

# 交流電位差法による摩耗の推定

## Estimation of Wear Using the ACPD Method

○清水 友治\*, 岩渕 明\*, 松本 行朗\*

○Tomoharu Shimizu, Akira Iwabuchi, Koro Matsumoto

\*岩手大学

\*Iwate University

キーワード：電位差法(potential drop method), メンテナンストライボロジー(maintenance tribology), 非破壊検査(nondestructive inspection), カルマンフィルタ(Kalman filter)

連絡先：〒020-8551 盛岡市上田四丁目3-5 岩手大学 工学部 機械工学科 機械材料及び機械加工学研究室  
清水友治, Tel : (019)621-6416, Fax : (019)621-6417, E-mail : tshimizu@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 生産システムやプラントは, ますます大型化・複雑化している. このような機械システムにおいて, 故障の原因の多くは摩耗などのトライボロジー的要因であるといわれている. そこで, 機器の保全を目的として, メンテナンストライボロジー技術の研究開発が盛んになってきている。

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.

### 2. 実験装置

本研究で使用した実験システムの構成を図1に示す. 本システムは往復動の転がり摩耗試験装置と電位差の測定のためのファンクションジェネレータ, 電流アンプ, DCアンプ, 高速エネレータ, 電流アンプ, DCアンプ, 高速

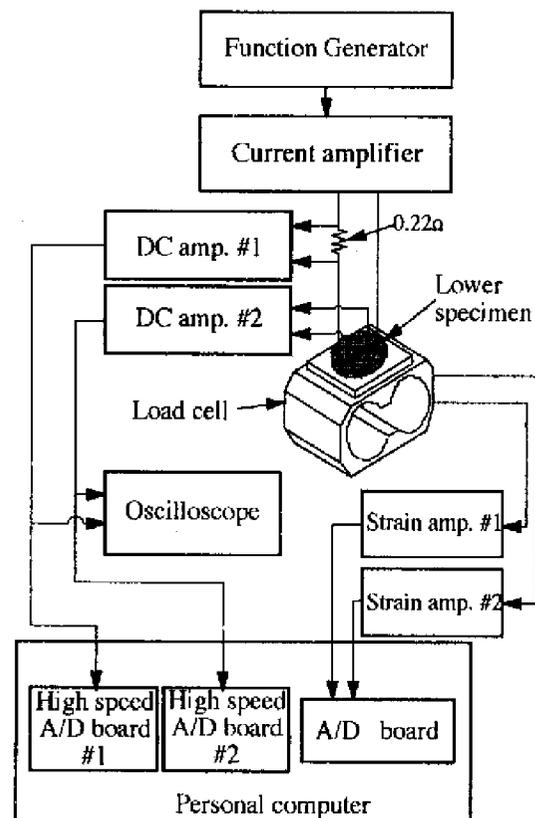


図1 実験システムの概要

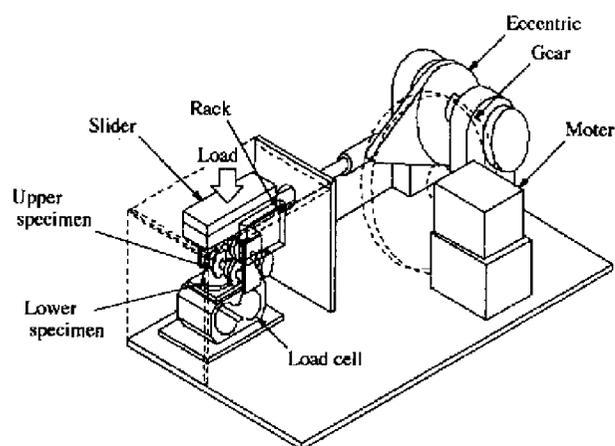


図2 転がり摩耗試験器

A/Dボード，そしてパーソナルコンピュータ等から構成される。ファンクションジェネレータから出力された交流電圧は電流アンプで電流に変換され，試験片に印加される。試験片からの電位差はDCアンプにより増幅され，オシロスコープおよび高速A/Dボードに入力される。高速A/Dボードは2チャンネル分用意され，電位差と同時に試験片に印加される電流を測定することができる。この印加電流は電流ループの途中にある $0.22\Omega$ の抵抗の両端の電圧をDCアンプを通して測定される。

