

融雪期における移動式たわみ測定装置(MWD)の測定手法に関する一検討

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 ○松本 第佑
国立研究開発法人土木研究所 つくば中央研究所 根津 孝文
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 丸山 記美雄

舗装の構造的健全度を効率的に把握する手法として、移動しながら連続的に舗装のたわみ量を測定する移動式たわみ測定装置(MWD)の開発が進められている。積雪寒冷地では、融雪期の舗装体の支持力低下による損傷が近年顕在化しており、支持力低下箇所を効率的に抽出する手法としてMWDの活用が期待される。本検討では、融雪期におけるMWDの測定上の留意事項や課題について、現道での調査を踏まえ整理した結果を報告する。

キーワード：維持管理、点検診断、舗装たわみ量、MWD

1. はじめに

日本国内の道路延長は令和5年度末時点で約122万 kmを超え、100万 km以上の道路が舗装されている¹⁾。また、北海道内の道路延長は約9万 kmと国内で最も多く、温暖地域よりも厳しい環境条件の中で、ポットホールや低温クラックなどの積雪寒冷地特有の舗装損傷が多発している。これらの膨大な舗装ストックを厳しい予算制約の中で、効率的かつ持続的に点検し、舗装の維持管理を実施していくことが一層求められている。

アスファルト舗装においては、アスファルト舗装の詳細調査・修繕設計便覧²⁾が令和5年度に発刊され、舗装点検要領における診断区分Ⅲ-2に該当する早期劣化区間では、粒状路盤層以下を含めた詳細調査を行い、損傷した層の特定および劣化要因の検討を行う。詳細調査のひとつに、非破壊で舗装の構造的健全性を評価可能な舗装たわみ測定装置(Falling Weight Deflectometer: FWD)が広く用いられている。測定地点において重錘を落下させ衝撃荷重を与えることで舗装のたわみ量を測定し、舗装体の支持力を評価する。FWDは測定時に車両を停止させた状態で行う必要があり、1点の測定に3～5分程度を要する。そのため、測定時には交通規制を行いながら実施する。また、数 mおきに測定を行うため、測定された舗装のたわみ量から連続的に舗装体の支持力を把握することは難しい。

近年国内では、写真-1に示すような移動しながら連続的に舗装のたわみ量を測定可能な移動式たわみ測定装置(Moving Wheel Deflectometer: MWD)の開発が進められており、ネットワークレベルでの効率的な舗装点検への活用が期待されている³⁾。これまでに積雪寒冷地では、一般国道においてMWD測定を実施しており、様々な舗装

構成や積雪寒冷環境下でのMWDの適用について検討が進められている⁴⁾。特に積雪寒冷地では、融雪期の舗装体の支持力低下によるポットホール等の舗装損傷が顕在化しており、支持力低下箇所を効率的に抽出する手法としてMWDの活用が期待される。一方で、融雪期はポットホールや亀甲状のひび割れが発生しやすい路面状況であることや、路肩に堆雪した雪が解け、路面に水たまりができやすい路面状況が想定され、MWDがこのような融雪期の路面状況においてどのような計測結果が得られるか明らかとなっていない。特に、MWDに搭載しているドップラ振動計は、路面に水たまりなどの水膜があると、ドップラ振動計のレーザ光が乱反射し正確にたわみ量を測定できない可能性がある⁵⁾。

そこで本検討では、舗装体の支持力低下が想定される融雪期において、舗装損傷につながる箇所の抽出(スクリーニング)を目的としたMWDの測定手法について検討するための基礎的なデータ取得を行った。融雪期におけるMWDの測定上の留意事項や課題について、現道での調査を踏まえ整理した結果を報告する。



写真-1 MWDの外観

2. MWDの概要

MWDの車両は8tの中型車であり、自らの輪荷重によって生じる路面のたわみ量を走行しながら測定できる装置である。走行するだけでたわみ量データを連続的に取得可能であるため、交通規制が不要で短時間での測定が可能である。海外においても同様に移動しながらたわみ量を測定できる装置が開発されているが、海外の車両は全長8mを超える大型の車両を採用しており、日本国内では測定可能な路線が限定される。そのため、MWDは日本の道路事情を勘案し、比較的幅員の狭い道路でも走行できるように海外よりも小型の中型車（全長約7.5m）を採用している。

