

研究解説

独立回転車輪を用いた操舵台車の研究開発の動向

Study on Steering Trucks with Independently Rotating Wheels for Rail Vehicles

須田 義大*

Yoshihiro SUDA

鉄道車両には、曲線に沿って自己操舵を行う最も基本的なメカニズムに輪軸がある。この代わりに独立回転車輪を用いる方式は、従来高速安定性に対する切り札とみなされてきた。ところが最近になり、操舵機能を持たせる工夫が考案され、操舵台車にも利用されるようになってきた。従来あまり馴染みのないこの方式について研究開発の動向を解説する。

1. はじめに

鉄道車両において、左右の車輪を剛に結合した輪軸は、セルフステアリングというメカニカルな自動制御機能を持つ優れた工夫の産物である。鉄道システムが多くの車両を連結し、脱線せずに安全にレールに沿って走行するための基本的な仕組みである。ところが、このメカニカルなフィードバック制御は蛇行を引き起こすという高速安定性についての問題点を同時に含んでいる。そのため、従来の鉄道台車では、安定性を重視して、操舵性能がおろそかにされていた。その弊害は、曲線区間におけるレールに作用する著大横圧や、レールと車輪の摩擦である。

近年、高速安定性も確保した上で操舵性能も重視した、いわゆる操舵台車（あるいはラジアル台車、セルフステアリング台車ともいう）が各種考案され、実用化してきた¹⁾。その概要は文献1)にまとめている。一方、高速安定性の確保を目的とした独立回転車輪を用いるアイデアが、古くから試みられてきた。一部実用化してきているが、その主たる目的は安定性確保というよりか、ゲージ可変方式の実現や低床路面電車での空間の有効利用などといった、いわば特殊な目的を達成するためであった。それは、単に独立回転車輪にするだけでは、セルフステアリング機能がほとんど失われ、直線走行においても偏り走行して、実用上問題が生じるためである。

ところが、最近になって、操舵性能を付加するための考案がなされ、新たな独立回転車輪方式を用いた車両がドイツを中心に実用化されてきた^{2),3)}。いわゆるFrederich台車と呼ばれるものであり、ドイツ・アーヘン工大のFrederich教授が考案した3種類のタイプである。これら

の方式は、すぐれた方式であるにも関わらず、我が国ではその原理や仕組み、効果などがあまり紹介されていない。そこで通常の独立回転方式との違いに焦点をあて、独立回転車輪であっても操舵機能を付加するための原理を解説する。

さらに、筆者が提案する後軸のみに独立回転車輪を用いる方式^{4)~7)}も、急曲線の内軌側レールに発生する波状摩擦（コルゲーション）の対策上、有効に作用する可能性が出て来たので、この方式についても紹介する。

2. 従来の独立回転車輪方式

蛇行が理論上起こり得ないという優れた性質から、超高速での安定性確保が、独立回転車輪方式の最大の長所である。輪軸単体では、左右の車輪の回転が独立にできると、踏面勾配のために静的に不安定となって、走行することはできない。しかし、台車を構成すると、台車蛇行の原因となる、輪軸の左右とヨーイングの連性運動が排除されるため、台車の高速安定性は飛躍的に向上する。そのため、数多くの試みがあったが、後述のように、ステアリング機能が失われるデメリットのために、この目的を第一においた台車は実用化されていない。既に実用化、あるいは実用化に近いものでは、以下に示すような独立回転車輪方式の持つ別の長所がターゲットになっている。

(1) 車軸を廃止することによる軽量化

エネルギー消費、振動特性の改善など、多くのメリットをもたらす軽量化の要求を満たすためには、車軸をなくすことは有効な方法である。鉄道車両において、鉄の塊である通常の輪軸は約1.5tもある。車軸を中空にする努力も払われているが、廃止することの効果が大きい。このような軽量化を目標とした試験台車が我が国で試作されている⁸⁾。この台車では、遠心力による操舵機能を期待した工夫がな

*東京大学生産技術研究所 第2部

されている。

(2) 車軸を廃止することによる空間の有効利用

近年、路面電車の生れ変わりである LRT (Light Rail Transit) が、欧米において活発に活用され始めている。路面から直接乗降できる手軽さが、その成功の理由のひとつであるが、そのための重要な技術開発が低床車両の実現である。床面高さを路面上 350 mm に実現するためには、車軸が邪魔になる。車軸をなくし、左右の車輪の間に通路を設ける方式が定着している。車軸がないため、当然独立回転車輪となる⁹⁾。低速車両ということもあり、操舵のための特別な装置はない場合が普通であったが、操舵機能を備えた後述のFrederich台車が実現して来た。

