

粗さ・硬さ同時計測システムの構築

1030164

山本 英二

知能機械システム工学科
トライボロジー研究室

指導教員：竹内 彰敏

目次

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 1 . 緒言 | 1 |
| 2 . 従来の硬さ計測法 | 2 |
| 2 . 1 硬さとは | 2 |
| 2 . 2 ブリネル硬さ | 2 |
| 2 . 3 ビッカース硬さ | 3 |
| 2 . 4 ショア硬さ | 5 |
| 2 . 5 ユニバーサル硬さ | 6 |
| 2 . 6 塑性硬さ | 7 |
| 2 . 7 超音波硬さ計 | 8 |
| 3 . 粗さ・硬さ同時計測システム | 9 |
| 3 . 1 硬さセンサーの原理 | 9 |
| 3 . 2 3次元表面粗さ測定装置 | 11 |
| 3 . 3 粗さ・硬さ同時計測システムの構成 | 12 |
| 3 . 4 出力されるデータ | 13 |
| 3 . 5 3次元測定データの分布図作成法 | 14 |
| 3 . 6 測定データの較正 | 17 |
| 3 . 7 硬さ測定部の改良 | 18 |
| 4 . 測定実験と結果 | 20 |
| 4 . 1 硬さセンサーの特性測定 | 20 |
| 4 . 2 粗さ・硬さ同時測定実験 | 21 |
| 4 . 3 コーティング下の硬さ測定 | 24 |
| 4 . 4 コーティングの膜厚測定 | 25 |
| 4 . 5 荷重の大小による表層下の空孔の判別 | 28 |
| 5 . 結言 | 32 |
| 参考文献 | 33 |
| 謝辞 | 33 |
| 付録 センサーの実用例：虫歯診断への利用 | 34 |

1 . 緒言

材料には様々な物性値があり、製品の開発を行う上でそれらの情報は重要な位置を占める。どのような製品にも使用する環境に応じて加わる力や衝撃、曲げ強さ、腐食、摩耗などの様々な劣化要因が存在し、材料はそれらに耐え得る物を選択しなければならない。その為材料の強度、曲げ強さなどの材料物性値の測定法は測定する物性、測定する材料によって様々な方法が考えられている。

本システムで測定を行う硬さは材料を評価する上で重要な位置を占めるパラメーターの1つである。しかし、硬さの測定法はその重要さに対して、硬い材質から柔らかい材質まで、共用して測定できる測定法はまだ発見されていない。例えば現在一般的な硬さ測定法はブリネル硬さ、ビッカース硬さ、ロックウェル硬さなどの圧痕を利用した押し込み試験法が主だが、全て直接の変形量から硬さを判断する測定法である。よって適用範囲が塑性変形の大きな材料に限定され、ゴムのような弾性変形の大きな材料の測定には不向きである。このような弾性変形の大きな材料では、その弾性を利用したショア硬さ等の硬さ測定法を利用する事になる。また、これらの硬さ測定法は、その特性上試験機にあわせて作られた試験片でしか満足な結果を得られず、製品で測定を行う事は難しい。そして測定範囲はその試験片の中でも更に一部分のみであり、精密な硬さの分布は現存する測定法では求める事が不可能である。

しかしどのような物質であっても硬さが均一という事はなく、測定箇所によって結果は変動してくる。本実験で構築したシステムは、粗さ測定機と硬さセンサーを利用して、測定対象の硬さ・粗さを3次元分布として測定する事を目的としている。そして両データの分布を比較する事により解析可能と思われる、塗装の剥離状態、部材の劣化といった事象を考え、それらの診断の可能性を調べる為いくつかの測定実験を行った。

2. 従来の硬さ測定法

2.1 硬さとは

硬さは元々、物質どうしを擦り合わせた時、摩耗の生じた方が軟らかいといった判断のみで表されていた。現在では硬さの判断を同一の単位で比較する為、測定物に外力が加わったときの、塑性変形のしやすさが硬さとされている。

この硬さは同一の尺度でゴムの様な軟らかいものから鋼等の硬いものまで、すべての範囲を精度よく測定できれば理想的ではあるが、そのような硬さ測定法は現在でもまだ見つかっていない。そのため、測定対象の性質に応じて原理的に異なる様々な測定法が開発されており、この測定法の違いによって硬さの値も異なってくる。以下には、現在一般的に用いられている硬さの測定法とその適用範囲、そして本測定での硬さ測定において、硬さの比較に用いた測定法について述べる。

2.2 ブリネル硬さ(Brinell Hardness[H_B])

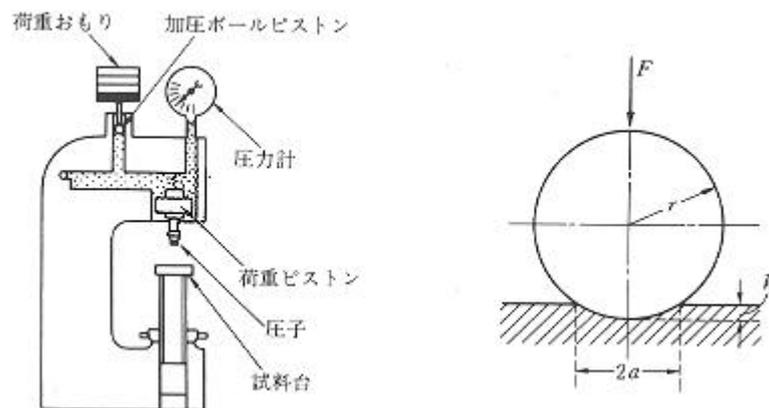


図1 ブリネル硬さ試験機・圧子

ブリネル硬さは、押し込み型(静荷重式)の硬さ試験法の1つで、いくつかの押し込み型の試験法の中で、広く利用されている試験法である。

図1に試験機の構造と圧子の形状を示す。材料の硬さによって、圧子の直径と荷重は決められており、圧子の直径1~10mmに対し4.903N~29.42kNが用いられる。図のように、半径 r の鋼あるいは超硬合金の球形圧子を過重 F (N)で試験片に押し込む。そして r , a より h 、そして接触球面部分の面積 S を求める。ブリネル硬さ(H_B)は、このときの接触球面の平均圧力 F/S で硬さを表す。この値は応力の次元となるが、硬さの単位ではその測定法に応じた単位を付ける事になっている。この硬さ測定法は圧痕が大きいので硬さが不均一な材

料、素材、鍛造品に適している。その反面、圧痕の大きさから、小さい試料や薄い試料の測定には適さない。

H_B の実際値は、鉄や鋼で 160 以上、銅やアルミ合金で 160 ~ 60、鉛やすすで 20 以下である。

ブリネル硬さ算出式

$$H_B = \frac{F}{S} = \frac{F}{2pr(r - \sqrt{r^2 - a^2})} \quad - (1)$$

2.3 ビッカース硬さ(Vickers Hardness [H_V])

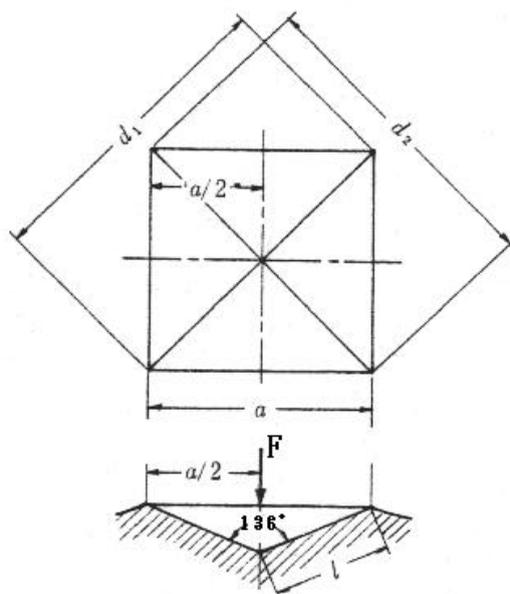


図2 ビッカース圧子と圧痕の形状

圧子の形状は対面角が 136° のダイヤモンドの正四角錐で、これを過重 $F(N)$ で試験片に押し込み、荷重を取り去った後、 $F(N)$ を塑性変形窪みの対角線の長さ $d(mm)$ から求めた表面積 $S(mm^2)$ で除した F/S を硬度 H_V とし、無単位の値で用いる。

ビッカース硬さ算出式

$$H_V = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \quad - (2)$$

この測定法では、窪みの形状は圧子の大きさに関係なく相似形となるため、試験荷重の大きさを自由に選ぶ事ができ、小さい試料、薄い材料などの測定に

適している。試験荷重は通常、49.03N～490.3N が用いられる。

炭素鋼の H_V は 100～150、また硬質鋳鉄は 350～800、黄銅は 70～150 である。

このビッカース硬さと上で述べたブリネル硬さ、そしてもう 1 つロックウェル硬さ(H_R)の 3 種類の硬さ試験法は、どれも押し込み荷重に対する塑性変形の大小で硬さを調べるものである。そのため測定時に測定対象に傷を付ける事が避けられず、製品の硬さ測定には向いていない。また、ゴムのような弾性変形量の大きな物質での測定は、不可能である。

H_B, H_R, H_V 相互間では理論的な換算が行えるように思えるが、一般的な換算式を作る事は難しい。そのため、実用面では、材料を限定した実験式や換算表が近似的に用いられている。

| ビッカース 硬さ(H_V) | ブリネル硬さ10mm球 | | ロックウェル硬さ | | | |
|----------------------|-------------|--------------|----------|--------|-------|-------|
| | 標準球 | タングステンカーバイト球 | Aスケール | Bスケール | Cスケール | Dスケール |
| 500 | -465 | 471 | 75.3 | - | 49.1 | 62.2 |
| 480 | 448 | 452 | 74.5 | - | 47.7 | 61.3 |
| 460 | 433 | 433 | 73.6 | - | 46.1 | 60.1 |
| 440 | 415 | 415 | 72.8 | - | 44.5 | 58.8 |
| 420 | 397 | 397 | 71.8 | - | 42.7 | 57.5 |
| 400 | 379 | 379 | 70.8 | - | 40.8 | 56 |
| 380 | 360 | 360 | 69.8 | -110 | 38.8 | 54.4 |
| 360 | 341 | 341 | 68.7 | -109 | 36.6 | 52.8 |
| 340 | 322 | 322 | 67.6 | -108 | 34.4 | 51.1 |
| 320 | 303 | 303 | 66.4 | -107 | 32.2 | 49.4 |
| 300 | 284 | 284 | 65.2 | -105.5 | 29.8 | 47.5 |

図 3 H_B, H_R, H_V 換算表

2.4 ショア硬さ(Shore Hardness[H_s])

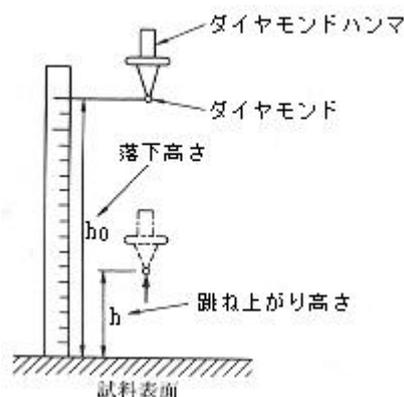


図4 ショア硬さ試験法

反発型(衝撃荷重式)に分類される硬さ診断法で、一般的に広く使われている。一定の形状と重さを持つダイヤモンドハンマを一定の高さ h_0 (m) から試験面に垂直に落下させ、その跳ね上がり高さ h (m) を求める。跳ね上がり高さを目測で読み取る方式の C 型とよばれるものでは、ハンマ重量 2.31×10^{-2} N、先端半球ダイヤモンドチップの半径は 10^{-3} m、落下高さ 0.254m であり、次式でショア硬さ H_s が求められる。

ショア硬さ算出式

$$H_s = \frac{10^4}{65} \frac{h}{h_0} \quad - (3)$$

ショア硬さ試験は動的なもので、衝突時の反発エネルギーの損失が、試料の寸法や資料とその保持台の質量によっても異なるので、試料の大きさや保持法について留意する必要がある。また、試料表面の粗さと平面度についても注意しなければならない。

この測定法は物質の弾性を利用した測定法で、測定物に大きな損傷を残す事はない。そのため、製品の硬さ測定に適している。

2.5 ユニバーサル硬さ(Universal Hardness[H_U])

