

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

2021年12月

（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

（株）ガイアート

東亜道路工業（株）

ニチレキ（株）

（株）パスコ

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

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た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、日本国内でのMWDの実用化に向け、装置の開発、たわみ量解析手法の検討、健全度評価手法の検討、試験法の検討などを実施したので、本報告書により報告するものである。

キーワード：移動式たわみ測定装置、MWD、FWD、舗装の健全度評価

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
2.1 移動式たわみ測定装置（MWD）の活用方針.....	3
2.2 移動式たわみ測定装置（MWD）の国内での適用.....	3
3 MWDの開発の経緯.....	5
3.1 我が国における移動式たわみ測定装置（MWD）研究・開発.....	5
3.2 荷重車を用いたMWD1号機の開発（2009～2014年）.....	5
3.2.1 測定方法①：レーザ変位計による方法.....	6
3.2.2 測定方法②：ドップラ振動計による方法.....	7
3.2.3 車両振動の影響と対策.....	8
3.2.4 測定結果.....	11
3.3 中型車を用いたMWD2号機の開発（2014～2018年）.....	12
3.4 中型車を用いたMWD3号機の開発（2018年～2021年）.....	14
4 移動式たわみ測定装置の測定方法の検討.....	16
4.1 ドップラ振動計による測定方法（ウェーブレット法）.....	16
4.1.1 ウェーブレット法の検討.....	16
4.1.2 土木研究所外周路での測定.....	16
4.1.3 測定間隔（測定周波数）の影響.....	18
4.1.4 速度の影響.....	27
4.1.5 温度の影響.....	31
4.1.6 走行位置の影響.....	36
4.1.7 道路構造による影響.....	46
4.1.8 舗装断面の影響.....	58
4.2 ドップラ振動計による測定方法（たわみ速度差法）.....	61
4.2.1 たわみ速度差法の検討.....	61
4.2.2 土木研究所外周路での測定.....	70
4.2.3 測定間隔（測定周波数）の影響.....	71
4.2.4 速度の影響.....	75
4.2.5 温度の影響.....	78
4.2.6 走行位置の影響.....	86
4.2.7 道路構造による影響.....	93

4.2.8 舗装断面の影響	105
4.3 レーザ変位計による測定方法（レーザ法）	108
4.3.1 レーザ法の概要	108
4.3.2 土木研究所外周路での測定	111
4.3.3 測定間隔の影響	113
4.3.4 速度の影響	117
4.3.5 温度の影響	120
4.3.6 走行位置の影響	128
4.3.7 道路構造による影響	135
4.3.8 舗装断面の影響	147
5 健全度評価手法の検討	150
5.1 たわみのバラツキ考慮した舗装の健全度評価手法	150
5.2 交通量区分別の FWD による許容たわみ量の目安による健全度評価手法	152
5.3 追跡調査による方法	153
6 実道における測定と健全度評価事例	155
6.1 白糸ハイランドウェイにおける測定・評価事例（レーザ法）	155
6.2 県管理道路におけるネットワークレベルでの測定・評価事例	162
7 まとめ	178
7.1 MWD を用いたたわみ量算定手法の提案	178
7.2 健全度評価手法の提案	179
7.3 MWD を用いた舗装のたわみ測定方法の提案	180
8 今後の課題	181

【参考文献】

- 付録1) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～ウェーブレット法編～
- 付録2) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～たわみ速度差法～
- 付録3) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～レーザ法～
- 付録4) 国内における MWD に関する文献

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、適切なメンテナイ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。写真 1.1.1 に FWD を示すが、FWD たわみ量調査は、路面に重錘を落下させた時に生じ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する手法である。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。

一方で、国立研究開発法人土木研究所（以下「土木研究所」という）では平成 17 年度より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が、実道での測定実績が少なく、また測定結果の精度や活用方法についての検証も不十分であった。

そこで、本共同研究は MWD の実用化に向けて、MWD 測定車の開発、健全度評価手法等の提案を行ったので以降報告する。



写真 1.1.1 FWD

1.2 共同研究体制

本共同研究は2016年6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	2016.7-2021.5
	寺田 剛	道路技術研究グループ(舗装) 総括主任研究員	2016.7-2021.3
	若林 由弥	道路技術研究グループ(舗装) 研究員	2016.7-2018.3
	綾部 孝之	道路技術研究グループ(舗装) 研究員	2018.4-2021.5
	永塚 竜也	道路技術研究グループ(舗装) 専門研究員	2020.8-2021.5
(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
アールテックコン サルタント(株)	河田 久儀	技術部 技術部長	2016.7-2021.3
	阿部 貴幸	技術部 係長	2016.7-2021.5
	鈴木 治喜	技術部	2016.7-2021.5
(株)ガイアート	竹井 利公	技術研究所 審議役	2016.7-2021.5
	齊藤 一之	技術研究所 主席研究員	2016.7-2021.5
	山本 啓	技術研究所 研究員	2016.7-2021.5
(株)高速道路総合 技術研究所	神谷 恵三	道路研究部 部長	2016.7-2020.4
	高橋 茂樹	道路研究部 部長	2020.4-2021.5
	加藤 亮	道路研究部 舗装研究室 室長	2020.4-2021.5
	江口 利幸	道路研究部 舗装研究室 主任研究員	2016.7-2017.7
	石坂 健一	道路研究部 舗装研究室 主任研究員	2017.7-2019.7
	洲崎 尚樹	道路研究部 舗装研究室 主任研究員	2019.7-2021.5
	滝 友宏	道路研究部 舗装研究室 研究員	2019.7-2021.5
東亜道路工業(株)	阿部 長門	営業本部 技術営業部長	2016.7-2021.5
	藤永 弥	技術本部 技術部長	2016.7-2021.5
	塚本 真也	技術部 課長、技術研究所 副所長	2016.7-2021.5
	梅田 隼	技術研究所 第3研究室 主任研究員	2018.4-2021.5
ニチレキ(株)	金盛 隆	道路エンジニアリング部 開発課 専門部長	2016.7-2019.3
	那珂 通大	道路エンジニアリング部 調査課 調査課長	2020.4-2021.5
	牧田 哲也	道路エンジニアリング部 調査課 課長代理	2016.7-2018.3
	鬼塚 久史	道路エンジニアリング部 開発課 課長代理	2017.4-2021.5
	永塚 竜也	道路エンジニアリング部 開発課	2016.7-2017.3
(株)パスコ	黒須 秀明	研究開発本部 開発センター 副部長	2016.7-2019.3
	小岩 弘道	研究開発本部 パスコ総合研究所 課長	2016.7-2019.3
	谷黒 瓦	中央事業部 技術センター 上級主任技師	2016.7-2019.3
	前田 近邦	新空間情報事業部 新空間技術部 主任技師	2019.4-2021.5

2 研究概要

2.1 移動式たわみ測定装置（MWD）の活用方針

舗装構造の健全性を非破壊で調査する手法として FWD によるたわみ量調査が存在し、近年多くの現場で活用されている。しかし、FWD による調査は停車して測定する必要があることから交通規制が必要であるとともに、1 点の測定に 2～3 分の時間を要すること、測定点のみの評価になることから、「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の調査には非効率である。一方、MWD は走行しながら自らの輪荷重により発生するたわみ量を測定するため、交通規制が不要であるとともに、測定時間も大幅に短縮することができる。また、連続的にたわみ量の測定を行うため、点ではなく線での評価が可能であることから、ネットワークレベルでの調査に適した手法である。

本共同研究では、図 2.1.1 に示すように、MWD にてネットワークレベルで調査することで非健全区間を抽出することを目的とし、MWD の開発を実施した。

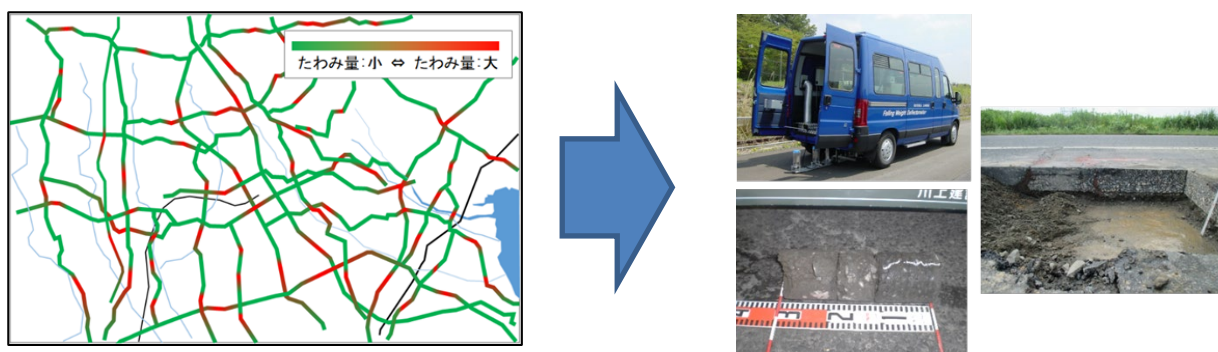


図 2.1.1 ネットワークレベル(左)とプロジェクトレベル(右)での調査のイメージ

2.2 移動式たわみ測定装置（MWD）の国内での適用

ネットワークレベルでの舗装構造の健全性を評価するために、移動しながら連続的にたわみを計測する試験機は、1990 年代の初頭から各国で開発³⁾されてきた。代表的な試験機を表-2.1.1 に示す。これらの試験機は実用化し道路管理に活用されているものもあるが、現在でも試験で得られたデータの処理方法などの研究が行われている。

表-2.1.1 海外で開発された代表的な試験機

名称	開発国	使用機器	全長
Rolling Wheel Deflectometer ⁴⁾ (RWD)	アメリカ	レーザ距離計	16.2m
Road Deflection Tester ⁵⁾ (RDT)	スウェーデン	レーザ距離計	8.95m
Traffic Speed Deflectometer ⁶⁾ (TSD)	デンマーク	ドップラ振動計	14.9m

海外で開発されている移動式たわみ測定装置は、**写真 2.2.1** に示すように巨大な牽引式トレーラにレーザ変位計を取り付けたもの等、高精度な変位測定のために様々な工夫がなされているが、車体が大きく我が国では測定できる路線が限定されるとともに、車両寸法が車両制限令に抵触する場合もあるため、我が国の道路にて適用する試験機としては現実的ではない。

そのため、本共同研究では、我が国の道路事情でも測定可能な大きさの車両（中型車）を用いた MWD を開発することとした。



写真 2.2.1 RWD の全景

3 MWDの開発の経緯

3.1 我が国における移動式たわみ測定装置（MWD）研究・開発

MWDの研究・開発の実績を図3.1.1に示す。MWDの研究・開発は、2005年の土木研究所、大学、NEXCOの3者の勉強会からスタートした。2009年には科学研究費助成事業（科研費）を受けて、土木研究所所有の荷重車（大型車）にレーザ変位計を取り付けたMWD1号機の開発に着手した。

2012年には国土交通省新道路技術会議（CART）にて、レーザ変位計に加えレーザドップラ振動計（以降、「ドップラ振動計」と表記する。）を用いた測定方法の検討を行うとともに、2014年に公道走行可能な中型車をベースとしたMWD2号機の開発を行った。本共同研究では、このMWD2号機の開発過程で生じた各種の課題を踏まえ、実用化に向けたMWD3号機の開発を行った。

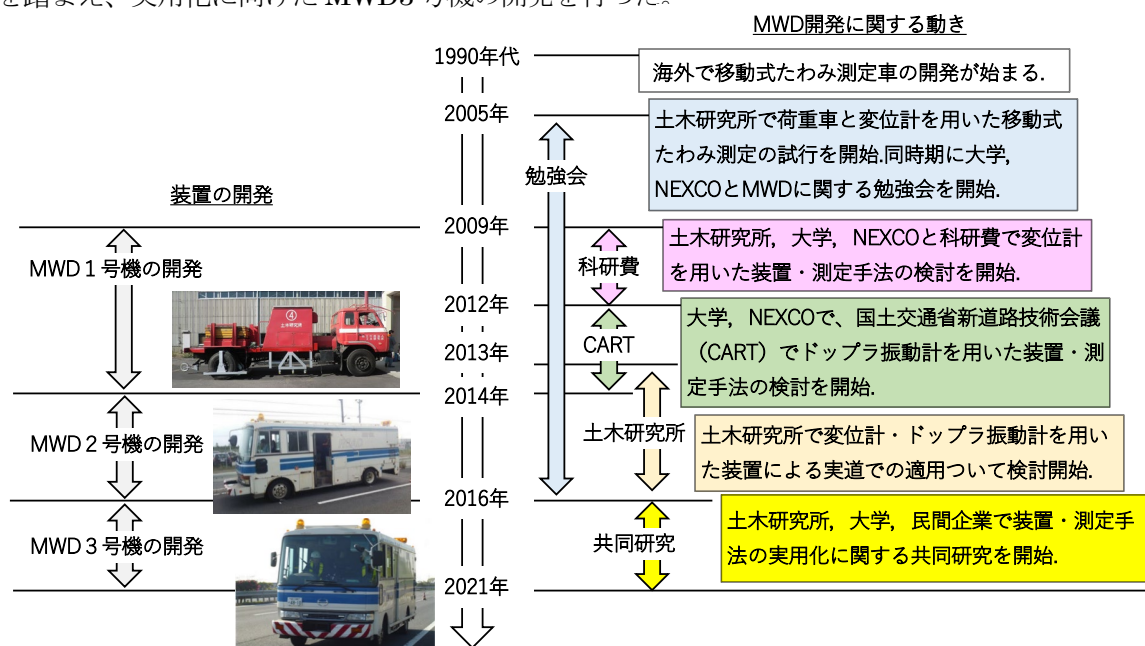


図 3.1.1 MWDの研究・開発実績

3.2 荷重車を用いたMWD1号機の開発（2009～2014年）

2009年、土木研究所舗装走行実験場で舗装の促進載荷試験に利用していた荷重車（大型車）をベースにMWD1号機の開発に着手した。

写真3.2.1に示す荷重車に、レーザ変位計とドップラ振動計を取り付けた。レーザ変位計は、センサ本体から路面までの距離を測定し解析によりたわみ量を算出するが、測定値にはたわみ成分以外に車両の振動やわだち掘れ等の路面の形状に由来する距離も含まれるため、解析時には測定値に含まれるノイズをいかに除去できるかが課題となる。また、ドップラ振動計は、路面が変形する際のたわみ速度を測定し解析によりたわみ量を算出するが、測定値には計算に必要なたわみ速度以外に走行速度、車両の動きに由来する速度等のノイズが含まれるため、レーザ変位計による方法と同様にノイズの処理方法が課題となる。

そのため、車体の振動等のノイズの除去方法を含む解析手法（たわみ量算出手法）について検討した。なお、測定値からノイズを除去し正確なたわみ量の算出の精度については、FWDによる計測結果（ D_0 ）と比較することにより検証した。なお、ドップラ振動計を用いた検討は、国土交通省新道路技術開発の採択技術

「舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価に関する研究⁷⁾」(研究代表者：東京農業大学 竹内康教授)の支援を受けて行っている。



写真 3.2.1 MWD1 号機

3.2.1 測定方法①：レーザ変位計による方法⁸⁾

(1) レーザ変位計の配置

レーザ変位計は、車輪の前後でたわみ形状が異なることも考慮し、車輪の前後に3個ずつセンサを設置している。また、サスペンションの影響により車軸と車体フレームの運動が異なるため、車軸をベアリングで挟み、それにセンサの架台を取り付け、センサと車軸を剛結して運動が一致するようにした。さらに、路面の原位置として車輪による変形の影響をあまり受けない路面の位置を把握するために車両の中央部にセンサを3つ取り付けた。センサの配置状況の詳細は、図 3.2.1.1 に示すとおりである。

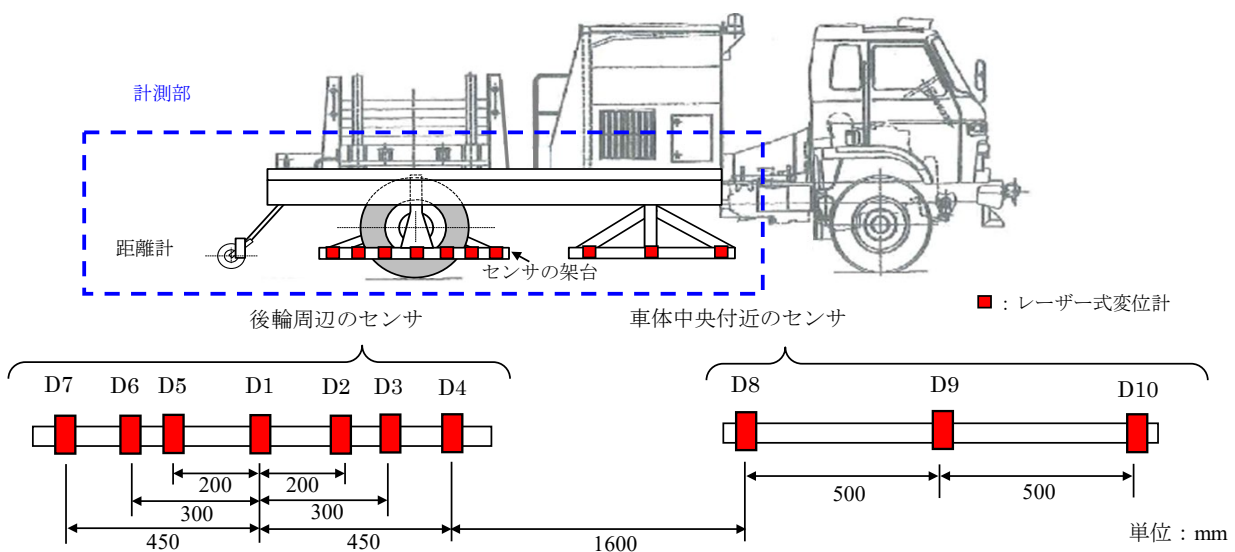


図 3.2.1.1 MWD1 号機におけるレーザ変位計配置図

(2) レーザ変位計による路面たわみ量の算出方法

レーザ変位計によるたわみ量の算出方法について、図 3.2.1.2 にイメージ図を示す。車両が x 軸方向に速度 v で進行するものとし、路面に凹凸や傾斜がなく、車体自体の振動や傾きもない場合、車輪直下のたわみ量は、以下の式 3.2.1.1 となる。この $\Delta 0$ および Δd をレーザ式変位計で測定することでたわみ量を算出することができる。

$$w_0 = \Delta 0 - \Delta d \quad \dots \dots \dots \text{式 3.2.1.1}$$

ここで、

w_0 : $x = 0$ におけるたわみ量

$\Delta 0$: 载荷位置 ($x = 0$) における路面までの距離

Δd : 载荷輪から十分離れ、その影響を受けない位置 ($x = d$) における路面までの距離

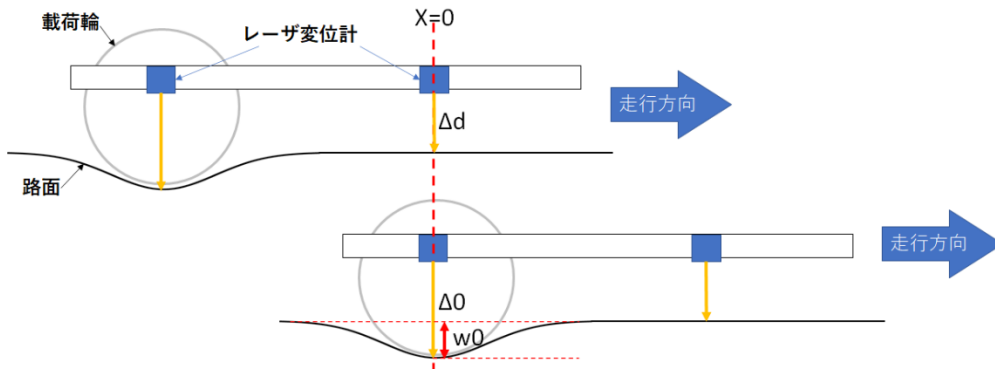


図 3.2.1.2 たわみ量算出のイメージ (レーザ変位計)

3.2.2 測定方法②：ドップラ振動計による方法⁷⁾

(1) ドップラ振動計の配置

ドップラ振動計は図 3.2.2.1 に示すとおり荷重車の左後輪上部に設置した架台に剛結させた。また、ドップラ振動計の挙動を把握して計測値に含まれるノイズを除去するために、ドップラ振動計が剛結された架台に加速度計を設置した。なお、ドップラ振動計は 3 台設置している。

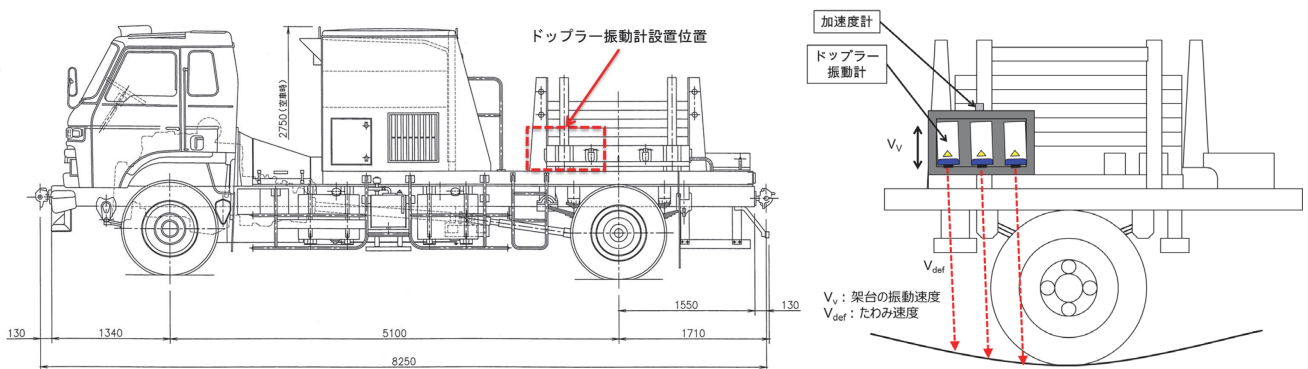


図 3.2.2.1 ドップラ振動計配置図

(2) ドップラ振動計によるたわみ量の算出方法

ドップラ振動計によるたわみ量の算出手法について、図 3.2.2.2 にイメージ図を示す。車輪直下を原点とする局所座標系において、たわみ量を w 、車両走行速度を V 、距離および時間をそれぞれ x 、 t とすると、式 3.2.2.1 に示すように、たわみ角 dw/dx は V とたわみ速度 dw/dt によって求めることができる。たわみ量は、たわみ角 dw/dx を x で積分すればたわみ量を算出することができる。

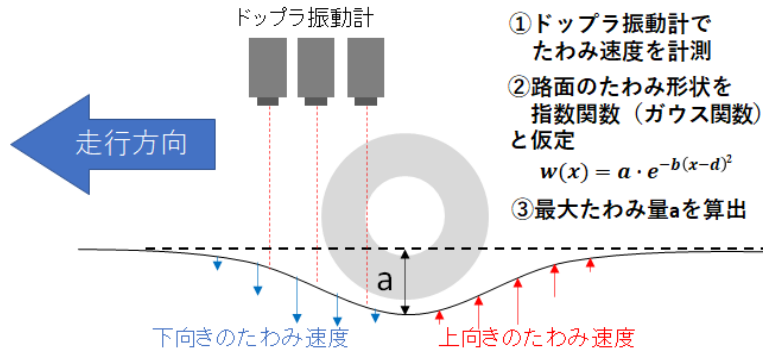


図 3.2.2.2 たわみ量算出のイメージ (ドップラ振動計)

$$\frac{dw}{dx} = \frac{dt}{dx} \cdot \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \quad \dots \dots \text{式 3.2.2.1}$$

3.2.3 車両振動の影響と対策

(1) 車両振動の影響

土木研究所構内の外周道路（以下、「土木研究所外周路」と表記する。）にて MWD1 号機を用いた測定を実施したところ、車両の振動と思われるノイズ成分により、FWD たわみ量と大きな差異が生じた。そこで、レーザ変位計の測定値に対しスペクトル解析を行い測定値に含まれる周波数成分を算出した。図 3.2.3.1 にレーザ変位計のスペクトル解析結果を示す。図中の D1、D4、D7 は図 3.2.1.1 に示した図におけるレーザ変位計の番号である。図 3.2.3.1 から 2~3Hz 付近の成分がいずれも卓越しており、この部分が車体の振動成分であると想定される。舗装のたわみに比べ車両の振動成分は非常に大きいため、たわみを正確に求めるには車両振動成分を取り除く必要がある。

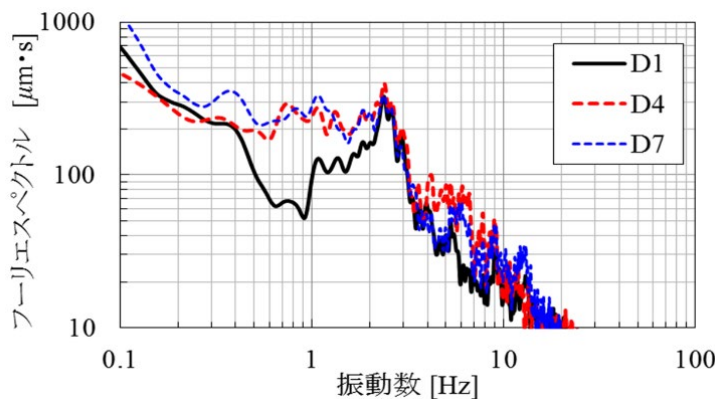


図 3.2.3.1 レーザ変位計のスペクトル解析結果

(2) 振動抑制対策

1) ハード面での振動対策法の検討

たわみの評価に当たっては、車両の振動を除去する必要があることが分かったため、物理的な振動対策として、**写真 3.2.3.1** に示すコイル状バネと高周波帯域の振動を吸収させノイズを軽減することができる衝撃吸収効果の高いゲル状の素材を使用したインシュレータとゲルマットを用いた対策について検討した。センサ架台に生じる振動特性をセンサ架台上端に設置した加速度計で計測し、フーリエ解析によりパワースペクトルを求めた。その結果を**図 3.2.3.2** に示す。その結果、6~10Hz、10~30Hz および 100~300Hz 付近の振動が増加していることがわかる。また、荷重車のリーフスプリングサスペンションに起因する 3Hz 付近の振動も増加していることから防振材料による効果は期待できないことがわかる。そのため、センサ架台は車体に剛結し、センサ架台の不規則振動を加速度計で測定しソフト面でのノイズ除去を試みることにした。

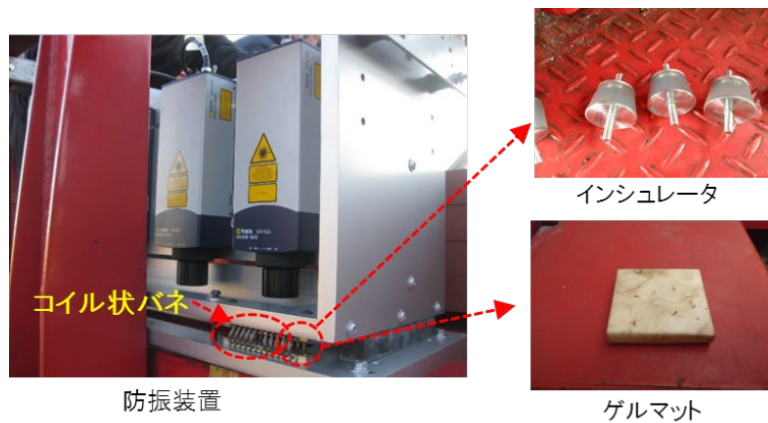


写真 3.2.3.1 物理的な振動対策

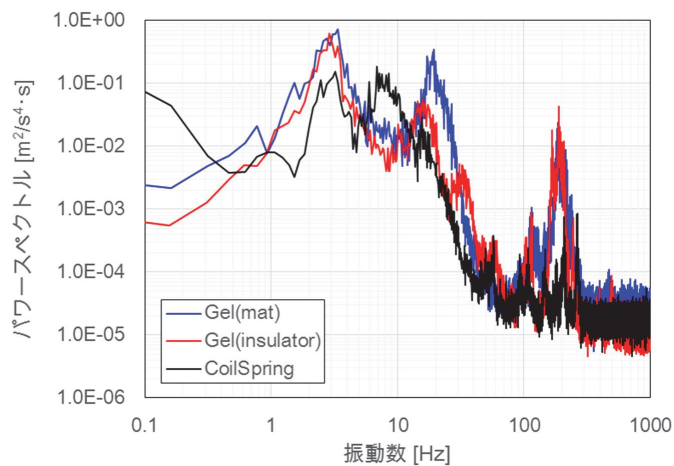


図 3.2.3.2 振動対策効果の測定結果

2) ソフト面での振動対策法の検討

ハード的対策のみでは、架台の振動を抑制できないことがわかったため、ウェーブレット解析を用いたソフト的振動除去を検討した。

ウェーブレット解析は、図 3.2.3.3 に示すように観測パターンを短い波（ウェーブレット）の集合体として分解・解析するもので、車両の不規則振動波形の解析に適している。

ウェーブレット解析を用いたソフト的振動除去方法のイメージを図 3.2.3.4 に示す。架台に取り付けた加速度計の測定値をウェーブレット変換し、加速度が 0 になるようにフィルタを設定する。次に、ドップラ振動計で測定したたわみ速度をウェーブレット変換する。たわみ速度には、車両の振動成分とたわみ速度成分が含まれているので、加速度が 0 になるように設定した同じフィルタを適用すると車両の振動成分が除去できるので、たわみ速度成分だけが残ることになる。

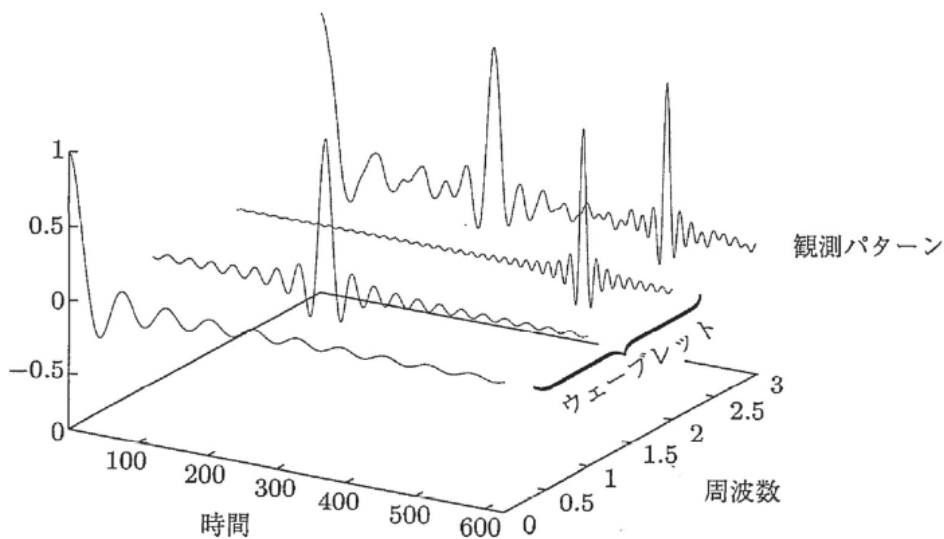


図 3.2.3.3 ウェーブレット解析の概念

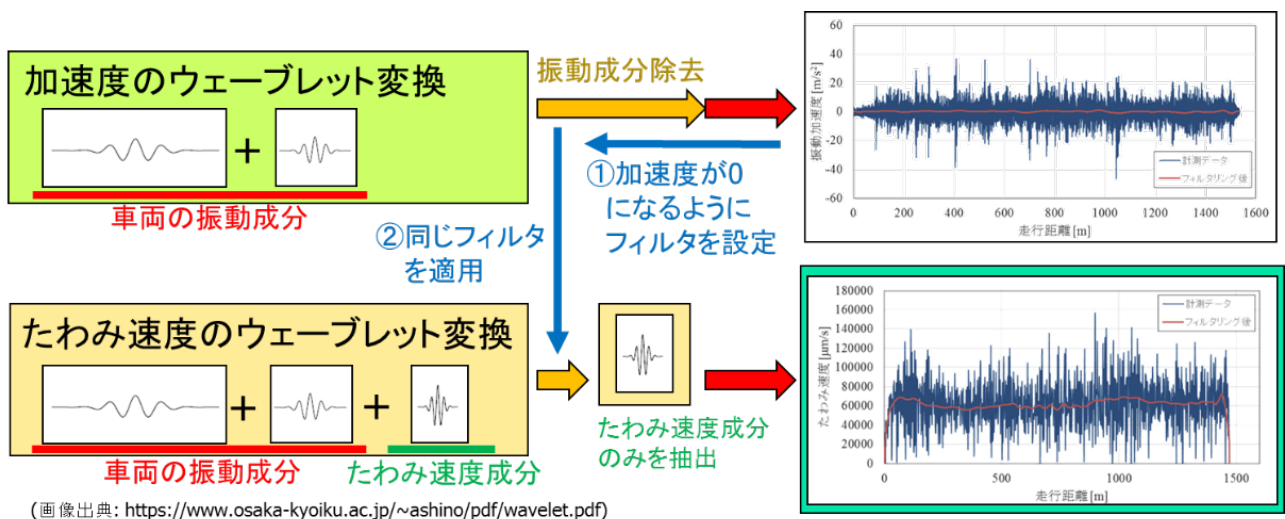


図 3.2.3.4 ウェーブレット解析を用いたソフト的振動除去方法のイメージ図

3.2.4 測定結果

図 3.2.4.1 に示す土木研究所外周路の約 1400m で MWD たわみ量と FWD たわみ量を測定した。なお、FWD たわみ量は 5m 間隔で測定し MWD たわみ量との比較を行った。



図 3.2.4.1 MWD 測定区間 (土木研究所外周路) ⁷⁾

(1) 測定方法①：レーザ変位計による測定結果

レーザ変位計の結果として時速 30km/h で測定した結果を図 3.2.4.2 に、時速 50km/h で測定した結果を図 3.2.4.3 に示す。FWD と概ね一致する結果が得られていることを確認した。

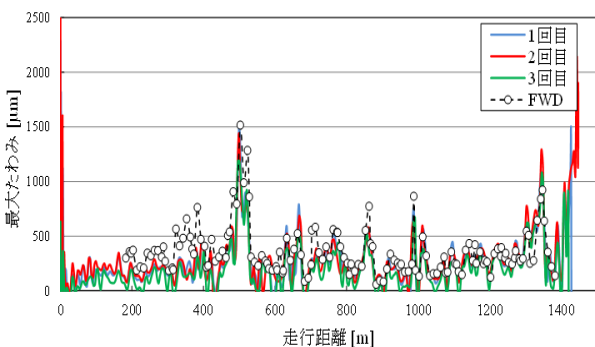


図 3.2.4.2 MWD たわみと FWD たわみの比較 (レーザ変位計、30km/h)

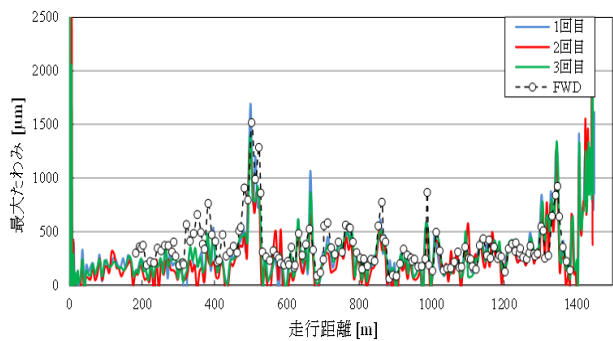


図 3.2.4.3 MWD たわみと FWD たわみの比較 (レーザ変位計、50km/h)

(2) 測定方法②：ドップラ振動計による測定結果

ドップラ振動計の結果として時速 30km/h で測定した結果を図 3.2.4.4 に、時速 50km/h で測定した結果を図 3.2.4.5 に示す。FWD と概ね一致する結果が得られていることを確認した。

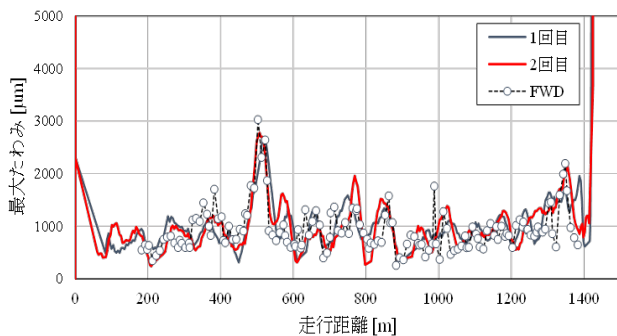


図 3.2.4.5 MWD たわみと FWD たわみの比較 (ドップラ振動計、30km/h)

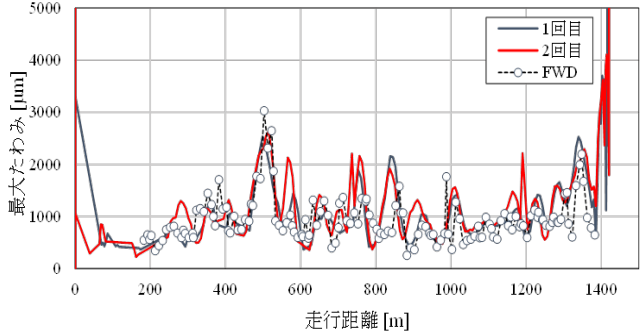


図 3.2.4.5 MWD たわみと FWD たわみの比較 (ドップラ振動計、50km/h)

3.3 中型車を用いた MWD2 号機の開発（2014～2018 年）

1 号機は試験車両のため現道を走行できないことから、計測システムを一般道で走行可能な中型車へ移設した 2 号機を製作した。写真 3.3.1 に MWD2 号機の外観を、写真 3.3.2 に車両内部の状況を、写真 3.3.3 に移設したドップラ振動計の写真を示す。



写真 3.3.1 MWD2 号機



写真 3.3.2 車両内部



写真 3.3.3 ドップラ振動計

MWD2 号機では路面の段差やわだち掘れに影響を受けないドップラ振動計を用いた方法について主に検討を行った。MWD2 号機についても MWD1 号機と同様に土木研究所外周路での検証を行ったが、図 3.3.1 に示すとおり FWD と概ね一致する結果が得られた。しかし、FWD たわみ量と乖離する結果が算出される場合も確認でき、MWD1 号機と比べ精度が若干劣る結果となった。また、図 3.3.2 に示すように、測定時にドップラ振動計の測定データが飛ぶ現象や測定データが反転する現象が頻繁に確認されるなど、安定的にデータを取得するのが困難な状況が見られた。これらの原因として、MWD2 号機はサスペンションにリーフスプリング（板バネ）を使用していることから、車両の振動が直接ドップラ振動計に作用することで、頻繁に測定データに不具合が生じるのではないかと考えられた。そこで、より振動の少ないエアスプリングをサスペンションに使用することで振動成分の低減ができると考え、エアサスペンション車に測定システムを移

設することとした。なお、エアサスペンション車を用いたものがMWD3号機となるが、MWD3号機の開発から本共同研究の取り組みとなる。

また、測定データを安定的に取得できない要因として、ドップラ振動計自体の能力による影響も大きいものと考えられる。測定に用いているドップラ振動計は海外製の市販品であり、車両振動の多いMWDに適応するよう設計された機器ではない。そのため、本共同研究ではエアサスペンション車を採用するなどのハード面での振動対策に加え、別途実施した機器メーカーとの共同研究にて、MWDに適用可能なドップラ振動計の開発についても着手することとした。機器メーカーとの共同研究については「共同研究報告書第550号（小野測器株式会社）」「共同研究報告書第551号（協立電機株式会社）」を参照頂きたい。

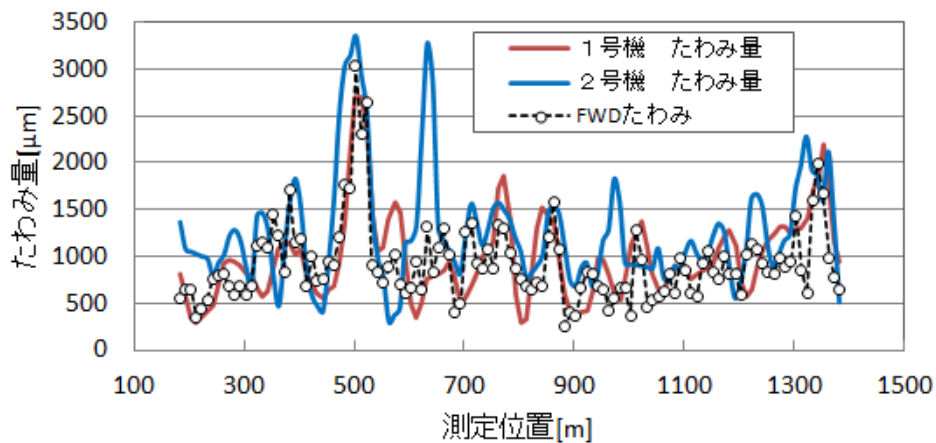


図 3.3.1 MWD たわみと FWD たわみの比較

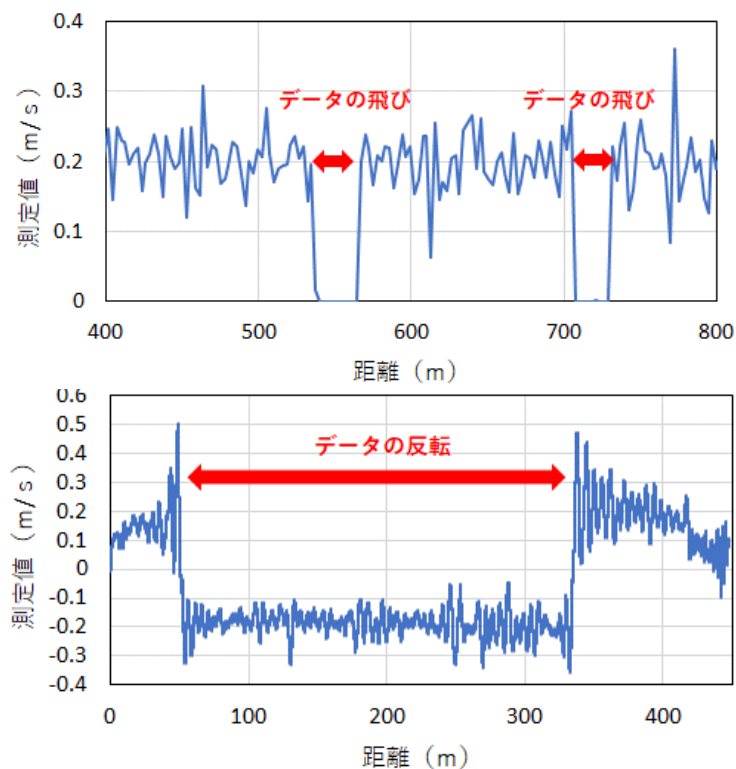


図 3.3.2 車両振動による測定データの不具合（上：データの飛び、下：データの反転）

3.4 中型車を用いた MWD3 号機の開発（2018 年～2021 年）

本共同研究では、3.3 の検討結果を踏まえて、はじめに MWD2 号機のリーフスプリング車から、同じ中型車のエアサスペンション車に各種測定機器を載せ替える作業に着手した。エアサスペンション車である 3 号機を写真 3.4.1 に、機器の構成を図 3.4.1 に示す。まず、エアサスペンション車への変更後に車両振動が低減されているか確認するため、車両走行時の上下方向加速度の測定を行い、振動低減効果について確認した。

図 3.4.2 にリーフスプリング車とエアサスペンション車の測定結果を示す。エアサスペンションとすることで上下方向の加速度が低減されていることが確認できる。また、データの飛びや反転等、MWD2 号機では頻繁に確認されていた現象が、MWD3 号機では概ね解消できることを確認した。

本共同研究では、エアサスペンション車を用いた MWD3 号機を用いて各種検討を実施した。なお、MWD の解析手法については、MWD1 号機、MWD2 号機で検討していたドップラ振動計を用いた解析手法（ウェーブレット法）に加え、本共同研究にて新たに提案するドップラ振動計を用いた解析手法（たわみ速度差法）、および共同研究者から提案のあったレーザ変位計を用いた解析手法（レーザ法）について、各種検討を実施した。

○ドップラ振動計を用いた解析手法（ウェーブレット法：特許第 6347078 号）

ドップラ振動計を用いて舗装のたわみ量を算出する手法で、車両振動等のノイズをウェーブレット解析により除去し、舗装の最大たわみ量を算出する手法（4.1 にて紹介）

○ドップラ振動計を用いた解析手法（たわみ速度差法：特許出願中）

ドップラ振動計を用いて舗装のたわみ量を算出する手法で、車両振動等のノイズをドップラ振動計間の測定値の差により除去して、舗装の最大たわみ量を算出する手法（4.2 にて紹介）

○レーザ変位計を用いた解析手法（レーザ法：特許 6735578 号）

車両側面に設置したレーザ変位計を用いて、たわみが発生していない箇所の変位とたわみ発生箇所の変位の差分により、舗装のたわみ量を算出する手法（4.3 にて紹介）

これらの手法にて各種検討を実施した結果を 4 章以降に示す。



写真 3.4.1 MWD3 号機

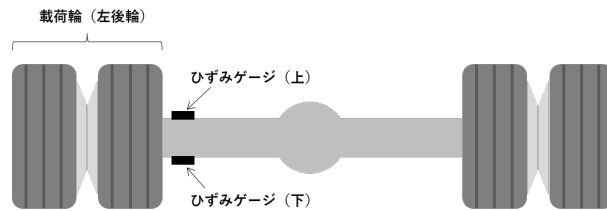
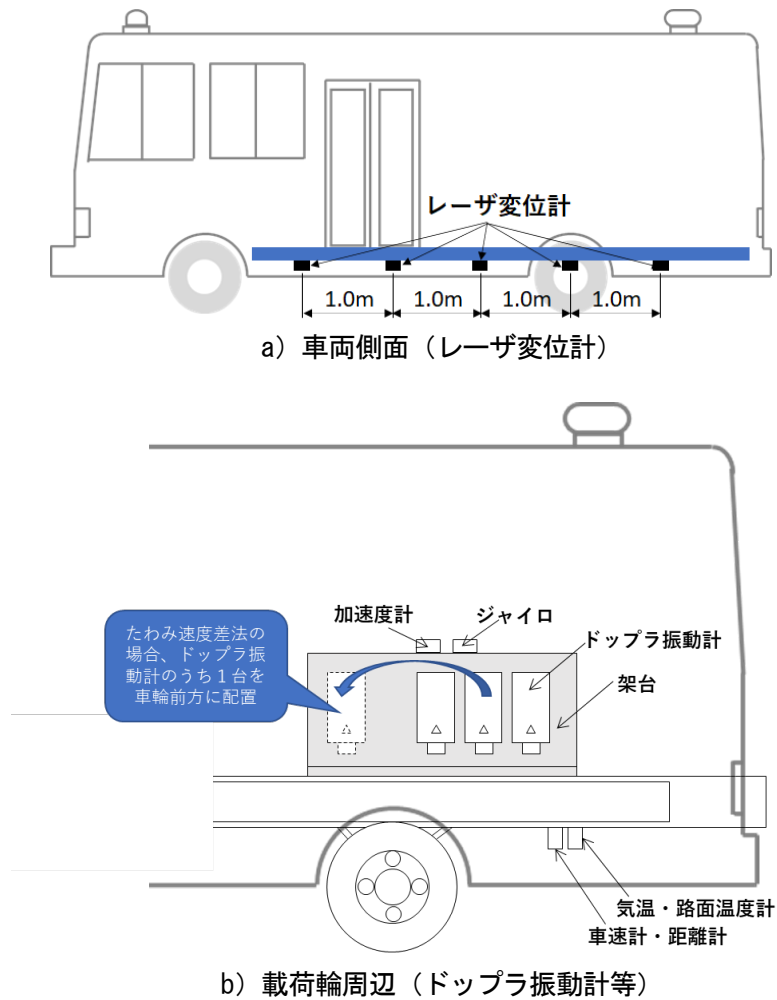


図 3.4.1 MWD 3号機の機器配置

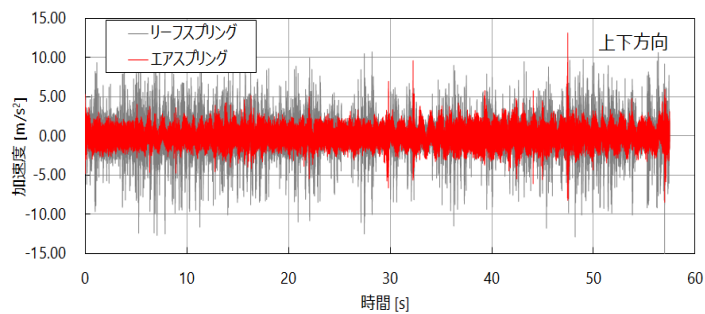


図 3.4.2 エアサスペンション車の車両振動低減効果

4 移動式たわみ測定装置の測定方法の検討

4.1 ドップラ振動計による測定方法（ウェーブレット法）

4.1.1 ウェーブレット法の検討

基本的な測定原理等については、本報告書の3.2.2及び参考文献7)で記載のとおりであり本章では詳細な説明は省略するが、MWD3号機では、さらに精度を向上するため、車両の傾きに着目したソフト面の対策を取り入れている。ドップラ振動計は図4.1.1.1に示すように路面から取り付け角度 θ （2°程度）の傾斜をつけて設置している。そのため、計測された測定値には、たわみ速度成分のみでなく、車両の走行速度成分も含まれるため、車両の走行速度成分を除去する必要がある。これまでは θ を一定として計算してきたが、走行中の車両の傾きにより θ は絶えず変化しており、その誤差は無視できない。そのためMWD3号機の測定からは、車両の傾斜を測定し、たわみ量の算定に反映させることにした。なお、車両の傾斜は図4.1.1.2に示すように、車両側面に設置したレーザ変位計の測定値から算定した。

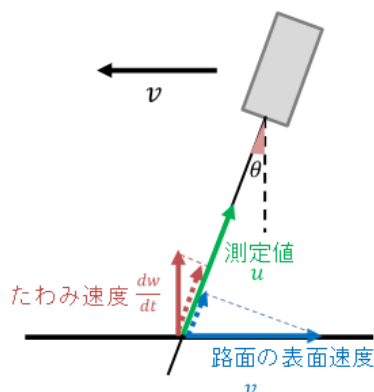


図 4.1.1.1 ドップラ振動計の設置角度のイメージ

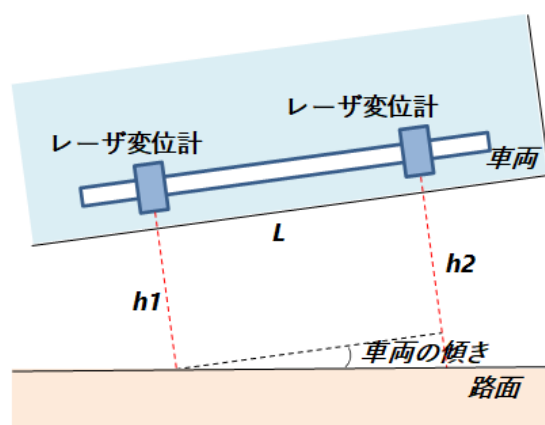


図 4.1.1.2 車両の傾斜測定イメージ

4.1.2 土木研究所外周路での測定

本共同研究では、各測定手法の検証のため図4.1.2.1に示す土木研究所外周路の約1300m程度においてMWD及びFWDの測定を行い、MWDたわみ量とFWDたわみ量との比較をすることで精度を検証した。なお、測定範囲は、ひび割れがなく健全な区間、亀甲状のひび割れが発生している不健全な区間が混在している約1300m程度を選定している。

土木研究所外周路での測定結果を図4.1.2.2、図4.1.2.3に示す。全体としてFWDたわみ量と同様の傾向を示しているとともに、FWDたわみ量とある程度の相関が確認できる。

なお、たわみ量が小さい区間等でFWDとの乖離は確認できるが、健全性が大きく低下している500m付近のたわみ量が良く一致していることから、舗装の健全性が低下した区間の抽出するネットワークレベルでの調査として活用が可能であるものと考えられる。



図 4.1.2.1 MWD 測定区間 (土木研究所外周路)

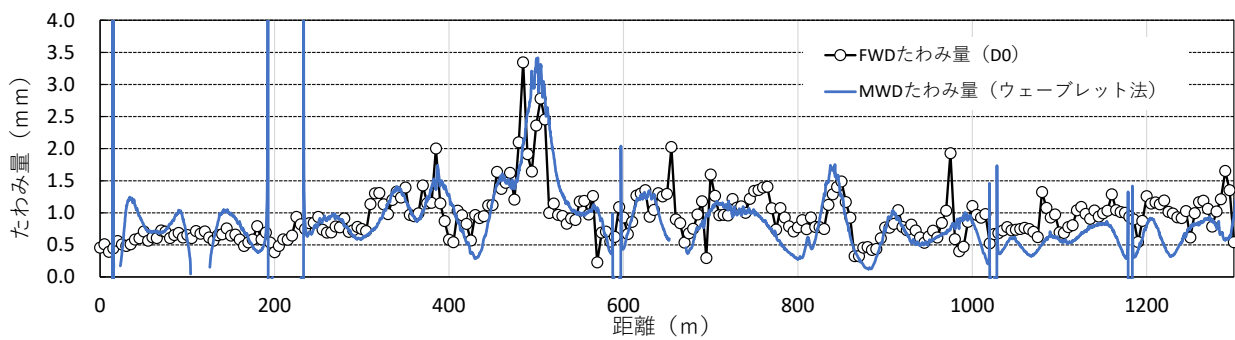


図 4.1.2.2 土木研究所外周路での測定結果 (ウェーブレット法)

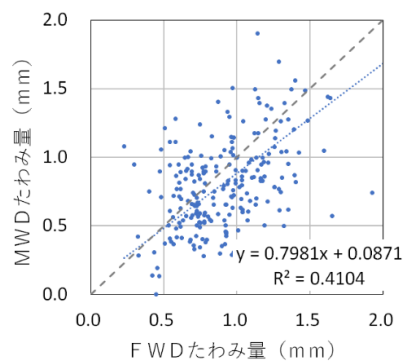


図 4.1.2.3 MWD (ウェーブレット法) と FWD の相関

4.1.3 測定間隔（測定周波数）の影響

(1) 目的

一般的にデータ取得間隔が短いほど取得データ内に含まれる高周波数の上限は大きくなり含まれる情報は増える。それに伴いデータ容量は大きくなりデータ処理にも時間を要する。そこで、効率的な計測、解析のためには取得対象に適したデータ取得間隔が必要となる。

本検証では、MWD たわみ量を算出するのに必要な MWD のデータ取得間隔を確認することを目的に、データ取得間隔の相違が MWD たわみ量に与える影響について確認した。

(2) 既存データのダウンサンプリング処理による確認

まず模擬的な方法での確認として、既存データをダウンサンプリング処理して作成したデータを用いてデータ取得間隔の相違が MWD たわみ量に与える影響について確認した。本共同研究では MWD 測定時に通常 2000Hz (0.0005sec 間隔) で計測している。この既存データをダウンサンプリング処理することで通常より測定間隔の長いデータを作成し、このデータをウェーブレット法で算出した MWD たわみ量と比較した。

1) 使用データ

2020 年 10 月 14 日（水）に土木研究所外周路で計測したデータのうち、比較的たわみ量が大きい区間を対象データとした（図 4.1.3.1）。計測は時速 20 kmで行っている。

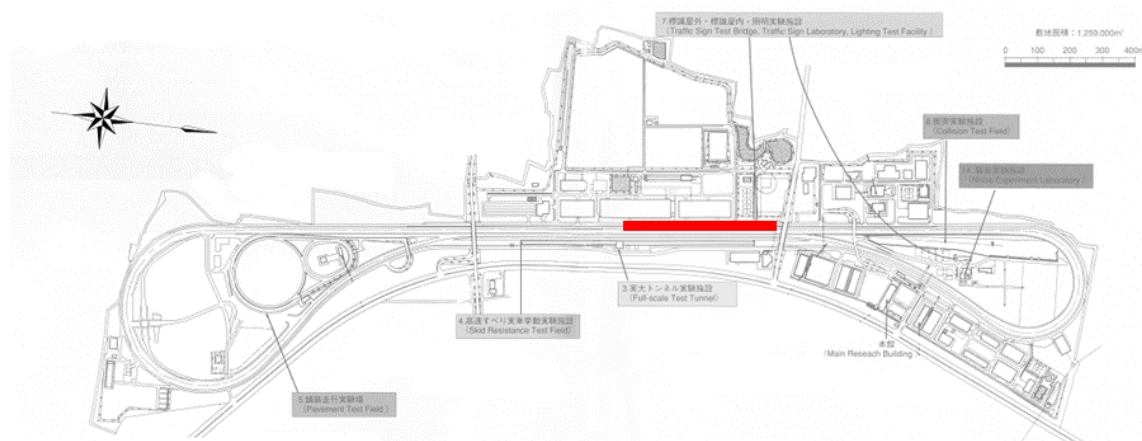


図 4.1.3.1 計測対象区間

2) データ処理

解析前のデータ処理として、2000Hz のデータを 1000Hz、500Hz、100Hz、10Hz、1Hz での計測と同じになるようにダウンサンプリング処理を行った。ダウンサンプリングを行う際は、データのエリアジング (折り返し) 誤差を除去するため、カットオフ周波数が $f_s/2$ のローパスフィルタによる処理を行ってからデータを間引いている。また、ウェーブレット法を処理するソフトウェアは 2000Hz のデータのみ処理可能であることから、ダウンサンプリングしたデータの間を線形補間し、データ上は 2000Hz と同数のレコードとなるようにした。

ダウンサンプリングの例として、ドップラ振動計 1 のデータを図 4.1.3.2 に示す。ドップラ振動計のデータでは、データ間隔が長くなるほど波形に含まれる高周波数成分が小さくなることから波形全体の振幅が小さくなっている。しかしながら、10Hz までは元波形の形状を比較的保っていた。

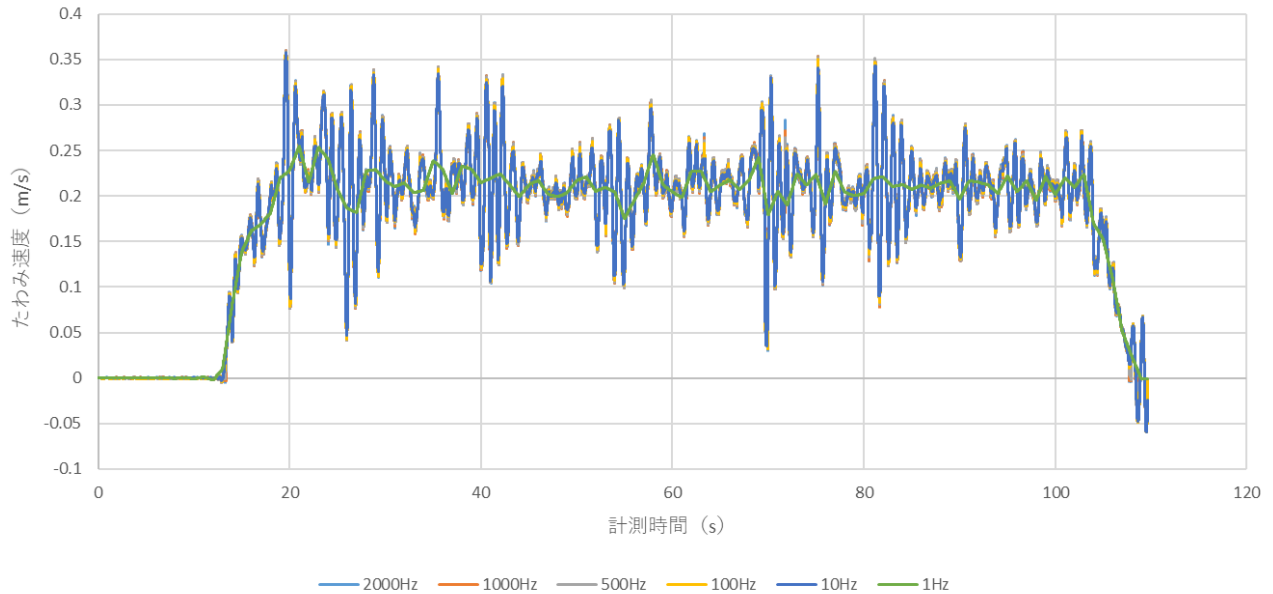


図 4.1.3.2 ドップラ振動計 1 のデータ

3) 解析結果

ダウンサンプリングしたデータを以下の条件でウェーブレット法による処理を行った。ウェーブレット法による MWD たわみ量の算出結果を図 4.1.3.3~4.1.3.5 に示す。

- ・マザーウェーブレット：Coiflets18
- ・最小レベル：12~14
- ・最大レベル：各計測データの最大

結果から、最小レベルの相違に関係なく、10Hz までは同等の MWD たわみ量が算出されることが確認された。1Hz に関しても、全体的な MWD たわみ量の傾向は得られていた。400m~520m の間のデータで、2000Hz に対する MWD たわみ量の差の RMS (Root Mean Square) を算出したところ (表 4.1.3.1)、10Hz までは 0.03 程度であり、2000Hz と全体的な差は見られなかった。1 Hz では 0.2 程度となっており、他のデータ間隔よりも 2000Hz との差が顕著であった。

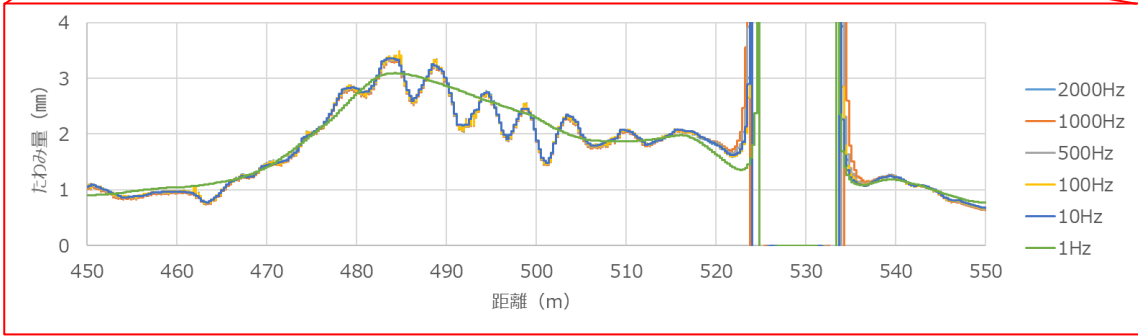
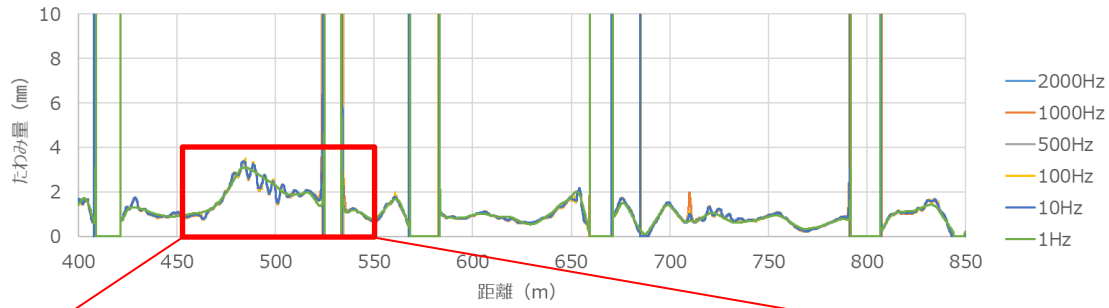


図 4.1.3.3 各データ間隔での MWD たわみ量 (ウェーブレット法、最小レベル 12)

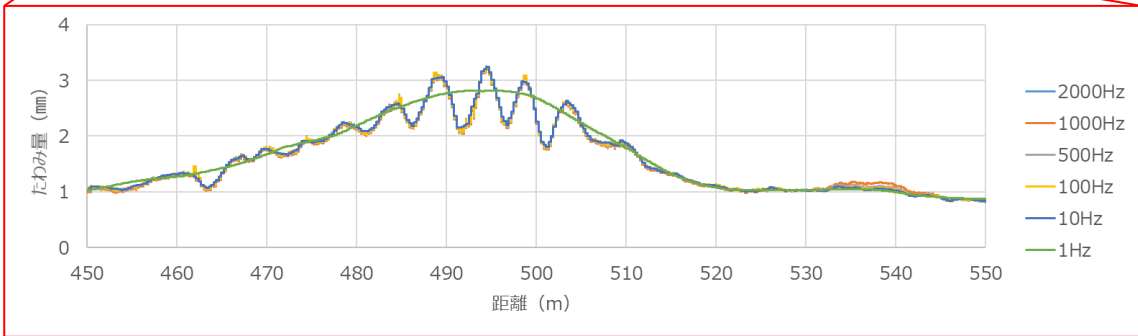
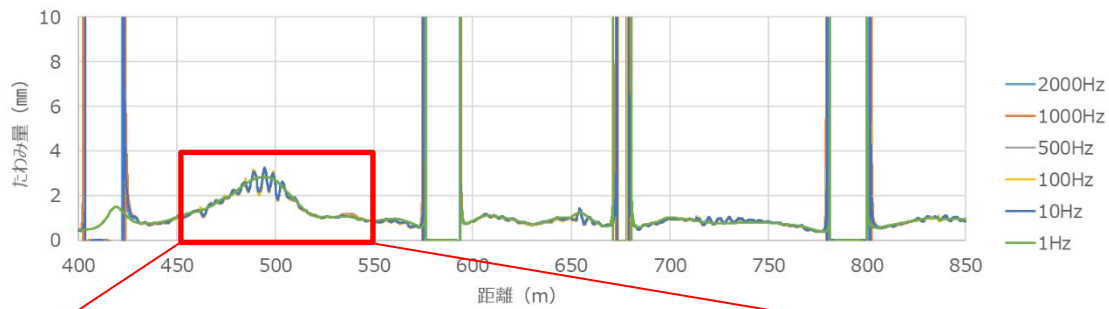


図 4.1.3.4 各データ間隔での MWD たわみ量 (ウェーブレット法、最小レベル 13)

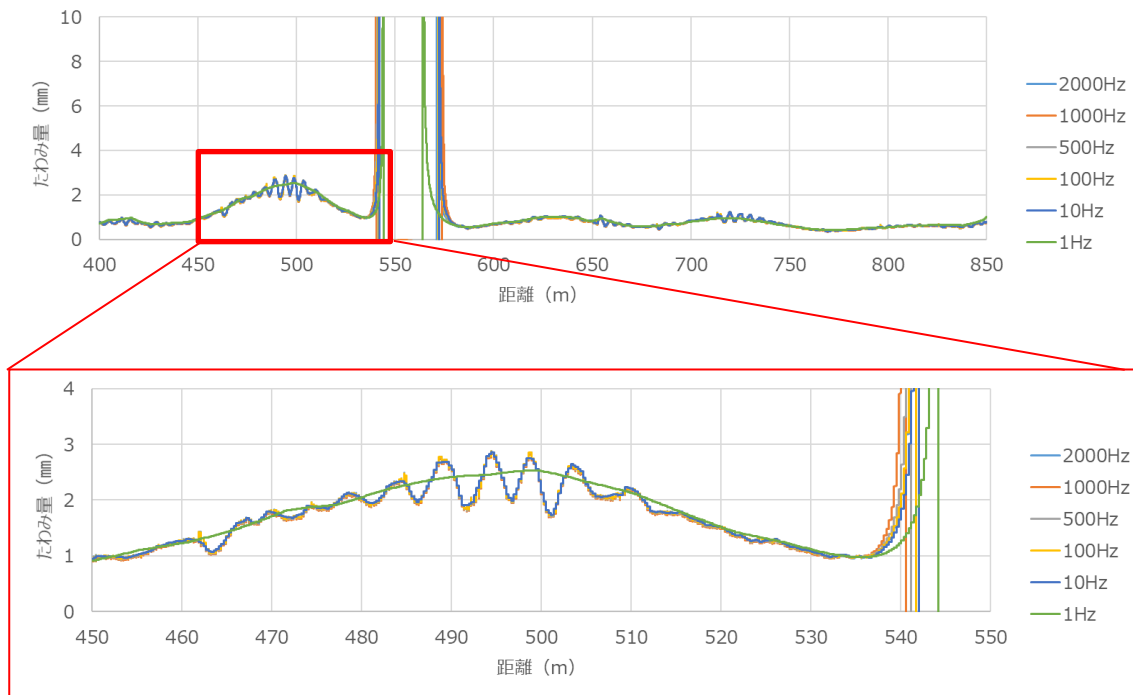


図 4.1.3.5 各データ間隔での MWD たわみ量 (ウェーブレット法、最小レベル 14)

表 4.1.3.1 2000Hz データに対する各データ間隔の MWD たわみ量の差の RMS

最小レベル	RMS (mm)				
	1000Hz	500Hz	100Hz	10Hz	1Hz
12	0.023	0.009	0.011	0.032	0.218
13	0.023	0.005	0.009	0.033	0.221
14	0.023	0.005	0.008	0.031	0.202

(3) 測定間隔を変えて取得したデータでの確認

次に、MWD の測定間隔を変えた場合での MWD たわみ量の変化を確認するため、MWD の測定間隔を変えて計測したデータからウェーブレット法で算出した MWD たわみ量を比較した。

1) 測定パターンの検討

データの測点間隔を 10 cm とした場合、サンプリング定理に基づき必要な測定間隔を整理すると表 4.1.3.2 の通りになる。対象波形が持つ周波数を正確に取得するためには対象波形の周波数の 10 倍以上でサンプリングする必要があり、2 倍未満だとエイリアジングの影響で異なる波形で取得されてしまう。時速 20 km であれば、555Hz 以上の測定間隔であれば正確に MWD たわみ量を算出でき、111Hz 以下だと異なる値で MWD たわみ量が算出されることになる。本測定では表 4.1.3.2 で整理した結果から正常に MWD たわみ量算出で

きる場合、誤差は含むが同程度の MWD たわみ量が算出できる場合、異なる値で MWD たわみ量が算出される場合が確認できるように、速度を時速 20 km と時速 40 km の 2 パターン、測定間隔を 100Hz、250Hz、1000Hz、1500Hz の 4 パターン、合計 8 パターンでの測定を行った。上記パターンを整理すると表 4.1.3.3 の通りとなる。

表 4.1.3.2 測点間隔が 10 cm の場合の計測速度に対する測定間隔

計測速度		10 cm で計測するのに必要な測定間隔 (Hz)	最低限必要な測定間隔 (Hz)	サンプリング定理を満たす測定間隔 (Hz)
時速 (km/h)	秒速 (m/s)			
60	16.7	167	334	1670
50	13.9	139	278	1390
40	11.1	111	222	1110
30	8.3	83	166	830
20	5.6	56	112	560

表 4.1.3.3 測定パターンと計測間隔の妥当性

計測間隔	取得データの計測間隔の妥当性	
	20 km/h	40 km/h
100Hz	△	×
250Hz	○	△
500Hz	○	○
1000Hz	○	○
1500Hz	○	○

2) 現場測定

MWD の測定を 2021 年 7 月 30 日に土木研究所外周路で行った。対象区間は図 4.1.3.6 に示す比較的たわみ量が多い区間とした。当日の天候は曇りであった。

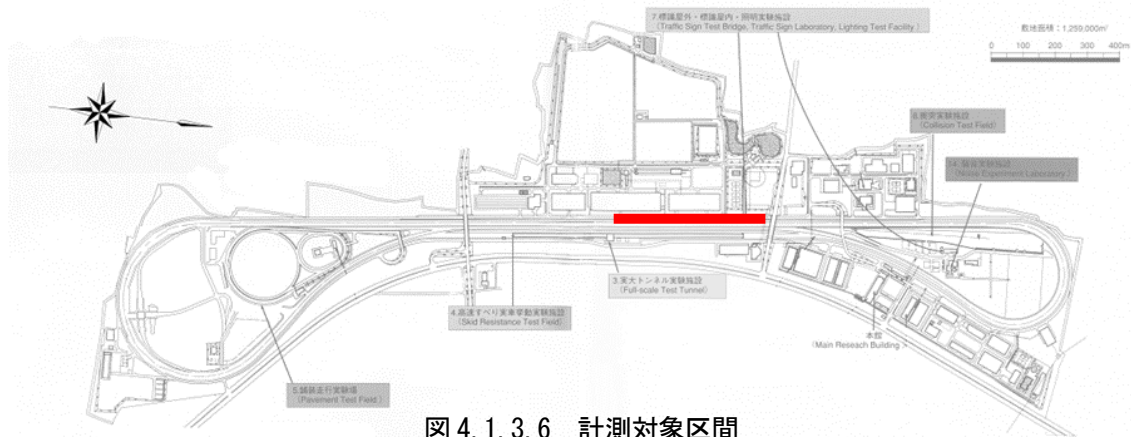


図 4.1.3.6 計測対象区間

3) 測定データ

測定データの測定間隔の影響を確認するため測定データの比較を行った。比較例として、ドップラ振動計 1 (車両進行方向最前部に位置するドップラ振動計) のデータを図 4.1.3.7、図 4.1.3.8 に示す。妥当性検討で異なる値になると想定していた 40 km/h の 100Hz で他の測定間隔よりも振幅が小さい箇所がみられたが、全体的には同じ波形を示しており、有意な差がみられなかった。

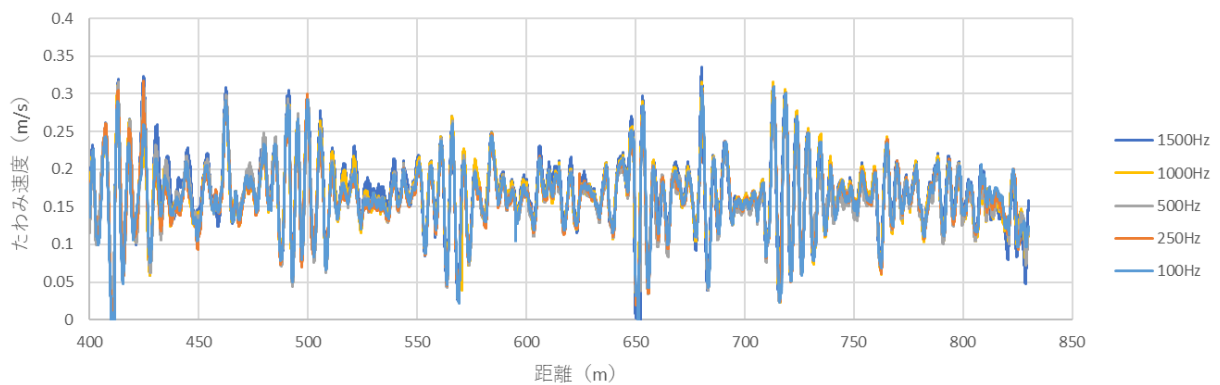


図 4.1.3.7 ドップラ振動計 1 のデータ (測定速度 20 km/h)

