

## 2404 軸箱加速度による短波長領域の軌道狂いの評価

### A Method to Control Short Wave Track Irregularities Using Axlebox Acceleration

正 [土] ○西垣 拓也 (鉄道総研)

正 [土] 須永 陽一 (鉄道総研)

正 [土] 瀬川 祥 (JR西日本)

Takuya NISHIGAKI, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho Kokuubnji-city Tokyo

Youichi SUNAGA, Railway Technical Research Institute.

Syou SEGWA, West Japan Railway Company.

To maintain good quality of track, it is important to restrict a steady increase in wheel load fluctuation caused by the short wave track irregularities, such as rail surface roughness or inequality of supporting system. A measurement utilizing of axle box acceleration is proposed to evaluate wheel load fluctuation. This paper describes a method to identify the short wave track irregularities by analyzing axlebox acceleration considering its typical frequency.

**Keyword:** Axlebox acceleration, Rail surface roughness, Loose sleeper, Defect at a weld, Wavelet analysis

#### 1. はじめに

線路に生じる変形の中には、波長 10m以上の線路のゆがみだけではなく、レール表面の微小な凹凸や、浮まくらぎと呼ばれるまくらぎ下の空隙のような、短い波長領域の局部的な変形がある。近年の車両の高速化に伴い、短い波長領域の軌道狂いに起因した輪重変動が増大する傾向にあり、これらレール表面や道床の不整を効率的に検出し、保守する手法の確立が要望されている。そこで本報告では、今まで得られた知見をもとに、軸箱加速度を用いて短波長軌道狂いを効率的に検出・管理する手法について報告する。

#### 2. 軸箱加速度の測定

本報告でいう軸箱加速度とは、車軸と台車枠をつなぐ軸箱上に設置した加速度計により測定した上下振動加速度のことをいう。レール頭頂面に細かな凹凸がある箇所を車両が走行すれば、車輪や軸箱が加振され、その時の振動を測定すれば、レール表面の凹凸の大きさ等を解析することが出来る。軸箱加速度データを解析に用いるためには正確に測定する必要があるため、設置箇所や方法に留意しなければならない。取付治具等を用いれば、治具による固有振動の影響を受ける可能性があるため、接着剤等を用いて強固に直付けする事が望ましい。また、用いるセンサは新幹線・在来線ともに、0~1000Hzの周波数範囲を測定でき、上限加速度が500m/s<sup>2</sup>の加速度センサの使用を推奨しており、価格等も考慮して、通常は抵抗線型加速度計を採用している。

#### 3. 新幹線における軸箱加速度の利用

最近の高速化とともに著大輪重の抑制が重要な課題となっており、これら著大輪重の発生原因を特定するために、軸箱加速度の利用が提案されている<sup>1)</sup>。

##### 3.1 輪重と軸箱加速度

大きなレール凹凸の箇所を車両が通過すると、輪重変動と呼ばれる動的な荷重の変動が生じる。そこで、車輪の動的な輪重と軸箱加速度の関係を調べると Fig. 1 に示す関係が得られた。図に示すとおり、動的な輪重は、車輪の慣性力(車輪の質量と軸箱加速度を掛け合わせた量)と静的な輪重を加えた関係式で表せることが分かった。これより、軸箱加速度

を測定すれば動的な輪重を推定できるといえる。

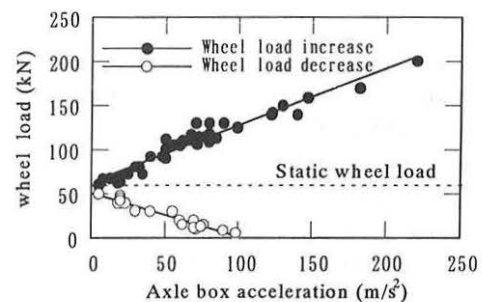


Fig.1 Relationship between wheel load fluctuation and axlebox acceleration

##### 3.2 軸箱加速度の周波数特性

軸箱加速度には、低い周波数から高い周波数までの成分を含んだランダムな変動が生じる。そこで、周波数特性の検討を行った。Fig. 2 に、同一区間を速度 300km/h、275km/h、230km/h の各速度段で走行時のパワースペクトル密度を示す。

