

論文 差分法を併用した慣性正矢軌道検測装置の 波形処理による測定精度向上手法の開発

須藤 雅人¹・坪川 洋友¹・吉田 尚²

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail:suto.masato.11@rtri.or.jp, tsubokawa.yosuke.32@rtri.or.jp

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 (〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町2-479)
E-mail:hisasi-yosida@jreast.co.jp

差分法を併用した慣性正矢軌道検測装置の慣性正矢法と差分法の切り替えは、それぞれの測定値を混合する速度帯を設定し、速度に応じて混合割合を変化させることで徐々に遷移させている。しかし、慣性正矢法の測定精度は、短波長成分では概ね速度20km/h以上で十分高いのに対し、長波長成分では装置ごとにばらつきがあり、混合した測定値の測定精度低下の要因となっていた。

そこで、慣性正矢法の長波長成分を除くため、慣性正矢法からは短波長成分を、差分法からは長波長成分をそれぞれ抜き出して合成した波形を新たに作成し、差分法および慣性正矢法と速度に応じて切り替える手法を開発した。そして、開発した手法と従来の手法のそれぞれの測定値の再現性と軌道検測車の測定値との整合性を検証し、開発した手法によって測定精度を向上できることを確認した。

Key Words : track measurement, inertial mid-chord offset method, differential method

1. はじめに

鉄道総研では、軌道検測装置の小型化および低コスト化を目的に、慣性測定法に正矢法の演算を組み合わせた慣性正矢法を用いた小型の軌道検測装置の開発を行ってきた¹⁾。この慣性正矢軌道検測装置(以下、「本装置」という)は、これまでの研究開発や試験検測の結果、軌道検測において実用上十分な測定精度を有していることが確認され、車両の台車枠に設置する台車装架型²⁾と車体の床下に設置する車体装架型³⁾の2種類の搭載方法で実用化されている。特に、JR東日本の在来線では、図-1に示すように車体装架型の搭載方法で実用化され、営業車で高頻度に測定した軌道変位等のデータを活用したスマートメンテナンスの実現に貢献している⁷⁾。

慣性正矢法では、検測ユニット内に設置された加速度

計とジャイロの出力から本装置の空間的な位置と姿勢を求め、レーザ変位計で測定された本装置とレールとの相対変位を加算することで軌道変位を算出している。ただし、加速度計を用いるため、速度が低下して加速度信号のSN比が低下すると、測定精度が低下するという課題がある。そこで、レーザ変位計のみを備えた検測ユニットをもう1組車体の床下に搭載し、ジャイロと2組のレーザ変位計の出力から、速度0km/hまでの低速時でも測定可能な差分の原理(以下、「差分法」という)によって軌道変位を測定することで、慣性正矢法の低速時の測定精度を補う手法がある⁹⁾¹⁰⁾。

この差分法については、高低変位は単純な1次差分、通り変位は2組の検測ユニットの間隔での2回の測定結果の差分(2次差分)による演算を行っている。検測ユニットの間隔は、5mを超えると1次差分から10m弦正矢へ変換する際の伝達関数が不安定になり、10m弦正矢の波形も不安定となるため、最大で5m程度としている。また、通り変位を1次差分としないのは、演算に方位角の正接の項が含まれ、環状線などの線区では、方位角が±90度付近で発散し、検測不能になるためである。

差分法を併用する場合については、2種類の異なる手法による測定値を用いるため、その測定値を適切に切り替えて運用する必要がある。この切り替えについて、JR

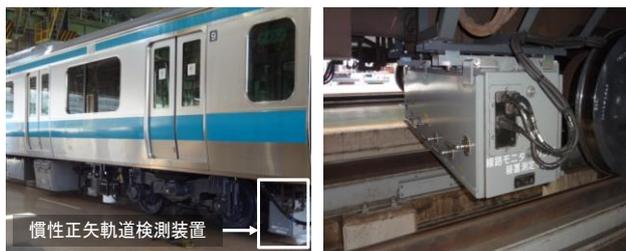


図-1 車体装架型の慣性正矢軌道検測装置

東日本では、それぞれの測定値を混合する速度帯（以下、「遷移領域」という）を全装置に対して一律に設定し、この遷移領域内でそれぞれの測定値の混合割合を速度に応じて変化させることで徐々に遷移させている。

しかし、慣性正矢法の測定精度については、短波長成分が速度20km/h程度まで低下しても実用上十分高いのに対し、長波長成分は速度20km/h以上でも装置ごとにばらつきがあり、上記の手法で混合した測定値の測定精度を低下させている場合があることがわかった。

そこで、本研究では、差分法を併用した場合の本装置の測定精度の向上を目的として、慣性正矢法と差分法の測定値を切り替える新たな手法を検討した。

2. 慣性正矢法と差分法の測定値の切り替え手法

(1) 従来の切り替え手法の概要

慣性正矢法は、上記のとおり、速度が低下すると測定精度が著しく低下する。図-2に、速度0km/hの停車部付近の同一測定日の3測定分の慣性正矢法と差分法の10m弦高低の波形を示す。

図-2より、慣性正矢法の波形は、速度が低下して0km/hに近づくとき、いずれの試番も発散し、正常な軌道変位データとして扱うことができなくなることがわかる。したがって、慣性正矢法の精度補償範囲は、概ね速度20km/h以上とされている¹⁾。

