土砂系舗装の路面形状と車両振動特性に関する研究

坂本康文¹・五傳木 一²・芳賀潤一²・緒方英彦³

¹正会員 鹿島道路株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

E-mail : sakamoto@kajimaro.co.jp

²正会員 鹿島道路株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

³正会員 博(農) 鳥取大学 農学部 (〒680-8553 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

農道の舗装は、アスファルト舗装、コンクリート舗装、土砂系舗装に分類される。アスファルト舗装、コンクリート舗装については性能規定化が進められているが、土砂系舗装については、要求される性能指標の設定が困難なため、性能規定化への移行が滞っている。本研究では、農作物輸送時の荷傷みに大きく影響すると考えられる路面形状と車両走行時の荷台の振動特性に着目し、実道で実測した振動加速度と車両運動シミュレーションソフトで求めた解析値を比較・分析することで、実測値と解析値の関係を明らかにするとともに、土砂系舗装を維持管理する上で閾値となり得る路面形状を見出した。

Key Words : *sediment pavement, on-farm road, longitudinal profile, vibrating acceleration, power spectral density*

1. はじめに

農道の舗装は、アスファルト舗装、コンクリート舗装、土砂系舗装に分類される¹⁾。アスファルト舗装、コンクリート舗装については、舗装設計施工指針²⁾に準拠することで、要求性能、性能指標や性能値が一通り提示され、性能設計ができる状況になっているが、土砂系舗装については、要求される性能指標の設定が困難であるとして、従前どおり経験に基づく舗装構成による仕様規定によってもよい¹⁾とされており、求められる性能が定義されていないために、性能規定への移行が滞っているような現状にある。

農道の舗装率を算出する際には、土砂系舗装は未舗装に分類されており、平成 23 年度の調査報告³⁾によれば、農道の舗装率は 35.7% (総延長 175,352km のうち舗装済延長は 62,626km) となっている。したがって、農道の大半は土砂系舗装と言っても過言ではない。社会資本整備費の見直しや縮減が叫ばれる中、アカウンタビリティとしての道路利用者や沿道住民等への便益確保は必要不可欠であり、土砂系舗装にあつては、アスファルト舗装やコンクリート舗装等に打ち換えるのではなく、まずは土砂系舗装の挙動や供用性を評価し、ほ場内農道の特質を踏まえた性能規定化を模索することが望ましいと考える。貴重な社会資本である土砂系舗装の性能指標の目標値が設定されれば、それに基づいた適切な維持管理も可能となり、アスファルト舗装やコンクリート舗装等に打

ち換えずに既存社会資本を有効利用できることから、道路資材の節減にも繋がるものと考えられる。

土砂系舗装は、主にほ場への通作、営農資材の搬入、ほ場からの農産物の搬出等の農業生産活動に利用されるほ場内農道に多いことから、ほ場内農道の管理主体である土地改良区にアンケート調査を実施し、土砂系舗装に求められる機能を次のように定義することとした⁴⁾。

- 1) 農業用機械の走行に耐え、農道脇の水路の安全性(破壊)や安定性(移動)を確保するために十分な強度を有していること。
- 2) 荷(農作物)痛みしない程度の平たん性とわだち掘れ抵抗性(均一な支持力)を有していること。
- 3) 農道内の雑草の繁茂を抑制すること。

既往の主な研究としては、岩元ら^{5),6),7)}が青果物が輸送中に生じる損傷は繰り返される振動加速度下での疲労破壊であることを解明し、振動加速度と許容繰返し数の関係について、実験で得られた疲労曲線(S-N 曲線)をもとに疲労度として提案しているが、路面形状については探究されていない。また細見ら⁸⁾は、岩元らの研究成果と独自に調査した路面性状や振動測定データを関連付けることで、IRI (International Roughness Index) で荷傷みを適切に評価できる可能性が高いことを示しているが、調査の対象とした路面はアスファルト舗装であり、かつ広域農道と呼ばれる比較的交通量の多い路線を対象としている。雑草の繁茂抑制については、これまでも多くの研究がなされており、最近の的羽⁹⁾の検討によれば、メンテ

ナンスフリーあるいはメンテナンスイージーと称されている道路の雑草抑制技術を多方面から比較した結果、道路の周辺環境や機能・目的に応じて様々な工法の採用が可能としているが、フィールド試行による効果検証は欠かせないと結論付けている。

