

コンマミリレベルの路面の動的変動を 走行しながら測る！

～次世代舗装の舗装点検・診断技術への新たな挑戦～

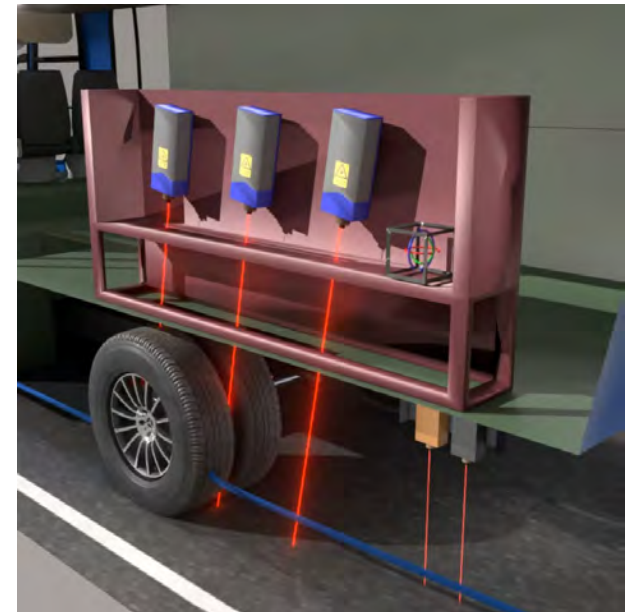


つくば中央研究所
道路技術研究グループ（舗装）
上席研究員 渡邊 一弘

0. 開発技術に関わるプログラム研究の概要

-----以降、紹介する開発技術の内容-----

1. 舗装の概要（舗装構造に着目して）
2. 移動式たわみ測定装置（MWD）の概要
3. MWDの現場実装が期待される背景
4. MWDの測定原理と実道での測定事例
5. 開発技術の現場実装に向けた取り組み



研究開発プログラム

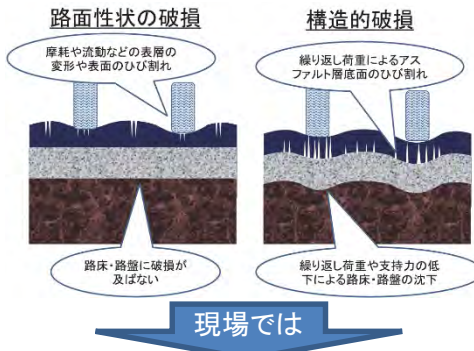
社会インフラの長寿命・信頼性向上を
目指した更新・新設に関する研究開発

- プログラムリーダー：道路技術研究G長
- 研究期間：令和4年度～令和9年度

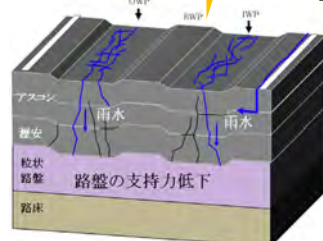
研究の背景・必要性

- 我が国の財政状況は依然として厳しいが、一方で昨今の豪雨災害などにより安全・安心な国土形成を求める声は高まっている(「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」など)。
- こうした背景から社会インフラの更新・新設はより効率的・合理的に行われなければならない。
- わが国にはすでに膨大な量の社会資本ストックが存在し、その整備や維持管理等を通じて得られた知識を活かすことで今後更新・新設する社会インフラを長寿命化することが必要である。
- そのためには過去の供用実績により判明した新たな破損・損傷メカニズムを考慮した新設・更新手法を構築するとともに、さらなる長寿命化に寄与する新材料・新工法の開発・活用が肝要である
- 一方、平成28年に発生した福岡地下鉄工事による道路陥没事故を契機に地質・地盤リスクが注目されるようになり、社会インフラの更新・新設を行うにはライフサイクルでのインフラの信頼性を向上させる対応も考慮する必要がある。
- そのためには施工直後の高耐久性を実現するだけでなく、管理や修繕のしやすさといった全体を俯瞰した設計思想を実現することが肝要である。

◆既存の設計法の前提と現場での破損の乖離



現場では 浸透した水による舗装の破損の実態



「新設・更新段階から対処することでより長寿命な社会資本を整備」

- ・舗装
⇒浸透する水への対処
- ・補強土壁
⇒新たな限界状態
- ・下水道
⇒有機酸等
- ・鋼桁橋
⇒3次元挙動

◆地質・地盤リスク(当該事業の目的に対する地質・地盤に関わる不確実性の影響) ⇒土木事業における事故やトラブルに発展

福岡における道路陥没事故の事例



⇒調査不足であった、
リスク評価をしていなかった

地質・地盤リスクへの対応が喫緊の課題

- ◆地質・地盤リスクに適切に対処することで
 - ⇒事業の進捗改善(急な設計変更や工法の変更などの抑制)
 - ・事故の防止(調査不足の解消やリスク情報の共有)
 - ・事業費増加に対する説明責任の向上(不確実性を考慮した事業費の幅をあらかじめ設定して、想定範囲内であることが説明可能)

プログラム目標と達成目標

プログラム目標	達成目標
より長寿命な構造物への更新・新設および施工から管理までのプロセスを通してインフラの信頼性を向上する技術の開発	(1)新たに解明した破損・損傷メカニズムに対応した構造物の更新・新設技術の開発
	(2)破損・損傷の実態を考慮した、より長寿命な構造物への更新・新設を実現する新材料・新工法の開発
	(3)地質・地盤リスクに適切に対応し、更新・新設から管理までのプロセスを通してインフラの信頼性を向上する技術の開発

達成目標(1)新たに解明した破損・損傷メカニズムに対応した構造物の更新・新設技術の開発

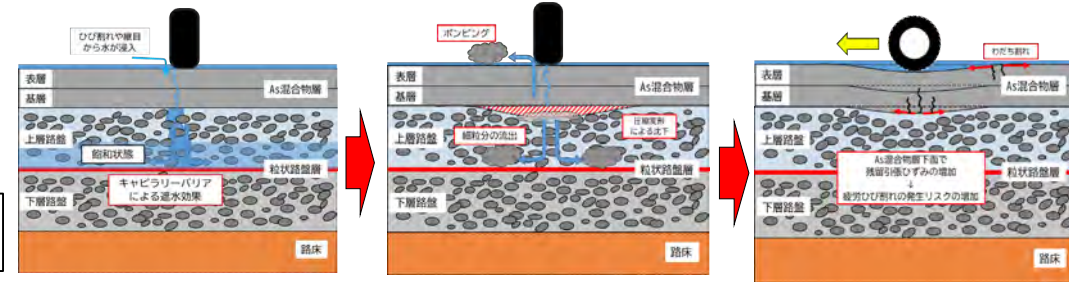
舗装の長寿命設計・更新技術

- 舗装の劣化メカニズムに対応した長寿命設計・更新技術の開発・提案を目指す。

○舗装の早期劣化メカニズムの解明

- 実大試験の結果より**これまでに想定されていなかった路盤の劣化現象を把握**。
舗装構造の長寿命化に資する、**路盤設計の新たな考え方の可能性**を見出した。

○劣化メカニズムに対応した技術および設計手法の検証



実構造物(舗装走行実験場)で検証した路盤の劣化現象



比較工区で発生した損傷(舗装走行実験場)



劣化にかかわる詳細データの収集例(レーダー探査)

止水技術の開発

施工継目(輪荷重位置)での試験施工



施工直後



13ヶ月後

水散布直後

止水性の検証

- 散水による観察 →
- 現場透水試験
- 現場透気試験 等



水散布17分経過

早期劣化発生の主要因
『舗装内部への浸水』

- 止水材の基準試験
- 性能項目と試験法
 - 材料試験
 - 現道評価との対比へ



長寿命技術・設計手法の検証

- SIP等と連携し、修繕設計の合理化に資する詳細データの収集。力学モデルに基づく設計手法を検討。
- 長寿命化に資する舗装構造を検討。現時点で比較工区より高耐久であることを確認。

R6年度
成果

- 舗装の内部浸水による早期劣化を再現し、実道では検証できなかった劣化メカニズムを把握し、**これまで想定されていなかった路盤の劣化現象を把握**した。また、施工継目やひび割れ部への**止水材料の性能と耐久性を実道試験施工で検証**した。

【研究開発成果の普及】

デジタル技術で効率的な舗装マネジメントに貢献

注目ポイント 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）に参画し、移動式たわみ測定装置（MWD）等を用いた舗装点検技術の社会実装に向けた活動を実施。MWDが関東地整管内の舗装調査業務の特記仕様書に反映され、活用される等、現場実装が進み、道路管理の省力化、的確な維持管理が期待される。

研究概要 土木研究所が中心となって開発したMWDの社会実装に向け、MWDの精度向上およびMWDを用いた舗装マネジメントシステムの構築を検討している。これにより、これまで困難であった舗装構造の健全性評価をネットワークレベルで実施することが可能となり、効率的かつ効果的な舗装マネジメントが可能となる。

