

新幹線高速化に伴う 軌道管理手法の開発



小野 重亮*



鵜飼 毅彦*

新幹線高速車両による速度向上時の乗り心地について、適切な軌道管理指標の検討を行った。左右方向は車両の動揺防止制御により良好な乗り心地を達成したため、軌道における上下乗り心地管理について検討した。

高速車両360km/h域の車体振動加速度応答特性を実測から求め、現在の軌道管理指標（40m弦）のゲインと比較したところ、両者は適合していることが示された。また、40m弦整備と60m弦整備による乗り心地レベル改善効果をシミュレーションし、軌道整備延長に対する乗り心地レベル改善効果は40m弦と60m弦で同等との結果を得た。さらに、40m弦による軌道整備が乗り心地改善に有効であることを実車両で確認した。これらから、現行40m弦管理で速度向上時の乗り心地管理に対応できる見通しを得た。

●キーワード：乗り心地、軌道管理、車体振動加速度応答、正矢法、弦、検測倍率

1. はじめに

軌道は列車荷重や、構造物の変形により、不整（軌道変位）が増大する。軌道変位は走行車両の乗り心地と走行安全性に影響するため、軌道変位を検測し、適切な指標で評価して整備することを軌道管理と称している。

一般的には速度が向上するほど、長い波長の軌道変位が影響するようになる。そこで、新型高速車両による営業速度向上時に、乗り心地の観点から現在の軌道管理指標が対応できるか、あるいはより長波長に対応した新たな指標が必要かを検討した。

FASTECH360は、左右方向については台車に動揺防止制御（アクティブサスペンション）が装着されており、275km/h走行の営業車（動揺防止制御なし）と比較して数dB以上の乗り心地改善効果が走行試験により確認された。このため左右方向については現行の軌道状態で十分良好な乗り心地が得られると判断し、ここでは上下方向についての検討を行った。

まず、40m弦・60m弦・80m弦正矢法による軌道変位と、車体上下振動加速度（乗り心地補正あり・なし）の波形を比較した。次に、周波数分析から求めた車体振動加速度応答と現在の軌道管理指標の検測倍率を比較した。さらに、軌道整備のシミュレーションを行い、40m弦管理と60m弦管理の、軌道整備延長に対する乗り心地レベル改善効果を

比較した。最後に、実際に40m弦軌道整備を行って、乗り心地レベルが改善されるかどうかを把握した。

2. 背景

乗り心地について適切な軌道管理を行うためには、以下を考慮する必要がある。

- ・乗り心地と車体振動加速度の関係
- ・車体振動加速度と軌道変位の関係
- ・軌道変位と軌道管理指標の関係

2.1 乗り心地と車体振動加速度の関係

乗客の乗り心地からみた車体振動加速度の指標として、鉄道車両に用いられているのは、地盤振動その他におけるISO2631（「全身振動暴露に対する評価指針」）を基本に、旧国鉄における「乗心地管理基準に関する研究委員会」にて、提案された等感度曲線である。1Hz以下を扱うため0.5Hzまでの低周波域に拡大されている。これに基づく「乗り心地フィルター」（図1）により、車体振動加速度に乗り心地補正を行う。振動の実効値（2乗平均の平方根）の対数を取り、dB表示する（ $1\text{m/s}^2=100\text{dB}$ ）。

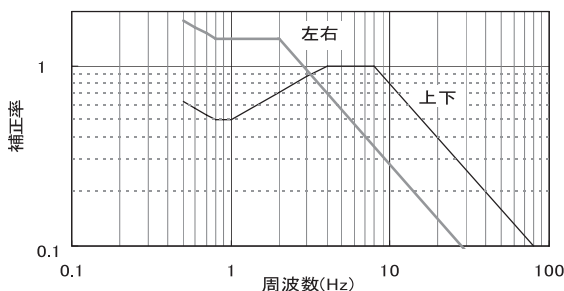


図1 乗り心地フィルター

2.2 車体振動加速度と軌道変位の関係

車両上下の運動は、図2に示す多自由度系モデルで表され、ばねやダンパの特性は概ね線型である。したがって、このモデル化の範囲では、車体振動加速度と軌道変位の関係（車体振動加速度応答）には線形性がある。このことを用いて、本研究では、走行試験で実測値を周波数解析し、線形応答関数を求めた。

