

# 営業車両の走行時の車両振動を用いた 軌道モニタリングシステム（TIMS）の開発

石井 博典<sup>1</sup>・藤野 陽三<sup>2</sup>・水野 裕介<sup>3</sup>・貝戸 清之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)横河ブリッジ (〒273-0026 千葉県船橋市山野町27) 研究当時 東京大学研究員  
E-mail: h.ishii@yokogawa-bridge.co.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)  
E-mail: fujino@civil.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京大学大学院助教 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)  
E-mail: mizuno@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 大阪大学大学院特任講師 工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点  
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1) 研究当時 (株)ビーエムシー  
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

本研究では、主に合理的な維持管理を必要とする中小鉄道を対象として、高頻度な計測が可能な軌道モニタリングシステム (Train Intelligent Monitoring System : TIMS) の開発を行った。営業車両内に加速度計、GPSで構成される簡易な計測システムを設置し、走行中の車両振動から軌道の状態を常時監視するシステムを構築し、地方鉄道において継続的な実験を実施した。GPSセンサから得られる速度情報と、車両加速度を2回積分して得られる距離情報を補完しあうことにより、車両走行位置を検出する位置同定手法を開発した上で、車両の上下、左右方向の加速度の最大値、RMS値を管理することにより、軌道状態を高頻度で監視することが可能な軌道モニタリングシステム (TIMS) を構築した。

**Key Words :** local railway, track, irregularity, acceleration, monitoring, GPS, TIMS

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景と既往の研究

鉄道はメンテナンスの比率が占める割合が高く、輸送量の増加が見込めない今日においてメンテナンスの効率化は経営上の大きな課題となっている<sup>1)</sup>。一方で、人命にかかわる重大な事故の発生もあり、一層の安全性の向上が求められている。そのため、JRや大手私鉄では、安全性の向上や鉄道施設の維持管理の合理化を目的として、新たな検査機器や施工機械の導入、情報技術を活用した管理体制の構築、安全性向上のための技術や鉄道施設のメンテナンス技術の開発が進められている<sup>2)~11)</sup>。しかし、第三セクター鉄道や地方鉄道に代表される中小鉄道では、老朽化する施設に対して十分な管理が行えない状況にあり、維持管理の合理化を図る中で安全性の確保が大きな課題となっている。

鉄道事業者数の80%を占める中小鉄道の内、その約半数が営業収益5億円以下の比較的小さな事業者であり、約6割が赤字経営となっている<sup>12)</sup>。中小鉄道では、この

ような厳しい経営状態の中で老朽化した施設を維持管理し、安全性を確保していく必要があることから、より効率的なメンテナンスシステムを構築し、車両運行の安全を確保していくことが求められている。メンテナンスの対象は軌道、土木構造物、電気設備、車両など多岐に渡るが、その中でも軌道は定常的な保守を前提とした特殊な構造物であることに加え、軌道の変状は直ちに車両の脱線など大きな事故を発生させる要因となるため、軌道の状態を常に一定以上の状態に保つことは鉄道管理者にとって最重要課題の一つとなっている。

軌道の効率的な維持管理方法に関する研究については、これまでに数多く研究されている。古川らは、システム同定手法を用いた車両動的挙動の高精度な同定手法を確立し、軌道保守へ適用する方法を提案している<sup>2)~4)</sup>。しかし、ここで提案されている手法は基本的に車両の速度が一定であることを前提としている他、速度毎の入出力値 (車両応答および軌道狂い値) が必要であることから、駅間が短く車両の加減速が頻繁で、軌道検測値のデジタルデータがないこともある中小鉄道への適用については、

難しいところがあると考えられる。この他にも、慣性正矢軌道検測装置<sup>5)</sup>や軸箱加速度を用いた手法<sup>6)</sup>、車軸にひずみゲージや非接触型の変位計を取り付ける方法<sup>7)</sup>など、営業車両を用いた高精度な軌道検測手法がいくつか開発されているが<sup>8)9)</sup>、いずれもJR在来線や新幹線を対象とした研究であり、車両の一部改造を伴うなど、人的、経済的資源に乏しい中小鉄道へは適用しにくい面が多いと推測される。

## (2) 本システムのねらい

このような背景から、本研究では主に中小鉄道を対象として、車両の改造の必要がなく設置が容易な軌道モニタリングシステム (Train Intelligent Monitoring System : TIMS) を開発することを目的とした。本システムは、車両フロア上に設置した加速度計により車両振動を計測し、軌道の異常を検知するシステムである。本システムは営業車両に設置することを前提としており、高頻度な計測が可能となる。これにより、軌道管理の合理化のみでなく、大雨後の地盤のゆるみによる軌道変位、橋脚の洗掘による軌道の通り変位など、突発的な現象についても、定量的に常時監視することが可能となり、第三者被害を与えるような事故や災害の防止に役立つと考えられる。日々のデータを蓄積、分析することで、新たな知見、例えば盛土の崩壊や橋梁など構造物の損傷と車両振動との関係が得られることも期待される。また、万が一事故が起こった際、現状では事故時の車両の挙動が不明であることが問題となるが、全ての営業車両に本システムを設置することが出来れば、事故が発生した場合のフライトレコーダ的な役割を担うことも十分に期待される。

本システムにおける測定装置は、営業車両内フロア上に設置した車両振動測定用の3軸加速度計と、位置同定用のGPSにより構成される。本システムの開発にあたっては、計測した車両加速度と実際の軌道狂い量との相関の検討、および車両走行位置同定の2つが大きな課題である。1つ目の課題については、車両の力学モデルを用いる手法と、古川らのように車両加速度と軌道狂いの入出力の関係を用いる手法の2つが考えられるが、本研究の対象とする中小鉄道では、[1]軌道狂い値のデジタルデータがない場合もあること、[2]駅間が短く、一定速度で走行する区間が少ないため入出力の関係から伝達関数を算出することが難しく、また、伝達関数を得るためには速度毎の多くの測定が必要になること、から、車両の力学モデルを用いることとした。2つ目の課題については、既往の研究では車両のパルス信号とATSの信号が用いられる場合が多いが<sup>10)11)</sup>、本研究では車両の改造を必要としない独立したシステムの構築を想定し、GPSセンサと加速度計を用いた位置同定手法の開発を行った。

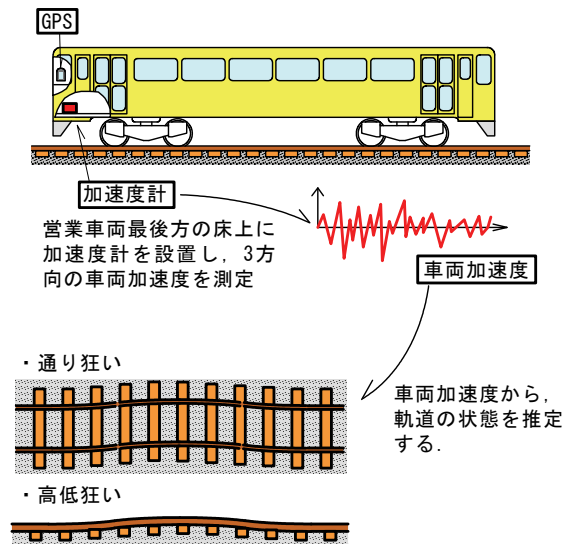


図-1 軌道モニタリングシステムの概要

## 2. 軌道モニタリングシステムと軌道保守の概要

### (1) 軌道モニタリングシステム

提案する軌道モニタリングシステムの概要を図-1に示す。営業車両のフロア上に加速度計を設置し、車両の加速度から軌道状態を推定し、軌道状態の変化、異常をリアルタイムに検知し、車両走行の安全性を確保するシステムである<sup>13)</sup>。本システムの特徴は、

- 1) 導入コストの負担が少ない
- 2) 全線における自動的な計測、解析が可能であり、運用に専門的な知識を必要としない
- 3) 測定機器の設置スペースが小さく、営業車両に設置可能であり、車両の改造を必要としない

ところにある。

システムの開発にあたっては、ある地方鉄道の協力を得て、継続的な実地試験を実施した。計測対象路線の概要を表-1に示す。軌道延長26.8kmの単線で、車両編成は基本的に1両編成である。

測定システムの概要を図-2に、加速度計の諸元を表-2に示す。測定システムは、走行中の上下方向、左右方向の車両振動を計測するための3軸加速度計 (圧電型加速度計、測定周波数範囲1~4000Hz)、進行方向加速度を計測するためのサーボ型加速度計 (測定周波数範囲DC~100Hz)、測定した加速度と車両走行位置を関連付けるためのGPSセンサ、それらのデータを収録するパーソナルコンピュータにより構成される。進行方向加速度は、後述する車両走行位置同定のため、低周波域で精度の高いサーボ型加速度計を用いた。乗客の乗降、車両の運行の妨げにならないように、計測機器の設置位置は車両最後部とした。測定システムの設置状況は図-3に示す

表-1 計測対象路線概要

路線延長	26.8km (単線)
駅数	13
車両編成	1両 (ラッシュ時は2両)
運行本数/日	15往復
旅客数/日	約2000人

表-2 加速度計諸元

	圧電型加速度計	サーボ型加速度計
メーカー	リオン(株)	リオン(株)
型式	PV-93	LS-10C
質量	30g	220g
測定周波数範囲	1~4000Hz	DC~100Hz
感度	0.3pC/(m/s <sup>2</sup> )	0.3V/(m/s <sup>2</sup> )
最大測定加速度	10000m/s <sup>2</sup>	30m/s <sup>2</sup>

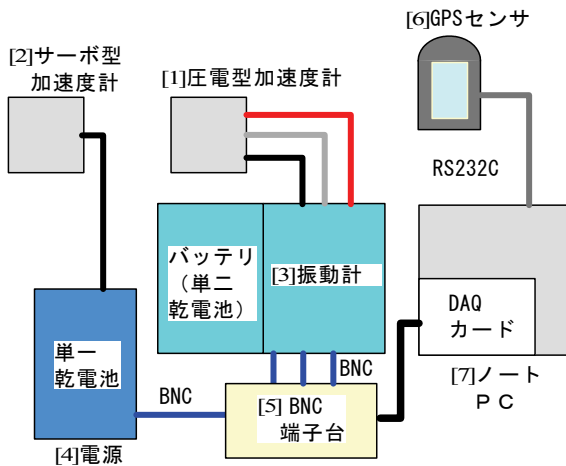


図-2 測定システム

通りである。パソコン、アンプ、A/D変換機などはコンパクトにまとめ、機器の設置、撤去が容易に出来るようにした。各センサ、計測器は全て乾電池もしくはバッテリーにより駆動するため、外部電源は不要である。車両の固有振動数が1~2Hz程度であることを考慮し、加速度のサンプリング周波数は200Hzとした。GPSのサンプリング周波数は、GPSセンサの性能から0.5Hzとした。

計測した加速度・位置情報はリアルタイムで処理することも可能であるが、現在のところは計測終了後に解析処理することを想定している。加速度の経時変化、異常値の発生を監視することにより、軌道状態を高頻度に監視するシステムである。

## (2) 軌道保守

鉄道の軌道は、補修時の施工誤差や車両荷重の影響による変位などにより、設計値とある程度の差が生じる。この設計値と実際の軌道との差を軌道狂いと呼ぶ。軌道狂いは車両の走行安全性および乗り心地に悪影響を及ぼ