令和6年度の成果 ・ MWDを用いた舗装点検技術の社会実装に向けた活動の成果として、本技術が関東地整管内の舗装調査業務に活用された。



移動式たわみ測定装置（MWD）

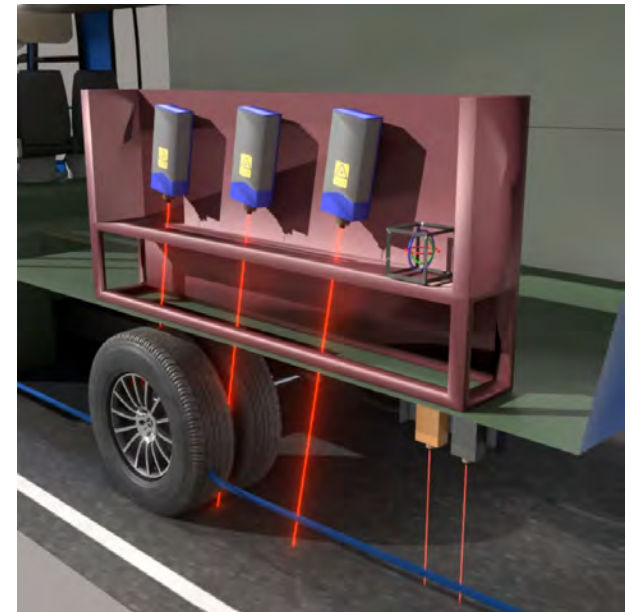


関東地整管内の直轄国道において実施した舗装点検の状況

0. 開発技術に関わるプログラム研究の概要

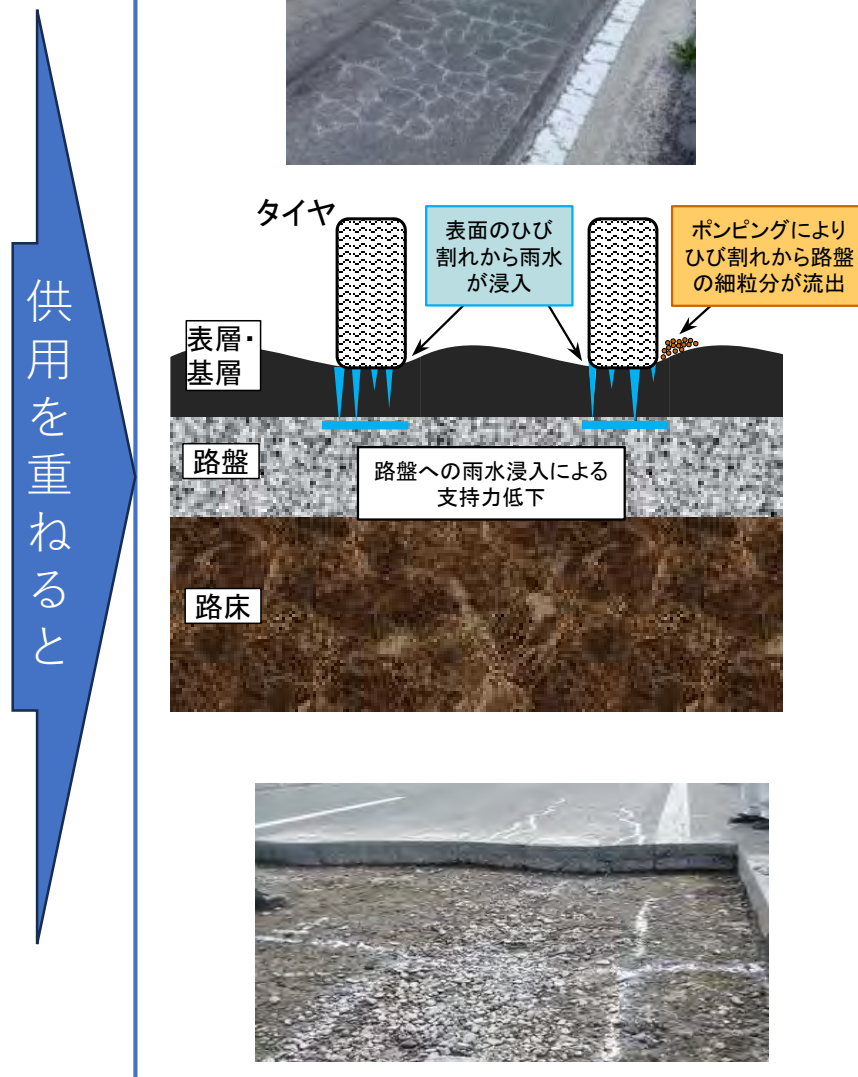
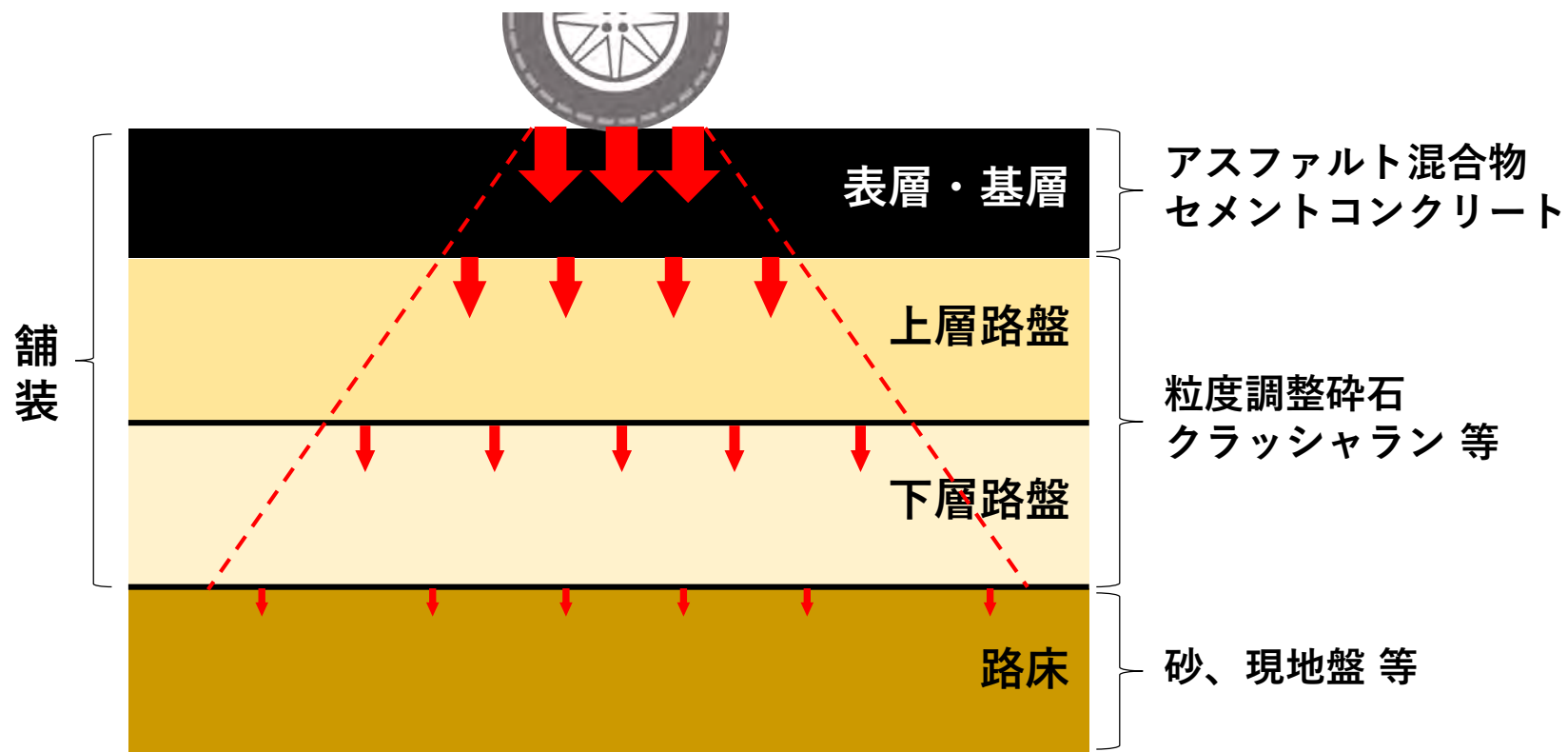
-----以降、紹介する開発技術の内容-----

1. 舗装の概要（舗装構造に着目して）
2. 移動式たわみ測定装置（MWD）の概要
3. MWDの現場実装が期待される背景
4. MWDの測定原理と実道での測定事例
5. 開発技術の現場実装に向けた取り組み