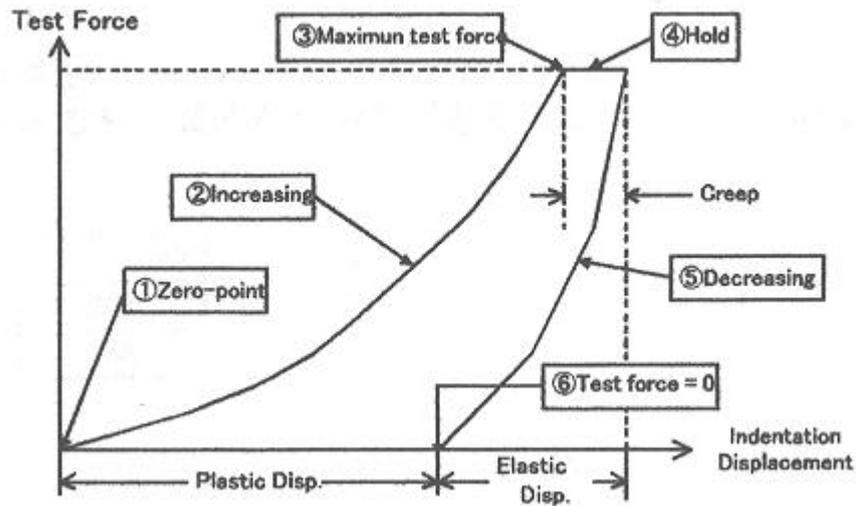


図5 ユニバーサル硬さ試験 変形量 - 荷重グラフ

ユニバーサル硬さとは超微小硬度計を用いた材料評価方法である。超微小硬度計に関する規格は制定されておらず、各機関から提案が出されており、ISOにはユニバーサル硬さ試験として規格草案が提出されている。超微小硬度計では他の硬さ試験に比べて負荷荷重が小さいため、薄膜等、材料のごく表面の硬さ測定も可能となっている。

ユニバーサル硬さは負荷した試験力(F)とくぼみの表面積 A(h)との商と定義され、くぼみ表面積 A(h)は、押し込み深さ(h)から算出する。圧子にはビッカース圧子、もしくはベルコビッチ圧子を使用し、それぞれに硬さ算出式が決まっている。

ビッカース圧子を用いた場合の算出式は、

$$H_U = \frac{F}{A(h)} = \frac{F}{26.43 \times h^2} \quad - (4)$$

$$A(h) = \frac{4 \times \sin\left(\frac{a}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{a}{2}\right)} \quad a : 136^\circ \quad - (5)$$

となっている。また、ユニバーサル硬さで鋼を測定した時の荷重 - 変形量の関係を図6に示す。

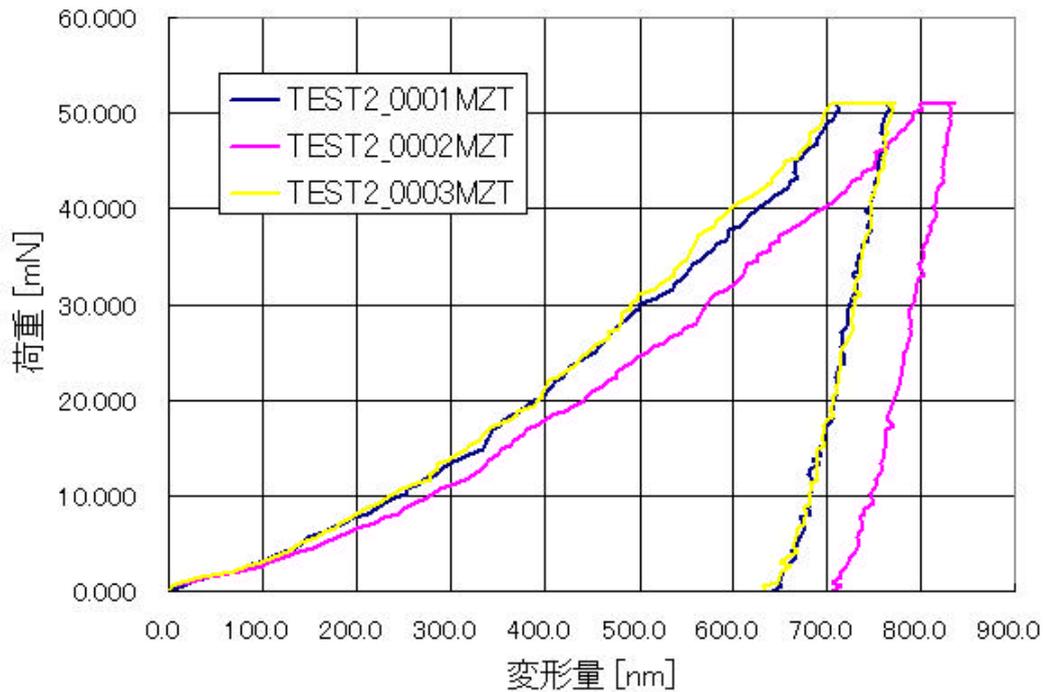


図6 鋼のユニバーサル硬さ測定 変形量 - 荷重グラフ

2.6 塑性硬さ(Plastic Hardness[$H_{Upplast}$])

圧子、硬さ算出式はユニバーサル硬さと同じ物を用いた微小硬度計による硬さ測定法で、押し込み深さに図6に示す塑性変形量 h_r を代入して計算した硬さである。この測定法は他の測定法に比べ、測定対象のごく表面の硬さを測定できる、表面を傷つけない、そして何より硬さの分布を取り易いといった特徴がある。よって、本測定実験で硬さ測定に用いたセンサーの硬さ測定値は、塑性硬さで測定した値との比較から導き出した。

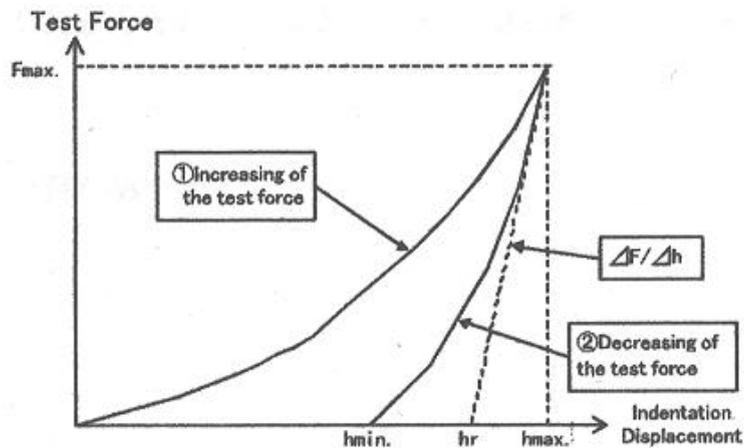


図7 塑性硬さ 変形量 - 荷重グラフ

2.7 超音波硬さ計



図8 超音波硬さ計(SONOHARD SH-75A)

超音波硬さ計は上に挙げた4つの硬さ測定法とは別の原理を用いた硬さ測定法を利用している。振動させた圧子を測定対象物に押し付けると、軟らかい物質では圧痕が深くなり、拘束力が高くなる。それにより、圧子の共振周波数は大きくなる。硬い物質では、圧痕が小さく、軟らかい物質のときに比べ、拘束力は小さくなり、共振周波数は低くなる。その共振周波数の変化量と硬さとの相関を取り、硬さ換算を行っている。振動の駆動・測定系には交流電圧により振動する圧電素子を用いており、圧子にはマイクロビッカースダイヤモンド圧子を用いている。また、 H_V ・ H_{RC} ・ H_B ・ H_S など様々な硬さに変換して求める事が可能である。

3 . 粗さ・硬さ同時測定システム

3 . 1 硬さセンサーの原理

物にはそれぞれ固有の振動数があり、硬いものは高い固有振動数をもち、軟らかいものは低い固有振動数をもっている。ある固有振動数 f_0 を持った物質を別の固有振動数 f を持った物質と接触させると、その接触状態により、固有振動数 f_0 は変化する。この時の周波数変化 f を検出し、硬さとして測定を行う。

このセンサーの原理は触覚センサーとして、主に医療分野で利用されてきた。だが、その大部分が人体の硬さを測定する事を目的としており、測定対象は柔らかい物ばかりであった。本測定実験ではこのセンサーの硬さ計測可能範囲の広さに注目し、工学分野での利用も可能と考え、同時測定の硬さ測定に利用する事とした。

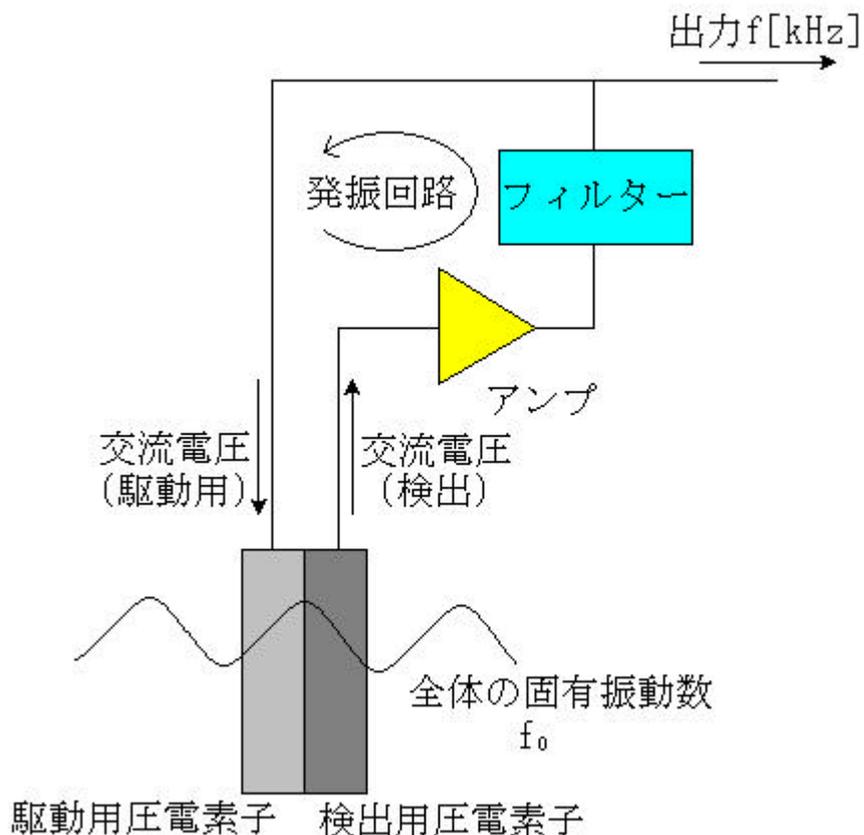


図9 センサー部の概略図

圧電素子は交流電圧を負荷すると振動する。逆に振動が加えられると交流電圧が発生するという特性がある。そこで、駆動用の圧電素子と検出用圧電素子を組み合わせ、検出用素子から出力された振動の変化をとらえ、帰還回路を通

じて駆動素子に帰還させると同時にその変化を出力させ、測定する。

一般的に、センサを一定の接触圧で物質に押し当てたとき、その物質が十分に硬ければ固有振動数は高くなり、軟らかければ固有振動数は低くなる事が知られている。このときの固有振動数の変化を検出することで、物質の硬さ・軟らかさをリアルタイムで測定することが出来るのである。

このセンサーの原理は、測定対象の剛性を測定していると思われる。だが今回は、このセンサーでの測定結果を硬さとして考える事とした。

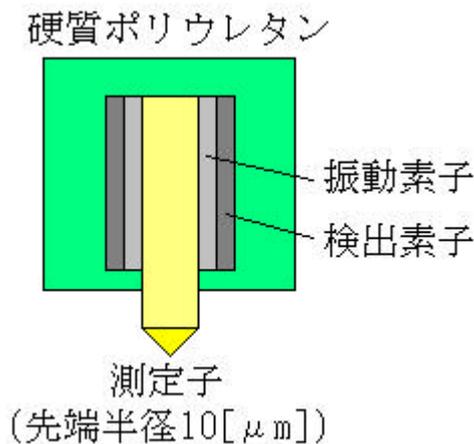


図10 測定に用いた硬さセンサー部

同時測定では硬さを測定すると同時に粗さの検出を行う必要がある為、図9のように粗さ測定機の触針の代わりに測定子を振動素子・検出素子で挟んだセンサーを作成した。そしてセンサー全体をフリーな状態で振動させる為、硬質ポリウレタンで測定子の一部を除き覆ってある。

この硬さセンサーは、振動の変化を硬さ変化として測定する、振動には圧電素子を用いるなどといった点で超音波硬さ計と似通っている。だが、大きな違いとして、超音波硬さ計では圧子を測定物に押し込み、圧痕を付ける事で拘束力の変化から共振周波数の変化を起こさせるのに対し、硬さセンサーではセンサーの測定子を測定対象物に一定の力で押しつける事により、対象物の硬さによる接触状態の変化から共振周波数の変化を起こさせる。これにより、測定対象物に圧痕が残るといった問題が無くなり、これまで測定が行われなかった製品の硬さ測定にも利用可能となった。

