

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04661

研究課題名(和文) 鉄道軌道構造における不確実性を考慮したロングレール座屈温度の確率論的評価

研究課題名(英文) Probabilistic analysis of buckling of continuous welded rail considering stochasticity in track

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：継目の無いロングレール軌道の座屈温度を支配する初期通り変位波形と道床横抵抗力とを不確実性を有する確率変数として捉え、座屈温度の確率分布を求め、座屈確率に基づいた軌道管理法について検討した。

その結果、初期通り変位の分散や、座屈モードより長波長の道床横抵抗力空間変動成分が軌道の飛び移り座屈温度の確率特性に大きく影響することがわかった。また、通常用いられている10m弦正矢に基づいた通り変位補修が座屈強度の改善に有効であることを確率論的に明らかにした。さらに、5m弦正矢データから復元した初期通り変位波形を用いた座屈解析が、軌道座屈予測の実現に有効であることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

継目の無いロングレール軌道では適切な座屈管理が重要となる。軌道座屈強度はレールの横方向初期たわみ(通り変位)と横方向拘束力(道床横抵抗力)とに大きく依存するが、それらはバラツキを有しているため、座屈強度の確定論的評価ができない。現行では、座屈が確実に発生し得ないレベルのレール温度に基づいた管理がなされているが、過度な安全性が求められている懸念がある。

本研究では、上述の不確実性を考慮して軌道座屈強度を確率論的に評価した。また、軌道状態に関する情報量の多寡に応じた管理手法についても検討した。これらの成果をとおり、より合理的な座屈管理手法の可能性を示唆することができた。

研究成果の概要(英文)：Probabilistic analysis of continuous welded rail track buckling is achieved.

For this purpose, the Monte Carlo simulation (MCS) is performed, in which the initial lateral misalignment and track lateral resistance are generated as stationary random process. It was found that the buckling probability is sensitive to statistical parameters such as the standard deviations of the misalignment and the lateral resistance. Influence of the track lateral realignment on the buckling strength is also discussed. Through MCS, it was found that the realignment based on the 10m-chord versine criterion can be an effective remedy for the reduction of track buckling probability. Moreover, possibility of buckling prediction based on measurement data which is obtained for the lateral alignment is discussed. It was found that the buckling analysis with alignment estimated from 5m-chord versine data enables the buckling prediction with good accuracy.

研究分野：応用力学

キーワード：軌道座屈管理 座屈確率 初期通り変位 道床横抵抗力 ランダム波形

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉄道軌道において、継ぎ目を持たないロングレールは列車・軌道系の振動・騒音低減に有効であることなどから、在来線においてもその導入が進められてきた。しかし、長い区間にわたりまくらぎを介してレールが拘束されることで、夏季の日中など高温時にはレールに著大な圧縮軸力が発生し得る。特にバラスト軌道では、水平横方向変位(通り変位)に対する拘束力(道床横抵抗力)が比較的小さい場合、レールの温度上昇が座屈を惹き起こす危険性がある。

軌道座屈強度は、レール軸力がゼロとなる時のレール温度(中立温度)や、道床横抵抗力、およびレールの初期不整(初期通り変位)などに大きく依存する。そのため、ロングレール軌道においては、これらの適切な管理が重要となる。一般に、軌道横変位と中立温度からの相対温度(レール温度)との関係は図1に示す様なつり合い経路で与えられる。実際の軌道座屈強度は、図1のA点における飛び移り座屈時の温度で与えられる。レール温度が当該値に達すると、力学状態は安定なつり合い解を与えるC点へと遷移し、その結果として瞬時に大きな変位が発生する。この座屈温度は、初期通り変位振幅の増加と共に急激に低下する「初期不整鋭敏性」を有する。そのため、ランダムな波形で特徴づけられる通常の初期通り変位存在下で、軌道の座屈温度を確定論的に評価することは現実的でない。