そこで筆者らは、土砂系舗装の性能規定化に資することを目的とした、土砂系舗装に求められる性能やその値を明確にするための研究を進めている^{4),10),11),12)}。これまでの研究によって、従前の試験方法を応用することで土砂系舗装材料の性能評価が可能であること、一般のアスファルト舗装路面に比べ土砂系舗装は短い間隔で比較的大きな凹凸を有していること、また農業従事者から見た土砂系舗装の平坦性の要求値は、車両走行時の荷台の振動加速度と路面プロファイルで定義できる可能性があること等がわかってきているが、他方では、土砂系舗装の路面形状と荷傷みの関係、土砂系舗装の耐久性や雑草繁殖抑制等については明確になっていない。

本研究では、農作物輸送時の荷傷みに大きく影響すると考えられる路面形状と車両走行時の荷台の振動特性の関係を明らかにするために、実道で測定した振動加速度

を分析し、車両運動シミュレーションソフト(TruckSim8.1)を使って求めた解析値と比較する¹³⁾ことで、実測値と解析値の関係を明らかにした。また、その結果を整理することによって、土砂系舗装を維持管理する上で閾値となり得る路面形状も見出せた。以下では、それらを取りまとめて報告する。

2. 実路での振動特性の分析

(1) 調査対象路面の概要

調査対象路面は表-1 および写真-1 に示す4種類とした。

表-1 調査対象路面一覧

路面	道路種別*	路面構成材
I	鳥取大付属ほ場内農道	土砂系材料(細粒分質礫質砂)
II	〃	上記土砂系材料の安定処理
III	一般ほ場内農道	土砂系材料(細粒分質礫質砂)
IV	〃	〃

※ ほ場内農道とは、主にほ場(田畑)への通作、営農資材の搬入、ほ場からの農産物の搬出等の農業生産活動に利用される農道をいう。

路面 I (L=161m)

路面 II (L=161m)

路面 III (L=157m)

路面 IV (L=118m)

写真-1 調査対象路面の外観

図-1 縦断プロファイルの測定結果

写真-2 加速度計の固定状況

路面Ⅰと路面Ⅱは、鳥取大学附属農場内の支線農道であり、同一路線での舗装改良前後の路面である。当該路線は、営農を目的とした道路ではないため日常の交通量は極めて少なく、改良前の路面Ⅰには丈の短い雑草が全面に繁茂している状態の路面である。一方、路面Ⅱは当該路線で路上再生工法による安定処理で改良を施した路面である。路面Ⅲと路面Ⅳは、一般の営農のためのほ場内支線農道であり、わだち部には土砂系材料が露出し、非わだち部は丈の短い雑草が繁茂した土砂系舗装によく見られる路面状態である。また、いずれの路面も縦断方向の勾配はほとんどない路線である。

各路面の縦断プロファイルを図-1に示す。図中には3mプロファイルメータでの標準偏差(σ_{3m})、IRIに加えて、個々の路面高さのデータの標準偏差(SD_{pro})⁹⁾も併記した。縦断プロファイルの測定にはMRP (Multi Road Profiler, クマタカエンジニアリング) を使用し、後述する走行試験での運転席側となるわだち部を対象として1cm間隔で測定した。また、農用車両(軽トラック)のタイヤの接地長を考慮して、前後10cmを含めた計20cmの単純移動平均により平滑化して表した¹¹⁾。ただし、路面Ⅰについては、雑草の影響を受けて路面の形状を正確に測定しているとは言い難いことから、以下では参考値として取り扱うこととする。

(2) 振動加速度の応答波形

走行車両には、実際の農産物の荷傷みの検討に配慮して軽トラック(ダイハツHIJET、車両重量750kgに加えて運転員1名と測定員1名約130kgが搭乗)を選定し、写真-2に示すように荷台中央にマグネットで加速度計を固定して走行時の垂直方向の振動加速度を測定した。データの取り込みは2kHz(0.0005s間隔)とし、走行速度は10km/h、20km/h、30km/hの3段階を目標とした。

