

トバリ線の断面形状および構造が 耐疲労特性に及ぼす影響

菅原 淳* 山下 主税* 白木 理倫*

Influence of Cross-sectional Shape and Structure on Antifatigue Property of Contact Wire

Atsushi SUGAHARA Chikara YAMASHITA Tadanori USUKI

Bending stress which occurs in contact wire with every pantograph passage may cause fatigue of contact wire. The authors inspected whether any peculiar stress distribution occurs in contact wire which has special cross-sectional shape or composite structure and whether it causes deterioration of antifatigue property. The authors conducted stress analysis by finite element method (FEM) of hard drawn copper contact wire (called GT-P) and copper clad steel contact wire (called CSD-P), both of which have built-in insulated wire for wear limit alarm. The results of analysis indicated that any peculiar stress distribution does not occur with respect to GT-P contact wire, while high value stress occurs in steel core with respect to CSD-P contact wire. So the authors conducted accelerative fatigue test of CSD-P contact wire to prepare a sample for fatigue crack observation. Results of observation of the sample are as follows; (1) no fatigue crack originated from the steel core, (2) fatigue crack propagated in the copper layer did not penetrate into the steel core straight. From these results, the steel core does not seem to deteriorate antifatigue property of CSD-P contact wire.

キーワード：トバリ線，疲労，断面形状，警報線入りトバリ線，銅覆鋼トバリ線

1. はじめに

トバリ線にはパンタグラフ通過のたびに曲げ応力が誘起され、疲労を生じることがある。

トバリ線は銅または銅合金の単一材で構成され、また、断面形状は円形に対して金具（イヤ）を取り付けるための溝を設けたものが一般的である。一方、複合材料のトバリ線や、万一摩耗限度に至った場合にアラームを発生するための絶縁電線（警報線）を挿入したトバリ線のような断面形状が特殊なものでは、局部的に著大応力が生じるなど特異な応力分布となり、耐疲労性が低下する可能性が考えられる。

そこで、警報線入りの硬銅トバリ線および銅覆鋼トバリ線を対象に、有限要素法（FEM）による応力解析および加速疲労試験を通じて耐疲労性低下の可能性を検証した。その結果、いずれもその恐れはないと考えられた。

様を表1に示す。いずれも公称断面積は170mm²である。摩耗限度の位置に絶縁電線が警報線として左右対称に2本挿入されており、万一摩耗限度に至った場合は警報線が断線またはトバリ線本体と導通することにより検知するものである。

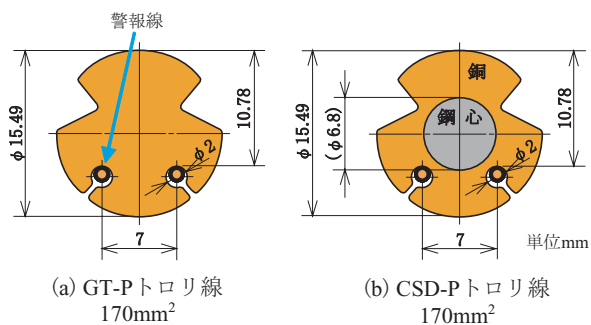


図1 検討対象としたトバリ線の横断面形状

2. 検討対象トバリ線

対象としたトバリ線は先に述べたとおり警報線入り硬銅トバリ線（GT-Pトバリ線）および銅覆鋼トバリ線（CSD-Pトバリ線）である。その横断面形状を図1に、仕

表1 検討対象としたトバリ線の仕様

線種 公称断面積	断面積 (mm ²) (警報線別)	質量 (g/m) (警報線込)	引張破断荷重 (kN)	導電率* (%)
GT-P 170mm ²	162.7	1,457	55.7以上	97.5以上
CSD-P 170mm ²	銅 126.4 鋼 36.3	1,420	65.3以上	80.0以上

