

株式会社 NIPPO 総合技術部 白井 悠
株式会社 NIPPO 総合技術部 井原 務
株式会社 NIPPO 総合技術部 村上 浩

1. はじめに

2012年の笹子トンネル事故以来、我が国の維持管理に対する重要性が見直され、維持管理を効率的に行うための技術（材料、工法、モニタリング等）が数多く開発されている。舗装分野においても、舗装の維持修繕ガイドブック 2013 において、我が国の舗装管理のあるべき姿は、「道路利用者および納税者にとってわかりやすい透明性のある管理の実現、および最小コストで最適な効果を調達する効率的な管理の実現」¹⁾との理想を示されたことから、維持管理に関する重要性がさらに高まっている。

維持管理のあるべき姿の中で、前者の「道路利用者および納税者にとってわかりやすい透明性のある管理の実現」¹⁾については、道路利用者のニーズに合致した理解しやすい指標の設定が必要であると考え。一般的な道路利用者は、車両走行時における乗り心地の満足度が重要であることから、当該指標を直接評価・数値化することが最良である。ここで、「路面の状態」を評価する指標の中で乗り心地に関連する指標は平坦性、IRI あるいは段差量といった路面性状値である。しかし、これらの路面性状値では指標が平均化されることにより局所的な損傷が表面化しない問題、搭乗者の体感と不一致となる問題があるとの報告がある²⁾³⁾。ここで「路面の状態」と「乗り心地」の関係をイメージしたものを図-1 に示す。

これより、「路面の状態」と「乗り心地」との間には「車両/速度」という媒体が介在していることが、平坦性、

IRI、段差量では十分に「乗り心地」を評価できない点であると考え。

一方、図-1 にある、「バネ上振動加速度」は「乗り心地」を評価でき非常に有用であるが、「路面の状態」の推定は、「車両/速度」の影響をうけることから、困難であるという課題がある。このことから、「バネ上振動加速度」と「路面の状態」を関係付けることが、道路利用者のニーズに合致した指標設定のための第一歩であると考えた。

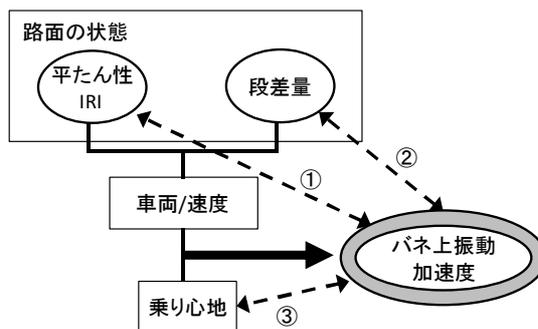


図-1 路面の状態と乗り心地との関係

次に、後者の「最小コストで最適な効果を調達する効率的な管理の実現」¹⁾については、舗装のマネジメントシステムを構築し、計画から評価に至る一貫したマネジメントを実施するといったメンテナンスサイクルを構築・実行することが重要であると考え。この中で、特に、調査・点検は、インフラの劣化予測を行う上で不可欠であるが、実際にはこれらの継続的实施とこれに伴う

コスト負担が課題となっている。

以上のような背景のもと、安価にかつ迅速に「バネ上振動加速度」を調査できるツールとして、筆者らは、スマートフォン（以下スマホ）を用いた装置を開発した。本測定装置の大きな特長は2つある。一つは、開発したスマホ用アプリ（アンドロイド版）をスマホにインストールするだけで、容易に導入できる点である。

もう一つは、導入コストが安い点である。本測定装置をうまく活用することで、調査・点検業務全体のコストダウンにつながると期待できる。

本論文では、まず、スマホを用いた本測定装置の紹介を行い、次に、図-1に示すように①加速度とIRIの関係、②加速度と段差量の関係、および実路における管理事例について述べる。最後に、③路面の状態→加速度→乗り心地の関係について述べる。

