

第37回

連結装置

鉄道の誕生と連結装置の役割

1800年代にイギリスで蒸気機関車が誕生した当初から、**図1**に示すように、鉄道では蒸気機関車が客車や貨車をけん引して走行していました。鉄道は他の交通手段に比べて走行抵抗が格段に少なく、ハンドル操作を必要としないことから、多数の車両を連結して列車を編成し、一度に大量の人や物を輸送することができるという特長があります。この特長を最大限に発揮させるために、鉄道誕生当初から車両と車両をつなぐ連結装置は必要不可欠な存在でした。

連結装置には次の役割が求められます。一つは、車両同士をつなぐこと、

そしてもう一つは、車両間隔を一定範囲内に保つことです。しかし、これらの役割を果たそうとしたとき、厄介な現象が発生します。つまり、車両と車両とが接近すると突っ張りあい、逆に離れようとしたときには引っ張り合うような力が発生します。そうすると、連結装置を介して車両に力が作用するため、この力によって車両が揺さぶられ、その結果乗り心地が悪化してしまいます。この現象により生じる力、すなわち「連結装置を介して車両に作用する力」、あるいは「連結装置に作用する力」のことを、自動連結器力を短縮した呼び方で「自連力」と呼んでいます（自動連結器については次章で説明します）。

自連力は、車両同士をつないでいる以上必ず生じます。しかし、著大な自連力が発生すると、大きな力に耐えきれず車両が損傷してしまう恐れがあります。そこで、発生する自連力を低く抑え、強度の面で車両を守り、かつ前後方向の乗り心地を良くするため、連結装置には衝撃を和らげるための「緩衝器」と呼ばれる装置が備わっています。

このように、連結装置は自連力を伝達して車両と車両の間隔を維持する役割がありますが、さらに必要に応じて車両を安全かつ簡単に分離できるという機能も要求されます。車両の結合と分離を実現するための装置を特に「連結器」と呼びます。連結器には、自動連結器、密着連結器、棒連結器など、使用

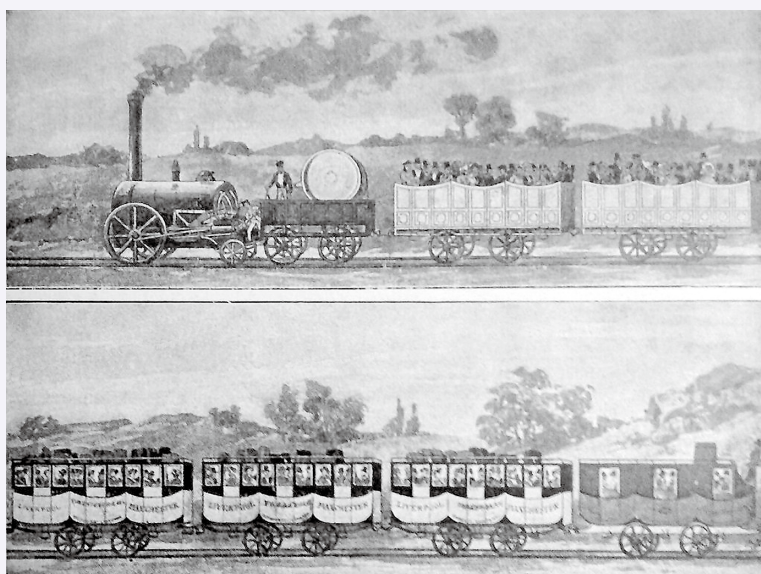


図1 世界初の実用的な旅客鉄道（リバプール・アンド・マンチェスター鉄道）
出典：By Tolnai - korabeli képek alapján (Tolnai Világtörténelme. Legújabb kor) [Public domain], via Wikimedia Commons



