

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06529

研究課題名（和文）走行列車から軌道の力学状態を推定する手法の理論的検討

研究課題名（英文）Theoretical study on an estimation method for mechanical condition of track using rail lateral displacement data obtained with commercial trains

研究代表者

阿部 和久（Abe, Kazuhisa）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：40175899

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）： 営業車両に搭載された検測装置によって取得された軌道の通り変位波形を用い、軌道の力学状態を推定する手法について、基礎理論の構築を目指した。具体的には、2つの異なる軸力下で得たレールたわみ測定値の変化量から、レール軸力と道床横剛性とを係数に持つ波数に関する4次関数を導出した。当該多項式の係数を介して、原理的にはレール軸力と道床横剛性とを求めることができ、さらに実軌道の力学特性を考慮した場合でも相対軸力の推定が可能であることを立証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

営業列車に搭載した検測装置による軌道状態監視の検討は、国内外において精力的に行われている。しかし、これらは軌道の幾何形状に基づいた異常箇所の検出や、軌道変位進みの将来予測に主眼が置かれており、力学状態の把握は検討の対象外とされてきた。一方、レール軸力測定法の研究は、定期点検を前提とした定点測定のみが対象であった。本研究では、レール軸力とそれに起因する軌道形状の変化との力学的関係に着目し、これらを理論的に関連付け、軸力と道床横抵抗力といった軌道の力学状態の線区全域に亘る高頻度モニタリングを対象とする点に学術的、社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）： In order to estimate the mechanical conditions of a track such as the rail axial load and the ballast lateral stiffness, a track monitoring method utilizing the lateral rail displacement measured by an instrument mounted on a commercial train is studied. For this purpose, a mechanical relationship between the lateral rail deflection and the axial stress is derived. A 4th order polynomial in which the coefficients of the 2nd and 4th order terms are described in terms of the mechanical unknowns is then obtained. Through numerical experiments, the theoretical validity of the method has been proved. Moreover, it has also been found that, at least, the relative rail stress can be estimated to an elaborated track model which takes into account its mechanical nonlinearity.

研究分野：応用力学

キーワード：レール軸力推定 慣性正矢法 軌道検測 通り変位

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉄道分野において、維持管理の省力化が重要課題となっている。その解決策の一つが、定期保守を常時状態監視に基づく予防保全に改めることである。鉄道のモニタリング技術は年々進歩しており、営業車両に加速度計を搭載して軌道変位を常時計測する試みが鉄道事業者によってなされつつある[1]。特に軌道の高低変位(起伏)は乗り心地や振動に関する重要項目のため、関連技術が国内外で研究されている。一方、軌道の通り変位(蛇行)データの有効活用については殆ど議論されていない。

レール張出し(座屈)は安全上重要な事象である。その管理は、温度と通り変位に基づいた修繕個所の検出によって行っている。しかしその合理化には、レール軸力やバラスト道床による軌道拘束力(道床横抵抗力)などの力学状態の把握も必要となる。中でもレール軸力は重要項目の一つであるが、その測定は容易ではない。これまでにひずみ測定法、X線応力測定法、振動軸力測定法など様々な方法が考案された。しかしこれらの多くが相対軸力のみ評価可能なものであり、さらに点状測定箇所のレール軸力に限定され、全線区にわたる状態の把握ができない。また、道床から軌道に作用する道床横抵抗力に関しては、レール締結装置を外してまくらぎの引抜き試験を実施する以外に術は無く、時間とコストの面で大きな制約が課せられている。

2. 研究の目的

本研究は、上述の現状と課題を踏まえ、軌道の高頻度計測技術を活用した軌道力学状態推定法の理論構築を目的とする。具体的には、営業列車に搭載された軌道検測装置により得られた軌道通り変位波形データを用いた、軌道力学状態の常時モニタリング手法の構築に向け、理論的検討を行い、その可能性を探る。そのために、まず軌道力学状態の簡易な数理モデルに基づき、通り変位波形データを用いたレール軸力および道床横剛性の推定式を導出する。次に、その妥当性について数値軌道モデルに基づき検証する。また、測定ノイズ下での推定法についても検討する。さらに、実軌道の力学特性や、日射によるレール温度履歴を忠実に再現し得る精緻な軌道モデルを構築し、それにより得られた擬似測定データに対して本推定法を適用し、その適用可能性と課題について明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 軌道力学状態推定法の基礎理論構築とその妥当性の検証