※：体積抵抗率0.017241 Ω mm²/mの場合を100%とした相対値

* 電力技術研究部（集電管理）

特集：電力技術

3. トロリ線の応力解析

3.1 CSD-P トロリ線鋼心の引張試験

FEMでトロリ線の応力解析を行うにあたり、対象物を構成する材料の応力-ひずみ特性が必要になる。硬銅については既に筆者ら自身でも引張試験により調べているが¹⁾、CSD-Pトロリ線の鋼心については明らかでなかった。鋼材の各種強度特性は熱処理や塑性加工履歴等の影響を受けるため、実際にCSD-Pトロリ線の鋼心から試験片を削り出し、引張試験を実施して応力-ひずみ特性を調べた。

試験片形状はJIS Z 2201「金属材料引張試験片」より14A号を適用し図2のとおりとした。ひずみの測定は図3に示すように試験片にひずみゲージを貼付して行った。引張強度および基本応力-ひずみ曲線を求めるための単純引張試験と、ヤング率を求めるためのくり返し引張試験をそれぞれ3試番、2試番実施した。

それらの結果に基づき、FEMに適用する鋼心の応力-ひずみ特性を図4のとおりとした。鋼心の材質はJIS G 3506「硬鋼線材」のSWRH62A（炭素量0.59～0.66%）である。引張強さは同JISに規定されていないが、本試験から鋼心の引張強さは1000MPa超であることが確認された。ヤング率は鋼の一般的な値とされる $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ よりやや小さく $1.78 \times 10^5 \text{MPa}$ であった。また、軟鋼の応力-ひずみ特性で見られる降伏域は認められず、0.2%耐力は790MPaであった。

3.2 有限要素法による応力解析

3.2.1 解析方法

応力解析で想定した断面形状は図1のとおりであるが、警報線は解析の対象外とした。

解析には大型計算機用FEM解析プログラムNastranおよびプリ・ポストプロセッサFEMAPを用いた。本解析の目的は応力分布の推定であるため、3次元ソリッドモデルを適用した。応力解析モデルを図5に示す。両端面の形状および平面性は崩れないものとし所定の拘束を設定した上で、中央に下側から曲げ荷重を与える。ただしこのモデルはx方向およびy方向に対称なので、実際には計算時間短縮のため両方向をそれぞれ1/2にした1/4モデルとした。解析用のメッシュを切った横断面を図6に示す。

解析の際、トロリ線に与える張力の条件は19.6kNとした。解析は、①張力のみ負荷する場合、②曲げ荷重点の上面に 500×10^{-6} の曲げひずみが生じる場合、③同じく 1500×10^{-6} の場合、の3とおりに行った。②と③については曲げ荷重を変えながら解析を行って曲げひずみを調べ、所定のひずみとなる荷重を求めた。求めた曲げ荷重を表2に示す。実際のパンタグラフ接触力とかけ

