回転ローラ間に生ずる接触圧力測定への 微小突起を有する電着銅薄膜の適用*

小 野 勇 一^{*1}, 北 岡 征 一 郎^{*1}
長 谷 川 達 也^{*2}, 松 嶋 剛 志^{*3}

An Application of Electrodeposited Copper Foil with Micro Projections to the Measurement of Pressure between Two Rollers in Contact

Yuichi ONO^{*4}, Seiichiro KITAOKA,
Tatsuya HASEGAWA and Takeshi MATSUSHIMA

^{*4} Department of Mechanical Engineering, Tottori University,
4-101 Koyama-cho Minami, Tottori-shi, Tottori, 680-8552 Japan

An electrodeposited copper foil that possesses conical projections regularly is applied to measure the pressure between two rollers in contact. Before measuring the pressure, the effects of number of cycles and frequency of the pressure on the ratio of real contact surface area to bottom area of the projections are investigated using servohydraulic testing machine. The cyclic softening of the copper foil is gradually recognized after 10^3 cycles and its frequency dependence is also recognized in the pulsating compression test. Namely, if the number of cycles is the same, the increase of the frequency delays the progress of cyclic softening. However, if the number of cycles is 10^2 cycles in which the cyclic softening hardly proceeds, the ratio of real contact surface area to bottom area of the projections doesn't depend on the frequency, and the ratio is almost same value in the static test. The pressure between two rollers is measured at 10^2 cycles. The mean pressure over the width direction of the roller obtained by this method is in good agreement with theoretical values obtained by load cell.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Contact Problem, Fatigue, Plasticity

1. 結 言

機械要素間の接触面に生ずる圧力を実験的に測定するためには、感圧フィルム法、圧電セラミックスを用いた方法⁽¹⁾、および光弾性法などがある。しかしながら、感圧フィルム法では、測定は簡便であるが、機械要素間にしばしば生ずる高い圧力の計測ができない。また、圧電セラミックスを用いた方法では、高压の測定は可能であるが、センサ部が複雑で大きくなるとともに、機械要素の疲労の原因となる局所的な圧力を計測するには十分とはいえない。このように、実験的圧力測定法には一長一短があり、また繰返し圧力を計測できる測定法も少ない。そこで、これらの測定原理とは異なる微小突起を有する電着銅薄膜を用いた圧力測定法⁽²⁾⁽³⁾が提案されている。この測定法は、固体接触面の微小領域に生ずる静圧や繰返し圧力の測定を目的とした計測法である。すなわち、電着により作製し

た多数の微小な突起を有する銅薄膜を固体接触面に挿入し、突起部先端が静圧や繰返し圧力の作用により塑性変形し、固体と突起との真実接触面積がこれらの圧力に依存する点に着目した方法である。したがって、予め較正試験により、圧力と真実接触面との関係を求めておけば、機械要素間に生ずる圧力の測定が可能となる。また、薄膜に銅よりもさらに硬さの大きい金属薄膜を用いれば、高压測定の可能性も期待できる。

ところで、機械要素などに用いられる回転するローラでは、その接触面に周期的に局所的な圧力が生じ、高压力になる場合も少なくない。したがって、このような圧力を実測することは、ローラの磨耗や疲労を検討するうえでも重要な課題といえる。

以上の観点から本報告では、微小突起を有する電着銅薄膜を用いて回転するローラ間に生ずる圧力測定の可能性を検討した。すなわち、まず油圧制御式疲労試験機を用いて、微小突起を有する電着銅薄膜の繰返し圧縮試験を種々の圧力振幅と周波数のもとで実施し、静圧試験により得られた結果と比較した。次いで、この結果に基づいて、自作したローラ試験機の接触面に生ずる繰返し圧力を計測し、得られた結果を接触問題の弾性解と比較し、本測定法の妥当性を検討した。