我国における座屈管理は図1のB点(最低座屈強さ)に基づき行われてきている。最低座屈強さは、飛び移り座屈後のつり合い経路が取り得る最低温度を与える。この値は、A点の飛び移り座屈温度とは異なり、通り変位の影響をほとんど受けない。したがって、実際に発生するレール温度が当該値を上回らない様に軌道の座屈強度を確保することで、軌道座屈を確実に防ぐことができる。

しかし、日最高気温が上昇傾向にある近年では、最低座屈強さに基づいた軌道管理が困難になりつつある。そのため、最低座屈強さから実際に大きな変位が発生する飛び移り座屈までの温度差(座屈余裕度)を考慮した管理基準の緩和が合理的に思われる。

2. 研究の目的

前述のとおり、軌道の通り変位はランダムな波形を持つため、初期不整に鋭敏な飛び移り座屈温度の確定論的な評価は適切ではない。従って、従来採用されてきた所定の通り変位波形の設定下で求めた飛び移り座屈温度に基づく座屈余裕度の議論のみでは十分ではないと考えられる。

本研究では、軌道の座屈温度(強度)を支配する初期通り変位波形と道床横抵抗力とを、不確実性を有する確率変数として捉え、それらのバラツキを考慮した座屈温度の確率分布を求め、座屈確率に基づいた合理的管理法の構築に向けた検討を行うことを目的とする。また、軌道状態に関する情報量の多寡に応じた管理手法についても検討する。

3. 研究の方法

本研究では、所定のパワースペクトル密度(PSD)に従うランダム波形として初期通り変位波形を生成し、これらに対して軌道座屈解析を行う。その下で、モンテカルロシミュレーション(MCS)を実施し、座屈強度の確率特性を評価する。

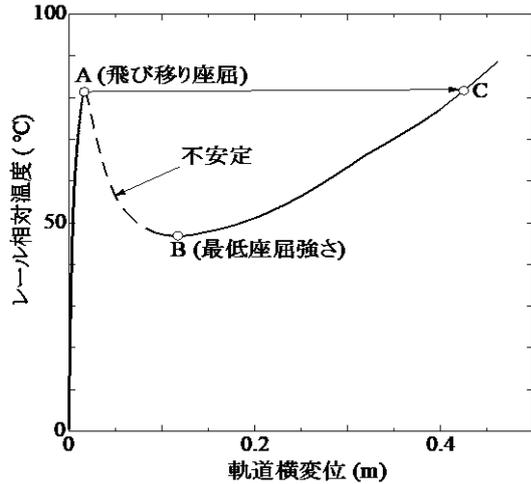


図1 軌道座屈のつり合い経路

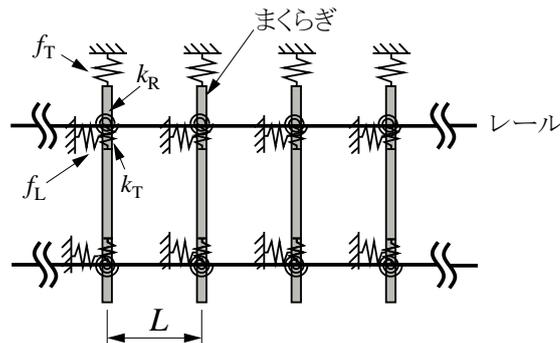


図2 軌道のモデル化

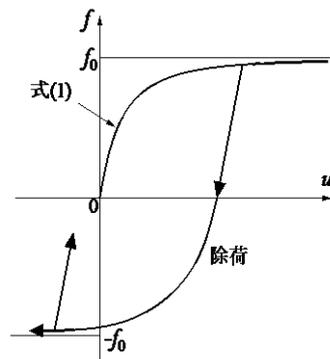


図3 道床横・縦抵抗力の載・除荷曲線

(1) 軌道のモデル化

左右レールとまくらぎから構成される軌きょうを図2のようにモデル化する。レールは、横方向たわみと長手方向の伸縮を考慮した Euler ばりにより表現する。まくらぎは等間隔 L で配置し、横方向と軌道長手方向変位を考慮した剛な棒により与える。レール締結部には、回転バネ k_R と横方向バネ k_T を設定する。また、まくらぎに作用する道床横抵抗力 f_T と縦抵抗力 f_L は最終道床横・縦抵抗力 f_{OT}, f_{OL} に漸近する図3 の様な骨格曲線を与える。

