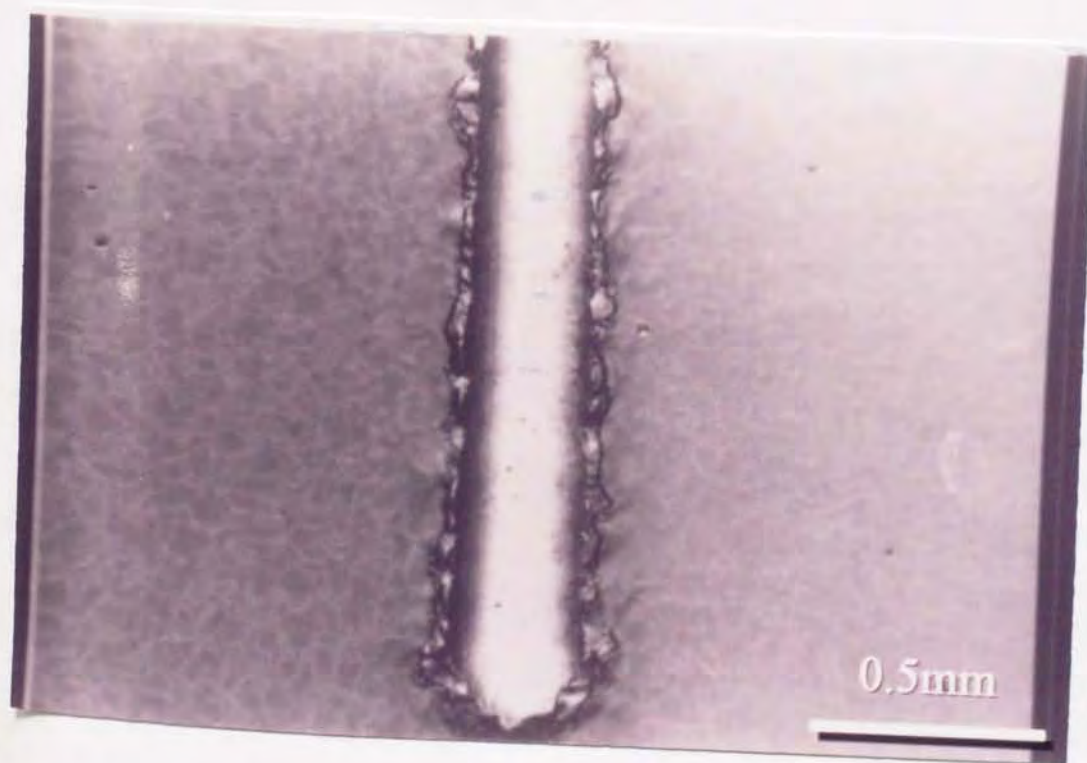


図 3.37 薄膜表面のスクラッチ痕

験条件を設定した。すなわち、前者においては、接触圧力 11.7MPa、摺動速度 1.57m/s、摩耗時間 120 分 (摺動距離 11500m) の条件を考慮し、ピンの摩耗量、摩擦係数および AE を測定した。ここでピンの摩耗量は、分解能 1 μ m の差動トランスの出力よりピンの長さの減少量を求めるとともに、試験終了後にピンの摩耗重量を計測した。なお、摩耗重量の計測に際し、ピンの表面に付着した油脂および摩耗粉等を取り除くために、アセトン中で超音波洗浄を行い充分乾燥した後に重量を計測した。さらに、得られた測定結果をもとにして、各高周波電力の条件で成膜した TiN 薄膜の摩耗特性を評価するとともに、摩耗率と AE 発生特性の相関を明らかにした。

ピンの押付け荷重を一定の割合で増加させる摩耗試験においては、摺動速度および接触圧力増加率をそれぞれ 1.57m/s、 3.9×10^{-2} MPa/m として、摩擦係数および AE 発生量を測定した。ここでは、薄膜の特性評価基準として摩擦係数および AE 発生特性がそれぞれ変化し始めるときの接触圧力値を考慮した。また、いずれのピン押付け条件においても、摺動面に 60℃のタービン油 (#32) を 200cc/min で滴下した。

3.3.2 結果および考察

ピン押付け荷重を一定とした場合の摩耗試験の結果を図 3.38 に示す。縦軸に実験後におけるピンの摩耗重量を、横軸に成膜時の高周波電力をそれぞれ示す。TiN 薄膜を高周波電力 1 ~ 2.5KW の条件で成膜した場合、TiN/SKD11 と TiN/SKH51 の摩耗重量は共に小さく、実験後の薄膜はアブレッシブ摩耗痕を認めるが、全摺動面で薄膜消失部分は見られなかった。一方、0.5KW で成膜した場合、TiN/SKD11 において薄膜は完全に剥離し、TiN/SKH51 では接触面積の 50% で剥離が見られ、摩耗重量も増加した。また、3KW で成膜した場合も摩耗重量は多く、TiN/SKD11 ではほぼ完全に薄膜剥離が認められたのに対し、TiN/SKH51 では見掛けの接触面積の約 25% で剥離が認められた。図 3.39 から図 3.44 に高周波電力が 0.5KW、1.5KW ならびに 3KW とした場合の試験終了後における摺動面の SEM 像を示す。なお、図 3.39 から図 3.41 は TiN/SKH51、図 3.42 から図 3.44 は TiN/SKD11 をそ

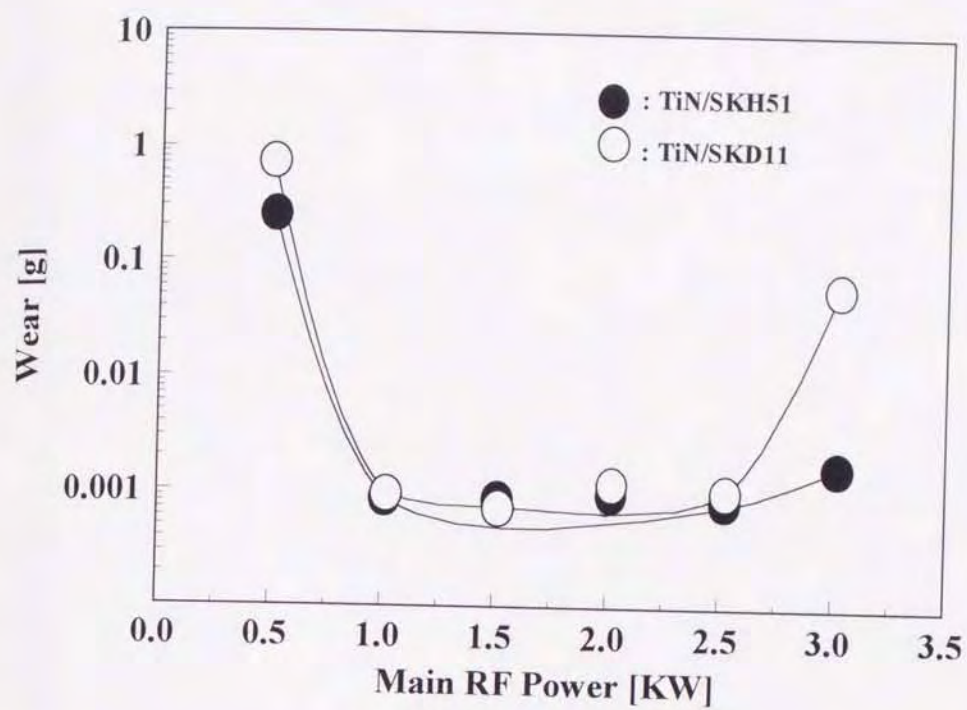


図 3.38 摩耗重量と Main RF Power の関係



図 3.39 TiN/SKH51 の SEM 像 (Main RF Power : 0.5KW)



図 3.40 TiN/SKH51 の SEM 像 (Main RF Power : 1.5KW)

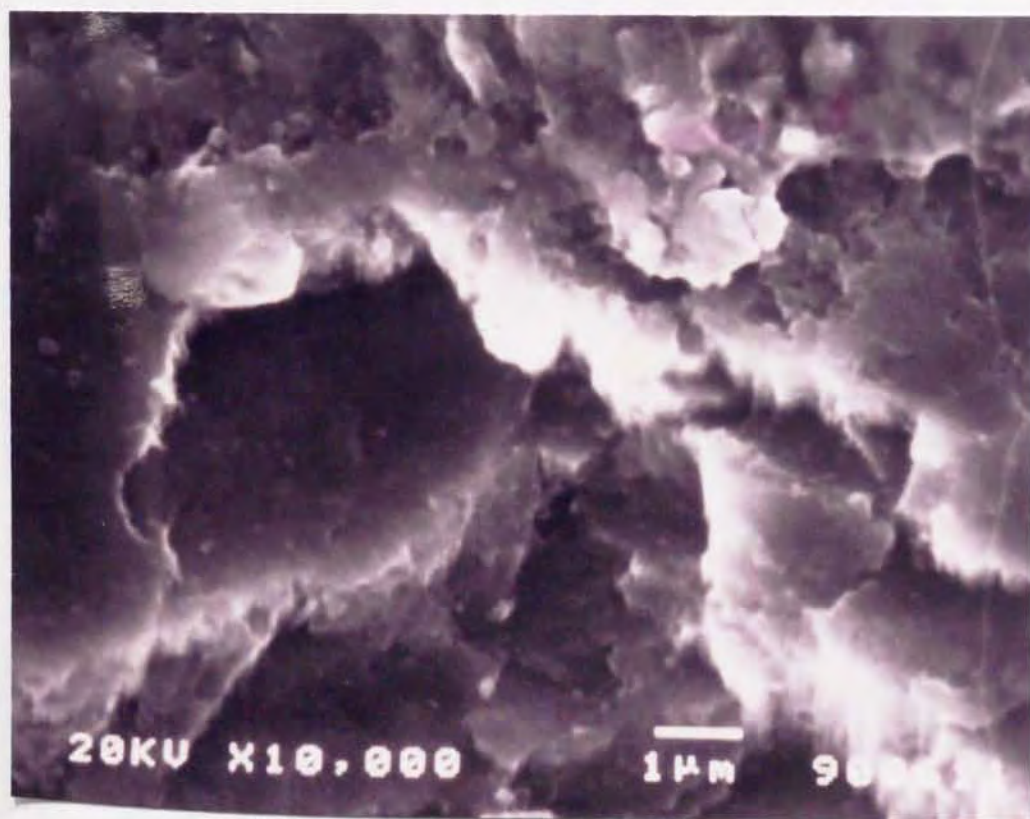


図 3.41 TiN/SKH51 の SEM 像 (Main RF Power : 3KW)



図 3.42 TiN/SKD11 の SEM 像 (Main RF Power : 0.5KW)



図 3.43 TiN/SKD11 の SEM 像 (Main RF Power : 1.5KW)

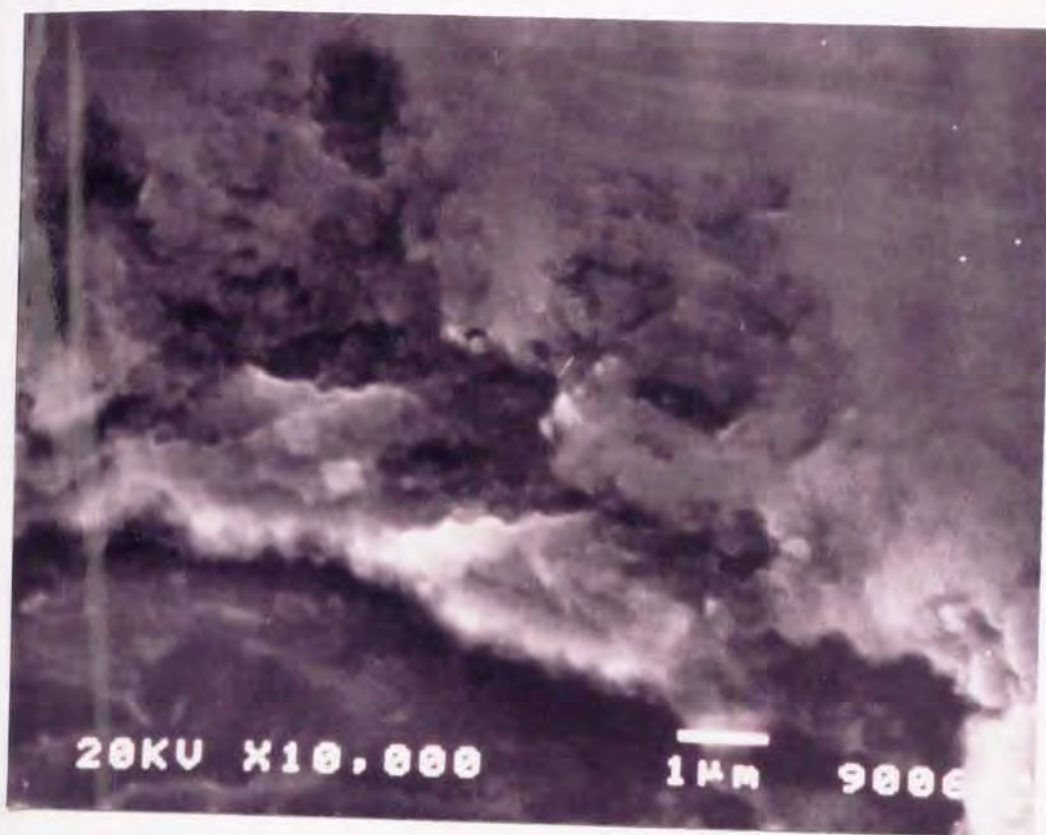


図 3.44 TiN/SKD11 の SEM 像 (Main RF Power : 3KW)

れぞれ示している。TiN/SKH51 及び TiN/SKD11 とともに高周波電力が増加するに従い、薄膜欠損部の形状が鋭利になる傾向が見られた。このことより、薄膜の硬度のみならず靱性も薄膜の摩耗特性に影響を及ぼすものと思われる。

図 3.45 に摩耗試験時に検出される AE のスペクトル特性を示す。図の横軸は周波数、縦軸は AE 出力及び奥行きは測定時刻をそれぞれ示す。50KHz 以下と 300KHz 付近においてピークがそれぞれ見られる。前者は摺動音、後者は摩耗による試験片の破壊音およびき裂進展による AE に起因するスペクトルであると考えられることから、本研究では 300KHz の AE が測定可能なバンドパスフィルターを利用し、測定を行った。

図 3.46 及び図 3.47 にピン押付け荷重を一定とし、高周波電力をそれぞれ 2KW と 0.5KW で成膜した TiN/SKD11 の AE 検出例を示す。両図の横軸は摺動距離を、縦軸は摩耗量、AE 及び摩擦係数をそれぞれ示す。図 3.46 より初期摩耗時において最も AE 発生量が多く、定常摩耗に移行するととも

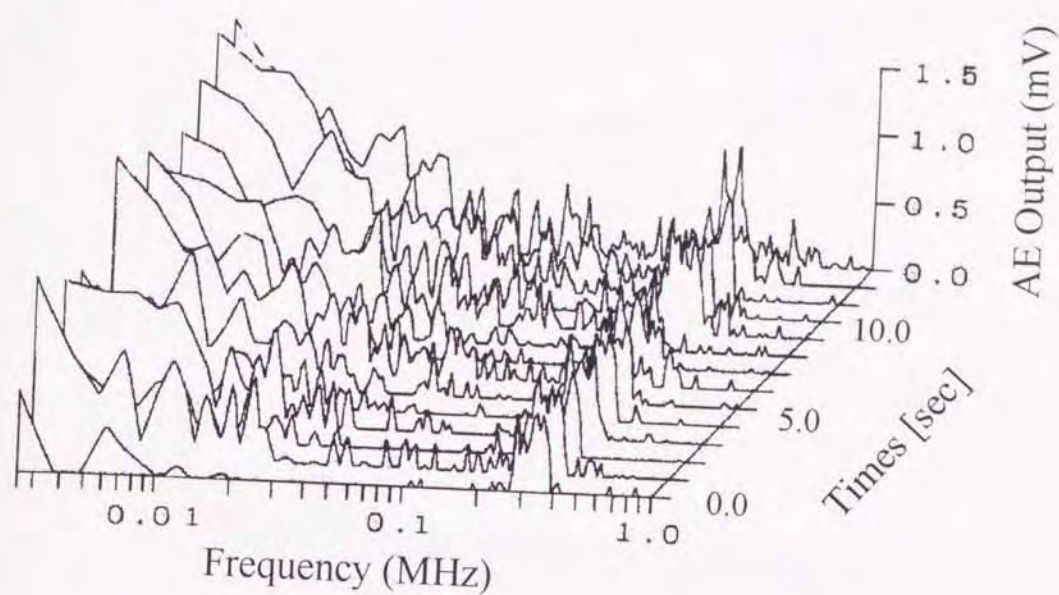


図 3.45 AE の周波数特性

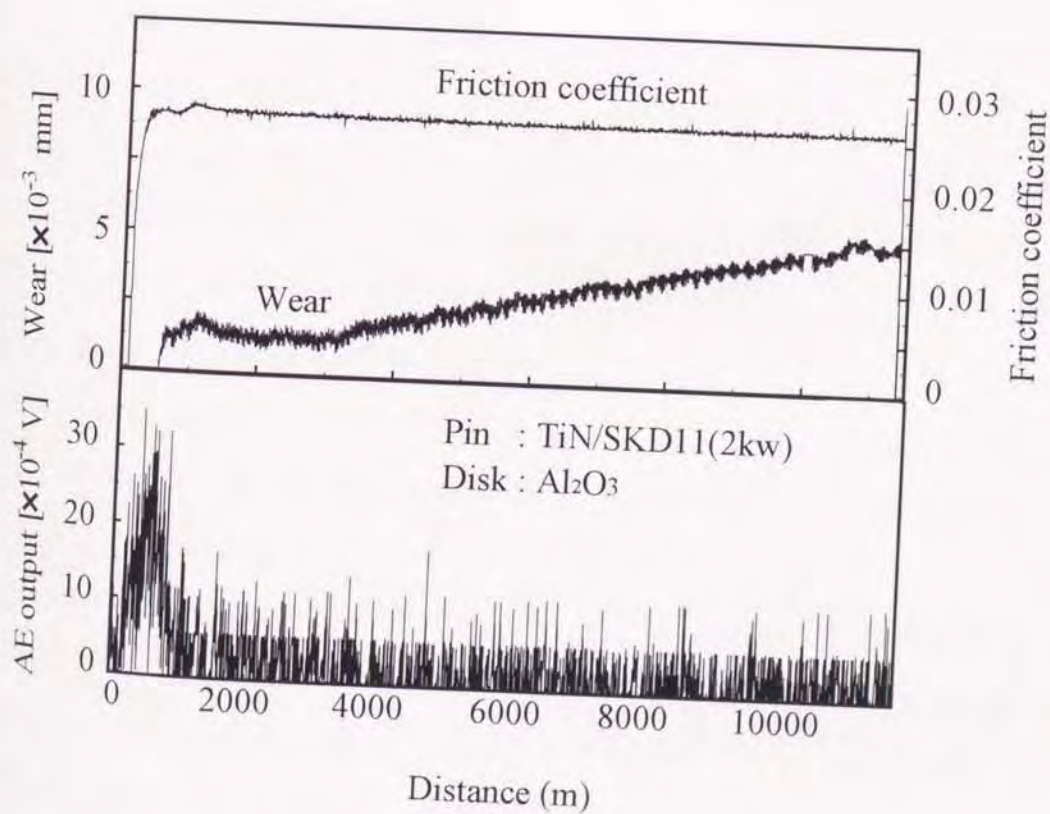


図 3.46 AE 検出例 (TiN/SKD11 : 2KW)

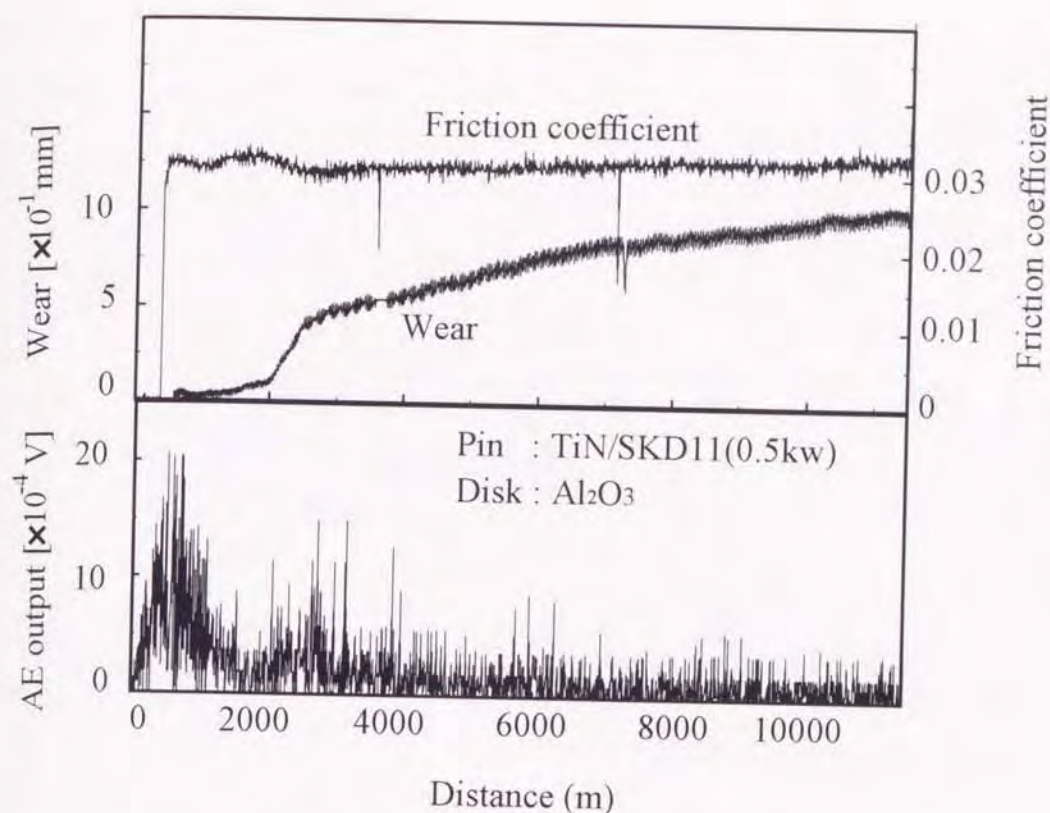


図 3.47 AE 検出例 (TiN/SKD11:0.5KW)

もに徐々に減少する。また、摩擦係数は試験初期において増加傾向を示すが、定常摩耗状態に移行するとともに、0.03に近い一定値となった。

他方、図 3.47 より高周波電力が 0.5KW の条件下であっても 2KW の場合と同様に初期摩耗時において AE 発生量が最大となることが解る。また、摺動距離 2Km で AE 発生量が増加するが、TiN 薄膜が剥離するとともに摩耗量が一時的かつ急激に増加することに起因すると考えられる。なお、TiN 薄膜の剥離前後で、摩擦係数の変化はほとんど見られなかったことから、摩耗試験での TiN 薄膜の剥離過程を評価する上で、AE 測定はきわめて有効であると考えられる。

図 3.48 は SKD11 鋼と SKH51 鋼に成膜した TiN 薄膜および調質鋼における摩耗率と AE 発生量の関係を示した図である。横軸にはピンの長さの減少量より求めた摩耗率、縦軸には AE の R.M.S 値をそれぞれ示す。両者の関係は上に凸の曲線で与えられ、かつ材質および TiN 薄膜の有無に依存した特性を示す。以上の結果より AE 発生特性と摩耗率の関係を示す実験式

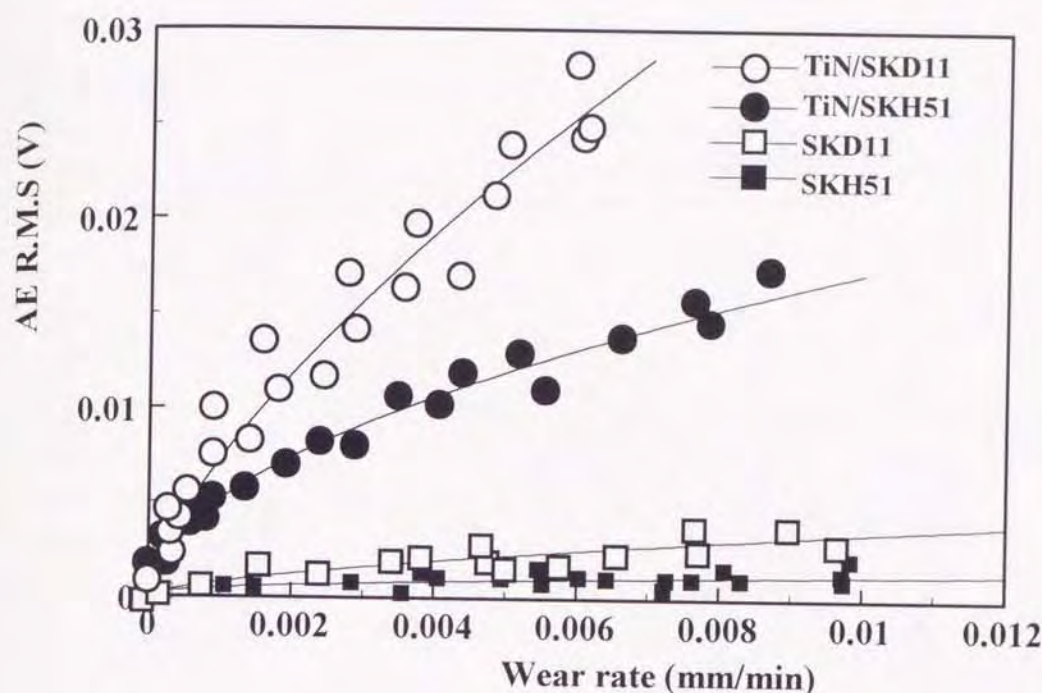


図 3.48 摩耗率と AE 信号放出特性の関係

を以下に示す。ここで、 A_R は AE の RMS 値 (V) を、 W は摩耗率 (mm/min) を示しており、添え字はそれぞれピンの材質を示す。なお、成膜時の高周波電力条件による特性曲線の差異はきわめて小さい。

$$\left. \begin{aligned}
 \text{TiN/SKD11} &: A_{R_{\text{TiN/SKD11}}} = 0.918 W_{\text{TiN/SKD11}}^{0.699} \\
 \text{TiN/SKH51} &: A_{R_{\text{TiN/SKH51}}} = 0.101 W_{\text{TiN/SKH51}}^{0.523} \\
 \text{SKD11} &: A_{R_{\text{SKD11}}} = 0.066 W_{\text{SKD11}}^{0.629} \\
 \text{SKH51} &: A_{R_{\text{SKH51}}} = 0.008 W_{\text{SKH51}}^{0.410}
 \end{aligned} \right\} \dots (3.1)$$

図 3.49 はピン押付け力を一定の割合で増加した場合の AE の検出例であり、代表例として、高周波電力が 1.5KW および 3KW の場合について示した。試験条件は接触圧力の増加率を 3.9×10^{-2} MPa/m、摺動速度を 1.57m/s に設定し、潤滑油として 60℃ のタービン油 (#32) を摺動面に 200cc/min で滴下した。横軸に摺動距離、縦軸に接触圧力、摩擦係数および AE の RMS 値をそれぞれ示した。図中の細線および太線はそれぞれ 1.5KW および 3KW の高周波電力で成膜した TiN/SKD11 の測定結果を示している。両者

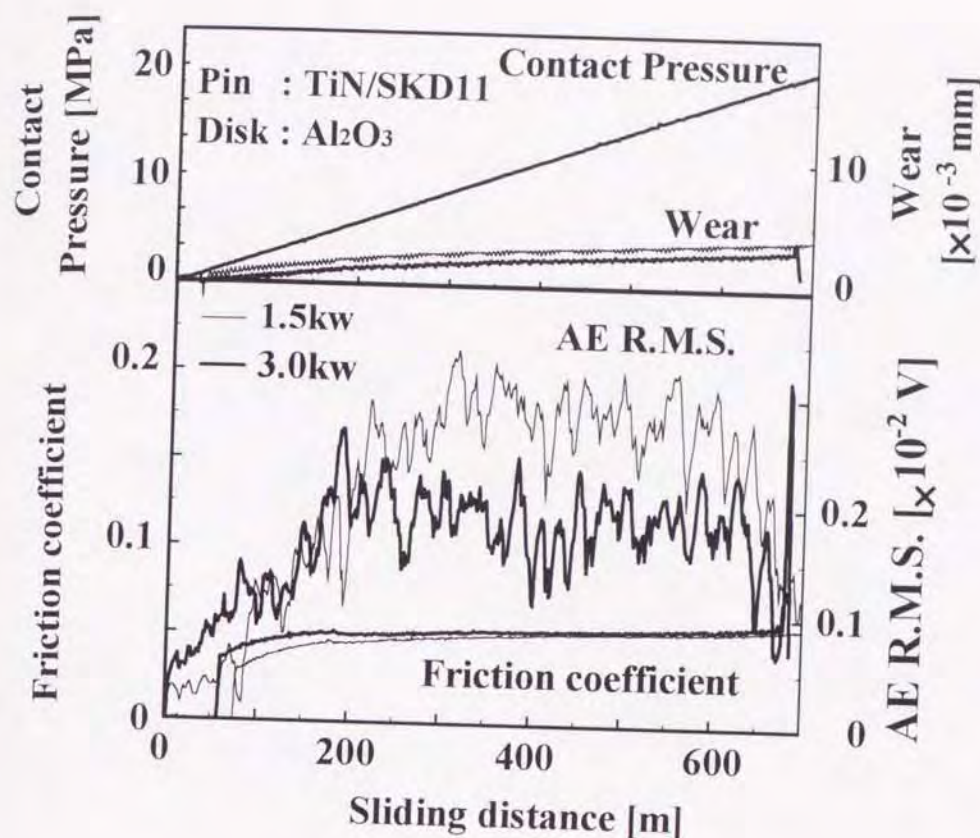


図 3.49 AE 検出例 (TiN/SKD11)

の試験初期の AE 発生量は接触圧力とともに増加した。また、1.5Kw の高周波電力で成膜した TiN/SKD11 においては摩耗量が単調に増加するにも関わらず、300m 摺動時以降では増加傾向が鈍化し、600m 摺動時以降では減少する。

図 3.50 に 600m 摺動時における前者の試験片摺動部の超音波顕微鏡 (SAM) による観察結果を示す。なお、摺動表面から 5 μ m 内部の観察結果である。右下がりの多数の線状痕はアブレッシブ摩耗によるものであり、左上部では薄膜の剥離が見受けられる。また、写真中央の縦縞模様は薄膜と基板の境界部に生じたき裂と考えられる。よって、600m 摺動時における AE 発生量の減少は、TiN 薄膜の一部が欠落して AE 発生量の比較的小さい SKD11 鋼が接触表面に現れたことに起因するものと考えられる。一方、3KW で成膜した TiN/SKD11 の AE 発生量は、図 3.49 から明らかな様に、摺動距離 100m までは 1.5KW で成膜した場合よりも多く、摺動距離 200m で最大値を示した後、減少傾向を示した。これは、3KW で成膜した薄膜は 1.5

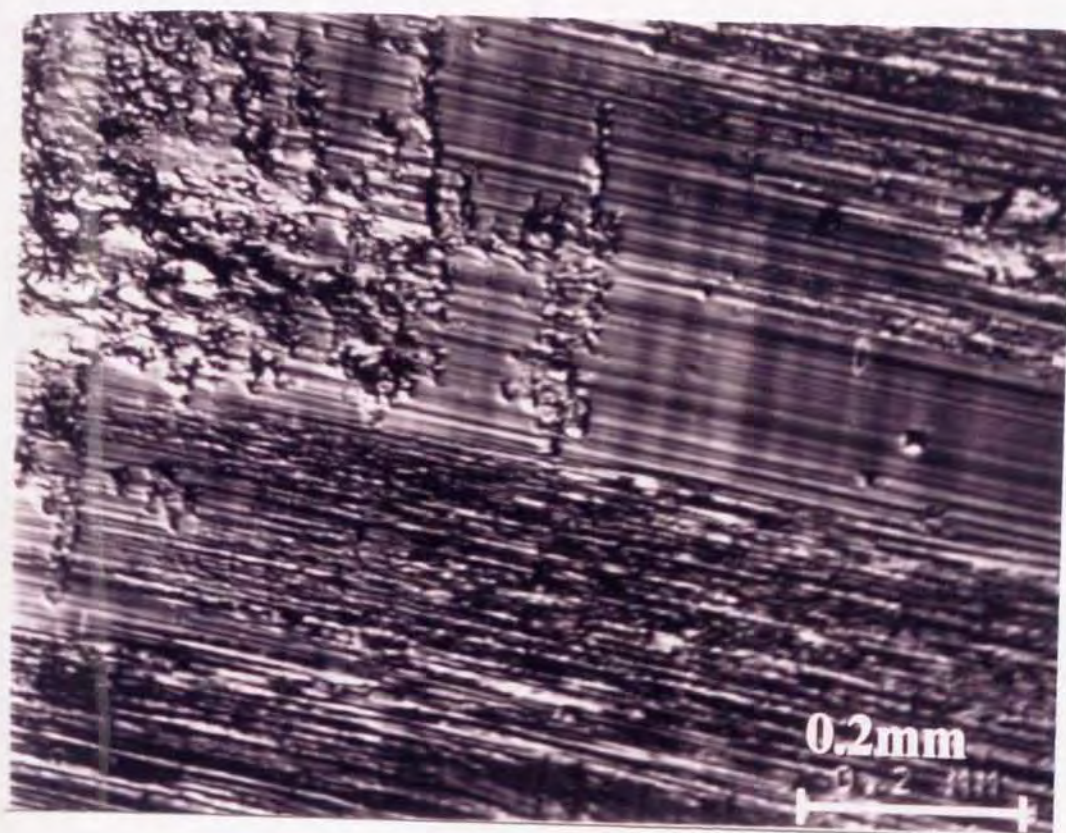


図 3.50 TiN/SKD11 の SAM 像 (摺動距離 :600m 表面下 $5 \mu\text{m}$)

Kwの場合に比べ、小さい接触圧力で剥離したことを示している。なお、摩擦係数はいずれの高周波電力で成膜した場合においても、TiN薄膜が完全に脱落する摺動距離で急激に増加する。

上述の結果をもとに、摩擦係数が急激に増加する時およびAEのR.M.S値が減少し始める時の臨界接触圧力値をそれぞれ P_m および P_{AE} と定義し、成膜時の高周波電力とこれらの臨界接触圧力の関係を図 3.51 及び図 3.52 にそれぞれ示す。両図の縦軸は P_m 及び P_{AE} を示し、横軸は共に成膜時の高周波電力を示している。TiN/SKH51では高周波電力の増加に伴い P_m も増加し、3KWの場合には30.7MPa程度の値を示す。これに対し、TiN/SKD11においても高周波電力の増加に伴い P_m は増加するが、1.5KWで最大値を示し、これ以上の高周波電力では逆に減少した。

図 3.52 に高周波電力と P_{AE} の関係を示す。 P_{AE} は図 3.51 の P_m に比べて、いずれの高周波電力においても小さな値である。また、TiN/SKD11とTiN/SKH51の P_{AE} は高周波電力値が1.5KWの場合に最大となり、以後高周波

