

共同研究報告書

整理番号第550号

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1）～

2021年12月

（国研） 土木研究所

（学） 東京農業大学

（株） 小野測器

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1）～

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：レーザドップラ振動計、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 MWD 用レーザドップラ振動計の開発.....	4
3.1 レーザドップラ振動計の測定原理.....	4
3.2 レーザドップラ振動計 LV-1800 の紹介.....	5
3.3 研究の経緯と目的.....	6
3.4 開発の目標（指標、仕様）.....	8
3.5 試作機の製作.....	13
3.5.1 試作機の製品仕様.....	13
3.5.2 試作機の事前評価.....	15
4 試作機の実道検証.....	20
4.1 レーザドップラ振動計の架台への設置.....	20
4.2 走行速度の影響.....	21
4.3 路面の段差の影響.....	23
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 まとめ.....	30
〈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、その道路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、既存のレーザ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 に適用可能なレーザ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
(株) 小野測器	飯塚 啓之	開発設計本部 標準設計ブロック ハード製品設計グループ グループマネージャー	2018.1-2021.5
	大島 良太	開発設計本部 開発室 リーダー	2018.1-2021.5
	古川 裕彦	営業本部 新規事業開拓室 リーダー	2018.1-2021.5
	勝野 雄輝	営業本部 商品統括ブロック SVグループ	2019.4-2021.5
	箱崎 深治	営業本部 営業統括ブロック 首都圏営業所 課長	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、レーザドップラ振動計を用いる方法が提案されている³⁾。

レーザ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。

レーザ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に搭載されているレーザドップラ振動計（既存レーザドップラ振動計）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、既存レーザドップラ振動計以外にMWDに搭載し十分な性能を發揮できるレーザドップラ振動計が存在しないのが現状であるとともに、国内で安定的にレーザ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でドップラ振動計の開発を実施した。

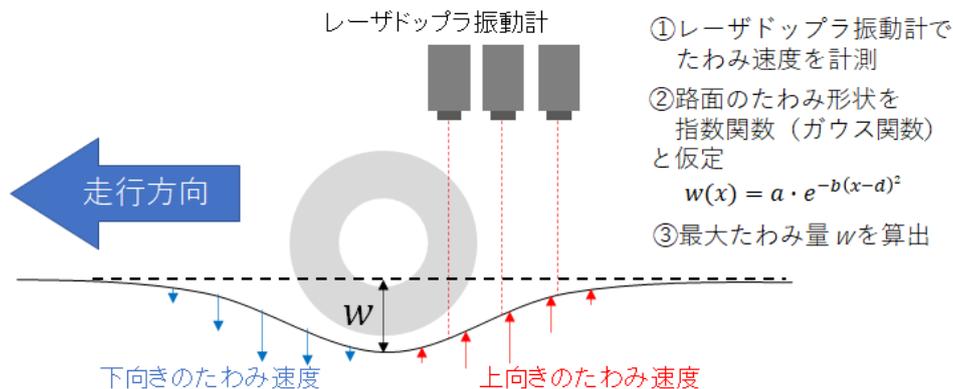


図 2.1 レーザドップラ振動計を用いたMWDの測定手法（イメージ）

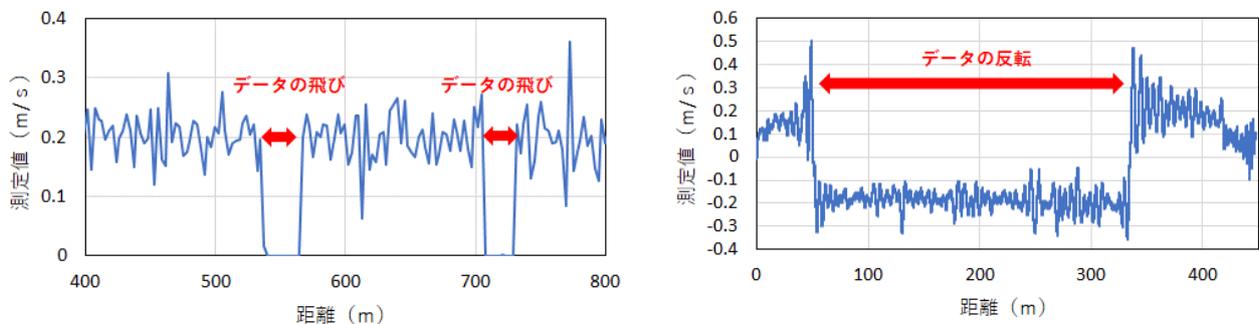
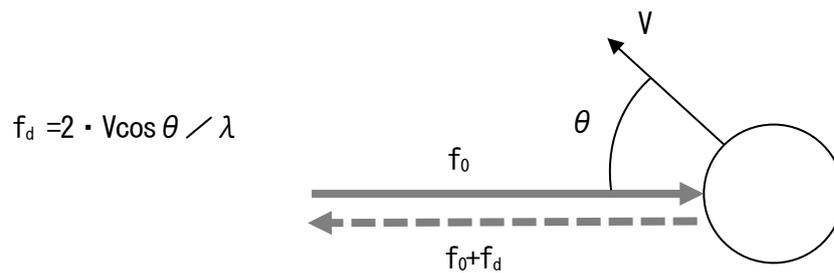


図 2.2 既存ドップラ振動計の不具合事例

3 MWD用レーザドップラ振動計の開発

3.1 レーザドップラ振動計の測定原理

レーザドップラ振動計はドップラ効果を応用した計測器であり、無負荷かつ非接触で振動の速度振幅を検出可能である。ドップラ効果とは波（音波や電磁波）を移動物体にあてると生じる移動物体のもつ速度成分に比例した周波数変化をいい、レーザ光でも同様の現象が発生する（図 3.1.1）。レーザ光のドップラ効果（ドップラシフト）を応用した速度計の中でも、レーザ光と測定対象物のなす角 θ が 0° の場合、振動計に分類される。



$$f_d = 2 \cdot V \cos \theta / \lambda$$

f_0 : レーザ光の周波数

f_d : ドップラシフト周波数

V : 移動物体の速度

θ : レーザ光と測定対象物のなす角

λ : レーザ光の波長

図 3.1.1 レーザ光のドップラ効果

図 3.1.1 より、レーザ光の周波数を f_0 とすると、反射光の周波数は f_0+f_d にシフトする。反射光よりドップラシフト周波数を直接測定することは困難なため、照射光 (f_0) と反射光 (f_0+f_d) を干渉し発生させたビート周波数を検出する。レーザドップラ振動計は図 3.1.2 のようなマッハ・ツェンダー干渉計で構成される。光源から出射されたレーザ光はビームスプリッタを介して 2 系統に分割され、一方は被測定物にあてられる照射光、もう一方は干渉計内部で参照光となる。参照光は移動物体の方向判別のため、音響光学変調器 (AOM) を使用してドップラシフト周波数より高い周波数 f_M で周波数をシフトさせる。反射光 (f_0+f_d) と参照光 (f_0+f_M) の干渉により得られたビート周波数は f_d+f_M は受光器で光電変換され、FM 復調回路を用いて振動速度に応じた電圧信号として出力する。

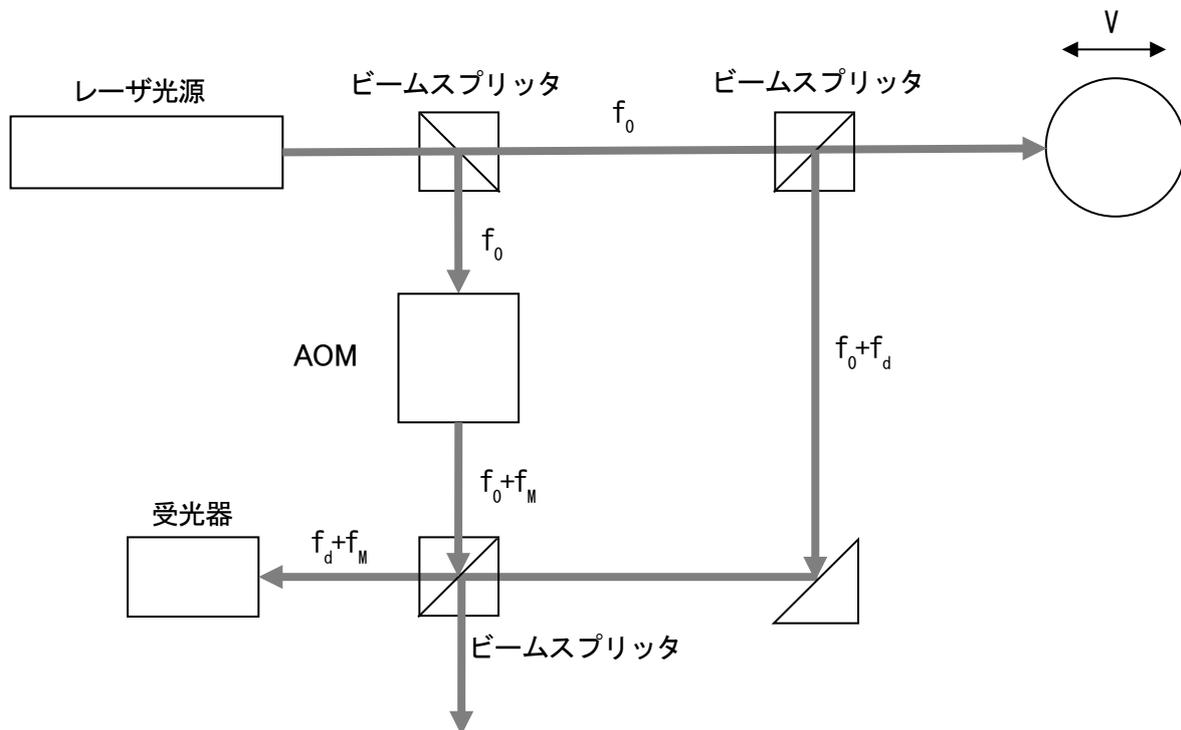


図 3.1.2 レーザドップラ振動計の光学干渉計

3.2 レーザドップラ振動計 LV-1800 の紹介

前項で説明した測定原理を用いた製品として小野測器製のレーザドップラ振動計 LV-1800 を紹介する。LV-1800 は光学干渉計の新設計により従来製品の LV-1700 シリーズに対して 10 倍以上の高感度化を実現、さらに内蔵カメラによるレーザ照射位置観察を実現した非接触振動計である。圧電素子を使った超音波駆動の小型アクチュエータや、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) などの高周波振動を無負荷で計測可能な製品である (写真 3.2.1、表 3.2.1)。本共同研究では LV-1800 をベースとして MWD に適用可能なレーザドップラ振動計の開発を行った。



