

ほ場内農道における土砂系舗装の性能に関する研究
Research on the Performance of Sediment Pavement on Farm Road

坂本 康文

Yasufumi SAKAMOTO

2013

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 農道整備の現状	1
1.1.2 農道舗装の設計法の現状	3
1.1.3 社会資本の維持管理・更新の方向性	8
1.2 既往の研究	10
1.2.1 農産物の輸送時の荷傷みに関する研究	10
1.2.2 農道の路面性状に関する研究	12
1.2.3 農道以外の土系舗装に関する研究	14
1.2.4 海外の土砂系舗装の現状	16
1.3 本研究の目的	18
1.4 本論文の構成	19
第1章の参考文献	22
第2章 土地改良区が求める農道舗装の機能に関する調査	26
2.1 概要	26
2.2 土地改良区をアンケート対象とした背景	27
2.3 アンケート調査の内容	29
2.4 アンケート調査結果	31
2.4.1 現状の農道に対する意見	31
2.4.2 農道の整備に考慮すべき条件	33
2.5 第2章の結論	35
第2章の参考文献	36
第3章 既設土砂系舗装の現状性能に関する研究	37
3.1 概要	37
3.2 既設土砂系舗装の路面プロファイル特性	38
3.2.1 調査路面	38
3.2.2 調査方法	39
3.2.3 路面プロファイルの測定結果	42
3.2.4 路面プロファイルの周波数分析	48
3.3 既設土砂系舗装走行時の車両振動特性	52

3.3.1	調査路面	52
3.3.2	調査方法	52
3.3.3	振動加速度の測定結果	54
3.3.4	振動加速度の周波数分析	59
3.3.5	振動加速度と路面プロファイルの関係	62
3.3.6	振動加速度と荷傷みの関係	63
3.4	第3章の結論	66
	第3章の参考文献	67
第4章	荷傷みに配慮した土砂系舗装の路面凹凸の閾値に関する研究	69
4.1	概要	69
4.2	TruckSimによる走行シミュレーションと実測値の比較	70
4.2.1	シミュレーションの設定条件	70
4.2.2	実測値の測定路面	73
4.2.3	シミュレーション結果と実測値の比較	74
4.3	仮想路面を用いた走行シミュレーション	81
4.3.1	仮想路面形状と結果の整理方法	81
4.3.2	走行シミュレーション結果	82
4.4	第4章の結論	86
	第4章の参考文献	87
第5章	土砂系舗装材料の性能評価・照査手法に関する研究	88
5.1	概要	88
5.2	土砂系舗装材料の選定とその基本物性	89
5.2.1	現状土	90
5.2.2	C-40	91
5.2.3	石灰安定処理土	91
5.2.4	石灰フォームド安定処理土	92
5.3	土砂系舗装材料の各種性能評価	95
5.3.1	塑性変形抵抗性	95
5.3.2	骨材飛散抵抗性	98
5.3.3	透水性	100
5.3.4	弾性係数(変形係数)	101
5.4	第5章の結論	106

第 5 章の参考文献	-----	107
第 6 章 試験舗装による土砂系舗装材料の供用性能に関する研究	-----	108
6.1 概要	-----	108
6.2 試験舗装の概要と調査内容	-----	109
6.2.1 試験舗装の種類と構造	-----	109
6.2.2 試験舗装の施工	-----	111
6.2.3 調査内容	-----	113
6.3 調査結果	-----	116
6.3.1 わだち掘れ抵抗性	-----	116
6.3.2 舗装支持力特性	-----	117
6.3.3 走行車両の振動特性	-----	121
6.3.4 路床内部の含水状態	-----	122
6.3.5 雑草の繁茂状況	-----	124
6.3.6 降水後の路面状態	-----	126
6.4 第 6 章の結論	-----	128
第 6 章の参考文献	-----	129
第 7 章 結論	-----	130
謝辞	-----	136
摘要〔 Abstract 〕	-----	137
学会誌公表論文リスト	-----	143

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 農道整備の現状

農道は、文字通り「農業のための道路」[1]であり、耕作道的な性格の道路としてだけでなく、農業機械の導入による生産性の向上、農業近代化施設の整備に伴う農産物流通圏の拡大、輸送量の増大、交通車両の大型化等の農業生産の近代化、農産物流通の合理化などに資するとともに、都市に比べて立ち遅れている農村地域の社会生活環境の改善に資するものであることも求められている。また、農道は“基幹的農道”と“ほ場内農道”に大別されるが、単一の利用目的、機能のみを有するものはほとんどなく、それぞれが重複している面があることを理解した上での整備が求められる[2]。基幹的農道は、農村地域の基幹となる農道であり、ほ場内農道や農業集落道と有機的に連結して、農業施設の効率的な利用に寄与するものである。一方、ほ場内農道は、ほ場への通作、営農資材の搬入、農産物の搬出等ほ場作業を効率的に行うためのものであり、地形勾配、ほ場の区画形状、用排水路の設置、集落、農業施設、既存道路の位置等に十分配慮しながら、安全で効率的な農業関連の交通および農作業を支えるものである。

2011年の農道整備状況調査報告(2011年8月1日現在)[3]によれば、農道の総延長は175,352kmとなっている。ここでの農道とは、調査期日現在で、土地改良法に基づく土地改良事業で造成され、農道として管理されている幅員1.8m以上の道路、独立行政法人森林総合研究所法に基づく農用地総合整備事業、特定中山間保全整備事業またはふるさと農道緊急整備事業により造成された幅員1.8m以上の道路を指しており、農道として造成された道路であっても既に都道府県道、市町村道に認定されている道路は含まれていない。一方、道路法に基づく一般の道路、すなわち高速自動車国道、一般国道、都道府県道および市町村道については、道路統計年報2011(2010年4月1日現在)[4]によれば、総実延長は1,210,251kmで、その内訳は、高速自動車国道7,803km、一般国道54,981km、都道府県道129,366km、市町村道1,018,101kmとなっており、農道の総延長は国道や都道府県道よりも遥かに長いことがわかる。

農道の舗装率と整備状況[3]を全国農業地域の表章区分別で整理したものを図-1.1および図-1.2に示す。農道の舗装率は全国平均で35.7%となっている。農道の舗装は、アスファルト舗装、コンクリート舗装、土砂系舗装に大別される[2]。土砂系舗装とは、路床の上に砂利、碎石等で層(路盤)を造り、その表面を路面として用いるもので、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ることから、わが国の農道の大半は土砂系舗装であると言っても過言ではない。また、舗装率と延長を地域別で見ると、北

日本では舗装率が低く農道の延長も長くなっているのに対して、西日本では舗装率は高いが、延長は九州を除いて北日本よりも短いといったのが特徴的である。

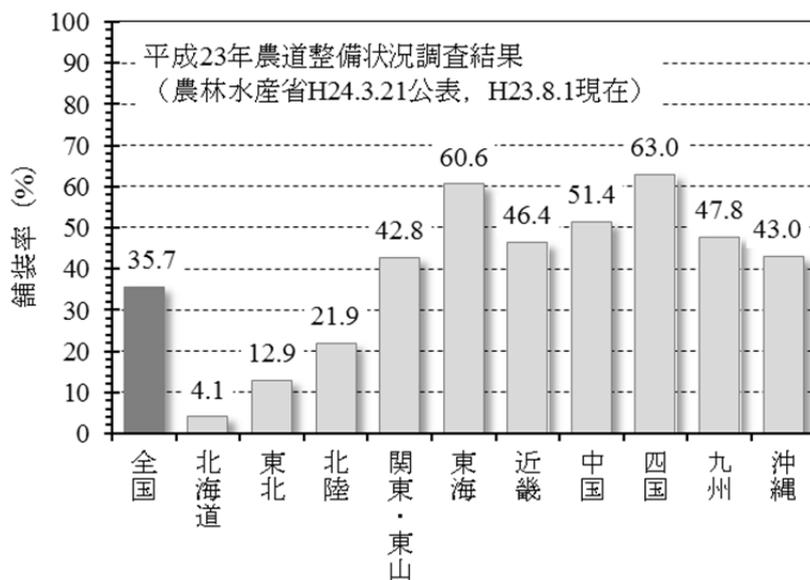


図-1.1 全国農業地域の表章区分別で見た農道の舗装率

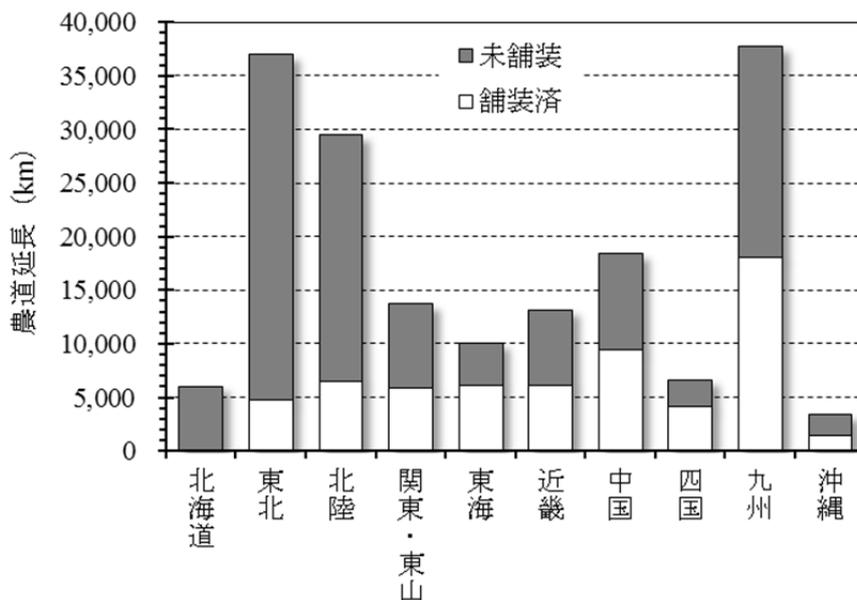


図-1.2 全国農業地域の表章区分別で見た農道の延長

め、農道は農業交通形態の特殊性を考慮した規模・構造となっている [2]。つまり、自動車交通量のうち農業に係るものが過半を占める前提で道路構造が設計されることになる。

また、「土地改良法」に基づいて建設される農道は「道路法」の適用を受けないが、その機能や路線配置によっては「道路構造令」に準拠する [2]。また、道路標識や交通信号機などの交通管理施設は「道路法」、「道路交通法」、「道路標識、区画線及び道路標示に関する命令」により規定されており、道路標識には「無理な運転をしないでください。」と書かれていることが多い [5]。

2001 年の土地改良法の一部改正により、「環境との調和への配慮」が土地改良事業実施の際に求められるようになったことに加えて、農村における生活様式の都市化、混住化等にも対応した「地域や目的に応じた農道の設計」が求められるようになった [6]。さらには、公共工事のコスト縮減に向けた設計・施工の合理化や従来の仕様規定から性能規定への移行などの見直しに伴い、舗装に関しては「舗装の構造に関する技術基準」[7]をはじめとした主要な関連諸基準が改定されている。このような状況を踏まえ、2005 年 3 月に、①地域や目的に応じた農道設計手法の明記、②環境との調和に配慮した農道設計手法の追記、③関連技術基準類の改定に係る見直しに主眼を置いて、「土地改良事業計画設計基準・設計「農道」」が改定された。これによって、農道舗装の構造設計に関しても性能規定が取り入れられ、具体的な設計手法としては「舗装設計施工指針」[4]に準拠することとなった。

先にも述べたように、農道の舗装は、アスファルト舗装、コンクリート舗装、土砂系舗装に大別される。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」に準拠することで、要求性能、性能指標や性能値が一通り整理され、車道および側帯の舗装の必須の性能指標として、「疲労破壊輪数（路面のひび割れに対する許容交通量）」、「塑性変形輪数（路面のわだち掘れ抵抗性）」、「平坦性（縦断方向の路面凹凸の標準偏差）」の基準値が示され、具体的な性能指標値に基づいた性能設計ができる状態になっている [8]。一方、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、従前どおりの経験に基づく舗装構成による仕様規定によってもよいとされており [2]、性能規定への移行が滞っている現状にある。

農道舗装の設計における一般の道路舗装の設計との違いとしては、計画交通量の基となる大型車交通量の区分が挙げられる。いずれも当該路線を通行する大型車交通量によって計画交通量を区分しているが、農道舗装においては農業大型車交通量と一般大型車交通量に細分されている。舗装の設計に用いる計画交通量は、農道舗装では“大型車交通量”と呼ばれ、表-1.2 のように 5 つに区分されており、一般の道路舗装では“舗装計画交通量”と呼ばれ、農道の 5 つの区分に交通量が多い 2 つの区分を加え、表-1.3 に示す 7 つの区分で運用されている。

表-1.2 農道舗装設計における計画交通量の区分

交通量の区分	大型車交通量 (台/日)	
I-1	1 以上	15 未満
I-2	15 以上	40 未満
II	40 以上	100 未満
III	100 以上	250 未満
IV	250 以上	1,000 未満

表-1.3 一般の道路舗装設計における計画交通量の区分

交通量の区分	舗装計画交通量 (台/日・方向)	
N ₁		15 未満
N ₂	15 以上	40 未満
N ₃	40 以上	100 未満
N ₄	100 以上	250 未満
N ₅	250 以上	1,000 未満
N ₆	1,000 以上	3,000 未満
N ₇	3,000 以上	

また、舗装の設計期間は、路盤、基層、表層等の舗装構造全体の繰返し荷重に対する耐荷力を設定するための期間で、舗装構造全体の疲労破壊によりひび割れが生じるまでの期間として設定される。つまり、舗装の設計上は、疲労破壊によるひび割れが発生した時点をも舗装の破壊と定義しており、その疲労破壊が生じる交通量を“疲労破壊輪数”という性能指標で表している。疲労破壊輪数は、大型車の最大輪荷重 49kN(最大軸荷重 98kN の 1/2) を基準として、設計の対象となる路線で実測された通行車両の輪荷重から式-1.1 を用いて 1 日 1 方向当たりの 49kN 換算輪数を求め、式-1.2 で設計期間 n 年の累積 49kN 換算輪数を求めて設定される [9]。式-1.1 は 4 乗則とも呼ばれており、「交通荷重が舗装に与えるダメージは輪荷重の 4 乗に比例して指数関数的に増加する」という考えに基づいたものである [6]。

$$N_{49} = \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{P_j}{49} \right)^4 \times N_j \right] \quad \text{式-1.1}$$

$$N = \sum_{i=1}^n (N_{49} \times 365 \times a_i) \quad \text{式-1.2}$$

ここに、 N_{49} : 1 日 1 方向当たりの 49kN 換算輪数
 P_j : j 番目の輪荷重の大きさに区分される輪荷重の代表値
 m : 輪荷重の大きさの区分数
 $j=1 \sim m$

- N_j : P_j の通過数
 N : 設計期間の累積 49kN 換算輪数 (必要疲労破壊輪数)
 n : 設計期間 (年)
 a_i : N_{49} に対する i 年後の伸び率
 $i=1\sim n$

疲労破壊輪数の基準値を表-1.4 に示す。交通量の少ない区分に若干の違いはあるが、農道、一般の道路とも交通量の区分の設定と同じで、基本となる考え方に違いはない。

表-1.4 疲労破壊輪数の基準値

農道舗装		一般の道路舗装	
交通量の区分	疲労破壊輪数 (回/10年)	交通量の区分	疲労破壊輪数 (回/10年)
I-1	(1,500) 以上	N_1	1,500 以上
I-2	(10,000) 以上	N_2	7,000 以上
II	30,000 以上	N_3	30,000 以上
III	150,000 以上	N_4	150,000 以上
IV	1,000,000 以上	N_5	1,000,000 以上
注) () は一般的な目安値で、累積 49kN 換算輪数が推定できる場合はその適用を妨げない。		N_6	7,000,000 以上
		N_7	35,000,000 以上

その他の性能指標として「塑性変形輪数」と「平たん性」があり、それぞれ表-1.5、表-1.6 のように基準値が定められている。塑性変形輪数については、一般の道路舗装における交通量が少ない「その他」の区分での基準値が農道舗装に適用されている。平たん性については同じ値となっている。いずれも疲労破壊輪数と同様に、農道舗装と一般の道路舗装の考え方は同じである。

表-1.5 塑性変形輪数の基準値

農道舗装 塑性変形輪数 (回/mm)	一般の道路舗装		
	区分	舗装計画交通量 (台/日)	塑性変形輪数 (回/mm)
500 以上	第1種、第2種、第3種第1級及び第2級並びに第4種第1級	3,000 以上	3,000 以上
		3,000 未満	1,500 以上
	その他		500 以上

※ 農道、一般の道路のいずれにおいても、積雪寒冷地域の道路や近い将来に路上工事が予定されている道路、その他特別の理由によりやむを得ない場合においては、当該基準に拠らないことができる。

表-1.6 平たん性の基準値

農道舗装	一般の道路舗装
平たん性 (mm)	平たん性 (mm)
2.4 以下	2.4 以下

一方、土砂系舗装については、農道特有の設計法が示されている [2]。具体的には、土砂系舗装がさらに土砂道と砂利道とに細分化され、それぞれ次の①、②のような定義のもとに、材料と構造がカタログ表示されており、砂利道については、表-1.7 に示すように路盤として表記され取り扱われている [2]。

- ① 土砂道：天然土壌だけで造り、他の材料で路面舗装を行わない道路。
- ② 砂利道：砂利または碎石に適量の結合材として粘土、ロームまたは石粉を含んだものを材料として用いることが推奨されており、そのような材料を既設の地盤（路床）上に厚さ 10～20cm 程度として造った道路。

表-1.7 砂利道の路盤厚（舗装厚）

路床の設計 CBR	2	3	4	6	8	12 以上
路盤厚 (cm)	20	20	15	15	15	10

現在の農道に多く見られる土砂系舗装は、②の砂利道の区分に属するものと考えられる。正式に路面を形成する層として舗装材料を構築したものは当然砂利道に区分されるが、当初は写真-1.1 に示すような土砂道であった路面であっても、車両の走行によって生じる凹みに碎石等を補充あるいは敷き均すなどの維持管理作業を長年に亘って行ってきたことで、写真-1.2 のような砂利道路面を有する状態となっているためである。



写真-1.1 土砂道の例



写真-1.2 砂利道の例

以上のように、土砂系舗装の構造設計法には、設計用値として交通量が組み込まれておらず、先に述べたような性能指標の基となる舗装の破壊に関する考え方も示されていない。

したがって、土砂系舗装を維持する場合の舗装構造設計において、材料や構造に選択の余地は極めて少ない。土砂系舗装が多く見られるほ場内農道にあっては、ほ場への通作、営農資材の搬入、農産物の搬出等が主となることから、必須の性能としては、農業用機械の走行に耐えるだけの支持力を有することが挙げられる。また、農作物が荷傷みしない程

