

隨筆

鉄道あれこれ8

トロリー線とパンタグラフの相互の動的関係と振動特性の秘密を分析する
～新幹線の実現のためには、トロリー線の弾力性が減る硬点でパンタグラフの離線をいかに減らすかが最大の課題だった～

香川大学医師会 原 量 宏

これまで架線（トロリー線）とパンタグラフに関して個別に考察して来ましたが、今回は両者の相互の関係、すなわち高速で走行する場合のトロリー線とパンタグラフの相互の微妙な関係、さらにパンタグラフに高速で接して電流を流す（集電する）大変重要なナリ板に関しても考察してみたいと思います。

22. トロリー線とパンタグラフの動的関係、振動特性

随筆6ではトロリー線に関して、随筆7ではパンタグラフに関して、個別にしかも静的な観点から考察してみましたが、やはりトロリー線とパンタグラフは相互の運動特性を一体として考えるべきで、そうしてみると技術的に大変奥深いことが浮かんできます。

1) パンタグラフの上げ下げ

パンタグラフをたたんでいる時にはフックでしっかりと固定してあり、フックをはずすとばねの力で自然にパンタグラフが上昇し、逆に下げる時にはコンプレッサーで空気圧をかけて下降する様になっています。

2) トロリー線とパンタグラフの接触

パンタグラフがトロリー線を押し上げる強さは、在来線では約4.5から6 kgf、新幹線では約5.5kgfとなっています。当然押し上げる力が強い方が、離線が少なく安定して電流を流せるのですが、もちろんパンタグラフとトロリー線の摩耗が大きくなり、保守に手間と経費がかかります。ちなみに欧州の鉄道では日本の2倍程度になっていますが、欧州では日本に比べて走行する列車の本数が少ないため可能となっています。列車の走行密度が圧倒的に高い日本では、押上力を低くすることにより保守を楽にしています。ただしこの押上力では湿った雪の重さでも下がるほどと言われ、パンタグラフの離線を防ぐために技術的に解決すべき問題が沢山出ています。

レールの軸重に関して、日本では欧州や米国に比べて大変軽く、そのため、軸重が軽くてよい電車の開発が進んだことは以前触ましたが、パンタグラフの押上力に関しても約半分であることは大変興味深いです。

3) パンタグラフによるトロリー線の高さの上昇 (弾力性、しなやかさ、しなり)

YouTubeなどで電気機関車のパンタグラフが上昇する場面を見ると、パンタグラフがトロリー線に接触する際に、トロリー線もわずかですが上下に振動する様子がわかります。トロリー線が押し上げられる幅（しなり）は、新幹線など高速鉄道では120mm以内となっています。車両がトロリー線を押し上げながら走ることにより、走行中にパンタグラフが振動でバウンドしそうになってしまっても、逆にトロリー線がパンタグラフの動きにしなやかに追従することにより離線しにくくなり、その結果トロリー線から大電流を安定して取り込める様になっています。

一方、地下鉄等の鋼体架線では、弾力性が全くないため、パンタグラフがバウンドしやすく、しかもパンタグラフの動き（下降する時）に全く追従しないため、離線が大変生じやすくなります。そのため関西のJR東西線（東京メトロの東西線ではなく）の様に、地下の鋼体架線の区間（尼崎駅－京橋駅間）では、わざわざダブルパンタにしています。

4) トロリー線を水平に保持するためのハンガー

車両が高速走行時に、パンタグラフとトロリー線との接触を安定して保つには、トロリー線をできるだけ水平に張る必要があります。トロリー線はカテナリー曲線を描く吊架線から、ハンガーと呼ばれる金具で約5mごとの間隔で吊り下げられています。ハンガーの長さは、トロリー線が水平になる様に、カテナリー曲線のカーブに合わせて正確に計算されています。架線を張るための電柱は、直線部分ではほぼ50m間隔で建てられていて、カーペ