2. スマートフォンを用いた本測定装置

2.1 装置の概要

写真-1にスマホを用いた本測定装置を示す。



写真-1 本測定装置

本測定装置の測定方法は、路面の凹凸等の測定方法としては、表-1に示すクラス3（レスポンス型）に相当する。

表-1 本測定装置のクラス

クラス	路面の凹凸等の測定方法	IRIの算出方法
1	水準測量	間隔250mm以下の水準測量で縦断プロファイルを測定し、QCシミュレーションによりIRIを算出する。
2	任意の縦断プロファイル測定装置	任意の縦断プロファイル測定装置で縦断プロファイルを測定し、QCシミュレーションによりIRIを算出する。
3	RTRRMS(レスポンス型道路ラフネス測定システム)	RTRRMS(レスポンス型道路ラフネス測定システム)で任意尺度のラフネス指数を測定し、相関式によりIRIに変換する。
4	パトロールカーに乗車した調査員の体感や目視	パトロールカーに乗車した調査員の体感や目視によりIRIを推測する。

写真-1に示すように、本測定装置を車両フロント部に

設置し、走行時に発生する車両振動から垂直方向加速度（以下加速度）をスマートフォン内蔵の加速度センサ（サンプリング間隔 0.01 秒）を用いて収集する。収集した加速度は取扱いしやすいように RMS(Root Mean Square : 実効値)に変換する。以下、変換したものを加速度 RMS と呼ぶこととした。

また、測定結果のアウトプットの方法としてはスマホの画面にリアルタイムで路面の状態を表示することが可能であるとともに、スマホ内の GPS 情報を用いて、測定箇所の位置情報を電子地図（GIS）上に表示することも可能である。

3. 路面性状値と加速度の関係⁴⁾

3.1 実験概要

IRI および段差量と加速度との関係を把握するために、実車による走行実験を実施した。実験概要を表-2に示す。実験データの収集は、IRI は関東地方にある一般道路で測定し、段差量はコンクリート舗装版目地部段差（垂直形状段差）を模擬した仮設路面で測定した。IRI は区間平均 RMS (加速度 RMS を評価区間長で算術平均したもの)、段差量は加速度 RMS により、各指標との相関を確認した。

表-2 IRI および段差量実験の概要

項目	IRI	段差量
車種	RAV4(トヨタ)	
設定速度	30,40,50km/h	20,30,40km/h
RMS値	区間平均RMS (評価区間長)	加速度RMS (0.1秒間)
対象	一般道路 IRI: 1.9~8.5m/km	模擬路面 t= 9,18,27,36mm
比較データ	路面性状測定車	実測値

3.2 IRI と加速度との関係

IRI と加速度との相関は評価区間長 100m の IRI で行うこととした。路面性状測定車により測定した実測 IRI と本測定装置により測定した区間平均 RMS との関係を検討した。

結果は、回帰モデルとともに図-2に示す。なお、本検討では原点を通る一次回帰モデルを用いた。

図-2より、①区間平均 RMS と IRI との関係は正の相関があること、②回帰モデルに速度依存性があること、③回帰モデルの傾きは、速度が低いほど大きくなること

が確認できた。図-2 の回帰モデルをもとに、基準速度（40km/h）に速度補正し、算出した推定 IRI と実測した IRI との関係を図-3 に示す。

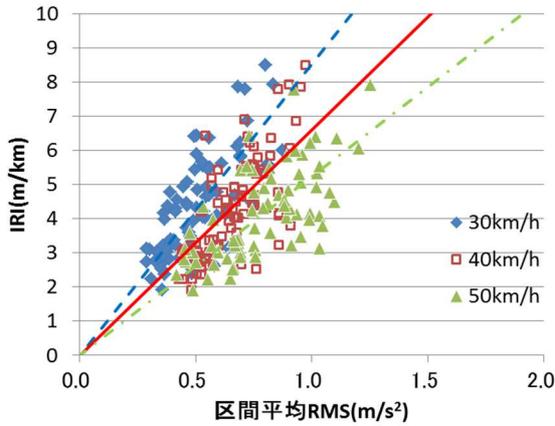


図-2 区間平均 RMS と IRI との関係

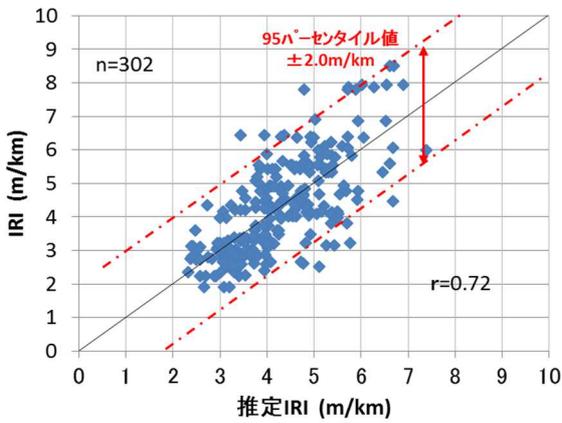


図-3 推定 IRI と IRI との関係

図-3 より、推定 IRI と IRI との関係はデータにバラつきがみられるものの、 $r=0.72$ となり、高い相関が確認できた。これから、本測定装置を用いることで路面の IRI を概ね推定できると考えた。これは、一次点検レベルにおいて、不良箇所の抽出に期待できると考える。

