ばね用導電ステンレス鋼線の開発*

Development of High Strength, Conductive
Stainless Steel Wire for Springs

山本 進**・佐藤 和良**

Susumu YAMAMOTO・Kazuyoshi SATO

この論文はばね用高強度導電ステンレス鋼線について述べたものである。リン青銅やベリリウム銅は高強度で導電性が必要となすによく用いられるが、実際には強度(疲労や振りも含む)が充分でなかったり、耐熱性や耐食性が劣っていたり、更には耐摩耗も充分でないこともある。この論文で紹介された材料は銅芯を有するステンレス鋼線で前記問題点を改良したものである。この材料の導電率は高強度銅合金の2~4倍ある。もちろん強度は銅合金より優れているばかりかステンレス鋼そのものより10~30%劣るだけである。したがってこの材料はばね、シャフト、電極等導電性の必要な用途に利用できる。

This paper discussed the development of high strength, conductive stainless steel wire for springs. Although copper-alloyed metals such as phosphor bronze and beryllium copper have been conventionally used when high strength, electrically conductive materials are required, they have, in fact, presented such problems as insufficient strength (including fatigue and torsion), poor heat resistance and corrosion resistance, as well as virtually no abrasion resistance. The material discussed in this paper is a stainless steel wire containing a copper core, and thus greatly improves upon the above problems. The conductivity of this material was 200 to 400% greater than that of high strength copper alloys: its strength was of course superior to copper alloys, being only 10-30% less than stainless steel itself. Accordingly, this material is expected to be used in springs, shafts, electrical poles, and other applications requiring electrical conductivity.

1. 緒 言

一般にばね用導電材料としてリン青銅が広く用いられ、より高強度が要求される場合はベリリウム銅やチタン銅合金が用いられている。しかし前者は強度が低く、後者は非常に高価で、かつ両者とも靱性、耐食性それに耐熱性等も充分でない場合がある。そこで銅合金の導電性と鋼系材料の機械的性能を有し、そのうえ耐食性等も優れる材料として銅芯を有するばね用導電304ステンレス鋼線を開発したので以下にその特性を報告する。

図1に既存の銅合金の導電率と引張強度との関係を示す。本開発材は図中の斜線部の特性を有することが期待されるが、本報では黒丸部の特性を狙った。なおSUS 304鋼を外層に用いたのは良好な耐食、耐高温酸化及び耐摩耗材料とするためであり、更にばねとして

振り応力が負荷される場合、剛性率の高いSUS 304鋼がより有効に働らくことを狙ったためである。

2. 供 試 材

供試材は銅芯を有するSUS 304鋼線(304 CL)、比較材としての高強度ばね用リン青銅線(PB)及びSUS 304ステンレス鋼線で、それぞれの母材の化学成分を表1に示す。304 CLは熱処理、伸線加工を繰返して供試線径(2.0 mmφ)にしたが、最終線径での(ステンレス断面積)/(全断面積)は54%で、その横断面写真を図2に示す。また図3にはX線マイクロアナライザーの線分析による境界面のCu, Fe, Cr及びNiの分布を示すが、相互拡散層は5 μm程度であり、拡散層にはFeやCrが濃縮されている部分が認められる。

3. 機械的性質

表2には各供試材の低温焼鈍(304 CL: 200℃×20分, PB: 250℃×60分, 304: 380℃×20分)前後の引張強度、降伏応力、伸び、絞り、ヤング率、剛性率、捻回値及び屈曲値を示す。304 CLの引張強度やヤング率は鋼(引張強度: 約40 kg/mm², ヤング率: 約12,000

* 1) ばね技術研究会 昭和58年度春季講演会

2) 松島, 山本他, 住友電気, 129 (1984), 102に発表

** 住友電気工業株式会社 (Sumitono Electric Industries, LTD.)

表1 供試材の化学成分

供 試 材		C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Sn
304 CL	304	0.041	0.47	1.02	0.032	—	8.76	18.16	—
	純 銅	—	—	—	—	>99.9	—	—	—
PB (リン青銅)		—	—	—	0.20	93.2	—	—	6.58
304		0.070	0.72	1.37	0.032	0.29	8.41	18.51	—