(2) 初期通り原波形の設定

過去に取得された通り変位の 10m 弦正矢データから距離相関を直接評価すると、原波形の距離に関する自己相関関数(距離相関) $R(x)$ は概ね次式で近似することができる。

$$R(x) = \sigma^2 e^{-\left(\frac{x}{d}\right)^2} \quad (1)$$

ここで、 σ と d は通り変位波形の標準偏差と相関長(相関性が存在する距離の代表値)である。なお、ある区間において得られた既存の検測データに関しては、標準偏差と相関長がそれぞれ 1cm 以下、および 1.7m 程度と推定された。

一方、同一データでも、10m 弦正矢測定データの PSD から原波形の PSD を求め、その逆 Fourier 変換より概ね 2(1/m)以下の波数域特性を反映した初期通り変位原波形の距離相関を求めると、それは次式で近似できた。

$$R(x) = \frac{\sigma^2}{1 + (x/d)^2} \quad (2)$$

なお、式(3)による場合の相関長は $d = 2.84\text{m}$ と推定された。

式(1)または(2)に従うランダム波形を K-L 展開により多数生成し、各々の波形の下で軌道座屈解析を行い飛び移り座屈温度を求める、MCS を実施する。

4. 研究成果

(1) 解析条件

座屈解析に当り、50kgN レールで構成される軌道を想定し、水平面内(弱軸回り)曲げ剛性を $663 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 、伸び剛性を 1.32 GN と設定した。また、線膨張係数は $12 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ とした。まくらぎ間隔は 0.6 m とし、軌道長 720 m (まくらぎ 1200 本)をモデル化して、まくらぎ支持区間のレールをはり要素で 2 分割する様にして離散化を行った。その際に、軌道両端は固定せず、温度伸縮や座屈過程での軌道変位を許容する様にした。最終道床横抵抗力(まくらぎ 1 本分)は 5.5 kN を基準とした。

MCS において、座屈確率が 0.1%程度であればサンプル数を 1000 とした場合と 5000 とした場合との差異が比較的小さかったことから、以下の MCS でのサンプル数は 1000 を基準とした。

(2) 初期通り変位波形の標準偏差が座屈確率特性に及ぼす影響

初期通り変位波形の標準偏差 σ を 3~8 mm まで 1 mm 間隔で設定して MCS を実施した。飛び移り座屈温度の確率密度関数を図4に示す。図4より、飛び移り座屈温度の最頻値は、初期通り変位波形の標準偏差の増加と共に低下しており、その度合いは標準偏差の値が小さい程顕著であり、座屈温度の初期不整鋭敏性が最頻値にも現れている。また、確率密度関数の広がり(分散)については、最頻値とは逆に標準偏差の増加と共に減少しており、確率密度関数の分布範囲が次第に狭まる傾向が確認できる。なお、飛び移り座屈温度の凡その下限値は約 40°C と推定される。

次に、飛び移り座屈温度と最低座屈温度の確率分布関数を図5に示す。この図には、初期通り変位波形の標準偏差が 3, 4, 5, および 8 mm の 4 ケースを示した。飛び移り座屈温度の確率分布関数には、確率密度関数と同様に標準偏差の影響が顕著に現れている。例えば座屈確率 $P(t) = 0.1\%$ で比較すると、 $\sigma = 3 \text{ mm}$ と 4 mm とではレール温度に 6°C 程度の違いが認められ、初期通り変位波形の標準偏差のわずか 1 mm の違いが座屈確率に大きく影響することがわかる。一方、最低座屈温度の確率分布関数に標準偏差が及ぼす影響は、飛び移り座屈温度に比べ非常に小さい。

