

移動式たわみ測定装置（MWD）の実用化に 関する共同研究報告書

～MWDに適用可能なレーザドップラ振動計の開発（その2）～

2021年12月

（国研）土木研究所

（学）東京農業大学

協立電機（株）

Copyright © (2021) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

移動式たわみ測定装置（MWD）の実用化に 関する共同研究報告書

～MWD に適用可能なレーザドップラ振動計の開発（その2）～

要 旨：

平成28年10月に国土交通省により舗装点検要領が策定された。舗装点検要領では路面のみでなく路盤以下も含め舗装構造に着目した道路管理の重要性が示されている。

路盤以下も含めた舗装構造全体の健全性を把握する手法としては、近年多くの現場で活用されている重錘落下式たわみ測定装置（FWD：Falling Weight Deflectometer）による舗装のたわみ量調査が存在するが、調査には交通規制が必要であるとともに、測定に一定の時間が必要であるため「管理路線全体にどの程度問題がある区間が存在するか」といったネットワークレベルでの調査での適用は非効率であり、走行しながら舗装のたわみ量の測定が可能な移動式たわみ測定装置（MWD：Moving Wheel Deflectometer）の実用化が期待されている。

本共同研究では、MWDに搭載されている測定機器の中で最も重要な路面のたわみ速度を測定するレーザドップラ振動計の開発を実施したので、本報告書により報告するものである。

キーワード：ドップラ振動計、移動式たわみ測定装置、MWD、FWD、舗装の健全度

目次

1 はじめに.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 共同研究体制.....	2
2 研究概要.....	3
3 ドップラ振動計の開発.....	4
3.1 経緯・目的.....	4
3.2 開発目標（指標・仕様）.....	4
3.3 原理機の製作.....	7
3.4 原理機での室内試験.....	7
3.5 試作機の製作.....	13
3.6 試作機での室内検証.....	14
4 試作機の実道検証.....	19
4.1 ドップラ振動計の架台への設置.....	19
4.2 走行速度の影響.....	20
4.3 路面の段差の影響.....	22
4.4 路面の平坦性の影響.....	25
4.5 たわみ量計測（MWD 測定システムとしての試作機の検証）.....	27
5 ドップラ振動計を用いた新たなたわみ量解析手法の提案.....	33
5.1 ドップラ振動計の測定値に含まれるノイズ.....	33
5.2 ドップラ振動計の配置.....	37
5.3 たわみ速度差法での検証.....	38
5.3.1 土木研究所外周路における検証.....	38
5.3.2 つくば市内実道での検証.....	40
6 まとめ.....	41
〈参考文献〉	

1 はじめに

1.1 背景

わが国では、高度成長期に集中的に整備された道路が建設後 30 年以上経過し、その多くで老朽化が進行している。また、道路延長が約 100 万 km¹⁾に達し、そのストックも膨大なものになっている。限られた予算の中、道路を適切に管理するためには、適切なメンテナンスサイクルを確立し、効率的な維持修繕を行うことが重要である。

そのような中、平成 28 年 10 月に国土交通省により舗装点検要領²⁾が策定された。舗装点検要領では、路盤以下の層の保護など舗装構造に着目した道路管理の重要性が示されている。そのため、今後は路盤以下も含めた舗装構造の健全性を考慮した維持修繕の実施が求められる。

舗装構造の健全性を把握する手法としては、開削調査、コア調査の他、近年多くの現場で活用されている FWD (Falling Weight Deflectometer) によるたわみ量調査があげられる。FWD たわみ量調査は、路面に重錘を落下させた時に得られるたわみ量を計測し、そのデータから解析により舗装構造の健全性を把握できる手法である。しかし、落下地点のみの測定であるため、連続して舗装構造の健全性を把握することができず、局所的に支持力が低下している箇所を見逃す可能性があるとともに、1 点の測定に 2~3 分の時間を要し、交通規制が必要であるため、広範囲な調査においては非効率となる。舗装の計画的な管理を実施するためには、「管理路線全体にどの程度問題がある区間が存在するのか」といったネットワークレベルで広範囲の舗装の健全性を把握することが重要であり、効率的にデータを取得できるモニタリング手法が求められている。

国立研究開発法人土木研究所（以下「土木研究所」という）では 2005 年から移動しながら舗装のたわみを測定する移動式たわみ測定装置 (MWD : Moving Wheel Deflectometer) の開発を進めている。MWD における舗装のたわみ量の算定手法の中には、レーザドップラ振動計（以下、「ドップラ振動計」）を用いて路面に生じるたわみ速度を測定し、解析によりたわみ量を算定する方法が存在するが、既存のドップラ振動計は車両に搭載することを想定していないことから、測定時の車両の振動等により頻繁に測定値の飛びが発生したり、走行速度が高速になると測定自体が困難になる等の不具合が発生していた。

そこで、本共同研究では MWD に適用可能なドップラ振動計の開発を実施したので、以降報告する。



写真 1.1.1 移動式たわみ測定装置 (MWD)

1.2 共同研究体制

本共同研究は2018年1月～2021年5月までの期間で実施した。以下に本共同研究の参加者を表1.2.1に示す。

表 1.2.1 共同研究体制

機関	氏名	所属・役職	参加期間
(国研)土木研究所	藪 雅行	道路技術研究グループ(舗装) 上席研究員	2018.1-2021.5
	寺田 剛	道路技術研究グループ(舗装) 総括主任研究員	2018.1-2021.3
	若林 由弥	道路技術研究グループ(舗装) 研究員	2018.1-2018.3
	綾部 孝之	道路技術研究グループ(舗装) 研究員	2018.4-2021.5
(学)東京農業大学	竹内 康	地域マネジメント分野 地域環境工学研究室 教授	2016.7-2021.5
	川名 太	環境基盤創成分野 社会基盤工学研究室 教授	2016.7-2021.5
協立電機(株)	川口 恵之	執行役員	2018.1-2021.5
	山口 和郎	電子技研工業(株) 技術部 部長	2018.1-2021.5

なお、本共同研究と並行して、MWDの開発、解析手法、健全度評価手法、試験法等の検討を実施する別途共同研究も本共同研究と連携して実施している。MWDの全体に関する検討については、別途共同研究でとりまとめた「共同研究報告書第549号」を参照すると良い。

【参考】別途共同研究

名称：移動式たわみ測定装置(MWD)の実用化に関する共同研究

参加機関：(国研)土木研究所、(学)東京農業大学、アールテックコンサルタント(株)、
(株)高速道路総合技術研究所、ガイアート(株)、東亜道路工業(株)、ニチレキ(株)、
(株)パスコ

研究期間：2016年6月～2021年5月

研究内容：MWDの開発、たわみ量解析手法の検討、健全度評価手法の検討、試験法の検討等

研究成果：共同研究報告書第549号

2 研究概要

移動式たわみ測定装置（MWD）を用いた路面のたわみを測定する方法として、ドップラ振動計を用いる方法が提案されている³⁾。

ドップラ振動計による方法は、**図 2.1** に示すように载荷輪の影響で変形する際の路面のたわみ速度を測定し、路面のたわみ形状を示す指数関数から解析によりたわみ量を算出する手法である。

ドップラ振動計による方法は、路面の形状による影響がなく、別途共同研究による各種検討でも高い精度での測定が可能であることが確認されているなど、今後 MWD による計測手法として期待される手法である。ただし、別途共同研究で開発している MWD に搭載されているドップラ振動計（既存ドップラ振動計）は海外製の市販品であり、大きな振動を受ける車両に搭載して路面のたわみ速度を測定することは想定していないこと等から、**図 2.2** に示すように測定時に「データの飛びが生じる」、「データが反転する」、「測定が不能である（概ね 50km/h 以上では測定困難）」等の不具合が確認されており、安定的な測定が困難であるのが現状である。また、既存ドップラ振動計以外に MWD に搭載し十分な性能を発揮できるドップラ振動計が存在しないのが現状であるとともに、国内で安定的にドップラ振動計を供給できるメーカー等が存在しない。

そのため、本共同研究では既存ドップラ振動計で確認されているような不具合が発生することがなく、MWD に搭載しても安定的に測定が可能なドップラ振動計の開発を実施した。

なお、本共同研究では MWD に適用可能なドップラ振動計の開発を実施したものであるが、開発途上の段階でドップラ振動計の測定値に含まれるノイズを除去する手法について提案したので併せて報告する。

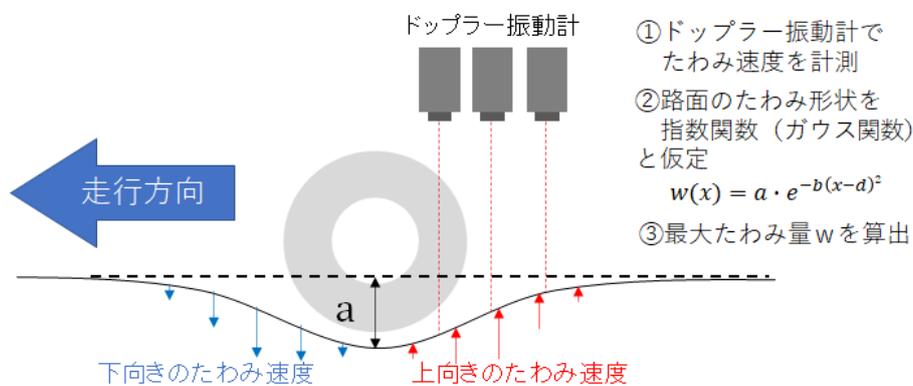


図 2.1 ドップラ振動計を用いた MWD の測定手法（イメージ）

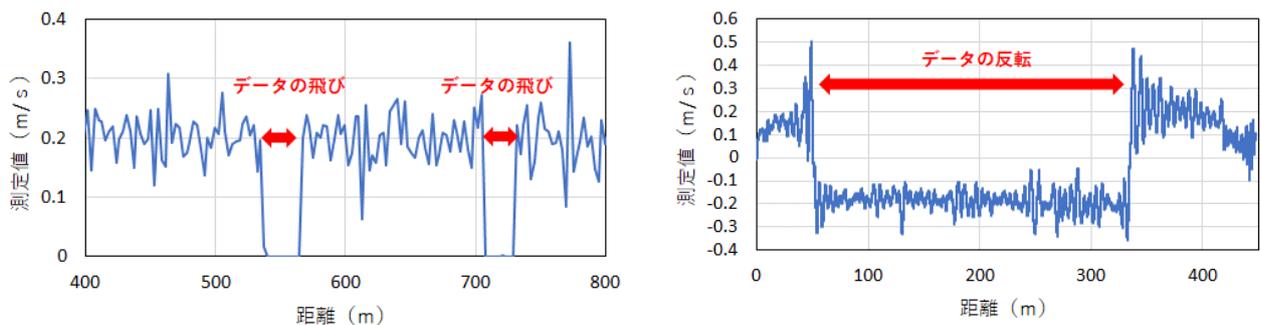


図 2.2 既存ドップラ振動計の不具合事例

3 ドップラ振動計の開発

3.1 経緯・目的

MWD ではドップラ振動計を車両に剛結して使用するため、振動する車両への搭載を想定していない既存のドップラ振動計では、頻繁に測定値が飛ぶ、測定値が反転する、走行速度が高速になると測定自体が困難になる等の不具合が発生している。

このような事情に鑑み、本研究では測定精度を堅持しながら、安定的に路面のたわみ速度を測定することが可能な、広い測定深度と高い耐振動性能を有するドップラ振動計を、次の 2 ステップで開発した。

- 1) 原理機の製作、評価
- 2) 試作機の製作、評価

3.2 開発目標（指標・仕様）

MWD に搭載されるドップラ振動計は、車両に剛結して運用されるため、ドップラ振動計には路面の凹凸や段差等を走行する際に強い衝撃が加わる。また、車両の上下動や仰角変動によりドップラ振動計の速度測定ポイントと路面の位置関係は 3 次元空間で常に変化するため、安定的に路面のたわみ速度を測定するためには、広い測定深度が必要となる。

このようなことから、本開発では測定精度、測定深度ならびに耐加速度性能の高いドップラ振動計を目標に開発を行った。

開発目標仕様を表 3.2.1 に示す。開発目標仕様は、現 MWD の仕様や実測データを参考にして決定した。

表 3.2.1 開発目標仕様

区分	項目	内容	備考
光学系	レーザ安全規格	クラス 3R JIS C6802	測定感度と機器運用の容易さから決定
	レーザ波長	532nm	運用の容易さから可視光とする
	レーザ射出パワー	5mW 未満	測定感度と機器運用の容易さから決定
	フォーカス範囲	1～2m	現 MWD に基づき決定
	測定深度	±50mm	MWD 走行時の実データに基づき決定
信号処理系	測定周波数範囲	DC～100Hz(-3dB)	委員会における御意見を参考に決定
	測定速度範囲	+1m/s～-1m/s	現 MWD に準拠
	速度出力	アナログ電圧	現 MWD に準拠
	測定精度	±0.1% (F.S.)	現 MWD に準拠
	最大許容速度 (上下方向)	±1m/s	仕様「測定速度範囲」より
	最大許容加速度 (上下方向)	±10m/s ²	MWD 走行時の実データに基づき決定
	最大許容加速度 (前後方向)	±5m/s ²	MWD 走行時の実データに基づき決定
一般	使用温度範囲	+5～+40℃	使用環境を想定して決定
	使用湿度範囲	20～80% (但し結露しないこと)	使用環境を想定して決定
	電源電圧	AC100V	現 MWD に準拠

表 3.2.1 中の測定深度を説明する資料として、測定深度の概念図を図 3.2.1 に示す。

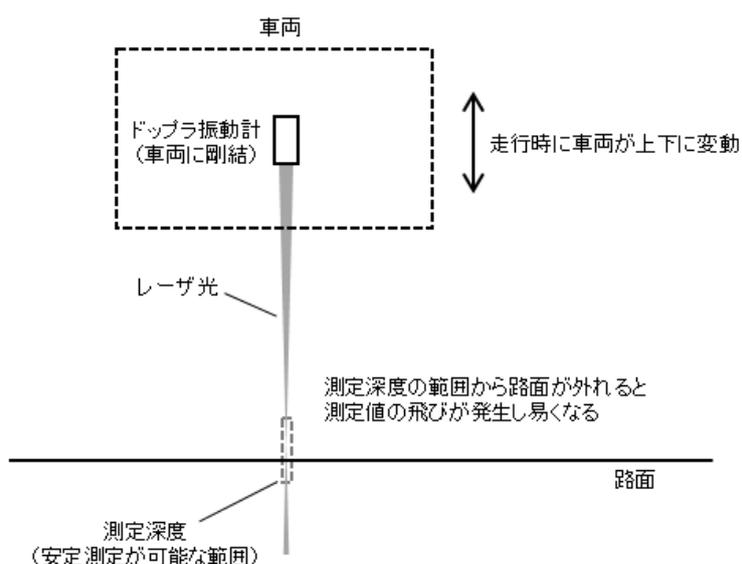


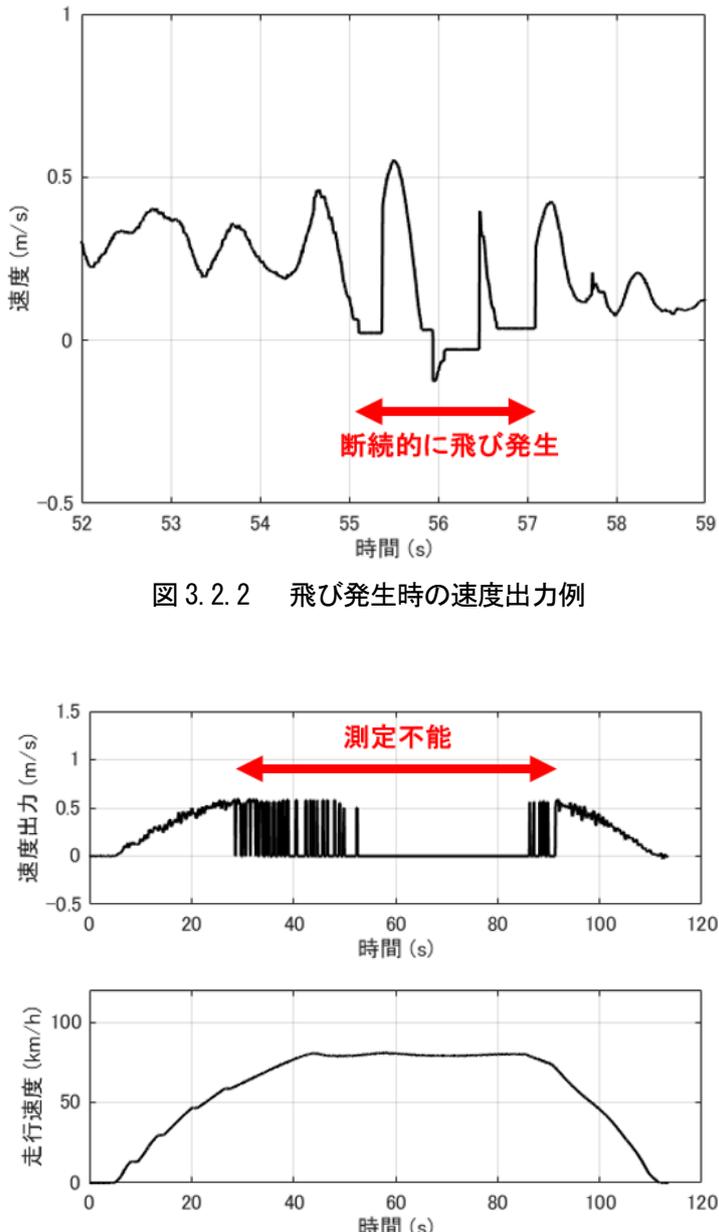
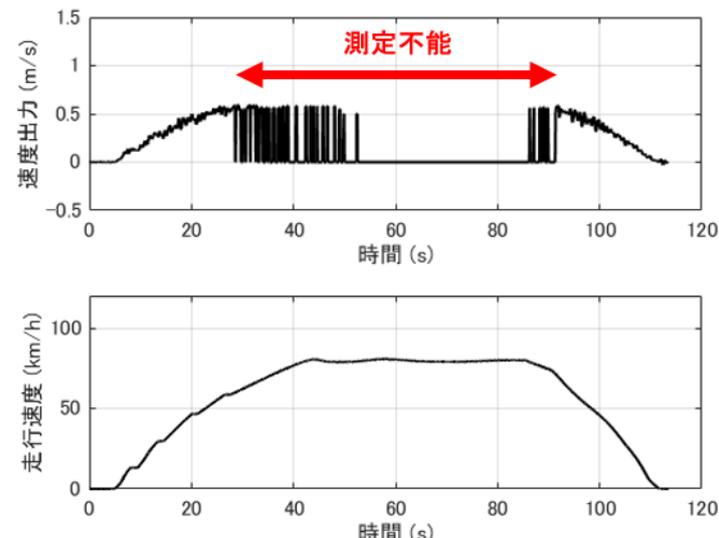
図 3.2.1 測定深度の概念図

