

論文 慣性正矢軌道検測装置の光飛び対策法の開発

石川 智行¹・坪川 洋友¹・大島 崇史²・菊池 健司³

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒184-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail:ishikawa.tomoyuki.38@rtri.or.jp, tsubokawa.yosuke.32@rtri.or.jp

²正会員 元 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒184-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail:ooshima-t@jreast.co.jp

³非会員 東日本旅客鉄道株式会社 (〒331-0823 埼玉県さいたま市北区日進町 2-479)
E-mail:kikuchi-ke@jreast.co.jp

慣性正矢軌道検測装置に用いられている 2 軸レール変位検出装置では、伸縮継目及び分岐器の影響や降雨・降雪の影響により、レールを適切に検知できなくなる光飛びという現象が発生しており、安定した軌道検測が行えないことが課題となっている。そこで、光飛び対策として、伸縮継目及び分岐器の付近を測定する際の 2 軸レール変位検出装置の詳細な挙動を分析し、2 軸レール変位検出装置の制御方法を改良した。対策前後の軌道検測データを比較した結果、伸縮継目及び分岐器の付近での光飛びの発生が抑制され、対策の有効性が確認された。また、降雨・降雪時においてレーザを投受光するガラス面への汚れ付着現象の分析を行い、防止策として汚れ防止カバーを提案した。そして、流体シミュレーションと風洞試験により提案した汚れ防止カバーの効果を確認した。

Key Words: Track Measurement Device, Inertial Mid-chord Offset Method, Light Crippling

1. はじめに

慣性正矢軌道検測装置は営業車両への搭載ができるため、軌道検測を高頻度で行うことが可能となる¹⁾。慣性正矢軌道検測装置では、**図-1**に示す検測ユニット内のジャイロと加速度計により検測ユニット本体の空間上の位置を求め、2 軸レール変位検出装置により検測ユニット本体とレールの相対位置を測定している。**図-2**に 2 軸レール変位検出装置 (以下、「2 軸変位計」とする。)の構造を、**図-3**に 2 軸レール変位検出装置の制御方式を示す。**図-3**に示した制御方式では、追従動作を行う範囲内

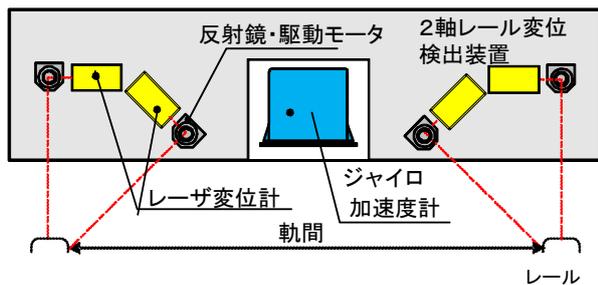


図-1 慣性正矢軌道検測装置の検測ユニット

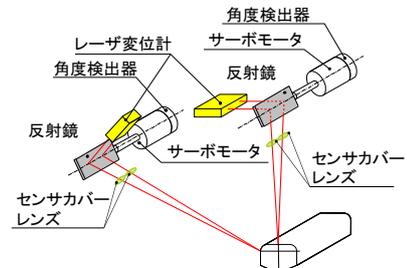


図-2 2軸レール変位検出装置の構造

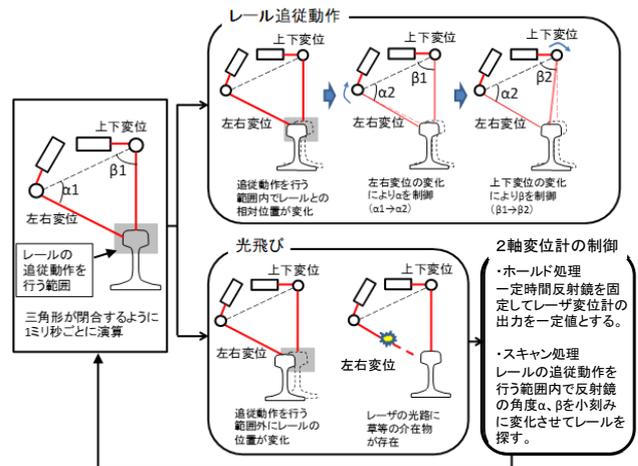


図-3 2軸レール変位検出装置の制御方式

にレールが存在する場合、2軸変位計は、三角形が閉合するように1msごとに反射鏡の角度 α 、 β を制御することによりレールの決められた位置を追従し、上下変位および左右変位を求める。一方、追従動作を行う範囲外にレールが位置する場合やレーザーの光路に草などが介在してレールを検出できなくなった場合には、反射鏡を固定してレーザー変位計の出力を一定値とするホールド処理が行われる。ホールド処理が行われてから120ms経過してもレールを検出できない場合には、レールの追従動作を行う範囲内で反射鏡の角度 α 、 β を小刻みに変化させてレールを探すスキャン処理が行われる。2軸変位計にこれらの制御が行われた時には、上下変位、左右変位に局所的な変動が生じる。この現象は「光飛び」と呼ばれており、光飛びが発生した場合には、軌道検測データに影響が現れることがあるため、安定した軌道検測が行えないことが課題となっている。なお、出力される軌道検測データには、通常時は0、ホールド処理やスキャン処理が実行された時には1が出力されるデジタル信号（以下、「ビット信号」とする。）が記録されている。

