

# 「車両の脱線メカニズム」

(財)鉄道総合技術研究所

宮本 昌幸

## 1. まえがき

鉄道の基本的要件である安全性を阻害する、重要な要因が脱線現象である。鶴見事故を契機にし鉄道技術研究所に「脱線に対する安全基準研究グループ」を組織し、1965年から2年間超重点課題として取り組んだ。その結果が現在の安全基準の骨格をなしている。最近、高速化の取り組みの中で、従来の基準では評価しきれない現象が生じてきた事等がきっかけとなり、新しく脱線係数の連続的測定法を開発し、この測定法を用いた新しい安全性評価指標の提案を行ってきた。これらの結果をまず述べる。次いで、地震時の脱線現象解明のために現在開発を進めている、より限界状態までを模擬できるシミュレーションプログラムの概要について述べる。

## 2. 脱線はどうして起きるか

### 2. 1 脱線とは

広辞苑によると、脱線とは、「汽車や電車などが線路からはずれること」となっている。より具体的には、左右の車輪とそれらをつなぐ軸から構成される輪軸が、レールからはずれることである。

一般に物体は三つの直線方向、前後、左右、上下と三つの回転方向、ローリング、ピッチング、ヨーイングの計6方向の動きを同時にできる。レール上を転走する輪軸では、左右それぞれのレールと車輪が接触しているという2個の拘束条件が加わるので、 $6 - 2 = 4$ 方向の動きに限定される。すなわち、輪軸の上下位置、ローリング位置は任意の値をとることはできず、左右、ヨーイング位置が決まると自ずと決まってしまう。はずれるとは、この拘束条件が無くなることと言い換えることができる。

脱線の他に、転覆という言葉が使われるが、転覆とは車両が転倒する事である。強い横風などを受けた車両が、片側の車輪はレール上にあり、反対側の車輪が持ち上げられ、直接転覆に至る1次的な転覆と、脱線の結果転覆する2次的な転覆とがある。1次的な転覆を脱線と区別している場合も多いが、いずれもその過程で、レールからの拘束条件が無くなるという面があり、同じ現象と考えることもできるので、以後両者を包含して脱線として扱うことにする。

### 2. 2 脱線の分類

輪軸はモーターにより増速しながら、あるいはブレーキにより減速しながら、またある

場合は惰行状態の等速で、レールの上を転がっている。これらの輪軸には、軸箱を介して台車からの力が伝わってくる。その台車には空気ばね等を介して車体からの力が伝わってくる。結局、輪軸は、車体、台車、輪軸から成り立っている車両全体の荷重を支え、また、車両に加わる各方向の力やモーメントを一身に受ける事となる。

この軸箱を介して輪軸が受ける力と輪軸に加わる回転トルク、輪軸自重は、図1に示す

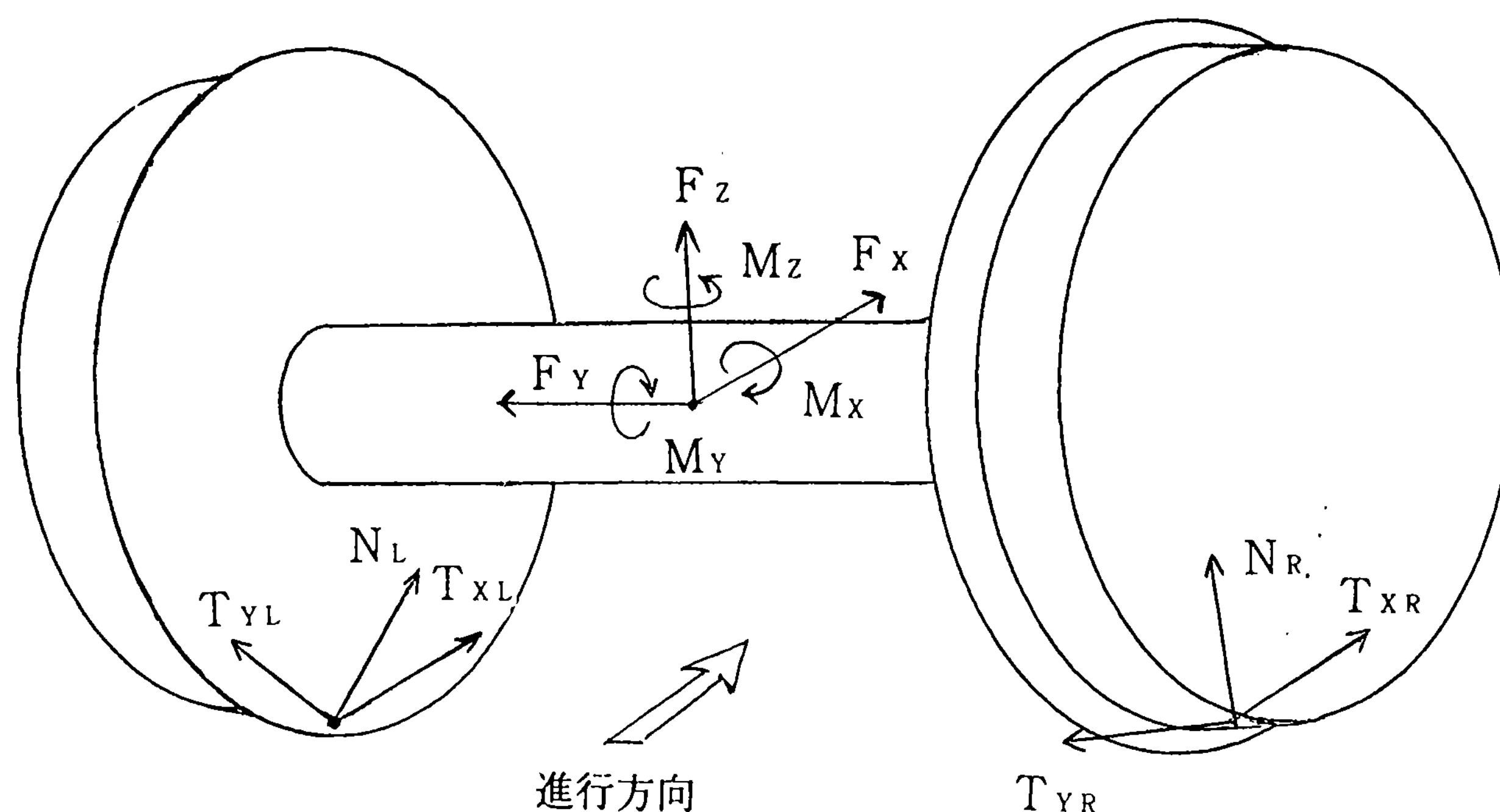


図1 輪軸に働く各力

ように、輪軸重心に働く等価的な前後力 $F_x$ 、左右力 $F_y$ 、上下力 $F_z$ 、ローリングモーメント $M_x$ 、ピッチングモーメント $M_y$ 、ヨーイングモーメント $M_z$ と置き換えることができる。

また、輪軸は右、左の各車輪とレールの接触点からの3方向の力も受ける。接触点での接平面に垂直な法線力 $N_R$ と、接平面内の2方向の力 $T_{xR}$ （進行方向）、と $T_{yR}$ （進行方向に直角方向）である。左車輪も同様に、 $N_L$ 、 $T_{xL}$ 、 $T_{yL}$ の力を受ける。

これらが、脱線劇場に登場する力の役者オールキャストである。

ここで、 $T_x$ 、 $T_y$ はそれぞれ縦クリープ力、横クリープ力と呼ばれているもので、車輪とレール間の微少な滑り（クリープ率）により生じる。滑りが大きくなると二つの力 $T_x$ 、 $T_y$ の合力は摩擦力 $\mu N$ に漸近していく。

横クリープ力 $T_y$ は、輪軸の左右振動速度、後述のアタック角などで決まる横クリープ率、接触点接平面の傾き角などで決まるスピנקリープ率などの関数として定まる。アタック角とは、図2に示す車輪の進行方向とレールの方向との角度差である。アタック角が大きいほど横クリープ力は大きく、その最大値は摩擦力 $\mu N$ となる。アタック角による横クリープ力の方向は、車輪の向いている方向である。

