特集：軌道技術

慣性正矢軌道検測装置のレール検出精度向上策の提案

石川　智行*　　坪川　洋友*　　大島　崇史**

Improvement Proposal about Rail Detection Method for Track Measuring Device with the Inertial Mid-chord Offset Method

Tomoyuki ISHIKAWA　　Yosuke TSUBOKAWA　　Takashi OSHIMA

Optical two-axis rail displacement sensors used as a part of an on-board track measurement device with the inertial mid-chord offset method sometimes cannot detect rail correctly depending on track structures, e.g. an expansion joint or a turnout, and on weather conditions such as rain or snow. This phenomenon is called “light clipping” and we cannot obtain accurate measurement data when light clipping occurs. To find a countermeasure to light clipping, we measure detailed movement of the sensors. We propose improved control methods for existing devices. As a result, the frequency of light clipping by track structures is decreased. We also propose a cover for preventing soiled things from attaching to windows for laser projecting and receiving under rain or snow condition. Then we confirm the effectiveness of this cover by fluid simulation and wind tunnel testing.

キーワード：慣性正矢軌道検測装置，2 軸レール変位検出装置，光飛び，流体シミュレーション，風洞試験

1．はじめに

営業車両に搭載可能な小型の軌道検測装置として慣性正矢軌道検測装置が開発され，運用されている[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，図2に示す2軸レール変位検出装置（以下，「2軸変位計」とする）により検測ユニット本体とレールの上下方向及び左右方向の相対位置を測定して，軌道変位を算出している。

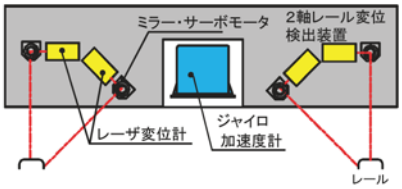

図１　慣性正矢軌道検測装置の検測ユニット

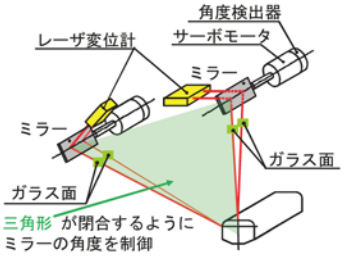

図２　２軸レール変位検出装置の構造

＊　軌道技術研究部　軌道管理研究室
＊＊　軌道技術研究部　軌道管理研究室（現　東日本旅客鉄道株式会社）

現在運用されている装置では，レーザがレールを検出できなくなった場合，軌道検測データに局所的な変動が生じる現象が発生することがある。この現象は「光飛び」と呼ばれ，多くは以下のような場合に発生している。

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に 2 軸変位計が追従して発生する場合

②降雨・降雪等の気象条件下において，レーザの投受光窓のガラス面に水滴や粉塵等が付着し，レールを検知できなくなる場合

本論文では，光飛びの発生時の 2 軸変位計の挙動を分析し，①に対してはセンサの制御方式の改良，②に対しては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し，レール検出精度を向上させる方法を提案した結果を報告する[2)]。

2．２軸変位計の制御方式

2 軸変位計は，追従動作を行う範囲内にレールが存在する場合，三角形が閉合するように 1ms ごとにミラーの角度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，上下変位及び左右変位を測定している。ここで，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，ミラーを固定してレーザ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知できない場合には，レールの追従動作を行う範囲内でミラーを小刻み

に変化させてレールを探すスキャン処理が行われる。2軸変位計で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，軌道検測データに影響が現れることがある。この現象が光飛びであり，これが発生すると，安定した軌道検測が行えなくなることが本装置の課題である。なお，出力される軌道検測データには，通常時は0で，ホールド処理やスキャン処理が実行された時は1が出力されるデジタル信号（以下，「ビット信号」とする）が記録される。

3．センサの制御方式の改良

3.1　センサデータの取得と分析

慣性正矢軌道検測装置では，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の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，光飛び発生時のセンサの詳細な挙動の把握を目的として，データロガーを装置内に設置し，0.2ms（5000Hz）でレーザ変位計とミラーの動作のデータ（以下，「ロガーデータ」とする）を取得した。ロガーデータは図3に示すように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。

3.1.1　伸縮継目･分岐器（ポイント･可動クロッシング）

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4に，伸縮継目の測定において，ホールド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。この乱れは，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，変位計がレー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5に，伸縮継目の測定において，ホールドやスキャン処理のビット信号が記録された例を示す。ロガーデータの変位計（左）上下の値は①の箇所で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，ミラーが固定されている。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，レーザ変位計の値には，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している途中の位置の測定値がホールドされている。