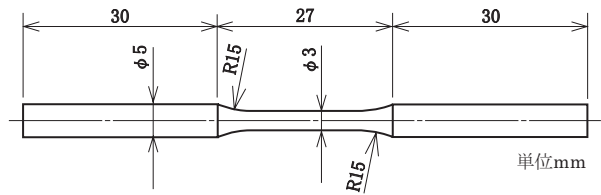


図2 CSD-P トロリ線鋼心引張試験片形状

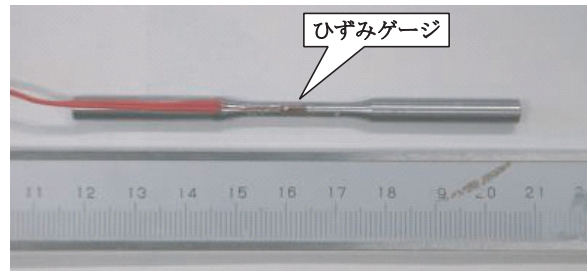


図3 ひずみゲージを貼付した引張試験片

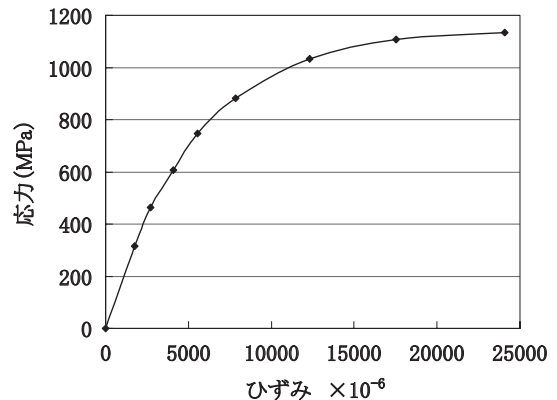


図4 CSD-P トロリ線鋼心の応力-ひずみ特性

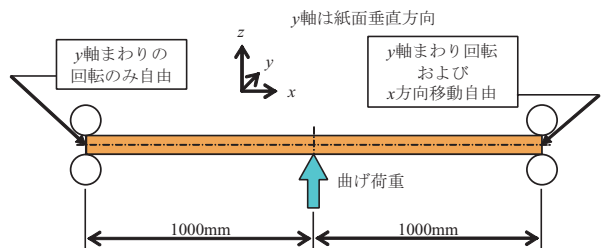
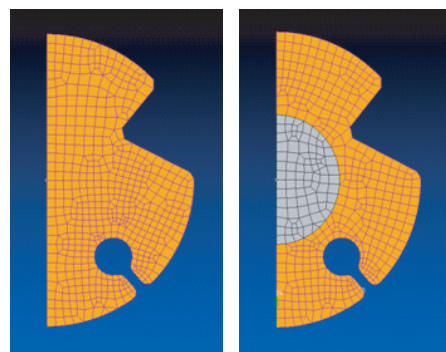


図5 応力解析モデル



(a) GT-Pトロリ線 (b) CSD-Pトロリ線

図6 解析用メッシュ

離れた値であるが、これはトロリ線拘束条件、特に支持スパンの影響と見なすことができる。つまり、スパンが短ければ同一の曲げ応力や曲げひずみを生じさせるのにより大きな曲げ荷重を要する。

なお、解析の妥当性を検証するため、公称断面積 170mm^2 の硬銅トロリ線 (JIS E 2101「みぞ付き硬銅トロリ線」規格品) について図7に示す試験を行い、曲げ荷重と荷重点上面に生じる曲げひずみの対応を調べた。その結果、張力 19.6kN のもとで 500×10^{-6} のひずみを生じさせるのに必要な荷重は約 280N 、 1500×10^{-6} では約 820N であった。表2のGT-P 170mm^2 トロリ線に対する値とやや異なるものの、トロリ線の拘束条件が異なることを考慮すれば著しい相違ではなく、解析は概ね妥当に行えたと考えられる。

表2 FEM解析におけるトロリ線上面の曲げひずみと曲げ荷重の対応

上面曲げひずみ ($\times 10^{-6}$)	曲げ荷重 (N)	
	GT-P 170	CSD-P 170
500	322	331
1500	911	949

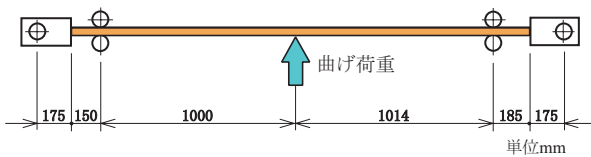


図7 トロリ線曲げひずみ測定試験概略図

3.2.2 解析結果

引張/圧縮応力の解析結果を図8に、せん断応力の解析結果を図9に示す。これらの図は曲げ荷重点の横断面のもので、せん断応力は横断面に平行な上下方向のものを示す。

(1) 引張/圧縮応力

上面の曲げひずみが0、即ち張力のみ負荷した場合、GT-Pトロリ線では横断面全体にわたって応力は均一で 121.0MPa である。応力解析で想定した張力 19.6kN を表1に示す警報線を除いた断面積 162.7mm^2 で除した値は 120.5MPa であり、解析結果と一致する。一方、CSD-Pトロリ線では鋼心のヤング率が銅より大きいため鋼心部分の応力が銅部分より大きく、値はそれぞれ 167.4MPa 、 107.7MPa である。