これらの力が互いに釣り合っていれば、輪軸はその位置を保ちながら転走していく。左方向への作用力が過大になると、輪軸は左へ移動することにより、接触点からの左右方向反力をより大きくして新たな釣り合い点に達する。作用力がさらに強くなると、輪軸は左へさらに移動し、左車輪はレールとフランジ部で接触する事になる。これが脱線劇場の序幕である。

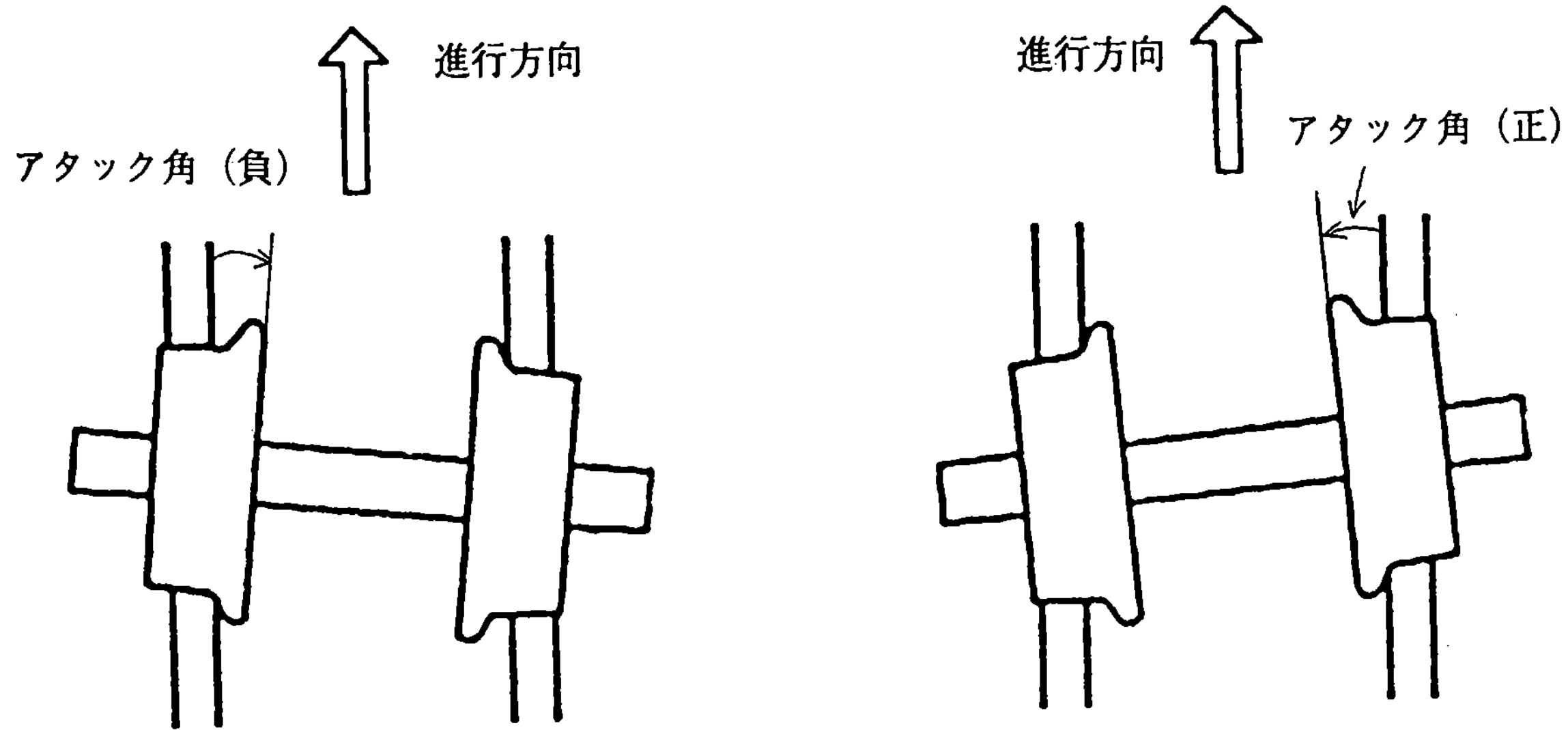


図2 輪軸のアタック角

脱線に至る経過により、脱線をいくつかに分類している。以下、それらについて述べる。

(1) 乗り上がり脱線

車輪フランジ部が、レール肩部を転がり上がって脱線に至るものである。ここで、アタック角が重要なパラメータとなる。

アタック角が正の状態では、左車輪はレールにぶつかる方向に進んでいき、図3に示すように、横クリープ力 $T_{YL}$ は車輪の向いている方向、すなわち接平面上の左上の方向に働く。また、左、右それぞれの接触点での接平面が水平面となす角を $\alpha_L$ 、 $\alpha_R$ とする。この左車輪の接触点で車輪がレールから受ける力 $N_L$ 、 $T_{YL}$ の合力 $F$ の、垂直、及び水平成分が輪重 $P_L$ 、横圧 $Q_L$ であり（図4）、 $Q_L/P_L$ が脱線係数と呼ばれている脱線現象を判定す

