論文　レール凹凸連続測定装置の偏心矢弦配置の寸法精度が凹凸測定精度に及ぼす影響の検討

斉藤　大樹[1]・田中　博文[2]

[1]正会員　公益財団法人鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部軌道管理
（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38）
E-mail: saito.daiki.48@rtri.or.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　公益財団法人鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部軌道管理
（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38）
E-mail: tanaka.hirofumi.96@rtri.or.jp

既往のレール凹凸連続測定装置は 25-230mm 偏心矢を採用していたが，この偏心矢弦配置ではレール波状摩耗の成長過程の飽和期において生じるような高調波凹凸のうち，十数 mm 程度の短い波長の凹凸は把握が困難であった．そのため本研究では，弦配置を工夫することにより短波長側の測定可能波長を拡大する検討の一環として，装置の偏心矢弦配置における寸法誤差の影響について分析した．レール凹凸の復元波形に生じる誤差は，弦配置に誤差のある偏心矢測定と復元フィルタの合成振幅特性として特徴づけられることから，モンテカルロシミュレーションを用いて，ある公差の下で生じ得る誤差の範囲を分析した．その結果，25-33mm 偏心矢または 36-43mm 偏心矢により波長 10mm 以上の帯域で実用に耐える精度が確保できる見通しを得た．

Key Words: *rail surface roughness, rail corrugation, asymmetrical chord offset method, Monte-Carlo simulation, digital signal processing*

1. 緒言

鉄道車両の繰り返し走行により，軌道を構成する各部材にはそれぞれ劣化や摩耗を生じ，さまざまな波長の軌道不整として現れる場合がある．その一つに，レール波状摩耗が挙げられる．これは，レール頭頂面に現れる規則的な波長数十 mm～数百 mm 程度，振幅 1mm 程度以下の凹凸で，車両・軌道間の動的相互作用により形成されると考えられている[1]．

レール波状摩耗そのものは，直接的には走行安全性に対する影響は小さいと考えられているが，車両走行時に転動騒音を発生することから乗客並びに沿線環境に対する快適性を低下させる．また，車輪の転動時に軌道に対して発生する衝撃力が増大する結果，軌道の各部材の劣化が加速する[2]．特にバラスト軌道では，道床の劣化・変形により，軌道に対して，主に上下方向の変位に関わる高低変位・水準変位の進行を助長する場合があることが知られている[3]．したがって鉄道事業者では，レール波状摩耗の発生状況を適切に把握し，管理することが必要である．



図-1　レール凹凸連続測定装置[1]

それに対して，レール波状摩耗の凹凸を効率的に測定する装置[1)4)]や，レール波状摩耗の形成・進展機構の理論的解明[5)6)7)]，レール削正によるレール凹凸の適切な保守方法の検討[8)]や，レール波状摩耗の形成を抑制する軌道構造の検討[9)]など，多角的な研究開発が行われている．

レール波状摩耗を含む，波長数十～数百 mm のレール凹凸を測定，把握するための装置の一つに，レール凹凸連続測定装置[1)]がある．本装置は，**図-1** に示すような軌

道上を人力によって移動可能なトロリーである．このトロリーに設置された複数のレーザ変位センサを用いて，2 台車方式の軌道検測車と同様の偏心矢法 [10]の測定原理によってレール凹凸を測定する装置である．連続的に測定された偏心矢量から，「復元波形」と呼ばれるレール凹凸の近似形状を求めるデジタルフィルタ処理を行うことで，レール波状摩耗等の評価に用いることができる．この処理のことを「復元」と呼ぶ [11]．

ただし，このような偏心矢方式の測定装置において，レール長手方向の凹凸の復元可能な波長帯域は，測定機構の偏心矢の弦配置（短弦と長弦の長さの組合せ）に依存する．現在実用化しているレール凹凸連続測定装置（以下，「既存装置」という．）は，日本国内の在来線で一般的に確認されているレール波状摩耗の波長を考慮して，**図-2** に示すような剛な梁（測定基準梁）に 4 つのレーザ変位センサを配置した 25-230mm 偏心矢を採用し，波長約 27～705mm のレール凹凸を測定可能としている [1]．なお，前後対称のセンサ配置として，弦配置が等しい 2 組の偏心矢を構成しているのは測定系の冗長性を確保することが目的である．

近年，レール波状摩耗の進展機構の理論的な検討により，レール波状摩耗の成長が進んだ飽和期において，凹凸の基本波長の 1/N 波長の高調波凹凸が成長することが示唆されており，実際に営業線において，波長の長い波状摩耗では高調波凹凸が測定により確認されている [7][12]．しかし，既存装置では波長の短い波状摩耗について，その高調波凹凸が性能上測定できなかった．そのため，既存装置の測定範囲よりも短い，波長 10～30mm 程度のレール凹凸を把握するための検討が行われている [13][14]．

このような課題に対し，著者らは，文献 [14]において，偏心矢法の測定原理に基づき，目的とする波長帯域を所与として，装置構成上の制約条件の下で，最も精度よく測定できる偏心矢弦配置を求める最適化モデルを提案している．それによって，**図-3** のように偏心矢を構成するレーザ変位センサの設置間隔を変更することで測定可能波長を拡大する 2 種類の改良案が示された．**図-3 (a)**は，既存装置の冗長系に当たる第 3 センサのみを移動することで，既存装置と同じ第 1，第 2，第 4 センサで構成する 25-230mm 偏心矢に，第 1，第 2，第 3 センサで構成する 25-33mm 偏心矢を組み合わせて，波長約 10～30mm の検測精度を補完する改良案である．**図-3 (b)**は，第 3 センサに加えて第 2 センサも移動できるものとして制約を緩和して得られた解である 36-43mm 偏心矢を第 1，第 2，第 3 センサで構成し，それに第 1，第 3，第 4 センサで構成する 79-176mm 偏心矢を組み合わせる改良案である．

