

交流電位差法による転がり摩耗のモニタリング

研究課題番号 1 1 6 5 0 1 4 4

平成11年度～平成12年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）
研究成果報告書

平成13年 3月

研究代表者 清水 友治
(岩手大学工学部助教授)

はしがき

本報告書は平成11年度及び平成12年度、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(C)）によって行われた研究「交流電位差法による転がり摩耗のモニタリング」の成果をまとめたものである。

非破壊計測技術あるいは非破壊検査技術は、材料、部品、構造物の状態、あるいはそれらに存在する可能性のある欠陥を破壊せずに、すなわち試験対象物の原型と昨日を変化させることなく、その物理的性質・内部欠陥の有無などを計測ないし検出する技術である。

近年、システムはプラントはますます大型化、複雑化、自動化されている。これに伴い、1個の機械要素の損傷（異常）は1台の機械の停止ばかりでなく、システムやプラント全体の停止につながる。特に機械システムの摺動部分では、常時摩耗が進行しており、その量がある程度限界を超えると機械の性能を著しく低下させ、作動不良などの結果を招く。産業機械などの故障の原因には、周期的な応力の繰返し、硬い異物の噛み込み、腐食、アライメントの不良、潤滑油の不良、取扱い方法の誤りなど、様々な要因が単独または複合して異常摩耗を引き起すと言われているが、中でもトライボロジー的要因によって発生する故障が多い。特に航空機は、多数の軸受、歯車列、油圧システムから構成されている。その中の機械要素1個の異常は安全な非行を不可能とし、多数の尊い命を奪うことになる。製造業の分野においても、稼働している機械システムやプラントの数は膨大であり、ライン化の進んだ工場において、機械要素1個の異常は、ライン停止、生産中止を引き起すことになる。

このように、システム停止に伴う経済的損失はもとより社会生活に与える影響も多大である。トライボロジー的なメンテナンスの問題に関しても摩耗によって生じた表面損傷を、経済的・効率的に評価することも重要な課題となっている。それ故、これらの機械システムの保守保全（メンテナンス）は重要であり、定期的に厳しい検査が成されている。

本研究では、メンテナンストライボロジーの1手法として交流電位差法を転がり摩耗のモニタリングへ適用する。交流電位差法は非破壊検査法の一つとして材料のき裂の検出に用いられている。一般に、転がり摩耗は表面から微小なき裂が発生し、比較的大きな摩耗粉を生成し摩耗が進行することが知られている。よって、電位差法の適用は有望と考えられる。しかし、摩耗による表面損傷は疲労き裂よりも小さいことが多く、交流電位差法において、より高測定精度の測定システムが要求される。そこで、測定誤差の大きな要因となる交流誘導起電力の影響の補償機能を持つ交流電位差評価システムを構成し、往復動転がり摩耗による表面損傷の評価を行う。

研究組織

研究代表者：清水 友治（岩手大学工学部助教授）
研究分担者：岩渕 明（岩手大学工学部教授）
研究協力者：高橋 隆行（東北大学情報科学研究科助教授）

研究経費

平成11年度	2,700千円
平成12年度	900千円
計	3,600千円

研究発表

(1) 学会誌等

T. Shimizu, A. Iwabuchi, K. Matsumoto

"MONITORING OF ROLLING WEAR USING THE ALTERNATING CURRENT POTENTIAL DROP METHOD"

Proc. Int. Tribology Conf. Nagasaki, 2000（掲載予定）

(2) 口頭発表

清水友治，交流電位差法による往復動転がり摩耗のモニタリング，日本トライボロジー学会，1999年10月28日

研究成果

以下に本研究で得られた成果を示す。本報告書では以下のような構成とした。

1. 交流電位差法の位相差による高精度化
2. 交流電位差システムの構成と疲労き裂の測定実験
3. 往復動転がり摩耗試験と摩耗機構及び交流電位差法による摩耗の評価

1. 交流電位差法の位相差による高精度化

1.1 電位差法

電位差法は、導電性の被検査物に電流を流し、被検査物表面上の電位差を測定することにより、材料を非破壊評価する手法である。定電流電源と電圧計が基本として用いる装置であり、したがって種々の他の手法に比べ装置が安価で、かつ電気信号によるためデータ処理が容易であり、取り扱いに熟練を必要としないなどの特徴を有する。

電位差法には直流を用いるものと交流を用いるものがある。表 2.1 にその比較を示す。両者の大きな違いは、交流では被検査物の表面を電流が流れるのに対して、直流では被検査物の板厚内部にも電流が流れる点である。交流電流は導電体表面に沿って、次式で与えられる表皮厚さ δ の中を主に流れることが知られている。

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad \dots (2.1)$$

ここで、 f は交流電流の周波数、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_r は比透磁率、 σ は電気抵抗率である。式 (2.1) からわかるように、交流電流の周波数が高くなるほど、 δ は小さくなる。交流のこのような現象は表皮効果(skin effect)と呼ばれている。

ある断面積を持つ導体に直流が流れている場合、直流は導体断面に一様に分布して流れる。しかし、交流が流れているときには電流と交差する磁束が変化するために電磁誘導によって起電力が生じ、これが断面にわたって一定でないため電流は導体断面に均一に流れない。

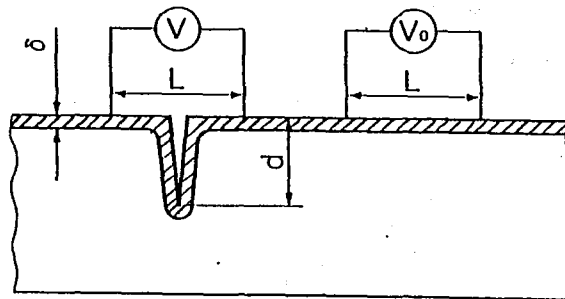
導体円柱に電流が流れているとき、導体に流れる電流を線電流の集まりと考えれば、中心部の電流は周辺部の電流に比べ磁束と鎖交する割合は大きいことがわかる。従って中心部ほど誘導起電力は大きい。すなわち、電流の変化を妨げるように発生する起電力が大きいので、中心部では電流は流れにくくなる。これに対し周辺部ではこの効果は少ない。よって交流電流は導体表面近くを多く流れることになる。

交流電位差法の原理を図 2.1 に示す。き裂を有する導電体に交流電流を流し、距離 L だけ離れた電位差を計測する。き裂の深さ d による電流流路の違いから、き裂をまたいだ 2 点間で計測される電位差 V と、き裂をまたがない 2 点間で計測される電位差 V_0 には差が生ずる。この電位差を測定することによりき裂を検出することが可能となる。電位差法では一般に電流入力端子電位差計測用端子を独立に配置する。すなわち 4 端子法

により計測が行われる。これは、電流入力用端子を電位差計測用端子として用いる2端子法に比べて計測精度がよいためである。

交流電位差法では測定面上に突き出たき裂(表面き裂)を対象としたとき、これと同じ大きさの電流を使った直流電位差法に比べ、表皮効果に起因して電流密度が高くなり、大きな電位差が出る。そのため、電位差の計測が容易になるという利点がある。また言い換えると、被検査物内部に存在するき裂(埋没き裂)、あるいは測定面と反対側の面にあるき裂(裏面き裂)によって、電流場が乱されにくいため、純粹に表面き裂だけを検出できるということになる。この交流電位差法の特徴を用いればトライボロジー的要因による表面損傷の検出に有効と考えられる。また、式(2.1)を見ると物質の透磁率の変化をも検出することが可能である。交流電位差法のもう一つの特徴として、位相が挙げられる。

被検査物通過前と通過後の電流位相とを比較することにより、交流電位差法の問題の一つである誘導起電力成分を除去することができ、より高精度な測定が可能となる。よって、SUS304などのオーステナイト系ステンレス鋼などのように加工硬化によりマルテンサイト変態することで透磁率が大幅に変化する材料では、き裂長さだけではなく表面のそのような変化をも検出できる。



$$\frac{V}{V_0} = \frac{2d}{L} + 1$$

δ : 表皮厚さ

f : 交流電流の周波数

μ_r : 被検査物の比透磁率

μ_0 : 真空の透磁率

σ : 被検査物の電気抵抗率

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi f \mu_0 \mu_r}}$$

図 2.1 交流電位差法の原理

表 2.1 交流電位差法と直流電位差法の比較

	no crack	surface crack	inside crack	reverse surface crack
ACPD (交流電位差法)				
DCPD (直流電位差法)				

1.2 位相差の補正

S.Tiku⁴⁾らは、被検査物に発生する交流電圧信号は印加電流の位相に対して 45° 進むと述べている。

図 2.2 に位相差の概念を模式的に示す。図において OA は被検査物で発生した電位差を表し、その位相は印加電流の位相 OC より 45° 進む。AB は誘導起電力成分を表し、電流位相より 90° 進む、この大きさは電流の閉回路の大きさや配線の配置に依存する。この誘導起電力成分のため、実際に測定される交流電位差は OA より大きい OB となる。このように交流電位差は、き裂や応力など関係しない外部要因で大きく変化することから誘導起電力成分によって変化した位相差 θ を求めることにより、測定した交流電位差を補正することができる。

今回の実験で測定された位相差データの補正方法を以下に述べる。図 2.2 において、試験片に接続された電位差測定用のアンプを amp1 とする。amp2 を電流増幅回路で発生した交流電圧測定用のアンプとして、 0.081Ω の固定抵抗を接続して測定する。固定抵抗の位相は変化しないため、amp2 で測定されたデータを位相比較用とする。2つのアンプからの出力をパーソナルコンピュータに入力し、C 言語プログラムによって解析された位相差を $45^\circ + \theta$ (OB) とすると、これは実験中に測定されるデータとなる。また、2つのアンプはその周波数・位相特性により位相のずれがあり、位相進み角を α とすると $\alpha = 7.5108098$ であった。先ほどの位相差に α 成分も考慮して $\phi = 45^\circ + \theta + \alpha$ (OD) を実際の電位差とし、以下に示す関係式が得られる：

$$45^\circ \text{ (OA)} = \phi - \theta - \alpha \quad \dots (2.2)$$

本研究で行った転がり摩耗損傷の評価に関する実験データは式 (2.2) を用いて補正される。

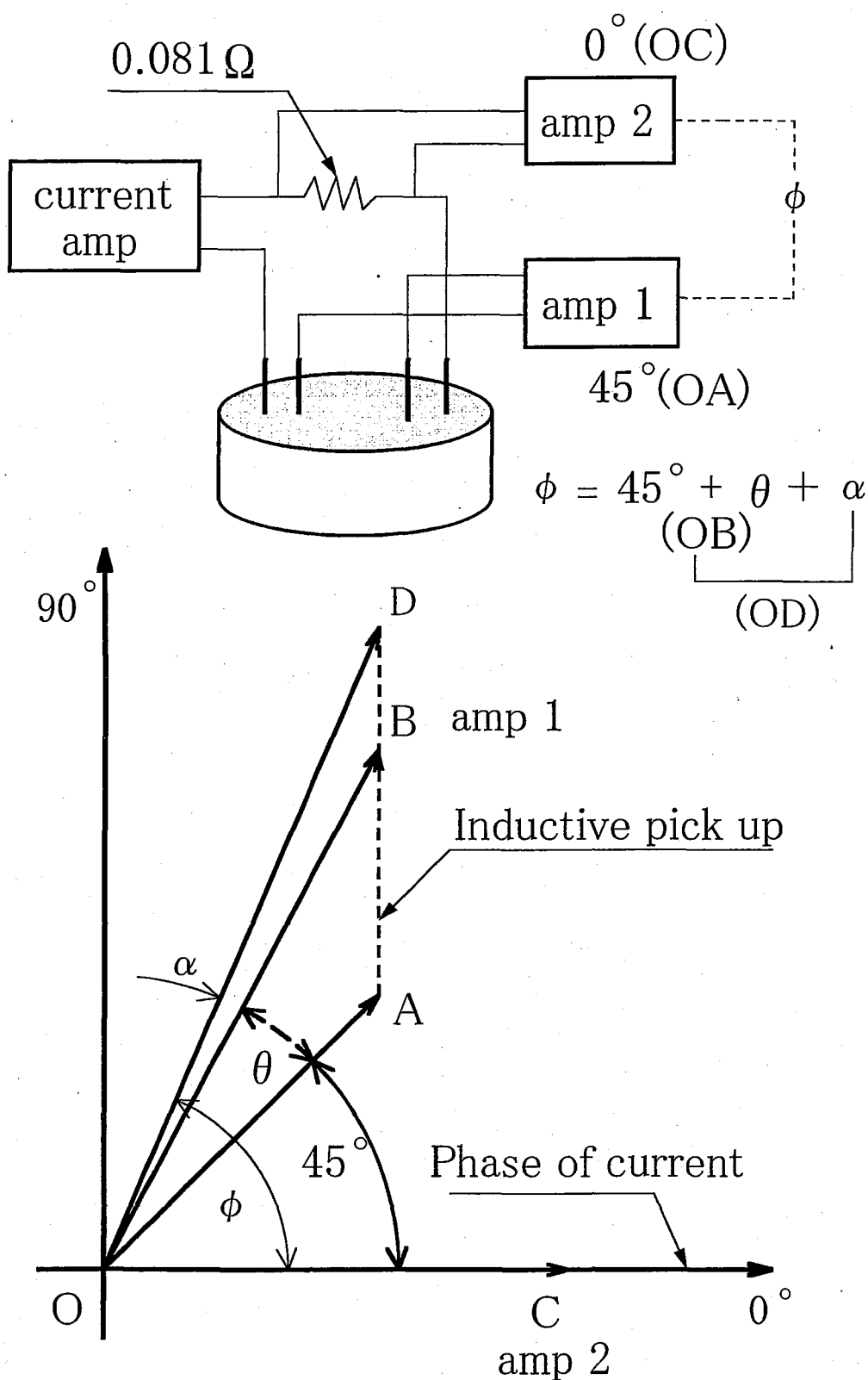


图2.2 位相差補正外觀図

2. 交流電位差システムの構成と疲労き裂の測定実験

2.1 疲労き裂の評価

2.1.1 測定装置

実験で使用した装置の概略図を図 3.1 に示す。測定装置は、ファンクションジェネレータ(KENWOOD FG-273A), 電流増幅回路, 市販の DC アンプ(日本電気三栄 AS2101, 共和電業 DMP-305), およびオシロスコープ(KIKUSUI COR5561), そして自作した測定端子から構成される。この移動式測定端子の概略図を図 3.2 に示す。ここで, 電位差測定端子 A-A'の端子間距離は 5mm, 電流入力端子 B-B'の端子間距離は 40mm である。端子先端は 60°の V 型をしており, 接触面積が小さくなるように配慮した。また, ノイズ対策として端子全体を強磁性体である軟鋼の薄板でシールドし, 測定面と端子が一定の圧力で接触するように圧縮バネを用いた。ファンクションジェネレータによって発生した sin 波は, 電流増幅回路で増幅され, 交流電流が発生する。発振周波数は 0.2~2MHz まで連続的に変化させることができる。

2.1.2 電流増幅回路

本研究で使用した電流増幅装置の回路図を図 3.3 に示す。この電流増幅装置は, 入力された電圧信号に比例した電流を出力するパワーアンプである。電流増幅装置には直流電源を組み込んでいる。電流増幅部には, パワーブースタ(APEX MICROT TECHNOLOGY 社製 PB58)を用い, ファンクションジェネレータから出力された電圧信号を入力し, それに比例した電流を出力することにより交流電流を発生させる。この装置の出力交流電流は最大で 1.4A である。

2.1.3 試験片

本研究で使用した試験片は, 日本非破壊検査協会定量評価電位差法研究会のラウンドロビンテスト用に作成されたものを使用した。概略図を, 図 3.4(a)に示す。材質はステンレス鋼(SUS304), 軟鋼(SS400)の2種類である。これらの試験片には図 3.4(b)のように, 予き裂として半楕円板状のスリットが放電加工により施されている。試験片は

それぞれ2本ずつ用意されている。

2.1.4 実験方法

表 3.1 に、実験条件を示す。また、表 3.1 の負荷条件で疲労試験をした結果を表 3.2 に示す。以上より図 3.4(b)のような疲労き裂が生じているとの予測のもとで、交流電位差法により、電位差を測定した。実験に用いた周波数は 10kHz, 100kHz である。測定は、図 3.4 のように、予き裂の中心から 2mm 間隔でき裂と測定端子が垂直になるように移動させることにより計 13 個所の電位 V を測定した。測定はオシロスコープを用いて画面上の出力波形から求めた。また、基準となる電圧 V_0 をき裂から十分離れた点(試験片端)で測定した。同様の操作を 5 回繰り返し、測定した電位差を評価に用いた。