写真 3.2.1 レーザドップラ振動計 LV-1800

表 3.2.1 LV-1800 の主な仕様

検出部	
光源	He-Ne レーザ
レーザ安全クラス	クラス 2
検出距離	100 mm～10 m (反射体による)
外形寸法	W 53 mm × H 52.5 mm × D 152.5 mm
質量	約 750 g
変換部	
周波数範囲	0.3～3 MHz (fc で-3dB)
最大検出速度	10 m/s (0-P 値)
最小分解能	0.3 μ m/s 以下
外形寸法	W 410 mm × H 120 mm × D 324 mm
質量	約 8.1 kg

3.3 研究の経緯と目的

移動式たわみ測定装置(MWD)の実用化に向けた共同研究(別途共同研究)は平成28年4月より実施されており、当初の研究メンバーには「舗装たわみの測定に応用可能な装置(レーザ変位計またはレーザドップラ振動計)」研究開発技術を有する機関の参画がなく、現行の装置を用いて検討を行っていた。

しかしながら現行の海外製のレーザドップラ振動計は2.で示したように測定時の不具合により安定的な測定が難しく、これ以上の改善も期待できなかったため、実用化に向けてMWDに適用可能なレーザドップラ振動計の国内での開発が必要となった。そのため、レーザドップラ振動計の開発を主目的とした本共同研究を開始し、現行の海外製レーザドップラ振動計が抱える以下の課題に対応することになった。

課題1) 車両速度 50 km/h 以上は走行たわみの測定が困難

課題2) 反射光量が不足すると速度出力が反転

課題3) 10 m/s²を超える車両振動下では測定不可

3.2 で紹介した LV-1800 をベースに MWD 用レーザドップラ振動計の開発を進めることにしたが、舗装たわみ測定を行うために十分な性能を有していない。LV-1800 の検出距離は、再帰性反射シール（写真 3.3.1、図 3.3.1）無しで 300 mm 程度を想定した設計であり、低周波領域の測定も 0.3 Hz 以下は計測できない回路で構成されている。MWD では、1.4 m 離れたアスファルト面の測定と DC 領域からの応答性が必要となり、LV1800 の性能のままでは MWD への搭載は難しく、専用のレーザドップラ振動計の開発に向けて以下の技術的課題も追加した。

課題 4) 検出距離の拡大 (1.4 m 離れたアスファルト面の測定)

課題 5) 応答周波数 0 Hz (DC) からの対応

再帰性反射シール（低反射材料の測定時に貼り付けるシール）

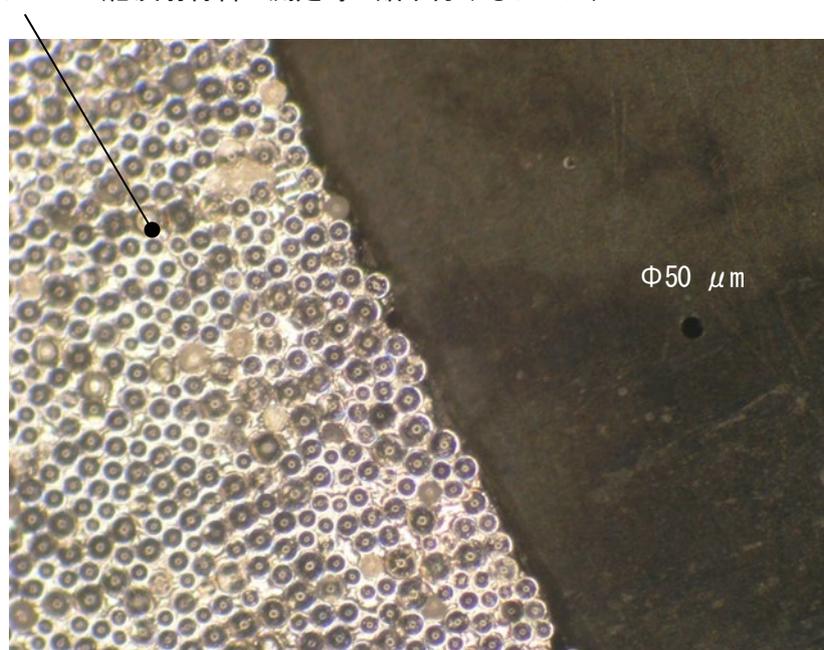


写真 3.3.1 再帰性反射シール拡大写真

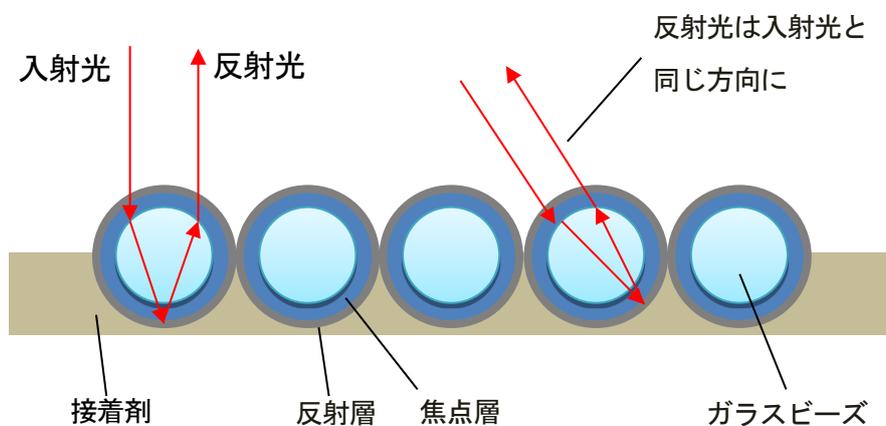


図 3.3.1 再帰性反射シールの構造

3.4 開発の目標（指標、仕様）

3.3 で示した 5 つの技術的課題について開発目標を設定した。

課題 1) 「車両速度 50 km/h 以上は走行たわみの測定が困難」

MWD 用レーザドップラ振動計は、アスファルト路面に亀裂があった場合も光が反射し受光できるように路面に対して角度を付けて車両に搭載される。路面に対して θ° 傾けたときのレーザドップラ振動計で計測されるたわみ速度 dw_m/dt は車両走行速度 V の影響を受けて次式となる。

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{dw}{dt} + V \sin \theta$$

dw_m/dt : レーザドップラ振動計で計測されたたわみ速度

dw/dt : 载荷によるたわみ速度

V : 車両走行速度

θ : レーザの照射角度

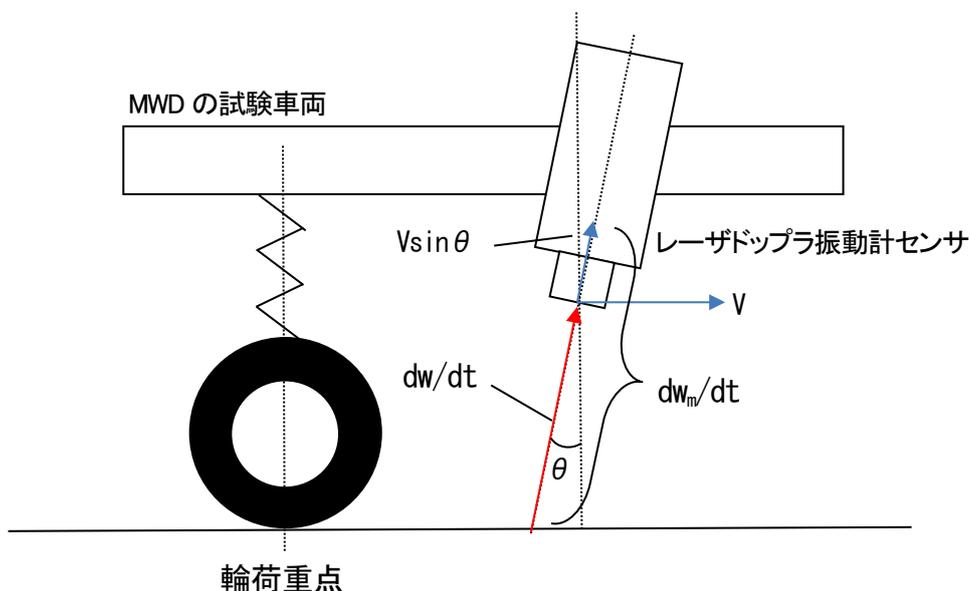


図 3.4.1 レーザドップラ振動計の車両走行速度の影響

MWD 用のレーザドップラ振動計の最大検出速度範囲は $V \sin \theta$ を考慮する必要がある。図 3.4.1 より、センサの傾き 3° 、車両走行速度 100 km/h とすると $V \sin \theta$ は 1.45 m/s となる。測定すべき载荷によるたわみ速度 dw/dt (0.05 m/s 以下) や車両走行時の振動 (0.5 m/s 以下) も考慮し、2 m/s 以上の最大検出速度を目指す。

事前調査より、現行機の海外製レーザドップラ振動計は DC 領域の最大検出速度は約 1.67 m/s、1 Hz 以上は処理回路の追従加速度の制限により狭くなり、0.1 m/s 以下であることが推測される (課題 3 で後述)。

課題2) 「反射光量が不足するとの速度出力が反転」

現行機の海外製レーザドップラ振動計は、反射光量が不足した際に速度出力が反転される場合があります(図 3.4.2)、誤測定が懸念される。速度出力の反転現象は光量不足時の補間回路が影響している可能性が高く、本共同研究にて開発する補間回路では速度出力の反転などの誤出力しないアルゴリズムを検討する。また反射光量不足時にはエラーを出力し、測定値の信頼性を確認できる製品を目指す。