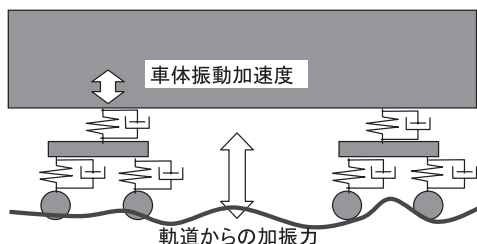


図2 車体の多自由度系モデル

2.3 軌道変位と軌道管理指標の関係

軌道変位を測量して把握することは効率が悪いので、多くの場合は軌道に10mなどの直線を沿わせて基準とし（弦と称する）、弦の中心と軌道との離れを測定している（正矢法と称する）（図3）。弦の設置方法は、軌道検測車の車体、現場で張った糸などがあり、必要に応じてこれらの計算結果から演算して必要な弦長を得ている。

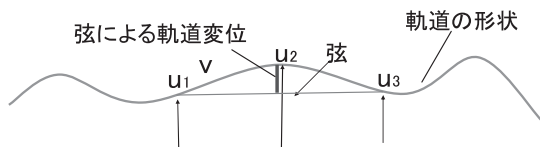


図3 正矢法による軌道変位測定

正矢法による測定のゲイン、すなわち真の軌道変位との比（検測倍率と称する）は、弦長と軌道変位の波長とによって異なる。図3に示す軌道変位 u_1, u_2, u_3 より、 u_3 の点の弦による軌道変位 v は、

$$v = u_2 - (u_1 + u_3) / 2$$

となる。ここで軌道の形状を正弦波とし、振幅 a 、波長 λ

とする。また弦長を L とすると、

$$u_2 = A \sin(2\pi x / \lambda) \quad u_1 = A \sin(2\pi (x + L/2) / \lambda)$$

$$u_3 = A \sin(2\pi (x - L/2) / \lambda)$$

より

$$v = A \sin(2\pi x / \lambda) (1 - \cos(\pi L / \lambda))$$

検測倍率は

$$v / u_2 = (1 - \cos(\pi L / \lambda))$$

となる。弦長ごとに、軌道変位の波長と検測倍率の関係を図4に示す。波長が弦長に等しいとき、検測倍率は最大の2倍になり、これより波長が大きくなるほど検測倍率は低下する。このような正矢法の性質は、車体振動加速度応答の大きい波長域の軌道変位を重点的に管理することに適している。

現在新幹線における乗り心地管理としては、40m弦と20m弦の軌道変位（長波長軌道整備目標値）が用いられているが、速度が向上するほど、長い波長の軌道変位が車体振動加速度に影響するようになる。このような波長に対して、現在の弦長における検測倍率は低下する。そこで速度向上時に、より長い弦長が必要となるか、あるいは現在の弦長でも対応できるかを、以下に検討した。

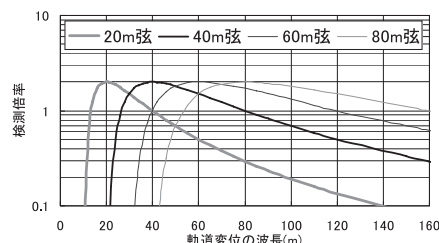


図4 正矢法による検測倍率

3. 軌道変位と車体振動加速度の波形比較

40m弦・60m弦・80m弦正矢法による上下方向の軌道変位（高低変位）と、車体上下振動加速度（乗り心地補正あり・なし）の実測波形を図5に示す。

図5において、四角形の枠で囲った部分に着目すると、弦長が長いほど、軌道変位の値は大きくなる傾向にある。これは、図4より、長い波長の軌道変位に対しては、弦長が長いほど検測倍率が高いことを反映しているものと理解される。