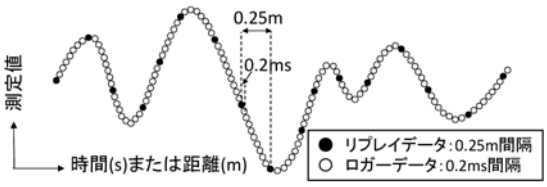

図3　データのサンプリング間隔のイメージ

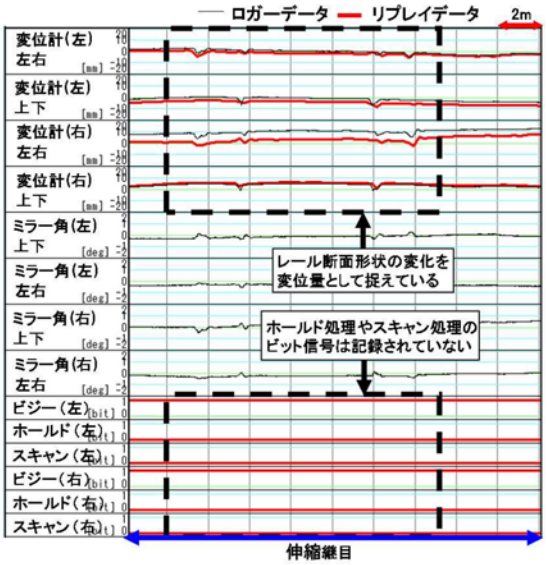

図4　伸縮継目でのセンサの挙動（ビット信号なし）

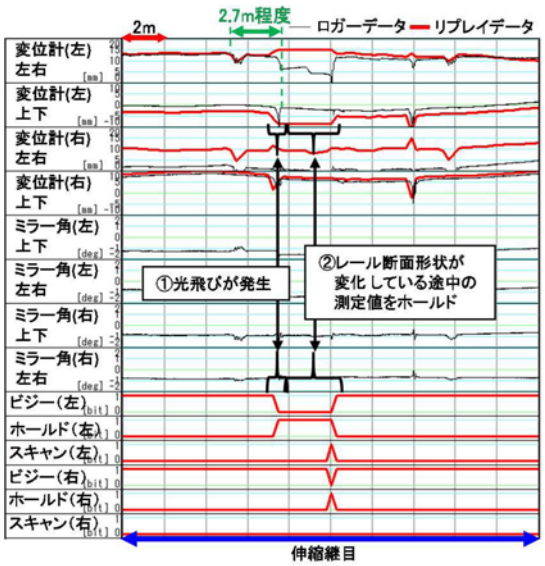

図5　伸縮継目でのセンサの挙動（ビット信号あり）

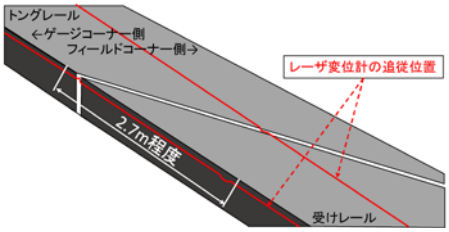

図6　伸縮継目付近のレーザ変位計の追従位置

図 6 に，伸縮継目の測定における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 5 及び図 6 より，レール乗り移り部を測定する際に変位計の波形に乱れが生じた区間の延長と，伸縮継目のトングレールと受けレールの乗り移り時に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に形状の変化が生じる区間の延長が概ね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わかる。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）においても変位計の波形に同様の現象が確認された。

3. 1. 2　分岐器（固定クロッシング）

図 7 に，分岐器の固定クロッシングを対向方向に進行して測定する際に，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に追従してミラー角の値が小さくなっていき，②でウイングレールを見失ってホールド処理が行われ，③までミラーを固定している。③からはレールを検出するスキャン処理の動作として，ミラーを 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からミラーを大きく動かして，⑤でノーズレールを検出していることがわかる。

スキャン処理時の近傍探索の回数は，レールが近くにあると想定して 3 回としている。ここで，図 7 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に追従し，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，近傍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，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。

3. 2　センサの制御方式の検討

センサデータ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。

3. 2. 1　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に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，避けることができない。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の適用を検討した。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，次数 7 次のメディアンフィルタをリプレイデータに対して適用することとした。

図 8 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，メディアンフィルタを適用し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。

