

# 車両分野の諸課題解決に資する鉄道固有現象の解明

## 車両構造技術研究部長 石毛 真



### 1.はじめに

鉄道総研の車両分野における研究開発においては、「車両の安全性、信頼性の更なる向上」「輸送サービス、品質の更なる向上」「保守作業の省力化、省人化」の3つの方向性を目指している。中でも安全性の向上を最も重要と位置づけ研究開発に取り組んでいる。

鉄道車両における安全性を損なう事象としては、脱線、転覆、蛇行動、衝突、列車座屈、き裂(車軸、台車枠)、火災などが挙げられる。鉄道はレールに案内されて車両が走行する輸送機関であるため、車輪がレールから外れることは重大な危険事象であり、他の輸送機関と比べたときの鉄道の固有性と考えられる。また、高速時に発生する自励振動である「蛇行動」や、踏切での「衝突」を進路で回避できないことなどもレールに案内されて走行するが故に起きうる不安全な事象といえる。この他、鉄道車両は車体の大きさに対してレール幅が狭い(支持間隔が狭い)ため、横風による「転覆」の可能性も考慮すべき重要な課題である。

「脱線」に至る事象にはさまざまな形態があり、「蛇行動」「転覆」「衝突」もその原因となる。車軸や台車枠のき裂、折損などの車両自体の損傷や、地震などによっても脱線は発生する。また逆に、「脱線」は「転覆」「衝突」の原因ともなる。

鉄道は、車両が連なって走行する編成走行が可能であり、またそれが特徴ともなっている。編成走行であるがゆえに発生する事象としては、「列車座屈」、踏切衝突時に生じる「編成内衝突」があり、列車座屈は、「脱線」につながる事象でもある。

このように、鉄道車両には車両が走行する際の車輪とレールの接触に関する問題をはじめとする鉄道固有の現象が存在し、それらの現象を解明することが鉄道の安全性向上につながる。鉄道総研の車両分野では、

この「鉄道固有の現象解明」を基礎研究と位置づけて研究に取り組んでいる。ここでは、固有現象解明に向けた取組の事例として、「脱線(乗り上がり脱線)」「蛇行動」「衝突における破壊挙動」の3つを紹介する。

### 2.乗り上がり脱線

鉄道の車輪とレールには鉄(正確には鋼)が用いられる。鉄は、自動車のゴムタイヤなどに比べて硬く変形しにくいいため、転がり抵抗が小さく大荷重を支えることができる反面、接触部の面積が非常に小さく、接触部に働く応力が非常に大きくなる。車両はレールに沿って転走するが、軌道との間で相互に影響を及ぼし合っており、車両が運動することで車輪レールの接触部に働く力が変動することになる。

接触部に働く力の変動がある境界値を超えると脱線に至る可能性が出てくる。その一例が乗り上がり現象である。乗り上がりとは、車輪フランジ部とレールの摩擦力を足掛かりにして車輪がレールに接触したままレールをよじ登る現象を指す。接触部に作用する横方向の荷重が大きくなると摩擦力が大きくなり、このような車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がる事象が発生する可能性がある。乗り上がり脱線に関する研究のこれまでの変遷を以下に示す。

1963年に発生した鶴見事故をきっかけに顕在化した貨車の競合脱線については、狩勝実験線での脱線試験により脱線原因の究明が行われ、貨車のリンク機構の改良や、踏面形状の変更などの対策が取られた。

2000年の日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故<sup>1)</sup>では、急曲線における低速乗り上がり脱線が注目された。検討の結果、車両の静止輪重アンバランス、車輪レール間の摩擦係数、線路線形、平面性変位などの影響が複合して脱線に至ったと推定された。この事故をきっかけ

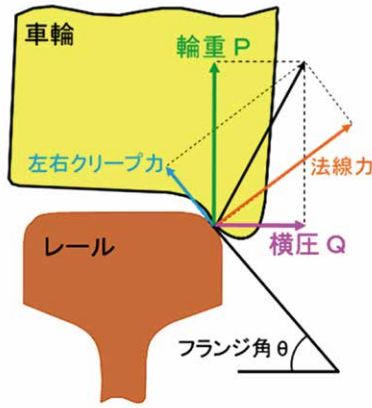


図1 車輪レール間に働く力

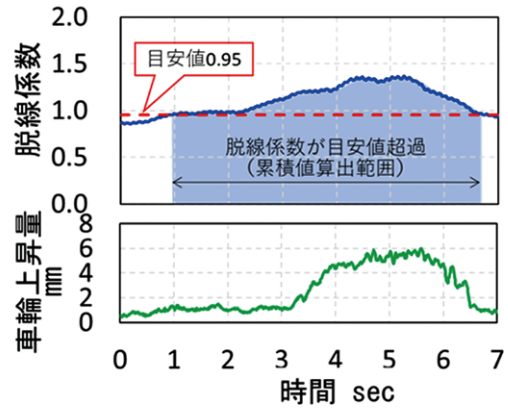


図2 脱線係数と車輪上昇量

に、乗り上がり脱線メカニズムの解明が理論解析、実験の両面から行われ<sup>2)3)</sup>、車両側の対策としては、静止輪重の管理や、フランジ角度の変更等の対策が取られた。