MWDの主な機器構成を表-1に示す。また、機器の配置イメージを図-1、たわみ量の算出原理を図-2に示す。測定機器やノイズ除去手法はMWDに関する共同研究³⁾で詳細に検討されているため、ここではMWDの最大たわみ量（以下、MWDたわみ量）の算出手法を概説する。

MWDでは、車両の左後輪の直上に設置したドップラ振動計により、車両の走行によって路面がたわむ際の実速度（以下、たわみ速度）を測定し、各種信号処理によりノイズを除去し、舗装の最大たわみ量を算出する。ドップラ振動計は、レーザ光の入射光と反射光のドップラ効果による周波数変化を利用して、対象物の運動状態を計測する装置である。車速計によって車両の速度を計測し、ジャイロによって車両の加減速時に発生する車両のピッチ方向の角速度を計測している。また、過去の知見⁹⁾より、車軸上下のひずみ差と輪荷重には高い相関があることがわかっていることから、車両後輪の軸の上下にひずみゲージを取り付け、時々刻々と変化する輪荷重を測定している。

MWDでは、路面のたわみ曲線を式(1)に示すガウス関数で近似し、たわみ位置 x の微分により、式(2)に示したたわみ角度 dw/dx を求めることができる。さらに、車両速度とたわみ位置の関係により、たわみ速度 dw/dt は式(3)より算出される。

$$w = a \cdot e^{-bx^2} \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dx} = -2abx \cdot e^{-bx^2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dw}{dx} \\ &= -v \cdot \frac{dw}{dx} = 2vabx \cdot e^{-bx^2} \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、 w ：たわみ量、 a ：最大たわみ量、 b ：たわみ形状に関する係数、 x ：たわみ位置、 t ：時間、 v ：車両走行速度

MWDに搭載しているドップラ振動計によって計測される計測値には、舗装路面のたわみ速度だけでなく、車両の走行速度成分、車両が上下方向に動く際の実速度成分、車両のピッチ方向に回転する速度成分のノイズが含まれ

表-1 MWDの主要機器構成

使用機器	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
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・走行距離
GNSS	1	車両位置情報

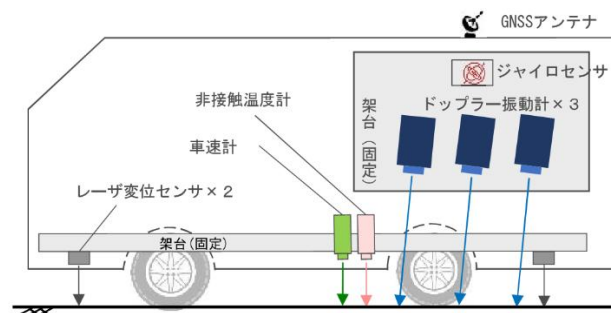


図-1 機器配置イメージ⁵⁾

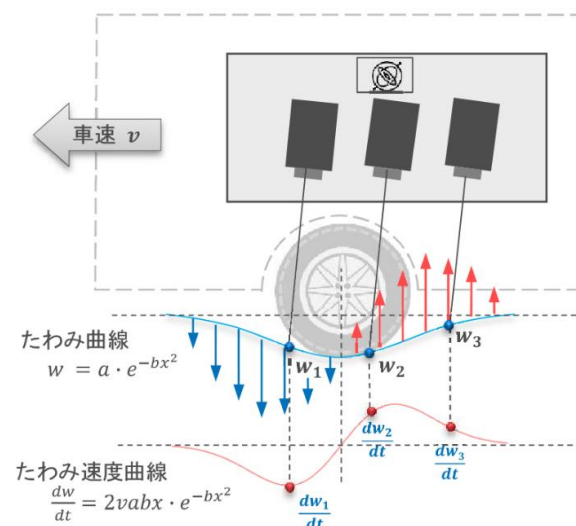


図-2 MWDたわみ量の測定原理⁵⁾

る。車両の走行速度成分のノイズを除去するために車速計によって計測された車両の走行速度を用い、車両のピッチ方向に回転する速度成分のノイズを除去するためにジャイロによって計測された角速度を用いている。舗装路面のたわみ量を正確に算出するためには、ドップラ振動計によって計測される計測値から、これらのノイズを可能な限り除去することが重要である。土木研究所を中心として行われたMWDに関する共同研究では、ノイズを除去する手法について各種の検討が行われ、より効果的にノイズを除去する手法としてたわみ速度差法が考案された。たわみ速度差法によってノイズが除去されたたわみ速度を式(3)に代入することで、MWDの最大たわみ量を算出している。

