電導性の良いばね用ステンレス鋼線*

Copper Plated Stainless Steel Spring Wire with High Electric Conductivity

大代 三夫**・井上 和政**・松本 秀一**・本間 達**

Mitsuo ŌSHIRO・Kazumasa INOUE・Hidekazu MATSUMOTO・Satoru HONMA

飯村 富男**・松本 強資***

Tomio IIMURA・Tsuyoshi MATSUMOTO

1. 緒 言

従来より、鋼線に銅めっきを施す^{1),2)}ことは行なわれているが、高強度と耐熱性をそなえたステンレス鋼線に電導性を改良する目的で銅めっきを施し、ばねとして使用した例³⁾は少ない。

従って今までに、銅めっきステンレス鋼線のばね材としての適合性については、詳しく調べられたことはなかった。

本報では電気部品用ばねとして、電気的特性の他に、コイル外径の精度、取り付け荷重の精度等が要求される小型モーターカーボンブラシ用ばねとしての銅めっきステンレス鋼線について検討を行った。

一般的にカーボンブラシの役割は回転体の一部分である整流子、またはスリップリングとの間に電流の授受を行い、直流機あるいは交流整流機においては、ブラシによって短絡されているコイルの電流が、接触期間中に電氣的に 180° 反転するのに役立つことである。

通常、小型モーターに使用されているカーボンブラシ用ばねは極小型モーターを除いて、ほとんどが写真 1 の

a type に示すようなステンレスばねの中に銅の編組線(リード線)が使用されているタイプである。ここに銅めっきステンレス鋼線をばねとして使用すると、写真 1 の b type のようにばねとしての機能の他に、リード線のもつ電導性をワイヤ表面に被覆された銅がはたすためリード線が不要となる。このためカーボンブラシ組立工程における工程省略化が期待できる。

このような目的で作られた銅めっきステンレス鋼線は、表層部の厚い銅層の影響で物性的に複合材料の挙動を示し、ばね設計を難しくしている。

本報においては、実用化の一段階として銅めっきステンレス鋼線の静的特性、及びカーボンブラシ用ばねとしての適合性について調べた。

静的特性として、(1)電気抵抗値とめっき線径の関係、(2)ばね成形後の無酸化低温焼なまし処理時のコイル外径の変化について、(3)ばねを設計する上での実用的な横弾性係数の推定等について検討した。次に実際のモーターに組込んだのち、電気的特性及び耐久性を調べた。

2. 供試材及び供試ばね

オーステナイト系ステンレス鋼線材 SUS 304 を用いて、図 1 に示すように固溶体化熱処理を施したのち銅めっき及び伸線加工を行い供試材を作成し、同時に比較用として銅めっきを施さない通常のばね用ステンレス鋼線も作成した。この化学成分を表 1 に示した。さらに比較用として軟銅線に上記ばね用ステンレス鋼線と同一の伸線加工を施したものを作成した。

供試材の線径は 0.30, 0.35, 0.40, 0.50 及び 0.60 mm の 5 種類とした。供試材 A, B, C 及び D は各線径で導電率 30% ICAS を満足するようにめっきを施した。また、横弾性係数の測定用として、同一線径でそれぞれ銅の体積比率を変化させたもの(供試材 C, E 及び

a type b type

写真 1 カーボンブラシ用ばね

a type: 従来型(リード線付)

b type: 銅めっきステンレス鋼線使用
(リード線なし)

表 1 供試材 J を除くステンレス鋼線の化学成分 (wt %)

鋼 種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS 304	0.06	0.51	1.24	0.003	0.008	8.64	18.48