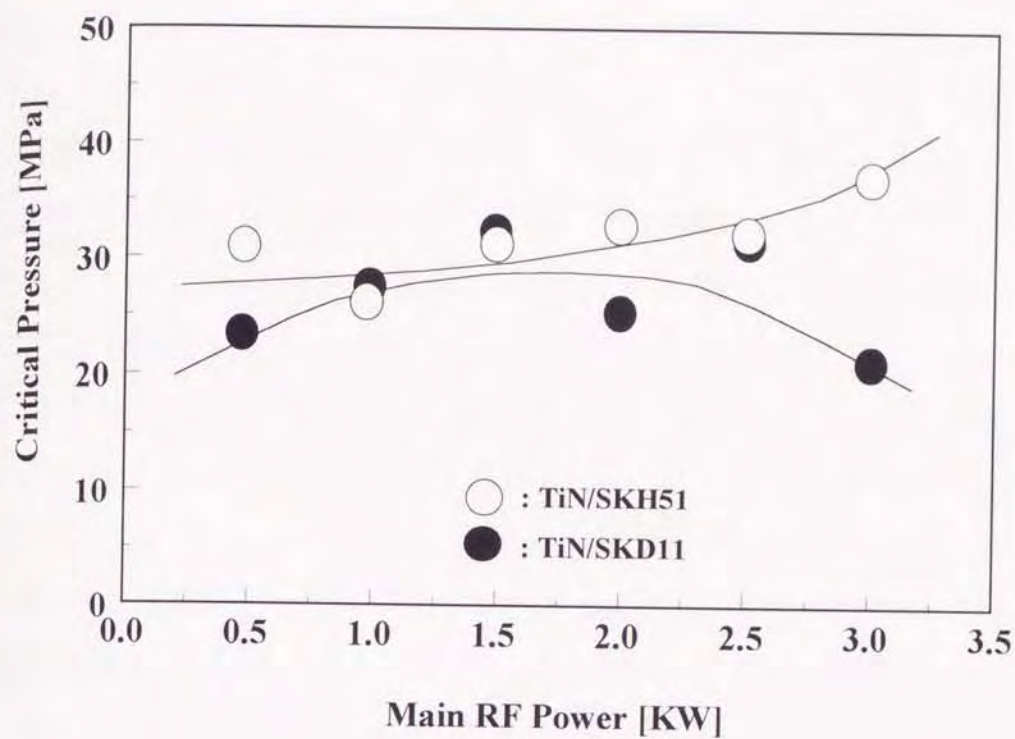


図 3.51 Main RF power と P_m の関係

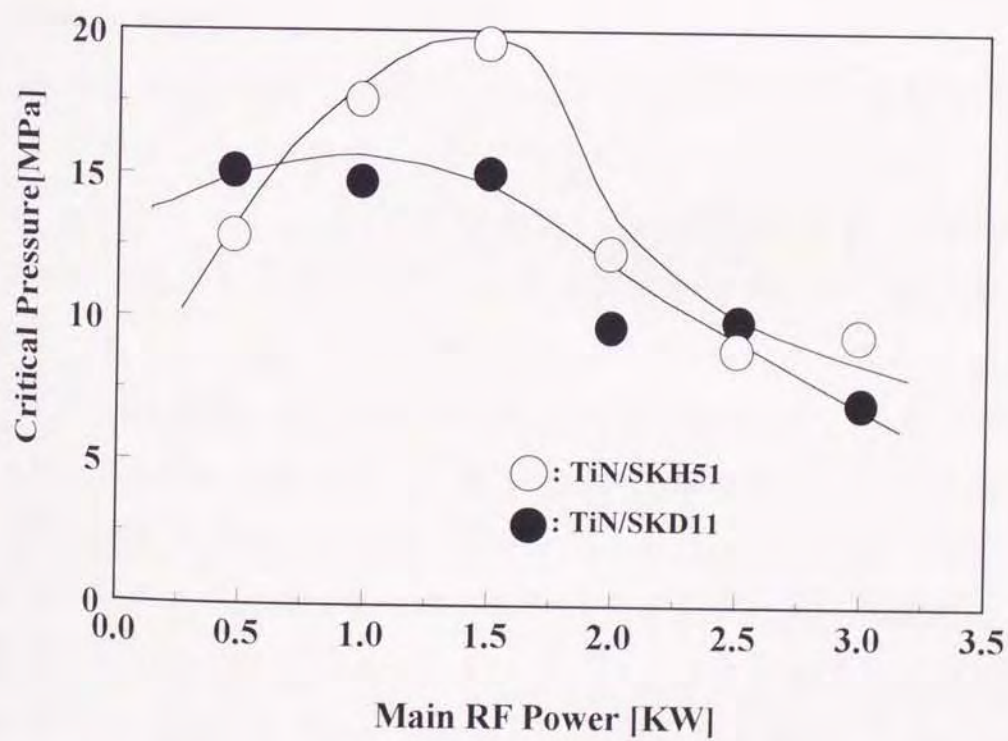


図 3.52 Main RF power と P_{AE} の関係

電力値の増加にともない減少する。Pm は母材から TiN 薄膜が完全に剥離したときの接触圧力、一方 PAE は TiN 薄膜が剥離して摺動面の一部に母材が現れたときの接触圧力にそれぞれ対応すると考えられることから、後者を利用すれば薄膜の付着力を感度良く評価し得ると思われる。また、Pm 及び PAE と高周波電力の関係は、スクラッチ試験で得られた付着力測定の結果と差異が認められる。これは、両試験時の TiN 薄膜の剥離機構の違いに起因すると思われる。すなわち、スクラッチ試験では圧子半径が 0.2mm であり、接触面積は小さい。よって、試験時の薄膜および母材が変形する領域は、圧子が接触する付近に限定される。よって、薄膜にはスクラッチ方向のせん断応力のみならず曲げ応力も作用し、そのため測定結果に差異を生じたものと考えられる。以上のことから、本研究で提案する TiN 薄膜の付着力測定は、実際の摩耗状態により近い状態での評価が可能であると考えられ、TiN/SKD11、TiN/SKH51 共に高周波電力を 1.5KW とした場合に摩耗特性及び付着力が良好であることがわかる。

図 3.53 及び図 3.54 に TiN/SKH51 及び TiN/SKD11 の X 線光電子分光装置 (ESCA) を用いた定量分析結果であり、測定結果の一例として 2Kw の高周波電力で成膜した場合の薄膜部の深さ方向の成分分布を示す。両者ともに薄膜中の成分はチタン (Ti) 及び窒素 (N) のみならず酸素 (O) の含有量が多いことがわかる。また、TiN/SKH51 の基板内部で N が検出されており、基板内に拡散・浸透していることが解る。この窒素の拡散は TiN/SKH51 と TiN/SKD11 で異なるトライボロジー特性を有する薄膜が得られる理由の一つであると考えられる。一方、プラズマ CVD 法で析出する化合物の形態及び性状は反応温度、反応に寄与する化学種の過飽和度、反応温度での核生成速度などに大きく依存する。図 3.55 に示す様に析出温度と過飽和度により、析出物質の形態は異なる。良質な薄膜を得るためには、気相-気相反応による気相中での核発生、すなわち粉末生成を防ぎ、基板表面上での核生成を促進する条件をまず設定することが重要である。定量分析結果より、高周波電力が低い領域では反応エネルギーが不足し、 TiCl_4 の解離が不十分となることから、Cl が混入することにより結晶性が弱くなり、硬さの低下が起こるものと推測される。一方、高周波電力の増加に伴い気体

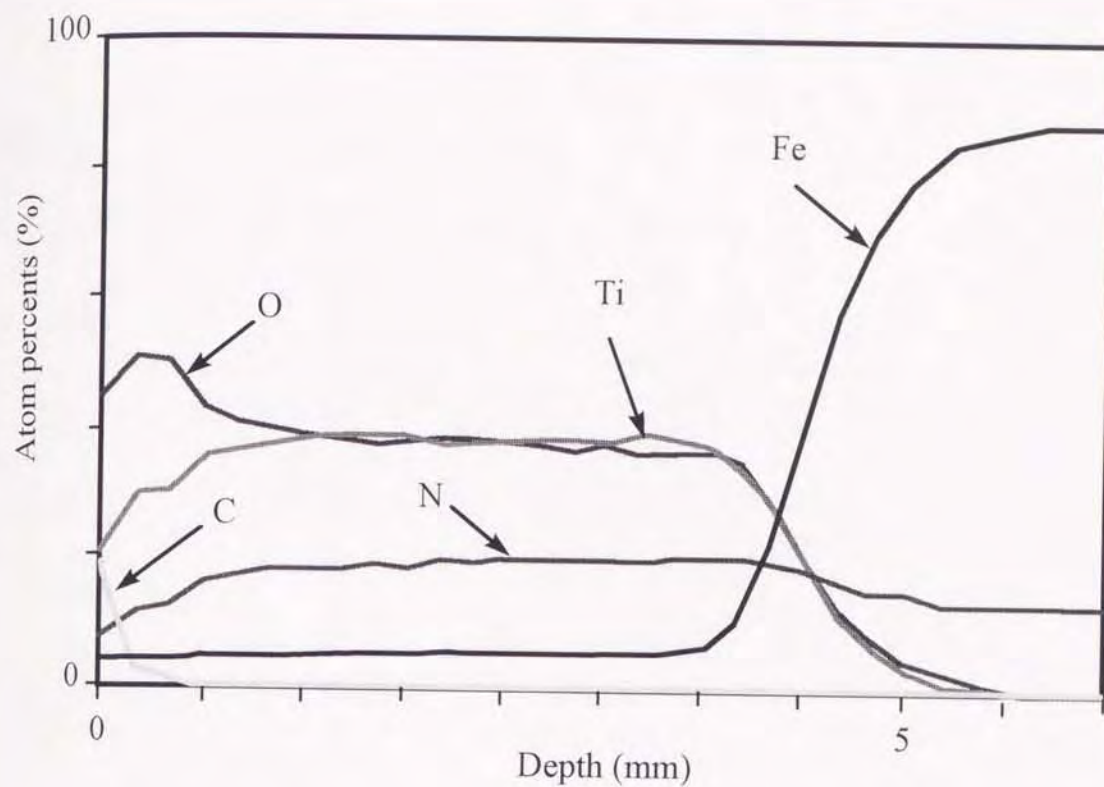


図 3.53 ESCA による深さ方向の分析結果 (TiN/SKH51, Main RF Power : 2KW)

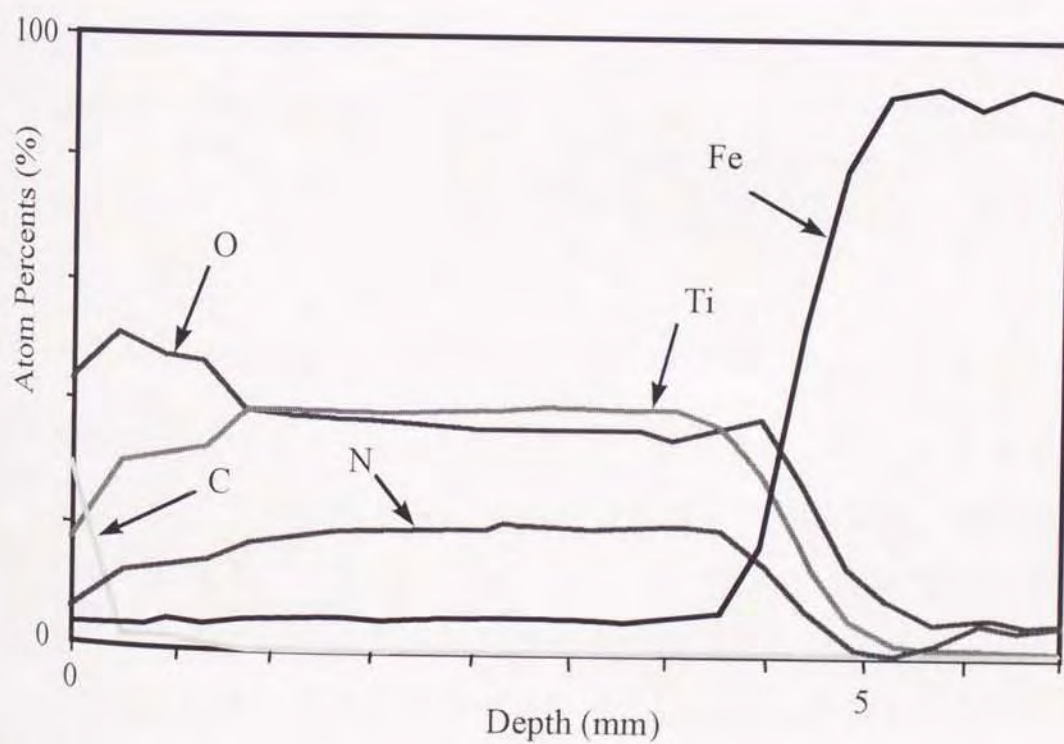


図 3.54 ESCA による深さ方向の分析結果 (TiN/SKD11, Main RF Power : 2KW)

高											小
基 板 温 度	エ ツ チ ン グ										過 飽 和 度
	エ ピ キ シ ヤ ル 成 長										
	板 状 結 晶										
	ホ イ ス 力 一										
	樹 枝 状 晶										
	柱 状 多 結 晶										
	微 粒 多 結 晶										
低	非 晶 質										大
	析 出 零					気 相 中 析 出					

図 3.55 プラズマ CVD 法による生成物の析出形態と基板温度と過飽和度の関係

分子の励起が活発になりイオン・ラジカル等の活性種が増加する。このため、基板表面においては良好に反応し、不純物の減少、硬さ・結晶性が向上するものの、脆くなるものと考えられる。

第 3.4 節 結 言

本章では超音波を利用した摺動面のトライボロジー特性の評価方法を検討する基礎的研究の一環として、硼化处理鋼及び TiN 薄膜の摩耗実験及び焼き付き性実験を行った。さらに、その時に発生する AE 信号を利用した硼化处理層のアルミナセラミクスに対する焼き付き特性評価、ならびに薄膜と基板の付着力を評価する手法の実用性について検討し、以下に示す知見を得た。

- (1) 硼化处理鋼，TiN 薄膜を蒸着した鋼及び調質鋼で，摩耗率と AE 発生特性は相関性をそれぞれ有する．その相関性は摺動部材の硼化处理層及び TiN 薄膜の有無および母材となるピンの材質により異なる．
- (2) 硼化处理鋼の摩耗率と AE 発生量の関係は摺動速度や接触圧力に依存しないが，摺動部材の材質に強く影響される．すなわち，同量の AE 発生量に対する摩耗率は SKD11 の硼化处理鋼，S45C の硼化处理鋼，SKD11 の調質鋼および S45C の調質鋼の順に大きくなることが確認された．
- (3) 摩耗実験時の AE 発生特性を利用して硼化物層の欠落状態等が把握できる．さらに，摩耗率と AE 発生特性の間に，相関性が見られることから，AE 法により摩耗状態の評価が可能である．
- (4) 負荷の増加とともに AE 発生特性が変化した後に摩擦係数が変化することから，摺動時の AE 特性を測定することによって異常摩耗の早期予知が可能である．
- (5) 摩耗試験時のピン押付け荷重を一定割合で増加した場合，TiN 薄膜の一部が剥離しても摩擦係数の変化は極めて小さく，ほぼ一定値であった．なお，この時 AE 発生が少ない母材が摺動表面に現れるため，AE 発生量の減少傾向が見られた．また，AE の RMS 値が急激に減少する時の接触圧力を測定すれば，成膜条件をも考慮した TiN 薄膜付着力の評価が十分に可能であることを明示した．
- (6) 本研究で成膜した TiN 薄膜は TiN/SKD11，TiN/SKH51 とともに高周波電力を 1.5KW にした場合の付着力がもっとも良好であり，かつ摩耗特性も優れている．

第4章 ゴム摺動面におけるアブレーションパターン形成機構の解析

第4.1節 緒言

一般車両のタイヤや搬送用のゴムローラ等のようにゴム材料を摺動面に用いた場合、その摺動表面には、摺動方向に対して垂直にアブレーションパターン^{(122) - (135)}と呼ばれる波状模様がしばしば見られる。このパターンの間隔は接触相手の表面粗さ、ゴムの弾性係数及び負荷の大きさ等によって変化する。生産現場においては、パターンの間隔を計測し、ゴム表面の作用荷重を簡易的に推定する場合もある。車両用ゴムタイヤにおいては、周期的な異常摩耗痕を生ずる場合もあり、事故防止の観点からこのようなゴム表面のアブレーションパターンの特性を調べることは重要である。後藤ら⁽¹³¹⁾はタイヤの摩耗メカニズムを調べるために、回転する粘弾性円盤に接触荷重を与え、動的粘弾性力学挙動に伴う発熱現象等を解析している。他方、内山ら⁽¹²⁹⁾は半球状ゴムがガラス円板上を摺動する場合のパターン生成過程を観察し、パターン生成時におけるき裂進展角度や平均接触圧力とパターン間隔の関係を明示している。Gent⁽¹³⁵⁾等のように、ゴム材料に作用する応力に基づいてパターンの生成機構を論じた研究例は比較的多く見られるが、いずれにおいても接触圧力の評価方法が十分ではないようであり、より具体的なアブレーションパターン生成機構の解明が待たれている。

一方、超音波を利用した接触圧力測定法^{(81) - (97)}は接触面に特別な加工を施したり、接触面間にセンサーを挿入する等の必要がなく、さらには摺動時等、動的な接触状態においても適用可能であるという特徴を有する。しかしながら、接触端部での高精度測定は、指向性の影響を含む超音波伝搬特性等を十分に考慮する必要がある。

ところで、近年計測信号波形の時間-周波数2次元解析法(以下、 $t-f$ 解析法)に関する研究が注目されており、これらの解析法を利用すること

により有用な知見が得られている。中でも、ウィグナ分布^{(21)~(24)}を利用する方法は、特に過渡特性を有する信号の $t-f$ 解析に適していることが明らかにされている。このような特性を超音波接触圧力測定法に適用した場合、接触面からの反射波信号のウィグナ分布を求めることによって、従来の手法よりも反射波を有効に評価することが可能となるのみならず、測定精度の大幅な向上が期待される。このことは、例えば摺動面の接触メカニズムを解明する上で極めて有望な手法の一つとして考えられ、ゴム摺動面に生ずる波状のアブレーションパターンの生成機構を解明するための手掛かりを提供するものと思われる。

この様な観点から本章では、超音波法を利用してゴム円柱がアクリルプレートに押し付けられ、この状態で摺動する場合の接触圧力の測定を行い、接触メカニズムの解明を行う。章の前半では非摺動時に準静的に押し付け力が作用する場合の接触圧力測定を行い、測定方法の適用可能な範囲を検証する。すなわち、接触域端部の測定の際に第2.5節で示した反射特性の補正方法を適用し、その実用性を検討する。次いで、本法では従来あまり論じられてこなかった除荷時及び再負荷時の接触圧力の測定を行う。これらの結果とポイントマッチング法で求めた解を比較検討し、本測定法の信頼性を検討する。また、本測定の応用例として硬度等機械的性質の異なるゴム試験片を用いて、準静的押し付け時の接触圧力を測定し、ゴム材料の特性と接触圧力分布の相関を明らかにする。さらに、動的に押し付け力が変化する場合の接触圧力を測定し、本測定法がこの様な場合においても適用可能であることを明らかにする。

章の後半においては、超音波法を利用した接触圧力測定の実用例としてゴム材が摺動する場合の接触圧力を測定し、アブレーションパターンの生成機構に関する考察を行う。実験はピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用いて行い、回転するアクリル円板に天然ゴム試料を押し付けた場合の接触面に作用する接触圧力を測定し、その変化パターンを解析する。すなわち、接触圧力の変化曲線を基に得られた Root Mean Square 値と摩耗量において分布相関性を検討し、接触圧力とアブレーションパターン形成の相関を明らかにする。さらに、第2.6節で示した接触面からの第1エコー波形の

ウィグナ分布を利用した超音波接触圧力測定法に多点同時測定システムを併用する。これを回転するゴムシート上にアクリル試験片を押し付けた場合の接触圧力の測定に適用し、この様な摺動面に作用する接触圧力を経時的に評価する。得られた結果を検討し、振動を伴って接触する二面間の接触圧力を評価する上で本測定法の実用性を検討する。

第4.2節 非摺動時の接触圧力

4.2.1 実験装置と実験方法

図4.1に示すように直径30mm、厚さ30mmのゴム円柱上に厚さ20mmのアクリルプレート置き、これをプレートカバーを介して負荷した。なお、接触面に対して出来るだけ均一に負荷荷重が作用するよう鋼球を用いた。なお、両試験片の接触表面はエチルアルコールを用いて十分に脱脂した。

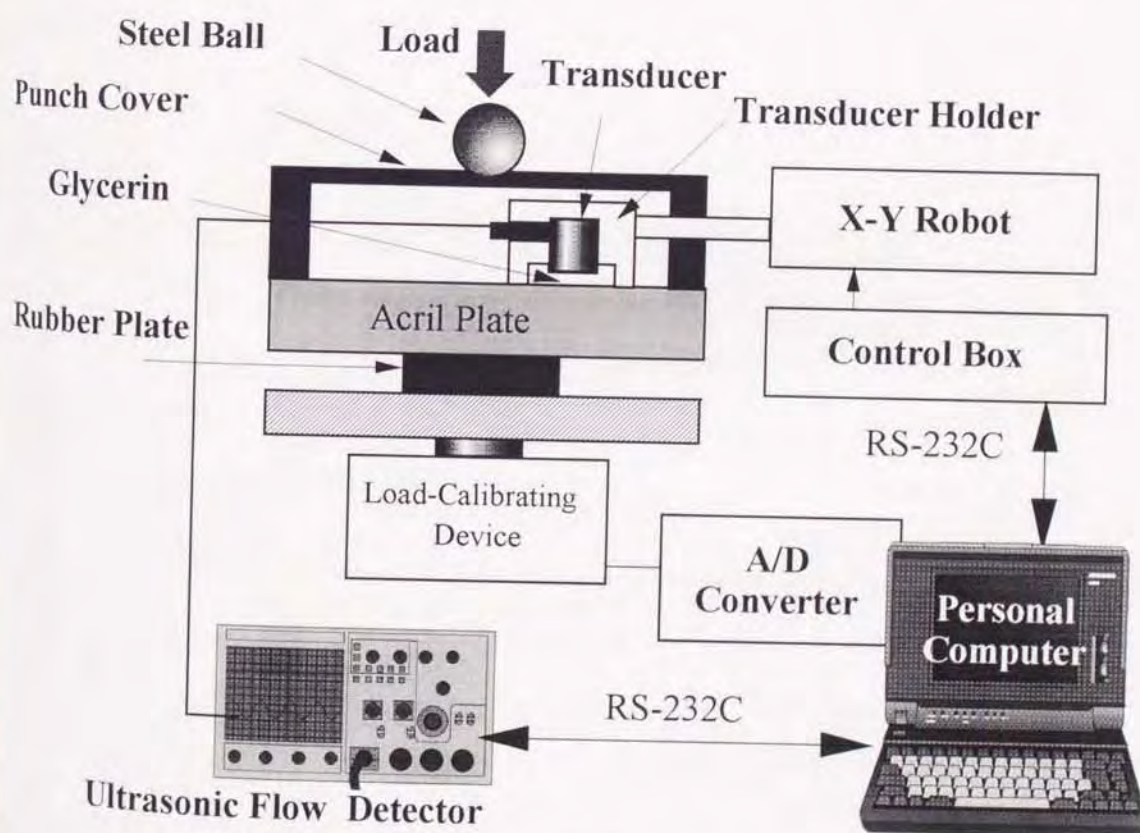


図4.1 接触圧力測定システム

この状態を保持して、X-Yロボットを用いて探触子をアクリルプレート上で捜査し、ゴムブロックとアクリルプレートの接触面からの第1エコー高さをX及びY方向それぞれ1mmの間隔で検出した。なお、走査中に探触子が傾かないこと、接触媒質であるグリセリン(日合アセチレン ソニコート)が十分に探触子とアクリルプレート間を満たす必要があることを考慮し、四隅に突起を設けた探触子ホルダーに探触子を取り付けた。さらに、ギャップ法を適用しアクリルプレートと探触子の端面の間隔を0.2mmに設定した。なお、第2.5節に示した校正実験においてもギャップ法を適用していることから、これによる超音波反射特性への影響は無視し得る。また、アクリルプレート及びゴム円柱の接触表面は校正実験で使ったものと同様にした。すなわち、ゴム円柱は射出成形面を利用し、一方、アクリルプレートの表面はラップ加工を施した。それぞれの表面粗さは中心線平均粗さRaで前者は $0.77\mu\text{m}$ 、後者では $1.30\mu\text{m}$ であった。超音波探傷器及びX-Yロボットの制御ならびに測定値の解析・記録はパーソナルコンピュータを用いた。得られた第1エコー高さを解析し、エコー高さ比 Er^* を算出すると共に接触域端部においては測定領域における超音波の音

表 4.1 使用したゴム試験片及び実験条件

NO.	Rubber	Load	Column Velocity
1	A	0N, 196N, 274N, 392N, 274N, 196N, 274N, 392N	Static
2	A	0N, 96N	Static
3	B ₁	0N, 205N, 304N	Static
	B ₂	0N, 205N, 304N	Static
	B ₃	0N, 205N, 304N	Static
	B ₄	0N, 205N, 304N	Static
	B ₅	0N, 205N, 304N	Static
	B ₆	0N, 205N, 304N	Static
4	C	0N, 98N, 196N, 294N, 196N, 98N, 196N, 294N	0.1mm/min
	C	0N, 98N, 196N, 294N, 196N, 98N, 196N, 294N	1.0mm/min

表 4.2 使用したゴムの機械的特性及び代表寸法

Rubber	A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	C
Diameter (mm)	30	30	30	30	30	30	30	104
Thickness (mm)	30	30	30	30	30	30	30	10
Hardness (JIS)	59	67	65	60	64	64	62	59
Elongation of Breaking(%)	467.0	517.0	539.0	541.8	570.8	565.3	602.5	467.0
Tensile Strength of Breaking(kPa)	23.1	30.6	32.5	27.0	29.0	30.4	27.3	23.1
Toughness (J)	430.3	775.3	877.7	662.5	783.0	763.0	742.3	430.0
Res (J)	59.8	47.7	57.5	52.2	51.3	57.7	51.6	59.8

圧分布を考慮し、第 2.5 節で示したエコー高さ及び測定位置の補正した後、に接触圧力とエコー高さ比の関係を基に接触圧力値を求めた。表 4.1 に実験条件、表 4.2 に使用したゴム材料の機械的特性及び試験片の代表寸法をそれぞれ示す。なお、表 4.1 中のゴム試料番号は表 4.2 のものに対応している。ここで、B₁ から B₃ のゴム材料は B₄ から B₆ のゴム材料にシリカ (SiO₂) を混入することにより、機械的特性を改良したゴム材料である。また、表 4.2 中の「Res」は次式で示される引張試験時の動的損失を示す値である。

$$Res = 1 - (\text{蓄積されたエネルギー}) / (\text{与えられたエネルギー})$$

表 4.1 中の実験 1 においては超音波接触圧力測定法ではこれまであまり論じられてこなかった除荷時及び再負荷時の接触圧力測定を行い、本測定法が適用可能であることを示す。また、実験 2 では得られた測定結果を接触圧力の数値計算法の一手法であるポイントマッチング法⁽⁵⁹⁾を用いて得られた解と比較・検討し、接触域端部における接触圧力測定において第 2.5 節で示した超音波反射特性の補正方法の実用性を明らかにする。実験 3 では超音波法による接触圧力測定の応用例として異なる特性のゴム試験片を押し付けた際の接触圧力を測定し、ゴム材料の特性と接触圧力分布形状の比較を行う。なお、加硫ゴムは微小変形ではほぼ弾性挙動を示すことか

ら、硬さと弾性率は相関性を有する。すなわち、硬さと弾性率の関係については種々の理論式及び実験式が提出されている。球を押し込んだ場合は次式が適用される。

$$P = K (F/E)^{0.74} R^{-0.48} \quad \dots (4.1)$$

ここで、 P : 押し込み量、 E : 弾性係数、 K : 定数、 F : 荷重、 R : 球の半径である。

さらには、実験 4 では動的に押し付け荷重が変化した場合の接触圧力を測定し、負荷速度と接触圧力分布の比較・検討を行い、本測定法の実用性を示す。

4.2 結果及び考察

図 4.2 に実験 1 で得られた結果の一例として、アクリルプレートの押し付け力を 392N とした場合のエコー高さ比 E_R^* の分布曲線を示す。横軸は接触域中心からの距離、縦軸は E_R^* の値をそれぞれ示す。超音波はアクリル

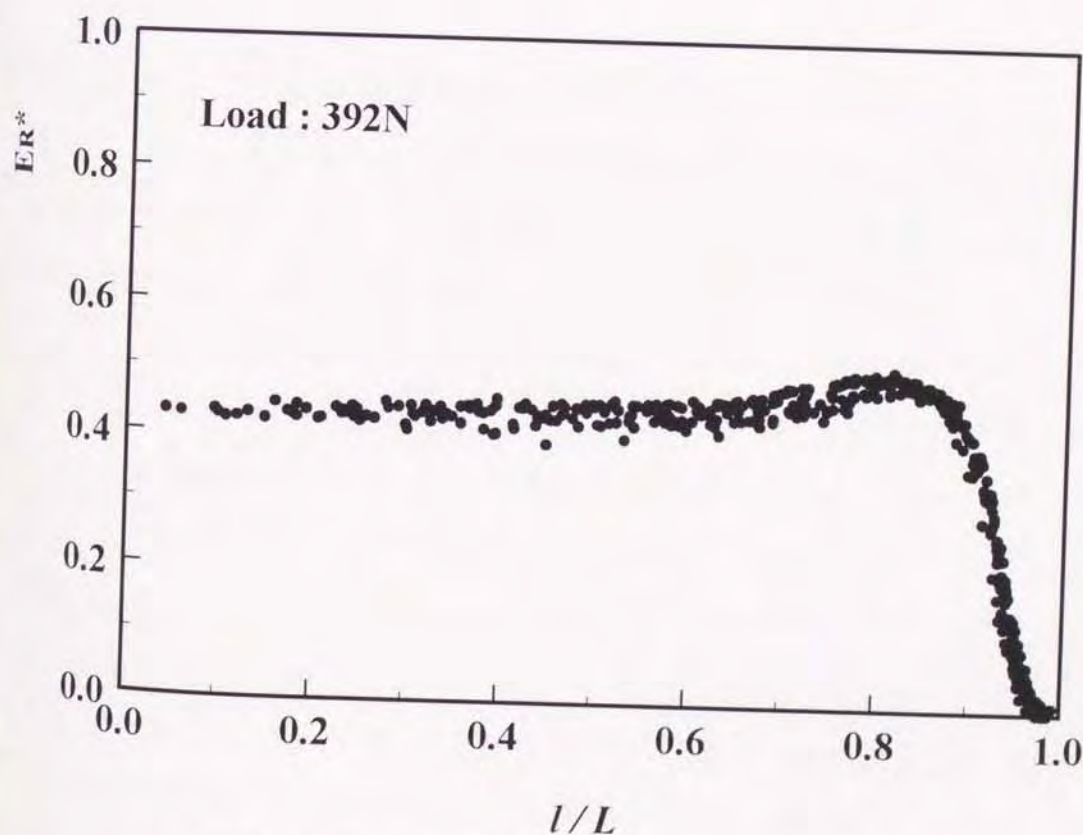


図 4.2 補正前の E_R^* 分布曲線 (Load = 392N)

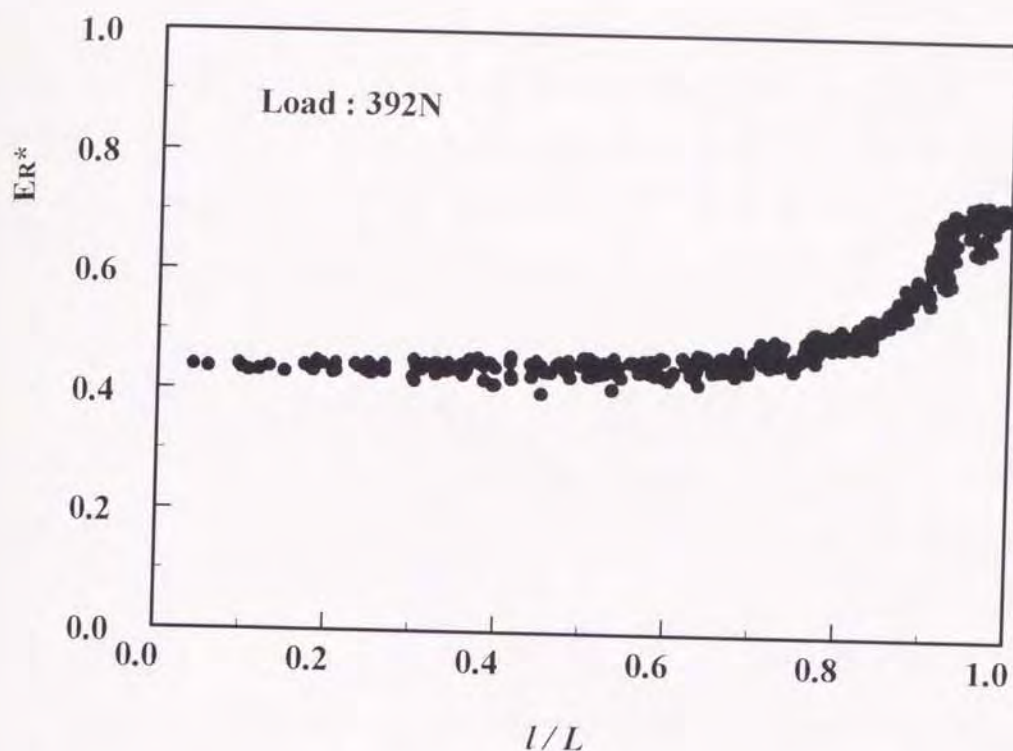


図 4.3 補正後の ER^* 分布曲線 (Load = 392N)

プレート内を指向性を持って広がりながら伝播することから、接触域端部における測定では、超音波到達領域は接触領域と非接触領域が存在する。超音波到達領域内の非接触領域から得られる反射波音圧は、接触領域における接触圧力の増減に関わらず常に不変である。超音波探傷器で測定されるエコー高さの変化量は、接触領域での反射波音圧の変化を示していることから、測定位置が接触領域端部に近づくにつれて、接触領域からの反射波は非接触領域からの反射波に比べ小さくなり、 ER^* の値は減少傾向を示す。一方、第2.5節で示したエコー高さの変化量及び測定位置の補正を行うことにより、図4.3に示す ER^* の分布を得た。接触面における反射超音波の存在領域、すなわち接触圧力の測定対象領域はアクリルプレートの厚さが20mmであることから、第2.5節の結果より半径2mmの円形領域であると考えられる。実験に使用したゴム円柱の直径が30mmであることから、探触子を接触領域の中心から13mmよりも外側の位置に設置した場合、式(2.59)に示す第1エコー高さの補正及び式(2.58)に示す測定位置の補正を行

った。このような補正を行うことにより、接触域端部において E_R^* は増加傾向を示し、実際の接触圧力分布を反映した値を示す。

図 4.4 は第 2.5 節で示したエコー高さ比 E_R^* と接触圧力の関係をもとに、図 4.3 で得られたエコー高さ比 E_R^* を接触圧力値に換算して求めた接触圧力分布パターンを示す。なお、図中の 16 通りのタイルパターンは接触圧力の大きさを示している。図より、接触圧力の分布形状はほぼ軸対象であることがわかる。なお、接触域中央部において接触圧力は 0.4MPa 程度であるのに対し接触圧力端部に近づくに従い、分布勾配は大きくなる。図 4.5 から図 4.7 に負荷過程、除荷過程及び再負荷過程における接触圧力分布をそれぞれ示す。図の横軸は接触域中心からの測定位置までの距離 l を接触半径 L で除した l/L を、縦軸は接触圧力値をそれぞれ示す。負荷の過程が負荷、除荷及び再負荷にかかわらず負荷荷重が等しければ、接触圧力分布は定性的にかつ定量的にほぼ一致する。なお、それぞれの負荷の過程で E_R^* を接触圧力に換算する際に、任意の測定位置における E_R^* の履歴を

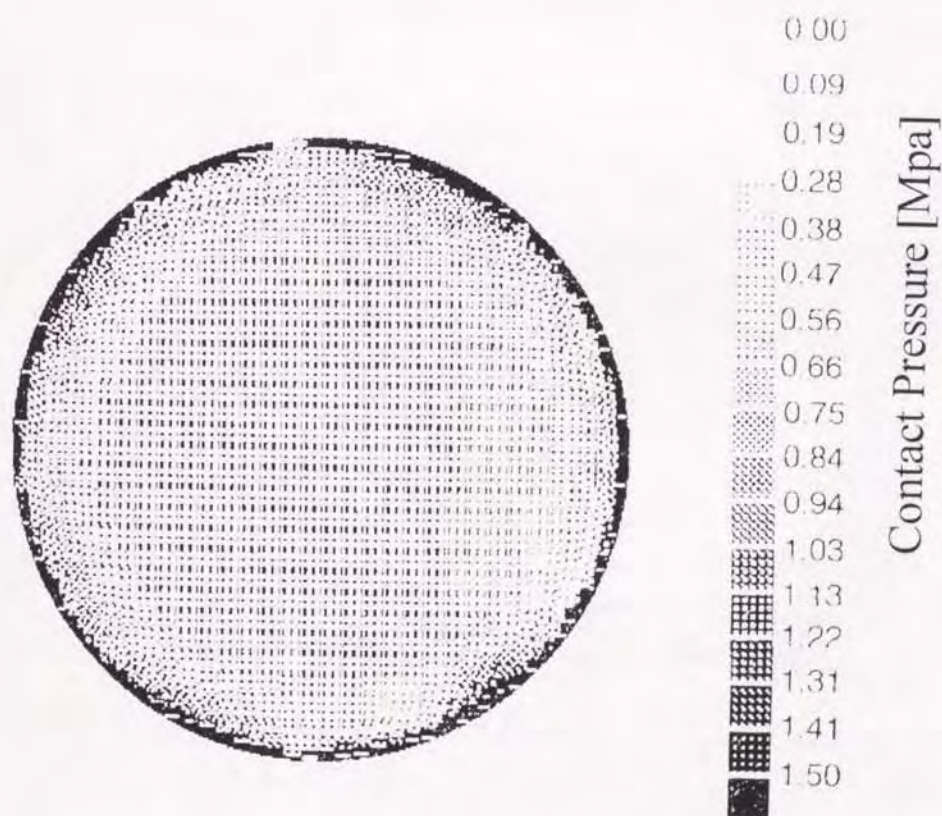


図 4.4 接触圧力パターン (Load = 392N)