3.3 段差量と加速度との関係

模擬路面の段差量と加速度 RMS との関係を図-4 に示す。図-4 より、①IRI と同様に段差量と加速度 RMS との関係は正の相関があること、②回帰モデルは速度依存性があること、③回帰モデルの傾きは速度が低いほど大きくなることを確認できた。

回帰モデルをもとに基準速度（40km/h）に速度補正し、算出した推定段差量と模擬路面の段差量との関係を図-5 に示す。図-5 より、両者の相関係数は、 $r=0.98$ となり、非常に高い結果となった。また、推定段差量と模

擬段差量の誤差の95 パーセント値は±3.7mm 程度であった。推定 IRI と同様に、一次評価レベルにおいて段差量の抽出に活用できると考える。

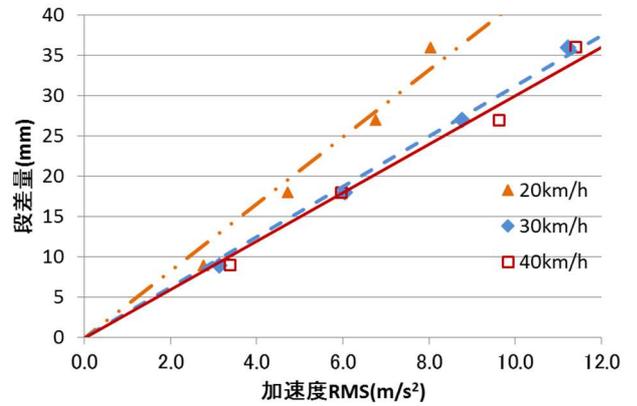


図-4 加速度 RMS と段差量との関係

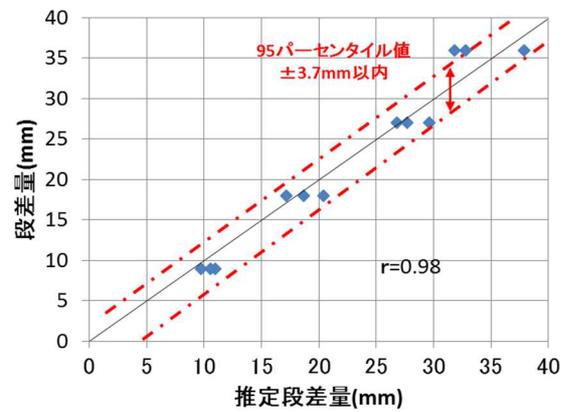


図-5 推定段差量と段差量との関係

4. 実路における管理事例

4.1 工事概要

模擬路面における測定で段差量を評価できることがわかったため、実道への適用を試みた。一般国道における性能規定型維持工事の段差量管理に本測定装置を用いたものである。工事概要は表-3 に示すとおり。

表-3 工事概要

項目	内容
道路種	自動車専用道路 (上下線:片側2車線)
工事期間	2年間
対象区間長	5.6km
性能規定値	段差量:30mm
法定速度	80km/h

工事初期に全箇所の段差量を4日間かけて測定した。交通規制は規制を行うこと自体でコストが発生するが、

道路利用者にとっても時間的損失および安全上の観点からも好ましくない。このため、交通規制を必要とせず、容易に段差量を評価する必要があった。

4.2 実施事例

1) 段差量と加速度 RMS との関係

工事初期に測定した実測段差量（舗装調査・試験法便覧法）と同時期に測定した加速度 RMS との関係式から段差量を推定する方法を検討した。加速度 RMS と実測の段差量との関係を図-6 に示す。この図-6 から加速度 RMS と段差量との関係はバラツキが大きく、その他の要因が介在すると考えられたため、このまま単純に推定するのは難しいと考えた。