現在運用されている慣性正矢軌道検測装置で得られたデータから、光飛びの多くは以下の条件下で発生していることがわかっている。

- ①伸縮継目や分岐器の付近を測定する際に、レールの断面形状の変化を2軸変位計が追従して発生する光飛び
- ②降雨・降雪等の気象条件下において、レーザーの投受光のためのガラス面に水滴や粉塵等が付着し、レールを検出できなくなることによる光飛び

本研究では、それぞれの光飛びの発生時の2軸変位計の挙動を分析し、①に対してはソフト面の対策としてセンサの制御方法の改良、②に対してはハード面の対策としてガラス面への汚れの付着を防止する構造の設計検討により光飛びの発生を抑制する方法を開発した。

2. センサの制御方式の改良

(1) センサデータの測定と分析結果

慣性正矢軌道検測装置の検測データに関して、通常の検測で出力されるデータ（以下、「リプレイデータ」とする。）は0.25m間隔であり、ビット信号から光飛びの発生を把握は可能であるが、各種センサがどのように動作しているかを詳細に把握することはできない。一方で、レーザー変位計とミラー角の挙動のデータは1ms（1000Hz）のサンプリングで装置内部に一時的に保管されている。そこで、光飛びが発生するときのセンサの詳細な挙動の把握を目的として、図-4に示すようにデータロガーを慣性正矢軌道検測装置内に設置して、0.2ms（5000Hz）でレーザー変位計と反射鏡の動作のデータ（以下、「ロガー

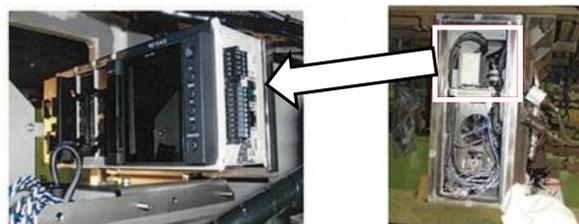


図-4 データロガーの設置状況

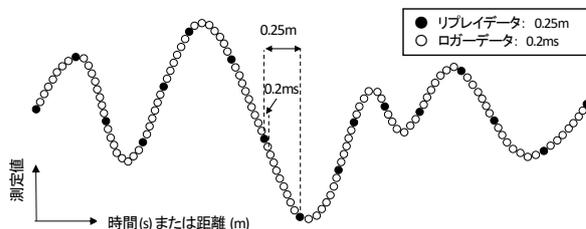


図-5 データのサンプリング間隔のイメージ

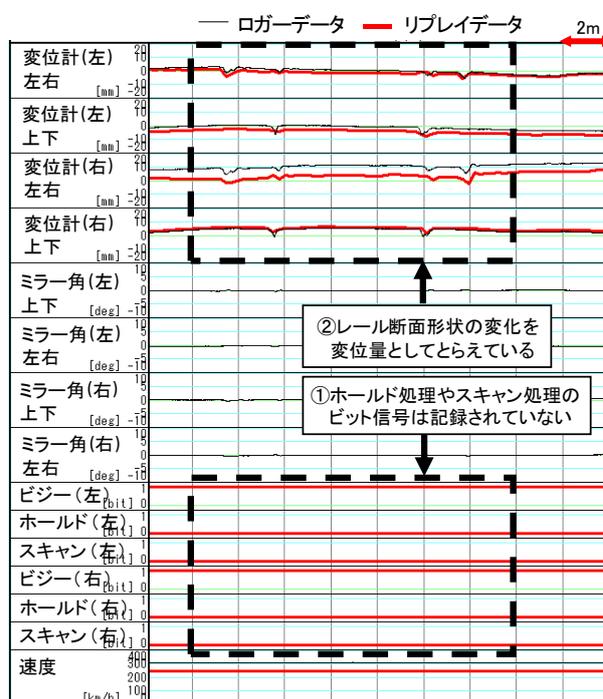


図-6 伸縮継目付近のセンサの挙動（ビット信号なし）

データ」とする。）を取得した。図-5に示すようにロガーデータは時間サンプリングであるため、距離サンプリングのデータへの変換を行い、伸縮継目及び分岐器でのセンサの挙動を分析した。

a) 伸縮継目・分岐器（ポイント・可動クロッシング）での挙動

伸縮継目・分岐器（ポイント・可動クロッシング）のレール乗り移り部を測定する際に発生している光飛びでは、ホールド処理やスキャン処理のビット信号が記録されない場合とされる場合が確認された。

図-6に、伸縮継目の測定において、ホールド処理やスキャン処理のビット信号は記録されていないが、変位計の波形が乱れた例を示す。変位計の波形の乱れは、伸縮継目のトングレールと受けレールの乗り移りの際に、レー

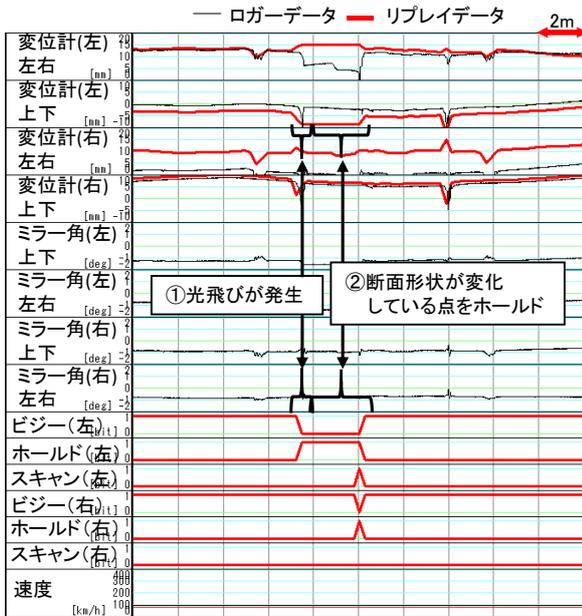


図-7 伸縮継目付近のセンサの挙動 (ビット信号あり)