(3) ゲージ可変方式の適用

スペインの軌間は、他のヨーロッパ諸国の標準 1435 mm より広い 1668 mm を採用している。そのため、直通運転を図るためにタルゴ (Talgo) と呼ばれる車輪のゲージを自動的に変える機構が組み込まれた 1 軸の連接方式車両が広く活用されている。車軸を廃止し、車輪の左右方向の位置を台枠にピンで固定する方式であり、特殊な可変ゲージ機構を備えた区間を低速で走行することによって、専用レールにより台枠を支持して車輪荷重の開放、ゲージ固定のピンの開放、車輪ゲージの変更、ピンの固定というプロセスをすべて自動的に、しかもメカニカルな機構で実現している¹⁰⁾。操舵については、車輪が前後二つの車体角度の 2 等分となるような車体間に Z リンク機構を設けて、車輪が必ずラジアル方向に操舵する仕組みが用いられている¹¹⁾。

以上のような特殊な目的のために実用化した独立回転車輪方式であるが、Z リンクを用いる以外に有効な手段がなかった操舵機能を新たな仕組みで得る方式が考案されて来た。そのため、操舵台車として、通常の使用目的に対しても実用化の道が最近開けたと言える。以下、新たな操舵原理と、それを用いる台車について紹介する。

3. 独立回転車輪に操舵機能を持たせる手法

3.1 輪軸の持つセルフステアリング機能

輪軸は左右の車輪を剛に結合したものであり、左右とヨーイング変位によって、図 1 のようなクリープ力が作用する。よって、輪軸の左右変位、ヨーイング変位に対する力の伝達は、図 2 のようになる。左右とヨーイングの運動は連成し、連成することによって復元力およびモーメントが発生する。このため、曲線に追従することができる代りに、蛇行動が発生する。

独立回転車輪にすると、図 1 の点線部分の結合がなくなり、縦クリープ力が作用しなくなる。そのため、図 2 のように、左右変位入力に対して、なんら応答を示さなくなり、それだけでなく、車輪をヨーイングさせるステアリングの

復元モーメントも消滅してしまう。すなわち、このような独立回転車輪とした輪軸単体では静的に不安定で、レールの上に載せることもできなくなる。しかし、動的には安定であり、蛇行動の発生を抑制する。2 軸台車に用いれば、蛇行動は抑えられても、曲線をスムーズに旋回出来なくなる原因になる。そして、外乱などの作用によって、一度車輪がヨー変位をすると、復元モーメントが作用しないため、直線走行においても著大な横圧を発生させたり、フランジ接触による偏摩耗の原因を引き起こすことになる。

そこで、左右の車輪結合をするのと同様の機能を持たせるために、次に 3 つの手法を解説する。

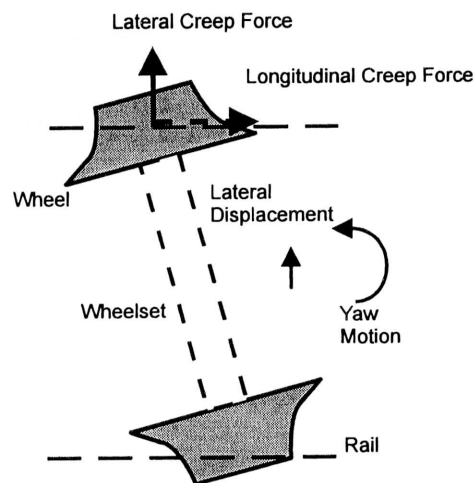


図1 輪軸および独立回転車輪に作用するクリープ力

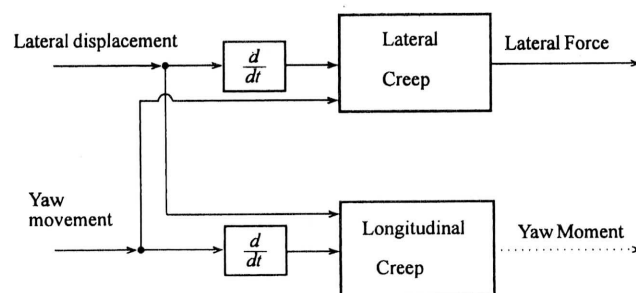


図2 車輪、輪軸の応答

3.2 前後の車輪を結合する方式

通常輪軸では、左右二つの車輪の回転を拘束することによって、左右とヨーイングの連性を発生し、ステアリングモーメントを産み出して来た。左右の車輪を結合するのではなく、左右の片側だけを考え、同じレールを走行する前後2つの車輪の結合によっても、同様な連性を生じさせることができる（図3）。これが、Frederich 教授の考案した EDF (ドイツ語で Single-wheel Double running gear の意味) 台車の原理である²⁾。台車を構成する前後2つの