一方、差分法の波形については、試番ごとのばらつきはあるが、慣性正矢法のように発散はしない。そこで、本装置では、理論上速度0km/hから測定可能な差分法を併用し、速度に応じて慣性正矢法と差分法の測定値を切

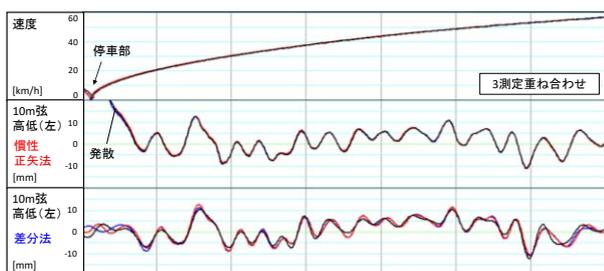


図-2 停車部付近の繰り返し測定結果

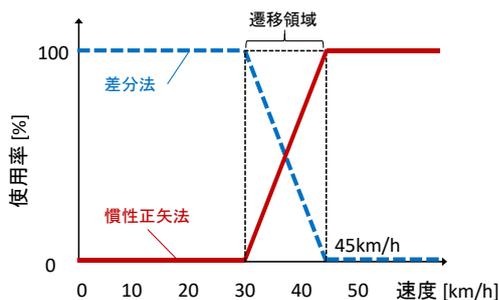


図-3 従来の測定値の切り替え手法の例

り替えることで、全速度域で測定を可能としている。

測定値の切り替え手法の例を図-3に示す。測定値の切り替えは、それぞれの測定値を混合する遷移領域を設定し、遷移領域内で速度に応じて測定値の混合割合を変化させている。本図に示した例の場合、速度30km/h以下では差分法の測定値を、速度45km/h以上では慣性正矢法の測定値を使用し、速度30～45km/hの遷移領域ではそれぞれの測定値を混合している。なお、遷移領域での混合割合は、速度に応じて線形に変化させている。本研究では、この測定値の切り替え手法を「従来の手法」という。

(2) 従来の手法の課題

従来の手法の測定精度については、主に以下の2つの課題があった。なお、本研究における測定精度とは、繰り返し測定時の測定値の再現性を示す再現性誤差と、軌道検測車の測定値（以下、「基準データ」という）との整合性を示す整合性誤差を指すものとする。

a) 差分法の測定値の再現性誤差

図-3の場合、遷移領域を含めると速度45km/h以下で差分法の測定値を使用する。しかし、図-2によれば差分法の再現性誤差は、慣性正矢法の測定精度が補償されていない概ね速度20km/h以下の低速時を除けば、慣性正矢法と比較して大きい傾向にある。

表-1に、図-2に示した区間の10m弦高低・通りの再現性誤差を概ね5km/hの速度帯ごとに標準偏差として算出した結果を示す。この標準偏差は、図-2中の1つの試番の測定値を基準として残りの2つの試番の測定値との差の標準偏差をそれぞれ算出し、値の大きい方を表記している。なお、これ以降の同一区間における繰り返し測定時の再現性誤差の算出方法は、すべて上記と同様である。また、一般的に、軌道検測装置の再現性誤差の評価区間の延長は200mとされることが多い。しかし、図-2に示すような加減速区間では各速度帯の延長（データ数）が十分に確保できないことおよび各速度帯の再現性誤差を相対的に比較することが目的であることから、ここでは各速度帯における再現性誤差を算出した。

図-2より、慣性正矢法と差分法のそれぞれの3測定分の波形は、概ね一致しているが、表-1より、同じ速度帯

表-1 低速時の繰り返し測定の再現性誤差

速度帯 [km/h]	再現性誤差[mm]			
	10m弦高低(左) 慣性正矢法	10m弦高低(右) 差分法	10m弦通り(左) 慣性正矢法	10m弦通り(右) 差分法
0～10	6.36	2.01	7.05	0.10
10～15	0.43	1.44	1.33	0.52
15～20	0.37	1.18	0.62	0.47
20～25	0.13	0.79	0.21	0.27
25～30	0.24	1.38	0.49	0.45
30～35	0.15	0.96	0.16	0.45
35～40	0.19	1.40	0.17	0.42
40～45	0.27	1.22	0.21	0.40
45～50	0.23	0.81	0.30	0.31
50～55	0.30	1.63	0.24	0.28
55～60	0.17	1.33	0.21	1.28

※太字は0.5mm以上

従来の
手法の
差分法の
使用領域

でも差分法の再現性誤差は、慣性正矢法と比較して大きい場合が多く、在来線の10m弦高低・通りの精度目標とされる0.5mmを超過する場合も多い。一方、慣性正矢法の再現性誤差は、速度20km/h以上ではいずれの速度帯でも0.5mm以下であり、実用上十分に高い再現性を有していることがわかる。