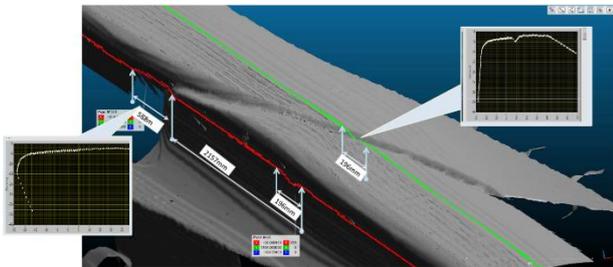


図-8 伸縮継目付近におけるレーザ変位計の追従位置

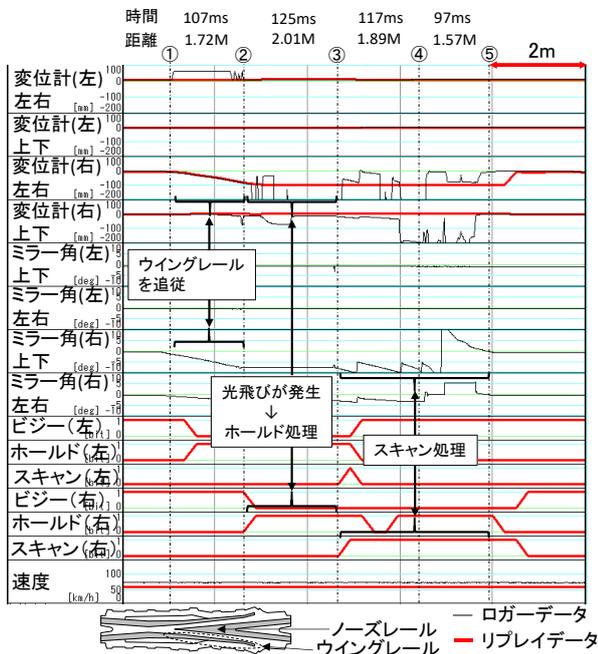


図-9 分岐器の固定クロッシング付近のセンサの挙動

ル断面形状の変化を変位量として捉えたためと考えられる。

図-7に、伸縮継目の測定において、ホールド処理やスキャン処理のビット信号が記録された例を示す。ロガーデータの上下変位計(左)の値は①の箇所大きく変動

している。リプレイデータでは、ロガーデータの変動が最も大きくなった位置でホールド処理が行われており、反射鏡が固定されている。そして、ホールド処理が行われてから一定時間経過後に、スキャン処理が行われ測定レールを検知している。なお、この伸縮継目では、ホールド処理において、レーザ変位計の値にレール断面形状の変化が始まる前の位置の測定値ではなく、レール断面形状が変化中の位置の測定値が参照されている。

図-8に、伸縮継目の測定においてレール断面形状の変化と2軸変位計のレーザ変位計の追従位置のイメージを示す。図-7および図-8よりレーザ変位計がレール頭頂面及び側面を測定している線の形状の変化が生じている位置と伸縮継目のトンゲレールと受けレールの乗り移りの位置は一致していることがわかる。これより、伸縮継目による光飛びはレールの断面形状の変化に起因する現象であることが確認できる。また、伸縮継目と構造が類似している分岐器(ポイント・可動クロッシング)においても同様の波形が確認され、同じ現象による光飛びが発生していた。

b) 分岐器(固定クロッシング)での挙動

図-9に、分岐器の固定クロッシングを対向方向で測定する際に、光飛びが発生した例を示す。図中には、光飛びが発生している距離と同区間の平均速度(57.97km/h)から算出した時間を示している。この分岐器の固定クロッシングでは、2軸変位計は、図中の①からウイングレールを追従してミラー角の値は小さくなっていき、②でウイングレールを見失ってホールド状態となり、③まで反射鏡を固定している。③からはレールを検出するスキャン処理の動作として、反射鏡を3回小さく動かしてホールドした位置の近傍でレールを探索したがレールを検出できず、④から反射鏡を大きく動かして、⑤でノーズレールを検出していることがわかる。

スキャン処理時に反射鏡を小さく動かす回数は、レールが近くにあることを想定して3回としている。ここで、図-9の分岐器の固定クロッシングの欠線部は0.888mであり、レーザ変位計による測定位置は、ホールド処理前またはホールド処理中に欠線部を通過してノーズレールの区間に入っていると考えられる。しかしながら、①から②で2軸変位計がウイングレールを追従し、ノーズレールから離れた位置でホールド状態となったため、反射鏡を小さく動かす近傍の探索ではノーズレールを検出できないと推測される。この結果より、2軸変位計のスキャン処理の動作が、光飛びが発生している時間を必要以上に長くしている場合があることがわかる。