* 昭和 51 年秋季講演会で発表

** 鈴木金属工業株式会社

*** 東洋炭素株式会社

表2 供 試 材

供 試 材	材 質	めっき線径 d (mm)	めっき厚さ t' (μm)	芯線径 d_0 (mm)	銅の体積比* ¹ V (%)	引張り強さ σ_B (kgf/mm ²)	備 考* ³
A* ²	銅めっきステンレス鋼線	0.30	22.5	0.255	27.8	170.0	
B	〃	0.35	26.3	0.297	28.0	165.5	○
C	〃	0.40	30.0	0.340	27.8	162.5	◎
D	〃	0.50	37.5	0.425	27.8	159.0	
E	〃	0.40	15.5	0.369	14.8	195.0	◎
F	〃	0.40	40.0	0.320	36.0	150.0	◎
G	〃	0.60	24.0	0.552	15.4	187.5	◎
H	〃	0.60	47.0	0.506	28.9	162.2	◎
I	〃	0.60	62.5	0.475	37.3	143.0	◎
J	純銅線	0.40	—	—	100.0	45.0	◎ (純度 99.90% 以上)
K	SUS 304	0.40	—	—	0.0	210.0	◎
L	SUS 304	0.35	—	—	0.0	215.0	○

(注) *¹ 銅の体積比率 $V = \{(\text{銅めっき層体積})/(\text{銅めっきステンレス鋼線の体積})\} \times 100$ (%)

*² 供試材 A, B, C, D は導電率 30% に相当

*³ ◎: 横弾性係数測定材, ○: 実用特性試験材

図1 供試材と供試ばねの製造工程

F と供試材 G, H 及び I) と比較材として、供試材 J と K を作成した。さらに、実用特性試験の比較材として、供試材 L のばね用ステンレス鋼線を作成した。これらを表2に示した。

図1に示した供試ばね(1)は、低温焼なまし処理時のコイル外径の変化率測定用として用いたもので、成形後のばね仕様を表3に示した。また供試ばね(2)は、実用特性試験用として用いたもので成形・低温焼なまし処理

表3 供試ばね(1)の成形後のばね仕様

供 試 材	NO	コイル外径 D_A mm	有効巻き数 N
A	1	6.0	20
	2	6.6	25
	3	6.0	30
	4	6.0	35
	5	6.0	40
	6	5.0	35
	7	7.0	35
	8	8.0	35
C	9	6.0	20
	10	6.0	25
	11	6.0	30
	12	6.0	35
	13	6.0	40
	14	5.0	35
	15	7.0	35
	16	8.0	35
D	17	6.0	20
	18	6.0	25
	19	6.0	30
	20	6.0	35
	21	6.0	40
	22	5.0	35
	23	7.0	35
	24	8.0	35

(注) 自由高さは 70 mm 一定とした。

後のばね仕様を表4に示した。

これらのばねのコイリングは自動コイリング機で行った。なお、コイリング後の低温焼なまし処理は無酸化雰

表 4 供試ばね(2)のばね仕様

供 試 材	B	L
めっき線径 d	0.35 mm	0.35 mm
コイル平均径 D	5.25 mm	5.55 mm
自由高さ H	50 mm	46.0 mm
有効巻き数 N	15	18
総巻き数 N'	17	20

囲気で熱風循環炉を用い、400℃×30 分の条件で行い、その後常温まで無酸化雰囲気のまま冷却した。

3. 測定方法

3.1 静的特性

ワイヤの機械的特性は汎用試験機を用いた。電気抵抗値はダブルホイットストーンブリッジ法により直流で20℃における値を測定した。また、ばねの低温焼なまし処理による外径の変化率の測定は、いずれもノギスを用い、3ヵ所または3回測定し、その平均値を使用した。

横弾性係数は、ワイヤについては振り振子法により、ばねについては精密荷電試験機により荷重とたわみの関係を5点測定し、荷重-たわみ線図から得られるばね定数を最小二乗法により求め、この値より算出した。

3.2 実用特性

実際に使用されているモーターのカーボンブラシ部に銅めっきステンレス鋼線により製作したリード線なしのばね(写真1-b type)、及び比較材として従来より使用されているリード線付カーボンブラシ用ばね(写真1-a type)を組み込み、380 時間の連続運転を行い、諸特性を調べた。その時の供試ばね(2)は、供試材Bの銅めっきステンレス鋼線を用い、比較材としては供試材Lのばね用ステンレス鋼線を用いて作成した。この試験条件を表5に示した。