以上より、飛び移り座屈と最低座屈との温度差で与えられる座屈余裕度においては、標準偏差が飛び移り座屈温度に及ぼす影響が支配的となることが確認できた。ちなみに座屈強度確率 0.1%で見ると、 $\sigma = 3 \text{ mm}$ での座屈余裕度が 12°C 以上であるのに対し、 $\sigma = 8 \text{ mm}$ では 1°C 以下

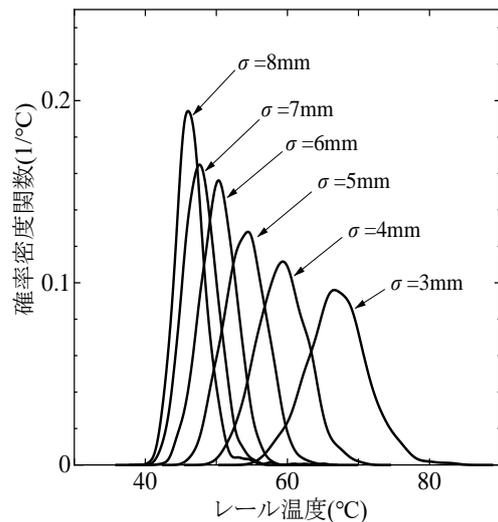


図4 通り変位の標準偏差が飛び移り座屈温度の確率密度関数に及ぼす影響 ($d=1.7\text{m}$)

となっている。

(3) 最終道床横抵抗力の空間変動が座屈確率特性に及ぼす影響

最終道床横抵抗力に次式で示す空間変動を与え、その下で初期通り変位波形をランダムに設定してMCSを実施した。

$$f_{0Ti} = \bar{f}_{0T} \left\{ 1 + 0.5 \sin \left(\frac{2\pi Li}{\lambda} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 f_{0Ti} は軌道モデル左端から i 番目のまくらぎにおける最終道床横抵抗力、 \bar{f}_{0T} はそれらの平均値、 λ は空間変動波長である。なお、 $\bar{f}_{0T}=5.5$ kN/本とした。また、実軌道における変動振幅はせいぜい $0.3\bar{f}_{0T}$ 程度と推定されるが、ここでは空間変動の影響を確認する目的で $0.5\bar{f}_{0T}$ と大き目に設定した。

初期通り変位波形の標準偏差と相関長をそれぞれ 5 mm、1.7 m とし、式(3)の変動波長を 2 ~ 20 m までの範囲で設定して得られた飛び移り座屈温度の確率密度関数を 図 6 に示す。 λ の増加と共に確率密度関数の分布域が低温度側へ移動する様子が確認できる。ただし、 $\lambda=2$ m の結果は最終道床横抵抗力一定のものと同様一致しており、変動の影響は認められず、 $\lambda=4$ m において急激に変化している。また、 $\lambda=4 \sim 10$ m の範囲における変化は、 $\lambda=2$ m と 4 m の両ケース間の変化に比べやや小さく、それ以上の波長域においても緩慢である。本軌道モデルにおける分岐座屈時の理論座屈波長は 3.9 m であり、 $\lambda=4$ m に近い。軌道座屈過程では、この理論波長を起点として、たわみの増大と共により長波長の変位波形成分が成長する傾向が認められる。よって、 $\lambda=4$ m 以下の波長成分は飛び移り座屈には影響を与えなかったものと考えられる。一方、座屈たわみが集中して発生する箇所の間隔長に比べより長い変動波長成分は、座屈区間全域の最終道床横抵抗力をほぼ一様に低下させる効果を持つため、それ以上変動波長を長くしても確率密度関数への影響は小さく、分布域は一定領域に漸近していくものと推測される。