3. たわみ量測定概要

(1) 測定箇所

本検討で実施した測定箇所は、一般国道337号長沼町幌内における片側1車線の道路である。交通量区分はN5交通量区分である。測定区間は、図-3の赤色着色部の片道約2 kmの上下車線（KP=14.00～16.00）であり、上り車線の約200 m区間（KP=16.00～15.80）でFWDによるたわみ量測定を実施している。FWD測定実施区間の舗装構成を表-2に示す。アスファルト混合物層は、表層4 cm、基層5 cm、上層路盤層6 cmの区間である。

FWDの測定状況を写真-2に示す。FWD測定区間では、写真-3に示すように車輪走行位置に線状のクラックや横断方向のクラックが発生し、一部ではポットホール状の損傷も発生していた。また、過去にレールパッチングによる補修が行われている箇所もあり、大型車等の交通による損傷が顕著な区間と、健全な区間が混在している。

(2) 測定方法

本検討では、MWDとFWDの測定区間を一致させるため、上り車線でのMWD測定においては、FWDの測定開始点とMWDの測定開始点が一致するようにKP=16.00を測定開始点として測定を行った。また、下り車線ではKP=16.00を測定終了点として測定を行った。

前述したように、MWDは車両の走行速度が得られるたわみ量に影響を与える可能性があるため、MWDの測定は時速30km/hの一定速度で行った。そのため、上り区間では加速区間として、測定開始点から200 m手前からMWDを走行させ、下り区間では測定終了点から50 mを減速区間として設けた。走行中はFWDの測定位置とMWDの車輪走行位置が限りなく一致するように運転した。

FWD測定では、上り車線の約200 m区間を5 m間隔で計42点測定した。測定点1点に対し、4回重錘を落下させて舗装のたわみ量を測定した。1回目を除く2～4回目の載荷点直下の最大たわみ量を平均した値（以下、FWDたわみ量）を本検討では用いた。

FWD測定とMWD測定は同一日中に実施し、午前中にFWD測定、午後にMWD測定を実施した。MWDの測定回数は日没までに測定可能な時間を考慮し、上り車線と下り車線のいずれも3回以上実施した。

(3) 測定時期

融雪期の路面状況における測定結果について検討することから、融雪期の比較として令和6年10月下旬の秋期（測定時の気温：約15℃）に加え、令和7年2月下旬の融雪期（測定時の気温：約5℃）の2時期に測定を行った。

なお、ドップラ振動計は機器の仕様上、低温環境下では起動に時間がかかり、測定開始の1時間以上前から車内および機器類の配置部分をエアコン等で暖め、ドップ

MATSUMOTO Daisuke, NEZU Takafumi, MARUYAMA Kimio

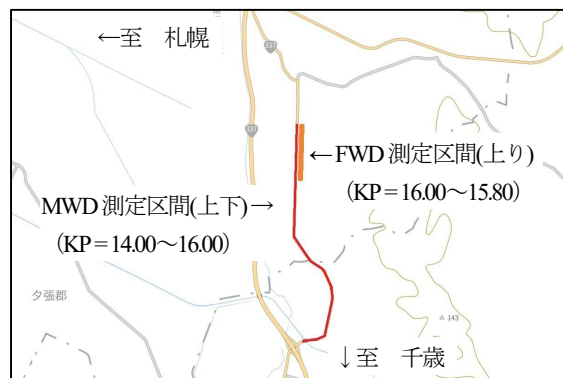


図-3 測定区間（一般国道 337 号 KP=14.00～16.00）

表-2 FWD 測定区間の舗装構成

表層	4cm	密粒度アスファルト混合物（再生）
基層	5cm	粗粒度アスファルト混合物
上層路盤	6cm	アスファルト安定処理混合物
下層路盤	65cm	40mm級 粒状路盤材