従来の手法では、速度45km/h以下で差分法の測定値を使用するため、この速度帯では、差分法の測定値を使用しない速度45km/h以上の速度帯と比較して再現性が低下する場合があった。そこで、差分法の測定値を使用する速度帯をより限定し、再現性の高い慣性正矢法の測定値をより低い速度から使用することで、本装置の低速時の再現性誤差を小さくする手法が必要であった。

b) 慣性正矢法の波形ずれ

慣性正矢法の波形は速度0km/h付近で発散し、差分法や基準データの波形と大きくかき離れるが、このかき離れは速度が高くなるとともに解消される。

図-4および図-5に、装置Aと装置Bの停車部付近の慣性正矢法と差分法の10m弦高低の波形をそれぞれ示す。

これらの図より、装置Aと装置Bの慣性正矢法の波形は、いずれも速度0km/h付近で発散しているが、装置Bの波形は、速度20km/h程度で差分法の波形と概ね一致するのに対し、装置Aの波形は、50km/h程度まで差分法の波形とかが離れている。本研究では、慣性正矢法の波形が差分法や基準データの波形からかき離れる現象を「波形ずれ」といい、上記のとおり、波形ずれが生じる速度の範囲は装置ごとに異なる場合があることがわかった。

JR東日本では、先掲の図-3の遷移領域の速度を装置に寄らず一律に決めている。したがって、装置Aのように、波形ずれが生じる速度の範囲が、慣性正矢法の測定値を使用する30km/h以上の速度にまで及ぶ装置では、混合した測定値にも波形ずれの影響が含まれるため、整合性が低下するという課題があった。

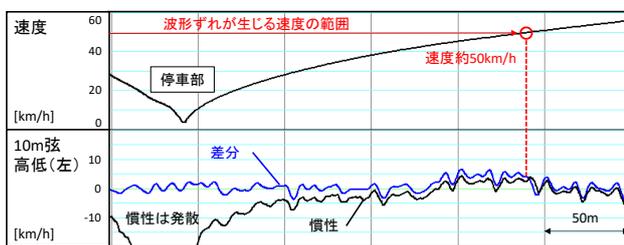


図-4 装置Aの慣性正矢法と差分法の波形

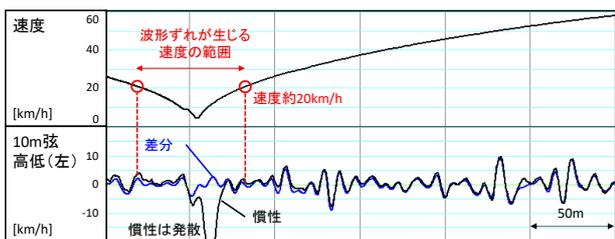


図-5 装置Bの慣性正矢法と差分法の波形

波形ずれが生じる速度の範囲が装置ごとに異なる要因については、本装置ではジャイロの出力により加速度計の傾きを補正していることから、ジャイロの出力に影響する速度発電機やジャイロ自体の個体差などが考えられるものの、現時点では特定に至っていない。よって、測定値の切り替え手法を見直すことで、いずれの装置においても整合性を向上できる新たな手法が必要であった。

3. 開発した測定値の切り替え手法

(1) 開発した測定値の切り替え手法の概要

2章で示した課題を解消するために、以下の2点を満足する測定値の切り替え手法を開発する必要があった。

- ・ 差分法の測定値を使用する速度をより限定し、従来の手法よりも再現性誤差を小さくすること
- ・ 波形ずれの影響を抑制し、従来の手法よりも整合性を向上すること

そこで、波形ずれは長波長成分であることに着目し、慣性正矢法の測定値については短波長成分のみを使用し、長波長成分については差分法の測定値で補う手法を検討した。

測定値の短波長成分と長波長成分を算出する方法として、デジタルフィルタ処理と移動平均処理が考えられる。しかしながら、デジタルフィルタのうち、FIRフィルタは、フィルタを安定させるために次数を大きくする必要があり、停車部付近では、慣性正矢法の発散の影響を強く受けてしまう。また、IIRフィルタには、小さい次数で比較的安定したフィルタを作成できるものもあるが、意図した波長域を適切に遮断できなかった。そこで、本研究では、移動平均処理を用いて測定値の短波長成分と長波長成分を算出することとした。

具体的には、図-6に示すように、慣性正矢法の測定値からその測定値に移動平均処理を適用した値を減じることで慣性正矢法の短波長成分を算出し、差分法の測定値に移動平均処理を適用した差分法の長波長成分を加算した波形（以下、「混合波形」という）を活用する手法を検討した。

ただし、慣性正矢法の精度補償範囲は、速度約20km/h以上であるため、それより低速では差分法に切り替える

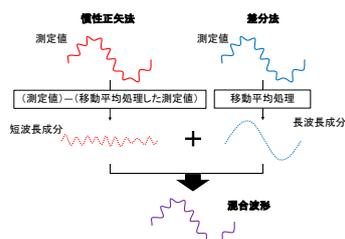


図-6 混合波形の算出方法

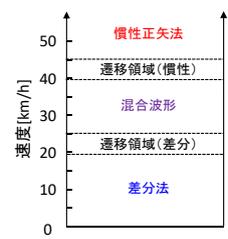


図-7 開発した手法

必要がある。また、慣性正矢法の測定精度が補償されている速度約20km/h以上で、かつ波形ずれが生じない速度帯では、差分法を使用する混合波形よりも慣性正矢法の再現性の方が高くなると考えられるため、混合波形から慣性正矢法への切り替えを行う。

以上より、速度に応じて差分法、混合波形、慣性正矢法を切り替える手法を考案した。本手法の測定値の切り替え例を図-7に示す。本手法では、測定値を滑らかに取り付けるために、混合波形と差分法および慣性正矢法との切り替えに、速度5km/h幅の遷移領域（差分）と遷移領域（慣性）を設けている。これらの遷移領域における測定値の混合割合は、従来の手法と同様に、速度に応じて線形に変化させる。本研究では、この測定値の切り替え手法を「開発した手法」という。