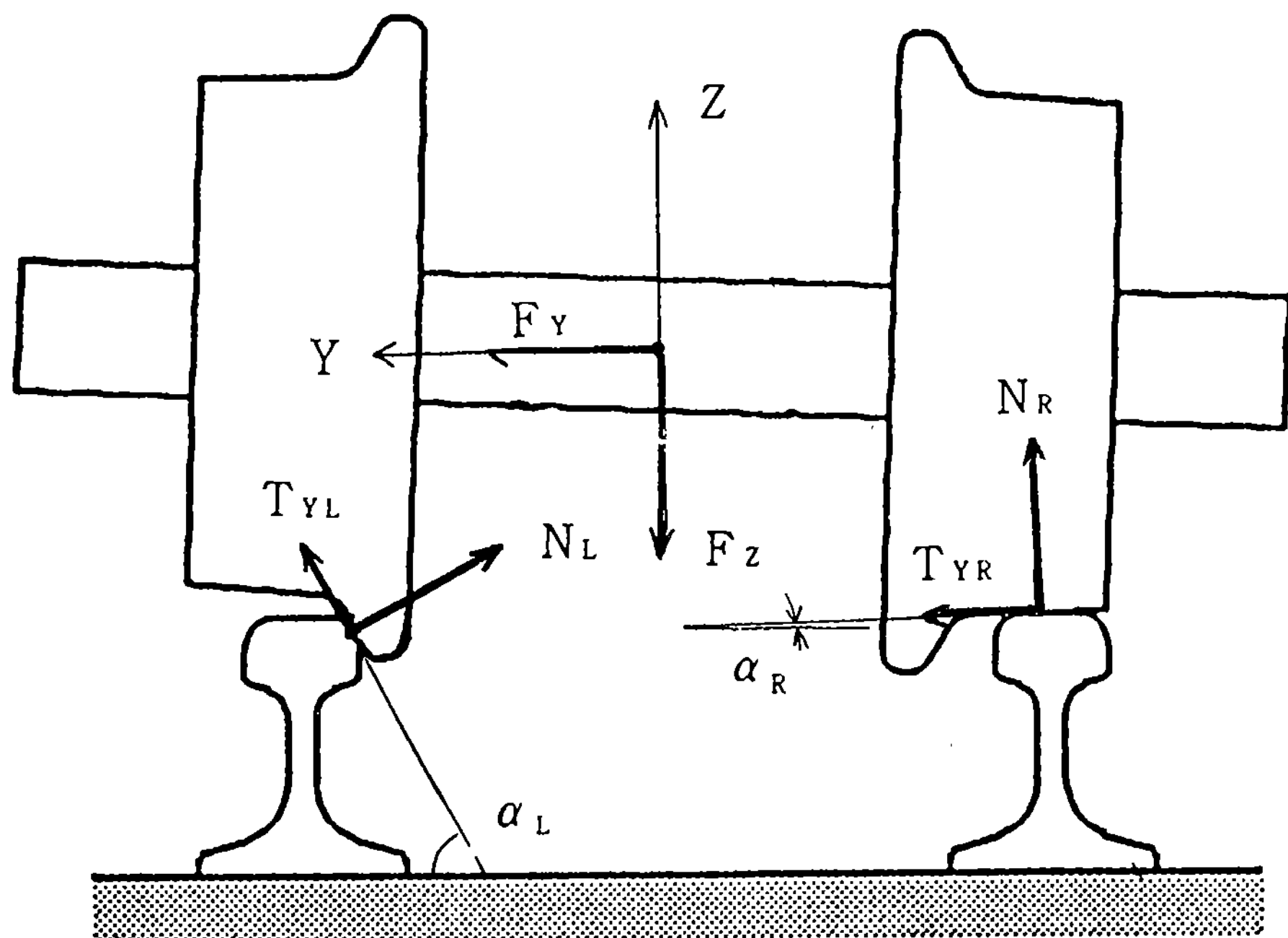


図3 輪軸に働く各力（進行方向に直角の平面内）

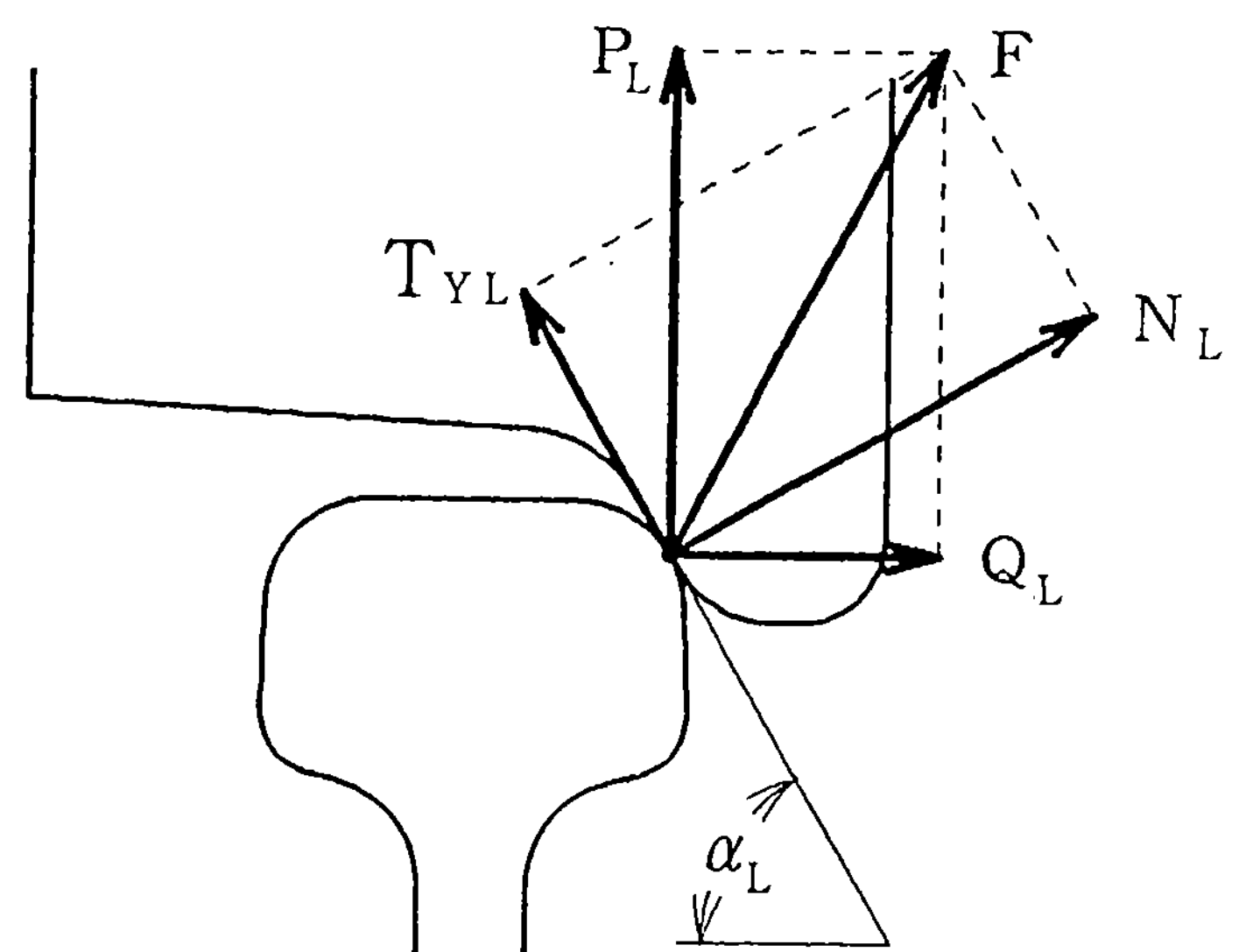


図4 車輪・レール間の作用力

る重要な指標である。図4より脱線係数は、

$$\frac{Q_L}{P_L} = \frac{N_L \sin \alpha_L - T_{YL} \cos \alpha_L}{N_L \cos \alpha_L + T_{YL} \sin \alpha_L} = \frac{\tan \alpha_L - (T_{YL}/N_L)}{1 + (T_{YL}/N_L) \tan \alpha_L} \quad (1)$$

となる。

式(1)の値は $T_{YL}$ が大きいほど小さくなる。 $T_{YL}$ は前述のように摩擦力 $\mu N$ が最大値なので、 $Q_L/P_L$ の最小値は

$$\frac{Q_L}{P_L} = \frac{\tan \alpha_L - \mu}{1 + \mu \tan \alpha_L} \quad (2)$$

となる。この式(2)がよく知られているNadalの式である。

このNadalの式による $Q_L/P_L$ と接触角 $\alpha_L$ との関係を図示すると図5のようになる。この図より、摩擦係数が0.5より小さければ、 $Q_L/P_L$ が、例えば0.8より小さいことは、接触角が $65^\circ$ より小さいことを示している。この角度がフランジ角度より小さければ、まだフランジ接触に至っていないことを示すことになり、 $Q_L/P_L$ が安全性の指標となり得ることがわかる。

また、輪軸重心に左右方向への力 $F_Y$ 、下方向への力 $F_Z$ が働くとき、一輪軸の上下、左右方向の運動方程式は

$$F_Y + N_R \sin \alpha_R + T_{YR} \cos \alpha_R - m \ddot{y} = N_L \sin \alpha_L - T_{YL} \cos \alpha_L \quad (3)$$

$$F_Z - N_R \cos \alpha_R + T_{YR} \sin \alpha_R + m \ddot{z} = N_L \cos \alpha_L + T_{YL} \sin \alpha_L \quad (4)$$

となる。この式の右辺が前述の $Q_L$ 、 $P_L$ なので、横圧 $Q_L$ 、輪重 $P_L$ とは、左車輪接触点以外に一輪軸に働く力の合力(重心に働く力、右車輪接触点に働く力、慣性力)に釣り合っている力であることがわかる。

## (2) 滑り上がり脱線

同じく左車輪に注目する。アタック角が負の状態では、左車輪はレールから離れる方向に向いている。(1)の場合とは逆に、横クリープ力 $T_{YL}$ は接平面上の右下の方向に働き、左車輪は転がり下がろうとしているが、それを越える大きな左方向への左右力が働き脱線に至るものである。従って乗り上がり脱線より起こりにくい。