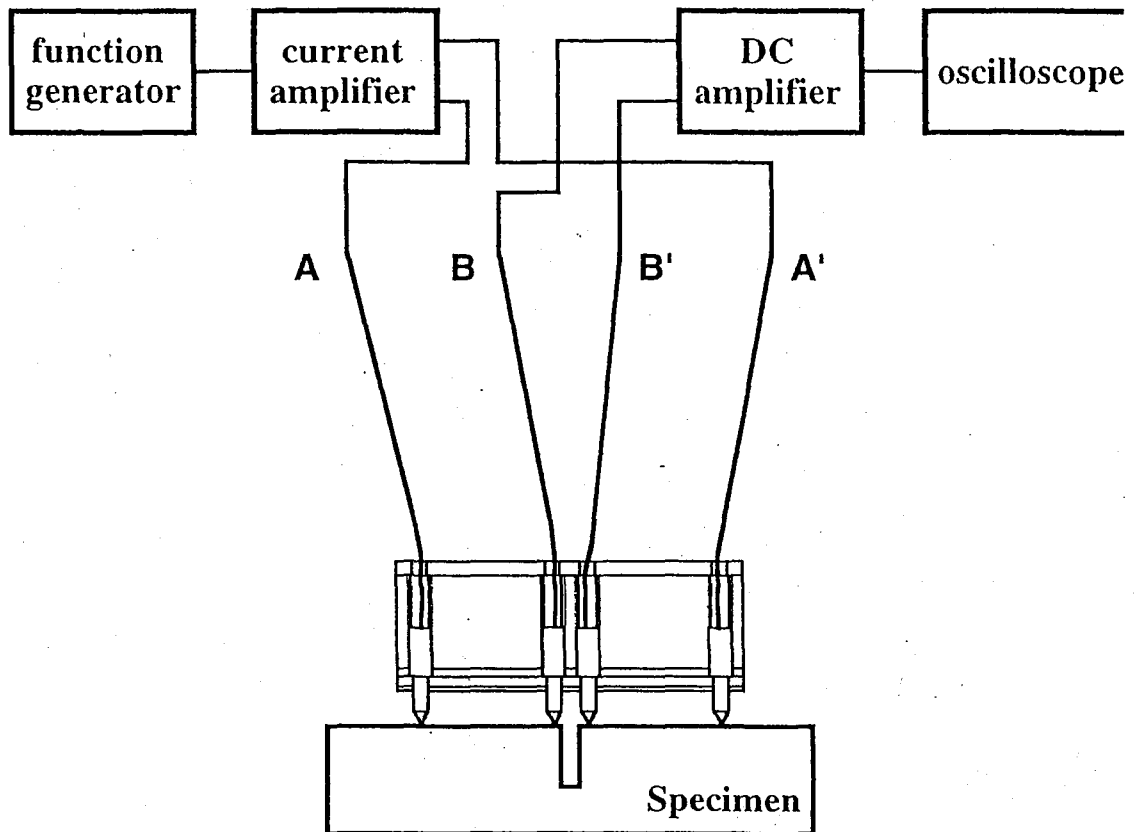


图3.1 測定装置概略図

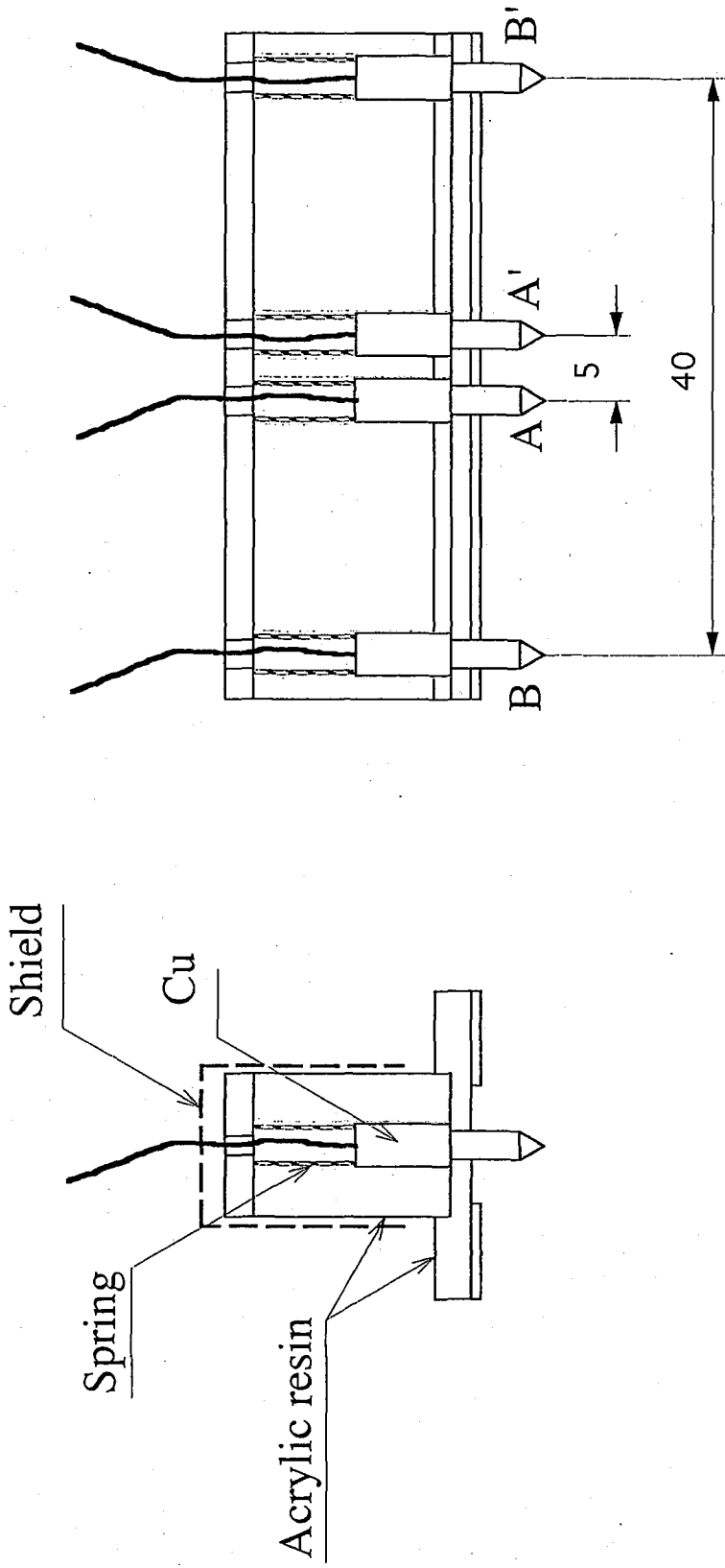


图3.2 移动式测定端子概略图

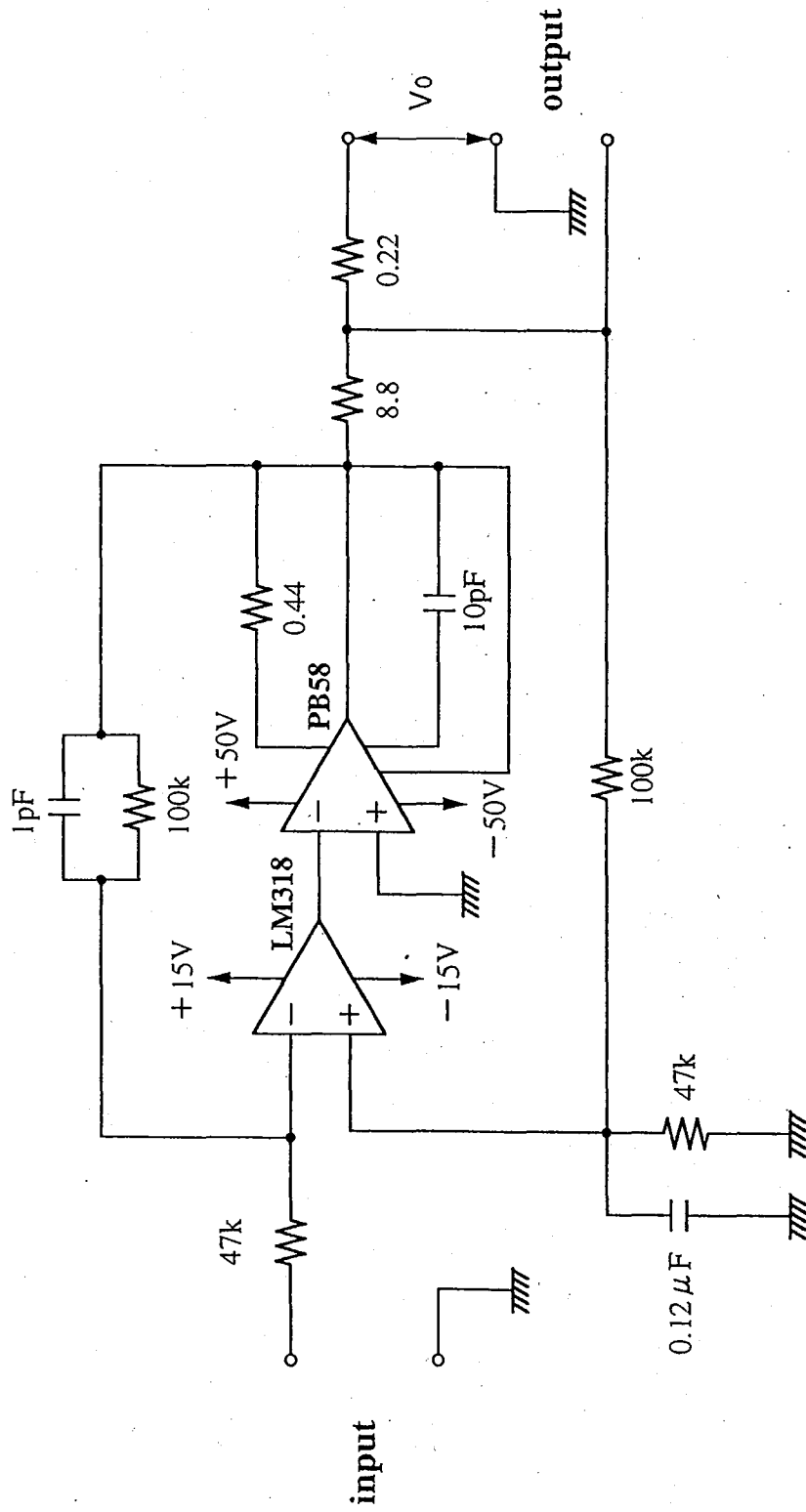
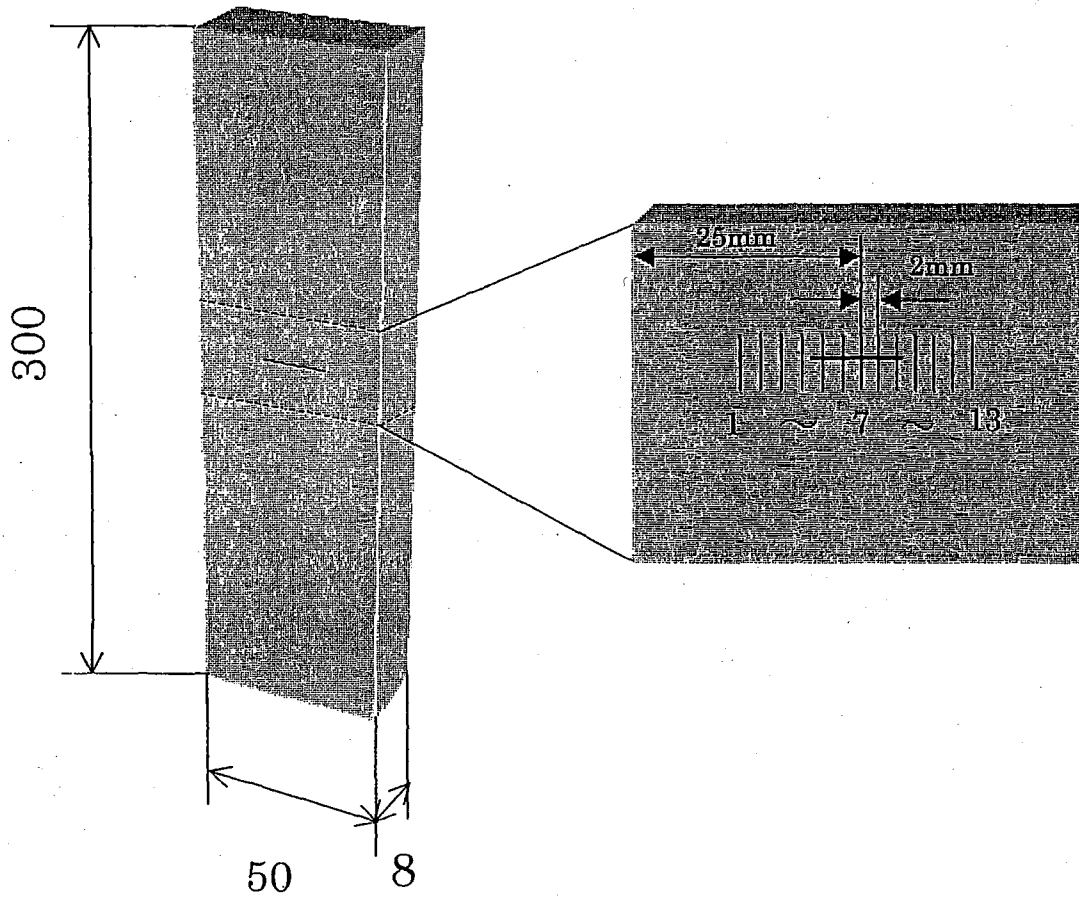
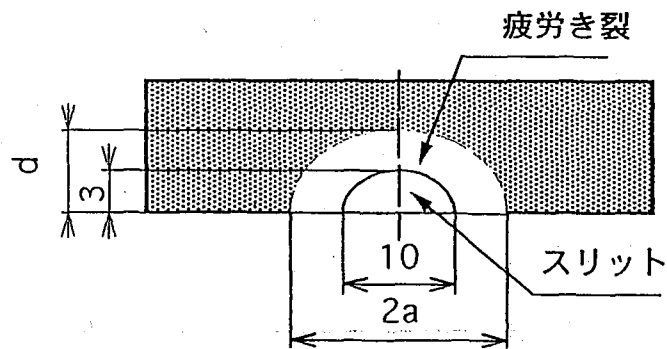


图3.3 電流增幅回路図



(a)測定端子位置概略図



(b)き裂部断面図

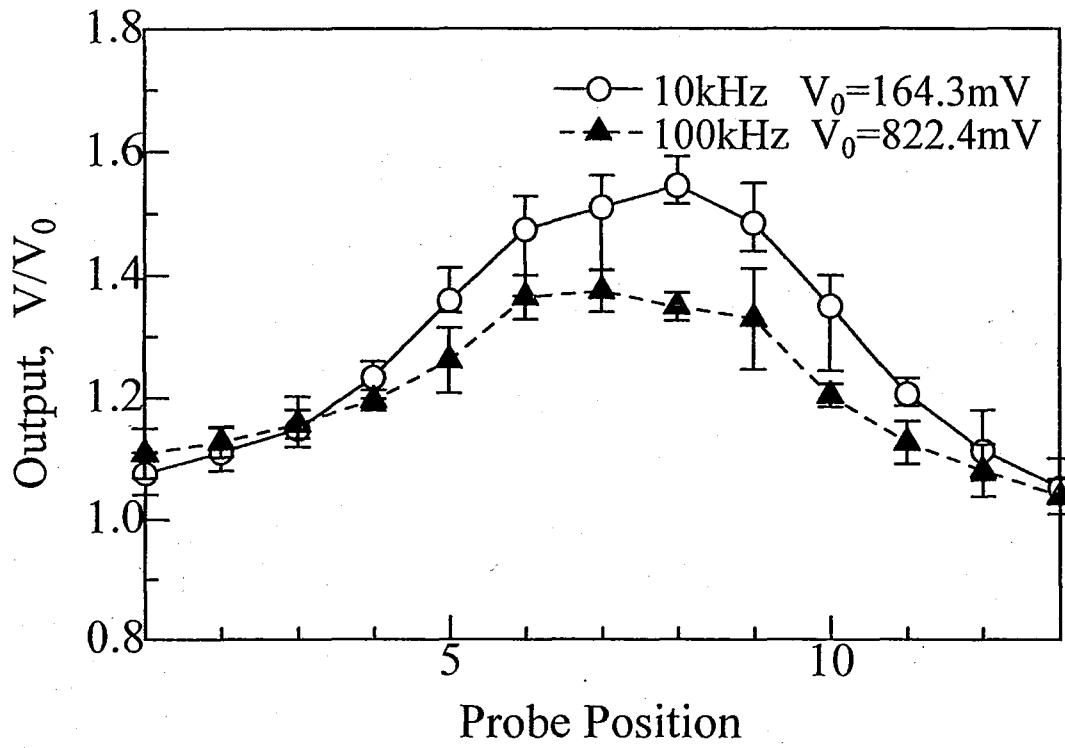
図 3.4 測定端子位置概略図

表3.1 負荷条件

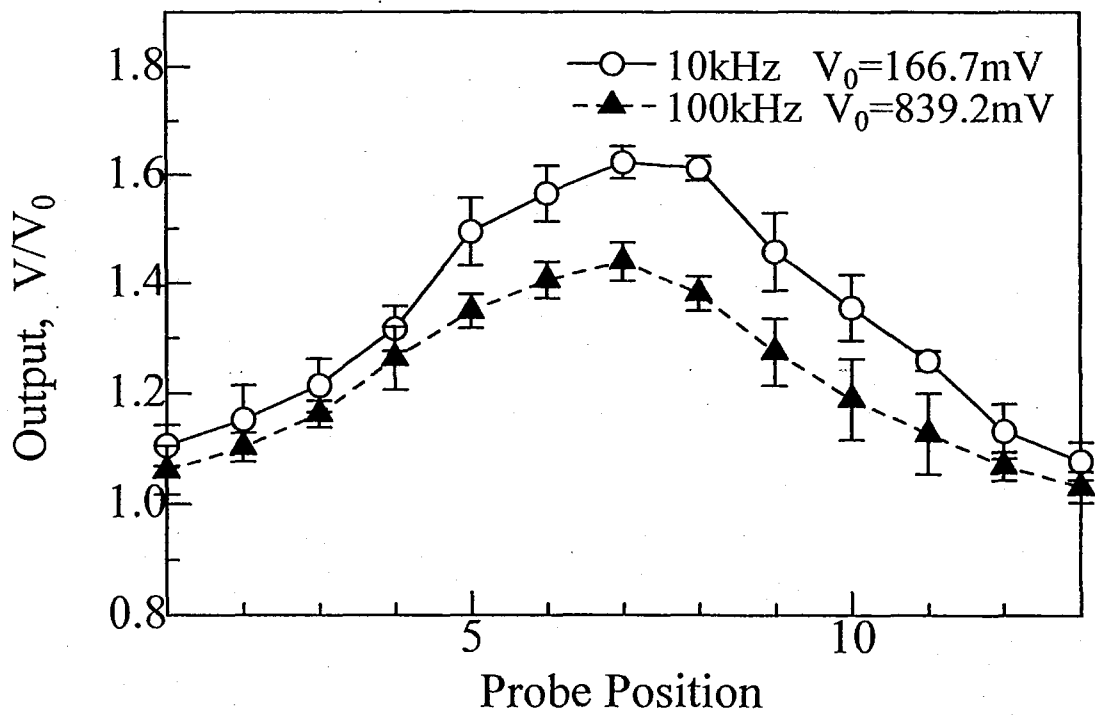
負荷条件	片振引張
周波数 f	15Hz
最大応力 σ_{\max}	100(MPa)
最小応力 σ_{\min}	10(MPa)
平均応力 σ_{mean}	55(MPa)

表3.2 疲労試験結果

試験片 No	試験片材質	予備実験	1	2
き裂長さ $2a(\text{mm})$	SUS304	25.5	15	18
	SS400	21	14	16
き裂深さ d	SUS304	貫通	Unknown	Unknown
	SS400	貫通	Unknown	Unknown
負荷回数 n	SUS304	1.34×10^6	1.24×10^6	1.01×10^6
	SS400	1.61×10^6	1.01×10^6	1.33×10^6



(a) SS400 No.1



(b) SS400 No.2

図 4.1 測定端子位置に対する電位差の変化(SS400)

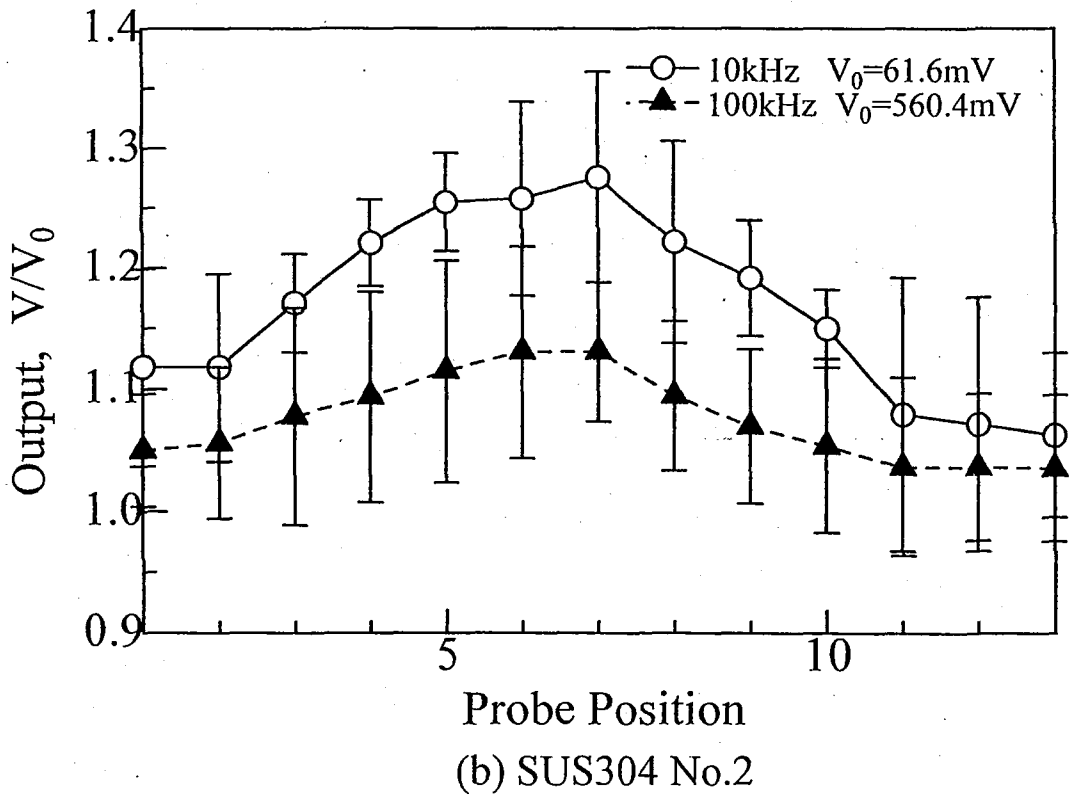
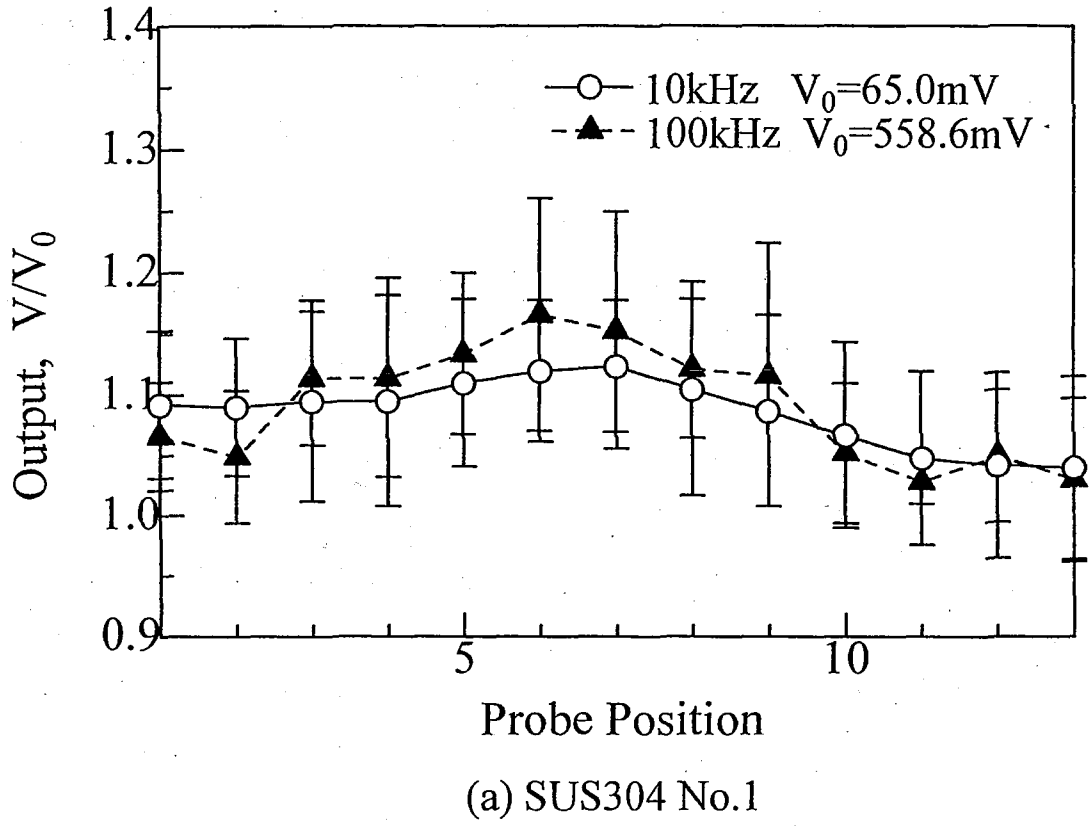
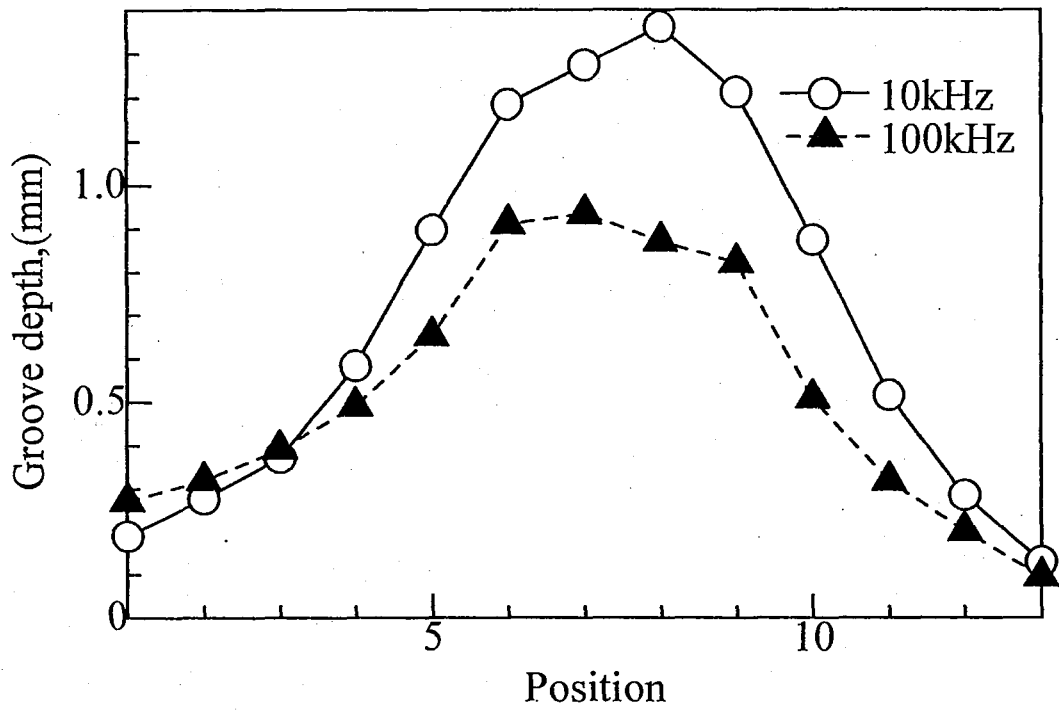
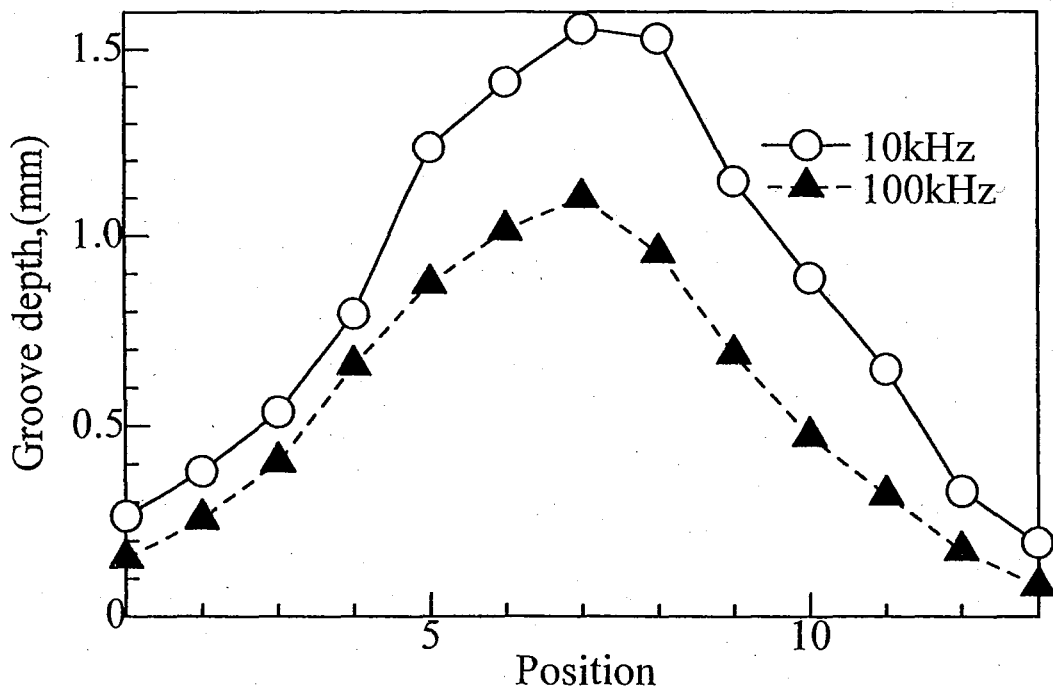