表2 各供試材の引張及び振り特性

供試材	低 温 焼 純	引張強度 kgf/mm ²	弾性限度力 kgf/mm ²	比 %	降伏応力 kgf/mm ²	比 %	伸び %	絞り %	ヤング率 kgf/mm ²	剛 性 率 kgf/mm ²	捻回値	屈曲値
304 CL	無	118	63	54	90	77	2.5	43	15,000	6,600	20.7	9.4
	有	126	70	56	101	80	1.4	19	15,100	6,800	27.0	6.9
PB	無	98	64	65	87	89	1.5	63	10,400	4,500	2.5	25.0
	有	86	72	84	83	97	2.4	68	10,700	4,600	5.0	26.0
304	無	180	144	80	164	91	1.1	53	17,000	7,100	3.6	14.2
	有	199	157	79	182	91	0.5	47	17,500	7,400	1.6	14.6

図1 各種銅合金の引張強度と導電率との関係

図2 横断面拡大写真
(線径2.0 mmφ)

図3 304-Cu界面の各原子拡散状況

図4 304 CLの捻回破面

表3 供試ばね諸元

線径	2.0 mm
コイル平均径	18.5 mm
有効巻数	4.5
総巻数	6.5
自由長	47.0 mm
巻方向	右

図5 ばね疲労試験結果-1

kg/mm²)と SUS 304 鋼の断面積比率に対応した値となっており、剛性率は 304 に近く PB の約 1.5 倍もある。

一方捻回破面も図4に示すように内外層の剥離は認められず良好な接着状態を示している。また本材料は剛性率が高く、表面層の SUS 304 鋼は引張強度が高いので、ばね材料として利用すると細径化、軽量化に非常に有効であると期待される。

4. 耐疲労性能

疲労特性を評価するために表3に示す諸元の圧縮ばねに加工後、70 kgf/mm² (304 CL 及び 304) 及び 50 kgf/mm² (PB) の応力でセッティングし、ばね疲労試験に供した。

当初 304 CL と PB の S-N 曲線を同じ応力条件で

図6 ばね疲労試験結果-2

図7 ばね疲労試験結果-3

比較しようと考えたが、あまりにも特性差が大き過ぎ困難であった。S-N 曲線の一部分が何とか同じグラフ上で示せた例として応力振幅を 20 kgf/mm² とした場合を図5に示す。304 CL の疲労限は平均応力で 48 kgf/mm² となるが、50 kgf/mm² 以上の応力を負荷するとセッティング応力を超え密着してしまうためテストできない。一方 PB は平均応力が 20 kgf/mm² 以下になると最低応力が負になり疲労試験に供せられなくなるので疲労限を求めることができなかった。

そこで応力振幅を 13.5 kgf/mm² に減じた場合、図6に示すように PB の疲労限は平均応力 28 kgf/mm² となったが、304 CL では負荷できる応力範囲内では全く折損しなかった。

なお図7には 304 CL と 304 の S-N 曲線 (平均応力一定) を示すが大きな差は認められない。これは外層にステンレス鋼を採用したためと判断される。

図8には 304 CL の疲労破断後の SEM による破面を示すが、疲労破壊の起点は外層の SUS 304 の外周部であり、銅との境界部のような異常な場所ではないこ

図8 304CLの疲労破面例

図9 ばねへたり試験結果

とが確認されている。また破面も正常な疲労破面を示しており問題はない。

5. ばねへたり特性

5.1 常温での特性

表3に示す諸元を有するばねに常温で20時間の締付試験を実施し、ばねのへたり量から締付応力と残留剪断歪量の関係を求めた。結果を図9に示すが304CLの残留剪断歪は非常に小さくばねへたり特性が優れていることがわかる。

図10 高温へたり試験結果

表4 各供試材の導電率

供試材	導電率(% IACS)
304 CL	46.64
PB	12.24
304	2.23

5.2 高温での特性

35 kgf/mm²の締付応力及び20時間の締付時間でばねの高温でのへたり試験を実施した。その結果を図10に示すが、304CLのほうがかなり優れており、その差は高温になるほど広がる傾向にある。