上記の他、次の内容も開発目標とした。

1) 測定値に時間幅 7.5ms 以上の飛びを発生させない

※時間幅 7.5ms は、現在 MWD で用いられている飛び除去フィルタの長さに相当する時間である。

2) 走行速度 100km/h における最大たわみ量の計測に対応

測定値の飛び発生時、および高速走行時に測定不能となった場合のドップラ振動計の速度出力の例を、 3.2.2、 3.2.3 に示す。

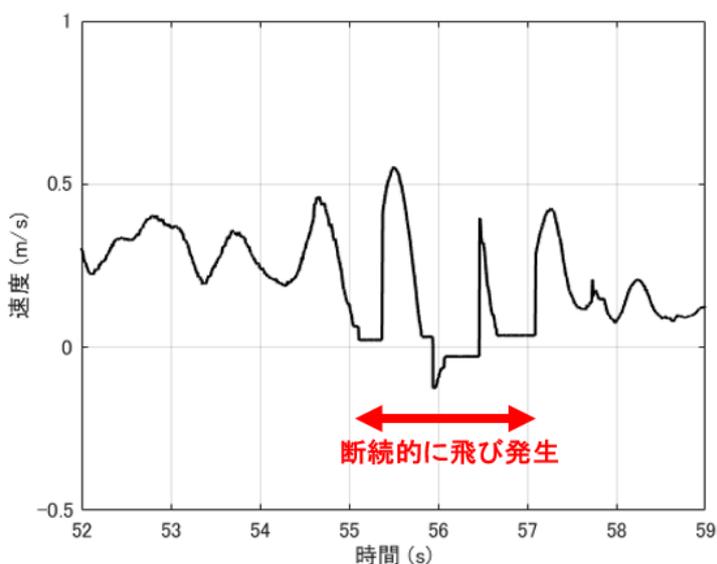


図 3.2.2 飛び発生時の速度出力例

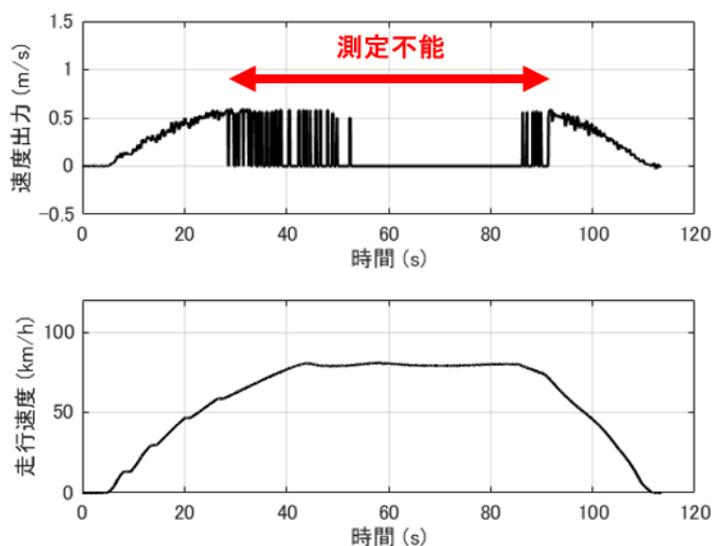


図 3.2.3 高速走行時における測定不能の例

3.3 原理機の製作

開発目標仕様を満たすドップラ振動計の原理機を新規に設計し、光学定盤上に原理機を構築した。
原理機の構成ブロック図を図 3.3.1 に示す。

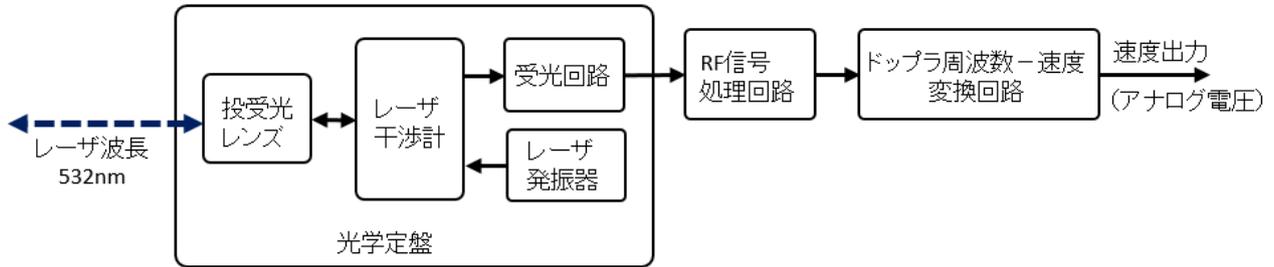


図 3.3.1 原理機の構成ブロック図

3.4 原理機での室内試験

3.4.1 速度検出回路の速度測定範囲検証

原理機について、以下内容の室内検証を行った。

- 1) 速度検出回路の速度測定範囲、速度検出精度および速度出力の周波数特性を検証
- 2) 走行状態を模擬したテスト装置を用いて原理機全体の測定精度を検証

図 3.4.1 は、速度検出回路の検証に用いた機器構成を示すブロック図である。

テスト信号発生器の信号をレーザーダイオードにより電気からレーザー光へ変換し、そのレーザー光を原理機の受光回路（受光素子）へ入射させている。

最終的にアナログ電圧へ変換された速度信号の電圧値を、デジタルマルチメータを用いて測定する。

なお、テスト信号の周波数とドップラ振動計が測定する速度との間には、次の関係がある。

$$f_a = (2/\lambda) \cdot v$$

f_a : テスト信号の周波数[Hz]、 v : 速度[m/s]、 λ : 原理機のレーザー波長 532.3×10^{-9} [m]

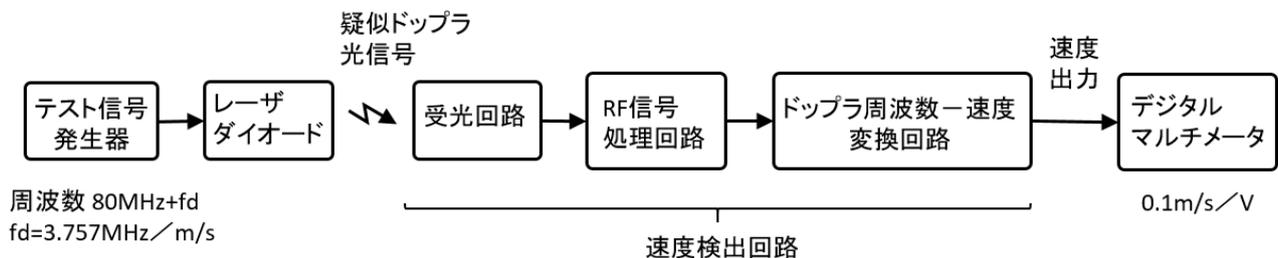


図 3.4.1 速度検出回路の検証ブロック図

図 3.4.2 は、速度検出回路の入出力特性の測定結果である。

このグラフより、原理機の色度検出回路は、色度測定範囲の開発目標仕様±1m/s を満たしており、且つ高いリニアリティを有している回路であることが分かった。

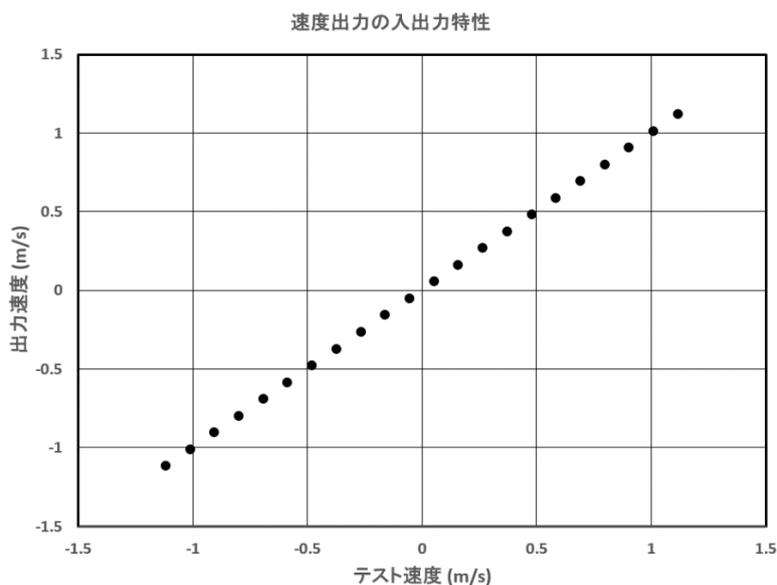


図 3.4.2 速度検出回路の色度測定範囲およびリニアリティ

3.4.2 速度検出回路の色度検出精度の検証

図 3.4.3 は、図 3.4.2 の縦軸を出力誤差で表したグラフである。

このグラフより、速度検波回路の測定精度が開発目標仕様±0.1%以内に十分収まっていることが分かった。

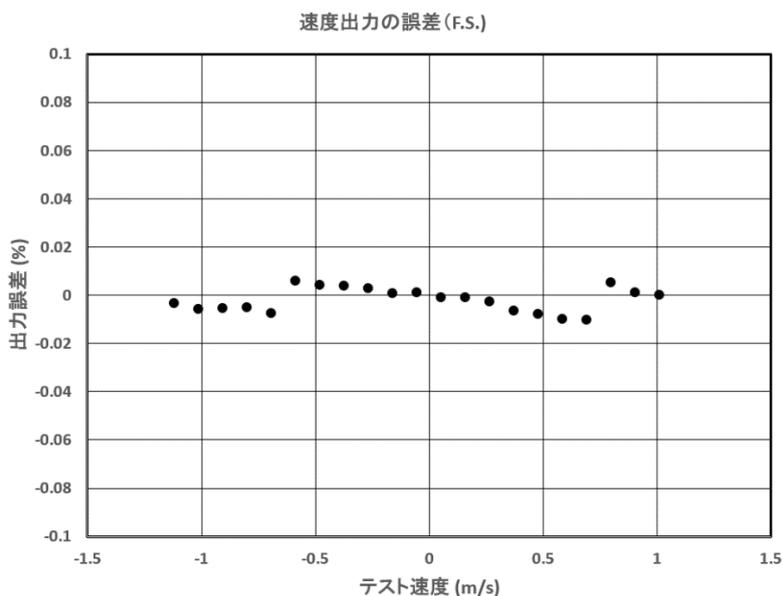


図 3.4.3 速度検出回路の色度検出精度

(データに関する補足)

図 3.4.3 のデータに見られる不連続点は、電圧測定に用いたデジタルマルチメータの入力電圧レンジの切り替わりと同期して発生している。

3.4.3 速度検出回路の周波数特性の検証

図 3.4.4 は、速度検出回路の周波数特性の測定結果である。

このグラフから、速度出力のカットオフ周波数が 134Hz(-3dB)であることが分かり、原理機の速度検出回路の測定周波数範囲が開発目標仕様 DC~100Hz(-3dB)の基準を満たしていることが分かった。

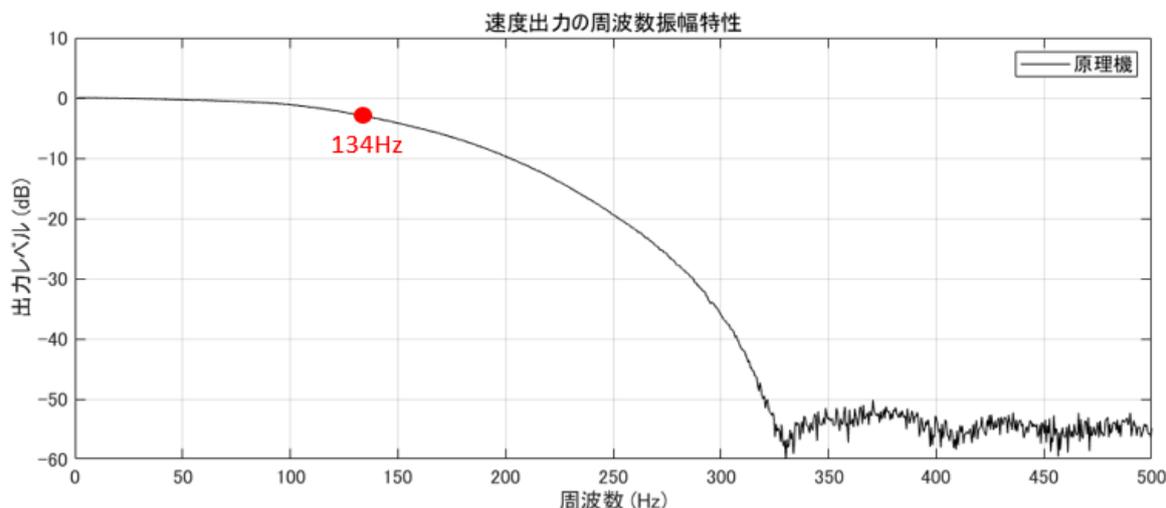


図 3.4.4 速度検出回路の周波数特性

3.4.4 測定精度の総合評価

測定精度の総合評価を行うにあたり、原理機および後述する試作機の性能評価用に走行路面を模擬する走行面発生装置の製作を行った（写真 3.4.1）。

この走行面発生装置は、走行路面を模擬する面として、3.5 インチハードディスクの回転ディスク面を利用している。ディスクの回転数は外部からの駆動信号により制御され、ディスク表面にはレーザ光を散乱させるための処理を施している。

この 3.5 インチハードディスクを精密回転ステージ上に設置し、微動ハンドルを用いてステージのヨー角を微調整する。レーザ光軸に対するディスク面のヨー角は、リニアゲージを用いて測定した精密回転ステージに結合されているアーム先端の変位と、精密回転ステージの中心からリニアゲージ先端までの距離との三角関数から求めている。

走行面発生装置の設定

ディスク面のヨー角：-0.100°~+0.100°の範囲を 0.025°刻みで設定（9 通り）

レーザ光照射部におけるディスク回転速度：15、30、50、65m/s（4 通り）

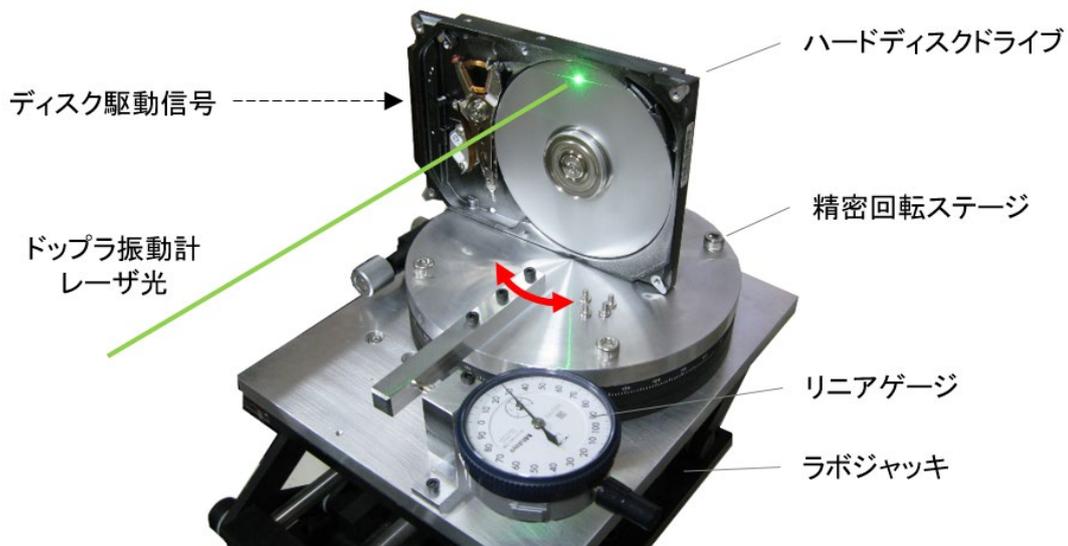


写真 3.4.1 走行面発生装置

図 3.4.5 は、ディスクの回転数およびヨー角で算出されたテスト速度とドップラ振動計の原理機が測定した速度出力の関係を示すグラフである。

なお、走行面発生装置で発生させたテスト速度は、次式を用いて求めている。

$$\text{テスト速度} = 2\pi \times L \times N \times \sin\theta$$

L : ディスクの回転中心とレーザー光照射ポイント間の距離

N : ディスクの回転数、 θ : レーザ光軸とディスク面の法線とのなす角

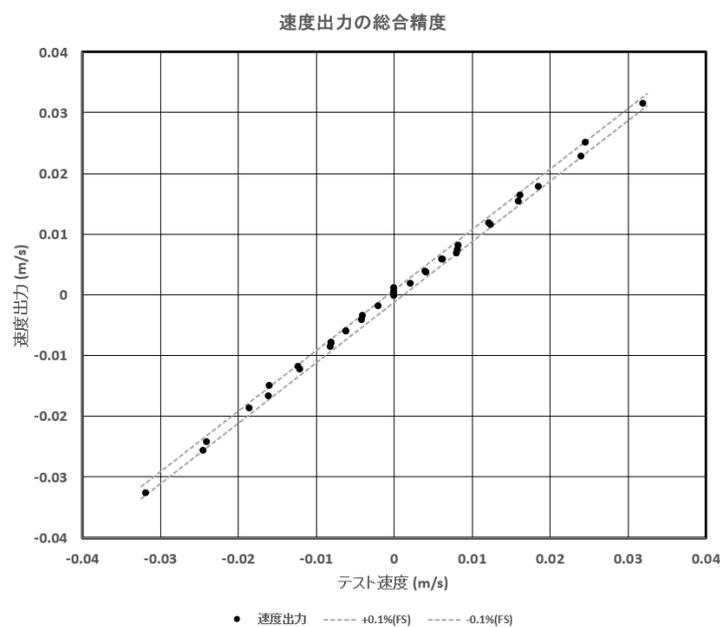


図 3.4.5 速度出力の総合測定精度

図 3.4.5 より、速度出力の値が測定誤差 $\pm 0.1\%$ のライン内に収まっており、原理機の測定精度が開発目標仕様 $\pm 0.1\%$ を満たしていることが分かった。

3.4.5 測定深度の評価

舗装の異なる2種類のコアサンプルを用いて、測定深度の評価を行った。測定深度の評価は、図3.4.6に示すように、レーザ光のフォーカス距離をドップラ振動計の設置高さを参考に1350mmに固定化し、レーザ光の光軸に沿ってコアサンプルを前後に移動させたときに観察されるドップラ振動計の出力波形を総合的に判断して行った。なお、測定面（舗装面）の速度はコアサンプルを手動で転がすことにより発生させた。