度の平坦性を有することも重要な性能であると考えられる。土砂系舗装の設計を柔軟に行うには、それら求められる性能を明らかにすることが必須であると考ええる。

1.1.3 社会資本の維持管理・更新の方向性

2006年3月に農林水産省から示された「21世紀の社会構造に対応する農業農村整備の展開方向」によれば、人口減少社会の到来を大きな社会の動きと捉えて、①地方圏人口、農家人口の減少、②社会資本整備投資余力の減少、③集落機能の脆弱化、④国民の農村への期待の高まり、等が農業農村への影響として取りまとめられている[10]。

2010年3月には「食料・農業・農村基本計画」が閣議決定され、その中で農業の持続的発展に関する施策として“農業生産力強化に向けた農業生産基盤整備の抜本見直し”を掲げ、国民の食料を支える基本インフラの戦略的な保全管理として、まずは水利施設が取り上げられており、『基幹的水利施設は、わが国の食料生産に不可欠な基本インフラであるが、国や地方公共団体、管理者の財政の逼迫等により、これらの機能の将来にわたる安定的な発揮に不安が生じている。このため、リスク管理を行いつつ、施設のライフサイクルコストを低減し、施設機能の監視・診断、補修、更新等を機動的かつ確実に行う新しい戦略的な保全管理を推進する。』ことが明記された[11]。これに先駆け、農林水産省では2007年3月に「農業水利施設の機能保全の手引き」を編纂・公表しており、2009年5月には「農業水利施設の機能保全の手引き「パイプライン」」、2010年6月には「農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」」、2010年6月には「農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」」、2010年6月には「農業水利施設の機能保全の手引き「ゲート設備」」が公表されている。さらには、農業水利施設の長寿命化対策を実施するにあたり、施設の劣化状況を踏まえた上で、最適な材料および工法を選定するための視点や考え方を整理した「農業水利施設の長寿命化の手引き」が2011年5月に公表されている。

このように、農業農村整備に係る分野では、既存の社会資本を有効活用するための機能保全に加えて、既存ストックの延命化・長寿命化までを見据えた、いわゆるストックマネジメントが推し進められている。

一方、国土交通省においても、1960年代中頃からの高度経済成長期に集中的に整備された社会資本が今後急速に老朽化することが見込まれ、厳しい財政制約の中、今後も不足する社会基盤の整備を着実に進めるとともに、既存の社会基盤を効率的に活用し適切かつ確実に維持管理・更新を進めることにより、国民の貴重な財産である社会資本を次世代に確実に引き継ぐことが喫緊の課題となっている。社会資本の長寿命化等による維持管理・更新のあり方および技術開発の方向性を検討し、トータルコストの縮減を目指すことが重要であり、さらには、少子高齢化、人口減少をはじめとする社会構造の変化に対応した社会資本の維持管理・更新のあり方を検討する必要があるとして、2012年7月に今後の社会資

本の維持管理・更新のあり方について、社会資本整備審議会・交通政策審議会から関係機関への諮問がスタートしたところである [12].

高度成長期に莫大な社会ストックが蓄積され、これによってわが国の社会は豊かで、安全で、快適性のある程度実現した。一方で、自然環境に大きな負荷を与え、また、そのストックの維持や管理に莫大なコストが集中的に必要なこととなった。そのためにストックの寿命を延ばすことで更新コストを節減することも試みられている。21世紀の成熟社会では、高度成長期に蓄積されたストックを厳しく峻別するとともに、自然環境への負荷を減らし、自然との共生・共存を図りながら、持続的な社会運営を図らなければならないと考えられる。農業農村部門においても高度成長期に多くの社会基盤の整備が図られ、莫大なストックが蓄積された。生産と生活の両面で自然環境と関係の深い農業農村においては、それらのストックを適切に使用することで、自然との共生・共存を強化できる可能は極めて高いものとする。新しく作る（造る）のではなく、今あるものを適切に維持管理し、更にはそれに付加価値を付けて次世代に引き継ぐことが大切であり、自然環境への負荷を小さくしつつ、自然との共生・共存も図っていくことが、農業農村整備を考える上では重要になってくるものとする。

したがって、現在の統計上は未舗装として整理されている土砂系舗装についても、安易にアスファルト舗装やコンクリート舗装に打ち換えるだけでなく、既設土砂系舗装を適切に評価することが大切であるとする。土砂系舗装の材料物性や供用特性を適切（的確）に評価することは、土砂系舗装に求められる性能の明確化にも繋がり、延いては性能規定化を図ることによって、これまでの仕様規定ではできなかった柔軟な設計が可能となり、ストックの有効活用だけでなく、より環境にやさしい整備手法の技術開発にも繋がるものとする。

1.2 既往の研究

既往の土砂系舗装に関する研究成果を調べるために、2008年12月に（独法）科学技術振興機構（旧科学技術振興事業団）の科学技術文献検索システム“JDream II”（旧 JOIS と JDream を統合したもの）を使い、「土砂系舗装」をキーワードとして検索したが、該当するものは無かった。なお、2012年10月時点での上記 JDream II の検索では、筆者らの本研究に付随して既に発表している論文 8 編 [13,14,15,16,17,18,19,20] が該当しただけであった。また、インターネットのウェブ検索では、国、都道府県および市町村の共通仕様書や要領などの発注図書関係だけであり、研究論文等は見当たらなかった。

そこで、本研究では、ほ場内農道の性能あるいは機能に関連すると考えられる次の①～④の研究に関する既往の成果を整理することとした。

- ① 農産物の輸送時の荷傷みに関する研究
- ② 農道の路面性状に関する研究
- ③ 農道以外の土砂系舗装に類似した舗装に関する研究
- ④ 海外の土砂系舗装の研究

以下に、既往の研究の主な成果の概要を述べる。

1.2.1 農産物の輸送時の荷傷みに関する研究

ほ場内農道の土砂系舗装を考える上で、農産物の輸送時の荷傷みは欠かせない事象であり、農作物の輸送時の荷傷みは、生産者にとっては品質上の大きな問題である。農作物の品質は、質的な市場価値であり、農作物の命とも言えるものである。生産から供給までの各段階において、生産者、販売者、消費者等の様々な視点での品質が求められる。食品の品質要素は、栄養があり、安全であるという基本的特性と食品が人の感覚や生理などに及ぼす作用、働きとしての機能的特性に分類される [21]。荷傷みは、品質の機能的特性の中でも、“色”や“形”の見て好ましいといった嗜好特性に分類される外観品質であり、消費者の購買意欲に直結するものである。そのため、収穫された農作物は外観規格によって選別され、等級という便宜上の品質レベルに分けられて出荷されている。

農作物の輸送時に荷傷みが生じる要因は、荷台上での振動の繰返しにある [22,23,24]。岩元ら [22,23,24] は、輸送技術の改善に向けて、輸送中に農産物が受ける物理的損傷を室内で等価に再現させる輸送シミュレーションの確立を目的に、レタスなどを試験材料とし、荷台を想定した加振機を使った実験的検討を行っている。その結果、青果物の物理的損傷の評価には、疲労破壊の解析に用いられる Miner 則の $S-N$ 曲線の適用が可能であることを示した。 $S-N$ 曲線とは、一定の応力振幅 S (*Stress amplitude*) を供試体に繰返し与えたときの、応力振幅 S と破壊までの総繰返し回数 (N_f) との関係を表したものであり、横軸には破壊繰返し数の対数 $\log N_f$ を取ることが多い。その概念を図-1.4 に示す。

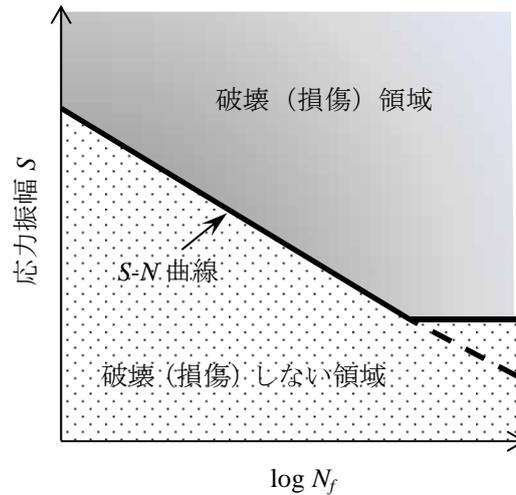


図-1.4 S-N 曲線の概念

岩元らは、輸送時の振動加速度を応力振幅に対応させて、農産物の損傷度（疲労度）を次のように整理している。まず、一定の応力振幅 S が供試体に繰り返して加えられたとき、破壊までに繰り返される総サイクル数 N との関係は、

$$N \cdot S^\alpha = \beta \quad \text{式-1.3}$$

で与えられる。 α 、 β は供試体固有の定数である。輸送時の応力変化を振動加速度の変化として捉え、式-1.3 の S は加速度振幅 G と表すことができる。

$$N \cdot G^\alpha = \beta \quad \text{式-1.4}$$

N と S (G) の関係は、 x 軸、 y 軸ともに対数を取った両対数紙上で直線関係となる。これは、農産物に作用する振動加速度 G が大きいほど、これに耐え得る許容繰返し数は少なくなることを示している。

次にレベルの異なる加速度 G_i を n_i サイクル ($i=1, 2, \dots, T$) ずつ受けたものの損傷度（疲労度） FD (Fatigue Damage) は、

$$FD = \sum_{i=1}^T \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad \text{式-1.5}$$

で与えられる。ここに、 N_i は G_i の加速度で破壊に至るまで許容され得る総サイクル数であり、Miner 則と同様に FD が 1 になった時に破壊が生じるというものである。

レタスについては、 $\alpha=4.17$ 、 $\beta=5.32 \times 10^3$ が導出されており、多段積載時には 10Hz 前後の振動数帯でのみレタスの損傷を考慮すればよいこと、また 1G ($\approx 9.8\text{m/s}^2$) 以下ではレタスに物理的損傷は生じないことなどが示されている。また、岩元ら [22,23,24] は、宮崎市から大阪市までの 880.5km 区間での輸送実験を行い、提案した S-N 曲線での損傷度評

価の妥当性も検証しており、土砂系舗装の研究に際しても大変有用な成果であると考えられる。しかしながら、ここでの評価に用いた舗装路面は都市間の幹線道路であり、生産者の輸送時の荷傷みではなく、集荷後の輸送業者による大量輸送時の荷傷みを評価している。つまり、土砂系舗装の路面での評価には至っていないのが実状である。

以上は、荷台の振動と荷傷みに関する研究であるが、その荷傷みの対策については、梱包からトラック開発の分野に至るまで盛んに研究が行われている [25,26,27,28,29,30]。特に近年では、農産物の市場拡大等を念頭に置いた東南アジアなど海外の富裕層をターゲットとする輸出に関連したものが多くみられる。その理由としては、輸出相手国内での輸送時に粗雑な荷扱い等によって大きな衝撃を受けることが多いためであるとされており、それらのトラブルを回避するために、農産物の種類に応じたさまざまな緩衝資材等が研究・開発されている。

その主な成果の例としては、高橋ら [27] はオウトウ果実（さくらんぼ）を対象とし、輸送時の衝撃による物理的障害果の発生が少なく、温湿度環境に対応できる梱包方法について、緩衝資材としてポリウレタンフォームを出荷用パックの内側底面に敷き、個装された出荷化粧段ボール箱を更に別の段ボール箱で二重梱包することを提案している。また今野ら [28] は、モモを対象とした輸出国での輸送時の荷傷みを軽減する方法として、緩衝資材としてフルーツキャップを用いると輸送中の果実の回転や乱れおよび押し傷程度の発生がソフトパケットレーより少なく、荷傷み防止効果が高いことを明らかにしている。

したがって、梱包関係の研究においても、先の岩元らの研究と同様に生産者の輸送時の荷傷みのことではなく、集荷後の輸送業者による大量輸送時の荷傷みを想定したものとなっている。加えて上記の研究では、車両による輸送だけでなく、飛行機やコンテナ船等での輸送も含まれている。そのため、ここでも車両での輸送では高速道路のような都市間ネットワークを対象とした検討が主であり、土砂系舗装のような特異な路面やその特性等を把握することは、生産者にとって大きな意義があるものと考えられる。

1.2.2 農道の路面性状に関する研究

農道の路面性状に関する主な研究としては、路面のひび割れに関する研究と路面性状と荷傷みを関連付けた研究に大別できる。

ひび割れに関する研究においては、竹内ら [31] は福島県郡山市西部地区広域農道と福島市西部地区広域農道においてアスファルト舗装のひび割れ調査を行っている。その結果、わだち掘れ部でのひび割れは表面から底面に向かって発生していることを明らかにし、そのひび割れが疲労によって発生したものであると推察している。平井ら [32] は、福島県郡山市西部地区広域農道で路面調査を行い、これまで重交通道路でのみ検討されていた車輪通過部の縦ひび割れ（わだち割れ）が、農道のような軽交通道路においても発生し得る

ことを示し、散逸エネルギー理論を用いた疲労破壊規準 [33] での評価を行うことで、このひび割れが Top-Down (アスファルト舗装表面から下方に向かって入るもので、アスファルト混合物層の下面から上方(表面)に向かって入るものは Bottom-Up と呼ばれている。)の疲労ひび割れであることを示唆している。また、竹内ら [34] は、福島市西部地区広域農道においてアスファルト舗装の縦ひび割れ (Top-Down ひび割れ) 長さの調査を行い、疲労解析結果とひび割れ長さの関係を AASHTO Design Guide 2002 の予測式 [35] と比較し、AASHTO の予測式と調査結果は良く一致していたことから、Top-Down の疲労解析から縦ひび割れ長さの類推が可能であるとしている。

以上のように、農道のアスファルト舗装路面のひび割れに関する調査・研究成果から、これまで比較的軽交通道路に近いとみなされていた農道の路面破損は、実は重交通道路のような疲労ひび割れが起こっていることがわかった。これは農道への大型車両の流入量の増大に起因しているものと推察されるが、農道と一般の道路との使用環境の違いも大きく影響しているものと考えられる。

一般の道路では、交差点部や駐車場等の繰返し発進・制動による荷重やタイヤの据え切り作用を受けるような箇所を特殊箇所として、舗装表面の強化やコンクリート舗装の採用等の対策が施されることが多い [9]。これは、車両の発進・制動荷重を受ける交差点部等のアスファルト舗装では、コルゲーションと呼ばれる縦断方向に比較的短い波長で連続的に発生する波状の凹凸が発生しやすく、タイヤの据え切り作用を受ける駐車場やバスなどの駐車帯等のアスファルト舗装では、骨材飛散や寄り、車輪部の凹みなどの損傷が発生しやすいためである。一方、農道においては、その利用形態上、農用車両の走行だけでなく農作業に伴う車両の駐停車時の発進・制動荷重やタイヤの据え切り作用を受けることが多いにもかかわらず、一般の道路のような特別な対策は講じられていない。特にほ場内農道は線形が直線であることが多いために、そのような特異な荷重や作用が考慮されていないものと考えられるが、農道舗装を設計する際には、当該農道の使用環境に配慮した適切な材料選定が必要であると考えられる。

次に、路面性状と荷傷みを関連付けた研究では、細見ら [36,37] が、福島県の会津若松市内と福島市内の広域農道のアスファルト舗装で、路面の平坦性と軽トラック走行時 (50km/h) の荷台の車軸中央付近における鉛直方向の振動加速度を測定し、平坦性については 3m プロフィールメータでの解析結果 σ_{3m} (1.1.2 で述べた平坦性の性能指標) と IRI (*International Roughness Index*: 国際ラフネス指数とも呼ばれ、各国や機関によって異なる平坦性の指標を共通化する目的で 1986 年に世界銀行から提案された評価基準) [38] を求めて比較し、振動加速度については、岩元らの荷傷みに関する研究成果 (*S-N* 曲線) [22, 23,24] を用いた荷傷み解析を行っている。その結果、IRI は σ_{3m} に比べて農産物の輸送による荷傷みを適切に評価できる可能性があることを示した。IRI は、国内の道路管理者が

既設舗装の平坦性評価指標としての適用に向けた積極的な検討がなされており [39]、特に高速道路3社（NEXCO 東日本、NEXCO 中日本、NEXCO 西日本）では維持修繕の管理基準として採用しているものである [40]。

細見らの研究 [36,37] は、広域農道という交通量の多い幹線道路に近い路線のアスファルト舗装路面を対象とした研究であり、そこで得られた振動加速度は都市間の幹線道路でのもので、生産者の輸送時の荷傷みを評価したものではなく、集荷後の輸送業者による大量輸送時の荷傷みを評価している。

したがって、農道の路面性状に関するこれまでの研究においても、生産者に直結した土砂系舗装の路面性状を評価するような研究は行われていない。また、路面性状に限らず、土砂系舗装の耐久性あるいは供用性に関する研究も実施されていないことから、土砂系舗装の性能規定化に向けては、まずは求められる性能を整理し、調査・研究を進めることが望ましいものとする。

1.2.3 農道以外の土系舗装に関する研究

自然との触れ合いや景観に対して国民のニーズが高まってきたことを背景として、2004年7月には「美しい国づくり政策大綱」、2005年6月には「景観法」が全面施行され、農林水産省や国土交通省からは景観に配慮した様々な施策が打ち出されている。道路舗装においては、景観舗装としてカラー舗装やブロック舗装など多種多様あるが、自然素材を用いた舗装としては土系舗装、木質系舗装、緑化系舗装などがあり、主に公園の遊歩道等に適用されている。土系舗装については、自然に近い風合いがあること、路面温度の上昇抑制が期待されること、比較的安価であることなどから、今後の整備が期待される舗装技術の一つとされていた。

そのような中、2006年1月には(独法)土木研究所と施工会社(鹿島道路(株)、(株)NIPPO、日本道路(株)、ニチレキ(株)、大成ロテック(株)・(株)近代化成、東亜道路工業(株)・(株)佐藤渡辺)との共同研究「土系舗装の実道への適用に向けた研究」がスタートし、土系舗装の車道への適用に向けて、車道に適した土系舗装の開発、土木研究所舗装走行実験場における荷重車走行による耐久性評価(促進載荷試験)、および評価方法の検討等が実施されている [41,42,43,44,45,46,47,48,49]。当該共同研究の具体的な目的としては『土の風合いがあり、かつ、軽交通に対する耐久性の向上を目指した土系舗装の技術開発および車道に適した評価手法を開発すること』としており、車道用土系舗装の性能指標について表-1.8のように整理し、さらに必須の性能と必要に応じて定める性能に区分している。