写真-2 FWD の測定状況



写真-3 FWD 測定区間の路面状況

ラ振動計を測定可能な状態にしてから現地での測定を実施した。

4. 測定結果

FWD測定区間において測定されたFWDたわみ量は49 kNへの荷重補正を行い、MWDたわみ量についても同様

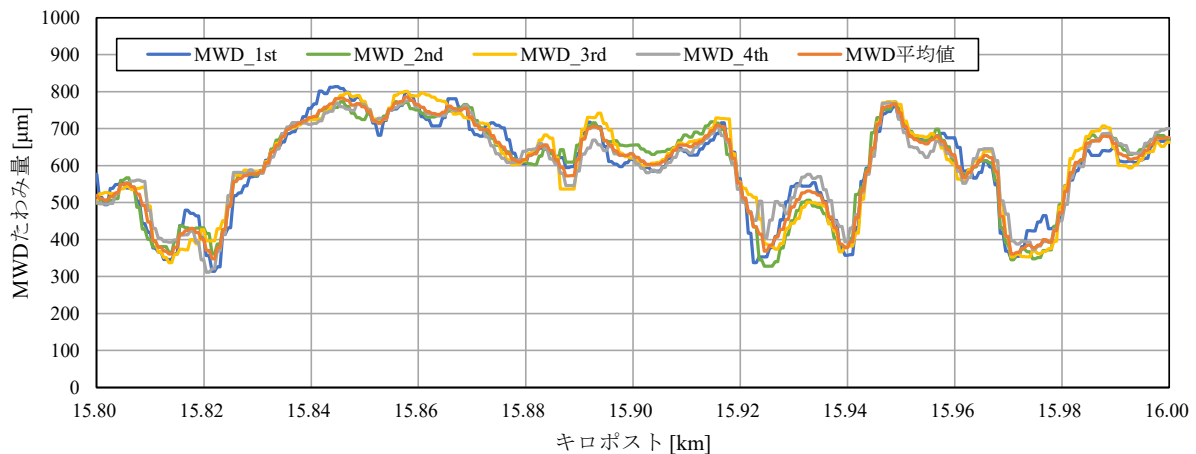


図4 秋期における MWDたわみ量の繰り返し測定結果（上り車線：KP=15.80～16.00）

に49 kNへの荷重補正を行い整理した。また、温度補正については、温度によるたわみ量への影響が軽微となるように同一日中に測定を実施していることから、本検討では温度補正を実施していない。

(1) MWDの繰り返し測定の再現性

はじめに、MWDたわみ量の再現性について確認した。既往の検討⁹⁾にもあるとおり、MWDで複数回測定して得られたたわみ量は、多少のばらつきはあるものの同様の値を示している。本測定においても繰り返し複数回測定した場合の再現性について確認する。

秋期のFWD測定区間におけるMWDたわみ量の計測結果を図-4に示す。秋期の上り車線では4回計測を実施した。また、FWD測定区間においてMWDたわみ量を0.5 m毎に抽出し、4回測定した同一地点のMWDたわみ量の平均値と標準偏差より各地点の変動係数を算出した。FWD測定区間における各地点の変動係数の平均値、最大値、最小値を表-3に示す。

図-4より、4回計測したMWDたわみ量は、一部ではたわみ量がばらついている箇所も見られるが、概ね一致している結果を示した。また、表-3より、同一地点におけるMWDたわみ量の変動係数は、MWDの各測定時の走行位置の変動もあり最大で18.8%であったが、区間平均で4.5%と小さく、4回測定されたMWDたわみ量はいずれも同程度の値であると判断される。

したがって、本検討における計測区間内では、MWDによって舗装のたわみ量を繰り返し測定しても同程度の値が得られると判断される。

(2) FWDとMWDの傾向分析

次に、FWDたわみ量とMWDたわみ量を比較した結果を図-5に示す。図-5には、1:1線を実線で示し、FWDたわみ量とMWDたわみ量の近似曲線および決定係数 R^2 を併記している。また、FWD測定区間内のそれぞれのたわみ量の傾向の一致度を把握するため、以下の式によりた