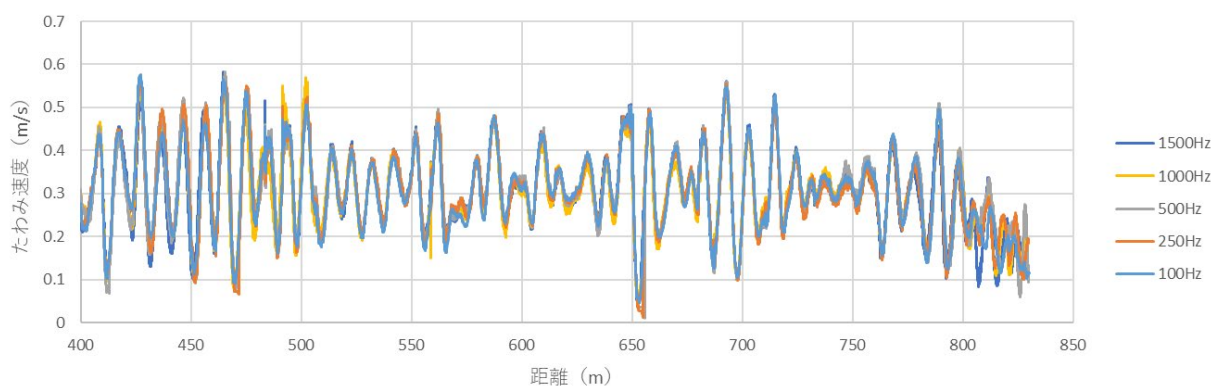


図 4.1.3.8 ドップラ振動計 1 のデータ (測定速度 40 km/h)

4) 解析結果

測定データを以下の条件でウェーブレット法による処理を行った。ウェーブレット法による MWD たわみ量の算出結果を図 4.1.3.9～図 4.1.3.12 に示す。

- ・マザーウェーブレット：Coiflets18
- ・最小レベル：13、14
- ・最大レベル：各計測データの最大

結果から、20 km/h、40 km/h とも測定間隔による MWD たわみ量に大きな相違はなく、妥当性検討で異なる値になると想定していた 40 km/h の 100Hz においても MWD たわみ量は他の測定間隔と同傾向を示していた。40 km/h で 10 cm での測定を想定した場合、サンプリング定理に基づく最低でも 222.22Hz での測定が必要となるが、取得対象路面から得られる測定データに含まれる周波数が、単純な 40 km/h で 10 cm での測定間隔 (111.11Hz) と同程度である 100Hz でも必要な周波数情報が得られたためと考えられる。そのため、大きな相違がなかったと推察される。

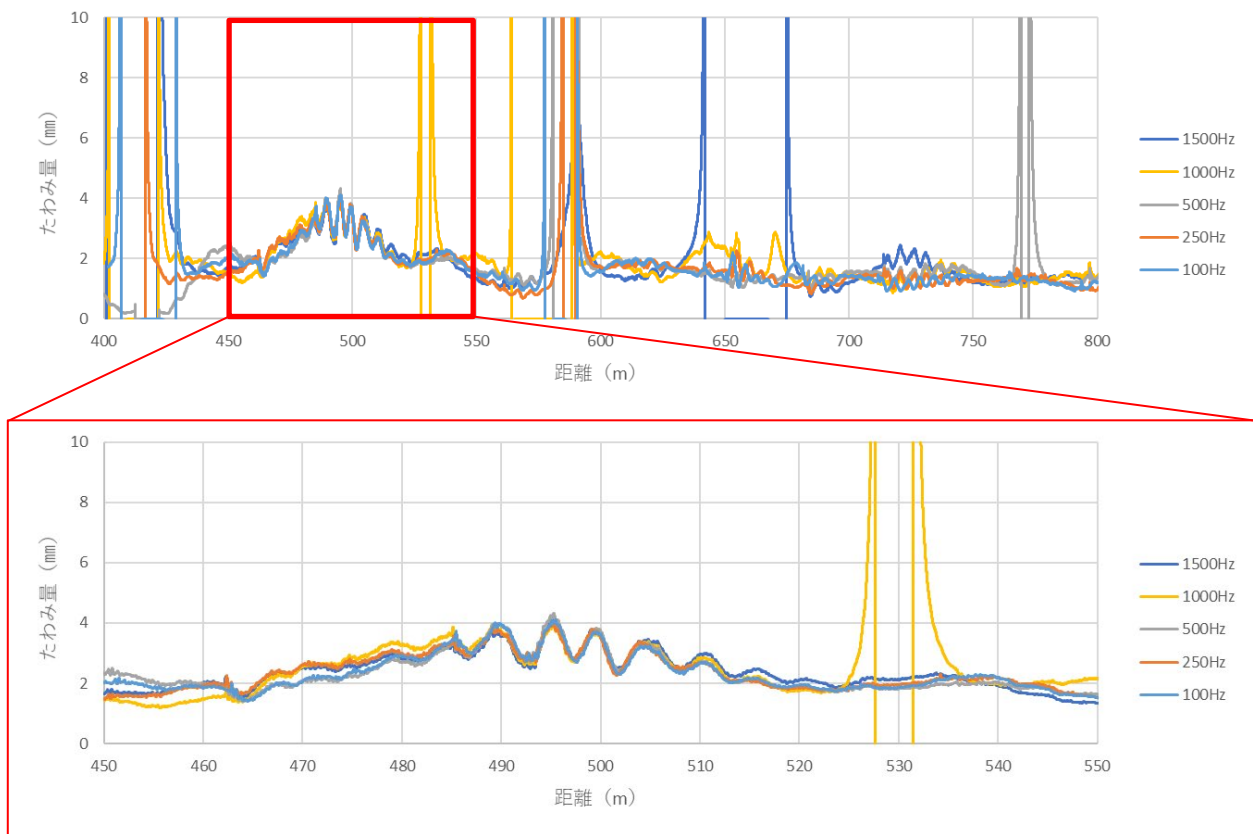


図 4.1.3.9 各データ間隔での MWD たわみ量 (測定速度 20 km/h、ウェーブレット法、最小レベル 13)

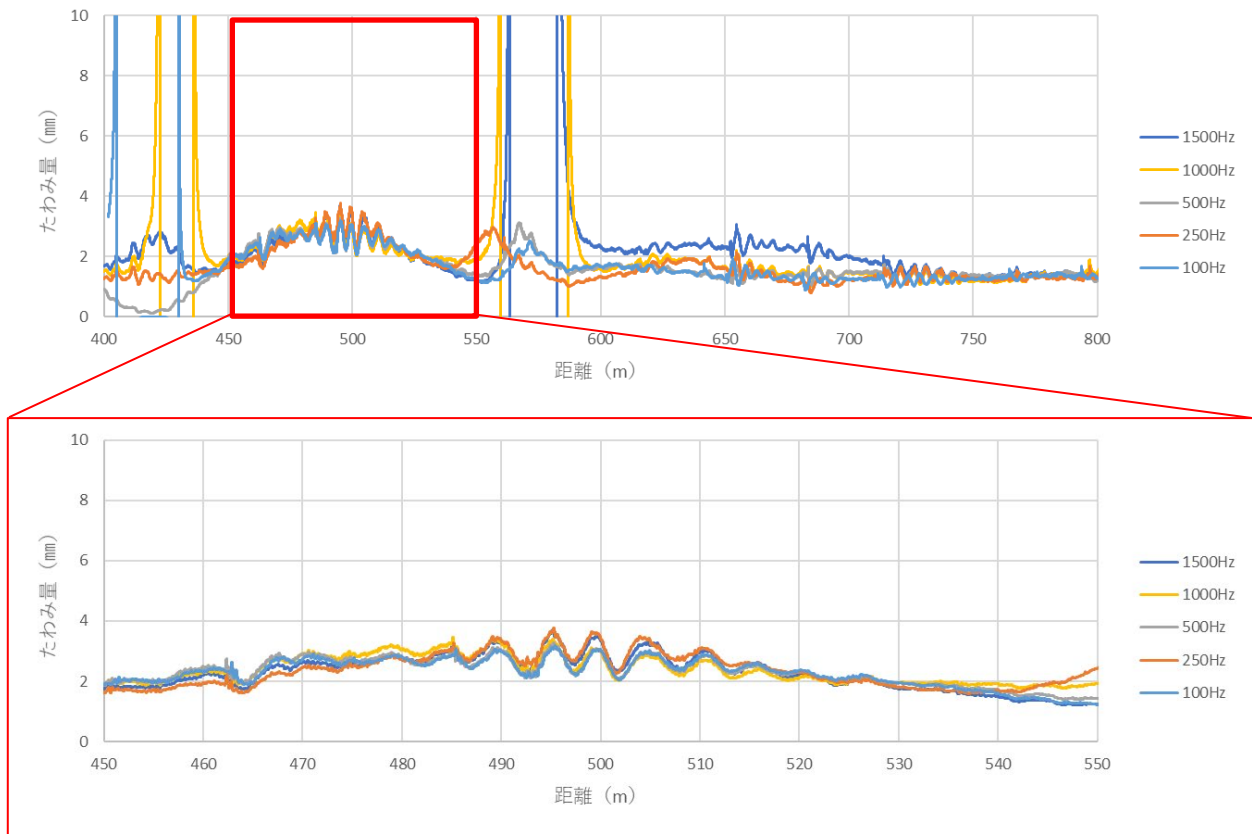


図 4.1.3.10 各データ間隔での MWD たわみ量 (測定速度 20 km/h、ウェーブレット法、最小レベル 14)

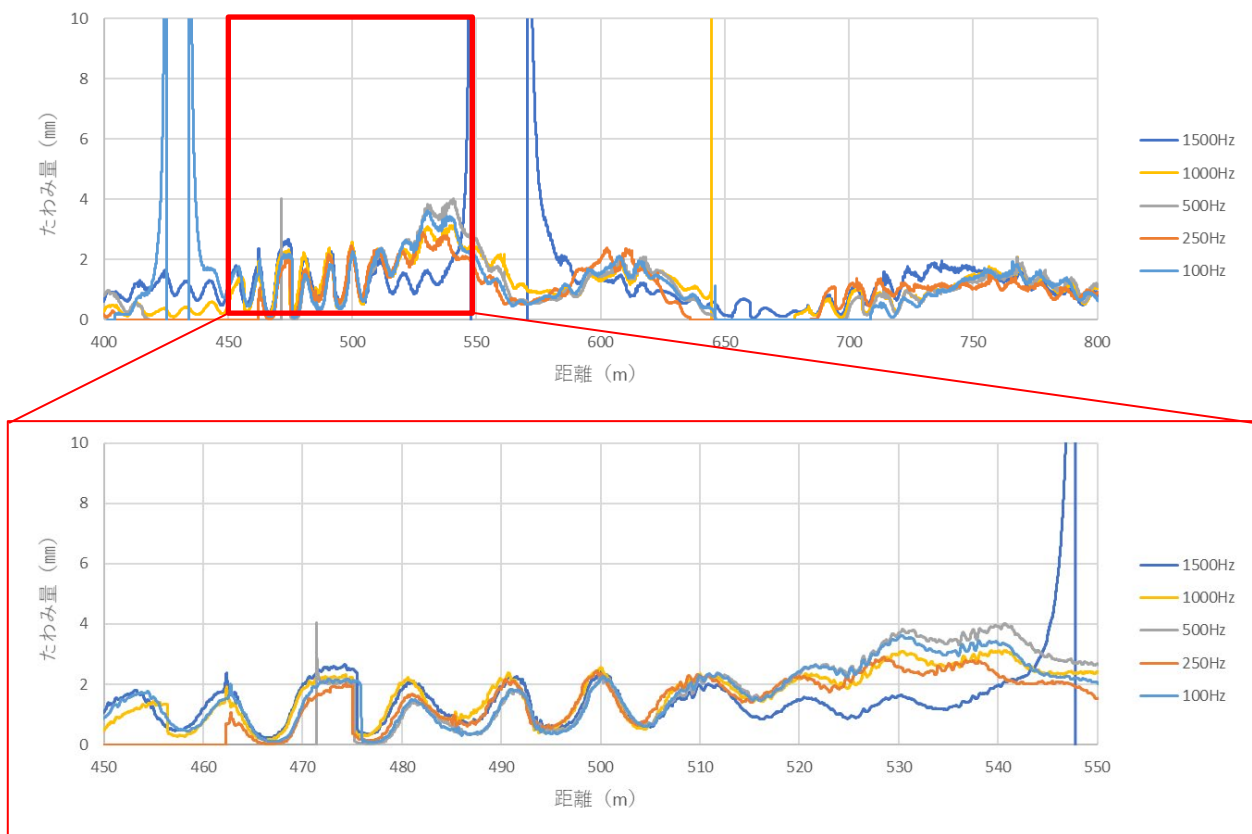


図 4.1.3.11 各データ間隔での MWD たわみ量 (測定速度 40 km/h、ウェーブレット法、最小レベル 13)

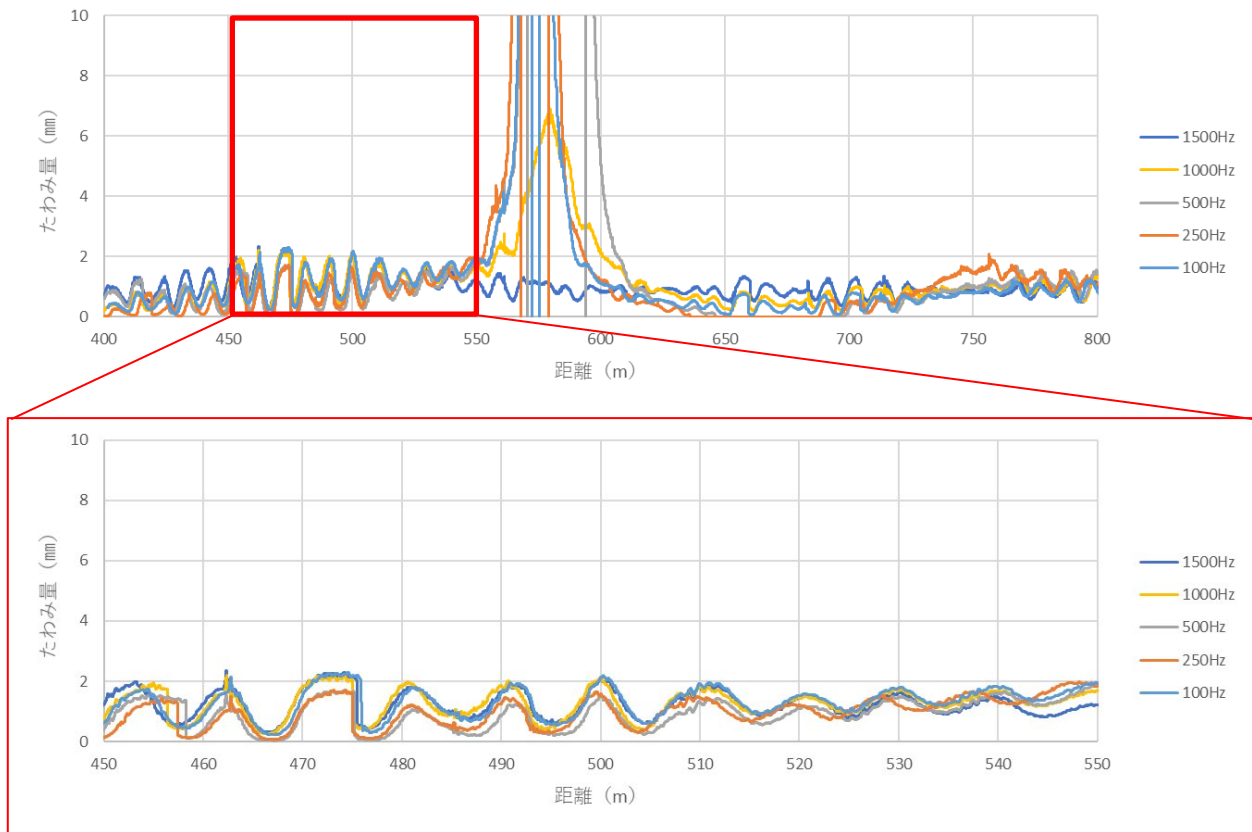


図 4.1.3.12 各データ間隔での MWD たわみ量（測定速度 40 km/h、ウェーブレット法、最小レベル 14）

（４）まとめ

データ取得間隔の相違が MWD たわみ量に与える影響について確認した結果、以下の知見を得た。

- ・ダウンサンプリングによるデータ取得間隔を変えて解析を行った結果、10Hz までは 2000Hz と同等の MWD たわみ量を算出することが可能である
- ・20 km/h、40 km/h で異なる測定間隔で取得したデータを解析した結果、サンプリング定理に基づき異なる値になると想定していた 40 km/h の 100Hz においても MWD たわみ量は他の測定間隔と同傾向を示していた。
- ・取得対象路面から得られる測定データにおいては、波形に含まれる周波数によっては、速度に応じた単純測定間隔と同程度測定間隔でも必要な周波数情報を取得される。

4.1.4 速度の影響

走行速度が解析結果に及ぼす影響を調査するため、土木研究所外周路において車速を変化させ、一定速度で走行し測定を行った。

車速 20km/h、40km/h のデータに対して、ウェーブレット解析を行った。ウェーブレット解析の高周波除去レベルは 13、14 の二通りとした。ドップラ振動計の観測値 u から車速成分 $V\sin\theta$ を除いた値に対してウェーブレット除去を行った結果を図 4.1.4.1 に示す。ウェーブレットによりノイズが除去された波形を見ると、20km/h_除去レベル 14 の波形は、40km/h におけるレベル 13 と、より近い形状であることを確認した。

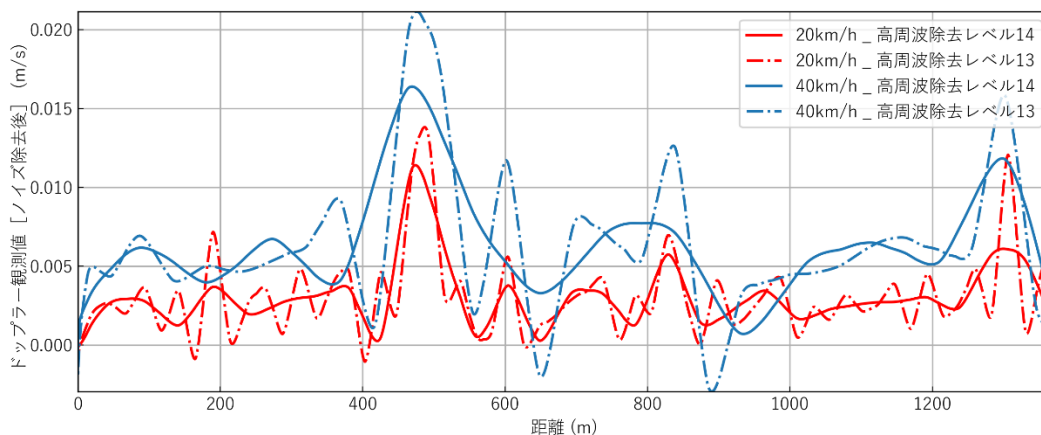


図 4.1.4.1 車速と振動除去レベルの関係

上記事例にて、実際にたわみ量を算出した結果を図 4.1.4.2 に示す。たわみ量は荷重補正を行ったものを表示している。こちらも図 4.1.4.1 と同様に、20km/h_除去レベル 14 の波形は、40km/h におけるレベル 13 と、より近い形状であることがわかる。

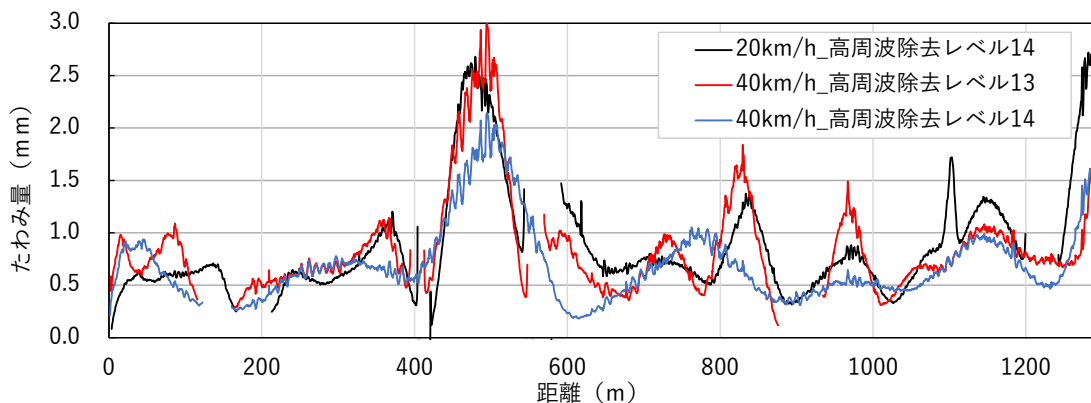
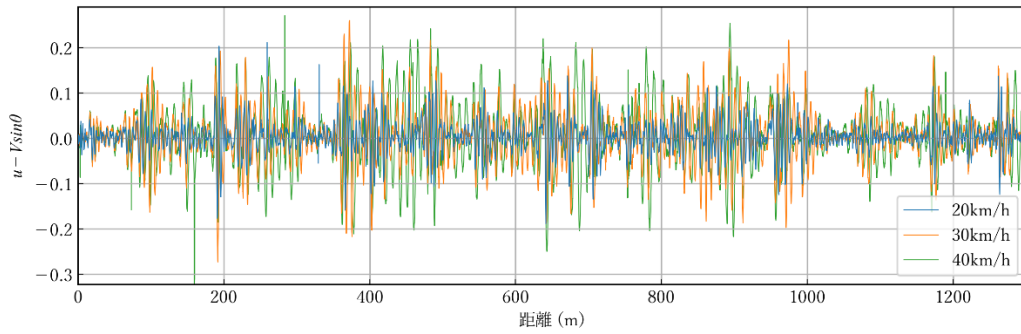
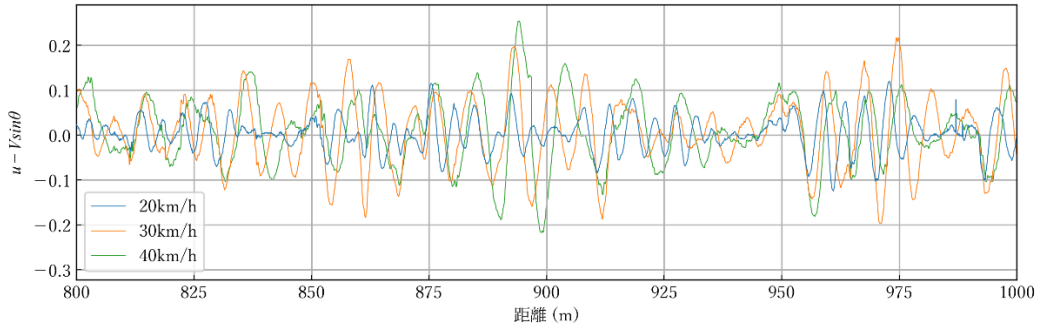


図 4.1.4.2 車速と振動除去レベルの関係

ここで、ドップラ振動計の観測値 u から車速成分 $V\sin\theta$ を除いた値（ソフトによる振動除去をする前の値）と走行距離との関係を図 4.1.4.3 に、データ数との関係を図 4.1.4.4 に示す。



(a) 土木研究所外周路 0~1300m のドップラ振動計観測値



(b) 土木研究所外周路 800~1000m のドップラ振動計観測値

図 4. 1. 4. 3 ドップラ振動計観測値と走行距離の関係

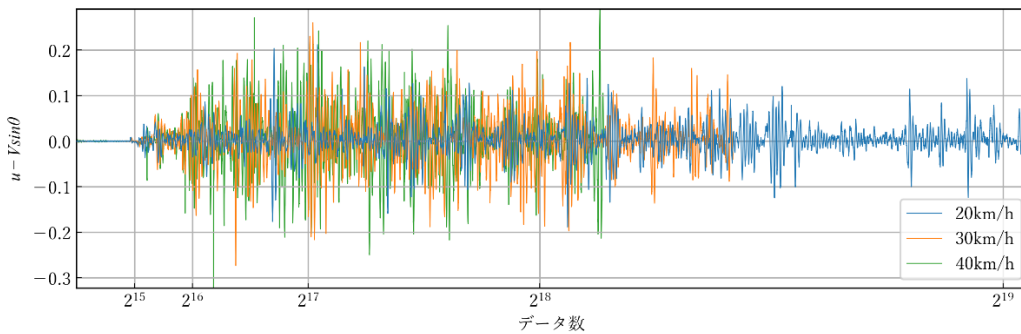
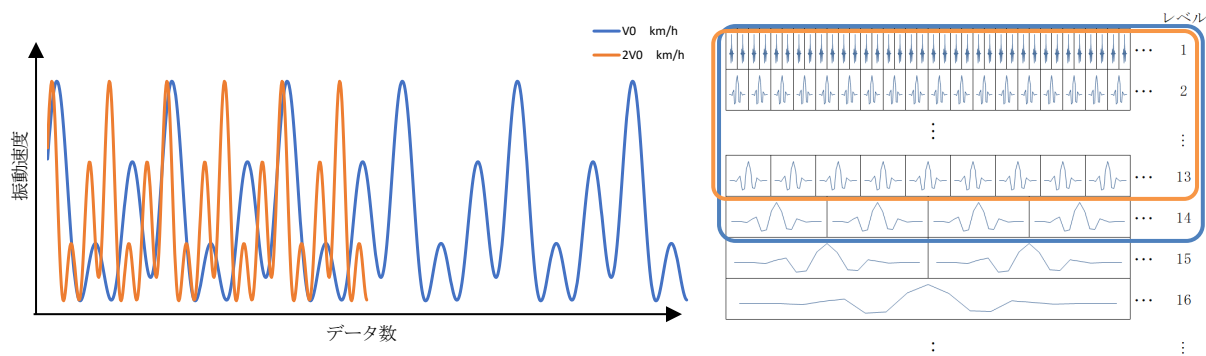


図 4. 1. 4. 4 ドップラ振動計観測値と取得データ数の関係

図 4. 1. 4. 3 より、振動除去前の観測値において、振幅の大小はあるものの各位置における振動の周期は速度に依らずおおよそ同様の傾向を示す。一方、図 4. 1. 4. 4 のようにデータ数毎に整列すると、当然高速走行における振動の周期は短くなる。

ウェーブレット法の解析において、除去するレベルは 2 の N 乗毎に設定されている。マザーウェーブレットのサイズはレベルごとにスケールされるため、振動周期の増減により除去するレベルは変化すると考えられる (図 4. 1. 4. 5)。



4.1.4.5 ウェーブレットによるノイズ除去イメージ

以上の結果より、

- ・ ウェーブレットによるノイズ除去手法は速度による影響を受ける。
- ・ 定速走行を行うことで、ノイズを除去しやすくなる

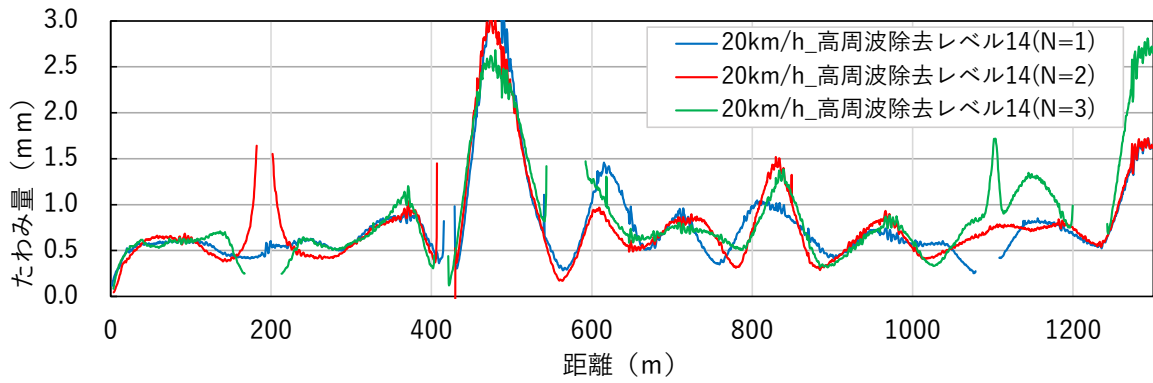
ということが分かった。

ウェーブレット法は速度により影響を受けるため、定速で走行することが望ましく、走行速度に応じて適切な高周波除去レベルを設定することで、走行速度毎のたわみ量を算出することができると考えられる。

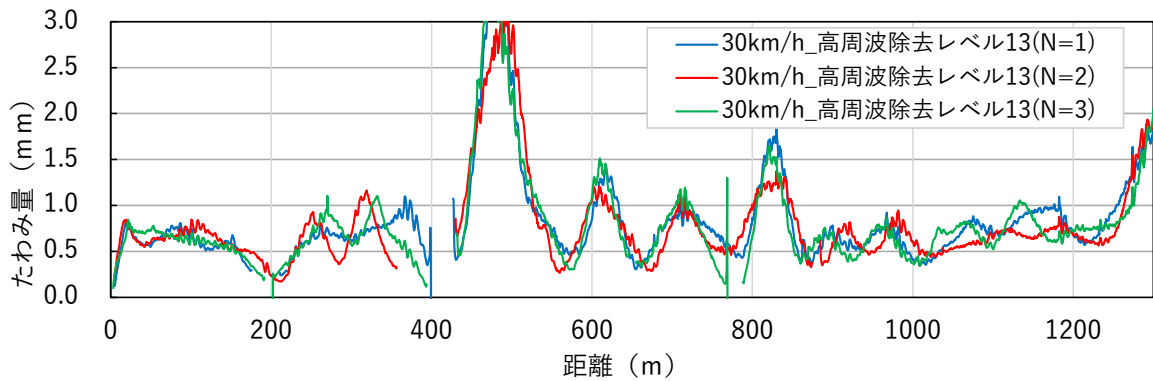
図 4.1.4.6 に土木研究所外周路において、ウェーブレット法により算出した測定結果を示す。測定及び解析の条件は以下とした。

- ・ 時速 20km/h - 除去レベル 14 - 測定回数 3 回
- ・ 時速 30km/h - 除去レベル 14 - 測定回数 3 回
- ・ 時速 40km/h - 除去レベル 13 - 測定回数 3 回
- ・ 各速度における 3 回の平均

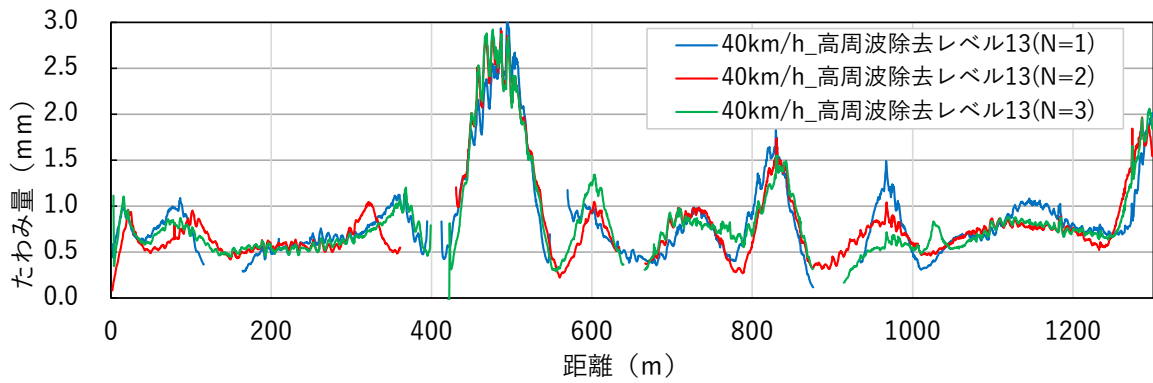
図 4.1.4.6 (d) より、ノイズ除去レベルを適切に設定することで車速 20km/h、30km/h、40km/h でのたわみ測定結果を等しく算出できた。



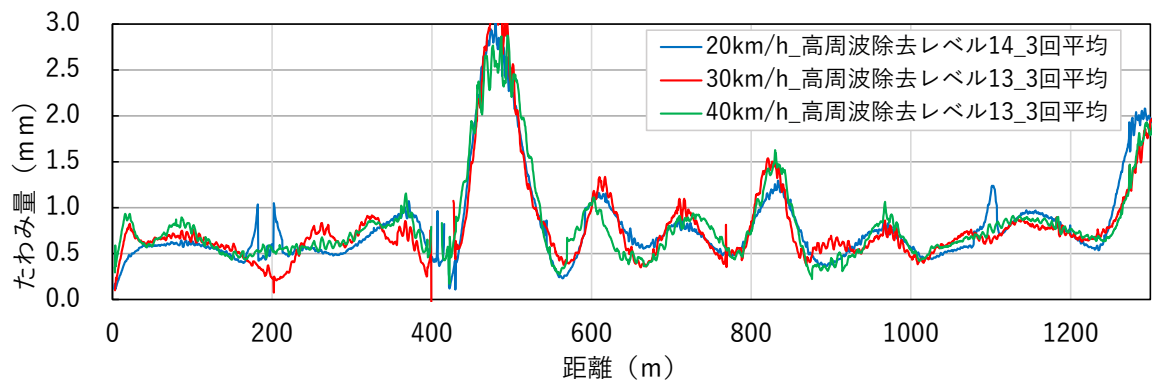
(a) 20km/h (除去レベル 14)



(b) 30km/h (除去レベル 14)



(c) 40km/h (除去レベル 13)



(d) 各速度における平均

4.1.4.6 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断図(荷重補正_ウェーブレット法)

4.1.5 温度の影響

測定時期の異なる MWD たわみを比較するためには、標準状態における MWD たわみを求める必要がある。測点区間での MWD 測定により得られたたわみとアスコン層の温度を用いて、MWD 最大たわみ量 a の温度補正についての検討を行った。

(1) 測定概要

測定箇所：土木研究所外周路 1300m

測定日時、測定温度：表 4.1.5.1 参照

表 4.1.5.1 に本調査の測定概要を示す。本調査ではアスコン層温度に対して複数条件で測定を行った。

なお、車速は 3 水準、測定回数は 3 回とした。

MWD 測定と同時期に FWD 測定を実施し、FWD の温度条件によるたわみ量変化との差異を観測し考察を行った。FWD については、起点から 400m～800m 地点の特にたわみ量の変動が大きな範囲とし、5m 間隔で測定を行った。

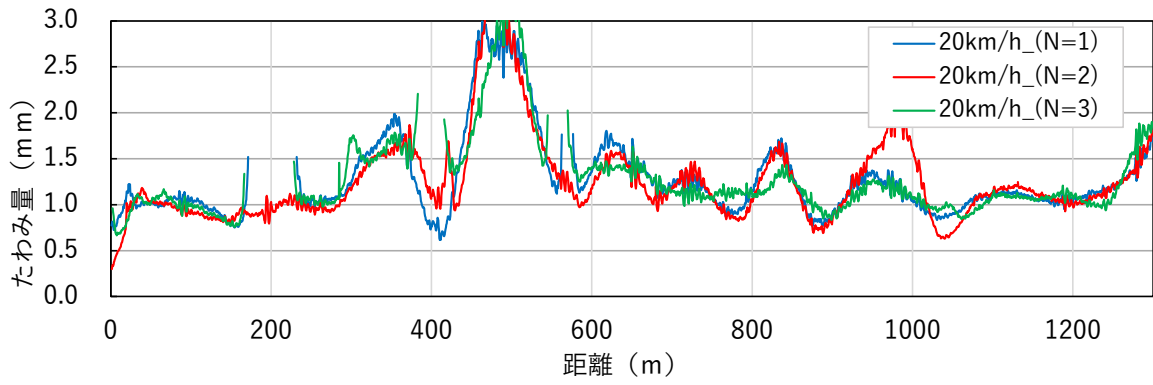
表 4.1.5.1 土木研究所外周路における MWD 測定概要

測定日時	時刻測定	目標表面温度	測定表面温度	車速 (km/h)	測定回数
2020/8/21	10:00-12:00	高温時 (45°C程度)	約55°C程度	20 30 40	N=3
2020/8/24	14:00-16:00				
2020/10/13	8:00-10:00	標準温度 (20°C程度)	約30°C程度		
2020/10/15	8:00-10:00				
2021/1/6	8:00-10:00	低温時 (5°C程度)	約10°C程度		
2021/1/7	8:00-10:00				

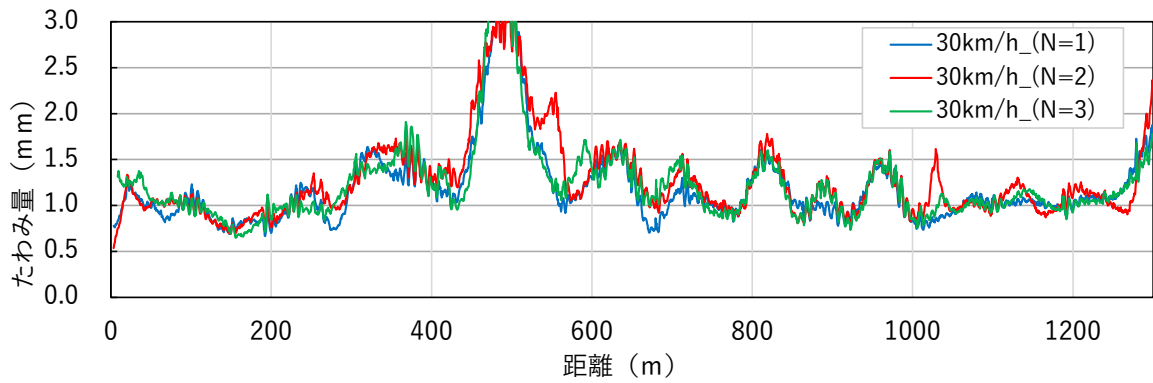
(2) 測定結果

1) 各温度条件における MWD たわみ量

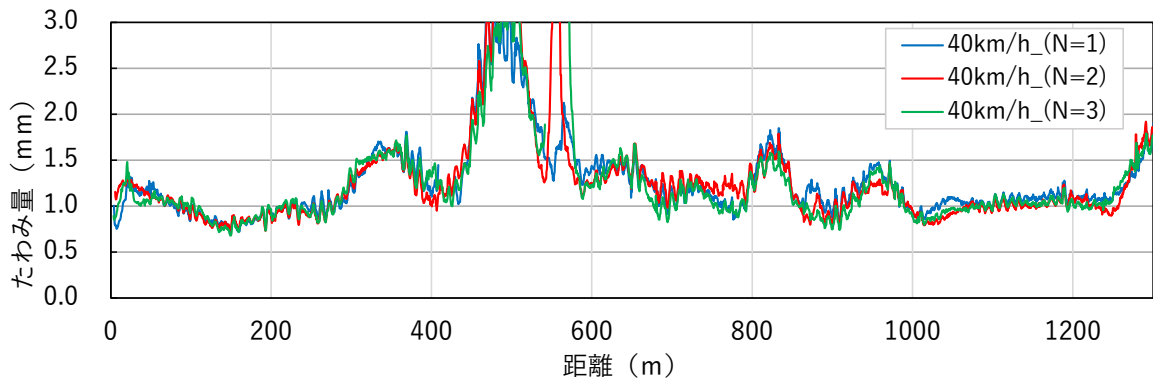
各温度条件におけるウェーブレット法による MWD たわみ縦断図を図 4.1.5.1～図 4.1.5.3 に示す。各速度条件、各測定回数によるバラツキは大きいものの、全体のたわみ量の傾向は概ね一致していたため、図 4.1.5.4 では全データ(速度 3×回数 3=9 データ)の平均を用いて表示している。



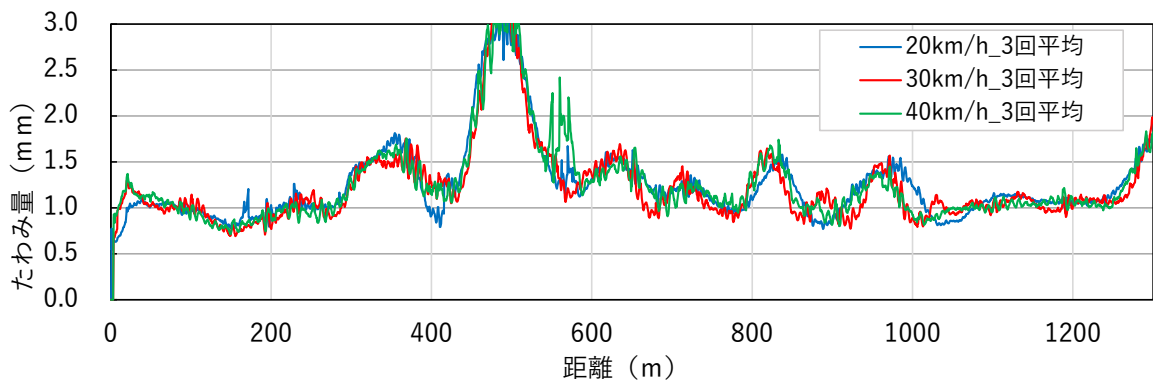
(a) 20km/h



(b) 30km/h

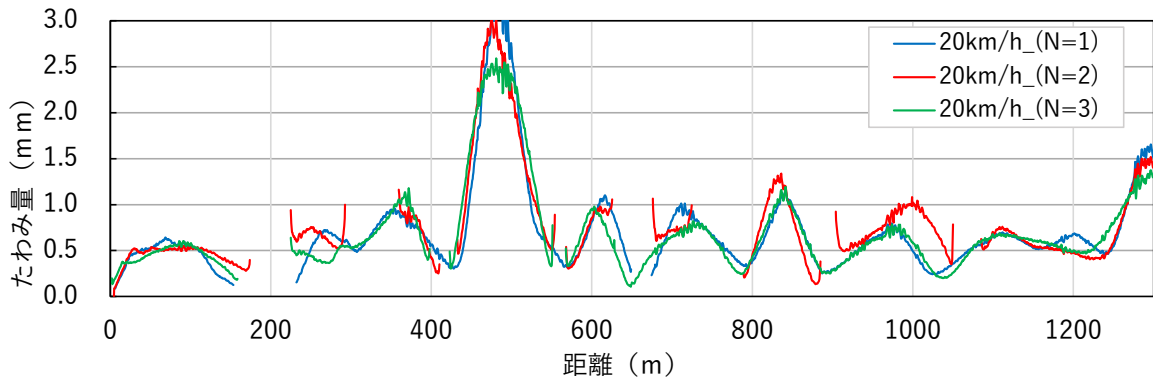


(c) 40km/h

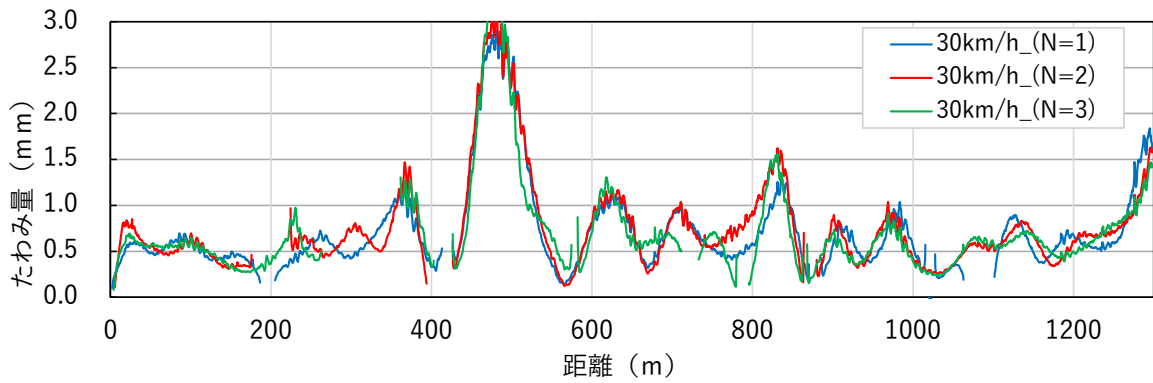


(d) 各速度平均および全速度平均

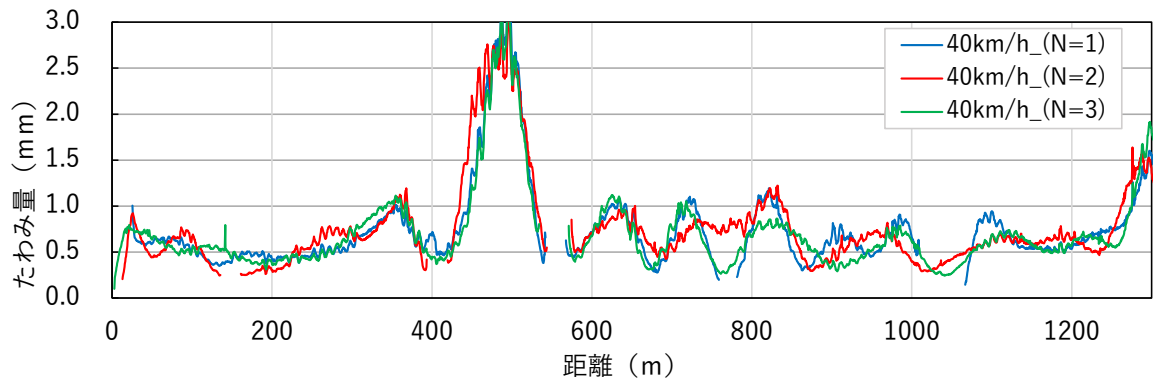
図 4.1.5.1 高温時(約 55°C) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断面図



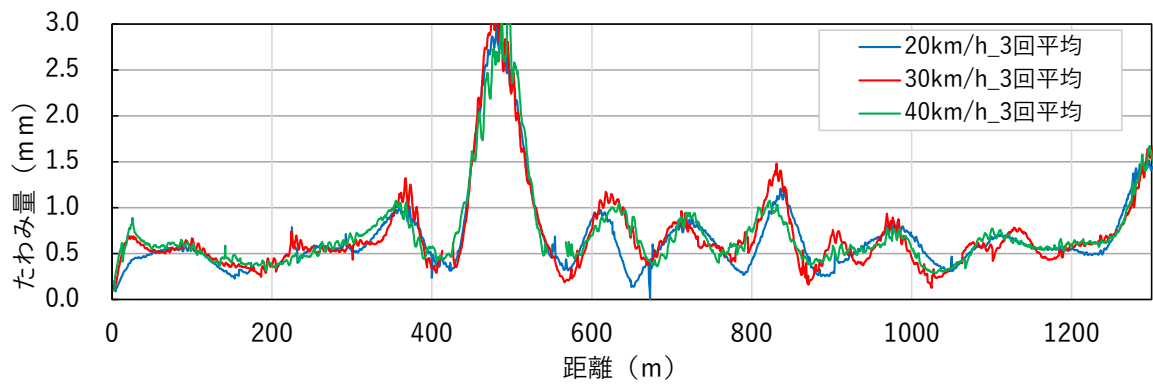
(a) 20km/h



(b) 30km/h

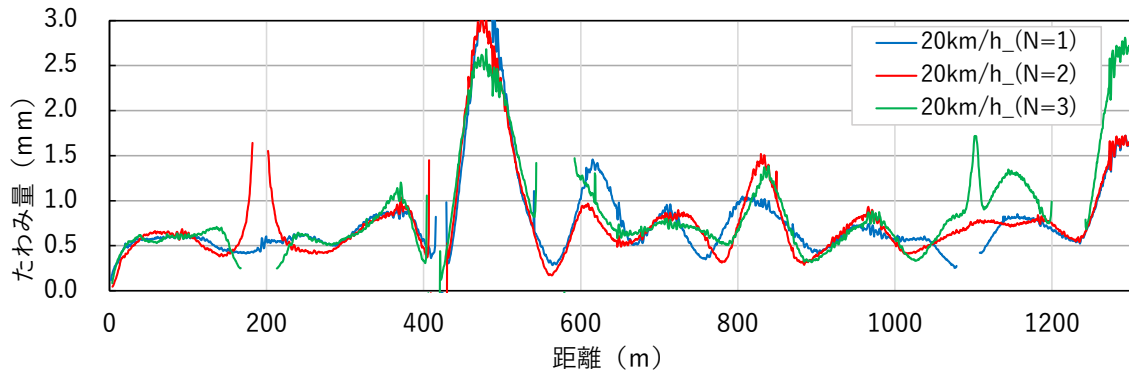


(c) 40km/h

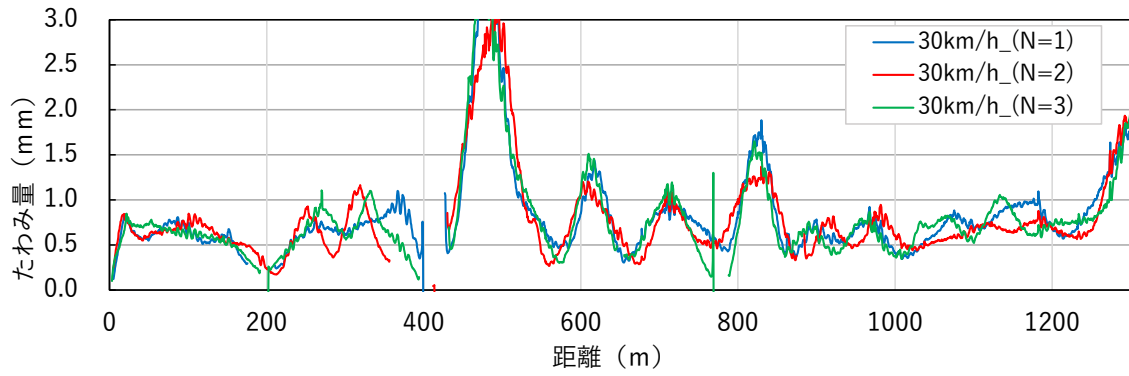


(d) 各速度平均および全速度平均

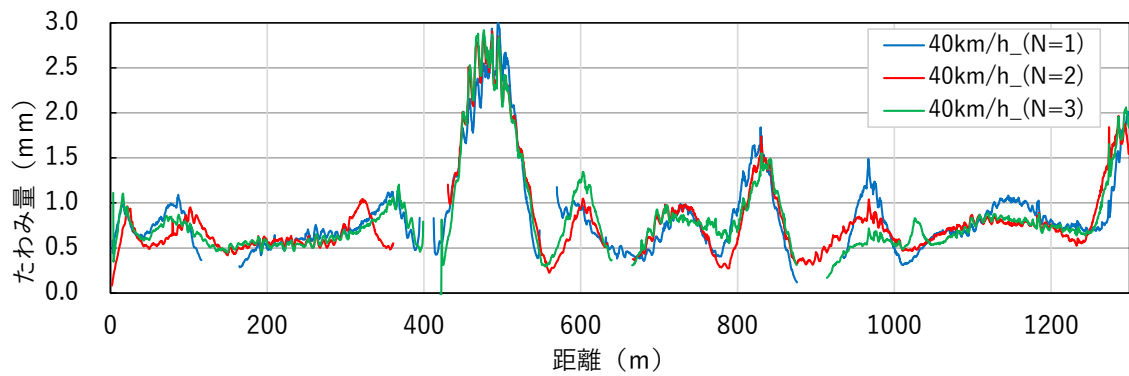
図 4.1.5.2 平温時(約 30°C) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断面図



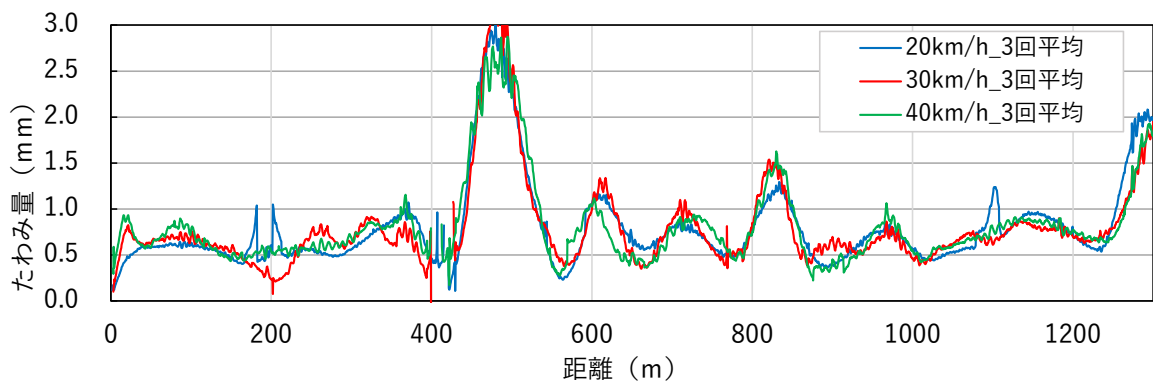
(a) 20km/h



(b) 30km/h



(c) 40km/h



(d) 各速度平均および全速度平均

図 4.1.5.3 低温時(約 10°C) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断面図

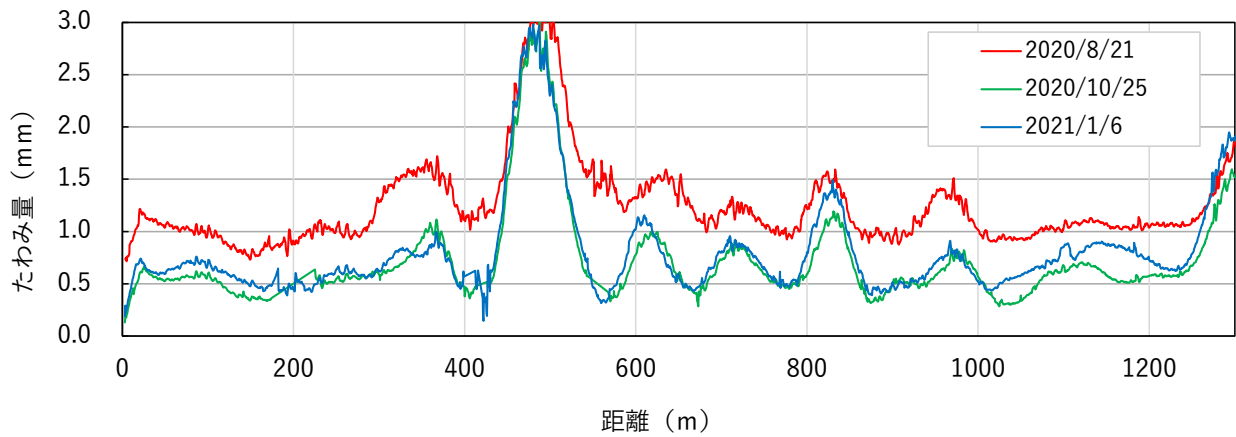


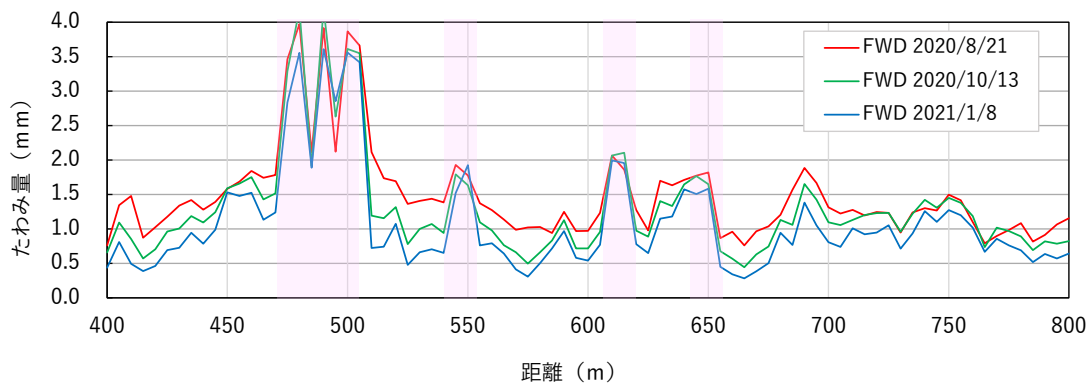
図 4.1.5.4 気温条件ごとの MWD たわみ縦断面図 (荷重補正_ウェーブレット法)

図 4.1.5.4 より、MWD たわみ量も FWD たわみ量と同様に温度の影響により増減することがわかる。

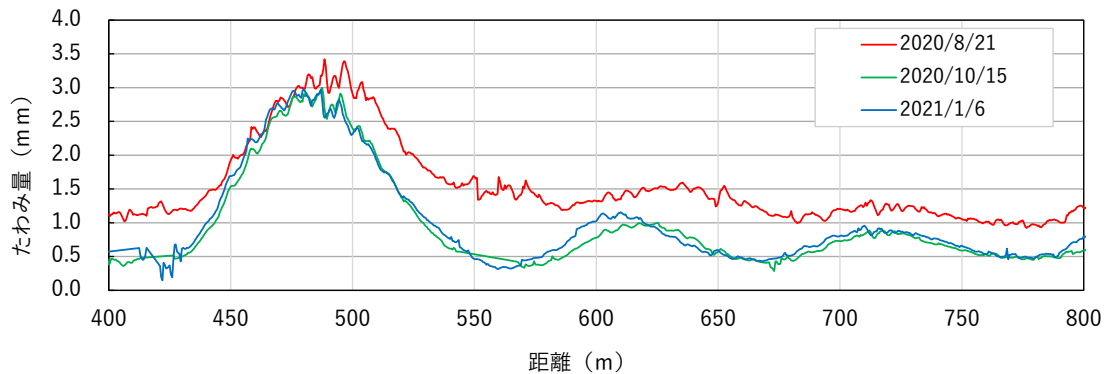
高温時の測定データはたわみ量が最も大きく出ている一方、標準温度と低温時の差が殆どない、もしくは低温時のたわみの方が大きく算出される箇所があった。

この理由として、ウェーブレットのノイズ除去によりデータが平滑化され、微小な差が見えづらくなってしまったことが一因として考えられる。

ウェーブレット法による測定結果は温度条件の影響を受けることがわかったものの、温度補正式を推測するのは現状の知見では困難であると考えられる。



(a) FWD たわみ縦断面図 (荷重補正)



(b) MWD たわみ縦断面図 (荷重補正_ウェーブレット法)

図 4.1.5.5 荷重補正後-たわみ量比較

4.1.6 走行位置の影響

(1) 目的

MWD では走行計測のため、走行中のハンドル操作などで蛇行が発生し、測線位置に対してズレて計測することがある。その場合、同じ測線を計測しても測線のズレにより計測値にばらつきが発生することになる。

本調査では、走行計測による計測値のばらつきの原因となる走行時の測線位置のズレが MWD たわみ量に与える影響についてウェーブレット法による結果から確認する。

(2) 使用データ

土木研究所外周路で実施した計測データを用いた。対象区間は図 4.1.6.1 に示す比較的たわみ量大きい区間とした。

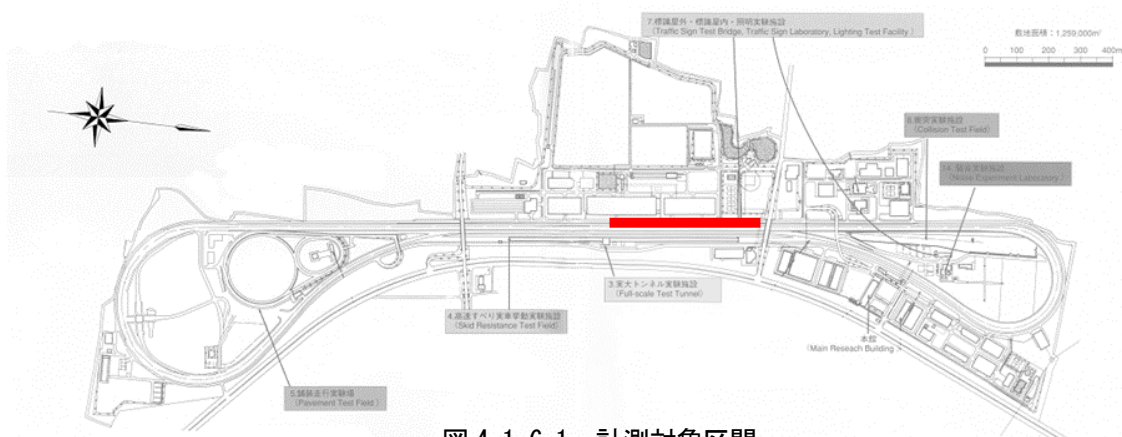


図 4.1.6.1 計測対象区間

1) 計測日時

計測は 2020 年 10 月 14 日 (水) に実施した。当日の天候は曇り時々晴れであった。実施状況を写真 4.1.6.1 に示す。

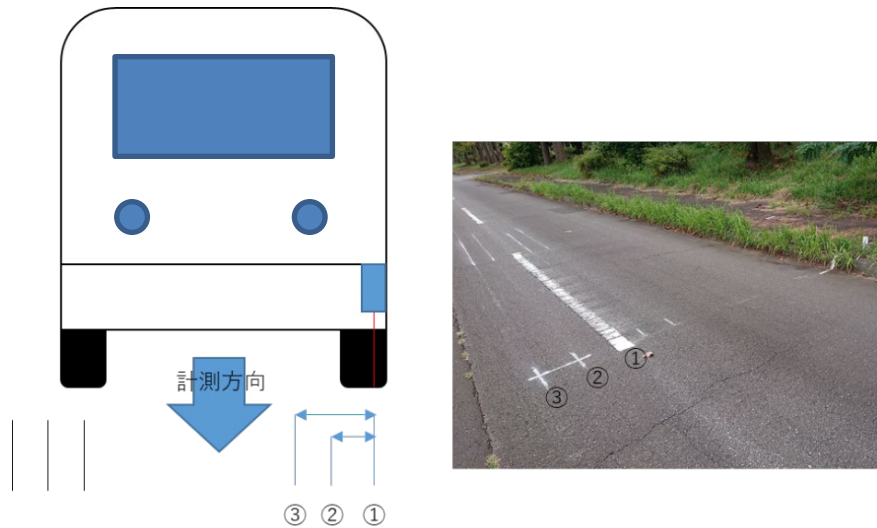


写真 4.1.6.1 計測状況

2) 計測方法

たわみ量が既知の場所において、測線をずらして計測した。当初は左右に同じ間隔でずらして設置する予定であったが、左側は路肩が近く、計測できないことから、右側のみに設置することとした。

正しい計測線に対して、右方向にタイヤ1個ずれた場合（+30 cm）、タイヤ2個ずれた場合（+60 cm）の計測を行った。計測模式図を図4.1.6.2に示す。計測は時速20 kmで各測線5回行った。



- 計測は下記3パターンについて各5回計測
- ① FWDと同一測線
 - ② 進行方向右にタイヤ1つ分ずれた測線（30cm）
 - ③ 進行方向右にタイヤ2つ分ずれた測線（60cm）

図4.1.6.2 計測模式図

(3) 解析結果

1) MWD たわみ量の比較

計測したデータを用いて、以下の条件でウェーブレット法による解析を行った。解析結果はFWDと比較しやすいように、FWDの測点間隔（400～800m、5m間隔）に近い点のたわみ量を抽出している。解析の結果を図4.1.6.3～図4.1.6.5に示す。

- ・マザーウェーブレット：Coiflets18
- ・最小レベル：12～14
- ・最大レベル：各計測データの最大

解析の結果、解析波形には局所的に解析不能な箇所がみられた。また、最小レベルが12の場合が最もFWDのたわみ量に近い波形を有していた。測線位置0 cmと比較すると、470～510mのFWDたわみ量が比較的大きい箇所については測線が離れるほどたわみ量の低減がみられたが、700m～750mのように比較的小さい箇所については測線による大きな違いは見られなかった。

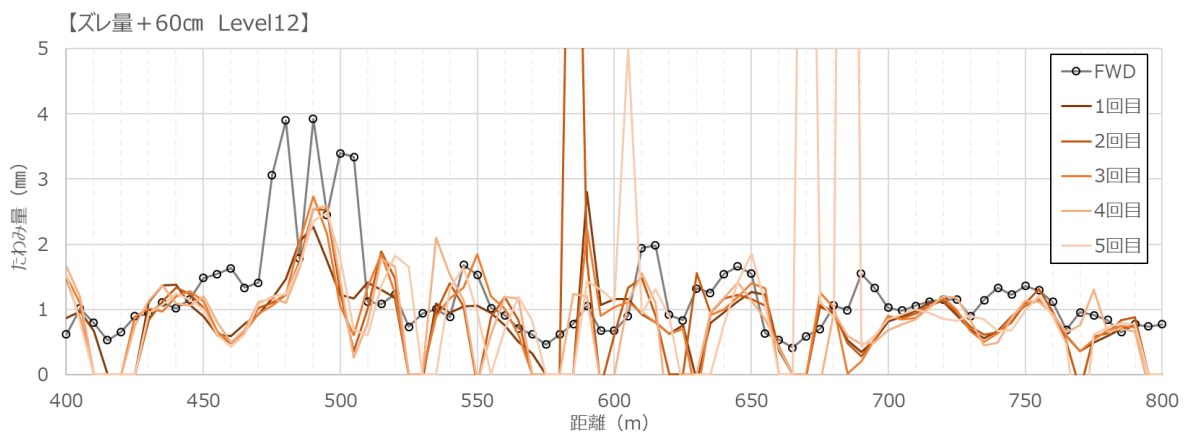
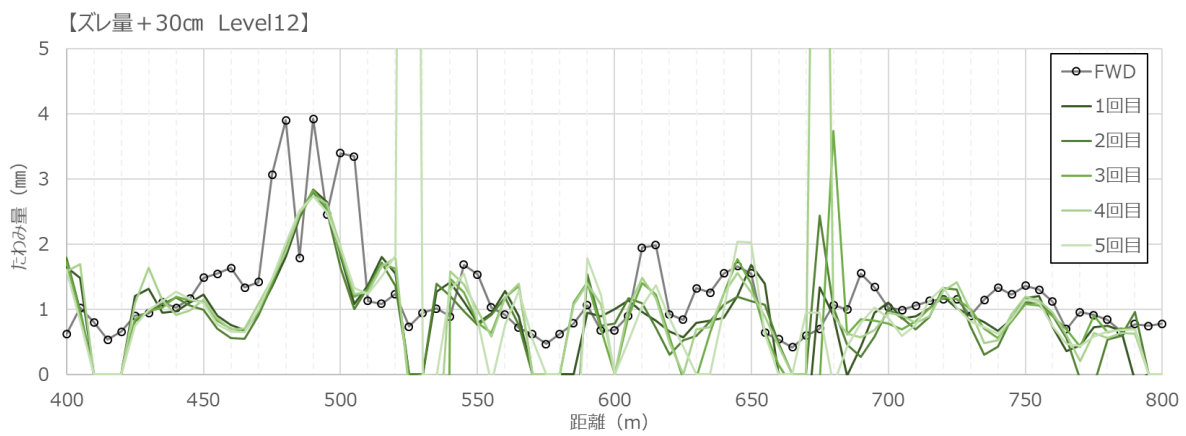
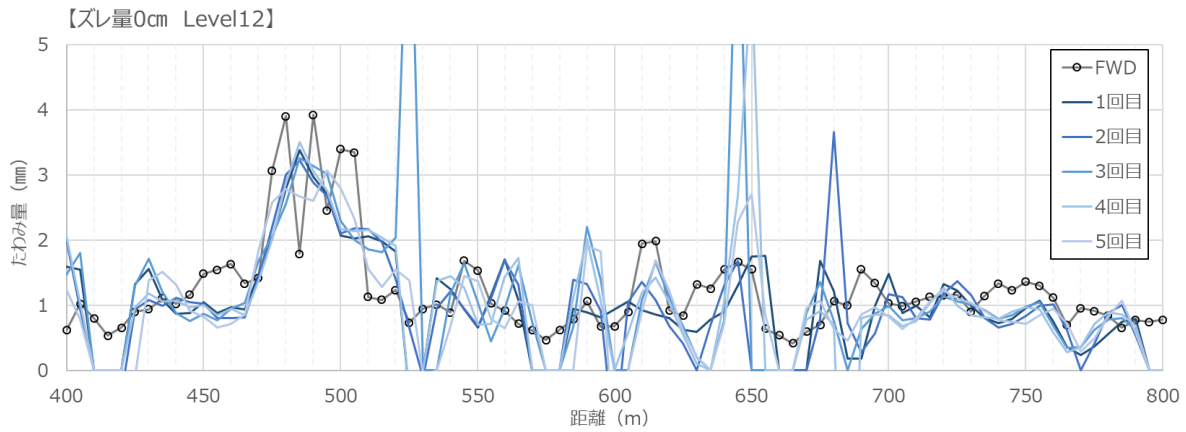


図 4.1.6.3 ウェーブレット法により算出したたわみ量 (レベル 12)

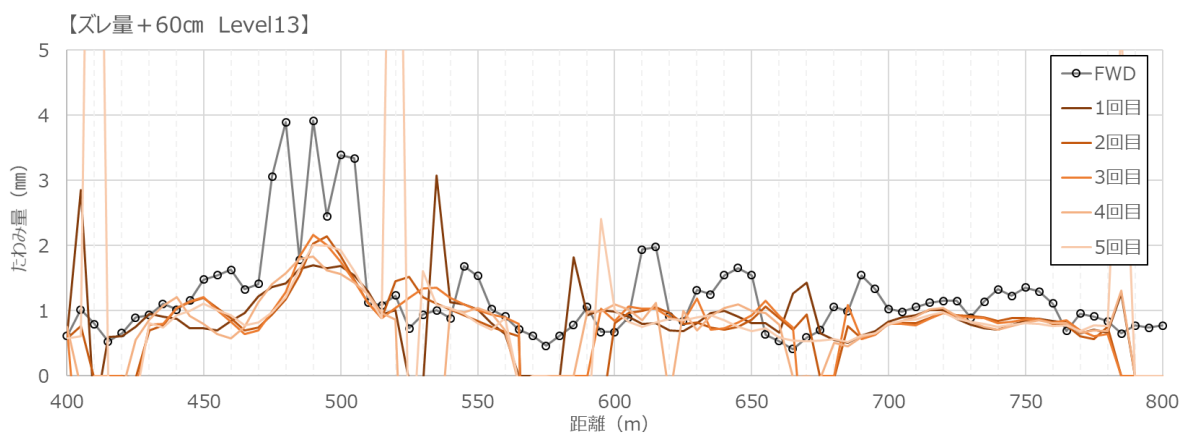
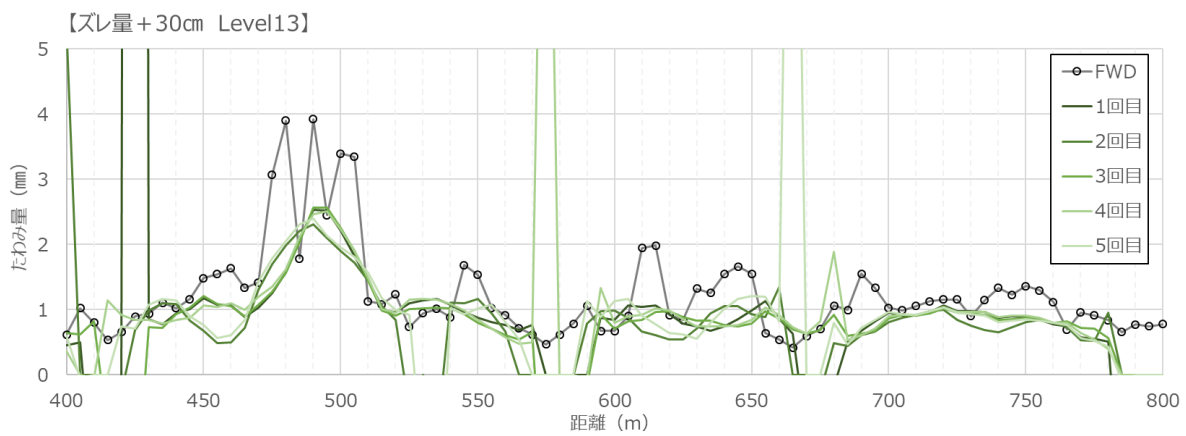
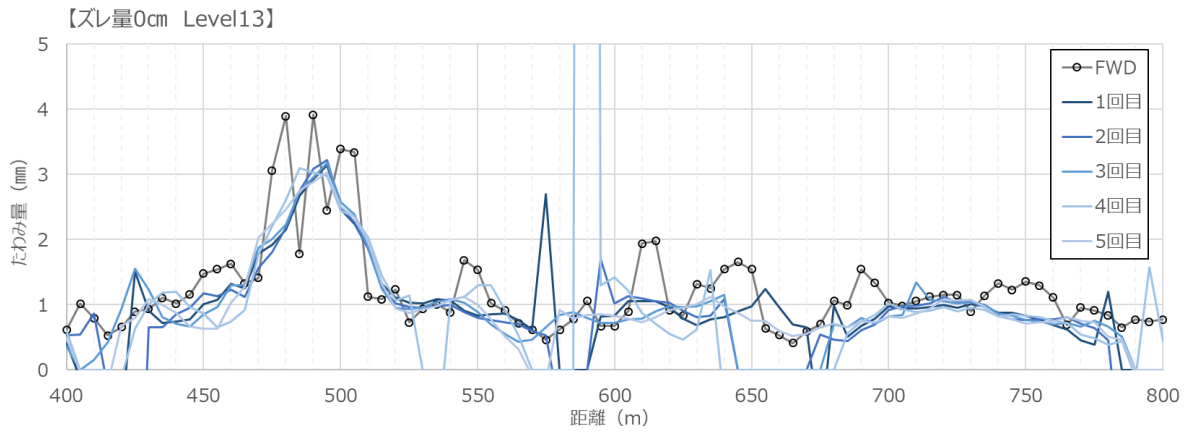


図 4.1.6.4 ウェーブレット法により算出したたわみ量 (レベル 13)