表-1.8 車道用土系舗装の性能指標

性能（測定項目）		性能指標	備考
走行安全性	すべり抵抗性	すべり抵抗値	必須の性能
耐久性	平たん性	平たん性	
	横断形状	わだち掘れ量	
	ひび割れ抵抗性	ひび割れ率	
	摩耗抵抗性	きめ粗さ	
景観（美観）性		明度， $L^*a^*b^*$ 表色値	
環境負荷軽減性	路面温度	路面温度低減値	
その他の性能	支持力，弾力・吸収性能等	FWDによる D_0 たわみ量／弾性係数，GB・SBによる反発係数等	必要に応じて定める性能

当該共同研究で検討された土系舗装の概要を表-1.9に示す。ほとんどの工法が“まさ土”あるいは“まさ土”と“砕石”を混合したものに、セメントなどの固化材を添加して固めたものとなっている。これは、まさ土の中でも粘土質の低いものについては、水はけが良いことが広く知られており、遊歩道等の歩行者系道路への適用実績が多く、舗装材としての知見も豊富であるためと考えられる。これらの工法は、材料面では農道の土砂系舗装に近いものであり、使用材料から判断するとコスト的にやや高価なものであることは否めないが、ここで検討している路面の耐久性の評価方法については、土砂系舗装へも十分適用可能なものとする。

表-1.9 共同研究で検討された車道用土系舗装の概要

工法	工法の概要
A	まさ土と切込み砕石をセメントとフォームドアスファルト [50,51,52] で固着させたものにアクリル系樹脂で表面強化を図る工法
B	まさ土などの現地の土とアスファルト乳剤，セメント，消石灰を混合したものに樹脂系トップコートを施す工法
C	まさ土と特殊エポキシ樹脂乳剤を混合した工法
D	透明性の高い熱可塑性樹脂バインダを用いた加熱混合物による工法（土風舗装）
E	まさ土と砕石を脱色バインダで結合した工法
F	まさ土に天然有機物を含んだセメント系固化材を添加した土系混合物で，表面強化材を併用する工法

表-1.9に示した工法Aについては、49kN換算輪数で約3,000輪通過後であっても路面損傷はほとんど認められていないことが報告されている [41]。加えて、工法Aについてはプラントでの混合物の製造だけでなく、現位置での路上混合による製造も可能な工法である。他の工法については、プラントでの混合物製造に限られており、既設土砂系舗装を有効活用できる整備等を考えるにあたっては、工法Aが参考になるものとする。また工法Aでは、図-1.5に示すように密粒度アスファルト舗装に比べて7℃程度の路面温度低減

効果が報告 [41] されており，風合いによる周辺環境との調和だけでなく，ヒートアイランド現象の緩和や周辺環境の改善にも寄与できるものと考えられる。

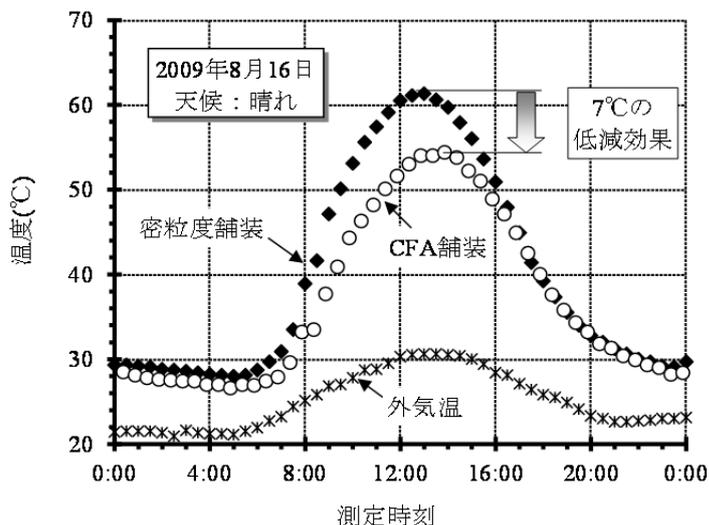


図-1.5 路面温度測定結果例

また，やや古い研究成果ではあるが，岩川ら [53,54] は林道を対象としてトラック荷台の振動加速度に関する研究を行っている．これらは林道での走行実験の成果を取りまとめたものであり，水平方向の振動加速度よりも上下方向の振動加速度の方が大きいこと，走行速度を 10km/h, 20km/h, 30km/h と変化させた場合の振動加速度は単純に増大するのではなく，路面凹凸の形状によっては低速の方が振動加速度が大きくなることもある等の知見が得られている．ここでの林道は当然縦断勾配が大きい路線であることと，当時の車両と現在の車両には性能面での格段の違い等があるため，ここでの成果をそのまま農道に適用することはできないが，対象とした路面は土砂系舗装に近い状態のものであり，調査方法も含めて土砂系舗装を研究する上では参考となるところが多い。

1.2.4 海外の土砂系舗装の現状

土砂系舗装は，海外では開発途上国に多く見られ，各国の援助等により道路整備がなされている．その際によく使われている仕様書として英国交通研究所 TRL (Transport Research Laboratory) から出されている OVERSEAS ROAD NOTE 31—A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries— [55] がある．この仕様書では，表層としてアスファルト混合物層やコンクリート舗装版を用いたものが記載されており，土砂系舗装に関わるような記述はされていない．このことは，わが国の農道で定義されているような土砂系舗装は舗装として認知されておらず，あくまでもアスファルト舗装

やコンクリート舗装が舗装であると位置付けされているということであり、当然土砂系舗装に関する研究成果は見当たらない。

米国連邦高速道路局 FHA (Federal Highway Administration) では、碎石敷の道路の維持管理に関する図書として、*Gravel Roads – Maintenance and Design Manual* – [56] が出されているが、具体的にどんな機械を使ってどのように維持すればよいかということが主内容であり、維持管理の目標値や舗装の設計には触れられておらず、あくまでも写真や図がメインのマニュアルとなっている。この背景としては、米国の地盤の良さがあるものと考えられる。わが国の関東ロームに代表されるような軟弱な路床は少なく、地盤が良好な砂利敷の舗装は、オフロードを楽しむためのフィールドのような状態にあるようである。

また、米国環境保護庁 EPA (Environmental Protection Agency) では、*Environmentally Sensitive Maintenance for Dirt and Gravel Roads* [57] というテクニカルレポートを出している。このレポートは林道が主体のものであり、いわゆる土砂系舗装に近い路面を扱ってはいるが、舗装に着目したものではなく、道路としての構造をメインに記述されており、米国でも土砂系舗装に関する研究成果を探すのは困難な状況にある。

東南アジアに目を向けてみると、近年の成長・発展には目覚ましいものがあり、乗り物では2輪車から4輪車へと移行してきている。それに伴い、道路については、高規格化等の整備が求められている。したがって、東南アジアにおいても、土砂系舗装に関する注目度は極めて低い現状にある。また、アジア諸国へのわが国の政府開発援助 ODA (*Official Development Assistance*) 工事においても、成長基盤となるインフラの整備が進められているが、その中の道路舗装は、アスファルト舗装かコンクリート舗装が主体であり、わが国の簡易舗装(路盤上にアスファルト表面処理が施された程度の舗装)が一部に見られるが、土砂系舗装を土砂系舗装のまま活用することや、性能アップを図るといった研究はなされていない [58]。

1.3 本研究の目的

比較的交通量の多い農道に施工されているアスファルト舗装やコンクリート舗装については、性能設計に必要な性能指標やその値が定められている。一方、大型車の通行が少ないほ場内農道における土砂系舗装については、全国の農道の大半を占めているにもかかわらず、性能指標の設定が困難であるとして、従前からの仕様規定が踏襲されており、土砂系舗装を維持する場合の舗装構造設計においては、材料や構造に選択の余地は極めて少ない。社会資本整備においては、既存ストックの効率的・効果的な維持管理が求められているが、これは農道整備においても同様であり、そのためには農道の既存ストックとしての土砂系舗装を適切に評価し、有効に活用することが必須であると考えられる。

既往の土砂系舗装に関する国内の研究成果は見当たらなかったが、農道に関する既往の研究成果としては、幹線道路のアスファルト舗装路面を対象とした農産物の輸送時の車両荷台の振動と荷傷みの関係や路面性状と荷傷みの関係が明らかにされており、その中で検討されている疲労破壊の考え方は、土砂系舗装の性能を検討する上でも参考になるところが多い。また、東南アジアの富裕層をターゲットとした農産物の荷傷み防止のための梱包技術に関する研究も盛んに行われ、農産物ごとに適した梱包方法が提案されている。材料面では、土砂系舗装に近い材料を用いた土系舗装について、一般の道路への適用性が検討されており、土砂系舗装の整備を考えるにあたって参考となる成果も認められた。しかしながら、いずれの研究も評価に用いた舗装路面は都市間の幹線道路であり、生産者の輸送に関するものではなく、集荷後の輸送業者による大量輸送時を対象としたものとなっている。また海外においても土砂系舗装への関心は低く、研究も着手されていない状況にある。

本研究の最終目標は、『ほ場内農道における土砂系舗装の性能設計に必要な性能指標やその値（閾値）を示すとともに、効果的で経済的な整備手法を提案すること』にある。性能指標やその値を示すためには、数多くの実路での調査データに基づいた分析や室内での評価試験を繰り返し実施して評価することが必要であり、効果的で経済的な整備手法を提案するためには、各地の実路で試験施工を行い、長期に亘る路面や交通量等の追跡調査・分析を継続する必要があるものと考えられる。本研究では、その最終目標に近づくために、以下のようなことを目標として設定し研究を行った。

- ① ほ場内農道の利用者であり管理者でもある土地改良区がどのような機能（性能）を農道に求めているのかを明らかにし、土砂系舗装に求められる機能を整理する。
- ② ①の求められる機能を踏まえ、既設土砂系舗装の現状性能を明らかにする。
- ③ ②の現状性能を基に、荷傷みに配慮した土砂系舗装の路面凹凸の閾値を提案する。
- ④ ①を踏まえ、土砂系舗装の性能設計に必要な性能評価・照査手法を提案する。
- ⑤ ②、④を踏まえ、土砂系舗装材料の供用性能を試験舗装の追跡調査から明らかにし、望ましい整備手法のあり方を提案する。

1.4 本論文の構成

本論文は、次の7章から構成されており、各章の関係は図-1.6に示すとおりである。

第1章 序論

第2章 土地改良区が求める農道舗装の機能に関する調査 [13]

第3章 既設土砂系舗装の現状性能に関する研究 [14,59,60]

第4章 荷傷みに配慮した土砂系舗装の路面凹凸の閾値に関する研究 [60]

第5章 土砂系舗装材料の性能評価・照査手法に関する研究 [15,19]

第6章 試験舗装による土砂系舗装材料の供用性能に関する研究 [59,61]

第7章 結論

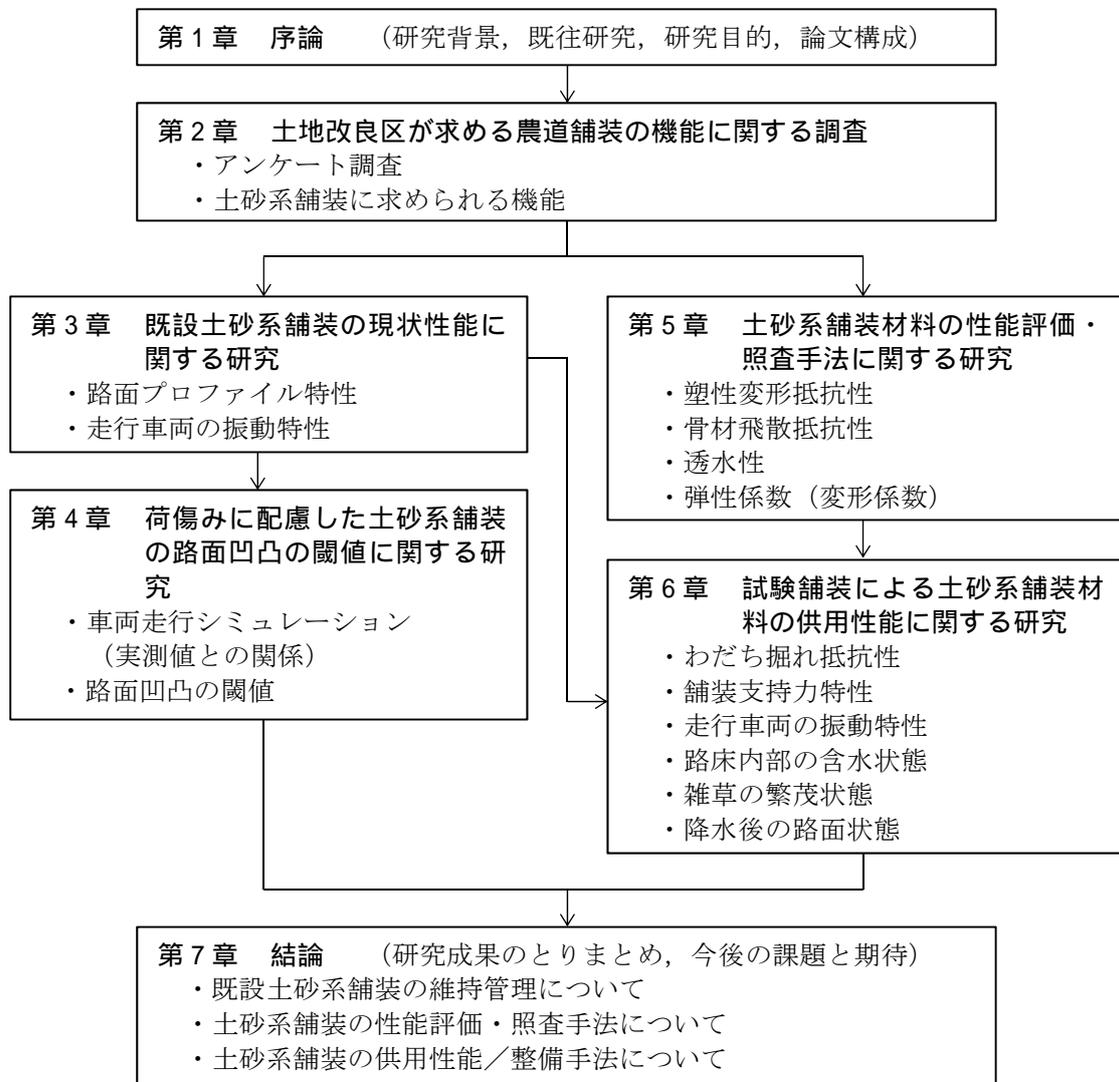


図-1.6 本論文の各章の関係

各章の主な内容を以下に示す。

第1章 序論

本研究の背景について述べ、既往の研究成果を踏まえたうえで課題を整理し、本研究の目的を示した。

第2章 土地改良区が求める農道舗装の機能に関する調査

調査対象に土地改良区を選定した背景を土地改良区の成り立ちから整理して示すとともに、ほ場内農道の利用者でもあり管理者でもある土地改良区に対するアンケート調査から農道の問題抽出を行い、本研究に先立ち、土地改良区が農道に求めている機能について考察し、土砂系舗装に求められる機能を整理した。

第3章 既設土砂系舗装の現状性能に関する研究

既設土砂系舗装の現状性能の把握を目的として、路面形状特性および車両走行時の荷台の振動特性を取り上げ、まず、既設土砂系舗装の縦断方向の路面形状（路面プロファイル）がどのようになっているのか、プロファイルデータの比較や周波数分析等を行った。その結果、土砂系舗装は一般の道路舗装と比べて短い間隔で比較的大きな凹凸を有しているなどの路面特性を明らかにした。次に、既設土砂系舗装上を軽トラックが走行した際に荷台の振動はどのような応答を示すのかを把握するために実路での走行実験を行い、振動加速度データの比較や路面プロファイルとの関係を調べた。その結果、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認められ、雑草が繁茂していると振動加速度は大きくなること等がわかり、荷傷み防止の観点からも雑草繁茂抑制が重要であること等を明らかにした。

第4章 荷傷みに配慮した土砂系舗装の路面凹凸の閾値に関する研究

荷傷みが生じる路面凹みの閾値を見出すために、路面形状と振動加速度の関係をより単純化した条件で、車両運動シミュレーションソフトを使った検討を行った。具体的には、まず、車両運動シミュレーションにより求まる振動加速度と実測値とを比較し、強い相関関係があることを示した。次に、正弦波形で近似した仮想路面の凹み上での走行をシミュレートすることで、路面の凹み形状と軽トラックの荷台に生じる垂直方向の振動加速度の関係を調べた。その結果、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こと等を明らかにした。

第5章 土砂系舗装材料の性能評価・照査手法に関する研究

土砂系舗装の性能規定化に資する性能評価・照査手法の確立を目指して、土砂系舗装の路面に適用可能な材料として4種類の材料を選定し、種々の物性試験により材料特性を評価するとともに、土砂系舗装材料の性能照査手法について考察を行った。そして、従前の試験方法を応用することで、土砂系舗装材料の塑性変形抵抗性や骨材飛散抵抗性の評価、弾性係数の推定が可能であること等を明らかにした。

第6章 試験舗装による土砂系舗装材料の供用性能に関する研究

土砂系舗装の性能を定量的に把握することを目的として、2009年12月に鳥取大学付属農場内にて土砂系舗装の試験舗装を構築し、わだち掘れ抵抗性、舗装支持力特性、車両振動特性、含水状態、雑草繁茂状態等について、継続した調査を実施した。これら約2年間の調査結果を整理・解析することで、7種類の土砂系舗装材料の供用性能を明らかにした。

第7章 結論

本研究から得られた知見を「既設土砂系舗装の維持管理」「土砂系舗装の性能評価・照査手法」「土砂系舗装の供用性能／整備手法」に分類・整理して示すとともに、残された課題と今後の研究への期待を述べた。

第1章の参考文献

- [1] 地球出版（株）：農村道路，農林省農地局監修，1968.11.
- [2] 農林水産省：土地改良事業計画設計基準・設計「農道」，2005.3.
- [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] 国土交通省：道路統計年報2011
(国土交通省 HP に掲載 <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html>)
- [5] (財) 東京市政調査会：都市調査報告⑬補助金行政にみる規律密度－農道整備事業を事例として－，2008.5.
- [6] (社) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説，2001.7.
- [7] (社) 日本道路協会：舗装設計施工指針，2001.12.
- [8] (社) 日本道路協会：舗装性能評価法，2006.1.
- [9] (社) 日本道路協会：舗装設計便覧，2006.2.
- [10] 農林水産省：21世紀の社会構造に対応する農業農村整備の展開方向，2006.3.
- [11] 農林水産省：食料・農業・農村基本計画，2010.3.
- [12] 国土交通省：今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について，社会資本整備審議会・交通政策審議会第9回技術部会資料，2012.7.
- [13] 緒方英彦，野田智之，坂本康文，篠塚政則，鎌田修，中村和明：水田地域におけるほ場内農道の要求機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.
- [14] 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ァイルに関する研究，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.I_81-I_86，2011.12.
- [15] 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.
- [16] 緒方英彦，野田智之，坂本康文，篠塚政則：土砂系舗装の圃場内農道における路面及び地盤性状の一考察，平成22年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.472-473，2010.9.
- [17] 中村和明，篠塚政則，鎌田修，坂本康文，緒方英彦：土砂系舗装の路面プロファイルと振動特性の評価，平成22年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.474-475，2010.9.
- [18] 坂本康文，達増康隆，野田智之，緒方英彦：降雨と水田水管理による土砂系舗装の地盤弾性係数と土壌水分量の変化，平成23年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.556-557，2011.9.
- [19] 達増康隆，坂本康文，緒方英彦：繰返し載荷 CBR 試験の土砂系舗装材料への性能照