(4) 10m 弦正矢に基づく軌道通り変位補修が座屈確率に及ぼす影響

軌道の通り変位の管理は、それ自体の幾何形状(原波形)ではなく、一般に 10m 弦正矢と呼ばれる値に基づいてなされる。なお、10m 弦正矢は、図 7 に示す様に、着目点 x_i における通り変位原波形値 $w(x_i)$ と、そこから前後 5m 離れた 2 地点における通り変位原波形 $w(x_i - 5)$ 、 $w(x_i + 5)$ とを結ぶ直線上(弦)の midpoint x_i における値との差 y_i で与えられる。軌道保守過程で 10m 弦正矢に基づき通り変位補修が行われた場合、それが許容値以下に修正されることで、結果的に座屈確率も改善されるものと考えられる。そこで、初期通り変位原波形に 10m 弦正矢の許容値に基づいた補正を加え、それが軌道座屈確率に及ぼす影響について調べる。なお、数値解析において、各節点における 10m 弦正矢値が許容値以下となる様な通り変位原波形の補正量を求めるための一連の操作を実施するために、それを最適化問題として定式化し直し、新たな補修法を構成した。

初期通り変位原波形の標準偏差 $\sigma=4$ mm、10m 弦正矢の許容値 $y_{max}=4$ mm のケースを対象に、通り変位原波形補修前後における座屈強度(温度)の確率分布関数を求めた結果を図 8 に示す。この図には飛び移り座屈強度(実線)と最低座屈強度(破線)の確率分布関数を示した。図 8 より、通り変位原波形の補修により、飛び移り座屈強度が大幅に向上する様子が確認できる。例えば、座

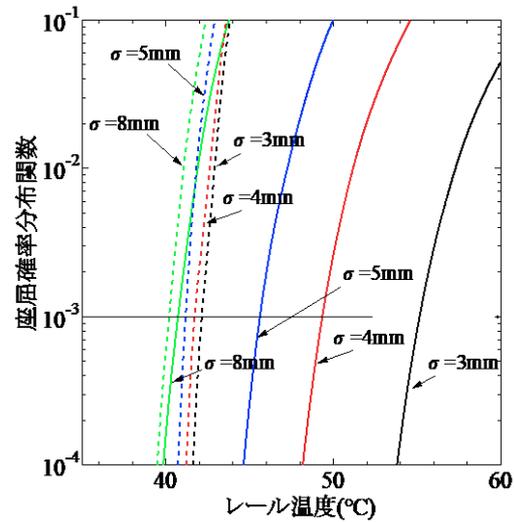


図 5 通り変位の標準偏差が飛び移り座屈温度と最低座屈温度の確率分布関数に及ぼす影響(実線：飛び移り座屈、破線：最低座屈、 $d=1.7$ m)

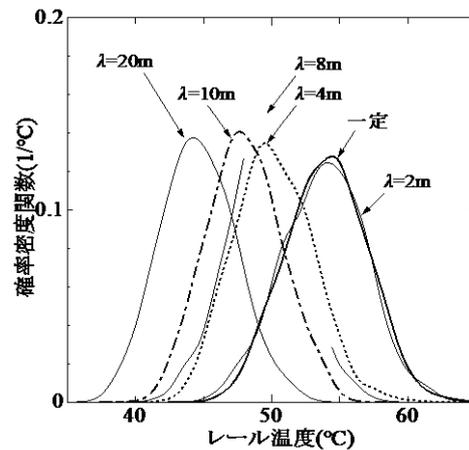


図 6 最終道床横抵抗力の変動波長が飛び移り座屈温度の確率密度関数に及ぼす影響($\sigma=5$ mm, $d=1.7$ m)

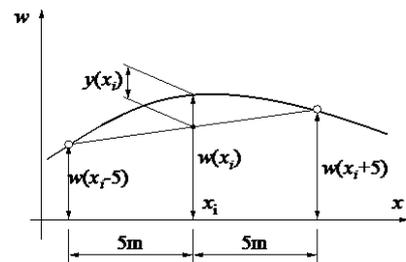


図 7 通り変位原波形と 10m 弦正矢

屈強度確率 0.1%で比較すると、通り変位原波形補修により座屈温度は 59℃から 67℃にまで上昇しており、10m 弦正矢の許容値に基づく波形補正が座屈強度向上に有効に作用することがわかる。一方、最低座屈強さの場合、飛び移り座屈強度とは異なり、通り変位原波形補修の前後において 1℃程度しか変化していない。その結果、最低座屈強さと飛び移り座屈強度との差で与えられる座屈余裕度は、通り変位原波形補修によって 17℃から 24℃にまで増加しており、最低座屈強さに基づいた管理基準値のより大幅な緩和が期待できる。