図 4.2 測定端子位置に対する電位差の変化(SUS304)

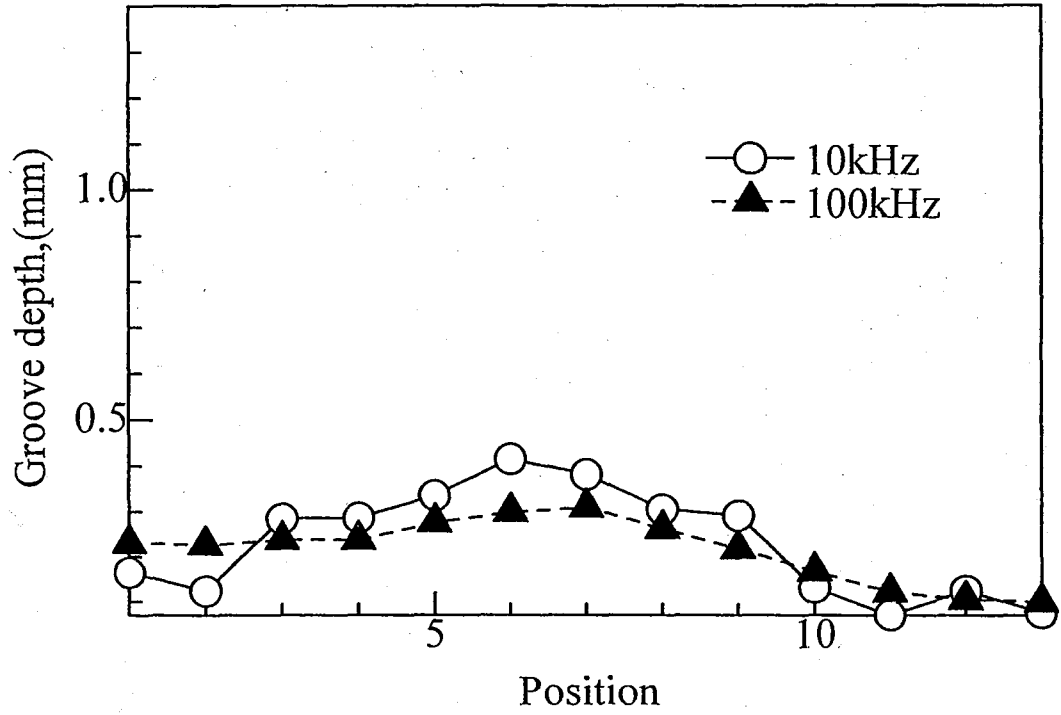


(a) SS400 No.1

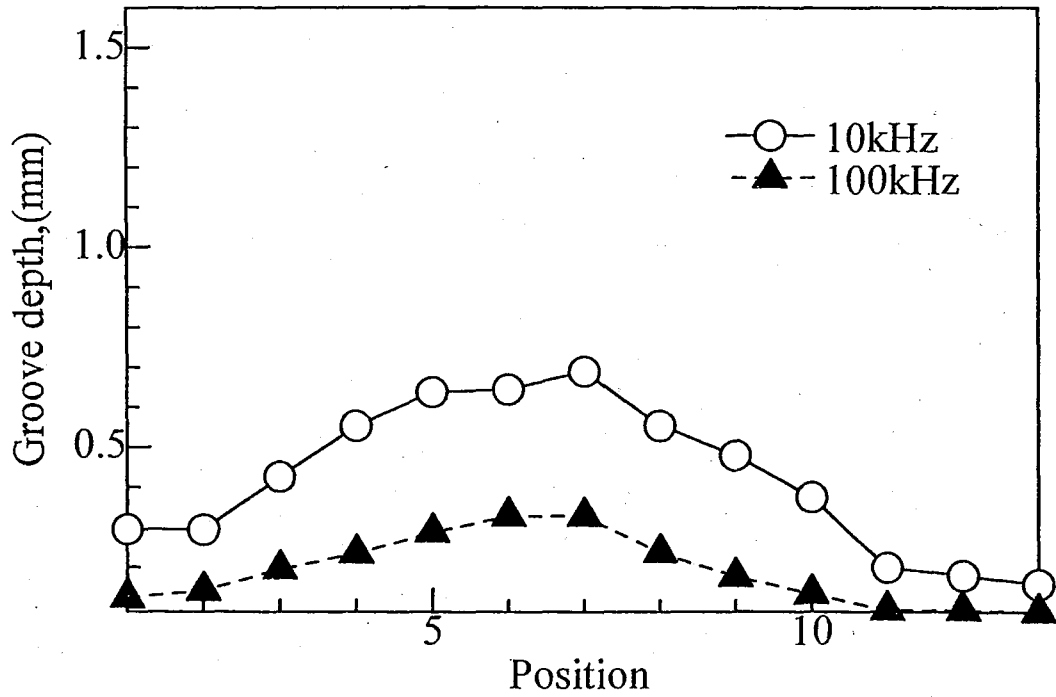


(b) SS400 No.2

図 4.3 電位差から算出したき裂深さ(SS400)

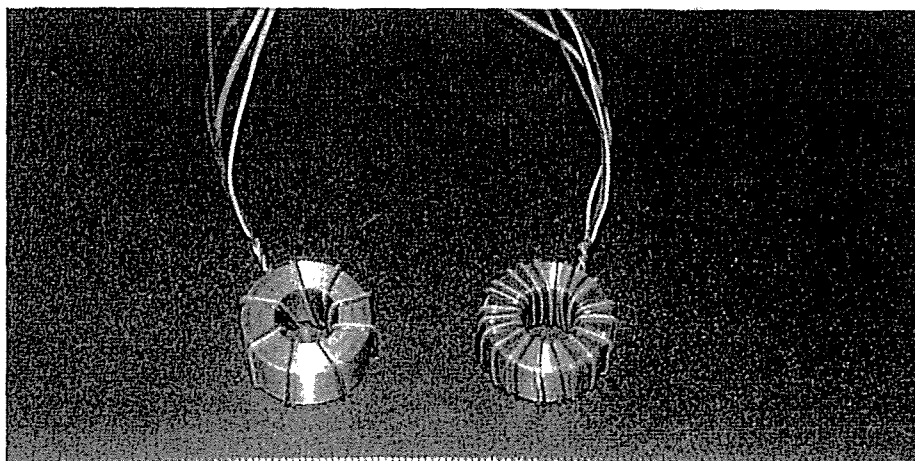


(a) SUS304 (No.1)



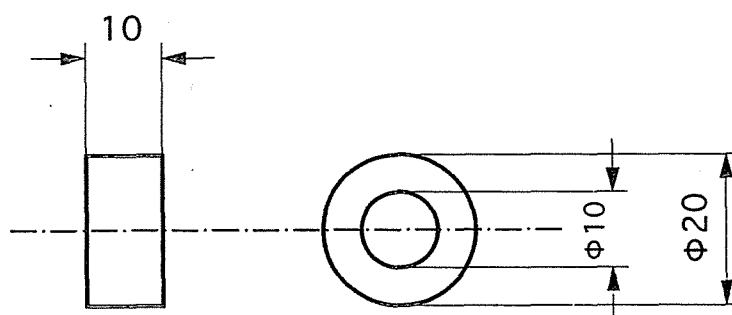
(b) SUS304 (No.2)

図 4.4 電位差から算出したき裂深さ(SUS304)



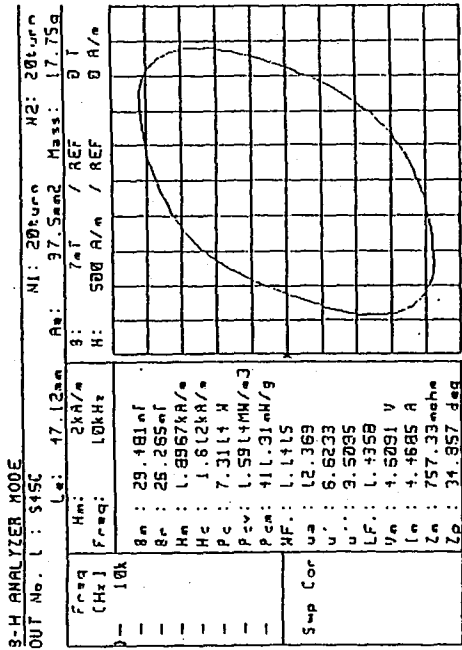
AKT

(a) 外觀圖

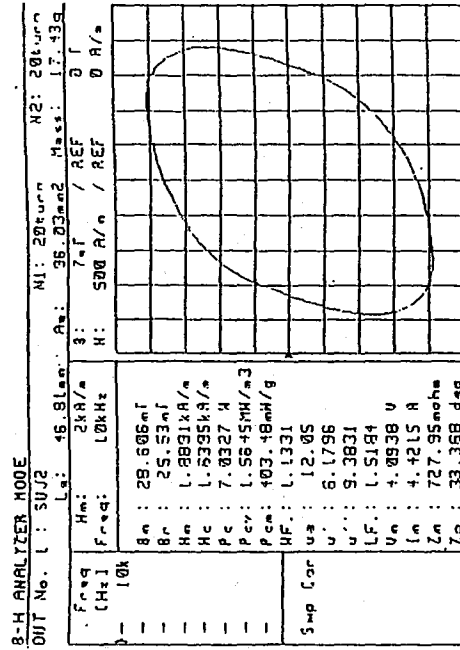


(b) 概略圖

圖4.14 透磁率測定用試驗片



(a) S45C



(b) SUJ2

図 4.15 透磁率測定結果

- Bm : 最大磁束密度[T]
- Br : 残留磁束密度[T]
- Hm : 最大磁界[A/m]
- Hc : 保磁力[A/m]
- Pc : 磁心損失[W]
- Pcv : 単位体積あたりの磁心損失[W/m³]
- Pcm : 単位質量あたりの磁心損失[W/g]
- WF : 波形率, 1.11 ± 0.03 ならば正弦波
- ua : 振幅比透磁率
- u' : 複素透磁率の実数部
- u'' : 複素透磁率の虚数部
- LF = tan δ = μ' / μ'' : 損失係数
- Vm : 2次側巻線の電圧 (ピーク値) [V]
- Im : 1次側巻線の励磁電流 (ピーク値) [A]
- Zm : 1次-2次側巻線の伝達インピーダンス[Ω], Vm と Im の比
- Zp : 伝達インピーダンスの位相角[deg], 磁心に損失がないときは90[deg]に近づく

Bm Br Hm Hc Pc Pcv Pcm WF ua = Bm/Hm μ' μ'' LF = tan δ = μ' / μ'' Vm Im Zm Zp

表4.1 電気抵抗率, 比透磁率および表皮厚さ

	SUJ2	S45C	SUS304
電気抵抗率($\times 10^{-8} \Omega \cdot m$)	22.4	19.5	72.0
比透磁率	6.18	6.62	1.00
表皮厚さ δ (mm) 10kHz	0.96	0.86	4.27

3. 往復動転がり摩耗試験と摩耗機構及び交流電位差法による摩耗の評価

3.1 実験装置

本研究で使用した実験装置外観写真を図 3.1 に、測定装置概略図を図 3.2 に示す。測定装置は、ファンクションジェネレータ(KENWOOD FG-273A)、電流増幅回路、市販の DC アンプ(日本電気三栄 AS2101)、オシロスコープ(KIKUSUI COR5561)、往復動転がり摩耗試験機、測定機器として、DC アンプ(共和電業 DMP-305)、高速 A/D ボード、パーソナルコンピュータ(日本電気 PC9821Xv13)から構成される。この実験では電流増幅回路からの出力は 2.0A となっている。

往復動転がり摩耗試験機の外観写真を図 3.3 に、概略図を図 3.4 に示す。往復動転がり摩耗試験機は、DC モーターの回転を偏心機構により振幅 20mm の往復運動に変換する。試験片取り付け部の写真を図 3.5 に示す。この試験片取り付け部は、ラックとピニオン機構により往復運動をしながら上部試験片に回転運動を与えることができる。ピニオンと試験片の直径が同じならば歯車の減速比が 1:1 のとき、滑り率 0 の転がりとなる。また、荷重はスライダを取り付けた天板に分銅を載せることによって負荷する。

本研究では、表面の損傷部の電位差の位相が、印加電流の位相に比べ 45° 進むということから、位相比較用の電圧を 0.081Ω の固定抵抗を接続して同時に測定した。また測定した電圧は、DC アンプにより増幅された後、超高速 A/D ボード(THAMWAY AD12H25)により A/D 変換される。これは、通常 A/D のボードに比べサンプリング周波数が最高 25MHz と高速で、分解能が 12bit である。測定データは一時的に 1Mword のオンボード・メモリに保持され、C 言語による実験プログラムによりハードディスクに保持される。また試験片の電流入力端子、電位差測定用端子、リード線などの配線、および試験片の固定などは測定値に大きな影響を及ぼす。特に電位差測定側の配線は、電磁誘導による起電力に大きく影響するため、測定側の配線における閉回路部の面積を極力小さくするために、配線にはシールド線を用い、試験片近傍では配線をより合わせ電磁誘導による影響が最小となるように十分に配慮した。

3.2 試験片

本研究で用いた試験片の形状および寸法を図 3.6 に示す。試験片の材質は、上部試験片に高炭素クロム軸受鋼 SUJ2, 下部試験片には同じく SUJ2 と中炭素鋼 S45C を用い、両試験片ともに直径は 30mm である。それぞれの試験片の成分を表 3.1 に示す。試験片は、上部、下部、ともに焼き入れ処理を施し、ビッカース硬さ計(AKASHI MVK-F Hardness Tester)によって測定した焼き入れ後の硬さは、上部試験片 SUJ2 では 613 ± 5 HV, 下部試験片 SUJ2 では 590 ± 19 HV, S45C では 379 ± 9 HV である。同材質による硬さの違いは試験片の形状の違いによるものと考えられる。また、熱処理の内容を表 3.2 に示す。

試験片の接触面圧を高めるため、上部試験片には軸方向に R5 のクラウニング処理を施した。上部、下部試験片ともに、接触面はバフ研磨により鏡面に仕上げ、研磨後の下部試験片の表面粗さは、S45C では $R_y = 0.58 \mu\text{m}$, SUJ2 では $R_y = 0.24 \mu\text{m}$ である。また、端子には $\phi 1.0$ のホルマル線を用い、下部試験片に $\phi 1.5\text{mm}$, 深さ 5.0mm の穴を開け、ステンレス用はんだを流し込んで固定した。T.Kayaba⁹⁾らは、転がり摩耗による亀裂が摺動方向に対して 45° 方向に発生したと報告している。このことから端子は損傷部に対し 45° ずらして配置した。上部試験片と下部試験片との接触状態の外観図を図 3.7 に示す。これは上部試験片が回転をしながら往復動している状態を表し、A-A'は電流入力端子、B-B'は電位差測定用端子である。

3.3 実験条件

本実験は無潤滑下で行った。試験片に負荷する荷重は 80N, DC モータの回転数は 1000rpm, 入力電流 2.0A, 周波数 10kHz である。また、上部ギヤと下部ギヤの歯数を変えることによって上部試験片のすべり率を変化させることができ、下部試験片 S45C では歯数比 20/24 (すべり率 16.7%), SUJ2 では同じく 20/24 (16.7%) と 21/23 (8.7%), さらに 19/25 (24.0%) のギヤを用いた。

実験中の雰囲気は温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度 $25 \pm 5\%$ であった。

3.4 実験方法

試験片は実験前に超音波洗浄機(iuchi US-1)を用いて、アセトン(CH₃COOH₃)中で10分間洗浄した後、図 3.7 の電流入力端子 A-A'に電流増幅装置からの電流出力を、B-B'間に電位差測定用端子を接続する。下部試験片からの電圧信号は DC アンプで 1000 倍に増幅された後、A/D ボードを介してパーソナルコンピュータによりその電圧振幅をサンプリング周波数 6.25MHz で、10000 個のデータを測定した。上記のサンプリング周波数で周波数 10kHz の信号を測定すると、1 周期あたり 625 個のデータを 16 周期分測定することができる。所定の繰り返し数毎にサンプリングを 5 回行い、合計 48 周期の平均振幅から電位差を、また、C 言語解析プログラムにより位相差を算出した。測定は繰り返し数 10⁴ 回と 5 × 10⁴ 回で一旦往復動を停止し、その後 5 × 10⁴ 回毎に同様に停止させ、上部試験片を下部試験片から離れた状態で下部試験片に電流を流し、電位差、位相差を測定する。この操作を繰り返し、最終的に繰り返し数 30 × 10⁵ 回まで行った。