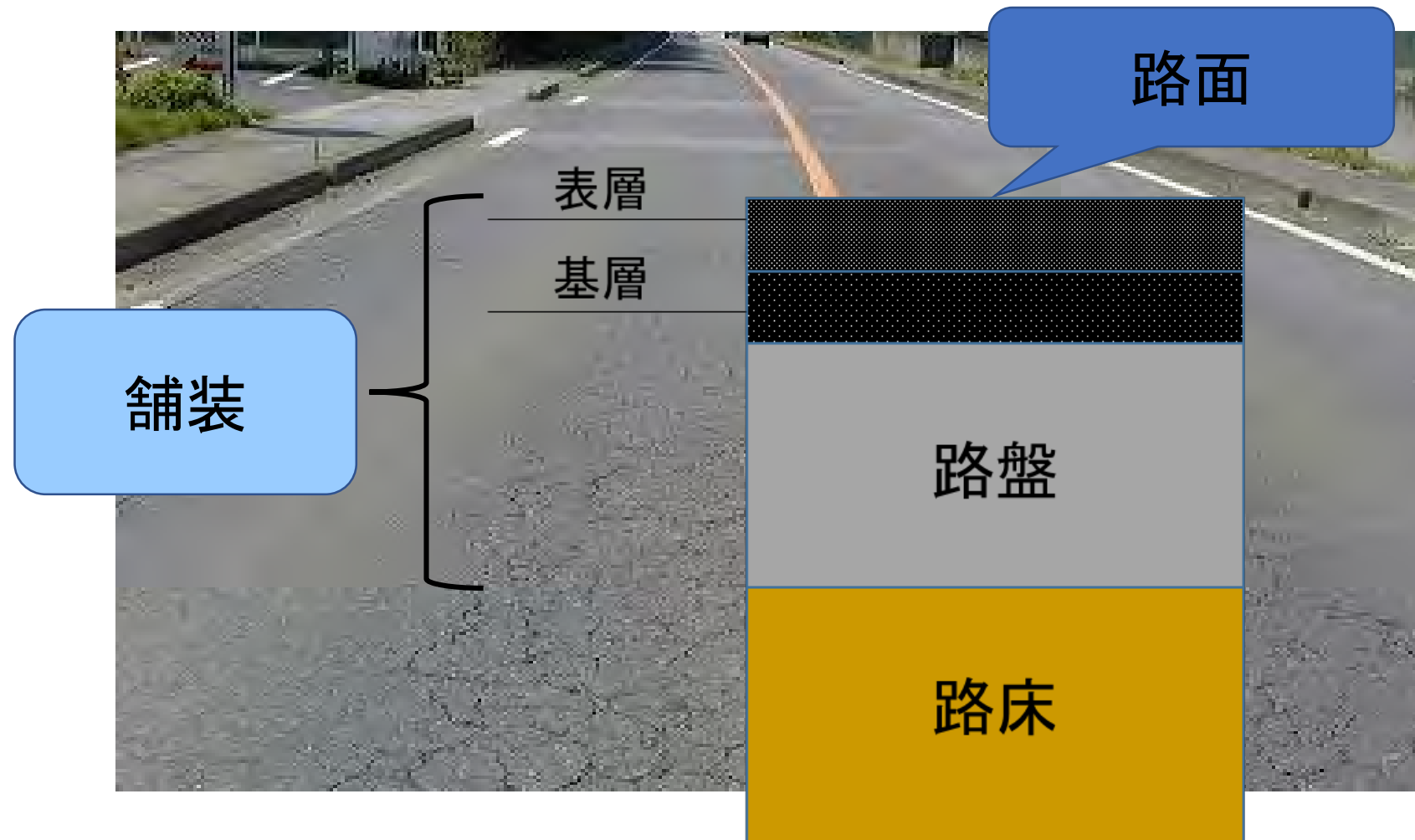


1. 舗装の概要

○舗装構造



「舗装」を「**構造物**」として考えなければならない！



○舗装点検要領（H28）

舗装点検要領

平成28年10月
国土交通省 道路局

舗装点検要領のポイント

- 道路特性に応じた点検の実施
⇒全道路（舗装）一律でなく、道路特性に応じた点検
- 舗装構造に着目した点検の実施
⇒舗装路面だけでなく路盤以下の舗装構造にも着目した点検
- 点検・診断・措置・記録を規定
⇒点検→診断→措置→記録のメンテナンスサイクルの構築

○舗装点検要領（H28）

直轄国道の管理基準

区分	ひび割れ率	わだち掘れ量	IRI
I	20%未満 程度	20mm未満 程度	3mm/m未満 程度
II	20%以上 程度	20mm以上 程度	3mm/m以上 程度
III	40%以上 程度	40mm以上 程度	8mm以上 程度

区分		状態
I	健全	損傷レベル小：管理基準に照らし、劣化の程度が小さく、舗装表面が健全な状態である。
II	表層機能保持段階	損傷レベル中：管理基準に照らし、劣化の程度が中程度である。
III	修繕段階	損傷レベル大：管理基準に照らし、それを超過している又は早期の超過が予見される状態
	(III - 1 : 表層等修繕)	表層の供用年数が <u>使用目標年数を超える場合</u> （路盤以下の層が健全であると想定される場合）
	(III - 2 : 路盤打換等)	表層の供用年数が <u>使用目標年数未満である場合</u> （路盤以下の層が損傷していると想定される場合）

- ・路面の状況のみでなく、路盤以下の舗装構造にも着目した点検の必要性が明記
- ・舗装構造の健全性を効率的に把握する手法がない
- ・使用目標年数を用いた「みなし規定」で運用中

⇒舗装構造を直接調査して診断区分の判定することが望ましい。

1. 舗装の概要

○舗装構造の健全性を把握するには

開削調査



舗装を掘削して、劣化状況を調査する手法

【破壊調査】

コア調査



コアを採取して、劣化状況を調査する手法

【破壊調査】

たわみ量調査



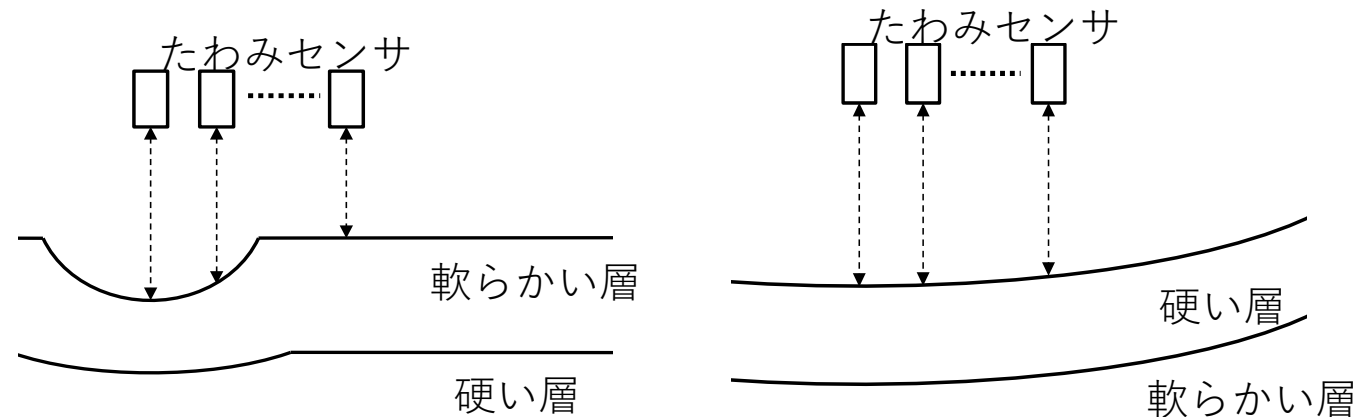
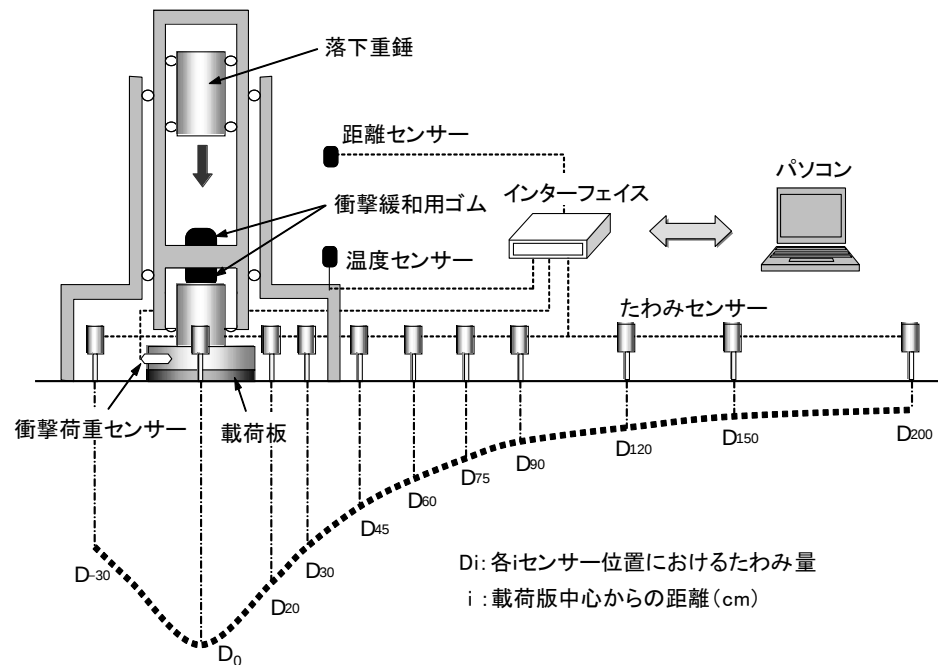
たわみ量を測定して、劣化状態を調査する手法