この場合のNadalの式は式(2)の摩擦係数の項の符号を逆にした式となる。

## (3) 飛び上がり脱線

輪軸のレールに対する左右方向の速度が大きくなると、車輪はレールに衝突して飛び上がりの現象を起こし脱線に至る。

## 3. 脱線に対する安全基準<sup>(1)</sup>

1965年に鉄道技術研究所に「脱線に対する安全基準研究グループ」を組織し、2年間の検討の結果、脱線現象の指標として重要な以下の7項目の許容限度を提出した。

- ・静的輪重抜け
- ・動的輪重抜け
- ・横圧
- ・脱線係数
- ・車輪のレールへの横方向衝突速度
- ・車体左右振動加速度
- ・自連力

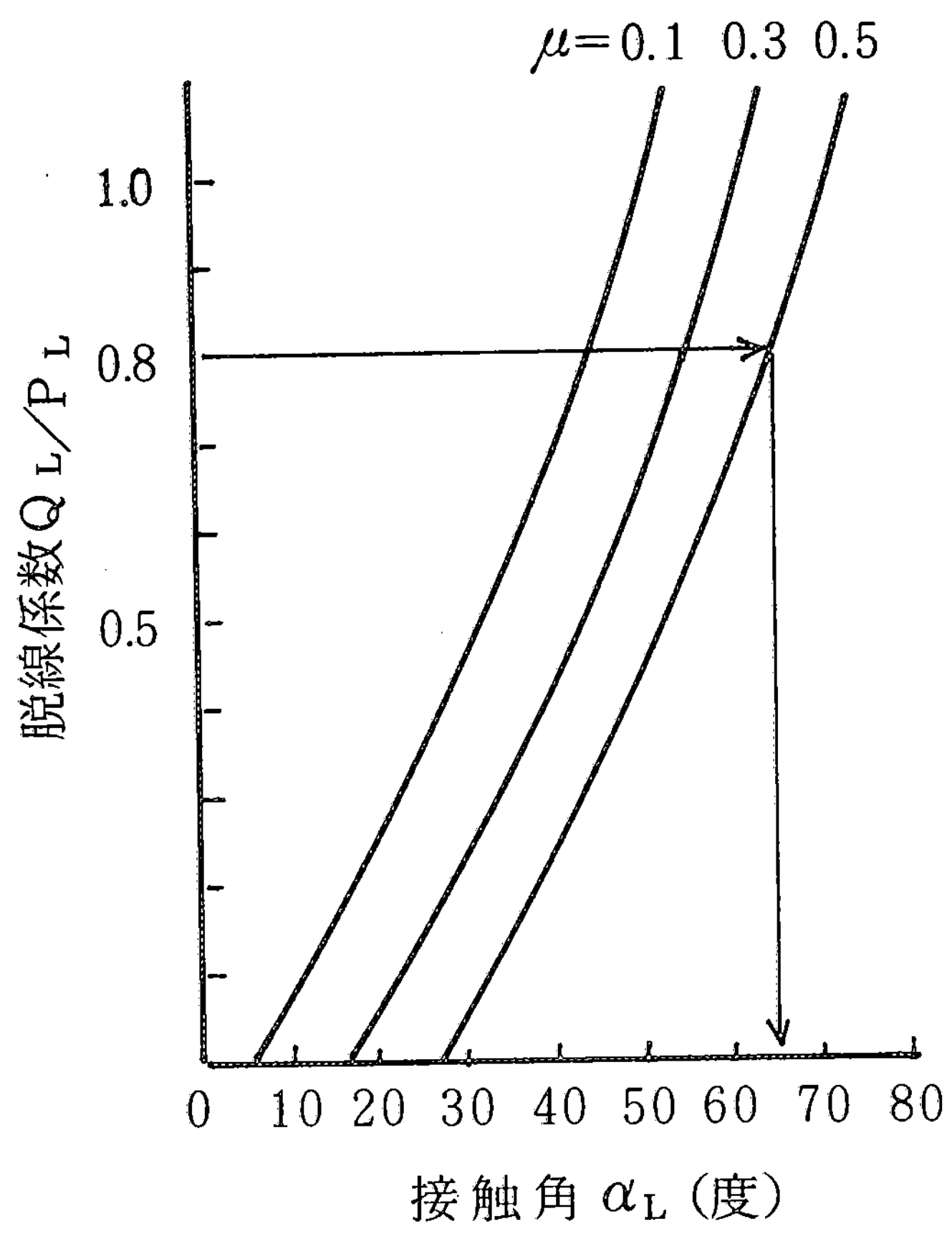


図5 Nadalの式による脱線係数と接触角の関係

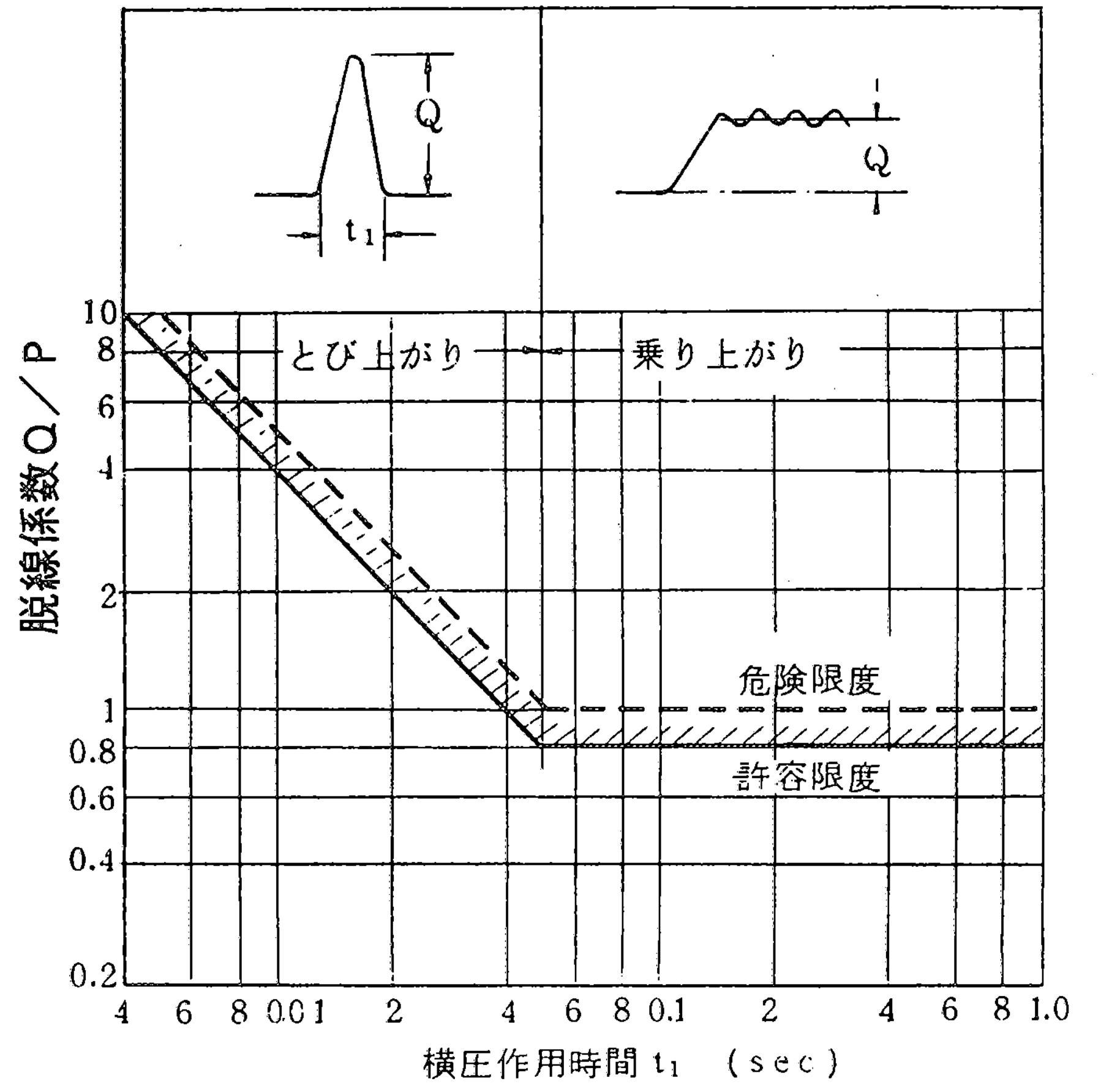


図6 脱線係数 $Q/P$ の許容限度

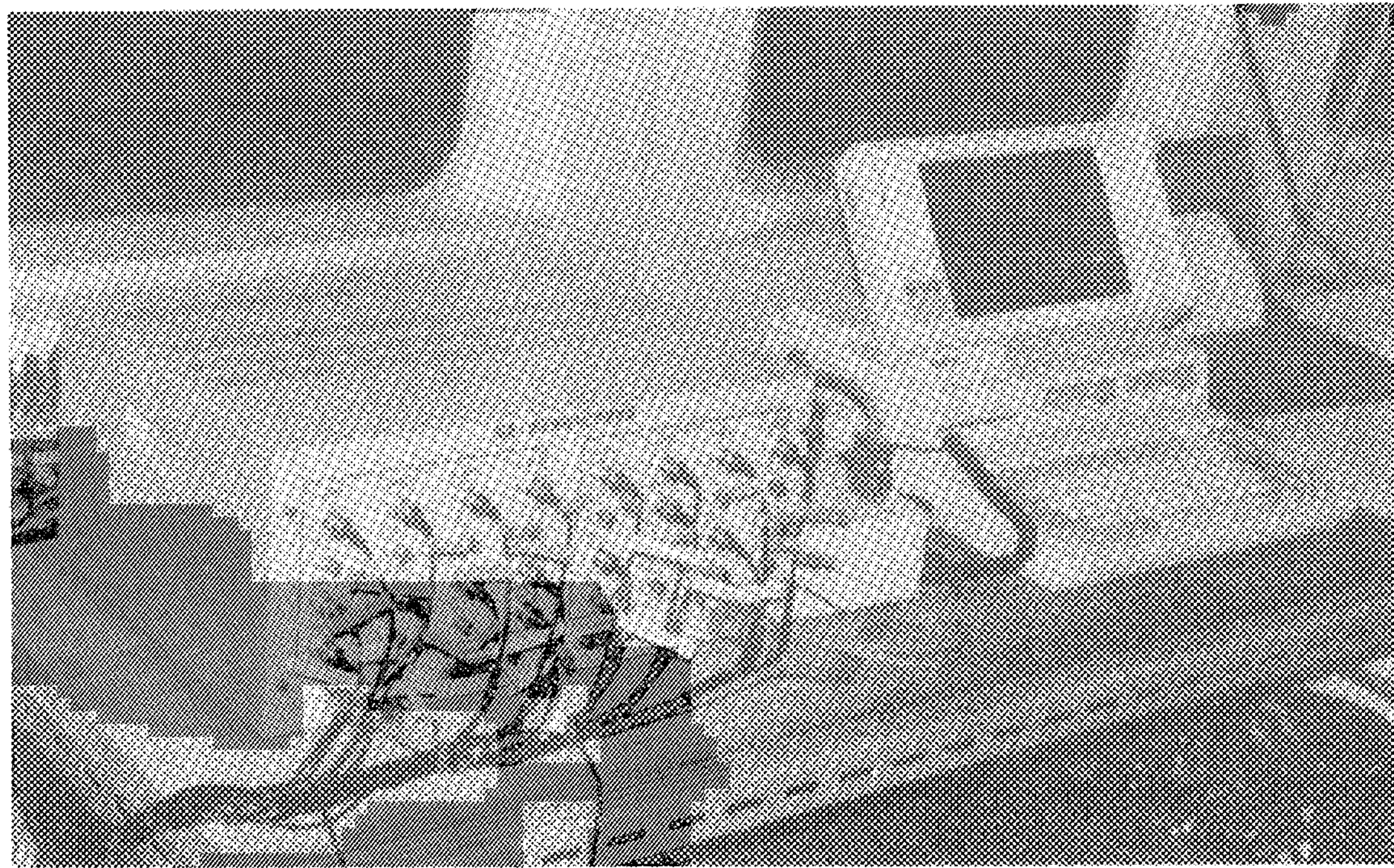


図7 輪重、横圧、脱線係数連続測定装置

### (1) 輪重抜け

静的輪重抜けについては、輪軸に加わる力の釣り合いの理論解析により、普通の乾燥状態の摩擦係数0.2、フランジ角度60度、踏面勾配1/10以下とすると、輪重抜けはほぼ平均輪重の60%以下に収まるとの結論が得られたので、輪重減少率の静的限度は60%と決められた。

動的輪重減少率限度については、理論的根拠はないが、実験線における脱線実験結果を参考にして、暫定的に80%とされた。