ブの区間では曲線の度合いに応じて短く（40m前後）なっています。電柱と電柱の間、トロリー線は完全に直線的に張られていますが、以前説明しました様に、レールが完全な直線区間においても、トロリー線がレールに対して左右にジグザグになる様に（幅20cm程度）、可動ブラケットと曲線引金具という特殊な金具を用いて電柱に固定されています。詳しく説明すると長くなりますが、可動ブラケットは、温度の変化で架線の長さが変化しても、架線に無理な力がかからない様に、電柱の取付部を中心に水平に可動な柔軟な構造になっています。

5) トロリー線の硬点、パンタグラフが通過する際に飛び跳ねやすい強い硬点が50m（電柱の間隔）ごとにある。

パンタグラフは、少しですがトロリー線を押し上げながら走るため、トロリー線はすべての区間で同じ弾力性（しなり）を持つことが理想ですが、トロリー線を保持する部分で弾力性の少ない点（硬点）が出来てしまいます。

（実際には、その部分の硬さというより、加速度を受けた時に動きにくくなる意味で、重さが関係します。）

トロリー線を単に上から吊るすだけのハンガーは、構造が簡単でかなり軽くすることができますが、支柱の所でトロリー線をジグザグに保つために固定している部分では、たとえ器具を軽くできても、横方向（実際には斜め上方向に16度）に強く牽引しているため、パンタグラフが近づいた時に、硬点を持ち上げられず、逆にパンタグラフが下方向に跳ねやすくなります。

細かく考えると、パンタグラフは、5mごとにあるハンガーの部分の硬点（弱め）を10か所通過したあと、50mごとの強めの硬点を1か所の割合で走行することになります。

以上はシンプルカテナリーの場合ですが、コンパウンドカテナリーでは、吊架線の下にドロッパー（10m間隔で設置）を用いて補助吊架線を水平に張り、さらにその下にハンガー（5m間隔）でトロリー線を保持しています。補助吊架線はほぼ水平になっているので、ハンガーはすべてほぼ同じ長さでよく、しかも短く軽いため、硬点での硬さが和らぎますが、やはり支柱のところでは曲線引金具（個別に上下2

か所）で牽引するため、硬点の硬さは変わりません。

上下の方向は逆になりますが、まさに海でモーターボートに乗って高速で走行する際に、小波（連続して10波）と大波（1波）で上下に揺れて、離線は大波の時に、一旦船体が空中に浮いて、その後重力で下に落ちる状況でしょうか。

6) 東海道新幹線が走り始めた当初、初代の0系新幹線では離線が大きな問題となった。

随筆7すでに触れましたが、東海道新幹線の初代0系電車では、パンタグラフの離線が大きな問題となりました。在来線の電車は車両の長さが20mですが、新幹線の車両の長さは25mであり、しかも2両（2両でほぼ50m）に1基（16両編成で合計8基）のパンタグラフが付いているため、50mごとの硬点でパンタグラフがほぼ同時に離線しやすくなります。

鉄道ファンの間では、新幹線を開発する際に、電柱の間隔と車体の長さの関係まで考えなかったのかと恰好の話題です。しかし、その後、パンタグラフやトロリー線を改良したり、車両間に高圧母線（新幹線では特高压引通線と言います）を引くことにより、現在は離線を起こさず、少ないパンタグラフ（2基）で安定して大電力を取り込むことができる様になっています。

日本のパンタグラフの低い押上力（欧洲の約半分）の厳しい条件があったからこそ、性能の良いパンタグラフが開発され、その結果トロリー線の摩耗も減り保守が容易になったことは、世界の鉄道業界に誇れると思います。

7) 離線とアーク放電、直流と交流の差

パンタグラフがトロリー線から離線する時に、電流がさらに続けて流れようとしてアーク放電（火花が散って音がする）が発生します。直流1,500ボルトの場合、パンタグラフには1,000～2,000アンペア以上も流れるので、アーク放電の熱は5,000℃以上にもなり、トロリー線とパンタグラフ（すり板）の損傷だけでなく、場合によってはトロリー線の断線に至ります。

離線する時には直流の方が交流より火花が大きく障害が出やすいため大変興味深いです。交流の場合、同じ電力でも電圧が高い分電流が少なく、しかも1秒間に50、60回の頻度で電圧がゼロ