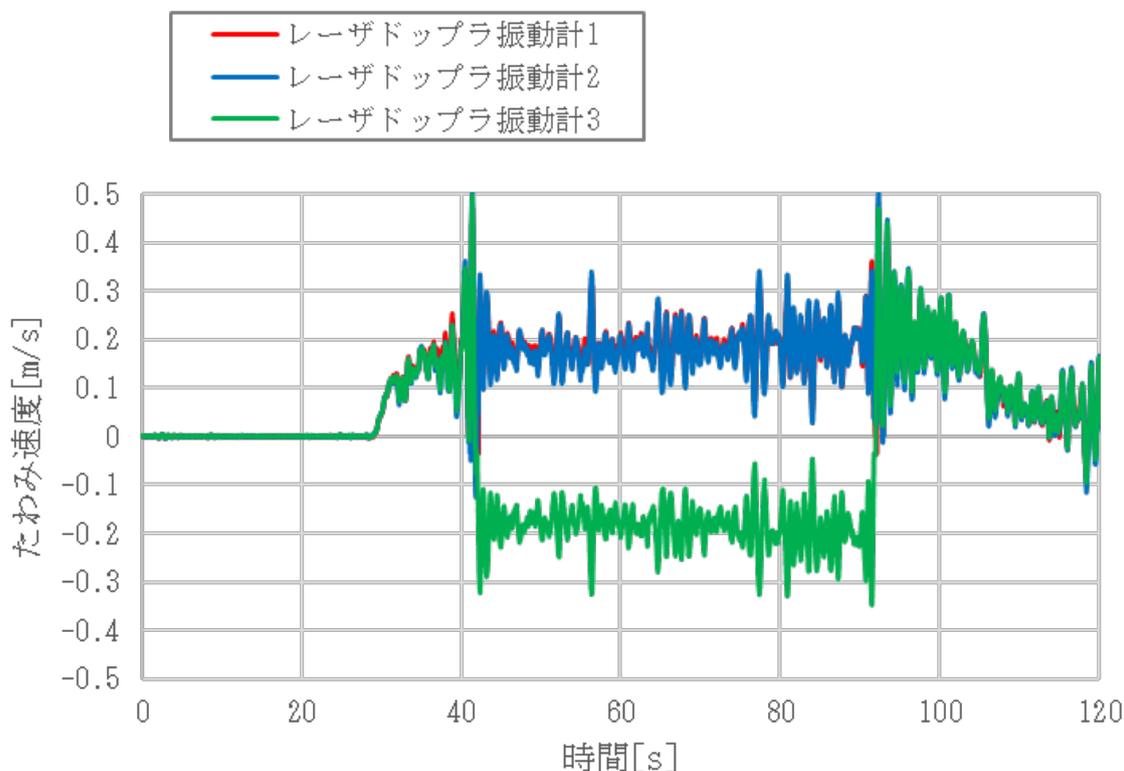


図 3.4.2 海外製レーザドップラ振動計の速度出力反転時の波形

課題3) 「10 m/s²を超える車両振動下では測定不可」

輪荷重点から最も離れたセンサは走行時の車両振動の影響を最も受けやすく、車両走行時の振動加速度は数 m/s²程度となる(図 3.4.3)。海外製レーザドップラ振動計の AC 領域の最大検出速度と追従加速度は図 3.4.4 のような特性となり、超過すると波形に歪や欠けが発生する。本来振動計の最大検出速度範囲は、周波数によらず一定だが、補間回路の影響などで追従加速度の制限がかかり、周波数と共に低下する(10 Hz まで)。当社で開発する MWD 用レーザドップラ振動計は、車両走行時の振動を考慮し、応答周波数全帯域で 10 m/s²以上の追従加速度を目指す。

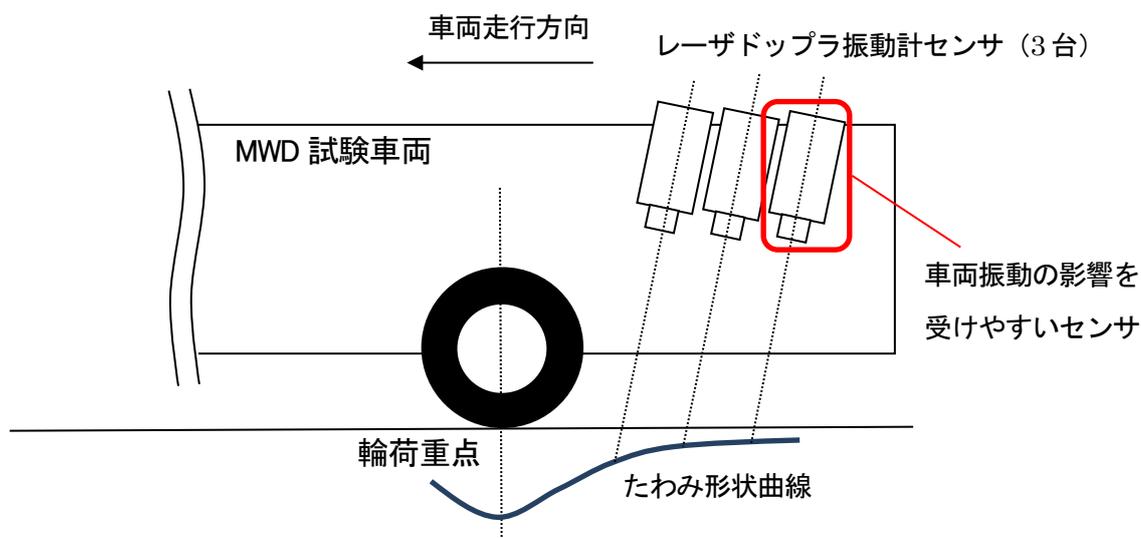


図 3.4.3 MWD 試験車両とレーザドップラ振動計の取付位置

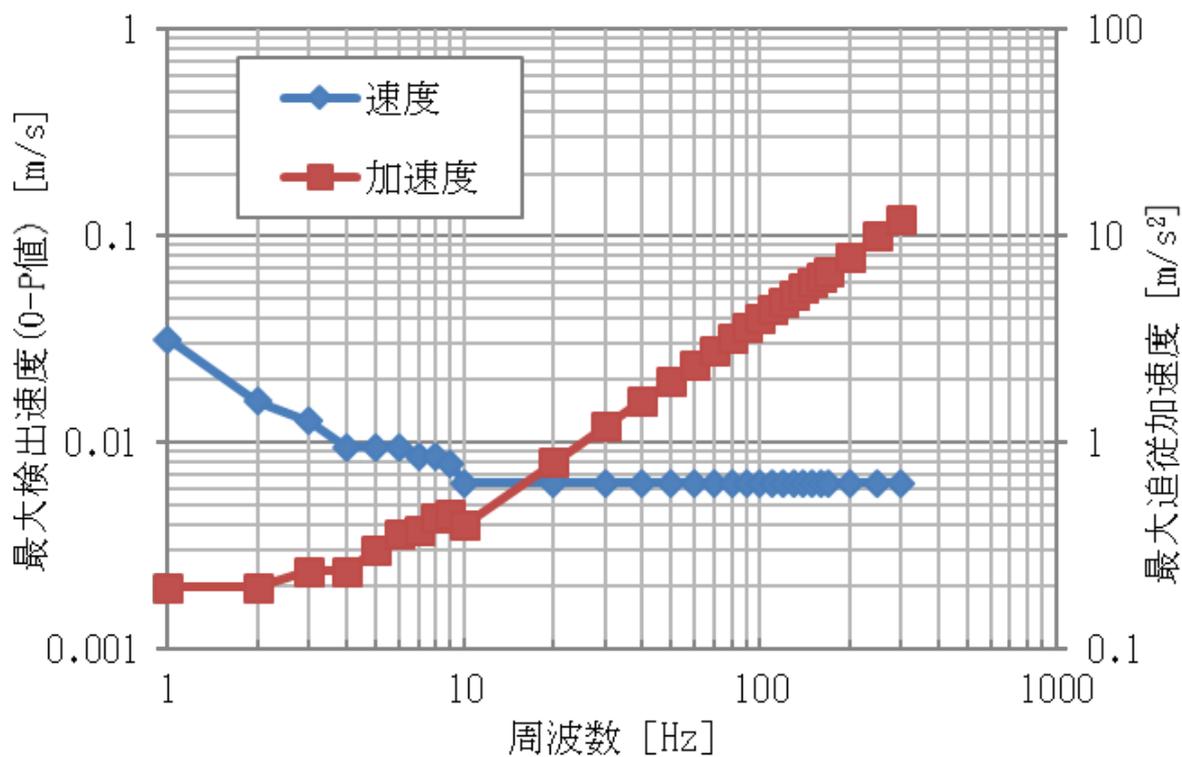


図 3.4.4 海外製レーザドップラ振動計の最大検出速度と追従加速度

課題 4) 「検出距離の拡大 (1.4 m 離れたアスファルト舗装面の測定)」

レーザドップラ振動計の検出距離を拡大することで、同じ検出距離でも反射率の低い対象物が測定可能となる (受光感度向上)。LV-1800 の光源は He-Ne レーザ (0.6328 μm) を使用しており、レーザ出力も 1 mW 未満と人体に有害でないレーザ安全クラス (表 3.4.1) となっているため、再帰性反射シールなしでは検出距離は 300 mm 程度になる。

レーザドップラ振動計のレーザ出力と検出距離は一定レベルまでは比例関係にあり、安全性とトレードオフになるが、アイセーフレーザと呼ばれる波長帯域 (1.4 μm ~2.6 μm) を用いてることで 10 mW まで安全に出力可能となる。MWD では 1.4 m 離れたアスファルト路面の測定が必要であり、高出力でも安全なアイセーフレーザを用いて MWD 用レーザドップラ振動計を開発することとした。

表 3.4.1 分散光源ではない連続発振レーザの安全クラス ⁴⁾

クラス分け	最大出力の目安値 (mW)		クラス分けの概要
	0.6328 μm	1.4 μm ~2.6 μm	
クラス 1 及び クラス 1M	0.39 mW 未満	10 mW 未満	クラス 1 レーザ製品は、直接ビーム内観察を長時間行っても、またそのとき、望遠光学系を用いても安全であるレーザ製品である。クラス 1M レーザ製品は、裸眼 (光学器具を用いない。) で、直接ビーム内観察を長時間行っても安全であるレーザ製品である。
クラス 2 及び クラス 2M	1 mW 未満	-	クラス 2 レーザ製品は、400 nm~700 nm の波長範囲の可視光を放射するレーザ製品であって、瞬間的な被ばくのは安全であるが、意図的にビーム内を凝視すると危険なレーザ製品である。0.25 s の時間基準は、クラスの定義に内在している。これは、多少長めであっても、瞬間的な被ばくによって障害が生じるリスクは非常に小さいという推定に基づいている。クラス 2M レーザ製品は、可視のレーザビームを射出するレーザ製品であって、光学器具を用いない裸眼に対してだけ短時間の被ばくが安全なレーザ製品である。
クラス 3R	5 mW 未満	50 mW 未満	クラス 3R レーザ製品は、放射出力のレベルが、直接のビーム内観察条件に対して MPE (最大許容露光量) を超えるものの、AEL (被ばく放出限界) がクラス 2 の AEL (可視レーザの場合) の 5 倍又はクラス 1 の AEL (不可視レーザの場合) の 5 倍であることから、障害が生じるリスクが比較的小さいレーザ製品である。リスクが比較的低いので、製造業者への要求事項及び使用者のための各国の規則による管理基準を、クラス 3B よりも緩和している。

<p>クラス 3B</p>	<p>500 mW 未満</p>	<p>クラス 3B レーザ製品は、目へのビーム内露光が生じると、偶然による短時間の露光でも、通常危険なレーザ製品である。拡散反射光の観察は通常安全である。クラス 3B の AEL 近傍のクラス 3B レーザは、軽度の皮膚障害又は可燃物の点火を引き起こす可能性がある。ただし、これはビームの直径が小さいか、又は集光したときだけに起こり得る。</p>
<p>クラス 4</p>	<p>500 mW 以上</p>	<p>クラス 4 レーザ製品は、ビーム内の観察及び皮膚への露光は危険であり、また拡散反射の観察も危険となる可能性があるレーザ製品である。これらのレーザは、場合によっては火災の危険性が伴う。</p>