近年では、コンテナ貨車の乗り上がり脱線が複数回発生したが、事故時の車両運動の解析からコンテナの積載条件によっては軌道の周期的な水準変位と車体ローリング振動の共振により輪重変動が発生し、乗り上がりに至ることが判明した。車両側の対策としては、車体支持装置の上下動ダンパの減衰特性を見直すことで、共振による輪重変動の抑制が図られた<sup>4)</sup>。

## 2.1 脱線に対する走行安全性の評価方法<sup>5) 6)</sup>

車輪とレールの間に働く力(図1)のうち、水平方向の力である横圧(Q)を垂直方向の力である輪重(P)で割った値を脱線係数(Q/P)と呼ぶ。この脱線係数の値が式(1)に示すナダルの式から計算される限界脱線係数((Q/P)<sub>LIMIT</sub>)を超えると脱線に至る可能性が出てくる。走行安全性の評価においては、限界脱線係数に対して安全率を掛けた脱線係数の目安値が設定される。一例として、フランジ角度65度、摩擦係数0.3の場合、脱線係数の目安値は0.95となる。新形式車両の性能試験等では、輪重および横圧を測定するための専用輪軸を組み込んだ車両を用いて走行安全性の評価が行われ、走行試験で測定される脱線係数が、目安値以下であれば安全と判断する。これまでの長年の実績、データの蓄積により、脱線係数の目安値による走行安全性評価は一定の評価を得ている。この評価方法においては、基本的に各地点で時々刻々測定された脱線係数の瞬時値を用いて評価が行われる。しかし、限界脱線係数は「乗り上がり脱線の発生が可能となる条件」であり、実際には脱線係数が目安値を超過し、さらに限界脱線係数を超過する状態が観測されても脱線には至らないケースが多々存在する。

$$\left(\frac{Q}{P}\right)_{LIMIT} = \frac{\tan \theta - \mu}{1 + \mu \tan \theta} \quad \dots (1)$$

ここで、θ：車輪フランジ角度、μ：車輪レール間摩擦係数

日比谷線脱線事故後の乗り上がり脱線メカニズム解明の中で、急曲線低速走行時の乗り上がり現象の観察が繰り返し行われ、車輪がレールに乗り上がり始めてから脱線に至るまでには車輪半周～1周程度走行することが見えてきた。この知見から、従来は脱線係数瞬時値による評価だったのに対して、ある程度の走行距離における平均的な脱線係数の値による評価方法の可能性が示された。これを受けて行っている、ある区間の平均的な値による評価に関する取り組みについて、次に紹介する。

## 2.2 累積値による評価手法<sup>7)</sup>

ある程度の走行距離における平均的な値による評価の指標として、脱線係数の累積値による評価に取り組んだ。これは、脱線係数が目安値を連続して超過している間の脱線係数の値を累積し、その累積値と車輪上昇量との関係を検証するものである。この検証については、鉄道総研所内の試験線を用い、急曲線低速走行条件で行った。脱線係数が目安値を超過している間の脱線係数の値をそのまま累積すると、脱線係数の時間積分値となる。図2に急曲線出口側緩曲線低速走行時の脱線係数の値と車輪上昇量の波形例を示す。脱線係数が目安値0.95を連続的に超過しており、また、車輪も徐々に上昇している状況がわかる。脱線係数の累積値は、図2において脱線係数が0.95を超過している間の脱線係数値を足し合わせたものとなり、この区間の脱線係数の線図の下側の面積(図2の水色部分)を計算することとなる。これが脱線係数の時間累積値となる。

この時間累積値に対して走行速度を掛けたものが脱線係数の距離累積値となる。このようにして求まる脱線係数の距離累積値について、車輪上昇量との関係を検証した結果、速度に応じて車輪上昇量が急増する閾値があり、累積値の増加とともに車輪上昇量も増加する傾向が見られた(図3)。このことから、脱線係数の距離累積値が乗り上がり脱線に対する指標として使用できる可能性が見いだされた。ここで紹介した事例は急曲線低速走行試験の結果から得られた知見であり、今後、中高速域でも検証を進めていくことを考えている。