一方で車体上下振動加速度は、四角形の枠で囲った部分が特に大きいとはいえず、特に弦長が長い軌道変位ほど乖離が大きくなる傾向にある。これは乗り心地補正を

行った車体上下振動加速度において、より著しい。

この結果から、弦長を長くしても、乗り心地に対する指標としてのメリットは大差ないことが想定される。

4. 車体振動加速度応答と検測倍率の適合性

4.1 概要

先述したように、軌道変位の指標として正矢法（弦）が用いられる理由は、車体振動加速度との適合性にある。そこで、高速車両の車体振動加速度応答と現在の正矢法（40m弦）の検測倍率との適合性を比較した。

4.2 高速車両と現行営業車の車体振動加速度応答

高速車両の走行試験における車体振動加速度と、同時期の軌道検測車測定における軌道変位を周波数解析し、軌道変位に対する車体振動加速度応答を周波数ごとに算出した（図6）。車両はFASTECH360S（E954）とした。営業車のE2系と比較すると、広い周波数域で応答が低減

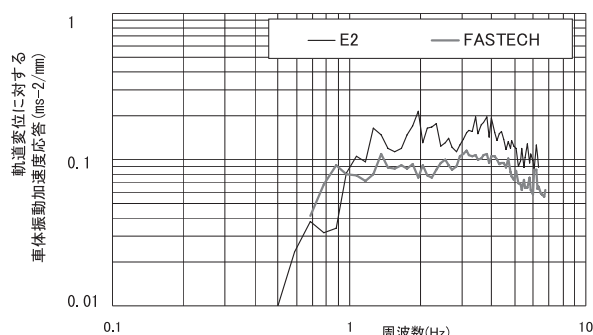


図6 軌道変位に対する車体振動加速度応答（上下）

している。これは、車両における乗り心地改善方策の効果を示すものである。

4.3 車体振動加速度応答と軌道変位検測倍率

図6の車体振動加速度応答に、図1に示す乗り心地補正を行うことにより、乗り心地を加味した車体振動加速度応答を得る。さらに、走行速度の影響を考慮するため、横軸の周波数を、E2系については275km/h、FASTECHについては360km/hに対応する軌道変位波長に置き換える。これによって得られた、軌道変位の波長別の車体振動加速度応答（乗り心地補正）が、現行の40m弦正矢法で対応できるかを検討するために、40m弦の検測倍率とともに図7に示す。検測倍率は波長39mにおいて、E2系275km/hの車体振動加速度応答に接するように示した。図7において、高速車両360km/hの車体振動加速度応答は、すべて検測倍率の曲線の下にあることから、40m弦の検測倍率は適合しているといえる。

この意味について図8により考察する。仮に波長1と波長2において、車体振動加速度応答1、2と40m弦検測倍率が接していたとすると、これらの比はいずれも $1:\alpha$ で等しい。したがって、波長1と波長2で、40m弦による軌道変位が同じ値であれば、車体振動加速度も同じ値となる。

よって図7より、40m弦による軌道変位が一定に管理された軌道では、高速車両に発生しうる車体振動加速度はどの軌道変位波長でも、E2系275km/hに発生しうる車体振動加速度（波長39m）を下回ることになる。