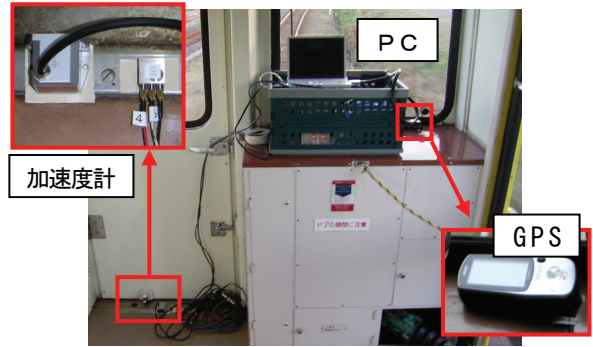


図-3 測定状況

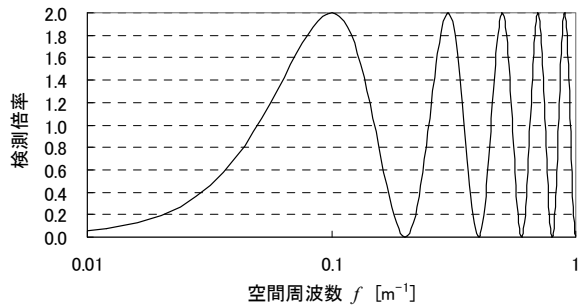


図-4 10m弦正矢法の検波特性

すため、鉄道事業者は管理値を定め、定期的に保守・修繕を行い、車両の安全性と快適性を保っている。

軌道狂いには、

- 1) 高低狂い：レールの上下方向の設計値からの差
  - 2) 通り狂い：左右方向の設計値からの差
  - 3) 水準狂い：左右のレールの高さの設計値からの差
  - 4) 軌間狂い：左右のレール間の設計値からの差
- がある。このうち、高低狂いは車両の上下振動とピッチング振動に、通り狂いは車両のヨーイング運動と左右並進運動に、水準狂いはローリング振動に影響を及ぼす。

軌道狂いは、一般的に10m弦正矢法と言われる測定法により測定された値を用いて管理されている。10m弦正矢法とは、原理的には10mの弦の両端をレールにあて、弦中央のレールと弦との離れ量を弦を移動しながら計測していく軌道検出方法である<sup>14)</sup>。計測対象路線においても、1年に1度、10m弦正矢法による軌道計測が行われている。測定原理からわかるように、測定した軌道狂いは実際の軌道狂いに次式および図-4に示す検波特性を乗じた値となる。

$$H(f) = 1 - \cos 10\pi f \quad (1)$$

従って、実際の軌道狂いを得るためには計測した軌道狂いに式(1)の逆フィルターを掛けて補正する必要がある。しかし、図中に示すように周波数フィルターには一定周波数毎に0となる周波数があり、その位置の逆フィルターは無限大になってしまうことから、実際の補正にあたっては着目する周波数などを考慮する必要がある。

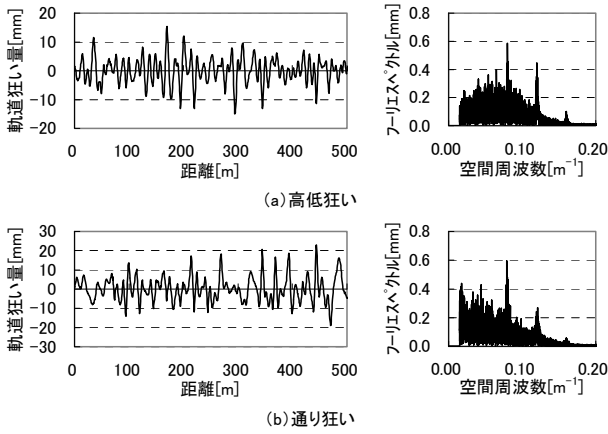


図-5 10m弦正矢法による軌道狂いの測定例

本研究では既往の研究結果<sup>2)~4)</sup>や10m弦正矢法の検波特性、後述するように車両振動の卓越する空間周波数が時速30~60km/hで0.08~0.16m<sup>-1</sup>であることから、着目する空間周波数を0.06 m<sup>-1</sup>~0.167 m<sup>-1</sup>とした。計測対象路線における軌道の高低狂い、通り狂い波形の1例と、全線27kmの軌道狂いのフーリエスペクトルを図-5に示す。高低狂い、通り狂いともに空間周波数0.08 m<sup>-1</sup> (波長12.5m) , 0.12 m<sup>-1</sup> (波長8.33m) が卓越しているが、レール長25mに起因している。

### 3. 車両走行位置同定手法の開発

本システムでは、測定した時間軸上の加速度と車両位置を関連付けることが重要である。システムの開発当初、GPSセンサにより得られた速度情報を積分することにより車両の走行距離を算出し、車両の走行位置同定を行った。しかし、駅舎部分や山間部などで電波状態が悪く、全線に渡る位置同定が困難であるという問題が生じたため (全線で取得率約60%) , 新たな車両位置同定手法の開発が必要となった。なお、ここでGPSの緯度、経度の位置情報を直接用いない理由は、[1]軌道は始発駅からのキロ程で管理されており、緯度、経度と鉄道施設との関係が明らかでないこと、[2]GPSの緯度・経度の誤差がそのまま位置同定誤差になってしまうこと、である。

このような場合に適用可能な位置同定手法として、航空機などを対象に開発されている慣性航法装置 (IMU) 等がある<sup>15)</sup>。しかし、装置が高価なため、本システムへの適用は適切でない判断した。

そこで、GPS情報に加え、車両加速度や駅間距離を用いた簡易な車両走行位置同定手法を開発することとした。具体的には、軌道モニタリングシステムで測定する3方向の車両加速度のうち、進行方向加速度を数値積分することで車両速度、走行距離を求め、その速度、距離をGPS速度情報に加え、鉄道では既知である駅間距離によ

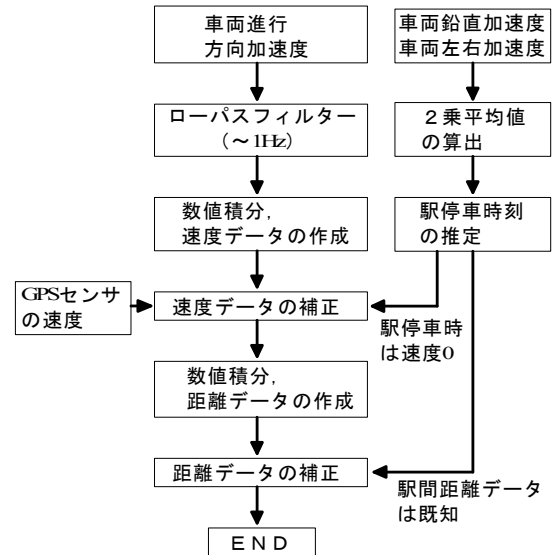


図-6 位置同定手順

り補正することによって、全線にわたる位置同定を行うものである。進行方向加速度については、車両の加減速に伴う低周波の加速度を測定する必要があるため、圧電型加速度計 (測定周波数範囲1~4000Hz) ではなく、サーボ型加速度計 (測定周波数範囲DC~100Hz) を用いた。

位置同定手法の手順を図-6に示す。最初に、車両の鉛直加速度と左右加速度から、駅に停車した時刻を推定する。車両の左右加速度、鉛直加速度、前後加速度の計測波形の一例を図-7に示す。加速度の値が小さくなる部位は駅に停車している時刻であるが、駅停車時でもある程度の振動があり、また、走行中においても振動が小さくなる場合もあることから、直接、この波形から自動的に駅停車時刻を推定することは困難であった。そこで、鉛直方向加速度と水平方向加速度の2乗平均を掛け合わせることで走行時と停車時の差をより明確にし、その値により駅停車時刻を判断することとした。駅停車時刻の判定方法は次式の通りである。判断に用いた閾値は、数回の測定結果から $3.0 \times 10^4 \text{ m}^4/\text{s}^8$ とした。

$$\frac{1}{T} \int_0^T (A_y(t)^2 \times A_z(t)^2) dt < A_{\text{lim}} \quad (2)$$

- $A_y(t)$  : 左右方向加速度
- $A_z(t)$  : 鉛直方向加速度
- $T$  : 評価時間幅 (1秒とした)
- $A_{\text{lim}}$  : 閾値 ( $3.0 \times 10^4 \text{ m}^4/\text{s}^8$ )

対象路線約27km全線に渡り、この値を算出した結果を図-8に示す。停車時と走行時の差が明確となり、閾値との比較により、駅の停車時刻を確実に判断することが可能となった。

次に、車両進行方向の加速度を数値積分することにより、全線にわたる速度データを算出する。レール継目通

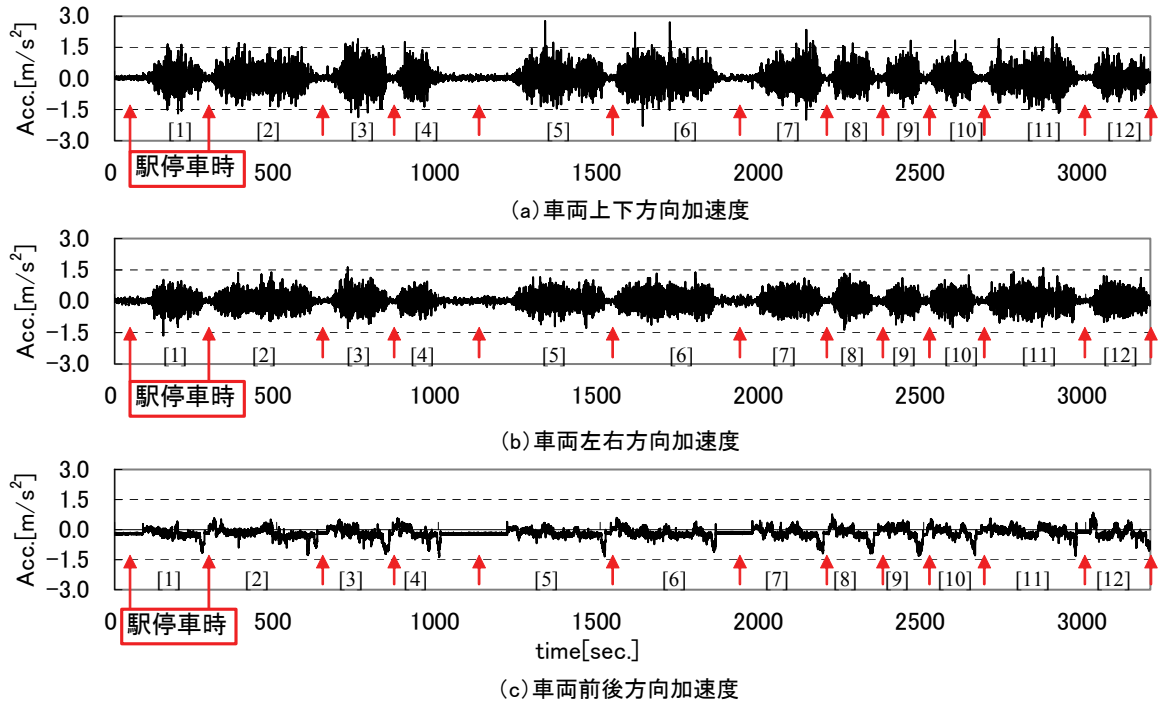


図-7 車両加速度の測定例(全線27km, [ ]内数字は駅間番号)

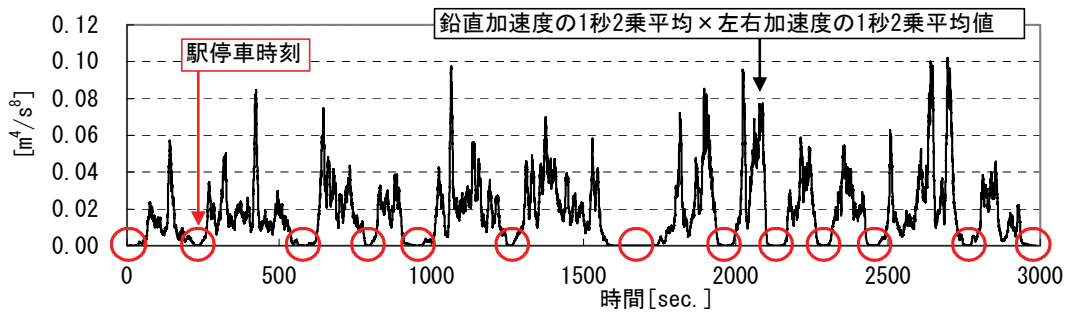


図-8 駅停車時刻の推定

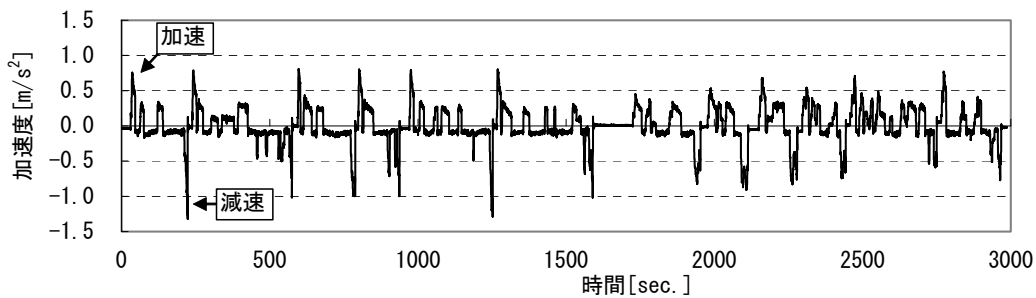


図-9 車両進行方向加速度

過時に発生する高周波の加速度成分や車体の振動による加速度成分を除去して車両の加減速による加速度を得るため、車両進行方向加速度に1Hzのローパスフィルター処理を行った(図-9)。この加速度データを数値積分して得た速度データを図-10(a)に示す。加速度を積分して得た速度データは、加速度の測定誤差や勾配の影響などにより大きな誤差を生じている。この積分により得られた速度を、GPS感度が良い場所で得られたGPS速度情報、駅停車時刻では速度が0であるという情報を利用し、