損傷を与える前の試験片の初期電位差 V_0 と転がり摩耗を与えた後の測定電位差 V との比である電位差比 V/V_0 を求め、評価に使用した。

交流電流のばらつきによる電位差比への影響を無くすために、電位差比に以下の補正をした。補正前の電位差比は次式で与えられる。

$$\frac{V'}{V_0'} = \frac{I \cdot R}{I_0 \cdot R_0} \quad \dots (3.1)$$

ここで、 V' 、 R 、 I はそれぞれ転がり摩耗実験後の試験片の測定電位差、抵抗値、電流値、 V_0' 、 R_0 、 I_0 はそれぞれ転がり摩耗実験前の試験片の測定電位差、抵抗値、電流値である。電流値にばらつきがあるとすると、電位差比は I/I_0 の分増加してしまうため、次式とし補正した。

$$\frac{V}{V_0} = \frac{V'}{V_0'} \cdot \frac{I_0}{I} \quad \dots (3.2)$$

また、 I および I_0 は、図 3.2 の固定抵抗(0.081Ω)に電流を流したときの測定電圧値を用いて次式から求めた。

$$I = \frac{V''}{0.081} \quad \text{および} \quad I_0 = \frac{V_0''}{0.081} \quad \dots (3.3)$$

ここで V'' 、 V_0'' はそれぞれ転がり摩耗実験前、後の電位差測定時の抵抗による測定電圧値である。

本研究では、以上のように補正した電位差比 V/V_0 を用い評価した。

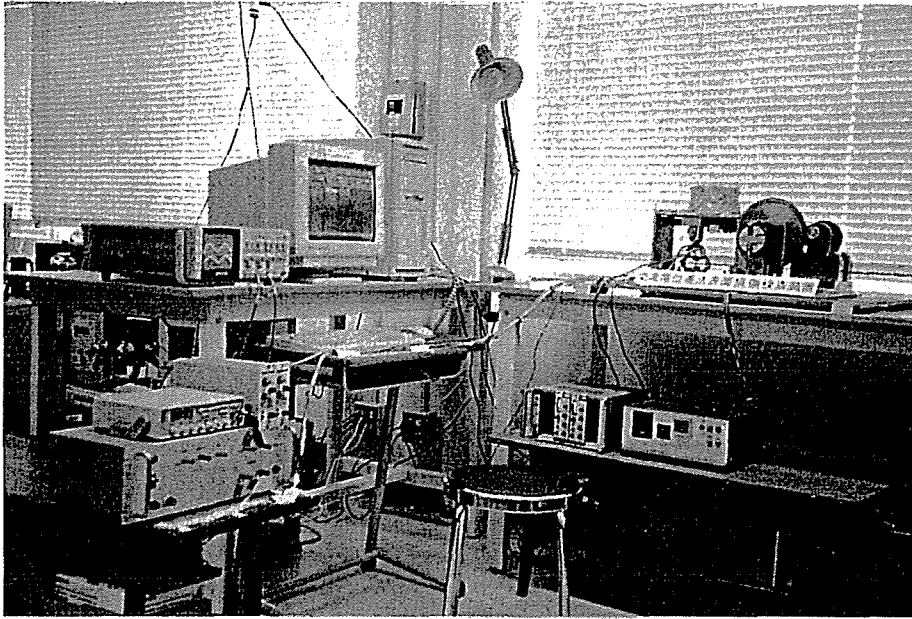


図 3.1 実験装置外観図

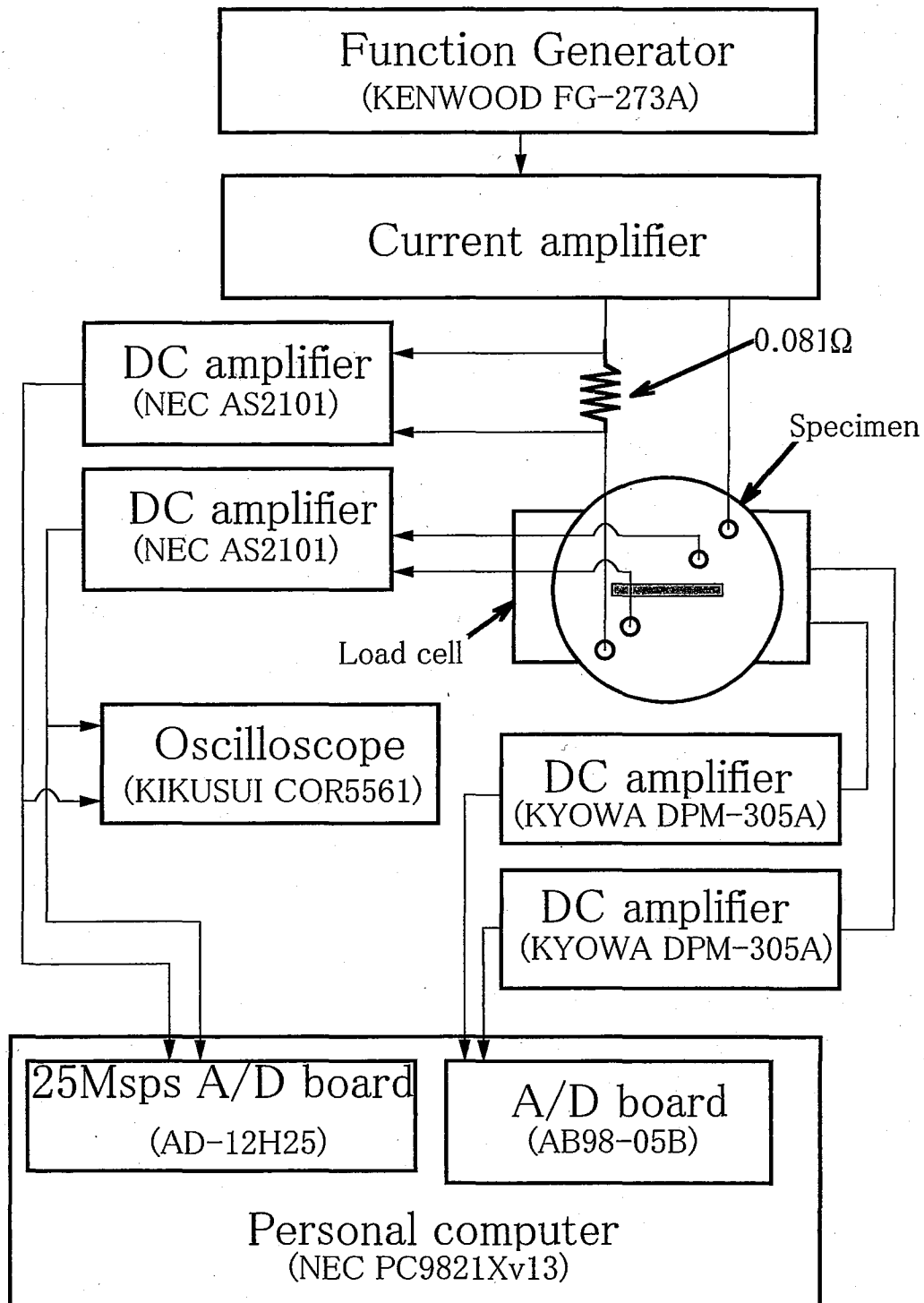


図3.2 測定配線系概略図

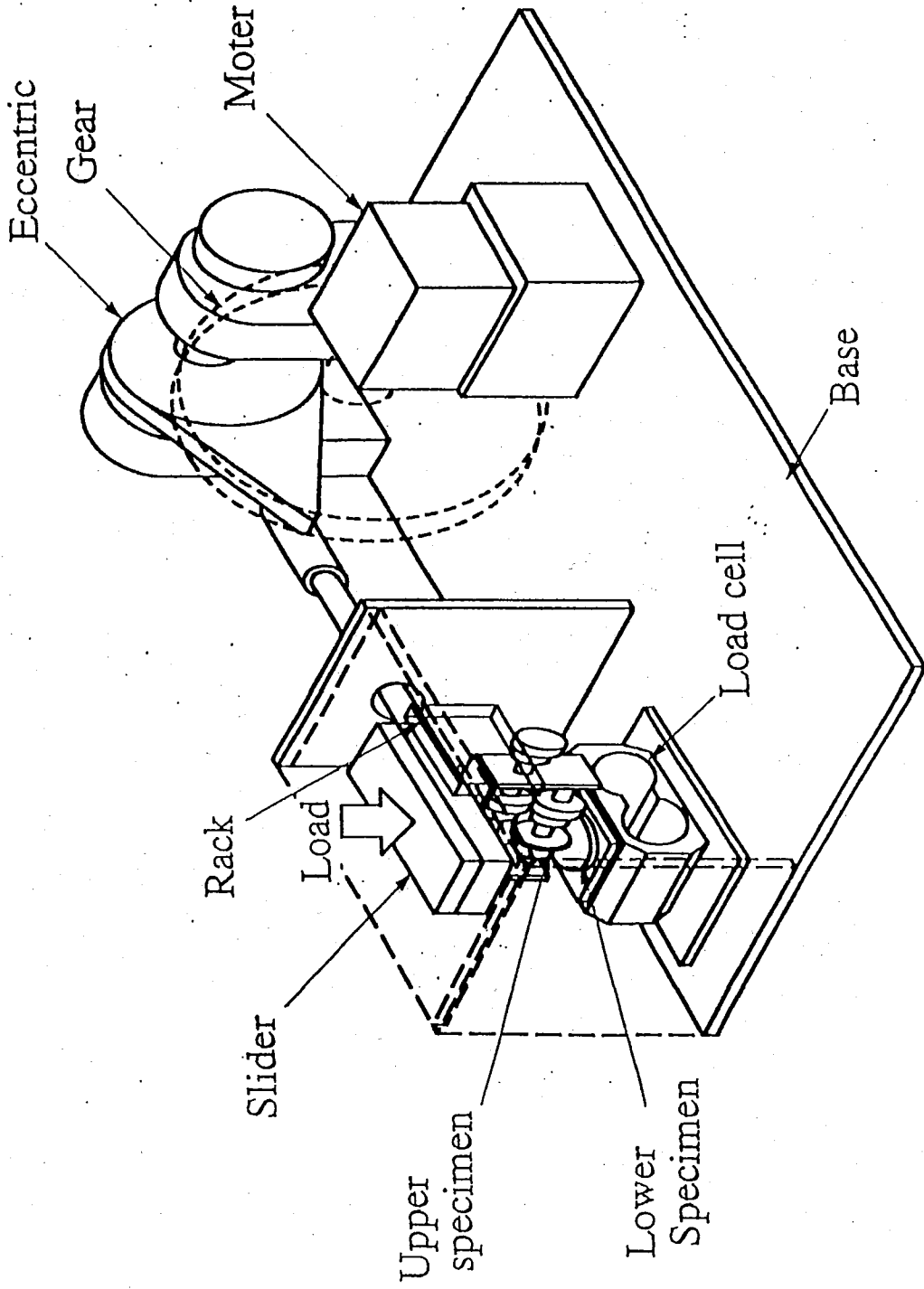


図 3.3 往復動転がり摩擦試験機

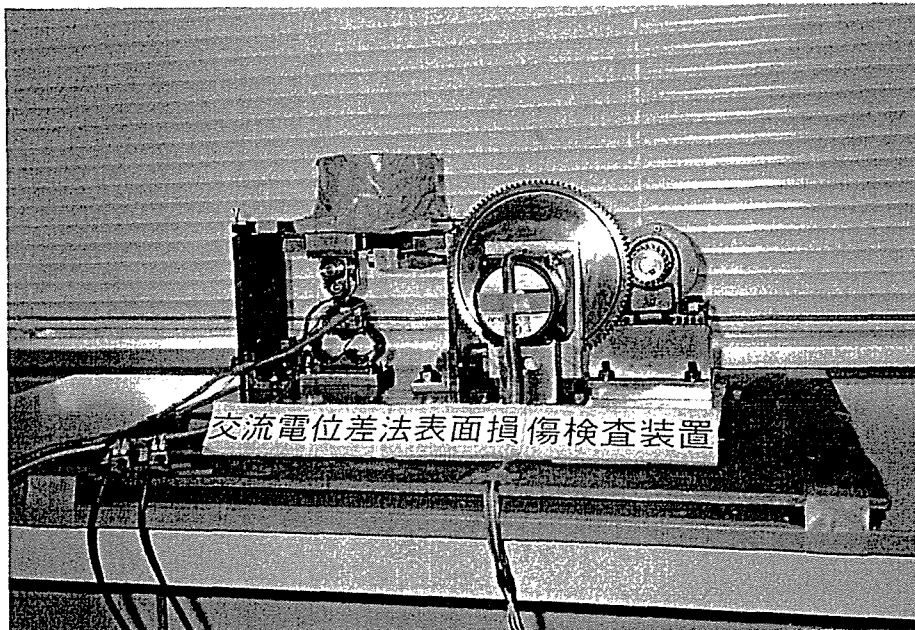


図 3.4 往復動転がり摩擦試験機

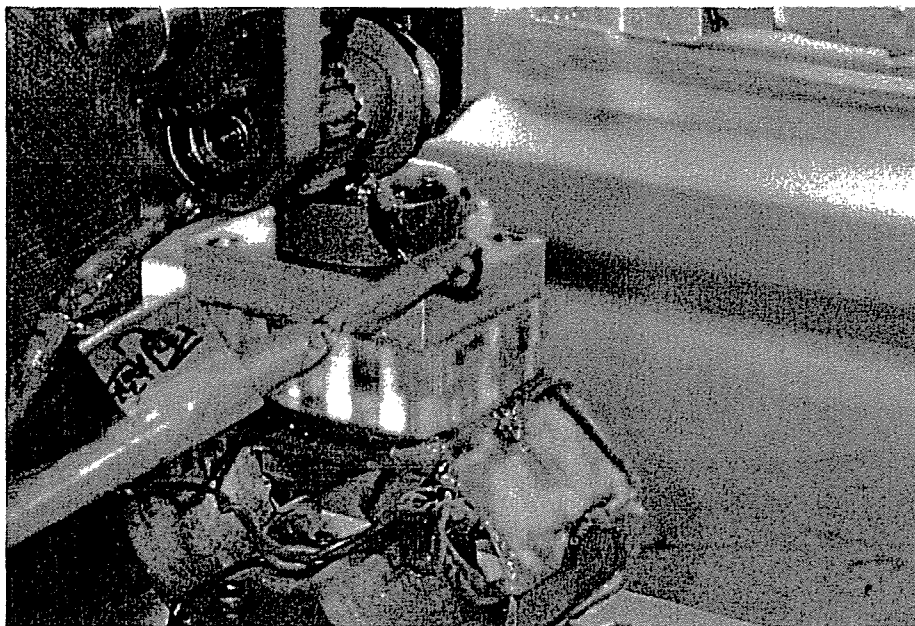
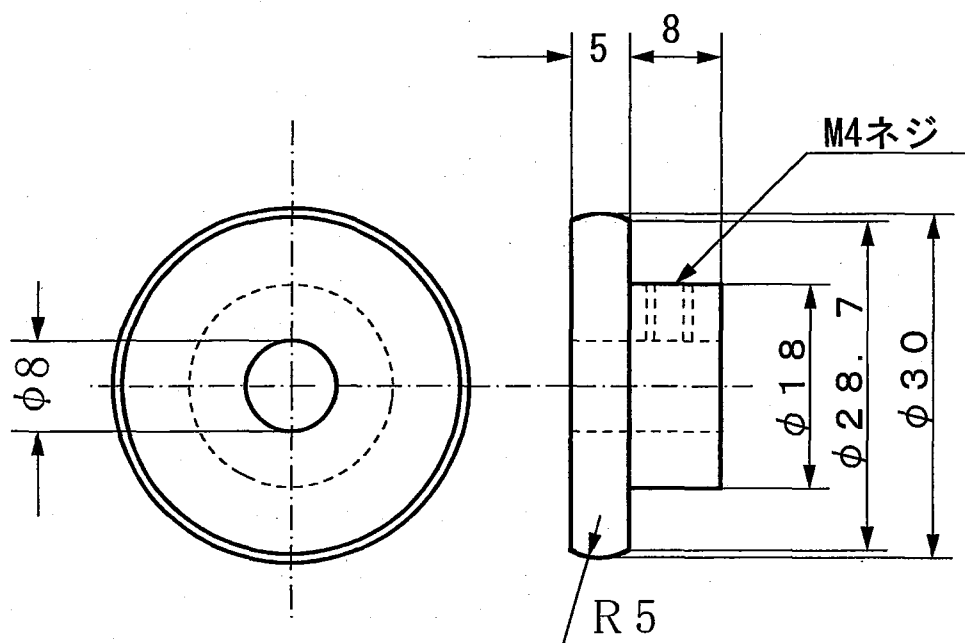
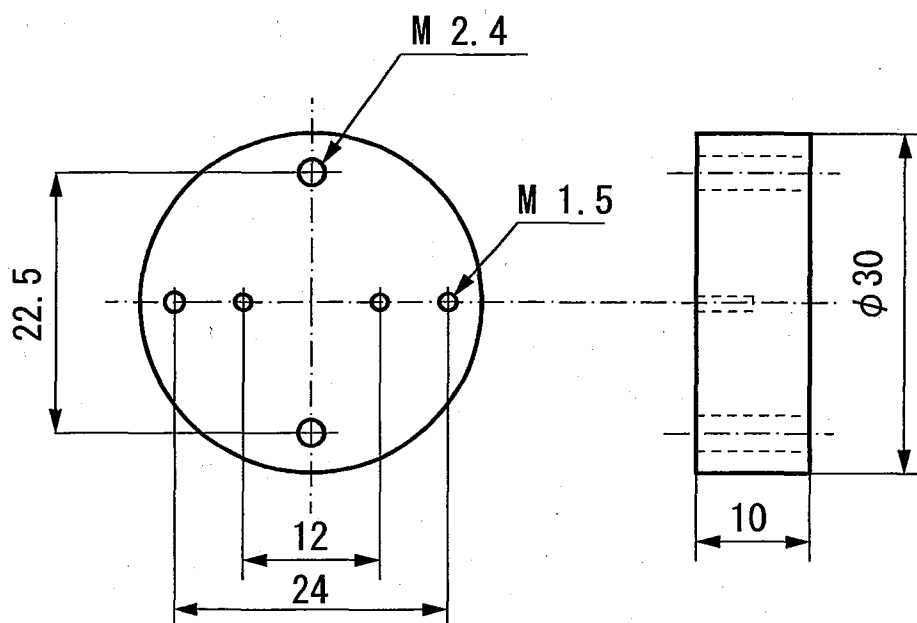


図 3.5 試験片取り付け部



Upper specimen



Lower specimen

図3.6 試験片形状

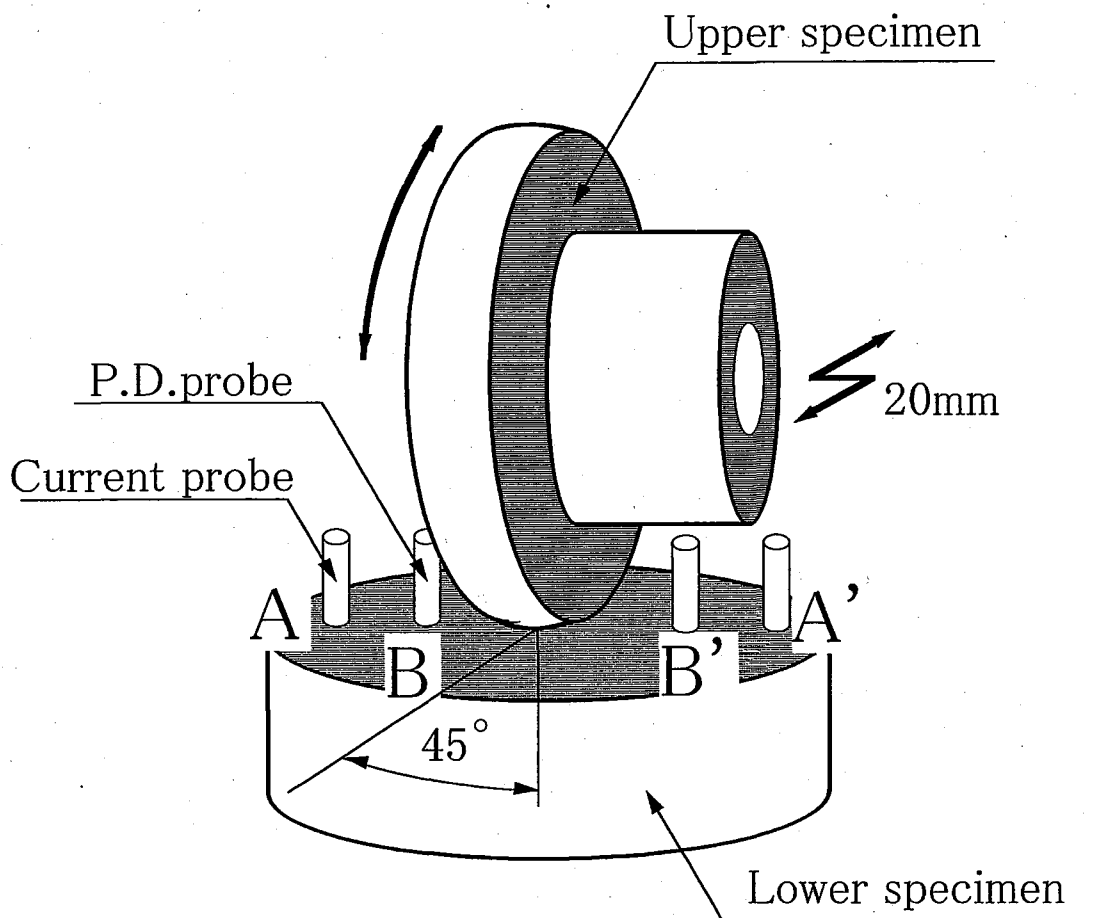


図3.7 試験片接触状態外観図

表 3.1 試験片の化学成分 [wt.%]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
SUJ2	0.99	0.17	0.34	0.015	0.006	1.40	0.006	0.11	0.02
S45C	0.44	0.16	0.77	0.024	0.021	0.13	0.02	0.01	

