論文　複数項目の軌道変位データの同時分布に着目した木まくらぎ連続不良の検知手法

昆野　修平[1]・永原　裕一[2]

[1]正会員　公益財団法人鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: konno.shuhei.33@rtri.or.jp (Corresponding Author)

[2]明治大学教授　政治経済学部（〒101-8301 東京都千代田区神田駿河台 1-1）
E-mail: nagahara@meiji.ac.jp

木まくらぎ構造を有する線区では，木まくらぎの連続的な締結不良に起因する軌間内脱線が発生することがある．本研究では，軌間内脱線防止のためにより効果的な軌道保守管理方法を検討するべく，過去に軌間内脱線が発生した箇所において発生直近に軌道検測車で測定された軌道変位データを分析して，その統計的な特徴を調べた．そして，複数項目の軌道変位データの組み合わせにより木まくらぎ連続締結不良時に共通して見られる統計的な特徴を利用して，木まくらぎ連続締結不良が発生している箇所の検知手法を構築した．また，本検知手法を他路線の軌道検測データに適用し，異常と判断された箇所を現地確認することで，手法の妥当性を確認した．

Key Words: *gauge widening, derailment, timber sleeper, track irregularity, joint probability distribution*

1. はじめに

木まくらぎ構造を有する線区では，木まくらぎの劣化等に伴い，レール締結（以下，「締結」という．）の状態に不良が生じることがある．この締結状態の不良（以下，「締結不良」という．）が車両進行方向に連続して存在すると，車両通過時にレール小返り等によって軌間が拡大し，車輪が軌間内に落下する軌間内脱線が生じる可能性が高まる．軌間内脱線は近年においても度々発生しており，軌間内脱線を防止するために締結状態や動的な軌間変位を適正に保守管理することが重要である[注 1)]．

締結状態の管理は，線路巡視によってまくらぎ 1 本ごとに目視や打音の検査によって行うのが通常であり，これには多大な労力を要する．最近では，まくらぎの目視検査の効率化を目的として，列車前方画像を用いた木まくらぎ劣化度判定システムが開発されており[1)]，同システムによれば，走行する車両で得た画像データから外観上不良なまくらぎを判定することが可能である．しかし，このシステムはあくまで線路巡視におけるまくらぎの検査事項のうち目視検査の判断を代替するのを目的としたものであり，外観上良好な状態にある木まくらぎにおける犬くぎの抜け上がりや締結装置の緩み等の連続的な締結不良を走行する車両から検知する方法は確立されていない．

そこで本研究では，軌道検測車で測定される軌道変位データを活用して木まくらぎの連続締結不良に伴って軌間が拡大している箇所を検知する手法の構築を目指し，木まくらぎ構造を有する路線において軌道検測車で測定される動的な軌道変位データの統計的特徴を調べた．そして，複数項目の軌道変位データの同時分布において木まくらぎの連続締結不良時に共通して見られる統計的な特徴を利用して木まくらぎの連続締結不良を検知する手法を検討した[2,3)]．

2. 軌道変位データの基礎分析

動的な軌間拡大によって発生したと考えられる軌間内脱線において，事故発生直前の軌道変位データの特徴を把握するため，当該路線における軌道検測車による事故発生直近の測定データを用いた基礎分析を行った．ここでは，複数項目の軌道変位データの同時分布に着目して，データの全体的な特徴の把握や，脱線箇所のデータとそれ以外のデータを比較した．

(1) 使用データ

本分析では，過去に発生した軌間内脱線における事故発生直近の軌道検測車による測定データを用いた．また，

軌間拡大は定常横圧（輪軸が曲線を通過するときの転向力や，曲線での遠心力やカントにより生じる車輪・レール間の左右方向荷重の総和）[注2)]が生じる曲線で生じやすいと考えられることから，本分析では曲線（緩和曲線を含む）のデータを対象とした．

軌道変位データは，軌間の設計値からの拡大量を表す軌間変位のほか，連続締結不良に伴うレールの小返りや軌間外側への変位の影響があると考えられる通り変位を用いることとした．また，これら軌道変位データは，線路線形に起因する長波長の波形成分を除くため，通り変位に関しては，軌道の保守管理で一般に扱われる10m弦正矢の測定波形[注3)]から，波長6~20mで復元した復元波形を用い，軌間変位に関しては，波長20mのハイパスフィルタ（以下，「HPF」という．）処理をしたデータを用いた．また，軌道変位データは1m距離サンプリングのものを用いた．

さらに，本分析では，曲線（緩和曲線を含む）における外軌通り変位と内軌通り変位の差である通り変位内外差を用いることとした．**図-1**に示すように，レールとまくらぎ間の締結状態が良好な軌道状態では，2本のレールは締結部を介してまくらぎに固定されており，通り変位，すなわちレール長手方向の左右変位は，まくらぎの左右変位と等しくなるため，左右レールの通り変位は高い相関関係となる．一方で，締結に不良が生じると，列車通過時に左右のレールが押し拡げられやすくなるため，この関係が崩れて内外差が大きくなると考えられる．通り変位内外差は，軌道の保守管理で一般に用いられる値ではないが，連続的な締結不良の検知に活用できる可能性があるため，本稿においては他の軌道変位項目と同じように扱った．