### (2) 横圧

軌間拡大に対する車輪横圧限度、急激な通り狂いの発生に対する輪軸横圧限度の両面から検討された。前者については、木枕木の車輪横圧限度が、タイプレートの有無、輪重の大きさに応じて定められた。後者については、軸重に応じた輪軸横圧限度値が定められた。

### (3) 脱線係数

乗り上がり脱線については、フランジ角度を当時の国鉄が採用していた標準型の車輪の60度に、摩擦係数を当時通常 of 最大値と考えられていた0.3として求まるNadalの式の値0.95に1.2の安全率を見込んで0.8と決められた。

飛び上がり脱線については、運動シミュレーション、模型実験の結果を基に、横圧の作用時間0.05秒以下の限度が定められた。これらの検討は、2軸貨車を対象に行われたもので、当時からボギー車への拡張が課題とされていた。

この結果を図6に示す。

### (4) 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル<sup>(2)</sup>

上記の安全基準が、その後の安全性評価指標として用いられてきたが、在来鉄道運転速度向上研究会が平成2年に設置され、その活動の一環として表記マニュアルが平成4年に作成された。脱線に関しては、基本的には従来基準の踏襲であるが、フランジ角度の大きい踏面形状が多く採用されていることなどの状況を踏まえ、車輪フランジ角度に応じた脱線係数の目安値を採用できると改訂された。また、従来から各種の輪重、横圧測定法が用いられてきているが、それらの方法と脱線係数の評価法の関係が統一的に整理された。