表 3.2 熱処理内容 (無酸化雰囲気)

SUJ2	均熱	浸炭		油冷	焼戻し
	860 [°C]			100 [°C]	180 [°C]
	20 [min]	50 [min]		5 [min]	60 [min]
S45C	均熱	浸炭	焼入保持	油冷	焼戻し
	830 [°C]		830 [°C]	100 [°C]	180 [°C]
	20 [min]	70 [min]	15 [min]	5 [min]	60 [min]

実験結果

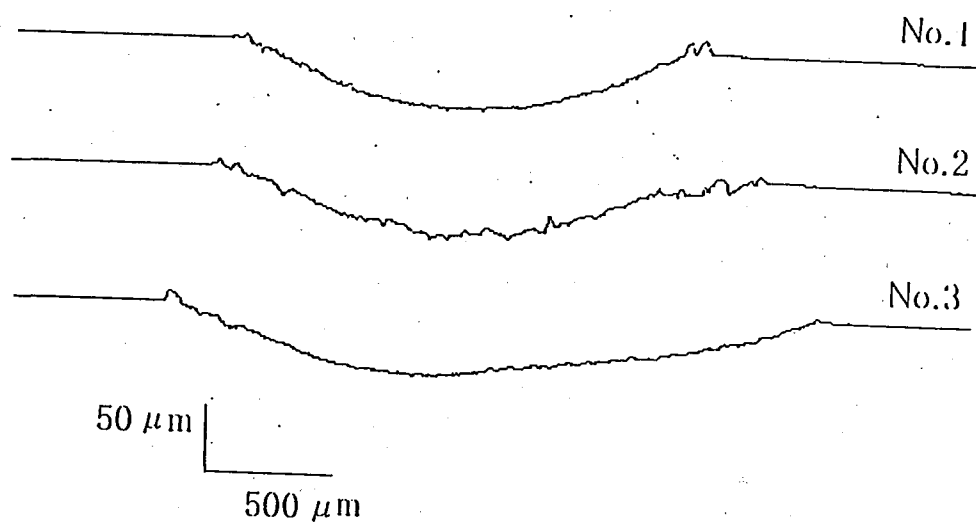
4.1 摩耗量

下部試験片 S45C を用いてすべり率 16.7%を与えたときの表面粗さ計 (KOASA LABOLATORY Ltd SE-3) により測定した摩耗痕の断面トレースとそのときの摩耗量を図 4.1 に、同じすべり率 16.7%で下部試験片 SUJ2 の摩耗痕断面トレースと摩耗量を図 4.2 に示す。摩耗量は摩耗痕断面積と振幅 20mm から算出した。S45C においては 3 つの摩耗痕断面は幅、深さに多少の差が見られるが、摩耗量は $1.3\sim 1.6\text{mm}^3$ ほどであった。SUJ2 においては摩耗痕、摩耗量ともに差は見られないが、S45C と比べ、摩耗痕断面には突起状のものが多く見られる。

また、下部試験片 SUJ2 を用いてすべり率 8.7%の場合を図 4.3 に、24.0%の場合を図 4.4 にそれぞれの摩耗痕断面、摩耗量を示す。これより、すべり率が増すにつれ摩耗痕の形状は深さ方向に主に拡大し、接触する上部試験片の形状に近い形を示す。

各すべり率における S45C と SUJ2 の摩耗量を図 4.5 に示す。SUJ2 においてはすべり率が 5%増加すると摩耗量は $0.08\sim 0.13\text{mm}^3$ 増加した。また、同じすべり率 16.7%では、S45C は SUJ2 に比べ、約 4.2 倍の摩耗量となった。

図 4.6~4.11 は走査型電子顕微鏡 SEM (JOEL MP-3504) による摩耗痕表面の写真である。この写真より同じすべり率 16.7%を与えた S45C, SUJ2 ともに摺動方向に層状の剥離が起きていることが確認される。すべり率 8.7%の SUJ2 の表面には、16.7%のときに見られた層状剥離と上部試験片からの移着のあとが見られるが、剥離は少なく、移着の方が数多く確認され、また、すべり率 24.0%では摺動方向とは関係なく層状とは呼べない剥離と、比較的大きな摩耗粒子が移着していることが確認される。



摩耗痕断面トレース

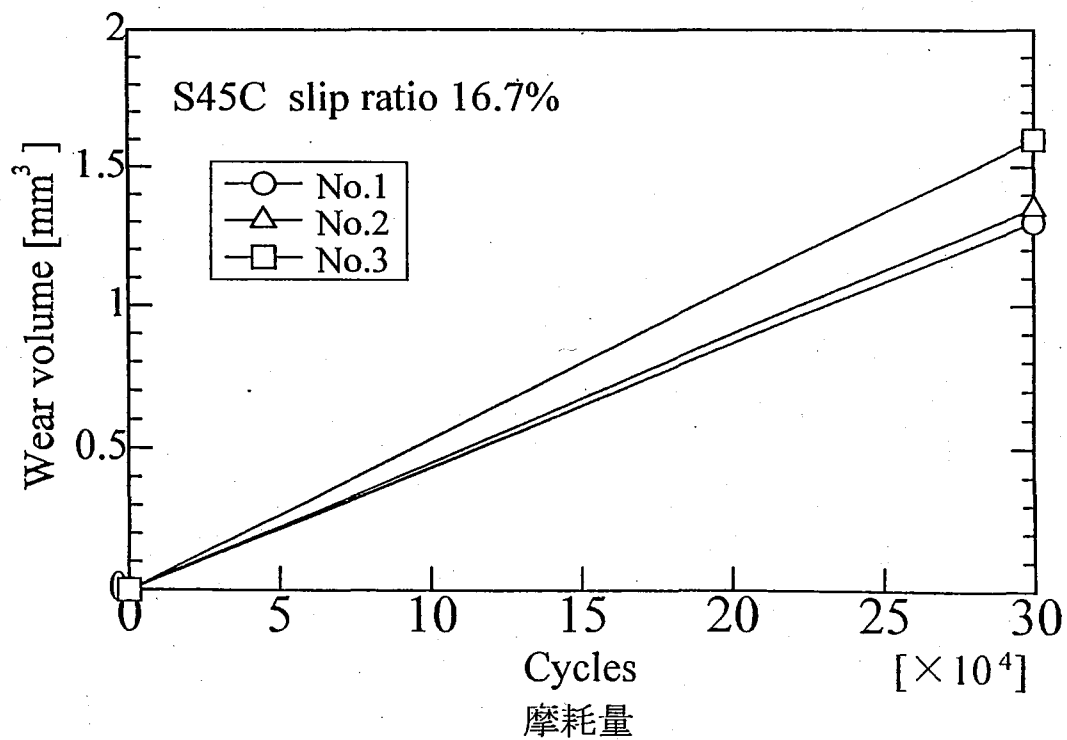
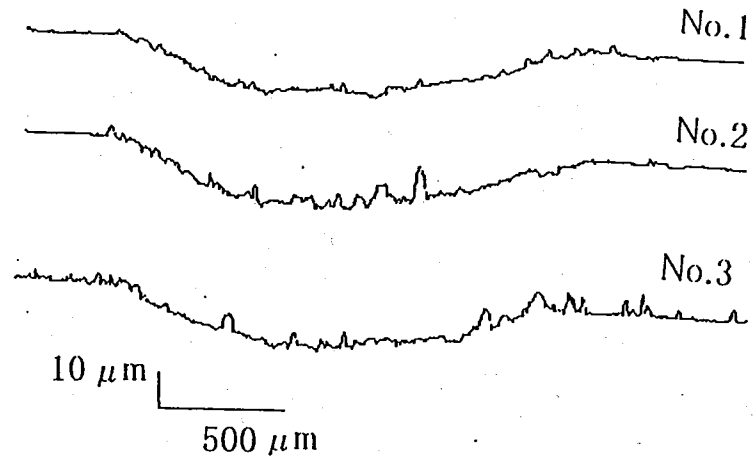


図4.1 下部試験片S45C (すべり率16.7%)



摩耗痕断面トレース

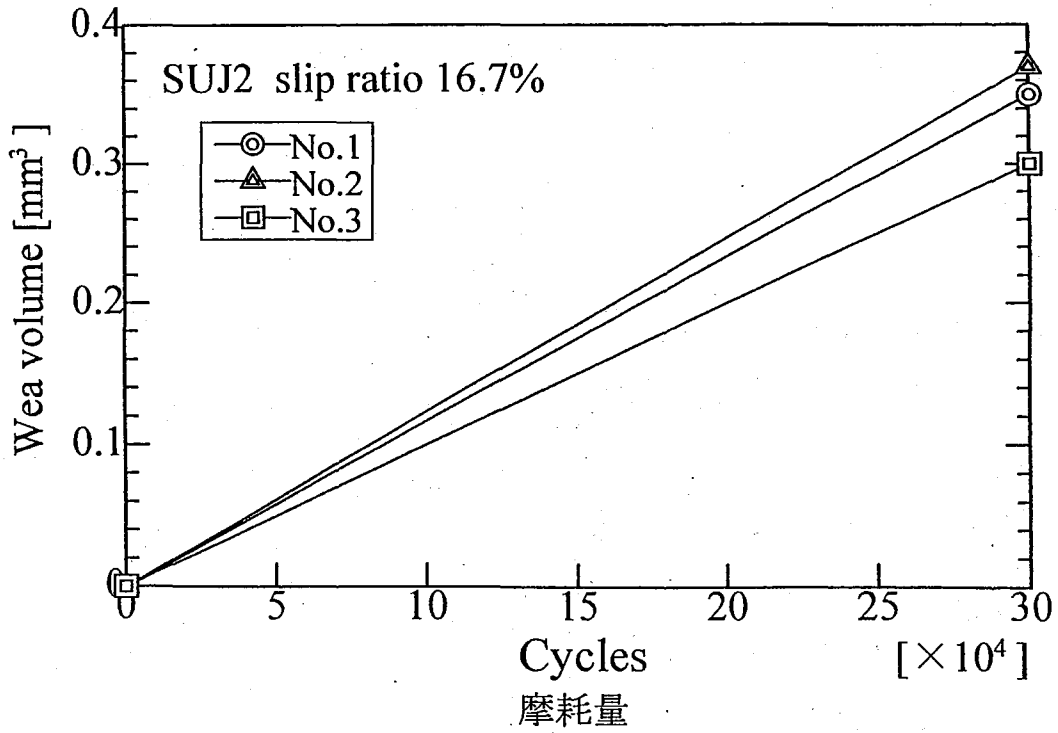
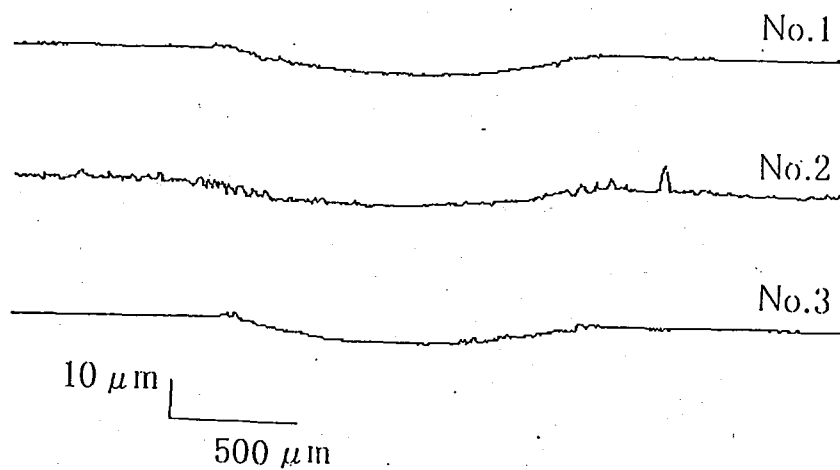


図4.2 下部試験片SUJ2 (すべり率16.7%)



摩耗痕断面トレース

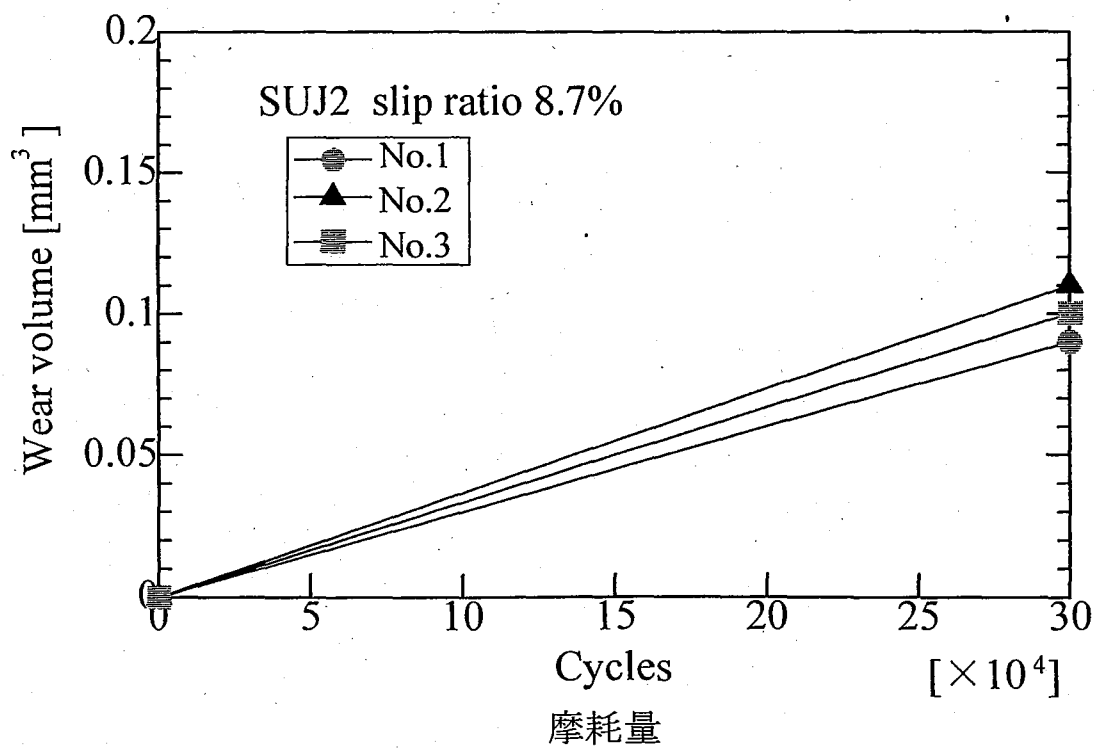
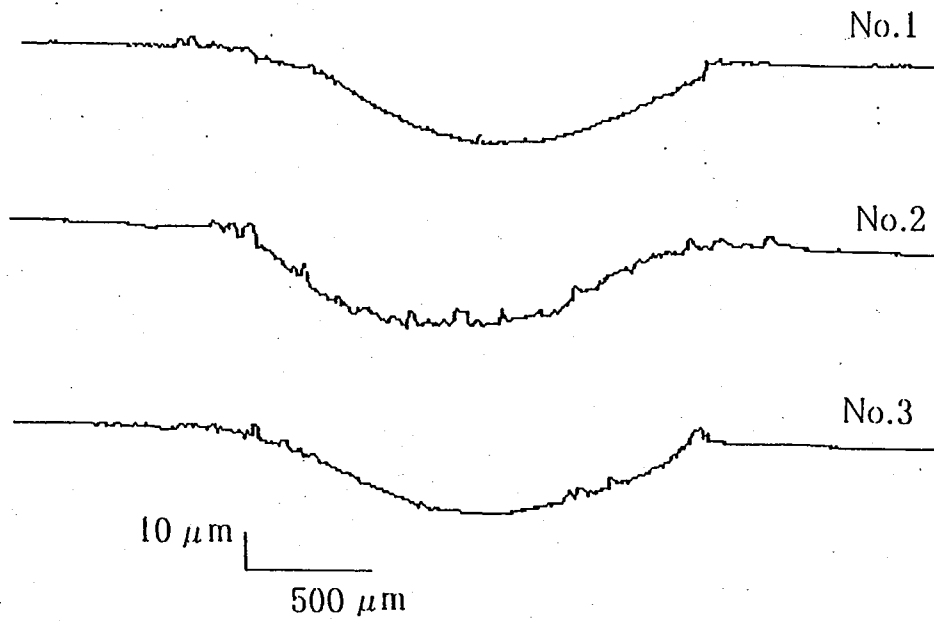


図4.3 下部試験片SUJ2 (すべり率8.7%)



摩耗痕断面トレース

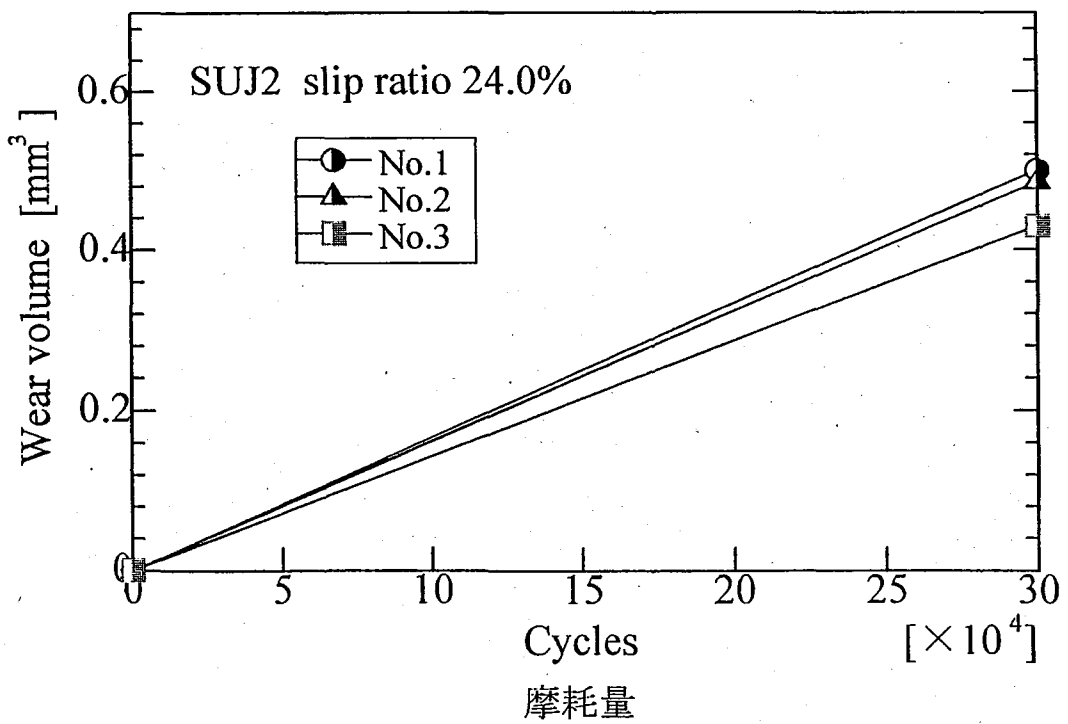


図4.4 下部試験片SUJ2 (すべり率24.0%)