以上をまとめると，本分析では曲線における次の4項目の軌道変位データに着目した．

① 軌間変位（20mHPF）
② 外軌通り変位（6~20m復元波形）
③ 内軌通り変位（6~20m復元波形）
④ 通り変位内外差（②と③の差）

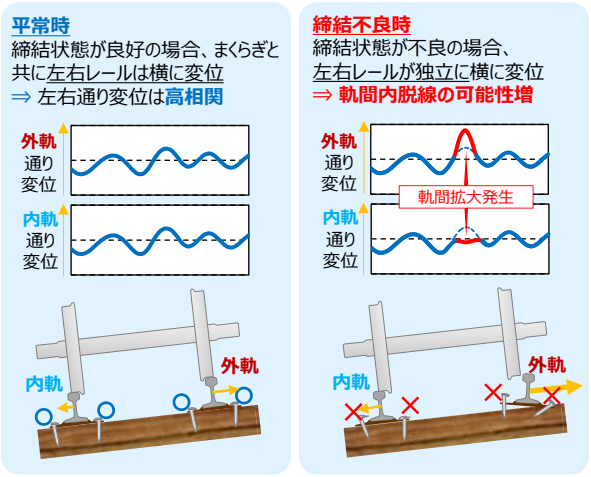
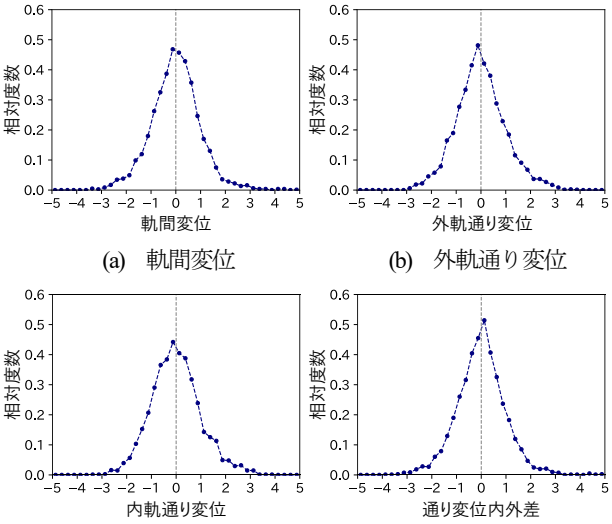


図-1 連続締結不良時の通り変位のイメージ

表-1 記述統計量（データ数=3249）

データ項目	平均	標準偏差	歪度	尖度
軌間変位	0.05	2.72	0.34	5.08
外軌通り変位	-0.02	4.45	0.25	3.45
内軌通り変位	-0.02	4.37	0.30	3.36
通り変位内外差	0.01	2.75	0.35	5.32

※平均，標準偏差の単位はmm



(a) 軌間変位　(b) 外軌通り変位
(c) 内軌通り変位　(d) 通り変位内外差

図-2 周辺分布の度数分布

(2) 周辺分布の特徴

分析対象とした路線において，事故発生曲線と同一の半径を持つすべての曲線に着目して，曲線区間（緩和曲線を含む）の全データを母集団とみなした際の軌道変位データの各項目で度数分布と記述統計量を求めた．

表-1に，各項目の記述統計量として平均・標準偏差・歪度・尖度を，**図-2**に，各項目の度数分布を示す．同図の度数分布は，分布の形状に着目するため，データの平均，標準偏差によって標準化したデータを示している．

表-1より，各項目とも尖度は正規分布の3と比べて大きく，軌間変位と通り変位内外差で特に大きい．また，軌間変位と通り変位内外差，および，外軌通り変位と内軌通り変位の間で，各統計量が近い値となっている．**図-2**より，いずれのデータ項目においても，正規分布より尖った分布形状をしているように見え，尖度が大きいことと整合している．

このように，軌道変位各項目のデータは，記述統計量と分布形状から，正規分布に従うとは言い難い．さらに，軌道変位データの異常評価のためには，分布の裾に位置する外れ値の異常の程度を定量的に評価することが重要であり，このためにはデータの裾の分布形状を適切に表現することが重要である．ここで，軌間変位と通り変位

内外差については，尖度の大きさから分布の裾が厚い，すなわち平均から極端に離れた事象（外れ値）の発生する確率が正規分布から予想される確率よりも高いと判断できる．また，いずれのデータ項目においても歪度が正であることから，分布の右側の方が裾が厚い，すなわち，正値の方で外れ値が生じやすい傾向にあることがわかる．

(3) 同時分布の特徴

事故発生データに特徴が見られた，「軌間変位-通り変位内外差」および「内軌通り変位-外軌通り変位」の2つの組み合わせの結果を示す．ここでも，(2)と同様にデータの分布形状に着目するため，各データを曲線別に標準化したデータを示す．

