

# 脱線・衝突に対する安全性向上



石塚 弘道  
Hiromichi Ishiduka

車両構造技術研究部  
主管研究員  
[専門分野] 材料強度, 金属疲労

脱線に対する安全性の向上に関しては、輪重減少抑制機構を備えた脱線しにくい台車を開発しました。また、衝突に対する安全性向上に関しては、車両衝突時の車体変形シミュレーションと乗客挙動シミュレーションを連携させ、乗客の傷害度を評価する手法を開発しました。

## 脱線しにくい台車

### 輪重減少抑制機構

車両がカントのある急曲線を低速で走行する際、輪軸はアタック角(車輪の進行方向とレールがなす角度)を持ち、外軌側車輪は比較的大きな横圧が発生する一方、輪重が定常的に小さくなります。この状態で、曲線出口の緩和曲線部に車両が入ると、先頭軸外軌側の輪重がさらに小さくなり、車輪がレール上に乗り上がりやすくなります。そこで、出口緩和曲線のように構造的にねじり(平面性変位)のある箇所

左右の側ばりを回転して軌道に追従させ、輪重減少を抑制する台車(輪重減少抑制台車)を開発しました。

輪重減少抑制台車の核となる回転機構には、1) 側ばりのスムーズな回転を実現すること、2) 台車枠がひし形に変形して走行安定性能が低下することを防止するため、側ばりの回転以外の運動を拘束すること、3) まくらばね荷重が側ばりをねじるモーメントに耐えること、4) 常時の微小振動に耐えること、5) 全般検査周期程度の耐久性を有すること、などが要求されま

す。これらの要件を満たす機械要素について検討を行った結果、固体潤滑剤分散型複層型すべり軸受を採用することとし、この軸受を圧入した側ばりに対して、横ばりに設けた回転軸を挿入しています(図1)。横ばりの端面を側ばり側面に接触させることにより、まくらぎ方向の相対運動を拘束し、走行安定性能を確保しています。

側ばりが過度に回転すると、横ばりに取り付けられた台車部品や車体に対して側ばりが干渉する恐れがあることから、その回転には一定の制限を設ける必要があります。輪重減少抑制台車では、回転角2度ピンと呼ぶ機械部品により側ばりの回転許容角を $\pm 2^\circ$ に制限する機構を設けました。

一般的な構造の台車では、力行、制動などで生じる車両からの反力を台車枠の剛性により受け止めています。一方、輪重減少抑制台車は、側ばりと横ばりの間に回転機構が介在しているため、これらの力を受け止めることができず、横ばりが回転してしまいます。このため、既存のけん引装置では、回転した横ばりが台車部品や車体と干渉

