

九大工 ○久保田 祐信
九大工 栄 中

九大 [学部] 松澤 卓
九大工 近藤 良之

1 緒 言

近年、電子・電気部品に用いられている直径数十 μm の銅線が機器の受ける振動により疲労破壊することが問題になっている。導線の破断は機器の性能や信頼性に直接に関わるので、微細な銅線の疲労強度について評価法や向上法の研究が強く望まれている。線材の疲労試験には、両端を支持し弧状に曲げた線材の一方の端をモーターにつなぐ回転曲げ形式¹⁾、一定の張力を与えた線材をプーリーに繰返し巻付けて曲げ応力を発生させる形式²⁾、引張圧縮形式³⁾などが文献にみられるが、直径数十 μm の銅線の振動による疲労破壊を評価するのに適した試験法は確立されていない。本研究では、直径 50 μm ~ 約 0.26 mm の電気配線用銅線を用いて曲げ疲労試験を行い、その疲労強度特性を明らかにした。さらに、線の形状を変化させた実験を行い、疲労強度の向上に関連する配線の形状について検討した。

2 実験方法

2.1 曲げ疲労試験機 Fig. 1 に示す疲労試験機を、スピーカのボイスコイルを利用して製作した。ボイスコイルに取付けた棒の先端と固定壁間に銅線を両端回転拘束で取付け周波数 50 Hz の繰返し変位を加えた。疲労試験は、取付け棒の先端における振動振幅をレーザー変位計で測定し制御する変位制御で行った。試験片の両端ははんだ付けにより固定した。

Fig. 2 に試験片の形状を示す。3 種類の形状の試験片を用いた。線径と疲労限度の関係を求める試験では Fig. 2 (a) のような真直な試験片を、疲労強度の向上を目的とした試験では Fig. 2 (b), (c) のような屈曲させた試験片を用いた。

2.2 供試材 供試材は市販の電線を用いた。線の直径 d は 0.050, 0.120, 0.180, 0.257 mm であり、すべて単線である。銅線の材質は Cu 99.9 wt% 以上のタフピッチ銅であるが、 $d = 0.050$ mm の銅線だけ 0.3 %Sn を含む。引張試験

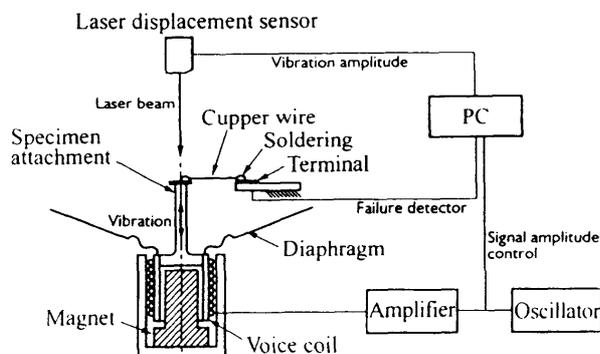


Fig. 1 Fatigue testing apparatus for fine wire

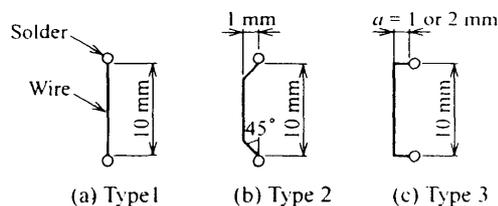


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

Table 1 Mechanical properties

| Diameter (mm) | Material | Tensile strength (MPa) | Reduction of area (%) |
|---------------|--------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.050 | Cu-0.3%Sn | 320 | 69 |
| 0.120 | Tough pitch copper | 236 | 75 |
| 0.180 | | 233 | 75 |
| 0.257 | Cu \geq 99.9 wt% | 224 | 75 |

の結果を Table 1 に示す。成分の異なる $d = 0.050$ mm の銅線は引張強さ σ_B が他の 1.4 倍程度高く、絞りが小さい。

3 実験結果と考察

3.1 疲労強度に及ぼす直径の影響 Fig. 3 に疲労試験結果を示す。グラフの縦軸は振動の振幅 δ である。以降、便宜的に試験片が 10^7 回の繰返しに耐えた最大の δ を疲労限度の振幅 δ_w と呼ぶ。 δ_w は線径に依らずほぼ同じ値を示した。これは、線径を太くしても疲労限度の変位振幅が向上しないことを示す。試験片には曲げ荷重が加えられているので、弾性力学的にはある一つの δ に対しては線径が太いほど最大曲げ応力も高い。そこで、一端に δ の強制変位が加わる両端固定ばりをモデルにして破断部の応力を求めると Fig. 4 のようになり、 σ_B のもっとも高い $d = 0.050$ mm の試験片の δ_w がもっとも低くなった。その理由について以下のような検討を行った。

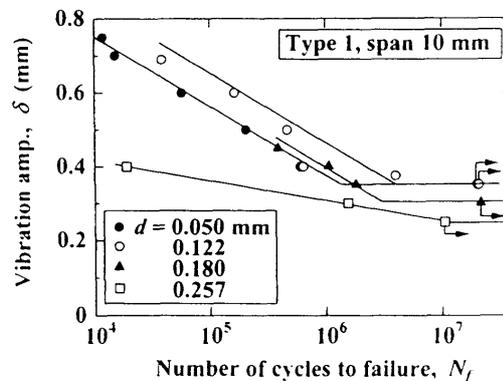


Fig. 3 Vibration amp. vs fatigue life

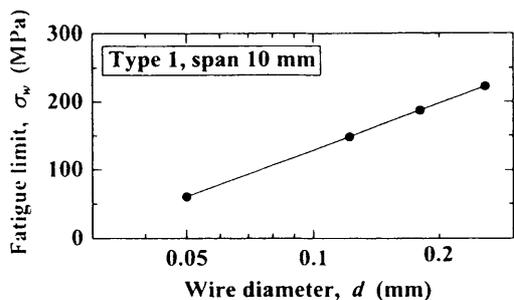
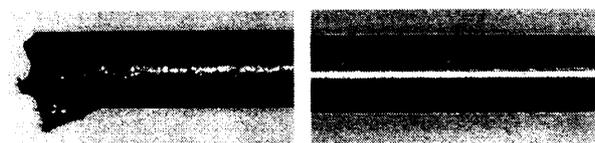