この手法で用いられたモデルは，所与の波長帯域における利得倍率の最小値を最大化するモデルである．しかし，偏心矢による利得倍率は，波長によっては，偏心矢弦配置の微小な変化に対して敏感に変動してしまう場合がある．そのため，偏心矢弦配置に寸法誤差が生じ得ることを考えると，設計上の利得倍率の最小値のみでは測定精度の評価として不十分である懸念があり，実現可能な装置の寸法精度の範囲で，所望の波長帯域における必要な測定精度が確保できるかをさらに検討することが望ましいと言える．

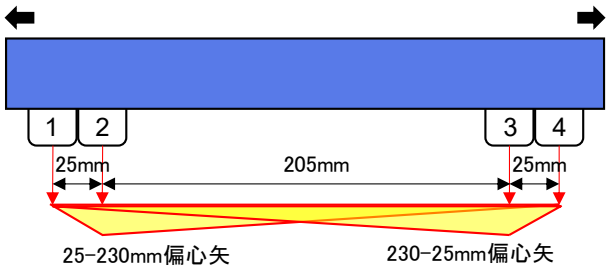
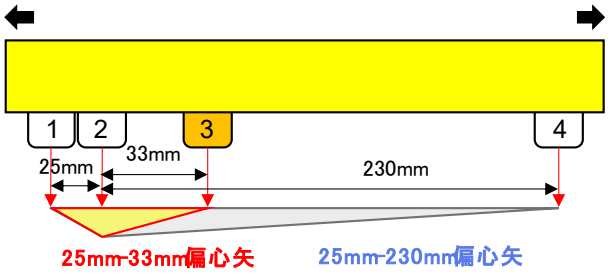
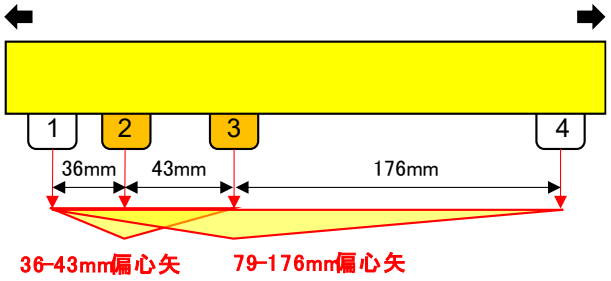


図-2　既存装置 [1]の偏心矢弦配置



(a)　第 3 センサのみを移動する案



(b)　第 2・第 3 センサを移動する案

図-3　偏心矢弦配置の改良案 [13][14]

そこで本研究では，**図-2** および**図-3** の既存装置ならびに先行研究が提案するレール凹凸連続測定装置の弦配置について，実際の弦配置が設計に対して寸法誤差を持っている状態をシミュレーションし，弦配置の寸法精度が測定精度に対してもたらす影響を分析した．具体的にはまず，偏心矢法および復元フィルタの伝達関数から，弦配置の誤差がレール凹凸復元波形に対して及ぼし得る誤差の波長領域での特性を求めた．また，既知の波形に対する検測・復元のシミュレーションから，測定の出力結果に生じ得る誤差の程度を把握することを試みた．なお，シミュレーション対象とする波形には，あるパワースペクトルを仮定して，逆フーリエ変換によりランダム波形を生成して用いる方法があるが，本研究では，規則的な

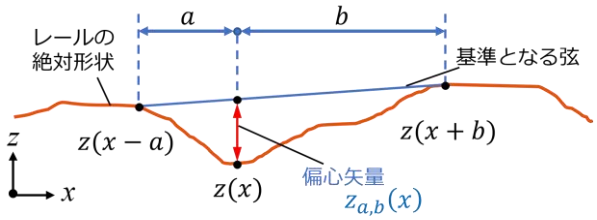


図-4　偏心矢測定における座標系

凹凸形状をなすレール波状摩耗の測定を対象としていることを踏まえ，正弦波に対して測定・復元のシミュレーションを行った．

2.　偏心矢法の特性と復元フィルタ

(1)　偏心矢法の測定原理と特性

偏心矢法は，軌道検測に使われる正矢法を一般化したものである [1)10)]．正矢法は，ある弦長（典型的には 10m）隔てて，レール上測定点の間に基準となる弦を張り，弦の中間点でレール上の測定点との離れを測る方法である．一方で，偏心矢法は，基準となる弦の中間点以外でレール上の測定点との離れを測る方法である．2 台車方式の軌道検測車による軌道検測で用いられているほか，レール凹凸連続測定装置も同じ原理を採用している．

実際の偏心矢法の測定系では，**図-4** のように弦の両端と間の測定点にあたる位置に変位センサを設け，式(1)によりレールの絶対形状$z(x)$から偏心矢量$z_{a,b}(x)$を得る．

$$z_{a,b}(x) = -\frac{b}{a+b}z(x-a) + z(x) - \frac{a}{a+b}z(x+b) \quad (1)$$

ただし，a, b はそれぞれ，測定点から弦の両端までの長さである．ここで，$z(x) = A_R e^{i\omega x}, \omega = 2\pi/\lambda$ の変換により，式(2)を得る。

$$z_{a,b}(x) = A_R e^{i\omega x}\left\{-\frac{b}{a+b}e^{-i\omega a} + 1 - \frac{a}{a+b}e^{i\omega b}\right\} \quad (2)$$