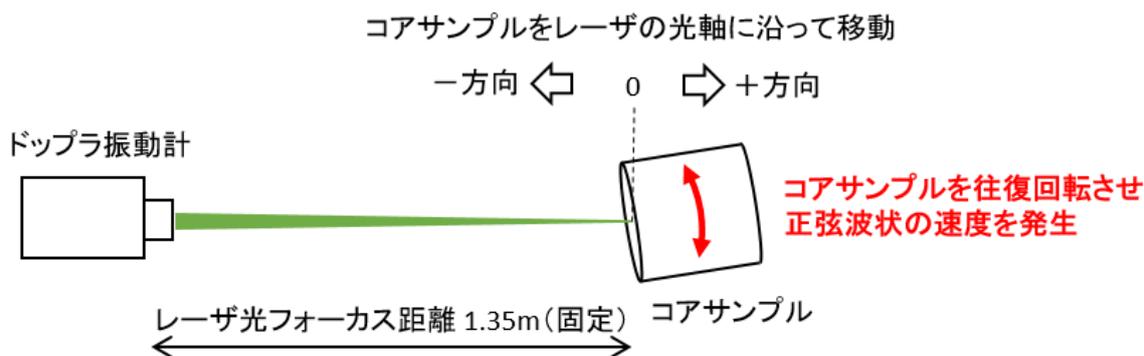


図3.4.6 測定深度の評価方法

写真3.4.2は、評価中のコアサンプルの様子を示す写真である。

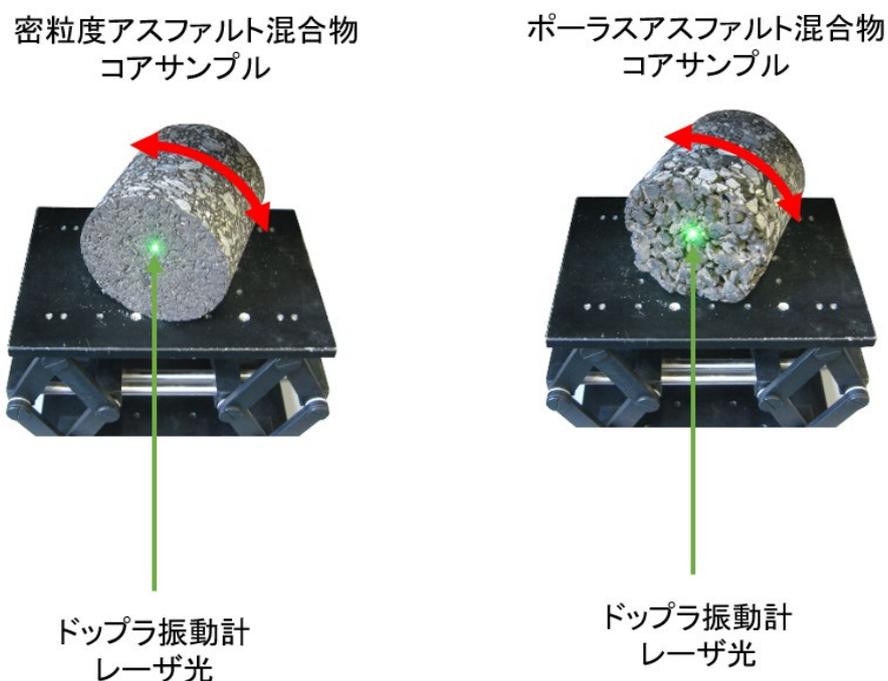


写真3.4.2 評価中のコアサンプル（左：密粒度、右：ポーラス）

図 3.4.7 は、レーザ光の光軸に沿って密粒度アスファルト混合物のコアサンプルを前後に移動させたときに観察されるドップラ振動計の速度出力波形である。移動量 0mm とは、ドップラ振動計から測定面までの距離が 1350mm の状態であり、レーザ光のフォーカス点と測定面（舗装面）とが一致している状態である。

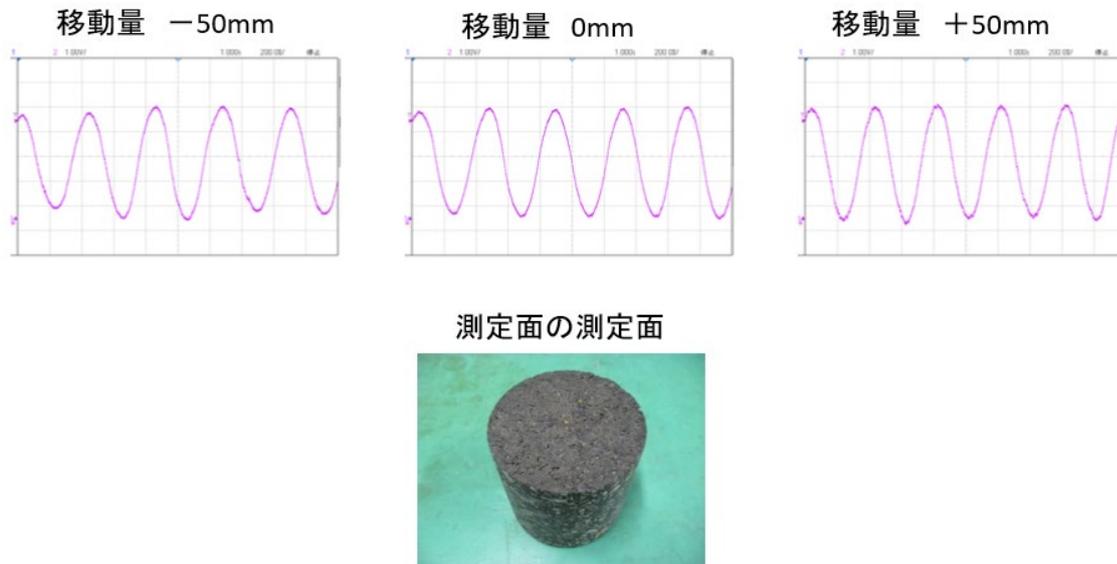


図 3.4.7 密粒度アスファルト混合物において測定される速度波形

図 3.4.8 は、レーザ光の光軸に沿ってポーラスアスファルト混合物のコアサンプルを前後に移動させたときに観察されるドップラ振動計の速度出力波形である。移動量 0mm とは、ドップラ振動計から測定面までの距離が 1350mm の状態であり、レーザ光のフォーカス点と測定面（舗装面）とが一致している状態である。

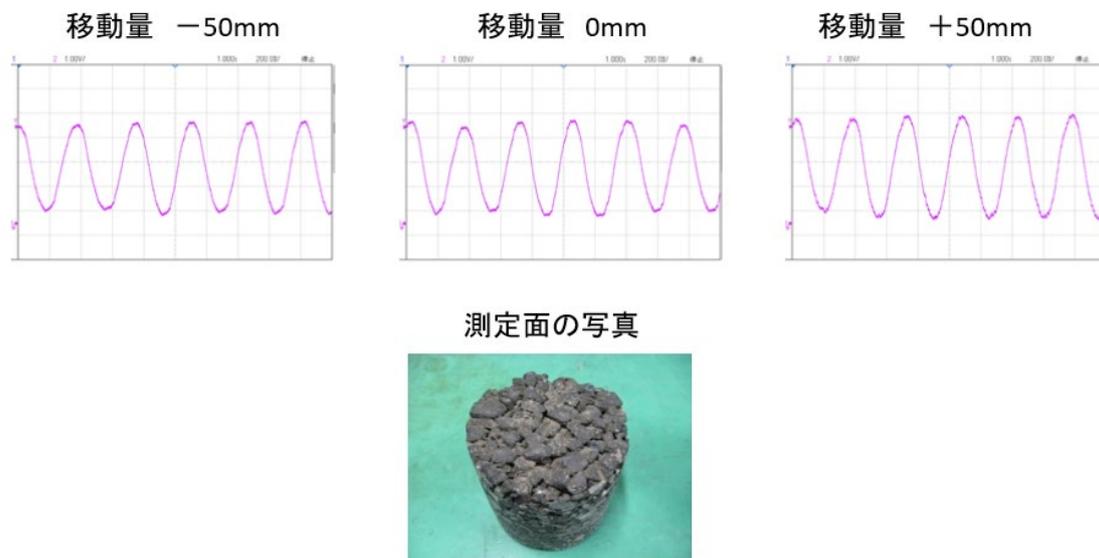


図 3.4.8 ポーラスアスファルト混合物において測定される速度波形

図 3.4.7 の密粒度アスファルト舗装、および図 3.4.8 のポーラスアスファルト舗装ともに、原理機は測定深度の開発目標仕様 $\pm 50\text{mm}$ を満たしていることが分かった。

3.5 試作機の製作

原理機の内容を一つのユニットに集約し、車載可能なドップラ振動計の試作機を製作した。なお、試作機を設計するにあたり、以下の改善を行った。

- 1) レーザ干渉計等の耐加速度化
- 2) 測定深度の更なる拡張
- 3) 速度出力の遅延特性の改善

製作した試作機の内部構成ブロック図を図 3.5.1 に、センサユニットおよび電源ユニットを写真 3.5.1 に示す。

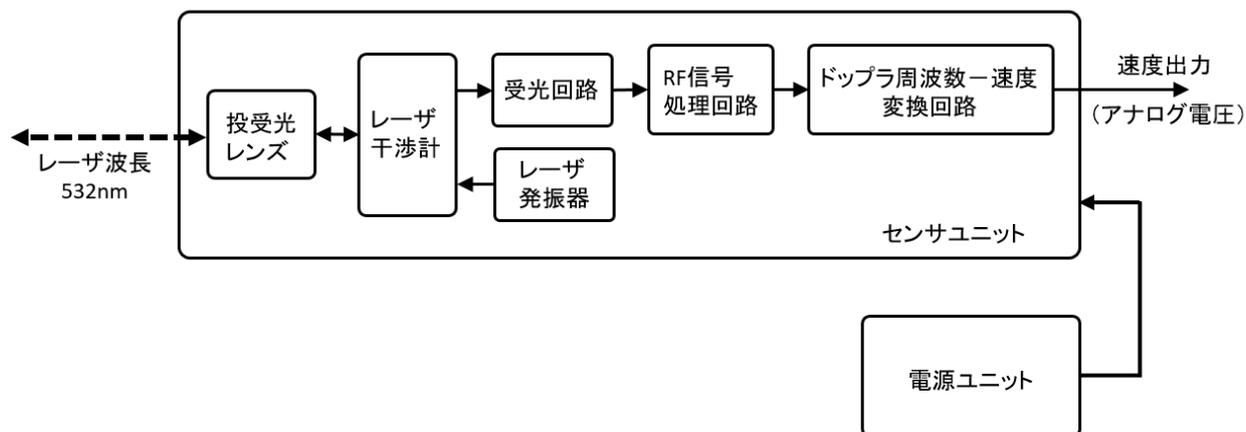


図 3.5.1 試作機の構成ブロック図

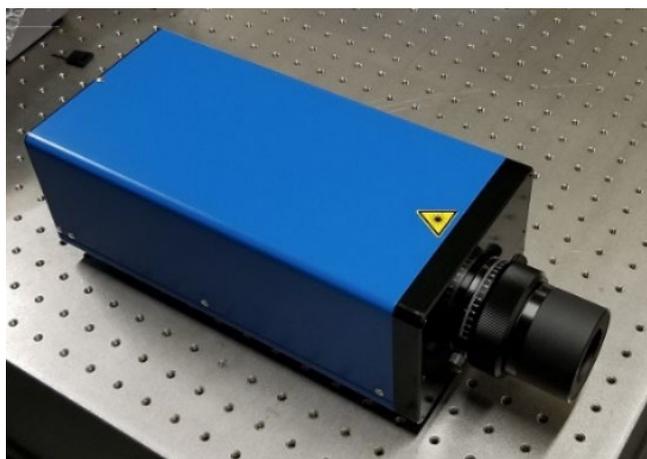


写真 3.5.1 試作機 (左: センサユニット、右: 電源ユニット)

3.6 試作機での室内検証

3.6.1 速度検出回路の速度測定範囲の検証

図 3.6.1 は、速度検出回路の検証に用いた機器の構成を示すブロック図である。なお、機器の構成や検証方法は原理機の場合と同一である。

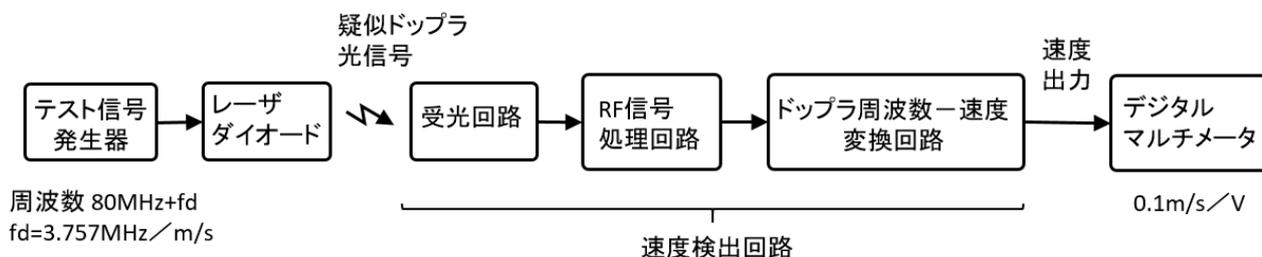


図 3.6.1 速度検出回路の検証ブロック図

図 3.6.2 は、速度検出回路の入出力特性の測定結果である。

このグラフより、試作機の色度検出回路は測定速度範囲の開発目標仕様 $\pm 1\text{m/s}$ を満たしており、且つ原理機同様に高いリニアリティを有している回路であることが分かった。

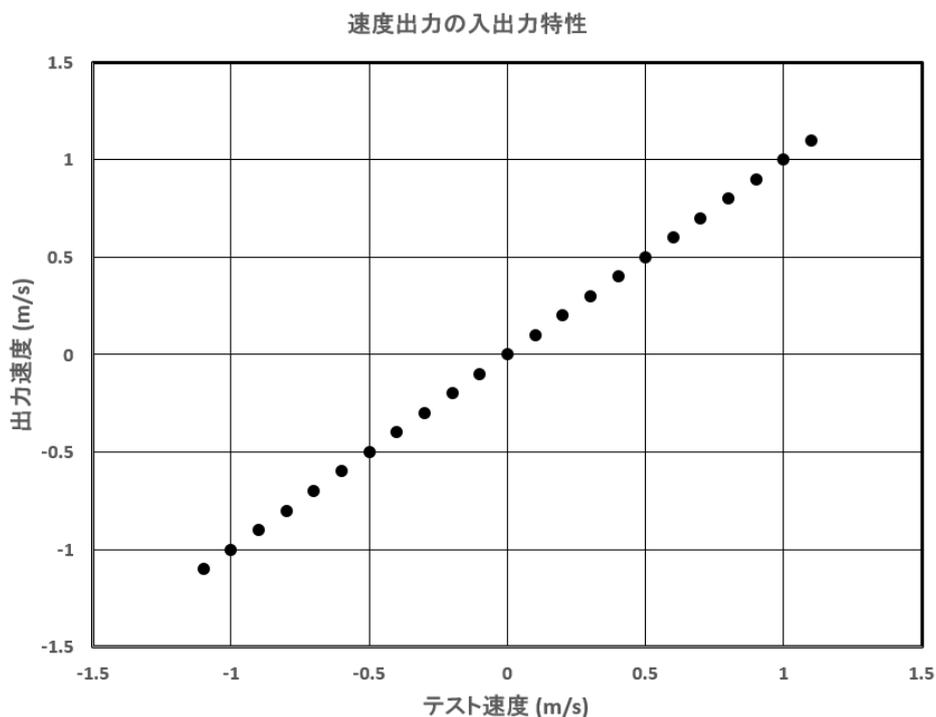


図 3.6.2 速度検出回路の速度測定範囲およびリニアリティ

3.6.2 速度検出回路の速度検出精度の検証

図 3.6.3 は、図 3.6.2 の縦軸を出力誤差にて表したグラフである。

このグラフより、速度検波回路の測定精度が開発目標仕様 $\pm 0.1\%$ 以内に十分収まっていることが分かった。

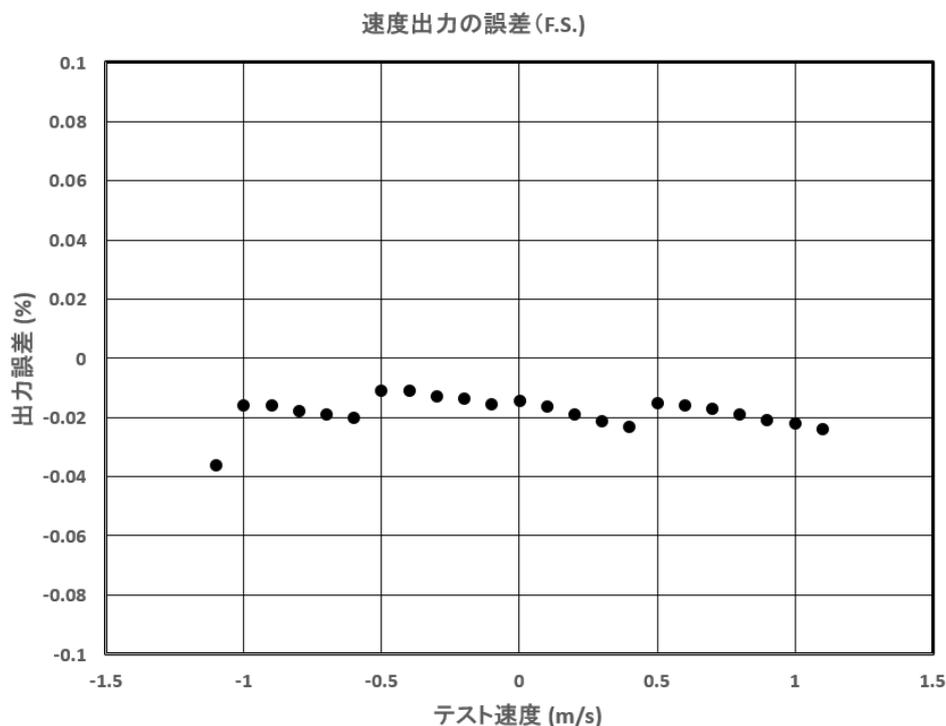


図 3.6.3 速度検出回路の速度検出精度

(データに関する補足)

図 3.6.3 のグラフに見られる不連続点は、電圧測定に用いたデジタルマルチメータの入力電圧レンジの切り替わりと同期して発生している。

3.6.3 速度検出回路の周波数特性の検証

図 3.6.4 は、速度検出回路の周波数特性の測定結果である。このグラフから、速度出力のカットオフ周波数が 114Hz(-3dB)であることが分かり、試作機の速度検出回路の測定周波数範囲が開発目標仕様 DC~100Hz(-3dB)の基準を満たしていることが分かった。

なお、試作機の周波数特性は、原理機の周波数特性に対して、滑らかな減衰曲線を描いている。これは試作機の速度出力回路を設計する際に、遅延特性を変更したために生じた変化であり、MWD 用に速度出力を最適化した結果である。