- 査手法としての適用性，平成 23 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.558-559，2011.9.
- [20] 野田智之，緒方英彦，坂本康文，篠塚政則：土砂系舗装路面の縦断プロファイルと走行車両の振動加速度，平成 23 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.560-561，2011.9.
- [21] 石谷孝佑：青果物の品質とは何か，どのように高めるか，(社) 日本生産者 GAP 協会 GAP 普及ニュース第 12 号，pp.6-8，2010.3.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 小林こずえ，長野英治：荷傷み低減への取り組み－長距離輸送におけるいちごの傷みの定量評価－，日野技報 (59)，pp.46-50，2008.5.
- [26] 小林こずえ，輸送時の荷傷みを低減するトラックの開発－「いちご」の傷みと振動特性の関係－，包装技術 48(4)，pp.344-348，2010.4.
- [27] 高橋和博，中條誉志幸，小野寺玲子，伊東良久，石川豊，中村ゆり，羽山裕子：オウトウ輸出における荷傷み防止方法，東北農業試験研究発表会資料－東北農業研究果樹部会 (63)，pp.105-106，2010.12.
- [28] 今野勉，小野寺玲子，工藤信，伊東良久，石川豊，中村ゆり，羽山裕子：モモ輸出における荷傷み防止方法，東北農業試験研究発表会資料－東北農業研究果樹部会 (63)，pp.107-108，2010.12.
- [29] 岡山県：平成 20 年度事業展開 [海外]－輸送調査の結果 (詳細)，2008.12.
- [30] (財) 福岡県産業・科学技術振興財団：超小型センサを利用した農産物用資材の機能性評価と新資材の開発，産学官共同研究開発事業研究成果報告書 (平成 20 年度～平成 21 年度)，2010.3.
- [31] 竹内康，江向俊文，齋藤正弘，姫野賢治，牧恒雄：広域農道におけるアスファルト舗装のひび割れ発生形態，平成 16 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集，pp.266-267，2004.
- [32] 平井和典，竹内康，江向俊文，牧恒雄，齋藤正弘，村上由貴：広域農道におけるアスファルト舗装の疲労ひび割れに関する研究，平成 17 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集，pp.608-609，2005.
- [33] 姫野賢治，渡辺隆，丸山暉彦：アスファルト混合物の拡張された疲労破壊規準に関

- する研究, 土木学会論文集, No.378, pp.259-268, 1987.
- [34] 竹内康, 江向俊文, 大野敦弘, 細見康文, 齋藤正弘: 広域農道におけるアスファルト舗装の縦ひび割れ発生状況, 平成 17 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.612-613, 2005.
- [35] AASHTO: *AASHTO Design Guide 2002*, Part 3 Chapter 3, pp.3.3.1-3.3.113, 2002.
- [36] 細見康文, 竹内康, 江向俊文, 齋藤正弘, 牧恒雄: 農道の路面性状と車両振動に関する研究, 平成 17 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.610-611, 2005.
- [37] 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, 東京農大農学集報, 51(4), pp.177-184, 2007.
- [38] (社) 土木学会: 路面のプロファイリング入門ー舗装工学ライブラリー1ー, pp.49-56, 2003.
- [39] (財) 高速道路調査会: 舗装の路面管理基準に関する検討 (日本道路公団委託), pp.44-48, 2004.
- [40] 東日本高速道路 (株), 中日本高速道路 (株), 西日本高速道路 (株): 設計要領第一集舗装編, (株) 高速道路総合技術研究所, pp.128-158, 2011.7.
- [41] 五傳木一, 坂本康文, 山埜井明弘, 川上篤史: 土系舗装材料の車道への適用性に関する一検討, 第 65 回土木学会年次学術講演会, V-130, 2010.9.
- [42] 青木正樹, 林昭一, 川上篤史: 固化材に特殊樹脂乳剤を使用した土系舗装, 第 65 回土木学会年次学術講演会, V-30, 2010.9.
- [43] 中塚将志, 青木正樹, 林昭一, 川上篤史, 西島純一郎: 特殊樹脂乳剤を使用した土系舗装の開発, 第 28 回日本道路会議, No.32030, 2009.10.
- [44] 中原大磯, 長谷川淳也, 美馬孝之: 固化材系土舗装の適用性検討, 第 28 回日本道路会議, No.32028, 2009.10.
- [45] 高橋秀典, 長谷川淳也, 川上篤史: 車道適用を目指した加熱型まさ土舗装の開発, 第 28 回日本道路会議, No.32027, 2009.10.
- [46] 新井篤洋, 大谷健, 多田悟士: 自然風薄層舗装材料の検討, 第 28 回日本道路会議, No.32007, 2009.10.
- [47] 川上篤史, 加納孝志, 久保和幸: 土系舗装の車道への適用に向けた検討について, 第 28 回日本道路会議, No.32P03, 2009.10.
- [48] 大嶋智彦, 五傳木一, 山埜井明弘, 川上篤史: セメント・フォームドアスファルトを用いた土系舗装の車道への適用性検討, No.32P02, 第 28 回日本道路会議, 2009.10.
- [49] 多田悟士, 浅野嘉津真, 川上篤史: 水添脱色バインダを使った土風加熱混合物の検討, 第 28 回日本道路会議, No.32P01, 2009.10.
- [50] Dan Brown: Expanded Asphalt Sees Growing Global Market, *Engineering News-Record*,

1998.3.

- [51] S. Maccarrone, G. Holleran, D. J. Leonard, S. Hey. Dip: Pavement Recycling Using Foamed Bitumen, *Proceeding 17th ARRB Conference Part 3*, 1994.8.
- [52] Daniel C. Brown: Wisconsin demo explores in-place asphalt rehabilitation, *Road & Bridges*, 1997.6.
- [53] 岩川治, 高田長武: 車両の荷台上の位置と振動加速度との関係, *日本林学会誌* 45 (11), pp-357-363, 1963.11.
- [54] 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.
- [55] TRL(UK), Overseas Center: *OVERSEAS ROAD NOTE 31 (FOURTH EDITION) - A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries -*, 1993.
- [56] FHA(US): *Gravel Roads – Maintenance and Design Manual -*, South Dakota Local Transportation Assistance Program, 2000.11.
- [57] EPA(US): *Environmentally Sensitive Maintenance for Dirt and Gravel Roads*, 2006.2.
- [58] 内閣府政策統括官室: アジアがけん引する景気回復とギリシャ財政危機のコンテジョン, *世界経済の潮流 2010 年 I<2010 年上半期世界経済報告>*, 2010.5.
- [59] 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—縦断形状と振動加速度による平坦性の評価—, *農業農村工学会論文集 No.278*, pp.121-128, 2012.4.
- [60] 坂本康文, 五傳木一, 芳賀潤一, 緒方英彦: 土砂系舗装の路面形状と車両振動特性に関する研究, *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 卷), pp.I_37-I_44, 2012.12.
- [61] 坂本康文, 五傳木一, 芳賀潤一, 緒方英彦: 試験舗装による土砂系舗装材料の供用性能評価, *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 卷), pp.I_131-I_138, 2012.12.

第2章 土地改良区が求める農道舗装の機能に関する調査

2.1 概要

わが国の農道の総延長距離は、第1章でも述べたように約17.5万kmと膨大なものとなっているが、舗装率は35.7%と低く、管理主体別の舗装率は都道府県が59.4%、市町村が42.0%、土地改良区が22.7%と、特に延長距離の割合が高い市町村、土地改良区が管理主体の農道において低い[1]。農業生産活動、農産物流通、農村社会生活において重要な役割を果たす農道には、走行性や快適性および農産物輸送時の荷傷み防止等の機能を確保するために舗装が必要とされるが、実情としてその整備状況は十分であるとは言えない。

一方、農林水産省が取りまとめた2008～2012年度の土地改良長期計画では、自給率向上に向けた食料供給力の強化の視点から、農地の区画整理等が約200万ha以上実施される予定[2]であり、農地の集積化や高度利用化、営農体系の変化に伴い農地の区画整理が将来的に実施されることが考えられる。農地と農道は、一体とした整備がなされることで、農業生産活動や農産物流通をつつがなく行うことができ、農地の区画整理に伴う農道の再整備も必要になると考えられる。

農道の舗装率の向上を含めた整備は、基幹的農道とほ場内農道に大別される農道の種類を踏まえ、農道に要求される機能に基づいて舗装工法を選択する等、経済的なものでなければならない。特に幹線農道、支線農道、耕作道に分けられるほ場内農道においては、走行車両の種類の限定、農道の脇に存在する農地や水路との位置関係、あるいは水田地域、畑地域で異なる路面高[3]等、供用環境や周辺環境の条件を見定めて機動的に整備方針を定めることが求められる。

ほ場内農道の舗装率を含めた整備状況は、前掲の表-1.1に示したように、管理主体別、幅員別でのみ整理されたものであることから定量的に把握できない[1]。しかし、市町村や土地改良区が管理主体となっている農道は、幅員4.0m以上に比べてほ場内農道と考えられる幅員1.8～4.0mの延長距離が長いことから、表中の舗装率より低い可能性が高い。つまり、舗装の整備により確保される走行性や快適性および農産物輸送時の荷傷み防止等の機能は、地域により状況は異なるにしてもほ場内農道において確保されていない可能性が高い。

そこで、ほ場内農道の利用者でもあり管理者でもある土地改良区に対するアンケート調査から農道の問題抽出を行い、土地改良区が農道に求めている機能について考察することとした。本章では、調査対象に土地改良区を選定した背景を土地改良区の成り立ちから整理して示すとともに、土地改良区が求める農道の機能を取りまとめた[4]。

2.2 土地改良区をアンケート調査対象とした背景

今回のアンケート調査の対象として土地改良区を選定した大きな理由としては、ほ場内農道の管理主体の多くが土地改良区であるということにある。

土地改良区とは、土地改良法（1949年6月6日法律第195号）に基づく土地改良事業を施行することを目的として同法に基づいて設立された法人で、2002年からは「水土里（みどり）ネット」という愛称で呼ばれており、15人以上の農業者が受益地内の事業参加資格者の3分の2以上の同意を得た上で、土地改良事業計画や定款等について都道府県知事の認可を得て設立される。農道は、農業振興地域における道路網のうち、農業活動に直接関わりを持つ道路であり、農業振興の観点から、ここでいう土地改良事業として整備されるのが一般的である〔5,6〕。

一方、道路法に基づく道路においては、高速自動車道路、一般国道、都道府県道および市町村道の4種類に区分され、高速自動車国道および一般国道については国の公共物、都道府県道については都道府県の公共物、市町村道については市町村の公共物とされており、高速自動車道路および指定区間内の一般国道については国土交通大臣、指定区間以外の一般国道および都道府県道については都道府県、市町村道については市町村がそれぞれの道路の管理一切の権能を有する道路管理者とされている。道路管理者とは、道路管理権を有している者を指し、その道路管理権とは、法律上認められた特殊な包括的権能のことであり、具体的には、道路の管理、すなわち新設、改築、維持、修繕、災害復旧その他の管理に関する一切の権能である〔7,8〕。

また、土地改良事業の実施手続き上の特色としては、「土地改良法第3条に規定する資格を有する者（農用地所有者等）、市町村、土地改良区および農業協同組合等は、国または都道府県が行うべき土地改良事業の実施について、国営土地改良事業については農林水産大臣に、都道府県営土地改良事業については都道府県知事に、申請することができる」とした申請主義であることと、土地改良事業に参加する資格を有するものは3条資格者であるという耕作者（養畜者）を主体としているところにある。

なお、「3条資格者」とは、事業の施行に係る地域内にある土地について次のいずれかに該当する者とされている。

農用地であって所有権に基づき耕作又は養畜の業務の目的に供されるものについては、その所有者

農用地であって所有権以外の権限に基づき耕作又は養畜の業務の目的に供されるものについては、農業委員会に対しその所有者からの当該土地改良事業に参加すべき旨の申出があり、かつ、その申出が相当であって農業委員会がこれを承認した場合にあっては、その所有者、その他の場合にあっては、その農用地につき当該権限に基づき耕作又は養畜の業務を営む者

農用地以外の土地であって所有権に基づき使用及び収益の目的に供されるものについては、その所有者

農用地以外の土地であって所有権以外の権限に基づき使用及び収益の目的に供されるものについては、その権限に基づき使用及び収益をする者が、その所有者の同意を得て農業委員会に対し当該土地改良事業に参加すべき旨を申し出た場合にあつては、その者、その他の場合にあつては、その所有者

農業委員会とは、主として農地に関する行政に農民の意見を反映させるために、「農業委員会等に関する法律」(1951)および「地方自治法」(1947)に基づいて市町村に設置されている行政委員会である。

すなわち、土地改良事業ならではの特別な施行主体として土地改良区があり、土地改良区が自ら行う土地改良事業においては、その施行・管理主体として活動することになる。

また、土地改良事業により整備された農道は、土地改良施設の一つに位置付けられ、土地改良施設の管理については、受益団体である土地改良区が管理することが原則とされており、土地改良施設の維持管理事業についても、原則として土地改良法上の一つの土地改良事業として組み込まれ、維持管理事業に要する費用は管理主体が負担することが基本とされている。このように、農道の整備・維持管理に要する費用は、道路法上の道路とは違って、国や都道府県からは補助金としての支出であり、受益者である土地改良区も費用負担することが前提となっている。

したがって、道路法上の道路の整備・維持管理を考えるにあたっては、利用者や管理者だけでなく、費用負担者とも言える納税者(国民,県民,市民…)の視点も求められるが、ほ場内農道の整備・維持管理を考えるにあたっては、利用者であり管理者で、かつ費用負担者である土地改良区の視点が重要となる。

以上のことを踏まえ、農道に必要な機能を整理するための方策として、土地改良区を対象としたアンケート調査を実施することとした。

2.3 アンケート調査の内容

わが国のほ場内農道の土砂系舗装において損傷を受けやすいのは、雨水だけではなく水田水管理による湿潤乾燥を繰り返す水田地域に存する土砂系舗装と考えられる。土砂系舗装の維持管理を見据えた検討を行うには、最も損傷を受けやすい環境下にある地域の現状を把握することが好ましいと考え、ここでは水田地域にあるほ場内農道舗装が抱える問題点や求められる機能を整理することとした。

水田地域にある農道が有する問題としては、走行車両の荷重により生じる不陸やひび割れ等の路面の問題、水路の泥上げ場所の確保や雑草の繁茂等に関わる路肩の問題、農道脇にある水路への転落等の通行者の安全確保の問題、一般車両との共用の問題等を挙げることができる。また、未舗装および土砂系舗装の農道においては、これらの問題に加えて、路面における雑草の繁茂、土砂の飛散による走行車両の汚れも加えることができる。農道が有する問題の解決は、問題の質（重要度や解決のための優先度）と農道に要求される機能との関係を明確にした上で合理的に取り組むべきであり、そのためにはまず農道が有する問題の抽出を行い、問題の重要度および問題解決の優先度を明らかにする必要がある。

また、農道の利用者は、農業従事者だけでなく地域住民を含めた国民全員であり、農道の利用目的および利用頻度に応じて、農道が有する問題の質や農道に要望する機能が異なることが考えられる。加えて、農道が有する問題の質や農道に要望する機能は、農業従事者においても利用する農道の舗装状況により異なることが考えられ、農道により運搬される農産物の種類によっても荷傷みへの影響に応じて異なることが考えられる。

今回のアンケート調査は、水田営農を主とする鳥取市内の土地改良区(受益面積:640ha, 組合員数:1,450名)に対して実施した。ただし、区内の農道の大半はアスファルト舗装が施されているという条件下であることを付記しておく。

アンケート内容は、以下のように「現状の農道に対する意見」と「農道の整備に考慮すべき条件」が把握できるように配慮し、質問内容を設定した。回答方法は、「現状の農道に対する意見」については(ア)思う,(イ)どちらともいえない,(ウ)思わない,の3つからの選択回答とし、「農道の整備に考慮すべき条件」に関しては(ア)特に考慮,(イ)少し考慮,(ウ)考慮しない,の3つからの選択回答とした。

【現状の農道に対する意見の調査内容】

農作業に関係のない一般の車が農道を通行するのは迷惑である

農道は舗装(アスファルト舗装やコンクリート舗装)されている方がよい

農道の幅が狭い

農道の脇に繁茂している雑草が気になる

農道の路面に繁茂している雑草が気になる

農道の路面の凸凹が気になる
農道の路面のひび割れが気になる
農道の脇に水路の泥上げの場所があるとよい
農道に夜間照明があるとよい
農道の脇にガードレールがあるとよい