したがって，偏心矢測定はレールの絶対形状に対する一種のフィルタ処理であるとみなすことができ，その伝達関数$H_{a,b}(\omega)$ は式(3)で与えられる。

$$H_{a,b}(\omega) = \frac{z_{a,b}(x)}{z(x)} = -\frac{b}{a+b}e^{-i\omega a} + 1 - \frac{a}{a+b}e^{i\omega b} \quad (3)$$

偏心矢法における利得倍率とは，$H_{a,b}(\omega)$ の振幅特性 $\left|H_{a,b}(\omega)\right|$ のことを言う。

(2)　復元フィルタの概要

偏心矢の特性$H(\omega)$ の逆特性を与えるデジタルフィルタを用いることで，連続的に測定された偏心矢量から元の凹凸形状の近似を得ることができ，これは「復元フィルタ [11)]」と呼ばれている．ただし，偏心矢の特性で利得倍率がゼロとなる波長では復元フィルタの特性が発散するため，ゼロから無限大までの全波長帯域の復元はできない．

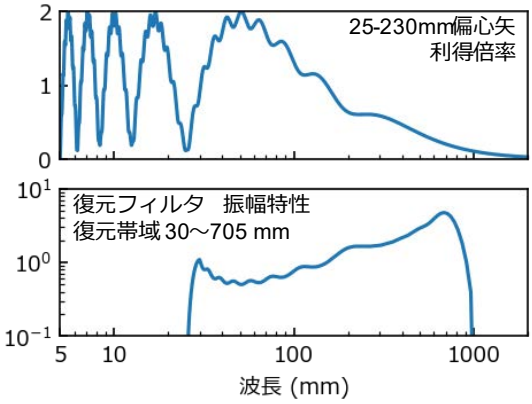


図-5　既存装置（25-230mm 偏心矢）の利得倍率と復元フィルタ特性の例

また，実用上の制約として，偏心矢の利得倍率が小さい波長は，復元倍率が大きくなることから，復元波形における S／N 比が低下し，測定ノイズの影響が避けられなくなる．そのため，2 台車方式の軌道検測車で測定される軌道変位の復元フィルタの復元帯域は，目安として偏心矢の利得倍率が 0.2 以上となる波長の範囲で設定されることが通常である [1)]．**図-5** に，既存装置における 25-230mm 偏心矢の偏心矢の利得倍率と，それに対応する復元フィルタの振幅特性を示す．

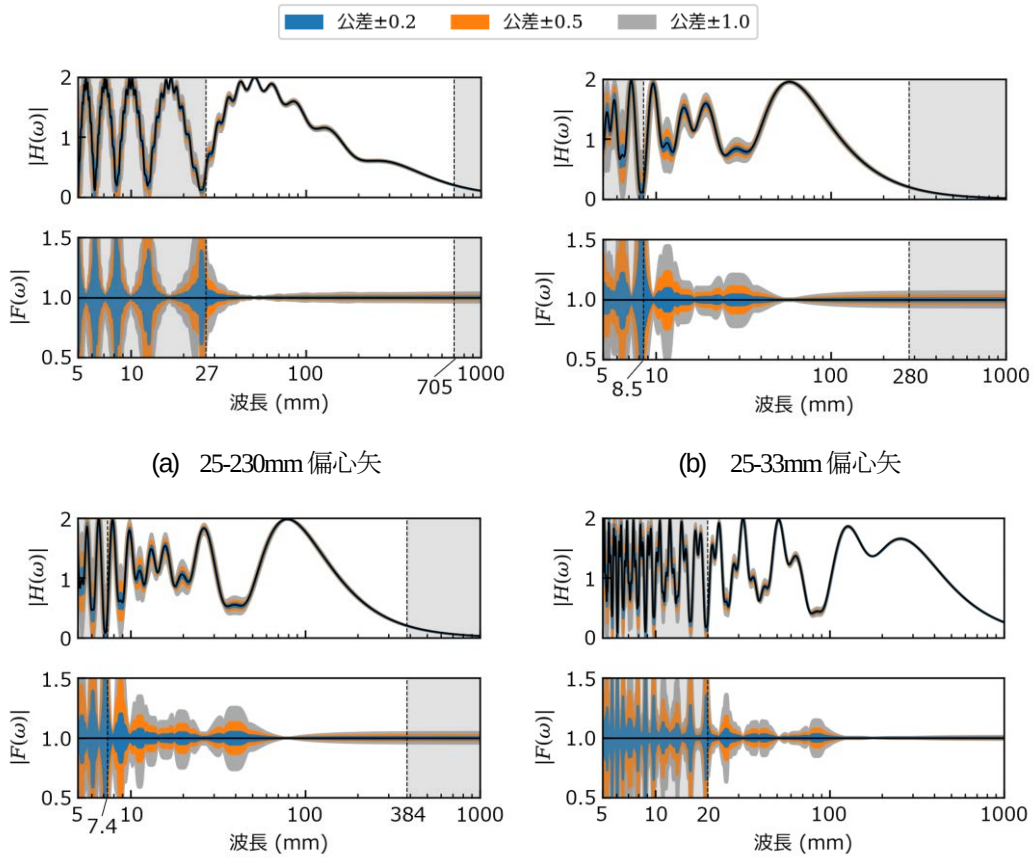
このように，復元フィルタで求めた波形は，特に波長領域においてレール凹凸の絶対形状と厳密には一致しないことから，区別して「復元波形」と呼ばれる．