まず、レール軸力作用下にある軌道の通り変位を、道床により連続支持されたはりの線形弾性たわみで表現した簡易な数理モデルを導出する。なお、道床横抵抗力については線形連続バネによりモデル化する。当該問題は軌道長手方向の座標系に関する微分方程式で与えられる。

次に、これを軌道長手方向について Fourier 変換して、2つの異なる軸力状態における通り変位波形の変換式からあるスペクトル比を求める。このスペクトル比は、理論上、波数に関する4次多項式で表すことができる。なお、この4次多項式の各係数は、2つのレール軸力と道床横剛性を含むものとなっている。そのため、通り変位波形データの Fourier 変換よりスペクトル比を求め、それを表す4次式の係数を求めれば、レール軸力と道床横剛性が推定可能となる。

上述の数理モデルに対応する数値軌道モデルを用いた解析より、本推定法の妥当性を検証する。また、測定ノイズに対処するため、粒子フィルタの援用を試みる。まず、(1)と同様の数値軌道モデルを用い、通り変位波形の擬似測定データを作成する。次に、当該データに対し本推定法を適用して、レール軸力と道床横剛性の推定を行い、その精度について調べる。

(2) 実軌道における力学特性が推定精度に及ぼす影響の検討

推定式は簡易な数理モデルに基づき導出している。しかし、当該モデルは現実の軌道状態を必ずしも忠実に反映してはいない。そこで、軌道のモデル化が推定結果に及ぼす影響について検討する。具体的には、まくらぎによる離散支持の影響、道床横抵抗力の非線形履歴特性の影響、道床横剛性の空間変動の影響などについて検討する。

また、レール温度は、気温と日射による輻射熱に支配される。これらは昼夜で変化するため、その影響を考慮したレール軸力の変動履歴下での推定の可能性についても検討する。そのために、気象データと太陽高度の変化に基づき、レール温度の変動をシミュレートする。その結果を精巧な数値軌道モデルに反映させて擬似測定データを作成する。

(3) 本推定に適した通り変位解の導出

3.(1)における定式化では、通り変位データのスペクトル比より未知量を推定するため、測定時のノイズの影響がスペクトル比の分母・分子に混入し、その分離ができず、合理的な目的関数の設定が困難であった。また、数値解析で用いられる有限要素方程式から推定式を定式化する場合、ノイズの分離が可能ではあるものの、レールの通り変位(たわみ)の記述のために、その一回微分であるたわみ角も変数として用いる必要がある。しかし、実際の測定ではたわみ角は求められてはおらず、通り変位の表現が測定データと整合していない。そこで、通り変位のみをパラメータとした軌道力学問題の解の表現方法について検討する。具体的には、通り変位を離散正弦変換により展開する。この場合、有限要素法と同様に測定ノイズを分離可能である上に、たわみ角を用いる必要がないので、測定データとの不整合も無い。さらに、通り変位を記述する方程式の離散正弦変換では、測定データの展開係数に対し、理論解とノイズの離散正弦変換とに分離した表現形式が保存される。当該関係式より測定誤差に関する目的関数を構成することで、標準的な推定法の適用が可能となる。本定式化を用いて推定を試み、今後の課題について整理する。

4. 研究成果

(1) 軌道力学状態推定法の基礎理論構築とその妥当性の検証

左右レールは締結装置を介してまくらぎに接合されている．したがって，左右いずれか一方のレール作用力がわかっていても道床横抵抗力を与えず，それらの合力を評価する必要がある．そのため，左右レール・まくらぎ連成系のつり合い状態について考える．

まず，レール軸力 N における，左右レールの水平たわみに関するつり合い式を求め，さらにまくらぎのつり合い式よりまくらぎ横変位を消去する．同様の式を軸力が $N+\Delta N$ である場合にも求め，それらの差分を求める．次に，軌道長手方向に Fourier 変換すると，多少の式変形の後に次式を得る．

$$k^2 \frac{\hat{w}_{LR} + \hat{w}_{LR0}}{\Delta \hat{w}_{LR}} := f(k) = ak^4 - bk^2 + c \quad (1)$$

w_{LR} は左右レールの通り変位の和， w_{LR0} は初期通り変位和， w_{LR} は 2 つの軸力 N と $N+\Delta N$ における通り変位の差， $(\hat{\cdot})$ はレール長手方向に関する Fourier 変換， k は波数である．また，右辺の 4 次関数の係数 a, b, c ，と軸力 $N+\Delta N$ ，道床横剛性ととの関係は次式で与えられる．

$$N + \Delta N = EI \frac{b}{a}, \quad \tilde{k}_T = \Delta N c \quad (2)$$

ここで， EI はレール弱軸回りの曲げ剛性である．

以上に述べた測定原理の正当性を検証するために，軌道モデルによる数値実験を実施した．軌道は弾性連続支持された Euler ばりとしてモデル化する．これをはり要素で離散化し，初期通り変位とレール軸力を設定して変形解析を行う．