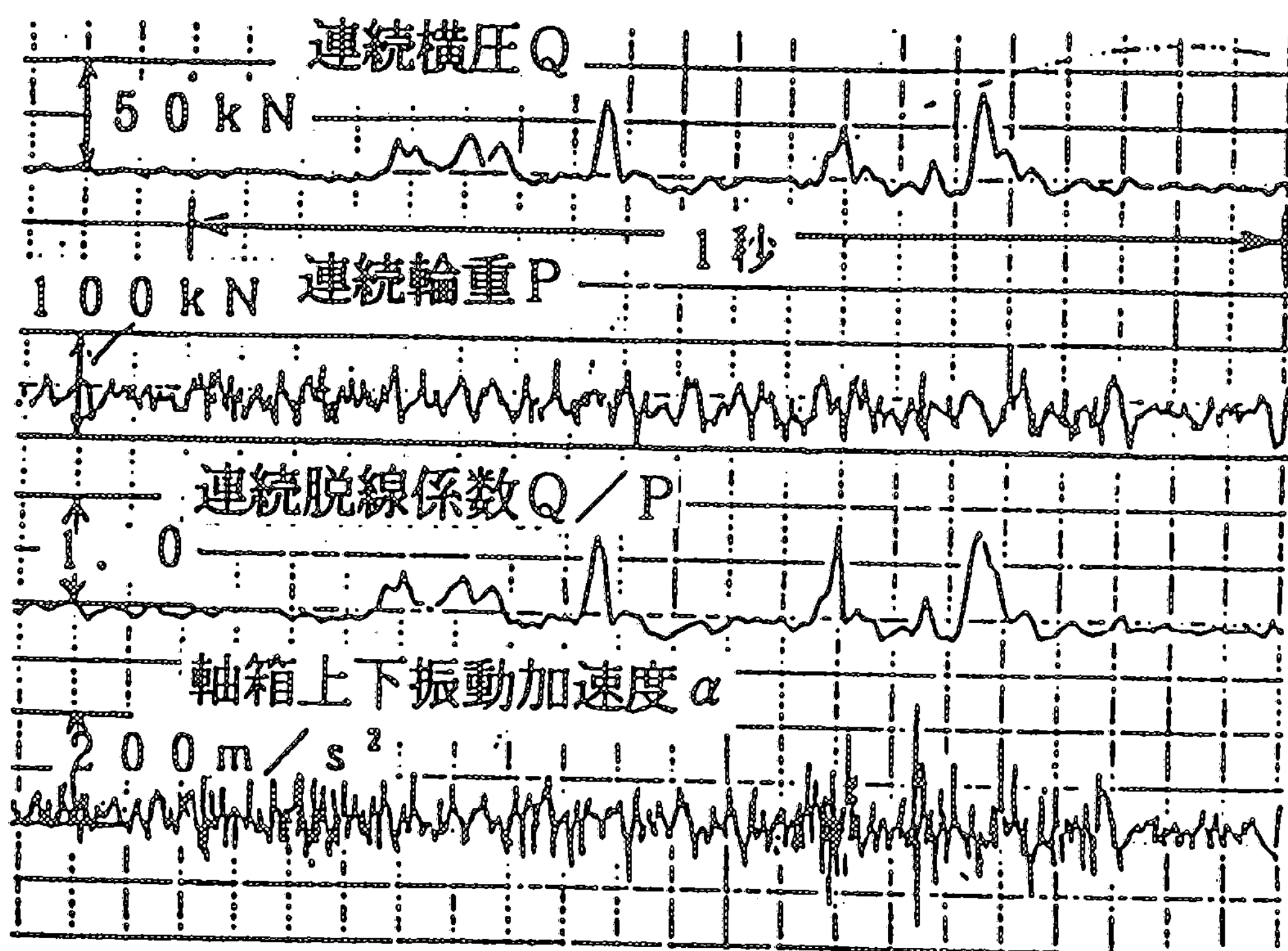


図8 輪重、横圧、脱線係数の連続測定波形

#### 4. 輪重、横圧、脱線係数連続測定装置<sup>(3)</sup>

脱線に対する安全性は車輪／レール間に作用する輪重、横圧、脱線係数を用いて評価されるが、従来から用いられている測定法では輪重の完全な連続出力を得ることができず、高周波輪重変動の現象を正確にとらえたり、この現象に起因する時々刻々の脱線係数の値を計測することは不可能であった。そこで、輪重、横圧、脱線係数を連続的に測定できる装置の開発を行った。

##### 4. 1 測定原理

従来の輪重、横圧の間欠測定法では、車輪1回転につき、4回の測定値しか得られない。それ以外の時には、測定感度が低減している。そこで、感度が回転位置によらず常に一定になるように、回転位置によって決まる重み係数を乗じることにより、連続的な輪重、横圧波計を得ている。実際には、感度0で重み係数が無限大になることの無いように、90度ずれた二組の歪みゲージのブリッジ出力を用いるなど、多くの工夫がなされている。

測定装置の写真を図7に示す。

##### 4. 2 本線走行試験時の測定データ

1993年度から本格的に輪重、横圧、脱線係数の連続測定を開始し、現車データの蓄積を図った。高速走行時の出力波形例を図8に示す。新しい連続法では輪重、横圧、脱線係数ともに0線を基準に上方を+として出力され、出力波形が連続であるため、レールに添った各地点での車輪／レール間の作用力や脱線係数の変動の有様が正確に観察できるほか、データのパワースペクトル密度解析等が可能となる。レール継ぎ目で発生した高周波輪重変動の波形は、軸箱上下振動速度の波形とよく似ている。

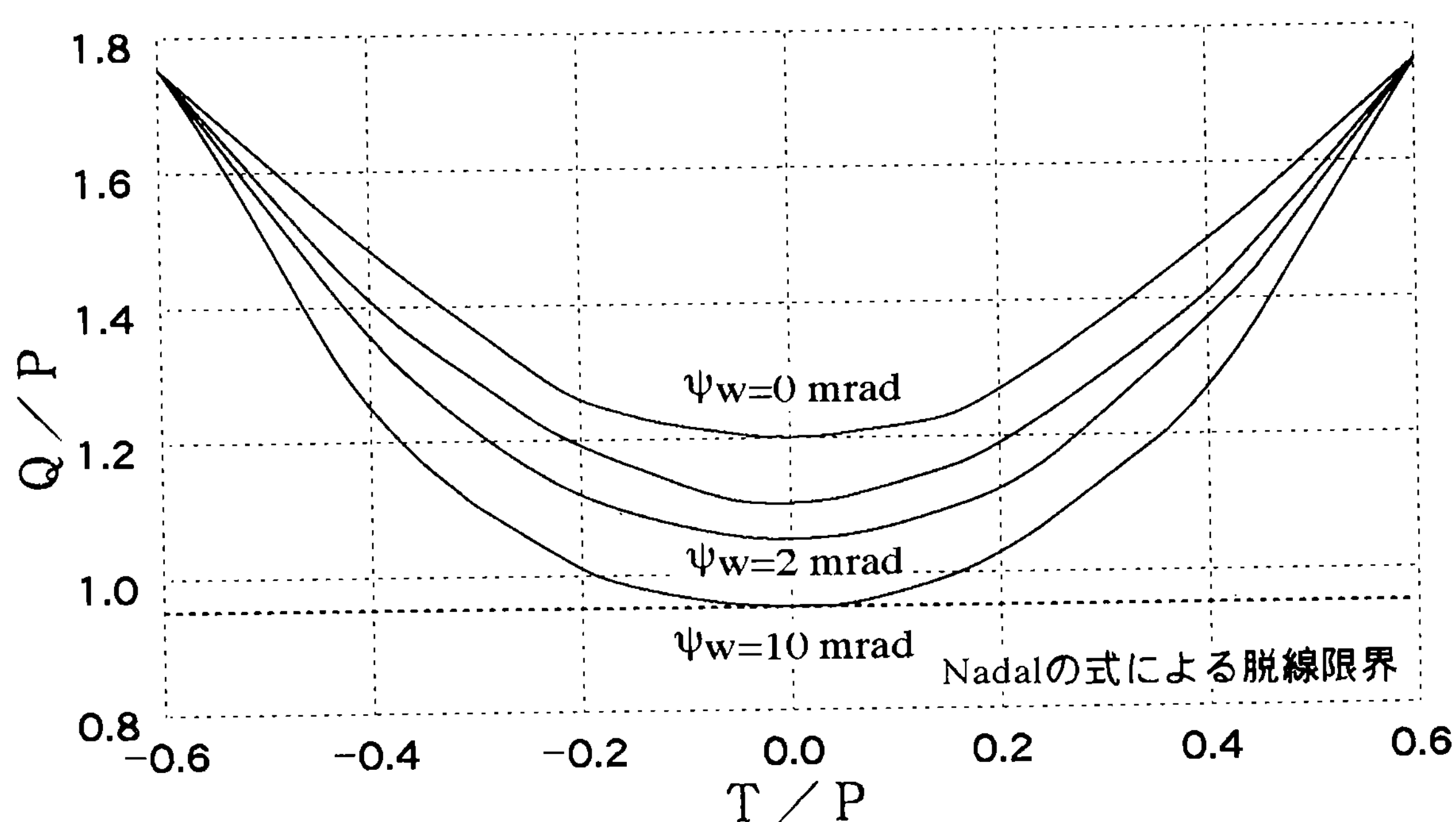


図9 脱線限界におけるT/PとQ/Pとの関係

(フランジ角度：60°、車輪半径：439mm、摩擦係数：0.3、法線力：30KN、アタック角 $\psi_w$ )

#### 5. 脱線に対する安全基準の再構築<sup>(4)</sup>

現車データの蓄積を図り実態の把握を進めながら、精度のよい走行安全性評価基準を提案するため、海外の事例調査や基礎的な輪軸の脱線現象と評価指標との関係について、シミュレーション、模型実験等による検討を行ってきている。ここでは、シミュレーシ

ョンによる検討の一端を紹介する。

### 5. 1 前後接線力／輪重比の影響

計算により求めた在来線輪軸の脱線限界における前後接線力／輪重比（ $T/P$ ）と脱線係数 $Q/P$ との関係を図9に示す。

脱線限界における脱線係数 $Q/P$ の値は、車輪／レールの接触角、摩擦係数のほかにアタック角の影響を受ける。これは車輪／レール間の前後、左右クリープ力の飽和特性に起因したもので、左右すべりのみで飽和したときの限度値がNada 1の式で与えられる。この飽和特性はアタック角だけの関数ではなく、力行、制動時のように大きな前後接線力が作用する場合には、前後方向すべりにより接触面内のクリープ力がほとんど飽和するので、左右クリープ力が小さくなり $Q/P$ の限度値は大きくなる。