図2 日本における鉄道創業時の蒸気機関車（青梅鉄道公園にて撮影）

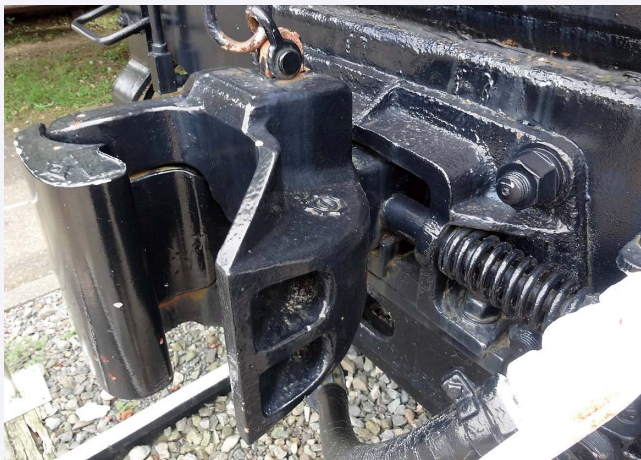


図3 自動連結器(青梅鉄道公園にて撮影)

方法や目的によってさまざまな種類がありますが、車体床下の両端部に取り付けられているため、普段鉄道を利用する乗客の視点からはほとんど見えないものです。

このように、連結装置とは連結器や緩衝器の総称であり、車両の前後力を伝える装置を指しています。なお、広義には電気系統や空気管などを車両間でつなぐ装置を連結装置と呼ぶ場合もありますが、ここでは車両間の前後力の伝達に関連する部分のみを指すものとします。

連結装置の変遷

鉄道の黎明期、車両同士は1メートル位の鎖で簡単に連結されたもので、出発や停車の際に大きな前後衝動が起これ、その都度乗客がこぶを作った¹⁾という逸話が残っています。その後、前後衝動を軽減するために、鎖の両側に緩衝器を備えた「ねじ式連結器」がヨーロッパの国々で普及しました。この方式は、一方の引張り棒にぶら下がっている鎖を他方のフックに掛け、さらに、ねじが切ってあるねじ棒をテコでまわし、両脇の緩衝器が突張るまで締め上げるというもので、連結した状態では前後方向のガタがなく、前後衝動を防ぐ意味では都合が良いものでした。日本はイギリスから鉄道技術を

取り入れたため、創業時の鉄道はこの形式を採用していました(図2)。

一方、この連結装置の場合、連結と解放に際して、車両間の狭い空間に人が入り込まなければならず、死傷事故の発生が絶えませんでした。多い時期には、連結手の死傷率が30%を超える²⁾年もありました。さらに、フックを人が持ち上げるという制約から、大型にして鎖の強度を増すことが困難であり、許容引張力は100~150(kN)程度が限度となっていました。その後、機関車の発達に伴い150(kN)を超える引張力を発揮する能力のある機関車が出現し始めたことから、ねじ式連結器は機関車の引張力に対しても安全とはいえないものとなってきていました。

ねじ式連結器が普及したヨーロッパと異なり、アメリカでは早くから自動連結器が発達していました。自動連結器とは、自動的に連結・解放できる連結器の総称で、ねじ式連結器のように連結手が車両間で作業する必要のないものです。例として、蒸気機関車に取り付けられた自動連結器を図3に示します。上記のねじ式連結器の問題を受けて、日本ではアメリカの自動連結器の調査が行われており、約7年の準備期間を経て、大正14年に連結装置が自動連結器に一齐に交換されました。交換対象とされた車両数は、機関車約3千両、客車約8千両、貨車約5万両であり、



図4 貨車用ゴム緩衝器(RD19)

これらを数日のうちに取り替えるため、全国の工場で交換のための器具の研究や作業能率の向上を目指した取り組みが実施されました²⁾。特に、交換作業の練習を競技会の方式としたことで、各地域で工夫された治具が発案され、本番の作業時間は予想されていた所要時間を大きく下回りました。この一大事業の結果、連結手の死傷事故が大幅に軽減するとともに、その後の輸送能力の増大にも備えることが可能になったと言えます。自動連結器化後の緩衝器の構造については、大正末期までコイルばねが用いられていましたが、その後、摩擦ばねを経て、昭和33年に初めてゴム緩衝器が用いられるようになりました。例として、貨車用のゴム緩衝器を図4に示します。構造が簡単で、保守上有利であるという理由から、現在はゴム緩衝器が用いられています。