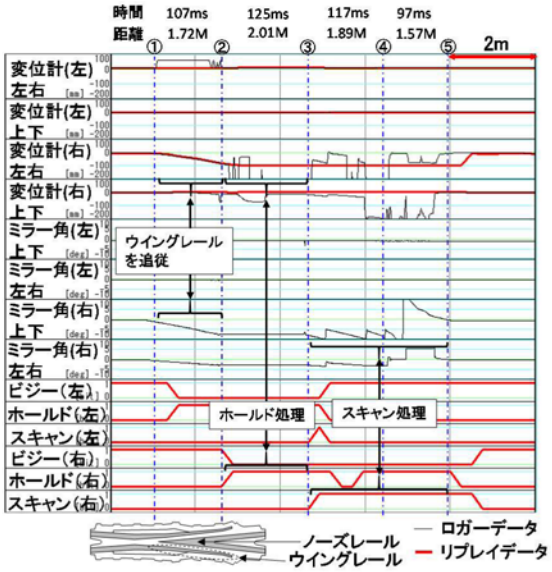

図 7　分岐器の固定クロッシングでのセンサの挙動

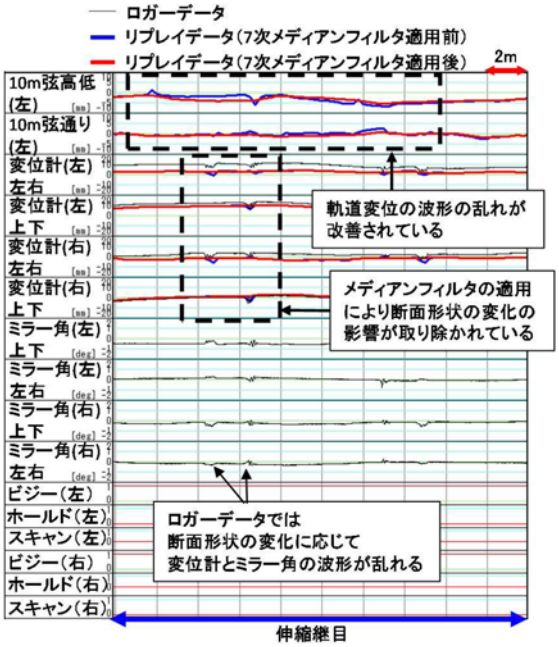

図 8　メディアンフィルタの適用結果

3. 2. 2　ホールド処理の改良

ホールド処理では，ミラーを固定し，ホールドが開始される 5 点（1ms）前の測定値をレーザ変位計の値として参照している。しかしながら，伸縮継目や分岐器の測定時には，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，断面形状が変化する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。そこで，伸縮継目及び分岐器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 9 に，ホールド処理の改良を行った結果を示す。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，変位計の値にレール断面形状の変化が始まる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。

3. 2. 3　スキャン処理の改良

スキャン処理では，ホールド処理によってミラー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を探索する処理が行われている。しかしながら，分岐器の固定クロッシングでは，近傍探索ではレールを検出できず，近傍探索を 3 回行うことが光飛びの影響範囲を長くする原因となっている。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可能となり，光飛びの影響範囲を小さくできると考えられる。

図 10 に，スキャン処理の近傍探索を 1 回に改良した後に，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するのは，固定クロッシングにおいてウイングレールに追従した場合のみであった。その他の箇所では，ミラー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。

3. 2. 4　ホールド・スキャン処理適用タイミングの改良

ホールド処理では最大で 120ms 間ミラーを固定するため，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，光飛びの影響範囲を小さくするためには，光飛び発生後，早期にレールの探索を開始することが望ましい。そこで，図 11 に示すように，ホールド処理の途中でミラーの固定を解除してレール探索を始めるように，ホールド・スキャン処理のタイミングを改良した。