車輪の相対左右、相対ヨーイング運動を拘束すると、2つの車輪が一体となった動きをする。この前後の車輪のペアを1つのブロック (Wheel-block) として考えると、車輪対のヨーイング運動に対して復元モーメントが作用することになる。このモーメントが作用する原理は、横クリープ力ではなく、車輪踏面につけられた勾配により、レールと車輪の接触面が角度を持つため、重力による抗力の水平方向成分である。横クリープ力は前後で等しく作用し、ヨーイングモーメントには寄与しない。しかし、重力による水平力は、車輪ブロックのヨーイングによって前後の車輪のレールとの接触点は異なるから、図3(b)のように、ブロックがヨーイングすると、フランジの喉元近くで接触している前輪の方が接触角が大きく、その分横力も大きくなる (図3(c))。よって、この横力の前後輪での差がステアリングモーメントになる。

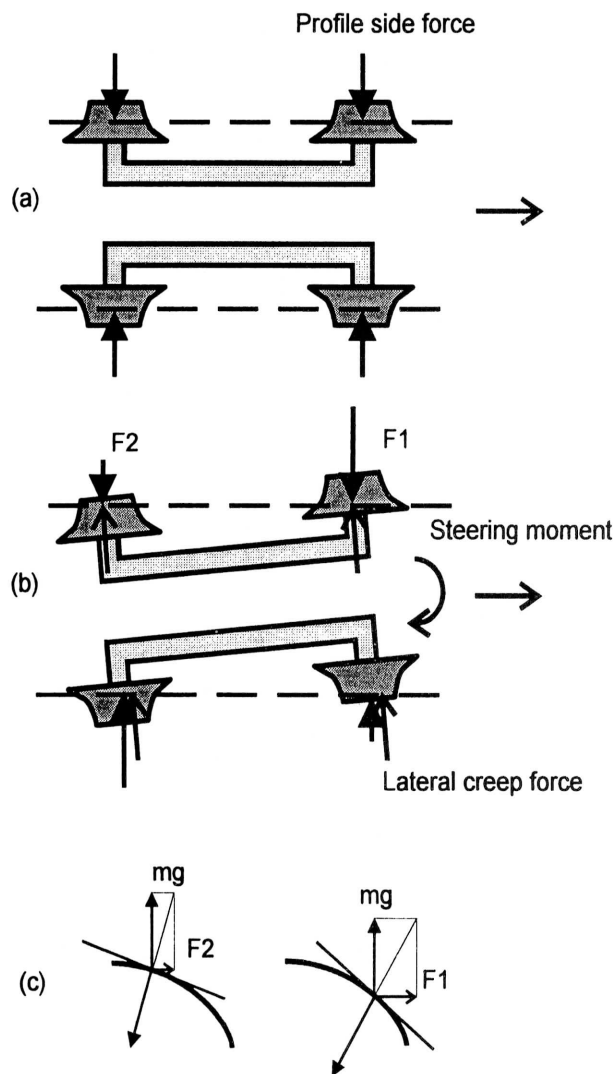


図3 前後車輪対 (Wheel Block) によるステアリングモーメントの作用 (EDF 下台車)

3.3 車輪の回転中心を接点からずらす方式

独立回転車輪にステアリングモーメントを付加するもう一つの工夫は、やはり Frederick 教授によって提案されている³⁾。これは輪軸や前後の車輪というように、剛に結合するペアにする車輪は必要がない。1車輪ですむことから、EEF (ドイツ語で Single-wheel Single running gear の意味) 方式という。車輪のレールとの接触点には、前述のように横クリープ力と、重力による分力が作用する。従来の考えでは、車輪の回転中心と接触点は一致するので、ステアリングには寄与しない。しかし、図4のように、車輪ヨーイングの回転中心を車輪のラジアル方向でレールの外側に設定出来れば、この新たな回転中心に対しては、重力による分力に関しては、 e だけ回転中心より偏差があるため、ステアリングモーメントとして作用する。アタックアングルがゼロの時にはクリープ力は作用せず、重力による分力は回転中心を通るためモーメントは作用しない。アタックアングルの符号に応じてモーメントの符号も変化するから、自動的にアタックアングルがゼロとなるように作用する。まさに、理想的なステアリング機構となるわけである。回転中心を外側に設定する機構は、図5のように、左右の車輪をリンクで結合することで実現できる。

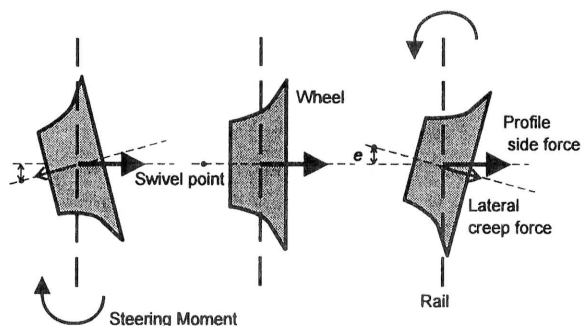


図4 車輪に作用するステアリングモーメント (EEF 方式)