### 2.3 活用イメージ

従来の時々刻々の脱線係数瞬時値による走行安全性評価手法は、長年の実績もあり、今後も新形式車両の性能試験等においては引き続き用いられていくものと思われるが、短時間の目安値超過が頻発するような線区においては、従来の評価手法の補完として脱線係数の距離累積値を用いた手法を用いることで、より精度よく評価できる可能性があると考えている。

## 3. 蛇行動

鉄道車両では、左右の車輪が車軸に圧入された一体輪軸が用いられ、その車輪踏面には勾配が設けられている(図4)。踏面勾配をもつ一体輪軸がレール上を走

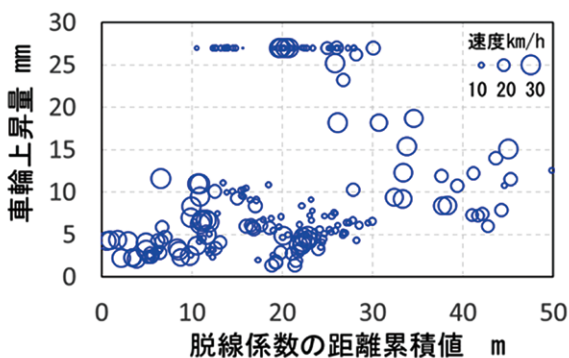


図3 脱線係数距離累積値と車輪上昇量

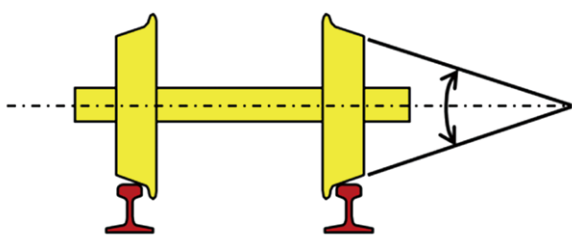


図4 踏面勾配をもつ一体輪軸

行することで、輪軸中心がレール中心からずれると左右車輪の接触位置に輪径差が発生し、走行方向がレール中心に向かうよう輪軸の向きを変える自己操舵性が発現する。輪軸はこの作用により図5のように蛇行しながら進もうとする性質を持っているが、走行速度がある限界を超えるとこの振幅が自励的に増大する蛇行動という現象を生じる。この時の波長は、踏面勾配、車輪径、軌間等によって決まり、「幾何学的蛇行動波長」と呼ばれる。蛇行動は、輪軸自体の走行エネルギーを取り込んで振動を持続成長させるため、高速では振動が大きくなり、最悪の場合脱線に至る可能性がある。

脱線に関する評価は走行安全性評価と呼んでいるが、蛇行動に関しては、走行安定性評価と呼んでいる。走行安定性の確保についてのこれまでの経緯を簡単に紹介する。

東海道新幹線開業に向けた1960年代前半においては、主に線形理論に基づく車両運動解析と模型実験による安定性解析が行われ、200km/h台で安定して走行するための台車構造、諸元値の選定が行われた。試作台車については、車両試験台による安定性評価が行われた。この当時の車両試験台(図6)の最高速度は250km/hであった。営業向けに設計製作されたDT200形式台車(図7)においては、蛇行動を起こすことなく200km/hで安定して走行するため、台車旋回に対する適切な抵抗を与え、踏面勾配は在来線よりも緩やかな1/40円錐踏面が採用された。

国鉄分割民営化前後の時期には、新幹線の速度向上に向けた研究開発が盛んに行われ、新幹線用のボルスタレス台車(図8)が開発された<sup>8)</sup>。この頃には計算機の性能向上もあり、車輪レール接触解析などの非線形要素も含む車両運動シミュレーション解析によって走行安定性の検証が行われ、軸箱支持装置の支持剛性の適値探索など、安定性向上のための諸元の最適化が図られた。試作ボルスタレス台車の性能確認には、最高