3.2 3次元表面粗さ測定装置

粗さ測定機は、東京精密社のサーフコム 1400A シリーズ DT14000-R016-01 を利用した。

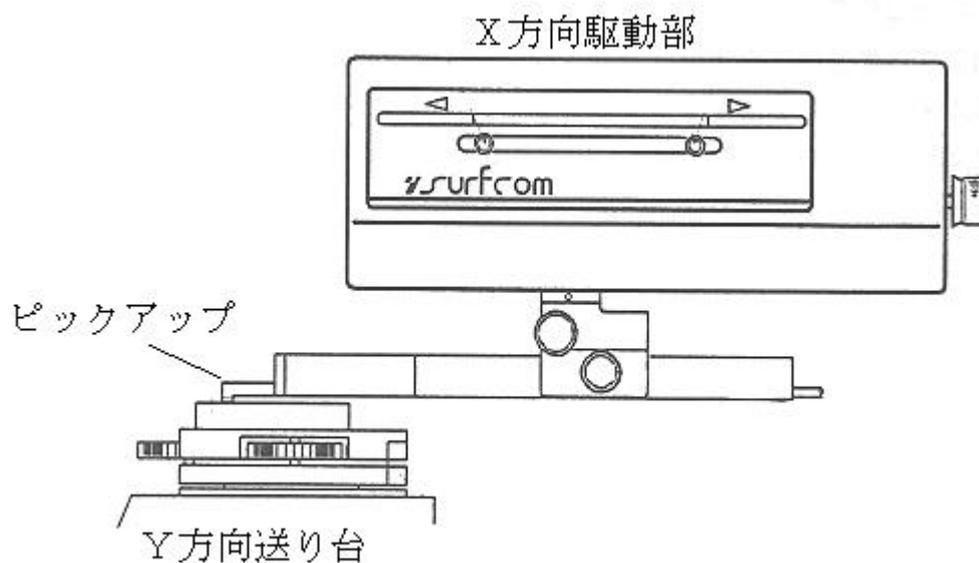


図 1 1 粗さ測定機概略図

粗さ測定子(ピックアップ)の微小な上下変化をノーズピースで検出し、上下の変化量に応じた電圧を出力する。そして出力電圧をコンピューターで測定し、 $v - \mu\text{m}$ の関係式を通し、長さに戻した値で結果を表示・解析するシステムである。

3次元測定は測定面上で、トレース方向(X方向)に対してY方向に一定ピッチずつずらしながら直線的な走査を行うことにより、平面全体の形状の測定を行い、粗さの解析を行う。

3.3 粗さ・硬さ同時計測システムの構成

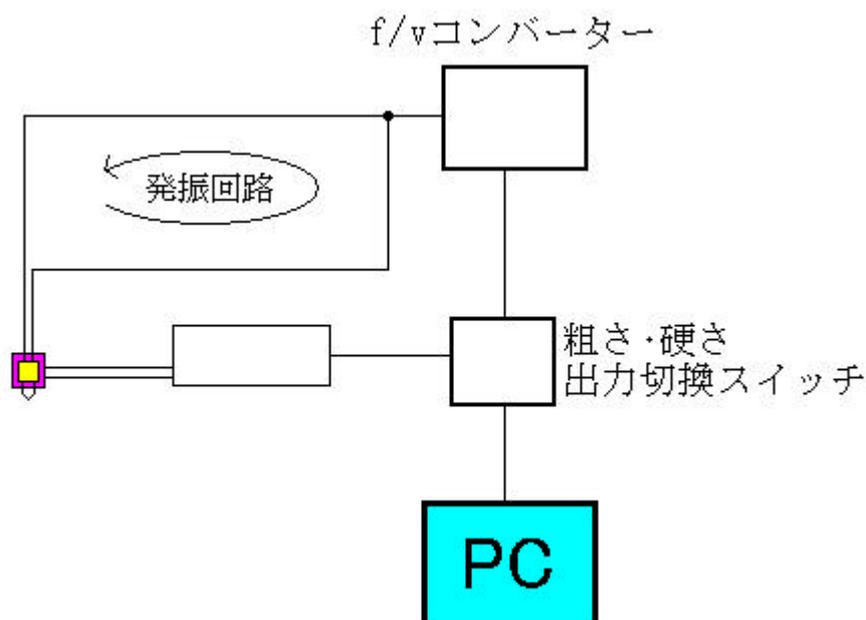


図 1 2 粗さ or 硬さ計測システム

粗さ測定機のピックアップ先端の触針の代わりに硬さセンサーを取り付け、粗さを測定すると同時に硬さの違いを検出できる構造とした。粗さ測定機のピックアップには一定荷重を加える為の負荷用バネが入っているが、測定子と相手面との接触状態を一定とする為、取り外してある。

硬さセンサーからの出力は、発振回路により周波数 f として出力されるため、データの測定は f/v コンバーターにより電圧変化に変換して行う。

粗さ・硬さを同時に測定するには、2つのデータを同時にコンピュータで読み込む必要がある。この段階の同時計測システムは、測定に粗さ測定機のコンピュータを利用しているため、データの計測は切り替えスイッチによりどちらか一方のみでしか行えない。

この問題を解決するために、測定は CONTEC 社のインターフェイスボード (ACX-PAC[W32]) を用いて粗さ測定機とは別のコンピュータで行う。

測定中、非測定中に関わらず両データは常に出力される。2次元測定の場合には問題ないが、3次元測定においてピックアップの戻り動作中・Y方向送り動作中のデータは余分であり、その部分は省いて測定を行わなければならない。この問題を解決するため、粗さ測定機を改造し、データの測定範囲決定用のトリガー信号を出力させ、粗さ・硬さと同時にコンピュータに取り込んだ。

(図 1 3)

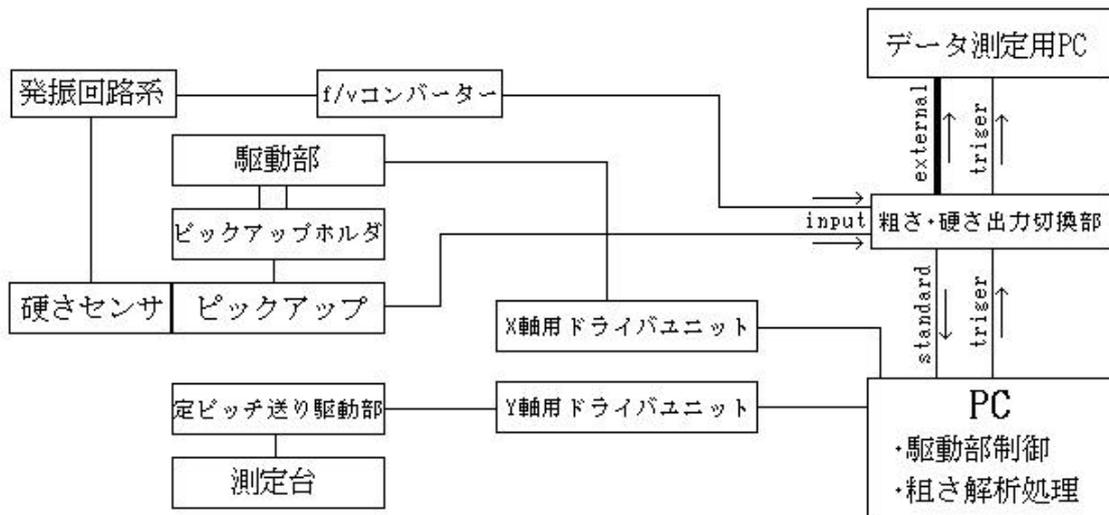


図 1 3 粗さ・硬さ同時計測システム（回路図）

3 . 4 出力されるデータ



図 1 4 external 出力用コネクタと入出力信号

測定中は、粗さ・硬さ出力切換部から external 出力として、粗さ測定機へのアナログ入力信号、粗さ測定機からのアナログ出力信号、トリガー信号の3種の信号を出力する。アナログ入出力用コネクタには、ヒロセ電機のRM15QRD-10PHを使用した。アナログ入力信号は外部入力の硬さデータであり、その電圧感度は $0.8V / 100 \mu m$ 、感度の可変範囲は $0.4 \sim 2$ 倍、入力インピーダンスは約 $16k$ 以上となっている。また、アナログ出力信号は粗さのデータであり、出力電圧感度は $0.8V / 100 \mu m$ の $\pm 20\%$ 、出力インピーダンスは 100 以下である。

トリガー信号は図 1 4 に示す 5 ピン・ 7 ピンを接続する事で TTL として出力される。これは測定の開始・終了のタイミングに合わせて出力電圧が変化する

信号で、その出力波形は図 1 5 に示すステップ信号となっている。出力電圧は、アナログ出力信号(粗さ測定データ)似合わせて変化し、測定範囲外で $V_{OH} > 2.4V$ (但し負荷電流: $I_{OH} < 1mA$ のとき)、測定範囲内で $V_{OL} < 0.4V$ (但し負荷電流: $I_{OL} < 16mA$ のとき)となっており、本測定では測定中、測定範囲内のとき 0.2 V、測定範囲外のとき 5 V の出力に設定した。測定範囲外には、測定機の待機中と、ピックアップの戻り動作・Y 方向送り動作、及び駆動の予備動作が含まれている。またこの信号は実際のサンプリングに対して最大 50ms の遅れ t_d を生じる。

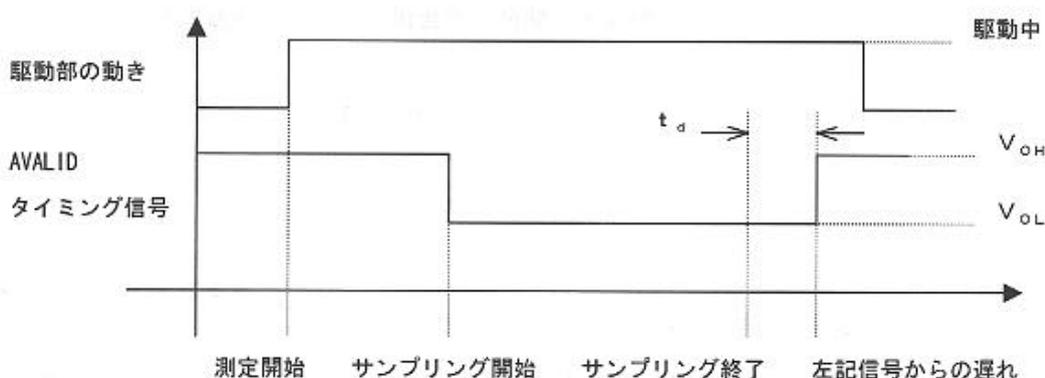


図 1 5 トリガー信号

3.5 3次元測定データの分布図作成法

3次元測定データを視覚的に判別しやすくするため、データを3次元分布図に変換する必要がある。この方法には、先に延べたトリガー信号を用いた測定が重要である。データ測定から分布図作成への一連の流れを図 1 6 - 1 8 に示す。

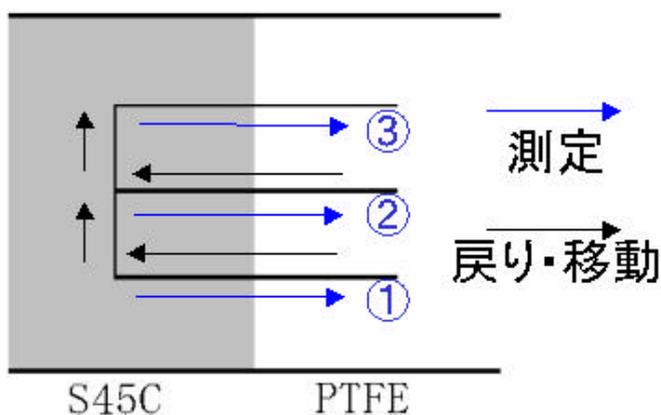


図 1 6 試験片とピックアップの走査

図16は、試験片の表面を走査するピックアップの動きを示している。この例には、S45CとPMMAを張り合わせ、表面を平らにした試験片を利用した。左半分がS45C、右半分がPMMAである。測定距離はX方向5mm、Y方向1mm、Y方向送り間隔を0.5mmとした。ピックアップはX方向にS45CからPMMAへと走査し、その後元の場所へと戻る。そしてY方向に指定距離移動し、またX方向に走査する。この動作を測定終了まで繰り返す。