転がり摩耗試験装置の概略を図2に示す。転がり摩耗試験装置では，モータの回転を偏心機構により振幅20mmの往復運動に変換する。回転数は，10～1000rpmまで任意に変化させることが可能である。試験片取付け部は，ラックとピニオン機構により往復運動をしながら試験片に回転運動を与えることができ，適当な滑り率を設定できる。

また転がり摩耗試験には図3のような形状の試験片を用いた。材質は上部試験片は軸受鋼SUJ2，下部試験片は中炭素鋼S45CとSUJ2である。試験片には焼き入れ処理を行い，ピッカース硬さは上部試験片SUJ2では $840\pm 15\text{HV}$ ，下部試験片SUJ2では $794\pm 5\text{HV}$ ，下部試験片S45Cでは， $597\pm 56\text{HV}$ である。

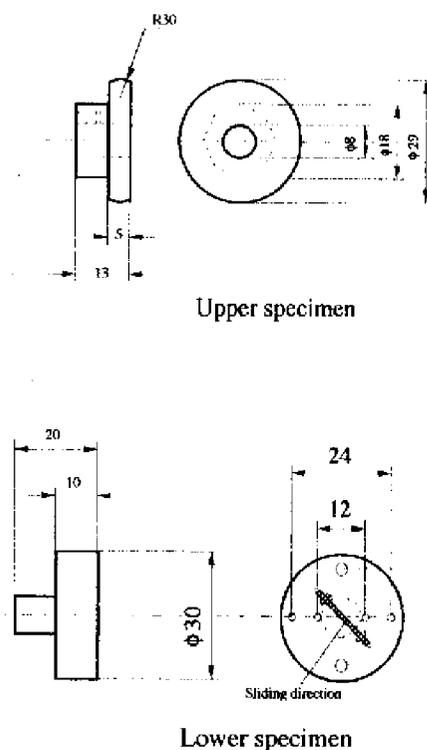


図3 転がり摩耗試験片

### 3. 実験方法

実験は無潤滑下で行い，押込み荷重は80Nとした。この荷重における最大ヘルツ圧力は $1.168\text{GPa}$ ，接触楕円長半径（転がり方向）は $0.326\text{mm}$ ，短半径（軸方向）は $0.100\text{mm}$ である。往復動は全振幅20mm，回転数は1000rpmで最大繰返し数は30万サイクルとした。また，歯数比21/23の歯車で上部試験片に回転を与えることにより，滑り率は8.7%となる。実験中の雰囲気は温度 $20\pm 1^\circ\text{C}$ ，湿度 $30\pm 5\%$ である。

下部試験片には上部試験片の転がり摩擦による直線状に摩耗痕が生じる。この摩耗痕に対し $45^\circ$ の角度に電流印加端子および電位差測定端子を配置した。これらの端子は直径0.5mmの銅線を試験片にあけた穴に埋込みステンレス用のハンダ付けにより取付けた。所定の繰返し数で往復動を停止し，試験片の電位差および印加電流の波形を測定した。

### 4. 交流電位差法の原理

直流電流は導体内を均一に流れるのに対し，周波数の高い交流電流は導体の表面付近を流れ

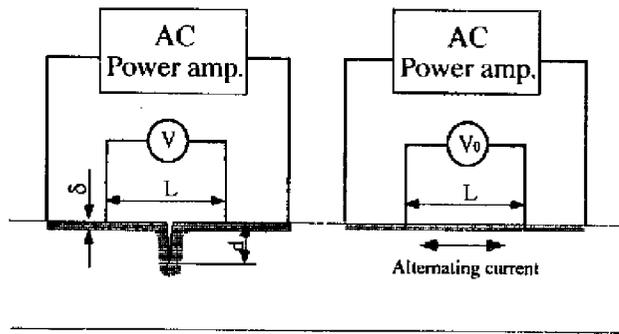


図4 交流電位差法の原理

る。これを電流の表皮効果といい、表皮厚さ $\delta$ は(1)式で表される。

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は被検査物の抵抗率、 $\mu_0$ は真空の透磁率、 $\mu_r$ は被検査物の比透磁率、 $f$ は印加電流の周波数である。