3.　偏心矢弦配置の寸法誤差がもたらすレール凹凸測定精度への影響の理論的検討

(1)　偏心矢測定・復元による合成振幅特性

本章では，測定装置の偏心矢弦配置に寸法誤差があった場合に，偏心矢測定ならびに復元フィルタの過程で復元波形に対して生じる誤差を理論的に検討する．偏心矢測定ならびに復元フィルタによって，レール凹凸の絶対形状から復元波形を得る過程を合成フィルタであるとみなすと，この過程で生じる誤差は合成フィルタ特性によって特徴づけられる．

以下，レール凹凸の絶対形状 $z(x)$ から弦配置 (a, b) の偏心矢量$z_{a,b}(x)$ を得る式(1)に対応するインパルス応答を $h_{a,b}(x)$，偏心矢量$z_{a,b}(x)$ から復元波形 $\hat{z}(x)$ を得るフィルタのインパルス応答を $h_{a,b}^{-1}(x)$ と書く．たたみこみ演算を*で表すと，偏心矢測定の過程は式(4)で，復



(a) 25-230mm 偏心矢　　(b) 25-33mm 偏心矢

(c) 36-43mm 偏心矢　　(d) 79-176mm 偏心矢

図-6 偏心矢測定の振幅特性と復元後の合成振幅特性のモンテカルロシミュレーション結果

元の過程は式(5)で表される．

$$z_{a,b}(x) = h_{a,b}(x) * z(x) \tag{4}$$

$$\hat{z}(x) = h_{a,b}^{-1}(x) * z_{a,b}(x) \tag{5}$$

いま，設計弦配置$(\bar{a}, \bar{b})$の偏心矢測定装置に寸法誤差$\varepsilon_a, \varepsilon_b$があり，実際の弦配置$(a, b)$は式(6)を満たすものとする．

$$(a, b) = (\bar{a} + \varepsilon_a, \bar{b} + \varepsilon_b) \tag{6}$$

この装置による偏心矢測定は，インパルス応答$h_{a,b}(x)$のフィルタ処理と等価である．

一方で，適用する復元フィルタのインパルス応答は，設計弦配置に基づく$h_{\bar{a},\bar{b}}^{-1}(x)$を用いることとなる．したがって，この装置によって測定し，復元波形を求める過程は式(7)のように表される．

$$\begin{aligned} \hat{z}(x) &= h_{\bar{a},\bar{b}}^{-1}(x) * z_{a,b}(x) \\ &= h_{\bar{a},\bar{b}}^{-1}(x) * h_{a,b}(x) * z(x) \end{aligned} \tag{7}$$

インパルス応答$h_{\bar{a},\bar{b}}^{-1}(x) * h_{a,b}(x)$の合成フィルタの伝達関数を$F(\omega)$とすると，偏心矢測定・復元によって生じる誤差はこの合成振幅特性$|F(\omega)|$によって評価ができる．実際の弦配置が設計に対して全く誤差のない状態であれば，$|F(\omega)|$は1で一定になる．

(2) 寸法誤差のモンテカルロシミュレーション

偏心矢弦配置にある寸法公差を想定したとき，その下で復元波形に生じ得る，波長ごとの誤差の範囲を評価するための方法として，モンテカルロシミュレーション[15]が挙げられる．

モンテカルロシミュレーションとは，乱数を用いて行う数値実験の手法の一つである．偏心矢弦の寸法公差に相当する範囲の一様乱数を生成し，寸法誤差を模擬する試行を十分大きな回数で行うと，偏心矢測定・復元による合成振幅特性の分布から，生じ得る誤差の範囲が得られる．

表-1に，レール凹凸連続測定装置の既存装置および先行研究によって提案されている偏心矢弦配置と，$|H(\omega)| \geq 0.2$を満たし，通常，復元帯域の目安とされる波長の範囲（復元帯域目安）を示す．これらの偏心矢

表-1 検討する偏心矢弦配置と対象波長範囲

偏心矢 (mm)	復元帯域目安 (mm)	備考
25－230	27～705	既存装置（**図-2**）
25－33	8.5～280	**図-3 (a)** 短波長用
36－43	7.4～384	**図-3 (b)** 短波長用
79－176	20～1000	**図-3 (b)** 長波長用

表-2　大きな誤差を生じ得る波長と誤差倍率の範囲

偏心矢 (mm)	波長 (mm)	寸法公差ごとの誤差倍率の範囲 ±0.2 mm	±0.5 mm	±1.0 mm
25－230	27.0	0.91～1.09	0.79～1.22	0.59～1.45
25－33	8.5	0.73～1.36	0.38～2.05	0.10～3.47
25－33	11.6	0.90～1.10	0.75～1.24	0.49～1.45
36－43	8.8	0.79～1.21	0.48～1.51	0.01～1.97
36－43	11.4	0.92～1.08	0.80～1.19	0.58～1.36
79－176	20.0	0.90～1.14	0.78～1.40	0.61～1.91
79－176	25.6	0.93～1.07	0.81～1.19	0.63～1.37