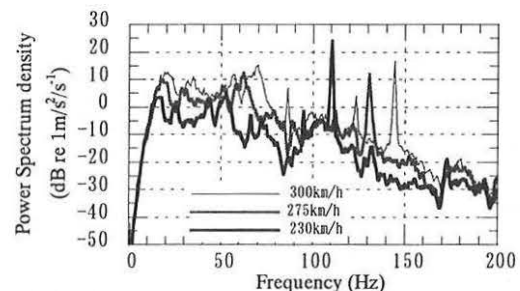


Fig.2 Power spectrum density of axlebox acceleration

図より、走行速度が上がるにつれて、パワースペクトル密度も大きくなる事が分かる。また、40~70Hz 付近の周波数に見られるピークと、100~140Hz 付近に見られるピークでは、速度変化による周波数の変動が異なっているのが分かる。これは、前者がバネ下質量の影響によるもので、速度変化により周波数が変化しにくい為であり、後者が締結装置間隔に依存するためと考えられる。

### 3.3 輪重変動の発生原因の推定

著大輪重の発生要因としては、レール溶接部を主体としたレール凹凸やレール波状摩耗、道床状態の劣化による浮まくらぎ等が挙げられる。そこで、これら軌道弱点箇所への補修方法として、レール凹凸やレール波状摩耗に対してはレール削正が、浮まくらぎにはむら直し等が挙げられることから、これらを区別して短波長軌道狂いを抽出することを試みた。

#### (1) レール凹凸

新幹線の高速走行時における著大輪重は、レール溶接部を主体に発生する傾向がある。レール溶接部では、波長10cm程度の短い波長成分が卓越する傾向があることから、軸箱加速度の高周波領域に着目した。10cm弦正矢を利用してレール凹凸の大きさを測定し、軸箱加速度との関係を求めた結果をFig.3に示す。図より、ややばらつきは有るものの、ほぼ比例した関係があるといえる。

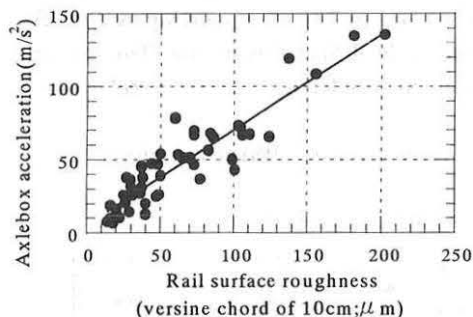


Fig.3 Relationship between rail surface roughness and axlebox acceleration

#### (2) 浮まくらぎ

高速走行時には浮まくらぎに起因した著大輪重も発生する。しかし、このような短波長の軌道狂いの検出は、現在一般的に利用されている10m弦正矢法による高低狂いでは困難であった。そこで、60Hz付近でピークとなるバネ下質量による慣性力を除去することを目的として、軸箱加速度データに30Hzカットオフのローパスフィルタ(LPF)処理を行い、これら狂いの抽出を試みた。Fig.4に浮まくらぎ等が確認されている箇所の軸箱加速度の原波形とフィルタ処理後のデータを示す。原波形では、図左には浮まくらぎ、図右側にはレール溶接部による軸箱加速度の変動が確認でき、これに30Hz LPF処理を行えばレール溶接等に起因する高周波の変動除去が可能となり、浮まくらぎの箇所のみを抽出できるのが確認できる。

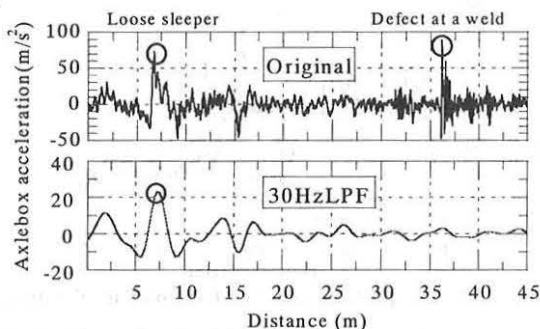


Fig.4 Example of axlebox acceleration at loose sleeper and rail surface roughness

ここで、浮まくらぎによる軌道狂いの波長を2~5m程度と想定し、軸箱加速度と高低狂いの相関の関係を検討した。対象とした高低狂いは、軌道検測車で得られた偏心矢高低狂いデータから復元原波形(復元帯域3~10m)で求めた。軸箱加速度と比較した結果をFig.5に示す。図より、高低狂いの復