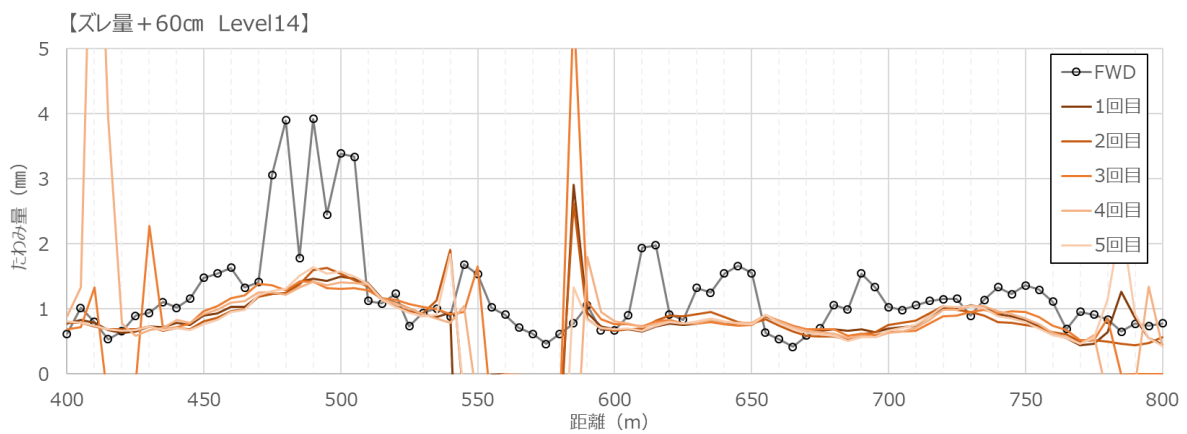
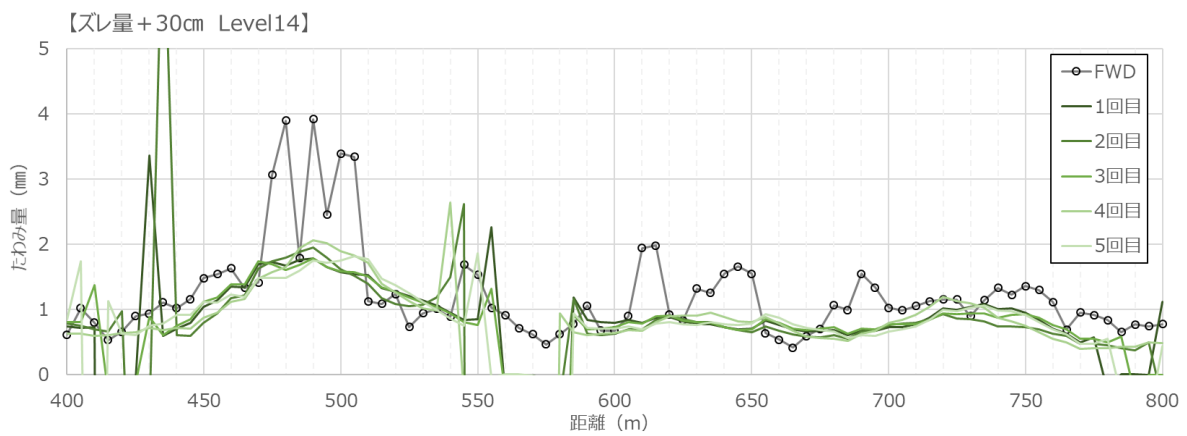
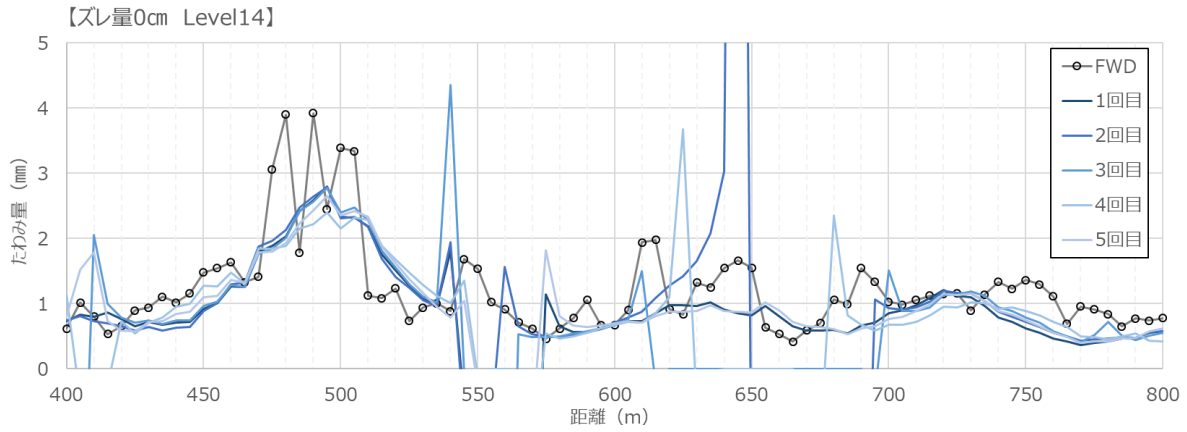


図 4.1.6.5 ウェーブレット法により算出したたわみ量 (レベル 14)

2) 各手法の繰り返し再現性

各手法、各測線位置において、MWD たわみ量の各測点の標準偏差と変動係数の平均値を求め、5回計測の繰り返し再現性を確認した。結果を表4.1.6.1に示す。各手法において、計測位置における再現性の差は見られなかった。

表 4.1.6.1 各測点における標準偏差と変動係数の平均（ウェーブレット法）

測線からの位置	0cm			+30cm			+60cm		
	Level	12	13	14	12	13	14	12	13
測点数	55	57	64	55	60	64	57	56	54
標準偏差(mm)	0.394	0.205	0.143	0.149	0.165	0.155	0.274	0.140	0.125
変動係数(%)	20.7	14.0	11.2	14.8	16.5	14.5	21.3	14.8	12.3

3) 測線位置における MWD たわみ量の分析

測線位置が MWD たわみ量に与える影響を確認するため、計測範囲の中で MWD たわみ量大きい区間（450～500m）と比較的小さい区間（700～750m）について、測線位置によるたわみ量の変化を確認した。

- ・ FWD の測点がある位置に最も近い点を抽出
- ・ 各地点の 5 回計測の平均を算出し、代表値とする
- ・ 各地点でずれ量 0 cm を基準としたときの各ずれ量でのたわみ量の割合を算出

① FWD たわみ量大きい区間（450～500m）

各地点の MWD たわみ量の 5 回平均を表 4.1.6.2、測線位置 0 cm に対する各測線（+30 cm、+60 cm）の MWD たわみ量の比率を表 4.1.6.3 に示す。

測線位置が離れるほど MWD たわみ量は低下していた。0 cm 位置の MWD たわみ量との比率を見てみると、測線位置が +30 cm 位置で 0.82～0.85、測線位置が +60 cm 位置では、0.7 であった。

表 4.1.6.2 各地点の MWD たわみ量 (5 回平均、400m~500m)

距離 (m)	たわみ量 (mm)								
	ウェーブレット法								
	Level12			Level13			Level14		
	0cm	+30cm	+60cm	0cm	+30cm	+60cm	0cm	+30cm	+60cm
450	0.950	1.109	1.048	0.908	0.976	1.010	1.026	0.984	0.869
455	0.789	0.807	0.661	0.892	0.850	0.881	1.085	1.062	0.930
460	0.875	0.670	0.497	1.125	0.864	0.815	1.338	1.251	1.042
465	0.896	0.646	0.684	1.173	0.868	0.766	1.293	1.258	1.068
470	1.552	0.974	1.017	1.806	1.206	0.925	1.815	1.604	1.244
475	2.175	1.410	1.138	2.040	1.471	1.135	1.867	1.643	1.273
480	2.799	1.903	1.254	2.328	1.756	1.335	1.996	1.642	1.261
485	3.206	2.456	1.831	2.807	2.153	1.693	2.341	1.769	1.410
490	2.928	2.783	2.485	2.980	2.450	1.947	2.489	1.864	1.508
495	2.845	2.568	2.299	3.112	2.365	1.885	2.680	1.764	1.455
500	2.282	1.839	1.364	2.500	2.105	1.759	2.308	1.683	1.467

表 4.1.6.3 測線位置 0 cmにおける各地点の MWD たわみ量の比率 (400m~500m)

距離 (m)	0cmに対する比率								
	ウェーブレット法								
	Level12			Level13			Level14		
	0cm	+30cm	+60cm	0cm	+30cm	+60cm	0cm	+30cm	+60cm
450	—	1.17	1.10	—	1.07	1.11	—	0.96	0.85
455	—	1.02	0.84	—	0.95	0.99	—	0.98	0.86
460	—	0.77	0.57	—	0.77	0.72	—	0.94	0.78
465	—	0.72	0.76	—	0.74	0.65	—	0.97	0.83
470	—	0.63	0.66	—	0.67	0.51	—	0.88	0.69
475	—	0.65	0.52	—	0.72	0.56	—	0.88	0.68
480	—	0.68	0.45	—	0.75	0.57	—	0.82	0.63
485	—	0.77	0.57	—	0.77	0.60	—	0.76	0.60
490	—	0.95	0.85	—	0.82	0.65	—	0.75	0.61
495	—	0.90	0.81	—	0.76	0.61	—	0.66	0.54
500	—	0.81	0.60	—	0.84	0.70	—	0.73	0.64
平均	—	0.82	0.70	—	0.81	0.70	—	0.85	0.70

②FWD たわみ量が小さい区間（700～750m）

各地点の MWD たわみ量の 5 回平均を表 4.1.6.4、測線位置 0 cm に対する各測線（+30 cm、+60 cm）の MWD たわみ量の比率を表 4.1.6.5 に示す。

FWD たわみ量が小さい区間では、0 cm から離れると MWD たわみ量の若干の低下は見られるが、0 cm 位置との比率では +60 cm でも 0.92 であり、測線位置の違いによる顕著な差がみられなかった。

表 4.1.6.4 各地点の MWD たわみ量（5 回平均、700m～750m）

距離 (m)	たわみ量 (mm)								
	ウェーブレット法								
	Level12			Level13			Level14		
	0cm	+30cm	+60cm	0cm	+30cm	+60cm	0cm	+30cm	+60cm
700	1.060	0.939	0.822	0.911	0.895	0.806	0.944	0.743	0.678
705	0.814	0.781	0.862	0.901	0.910	0.839	0.833	0.764	0.703
710	0.830	0.790	0.926	1.004	0.914	0.856	0.883	0.798	0.737
715	0.915	0.985	1.035	0.981	0.965	0.945	0.973	0.889	0.865
720	1.224	1.264	1.103	1.045	1.029	0.995	1.128	1.014	0.994
725	1.148	1.181	0.975	0.996	0.937	0.905	1.098	0.976	0.982
730	1.010	0.884	0.769	1.024	0.910	0.856	1.121	0.989	1.006
735	0.850	0.600	0.593	0.965	0.885	0.815	1.035	0.986	0.991
740	0.743	0.557	0.623	0.843	0.810	0.765	0.882	0.895	0.899
745	0.799	0.857	0.826	0.824	0.843	0.812	0.835	0.893	0.880
750	0.891	1.137	1.067	0.781	0.866	0.848	0.751	0.855	0.834

表 4.1.6.5 測線位置 0 cm における各地点の MWD たわみ量の比率（700m～750m）

距離 (m)	0cm に対する比率								
	ウェーブレット法								
	Level12			Level13			Level14		
	0cm	+30cm	+60cm	0cm	+30cm	+60cm	0cm	+30cm	+60cm
700	—	0.89	0.78	—	0.98	0.88	—	0.79	0.72
705	—	0.96	1.06	—	1.01	0.93	—	0.92	0.84
710	—	0.95	1.12	—	0.91	0.85	—	0.90	0.83
715	—	1.08	1.13	—	0.98	0.96	—	0.91	0.89
720	—	1.03	0.90	—	0.99	0.95	—	0.90	0.88
725	—	1.03	0.85	—	0.94	0.91	—	0.89	0.89
730	—	0.88	0.76	—	0.89	0.84	—	0.88	0.90
735	—	0.71	0.70	—	0.92	0.84	—	0.95	0.96
740	—	0.75	0.84	—	0.96	0.91	—	1.02	1.02
745	—	1.07	1.03	—	1.02	0.99	—	1.07	1.05
750	—	1.28	1.20	—	1.11	1.09	—	1.14	1.11
平均	—	0.96	0.94	—	0.97	0.92	—	0.94	0.92

4) 測線位置における FWD たわみ量と MWD たわみ量の相関性

FWD たわみ量に対する MWD たわみ量の関係性を確認する。FWD たわみ量に対する各測線位置の MWD たわみ量の相関図を図 4.1.6.6～図 4.1.6.8 に示す。測線位置が離れるほど傾きが小さくなる傾向を有していた。

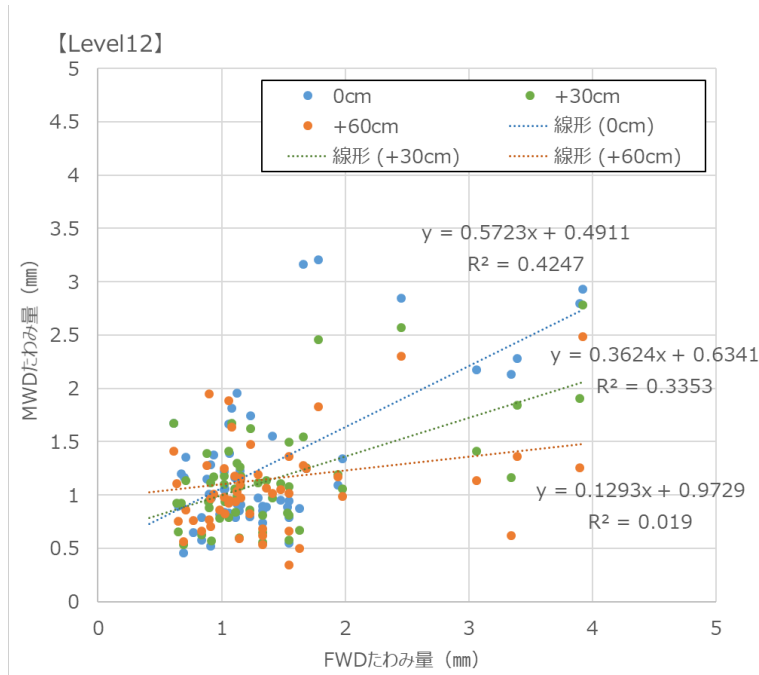


図 4.1.6.6 FWD たわみ量と MWD たわみ量の関係性 (ウェーブレット法、レベル 12)

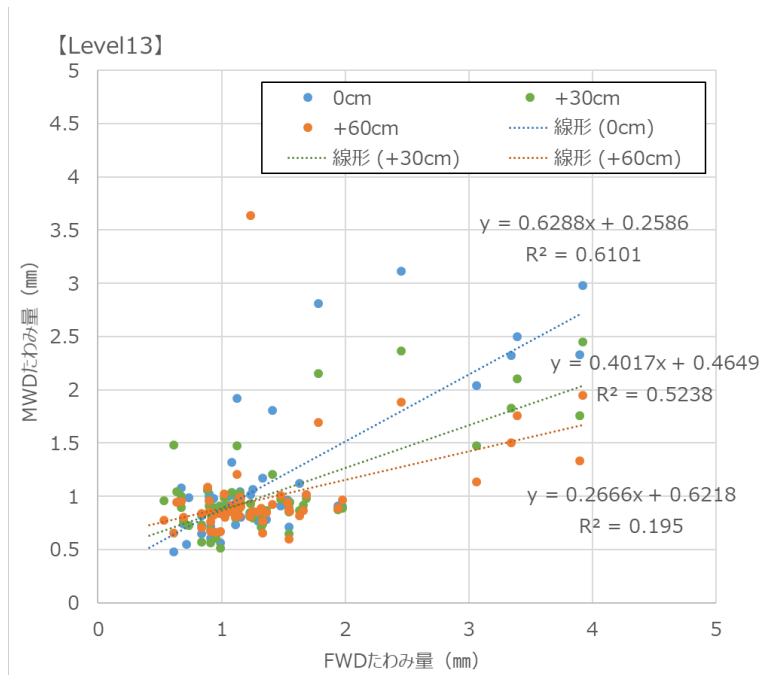


図 4.1.6.7 FWD たわみ量と MWD たわみ量の関係性 (ウェーブレット法、レベル 13)

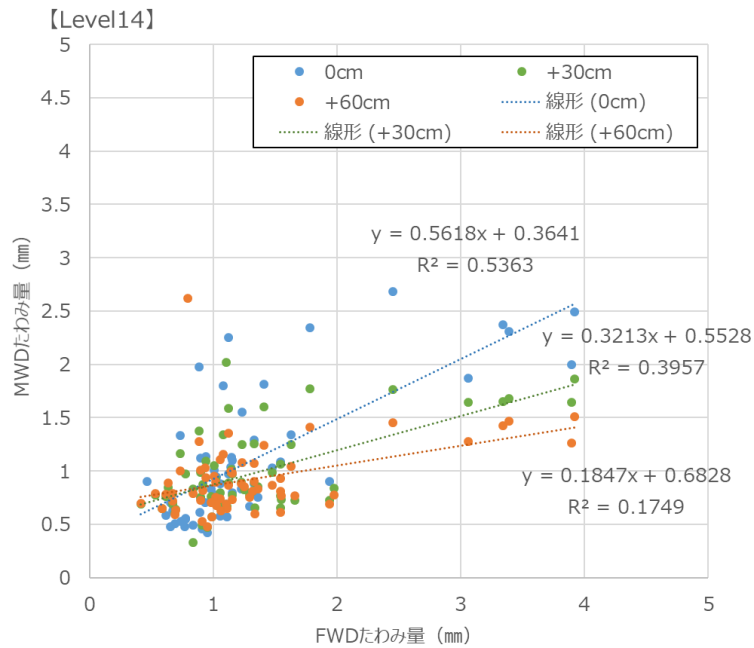


図 4.1.6.8 FWD たわみ量と MWD たわみ量の関係性 (ウェーブレット法、レベル 14)

(4) まとめ

ウェーブレット法の結果から走行位置が MWD たわみ量に与える影響の検討した結果、以下の知見を得た。

- ・測線位置 0 cmと比較すると、FWD たわみ量が比較的大きい箇所については測線が離れるほどたわみ量の低減がみられたが、FWD たわみ量が比較的小さい箇所については測線による大きな違いは見られない。
- ・FWD たわみ量が比較的大きい箇所では、30 cm (タイヤ 1 個分) ずれると 8 割～9 割、60 cm (タイヤ 2 個分) ずれると 7 割程度になる。

4.1.7 道路構造による影響

(1) 目的

道路構造〔坂路（縦断勾配）、カント（横断勾配）、カーブ〕や路面性状（段差など）が、ウェーブレット法による MWD たわみ量測定値に与える影響について検討した。

(2) 測定概要

土木研究所構内において道路構造（坂路、カント、カーブ）、路面性状（段差）の存在する箇所について MWD による計測を行った。なお、比較のため FWD による計測も実施し、MWD の計測結果と比較することにより、道路構造や路面性状が MWD たわみ量に与える影響について検証した。

(3) 測定箇所・測定条件

測定箇所は図 4.1.7.1 に示す箇所で、表 4.1.7.1 に示すように坂路、カント、カーブ及び段差が存在する箇所を選定した。また、測定条件は表 4.1.7.2 の通りであり各々の条件で 3 回測定した。なお、FWD 測定は測定箇所の一部において 5m 間隔で測定した。

また、ウェーブレット法による MWD のたわみ量は、以下の条件で解析した。以下の解析結果については、最小レベル 14 を代表として示す。

- ①マザーウェーブレット：coiflets18
- ②最小レベル：12～14
- ③最大レベル：最大

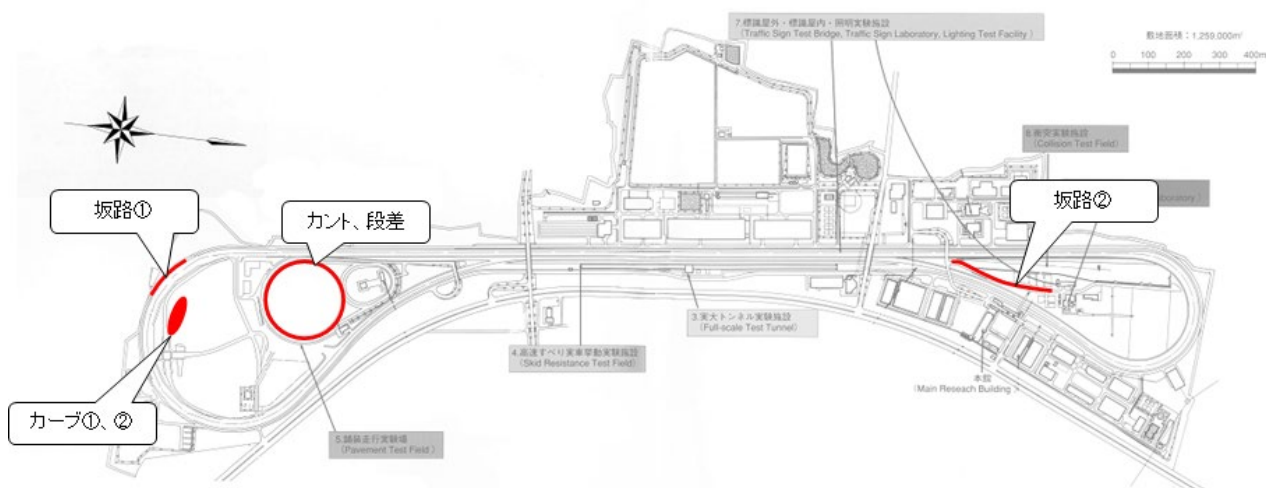


図 4.1.7.1 測定箇所位置図

表 4.1.7.1 測定箇所一覧表

要因	延長	検討内容
坂路①（縦断勾配）	坂路区間 100m、平坦区間 50m	縦断勾配の影響
坂路②（縦断勾配） 上り 坂路②（縦断勾配） 下り	坂路区間 50m、平坦区間 50m	縦断勾配の影響
カント（横断勾配） 段差（30mm）	カーブ区間 100m（R=100m） （内、平坦区間 50m、段差区間 50m）	横断勾配の影響 段差の影響
カーブ①（右回り） カーブ①（左回り）	カーブ区間 50m（R=50m）	カーブの影響
カーブ②（右回り） カーブ②（左回り）	カーブ区間 50m（R=30m）	カーブの影響

表 4.1.7.2 MWD 測定条件一覧表

路線名	測定速度 (km/h)	回数	備考
坂路①	10, 20, 30	各速度 3 回	20km/hのみデータ欠損のため2回測定
坂路②上り	10, 20, 30	各速度 3 回	
坂路②下り	10, 15	各速度 3 回	安全上の問題により低速のみ測定を実施
カント、段差	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ①（右回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ①（左回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ②（右回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ②（左回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	

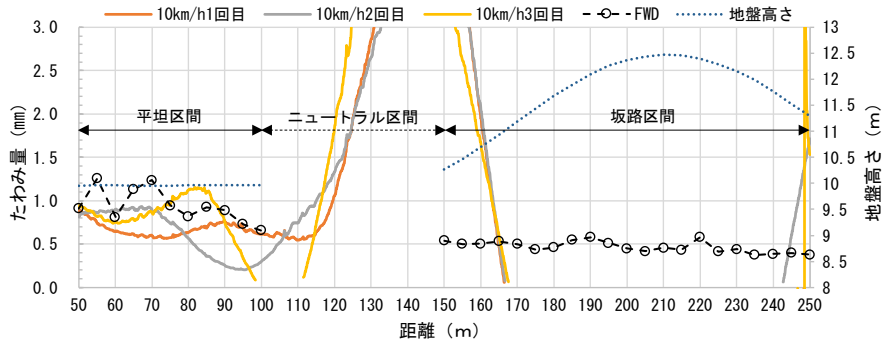
(4) 解析結果

1) 坂路①

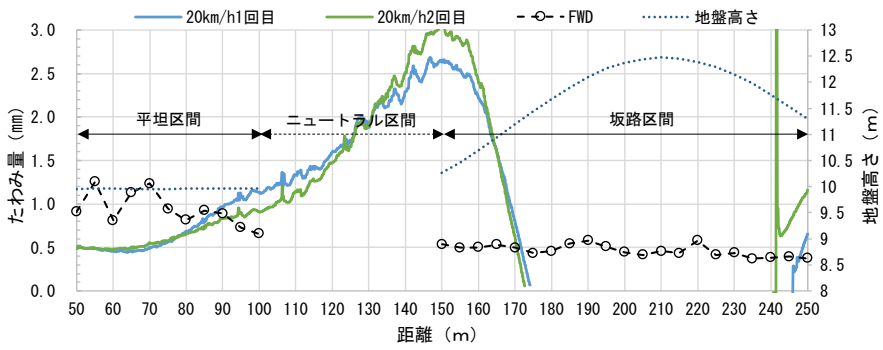
坂路①の縦横断勾配の一覧表を表 4.1.7.3 に、ウェーブレット法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.1.7.2 に示す。

表 4.1.7.3 坂路①縦横断勾配一覧表

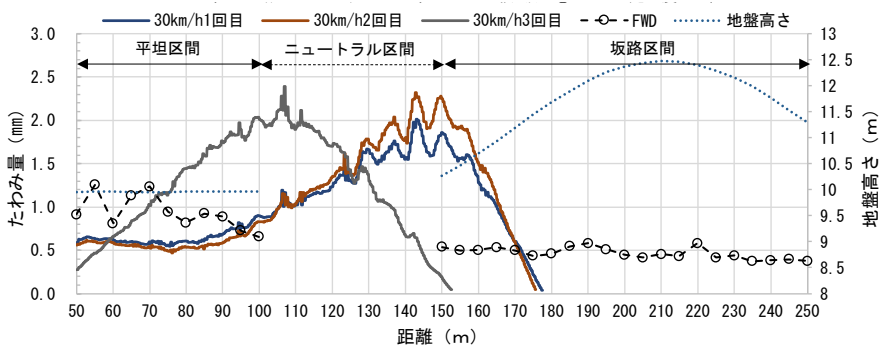
区間	MWD 距離 (m)	縦断勾配 (%)	平均横断勾配 (%)
平坦区間	50~100	0.0	1.2
上り坂区間	150~210	3.7	1.6
下り坂区間	210~250	-3.0	1.2



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.1.7.2 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路①)

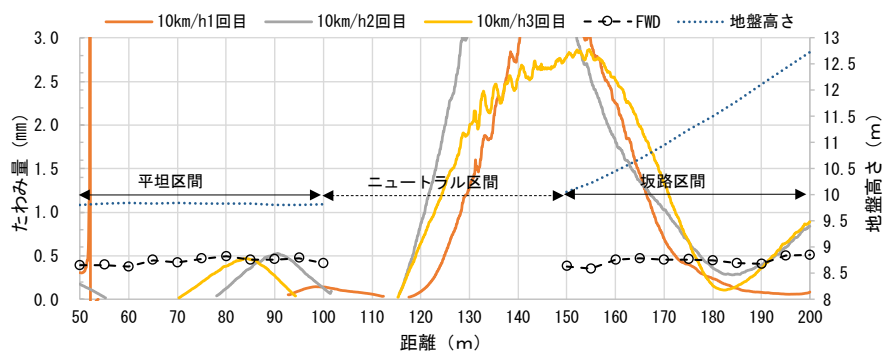
ウェーブレット法による MWD たわみ量は、FWD との乖離が大きく FWD たわみ量と同様の傾向が得られなかった。

2) 坂路②

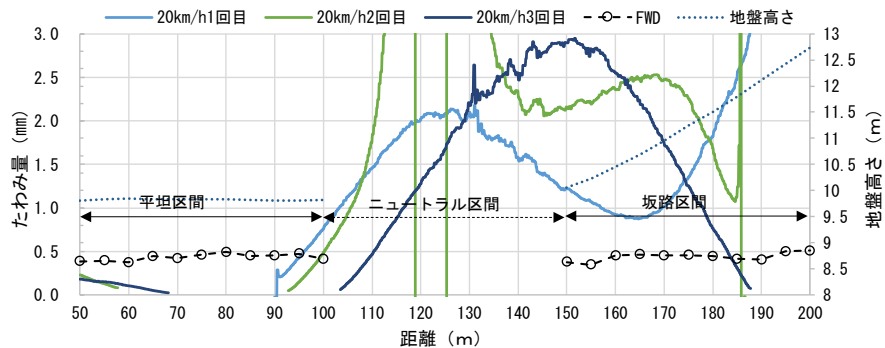
坂路②の縦横断勾配の一覧表を表 4.1.7.4 に、ウェーブレット法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.1.7.3、及び図 4.1.7.4 に示す。

表 4.1.7.4 坂路②縦横断勾配一覧表

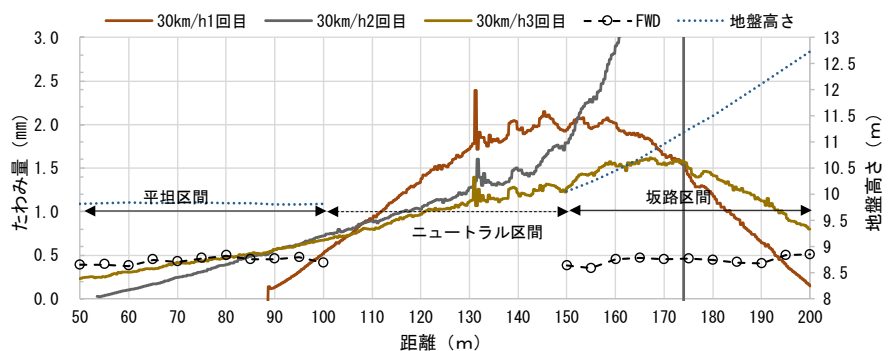
区間	MWD 距離 (m)	縦断勾配 (%)	平均横断勾配 (%)
上り 平坦区間	50~100	0.0	1.6
上り 坂路区間	150~200	5.3	1.9
下り 平坦区間	80~130	0.0	1.7
下り 坂路区間	210~250	-5.3	-1.9



(a) 10km/h

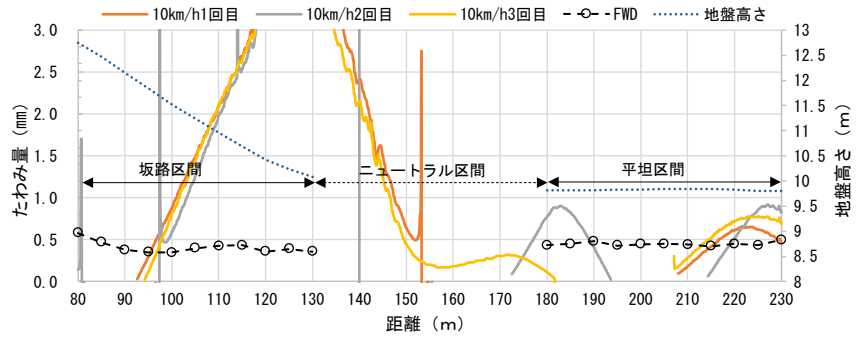


(b) 20km/h

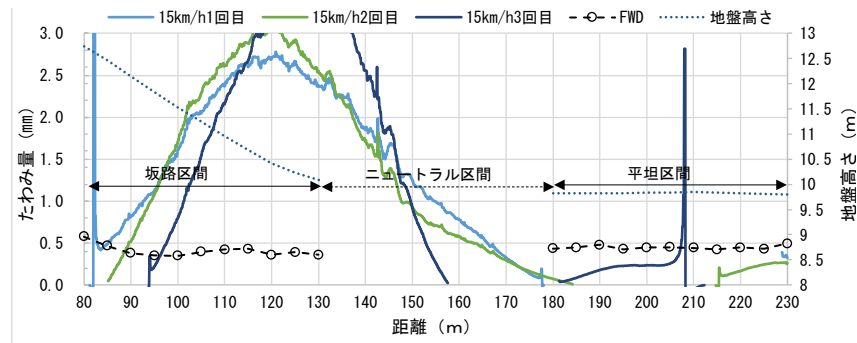


(c) 30km/h

図 4.1.7.3 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路②上り)



(a) 10km/h



(b) 15km/h

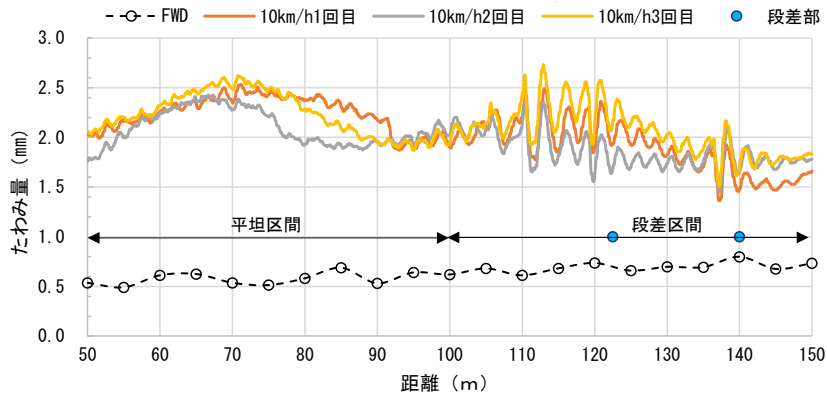
図 4.1.7.4 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路②下り)

ウェーブレット法による MWD たわみ量は、FWD との乖離が大きく FWD たわみ量と同様の傾向が得られなかった。

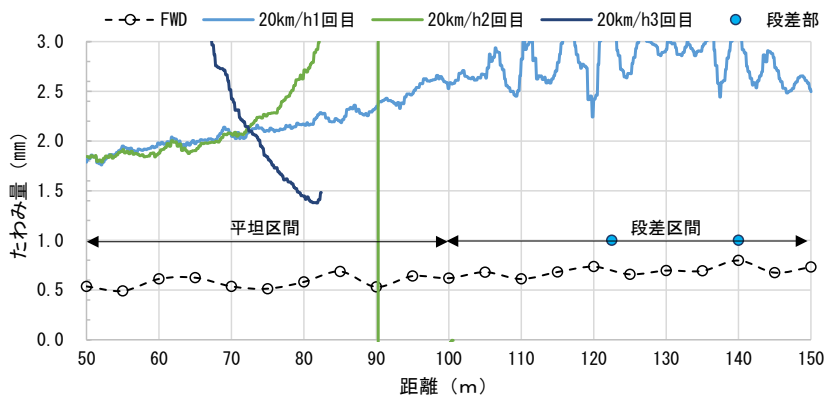
3) カント・段差

カント、段差の存在する測定箇所におけるウェーブレット法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.2.7.5 に示す。また、比較のため IRI (評価区間長 5m) の測定結果を図 4.2.7.6 に示す。

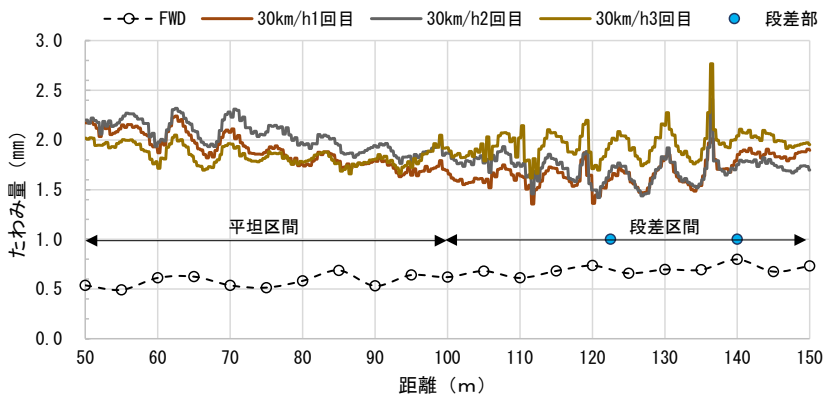
なお、当該カントは約 7% (R100m) であり、路面状態の良好な平坦区間と段差が発生している段差区間が存在している。段差区間では 30mm の段差が 2 箇所発生している。



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.1.7.5 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カント、段差)

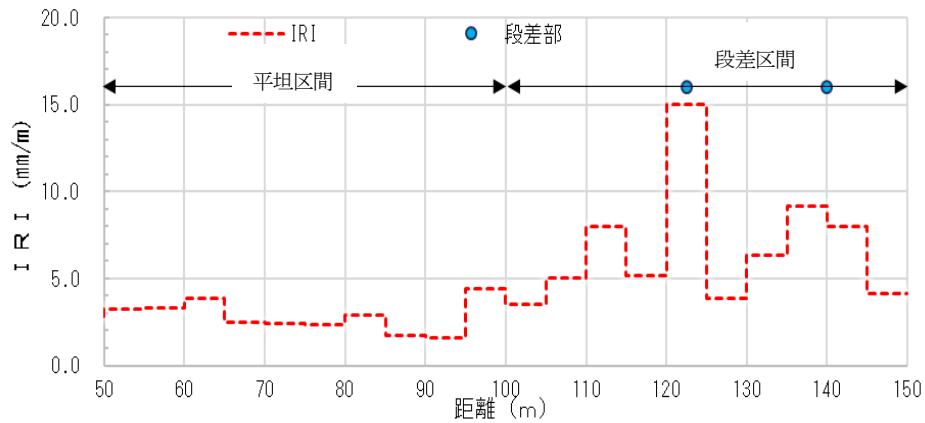


図 4.1.7.6 IRI の測定結果 (評価区間長 5m)

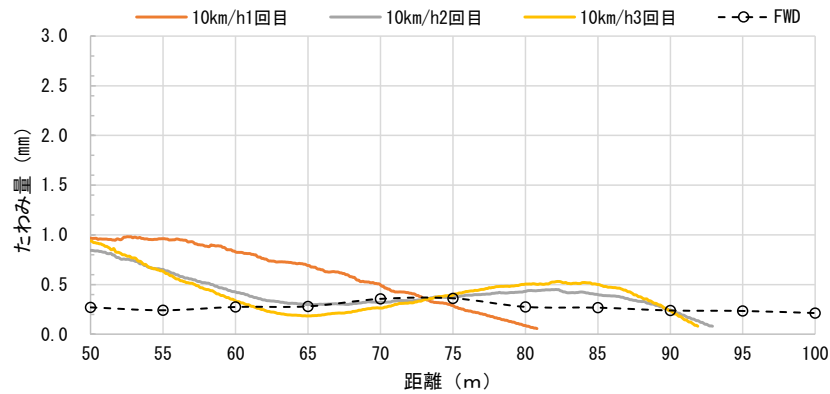
ウェーブレット法による MWD たわみ量は、概ね解析可能であったが、FWD たわみ量より大きい傾向を示す結果が得られた。

なお、走行速度 30km/h では安定した解析結果が得られている。これは、測定箇所が勾配 7% のカントであり、30km/h で車両に作用する重力と遠心力の合力が路面とほぼ直角な関係となることから、より安定した 30km/h の測定時に車両が大きく揺れることがなく、ノイズの処理が良好に行えたため安定した解析結果が得られたものと考えられる。

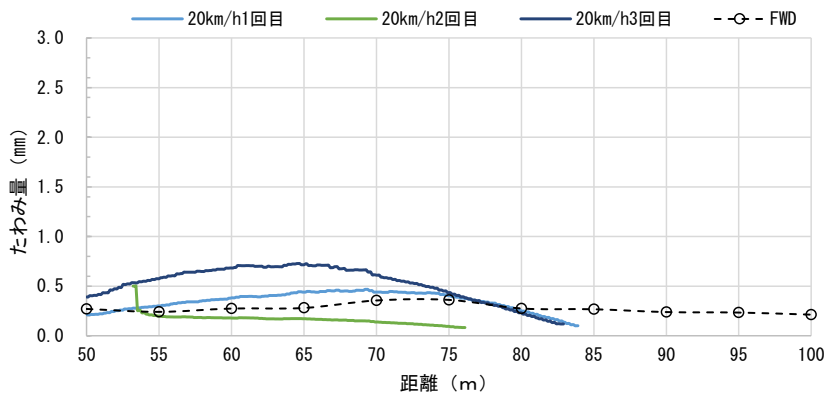
4) カーブ①

カーブ① (R=50m) のウェーブレット法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.1.7.7、及び図 4.1.7.8 に示す。

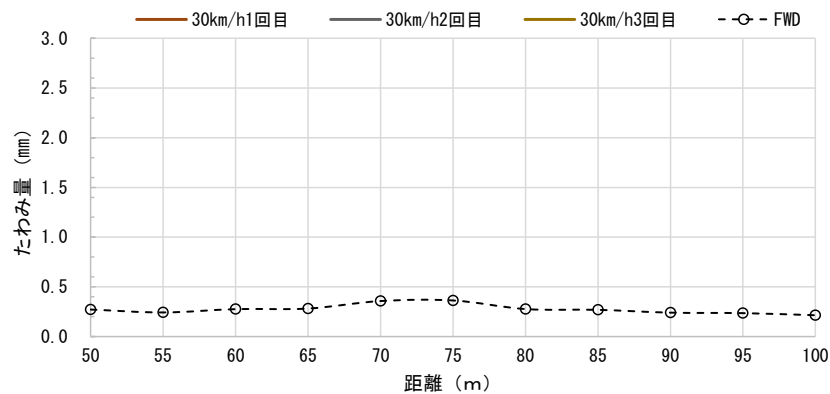
なお、カーブ①については走行方法により車輪に作用する輪荷重が異なるため、走行位置を右回りと左回りで走行して MWD の計測を実施した。



(a) 10km/h

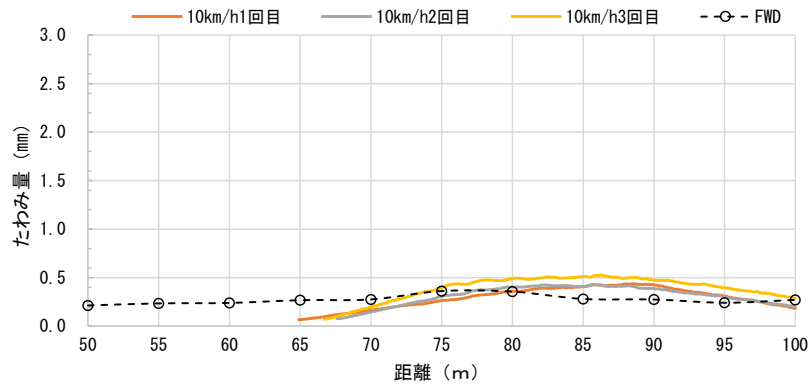


(b) 20km/h

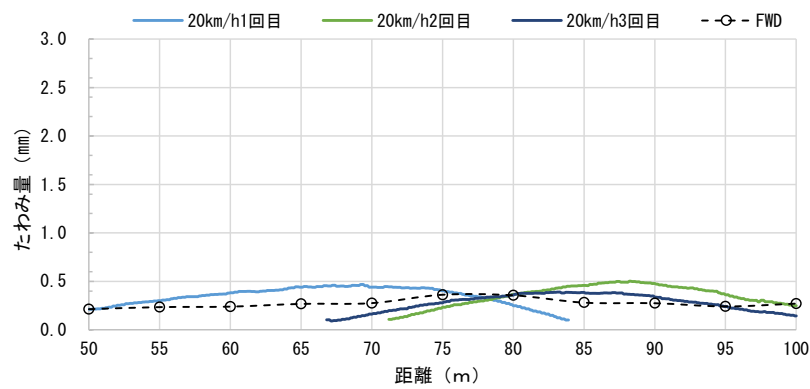


(c) 30km/h

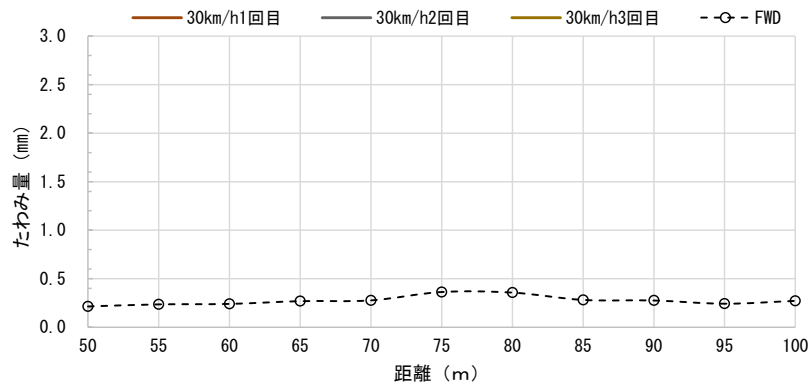
図 4.1.7.7 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ①右回り)



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

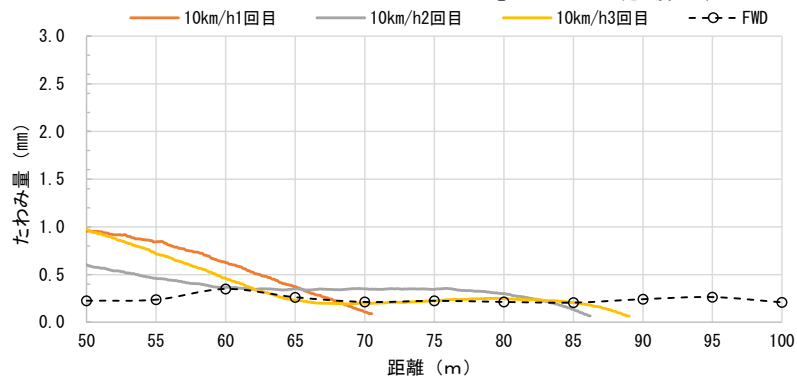
図 4.1.7.8 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ①左回り)

ウェーブレット法による MWD たわみ量は、FWD たわみ量と概ね同じレベルの結果が得られた区間もあるが、解析不可の区間も多く確認された。

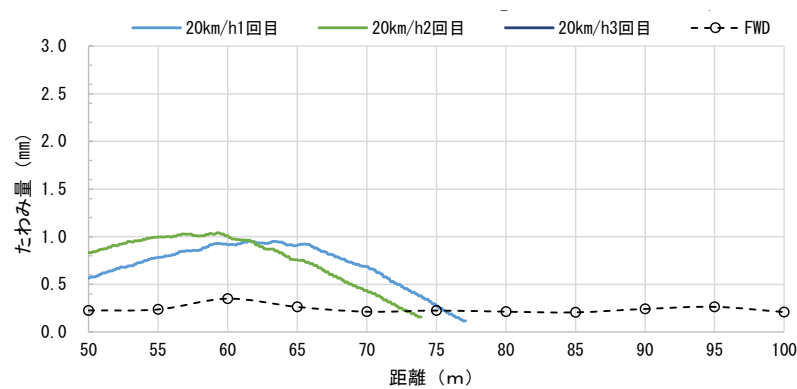
5) カーブ②

カーブ② (R=30m) のウェーブレット法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.1.7.9、及び図 4.1.7.10 に示す。

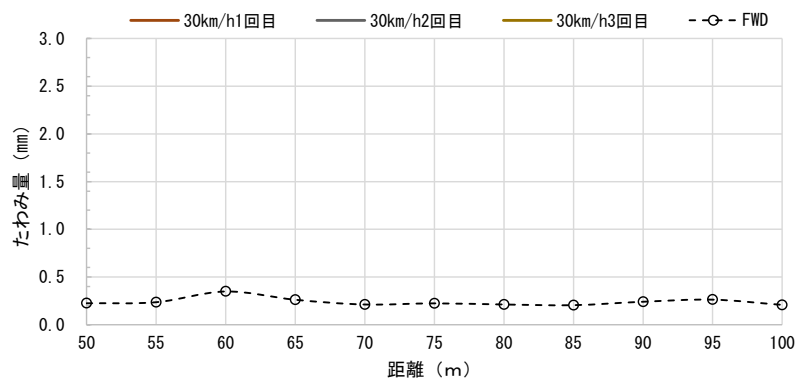
なお、カーブ②についてもカーブ①と同様に、走行位置を右回りと左回りで走行して MWD の計測を実施した。



(a) 10km/h

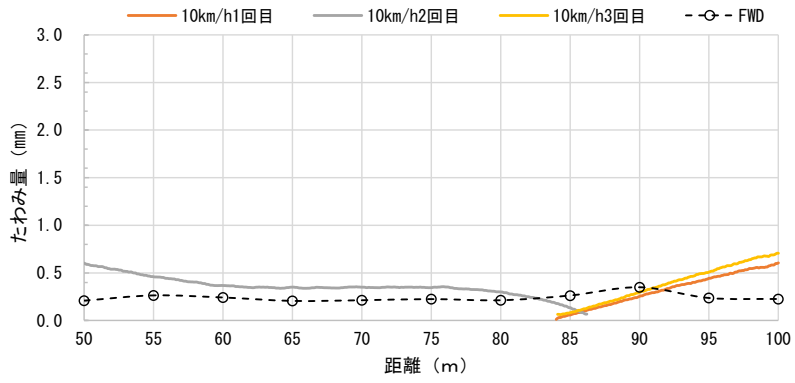


(b) 20km/h

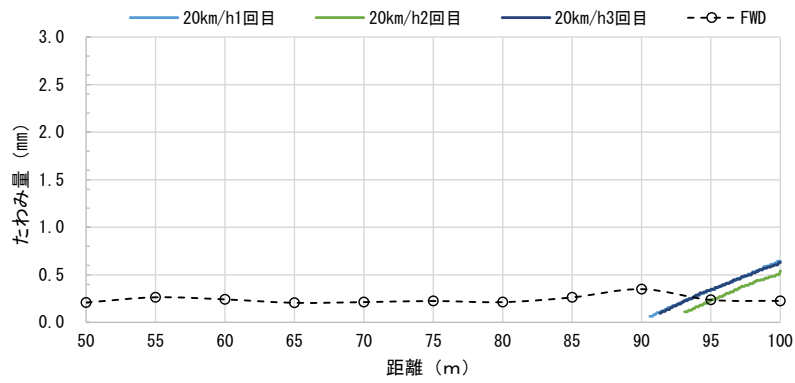


(c) 30km/h

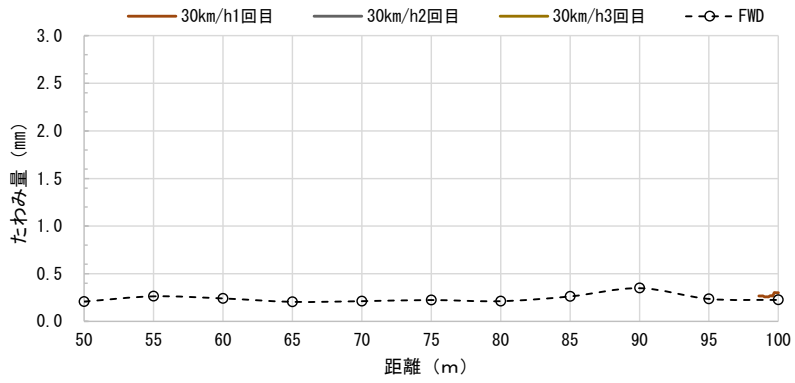
図 4.1.7.9 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ②右回り)



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.1.7.10 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ②左回り)

ウェーブレット法による MWD たわみ量は、カーブ①以上に解析不可の区間が多く確認された。

(5) まとめ

道路構造 [坂路 (縦断勾配)、カント (横断勾配)、カーブ] や路面性状 (段差) が、ウェーブレット法による MWD たわみ量測定値に与える影響について整理すると以下のとおりである。

1) 縦断勾配の影響

縦断勾配の異なる測定箇所 (坂路①、坂路②) にて MWD たわみ量の測定を行った結果、本検討では MWD たわみ量と FWD たわみ量の乖離が大きかったため、縦断勾配の影響を把握できなかった。

2) 横断勾配の影響

カント 7% の箇所について MWD たわみ量の測定を行った結果、本検討では MWD たわみ量と FWD たわみ量の乖離が大きかったため、縦断勾配の影響を把握できなかった。

3) カーブの影響

カーブ① (R50m)、カーブ② (R30m) で検証を試みたが、本検討では解析不可の区間が多かったため、カーブの影響を把握できなかった。

4) 段差等の路面性状の影響

3.0cm 程度の段差があり IRI が悪い路面で検証した結果、本検討では MWD たわみ量と FWD たわみ量の乖離が大きかったため、段差等の路面性状の影響を把握できなかった。

ウェーブレット法はウェーブレット解析を用いた時系列解析であり、ある程度の連続した測定データを用いて解析するため異常データがあると前後のたわみ量の解析結果に影響を及ぼすことがあり、本検討においても異常データの削除が十分ではなく解析不能な箇所が多く確認された可能性がある。

ウェーブレット法については、その特性を活かした検証を別途実施する必要があると考えられる。

4.1.8 舗装断面の影響

舗装断面が MWD たわみ量に与える影響について検討した。

(1) 検討路線

解析に用いた路線およびたわみ量の算出に用いた解析方法を表 4.1.8.1 に示す。測定速度はそれぞれ 20 km/h で、測定回数は 3~5 回行った。

表 4.1.8.1 検討に用いた路線

調査日時	調査箇所	工区	測定延長	解析方法		
				ウェーブレット法	たわみ速度差法	レーザー法
2019年2~3月	つくば市内県道45号線・55号線	12工区	200 m	○	-	○
2019年10月3日	白糸ハイランドウェイ(長野県)	2工区	415 m、210 m	○	-	○
2020年2月14日	柏市内市道	3工区	220 m、230 m	-	-	○
2020年6月	つくば市内市道	8工区	300 m	○	○	○

表 4.1.8.1 のそれぞれの路線・工区の舗装構成から計画交通量区分を推定した。計画交通量区分は開削調査から得られた舗装厚から等値換算係数 T_A を求めて推定した。開削調査ができなかった区間については非破壊によりアスファルト層厚を測定し、アスファルト層厚から計画交通量区分を推定した。それぞれの路線・工区のアスファルト層厚と推定した計画交通量区分を表 4.1.8.2 に示す。

表 4.1.8.2 各路線・工区の推定計画交通量区分

調査日時	調査箇所	工区	測定延長	As層厚	推定計画交通量区分
2019年2~3月	つくば市内県道45号線・55号線	No.1	200 m	24 cm	N6
		No.2	200 m	20 cm	N6
		No.3	200 m	-	N6
		No.4	200 m	20 cm	N7
		No.5	200 m	-	N6
		No.6	200 m	-	N6
		No.7	200 m	20 cm	N6
		No.8	200 m	23 cm	N6
		No.9	200 m	13 cm	N7
		No.10	200 m	21 cm	N6
		No.11	200 m	12cm	N7
		No.12	200 m	22 cm	N7
2019年10月3日	白糸ハイランドウェイ(長野県)	A	415 m	10 cm	N4
		B	210 m	10 cm	N4
2020年2月14日	柏市内市道	No.2(下り線)	220 m	4 cm	N1~3
		No.6(上り線)	230 m	10 cm	N5
		No.6(下り線)	230 m	10 cm	N5
2020年6月	つくば市内市道	No.1	300 m	5.1 cm	N1~3
		No.2	300 m	3.8 cm	N1~3
		No.3	300 m	5.1 cm	N1~3
		No.4	300 m	4.4 cm	N1~3
		No.5	300 m	4.4 cm	N1~3
		No.6	300 m	4.1 cm	N4
		No.7	300 m	5.7 cm	N4
		No.8	300 m	8.6 cm	N5

(2)解析結果

表 4.1.8.1 に示す路線・工区で MWD たわみ量を算出し、表 4.1.8.2 に示す推定計画交通量毎に集計した。まず、測定回数による繰り返し再現性について表 4.1.8.3 に示す。

表 4.1.8.3 各測点における標準偏差と変動係数の平均値

計画交通量区分	N1~3	N4	N5	N6	N7
測点数 n 個	267	127	43	297	64
標準偏差の平均値 (mm)	0.16	0.51	0.05	0.08	0.08
変動係数の平均値 (%)	13.46	20.76	16.57	15.47	17.36

表 4.1.8.3 より、N1 から N7 において、標準偏差の平均値は 0.05~0.51 mm、変動係数の平均値は 13~21%と大きい結果となった。ただし、標準偏差の平均値は舗装厚が厚くなると小さくなる傾向にあるものの、変動係数の平均値に傾向は見られず、ウェーブレット法によるたわみ量解析では舗装厚に影響は受けないものの、総じて各測定回でバラツキが多いことが分かった。

次に FWD D₀たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関性を求めた。その結果を図 4.1.8.1 および表 4.1.8.4 に示す。

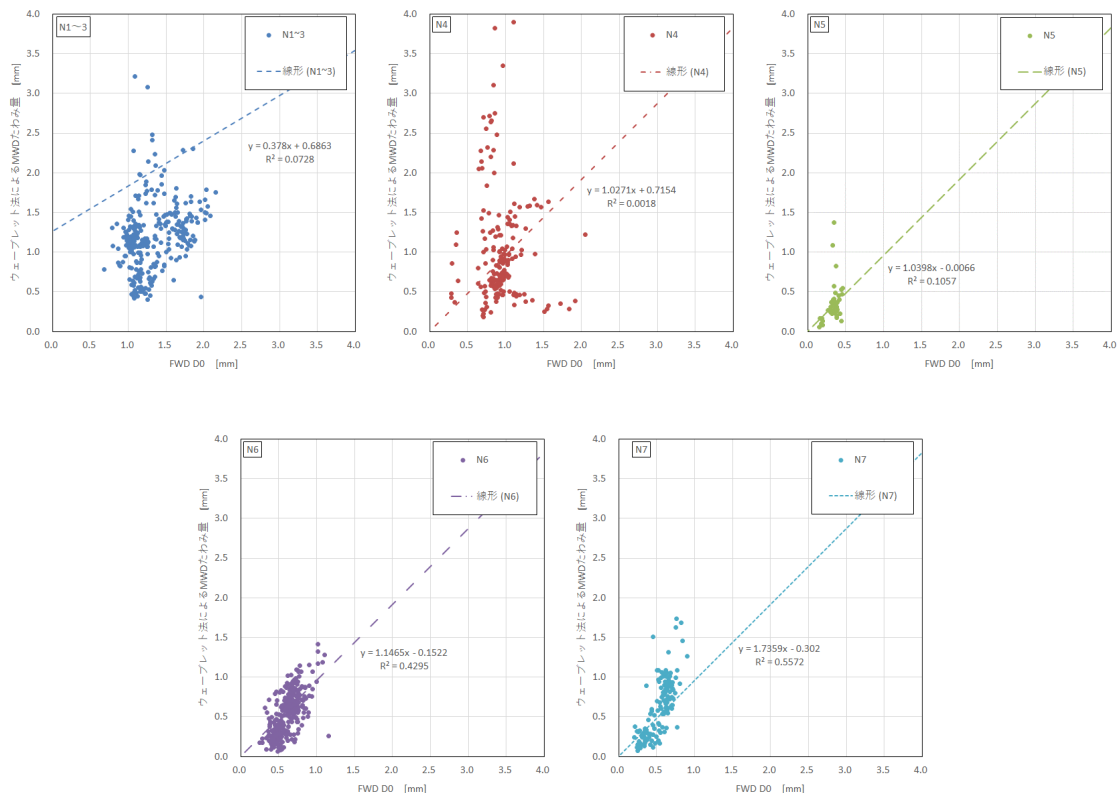


図 4.1.8.1 FWD D₀たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関関係

表 4.1.8.4 FWD D₀たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関係数

計画交通量区分	N1~3	N4	N5	N6	N7
回帰直線式の傾き a	0.38	1.03	1.04	1.15	1.74
回帰直線式の切片 b	0.69	0.72	-0.01	-0.15	-0.30
回帰直線式の決定係数 R ²	0.07	0.00	0.11	0.43	0.56
相関係数 r	0.27	0.04	0.33	0.66	0.75

表 4.1.8.4 より、FWD D₀たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関係数は 0.03~0.75 程度であり、舗装厚が厚いほど大きい値となり、N5 以上ではやや強い相関性を表した。また、回帰直線式を見ると N1 では傾きが 1 より小さく N2 から N6 では 1 程度、N7 では 1 よりも大きくなった。

以上より、ウェーブレット法による MWD たわみ量は舗装構成や舗装厚によって、繰り返し再現性への影響は小さいものの、FWD D₀たわみ量との相関性については影響を受けているものと思われる。

また、N6 および N7 ではやや強い相関性が見られたが、測定データの飛びや解析不可によって、MWD たわみ量の測定値が得られない場合が多くみられた。

今回の検討では計測データ数が少ないこと、計画交通量区分毎にデータ数のバラツキがあること等から、それぞれの計画交通量区分においてもたわみ量に偏りが見られたため、特に舗装厚が厚くたわみ量の大きい路線といったデータの取得が必要と思われる。

4.2 ドップラ振動計による測定方法（たわみ速度差法）

4.2.1 たわみ速度差法の検討

(1) 測定原理

ドップラ振動計で測定される値には、路面のたわみ速度のほかには走行車両の车速成分や車両振動によるノイズが含まれており(図 4.2.1.1)、それら不要成分は正確に除去する必要がある。

ドップラ振動計が観測する値 u を水平成分、垂直成分に分けて表示すると(式 4.2.1.1)となる。

$$u = u_{Horizontal} + u_{Vertical} \quad (\text{式 4.2.1.1})$$

ここで $u_{Horizontal}$ は車両の走行による観測値であり、従来は $v \sin\theta$ で表示していたものである。

$u_{Vertical}$ は路面のたわみ速度のほかには、車両の上下振動によるもの、車両の回転角の変化による回転角速度によるものの合成として観測されるものであり、(式 4.2.1.1)は(式 4.2.1.2)で表すことができる。

たわみ速度差法は、観測値 u から $v \sin\theta$ を除去した後、ジャイロセンサを用いて回転振動ノイズ e_r を計算で求めると共に、各ドップラ振動計の観測値の差を取ることで上下振動ノイズ e_z を除去する手法である。

$$u = v \sin\theta_N + \frac{dw}{dt} \cos\theta_N + \frac{e_r + e_z}{\cos\theta_N} \quad (\text{式 4.2.1.2})$$

$$\theta_N = \theta_{N,ini} + \theta_M \quad (\text{式 4.2.1.3})$$

ここで、

v : 車両走行速度

θ_N : 各ドップラ振動計と路面とのなす角度 (N=1,2,3)

$\frac{dw}{dt}$: 路面たわみ速度

$\theta_{N,ini}$: 各ドップラ振動計の初期角度

e_r : 車両回転振動ノイズの鉛直成分 (上が正)

θ_M : 車両角度

e_z : 車両上下振動ノイズの鉛直成分 (上が正)

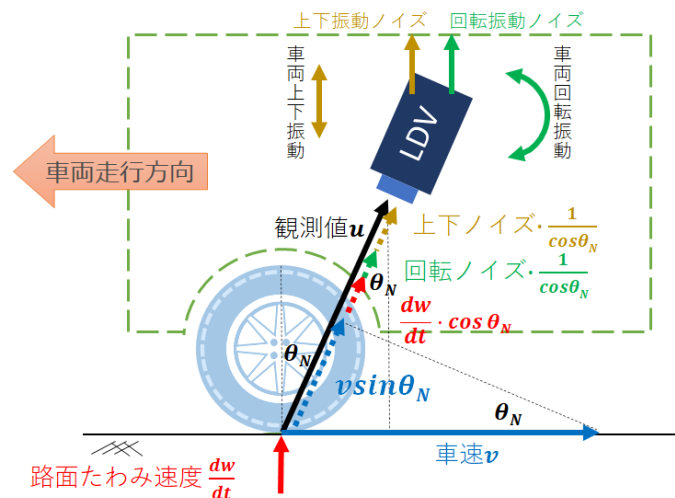


図 4.2.1.1 ドップラ振動計で観測される成分

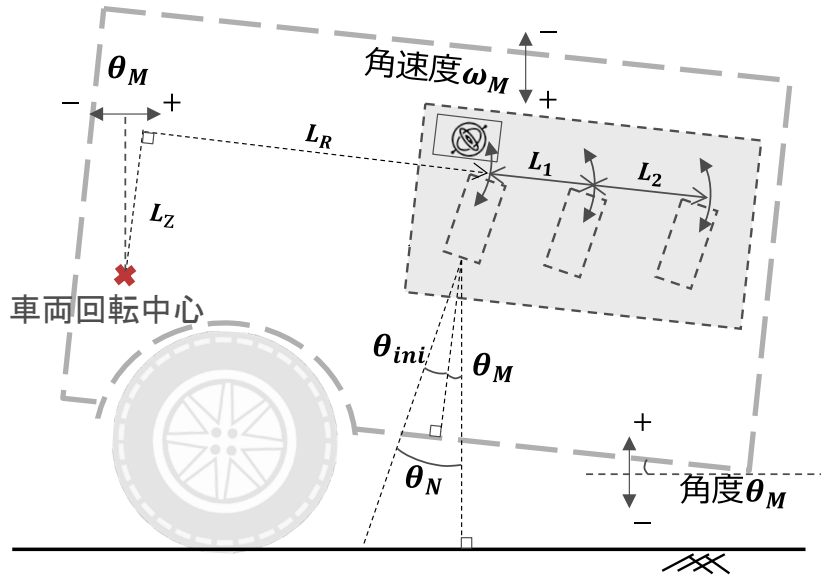


図 4.2.1.2 ドップラ振動計の角度及び角速度

1) 回転振動ノイズに関して

車両回転の中心位置からドップラ振動計までの距離を L_R 、回転中心から L_R に直交する点までの距離を L_Z 、の各センサ間の距離を L_1 、 L_2 とすると（図 4.2.1.2）、車両回転によって生じるドップラ振動計の上下速度成分は(式 4.2.1.4)となる。車両回転角速度 ω_M はドップラ振動計架台に設置したジャイロセンサにより取得が可能である。（車両回転中心位置を確認するのは困難であり、 L_R, L_Z の実測値は不明であるが、のちの計算により除去が可能である。）

$$e_r = L_R \cdot (-\omega_M) \cdot \cos\theta_M + L_Z \cdot (-\omega_M) \cdot \sin\theta_M \quad (\text{式 4.2.1.4})$$

ここで、

L_R : 車両回転中心からドップラ振動計までの水平距離

L_Z : 回転中心から L_R に直交する点までの距離

ω_M : 車両回転角速度

以上のことから各ドップラ振動計の観測値 u_1, u_2, u_3 は(式 4.2.1.5)～(式 4.2.1.7)となる。

$$u_1 = v \sin\theta_1 + \frac{dw_1}{dt} \cos\theta_1 + \frac{-L_R \cdot \omega_M \cdot \cos\theta_M - L_Z \cdot \omega_M \cdot \sin\theta_M + e_z}{\cos\theta_1} \quad (\text{式 4.2.1.5})$$

$$u_2 = v \sin\theta_2 + \frac{dw_2}{dt} \cos\theta_2 + \frac{-(L_R + L_1) \cdot \omega_M \cdot \cos\theta_M - L_Z \cdot \omega_M \cdot \sin\theta_M + e_z}{\cos\theta_2} \quad (\text{式 4.2.1.6})$$

$$u_3 = v \sin\theta_3 + \frac{dw_3}{dt} \cos\theta_3 + \frac{-(L_R + L_1 + L_2) \cdot \omega_M \cdot \cos\theta_M - L_Z \cdot \omega_M \cdot \sin\theta_M + e_z}{\cos\theta_3} \quad (\text{式 4.2.1.7})$$

ここで、MWD 車両が通常走行した場合の θ_N の範囲（約 1.5～2.5°程度）における $\cos\theta_N$ の変動は非常に小さいため、 $\cos\theta_N \cong 1$ 、 $\cos\theta_M \cong 1$ 、と近似すると以下が成り立つ。

$$\frac{dw_1}{dt} \cong u_1 - v \sin \theta_1 + L_R \cdot \omega_M + L_Z \cdot \omega_M \sin \theta_M - e_z \quad (\text{式 4.2.1.8})$$

$$\frac{dw_2}{dt} \cong u_2 - v \sin \theta_2 + (L_R + L_1)\omega_M + L_Z \cdot \omega_M \sin \theta_M - e_z \quad (\text{式 4.2.1.9})$$

$$\frac{dw_3}{dt} \cong u_3 - v \sin \theta_3 + (L_R + L_1 + L_2)\omega_M + L_Z \cdot \omega_M \sin \theta_M - e_z \quad (\text{式 4.2.1.10})$$

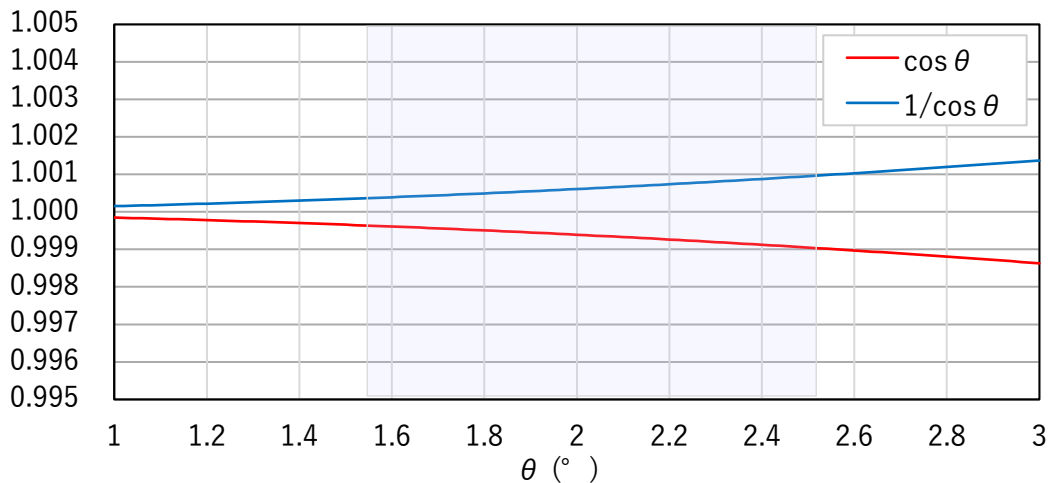


図 4.2.1.3 MWD 走行時における θ に対する $\cos \theta$ の変動

2) 車両上下振動ノイズの除去

3 つのドップラ振動計は架台を介して車両に剛結されているため、車両上下振動ノイズ e_z は全て同じ値を観測することに着目すると、それぞれの観測値の差を取ることで e_z の除去が可能となる。また上述の L_R 、 L_Z も除去可能となる。ドップラ振動計のたわみ速度の差に着目してノイズの除去を行うことから、本手法をたわみ速度差法と記すこととした。(式 4.2.1.8)～(式 4.2.1.10)の差分より、(式 4.2.1.11)、(式 4.2.1.12)が導出される。

$$\frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_2}{dt} = (u_1 - u_2) - v(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) - L_1 \cdot \omega_M \quad (\text{式 4.2.1.11})$$

$$\frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_3}{dt} = (u_1 - u_3) - v(\sin \theta_1 - \sin \theta_3) - (L_1 + L_2) \cdot \omega_M \quad (\text{式 4.2.1.12})$$

たわみ曲線、たわみ速度曲線に関しては 4.1 ウェーブレット法と同様であり、(式 4.2.1.14)が成り立っている。ここで、既往の研究⁹⁾よりたわみのピーク発生位置 $d(\text{mm})$ は走行速度が速くなるほど荷重中心後方の離れた位置に生じる (図 4.2.1.4、図 4.2.1.5) ことがわかっており、(式 4.2.1.15)のように車速 $v(\text{km/h})$ の関数で近似が可能である。

$$w = ae^{-b(x-d)^2} \quad (\text{式 4.2.1.13})$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dw}{dx} \cdot (-v) = 2abv(x-d)e^{-b(x-d)^2} \quad (\text{式 4.2.1.14})$$

$$d = \frac{0.00006597 \cdot v^3 - 0.02039 \cdot v^2 + 2.949 \cdot v - 0.3333}{1000} \quad (\text{式 4.2.1.15})$$

ここで、

- a : 路面の最大たわみ量を示す変数
- b : たわみ曲線の広がりを示す変数
- d : タイヤ直下からたわみピーク発生位置までの距離 (mm)

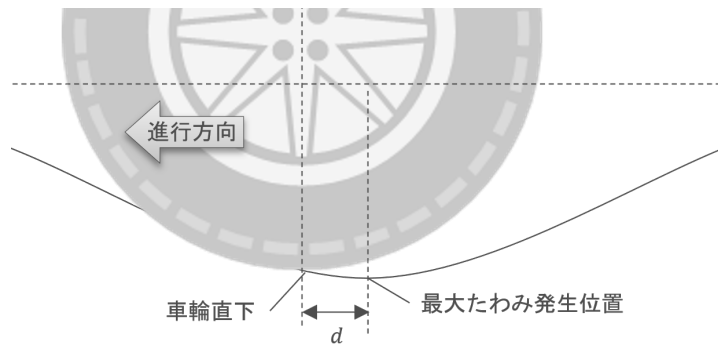


図 4.2.1.4 最大たわみ発生位置

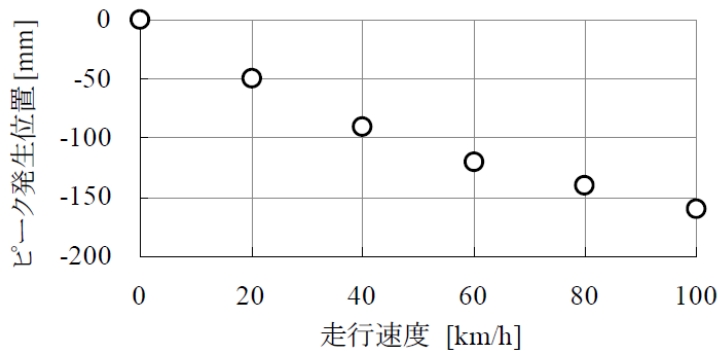


図 4.2.1.5 走行速度と最大たわみ発生位置の関係⁹⁾

3) 最大たわみ量 a の算出

路面のたわみ形状をたわみ曲線で近似した場合のたわみ速度の差は、(式 4.2.1.14)より以下の式で表せる。

$$\frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_2}{dt} = 2abv\{(x_1 - d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_1 - d)e^{-b(x_1-d)^2}\} \quad (\text{式 4.2.1.16})$$

$$\frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_3}{dt} = 2abv\{(x_1 - d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_3 - d)e^{-b(x_3-d)^2}\} \quad (\text{式 4.2.1.17})$$

(式 4.2.1.11)と(式 4.2.1.16)、(式 4.2.1.12)と(式 4.2.1.17)から、たわみ量 a の式として表すことができる。

$$a = \frac{(u_1 - u_2) - v(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) - L_1 \cdot \omega_M}{2bv\{(x_1 - d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_2 - d)e^{-b(x_2-d)^2}\}} \quad (\text{式 4.2.1.18})$$

$$a = \frac{(u_1 - u_3) - v(\sin \theta_1 - \sin \theta_3) - (L_1 + L_2) \cdot \omega_M}{2bv\{(x_1 - d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_3 - d)e^{-b(x_3-d)^2}\}} \quad (\text{式 4.2.1.19})$$

さらに式を整理すると(式 4.2.1.20)となる。

$$\frac{(u_1 - u_2) - v(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) - L_1 \cdot \omega_M}{2bv\{(x_1 - d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_2 - d)e^{-b(x_2-d)^2}\}} - \frac{(u_1 - u_3) - v(\sin \theta_1 - \sin \theta_3) - (L_1 + L_2) \cdot \omega_M}{2bv\{(x_1 - d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_3 - d)e^{-b(x_3-d)^2}\}} = 0 \quad (\text{式 4.2.1.20})$$

ここで(式 4.2.1.20)の変数は b のみである。式が成り立つ時の b を (式 4.2.1.18)または(式 4.2.1.19)に代入することで、最大たわみ量 a が求まる。

(2) 機器構成

機器の構成を図 4.2.1.6、図 4.2.1.7 に及び表 4.2.1.1 に示す。

車両走行時の後輪周辺に生じる路面の「たわみ速度」をドップラ振動計により計測し、計測されたたわみ速度よりたわみ量を推定する。後輪車軸に設置したひずみゲージにて荷重を、非接触温度計にて路面温度をリアルタイムで取得するため、FWD と同様に荷重・温度補正を行うことが可能となっている。

GNSS を除くすべての出力はアナログ信号で出力されたものを専用ロガーにより 2,000Hz で計測している。

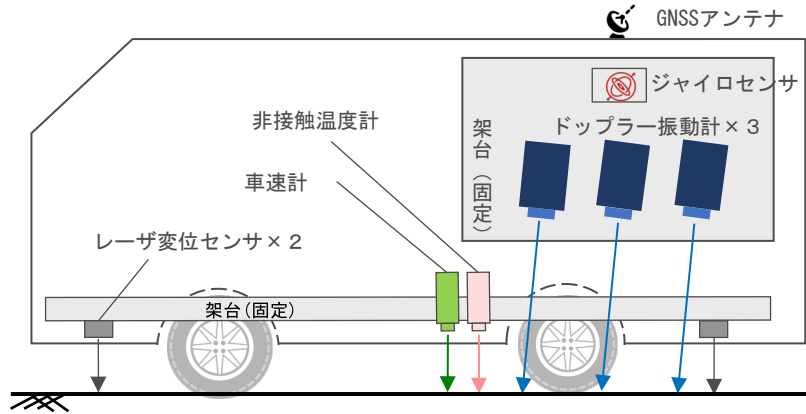


図 4.2.1.6 たわみ速度差法 機器配置図

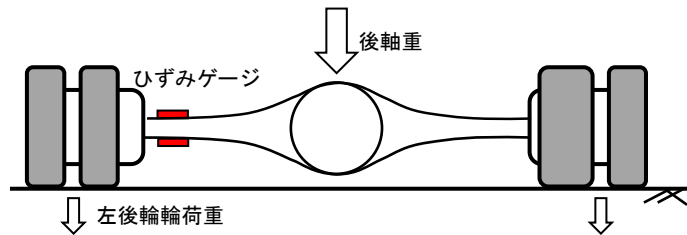


図 4.2.1.7 ひずみゲージ 配置図

表 4.2.1.1 主要機器構成

車両総重量	7.8 t (前軸重 2.7 t 後軸重 5.1 t)	
車両全長	7.5 m	
使用機器	必要台数	測定項目
ドップラ振動計	3	路面たわみ速度
ジャイロセンサ	1	車両角速度
レーザ変位センサ	2	車両角度
ひずみゲージ	2	後輪輪荷重
非接触赤外線センサ	1	気温・路面温度
ドップラレーザ距離計	1	車速・距離
GNSS	1	車両位置情報