課題 5) 「応答周波数 0 Hz (DC) から対応」

レーザドップラ振動計の FM 復調回路は図 3.4.5 の構成になっており、振動計の応答周波数はハイパスフィルタ (HPF) のカットオフ周波数によって決定される。ハイパスフィルタを回路から取り外しても、出力のオフセットやドリフトを抑えた回路を用いて、0 Hz から測定可能な MWD 用レーザドップラ振動計を開発することとした。

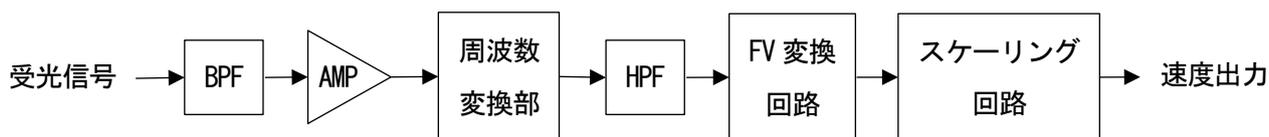


図 3.4.5 レーザドップラ振動計の FM 復調回路ブロック図

3.5 試作機の製作

3.5.1 試作機の製品仕様

前項であげた技術的課題を解決した MWD 用レーザドップラ振動計の構成は図 3.5.1 となる。光源を He-Ne レーザからアイセーフレーザ (半導体レーザ) に変更したことで、センサ部に配置される構成となった。また海外製現行機との製品仕様の比較を表 3.5.1 にまとめた。表 3.5.1 の周波数範囲、最大検出速度、追従加速度から、小野測器試作機は海外製現行機より MWD に適したレーザドップラ振動計になったことが分かる。検出距離は次項で評価した。

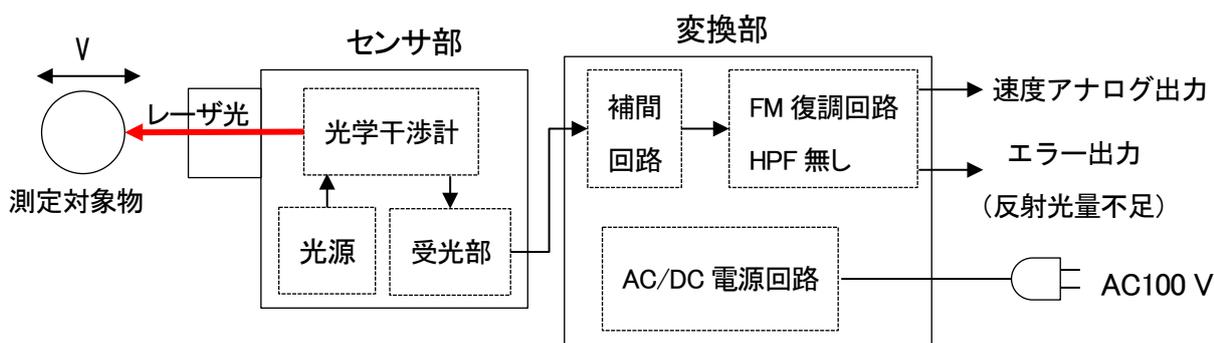


図 3.5.1 MWD 用レーザドップラ振動計の構成



写真 3.5.1 MWD 用レーザドップラ振動計の検出部

表 3.5.1 小野測器試作機と海外製現行機の仕様比較表

		小野測器試作機	海外製現行機 (実測値)
検出部	光源	アイセーフレーザ (測定光源) ※照準用光源も重畳	He-Ne レーザ
	レーザ安全クラス	クラス 1 (測定光源) クラス 2 (照準光源)	クラス 3R
	検出距離	30 m (反射体による)	-
	外形寸法	W 113.5 mm×H 66 mm×D 215 mm	W 120 mm×H 80 mm×D 358 mm
	質量	1.8 kg	3.4 kg
変換部	周波数範囲	0~5 kHz	0~300 Hz
	最大検出速度	3 m/s (全帯域)	1.67 m/s (DC 領域)
	最小分解能	2 μm/s 以下	5 μm/s 以下
	追従加速度	82 m/s ²	0.2~10 m/s ² ※図 3.4.4 参照
	外形寸法	W 120 mm×H 80 mm×D 358 mm	W 310 mm×H 135 mm×D 176 mm
	質量	約 3 kg	約 8 kg

3.5.2 試作機の事前評価

1) 検出距離の評価

検出距離はセンサの受光感度の指標であり、検出距離が長いほど受光感度は高くなる。検出距離と測定対象物（反射材）が同じであれば受光感度の差によってたわみ速度の検出可否に差が発生する。そこで海外製現行機と試作機を MWD 専用車両に搭載し、実用環境下（検出距離 1.4 m、アスファルト路面）にて検出距離を比較評価することとした。図 3.5.2 に構成図、写真 3.5.2 に車両搭載時の写真を示す。

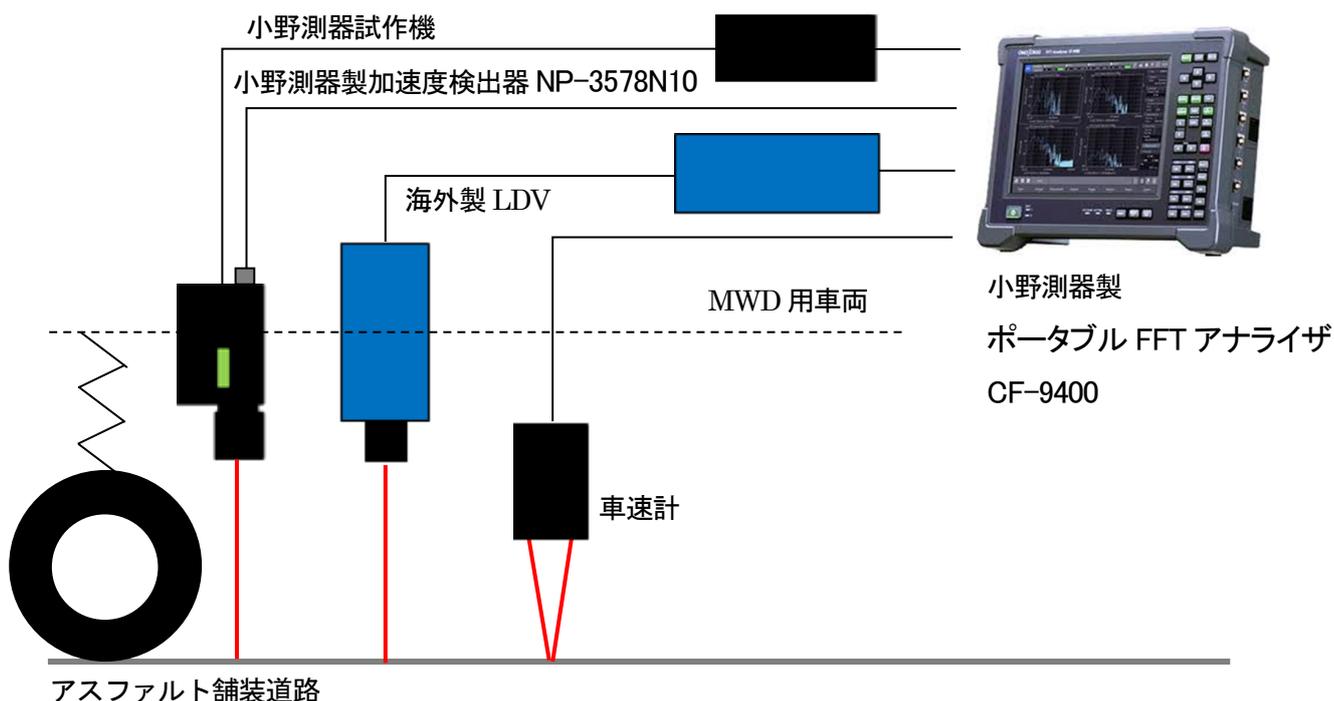


図 3.5.2 検出距離の評価構成図

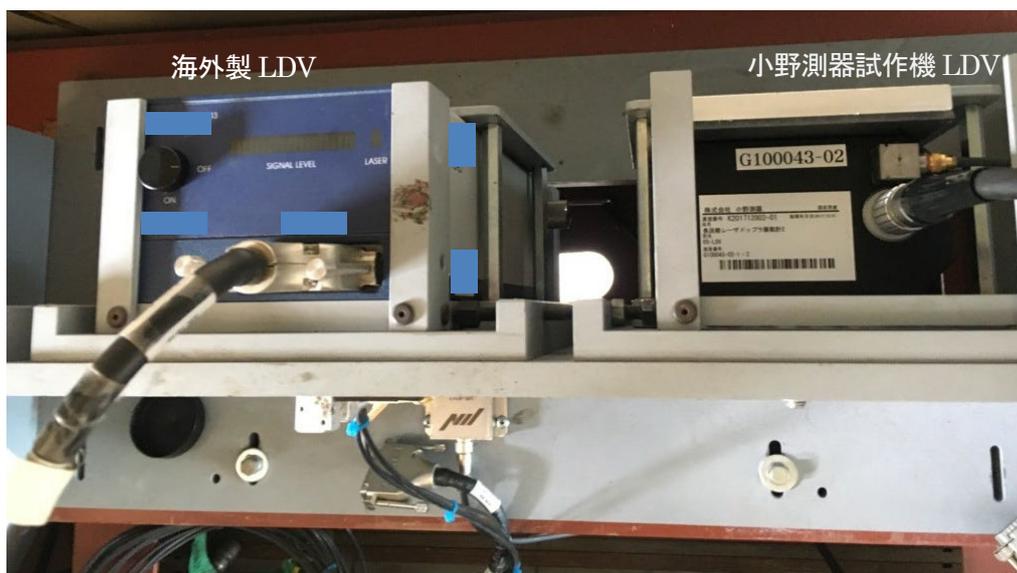


写真 3.5.2 MWD 専用車両に搭載した様子

土木研究所の外周路を約 20 km/h で走行した際のアスファルト舗装路面に対してのたわみ速度 dw_m/dt ($V\sin\theta$ 及び車両振動を含む) を測定した (図 3.5.3)。点線で分割した区間では海外製現行機の出力が一定になっており、正しいたわみ速度が測定できていない。そのときの試作機のたわみ速度は ± 0.3 m/s 以内、加速度センサで検出した車両振動も約 6 m/s^2 であり、最大検出速度も追従加速度も現行機の仕様内のため、受光感度不足が要因であることが分かる。本結果から、検出距離 (受光感度) においても現行機より MWD に適したレーザドップラ振動計になったことが分かる。