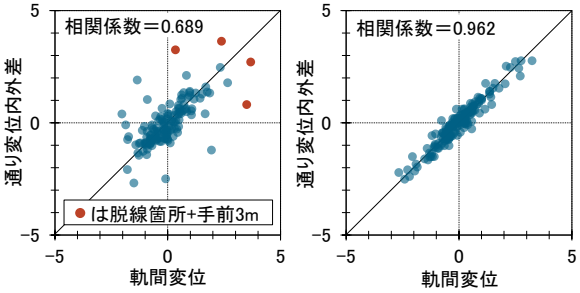
図-3 に，「軌間変位-通り変位内外差」の組み合わせにおける，事故発生曲線（これを，曲線Aとする．）と，同一路線内のある一曲線（これを，曲線Bとする．）の2次元分布を示す．同図より， 2変数は全体的な傾向として正の相関にあるが，脱線箇所付近では2変数ともに正に大きな値となり，なおかつ外に大回りするような点を描いている．ここで，**図-4** に，曲線A（事故発生曲線）における標準化前の2変数の波形を示す．同図より，脱線箇所では2変数間でピークの位置がずれており，このような軌道変位波形上の特徴が散布図に表れたと考えられる．

図-5 に，「内軌通り変位-外軌通り変位」の組み合わせについて，上記の曲線A，Bの2次元分布を示す．同図より，これも全体的な傾向として2変数は正の相関にあると見て取れるが，脱線箇所付近においては，外軌通り変位は大きいが，内軌通り変位が小さく，正の相関から外れた値が観測されている．これは，**図-1** に示したように，曲線A（事故発生曲線）の脱線箇所付近で，連続的な締結不良が生じていたことを表していると考えられる．

なお，ここでは，例として2曲線を代表して示したが，多くの曲線では脱線箇所のような特徴は見られず，一方，事故発生後の現地調査により軌道変位の測定時に木まくらぎの連続締結不良が存在していたと考えられる非脱線曲線においては，脱線箇所と同様の傾向を確認した．

3. 木まくらぎ連続締結不良の検知手法の検討

2章で確認したような事故発生箇所での軌道変位データの同時分布上の特徴を数値で評価する方法に落としこむことで，木まくらぎの連続締結不良に伴って軌間内脱線に対する余裕が小さい箇所を検知するための異常度評価方法について検討した．評価方法として，ここでは，マハラノビス距離の距離尺度によって簡便に評価する方法と，データが属する母集団の分布形状を予め推定して確率による表現で評価する方法の2つを検討した．分布推定を行う後者の方法は，適用する路線の軌道変位データの分布を事前に調べる必要があるが，データが非正規分布に従うことを仮定して異常の程度を評価できる．



(a) 曲線A　(b) 曲線B

図-3 軌間変位–通り変位内外差の同時分布

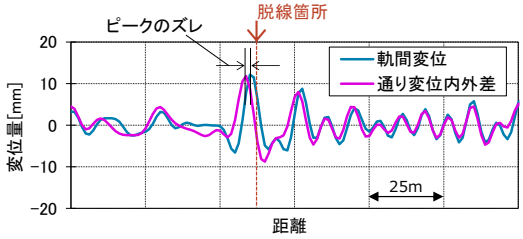
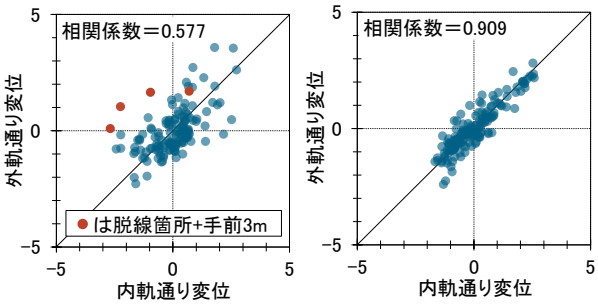


図-4 曲線Aの軌道変位波形



(a) 曲線A　(b) 曲線B

図-5 内軌通り変位–外軌通り変位の同時分布

(1) 異常度の評価方法

a) マハラノビス距離

マハラノビス距離は，品質工学の分野において広く用いられる多変量空間における距離尺度の一つであり[注4)]，多変量データに対する異常の程度の定量的な評価に用いられる．

標準化された多変量データにおける標本点 x のマハラノビス距離 D は， x の属する多変量分布の共分散行列の逆行列 Σ^{-1} により，

$$D = \sqrt{x^{\mathrm{T}}\Sigma^{-1}x} \qquad (1)$$

と定義される．したがって，標準化データの共分散は相関係数と等価であることを利用すると，標準化された2次元データ (x_0, x_1) のマハラノビス距離 D は，相関係数