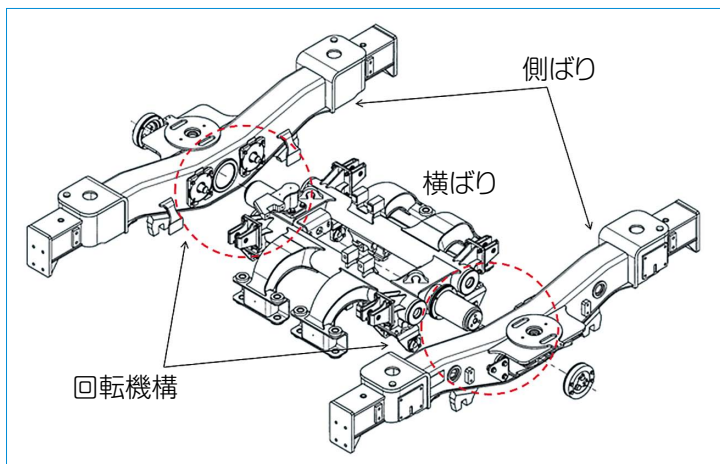


図1 輪重減少抑制台車の回転機構

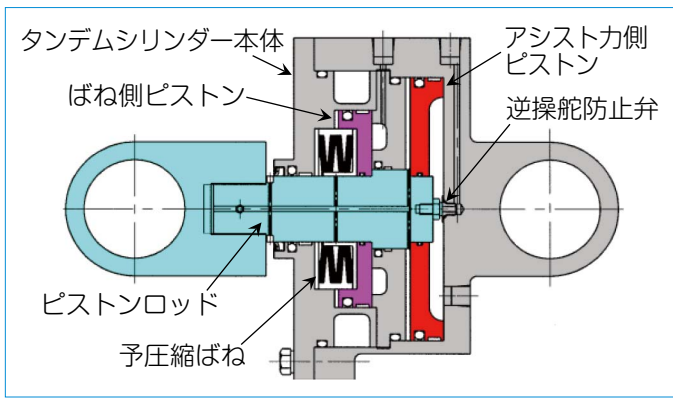


図2 タンデムシリンダーの構造

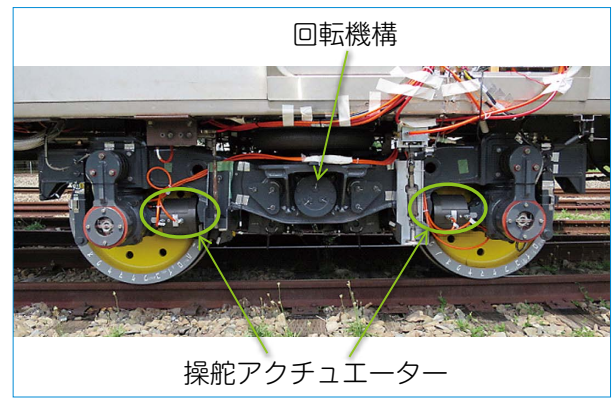


図3 空気圧制御操舵機構を組み込んだ輪重減少抑制台車

する恐れがあります。そこで、輪重減少抑制台車では、力行、制動時においても横ばりが回転しないように2段リンク式のけん引装置を採用しました。

### 空気圧制御操舵機構

曲線走行時の横圧を小さくするために実用化されているボギー角連動操舵台車は、リンク機構により積極的に円曲線通過中のアタック角を小さくすることから、横圧減少効果は大きいのですが、複雑なリンク機構を必要とするため製造・メンテナンスコストが高く、普及の妨げになっています。そこで、低コストで横圧減少効果を得るために、空気圧制御操舵機構を開発しました。

新たに開発した小型の空気圧アクチュエーターを軸箱と台車枠の前後方向に配置することで、輪軸の自己操舵性を補助（アシスト）する操舵を実現します。アクチュエーターには図2に示すタンデムシリンダーを採用しました。この操舵システムでは、曲線区間走行時の車体に対する台車の旋回角（ボギー角）を機械的に検出し、検出したボギー角に応じて空気圧制御バルブを動作させます。操舵アクチュエーターはこの制御空気圧によって輪軸の自己操舵性を補助する操舵力を発生して、台車の曲線通過性能を向上させます。純粋に機械的な動作によって操舵を行うため、反対方向に舵を切る（逆操舵する）可能性が低いことが本シ

テムの特徴です。本システムは、ボギー角検出機構・空気圧制御バルブ・操舵アクチュエーターの三つの要素で構成されます。

### 構内走行試験

上で述べた輪重減少抑制台車に空気圧制御操舵機構を組み込み、脱線しにくい構造とした台車（図3）の走行試験を、鉄道総研所内試験線にて行いました。試験結果として、走行速度15km/hでの、半径160mの円曲線およびその前後緩和曲線における脱線係数の最大値を図4に示します。回転機構抑止状態では出口緩和曲線部において脱線係数が大きいものに対して、輪重減少抑制機能と空気圧制御操舵システムを使用すると横圧低減機能の相乗効果で、脱線係数が5割程度小さくなることを確認しました。なお、操舵動作

の有無による輪重減少抑制効果の変化は認められず、両機能が干渉することなく良好に機能していることを確認しました。

### 衝突に対する安全性向上

#### 列車衝突解析

衝突事故時の車両の安全性を評価・検討する場合、衝突シナリオをどのように設定するかが重要です。本研究では、踏切に立ち往生しているダンプカーを衝突対象とし、積載物は最大積載量の土砂としました。