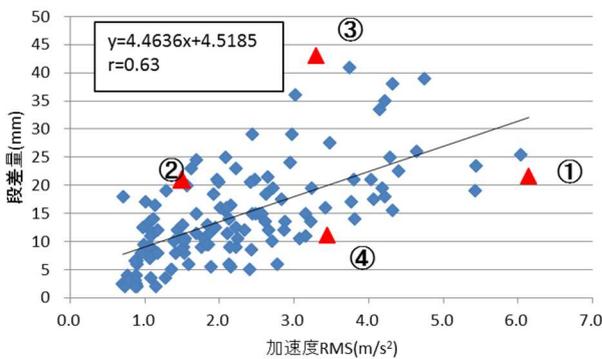


図-6 加速度 RMS と段差量との関係⁵⁾

2) 加速度 RMS の再現性

段差量管理位置における加速度 RMS の初期値と 3 ヶ月後測定値との関係は図-7 に示すとおりである。

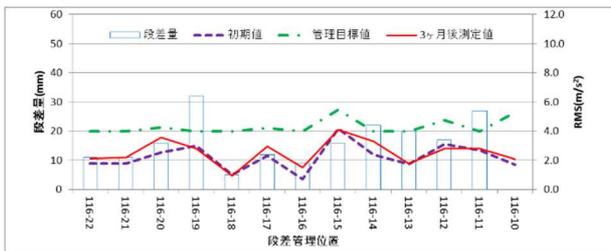


図-7 加速度 RMS の初期値と 3 ヶ月後測定値

初期値と 3 ヶ月後測定値の差の標準偏差は 0.43m/s² であり、また、同日の 3 回測定の結果もバラツキが小さく良好であった。加速度 RMS は再現性を十分有している結果となった。このことから、発注者と協議の上で段差管理位置ごとに加速度 RMS の管理目標値をそれぞれ設定し、自主管理を行うこととした。

3) 段差量管理方法

実行した管理方法のフローを図-8 に示す。

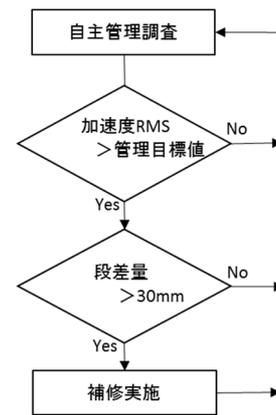


図-8 管理方法のフロー

図-8 に示すように、自主管理として本測定装置で測定評価を行い、加速度 RMS が管理目標値を越えた箇所のみ段差量を測定することとした。

また、自主管理測定の測定条件は表-4 に示すとおりである。なお、測定速度を一定の速度とするために、測定は夜間の交通量が少なくなる時間帯に行った。

表-4 自主管理測定の測定条件

項目	内容
使用車種	TOYOTA カローラフィールダー
使用タイヤ	ブリヂストン BLIZZAK REVO2
使用スマートフォン	SONY Ericson SO-02C
測定速度	80km/h
測定回数	3 回/車線・速度

4) 結果

図-8 に示すフローにて管理を行った結果、工事期間中において、加速度 RMS が管理目標値を超えた箇所が 4 箇所あった。そのうち、実測により段差量が規定値を超えて補修を実施した箇所は 1 箇所、規定値以内だったために経過観察とした箇所が 3 箇所であった。

本工事の自主管理に本測定装置を用いたことで、交通規制が、従来法を用いた場合に比べ、大幅に削減（4 日 → 0.5 日）されたことにより、費用、利用者便益の低下抑制などの全体的なコスト低減効果や、作業員の労働負荷軽減等の効果が得られた結果となった。

5. 路面形状と加速度の関係⁵⁾

段差と加速度との関係は、模擬段差路面のような同一形状の場合は、図-4 あるいは図-5 のように、加速度 RMS

と段差量との間には高い相関が確認できた。しかし、実路においては、図-6 に示すように、加速度 RMS と段差量はある程度の相関しか確認できなかった。そこで、段差と加速度との関係について検討を行った。

まず、図-6 中の特徴的な点①～④について検討を行った。①と②は段差量と同じでも加速度 RMS が異なっており、③と④は、加速度 RMS が同じでも段差量が異なっている。これは、加速度 RMS が段差量以外の影響を受けているためと考えた。