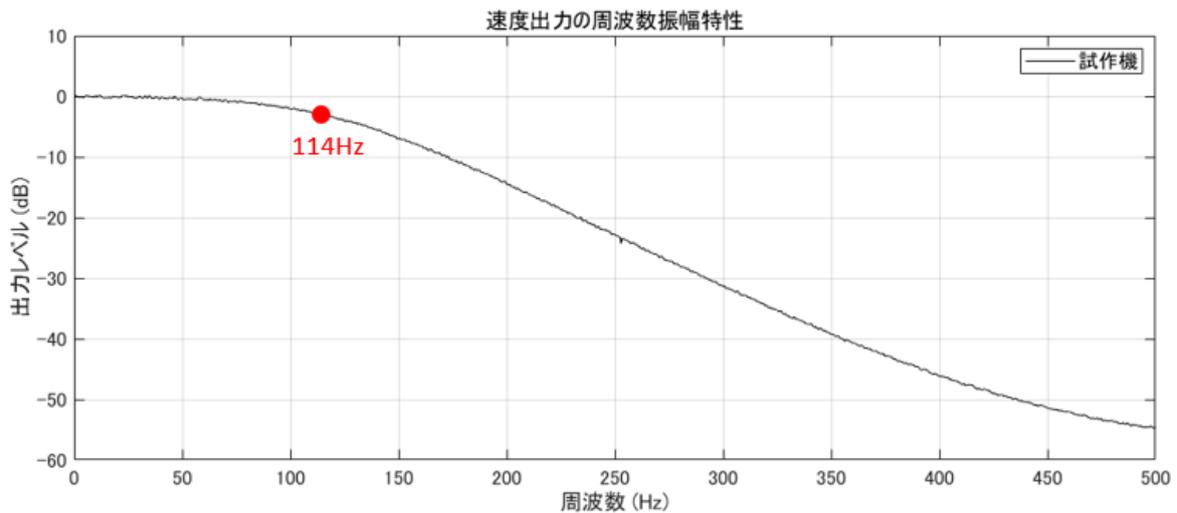


図 3.6.4 速度検出回路の周波数特性

3.6.4 測定精度の総合評価

原理機の場合と同様に、走行面発生装置を用いて同一条件で測定精度の総合評価を行った。走行面発生装置の設定は以下のとおりである。

走行面発生装置の設定

- ・ディスク面のヨー角： -0.100° ～ $+0.100^{\circ}$ の範囲を 0.025° 刻みで設定（9通り）
- ・レーザ光照射部におけるディスク回転速度：15、30、50、65m/s（4通り）

図 3.6.5 は、ディスクの回転数およびヨー角で算出されたテスト速度とドップラ振動計の試作機が測定した速度出力の関係を示すグラフである。

図 3.6.5 より、速度出力の値が測定誤差 $\pm 0.1\%$ のライン内に収まっていることから、試作機の測定精度が開発目標仕様 $\pm 0.1\%$ を満たしていることが分かった。

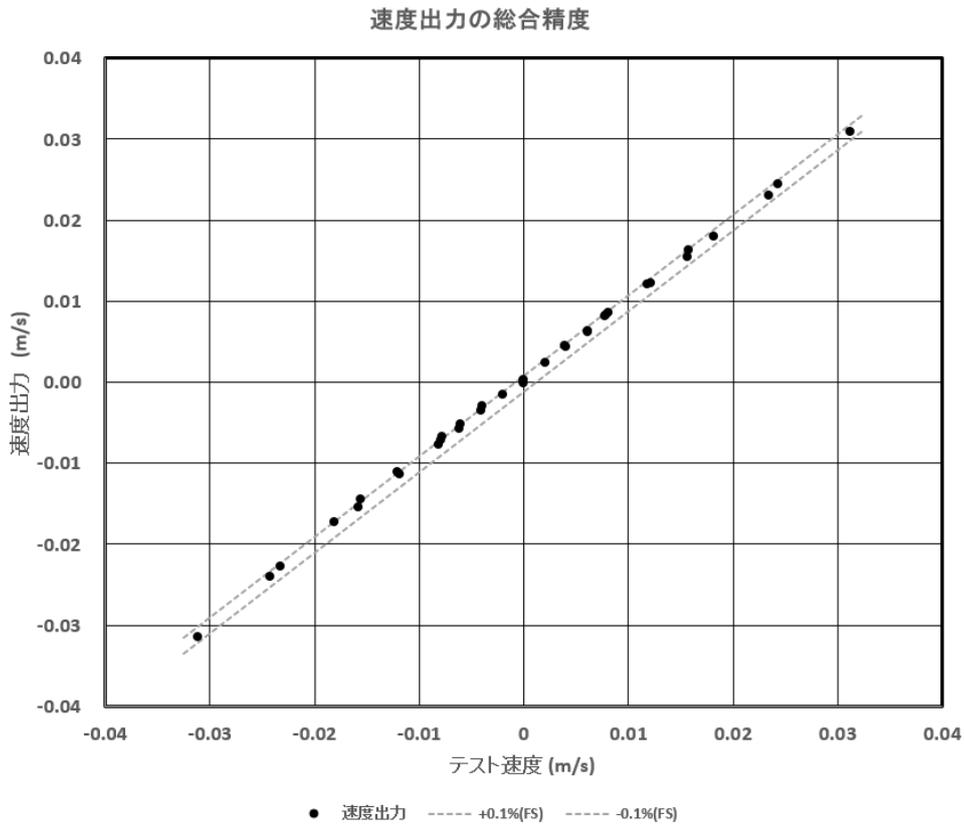


図 3.6.5 速度出力の総合測定精度

3.6.5 測定深度の評価

原理機の場合と同様、舗装の異なる 2 種類のコアサンプルを用いて測定深度の評価を行った。なお、測定深度の評価方法は原理機の場合と同一である。

図 3.6.6 は、レーザ光の光軸に沿って密粒度アスファルト舗装のコアサンプルを前後に移動させたときに観察されるドップラ振動計の速度出力波形である。移動量 0mm とは、ドップラ振動計から測定面までの距離が 1350mm の状態であり、レーザ光のフォーカス点と測定面（舗装面）とが一致している状態である。

図 3.6.7 は、レーザ光の光軸に沿ってポーラスアスファルト混合物のコアサンプルを前後に移動させたときに観察されるドップラ振動計の速度出力波形である。移動量 0mm とは、ドップラ振動計から測定面までの距離が 1350mm の状態であり、レーザ光のフォーカス点と測定面（舗装面）とが一致している状態である。

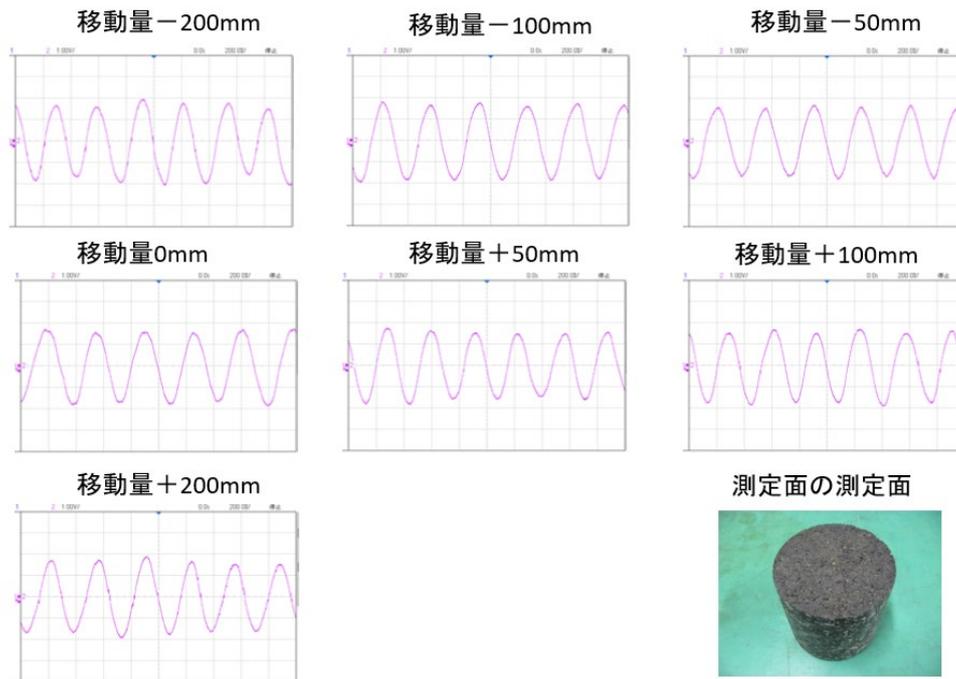


図 3.6.6 密粒度アスファルト混合物において測定される速度波形

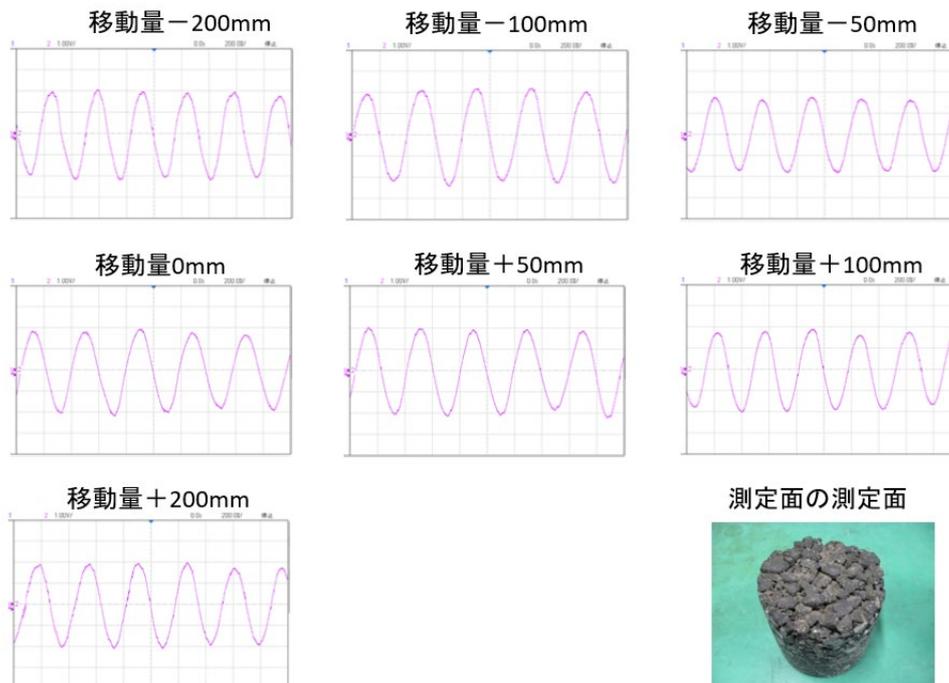


図 3.6.7 ポーラスアスファルト混合物において測定される速度波形

図 3.6.6 の密粒度アスファルト混合物、および図 3.6.7 のポーラスアスファルト混合物ともに、試作機は測定深度の開発目標仕様 $\pm 50\text{mm}$ を大幅に上回る $\pm 200\text{mm}$ の測定深度を有していることが分かった。

この広い測定深度により、MWDの車両に大きな上下動が生じたとしても、より安定的に路面との相対速度を測定することが可能になるものと考えられる。

4 試作機の実道検証

3. で記載したとおり、MWD に適用可能な性能を有する試作機が完成した。本章では試作機を MWD に搭載した場合でも安定的なデータ取得が可能であるか、また、MWD のたわみ計測システムとして試作機により正確なたわみ量が算出できるか等について検証を実施した。

4.1 ドップラ振動計の架台への設置

MWD ではドップラ振動計の測定値から解析によりたわみ量を算出するが、解析手法を適用するにあたりドップラ振動計から MWD の車体に剛結されていることが必要となる。剛結のイメージを図 4.1.1 に示す。ドップラ振動計を設置する架台（剛性の高い材料（鉄製））が車体にボルトにより剛結されている。ドップラ振動計は車体に剛結された架台に剛結する構造であることが必要である。

写真 4.1.1 に試作機の剛結状況の写真を示す。試作機には架台剛結のため底面に複数箇所の固定用ネジ穴が存在しており、架台にボルトで設置し隙間やぐらつきがなく確実に剛結されていることを確認した。また、以降の検討結果（4.5）からも正常にたわみ量の算出が可能であることを確認できたことから、試作機が確実に架台へ確実に剛結される構造であることが確認できた。

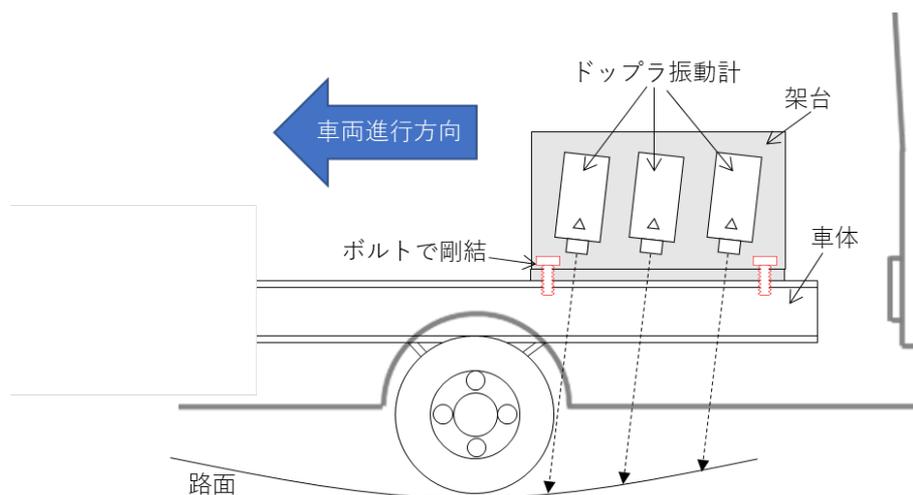


図 4.1.1 ドップラ振動計の架台剛結のイメージ



写真 4.1.1 試作機の架台剛結状況

4.2 走行速度の影響

走行速度が高速の場合でも安定した測定が可能か検証するため、土木研究所構内の試験走路 700m～1700m の直線区間にて試作機を搭載した MWD による走行速度試験を実施した。

走行速度は 20km/h、40km/h、60km/h、80km/h、100km/h とした。

試験結果を図 4.2.1～図 4.2.5 に示す。全ての走行速度でデータの飛び、データの反転、計測不能等の不具合は見られず、100km/h での走行でも安定的にデータを取得できることを確認した。

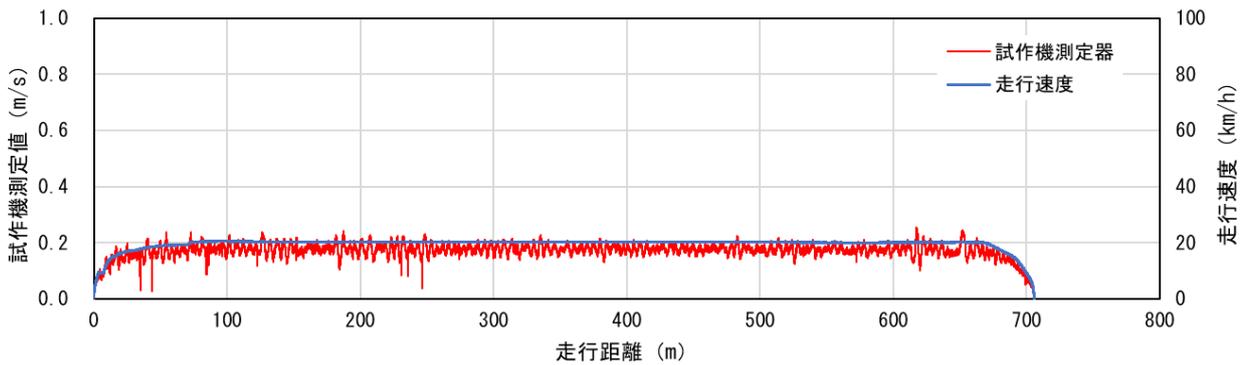


図 4.2.1 走行速度試験結果 (20km/h)

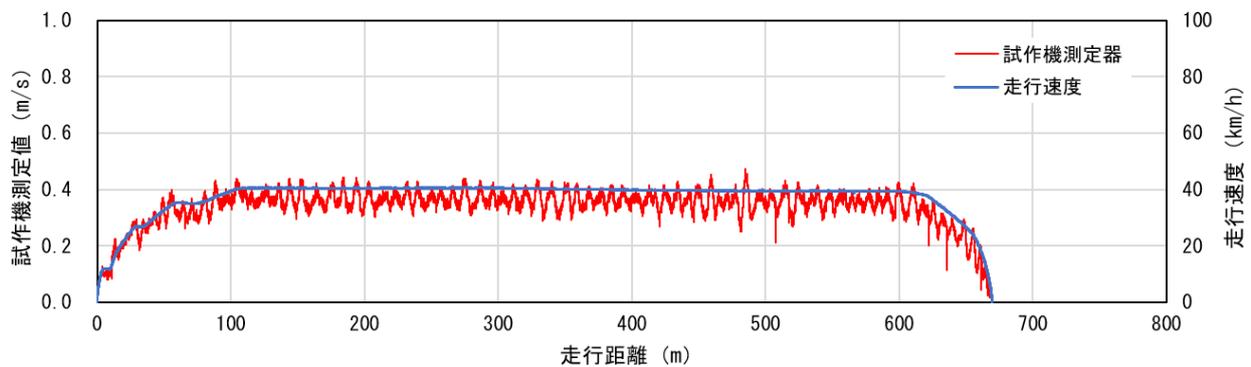


図 4.2.2 走行速度試験結果 (40km/h)

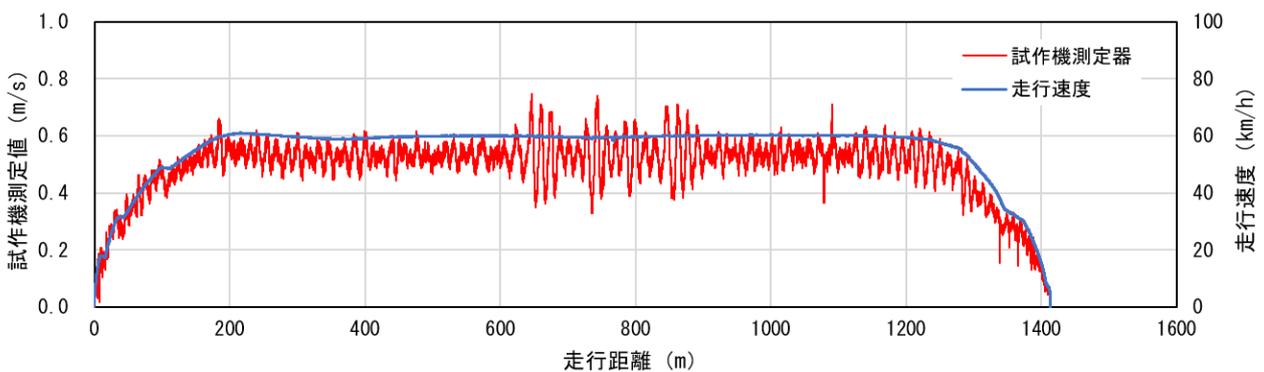


図 4.2.3 走行速度試験結果 (60km/h)