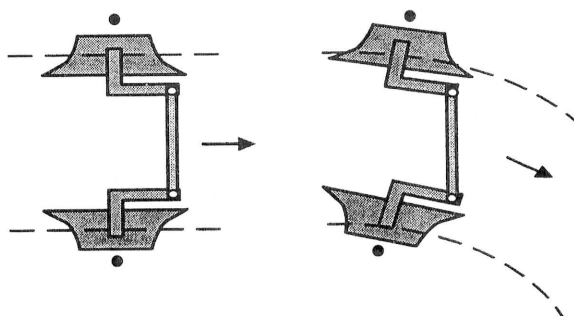
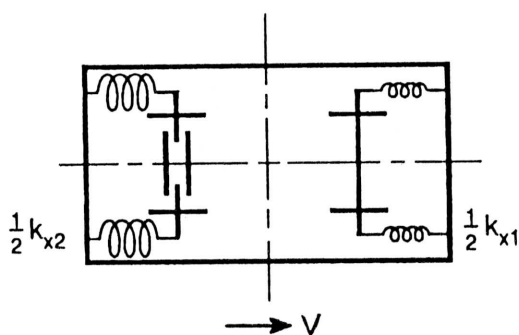


図5 リンクによるステアリング機構 (EEF 台車)

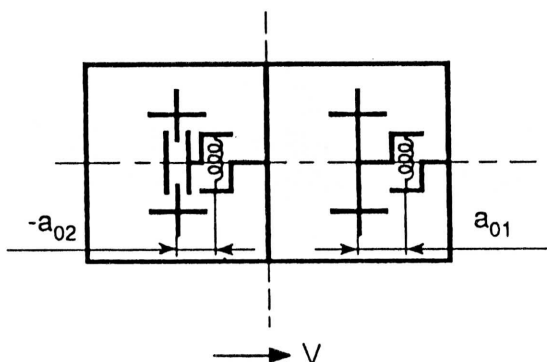
3.4 通常輪軸と組み合わせる方式

2軸ボギー台車であれば、両軸とも独立回転車輪にする必要がない。図6のように、前軸は通常輪軸としてステア

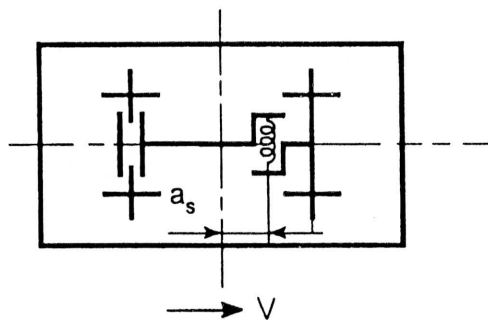
リング機能をもたせ、後軸に独立回転車輪を用いることが考えられる^{4)~7)}。ボギー台車がステアリングするためには、前軸には舵取りの機能が必要であるが、後軸には必ずしも必要が無い。ステアリング機能を持たない独立回転車輪が後軸にあっても、前輪で操舵する自動車から類推できるように、台車全体では問題なくステアリングできる。むしろ、前軸を柔支持、後軸を剛支持とする前後非対称方式操舵台車と組み合わせることによって、後軸による縦クリープ力の弊害が排除され、パーフェクトステアリングは理論上不可能であるが、安定性との両立という観点から、



(a) Conventional type without linkage



(b) Trucks with linkages between wheelsets and truck frame



(c) Trucks with cross-anchor linkage

図6 前後非対称輪軸・支持台車

優れた操舵台車が実現出来る可能性がある。

4. 独立回転車輪を用いた操舵台車

4.1 Frederick 台車

独立回転車輪に操舵機能を持たせる2つの方式を考案したドイツ・アーヘン工大のFrederich教授は、その原理を用いた3種類の台車を開発している。そのうち2つの方式は、前述のEDF方式およびEEF方式である。そしてそれぞれ、用途を図7のように定めている。

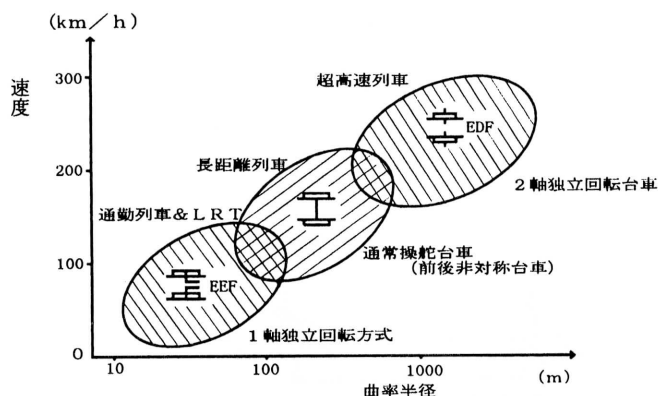


図7 独立回転車輪を用いた操舵台車の適用範囲

まず、高速車両向けは、EDF方式であり、図8のような構成である。前後の車輪対を左右に並べ、軌道の不整に追従できるように、左右のブロックはお互いに上下とローリング方向の相対自由度を持つ。走行安定性の検証では、ドイツの新幹線ICEの試作車両を用いて、330 km/hまでの走行試験を実施しており¹²⁾、現在は、ドイツ鉄道(DB)のIC (Inter City) で実用化している。