(2) センサの制御方式の検討

(1)の分析結果から、光飛びの発生の抑制や測定値への影響を小さくするセンサの制御方式を検討した。

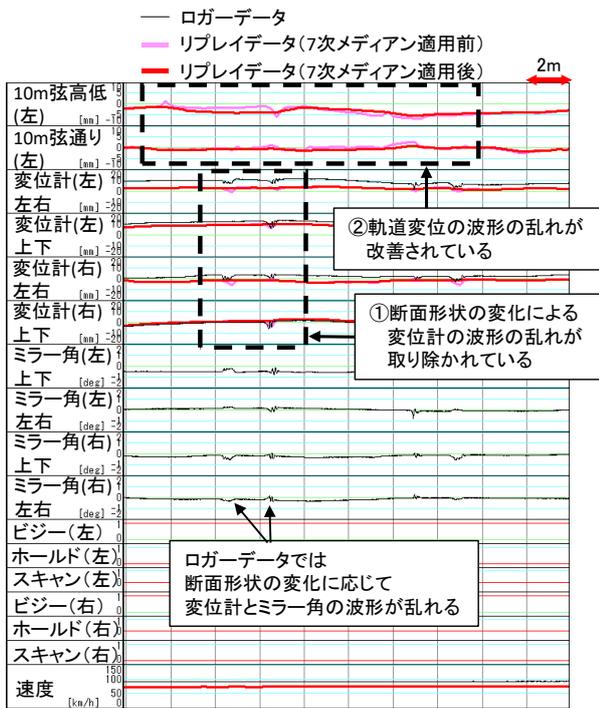


図-10 7次メディアンフィルタの適用結果

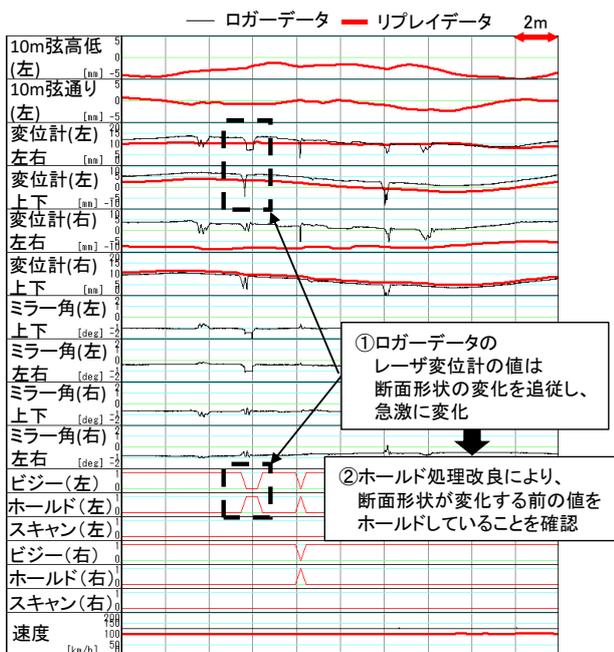


図-11 ホールド処理の改良結果

a) メディアンフィルタの適用

伸縮継目や分岐器において、レール断面形状の変化を追従することにより軌道検測結果に影響が生じることは、2軸変位計の制御方式上、避けることは不可能である。そこで、レール断面形状の変化を追従する過程で生じる光飛びの影響を小さくする方法として、メディアンフィルタ処理の適用を検討した。ここで、ロガーデータのような0.2msの時間サンプリングのデータにメディアンフィルタ処理を適用するには、メディアンフィルタの最適な次数が測定時の車両の速度により異なるため、次数の

決定が困難である。このため、0.25mの距離サンプリングのデータに対してメディアンフィルタ処理を適用する方法を検討することとした。また、レール断面形状の変化による変位計とミラー角の波形の乱れの延長は、伸縮継目や分岐器のポイントと可動クロッシングでは概ね0.6m以内であったが、分岐器の固定クロッシングでは約1.5mであった。固定クロッシングにおける光飛びの影響をメディアンフィルタ処理により抑制するためには、メディアンフィルタの次数は15次よりも大きくする必要があるが、伸縮継目等における測定値を不要に滑らかにして軌道変位の著大値を判定できなくなる恐れがある。ここで、分岐器は現在の軌道検測車の測定値でも超過判定の除外扱いとされているため、固定クロッシングを除く伸縮継目及び分岐器の区間における光飛びの影響を取り除くことを目的として、メディアンフィルタの次数は7次とした。

図-10に、7次メディアンフィルタを適用した例を示す。ロガーデータではレール断面形状の変化により変位計とミラー角の波形が乱れていたが、処理を行ったリプレイデータではレーザ変位計の測定値に対してレール断面形状の変化の影響が取り除かれ、軌道変位の波形の乱れが改善されていた。この結果より、本処理が光飛びに対して有効であることを確認した。

b) ホールド処理の改良

2軸変位計にホールド処理が行われた場合には、反射鏡の動作は固定され、レーザ変位計の値は、ホールドが開始される5点(1ms)前の測定値が参照されている。しかしながら、伸縮継目や分岐器を測定する場合には、レール断面形状が変化している途中の測定値が参照される場合があるため、1msより前の測定値を参照するように2軸変位計の制御方式を改良する必要がある。

図-11に、ホールド処理の改良を行った結果を示す。ホールド処理時にレール断面形状の変化より前の測定値を参照するために、分岐器のポイント部およびクロッシング部におけるレール断面形状の変化の延長を考慮して、ホールド処理で参照するデータを5ms前の測定値とした。5ms前は、速度120km/hで0.17m前、速度320km/hで0.44m前であり、0.25m間隔の軌道変位の測定値への影響は速度320km/hでも1または2データである。このため、上述したメディアンフィルタを併用することで、光飛びの影響を取り除くことができると考えられる。

図中のロガーデータでは、伸縮継目のレール断面形状の変化箇所ではレーザ変位計の値は急激に変化しており、レーザ変位計の挙動は従来と同様であることがわかる。一方でリプレイデータでは、レーザ変位計がレール断面形状の変化の影響を受ける直前の値がホールドされており、ホールド処理の改良が光飛びに対して有効であることを確認した。なお、ホールド処理が行われる時間につ