* 原稿受付 2006 年 6 月 29 日。

^{*1} 正員、鳥取大学工学部(☎ 680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)。

^{*2} 正員、中日本自動車短期大学(☎ 505-0077 岐阜県加茂郡坂祝町深室 1301)。

^{*3} 学生員、鳥取大学大学院工学研究科。

E-mail: ono@mech.tottori-u.ac.jp

2. 実験方法

2・1 微小突起を有する電着銅薄膜の作製 図1に示すように、メタルプリンタを用いて、鏡面仕上げを施したステンレス板の70mm×70mmの領域に微小な円錐状の圧痕を規則的に作製した。圧痕の直径は約75 μ mであり、圧痕の間隔は約100 μ mである。このステンレス板をめっき基板とし、硫酸銅を主体とするめっき液⁽⁴⁾にて銅めっきを施した。めっき終了後、最終着着面にはステンレス板の圧痕に沿って凹部が残るため、これを耐水研磨紙にて除去して平滑面とした後、基板からめっき部を剥離し、微小突起を有する電着銅薄膜とした。図2には、作製した銅薄膜のレーザ顕微鏡写真を示す。突起部の高さは、約28 μ mであり、薄膜の厚さ（突起先端部から研磨面までの厚さ）は約65 μ mである。

2・2 静圧試験 図3に示す圧力負荷ジグをMTS材料試験機に装着し、上下型の凸部にこれと同一直径に切出した微小突起を有する電着銅薄膜を挟みこみ、種々の静圧 p_s を60s加えて試験を実施した。静圧負荷後、図4に示すように、光学顕微鏡に備え付けられたデジタルカメラにて突起の画像を取り込み、圧力負荷ジグとの真実接触面となる突起部先端の平坦部の面積（真実接触面積） A_r と突起の底面積 A を画像処理ソフトにより計測し、 A_r/A を求めた。ここで、 A_r/A は薄膜

Fig. 1 Stainless steel plate with micro indentations

Fig. 2 Electrodeposited copper foil with micro projections

の任意の8ヶ所に対して得られた画像における合計30個の突起について計測した。

2・3 繰返し圧力試験 幅 w の二円柱が接触した場合、接触面には図5に示すような圧力が分布する⁽⁵⁾。なお、図中の $2a$ は接触面の円周方向の幅である。ここで、円柱の外周における任意の一点に着目すれば、円柱が1回転することにより円柱同士の接触面で図5に示すような圧力が生ずるので、1回転毎に図6の実線

Fig. 3 Apparatus for static and dynamic calibration test

Fig. 4 Configuration of micro projections deformed by static pressure ($p_s=100\text{MPa}$)

Fig. 5 Contact pressure between two cylinders

Fig. 6 Pressure pattern of rolling cylinder

Table 1 Experimental condition of dynamic test

f [Hz]	1	10	100
N [cycle]	10		
	10^2	10^2	
	10^3	10^3	10^3
	10^4	10^4	10^4
		10^5	10^5
			10^6

で示すような分布の圧力が生ずることになる。ここで、 n はローラの回転数[rpm]である。これと同じ圧力波形をMTS材料試験機では再現できないため、図中に破線で示したような圧力振幅 p_d の正弦波形（周波数 f ）でこれを近似し、前節の静圧試験と同様の圧力負荷ジグを用いて、表1に示す種々の周波数 f と繰返し数 N において片振り圧縮試験を実施した。なお、最大圧力 p_{max} ($=2p_d$) は、50, 100, 150MPaとした。

2・4 ローラ試験 図7(a), (b)には、自作したローラ試験機を、図8にはローラの形状・寸法を示す。ACモータの回転が、ギア比1の平衡車を介して上下ローラに伝わる構造となっている。クロスヘッドに取り付けられた六角ボルトを緩めることにより、上ローラがガイドに沿って徐々に下降し、下ローラに接触する。さらに六角ボルトを緩めれば、下ローラにクロスヘッドの荷重が負荷される。ローラの接触面には精密研磨が施してあり、ローラの接触幅 w をそれぞれ2.5mm, 5.0mmとして試験を実施した。なお、ローラ