交流電位差法の原理を図4に示す。交流電流が表皮内を流れると、検査物表面には電位差が発生する。表皮厚さが被検査物のき裂深さより十分小さいとき、流れる電流の経路差より、き裂深さ $d$ は以下で表される。

$$d = \frac{L}{2} \left( \frac{V}{V_0} - 1 \right) \quad (2)$$

ここで、 $V$ はき裂があるときの電位差、 $V_0$ はき裂がないときの電位差、 $L$ は測定端子間の長さである。

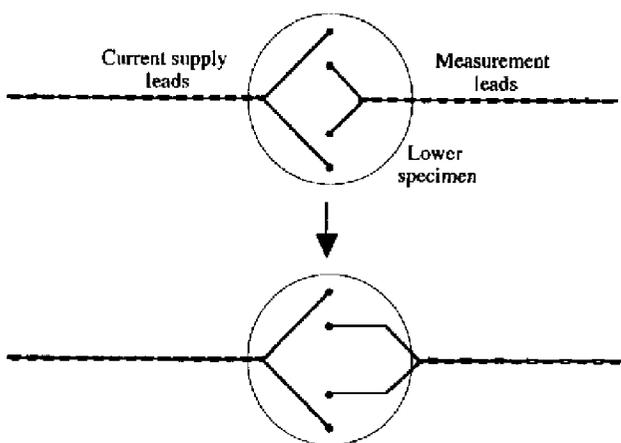


図5 位相補償試験

## 5. 誘導起電力成分の補償方法

### 5.1 補償実験

誘導起電力の影響を補償するための予備実験を行った。実験は、図5のように転がり摩耗実験前の下部試験片に接続した測定端子の閉回路面積を段階的に大きくすることで交流誘導起電力を意図的に大きくし、そのときの位相差を検出した。位相差は高速A/Dボードにより測定された電流と電位差のそれぞれの波形をパーソナルコンピュータにより解析することで求めた。また、同じ信号をDCアンプ1とDCアンプ2同時に測定することで、DCアンプ同士の位相差も検出し補正した。

### 5.2 補償方法の原理

印加電流と測定電圧の位相差の測定による誘導起電力の補償の原理を図6に示す。交流電流の流れる表面に発生する交流電位差は電流に対し $45^\circ$ 位相が進むことが知られている<sup>2)</sup>。しかし、実測される交流電位差は $90^\circ$ 位相が進んだ誘導起電力成分を含み、真の交流電位差より大きな値をとることになる。これが交流電位差法における測定誤差の大きな要因となっている。そこで、印加される交流電流と測定される交流電位差の位相差を検出できれば電流に対する $45^\circ$ の位相進みを持つ真の交流電位差を推定することができる。

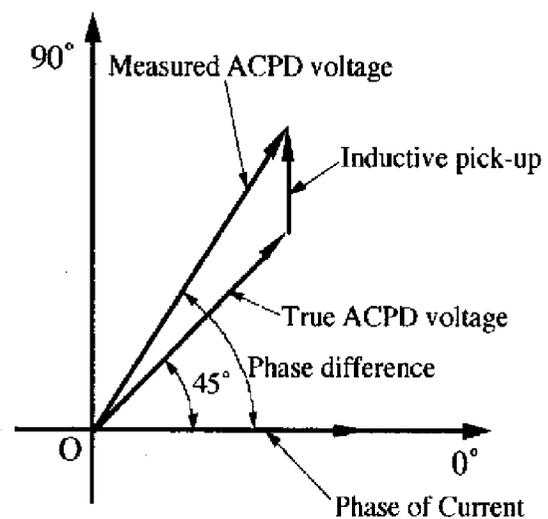


図6 誘導起電力の補償法の原理

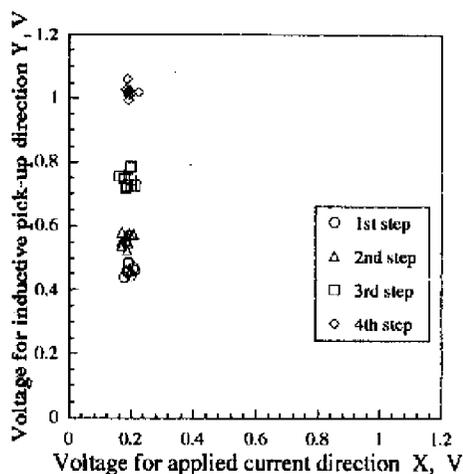


図7 印加電流と誘導起電力の関係

表1 誘導起電力の補償実験の結果  
(gain:1000)