曲げ荷重を加えた場合、GT-Pトロリ線では特異な応力分布は見られないが、CSD-Pトロリ線ではヤング率の相違により鋼心上部に大きな応力が生じている。上面の曲げひずみが 1500×10^{-6} の場合、その値は 280.3MPa である。

鋼心の耐疲労性を検討するのに参照できるデータとし

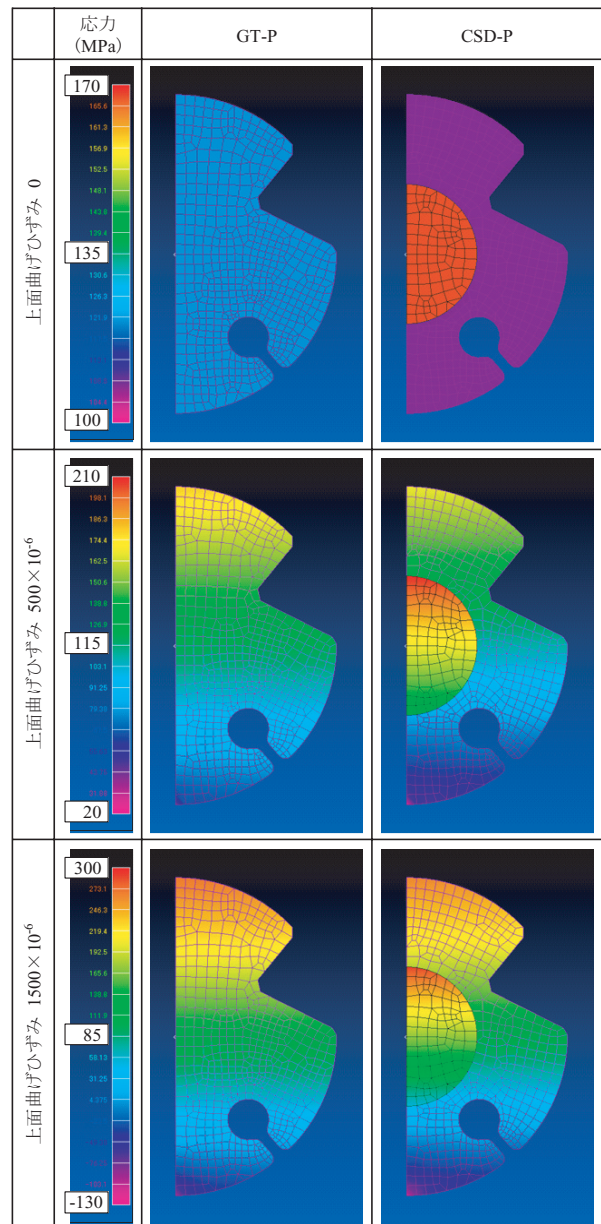


図8 引張/圧縮応力解析結果

ては、炭素量および引張強さが近い機械構造用炭素鋼鋼材 S55C の焼入れ焼もどし材 (炭素量 $0.52 \sim 0.58\%$ 、引張強さ約 960MPa 、降伏点約 750MPa) の両振り引張圧縮疲労限度として $240 \sim 360\text{MPa}$ という値が示されている²⁾。疲労限度に及ぼす平均引張応力の影響に関して修正グッドマン線図³⁾、つまり疲労限度は平均引張応力がその材料の引張強さに向かって増大するのに伴って直線的に低減するという考え方を適用すれば、平均引張応力 167.4MPa における疲労限度は図10のとおり $198\text{MPa} \sim 297\text{MPa}$ となる。一方、上面の曲げひずみが 1500×10^{-6} のときの鋼心上部の応力に占める曲げ成分は $(280.3 - 167.4) = 112.9\text{MPa}$ であり、上記の平均引張応力を考慮した疲労限度以下であるが、4章で述べる疲労き裂観察