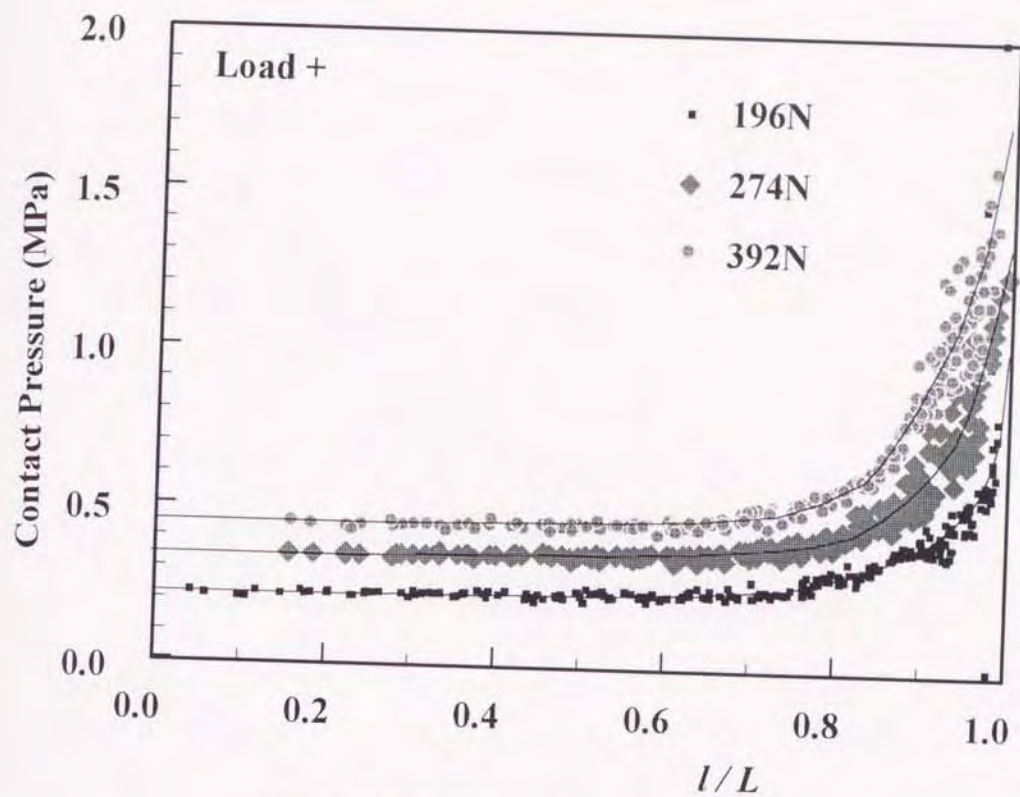


図 4.5 負荷過程の接触圧力分布

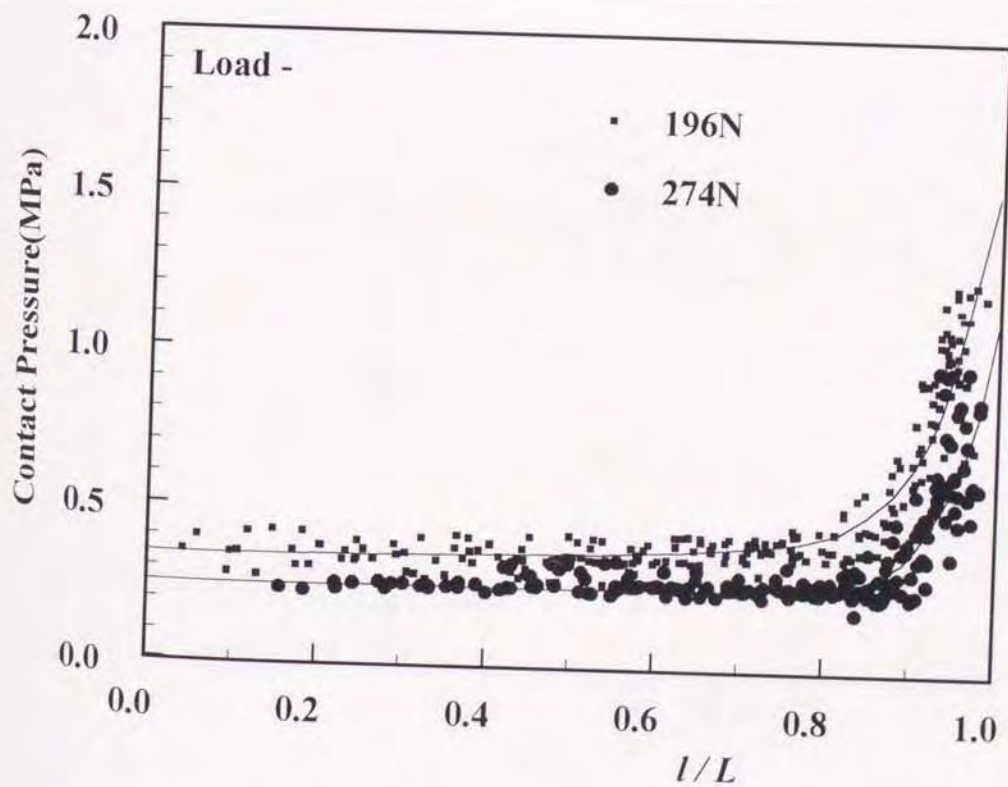


図 4.6 除荷過程の接触圧力分布

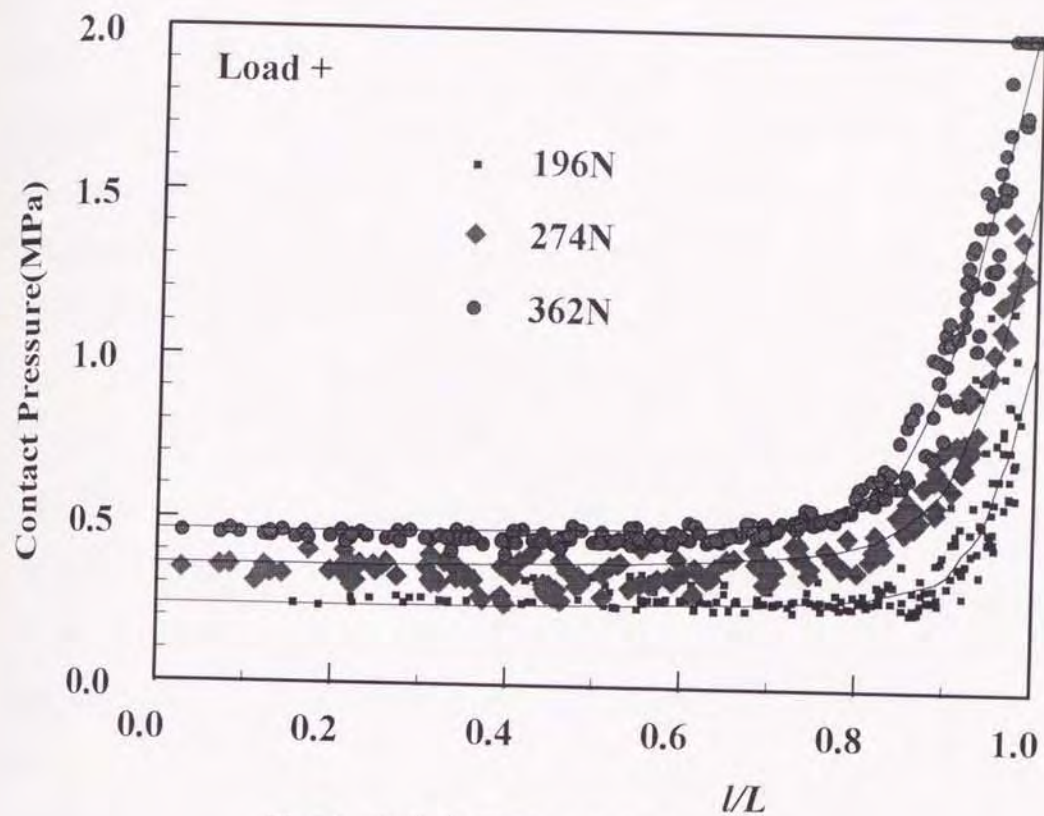


図 4.7 再負荷過程の接触圧力分布

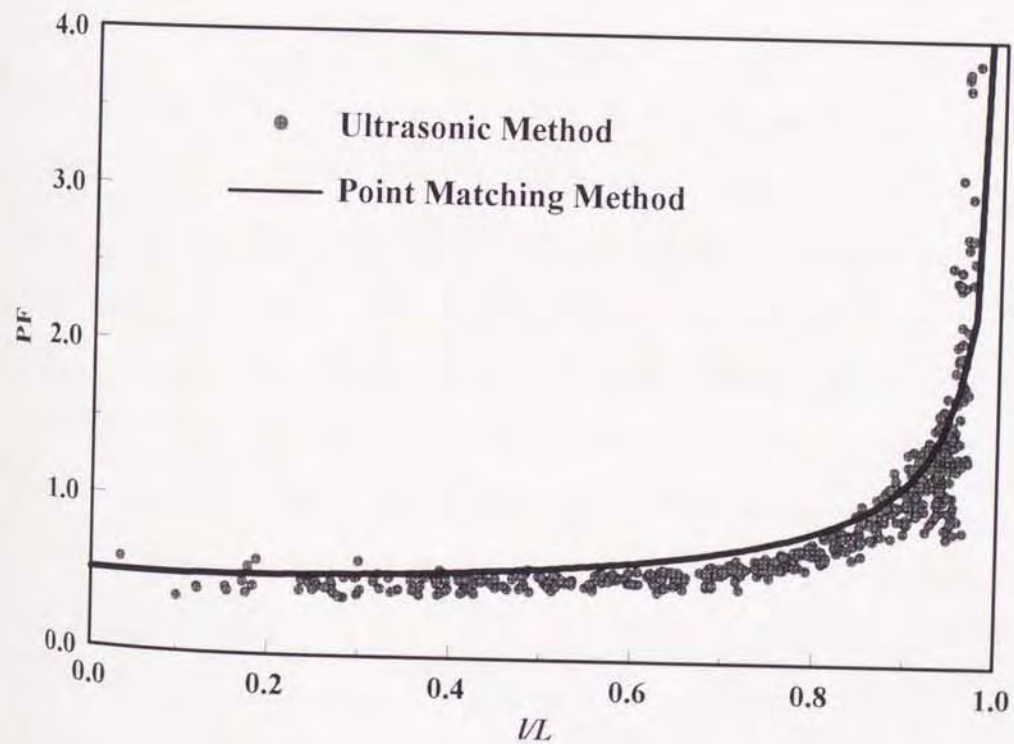


図 4.8 ポイントマッチング法による解との比較

十分に考慮し、較正曲線すなわち E_R^* と接触圧力の関係曲線を適宜最適なものを適用した。接触圧力の回収率はいずれの場合においても 97% ~ 103% であり、良好な接触圧力の回収率を得ている。

図 4.8 に実験 2 で得られた接触圧力分布及び本測定方法の測定精度を検証するために付録 1 に示すポイントマッチング法を利用して得られた接触圧力分布を併せて示す。横軸は接触域中心から測定位置までの距離 l をゴム試験片の半径 L で除した無次元長さ l/L を、縦軸はゴム円柱の押し付け力と見掛けの接触面積から求めた公称応力で、接触圧力の測定値を除して求めた PF 値をそれぞれ示す。図に示すように超音波による実験値とポイントマッチング法で得られた解は定性的かつ定量的にほぼ一致することから、超音波法で得られる接触圧力値は十分な信頼性を有していること、さらには接触域端部の測定時に用いたエコー高さ及び測定位置の補正方法は合理性を有し、かつ十分な精度で接触圧力の評価が可能であることを示している。

図 4.9 から図 4.14 に超音波法による接触圧力測定の応用例として、実験 3 で得られた測定結果を示す。なお、図は測定結果の一例であり、アクリルプレートがゴム円柱に 304N で押し付けた場合の接触圧力分布を $B_1 \sim B_6$ までそれぞれ示している。図の横軸は接触域中心部から測定位置までの距離をゴム円柱の半径 R で除した値 r/R 、縦軸は得られた接触圧力値を "押し付け荷重 / 見掛けの接触面積" で与えられる公称応力で除して求めた PF 値をそれぞれ示す。図よりいずれのゴム円柱を用いた場合においてもそれぞれ接触域中心部においては PF 値は小さく、接触域端部に近づくに従い圧力勾配は大きくなる。硬度が小さい B_3 及び B_6 は接触圧力の PF 値及びその勾配が大きくなる r/R 値が 0.7 程度よりも大きい領域であるのに対し、最も硬度が大きい B_2 では中心から $r/R = 0.8$ 程度までの領域における接触圧力はほぼ一定値を示す。一方、中心部の PF 値は弾性係数が小さいゴム試料ほど大きな値を示しており、 B_2 では 0.26 程度の値を示すのに対し B_6 では 0.35 程度である。すなわち、弾性係数が小さいゴム試料ほど接触圧力は接触端部集中型から分散型へ移行することを示している。

図 4.15 及び図 4.16 に実験 4 で得られた接触圧力分布をそれぞれ示す。な

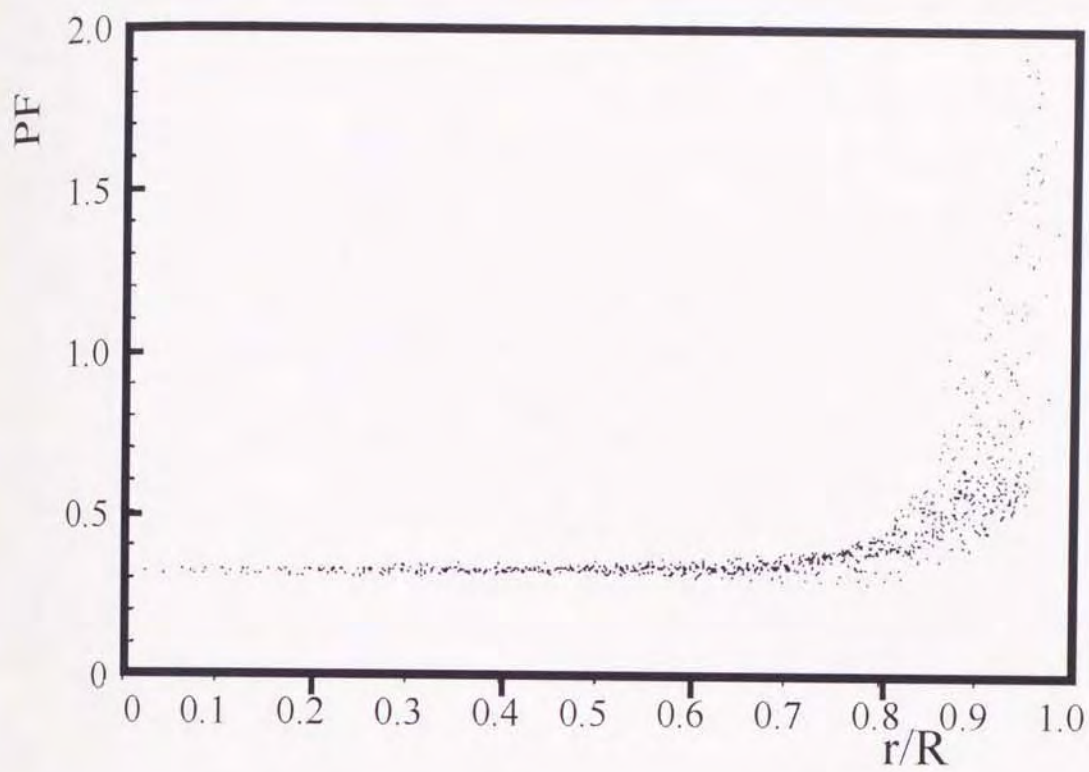


図 4.9 ゴム試験片 B₁ の接触圧力分布

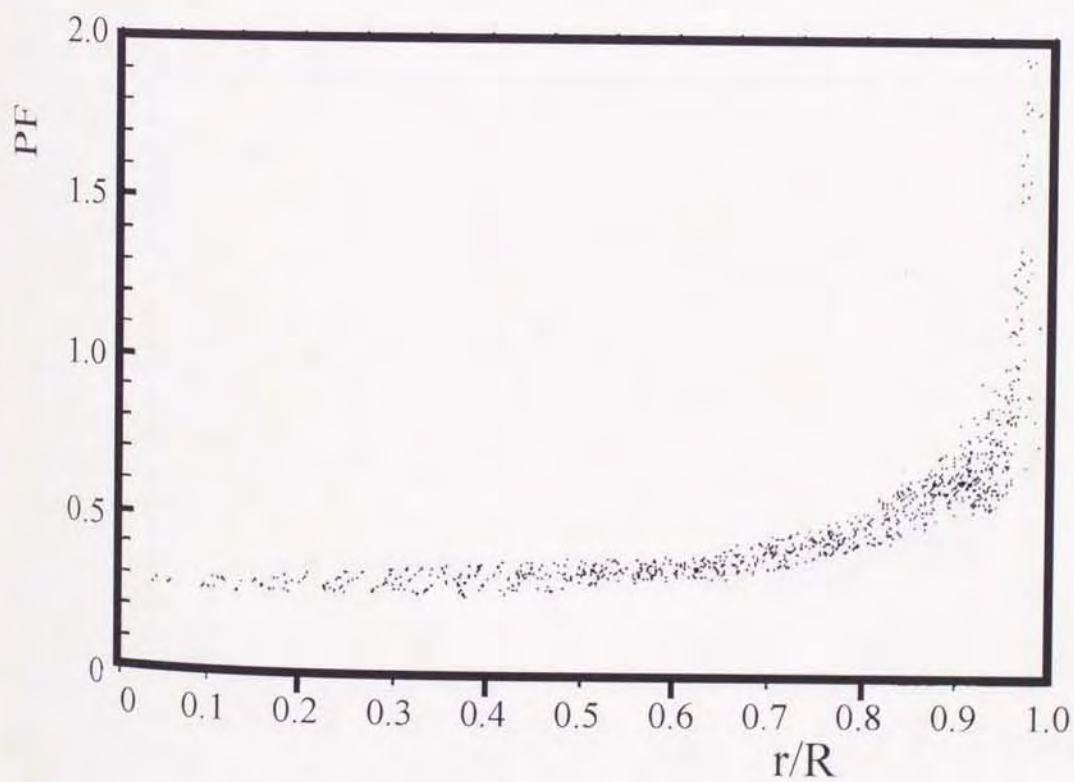


図 4.10 ゴム試験片 B₂ の接触圧力分布

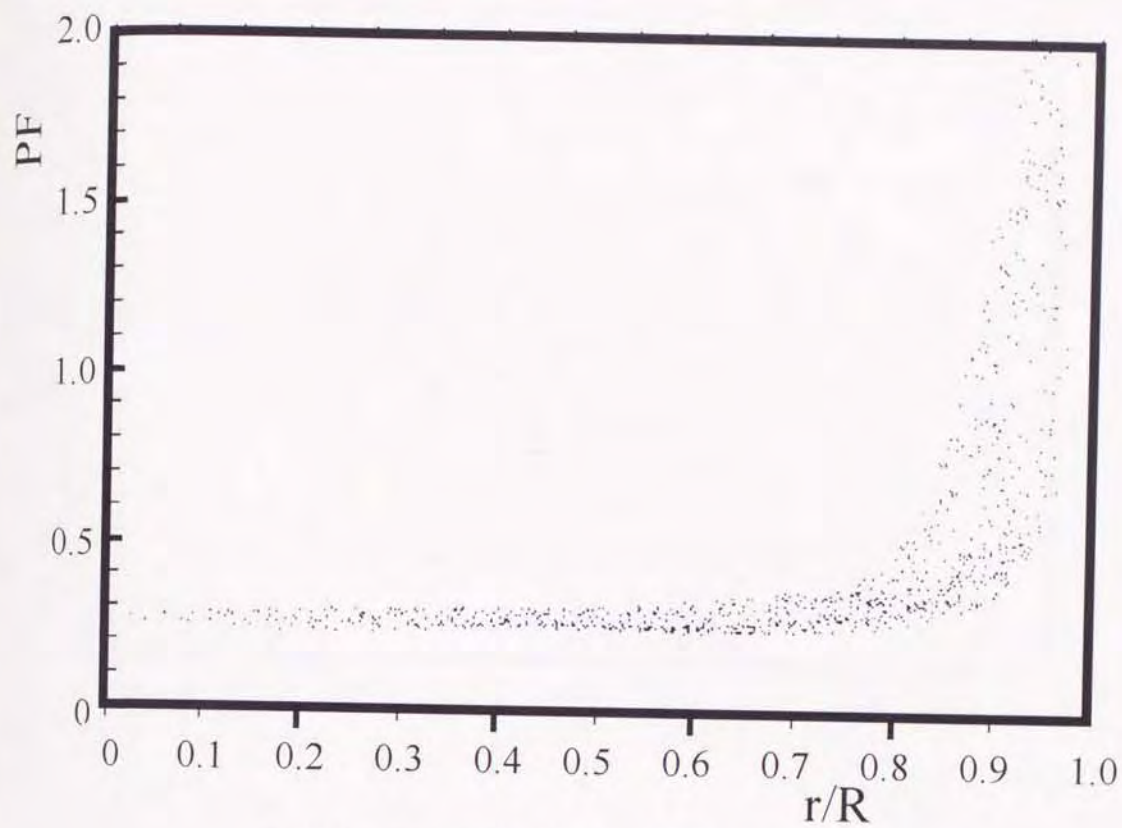


図 4.11 ゴム試験片 B₃ の接触圧力分布

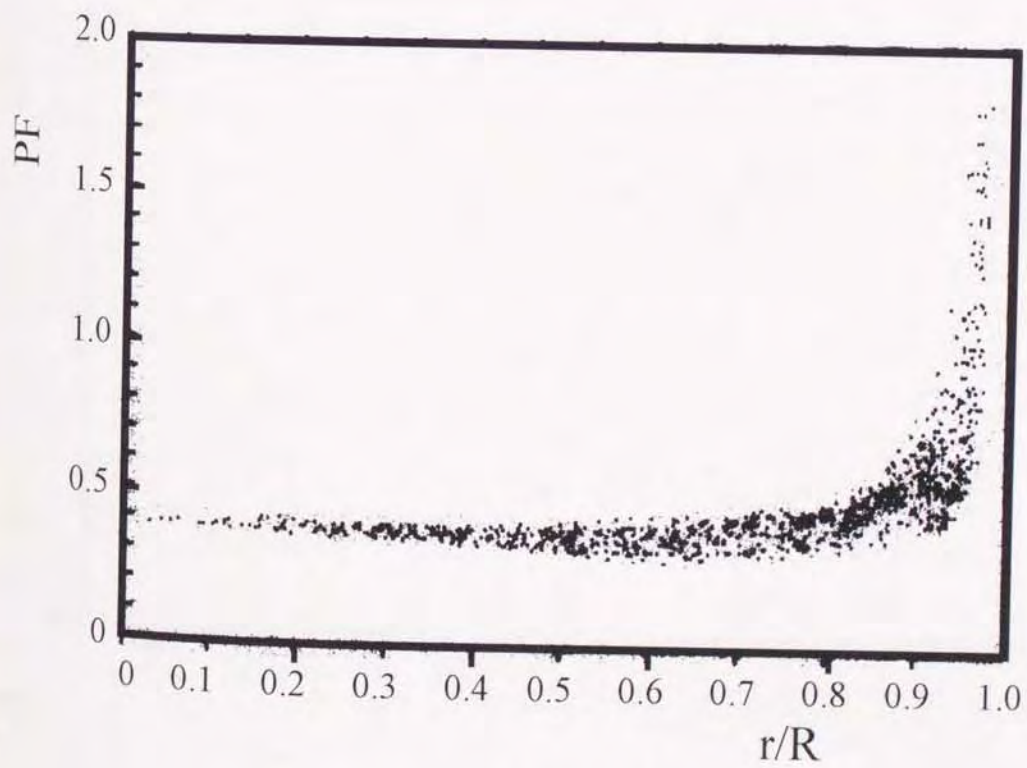


図 4.12 ゴム試験片 B₄ の接触圧力分布

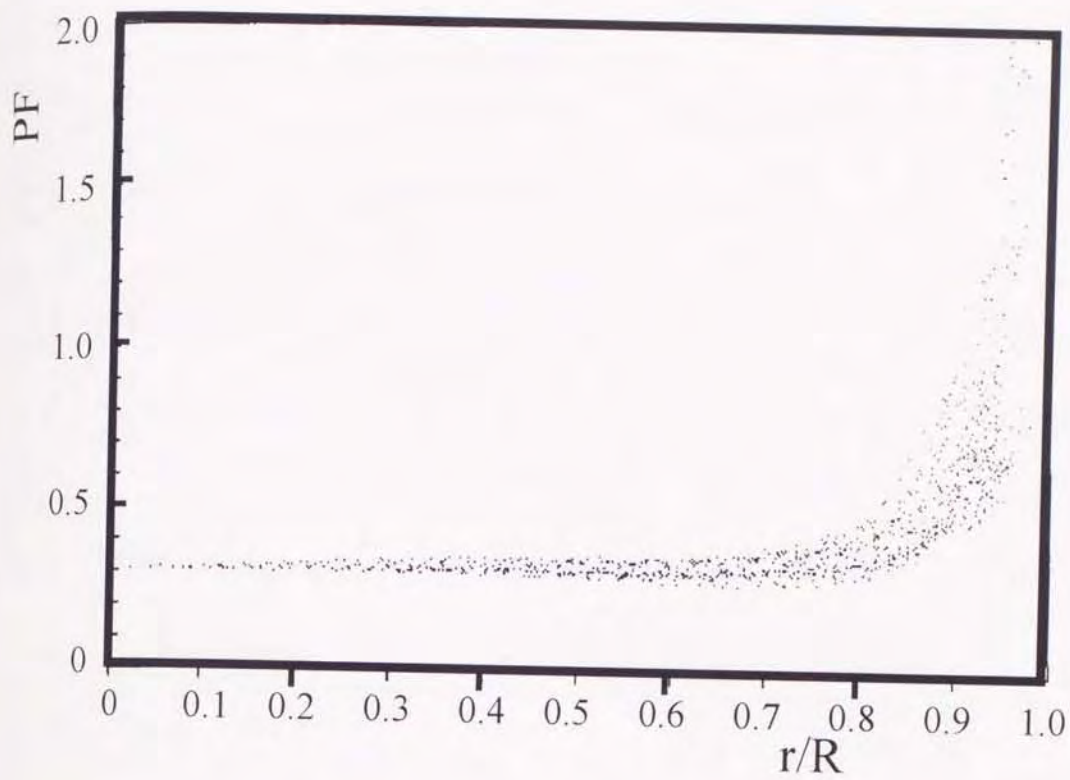


図 4.13 ゴム試験片 B₅ の接触圧力分布

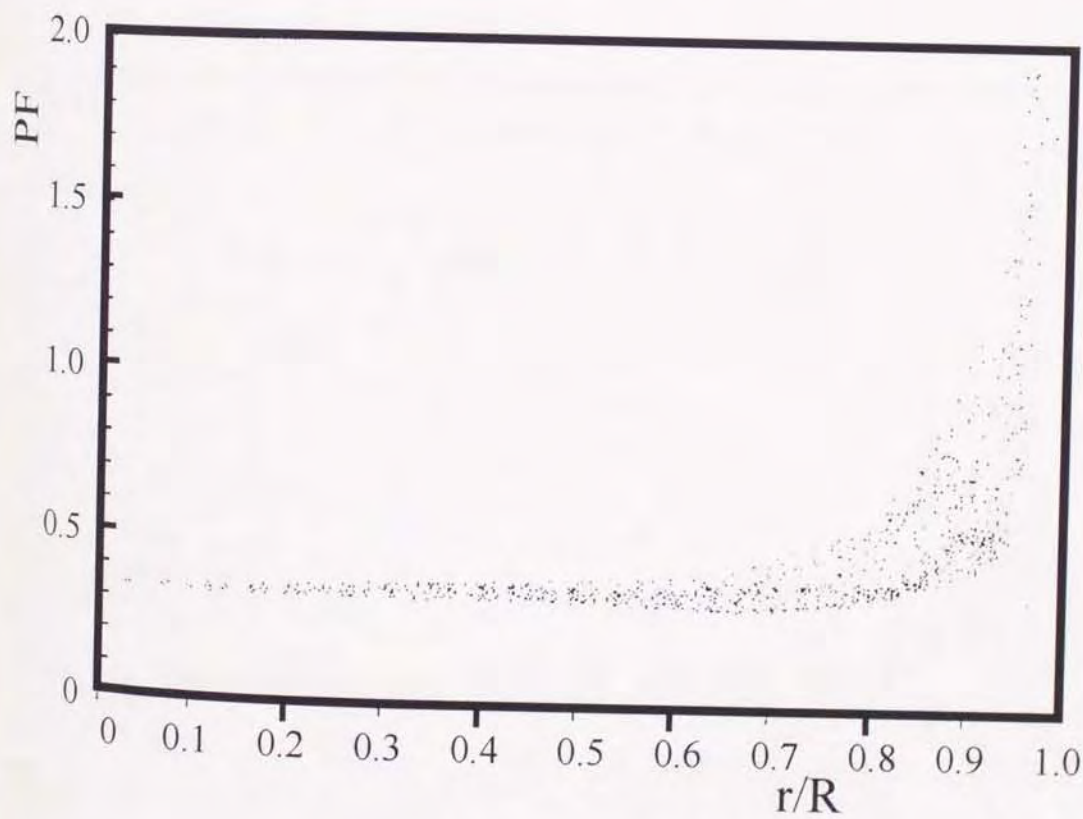


図 4.14 ゴム試験片 B₆ の接触圧力分布

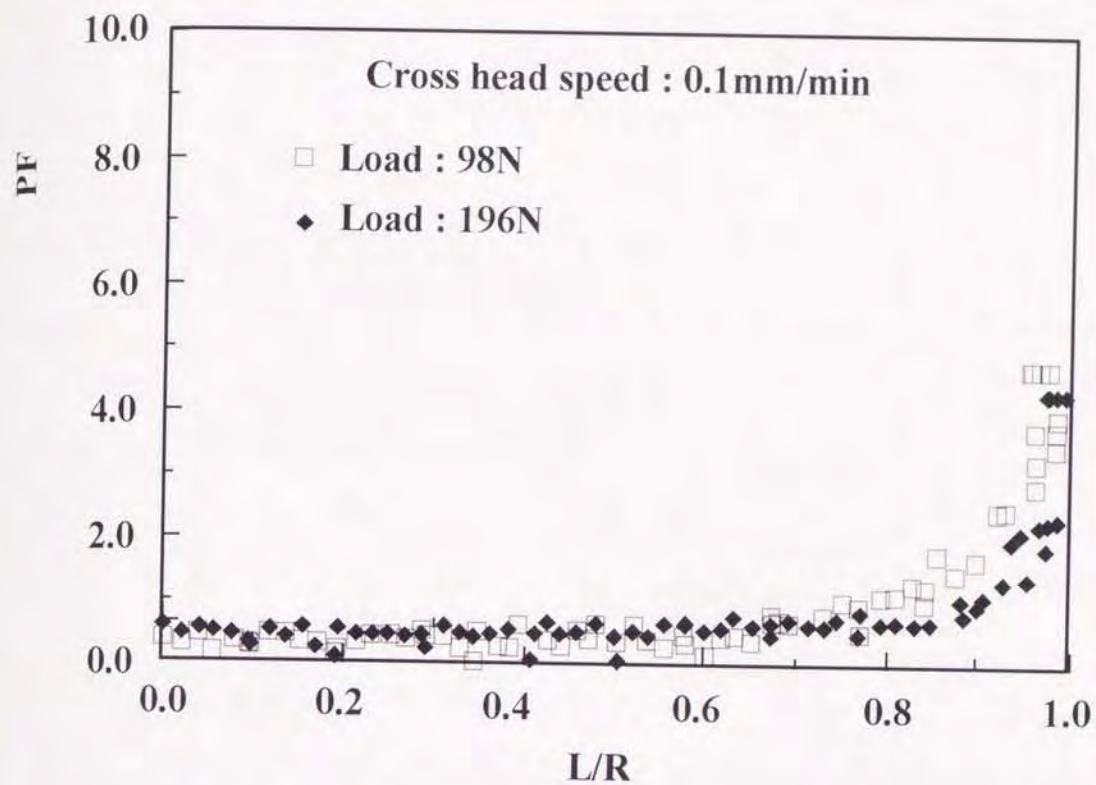


図 4.15 負荷速度による接触圧力分布への影響 (Cross head speed : 0.1mm/min)

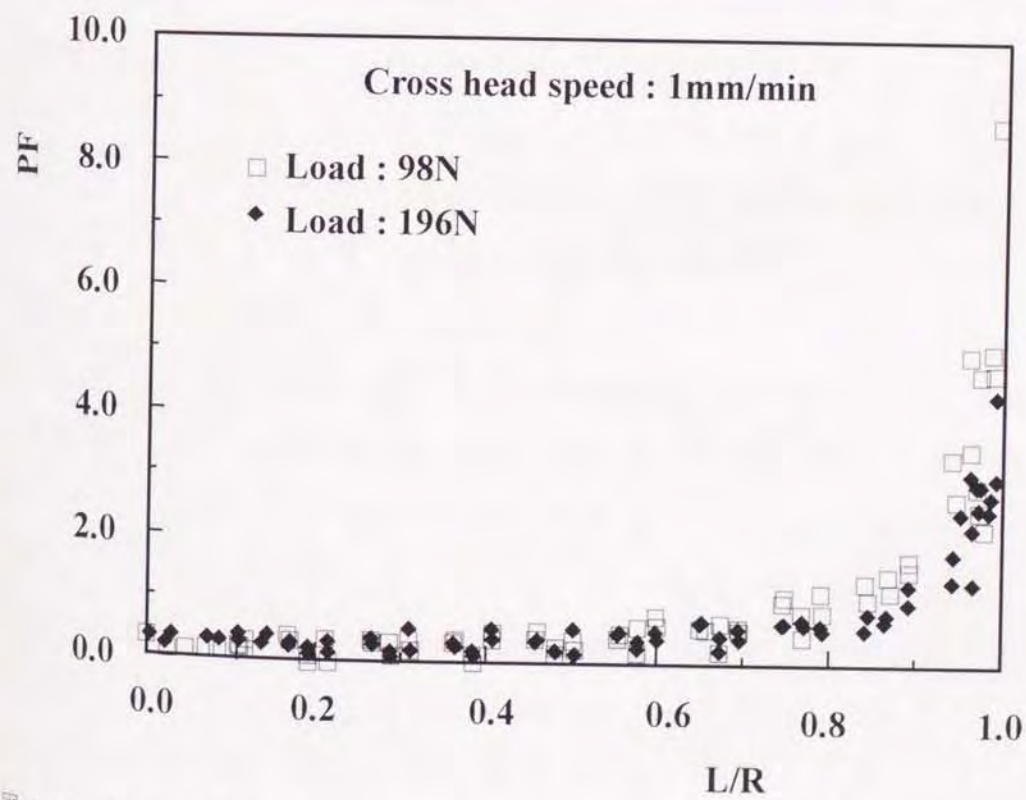


図 4.16 負荷速度による接触圧力分布への影響 (Cross head speed : 1mm/s)

お、図 4.15 はゴム試料の押し付け速度、すなわち万能試験機のコラム移動速度を 0.1mm/min に設定した場合、一方、図 4.16 は 1mm/min の場合を示す。図の縦軸は得られた接触圧力を公称応力で除した値である PF 値を、横軸には測定位置から接触領域中心までの距離 L をゴム円柱の半径 R で除した L/R をそれぞれ示す。

負荷速度に関わらず接触端部に近傍では接触圧力の勾配は急激に大きな値を示す。負荷荷重が小さくかつ負荷速度が大きい程、この傾向は顕著である。すなわち、負荷速度が小さくなる程、また荷重が大きくなる程、接触圧力分布は接触端部集中型から分散型へと移行することを示している。

第 4.3 節 摺動時の接触圧力

ゴム材料の耐摩耗特性は、実用上極めて重要な特性であり、ゴム材料の種類によって、ある程度の摩耗量を予測することは可能である。しかしながら、耐摩耗特性はゴム材料の使用条件、材料の配合要因などにより大きく変化する。耐摩耗特性を評価するための試験機は、各種提案され実用化されているものの、いずれの場合においても短時間に摩耗特性を評価するための加速試験であり、実際の使用条件に比べ相当過酷な条件が設定されている。例えば、タイヤのトレッドゴムの摩耗試験においては、通常、“ピコ法>ウィリアムス法>アクロン法=ランボーン法>>実地摩耗”の順で摩耗量が多く評価される。摺動時の温度は摩耗量に与える影響は大きく、ブタジエンゴムを除き、例えばスチレン・ブタジエンゴム、ブチルゴム、天然ゴム等は温度によって摩耗特性や摩擦特性は大きく変化する。さらには、配合要因によっても摩耗特性は変化する。たとえば、天然ゴムにカーボンプラックを配合し補強したときの摩耗量は、一般的に平均粒子径の小さいカーボンプラックを配合した場合、摩耗特性が数倍程度向上する。また、このように粒子径の小さいカーボンプラックを配合した系では、配合量に最適値が存在し、重量分率で約 60% 程度のカーボンプラックを混入した場合の摩耗特性が一般的に最も良好である。

一方、タイヤに用いられるトレッドゴム用材料は道路把持性、耐摩耗性

及び耐クラック性が良好であることが必要であり，スチレン・ブタジエンゴム，ブタジエンゴム及び天然ゴムが一般的に用いられている．本実験ではカーボンブラックを混入した天然ゴムで作製したゴム試験片を用いて，摺動時の接触圧力の評価を行う．

4.3.1 実験装置と実験方法

アブレーションパターン生成機構を接触圧力に基づいて解明するために第2.5節と同様にピン－オン－ディスク型摩耗試験機を利用して接触圧力測定実験を行った．図 4.17 及び図 4.18 はその測定システムである．便宜上，本システムを「測定システム I」と記述する．接触領域中心での摺動速度及びゴム試料の押し付け荷重を表 4.3 に示すように設定し，図 4.19 に示すようにアクリル円板上に円板中心より 118mm の位置で，表 4.2 の A で示したゴム材料で作成した直径 ϕ 30mm，厚さ 10mm のゴム試験片を押しつけた．この状態で，定常摩耗に移行した後に 2 軸制御のロボットを用



図 4.17 実験装置概略 (測定システム I)

