

第99回

電車の駆動装置

電気鉄道の黎明期

1879年ベルリン博覧会にて、ドイツの発明家であり実業家であるヴェルナー・フォン・ジーメンス(図1)により電気機関車^{けんいん}が出品されました。この電気機関車は3台の客車を牽引でき、速度は時速13kmでした。博覧会開催中四か月間で、およそ9万人の乗客を乗せて走ったといわれています。

その後、電気を動力に用いた鉄道の営業運転が始まります。1881年にジーメンスハルス社により、ベルリン内南西域のプロイセン王立カデット研究所とリヒターフェルデ間2.4kmで世界初の電気を動力として用いた路面電車の運行が開始されました(図2)。

1890年にはイギリスのCity and South London Railway社(C&SLR社)によって世界初の電気を動力として用

いた地下鉄の運行が開始されました(図3)。当時はトンネル小断面化の観点から、それまでの蒸気運転に換えて、定置の蒸気機関によるケーブルカー、あるいは蒸気以外の動力車両のみが法律で認められていました。当初の予定では地下鉄は蒸気ケーブルカーの方式で運用される予定でした。しかしケーブルカー会社が倒産してしまったため、電気機関車が使用されたようです。

電気鉄道黎明期の駆動装置

1879年、ベルリン博覧会に出品された電気機関車では、車輪を回すためのモーターは車体の中にあり車輪は車外にあるため、モーターの力を車輪まで伝える必要があります。このモーターの動力を車輪に伝える装置を駆動装置とよびます。

ジーメンスの電気機関車は二種類の



図2 ゴーメンスの路面電車
出典：Wikimedia Commons/Public Domain



図1 ゴーメンス
出典：Meyer's Encyclopedia (1906)



図3 電気機関車を用いたロンドンの地下鉄
出典：The Illustrated London News (1890)

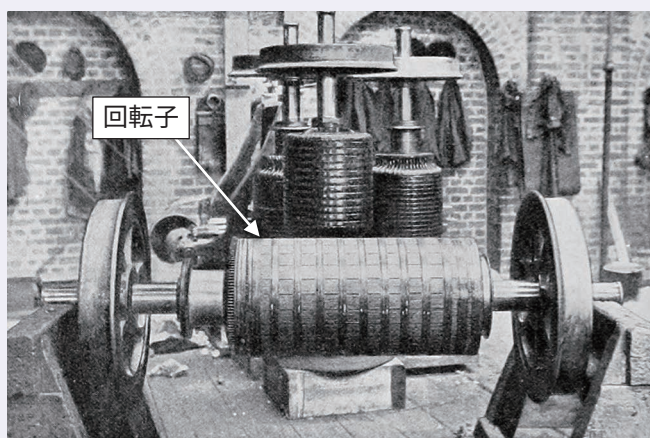


図4 C&SLR社の車軸一体モーター
出典：Electric railway engineering (1907) に加筆



図5 電車の父、スプレーグ
出典：Wikimedia Commons/CC-BY-SA 3.0/GFDL

歯車（傘歯車と平歯車）で動力を伝達していたということなので、これらの歯車が駆動装置に相当します。世界初の電気地下鉄であるC&SLR社の電気機関車では、駆動装置を用いず、モーターの力は直接車輪に伝えられていました（図4）。

このように鉄道に電気が使われ始めた当初は、シンプルにモーターの力が車輪まで伝えられていました。ただ、前述の車両の速度は時速20km以下と遅かったため、輸送能力増大のため高速化が図られることとなります。しかし、高速化にともない問題が生じます。その問題の一つが、高速走行時の振動や衝撃でモーターや歯車が壊れてしまうことでした¹⁾。この問題を解決するため、さまざまな駆動装置が開発されることとなります。

高速化にともない駆動装置に求められるようになった新たな機能が「相対変位の吸収」です。現在の電車はおもに輪軸、台車、車体から構成されています。これらはばねを介して接続されているため、走行時に発生する輪軸の振動は、台車や車体に伝わりにくくなっています。しかし、これは輪軸、台車、車体がそれぞれ相対的に変位していることを意味します。輪軸から伝わる衝撃を和らげるためモーターを台