このように、クリープ力ではなく重力によってステアリングさせる方式では、微小滑りが生じないため、車輪やレールの摩耗軽減に対して有効であるといわれ、計算上摩耗の指標となるクリープエネルギーは、通常の台車に比べて、半径190 mの急曲線では約1/2、300 km/hの直線走行においてはなんと約1/60に低減するという¹³⁾。

一方、EEF方式は、低速のLRT車両用と位置付けられている。1軸方式であり、特に急曲線旋回性能が優れているという。独立回転車輪であることを生かして、低床のLRT車両に実用化している¹⁴⁾。構成が簡単なこともあり、この台車はアーヘン工大で試作され、台上試験による走行安定性の検証や走行試験による操舵性能の確認も大学の中で行われたという(図9)。

第三の実用化台車は、タルゴと類似したもので、曲線での隣合う前後の車両の相対ヨーイング角をリンク機構によって伝達する方式である。DBでの試験を経て、デンマークのコペンハーゲンの地下鉄車両で実用化してい

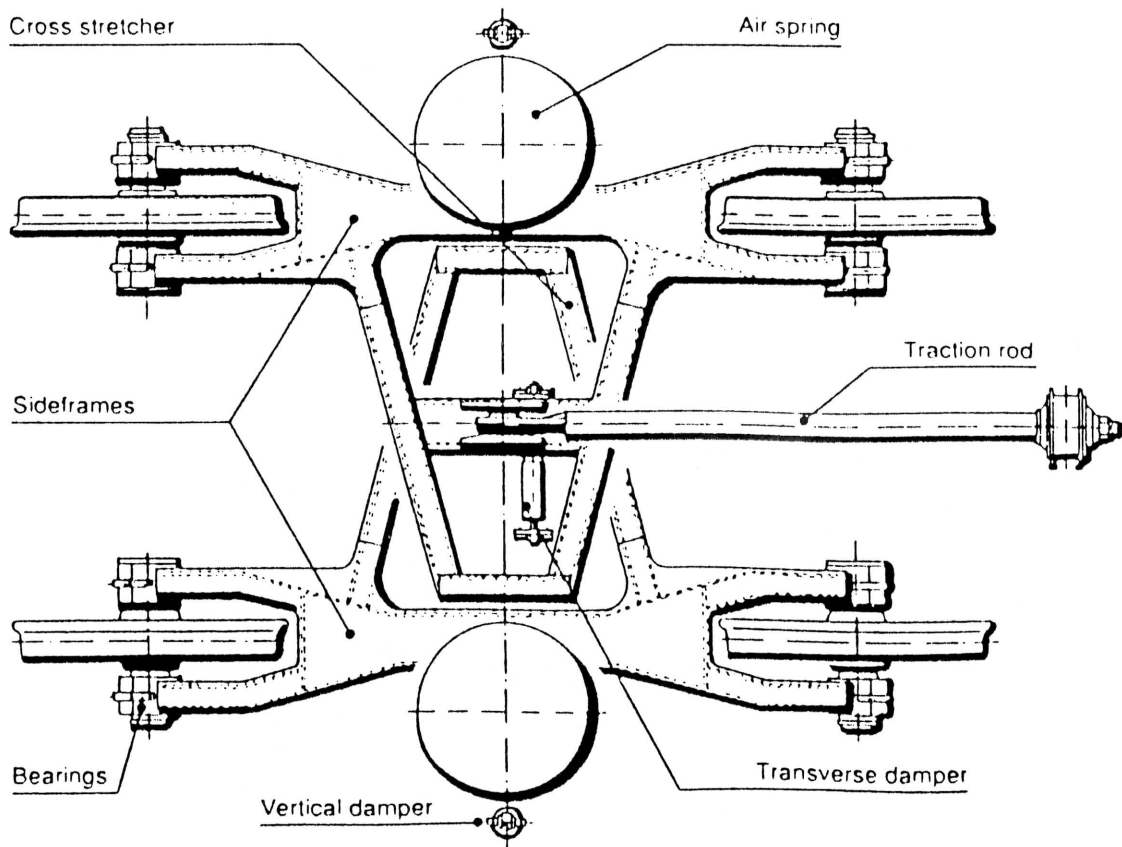
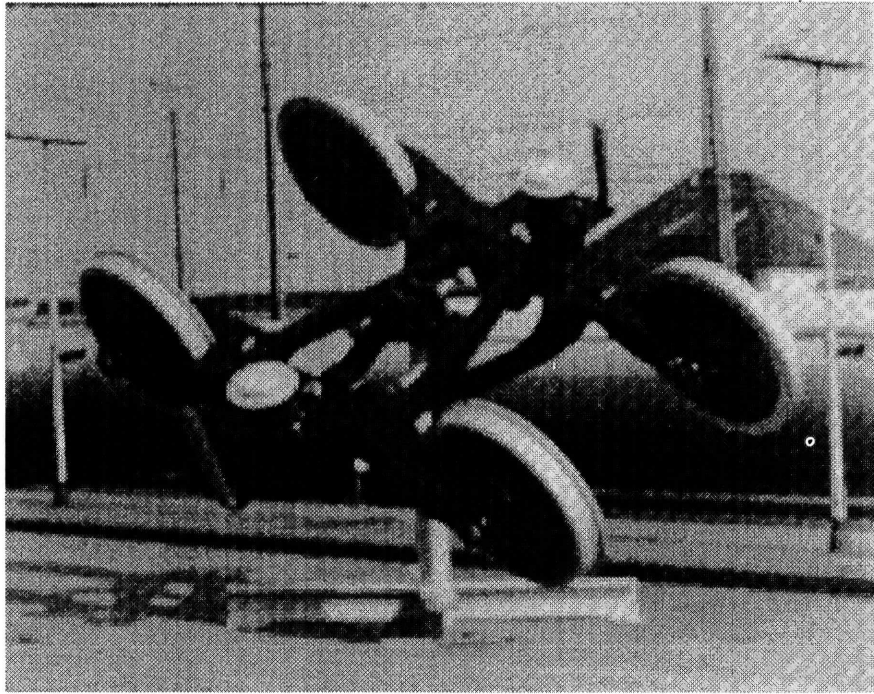