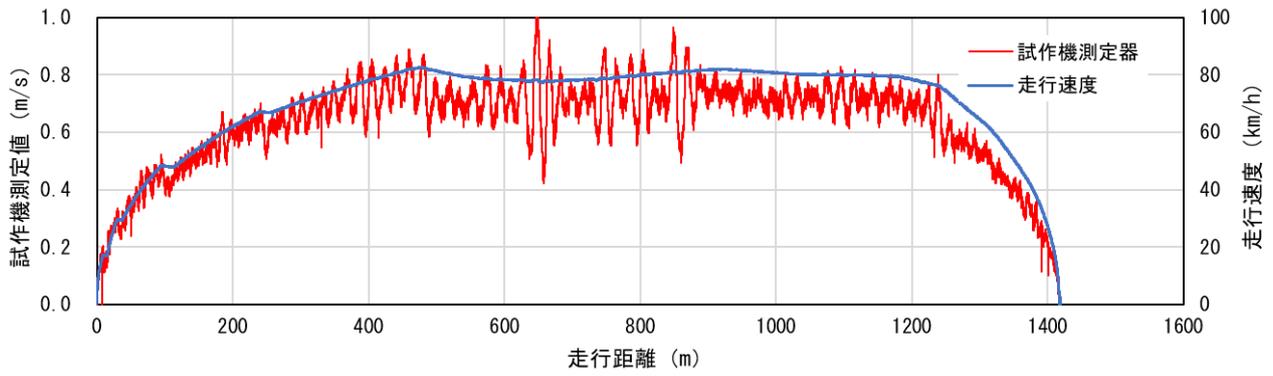


図 4.2.4 走行速度試験結果 (80km/h)

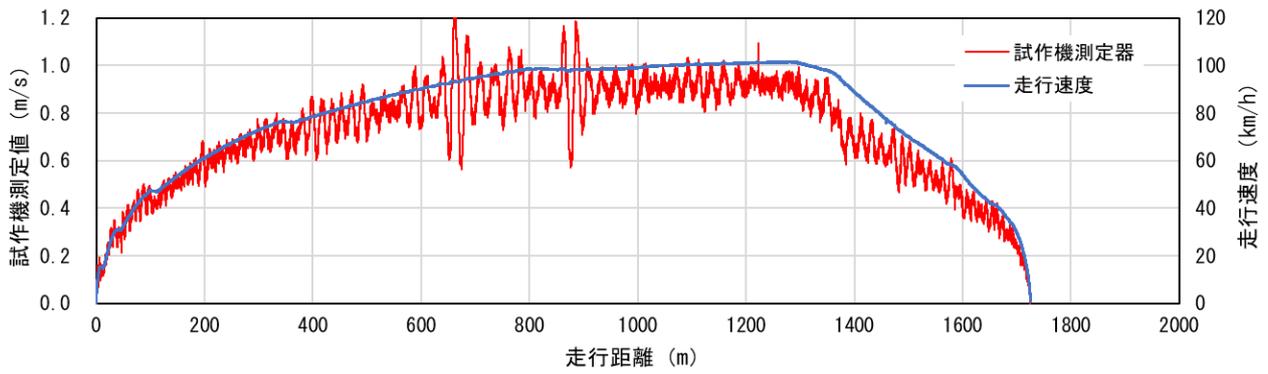


図 4.2.5 走行速度試験結果 (100km/h)

4.3 路面の段差の影響

段差により車両に衝撃が加わった場合でも安定した測定が可能か検証するため、土木研究所構内の試験走路にて模擬段差を作成し、試作機を搭載した MWD にて走行することによる段差走行試験を行った。

段差走行試験は図 4.3.1 の通り、50m おきに設置した 1cm、2cm、3cm の段差上を、走行速度 20km/h、40km/h、60km/h、80km/h で走行した。なお、段差は各々の厚さの木材をコンクリート釘で路面に固定させることで設置した。

段差走行試験結果を図 4.3.2～図 4.3.5 に示す。なお、参考として MWD に搭載した加速度計で測定された上下加速度の測定結果も併せて示す。全ての走行速度において段差 3cm があってもデータの飛びや反転、測定不能などの不具合は確認されず、安定的な測定ができることを確認した。

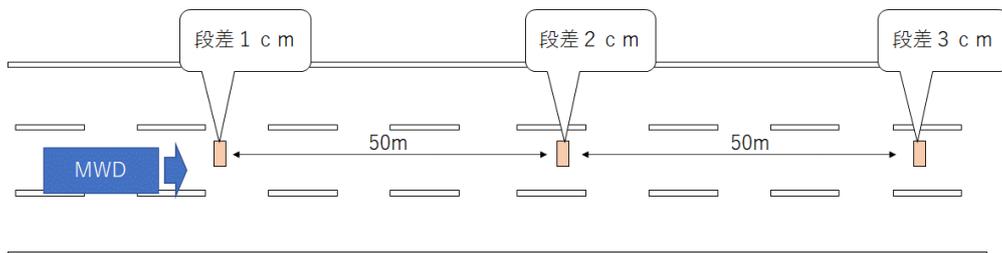


図 4.3.1 段差走行試験



写真 4.3.1 段差走行試験の様子

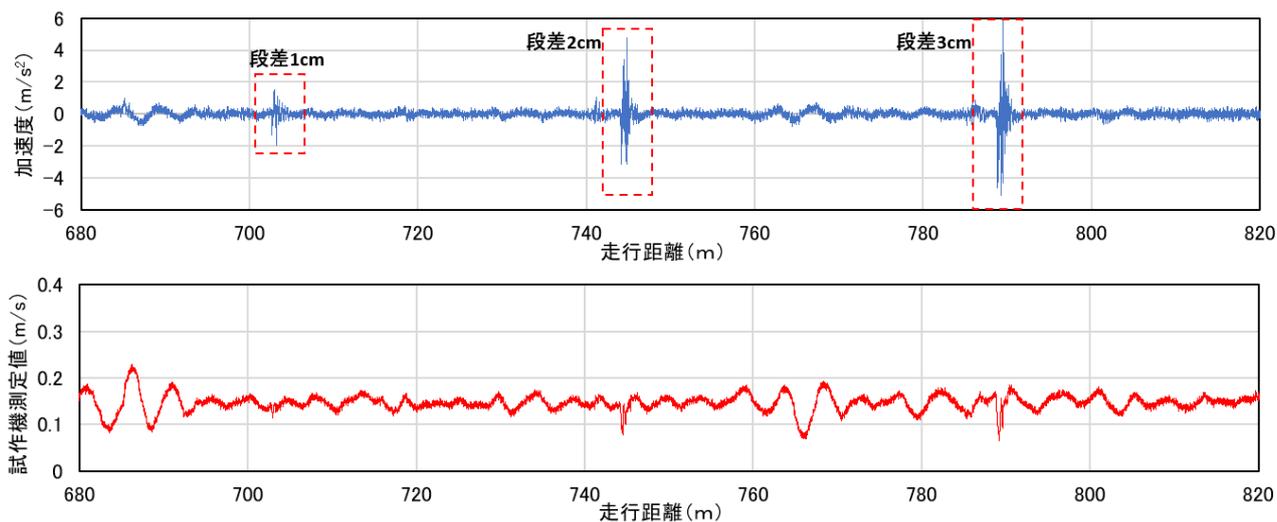


图 4.3.2 段差走行試験結果 (20km/h)

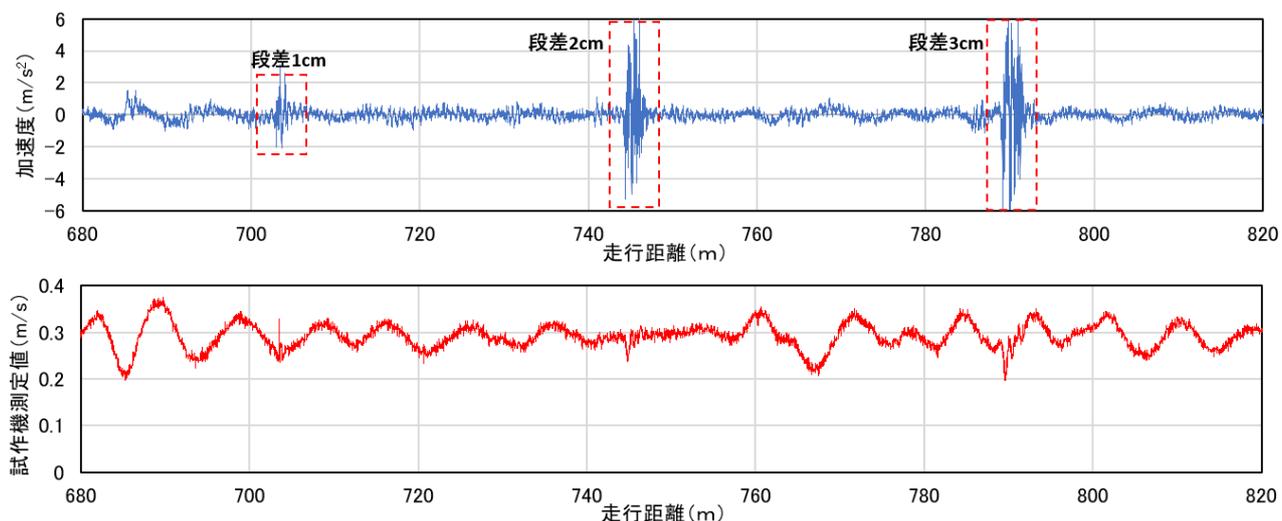


图 4.3.3 段差走行試験結果 (40km/h)

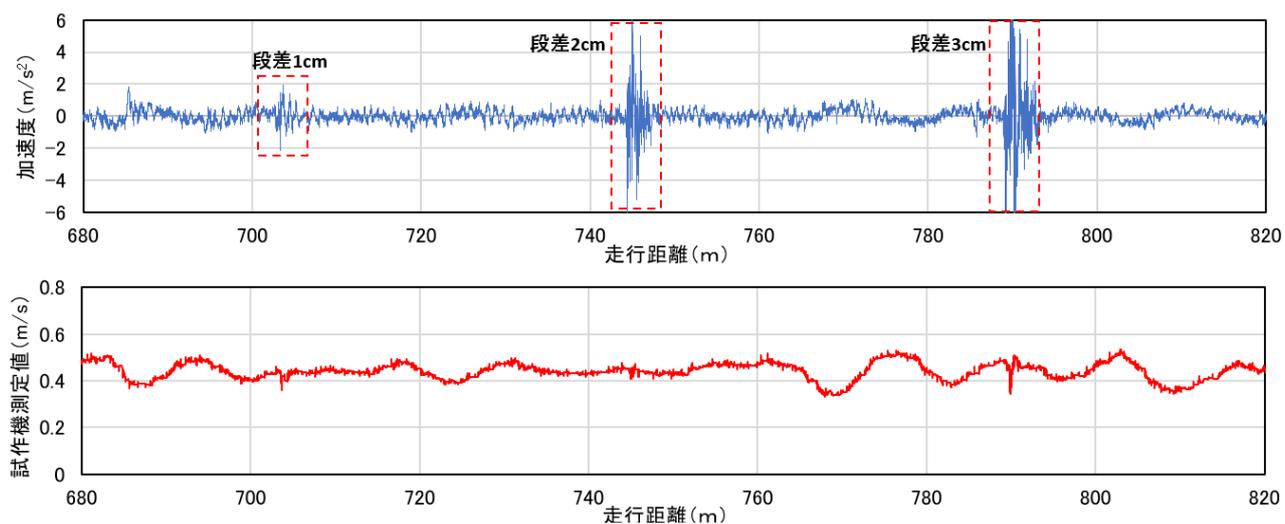


图 4.3.4 段差走行試験結果 (60km/h)

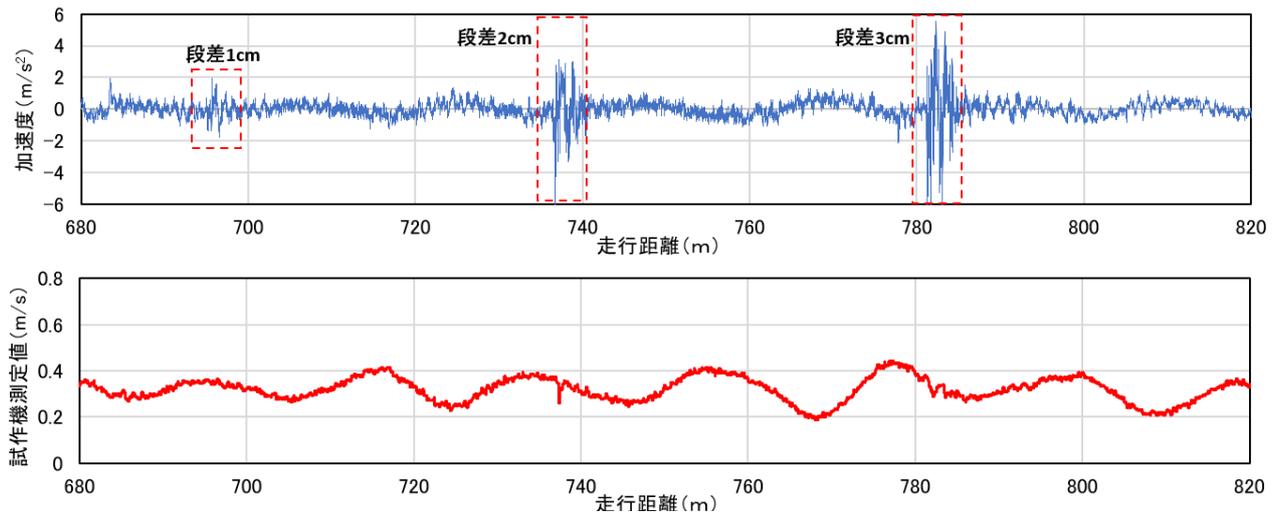


图 4.3.5 段差走行試験結果 (80km/h)

4.4 路面の平坦性の影響

路面の平坦性が悪化している舗装においても安定的な測定が可能であるか検証するため、土木研究所舗装走行実験場の中ループ（以下、中ループ）において平坦性走行試験を実施した。中ループは荷重車を用いた舗装の促進载荷試験⁵⁾を実施している場所であり、半径 100m、全長 628m の円形走路である。中ループは様々な路面変状（段差、わだち掘れ、ひび割れ等）が存在しており、平坦性が良い区間、悪い区間が混在している。

本検証では中ループにおける国際ラフネス指数（IRI）に着目して検証を実施した。IRI の測定は乗用車に取り付け可能な簡易 IRI 測定装置（共和電業(株)製「STAMPER」）により実施し評価区間長を 5m として算出した。なお、IRI は表 4.4.1⁶⁾に示す舗装の損傷レベルが参考となり、8 以上で舗装の損傷が大きく修繕工事等の措置の目安になる指標である。

図 4.4.1 に平坦性走行試験結果を示す。全ての測定速度において路面の損傷が大きいと判断される IRI8 以上の区間においても測定値の飛び、反転、測定不能といった不具合はなく、試作機にて安定的な測定が可能であることを確認した。



写真 4.4.1 舗装走行実験場全景（中ループ：写真中の円形の走路）

表 4.4.1 IRI の評価例⁶⁾

点検項目	損傷レベル（小）	損傷レベル（中）	損傷レベル（大）
IRI (mm/m)	0～3 程度	3～8 程度	8 以上

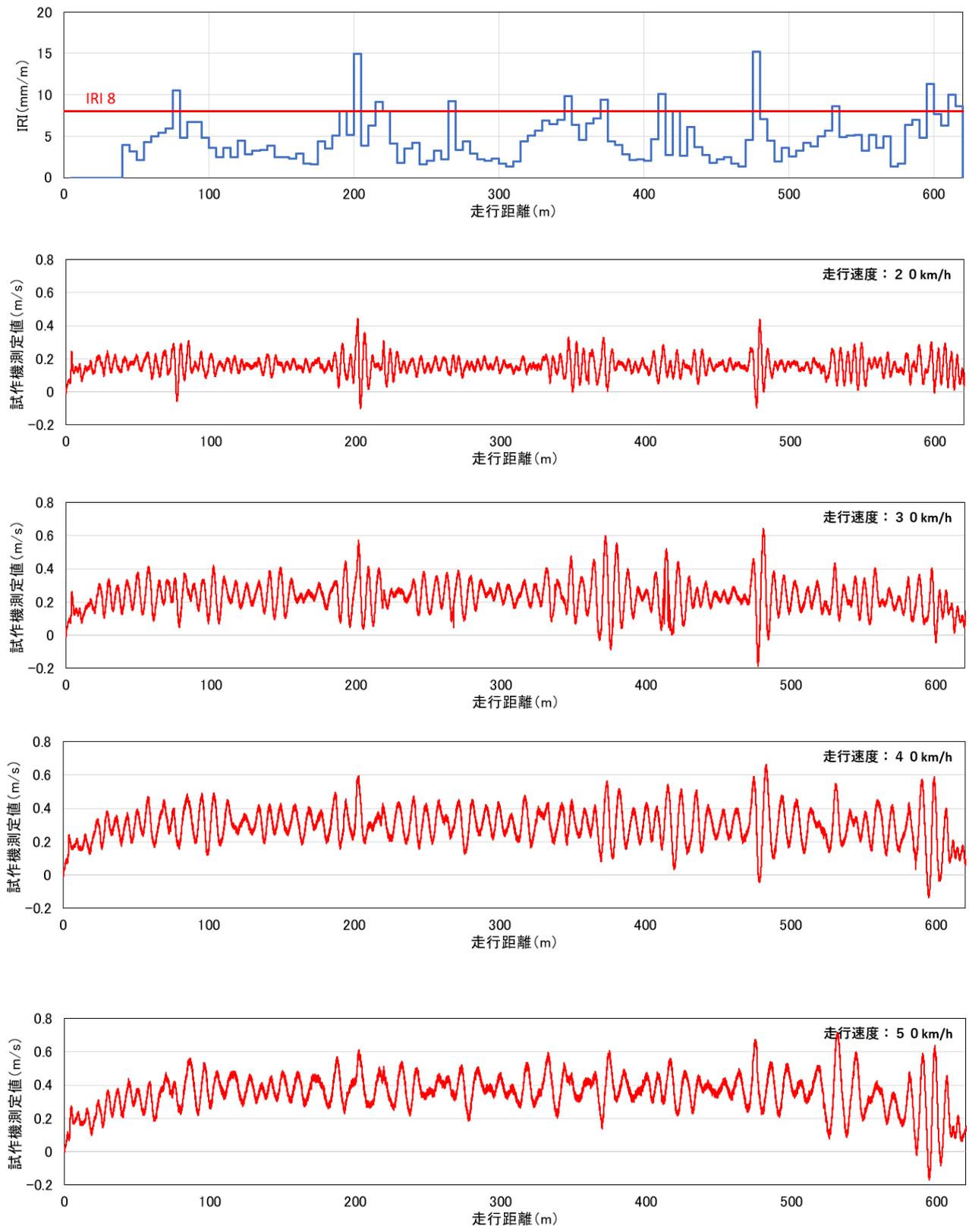


図 4.4.1 平坦性走行試験結果

4.5 たわみ量計測（MWD 測定システムとしての試作機の検証）

4.4 までの実道での検証では、主に測定条件の悪い悪路であっても試作機における測定が安定的に行えるかの検証を実施し、概ね実道で想定される路面性状での測定が可能であることを確認した。ただし、測定の目的はたわみ量の算出であり、MWD の計測システムの一部として試作機が正常に機能するか（試作機で測定した場合にたわみ量の算出が可能か）が重要である。