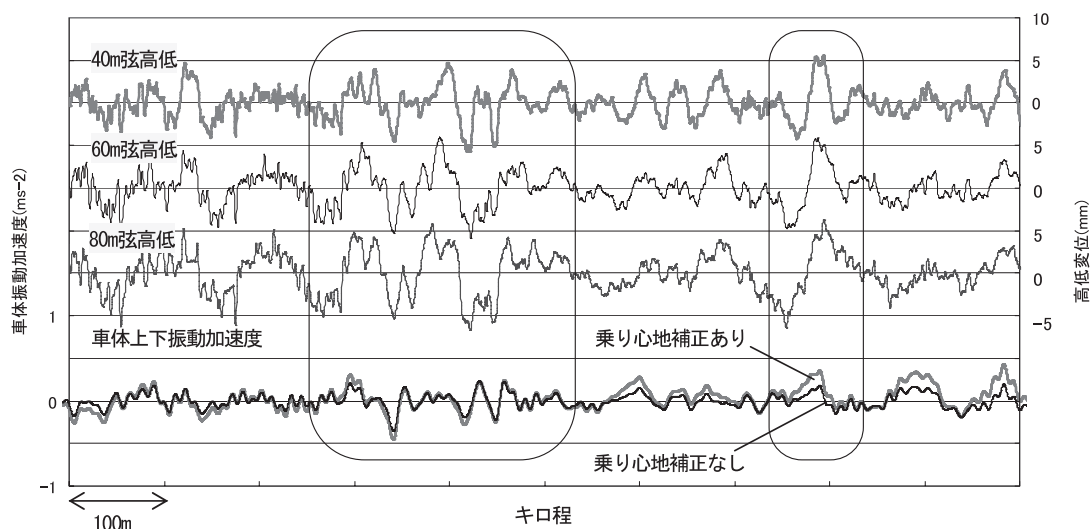


図5 40m弦、60m弦、80m弦軌道変位と車体振動加速度

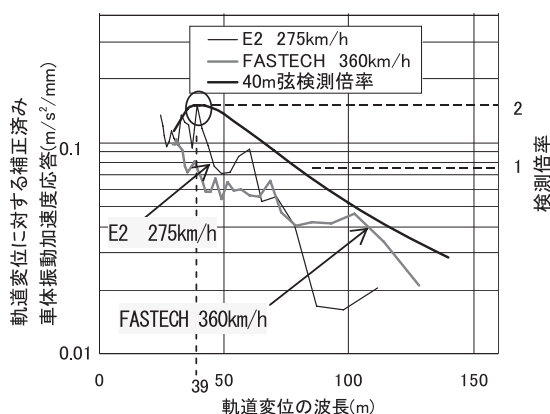


図7 E2系275km/hとFASTECH360km/hの車体振動加速度応答(乗り心地補正)

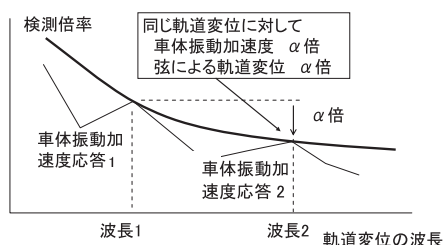


図8 車体振動加速度応答と検測倍率の関係

4.4 結論

車体振動加速度応答と弦測定による検測倍率の比較を行った。その結果、40m弦軌道変位で管理すれば、どの軌道変位波長でもFASTECH360km/hの車体振動加速度がE2系275km/hを下回るという結果が得られ、40m弦は車体振動加速度応答と適合していることが示された。

5. 軌道整備のシミュレーション

5.1 概要

4章においては周波数分析に基づく検討を行った。しかし実際の軌道変位はさまざまな波長が複合したものである。この影響を勘案して軌道管理方法を評価するため、実測から求めた車体振動加速度応答を用いて、軌道整備のシミュレーションを行った。

現在の軌道管理は、40m弦軌道変位が一定の限度値(整備目標値)を超過した箇所を抽出し、それをなくするような軌道整備を計画し施行している。今回は実際の軌道変位波形を用いて、40m弦管理と、60m弦管理による軌道整備を模擬し、シミュレーションにより軌道整備延長に対して乗り心地レベル改善(低減)効果を求め比較した。

5.2 計算方法

5.2.1 軌道整備の模擬

今回対象とした上下方向の軌道変位(高低変位)の整備は、レールの下にパッキン材などを入れて調節するので、基本的にはこう上(上げること)のみが可能で低下は考えない。また、軌道整備の始終点は極力軌道変位が小さい箇所に設定し、軌道整備が確実に施工されたことの確認を容易にする必要がある。このような実際の施工上の制約を考えて実際の軌道整備を模擬した。

