

高強度と高導電性を兼ね備えた PHCトロリ線

菅原 淳

電力技術研究部(集電管理 研究室長)



すがはら あつし

はじめに

高強度と高導電性を兼ね備えたトロリ線としてかねてより開発を行ってきたPHCトロリ線が、建設中の東北新幹線八戸～新青森間および九州新幹線博多～新八代間でようやく本格的な実用化を迎える見通しとなりました。PHCトロリ線についてはこれまでも各所で何回か紹介されていますが、この機会に改めてご紹介したいと思います。

開発の経緯

張力を加えて架設された状態のトロリ線には、弦のように波(波動)を伝える性質があります。その速度(波動伝播速度) C (m/s) は、トロリ線に加わっている張力を T (N)、トロリ線の単位長さ当たりの質量(線密度)を ρ (kg/m) とすれば次の式で表されます。

$$C = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

ところで、パンタグラフがトロリ線をしゅう動しながら走行することは、波を伝えるもの(波の媒体)に波を生じさせながら走行することにほかなりません。従って、架線から電気を取り入れている電車がどこまでスピードアップできるかはトロリ線の波動伝播速度に強く依存します。このことは、空気、即ち音という波動を伝える媒体の中を音を生じながら飛ぶ航空機が音速を突破するとき音の壁が発生することからも類推できるでしょう。これまでの研究から、電車の速度はトロリ線の波動伝播速度の約70%までが実用の範囲とされています。

ところが山陽新幹線や東北新幹線、上越新幹線の建設当初の架線(ヘビーコンパウンドカテナリ架線)では、公称断面積 170mm^2 の硬銅トロリ線またはSNトロリ線(特性は表1参照)を張力 14.7kN (1.5トン) で用いていました。このときの波動伝播速度は時速にすると概ね $350\sim 360\text{km/h}$ で、新幹線の営業最高速度が 200km/h 台前半であった時代には十分な性能でしたが、それ以上のスピード

アップを図ろうとする場合は波動伝播速度の向上が必要になります。

そのためには、 C を表す式からわかるように線密度に比べて引張強度が大きい、平たくいえば重さの割に強いトロリ線が必要になります。そこでまず開発されたのが銅心で強度の向上を図ったトロリ線です。銅心アルミニウムトロリ線(TAトロリ線)は試験架設にとどまりましたが、図1に示す銅覆銅トロリ線(CSトロリ線)は北陸新幹線高崎～長野間や東北新幹線盛岡～八戸間、九州新幹線新八代～鹿児島中央間で使用されています。また、断面積に占める銅の割合を増して、より大電流に対応できるようにしたCSDと呼ばれるトロリ線が東海道新幹線で使用されています。しかし導電性やリサイクル性では、複合材料より銅または銅合金の単一材料の方が有利です。そこで、銅合金で高強度かつ高導電性のトロリ線を実現できないか検討が行われました。

トロリ線への適用が見込まれる銅合金について調査を行ったところ、半導体のリードフレーム用材料に対して軽薄短小化への対応および放熱性の向上から高強度かつ高い熱伝導性の要求が強く、いくつかの銅合金が開発されてい

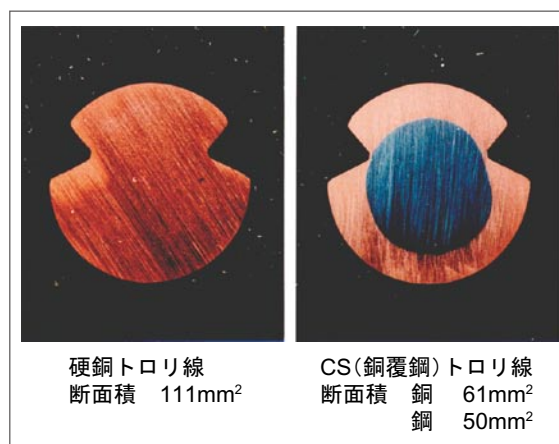


図1 硬銅トロリ線とCS(銅覆銅)トロリ線

ることがわかりました。金属では一般に、熱伝導性がよいものは導電性もよい性質があります。そこで、リードフレーム用銅合金の中から、銅に対して主な合金成分としてクロム約0.3%とジルコニウム約0.1%を添加し、析出硬化というメカニズムで強度の向上を図った合金を適用し、トロリ線を試作し基本特性評価試験に着手しました。これがPHCトロリ線の事始めで、1992年度のことです。余談ですが、トロリ線材料の開発は諸特性の確認試験や現地試験をくり返しながら進めるため、開発の端緒から本格的な実用化、特に新幹線での実用化に至るまでは長い期間を経るのが通例で、前述のCSトロリ線も10年以上を経て北陸新幹線に適用されました。