【農道の整備に考慮すべき条件の調査内容】

走行時の農業用車両の揺れ・振動による不快感
農産物輸送時の荷傷み
負担する経費の額
修繕が必要のない期間の長さ
周辺景観との調和

2.4 アンケート調査結果

アンケート用紙の記入者は、各地区の組合員を代表する総代 90 名であり、77 名から回答が得られた。回収率は 86%であった。

2.4.1 現状の農道に対する意見

現状の農道に対する意見についてのアンケートの集計結果を図-2.1、図-2.2 に示す。

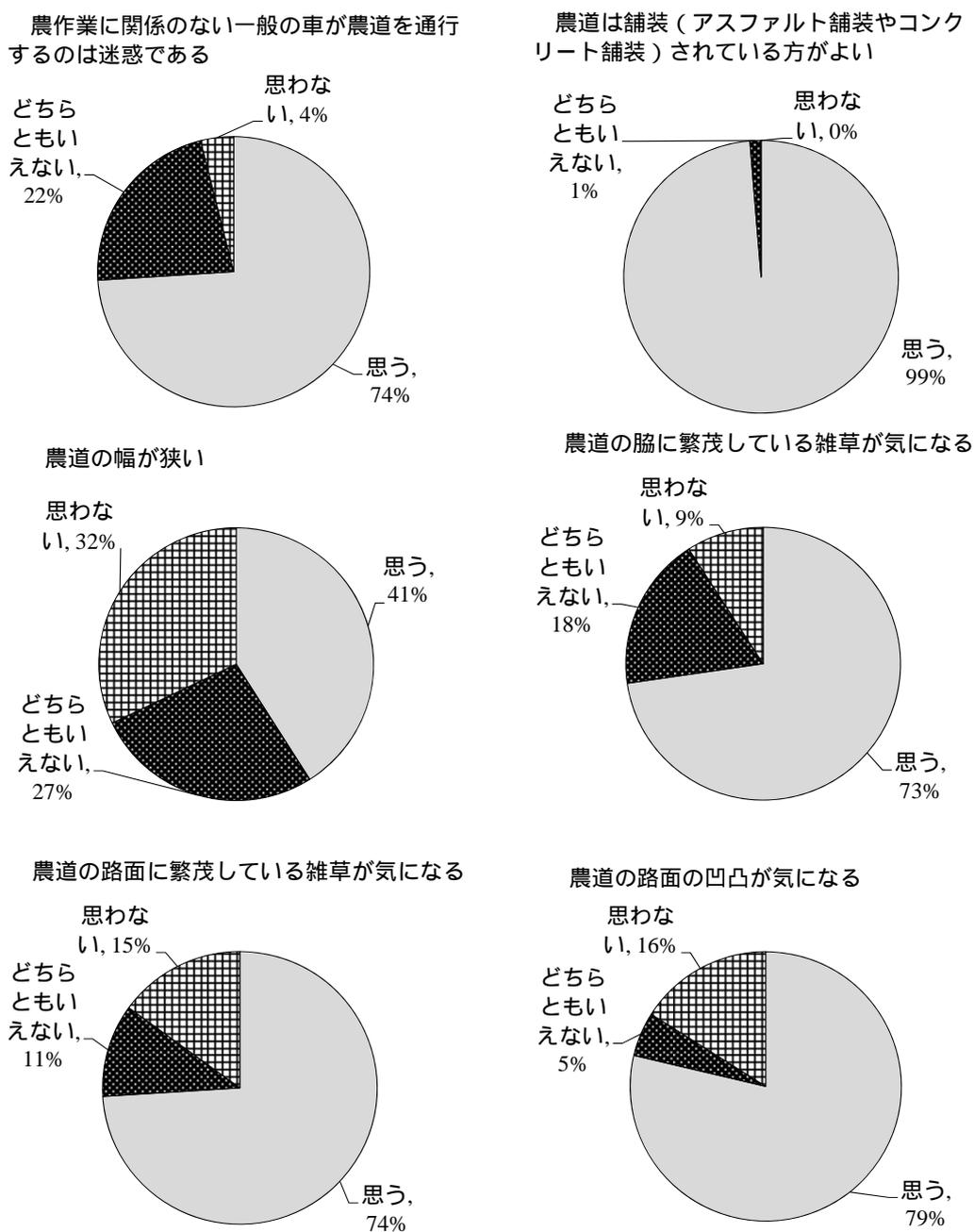


図-2.1 アンケート集計結果【現状の農道に対する意見（質問 ~ ）】

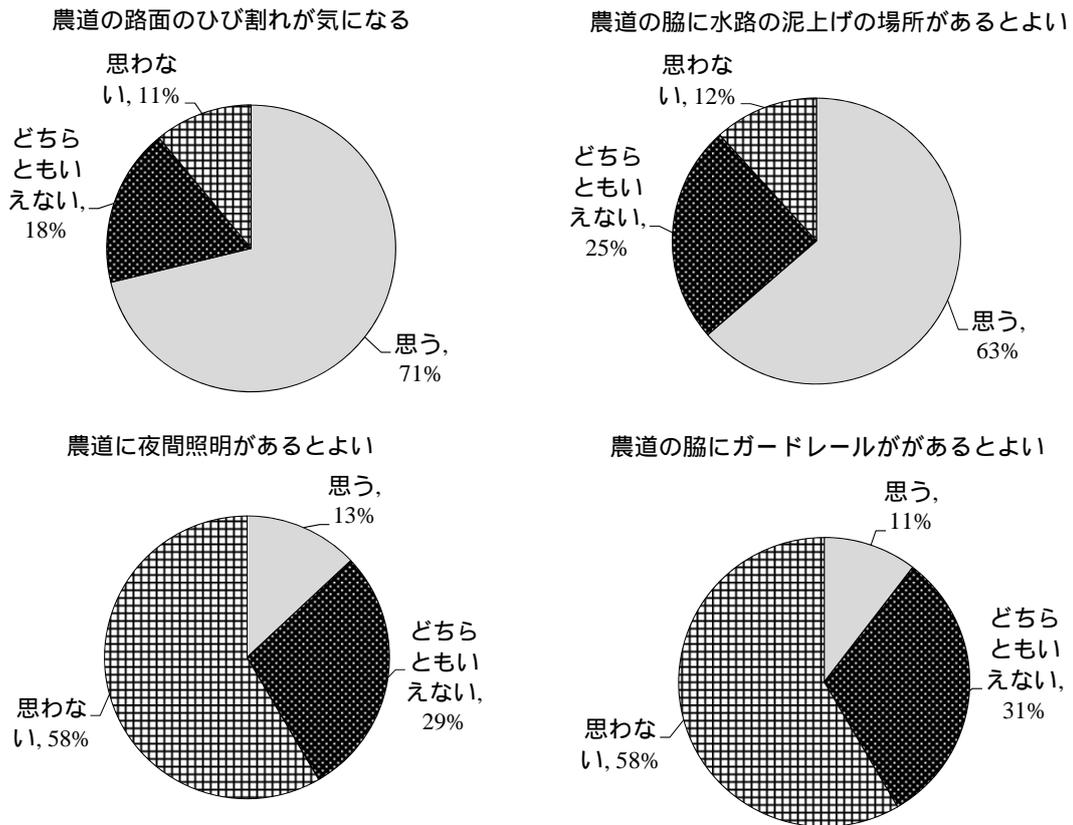


図-2.2 アンケート集計結果【現状の農道に対する意見（質問 ~ ）】

“思う”という回答の割合が最も多いのは、の「農道は舗装されている方がよい」であり、区内の農道が既にアスファルト舗装されており、舗装による路面の改善効果が認められている結果であると思われる。

路面の変状に関するの「路面の雑草が気になる」、の「路面の凸凹が気になる」、の「路面のひび割れが気になる」については、“思う”という回答の割合が71～79%とに次いで多い。これらからは、舗装による路面の改善効果は認めつつも、局所的な路面の変状が利用者に問題とされ、場合によっては舗装の評価を下げる恐れがあることが示唆される。

一方、の「農作業に関係のない一般の車が農道を通行するのは迷惑である」において“思う”という回答の割合が74%あることから、農業生産活動および農産物流通が一般車の通行により阻害されている現状を知ることができる。

また、の「夜間照明があるとよい」、の「ガードレールがあるとよい」において“思う”という回答の割合が少ないのは、付帯設備の設置による農道と農地の移動の障害が懸念された結果であると思われる。

2.4.2 農道の整備に考慮すべき条件

農道の整備に考慮すべき条件に関するアンケートの集計結果を図-2.3 に示す。

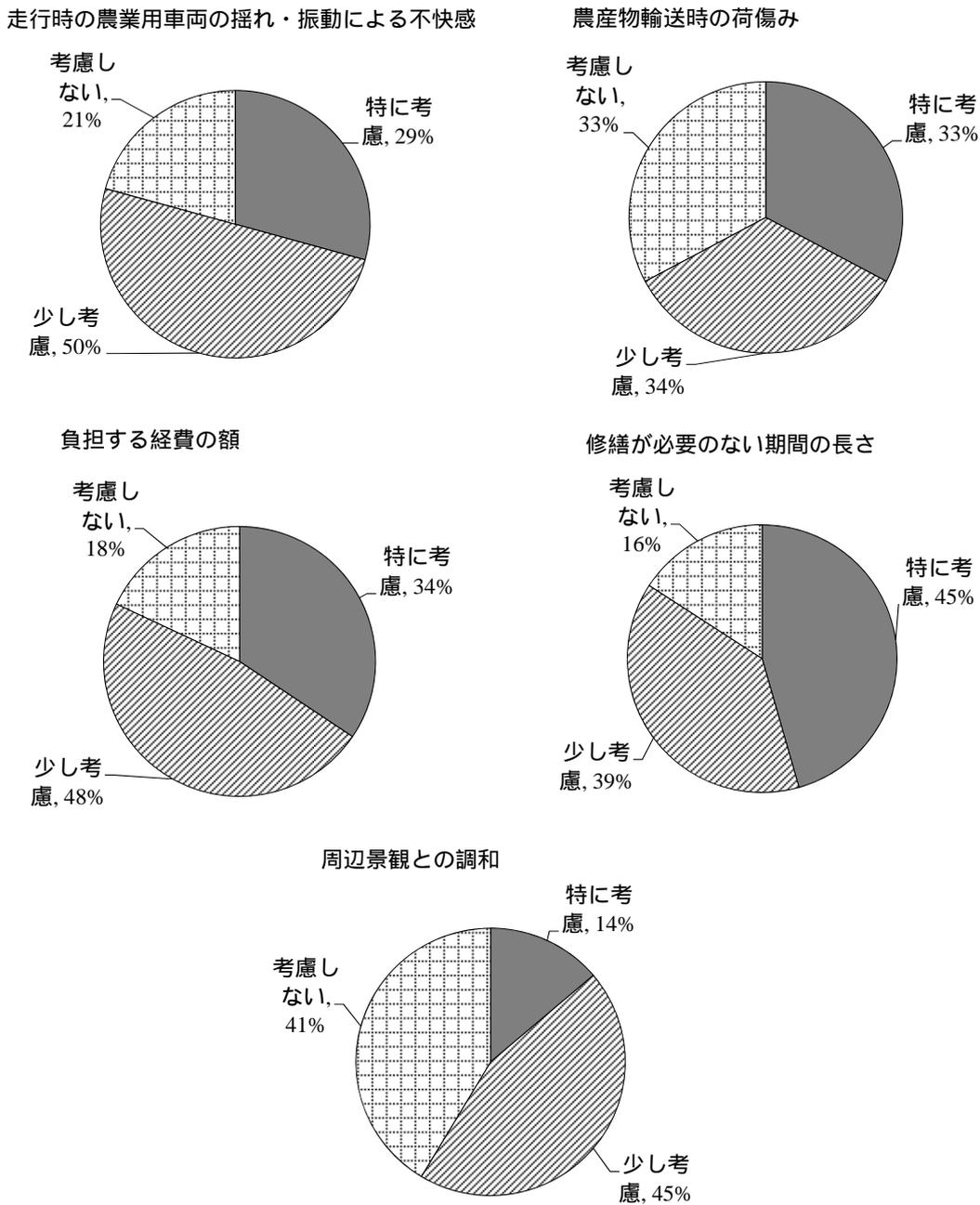


図-2.3 アンケート集計結果【農道の整備に考慮すべき条件】

“特に考慮”という回答の割合が最も多いのは、の「修繕が必要のない期間の長さ」であり、“少し考慮”を含めると84%にもなる。次に“特に考慮”、“少し考慮”を合わせて回答の割合が多いのは、の「負担する経費の額」であり82%になる。この結果からは、

本アンケート調査が土地改良区を対象としたものであることから、受益者負担を伴うことがあり得る農道整備の一端を垣間見ることができ、土地改良区にとって経費の負担額が農道整備のあり方に大きく関わっていることが示唆される。修繕が必要のない期間の長さが負担する経費の額よりも大きく考えられていることから、修繕作業および修繕費の負担の軽減が強く要望されている現状を知ることができる。

走行性や快適性に関する「揺れ・振動による不快感」については、“特に考慮”と回答した割合は と よりも若干ながら低いが、“少し考慮”を含めるとほぼ同じ割合になる。この揺れ・振動による不快感については、前述の2.4.1での考察からも、路面の凸凹やひび割れの変状が関係していると考えられ、局所的な路面の変状が農道における走行性や快適性の機能の確保においても問題になることがわかる。

の「荷傷み」において“特に考慮”、“少し考慮”と回答した割合は67%であり、
、
、
よりも低い。これは、今回のアンケート調査の対象者が水田営農を主とする土地改良区であり、農道により運搬される農産物の多くが穀物類であることから、荷傷みが懸念される野菜類、果樹類を生産する地区と荷傷みに対する意識が異なるためであると考えられる。

農道の整備に考慮すべき条件として“考慮しない”という回答の割合が最も多いのは、
の「周辺景観との調和」である。土地改良区にとって農道は、農業生産活動や農産物流通になくてはならないものであり、農道の使用性に関する機能を主たる要望としており、環境性の機能に関しては副次的なものとして捉えていることが示唆される。

2.5 第2章の結論

今回のアンケート調査の結果からは、路面の雑草、凹凸、ひび割れに代表される路面の変状が問題とされており、この変状に対する修繕を行わなくてよい期間が特に農道の整備において考慮すべき条件となることが明らかとなった。この路面の変状は、農道における走行性や快適性の機能の確保にも影響し、既にアスファルト舗装による整備がなされている農道においては、その改善が特に考慮すべき条件となる。

一方、荷傷み防止の機能の確保については、水田営農を主とする土地改良区において要望がそれほど強くなく、運搬する主たる農作物の種類が異なる水田地域、畑地域によりその重要性が変わることが示唆された。

本調査により得られた結果は、以下のようにまとめられる。

農道の利用者であり管理者でもある土地改良区は、走行性や快適性の機能の確保に関わる路面の変状（雑草の繁茂、凹凸、ひび割れ）の改善を求めている。

農道の利用者であり管理者でもある土地改良区は、農道の整備において考慮すべき条件として“修繕を行わなくてよい期間”を特に要望している。

今回のアンケート調査対象が水田営農が主体の土地改良区であったことを踏まえ、全国規模でのほ場内農道の土砂系舗装に求められる機能を整理してみると、次のように考えられることから、以降の研究ではこれらの機能を念頭に置いて、最終目標である『ほ場内農道における土砂系舗装の性能設計に必要な性能指標やその値（閾値）を示すとともに、効果的で経済的な整備手法を提案すること』に近づくために各種検討を行った。

- (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）傷みしない程度の平坦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。

第 2 章の参考文献

- [1] 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.
- [2] 農林水産省（2008）：食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会配付資料，
2008（http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/h20_3/index.html）
- [3] 農林水産省：土地改良事業計画設計基準・設計「農道」，2005.3.
- [4] 緒方英彦，野田智之，坂本康文，篠塚政則，鎌田修，中村和明：水田地域におけるほ
場内農道の要求機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] 土地改良法（昭和 24 年 6 月 6 日法律第 195 号），最終改正：平成 23 年 8 月 30 日法律
第 105 号
- [6] 土地改良法施行令（昭和 24 年 8 月 4 日政令第 295 号），最終改正：平成 24 年 4 月 6
日政令第 128 号
- [7] 道路法（昭和 27 年 6 月 10 日法律第 180 号），最終改正：平成 23 年 12 月 14 日法律第
122 号
- [8] 道路法施行令（昭和 27 年 12 月 4 日政令第 479 号），最終改正：平成 23 年 12 月 26
日政令第 424 号

第3章 既設土砂系舗装の現状性能に関する研究

3.1 概要

農業生産活動に直接的に影響を及ぼすほ場内農道の舗装率の向上を含めた整備は、ほ場内農道の供用環境や周辺環境の条件を見定めた上で、要求される機能を明確にして経済的に実施されなければならない。そのためには、未舗装および土砂系舗装のほ場内農道における現状を定量的に把握する必要がある。

一般の道路では、舗装の維持修繕における要否の判定には走行車両の車輪通過位置での縦断方向の路面凹凸の標準偏差 σ_{3m} （「舗装の構造に関する技術基準」[1]では、この値を“平坦性”と呼んでいる）が用いられ、 $\sigma_{3m}=3.5\text{mm}$ [2]をその目安として用いることが多い。しかし、一般道とは利用目的等の異なる農道舗装においては、求められる路面の性能が明らかにされておらず、 $\sigma_{3m}=3.5\text{mm}$ をそのまま管理目標に設定することは適切ではない。また、舗装の構造的な支持力を判断する方法として、交通量に応じたFWD (*Falling Weight Deflectometer*: 重錘落下式路面たわみ量測定装置)の49kN 載荷時のたわみ量が限界たわみ量として用いられている [3,4,5,6,7,8]が、これはアスファルト舗装路面やコンクリート舗装路面を対象としたものであり、土砂系舗装に一般の道路舗装での基準をそのまま転用することは現実的ではない。

そこで本章では、既設土砂系舗装の現状性能として、路面形状特性および車両走行時の荷台の振動特性を取り上げ、まず、既設土砂系舗装の縦断方向の路面形状（路面プロファイル）がどのようなになっているのか、プロファイルデータの比較や周波数解析等を行った。その結果、土砂系舗装は一般の道路舗装と比べて短い間隔で比較的大きな凹凸を有しているなどの路面特性等を明らかにした [9,10]。

次に、既設土砂系舗装上を軽トラックが走行した際に荷台の振動はどのような応答を示すのかを把握するために実路での走行実験を行い、振動加速度データの比較や路面プロファイルとの関係を調べた。その結果、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認められ、雑草が繁茂していると振動加速度は大きくなること等がわかり、荷傷み防止の観点からも雑草繁茂抑制が重要であること等を明らかにした [9,11]。

3.2 既設土砂系舗装の路面プロファイル特性

3.2.1 調査路面

土砂系舗装の持つ路面プロファイルの特性を把握するために、第6章で述べる鳥取大学附属農場内に構築した試験舗装の施工前後での測定（路面Ⅰ，路面Ⅱ）に加え，既設の土砂系舗装（路面Ⅲ，路面Ⅳ）や一般道で測定した路面プロファイル（路面Ⅴ，路面Ⅵ）について波形の分析を行った。今回の調査対象とした路面は表-3.1に示す6種類であり，調査箇所の路面の外観は写真-3.1に示すとおりである。

表-3.1 調査対象路面一覧

路面	道路種別	路面構成材
Ⅰ	鳥取大付属農場内ほ場内農道	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	鳥取市大井手土地改良区内ほ場内農道	土砂系材料（細粒分質礫質砂）
Ⅳ	〃	〃
Ⅴ	茨城県牛久市内一般市道	アスファルト混合物
Ⅵ	〃	アスファルト混合物



路面Ⅰ
(鳥取大付属ほ場内農道, L=161m)



路面Ⅱ
(鳥取大付属ほ場内農道, L=161m)



路面Ⅲ
(一般ほ場内農道, L=157m)