現在、40m弦高低変位は整備目標値7mmであるが、今回はさらなる乗り心地向上の可能性も視野にいれ、40m弦および60m弦軌道変位5mm以上の箇所について軌道整備を行った場合を想定し、試算を行った。

5.2.2 乗り心地改善効果の予測

乗り心地改善効果の予測は、軌道整備区間を含む一定区間の軌道変位の周波数成分をFFTによって求め、FASTECHの車体振動加速度応答および乗り心地フィルターを周波数ごとに乗じ、その2乗の合計をその区間の車体振動加速度のパワーとして、軌道整備前後の差を算出した。

図9に一例を示す。上段に真の軌道変位波形(軌道検測車のデータから推定したもの。復元波形という)、下段に予測した車体振動加速度を示す。車体振動加速度は、FASTECHの車体振動加速度応答の振幅と位相を求め、時間領域でたたみ込み積分して算出した。軌道整備後の軌道形状は直線とし、中央と両端を除き軌道変位は残存しないものとする。図9より、軌道整備区間での車体振動加速度はほとんど除去されるとの予測結果となり、このシミュレーションでは車体振動加速度が残存しないことを前提としていることがわかる。

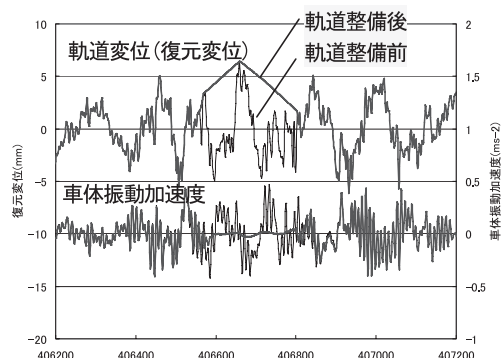


図9 軌道変位波形と車体振動加速度の整備前後(予測)

5.3 計算結果

東北新幹線における高速試験区間10kmの軌道変位でケーススタディを行った。40m弦5mmを上回ったのは10区間、60m弦5mmを上回ったのは20区間となった。前者は後者にすべて含まれる結果となった。この主な原因は、40m弦軌道変位より60m弦軌道変位の方が大きくなることによる。これをみるため、ケーススタディ区間における40m弦軌道変位と60m弦軌道変位の関係を図10に示す。60m弦軌道変位の方が、1mm程度大きい傾向にある。

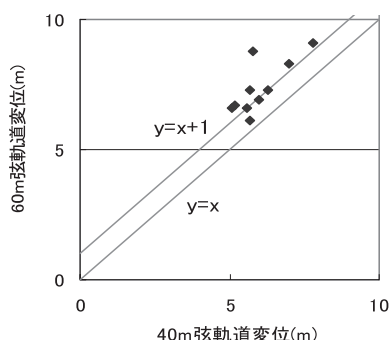


図10 ケーススタディ区間における40m弦軌道変位と60m弦軌道変位の関係

軌道変位の整備目標値を定めてそれを上回った箇所をすべて整備したときの、整備目標値と軌道整備延長の関係を図11に示す。当然ながら、軌道整備目標値を厳しくするほど、軌道整備延長が増大する。60m弦整備は、40m弦整備の傾向を単純に左方にシフトした関係にあるが、それは60m弦軌道変位の方が、1mm程度大きい傾向にあることで説明される。