图 8 EDF 台車

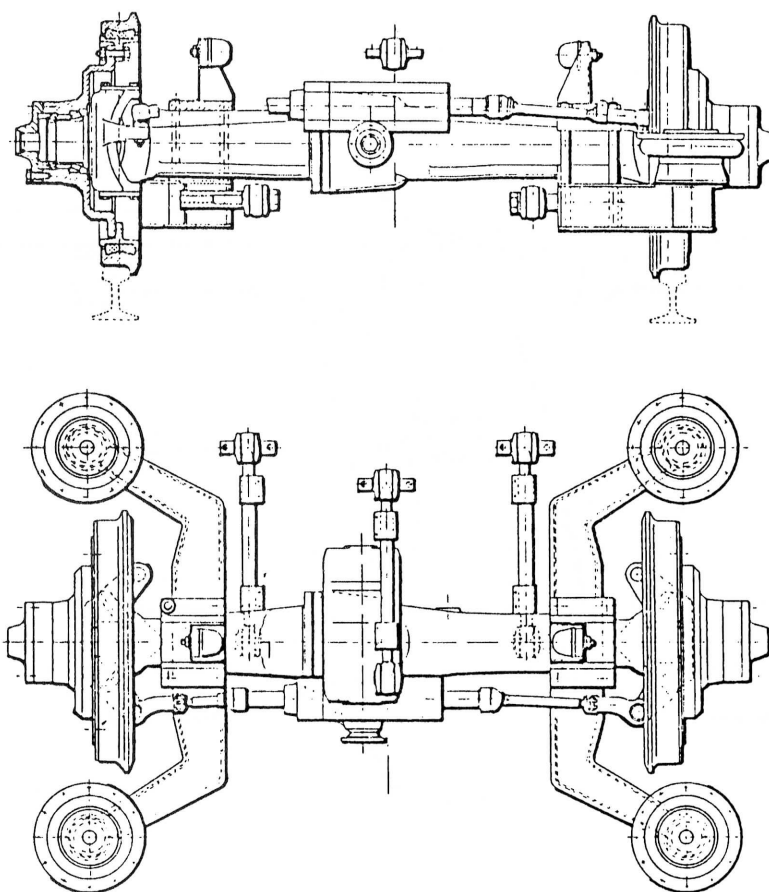
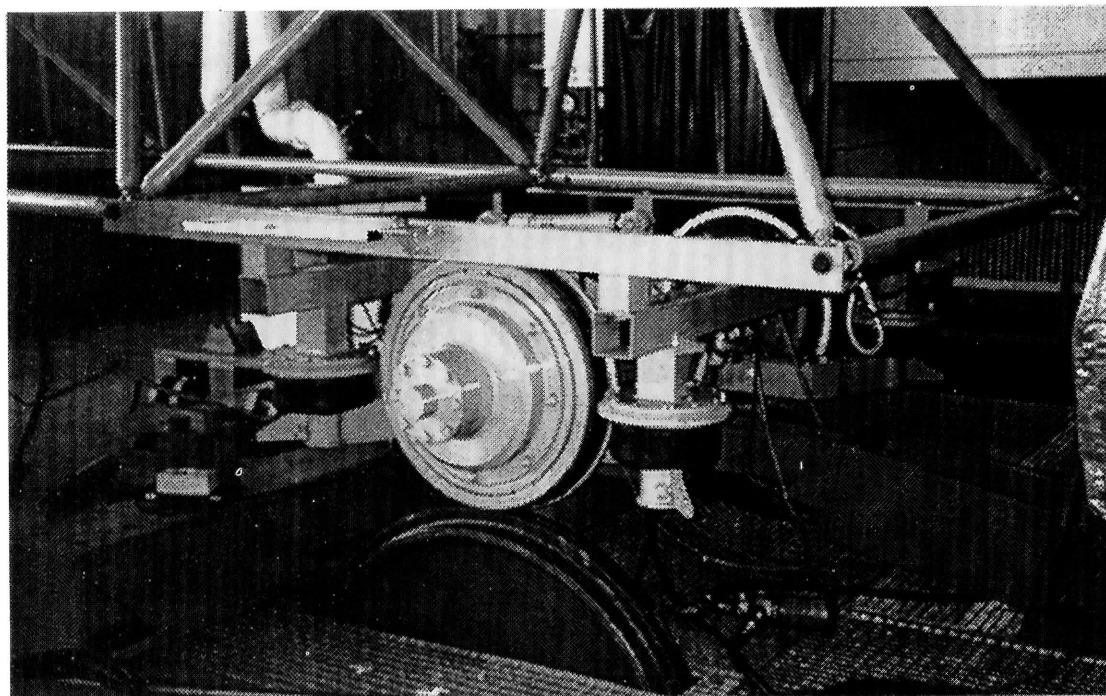