(2) 混合波形に用いる移動平均の検証

先掲の図-6のとおり、混合波形は慣性正矢法と差分法の測定値に移動平均処理を適用して算出する。そこで、移動平均の適切な長さを検証するため、12、24、48m一次移動平均と24m-18m二次移動平均の4種類の移動平均処理で算出した混合波形の整合性を検証した。

図-8に、各移動平均処理を適用した混合波形と、移動平均処理を適用していない慣性正矢法の波形の例を基準

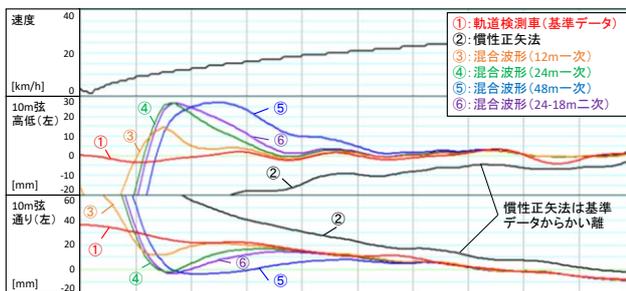


図-8 混合波形と慣性正矢法の波形

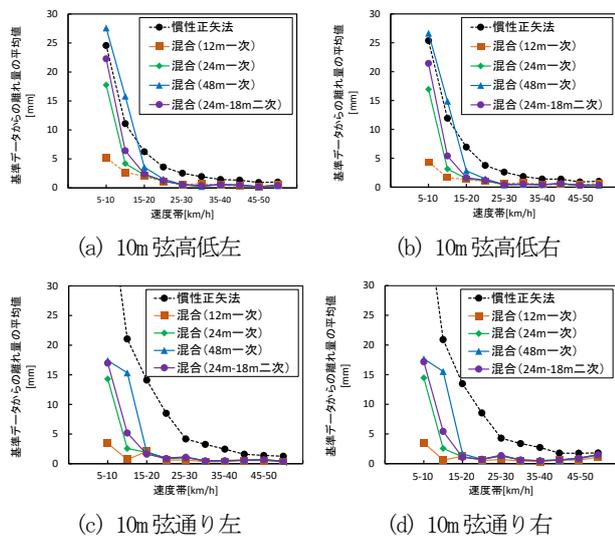


図-9 各混合波形と慣性正矢法の基準データからの離れ量

データとあわせて示す。本図より、移動平均処理を適用した各混合波形は、移動平均処理を適用していない慣性正矢法の波形と比較して、より低速まで波形ずれによる基準データからのかい離が抑制されることがわかる。

図-9に、図-8に示す各混合波形と慣性正矢法の5km/hの速度帯ごとの基準データからの離れ量の絶対値の平均値を示す。本図より以下の知見が得られた。

- いずれの軌道変位についても、速度20km/h以上では、混合波形の基準データからの離れ量は、慣性正矢法の基準データからの離れ量と比較して小さい。
- 速度20km/h以上においては、移動平均の長さの違いが混合波形の基準データからの離れ量に与える影響はほとんどない。

以上より、移動平均の長さについては、本研究で検討した長さであれば、いずれの長さでも混合波形の整合性に与える影響は小さいことがわかった。そこで、在来線の軌道検測車の基準線補正の仕様に合わせ、10m弦高低については24m一次移動平均を、10m弦通りについては24m-18m二次移動平均を適用することとした。

4. 適切な遷移領域の速度帯の検討

(1) 遷移領域（慣性）の速度帯の検討

先掲の図-7に示したとおり、開発した手法では混合波形と差分法および慣性正矢法との切り替えを行う遷移領域を設けている。まず、慣性正矢法との切り替えを行う遷移領域（慣性）の適切な速度帯を検証した。

遷移領域（慣性）の速度帯が低いと、慣性正矢法の長波長成分をより低い速度から使用することになるため、先掲の図-4に示したような波形ずれが高い速度まで生じる装置においては、整合性は低下すると考えられる。JR東日本で運用されている27装置の波形ずれを検証したところ、10m弦高低と10m弦通りで平均的に最も高い速度まで波形ずれが生じていた装置は、図-4に示した装置Aであった。そこで、以降の検証では、装置Aの測定データを用いることとした。

遷移領域（慣性）の速度帯が整合性に与える影響を検証するため、遷移領域（慣性）の速度帯を40~45km/h、50~55km/h、60~65km/hの3種類として開発した手法の波形を算出した。

図-10に、遷移領域（慣性）の速度帯を上記の3種類として求めた10m弦高低と同一日に測定された基準データの波形を示す。また、表-2に、10m弦高低・通りについて、開発した手法により作成した波形の整合性誤差を、基準データとの差の絶対値の平均値として算出した結果を示す。平均値を算出した区間は、開発した手法の波形が遷移領域（慣性）の速度帯の違いにより変化する区間