ヨーロッパの国々では、国境を越えて列車が相互に行き来するという事情から、規格の問題や経済事情により自動連結器化の調整に時間がかかりましたが、現在では一部の在来鉄道を除き自動連結器に置き換わっています。

列車の座屈現象

自連力に起因する鉄道固有の厄介な問題として、列車の座屈現象があります。細長い物に対して、その長手方向にある一定以上の圧縮力を加えると、図5に示すように、折れ曲がった状態になる

ことがあります。この現象を「座屈」と言います。一般に座屈現象は、材料が破断する力（これを破断荷重と呼びます。）よりも小さな力で発生し、同じ太さの棒であれば長いほど、同じ長さの棒であれば細いほど生じやすくなります。

列車の編成にも、これに似た現象が発生する場合があります。すなわち、けん引時には生じないけれども、圧縮方向の自連力がある大きさを超えて作用すると、自連力の上下、左右方向成分により、車体支持装置のばね作用範囲を超えて車体変位が増大し、列車長手方向の中心線から上下または左右方向へはみ出そうとする動きが生じます。このときの中心線からはみ出し方は、**図6**または**図7**のような形になります。図中の茶色の線は軌条を示します。

図6のような上下方向の座屈が生じると、車体が持ち上げられた側の台車の輪重が軽くなります。さらに進行すると、車体が台車から離れて浮上した

り、車体が台車を釣り上げてしまったような危険性があります。また、**図7**のような左右方向の座屈が生じると、車輪とレール間に横圧（車輪をレール外に押し出そうとする力）が発生し、最悪の場合脱線に至る危険性があります。

ブレーキや力行が車両間で協調制御されている通常の列車が座屈を起こすことはまずありません。しかし、列車の座屈現象は自連力に付帯して生じ得る現象の一つであり、通常とは異なる運転を行う場合には、車両の構造によっては車両の強度より小さな自連力で座屈が生じる可能性もあるため、走行安全性を確保する観点から、特に留意する必要があります。

過去の列車座屈事例としては、昭和38年の横川～軽井沢間の165系電車の列車座屈事故が挙げられます。この事故は、66.7%の急勾配区間をアプト式から粘着運転方式に切り替えるために

行われていた試験中に生じました。165系電車10両編成の先頭にEF63形電気機関車3両を連結して勾配を下る際、機関車が非常ブレーキをかけて停止したところ、1両目の電車の車

体後部が三角座屈により浮上し、車体と台車が分離してしまいました。この事故を契機に、列車座屈を防止するための列車の取り扱い方法などが決められました³⁾。

自連力が大きくなる例として、ブレーキの故障した編成をけん引する救援作業を考えてみましょう。このとき、走行中の列車を停止させるためにブレーキを扱うと、ブレーキの故障した編成（故障編成）は、ブレーキのかかった前方の編成（健全編成）に突っ込む状態となり、故障編成と健全編成の双方に圧縮自連力が作用します。前の車両にはブレーキがかかっているのに、中間の車両は後ろから押される状態になるため、編成両数が長ければ長いほど圧縮自連力が大きくなります。この例のように、通常とは異なる運転を行う場合には、空気ばねをパンク状態にして垂直座屈を生じにくくさせること⁴⁾や、高ノッチでの起動・急制動を避けて列車の座屈が生じないような運転方法を行うことが有効です。