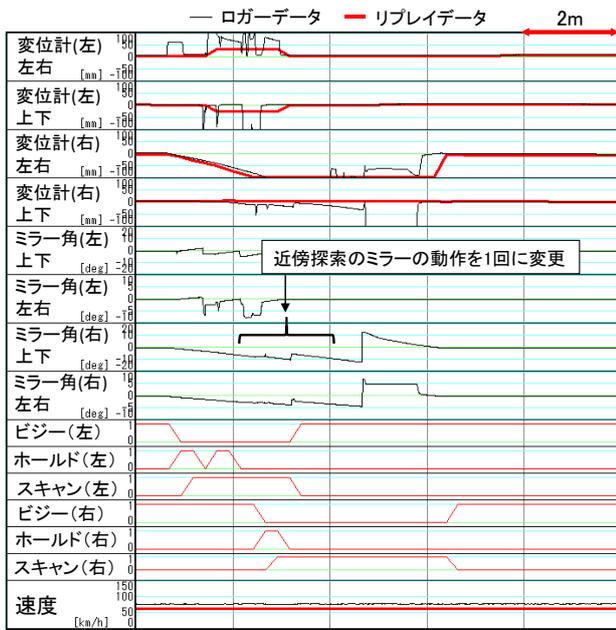


図-12 スキャン処理の改良結果

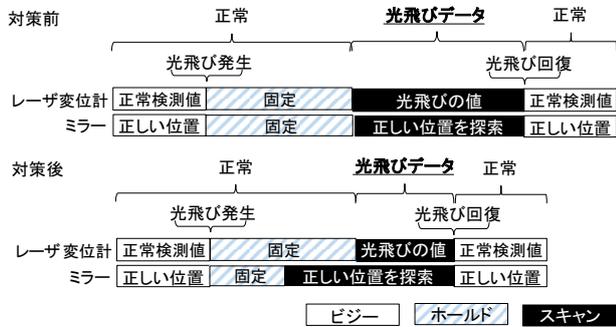


図-13 ホールド・スキャン処理の適用タイミングの改良

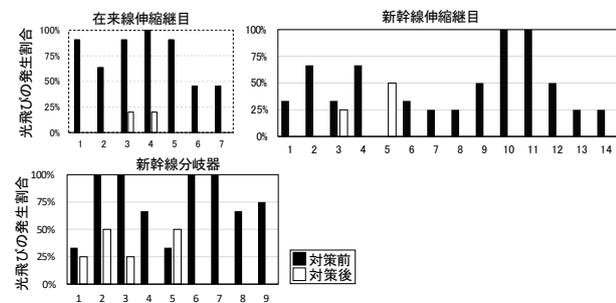


図-14 センサの制御方式の改良による光飛びの改善割合

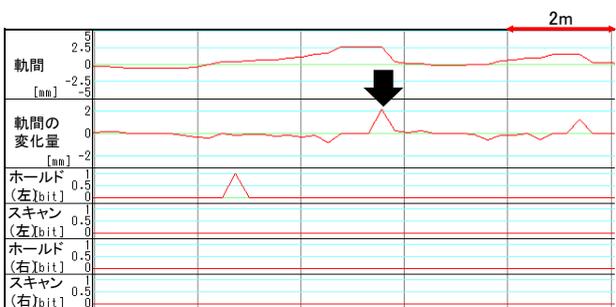


図-15 対策後に発生割合が増加した伸縮継目5付近の波形

いては、車両の速度を考慮して、新幹線と在来線で異なる設定とした。

c) スキャン処理の改良

2軸変位計のスキャン処理では、ホールド処理によって反射鏡を固定した位置の近傍で3回レールを探索し、レールを検出できなかった場合に広い範囲でレールを探索する処理が行われている。そこで、近傍探索を1回に変更することで、早期にレールが検出でき、分岐器の固定クロッシングにおける光飛びの影響を小さくすることが期待できると考えられる。

図-12に、スキャン処理の近傍探索を1回に改良して、固定クロッシングで光飛びが発生したときの波形例を示す。図より、固定クロッシングにおける光飛びが解消されるまでの時間が短縮できていることを確認した。なお、スキャン処理によってレールを検出した箇所のうち、広い範囲でレールを探索する処理が発生しているのは、固定クロッシングにおいてウイングレール追従した場合のみであった。その他の箇所では、反射鏡を固定した位置から1回目の近傍探索でレールを検出できていたことから、近傍探索を1回に変更しても問題ないと考えられる。

d) ホールド・スキャン処理の適用タイミングの改良

ホールド処理では最大で120ms反射鏡を固定するため、新幹線のように速度320km/hでホールド処理が行われた場合、10.6mの区間で追従動作が行われず、軌道変位の超過値等を見逃す可能性がある。このため、ホールド時間については、車両の速度を考慮して設定する必要がある。また、ロガーデータの分析結果より、光飛びの影響する測定値を少なくするためには、光飛び発生後、早期に反射鏡を動作させてレールの探索を開始することが望ましいことがわかった。そこで、図-13に示すように、ホールド処理の途中で反射鏡の固定だけを解除してレールを探索し始めるように、ホールド・スキャン処理を適用するタイミングを改良した。