誤差を補完してより正確な速度情報を得る。速度補正に使用するGPSデータの選択は捕捉衛星数およびPDOP値(位置精度低下率)により判断した。補正した速度データは図-10(b)に示す通りである。最後に、得られた速度を数値積分することにより、距離情報を得る。ここでも誤差が生じるので、本システムでは既知である駅間距離を用いて駅間毎に距離の補正を行った。各駅に停車した時刻は車両加速度から得られているので、速度の数値積分により得られた距離を、既知である駅間距離を真値



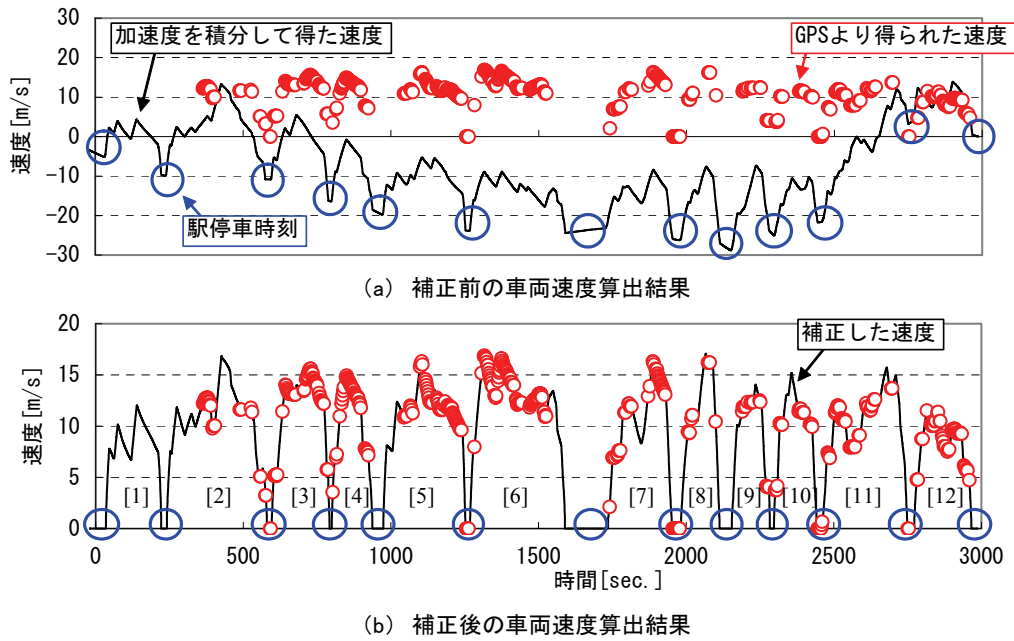


図-10 車両速度の算出

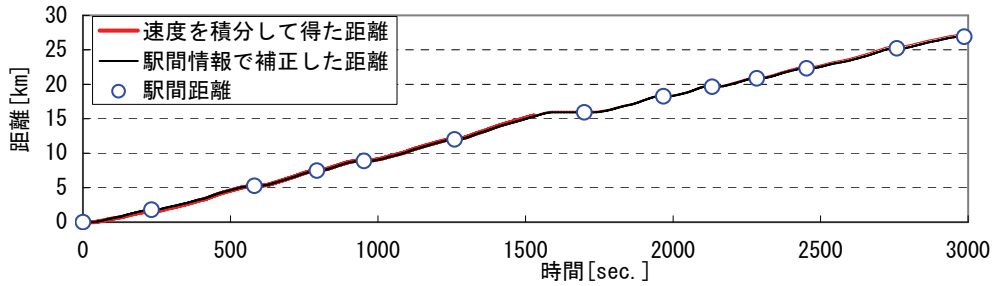


図-11 車両走行距離の算出

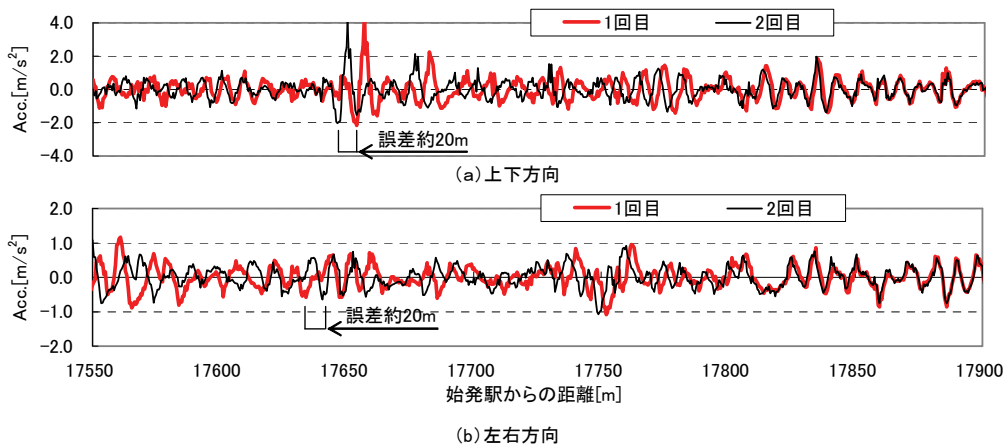


図-12 2回の加速度測定データの比較

として誤差を各サンプル間距離に応じて分配し、最終的に求める距離とした。対象路線全線の距離同定結果を図-11に示す。速度を積分した段階では各駅位置の同定誤差は最大で350m程度であったが、それを既知である駅間距離情報により補正し、全線にわたる距離同定を行った。

本手法による位置同定誤差を、異なる2回の測定結果の加速度波形のずれ量により確認する。図-11の距離同定結果を用いて、計測した時間-加速度波形を距離-加速度波形に置き換えた。例として、始発駅からの距離が17.5km付近（最寄の駅から1km程度）における2回の計測結果を重ねて図-12に示す。この例における位置同定誤

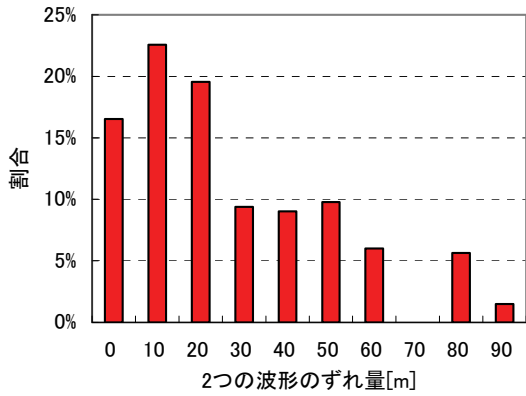


図-13 位置同定誤差

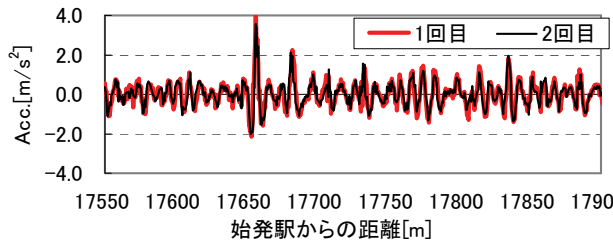


図-14 DPマッチング後の加速度波形例 (上下方向)

差は約20m程度であった。全線における位置同定誤差を確認するため、始発から終着まで、100m毎の2回の波形のずれ量を確認した。ずれ量を集計した結果を図-13に示す。60%が誤差20mの範囲内にあるが、35%が誤差30m~60m、最大で90m程度の誤差も見られた。大きな誤差は駅間が長く、GPSデータが比較的長時間得られない範囲(例えば図-10の駅間[2])に集中して見られた。誤差低減は今後の課題であり、GPSの設置位置の検討の他、緯度経度情報の利用など検討する必要がある。

誤差についてはさらに改善の余地があるが、以上の位置同定手法により、計測した加速度データ、GPSデータから、自動的に全線にわたる距離データを取得することが可能となった。なお、車両の速度パルスの出力を本システムに入力することが出来れば、距離同定精度は格段に向上する。

ところで、図-12に示したように、同じ軌道をほぼ同じ速度で走行した時の2回の加速度データは非常に良く似ている。このような場合における波形の位置ずれの補正手法としては、音声認識等に用いられている動的計画法<sup>16,17)</sup>(Dynamic Programming matching, 以下、DPマッチングと呼ぶ)を用いることが可能である。DPマッチングについての詳細は別途報告するが、複数回の計測結果の比較のため、ここではDPマッチングによる波形ずれの補正を行った<sup>18)</sup>。DPマッチングによる補正後の上下方向加速度の波形例を図-14に示す。区間は図-12と同じ区間である。2回のデータの波形のずれがなくなっている

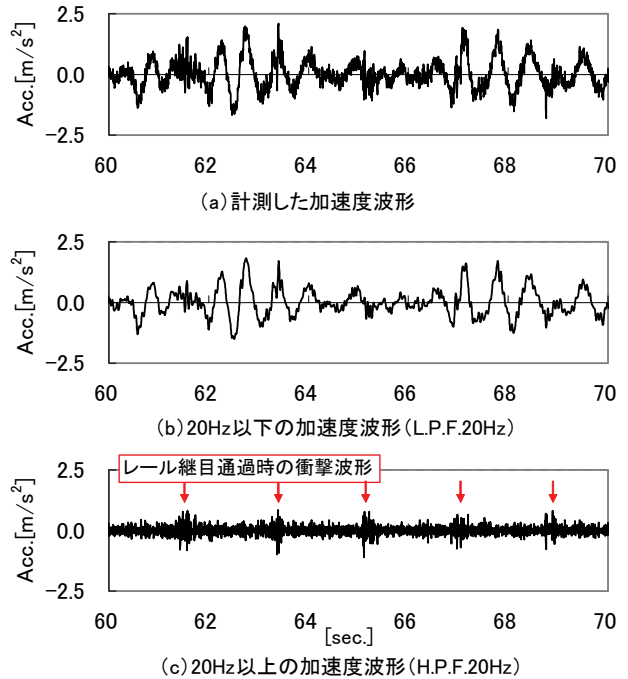


図-15 計測加速度とL.P.F.処理後の加速度

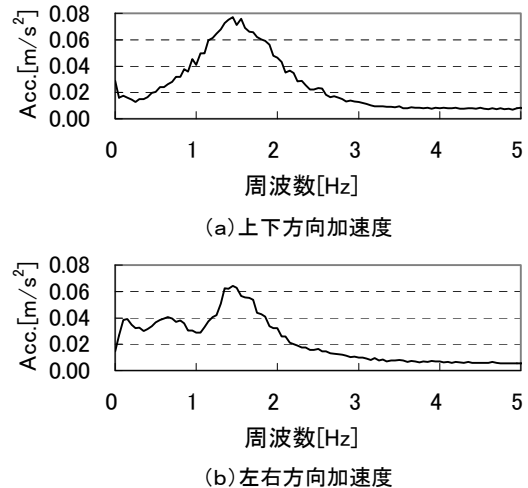


図-16 車両加速度のフーリエ振幅スペクトル

ことが確認できる。以後、複数回のデータの比較においては、DPマッチング後の波形を用いるものとする。

#### 4. 車両加速度の測定とその分析結果

##### (1) 車両加速度の特徴

計測対象の地方鉄道では、他の地方鉄道同様、ロングレールは導入されていないため、約25m間隔でレールの継目が存在する。そのため、車両にはレール継目通過時に上下方向、左右方向、前後方向共に高周波の加速度が発生する。本研究では比較的長周期(0.06~0.167m<sup>-1</sup>)の軌道狂いによる車両の振動を対象とする。そこで、車両加速度については20Hzのローパスフィルター処理を