各路面の振動加速度を図-2に示す。図中には平均値、最大値、最小値に加えて、標準偏差(SD_{acc})も併記した。

図-2を見ると、路面Ⅰの振動加速度が他の路面に比べて大きくなっている。川上らの研究¹⁴⁾によれば、トラクタ走行時の座席上振動は、アスファルト路面よりも草地

の方が大きく、草株による表面の凹凸が起因しているとしており、今回の路面Ⅰにおいても、わだち部に雑草が繁茂しており、それが大きく影響したものと考えられる。

次に、走行速度と SD_{acc} の関係を図-3に示す。これによれば上記のように路面Ⅰとそれ以外の路面で傾向が異なっているが、それぞれの路面においては表-2に示すような高い相関が得られた。したがって、同一路面であれば、今回のような相関式を使うことで SD_{acc} の測定値を速度補正し、同一速度での比較・検討が可能なものと考えられる。

(3) 振動加速度のスペクトル解析

図-2に示した振動加速度のスペクトル解析(汎用ソフトDIAdem2011; ハニング窓関数を適用)を行った。パワースペクトル密度(Power Spectral Density; PSD)を図-4に示す。

路面Ⅰでは周波数10Hz未満のPSDが卓越している。これは先に述べた川上らの研究¹⁴⁾でも指摘されており、雑草面上の表面の柔らかさと草根などの地中の固さが相互に影響し、振動周波数が低くなっているものと考えられる。

次に、路面Ⅱ、Ⅲ、Ⅳについては、走行速度10km/hではやや異なった傾向が認められるが、20km/hと30km/hでは、PSDに大小の差はあるものの、いずれも周波数30~70Hzの間にピークが見られる。

岩元らの研究^{5),6),7)}によれば、例えばレタスを積み重ねて輸送する際には10Hz前後の振動数帯のみで損傷を考慮すればよいとしており、このような視点に立つと、路面Ⅰのような路面が輸送上最も注意を要するものと言える。

(4) TrukSimによる走行シミュレーション

図-1の路面プロファイルを使ってTrukSimによる走行シミュレーションを行い、荷台中央部の垂直方向の振動加速度を求めた。走行速度は実車走行と同じ10km/h、20km/h、30km/hの3段階とし、車両はTrukSimに格納されている“Compact Utility Truck”をベースに、実路で使用した軽トラックに近いものとなるような設定とした。車両の主な入力諸元を表-3に示す。

TrukSimで得られた振動加速度の標準偏差と実測での振動加速度(表-2の関係式に基づいて速度補正したものの標準偏差)の関係を図-5に示す。ここでも路面Ⅰとそれ以外の路面とでは傾向が異なっているが、それぞれに高い相関関係が認められる。したがって、路面Ⅰのように雑草が繁茂していて路面のプロファイルが正確に測定できていないような場合を除けば、土砂系舗装においても、路面のプロファイルを使ったシミュレーション走行により、実際の車両に生じる振動加速度を高い精度で推定することが可能なものと考えられる。

図-2 各路面の振動加速度的実測データ

図-3 走行速度と SD_{acc} の関係

3. 仮想路面形状を用いたシミュレーション解析

ここでは路面形状と振動加速度の関係をより単純に把握することを目的として、図-6 に示すような路面の凹み（波長 0.1～5m、深さ 10～100mm）を正弦波形の近似で作成し、TruckSim による走行シミュレーション（走行速度 10km/h、20km/h、30km/h）を行った¹⁵⁾。路面の凹みは走行方向の車輪片側だけとし、もう一方は平たんな路面とした。また、発進時の振動をキャンセルできるよう助走区間として凹み部の前に 20m の平たん路を設けた。車両の設定は表-3 に示したものと同一であり、実路での計測と同様に荷台中央部の振動加速度を求めた。結果の一例を図-7 に示す。この図では助走区間のデータは省いて表示しているが、振動加速度の試算としては図中に示した最大値を抽出して整理することとした。

表-2 各路面の走行速度と SD_{acc} の関係

	関係式	決定係数 (R^2)
路面 I	$y=0.3198x+0.2114$	0.994
路面 II	$y=0.1638x+0.1054$	0.992
路面 III	$y=0.0939x+1.5828$	0.993
路面 IV	$y=0.0969x+1.9008$	0.994

路面形状と最大振動加速度値の関係を図-8 に示す。最大振動加速度は、路面の波長がある長さのときにピーク値を示しており、そのピーク値は凹み深さが大きいほど大きい。また、最大加速度がピークとなるときの波長は、走行速度が大きいほど長い。