(a) Side view (b) Front view

Fig. 7 Roller testing machine

Fig. 8 Geometry and dimensions of test roller

の材質は SNCM439（ヤング率 $E=204\text{GPa}$ ，ポアソン比 $\nu=0.3$ ）である。おおよそ $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ に切出した微小突起を有する電着銅薄膜の両端を粘着テープでローラに固定し、ローラ間に生ずる圧力を上述の較正試験の結果から求めた。また、ロードセルにより、上下ローラ間に作用する荷重を計測し、接触問題の弾性解から得られる接触圧力を求め、その妥当性を検証した。

3. 実験結果および考察

3・1 静圧試験 図9には、静圧試験により得られた A_r/A と p_s との関係を示す。なお、突起の底面積 A は、突起先端の塑性変形量が小さいときはほとんど変化しないが、塑性変形量が大きくなると A も増加することが確認できた。図から、 p_s の増加とともに A_r/A も増加し、上に凸の曲線となることから、静圧の増加とともに加工硬化が進行する⁽²⁾。また、この薄膜では、最大で300MPa程度の静圧測定が可能となる。両者の関係を最小二乗法により2次近似し、次式とおく。

$$A_r/A = sp_s^2 + tp_s \quad (1)$$

ここで、 s, t は定数であり、それぞれ $s=-4.39 \times 10^{-6}$ 、 $t=3.48 \times 10^{-3}$ となる。

3・2 繰返し圧力試験 図10(a)~(c)には、それぞれの周波数 f において得られた A_r/A と繰返し数 N との関係を片対数紙により示す。図には、 $p_{max}=p_s$ として静圧試験の結果を直線（実線、破線）により表示した。図から、 $f=1\text{Hz}$ の場合、 N が 10^2 回以下では、 A_r/A は静圧試験の結果とほぼ一致する。また、 $f=10\text{Hz}, 100\text{Hz}$ の場合に関しても、実験値から推定して N が 10^2 回以下では、 A_r/A は静圧試験結果と一致するものと考えられる。しかしながら、 N が 10^2 回を超えると、 N の増加とともに A_r/A も増加し、冷間加工された銅に認められ

Fig. 9 Relationship between A_r/A and p_s

るような加工軟化⁽⁶⁾が進行していくことがわかる。

図 11(a)～(c)には、 $N=10^2, 10^3, 10^4$ における A_r/A と周波数 f との関係を片対数紙により示す。図には図 10

と同様に静圧試験結果を直線で表示した。図 11(a)より、加工軟化が顕著に進行しない $N=10^2$ 回における A_r/A は周波数に依存しないが、図 11(b), (c)のように軟化の

(a) $f=1\text{Hz}$

(b) $f=10\text{Hz}$

(c) $f=100\text{Hz}$

Fig. 10 Relationship between A_r/A and N

(a) $N=10^2$ cycle

(b) $N=10^3$ cycle

(c) $N=10^4$ cycle

Fig. 11 Relationship between A_r/A and f

進行とともに A_s/A の f 依存性が認められ、 f の増加とともに A_s/A は小さくなる傾向が認められる。この要因について考察すると以下ようになる。一般に軟鋼などの降伏点にはひずみ速度依存性があることが知られており、ひずみ速度の増加とともに降伏点も上昇する⁽⁷⁾。このようなひずみ速度依存性は電着により作製した銅薄膜にも認められている⁽⁸⁾ ので、本実験においても N が小さい場合では、周波数の増加とともに A_s/A も小さくなるものと考えられる。しかしながら、図 11(a) に認められるように、加工軟化がほとんど進行しない N が小さい場合での A_s/A の周波数依存性はほとんど認められないことから、上述の降伏点のひずみ速度依存性が A_s/A に及ぼす影響は軽微であると考えられる。一方、 N が一定の場合、 f の増加とともに圧力の作用時間は短くなる。加工軟化は転位が安定な状態に移動することにより生ずるため⁽⁹⁾、圧力の作用時間が減少すれば、この移動に要する時間が十分ではなくなるため、軟化の進行が遅れ、図 11 に認められるような結果になったものと考えられる。したがって、銅薄膜の繰返し軟化が進行する N において本測定法を適用するには、上述の A_s/A の加工軟化の程度とその f 依存性を考慮する必要がある。