ダンプカーと列車の衝突解析では、列車は総重量31トンのステンレス鋼製車体の単車とし、ダンプカーは総重量22トン（土砂約11トン）としました。

解析結果の例として、衝突速度54km/h条件での衝突後約250ms経

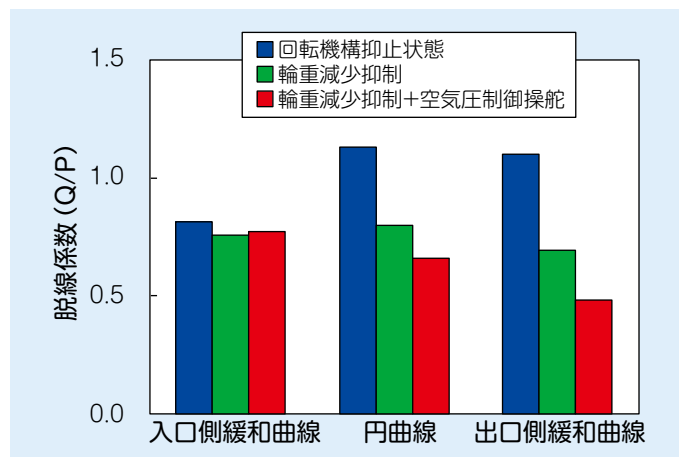


図4 脱線しにくい台車の走行試験結果

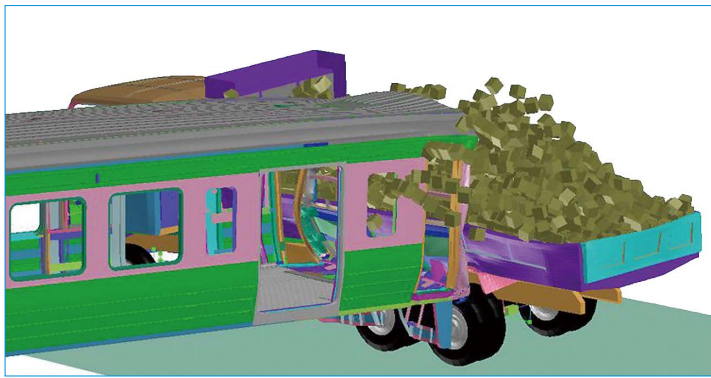


図5 ダンプカーとの衝突解析例



図6 ロングシート乗客の衝突解析

過時の変形状況を図5に示します。同図のように、衝突により列車先頭部が変形しダンプカーの土砂が飛散しましたが、客室内に顕著な変形は見られませんでした。また、室内位置によって加速度波形は異なり、最大衝撃加速度は7～11G程度でした。

このように列車衝突速度をパラメーターとする衝突解析で得られた、客室前位、中央、後位における衝撃加速度波形を入力として、以下において衝撃加速度波形と乗客の傷害度の関係を検証しました。

### ロングシート着座乗客の傷害度

通勤型車両に多くみられるロングシートに着座している乗客のうち、仕切板から二座席分空けて着座している乗客を対象として、仕切板との衝撃試験を行いました。仕切板は、SS400鋼板製とし、厚さを1.6mm、3.2mm、4.5mmと変えて、スレッド試験(☞参照)およびシミュレーション解析を実施し、乗客の傷害度評価を行いました。

スレッド試験では、加速度入力後、ダミー人形は仕切板側に倒れ込み、左

#### ☞ スレッド試験

車体に見立てた台車上にシートを設置して、乗客を模擬したダミー人形を載せ、台車ごと加速あるいは減速により内装品にぶつけて乗客の衝突を模擬する試験。

側頭部からこれに衝突しました。これに対して、衝突解析をMADYMO(汎用のマルチボディ解析ソフトウェア)を使用して行い(図6参照)、試験結果と比較することにより解析精度を確認しました。

スレッド試験およびシミュレーション解析により得られた頭部衝突速度と頭部傷害値の関係を、図7に示します。同図より、試験と解析の結果は概ね一致し、データの傾向は右肩上がりとなり、頭部衝突速度が高いほど、また、仕切板の板厚が厚くなるほど頭部傷害値が高くなるのが分かります。

#### クロスシート着座乗客の傷害度

回転式クロスシートに着座している乗客に対するスレッド試験は、2人掛けのクロスシートに2人掛けの条件(以

下、2C条件)と1人掛けの条件(以下、1C条件)とし、入力波形は最大加速度を14Gとして実施しました。なお、乗客が着座しているクロスシートと前のシートとの間隔は960mmとしました。また、1人掛けの場合は窓際に座ることが多いと考えられますので、進行方向に対して右窓際にダミー人形を配置しました。

1C条件における、ダミー人形の膝・すねおよび頭部がクロスシートに衝突した時の、高速度カメラの画像を図8に示します。1C条件では、脚部がクロスシート背面下部に衝突し、これによりクロスシートが前傾して回転し、約163msで頭部がクロスシート背面上部に衝突しました。その後もダミー人形の進行が止まらず、クロスシ

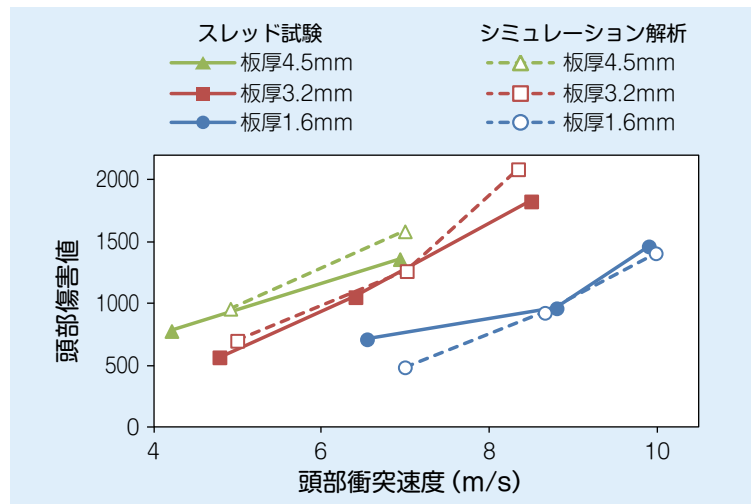


図7 頭部衝突速度と頭部傷害値の関係



図8 クロスシート着座乗客のスレッド試験(1C条件)