に対して，JIS B 0405[16]の普通公差を参考に，それぞれの偏心矢弦構成の寸法誤差$\varepsilon_a, \varepsilon_b$に対し，±0.2，±0.5，±1.0mm のいずれかの範囲で一様乱数を与えるシミュレーションを 1000 回繰り返した．

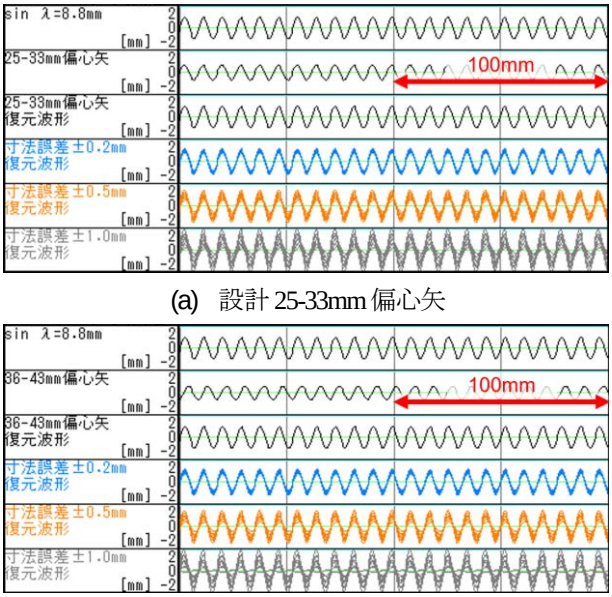
図-6 に，このとき得られた偏心矢測定の振幅特性$|H(\omega)|$と復元後に復元波形に生じる合成振幅特性$|F(\omega)|$の範囲を示す．また，**表-2** に，各偏心矢弦配置において，±0.5mm の公差で約 0.8～1.2 倍以上の比較的大きな誤差を生じ得るような測定上の弱点となる波長とその倍率（誤差倍率）の範囲を示す．

短波長レール凹凸測定用の新たな弦配置案のうち 25-33mm 偏心矢について，大きな誤差を生じ得る弱点波長は，8.5mm，11.6mm である．波長 8.5mm は，**図-6(b)**より，偏心矢弦配置の寸法誤差に対する測定誤差の感度が著しく高いことから，波長 8.5mm 付近を含まない復元帯域を設定する必要があると言える．同様に，36-43mm 偏心矢は，**図-6(c)**より弱点波長が 8.8mm，11.4mm であり，このうち波長 8.8mm 付近を含まない復元帯域とすることが望ましい．文献[14]では，いずれの偏心矢も，車輪－レール間の接触楕円（コンタクトパッチ）の大きさを考慮して，対象波長帯域を 10mm 以上とする制約条件で得られた解であるから，復元帯域としては，10mm 以上の範囲で設定することが妥当であると考えられる．

また，長波長側の復元時の誤差倍率は，1 付近で安定し，弦配置の寸法誤差による影響をほとんど受けなくなることが分かる．長波長側の測定精度に対しては，短波長側と異なり，レーザ変位センサそのものの測定誤差に大きな復元倍率がかかることによる誤差の影響が，相対的に大きくなると考えられる．

4. 既知の凹凸波形に対する偏心矢測定・復元シミュレーション

ここでは，実際の凹凸測定に現れ得る誤差を評価するため，振幅が 1mm で波長が既知の正弦波に対して，寸法誤差のある偏心矢測定の後に復元するシミュレーションを行う．シミュレーションには，鉄道事業者の保線管理システムやレール凹凸連続測定装置の処理プログラムにおいて実績のある，軌道保守管理データベースシステム「LABOCS[17]」を用いた．



(a)　設計 25-33mm 偏心矢

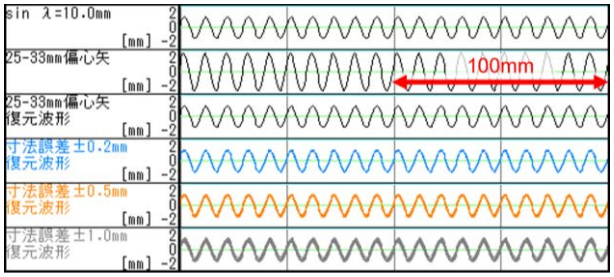
(b)　設計 36-43mm 偏心矢

図-7　正弦波に対する測定・復元のシミュレーション結果（波長 8.8mm）

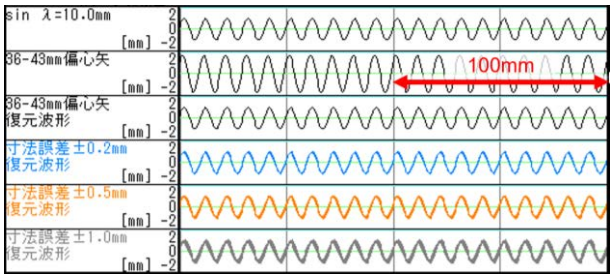
対象とする正弦波の波長は，3 章における結果を考慮して，λ＝8.8, 10.0, 11.5 (mm) とし，短波長凹凸測定用の 25-33mm 偏心矢と 36-43mm 偏心矢に対してシミュレーションを行った．また，既存装置のデータ処理では凹凸形状のサンプリング間隔は 1mm である[1]が，シミュレーションでは，従来よりも短波長の波形を処理するため，データのサンプリング間隔を 0.5 mm とした．なお，本シミュレーションでは，偏心矢弦配置の寸法誤差のみを考慮し，レーザ変位センサの測定値に生じる誤差を考慮しない．長波長側の復元精度は，前述の通りレーザ変位センサそのものの測定誤差に大きな復元倍率がかかる影響が相対的に大きいと考えられるため，評価対象外である．

