

第51回

トロリー線材料

トロリー線とは

鉄道の電化区間においては、電車に電力を供給するための電線（以下、電車線）があります。電車線はさまざまな部品で構成されますが、最も代表的なものがトロリー線です。トロリー線は、パンタグラフすり板と直接しゅう動することにより電力を受受するもので、レールの5m程度上空に架設されています。電力設備の一例を図1に示します。ここでは、架空式電車線のトロリー線の材料や断面形状について紹介します。

トロリー線に求められる性能

トロリー線の材料や断面形状に触れる前に、トロリー線自体について紹介します。電車へ供給される電力は、電力会社などの送電線から三相交流で受

電し、電気鉄道用変電所によって電気運転に適した電力に変換されて送られます。変換された電力は直流／交流や、送り出し電圧（き電電圧）にも数種類ありますが、最終的にはトロリー線、パンタグラフすり板を経由して電車のモーターへと送られます。トロリー線は電車へ電力を供給するための電気回路で、高電圧が課され、かつ多重系とすることが難しい設備です。したがって、次のような性能が要求されています。

①電気抵抗が小さいこと

送電ロスを小さくするためや、トロリー線自身の温度上昇を小さくするために、電気抵抗が小さいことが必要です。

②引張強度が高いこと

トロリー線には、9.8kNや19.6kNなどの張力が加わりますので、それに耐えうる十分な強度が必要です。また、

列車が高速になると、トロリー線とパンタグラフが接触を保つ性能（集電性能）にトロリー線張力が大きく関係します（※参照）。

③耐摩耗性が大きいこと

パンタグラフすり板としゅう動するため、トロリー線、すり板ともに摩擦します。そのため、すり板との兼ね合いを考えた耐摩耗性が重要です。

④耐疲労性が大きいこと

パンタグラフが通過するたびにトロリー線には曲げひずみが発生します。その曲げひずみに対して容易に疲労破断しないことが必要です。

⑤耐熱性が大きいこと

トロリー線とパンタグラフが機械的に離れた時にアーク放電が発生し、アークの温度は数千度にも達します。また、通電に伴いトロリー線自体の発熱やすり板との接点で発生するジュール熱も

※ トロリー線を線条と見なした時に伝播する横波の速度を、波動伝播速度と言います。安定して集電するための列車速度はトロリー線波動伝播速度の70%程度以下とされています¹⁾。波動伝播速度をC、トロリー線の張力をT、トロリー線の線密度（単位長さ当たりの質量）をρとすると、Cは次式で表されます。

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

つまり、鉄道の高速度を実現するためには、波動伝播速度を大きくする必要があります。そのためには、トロリー線の張力を大きく（高張力化）するか、トロリー線の線密度を小さく（トロリー線を軽く）するかの対策が必要となります。端的に言うと、高速化のためには細くて強いトロリー線が不可欠と言えます。