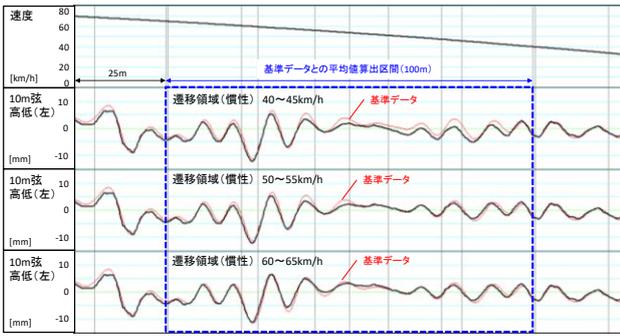


図-10 遷移領域（慣性）の速度帯を変化させた例

表-2 遷移領域（慣性）の速度帯と整合性誤差

遷移領域（慣性） の速度[km/h]	基準データとの差の平均値[mm]	
	10m弦高低(左)	10m弦通り(左)
40~45	1.22	1.13
50~55	0.76	1.02
60~65	0.65	0.96

を概ね含むように、図-10に示す100mとした。

図-10より、遷移領域（慣性）の速度帯が高いほど、開発した手法の波形と基準データの波形の差が小さいことがわかる。また、表-2からも遷移領域（慣性）の速度帯が高いほど、基準データとの差の平均値は小さく、整合性が高いといえる。これは、遷移領域（慣性）の速度帯が高いほど、波形ずれの影響を受けないためと考えられる。本研究では、1.0mm以下の精度で軌道を整正することは困難であることを踏まえ、本装置とは検出手法が異なる基準データとの差の平均値は1.0mm以下であれば、整合性は十分によいと判断し、遷移領域（慣性）の速度帯は、10m弦高低・通りの基準データとの差の平均値がいずれも1.0mm以下となる60~65km/hとすることとした。

(2) 遷移領域（差分）の速度帯の検討

上記の検討では、遷移領域（差分）の速度帯を20~25km/hとしていた。これは、慣性正矢法の精度補償範囲は速度約20km/h以上であること、先掲の図-9に示したとおり、混合波形の基準データからの離れ量は速度20km/h以下で増大することを考慮したためである。

一方で、速度が0km/hに近づく直前に、開発した手法の波形が大きく乱れる箇所が確認された。その例として、基準データとの比較と、同区間の慣性正矢法の短波長成分の波形を図-11に示す。

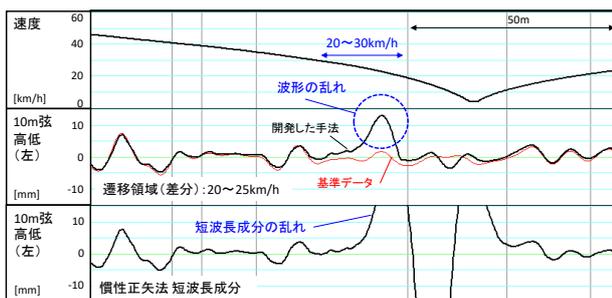


図-11 速度 20~30km/h 付近で波形が乱れる場合の例

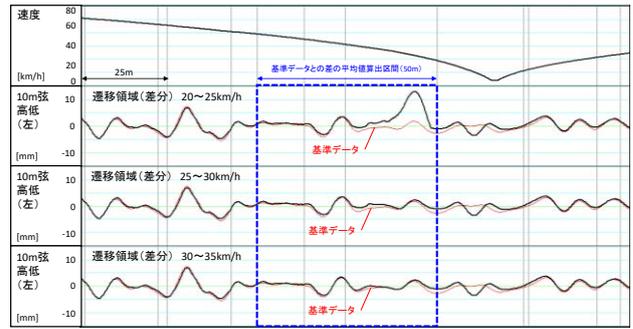


図-12 遷移領域（差分）の速度を変化させた波形の例

表-3 遷移領域（差分）の速度帯と整合性誤差

遷移領域（差分） の速度帯[km/h]	基準データとの差の平均値[mm]	
	10m弦高低(左)	10m弦通り(左)
20~25	2.31	1.86
25~30	0.60	0.79
30~35	0.44	0.61

図-11より、開発した手法の波形が大きく乱れている箇所は、概ね速度20~30km/hであり、混合波形と遷移領域（差分）が使用される速度である。この速度帯で使用される慣性正矢法の短波長成分の波形を確認すると、速度20~30km/h付近で大きく乱れて測定精度が低下し、開発した手法の波形に影響を与えていると考えられた。

そこで、遷移領域（差分）の速度帯を20~25km/hからより高い速度へ変更することで、慣性正矢法の短波長成分の波形の乱れの影響を防ぐこととした。

図-12に、遷移領域（差分）の速度帯を20~25km/h、25~30km/h、30~35km/hとして算出した開発した手法と、同時期に測定された基準データの10m弦高低の波形を示す。また、表-3に、10m弦高低・通りについて、遷移領域（差分）の速度帯を変化させた場合の開発した手法の整合性誤差を、基準データとの差の絶対値の平均値として算出した結果を示す。平均値を算出した区間は、開発した手法の波形が遷移領域（差分）の速度帯の違いにより変化する区間を含むように、図-11に示す50mとした。

図-12より、遷移領域（差分）の速度帯を25~30km/h以上とすることで、開発した手法の波形の大きな乱れが抑制され、基準データとの差は小さくなることが確認できる。また、表-3においても、遷移領域（差分）の速度帯を25~30km/h以上とすることで、開発した手法の基準データとの差の平均値が1.0mm以下になる。ただし、遷移領域（差分）の速度を必要以上に高くすると、慣性正矢法と比較して再現性の低い差分法の測定値を使う速度帯が広がるため、遷移領域（差分）の速度帯は25~30km/hとすることとした。