【非破壊調査】

○重錘落下式たわみ測定装置

Falling Weight Deflectometer (FWD)

- ・ 重錘が路面に落下する際に生じる舗装のたわみ量を測定
- ・ 得られたたわみ形状から、舗装内部の損傷度合いを推定
- ・ 舗装の破損原因調査や修繕工法の選定等の詳細調査に適

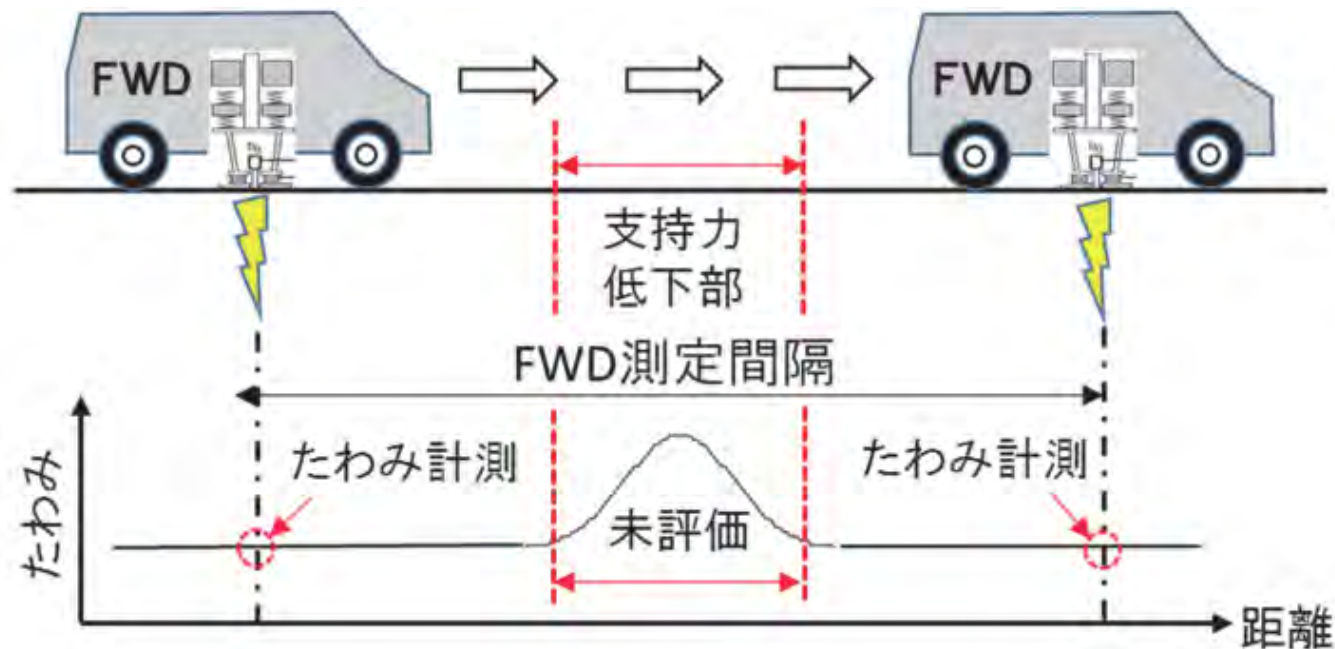


舗装の内部の状態により路面のたわみ形状が異なる
⇒解析により舗装各層の健全性を推定

しかし、要交通規制、離散的・・・

○重錘落下式たわみ測定装置（FWD）

- ・ 停車して測定する必要があるため交通規制が必須
 - ・ 点での測定であり、測定点間の情報が得られない
 - ・ 1点あたりの測定に2分程度必要であり時間と費用が必要
- ⇒ネットワークレベルでの調査での活用は現実的ではない



○海外の移動式たわみ測定装置

- ・ 各国で様々なタイプの移動式たわみ測定装置が開発
 - ・ けん引式の大型車等を採用した車両
- ⇒ 我が国の道路において適用できる路線が限定



RWD¹⁾ (Rolling Wheel Deflectometer, 米国)



TSD²⁾ (Traffic Speed Deflectometer, デンマーク)

1) Mostafa E., Ahmed M., Kevin G. Zhongjie Z. and Said I. : Evaluation of Continuous Deflection Testing Using the Rolling Wheel Deflectometer in Louisiana, Journal of Transportation Engineering, ASCE, pp.414-422, 2012.

2) <https://greenwood.dk/road/tsd/>

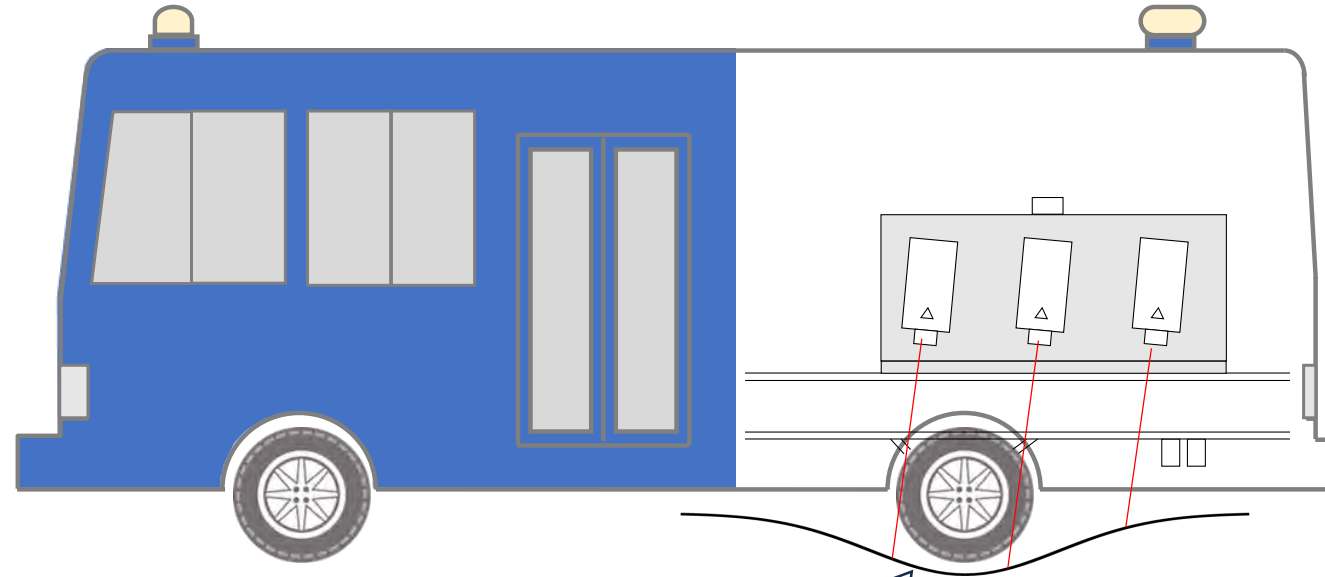
○移動式たわみ測定装置

Moving Wheel Deflectometer (MWD)

- ・ 中型車両（8 t）に各種測定機器を搭載
- ・ 自らの輪荷重によって生じる舗装のたわみ量を走行しながら測定



MWDの外観
※中型車（8 t）を採用

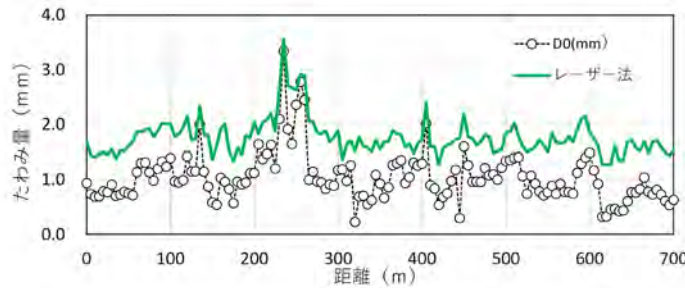
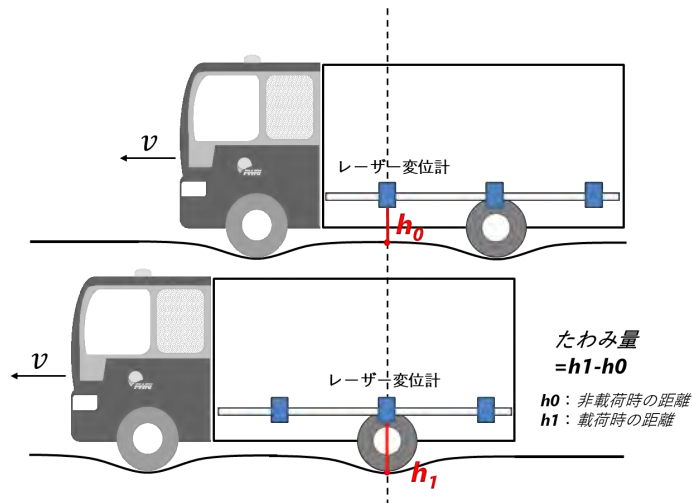