(3) センサの制御方式の改良効果の検証

現在運用されている慣性正矢軌道検測装置に対して、検討したセンサの制御方式を実装し、対策の効果を検証した。図-14に、比較的高い割合で光飛びの発生があった在来線の7カ所の伸縮継目、新幹線の14カ所の伸縮継目、9カ所の分岐器について、ホールド処理やスキャン処理のビット信号と0.25m間の軌間の変化量(2mm以上)から対策前後の光飛びの発生割合を算出した結果を示す。運用の都合上、対策前後で分析したデータ数は異なり、在来線は対策前11試番、対策後5試番で、新幹線は対策前3または4試番、対策後4試番を用いている。

図-14より、在来線、新幹線ともに、伸縮継目の測定における光飛びの発生割合は8割程度減少していた。なお、新幹線の伸縮継目5及び分岐器5では対策後に光飛びの発生割合が増加していた。これらの伸縮継目及び分岐器では、図-15に示すように軌間の変化が2mmを僅か

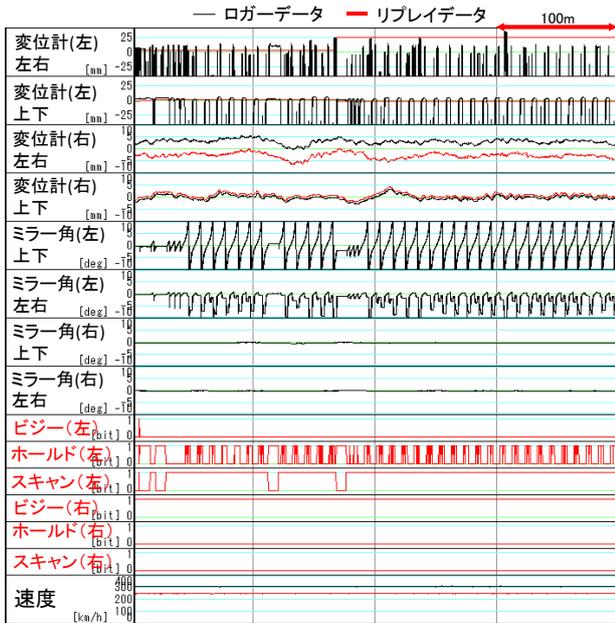


図-17 ガラス面の汚れによる光飛びの波形

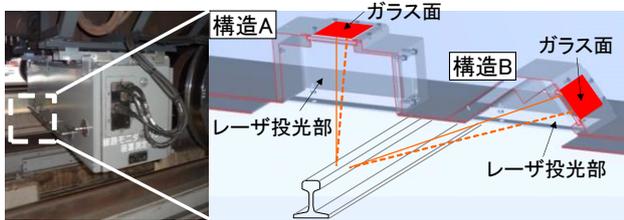


図-18 2軸変位計の構造



(a) 新幹線 (b) 在来線

図-19 ガラス面の汚れの状況

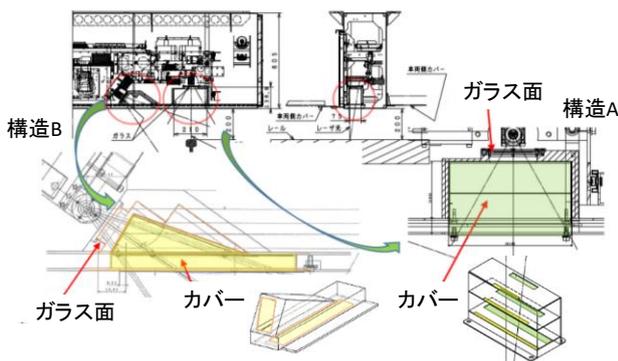


図-20 汚れ防止カバーの構造

に超えたため図-14 では光飛びと判定したが、軌道変位の測定値には大きな乱れがないことを確認している。また、対策前後の光飛びの発生割合の傾向は可動クロッシングでも同様であった。この結果より、本研究で新たに測定したロガーデータをもとに行ったセンサの制御方式の改良は、光飛びの抑制に効果があることを確認した。

3. 汚れ付着防止構造の設計検討

(1) ガラス面の汚れによる光飛びの分析結果

降雨・降雪等の条件下で発生している光飛びは、車両の走行によって巻き上げられた水滴や粉塵等が2軸変位計のレーザーの投受光部にあるガラス面に付着し、レーザーの遮断または屈折角に変化が生じることで、発生していると考えられる。図-17に、ガラス面の汚れによる光飛びの波形例を示す。

図-18に示すように、現在の2軸変位計の構造は、ガラス面への異物の付着を防ぐために、レーザーの投受光部を凹型の形状としてガラス面を可能な限りレール面から離している。以下では、凹型の形状の部分を「レーザー投光部」、レーザーをレール頭頂面に投光するレーザー投光部の構造を「構造A」、レール側面に投光する測定窓部の構造を「構造B」とする。

図-19(a)に示すように、新幹線で運用されている装置のガラス面には鉄粉を主とする異物が万遍なく付着していることが確認された。一方で、図-19(b)に示すように、在来線で運用されている装置のガラス面には汚れはほとんど付着していなかった。

ここで、ガラス面に付着する水滴等が光飛びやレール変位計の測定値に与える影響を確認するため、レールやガラス面に水滴を付着させ、レーザー変位計の出力を観測した結果、光飛びの波形が再現することを確認した。

(2) 汚れ付着防止構造の検討

ガラス面への汚れの付着を防止する数種類の方式を検討し、現在運用されている装置のレーザー投光部周辺の構造を変更することがない方式として、レーザー投光部に着脱が可能な汚れ防止カバーについて詳細な検討を行った。

図-20に、レーザー投光部の構造A、構造Bのそれぞれに着脱可能な汚れ防止カバーの構造を示す。汚れ防止カバーには、車両の走行により巻き上げられる水滴等の汚れがガラス面まで到達しづらくするための構造として、レーザー光路用のスリットのあるしきりを設けた。