図-7 から**図-9** に，凹凸絶対形状に相当する正弦波，設計弦配置による偏心矢測定波形および復元波形と，弦配置の寸法誤差があった際の誤差を含む復元波形の比較について，偏心矢弦配置と正弦波の波長ごとに示す．図中で誤差を含む復元波形には，寸法誤差を $\varepsilon = 0.2, 0.5, 1.0$ のいずれかとして，短弦，長弦の誤差$\varepsilon_a, \varepsilon_b$にそれぞれ 0 または$\pm\varepsilon$の誤差を任意に組み合わせた場合の 8 通り（$\varepsilon_a = \varepsilon_b = 0$ の場合を除く）のシミュレーション波形を重ねて示している．

いずれの正弦波波長と弦配置によるシミュレーションでも，設計値どおりの理想的な偏心矢で測定・復元したときの復元波形は，センサ測定値に生ずる誤差の影響がなく，デジタルフィルタによって処理を行っていることから，ほとんど誤差なく元の正弦波と一致する．しかし，

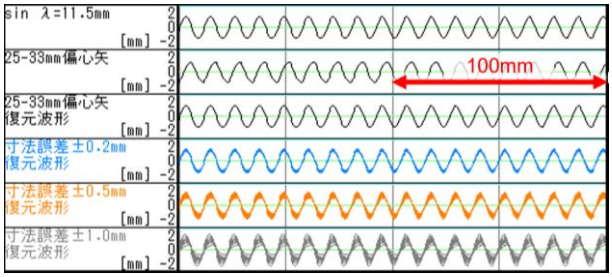


(a) 設計 25-33mm 偏心矢

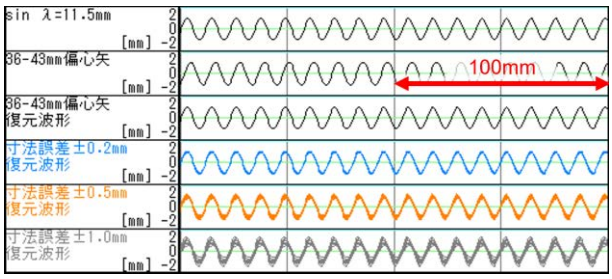


(b) 設計 36-43mm 偏心矢

図-8 正弦波に対する測定・復元のシミュレーション結果（波長 10.0mm）



(a) 設計 25-33mm 偏心矢



(b) 設計 36-43mm 偏心矢

図-9 正弦波に対する測定・復元のシミュレーション結果（波長 11.5mm）

表-3 測定・復元シミュレーションで得られた誤差倍率の最大・最小値と対応する偏心矢弦配置（波長 8.8mm）

設計弦配置 (mm)	寸法誤差 (mm)	誤差倍率最大	測定時弦配置 (mm)	誤差倍率最小	測定時弦配置 (mm)
25-33	±0.2	1.20	24.8-32.8	0.83	25.2-33.2
	±0.5	1.50	24.5-32.5	0.58	25.5-33.5
	±1.0	1.99	24.0-32.0	0.35	26.0-34.0
36-43	±0.2	1.21	36.2-42.8	0.78	35.8-43.2
	±0.5	1.52	36.5-42.5	0.44	35.5-43.5
	±1.0	2.00	37.0-42.0	0.39	35.0-44.0

偏心矢弦配置に寸法誤差がある下では，復元波形に誤差が生じるおそれがある．特に，**図-7** より，25-33mm 偏心矢と 36-43mm 偏心矢のいずれを採用したとしても，波長 8.8mm においては，寸法誤差が±0.5mm であっても復元波形の振幅に比較的大きい誤差を生じた．一方で，**図-8**, **図-9** のように，波長 10.0mm，11.5mm においては，凹凸復元波形の振幅に現れる誤差は比較的小さかった．

発生した誤差が最も大きかった波長 8.8mm の場合について，**表-3** に，偏心矢測定・復元シミュレーションで得られたうち，最大または最小となった振幅と，その測定時の誤差を含んだ偏心矢弦配置の対応を示す．設計弦配置 36-43mm のところ，±1.0mm の誤差を含んだ測定となった場合，3 章におけるモンテカルロシミュレーション（**表-2**）による誤差倍率上限 1.97 をわずかに上回る 2.00 倍の誤差倍率が 37.0-42.0mm 偏心矢で生じたが，いずれも概ねモンテカルロシミュレーションで予測された範囲内であったと評価できる．また，波長 10.0mm，11.5mm の場合においても，発生した誤差倍率の範囲は，概ね 3 章におけるモンテカルロシミュレーションで予測された範囲内であった．

したがって，復元帯域の設定は，装置の組立て精度と，測定・評価において各波長に求められる凹凸測定精度に応じて判断すればよい．

5. 装置の精度管理に対する展望

前章までの検討より，復元波形に発生する誤差は，偏心矢弦配置に応じて特定の弱点波長に対して生じやすいことが分かった．設計偏心矢の利得倍率が 0.2 を上回る波長においても弱点波長が生じる場合があることから，弦配置と復元帯域の組合せを検討する際，弦配置の寸法誤差に注意する必要があると言える．25-33mm 偏心矢または 36-43mm 偏心矢において波長 8.8mm は，設計上，0.2 を上回る利得倍率程度までの安定した測定は困難である示唆が得られたが，波長約 10mm 以上の帯域ではある程度実用上の性能を満足する測定が可能である見込が得られたものと考えられる．なお，本研究の検討の範囲では，弱点波長は，偏心矢の短弦よりも短い波長に生じやすい傾向があった．従来の軌道検測や既存装置のレール凹凸測定では，測定対象の波長は概ね短弦よりも長く取られていたことから，問題とならなかったものと考えられる．