50kgN レールを対象に，数値モデルの軌道長を 200m とし，0.25m のはり要素で離散化した．通り変位は 0.25m 間隔で測定するものとし，はり要素各節点におけるたわみより擬似測定データを作成した．また，左右レールから構成される軌道系を考えた場合の軌道横剛性 k_T は 2MN/m^2 と設定した．

たわみ解の Fourier 変換より式(1)左辺を求めた一例を図 1 に示す．なお，図には式(1)右辺の理論曲線を実線で示した．数値実験結果には長波長成分に乱れが認められるが，これは有限長で軌道をモデル化したためと考えられる．スペクトル比には多少の変動が認められるものの，概ね理論どおり式(1)の 4 次曲線が得られている．

次に，式(2)より軸力を推定した結果を図 2 に示す．なお，10m 弦正矢データの場合，波数が $k = 1.26(1/\text{m})$ で感度がゼロとなる．このことを念頭に，ここではそれ以下の波数域データを用いている．図より，いずれの軸力においても，前述の理論によって極めて高い精度で軸力推定がなされており，当該理論の正当性が確認できる．

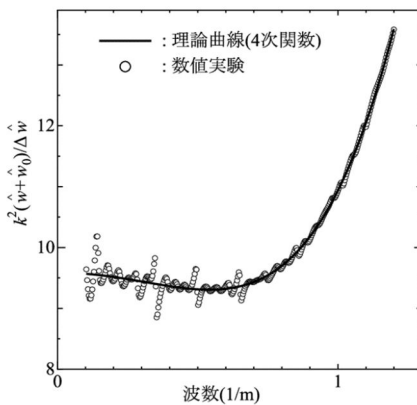


図 1 数値実験結果(ノイズ無し)

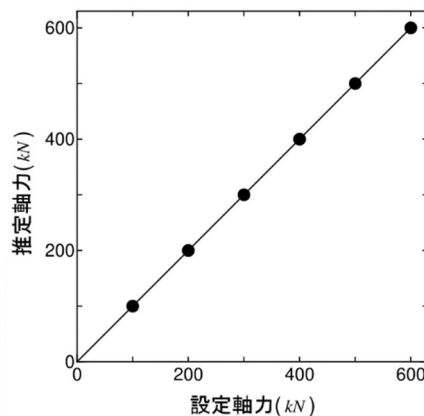


図 2 軸力推定結果(ノイズ無し)

次に，擬似測定データに標準偏差 0.5mm のガウスノイズを加え，粒子フィルタによる推定を試みた．初期通り変位の標準偏差を最大 5cm まで変化させた結果を図 3，図 4 に示す．図 3 の軸力については，初期通り変位振幅の大小によらず，同程度の推定精度が得られている．ただし，2 回の測定時における軸力 N_1 ， N_2 共に，正解値よりも 100kN 程度大きめの値を示しており，絶対軸力の推定にはさらなる工夫が必要である．一方，相対軸力 N_2-N_1 については，正解の 100kN に近い値が推定できており，相対軸力に関しては通り変位データから推定可能であることがわかる．道床横剛性の推定については，最大で 50% 程度の推定誤差となつてはいるものの，バラスト道床のバラツキを考慮すると要求精度の範囲内であると言える．