表-3 FWD測定区間におけるMWDたわみ量の変動係数

平均値 [%]	4.5
最大値 [%]	18.8
最小値 [%]	0.4

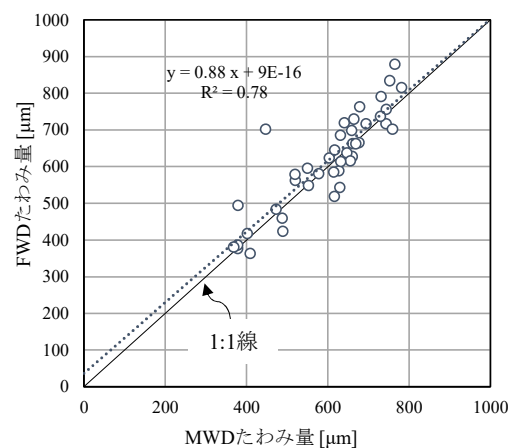


図-5 FWDたわみ量とMWDたわみ量の比較結果

わみ量を標準化し、たわみ量の傾向を分析した。

$$D' = \frac{D - D_{ave}}{\sigma} \quad (4)$$

ここに、 D' ：標準化したたわみ量、 D ：荷重補正後の測定たわみ量[μm]、 D_{ave} ：FWD測定区間内のたわみ量の平均値[μm]、 σ ：FWD測定区間内のたわみ量の標準偏差[μm]

データの標準化とは、測定したデータに対して、データの平均値の差を取り、標準偏差で除すことで、平均が0、標準偏差が1のデータ群に変換することである。MWDたわみ量は、測定する区間の舗装構成や、測定時の車両速度および走行位置の影響などがMWDたわみ量の値に影響するとされている。そのため、FWDたわみ量とMWDたわみ量の比較では、たわみ量を標準化することで、たわみ量の絶対値の比較ではなく、測定区間内のデータの大小の傾向を比較することが可能となる。標準化したた