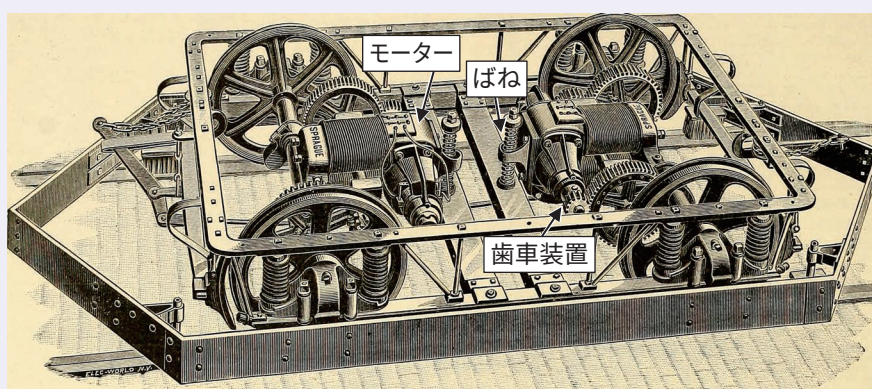


図6 吊り掛式を採用した台車
出典：The Street Railway Gazette (1895) に加筆

車や車体に設置した場合は、いかにして相対変位を吸収しつつ車輪にまで動力を伝えるかが重要です。

吊り掛式の発明

モーターに伝わる衝撃を和らげる方法として、1888年にアメリカの発明家で実業家のスプレーグ（図5）によって「吊り掛式」とよばれる駆動装置の方式が発明されました。吊り掛式はモーターの一端を軸受を介して車軸に支持し、もう一端を台車枠にばねなどを介して支持します（図6）。このようにモーターを支持することで、モーターに伝わる走行時の振動や衝撃が緩和されます。吊り掛式は構造が非常にシンプルで、メンテナンス作業も簡単

であり、現在でも機関車で使用されている駆動方式です。

画期的な吊り掛式ですが問題もあります。それは走行時の振動や衝撃からモーターを完全には絶縁できない、ということです。この方式ではモーターの重さの約半分を車軸で支持しているため、走行時の振動や衝撃はある程度伝わってしまいます。そしてばね下質量（台車と軸箱の間のばねよりも車輪側にある部品の質量）が重くなってしまう、というのも吊り掛式の問題の一つです。一般的にばね下質量の増加はレールやその下の構造物に好ましくない影響を与えるため、ばね下質量を低減できる駆動装置の開発が行われました。

カルダン駆動装置

モーターや歯車装置に振動や衝撃を伝えず、ばね下質量を低減するために発明された方式の一つがカルダン駆動方式です。この方式ではモーターを台車に置くことで、衝撃がモーターに伝わりにくくなっています。一方、歯車装置は車軸に支持されているため、モーターと歯車の位置関係が走行中にずれます。そのままではモーターのトルクを適切に伝達することができません。そこでモーターと歯車装置を「継手」を介して接続することで、この位置関係のずれを吸収しています。

歯車装置は車軸側に、モーターは台車または車体側に設置されます。車軸と台車はばねを介して接続されるため、モーターはばね下質量とはなりません。カルダン駆動方式は鉄軌道車両としては1921年ドイツのドルトムント市電で初めて実用化されました。カルダンジョイントと称する自在継手が使用されており、この継手形状を発明したイタリアの数学者の氏名が、カルダン駆動方式の名前の由来となっています。

その後、この継手を用いたさまざまな方式が開発されます。代表的な一つがPCCカルダン駆動装置です²⁾。1936年にアメリカの電気鉄道経営者協議委員会(PCC)によって開発されたPCC電車は多数の新技术が投入され、そのうちの一つがPCCカルダン駆動装置

です。PCC電車の最初のモデルが運用されて以来、アメリカ、カナダ、ヨーロッパの一部、ベルギーなどにおいて、路面電車はこのPCC電車に置き換えられていき、大成功を収めました。PCCカルダン駆動装置はモーターの軸と車軸が直角であるため「直角カルダン駆動」に分類されます。直角カルダン駆動の模式図を図7に示します。

カルダン駆動装置の代表的なもう一つが、1941年にスイスのメーカーであるブラウンボベリにより開発された「BBCディスクドライブ」駆動装置です²⁾。この方式ではモーターの回転軸を中空軸とし、その中に別の軸(ねじり軸)を通します(図8)。中空軸とねじり軸、ねじり軸と歯車装置を、たわみ板継手を介して接続し、モーターと歯車装置の相対変位を吸収します。この方式はスイスとドイツの一部において採用され、とくにスイスにおいては標準車の駆動装置として広く普及しました。また、モーター軸と車軸が平行であるため、「平行カルダン駆動」に分類されます。