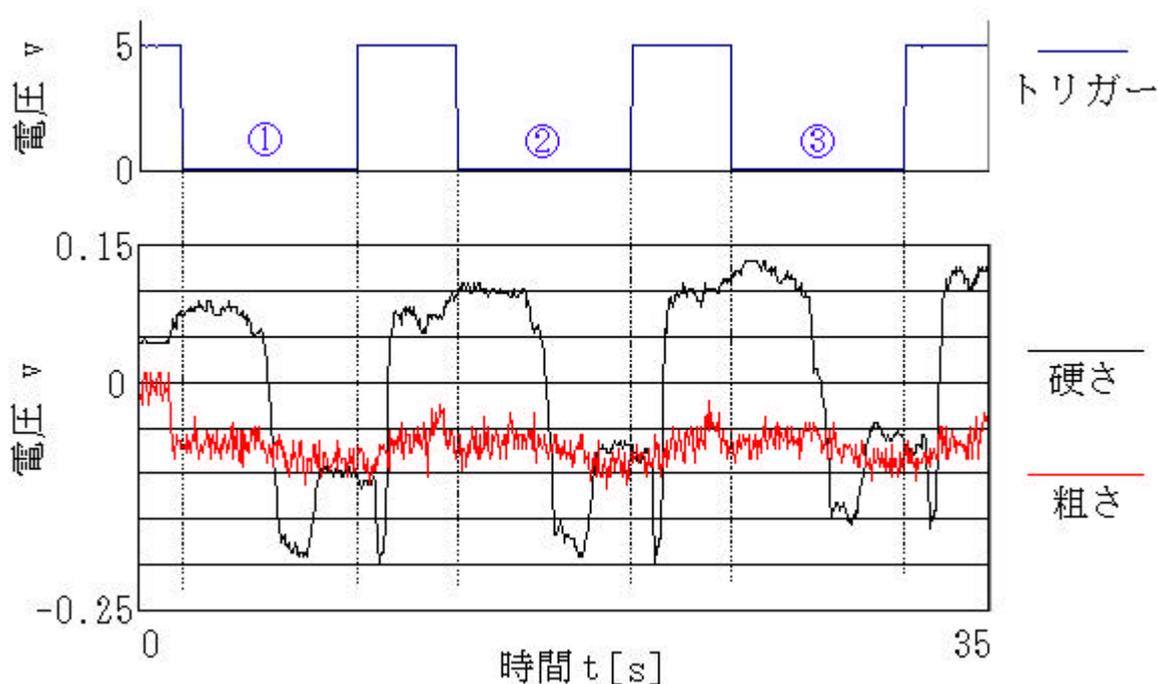


図17 測定データ

図17は、測定時の全測定データである。戻り区間・Y方向送り区間中のデータが含まれているが、必要なデータは測定区間の部分のみである。そしてトリガー信号は、この測定区間でのみ0(on)となる。測定区間外のデータを省いて測定を行うため、トリガー信号が0となった時から測定を開始、5vとなった時測定を終了、これを繰り返すプログラムを作成し、データの測定に用いた。

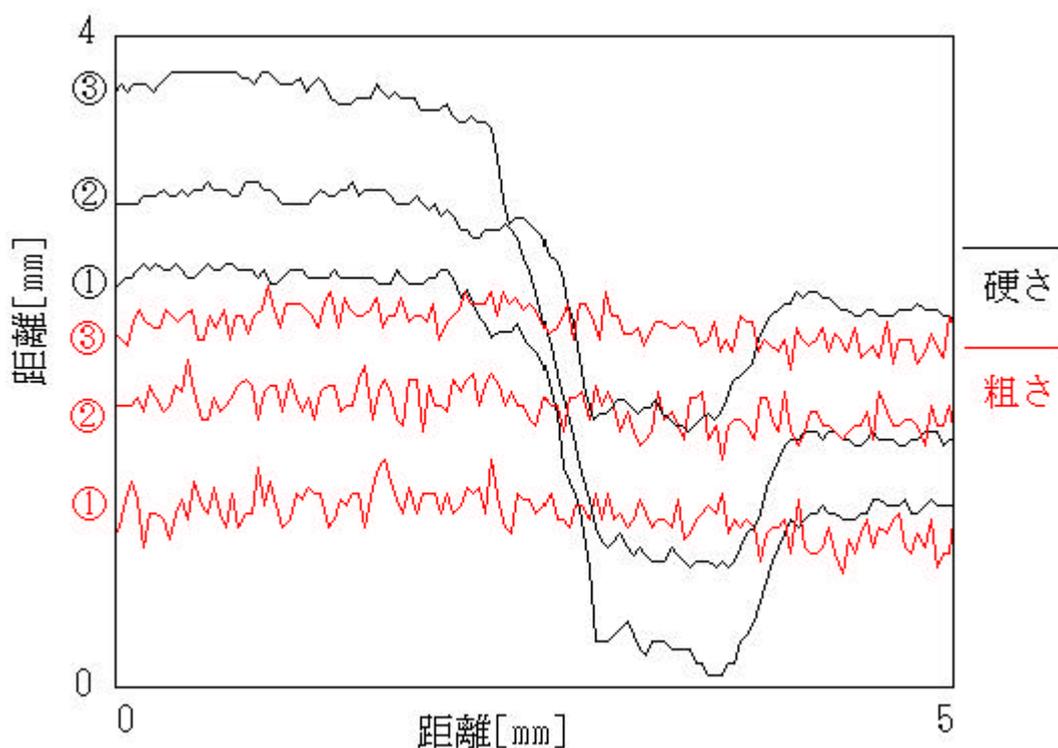


図 1 8 粗さ・硬さ 3 次元分布図

最後に、上記の方法で取り出した区間のデータを Y 軸間隔事に並べ、図 1 8 のように 3 次元図とする。こうする事で、粗さ・硬さの分布識別が容易となり、粗さ・硬さ分布解析の手助けとなる。実際にはさらに視認性を高めるため、等高線塗りつぶし表示といった表示法を利用する。

この測定結果では粗さはほぼ一定で変化が無く、硬さのみが変化している。S45C の領域で高周波数を示し、中ほどの界面で低周波数となり、最後に PMMA の領域で少し周波数が上がっている。中ほどの低周波数を界面の接着剤の硬さによるものと考えれば、おおよそ硬い材質で周波数が高くなり、柔らかい材質で周波数が下がる事が見て取れる。

3.6 測定データの較正

測定される値は粗さ・硬さ共に電圧変化なので、それぞれを粗さ値、硬さ値に変形するための較正值を求めなければならない。一定の傾きを持たせた断面を測定し、粗さの変化を粗さ測定機での結果と、同時測定用での出力電圧で比較した。

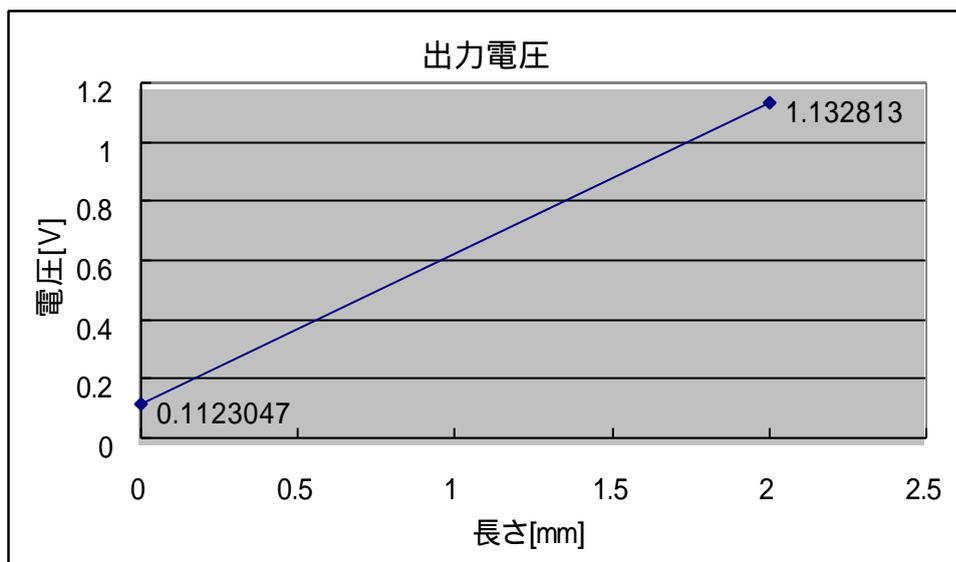


図 19 - 1 電圧データ

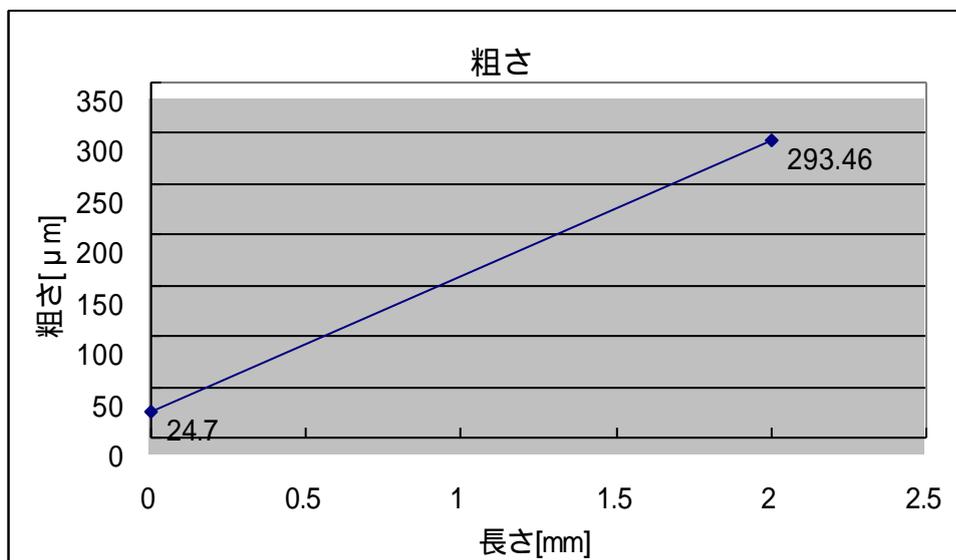


図 19 - 2 粗さデータ

図 19 - 1 , 19 - 2 より較正式は、

$$\frac{293.46 - 24.7[\mu m]}{1.132813 - 0.1123047[V]} = 266.3[\mu m/V] \quad - (6)$$

$$\text{粗さ}[\mu m] = 266.3 \times V \quad - (7)$$

により電圧値をで粗さ変化[μm]の値に変換できる。

硬さは、電圧値を周波数変化に直し、その後ユニバーサル硬さ値に較正する。
電圧変化 - 周波数変化は、粗さの較正と同じ方法で、

$$\text{周波数}f[kHz] = 0.77035 \times V \quad - (8)$$

で表せる。

周波数 - HU の較正式は、4 . 1 の式(9)に示す。

3 . 7 硬さ測定部の改良

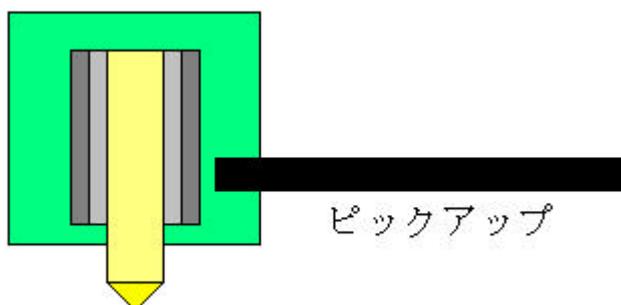


図 20 センサー部の固定(改良前)

4 . 6 の実験時に、硬さセンサー部に改良を加えた。図 20 は変更前のセンサー部であるが、ピックアップで硬質ポリウレタンを固定し、そして硬質ポリウレタンで間接的にピックアップと硬さセンサーを固定してある。これは硬さセンサーがピックアップと直接接触する事で共振周波数に変化が起きる事を防ぐ措置であると同時に、センサーを極力拘束の無い状態で振動させる為である。しかしセンサーの左右で拘束力が違い不安定であると思われた為、全方向からの拘束力が一定になるよう改良した。

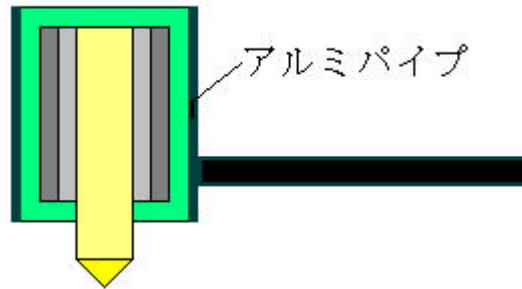


図2 1 センサー部の固定(改良後)

ピックアップによりアルミパイプを固定し、その中に硬質ポリウレタンに包んだ硬さセンサーを固定してある。この改良により、全方向からの拘束力を一定とし、センサー部の安定性向上を図った。

4 . 測定実験と結果

4 . 1 硬さセンサーの特性測定

測定機に組み込んだ硬さセンサーの特性を求めするため、あらかじめ硬度を測定しておいた測定材料を硬さセンサーで測定し、変化した周波数と物質の硬度との関係をグラフに表した。

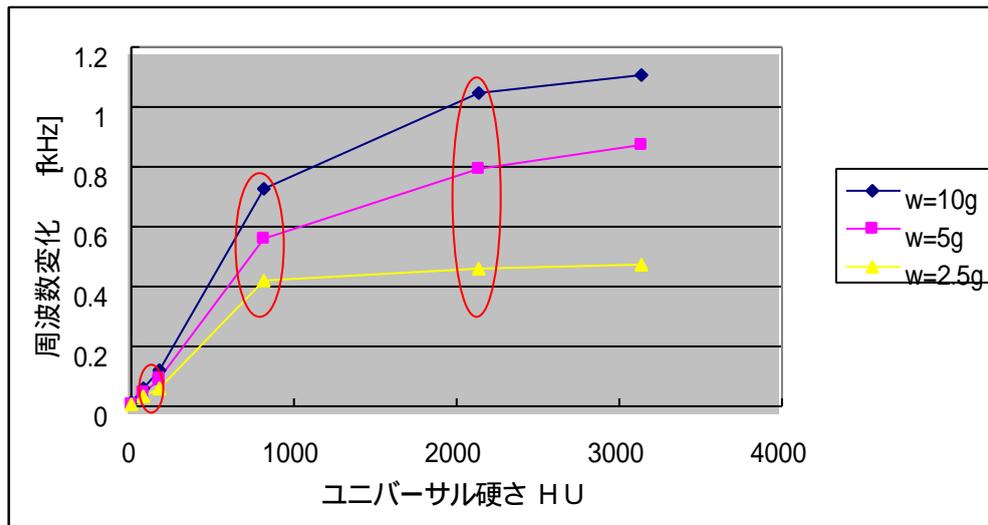


図 2 2 周波数変化 / 硬さグラフ

図 2 2 より、このセンサーは荷重を大きくする事により共振周波数の硬さによる変化が大きくなり、正確な測定結果を求め易くなる事が分かる。しかし、約 2000[HUplast]を越える硬さになると、傾きが緩やかになり、それ以上の硬さでは正確な測定が困難になると思える。