測定項目は、(1)負荷電流の変化、(2)ばねの自由高さの変化と取り付け荷重の変化、(3)カーボンブラシの摩耗長さの増加等について調べた。

表 5 実用特性試験条件

電 圧	100 VAC
負 荷	ファン装着
運 転 時 間	連続 380 hr
モーター回転数	9,000 rpm
モーター負荷電流	2.8 A
試 験 台 数	テスト用 (b type) 2台 比較用 (a type) 1台 (1台に2コのカーボンブラシ使用)
カーボンブラシ寸法	6×7×15 mm

4. 静的特性試験結果と考察

4.1 電気抵抗値について

銅めっきステンレス鋼線を製造する際、要求される特性である線径と電気抵抗値から銅めっき厚さを決定しなければならない。そのための関係式を得るため、供試材A, B, C 及び D について、電気抵抗値の測定を行った。その結果を表6に示す。

この結果から複合材料で使われている複合則をもとに、図2に示すような並列配置型モデルを考え、電気抵抗値の結果を整理した。

芯線材と銅被覆材とが、回路に抵抗として並列に入っていると仮定して合成抵抗を算出し、計算しやすい形にしたのが(1)式である。

$$R = R_s \cdot R_c / (R_s + R_c) \\ = 15.3 / (700d^2 - 683d_0^2) \dots\dots\dots (1)$$

ここで

R : 供試材長さ1mあたりの電気抵抗 ($\Omega \cdot m$)

R_s : 芯線材長さ1mあたりの電気抵抗 ($\Omega \cdot m$)

R_c : 銅被覆材長さ1mあたりの電気抵抗 ($\Omega \cdot m$)

d : めっき線径 (mm)

d_0 : 芯線径 (mm)

t : 銅めっき厚さ (mm)

ただし、SUS 304 の比電気抵抗を $70 \mu\Omega \cdot cm^5$ 、銅の比電気抵抗を $1.72 \mu\Omega \cdot cm^6$ とした。

図3にこの計算値と実測値との関係を示す。これから銅めっきステンレス鋼線の電気抵抗値は並列配置モデルで説明できることと、(1)式によって近似値を求められ

図 2 電気抵抗値推定の並列配置モデル

表 6 銅めっきステンレス鋼線の電気抵抗値

供 試 材	めっき線径 (mm)	めっき厚さ (μm)	電 気 抵 抗 ($\Omega \cdot m$ 20℃)
A	0.30	22.5	0.90
B	0.35	26.3	0.65
C	0.40	30.0	0.49
D	0.50	37.5	0.31

図3 電気抵抗値とめっき線線径との関係

ることがわかった。

4.2 低温焼なまし処理時におけるコイル外径の変化
ステンレス鋼線のコイルばねは低温焼なまし処理時に形状の変化（特にコイル外径の増加）があることが知られていたが、銅めっきステンレス鋼線においても同様な傾向がみられた。

図4 低温焼なまし処理におけるコイル外径の変化率と D/d との関係

カーボンブラシ用ばねの場合、ブラシホルダー内に装入する必要からコイル外径の上限が決められてしまう。そのため低温焼なまし処理でのコイル外径の変化量について定量的な把握が必要になる。

そこで、コイル外径の変化に影響を及ぼす因子とし

表7 低温焼なまし処理でのコイル外径の変化 ($n=8$)