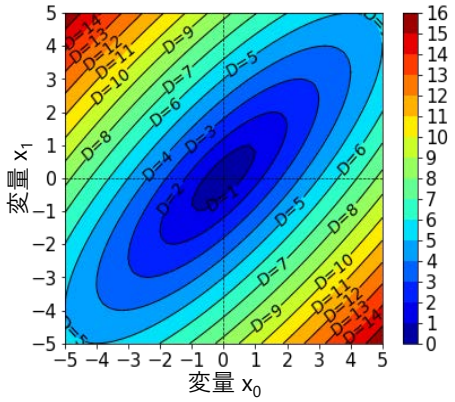


図-6　マハラノビス距離の等距離線（相関係数=0.8 の場合）

r を用いて，

$$D = \sqrt{\frac{x_0^2 + x_1^2 - 2rx_0x_1}{1 - r^2}} \qquad (2)$$

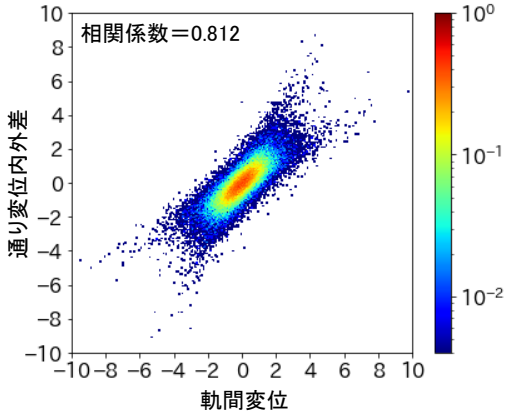
と表せる．**図-6** に，相関係数 r =0.8 の標準化された 2 次元データ (x_0, x_1) のマハラノビス距離 D の等距離線を示す．同図のように，マハラノビス距離は，散布図上の標本点に対して，データ間の相関，つまりは類似度を考慮して，相関のある方向には近くに（異常の程度を小さく），そうでない方向には遠くに（異常の程度を大きく）評価する．

また，マハラノビス距離の 2 乗は，データが n 次元正規分布に従うと仮定したとき，自由度 n の χ^2 分布に従うことが知られている[注 5)]．よって，マハラノビス距離から，データが多次元正規分布に従うと仮定した場合において，標本点の確率分布を解析的に表現できる．

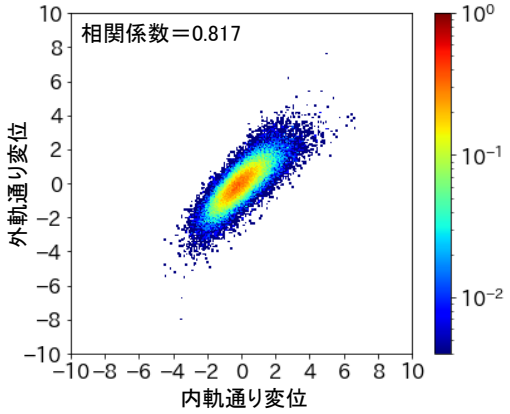
b)　同時分布推定による確率

非正規分布を表現する解析的な確率分布はいくつか存在するが，解析的な確率分布によって分布の裾の歪みや尖りを表現することは困難である．そこで，数が限られたデータから，裾の厚い分布や歪んだ分布を表現可能な乱数型多変量確率分布モデル[4,5,6)]により分布推定した．

図-7 に，1 章で分析対象とした同一曲線半径の全データから，脱線曲線（曲線 A）を除いたデータに対して推定した同時分布を示す．同図は各データを平均と標準偏差で標準化したスケールの推定分布である．1 章の分析で尖度の大きかった軌間変位や通り変位内外差は，内軌および外軌の通り変位と比べて，外れ値が生じやすい，つまり分布の裾が厚い結果となっていることがわかる．この図において確率密度の小さい領域に観測される軌道変位データを，発生するのが稀な事象，すなわち，異常な事象にあると評価できる．本検討においては，分布の裾の外れ具合をより適切に評価するため，**図-7** の分布をカーネル密度推定[注 6)]した確率密度（**図-8**）を異常度とみなして評価した．