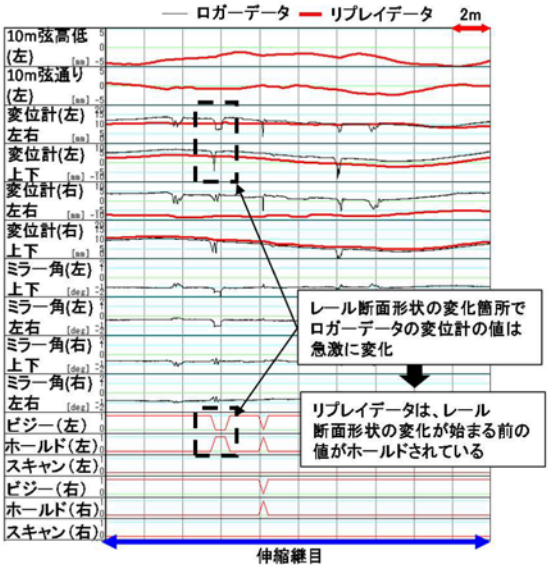

図 9　ホールド処理の改良結果

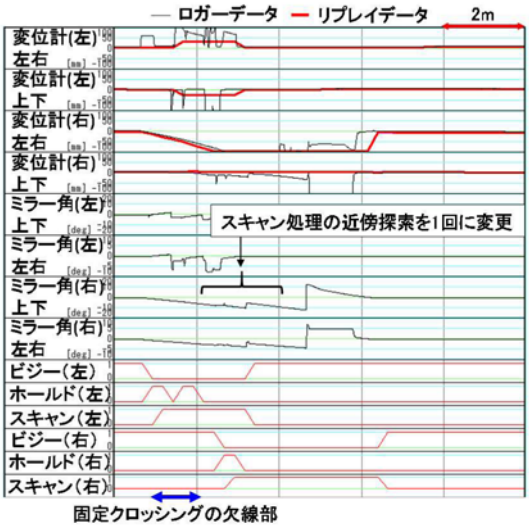

図 10　スキャン処理の改良結果

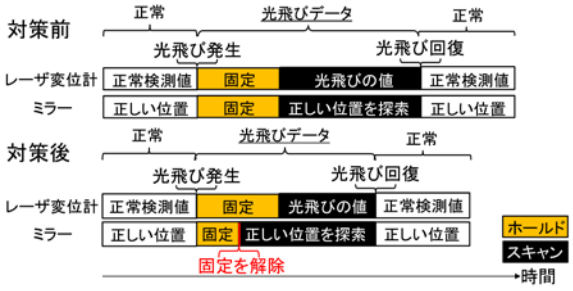

図 11　ホールド・スキャン処理適用タイミングの改良

3.3　センサの制御方式の改良効果の検証

検討したセンサの制御方式を現在運用されている装置に対して実装し，対策の効果を確認した。図 12 に，比較的高い割合で光飛びの発生があった在来線の 7 ヵ所の伸縮継目，新幹線の 14 ヵ所の伸縮継目，9 ヵ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 試番のデータを，新幹線は対策前 3 または 4 試番，対策後 4 試番のデータを用いている。

図 12 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，対策後の軌間の変化が 2mm を僅かに超えており光飛びと判定したため，対策後に光飛びの発生割合が増加していたが，軌道の測定値には大きな乱れがないことを確認している。この結果より，本研究で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。

4．汚れ付着防止構造の設計検討

4.1　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 軸変位計のレーザ投受光窓のガラス面に付着し，レーザの遮断または屈折角の変化が生じることで発生していると考えられる。ガラス面の汚れの状況として，現在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，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。

図 13 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「レーザ投光部」，レーザをレール頭頂面，側面に投光するレーザ投光部の構造をそれぞれ「構造 A」，「構造 B」とする。

4.2　汚れ付着防止構造の検討

現在運用されている装置のレーザ投光部周辺の構造を変更することなくガラス面への汚れの付着を防止する方式として，レーザ投光部に着脱が可能な汚れ防止カバーの検討を行った。図 14 に，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に，レーザ光路用のスリットのあるしきりを設けている。