そこで、試作機を MWD に搭載して図 4.5.1 に示す土木研究所研外周路（路面が健全な区間、非健全な区間が混在）約 1000m の区間にて測定を行い、たわみ量の算出が可能か検証を行った。なお、ドップラ振動計は写真 4.5.1 に示すように、既設機 2 台、試作機 1 台の計 3 台により測定した。解析手法は別途共同研究報告書³⁾で示す「ドップラ振動計を用いた手法（ウェーブレット法およびたわみ速度差法）」及び本報告書 5. で提案する「ドップラ振動計を用いた手法（たわみ速度差法）」にてたわみ量を算出した。

なお、MWD たわみ量の結果を見るとたわみ量の算出が不可能であった区間が存在するが、測定は 11 月に実施しており、落ち葉の影響から正確な測定ができなかったことが原因である。路面に落ち葉等の障害物があると当然であるが路面のたわみ速度の測定が不可能となるため、調査実施時期については落ち葉等の影響を受けないよう考慮することも重要である。



図 4.5.1 土木研究所外周路（計測区間）

（1）DRY 路面での検証

路面が乾燥した状態において、走行速度は 20km/h、30km/h、40km/h で MWD 測定を実施した。また、FWD 測定を 5m 間隔で実施し、FWD たわみ量 (D_0) と MWD たわみ量とを比較した。

図 4.5.2～図 4.5.7 にたわみ量計測結果を示す。全ての結果で概ねたわみ量の算出が可能となっており、FWD たわみ量と同様の傾向を示すとともに、500m 付近のたわみ量が大きい箇所を確実に抽出できる結果が得られた。以上より、試作機は MWD 計測システムの一部として正常に機能することを確認した。



写真 4.5.1 試作機の設置状況

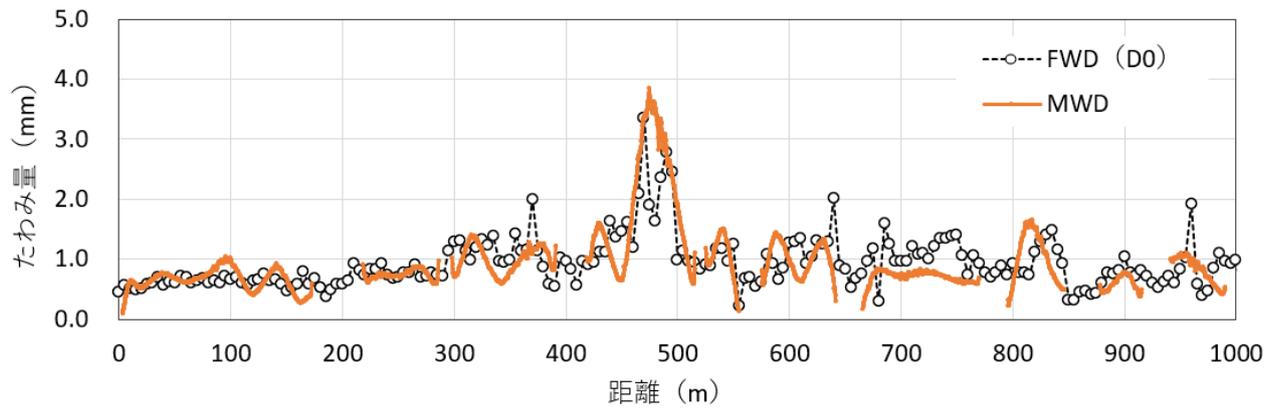


図 4.5.2 たわみ量計測結果 (ウェーブレット法_20km/h)

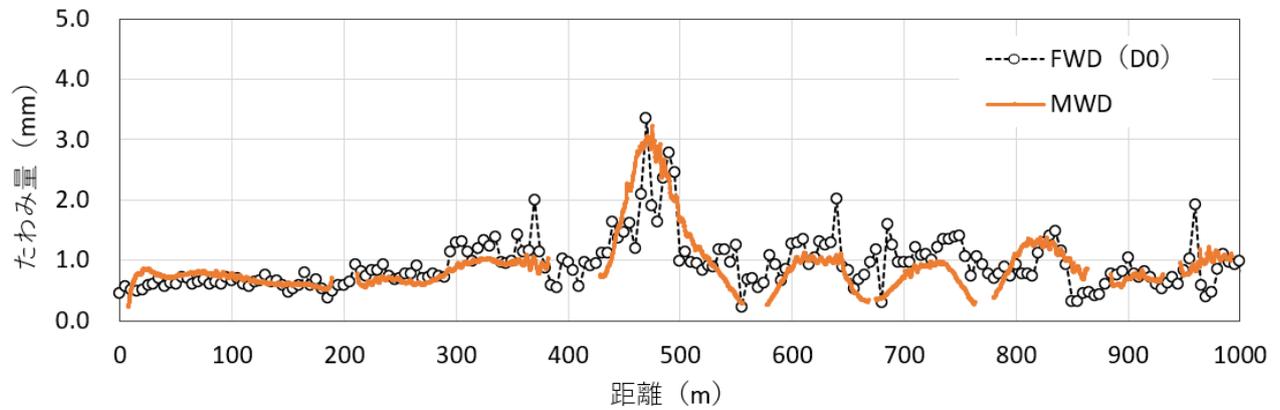


図 4.5.3 たわみ量計測結果 (ウェーブレット法_30km/h)

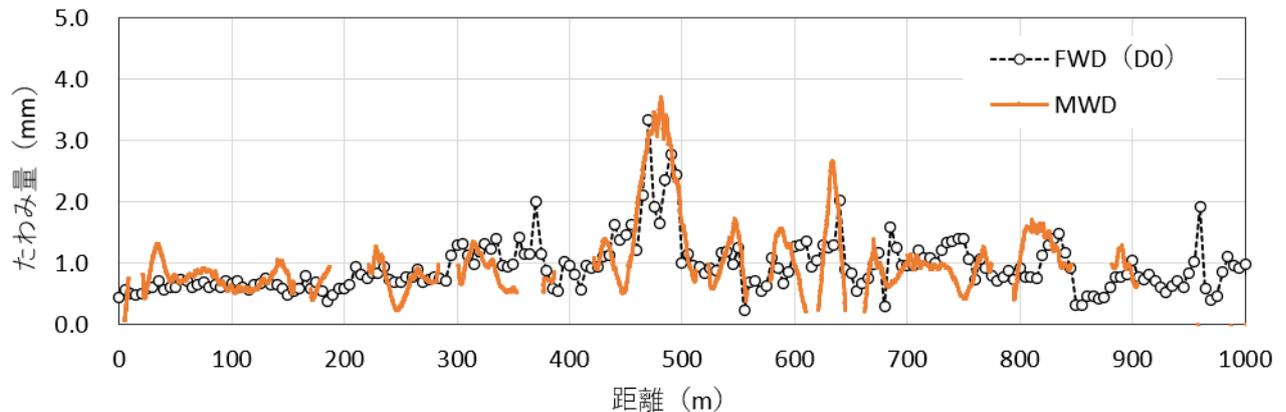


図 4.5.4 たわみ量計測結果 (ウェーブレット法_40km/h)

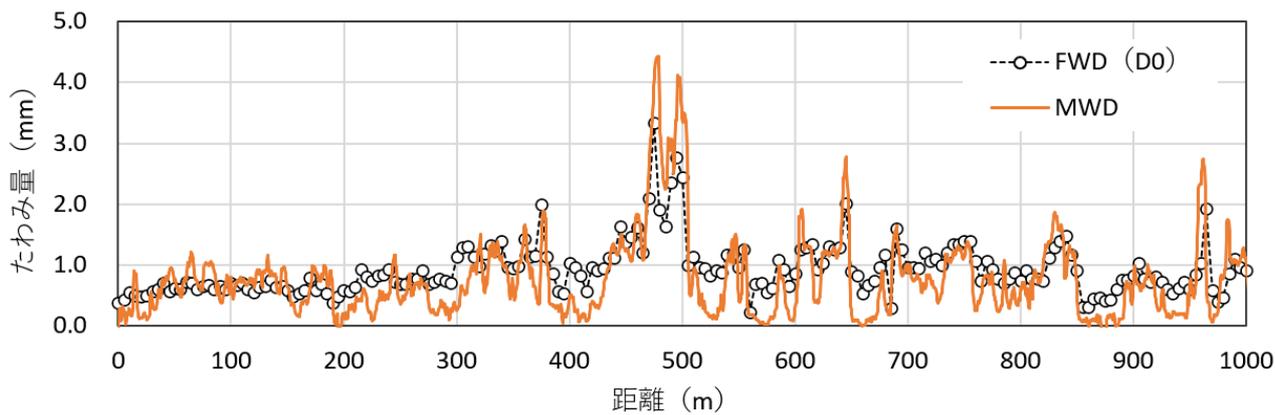


図 4.5.5 たわみ量計測結果 (たわみ速度差法_20km/h)

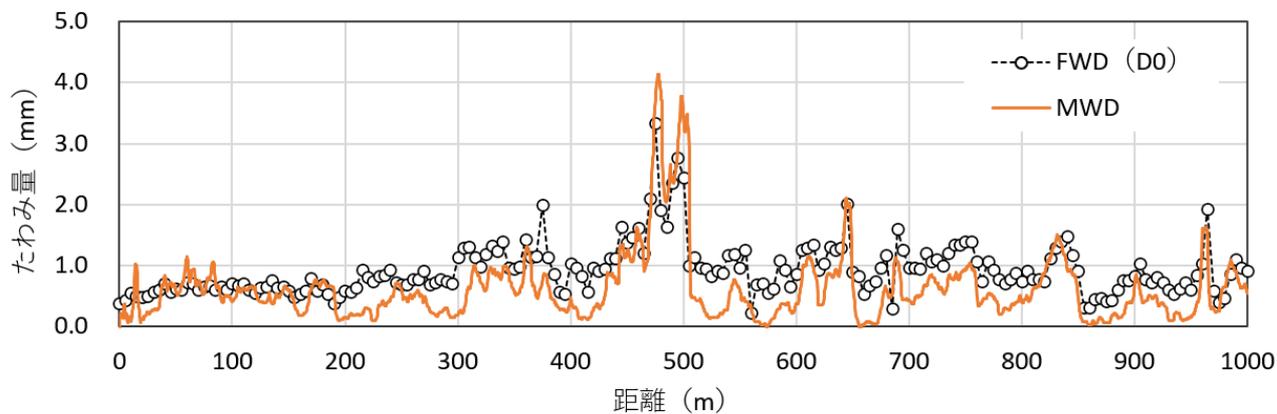


図 4.5.6 たわみ量計測結果 (たわみ速度差法_30km/h)

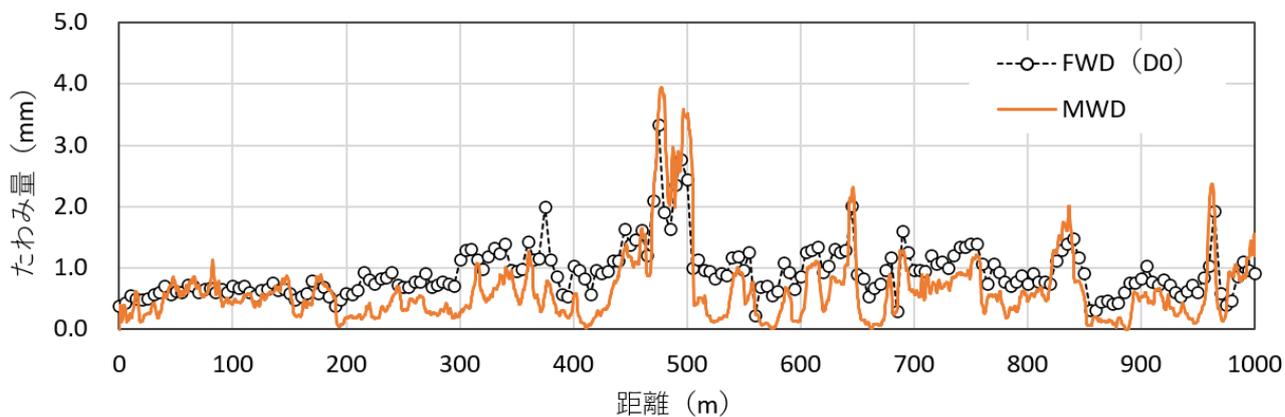


図 4.5.7 たわみ量計測結果 (たわみ速度差法_40km/h)

(2) WET 路面での検証

測定中に小雨が降った場合を想定し、ある程度路面が濡れた状態でも路面との相対速度ならびに MWD たわみ量の測定が可能か検証を実施した。

路面の濡れは写真 4.5.2 に示すように乾燥路面に散水することで再現した。散水範囲はたわみ量が大い 460m~510m の区間とし、走行速度は 20km/h、40km/h とした。

WET 路面走行時の試作機の世界測定結果を図 4.5.8~図 4.5.9 に示す。水溜まりがなく路面が濡れている程度であれば試作機での測定が可能であることを確認した。

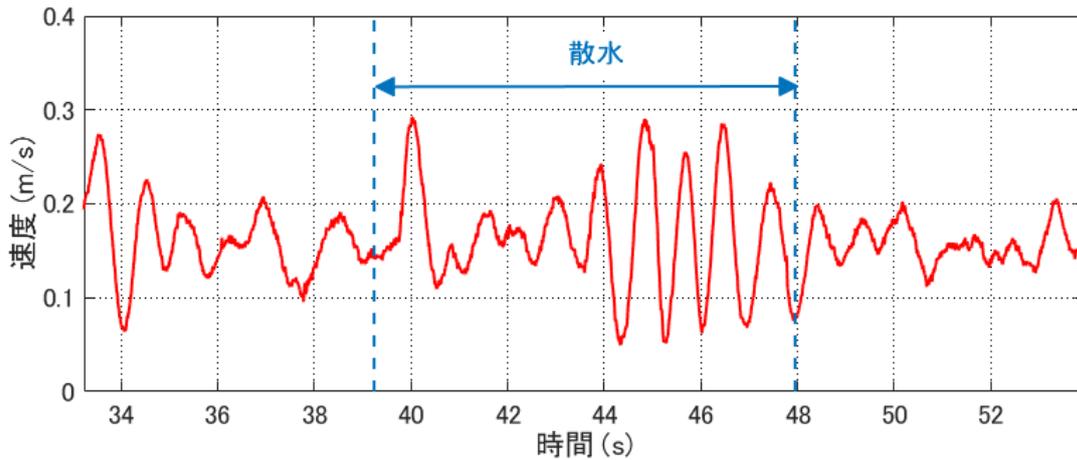


図 4.5.8 速度測定結果 (20km/h)

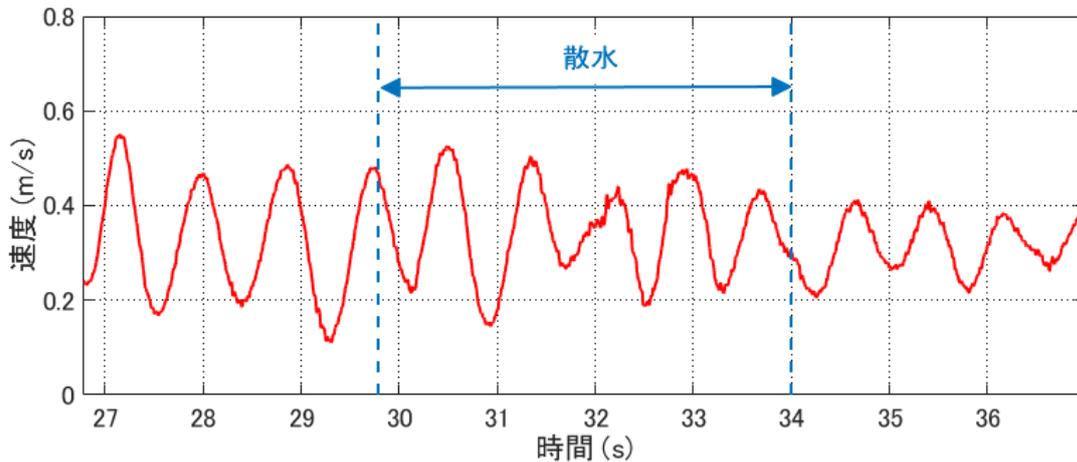


図 4.5.9 速度測定結果 (40km/h)

WET 路面走行時の MWD たわみ量の測定結果を図 4.5.10～図 4.5.13 に示す。全ての試験結果で乾燥路面同様のたわみ量が得られたことから、ある程度路面が濡れている状況でも MWD たわみ量の算出が可能であることを確認した。

ただし、路面の濡れがどの程度であれば測定不可になるのかの判断は測定中において不可能であることから、原則測定は路面が乾燥した状態で行うことが望ましい。



写真 4.5.2 散水の状況

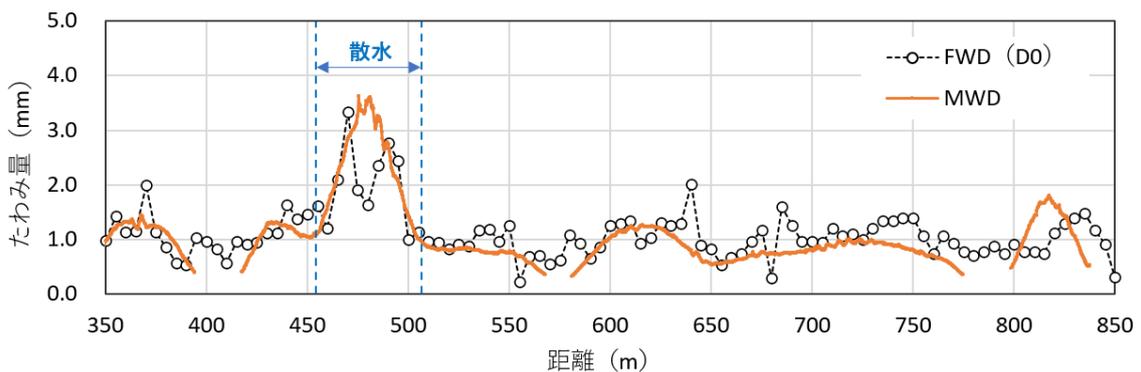


図 4.5.10 たわみ量計測結果 (ウェーブレット法_20km/h)