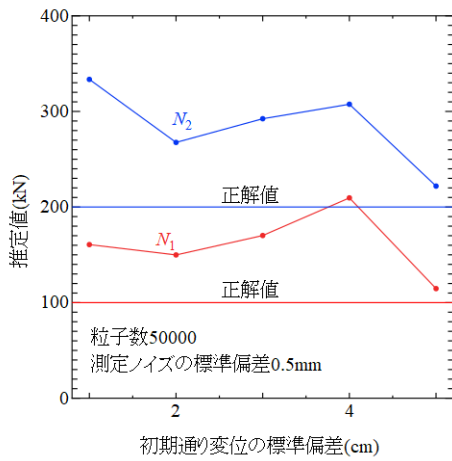


図3 軸力の推定結果

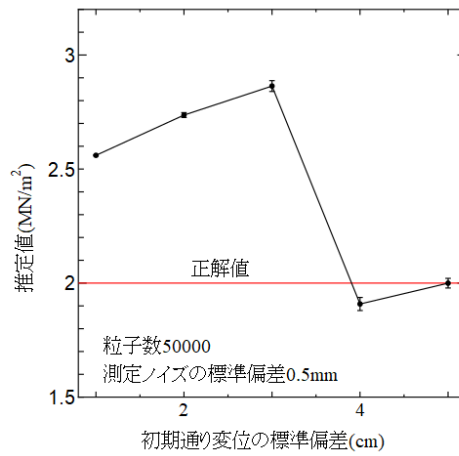


図4 道床横剛性の推定結果

(2)実軌道における力学特性が推定精度に及ぼす影響の検討

ロングレール軌道を有限長モデルで近似する．軌道中央区間において，左右打ち切り端からの影響が十分小さくなるように，軌道長を120mに設定した．理論モデルにおいてレールの横たわみはEulerばり近似を用いているが，この場合せん断たわみが無視されることとなる．その影響を確認するため，数値モデルではレールを要素長0.3mのTimoshenkoはり要素により離散化し，その両端を固定点で与えた．軌道通り変位は左右レールのそれを合算したもののつり合い式で記述できるので，ここでは左右レールの通り変位和 w_{LR} を変数として，離散化を行う．軌道の初期通り変位は，所定の距離相関を有し，期待値ゼロ，標準偏差 σ の Gauss 分布により設定する．レールはまくらぎで離散支持されているものとし，その間隔を0.6mとした．一般にレール・まくらぎ間の締結剛性は道床横剛性に比べ高いため，締結部は剛結されているものとした．まくらぎ拘束部に作用する道床横抵抗力は，まくらぎ位置に設定した非線形バネにより表現した．なお，その非線形特性については図5の様に与えた．また，実際の軌道の道床横剛性にはばらつきが存在すると考えられる．そこで，軌道モデルの道床横剛性に空間変動を考慮する場合は，図5の最終道床横抵抗力 f_0 を一定振幅・一定波長の sin 波形により設定した．

以下の検討では，50kgNレールを想定し，初期通り変位の標準偏差は1cm，相関長は1mとした．最終道床横抵抗力は $f_0=1.2\text{kN}$ ， $a=1\text{mm}$ とした．この値は，分布バネの単位長さ当り道床横剛性 k_T に換算すると， 2MN/m^2 に相当する．また，検測装置による通り変位測定時のノイズは，標準偏差0.5mm[2]のガウスノイズとして設定した．なお，波数 $k \leq 1$ (1/m)の範囲ではスペクトル比がノイズに鋭敏なため，推定には $1 \leq k \leq 2$ (1/m)の波数範囲を用いるものとする．また，以下の解析において，軸力は $N_1=100\text{kN}$ ， $N_2=200\text{kN}$ に設定した．

式(1)のスペクトル比で比較する限り，レールのモデル化や離散支持の影響は無視し得ることがわかった．また，最終道床横抵抗力の空間変動を様々な波長に設定したが，それがスペクトル比に及ぼす影響は認められなかった．唯一影響が認められたのが図6に示す道床横抵抗力の非線形性である．図より，数値モデルより得た擬似測定データのスペクトル比は，式(1)右辺で与えられる4次曲線(図中の赤線)に比べ全体に小さいことが分かる．ちなみに，道床横剛性は式(1)右辺の定数項(曲線の切片)に比例する．そのため，レール軸力に起因する弾性たわみの増加に伴い，道床横抵抗力の接線剛性は次第に低下し，それに連動して曲線の切片が低下したものと考えられる．なお，図6には理論4次曲線を，カーブフィッティングにより下方へ平行移動させたものも示した．当該曲線と擬似測定データのスペクトル比とは良好な一致が認められており，道床横抵抗力の非線形性はスペクトル比における2次と4次の項には影響しないことが分かる．このことより，道床横剛性は低めに評価されるものの，軸力推定は当該の非線形性の影響を受けないものと考えられる．