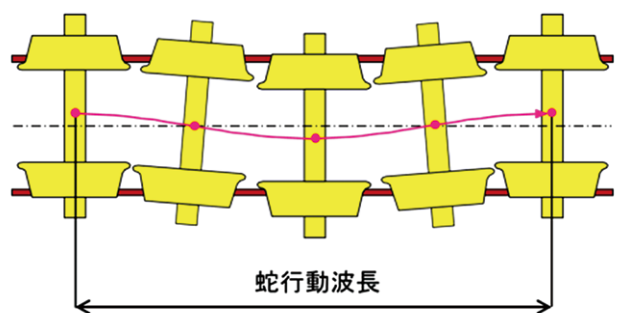


図5 蛇行動

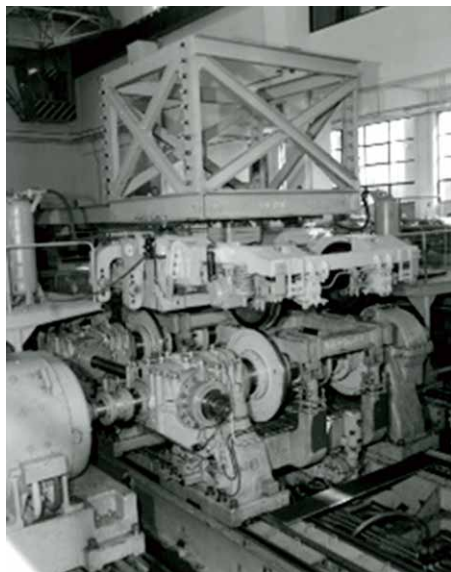


図6 車両試験台

速度500km/hで転動しながら軌条輪加振が可能な高速車両試験台(図9)が用いられた。ボルスタレス台車はそれまでの台車にあった枕はりおよび側受が存在しないため、台車旋回に対する抵抗はヨーダンパにより与える構造となった。また、高速走行性能と曲線通過性能を両立する円弧踏面も採用された。その後、車両運動解析の手法は、汎用マルチボディダイナミクス解析ソフトウェアの興隆もあり、広く活用されるようになり現在に至っている。

### 3.1 車両試験台における走行安定性確認手法

車両試験台では、通称「蛇行動試験」と呼ばれる試験が行われる。これは、段階的に速度を上げていき、蛇行動が発生する速度を確認するものである。この蛇行動が発生する速度を蛇行動限界速度と呼ぶ。蛇行動試験にはいくつかの試験方法がある。まず、「単純回転試験」は、明示的な外乱を与えず、回転速度を上げていったときに、蛇行動が自然発生的に発生する速度を確認する試験である。「軌条輪加振試験」は、各速度段において、軌条輪を左右に揺ることによって輪軸および台車に強制的に振動を発生させ、それをきっかけに蛇行動が発生する速度を確認する試験である。また、ボルスタレス台車に搭載されるヨーダンパは、油漏れや空気の混入などにより正常な減衰力を発生しない状況(フェール状態)の発生が想定されることから、通常一台車あたり偶数本搭載されるヨーダンパのうち1本を敢えて取り外し、走行安定性が低下した状態での蛇行動限界速度を確認する。

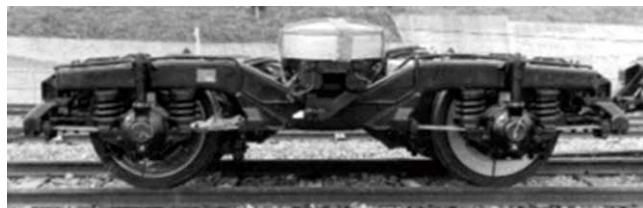


図7 DT200形式台車

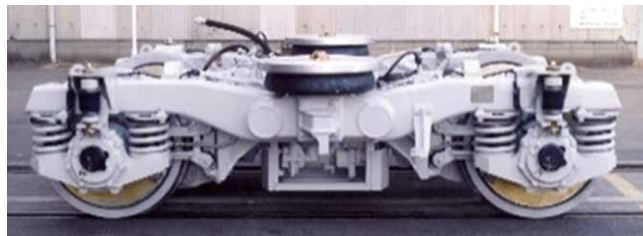


図8 新幹線用ボルスタレス台車



図9 高速車両試験台

踏面形状は通常設計形状で試験が実施されるが、摩耗踏面においては、等価踏面勾配の増加により安定性が低下するため、蛇行動試験では、踏面の摩耗やヨーダンパフェールなどの安定性低下要因を考慮してもなおかつ蛇行動限界速度が営業最高速度を十分に上回っていることを確認する。

鉄道総研の高速車両試験台では、主に軌条輪加振により外乱を与えるが、試験装置によってはアクチュエータによって輪軸を直接加振したり、車体に相当する荷重枠に強制変位を与えたりする場合もある。これまでの蛇行動試験の実績、経験から、加振条件によって蛇行動限界速度が変化することがわかっている。表1に一例を示す。単純回転試験の場合の限界速度282km/hに対して、軌条輪加振の場合は限界速度が低下し、なおかつ加振周波数、波数によって限界速度が異なっている。

蛇行動は図5に示す通り一定波長をもつ運動であることから、速度とともに蛇行動の周波数も変化する。したがって、一定周波数の加振よりも蛇行動に近い周波数による加振の方が限界速度は低くなる傾向がある。