元原波形は軸箱加速度と相関が有ることが確認できる。

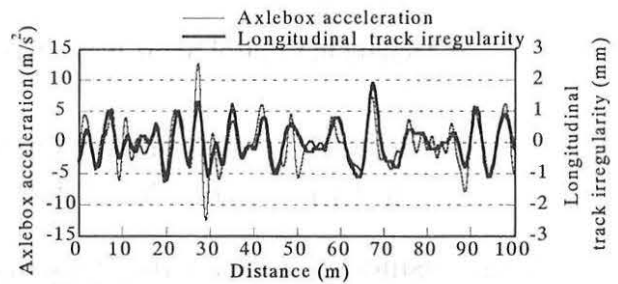


Fig.5 Waveforms of axlebox acceleration and longitudinal track irregularity

#### (3) 有道床軌道とスラブ軌道境界における変動

低周波領域を抽出すると、軸箱加速度の変動要因によって、その波形に特徴があることが分かった。一例として、スラブ軌道と有道床軌道の境付近の軸箱加速度の低周波波形をFig.6に示す。図より、有道床軌道からスラブ軌道に入る際は、正弦波形となったのに対し、スラブ軌道から出る際は上に凸の左右対称の波形となり、これらは同様の軌道構造を持つ他の多くの箇所でも、同じ特徴の波形が認められた。

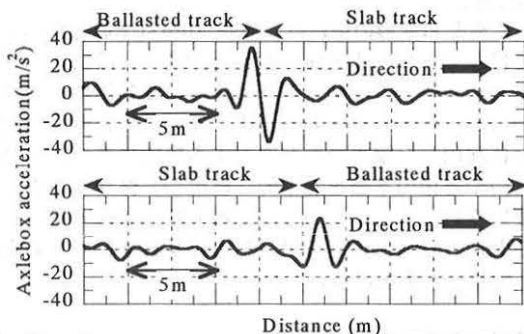


Fig.6 Waveforms of axlebox acceleration of slab track boundary

以上の軸箱加速度の周波数特性に着目した解析結果から、高周波でレール凹凸を、低周波で浮まくらぎを別個に検出できることが明らかになった。Fig.7にこれら軸箱加速度の解析結果を総合して、短波長軌道狂いの検出項目と検出周波数領域を示す。

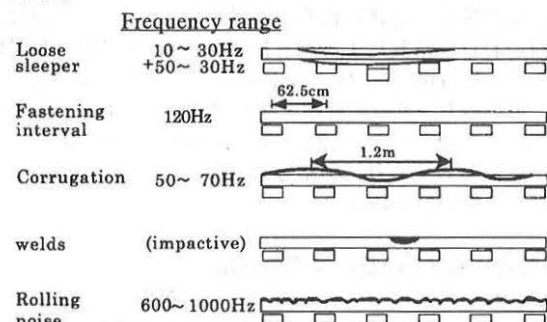


Fig.7 Classification of frequency range of axlebox accelerations in Shinkansen (train speed:270km/h)

図に示すとおり、軸箱加速度を解析することにより、レール凹凸の平滑化にはレール削正を、浮まくらぎの除去にはむら直しと言った、作業指示をすることが出来る。また、総合的に軌道状態を判断し、的確な作業指示が可能となるため、レール凹凸によって道床劣化が進行している箇所等を抽出することが可能となる。

#### 4. 軸箱加速度の管理指標

レール削正やMTT等の軌道保守は、ある区間を持って行われることが多いことから、軸箱加速度の管理は単発的な著大値の管理はもちろんのこと、軌道狂い指数P値のようなある一定区間の管理指標の確率も必要とされる。先ず原波形と30HzLPF処理済の軸箱加速度の確率密度関数を算出した結果をFig.8に示す。図より、原波形では軸箱加速度の分布はほぼ正規分布と近似できるので、軸箱加速度の変動が大きい所と小さい所を標準偏差で判別する事が可能だと考えられる。しかし、30HzLPF処理済では、分布形状が尖った形となり標準偏差では評価しづらいと考えられる。そこでレール凹凸の良否は標準偏差を、道床状態の良否は超過率（軸箱加速度が閾値を超える割合）を管理指標とすることとした。