6. 導電率

表4には導電率の測定結果をまとめたが、304CLの導電率はSUS304と銅(導電率100% IACS)の断面積の比率に対応した値を示しており、PEの4倍程度の導電性を有している。導電率は外層のSUS304鋼にガルバノメータの端子を接続し測定したが、導電率の低いSUS304鋼の厚さが0.32 mm程度しかないので全体の導電率をほとんど低下させなかったものと考えられる。もちろんSUS304鋼が厚く長さが短い場合、304CLの導電率は低下することが予想されるが、ワイヤ材料として利用される場合は(厚さ)/(全長)がほとんど1/100以下なので問題はない。

表5 腐食試験によるばね端面研磨部の発錆状況

供試材		塩水噴霧試験		亜硫酸水 ヒューム試験	
		発錆開始時	25日後の発錆面積率	発錆開始時	25日後の発錆面積率
304 CL	304	4 日	5—60 %	16 日	40—70 %
	純銅	1	10—30	12	20—80
PB		1	20	8	90
304		発錆せず	0	16	20

7. 耐 食 性

複合材料の場合、境界部での耐食性すなわち電位差腐食や接触腐食が問題となることが予想される。そこでばねの座巻部を想定し 304 CL の端面を斜めに切断しこの部分の電位差腐食に注目して塩水噴霧試験と亜硫酸水ヒューム試験を実施した。それぞれの試験で端面が発錆を始めた時と 25 日間の試験後の発錆面積率を表 5 に示す。銅は単独ではリン青銅とはほぼ同等の耐食性を有していると言われるが、304 CL の芯材として使用された場合には SUS 304 鋼に保護される傾向にあり発錆の程度は軽くなる。また SUS 304 鋼は銅と接触すると耐食性が劣化するようだが、これは銅の腐食生成物によるところが大であると思われる。またほかにステンレス鋼の不働態被膜が破れた時の電位差腐食も関係していると思われるが、ステンレスと銅の接触腐食に関しては別途詳細に述べることにしたい。304 CL の端面でない部分は 304 の表面と全く同等の耐食性を有していることは言うまでもない。

8. ばね巻加工性

本材料を用いて各種のばね巻を実施したがその特性の概略は以下の通りである。

- (1) コイリング速度は最適条件を見つければ従来のばね用ステンレス鋼線と同等にとれる。
- (2) 形状のばらつきは、精度良く作られたばね用ステンレス鋼線より若干大きい。(例えば標準偏差で 2 倍程度)
- (3) コイル径はテンパーの前後でほとんど変化しないという利点がある。

9. 結 言

銅芯を有するばね用導電ステンレス鋼線（断面の

SUS 304 鋼比 54%）を試作評価した。その特徴を以下にまとめる。

- 1) 引張強度は $120 \sim 130 \text{ kgf/mm}^2$ の高強度のものが得られる。
- 2) 剛性率、ヤング率及び疲労性能は SUS 304 鋼に近い性能となる。
- 3) 常温及び高温でのへたり特性はリン青銅より著しく優れる。
- 4) 導電率は銅基高強度材料の 2 倍以上で 50% IACS に近い。
- 5) 耐食性は端面以外では一般のステンレス鋼と全く同等で、端面でも少くとも銅合金よりは優れている。
- 6) 高温酸化特性や耐摩耗性は一般のステンレス鋼線と同等であることが当然期待される。

なお本材料は現在、 $0.3 \text{ mm}\phi \sim 10 \text{ mm}\phi$ まで製造可能で導電耐熱耐食ばね材料、電極、導電シャフト等として実用化過程にあり、その一部は既に実用されている。以下にその実用例を紹介する。

- ① 耐熱強度と導電性が要求されるため SUS 304 鋼のばねと銅燃線の複合構造であったものが銅芯 304 に替わった。
 - ② 強度と導電性が要求される導電試験治具のリン青銅ばねのへたりが大きく寿命が短かったが、銅芯 304 で寿命が飛躍に改善できた。
 - ③ ベリリウム銅の“代替”材として銅芯 304 が利用できた。
 - ④ ばね以外でも銅電極に代替され耐食寿命や摩耗寿命が著しく伸びたり、シャフトでも銅合金に比べると耐摩耗性が向上し寿命や機械の精度が改善された。
- 今後はサイズ域を広げるとともに各種の断面形状のものに拡大して行きたいと考えている。