輪荷重で発生する舗装のたわみを測定

OMWDのこれまでの開発

2005～

レーザ距離計による方法

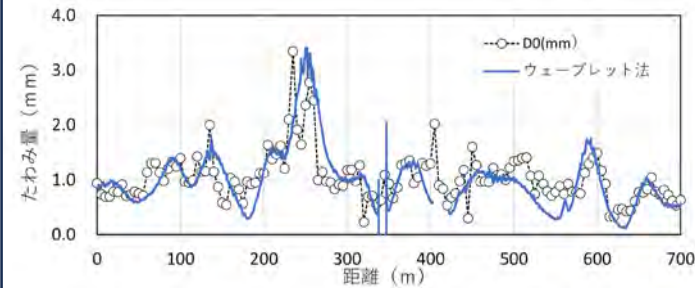
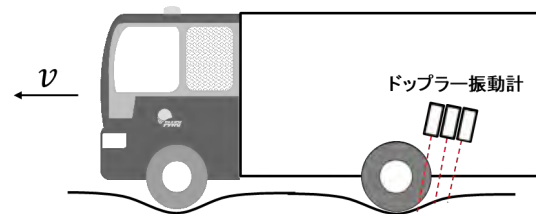


・路面の形状（凸凹、わだち掘れ等）が影響
⇒ノイズ除去に限界

2012～

ドップラ振動計による方法

時系列フィルタ処理によるノイズ除去

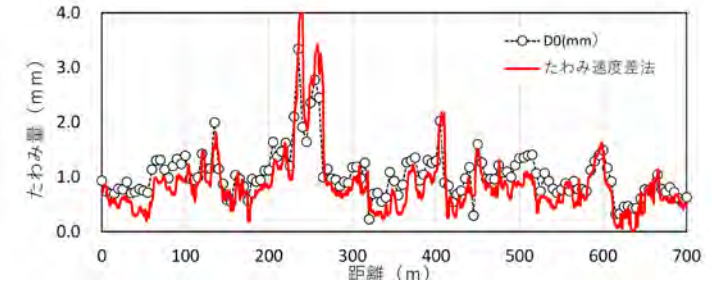
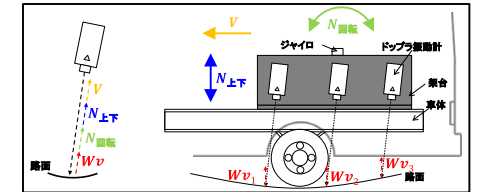
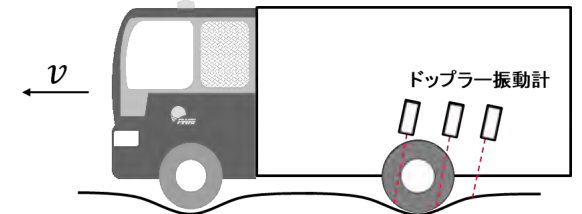