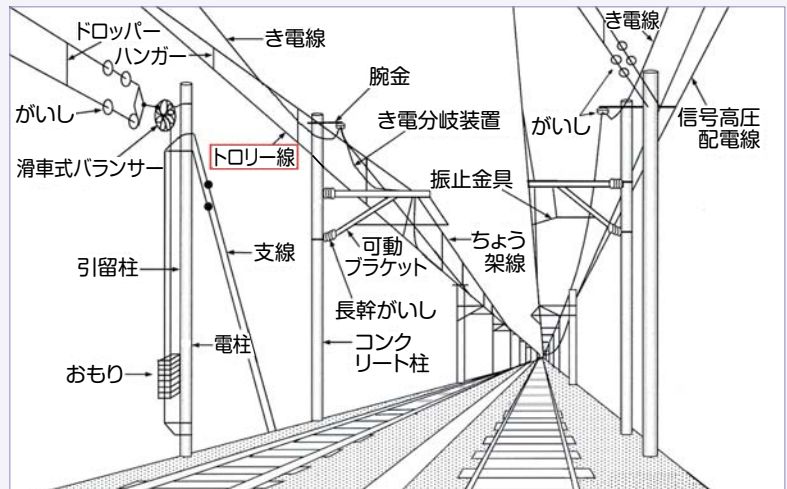


図1 電力設備の一例

あるので適度な耐熱性が必要です。

⑥耐食性が高いこと

屋外に、場合によっては40年を超えるような長期間にわたって架設されるため、腐食による損耗が少ないことが必要です。

⑦リサイクル性が高いこと

トロリー線は、摩耗量が管理値に達すると張り替えられる消耗品であるため、廃棄に伴う環境負荷が小さい、すなわちリサイクル性が高い方が好都合です。

トロリー線開発の歴史

トロリー線には要求性能が多いため材料選択の自由度は高くありません。そのため、トロリー線として使用される、または開発された材質は多くなく、単金属材料では銅系、アルミニウム系、鉄系の3種類、複合材料では銅-鉄、アルミニウム-鉄があるのみです。また、要求性能を材質以外の面から補完するために、断面形状にもさまざまな検討が行われています。年代順に現在に至るまでの各種トロリー線を紹介します。

(1) 電化初期～戦前

明治末期の電気鉄道建設の当初からしばらくの間は、タフピッチ銅を材料としたトロリー線が使用されました。1934年発行の電線便覧には公称断面積70, 85, 110, 150, 170mm²のトロリー線が掲載されています。したがって、現在のみぞ付き硬銅トロリー線は大正から昭和初期にかけて確立されたものと考えられます²⁾。この「みぞ」は、トロリー線を支持したり、電流を供給するための「イヤー」という金具を取り付けるためのもので、英語名のGrooved Trolley wireから、GTトロリー線とも呼ばれています(図2のA、図3のGT)。



図2 各種トロリー線の断面形状

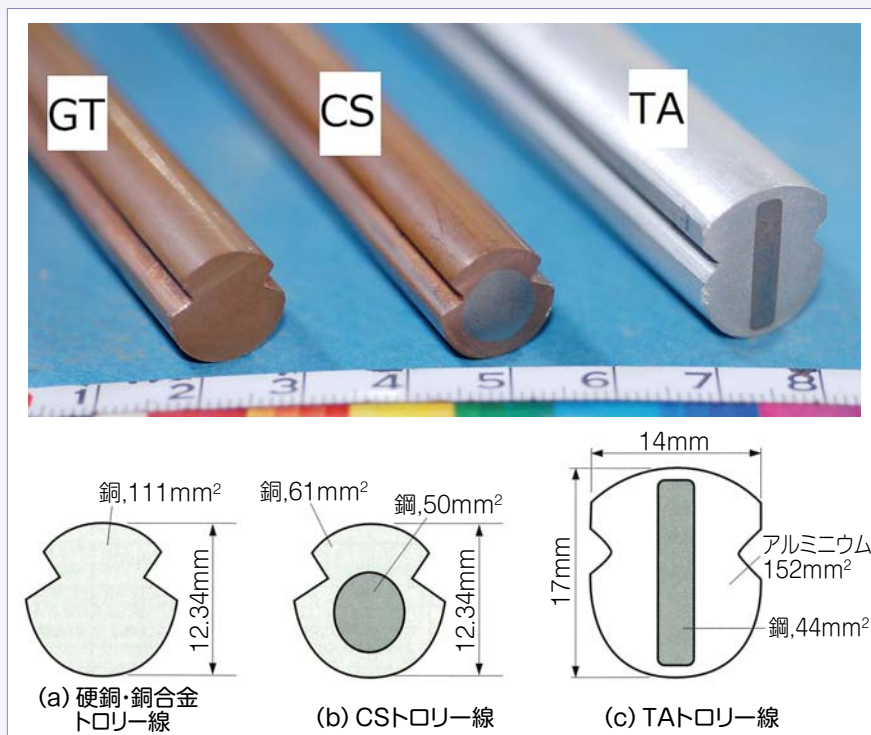


図3 各種トロリー線の外観と断面形状

なお、いつの頃からかは不明ですが、現在の硬銅トロリー線は無酸素銅を材料としています。冷間加工によって、所定の径、断面形状に加工し、また、冷間加工に伴う加工硬化によって所定の強度を実現したものでJIS E 2101「みぞ付き硬銅トロリー線」に規定されています。110mm²、170mm²硬銅トロリー線は広く使われ、代表的なトロリー線です。東海道新幹線開業時もGT110mm²トロリー線が使用されました³⁾。