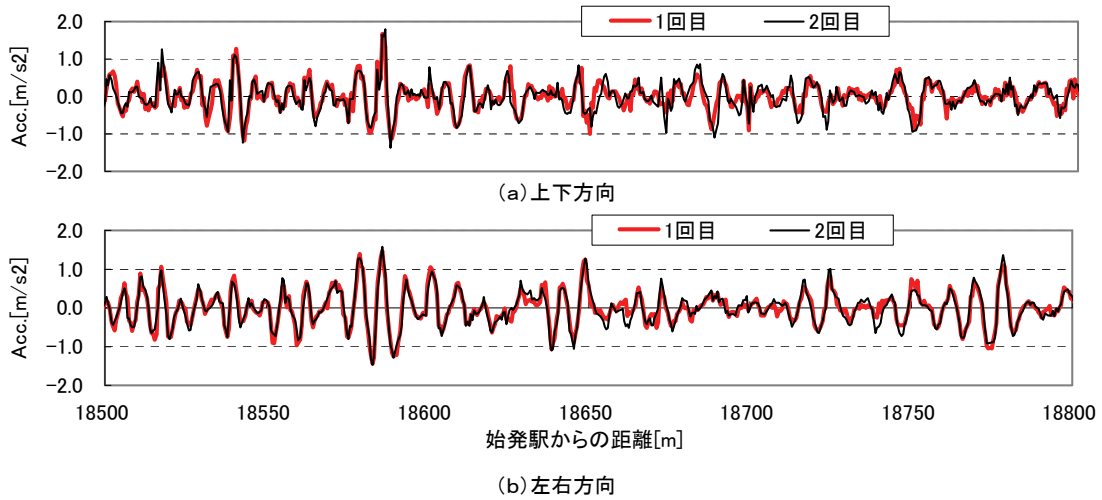


図-17 曲線部における加速度の再現性

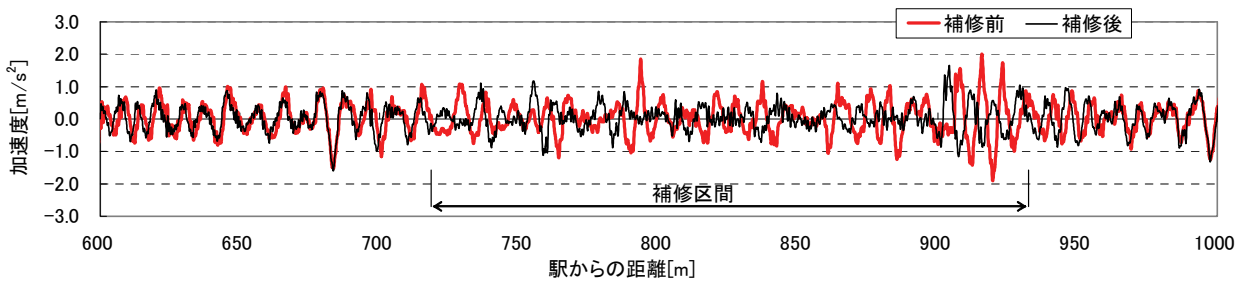


図-18 線路補修前後の加速度データ

行い、レール継目通過時の衝撃による高周波の加速度を取り除いた。計測した加速度波形、20Hzのローパス処理を行った加速度波形、および20Hzのハイパス処理を行った波形の一例を図-15に示す。高周波成分にレール継目通過時の衝撃的な応答がほぼ一定間隔で見られるが、20Hzのローパスフィルター処理によりそれらの影響は除去されていることがわかる。

図-7に示したのは20Hzのローパス処理を行った全線における車両加速度波形である。この加速度のうち、上下方向加速度、左右方向加速度の周波数解析の結果を図-16に示す。ノイズ成分を除去するため、約3000秒の計測データを20秒毎に周波数解析し、平均化処理を行っている。上下加速度、左右加速度ともに、3Hz以下の周波数で卓越したピークが見られる。後述する自由振動試験結果から、これらは車両の固有振動成分である。前後方向加速度については、特に卓越した周波数のピークは見られなかった。

## (2) 車両加速度の再現性

図-12には、同一日の2回の測定結果を示したが、上下振動、左右振動ともに2回の測定結果はほぼ一致しており、車両加速度の再現性は高い。車両振動は軌道状態を大きく反映していることを示している。図-12は直線部

における加速度の結果を比較したものであるが、これを路線の中でも曲率の大きい曲線部 ( $R=250\text{m}$ ) で比較した(図-17)。2回のデータの再現性は上下方向、左右方向共に非常に高く、曲線部においても、車両振動は軌道状態を大きく反映している。全線にわたるデータの再現性を確認するため、上下方向、左右方向の2回の加速度波形の相関係数を全線で算出した。その結果、上下方向が0.89、左右方向が0.74と全線に渡り再現性が高いことを確認した<sup>18)</sup>。ただし、1回目と2回目で車両速度の違いが大きい部位については、車両振動の再現性も悪くなることがわかった<sup>18)</sup>。

対象路線において、台風により盛土が一部崩壊する被害があった。軌道の復旧工事前後における計測データを図-18に示す。補修前は8月の計測データ、補修後は約半年後、2月の計測データである。補修区間以外では、計測間隔が約6ヶ月たっているにもかかわらず、2回の加速度データはほぼ一致している。一方、補修区間においては加速度データは大きく異なっており、補修後は車両加速度が減少している。このことから、車両振動は軌道状態を反映しており、また、車両振動から軌道状態を推測することが可能であることが確認できた。



表-3 車両の固有振動数および減衰定数一覧

振動モード	固有振動数	減衰定数
鉛直振動	1.40 Hz	0.14
ピッチング	1.45 Hz	0.14
ローリング	0.78 Hz	0.06
ヨーイング	1.96 Hz	0.06

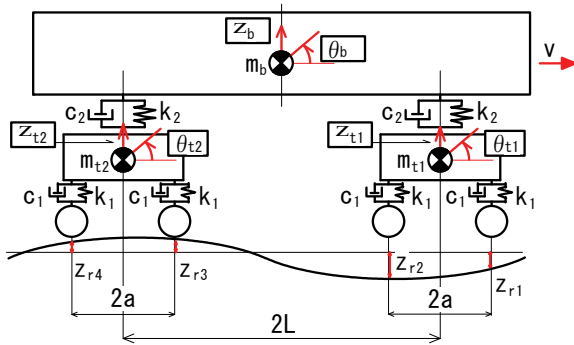


図-19 車両モデル (上下方向)

5. 車両力学モデルを用いた軌道高低狂い逆解析

(1) 軌道高低狂いの逆解析方法

前述したように、本研究では車両振動と軌道狂い値との関連付けには車両の力学モデルを用いる。ここでは、車両振動と軌道狂い値に高い相関があることが知られている軌道の高低狂いに着目し<sup>2,3)</sup>、車両モデルの周波数応答関数を用いて車両上下方向加速度から軌道高低狂いを求める手法について検討する。

車両のモデル化においては車両の振動特性、特に固有振動数と減衰定数を把握することが重要である。そこで、計測対象車両において自由振動試験を実施し、計測対象車両の振動特性を確認した。鉄道車両では、ローリング（車両前後軸周りの回転）、ピッチング（左右軸周りの回転）、ヨーイング（鉛直軸周りの回転）、ヒービング（上下動）の振動が顕著となる。自由振動試験では、この4つの振動モードの固有振動数、減衰定数を確認することを目的として、車両フロア上各部に加速度計を設置した。自由振動試験から得られた各振動モードにおける固有振動数、減衰定数を表-3に示す。自由振動試験の詳細については付録1に示す。

自由振動試験により得られた車両特性を用いて車両力学モデルを構築し、車両加速度から軌道狂いの算出を行う。軌道高低狂いを算出するための車両モデルを図-19に示す。モデルは車体と台車の上下動、ピッチング振動を考慮した3質点6自由度系の2次元線形モデルとした。車両モデルに必要なバネ定数などの各パラメータは、車両の設計値を基本に、車両自由振動試験結果により得られた各モードの固有振動数、減衰定数に合うように、

表-4 車両モデル諸元 (鉛直方向)

車体重量	$m_b$	17.0	tf
台車重量	$m_t$	2.8	tf
車体慣性モーメント	$I_b$	435.9	tf $\cdot$ m <sup>2</sup>
台車慣性モーメント	$I_t$	2.3	tf $\cdot$ m <sup>2</sup>
軸ばね剛性	$k_1$	1832.0	kNs/m
軸ばね減衰	$c_1$	78.4	kNs/m
枕ばね剛性	$k_2$	577.0	kNs/m
枕ばね減衰	$c_2$	25.0	kNs/m
台車間隔	$2L$	10.0	m
軸間隔	$2a$	1.8	m

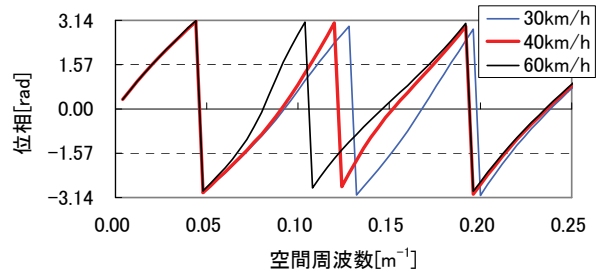
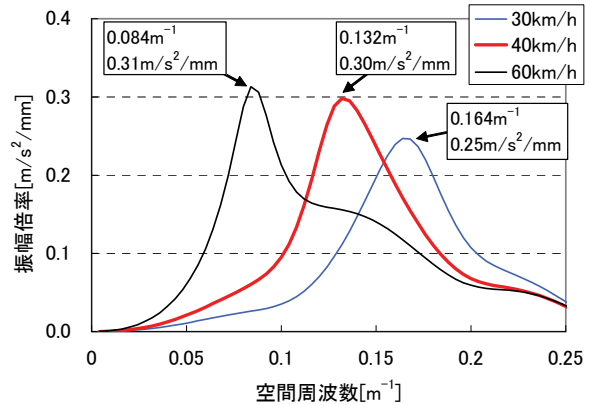


図-20 周波数応答関数の算出結果

枕ばね剛性 $k_2$ 、枕ばね減衰 $c_2$ 、および車両慣性モーメント $I_b$ に係数を乗じて調整した。車両モデルに用いた各値は表-4に示す通りである。車両上下方向モデルの運動方程式は付録2に示す。

車両モデルの運動方程式から得た周波数応答関数を図-20に示す。この図は、例えば車両の走行速度が40km/hの場合、周波数 $0.132m^{-1}$ （波長5.6m）の軌道狂いが連続する時、車両の振動が最も大きくなる（波高1mm)に対し応答加速度は $0.30m/s^2$ ）ことを示している。軌道の高低狂い値は、時間軸から距離軸に変換した車両加速度のフーリエ変換値に、この周波数応答関数の逆関数を乗じた後、逆フーリエ変換することによって求める。全区間の軌道狂いを算出する際、車両速度は一定ではないので、走行区間を250m毎に区切り、その区間における平均速度を用いて周波数応答関数を算出、軌道狂いを逆算して軌道狂いを求めた後、繋ぎ合わせるにより全区間の軌道狂いを求める。