図-8 の結果について、走行速度を路面の波長で除して求めた時間振動数¹⁵⁾を横軸にとって再整理したものを図-9 に示す。走行速度や凹みの深さによらず時間振動数が 10Hz のときに最大振動加速度のピークが現れている。軽トラックのバネ上固有振動数は 10Hz 程度¹⁶⁾であり、荷台上の振動加速度ではあるが、それが現れた結果となっているものと考ええる。このことは、前掲の岩元らの研究^{5),6),7)}結果の“レタスを積み重ねて輸送する際には 10Hz 前後の振動数帯のみで損傷を考慮すればよい”ということにも合致しており、荷傷み抑制を目的とした路面の維持管理を考えた場合、走行速度にかかわらず特定の時間振動数のときに生じる振動加速度に着目すればよいものと考えられる。

車両の固有振動数を f (Hz)、走行速度を v (m/s)、衝撃の間隔を L とすると、共振が起きる条件は

$$1/f = L/v \quad \text{すなわち、} L = v/f \quad (1)$$

図-4 実測した振動加速度の周波数解析結果

図-5 TruckSim と実測での SD_{acc} の関係

図-6 入力路面形状

表-3 軽トラックの主な諸元

全長	mm	3395
全幅	mm	1475
全高	mm	1780
ホイールベース	mm	1900
トレッド前	mm	1295
〃 後	mm	1300
荷台床面地上高	mm	655
車両重量	kg	750
搭乗員重量	kg	130

図-7 TruckSim の出力例

図-8 TruckSim で求めた最大振動加速度と波長の関係

図-9 TruckSim で求めた最大振動加速度と時間振動数の関係

で与えられる¹⁷⁾。車両の固有振動数を 10Hz とすると、走行速度 10km/h で 0.28m, 20km/h で 0.56m, 30km/h で 0.83m 間隔で衝撃が加わると共振が発生することになる。最大振動加速度がピークを示したときの路面の凹み深さと波長の関係は図-10 のように整理できる。前述のように凹み深さが変わっても、走行速度ごとにほぼ一定の波長

(10km/h ≒ 0.3m, 20km/h ≒ 0.6m, 30km/h ≒ 1.0m) で最大振動加速度はピークを示しており、これを車両が受ける衝撃の間隔と捉えると、共振が起こるであろう間隔と概ね一致していることがわかる。一方、路面凹み深さと最大振動加速度のピーク値の関係を見ると図-11 のようであり、今回の路面形状では走行速度が小さいほど振動加

図-10 ピークを示した深さと波長の関係

図-11 深さと振動加速度の最大値の関係

速度は大きくなっており、10km/h では路面凹み深さが40mm 付近に変曲点が現れている。走行速度が小さいほど振動加速度が大きくなっているのは、走行速度が小さければ路面形状に近い軌跡を走行するのに対して、走行速度が大きくなると、車輪が路面の凹みを通過する際に瞬間的に宙に浮いた状態での走行となり、見掛け上実路面より凹みの少ない路面を走行しているためと考えられる。このことは、岩川¹⁸⁾も指摘している現象であり、実路のように路面の凹凸が連続しているのとは違って、単一の凹み部でのシミュレーションとしたために上記のような事象が顕著に表れたものと推察される。

岩元らの研究^{5),6),7)}によれば、振動加速度が1G(≒9.8m/s²)以下であればヒトに物理的な損傷は生じないとしている。図-11 で見ると、概ね凹み深さ 40~60mm のときであり、走行速度 10km/h では波長 0.3m が振動加速度 1G に該当する。

したがって、荷傷みに配慮した土砂系舗装の路面管理の一方策として、路面に凹みが生じた場合に、その凹み深さが 40mm を超えているかどうかといったことが、管理基準の指標になり得るものと考えられる。

4. まとめ

土砂系舗装の路面形状と車両振動特性に関して、本研究によって得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 土砂系舗装では、走行車両の車輪通過位置での雑草繁茂の有無によって、荷台上の振動加速度の傾向に違いがあり、雑草が繁茂していると振動加速度は大きくなる。
- (2) 同一路面であれば、走行速度と振動加速度の標準偏差には高い相関関係があり、速度補正を行うことで、他の路線の同一速度での振動加速度と比較することができる。