(2) 第二次世界大戦中

第二次世界大戦中には、銅資源確保のため、鉄およびアルミニウム系のトロリー線が誕生しました。ひとつは、炭素0.05~0.15%の極軟鋼トロリー

線です。特に関西地方の私鉄で使用されることが多かったようです²⁾。

もうひとつは、アルミニウム合金トロリー線(Al-Si-Mg)で、国鉄で使用されました。また、阪神電鉄において純アルミニウムトロリー線が使用されました。いずれのトロリー線も、第二次世界大戦後の銅取引の自由化に伴い撤去されました²⁾。

(3) 第二次世界大戦後～電化区間拡大

戦後、トロリー線には純銅が使用されましたが、断面形状の工夫や材質の変更が施されました²⁾。

① 梯形(1952年実用化)

パンタグラフすり板との接触面積を大きくして耐摩耗性を向上をねらったも

ので、剛体電車線方式の箇所を導入されています(図2のB)。

②銀入りトロリー線(1955年頃)

国鉄の電化工事中(図4)、蒸気機関車の蒸気の熱によってトロリー線が軟化するのを防止するため、銅に銀を0.12%添加した銀入りトロリー線⁴⁾が開発されました。導電率をあまり低下させることなく、耐熱性・耐摩耗性を高めたのが特長です。開発のねらいどおり、硬銅トロリー線の許容温度(瞬時)200℃に対し、300℃と高いため、1972年11月の北陸トンネルの列車火災事故を契機として、長大トンネルの防災対策として利用されています。G合金トロリー線や耐熱トロリー線とも称されていました。

③異形丸形(1973年実用化)

170mm²トロリー線のみぞ部の寸法を110mm²と同一にして、イヤークラスの共用化と摩耗部分の増大をねらったものです。一般に、GT-Mと称し、現在でも導入されています(図2のC)。

④異形縦形(1973年実用化)

摩耗部分の増大をねらい、異形丸形とともに考案されました。GT-Tと称し東京駅構内をはじめ各所で試用され

ましたが、カテナリーちょう架では傾斜時に不具合があるため、現在では使用されていません(図2のD)。

このほか、1955年12月、国鉄の電化工事中に蒸気機関車から出る煤煙によりトロリー線しゅう動面が汚損することを防止するため、しゅう動面に防煤テープが貼り付けられたトロリー線が規格化されました。言うまでもなく、電気車運転開始前に防煤テープは全てはがして使用されました(図2のE)。

1975年頃以降、耐摩耗性向上を目的とし、銅にわずを0.3%程度添加したわず入りトロリー線が開発⁵⁾されました。0.3%わず入りトロリー線は、わずの元素記号SnからGT-SNトロリー線とも呼ばれます。硬銅トロリー線の導電率97.5% IACS(☞参照)に対して70.0% IACSと低下しますが、耐摩耗性が向上しているため全国的に広く導入されています。

高速化への対応

鉄道的高速化には細くて強いトロリー線が望まれます。そこで、細さや強度アップをねらったトロリー線が開発されました。

①TAトロリー線

芯に縦長の鋼材、表面にアルミニウム材を配した複合材料で、TAトロリー線と称されます。TAは鉄(T)とアルミニウム(A)に由来します。1990年代前半の新幹線試験電車による走行試験の頃までに試験架設されましたが、アルミニウムのしゅう動特性の