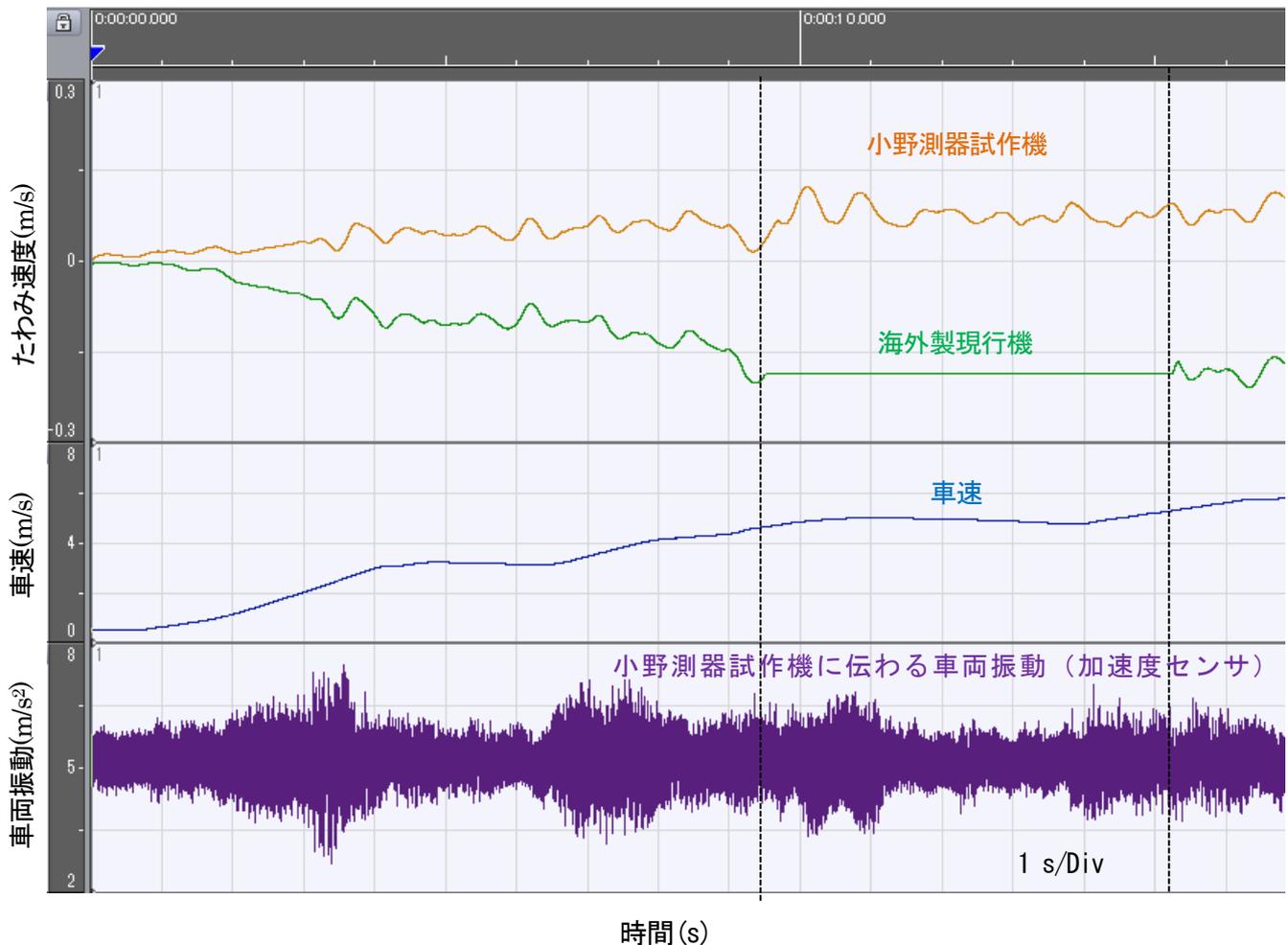


図 3.5.3 土木研究所の外周路で測定したたわみ速度 (車速 20 km/h)

2) 路面状態による測定への影響の評価

検出距離の拡大のために選定したアイセーフレーザは、He-Ne レーザと比較して水に 100 倍以上吸収されやすく、路面に濡れや水溜り、積雪があった場合、照射したレーザ光の吸収が発生し正しい測定ができないことが懸念される。路面状態を乾燥、水 (濡れ、水溜り)、積雪に分け、台車で試作機を移動することでレーザの照射位置を変化させ、路面状態による測定への影響を評価した。路面状態の変化に伴う測定可否は速度出力で確認した。



図 3.5.4 路面状態による測定の評価構成図



写真 3.5.3 台車に搭載した様子

図 3.5.5 と表 3.5.2 に濡れ・水溜り路面の測定可否をまとめた。水溜りでの測定は困難だが、アスファルト路面の色が変わる程度の濡れであれば測定できることを確認できた。

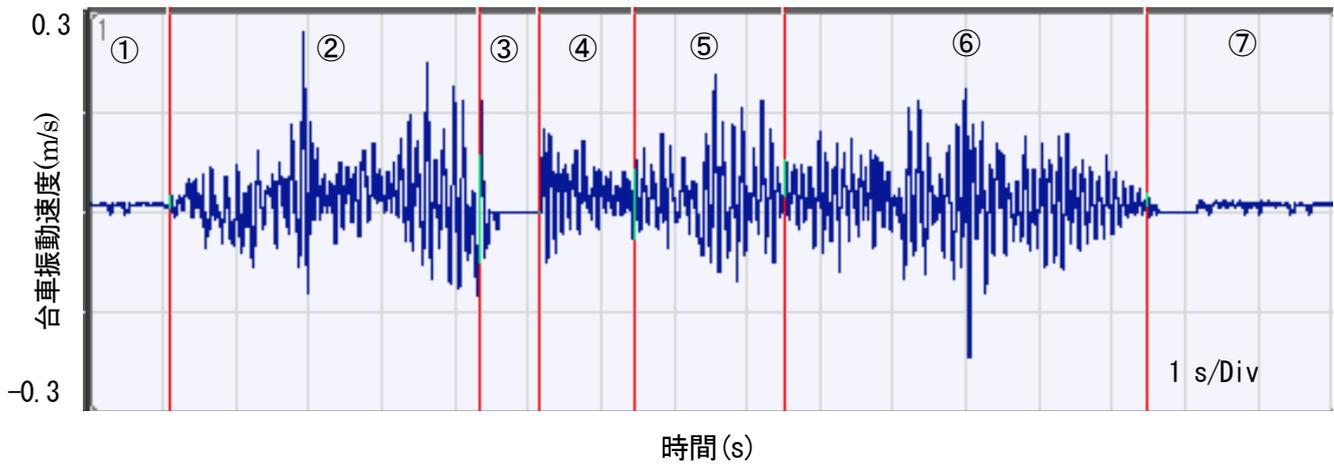


図 3.5.5 路面状態による検出可否の評価（濡れ、水溜り）

表 3.5.2 路面状態の変化（濡れ、水溜り）

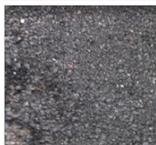
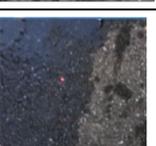
路面状態		測定可否
①乾燥（停止）		台車停止中のため、台車振動は発生していない。測定可能な状態。
②乾燥⇒濡れ（台車移動中）		台車移動に伴う振動を測定。測定可能な状態。アスファルトの色が濃くなるレベルの濡れであれば影響なし。
③水溜り（台車移動中）		台車移動中の振動が検出できず、速度出力が 0 m/s となった。測定不可。
④乾燥（台車移動中）		台車移動に伴う振動を測定。測定可能な状態。
⑤乾燥⇒濡れ（台車移動中）		②と同じ状態、測定可能。
⑥濡れ⇒乾燥（台車移動中）		②と同じ状態、測定可能
⑦乾燥（停止）		①と同じ状態、測定可能。停車する瞬間に測定不可となったが、路面状態とは関係ない。

図 3.5.6 と表 3.5.3 より、水溜り同様に積雪があると測定不可となることが分かる。これらの結果より小野測器試作機を用いた走行たわみ計測は、雨天、降雪時は避けるべきだが、多少の路面濡れは問題ないことが分かった。

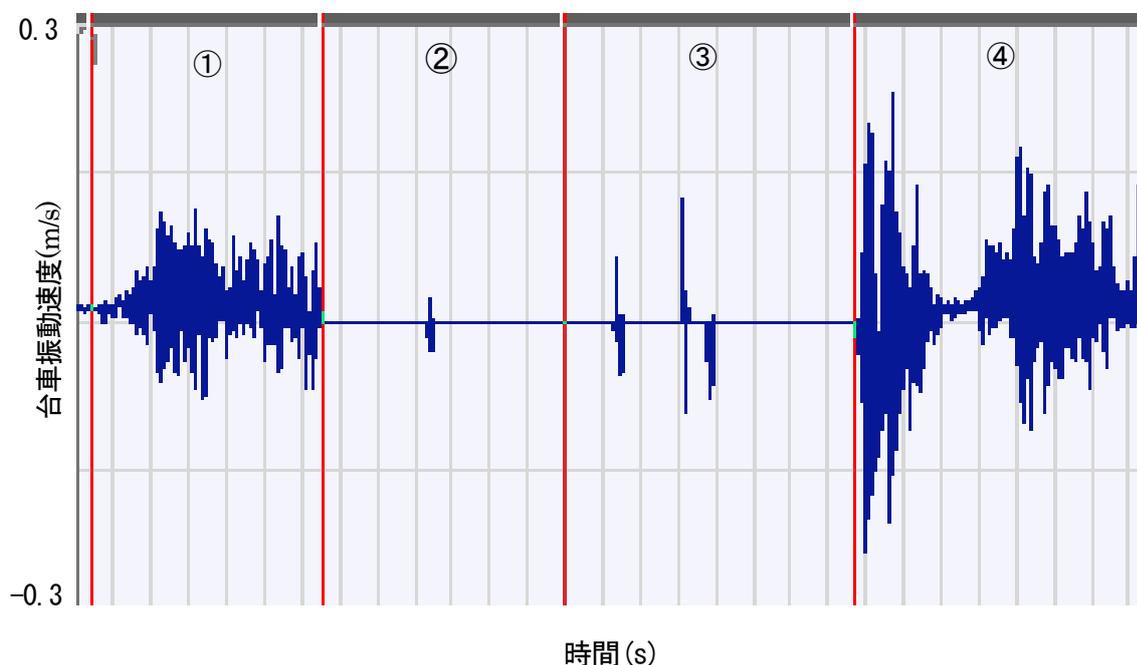


図 3.5.6 路面状態による検出可否の評価（積雪）

表 3.5.3 路面状態の変化（積雪）

路面状態		測定可否
①乾燥（台車移動中）		台車移動に伴う振動を測定。測定可能な状態。
②乾燥⇒積雪（台車移動中）		台車移動中の振動が検出できず、速度出力が 0 m/s となった。測定不可。
③積雪⇒乾燥（台車移動中）		②と同じ状態、測定不可。
④乾燥（台車移動中）		①と同じ状態、測定可能。

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 レーザドップラ振動計の架台への設置

MWD ではレーザ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レーザドップラ振動計は 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。レーザ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。レーザドップラ振動計は車体及び架台に剛結する構造であることが必要になる。