供試材	No.	処理前のコイル外径 (D_A)		処理後のコイル外径 (D_B)		コイル外径の変化率*1 (%)	D/d^{*2}
		$\bar{X}$ (mm)	σ	$\bar{X}$ (mm)	σ		
A	1	5.81	0.020	5.93	0.012	2.07	18.77
	2	5.86	0.024	6.01	0.016	2.56	19.03
	3	5.92	0.016	6.13	0.019	3.55	19.43
	4	5.89	0.039	6.10	0.020	3.57	19.33
	5	5.87	0.039	6.12	0.016	4.26	19.40
	6	4.88	0.010	5.02	0.016	2.87	15.73
	7	6.73	0.012	7.02	0.014	4.31	22.40
	8	7.58	0.019	7.94	0.032	4.75	25.47
C	9	6.05	0.020	6.14	0.019	1.49	14.35
	10	6.01	0.010	6.12	0.017	1.83	14.30
	11	5.95	0.013	6.08	0.014	2.18	14.20
	12	5.96	0.020	6.11	0.017	2.52	14.28
	13	6.00	0.011	6.09	0.006	1.50	14.23
	14	4.97	0.013	5.00	0.009	0.60	11.50
	15	6.92	0.018	7.02	0.013	1.45	16.55
	16	7.84	0.013	8.04	0.015	2.55	19.10
D	17	6.00	0.013	6.09	0.005	1.50	11.18
	18	6.05	0.013	6.19	0.017	2.31	11.38
	19	6.01	0.008	6.15	0.013	2.33	11.30
	20	6.02	0.012	6.13	0.010	1.83	11.26
	21	5.99	0.008	6.15	0.010	2.67	11.30
	22	5.00	0.020	5.15	0.019	3.00	9.30
	23	7.05	0.010	7.38	0.023	4.68	13.76
	24	7.99	0.019	8.36	0.020	4.63	15.72

注) *1 コイル外径の変化率(%) = $\{(D_B - D_A)/D_A\} \times 100$

*2 $D = D_B - d$

て、 D/d と有効巻き数を選び表3に示す形状のばねを作成し、低温焼なまし処理前後での外径の変化を調べた。

この結果を表7に示す。また、図4に D_B/d で整理した結果を示した。

測定結果からみると、コイル外径の変化率と D/d 、有効巻き数との明確な関係は認められず、相関分析及び重回帰分析を行ったが、供試材Aを除いては、有意差は認められなかった。

4.3 ばねの実用的横弾性係数の推定

ばねの指定取り付け高さにおける荷重を設計するために、横弾性係数を推定することが必要となる。

そこで、銅めっきステンレス鋼線の横弾性係数を複合材料の複合則で推定するための確認実験を行った。

供試材は表2に示す C, E, F, G, H 及び I の銅めっきステンレス鋼線と比較用として供試材Kのステンレス鋼線及び供試材Jの純銅線を使用し、横弾性係数を振り振子で測定した。この横弾性係数をこの報告では G_T と呼ぶことにした。この G_T の測定結果を図5に示した。

図5によると銅めっきステンレス鋼線の場合、最大せん断応力のかかる表層部が横弾性係数の小さな銅となっているため、銅の体積比率が大きくなるほど G_T は小さ

図5 横弾性係数と銅の体積比の関係
[J (純銅線)の G_T は 3,910 kgf/mm²]

い値を示した。また、図中に示した複合則の式により算出される値よりも測定された G_T 値は小さくなり、単純な形では複合則は成り立たないことを示している。

次に4.2節に用いた供試ばね(1)の低温焼なまし処理後のばねについて、荷重-たわみ線図を描きばね定数を求め、それより(2)式を用いてばねでの横弾性係数を算出した。

表8 ばね定数と横弾性係数の測定結果及び表10からの推定値 ($n=3$)