たわみ速度差法において、ドップラ振動計と計測タイヤとの位置関係は以下の4通りがある。

- ①車輪後方に3つ
- ②車輪後方に2つ、車輪前方に1つ
- ③車輪後方に1つ、車輪前方に2つ
- ④車輪前方に3つ

①と②の測定結果の一例を図 4.2.1.8 に示す。相対的なたわみの大小箇所の抽出はどちらの場合も可能であることが分かるが、②の方がより正確にたわみを算出できることがわかっている。これは図 4.2.1.9 に示すように、タイヤを跨いでドップラ振動計を配置することでたわみ速度の差が大きくなることが要因と推測される。

なお、③については②と、④については①と、同様の位置関係であるため、代表して①と②について検討を実施している。

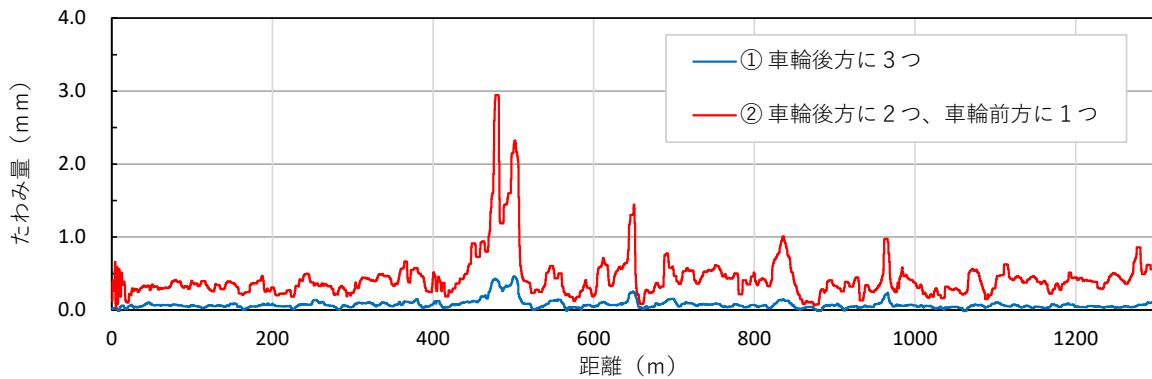


図 4.2.1.8 ドップラ振動計配置箇所によるたわみ量の違い

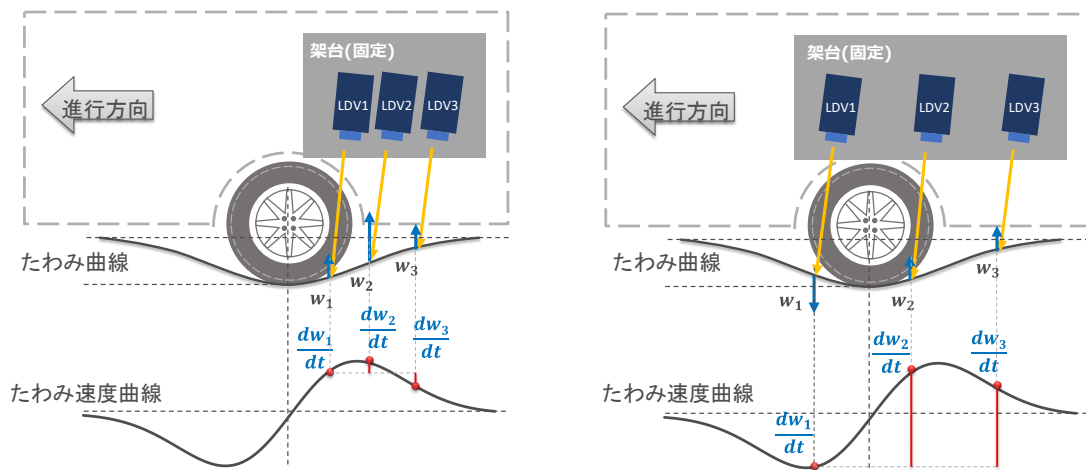


図 4.2.1.9 ドップラ振動計配置例 (左：車輪後方3台 右：車輪前方1台 車輪後方2台)

(3) 作業手順について

作業手順を以下のフロー図に示す。

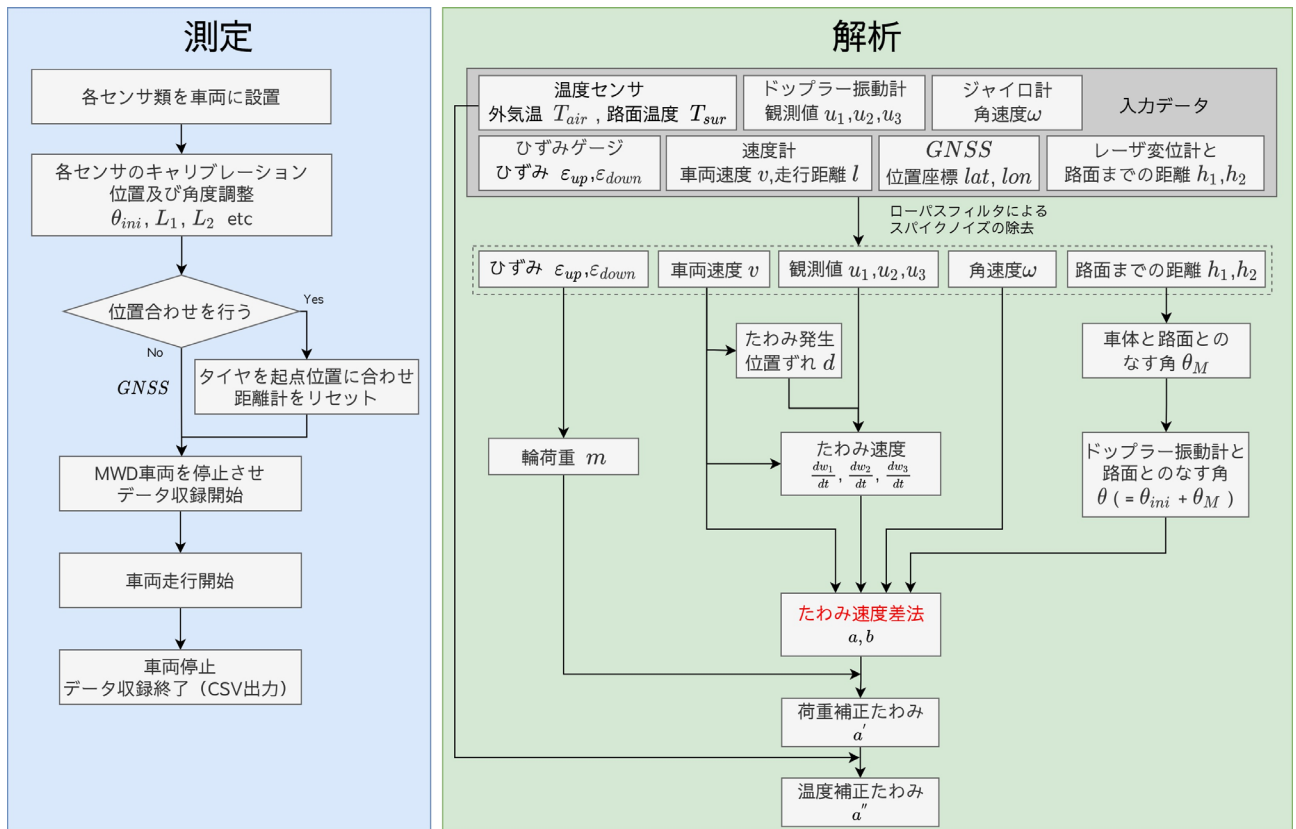


図 4.2.1.10 たわみ速度差法の作業フロー

1) 測定解析

- ・ ドップラ振動計およびジャイロセンサを架台へ剛結させる。このとき、3つのドップラ振動計は路面に対して微小角度（通常2°程度）傾斜させる。
- ・ 測定対象路面を計測する際は事前にセンサ類の初期状態を計測するためのキャリブレーションを行う。キャリブレーションは毎回行う必要はないが、定期的実施し機器に異常がないかを確認する。
- ・ キャリブレーション後、測定対象路面へMWD車両を移動する。測定したたわみを距離計と対応させる場合は、左後輪を事前にマーキングした起点位置に合わせて停車する。GNSSと対応させる場合は事前のマーキングや位置合わせは不要であるが、位置精度はGNSS測定条件に依る。
- ・ 車両を停止させた状態で記録を開始する。停止時において定常的にセンサに観測される値はゼロ点補正により除去する必要があるため、10秒程度停車時のセンサデータを取得しておく。
- ・ 測定対象路面上をMWDで走行する。対象区間を通過後に収録を停止する。測定データは解析を行うためcsv形式で出力する。

2) 解析

- ・ 測定前停車時の収録データを用いてセンサデータのゼロ点補正を行う。
- ・ たわみ速度式 (式 4.2.1.20) における d を、(式 4.2.1.15)を用いて求める。
- ・ たわみ速度差法より、たわみ波形式における a, b を算出する。

4.2.2 土木研究所外周路での測定

土木研究所外周路（4.1.2と同じ測定区間）における、たわみ速度差法を用いたたわみ量の測定結果を図4.2.2.1、図4.2.2.2に示す。図4.2.2.1から、たわみの局所的変状を捉えていることが分かる。またFWDの D_0 たわみ量とも概ね一致していることがわかる。また、図4.2.2.2からFWDたわみ量との相関が高いことが確認されており、本調査によるネットワークレベルでの調査は十分可能であるものと考えられる。

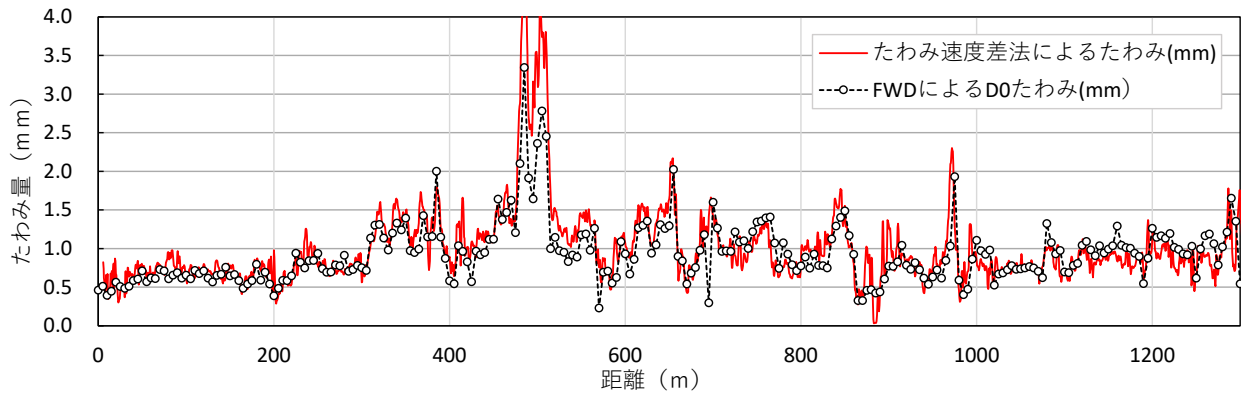


図 4.2.2.1 MWD（たわみ速度差法）と FWD によるたわみ量の比較

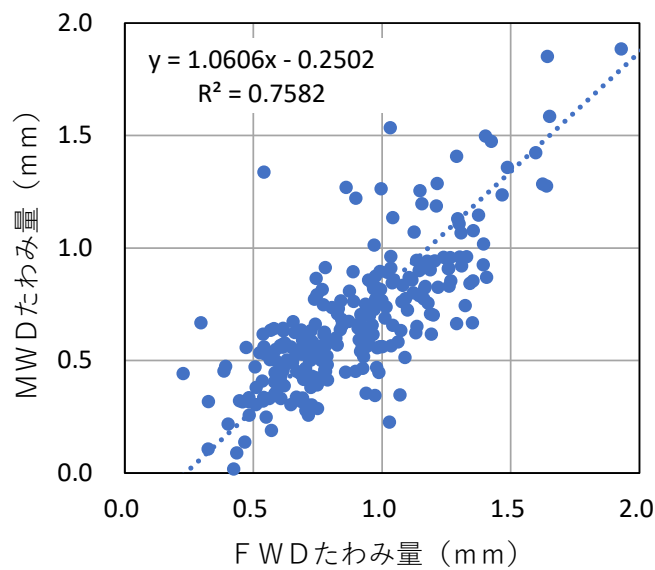


図 4.2.2.2 MWD（たわみ速度差法）と FWD のたわみ量相関図

4.2.3 測定間隔（測定周波数）の影響

（1）目的

一般的にデータ取得間隔が短いほど取得データ内に含まれる高周波数の上限は大きくなり含まれる情報は増える。それに伴いデータ容量は大きくなりデータ処理にも時間を要する。そこで、効率的な計測、解析のためには取得対象に適したデータ取得間隔が必要となる。

本検証では、データ取得間隔の相違が MWD たわみ量に与える影響を確認するため、測定間隔を変えて取得した MWD データからたわみ速度差法で算出した MWD たわみ量の比較を行った。

（2）測定データ

4.1.3 で測定した 8 パターンのデータを用いた。表 4.2.3.1 に測定パターンを整理した結果を示す。正常に MWD たわみ量算出できる場合、誤差は含むが同程度の MWD たわみ量が算出できる場合、異なる値で MWD たわみ量が算出される場合が確認できるように計測速度、測定間隔を設定している。

表 4.2.3.1 測定パターンと計測間隔の妥当性

測定間隔	取得データの 測定間隔の妥当性	
	20 km/h	40 km/h
100Hz	△	×
250Hz	○	△
500Hz	○	○
1000Hz	○	○
1500Hz	○	○

（3）解析結果

解析結果を図 4.2.3.1、図 4.2.3.2 に示す。結果から、測定間隔によって MWD たわみ量に大きな差は見られなかった。特に、妥当性検討で異なる値になると想定していた 40 km/h の 100Hz においても MWD たわみ量は他の測定間隔と同傾向を示していた。その要因として、取得対象路面から得られる測定データに含まれる周波数が、単純な 40 km/h で 10 cm での測定間隔（111.11Hz）と同程度である 100Hz でも MWD たわみ量の算出に必要な周波数情報が得られたためと考えられる。

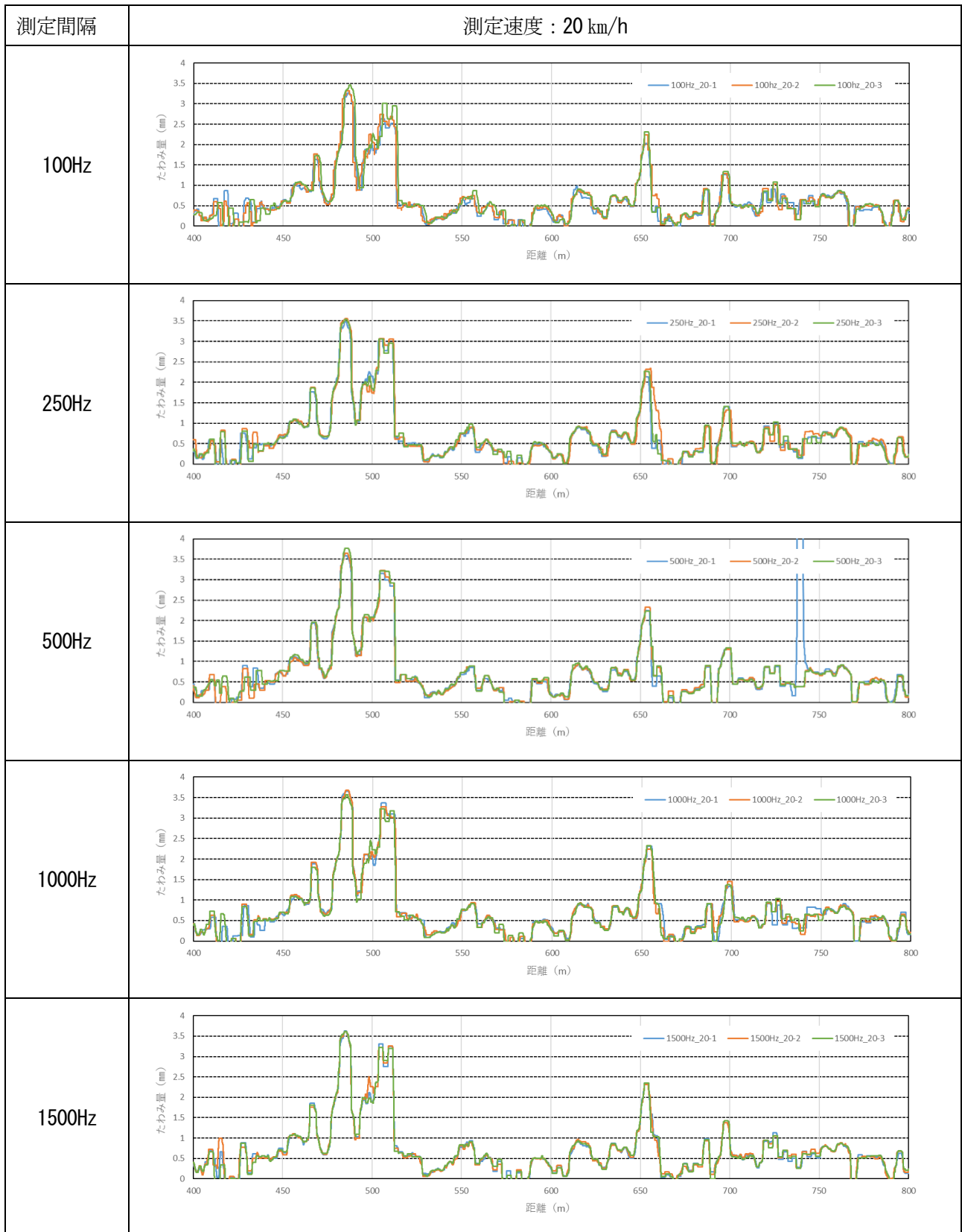


図 4. 2. 3. 1 各データ間隔での MWD たわみ量 (測定速度 20 km/h)

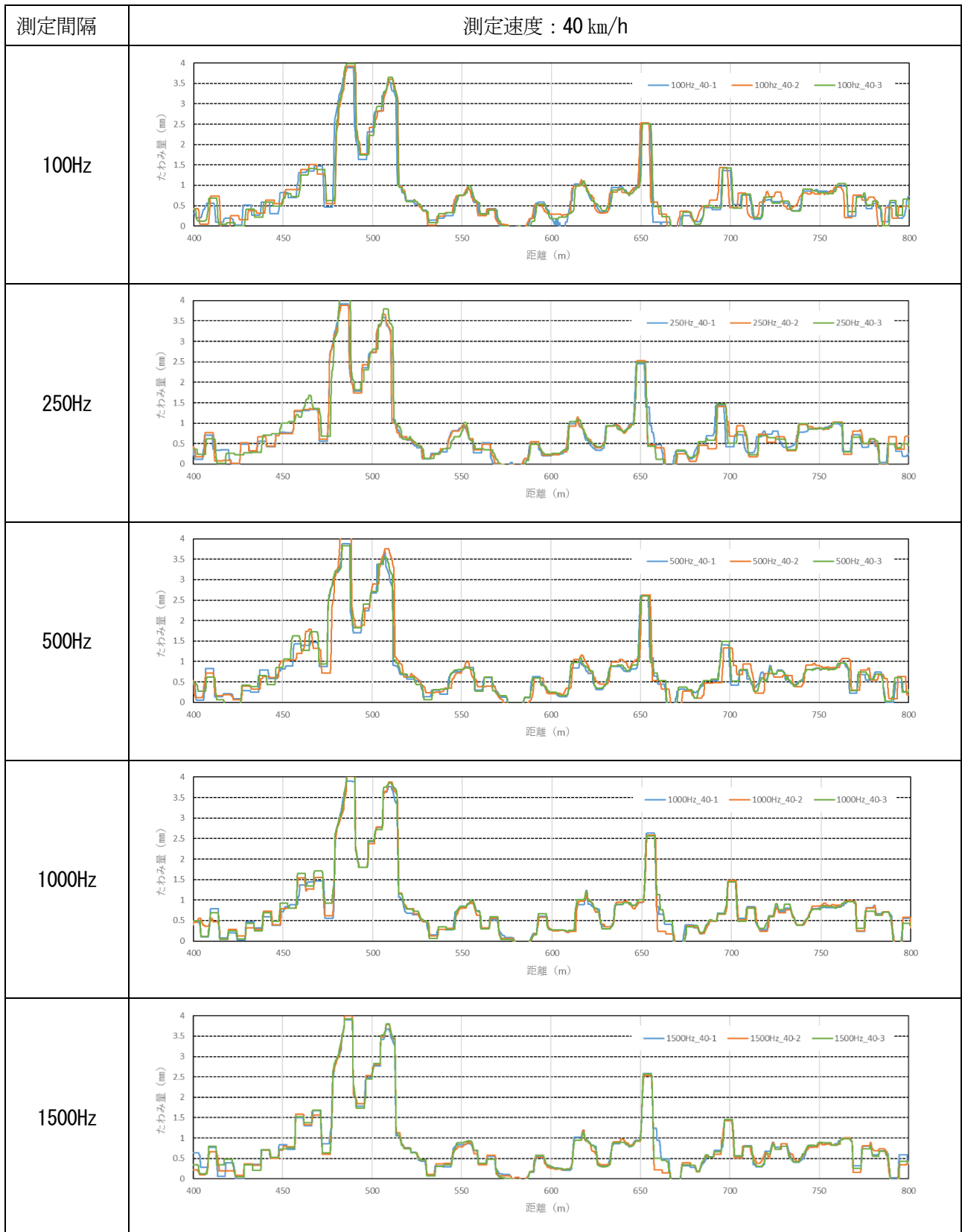


図 4.2.3.2 各データ間隔での MWD たわみ量 (測定速度 40 km/h)

(4) まとめ

データ取得間隔の相違が MWD たわみ量に与える影響について確認した結果、以下の知見を得た。

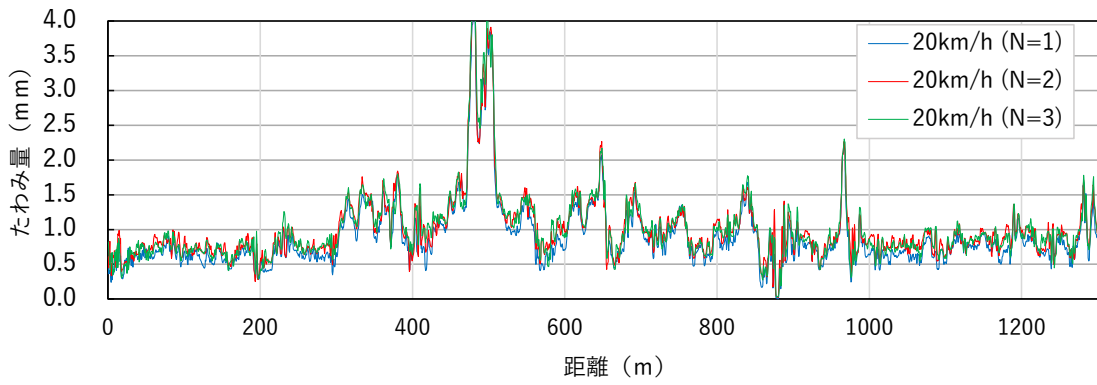
・ 20 km/h、40 km/h で異なる測定間隔で取得したデータを解析した結果、サンプリング定理に基づき異なる値になると想定していた 40 km/h の 100Hz においても MWD たわみ量は他の測定間隔と同傾向を示していた。

4.2.4 速度の影響

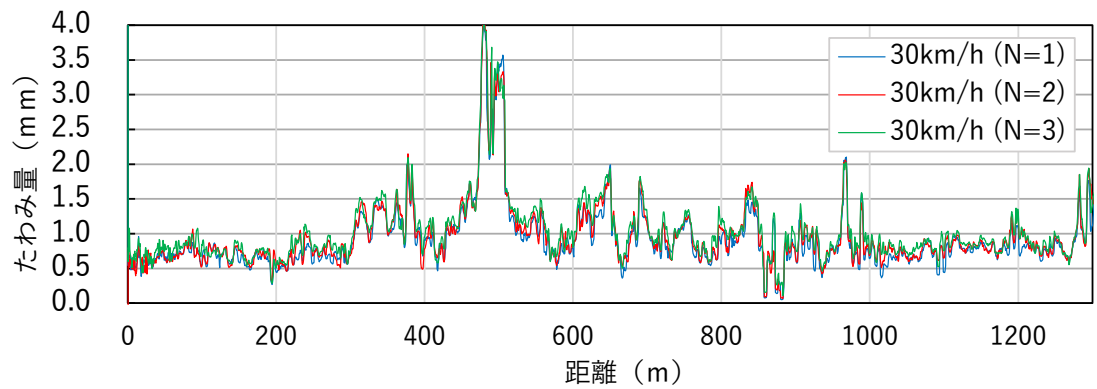
走行速度が解析結果に及ぼす影響を調査するため、土木研究所外周路において4.1.4と同条件のもと、車速を3水準に設定し測定を行った。各速度における測定回数はN=3回とし、たわみ量の結果は荷重補正のみを行っている。温度については同時刻にすべて測定を行い、路面および気温の温度変温による影響は殆どないため、温度補正は行っていない。

計測結果を図4.2.4.1、図4.2.4.2に示す。図4.2.4.1(a)~(c)より、各速度におけるたわみ量測定結果は非常によく一致している。また、図4.2.4.1(d)より、走行速度を変化させても形状はほとんど一致することがわかる。

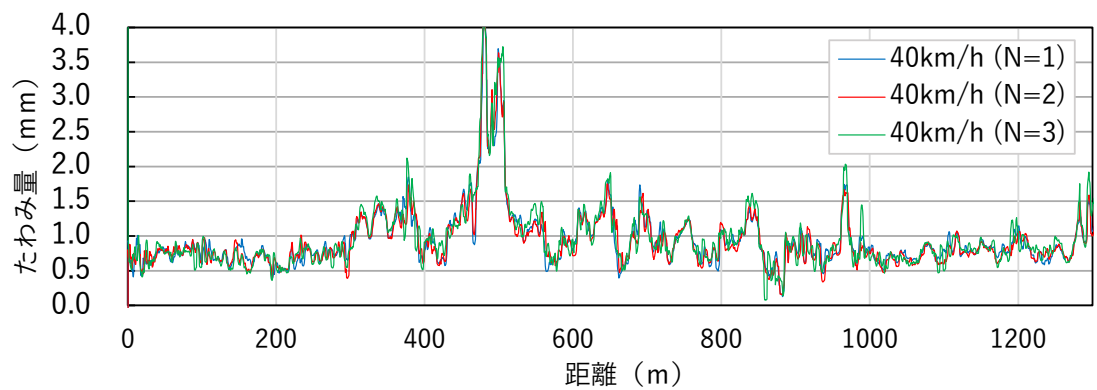
たわみ速度差法は、データを時系列ごとに逐次解析していくため、速度による影響は少ないと考えられる。



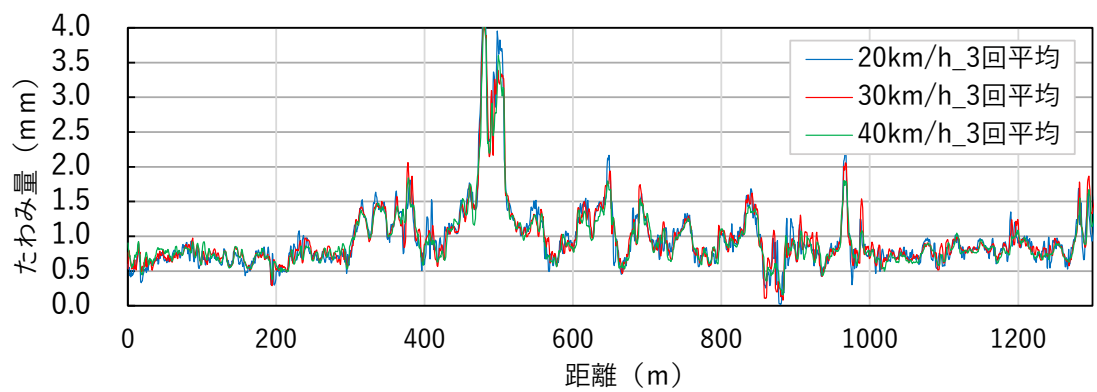
(a) 20km/h



(b) 30km/h



(c) 40km/h



(d) 各速度平均および全速度平均

図 4.2.4.1 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断図(荷重補正_たわみ速度差法)

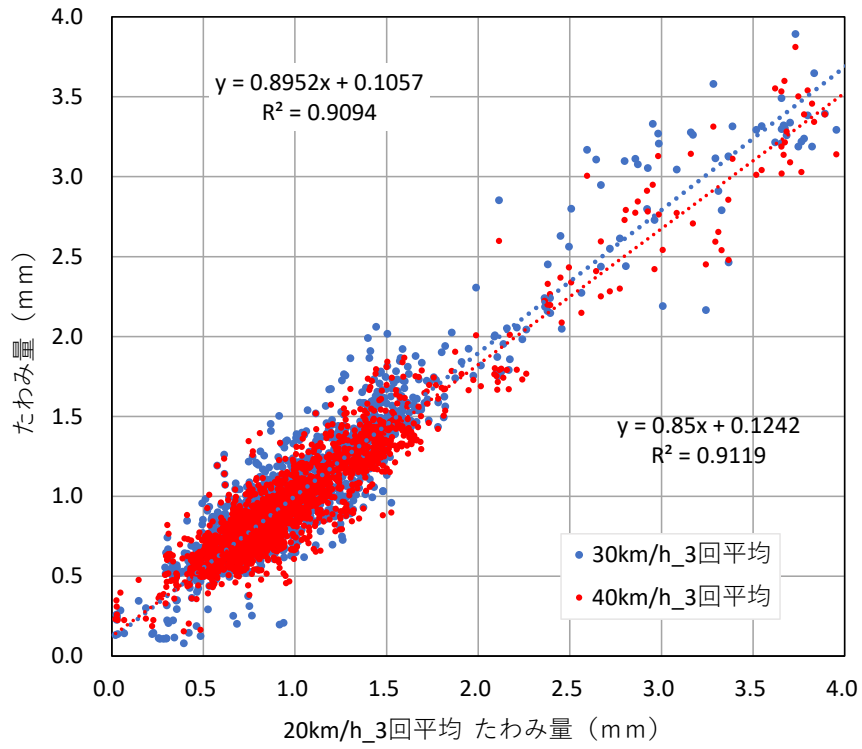


図 4.2.4.2 各速度条件におけるたわみ量の相関関係

4.2.5 温度の影響

測定時期の異なる MWD たわみを比較するためには、標準状態における MWD たわみを求める必要がある。測点区間での MWD 測定により得られたたわみとアスコン層の温度を用いて、MWD 最大たわみ量 a の温度補正についての検討を行った。

(1) 測定概要

測定箇所：土木研究所外周路 1300m

測定日時、測定温度：表 4.2.5.1 参照

表 4.2.5.1 に本調査の測定概要を示す。アスコン層温度に対して複数条件で測定を行った。

車速は 3 水準、測定回数は 3 回とし、たわみ速度差法の解析を行った。

また、MWD 測定と同時期に FWD 測定を行い、FWD の温度条件によるたわみ量変化との差異を観測し考察を行う。なお、FWD は、起点から 400m～800m 地点の特にたわみ量の変動が大きな範囲で測定を行った。

表 4.2.5.1 土木研究所外周路 MWD 測定概要

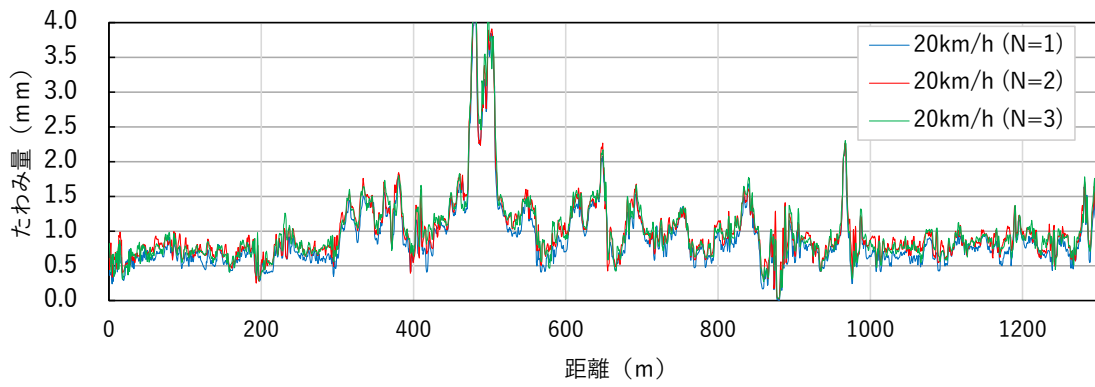
測定日時	時刻測定	目標表面温度	測定表面温度	車速 (km/h)	測定回数
2020/8/21	10:00-12:00	高温時 (45℃程度)	約55℃程度	20 30 40	N=3
2020/8/24	14:00-16:00				
2020/10/13	8:00-10:00	標準温度 (20℃程度)	約30℃程度		
2020/10/15	8:00-10:00				
2021/1/6	8:00-10:00	低温時 (5℃程度)	約10℃程度		
2021/1/7	8:00-10:00				

(2) 測定結果

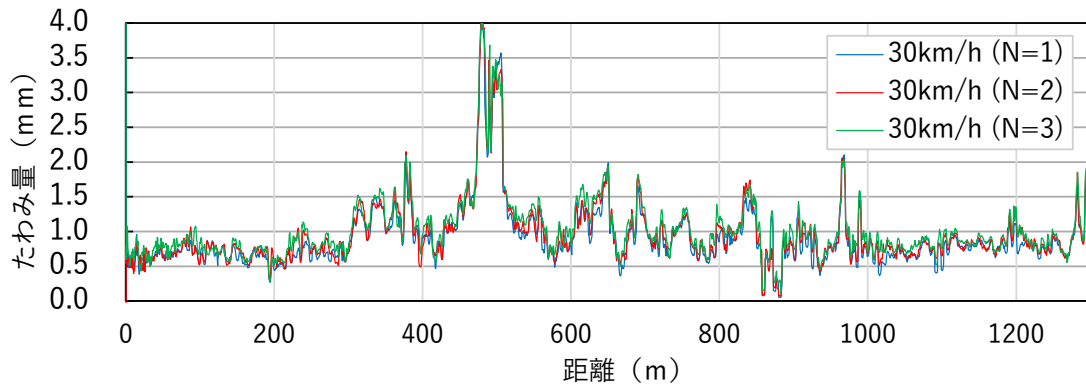
1) 各温度条件における MWD たわみ量

各温度条件におけるたわみ速度差法の MWD たわみ縦断の各データを図 4.2.5.1～図 4.2.5.4 に示す。

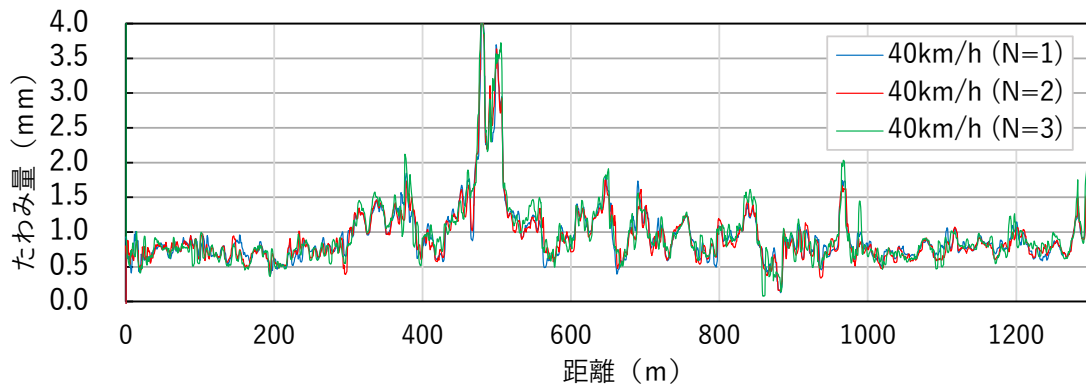
各速度条件、各測定回数の測定結果にはほとんど差がないため、図 4.2.5.4 では測定的全データ(速度 3×回数 3=9 データ)の平均のたわみ量を各温度でのたわみ量として表示する。



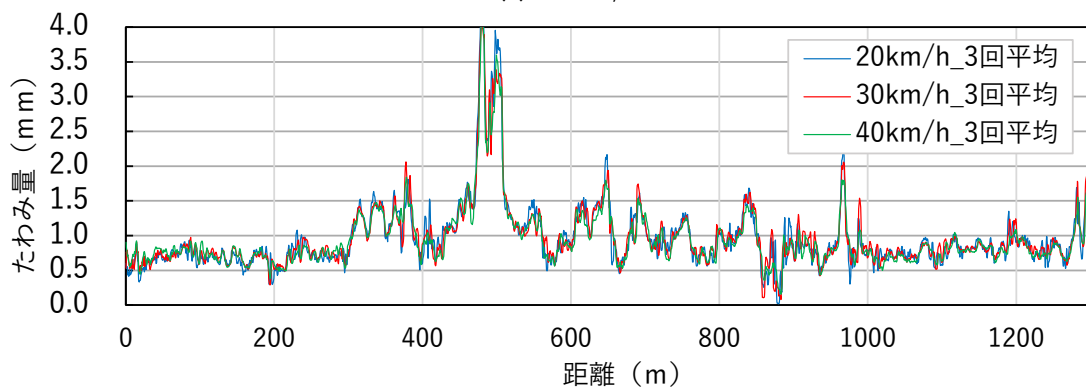
(a) 20km/h



(b) 30km/h

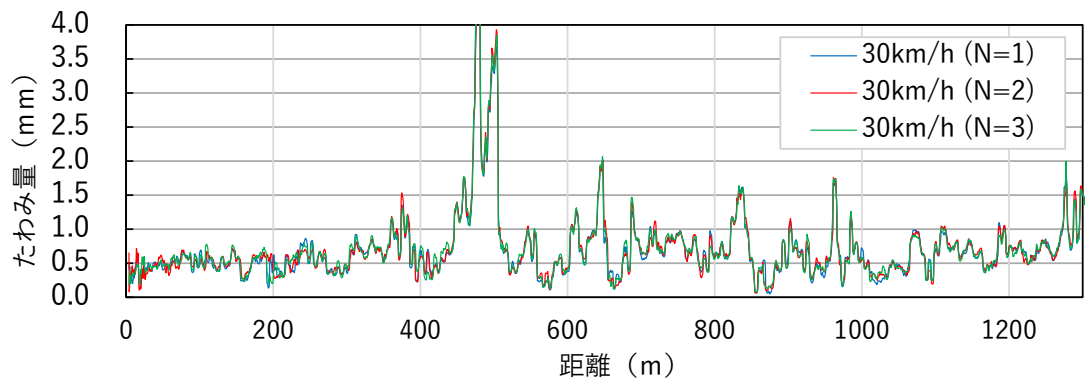


(c) 40km/h

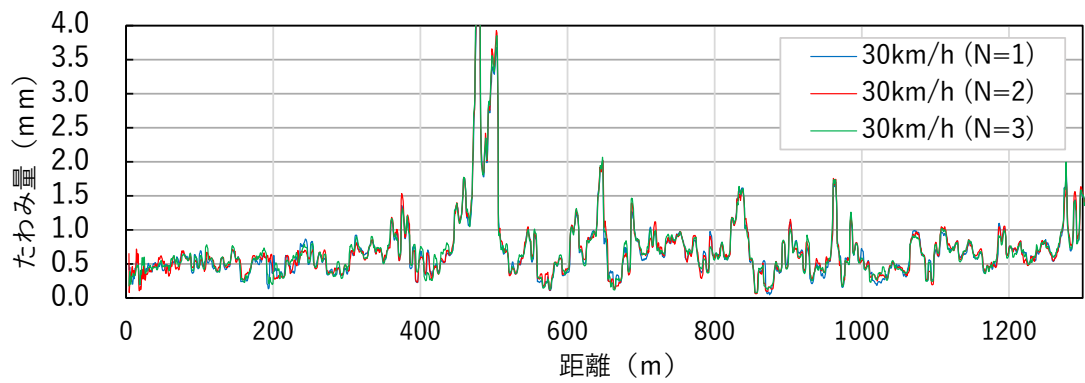


(d) 各速度平均

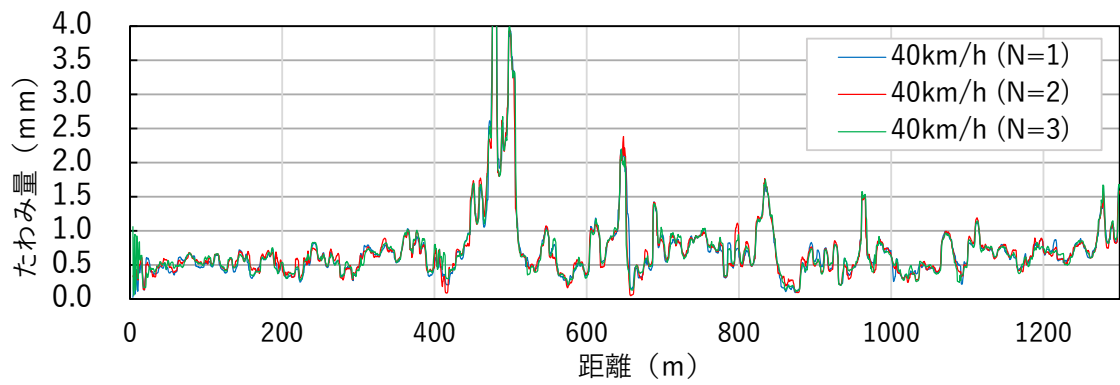
図 4.2.5.1 高温時(約 55℃) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断面図



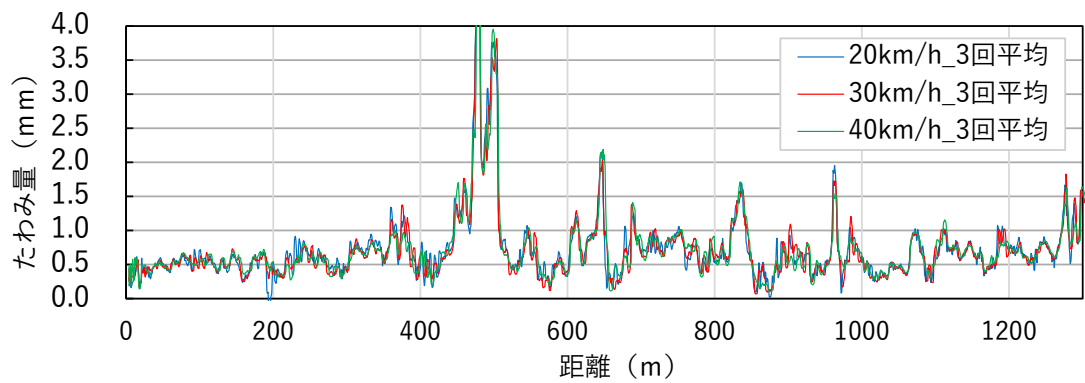
(a) 20km/h



(b) 30km/h

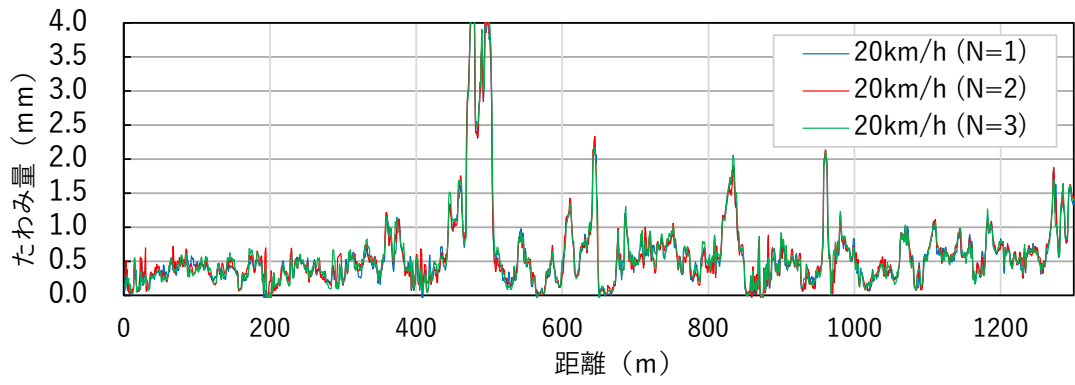


(c) 40km/h

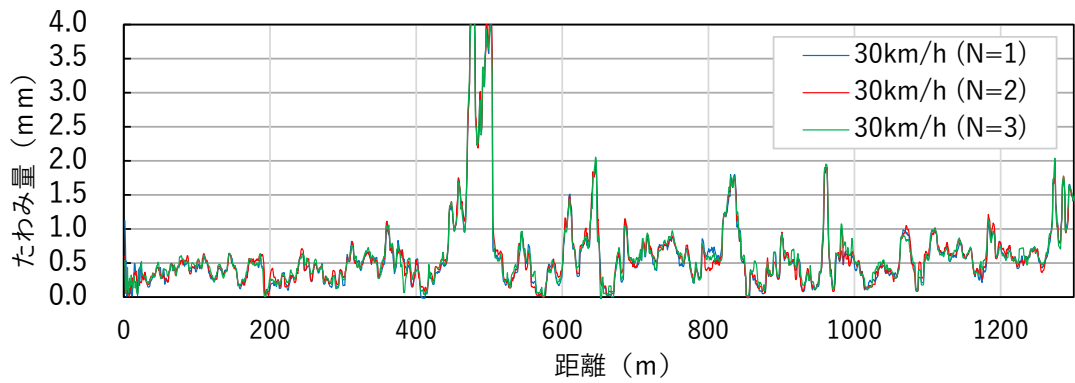


(d) 各速度平均

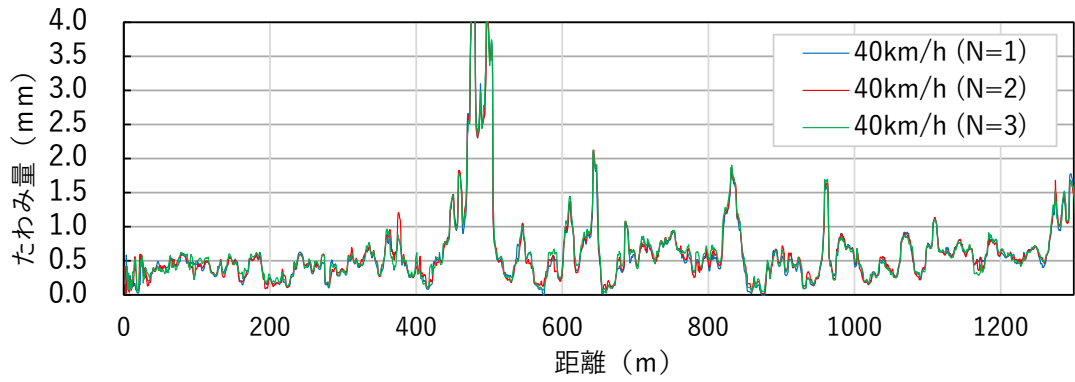
図 4.2.5.2 平温時(約 30°C) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断面図



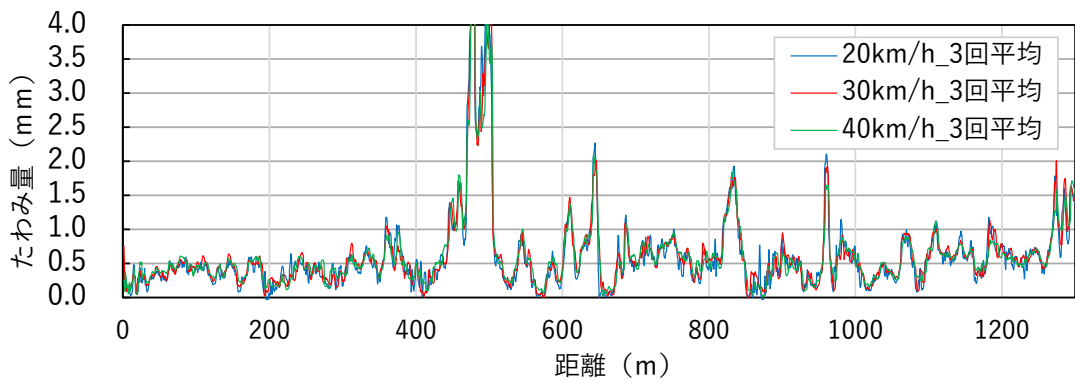
(a) 20km/h



(b) 30km/h



(c) 40km/h



(d) 各速度平均

図 4.2.5.3 低温時(約 10℃) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断面図

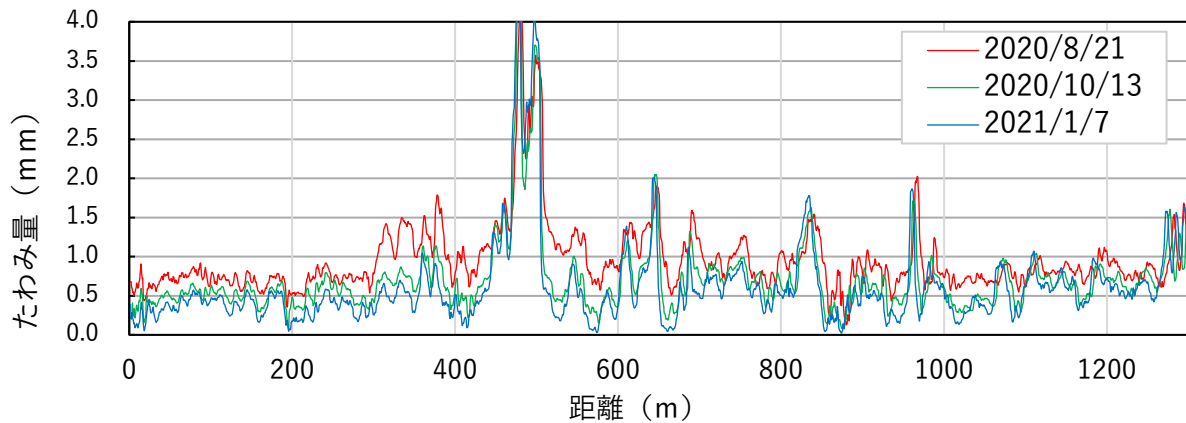


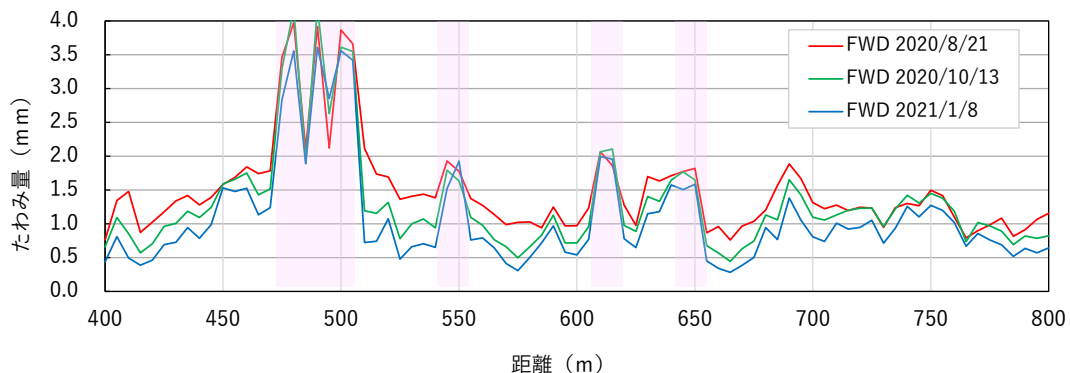
図 4.2.5.4 各温度での MWD たわみ縦断図 (荷重補正_たわみ速度差法)

図 4.2.5.4 より、大部分において低温・標準温度・高温の順にたわみ量が大きくなっていることから、MWD たわみ量も FWD たわみ量と同様に温度の影響により増減するということがわかる。

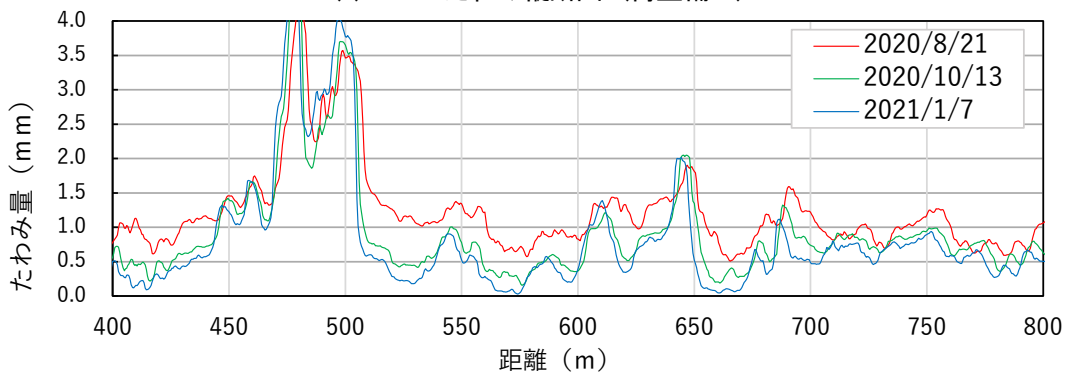
2) FWD たわみ量と MWD たわみ量の比較

400～800m 地点において、同時期に測定した FWD 荷重補正たわみと MWD 荷重補正たわみの比較を図 4.2.5.5 に示す。温度条件によるたわみ量の変化は FWD と MWD で似た傾向を示している。

図のハッチング箇所は他区間と比較してたわみが大きく且つ温度によるたわみ差が少ない。この区間はひび割れが多く亀甲状の箇所も多く存在する箇所であった。



(a) FWD たわみ縦断図 (荷重補正)



(b) MWD たわみ縦断図 (荷重補正_たわみ速度差法)

図 4.2.5.5 荷重補正後-たわみ量比較

3) 温度補正式の検討

FWD に用いられる温度補正式¹⁰⁾ (式 4.2.5.1) が、MWD のたわみ測定値にも適用可能かの検討を行った。MWD たわみの標準状態を、FWD と同様に載荷荷重 49kN・アスコン層の平均温度 20℃と設定し、荷重補正したたわみ量に温度補正を行った。なお、(式 4.2.5.2) の舗装体温度算出には FWD・MWD それぞれの測定日時・気温センサ・路面温度センサから得られた値を入力し、舗装構成は過去文献¹¹⁾より図 4.2.5.6 を標準としてたわみ量の算出を試みた。

$$D_t = CF \times D_w$$

$$\log CF = (-4.914 \times H_{as} + 2) \times 10^{-4} \times (T_{(s,t)} - 20) \dots\dots\dots (式 4.2.5.1)$$

- ここに、 D_t : 荷重・温度補正後の最大たわみ量 (μm)
- CF : 20℃の D_w (荷重補正後のたわみ量)に対する補正係数
- H_{as} : アスコン層の厚さ (cm)
- $T_{(s,t)}$: 舗装体温度 (アスコン層の平均温度) (℃)

$$T_{(s,t)} = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + e \dots\dots\dots (式 4.2.5.2)$$

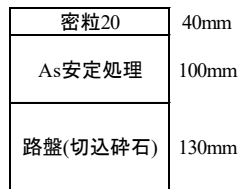


図 4.2.5.6 土木研究所外周路 舗装構成 (推定断面)

荷重・温度補正後の結果を図 4.2.5.7、図 4.2.5.8 に示す。亀甲状のひび割れが多く、舗装の損傷が著しい箇所 (ハッチング部分) に関して、温度補正後の低温時測定データと高温時測定データのたわみ量が乖離している。特に、低温時測定データの方が、値が大きく算出される傾向がある。当該箇所はひび割れによる損傷によりアスコン層が弾性体として均一に存在していないと推測される。そのため FWD や MWD による実際の舗装のたわみは温度による影響を受けにくい状況であるにもかかわらず、通常温度補正式による処理を行ったため、温度補正が過剰に作用したことが原因と推測される。

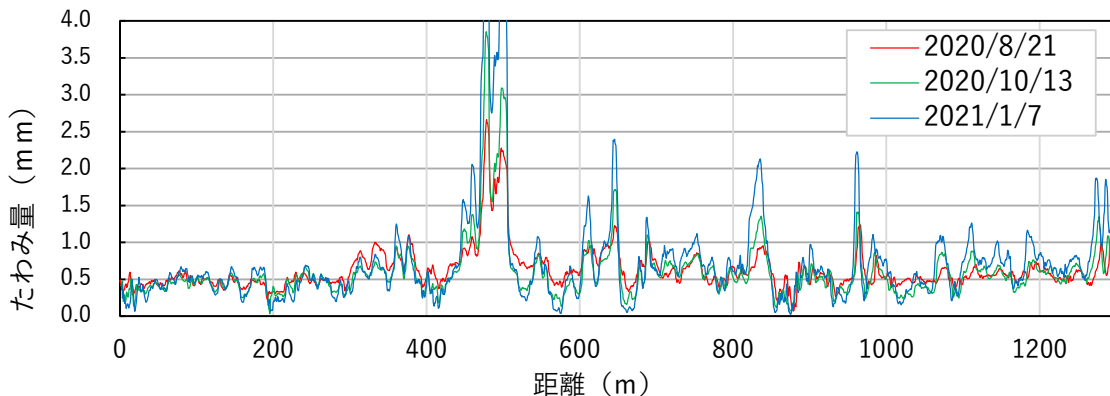
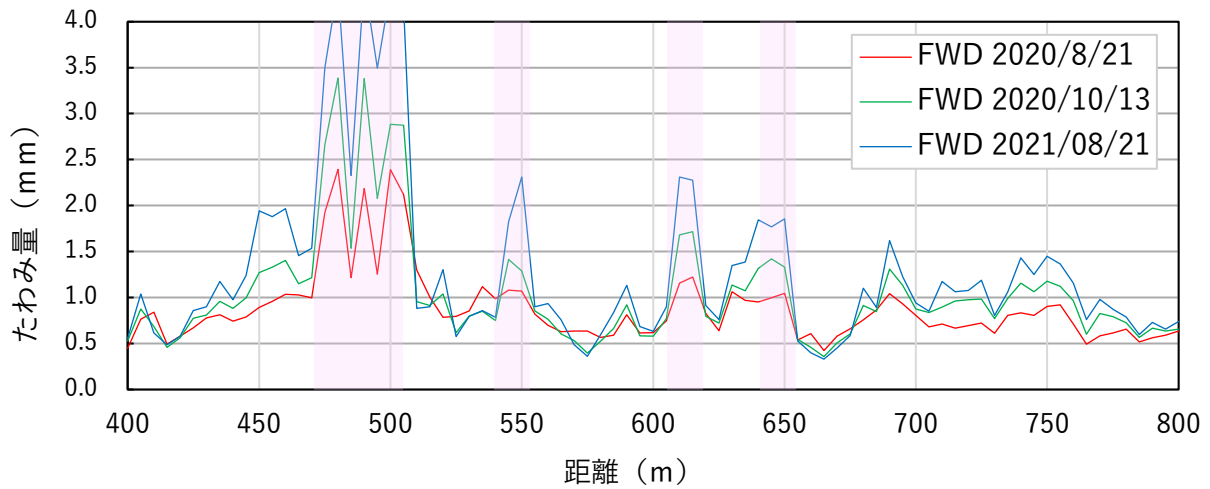
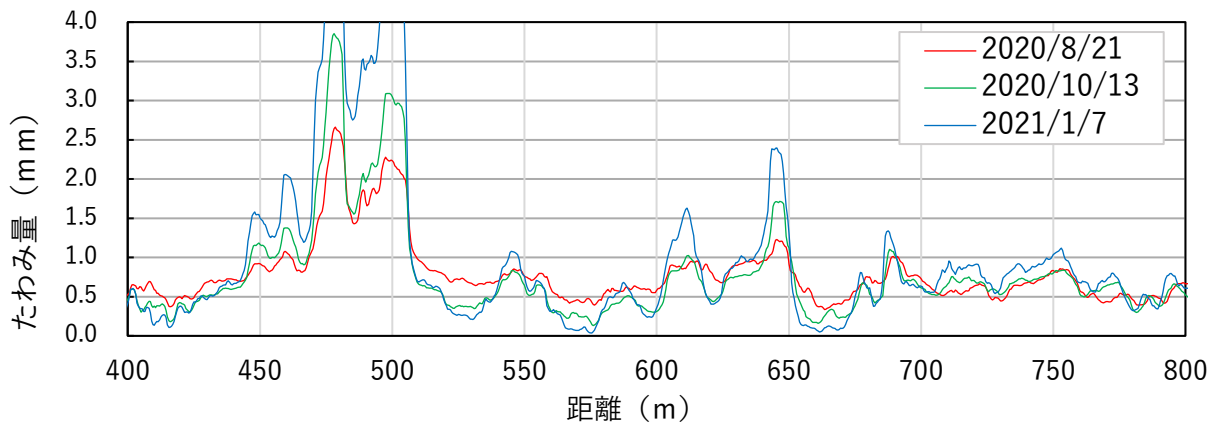


図 4.2.5.7 MWD たわみ縦断面図 (荷重・温度補正_たわみ速度差法)



(a) FWD たわみ縦断面図 (荷重・温度補正)



(b) MWD たわみ縦断面図 (荷重・温度補正_たわみ速度差法)

図 4.2.5.8 荷重・温度補正後-たわみ量比較

FWD・MWD の荷重・温度補正後たわみの相関を図 4.2.5.9 に示す。たわみが大きい箇所はバラツキが大きいものの、単回帰分析において総じて高い相関がある。また、各温度条件での回帰直線の傾きは 0.8 付近に収まっている。

以上の結果より (式 4.2.5.1) は MWD にもある程度は流用可能であると考えられる。

また、温度補正式 $\log CF = a \times (T_{(s,t)} - 20)$ において、異なるアスコン層厚やアスコン層温度についてより多くのデータを用いて解析をすることで、今後さらに適した係数 a を設定できる可能性がある。

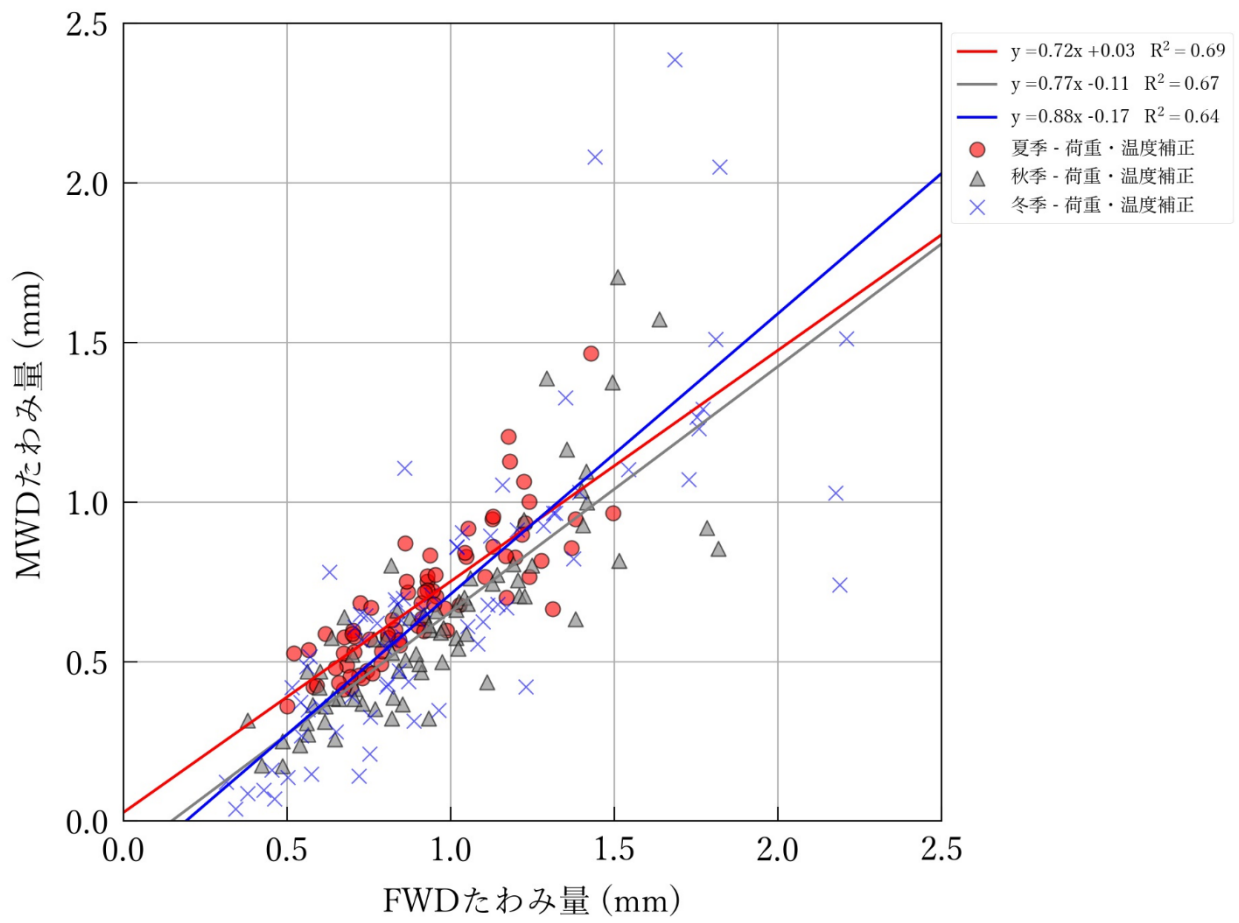


図 4.2.5.9 FWD-MWD 荷重・温度補正後のたわみ量相関

4.2.6 走行位置の影響

(1) 目的

MWD は走行計測のため、走行中のハンドル操作などで蛇行が発生し、測線位置に対してズレて計測することがある。その場合、同じ測線を計測しても、測線のズレにより計測値にばらつきが発生することになる。

本検証では、走行計測による計測値のばらつきの原因となる走行時の測線位置のズレが MWD たわみ量に与える影響についてたわみ速度差法による結果から確認する。

(2) 使用データ

土木研究所外周路で実施した計測データを用いた。対象区間は図 4.2.6.1 に示す比較的たわみ量が大きい区間とした。

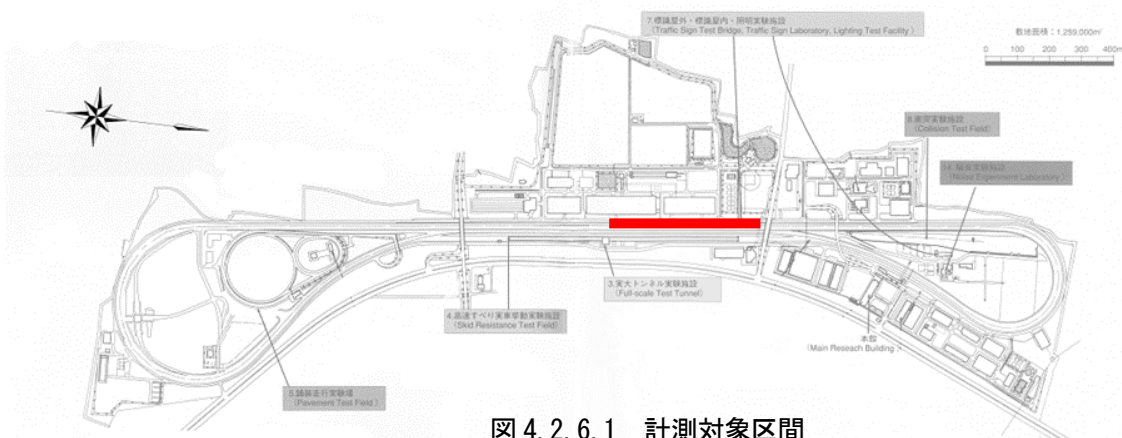


図 4.2.6.1 計測対象区間

1) 計測日時

計測は 2020 年 10 月 14 日（水）に実施した。当日の天候は曇り/晴れであった。実施状況を写真 4.2.6.1 に示す。

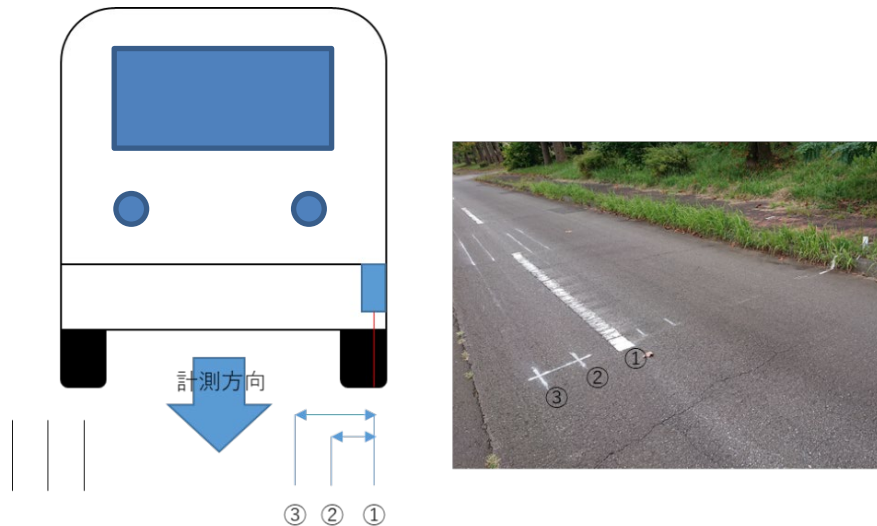


写真 4.2.6.1 計測状況

2) 計測方法

たわみ量が既知の場所において、測線をずらして計測した。当初は左右に同じ間隔でずらして設置する予定であったが、左側は路肩が近く、計測できないことから、右側のみに設置することとした。

正しい計測線に対して、右方向にタイヤ1個ずれた場合(+30 cm)、タイヤ2個ずれた場合(+60 cm)の計測を行った。計測模式図を図4.2.6.2に示す。計測は時速20 kmで各測線5回行った。



計測は下記3パターンについて各5回計測

- ① FWDと同一測線
- ② 進行方向右にタイヤ1つ分ずれた測線 (30cm)
- ③ 進行方向右にタイヤ2つ分ずれた測線 (60cm)

図4.2.6.2 計測模式図

(3) 解析結果

1) MWD たわみ量の比較

計測したデータを用いて、たわみ速度差法で MWD たわみ量を算出した。たわみ速度差法の結果を図4.2.6.3に示す。測線位置0 cmでは FWD たわみ量と同じ傾向を示していた。測線位置0 cmと比較するとウェーブレット法と同様に、470~510m の FWD たわみ量が比較的大きい箇所では測線が離れるほどたわみ量の低減がみられ、700m~750m のようにたわみ量が比較的小さい箇所では測線による相違が見られなかった。

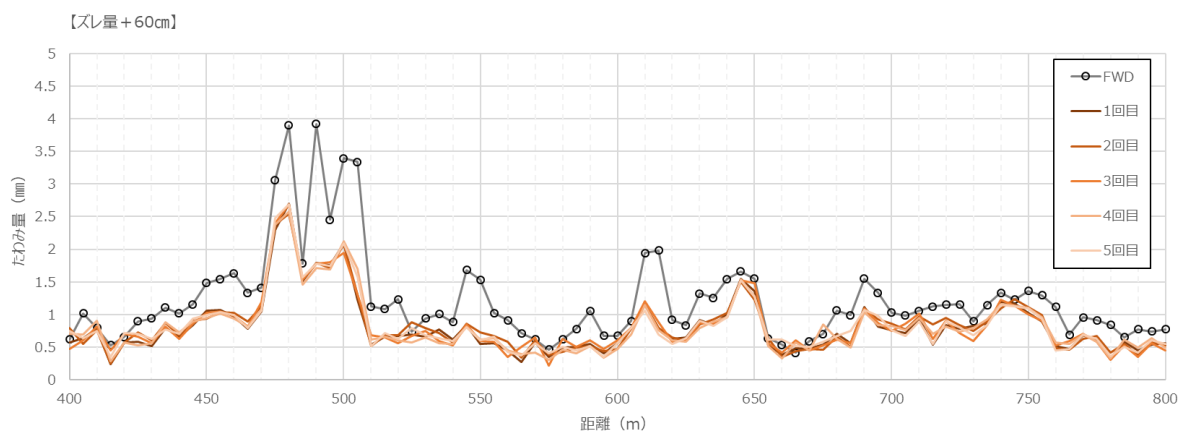
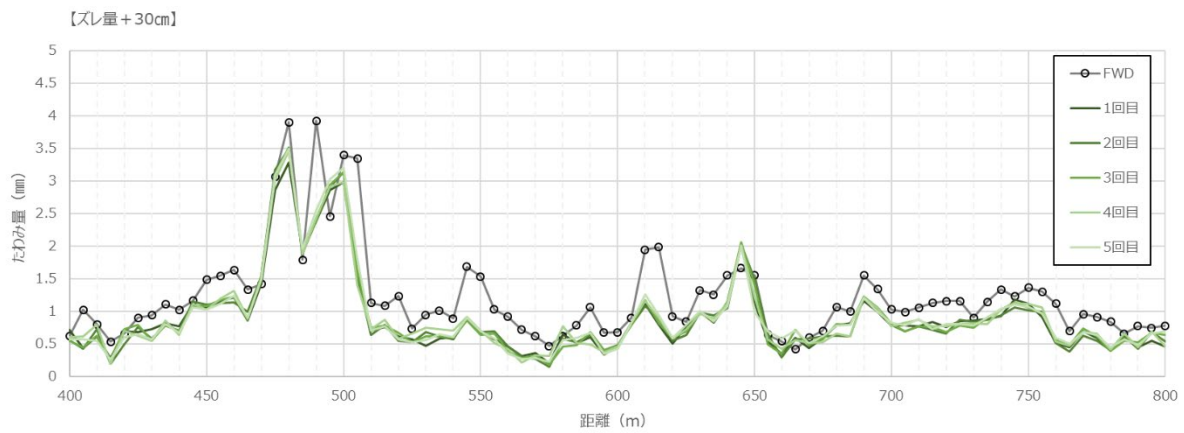
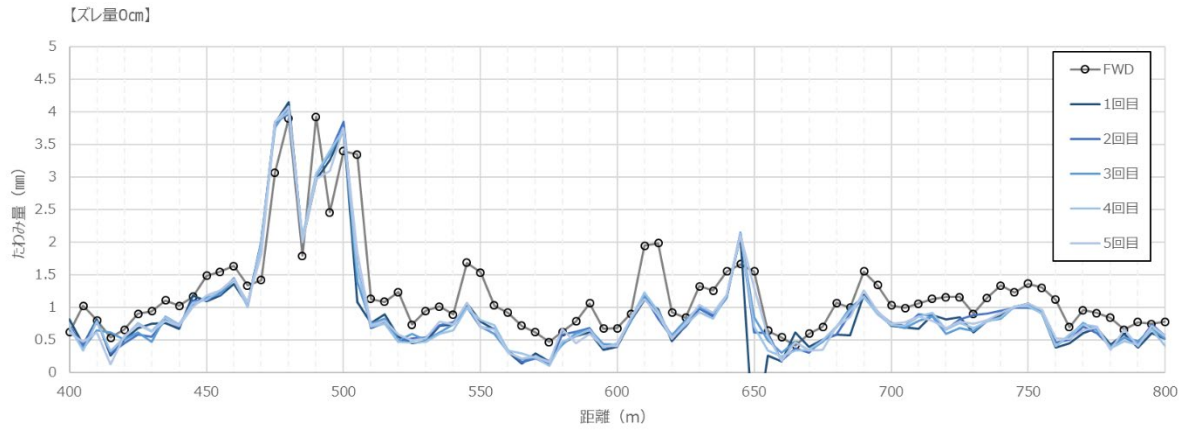