・時系列解析のため一定速度での走行が必要
・たわみ速度成分まで除去 or ノイズが残る
⇒ノイズ除去に限界

2021～

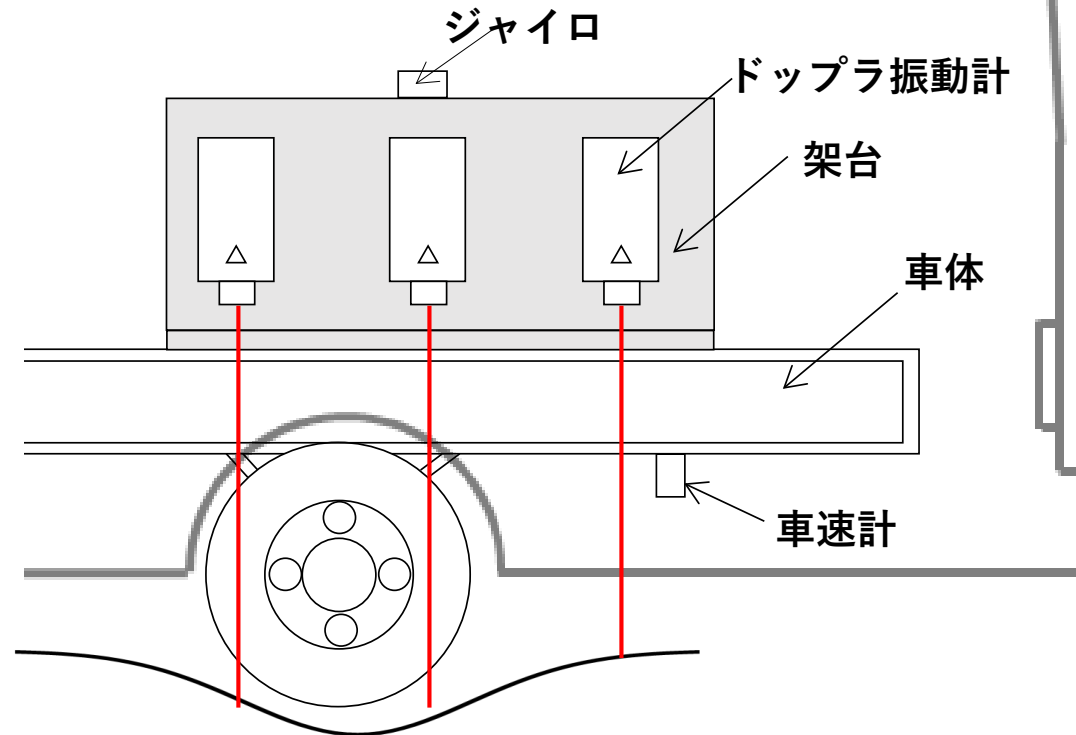
ドップラ振動計による方法

測定値間の差でノイズを除去



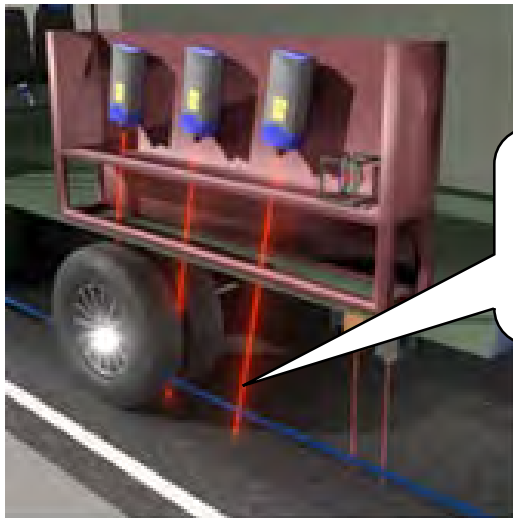
・ノイズが良好に除去
⇒さらなる精度向上の可能性

OMWDの主な搭載機器

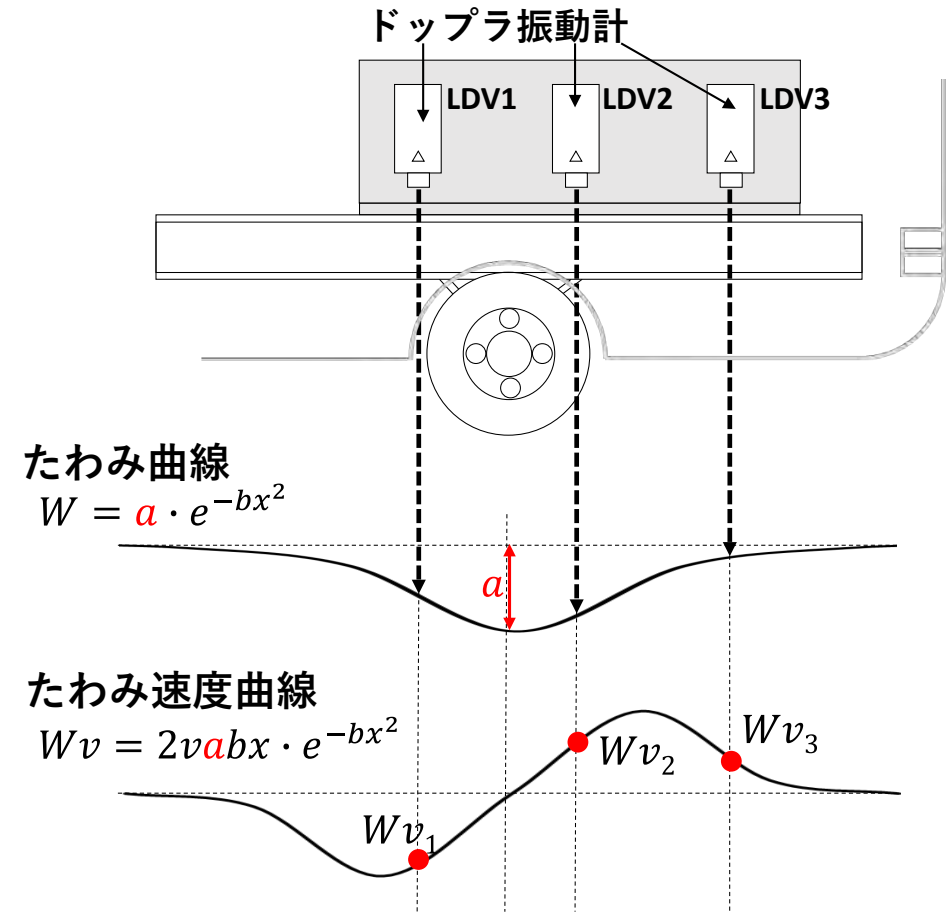


〇たわみ量算定の原理

「たわみ速度」を測定するドップラ振動計を搭載（3台）



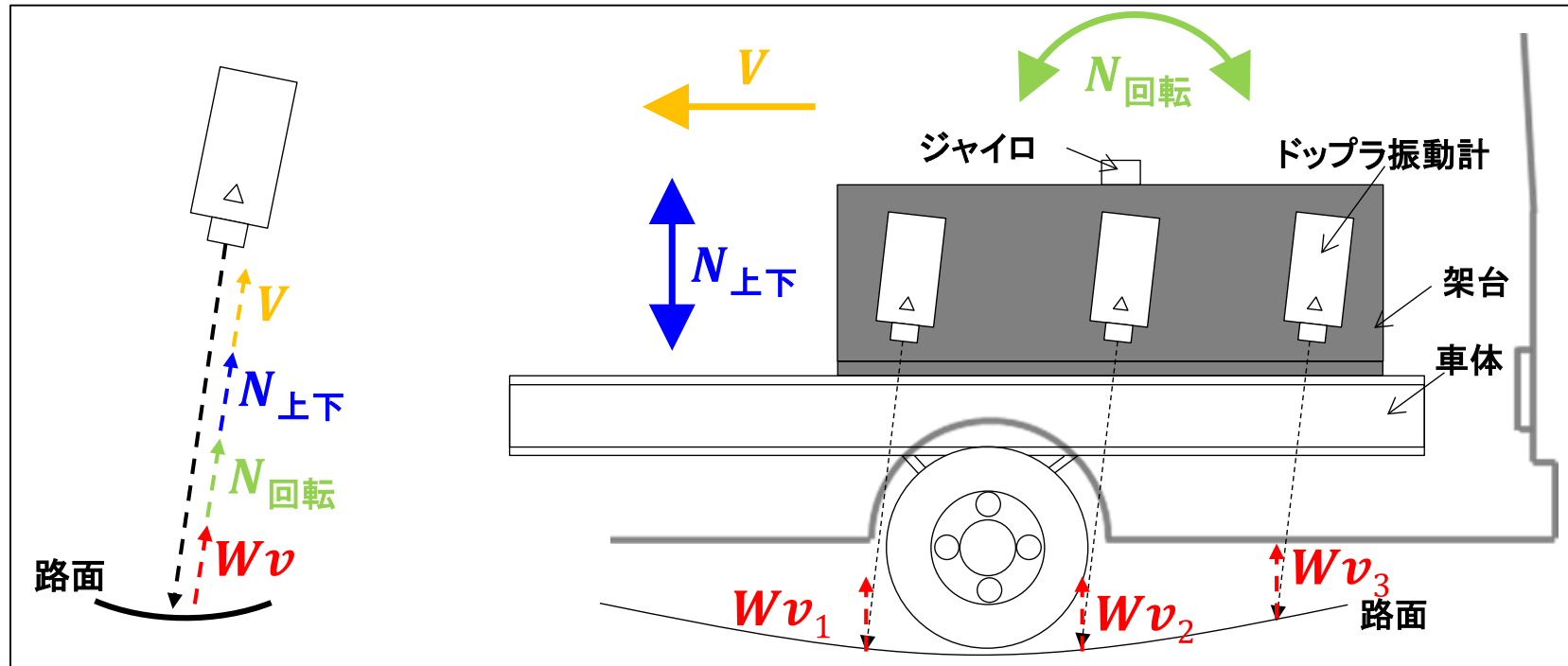
ドップラ振動計にて、左後輪の輪荷重で発生する「たわみ速度」を測定



- ①ドップラ振動計にて路面がたわむ際に発生する「たわみ速度」を測定
- ②路面の「たわみ曲線」をガウス関数であると仮定
- ③たわみ曲線（ガウス関数）に対応した「たわみ速度曲線」を算出
- ④ドップラ振動計で得られた「たわみ速度」をもとに「たわみ速度曲線」で近似させ「たわみ曲線（たわみ量）」を算出

○ドップラ振動計（LDV）に含まれるノイズ

$$\text{LDV測定値} = \text{たわみ速度 (} Wv \text{)} + \text{上下ノイズ (} N_{\text{上下}} \text{)} + \text{回転ノイズ (} N_{\text{回転}} \text{)} + \text{車速ノイズ (} V \text{)}$$



【ノイズ除去手法（通称：たわみ速度差法）】

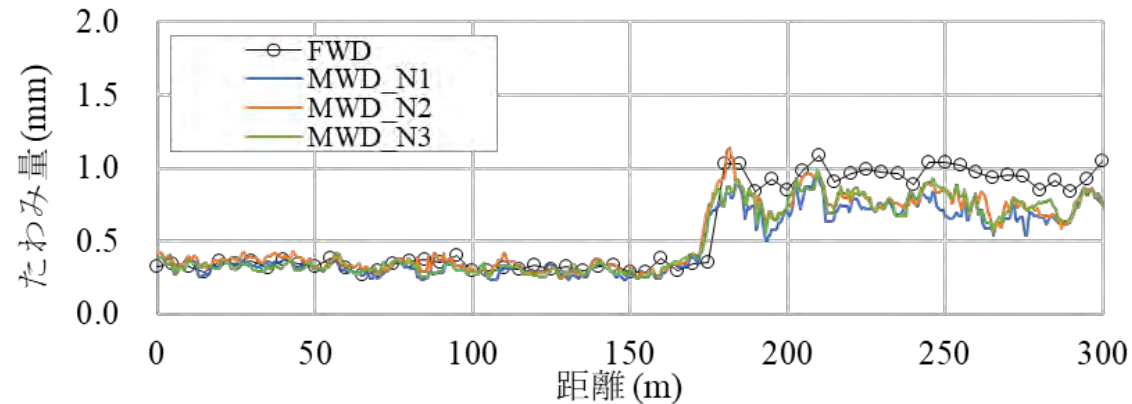
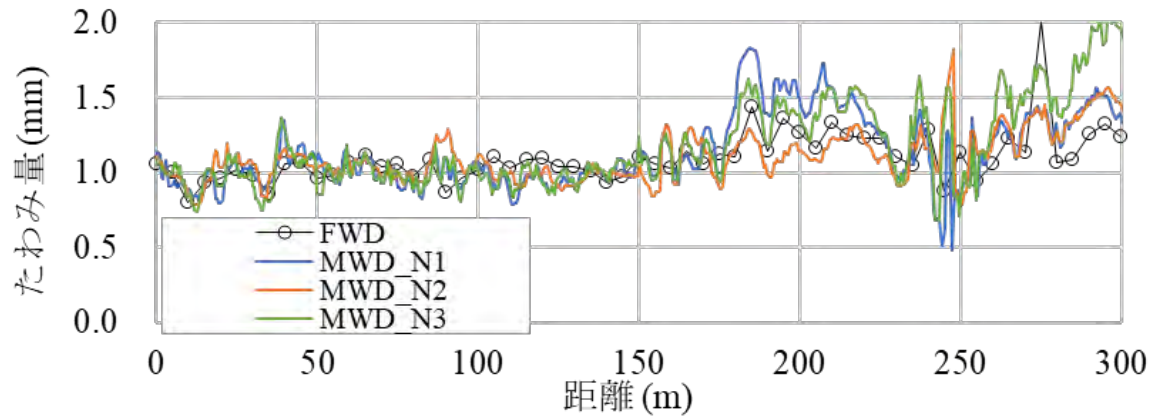
- ・ $N_{\text{上下}}$ の除去：ドップラ振動計の測定値の差をとることで除去
- ・ $N_{\text{回転}}$ の除去：搭載したジャイロの測定値（角速度）を用いて除去
- ・ V の除去：搭載した車速計の測定値を用いて除去