析出硬化とはごく簡単にいえば、本来は合金になりにくい成分（この場合は銅に対するクロムやジルコニウム）を高温から急冷することにより強制的に合金化すると、合金成分が素地金属（この場合は銅）の組織の中で集合体を形成、つまり析出しようとし、この析出物によって素地金属の変形が妨げられ、強度が向上する現象をいいます。なおPHCトロリ線の名称は、英語のPrecipitation Hardened Copper Alloy（析出硬化銅合金）に由来します。

PHCトロリ線の製造工程を図2¹⁾に示します。工程の中に熱処理が2回ありますが、1回目は先に述べた強制的に合金化する過程、2回目は合金成分の析出を促進する過程です。

PHCトロリ線の特性

(1)基本特性

各種トロリ線の特性を表1に示します。PHCトロリ線の引張破壊荷重は、公称断面積110mm² どうしで比較すると

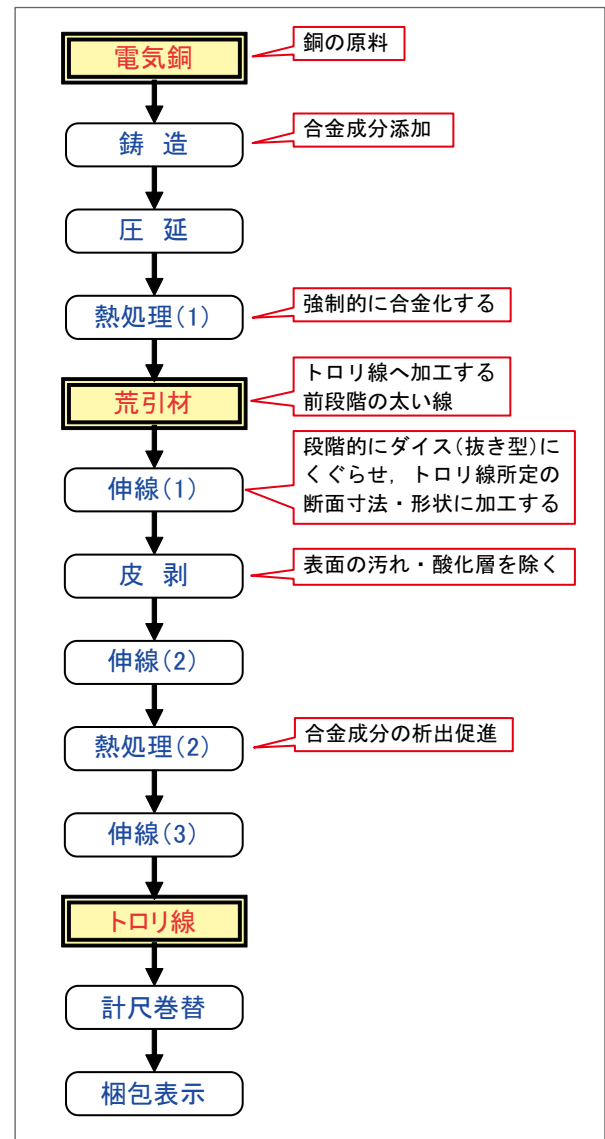


図2 PHCトロリ線の製造工程
(文献1)の図に加筆)