また、蛇行動試験においては、蛇行動が発生してもフレンジ接触を伴うような激しい蛇行動には至らず、小さい振動振幅のまま振動を継続する場合がある。これを小振幅蛇行動と呼んでいる。小振幅蛇行動は、速度の上昇や加振など、わずかな状況の変化で発散に至るものかどうかの判断が難しく、また、それほど高くない速度域から生じることもあり、小振幅蛇行動を蛇行動とみなすか否かについては評価が確立しているとは言えない。

以上のことから、走行安定性に関する研究課題として、加振条件と蛇行動限界速度の関係の精査、小振幅蛇行動の発生特性の把握が挙げられる。

### 3.2 最近の取り組み

車両試験台における蛇行動試験において、加振条件によって蛇行動限界速度が変化する特性を詳細に把握するため、様々な加振条件のもとで蛇行動試験を実施した。その結果の一例を図10に示す。ここで縦軸の初期振幅とは、加振後の輪軸の振幅の大きさを表す。加振後に振動が収束した場合を○で、加振後に振動が発

散した場合を×で表す。収束と発散のプロットは領域が明確に分かれており、その間を分ける境界があることがわかる。この境界線を「蛇行動限界曲線」と呼ぶこととする。この蛇行動限界曲線は速度と加振条件(振幅)によって図10の赤点線のように表されることがわかった<sup>9)</sup>。また、蛇行動限界曲線は、通常は一様に右下がりの曲線となり、車両諸元が変わると変化することがわかった。例えば車両質量が減少すると安定性は低下する(図11)。また、車両の条件によっては小振幅の蛇行動特性が現れることが実験的にわかった。この場合、蛇行動限界曲線は右下が低速側に回り込むような形状となり(図12)、この部分が小振幅蛇行動の特性を表す。

ここまで紹介した内容は実験的に把握できた現象であるが、蛇行動の特性を詳細に把握するために、様々な車両諸元に対して逐一試験を実施することは現実的ではないことから、現在、蛇行動限界曲線を解析的に求める取り組みを進めている。これを実現するためには、車両運動シミュレーション解析のさらなる精度向上や、効率よく解析を実行する探索手法を確立する必要がある。

解析的に蛇行動限界曲線を求める手法が確立できれば、車両諸元に対応した蛇行動限界曲線が求まることとなり、小振幅蛇行動を含む蛇行動特性の把握や、小振幅蛇行動の発生要因の把握が可能となって、走行安全性の向上につながっていくものと考えられる。

表1 加振条件による蛇行動限界速度の変化<sup>9)</sup>

加振条件	単純回転	1Hz,3mm,3波	蛇行動周波数 3mm,半波	蛇行動周波数 3mm,3波
蛇行動限界速度	282km/h	270km/h	250km/h	240km/h