5. 差分法の長波長成分の測定精度の検証

(1) 速度の影響

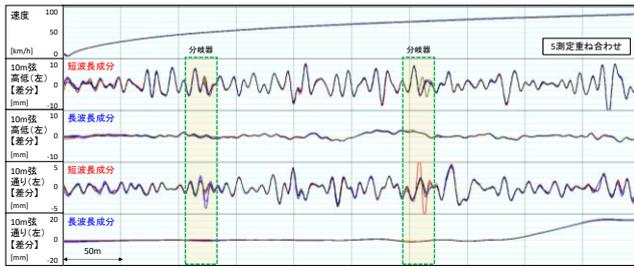


図-13 差分法の繰り返し測定結果

表-4 差分法の短波長成分と長波長成分の再現性誤差

速度帯[km/h]	再現性誤差[mm]			
	10m弦高低(左)		10m弦通り(左)	
	短波長成分	長波長成分	短波長成分	長波長成分
0~10	0.68	0.03	0.15	0.03
10~20	0.91	0.23	0.18	0.13
20~30	0.93	0.31	0.50	0.07
30~40	0.51	0.28	0.27	0.04
40~50	0.93	0.27	0.17	0.05
50~60	0.58	0.20	0.12	0.03
60~70	0.39	0.19	0.28	0.08
70~80	0.33	0.18	0.32	0.03

※太字は、0.5mm以上

4章では、遷移領域（慣性）の速度を60~65km/hまで高く設定したが、遷移領域（慣性）の速度帯を高くすると、差分法の長波長成分の測定値を使用する速度も高くなる。しかし、速度が速くなると車体の振動やねじれが大きくなり、2つの検出ユニットに相対的な変位が発生し、差分法の測定精度の低下が懸念される。そこで、速度が差分法の測定精度に与える影響を検証した。

上記の検証を行うため、直線区間で速度0~80km/h程度まで加速する区間における同一日の5測定分の差分法の再現性を確認した。図-13に、5測定分の差分法の波形を短波長成分と長波長成分に分けて示す。なお、短波長成分と長波長成分の算出方法は、混合波形の算出時と同様に、10m弦高低は24m一次移動平均、10m弦通りは24m-18m二次移動平均とした。また、表-4に、各波形の10km/hの速度帯ごとの再現性誤差を示す。なお、再現性誤差の算出においては、分岐器の敷設箇所で正常な測定ができていないデータは除外した。

図-13より、分岐器の敷設箇所を除いて、10m弦高低・通りともにいずれの試番の波形も概ね一致している。ただし、表-4より、10m弦高低・通りの短波長成分については、再現性誤差が0.5mm以上と大きい場合がある。一方で、長波長成分については、10m弦高低・通りともにいずれの速度帯でも再現性誤差が0.5mm以下であり、実用上十分に高い再現性を有していることがわかる。

したがって、今回検証した速度80km/h程度までは、差分法の長波長成分の再現性は十分に高く、遷移領域（慣性）の速度帯を60~65km/hとしても開発した手法の再現性低下の要因にはならないと考えられる。

(2) 曲線区間の測定精度の検証

車体の床下に一定の間隔で設置されたレーザ変位計の

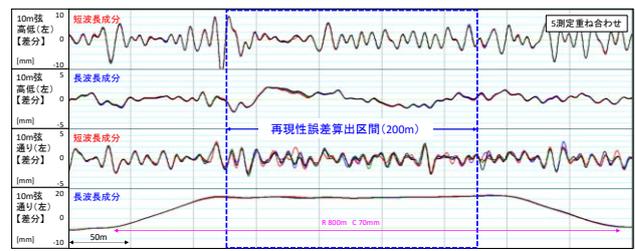


図-14 曲線区間の差分法の繰り返し測定結果

表-5 曲線区間における差分法の再現性誤差

項目	再現性誤差[mm]			
	10m弦高低(左)		10m弦通り(左)	
	短波長成分	長波長成分	短波長成分	長波長成分
試番2	0.31	0.13	0.58	0.24
試番3	0.16	0.06	0.33	0.16
試番4	0.21	0.09	0.34	0.15
試番5	0.14	0.07	0.32	0.09
最大値	0.31	0.13	0.58	0.24

※太字は0.5mm以上

測定値を演算に用いる差分法は、曲線区間における車体のねじれ等の影響により再現性が低下する可能性がある。そこで、曲線区間における差分法の再現性を検証した。

上記の検証を行うため、図-13と同様のデータを用いて、半径800m、カント70mmの延長約200mの曲線区間における差分法の短波長成分と長波長成分の再現性誤差を算出した。なお、当該区間の速度は、いずれの試番も90±5km/hである。

図-14に、当該区間の5測定分の差分法の波形を示す。また、表-5に、円曲線中の200mの区間の再現性誤差の算出結果を示す。

図-14より、10m弦通りの短波長成分については、曲線区間中の波形に試番ごとのばらつきがみられる。表-5に示す再現性誤差についても、10m弦通りの短波長成分は、他の波形と比較して大きい。ただし、長波長成分については、10m弦高低・通りともに再現性誤差は実用上十分に小さく、混合波形の再現性低下の要因にはならないと考えられる。