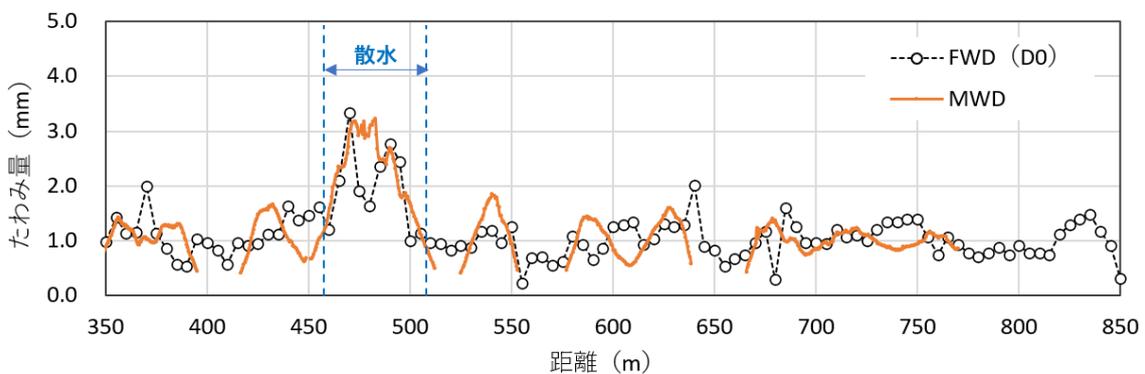


図 4.5.11 たわみ量計測結果 (ウェーブレット法_40km/h)

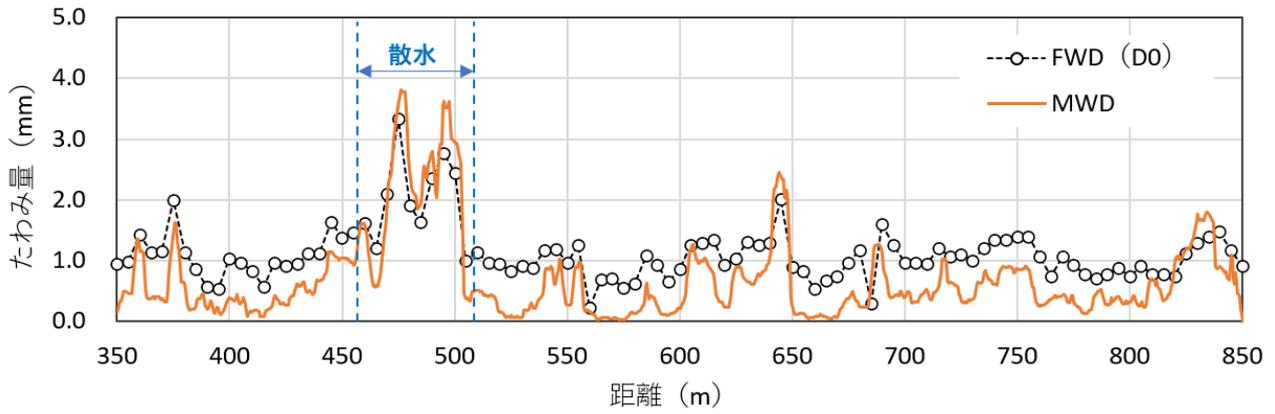


図 4.5.12 たわみ量計測結果 (たわみ速度差法_20km/h)

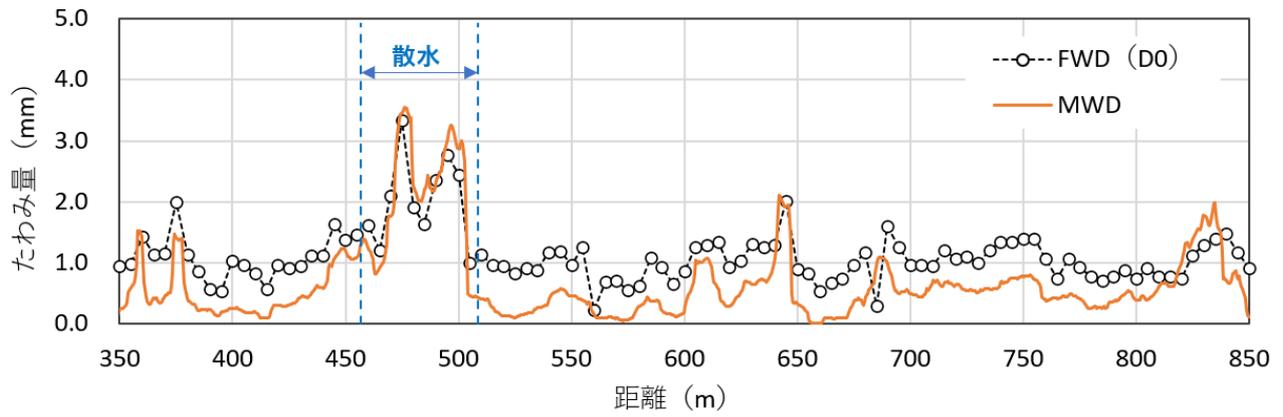


図 4.5.13 たわみ量計測結果 (たわみ速度差法_40km/h)

5 ドップラ振動計を用いた新たなたわみ量解析手法の提案

本共同研究では MWD に適用可能なドップラ振動計の開発を主目的に検討を実施してきた。開発段階で MWD に搭載したドップラ振動計の測定値に含まれる成分や MWD の構造について整理していたところ、ドップラ振動計の測定値に含まれるノイズ成分を容易に除去できる可能性のある方法（たわみ速度差法）を見出した。本章では、ドップラ振動計の測定値に含まれるノイズの新たな除去手法（たわみ速度差法）について考案した内容の概要を報告する。

なお、解析手法の詳細については別途共同研究報告書第 549 号にて紹介されているため参照するとよい。

5.1 ドップラ振動計の測定値に含まれるノイズ

MWD においてドップラ振動計は、図 5.1.1 に示すように車体に剛結された架台にドップラ振動計を剛結する構造となっている。設置したドップラ振動計の測定値に含まれる成分は、図 5.1.2 に示すように、路面のたわみ速度 (Wv)、車両の動きに由来するノイズ (Vn) が含まれる。路面のたわみ量算定には路面のたわみ速度 (Wv) が必要となるため、車両の動きに由来するノイズ (Vn) をできる限り除去する必要がある。車両の走行速度ノイズは MWD に搭載されている速度計とドップラ振動計の設置角度から算出可能であるため、車両の動きに由来するノイズ (Vn) をいかに除去するかが正確なたわみ量算出に必要であると考えた。そこで、車両の動きに由来するノイズ (Vn) には、主に車両の上下動に由来するノイズ (Vz) と車両の仰角変動に由来するノイズ ($V\omega$) と車速に由来するノイズ (V) が含まれることに着目しノイズ除去を試みた。なお、車両の動きに由来するノイズのうち、車速に由来するノイズ (V) については、MWD に搭載した車速計からノイズ成分の計算が可能であるため、詳細な説明を省略する。

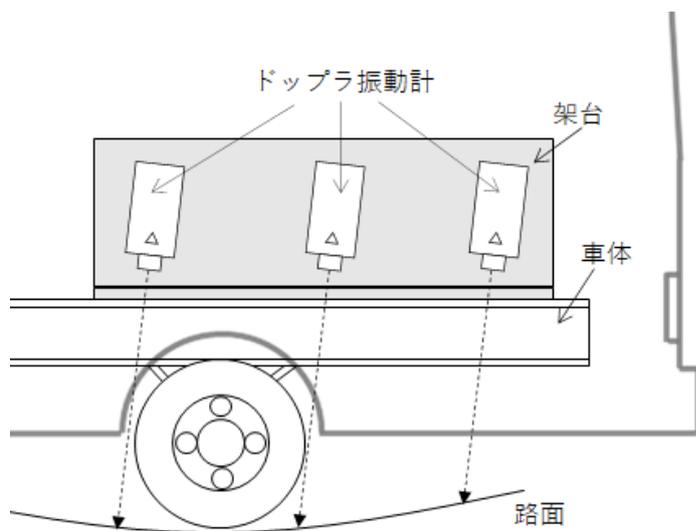


図 5.1.1 ドップラ振動計の設置概要

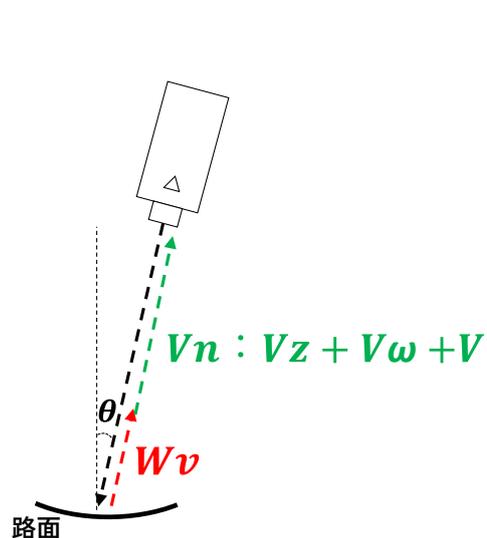


図 5.1.2 測定値に含まれる成分

5.1.1 車両の上下動に由来するノイズ (Vz)

車両の上下動に由来するノイズ (Vz) は、図 5.1.1.1 に示すように車両が路面に対して垂直に運動する時に発生する速度成分ノイズである。各ドップラ振動計を LDV1~3 とし、設置角度が全て同じであると仮定した場合、設置されている 3 台のドップラ振動計は架台に剛結されているため全て同じ動きをすることから、ドップラ振動計 3 台の測定値 (U1~3) に含まれる Vz 成分 (Vz1~3) は式 5.1.1.1 に示すように全て同じ値となる。

LDV1~3 の U1~3 を式 5.1.1.2 に示す。U1~3 に含まれる Vz1~3 は式 5.1.1.1 に示すとおり全て同じ値であるため、各測定値間の差を算出することで式 5.1.1.3 に示すとおり Vz 成分が除去されることとなる。

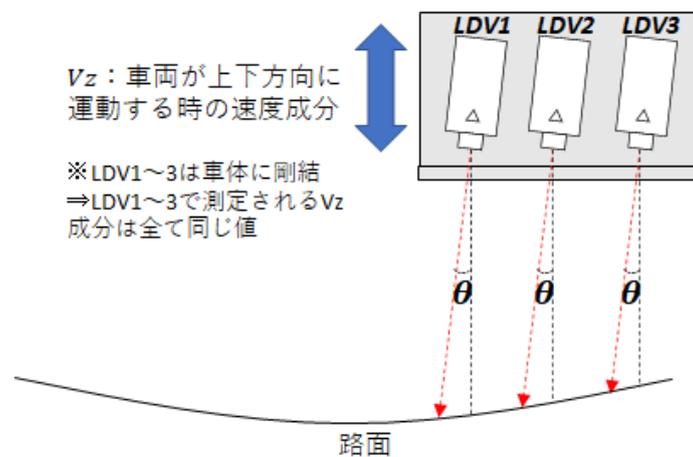


図 5.1.1.1 Vz のイメージ

$$V_{Z1} = V_{Z2} = V_{Z3} \quad \dots \text{式 5.1.1.1}$$

$$U_1 = W_{V1} + V_{Z1} + V_{\omega 1} + V$$

$$U_2 = W_{V2} + V_{Z2} + V_{\omega 2} + V$$

$$U_3 = W_{V3} + V_{Z3} + V_{\omega 3} + V \quad \dots \text{式 5.1.1.2}$$

$$U_1 - U_2 = W_{V1} - W_{V2} + V_{\omega 1} - V_{\omega 2}$$

$$U_1 - U_3 = W_{V1} - W_{V3} + V_{\omega 1} - V_{\omega 3} \quad \dots \text{式 5.1.1.3}$$

5.1.2 車両の仰角変動に由来するノイズ (V_ω)

車両の仰角変動に由来するノイズ (V_ω) は、図 5.1.1.1 に示すように車両がピッチング方向に回転運動する時に発生する速度成分ノイズである。各ドップラ振動計を $LDV_{1\sim 3}$ とし、設置角度が全て同じであると仮定した場合、設置されている 3 台のドップラ振動計は架台に剛結されているため全て同じ動きをすることから、式 5.1.12.1 に示すように $LDV_{1\sim 3}$ に作用する角速度 ω は全て同じ値となる。ドップラ振動計 3 台の測定値 ($U_{1\sim 3}$) を式 5.1.2.2 に示す。なお、 $LDV_{1\sim 3}$ と回転中心までの距離を $L_{1\sim 3}$ として表現した。

5.1.1 と同様に $LDV_{1\sim 3}$ の測定値の差を算出すると式 5.1.2.3 のとおりとなる。なお、 ω は架台にジャイロセンサを設置することで測定可能となり、 L_2 、 L_3 は各ドップラ振動計の設置間隔であるため既知の値となる。 L_1 は測定困難であるが最大たわみ量算出過程の計算により削除（詳細は別途共同研究報告書第 549 号参照）されるため V_ω 成分の除去が可能となる。

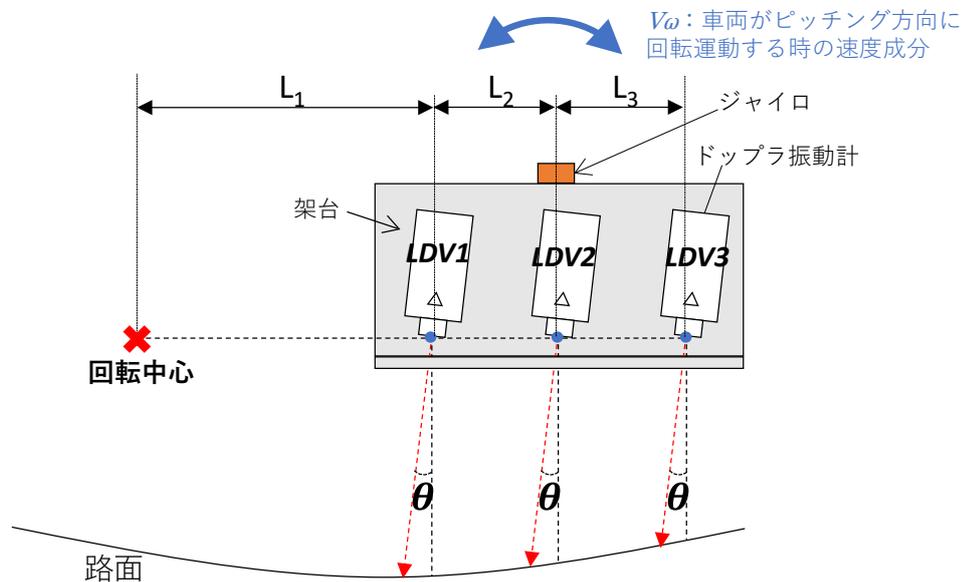


図 5.1.2.1 V_ω のイメージ

$$\begin{aligned} V_{\omega 1} &= \omega \cdot L_1 \\ V_{\omega 2} &= \omega \cdot (L_1 + L_2) \\ V_{\omega 3} &= \omega \cdot (L_1 + L_2 + L_3) \quad \dots \text{式 5.1.2.1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_1 &= W_{V1} + V_Z + \omega \cdot L_1 + V \\ U_2 &= W_{V2} + V_Z + \omega \cdot (L_1 + L_2) + V \\ U_3 &= W_{V3} + V_Z + \omega \cdot (L_1 + L_2 + L_3) + V \quad \dots \text{式 5.1.2.2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_1 \cdot U_2 &= W_{V1} \cdot W_{V2} + \omega \cdot L_1 - \omega \cdot (L_1 + L_2) \\ U_1 \cdot U_3 &= W_{V1} \cdot W_{V3} + \omega \cdot L_1 - \omega \cdot (L_1 + L_2 + L_3) \quad \dots \text{式 5.1.2.3} \end{aligned}$$

5.1.3 最大たわみ量の算出

式 5.1.2.3 を最大たわみ量 (a) 算出に必要なたわみ速度成分を抽出するよう整理すると式 5.1.3.1 が得られる。式 5.1.3.1 は MWD に搭載した 3 台のドップラ振動計で測定したたわみ速度の差を示す式となっている。図 5.1.3.1 に最大たわみ量算出のイメージを示す。既存知見⁷⁾のとおり路面に発生する舗装のたわみ形状をガウス関数であると仮定し、ガウス関数の数式と MWD の測定による得られた路面のたわみ速度からたわみ形状を確定させ、最大たわみ量 (a) を算出する。たわみ速度差法では、式 5.1.3.1 で得られたたわみ速度差からたわみ形状を確定させ、最大たわみ量を算出することとなる。

$$Wv_1 - Wv_2 = U_1 - U_2 + \omega \cdot L_2$$

$$Wv_1 - Wv_3 = U_1 - U_3 + \omega \cdot (L_2 + L_3) \quad \dots \text{式 5.1.3.1}$$

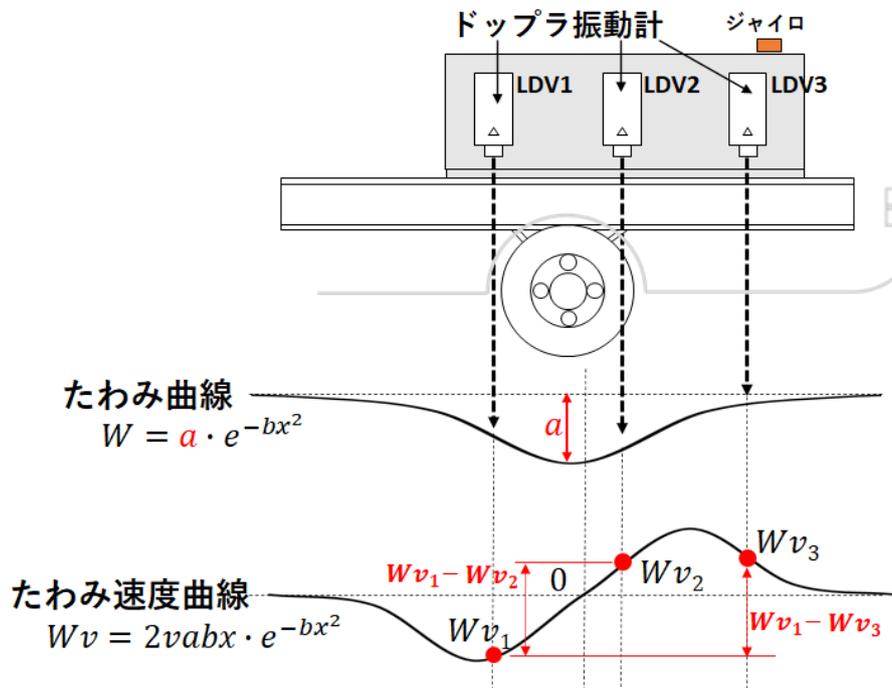


図 5.1.3.1 最大たわみ量(a)の算出のイメージ

5.2 ドップラ振動計の配置

たわみ速度差法を用いる場合、MWDに搭載された3台のドップラ振動計にて得られたたわみ速度差により最大たわみ量を算出する。ドップラ振動計の配置としては、図5.2.1に示す配置例①のように载荷輪の後方か前方に3台のドップラ振動計を配置する方法と、配置例②のように载荷輪を跨いで設置する方法が考えられる。最大たわみ量の算出原理からはどちらの配置でも最大たわみ量の算出は可能であるが、配置例①の場合は、たわみ速度差が小さくなることから、測定誤差の影響を受けやすく場合によりたわみ速度差の符号が逆転する等、最大たわみ量算出精度が大きく低下することも考えられる。そのため、たわみ速度差が大きくなる配置例②とすることが望ましい。