自連力に関わる課題

自連力の最大値を小さくするためには、緩衝器でのエネルギー吸収量を大きくすることが有効です。緩衝器の動

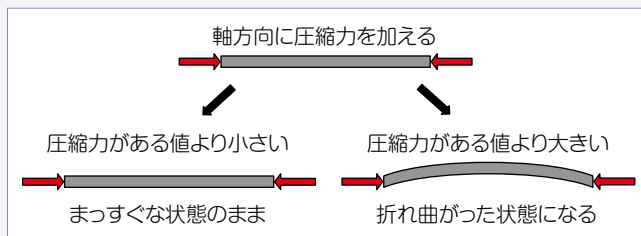


図5 はりの座屈現象

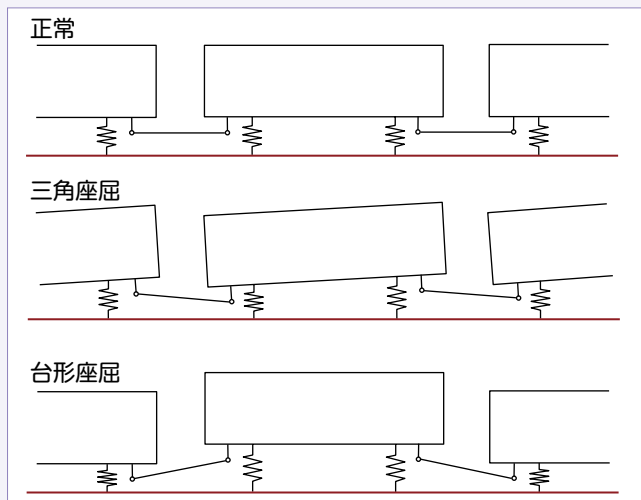


図6 垂直座屈（車両を側面から見た図）

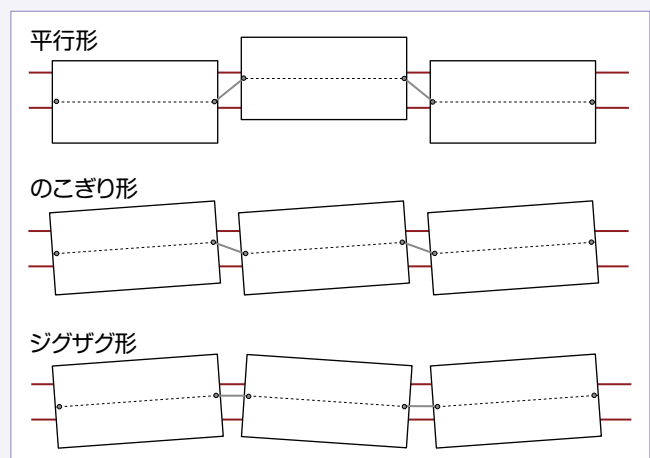


図7 水平座屈（車両を上空から見た図）

作特性(変位と力の関係)が図8の黒実線のように与えられたとすると、その緩衝器が吸収できる最大エネルギーは、黒実線で囲まれる面積で表されるため、例えば赤実線のような緩衝器特性を与えれば、同じ量のエネルギーを吸収するとした場合に、最大自連力を小さくすることができます。しかし、これではわずかの緩衝器変位しか発生しないような小さなエネルギー吸収量で済む通常の運転時に、黒線より大きな自連力が発生してしまいます。さらに、ゴツゴツと前後に揺すられて乗り心地が悪くなってしまうことから、乗り心地や荷崩れの観点からは、自連力が小さい方が車両の前後衝動が小さくなり望ましいと言えます。これらを踏まえると、緩衝器に求められる特性は次のようになります。

①通常運転中は、発生する自連力をできる限り小さく抑えることに加え、急激な自連力の変化を生じさせないこと。

②非常ブレーキの作動時や救援運転時など、ある程度自連力が大きくなると想定される状態で使用した場合でも、できる限り最大自連力を低く抑えることにより車体の破損や列車座屈を未然に防ぐこと。

吸収すべきエネルギー量が少ない①の場合には、緩衝器の変位が大きくなることを許容すれば図8の青線のように自連力を小さく抑えることができます。一方、緩衝器の動作行程はある範囲内に納めなければならないため、大きなエネルギーを吸収しなければならない②のような状況では、荷重のかかり始めから大きな力を発揮する赤点線(図8)のような緩衝器特性の方が適していると言えます。このように、列車の置かれた状況に応じて最適な緩衝器特性が異なるため、もし、ある車両に最大吸収エネルギーを重視した緩衝器