6. 開発した手法の測定精度の確認

(1) 開発した手法の再現性

4章の検証より、開発した手法の遷移領域（差分）の速度帯は25~30km/h、遷移領域（慣性）の速度帯は60~65km/hとした。この開発した手法の測定精度を確認するため、再現性および整合性を検証した。なお、本検証で使用したデータは、先掲の図-4に示した装置Aの測定データである。

まず、開発した手法の再現性が従来の手法と比較して向上することを確認するため、繰り返し測定時の速度にばらつきがあり、従来の手法の再現性が低下している区間を対象とし、再現性誤差を算出した。なお、このよう

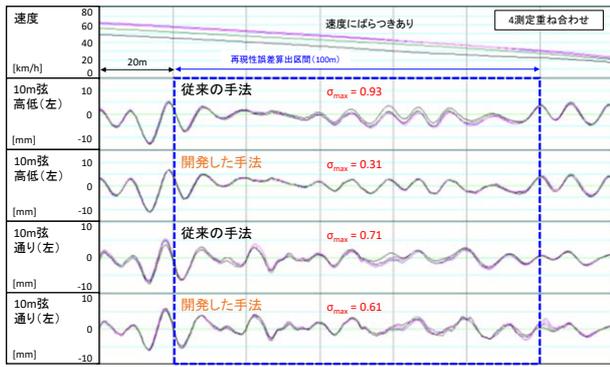


図-15 繰り返し測定時の速度に差がある区間の

な現象は、停車までの惰行運転区間で多く確認される。
 図-15に、3日間の4測定分の10m弦高低・通りの従来の手法と開発した手法の波形とそれぞれの再現性誤差の算出結果を示す。なお、再現性誤差を算出した区間は、速度の変化による従来の手法の測定値のばらつきが確認された区間を含む本図中の100mである。

図-15より、当該区間における従来の手法の10m弦高低・通りの波形は、試番ごとにばらつきが大きいことがわかる。一方、開発した手法の10m弦高低・通りの波形は、従来の手法の波形と比較すると、試番ごとのばらつきが小さく、再現性が高い。また、再現性誤差の算出結果から、10m弦高低・通りともに、開発した手法の再現性誤差は、従来の手法よりも小さい。このように、開発した手法を用いることで、速度にばらつきがある区間での測定値の再現性を向上できる。

ただし、ここまでの再現性誤差は、検証の目的に応じて特定の区間や速度帯での標準偏差を算出していた。しかし、前述のとおり、軌道検測装置の再現性誤差の評価区間は一般的に200mである。そこで、速度変化中に平面線形が左右に変化する200mの区間の開発した手法の再現性誤差を確認した。

図-16に、対象とした区間の10m弦高低・通りの波形と各軌道変位の再現性誤差の算出結果を示す。

図-16より、当該区間における繰り返し測定時の各軌道変位の波形は、ほとんど一致している。また、本図中に示す再現性誤差は、いずれの軌道変位も在来線目標の

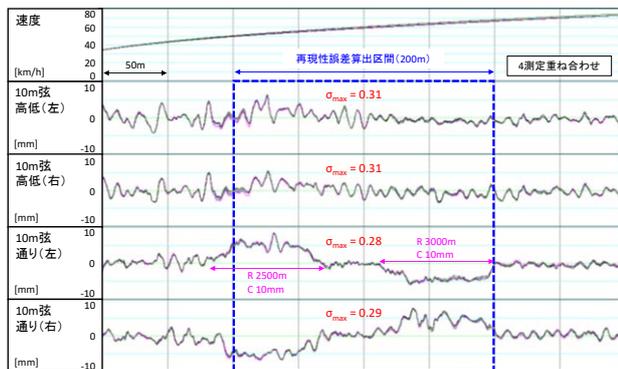


図-16 開発した手法の繰り返し測定時の再現性

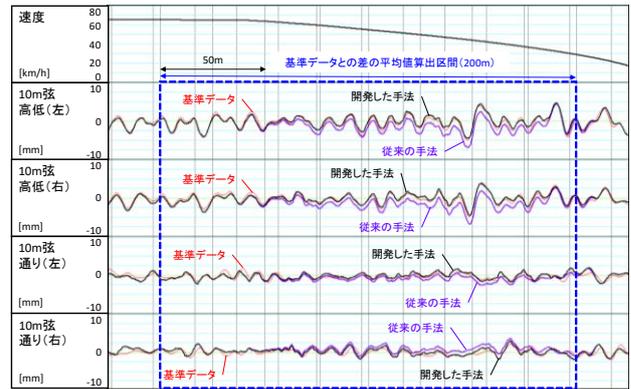


図-17 開発した手法と従来の手法の波形

表-6 開発した手法と従来の手法の整合性誤差

測定値の混合手法	基準データとの差の平均値[mm]			
	10m弦高低(左)	10m弦高低(右)	10m弦通り(左)	10m弦通り(右)
従来の手法	0.97	1.10	0.61	0.76
開発した手法	0.45	0.42	0.47	0.53

0.5mm以下であった。

以上より、開発した手法の再現性は実用上十分に高いことを確認できた。

(2) 開発した手法の整合性

次に、開発した手法の整合性を確認するため、波形ずれによって従来の手法の整合性が低下していた区間を対象とし、開発した手法の整合性を確認した。

図-17に、対象とした区間における10m弦高低・通りの従来の手法と開発した手法および基準データの波形を示す。また、表-6に、各軌道変位の従来の手法および開発した手法の整合性誤差を、基準データとの差の絶対値の平均値として算出した結果を示す。なお、平均値を算出した区間は、本図に示した波形ずれによって従来の手法の整合性が低下していた区間を含む200mとした。