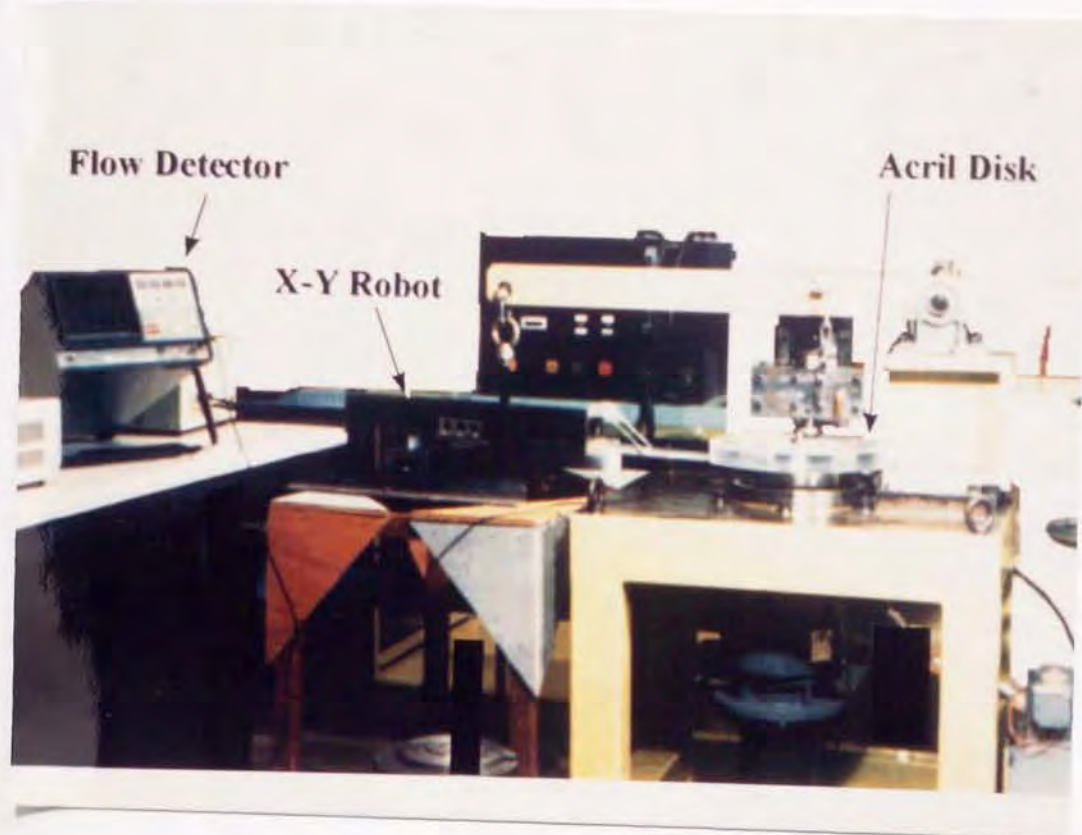


図 4.18 実験システム概略 (測定システム I)

表 4.3 実験条件

No.	Velocity	Load
A	5.4mm/s	254.8N
B	5.4mm/s	588.0N
C	10.8mm/s	254.8N
D	21.9mm/s	254.8N

い、ホルダーに取り付けた探触子をアクリル円板下面を走査して、 x , y 方向それぞれ 1mm 間隔で接触域全域の第 1 エコー高さを測定した。なお、探触子の設置はギャップ法を採用し、走査面と水平かつ 0.2mm の距離が保持してホルダーに固定した。探触子の接触媒質はグリセリン溶液を用い、探触子とアクリル円板間に充分グリセリン溶液が満たされるように測定時の間、常に補給した。超音波探傷器のゲインはゴム試料が非接触時において探傷器ディスプレイ上の第 1 エコー高さが 100% になるように設定した。

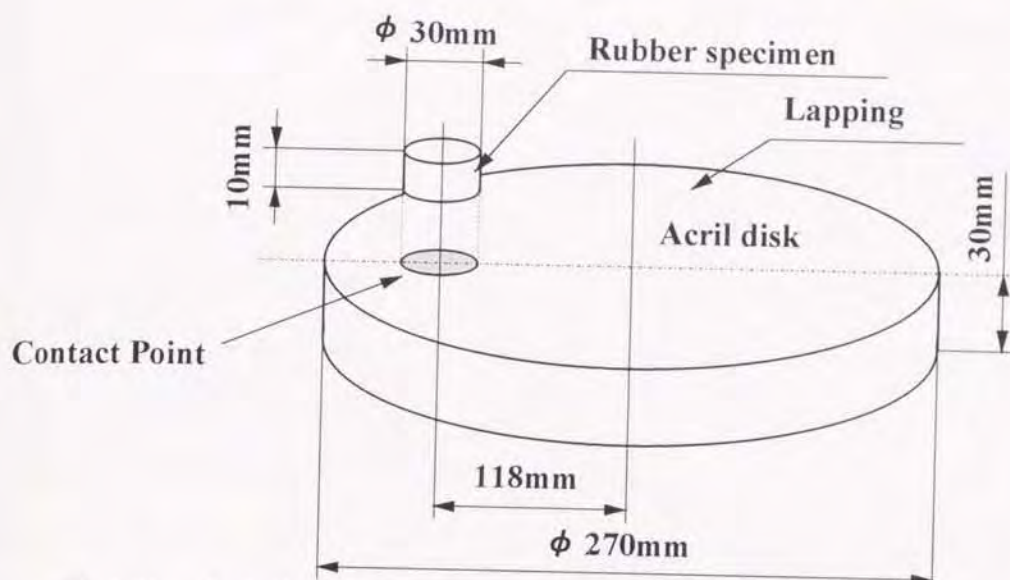
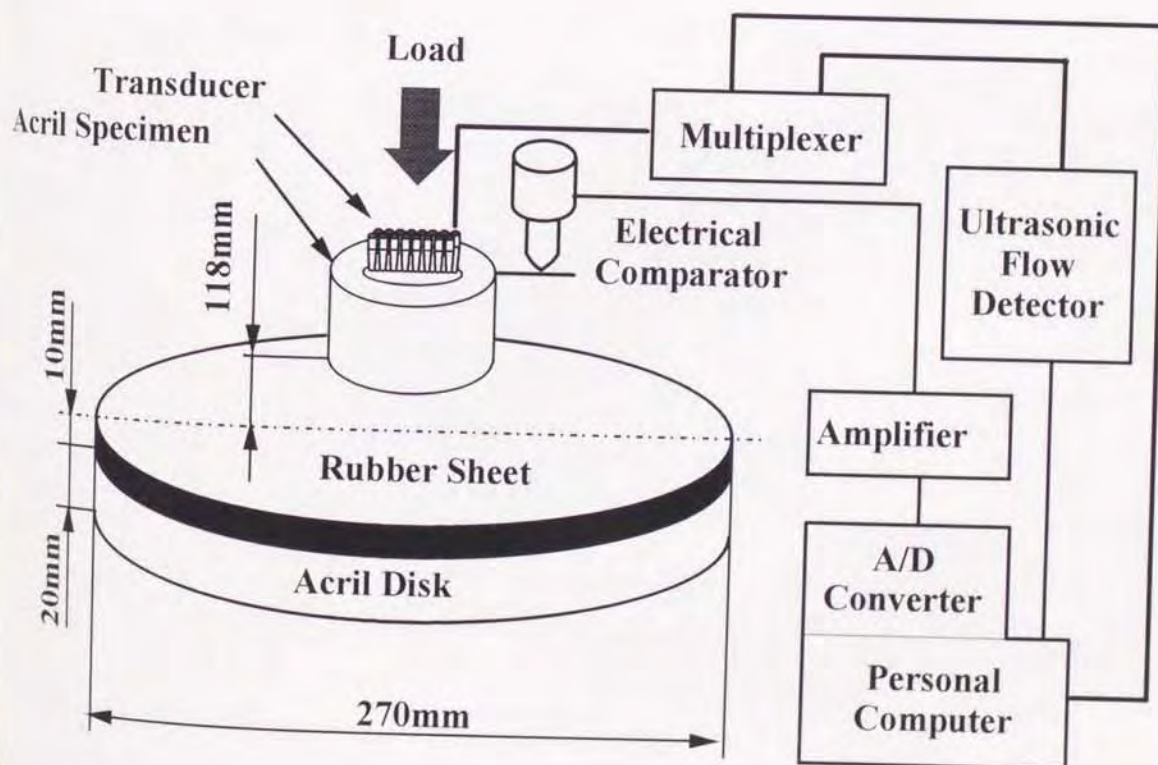


図 4.19 アクリル円板及びゴム試験片の形状と摺動位置

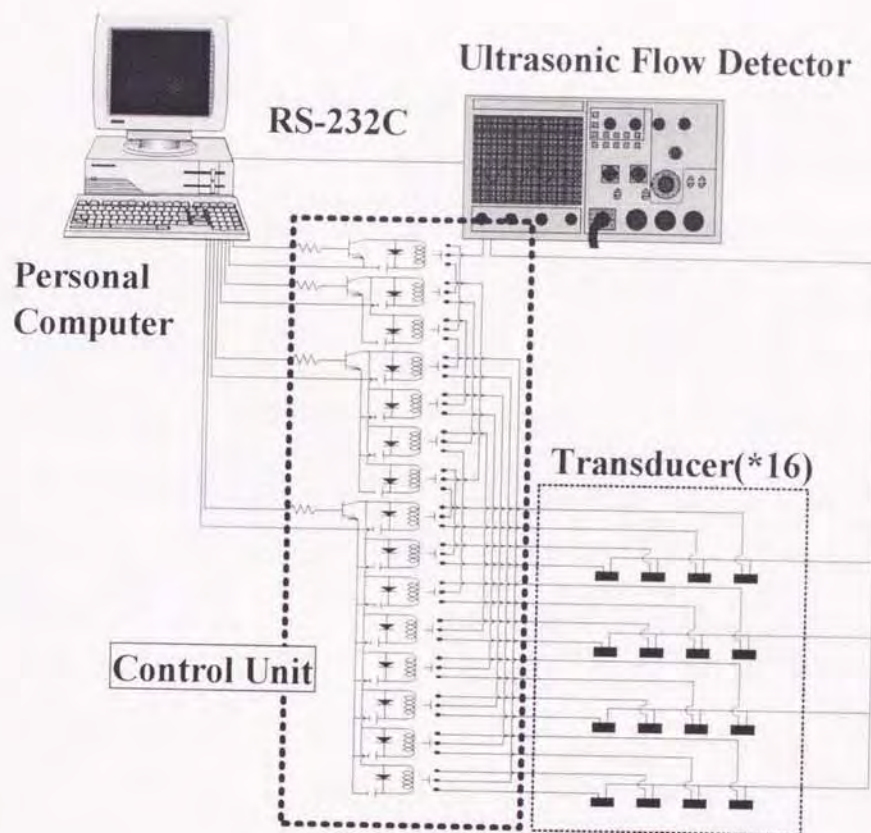
接触界面からの超音波の反射特性は接触面の表面粗さの影響を受ける。よって、アクリル円板とゴム試験片の初期摺動面は第 2.5 節で示した較正実験と同様にした。すなわち、前者はラップ加工を施し、均一な表面状態を得ると共に、後者においては射出成形面を利用した。初期表面の粗さは中心線平均粗さ R_a で $0.4 \mu m$ と $0.77 \mu m$ である。実験は室温・無潤滑で行うために実験に際してゴム試験片及びアクリル円板の接触表面をメチルアルコールで充分脱脂した。本実験で得られた接触面からの第 1 エコー高さの測定値よりエコー高さ比 E_R^* を算出し、較正実験結果をもとにして接触圧力値を求めた。特に、接触域端部の測定では反射波特性を考慮し、第 2.5 章に示した手法により測定値の補正を行った。

さらに、アブレーションパターンが形成されるとき接触圧力を、経時的に測定するために、実験システム I と同様にピン-オン-ディスク型摩擦試験機を利用した図 4.20(a) に示す接触圧力測定システムを用いた。便宜上、以後本システムを「測定システム II」で記述する。ゴム材料 A で作製した回転する天然ゴムシートの中心から 118mm の位置でアクリル試験片を押し付け、10.79mm/s で摺動する場合の接触面からの第 1 エコーを測定した。ゴム試験片の押し付け荷重は、127.6N、254.8N、588.0N および 931.0N とした。同図中 (c) に示すように、円盤形状のアクリル試験片 (直径 ϕ 30mm、高さ 20mm) に 16 本のアクリルピン (直径 ϕ 0.9mm、長さ 20mm) を摺動方向

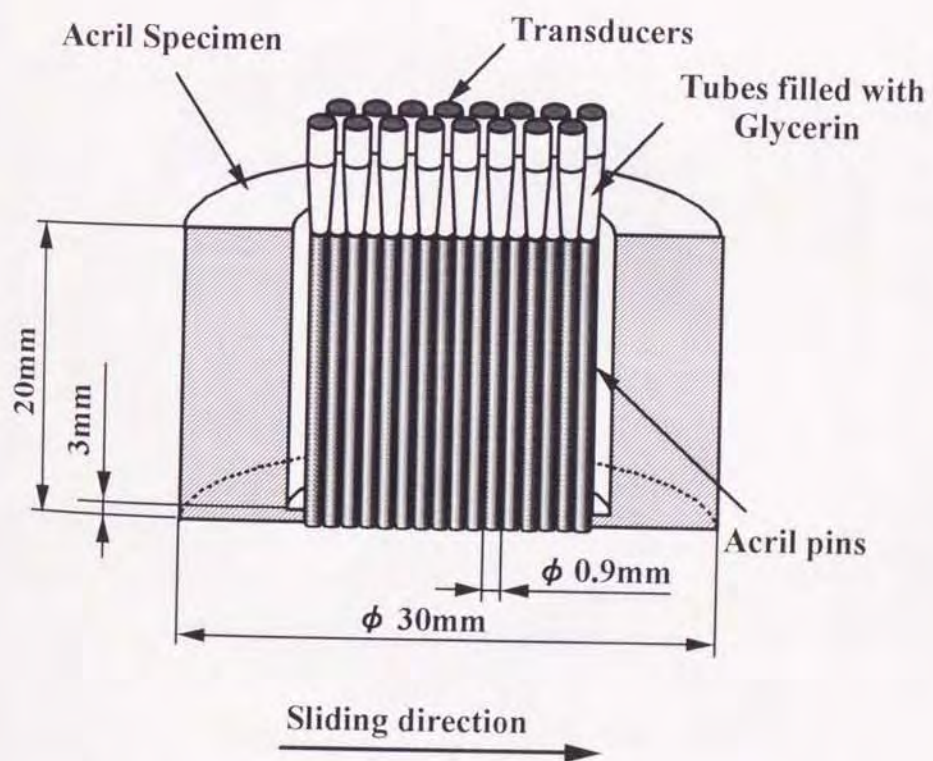
の中心軸上に 1mm 間隔で挿入し、これらの上にグリセリンを封入したテーパー管を介して公称中心周波数 10MHz、振動子直径 ϕ 6.4mm の垂直型縦波探触子を設置した。それぞれのアクリルピン内を伝播する接触面からのエコーを、同図中 (b) のマルチプレクサを用いて高速に切り替え、順次検出することにより多点同時測定を行った。反射波特性は接触面の表面粗さの影響を受けることから、アクリル試験片及びゴムシートの接触面の初期表面粗さは第 2.6 節で示す校正実験と同様な状態とし、中心線平均粗さ R_a でアクリル試験片は $1.2 \mu\text{m}$ 、ゴムシートは $0.6 \mu\text{m}$ とした。測定に際しては電気マイクロメータを用いて、試験片ホルダーの上下移動量を計測し、定常摩耗に移行したことを確認した後に第 1 エコーの測定を開始した。得られた反射波のウィグナ分布を求め、これを利用して反射波のエネルギー比 WDE_R^* 及びピーク周波数を算出し、第 2.6 節に示した接触圧力と反射波特性の関係を基に、接触圧力に換算した。



(a) 測定システム II



(b) マルチプレクサ詳細



(b) アクリル試験片

図 4.20 接触圧力測定装置概略 (測定システム II)

4.3.2 結果及び考察

本実験で設定した試験条件のうち，表 4.3 中の A，B 及び D で示す条件ではアブレーションパターンは形成されなかった，図 4.21 から図 4.23 はこの時のそれぞれの接触圧力の測定結果である．なお，図は接触圧力値を 16 通りのタイルパターンで示している．図の下端はリーディングエッジ，上端はトレディングエッジである．すなわち，ゴムの摺動方向は下方から上方へ向かう方向に一致する．接触圧力の分布はいずれの摺動条件においても接触域端部近傍で大きな値を示しており，さらにリーディングエッジ側へ偏った分布を示している．図 4.22 に示すように押し付け荷重が 588.0N の場合は摩擦応力によりゴム試験片が大きく変形することから，接触域の形状も特にリーディングエッジで変形している．

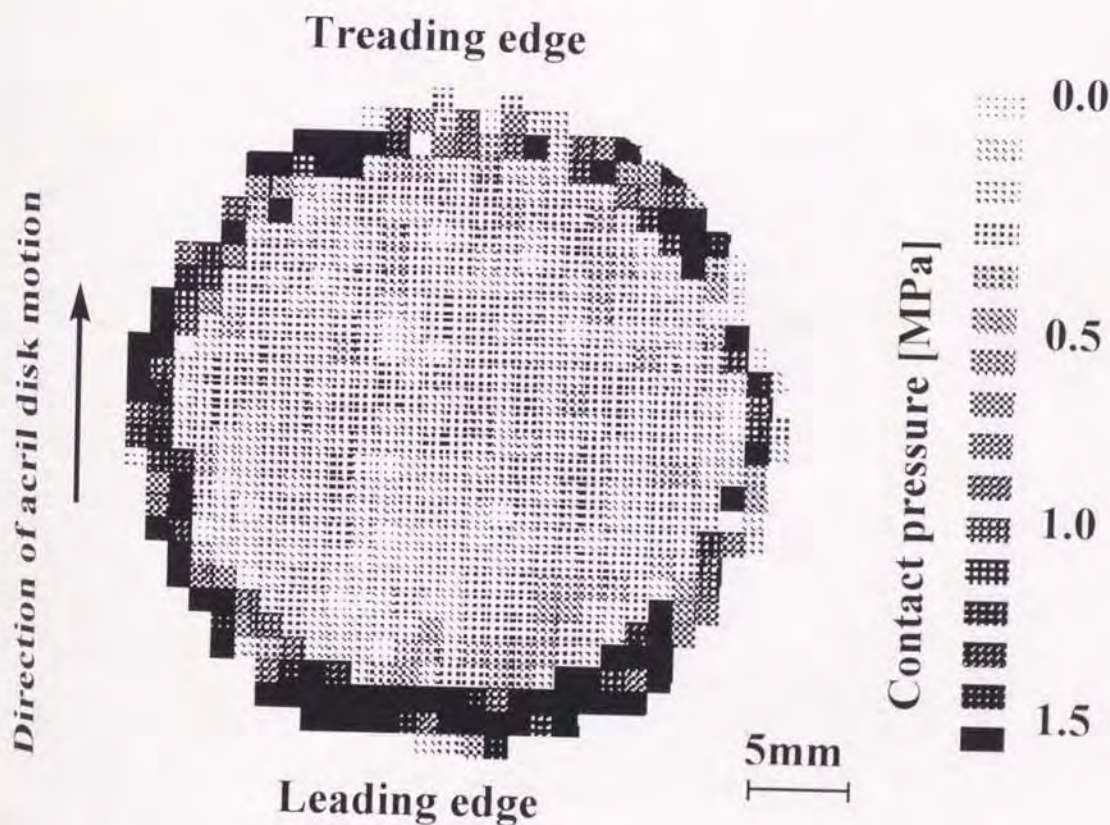


図 4.21 摺動時の接触圧力分布 (Load:254.8N Velocity:5.4mm/s)

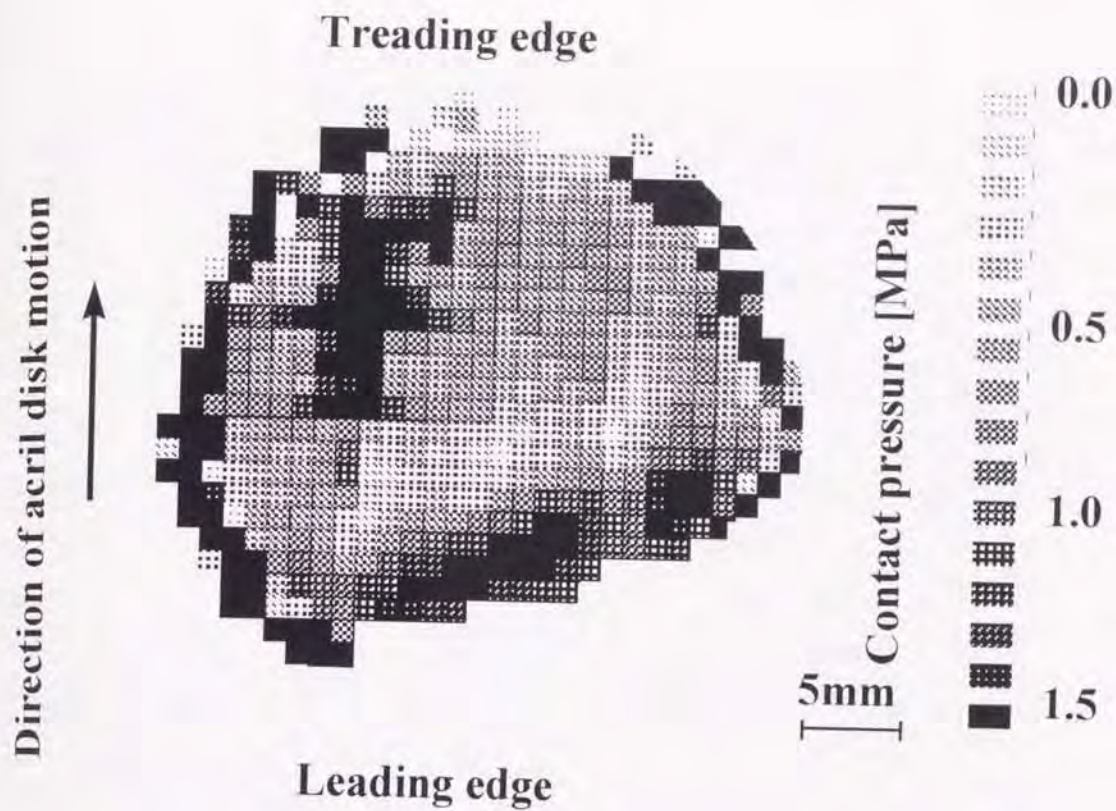


図 4.22 摺動時の接触圧力分布 (Load:588.0N Velocity:5.4mm/s)

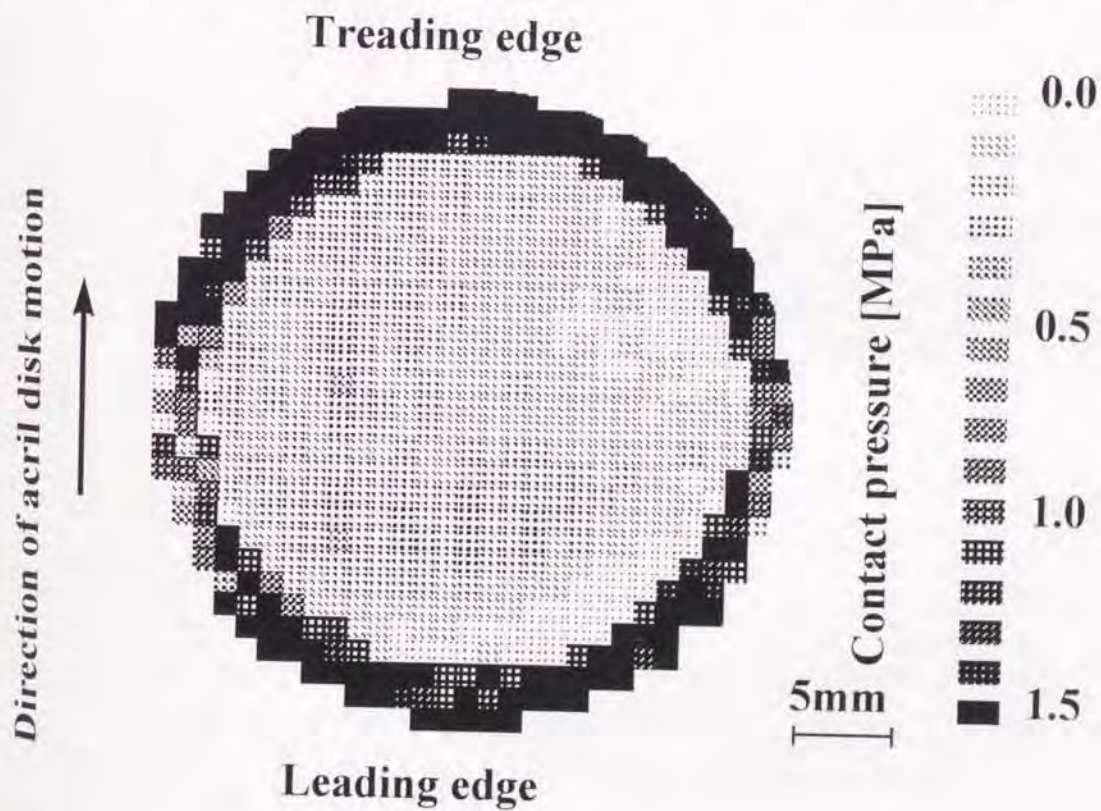


図 4.23 摺動時の接触圧力分布 (Load:254.8N Velocity:21.9mm/s)



図 4.24 ゴム試験片表面のアブレーションパターン

(Load:254.8N Velocity:10.8mm/s)

一方、実験番号 C, すなわち摺動速度 10.8mm/s, 押し付け荷重 294.2N の条件で摺動した場合, スティックスリップ現象が見受けられる. この様な条件で実験を行った後のゴム摺動面には図 4.24 の走査型電子顕微鏡写真に示すアブレーションパターンが見られた. パターンの間隔はほぼ 1mm であり, 摺動方向に対し垂直方向のパターンが生ずる.

図 4.25 は実験終了後のゴム試験片のレプリカをエポキシ系樹脂で作成し, その形状を 3 次元測定機 (ミットヨ SUPER FN304) を用いて計測した摩耗量の分布図である. 計測点は試験片の接触面に対し水平方向 (XY 方向) の間隔を 0.5mm として, それぞれの点での高さ (Z 座標値) を計測した. 実験前後の測定値の差より, その位置における摩耗量を決定した. 図中の矢印はアクリルディスクの回転方向を, 円の下端はリーディングエッジ, 上端はトレディングエッジをそれぞれ示している. リーディングエッジにおいて偏摩耗が見受けられる. また, 接触域中央部ではややトレディン

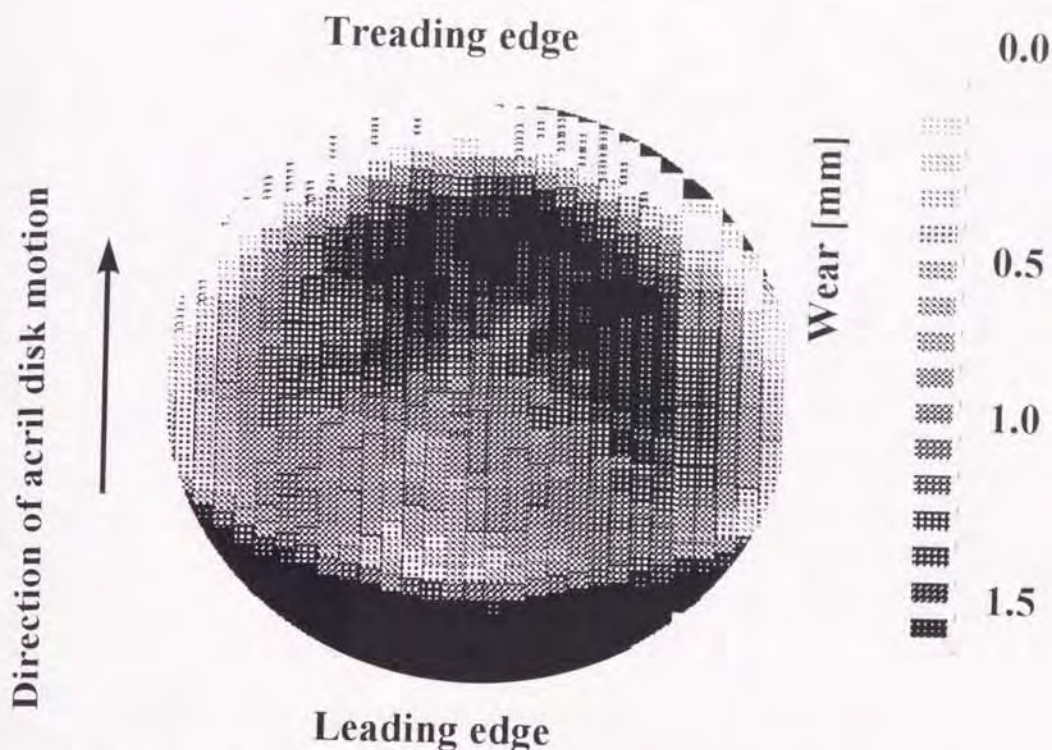


図 4.25 摺動後の摩耗量分布 (Load:254.8N Velocity:10.8mm/s)

グエッジ側の領域で摩耗量が多いことが解る。なお、図 4.24 に示したアブレーションパターンの多くは接触域中央部で摩耗量の多い領域内において観察された。

図 4.26 は押し付け荷重 254.8N、摺動速度 10.8mm/s の条件でゴム試験片を摺動した場合の接触圧力分布を示している。接触域端部の中でも特にリーディングエッジ近傍において接触圧力値は大きく、前述の偏摩耗が生じた領域に一致する。接触圧力の分布形状の図 4.21 から図 4.23 に示した様にパターンが形成されない場合と定性的にほぼ同様な分布傾向を示す。ゴム試験片の摺動方向の中心軸上、すなわち A - A 断面における接触圧力を接触子を高速に走査することにより求めた接触圧力の経時的变化を図 4.27 に示す。測定位置は円柱半径に基づく無次元量 r で示しており、 $r = 1.0$ はトレディングエッジを、 $r = -1.0$ はリーディングエッジをそれぞれ示す。端部に比べて中央部の接触圧力値は小さく、さらに 0.2MPa 以下の範囲内で振動していることがわかる。また、 $0 \leq r \leq 0.7$ の領域内で、特に接触圧力が 0.4 ~ 0.6MPa である黒色部分は時間と共に徐々にリーディングエッ

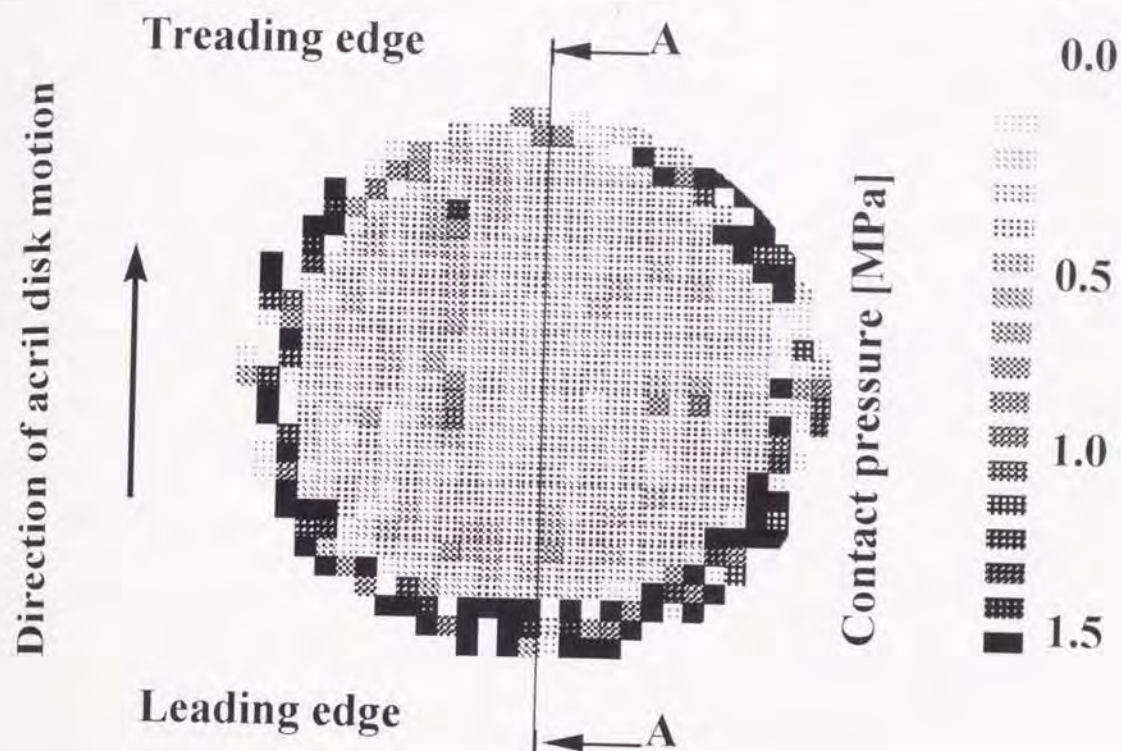


図 4.26 摺動時の接触圧力分布 (Load:254.8N Velocity:10.8mm/s)

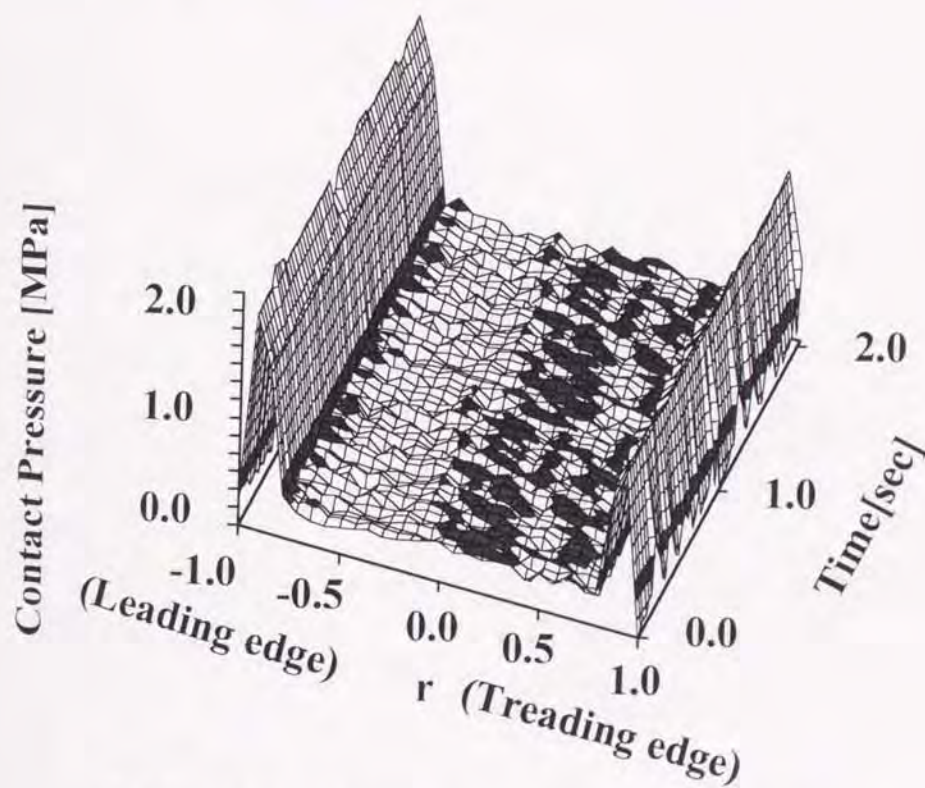


図 4.27 接触圧力の変化 (Load:254.8N Velocity:10.8mm/s)

ジ側に移動していることがわかる。これは、アブレーションパターンが生成し、移動するとともに接触圧力が変化することを示している。

リーディングエッジならびに接触域中央部における接触圧力値の変化曲線をFFT解析し、スペクトルを求めた結果を図4.28に示す。接触域中央部の接触圧力は30Hz程度で最も大きく変化するのに対し、リーディングエッジでは15Hz以下の周波数成分が多い。前者ではスティックスリップ現象、後者では摩耗粉の移動による接触圧力変化が支配的要因と考えられる。

接触圧力の変化曲線より求めたR.M.S値の分布を図4.29から図4.32にそれぞれ示す。図はそれぞれ16通りのタイルパターンで接触圧力変化曲線のR.M.S値の大きさを示し、下端はリーディングエッジ、上端はトレディングエッジを示す。アブレーションパターンが形成された条件である図4.31では接触域中央よりややトレディングエッジ側でR.M.S値の大きな領域が存在する。この領域は図4.25に示す摩耗量の大きな領域にほぼ一致する。これらのことから、スティックスリップ現象により接触圧力は0.4～0.6MPaの範囲内で30Hz程度変動し、これに伴ってアブレーションパ

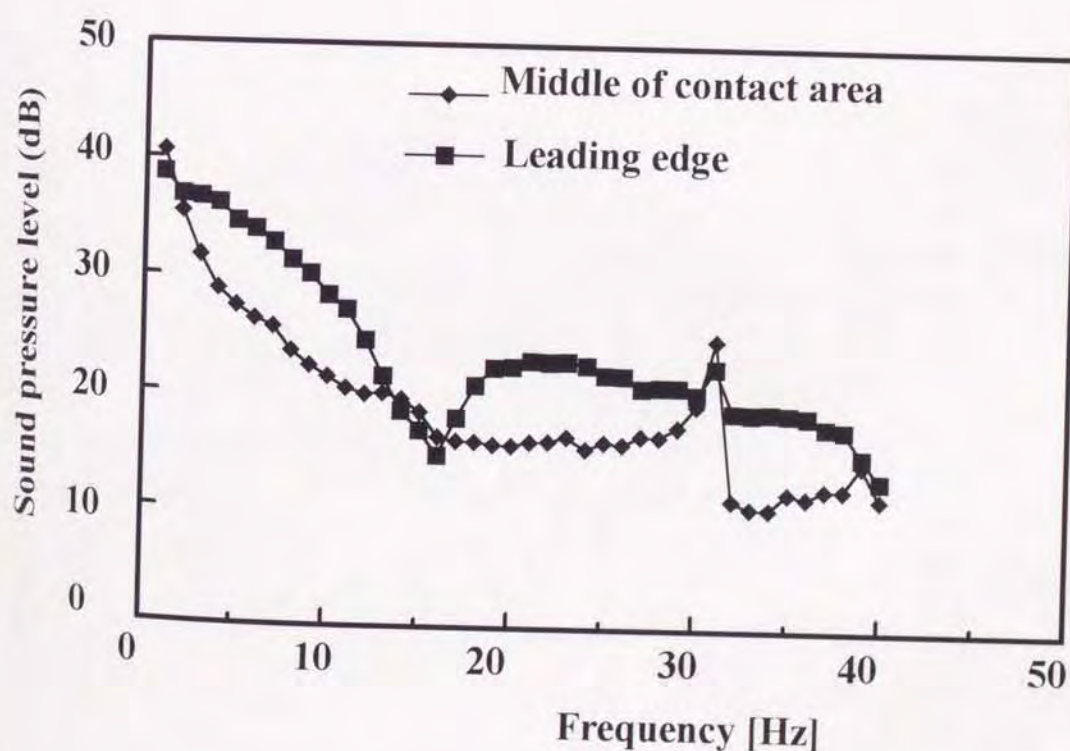


図 4.28 接触圧力変化曲線のスペクトル

(Load:254.8N Velocity:10.8mm/s)