图9 EEF 台車

る¹⁵⁾.

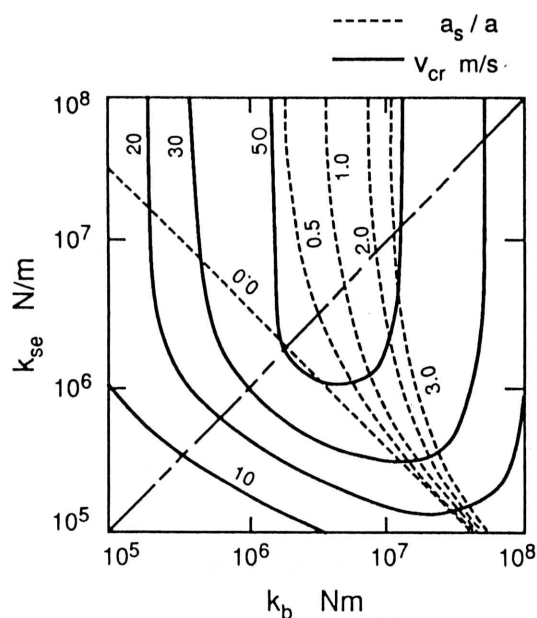
4.2 後軸独立方式前後非対称支持台車（前後非対称輪軸・支持台車）

2 軸ボギー台車において、後軸のみを独立車輪とする考えは、筆者の提案⁴⁾とほぼ同一時期に、アメリカ AAR (American Association of Railway) の Elkins によっても独立に提案されている¹⁶⁾。後者は、貨車の走行安定性改善を目的としたものであり、試作台車による走行性能の確認がなされている。輪軸の支持は前後対称のままであり、通常のスリーピース台車の後軸のみに独立回転車輪輪軸を用いている。操舵性能の改善というよりか、操舵機能を持ちながら、従来安定性について問題のあった貨車用台車の安定性を向上することが目的である。

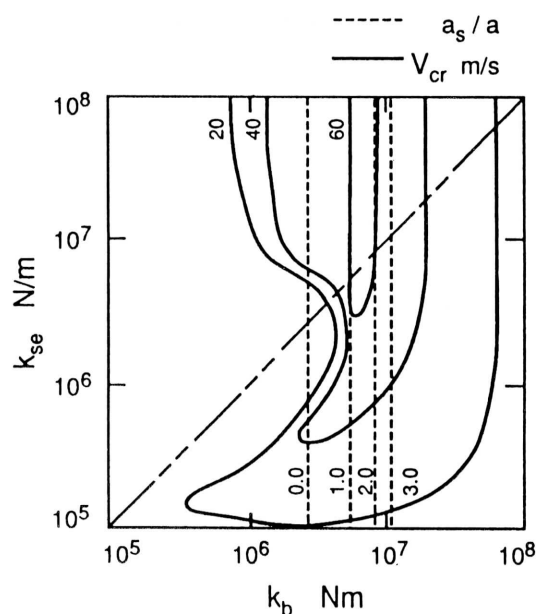
一方、筆者の提案する方式は、JR 東海の「しなの」用 383 系で実用化した前後非対称方式の操舵台車（前軸柔支持方式¹⁾と組み合わせたものであり、独立回転車輪となる後軸を剛支持、ステアリング機能を持たせる通常輪軸を柔支持とする方式である。計算上、前後非対称支持台車とは異なり、輪軸が必ずラジアル方向に向くパーフェクトステアリングは実現できないが、例えば 80% 操舵の性能を持つ条件で比較すると、後輪を独立回転車輪として、後軸の剛性を堅くする前後非対称支持を導入することによって、安定性を高めることが可能となる。図 10 には、後軸のみを独立回転車輪にしたときと通常の場合において、前後の支持剛性を変えて、台車が不安定となる限界の速度、すなわち臨界速度を計算した結果を示す。