(5) 弦データより復元した通り変位原波形に基づく軌道座屈予測

軌道の初期通り変位の弦正矢データが高精度・高密度に測定された場合を想定し、それより復元した原波形を用いた数値解析に基づく座屈予測の可能性について検討した。なお、本来は道床横抵抗力も不確定量となるが、最初の試みとして当該の値は既知量として一様に与えた。また、座屈解析を行う関係上、解析領域の全節点データに対して 10m 弦正矢を求め、それより原波形の全節点値を復元する必要がある。そこで、離散正弦変換を介した原波形推定法を新たに構成した。

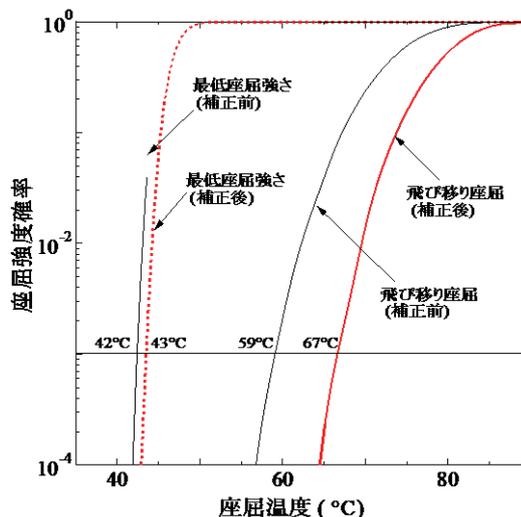


図 8 軌道の座屈強度確率($\sigma = 4\text{mm}$)

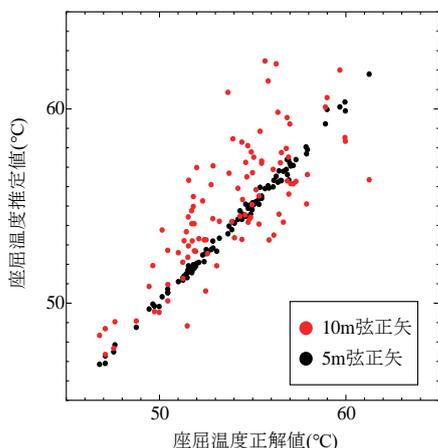


図 9 原波形とその復元波形より求めた座屈温度の比較

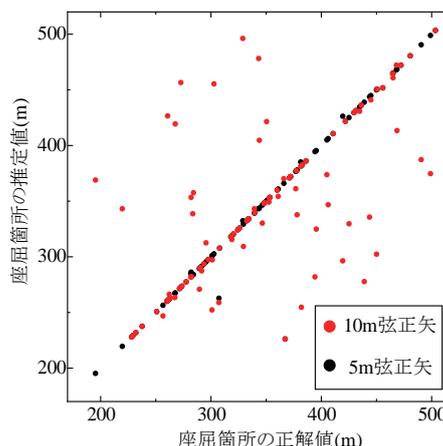


図 10 原波形とその復元波形より求めた座屈箇所の比較

初期通り変位原波形の設定値を 100 ケースランダムに生成し、それとその復元波形とに基づき座屈解析を実施した。初期通り変位原波形の標準偏差を 5 mm に設定した場合に対して、正解と復元波形とから得られた飛び移り座屈温度を比較した結果を図 9 に示す。また、両波形を用いた座屈解析において、レールの弾性たわみの絶対値が最初に 5 cm に達した箇所を座屈箇所と見なし、それを比較した結果を図 10 に示す。5m 弦正矢データより復元した原波形に基づいた座屈解析では、座屈温度・座屈箇所共にほぼ正しい結果が得られており、10m 弦正矢データに基づいたものに比べ格段に再現精度が向上しており、約 2.5 1/m 以下の波数成分が復元可能な 5m 弦正矢通り変位測定データが座屈予測に適することがわかった。なお、道床横抵抗力の不確実性を考慮すると、通り変位波形が再現できた場合の座屈の事後確率は多少変化するものの、不確実性の低減効果は限定的であった。