日本におけるカルダン駆動装置としては、東洋電機製造により開発された

「中空軸TD平行カルダン駆動装置」があります。基本的な方式はBBCディスクドライブと同様ですが、継手に東洋電機製造により開発された2枚のたわみ板を用いるTD(Twin Disk)継手を使用しています。この方式は全国の私鉄や国鉄で広く普及しました。後述の中実軸式と比較してモーターのスペースを広く確保できるため、とくに狭軌の鉄道事業者の間で普及しました。

技術の進歩によりインバーターと交流モーターによるモーターの小型軽量化が進んだことで、駆動装置のスペースに余裕が生まれました。これにより現在日本の電車でも広く普及している方式が「中実式平行カルダン駆動装置」です。この方式ではモーターと歯車装置の間に継手を配置します。継手には、1941年にアメリカのWestinghouseとNatal社によって開発されWN継手や、前述のTD継手が一般的に用いられています。

最後にフランスの高速電車TGV Atlantiqueの駆動装置の方式を紹介します。この車両ではモーターが台車ではなく、車体に支持されています。車軸とモーターの相対変位は比較的大き

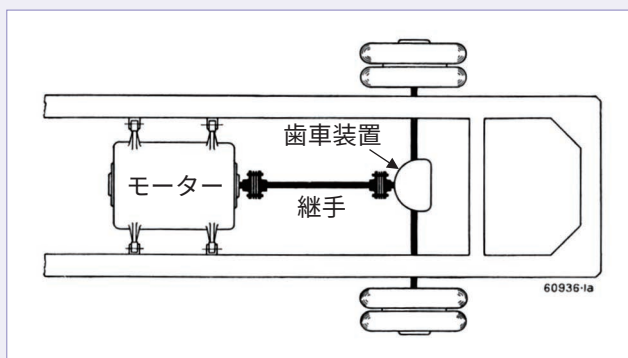


図7 直角カルダン駆動の模式図

出典：The Brown Boveri Review, No.10/11(1945)に加筆

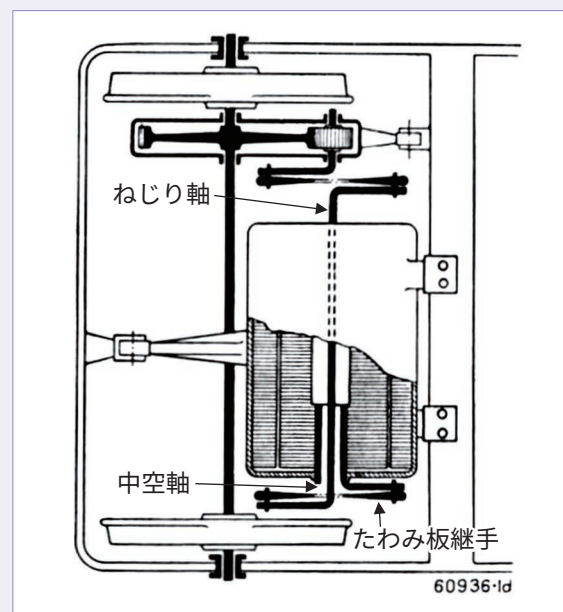


図8 中空軸平行カルダン駆動の模式図

出典：The Brown Boveri Review, No.10/11(1945)に加筆

くなるため、「トリポード」という継手が使用されています。

直接駆動方式

電車ではカルダン駆動方式が一般的に採用されていますが、電気機関車ではクイル式やリンク式といった電車とは異なる方式が採用されています。また、電車でもカルダン駆動方式以外の方式が採用されることがあります。それが電気鉄道黎明期に採用されていた直接駆動方式です。直接駆動方式は現在でも採用事例がいくつかあります。

直接駆動式のメリットは歯車装置や継手が不要となるため歯車にもなう損失がなくなり高効率化する、駆動装置の構造が単純化し省メンテナンス化できることです。その反面、基本的にはモーターを車軸で支持するため、ばね下質量が増加する、モーターが衝撃を受ける、といったデメリットがあります。