3.3 ローラ試験 図 7 において、上下ローラが接触した位置を基準として下ローラを取り外し、ここへロードセルを挿入して、5 回の計測によりクロスヘッドの荷重 W を求めれば、 $W=49.2\pm 2.4\text{N}$ となった。これに基づいて、ローラに作用する荷重の周波数を見積ってみた。図 5 に示すように接触面の半幅を a とすれば、弾性理論により、上下ローラの弾性係数 E 、 ν 、および半径 R が等しいとき、 a は次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$a = \sqrt{49PR} \quad (2)$$

ただし、

$$9 = (1 - \nu^2) / \pi E \quad (3)$$

であり、 P はローラの単位幅あたりの荷重 ($=W/w$) を表す。また、図 6 の関係から次式が成立する。

$$2a : 2\pi R = \frac{1}{2f} : \frac{60}{n} \quad (4)$$

したがって、較正試験の周波数 f は次式となる。

$$f = \pi n R / 120 a \quad (5)$$

$n=100\text{rpm}$ 、ローラの幅 w が 2.5mm、5.0mm の場合、 f を式 (2) ~ (5) を用いて求めると、それぞれ 1240Hz、1750Hz となる。本実験で用いた材料試験機では、この

ような高い周波数のもとで繰返し圧力試験を実施することはできない。また、上述の方法により圧力の周波数を求めるには、ローラに作用する荷重を予め求めておく必要がある。このような場合には、実験的圧力測定法によらずとも、後述するような弾性解を用いることでローラの幅方向に作用する接触圧力の平均値を見積ることができる。しかしながら、実際には、ローラに作用する荷重が未知である場合が多いため、接触圧力の計測が必要となる。このような場合には、上述のように周波数を求めることはできない。そこで、前節の結果から加工軟化が顕著に表れない繰返し数であれば、 A_s/A の周波数依存性もほとんどなく、静圧試験結果を利用できると考えられることから、 $N=10^2$ 回と設定して、ローラ試験を実施した。

図 12(a), (b) にはそれぞれローラ幅が 2.5mm、5mm の場合に得られたローラの幅方向の圧力分布を示す。ここで、 A_s/A の計測は、ローラの幅方向に 3 箇所実施

Fig. 12 Pressure distribution to the width direction of a roller

Table 2 Coefficients of approximate equations

w [mm]	2.5	5.0
h	-78.469	-0.7382
i	394.16	6.4753
j	-643.46	-18.102
k	388.91	19.189
l	168.77	143.94

Table 3 Comparison of mean pressure obtained by copper foil and load cell

w [mm]	Copper foil	Load cell
2.5	241	237 ±6
5.0	153	168 ±4

し、その平均値を採用した。また、 A_s/A と p_{max} との関係には静圧試験に対して得られた式 (1) の関係式を用いた。図から、ローラ幅が小さくなると、 p_{max} も明らかに大きくなる。

得られた結果を弾性解と比較し、その妥当性を検証してみた。図 12 の実験値を最小二乗法により 4 次近似し、次式とおく。

$$p_{max} = hx^4 + ix^3 + jx^2 + kx + l \quad (6)$$

ここで、 h, i, j, k, l は定数であり、その値を表 2 に示す。これより、ローラ幅方向の圧力分布の平均値 p_{mean} は次式で表される。

$$p_{mean} = \frac{\int_0^w p_{max} dx}{w} \quad (7)$$

これにより得られる値を図 12 に実線で示す。また、弾性理論により、ローラの接触面に作用する圧力 p_{mean}^* は、次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$p_{mean}^* = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{P}{\mathcal{R}}} \quad (8)$$