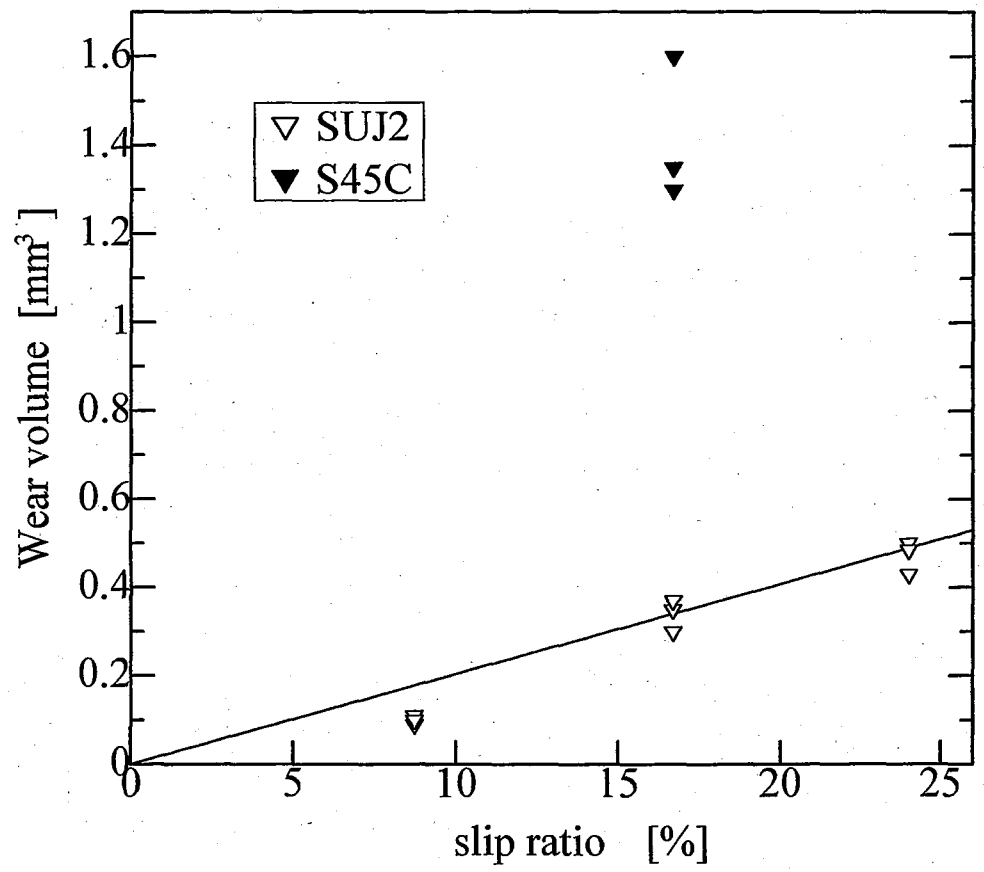
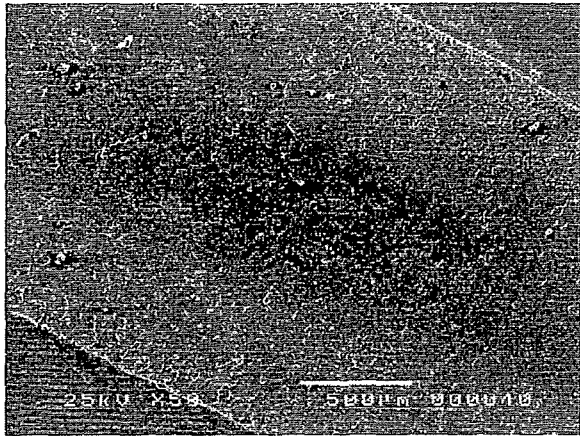
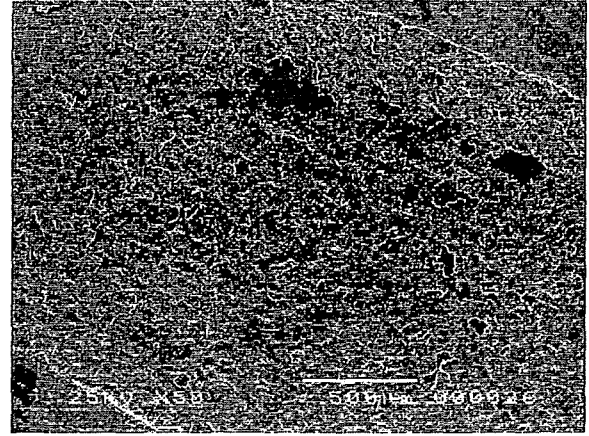


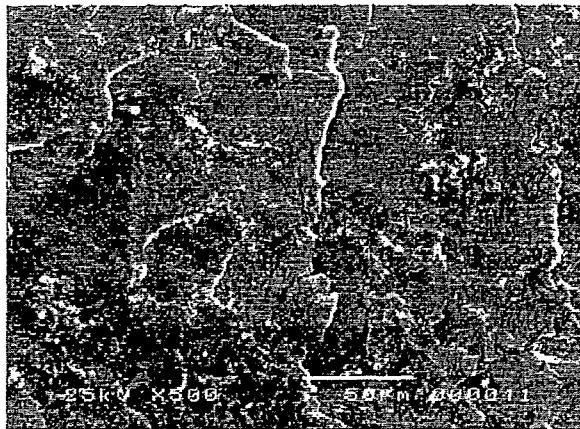
図4.5 各すべり率での摩耗量



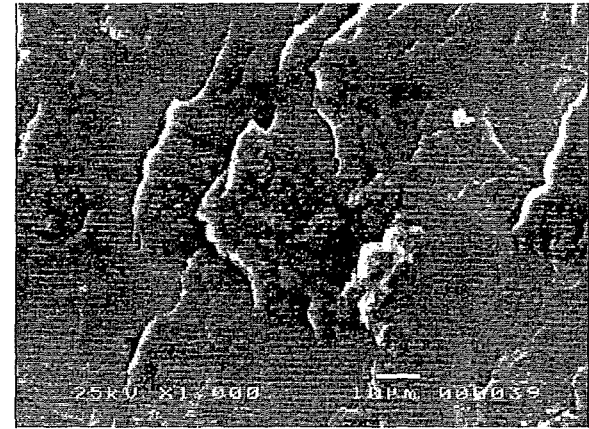
50倍



50倍



500倍

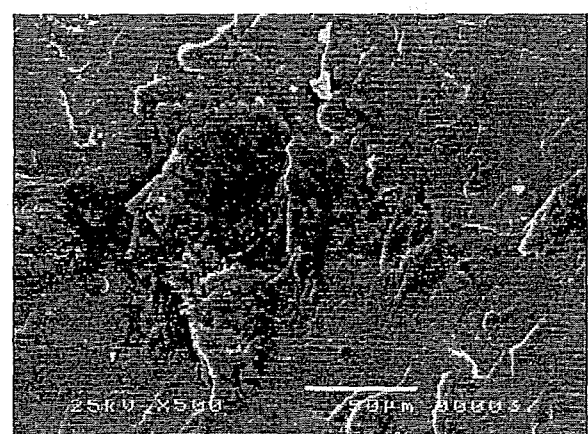


500倍



1000倍

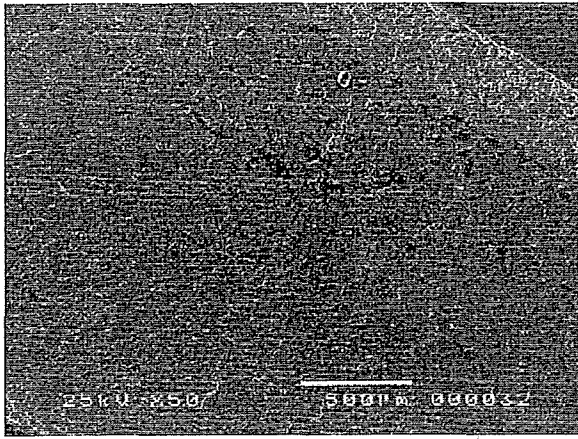
• S45C (16.7%) No.1



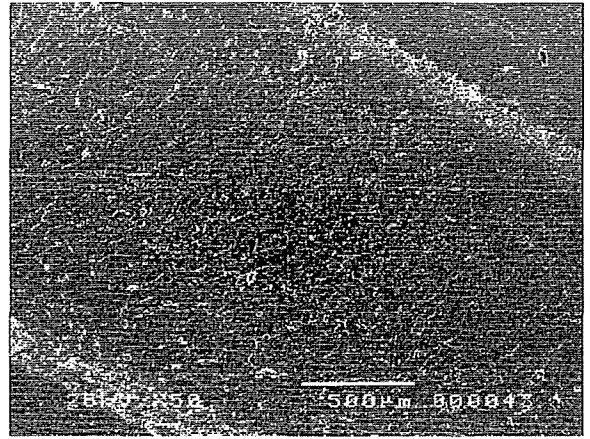
1000倍

• S45C (16.7%) No.2

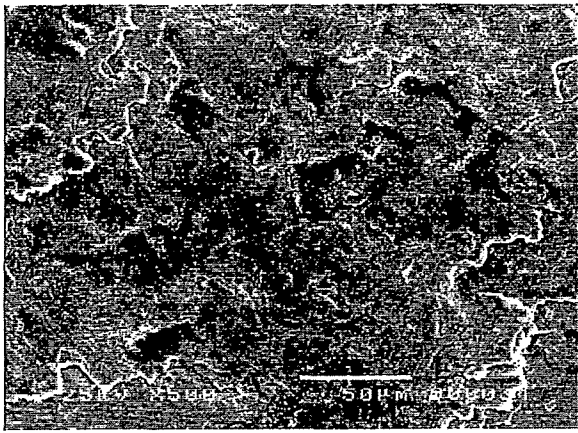
图 4.6 摩耗痕 SEM 写真 (1)



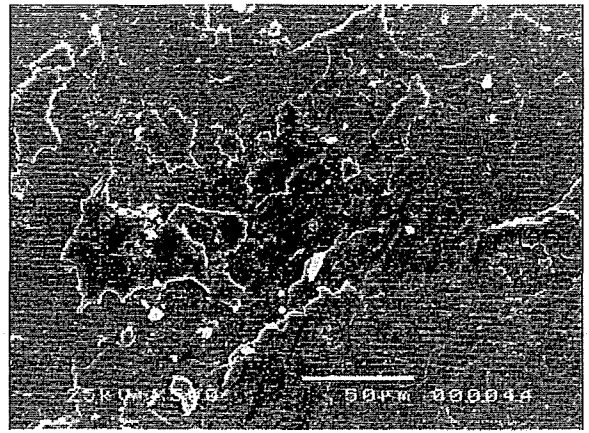
50倍



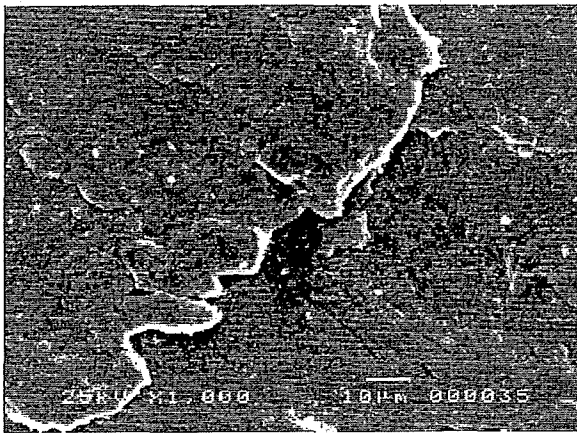
50倍



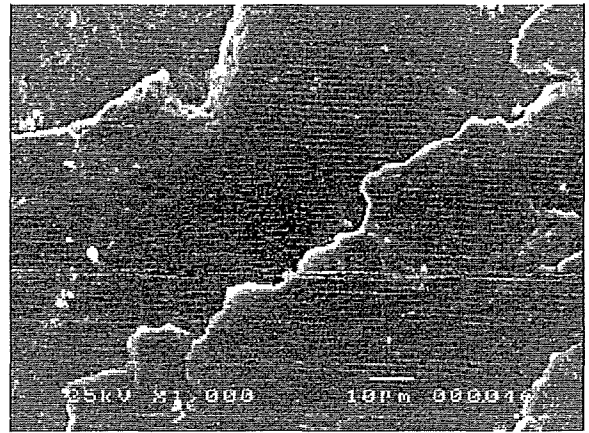
500倍



500倍



1000倍

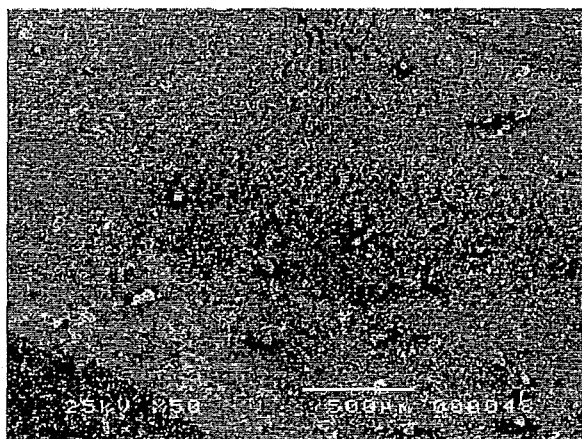


1000倍

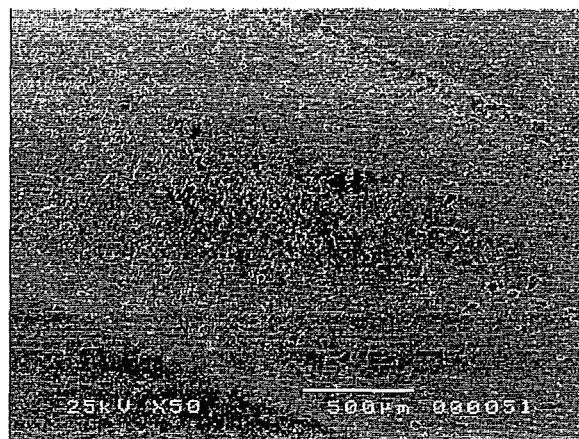
• S45C (16.7%) No.3

• SUJ2 (16.7%) No.1

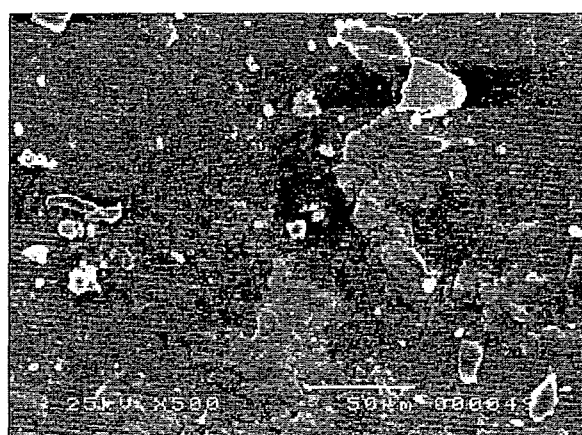
図 4.7 摩耗痕 SEM 写真 (2)



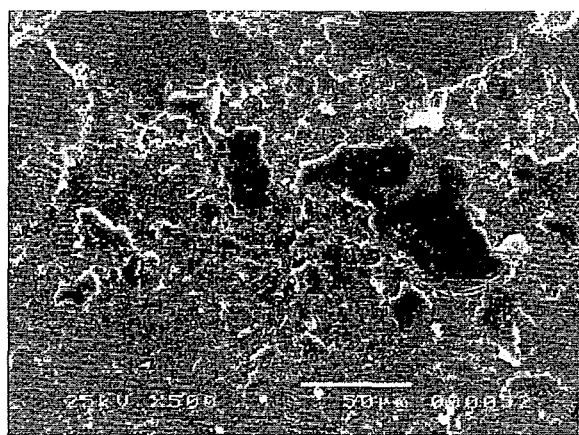
50 倍



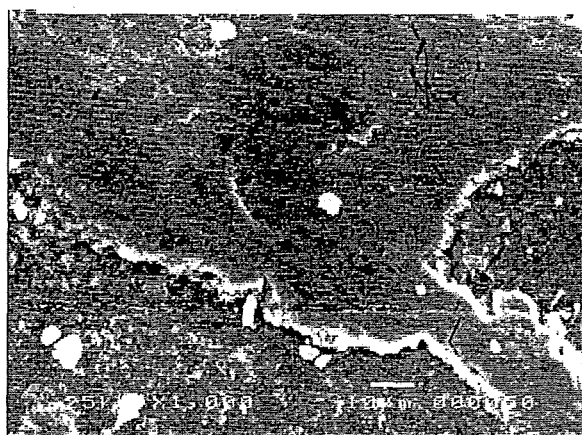
50 倍



500 倍

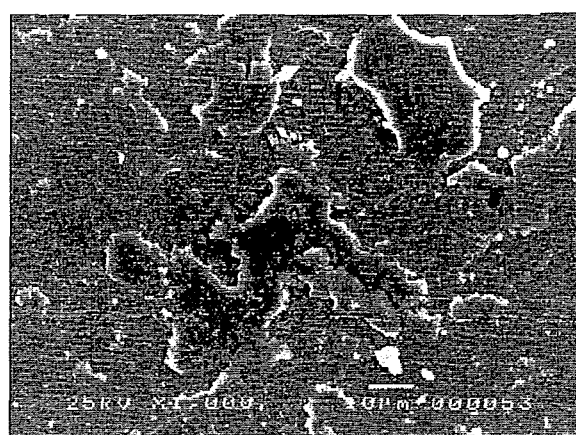


500 倍



1000 倍

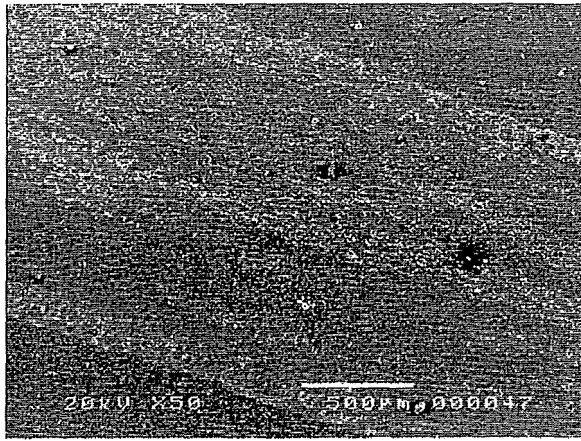
• SUJ2 (16.7%) No.2



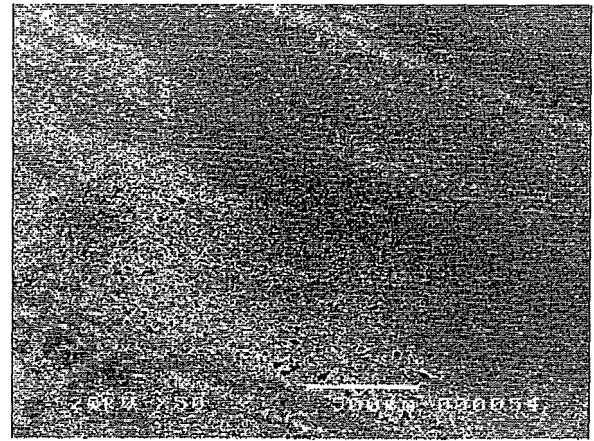
1000 倍

• SUJ2 (16.7%) No.3

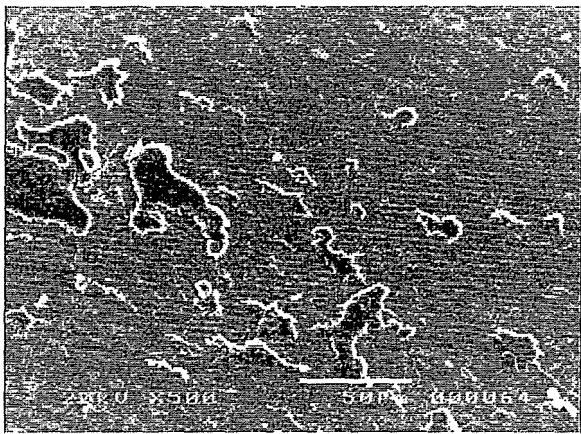
図 4.8 摩耗痕 SEM 写真 (3)