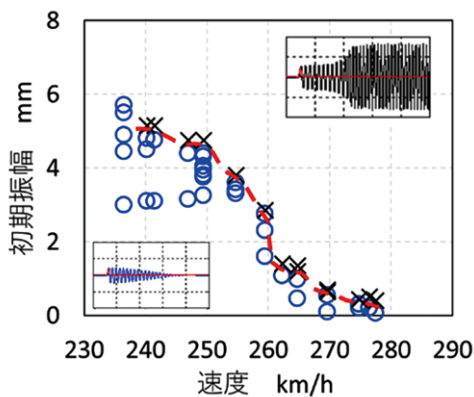


図10 蛇行動限界曲線

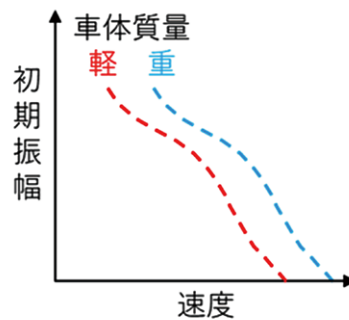


図11 蛇行動限界曲線の変化

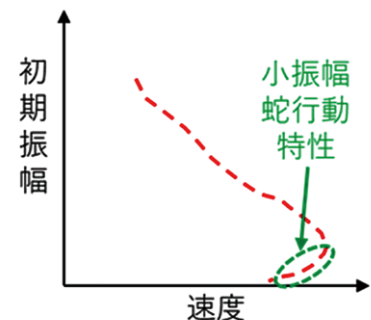


図12 小振幅蛇行動特性

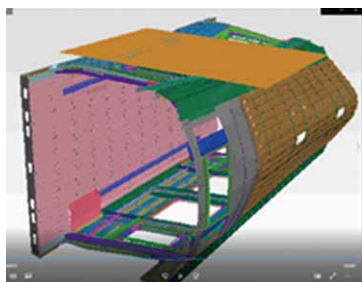


図13 側面衝突解析<sup>10)</sup>

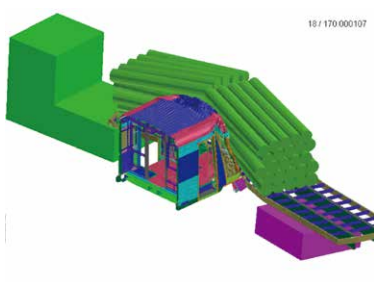


図14 踏切事故再現解析<sup>11)</sup>

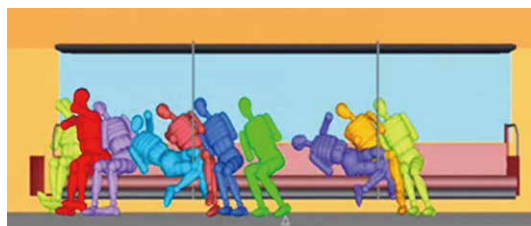


図15 2次衝突時の乗客挙動推定<sup>12)</sup>

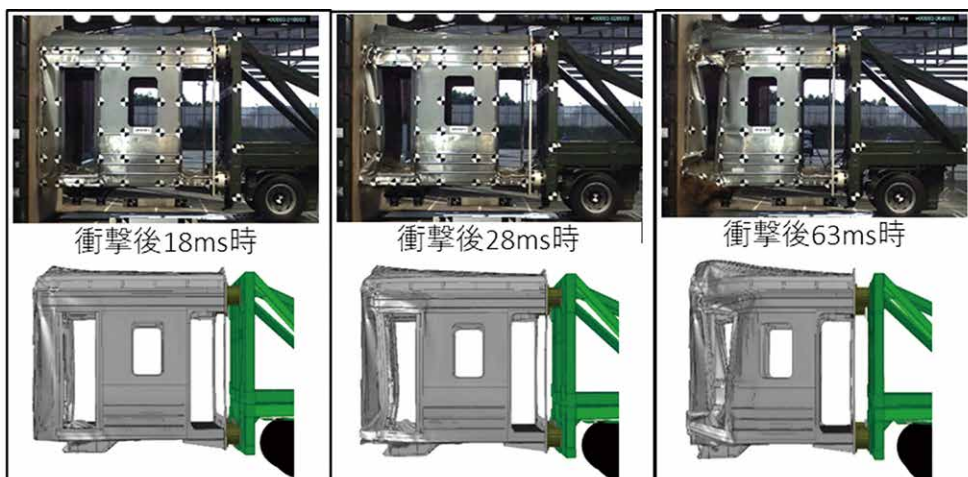


図16 列車衝突解析(上段：実験, 下段：解析)<sup>13)</sup>

## 4. 列車衝突における破壊挙動

衝突事象は鉄道以外の輸送機関でも起こり得るが、列車衝突の場合の固有性について考える。車両はレールに案内されて走行するため、進路上に障害物が存在する場合にはそれを避けることができず、衝突を回避するために可能な手段は減速動作のみである。鉄車輪・鉄レールの摩擦係数は自動車のゴムタイヤなどと比べると低く減速度を大きく取れないことから、踏切での直前横断の場合には実質的に衝突を回避することができない。また、乗務員と乗客を含めた乗員は基本的に自動車や航空機のようなシートベルトは着用しておらず、特に乗客は姿勢(座位、立位)、向き(前向き、後向き、横向きなど)が様々な状態で乗車していること、定員以上の乗車も日常的に行われており、2次衝突\*条件が非常に多岐にわたる。さらに列車は編成で走行するため、全体の質量が大きく、衝突が発生した場合の損傷が大きくなるとともに、編成内での車両同士の衝突も発生する。このような列車衝突の固有性を考慮したうえで、衝突時の乗員の被害を軽減するためには、車体の衝突挙動解明に加えて、様々な条件での2次衝突挙動解明が必要となる。

\*2次衝突：列車と対象物との衝突を1次衝突と呼び、1次衝突によって発生した床面衝撃加速度によって、乗客が車内あるいは他の乗客などと接触することを2次衝突と呼ぶ。

### 4.1 列車衝突現象解明に関するこれまでの経緯

列車衝突現象解明に関しては、1990年代に基礎的な検討として「鋼製車両の衝突挙動基礎検討」「衝撃時の乗客挙動推定」が行われた。その後、2000年代には、車体損傷の現象解明として「上下左右オフセット衝突の被害軽減」「妻面、側面衝突に対する車体損傷特性解明」(図13)が行われた。さらに、2010年代には衝突解析手法の構築と深度化が進められ「踏切事故再現と被害軽減」(図14)「編成モデル導入」「2次衝突被害軽減」(図15)等が行われている。