ロードセルにより得られた荷重 W から、式(8)により p_{mean}^* を求めれば、図 12 の破線となる。表 3 にはこれらの値を比較して示す。図 12 と表 3 より、両者は良好な一致を示し、ロードセルにより得られた値を真値とした場合の相対誤差は、それぞれ $w=2.5\text{mm}$ の場合で 2%、 $w=5.0\text{mm}$ の場合で 9% となる。

したがって、加工軟化が顕著に現れない繰返し数では、接触圧力の周波数によらず、本手法によりローラの接触面に作用する圧力分布を計測できるといえる。

4. 結 言

回転するローラ間の圧力測定に対し、微小突起を有する電着銅薄膜による接触圧力計測法の適用の可否を

検討するため、まず、種々の周波数と繰返し数のもとで片振り圧縮試験を実施し、静圧試験による結果と比較した。さらに、この結果を利用して回転するローラ間に生ずる圧力測定を実施した。

得られた結果を要約すれば、以下ようになる。

- (1) 突起部先端の真実接触面積と突起の底面積との比 A_s/A は繰返し数 N が 10^2 回以下では、静圧試験の結果とほぼ一致する。
- (2) N が 10^2 回を超えると、 N の増加とともに A_s/A も増加し、加工軟化が進行していく。
- (3) 加工軟化が顕著に進行しない $N=10^2$ 回における A_s/A は周波数 f に依存しない。
- (4) 加工軟化の進行とともに A_s/A の f 依存性が認められ、同一の N に対する A_s/A は f の増加とともに小さくなる傾向にある。
- (5) 本手法により回転するローラ間に生ずる繰返し圧力を計測すれば、弾性解とよく一致する。

文 献

- (1) Oda, J. et al., Development of Sensing System of Piezoelectric Ceramics Measuring Contact Pressure Distributions, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 54, No.498 (1988), pp. 399-404.
- (2) Kitaoka, S. et al., Measurement of Contact Pressure by Electrodeposited Copper Foil (2nd Report, Measurement of Static Pressure by the Foil with Micro Projections), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 64, No.619 (1998), pp. 689-695.
- (3) Kitaoka, S. et al., Measurement of Contact Pressure by Electrodeposited Copper Foil (3rd Report, Evaluation of Cyclic Pressure by the Foil with Micro Projections), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 68, No.670 (2002), pp. 930-935.
- (4) Ohkubo, H., Copper Electroplating Method of Stress Analysis, *Memoirs Fac. Eng. Nagoya Univ.*, Vol. 20, No.1 (1968), pp.1.
- (5) Kawata, Y. et al., *A Handbook of Materials Strength* (in Japanese), (1966), p.247, Asakurashoten.
- (6) Ralph I. S., Ali F., Robert R. S., and Henry O. F., *Metal Fatigue in Engineering*, (2001), p. 100, A Wiley-Interscience Publication.
- (7) Yokobori, T., *Strength, Fracture and Fatigue of Materials* (in Japanese), 3rd Ed., (1993), p.38, Gihodoshuppan.
- (8) Kitaoka, S. et al., Measurement of Biaxial Stress using Electrodeposited Copper Foil with a Microcircular Hole (Effect of Frequency and Wave Form on Strain Sensitivity), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 70, No.694 (2004), pp. 837-841.
- (9) Ralph I. S., Ali F., Robert R. S., and Henry O. F., *Metal Fatigue in Engineering*, (2001), p. 43, A Wiley-Interscience Publication.
- (10) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, 3rd Ed., (1970), p.418, McGraw-Hill.