図 4.2.6.3 たわみ速度差法により算出したたわみ量

2) 繰り返し再現性

各測線位置において、MWD たわみ量の各測点の標準偏差と変動係数の平均値を求め、5回計測の繰り返し再現性を確認した。結果を表 4.2.6.1 に示す。計測位置における再現性の差は見られなかった。

表 4.2.6.1 各測点における標準偏差と変動係数の平均（たわみ速度差法）

測線からの位置	0cm	+30cm	+60cm
測点数	81	81	81
標準偏差(mm)	0.059	0.058	0.069
変動係数(%)	8.9	8.2	11.6

3) 測線位置における MWD たわみ量の分析

測線位置が MWD たわみ量に与える影響を確認するため、計測範囲の中で MWD たわみ量が多い区間（450～500m）と比較的小さい区間（700～750m）について、測線位置によるたわみ量の変化を確認した。

- ・ FWD の測点がある位置に最も近い点を抽出
- ・ 各地点の 5 回計測の平均を算出し、代表値とする
- ・ 各地点でずれ量 0 cm を基準としたときの各ずれ量でのたわみ量の割合を算出

① FWD たわみ量が多い区間（450～500m）

各地点の MWD たわみ量の 5 回平均を表 4.2.6.2、測線位置 0 cm に対する各測線（+30 cm、+60 cm）の MWD たわみ量の比率を表 4.2.6.3 に示す。

測線位置が離れるほど MWD たわみ量は低下していた。0 cm 位置の MWD たわみ量との比率を見てみると、測線位置が +30 cm 位置で 0.86、測線位置が +60 cm 位置では 0.68 であった。

表 4. 2. 6. 2 各地点の MWD たわみ量 (5 回平均、400m~500m)

距離 (m)	たわみ量 (mm)		
	たわみ速度差法		
	0cm	+30cm	+60cm
450	1.123	1.057	0.993
455	1.225	1.149	1.041
460	1.414	1.221	0.978
465	1.033	0.899	0.820
470	1.964	1.496	1.101
475	3.819	3.044	2.385
480	4.051	3.447	2.640
485	2.030	1.913	1.522
490	3.007	2.426	1.771
495	3.291	2.927	1.740
500	3.756	3.086	2.066

表 4. 2. 6. 3 測線位置 0 cmにおける各地点の MWD たわみ量の比率 (400m~500m)

距離 (m)	0cmに対する比率		
	たわみ速度差法		
	0cm	+30cm	+60cm
450	—	0.94	0.88
455	—	0.94	0.85
460	—	0.86	0.69
465	—	0.87	0.79
470	—	0.76	0.56
475	—	0.80	0.62
480	—	0.85	0.65
485	—	0.94	0.75
490	—	0.81	0.59
495	—	0.89	0.53
500	—	0.82	0.55
平均	—	0.86	0.68

②FWD たわみ量が小さい区間（700～750m）

各地点の MWD たわみ量の 5 回平均を表 4.2.6.4、測線位置 0 cm に対する各測線（+30 cm、+60 cm）の MWD たわみ量の比率を表 4.2.6.5 に示す。

FWD たわみ量が小さい区間では、地点的には減少した箇所も見られたが、FWD たわみ量が大きい区間と比べると測線位置のズレによる変動幅は小さく同程度の MWD たわみ量であった。0 cm 位置の MWD たわみ量との比率を見てみると、+30 cm 位置で 1.06、+60 cm 位置で 1.09 となっていた。

表 4.2.6.4 各地点の MWD たわみ量（5 回平均、700m～750m）

距離 (m)	たわみ量 (mm)		
	たわみ速度差法		
	0cm	+30cm	+60cm
700	0.735	0.793	0.789
705	0.712	0.750	0.755
710	0.813	0.808	0.952
715	0.859	0.757	0.651
720	0.678	0.733	0.879
725	0.773	0.819	0.774
730	0.705	0.803	0.729
735	0.812	0.870	0.870
740	0.874	0.986	1.164
745	1.002	1.120	1.161
750	1.029	1.075	1.069

表 4.2.6.5 測線位置 0 cm における各地点の MWD たわみ量の比率（700m～750m）

距離 (m)	0cm に対する比率		
	たわみ速度差法		
	0cm	+30cm	+60cm
700	—	1.08	1.07
705	—	1.05	1.06
710	—	0.99	1.17
715	—	0.88	0.76
720	—	1.08	1.30
725	—	1.06	1.00
730	—	1.14	1.03
735	—	1.07	1.07
740	—	1.13	1.33
745	—	1.12	1.16
750	—	1.04	1.04
平均	—	1.06	1.09

4) 測線位置における FWD たわみ量と MWD たわみ量の相関性

FWD たわみ量に対する MWD たわみ量の関係性を確認する。FWD たわみ量に対する各測線位置の MWD たわみ量の相関図を図 4.2.6.4 に示す。測線位置が離れるほど傾きが小さくなる傾向を有していた。

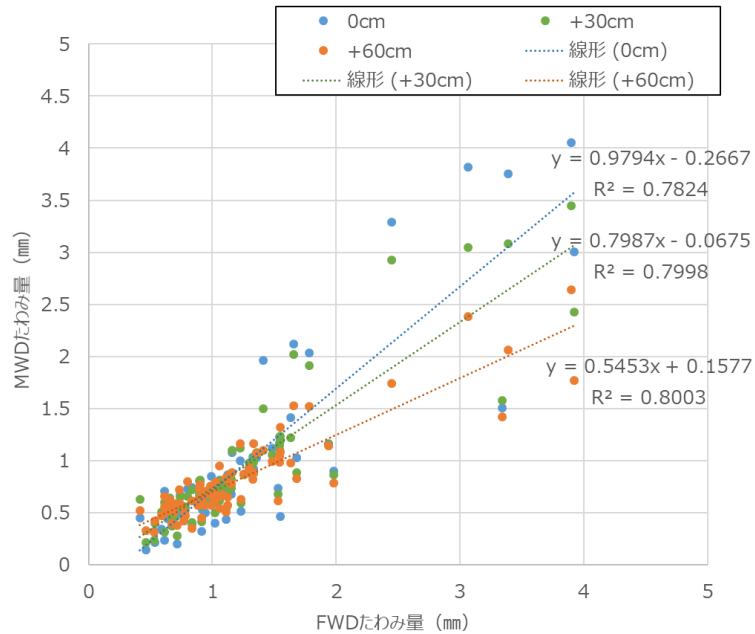


図 4.2.6.4 FWD たわみ量と MWD たわみ量の関係性 (たわみ速度差法)

(4) まとめ

たわみ速度差法の結果から走行位置が MWD たわみ量に与える影響の検討した結果、以下の知見を得た。

- ・ 測線位置 0 cm と比較すると、FWD たわみ量が比較的大きい箇所については測線が離れるほどたわみ量の低減がみられたが、FWD たわみ量が比較的小さい箇所については測線による大きな違いは見られない。
- ・ FWD たわみ量が比較的大きい箇所では、30 cm (タイヤ 1 個分) ずれると 8 割~9 割、60 cm (タイヤ 2 個分) ずれると 7 割程度になる。

4.2.7 道路構造による影響

(1) 目的

道路構造〔坂路（縦断勾配）、カント（横断勾配）、カーブ〕や路面性状（段差）が、たわみ速度差法による MWD たわみ量測定値に与える影響について検討した。

(2) 検討概要

土木研究所構内において坂路、カント、カーブ等の道路構造、路面性状（段差）の存在する箇所について MWD による計測を行った。なお、比較のため FWD による計測も実施し、MWD の計測結果と比較することにより、道路構造や路面性状が MWD たわみ量に与える影響について検証した。

(3) 測定箇所・測定条件

測定箇所は図 4.2.7.1 に示す箇所で、表 4.2.7.1 に示すように坂路、カント、カーブ及び段差が存在する箇所を選定した。また、測定条件は表 4.2.7.2 の通りであり各々の条件で 3 回測定した。なお、FWD 測定は測定箇所の一部において 5m 間隔で測定した。

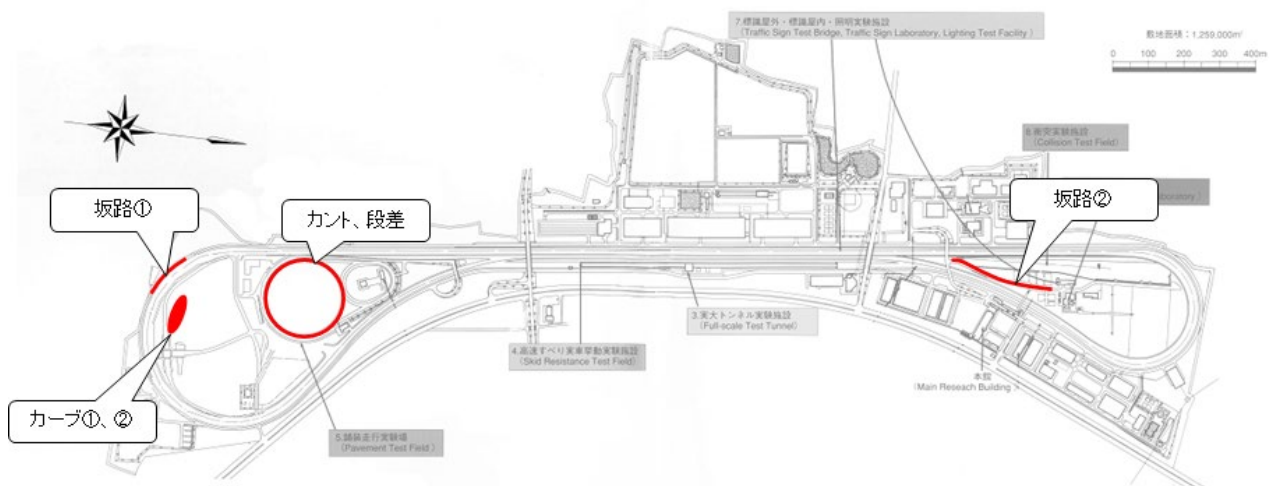


図 4.2.7.1 測定箇所位置図

表 4.2.7.1 測定箇所一覧表

要因	延長	検討内容
坂路①（縦断勾配）	坂路区間 100m、平坦区間 50m	縦断勾配の影響
坂路②（縦断勾配）上り 坂路②（縦断勾配）下り	坂路区間 50m、平坦区間 50m	縦断勾配の影響
カント（横断勾配） 段差（30mm）	カーブ区間 100m（R=100m） （内、平坦区間 50m、段差区間 50m）	横断勾配の影響 段差の影響
カーブ①（右回り） カーブ①（左回り）	カーブ区間 50m（R=50m）	カーブの影響
カーブ②（右回り） カーブ②（左回り）	カーブ区間 50m（R=30m）	カーブの影響

表 4.2.7.2 MWD 測定条件一覧表

路線名	測定速度 (km/h)	回数	備考
坂路①	10, 20, 30	各速度 3 回	
坂路②上り	10, 20, 30	各速度 3 回	
坂路②下り	10, 15	各速度 3 回	安全上の問題により低速のみ測定を実施
カント、段差	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ①（右回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ①（左回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ②（右回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ②（左回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	

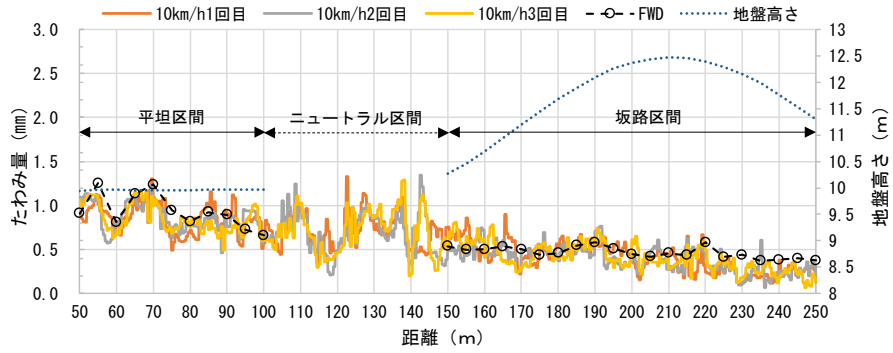
(4) 計測結果

1) 坂路①

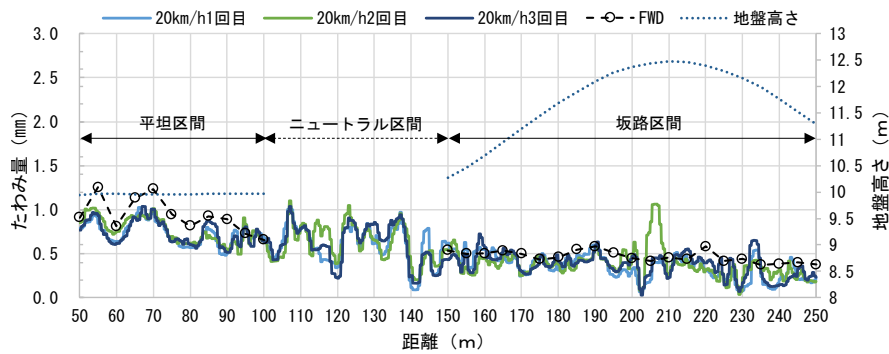
坂路①の縦横断勾配の一覧表を表 4.2.7.3 に、たわみ速度差による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.2.7.2 に示す。

表 4.2.7.3 坂路①縦横断勾配一覧表

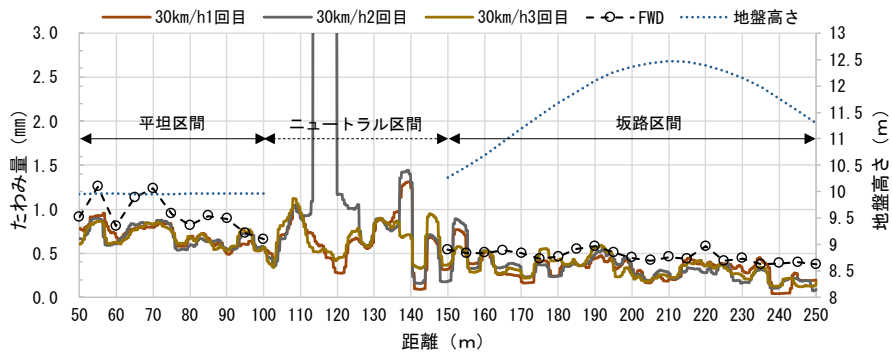
区間	MWD 距離 (m)	縦断勾配 (%)	平均横断勾配 (%)
平坦区間	50~100	0.0	1.2
上り坂区間	150~210	3.7	1.6
下り坂区間	210~250	-3.0	1.2



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.2.7.2 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路①)

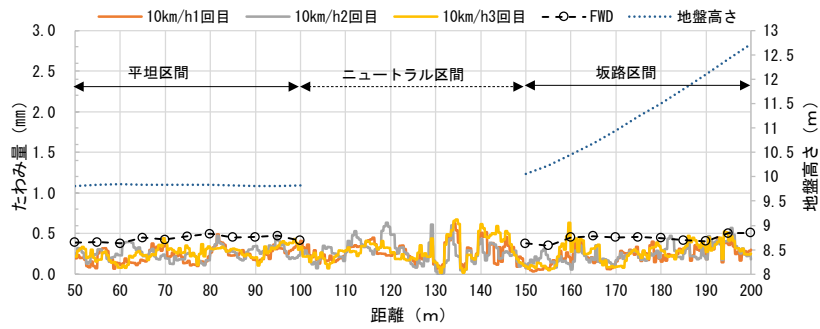
たわみ速度差による MWD たわみ量は、FWD たわみ量と比較し若干小さい値となっている場合もあるが、平坦区間、坂路区間ともに、概ね FWD たわみ量と同様の結果が得られた。

2) 坂路②

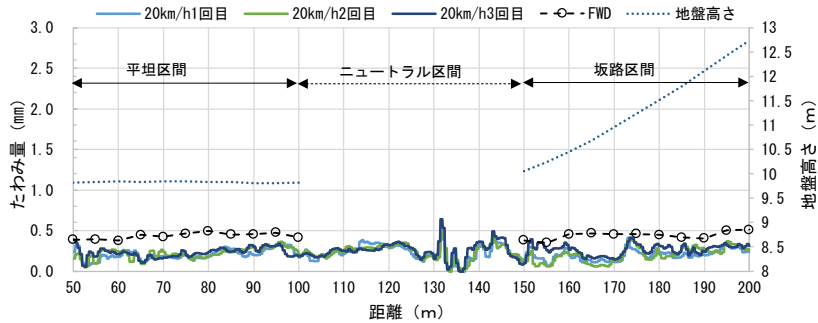
坂路②の縦横断勾配の一覧表を表 4.2.7.4 に、たわみ速度差による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.2.7.3、及び図 4.2.7.4 に示す。

表 4.2.7.4 坂路②縦横断勾配一覧表

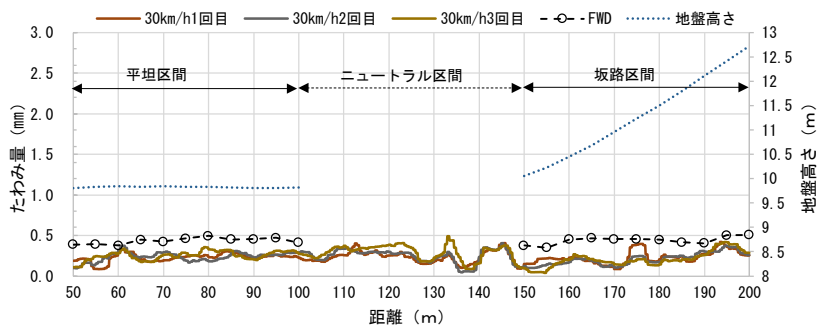
区間	MWD 距離 (m)	縦断勾配 (%)	平均横断勾配 (%)
上り 平坦区間	50~100	0.0	1.6
上り 坂路区間	150~200	5.3	1.9
下り 平坦区間	80~130	0.0	1.7
下り 坂路区間	210~250	-5.3	-1.9



(a) 10km/h

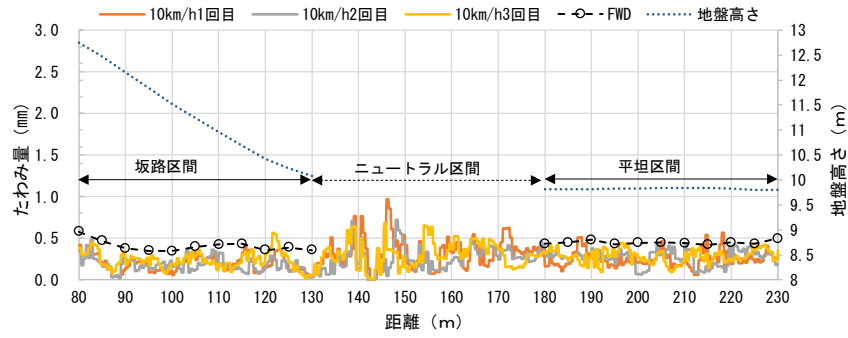


(b) 20km/h

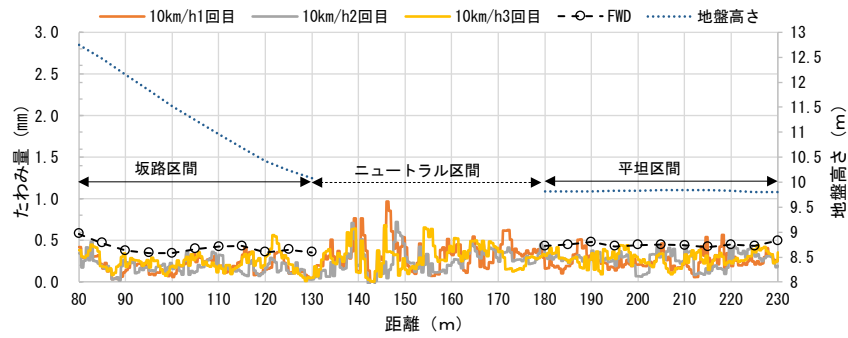


(c) 30km/h

図 4.2.7.3 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路②上り)



(a) 10km/h



(b) 15km/h

図 4.2.7.4 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路②下り)

たわみ速度差による MWD たわみ量は、平坦区間、坂路区間ともに、概ね FWD たわみ量と同様の傾向を示している。

ただし、FWD たわみ量と比較し全体に小さい値が得られている。その要因として測定箇所のたわみ量が小さく MWD の輪荷重 (中型車両) では十分なたわみ速度の計測ができなかった可能性がある。

3) カント・段差

カント、段差の存在する測定箇所におけるたわみ速度差法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.2.7.5 に示す。また、比較のため IRI (評価区間長 5m) の測定も実施したので図 4.2.7.6 に示す。

なお、当該カントは約 7% (R100m) であり、路面状態の良好な平坦区間と段差が発生している段差区間が存在している。段差区間では 30mm の段差が 2 箇所発生している。

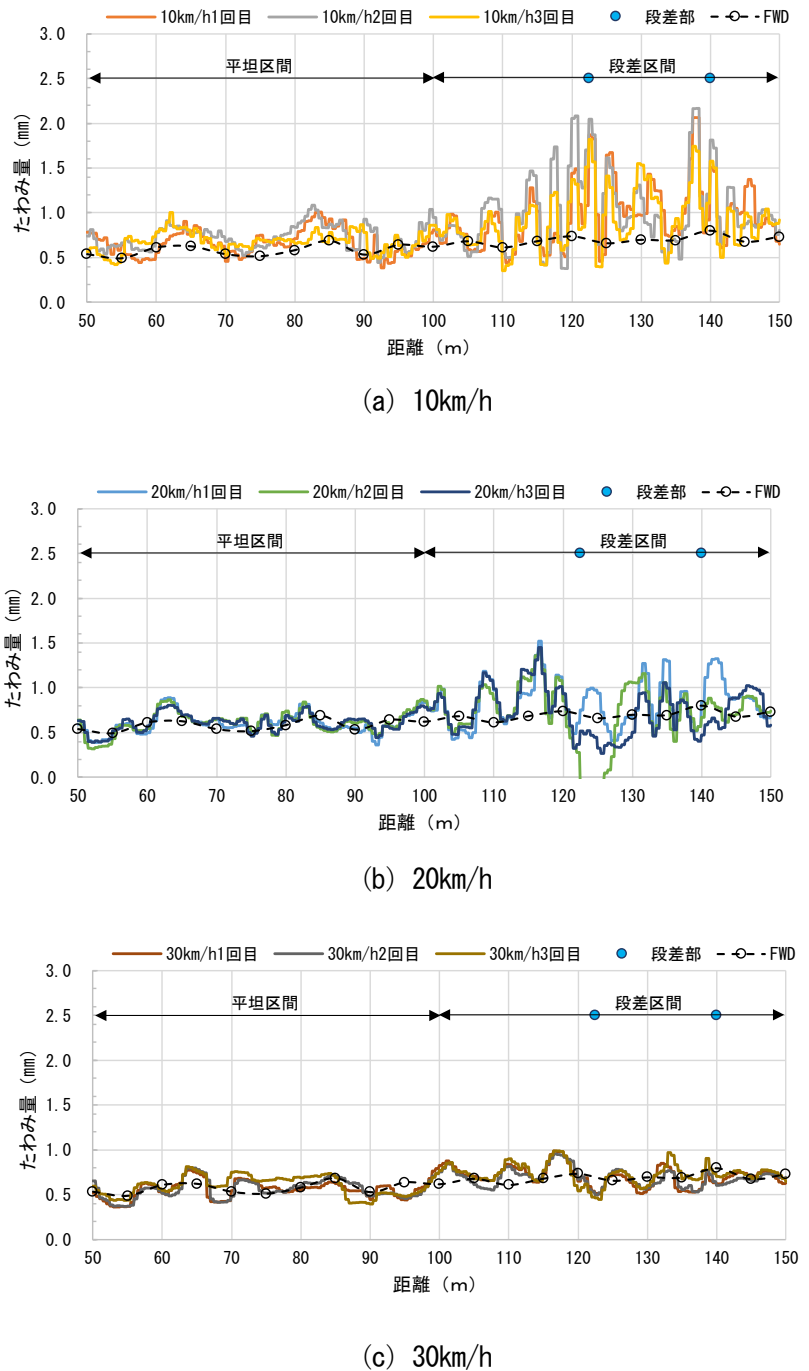


図 4.2.7.5 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カント・段差)

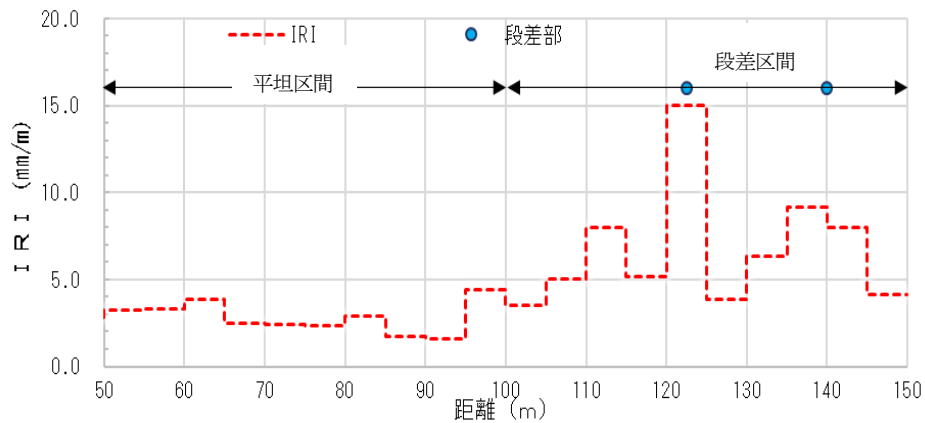


図 4.2.7.6 IRI の測定結果 (評価区間長 5m)

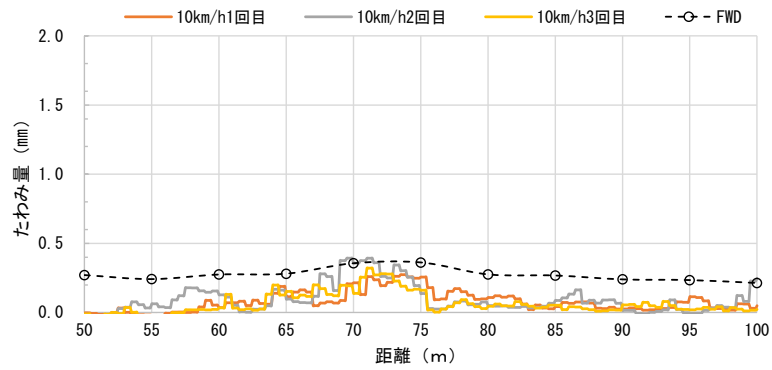
たわみ速度差法による MWD たわみ量は、平坦区間において概ね FWD たわみ量と同様の値が得られた。段差区間においては、30km/h において FWD たわみ量と概ね一致する値が得られたが、10km/h、20km/h において FWD たわみ量との乖離が見られた。

段差区間での FWD たわみ量との乖離が生じたデータは、IRI の測定結果から路面性状の悪い箇所であることが分かる。その影響で車両が大きく揺れ、たわみ量算定時のノイズ除去が正確に行えなかった可能性がある。また、段差区間の計測結果について、車速が大きくなるほど MWD たわみ量の変動が小さくなる傾向となった。これは、測定箇所が勾配 7% のカントであり、30km/h で車両に作用する重力と遠心力の合力が路面とほぼ直角な関係となることから、より安定した走行となる 30km/h の測定時に車両が大きく揺れることなく正確な測定が可能となったものと考えられる。

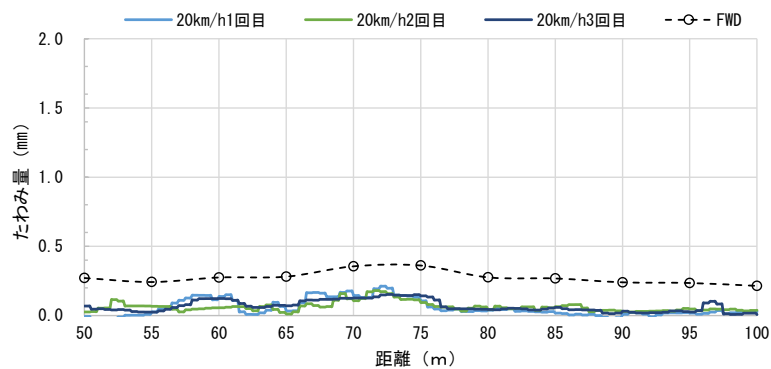
4) カーブ①

カーブ① (R=50m) のたわみ速度差による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4. 2. 7. 7、及び図 4. 2. 7. 8 に示す。

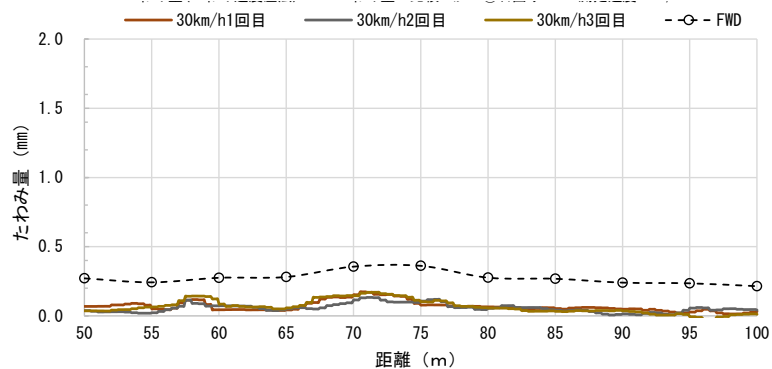
なお、カーブ①については走行方法により車輪に作用する輪荷重が異なるため、走行位置を右回りと左回りで走行して MWD の計測を実施した。



(a) 10km/h

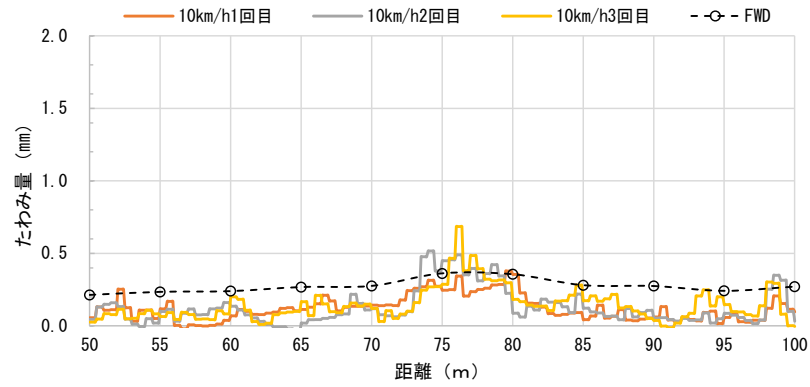


(b) 20km/h

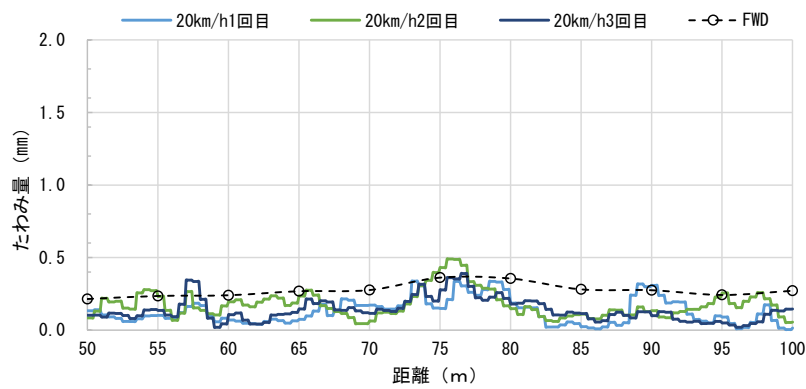


(c) 30km/h

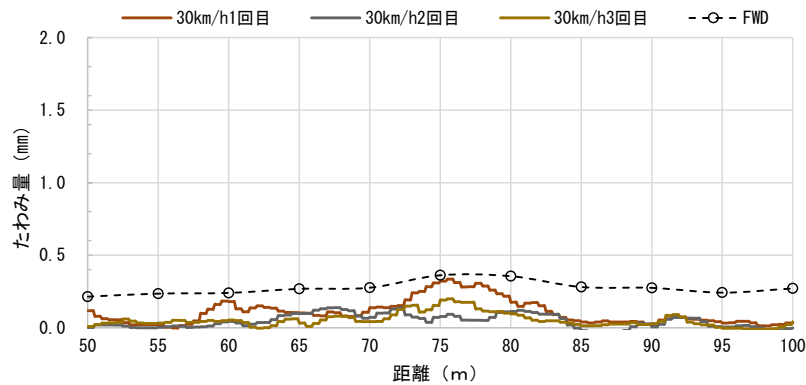
図 4. 2. 7. 7 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ①右回り)



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.2.7.8 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ①左回り)

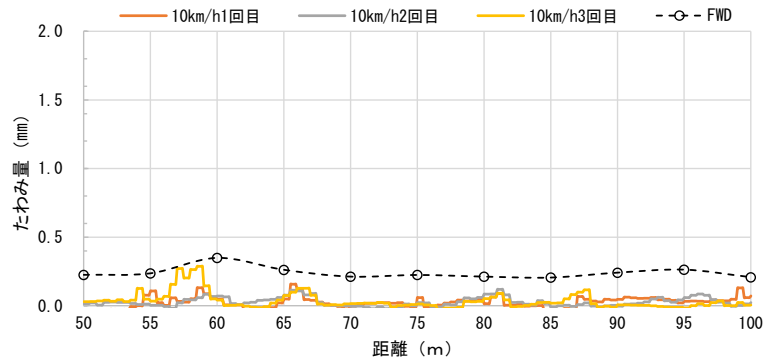
たわみ速度差法による MWD たわみ量は、右回り、左回り共に、全体的に FWD たわみ量よりも小さい値が算出された。

この測定で FWD よりも小さい値が計測された要因としては、測定箇所のたわみ量が 0.2~0.3mm 程度と小さく、MWD の輪荷重 (中型車両) では十分なたわみ速度の計測ができなかった可能性がある。また、複数回測定の再現性の悪い箇所について測定箇所は急なカーブであり走行位置のズレが影響しているものと考えられる。

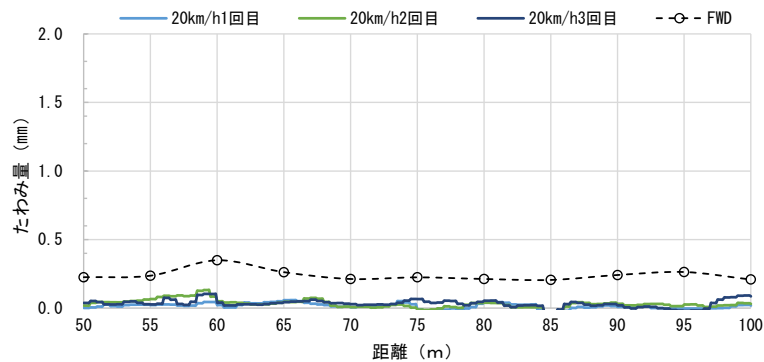
5) カーブ②

カーブ② (R=30m) のたわみ速度差法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.2.7.9、及び図 4.2.7.10 に示す。

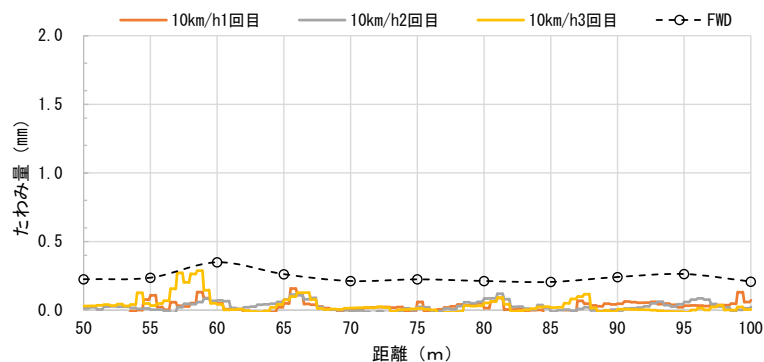
なお、カーブ②についてもカーブ①と同様に、走行位置を右回りと左回りで走行して MWD の計測を実施した。



(a) 10km/h

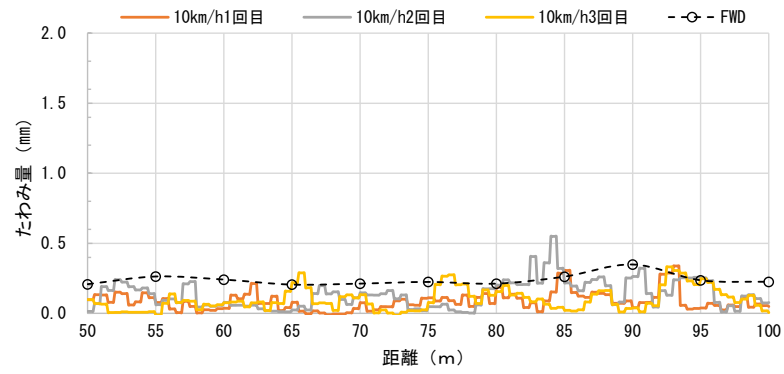


(b) 20km/h

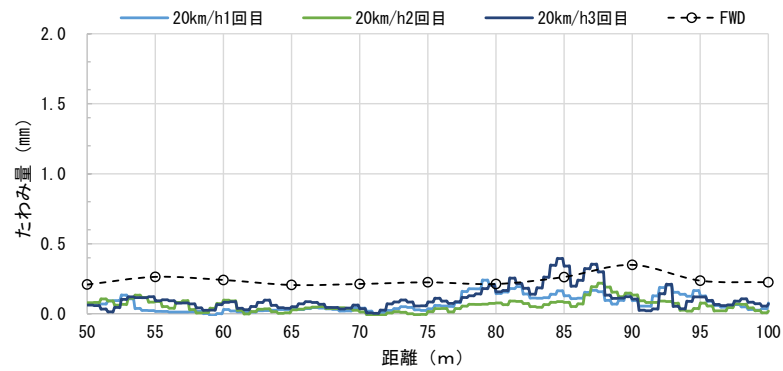


(c) 30km/h

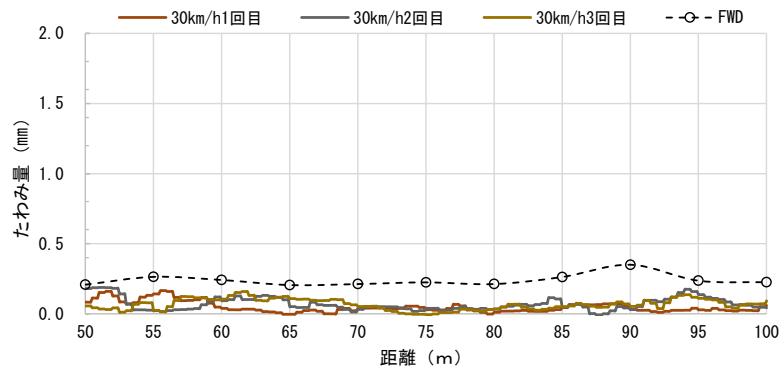
図 4.2.7.9 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ②右回り)



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.2.7.10 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ②左回り)

たわみ速度差法による MWD たわみ量は、右回り、左回り共に、全体的に FWD たわみ量よりも小さい値が算出された。

この測定で FWD よりも小さい値が計測された要因としては、測定箇所のたわみ量が 0.2~0.3mm 程度と小さく、MWD の輪荷重 (中型車両) では十分なたわみ速度の計測ができなかった可能性がある。また、複数回測定の実験の再現性の悪い箇所について測定箇所は急なカーブであり走行位置のズレが影響しているものと考えられる。

(5) まとめ

道路構造 [坂路 (縦断勾配)、カント (横断勾配)、カーブ] や路面性状 (段差) が、たわみ速度差による MWD たわみ量測定値に与える影響について整理すると以下のとおりである。

1) 縦横断勾配の影響

縦断勾配の異なる測定箇所 (坂路①、坂路②) にて MWD たわみ量の測定を行った結果、全体的に FWD たわみ量と概ね同様の結果が得られた。

ただし、坂路②においては FWD たわみ量より小さい値が得られており、その要因分析も含めた検討が必要である。

2) 横断勾配の影響

カント 7%の箇所について MWD たわみ量の測定を行った結果、概ね FWD たわみ量と同様の傾向が得られており、本検討結果からは横断勾配であっても MWD 測定が可能であるものと考えられる。

3) カーブの影響

カーブ① (R50m)、カーブ② (R30m) で検証を試みたが、本検討ではカーブの影響を把握できなかった。

4) 段差等の路面性状の影響

3.0cm 程度の段差があり IRI が悪い路面で検証した結果、FWD と概ね同様の結果が得られた。

ただし、一部の条件において車両が大きく揺れる等の影響で FWD たわみ量との差が大きい値が得られており、今後ノイズ処理等についてさらなる検討が必要である。

本検討では一部の条件での検証を実施した結果であり、今後様々な条件で検証を重ね、より精度の高い測定ができるよう検討を進める必要がある。

4.2.8 舗装断面の影響

舗装断面が MWD たわみ量に与える影響について検討した。

(1) 検討路線

解析に用いた路線およびたわみ量の算出に用いた解析方法を表 4.2.8.1 に示す。測定速度はそれぞれ 20 km/h で、測定回数は 3~5 回行った。

表 4.2.8.1 検討に用いた路線

調査日時	調査箇所	工区	測定延長	解析方法		
				ウェーブレット法	たわみ速度差法	レーザー法
2019年2~3月	つくば市内県道45号線・55号線	12工区	200 m	○	-	○
2019年10月3日	白糸ハイランドウェイ(長野県)	2工区	415 m、210 m	○	-	○
2020年2月14日	柏市内市道	3工区	220 m、230 m	-	-	○
2020年6月	つくば市内市道	8工区	300 m	○	○	○

表 4.2.8.1 のそれぞれの路線・工区の舗装構成から計画交通量区分を推定した。計画交通量区分は開削調査から得られた舗装厚から等値換算係数 T_A を求めて推定した。開削調査ができなかった区間については非破壊によりアスファルト層厚を測定し、アスファルト層厚から計画交通量区分を推定した。それぞれの路線・工区のアスファルト層厚と推定した計画交通量区分を表 4.2.8.2 に示す。

表 4.2.8.2 各路線・工区の推定計画交通量区分

調査日時	調査箇所	工区	測定延長	As層厚	推定計画交通量区分
2019年2~3月	つくば市内県道45号線・55号線	No.1	200 m	24 cm	N6
		No.2	200 m	20 cm	N6
		No.3	200 m	-	N6
		No.4	200 m	20 cm	N7
		No.5	200 m	-	N6
		No.6	200 m	-	N6
		No.7	200 m	20 cm	N6
		No.8	200 m	23 cm	N6
		No.9	200 m	13 cm	N7
		No.10	200 m	21 cm	N6
		No.11	200 m	12cm	N7
		No.12	200 m	22 cm	N7
2019年10月3日	白糸ハイランドウェイ(長野県)	A	415 m	10 cm	N4
		B	210 m	10 cm	N4
2020年2月14日	柏市内市道	No.2(下り線)	220 m	4 cm	N1~3
		No.6(上り線)	230 m	10 cm	N5
		No.6(下り線)	230 m	10 cm	N5
2020年6月	つくば市内市道	No.1	300 m	5.1 cm	N1~3
		No.2	300 m	3.8 cm	N1~3
		No.3	300 m	5.1 cm	N1~3
		No.4	300 m	4.4 cm	N1~3
		No.5	300 m	4.4 cm	N1~3
		No.6	300 m	4.1 cm	N4
		No.7	300 m	5.7 cm	N4
		No.8	300 m	8.6 cm	N5

(2) 解析結果

表 4.2.8.1 に示す路線・工区で MWD たわみ量を算出し、表 4.2.8.2 に示す推定計画交通量毎に集計した。まず、測定回数による繰り返し再現性について表 4.2.8.3 に示す。

表 4.2.8.3 各測点における標準偏差と変動係数の平均値

計画交通量区分	N1~3	N4	N5
測点数 n 個	239	122	61
標準偏差の平均値 (mm)	0.07	0.05	0.02
変動係数の平均値 (%)	6.82	6.99	14.76

表 4.2.8.3 より、N1 から N5 において、標準偏差の平均値は 0.02~0.07 mm、変動係数の平均値は 6~15%と小さい結果となった。N5 において変動係数の平均値が大きいのは N5 相当の路線が 1 路線分のみで測定値が全体で小さい値であるためと考えられる。

次に FWD D₀ たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関性を求めた。その結果を表 4.2.8.4 および図 4.2.8.1 に示す。

表 4.2.8.4 FWD D₀ たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関係数

計画交通量区分	N1~3	N4	N5
回帰直線式の傾き a	0.37	0.73	1.54
回帰直線式の切片 b	0.54	0.13	-0.26
回帰直線式の決定係数 R ²	0.32	0.77	0.83
相関係数 r	0.56	0.88	0.91

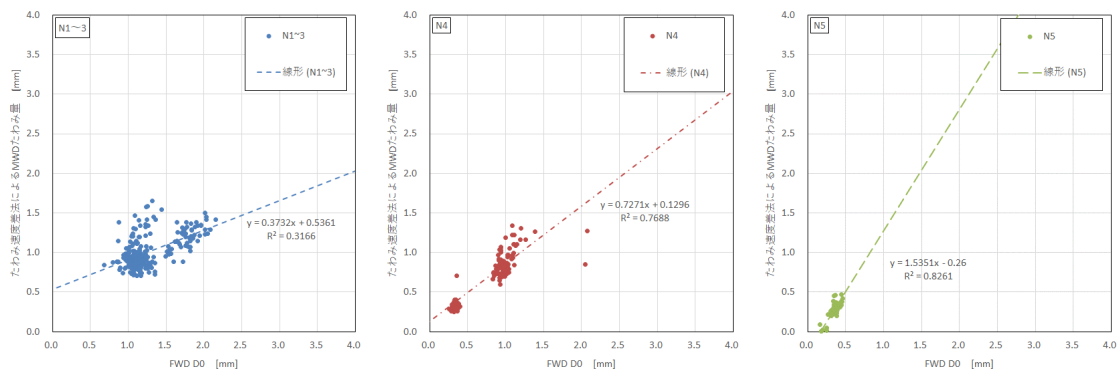


図 4.2.8.1 FWD D₀ たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関関係

表 4.2.8.4 より、FWD D₀ たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関係数は 0.56~0.91 程度であり、N4 以上では非常に強い相関性を表した。また、回帰直線式を見ると舗装厚が厚くなるに従い傾きが大きくなった。

以上より、たわみ速度差による MWD たわみ量は舗装構成や舗装厚によって、繰り返し再現性への影響は小さいものの、FWD D₀ たわみ量との相関性については影響を受けているものと思われる。

ただし、今回の検討では計画交通量区分毎にデータ数のバラツキがあり、全区分のデータを得ることができなかつた。また、それぞれの計画交通量区分においてもたわみ量に偏りが見られるため、今後は更にデータを取得していく必要がある。

4.3 レーザ変位計による測定方法（レーザ法）

4.3.1 レーザ法の概要

試作した MWD の車両左側面に取り付けられた剛性の高い架台に 5 個のレーザ変位計（以降、変位計）を 1 m 間隔で設置している。変位計の設置状況と変位計の設置概要を図 4.3.1.1 に示す。

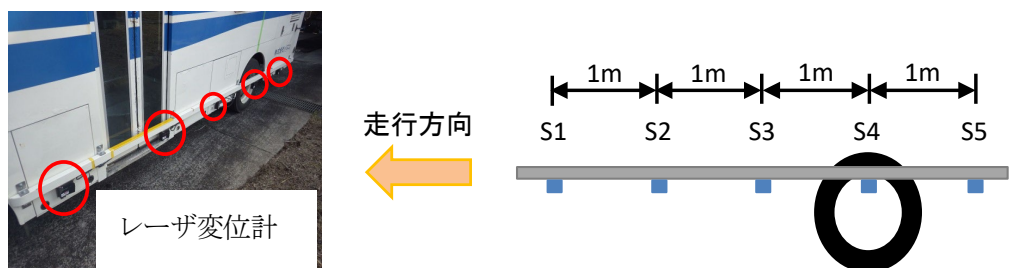


図 4.3.1.1 レーザ変位計の設置状況（左）と設置概要図（右）

レーザ法は、この 5 個の変位計と後輪軸に取り付けたひずみ計を用いてたわみ量を算出する。

まず、路面と車両に取り付けた架台が平行である状態でのたわみ量算出の概念図を図 4.3.1.2 に示す。

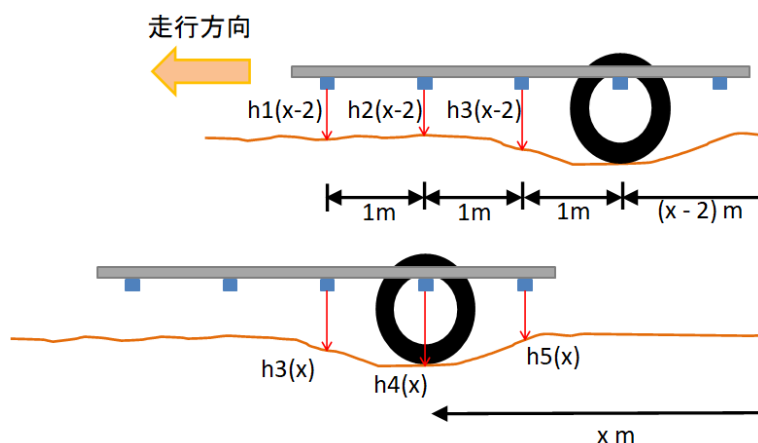


図 4.3.1.2 レーザ法によるたわみ量算出の概念図

変位計 S3 から S5 で左後輪が x m 地点にある時の路面形状（平たん性成分+たわみ成分： $d1$ ）を測定し、変位計 S1 から S3 で左後輪が $(x-2)$ m 地点にある時の路面形状（平たん性成分： $d2$ ）を測定する。この $d1$ および $d2$ の差より x m 地点における MWD たわみ量 d^* を求める。 $d1$ 、 $d2$ および d^* は以下の式(4.3.1.1) から式(4.3.1.3) より求める。

$$d1 = h4(x) - \frac{h3(x)+h5(x)}{2} \quad \dots \text{式(4.3.1.1)}$$

$$d2 = h2(x-2) - \frac{h1(x-2)+h3(x-2)}{2} \quad \dots \text{式(4.3.1.2)}$$

$$d^* = d1 - d2 \quad \dots \text{式(4.3.1.3)}$$

次に架台の傾きに対する補正を行う。変位計は静止時に路面に対して平行に取り付けられた架台から垂直方向の変位量を計測しているため、架台が走行中に傾斜すると路面に対して斜距離を計測してしまい、算出するたわみ量の値に影響を与える。そこで、設置している変位計を用いて図4.3.1.3に示す様に路面までの距離と変位計の設置間隔から架台の角度を算出し、式(4.3.1.4)より算出したたわみ量 d^* を補正する。 x m 地点での架台の角度 $\theta(x)$ は、輪荷重の影響が最も少ない変位計 S1 および S2 を用いて以下の式(4.3.1.4)より求める。

$$\theta(x) = \left| \tan^{-1} \left(\frac{h1(x) - h2(x)}{L} \right) \right| \quad \dots \text{式(4.3.1.4)}$$

(L : 変位計 S1 と S2 の設置間隔=1,000 mm)

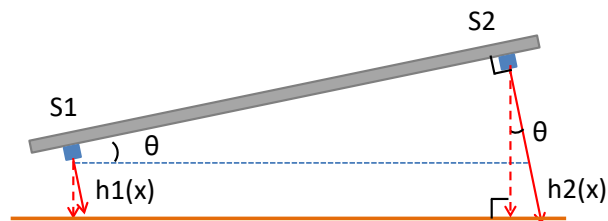


図 4.3.1.3 架台の角度算出

同様に $(x-2)$ m 地点における角度 $\theta(x-2)$ も変位計 S1 および S2 から求める。以上より算出した角度 $\theta(x)$ および $\theta(x-2)$ より角度補正したたわみ量 d' は以下の式(4.3.1.5)より求まる。

$$d' = d1 \times \cos \theta(x) - d2 \times \cos \theta(x - 2) \quad \dots \text{式(4.3.1.5)}$$

最後に路面に働く輪荷重は路面凹凸に伴う上下動等の影響で変化する。輪荷重が変化すると路面に生じるたわみ量に影響を与える。そこで、左後輪荷重を測定することでたわみ量を補正する。

輪荷重の測定は図4.3.1.4に示す様に左後輪軸の上下にひずみ計を設置し、走行中の後輪軸上下に生じるひずみ差を計測し、輪荷重とひずみ差の関係から間接的に求めた。

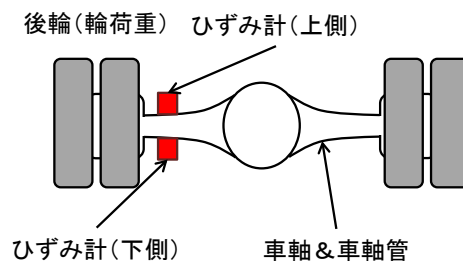


図 4.3.1.4 ひずみ計の設置箇所

輪荷重はマット型荷重計に左後輪を静止した状態で載荷して最大輪荷重を計測する。その後、油圧ジャッキを用いて段階的に除荷していき、その時の荷重とひずみを計測した。計測した値から輪荷重とひずみ差の関係を図 4.3.1.5 に示す。図 4.3.1.5 より輪荷重とひずみ差には高い相関性があり、この回帰直線式から走行中における輪荷重 m を算出した。

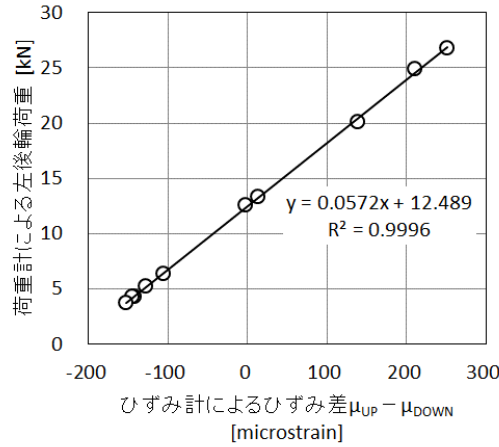


図 4.3.1.5 ひずみ差と輪荷重の関係

$$m = a \times (\mu_{UP} - \mu_{DOWN}) + b \quad \dots \text{式(4.3.1.6)}$$

(m : 走行中に測定した輪荷重 kN、 μ_{UP} ・ μ_{DOWN} : 上側・下側のひずみ計出力値 microstrain、 a 、 b : 図 4.3.1.5 より得られた回帰直線式の傾きと切片)

式(4.3.1.6)より得られた算出した輪荷重と角度補正たわみ量 d' から標準荷重 m^* における荷重補正たわみ量 d を求める。

$$d = d' \times \frac{m^*}{m} \quad \dots \text{式(4.3.1.7)}$$

(m^* : 標準荷重 kN)

また、変位計の計測値には走行中の振動等によるドロップアウトといったスパイクノイズが含まれる。これらのスパイクノイズの除去には式(4.3.1.8)に示すメディアンフィルタによって除去し、フィルタ長は $n=101$ 個で行う。

$$x_i = \begin{cases} \text{median}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{i+48}, x_{i+49}, x_{i+50}) & (i \leq 50) \\ \text{median}(x_{i-50}, x_{i-49}, x_{i-48}, \dots, x_{i+48}, x_{i+49}, x_{i+50}) & (51 < i < n - 50) \\ \text{median}(x_{i-50}, x_{i-49}, x_{i-48}, \dots, x_{n-2}, x_{n-1}, x_n) & (n - 50 \leq i) \end{cases} \quad \dots \text{式(4.3.1.8)}$$

(x_i : 各変位計の i 番目の出力値)

メディアンフィルタによってスパイクノイズを除去した値から高周波ノイズを除去するために区間平均を用いる。区間平均距離は 5.0 m とし、 x m 地点の前後 2.5 m 範囲の変位計出力値の平均値を $h(x)$ とする。

4.3.2 土木研究所外周路での測定

(1) 測定概要

レーザ法による MWD たわみ量と FWD たわみ量の測定を図 4.3.2.1 に示す土木研究所外周路の直線部 1,300 m において実施した。

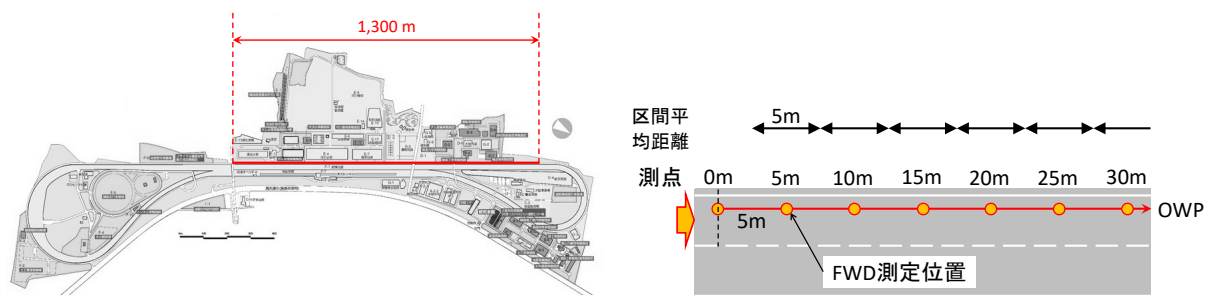


図 4.3.2.1 測定場所と MWD および FWD たわみ量の測定概要図

FWD の測定は 2016 年 5 月 31 日 (路面温度 37°C)、MWD の測定は 2018 年 8 月 27 日 (路面温度 54°C) に実施した。

FWD たわみ量は 0 m 地点から 5 m 間隔で 3 回測定を行い、その平均値をその地点での FWD たわみ量とした。また、MWD は後輪が 0 m 地点となる位置から走行を開始し、目標速度となるまで加速した後に 1,300 m 地点を通過するまで一定の速度で走行を行った。これを 3 回実施し、その平均値を MWD たわみ量とした。なお、MWD たわみ量は 4.3.1 に従って算出し、区間平均距離を 5 m として FWD たわみ量の測定位置で MWD たわみ量を算出した。

(2) 測定結果

走行速度を 20 km/h とした測定結果を図 4.3.2.2 に示す。

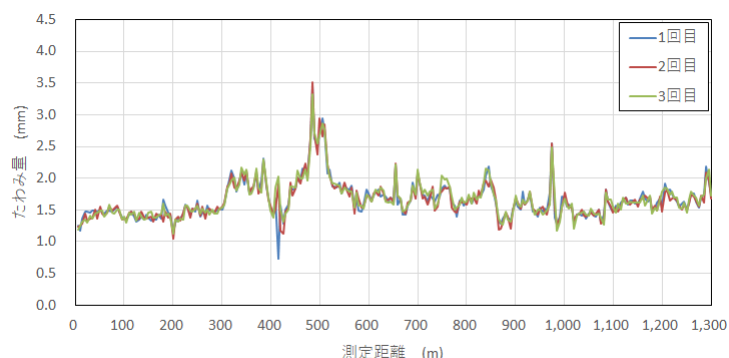


図 4.3.2.2 1~3 回の MWD たわみ量測定結果

各測点での MWD たわみ量の標準偏差と変動係数を求めると、全測点での標準偏差の平均値は 0.05 mm、変動係数の平均値は 2.96%であった。1～3 回の測定によるバラツキは小さく繰り返し再現性は高い結果であった。

次に FWD たわみ量と MWD たわみ量の 1～3 回測定の平均値を比較した結果を図 4.3.2.3 に示す。また、FWD たわみ量と MWD たわみ量の相関図を図 4.3.2.4 に示す。

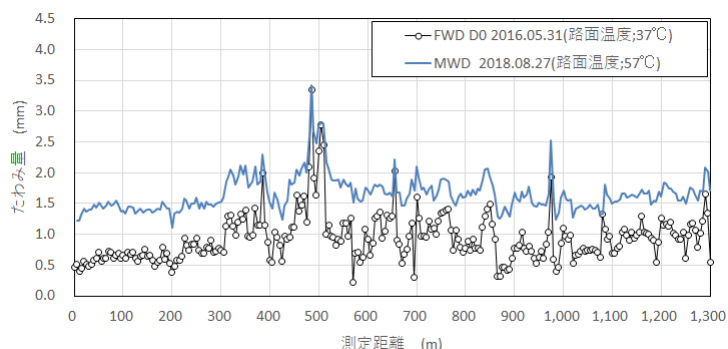


図 4.3.2.3 FWD たわみ量と MWD たわみ量の比較

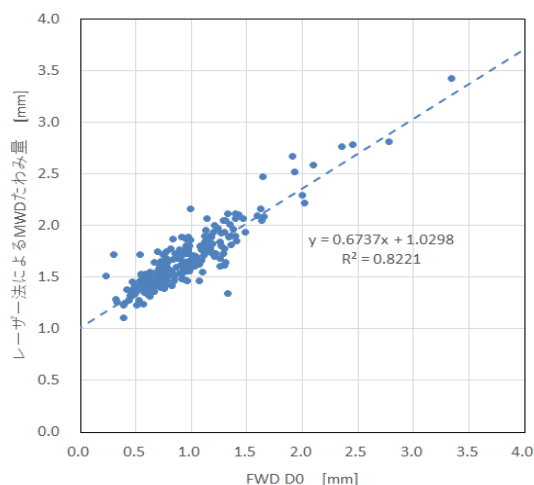


図 4.3.2.4 FWD たわみ量と MWD たわみ量の相関関係

これらの図から、FWD たわみ量は非常に強い相関性（相関係数 0.91）であることが分かった。しかし、図 4.3.2.3 より MWD たわみ量は FWD たわみ量よりも概ね 1mm 程度大きい値となっていることが分かる。この主な要因としては、MWD の測定を FWD の測定より暑い時期に測定したこと、0 点補正を動的な状態で実施していないこと等が考えられる。

(3) まとめ

土木研究所外周路の測定結果から、MWD 測定値の繰り返し再現性および MWD と FWD との相関性が非常に高いことが分かった。これらのことから、MWD によるネットワークレベルでの調査は十分に可能であると考えられる。

4.3.3 測定間隔の影響

(1) 目的

一般的にデータ取得間隔が短いほど取得データ内に含まれる高周波数の上限は大きくなり含まれる情報は増える。それに伴いデータ容量は大きくなりデータ処理にも時間を要する。そこで、効率的な計測、解析のためには取得対象に適したデータ取得間隔が必要となる。

本検証では、データ取得間隔の相違が MWD たわみ量に与える影響を確認するため、測定間隔を変えて取得した MWD データからレーザ法で算出した MWD たわみ量の比較を行った。

(2) 測定データ

4.1.3 で測定した 8 パターンのデータを用いた。表 4.3.3.1 に測定パターンを整理した結果を示す。正常に MWD たわみ量算出できる場合、誤差は含むが同程度の MWD たわみ量が算出できる場合、異なる値で MWD たわみ量が算出される場合が確認できるように計測速度、測定間隔を設定している。

表 4.3.3.1 測定パターンと計測間隔の妥当性

測定間隔	取得データの 測定間隔の妥当性	
	20 km/h	40 km/h
100Hz	△	×
250Hz	○	△
500Hz	○	○
1000Hz	○	○
1500Hz	○	○

(3) 解析結果

解析結果を図 4.3.3.1、図 4.3.3.2 に示す。解析結果から、測定間隔によって MWD たわみ量に大きな差は見られなかった。特に、妥当性検討で異なる値になると想定していた 40 km/h の 100Hz においても MWD たわみ量は他の測定間隔と同傾向を示していた。その要因として、取得対象路面から得られる測定データに含まれる周波数が、単純な 40 km/h で 10 cm での測定間隔 (111.11Hz) と同程度である 100Hz でも MWD たわみ量の算出に必要な周波数情報が得られたためと考えられる。

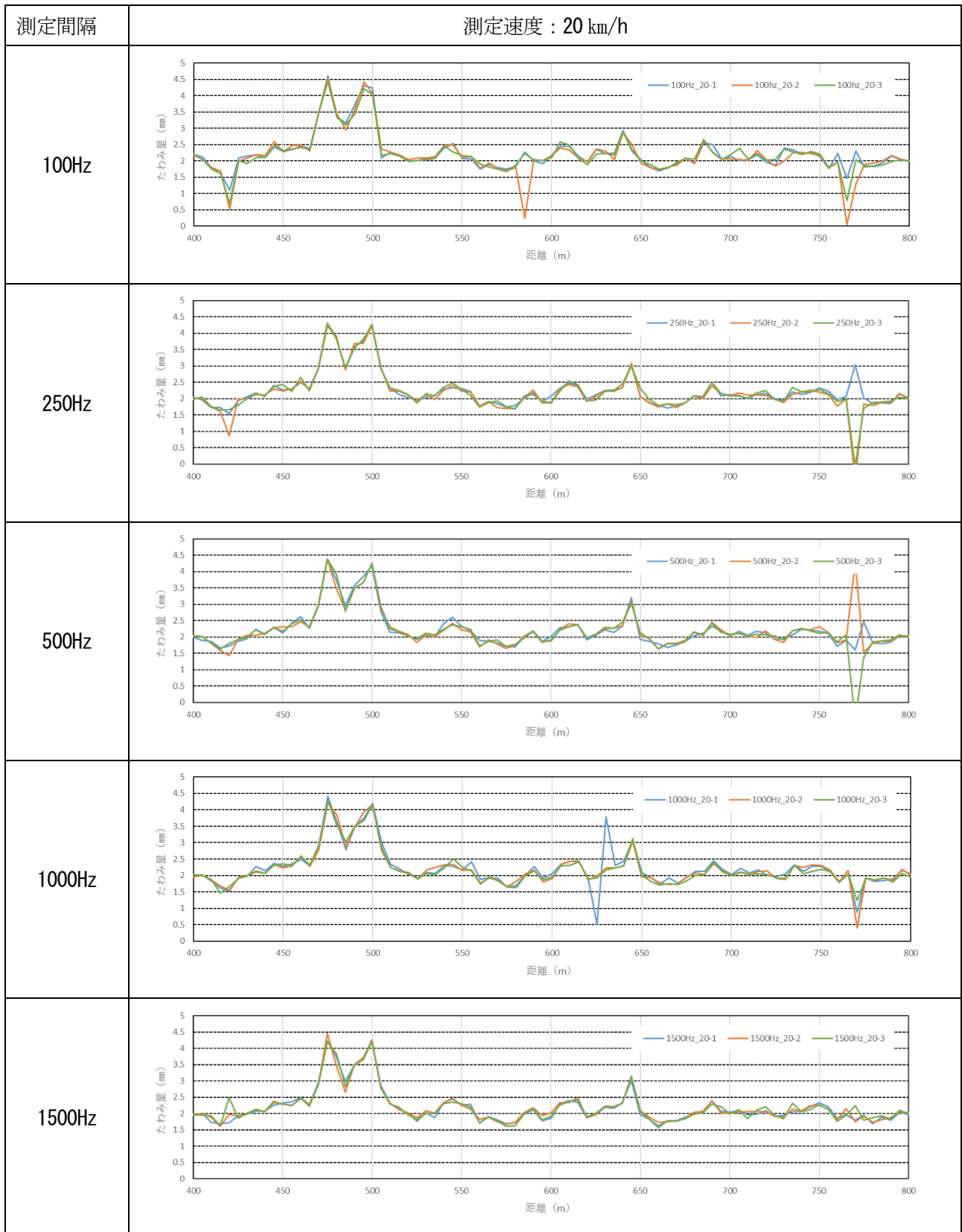


図 4.3.3.1 各データ間隔での MWD たわみ量 (測定速度 20 km/h)

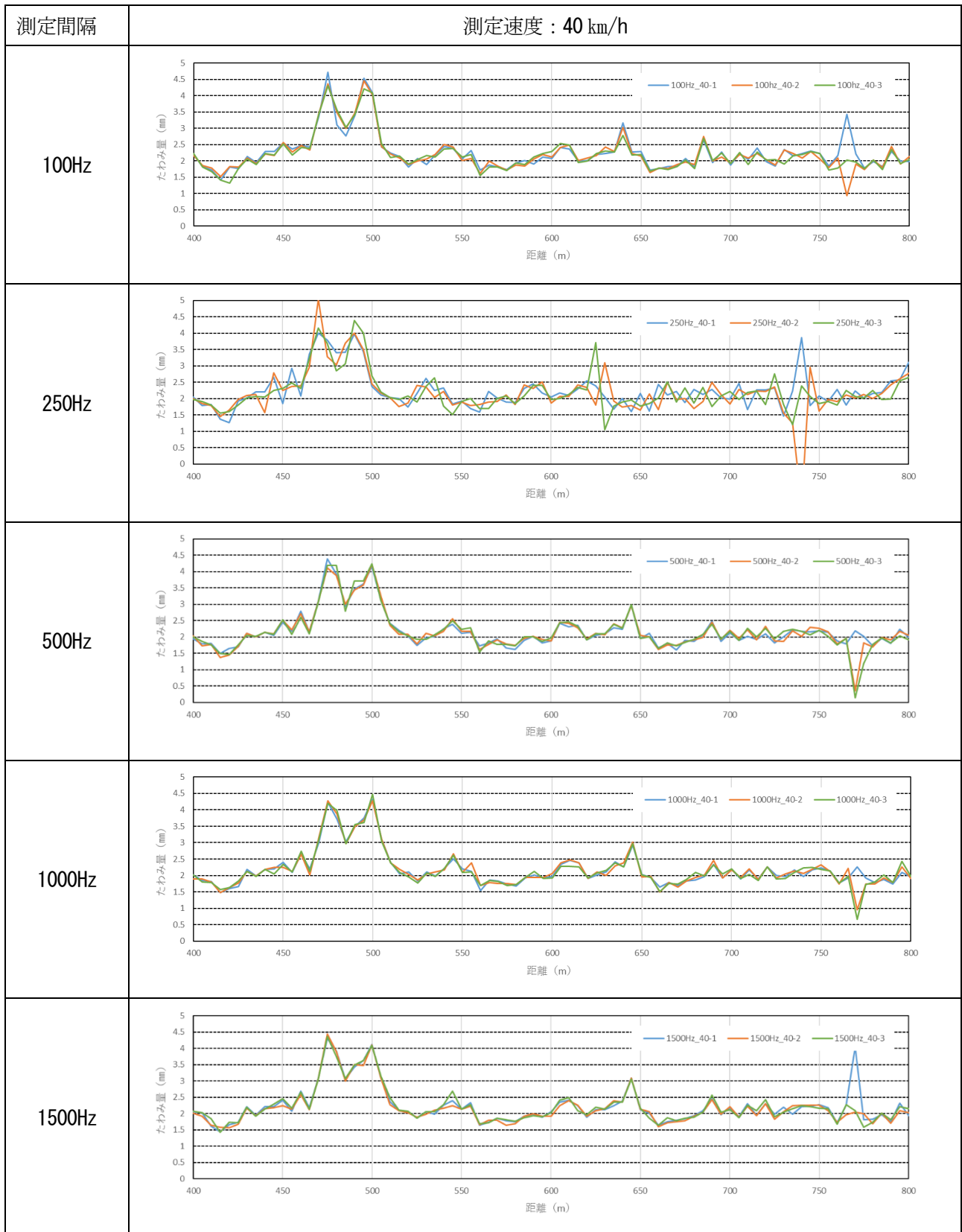


図 4.3.3.2 各データ間隔での MWD たわみ量 (測定速度 40 km/h)

(4) まとめ

データ取得間隔の相違が MWD たわみ量に与える影響について確認した結果、以下の知見を得た。

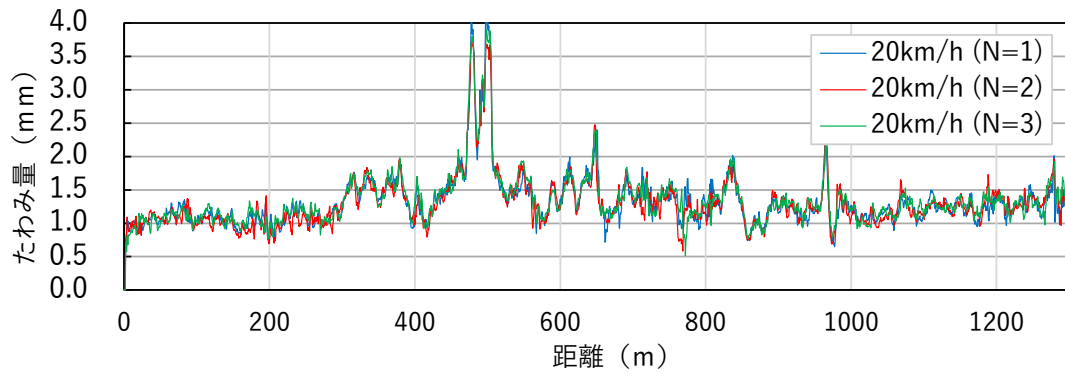
・ 20 km/h、40 km/h と異なる測定間隔で取得したデータを解析した結果、サンプリング定理に基づき異なる値になると想定していた 40 km/h の 100Hz においても MWD たわみ量は他の測定間隔と同傾向を示した。

4.3.4 速度の影響

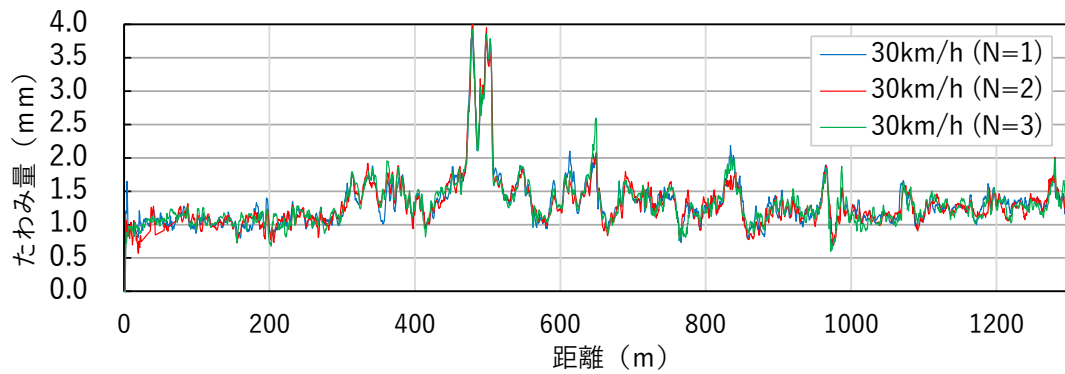
走行速度が解析結果に及ぼす影響を調査するため、土木研究所外周路において同条件のもと、車速を3水準に設定し測定を行った。なお、各速度における測定回数はN=3回とし、たわみ量の結果は荷重補正のみを行っている。温度については同時刻にすべて測定を行い、路面および気温の温度変温による影響は殆どないため、温度補正は行っていない。