最近の取り組みとして、衝突被害を軽減する車体構造提案に向けた解析精度の向上を行っている。一例として、ステンレス鋼製車体の衝突解析モデルを紹介する。

実際のステンレス鋼製構体の構造をもとにモデル化を行い、剛体壁に衝突させた場合の計算を行うとともに、解析精度の検証・向上を図るため、実物のステンレス鋼製構体の部分構体を用いた衝突試験を実施した。剛体壁に衝突させたときの解析結果および実車試験結果を図16に示す。車体の変形形状は概ね衝突時の挙動を再現できていることがわかる。

### 4.2 衝突安全性評価手法構築に向けた取組<sup>14) 15)</sup>

ステンレス鋼製構体とダンプカーの衝突解析モデルを用いて、日本国内の実情に即した衝突安全性評価手法の構築に向けた取り組みを進めている。実施内容の流れを簡単に示す。

#### (1) 踏切衝突事故事例調査

国内の踏切事故の実態を把握するため、過去の事故事例調査(図17)を行い、想定する衝突事故シナリオを決定した。ここでは、ステンレス鋼製車両が大型ダンプカーと衝突するモデルとした。

#### (2) 列車衝突解析

衝突事故シナリオに基づき、列車速度、衝突位置・角度、大型ダンプカーの総重量をパラメータとし、222ケースについて衝突解析を実施(図18)し、車体床面の衝撃減速度波形を求めた。

#### (3) 乗客衝突解析

車体床面の衝撃減速度波形を用いて、回転クロスシートに着座した乗客を対象に衝突解析を実施し、乗客の傷害度、具体的には大腿部に作用する荷重を求めた(図19)。

#### (4) 人体傷害度と相関の高い衝突安全性評価指標の検証

乗客衝突解析で得られた人体傷害度と、列車衝突解

析で得られた衝撃減速度波形の特徴を表すパラメータ(図20)との関係を検証し、欧州規格の指標である衝撃減速度の平均値、米国規格の指標である衝撃減速度最大値および衝撃減速度積分値を比較して、衝撃減速度積分値が最も人体傷害度との相関が高いことがわかった。2次衝突速度と大腿部荷重とは元々相関が高く、衝撃減速度積分値は乗客の2次衝突速度にほぼ相当することから、大腿部荷重と最も相関の高い結果が得られたものと考えられる。

### 4.3 今後の取り組み

衝突安全性に関する今後の取り組みとして、今回紹介したステンレス鋼製車体、クロスシートに加えて、アルミ合金製車体、ロングシートについても検討を進める。また、衝突対象物については詳細なモデル化が不要な簡易なモデルを検討し、衝突安全性評価手法の提案に繋げていきたいと考えている。

衝突安全性評価手法を提案し、新車設計時の衝突安全性評価において解析モデル、評価指針を適用することによって、衝突安全性の向上、設計の効率化に貢献できるものと考えている。