(3) 汚れ付着防止構造の効果の検証

a) 流体シミュレーション

2軸変位計のレーザー投光部に汚れ防止カバーを着装したことによるガラス面への汚れ付着防止の効果を確認するため、汚れ防止カバーを着装していない条件（以下、「現行」とする。）と着装した条件（以下、「対策」とする。）について、汎用熱流体解析ソフトウェア「ANSYS CFX²」により流体シミュレーションを行い、レーザー投光部内の流速を比較した。

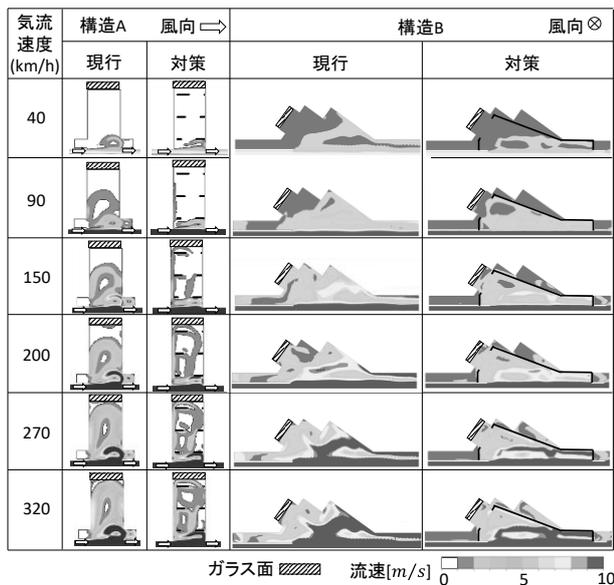


図-21 流体シミュレーションの結果

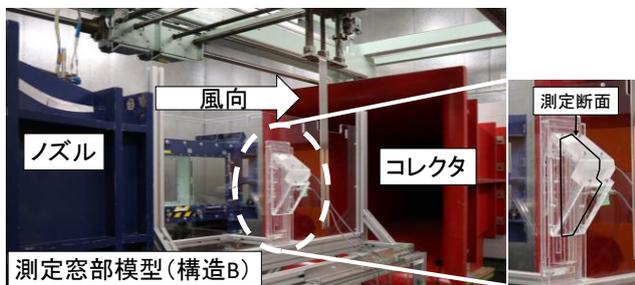
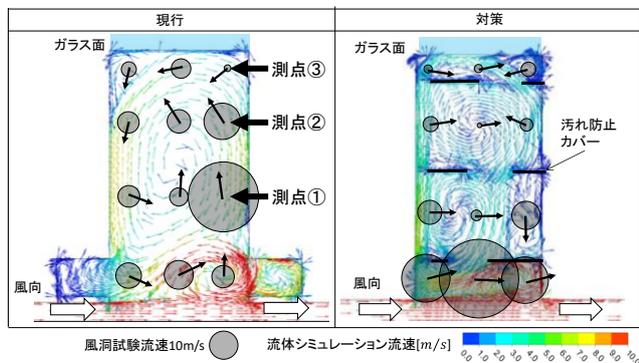
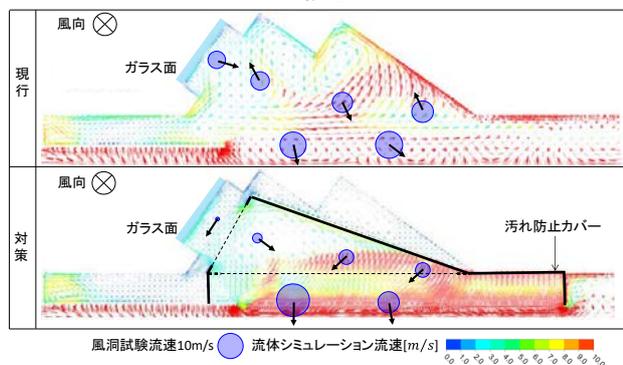


図-22 風洞試験の状況



(a) 構造 A



(b) 構造 B

図-23 流体シミュレーションと風洞試験の結果の比較

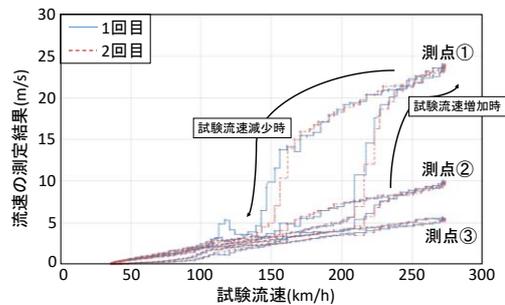


図-24 試験流速の変化による流速の測定結果の変化

図-21 に、対策前後の流体シミュレーションの結果を示す。図-21 において、風向は構造 A では矢印の方向、構造 B では手前から奥の方向である。現行の結果では、構造 A、構造 B ともに、入力する気流速度が大きくなると、レーザ投光部内の流速も大きくなり、ガラス面に近い位置まで空気の流れが到達していると推測される。一方、対策の結果では、構造 A、構造 B ともに、レーザ投光部内およびガラス面付近の流速は現行と比較して小さくなっている。この結果より、汚れ防止カバーを装着すると、車両の走行に伴うレーザ投光部内への異物の進入を減らすことができ、ガラス面への汚れの付着を抑制できると考えられる。

b) 風洞試験

流体シミュレーションの結果の妥当性を検証するため、レーザ投光部の模型を製作して、鉄道総研の小型低騒音風洞で試験を行った。図-22 に、風洞試験の状況を示す。この風洞では、風はノズルから吹き出され、レーザ投光部の模型が設置されている区間を通過して、コレクタに向かって流れる。試験流速は、車両が走行している時の先頭車両の下の流速は走行速度の 78%程度となる³⁾と仮定して、在来線を想定した 90km/h と新幹線を想定した 270km/h とした。