を設計して取り付けたとすると、減速に発生しない著大な自連力に備えて、通常求められる軽微な衝動に対する性能を犠牲にする結果となってしまいます。ここで、②において「ある程度」という表現を用いたのは、

何もかも緩衝器の性能に依存するのには限界があるという意味です。

したがって、現状ではエネルギー吸収性能が不足するような特殊な運転を行う場合は、圧縮自連力が大きくなりにくいようにブレーキ操作を工夫したり、編成両数を制限したりして、列車の運転計画で調整を図るのが得策です。

連結装置の高性能化に関する今後の展望

前章では、列車の置かれた状況に応じて、最適な緩衝器特性が異なることを述べました。したがって、状況に応じて特性が変化する緩衝器が開発されれば、鉄道輸送の品質を格段に高めることができます。このような緩衝器の開発を目指して、鉄道総研では新型のシリコン緩衝器の実用化に取り組んでいます。この緩衝器が実用化されれば、現状の緩衝器の最大エネルギー吸収量を損なうことなく通常運転時の前後衝動を低くすることができるため、乗り心地の改善や荷崩れの防止に大きく貢献できます。

ヨーロッパでの自動連結器への切り替えは日本よりも大きく遅れましたが、後からくる物は先の物よりも良くなるのは世の習いで、現在の日本の連結装置よりもはるかに強い強度と大きなエ

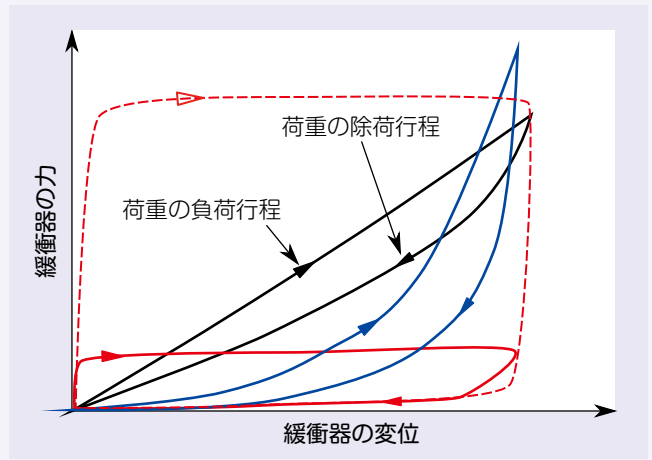


図8 緩衝器の変位と力の関係

ネルギー吸収量を持っています。日本とヨーロッパでは軌間・編成両数・けん引方式などが異なるので、必ずしもヨーロッパの規格が日本の鉄道に適しているわけではありませんが、今後、日本における鉄道輸送の能力と品質を向上する上で注目すべき存在であることは間違いありません。

編成内で前後の車両と協調して加減速することのできる理想的で安全な車両制御方法が実現されれば、連結器で車両同士をつなぐ必要がなくなり、自連力も生じないでしょう。一方で、連結器をなくすということは、編成内で情報をやり取りするために何らかの通信手段で車両同士をつなぐということを意味します。現時点では、通信速度の問題や制御機能を失った場合の安全性への課題があるため、当分は自連力とつきあう必要がありそうです。

(坂本裕一郎/車両構造技術研究部
車両運動研究室)

文献

- 1) 小坂隼二：客貨車工学(上巻)，日本機械学会，1948
- 2) 日本経済評論社：鉄道車輛ノ連結器ヲ自動連結器ニ取替二関スル記録，大正期鐵道史資料 第二期，1991
- 3) 小林正義，深澤香敏：列車座屈試験装置の試作，鉄道技術研究所速報，NoA-86-132，1986
- 4) 中橋順一：列車の座屈現象，RRR，Vol.65，No.8，pp.26-29，2008