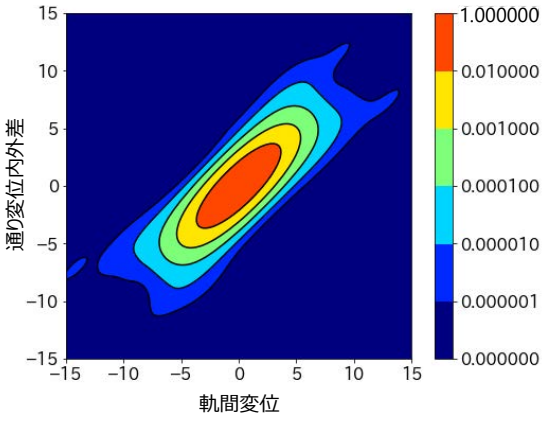


(a) 軌間変位–通り変位内外差

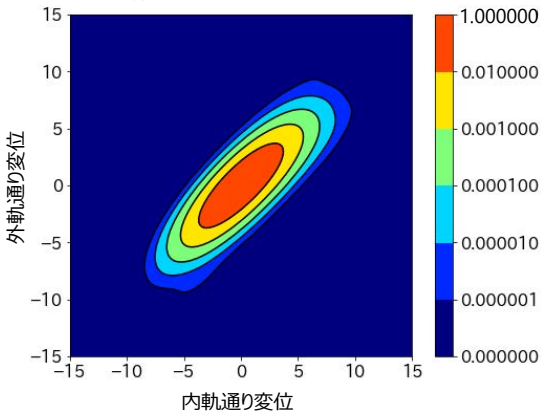


(b) 内軌通り変位–外軌通り変位

図-7　同時分布の推定結果

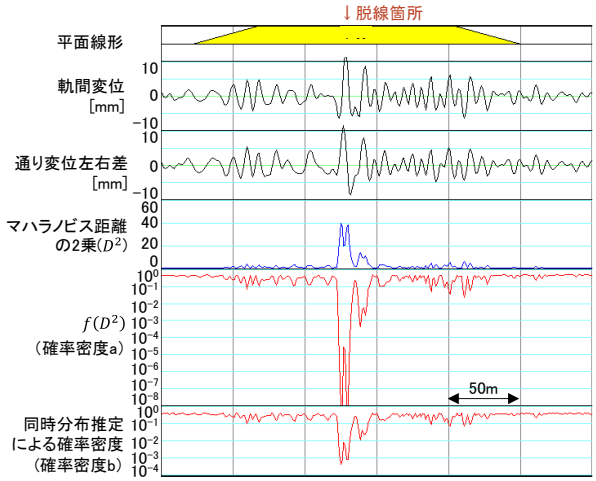


(a) 軌間変位–通り変位内外差

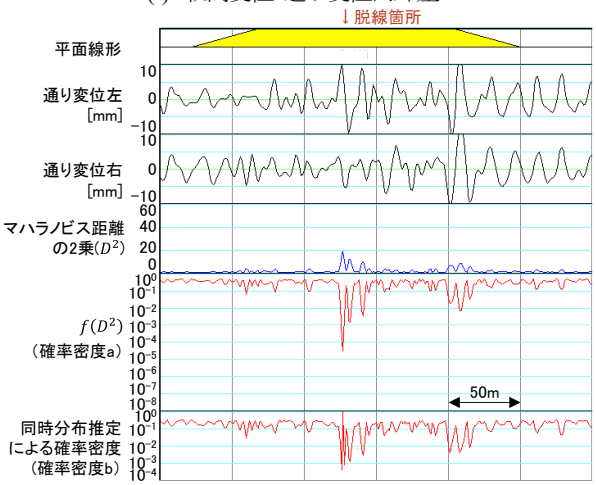


(b) 内軌通り変位–外軌通り変位

図-8　**図-7** をカーネル密度推定した確率密度



(a) 軌間変位–通り変位内外差

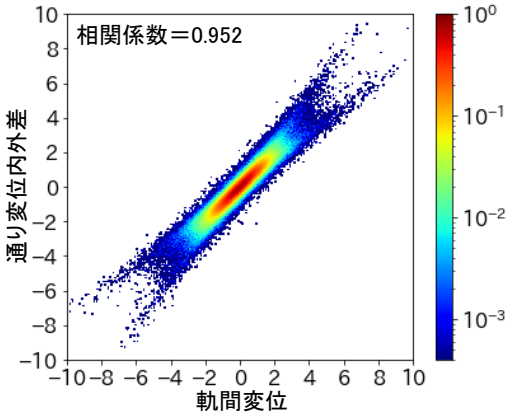


(b) 内軌通り変位–外軌通り変位

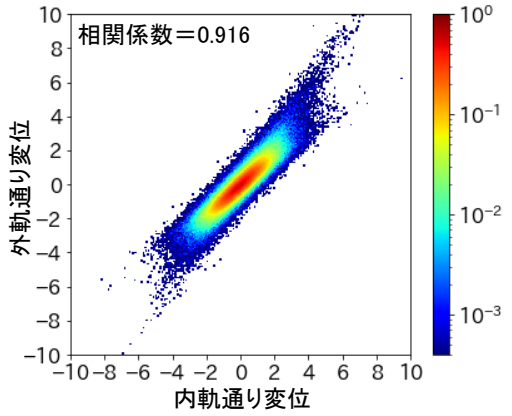
図-9 脱線箇所付近における確率密度の算出結果
（マハラノビス距離を D，自由度2の χ^2 分布の確率密度関数を $f(\cdot)$ と表す．）

(2) 異常度の評価結果

図-9に，異常度を表す指標として確率密度を算出した結果を示す．同図では，確率密度の算出に用いた軌道変位データのほか，マハラノビス距離 D の2乗と，マハラノビスの距離の上述の性質を利用してデータが2次元正規分布に従うと仮定した場合における分布の確率密度（確率密度 a），同時分布推定による確率密度（確率密度 b）を表す．ここでは，通り変位内外差は，直線等に一般化した通り変位左右差として表す．同図より，脱線箇所付近ではいずれの方法で算出した確率密度も小さいことから，**図-3, 4** で示したような脱線箇所付近のプロットを各方法で見つけることができている．また，同時分布推定の確率密度 b よりも，正規分布を仮定した確率密度 a の方が，脱線箇所付近の確率が小さく評価されている．この傾向は尖度の大きい（つまり外れ値の発生する確率が正規分布から予想される確率よりも高い）軌間変位と通り変位内外差を用いる方が大きい．このことから，正規分布を仮定した確率密度 a は，分布の裾に位置する脱線箇所付近のデータの外れ具合を過大評価（発生確率を過小評価）していることがわかる．しかし，a と b のいずれの確率密度においても，値の傾向は一致している．