- (3) 振動加速度のスペクトル解析を行った結果、雑草が繁茂した路面の振動加速度の PSD は 10Hz 付近が卓越しており、荷傷みに大きく影響する特性を有していることがわかった。
- (4) 実測の振動加速度の標準偏差とシミュレーションで試算した振動加速度の標準偏差には高い相関が認められ、雑草が繁茂している路面がどうか判別できれば、縦断方向の路面プロファイルを使って、実車に生じる振動加速度の標準偏差を高い精度で推定できることがわかった。
- (5) 荷傷み抑制を目的とした路面の維持管理を考える場合には、特定の時間振動数の場合に車両の荷台に生じる垂直方向の振動加速度に着目すればよい。
- (6) 路面の凹み形状を変えたシミュレーションの結果、土砂系舗装を維持管理する上では、凹み深さ 40mm が荷傷みに配慮した閾値として有効である。

参考文献

- 1) 農林水産省：土地改良事業計画設計基準・設計「農道」，2005.3.
- 2) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針，2001.12.
- 3) 農林水産省：農林水産統計平成 23 年農道整備状況調査結果の概要，2012.3.
- 4) 緒方英彦，野田智之，坂本康文，篠塚政則，鎌田修，中村和明：水田地域におけるは場内農道の要求性能と土砂系舗装の性能評価に関する一考察，農業農村工学会論文集 No.273，pp.73-79，2011.6.
- 5) 岩元睦夫，河野澄夫，早川昭，青果物輸送の等価再現化に関する研究－第 1 報－，農業機械学会誌 39-3，pp.343-349，1977.
- 6) 岩元睦夫，河野澄夫，早川昭，青果物輸送の等価再現化に関する研究－第 2 報－，農業機械学会誌 40-1，pp.61-67，1978.
- 7) 岩元睦夫，河野澄夫，早川昭，青果物輸送の等価再現化に関する研究－第 3 報－，農業機械学会誌 42-3，pp.369-374，1980.
- 8) 細見康文，竹内康，江向俊文，牧恒雄：荷傷みを考慮した農道舗装の路面性状評価手法に関する研究，東京農大農学集法，51(4)，pp177-184，2007.

- 9) 的羽正樹：道路除草の抑制技術に関する検討について，平成24年度近畿地方整備局研究発表会論文集 施工・安全管理対策部門 No.6, pp.1-4, 20012.
- 10) 坂本康文，篠塚政則，中村和明，緒方英彦：土砂系舗装材料の性能評価および性能照査手法の一考察，農業農村工学会論文集 No.276, pp.71-77, 2011.12.
- 11) 坂本康文，達増康隆，緒方英彦：既設土砂系舗装の路面プロフィールに関する研究，土木学会論文集 E1 (舗装工学) Vol.67 No.3 (舗装工学論文集第16巻)，pp.1_81-86, 2011.12.
- 12) 坂本康文，篠塚政則，鎌田修，緒方英彦：ほ場内農道における土砂系舗装の供用性に関する研究，農業農村工学会論文集 No.278, pp.121-128, 2012.4.
- 13) 向中野聡，増山幸衛，姫野賢治：大型車を想定したドライビングシミュレータの上下方向加速度の再現性の検討，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集，pp.571-572, 2007.9.
- 14) 川上克己，伊藤孝子，小宮道士：中形トラクタの農作業時座席振動，酪農学園大学紀要－自然科学編一，pp.25-30, 2000.10.
- 15) 坪川将丈：空港舗装の設計・維持管理手法の高度化に関する研究，国総研研究報告第41号，pp.38-48, 2010.3.
- 16) 青木英明，山田晴利，神崎紘郎：ランブルストリップの速度抑制効果と騒音・振動，土木学会論文集 No.407/IV-11, pp.57-65, 1989.7.
- 17) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集 No.724/I-62, pp.83-102, 2003.1.
- 18) 岩川治：車両の走行速度と振動加速度との関係について，日本林学会誌 46 (5), pp.157-162, 1964.5.

RESEARCH ON SURFACE PROFILE AND VEHICLE VIBRATION CHARACTERISTIC OF SEDIMENT PAVEMENT

Yasufumi SAKAMOTO, Hajime GODENKI, Junichi HAGA and Hidehiko OGATA

The pavement of the farm road is classified in asphalt pavement, concrete pavement, and sediment pavement. Although performance specification of asphalt pavement and concrete pavement is progressing, shift of performance specification of sediment pavement is delayed because the setting of a required performance index is difficult. This research is analyzing the road surface profile and the vibration characteristic of truck bed which influence greatly the damage of agricultural products at the time of conveying. The vibration acceleration measured in the actual road and analyzed by the simulation software of vehicles movement were compared and analyzed. Form of the road surface used as the threshold value for the maintenance management of sediment pavement was clarified.