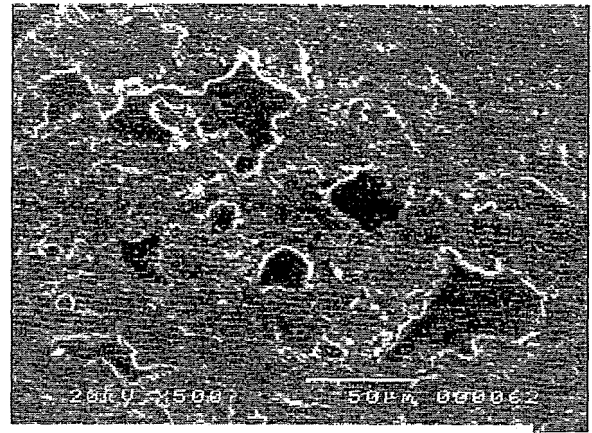
50 倍



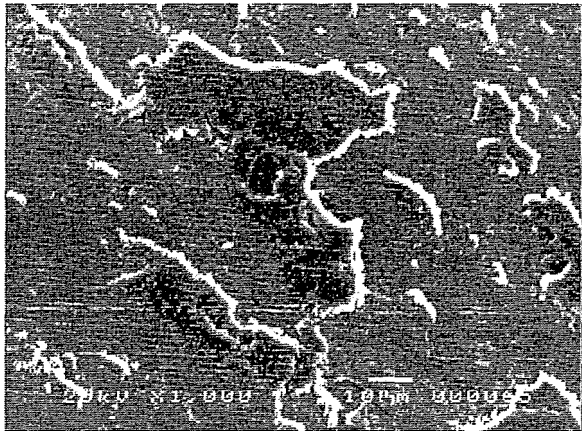
50 倍



500 倍

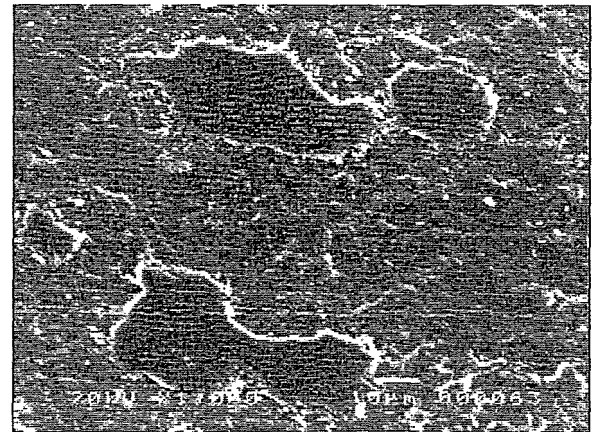


500 倍



1000 倍

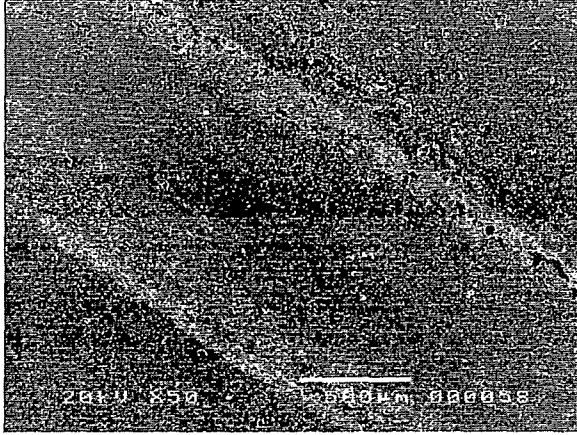
• SUJ2 (8.7%) No.1



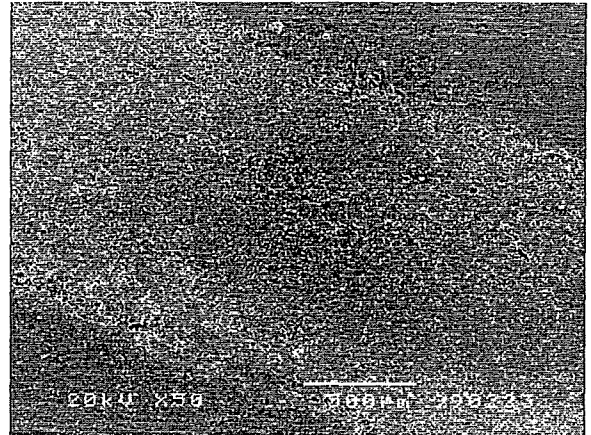
1000 倍

• SUJ2 (8.7%) No.2

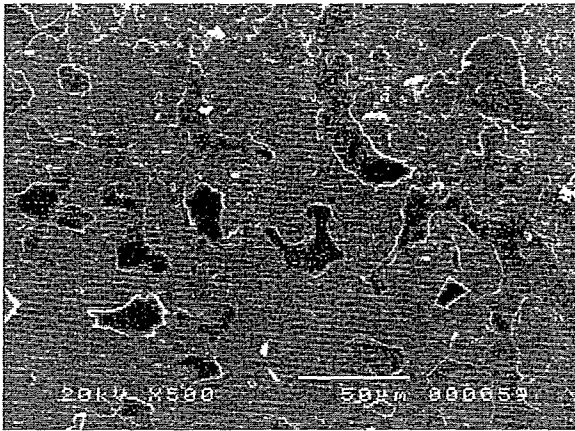
图 4.9 摩耗痕 SEM 写真 (4)



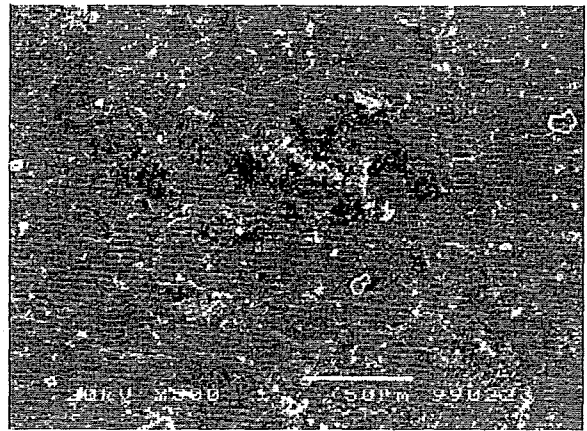
50倍



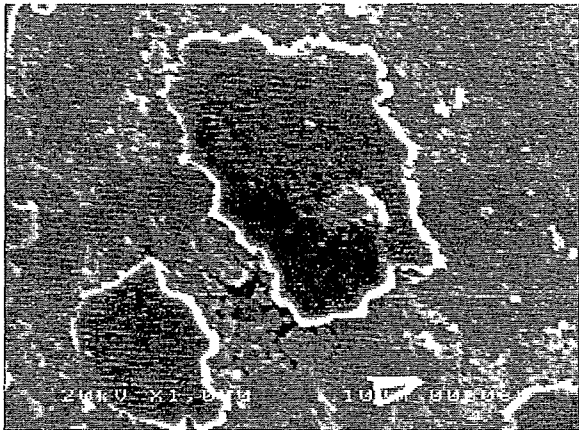
50倍



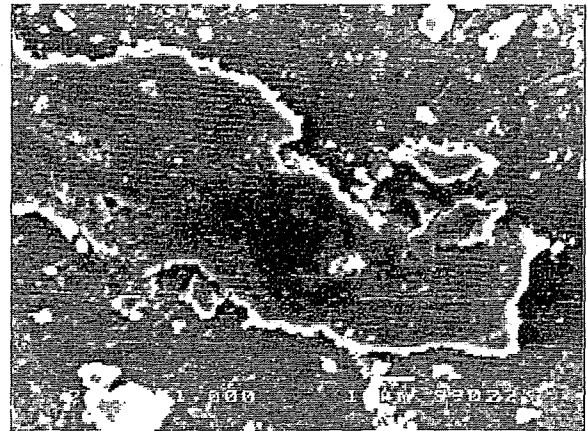
500倍



500倍



1000倍

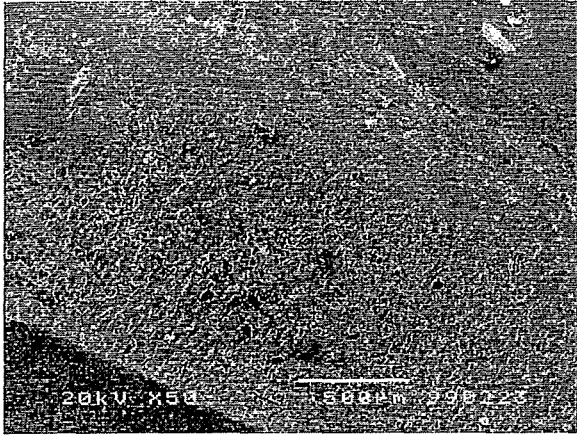


1000倍

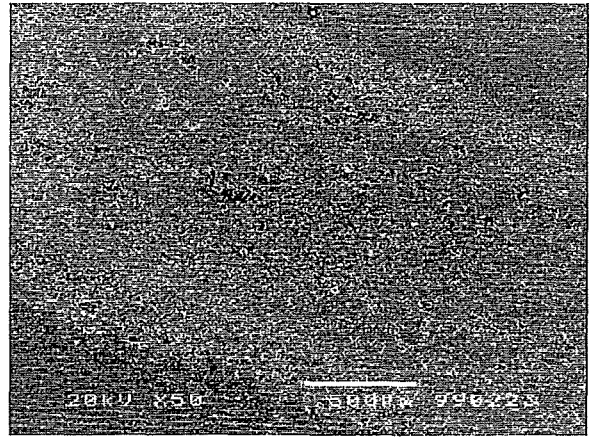
・SUJ2 (8.7%) No.3

・SUJ2 (24.0%) No.1

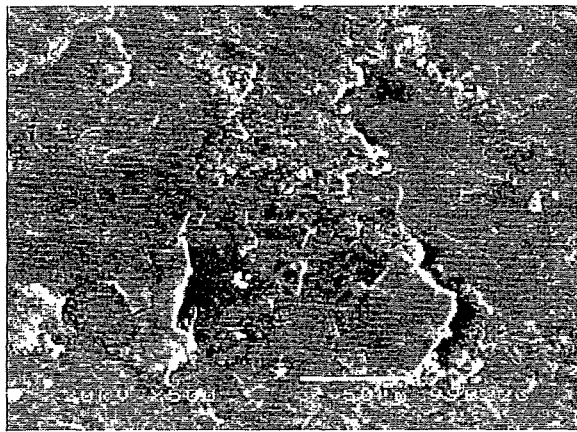
図 4.10 摩耗痕 SEM 写真 (5)



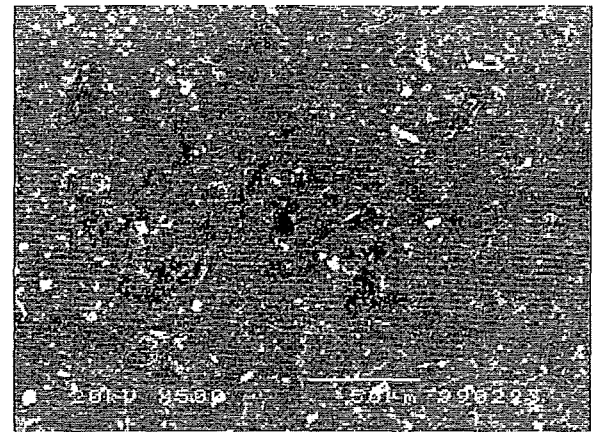
50 倍



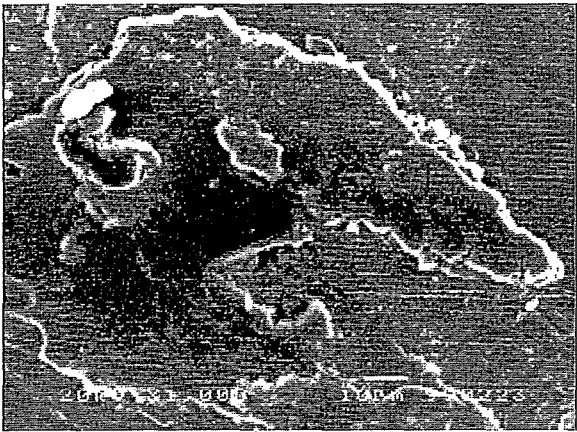
50 倍



500 倍

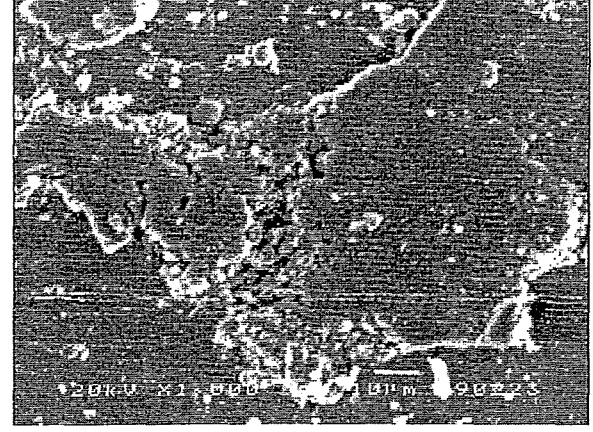


500 倍



1000 倍

• SUJ2 (24.0%) No.2



1000 倍

• SUJ2 (24.0%) No.3

图 4.11 摩耗痕 SEM 写真 (6)

4.2 電位差の変化

下部試験片 S45C を用いてすべり率 16.7% のときの実際に測定された電位差，そのときの位相差，誘導起電力成分を取り除いて補正した電位差を図 4.12 に示す．各繰り返し数において位相差はあまり一定の値を示さず，ばらつきが見られた．これは実験にまだ馴れておらず，配線の位置を一定にできなかったためだと思われる．また，補正後の電位差は補正前に比べ，ばらつきが減少し，傾向がよりはっきり現れるグラフとなった．それぞれの電位差には多少のばらつきが見られるが， 10^5 回までの電位差は 0.98～0.92 ぐらいまで徐々に減少し，その後 1.0 以上の値まで増加する傾向となった．

下部試験片 SUJ2 を用いて同じくすべり率 16.7% のときの補正前の電位差，そのときの位相差，補正後の電位差を図 4.13 に示す．位相差，補正後の電位差とも S45C のときと同じような傾向となったが，No.3 のみ電位差は初期の減少傾向は見られず，摩耗量との相関関係も見られなかった．

下部試験片を用いて，すべり率 8.7% の場合を図 4.14 に，24.0% の場合を図 4.15 に同様に示す．図より両方とも位相差の変化はだいたい一定の値となり，また，8.7% においては補正後の電位差は減少傾向を，24.0% では 1.05～1.1 の値まで増加傾向を示した．

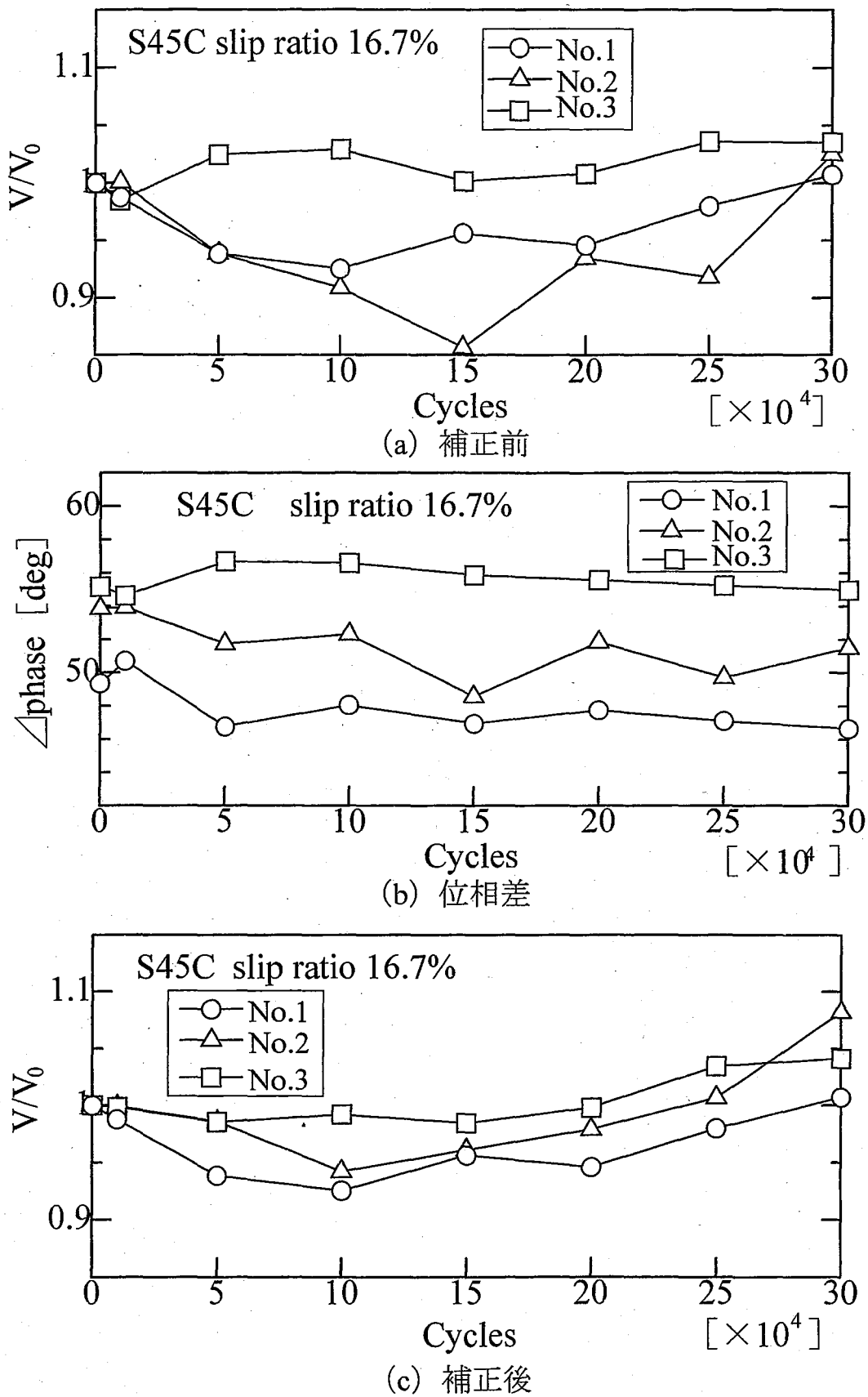


図4.12 下部試験片S45C (すべり率16.7%)

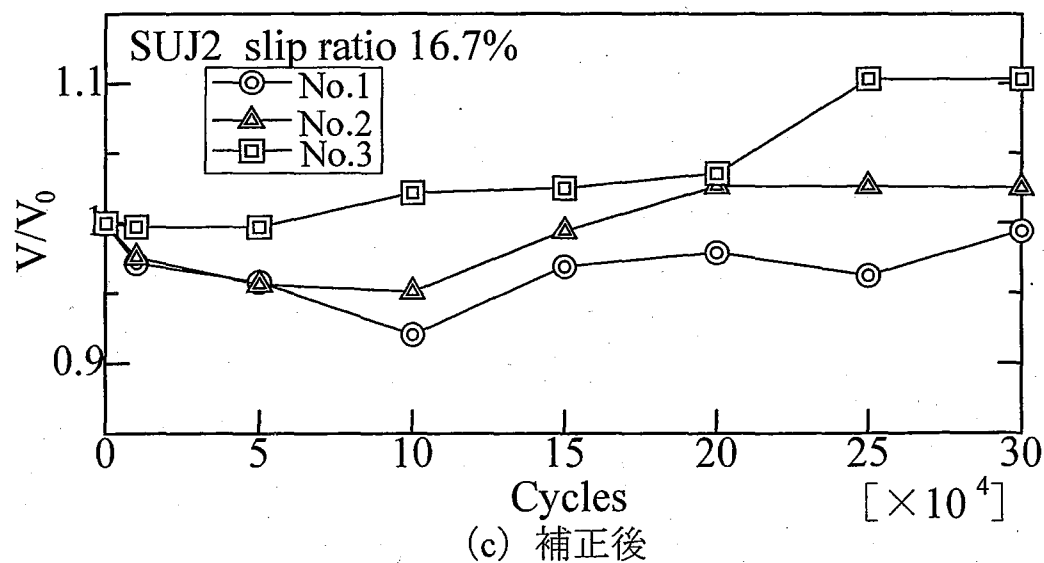
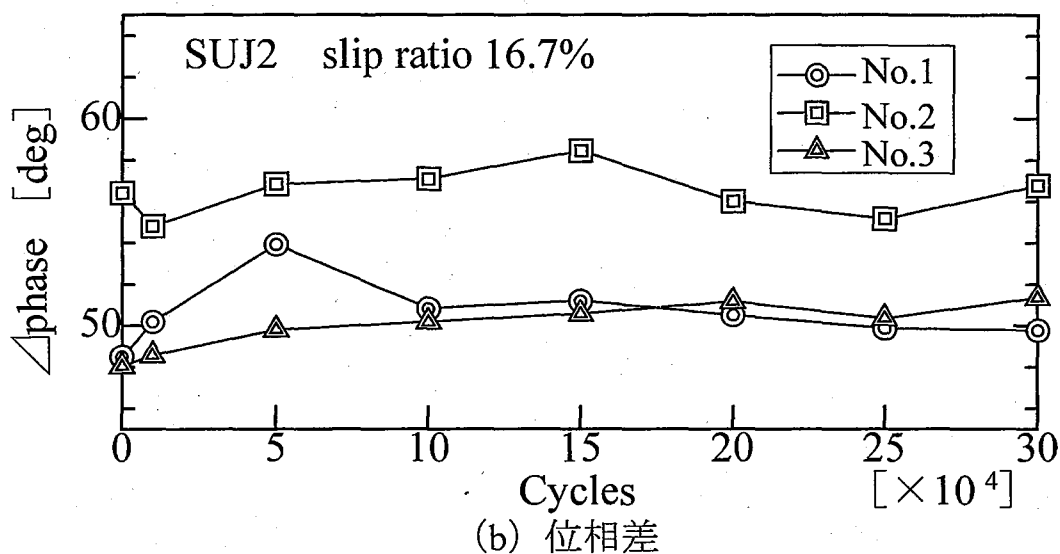
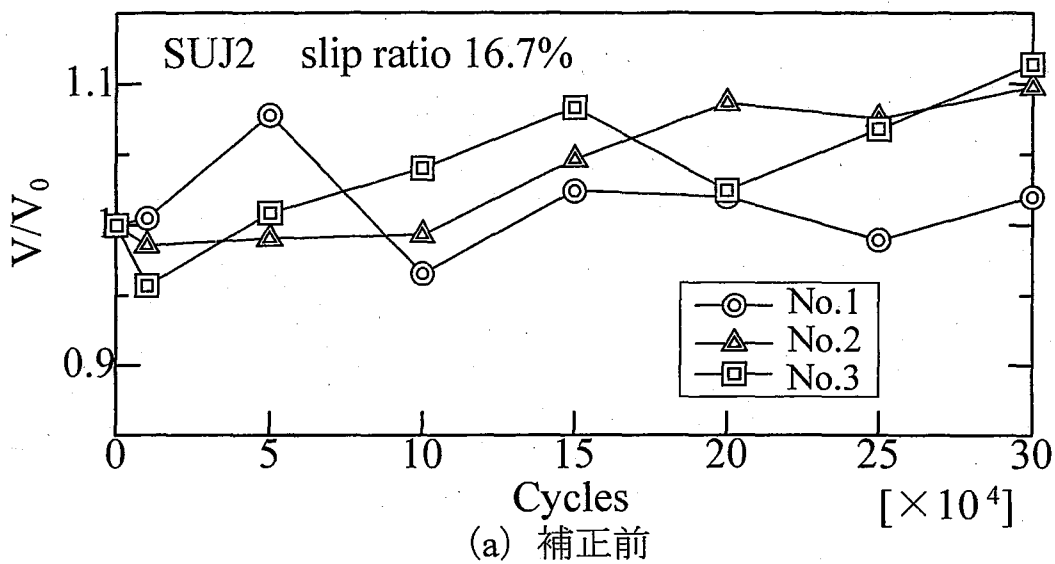
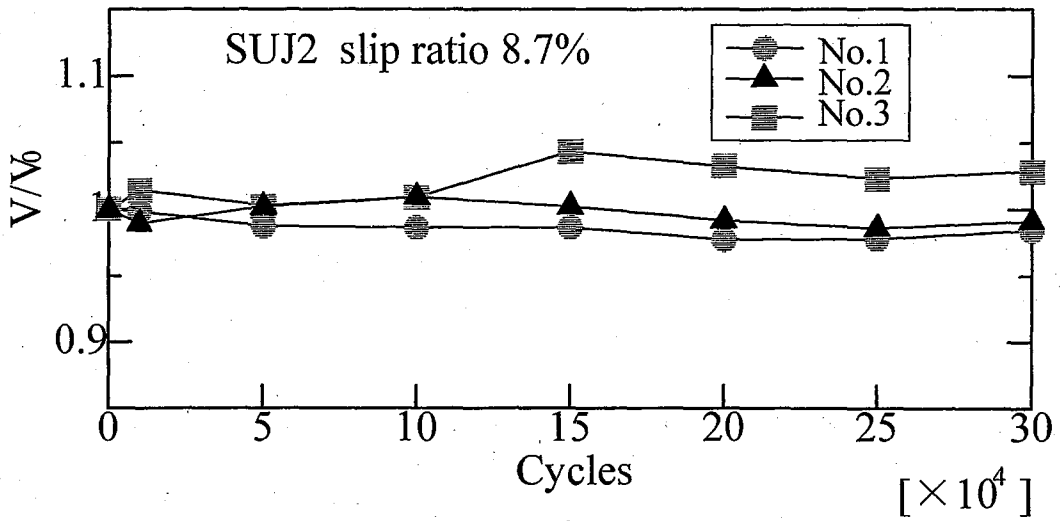
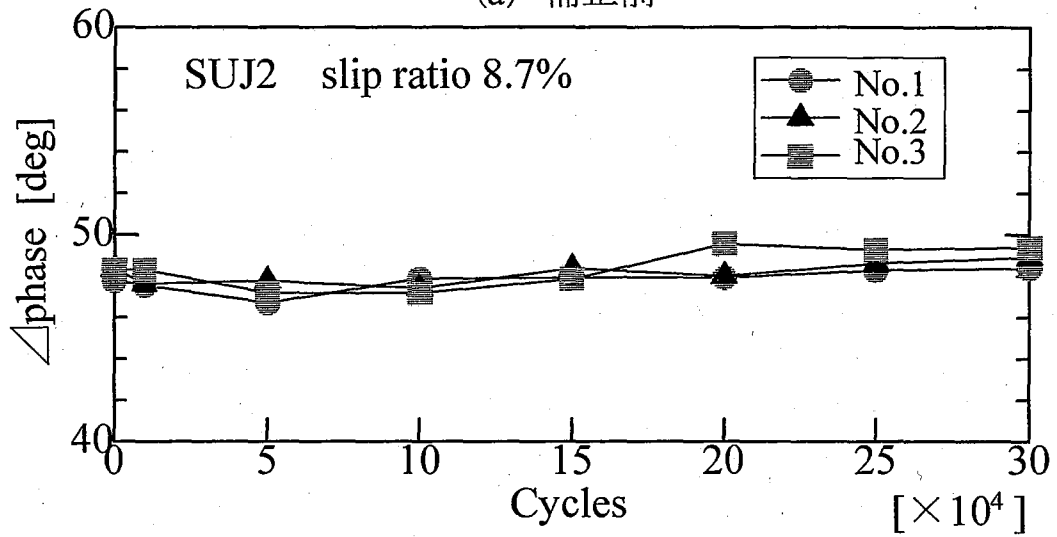