①～④に該当する段差量、加速度 RMS および管理位置前後 15m の縦断形状を示したものが図-9 である。

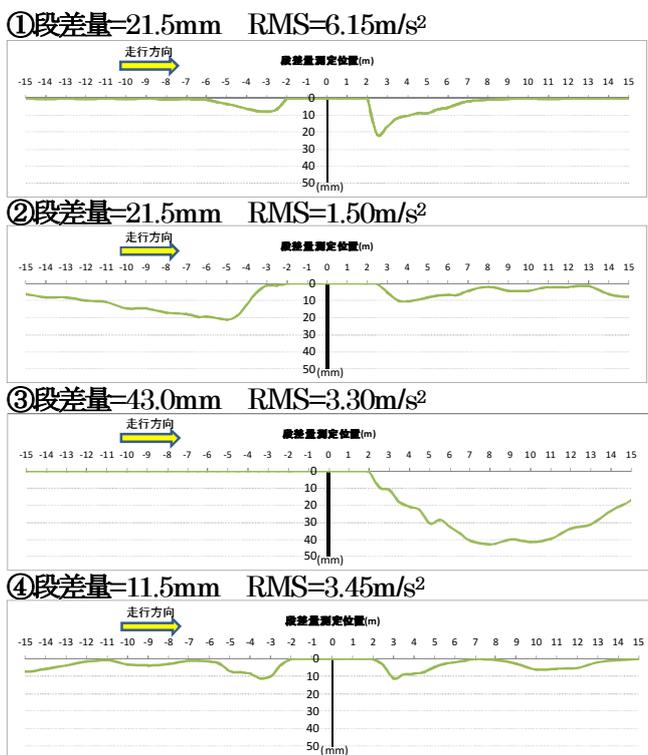


図-9 ①～④における段差の形状

図-9 より、①、②は、段差量は同じだが形状が異なっていることが分かる。また、③、④は同じ加速度 RMS であるが、③は『段差量は「大きい」が形状は「緩やか』であるに対して、④は『段差量は「小さい」が形状は「縦波状』となっている。このことから、加速度 RMS は段差量の他に、段差形状の影響も大きく受けるものであると考えた。

そこで、加速度 RMS と段差形状との関係について検討を行った。検討するにあたり、段差形状を表す指標として、段差勾配 i と 合成段差勾配 i_c を設定した。算出式は式-1, 2 に、イメージを図-10 に示す。

$$\text{段差勾配 (\%)} : i_i = \frac{t_{i+1} - t_i}{L} \times 100 \quad (\text{式-1})$$

$$\text{合成段差勾配 (\%)} : i_{ci} = i_i - i_{i+1} \quad (\text{式-2})$$

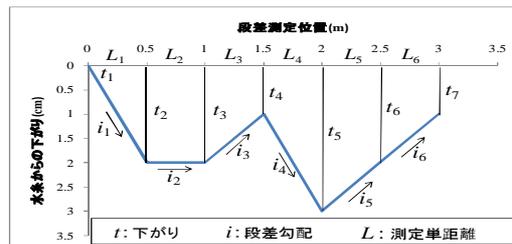


図-10 段差勾配および合成段差勾配のイメージ

また、加速度 RMS と合成段差勾配最大値との関係を図-11 に示す。

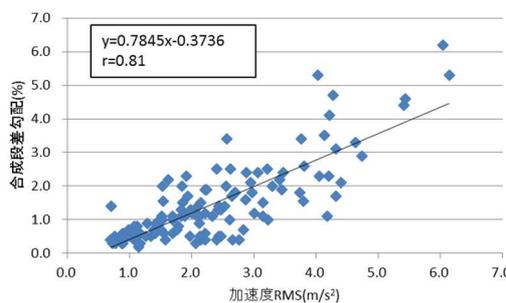


図-11 加速度 RMS と合成段差勾配との関係

図-11 より、相関は $r=0.81$ となり、高い相関が確認できた。この結果から、加速度 RMS が評価しているのは段差量のみでなく、形状も考慮した合成段差勾配であり、路面の状態（ラフネス）を評価しているといえる。

次に、加速度 RMS が道路利用者の感覚と合致しているか否かを検討することとした。

6. 加速度と乗り心地の関係

1) 感応調査の概要

加速度 RMS と乗り心地との関係について感応調査を行った。調査概要は表-5 のとおりである。

表-5 アンケート調査概要

項目	内容
人数	6人
走行速度	70±10km/h
乗車位置	助手席、後部席
対象路線	自動車専用道路 2路線

調査は車両に調査員が搭乗し、両手にスイッチを持ち、段差振動を認識したときには左、さらにその振動が不快に感じる場合は右のスイッチを押すことにより行った。

2) 感心調査結果

段差振動の認識に関する結果は図-12 に示すとおりである。図-12 は上段が助手席、下段が後部座席の調査結果を示しており、横軸が加速度 RMS、縦軸がスイッチの ON/OFF を表している。押したときが ON である。