結果を図4.3.4.1、図4.3.4.2に示す。図4.3.4.1(a)~(c)より、各速度におけるたわみ量測定結果は非常によく一致している。また、図4.3.4.1(d)より、走行速度を変化させても形状はほとんど一致することがわかる。

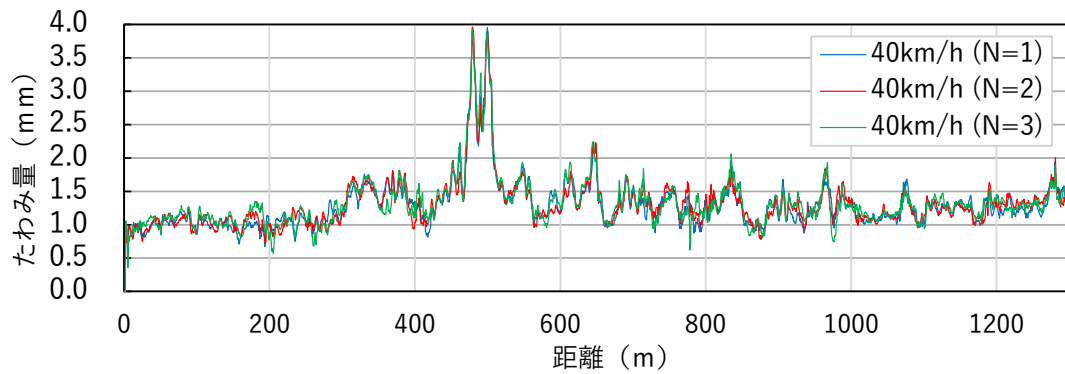
レーザ法は、データを時系列ごとに逐次解析していくため、速度による影響は少ないと考えられる。



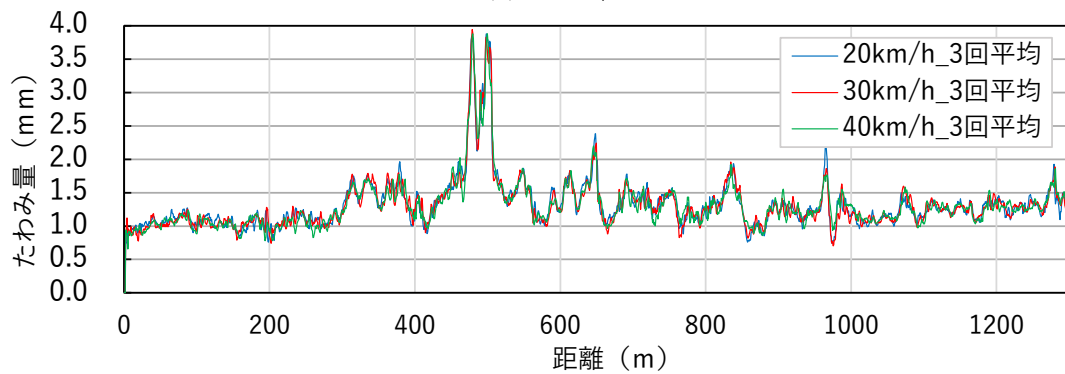
(a) 20km/h



(b) 30km/h



(c) 40km/h



(d) 各速度平均および全速度平均

図 4.3.4.1 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断図(荷重補正_レーザ法)

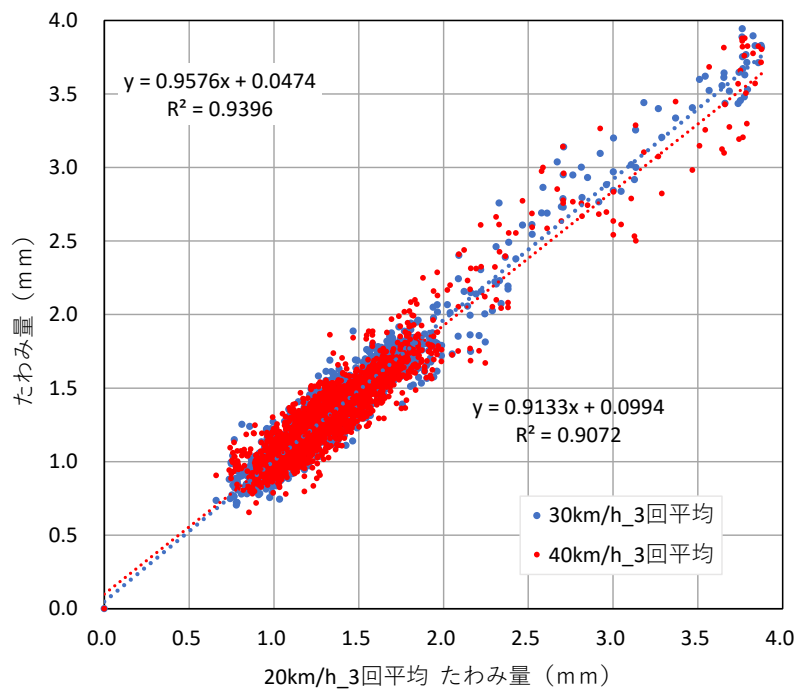


図 4.3.4.2 各速度条件におけるたわみ量の相関関係

4.3.5 温度の影響

測定時期の異なる MWD たわみを比較するためには、標準状態における MWD たわみを求める必要がある。そこで、測点区間での MWD 測定により得られたたわみとアスコン層の温度を用いて、MWD 最大たわみ量 a の温度補正についての検討を行った。

(1) 測定概要

測定箇所：土木研究所外周路 1300m

測定日時、測定温度：表 4.3.5.1 参照

表 4.3.5.1 に本調査の測定概要を示す。アスコン層温度に対して複数条件で測定を行った。

車速は 3 水準、測定回数は 3 回とし、レーザ法の解析を行った。

また、MWD 測定と同時期に FWD 測定を行い、FWD の温度条件によるたわみ量変化との差異を観測し考察を行った。なお、FWD は、起点から 400m～800m 地点の特にたわみ量の変動が大きな範囲で測定を行った。

表 4.3.5.1 土木研究所外周路 MWD 測定概要

測定日時	時刻測定	目標表面温度	測定表面温度	車速 (km/h)	測定回数
2020/8/21	10:00-12:00	高温時 (45°C程度)	約55°C程度	20 30 40	N=3
2020/8/24	14:00-16:00				
2020/10/13	8:00-10:00	標準温度 (20°C程度)	約30°C程度		
2020/10/15	8:00-10:00				
2021/1/6	8:00-10:00	低温時 (5°C程度)	約10°C程度		
2021/1/7	8:00-10:00				

(2) 測定結果

1) 各温度条件における MWD たわみ量

各温度条件におけるレーザ法の MWD たわみ縦断の各データを図 4.3.5.1～図 4.3.5.4 に示す。

各速度条件、各測定回数の測定結果にはほとんど差がないため、以降は測定的全データ(速度 3×回数 3=9 データ)の平均のたわみ量を各温度でのたわみ量として扱う (図 4.3.5.4)。

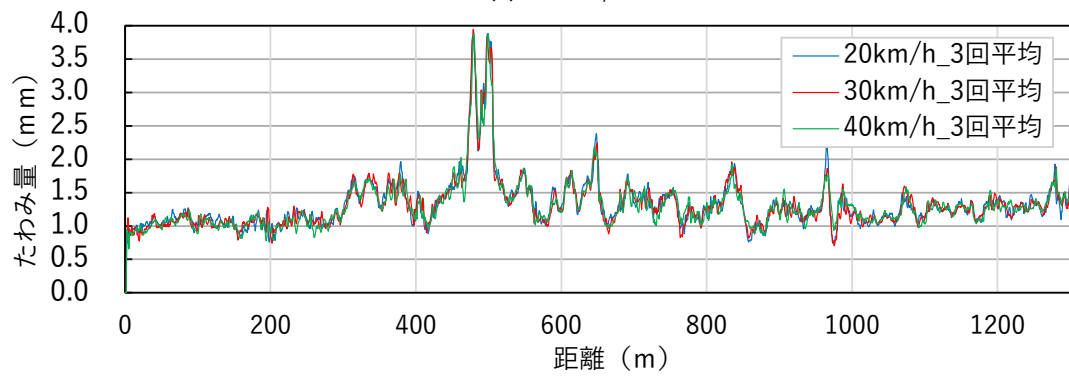
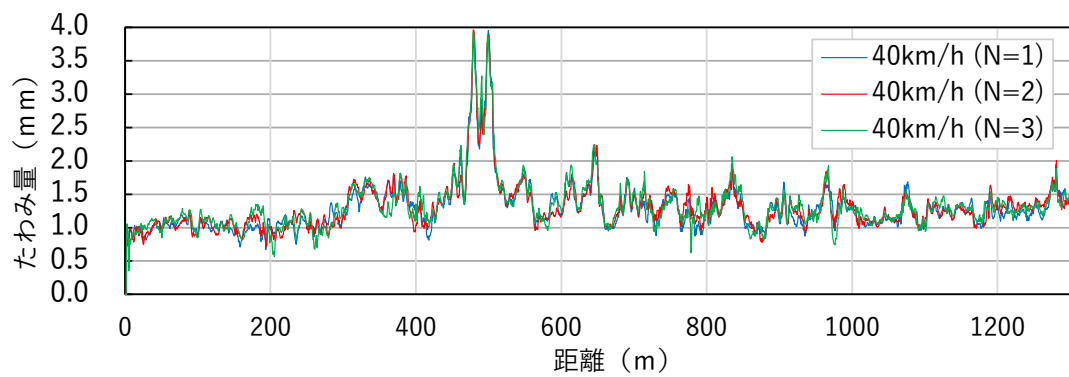
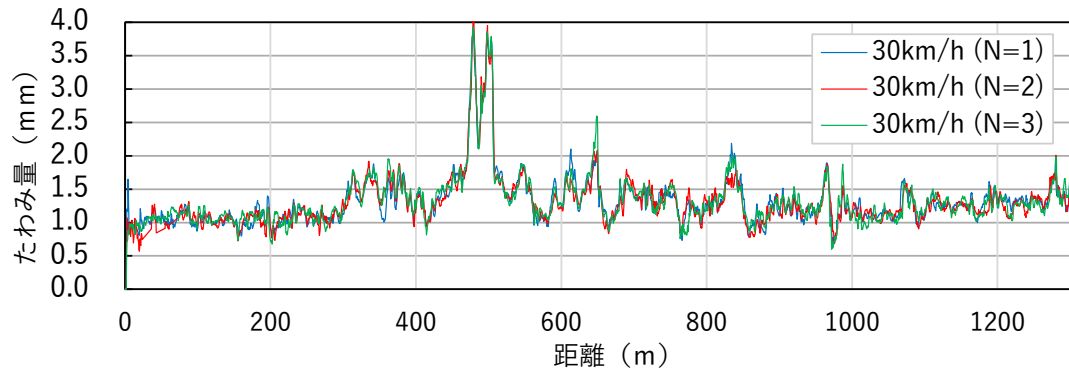
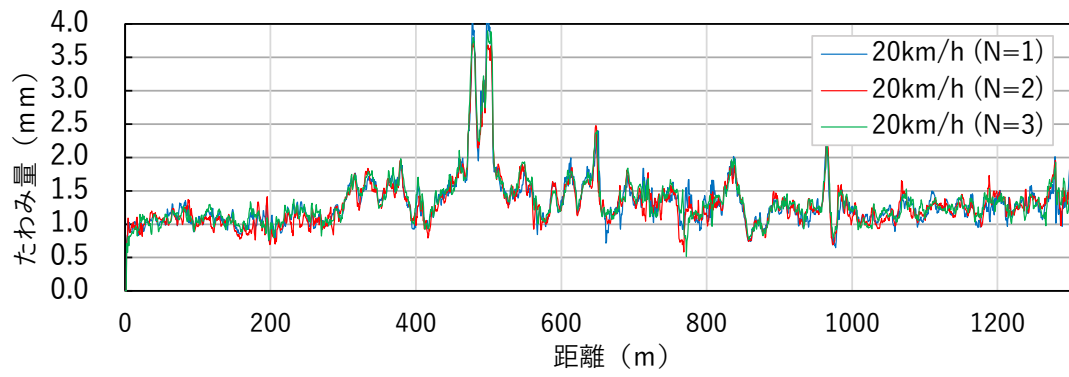
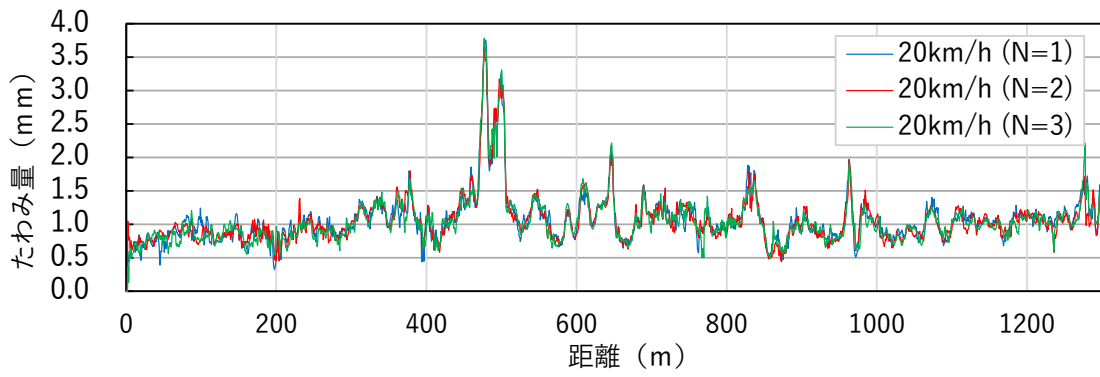
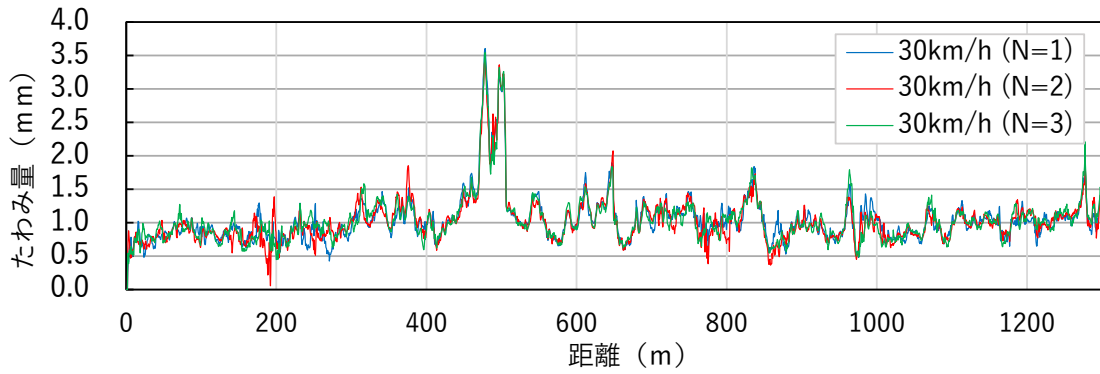


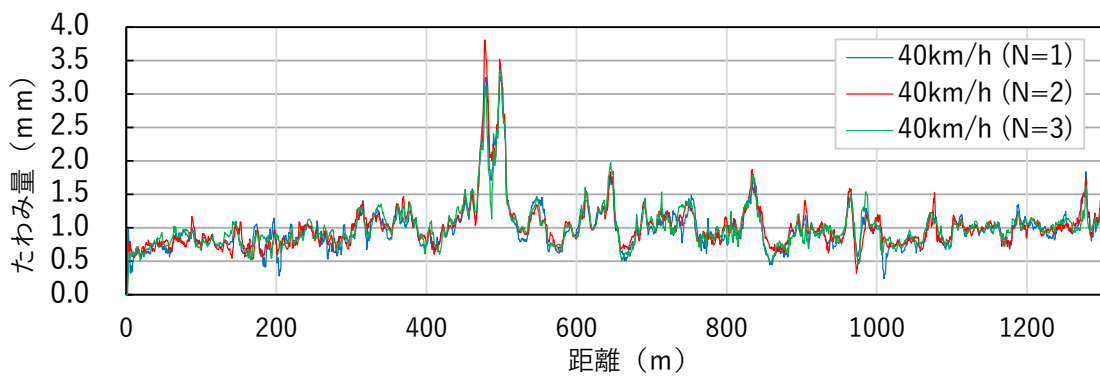
図 4.3.5.1 高温時(約 55°C) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断面図



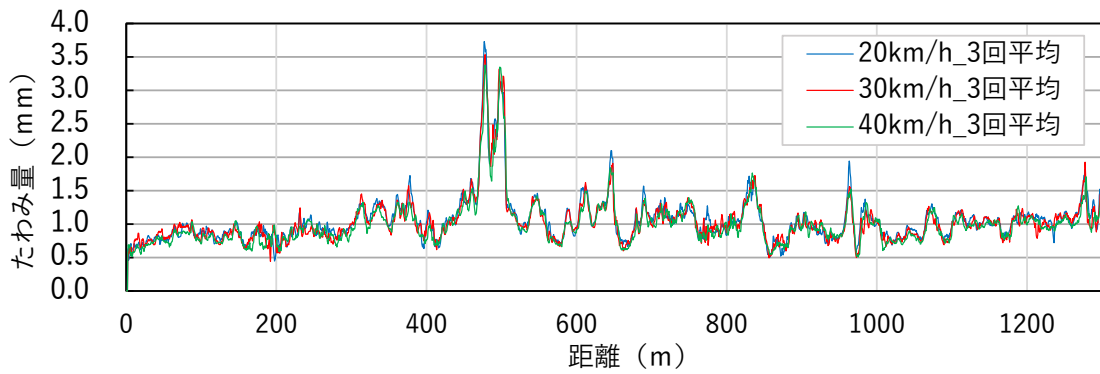
(a) 20km/h



(b) 30km/h

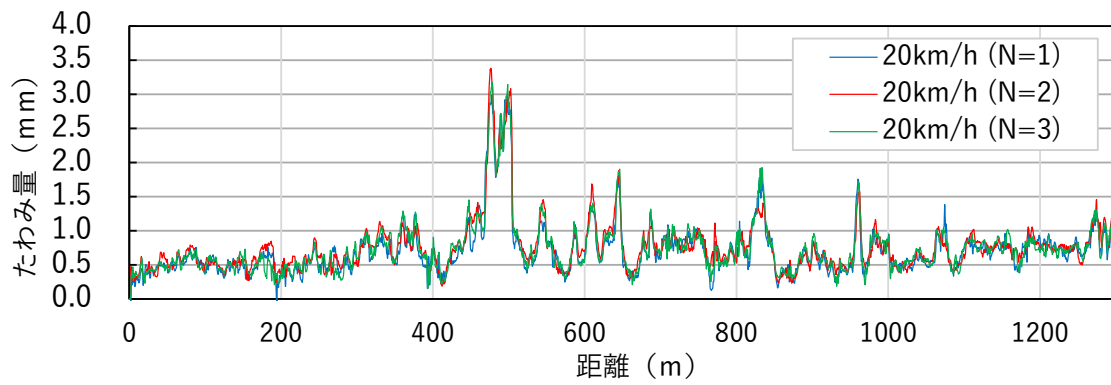


(c) 40km/h

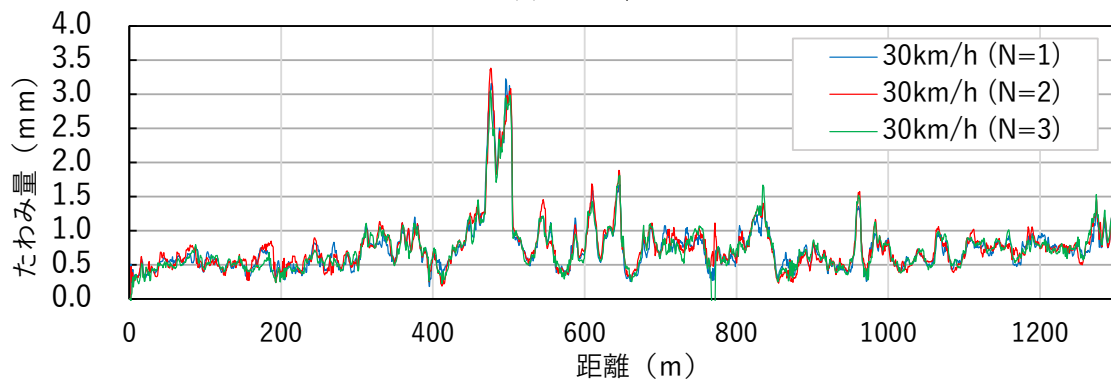


(d) 各速度平均および全速度平均

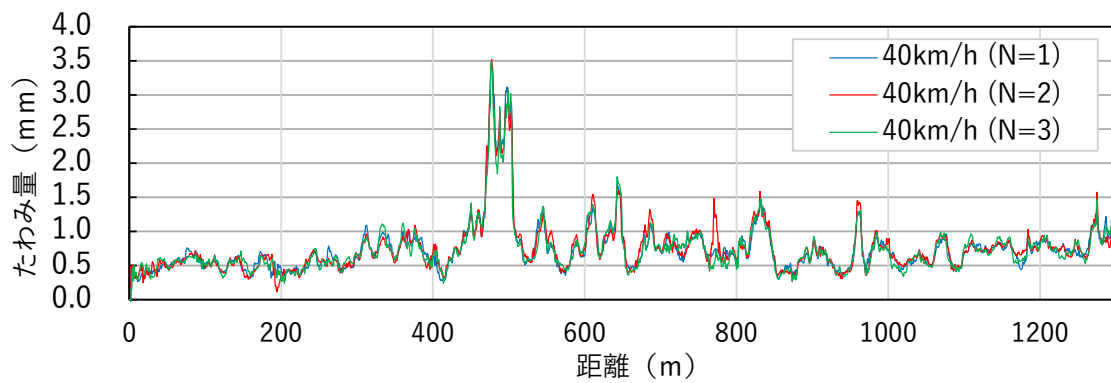
図 4.3.5.2 平温時(約 30℃) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断図



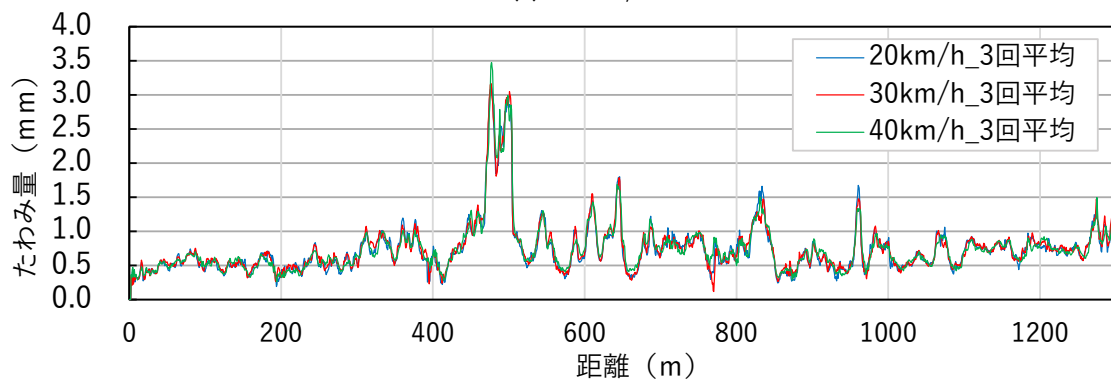
(a) 20km/h



(b) 30km/h



(c) 40km/h



(d) 各速度平均および全速度平均

図 4.3.5.3 低温時(約 10°C) 土木研究所外周路 MWD たわみ縦断面図

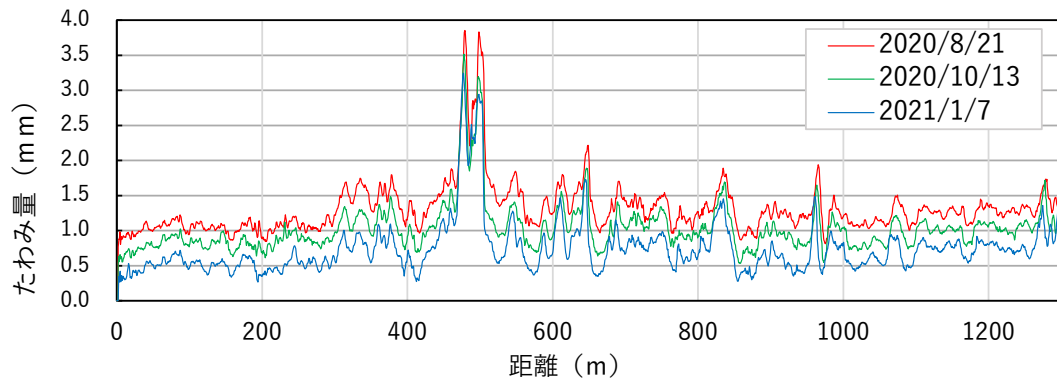


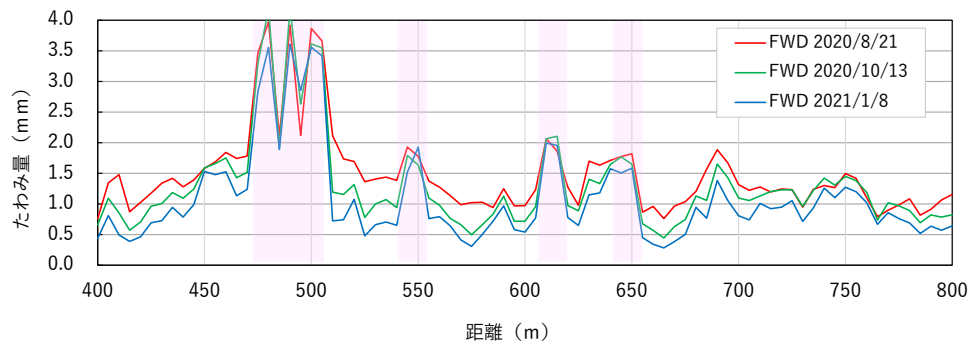
図 4.3.5.4 各温度での MWD たわみ縦断図 (荷重補正_レーザ法)

図 4.3.5.4 より、大部分において低温・標準温度・高温の順にたわみ量が大きくなっていることから、レーザ法による MWD たわみ量も FWD たわみ量と同様に温度の影響により増減するということがわかる。

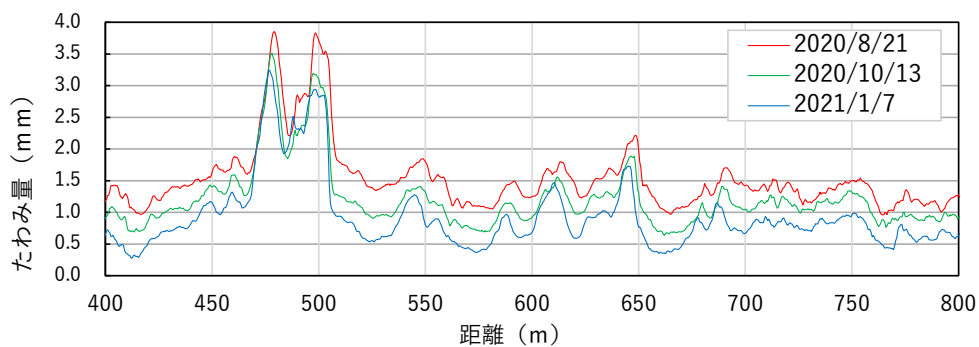
2) FWD たわみ量と MWD たわみ量の比較

路面の損傷が激しい 400~800m 地点において、同時期に測定した FWD 荷重補正たわみと MWD 荷重補正たわみの比較を図 4.3.5.5 に示す。温度条件によるたわみ量の変化は FWD と MWD で似た傾向を示している。

図のハッチング箇所は他区間と比較してたわみが大きくかつ温度によるたわみ差が少ない。この区間はひび割れが多く亀甲状の箇所も多く存在する箇所であった。



(a) FWD たわみ縦断図 (荷重補正)



(b) MWD たわみ縦断図 (荷重補正_レーザ法)

図 4.3.5.5 荷重補正後-たわみ量比較

3) 温度補正式の検討

FWD に用いられる温度補正式¹⁰⁾ (式 4.3.5.1) が、MWD のたわみ測定値にも適用可能かの検討を行った。MWD たわみの標準状態を、FWD と同様に載荷荷重 49kN・アスコン層の平均温度 20℃と設定し、荷重補正を行ったたわみ量に温度補正を行った。なお、(式 4.3.5.2) の舗装体温度算出には FWD・MWD それぞれの測定日時・気温センサ・路面温度センサから得られた値を入力し、舗装構成は過去文献¹¹⁾より図 4.3.5.6 を標準としてたわみ量の算出を試みた。

$$D_t = CF \times D_w$$

$$\log CF = (-4.914 \times H_{as} + 2) \times 10^{-4} \times (T_{(s,t)} - 20) \dots\dots\dots \text{(式 4.3.5.1)}$$

ここに、 D_t : 荷重・温度補正後の最大たわみ量 (μm)

CF : 20℃の D_w (荷重補正後のたわみ量)に対する補正係数

H_{as} : アスコン層の厚さ (cm)

$T_{(s,t)}$: 舗装体温度 (アスコン層の平均温度) (℃)

$$T_{(s,t)} = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + e \dots\dots\dots \text{(式 4.3.5.2)}$$

密粒20	40mm
As安定処理	100mm
路盤(切込碎石)	130mm

図 4.3.5.6 土木研究所外周路 舗装構成 (推定断面)

荷重・温度補正後の結果を図 4.3.5.7、図 4.3.5.8 に示す。亀甲状のひび割れが多く、舗装の損傷が著しい箇所 (ハッチング部分) に関して、温度補正後の低温時測定データと高温時測定データのたわみ量が乖離している。特に、低温時測定データの値が大きく算出される傾向がある。当該箇所はひび割れによる損傷によりアスコン層が弾性体として均一に存在していないと推測される。そのため FWD や MWD による実際の舗装のたわみは温度による影響を受けにくい状況であるにもかかわらず、通常温度補正式による処理を行ったため、温度補正が過剰に作用したことが原因と推測される。

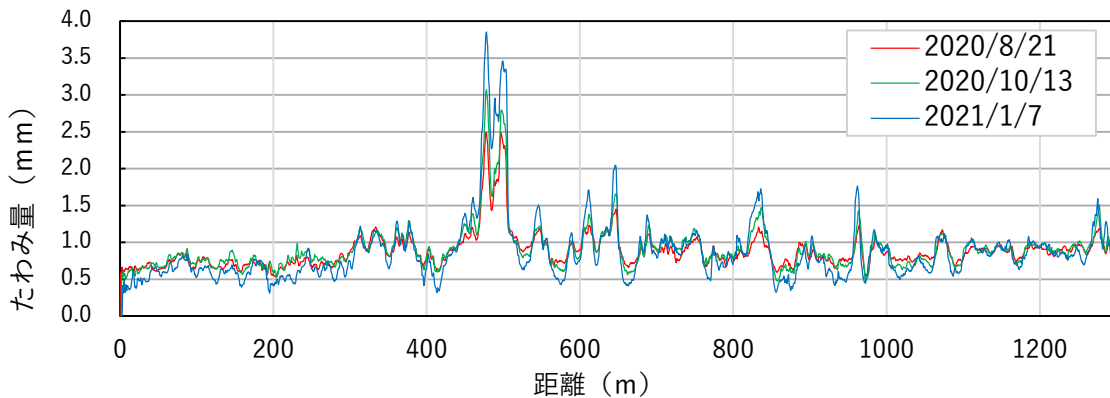
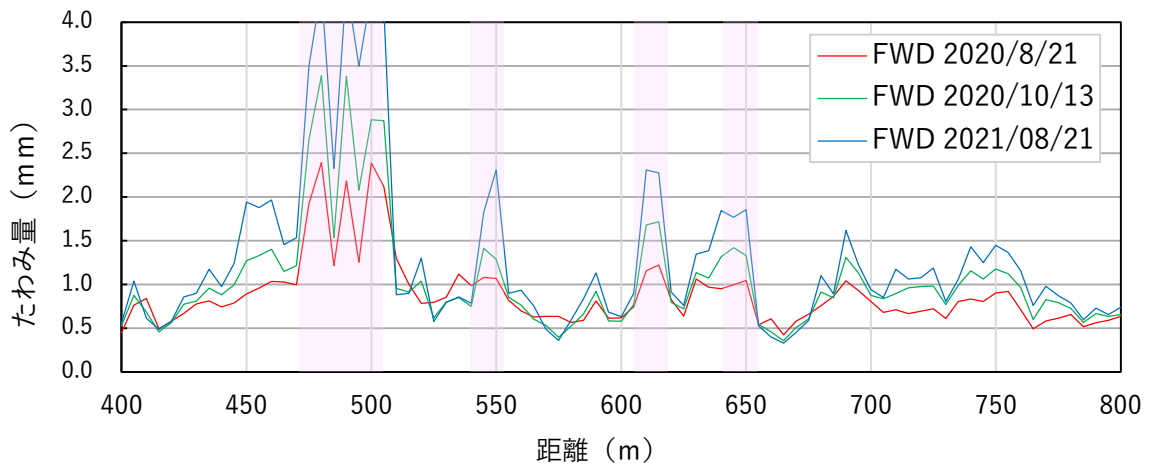
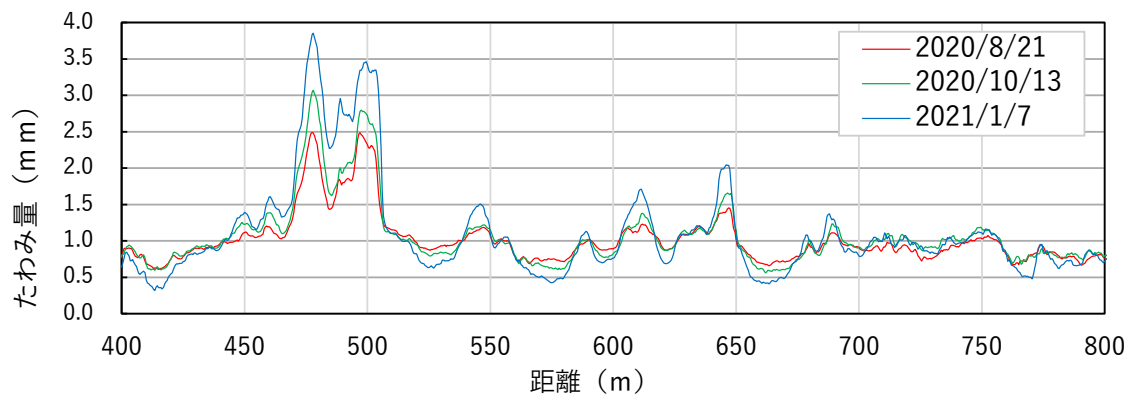


図 4.3.5.7 MWD たわみ縦断面図 (荷重・温度補正_レーザ法)



(a) FWD たわみ縦断面図 (荷重・温度補正)



(b) MWD たわみ縦断面図 (荷重・温度補正_レーザ法)

図 4.3.5.8 荷重・温度補正後-たわみ量比較

FWD・MWD の荷重・温度補正後たわみの相関を図 4.3.5.9 に示す。たわみ大きい箇所はバラツキが大きいものの、単回帰分析において総じて高い相関がある。また、各温度条件での回帰直線の傾きは 0.59~0.63 付近に収まっている。よって(式 4.3.5.1)は MWD にもある程度は流用可能であると考えられる。

$\log CF = a \times (T_{(s,t)} - 20)$ において、今後、異なるアスコン層厚やアスコン層温度についてより多くのデータを用いて解析をすることで、さらに適した係数 a を設定できる可能性がある。

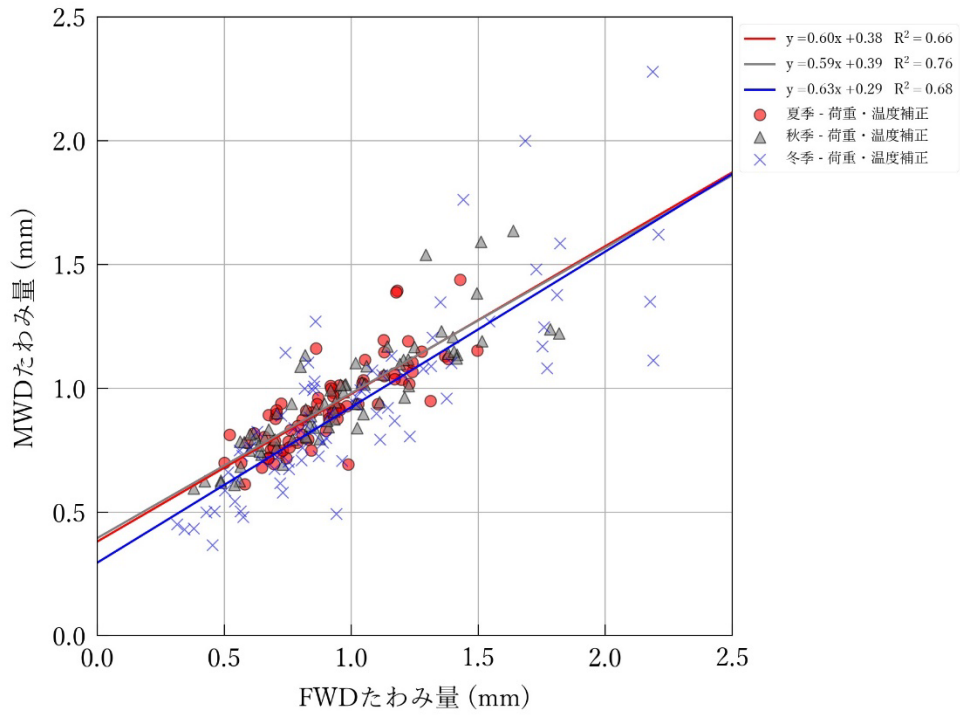


図 4.3.5.9 FWD-MWD 荷重・温度補正後のたわみ量の相関

4.3.6 走行位置の影響

(1) 目的

MWD では走行計測のため、走行中のハンドル操作などで蛇行が発生し、測線位置に対してズレて計測することがある。その場合、同じ測線を計測しても、測線のズレにより計測値にばらつきが発生することになる。

本検証では、走行計測による計測値のばらつきの原因となる走行時の測線位置のズレが MWD たわみ量に与える影響についてレーザ法による結果から確認する。

(2) 使用データ

土木研究所外周路で実施した計測データを用いた。対象区間は図 4.3.6.1 に示す比較的たわみ量が多い区間とした。

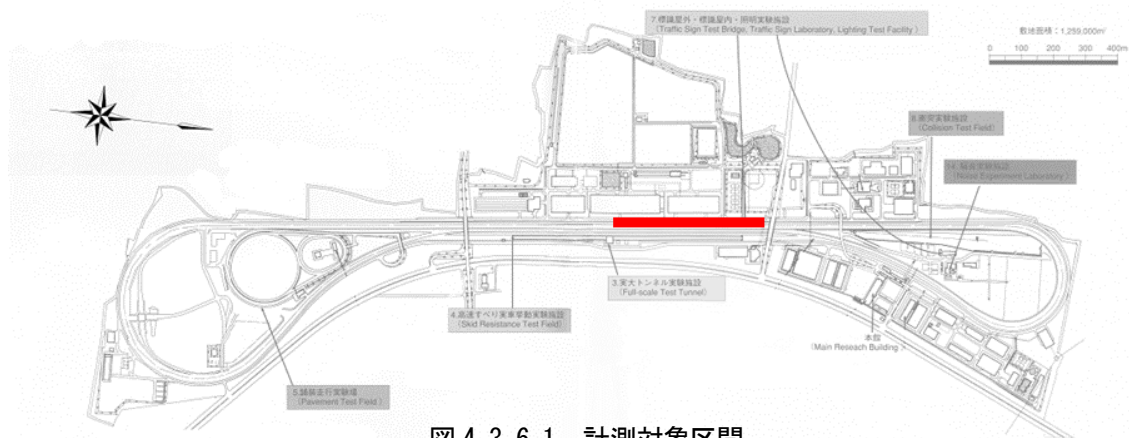


図 4.3.6.1 計測対象区間

1) 計測日時

計測は 2020 年 10 月 14 日 (水) に実施した。当日の天候は曇り時々晴れであった。実施状況を写真 4.3.6.1 に示す。

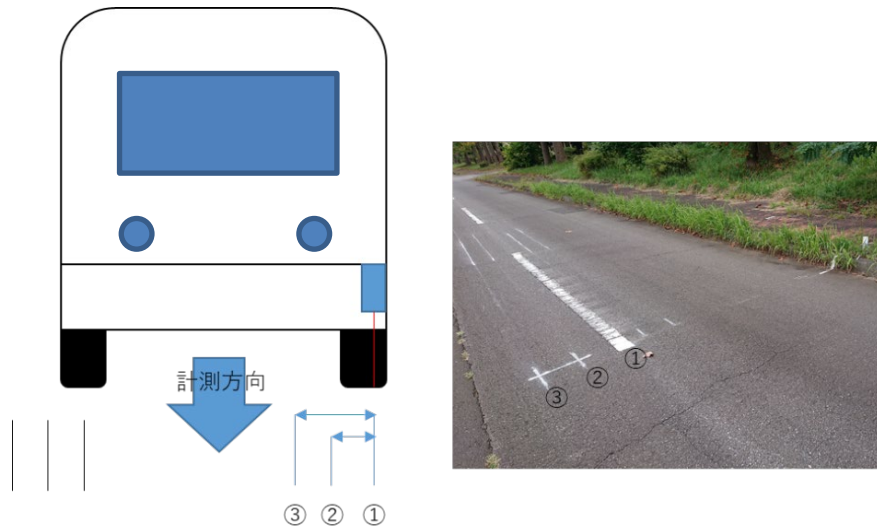


写真 4.3.6.1 計測状況

2) 計測方法

たわみ量が既知の場所において、測線をずらして計測した。当初は左右に同じ間隔でずらして設置する予定であったが、左側は路肩が近く、計測できないことから、右側のみに設置することとした。

正しい計測線に対して、右方向にタイヤ1個ずれた場合(+30 cm)、タイヤ2個ずれた場合(+60 cm)の計測を行った。計測模式図を図4.3.6.2に示す。計測は時速20 kmで各測線5回行った。



- 計測は下記3パターンについて各5回計測
- ① FWDと同一測線
 - ② 進行方向右にタイヤ1つ分ずれた測線 (30cm)
 - ③ 進行方向右にタイヤ2つ分ずれた測線 (60cm)

図 4.3.6.2 計測模式図

(3) 解析結果

1) MWD たわみ量の比較

計測したデータを用いて、レーザ法で MWD たわみ量を算出した。レーザ法の結果を図4.3.6.3に示す。測線位置 0 cmでは FWD たわみ量と同じ傾向を示していた。測線位置 0 cmと比較するとウェーブレット法、たわみ速度差法と同様に、470~510m の FWD たわみ量が比較的大きい箇所では測線が離れるほどたわみ量の低減がみられ、700m~750m のようにたわみ量が比較的小さい箇所では測線による相違が見られなかった。

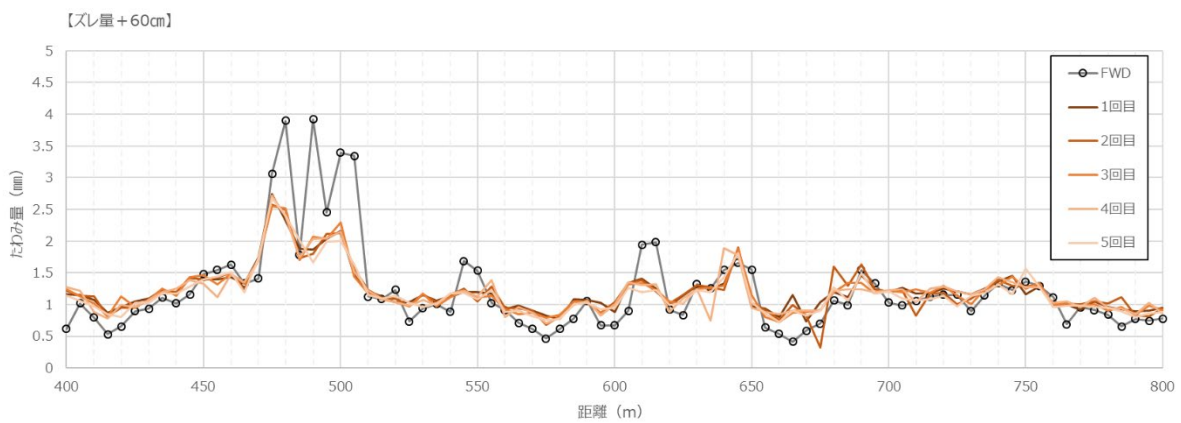
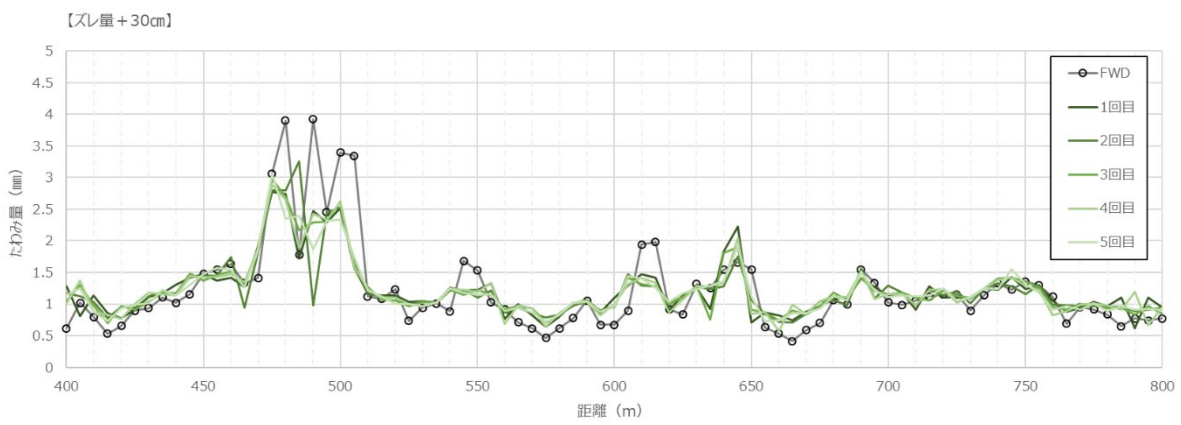
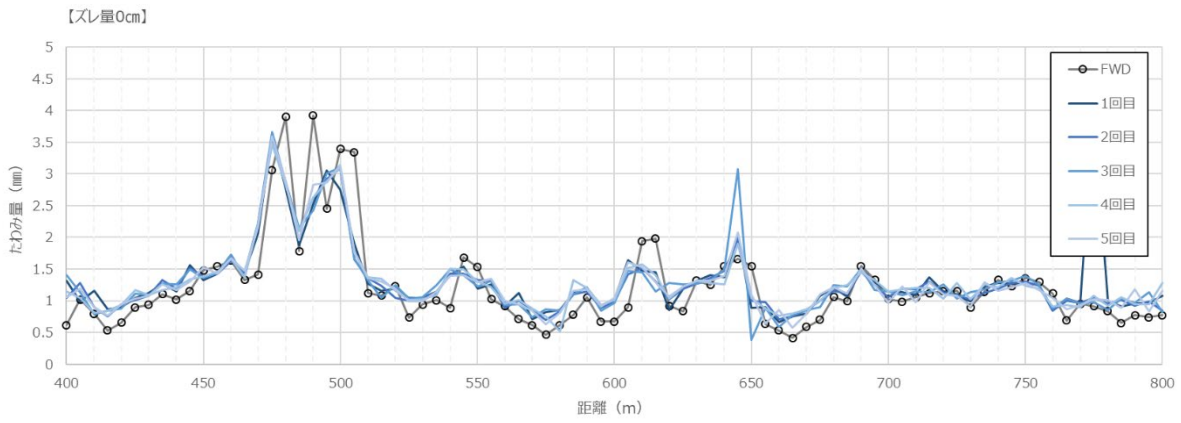


図 4. 3. 6. 3 レーザ法により算出したたわみ量

2) 繰り返し再現性

各測線位置において、MWD たわみ量の各測点の標準偏差と変動係数の平均値を求め、5回計測の繰り返し再現性を確認した。結果を表4.3.6.1に示す。計測位置における再現性の差は見られなかった。

表 4.3.6.1 各測点における標準偏差と変動係数の平均（レーザ法）

測線からの位置	0cm	+30cm	+60cm
測点数	81	81	81
標準偏差(mm)	0.071	0.088	0.097
変動係数(%)	6.1	7.0	7.8

3) 測線位置における MWD たわみ量の分析

測線位置が MWD たわみ量に与える影響を確認するため、計測範囲の中で MWD たわみ量大きい区間（450～500m）と比較的小さい区間（700～750m）について、測線位置によるたわみ量の変化を確認した。

- ・ FWD の測点がある位置に最も近い点を抽出
- ・ 各地点の 5 回計測の平均を算出し、代表値とする
- ・ 各地点でずれ量 0 cm を基準としたときの各ずれ量でのたわみ量の割合を算出

① FWD たわみ量大きい区間（450～500m）

各地点の MWD たわみ量の 5 回平均を表 4.3.6.2、測線位置 0 cm に対する各測線（+30 cm、+60 cm）の MWD たわみ量の比率を表 4.3.6.3 に示す。

測線位置が離れるほど MWD たわみ量は低下していた。0 cm 位置の MWD たわみ量との比率を見てみると、測線位置が +30 cm 位置で 0.90、測線位置が +60 cm 位置では 0.83 であった。

表 4.3.6.2 各地点の MWD たわみ量 (5 回平均、400m~500m)

距離 (m)	たわみ量 (mm)		
	レーザ法		
	0cm	+30cm	+60cm
450	1.397	1.438	1.395
455	1.438	1.455	1.343
460	1.676	1.537	1.480
465	1.420	1.227	1.289
470	2.168	1.861	1.721
475	3.579	2.899	2.651
480	2.848	2.647	2.430
485	2.041	2.284	1.814
490	2.605	2.006	1.887
495	2.946	2.338	2.042
500	3.033	2.519	2.148

表 4.3.6.3 測線位置 0 cmにおける各地点の MWD たわみ量の比率 (400m~500m)

距離 (m)	0cmに対する比率		
	レーザ法		
	0cm	+30cm	+60cm
450	—	1.03	1.00
455	—	1.01	0.93
460	—	0.92	0.88
465	—	0.86	0.91
470	—	0.86	0.79
475	—	0.81	0.74
480	—	0.93	0.85
485	—	1.12	0.89
490	—	0.77	0.72
495	—	0.79	0.69
500	—	0.83	0.71
平均	—	0.90	0.83

②FWD たわみ量が小さい区間（700～750m）

各地点の MWD たわみ量の 5 回平均を表 4.3.6.4、測線位置 0 cm に対する各測線（+30 cm、+60 cm）の MWD たわみ量の比率を表 4.3.6.5 に示す。

FWD たわみ量が小さい区間では、地点的には減少した箇所も見られたが、FWD たわみ量が大きい区間と比べると測線位置のズレによる変動幅は小さく同程度の MWD たわみ量であった。0 cm 位置の MWD たわみ量との比率を見てみると、+30 cm 位置で 1.02、+60 cm 位置で 1.03 となっていた。

表 4.3.6.4 各地点の MWD たわみ量（5 回平均、700m～750m）

距離 (m)	たわみ量 (mm)		
	レーザ法		
	0cm	+30cm	+60cm
700	1.092	1.171	1.214
705	1.166	1.167	1.205
710	1.123	1.020	1.068
715	1.261	1.184	1.175
720	1.133	1.188	1.232
725	1.116	1.104	1.106
730	1.020	1.085	1.111
735	1.219	1.249	1.229
740	1.227	1.313	1.358
745	1.285	1.419	1.340
750	1.298	1.272	1.308

表 4.3.6.5 測線位置 0 cm における各地点の MWD たわみ量の比率（700m～750m）

距離 (m)	0cm に対する比率		
	レーザ法		
	0cm	+30cm	+60cm
700	—	1.07	1.11
705	—	1.00	1.03
710	—	0.91	0.95
715	—	0.94	0.93
720	—	1.05	1.09
725	—	0.99	0.99
730	—	1.06	1.09
735	—	1.02	1.01
740	—	1.07	1.11
745	—	1.10	1.04
750	—	0.98	1.01
平均	—	1.02	1.03

4) 測線位置における FWD たわみ量と MWD たわみ量の相関性

FWD たわみ量に対する MWD たわみ量の関係性を確認する。FWD たわみ量に対する各測線位置の MWD たわみ量の相関図を図 4.3.6.4 に示す。測線位置が離れるほど傾きが小さくなる傾向を有していた。

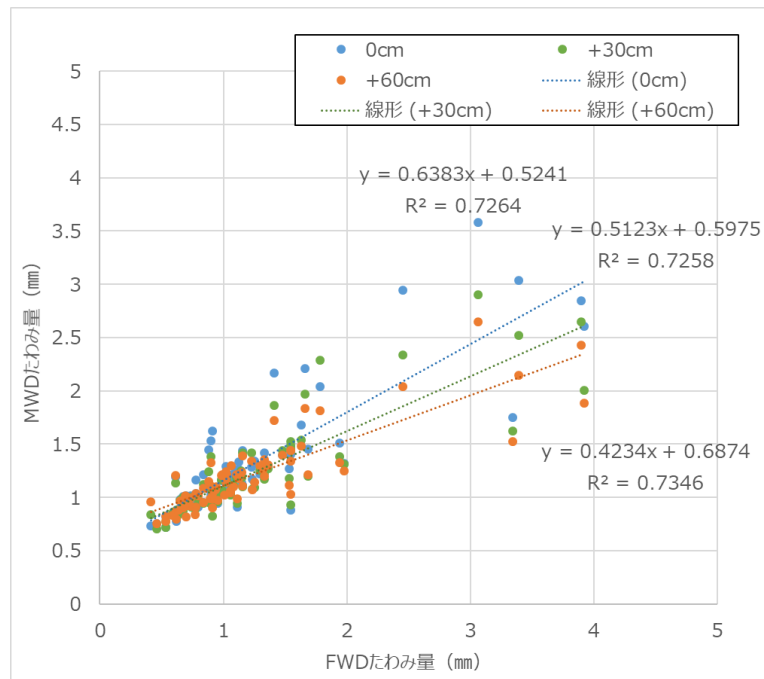


図 4.3.6.4 FWD たわみ量と MWD たわみ量の関係性 (レーザ法)

(4) まとめ

レーザ法の結果から走行位置が MWD たわみ量に与える影響の検討した結果、以下の知見を得た。

- ・ 測線位置 0 cm と比較すると、FWD たわみ量が比較的大きい箇所については測線が離れるほどたわみ量の低減がみられたが、FWD たわみ量が比較的小さい箇所については測線による大きな違いは見られない。
- ・ FWD たわみ量が比較的大きい箇所では、30 cm (タイヤ 1 個分) ずれると 9 割、60 cm (タイヤ 2 個分) ずれると 8 割程度になる。

4.3.7 道路構造による影響

(1) 目的

道路構造〔坂路（縦断勾配）、カント（横断勾配）、カーブ〕や路面性状（段差など）が、レーザ法によるMWD たわみ量測定値に与える影響について検討した。

(2) 測定概要

土木研究所構内で道路構造（坂道、カーブ）、路面性状（段差など）及びFWD たわみ量を新規に調査・計測しデータの収集を行った。その各計測結果を踏まえ、道路構造によりMWDによる計測が可能か、計測のデータのばらつき、相関関係を解析してMWD たわみ量に与える影響を分析した。

(3) 測定箇所・測定条件

測定箇所は図4.3.7.1に示す箇所で、表4.3.7.1に示すように坂路、カント、カーブ及び段差が存在する箇所を選定した。また、測定条件は表4.3.7.2の通りであり各々の条件で3回測定した。なお、FWD測定は測定箇所の一部において5m間隔で測定した。

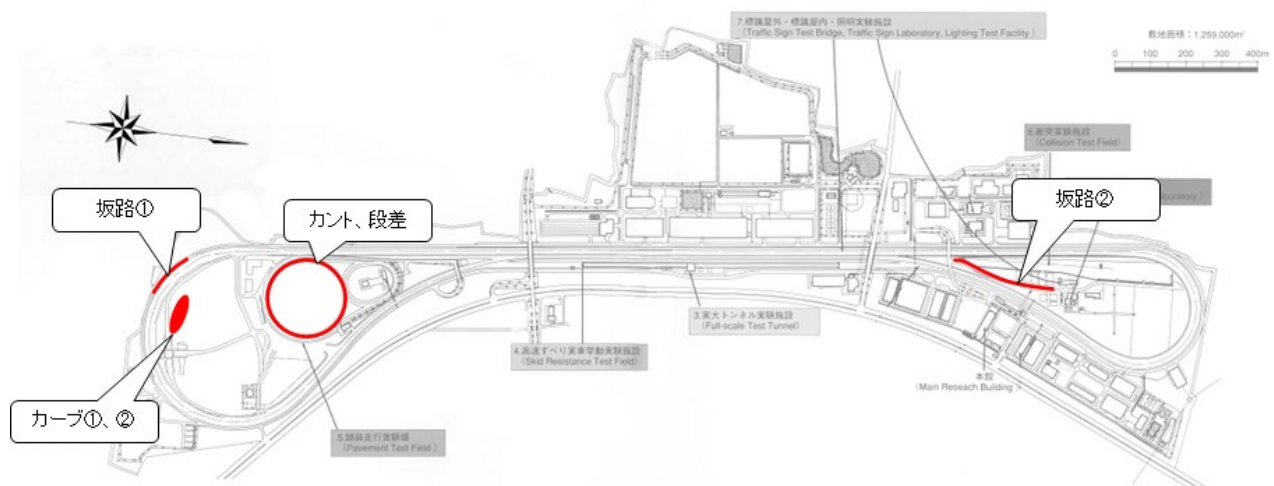


図 4.3.7.1 測定箇所位置図

表 4.2.7.1 測定箇所一覧表

要因	延長	検討内容
坂路①（縦断勾配）	坂路区間 100m、平坦区間 50m	縦断勾配の影響
坂路②（縦断勾配） 上り 坂路②（縦断勾配） 下り	坂路区間 50m、平坦区間 50m	縦断勾配の影響
カント（横断勾配） 段差（30mm）	カーブ区間 100m（R=100m） （内、平坦区間 50m、段差区間 50m）	横断勾配の影響 段差の影響
カーブ①（右回り） カーブ①（左回り）	カーブ区間 50m（R=50m）	カーブの影響
カーブ②（右回り） カーブ②（左回り）	カーブ区間 50m（R=30m）	カーブの影響

表 4.2.7.2 MWD 測定条件一覧表

路線名	測定速度 (km/h)	回数	備考
坂路①	10, 20, 30	各速度 3 回	20km/hのみデータ欠損のため2回測定
坂路②上り	10, 20, 30	各速度 3 回	
坂路②下り	10, 15	各速度 3 回	安全上の問題により低速のみ測定を実施
カント、段差	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ①（右回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ①（左回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ②（右回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	
カーブ②（左回り）	10, 20, 30	各速度 3 回	

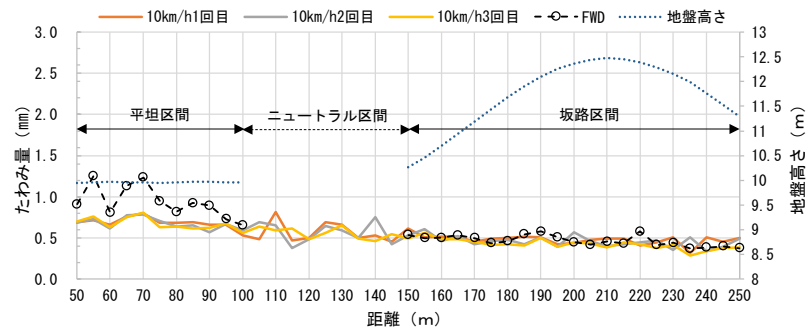
(4) 計測結果

1) 坂路①

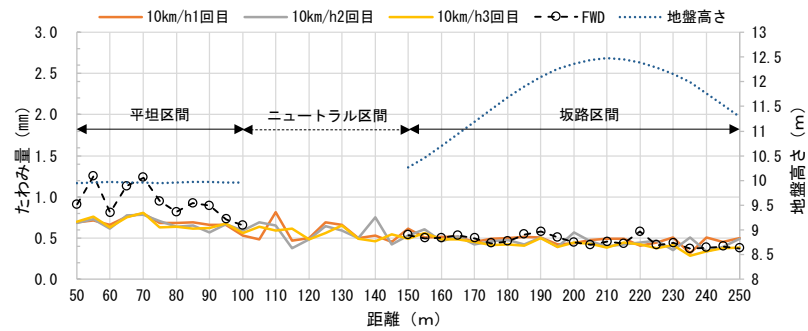
坂路①の縦横断勾配の一覧表を表 4.3.7.3 に、レーザ法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.3.7.2 に示す。

表 4.1.7.3 坂路①縦横断勾配一覧表

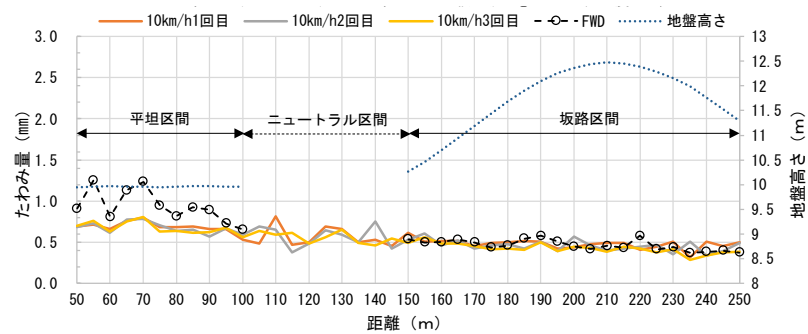
区間	MWD 距離 (m)	縦断勾配 (%)	平均横断勾配 (%)
平坦区間	50~100	0.0	1.2
上り坂区間	150~210	3.7	1.6
下り坂区間	210~250	-3.0	1.2



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.3.7.2 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路①)

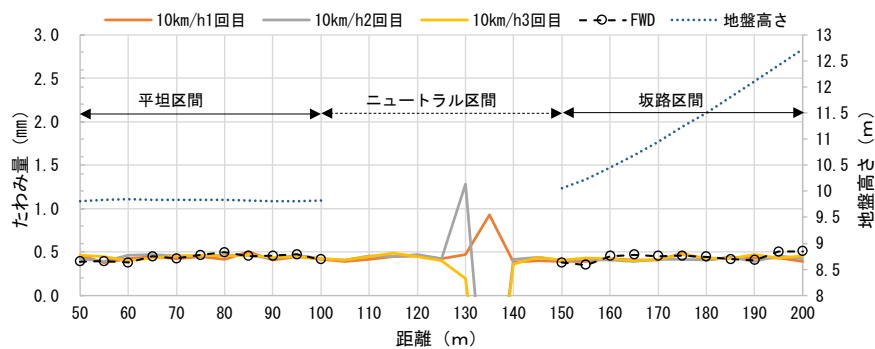
レーザ法による MWD たわみ量は、平坦区間において FWD たわみ量との差が大きくなったが、坂道区間において FWD たわみ量と概ね同様の値が得られた。

2) 坂路②

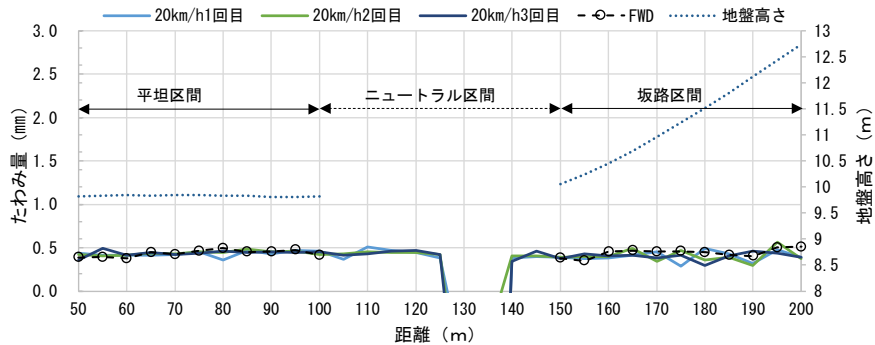
坂路②の縦横断勾配の一覧表を表 4.3.7.4 に、レーザ法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.3.7.3、及び図 4.3.7.4 に示す。

表 4.3.7.4 坂路②縦横断勾配一覧表

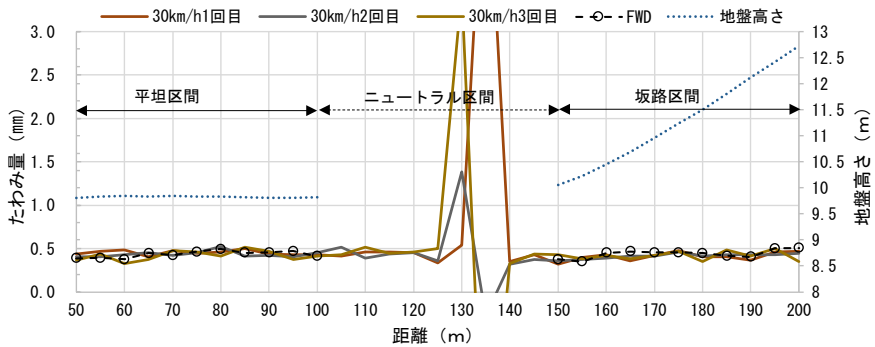
区間	MWD 距離 (m)	縦断勾配 (%)	平均横断勾配 (%)
上り 平坦区間	50~100	0.0	1.6
上り 坂路区間	150~200	5.3	1.9
下り 平坦区間	80~130	0.0	1.7
下り 坂路区間	210~250	-5.3	-1.9



(a) 10km/h

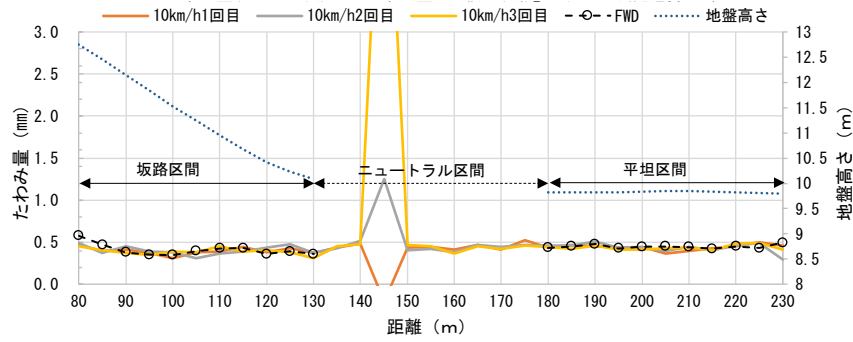


(b) 20km/h

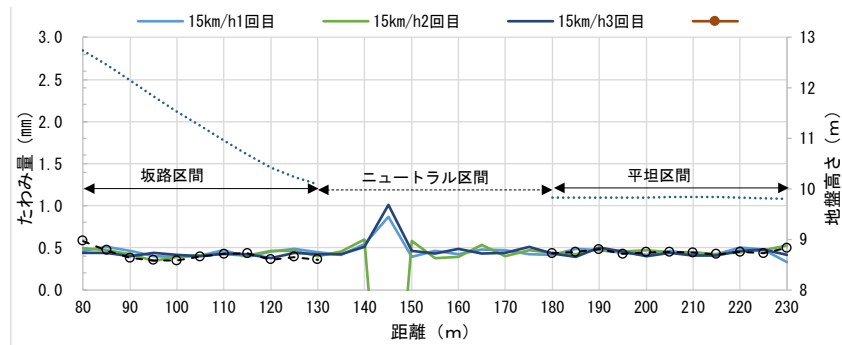


(c) 30km/h

図 4.3.7.3 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路②上り)



(a) 10km/h



(b) 15km/h

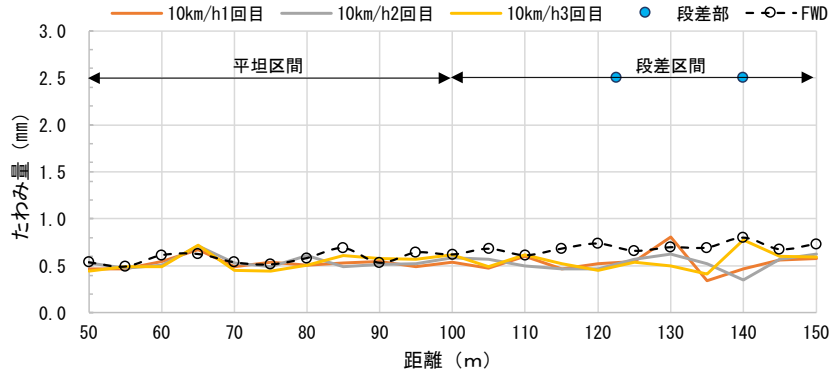
図 4.3.7.4 MWD と FWD のたわみ量の比較 (坂路②下り)

レーザ法による MWD たわみ量は、坂路区間、平坦区間ともに FWD たわみ量と概ね同様の値を示している。なお、FWD を測定していないニュートラル区間において MWD たわみ量の飛びについては、飛びが発生している地点で縦断勾配が大きく変化しているため、正確な解析ができなかった可能性が考えられる。

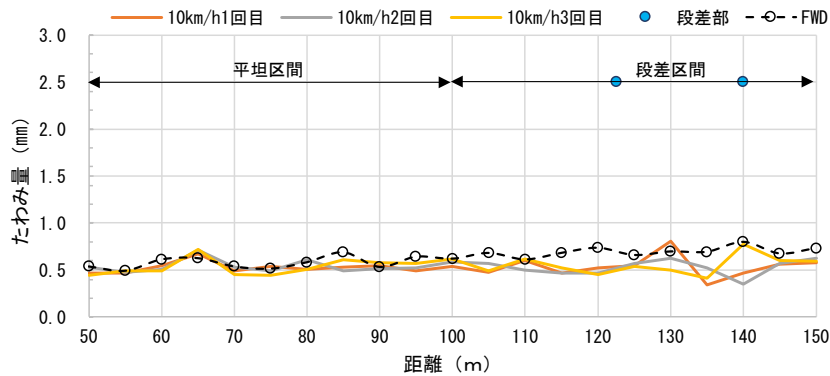
3) カント・段差

カント、段差の存在する測定箇所におけるたわみ速度差法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.3.7.5 に示す。また、比較のため IRI (評価区間長 5m) の測定も実施したので図 4.2.7.6 に示す。

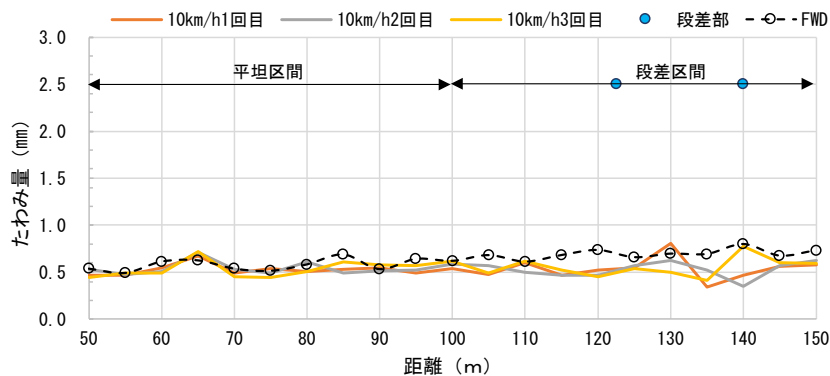
なお、当該カントは約 7% (R100m) であり、路面状態の良好な平坦区間と段差が発生している段差区間が存在している。段差区間では 30mm の段差が 2 箇所発生している。



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.3.7.5 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カント・段差)

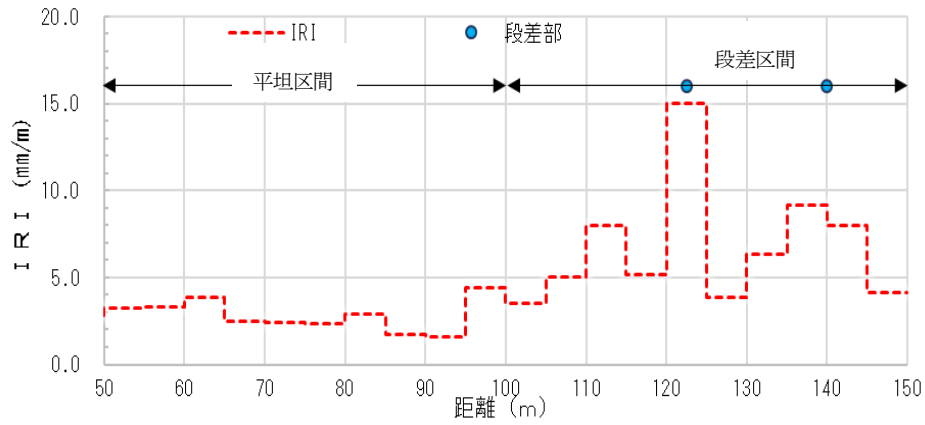


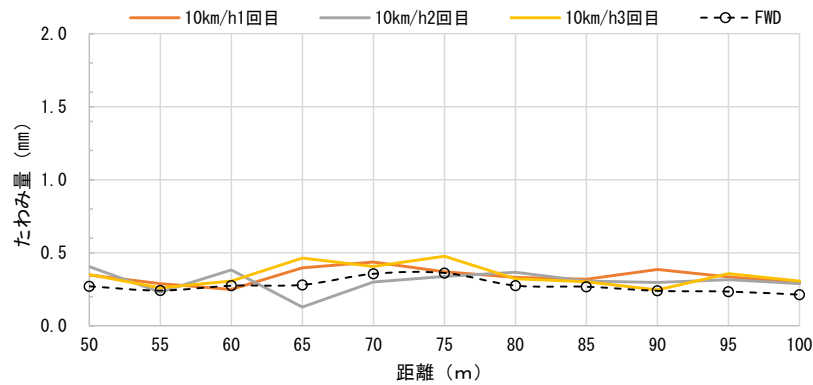
図 4.3.7.6 IRI の測定結果 (評価区間長 5m)

レーザ法による MWD たわみ量は、平坦区間について FWD たわみ量と概ね同様の結果が得られた。段差区間については、FWD たわみ量と概ね同様の値が得られているものの、段差部では FWD たわみ量との差が比較的大きくなることを確認できる。

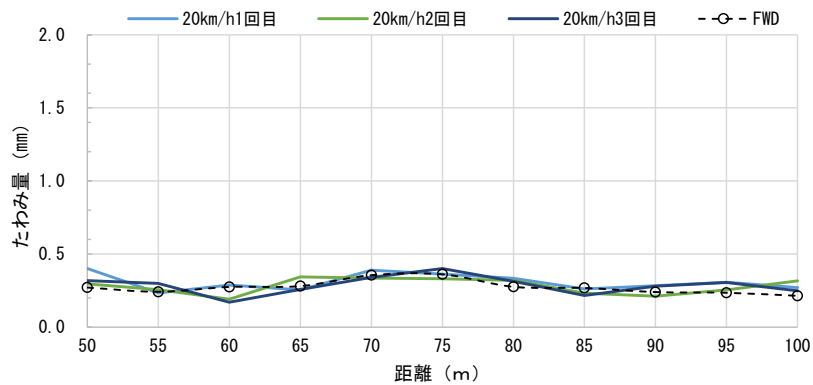
4) カーブ①

カーブ① (R=50m) のレーザ法による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4.3.7.7、図 4.3.7.8 に示す。