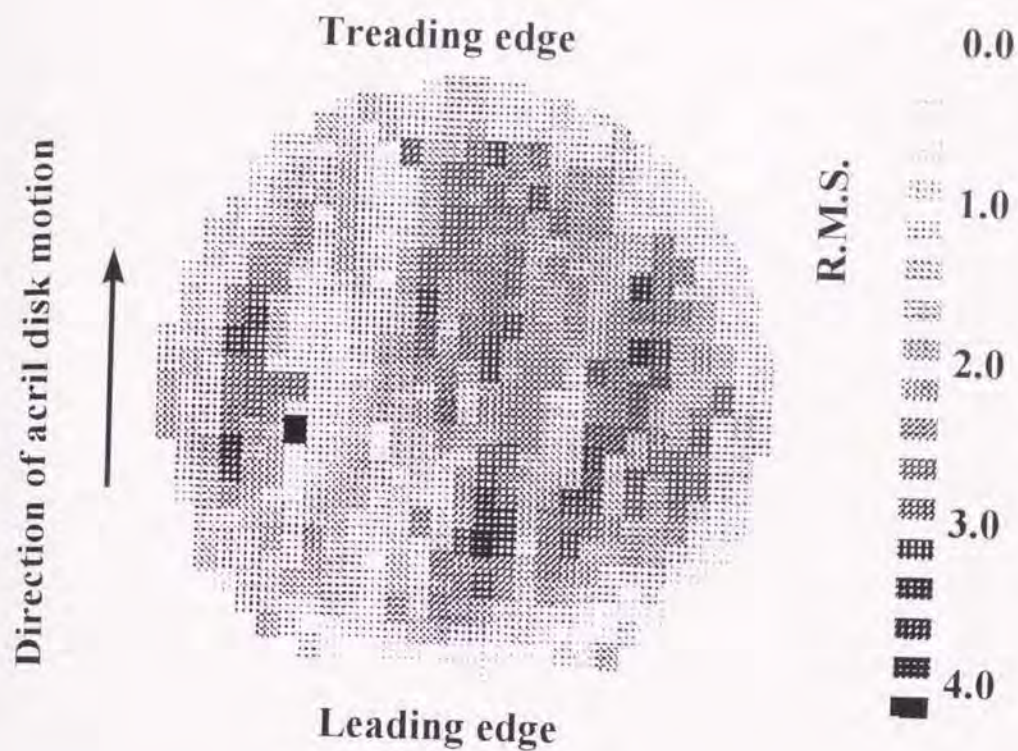


図 4.29 接触圧力の R.M.S 値分布 (Load:254.8N Velocity:5.4mm/s)

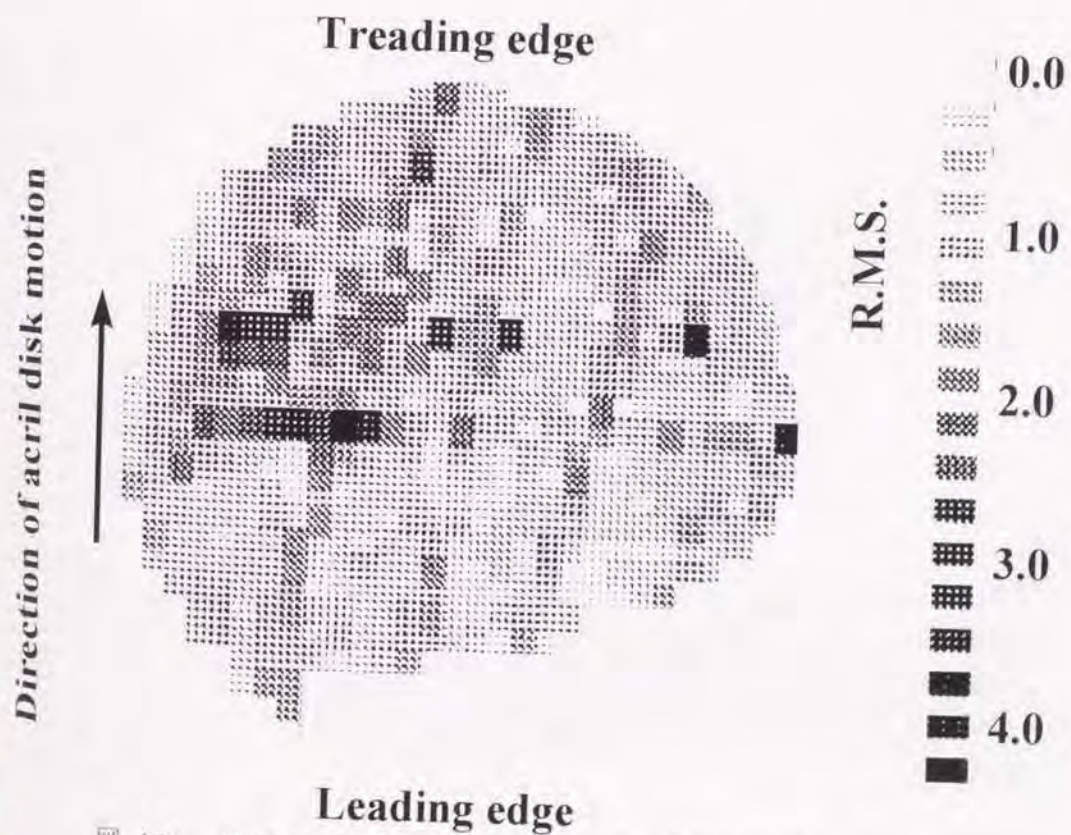


図 4.30 接触圧力の R.M.S 値分布 (Load:588.0N Velocity:5.4mm/s)

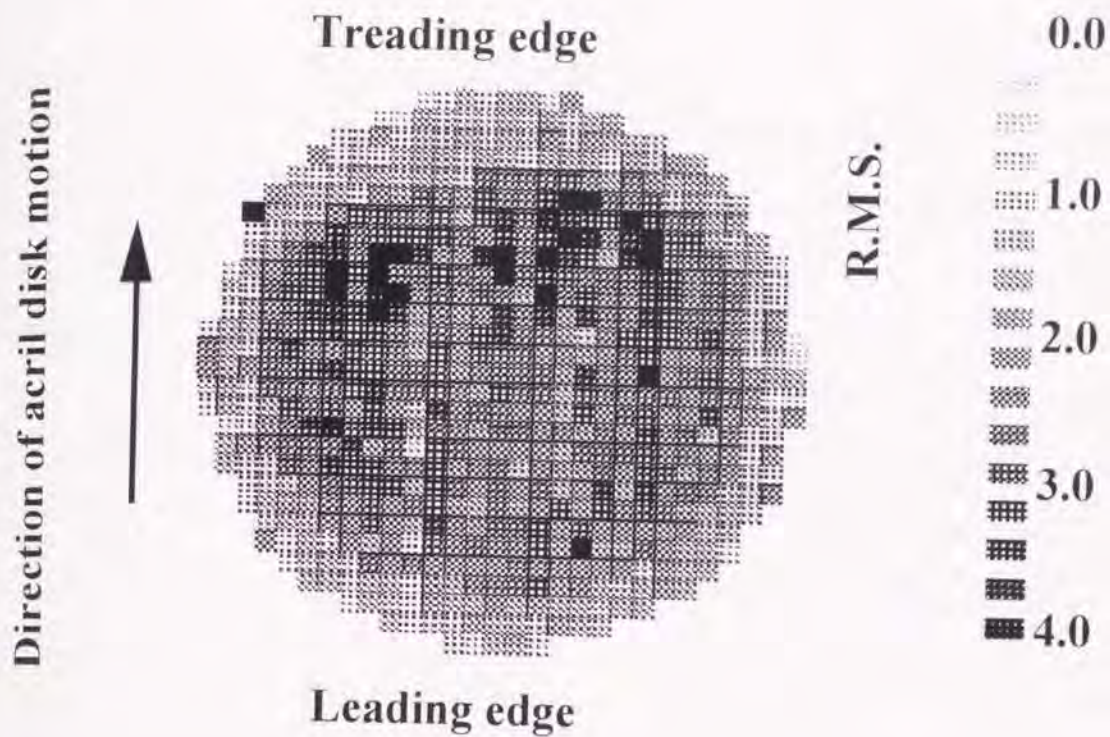


図 4.31 接触圧力の R.M.S 値分布 (Load:254.8N Velocity:10.8mm/s)

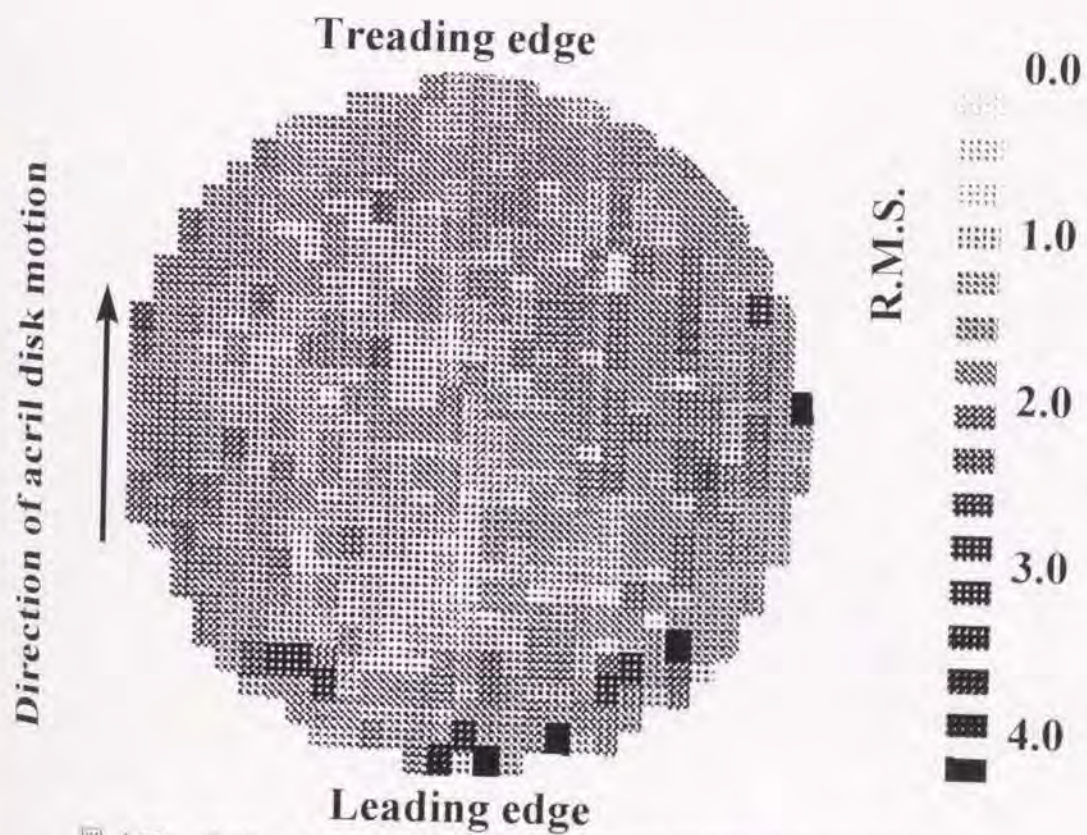


図 4.32 接触圧力の R.M.S 値分布 (Load:254.8N Velocity:21.9mm/s)

ターンが生成すると考えられる。

図 4.33 に測定システム II を用いて摺動方向中心軸上の接触圧力分布を測定した結果を経時的に示す。なお、試験条件はアクリル試験片の押し付け力 254.8N、摺動速度 10.8mm/s に設定した。図中の測定位置はアクリル試験片の中心位置から摺動方向中心軸上の測定点までの距離に対応し、リーディングエッジ側を負、トレディングエッジ側を正の値でそれぞれ示している。局所的に接触圧力が急激に変化する領域が存在し、この領域はトレディングエッジ側に移動している。この変化には特徴的パターンが見られ、接触面の一部に接触圧力が 0.6 ~ 0.9MPa 程度まで増加する領域を生じ、この領域はリーディングエッジ側に移動した後、急激にその部分の圧力をほぼ 0MPa まで減少させて、さらに 0.2MPa 程度まで増加する。なお、実験終了後のゴムシート摺動面上には約 1mm 間隔でアブレーションパターンが観察された。

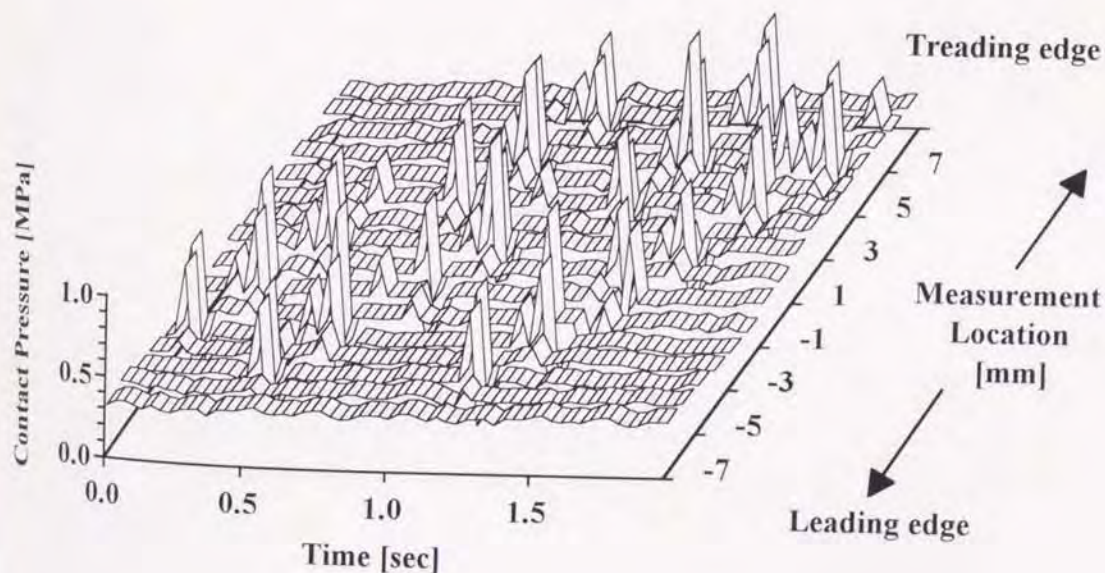


図 4.33 接触圧力の経時的変化 (Load : 254.8N)

一方、アクリル試験片に対する押し付け力が 127.4N の場合には、アブレーションパターンの生成は顕著ではなく、図 4.34 に示す様に接触圧力の振動幅は作用荷重が 254.8N 負荷の場合に比べて小さい。接触圧力の変化領域がトレディングエッジ側に移動する速度は摺動速度よりも遅く、ゴム摩耗粉の移動に起因していると考えられる。

図 4.35 及び図 4.36 に押し付け荷重を 588.0N 及び 931.0N とした場合の接触圧力の経時的变化をそれぞれ示す。前者は 254.8N 負荷時、後者は 127.4N 負荷時の接触圧力変化パターンによく似た傾向を示す。

図 4.37 にアクリル試験片の押しつけ力と接触域中心における接触圧力の変化幅の関係を示す。横軸は押しつけ力、縦軸には接触域中心での最大接触圧力値と最小接触圧力値をそれぞれ示している。また、破線はアクリル試験片の "押しつけ力 / 接触面積" の値に基づく公称応力を示している。作用荷重が 254.8N の場合に最も顕著なアブレーションパターンが見られ、その場合の接触圧力は最大となり、振幅も最大になる。

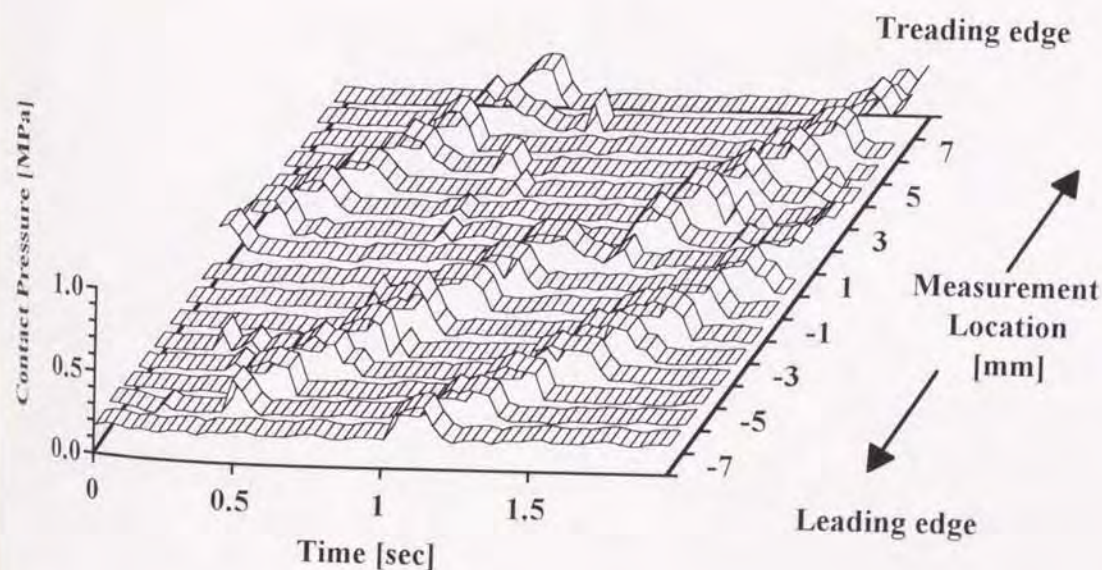


図 4.34 接触圧力の経時的变化 (Load : 127.4N)

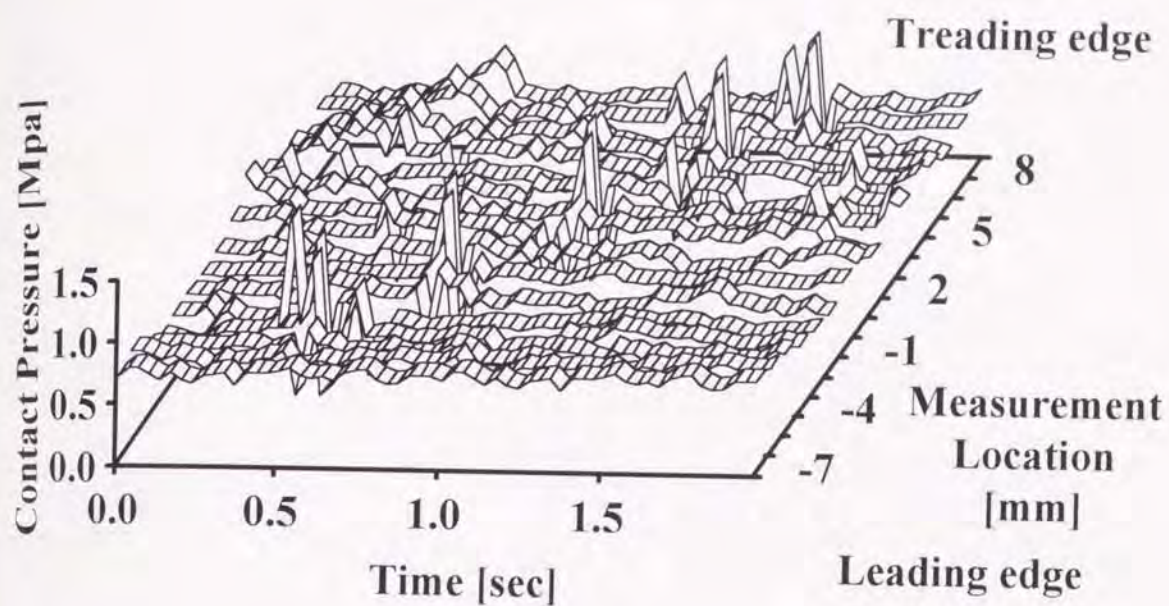


図 4.35 接触圧力の経時的変化 (Load : 588.0N)

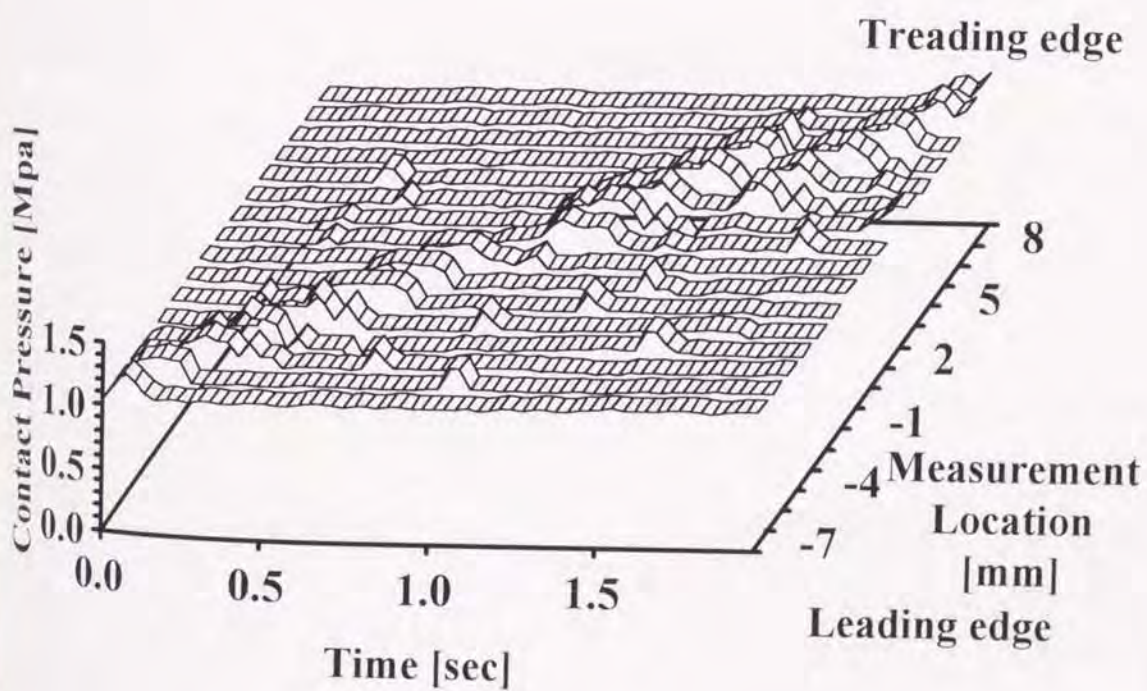


図 4.36 接触圧力の経時的変化 (Load : 931.0N)

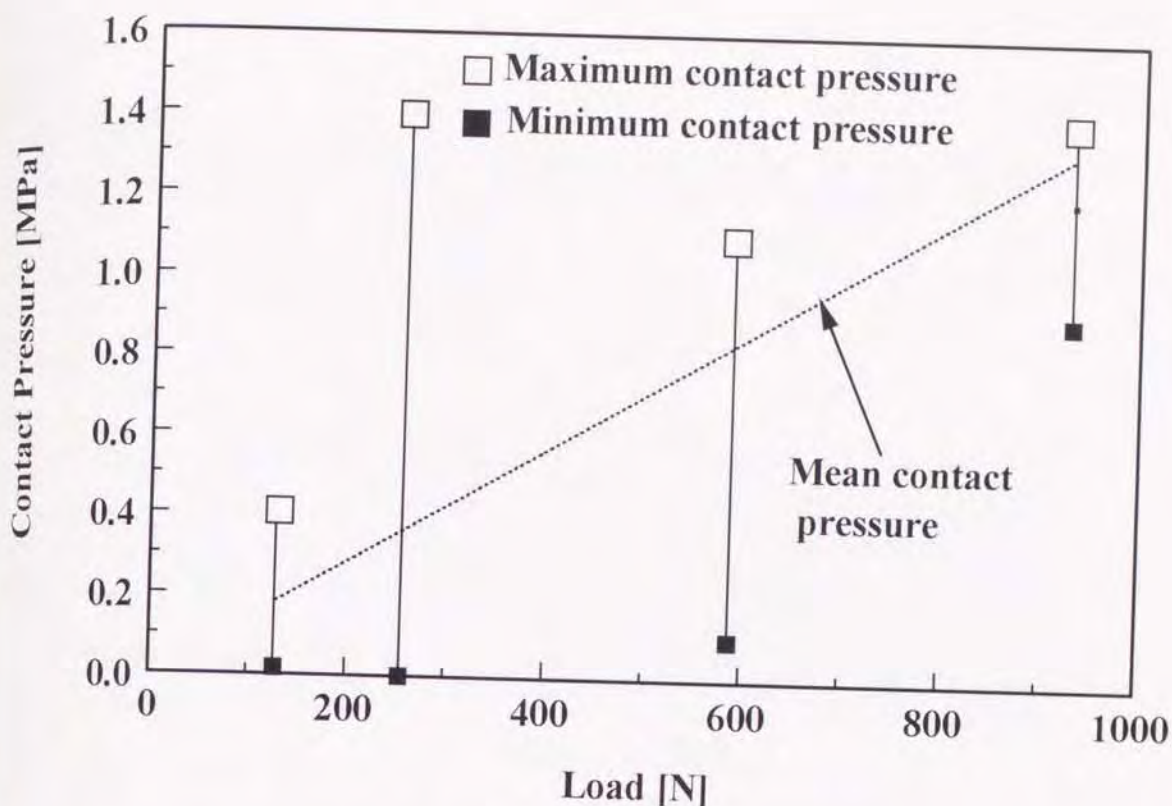
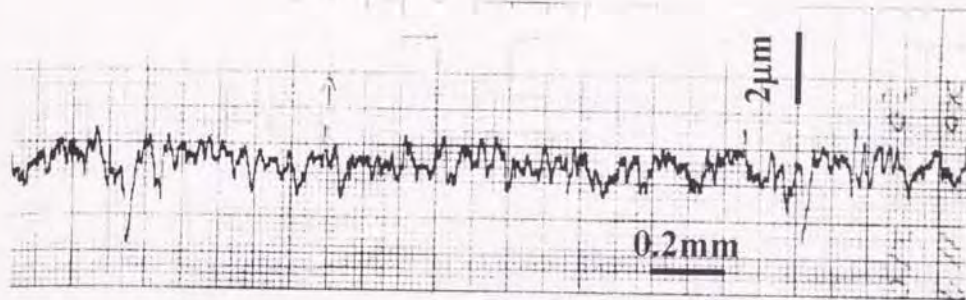


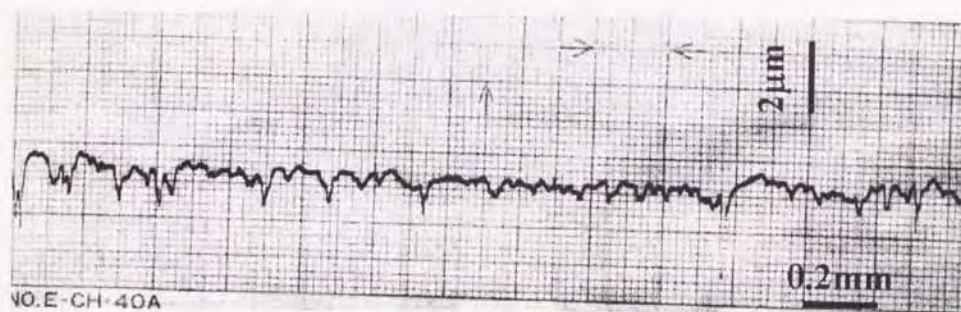
図 4.37 接触圧力の変化と荷重の関係

図 4.38 にアクリル試験片の接触表面のプロファイルを示す。実験開始前の摺動面はラップ加工を施したことから、ランダムな形状を示すものの、実験終了後の表面は摺動に伴い表面突起が摩耗したため、比較的平坦な状態であることが解る。この表面粗さの変化は押し付け力の大きさにかかわらず、ほぼ同様な傾向を示す。

図 4.39 及び図 4.40 に示すように、試験終了後の接触表面の 3D トポグラフィをコンピュータ支援型の表面粗さ計を用いて計測した。なお、図 4.39 は押し付け荷重を 254.8N とした場合、図 4.40 は 127.4N とした場合をそれぞれ示す。押し付け荷重が 127.4N の場合に比べ、254.8N ではアブレーションパターンの生成が顕著であったため、ゴム試験片の表面粗さは大きい。しかしながら、その最大高低差は $70 \mu\text{m}$ 程度であり、使用したゴム試験片の弾性係数を考慮すると図 4.33 で見受けられる局所的な接触圧力の増加量、すなわち 0.9MPa 程度の接触圧力の増減の直接的な原因になることは考えにくい。このことから、接触圧力の挙動はスティックスリップ現



(a) Lap加工面



(b) 実験後の摺動面

図 4.38 アクリル試験片の接触表面

(Load:254.8N Velocity:10.8mm/s)

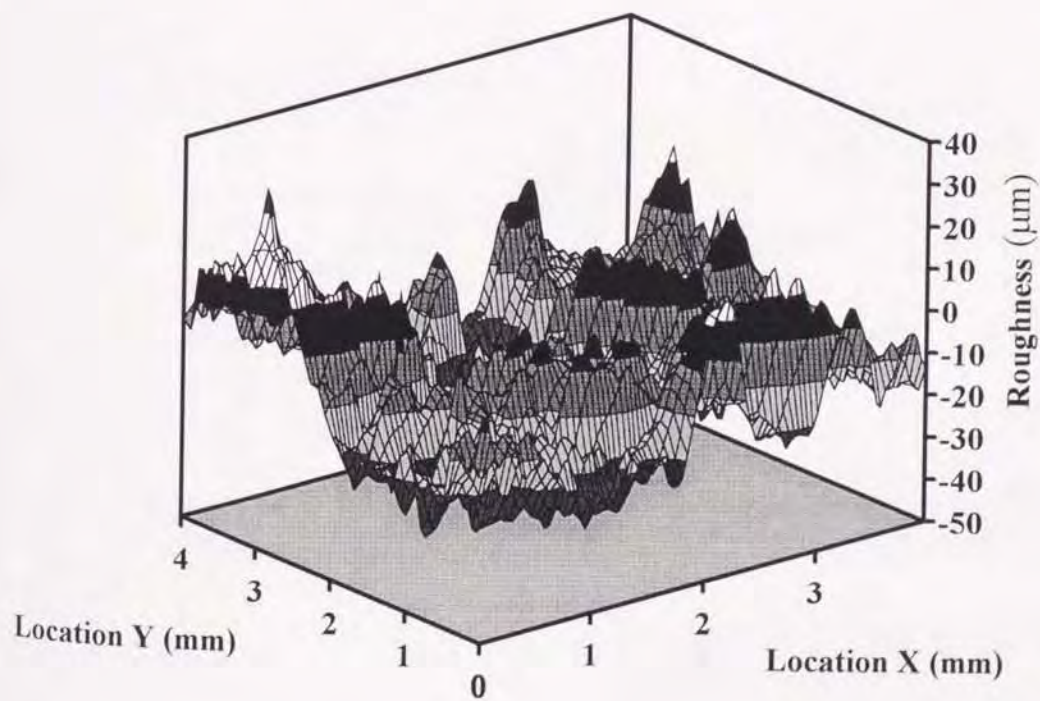


図 4.39 ゴム試験片の接触表面 3D トポグラフィー (Load : 254.8N)

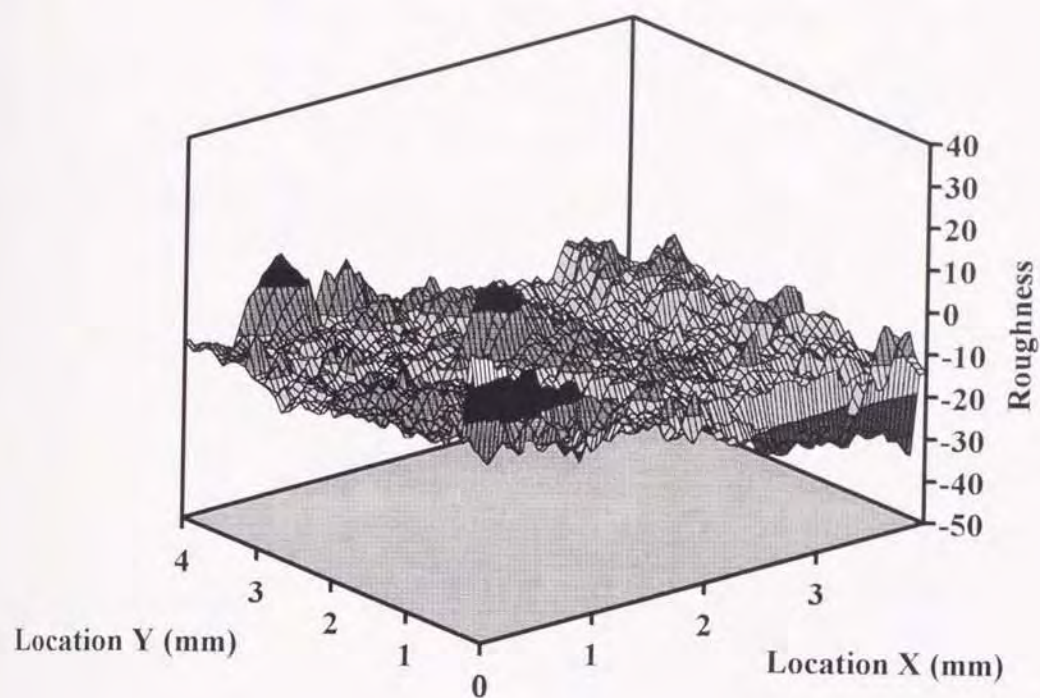


図 4.40 ゴム試験片の接触表面 3D トポグラフィー (Load : 127.4N)

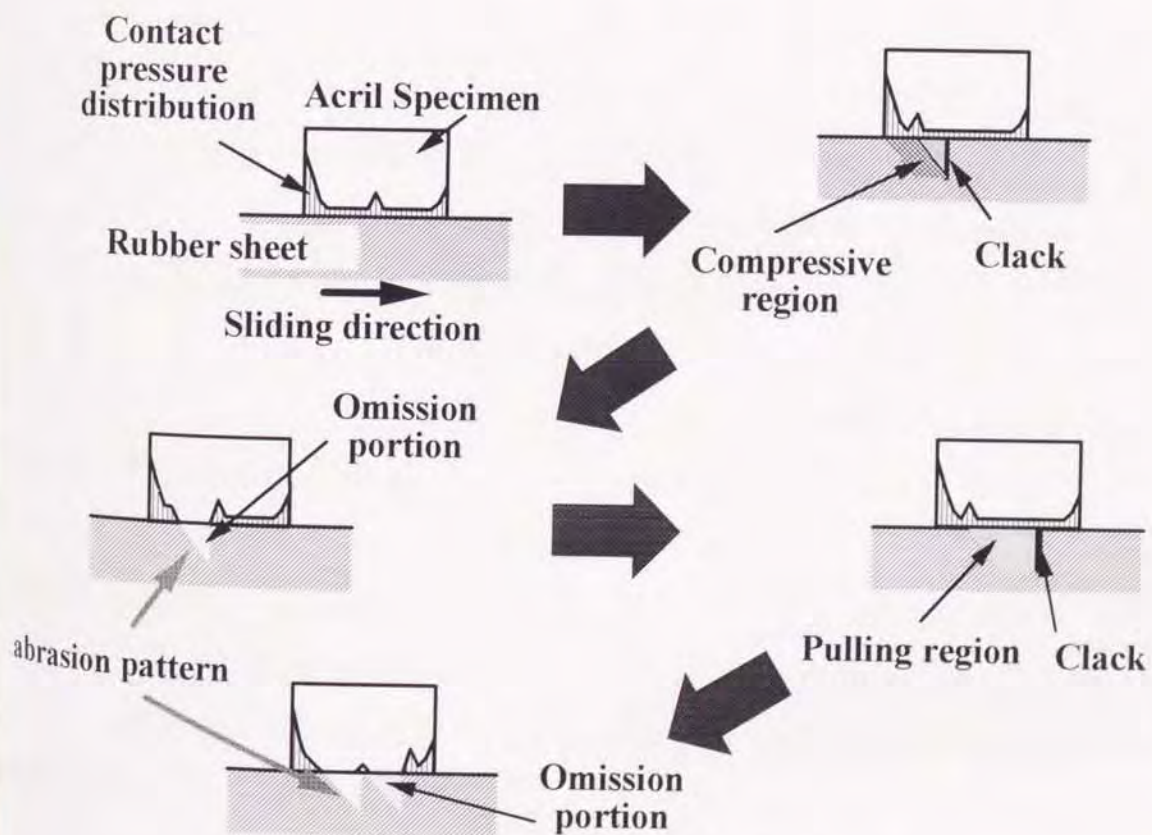


図 4.41 パターン形成時の模式図

象及びゴムシート表面の一部が剥離することによるものと考えられる。すなわち、この時の接触圧力の急激な増加はスティックスリップ現象のスティック過程であり、ゴムシートとアクリル試験片が密着状態にあることを示している。また、接触圧力が急増する微小領域は一時的にリーディングエッジ側へ移動していることから、密着状態を保持したままゴムシートがアクリル試験片に引かれている状況を示しており、このためゴムシート表面にき裂が発生および成長し、ついには表面の一部が脱落する。接触圧力の急激な減少はこの脱落に対応して生ずる現象であり、この領域の移動速度は摺動速度よりも速く、アブレーションパターンがアクリル試験片摺動方向に移動していることを示している。付録2に示すビデオ観察結果より、アブレーションパターンの形成は図4.41に示すようなスティックスリップ現象に基づく一時的な接触圧力の増加に密接な関連性を有していると考えられる。