特集：電力技術

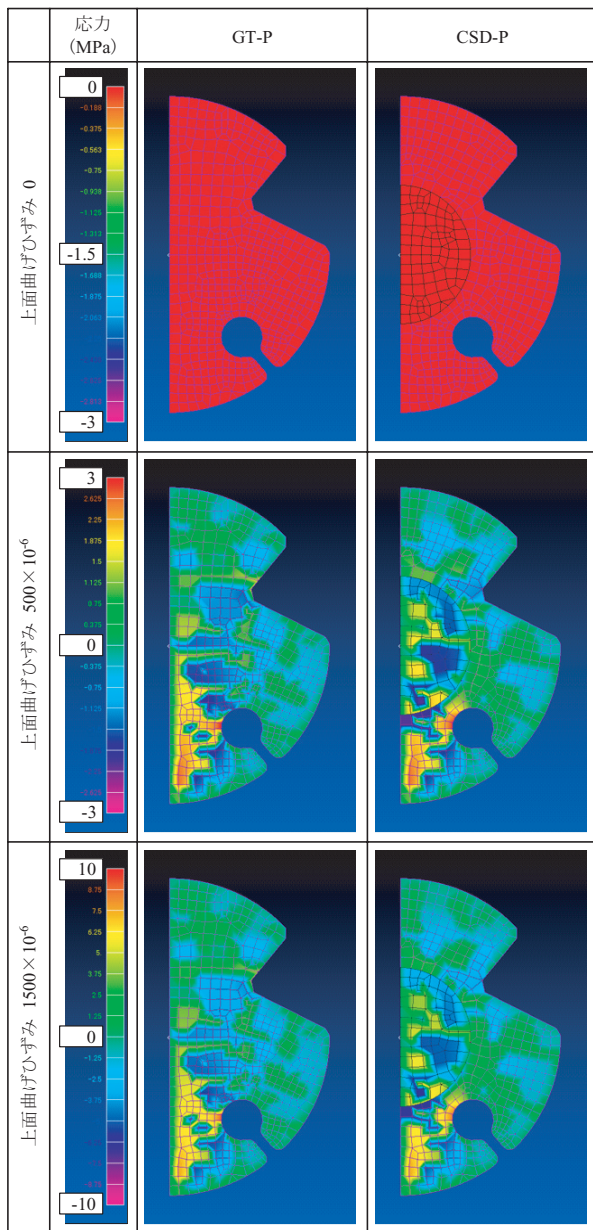


図9 せん断応力解析結果

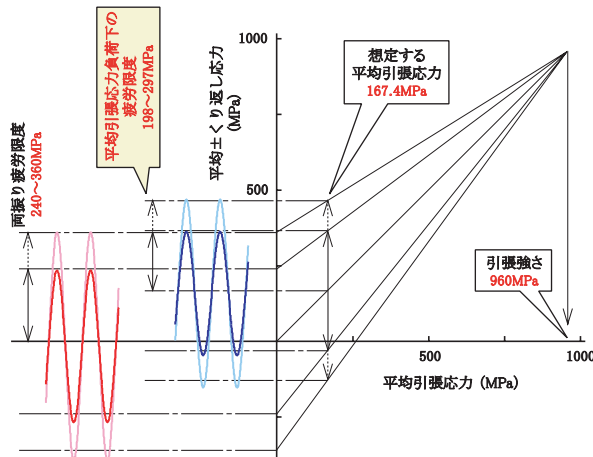


図10 修正グッドマン線図による疲労限度推定 (S55C 焼入れ焼もどし材, 平均引張応力 167.4MPa)