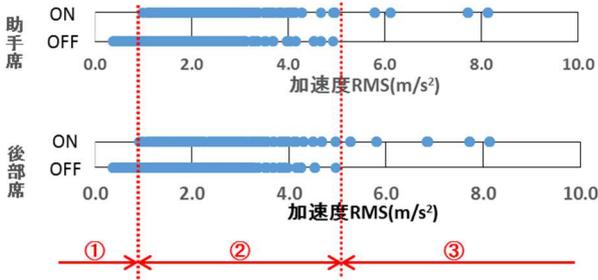


図-12 段差振動と認識する加速度

助手席と後部座席とでは結果に大きな差がなかった。段差振動の認識については、以下の結果となった。

- ① ほとんどの人が認識しない：1m/s²以下
- ② 人によっては認識する：1～5m/s²
- ③ ほとんどの人が認識する：5m/s²以上

次に、段差振動と認識した振動が、不快なものかどうかについて行った結果を図-13 に示す。

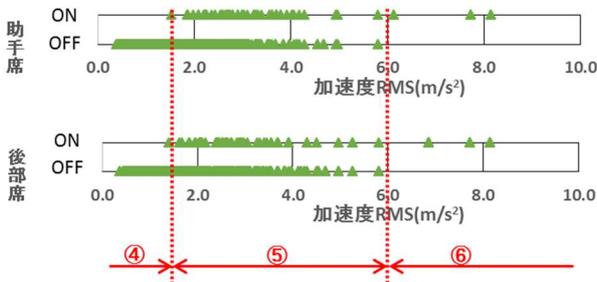


図-13 不快と感じる加速度

図-12 と同様に、助手席と後部座席とでは結果に差がなく、振動の不快感については、以下の結果となった。

- ④ ほとんどの人が不快でない：1.5m/s²以下
- ⑤ 人によっては不快である：1.5～6m/s²
- ⑥ ほとんどの人が不快である：6m/s²以上

この結果から、加速度 RMS と搭乗者の感心には関連性があることを確認した。

また、今後、加速度 RMS で路面評価を行う場合を想定し、段差振動の不快感の結果から、加速度 RMS による路面評価のための判定基準(案)を表6 に示すように

仮設定してみた。なお、表6 の適用条件は、今回の調査条件のみとする。

表6 加速度 RMS による判定基準(案)

加速度RMS (m/s ²)	判定
6以上	補修が必要
4～6	路面状況によっては補修が必要
1.5～4	要注意
1.5以下	望ましい状態

7. まとめ

本検討から得られた知見について以下に示す。

- 本測定装置により得られた加速度 RMS (バネ上振動加速度) からの路面性状値 (IRI/段差量) の推定は、一次評価レベルであれば可能である。
- 実路による試用から、本測定装置を適切に活用することで維持管理業務全体のコストを低減できた。
- 加速度 RMS は路面の状態を評価するのに適しており、また、搭乗者の感心と関連があるため、道路利用者視点での路面評価が可能であることがわかった。

8. おわりに

本検討においては、使用する車両を固定するなど、一定の条件下での検討で行ったが、今後は、様々な条件下でデータ収集を行い、実用化を目指したい。最後に、本論文が、我が国の今後の舗装維持管理技術向上の一助となれば幸甚である。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会：維持修繕ガイドブック、pp5-7
- 2) 白川、川村、富山：車の地点乗り心地を考慮した道路利用者のための平坦性管理方法、土木学会舗装工学論文集 第10巻 2005年12月
- 3) 岡本、北川：効率的な舗装管理手法の提案—重積雪寒冷地域 旭川管理事務所での試行から—、EXTEC No82-10
- 4) 白井、井原、細谷：簡易測定装置による IRI・段差量推定手法の検討、第68回土木学会年次学術講演会 V-470 2012
- 5) 白井、井原、吉田：簡易測定装置によるバネ上振動加速度 RMS と路面段差の関係、第69回土木学会年次学術講演会 V-562、2014