不具合から現在架設されている箇所はありません。

②銅覆鋼(CS)トロリー線

銅資源の節約と強度向上を目的として戦時中から構想があったもので、張力を鉄(鋼)で、電流を銅で分担する構造で、芯材の鋼の周りを銅で覆った複合材料のトロリー線です。1967年頃、国鉄とメーカーで検討が開始されましたが、当時は導入に至りませんでした²⁾。

しかし、近年になって製造方法が改良され、CSトロリー線という呼称で実用化されました⁶⁾。東海道新幹線、北陸新幹線(高崎～長野間)、東北新幹線(盛岡～八戸間)、九州新幹線(新八代～鹿児島中央間)などで導入されました。CSは銅覆鋼(Copper clad Steel)に由来します。

GT, CS, TAトロリー線の外観を図3に示します。

③PHCトロリー線

前述の複合材料のトロリー線に対して、強度と導電性の両立、およびリサイクル性向上をねらって開発された銅合金トロリー線です。PHCトロリー線以前に実用化に至った銅系トロリー線は、純銅に銀やわずなどの合金元素を添加して高強度化を実現していますが、一方で、一般に純銅に含まれる合金成分は導電率に著しい影響を与えることが知られています。

PHCトロリー線は、無酸素銅にクロム0.25～0.45%、ジルコニウム0.05～0.15%、ケイ素0.01～0.05%を添加して熱処理を加えた析出強化型銅合金材料で、導電率は76% IACS以上⁷⁾です。この素材は、铸造・圧延・熱処理工程を経て製作されます⁷⁾。東北新幹線(八戸～新青森)以降の整備新幹線区間の標準トロリー線として導入されています。PHCは、Precipitation Hardened Copper alloyに由来しています。

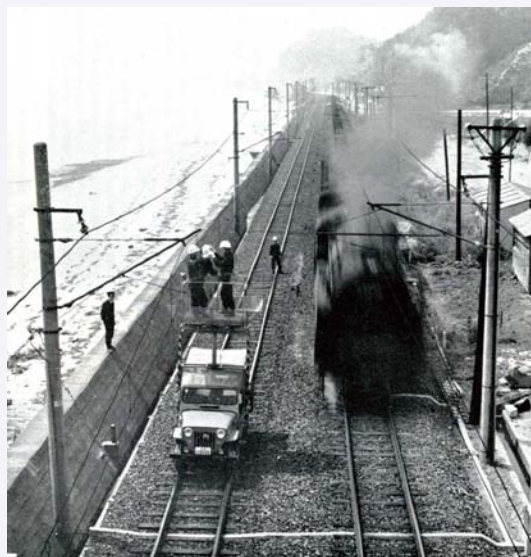


図4 電化開通直前の架線点検作業(1960年代前半の山陽本線)

出典：国鉄電化のあゆみ、社団法人鉄道電化協会、1964

☞ IACS

International Annealed Copper Standardの略。焼鈍標準軟銅の導電率を100% IACSとしています。

表1 トロリー線の特性⁴⁾

トロリー線種別			材料, 成分	公称断面積 mm ²	導電率 % IACS	引張強さ MPa
呼称	略号	構成, 断面形状				
硬銅トロリー線	Cu	純銅, 図3(a)	Cu	110	97.5	347
銀入りトロリー線	Ag	銅合金, 図3(a)	Cu, Ag (0.12%)	110	97.5	365
すす入りトロリー線	SN	銅合金, 図3(a)	Cu, Sn (0.3%)	110	69.8	365
TAトロリー線	TA	複合, 図3(c)	芯材: 鋼, 被覆材: Al	196	82.0	283
CSトロリー線	CS	複合, 図3(b)	芯材: 鋼, 被覆材: Cu	110	59.6	665
PHCトロリー線	PHC	銅合金, 図3(a)	Cu, Cr (0.23%), Zr (0.087%)	110	77.9	555

注1: TA以外のトロリー線では公称断面積が170mm²のものも実用化されています。
注2: CS, TAトロリー線の導電率・引張強さは複合材としての値から換算しています。