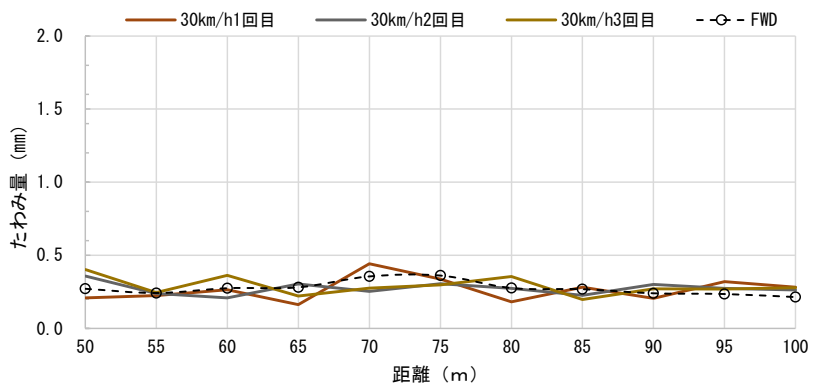
なお、カーブ①については走行方法により車輪に作用する輪荷重が異なるため、走行位置を右回りと左回りで走行して MWD の計測を実施した。



(a) 10km/h

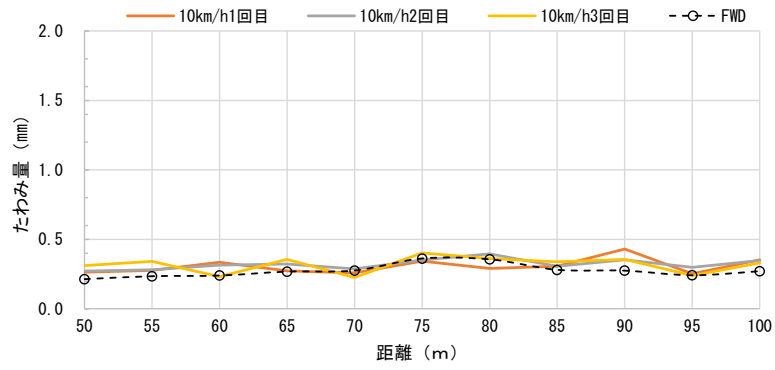


(b) 20km/h

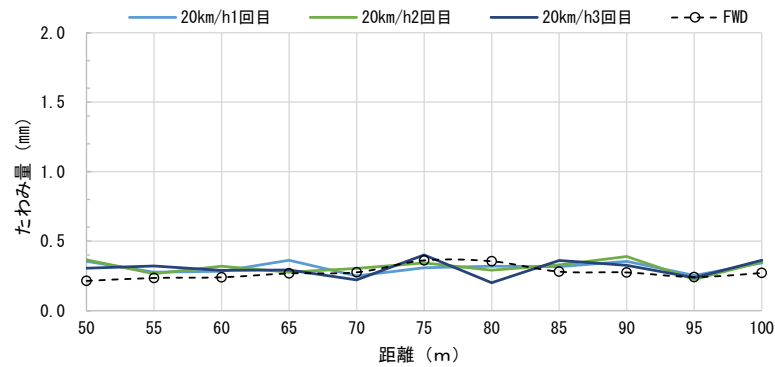


(c) 30km/h

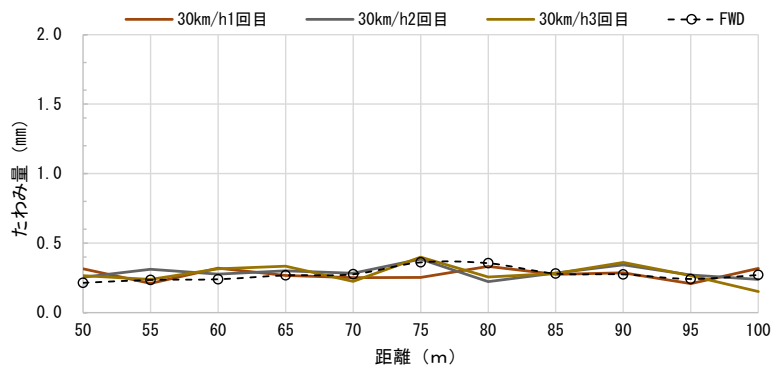
図 4.3.7.7 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ①右回り)



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

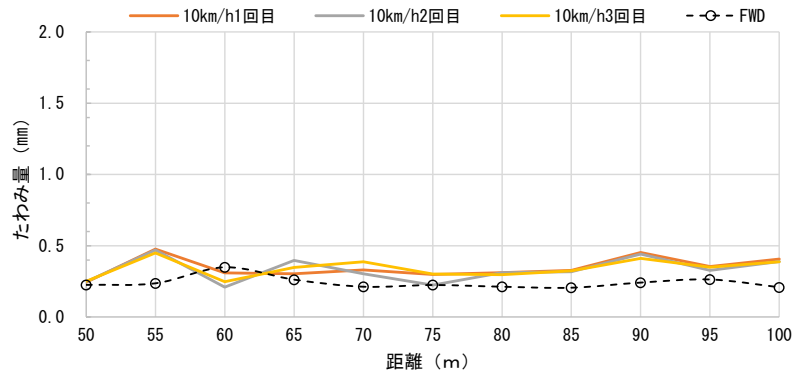
図 4.3.7.8 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ①左回り)

レーザ法による MWD たわみ量は、FWD たわみ量と左回り、右回りともに FWD たわみ量と概ね同様の値を示す結果が得られた。

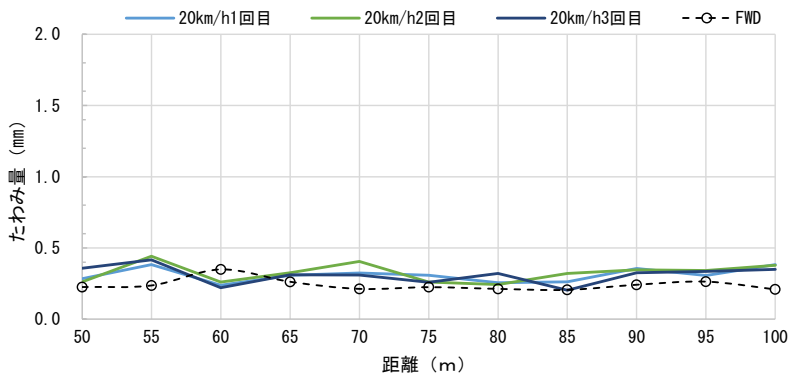
5) カーブ②

カーブ② (R=30m) のたわみ速度差による MWD たわみ量と FWD のたわみ量の比較を図 4. 2. 7. 9、及び図 4. 2. 7. 10 に示す。

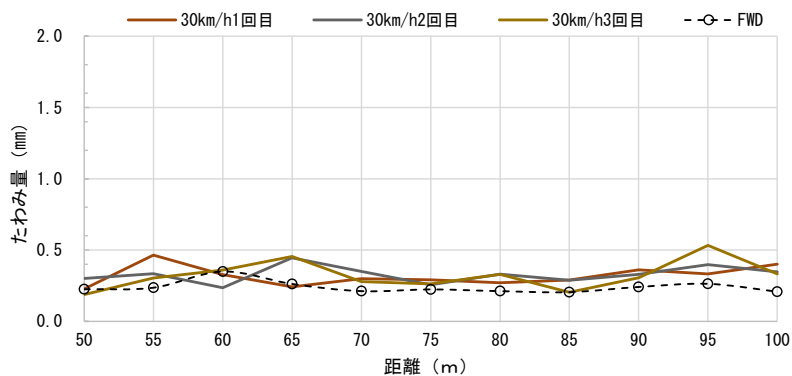
なお、カーブ②についてもカーブ①と同様に、走行位置を右回りと左回りで走行して MWD の計測を実施した。



(a) 10km/h

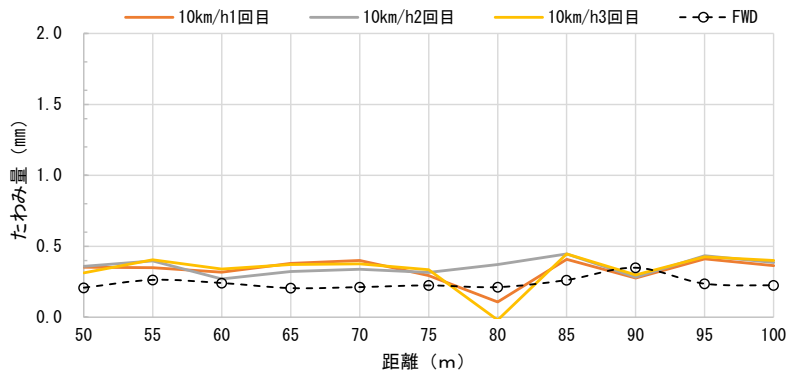


(b) 20km/h

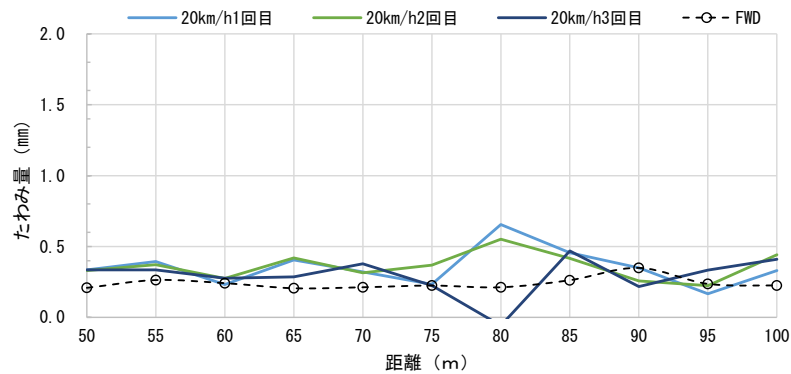


(c) 30km/h

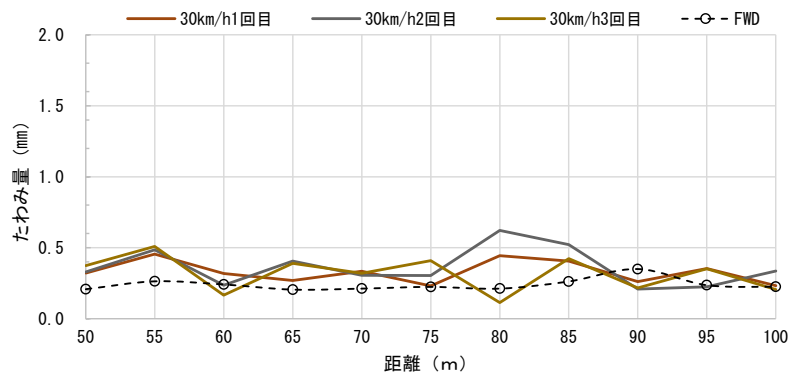
図 4. 3. 7. 9 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ②右回り)



(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h

図 4.3.7.10 MWD と FWD のたわみ量の比較 (カーブ②左回り)

レーザ法による MWD たわみ量は、R50 において FWD たわみ量と概ね同様の値が得られたが、R30 においては一部で FWD たわみ量と異なる傾向が確認できる。この要因として、わだち掘れ等の路面性状や車両が遠心力を受けることによる車両の揺れ等が影響している可能性がある。

(5) まとめ

道路構造 [坂路 (縦断勾配)、カント (横断勾配)、カーブ] や路面性状 (段差) が、たわみ速度差による MWD たわみ量測定値に与える影響について整理すると以下のとおりである。

1) 縦横断勾配の影響

縦断勾配の異なる測定箇所 (坂路①、坂路②) にて MWD たわみ量の測定を行った結果、概ね FWD たわみ量と概ね同様の結果が得られた。

ただし、坂路①の平坦区間において FWD たわみ量との差が大きい結果が得られており、その要因の分析も含めた検討が必要である。

2) 横断勾配の影響

カント 7%の箇所について MWD たわみ量の測定を行った結果、概ね FWD たわみ量と同様の傾向が得られた。

3) カーブの影響

カーブ① (R50m)、カーブ② (R30m) にて MWD たわみ量の測定を行った結果、概ね FWD たわみ量と概ね同様の結果が得られた。

ただし、曲率半径が小さくなった場合には、FWD たわみ量との差が大きくなることが確認されたため、今後その要因の分析も含めた検討が必要である。

4) 段差等の路面性状の影響

3.0cm 程度の段差があり IRI が悪い路面で検証した結果、概ね FWD たわみ量と概ね同様の結果が得られた。

ただし、段差部について平坦部と異なる傾向が確認できた。路面性状によっては MWD 測定結果に大きく影響する可能性もあるため、今後様々な路面性状の箇所による検証が必要であると考えられる。

本検討では一部の条件での検証を実施した結果であり、今後様々な条件で検証を重ね、より精度の高い測定ができるよう検討を進める必要がある。

4.3.8 舗装断面の影響

舗装断面が MWD たわみ量に与える影響について検討した。

(1) 検討路線

解析に用いた路線およびたわみ量の算出に用いた解析方法を表 4.3.8.1 に示す。測定速度はそれぞれ 20 km/h で、測定回数は 3~5 回行った。

表 4.3.8.1 検討に用いた路線

調査日時	調査箇所	工区	測定延長	解析方法		
				ウェーブレット法	たわみ速度差法	レーザー法
2019年2~3月	つくば市内県道45号線・55号線	12工区	200 m	○	-	○
2019年10月3日	白糸ハイランドウェイ(長野県)	2工区	415 m、210 m	○	-	○
2020年2月14日	柏市内市道	3工区	220 m、230 m	-	-	○
2020年6月	つくば市内市道	8工区	300 m	○	○	○

表 4.3.8.1 のそれぞれの路線・工区の舗装構成から計画交通量区分を推定した。計画交通量区分は開削調査から得られた舗装厚から等値換算係数 T_A を求めて推定した。開削調査ができなかった区間については非破壊によりアスファルト層厚を測定し、アスファルト層厚から計画交通量区分を推定した。それぞれの路線・工区のアスファルト層厚と推定した計画交通量区分を表 4.3.8.2 に示す。

表 4.3.8.2 各路線・工区の推定計画交通量区分

調査日時	調査箇所	工区	測定延長	As層厚	推定計画交通量区分
2019年2~3月	つくば市内県道45号線・55号線	No.1	200 m	24 cm	N6
		No.2	200 m	20 cm	N6
		No.3	200 m	-	N6
		No.4	200 m	20 cm	N7
		No.5	200 m	-	N6
		No.6	200 m	-	N6
		No.7	200 m	20 cm	N6
		No.8	200 m	23 cm	N6
		No.9	200 m	13 cm	N7
		No.10	200 m	21 cm	N6
		No.11	200 m	12cm	N7
		No.12	200 m	22 cm	N7
2019年10月3日	白糸ハイランドウェイ(長野県)	A	415 m	10 cm	N4
		B	210 m	10 cm	N4
2020年2月14日	柏市内市道	No.2 (下り線)	220 m	4 cm	N1~3
		No.6 (上り線)	230 m	10 cm	N5
		No.6 (下り線)	230 m	10 cm	N5
2020年6月	つくば市内市道	No.1	300 m	5.1 cm	N1~3
		No.2	300 m	3.8 cm	N1~3
		No.3	300 m	5.1 cm	N1~3
		No.4	300 m	4.4 cm	N1~3
		No.5	300 m	4.4 cm	N1~3
		No.6	300 m	4.1 cm	N4
		No.7	300 m	5.7 cm	N4
		No.8	300 m	8.6 cm	N5

(2) 解析結果

表 4.3.8.1 に示す路線・工区で MWD たわみ量を算出し、表 4.3.8.2 に示す推定計画交通量毎に集計した。まず、測定回数による繰り返し再現性について表 4.3.8.3 に示す。

表 4.3.8.3 各測点における標準偏差と変動係数の平均値

計画交通量	N1~3	N4	N5	N6	N7
測点数 n 個	335	230	131	328	164
標準偏差の平均値 (mm)	0.11	0.11	0.09	0.08	0.06
変動係数の平均値 (%)	8.22	8.79	13.83	6.45	5.20

表 4.3.8.3 より、N1 から N7 において、標準偏差の平均値は 0.06~0.11 mm、変動係数の平均値は 5~14%と小さい結果となった。

次に FWD D₀ たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関性を求めた。その結果を表 4.3.8.4 および図 4.3.8.1 に示す。

表 4.3.8.4 FWD D₀ たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関係数

計画交通量	N1~3	N4	N5	N6	N7
回帰直線式の傾き a	0.55	0.89	0.57	1.02	1.02
回帰直線式の切片 b	0.54	0.49	0.40	0.67	0.64
直線式の決定係数 R ²	0.45	0.42	0.39	0.44	0.40
相関係数 r	0.67	0.65	0.62	0.66	0.63

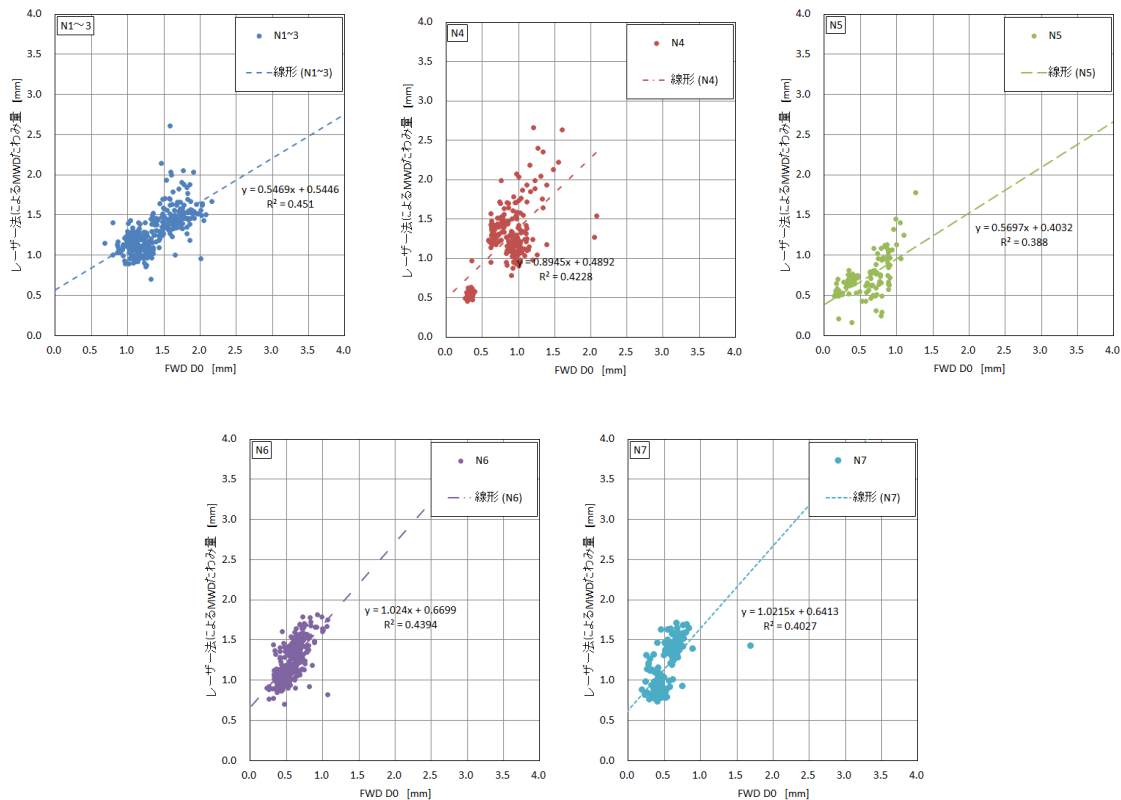


図 4.3.8.1 FWD D₀ たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関関係

表 4.3.8.4 より、FWD D_0 たわみ量と MWD 平均たわみ量の相関係数は 0.62~0.66 程度であり、全てにおいてやや強い相関性を表した。また、回帰直線式を見ると N1 から N5 では傾きが 1 より小さく、N6 および N7 では 1 程度であった。また、舗装厚に関わらず切片が 0.40~0.68 mm であり、MWD たわみ量は FWD D_0 たわみ量よりも 0.50 mm 程度大きくなる傾向が見られた。これは静的な状態で 0 点補正を行っており、動的な状態で 0 点補正していないためと思われる。

以上より、レーザ法による MWD たわみ量は舗装構成や舗装厚によって、繰り返し再現性や FWD D_0 たわみ量との相関性への影響は小さいものと思われる。しかし、舗装構成に関わらず 0.5 mm 程度 MWD たわみ量が大きくなり、N5 以下では FWD D_0 たわみ量に対して傾きが小さい傾向であることが分かった。

5 健全度評価手法の検討

MWD で得られるたわみ量は FWD における D_0 に相当するものであり、健全度評価については、基本的に FWD と同様となる。FWD との大きな違いは、管理路線全体を短時間かつ連続的に測定できることである。

そのため、MWD を用いた舗装の健全度手法については、図 5.1 に示すように MWD にてネットワークレベルで管理路線全体の健全性を把握し、その後、FWD 等の詳細調査にて修繕方法を選定するという流れをとることが MWD の活用の一つであると考えられる。

本検討では、MWD を用いた健全度評価手法として適用可能な手法について、既存知見を中心に紹介し、可能なものについては土木研究所外周路で測定したデータにて検証を実施した。なお、MWD による健全度評価は本章で紹介するもののみではなく、様々な活用方法が考えられる。評価する路線にどのような評価手法の適用が望ましいのか等を、現場の特性に合わせて選定・考案することが重要である。

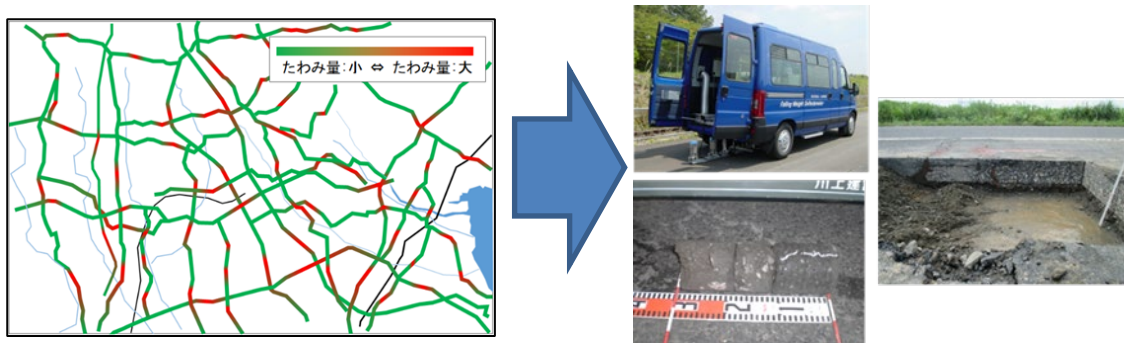


図 5.1 ネットワークレベルでの調査(左)とプロジェクトレベルでの調査(右)

5.1 たわみのバラツキ考慮した舗装の健全度評価手法⁷⁾

参考文献 7)において、MWD を用いた健全度評価手法について、「たわみ量のバラツキを考慮した健全度評価手法」が提案されている。要約すると以下に示す式にて閾値を設定している。

$$f_k = f_m \times D_R \cdot \cdot \cdot \text{(式 5.1.1)}$$

f_k : たわみの閾値、 f_m : 健全部のたわみの平均、 D_R : W_k を W_m で除したたわみ比

W_m : 温度条件が変化した場合のたわみ量解析結果

W_k : W_m に層厚やポアソン比の誤差、計測誤差を考慮した場合のたわみ量解析結果

図 5.1.1 は多層弾性理論による解析結果を示した図である。図中の凡例 N5~N7 は交通量区分、 W_m は温度条件が変化した場合の解析結果、 W_k は W_m に層厚やポアソン比の誤差、計測誤差を考慮した場合の解析結果を示している。

この結果より、構造条件が同じであってもたわみ量にはバラツキが生じていることが分かり、 W_k を W_m で除した値を D_R とすると、以下の式 5.1.2 が求められる。

$$D_R = W_k / W_m = 1.1198 \times T_A^{0.365} \cdot \cdot \cdot \text{(式 5.1.2)}$$

上記、式 5.1.2 をグラフ化したものを図 5.1.2 に示す。 D_R の分布範囲は 1.2~1.4 と狭く、式 5.1.2 の傾きも緩やかである結果となっている。

上記により、健全部のたわみ量及び設計時の T_A から求まる D_R により、対象路線の閾値を求め、閾値を超過した区間を非健全部として抽出することが可能となる。

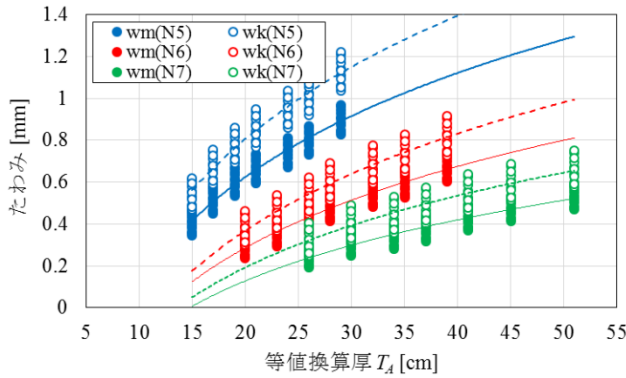


図 5.1.1 多層弾性理論による解析結果

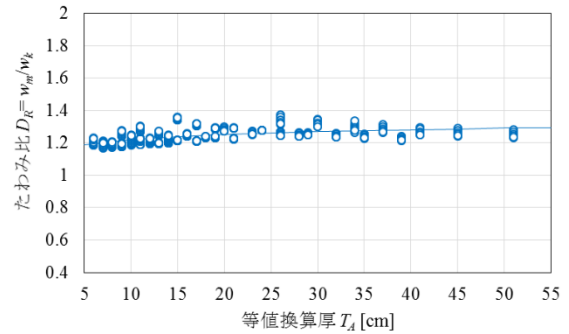


図 5.1.2 等値換算厚とたわみ比の関係

なお、対象路線にて健全なたわみ量を把握できない場合は、式 5.1.1 に示す f_m を、対象路線で得られたたわみ量の平均値とし、 D_R を上限である 1.4 として閾値を設定することも考えられる。その場合の閾値は、対象路線の相対的な非健全箇所を抽出することになるため、閾値以下であっても健全という判断にはならないが、対象路線における修繕の優先度の高い区間の抽出が可能である。

試算として、土木研究所外周路で実施した MWD たわみ量を用いて、閾値を設定し非健全箇所の判定を実施してみた。なお、 f_m は MWD で得られたたわみ量の平均として D_R は 1.4 とした。

試算結果を図 5.1.3 に示す。試算結果から、測定距離が 500m 付近の健全度が著しく低下した区間を抽出できており、その他においても亀甲状のひび割れが生じている箇所などの抽出ができていることが確認できる。また、FWD にて 5m 間隔で測定し同様に試算したが、結果 MWD とほぼ同様の評価ができることが分かる。

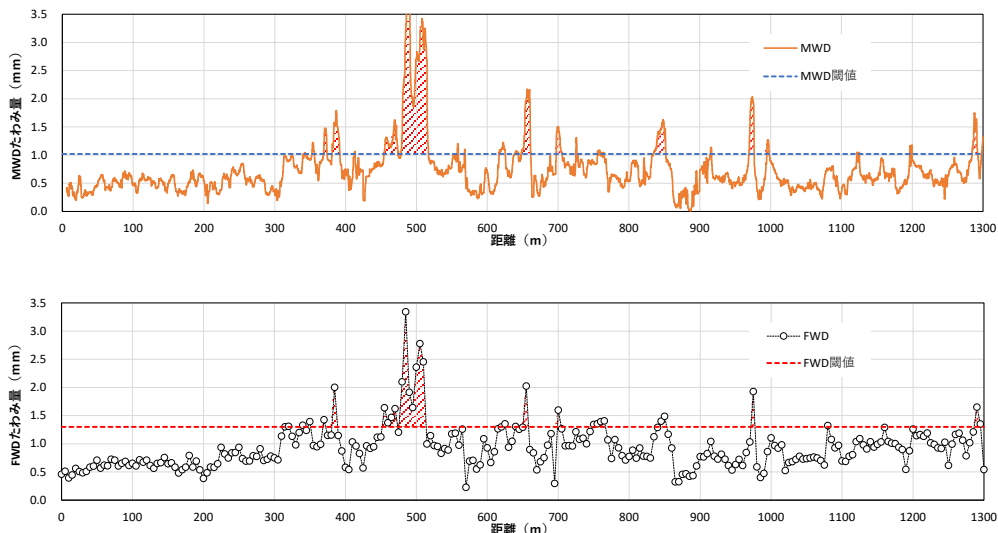


図 5.1.3 たわみのバラツキを考慮した健全度評価手法の試算（上：MWD、下：FWD）

5.2 交通量区分別の FWD による許容たわみ量の目安による健全度評価手法¹²⁾

FWD を用いた健全度評価手法の一つに、 D_0 を用いた「交通量区分別の FWD による許容たわみ量の目安¹²⁾ (以下、許容たわみ量の目安という)」を参考とする手法がある。表 5.2.1 に許容たわみ量の目安を示す。

表 5.2.1 交通量区分別の FWD による許容たわみ量の目安の例

交通量区分	N3	N4	N5	N6	N7
D_0 (mm)	1.3	0.9	0.6	0.4	0.3

表 5.2.2 参考：カタログ断面（信頼度 90%、CBR2 の場合を除く）

交通量区分	N3	N4	N5	N6	N7
舗装厚 (cm)	25~40	35~55	35~65	33~83	43~100
T_A	11.0~15.3	13.5~19	17.3~26.3	20.2~35.2	26.4~45.3
合計 AS 厚 (cm) 【表中基層、アス安】	5	5	10	18 【10、8】 19 【10、9】 20 【10、8】	23 【15、8】 25 【15、10】 26 【15、11】

この手法は、対象路線の交通量区分毎に設定された許容たわみ量の目安を閾値として、閾値を超過した区間で舗装の支持力が不足している可能性があることを示すものである。

判定に必要な情報は、対象路線の交通量区分のみであるが、対象とする交通量区分が不明な場合も考えられる。その場合は、表 5.2.2 を参考にして交通量区分を推定することも考えられる。

試算として、土木研究所外周路で実施した MWD たわみ量を用いて、閾値を設定し非健全箇所の判定を実施してみた。交通量区分は N4 として閾値を 0.9 とした。

図 5.2.1 に試算結果を示す。500m 付近の大きく健全性が低下している区間も含め、非健全部の抽出が可能であることが確認できる。また、確認のために FWD による D_0 にて同様に試算した結果を示す。MWD とほぼ同様の箇所で非健全との判断がされる結果となっている。

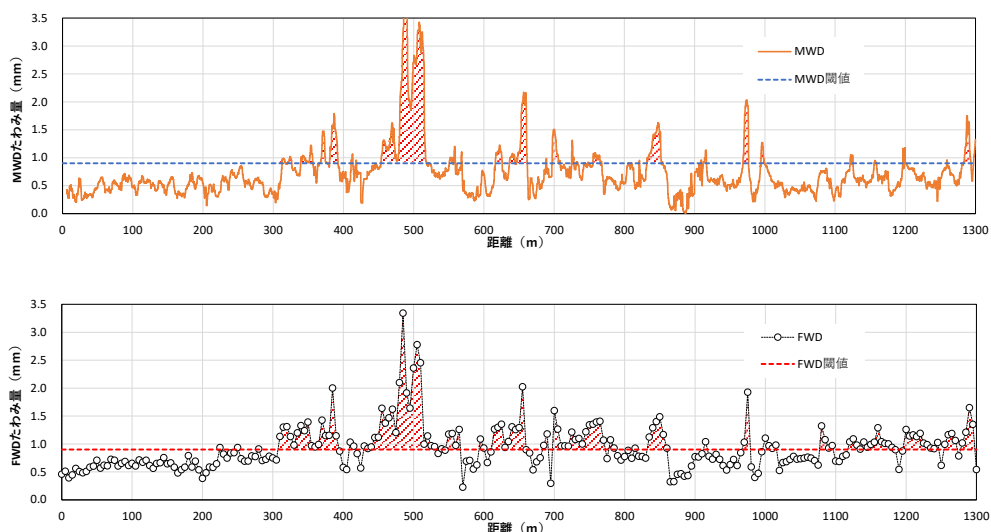


図 5.2.1 許容たわみ量の目安を用いた健全度評価手法（上：MWD、下：FWD）

5.3 追跡調査による方法

追跡調査により、たわみ量の変化を確認し不健全区間を抽出する方法である。

(1) たわみ量の増加を確認し非健全箇所を抽出する方法

MWD による追跡調査を定期的実施して、たわみ量の増加量を把握し、健全性が悪くなっている区間を抽出する方法である。追跡調査は温度の影響をなくすため、できるだけ舗装版の温度が同じ時期に実施することが必要となる。また、温度補正が可能な場合は、温度補正後にたわみ量を比較することも可能である。

(2) 健全性が大きく失われた区間の抽出する方法

亀甲状にひび割れが発生している区間、ひび割れがアスファルト版を貫通している区間については、追跡調査で確認できる可能性がある。

本共同研究では土木研究所外周路にて、各種検討を実施してきたが、検討の中で亀甲状にひび割れている区間やひび割れがアスファルト版を貫通している区間においては、季節（路面温度）によらずたわみ量が大きく変化しないことを確認した。図 5.3.1 は夏（路面温度 55℃）、秋（路面温度 30℃）、冬（路面温度 10℃）で測定した MWD たわみ量である。路面温度によりたわみ量は上下する結果となっているが、黄色に色付けした部分については、路面温度による大きな変化が見られない。また、FWD による D_0 を用いた試算も MWD 同様に実施したが、概ね MWD と同様の傾向が得られている。

そのため、たわみ量の変化がなかった区間 (①、②) 及びたわみ量の変化が確認された区間 (③) において、コア採取を行った。その結果、図 5.3.2 に示すように、①は亀甲状のひび割れが発生しており、ひび割れがアスファルト版を貫通している。②については、①よりは軽微であるが亀甲状のクラックが発生しており、①同様にひび割れがアスファルト版を貫通している。③については、亀甲状のひび割れが発生しておらず、ひびわれはアスファルト版を貫通していなかった。

これらの結果から、夏や冬など温度変化が大きい時期に調査をして比較することで、健全性が大きく失われた区間の抽出できる可能性があることが分かる。

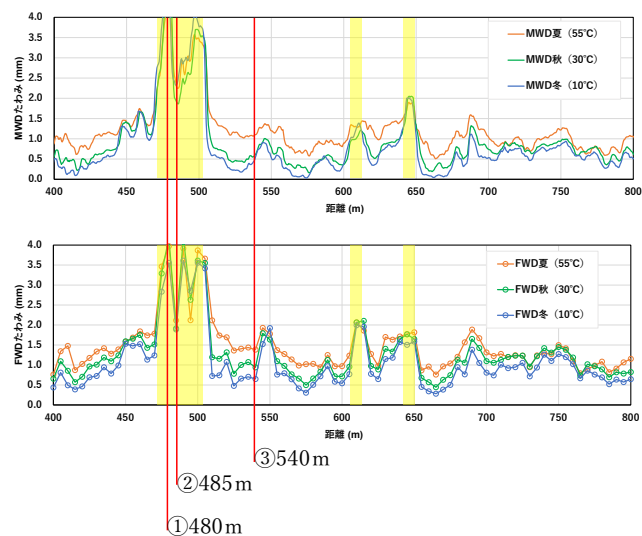


図 5.3.1 健全性が大きく低下している区間の抽出（上：MWD、下：FWD）

- ① 480 m地点
- ・亀甲状クラック (太)
 - ・ひび割れ貫通
 - ・コア自立せず (バラバラ)



- ② 485 m地点
- ・亀甲状クラック (細)
 - ・ひび割れ貫通
 - ・コア自立



- ③ 540 m地点
- ・線状クラック (細)
 - ・ひび割れ表面5cmまで
 - ・コア自立



図 5.3.2 コア採取の結果

6 実道における測定と健全度評価事例

6.1 白糸ハイランドウェイにおける測定・評価事例（レーザ法）

6.1.1 測定概要

本測定は長野県北佐久郡軽井沢町にある株式会社ガイアート管理の白糸ハイランドウェイにて実施した。上下線2車線、全長約10kmの路線を2019年9月19日にMWD測定車によるたわみ量測定、2019年10月3日から4日に路面性状測定車による路面性状測定を行った。本路線の位置図を図6.1.1.1に示す。また、本路線の舗装破損状況を写真6.1.1.1に示す。



図 6.1.1.1 白糸ハイランドウェイの位置図

(出展：株式会社白糸ハイランドウェイ HP<https://www.karuizawa-shw.com/>)



写真 6.1.1.1 舗装の破損状況

(左：0k200 付近、中：0k370 付近、右：7k700 付近)

測定方法は上り線および下り線共に0k100から7k800までの7,700mをキロポスト毎に分割測定した。分割したキロポストの手前50mから走行を開始し、キロポスト間を一定速度で測定した。走行速度は20km/hで、測定回数は3回行った。測定概要図を図6.1.1.2に示す。

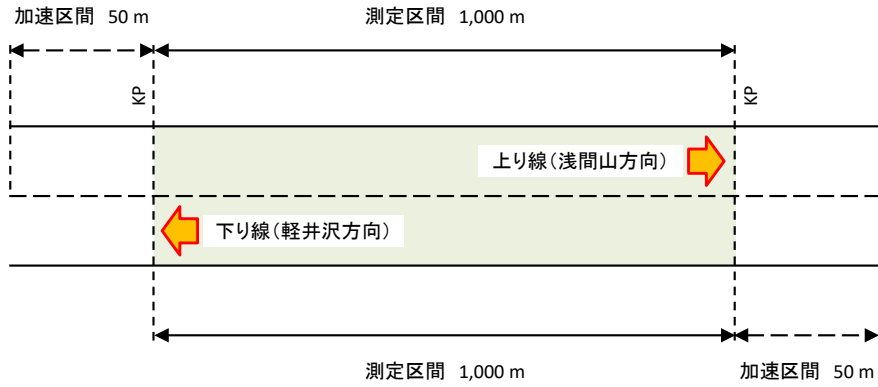


図 6.1.1.2 測定概要図

6.1.2 MWD たわみ量および路面性状測定結果

MWD たわみ量はレーザ法による解析によってたわみ量を算出し、算出間隔は5mで算出した。また、路面性状値は評価区間を100mとして比較した。その結果を図6.1.2.1および図6.1.2.2に示す。

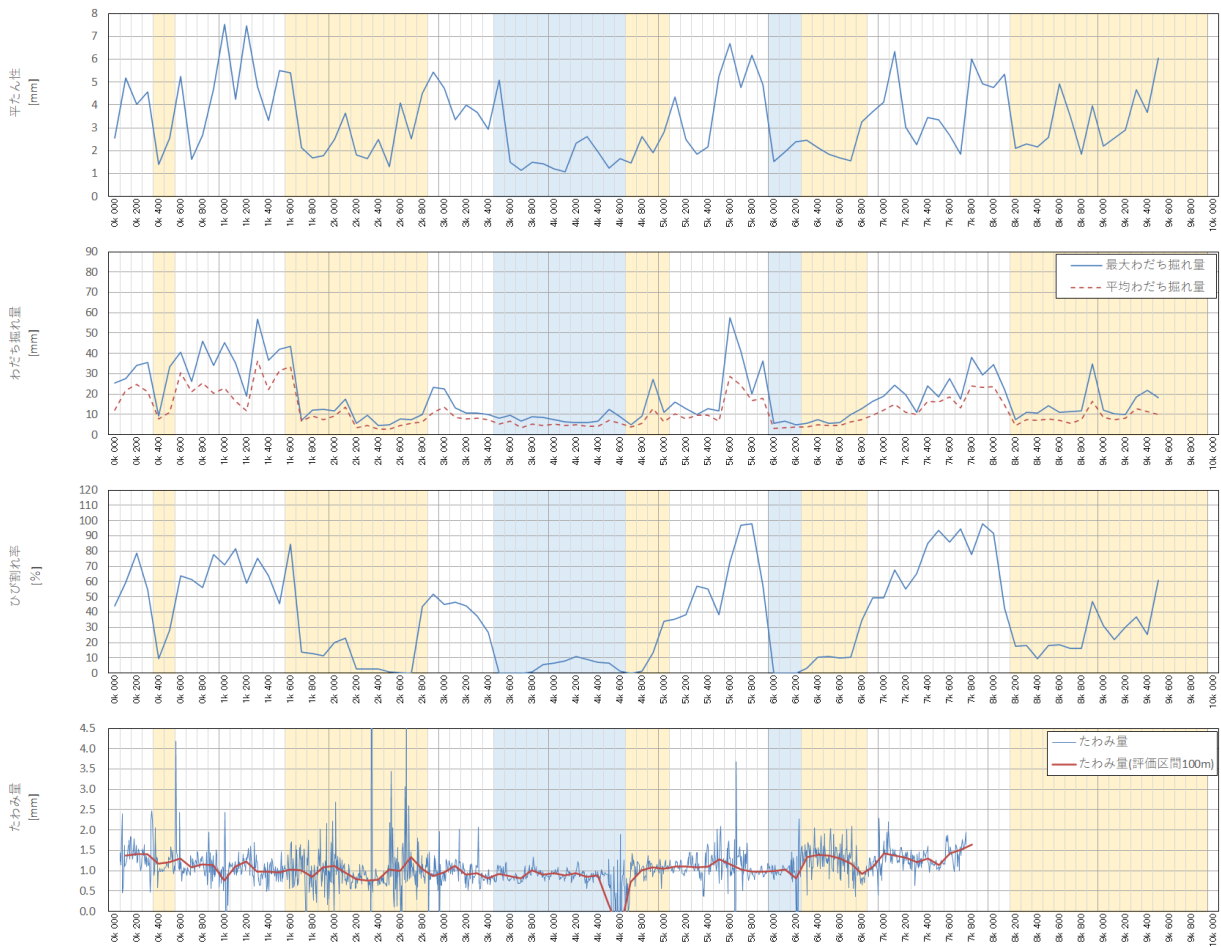


図 6.1.2.1 路面性状測定結果と MWD たわみ量測定結果（上り線）

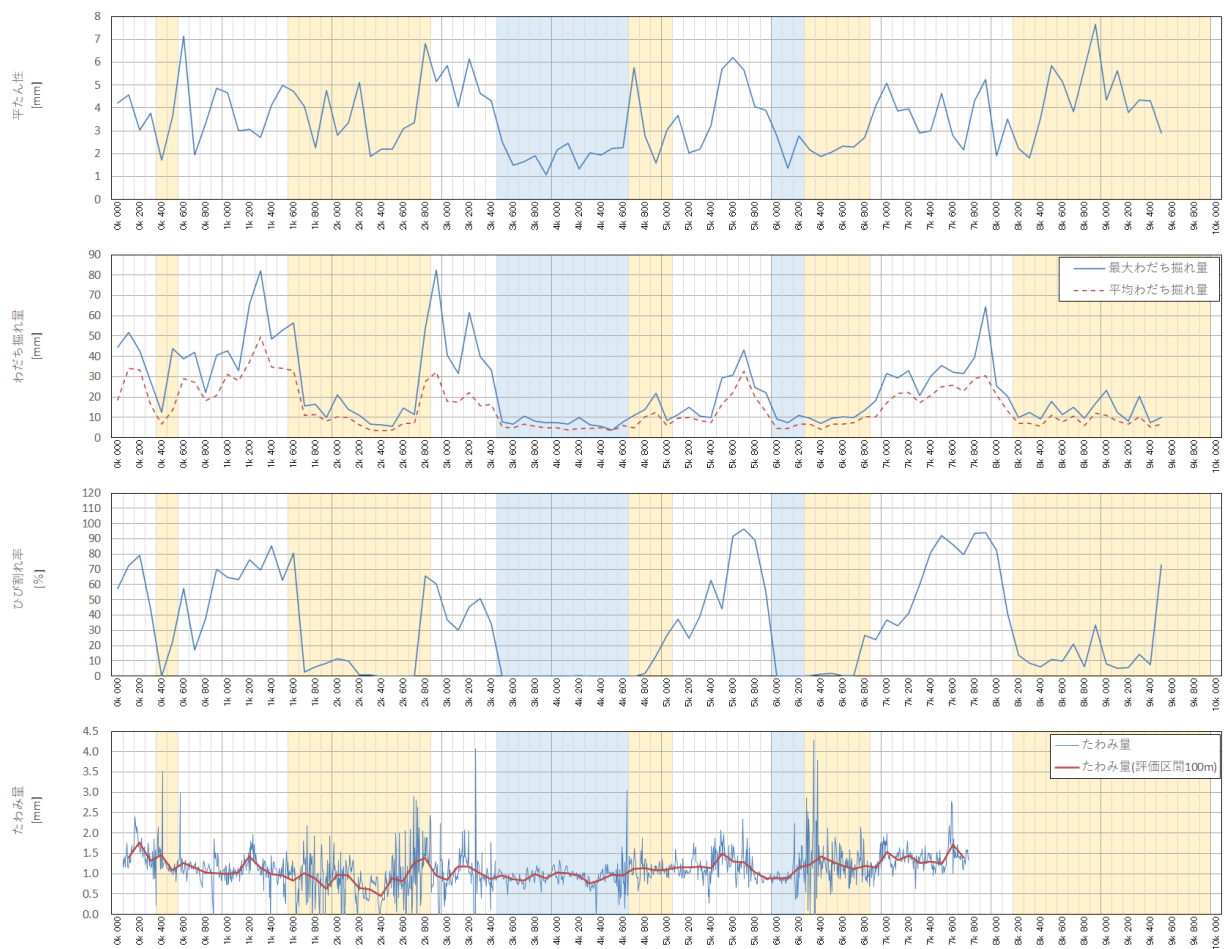


図 6.1.2.2 路面性状測定結果と MWD たわみ量測定結果（下り線）

本路線は部分的に切削オーバーレイもしくは打換えによる補修が施されており、補修が施された区間の表層には一部を除き多機能型排水性舗装が舗装されている。MWD たわみ量の波形が部分的に乱れている箇所についてはこの多機能型排水性舗装の縦溝に影響を受けたものと思われる。図 6.1.2.1 および図 6.1.2.2 の青色区間は密粒度アスファルト混合物、黄色区間は多機能型排水性舗装で補修された区間を示しており、供用後 10 年以下の区間である。レーザ法による解析では多機能型排水性舗装やグルーピング工法といった縦溝によってたわみ量の影響を受ける可能性があることが分かった。

補修区間は MWD たわみ量の測定を行っていない 7k800 以降を除くと、0k400～0k600、1k600～2k900、3k500～5k100、6k000～6k900 の 4 区間である。路面性状値を見ると、補修区間ではひび割れ率およびわだち掘れ量が小さく、未補修区間では大きな値となっている。それに対して、MWD たわみ量は未補修区間、補修区間に関わらず相対的にたわみ量が大きい箇所と小さい箇所が見られる。路面性状値および MWD たわみ量の未補修区間、補修区間の平均値を表 6.1.2.1 に示す。

表 6. 1. 2. 1 路面性状値および MWD たわみ量の未補修・補修区間の平均値

項目		未補修区間					補修区間			
		～0k400	0k600～ 1k600	2k900～ 3k500	5k100～ 6k000	6k900～ 7k800	0k400～ 0k600	1k600～ 2k900	3k500～ 5k100	6k000～ 6k900
上り線	ひび割れ率 (%)	59.2	65.5	41.9	61.1	71.7	30.6	16.8	4.7	8.8
	わだち掘れ量 (mm)	30.7	38.2	15.1	24.3	19.8	26.0	11.9	9.2	7.2
	平たん性 σ (mm)	4.08	4.71	4.02	4.29	3.42	2.83	2.73	1.91	2.09
	MWDたわみ量 (mm)	1.398	1.067	0.936	1.093	1.316	1.185	0.962	0.786	1.147
下り線	ひび割れ率 (%)	63.0	60.4	43.0	60.0	59.4	22.2	14.3	1.0	3.4
	わだち掘れ量 (mm)	41.7	46.9	48.2	22.0	29.2	28.0	18.7	9.0	9.8
	平たん性 σ (mm)	3.90	3.98	5.03	4.07	3.61	3.03	3.59	2.21	2.26
	MWDたわみ量 (mm)	1.476	1.102	1.007	1.177	1.375	1.275	0.905	0.970	1.155

表 6. 1. 2. 1 の MWD たわみ量から、補修区間であるにも関わらず例えば 0k400～0k600 および 6k000～6k900 は MWD たわみ量が大きくなっている。また、未補修区間では全体的に MWD たわみ量が大きくなっているが、図 6. 1. 2. 1. および図 6. 1. 2. 2 より上下線の例えば 5k400～5k800 において MWD たわみ量が大きくなっている箇所について、わだち掘れ量が局所的に大きくなっており、下り線の 1k200 付近でも MWD たわみ量が大きくなっている箇所について、わだち掘れ量が局所的に大きくなっている。

6. 1. 3 健全度評価

(1) バラツキを考慮した方法による評価

5. 1 に示す方法を用いて、本路線を MWD たわみ量による評価を行った。本路線の舗装断面から等値換算厚 T_A からたわみ比 D_R を求め、上下線それぞれの MWD たわみ量の平均値から閾値を算出し、閾値を超過する区間について求めた。この閾値と路面性状値の管理基準値を表 6. 1. 3. 1 として設定すると、それぞれの管理基準値を超過する区間は図 6. 1. 3. 1 および図 6. 1. 3. 2 に示す区間となる。

表 6. 1. 3. 1 設定した管理基準値

管理項目	管理値
ひび割れ率	35 %
わだち掘れ量	35 mm
IRI	8.0 mm/m
MWDたわみ量	上り線 1,298 mm
閾値	下り線 1,365 mm

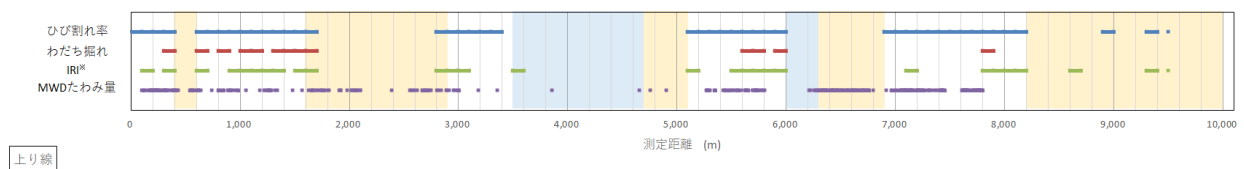


図 6. 1. 3. 1 管理基準値を超過する区間 (上り線)

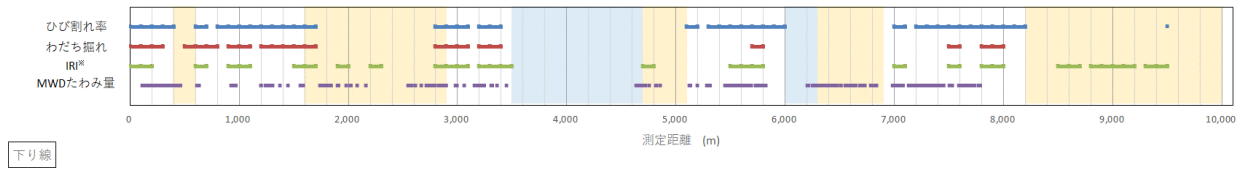


図 6.1.3.2 管理基準値を超過する区間（下り線）

図 6.1.3.1 および図 6.1.3.2 より、補修区間については路面性状値が管理基準値を超過している箇所はほとんどなく、未補修区間についてはひび割れ率がほぼ全域にわたって管理基準値を超過している。

MWD たわみ量については、補修区間であっても閾値を超過している箇所や、路面性状値が管理基準値を超過していても MWD たわみ量は閾値未満である箇所が存在する。例えば、2k000～3k000 付近は滝や川が近傍を流れており、路肩の駐車場や大型バスのバス停等があり、地下水位や大型車の駐停車による舗装への負荷が著しい区間である。また、6k500～7k000 付近にも滝や川が近傍を流れており、料金所での駐停車が繰り返される区間でもある。これらから、補修が行われている場合でも切削層以下の損傷によるたわみ量の増大によって、MWD たわみ量が閾値を超えた可能性が考えられる。

（2）許容たわみ量の目安による評価

本報告書 5.2 に示されている方法を用いて、FWD で示されている許容たわみ量の目安を閾値として評価を行った。本路線の舗装断面から計画交通量区分を推定すると N4 となる。N4 における許容たわみ量は 0.900 mm であるため、これを閾値としてそれぞれの管理基準値を超過する区間を図 6.1.3.3 および図 6.1.3.4 に示す。

表 6.1.3.2 設定した管理基準値

管理項目	管理値
ひび割れ率	35 %
わだち掘れ量	35 mm
IRI	8.0 mm/m
許容たわみ量	0.900 mm

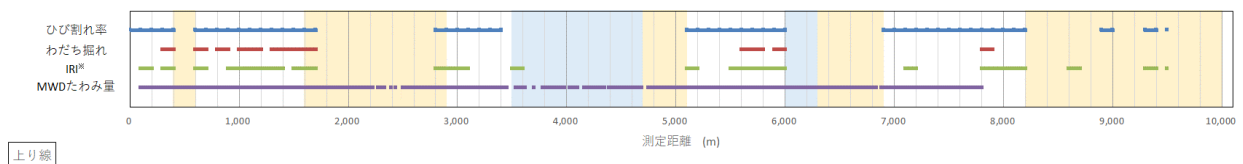


図 6.1.3.3 管理基準値を超過する区間（上り線）

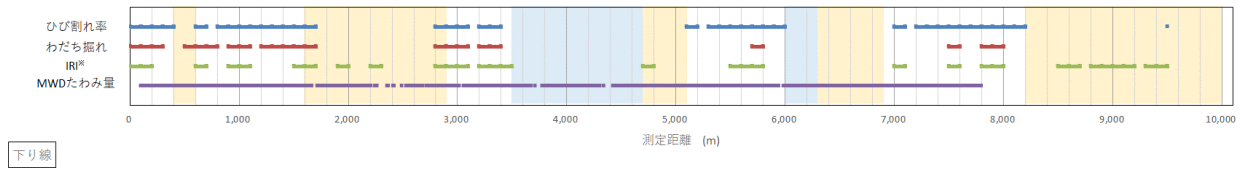


図 6.1.3.4 管理基準値を超過する区間（下り線）

図 6.1.3.3 および図 6.1.3.4 より、MWD たわみ量はほぼ全区間において閾値を超過しており、非健全区間の抽出はできていない。これは、4.3 よりレーザ法による MWD たわみ量が大きい値となる傾向があり、全体として大きなたわみ量が算出されているためと思われる。

前章の 4.3.8 において計画交通量区分毎の FWD たわみ量と MWD たわみ量の関係から図 4.3.8.5 に示す回帰直線が得られている。そこで、この回帰直線の式から本路線の MWD たわみ量を FWD たわみ量相当に換算した値を用いて FWD の許容たわみ量による評価を試みた。

本路線は計画交通量区分 N4 のため、使用した換算式は下の式(6.1.3.1)となる。

$$MWD = 0.89 \times FWD + 0.49 \quad \dots \text{式(6.1.3.1)}$$

許容たわみ量は前述と同様の 0.900 mm を閾値として管理基準値を超過する区間を図 6.1.3.5 および図 6.1.3.6 に示す。

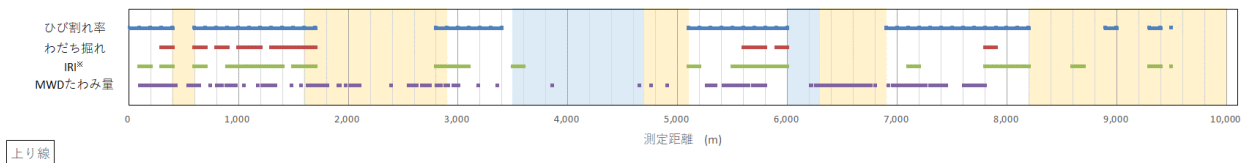


図 6.1.3.5 換算した MWD たわみ量と管理基準値を超過する区間（上り線）

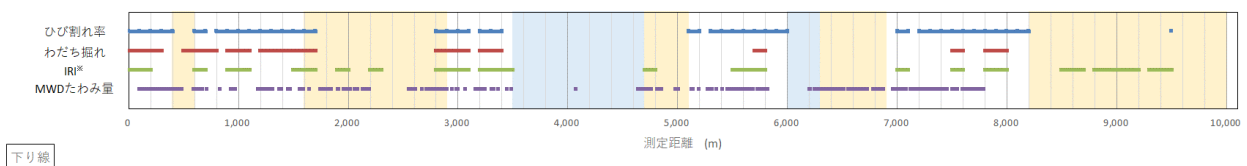


図 6.1.3.6 換算した MWD たわみ量と管理基準値を超過する区間（下り線）

図 6.1.3.5 および図 6.1.3.6 より (1) に示した図 6.1.3.1 および図 6.1.3.2 に類似した区間を抽出することができた。

6.1.4 まとめ

白糸ハイランドウェイにおけるレーザ法による MWD たわみ量測定によって以下のことが分かった。

- a) ネットワークレベルでのたわみ量の測定が可能である。
- b) レーザ法による解析では路面形状（縦溝グルーピング等）による影響を受ける可能性がある。
- c) バラツキを考慮した評価方法では算出されたたわみ量に対して相対的に大きい箇所をスクリーニングでき、非健全度区間と推定される区間を抽出することができる。
- d) 交通量区別の許容たわみ量の目安による評価では、得られた MWD たわみ量が FWD たわみ量と同程度の値でない場合、過剰もしくは過小評価となる。
- e) 測定された MWD たわみ量を FWD たわみ量に換算することで、バラツキを考慮した評価方法と同様の評価が行える。
- f) 補修が施されたことによって路面性状が回復した場合においてもたわみ量が大きくなる箇所があり、沿線状況と合わせることで、構造的損傷を推定することができる。

これらのことから、レーザ法による MWD たわみ量のネットワークレベルでの健全度評価を行うにあたって、バラツキを考慮した方法を用いることで非健全部を抽出することが可能である。許容たわみ量の目安による方法では MWD たわみ量の絶対値が FWD たわみ量と一致しないため、過小もしくは過大評価となるが、MWD たわみ量と FWD たわみ量の換算式を設けることができればバラツキを考慮した方法と同程度の評価が可能である。

6.2 県管理道路におけるネットワークレベルでの測定・評価事例

MWD のネットワークレベルでの活用方法を検討するため、茨城県管理（土浦市内）の路面性状データを有するいくつかの路線において、MWD で道路延長方向に連続したたわみデータを取得し、路面性状データとの関係を整理した。

6.2.1 MWD 計測

MWD 計測は、ウェーブレット法、たわみ速度差法の 2 つの手法に沿って、2020 年 5 月に路面点検を実施した交通量区分 N1～N2、N4～N7 交通（旧 L～D 交通）の約 85km を計測した。計測時の条件を表

6.2.1.1、計測路線を図 6.2.1.1 に示す。なお、本報告では、たわみ速度差法による手法について整理した結果を報告する。

表 6.2.1.1 計測時の条件

計測方法	ドップラ振動計
計測速度	40km/h以下実施、85km/2日間
天候条件	雨天中止、昼間

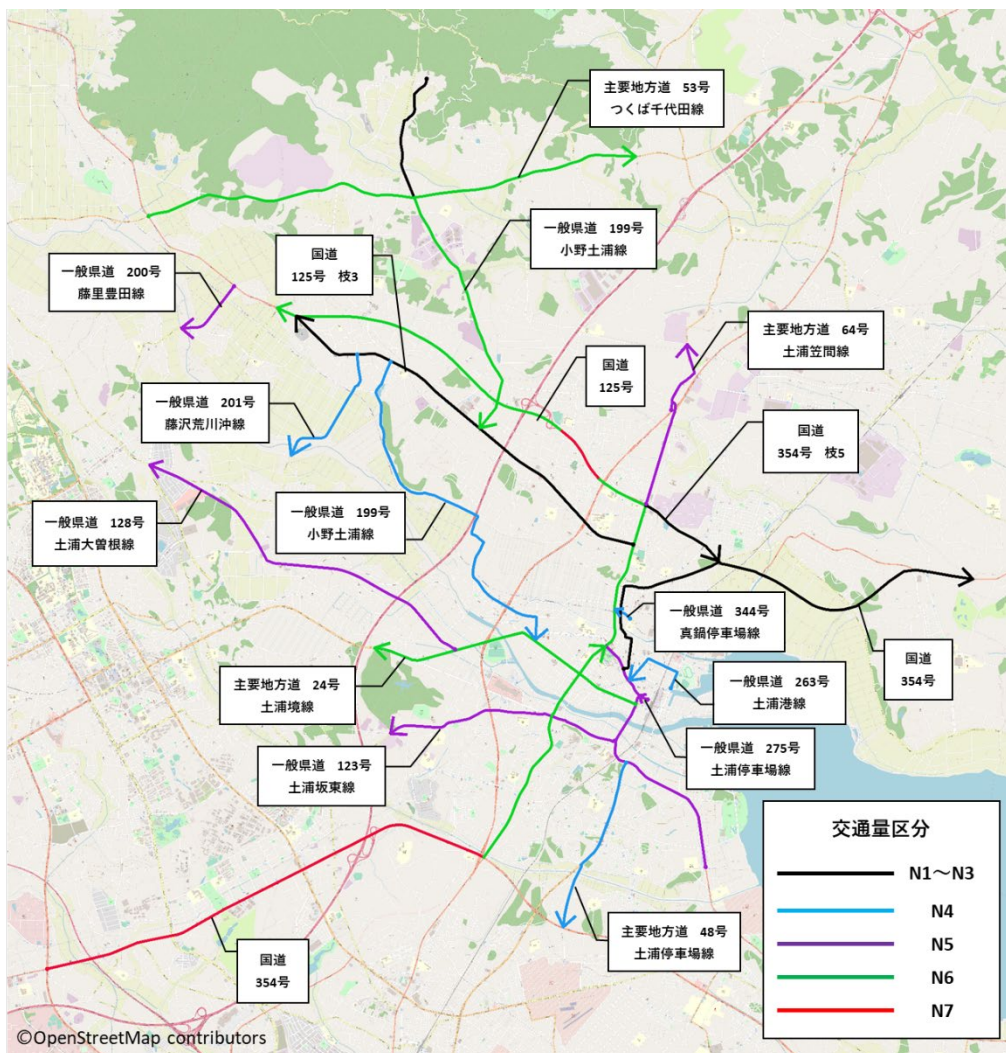


図 6.2.1.1 MWD 計測路線

6.2.2 MWD たわみ量のノイズフィルタリング

本調査において、計測速度が低速（停車時も含む）の場合に、MWD たわみ量解析結果が異常値（以下、「ノイズ」と表現する。）を示す現象が見られた。これらのノイズは停車時や低速時に発生する路面のたわみ速度が極めて小さいことから正確な解析ができず発生したものと考えられる。このノイズ成分を除去するため、停車時や低速時のノイズの変化量を考慮し、ノイズをフィルタリングする計測速度の閾値を検討した。

ノイズが発生している補正前の MWD たわみ量を図 6.2.2.1 に示す。データ数 0~70,000、150,000~210,000 付近に大きなノイズが発生しているのがわかる。

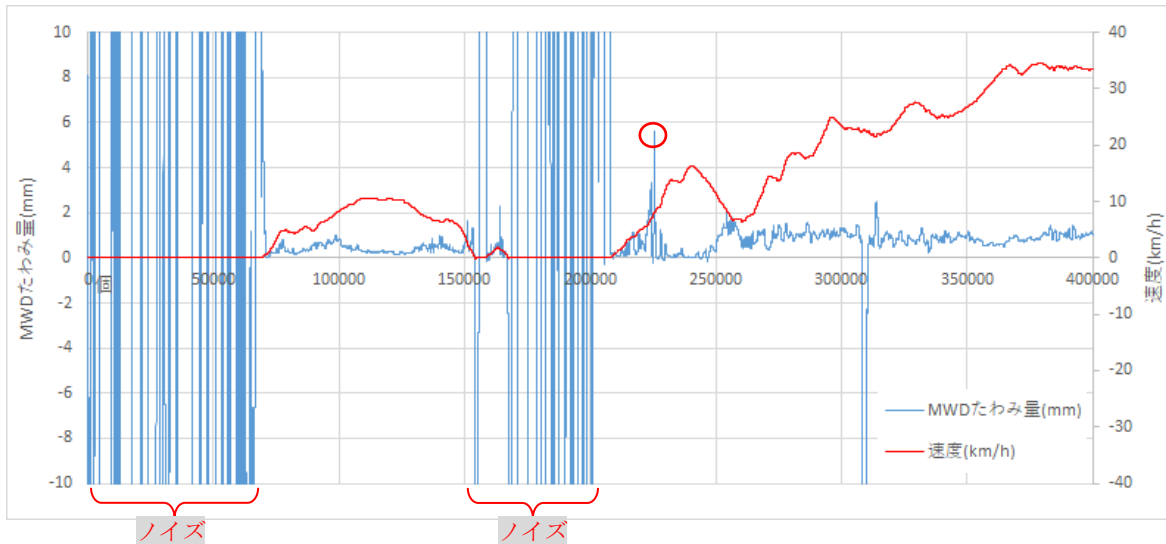


図 6.2.2.1 補正前（データ除去前）の MWD たわみ量（たわみ速度差法）

マイナス側の値を除去し、さらに停止時の速度データを除去した MWD たわみ量を図 6.2.2.2 に示す。

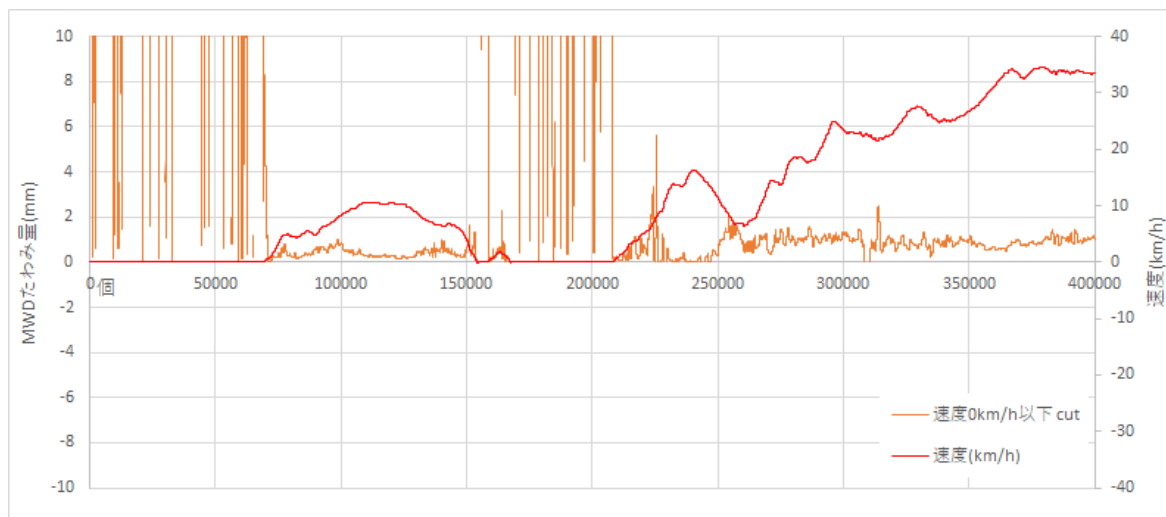


図 6.2.2.2 停止時（0km/h 以下）のデータを除去（たわみ速度差法）

5km/h 以下の MWD たわみ量を除去した場合（図 6.2.2.3）と 1km/h 以下の MWD たわみ量を除去した場合（図 6.2.2.4）のフィルタリング効果を比較したところ、除去する閾値の計測速度が大きいほど有効データの欠損（図 6.2.2.4 の赤丸箇所）が散見された。そこで今回は 1km/h 以下を基準値としてノイズの除去を行うこととした。これより、計測速度で閾値を設定することで効率的に多くのノイズ成分を除去することが可能となった。しかし、計測速度のみでは除去しきれないデータ（図 6.2.2.1 の赤丸 210,000 付近、計測速度 8km/h 程度）存在するため、今後の課題である。

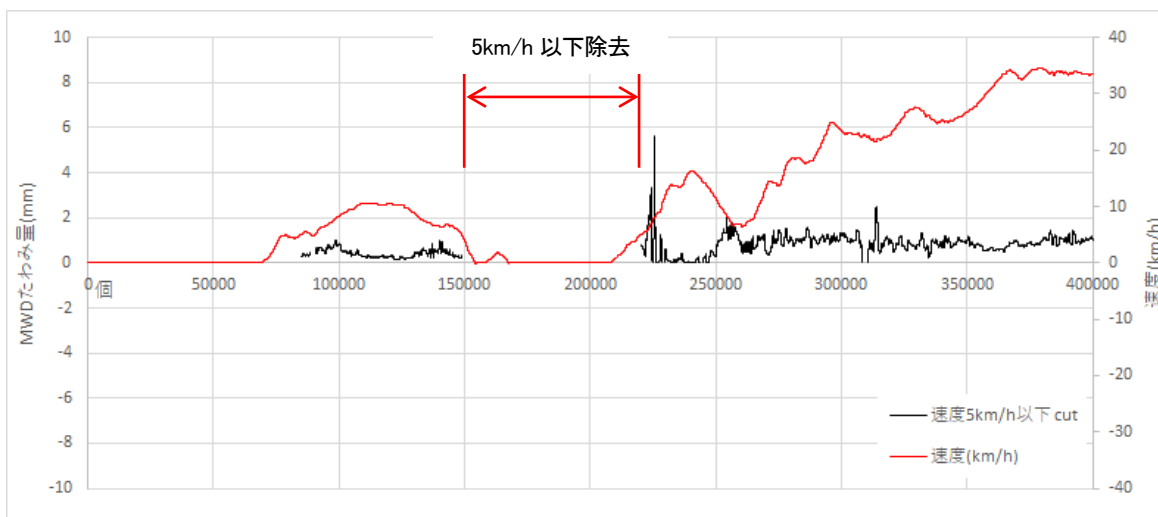


図 6.2.2.3 5km/h 以下のデータを除去（たわみ速度差法）

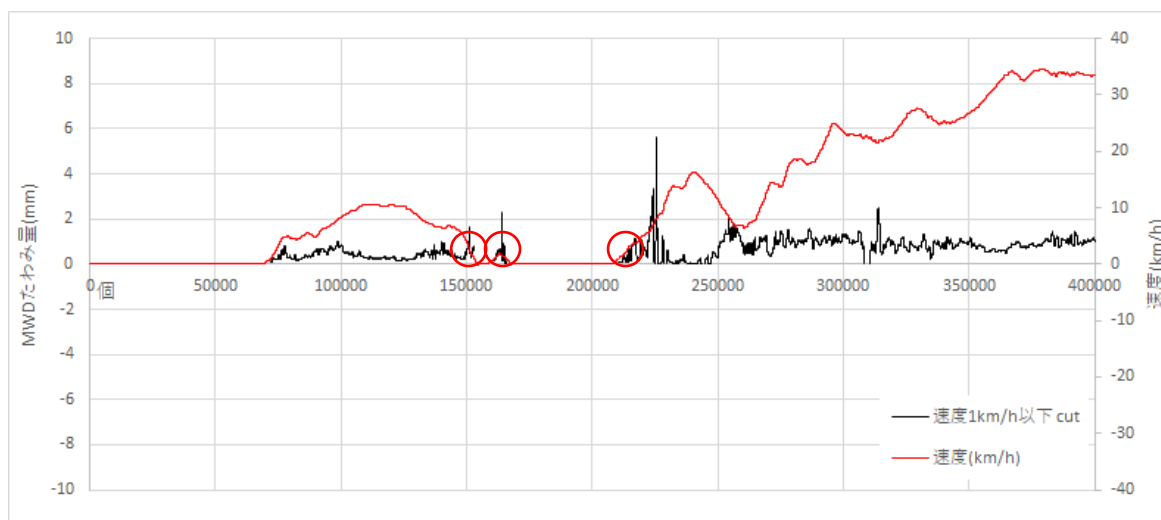


図 6.2.2.4 1km/h 以下のデータを除去（たわみ速度差法）

ウェーブレット法も同様に、低速時のノイズの変化量を考慮し、ノイズをフィルタリングする計測速度の閾値を検討した。今回の計測データでは、5km/h 以下のデータを除去した場合と 1km/h 以下のデータを除去した場合との明確な差は少ないため、たわみ速度差法と条件を統一し、1km/h 以下のデータを除去することとした。

6.2.3 MWD たわみ量と路面性状（ひび割れ率、わだち掘れ量）の比較

(1) 全体比較

フィルタリング後、1m ごとの MWD データに 20m ごとのひび割れ率、わだち掘れ量を整合し、交通量区分ごとに集計したものを表 6.2.3.1～表 6.2.3.2 に示す。ひび割れ率、わだち掘れ量は、診断区分ごとに 20 未満、20 以上 40 未満、40 以上の 3 ランクに分類した。

一般的にひび割れ率とたわみ量の関係は、舗装が損傷しているとひび割れ率、たわみ量ともに大きくなる傾向にある。今回の共同研究で得た結果においても MWD たわみ量が大きい箇所は、ひび割れ率が大きい傾向にあった。ただし、一部では、MWD たわみ量が大きくてもひび割れが小さい、あるいは MWD たわみ量が小さくてもひび割れ率が大きい箇所があった。これらについて次項で考察する。

表 6.2.3.1 交通量区分ごとの MWD たわみ量とひび割れ率の比較（たわみ速度差法）

単位：m

交通量区分	MWDたわみ量 (mm)	ひび割れ率 (%)				交通量区分	MWDたわみ量 (mm)	ひび割れ率 (%)			
		20未満	20-40	40以上	合計			20未満	20-40	40以上	合計
N1～3	0.5未満	5,724	251	41	6,016	N6	0.5未満	12,827	5,579	1,336	19,742
		95%	4%	1%	100%			65%	28%	7%	100%
	0.5-1.0	2,542	444	122	3,108		0.5-1.0	5,622	3,791	1,854	11,267
		82%	14%	4%	100%			50%	34%	16%	100%
	1.0-1.5	503	136	93	732		1.0-1.5	684	812	682	2,178
		69%	19%	13%	100%			31%	37%	31%	100%
1.5以上	200	103	148	451	1.5以上	80	96	109	285		
	44%	23%	33%	100%		28%	34%	38%	100%		
N1～3 計		8,969	934	404	10,307	N6 計		19,213	10,278	3,981	33,472
		87%	9%	4%	100%			57%	31%	12%	100%
N4	0.5未満	2,612	744	123	3,479	N7	0.5未満	1,959	1,274	157	3,390
		75%	21%	4%	100%			58%	38%	5%	100%
	0.5-1.0	2,139	1,397	783	4,319		0.5-1.0	1,525	1,019	285	2,829
		50%	32%	18%	100%			54%	36%	10%	100%
	1.0-1.5	1,109	528	685	2,322		1.0-1.5	229	206	117	552
		48%	23%	30%	100%			41%	37%	21%	100%
1.5以上	179	256	370	805	1.5以上	13	7	2	22		
	22%	32%	46%	100%		59%	32%	9%	100%		
N4 計		6,039	2,925	1,961	10,925	N7 計		3,726	2,506	561	6,793
		55%	27%	18%	100%			55%	37%	8%	100%
N5	0.5未満	8,467	2,422	699	11,588	合計	0.5未満	31,589	10,270	2,356	44,215
		73%	21%	6%	100%			71%	23%	5%	100%
	0.5-1.0	4,640	3,029	1,498	9,167		0.5-1.0	16,468	9,680	4,542	30,690
		51%	33%	16%	100%			54%	32%	15%	100%
	1.0-1.5	432	596	613	1,641		1.0-1.5	2,957	2,278	2,190	7,425
		26%	36%	37%	100%			40%	31%	29%	100%
1.5以上	33	54	56	143	1.5以上	505	516	685	1,706		
	23%	38%	39%	100%		30%	30%	40%	100%		
N5 計		13,572	6,101	2,866	22,539	合計		51,519	22,744	9,773	84,036
		60%	27%	13%	100%			61%	27%	12%	100%