になるため、アーク放電が消えやすいからです。もし新幹線が交流電化でなかったら、トロリー線の断線がしばしば起きていた可能性があります。

8) 離線がモーターや他の機器にあたえる影響

離線が生じた場合、トロリー線とパンタグラフに障害が生じるだけではなく、電流が瞬断することにより、制御用電子回路・機器、モーターや車輪など、非常に多くの機器に悪影響が生じます。たとえば、モーターに不規則な電圧がかかり、回転力の急激な変動が生じ、歯車への衝撃、車輪の空転、さらには発電ブレーキの不安定化などが生じます。

9) 離線とアーク放電の対策

離線とアーク放電は一緒に考えられることが多いのですが、離線そのものは機械的な問題で、アーク放電は電流の流れそのものと関係するので、対応策は別々に考える必要があります。

・離線の対策

離線に関しては、架線とパンタグラフ両者の対策になりますが、架線側では硬点を軽くすることに加えて、専門的になりますが、架線自体を軽くかつ張力を強くして、架線の固有振動周波数を高くすることなどがあります。

パンタグラフ側の対策としては、トロリー線の高さの大きな変化に関しては、パンタグラフ全体を軽くすることが重要で、トロリー線の上下の細かい変動に関しては、トロリー線に直接接触する「すり板」を軽くし、その下に小型のバネを挿入し、上下に動きやすくしています。最近は「すり板」を分割（実に12分割）して接触部分を極限まで軽くする工夫がなされています。

・アーク放電の対策

パンタグラフが離線した場合でも、他のパンタグラフから電気が供給されればスパークはかなり低減できます。そのため東海道新幹線の300系から、一編成全体の車両の屋根上に電気を通す特高圧引通線（母線）が設置される様になりました。これにより各電動車にパンタグラフを設置する必要は無くなり、0系では16両編成に8基あったパンタグラフを300系以降では2基まで減らすことが出来ました。

最近は在来型の電車でも高圧引通線が引かれていて、パンタグラフの数を減らしています。

（なお高圧引通線を引くことにより、異なる変電所からのトロリー線への配電の境界点で異常な電流が流れる等問題が生じやすいので、随筆9で触れたいと思います。）

10) トロリー線と高速で接するすり板の組成と交換時期

トロリー線と高速で滑りながら接するすり板は、夏も冬も、雨の日も雪の日も、あらゆる気象条件で安定して大電流を流す必要があるため、その組成は昔から大変大きな研究テーマでした。まずトロリー線とすり板のどちらが柔らかいかですが、もちろん交換しやすい、すり板です。トロリー線の素材には、摩耗に強い銅とすずの合金が使われます。

すり板の素材には、在来線では潤滑性が高くトロリー線の摩耗を抑える炭素材に銅を複合させたカーボン系すり板が使われます。新幹線では鉄系の焼結合金のすり板が使われています。新幹線では高速で走行するため、在来線とは比較にならないほどの厳しい条件下で集電する必要があります、衝撃に耐えうる高い強度と耐摩耗性を持つ鉄系の焼結合金が使われています。

トロリー線は意外と長期間使って、新品の時の直径15.5mmが約6mmまで減ると交換されます。交換時期としては、新幹線では約10年とされています。在来線では、非常な高頻度で電車が走る山手線（2～3分に1本）で約13年ですが、他の在来線ではかなり長期間使えます。ちなみに2022年に、伯備線・山陰本線電化開業40周年記念として鉄道ファンに売り出された、JR伯備線のトロリー線（文鎮にはやや長いですが40周年を記念して？40cm）は、実に40年間も使われていました。

すり板の交換時期は、新幹線では約2万キロごと（東京～博多間ではおよそ8.5往復）、在来線では、路線によって異なりますが、短い場合でも半年程度で交換される様ですので、いかに新幹線でのすり板の減り具合が早いかがわかります。

全く話は変わりますが、鉄道のレールに関しては、新幹線では約10年、在来線（通勤路線）では10～15年、一般の路線では20～30年での交換が目安とされています。偶然ですが、トロリー線の交換頻度と近いことは興味深いです。

（次回も思いつくまま鉄道のテーマに関して書きたいと思いますのでご期待ください。）