写真 4.1.1 に試作機の写真を示す。試作機には架台剛結のため側面に 4 箇所の固定用ネジ穴が存在しており、架台にはボルトで固定した。設置後は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。

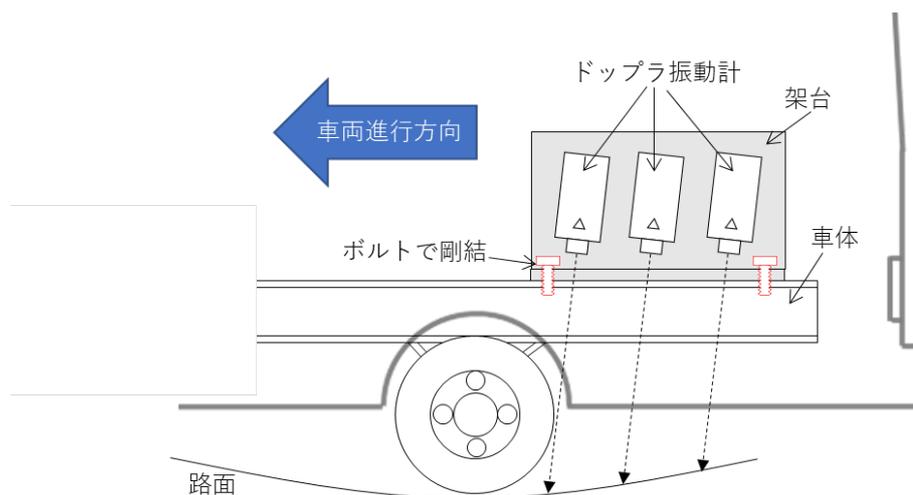


図 4.1.1 ドップラ振動計の架台剛結のイメージ



写真 4.1.1 試作機の架台固定位置（四隅にネジ穴）

4.2 走行速度の影響

本研究における測定の目的はたわみ量の算出であるが、4.2～4.4では、たわみ速度にデータの飛び、データの反転、計測不能等が発生しないかを確認し、計測システムの一部として試作機が正常に機能するか判断した。まず初めに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約1400 m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20 km/h、40 km/h、60 km/h、80 km/h、100 km/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、100 km/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。

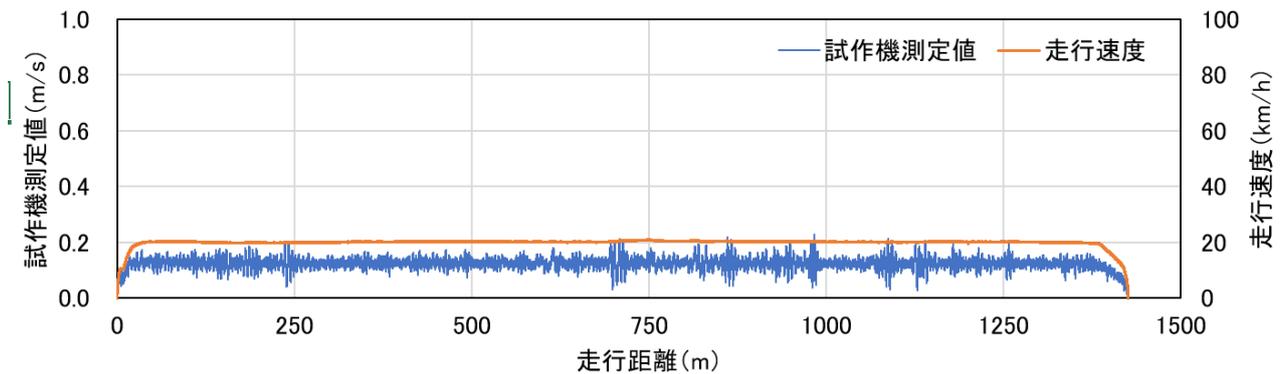


図 4.2.1 走行速度試験結果 (20km/h)

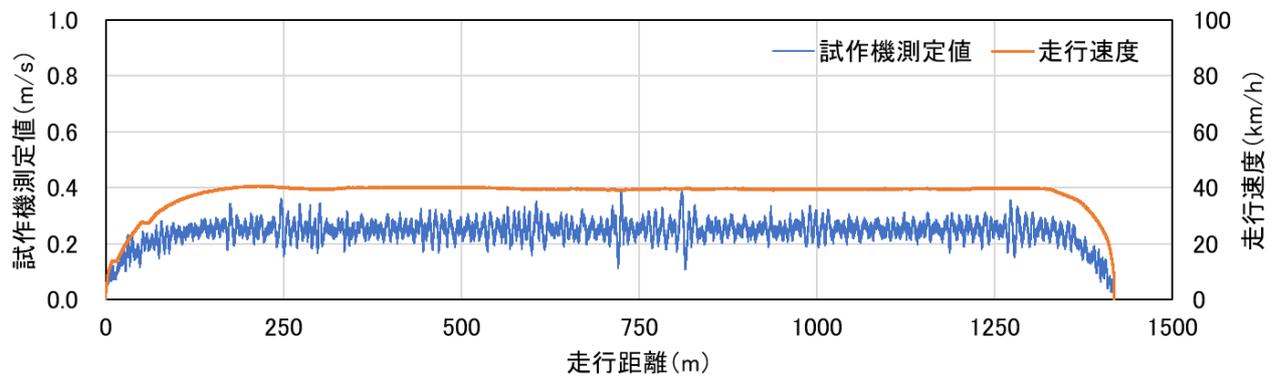


図 4.2.2 走行速度試験結果 (40km/h)

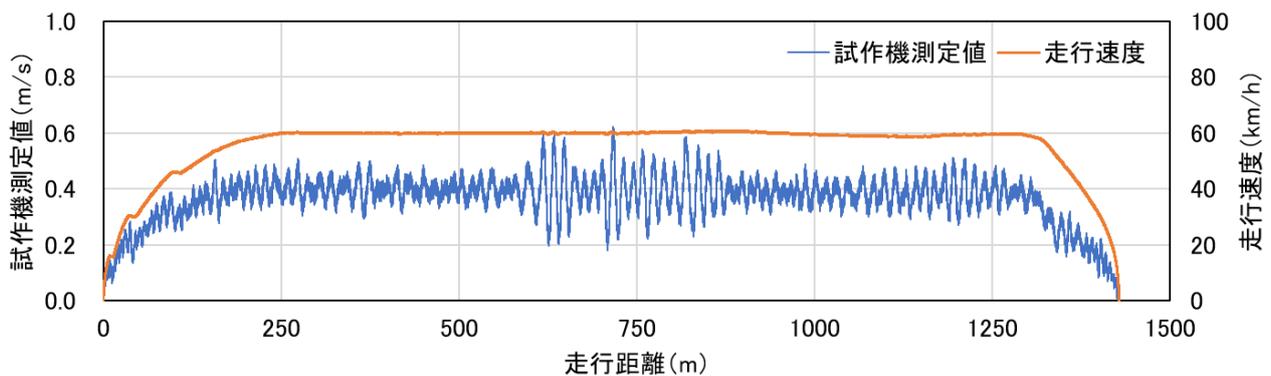


図 4.2.3 走行速度試験結果 (60km/h)

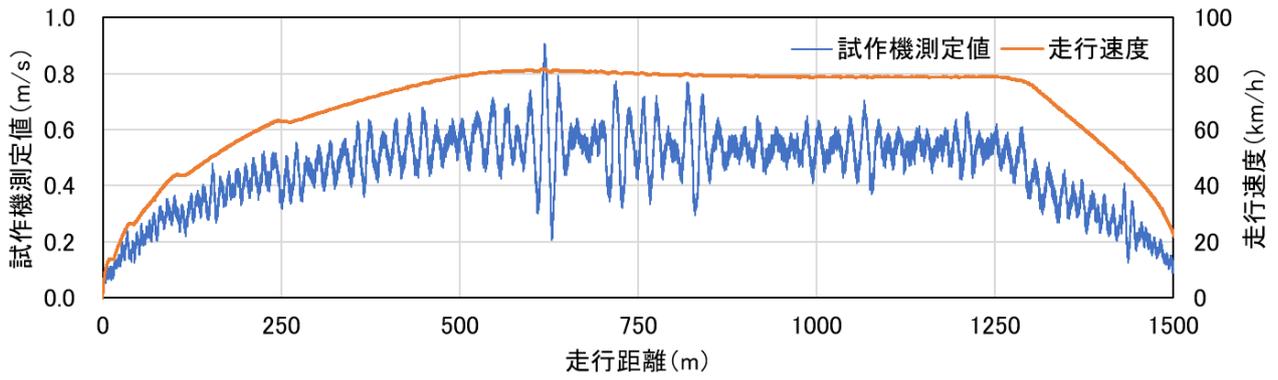


図 4.2.4 走行速度試験結果 (80km/h)

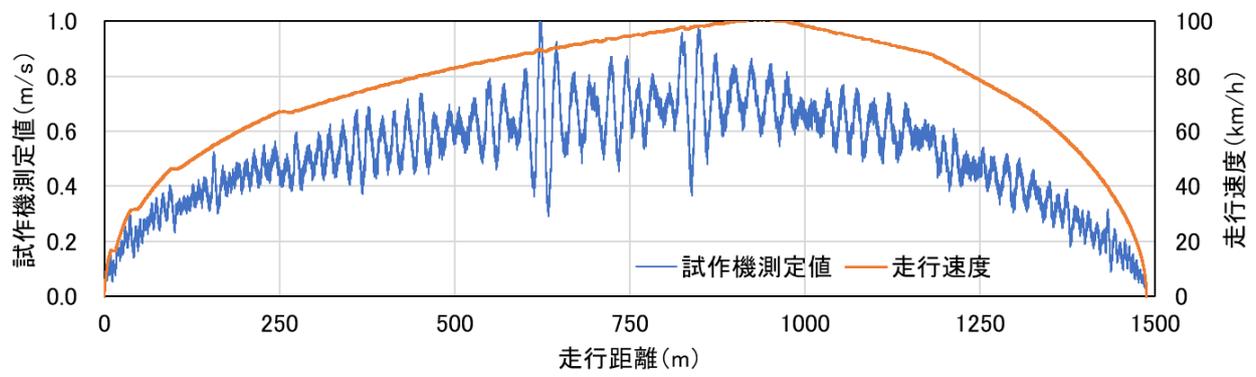


図 4.2.5 走行速度試験結果 (100km/h)

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を検証するため、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、50 mおきに設置した1 cm、2 cm、3 cm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。多少のデータ欠落があったものの、全ての走行速度、段差において反転、測定不能などのたわみ速度測定に影響する不具合は確認されず、良好な測定ができることを確認した。