レール凹凸連続測定装置の実用上は，装置の製作および校正の際に，偏心矢を構成するレーザ変位センサの照射点の間隔をこれまでよりも高い精度で管理しておき，凹凸測定時の正確な偏心矢弦配置を復元フィルタの設計

にも反映することで，弱点波長に対する著しい誤差の発生を抑制することができると考えられる．

レール凹凸連続測定装置を含む偏心矢方式の装置の測定精度は，同じ凹凸に対して繰り返し測定を行った際の再現性で評価されることが多かった．しかし，3章に示したように，モンテカルロシミュレーションによって，装置の寸法公差の下で，復元帯域内の弱点波長に生じる誤差倍率を新たに評価できるようになる可能性がある．

この評価は，従来装置が対応していなかったような短波長の測定を目的とする場合に重要となる．ただし先述のように，測定上の弱点波長は，短波長の帯域に生じやすく，必ずしも測定対象となるレール凹凸に卓越する波長とは異なる．そのため例えば，弱点波長に 0.9～1.1 倍の誤差倍率（±10%の誤差）が生じ得るとしても，距離軸領域で凹凸復元波形そのものに直接的に±10%の誤差が生じるわけではない．実際の凹凸復元波形の振幅に生じる誤差の程度は，装置の試作機による測定により，レール凹凸の短波長領域のデータを蓄積するとともに，絶対測定が可能な 1m ストレッチゲージ等との比較により明らかにすることができると考えられる．

なお，本研究で行った各種シミュレーションは，同じ偏心矢方式の軌道検測車にに対しては，理論的には適用可能であっても，車両構造上の制約が大きく，偏心矢弦配置の自由度が非常に小さいことから，実際的な応用は困難であると考えている．

6. 結論

レール凹凸連続測定装置において測定可能な短波長側の波長帯域を，既存装置から拡大するため，先行研究によって提案された偏心矢弦配置の案に対して，偏心矢弦配置に寸法誤差があった場合の影響を検討した．偏心矢を構成するセンサの設置間隔に±0.2，±0.5，±1.0 mm の寸法公差を仮定してモンテカルロシミュレーションを行い，波長ごとに凹凸復元波形に対して生じる誤差の影響を分析した．

本研究で得られた結果を以下に示す．

(1) 復元帯域を設定する際に，従来から目安とされていた，偏心矢による利得倍率が過少とならないことに加えて，偏心矢弦配置の寸法誤差による影響を受けにくい範囲とする必要があることを示した．

(2) 25-33mm 偏心矢または 36-43mm 偏心矢においては，復元帯域は少なくとも波長 10mm 以上で設定することが望ましいと考えられるが，波長 10mm 以上の帯域ではある程度実用上の性能を満足する測定が可能である見込みが得られた．

REFERENCES

1) 田中博文，梶原和博，清水惇，網干光雄：偏心矢法を用いたレール凹凸連続測定装置の開発とレール波状摩耗測定への適用，日本機械学会論文集，Vol.85, No.88， 2019. [Tanaka, H., Kajihara, K., Shimizu, A. and Aboshi, M.: Development of rail surface roughness continuous meas-urement trolley using asymmetrical chord method and ap-plication for rail corrugation measurment, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 85, No. 880, 2019, DOI: 10.1299/transjsme.19-00235.]

2) ベルンハルト・リヒトベアガー（徳岡研三訳）：軌道総覧， DVV Media Group GmbH I Eurailpress, 2012. [Bernhard L. (translated by Tokuoka, K.): *Track Compendium*, DVV Media Group GmbH I Eurailpress, 2012.]

3) 松本麻美，昆野修平，森健矢：MTT 保守とレール削正の組み合わせによる軌道状態の延命化の実地検証，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol. 2, No. 1, pp. 109-117, 2022. [Matsumoto, M., Konno, S. and Mori, K.: Field verification of the combination of rail grinding and ballast tamping to extend the life of track conditions, *Infrastracture Maintenance Practices*, Vol.2, No.1, pp. 109-117, *2023.*]

4) Grassie, S. L., Saxon, M. J., and Smith, D. J., Measurement of longitudinal rail irregularities and criteria for acceptable grinding, Journal of Sound and Vibration, Vol.225, No.5, pp.949-964, 1999.

5) 松本陽，佐藤安弘，藤井雅子，谷本益久，陸康思，曲線部に発生するレール波状摩耗の発生メカニズムに関する研究（第 1 報），日本機械学会論文集 C 編, Vol.62, No.597, pp.49-57, 1996. [Matsumoto, A., Sato, Y., Fujii, M., Tanimoto, M. and Oka, Y.: Formation mechanism of rail corrugation on curved track (1st report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.62, No.597, pp.49-57, 1996.]

6) 網干光雄，田中博文：レール波状摩耗の進展過程に関するシミュレーション解析，日本機械学会論文集, Vol. 85， No. 878， 2019, DOI: 10.1299/transjsme.19-00051 [Aboshi, M. and Tanaka, H.: Simulation analyses of progress process of rail corrugation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 85, No. 878, 2019, DOI: 10.1299/transjsme.19-00051.]