供試材	No.	ばね定数 (k) gf/mm	横弾性係数 (G_s) kgf/mm ²	表10からの推定値	
				ばね定数 (k_0) gf/mm	横弾性係数 (G_0) kgf/mm ²
A	1	1.42	5,000	1.42	5,130
	2	1.13	5,200	1.13	5,190
	3	0.81*	4,750*	0.89	5,240
	4	0.88*	5,960*	0.78	5,270
	5	0.67	5,180	0.68	5,300
	6	1.48	5,390	1.41	5,140
	7	0.50	5,240	0.51	5,370
	8	0.39*	5,530*	0.35	5,460
C	9	4.58	5,410	4.55	5,370
	10	3.78	5,530	3.077	5,510
	11	3.40	5,850	3.27	5,620
	12	2.92	5,920	2.82	5,730
	13	2.43	5,600	2.53	5,820
	14	4.68	4,990	4.93	5,300
	15	1.63*	5,190*	1.91	6,060
	16	1.30	6,340	1.31	6,360
D	17	9.50*	4,260*	11.75	5,260
	18	8.76	5,160	9.28	5,470
	19	8.13	5,650	8.07	5,600
	20	7.16	5,770	7.14	5,720
	21	6.53	5,530	6.31	5,830
	22	11.75	5,290	11.71	5,270
	23	4.40	6,420	4.27	6,230
	24	3.05	6,630	3.03	6,590

(備考) * 印 実測値と推定値との間に $\pm 7\%$ 以上のずれがあるもの。

表9 $\log(k)$ と $\log(0.001ND^3/d^4)$ との一次回帰の分散分析表

供試材	要因	平方和 (S)	自由度 (f)	不偏分散 (V)	分散比 (F_0)
A	回帰による R	0.2955	1	0.2955	347.83**
	残 差 E	0.0051	6	0.0008	
	計	0.3006	7	—	
C	回帰による R	0.2471	1	0.2471	541.11**
	残 差 E	0.0027	6	0.0005	
	計	0.2498	7	—	
D	回帰による R	0.3019	1	0.3019	728.97**
	残 差 E	0.0025	6	0.0004	
	計	0.3044	7	—	

(注) $F_0(0.01)=13.7$

$$G_s = (8ND^3/d^4) \times k \dots\dots\dots (2)$$

G_s : (2)式で求めた横弾性係数 (kgf/mm²)

N : 有効巻き数

d : めっき線径 (mm)

D : コイル平均径 (mm)

k : ばね常数 (kgf/mm)

この結果を表8に示す。

本来、横弾性係数の値はこの範囲のばね形状には左右されず、材料によって変る特性値といわれるが、この結果からは図5の供試材Cの G_T 値より同じ供試材で製作した供試ばね(1)による G_s 値が低くなった。

また、実際の問題としてばね形状によって、測定値が影響を受けることがわかった。これらは、荷重-たわみ線図を求める時のばねの座屈や有効巻き数の評価のちがいが原因であろう。そこで、ばねより求められた値から実用的横弾性係数の推定を試みた。

まず D/d 及び有効巻き数と横弾性係数の関係を調べたが、明確な関係が見られなかったので、有効巻き数とめっき線径及び D/d の交互作用として考え、(2)式よりばね定数 (k) とばね形状によって決ってくる値として (ND^3/d^4) を選び、関係を調べた。供試材A, C, Dについて表3の有効巻き数と表7の低温焼なまし処理後のコイル外径 (D_B) より $(0.001ND^3/d^4)$ を求め、表8のばね定数との関係を両対数方眼紙にプロットしたのが図6である。

その結果 (k) と $(0.001ND^3/d^4)$ との対数値に相関がみられたので、線径別に一次回帰分析を行った。その結果を表9に示した。

これから各線径とも回帰によるRが、危険率1%で有意であった。すなわち、 $\log(k)$ と $\log(0.001ND^3/d^4)$ は直線関係があるといえる。次に回帰直線の推定式を求め表10に示す。これよりばね定数 k_0 を推定し、この k_0 値より(2)式を用いて横弾性係数 G_0 を求め、その結果

表10 ばね形状からのばね定数推定式

供試材	ばね定数の推定式
A	$\log k_0 = 2.696 - 0.958 \log(0.001ND^3/d^4)$
C	$\log k_0 = 2.562 - 0.878 \log(0.001ND^3/d^4)$
D	$\log k_0 = 2.570 - 0.858 \log(0.001ND^3/d^4)$