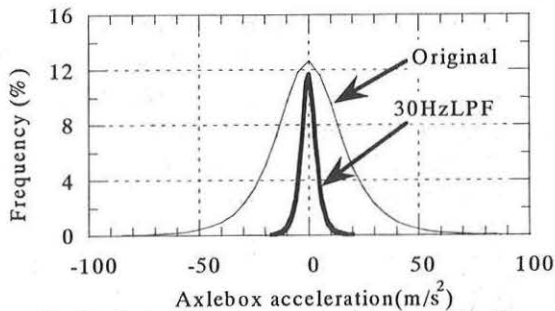


Fig.8 Probability density of axlebox acceleration

##### 4.1 走行速度補正

軸箱加速度は一般に走行速度の増加とともに大きくなる特徴をもっている。よって、これを管理指標等に用いる際には、走行速度に対する補正が必要となる。

新幹線において、同一箇所を各速度段で走行した時の1kmロット標準偏差の例をFig.9に示す。図より各速度段の差の大きさはほぼ一定の値となることから、軸箱加速度の速度補正が可能と考えられる。軸箱加速度を解析した結果では、新幹線・在来線ともに、通常の走行速度域において、軸箱加速度はほぼ走行速度に一次比例した関係が得られた。しかし、この関係を低速走行域にまで拡張すると、低速速度域で過大な補正係数になることから、指数関数近似による方法を提案した。

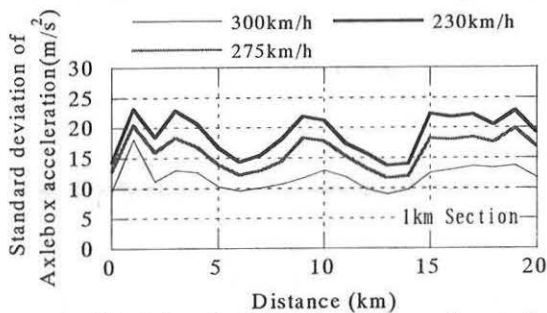


Fig.9 Standard deviation on every 1km section in 230-300km/h operation

##### 4.2 レール凹凸管理

レール凹凸に関して、50m・500m・1kmロットの標準偏差を求めた例をFig.10に示す。図よりロット長が短いほど変動に対する追従性が良いのが分かる。従って、前者では応急的な施工箇所の把握ができ、後者では大まかな施工箇所の把握が容易となるので、評価区間長は作業内容や保守量に応じて検討すれば良いと言える。例えば新幹線では、定期的なレール削正が行われているが、これらの評価手法を用いれば削正量の調整や施工順位の決定を効率的に行うことが可能にな

ると考えられる。

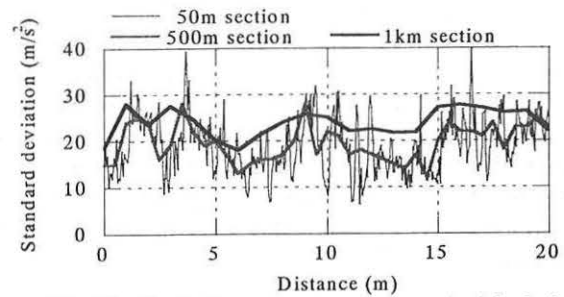


Fig.10 Evaluation of a section by standard deviation

##### 4.3 道床状態の管理

むら直し区間や道床修繕必要箇所を選定するためには、前述の頻度分布を考慮したうえで、不良な区間を的確に把握できる管理指標が必要となる。そこで区間評価指標として超過率を用いた。Fig.11に、ロット長を50m、閾値を12m/s²とした時の超過率と標準偏差のグラフを示した。図中に○印で示した箇所の標準偏差の大きさはほぼ同じであるが、超過率は両地点で大きさが異なった。超過率の変動は標準偏差に比べて鋭敏であり、道床状態の判別が容易となると考えられる。

ここで超過率の効果を確認するために、閾値を仮に12m/s²とおき、超過率が3%以上の区間と0%の区間を抽出し、それぞれの箇所のパワースペクトル密度を比較した。その結果をFig.12に示す。図には試験区間の有道床軌道全体のパワースペクトル密度の平均も併せて示した。図で有道床区間の波長1m~10mでは超過率の大小でパワースペクトル密度の大きさに明らかな差が生じ、最も大きい波長4m付近では超過率0%の区間に比べて、有道床軌道全体の平均では10dB程度、超過率3%以上の区間では15dB程度大きい結果となった。