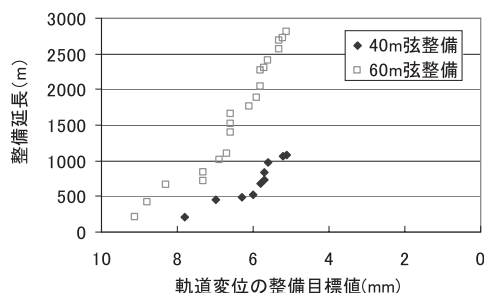


図11 軌道変位の整備目標値と軌道整備延長

軌道整備延長に対する乗り心地レベル改善効果が、軌道整備目標値を変えることでどのように変化するかで、40m弦と60m弦との比較を行った結果を図12に示す。40m弦整備は60m弦整備と、ほとんどラップする。このことから、60m弦整備も40m弦整備も、軌道整備延長に対する乗り心地レベル改善効果の点では同等といえる。

40m弦高低を5mmで整備した効果は、軌道整備延長の

全区間に対する比率10%程度、1dB弱であった。なお60m弦高低整備は、軌道整備延長の全区間に対する比率30%程度、1dB強であった。この差異は、図12より軌道整備延長の差によるものである。

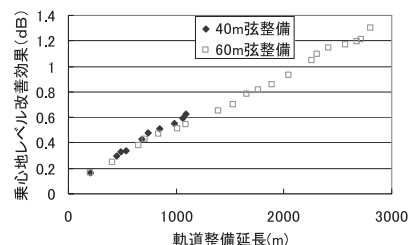


図12 軌道整備延長と乗り心地レベルの関係

5.4 結論

軌道整備延長に対する乗り心地改善効果は、40m弦整備でも60m弦整備でも差がないという結果から、現行40m弦管理で高速走行に対応できる見込みが得られた。

60m弦整備の目標値は、40m弦整備の目標値+1mm程度が相当する。高速列車についてさらに乗り心地の改善をめざす場合は、現行の40m弦高低変位目標値7mmをより小さくすることが考えられ、40m弦高低6mmと60m弦高低7mmがほぼ同等、40m弦高低5mmと60m弦高低6mmがほぼ同等といえる。現行7mmを5mmに強化した場合の効果は、最大1dB程度と推定される。

6. 軌道整備の効果確認試験

6.1 概要

4における軌道整備シミュレーションは、軌道整備により車体振動加速度がなくなることを前提としている。その前提条件の確認のため、現在行われている軌道整備の前後の車体振動加速度を比較し、軌道整備により車体振動加速度が残存せず、乗り心地レベルが十分改善されることを確認する。

6.2 試験方法

高速試験区間において40m弦高低整備を行い、乗り心地改善効果を明らかにする。対象は高低変位5mm超過箇所とした。これは、軌道整備工事後の40m動的仕上がり基準（軌道検測車で測定した場合の、軌道工事の検収における許容公差）が±4mmであるため、整備を計画できる下限と考えられる数値である。

軌道整備区間は7箇所となり、これを区間A～Gとする。

6.3 試験結果

図13は軌道整備区間における、車体振動加速度（乗り心地補正なし）、乗り心地レベルを示す。乗り心地レベルは、車体弾性振動や縦曲線の影響を除き、軌道変位と関係のある1-10Hz帯域で算出した。

軌道整備区間A～Gのうち、区間A,D,F,Gは、軌道整備前の乗り心地レベルがそもそも大きくない区間であった。軌道整備前の乗り心地レベルが大きい区間B,C,Eは、軌道整備の効果が認められる。

区間CとDの間には縦曲線（勾配変化部）があり、上下に定常加速度が発生しているが、1-10Hz帯域の乗り心地レベルには影響していない。

軌道整備区間A～Gにおける整備後の乗り心地レベルは、すべて80dBを下回り、車体振動が残存せずに除去されたと判断される。

よって、40m弦高低変位5mm超過箇所を整備した場合、整備前の乗り心地レベルが大きい場所については、軌道整備の効果が認められ、全ての区間において整備後の乗り心地レベルが小さくなる結果を得た。

6.4 結論

40m弦高低変位整備によって、FASTECHの360km/h走行時において、車体振動加速度の低減効果が認められた。この結果からは、現行の整備方法で高速運転に対応できる見通しが得られた。