4.3　汚れ付着防止構造の効果の検証

4.3.1　流体シミュレーション

汚れ防止カバーの着装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

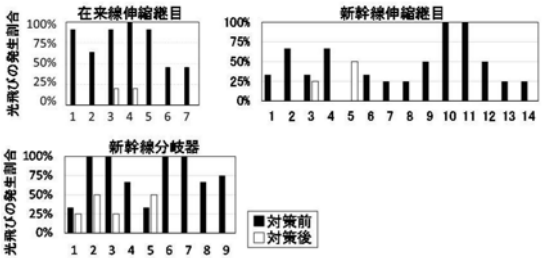

図 12　センサの制御方式の改良による光飛びの改善割合

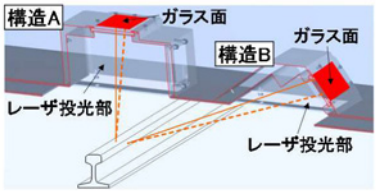

図 13　2 軸変位計の構造

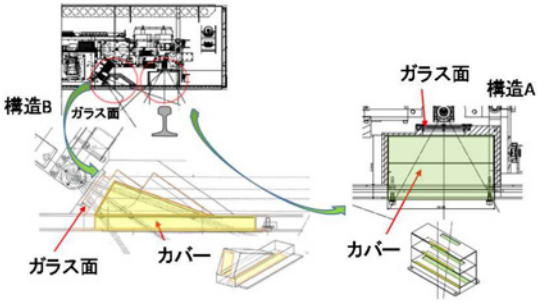

図 14　汚れ防止カバーの構造

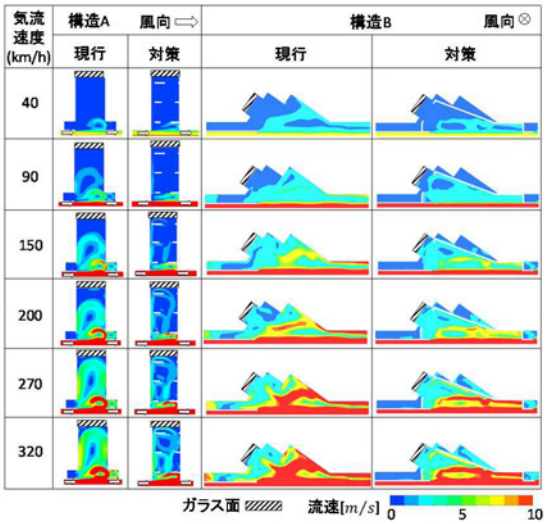

図 15　流体シミュレーションの結果

ア「ANSYS CFX[3)]」により流体シミュレーションを行い，レーザ投光部内の流速を比較した。

図 15 に，対策前後の流体シミュレーションの結果を示す。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, 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，対策後には，構造 A，B ともに，レーザ投光部内及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，汚れ防止カバーの着装により，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。

4. 3. 2　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，図 16 に示すように鉄道総研の小型低騒音風洞にレーザ投光部の模型を設置して，レーザ投光部内の風速及び風向の測定を行った。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。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[4)]となることから，試験流速は在来線を想定した 90km/h と新幹線を想定した 270km/h とした。

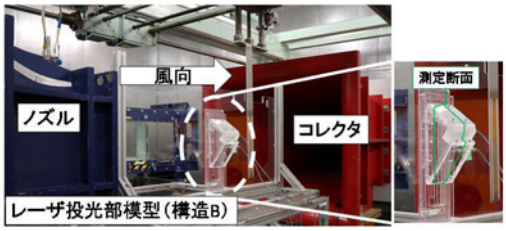

図 16　風洞試験の状況

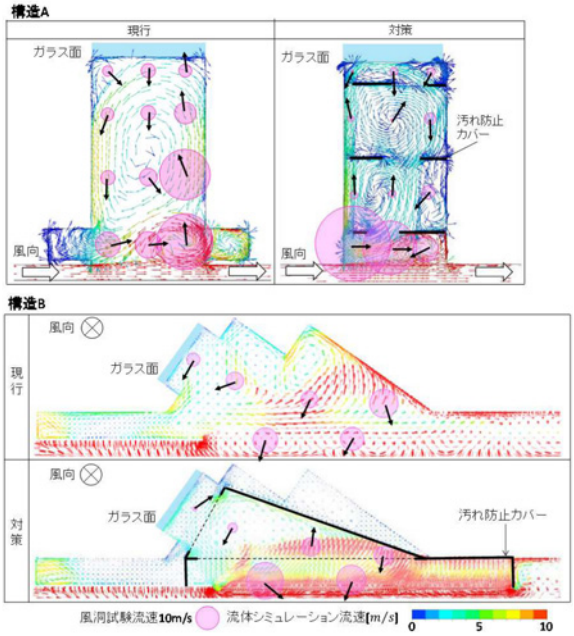

図 17　流体シミュレーションと風洞試験の結果の比較

図 17 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と風洞試験の結果を示す。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ことを示す。図 17 より，構造 A，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。また，ガラス面付近の流れの向きはガラス面に対して平行になっている傾向があり，流速が小さいほどガラス面に汚れが付着しにくいと考えられるが，汚れ防止カバーを着装することで，レーザ投光部内の流速は低下しているため，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。

5．まとめ

慣性正矢軌道検測装置のレール検出精度向上のため，センサの制御方式の改良及び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。得られた結果は以下の通りである。

(1) 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，センサ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ていることを確認した。

(2) 降雨・降雪時においてレーザの投受光のためのガラス面への汚れ付着の防止策として，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。

文　献

1）坪川洋友，矢澤英治，小木曽清高，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）石川智行，坪川洋友，大島崇史，菊池健司：慣性正矢軌道検測装置の光飛び対策法の開発，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.23，pp.187-194，2019

3）ANSYS 社 HP：https://www.ansys.com/ja-jp/
（参照日：2019 年 12 月 2 日）

4）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.199-200，2009