では、鋼心からき裂が発生していないかを着眼点とした。

なお、警報線近傍に特異な応力分布は見られなかった。

(2) せん断応力

せん断応力は上面の曲げひずみが0、即ち張力のみ負荷した場合、GT-P、CSD-P いずれのトロリ線でも当然ながら面全体にわたって0である。曲げ荷重を与えた場合でも引張/圧縮応力に比べ非常に小さく、上面の曲げひずみが 1500×10^{-6} の場合でも 10^0 MPa オーダである。今回用いたプリ・ポストプロセッサ FEMAP は解析を行った面にわたって応力を積分する機能はないが、仮に積分値が求められればその値は概ね曲げ荷重の1/2になるはずである(曲げ荷重点の前後で荷重に対してせん断応力が生じるため1/2になる)。逆に、単に曲げ荷重の1/2をトロリ線の計算断面積で除してみても、CSD-P トロリ線、上面の曲げひずみが 1500×10^{-6} の場合で $\{(949 \times 0.5) \div 162.7\} = 2.92$ MPa であり、オーダは解析結果と一致する。このようにせん断応力は小さいため、疲労に影響を及ぼす可能性は小さいと考えられる。実際のパンタグラフ接触力は本解析で想定した曲げ荷重より小さいため、せん断応力の影響はさらに小さいと見なすことができる。

4. CSD-P トロリ線の疲労き裂観察

応力解析において、GT-P トロリ線では疲労への影響が懸念される事項は特に見出されなかった。一方、CSD-P トロリ線では鋼心に大きな応力が生じるという結果が得られたのを踏まえ、CSD-P トロリ線について加速疲労試験を行って、疲労き裂の顕微鏡観察を行った。

4.1 トロリ線加速疲労試験

疲労試験の概略を図11に示す。供試トロリ線に所定の張力を加え、中央を上下に加振して所定の曲げひずみをくり返し発生させる。張力は応力解析と同じ19.6kNとした。加振波形は正弦波、周波数は5Hzである。

本疲労試験は加速的に疲労き裂を発生させるのが目的なので、加振部上面のひずみ振幅は $\pm 1500 \times 10^{-6}$ とし、加振回数 6652×10^2 回で試験を打ち切った。

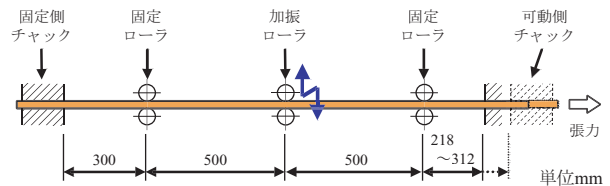


図11 トロリ線加速疲労試験概略図 (疲労き裂観察用サンプル作成)