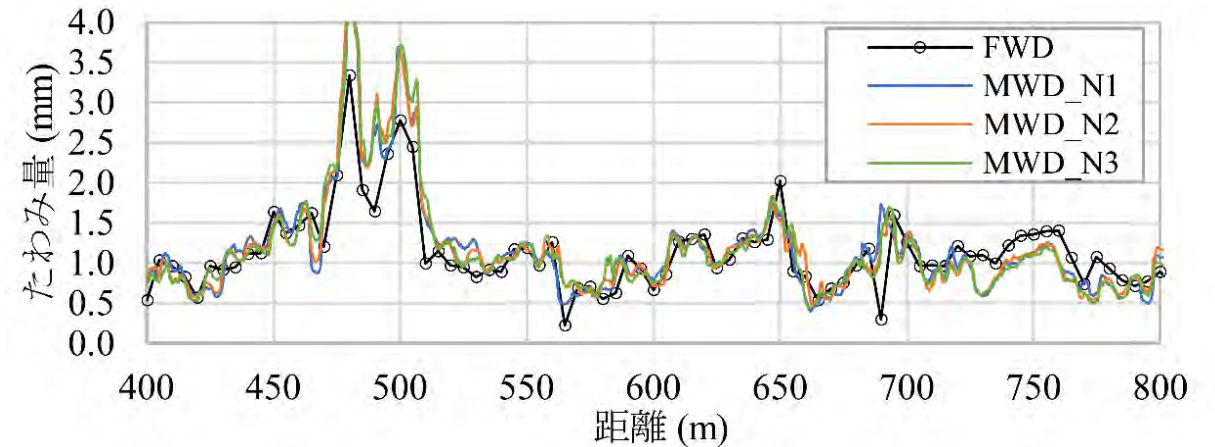
測定精度が飛躍的に向上

○実道での測定事例（FWDたわみ量との比較）

【舗装厚の薄い舗装】



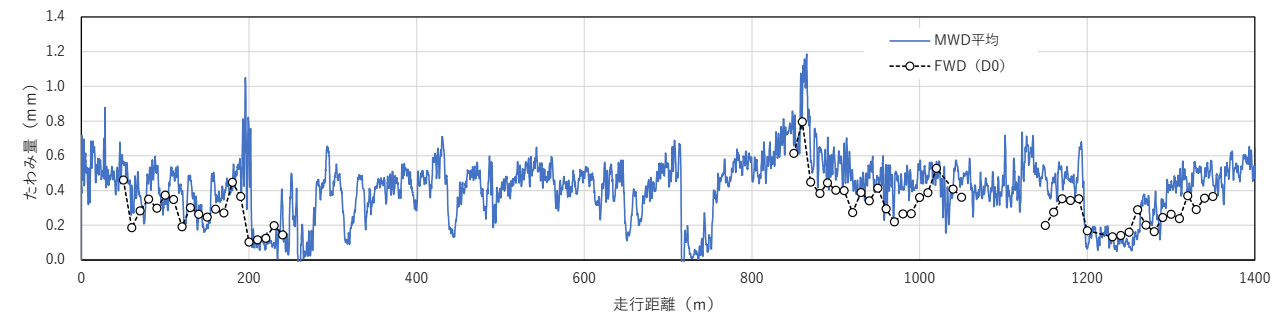
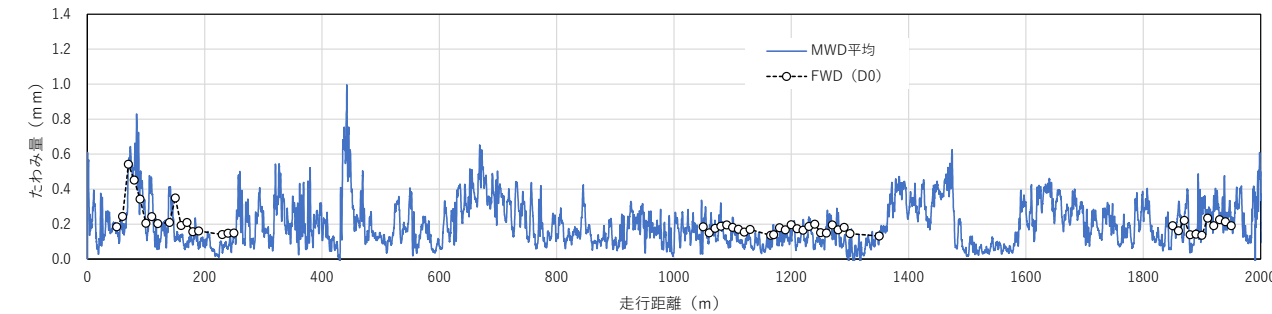
茨城県内市道



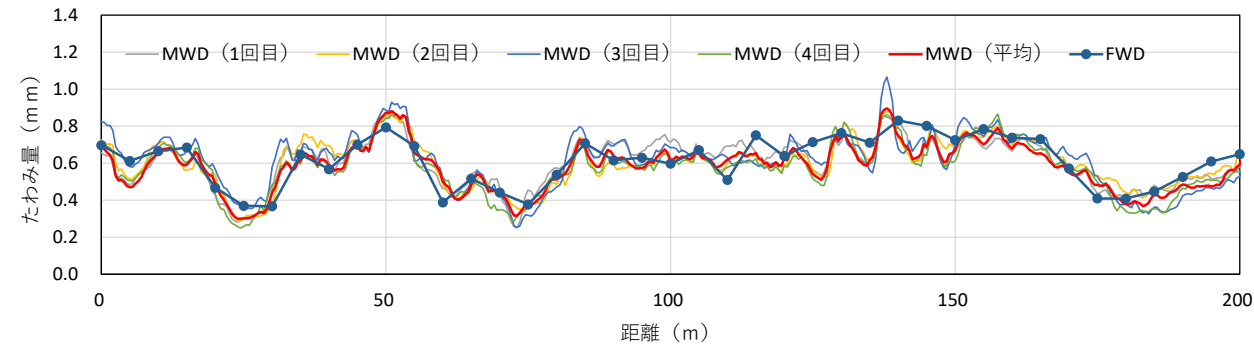
土木研究所構内道路

- ・ 比較対象のFWDたわみ量と同様の傾向を示すことを確認

【舗装厚の厚い舗装】



高速自動車国道



直轄国道

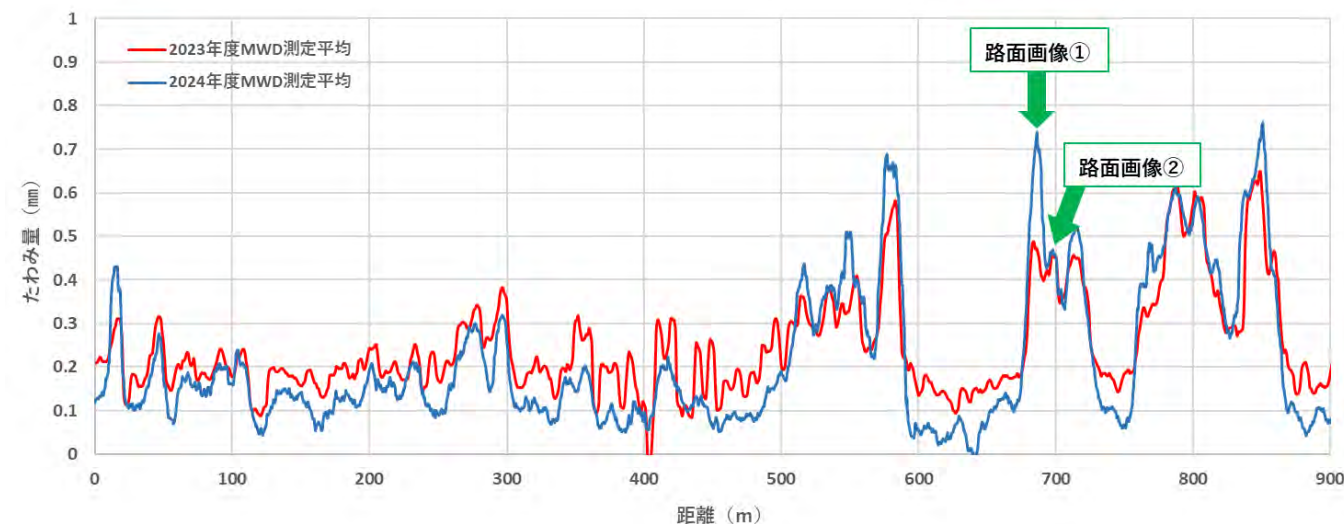
- ・ 比較対象のFWDたわみ量と同様の傾向を示すことを確認
- ・ 舗装厚が厚くてもたわみ量算定が可能であることを確認