車輪が踏面でレールと接触しているときの $T/P$ は接触角が小さいので、接触面内の前後接線力／法線力比（ $T/N$ ）とほぼ同じ0.2～0.4程度までの値しか取り得ないが、フランジ接触状態では法線力を輪重、横圧の両方で負担するため、アタック角が+のとき、 $T/P$ は $T/N$ の $1/\cos\alpha$ 倍（ $\alpha$ ：フランジ角度）の0.8程度の値を取る場合がある。

### 5. 2 新しい安全基準

走行試験において脱線係数を安全性の指標として用いる場合、短時間だけ作用する横圧あるいは輪重減少によって、脱線係数が瞬間的に目安値を超えることがある。しかし、実際には車輪の上昇量が小さく、脱線の危険性が皆無である場合があると考えられる。このように、脱線の危険性がないのに「危険」と判断される事例は、極力少なくすることが望ましい。

そこで、新しい安全基準案として、脱線係数の作用時間を規定するもの、脱線係数の時間の移動平均値、あるいは、西欧で行われているような走行距離の移動平均値に対する限度値を規定する方法などについて検討した。すなわち、衝撃的な横力が作用したときの、これらの指標と車輪上昇量の関係をシミュレーションにより調べた。

#### (1) 脱線係数の作用時間

静止輪重が軽くなるほどレール質量の影響が無視できなくなり、レール質量が飛び上がり脱線を起こしやすくさせる。その場においても、 $Q/P$ が目安値0.8を継続して超えている作用時間を、15ms以下とすれば十分安全性の確保が可能と考えられる。この脱線係数の作用時間を用いた基準を、新しい安全基準案の仮案と位置づけしており、現在現車での実績を積みつつある。

#### (2) 脱線係数の移動平均

車輪乗り上がり開始から、どれほどの時間後に、あるいは走行距離後に、車輪フランジ先端の円弧部がレールと接触し、フランジの脱線防止機能が有効に作用しなくなるかは、脱線の評価する上で重要な項目と考えられる。そこで、走行速度を変化させて、この有効



な時間または、有効な距離がいかに変化するかを検討した。

輪軸に加わるロールモーメント、左右力については、通常考えられる程度の値となるよう、定常輪軸抜け割合が40~50%、左右力は軸重×0.3~0.4、アタック角は最大20mradとした。

計算の結果、この時間は最短でも0.025秒より長く、距離では最短0.5m程度である。これらの値は移動平均を取る際の幅を決定する際の資料となる。

移動平均を取ることは測定データにフィルタをかけるのとはほぼ同じである。検討の結果、脱線係数の移動平均値により安全性を評価する場合には、距離ではなく、時間による移動平均値を用いるほうが良いことが解った。

このことは、脱線係数の時間平均値も新たな評価法として採用できる可能性があることを示しているが、時間幅の値については、今後脱線実験や現車データの解析結果から定めていく必要がある。

## 6. 地震時の脱線現象解明シミュレーションプログラム

### 6. 1 プログラムの概要

車両運動シミュレーションプログラムとしては、走行安定性、乗り心地などの検討のために種々レベルのものが開発されてきている<sup>(5)</sup>。その構成例を図10に示す。上に述べてきた、脱線に対する安全基準検討のシミュレーションプログラムでは、フランジ乗り上がりの過程など、より限界に近い状態の模擬も必要なので、図10のモデル化に加えて