(a) 軌間変位–通り変位内外差



(b) 内軌通り変位–外軌通り変位

図-10 実地検証区間で推定した同時分布

以上のことから，異常箇所の大まかな抽出や異常度の順位付けのためであれば，マハラノビス距離による評価方法を用いてよいと考えられるが，観測されたデータの異常の程度の評価等，確率に意味をもった分析をする際は，同時分布推定による確率密度を用いるのがよいと考えられる．

4. 実地検証

本章では，3章で検討した異常度評価方法の妥当性を確認するために，前章までに用いた軌道変位データとは別の路線の軌道変位データに本方法を適用し，異常と判定された箇所の軌道状態を現地で確認した．

(1) 検証方法

前章までに用いた軌道変位データとは別の路線における，軌道検測車の軌道変位データを検証対象とした．本路線は大半が木まくらぎ区間であるものの，一部にはPCまくらぎ区間や部分PCまくらぎ化（数本に1本の割合で木まくらぎを PC まくらぎに交換すること）された

表-2　判定箇所一覧と軌道状態確認結果

地点	曲線番号	推定分布による確率密度※ 軌間変位-通り変位内外差	推定分布による確率密度※ 内軌通り変位-外軌通り変位	確認方法	確認結果
A	1	◎	◎	現地確認	外軌で最大 16mm の軌間拡大痕
B	2	○		現地確認	外軌で小返り痕，継目の角折れ，
C	3	○	○	現地確認	外軌で 3mm の軌間拡大痕と小返り痕，外軌軌間外側の犬くぎ欠落
D	3	○	○	前方画像	外観上不良なまくらぎが少なくとも 3 本連続して存在
E	4	◎	○	前方画像	非有道床の踏切，軌間縮小
F	2		○	—	
G	2	○	○	—	
H	5	◎	○	—	
I	6	○		—	
J	7	○		—	
K	8	○		—	

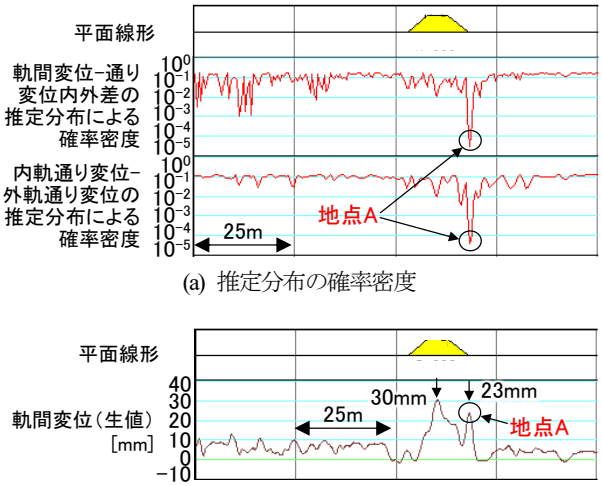
※　○：確率密度＜10^{3}(0.1%)，◎：確率密度＜10^{4}(0.01%)

区間も存在したが，本方法で着目する締結不良に伴う軌間拡大はまくらぎや締結装置の種別に関係なく発生すると考え，異常評価もまくらぎや締結装置の種別を考慮せずに行った．

はじめに，マハラノビス距離による異常度を算出した結果，異常と判断される箇所のほとんどが特定の半径の曲線に存在していたため，その半径の曲線内の全データで分布推定して確率密度を求めた．**図-10** に，推定した分布形状を標準化スケールで示す．いずれの軌道変位の組み合わせにおいても，前章で示した分布（**図-7**）よりもデータ間の相関が高いが，これは路線や着目した曲線半径の違いより，推定対象としたデータ区間の全体的な軌道状態が良いためと考えられる．また，**図-10** は，**図-7** よりも中心から大きく外れた値が多く，分布の尖度が高いことがわかる．

(2)　検証結果

表-2 に，推定分布で異常判定された箇所の一覧および軌道状態の確認結果を示す．本検証においては，前章の脱線箇所における同時分布推定の確率密度が 0.001（0.1%）付近であったことから，確率密度 0.001 を閾値としてそれよりも確率密度が小さい箇所を異常と判定した．なお，この閾値に関しては，あくまでも本検証において暫定的に用いたものであり，脱線との関連性については今後検証を重ねる必要があると考えている．異常判定の結果，「軌間変位-通り変位内外差」の軌道変位項目からは 8 曲線 10 地点，「内軌通り変位-外軌通り変位」からは 5 曲線 7 地点，両者の重複を 1 と数える合計で 8 曲線 11 地点が抽出された．そして，これら箇所に対して，一部箇所の軌道状態を後日現地確認した．軌道検測後すぐに修繕された箇所の一部区間に対しては，軌道検測と同時測定した列車前方画像や，その画像を木まくらぎ劣化度判定システム[1]に適用した結果を調べた．