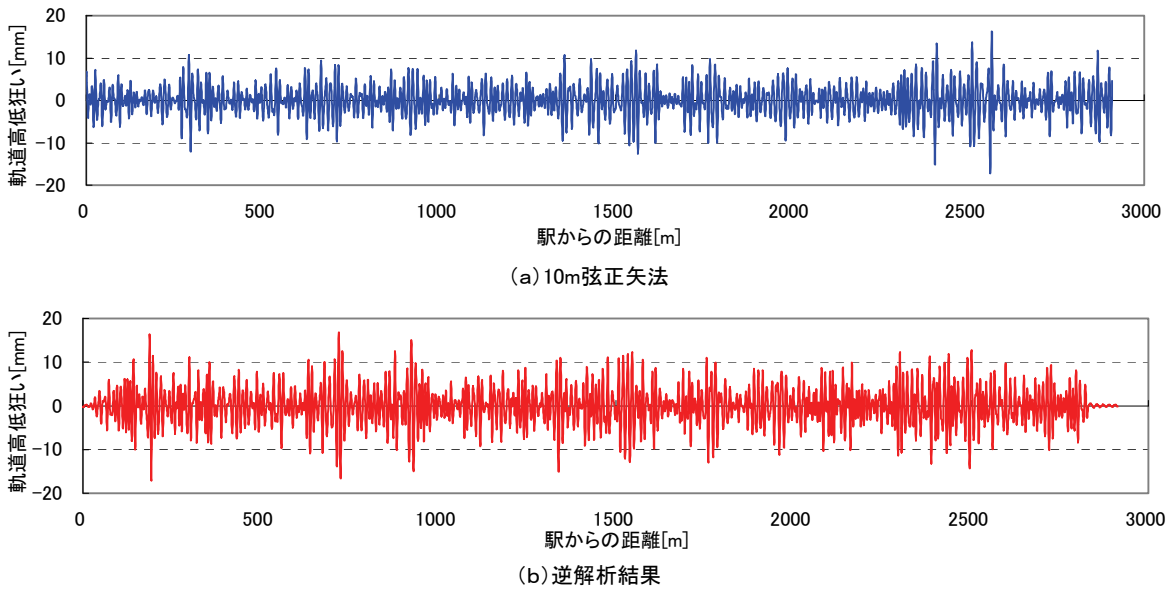


図-21 駅間[11]における検測値と軌道狂いの逆解析結果の比較

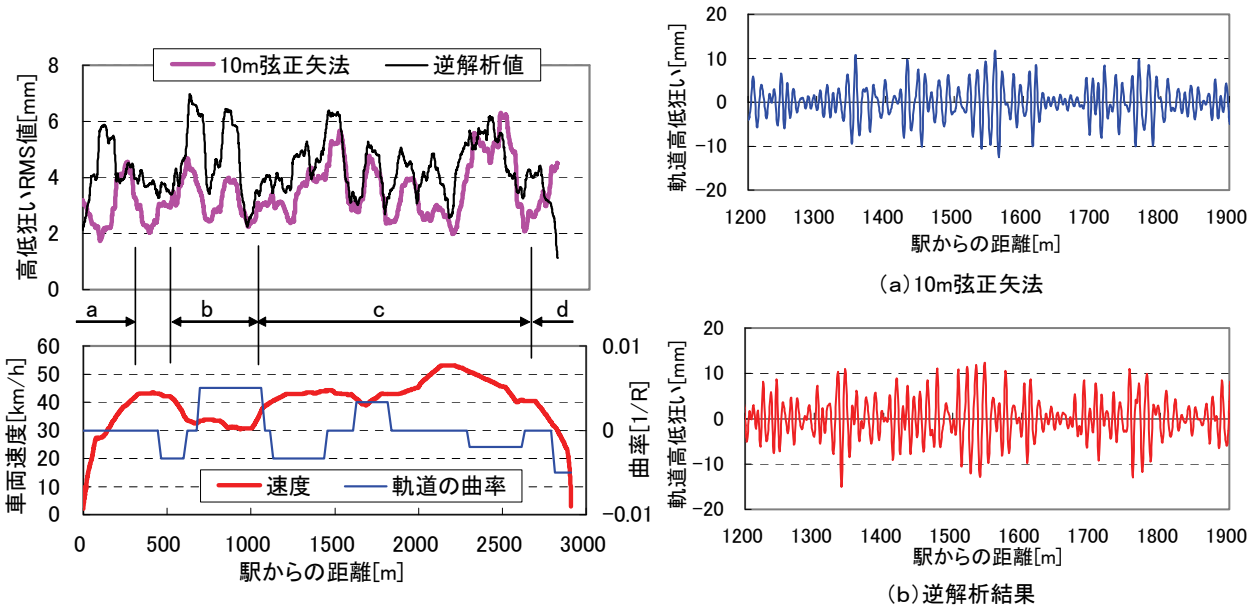


図-22 軌道狂いRMS値の検測値と解析値の比較 (駅間[11])

図-23 解析精度の高い部位の検測値と解析値の比較

(2) 軌道高低狂いの逆解析結果

前述した手順に従い、車両の鉛直振動から軌道の高低狂いを算出した。検証のため、ここでは本手法により算出した軌道高低狂いの逆解析結果と、10m弦正矢法により計測された検測値を比較する。比較のため、軌道高低狂いの逆解析値には式(1)の検波特性を乗じた。駅間[11]における軌道狂い算出値と、10m弦正矢法により計測された軌道狂い値を比較して図-21に示す。10m弦正矢法、本手法による算出結果とも、軌道高低狂い量の最大値は10mm~15mm程度である。両者を比較すると、全体的に本手法による軌道狂い算出値の方が10m弦正矢法に比べて若干大きく、また、特に1000m以前でその傾向が顕著である。これらの傾向を把握するため、両者の軌道狂い量から移動RMS値(計算区間100m)を算出した。

10m弦正矢法、逆解析値の移動RMS値を車両走行速度、軌道の曲率とあわせて図-22に示す。車両速度が40km/h~50km/hである区間cについては、逆解析結果は10m弦正矢法の傾向をよく捉えている。一方、車両走行速度が約30km/hである区間bについては両者の差が大きい。この理由としては、次のことが考えられる。軌道高低狂いの空間周波数は図-5に示した通り、 $0.08m^{-1}$ 、 $0.12m^{-1}$ が卓越している。しかし、図-20に示した時速30km/hにおける車両の周波数応答関数では、 $0.08m^{-1}$ 、 $0.12m^{-1}$ の軌道狂いに対する車両応答は小さい。すなわち、存在する軌道狂いに対して車両の振動が励起されにくいことを示している。また、曲率からわかるように、速度が遅い位置は曲率の大きな曲線区間であるが、本手法では曲線の影響は考慮していない。以上から、例えば時速30km/hの場合は

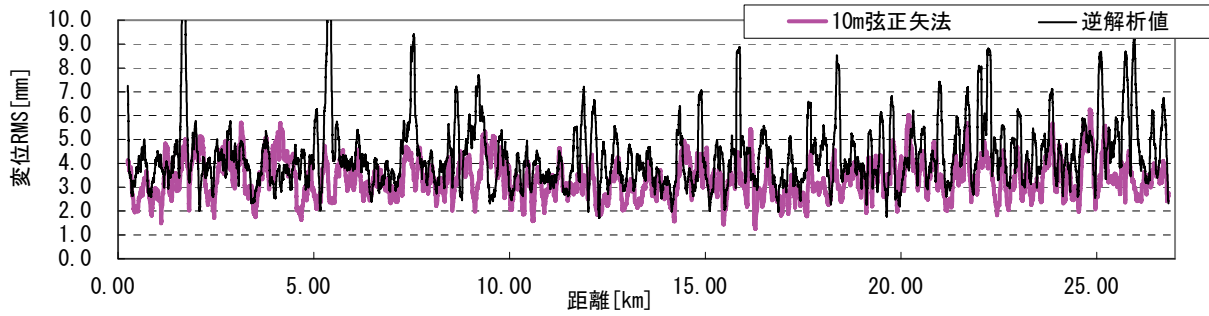


図-24 軌道狂いRMS値の検測値と解析値の比較(全線)

測定値と逆解析結果の差が生じやすくなるものと考えられる。その他、区間a, dのように駅前後などで車両速度の変化の大きい場合については、本手法で算出した軌道高低狂い量と10m正弦矢法による検測値は一致しない。

図-22のうち、RMS値の傾向が一致している区間cの1200mから1900mにおける軌道狂い波形を図-23に示す。逆解析により得られた軌道狂い波形は、10m弦正矢法により検測された軌道狂い波形の傾向を良く捉えていることがわかる。このように、車両の走行速度がほぼ一定で、かつ、10m弦正矢法で検波特性の高い周波数と車両が励起される周波数がほぼ一致するような場合については、車両の周波数応答関数を用いた逆解析により比較的精度良く軌道狂いを算出できることが確認できた。

次に、路線全体にわたる精度検証をおこなうため、全線27kmの10m弦正矢法による検測値と逆解析結果の100m毎のRMS値を比較して図-24に示す。両者の差は比較的大きく、相関係数を計算すると0.29となった。相関係数を速度毎に計算すると表-5の通りであり、速度が高いほど相関係数も大きくなる傾向にあることもわかった。前述したように、速度の遅い部位では誤差が大きくなりやすいこと、逆解析は速度が一定であることを前提としているが、図-10に示したように対象とした車両は駅間が短く山間部を走るため速度変化も大きいことから、このような差が生じるものと考えられる。その他、全体的に両者に差をもたらす一因としては、計測した車両振動には、レール継目通過時の衝撃により低周波自由振動が励起されるためであると考えられる。対象とした鉄道では25m毎にレールの継目が存在するため、その影響は比較的大きいものと推測される。

## 6. 車両力学モデルを用いた車両加速度の算出

前章で示した車両加速度から軌道高低狂いを算出する方法は、速度が一定である部位については適用可能であるが、速度変化の大きい箇所や速度が遅い部位においては適用は困難であり、全線における常時モニタリングとして実用化するのには現時点では難しいことを示した。ま

表-5 10m弦正矢法と逆解析結果のRMS値の相関と車両速度

車両速度 km/h	相関係数
0~10.8	0.39
10.8~21.6	0.25
21.6~32.4	0.21
32.4~43.2	0.26
43.2~54	0.37
54~	0.48
	0.29

た、車両の左右方向の振動については通り狂い、水準狂いなど複数の影響をうける他、蛇行動の影響など振動性状が複雑なため上下方向のような逆解析は難しい。

ところで、軌道管理の目的は、車両走行の安全性および乗り心地の確保にある。車両の上下加速度、左右加速度を直接モニタリングすることで、安全性や乗り心地に問題を与えるような軌道狂いの存在を推測し、軌道管理に反映すればよいと考える。ここでは、加速度を直接モニタリングする手法を検証するため、車両モデルを用いて、上下方向、左右方向の軌道狂い量と、車両上下、左右加速度の相関について検討する。10m弦正矢法により検測された軌道狂いを図-4に示した検波特性の逆フィルターを用いて補正した後、車両モデルに与え、得られた車両応答と計測加速度を比較することで車両モデルの妥当性を検証するとともに、軌道狂いと車両加速度との相関を確認する。

### (1) 車両上下加速度と軌道高低狂いの相関

車両の上下方向の振動について検討する。車両の上下方向の運動方程式は付録2に示す通りである。本モデルに、10m弦正矢法で測定した軌道高低狂い量を与えて車両加速度を算出した。車両加速度を算出した駅間は前章で逆解析を行った駅間と同じ駅間である。10m弦正矢法の検波特性を考慮し、空間周波数0.06Hzから0.167Hzの領域において図-4に示した検波特性の逆フィルターにより補正した軌道高低狂い量を車両力学モデルに与えた。