Trial step	Measurement potential drop, mV	Phase difference, deg.	Estimated potential drop, mV	Standard deviation, mV
1	502.71	67.53	271.39	5.193
2	587.82	70.81	273.26	12.184
3	777.26	75.44	276.02	6.630
4	1031.49	79.18	273.79	4.757

### 5.3 位相差の検出方法

印加電流および測定される電位差は正弦波であるので次式で表されるものとする。

$$y = \theta_1 \sin(\theta_2 t - \theta_3) + \theta_4 \quad (3)$$

ここで、 $y$ は測定されたデータ、 $t$ は時間である。印加電流および電位差の(3)式におけるパラメータ $\theta_3$ のみを求めれば位相差を検出することができる。ここでは、測定時のノイズを考慮し、拡張カルマンフィルタ<sup>9)</sup>のアルゴリズムを用いて式(3)の全てのパラメータを求めた。

5.4 補償実験結果 印加電流の周波数10kHzにおける補償実験の測定結果をプロットしたものを図7に、また、その平均および標準偏差をまとめたものを表1に示す。これは測定用リード線の配置を4段階変え、そのときのDCアンプからの出力を各段階5回測定し、交流電位差と位相差を求めたものである。測定用リード線の配置を変えることによって交流電位差が2倍以上に増加したが、位相差により補正をすると、交流電位差の変動は2%以下となった。

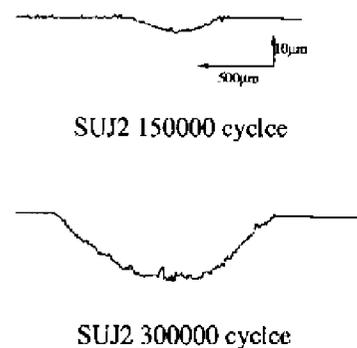


図8 摩耗痕の断面形状

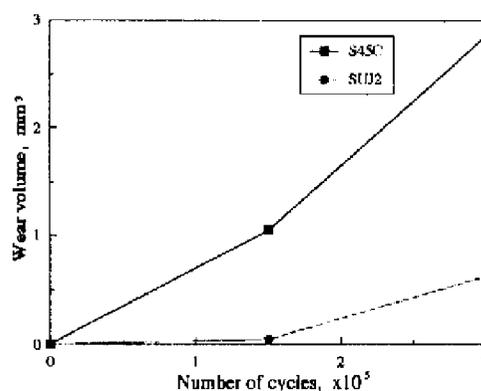


図9 摩耗量の変化

## 6. 結果および考察

図8に摩耗痕の断面トレースを示す。今回の転がり摩耗試験では、あまり大きな摩耗粉の生成がみられず、ミクロンオーダーの小さな表面のき裂しかみられなかった。これは、今回の実験では、滑り形態を往復動としたためと思われる。

図9にS45CおよびSUJ2における繰返し数と摩耗体積の関係を示す。繰返し数15万サイクルでS45Cでは0.96, SUJ2では0.05mm<sup>3</sup>, 30万サイクルでS45Cでは2.9, SUJ2では0.63mm<sup>3</sup>となった。S45Cでは繰返し数にほぼ比例して摩耗体積が増加するのに対し、SUJ2では繰返し数の後半の摩耗が多いことが分る。

図10に測定された印加電流(電圧値として表示)と交流電位差の例を示す。この交流電位差はDCアンプのゲインを1000倍にして測定されたものである。比較的大きなノイズがのっ