(6) 今後の課題

軌道の座屈発生確率の評価には、座屈強度の確率特性に加え、レール相対温度の確率特性の把握も必要であり、中立温度の空間分布特性を含め、そのための検討が今後の課題である。

<引用文献>

- [1] 岩井 翔, 阿部和久, 紅露一寛, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.25, 69-76, 2021.
- [2] 阿部和久, 新井優介, 紅露一寛, 計算数理工学論文集, Vol.21, pp. 45-50, 2021.
- [3] 中田健太, 阿部和久, 紅露一寛, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.26, 89-96, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 岩井 翔, 阿部和久, 紅露一寛	4. 巻 25
2. 論文標題 通り変位と道床横抵抗力のバラツキを考慮した軌道座屈余裕度の確率的評価	5. 発行年 2021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 69 ~ 76
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 阿部和久, 新井優介, 紅露一寛	4. 巻 21
2. 論文標題 軌道通り変位補正が座屈確率に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 45 ~ 50
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 阿部和久, 水野雄太, 紅露一寛	4. 巻 24
2. 論文標題 通り変位波形におけるバラツキが軌道座屈強度の確率特性に及ぼす影響	5. 発行年 2020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 167 ~ 174
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 中田健太, 阿部和久, 紅露一寛	4. 巻 26
2. 論文標題 復元通り変位原波形に基づく軌道座屈予測に関する基礎的検討	5. 発行年 2022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 89 ~ 96
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13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 岩井 翔, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 軌道の通り変位と道床横抵抗力のランダム性が座屈余裕度を与える影響
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井 翔, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 軌道の通り変位と道床横抵抗力のパラツキが座屈余裕度の確率特性を与える影響
3. 学会等名 J-Rail2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井 翔, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 軌道における初期通り変位と道床横抵抗力のパラツキが及ぼす座屈余裕度への影響
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川 慧, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 離散正弦変換を用いた通り変位の原波形復元法
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田 健太, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 復元通り変位原波形に基づく軌道座屈予測に関する研究
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新井 優介, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 10m 弦正矢への制約が軌道座屈温度の確率分布に及ぼす影響
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Abe, K., Arai, Y. and Koro, K.
2. 発表標題 Effect of rail lateral realignment on track buckling probability
3. 学会等名 STECH2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井 翔, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 ランダムな初期通り変位波形を持つ軌道の温度座屈確率の評価
3. 学会等名 第27回鉄道技術・政策連合シンポジウムJ-Rai I2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井 翔, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 軌道における初期通り変位のバラツキが及ぼす温度座屈確率への影響
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論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永谷航太, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 PC展開適用による軌道通り変位ランダムデータ生成法
3. 学会等名 第40回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川 慧, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 軌道座屈解析のための通り変位原波形復元に適した偏心矢法
3. 学会等名 第40回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中田健太, 阿部和久, 紅露一寛
2. 発表標題 初期通り変位波形の波数特性と軌道座屈温度の関係
3. 学会等名 第40回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Abe, K., Nakata, K. and Koro, K.
2. 発表標題 A study on prediction of track buckling using measured lateral alignment
3. 学会等名 Raylways 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>鉄道軌道構造における不確実性を考慮したロングレール座屈温度の確率論的評価 http://aplmec.eng.niigata-u.ac.jp/research/longrailbuckling/index.html</p>
--

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	中田 健太 (Nakata Kenta)		
研究協力者	中川 慧 (Nakagawa Kei)		
研究協力者	新井 優介 (Arai Yuusuke)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------