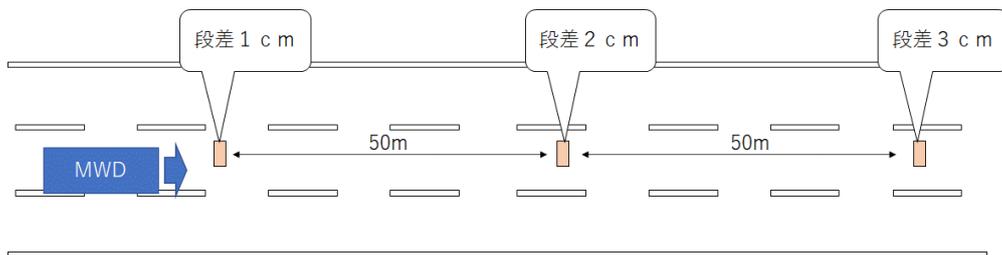


図 4.3.1 段差走行試験



写真 4.3.1 段差走行試験の様子

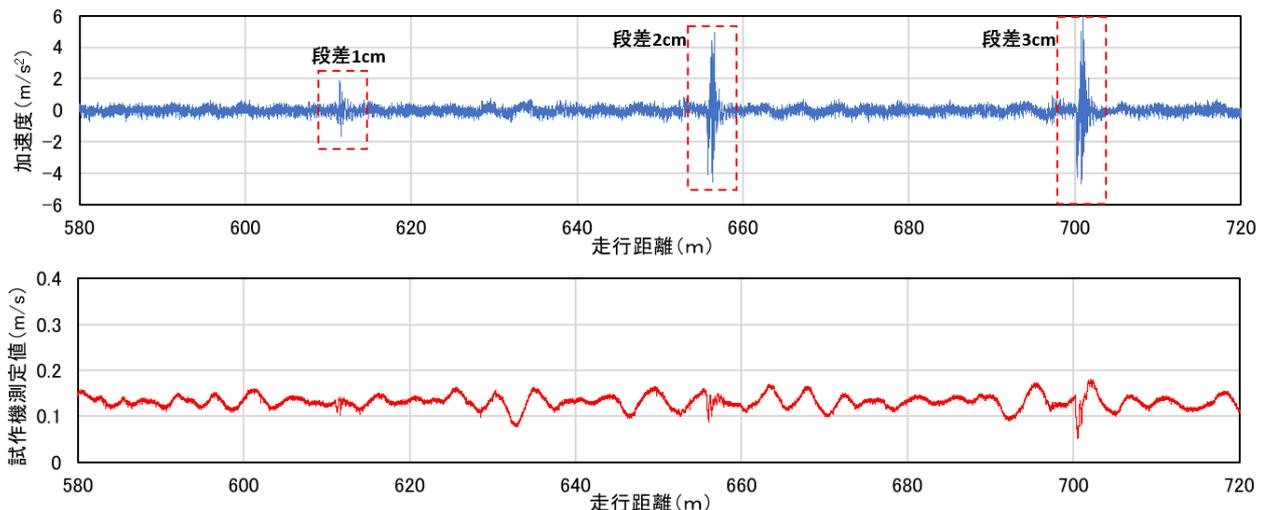


図 4.3.2 段差走行試験結果 (20km/h)

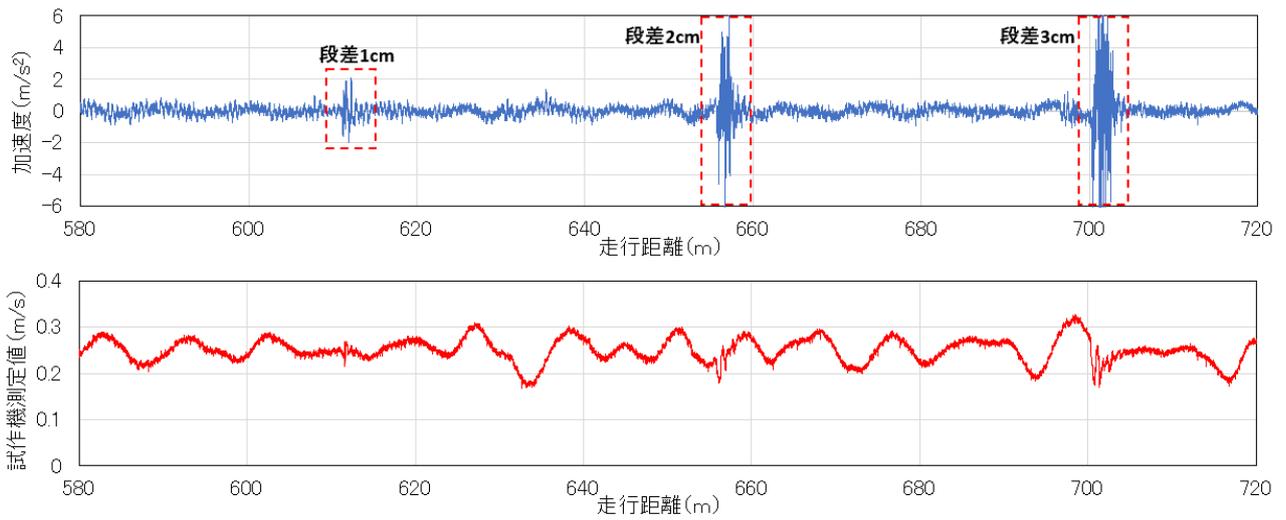


図 4.3.3 段差走行試験結果 (40km/h)

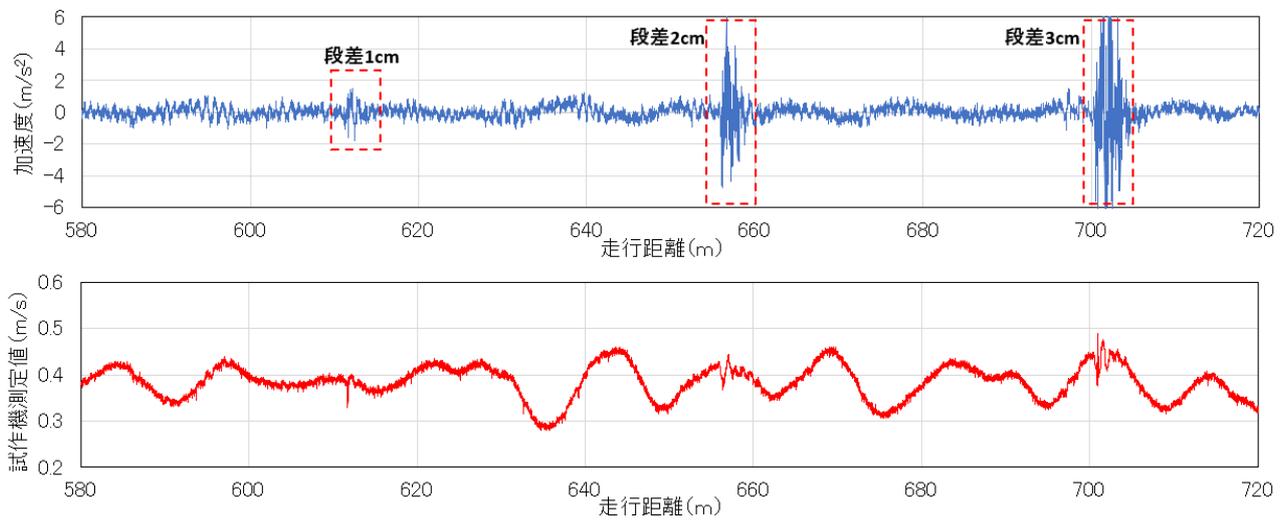


図 4.3.4 段差走行試験結果 (60km/h)

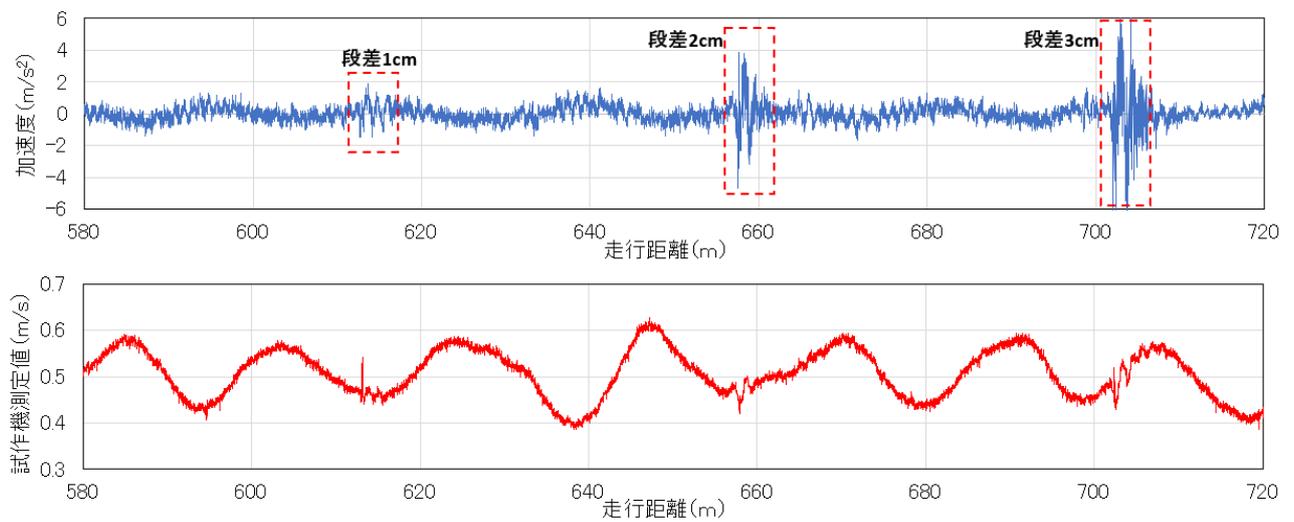


図 4.3.5 段差走行試験結果 (80km/h)

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 100 m、全長 628 m 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 5 m 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