1920年にアメリカで開発されたミルウォーキー鉄道のEP2という電気機関車を図9に示します。この時代にはすでに吊り掛式が開発されていましたが、EP2では歯車装置を使用せず、直接駆動式が採用されました。ここでモーターは回転する部分と固定されている部分に大別され、モーターの回転する部分を「回転子」、固定されて回転しない部分を「固定子」とよびます。EP2に採用されているモーターの固定子は台車枠に設置されており、上下が切り取られたような形となっています³⁾。また回転子は車軸に取り付けられています。モーターの回転子と固定子は支持されている場所が異なるため、相対変位が生じますが、固定子構造のおかげで、回転子と固定子はぶつかることはありません。モーターの模式図を図10に示します。最高速度は時速110kmで、30年間運用されていました。

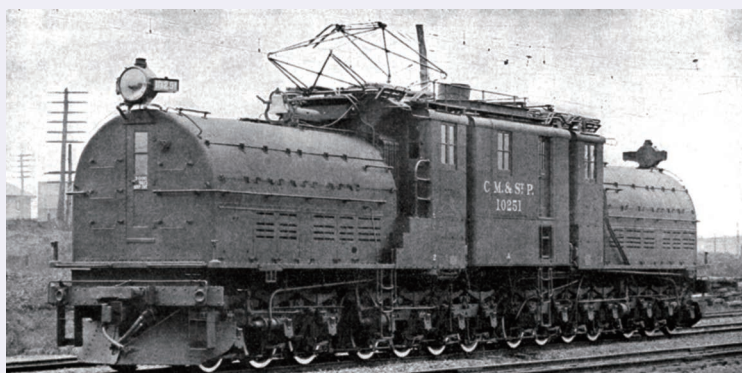


図9 直接駆動式の電気機関車 EP2
出典：Locomotive Cyclopedia of American Practice (1922)

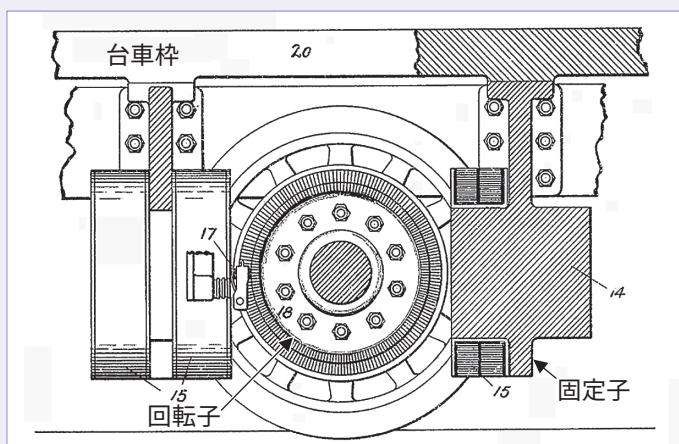


図10 二極モーターの模式図
出典：U.S. Patent No. 808, 717 (1906)に加筆

これからの駆動装置

ここまで、電車が発明されてから現在に至るまでの駆動装置の変遷をたどってきました。電気鉄道の駆動装置は歯車直結方式や直接駆動方式から始まり、吊り掛式、直角カルダン方式、中空軸平行カルダン方式、中実軸平行カルダン方式とさまざまな方式が開発されてきました。ここで注目したいのが中空軸平行カルダン方式から中実軸平行カルダン方式への遷移です。モーター技術の進歩によって、モーターが小型軽量化し駆動装置のスペースに余裕が生まれることで複雑な方向へと発展していた駆動装置がシンプルな方向へ変化しています。

現在もモーターの材料や、モーターを

設計したり制御したりする技術の進歩は続いています。今後これらの技術が盛り込まれたモーターが登場することで、駆動装置もかつてのようなシンプルな姿に戻っていき、直接駆動方式が主流となる時代が来るかもしれません。

(堺谷洋／車両制御技術研究部
動力システム研究室)

文献

- 1) Frank Rowsome: The Birth of Electric Traction: the extraordinary life and times of inventor Frank Julian Sprague, Create Space Independent Publishing Platform, 2014
- 2) 松田新市：高速度電動機と駆動装置, 電気車研究会, 1958
- 3) Andreas Steimel: Electric Traction - Motive Power and Energy Supply, Oldenbourg Industieverlag GmbH, 2008