周波数変化 硬さの較正式は、このグラフの曲線からは近似曲線を求める事が困難なため、導くことが出来なかった。よって、今回の測定結果の周波数変化 - 硬さへの変換の較正式は、グラフに示す 3 点から求めた式を利用する。

荷重 5 g の時の較正式

$$HU = 3835.5f^2 \times 1167.6f + 252.67 \quad - (9)$$

4.2 粗さ・硬さ同時測定実験

システムが完成し、硬さ毎の周波数変化も求めたので、同時測定の実験を行った。実験に用いる試験片は、PMMA 板に銅板、アルミ板を挟み、表面を粗い紙やすりで粗面とした試験片を使用する。

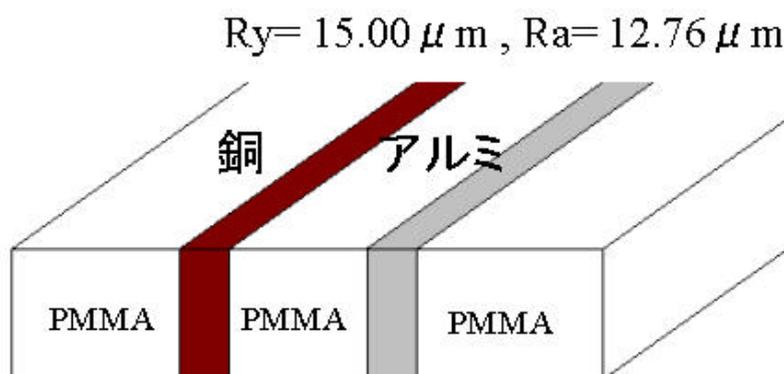


図 2.3 測定 1 試験片

実験条件

| | |
|--------|----------------|
| 種別 | 粗さ・硬さ同時測定 |
| 試験片 | PMMA + 銅 + アルミ |
| X軸長さ | 8mm |
| Y軸長さ | 2mm |
| Y軸測定間隔 | 0.25mm |
| 荷重 | 5g |

硬さのデータは、基準となっているセンサーの固有振動数からどれだけ共振周波数が変化するかを測定しなければならない。そのため測定を行う前に f/v コンバーターを調節し、センサーの固有振動数での出力を 0 [v] に設定しておく。

次に、粗さ測定を行う準備として、ピックアップを測定面に接触させ、粗さ 0 の位置まで降下させる。粗さ・硬さ切換部で粗さ出力に設定し、ピックアップを降下させれば粗さ 0 の位置で自動的に止まる。この時、硬さデータを出力に設定していると、0 で止まらず下がりつづけ、ピックアップを破損させてしまうので、注意する必要がある。

測定機の準備が終わったら、粗さ測定機に付属の測定・制御用ソフト TIMS とデータ測定用 PC のデータ測定プログラムに、測定範囲とピックアップの走査速度、Y 方向のピッチを設定する。設定が終わったら、先に測定プログラムを開始した後、TIMS を実行し、測定を開始する。測定プログラムはトリガー信号に合わせて、自動的にデータ測定開始・終了を行う。

測定されたデータの形式は、粗さ・硬さ共にテキストフォーマットで、

| 書式フォーマット | データ(粗さ) | データ(硬さ) |
|-------------|----------|----------|
| 総データ数 | 9027 | 9027 |
| 1ラインの点数 | 532 | 532 |
| ライン数 | 17 | 17 |
| X方向のピッチ | 1.51E-02 | 1.51E-02 |
| ライン間のピッチ | 0.25 | 0.25 |
| 1ライン1点目データ | 8.54E-03 | 4.39E-02 |
| 1ライン2点目データ | 9.77E-03 | 4.94E-02 |
| . | . | . |
| 1ライン最終点データ | 0.31 | 4.21E-02 |
| 2ライン1点目データ | 6.71E-03 | 4.15E-02 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 最終ライン最終点データ | 0.32 | 4.21E-02 |

となっている。

5行目以降のデータは粗さ・硬さの較正值を掛ける事により粗さ・硬さデータに変換する。その後サーフコム1400-3DFテキストファイルコンバータを用いてデータファイルをTIMSの解析用フォーマットに変換し、データ解析を行う。

測定結果

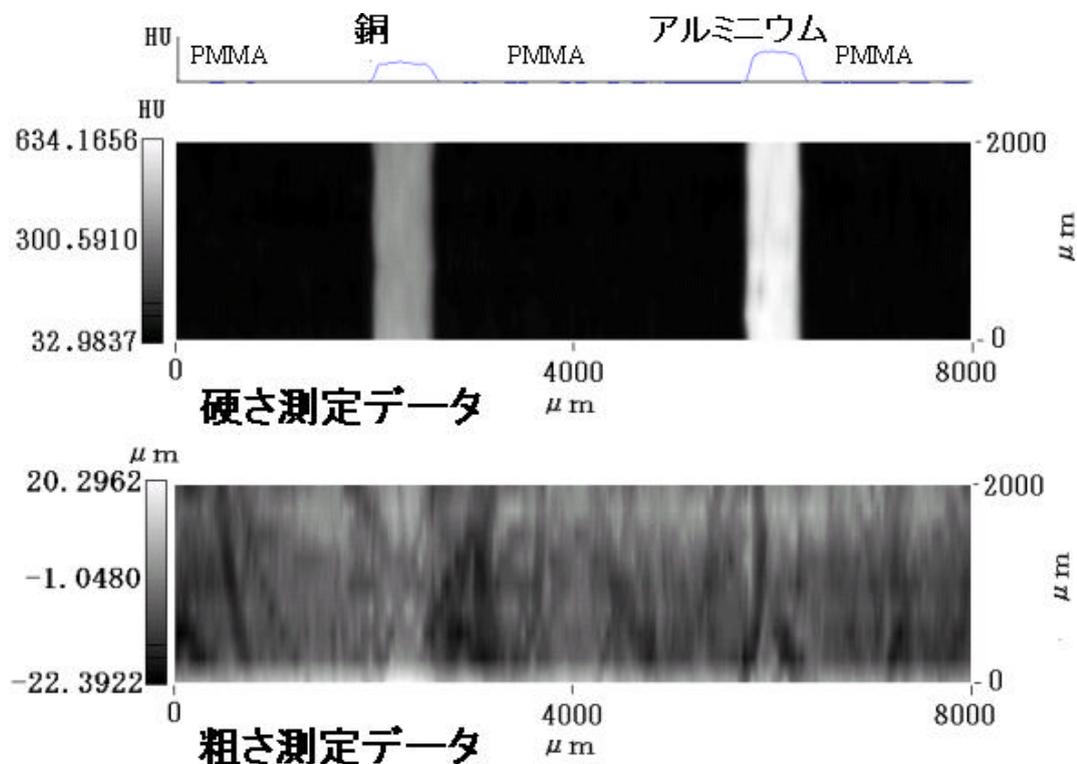


図 2 4 粗面の粗さ・硬さ同時測定結果

図 2 4 の硬さ測定データには、粗さ測定データには見られない銅とアルミニウムの存在する場所が明確に白く現れている。また、粗さ測定データを見ると分かるように、この試験片はかなり粗い試験片となっている。しかし、硬さ測定では、粗さの影響を受けず、材質事の硬さのみを明瞭に測定出来ている事が分かる。

4.3 コーティング下の硬さ測定

次に、表面のコーティングを通して、下地の硬さを測定できるかどうかの実験を行う。3.5で用いた試験片に合成樹脂エナメル塗料を厚さ10 μ m程塗布した試験片を用いる。表面のコーティングの硬さは一定なので、この状態で硬さに変化が出れば、このセンサーは材料表面だけでなく、深部の硬さも測定可能な事が立証できる。

今回の試験片は表面粗さの変化が微小なため、粗さ測定は行っていない。

実験条件

| | |
|--------|-------------|
| 種別 | 硬さ測定 |
| 試験片 | S45C + PMMA |
| X軸長さ | 3mm |
| Y軸長さ | 3mm |
| Y軸測定間隔 | 0.1mm |
| 荷重 | 5g |

実験結果

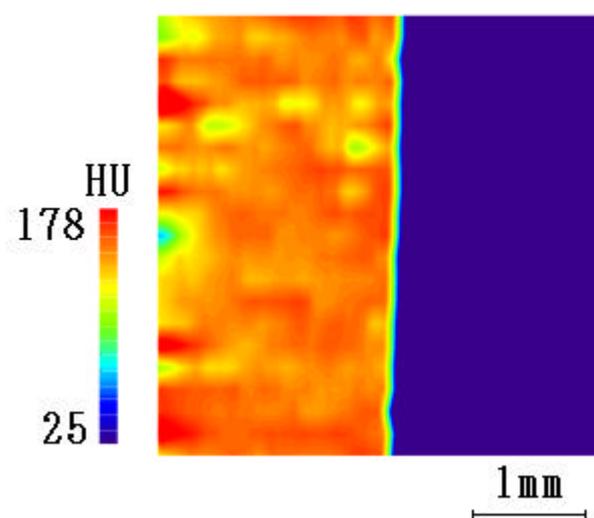


図25 硬さ測定データ等高線塗りつぶし表示

左面と右面で明らかな硬さの差が認められた。この測定機は、測定対象のごく表面だけではなく、表層下の硬さの測定も可能なことが分かった。荷重を変える事で、ごく表面から表層下まで様々な深さでの硬さを測定できる可能性がある。また荷重の大小だけでなく、硬さセンサーの振動周波数を変える事によっても、測定可能な深度は変化すると思われる。

4.4 コーティングの膜厚測定

硬さ測定により表層下の硬さを測定できるならば、それを利用してコーティングの膜厚を測定できる可能性がある。この可能性を確かめるため、基準粗さ試験片(アラサ番号：SN-11)の測定面の半分は合成樹脂エナメル塗料でコーティングを施し、コーティング部を平らにした上で、コーティング部と未コーティング部の同時測定を行い、結果を比較した。

実験条件

| | |
|--------|--------------|
| 種別 | 粗さ・硬さ同時測定 |
| 試験片 | 粗さ試験片+コーティング |
| X軸長さ | 4mm |
| Y軸長さ | 2mm |
| Y軸測定間隔 | 0.25mm |
| 荷重 | 5g |