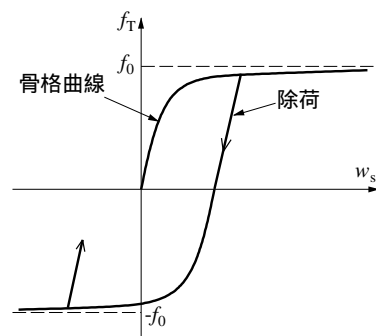


図5 道床横抵抗力のモデル化

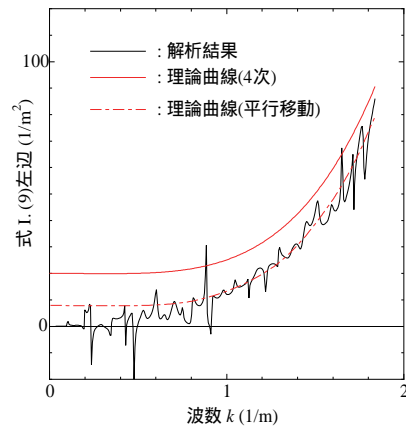


図6 スペクトル比の比較

次に、昼夜のレール温度変化に伴う軸力の変動履歴を考慮した解析により通り変位の擬似測定データを作成して、レール軸力が大きくなる夏季を対象に推定を行った。特に日中での推定を想定し、2回目の測定時刻をレール温度が高くなる13時に設定した。なお、レール設定は8月1日午前1時とし、測定日を8月15日とした。また、日射によるレール温度の変化は、文献[2]の解析手法に基づき求め、検測結果よりランダムな通り変位波形を設定した。測定日までのレール温度変化による、軌道上のある点における通り変位変動履歴を図7に示す。レール設定から10日程で変位の増加が収束し、定常状態に至っている。

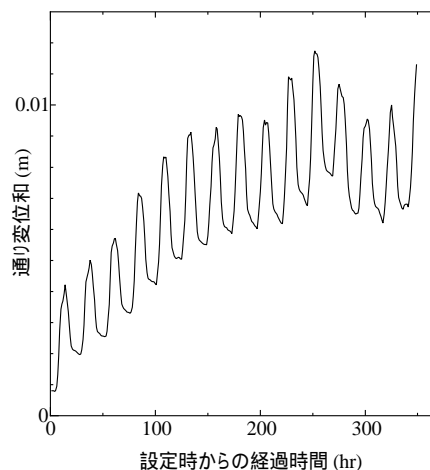


図7 レール通り変位和の変動履歴

1回目の測定時刻を10時とした場合の推定結果を表1に示す。2つの軸力の内、相対的に低い値を有する N_1 については比較的大きな推定誤差が得られたが、本ケースの場合、2回目の測定時における軸力 N_2 について概ね良好な推定結果を与えている。

なお、他の様々なケースでの検討を行った結果、レール軸力が大きくなる N_2 の推定でも、比較的大きな誤差を生ずる例も認められた。ただし、相対軸力の評価に関しては、いずれのケースでも概ね良好な精度が確保されていた。

表1 軸力推定結果

	N_1	N_2
日時	8月15日10時	8月15日13時
正解軸力(N)	302722	378073
推定軸力(N)	162316	358886
推定誤差(N)	-140406	-19187

(3) 本推定に適した通り変位解の導出

レールたわみ(軌道通り変位)を離散正弦変換により定式化して、軸力作用下の通り変位と初期通り変位との関係式を導出した。当該式は、各離散波数における、両通り変位成分間の比例関係式を与え、その係数は軸力と道床横剛性の陽な関数で与えられる。したがって、通り変位波形の測定データの離散正弦変換は、初期通り変位波形と、測定ノイズの変換成分の二項に分離表現できる。

未知量は、軸力と道床横剛性、および初期通り変位波形の変換成分となる。これらの推定を二段階に分けて実施した。まず、2つの軸力と道床横剛性のある値に設定する。その下で、2回の測定データの変換成分から初期通り変位成分を推定する。これより得られる通り変位の変換成分の理論値と測定データとの差の二乗を、全離散波数成分について総和をとり、それを指数変換したものを評価値とする。この操作を、軸力と道床横剛性を順次変化させて行い、評価値に基づき未知量を推定する。