7) 網干光雄，田中博文：理論・数値解析に基づくレール波状摩耗の成長機構と進展過程，鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp. 11-16, 2020. [Aboshi, M. and Tanaka, H.: Growth mechanism and evolution process of rail corrugation based on theoretical and numerical analyses, *RTRI Report*, Vol.34, No.4, pp. 11-16, 2020.]

8) 田中博文，梶原和博，三和雅史：レール波状摩耗の進展過程を考慮した効率的な削正時期の検討，第 26 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集（J-RAIL2019）， JSCM-2-1, pp. 138-141, 2019. [Tanaka, H. Kajihara, K. and Miwa, M.: Efficient rail grinding time considering growth process of rail corrugation, *The*

Proceedings of J-RAIL 2019, JSCM-2-1, pp. 138-141, 2019.]

9) 細田充，田中博文，石川達也：鉄道におけるレール波状摩耗発生・成長機構の検討のための 軌道の支持剛性を考慮したマルチボディダイナミクスによる車両運動解析，構造工学論文集，Vol. 63A, pp.171-181, 2017. [Hosoda, M., Tanaka, H. and Ishikawa, T.: Vehicle/track multibody dynamics simulation in consideration of track supporting stiffness for study on the generation and propagation mechanism of rail corrugation, *Dynamics and Control of Structures*, Vol. 63A, pp. 171-181, 2017.]
10) 竹下邦夫：偏心矢法による軌道狂い検出法，鉄道総研報告，Vol.4, No.10, pp.18-24, (1990) [Takeshita, K.: A method for track irregularity inspection by asymmetrical chord offset method, *RTRI Report*, Vol. 4, No. 10, pp. 18-24, 1990.]
11) 吉村彰芳：軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の検討とその適用，土木学会論文集，Vol.377／IV-6, pp.117-126, 1987. [Yoshimura, A.: Study on theoretical foundations to restoring an original waveform of track irregularity and its application, *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.377／IV-6, pp.117-126, 1987.]
12) 田中博文，梶原和博，網干光雄：営業線におけるレール波状摩耗の成長機構と進展過程の検証，鉄道総研報告，Vol.34，No.4，pp.17-22，2020. [Tanaka, H., Kajihara, K. and Aboshi, M.: Verification of growth mechanism and evolution process of rail corrugation by measuring rail surface roughness of commercial lines, *RTRI report*, Vol. 34, No. 4, pp. 17-22, 2020.]
13) 田中博文，梶原和博：レール凹凸連続測定装置の検出波長帯域の拡張に関する検討，土木学会第 77 回年次学術講演会論文集，VI-941, 2022. [Tanaka, H. and Kajihara, K.: Examination on expansion of detection wavelength band of rail surface roughness mearsuring trolley, *Japan Society of Civil Engineers 77th Annual Meeting*, VI-941, 2022.]
14) 斉藤大樹，田中博文：最適化理論を用いた偏心矢法の弦配置に関する検討，第 29 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2022)，S2-2-4，2022. [Saito, D. and Tanaka, H., A Studyof the optimal chord-length design in asymmetrical chord offset method, *The Proceedings of J-RAIL 2022*, S2-2-4, 2022.]
15) Kroese,D.P., Taimre,T., Botev, Z.I.（伏見正則，逆瀬川浩孝訳）：モンテカルロ法ハンドブック，朝倉書店, 2014. [Kroese,D.P., Taimre,T. and Botev, Z.I. (translated by Fushimi, M. and Sakasegawa, H.), *Handbook of Monte Carlo Methods*, Asakura Shoten, 2014.]
16) 日本工業規格 JIS B 0405-1991 普通公差－第 1 部：個々に公差の指示がない長さ寸法及び角度寸法に対する公差，1991. [Japanese Industrial Standards: *JIS B 0405-1991 General tolerances－Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications*, 1991]
17) 吉村彰芳，吉田康夫，細川岳洋，菊地勝浩：軌道保守管理データベースシステム:マイクロ LABOCS-Ⅱ+ の開発，鉄道総研報告, Vol.6, No.11, pp.69-78, 1992. [Yoshimura, A, Yoshida, Y., Hosokawa, T. and Kikuchi, K.: Development of Database System for Railway Track Maintenance Management, Micro LABOCS-Ⅱ+, *RTRI Report*, Vol.6, No.11, pp.69-78, 1992.]

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

THE EFFECT ON MEASUREMENT ACCURACY OF DIMENSIONAL TOLERANCE OF THE ASYMMETRICAL CHORD LAYOUT FOR THE RAIL SURFACE ROUGHNESS CONTINUOUS MEASUREMENT TROLLEY

Daiki SAITO and Hirofumi TANAKA

The rail surface roughness continuous measurement trolley is equipped with asymmetric 25-230 mm chord offset measurement. However, it has been difficult to detect the short wavelength component rail corrugation of about 10 to 30 mm, which occurs during the saturating term of its growth process. In this study, the effect of dimensional errors in the asymmetric chord layout is examined to revise it. The error on the estimated surface profile is characterized by the composite filter property of chord offset measuring (with dimensional error) and restoring, therefore, a Monte-Calro simulation assuming certain dimensional tolerance is conducted, and the error response is analyzed. As a result, the prospect is obtained that 25-33 mm and 36-43 mm chord offsets can measure the profile of 10 mm or longer wavelength with practical accuracy.