Fig. 4 Fatigue limit vs wire diameter

Fig. 5は破断部を実体顕微鏡で観察した写真である。破断部の近くには多くのすべり線が現れ、変形の繰返しにより塑性変形を生じていたことが窺える。Fig. 6に試験片に静的に強制変位を与え、はんだ付け部近傍の変形量を測定した結果を示す。静的変位 $\delta_{static} = 0.3 \text{ mm}$ について材料力学的に求めた試験片の変位を実線で、試験片の固定部と固定部を結ぶ直線を破線で示す。試験片の変形量は材力的に計算した値よりかなり大きく、固定部間を結んだ直線とほぼ同じであった。

通常の寸法の試験片を用いた銅の平面曲げ疲労試験によると、本研究の供試材と同じ引張強さを持つ材料の疲労限度は約 90~130 MPa ($d = 0.050 \text{ mm}$ の材料について)、70~90 MPa ($d = 0.050 \text{ mm}$ 以外) である⁴⁾。Fig. 4に示した応力の値はこれらに較べてかなり高い。また、 $d = 0.257 \text{ mm}$ の試験片では σ_w と σ_B がほとんど同じ値になっている。以上から、材料力学的に計算した破断部の応力は実際とは異なっており、応力の正確な推定には試験片の塑性的な挙動、試験片の変形などを考慮する必要がある。



(a) $\delta = 0.6 \text{ mm}$, $N_f = 3.8 \times 10^4$ (b) Virgin
Fig. 5 Slip lines observed near fatigue fracture part

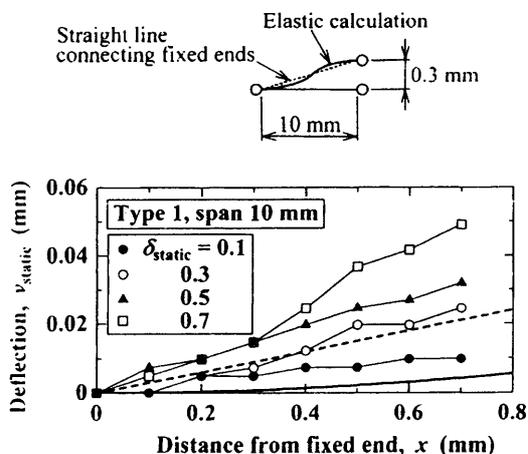


Fig. 6 Specimen deformation caused by static displacement

3.2 疲労強度の向上と配線の形状 Type 2, Type 3 ($a = 1 \text{ mm}$) の実験結果を Table 2 に示す。線径は 0.122 mm のものを用いた。これらの試験片は、破断部に加わる曲げをねじりに変換することで疲労強度の向上を狙ったものである。 δ_w は角度が大きくなるにつれて向上した。表には 3.1 と同様にして求めた σ_w の値も示す。

Table 3 に Type 3 の試験片を用いて、ねじりを受ける部分の長さ a を変えて実験を行った結果を示す。 a の増加により疲労限度は大きく向上した。これらの実験に用いた直径 0.122 mm の銅線について、Fig. 4 と Table 2, Table 3 の σ_w は一定の値でなく、疲労強度の向上を応力により定量的に扱うためにはさらに検討が必要である。

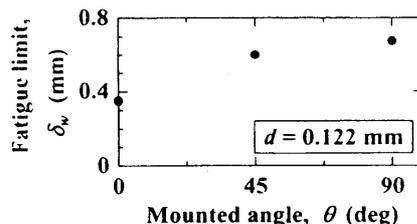


Fig. 7 Relationship between fatigue limit and mounted angle

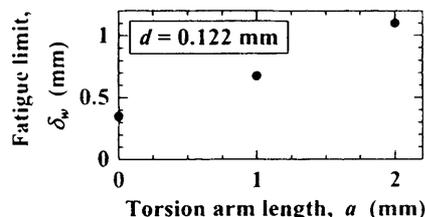


Fig. 8 Relation between fatigue limit and torsion arm length

4 結 言

直径 0.050~0.257 mm の電気配線用銅線を用いて変位制御の曲げ疲労試験を行った。疲労限度の振動の振幅は線径に依らずほぼ同じであった。材料力学的に求めた応力では、引張強さのもっとも高い直径 0.050 mm の銅線の疲労限度がもっとも低かった。これは、試験片の変形が弾性的なモデルとは異なっており、応力の推定には塑性変形も考慮しなければならないためである。配線の形状を変えて破断部の曲げ応力をねじり応力に変換し、疲労強度を向上させた。

参考文献

- 1) H. Tobushi, et al., Trans ASME, **120**, 64-70 (1998).
- 2) 西川他 3 名, 材料学会講演論文集, **48**, 213-214 (1999).
- 3) 大野他 7 名, 日本機械学会関西学生会平成 9 年度卒業研究発表講演会, 68 (1998).
- 4) “金属材料 疲れ強さの設計資料”, p. 81 (1961) 日本機械学会.

謝 辞

銅線の成分をご教示いただいた (株) 山形共和電業技術課 後藤氏, 0.050 mm の銅線をご提供いただいた赤司製線株式会社には厚く御礼申し上げます。