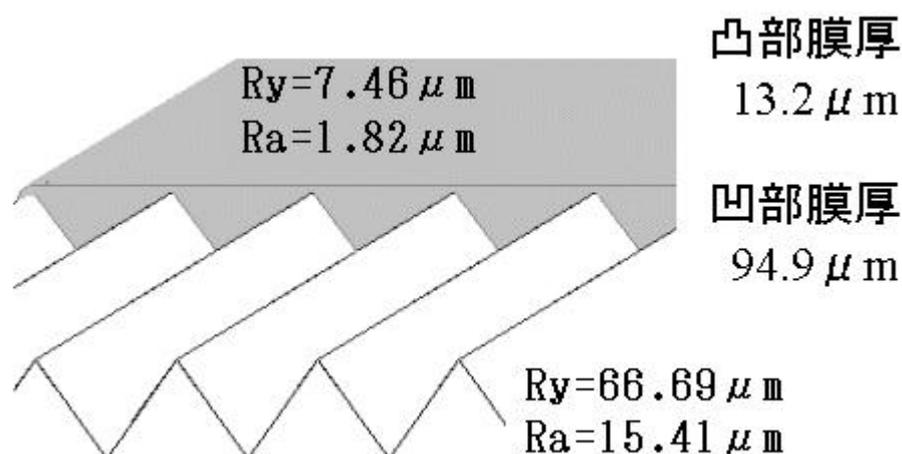


図26 測定3試験片

実験結果

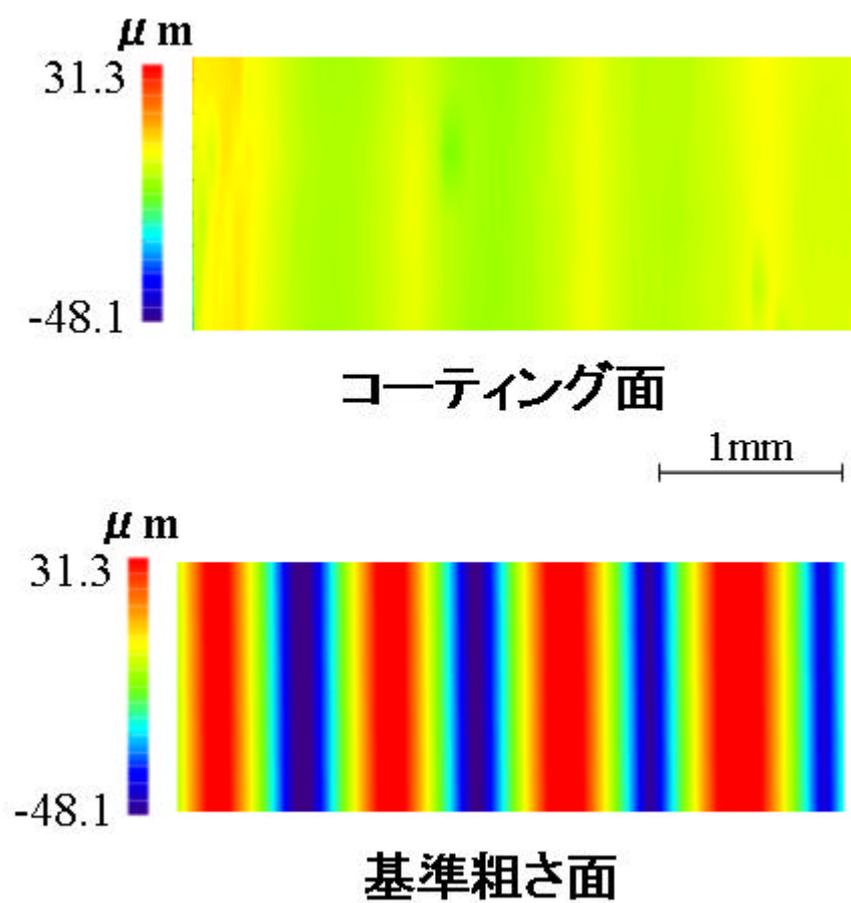


図 2 7 - 1 粗さデータ

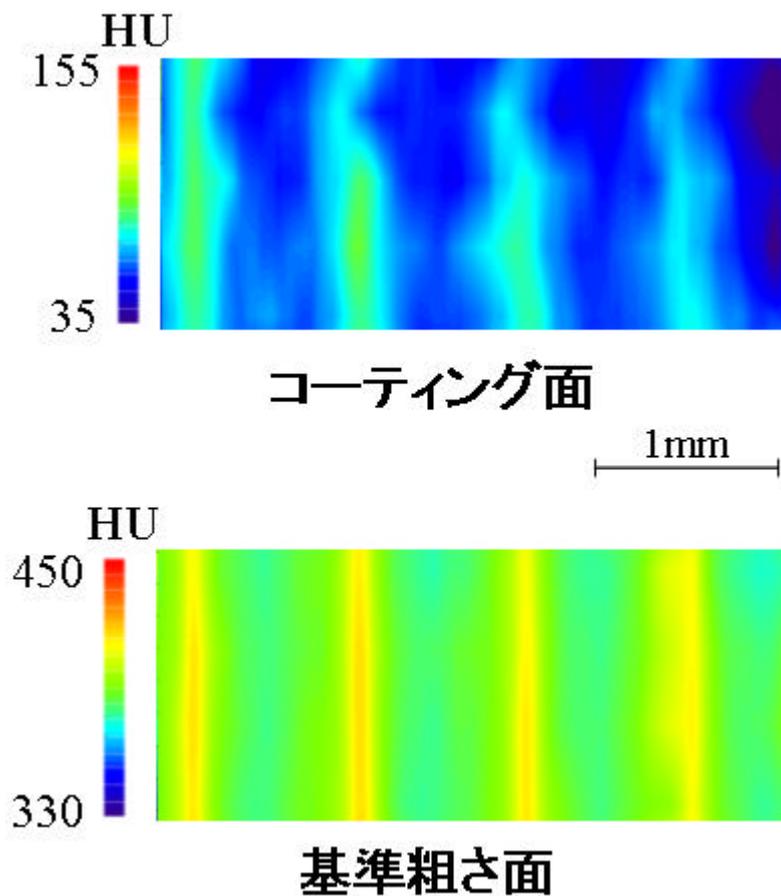


図 2 7 - 2 硬さデータ

粗さ分布図より、粗さはコーティング面ではコーティングなしと比べて非常に小さいものと考えられる。しかし硬さ分布を見ると、コーティング面においても硬さに差が見て取れる。これは母材の粗さの影響であり、コーティングの膜厚によって変化する硬さの違いを検出していると思われる。この結果から、硬さと膜厚を対応させる事が出来れば、その部分のコーティングの厚さを判別できる可能性があり、粗さの測定結果と比較する事で、コーティング下の母材の形状を判別出来る可能性も出てくる。これを利用すれば、コーティング下に存在する異物の発見や、その異物が何であるかを調べる事も可能となり、コーティングの異物混入・剥離状況等の検査に利用できる可能性がある。

4.5 荷重の大小による表層下の空孔の判別

前回までの結果から、荷重の大小により測定深度が変化する可能性が挙がり、そして表層下の空孔発見の可能性が出てきた。これらを調べるため、直径5mm, 2mm, 1mm, 0.5mmの4種の空孔を空けた試験片を作成し(図2.2)、様々な厚さのシックネスゲージを貼り付け、どの厚さまで下地の判別が可能か測定実験を行い調べた。

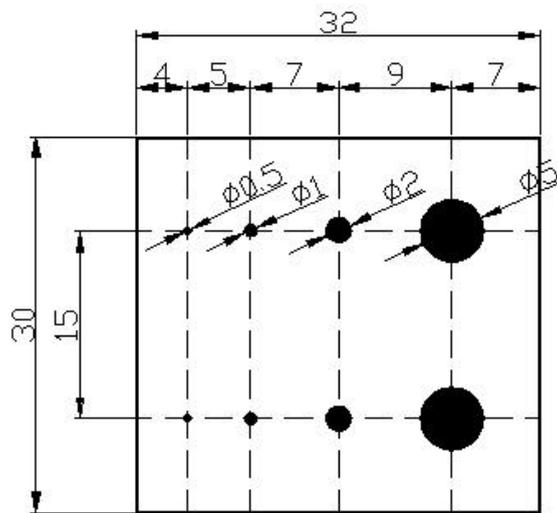


図2.8 測定4試験片(黒円は空孔部分)

実験条件

| | |
|--------|-----------------|
| 種別 | 硬さ測定 |
| 試験片 | アルミ+シックネスゲージ |
| | 0.04mm ~ 0.15mm |
| X軸長さ | 28mm |
| Y軸長さ | 8mm |
| Y軸測定間隔 | 0.2mm |
| 荷重 | 2g or 5g |

実験結果

図 2 9 - 1 ~ 3 にそれぞれ 0 . 0 4 mm 荷重 2 g、0 . 0 4 mm 荷重 5 g、0 . 1 5 mm 荷重 5 g で測定した硬さデータを示す。

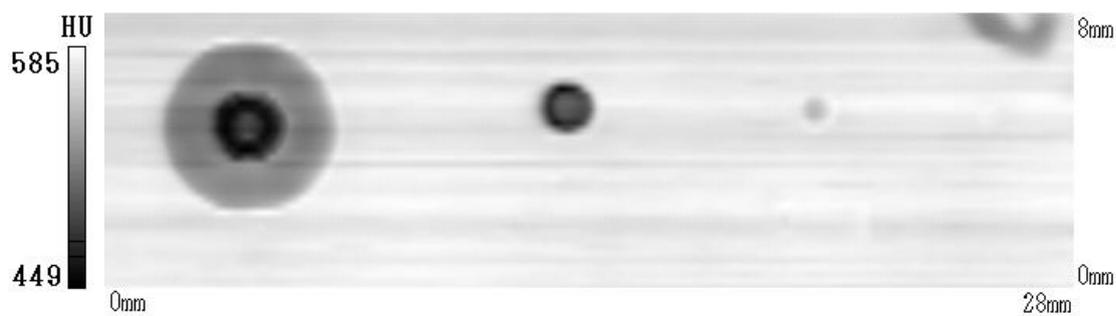


図 2 9 - 1 厚さ0.04mm, 荷重2g

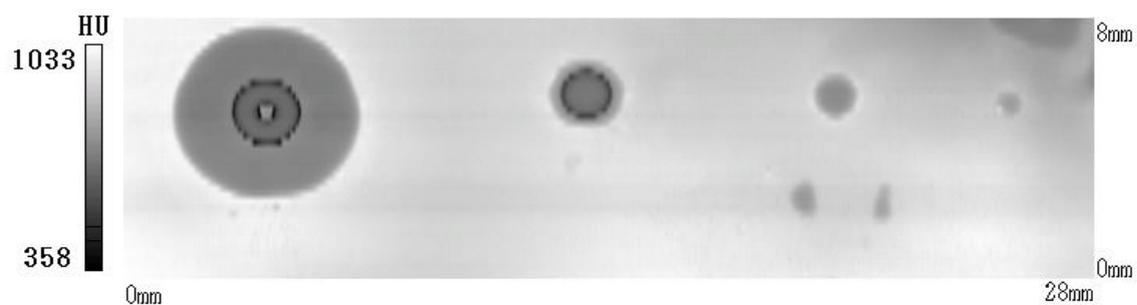


図 2 9 - 2 厚さ0.04mm, 荷重5g



図 2 9 - 3 厚さ0.15mm, 荷重5g

0.04mmは最も母材の空孔の様子が明瞭に識別でき、0.5mmの空孔まで検出できた。逆に0.15mmは荷重5gでも5mmの空孔を判別するのが限界だった。今回はセンサーを別の固有振動数で測定した場合を考えていないが、別の固有振動数を持たせて測定すると、さらに測定の深度が変化する可能性がある。

ここで、3.6で改良したセンサーによるデータを示す。図30-1~3はそれぞれ、新しいセンサーを利用して測定した0.04mm、0.15mmのシックネスゲージを貼り付けた試験片の測定データである。

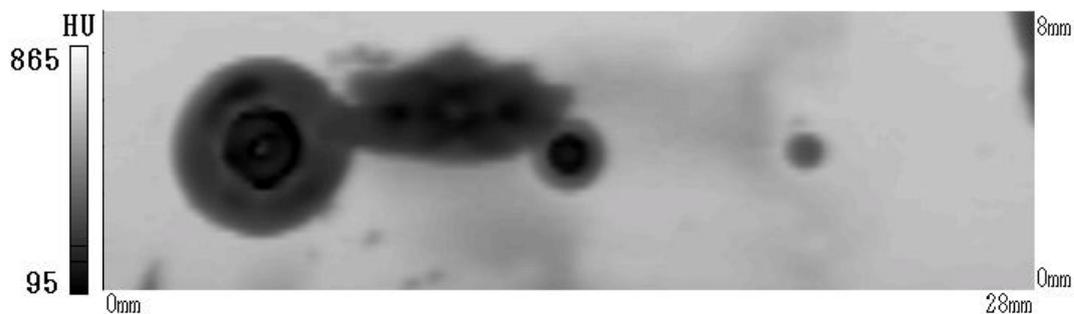


図30-1 厚さ0.04mm, 荷重2g (X軸, Y軸:mm)

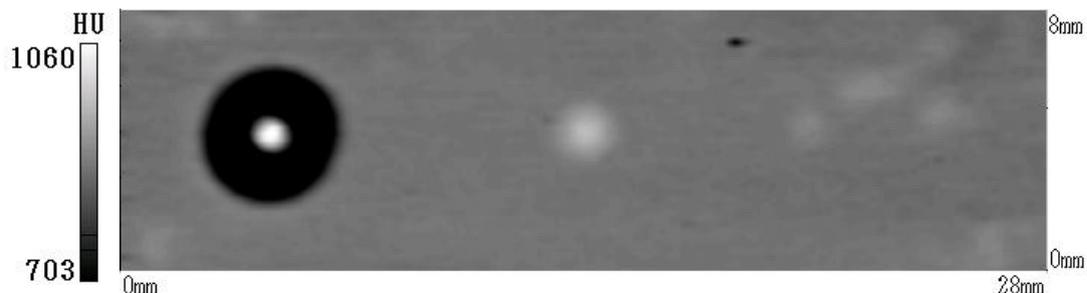


図30-2 厚さ0.04mm, 荷重5g

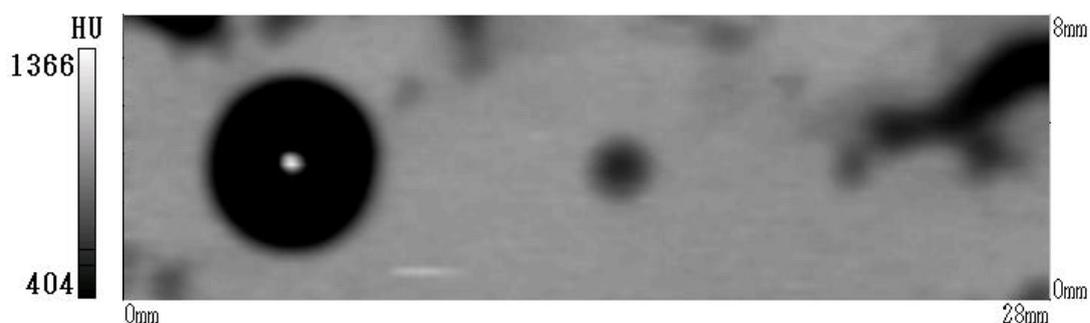


図30-3 厚さ0.15mm, 荷重5g

前回の解析図と比較すると、今までのセンサーより空孔の場所が判別しやすくなっている事が分かる。特に0.15mmのデータは、前センサーの結果より精度が高くなっていることが明白である。この改良によりセンサー自体の重量は増加したが、これまでより精度の高いデータが測定可能となった。