路面Ⅳ
(一般ほ場内農道, L=118m)



路面Ⅴ
(一般市町村道, L=150m)



路面Ⅵ
(一般市町村道, L=149m)

写真-3.1 調査対象路面の外観

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，同一路線での試験施工前後の路面である。この支線農道は，営農を目的とした道路ではないために日常の交通量は極め

て少なく、道路の両脇には幅 50cm 程度のコンクリート製用水路が設置されている。路面Ⅰは丈の短い雑草が全面に繁茂している試験施工前の状態の路面である。一方、路面Ⅱは当該路線で路上再生工法による安定処理を施したもの（詳細は第 6 章に記載）で、ほぼ平滑に改良された路面である。

路面Ⅲと路面Ⅳは、鳥取市大井手土地改良区内の一般の営農のためのは場内支線農道であり、わだち部は土砂系材料が露出し、それ以外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。路面Ⅲ、Ⅳにはともに片側に用水路が設けられており、路面Ⅲでは幅 50cm 程度のコンクリート製、路面Ⅳでは幅 2m 程度の素掘りである。

路面Ⅴと路面Ⅵは、茨城県牛久市内の一般市道のアスファルト舗装である。写真でもわかるように、路面Ⅴはひび割れが多くかなり損傷が進んだ状態であるのに対して、路面Ⅵは修繕工事後の新設に近い状態の路面であり、土砂系舗装との比較対象として選定した。

各路面の測定延長は 120～160m であり、路面プロファイルを評価する上では十分な延長とは言えないが、ほ場内農道の実態を踏まえ、路面Ⅴと路面Ⅵについても同程度の延長となるようデータを抽出して用いた。また、いずれの路面も縦断勾配はほとんどない路線である。

3.2.2 調査方法

路面の縦断方向の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) [12] を用い、 σ_{3m} 、路面テクスチャ、IRI (*International Roughness Index*) を求めた。MRP は、内蔵されたジャイロセンサによって装置の傾きを認識し、それによって絶対高さでの路面の凹凸評価が可能な機構を有している。 σ_{3m} は 3m プロファイルメータで測定された 1.5m 間隔の路面凹凸の標準偏差で、式-3.1 で算出される。その概念は図-3.1 に示すように、連続測定ではあるが測定器の移動とともに基準となる高さも変化するため、路面の絶対的な高さを評価したものではない。

$$\sigma_{3m} = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}} \quad \text{式-3.1}$$

- ここに、 σ_{3m} : 平たん性 (mm)
 d : 測定値 (mm)
 n : データ数

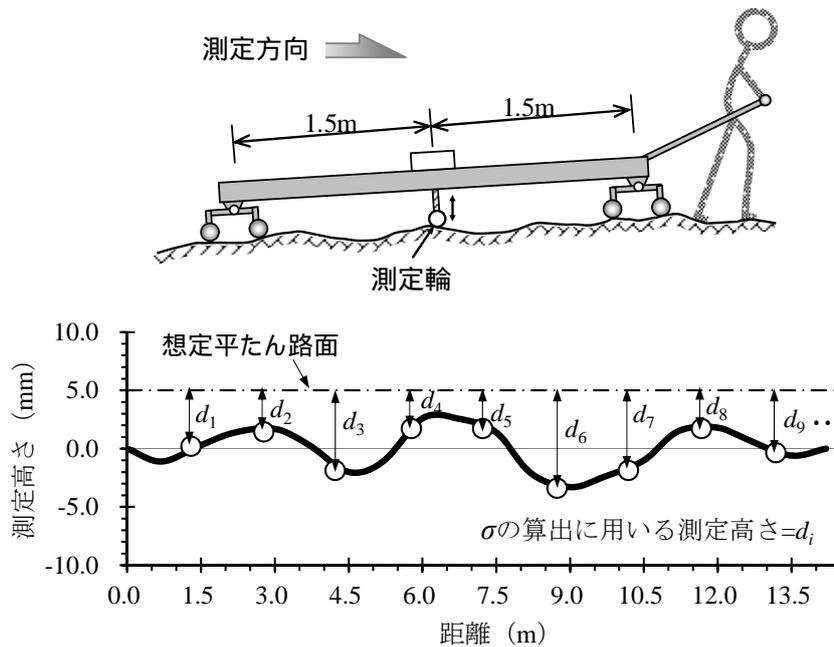


図-3.1 3m プロフィールメータの測定概念図

また、IRI は、1986 年に世界銀行から提案された道路の縦断方向のラフネスを評価する指標で、2 軸 4 輪の車両の 1 輪だけを取り出した仮想車両モデル（クォーターカー）を一定速度で路面上を走行させたときに車が受ける上下方向の運動変位の累積値と走行距離の比として表される。IRI の算出概念は図-3.2 に示すとおりであり、式-3.2 で表される。

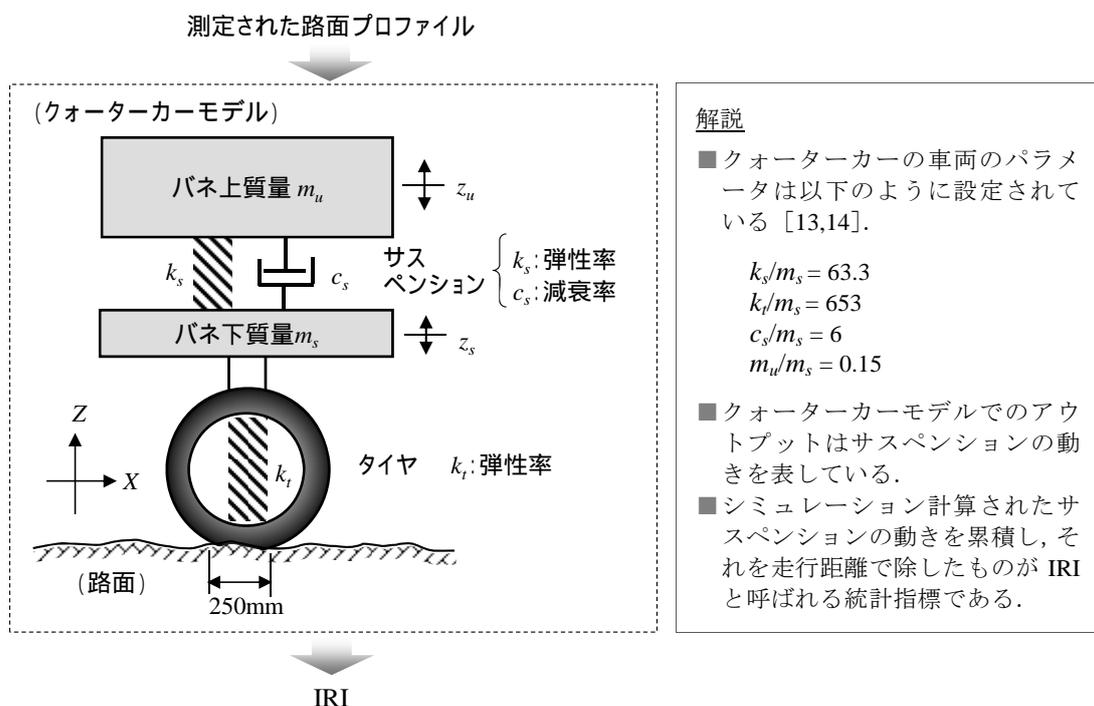


図-3.2 IRI の算出概念図

$$\text{IRI} = \frac{\int^{L/V} |z_s - z_u| dt}{L} \quad \text{式-3.2}$$

ここに、IRI：国際ラフネス指数 (mm/m)

z_u ：バネ上質量の高さ (mm)

z_s ：バネ下質量の高さ (mm)

L ：走行距離 (mm)

V ：走行速度 (km/h)

t ：時間 (s)

データの取り込みは延長距離 1cm ピッチで行い、後述する農用車両（軽トラック）での走行試験での比較を念頭に置き、軽トラックのタイヤの接地長を考慮して測定値の前後 10cm を含めた計 20cm を式-3.3 のように単純移動平均により平滑化し、全体の平均高さを基準として、そこからの差として表した。

$$H_{sma,i} = \frac{H_{i-10} + \dots + H_i + \dots + H_{i+10}}{21} \quad \text{式-3.3}$$

ここに、 $H_{sma,i}$ ： i 番目の地点の単純移動平均後の高さ (mm)

H_{i-10} ： i 番目の地点よりも 10cm 後方の実測高さ (mm)

H_i ： i 番目の地点の実測高さ (mm)

H_{i+10} ： i 番目の地点よりも 10cm 前方の実測高さ (mm)

MRP での測定状況を写真-3.2 に示す。



写真-3.2 MRP 測定状況

3.2.3 路面プロファイルの測定結果

路面ごとの測定結果を図-3.3, 3.4 に示す. 図中には, 3m プロフィールメータでの標準偏差 (σ_{3m}) と IRI も併記した.

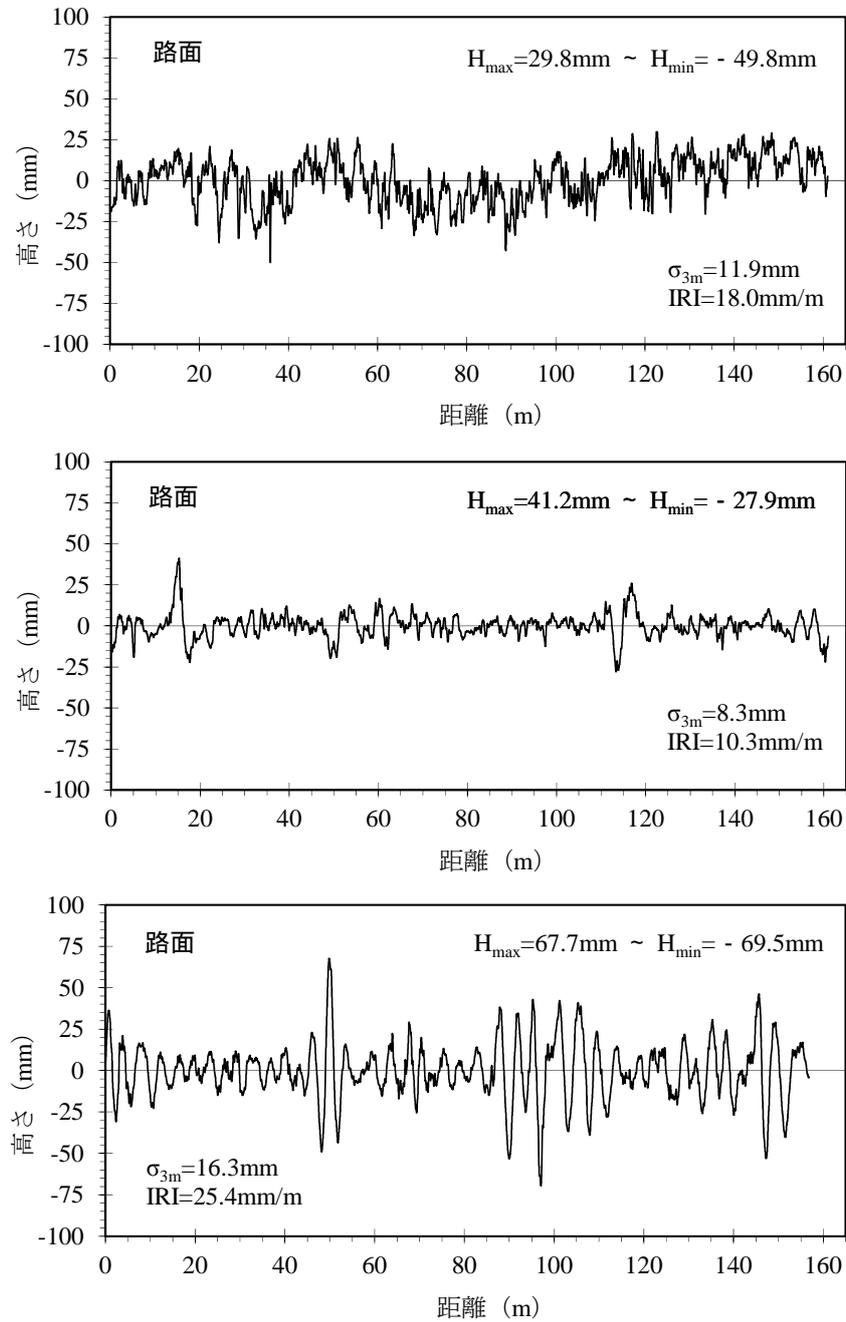


図-3.3 縦断プロファイルの測定結果 (路面 I, II, III)

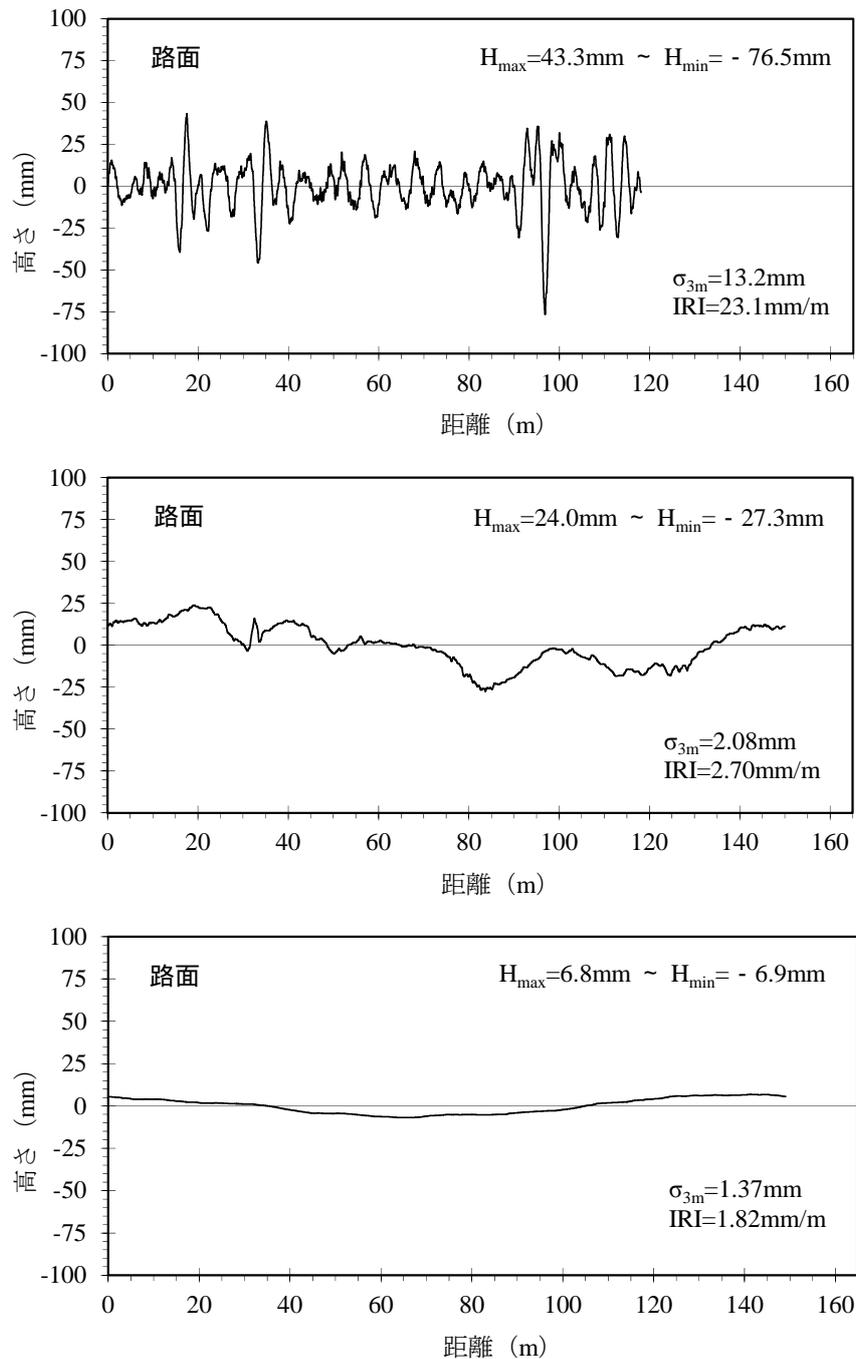


図-3.4 縦断プロファイルの測定結果（路面IV， V， VI）

路面 I ~ IVの土砂系舗装では、短い間隔で大きな凹凸があるのに対して、路面 V， VIのアスファルト舗装では、比較的大きな間隔で凹凸が生じており、その凹凸の振幅だけで見ると、路面VIは極端に小さくなっている。特に土砂系舗装の σ_{3m} は一般の道路の管理目標とされている 3.5mm を大きく上回っており、土砂系舗装の路面プロファイルの特徴は、一般の道路よりも短い間隔で大きな凹凸があることと言える。

路面ごとに得られた σ_{3m} と IRI の関係を示すと図-3.5 のようになる。見掛け上は強い相関が認められるが、前述のように波形には大きな違いがある。IRI と路面状態には図-3.6 のような関係があるとされており [13,14]、土砂系舗装は“粗い舗装されていない道路”に該当する。しかし、そこでの標準走行速度は幅が広く、かつ農道の設計速度の下限値である 20km/h に相当する IRI は示されていない。したがって、土砂系舗装の IRI を適切に評価するためには、求められる性能との関連付け等を別途検討する必要があるものとする。