図-23 に、試験流速を 270km/h とした条件について、流体シミュレーションの結果に風洞試験の結果を重ねた結果を示す。流体シミュレーションの結果は矢印で示しており、矢印の向きが流れの向きを、矢印の色が流速を示している。風洞試験の結果は、円を起点とする矢印が流れの向きを、円の大きさが流速を示しており、円が大きいほど流速が大きい。図-23 より、構造 A、構造 B ともに、風洞試験の結果の流速が大きかった測点では、流体シミュレーションの流速も大きい傾向にあった。また、流れの向きについても、風洞試験と流体シミュレーションの結果は概ね一致していた。この結果より、汚れ防止カバーを装着することで、レーザ投光部内の流速は低下し、流れの向きはガラス面から外側に向かうように改善されると考えられ、ガラス面の汚れによる光飛びの抑制の効果が期待できることを確認した。

図-24 に、図-23(a)中の試験流速と測点①、②、③にお

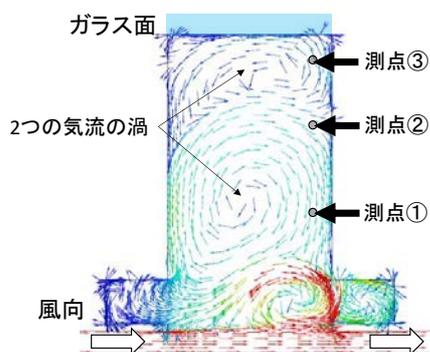


図-25 流体シミュレーション結果（構造 A・200km/h）

ける流速の測定結果の関係を示す。測点①と②の流速の測定結果では、程度の差はあったが、試験流速を大きくしていく場合は 220km/h 程度の時に急激に増加し、試験流速を小さくしていく場合は 160km/h 程度の時に急激に低下していた。また、この流速の測定結果の変化は、2 回の測定結果で同様の傾向が得られ、再現することを確認した。図-25 に、構造 A の現行において気流速度を 200km/h とした流体シミュレーションの結果を示す。流体シミュレーションでは、図-23 より気流速度が 270km/h の場合では、レーザ投光部内の気流の渦は 1 つであったが、図-25 のように気流速度が 200km/h となると、レーザ投光部内に 2 つの気流の渦が発生していた。ここで、気流速度が 200km/h のときに見られた 2 つの気流の渦のうちガラス面付近の方の気流の渦は流速は小さかった。このため、走行速度が 200km/h 以下の在来線で運用されている装置では、図-19(b)に示すようにガラス面の汚れが少なかったと考えられる。今後は、流体シミュレーション及び風洞試験の結果を参考として、装置を搭載する車両の走行速度ごとに適したレーザ投光部の構造を検討することが可能であると考えられる。

4. おわりに

慣性正矢軌道検測装置の光飛びについて、ソフト面の対策としてセンサの制御方法の改良、ハード面の対策としてガラス面への汚れの付着を防止する構造の設計検討を行った。

ソフト面の対策では、データロガーで取得した高サンプリング周波数のデータを用いて、伸縮継目及び分岐器の付近を測定する際の 2 軸レール変位検出装置の詳細な挙動の分析を行い、分析結果を基に 2 軸レール変位検出装置の制御方法を改良した。対策前後の慣性正矢軌道検測装置で取得した軌道検測データを比較した結果、伸縮継目及び分岐器の付近での光飛びが抑制され、対策の有効性が確認された。

ハード面の対策では、降雨・降雪などの条件下で発生しているレーザを投受光するガラス面への汚れ付着現象の分析を行い、防止策として現在運用されている装置にも着脱可能な汚れ防止カバーを提案した。そして、流体シミュレーションと風洞試験により、提案した汚れ防止カバーの効果を確認した。

参考文献

- 1) 坪川洋友, 矢澤英治, 小木曾清高, 南木聡明: 車体装架型慣性正矢軌道検測装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.2, pp.7-12, 2012.
- 2) ANSYS 社 HP (<https://www.ansys.com/ja-jp/>)
- 3) 井門敦志, 山崎展博, 栗田健, 松本雅則: LDV による車両床下流速分布の測定, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.199-200, 2019.

(2019.4.5 受付)

Development of Countermeasures about Light Clipping for Track Measuring Device with the Inertial Mid-chord Offset Method

Tomoyuki ISHIKAWA, Yosuke TSUBOKAWA, Takashi OSHIMA and Kenji KIKUCHI

Optical two-axis rail displacement sensors used track measurement device with the inertial mid-chord offset method sometimes cannot detect rail displacement correctly by an expansion joint or a turnout, and weather condition, like rain or snow. This phenomenon is called “light clipping” and we cannot obtain accurate measurement data when light clipping is occurred. As a countermeasure to light clipping, we measure detailed movement of rail displacement sensors and improve control methods of these sensors. As a result, frequency of light clipping by an expansion joint or a turnout is decreased. Moreover, we analyze how to attach soiled things to windows for laser projecting and receiving under rain or snow condition and propose a cover for prevent soiled things. Then we confirm effectiveness of this cover by fluid simulation and wind tunnel testing.