しかしこのセンサーで測定を行うと、空孔部の硬さが空孔中心からの距離によって変化する。おそらくセンサーとの接触部で共振が起こっていると思われ

る。今後はこれに対処する為、振動解析を行い、共振を避けるためのセンサーの調整を行わなければならない。

最後に、試験片の穴の部分に高分子接着剤(未硬化)で満たし、空洞の場合との硬さの違いを比較し、異物の材質判別の可能性を調べた。試験片は、0.04mmのシックネスゲージを貼り付けた物を用いた。

実験結果

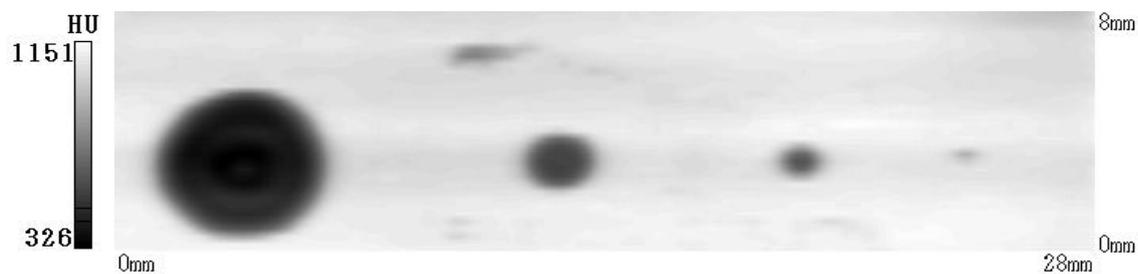


図 3 1 厚さ0.04mm, 荷重5g

接着剤の部分は判別できたが、空孔で測定した場合と高分子接着剤を満たした場合では、ほぼ同じ結果となった。表層下の異物の判別は、少なくとも異物が他より柔らかい物質ならば可能な事が分かった。

5 . 結言

測定実験によりこのシステムは、

- 1 . 硬さ・粗さの変化を捉え、分布図を作成できる。
- 2 . 硬さを測定する最、粗さによる影響がほとんど無い。
- 3 . 荷重の大きくする事により、表面下の硬さ変化も測定する事ができる。

といったことが実験により確かめられた。これらの特性を生かした測定を行う事で、コーティング下の異物発見や母材の状態診断といったコーティングの状態評価に利用できる可能性がある。

参考文献

- ・南茂男・木村一郎・荒木勤 / 著 『はじめての計測工学』
- ・若山芳三郎 / 著 『学生のための Visual Basic』
- ・金藤仁 / 著 『自動計測システムのための Visual Basic 6』
- ・ Akashi 微小表面材料特性評価システム
型式：MZT-5 2 2 サンプル測定報告書

謝辞

本研究は竹内彰敏助教授の御指導の元行ったものです。竹内彰敏助教授には研究を行う上で、貴重な御意見・御指導を頂きました。心から感謝し、御礼申し上げます。

付録

センサーの実用例：虫歯診断への利用

この同時測定システムの実用例として、虫歯の硬さ測定を行った。ここで紹介するデータは、実際にう蝕が進行した虫歯と、脱灰という処理によって表層よりわずかに内側を軟らかくした人工虫歯のサンプルを測定したものである。

測定を行う前に、虫歯のう蝕のメカニズムについて説明を行う。う蝕とは糖の代謝によって細菌が出した有機酸で歯が溶解することをいい、酸の作用時間と強さで2種類の脱灰の形態がある。強い酸が短時間歯に働いて、直接表面から脱灰されるものと、弱い酸が長時間働いて表面下から脱灰されるものである。強酸による脱灰は歯の表面から脱灰が起こるため、表面粗さが大きくなり、硬組織の変化は表面に留まる。弱酸の場合では、表面粗さの変化が無く、歯の表面から50-200 μ mの表面下で脱灰がすすみ、表面の硬さ・粗さにはあまり変化は見られない。強酸による脱灰を活動性のう蝕、弱酸によるう蝕は酸から取り除いて唾液の中に放置すると、表面化の脱灰層が再石灰化する事から、要観察歯と考える。しかし要観察歯でも、表層下の脱灰が進と歯の表面を支える部分が無くなり、崩れてしまう。強酸によるう蝕は歯科医師による治療を行うが、弱酸による脱灰ではその進行具合を判別し、用観察、もしくは集中治療の必要を判別する事が重要となる。現在、これらの硬さを測定する事は圧痕による硬さ測定では不可能であり、この同時測定機の硬さ測定において測定が可能となれば、歯科医療分野での実用が可能という事になる。

まず虫歯の表面をホルマリンで処理し、表面を固定した抜去歯を測定し、2次元硬さ分布図とした。

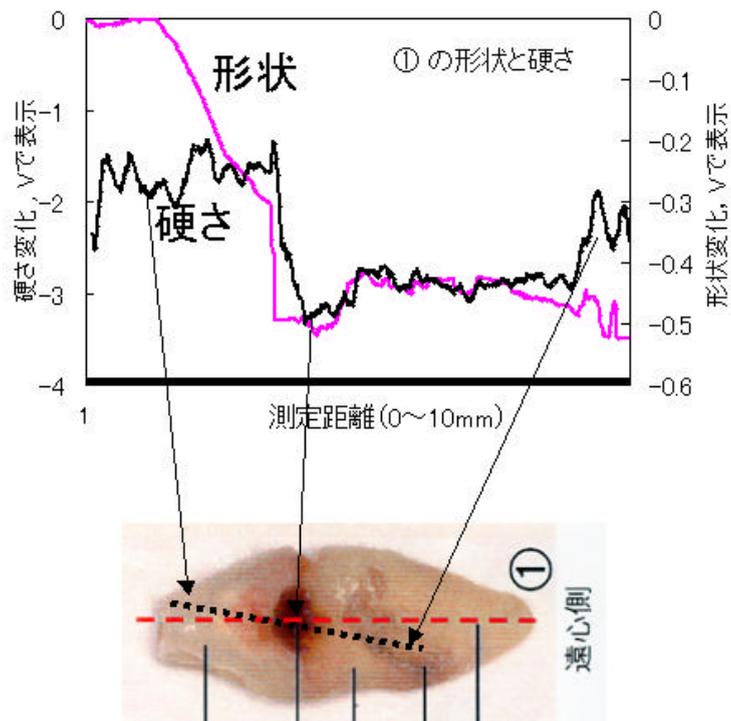


図 3 2 - 1 虫歯の粗さ・硬さ 2次元測定結果 1

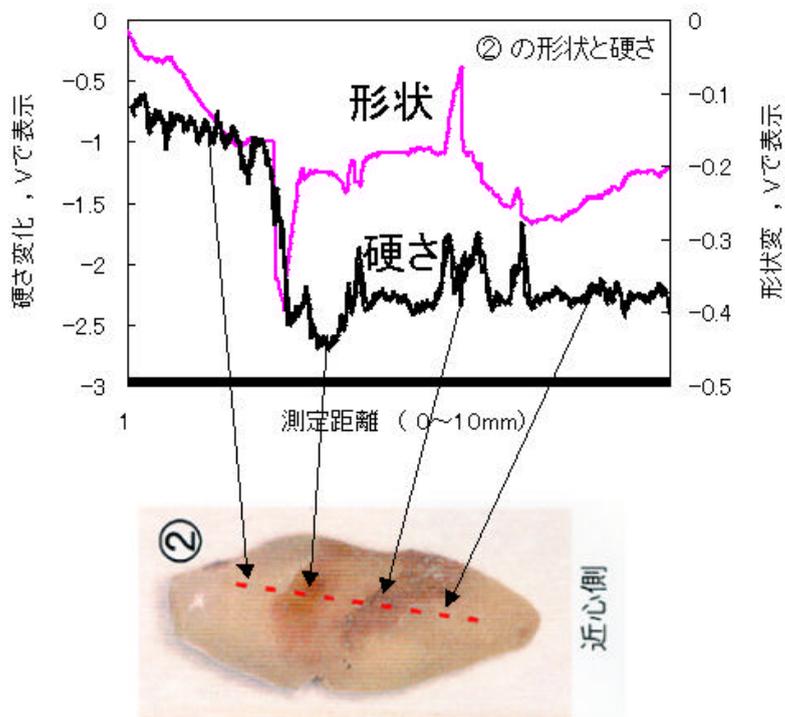


図 3 2 - 2 虫歯の粗さ・硬さ 2次元測定結果 2

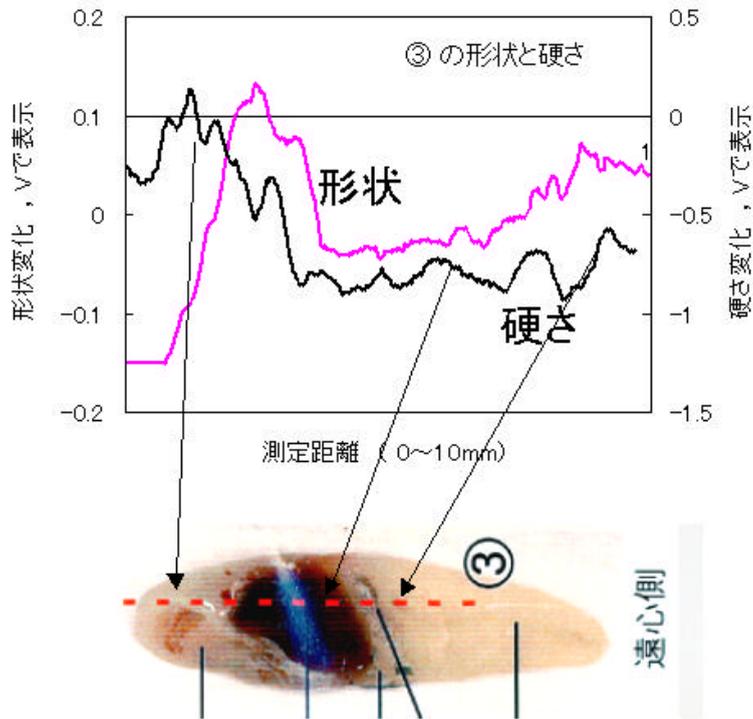


図 3 3 - 3 虫歯の粗さ・硬さ 2次元測定結果 3

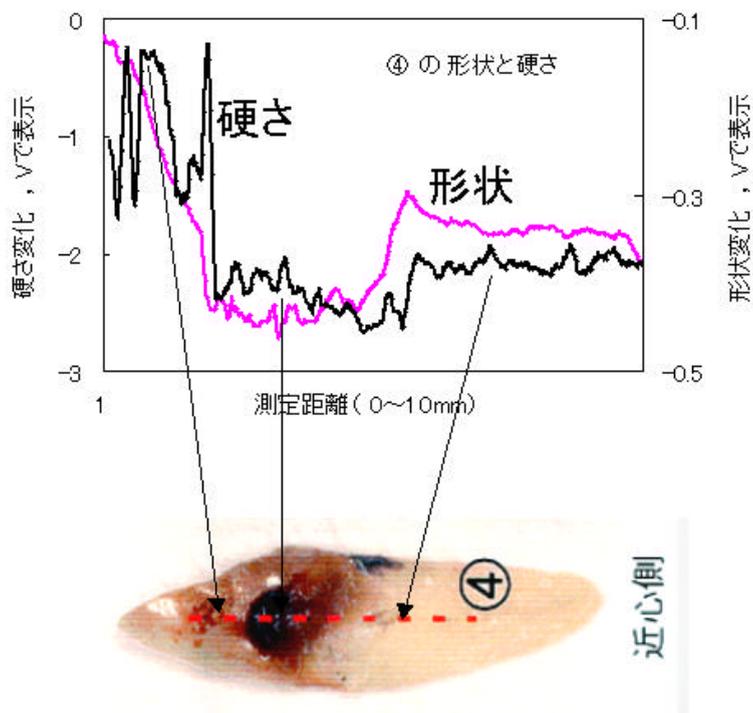


図 3 3 - 4 虫歯の粗さ・硬さ 2次元測定結果 4

次に、人工的に脱灰を行った歯のサンプルを測定し、初期う蝕判別の可能性を調べた。サンプル1は強酸により短時間で脱灰(0.2M乳酸溶液脱灰)を行ったサンプルで、サンプル2は弱酸を長時間作用させ脱灰(0.1M乳酸CMCゲル脱灰)させたサンプルである。歯の表面を4分割して、それぞれ4種類の時間で脱灰を行っている。サンプルの概要図と測定したデータをを図25 1~3、26 1~3に示す。