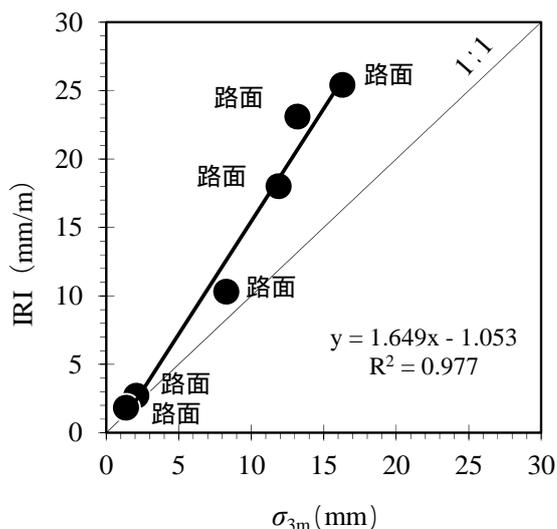


図-3.5 σ_{3m} と IRI の関係

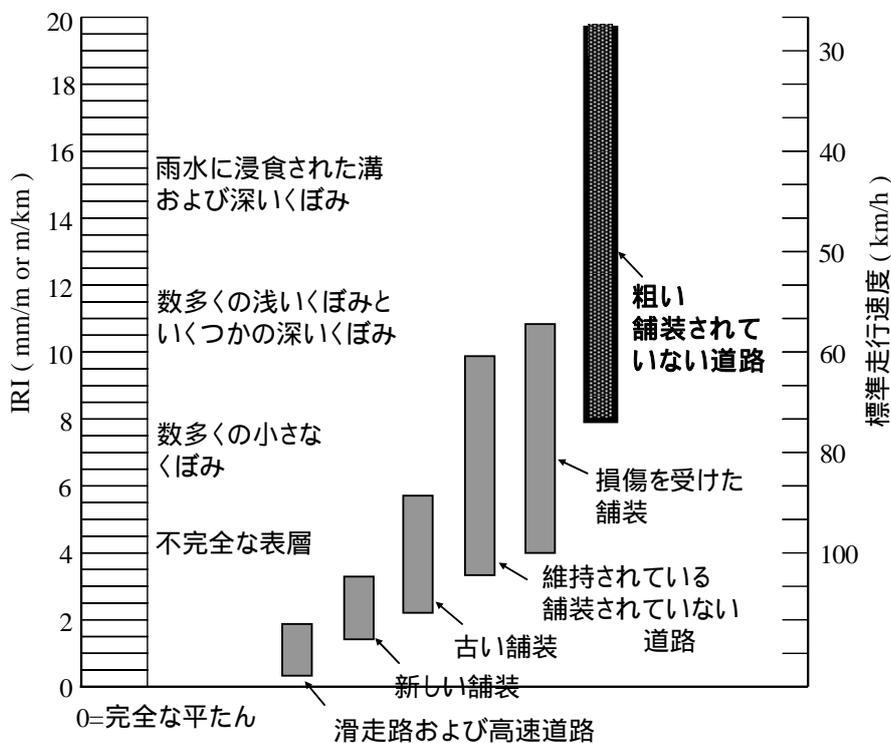


図-3.6 路面性状とラフネスの関係

次に、路面ごとのプロファイルデータの分布を図-3.7, 3.8に示す。個々の路面高さデータの標準偏差 (SD_{pro}) も併記した。どの路面も正規分布に近い分布形状ではあるが、いずれも最大度数を示す階級は平均値よりもやや右側に偏っていることがわかる。

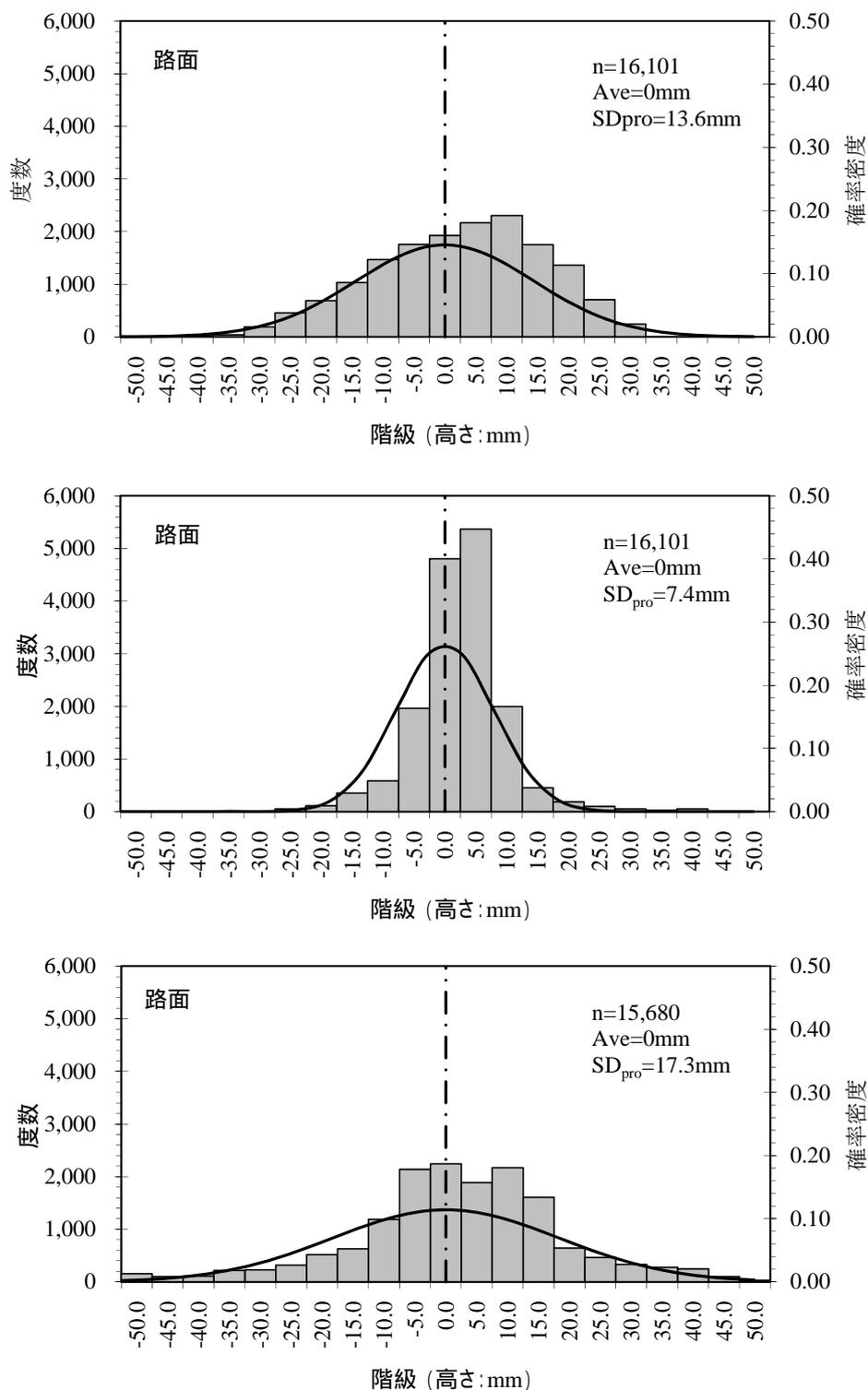


図-3.7 路面プロファイルデータの分布 (路面 I, II, III)

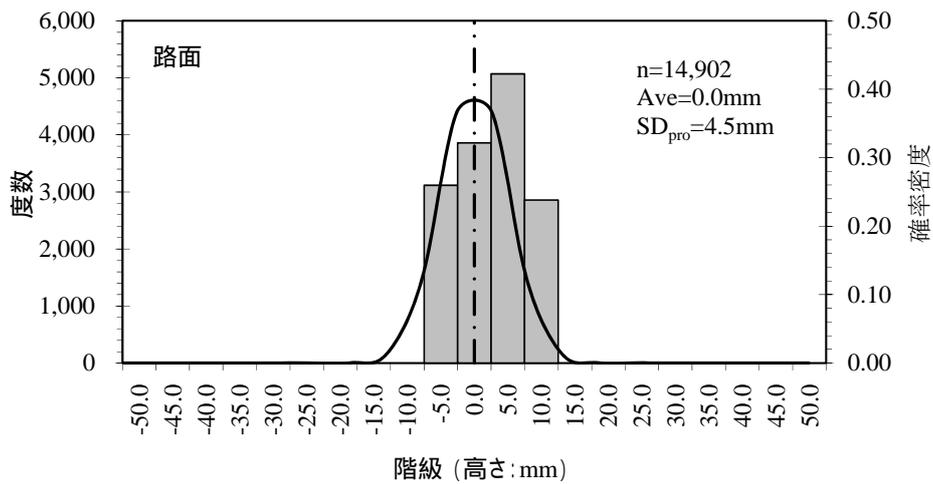
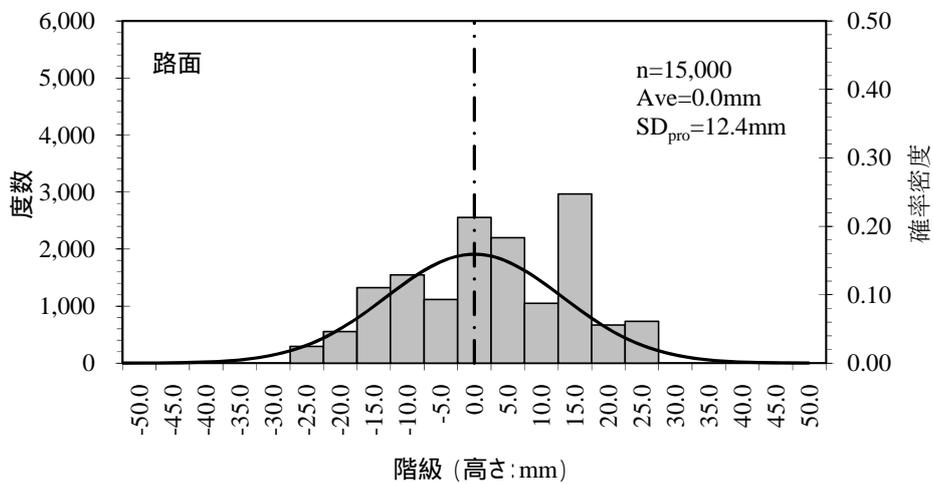
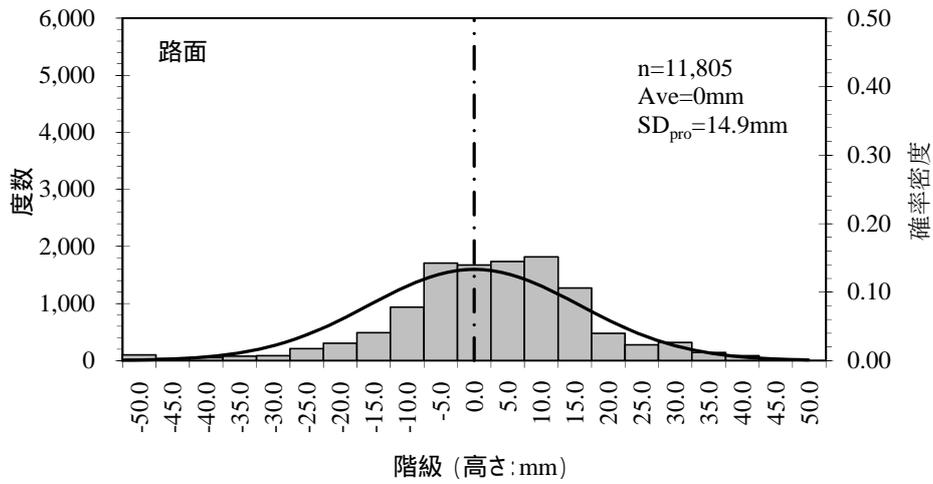


図-3.8 路面プロファイルデータの分布 (路面IV, V, VI)

次に、ここで求めた SD_{pro} と IRI の関係を図-3.9 に示す。 σ_{3m} との関係とは違って、土砂系舗装とアスファルト舗装では関係式の勾配が大きく異なった形で現れている。特に、路

面VIは土砂系舗装の延長線上に近い値であるのに対して、路面Vは大きく外れており、データ数は少ないものの、土砂系舗装とアスファルト舗装における路面の損傷形態の違いが、 SD_{pro} とIRIとの関係の違いとなって現れているものと考えられる。

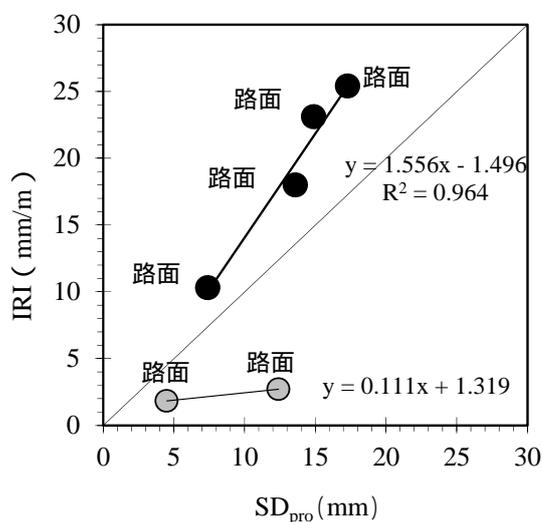


図-3.9 SD_{pro} とIRIの関係

図-3.5に示した σ_{3m} とIRIの関係と図-3.9の SD_{pro} とIRIの関係が異なっている要因としては、 σ_{3m} の算出に用いる路面高さが1.5m間隔で測定された値であることと、連続測定ではあるが測定器の移動に伴い基準となる高さに変化するため、路面の絶対的な高さが評価できていないことなどが挙げられる。

以上のことから得られた知見を取りまとめると、まず、土砂系舗装は一般のアスファルト舗装に比べて短い間隔で比較的大きい凹凸を含む路面を有していることがわかった。また、そのような特徴を持つ土砂系舗装の損傷度合いを評価するには、従前からの平坦性の評価指標である σ_{3m} だけでなく、個々の路面高さデータの標準偏差(SD_{pro})を測定・評価し、IRIとの関係を把握することが有用であると考えられる。

3.2.4 路面プロファイルの周波数分析

路面のプロファイルは、様々な周波数と振幅を有する波の複合体と捉えられる。路面の波状特性を分類したものとして、図-3.10 に示す PIARC (*Permanent International Association of Road Congress*) の路面性状に関する技術委員会 C1 から報告されたものがある [15]。これによると、路面の平坦性は 5cm~50m の波長帯に属し、車両の乗り心地と関係が深いことがわかる。そこで、土砂系舗装の路面プロファイルの特徴をより明確に示すために、測定したプロファイルデータの周波数分析を行うこととした。

路面の波状特性を分類する手法には、パワースペクトル密度 (*Power Spectral Density* ; PSD) 関数による方法がある。上記のように路面のプロファイルには種々の正弦波 (sinusoid) における波長のスペクトルが含まれており、その様々な波数の重要度を統計的に表したものが PSD 関数である [13,14,16]。図-3.11 に、今回計測した路面プロファイルの空間周波数と路面高さの PSD の関係を示す。同一周波数あるいは波長で比較した場合、下方に位置するほどその成分が少ないことを意味しており、下方に位置する方が路面状態は良いと判断される。なお、ここでの PSD は Pro VAL [17] を使って求めた。

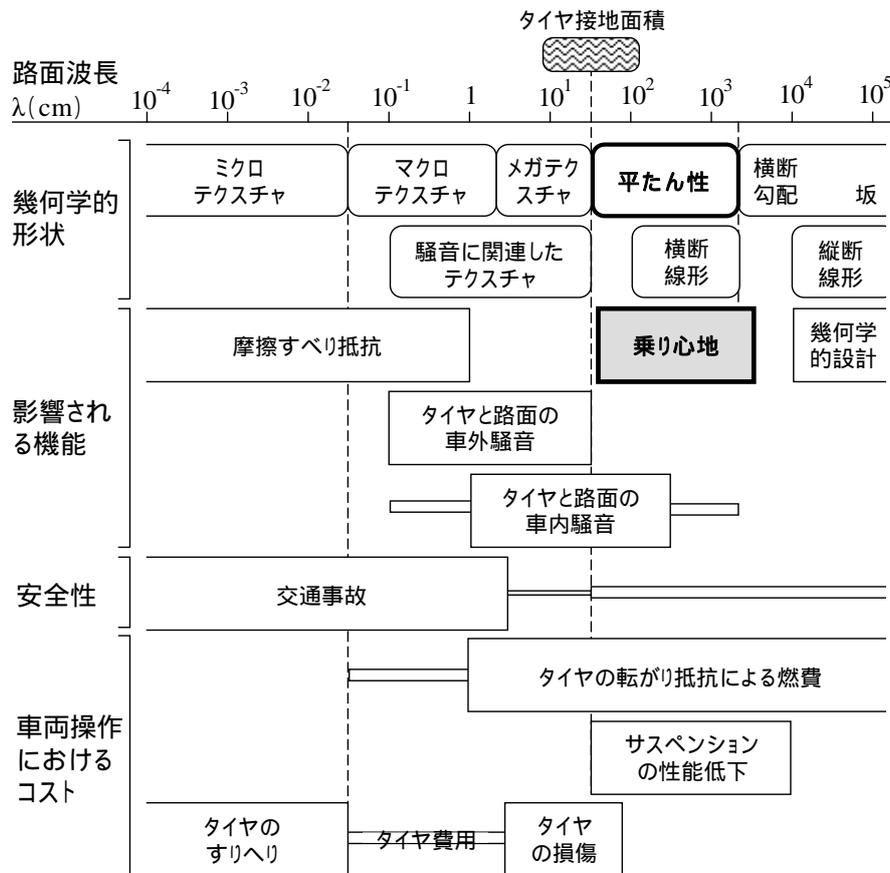


図-3.10 路面の波状特性による分類

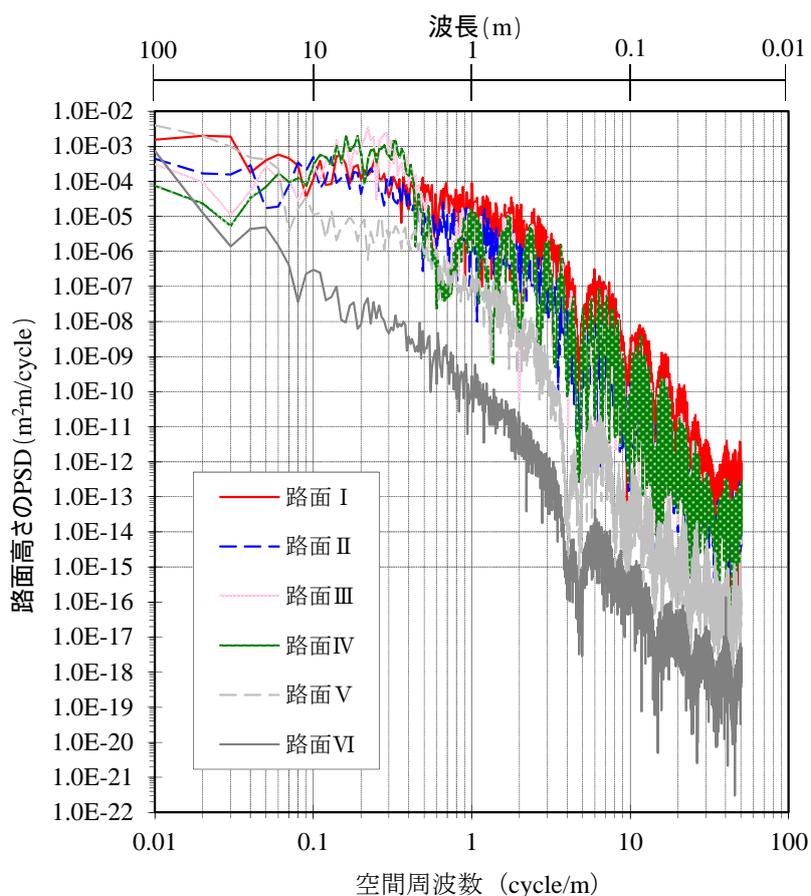


図-3.11 路面 I ~VIの PSD

図-3.11 より、路面VIについては、5cm~100m のすべての波長域において他の路面とは異なる PSD を示しており、波形成分の違いが明確に現れていることがわかる。特に、車両の乗り心地に影響を及ぼすとされる波長 50m 以下での違いが顕著であり、土砂系舗装とアスファルト舗装では、路面プロファイルに含まれる空間周波数の密度分布が大きく異なっていることがわかる。また、いずれも空間周波数 5cycle/m 付近で急激な低下が見られる。この要因としては、路面高さとして 20cm の移動平均を用いたことも影響しているものと考えられるが、現段階では明確な結論は得られていない。

次に路面Vについて見ると、路面VIに比べれば土砂系舗装に近いものの、土砂系舗装全体と比べると良好な路面状態にあるものと思われる。

路面 I ~IVの土砂系舗装の違いについては、曲線が入り乱れて判別が難しいことから、1/3 オクターブバンドでフィルターを掛けた再分析を行うこととした。結果は図-3.12 に示すとおりである。図中には、路面ごとの曲線の違いを判断するための目安として、ISO (International Organization for Standardization) によって提案されている PSD による路面の

平坦性に関する 8 段階の分類 (A~H) [18] も併記した. 各分類の PSD の比率はそれぞれ 4 倍 (詳しくは後述する表-3.2 中の $S(n_0)$ 欄を参照されたい) となっている.