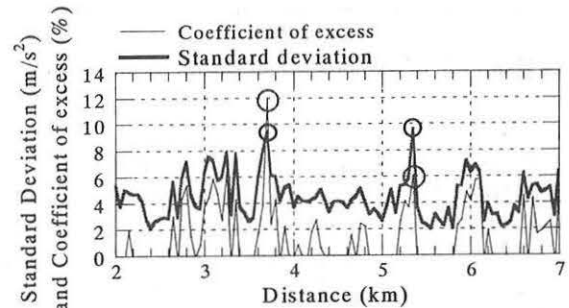


Fig.11 Evaluation of a section by standard deviation and coefficient of excess

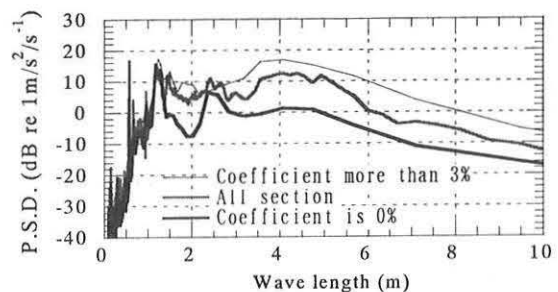


Fig.12 Power spectrum density of axlebox acceleration on ballasted track

##### 4.4 スラブ軌道における30HzLPFの適用

上記処理をスラブ軌道において行ってみた(Fig.13)。するとスラブ軌道においても、超過率の大小によって、スペクトルの大きさに違いが生じた。そこで、この波長5mをピークと

する変動がどのような箇所で生じているか、実波形により検討した。Fig.14に軸箱加速度の変動が大きい箇所の、高周波と低周波の実波形を示す。図より、低周波領域において、輪重変動の発生要因が見受けられない箇所でも、波長5mの比較的大きな狂いが生じている事が確認できる。スラブ軌道においてこの5m波長に対応するのは、スラブ板一枚の長さであり、スラブ板の不陸やあおりが生じていると考えられる。この波長5mの狂いは、現行の10m弦正矢法を用いた管理手法では検出できないので、軸箱加速度を用いたスラブ板の管理が可能であると考えられる。

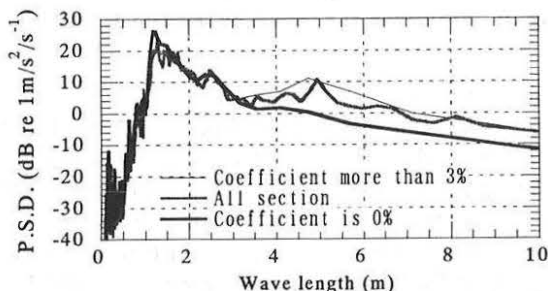


Fig.13 Power spectrum density of axlebox acceleration on slab track

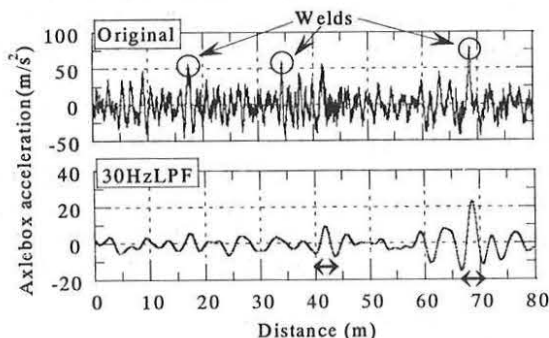


Fig.14 Example of axlebox acceleration at slab track

## 5. 新しい解析手法

先に述べたとおり、軸箱加速度をフィルタ処理を行って、周波数帯域別の成分を抽出すれば、輪重変動の発生原因の推定が可能である。そこで、新しい信号解析手法として注目されているウェーブレット解析に着目し、軸箱加速度への適用に関して試行した。ここではウェーブレット関数として、位相特性が線形となる Biorthogonal (双直交) 関数を用いた。