この方式は、軸箱支持剛性と輪軸の両方に方向性をもつため、実際の使用には切り替え機構が必要なため、未だコンセプトの段階である。しかし、我が国においても、筆者の提案を受けて、後輪独立回転車輪方式のみの走行試験は、鉄道総研の試作台車 RT-X 1 で行われており、両軸とも独立回転車輪にする方式に比べて、走行性能が改善されることが確認されている¹⁷⁾。

操舵台車の導入の目的は、車輪とレールに作用する著大な横圧を低減し、軌道破壊や摩耗を防止することである。それによって、保守の低減が期待でき、また、曲線での速度向上に貢献する。一方、曲線半径が約 200 m 以下の急曲線の内軌側レールの表面上には、コルゲーション（波状摩耗）が発生することが多い。急曲線を通過する通常台車は、操舵が十分になされないため、前軸には主としてアタックアングルをとるような横滑りが、後軸には左右車輪の回転半径差による縦滑りが発生することが実車の走行状況の測定から分かっている¹⁸⁾。よって、これらの滑り現象がこのコルゲーション現象には関係していることが予想される。滑りを伴わないコルゲーションの発生・成長機構の解明は進んで来たが¹⁹⁾、この滑りを伴うコルゲーションの発生



(a) 通常の輪軸を用いた場合



(b) 後軸に独立回転車輪を用いた場合

図 10 80% のパーフェクトステアリング性能を満たすときの安定性
(b) の方が臨界速度を高めることができる

メカニズムについても、現在研究が進められており^{20), 21)}、滑りを低減させることが一つの対策になると考えられる。前軸のアタックアングルを低減するためには前軸柔支持の輪軸が、また後軸の縦滑りを減少させるには後軸の独立回転車輪の採用が有効である。この意味からも、提案する前

後非対称輪軸・支持台車の効果が期待できる。図7の中間の速度域における操舵台車としての役割が果たせるとも考えられる。

5. お わ り に

自己操舵というメカニカルな自動制御機能を、左右の車輪を剛に結合するだけで実現した輪軸は、鉄道における最も重大な発明の一つである。よって、左右の車輪の結合を切り離した独立回転車輪に置きかえるためには、それと同等の発明を伴わなければ実現できない。最近登場した独立回転車輪に操舵機能を持たせるアイデアにより、独立回転車輪の持つ台車蛇行動作を安定化できるという優れた性質と、操舵機能の両立が可能になって来た。今後の実用化の展開が期待される。

(1995年6月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 須田, 生産研究, 46-4 (1994), p. 225.
- 2) Frederich, F., Rail International, 1985-11, p. 33.
- 3) Frederich, F., Railway Gazette International, 1988-9, p. 583.
- 4) 須田, 日本機械学会講演論文集, 880-8, (1988), p. 9.
- 5) Suda, Y., JSME Int. J., 33-2 Ser. III (1990), p. 176.
- 6) 須田・和田, 日本機械学会論文集 C 編, 57-534, (1991), p. 586.
- 7) Suda, Y., Vehicle System Dynamics, 23 (1994), p. 29.
- 8) 佐藤, JREA, 33-8, (1990), p. 43.
- 9) 日本機械学会編, 台車のダイナミクス, 電気車研究会, 1994, p. 93.
- 10) Patentes Talgo, S. A., パンフレット.
- 11) 須田, JREA, 33-9, (1990), p. 18.
- 12) Schraut, R., ZEV-Glas. Ann, 115-1/2, (1991), p. 37.
- 13) Frederich, F., Proc. of 11th IAVSD Symp., (1989), p. 217.
- 14) VÖV-Niederflur-Stadtbahn, パンフレット.
- 15) Railway Gazette International, 1994-2, p. 105.
- 16) Elkins, J. A., Proc. of 11th IAVSD Symp., (1989), p. 203.
- 17) 佐藤・宮本・深沢・早勢, 日本機械学会論文集 C 編, 59-566, (1993), 3123.
- 18) 松本・佐藤・谷本・康・古田, 鉄道技術連合シンポジウム94, 日本機械学会, (1994), 213.
- 19) 須田, トライボロジスト, 38-12, (1993), 1052.
- 20) 須田・西垣戸・小峰, 日本機械学会講演論文集, 95-1, (1995), p. 133.
- 21) 松本・佐藤・藤井・谷本・康・宮内, 第4回運動と振動の制御シンポジウム, 日本機械学会1995-7.