4.2 観察結果

疲労き裂の観察は、加振部の上下方向縦断面を作成

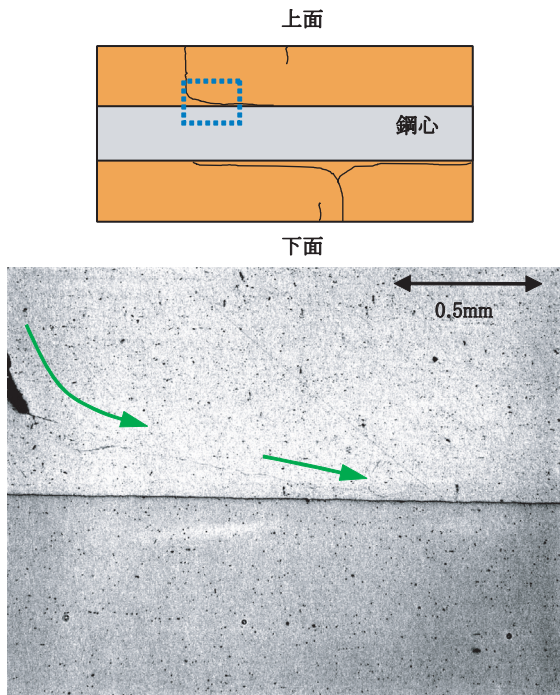


図 12 鋼心近傍における疲労き裂進展（上面側）

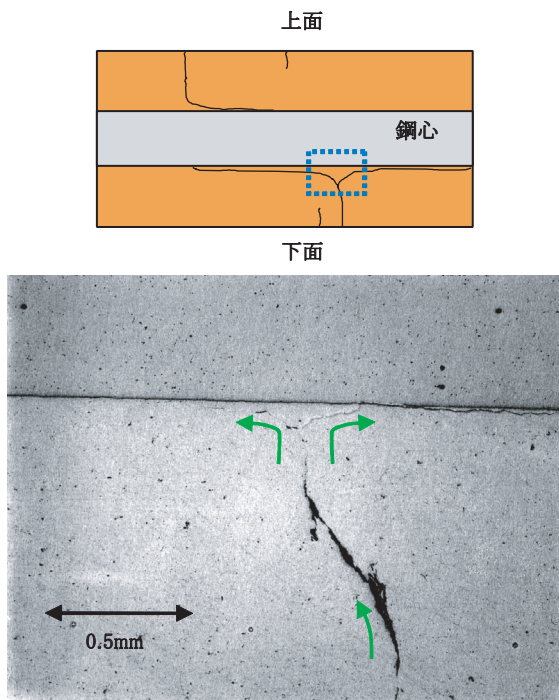


図 13 鋼心近傍における疲労き裂進展（下面側）

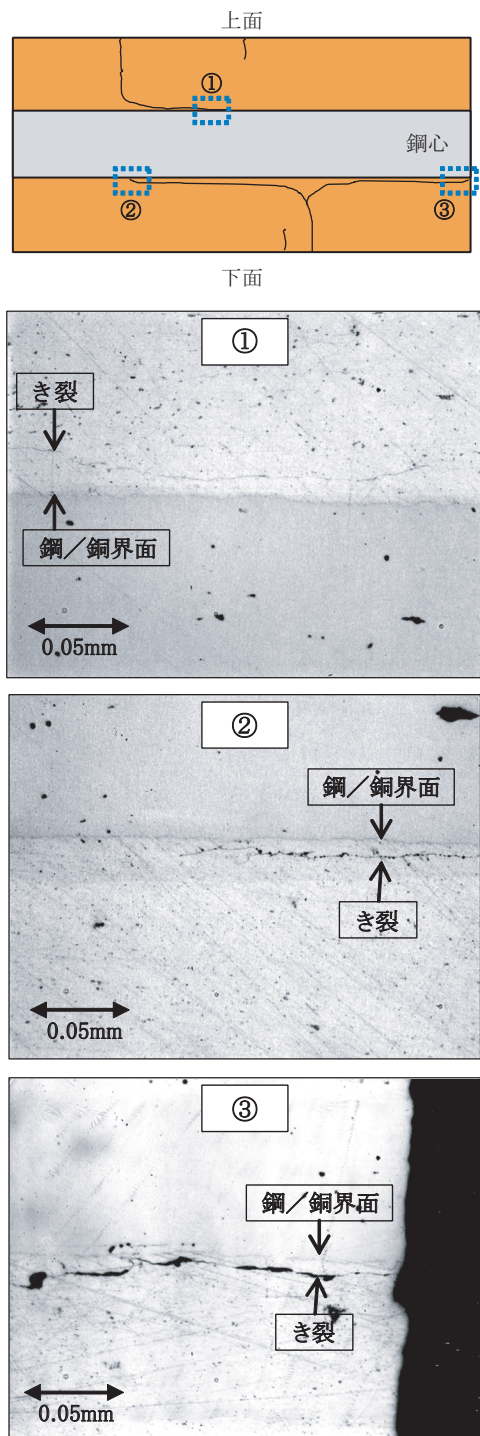


図 14 疲労き裂拡大観察

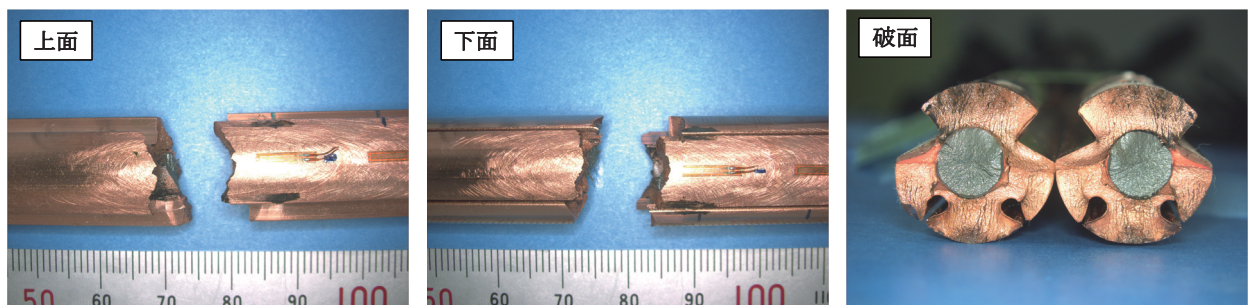


図 15 疲労破断させたCSD-P トロリ線の破断部（ひずみ振幅±1500×10⁻⁶，加振回数7615×10²回）

特集：電力技術

し、金属顕微鏡で行った。

応力解析結果を踏まえて疲労き裂観察の着眼点とした、鋼心からのき裂発生は認められなかった。一方、上面および下面から銅部分を進展してきたき裂はそのまま鋼心内には進まず、図 12、図 13 に示すように鋼心方向に向きを変え進展しているのが認められた。この鋼心に沿って進展しているき裂が鋼と銅の界面の剥離かどうか確認するため、拡大観察を行った。拡大像を図 14 に示す。いずれもき裂は銅部分を進展しており、鋼と銅の界面の剥離ではないことが確認できた。

硬銅など単一材のトロリ線では、上面または下面から進展してきた疲労き裂はそのまま進むであろうから、破断直前の状況における差違とはいえ、疲労き裂挙動の観点でいえば鋼心は耐疲労性向上に寄与するものと考えられる。