図-17より、当該区間における開発した手法の10m弦高低・通りの波形は、従来の手法の波形と比較して、基準データとの差が小さい。また、表-6より、開発した手法の基準データとの差の平均値は、従来の手法の基準データとの差の平均値と比較して小さい。このように、開発した手法を用いることで、波形ずれによって従来の手法では整合性が低下していた区間での整合性を向上できる。

(3) 開発した手法の測定精度のまとめ

開発した手法の測定精度を検証した結果、本手法は実用上十分に高い再現性を有しており、従来の手法と比較して、速度にばらつきがある区間での再現性を向上できることを確認した。また、整合性も従来の手法より向上できることがわかった。したがって、本手法は、差分法を併用した慣性正矢法の測定精度向上に有効である。

7. まとめ

本研究では、差分法を併用した慣性正矢法の測定精度の向上を目的として、慣性正矢法と差分法の測定値を切り替える新たな手法を開発した。また、開発した手法の再現性と整合性を、従来の手法と比較して検証した。得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 慣性正矢法の長波長成分を含まない混合波形を活用する手法を開発した。この手法では、速度に応じて差分法、混合波形、慣性正矢法の測定値を切り替えて使用する。開発した手法により、波形ずれを抑制できる。
- (2) 速度20km/h以上では、混合波形を算出するための移動平均の長さが、混合波形の整合性に与える影響は小さかった。そこで、10m弦高低については24m一次移動平均を、10m弦通りについては24m-18m二次移動平均を適用することとした。
- (3) 混合波形と慣性正矢法の切り替え時に設ける遷移領域（慣性）の速度帯は、検証した速度の範囲では、高いほど整合性が高かった。本研究では、基準データとの差の平均値が1.0mm以下となる60～65km/hが適切と判断した。
- (4) 混合波形と差分法の切り替え時に設ける遷移領域（差分）の速度帯を25～30km/h以上とすることで、低速時に発生する慣性正矢法の短波長成分の波形の乱れを防ぎ、基準データとの差の平均値を1.0mm以下にできる。
- (5) 開発した手法は実用上十分に高い再現性を有しており、従来の手法と比較して、速度にばらつきがある区間での再現性を向上できる。また、整合性も従来の手法より向上できる。

今後は、慣性正矢法の波形ずれの発生原因の究明および対策を検討し、差分法を併用した慣性正矢軌道検測装

置のさらなる精度向上を目指す。

参考文献

- 1) 竹下邦夫：営業車による軌道狂い検測手法，鉄道総研報告，Vol.9，No.2，pp.29-34，1995.
- 2) 竹下邦夫，矢澤英治：慣性正矢法による軌道狂い検測装置の開発，鉄道総研報告，Vol.14，No.4，pp.25-30，2000.
- 3) 坪川洋友，矢澤英治，森高寛功：慣性正矢法を用いた営業車による軌道検測，第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム，2008.
- 4) 森高寛功，松本隆，矢澤英治：九州新幹線営業車による総合軌道検測，新線路，Vol.63，No.12，pp.26-28，2009.
- 5) 坪川洋友，矢澤英治，小木曾清高，南木聡明：車体装荷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.
- 6) 南木聡明，矢澤英治，松田博之：車体装荷型慣性正矢軌道検測装置の試験検測，第16回鉄道技術連合シンポジウム，2009.
- 7) 吉田尚，山本修平，小松佳弘，兼子弘，元好茂，小西俊之：線路設備モニタリング装置の更なる活用に向けた研究開発，JR 東日本テクニカルレビュー，No.62，pp.27-32，2019.
- 8) 穴見徹広：スマートメンテナンスの取り組み状況について，JR 東日本テクニカルレビュー，No.62，pp.5-10，2019.
- 9) 南木聡明，矢澤英治，松田博之：1次差分法による慣性測定 of 低速時高低検測精度補償，土木学会第65回年次学術講演会，2010.
- 10) 矢澤英治，南木聡明，松田博之：2次差分法による慣性測定 of 低速時通り検測精度補償，土木学会第65回年次学術講演会，2010.
- 11) 矢澤英治，岡井忠生：慣性正矢軌道検測装置実用化に向けた性能向上，鉄道総研報告，Vol.18，No.3，pp.35-40，2004

(2020.4.3 受付)

IMPROVING MEASUREMENT ACCURACY BY WAVEFORM PROCESSING OF TRACK MEASURING DEVICE USING INERTIAL MID-CHORD OFFSET METHOD AND DIFFERENCE METHOD

Masato SUTO, Yosuke TSUBOKAWA and Hisashi YOSHIDA

We have developed an appropriate method for switching the measured values in a track measuring device using inertial mid-chord offset method and difference method. Specifically, we developed a new mixed waveform by combining the short-wavelength component of the inertial mid-chord offset method and the long-wavelength component of the difference method. Then, this mixed waveform is switched between the difference method and the inertial mid-chord offset method according to the velocity.

By using this method, we can expect that the decrease in measurement accuracy due to the instability of the long wavelength component of the inertial mid-chord offset method is eliminated. In addition, the repeatability of the track measuring device and the reproducibility of the measured values with the track inspection car can be improved as compared with the conventional methods. In this paper, we describe the details of the developed method and the verification results.