図6 ばね定数と $(0.001ND^3/d^4)$ の関係

を G_s 値と比較するため表8右欄に示した。

すなわち、表8に*印で示す5例を除くと、設計の基本値である横弾性係数の値が $\pm 7\%$ の精度をもって、ばね形状より推定できた。

この結果は、本供試材を使用する場合、表8の G_0 値を用いれば、実用的なばね設計ができることを示している。

5. 実用試験結果と考察

連続380時間運転後の諸特性について表11に、負荷電流の変化を図7、自由高さの減少率と取り付け荷重の減少率を図8、ブラシ摩耗量の増加を図9に示した。

銅めっきステンレス鋼線によるカーボンブラシ用ばね

表 11 試験後のモーター諸特性

		b type		a type
モーター番号		No. 1	No. 2	No. 3
ブラシ固有抵抗 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$		5,100	5,245	5,675
負荷電流 A		2.72	2.60	2.75
回転数 rpm		8,680	8,850	9,070
入力容量 W		253	240	255
自由高さ	試験前 mm	50.0	49.5	47.0
	試験後 mm	46.8	46.0	46.2
	変化率 %	-6.5	-7.1	-1.7
取り付け荷重	試験前 g	151.5	149.0	170.0
	試験後 g	148.0	146.5	165.0
	変化率 %	-2.4	-1.7	-3.0
ブラシ摩耗長さ mm		10.87	11.62	6.40
ブラシ摩耗率 mm/100hr		2.86	3.06	1.69

(注) 諸特性値は、モーター1台につき2箇のカーボンブラシ用ばねの平均値を用いている。

図 7 運転時間経過による負荷電流の変化

(b type) の負荷電流は、比較用ステンレスばねのリード線付き (a type) のものに比べやや低下しているが、モーターに悪影響を及ぼす程度ではない。

また、図8にみるように b type は a type に比べ、自由高さの変化が大きい割に荷重の低下は少なく、a type とほぼ同等であった。

荷重の低下が少ないため、実際使用上の問題にはならないが、現在、その現象の解明にはっていない。

ブラシ摩耗量は b type において 200 時間を越える頃から増加する傾向がみられるが、表 11 に示した 100 時間あたりのブラシ摩耗率からみると特に問題となる値ではない。

図 8 運転時間経過による取り付け荷重と自由高さの変化率の挙動

図 9 運転時間経過によるブラシ摩耗長さの増加

6. ま と め

本報は、小型モーターのカーボンブラシ用ばねに銅めっきステンレス鋼線を使用し、従来からのリード線の取り付けの省略化を目標に、線での特性、ばね特性及び実用性の検討を行ったものである。

各種実験結果、つぎのことが明らかになった。

- (1) 銅めっきステンレス鋼線の電気抵抗値は、ほぼ、並列配置モデルにより説明できた。
- (2) 銅めっきステンレス鋼線の横弾性係数については、単純な複合則が成り立たなかった。
- (3) 本供試材を用いたカーボンブラシ用ばねの形状から、実用的横弾性係数 G_0 が $\pm 7\%$ の精度で推

定できた。

この値をもとに、設計されたブラシ用ばねは、
現在実用的にも問題なく使用されている。

- (4) 銅めっきステンレス鋼線によるカーボンブラシ
用ばね (b type) を使用した場合、モーター特性
は従来のものに比べ低下はあるが、実際使用上の
問題にはならないことがわかった。

一方、低温焼なまし処理におけるコイル外径の変化
や、実用試験での自由高さのへタリが大きいわりに、荷
重の低下が少ないことなど、まだ不明の点が残ってい

る。

参考文献

- 1) 小村敬一：金属材料，第7巻第1号（1967）53.
- 2) 沢田他：ばね論文集，第11号（1966）33.
- 3) CORTEM INTERNATIONAL テクニカルレポート
- 4) 炭素材料学会編：電気用ブラシとその使い方（昭51）1，
日刊工業新聞社.
- 5) 長谷川編：ステンレス鋼便覧（1973）110，日刊工業新
聞社.
- 6) ASTM B-452-67（1972）643.