表1 各種トロリ線の特性

公称断面積	材質	新品時断面積 (mm ²)	線密度 (g/m)	引張破壊荷重 ^{注1} (kN)	電気抵抗 (Ω/km)	導電率 ^{注1,2} (%)	備考
110mm ²	硬銅	111.1	988	※38.2	0.159	※97.5	JIS規格あり。材質としてはほぼ純銅。
	すず入り銅 (SN)	110.5	982	※40.2	0.223	※70	銅+すず0.3%の合金を適用。旧国鉄時代に耐摩耗性向上のため開発。
	銅覆鋼 (CS)	銅 約61 鋼 約50	935	※65.1	0.259	※60	北陸新幹線高崎～長野間等で使用。
	PHC	111.1	991	※59.0	0.204	※76.0	東北新幹線八戸～新青森間等で使用予定。
170mm ²	硬銅	170	1511	※57.8	0.104	※97.5	
	すず入り銅 (SN)	169.4	1506	※58.8	0.145	※70	
	銅覆鋼 (CSD-P)	銅 約126 鋼 約36	1420	※65.3	0.132	※80	東海道新幹線で使用。摩耗限度警報線入り。

注1：引張荷重と導電率について、※は規格上または仕様上の最小値

注2：導電率は、標準軟銅(体積抵抗率1.7241 × 10⁻⁵ Ω・mm)を導電率100%として示した相対値

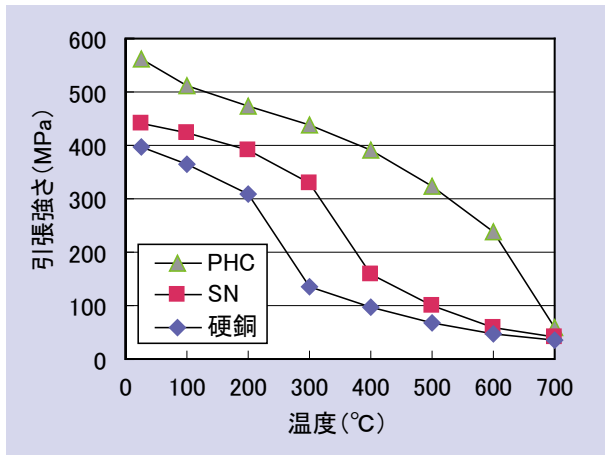


図3 各種トロリ線材料の高温引張特性

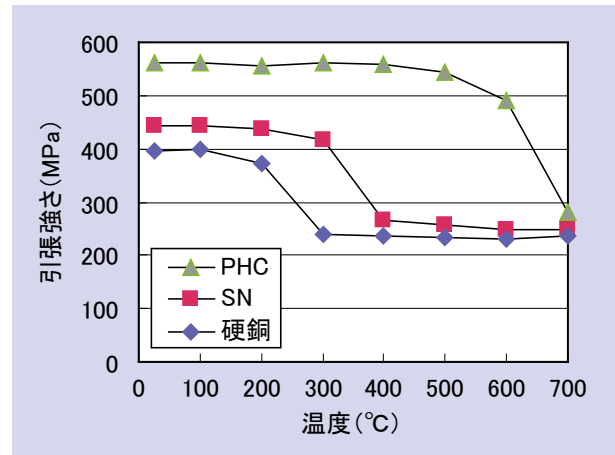


図4 各種トロリ線材料の焼鈍軟化特性

CSトロリ線には及ばないものの、破壊強度自体は59kN(約6トン)以上あり、CSトロリ線と同様に架設張力19.6kN(2トン)での使用が可能です。そのときの波動伝播速度は506km/hとなります。導電性は、旧国鉄時代に開発され現在も広く使用されているすず入り銅トロリ線(SNトロリ線)をしのぐ性能を有しています。

(2) 耐熱性

硬銅、SNおよびPHCトロリ線の高温引張特性と焼鈍軟化特性それぞれ図3、図4²⁾に示します。前者は各トロリ線の材料を横軸の温度に10分間保持した後、その温度で引張試験を行った結果、後者は横軸の温度に1時間保持した後、常温に戻して引張試験を行った結果です。PHCトロリ線は耐熱性も大幅に向上しており、スピードアップへの対応だけでなく温度上昇が懸念される箇所への適用も考えられます。