- ・ レール弾性 (図11)
- ・ 車輪が踏面、フランジの2点でレールと接触する状態

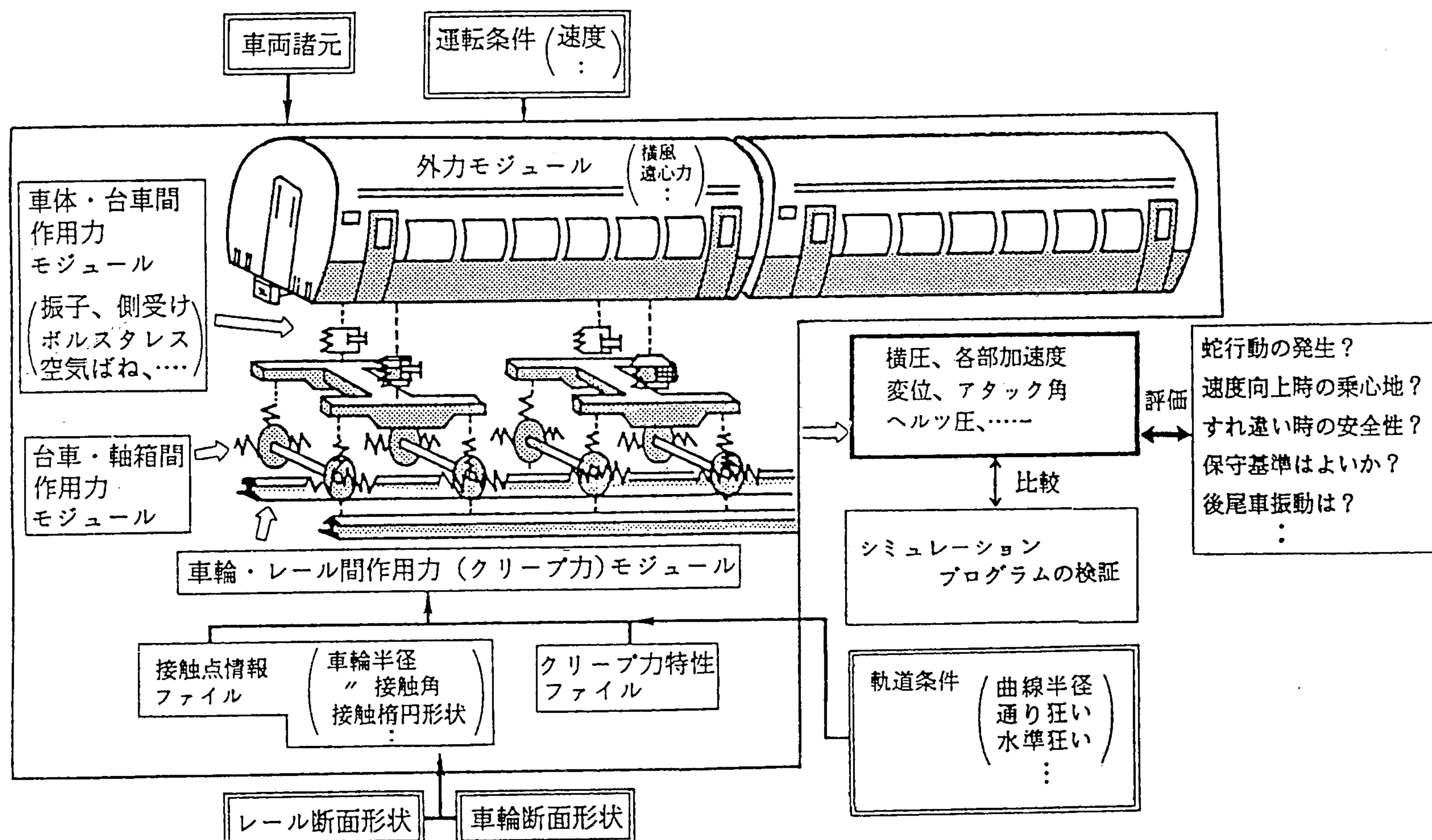


図10 車両運動シミュレーションプログラムの構成例

などが考慮されている。

さらに、地震時の脱線現象の解明には、車両がレールからの拘束を離れ大変位の動きをすることの考慮のためや、未知の要因の影響度を調べるなどのために、

- ・車輪がレールから離れ浮き上がっていく過程の模擬

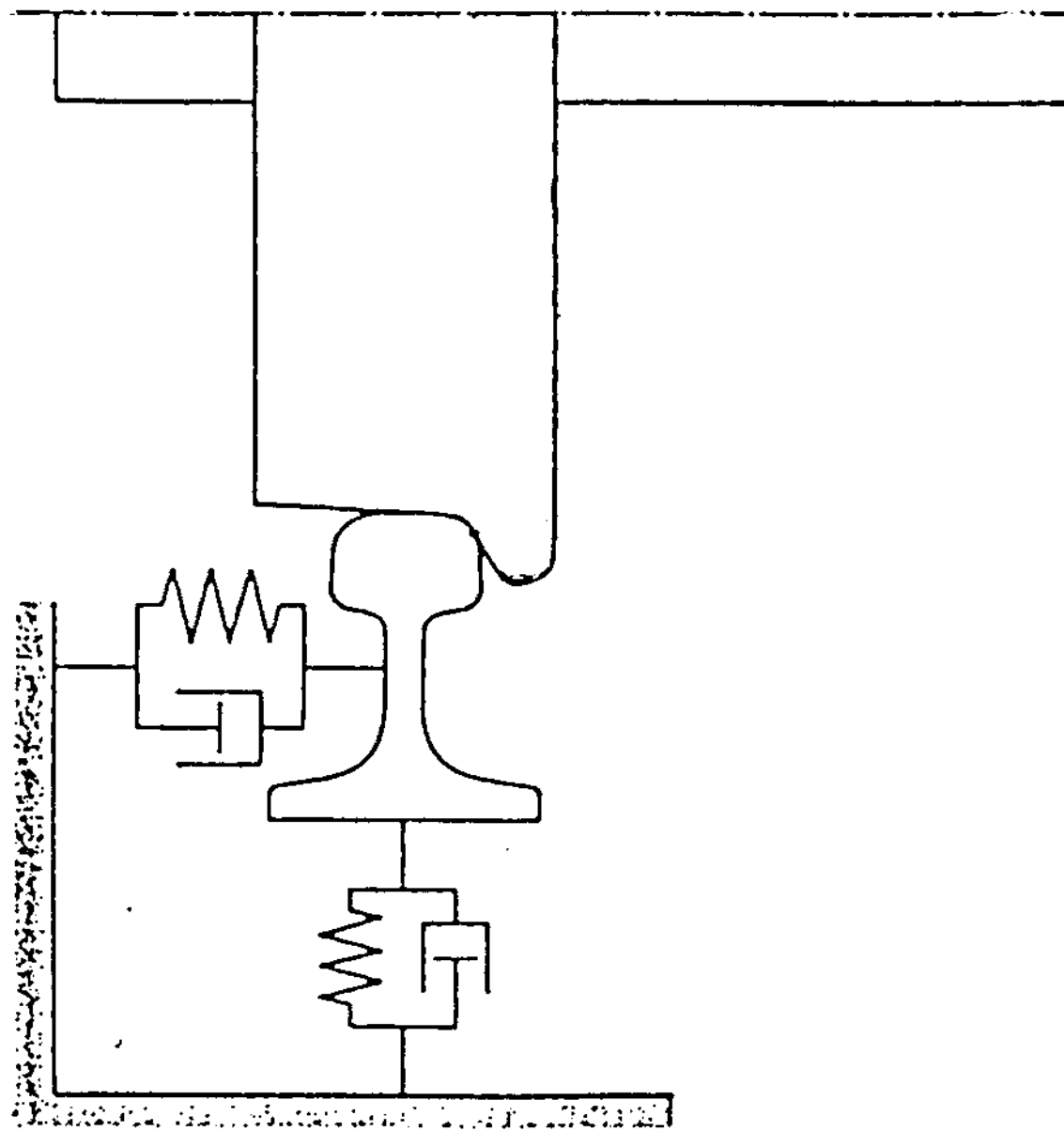


図11 レールの弾性支持モデル

- ・車両の変位が大きく、小変位の仮定が成り立たない状態の模擬

- ・重力による転倒モーメントの正確な模擬

- ・地震動によるレールの左右動の模擬（通り狂いの模擬とは異なる）

- ・車両停止時の車両脱線の模擬

- ・車輪ジャイロモーメントの影響調査

が必要で、現在プログラムの改造を行っている。

なお、鉄道の安全性研究の動向全般について概観した文献<sup>(6)</sup>において、地震についても触れられている。過去に横振動する軌道上の鉄道車両の応答については、本州四国連絡橋計画のなかでシミュレーションによる検討も

されている<sup>(7)</sup>。軌道そのものが横振動するという点では、地震発生時と同じである。この時の検討に用いられた力学モデルでは、

- ・半車体モデルで、車体、台車の左右、ローリング変位のみを考慮

- ・レールと車輪の接触に関する部分はモデル化されていず、車輪が直接地震動で加振されるとしている

- ・脱線係数を、車輪横圧ではなく輪軸横圧から求めている

等の、簡略化がなされている。この簡略化の妥当性を検討する意味でも、上記のようなより現実に近く地震時の限界状態までの車両の動きを模擬できる、シミュレーションプログラム開発の必要性が高い。

## 6. 2 検討項目

このようなプログラムによる検討項目として、以下のものがある。

(1) 地震時の走行安全性評価の基準

(2) 正弦波入力ならびに実地震波入力により軌道が振動している状態での、走行安全性に与える以下の要因の影響度調査、ならびに乗り心地等に与える悪影響の有無の調査

- ・入力

正弦波振幅・振動数、左右動と上下動の同時入力、地震波特性、各軸位相差加振

- ・走行状態

走行速度、乗車人員、力行・制動・惰行、走行・停止

- ・車両パラメータ

車輪を乗り上がりにくくさせる可能性

フランジ角度増大、フランジ高さ増大、フランジ部摩擦係数

車両固有振動数を変化させ、地震振動数から遠ざけ共振を避ける可能性

車体重心高さ低減、車体ロール慣性モーメント低減、ばね定数増加

車体横ずれを減らし、転倒モーメントを減少させる可能性

車体重心高さ低減、ばね定数増加

脱線後、転覆、座屈を起こりにくくする可能性

空気ばねをパンクさせる、車体間ダンパ

・力学モデルのレベル

平面モデル・詳細モデル、車輪ジャイロモーメント

(3) 地震後の軌道変化がある場合の、走行安全性に与える各種要因の影響度調査

地震により生じる、軌道の角折れ、目違いなどの限度値の再精査を、(2)と同様な各種要因の走行安全性に与える影響の調査を通して行う。

## 7. あとがき

脱線現象が生じる一般的なメカニズム、従来用いられてきた脱線に対する安全基準、新しく開発した脱線係数の連続的測定法、この測定法を用いた新しい安全性評価指標の提案の紹介、そして地震時の脱線現象解明のために現在開発を進めている、より限界状態までを模擬できるシミュレーションプログラムの概要と今後の検討項目について述べた。

兵庫県南部地震のような直下型の大地震時の脱線現象の本格的解明については、緒にいたばかりで、まだ結論を記述できる段階に達していない。より安全な鉄道システム構築のために、精力的にこれらの現象を解明していきたい。

### [文 献]

- 1) 松井、国枝、横瀬他：脱線に対する安全基準、鉄道技研報告，No.S3，1968. 11
- 2) (財)鉄道総合技術研究所編：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，1993. 5，研友社
- 3) 石田、植木、深澤、手塚、松尾：輪重、横圧、脱線係数連続測定装置の開発、鉄道総研報告，Vol.7，No.8，1993. 8
- 4) 石田、手塚、植木、深沢、松尾：脱線に対する安全性評価指標の研究、鉄道総研報告，Vol.9，No.8，1995. 8
- 5) 宮本：車両・軌道系の運動シミュレーション、電気学会産業応用部門全国大会シンポジウム講演論文集（I），1995. 8
- 6) 宮本：特別講演 鉄道の安全性研究の最前線、機械学会講演論文集，J-RAIL'94 No.9 40-57，1994. 12
- 7) 松井：横方向に正弦波振動する軌道上の走行安全性、昭和56年度本州四国連絡橋の列車走行に関する研究報告書 PP181～201，日本鉄道施設協会