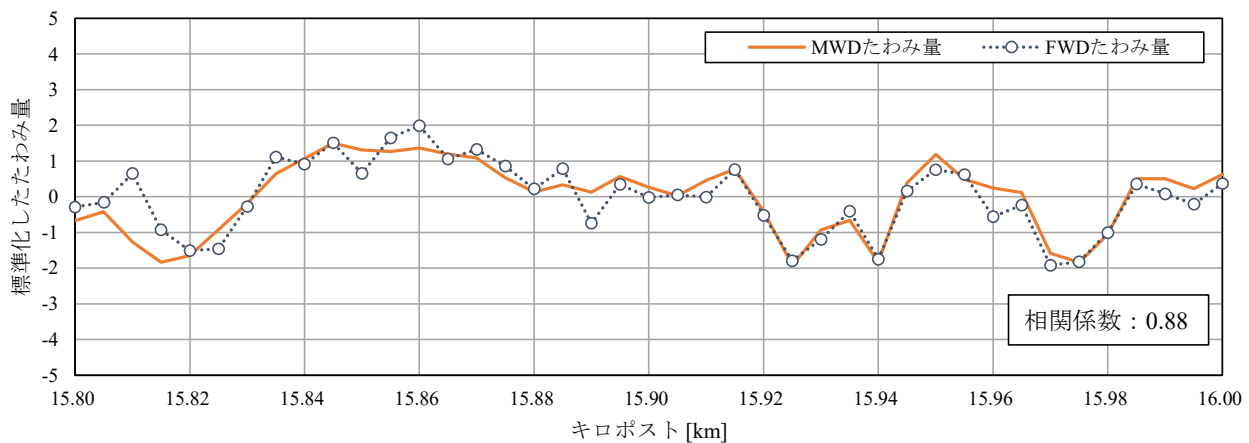


図-6 標準化した FWD たわみ量と標準化した MWD たわみ量の比較結果（上り車線：KP=15.80～16.00）

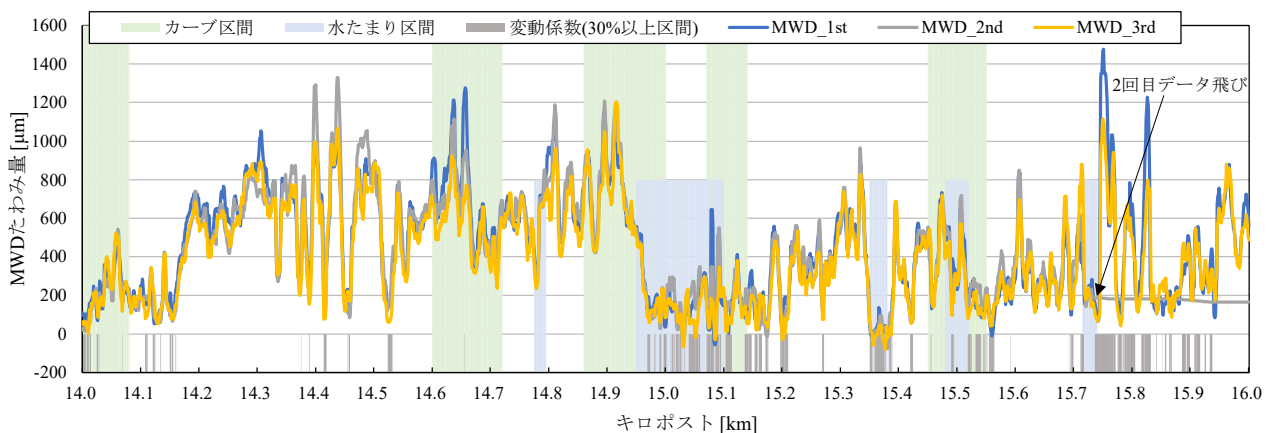


図-7 融雪期における MWD たわみ量の測定結果（下り車線：KP=14.00～16.00）

わみ量の比較結果を図-6に示す。

図-5より、本検討における測定区間内においては、FWDたわみ量とMWDたわみ量は同程度の値を示す傾向であった。また、図-6より、標準化したFWDたわみ量と標準化したMWDたわみ量を比較すると、これらの相関係数は0.88と高い相関を示し、区間内のたわみ量の傾向の一致度が高いと判断される。

以上より、MWDたわみ量の傾向はFWDたわみ量の傾向と一致し、MWDたわみ量を計測することで、舗装体の支持力低下箇所を広域的にスクリーニングすることができる可能性があると考えられる。本検討で測定した区間はアスファルト混合物層が15 cmで、MWD測定時の走行速度が30 km/hという特定の条件であるため、今後様々な舗装構成、車両の走行速度でMWDたわみ量を計測して、MWDによるたわみ量計測手法について検討を継続していく必要があると考えられる。

(3) 融雪期の路面状況におけるMWDたわみ量測定結果

次に、融雪期における舗装の路面状況とMWDたわみ量の関係について整理した。計測区間は、KP=16.00～KP=14.00の上下各2.0 km区間で、MWD測定を3回実施した。ここでは、舗装のひび割れ損傷が顕著であった下り

車線におけるMWDたわみ量の計測結果を図-7に示す。

図-7には、カーブ区間を緑色塗りつぶしで示し、路肩からの融雪水が路面に滞水し水たまりが発生していた箇所を水色塗りつぶしで示している。なお、カーブ区間および水たまり区間は、MWD測定時に撮影した路面状況の動画から目視によって判別した。また、3回計測した同一地点におけるMWDたわみ量の変動係数が30 %以上の比較的ばらつきが大きかった箇所を灰色塗りつぶしで下部に示している。

図-7より、2.0 km区間の全体にわたって3回とも同程度のMWDたわみ量が計測されており、計測2回目のKP=15.72～16.00の区間を除いて、水たまり区間での水はね等によってデータが欠損することはなかった。また、測定時の気温が約5℃の低温環境下においても、データが欠測することなく、たわみ量を測定できていた。

KP=15.72付近では舗装路面が沈下し、水たまりおよびやや大きな段差が生じており、2回目の測定では水はね等によってデータが欠測した可能性がある。

一方で、KP=15.00付近のカーブ区間や、水たまり区間付近では、変動係数が30 %以上の箇所が多く、ばらつきが比較的大きい結果であった。

ばらつきが大きくなった要因として、カーブ区間で

は正確に同じ位置を走行することが難しく、走行位置の違いによってMWDたわみ量にばらつきが生じた可能性がある。また、水たまりがある箇所ではデータが欠測する恐れがあったため、水たまり区間を避けるような走行になったこともあり、走行位置の違いによってたわみ量にばらつきが生じた可能性がある。