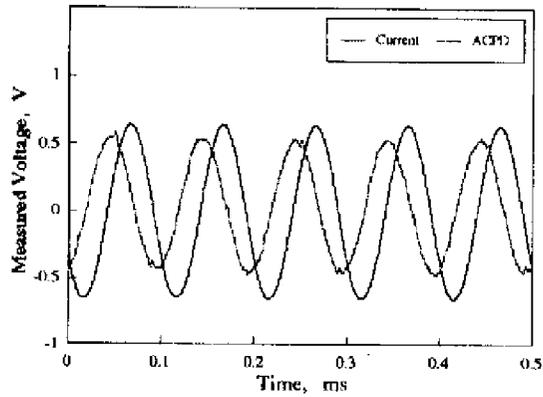


図10 測定された印加電流と電位差

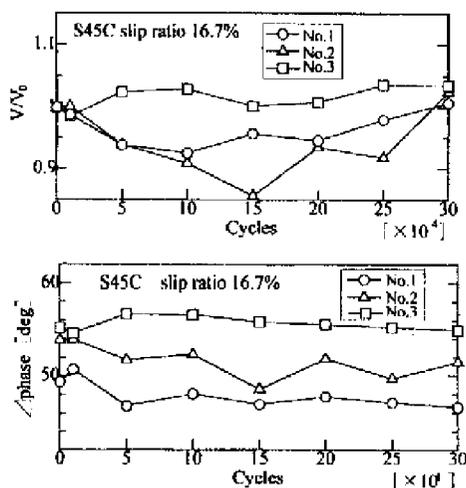


図11 測定された電位差の変化と位相差 (S45C)

ることがわかる。

図11および図12にそれぞれS45CとSUJ2の繰返し数に対する測定された電位差の変化を示す。電位差は転がり摩耗試験直前に測定した電位差 $V_0$ で除した値で整理した。

図13および図14に位相差により補正した電位差の変化を示す。これらの結果より、電位差は、はじめ、減少傾向を示し、その後、繰返し数の増加に伴い電位差が増加していることが分る。このはじめの減少傾向は転がり摩擦により表面付近の材質が変化したためと考えられる。また、その後の増加傾向は摩耗の進行により表面形状の変化によるものと考えられる。

## 7. おわりに

交流電位差法において交流誘導起電力によっ

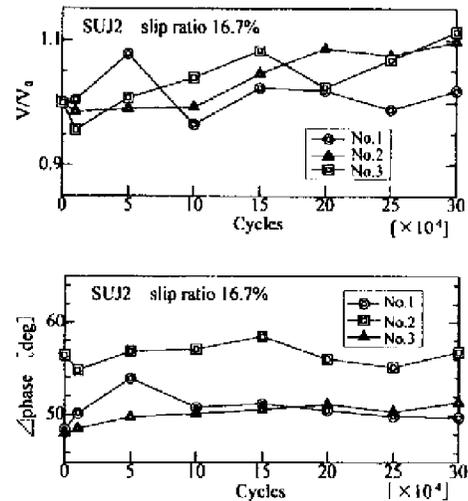


図12 測定された電位差の変化と位相差 (SUJ2)

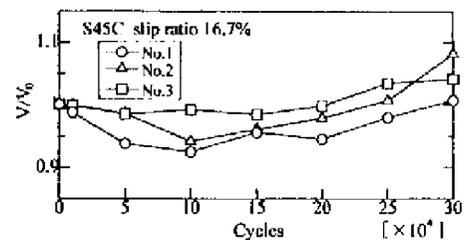


図13 補正後の電位差の変化(S45C)

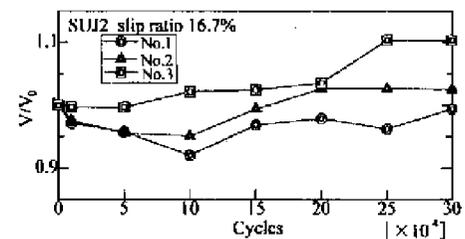


図14 補正後の電位差の変化(SUJ2)

て生じる測定誤差を補償するシステムを試作した。本交流電位差法システムにより、転がり摩耗による表面損傷の評価を行った。

## 参考文献

- 1) 木村：トライボロジスト, 39-7, 553/558 (1994)
- 2) T. V. Venkatasubramanian : J. Phys, E: Sci. Instrum., 177, 65/771 (1984)
- 3) 片山：応用カルマンフィルタ, 87/89 (1983)