車両モデルを用いて算出した加速度と、計測加速度を比較したものを図-25に示す。図中、加速度の周波数解

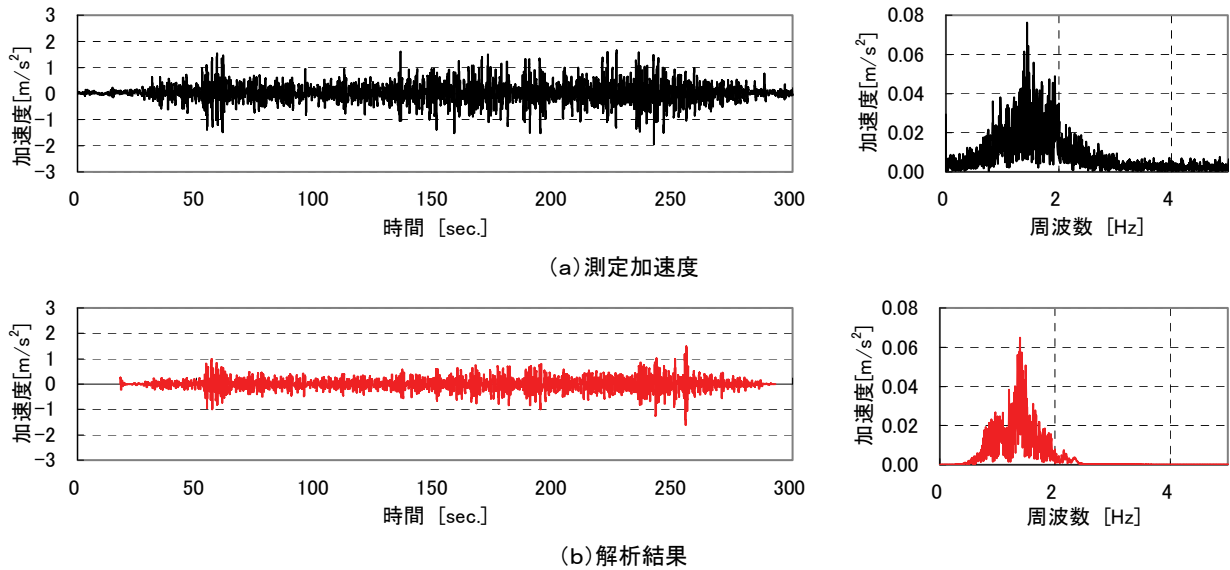


図-25 車両上下方向加速度の測定値と解析結果の比較 (駅間[11])

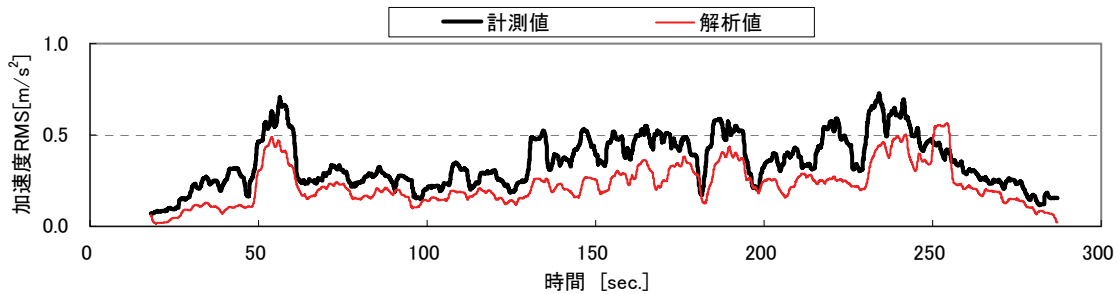


図-26 車両上下方向加速度のRMS値による比較 (駅間[11])

表-6 計測加速度と解析値との相関係数 (上下方向)

駅間番号	相関係数	駅間番号	相関係数
駅間[1]	0.47	駅間[7]	0.54
駅間[2]	0.50	駅間[8]	0.83
駅間[3]	0.81	駅間[9]	0.77
駅間[4]	0.89	駅間[10]	0.82
駅間[5]	0.71	駅間[11]	0.78
駅間[6]	0.71	駅間[12]	0.68
		全区間	0.66

表-7 車両モデル諸元 (左右方向)

車体慣性モーメント(ローリング)	$I_{bx}$	51.1	$tf \cdot m^2$
車体慣性モーメント(ヨーイング)	$I_{bz}$	129.2	$tf \cdot m^2$
台車慣性モーメント(ローリング)	$I_t$	1.8	$tf \cdot m^2$
水平ばねから車両重心	$h_1$	0.4	m
水平ばねから台車重心	$h_2$	0.3	m
枕ばね間隔	$2b$	2.0	m

※他の値は表-3参照

析結果も併記した。加速度の大きさ、分布形状などは、時間領域、周波数領域ともに両者は比較的良く一致している。前章同様、傾向を比較するため、加速度の移動RMS値をもとめて、両者を比較する。比較した結果を図-26に示す。移動RMS値の計算幅は1sec.とした。計測した加速度RMSの分布形状は解析値の分布形状と一致している。

計測加速度と車両モデルの解析による加速度のRMS値を全線にわたり算出し、駅間毎に相関係数を算出した結果を表-6に示す。全線の解析値と実測値の相関係数は0.66であり、駅間[1], [2], [7]を除けば相関係数は0.8前後と高いことから、本車両モデルは実際の車両の振動の傾向を良く再現できていると言える。

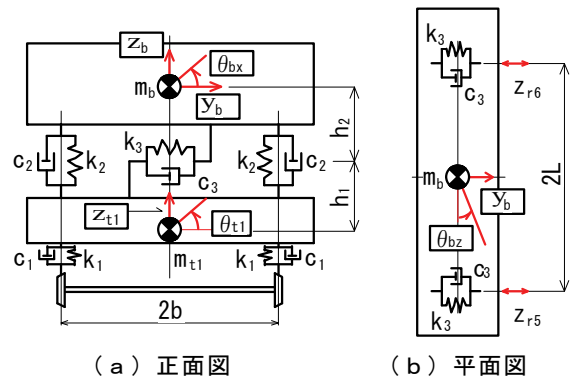


図-27 車両モデル (左右方向)



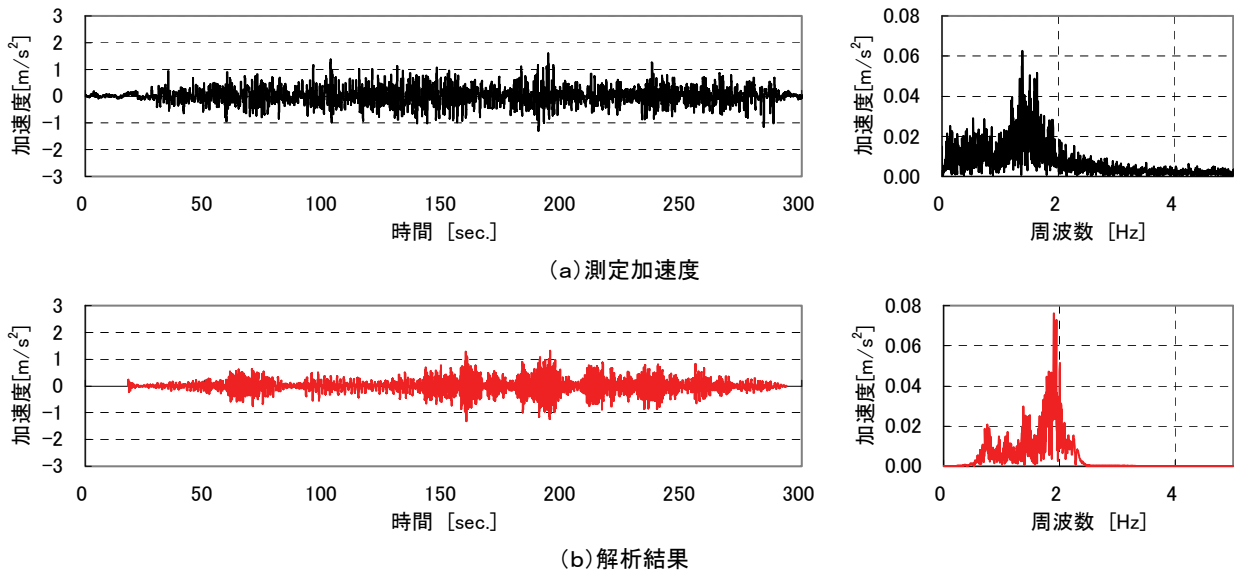


図-28 車両左右加速度の測定値と解析結果の比較 (駅間[11])

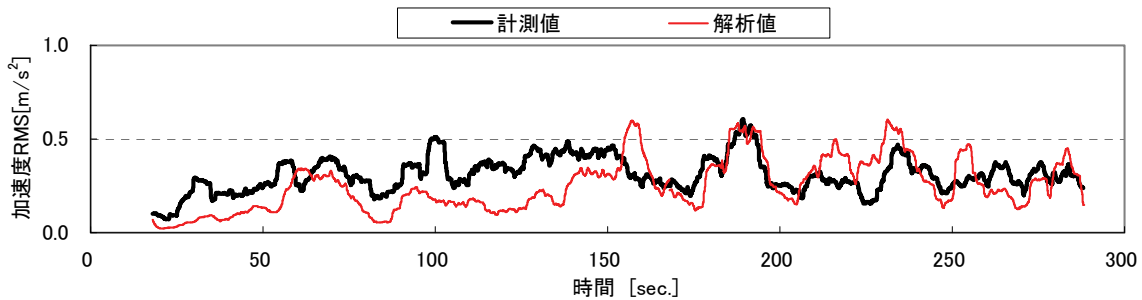


図-29 車両左右加速度の RMS 値による比較 (駅間[11])

(2) 車両左右加速度と軌道通り・水準狂いの相関

高低狂い同様、左右方向の車両モデルを構築し、軌道の通り狂い、水準狂いの検測値を車両モデルに与え、軌道狂い量と車両左右加速度の相関を確認する。車両モデルを図-27に示す。車両モデルは文献19)を参考に構築した。車体の上下動、左右動、ヨーイング、ローリングおよび前後台車の上下動、ローリングを考慮した3質点8自由度モデルとし、車両の高低狂い、通り狂い、水準狂いを考慮できるモデルとした。運動方程式は付録3に示すとおりである。

車両モデルに必要なバネ定数などの各パラメーターは、上下方向モデル同様、車両の設計値を基本に、表-3に示した車両自由振動試験結果により得られた各モードの固有振動数、減衰定数に合うように調整した。解析に用いた各値は表-7に示す通りである。

車両鉛直加速度算出時と同様にして、10m正弦矢法により得られた軌道高低狂い、軌道通り狂い、軌道水準狂い量を、図-4で示した検波特性の逆フィルターを用いて補正して運動方程式に与え、車両の左右加速度を求めた。

上下方向の検討と同じ駅間において、解析により得られた車両左右方向加速度と、測定された左右方向加速度

表-8 計測加速度と解析値との相関係数 (左右方向)

駅間番号	相関係数	駅間番号	相関係数
駅間[1]	0.64	駅間[7]	0.57
駅間[2]	0.49	駅間[8]	0.61
駅間[3]	0.68	駅間[9]	0.31
駅間[4]	0.77	駅間[10]	0.58
駅間[5]	0.69	駅間[11]	0.50
駅間[6]	0.50	駅間[12]	0.61
		全区間	0.51

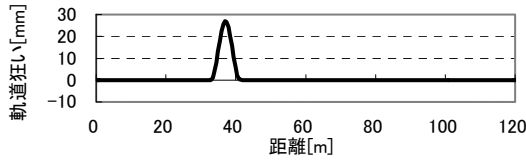
を図-28に示す。図中、加速度の周波数解析結果も併記した。時間領域において、加速度の大きさ、分布形状などは比較的一致しているものと考えられる。周波数領域においては、ピーク周波数に若干、誤差が見られるが、分布形状などは比較的一致している。

図-29は測定値と解析値の移動RMS値を比較した図である。測定値と解析値のRMS値の分布形状は傾向が似ている。80秒から150秒区間においては解析値と10m正弦矢法による検測値に差が見られるが、この区間は図-22で示した区間bであり、車両の走行速度が約30km/hと遅い部位である。車両速度が遅い部位においては、曲線や勾配の影響などから、上下方向同様、解析値と実測値は整合しにくいものと考えられる。

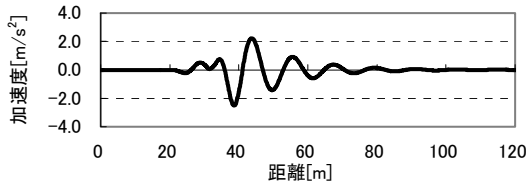


表-9 軌道狂いの制限値 (丙修繕整備基準値)

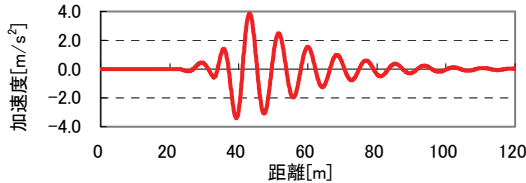
	甲線 [mm]	乙線 [mm]	丙線 [mm]
高低狂い	23	25	27
通り狂い	23	25	27