なお、適切な配置例の検証については別途共同研究報告書第549号にて記載されているため参考にする
と良い。

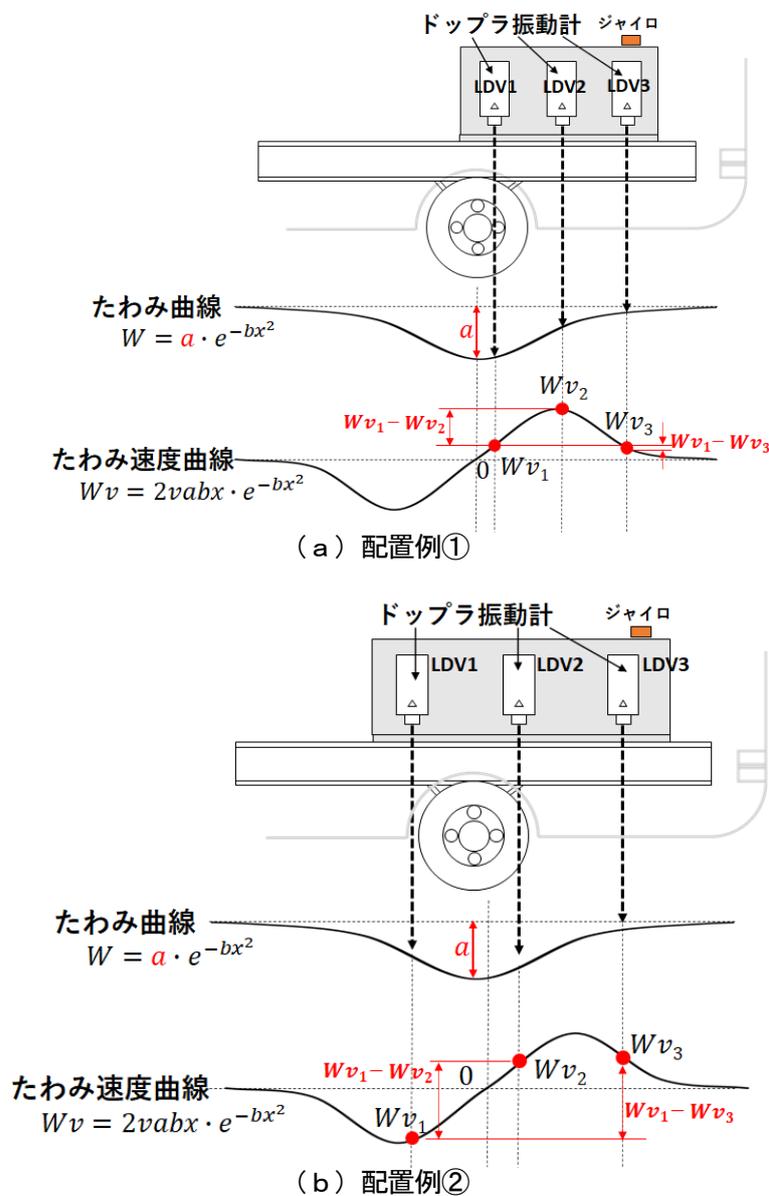


図5.2.1 ドップラ振動計の配置例

5.3 たわみ速度差法での検証

5.3.1 土木研究所外周路における検証

たわみ速度差法の検証のため、土木研究所外周路にて MWD 測定を実施した。測定条件は 4.5 で示した条件と同様であり、ドップラ振動計は既設の海外製の 3 台で実施した。

(1) 測定精度の検証

測定精度の検証のため、外周路にて 20km/h、40km/h にて各々2回の測定を実施した。また、比較対象として 5m 毎に FWD たわみ量 (D₀) を測定した。図 5.3.1.1 に測定結果を、図 5.3.1.2 に1回目測定のみ MWD たわみ量との相関図を示す。

20km/h、40km/h とともに FWD たわみ量と同様の傾向を示しており相関も高い結果が得られた。また、2回目の測定でも同様の結果が得られており再現性も良好であることを確認した。これにより、たわみ速度差法は有効な MWD の解析手法になるものと考えられる。

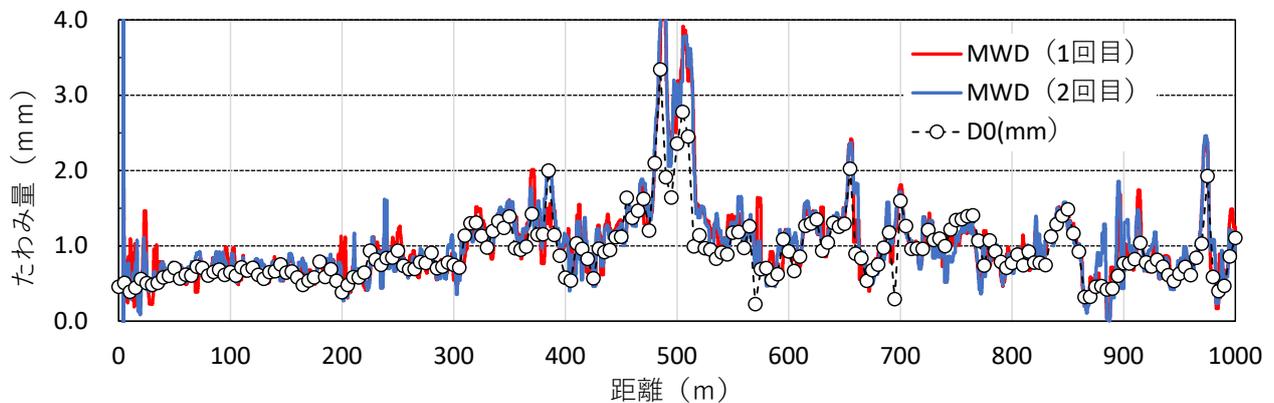


図 5.3.1.1 外周路での測定結果

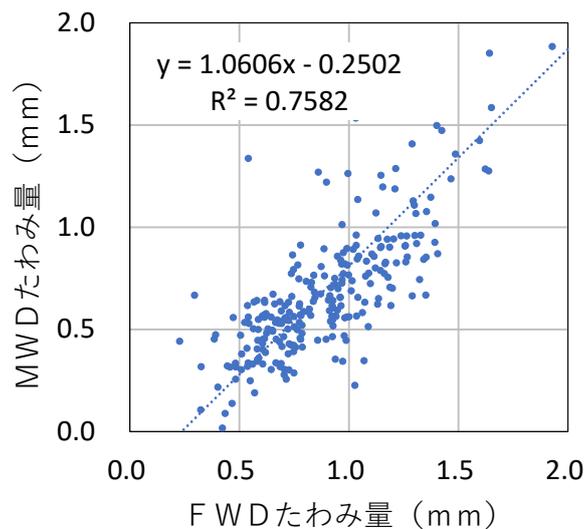


図 5.3.1.2 FWD たわみ量との相関図

(2) 走行速度の影響

走行速度の影響を検証するため、外周路の 1000m の区間でランダムに速度を変化させて測定を実施した。検証①として走行速度 10~25km/h でのランダム走行、検証②として 10~40km/h でのランダム走行を各々 2 回実施した。検証結果を図 5.3.1.3~5.3.1.4 に示す。

全ての測定結果でランダム走行をしても FWD たわみ量と同様の傾向を示しており、2 回目の測定でも同様の結果が得られることを確認した。これにより、たわみ速度差法は走行速度の影響が少ない手法であるものと考えられる。また、実道での調査では一般交通の流れに従い測定する必要があるため、一定速度での調査は夜間の交通量が少ない時間帯に測定するなど制約が大きい。走行速度の影響が少ないたわみ速度手法は実務において大きなメリットとなるものと考えられる。

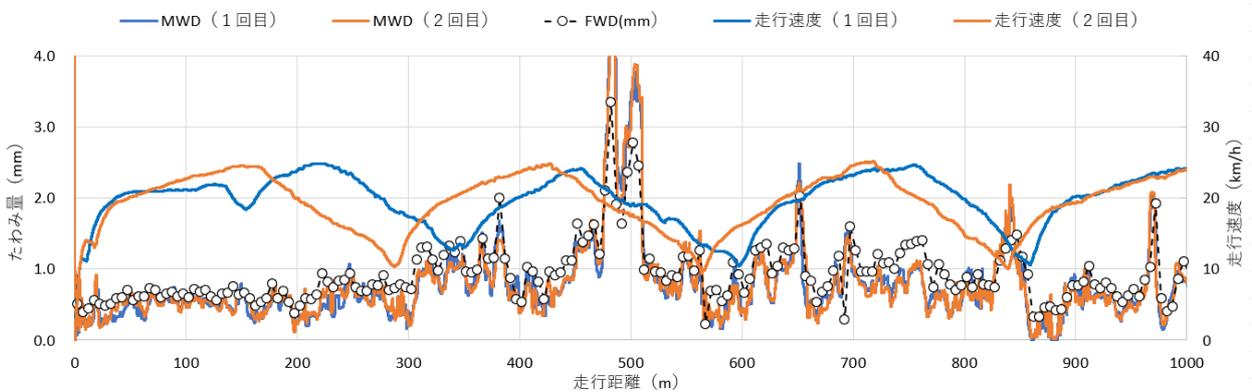


図 5.3.1.3 外周路ランダム走行の結果 (10~25km/h)

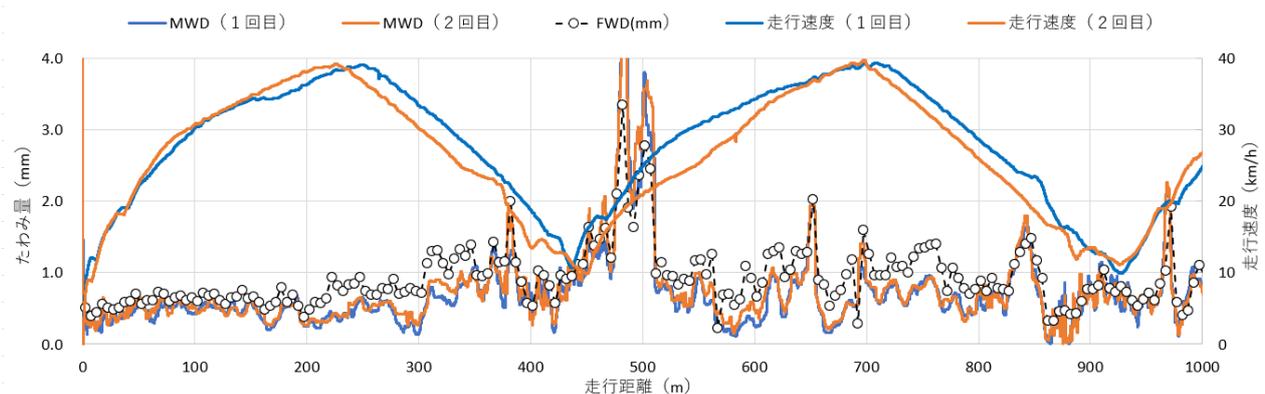


図 5.3.1.4 外周路ランダム走行の結果 (10~40km/h)

5.3.2 つくば市内実道での検証

供用している実道における検証を実施した。なお、検証は茨城県つくば市道の3箇所で各々2回測定を実施し、比較対象としてFWDたわみ量(D₀)の測定も併せて実施した。

測定結果を図5.3.2.1~5.3.2.3に示す。全ての結果でFWDたわみ量と同様の傾向を示しており、複数回測定の再現性も良好である。また、図5.3.2.2の320m付近、図5.3.2.3の180m及び250m付近ではFWDたわみ量が大きく変化している区間(舗装断面が異なると考えられる区間)が存在するが、MWDにおいても抽出できていることが分かる。

なお、図5.3.2.1の280m以降の区間については、FWDと多少の乖離が確認できるが、狭い車道であったため対向車と安全な距離を保つために走行位置が多少異なることが原因であるものと考えている。また、図5.3.2.3ではFWDたわみ量が小さくなっている箇所においてMWDたわみ量がゼロになっていることが確認できるが、極めて小さいたわみ量であったためたわみ量の算定が正確に行えなかった可能性がある。これらは今後の課題であり検討を継続する予定である。

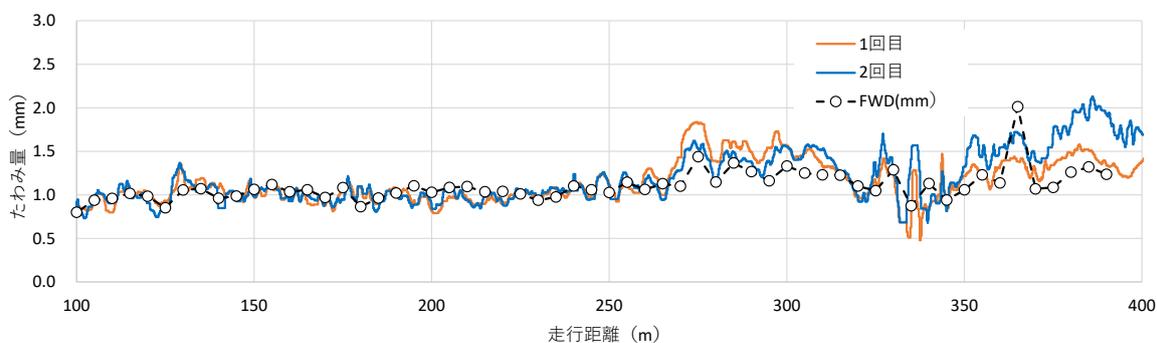


図 5.3.2.1 つくば市道測定結果①

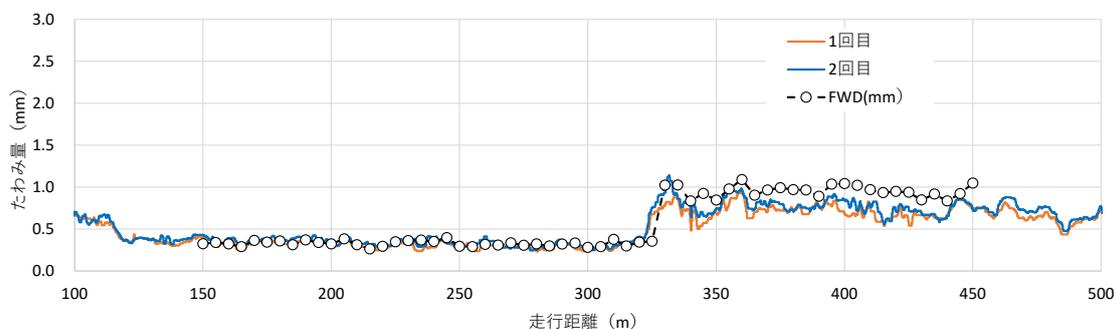


図 5.3.2.2 つくば市道測定結果②

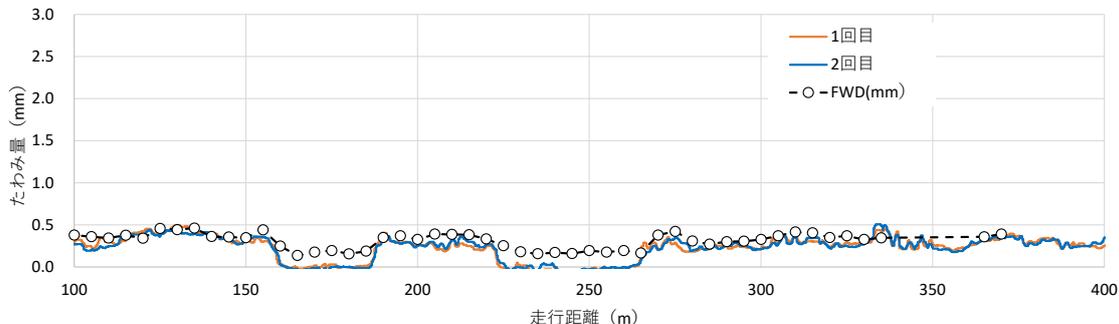


図 5.3.2.3 つくば市道測定結果③

6 まとめ

本共同研究では、MWD に適用可能なドップラ振動計の開発と、試作機による実道での検証を実施した。以下に、本共同研究で得られた成果をまとめる。

(1) MWD に適用可能なドップラ振動計の開発

- 1) 海外製既存ドップラ振動計にて確認された不具合（データの飛び、反転、測定不能等）について、原因を推定し課題を整理することで開発目標を設定した。開発目標を満たすドップラ振動計を新規に設計し、原理機ではドップラ振動計としての基本動作の検証を行い、試作機では温度の影響や振動に対する耐性を考慮しながら設計・製作を行った結果、開発目標を満足する試作機の製作に成功した。
- 2) 試作機を MWD に搭載し各種走行試験（走行速度の影響、段差の影響、平坦性の影響）を実施した結果、全ての測定において、安定的にデータ取得が可能であることを確認した。
- 3) 試作機を MWD に搭載したたわみ量計測を実施した結果、概ね比較対象の FWD と概ね同様の傾向が得られた。MWD の計測システムとしても正常に機能することを確認した。
- 4) 以上から、本共同研究で開発した製品が MWD に適用可能な機器であることを確認した。

(2) 新たなたわみ量解析手法の提案

- 1) ドップラ振動計の測定値に含まれるノイズのうち、車両の上下動に由来するノイズと車両の仰角変動に由来するノイズの影響が大きいことに着目し、正確にノイズを除去し最大たわみ量算出を可能とする「たわみ速度差法」を提案した。
- 2) 外周路での検証の結果、FWD たわみ量と概ね同じ傾向となり、相関も高い結果が得られた。また、複数回走行再現性も良好な結果が得られた。
- 3) 外周路にて、走行速度をランダムに変化させた測定により走行速度の影響の検証を実施した結果、全ての結果で FWD たわみ量と同様の傾向を示しており、複数回走行の再現性も良好であった。
- 4) 茨城県つくば市道での検証の結果、全ての箇所でも FWD と同様の傾向を示しており、複数回測定の再現性も良好な結果が得られた。
- 5) 以上から、たわみ速度差法はドップラ振動計の測定値に含まれるノイズを良好に除去できる、有効な手法である可能性を見出した。

本共同研究では、MWD のたわみ計測において最も重要なドップラ振動計について、海外製現行機の課題を解決する製品を開発した。MWD において安定的に測定が可能であるドップラ振動計を開発できた意義は大きい。また、ドップラ振動計の測定値に含まれるノイズを正確に除去できる新たなノイズ除去手法「たわみ速度差法」を提案した。今後、道路管理においてさらなる効率的な維持管理の実現のために、本共同研究成果が活かされることを望んでいる。

〈参考文献〉

- 1) 国土交通省：道路統計年報、2017
- 2) 国土交通省：舗装点検要領、2016
- 3) 土木研究所他：移動式たわみ測定装置の実用化に関する共同研究報告書、共同研究報告書第 549 号、2021、12
- 4) JIS C 6802:2014：レーザ製品の安全基準
- 5) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説、2001.9
- 6) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成 31 年度版）[第 1 分冊]、2019.3
- 7) 竹内康他：舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価、新道路技術会議（CART）、道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート№24-9、2015

共同研究報告書

Cooperative Research Report of PWRI

No. 551 December 2021

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所企画部業務課

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 電話 029-879-6754