第4.4節 結 言

本章では、超音波法を利用してゴム円柱がアクリルプレートに押し付けられる場合の接触圧力の測定を行った。すなわち、準静的に押し付け力が作用する場合の接触域端部の測定の際に、第2章で示した反射特性の補正方法を適用し、その実用性を検討した。次いで、本法では従来あまり論じられてこなかった除荷時及び再負荷時の接触圧力の測定を行い、これらの結果とポイントマッチング法で求めた解を比較検討し、本測定法の信頼性を検討した。さらに、動的に押し付け力が変化する場合の接触圧力測定を行い、本測定法が適用可能であることを明らかにした。

一方、超音波法を利用した接触圧力測定の実用例としてゴム部材が摺動する場合の接触圧力を測定し、アブレーションパターンの生成機構に関する考察を行った。すなわち、ピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用いて、回転するアクリル円板に天然ゴム試料を押し付けた場合の接触面に作用する接触圧力を超音波法を用いて測定し、接触圧力の変化パターンを解析した。すなわち、接触圧力の変化曲線を基に得られた Root Mean Square 値と摩

耗量間に分布相関性を有することを明らかにした。さらに、第2章で示した接触面からの第1エコー波形のウィグナ分布を利用した超音波接触圧力測定法に多点同時測定システムを併用し、これを摺動時のアクリル-天然ゴム間の接触圧力の測定に適用し、この様な接触面に作用する接触圧力を経時的に評価した。得られた結果を検討し、振動を伴って接触する二面間の接触圧力を評価する上で本測定法の実用性を検討した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 超音波法を利用して接触域端部の接触圧力を測定する際に第2.5節で示したエコー高さの変化量及び測定位置の補正を行うことにより、精度及び信頼性の良好な接触圧力評価が可能である。
- (2) 負荷時のみならず除荷時や再負荷時においても超音波法を利用して接触圧力の定量的測定は可能である。この際、測定点におけるエコー高さ比 Er^* の履歴を把握し、接触圧力値に換算する際に用いる較正曲線を適宜選択する必要がある。
- (3) 準静的な接触圧力のみならず、動的に接触部材に押し付け力が増減する場合の接触圧力を超音波法を利用して定量的に評価することが可能である。この際、測定点におけるエコー高さ比 Er^* の値のみならずその変化速度を把握し、接触圧力値に換算する際に用いる較正曲線を適宜選択する必要がある。
- (4) ゴム材が摺動する際の接触圧力を超音波法を利用して測定することが可能である。また、アブレーションパターンが形成される条件で摺動させた場合の接触圧力は接触域端部と中央部で異なる変化傾向を示す。接触圧力の変化曲線に基づく R.M.S 値は接触域中央部よりややトレディングエッジ側の領域で大きく、この領域でステックスリップ現象に起因するアブレーションパターン形成がなされる。
- (5) ゴム摺動面にあわれるアブレーションパターン形成時の接触圧力は接触領域の一部で急激に増減する。この増減はステックスリップ現象のステイック過程およびゴム表面の剥離に起因するものと考えられ、特に密着時における接触圧力は一時的ではあるが、接触領域中心で公称応力

の4倍程度の値を示すことを明らかにした。

第5章 鋼—セラミクス摺動時のなじみ過程における摩擦応力の測定

第5.1節 緒言

音弾性，すなわち固体内を伝播する超音波の音速が応力依存性を有することを Bruce⁽⁴²⁾，Allen⁽⁴⁴⁾，Dike⁽⁴⁸⁾をはじめ，これまでに多くの研究者^{(30) - (48)}が報告している．これはせん断波及び疎密波の伝播速度における現象であり，かつ応力が作用する部材の材料で音速の変化率，すなわち音弾性係数は固有値を持つ．また，等方性材質では変化率は一つの固有値であるものの，異方性材料では伝播方向によってそれぞれ異なる値を示す．

光弾性⁽²⁸⁾の場合では平面応力場において，主応力の変化と偏向波の速度の変化は比例関係にあることが明らかにされている．すなわち，超音波による実験的応力解析は従来の光弾性と類似していることを示している．超音波による応力測定法は非破壊な検査方法である他に以下に示す特徴を有する．

- (1) 応力の定量測定が可能である．
- (2) 応力測定は高分子材料等のような粘弾性を有する材料や繊維材のような異方性を有する材料でも可能である．
- (3) 実際に使用されている機械要素を測定対象物に設定することが可能である．
- (4) 応力測定と同時に内部欠陥の測定も可能である．

光弾性法を利用した応力解析では早い波と遅い波の位相差で干渉する効果から，スクリーン上に干渉縞模様が現れる．この縞の数を観察し，応力の定量測定を行う．超音波のせん断波で同様な測定を行った場合，応力によって生ずる複屈折の大きさ，すなわち2偏向波の単位応力あたりの相対速度差はエポキシ樹脂等の高分子材料を用いる光弾性の場合と金属材料を用いる音弾性とではほとんど同程度の大きさである．しかしながら，金属中を伝播する数 MHz 帯域の弾性波の波長は光の波長に比べ数千倍も長い

ことから、干渉縞1本を得るのに必要な応力は音弾性においては数千 MPa を要する。このため、音弾性を利用する場合において、光弾性と同様に干渉縞を利用する測定法を適用することは測定精度上不利である。これらのことから、多くの研究者は材料に作用する応力を求めるために直接的に超音波のせん断波の速度を測定することにより、有益な成果を上げている。測定精度としては、例えば軟鋼に対しては単位応力あたりの相対速度差が $7 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ であるが、厚さ 15mm の試験片について反射法を用いるときは位置往復の伝播速度は約 $10 \mu\text{s}$ であるから、10MPa の分解能で応力を測定するためには 7×10^{-10} 秒の精度で測定する必要がある。Crecraft は精密な伝播時間の測定方法の一手法であるシングア라운드法を用いて音速を測定し、音弾性効果と集合組織効果の分離の重要性を指摘している。

このように、音弾性は構造物や機械要素の応力を測定する新しい手法として、光弾性法における偏向波と同じ作用が存在することを明らかにされている。また、光弾性法のように、測定対象物である透明な樹脂モデルを作成する必要がなく、実物の残留応力の測定に適していることから、藤沢⁽¹³⁸⁾等は鉄道車輪のリム部に作用する応力を超音波法を利用して非破壊測定し、車軸に試験機を組み込んだ状態での測定、すなわちフィールド検査方法として本法が有効であることを示している。しかしながら、未だ超音波の音弾性を利用した応力測定には以下に示す様な困難な問題を克服する必要があることが指摘されている。

- (1) 探触子と試験片間の接触媒質の厚さ等が変化しやすく、この変化により正確な音速測定が困難になる。
- (2) 材料の集合組織効果が測定値に及ぼす影響を無視し得ない。
- (3) 応力に起因する音速の変化は非常に小さい。

一方、機械や構造物の摺動部材に作用する応力は摩擦・摩耗特性に極めて大きな影響を及ぼす。摺動部の応力状態を正確に評価すれば、摺動部材の寿命予測や合理的な設計を行う上で貴重なデータが提供される。この様な観点から、摺動面に作用する応力評価に関する研究が多数行われており、例えば済木等⁽¹⁰⁴⁾⁽¹⁰⁵⁾は数種の潤滑剤を用いた潤滑条件下でアルミニウムのリングを圧縮試験し、各行程での平均の摩擦係数と摺動部の真実接触

面積を超音波法を用いて測定することにより、工具と素材間の接触界面を対象とした真実接触部の摩擦応力を示している。しかしながら、この方法を適用して実際の加工時の摩擦応力評価に適用するためには、超音波の反射波特性が接触面の表面粗さの影響を大きく受けることから、摺動面が安定している状態、すなわち定常状態である必要があること、さらには潤滑油の温度、接触圧力の大きさ及び潤滑油膜の厚さ等を考慮した膨大な基礎データを蓄積しておく必要がある。さらに、摺動部を有する機械を運転する際に安定した摺動状態を得るためには、摺動初期に最も摺動面は潤滑条件等が過酷な状態になり易いことから、この様な場合の摩擦挙動を十分に把握しておく必要がある。この様な観点から、小川等^(6.4)は滑り摩擦開始時の摺動面の接触圧力及び摺動部材の接触面近傍のひずみを計測するとともに、極めて短時間内に起こる相対変位の局所的な変化を測定し、微視的な滑りから巨視的な滑りへ移行する過程とその際に生ずる動的な挙動を明らかにしている。さらに、鏡^(12.8)は銅材で作成したピンとリングの摩耗実験を行い、摺動初期におけるいわゆる「なじみ過程」における摩擦面形状をコンピュータ支援の表面粗さ計を用いて3次元的に計測し、さらに摩擦係数の変化との相関を詳細に調べている。また、Ludema^(12.7)もシリンダー-オン-ディスク型の摩耗試験機を用いて鋼材で作成した試験片を試験し、なじみ過程の Fe_3O_4 皮膜形成に伴うトライボロジー特性の影響を詳細に調べている。しかしながら、ここで測定した摩擦係数は摺動部材を移動させるために要した全体の力から求めたものであり、摺動面における摩擦応力の分布については考慮されていない。よって、より詳細に接触面に作用する摩擦応力を評価し、摺動面全体の摩擦応力の分布を把握することは、接触境界面のトライボロジー現象を評価する上で非常に有益なデータを提供するものと期待される。

そこで、本章では第2.6節に示した超音波法を利用した摩擦応力の評価方法の実用性の検討を行う。すなわち、本法をアルミナセラミクスプレート上をSKD11試験片が摺動する場合の摺動初期の摩擦応力評価に適用し、なじみ過程において摺動面に作用する摩擦応力の評価を行う。実験は、摺動するSKD11試験片内を伝播する超音波の波形を計測し、ウェーブレット

変換^{(25) - (27)}を利用し、得られた波形から伝播速度を求め、音弾性の性質を適用して伝播経路で作用する摺動方向の垂直応力を決定する。さらに、差分法を適用し摺動面に分布する摩擦応力を求めるとともに、摩擦係数、摺動時の AE 及び接触表面の 3D トポグラフィー等を測定し、これらと比較検討し、なじみ過程における摺動面形状と摩擦応力の関係を示す。

第 5.2 節 実験装置と実験方法

図 5.1 に摺動時の摩擦応力を測定するために用いた実験システムの概略を示す。実験装置はピン-オン-ディスク型摩耗試験機を利用し、120 度揺動運動するターンテーブル上にアルミナセラミクスプレート (100mm × 100mm × 10mm) を固定した。これに厚さ 20mm、接触面形状が長方形 (45mm × 30mm) の SKD11 試験片をアルミナセラミクスプレートが下方を左回転で通過するときのみ、4.9kN で垂直に押し付けた。公称周波数 10MHz、振動子直径がそれぞれ 5.0mm および 6.4mm の 2 対の縦波垂直型探触子を摺動方向に配してアタッチメントに装着し、SKD11 試験片上を X-Y ロボットを用いて摺動方向中心線上を走査した。なお、アタッチメントの探触子設置面と SKD11 試験片上面とのなす角度は 45 度である。さらに、アタッチメントは SKD11 鋼で作成したことから、超音波は摺動面に対し 45 度の角度で SKD11 試験片内を伝播することになる。この状態で、振動子直径 5.0mm の探触子から超音波を発信し、接触面で反射する第 1 エコーを振動子直径 6.4mm の探触子で受信し、超音波探傷機で検出した。また、SKD11 試験片上面に作用する摺動方向の垂直応力の分布を測定するために、歪みゲージを 10mm 間隔に張り付け、摺動時に作用する応力を測定した。一方、摺動時に発生する AE を測定するために SKD11 試験片上面に AE センサを設置した。得られた波形をプリアンプで 60dB 増幅した後に、トランジェントメモリに一時的に記録し、あらかじめ摩耗試験機に取り付けられてある摩擦係数の記録計のデータ、超音波探傷器で検出した超音波波形とともにパソコンに入力し解析、記録を行った。ここで、接触域中心部における摺動速度は 5.4mm/s に設定し、潤滑は施さず乾燥面での接触状態とした。

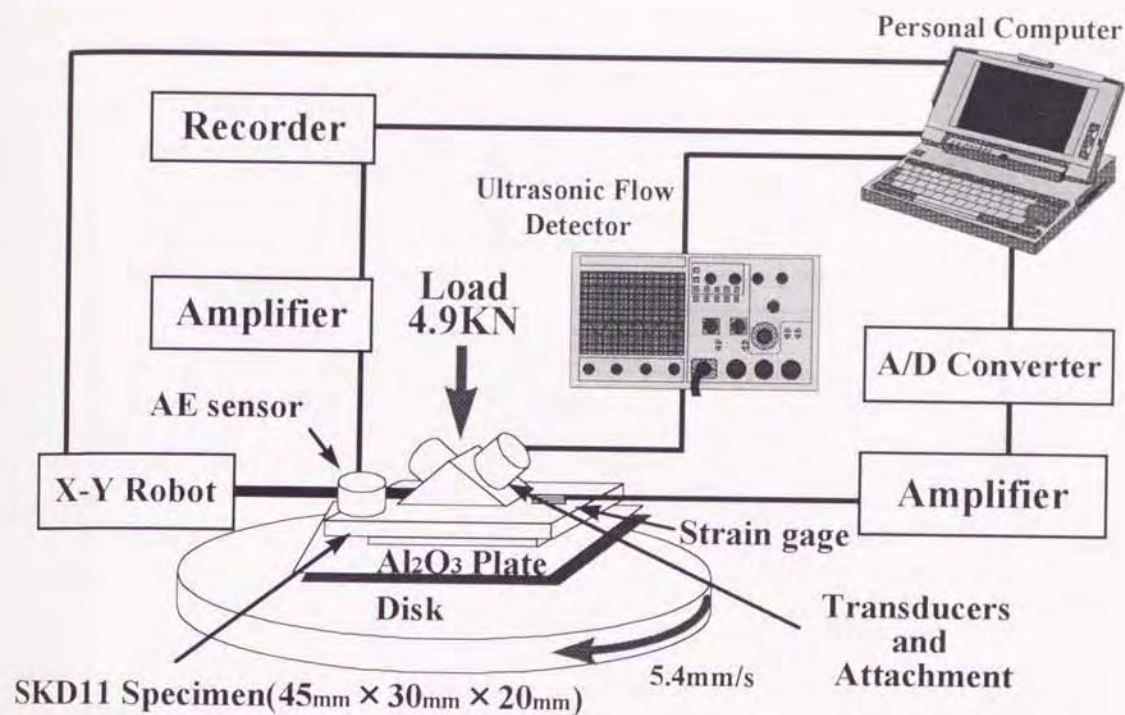


図 5.1 摩擦応力測定システム概略

なお、SKD11 試験片ならびにアルミナセラミクスプレートの初期接触面はラップ加工を施し、ともに中心線平均粗さ R_a で $1.8 \mu m$ に調整した。また、音速は集合結晶組織を有する材料中を伝播する音波の速度はその結晶の配行方向の影響を受け、その影響を無視し得ない。よって、第 2.6 節で得られた応力と音速の関係を本実験に適用するために、試験片は圧延方向と摺動方向を一致させた。同節中に示したように本法を適用して摩擦応力を評価するためには、試験片に作用する垂直荷重及び摺動に要する荷重の 2 方向の荷重による音速への影響を分離して評価する必要がある。このため、摺動時の音速と接触面に対して垂直荷重のみが作用する静的接触時の音速差を考慮する。そこで、実験に際して一行程ごとに摺動時の計測と静的接触時の計測を交互に行った。また、摩擦熱による音速変化への影響を十分考慮した後に、得られた反射波をウェブレット変換し、第 2.6 節で示した手法を利用して摩擦応力を求めた。表 5.1 に使用したアルミナセラミクスプレートの物性を示す。

表 5.1 アルミナセラミックスの物性

		Property
Density		3.92 g/cm ³
Fracture toughness		4.5 MPa m ^{1/2} (SEPB JIS R1601)
Bending strength		356 MPa (JIS R1601)
Young's modulus		381 GPa
Hardness [Hv]		1620 (Load 98N)
Coefficient of heat transfer		31.0 W/mk
Purity	Al ₂ O ₃	> 99.7 (Wt%)
	MgO	0.075
	SiO ₂	0.070
	Na ₂ O	0.034
	Fe ₂ O ₃	0.011
	TiO ₂	0.003
	CaO	0.047

第 5.3 節 結果及び考察

図 5.2 は各測定点で得られたエコー波形をウェブレット変換し，これを利用して第 2.6 節で求めた音弾性係数を適用し，差分法を適用することによって得られた試験片摺動方向断面の摺動方向垂直応力の分布の一例を示す．なお，差分法を適用するにあたり，以下に示す境界条件を設定した．すなわち，

- (1) リーディングエッジ側面の垂直応力 σ_x は 0MPa.
- (2) トレッディングエッジ側面の σ_x は摺動に要した力 $F = 3.9\text{N}$ を SKD11 試験片の側面積 $A = 600\text{mm}^2$ で除した値であり，6.5MPa を適用．
- (3) 試験片上面の σ_x は歪みゲージを用いた実測値を代入．
- (4) ウェブレット変換により求められる音速の変化は，超音波の伝播経路上のすべての格子点で作用する σ_x の影響を受ける．

さらに、摺動面に位置する格子点上の σ_x を考慮し、摺動面に作用する摺動方向垂直応力を決定した。図の横軸は摺動方向(X方向)の測定位置であり、-20はリーディングエッジ、20はトレディングエッジをそれぞれ示す。一方、縦軸はSKD11試験片の厚さ方向の位置を示しており、0は摺動面、20は試験片上面にそれぞれ対応している。図より、摺動方向に作用する垂直応力 σ_x はトレディングエッジ側で大きく、リーディングエッジに近づくに従い減少する。また、摺動面に作用する応力 σ_x は、SKD11試験片上面に作用する応力 σ_x に比べ大きい。この様にして得られた摺動面上の垂直応力を基に、摺動面に作用する摩擦応力を求めた結果を図5.3及び図5.4に示す。

図5.3は摺動時間が0から20秒、すなわち摺動距離が0から108mmまでの摺動方向中心上の摩擦応力分布を経時的に示している。横軸は摺動方向中心線上の測定位置を接触域中心からの距離で示しており、-20はリーディングエッジ、20はトレディングエッジに対応する。また、縦軸は摩擦応力、奥行きは測定時間をそれぞれ示す。摩擦応力が大きな値を示す箇所と小さな値を示す箇所が存在する。摩擦応力が大きな値を示す部分は、

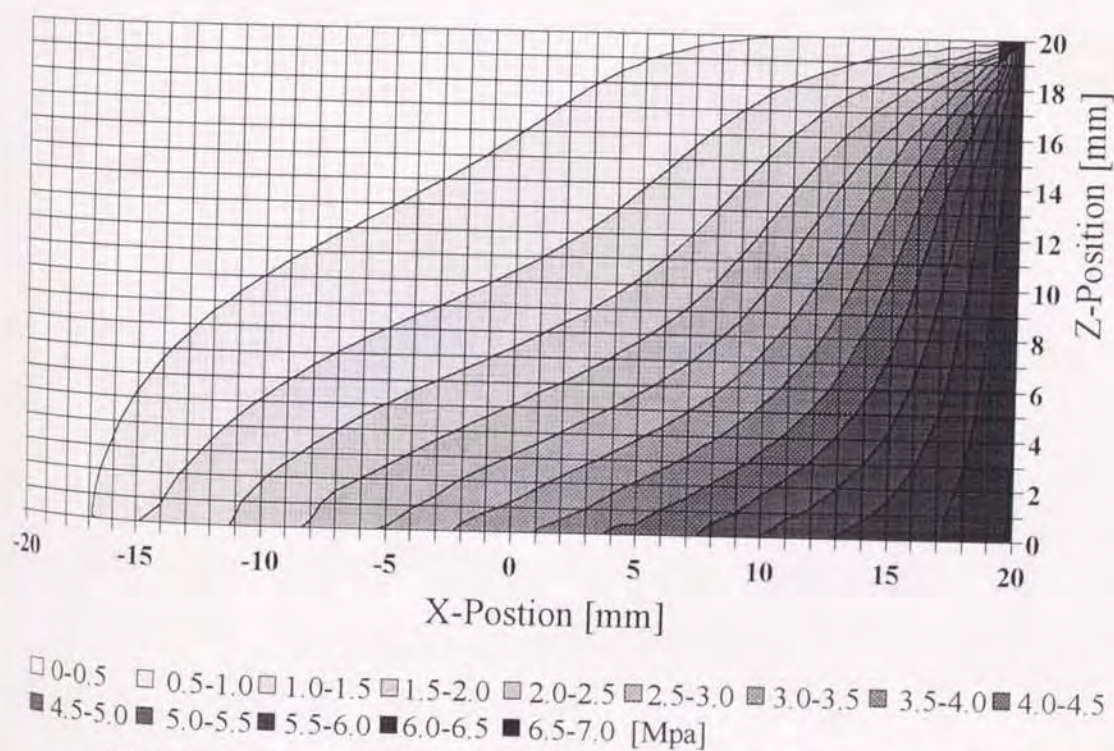


図 5.2 試験片摺動方向断面の水平方向垂直応力の分布

接触域中央部に比べ比較的接触域端部，すなわちリーディングエッジ及び
トレディングエッジに付近の領域に分布している．また，この領域にお
いても摩擦応力は常に大きな値を示すわけではなく，時間の経過に従い大
きく変化していることがわかる．摩擦応力は時間の経過にともなう変化は，
接触表面の凸部の摩耗や相手摺動面の凸部が移動することにより，常に真
実接触部の位置が変化しているためと推測される．なお，図中の -17mm の
測定位置のように常に摩擦応力が小さい値を示す部分は非接触部であると
考えられる．一方，摺動時間が 100 秒から 120 秒，すなわち摺動距離が
540mm から 648mm までの場合は，図 5.4 に示すように，摩擦応力の経時的
変化は小さくかつ，摺動方向中心線上ではほぼ均一に分布している．また，
摩擦応力の値は図 5.3 の場合に比べ増加しており，ほぼ 5MPa 程度の値を示
している．

図 5.5 に摺動距離が 54mm，270mm，540mm 及び 1350mm の時に発生した AE
波形を示す．図の横軸は測定時間，縦軸は AE 出力をそれぞれ示す．さら
に，図 5.6 に AE 波形を基にして得た AE 信号の波高値分布を示す．図の横

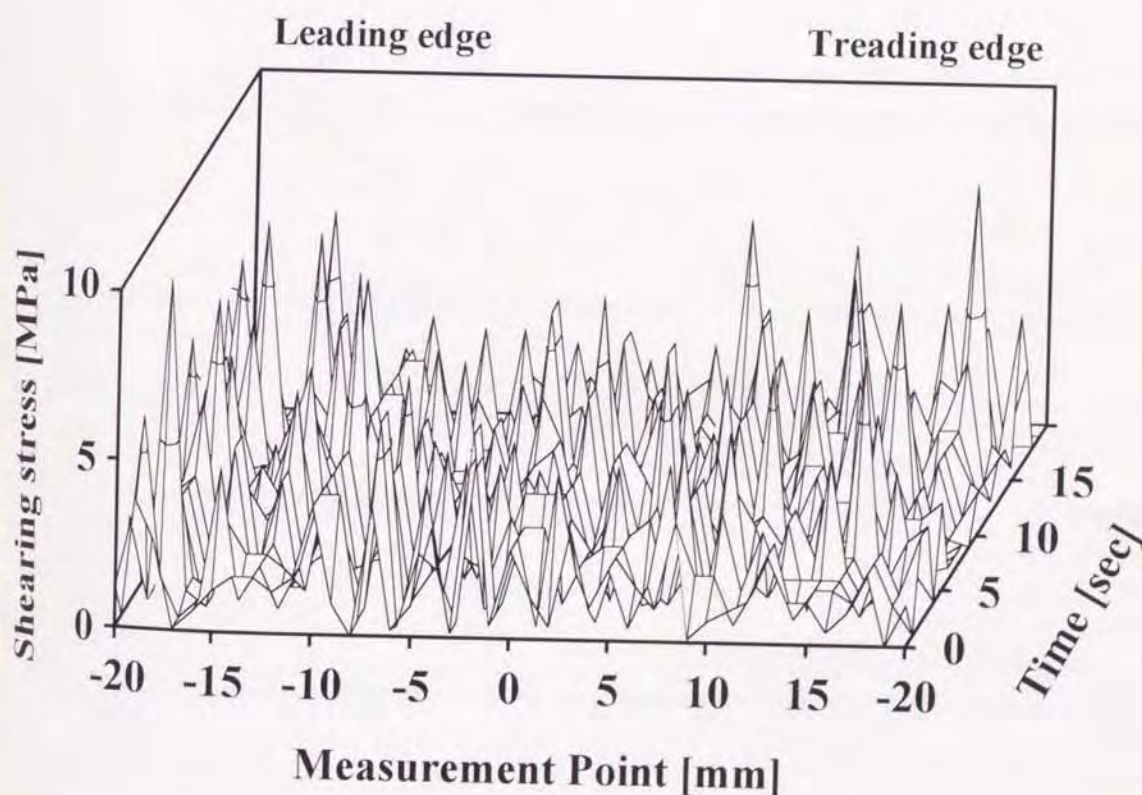


図 5.3 摩擦応力の分布 [0sec ~ 20sec]

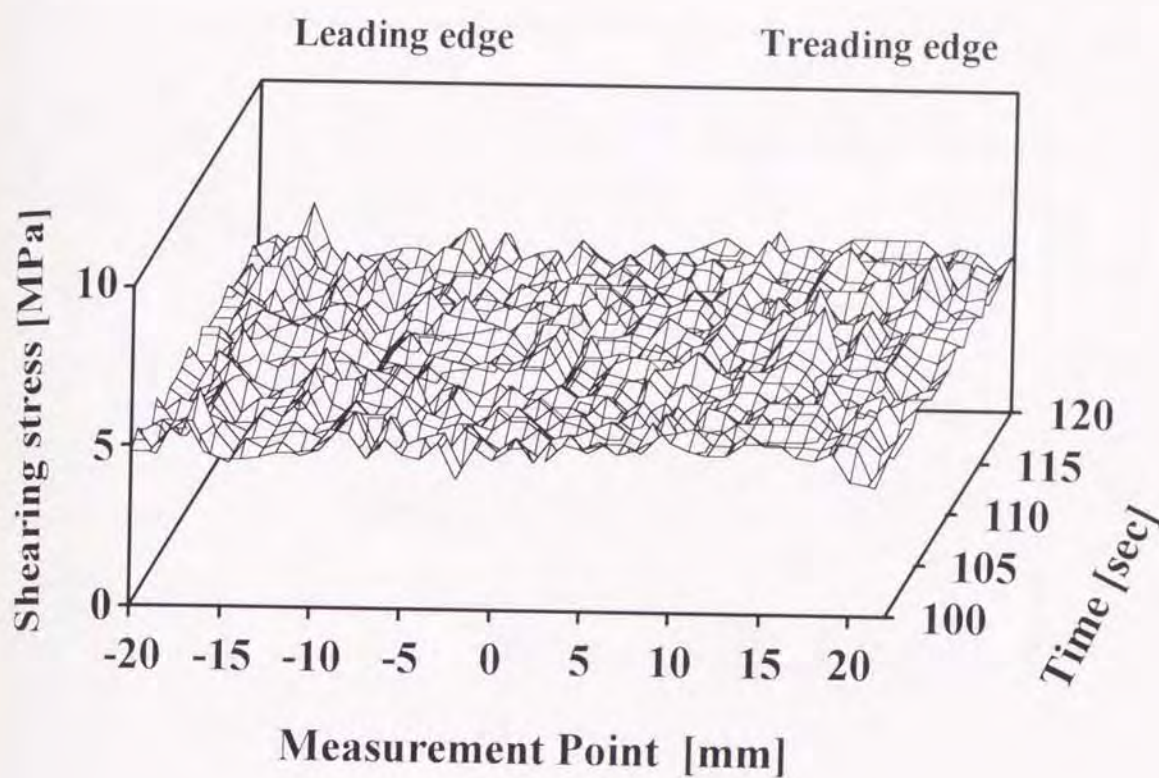


図 5.4 摩擦応力の分布 [100sec ~ 117sec]

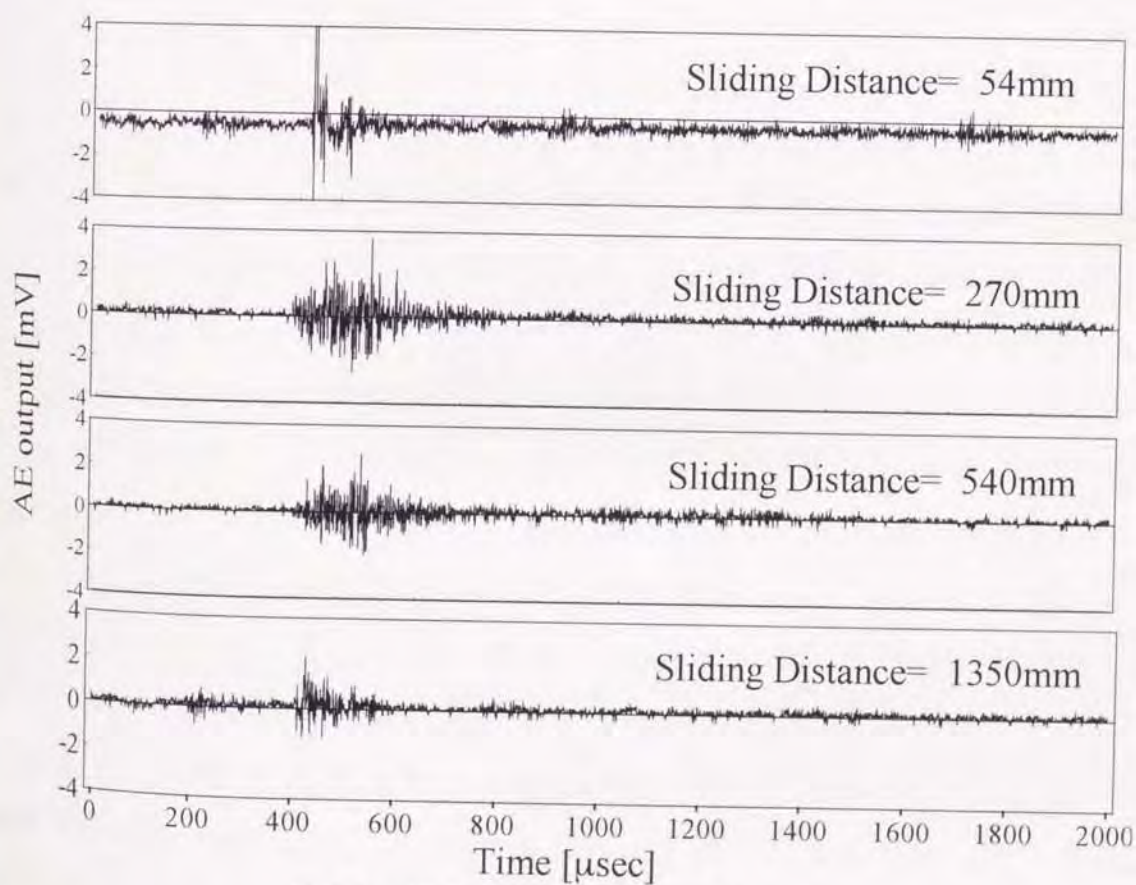


図 5.5 摺動時に発生する AE 波形

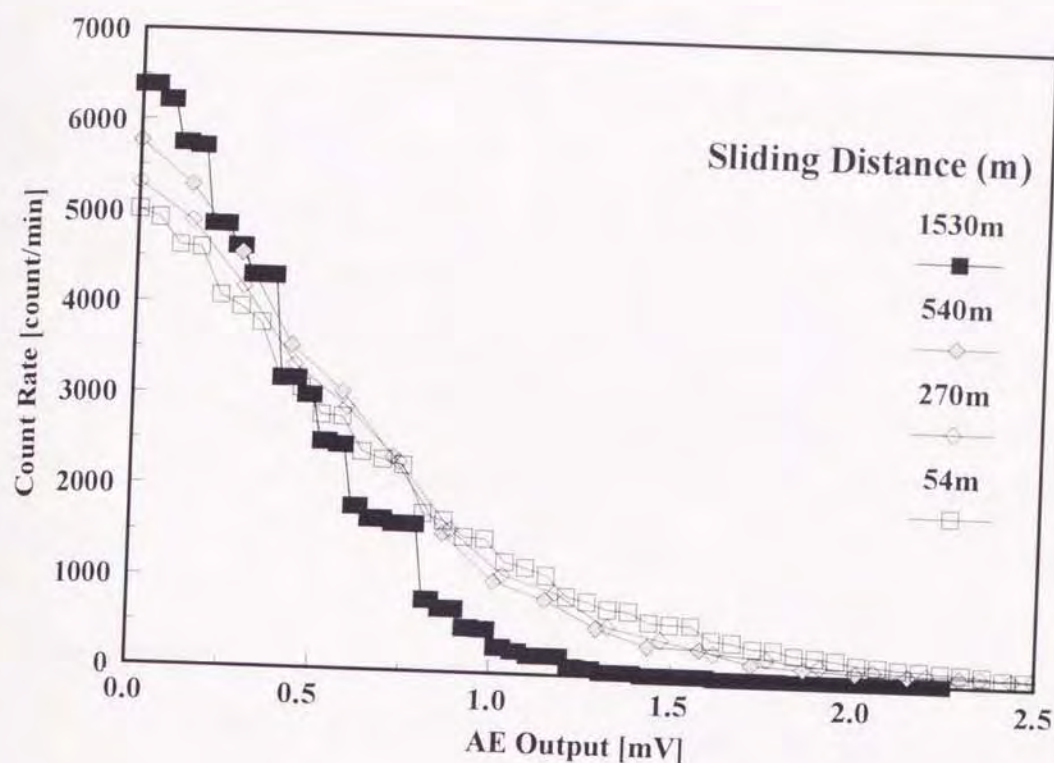


図 5.6 AE 信号の波高値分布

軸はしきい値電圧、縦軸はリングダウンカウントレートをそれぞれ示す。試験初期においては摺動距離が 54mm の場合を例に示すように比較的振幅の大きな突発型の AE が多く見受けられる。このことは、摺動初期においては見かけの接触面積に対して AE の発生源となる真実接触部が少ないこと、また発生する AE のエネルギーが大きいことから発生時の摺動面の損傷の程度が大きいことを示している。一方、摺動距離が増加するに従い、1350mm 時に示すように連続型の波形が見受けられるようになり、また振幅も減少傾向を示す。すなわち、摺動距離の増加にともない、摺動面のなじみ過程が進行することによって、真実接触部面積の増加とともに AE の発生源も増加すること、さらには AE の一波形で起こる摺動面の損傷が比較的小さい規模に移行していることが推測される。

図 5.7 に各摺動距離における摩擦係数を示す。奥行きには摺動距離、縦軸には摩擦係数、横軸には時間をそれぞれ示す。摩擦係数は、各摺動距離で一定値を示すわけではなく振動しているものの、その最大値は摺動距

離が 270mm 以下の領域では摩擦係数は 0.9 程度，これ以上の摺動距離では摩擦係数は 1.8 程度の値を示す，摺動距離 270mm 以前では，真実接触面積が微少であったこと，さらに比較的大きな摩耗粉が「ころ」の作用を果たし，摩擦係数を小さく保持したものと考えられる．一方，なじみ過程の終期においては真実接触面積が増加したこと，さらにはアルミナセラミクスプレート摺動面の凹部に SKD11 試験片の摩耗粉が移着し，比較的大きな摩耗粉が埋収されやすくなったために摩擦係数が増加したものと考えられる．

図 5.8 及び図 5.9 に実験時における SKD11 試験片の摺動表面の接触域中央部の 3D トポグラフィーを示す．なお，計測にはコンピュータ支援の表面粗さ計（ミットヨ サーフテスト 512）を用い，得られた 2 次元データを基に 3 次元データを構築した．図 5.8 は摺動距離 54mm，図 5.9 は摺動距離 540mm の時の 3D トポグラフィーをそれぞれ示す．それぞれの図中の Y 軸方向は摺動方向と一致している．54mm 摺動時においては，表面の凹凸は不均一であり，さらに $X = 4$ 付近に小さな摩耗痕が認められる．なお，粗さは中心線平均粗さ R_a で $1.6 \mu m$ である．一方，540mm 摺動時にお