保安度を向上したトロリー線

トロリー線のメンテナンス性向上や、保安度の向上をねらい、次のようなトロリー線も開発されています。

①MFトロリー線

新幹線のトロリー線摩耗管理は、電気・軌道検測車によって行われています。検測車では、パンタグラフすり板との接触面にレーザーを照射し、摩耗面の幅を計測することで摩耗管理を行っています。トロリー線摩耗量の誤検出を避けるため、また摩耗管理値への到達の判断をやすくするため、断面形状を変化させたトロリー線が開発されています⁸⁾。なお、MFはMeasure Freeに由来しています。

②摩耗警報線入りトロリー線

トロリー線摩耗管理の保安度向上のため、トロリー線内部に絶縁電線や光ファイバーを内蔵したトロリー線も開発されています⁹⁾。別途表示器や伝送機能が必要となりますが、トロリー線が摩耗管理値に達したときに警報を出すことが可能となります。

③着雪・着氷霜防止のためのトロリー線

冬期にトロリー線が着雪・着氷霜すると不具合を生じることがあります。そこで、京王電鉄などでは内部にヒーター線を内蔵したトロリー線を¹⁰⁾、JR東日本ではトロリー線自体に電流を流して発熱させる機能を有したシステムを一部区間に導入しており¹¹⁾、ともに

発生した熱でトロリー線への着雪や着氷霜の付着成長を抑えることを目的としています。

ヨーロッパのトロリー線

欧州規格EN50149:2012には、表2に示すようなトロリー線銅合金の材質が規定されています。日本にはない添加元素、マグネシウム入りも規定されている点の特徴です。ただし、環境への配慮からカドミウムの使用は推奨されていません。

今後の展望

新幹線速度向上時の基盤技術として、強度と導電性を両立した高性能トロリー線の開発が見込まれます。開発にあたっては、リサイクル性やトータルコストの低減も重要な要素になると考えられます。

高強度化においては、EN規格にはあるものの、現在日本では合金元素として使用されていないマグネシウムも添加元素のひとつとして検討される可能性があります。

鉄道総研においても、トロリー線開発に積極的に取り組んでいきたいと考えています。

(白木理倫／電力技術研究部
集電管理研究室)

表2 ENに規定のトロリー線銅合金

種別	含有率
銀入り	0.1%
カドミウム入り	0.7%, 1.0%
マグネシウム入り	0.2%, 0.5%
すす入り	0.2%, 0.4%

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：電車線とパンタグラフの特性，研友社，p.49, 1993
- 2) 鉄道電化協会：電気鉄道技術発達史，pp.243-247, 1983
- 3) 下前哲夫ほか：新幹線の連続アークはどのようにして解消されたか，(社)日本鉄道電気技術協会，p.14, 2008
- 4) 藤井保和：トロリー線と高速化，RRR，Vol.58, No.11, pp.34-35, 2001
- 5) 斎藤寿雄，芳村徳巳：電車用トロリー線について，日本金属学会会報，第19巻，第12号，p.904, 1980
- 6) 鈴木陽，大場顕，土屋敬一ほか：複合トロリー線の開発（第1報），鉄道技術研究所速報，No.A-186-189, 1986
- 7) 長俊之ほか：整備新幹線向け析出強化型銅合金トロリー線，三菱電線工業時報，第105号，p.43, 2008
- 8) 久保吏：JR西日本で採用しているトロリー線について，鉄道と電気技術，Vol.18, No.8, p.12, 2007
- 9) 光ファイバー式警報トロリー線システム，日立金属技報，Vol.32, p.51, 2016
- 10) 最近の集電技術動向に関する調査専門委員会編：最近の集電技術動向に関する調査報告，電気学会技術報告，第984号（D部門），p.91, 2004
- 11) 白石秀男，小林雅晴：トロリー線の着氷霜対策，鉄道と電気技術，Vol.2, No.8, pp.40-44, 1991