7. まとめ

FASTECH高速走行試験において、左右方向は動揺防止制御により良好な乗り心地を達成したため、上下乗り心地管理について検討した。

高速車両の車体振動加速度特性を車上測定から求め、40m弦などの検測倍率の適合性を検討した。この結果、360km/h域のFASTECHの車体振動加速度（乗り心地補正）は、周波数別にみると、現行の40m弦管理の下で、E2系275km/hの最大の車体振動加速度と同程度以下となることが予測され、40m弦を用いて管理できることが示唆された。

40m弦整備と60m弦整備それぞれによる乗り心地レベル改善効果をシミュレーションした。そこで、軌道整備延長に対する乗り心地レベル改善効果は40m弦と60m弦が同等であったため、現行40m弦高低管理で対応できる見通しが得られた。

現行の40m弦軌道整備後の乗り心地レベルは高速列車においても十分改善されることがわかり、この結果からは、現行の整備方法で高速運転に対応できる見通しが得られた。

参考文献

- 1) 小野 重亮、峰岸 大介；新幹線高速域における軌道管理手法，JR East Technical Review No.14, pp.61-64, 2006
- 2) 小野 重亮；高速列車の乗り心地管理に関する一考察，鉄道力学論文集、No.11, pp.51～56, 2007.7

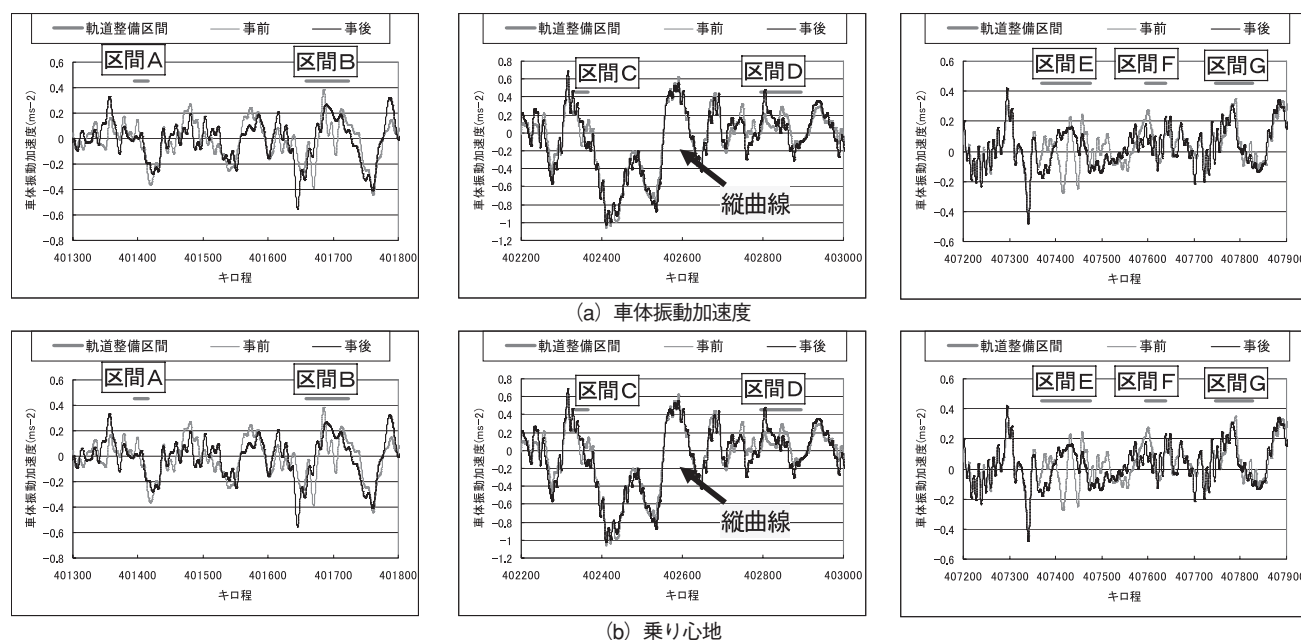


図13 40m弦高低整備結果