(a) 推定分布の確率密度

(b) 軌間変位（生値）

図-11　地点 A の推定分布の確率密度と軌間変位（生値）



図-12　地点 A の軌道状態（外軌の軌間外側）

軌道状態を確認できた 5 地点中，4 地点で軌間拡大が発生していたと考えられる結果であった．残りの 1 地点は非有道床の踏切で軌間縮小が発生していたと考えられる地点であった．以下に，軌道状態の確認結果の主なものを示す．

a)　地点 A

図-11 に，地点 A における分布推定による確率密度の算出結果と軌間変位（生値）を示す．地点 A は構内分岐器付帯曲線内であり，軌間変位の生値が 23mm であったが，16m 手前にそれよりも大きな軌間変位 30mm が発生していた．地点 A の軌道状態を現地確認すると，連続した締結不良によってレールが押し拡げられて横移動した痕跡が確認でき，外軌で最大 16mm の横移動の痕跡が確認できた（**図-12**）．一方で，地点 A の手前，軌間変位 30mm の箇所では，地点 A と比較して締結不良の程度は小さく，最大 2mm のレールの横移動の痕跡が見られた．このことは，地点 A で確率密度が小さく異常度が大きくなったことと整合する．

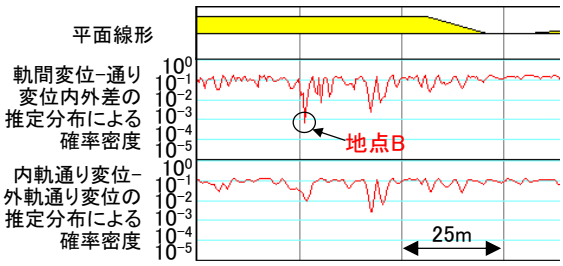


図-13　地点Bにおける推定分布の確率密度



図-14　地点Bの軌道状態（外軌軌間内側）

b)　地点B

図-13に，地点Bにおける分布推定による確率密度の算出結果を示す．地点Bの軌道状態を現地確認すると，当該地点は継目部であり，レールの横移動の痕跡は見られなかったが，図-14に示すように外軌の軌間内側の犬くぎに連続した浮きが見られた．このことから，レールの小返りにより軌間拡大が発生していたと考えられる．

c)　地点C

図-15に，地点CとDにおける分布推定による確率密度の算出結果を示す．地点Cの現地確認した結果，外軌軌間外側の犬くぎが欠落しており，軌間が外側に拡がりやすいと考えられる状態にあった（図-16）．また，最大3mm程度のレール横移動の痕跡や軌間外側にタイプレートがまくらぎに食い込んでレールが小返っていると考えられる痕跡を確認した．

d)　地点D

地点Dにおける分布推定による確率密度の算出結果は図-15の通りである．同地点では，今回の測定で最も大きな軌間変位（生値）が発生していた．現地調査時には既に修繕されていたため，列車前方画像と木まくらぎ劣化度判定システム[1]の適用結果を調べた．

図-17に同システムによる木まくらぎ劣化度の判定結果を示す．地点Dは，軌間保持機能が低下しているとの判定である劣化度Aのまくらぎが3本連続していた．また，劣化度Bや劣化度C判定のまくらぎが3本連続の劣化度Aのまくらぎに隣接していた．さらに，前方画像から作成した真上から俯瞰した画像で劣化度Aと判定されたまくらぎを確認すると，まくらぎの割れが締結部付近で発生していた．これらのことから，同地点においては連続締結不良が発生していた可能性がある．

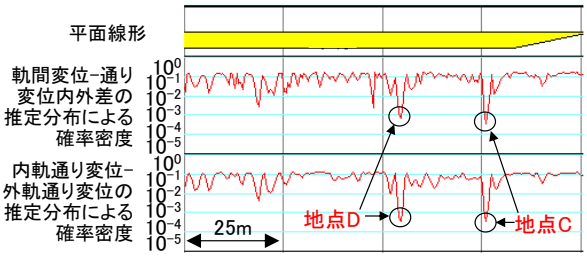


図-15　地点CとDにおける推定分布の確率密度



図-16　地点Cの軌道状態（外軌）

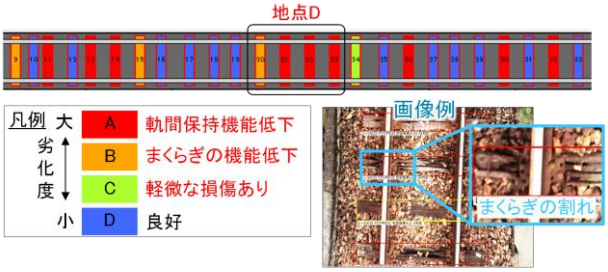


図-17　地点Dの木まくらぎ劣化度判定結果

5.　まとめ

軌道検測車で測定される軌道変位データを活用して木まくらぎの連続締結不良に伴って軌間内脱線に対する余裕が少ない箇所を検知する手法の構築を目指し，軌道変位データの同時分布に着目した木まくらぎ連続締結不良の検知手法について検討した．本論文のまとめは次の通りである．

(1) 過去の軌間内脱線の発生直近の軌道変位データを分析した．その結果，脱線時の軌間拡大に起因すると考えられる，軌間変位，通り変位，通り変位内外差の間の同時分布上の特徴が見られた．また，これら項目の軌道変位データの分布の裾が厚い，すなわち平均から極端に離れた事象（外れ値）の発生する確率が正規分布から予想される確率よりも高いと考えられることがわかった．