⇒ MWDにより舗装構造の健全性を判断するスクリーニング機能を十分に発揮できることを示唆

○実道での測定事例（追跡調査：2 時期での測定結果）

【直轄国道の事例】

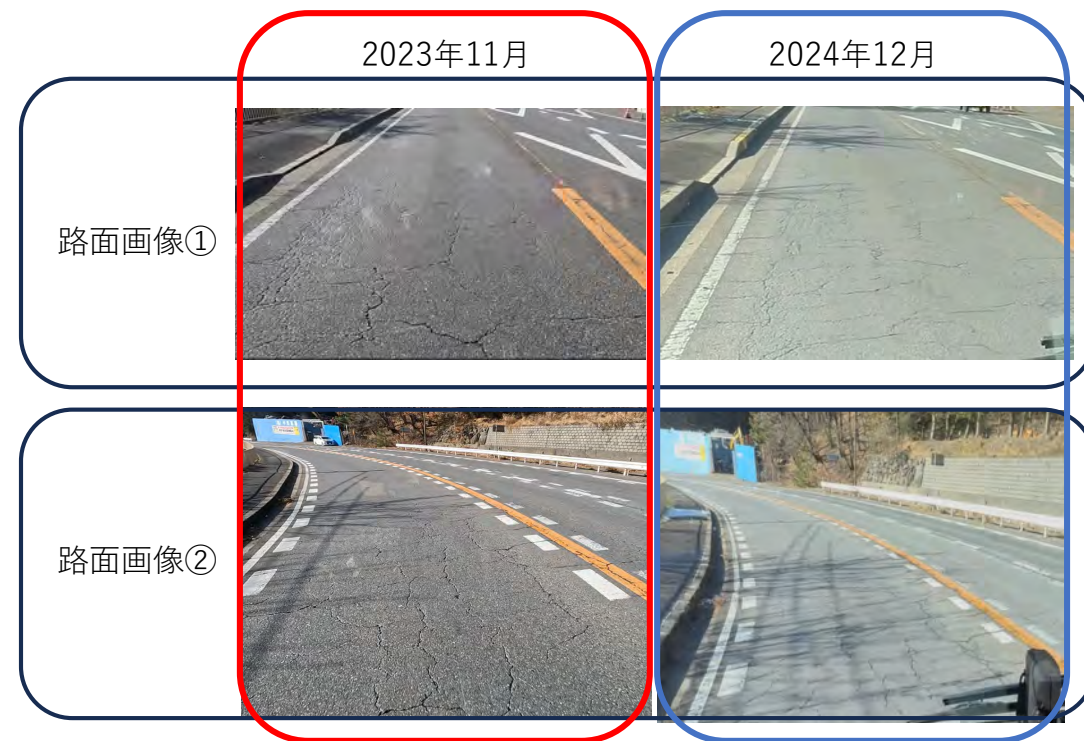
調査時期	2023年11月	2024年12月
測定時の気温	7.3℃	1.1℃
1時間前の気温	6.1℃	-0.7℃



- ・ 全体的に2024年度のたわみ量が小さい傾向
※気温が低いため
 - ・ 部分的に2024年度の方が大きくなる個所あり
※路面画像②のような個所
- ⇒舗装の損傷により劣化速が増した可能性



MWDが舗装劣化のメカニズムの解明に大いに役立つ可能性を示唆



MWDの測定原理と実道での測定事例②

2023年11月

2024年12月

路面画像①

たわみ量
増加



路面画像②

たわみ量
不変



○第9回道路技術懇談会（令和5年5月30日）

国土交通省が「xRoadを活用した次世代舗装マネジメント」と題して、今後の舗装マネジメントの方針を公表

第9回道路技術懇談会資料から抜粋

資料3

xROADを活用した 次世代の舗装マネジメント

国土交通省 道路局 国道・技術課
道路メンテナンス企画室

○第9回道路技術懇談会（令和5年5月30日）

今後、AI・ICT等を活用した効率的な点検へ

第9回道路技術懇談会資料から抜粋

- 現在、舗装点検の多くは目視で行われているが、今後はAI・ICTを活用した機器により行う方向へ転換。
- 令和4年度に、ひび割れ率、わだち掘れ量、IRIを計測する機器の性能評価を行い、コストを含めカタログ化して公表。
- 令和5年度より、国の舗装点検では、カタログの中で一定水準以上の技術を使用することを原則化。
※点検データは、「見える化アプリ」へ容易に取り込めるように設定する予定
- 今後も定期的に機器の性能評価を行い、良いものは国が率先して使用していくことで、民間の技術開発を促していく。
- また、路盤が傷んでいるかどうかの判定については、本来、FWD調査を実施すべきだが、同調査は交通規制等を伴うため、現実的な方法として、これまで使用目標年数による「みなし判定」を主たる方法としてきたところ。
- しかしながら、「みなし判定」には誤差もあることから、今後、走行しながら調査が可能な機器（移動式たわみ測定装置（MWD））を開発していく予定。

■カタログ掲載技術の例

【技術ごとに、検出可能項目、機器タイプ、実働試験結果、経済性（コスト）、測定条件、実績等を掲載】

AI・ICTを活用した舗装点検技術の例

■MWD(移動式たわみ測定装置)

【土木研究所所有】

ドップラ振動計により、左後輪の輪荷重で発生する「たわみ速度」を測定

【参考】舗装マネジメント等に関する従来と今後の主な違い

第9回道路技術懇談会資料から抜粋

	従 来	今 後
点検・診断	● 表層の状態は目視で点検。 ● 表層がIII判定のものについて、使用目標年数に比して表層が早期劣化する箇所は路盤・路床が悪いとみなしてIII-2判定とする簡易な方法を採用。	● 表層の状態について、AI・ICTを活用した点検技術を使用して効率化。 ● 地中の路盤・路床の状態を、路面から簡易に調査できる移動式たわみ測定装置（MWD）を開発し、正確性を高める。
マネジメント	● III判定をターゲットにして修繕を行ってきているが、予防保全段階には至っていない。 ● データに基づく、劣化要因等の分析が必ずしも十分ではなかった。	● xROADデータの見える化アプリを開発し、まずは直轄において、修繕が必要な箇所に応じて対策が行われていることのチェックや修繕の年次計画を立てて実施。これにより早期の予防保全段階への移行を目指す。 ● また、xROADのデータ分析を通じて、舗装の劣化要因等の分析を進め、適宜、マネジメントに反映していくサイクルを構築。
修繕設計	● 十分な検討と設計が行われていない。	● 修繕設計段階での検討を充実させるため、まずは直轄から、段階的にコンサルへ発注を増やしていく。（コンサルの育成） ● 調査や設計は、「アスファルト舗装の詳細調査・修繕設計便覧」等に沿って実施。 ● なお、定期点検でIII判定とされた箇所について、当面、直轄においては、土地の成り立ちが軟弱地盤等であり、かつ過去の修繕間隔が短い（使用目標年数の半分以上で繰り返し修繕）箇所についても、路床の状態を確認し、路床改良などそれに応じた措置を講ずる。 ● このほか、新技術・新材料の採用、Co舗装・As舗装の選択などの検討を行い、ライフサイクルコストを最小化するような舗装設計を実施。

⇒移動式たわみ測定装置（MWD）を活用する旨の内容が明記

○MWDの試験法整備

- ・どの車両でも同じ条件で測定できるように試験法の整備が必要
⇒土木研究所の研究課題で検討中（R6～R8）

○MWDの精度向上とMWDを用いた舗装マネジメント手法の提案

- ・MWDのさらなる精度向上が必要
- ・MWDを用いた適切な舗装マネジメント手法の確立が必要
⇒戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）にて検討中（R5～R9）

S I P : <https://www.pwri.go.jp/jpn/research/sip/index.html>

【スマートインフラマネジメントシステムの構築 サブ課題B B-2】

「移動式たわみ測定装置（MWD）を用いた舗装内部の健全度評価技術の開発」

研究代表者：東京農業大学 竹内 康 教授

連携者：土木研究所舗装チーム、道路会社、材料メーカー

【MWDの概説】

- 綾部孝之、藪雅行：舗装構造の健全性を把握するための調査手法について、道路建設、No.797、2023.3
- 綾部孝之、根津孝文、藪雅行：移動式たわみ測定装置（MWD）に関する各種検討、舗装、Vol.58、2023.9
- 綾部孝之、根津孝文、藪雅行、渡邊一弘：次世代舗装マネジメントに向けた舗装の点検・診断技術の開発、土木技術資料、66-9、2024.9

【MWDの解析手法】

- 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レポート、No.24-9、第27回新道路技術会議、2015
- 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
- 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】

【SIP、土研研究課題成果】

- 竹内康、藪雅行、前島拓：次世代舗装マネジメントの実現に向けて、道路建設、No.805、2024.7
- 竹内康、山本尚毅、川名太、藪雅行、渡邊一弘：FWDたわみ特性によるアスファルト舗装の粒状路盤の圧縮ひずみ予測法、インフラメンテナンス実践研究論文集、Vol.3、pp40-47、2024
- 綾部孝之、竹内康、根津隆文、藪雅行：移動式たわみ測定装置（MWD）を用いた舗装各層における健全性評価の可能性について、令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会、V-225、2024.9
- 根津隆文、綾部孝之、渡邊一弘：移動式たわみ測定装置（MWD）を用いた実道での測定（2時期測定の事例）、第16回北陸道路舗装会議、2025.6