(a) 軌道狂い(高低, 通り)



(b) 車両上下加速度



(c) 車両水平加速度

図-30 軌道狂い制限値による車両加速度解析値の一例  
(軌道狂い波長8.33m, 車両速度60km/h)

上下方向同様、計測加速度と車両モデルの解析による加速度のRMS値を全線にわたり算出し、駅間毎に相関係数を算出した。相関係数の算出結果を表-8に示す。全線の解析値と実測値の相関係数は0.50と上下方向と比較して小さかった。車両の左右方向の振動現象については、レール踏面と車輪の接触状況による蛇行動の影響や、曲線部におけるカントの影響、遠心力の影響など、複雑な挙動を示すことが知られており<sup>19)20)</sup>、軌道の狂いのみから左右方向の振動を推測することは難しい。しかし、駅間[3], [4], [5]では相関係数は0.7前後、駅間[1], [8], [12]でも0.6以上であり、軌道の通り狂い、水準狂いと車両の左右方向の振動の相関は比較的高いものと考えられる。

## 7. 車両加速度を基準とした軌道管理手法の提案

### (1) 提案する軌道管理手法の概要

本研究ではTIMSを用いた軌道管理手法として、計測した加速度を、[1]閾値との比較による局所的な異常の検知、[2]前後データとの比較による経時変化、により管理することを提案する。特に、加速度の高い再現性が

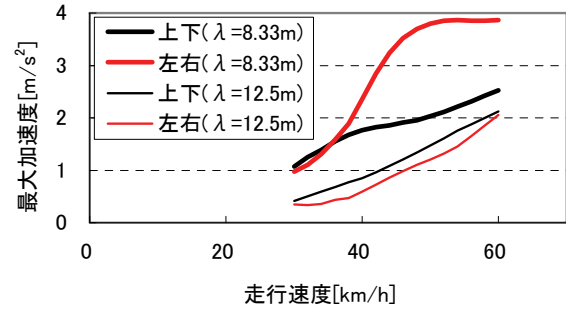


図-31 車両最大加速度と車両走行速度の関係

確認できたことから、[2]の経時変化については軌道管理上、また、安全管理上有用なものになると考えられる。

[1]については、前章で妥当性が確認された車両モデルに、軌道整備規準値を与えることで加速度の閾値を求めることとする。[2]については、区間代表値として加速度のRMS値を用い、前後データの経時変化を管理することを提案する。

### (2) 加速度閾値の算出

車両モデルに軌道整備基準値を与え、加速度をモニタリングする際の加速度の閾値を算出する。在来線整備規準値の一覧を表-9に示す。本研究で対象とする地方鉄道は、「重要でない連絡線、または地方線と認められるもの」にあたる“丙線”である。また、モニタリングにおける限度値は「軌道変位がこの値を超えた場合は15日以内に保守を行うか、徐行などの措置を取らなければならない範囲」にあたる“丙修繕”に当たると考え、表-9から、上下方向モデルには27mmの高低狂いを、左右方向モデルには27mmの通り狂いを与えた。高低狂い、通り狂いはcos波、波長は図-5に示した実際の軌道狂いを考慮し、代表的な値として8.33m ( $0.12[m^{-1}]$ )、12.5m ( $0.08[m^{-1}]$ )とした。軌道狂いをsin波ではなくcos波としたのは、軌道狂いの立ち上がり部分の急変の影響を除くためである。

車両モデルに与えた軌道狂い波形(波長8.33m)、車両速度が60km/hにおける車両の加速度波形の一例を図-30に示す。上下方向と左右方向を比較すると、左右方向の加速度が大きく、また、減衰が小さいため振動の継続時間が長いことが確認できる。

車両の速度を30km/hから60km/hまで2km/hきざみに変化させ、車両速度と最大加速度との関係を調べた。車両速度と最大加速度との関係を図-31に示す。軌道の整備基準である27mmの軌道高低狂い、もしくは軌道通り狂いが存在した場合、上下方向で $2.5m/s^2$ 程度、左右方向で $4m/s^2$ 弱程度の加速度が生じることが確かめられた。また、車両の加速度は車両走行速度が速くなるほどに大きくなることもわかった。これらの値を参考に、モニタリングする上下加速度、左右加速度の閾値を定めればよいと考える。

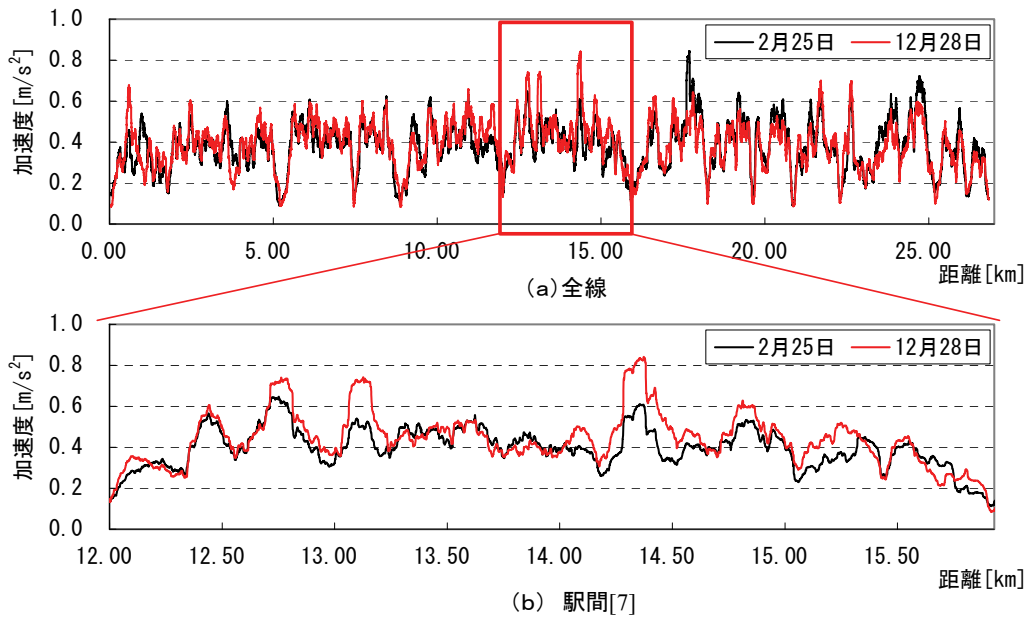


図-32 車両鉛直加速度のRMS値算出結果

### (3) RMS値の経時変化の管理

加速度の経時変化の確認において、前後データとの比較を自動で行うことを考えた場合、局所的な変化の影響や位置同定誤差の影響などを受けるなど問題が生じることが考えられる。ところで、鉄道では、軌道保守がある一定長の区間単位で行われること、軌道変位の分布は一般的には正規分布をなす性質があり、標準偏差を管理すれば過大な軌道狂いを防止できることから、実際の軌道保守では、100m~1km程度の区間毎の軌道狂い指数や標準偏差が用いられている<sup>2)</sup>。そこで、ここでも、経時変化については区間の代表値を用いて行うことを提案する。区間の代表値例として、100m毎のRMS値を考える。距離を100mとしたのは、算出区間が短いと局所的な振動の影響を大きく受けてしまい、距離同定誤差もあることから前後データの比較が難しくなること、算出区間が長いと平均化されすぎるため、変状の検知が難しくなることである。

2005年2月25日と2005年12月28日に測定した時系列の加速度データを距離-加速度データに変換した後、100m毎の移動RMS値を算出した。それらを重ねて図-32 (a) に示す。ピーク位置は車両の振動の大きな部位、すなわち軌道状態が比較的良くない位置であると考えられる。ある駅間、12.0kmから15.9kmに着目した図を図-32 (b) に示す。例えば14.3kmから14.5km付近では2月に計測したデータに比べて12月に計測したデータの振動が大きくなっており、軌道狂いが進んでいると判断することができる。一方、もし、この加速度の経時変化が路線全体でほぼ均一に変化するようであれば、軌道狂いの変化ではなく、車両の劣化が進んでいると判断することも可能で

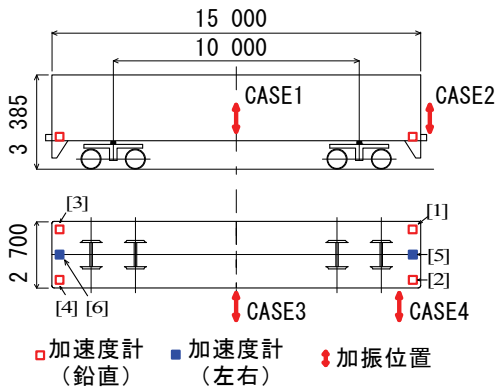
ある。以上の手法によれば、加速度、GPSの計測から波形のずれの補正、閾値との比較、RMS値の算出、経時変化の確認まで、ほぼ自動で行うことが可能である。

本システムにより閾値を超える加速度、加速度RMS値の経時変化を確認し、異常の見られた部位においては現地調査、徐行運転、軌道保守などの処置を実施すれば良いと考える。

## 8. 結論

中小鉄道を対象として、営業車両に設置が可能な軌道モニタリングシステム (TIMS) の開発を行った。得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) GPSの速度情報、車両進行方向加速度、駅間距離情報を用いたシステムにより、車両位置の同定が可能となった。
- 2) 上下方向、左右方向の車両加速度の再現性は直線部、曲線部ともに高く、車両加速度が軌道状態を反映していることが確認できた。
- 3) 車両の自由振動試験から得られた固有振動数、減衰定数を反映した車両力学モデルから求めた周波数伝達関数を用いて逆解析を行い、走行車両の上下方向加速度から軌道の高低狂いを比較的精度良く逆算できることを明らかとした。ただし、車両走行速度が変化する場合や遅い場合には、誤差が大きくなることが確認された。
- 4) 上述の車両力学モデルを用いて、上下方向、左右方向ともに、軌道狂いと車両振動の相関が高いことを明らかとした。



付図-1 自由振動試験方法

5) 車両振動と軌道狂いの相関が確認されたことから、車両加速度をモニタリングし、閾値との比較により局所的な異常を検知するとともに、RMS値の経時変化により軌道状態を監視し、車両走行の安全性を向上する手法を提案した。

本研究においては、実用上、必要な精度を確保する範囲で、経済性や実用性を追求して出来るだけ簡易なシステムを構築した。簡易なシステムとしたことで、JRや大手私鉄の導入しているシステムと比べて精度は劣る反面、高頻度な計測が可能となる。高頻度な計測が可能となれば、1回毎の測定データに車両速度の影響などによる誤差があったとしても、基本的には複数回の測定結果から軌道の経時変化や異常を判断することで、よりの確な判断が可能になるものと考えられる。

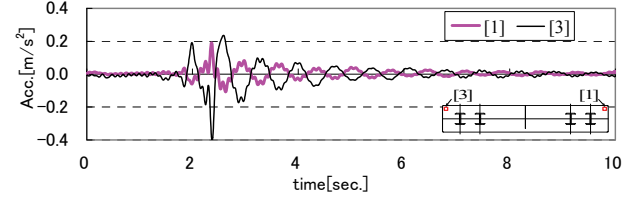
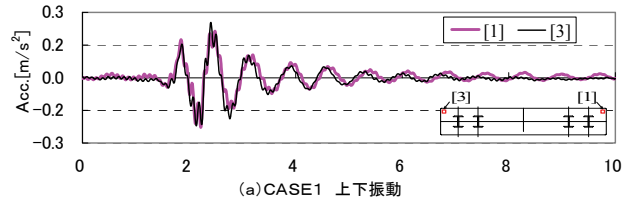
計測精度に関しては、車両速度の影響、位置同定誤差、電気ノイズなど、克服すべき課題はいくつか挙げられる。これらの課題を克服するため、実車両を用いたフィールド試験を引き続き実施し、システムの改良を図る必要があると考えられる。

**謝辞:** 本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構の運輸分野における基礎的研究推進制度（平成15～17年度）および日本学術振興会の科学研究費補助金（基盤A、代表：藤野陽三）によるものです。また、本研究は下園武憲氏（研究当時 東京大学工学系研究科、現 東京海洋大学 海洋科学部海洋環境学科 助教）の協力、助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