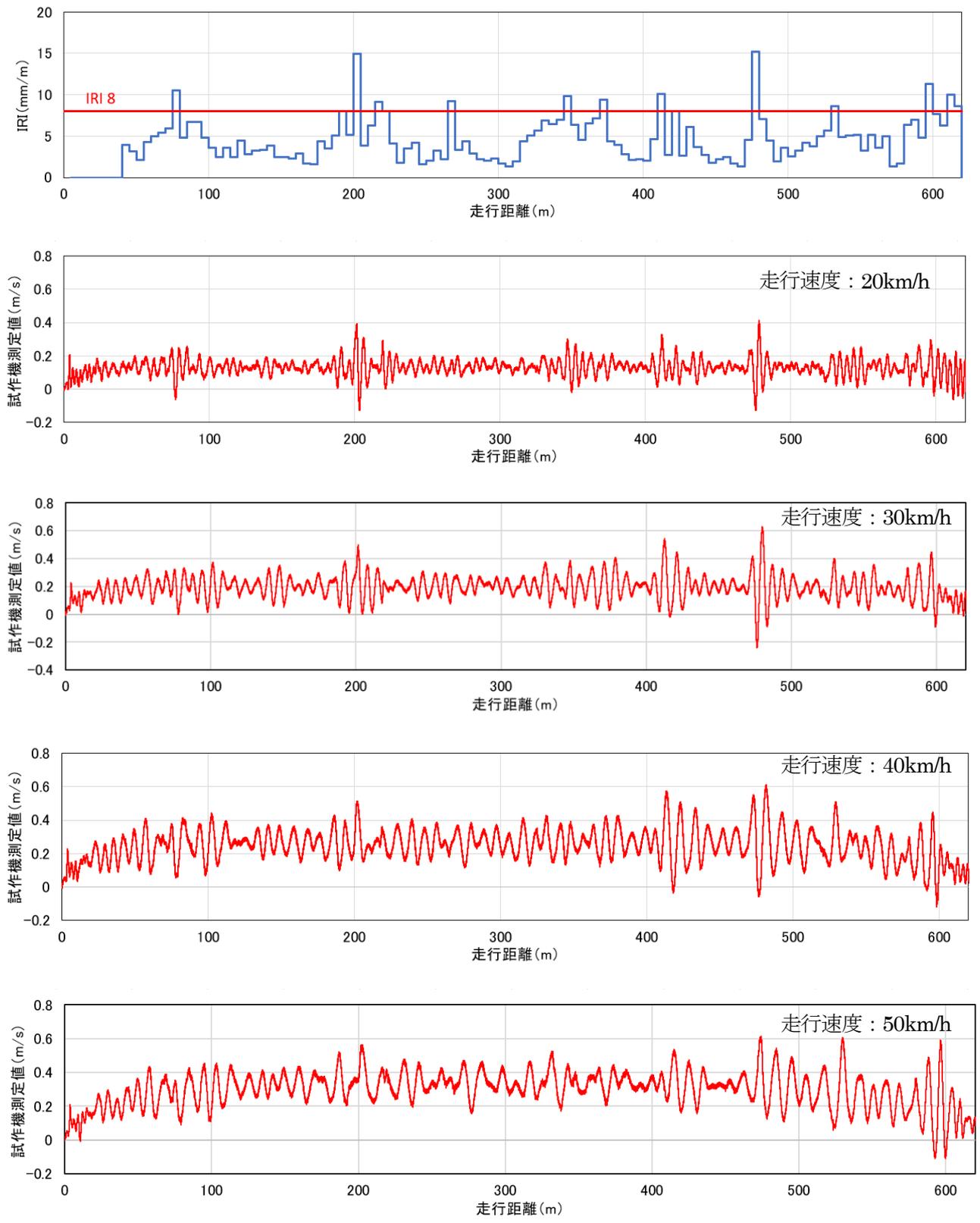


図 4.4.1 平坦性走行試験結果

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。

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 1000 m 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、試作機は 3 台製作し MWD に設置した。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）」にてたわみ量を算出した。



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 20 km/h、30 km/h、40 km/h でMWD測定を実施した。また、FWD 測定を 5 m 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 4.5.4 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、500 m 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。

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に起因する。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。



写真 4.5.1 たわみ量測定状況

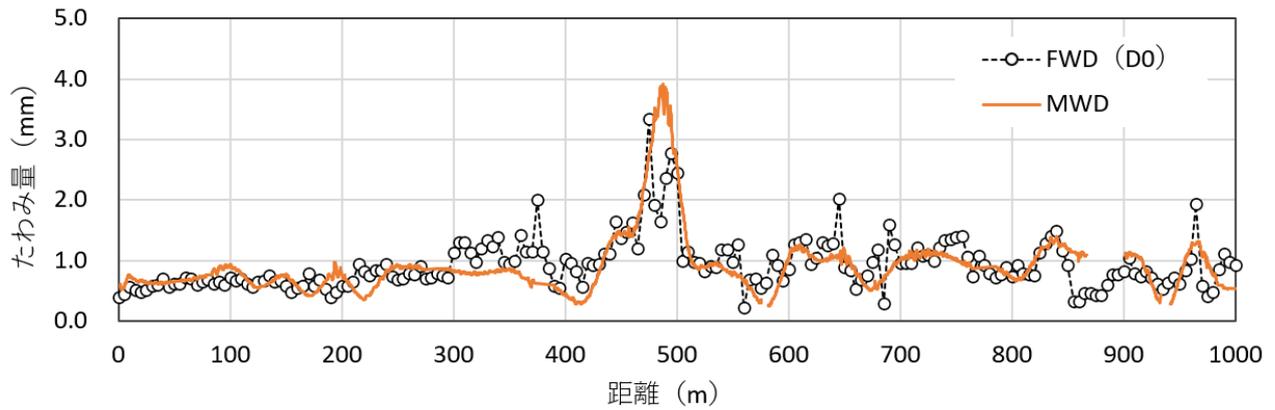


図 4.5.2 たわみ量計測結果 (20km/h)

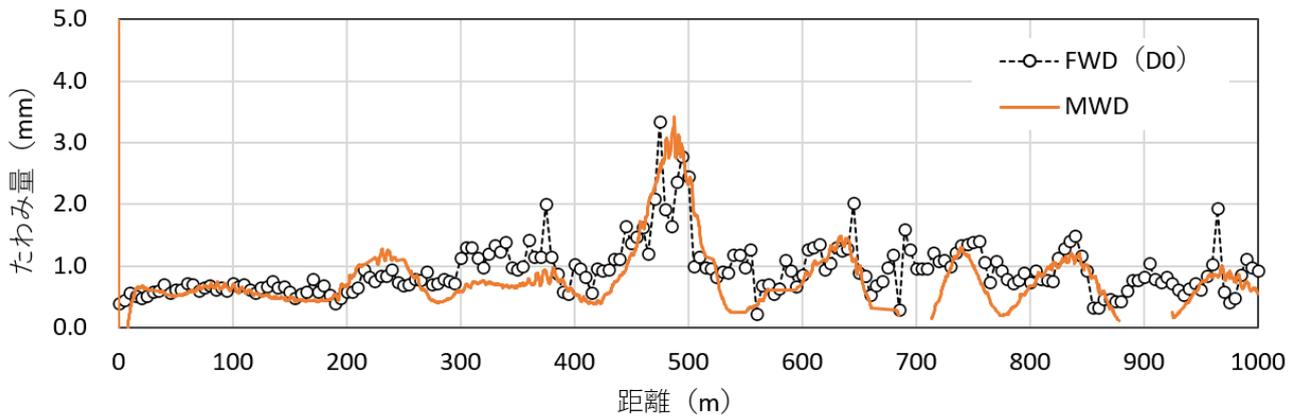


図 4.5.3 たわみ量計測結果 (30km/h)

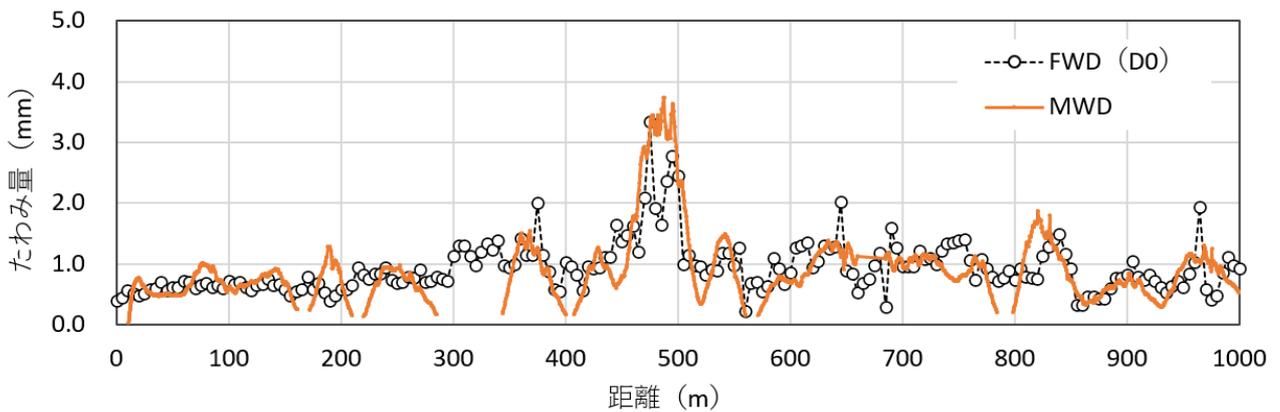


図 4.5.4 たわみ量計測結果 (40km/h)

(2) WET路面での検証

3.5.2 の検証では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報告したが、路面がある程度濡れた状態でもたわみ量の算出が可能であるか検証を実施した。

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大きい 460 m～510 m の区間とし、走行速度は 20 km/h、40 km/h とした。

測定結果を図 4.5.5～図 4.5.6 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

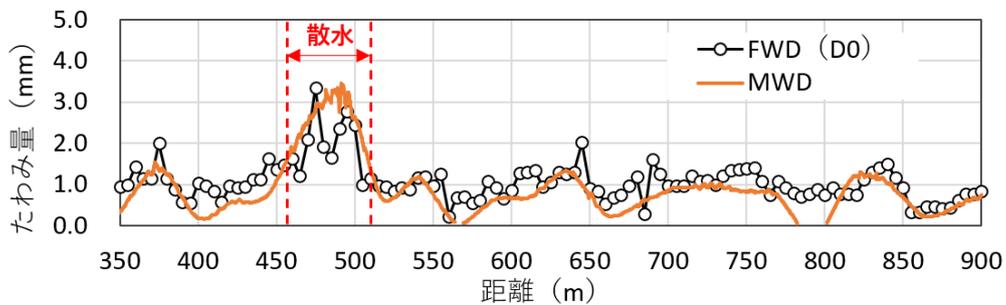


図 4.5.5 たわみ量計測結果 (20km/h)

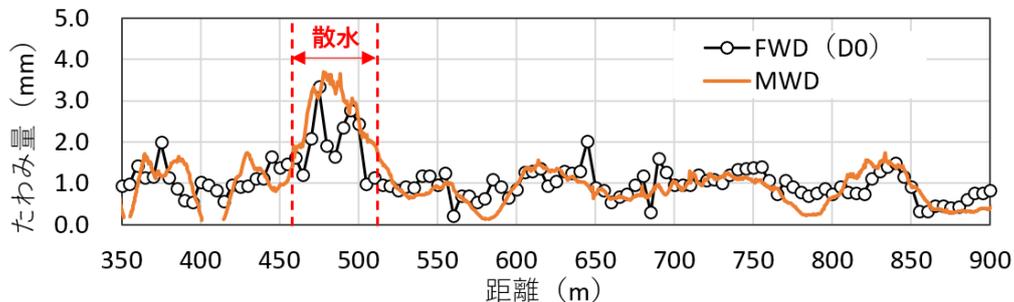


図 4.5.6 たわみ量計測結果 (40km/h)

5 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) 海外製既設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。小野測器制 LV-1800 をベースとして改良することで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。

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。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

共同研究報告書

Cooperative Research Report of PWRI

No. 550 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