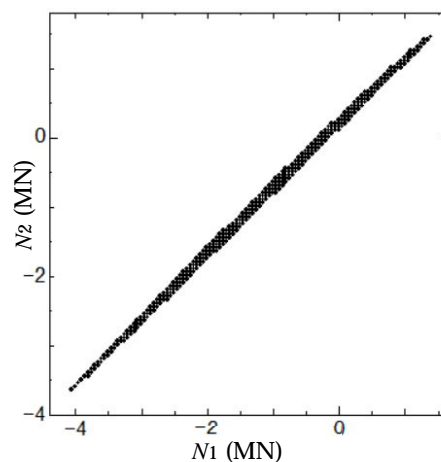


図8 評価値の分布

図8は高評価値の分布を示したものである。なお、道床横剛性が正解値を与える軸力平面を図示した。正解の軸力は $N_1=100\text{kN}$ 、 $N_2=200\text{kN}$ である。評価値の高い領域が直線上に分布している。当該領域の評価値に関する軸力の重み平均は $N_1=1100\text{kN}$ 、 $N_2=1200\text{kN}$ となり、正解値から大きく離れているものの、相対軸力は高い精度で推定できている。なお、レール剛性の高い60kgレールの推定精度は相対的に低くなる傾向が認められた。

(4) 今後の課題

営業列車による軌道通り変位の常時測定を活用した軌道力学状態の推定が、原理的には可能であることを確認した。測定ノイズの影響を考慮しても、線区全域にわたるレールの相対軸力推定は可能性と考えられる。ただし、絶対軸力推定にはさらなる工夫が必要である。

<引用文献>

[1] 坪川 他, 鉄道総研報告, Vol.26(2), 7-12, 2012.

[2] 阿部 他, 鉄道力学シンポジウム論文集, No.16, 101-108, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 阿部和久, 千葉 颯兵, 佐藤拓郎, 小松佳弘, 紅露 一寛	4. 巻 22
2. 論文標題 通り変位測定データを用いた軌道力学状態推定に関する基礎的検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鉄道工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 107 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤拓郎, 阿部和久, 清水彰久, 紅露一寛	4. 巻 23
2. 論文標題 軌道状態が通り変位軸力測定法の推定精度に及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鉄道工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 253 ~ 260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐藤拓郎, 阿部和久, 小松佳弘, 紅露一寛
2. 発表標題 軌道状態が通り変位軸力測定法に及ぼす影響
3. 学会等名 平成30年度土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤拓郎, 阿部和久, 紅露一寛, 小松佳弘
2. 発表標題 軌道条件が通り変位軸力測定法に及ぼす影響
3. 学会等名 第36回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤拓郎, 阿部和久, 小松佳弘, 紅露一寛
2. 発表標題 軌道状態が通り変位データに基づく推定軸力に及ぼす影響
3. 学会等名 第25回鉄道技術連合シンポジウムJ-Rail2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuhisa Abe, Sohei Chiba, Yoshihiro Komatsu and Kazuhiro Koro
2. 発表標題 A theoretical study on a rail stress monitoring method using rail lateral displacement observed by commercial trains
3. 学会等名 Railways2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千葉 颯兵, 阿部 和久, 小松 佳弘, 紅露 一寛
2. 発表標題 営業車両による通り変位測定データに基づく軌道力学状態の推定
3. 学会等名 平成29年度土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 千葉 颯兵, 阿部 和久, 小松 佳弘, 紅露 一寛
2. 発表標題 営業車両による通り変位測定データに基づく軌道軸力推定法の検討
3. 学会等名 第35回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 千葉 颯兵, 阿部 和久, 小松 佳弘, 紅露 一寛
2. 発表標題 通り変位測定データに基づくレール軸力測定法に関する理論的検討
3. 学会等名 第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-Rail2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤拓郎, 阿部和久, 清水彰久, 紅露一寛
2. 発表標題 レール温度履歴が通り変位軸力推定法に及ぼす影響
3. 学会等名 第37回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝林裕太, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 通り変位軸力推定法の精度改善を目的とした離散正弦変換軌道モデルの有効性
3. 学会等名 第37回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤拓郎, 阿部和久, 清水彰久, 紅露一寛
2. 発表標題 レール温度履歴が通り変位軸力推定法の精度に及ぼす影響
3. 学会等名 第26回鉄道技術連合シンポジウムJ-Rail2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhisa Abe, Takuro Sato, kihisa Shimizu, Kazuhiro Koro
2. 発表標題 A monitoring method for mechanical condition of track using rail lateral displacement data obtained with commercial trains
3. 学会等名 WCRR2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	清水 彰久 (Shimizu Akihisa)		
研究協力者	小松 佳弘 (Komatsu Yoshihiro)		
研究協力者	千葉 颯兵 (Chiba Sohei)		
研究協力者	佐藤 拓郎 (Sato Takuro)		
研究協力者	滝林 裕太 (Takibayashi Yuta)		