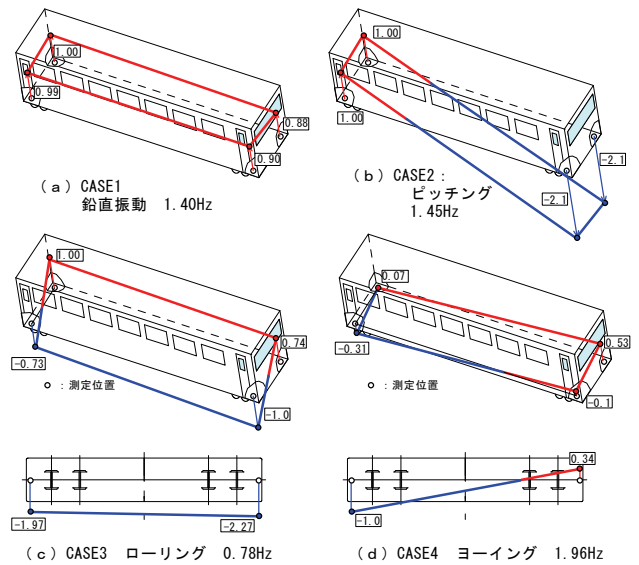
**付録1 車両の自由振動試験**

車両の振動特性を得るため、計測対象車両の自由振動試験を実施した。計測位置と計測ケースを付図-1に、得られた自由振動波形例を付図-2に示す。

計測した自由振動波形から、クロススペクトル法による振動モード、固有振動数同定を行った結果を付図-3に



付図-2 自由振動波形例



付図-3 固有振動数および振動モード同定結果

示す。減衰定数については、付図-2の振動波形からバンドパスフィルターを用いて自由振動波形を取り出し、その対数減衰率から算出した。

**付録2 車両上下方向モデルの運動方程式**

車両上下方向の運動方程式は式(3)から式(9)に示す通りである。

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F \tag{3}$$

$M, C, K$ : 質量, 減衰, 剛性マトリクス

$q$ : 車両各部の絶対変位マトリクス

$F$ : 軌道狂いを含む外力マトリクス

$$M = \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} 2c_2 & -c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & 2c_1 + c_2 & 0 & -c_2 l & 0 & 0 \\ -c_2 & 0 & 2c_1 + c_2 & c_2 l & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 l & c_2 l & 2c_2 l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2c_1 a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2c_1 a^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K = \begin{bmatrix} 2k_2 & -k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & 2k_1 + k_2 & 0 & -k_2 l & 0 & 0 \\ -k_2 & 0 & 2k_1 + k_2 & k_2 l & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 l & k_2 l & 2k_2 l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_1 a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_1 a^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$q = \begin{bmatrix} z_b \\ z_{t1} \\ z_{t2} \\ \theta_b \\ \theta_{t1} \\ \theta_{t2} \end{bmatrix} \quad (7) \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ c_1 \cdot (\dot{z}_{r1} + \dot{z}_{r2}) + k_1 \cdot (z_{r1} + z_{r2}) \\ c_1 \cdot (\dot{z}_{r3} + \dot{z}_{r4}) + k_1 \cdot (z_{r3} + z_{r4}) \\ 0 \\ c_1 a \cdot (\dot{z}_{r1} - \dot{z}_{r2}) + k_1 a \cdot (z_{r1} - z_{r2}) \\ c_1 a \cdot (\dot{z}_{r3} - \dot{z}_{r4}) + k_1 a \cdot (z_{r3} - z_{r4}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$z_{r1} \sim z_{r4}$  : 各車軸位置における軌道高低狂い

$$z_{r1} = A \times \exp(i \omega t) \quad (9a)$$

$$z_{r2} = A \times \exp\left\{i \omega \cdot \left(t + 2 \cdot \frac{a}{v}\right)\right\} \quad (9b)$$

$$z_{r3} = A \times \exp\left\{i \omega \cdot \left(t + 2 \cdot \frac{L}{v}\right)\right\} \quad (9c)$$

$$z_{r4} = A \times \exp\left\{i \omega \cdot \left(t + 2 \cdot \frac{L+a}{v}\right)\right\} \quad (9d)$$

その他の各記号は図-19, 表-4参照

### 付録3 車両左右方向モデルの運動方程式

車両左右方向の運動方程式は式(4)と同様である。各マトリクスは式(10)から式(13)に示す通りである。

$$M = \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{r1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{r2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{bx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{bz} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 4c_2 & -2c_2 & -2c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2c_2 & 2c_1 + 2c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2c_2 & 0 & 2c_1 + 2c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2c_3 & 2c_3 h_2 & c_3 h_1 & c_3 h_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2c_3 h_2 & C_{55} & C_{56} & C_{57} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_3 h_2 & C_{65} & C_{66} & 0 & c_3 l h_1 \\ 0 & 0 & 0 & c_3 h_2 & C_{75} & 0 & C_{77} & -c_3 l h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 l h_1 & -c_3 l h & 2c_3 l^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_{55} = 4c_2 b^2 + 2c_3 h_2^2 \quad C_{66} = C_{77} = 2c_2 b^2 + c_3 h_1^2 + 2c_1 b^2$$

$$C_{56} = C_{57} = C_{65} = C_{75} = c_3 h_1 h_2 - 2c_2 b^2$$

$$K = \begin{bmatrix} 4k_2 & -2k_2 & -2k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2k_2 & 2k_1 + 2k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2k_2 & 0 & 2k_1 + 2k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_3 & 2k_3 h_2 & k_3 h_1 & k_3 h_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_3 h_2 & K_{55} & K_{56} & K_{57} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_3 h_2 & K_{65} & K_{66} & 0 & k_3 l h_1 \\ 0 & 0 & 0 & k_3 h_2 & K_{75} & 0 & K_{77} & -k_3 l h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_3 l h_1 & -k_3 l h & 2k_3 l^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K_{55} = 4k_2 b^2 + 2k_3 h_2^2 \quad K_{66} = K_{77} = 2k_2 b^2 + k_3 h_1^2 + 2k_1 b^2$$

$$K_{56} = K_{57} = K_{65} = K_{75} = k_3 h_1 h_2 - 2k_2 b^2$$

$$q = \begin{bmatrix} z_b \\ z_{r1} \\ z_{r2} \\ y_b \\ \theta_{bx} \\ \theta_{t1} \\ \theta_{t2} \\ \theta_{bz} \end{bmatrix} \quad (13) \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ c_1 \cdot (\dot{z}_{r1} + \dot{z}_{r2}) + k_1 \cdot (z_{r1} + z_{r2}) \\ c_1 \cdot (\dot{z}_{r3} + \dot{z}_{r4}) + k_1 \cdot (z_{r3} + z_{r4}) \\ c_3 \cdot (\dot{z}_{r5} + \dot{z}_{r6}) + k_3 \cdot (z_{r5} + z_{r6}) \\ c_3 h_2 \cdot (\dot{z}_{r5} + \dot{z}_{r6}) + k_3 h_2 \cdot (z_{r5} + z_{r6}) \\ c_3 h_1 \cdot \dot{z}_{r5} + c_1 b \cdot \dot{z}_{r7} + k_3 h_1 \cdot z_{r5} + k_1 b \cdot z_{r7} \\ c_3 h_1 \cdot \dot{z}_{r6} + c_1 b \cdot \dot{z}_{r8} + k_3 h_1 \cdot z_{r6} + k_1 b \cdot z_{r8} \\ c_3 h_2 \cdot (\dot{z}_{r5} + \dot{z}_{r6}) + k_3 h_2 \cdot (z_{r5} + z_{r6}) \\ c_3 l \cdot (\dot{z}_{r5} - \dot{z}_{r6}) + k_3 l \cdot (z_{r5} - z_{r6}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$z_{r5} \sim z_{r6}$  : 各台車位置における軌道通り狂い

$z_{r7} \sim z_{r8}$  : 各台車位置における軌道水準狂い

その他の各記号は図-19, 図-27, 表-4, 表-7参照

### 参考文献

- 1) 高井秀之：軌道技術に求められるもの，鉄道総研報告，Vol.18, No.3, pp.1-4, 2004.3.
- 2) 古川敦，吉村彰芳：統計モデルによる車両上下動揺の予測と軌道管理への適用，鉄道総研報告，Vol.17, No.2, pp.29-34, 2003.2.
- 3) 古川敦，吉村彰芳：鉄道車両の上下動特性の同定および軌道保守への適用，土木学会論文集，No.730/IV-59, pp.15-25, 2003.4.
- 4) 古川敦，吉村彰芳：軌道狂い管理のための車両左右動特性の同定，鉄道総研報告，Vol.18, No.3, pp.29-34, 2004.3.
- 5) 矢澤英活，岡井忠生：慣性正矢軌道検測装置実用化に向けた性能向上，鉄道総研報告，Vol.18, No.3, pp.35-40, 2004.3.
- 6) 須永陽一，井手寅三郎，金尾稔：軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法，鉄道総研報告，Vol.9, No.2, pp.35-40, 1995.2.
- 7) 松本陽，佐藤安弘，緒方正剛，大野寛之，水間毅，留岡正男，谷本益久，網島均：営業車両による鉄道路線の状態監視システムの研究，交通安全研究所研究発表会 ポスターセッション 16, 2004.12.
- 8) 永沼泰州，高井秀之：新幹線車両の動特性を考慮した軌道管理手法，鉄道総研報告，Vol.9, No.12, pp.37-42, 1995.12.

- 9) 竹下邦夫：営業車による軌道狂い検出手法，鉄道総研報告，Vol.9, No.2, pp.29-34, 1995.2.
- 10) 真木康隆，榎本衛，佐々木君章，辻野昭道：GPS と線形情報を併用した地点検出システム，鉄道総研報告，Vol.17, No.4, pp.11-16, 2003.4.
- 11) 吉村彰芳，細川岳洋：高速車両の動揺と軌道狂いの位置照合問題の解法，鉄道総研報告，Vol.8, No.9, pp.13-18, 1994.9.
- 12) 国土交通省鉄道局：平成 14 年度鉄道統計年報，社団法人政府資料等普及調査会，2003.
- 13) 下園武憲，阿部雅人，藤野陽三，小芝明宏：車両振動に着目した軌道モニタリングシステムの開発，第 58 回年次学術講演会概要集，CSI-003, pp.5-6, 2003.9.
- 14) 山之内秀一郎：鉄道とメンテナンス，交通新聞社，2000.
- 15) 測量編集委員会：次世代の測量技術を探る－慣性測量，月刊測量，pp.17-24, 1997.1.
- 16) 神山雅子，樋口知之：動的計画法と非線形フィルタを用いた鉄道線路形状測定位置の補正，電子情報通信学会論文誌，D-II Vol.87-D-II No.6, pp.1199-1207, 2004.6.
- 17) 古井貞熙：音声情報処理，森北出版，1998.6.
- 18) 石井博典：移動体としての車両を利用した鉄道施設の常時モニタリングシステム，東京大学博士論文，2007.3.
- 19) 藤本裕，宮本昌幸：車両運動シミュレーションによる曲線通過特性の解析，日本機械学会論文集，C編，58 巻第 548 号，pp.73-80, 1992.4.
- 20) 日本機械学会：鉄道車両のダイナミクス，電気車研究会，1995.
- 21) 高橋寛：鉄道工学，森北出版，1970.

(2006.9.13 受付)

## A DEVELOPMENT OF TRAIN INTELLIGENT MONITORING SYSTEM USING ACCELERATION OF TRAIN

Hironori ISHII, Yozo FUJINO, Yusuke MIZUNO and Kiyoyuki KAITO

A simple and low-cost monitoring system, namely TIMS (Train intelligent monitoring system) that can be installed in ordinary trains is developed to inspect conditions of the railway track frequently. The accelerometers and GPS are installed in trains. In the system, train position is identified using GPS and train velocity record, and acceleration records of trains by separate measurement are adjusted by a dynamic-programming-based matching method. The field measurements were carried out in local railways and we confirmed high correlation between the train acceleration and track irregularity.