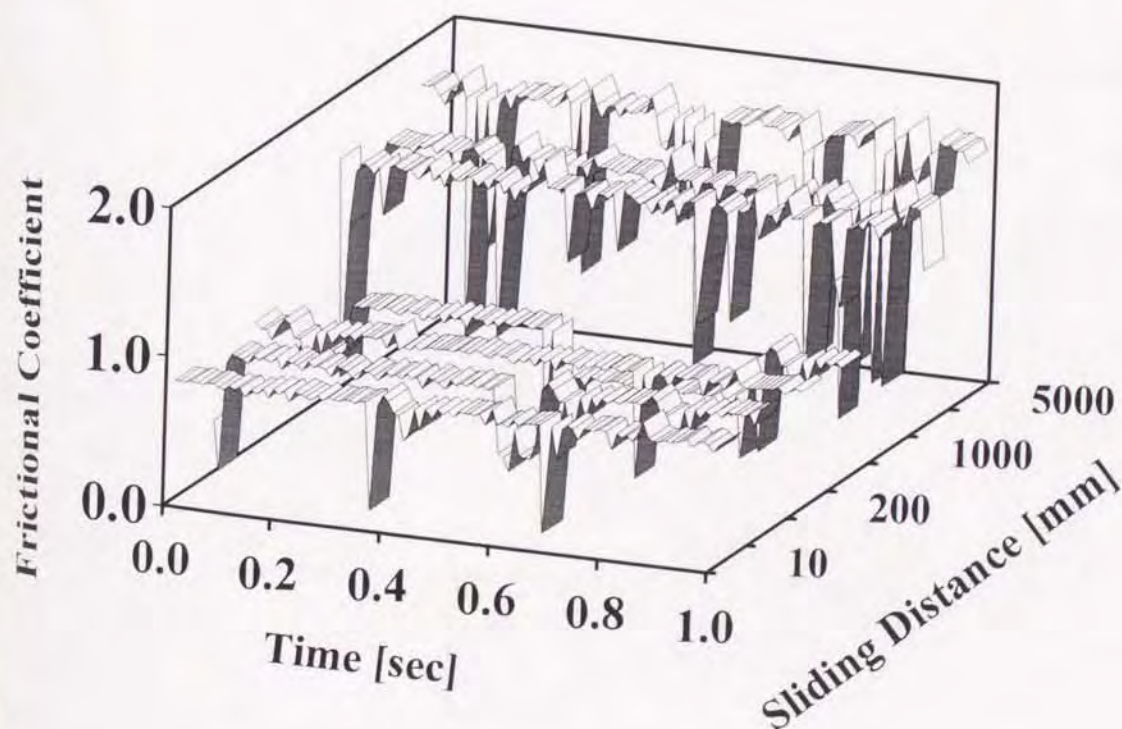


図 5.7 摩擦係数の変化

Sliding Distance : 54mm

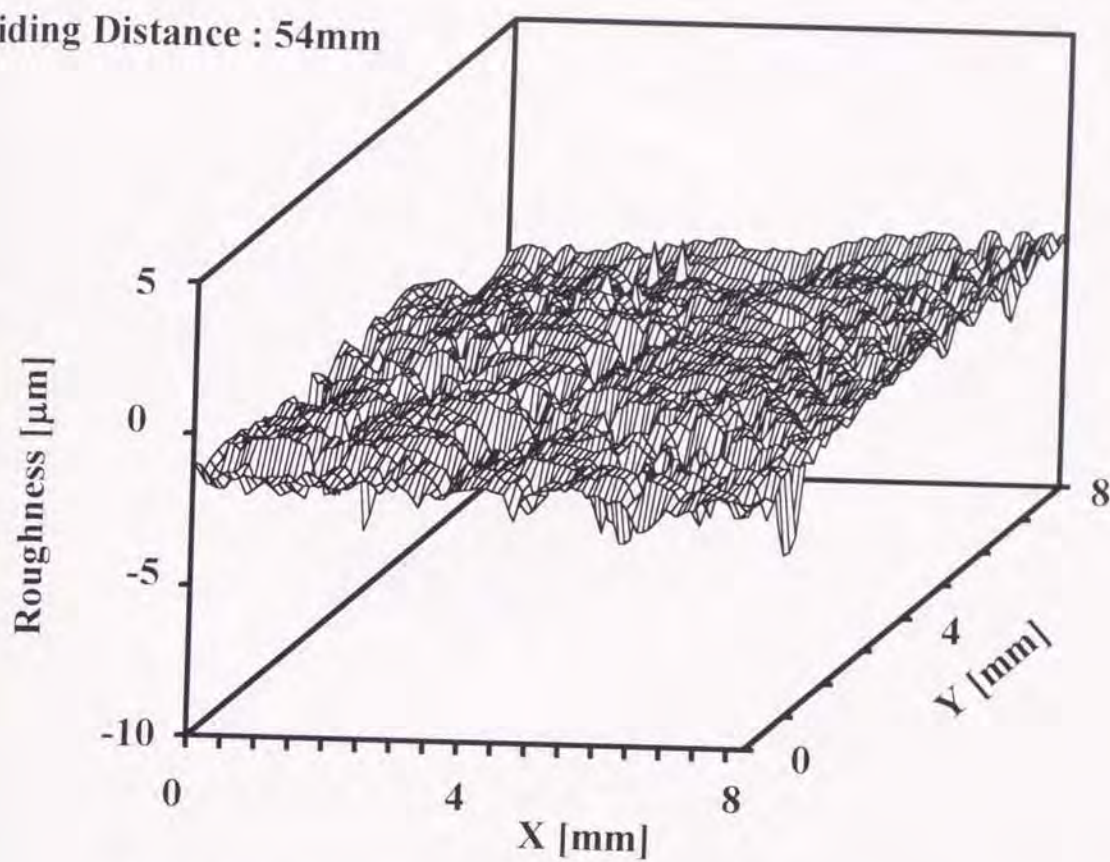


図 5.8 摺動表面の 3D トポグラフィー (摺動距離 : 54mm)

Sliding Distance : 540mm

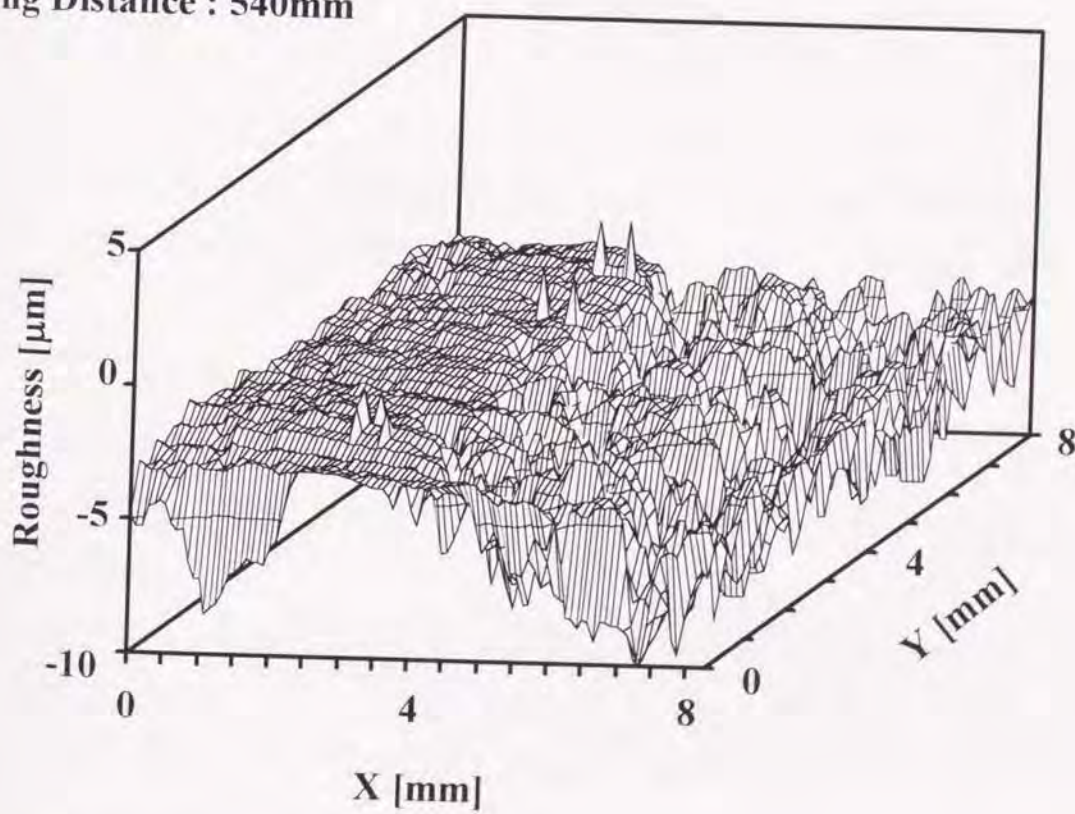


図 5.9 摺動表面の 3D トポグラフィー (摺動距離 : 540mm)

いては $X > 4\text{mm}$ の領域の様に摩耗痕が大きく成長するものの、その他の摺動部では $X < 4\text{mm}$ の領域の様に摺動面の微小突起が摩耗することによって比較的平坦な部分が存在する。なお、中心線平均粗さは R_a で $4.5\ \mu\text{m}$ であった。接触面の 3D トポグラフィーの変化からも明らかなように、SKD11 試験片の摺動面が平坦な接触面を形成すること、さらには SKD11 試験片の表面の一部が摩耗・脱落し、アルミナセラミクスプレート上に移着したために、表面突起をほぼ覆い、滑らかな表面を形成していることから、摩擦応力の分布も均一になるものと考えられる。

第 5.4 節 結 言

本章では第 2.6 節に示した超音波法を利用した摩擦応力の評価方法の実用性の検討を行った。すなわち、本法をアルミナセラミクスプレート上を SKD11 材が摺動する場合の摺動初期の摩擦応力評価に適用し、なじみ過程における摩擦応力の評価を行った。実験は摺動する SKD11 試験片内を伝播する超音波の波形を計測し、ウェーブレット変換を利用し伝播速度を求め、音弾性の性質を適用して伝播経路で作用する摺動方向の垂直応力を決定した。さらに、差分法を適用し摺動面に分布する摩擦応力を求めるとともに、摩擦係数、摺動時の AE 及び接触表面の 3D トポグラフィー等を測定し、これらと比較検討し、なじみ過程における摺動面形状と摩擦応力の関係を示し、以下に示す知見を得た。

- (1) 摺動部材内を伝播する超音波波形をウェーブレット変換し音速を求め、音弾性の法則及び差分法を利用し、摺動面に作用する摩擦応力を測定することが可能である。
- (2) 摺動初期すなわち 54mm 摺動時に超音波法で得られた摩擦応力の平均値は 2.4MPa であるのに対し、 540mm 摺動時での平均値は 5.4MPa であり、ほぼ 2 倍程度に増加する。この増加は摺動に要する力を基にして求めた摩擦係数の変化に対応する。
- (3) 摺動初期の摩擦応力の挙動は摺動面なじみ過程で、摺動表面の凸部

の摩耗にともない大きく変化する。一方、摺動距離 540mm において、摩擦応力の分布は、ほぼ均一な分布形状を示す。これは、初期摺動面においては、多数の表面突起が存在し真実接触部と空隙部を形成するものの、なじみ過程で SKD11 試験片の表面突起が摩耗し平坦な面を形成すること及びその摩耗粉がアルミナセラミクスプレート上に移着し、摺動面の凹凸を覆うことによって、均一な接触状態が得られることに起因する。

第6章 結 論

本論文では摺動時に発生する AE を利用した摺動面損傷評価及び超音波探傷装置を用いた接触圧力の測定を基にしたトライボロジー特性評価法に着目し、それぞれの測定法の実用性を検討した。これらの手法を TiN 薄膜の付着力評価、珪化处理層のアルミナセラミクスに対する焼き付き特性評価、ゴム摺動時に現れるアブレーションパターン生成機構解析及びなじみ過程における摩擦応力測定に適用し、それぞれの測定法の有用性を論じた。各章で得られた結論を以下に示す。

第1章「緒論」では超音波を利用した従来の研究を総括した後、超音波を利用した研究の意義及び研究の背景に加えて、本論文の目的と構成を述べた。

第2章では境界面における音波の反射・透過及び減衰特性について示すとともに AE の測定システムの概要及び超音波顕微鏡を利用した物性評価の基本原則を示した。さらに、超音波法を利用した作用応力の測定方法、すなわち①接触面からの第1エコー高さの変化を利用した接触圧力測定法、②エコー波形のウィグナ分布を利用した接触圧力測定法、さらには③音弾性とウェブレット解析法を利用した摩擦応力測定法についての測定原理について示した。すなわち、①で示す手法をゴム試験片とアクリルプレートとの接触時に適用した場合、エコー高さ比 ER^* と接触圧力の関係は、摺動時及び非摺動時に関わらず負荷過程及び除荷過程において、上に凸の曲線で得られた。非摺動時においては、負荷過程において接触面が密着し、除荷過程においてもその状態が接触圧力が極めて小さくなるまで保持されることから、接触面に同じ接触圧力が作用していても、 ER^* は負荷過程における値に比べ、大きな値を示す。一方、摺動時では接触面が密着状態になりにくいことから、負荷過程と除荷過程は、ほぼ同じ履歴を示す。接触圧力測定対象面から反射してくる超音波の分布を求めるための簡易的な数値計算法を示すとともに、実際にこのような場合の音圧分布を測定し、計算値と実測値の比較検討を行った。計算値と実測値は良く一致し、反射波特性を

求める上で示した実験的手法は十分有効で、合理性を有すると考えられる。さらに、本数値計算法を基に①の手法で接触域端部の接触圧力を測定する際の、 E_R^* 及び測定位置の補正方法について示した。②で示す手法をゴム-アクリル間の接触圧力測定に利用するために、接触面からのエコー波形のウィグナ分布を時間及び周波数に関して体積積分し、これに基づく WDE_R^* を定義した。比較的接触圧力が小さい領域では、接触圧力の増減による WDE_R^* の変化は E_R^* の変化に比べて顕著であることから、この様な領域の接触圧力を測定する際には、 WDE_R^* を基に接触圧力を評価することで、良好な測定感度を得られることを示した。また、比較的大きな接触圧力が作用する場合、接触圧力の増減に対する WDE_R^* 及び E_R^* の変化率は減少するものの、ウィグナ分布より得られるエコーのピーク周波数は、接触圧力の増加に伴い低い周波数に移動する。よって、ピーク周波数を接触圧力の評価基準に用いることにより、比較的精度よく測定可能であることを示した。また、応力測定の水平解像度を改良するために、ピンを挿入し、これを利用する方法を示すとともに、ピンによる反射波特性に対する影響が無視し得ることを示した。③の手法を利用する際に必要となる音速と作用応力の関係、すなわち音弾性係数を求める際に本研究ではスペクトル法を利用して、音速を求めた。スペクトルを得るためにウェブレット変換とフーリエ変換を用い、両者の測定感度に関する比較を行った。その結果、前者を利用することにより、感度良く作用応力の評価が可能であることを示した。

第3章では超音波を利用し、摺動面のトライボロジー特性を評価する方法を検討する基礎的研究の一環として硼化处理鋼及び TiN 薄膜の摩耗実験及び焼き付き性実験を行うとともに、その時に発生する AE 信号を利用した硼化处理層の焼き付き特性評価ならびに薄膜と母材の付着力を評価する手法について検討し、AE 法を用いた簡便な評価方法が有効であることを示した。すなわち、硼化处理鋼を摩耗実験し、この時の AE 発生特性を利用することにより、硼化物層の欠落状態等を In-situ で検出することが可能であることを示した。また、摩耗率と AE 発生特性の間に、相関性が見られることから、AE 法により硼化处理層の摩耗状態の評価が可能であるこ

とを示した。ここで、摩耗率と AE 発生量の関係は摺動速度や接触圧力による影響を無視し得るものの、摺動部材の材質により異なる特性曲線を示す。すなわち、同一の AE 発生量に対する摩耗率は SKD11 材の硼化処理鋼、S45C 材の硼化処理鋼、SKD11 材の調質鋼および S45C 材の調質鋼の順に大きくなることが示された。焼き付き性実験においては、AE 発生特性が変化した後に摩擦係数が変化することから、この様に AE 発生特性を評価することによって異常摩耗の早期予知が可能であることを示した。一方、TiN 薄膜の付着力測定に AE 法を適用した。薄膜の摩耗率と AE 発生特性は相関性を有し、その相関性は摺動部材の TiN 薄膜の有無及び基板となるピンの材質により異なることを示した。また、摩耗試験時のピンの押し付け荷重を一定割合で増加する場合、TiN 薄膜の一部が剥離しても摩擦係数の変化は極めて小さいものの、薄膜に比べ AE 発生量の小さい基板が摺動表面に現れることから、AE 発生量は減少傾向を示す。よって、発生 AE の RMS 値が急激に減少する時の接触圧力を測定すれば、成膜条件をも考慮した TiN 薄膜付着力の評価が十分に可能であることを示し、さらに本研究で成膜した TiN 薄膜は TiN/SKD11、TiN/SKH51 とともに高周波電力を 1.5KW にした場合の付着力がもっとも良好であり、かつ摩耗特性も優れていることを示した。

第 4 章では、接触域端部の超音波反射波特性を考慮し、精度良く接触圧力を測定する方法を、アクリルプレートにゴム円柱が押し付けられる場合の接触圧力測定に適用した。得られた結果とポイントマッチング法を利用した解を比較した結果、両者は定性的かつ定量的にほぼ一致したことから、接触域端部における測定値及び測定位置の補正方法が十分に実用的であることを示した。また、従来あまり論じられなかった除荷過程や再負荷過程においても、任意の測定位置でのエコー高さ比 Er^* の履歴を把握し、適宜最適な較正曲線を適用することにより、定量的な接触圧力を評価することが充分可能であることを示した。また、静的な接触状態のみならず、押し付け荷重が動的に作用する場合においてもエコー高さ比 Er^* の履歴及び変化速度を考慮し、適宜最適な較正曲線を選択することで接触圧力評価が可能であることを示した。さらに、本測定法を利用した接触圧力測定の実用

例として、ゴム材料が摺動する場合の接触圧力を測定し、摺動時に現れるアブレーションパターンの生成機構を解析し考察を行った。すなわち、アブレーションパターンが形成されるような摺動条件では、ゴム摺動時における接触圧力は接触域端部と中央部で異なる変化傾向を示す。接触圧力の変化曲線に基づく R.M.S 値は接触域中央部よりややトレッディングエッジ側の領域で大きい。この領域でスティックスリップ現象に起因するアブレーションパターン形成がなされることから、アブレーションパターンの形成と接触圧力が相関性を有することを示した。さらには、接触面からの第1エコーのウィグナ分布を利用する接触圧力測定法に、多点同時測定システムを併用することにより、アブレーションパターン形成時の接触圧力は局所的に急激に増減すること、さらにはこの増減はスティックスリップ現象のスティック過程およびゴム表面の剥離に起因するものであり、特に密着時における接触圧力は一時的ではあるが、接触領域中心で公称応力の4倍程度の値を示すことを明らかにした。得られた結果を検討し、振動をともなって接触する2面間の接触圧力を評価する上で、本測定法が実用的であることを示した。

第5章ではウェブレット変換ならびに音弾性を利用した超音波法に差分法を適用することで、摩擦応力の評価が可能であることを示した。さらに、本法をアルミナセラミクスプレート上を SKD11 試験片が摺動する際のなじみ過程の摩擦応力の測定を行い、本測定法の実用性を示した。すなわち、摺動初期の摩擦応力は摺動面なじみ過程で、摺動面における凸部では摩耗し、凹部ではその摩耗粉が移着することから、摩擦応力の分布は不均一であり、その値は常に大きく変動する。一方、摺動距離が増加するに従い、ほぼ均一な分布を示すとともに変化も小さくなる。また、その平均値は摺動距離の増加に伴い増加し、摩擦係数の変化と対応することを示した。

謝 辞

本論文作成に関して、格別に懇切なる御指導・御鞭撻を賜りました新潟大学工学部 原 利昭教授に衷心から御礼申し上げます。また、同工学部 一宮亮一教授、長谷川富市教授より御指導を賜りました。さらに、新潟職業能力開発短期大学校 宮坂啓像校長をはじめとする同短大の諸先生方に対しても厚く御礼申し上げます。

著者は平成元年4月より平成4年3月までの間、新潟県工業技術センター（現 新潟県工業技術総合研究所）において、「新素材等の耐摩耗特性に関する研究」に従事いたしました。その際に機械・電子研究室の方々から多大なる御好意と御助言を受けました。特に、お世話になりました材料特性科の高野 格科長、田中 互専門研究員、桂沢 豊専門研究員に厚く御礼を申し上げます。

本研究の実験に際しましては、新潟大学工学部 材料力学研究室の竹下重忠君、夏目 実君、鹿俣 丞君、新潟職業能力開発短期大学校の卒研究生のご協力を得ました。

最後に、本論文はこれらの方々の御好意と御尽力を無くして作成することは出来なかったものであり、著者は深甚な感謝の意を表する次第です。

参 考 文 献

- (1) Elijah Kannatey-Asibu, Jr. ・ David A. Dornfeld
Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting
Trans. ASME, J. Eng. Industry, 103, (1981), P. 330-340.
- (2) D. Dornfeld ・ He Gao Cai
An investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission
Trans. ASME, J. Eng. Industry, 106, (1984), P. 28-33.
- (3) 小島浩二 ・ 稲崎一郎 ・ 三宅亮一
アコースティックエミッションを利用した切削プロセスの監視
機論 , 52-474, C(1986), P. 799-805.
- (4) 武藤一夫 ・ 二村昭二 ・ 堤正臣
AE センサを利用した放電加工現象のモニタリング
(第 1 報 , 放電加工条件と AE 信号の出力特性)
機論 , 58-549, (1992), P. 1521-1525
- (5) 萱場英樹 ・ 稲崎一郎
アコースティックエミッションセンサを用いた回転工具損傷の検出
機論 , 60-580, (1994), P. 4374-4379
- (6) 三輪祐司 ・ 稲崎一郎 ・ 米津栄
アコースティックエミッションによる工具損傷のインプロセス検出
機論 , 47-424, (1981), P. 1680-1689
- (7) 相田収平 ・ 稲崎一郎 ・ 福岡真一郎
AE を利用した工具チップング検出システムの開発
機論 , 52-481, (1986), P. 2563-2569
- (8) 自念榮一 ・ 平井幹也
AE 法による疲労したチョップドストランド型 CFRP の破壊機構の解明
機論 , 58-553, (1992), P. 1581-1587
- (9) 木田外明 ・ 鈴木恵 ・ 諸橋茂 ・ 宮下寿徳
AE 法による短繊維強化 PET の破壊機構に関する研究

(切欠き長さと繊維含有率の影響)

機論 ,58-553,(1992),P.1537-1543

(10) Xiangying Liu ・ Elijah Kannatey-Asib.Jr

Acoustic Emission From Single-Plate Martensitic Transformation

Trans.ASME.J.Appli.Mech.,58,(1991),P.889-894.

(11) M.K.Au-Yang

Application of Ultrasonics to Nonintrusive Vibration Measurement

Trans.ASME.J.Press.Vessel.Tech., 115,(1993),P.415-134.

(12) M.K.Au-Yang

Acoustic and Ultrasonic Signals as Dianostic Tools for Chechk Valves

Trans.ASME. J.Press.Vessel.Tech.,115,(1993),P.135-141.

(13) 和田正毅 ・ 水野萬亀雄

AEによる摩擦・摩耗の観測 - 危険予知について -

精密工学会誌 ,10,(1986),P.1719-1724.

(14) 和田正毅 ・ 水野萬亀雄

AEによる摩擦・摩耗の研究 - 摩耗形態と AE 信号 -

精密工学会誌 ,4,(1989),P.673-678.

(15) 久門輝正 ・ 横山和秀 ・ 関春彦

AEによる摩擦損傷監視システムの基礎的研究

トライボロジスト ,37-8,(1992),P.660-666.

(16) 久門輝正 ・ 池田哲也

AE計数率による摩擦摩耗特性の評価

機論 ,60-579,C(1994),P.3934-3939.

(17) 松岡薫 ・ David FORREST ・ Ming-Kai TSE

AEを用いた Mn-Zn フェライトのオンライン摩耗検出法

機論 ,60-576,C(1994),P.2615-2620.

(18) M.J.Bastians

The wigner distribution function applied to optical signals and systems

Opt.Comm., 34724, (1978),P.26-30.

(19) Theo.A.C.M.Classen ・ Wolfgang.F.G.Mecklenbrauker

The wigner distribution - A tool for time-frequency signal analysis

Philips J.Res.,35,(1980),P.217-250.

(20) M.J.Bastiaans

The wigner distribution function applied to optical signals and systems

Opt.Communications, 34724,(1978),P.26-30.

(21) Theo.A.C.M.Classen ・ Wolfgang.F.G.Mecklenbrauker

The aliasing problem in discrete-time wigner distributions

Trans.acoustics.Speech and signal processing,34850,(1983),P.1067-1072.

(22) 杵築兼史 ・ 宇野裕喜 ・ 北川猛 ・ 石光俊介

Auto-Wigner 分布による時系列解析 (周波数応答解析と適正ラグ窓の選定),

機論 ,58-552,(1992),P.2431-2437

(23) H.O.Bartelt ・ K.H.Brenner ・ A.W.Lohmann

The Winger Distribution Function and its Optical Production

Opt.Comm.,32-1,(1980),P.32-38

(24) 柏田浩貴 ・ 渡辺芳明 ・ 北川猛

反射超音波信号の時間一周波数解析

機論 ,57-555,C(1991),P.774-779

(25) 井上裕嗣 ・ 岸本喜久雄 ・ 中西智明 ・ 渋谷寿一

ウェーブレット変換による分散性応力波の時間一周波数解析 (群速度の
同定と超音波材料評価への応用)

機論 ,61-581,(1995),P.153-160.

(26) A.Grossmann ・ J.Morlet ・ T.Paul

Transforms associated to square integrable group representations.I.General results

J.Math.Phys., 26-10,(1985),P.2473-2479

(27) Ingrid Daubechies

Painless nonorthogonal expansions

J.Math.Phys.,27-5,(1986),P.1271-1283

(28) 尾田十八 ・ 西河雅宏

接触応力場におけるき裂の応力拡大係数について

機論 ,49-444,A(昭 58),P.911-919.

(29) 北岡 征一郎・大嶋 和彦・平出 誠治

金属薄膜のすべり線を利用した応力測定に関する研究

機論 ,55-511,(1989),P.614-621

(30) 前田 敬一・松本 英治・柴田 俊忍

スペクトル解析による高分子材料の音弾性係数(アクリル樹脂の縦波音弾性係数)

機論 ,60-569,A(1994),P.244-249.

(31) J.Blinka・W.Sachse

Application of Ultrasonic-pulse-spectroscopy Measurements to Experimental Stress Analysis

Experimental Mechanics, Vol.16,(1976),P.448-453.

(32) 岩清水 幸夫

横波の音弾性測に関する考察

材料 ,41-466,(1992),P.1191-1197

(33) 長秀雄・林康久・竹本 幹男

パルス弾性波位相スペクトラムを用いる位相速度の計算法

非破壊検査 ,43-4,(1994),P.236-246

(34) Kenichi Okada

Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique

J.Acoust.Soc.Jpn., E1-3,(1980),P.193-199

(35) 戸田 裕己・福岡 秀和・山崎 友裕

縦波音速測定時の超音波散乱に伴う誤差の評価

機論 ,55-512,(1989),P.888-895

(36) 川嶋 紘一郎・藤井 郁也

固体中の超音波パルス伝ば時間を求める各種デジタル測定法の比較

機論 ,59-567,(1993),P.2758-2763

(37) 荒居 善雄・小林 英男・住永 知毅

磁気誘起速度変化を利用した音弾性応力測定法

機論 ,55-511,(1989),P.622-627

(38) 藤沢 和夫・村山 理一・米原 貞夫・坂本 東男

電磁超音波探触子による鉄道車輪残留応力測定装置の開発

非破壊検査, 43-1, (1994), P.29-35

- (39) 戸田裕己・福岡秀和・山崎友裕・竹内博之
電磁超音波素子による薄板の応力測定

機論, 55-518, (1989), P.2178-2183

- (40) 村上芳則・平尾雅彦・福岡秀和・矢田高広・横山雅哲
パワーケプストラムによる音弾性複屈折法

機論, 55-512, (1989), P.910-916

- (41) 萩博次・平尾雅彦・福岡秀和

電磁超音波共鳴法による金属薄板の応力測定

機論, 60-569, (1994), P.250-257

- (42) R.Bruce Thompson・S.S.Lee・J.F.Smith

Angular dependence of ultrasonic wave propagation in a stressed orthorhombic continuum

Theory and application to the measurement of stress and texture

J.Acoust.Soc.Am., 80-3, (1986), P.921-931.

- (43) R.B.King・C.M.Fortunko

Determination of in-plane residual stress states in plates using horizontally polarized shear waves

J.Appl.Phys., 54-6, (1983), P.3027-3035.

- (44) D.R.Allen・C.M.Sayers

The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique,

Ultrasonics, July, (1984), P.179-188.

- (45) A.J.Allen・M.T.Hutchings・C.M.Sayers

Use of Neutron diffraction texture measurements to establish a model for calculation of ultrasonic velocities in highly oriented austenitic weld material

J.Appl.Phys., 54-2, (1983), P.555-560.

- (46) Yih-Hsing Pao・Tsong-Tsong Wu・Udo Gamer

Acoustoelastic Birefringences in Plastically Deformed Solids: Part 1-Theory,

Trans.ASME.J.Appli.Mech., 58, (1991), P.11-17.

- (47) Yih-Hsing Pao・Tsong-Tsong Wu・Udo Gamer

Acoustoelastic Birefringences in Plastically Deformed Solids: Part 1-Experiment,

Trans. ASME. J. Appl. Mech., 58, (1991), P. 18-23

(48) J.J. Dike ・ G.C. Johnson

Residual Stress Determination Using Acoustoelasticity,

Trans. ASME. J. Appl. Mech., 57, (1990), P. 12-17.

(49) G.G. Adams ・ D.B. Bogy.

The Plane Solution for the Elastic Contact Problem of a Semi-Infinite Strip and Half Plane,

Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mechanics., 15797, (1976), P. 603-607.

(50) G.G. Adams ・ I. Zeid.,

An Elastic Punch Moving Across the Surface of a Semi-Infinite Solid,

Trans. ASME. J. Appl. Mechanics., 18688, (1984), P. 622-629.

(51) 水口義久 ・ 小泉堯 ・ 渋谷寿一 ・ 吉峯鼎

二つの弾性体の接触応力 (弾性体が有限円筒の場合)

機論 ,48-433,A(昭 57),P.1178-1185.

(52) 原利昭 ・ 坂本信 ・ 渋谷寿一 ・ 小泉堯

ねじりを受ける有孔剛体床上の弾性厚板に関する軸対称接触問題

機論 ,52-474,A(昭 61),P.299-304.

(53) L.A. Galin ・ I.G. Goriacheva.,

Three-dimensional Contact Problem of the Motion of a Stamp with Friction,

PMM U.S.S.R., 16954, (1983), P. 819-824.

(54) 浅野直輝

有限要素法による動的接触応力解のためのズームング法,

機論 ,46-402,A(昭 55),P.180-185.

(55) 岡本紀明,

有限要素法による非線形接触問題解析,

機論 (第 1 部),43-374,(昭 52),P.3716-3722.

(56) 矢川元基 ・ 平山浩 ・ 安藤良夫,

ペナルティー法による二次元はりの接触問題の解析,

機論 ,46-411,A(昭 55),P.1220-1229.

(57) 伊東勝悦,

有限要素法による接触問題の解法,

機械の研究,13971,(1986),P.503-506.

(58) 大手敏,

有限要素法による弾性接触応力の解析,

機論 (第1部),38-313,(昭47),P.2210-2216.

(59) 尾田十八,

三次元弾性接触問題に対するポイント・マッチング法の応用,

機論 (第1部),40-329,(昭49),P.70-77.

(60) 尾田十八,

ポイント・マッチング法による弾性接触問題の自動解析,

機論 (第1部),42-358,(昭51),P.55-60.

(61) C.H.Kuo · L.M.Keer,

Contact Stress Analysis of a Layered Transversely Isotropic Half-Space,

Trans.ASME.J.Tribology, 114,(1992),P.253-262

(62) D.Novell · D.A.Hills

Hertzian Contact of Ground Surfaces,

Trans.ASME.J.Tribology,111,(1989),P.175-179.

(63) D.M.Bailey · R.S.Sayles,

Effect of Roughness and Sliding Friction on Contact Stresses,

Trans.ASME.J.Tribology, 113,(1991),P.729-738.

(64) 小川鉄也・樋田晃宏・野村雅彦・杉山文子,

すべり摩擦開始時の動的挙動,

機論,60-578,A(1994),P.2404-2410.

(65) 久門輝正,

摩擦面における接触機構 (第1報,あらさ分布曲線と突起形状の影響),

潤滑,29-7,(昭59),P.529-536.

(66) 久門輝正,

摩擦面における接触機構 (第2報,弾性的接触と移着層の影響),

潤滑,34971,(昭59),P.679-686.

(67) 久門輝正,

摩擦面における接触機構 (第3報,セラミックスの摩耗試験による理論

の実験的検証),

潤滑,34910,(昭60),P.515-523.

(68) 久門輝正,

摩擦面における接触機構(第4報,高分子の摩擦・摩耗に及ぼす相手面
表面あらさの影響の理論解析),

潤滑,35033,(昭60),P.822-829.

(69) 米山・他3名,

光ファイバセンサを用いた工具面圧力計の開発,

塑性と加工,35-397,(1994),P.58-163.

(70) 水口・他2名,

測圧ピンによる接触圧力測定法の改良,

非破壊検査,11628,(1982),P.843-848.

(71) 小島之夫,

パイプ型ひずみゲージを用いた接触圧力の測定,

機論,59-567,A(1993),P.2599-2604.

(72) 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),

機論(第3部),44-381,(昭53),P.1742-1751.

(73) 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
の接触圧力分布),

機論,46-404,C(昭55),P.438-444.

(74) 加藤仁・山口勝美・加藤隆雄,

表面あらさ変による金属接触面の圧力分布測定法(第3報,ランダム
な粗さを持つ金属面の場合),

機論,48-427,C(昭57),P.408-417.

(75) 山口勝美・水掇文浩,

光の表面反射特性を用いた接触圧力分布測定法,

機論,51-471,C(昭60),P.2869-2876.

(76) 尾田十八・本悟・井上二郎・多保田純,

圧電セラミックスを用いた接触圧力分布の測定用センサシステムの開発
(測定の多点化と高速化への試み),

機論,55-513,A(1989),P.1230-1235.

(77) 下条誠,

感圧導電ゴムの履歴特性,

機論,59-564,(1993),P.2464-2469

(78) Plock.R,

Die Übergangsstiffigkeit von Schraubenverbindungen,

Industrie-Anzeiger,93-27,(1971),P.571-575.

(79) 池浩,

感圧箔による接触面圧分布測定

塑性と加工,33-383,(1992),P.1394-1399.

(80) 小山武夫,

蒸着素子による接触圧力分布の測定

潤滑,34972,(昭60),P.639-644.

(81) 益子正巳・伊東誼,

すべり案内面の圧力分布に関する研究(第1報,超音波による接触圧力測定),

機論(第3部),34-257,(昭43),P.191-198.

(82) 伊東誼・益子正巳,

すべり案内面の圧力分布に関する研究(第2報,固体接触状態の面圧分布形状),

機論(第3部),36-284,(昭45),P.639-648.

(83) K.Kendall・D.Tabor,

An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces,

Proc.Roy.Soc.Lond A,A323,(1971),P.321-340.

(84) 伊藤周三・廬相舜・伊東誼,

焦点形超音波振動子によるコンタクトパターン之二、三の測定結果,

機論,48-425,C(昭57),P.70-77.

(85) 伊藤・他2名,

単一ボルト締結体の締付圧力分布(二次元締付圧力分布測定を試作と二、三の測定結果),

機論,50-458,C(1984),1816-1824.

(86) 水口義久・小泉堯・吉峯鼎,

超音波による接触圧力の測定,

非破壊検査,12024,(昭58),P.956-963.

(87) 水口義久,

超音波による接触圧力測定(金属平形ガスケットを挿入したボルト締結体について),

機論,50-457,A(昭59),P.1668-1674.

(88) 水口義久・吉峯鼎・小泉堯・萩原隆徳,

超音波による接触圧力測定(定量測定法について),

機論,50-453,A(昭59),P.953-958.

(89) 水口義久・小泉堯・渋谷寿一,

斜角探触子を用いた超音波による接触圧力の測定,

機論,51-461,A(昭60),P.268-272.

(90) 水口義久・渋谷寿一・小泉堯,

超音波による結合板間の接触圧力分布に及ぼす平面度の影響評価,

機論,55-517,A(1989),P.2021-2026.

(91) 水口義久・渋谷寿一・小泉堯,

超音波による接触圧力測定法の改良,

機論,60-571,A(1994),P.888-894.

(92) 水口義久・春日宏行,

超音波の多重エコーを用いた接触圧力測定,

非破壊検査,40-9,(1991),P.609-615

(93) 堤正巳・劉推均・谷口明・伊藤誼,

横波を利用した超音波接触圧力測定法とその応用,

機講論,No.820-13,(昭57-10),P.247-249.