(3) 耐摩耗性

PHCトロリ線は強度が向上している分硬さも向上しており、耐摩耗性向上も期待できます。新幹線の駅の停車線に試験架設されたPHCトロリ線と、同じ駅の反対方向の停車線に架設されていたSNトロリ線の摩耗を比較した例があります³⁾。その結果を図5に示します。グラフ縦軸の断面積摩耗率とは、パンタグラフ通過1万回あたりの断面積減少を意味します。トロリ線の摩耗には材質以外にも速度、集電電流、離線アーク(スパーク)ほか多くの要因が影響しますので一概にはいえませんが、この例でいえば一般箇所の摩耗率はPHCトロリ線ではSNトロリ線の約1/2、トロリ線に重量物であるMTコネクタが取り付けられている点や、一般に摩耗率が大きいパンタグラフ停止点ではさらに大きな相違となっています。

また、新幹線高速区間の同一箇所でもCSトロリ線とPHCトロリ線の摩耗を比較した例もあります⁴⁾。その結果を図6に示します。CSトロリ線の銅部分の材質は特に合金を用いているわけではなく、硬銅トロリ線と同じです。この例では、PHCトロリ線の摩耗率はCSトロリ線の約70%であり、高速区間でも耐摩耗性が向上していることがわかります。

(4) 耐疲労性

トロリ線にはパンタグラフ通過のたびに曲げひずみが発生します。図7はそのイメージです。列車のスピードアップ等に伴ってこのひずみが大きくなるとトロリ線が疲労で破断することがあります。そこで、PHCトロリ線について

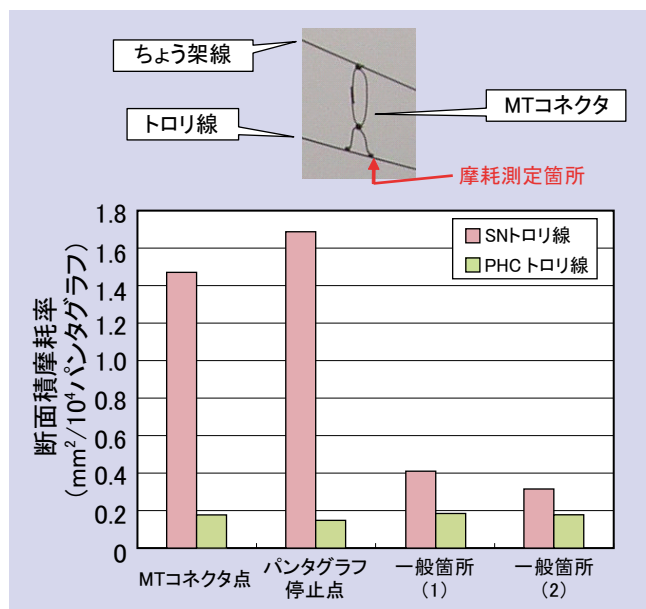


図5 トロリ線の摩耗率(新幹線駅構内)

て試験を行い疲労特性を確認しました。

図8は疲労試験の概略図です。トロリ線を試験装置に取り付けて張力を加え、中央を上下に加振してくり返し曲げひずみを与えます。そして、疲労で破断するまでの加振回数を疲労寿命とします。そのような試験をさまざまなひずみ振幅で行い、ひずみ振幅と疲労寿命の関係を求めます。

試験結果を硬銅トロリ線の結果とあわせて図9に示します。図中の平均引張応力とは試験時の張力を断面積で割った値です。実際の架線ではトロリ線は摩耗で断面積が減少していくので、疲労試験の際は限度まで摩耗した状態を想定しました。PHCトロリ線は引張強度が大きいので、疲労試験時の平均引張応力も硬銅より大きな値としています。一般に、金属材料の耐疲労性は引張強さや硬さなどの静的強度特性と相関がありますが、図9から、PHCトロリ線は耐疲労性も大幅に向上していることがわかります。トロリ線疲労破断の懸念がないひずみの目安値は、硬銅トロリ線の疲労特性に基づいて 500×10^6 とされていますが⁵⁾、PHCトロリ線では目安値の向上も期待できます。