| | |
|-----|------|
| 20分 | 30秒 |
| 5分 | 脱灰なし |



図34 1 サンプル2脱灰時間と測定部

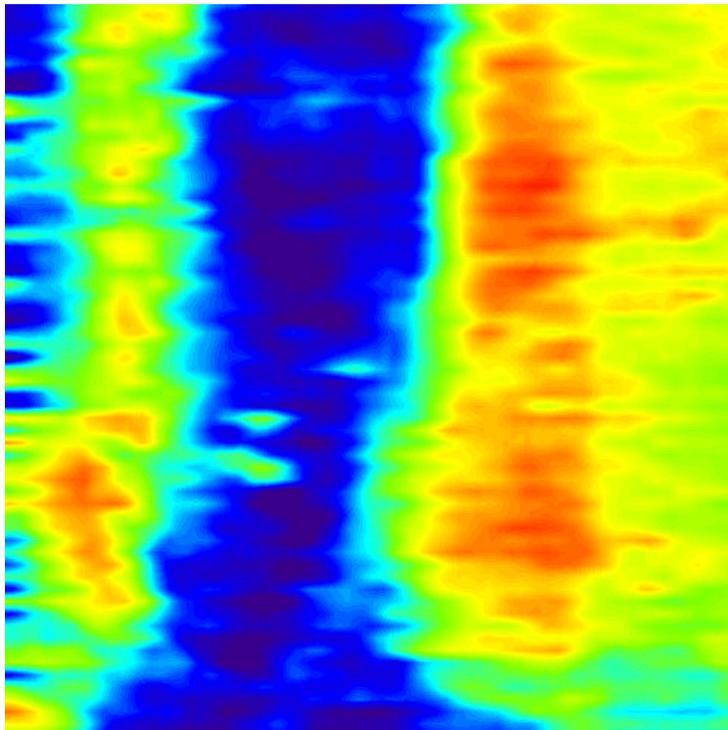


図34 2 硬さ分布図

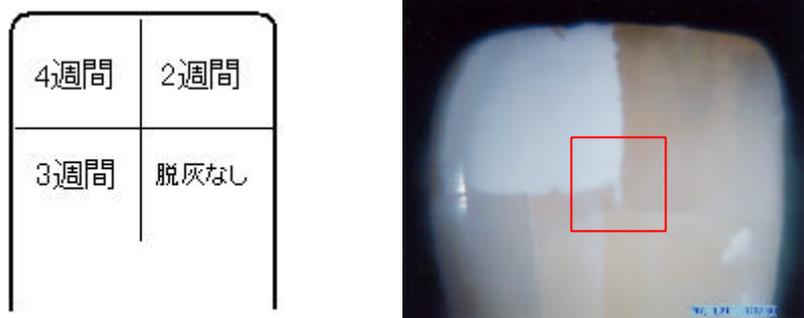


図 3 5 1 サンプル 2 と脱灰時間

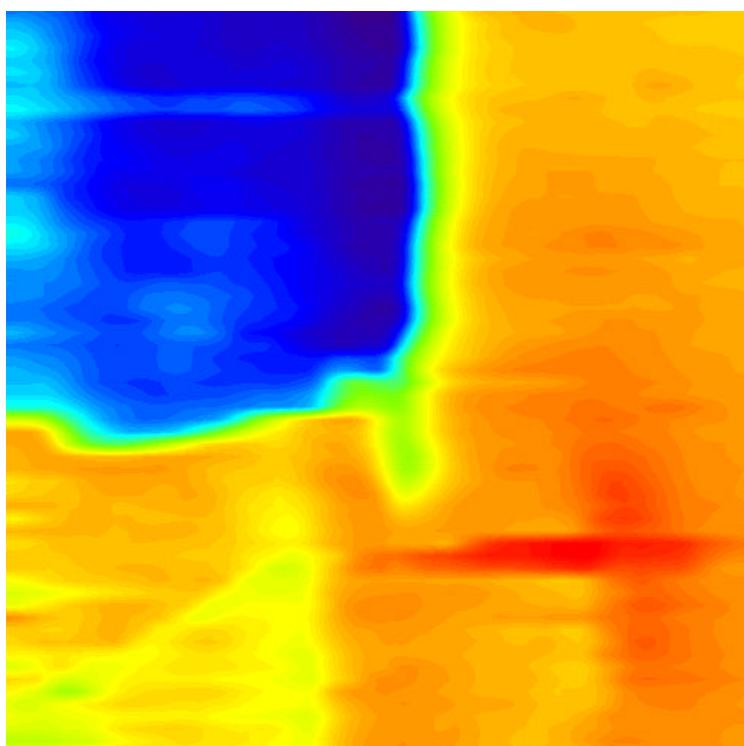


図 3 5 2 サンプル 2 硬さ分布図

サンプル 2 については、押し込み硬さ試験のデータと断面写真を図 3 6、3 7 に示す。

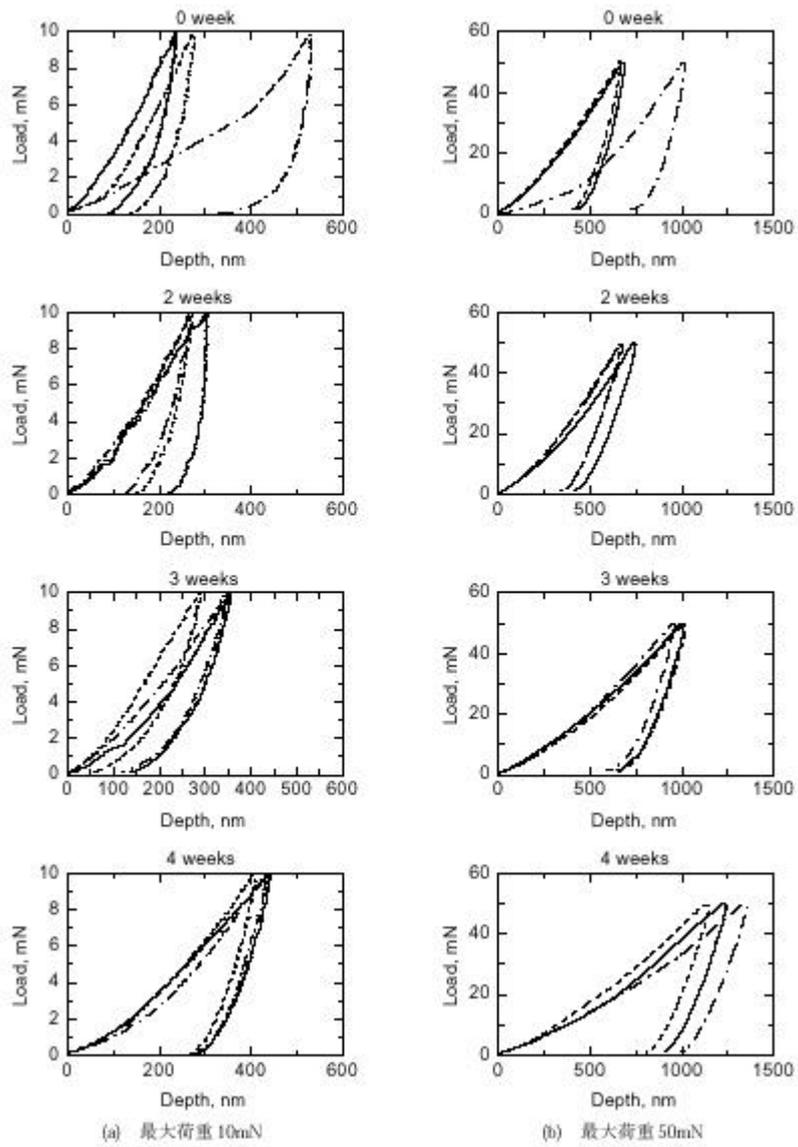


図 3 6 - 1 押し込み荷重 - 変位曲線図 (荷重10[mN], [50mN])

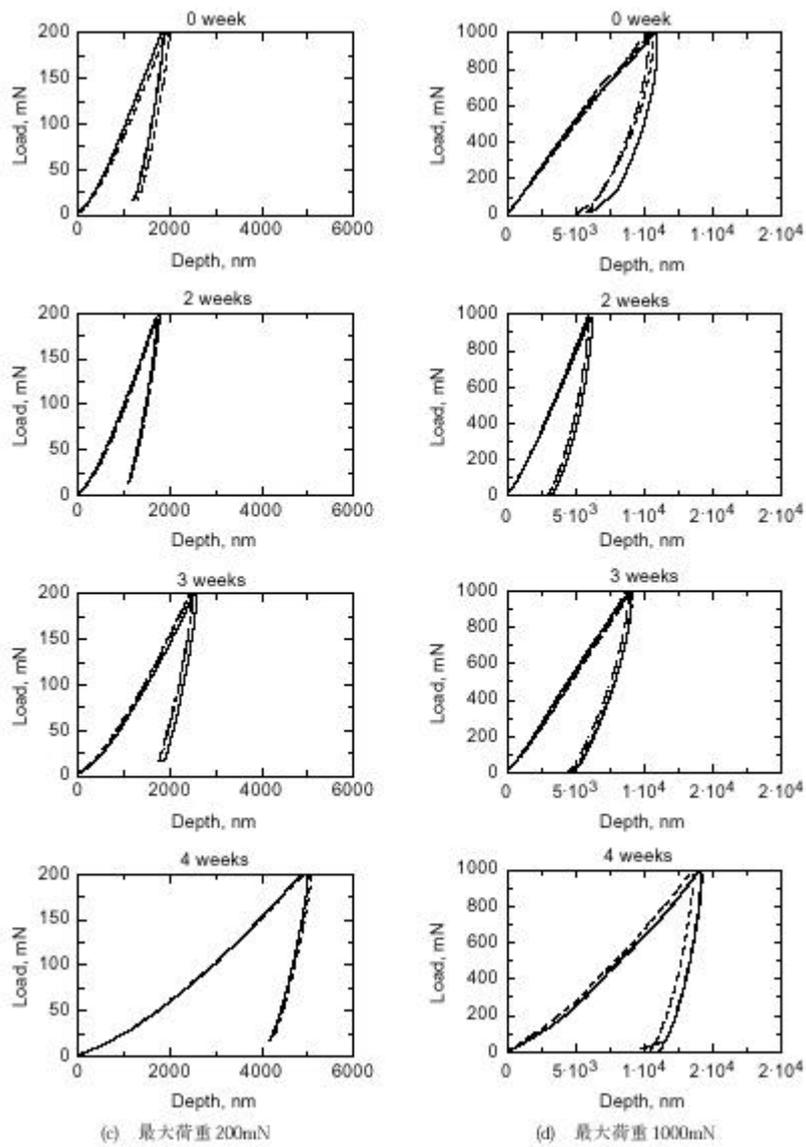


図 3 6 - 2 押し込み荷重 - 変位曲線図 (荷重200[mN], [1000mN])

どの荷重による試験においても全体の傾向として、脱灰時間が長いほど荷重による変形量が大きくなっており、表面が軟化している事が分かる。

脱灰なし 脱灰3週間

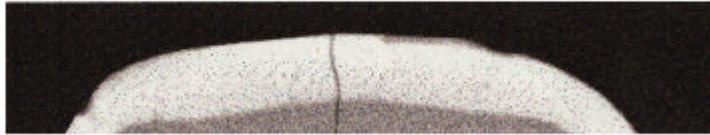


図37-1 断面写真(下半分)

脱灰2週間 脱灰4週間

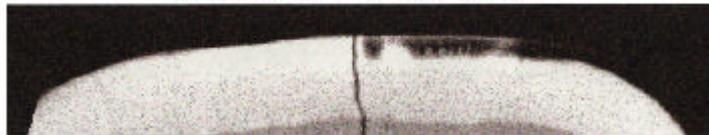


図37-2 断面写真(上半分)

脱灰時間が長いほど、歯の表面下が黒くなっている。これは、歯の表面が酸によって溶かされ、エナメル質が溶け出して空洞が出来ている為である。脱灰4週間の部分を見ると分かるように、弱酸による脱灰では、表面は硬いまま、内部から柔らかくなる。このような状態の硬さも、図35-2のように、硬さセンサーで判別可能である。

測定結果と歯のデータから、少なくとも硬さによるう蝕の判別は、このセンサーで可能な事が分かる。硬さとう蝕進行度合いの硬正が付けられれば、実際にう蝕診断機として利用できると思われる。

虫歯の診断に関しては、別に専用のピックアップを作成し、そちらで研究を進めていく予定である。