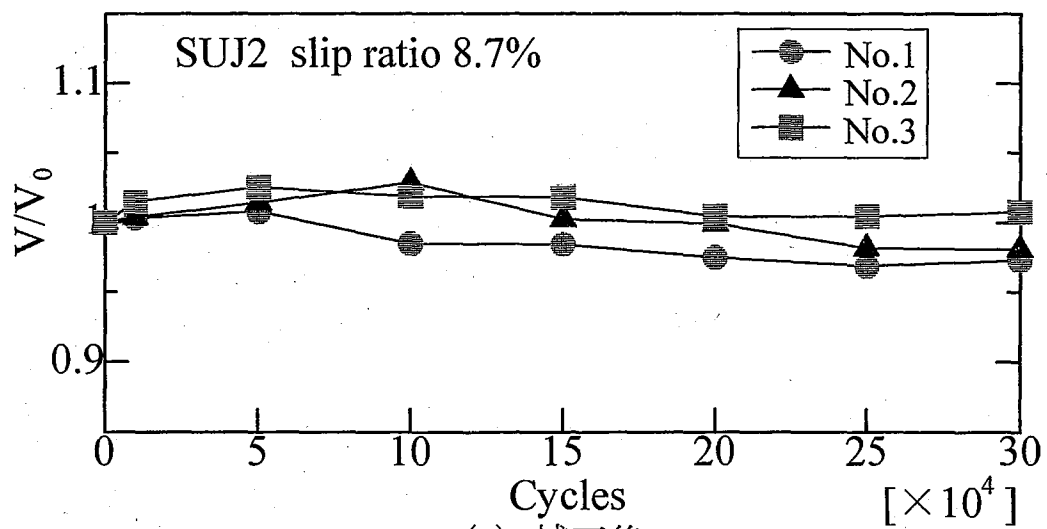
図4.13 下部試験片SUJ2 (すべり率16.7%)



(a) 補正前



(b) 位相差



(c) 補正後

図4.14 下部試験片SUJ2 (すべり率8.7%)

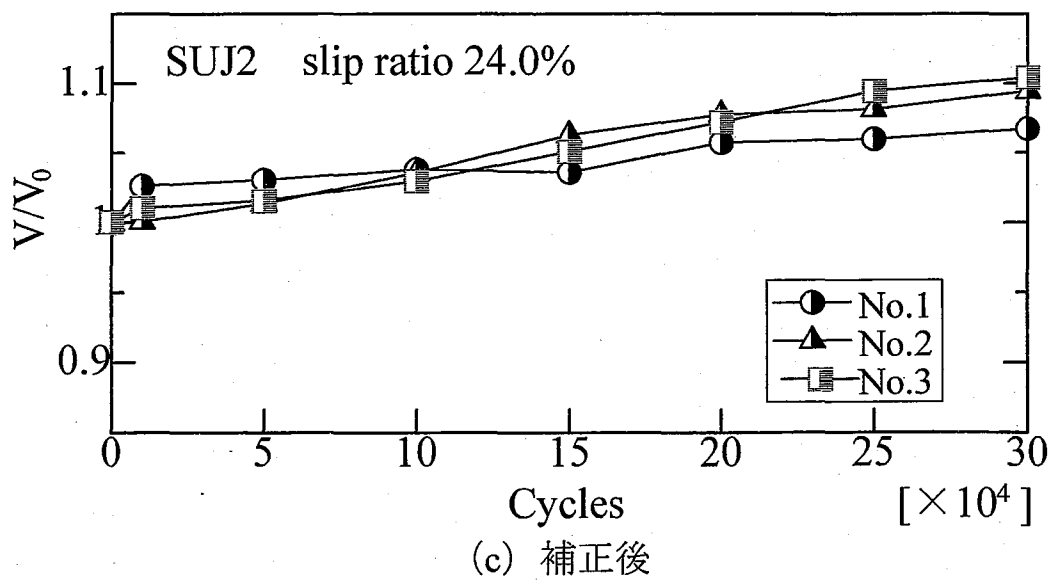
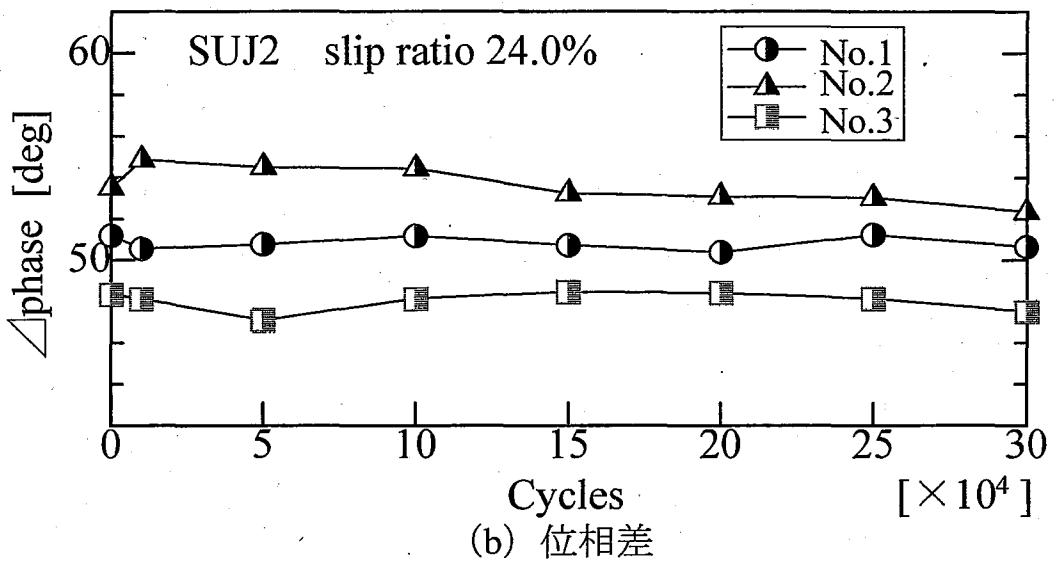
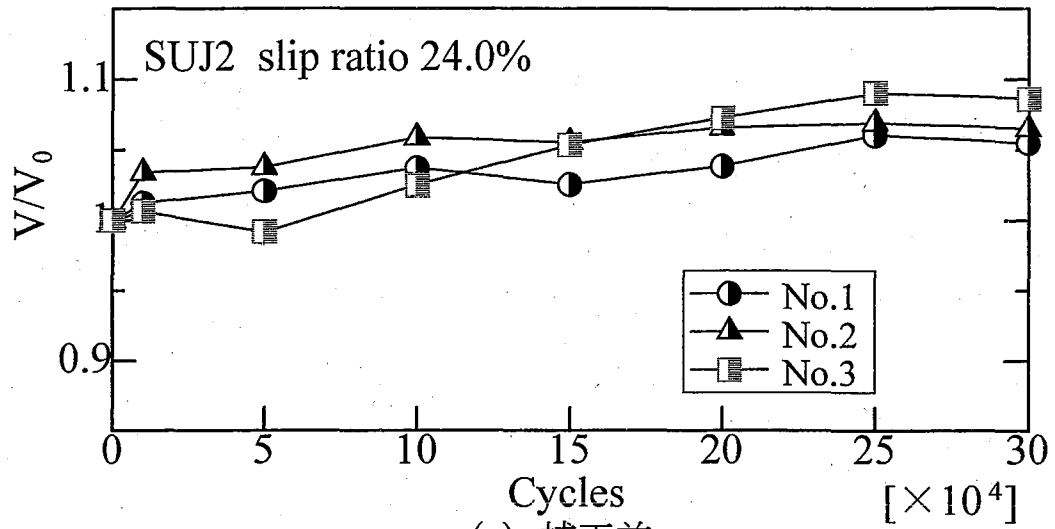


図4.15 下部試験片SUJ2 (すべり率24.0%)

第5章 考察

図5.1は下部試験片SUJ2を用いたときの各すべり率での補正後の平均電位差を示す。すべり率8.7%では、 5×10^4 回までに1.01までわずかに増加し、その後0.98まで徐々に減少し、16.7%では 10^5 回までに0.96まで減少、その後1.04まで増加、24.0%では電位差は減少せずに1.09まで一定の傾きで増加した。

ここで交流電流は、(2.1)式で与えられる表皮厚さ δ の中を流れるが、庄子ら⁶⁾は、転がり摩耗の初期においては表面の疲労ダメージの蓄積によって電気抵抗率 σ が減少、又は比透磁率 μ_r が増加すると述べている。これを考慮して図5.2に疲労ダメージと摩耗痕形状の電位差への影響として模式的に示す。

(a)のすべり率16.7%においては、一点鎖線で示す疲労ダメージのみの影響として初期に電位差は減少し、ある程度の繰り返し数まで摩耗が進むと疲労ダメージは飽和し電位差への影響は一定となる。点線で示す摩耗痕形状は摩耗が進むにつれて大きくなり、電位差は増加を続ける。この二つの要素の合計として図の実線にあるような形で電位差が変化したと考えられる。

(b)のすべり率8.7%においては、電位差は減少し続ける。摩耗量は小さく、摩耗痕形状の電位差への影響は微小な傾きの増加なので、電位差は一点鎖線に引っ張られる形で減少したと考えられる。

(c)のすべり率24.0%においては、疲労ダメージは早い段階で飽和し、また摩耗量も多く、摩耗痕形状も急な傾きで増加し続けるので、電位差は常に8.7%のときとは逆に点線に引っ張られる形で増加傾向を示したと考えられる。

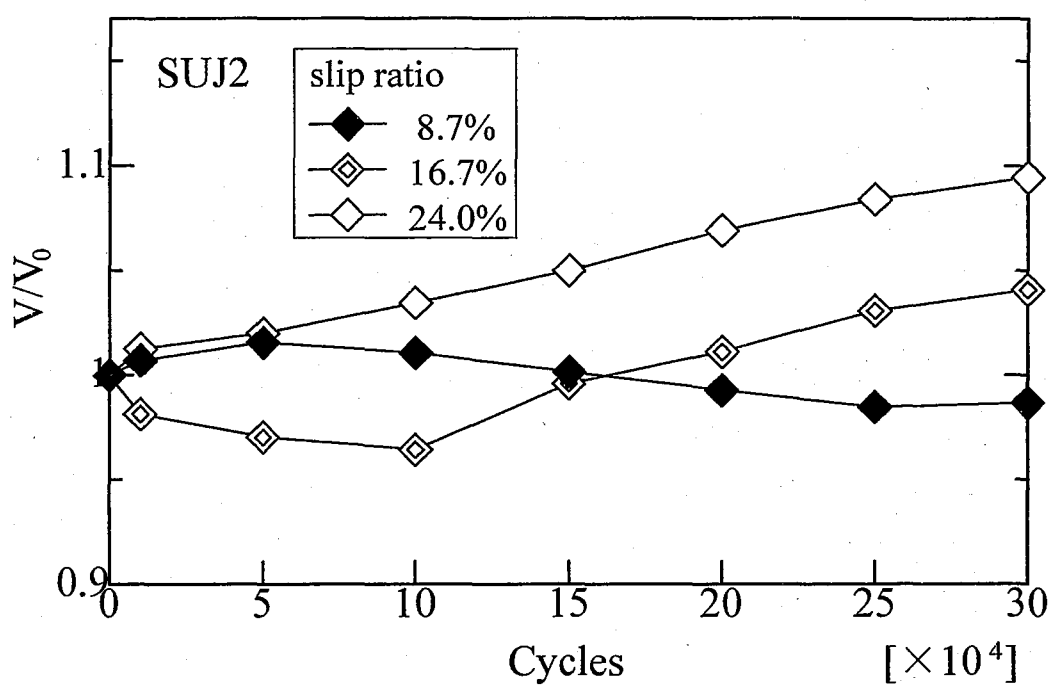
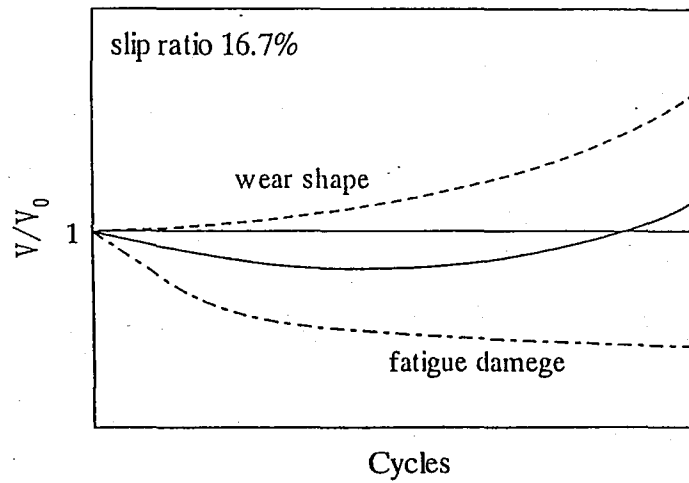
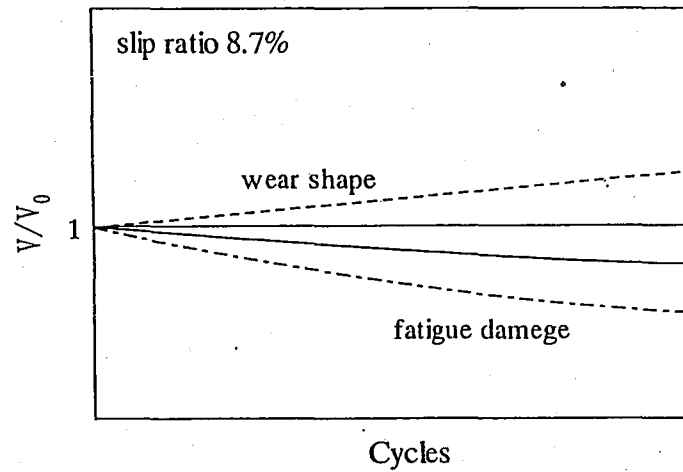


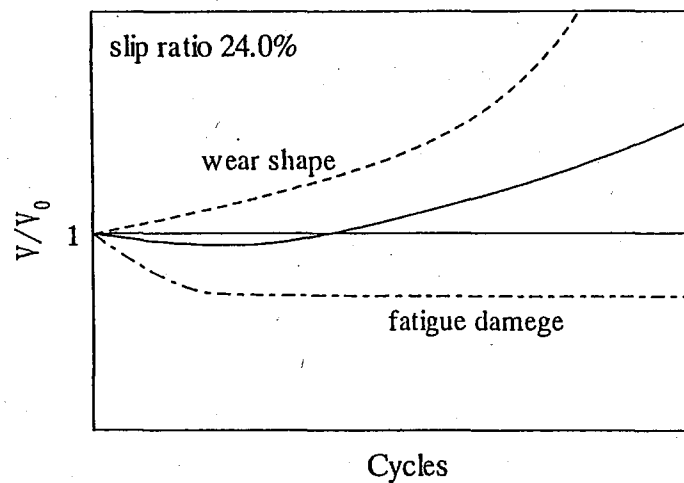
図5.1 各すべり率における電位差(SUJ2)



(a) すべり率16.7%



(b) すべり率8.7%



(c) すべり率24.0%

図5.2 疲労ダメージと磨耗痕形状の電位差への影響

第6章 結言

本研究では、往復動転がり摩耗による損傷を交流電位差法を用いて評価を試みた結果、以下のことが分かった。

- 1) 固定抵抗の印加電流と下部試験片の検出電位差の位相差を用いて誘導起電力を取り除いて補正することにより、補正前の電位差に比べ、ばらつきの少ない結果が得られた。
- 2) 同じすべり率 16.7%で下部試験片に S45C を用いた場合と SUJ2 を用いた場合では、補正後の電位差はほぼ同様な傾向を示した。
- 3) 下部試験片 SUJ2 を用いてすべり率を変えた実験では、繰り返し数に対する補正後の電位差の変化する様子はすべり率によって変化した。

参考文献

- 1) 上野, フレッシング摩耗のモニタリングシステムの開発, 日本機械学会全国大会
講演論文集 No.96-15, 1996, 119-120
- 2) 菅川, 交流電位差法による表面損傷の評価に関する研究, 岩手大学大学院工学研究
科修士論文, 1997
- 3) 上野, 交流電位差法を用いた表面損傷の検出に関する研究, 岩手大学大学院工学研
究科修士論文, 1998
- 4) Sanjay Tikku, Norman J. Marchand, Bhikhu Unvala, An advanced multiple
frequency ACPD system for crack detection and calibration, ASTM, 1997
- 5) T Kayaba, S Suzuki, An investigation of surface damage by rolling contact,
Technology Report Tohoku Univ., Vol.41, No.1, 1976
- 6) 庄子, 集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の計測, 日本機械学会東北支部 第 32
期総会・講演会論文集 No.971-1, 1997, 41-42