次に、変動係数が他の箇所と比較して小さかったKP=14.10～14.60の区間で、秋期に測定したMWDたわみ量の平均値と融雪期に測定したMWDたわみ量の平均値を比較した結果を図-8に示す。図-8には、亀甲状のひび割れが発生していた箇所を赤色塗りつぶして示している。

図-8より、ひび割れの発生していなかったKP=14.10～14.25では、秋期のMWDたわみ量と融雪期のMWDたわみ量は概ね同程度の値であり、路面もひび割れがなく健全な状態であった。一方で、KP=14.25～14.53では秋期と比較して融雪期のMWDたわみ量が増加した。

KP=14.33～14.53のひび割れ区間では、ひび割れ損傷によって舗装の支持力が低下したことでたわみ量が大きくなったと推察される。加えて、ひび割れから舗装内部に浸入した水分が凍結および融解し、ひび割れ損傷との複合的な影響によって舗装体の支持力が低下したと推測される。一方で、KP=14.25～14.33ではひび割れが発生していなくても融雪期のたわみ量が秋期よりも大きくなっており、今後ひび割れ等の損傷が発生する可能性があると考えられる。今後より詳細に路面の損傷状況および舗装内部の状況を把握し、MWDたわみ量との関係を明らかにすることで、MWDたわみ量を用いた舗装損傷箇所のスクリーニングに寄与できる可能性があると考えられる。

5. まとめ

本検討では、舗装体の支持力低下が想定される融雪期において、舗装損傷につながる箇所の抽出を目的としたMWDの測定手法を検討するための基礎的なデータ取得を行った。本検討における計測で得られた知見、および融雪期におけるMWDの測定上の留意事項や課題をまとめると以下の通りである。

- 1) 融雪期などの低温環境下での測定では、測定に先立ちMWDの車内を暖め、ドップラ振動計を測定可能な状態にする必要がある。
- 2) 本検討で実施した気温5℃程度の低温環境下では、MWDたわみ量は欠測することなく測定できる結果であった。
- 3) 本検討における計測区間内では、MWDによって舗装のたわみ量を繰り返し測定しても同程度の

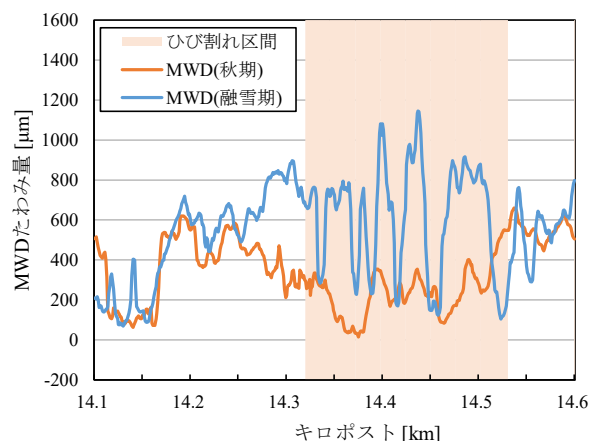


図-8 秋期と融雪期におけるMWDたわみ量の平均値の比較結果（下り車線：KP=14.10～14.60）

値が得られた。

- 4) 本計測区間内におけるMWDたわみ量の傾向はFWDたわみ量の傾向と概ね一致した。
- 5) カーブ区間などでは走行位置の違いによって、複数回測定したたわみ量にばらつきが生じやすい傾向にある。
- 6) 本検討の水たまり区間では、概ねデータが欠測することなくたわみ量を計測できたが、どの程度の水膜であれば欠測するかは今後検証する必要がある。

謝辞：本検討の現地測定にあたり、北海道開発局札幌開発建設部には現場フィールドをご提供頂いたことをここに記し、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路統計年報，2024。
- 2) (一社)日本道路協会：アスファルト舗装の詳細調査・修繕設計便覧，2023。
- 3) (国研)土木研究所，東京農業大学，アールテックコンサルタント，高速道路総合技術研究所，ガイアート，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，第549号，2021。
- 4) 紅林俊，丸山記美雄：移動式たわみ測定装置(MWD)による舗装のたわみ量計測とひび割れ率に関する検討，寒地土木研究所月報，No.864，pp.27-33，2024。
- 5) 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），Vol77，No.2，pp.179-187，2021。
- 6) 竹内康：舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価，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，第27回新道路技術会議，2015。