おわりに

以上紹介してきたようにPHCトロリ線は多くの性能に優れており、今後の適用拡大が期待されます。

なお、PHCトロリ線の開発は三菱マテリアル株式会社および三菱電線工業株式会社と共同で行いました。

RRR

文献

- 1) 長俊之, 大戸路暁, 細川浩一, 橋本幸治, 林隆行: 整備新幹線向け析出強化型銅合金トロリ線, 三菱電線工業時報, 第105号, p.42, 2008
- 2) 長沢広樹, 青木純久, 片山信一, 菅原淳: 析出強化型銅合金のトロリ線・吊架線への適用, 鉄道総研報告, 第8巻第11号, p.5, 1994
- 3) 小比田正, 片山信一, 藤井保和, 長沢広樹, 大塚秀昭: PHCトロリ線の新幹線における実用化の検討, 平成13年電気学会全国大会論文集[第5分冊], p.2128, 2001
- 4) 原田智, 清水政利, 池田国夫, 佐藤純一, 小谷野昭一, 近成健二: PHCトロリ線を用いた新幹線用シンプル架線の開発, 鉄道総研報告, 第21巻第10号, p.35, 2007
- 5) 運輸省鉄道局, 鉄道総合技術研究所: 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 研友社, pp.50~52およびpp.203~209, 1993

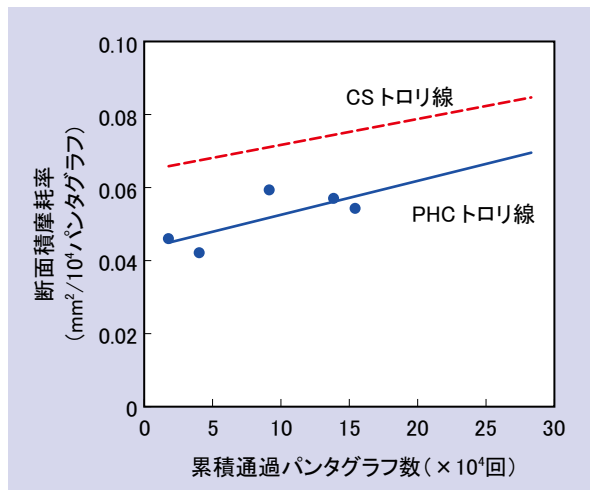


図6 トロリ線の摩耗率推移 (新幹線高速区間)

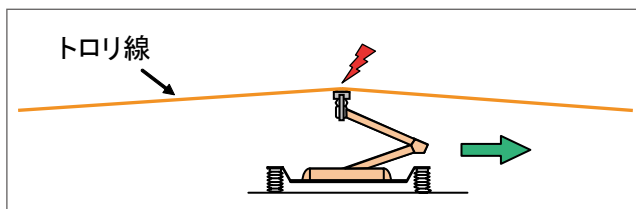


図7 パンタグラフ通過に伴うトロリ線曲げひずみ発生イメージ

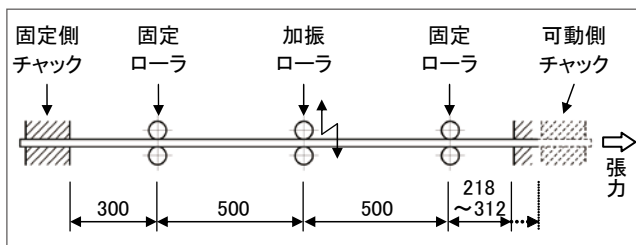


図8 トロリ線疲労試験装置概略

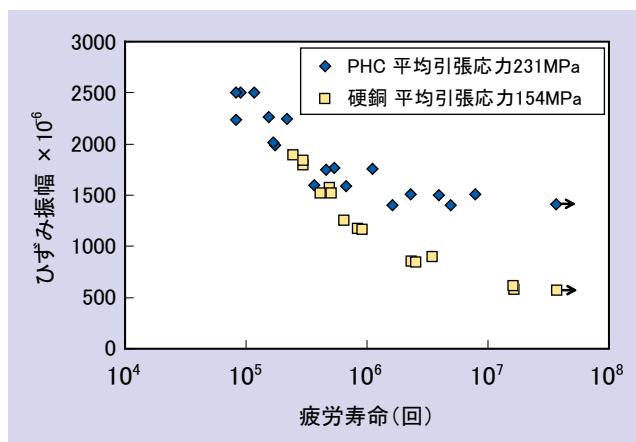


図9 トロリ線疲労試験結果 (→は未破断で試験打ち切り)