トは90°以上回転しました。なお、2C条件では左右2体がほぼ同時に衝突したため、クロスシートはほとんど回転しませんでした。クロスシートの脚部が前方へ大きく変形しました。

スレッド試験に相当する衝突解析を、PAMCRASH(汎用の陽解法有限要素解析ソフトウェア)を使用して実施しました。それぞれの条件におけるダミーモデルの傷害値の試験結果を解析結果とあわせて表1に示します。同表のとおり、1C条件における左大たい部荷重のみが試験結果12.8kN・解析結果12.7kNと限度値である10kNを超えました。

頭部傷害値の解析結果は、試験結果と比較して全体的に低めの値となり、最大105(36%)の誤差がありました。いずれの条件でも、試験結果・解析結果とも限度値1000に対して十分

表1 クロスシート着座乗客の傷害値

試験(解析)条件	1C条件		2C条件	
	右側ダミー	左側ダミー	左側ダミー	右側ダミー
頭部障害値 【限度値：1000】	288 (183)	219 (153)	219 (153)	161 (169)
胸部障害値 【限度値：60G】	50.5G* (19.5G)	12.3G (21.9G)	12.3G (21.9G)	20.0G (22.2G)
大たい部荷重 【限度値：10kN】	左	12.8kN (12.7kN)	4.7kN (6.4kN)	6.6kN (8.6kN)
	右	5.9kN (6.1kN)	5.6kN (7.3kN)	5.3kN (6.8kN)

\*…参考値

(括弧内は解析結果を示します)

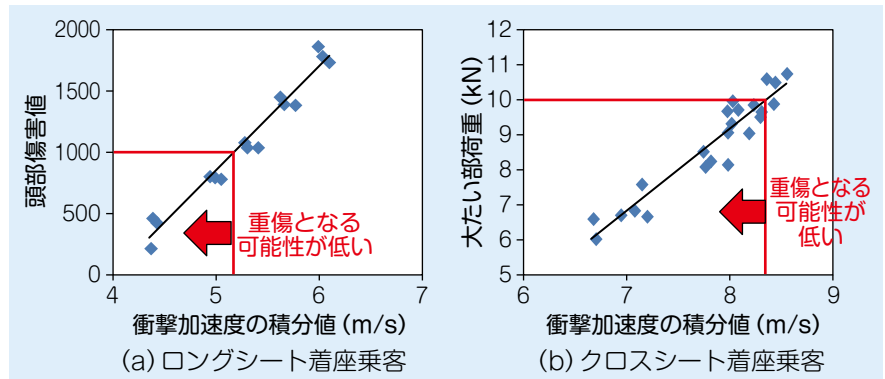


図9 衝撃加速度の積分値と傷害値

小さい結果となりました。

以上の結果から、今回の試験条件(テーブルがない)においてクロスシート着座乗客が前席に衝突することによって重傷となる可能性が高いのは、大たい部であることが明確となりました。

#### 衝撃加速度波形と乗客傷害値の関係

車両衝突後の衝撃加速度波形を、車両の衝突時刻からロングシート着座乗客の頭部が仕切板に衝突する時刻まで時間積分した結果と頭部傷害値の関係を図9(a)に示します。同図より、衝撃加速度の積分値と傷害値の間には線形の関係が認められ、ロングシート着座乗客の場合は5m/s程度以下であれば、頭部傷害値が限度値内に収まると判断されます。図9(b)はクロスシート着座乗客の場合で、同様に、8m/s程度以下であれば、大たい部荷重が限度値内に収まると判断されます。

#### 成果の活用

今後、実用化に向けて、脱線しにくい台車については、試験線での長期間の高速試験により耐久性などに問題の無いことを確認したうえで、軌道条件の悪い線路などを走行する車両の台車として採用されることを目指します。また、乗客の傷害度を考慮した衝突シミュレーションについては、乗客の傷害度が大きくなる条件の検討などを実施して、衝撃加速度の積分値と乗客の傷害度との関係をさらに明確にしていきます。そのうえで、新車両の設計時に、車体衝撃加速度の積分値を指標とする衝突シミュレーションを実施することによって、より衝突安全性の高い車両の製造に寄与することを目指します。[RRR]