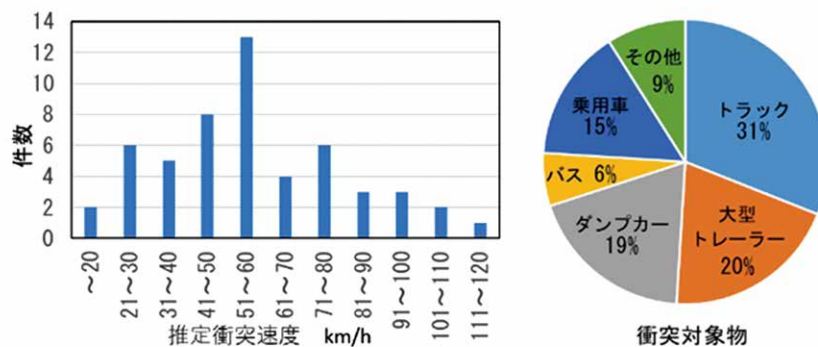


図17 踏切衝突事故事例調査

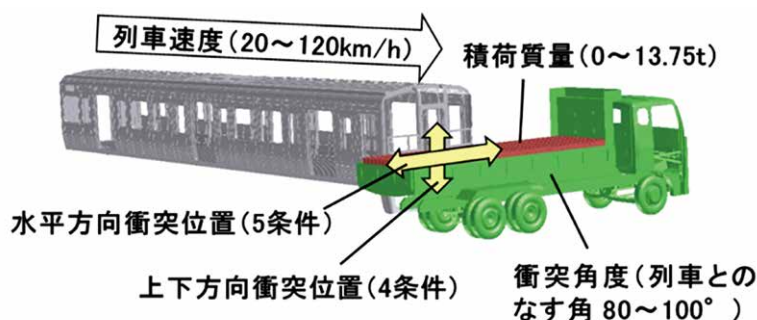


図18 列車衝突解析

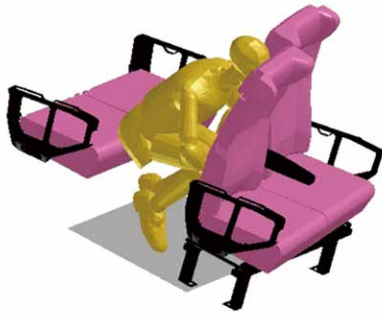


図19 乗客衝突解析・傷害度評価

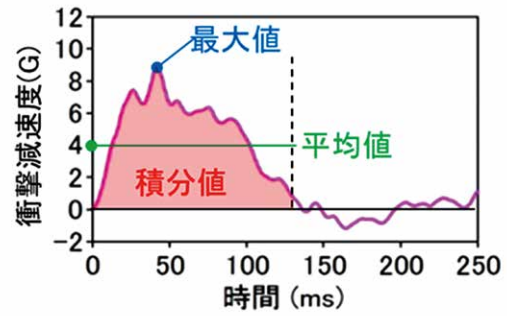


図20 衝撃減速度波形とパラメータ

## 5.まとめ

鉄道車両の固有現象の解明に関する内容として、走行時の安全性向上を例として、乗り上がり脱線、蛇行動、衝突について紹介した。固有現象の解明においては、実験的な現象の把握と、理論解析・数値計算によるメカニズム解明の両面からのアプローチが必要である。車両の構造や使用条件は時代と共に変遷していき、それに伴い発生する事象の性質も変化していく。情報処理に関する社会状況も日進月歩であり、解析技術も日々向上している。こうした条件の変化に対して安全性を維持していくことは鉄道技術者の責務と考えており、そのような時代の変化に応じて固有現象の解明に継続して取り組み、乗り上がり脱線の防止や輪重横圧測定効率化と精度向上、車両衝突に対する安全性向上など、安全性の更なる向上を目指して研究開発を行っていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 事故調査検討会：都高速度交通営団 日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書, 2000
- 2) 石田弘明, 宮本岳史, 前橋栄一, 土井久代, 飯田浩平, 古川敦：急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する安全性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.18, No.8, pp.5-10, 2004
- 3) 石田弘明：急曲線低速走行試験における安全性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.5-10, 2005
- 4) 貨物列車走行の安全性向上に関する検討会：列車走行の安全性向上に関する検討結果について（とりまとめ）, 2020
- 5) 運輸省鉄道局監修：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 鉄道総合技術研究所, 1993
- 6) 鈴木康文：急曲線を安全に走行する, 第16回鉄道総研講演会, 2003
- 7) 土井久代, 石田弘明, 宮本岳史：脱線係数と車輪上昇量に基づく低速走行時の乗り上がり脱線の走行安全性評価, 鉄道総研報告, Vol.34, No.8, pp.29-35, 2020
- 8) 岡本勲, 小柳志郎, 池本憲三, 榎本衛：新幹線電車用ボルスタレス台車 (DT9023E/F) の開発－高速走行性能および乗心地の向上をめざして－, 鉄道総研報告, Vol.7, No.3, pp.9-18, 1993
- 9) 山長雄亮, 木戸和哉：蛇行動限界速度評価における加振条件の影響, 鉄道総研報告, Vol.32, No.8, pp.35-41, 2018
- 10) 沖野友洋, 宇治田寧：側面からの荷重に対する車体強度特性評価, 鉄道総研報告, Vol.25, No.8, pp.23-28, 2011
- 11) 沖野友洋：踏切事故に対する車両の安全性を評価する, RRR, Vol.70, No.4, pp.12-15, 2014
- 12) 小美濃幸司, 中井一馬, 白戸宏明, 鈴木大輔：通勤列車の踏切事故時の乗客挙動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.26, No.1, pp.21-26, 2012
- 13) 沖野友洋, 永田恵輔, 堀川敬太郎, 小林秀敏：実物大のステンレス鋼製鉄道車体構造を用いた衝突試験, 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス講演論文集, 講演番号OS1530, 2019
- 14) 沖野友洋, 永田恵輔, 佐藤裕之, 堀川敬太郎, 小林秀敏：踏切衝突事故時の各因子が列車乗員の被害度に及ぼす影響評価, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.869, 2019
- 15) 沖野友洋, 永田恵輔, 堀川敬太郎, 小林秀敏：乗客の傷害度との相関に基づく鉄道車両の衝突安全性評価方法, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.881, 2020