なお、鋼心に沿って進展したき裂が銅層の剥離・脱落を招かないか、別途、完全に疲労破断させる試験を実施して検証した（加振部上面ひずみ振幅 $\pm 1500 \times 10^{-6}$ 、加振回数 7615×10^2 回）。その結果、図 15 に示すようにそのような現象は見られなかった。

5. まとめ

複合材料トロリ線や断面形状が特殊なトロリ線では、局所的な著大応力など特異な応力分布が発生し耐疲労性

低下要因にならないかという観点から、GT-P トロリ線およびCSD-P トロリ線を対象に、FEMによる応力解析を行った。その結果、GT-P トロリ線では疲労への影響が懸念される事項は特に見出されなかった一方、CSD-P トロリ線では鋼心に大きな応力が生じるという結果が得られた。

応力解析の結果を踏まえ、CSD-P トロリ線について加速疲労試験を行ってサンプルを作成し、疲労き裂の顕微鏡観察を行った。その結果、鋼心からのき裂発生は認められなかった。一方、銅部分を進展してきたき裂は鋼心内にはそのまま進まず、鋼心に沿って進むこと、およびそのき裂は鋼と銅の界面の剥離ではないことが認められた。以上から、鋼心は耐疲労性向上に寄与こそすれ、耐疲労性低下要因にはならないと考えられた。

文献

- 1) 菅原淳, 山下主税: 硬銅トロリ線の疲労寿命に及ぼす諸要因の影響評価, 鉄道総研報告, Vol. 20, No. 9, pp. 17-22, 2006
- 2) 日本機械学会材料力学・機械材料部門委員会: 金属材料疲れ強さの設計資料, 日本機械学会, p.15, 1961
- 3) 日本材料学会編: 疲労設計便覧, 養賢堂, pp.82-84, 1995