表 6. 2. 3. 2 交通量区分ごとの MWD たわみ量とわだち掘れ量の比較 (たわみ速度差法)

単位：m

交通量区分	MWDたわみ量 (mm)	わだち掘れ量 (mm)				交通量区分	MWDたわみ量 (mm)	わだち掘れ量 (mm)			
		20未満	20-40	40以上	合計			20未満	20-40	40以上	合計
N1~3	0.5未満	5,840	176	0	6,016	N6	0.5未満	17,274	2,468	1,336	19,742
		93%	7%	0%	100%			73%	27%	7%	100%
	0.5-1.0	2,868	240	0	3,108		0.5-1.0	9,380	1,887	1,854	11,267
		83%	17%	0%	100%			66%	34%	16%	100%
	1.0-1.5	663	69	0	732		1.0-1.5	1,485	693	682	2,178
76%		24%	0%	100%	49%	51%		31%	100%		
1.5以上	386	65	0	451	1.5以上	216	69	109	285		
	71%	29%	0%	100%		61%	39%	38%	100%		
N1~3 計		9,757	550	0	10,307	N6 計		28,355	5,117	3,981	33,472
		95%	5%	0%	100%			85%	15%	12%	100%
N4	0.5未満	3,330	149	123	3,479	N7	0.5未満	3,252	138	157	3,390
		89%	11%	4%	100%			90%	10%	5%	100%
	0.5-1.0	3,825	494	783	4,319		0.5-1.0	2,634	195	285	2,829
		75%	25%	18%	100%			84%	16%	10%	100%
	1.0-1.5	2,195	127	685	2,322		1.0-1.5	458	94	117	552
87%		13%	30%	100%	68%	32%		21%	100%		
1.5以上	676	129	370	805	1.5以上	21	1	2	22		
	70%	30%	46%	100%		89%	11%	9%	100%		
N4 計		10,026	899	1,961	10,925	N7 計		6,365	428	561	6,793
		92%	8%	18%	100%			94%	6%	8%	100%
N5	0.5未満	10,226	1,362	699	11,588	合計	0.5未満	39,922	4,293	2,356	44,215
		74%	26%	6%	100%			78%	22%	5%	100%
	0.5-1.0	8,556	611	1,498	9,167		0.5-1.0	27,263	3,427	4,542	30,690
		84%	16%	16%	100%			75%	25%	15%	100%
	1.0-1.5	1,581	60	613	1,641		1.0-1.5	6,382	1,043	2,190	7,425
91%		9%	37%	100%	71%	29%		29%	100%		
1.5以上	140	3	56	143	1.5以上	1,439	267	685	1,706		
	96%	4%	39%	100%		71%	29%	40%	100%		
N5 計		20,503	2,036	2,866	22,539	合計		75,006	9,030	9,773	84,036
		91%	9%	13%	100%			89%	11%	12%	100%

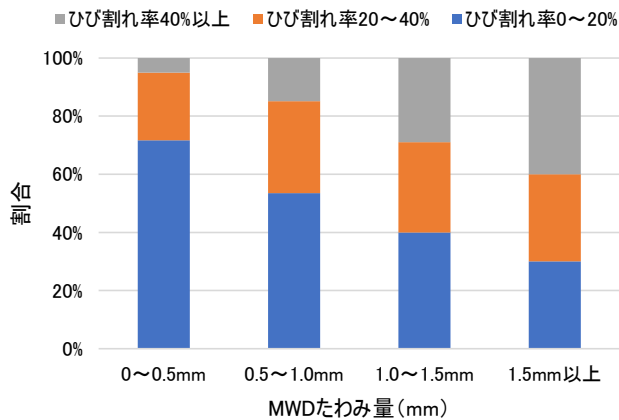


図-6. 2. 3. 1 MWD たわみ量とひび割れ率の関係

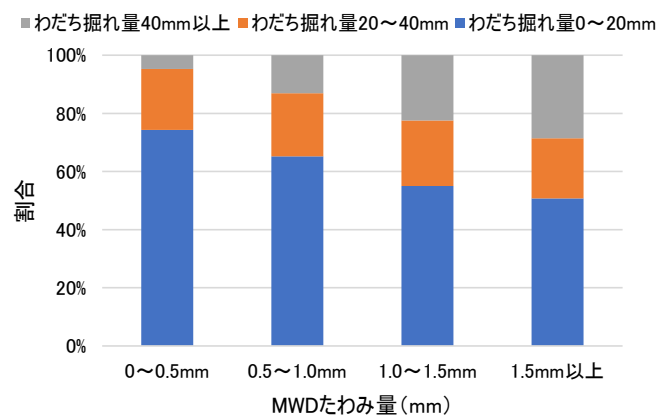


図-6. 2. 3. 2 MWD たわみ量とわだち掘れ量の関係

6.2.4 調査結果

(1) 全体の傾向

路線全体の傾向を確認するため、MWD 評価方法に基づき MWD たわみ量を整理した。MWD の評価方法は、「5.2 交通量区別の FWD による許容たわみ量の目安による方法」と「5.1 たわみのバラツキを考慮した舗装の健全度評価手法」による方法がある。それぞれの手法から、交通量区別に修繕の目安となる基準値以上と未満の路面性状（ひび割れ率、わだち掘れ量）を集計した。

1) 交通量区別の FWD による許容たわみ量の目安による方法

交通量区別の FWD による許容たわみ量の目安を表 6.2.4.1 に示す。このたわみ量より大きい場合は基準値以上、小さい場合は基準値未満とした。

表 6.2.4.1 交通量区別の FWD による許容たわみ量の目安の閾値

交通量区分	N1~3	N4	N5	N6	N7
D ₀ (mm)	1.3	0.9	0.6	0.4	0.3

交通量区別の FWD による許容たわみ量の目安による方法の MWD たわみ量と路面性状（ひび割れ率、わだち掘れ量）の測定結果について集計したものを表 6.2.4.2 に示す。MWD たわみ量の基準値以上の延長は、35,476m（全体の 42%）、平均ひび割れ率が 24.7%であるのに対し、基準値未満の延長は、48,560m（全体の 58%）、平均ひび割れ率が 16.6%であった。また、ひび割れ率は、全ての交通量区分で基準値以上の方が大きな値を示した。このことから、本調査路線においては、ひび割れ率が大きい箇所では MWD たわみ量も大きい傾向にあり、構造的な損傷の疑いがある箇所をネットワークレベルで抽出できる可能性が示唆された。一方、本調査路線におけるわだち掘れ量は、平均値で 11mm 前後と比較的軽微であり、MWD との明確な関係性は見られなかった。

表 6.2.4.2 MWD たわみ量と路面性状（交通量区別の FWD による許容たわみ量の目安）

交通量区分	基準値 以上			基準値 未満			計		
	平均ひび割れ率 (%)	平均わだち掘れ量 (mm)	延長 (m)	平均ひび割れ率 (%)	平均わだち掘れ量 (mm)	延長 (m)	平均ひび割れ率 (%)	平均わだち掘れ量 (mm)	延長 (m)
N1~3	22.7	10.6	681	13.3	10.6	9,626	12.1	10.6	10,307
N4	29.6	10.0	3,943	19.3	10.1	6,982	23.0	10.1	10,925
N5	26.7	9.6	7,788	17.1	10.9	14,751	20.4	10.5	22,539
N6	23.7	12.1	17,842	18.0	11.4	15,630	21.0	11.8	33,472
N7	21.5	10.1	5,222	17.8	8.5	1,571	20.7	9.7	6,793
計	24.7	11.0	35,476	16.6	10.8	48,560	20.0	10.9	84,036

2) たわみのバラツキを考慮した舗装の健全度評価手法

たわみのバラツキを考慮した舗装の健全度評価手法は、以下に示す式を用いて、交通量区分ごとに閾値を設定した。なお、健全部のたわみ量は、交通量区分別の FWD による許容たわみ量の目安の値より小さい値を健全部とした。式 6.2.4.1 より算出した閾値を表 6.2.4.3 に示す。

$$f_k = f_m \times D_R \quad \dots \dots \text{(式 6.2.4.1)}$$

f_k : たわみの閾値

f_m : 交通量区分ごとの健全部のたわみ量の平均値

D_R : 1.4 (等値換算厚とたわみ比の関係の上限である 1.4 を採用)

表 6.2.4.3 たわみのバラツキを考慮した舗装の健全度評価の閾値

交通量区分	N1~3	N4	N5	N6	N7
D_0 (mm)	0.6	0.7	0.5	0.3	0.3

たわみのバラツキを考慮した舗装の健全度評価手法の MWD たわみ量と路面性状（ひび割れ率、わだち掘れ量）の測定結果について集計したものを表 6.2.4.4 に示す。MWD たわみ量の基準値以上の延長は、47,325 m (全体の 56%)、平均ひび割れ率が 23.3%であるのに対し、基準値未満の延長は、36,711m (全体の 44%)、平均ひび割れ率が 15.7%であった。また、交通量区分別の FWD による許容たわみ量の目安による方法と同様に全ての交通量区分でひび割れ率は基準値以上の方が大きな値を示した。一方、本調査路線におけるわだち掘れ量は、平均値で 11mm 前後と比較的軽微であり、MWD との明確な関係性は見られなかった。

表 6.2.4.4 MWD たわみ量と路面性状 (たわみのバラツキを考慮した舗装の健全度評価手法)

交通量区分	基準値 以上			基準値 未満			計		
	平均ひび割れ率 (%)	平均わだち掘れ量 (mm)	延長 (m)	平均ひび割れ率 (%)	平均わだち掘れ量 (mm)	延長 (m)	平均ひび割れ率 (%)	平均わだち掘れ量 (mm)	延長 (m)
N1~3	16.2	10.4	3,161	10.2	10.7	7,146	12.1	10.6	10,307
N4	28.5	10.3	5,660	17.1	9.8	5,265	23.0	10.1	10,925
N5	24.7	9.8	10,951	16.4	11.1	11,588	20.4	10.5	22,539
N6	22.8	11.9	22,331	17.6	11.5	11,141	21.0	11.8	33,472
N7	21.5	10.1	5,222	17.8	8.5	1,571	20.7	9.7	6,793
計	23.3	10.9	47,325	15.7	10.8	36,711	20.0	10.9	84,036

(2) 路線別の傾向

ひび割れ率が大きい箇所は、MWD たわみ量が大きくなる傾向となるが、それにあてはまらない場合の路面の状態と MWD たわみ量の関係に特徴のある区間について考察を述べる。

1) ひび割れ率が大きく MWD たわみ量が小さい区間の例

当該区間（1,000～2,000m 区間、N5 交通）は、ひび割れ率が大きく MWD たわみ量は小さい区間の例である。ひび割れ率と MWD たわみ量を比較したものを図 6.2.4.1 に、現場状況を写真 6.2.4.1 に示す。当該区間の地点 A の位置では、ひび割れ率が 10%程度と小さい値であり、MWD たわみ量も 0.5mm 程度と基準値未満の値であった。しかし、地点 B の位置では、舗装路面の損傷が著しく、ひび割れ率は 50%以上と大きな値を示していたが、MWD たわみ量は 0.5mm と基準値未満の値であった。該当区間の工事履歴と現場状況を確認したところ、連続してオーバーレイが実施されている区間で、施工後約 10 年が経過していた。このことから、当該区間の路面の損傷はアスファルト混合物層内に留まっており、路盤以下の層の構造的破損の可能性は低いと推定される。

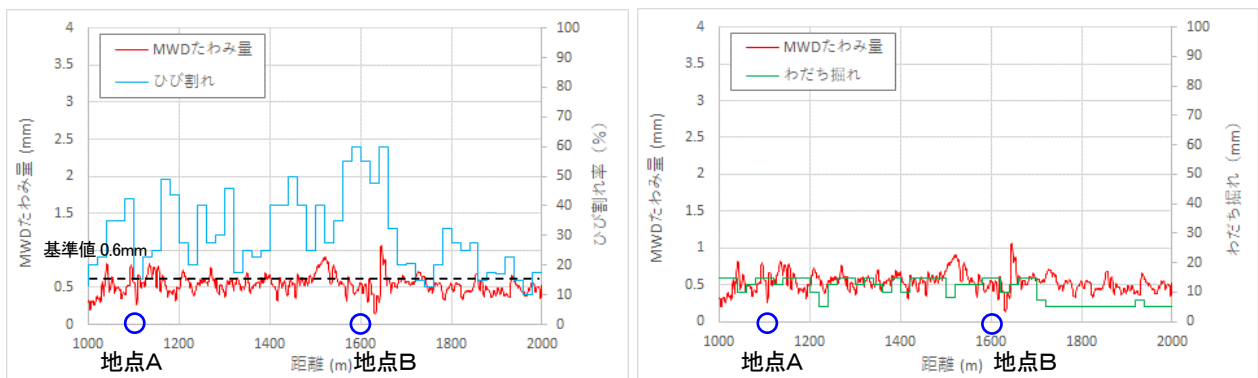


図 6.2.4.1 MWD たわみ量と路面性状（ひび割れ率（左）、わだち掘れ量（右））



写真 6.2.4.1 地点 A 1,100m 位置（左）と地点 B 1,600m 位置（右）

2) ひび割れ率が小さく MWD たわみ量が多い区間の例

当該区間（1,000～2,000m 区間、N2 交通）は、ひび割れ率は小さく MWD たわみ量が多い区間の例である。ひび割れ率と MWD たわみ量を比較したものを図 6.2.4.2 に、現場状況を写真 6.2.4.2 に示す。該当区間の地点 C の位置は、ひび割れ率が 5%程度と比較的軽微であるのに対し、MWD たわみ量は、1.5mm と基準値以上の値を示していた。工事履歴を確認すると、3 年前にアスコン層の修繕を実施していた。一方、地点 C の位置から 200m 先の地点 D の位置では、ひび割れ率が 50%以上と損傷が著しく、路面には路盤からの細粒分と推定される噴出物も見られた。このことから、地点 C～D 付近は路盤の構造的健全性の低下が疑われ、地点 C においては路盤の健全性が低下しているにも関わらず、アスコン層のみの修繕で対応したものと推定される。このように、MWD たわみ量により路面からの判断が難しい、構造的に損傷の疑いがある箇所を効率的に抽出することができ、詳細調査を含めた適切な措置の判断が可能になるといえる。

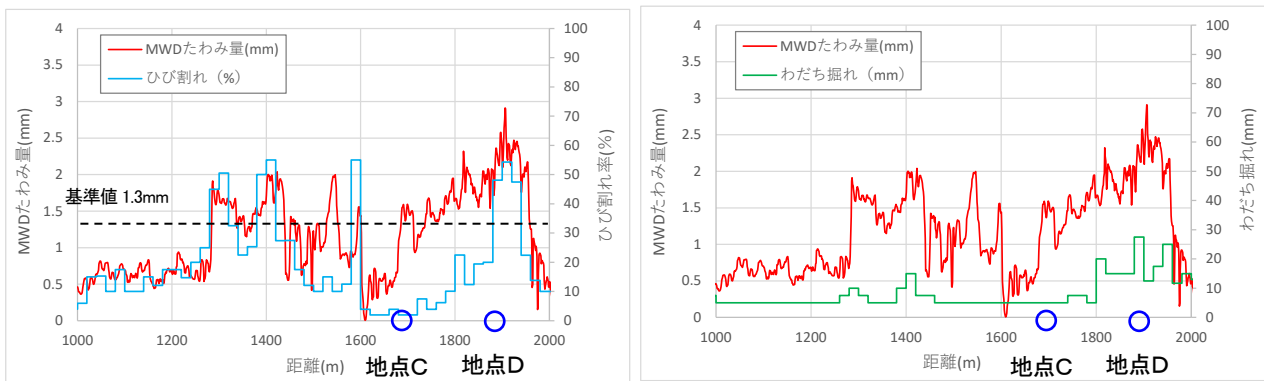


図 6.2.4.8 MWD たわみ量と路面性状（ひび割れ率（左）、わだち掘れ量（右））



写真 6.2.4.2 地点 C 1,680m 位置（左）と地点 D 1,880m 位置（右）

3) ひび割れ率が小さく局所的にたわみ量が多い区間の例

当該区間 (0~1,000m 区間、N5 交通) の MWD たわみ量とひび割れ、わだち掘れを比較したものを図 6.2.4.3 に現場状況を写真 6.2.4.3 に示す。地点 E の位置では、ひび割れ率が 10%前後と小さい値に対し、MWD たわみ量は 1.5mm 以上を示していた。同位置には田土部陸橋 (L=22m) があり、そのジョイント部の影響で MWD たわみ量が大きくなったものと推測される。地点 F の位置では、ひび割れが大きい値に対し、MWD たわみ量が 0.7mm と比較的小さい値を示した。地点 F の位置では、オーバーレイが行われており、当初設計より舗装厚が厚いと推測される。そのため、MWD たわみ量が小さい値を示したと推測される。なお、同位置区間のわだち掘れ量は 30mm と大きな値を示していた。

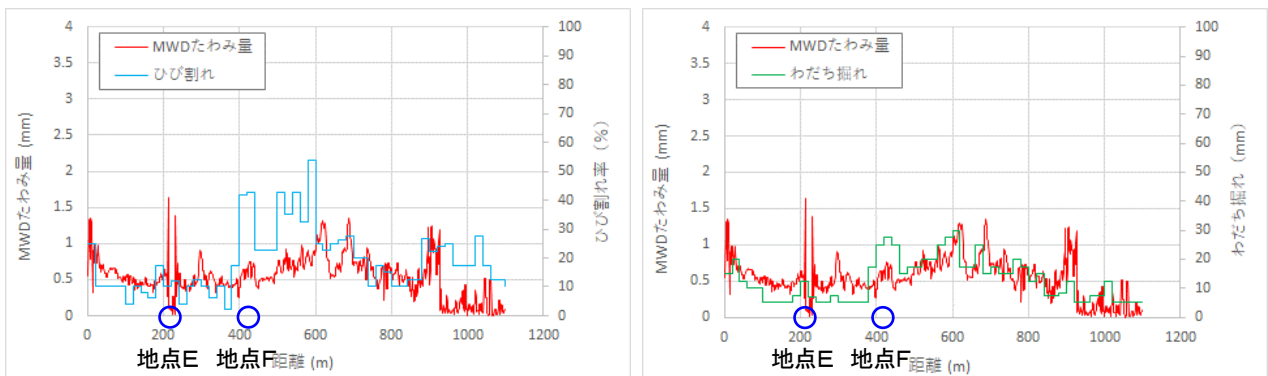


図 6.2.4.3 MWD たわみ量と路面性状 (ひび割れ率 (左)、わだち掘れ量 (右))



写真 6.2.4.3 地点 E 210m 位置 (左) と地点 F 410m 位置 (右)

6.2.5 まとめと課題

ネットワークレベルで活用するため、調査時間と舗装構造の損傷箇所の抽出の2つについて整理した。

1) 調査時間

MWDは走行しながら自らの輪荷重により発生するたわみ量を測定するため、交通規制が不要な調査である。今回の測定の調査日数は、一般県道85kmに対して2日間を要した。これは同じく交通規制が不要で、ネットワークレベルでの調査において数多くの実績がある路面性状測定車(50km/日程度、一般県道の場合)と同程度である。

2) 舗装構造の損傷箇所の抽出

MWDたわみ量から、ネットワークレベルで舗装構造の健全性の低下が疑われる箇所を抽出することができた。MWDたわみ量は、路面の損傷状態や工事履歴等と合わせて評価することで、詳細調査を含めた適切な措置の判断が可能である。また、MWDは詳細調査のスクリーニング手段として有効な調査である。

本検討により、短時間で広範囲のMWDたわみ量を取得できることが確認された。また、MWDたわみ量から舗装構造の健全性の低下が疑われる箇所を抽出できることもわかった。これより、MWDは調査時間、調査能力において、ネットワークレベルでの活用が可能なが示された。今後は実道においてFWD車両との比較検証を行い、ネットワークレベルでの適用における更なる課題の洗い出しや解決策について検討を進める必要がある。

参考) 各データの地図表示

MWD たわみ量、ひび割れ率およびわだち掘れ量のデータを地図上にそれぞれ可視化したものを以下に示す。



MWDたわみ量(たわみ速度差法 目安による方法)



MWDたわみ量(たわみ速度差法 目安による方法)

- 基準値以上
- 基準値未満

MWDたわみ量(たわみ速度差法 バラツキを考慮した方法)



MWDたわみ量(たわみ速度差法 バラツキを考慮した方法)

- 基準値以上
- 基準値未満

ひび割れ率



わだち掘れ量



7 まとめ

7.1 MWD を用いたたわみ量算定手法の提案

本共同研究では、3つの測定手法およびたわみ量算定手法について検討を実施した。

①ウェーブレット法 (4.1 ドップラ振動計による測定計測 (ウェーブレット法))

ドップラ振動計の測定値に含まれるノイズを、ウェーブレット解析を用いて除去し、ガウス関数をたわみ曲線と仮定し最大たわみ量を算定する手法

②たわみ速度差法 (4.2 ドップラ振動計による測定方法 (たわみ速度差法))

ドップラ振動計の測定に含まれるノイズのうち、上下方向のノイズは各ドップラ振動計の測定値の差で除去し、車両のピッチング方向のノイズはジャイロを用いて除去する手法。最大たわみ量算出はウェーブレット法と同様の考え方で算出。

③レーザ変位計を用いた方法 (4.3 レーザ変位計による測定方法 (レーザ法))

MWD 側面に設置したレーザ変位計を用いて、各変位計の測定値の差からたわみ量を算定する手法。

各手法には計測方法の違いや、ノイズ除去方法の違い等により特徴が存在する。特徴について考えられるメリット、デメリットの一部を表 7.1.1 に示す。解析手法の選定の際には、各手法の特性を十分理解し、調査目的に合致した手法を選定することが重要である。

表 7.1.1 各解析手法の特徴

解析手法	メリット	デメリット
ウェーブレット法	<ul style="list-style-type: none"> 路面の凸凹の影響なし。 	<ul style="list-style-type: none"> たわみ成分まで除去の可能性。 車速は一定であることが望ましい。 停車時の測定不可。 解析が複雑でプログラム化が必須 測定機器が高価
たわみ速度差法	<ul style="list-style-type: none"> 車速の影響なし。 路面の凸凹の影響なし。 	<ul style="list-style-type: none"> 停車時測定不可。 解析が複雑でプログラム化が必須 測定機器が高価
レーザ法	<ul style="list-style-type: none"> 解析はエクセルの表計算レベルで可。 車速の影響なし 測定機器が安価 	<ul style="list-style-type: none"> 停車時測定不可。 縦溝のある路面の測定不可。 わだち掘れが大きく、かつ、急カーブの箇所では精度低下が懸念。

7.2 健全度評価手法の提案

本共同研究では、健全度評価手法として3つの手法を紹介した。

(1) たわみのバラツキを考慮した健全度評価手法

舗装断面が同一の箇所において、健全なたわみ量の平均にバラツキの指標である D_R を乗じた値を閾値にする方法であり、対象路線の非健全区間の抽出が可能である。また、健全なたわみ量のデータがない場合、舗装断面が分からない場合は、対象路線のたわみ量の平均値、 D_R を上限を用いることで、対象路線における相対的な非健全箇所の抽出が可能である。

(2) 許容値の目安による方法

FWD における D_0 の許容値の目安を閾値とする方法である。FWD による健全度評価では広く使われている方法である。

(3) 追跡調査による方法

追跡調査を行い、経年により健全性が低下している区間を抽出する方法である。また、温度帯の異なる時期に追跡調査を行うことで、健全性が著しく低下した区間の抽出ができる可能性がある方法である。

上記、健全度評価手法の特徴について、考えられるメリット、デメリットの一部を表 7.2.1 に示す。健全度評価手法選定の際は、その特性を十分理解し、調査目的に合致した手法を選定することが重要である。

表 7.2.1 各解析手法の特徴

解析手法	メリット	デメリット
たわみのバラツキを考慮した健全度評価手法	<ul style="list-style-type: none"> 対象路線で舗装構造が同じであれば、詳細な舗装構成等が分からなくても評価は可能 舗装断面毎の評価であり、舗装の特性を活かした評価が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 対象路線で舗装構造が変わる場合は注意が必要。
許容値の目安による方法	<ul style="list-style-type: none"> 交通量区分のみで閾値を設定 	<ul style="list-style-type: none"> 絶対値での評価となるため FWD 同様の精度が必要。 温度補正もしくは路面温度 20°C での測定が必要。
追跡調査による方法	<ul style="list-style-type: none"> 調査結果を比較するだけで容易 	<ul style="list-style-type: none"> 複数回の調査が必要 温度補正を行うか、路面温度が同様の時期での調査が必要。 <p>※著しく健全度が低下した区間を抽出する方法では温度補正は不必要。</p>

7.3 MWD を用いた舗装のたわみ測定方法の提案

本共同研究では、MWD を用いたたわみ量算定手法として 7.1 に示す 3 種類について提案した。解析手法毎に必要な試験機や試験条件が異なるため、本共同研究では、以下のとおり測定方法（案）をとりまとめた。

- 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～ウェーブレット法編～
- 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～たわみ速度差法編～
- 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～レーザ法編～

上記については、本報告書の付録にてとりまとめたものを掲載している。ただし、付録で記載の試験法は現時点での知見を整理したものであり完全な内容のものではない。今後さらなる検討の中で更新していくことが重要である。

8 今後の課題

本共同研究では、MWD を用いたたわみ量算出手法の検討及び土木研究所外周路を中心とした実道実験を実施してきた。本検討において MWD は非健全箇所のスクリーニングに活用することが目的であるため、現時点での精度で十分な活用ができるものと考えられるが、今後の MWD のさらなる活用のためには様々な課題が存在する。以下に今後の課題の一部について記載する。

○MWD の測定精度について

本共同研究における検討においては、FWD たわみ量 (D_0) と MWD たわみ量との相関はある程度確認されたが、条件によってはたわみ量の絶対値が必ずしも一致しない場合がある。今後様々な条件（舗装断面、道路構造、路面性状、路面温度等）で多くのデータを収集し、より精度の高いたわみ量の算出ができるようパラメータの設定や機器のキャリブレーション方法等について随時検討を継続する必要がある。

○MWD の活用について

MWD 測定車は土木研究所所有の 1 台のみであり、現時点では実道での道路管理に適用された事例がない。今後、本共同研究で実施した内容の普及につとめ、国内の MWD の台数を増やし、道路管理への適用を実現することが重要である。

○MWD のさらなる高度化について

MWD による最大たわみ量の算出はドップラ振動計を用いる場合、路面のたわみ曲線をガウス関数にて仮定し算出している。しかし、実際のたわみ曲線はガウス関数とは異なり舗装断面や舗装の健全性により多種多様な形状をしているものと考えられる。そのように時々刻々と変化するたわみ曲線をより正確に把握する方法としては、ドップラ振動計の数を増やすことが考えられる。ドップラ振動計の数を増やすことで正確なたわみ曲線を得ることができれば、FWD で実施しているように多層弾性理論による逆解析が可能になるなど MWD の活用範囲が広がる可能性がある。

上記は MWD における課題の一部である。MWD の活用方法により多くの課題が存在するため、今後も継続した検討が必要になる。

なお、本報告書で記載している MWD の解析手法は、特許取得もしくは出願中の技術であるが、各権利者で技術を独占しようとするものではない。本技術の活用をお考えの方は土木研究所や本共同研究のメンバーにご相談頂ければ幸いである。

【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、2016.10
- 3) 土木学会：非破壊試験による舗装のたわみ測定と構造評価、舗装工学ライブラリー14、2015
- 4) D. S. Gedafa, M. Hossain, R. W. Miller, and D. Steele : Network Level Pavement Structural Evaluation Using Rolling Wheel Deflectometer, Transp. Res. Board 87th Annu. Meeting, Rep. 08-2648, 2008
- 5) Andren, P. : Development and Results of the Swedish Road Deflection Tester , Licentiate thesis from Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Sweden, June 2006
- 6) Flintsch, G. W. , B.Ferne, B. Diefenderfer, S. Katicha, J.Bryce and S. Nell : Evaluation of Traffic-Speed Deflectometers, Journal of the Transportation Research Board, No. 2304, pp. 37-46,2012
- 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 No.24-9、2015
- 8) 寺田剛他：移動式たわみ測定装置を用いた舗装の健全性評価手法に関する一検討、土木学会論文集 E1（舗装工学）、vol.68、No.3（舗装工学論文集第 17 巻）、I_13-I_20、2012
- 9) 松井邦人、久保和幸、寺田剛、川名太：走行型路面たわみ測定試験機の現状と我が国における取組み、土木技術資料 55-12、pp.10-13、2013
- 10) 日本道路協会：舗装性能評価法－必須および主要な性能指標編－（平成 25 年版）、p.73、2013
- 11) 若林他：移動式たわみ測定装置(MWD)の測定精度に関する検討、舗装 52(4)、PP25-30、2017
- 12) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013、p.38-42、2013

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 付録

付録 1) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～ウェーブレット法編～

付録 2) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～たわみ速度差法編～

付録 3) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法（案）～レーザ法編～

付録 4) 国内における MWD に関する主な文献

付録1) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法(案)～ウェーブレット法編～

1. 目的

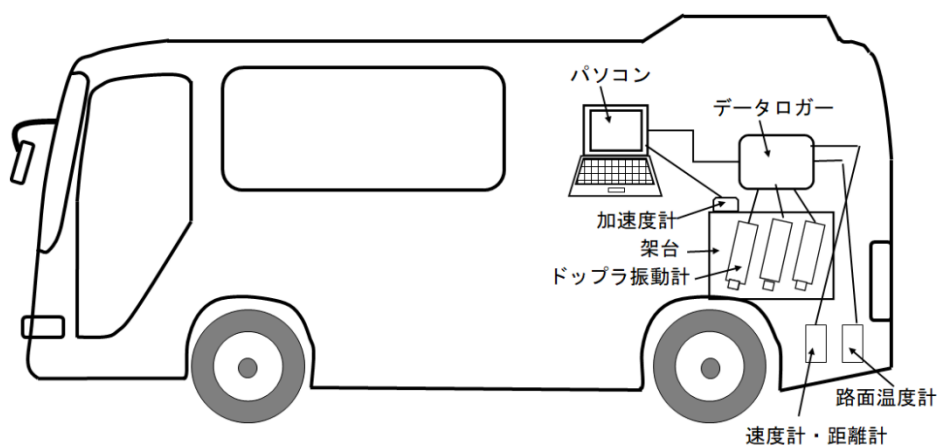
舗装のたわみ量を移動式たわみ測定装置(Moving Wheel Deflectometer)を用いて測定する。なお、測定はドップラ振動計を用いて、測定値に含まれるノイズはウェーブレット解析を用いて除去する手法とする。

2. 適用範囲

主にアスファルト舗装に適用し、現場で実施する。

3. 測定装置

測定装置は、載荷用車両、架台、ドップラ振動計、加速度計、レーザ変位計、車速度計、距離計、ひずみ計などから構成される。付図1.1に測定装置の例を示す。



付図-1.1 測定装置の例

(1) 載荷用車両

載荷用車両は、輪荷重 25kN 程度以上の車両を用いるものとする。

(2) 架台

・架台はドップラ振動計と加速度計を剛結するためのものであり、剛性の高い鉄などの材料を用いて載荷用車両と剛結させるものとする。

(3) ドップラ振動計

ドップラ振動計は路面との相対速度を測定するものであり、以下の性能を満足するものとする。

- ・ 停車時および時速 80km/h 以上での走行においても安定的にデータが取得できるもの。
- ・ レーザ安全クラスは Class2～3R 程度のもの。
- ・ $\pm 1.0\text{m/s}$ 程度の測定が可能であるもの。
- ・ フルスケールで 0.1%程度の精度を有するもの。
- ・ ドップラ振動計架台に剛結できる構造のもの。

(4) 加速度計

加速度計はウェーブレット解析時にフィルタリングレベルを決定するために必要な車両の上下方向の加速度を測定するためのものであり、 $\pm 50\text{m/s}^2$ 程度以上の測定が可能なものとする。

(5) 路面温度計、気温計

路面温度計および気温計は温度補正に必要な温度データを取得するためのものであり、走行しながら路面温度を 0.1°C 以上の精度で測定できるものとする。

(6) 速度計

速度計はドップラ振動計の測定値に含まれる走行速度ノイズを除去するために必要な車両の走行速度を測定するためのものであり、 0.1km/h の精度で測定できるものとする。

(7) 距離計

距離計は算出された舗装のたわみ量の詳細な位置を特定するために必要な距離を測定するためのものであり、 1cm の精度で測定できるものとする。

(8) ひずみゲージ

ひずみゲージは算出された舗装のたわみ量の荷重補正に必要なデータを取得するためのものであり、車軸の上下に張り付けが可能で、車軸に想定される荷重が作用した時にひずみが測定できるものと

(9) レーザ変位計

レーザ変位計は車両走行中に変化する車両の傾きを測定するためのものであり、路面に対し垂直となるように車両の前方および後方に各々 1 機以上設置する。なお、測定レンジは $400\pm 100\text{mm}$ 程度の性能を有するものとする。

(10) データロガー

データロガーは、各測定機器で測定されたデータを同期するために必要なものであり、測定データ数以上のデータを処理できるものとする。

(1 1) 記憶装置

データロガーで同期されたデータを記憶するためのものであり、パーソナルコンピュータ等を用いる。

(1 2) 解析ソフト

ドップラ振動計の測定値からノイズを除去し、最大たわみ量を算出可能な解析ソフトとする。

4. 測定方法

(1) ドップラ振動計の設置

ドップラ振動計は、設置角度 2 度程度で載荷輪の後方に 3 台設置する。3 台のドップラ振動計は架台に剛結させるものとし、ドップラ振動計の照射位置は載荷輪（後軸左側）の車軸中心から 20cm～30cm 間隔で設置する。なお、3 つ目のドップラ振動計の照射位置が車軸中心から 100cm 以内になるよう設置間隔を調整する。

(2) 加速度計の設置

加速度計は、設置時に車体と水平となるよう調整し架台に剛結する。

(3) キャリブレーション

各測定機器が正確な値を測定できるよう、キャリブレーションを行った上で調査を実施する。以下、MWD に特化したキャリブレーションである荷重補正について方法を示す。

1) 荷重補正式

載荷用車両の載荷輪に荷重計を設置し、車体を油圧ジャッキ等で徐々に持ち上げ、任意の間隔で荷重とひずみゲージから得られたひずみを測定する。荷重計で得られた荷重と車軸上下に設置したひずみゲージから得られたひずみ差との関係から荷重補正式を算出する。

(4) 試験準備

1) 事前準備

測定に先立ち、測定対象箇所の距離や交差点、構造物などの位置を図面等で確認するとともに、現地踏査を行い除外対象箇所の確認及び測定区間の起終点の位置をマークするか目印を確認しておく。このとき交通の状況等について十分把握しておくことが重要である。

2) 計測装置の動作確認

計測装置が正しく接続され、正常に動作していることを確認する。

(5) 測定

1) 測定速度

測定速度は法定速度内で任意で定めて良いが、解析の特性上一定速度となるよう測定する。

2) 測定位置

ドップラ振動計の照射位置が、外側車輪通過位置（OWP）もしくは車線中央から路肩側 1m の位置になるように測定する。

3) 測定回数

測定回数はデータの飛び等の異常がなく舗装のたわみ量が算出され、正確に測定位置を走行できた場

合は1回で良いが、実道での測定のため走行位置の離脱や、取得データに異常が認められる場合があるため、複数回（3回程度）測定することが望ましい。

4) サンプリング間隔

1000Hz 以上とする。

5) その他

各機器の測定値のオフセット（ゼロ補正）のため、測定開始前に 10 秒程度停車させた状態で測定を行う。

5. 結果の整理

(1) 舗装のたわみ量の算出

解析ソフトを使用して、ドップラ振動計の測定値からノイズを除去し、舗装のたわみ量を算出する。

(2) 荷重補正

4. (3) で得られた荷重補正式を用いて、5. (1) で算出された舗装のたわみ量から荷重補正を行う。

なお、荷重補正は任意の値で換算できるが、アスファルト舗装の場合は 49kN に換算するものとする。

6. 報告事項

- 1) 測定年月日、測定時刻
- 2) 天候、路面温度、気温
- 3) 測定路線
- 4) 測定箇所（測定車線、上・下の区別、測定・除外区間）
- 5) 舗装種別（舗装構成、表層材料の種類など）
- 6) 解析手法
- 7) 測定速度
- 8) 測定結果（解析結果）

【補足・注意事項】

1) 主な測定機器の例

参考に本共同研究にて製作した MWD に搭載し動作確認をした実績のある機器の一部を参考に示す。なお、下表は測定機器を指定するものではなく、参考として示すものである。なお、ドップラ振動計については、本共同研究と連携し MWD 用に開発した機器であり、詳細は別途共同研究報告書を参照されたい。

主な測定機器の例（本共同研究で製作した MWD で実績のあるもの）

測定機器	製造会社	品番等
ドップラ振動計	小野測器 協立電機（電子技研工業）	共同研究報告書第 550 号参照 共同研究報告書第 551 号参照
路面温度計	ヴァイサラ	品番 DSP100
速度計・距離計	アクト電子	測定部：1521N、信号処理部：2532A、パルス演算カウンタ部：CNT-3921-E10
ひずみゲージ	東京測器研究所	UFLA-5-11-5LT
レーザ変位計	キーエンス	LK-G400
加速度計	IMV	VP-8013M

2) 降雨等の影響

ドップラ振動計は路面に水分があるとレーザ光が乱反射し正確な測定ができない。別途実施したドップラ振動計機器メーカーとの共同研究（共同研究報告書第 550 号および第 551 号参照）での検証では、ある程度路面が濡れている状態であれば測定可能であるという知見は得られているが、どの程度の水膜があると測定不可であるかの知見は得られていないことから、路面が乾燥している状態での測定が望ましい。

3) 速度の影響

ウェーブレット解析を用いたノイズ処理であることから、一定速度となるように測定する必要がある。測定路線の交通量が多い等一定速度での測定が困難な場合は、夜間の交通量が少ない時間帯で測定するなど、事前に詳細に計画することが重要である。

4) 路面温度の影響

アスファルト舗装の場合、路面温度が測定結果に影響を及ぼす。FWD では測定結果を温度補正して健全度を評価するが、本共同研究での検討（4.1.5）では温度補正の適用についての知見が十分に得られなかった。そのため、健全度評価手法にもよるが、路面温度の統一が必要な場合は路面温度が 20° 程度の時期に調査を実施するとよい。

5) 測定位置の影響

載荷用車両の走行位置により得られる測定結果が異なる。本共同研究での検討（4.1.6）では、たわみの大きな区間について、30cm では 1 割～2 程度、60cm では 3 割程度の違いが確認されているため、測定位置はできるだけ OWP 上になるように測定する。なお、走行位置の影響を少なくするためには、複数回測定した結果を平均するなどの方法も有効である。

6) 道路構造の影響

MWD は測定結果を荷重補正するため、坂道、カント、カーブ等の道路構造には基本的に影響を受けないものと考えられるが、本共同研究での検討（4.1.7）では道路構造の影響について把握できなかった。そのため、坂道やカント、カーブが存在する区間については記録し、異常データがあれば測定区間から除外する等の処理が必要である可能性がある。

7) サンプリング周波数

本共同研究での検証では 2000Hz で実施しているが、評価したい区間長や走行速度等を考慮して設定することが必要である。なお、本共同研究での検討 (4.1.3) ではサンプリング周波数 100Hz でも 2000Hz で測定した場合と同様の結果が得られているが、検証箇所と検証パターンが限られていることから、本試験法では暫定的に 1000Hz 以上として記載した。

8) 健全度評価

健全度評価方法については本報告書で記載方法 (5.) が考えられる。本報告書以外の方法でも調査の目的により様々な手法が考えられるため、道路管理者の目的に合致した健全度評価手法の選定・発案をすることが重要である。

9) MWD の運転方法

車両の大きな揺れ等によるデータ異常で正常なたわみ量算定ができなくなる可能性があるため、MWD 運転の際は、急な加減速を行わないよう丁寧な運転を心がける。

10) ドップラ振動計の設置角度のキャリブレーションについて

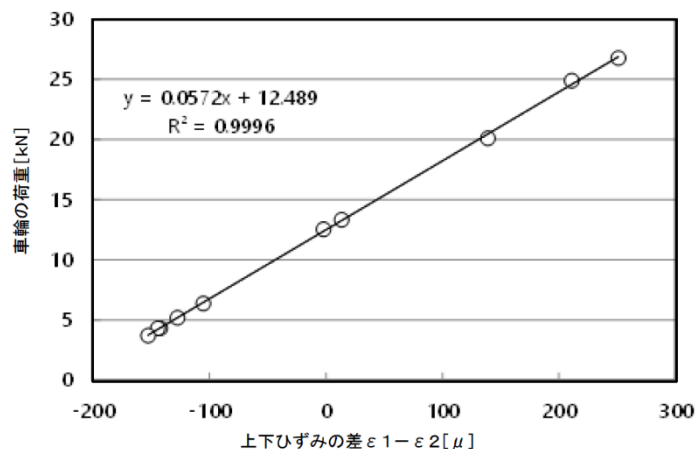
ドップラ振動計の設置角度は、様々な方法が考えられ、さらなる計測精度向上のため継続した検討が必要であるが、暫定的な方法として以下に簡単に記載する。

- ・コンクリート舗装等なるべくたわみが発生しない路面等で車両を走行させ、走行速度、ドップラ振動計と路面との相対速度を計測する。
- ・取得したデータからたわみ速度が最小となる角度を算出し、各ドップラ振動計の設置角度とする。

11) 荷重補正のキャリブレーションの例

荷重補正式は、以下の手順で求める。荷重補正式の算出事例を下図に示す。

- ・載荷用車両の載荷輪に荷重計を設置し、車体を油圧ジャッキ等で徐々に持ち上げ、任意の間隔で荷重とひずみゲージから得られたひずみを測定する。
- ・荷重計で得られた荷重と車軸上下に設置したひずみゲージから得られたひずみ差との関係から荷重補正式を算出する。



荷重補正式の算出

1 2) その他

測定にあたっては、解析手法の特性を十分に理解し測定することが重要である。また、今後の測定により得られた知見はできる限り公表し MWD の高度化に寄与することが望まれる。

付録2) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法(案)～たわみ速度差法編～

1. 目的

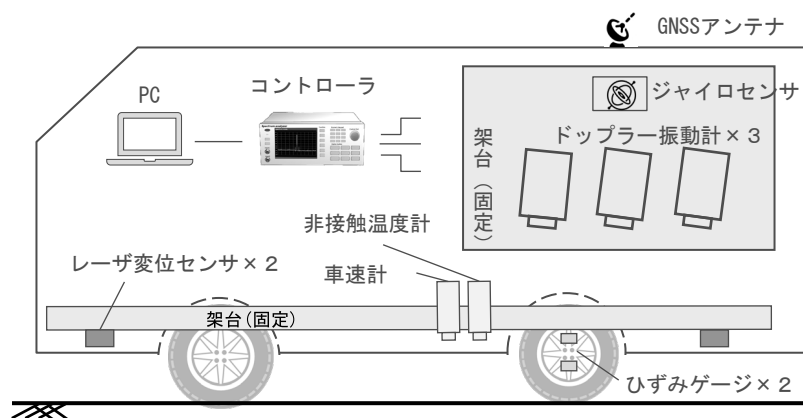
舗装の健全性を評価することを目的に、移動式たわみ測定装置(Moving Wheel Deflectometer)を用いて、測定値に含まれるノイズを測定値間の差で除去する手法(たわみ速度差法)により舗装たわみ量を測定する。

2. 適用範囲

主にアスファルト舗装に適用し、現場で実施する。

3. 測定装置

測定装置は、載荷用車両、架台、ドップラ振動計、ジャイロセンサ、速度計、距離計、ひずみゲージ、路面温度計、気温計などから構成される。付図-2.1に測定装置の例を示す。



付図- 2.1 測定装置の例

(1) 載荷用車両

載荷用車両は、輪荷重 25kN 程度以上の車両を用いるものとする。

(2) ドップラ振動計 (3 台)

ドップラ振動計は路面との相対速度を測定するものであり、以下の性能を満足するものとする。

- ・ 停車時および時速 80km/h 以上での走行においても安定的にデータが取得できるもの。
- ・ レーザ安全クラスは Class2～3R 程度のもの。
- ・ $\pm 1.0\text{m/s}$ 程度の測定が可能であるもの。
- ・ フルスケールで 0.1%程度の精度を有するもの。
- ・ 架台に剛結できる構造のもの。

(3) 路面温度計、気温計

路面温度計及び気温計は温度補正に必要な温度データを取得するためのものであり、走行しながら路面温度を 0.1°C 以上の精度で測定できるものとする。

(4) 速度計

速度計はドップラ振動計の測定値に含まれる走行速度ノイズを除去するために必要な車両の走行速度を測定するためのものであり、0.1km/hの精度で測定できるものとする。

(5) 距離計

距離計は算出された舗装のたわみ量の詳細な位置を特定するために必要な距離を測定するためのものであり、1cmの精度で測定できるものとする。

(6) ひずみゲージ

ひずみゲージは算出された舗装のたわみ量の荷重補正に必要なデータを取得するためのものであり、車軸の上下に張り付けが可能で、車軸に想定される荷重が作用した時にひずみが測定できるものとする。

(7) ジャイロセンサ

車両加減速時等に発生する車両のピッチング方向の角速度を測定する。ジャイロセンサはドップラ振動計と同じ架台に剛結し、車両回転時にはドップラ振動計と同様に移動する。

(8) データロガー

データロガーは、各測定機器で測定されたデータを同期するために必要なものであり、測定データ数以上のデータを処理できるものとする。

(9) 記憶装置 (パーソナルコンピュータ)

データロガーで同期されたデータを記憶するためのものであり、パーソナルコンピュータ等を用いる。

(10) 解析ソフト

ドップラ振動計の測定値からたわみ速度差法を用いてノイズを除去し、最大たわみ量を算出可能な解析ソフトとする。

4. 測定方法

(1) ドップラ振動計の設置

ドップラ振動計は、設置角度2度程度で載荷輪の前後に3台設置する。3台のドップラ振動計は架台に剛結させるものとし、ドップラ振動計の照射位置は載荷輪(後軸左側)の車軸中心から20cm~30cm間隔で設置する。なお、3つ目のドップラ振動計の照射位置が車軸中心から100cm以内になるよう設置間隔を調整する。

(2) キャリブレーション

各測定機器が正確な値を測定できるよう、キャリブレーションを行った上で調査を実施する。以下、MWDに特化したキャリブレーションである荷重補正について方法を示す。

1) 荷重補正式

載荷用車両の載荷輪に荷重計を設置し、車体を油圧ジャッキ等で徐々に持ち上げ、任意の間隔で荷重とひずみゲージから得られたひずみを測定する。荷重計で得られた荷重と車軸上下に設置したひずみゲージから得られたひずみ差との関係から荷重補正式を算出する。

(3) 試験準備

1) 事前準備

測定に先立ち、測定対象箇所の距離や交差点、構造物などの位置を図面等で確認するとともに、現地踏査を行い除外対象箇所の確認及び測定区間の起終点の位置をマークするか目印を確認しておく。このとき交通の状況等について十分把握しておくことが重要である。

2) 計測装置の動作確認

計測装置が正しく接続され、正常に動作していることを確認する。

(4) 測定

1) 測定速度

測定速度は法定速度内とする。

2) 測定位置

ドップラ振動計の照射位置が、外側車輪通過位置 (OWP) もしくは車線中央から路肩側 1m の位置になるように測定する。

3) 測定回数

測定回数はデータの飛び等の異常がなく舗装のたわみ量が算出され、正確に測定位置を走行できた場合は1回で良いが、実道での測定のため走行位置の離脱や、取得データに異常が認められる場合があるため、複数回 (3回程度) 測定することが望ましい。

4) サンプルング間隔

1000Hz 以上とする。

5) その他

各機器の測定値のオフセット (ゼロ補正) のため、測定開始前に 10 秒程度停車させた状態で測定を行う。

5. 結果の整理

(1) 舗装のたわみ量の算出

解析ソフトを使用して、ドップラ振動計の測定値からノイズを除去し、舗装のたわみ量を算出する。

(2) 荷重補正

4. (2) で得られた荷重補正式を用いて、5. (1) で算出された舗装のたわみ量から荷重補正を行う。なお、荷重補正は任意の値で換算できるが、アスファルト舗装の場合は 49kN に換算するものとする。

6. 報告事項

1) 測定年月日、測定時刻

2) 天候、路面温度、気温

3) 測定路線

4) 測定箇所 (測定車線、上・下の区別、測定・除外区間)

- 5) 舗装種別（舗装構成、表層材料の種類など）
- 6) 解析手法
- 7) 測定速度
- 8) 測定結果（解析結果）

【補足・注意事項】

1) 主な測定機器の例

参考に本共同研究にて製作した MWD に搭載し動作確認をした実績のある機器の一部を参考に示す。なお、下表は測定機器を指定するものではなく、参考として示すものである。なお、ドップラ振動計については、本共同研究と連携し MWD 用に開発した機器であり、詳細は別途共同研究報告書を参照されたい。

主な測定機器の例（本共同研究で製作した MWD で実績のあるもの）

測定機器	製造会社	品番等
ドップラ振動計	小野測器	共同研究報告書第 550 号参照
	協立電機（電子技研工業）	共同研究報告書第 551 号参照
路面温度計	ヴァイサラ	DSP100
速度計・距離計	アクト電子	測定部：1521N、信号処理部：2532A、パルス演算カウンタ部：CNT-3921-E10
ひずみゲージ	東京測器研究所	UFLA-5-11-5LT
ジャイロセンサ	電子技研工業	G10

2) 降雨等の影響

ドップラ振動計は路面に水分があるとレーザ光が乱反射し正確な測定ができない。別途実施したドップラ振動計機器メーカーとの共同研究（共同研究報告書第 550 号および第 551 号参照）での検証では、ある程度路面が濡れている状態であれば測定可能であるという知見は得られているが、どの程度の水膜があると測定不可であるかの知見は得られていないことから、路面が乾燥している状態での測定が望ましい。

3) 速度の影響

本共同研究での検討（4.2.4）では、走行速度の影響は小さいことが確認されている。ただし、たわみ量算出の原理として停車及び低速の場合はたわみ量の算出ができないため、停車及び低速走行のデータは除外する必要がある。なお、本共同研究での検討（6.2）では 1km/h 以上の走行速度で得られたデータを有効データとしてたわみ量を算出しているので参考にするとうい。走行速度の下限値については今後の課題である。

4) 路面温度の影響

健全度の評価方法によるが、MWD の計測結果を他のデータと比較する、同様の測定路線の過去のデー

タと比較する等が必要な場合は、路面温度が測定結果に影響を及ぼすため、路面温度が同じ（通常 20℃）時期に測定するか、FWD 同様に測定結果を温度補正する必要がある。本共同研究での検討（4.2.5）では FWD 同様に MWD（たわみ速度差法）たわみ量の温度補正ができる可能性が示されている。ただし、4.2.5 での検討は土木研究所外周路のみでの検証結果であり、今後さらなる知見の蓄積が重要である。

5) 測定位置の影響

載荷用車両の走行位置により得られる測定結果が異なる。本共同研究での検討（4.2.6）では、たわみの大きな区間について、30cm では 1~2 割程度、60cm では 3 割程度の違いが確認されているため、測定位置はできるだけ OWP 上になるように測定する。なお、走行位置の影響を少なくするためには、複数回測定した結果を平均するなどの方法も有効である。

6) 道路構造の影響

MWD は測定結果を荷重補正するため、坂道、カント、カーブ等の道路構造には基本的に影響を受けないものと考えられるが、本共同研究での検討（4.2.7）では、段差等で車両が大きく揺れた場合に正確な解析ができないケースが確認されている。車両が大きく揺れる等の現象が発生した場合には記録し、正常に解析結果が得られない場合には、測定区間から除外するなどの措置が必要となる。

7) サンプル周波数

本共同研究での検証では 2000Hz で実施しているが、評価したい区間長や想定される最大走行速度等を考慮して設定することが必要である。なお、本共同研究での検討（4.2.3）ではサンプル周波数 100Hz でも 2000Hz で測定した場合と同様の結果が得られているが、検証箇所と検証パターンが限られていることから、本試験法では暫定的に 1000Hz 以上として記載した。

8) 健全度評価

健全度評価方法については本報告書で記載方法（5.）が考えられる。本報告書以外の方法でも調査の目的により様々な手法が考えられるため、道路管理者の目的に合致した健全度評価手法の選定・発案をすることが重要である。

9) MWD の運転方法

車両の大きな揺れ等によるデータ異常で正常なたわみ量算定ができなくなる可能性があるため、MWD 運転の際は、急な加減速を行わないよう丁寧な運転を心がける。

10) ドップラ振動計の設置角度のキャリブレーションについて

ドップラ振動計の設置角度は、様々な方法が考えられ、さらなる計測精度向上のため継続した検討が必要であるが、暫定的な方法として以下に簡単に記載する。

- ・コンクリート舗装等なるべくたわみが発生しない路面等で車両を走行させ、走行速度、ドップラ振動計と路面との相対速度を計測する。
- ・取得したデータからたわみ速度が最小となる角度を算出し、各ドップラ振動計の設置角度とする。

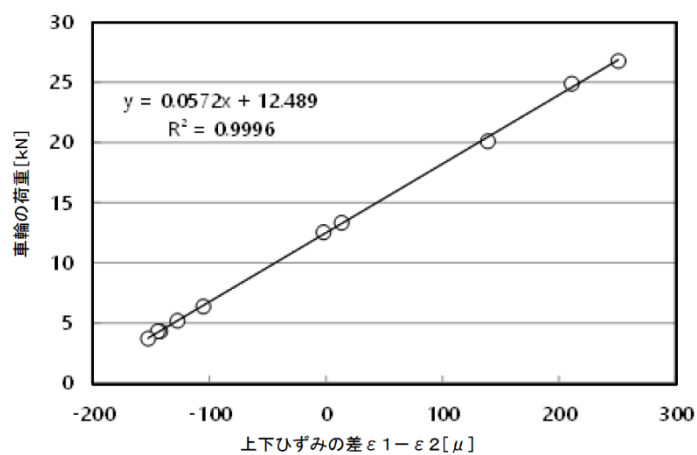
11) 荷重補正のキャリブレーションの例

荷重補正式は、以下の手順で求める。荷重補正式の算出事例を下図に示す。

- ・載荷用車両の載荷輪に荷重計を設置し、車体を油圧ジャッキ等で徐々に持ち上げ、任意の間隔で荷重

とひずみゲージから得られたひずみを測定する。

・荷重計で得られた荷重と車軸上下に設置したひずみゲージから得られたひずみ差との関係から荷重補正式を算出する。



荷重補正式の算出

1 2) その他

測定にあたっては、解析手法の特性を十分に理解し測定することが重要である。また、今後の測定により得られた知見はできる限り公表し MWD の高度化に寄与することが望まれる。

付録3) 移動式たわみ測定装置を用いた舗装のたわみ測定方法(案)～レーザ法編～

1. 目的

舗装のたわみ量を移動式たわみ測定装置(Moving Wheel Deflectometer)を用いて測定する。なお、測定は載荷用車両の側面に設置したレーザ変位計を用いて、載荷車輪直下の路面の変位と載荷輪から離れた路面の変位の差によりたわみ量を算出する手法(レーザ法)を用いて測定する方法とする。

2. 適用範囲

主にアスファルト舗装に適用し、現場で実施する。

3. 測定器具

MWD装置の模式図を付図-3.1に示す。測定装置は、載荷用車両、レーザ変位計、速度計、距離計、ひずみゲージなどから構成されている。

(1) 載荷用車両

載荷用車両は、輪荷重25kN以上の車両を用いるものとする。

(2) レーザ変位計

レーザ変位計は路面との距離を測定するものであり、測定レンジは400±100mm程度の性能を有するものとする。

(3) 路面温度計・気温計

路面温度計および気温計は温度補正に必要な温度データを取得するためのものであり、走行しながら0.1℃以上の精度で測定できるものとする。

(4) 速度計

速度計は載荷用車両の走行速度を測定するためのものであり、0.1km/h以上の精度で走行できるものとする。

(5) 距離計

距離計は算出された舗装のたわみ量の詳細な位置を特定するために必要なデータを取得するためのものであり、0.1mの精度で測定できるものとする。

(6) ひずみゲージ

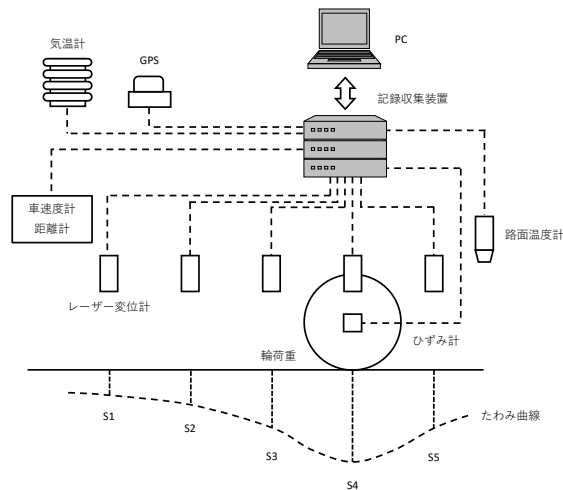
ひずみゲージは算出された舗装のたわみ量の荷重補正に必要なデータを取得するためのものであり、載荷輪の上下に貼り付けが可能で、車軸に想定される荷重が作業した時にひずみが測定できるものとする。

(7) データロガー

データロガーは各測定機器で測定されたデータを同期するために必要なものであり、測定データ数以上のデータを処理できるものとする。

(8) 記憶装置

データロガーで同期されたデータを記憶するためのものであり、パーソナルコンピュータ等を用いる。



付図-3.1 MWD装置の模式図測定方法

4. 測定方法

(1) レーザ変位計の設置

レーザ変位計は測定車両の側面に設置し、路面に対し垂直位置に設置する。また、載荷位置に直近となる点を基準に進行方向前側に3個、後側に1個の計5個を1m間隔で設置する。レーザ変位計は走行中に縁石などの構造物と接触しない高さに設置し、十分な焦点距離を有するものとする。

(2) キャリブレーション

1) レーザ変位計のゼロ点較正

レーザ変位計は基準点からの変位量を計測するため、予め基準となる路面でゼロ点較正を行っておく。路面は輪荷重が生じてたわみが発生しない剛性の高い路面上で行う。剛性の高い路面上でレーザ変位計の測定値に変化が見られないことを確認し、各レーザ変位計のゼロ点を設定する。

2) レーザ変位計による角度補正

走行中の載荷用車両におけるピッチング方法に変動する角度（ピッチ角）を計測するため、予めレーザ変位計によって算出される角度と実際の車体のピッチ角の関係式を把握しておく。1) で使用した剛性の高い路面上で、載荷軸を油圧ジャッキ等により徐々に持ち上げ、その時の車体角度を角度計等を用いて測定する。この時の2個のレーザ変位計で計測した変位量の差分とレーザ変位計の設置距離から角度を算出する。これを1°程度ずつ5点で行い回帰式を求める。

3) ひずみゲージによる荷重補正

載荷用車両の載荷輪に荷重計を設置し、車体を油圧ジャッキ等で徐々に持ち上げ、任意の間隔で荷重とひずみゲージから得られたひずみを測定する。荷重計で得られた荷重と車軸上下に設置したひずみゲージから得られたひずみ差との関係から荷重補正式を算出する。

(3) 試験準備

1) 事前準備

測定に先立ち、測定対象箇所の距離や交差点、構造物などの位置を図面等で確認するとともに、現地踏査を行い除外対象箇所の確認及び測定区間の起終点の位置をマーキングするか目印を確認しておく。このとき交通の状況等について十分把握しておくことが重要である。

2) 計測装置の動作確認

測定装置が正しく接続され、正常に動作していることを確認する。

(4) 測定

1) 測定速度

測定は法定速度内で任意で定めて良いが、測定中は加減速を極力行わず、一定速度を保つことが望ましい。加減速によって測定値に影響したと思われる箇所については記録し、場合によっては測定範囲から除外する。

2) 測定位置

測定位置、すなわち輪荷重を加える位置は外側車輪通過位置 (OWP) もしくは車線中央から路肩側 1 m となるよう走行する。

3) 測定回数

測定回数はデータの飛び等の異常がなく舗装のたわみ量が算出され、正確に測定位置を走行できた場合は 1 回で良いが、実道での測定のため走行位置の離脱や、取得データに異常が認められる場合があるため、複数回 (3 回程度) 測定することが望ましい。

4) サンプルング間隔

1000Hz 以上とする。

5) その他

各機器の測定値のオフセット (ゼロ補正) のため、測定開始前に 10 秒程度停車させた状態で測定を行う。

5. 結果の整理

(1) 舗装のたわみ量の算出

a) レーザ変位計出力値のスパイクノイズの除去

メディアンフィルタを用いてデータのフィルタリングを行う。フィルタは $n=101$ で行い、付式 (3・

1) で定義される。

$$S = \begin{cases} \text{median}(s_1, s_2, s_3, \dots, s_{i+48}, s_{i+49}, s_{i+50}) & (i \leq 50) \\ \text{median}(s_{i-50}, s_{i-49}, s_{i-48}, \dots, s_{i+48}, s_{i+49}, s_{i+50}) & (51 < i < n - 50) \dots \dots \dots \text{付式 (3・1)} \\ \text{median}(s_{i-50}, s_{i-49}, s_{i-48}, \dots, s_{n-2}, s_{n-1}, s_n) & (n - 50 \leq i) \end{cases}$$

ここに、 S : 各レーザ変位計のフィルタリング後の変位量 (μm)

s : 各レーザ変位計の出力値 (μm)

また、メディアンフィルタによってスパイクノイズを除去した後に、車両振動や路面テクスチャ等によって生じる高周波ノイズを除去するため、変位量の区間平均を算出する。

区間平均の算出間隔は任意として、1～5m 程度とするのが良い。また、区間平均距離は 5m とする。

b) 左後輪が測点 x m の位置に載荷している時の測点 x m の路面形状を付式 (3・2) から算出する。

$$d_1 = S4(x) - \frac{S3(x)+S5(x)}{2} \dots \dots \dots \text{付式 (3・2)}$$

ここに、 d_1 : 載荷輪が測点 x m にある時の測点 x m の路面形状 (μm)

$S3\sim S5$: 車両前方から 3～5 個目のレーザ変位計で計測したノイズ除去後の変位 (μm)

c) 左後輪が測点 $(x-2)$ m の位置に載荷している時の測点 x m の路面形状を付式 (3・2) から算出する。

$$d_2 = S2(x-2) - \frac{S1(x-2)+S3(x-2)}{2} \dots \dots \dots \text{付式 (3・3)}$$

ここに、 d_2 : 載荷輪が測点 x m にある時の測点 x m の路面形状 (μm)

$S1\sim S3$: 車両前方から 1～3 個目のレーザ変位計で計測したノイズ除去後の変位 (μm)

d) b), c) にて求めた路面形状からたわみ量を算出する。

$$d' = d_1 \times \cos \theta(x) - d_2 \times \cos \theta(x-2) \dots \dots \dots \text{付式 (3・4)}$$

ここに、 d' : 角度によって補正したたわみ量 (μm)

$\theta(x)$: 左後輪が測点 x m にある時の車体角度 (rad)

$\theta(x-2)$: 左後輪が測点 $(x-2)$ m にある時の車体角度 (rad)

$\theta(x)$ 、 $\theta(x-2)$ はそれぞれ付式 (3・5) より求める。

$$\theta(x) = \left| \tan^{-1} \left(\frac{S1(x)-S2(x)}{1,000} \right) \right|, \quad \theta(x-2) = \left| \tan^{-1} \left(\frac{S1(x-2)-S2(x-2)}{1,000} \right) \right| \dots \dots \dots \text{付式 (3・5)}$$

(1,000=レーザ変位計の設置間隔 (mm))

(2) 荷重補正

4. (2) で得られた荷重補正式を用いて、5. (1) で得られた舗装のたわみ量から荷重補正を行う。なお、荷重補正は任意の値で換算できるが、アスファルト舗装の場合は 49kN に換算するものとする。

$$d^* = d' \times \frac{m^*}{m} \dots \dots \dots \text{付式 (3・6)}$$

ここに、 d^* : 角度および荷重によって補正したたわみ量 (μm)

m^* : 標準荷重 (49kN) (kN)

m : 走行中の輪荷重 (kN)

6. 報告事項

- 1) 測定年月日、測定時刻
- 2) 天候、路面温度、気温
- 3) 測定路線
- 4) 測定箇所 (測定車線、上・下の区別、測定・除外区間)
- 5) 舗装種別 (舗装構成、表層材料の種類など)
- 6) 解析手法
- 7) 測定速度
- 8) 測定結果 (解析結果)

【補足・注意事項】

1) 主な測定機器の例

参考に本共同研究にて製作した MWD に搭載し動作確認をした実績のある機器の一部を参考に示す。なお、下表は測定機器を指定するものではなく、参考として示すものである。

主な測定機器の例（本共同研究で製作した MWD で実績のあるもの）

測定機器	製造会社	品番等
レーザ変位計	キーエンス	LK-G400
路面温度計	ヴァイサラ	品番 DSP100
速度計・距離計	アクト電子	測定部：1521N、信号処理部：2532A、パルス演算カウンタ部：CNT-3921-E10
ひずみゲージ	東京測器研究所	UFLA-5-11-5LT

2) 降雨等の影響

レーザ変位計路面に水分があるとレーザ光が乱反射し正確な測定ができないことから、路面が乾燥している状態での測定が望ましい。

3) 速度の影響

本共同研究での検討（4.3.4）では、走行速度の影響は小さいことが確認されているため、法定速度内で任意に設定しても良い。

4) 路面温度の影響

健全度の評価方法によるが、MWD の計測結果を他のデータと比較する、同様の測定路線の過去のデータと比較する等が必要な場合は、路面温度が測定結果に影響を及ぼすため、路面温度が同じ（通常 20℃）時期に測定するか、FWD 同様に測定結果を温度補正する必要がある。本共同研究での検討（4.3.5）では FWD 同様に MWD（たわみ速度差法）たわみ量の温度補正ができる可能性が示されている。ただし、4.2.5 での検討は土木研究所外周路のみでの検証結果であり、今後さらなる知見の蓄積が重要である。

5) 測定位置の影響

載荷用車両の走行位置により得られる測定結果が異なる。本共同研究での検討（4.3.6）では、たわみの小さな区間では測定位置の影響はないものの、たわみの大きな区間では 30 cm で 1 割程度、60 cm で 2 割り程度の違いが確認されているため、測定位置はできるだけ OWP 上になるように測定する。なお、走行位置の影響を少なくするためには、複数回測定した結果を平均するなどの方法も有効である。

6) 道路構造の影響

MWD は測定結果を荷重補正するため、坂道、カント、カーブ等の道路構造には基本的に影響を受けないものと考えられるが、本共同研究での検討（4.3.7）では、段差等で車両が大きく揺れた場合に正確な解析ができないケースが確認されている。車両が大きく揺れる等の現象が発生した場合には記録し、正常に解析結果が得られない場合には、測定区間から除外するなどの措置が必要となる。

7) サンプリング周波数

本共同研究での検証では 2000Hz で実施しているが、評価したい区間長や想定される最大走行速度等を考慮して設定することが必要である。なお、本共同研究での検討 (4.3.3) ではサンプリング周波数 100Hz でも 2000Hz で測定した場合と同様の結果が得られているが、検証箇所と検証パターンが限られていることから、本試験法では暫定的に 1000Hz 以上として記載した。

8) 健全度評価

健全度評価方法については本報告書で記載方法 (5.) が考えられる。本報告書以外の方法でも調査の目的により様々な手法が考えられるため、道路管理者の目的に合致した健全度評価手法の選定・発案をすることが重要である。

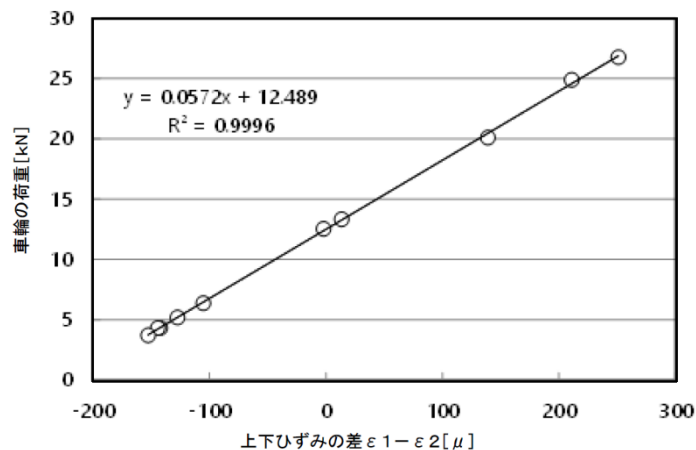
9) MWD の運転方法

車両の大きな揺れ等によるデータ異常で正常なたわみ量算定ができなくなる可能性があるため、MWD 運転の際は、急な加減速を行わないよう丁寧な運転を心がける。

10) 荷重補正のキャリブレーションの例

荷重補正式は、以下の手順で求める。荷重補正式の算出事例を下図に示す。

- ・ 載荷用車両の載荷輪に荷重計を設置し、車体を油圧ジャッキ等で徐々に持ち上げ、任意の間隔で荷重とひずみゲージから得られたひずみを測定する。
- ・ 荷重計で得られた荷重と車軸上下に設置したひずみゲージから得られたひずみ差との関係から荷重補正式を算出する。



荷重補正式の算出

11) その他

測定にあたっては、解析手法の特性を十分に理解し測定することが重要である。また、今後の測定により得られた知見はできる限り公表し MWD の高度化に寄与することが望まれる。

付録4) 国内におけるMWDに関する文献

- 加納孝志、岩永真和、大場拓也、塚越智弘、永島直紀、森嶋洋幸：「移動式たわみ測定装置」について—舗装のたわみ測定装置の変遷—、アスファルト、Vol.51、No.224、pp43-54、2008
 - 寺田剛、川名太、久保和幸、竹内康、松井邦人：移動式たわみ測定装置を用いた舗装の健全性評価手法に関する一検討、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.68、No.3 (舗装工学論文集第 17 巻)、I_13- I_20、2012
 - 松井邦人、久保和幸、寺田剛、川名太：走行型路面たわみ測定試験機の現状と我が国における取組み、土木技術資料 55-12、pp10-13、2013
 - 竹内康、川名太、渡辺晃志、松井邦人：動的たわみ計測装置 (Moving Wheel Deflectometer) の開発と舗装の健全度評価に関する研究～たわみ評価法概要と特殊車両での計測結果～、土木学会平成 27 年度全国大会、第 70 回年次学術講演会、V-322、pp643-644、2015
 - 川名太、竹内康、松井邦人：動的たわみ計測装置 (Moving Wheel Deflectometer) の開発と舗装の健全度評価に関する研究～中型車両による測定結果～、土木学会平成 27 年度全国大会、第 70 回年次学術講演会、V-323、pp645-646、2015
 - 土木学会：非破壊試験による舗装のたわみ測定と構造評価、舗装工学ライブラリー14、2015
 - 竹内康、姫野賢治、松井邦人、丸山輝彦、西澤辰男、川名太、神谷恵三：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 No.24-9、2015
 - 若林由弥、寺田剛、久保和幸、竹内康、川名太：移動式たわみ測定装置 (MWD) の測定精度に関する検討、土木学会平成 28 年度全国大会、第 71 回年次学術講演会、V-044、pp87-88、2016
 - 若林由弥、寺田剛、藪雅行、竹内康：舗装の効率的評価のための新しい測定装置の開発～MWD の実用化に向けた取組み～、土木技術資料 58-8、pp12-15、2016
 - 若林由弥、藪雅行、寺田剛、竹内康、川名太：移動式たわみ測定装置 (MWD) の測定精度に関する検討、舗装 52-4、pp25-30、2017
 - 若林由弥、藪雅行：移動式たわみ測定装置の開発と実用化に向けた取り組み、平成 29 年度国土交通省国土技術研究会論文集、pp220-223、2017
- <本共同研究の成果に関する文献>
- 綾部孝之、寺田剛、渡邊真一、藪雅行：移動式たわみ測定装置の実用化に向けた取組み、土木技術資料 61-4、pp12-15、2019.4
 - 寺田剛、綾部孝之、藪雅行：移動式たわみ測定装置 (MWD) の実用化に関する検討、第 34 回日本道路会議、No.3030、2021.11
 - 綾部孝之、梅田隼、山口和郎、寺田剛、藪雅行：ドップラ振動計を用いた移動式たわみ測定装置 (MWD) のたわみ量解析手法について、第 34 回日本道路会議、No.3031、2021.11 【優秀賞】
 - 山本啓、齊藤一之、綾部孝之：レーザ変位計を用いた移動式たわみ測定装置 (MWD) のたわみ量解析手法

について、第 34 回日本道路会議、No.3032、2021.11

- 阿部貴幸、河田久儀、綾部孝之：坂道等が移動式たわみ測定装置（MWD）の測定結果に与える影響、第 34 回日本道路会議、No.3033、2021.11 【優秀賞】
- 那珂道大、鬼塚久史、永塚竜也、綾部孝之：移動式たわみ測定装置（MWD）を用いたネットワークレベルでの測定事例、第 34 回日本道路会議、No.3034、2021.11
- 梅田隼、塚本真也、山口和郎、綾部孝之、寺田剛：移動式たわみ測定装置（MWD）のたわみ量解析手法の提案、土木学会論文集 E1（舗装工学）、Vol.77、No.2（舗装工学論文集第 26 巻）、I.179-I.187、2021 【舗装工学論文賞】
- 土木研究所、東京農業大学、アールテックコンサルタント、ガイアート、高速道路総合技術研究所、東亜道路工業、ニチレキ、パスコ：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、土木研究所共同研究報告書、整理番号第 549 号、2021
- 土木研究所、東京農業大学、小野測器：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～、土木研究所共同研究報告書、整理番号第 550 号、2021
- 土木研究所、東京農業大学、協立電機：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～ ～MWD の新たな解析手法の提案～、土木研究所共同研究報告書、整理番号第 551 号、2021

共同研究報告書

Cooperative Research Report of PWRI

No. 549 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