(94) 小倉幸夫・宮島猛,

超音波による接触面圧測定法の検討,

- 非破壊検査 ,11720,(昭 58),P.124-125.
- (95) 伊藤周三・村上靖典・伊藤誼 ,
複合荷重下におけるボルト締結体の締め付け圧力分布 (結合部数学モデルの設定への一寄与),
機論 ,51-469,C(昭 60),P.2414-2418.
- (96) 原利昭・大石浩彦 ,
超音波による金属パンチと非金属板間の接触圧力測定 ,
機論 ,51-471,A(昭 60),P.2646-2650.
- (97) 堤正臣 ,
超音波の機械計測への応用 ,
精密機械 ,17715,(1982),P.953-959.
- (98) Y.Ito ・ J.Toyoda ・ S.Nagata,
Interface Pressure Distribution in a Bolt-Flange Assembly,J.Mechanical
Design,101,(1979),P.330-337.
- (99) 築添正
表面あらさと面の接触機構について
潤滑 ,34771,(昭 43),P.101-108.
- (100) P. W. O'callaghan ・ S. D. Probert,
Prediction and measurement of true areas of contact between solids,
Wear,120,(1987),P.29-49.
- (101) P.Daponte ・ R.S.Olivito ・ G.Spadea
Ultrasonic and laser measurements in structural contact problems,
Materials and Structures,25,(1992),P.42-48.
- (102) 超音波探傷法 ,
日本学術振興会製鋼第 19 委員会編 ,
日刊工業新聞 ,(昭 49),
- (103) 超音波技術便覧 (新訂版), 日本工業新聞社
- (104) 済木弘行・坂田豊・丸茂康男・志宏
リング圧縮試験における潤滑条件下の摩擦せん断応力の評価 (超音波測定
の適用),

- 機論 ,60-577,A(1995),P.3171-3176.
- (105) 濟木弘行・坂田豊・里中忍・丸茂康男・志宏 ,
鍛造加工における超音波測定による摩擦接触状態の評価 ,
機論 ,59-562,C(1993),P.1934-1939
- (106) 野中寿夫 ,
超音波顕微鏡によるガラス基板上の金薄膜の特性評価 ,
機論 ,58-548,C(1992),P.1162-1169.
- (107) 野中寿夫・山本弘・西森博幸・藤島一郎・宮木克己・早川泰夫 ,
超音波顕微鏡の物性評価への応用 ,
機論 ,58-552,A(1992),P.1481-1488.
- (108) Koichi Karaki ・ Masaru Suzuki ・ Yuichi Okuda,
Acoustic microscope using pressurized superfluid 4He,
J.Appl.Phys,67-4,(1990),P.1680-1683.
- (109) 飯田司・小野沢元久・竹内彰敏・佐藤光正・青木弘 ,
超音波法による固体接触面の評価 ,
トライボロジスト ,37-1,(1992),P.69-75
- (110) 高坪純治・山本茂之 ,
セラミックス多孔体の超音波伝ばメカニズム (第1報, 理論),
機論 ,60-577,A(1994),P.2126-2131
- (111) 高坪純治・山本茂之 ,
セラミックス多孔体の超音波伝ばメカニズム (第2報, 理論の検証実験),
機論 ,60-577,A(1994),P.2132-2137
- (112) 鈴木賢治・田中啓介・河合千尋 ,
CVD 法による TiC-SiC 系被覆膜の残留応力 ,
機論 ,58-555,A(1992),P.2172-2178.
- (113) 香川博之・市川昌弘・高松徹 ,
弾性球圧子押込みによる薄膜・基板接合体の接触圧力分布
(薄膜の機械的特性評価を目的として),
機論 ,58-546,A(1992),P.223-229.
- (114) 香川博之・市川昌弘・高松徹・桑野博喜 ,

球圧子押込みによる薄膜・基板接合体の応力分布の有限要素法解析
(薄膜及び界面のミクロ破壊との関連において),

機論 ,58-546,A(1992),P.230-236.

(115) 岩城敏博,

薄膜の応力・ひずみに関する分子動力学的研究,

機論 ,61-582,(1995),P.319-325

(116) 塩沢和章・韓玲,

PVD 法による TiN 被覆炭素鋼の低サイクル疲労強度,

機論 ,59-559,(1993),P.733-740

(117) 金原繁,

蒸着膜の付着力測定,

潤滑 ,32-9,(1986),P.638-641.

(118) 佐々木直哉・岩崎富生・千葉矩正・阿部康夫,

薄膜を有する金属面における摩擦・摩耗現象の分子動力学シミュレーション,

機論 ,60-575,A(1994),P.1682-1689.

(119) 栗津薫・中川多津夫,

CVD 法で TiC と TiN を被覆した SKD 鋼の摩擦摩耗特性,

機論 ,57-535,C(1991),P.960-964.

(120) 中原綱光・畑一志・青木弘,

流体潤滑の摩耗特性に及ぼす表面あらさの影響に関する研究,

潤滑 ,34817,(昭 58),P.294-300.

(121) 中原綱光・武居誠之・青木弘,

流体潤滑における表面あらさと軸受け縦横比への影響,

潤滑 ,34908,(昭 58),P.543-548.

(122) 久門輝正・古川秀樹・築添正,

境界潤滑下の固体接触と摩擦粉生成機構,

潤滑 ,26-8,(昭 56),P.568-575.

(123) 山口章三郎,

各種機器における固体潤滑,

潤滑, 34847, (昭 57), P.383-387.

(124) 山口章三郎,

軸受材としてのプラスチック,

潤滑, 34991, (昭 49), P.718-723.

(125) K.M.Marshak · H.H.Chen,

Discretization Pressure-Wear Theory for Bodies in Sliding Contact,

Trans.ASME.J.Tribology, 111, (1989), P.95-100.

(126) A.Majumdar · B.Bhushan,

Fractal Model of Elastic-Plastic Contact Between Rough Surfaces,

Trans.ASME.J.Tribology, 113, (1991), P.1-11.

(127) M.Suzuki · K.C.Ludema,

The Wear Process During the "Running-In" of Steel in Lubricated Sliding,

Trans.ASME.J.Tribology, 109, (1987), P.587-593.

(128) 鏡重次郎 · 畑沢鉄三 · 川口尊久 · 山田国男,

なじみ過程における摩耗面形状変化の測定と観察,

潤滑, 33-12, (1988), P.900-906.

(129) 内山吉隆,

ゴムの摩耗とアブレーションパターンの生成過程,

潤滑, 30-7, (1985), P.524-531.

(130) S.W.Zhang,

Mechanisms of rubber abrasion in unsteady state,

Rubber Chem.Techol., vol.57, (1984), P.755-768.

(131) 後藤仁一郎 · 三澤章博 · 隆雅久 · 國尾武,

接触負荷を受ける回転粘弾性円板周上の周期的摩耗に関する一考察,

機論, 60-572, A(1994), P.1005-1010.

(132) S.W.Zhang,

Investigation of abrasion of nitrile rubber,

Rubber Chem. Technol., 57, (1984), P.769-778.

(133) D.H.Champ · E.Southern · A.G.Thomas,

Fracture mechanics applied to rubber abrasion,

- J.Polym.Sci., 28,(1983),P.943-960.
- (134) Yoshitaka UCHIYAMA,
The wear of rubber and the formation processes of abrasion patterns,
J.JSLE.Int.Edition,7,(1986),P.59-64
- (135) A.N.Gent ・ C.T.R.Pulford,
Mechanisms of Rubber Abrasion,
J.App.Polymer Sci.,28,(1983),P.943-960.
- (136) 金石三・加藤康司・堀切川一男,
アルミナセラミックスの焼付きと摩耗特性,
潤滑,31-5,(1986),P.329-335.
- (137) 宇佐美初彦・船橋鉦一・中村隆・馬淵英二,
セラミックスの摩擦試験
(第1報)-各種セラミックスの鋼に対する摩擦・摩耗特性-,
トライボロジスト,34-6,(1989),P.458-464.
- (138) 佐々木信也,
セラミックスの摩擦・摩耗に及ぼす水の影響,
潤滑,33-8,(1988),P.620-628
- (139) V.Aronov ・ T.Mesyef,
Wear in Ceramic/Ceramic and Ceramic/Metal Reciprocating Sliding Contact.Part 1,
Trans.ASME.J.Tribology,108,(1986),P.16-21.
- (140) 仲町英治・駒田淳,
表面処理板材の摩擦特性実験式の導入および成形問題の有限要素シミュレーション,
機論,58-551,(1992),P.1228-1233
- (141) 竹内栄一・片桐敏夫・藤井京子,
Fe-Fe₂B 共晶組織の摩耗特性,
熱処理,22-3,(1982),P.156-162.
- (142) 山本久・川本博茂・吉岡正三,
ホウ砂とカーボランダム混合浴による電解浸ホウ法,
金属表面技術,22-10,(1971),P.508-521.

- (143) 牟田明德・戸田堯三・島軒治弥,
B₄C-アルカリ金属炭酸塩による鉄鋼のほう化,
金属,32-5,(1968),P.440-443
- (144) 堀江皓・小錦利憲・藤本浩章・中神孝・川原業三,
球状黒鉛鋳鉄のほう化处理,
鋳物,62-3,(1990),P.208-213.
- (145) 細川一夫・上田益造・関文男,
フェロボロンとほう砂による鉄のほう化反応,
金属表面技術,22-9,(1971),P.442-448
- (146) 沖猛雄・兼松秀行
KCl-BaCl₂-NaF系熔融塩中浸せきによるFe₂Bコーティング,
金属表面技術,39-5,(1988),P.260-265
- (147) 森口繁一・宇田川桂久・一松信
数学公式
(S58),岩波全書
- (148) 福岡秀和・戸田裕己・平尾雅彦
音弾性の基礎と応用
1993,オーム社

著者による関係論文

1. 尾田雅文・原 利昭：ゴム摺動面のアブレーションパターンに及ぼすステックスリップ現象の影響

平成 7 年 7 月発行 日本機械学会論文集 A 編 第 61 巻 587 号

1663-1668 頁に発表

2. 尾田雅文・原 利昭：AE を用いたほう化処理鋼のトライボロジー特性評価

平成 7 年 11 月発行 日本機械学会論文集 C 編 第 61 巻 591 号

4450-4456 頁に発表

3. 尾田雅文・原 利昭：AE を用いた TiN 薄膜の付着力評価方法の検討

平成 8 年 3 月発行 日本機械学会論文集 A 編 第 62 巻 59 号

掲載決定

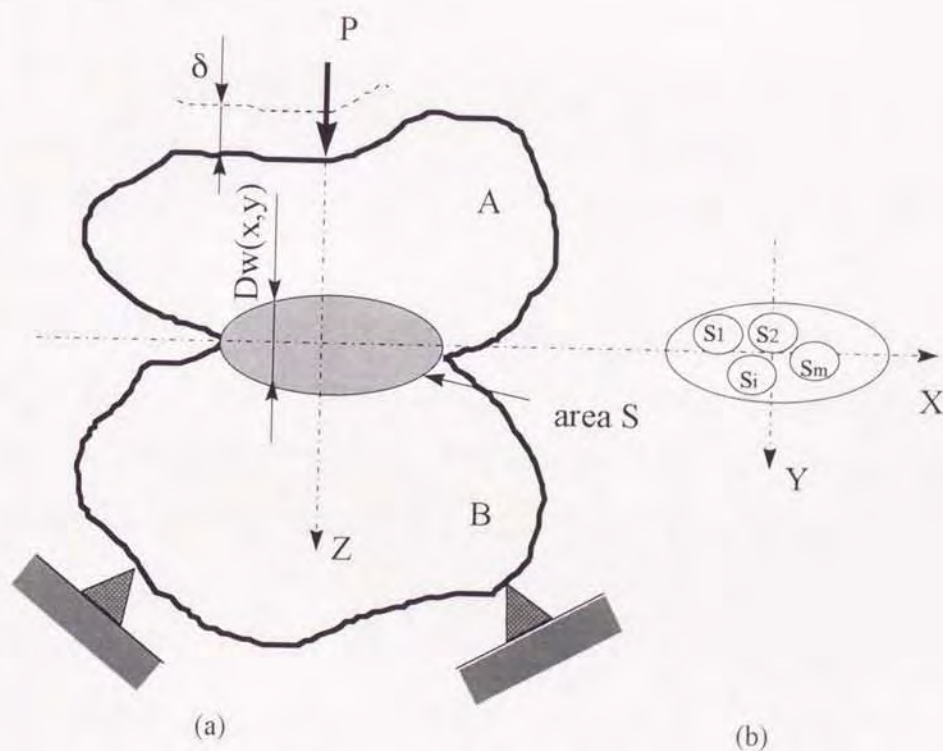
付録 (A) ポイントマッチング法による接触圧力解析

一般的な弾性接触問題に於いて、附図 1(a) に示すように任意の二つの物体 A 及び B がはじめ一点で接触し、その後荷重 P あるいは変位 δ により接触域 S を生じている場合、附図 2 に示すように接触域 S には、 Z 方向の垂直応力 p と x 方向のせん断応力 τ 及び y 方向のせん断応力 q が存在し、これらは接触域 S 内で、一様ではない。

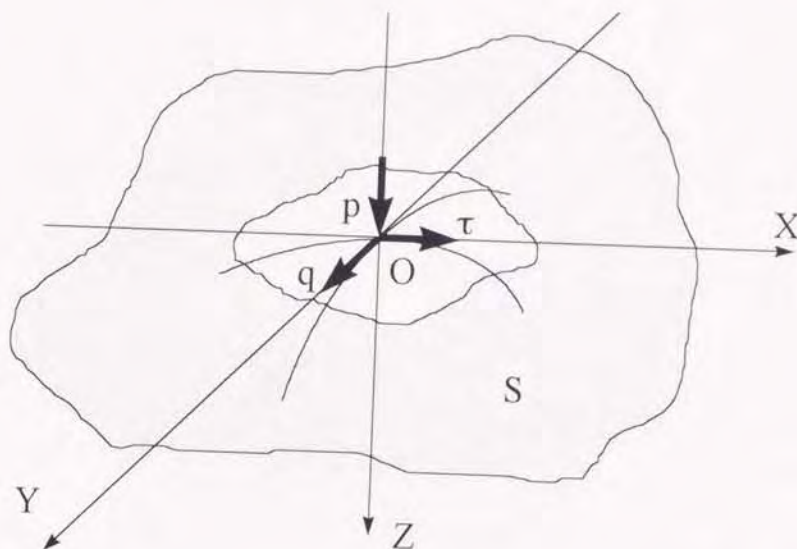
附図 1(b) に示すように、接触域 S を $S_1 \cdots S_m$ の m 個の微小領域に分割する。これら微小領域内では、垂直応力 p 、せん断応力 τ 、 q 及び x, y, z 方向の変位 u, v, w がそれぞれ一様であると仮定すれば、 i 番目の微小領域 S_i に作用する応力 p_i, τ_i, q_i により、任意物体 A, B の表面には次のような変位が生ずるものとする。

(i) p_i によって生ずる変位

$$\left. \begin{array}{l} x \text{ 方向} \cdots u^{p_i}(x, y) \\ y \text{ 方向} \cdots v^{p_i}(x, y) \\ z \text{ 方向} \cdots w^{p_i}(x, y) \end{array} \right\} \quad \cdots (\text{附 1})$$



附図 1 接触する任意形状物体とその接触域



附図2 接触域に作用する応力

(ii) τ_i によって生ずる変位

$$\left. \begin{array}{l} x \text{ 方向} \cdots u^{\tau_i}(x, y) \\ y \text{ 方向} \cdots v^{\tau_i}(x, y) \\ z \text{ 方向} \cdots w^{\tau_i}(x, y) \end{array} \right\} \quad \cdots (\text{附 } 2)$$

(iii) q_i によって生ずる変位

$$\left. \begin{array}{l} x \text{ 方向} \cdots u^{q_i}(x, y) \\ y \text{ 方向} \cdots v^{q_i}(x, y) \\ z \text{ 方向} \cdots w^{q_i}(x, y) \end{array} \right\} \quad \cdots (\text{附 } 3)$$

以上により、接触領域 S の i 番目の微小要素に於いて応力 p_i , τ_i , q_i が作用する場合の j 番目の要素 ($x = a_j$, $y = b_j$) における任意物体の表面変位は式 (附 1), 式 (附 2) 及び式 (附 3) を重ね合わせることにより決定される。また、接触域 S 内の j 番目の要素における x , y , z 方向の変位拘束量を

$$\left. \begin{array}{l} x \text{ 方向} \cdots Du(x, y) \\ y \text{ 方向} \cdots Dv(x, y) \\ z \text{ 方向} \cdots Dw(x, y) \end{array} \right\} \quad \cdots (\text{附 } 4)$$

とすれば、接触面における変位の連続条件を考慮することにより j 番目の要素に於いて次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m \left\{ u_A^{p_i}(a_j, b_j) + u_A^{\tau_i}(a_j, b_j) + u_A^{q_i}(a_j, b_j) \right\} \\
& - \sum_{i=1}^m \left\{ u_B^{p_i}(a_j, b_j) + u_B^{\tau_i}(a_j, b_j) + u_B^{q_i}(a_j, b_j) \right\} = Du(a_j, b_j) \\
& \sum_{i=1}^m \left\{ v_A^{p_i}(a_j, b_j) + v_A^{\tau_i}(a_j, b_j) + v_A^{q_i}(a_j, b_j) \right\} \\
& - \sum_{i=1}^m \left\{ v_B^{p_i}(a_j, b_j) + v_B^{\tau_i}(a_j, b_j) + v_B^{q_i}(a_j, b_j) \right\} = Dv(a_j, b_j) \\
& \sum_{i=1}^m \left\{ w_A^{p_i}(a_j, b_j) + w_A^{\tau_i}(a_j, b_j) + w_A^{q_i}(a_j, b_j) \right\} \\
& - \sum_{i=1}^m \left\{ w_B^{p_i}(a_j, b_j) + w_B^{\tau_i}(a_j, b_j) + w_B^{q_i}(a_j, b_j) \right\} = Dw(a_j, b_j)
\end{aligned} \right\} \quad \cdots (\text{附 } 5)$$

ここで、変位における添え字 A, B は任意物体を示している。接触面に於いて摩擦がないものと仮定すれば、z 方向の垂直応力 p_i による z 方向の変位 w^{p_i} のみを考慮することにより式 (附 5) は次式のように簡略化される。

$$\sum_{i=1}^m w_A^{p_i}(a_j, b_j) - \sum_{i=1}^m w_B^{p_i}(a_j, b_j) = Dw(a_j, b_j) \quad \cdots (\text{附 } 6)$$

これらの式は m 個の各要素に於いて得られるので m 個の未知応力 $p_1 \cdots p_m$ は m 元連立方程式となる式 (附 6) を解くことにより決定される。ここで、m の数を大きくすることにより、すなわち接触領域をより細かく分割することにより、解は真の応力値に近づくと考えられる。

一般に、剛体パンチを摩擦のない半無限弾性表面に押し込む問題では、次のような境界条件が存在する。

- i) $w_z = \delta$ (パンチ接触領域)
- ii) $\sigma_z = 0$ (非接触領域)
- iii) $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$ (半無限体の全表面領域)
- iv) すべての応力成分は無限遠方で消失する。

ここで、荷重 P あるいは押し込み量 δ が変化しても接触域 S は一定であること、変位拘束量 Dw は全接触域で一定値 δ となること、また接触面に摩擦がないので垂直方向変位 w_p のみを考慮すれば良いこと等より式 (附 6) は次式のように置き換えることが出来る。

$$\sum_{i=1}^m w^{p_i}(a_j, b_j) = \delta \quad \cdots (\text{附 } 7)$$

従って、本問題は式(附7)より得られる m 元一次方程式を解くことにより接触応力を求める問題となる。

附図3の様に等分布荷重 P_0 が半無限弾性体表面上の半径 a の円形領域に作用している場合の等分布荷重と変位の関係は文献 [59][60] より、以下のようになる。

$$(w_z)_{z=0} = -\frac{(1-\nu)P_0 a}{G} \int_0^\infty J_1(\gamma a) J_0(\gamma r) \frac{d\gamma}{\gamma} \quad \cdots (\text{附 } 8)$$

$$\begin{aligned} & \textcircled{1} \int_0^\infty x^\lambda J_\mu(ax) J_\nu(bx) dx \quad [R\lambda < 1, R(\lambda + \mu + \nu) > -1] \\ & \quad i) \quad a > b > 0 \\ & \quad \quad = \frac{2^\lambda b^\nu \Gamma(\alpha)}{a^{\lambda+\nu+1} \Gamma(\nu+1) \Gamma(1-\beta)} F(\alpha, \beta, \nu+1; b^2/a^2) \\ & \quad ii) \quad b > a > 0 \\ & \quad \quad = \frac{2^\lambda a^\mu \Gamma(\alpha)}{b^{\lambda+\mu+1} \Gamma(\mu+1) \Gamma(\nu-\alpha+1)} F(\alpha, \alpha-\nu, \mu+1; a^2/b^2) \\ & \quad \quad \alpha = (\lambda + \mu + \nu + 1)/2, \beta = (\lambda - \mu + \nu + 1)/2 \\ & \quad \quad F(\alpha, \beta, \gamma; z) \text{ はガウスの超幾何関数で} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \cdots (\text{附 } 9)$$

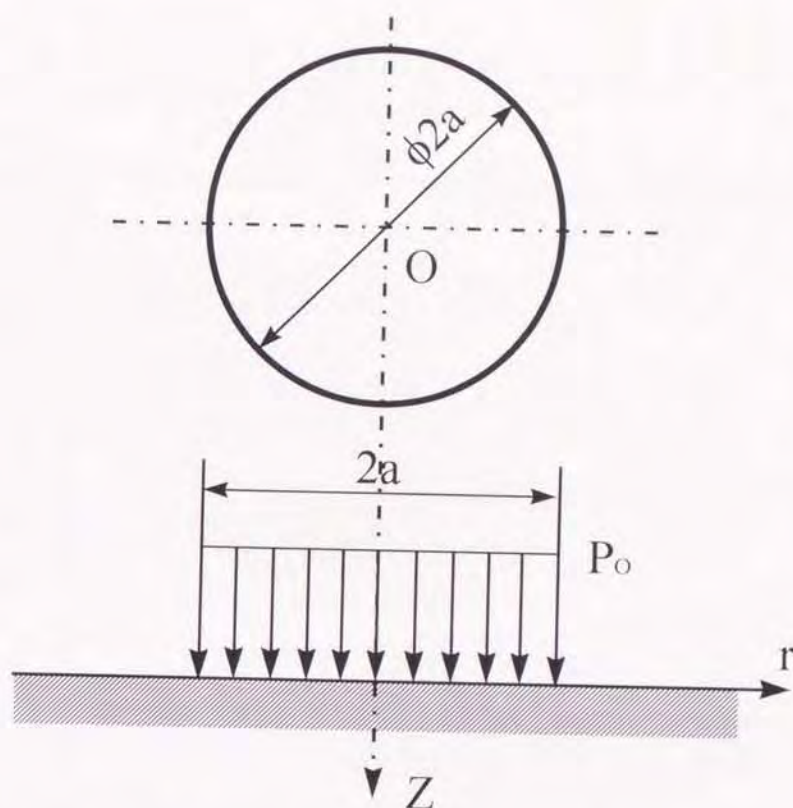
$$F(\alpha, \beta, \gamma; z) = \frac{\Gamma(\gamma)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{m=0}^\infty \frac{\Gamma(\alpha+m)\Gamma(\beta+m)}{\Gamma(\gamma+m)} \frac{z^m}{m!}$$

$$\begin{aligned} & \textcircled{2} \int_0^\infty x^{\mu-1} J_\nu(ax) dx \quad [\nu > -\mu > -3/2] \\ & \quad = \frac{2^{\mu-1} \Gamma[(\mu-\nu)/2]}{a^\mu \Gamma[(\nu-\mu)/2+1]} \quad \cdots (\text{附 } 10) \end{aligned}$$

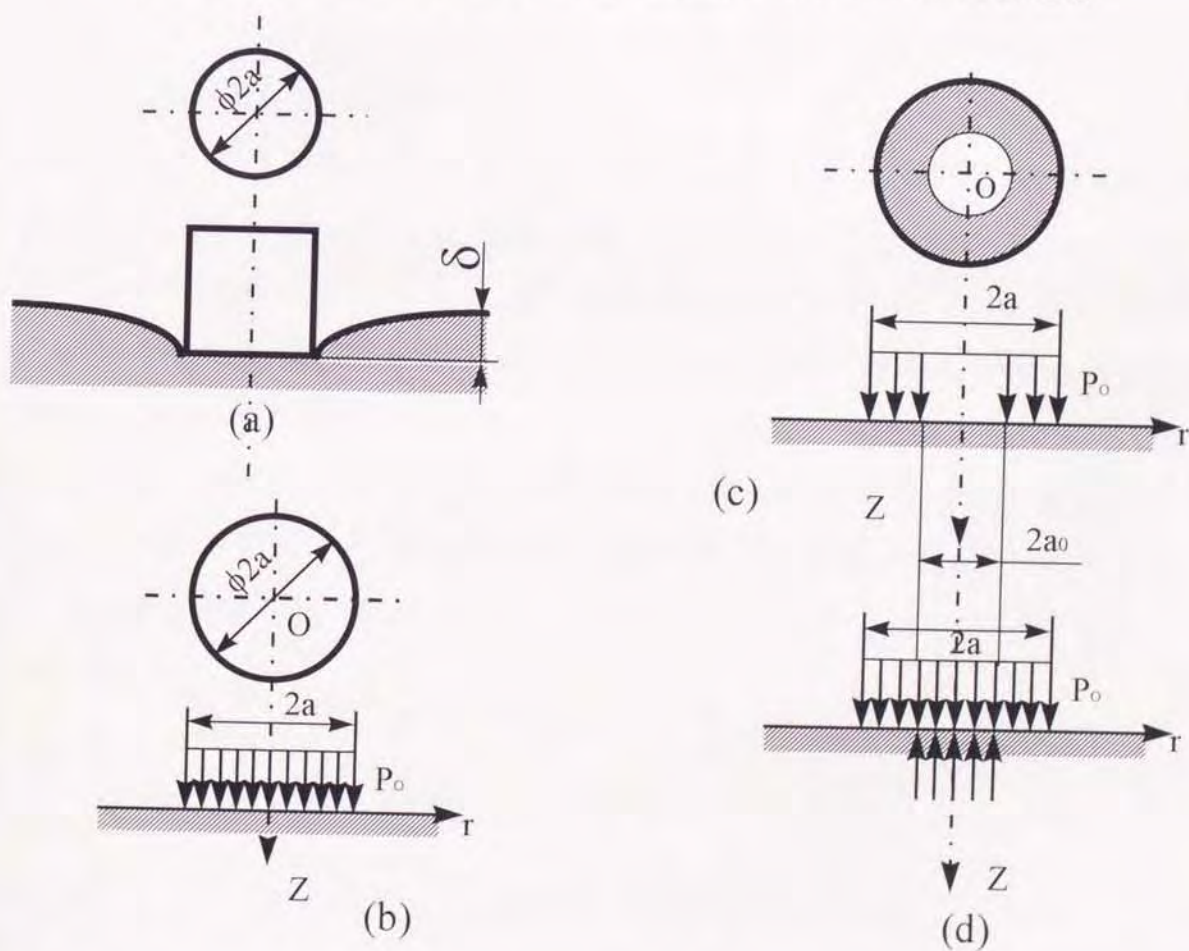
ここで、右辺の無限積分は積分公式⁽¹⁴⁷⁾、式(附9)及び式(附10)を用いることにより、次式のようにして数値計算を行うことが出来る。

$$(w_z)_{z=0} = \left[\begin{array}{ll} -\frac{(1-\nu^2)P_0 a}{E} \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^\infty \frac{\Gamma(n+1/2)\Gamma(n-1/2)}{\Gamma(n+1)} \frac{r^{2n}}{a^{2n}n!} & (r > a > 0) \\ -\frac{(1-\nu^2)P_0 a}{E} \frac{1}{r\pi} \sum_{n=0}^\infty \frac{\Gamma(n+1/2)\Gamma(n+1/2)}{\Gamma(n+2)} \frac{a^{2n}}{r^{2n}n!} & (a > r > 0) \\ -\frac{2(1-\nu^2)P_0 a}{E} & (a > r = 0) \end{array} \right] \cdots (\text{附 } 11)$$

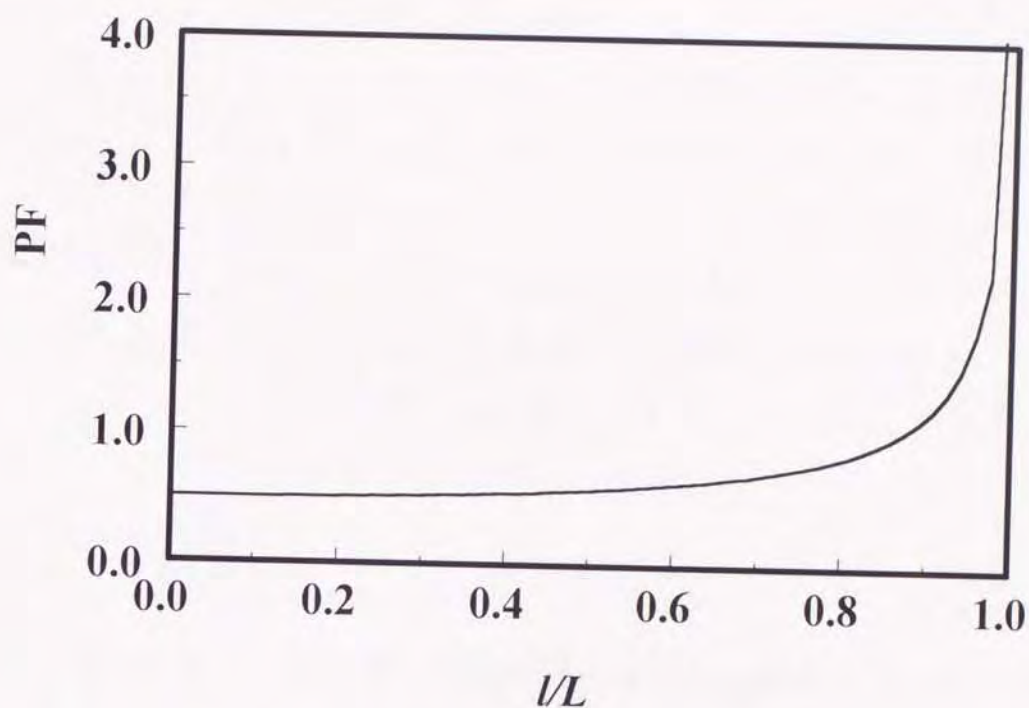
附図4(a)の様に円柱状剛体パンチが半無限弾性体に押し込まれる場合を考える。半径方向の要素の分割数を60とし、半径方向の長さを等分割し、数値計算を行う。同図中(b)に示す様に外径 a 、内径 a_0 のドーナツ状の領



附図 3 表面の円形領域に等分布荷重を受ける半無限弾性体



附図 4 円柱状剛体パンチによって δ だけ押し込まれた半無限弾性体



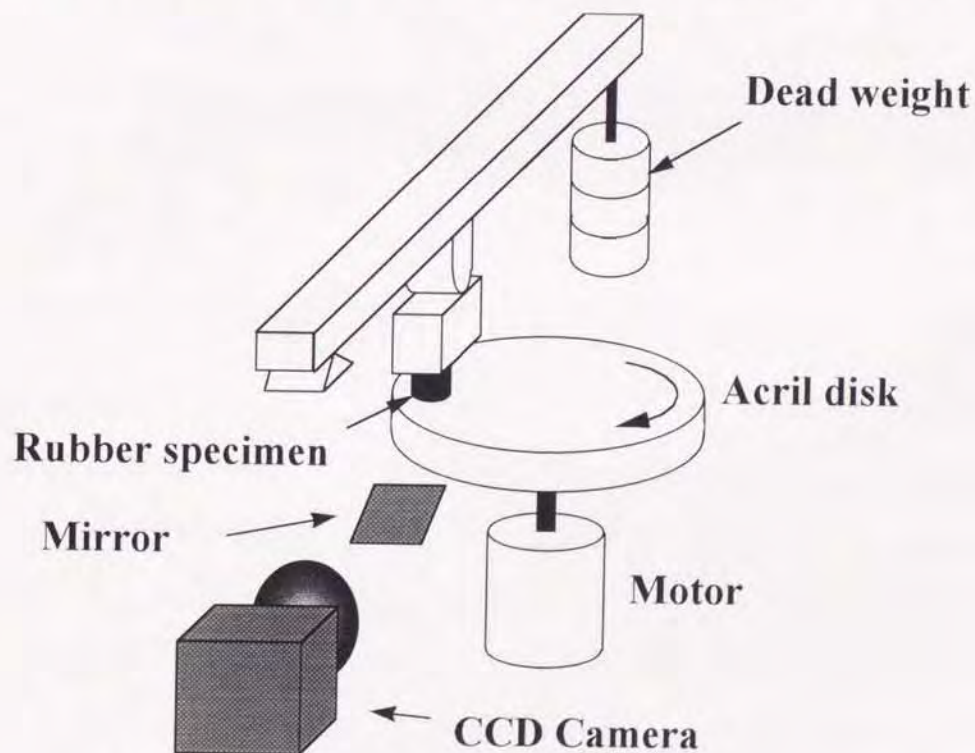
附図 5 σ_z の分布

域に等分布荷重が作用する場合は、同図中 (c) に示す様に、半径 a の円形領域に上方から、半径 a_0 の円形領域に下方からそれぞれ等分布荷重 P_0 が作用している場合を考え、これを重ね合わせて求める。この様にして 60 要素を考慮した式 (附 7) を求め、これを数値計算し得られた解を附図 5 に示す。図の横軸は接触領域中心からの距離を円柱パンチの半径で除した値、縦軸は各位置での垂直応力を "押し付け荷重 / 接触面積" で定義される公称応力で除して求めた PF 値を示す。図より、接触域中央部では PF 値は小さく、接触域端部に近づくに従い、圧力勾配が大きくなることが解る。

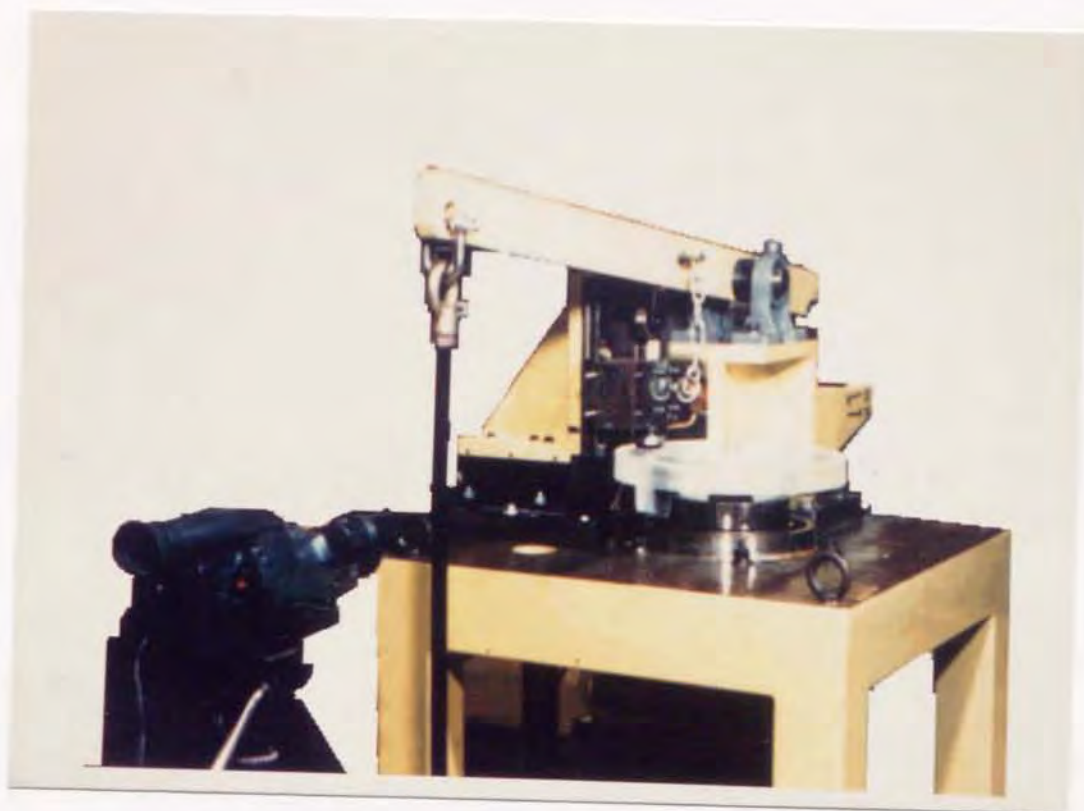
付録 (B) ゴム摺動時のビデオカメラを用いた観察法

第 4.3 節に示すように、アブレーションパターン形成機構を接触圧力に基づいて解明するために、超音波法を用いて回転するアクリル円板上にゴム円柱を押し付けた場合の接触圧力測定を行った。さらに、この時用いたピン-オン-ディスク型摩耗試験機を利用して、摺動面の観察を行った。附図 6 及び附図 7 にその測定システムを示す。摺動速度及びゴム試料の押し付け荷重を附表 1 に示すように設定し、アクリル円板上の中心より 118mm の位置で直径 ϕ 30mm のゴム試験片を押しつけた。この状態で、アクリルディスクの下方に鏡を 45 度傾けて設置し、これに映った摺動接触部をビデオカメラを用いて観察・記録する。アクリル円板とゴム試験片の初期表面は第 4.3 節の接触圧力測定実験と同様にした。すなわち、前者はラップ加工を施し、均一な表面状態を得ると共に、後者においては射出成形面を利用した。初期表面の粗さはそれぞれ中心線平均粗さ R_a で $0.4 \mu m$ と $0.77 \mu m$ である。

附図 8 に観察例を経時的に示す。摺動速度は $10.8mm/s$ 、ゴム試料の押し



附図 6 実験システム概略図



附図 7 測定時の様子

附表 1 実験条件

No.	Volocity	Load
A	5.4mm/s	254.8N
B	5.4mm/s	588.0N
C	10.8mm/s	254.8N
D	21.9mm/s	254.8N

付け荷重は 254.8N である。なお、下端はリーディングエッジ、上端はトレディングエッジである。接触域端部が黒く示されている。これは、アクリルプレートとゴム試験片が密着しており、この領域の大きな接触圧力が作用していることが予測される。また、トレディングエッジ付近においても、この様な黒色の点が存在し、かつこの点は時間の経過に伴い上方に移動している。このように、局所的に接触圧力が大きな箇所が存在する。この様にして得られた、摺動接触面の観察結果を参考にして、アブレーションパターン形成機構を検討した。



$t = 0\text{sec}$



$t = 0.2\text{sec}$



$t = 0.4\text{sec}$



$t = 0.6\text{sec}$



$t = 0.8\text{sec}$



$t = 1.0\text{sec}$

附図 8 摺動接触面の観察例 (Velocity = 10.8mm/s, Load = 254.8N)