### 5.1 連続ウェーブレット変換

軸箱加速度へウェーブレット解析を適用すれば、時間(場所)と周波数の2つの変数を用いて波形変化の特徴を抽出することが出来る。Fig.4に示した波形に連続ウェーブレット解析を適用した例をFig.15に示す。図は3次元で表しているが、

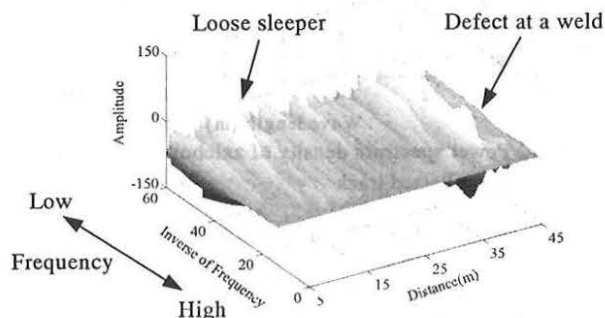


Fig.15 Example of continuous wavelet analysis

横軸は周波数の逆数であり、実際には周波数の逆数に3000を乗じたものを示す。図より、浮まくらぎとレール溶接に対応した周波数帯域で極大値が出現しており、軸箱加速度からその発生原因とその位置の情報が抽出可能であることが分かる。また、やや不良な溶接部では周波数帯域全域で振幅が大きくなっていることが分かる。

### 5.2 離散ウェーブレット変換

離散ウェーブレット変換では、一對のハイパスフィルタとローパスフィルタを重層的に組み合わせることによって、オリジナルの信号を複数の周波数区分に分離するバンドパスフィルタ(BPF)が構成できる。いま、離散ウェーブレット変換を7次の次数に分解すれば、原波形  $F(s)$  を式(1)のように表すことが出来る。

$$F(s) = a_7 + d_7 + d_6 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1 \dots (1)$$

ただし、 $a_7$ : 7次のローパスフィルタ、 $d_1 \sim d_7$ : 1次~7次のBPFであり、次数が小さいほど高周波領域のBPFとなる。Fig.16に各次数のBPFの周波数応答を示す。

各フィルタの遮断周波数は2のべき乗で決まるため、図に示すとおり低周波領域になるほど、遮断帯域が小さくなる。

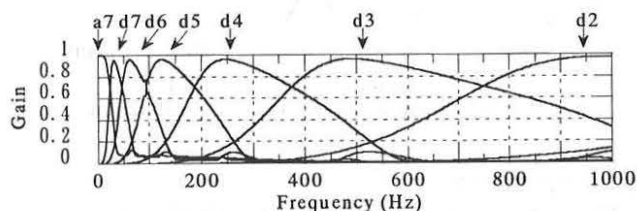


Fig.16 Gain of biorthogonal wavelet function

ここで、この離散ウェーブレット変換をFig.4、Fig.15と同一地点の軸箱加速度に適用した例をFig.17に示す。図より、この手法を用いても、Fig.4と同様にレール凹凸や浮まくらぎを検出することが出来ることが分かった。また、Fig.7に示したような各周波数帯域の軸箱加速度の抽出も容易に行うことが出来る。

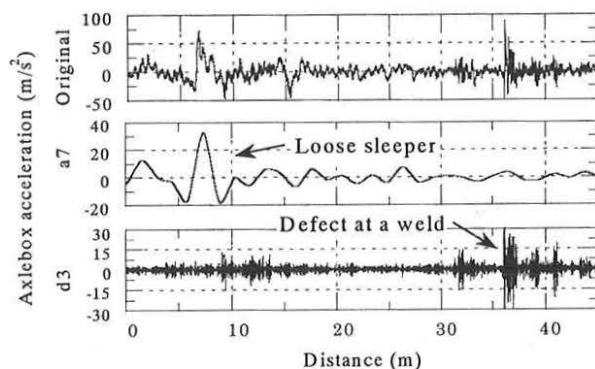


Fig.17 Example of discrete wavelet analysis

## 6. おわりに

このように、軸箱加速度を用いて短波長軌道狂いを検出・管理できる見通しが得られた。廉価かつ簡易な手法で効率的な短波長軌道狂いの検出が可能になるよう、今後も引き続き検討を進めていきたいと考える。

### 参考文献

- 1) 須永陽一・佐野功 他: 高速新幹線における短波長軌道狂いの検出法、鉄道総研報告、Vol.13 p.11、1999.5