(2) 同時分布から，木まくらぎ連続不良に対する異常度を評価する方法を提案した．マハラノビス距離の距離尺度によって簡便に評価する方法と，裾が厚く歪んだ非正規分布を仮定した同時分布推定による確率密度を用いる方法の2つの方法を提案した．脱線箇所の軌道変位データに適用した結果，異常箇所の大

まかな抽出や異常度の順位付けのためであれば，マハラノビス距離を用いてよいと考えられるが，観測されたデータの異常の程度の評価等，確率に意味をもった分析をする際は，同時分布推定による確率密度を用いるのがよいと考えられる．

(3) 提案手法を，別の路線の軌道変位データに適用し，異常判定された箇所の軌道状態を確認した．その結果，5地点中，4地点で軌間拡大が発生していたと考えられる痕跡を現地で確認するか，連続締結不良が発生していた可能性があることを前頭画像により確認した．なお，残りの 1 地点は非有道床の踏切で軌間縮小が発生していたと考えられる地点であった．

今後の課題として，今回行った実地検証においては提案手法で検知されなかった箇所で連続締結不良が発生していなかったかについての検証ができていないため，それを検証する．また，本研究の成果を軌道保守管理の実務に活用するための検討を行う．列車前方画像を用いた木まくらぎ劣化度判定システム [1)]を活用することも視野に入れて検討する．

NOTES

注1) 運輸安全委員会：軌間拡大による列車脱線事故の防止に係る意見について，運委参第43号，2018年6月28日， https://www.mlit.go.jp/jtsb/railkankoku/railway-iken4_20180628.pdf，2023年3月15日閲覧．

注2) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説　軌道構造，2012．

注3) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）の手引き，2007年3月．

注4) 救仁郷誠：解説 マハラノビスの距離 入門，品質工学，Vol. 9，No. 1，2001．

注5) 飯田孝久，福島崇博，篠崎信雄：2 値変量が混在する場合のマハラノビス距離による異常検出，応用統計学，Vol. 37，No. 2，pp.55-76，2008．など

注6) Pythonの scipy.statsモジュールを使用した．（Webページ：scipy.stats.gaussian_kde —SciPy v1.10.1 Manual, https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.gaussian_kde.html，2023年3月15日閲覧．）

REFERENCES

1) 坪川洋友，糸井謙介，長峯望，合田航，前田梨帆：列車前方画像による木まくらぎの劣化度診断，鉄道総合技術研究所，RRR，Vol. 79，No. 7，pp. 50-55，2022．[Tsubokawa, Y., Itoi, K., Nagamine, N., Goda, W. and Maeda, R.: Determining the Degree of Degradation of Wooden Sleepers Using Train Forward Images, *RRR*, Vol. 79, No. 7, pp. 50-55, 2022.]

2) 昆野修平，三和雅史，永原裕一：軌道変位データを多変量確率分布と捉えた統計分析による軌間内脱線の早期検知手法，第28回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集（J-RAIL2021），SS2-1-5，2021．[Konno, S., Miwa, M. and Nagahara, Y.: Detection Method of Possible Derailment due to Gauge Widening Using On-vehicle Track Measurement Data, *Proceedings of J-RAIL2021*, SS2-1-5, 2021.]

3) 昆野修平：軌道変位データの統計分析による木まくらぎ連続不良の検知手法，日本鉄道施設協会誌，Vol. 61，No. 5，pp. 354-357，2023．[Konno, S.: Detection Method for Consecutive Defects in Wooden Sleepers by Statistical Analysis of Track Irregularity Data, *The Journal of Japan Railway Civil Engineering Association*, Vol. 61, No. 5, pp. 354-357, 2023.]

4) Nagahara, Y.: A Method of Simulating Multivariate Non-Normal Distributions by the Pearson Distribution System, *Computational Statistics and Data Analysis*, Vol. 47, No. 1, pp. 1-29, 2004.

5) Nagahara, Y.: A Method of Calculating the Downside Risk by Multivariate Non-Normal Distributions, *Asia-Pacific Financial Markets*, Vol. 15, No. 3-4, pp. 175-184, 2008.

6) Ohno, K., Nagahara, Y., Tsunoyama, K. and Orita, M.: Are There Differences between Launched Drugs, Clinical Candidates, and Commercially Available Compounds?, *Journal of Chemical Information and Modeling*, Vol. 50, No. 5, pp. 815-821, 2010.

(Received March 31, 2023)
(Accepted June 9, 2023)

A METHOD FOR EXTRACTING CONSECUTIVE FASTENING DEFECTS IN TIMBER SLEEPERS USING JOINT DISTRIBUTION OF TRACK IRREGULARITY DATA

Shuhei KONNO and Yuichi NAGAHARA

Train derailment caused by gauge widening have been occasionally reported even in recent years. Inspecting the fastening condition between sleepers and rails to prevent such derailment is done by human eyes and involves a lot of cost. In the beginning of this paper, statistical analysis is carried out using track irregularity data, including actual incident data. Then, a method for detecting the presence of consecutive sleeper failure was developed using the features found in the joint probability distribution of multiple items of track irregularity data. In addition, the validity of the method was checked by applying to other lines and by conducting field checks of the locations that are detected.