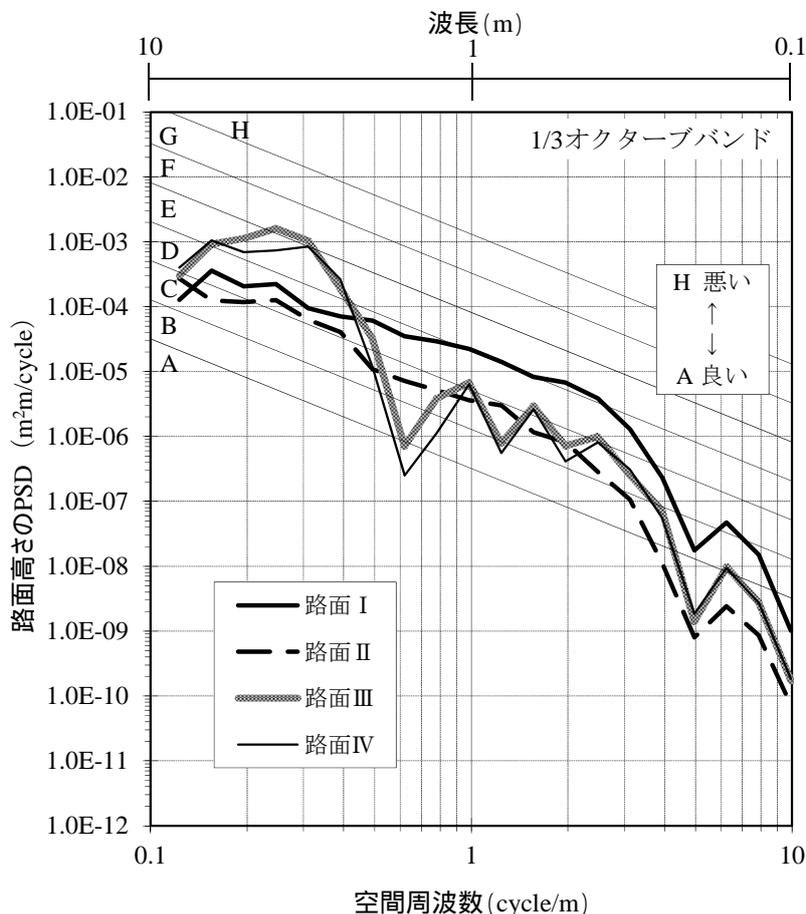


図-3.12 路面 I ~IV の 1/3 オクターブバンド PSD

図-3.12 より, 1/3 オクターブバンドフィルターを通したことで, 土砂系舗装ごとの路面の波形の違いがよく表れている. 具体的には, 路面 I, 路面 II と路面 III, 路面 IV の波形が明らかに異なっている. 路面 I と路面 II を比較すると, 波長が 10m 程度以下の PSD において, ISO の路面分類で 1 段階分の差が現れていることがわかる. つまり, 路面 I に改良を加えたことで, 波長 10m 以下の PSD が 1/4 になったことを意味しており, 改良の効果が波状特性としても顕著に現れていることが確認できる. また, 路面 III と路面 IV については, すべての波長域でほぼ同等の PSD であり, 同じような路面のうねりを有していることがわかる.

路面波形の PSD では, パワースペクトル $S(n)$ と空間周波数 n との関係が両対数軸上で直線になることが多いことから, ISO では A~H の 8 段階の分類が設定されており, その場合の $S(n)$ は式-3.4 のように表されている [16,18].

$$S(n) = S(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad \text{式-3.4}$$

ここに, n_0 : 基準空間周波数 (= 0.1cycle/m)

$S(n_0)$: 路面の平滑度

w : 対象周波数の分散度

図-3.12 に示した路面 I ~ IV のパワースペクトルと空間周波数の関係を求めると表-3.2 のようになる。参考として ISO の 8 段階の分類の数値も示した。路面の平滑度 $S(n_0)$ を見るといずれの路面も E 区分に分類されるが、路面 I, II は範囲の下限側であり、路面 III が上限側、路面 IV が中央に近い値となっている。これは、路面高さの標準偏差 SD_{pro} と同様の傾向である。一方、分散度 w を見ると、路面 I, II は ISO の 2 に近い値であるが、路面 III, IV は 3 を超えた値となっており、路面プロファイルの違いが、分散度としても現れているものと考えられる。

表-3.2 路面 I ~ IV の $S(n_0)$ と w

		$S(n_0) (\times 10^{-6})$	w
路面 I		2269	2.253
路面 II		2243	2.243
路面 III		7528	3.378
路面 IV		4891	3.302
ISO8608	A	> 32	2
	B	32 ~ 128	
	C	128 ~ 512	
	D	512 ~ 2048	
	E	2048 ~ 8192	
	F	8192 ~ 32768	
	G	32768 ~ 13072	
	H	13072 <	

したがって、土砂系舗装においても、路面プロファイルの評価にあたっては、周波数分析がかなり有効な手段であることがわかった。

3.3 既設土砂系舗装走行時の車両振動特性

3.3.1 調査路面

既設土砂系舗装上を走行した際の車両荷台の振動特性を把握するために、表-3.3 に示す4箇所の路面を対象として走行試験を行った。当該路面は表-3.1 で示した路面と同一箇所であり、外観を写真-3.3 に再掲する。

表-3.3 調査対象路面一覧

路面	道路種別	路面構成材
I	鳥取大付属農場内ほ場内農道	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	鳥取市大井手土地改良区内ほ場内農道	土砂系材料（細粒分質礫質砂）
IV	〃	〃



路面 I
(鳥取大付属ほ場内農道, L=161m)



路面 II
(鳥取大付属ほ場内農道, L=161m)



路面 III
(一般ほ場内農道, L=157m)



路面 IV
(一般ほ場内農道, L=118m)

写真-3.3 調査対象路面の外観

3.3.2 調査方法

走行車両には、実際の農産物の荷傷みの検討に配慮して鳥取大学所有の軽トラック（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-3.4 および図-3.13 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。岩川らの研究 [19] によれば、車軸上の荷台の振動加速度が最も大きく、車軸からの距離が遠いほど振動加速度は小さくなり、車軸間中央部の荷台の振動加速度が最も小さいとしている。したがって、図-3.13 からわかるよ

うに、今回測定した位置では、荷台上に生じる振動加速度の最大値と最小値の中間的な値が得られているものと考えられる。データの取り込みは 2kHz (0.0005s 間隔) とし、走行速度は、農道の設計速度の下限値が 20km/h [20] であることから、10km/h, 20km/h, 30km/h の 3 段階を目標とした。測定状況を写真-3.5 に示す。

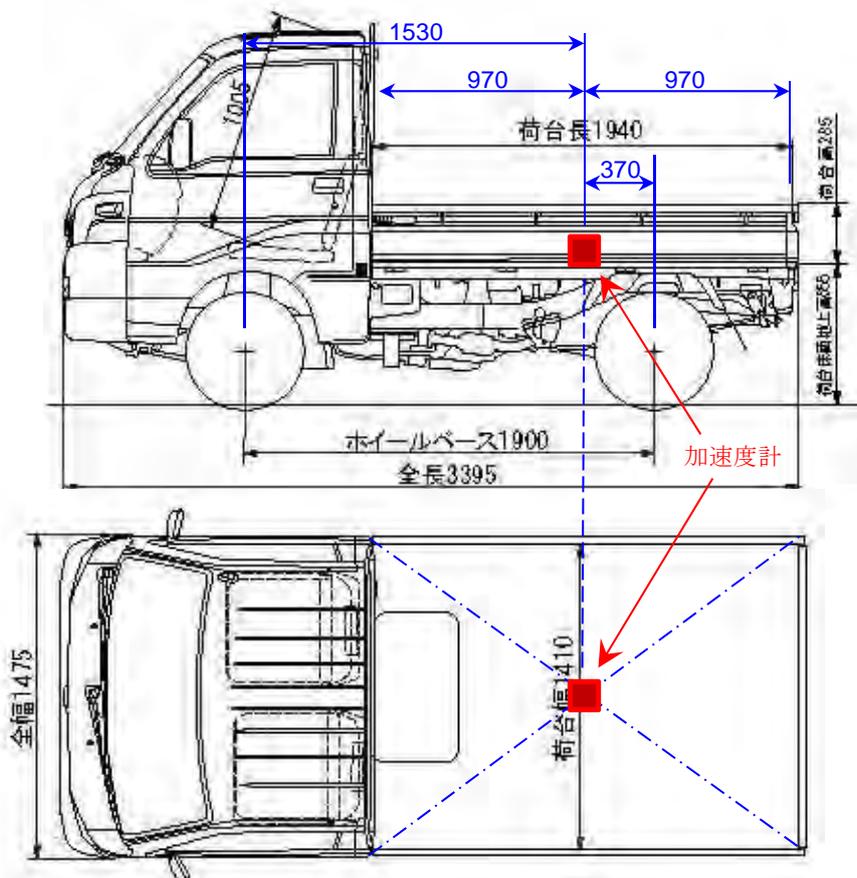
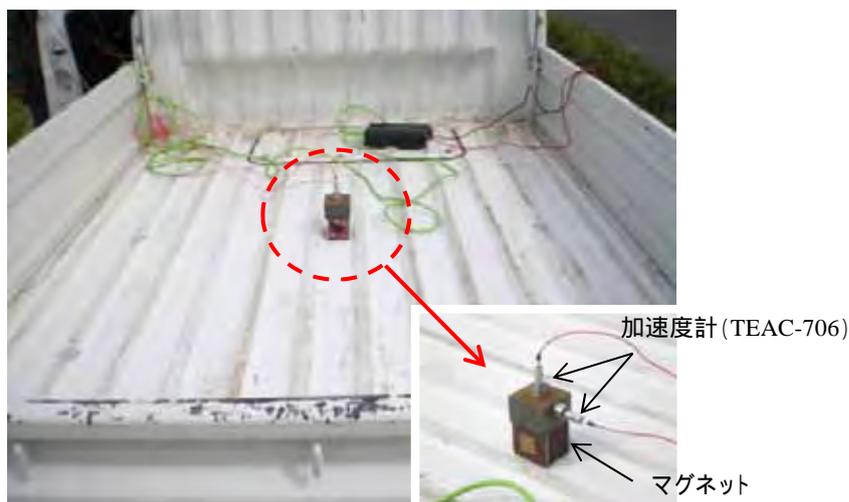




写真-3.5 振動加速度の測定状況

3.3.3 振動加速度の測定結果

各路面の振動加速度を図-3.14～3.17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-3.14～3.17を見ると，路面のプロファイルの評価では，路面Ⅱ，路面Ⅰ，路面Ⅳ，路面Ⅲの順に良好であったものが，路面Ⅰの振動加速度だけが他の路面に比べて大きくなっている。川上らの研究 [21] 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するとしている。今回の路面Ⅰと他の路面の大きな違いは，わだち部の雑草の繁茂状態の違いであることから，車輪通過位置の路面下の草株が車両の振動に大きく影響したものと考えられる。

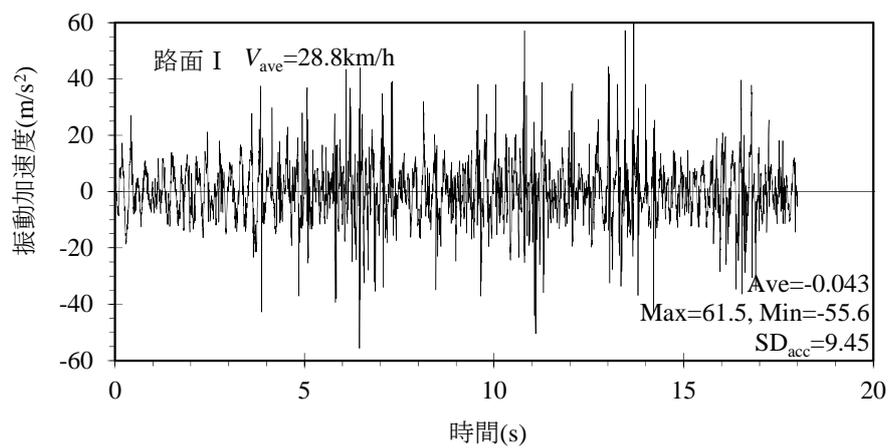
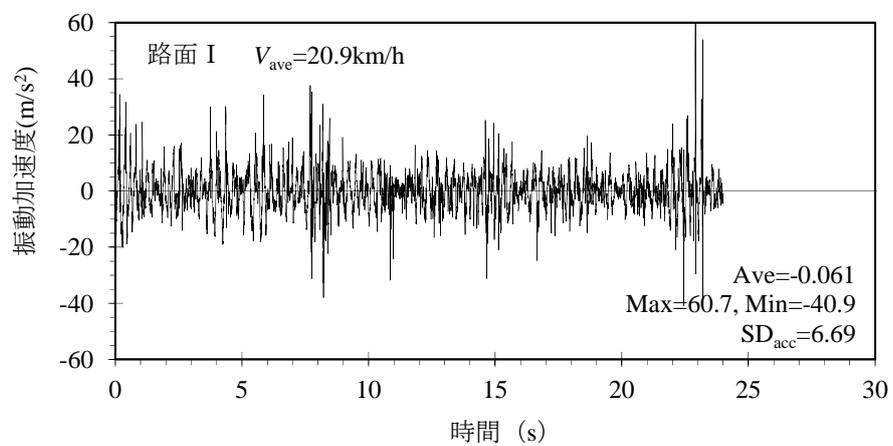
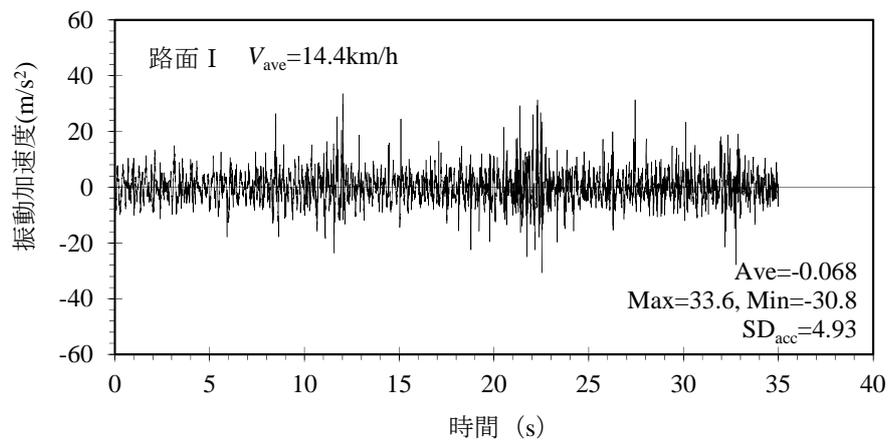


図-3.14 振動加速度の測定結果（路面 I）

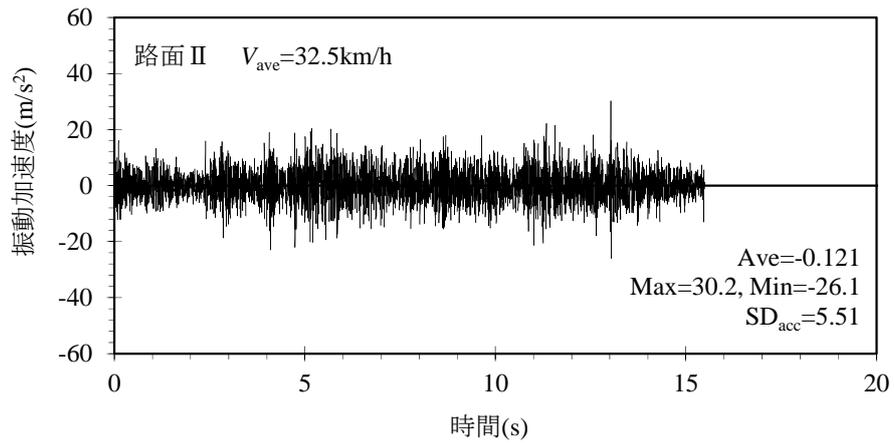
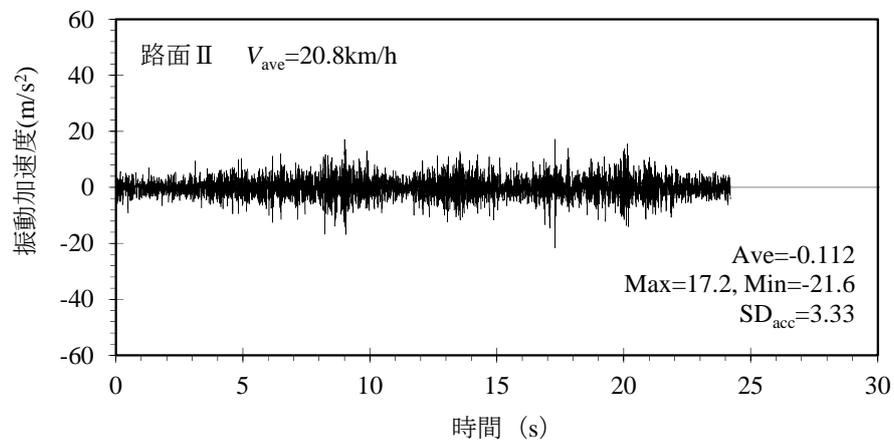
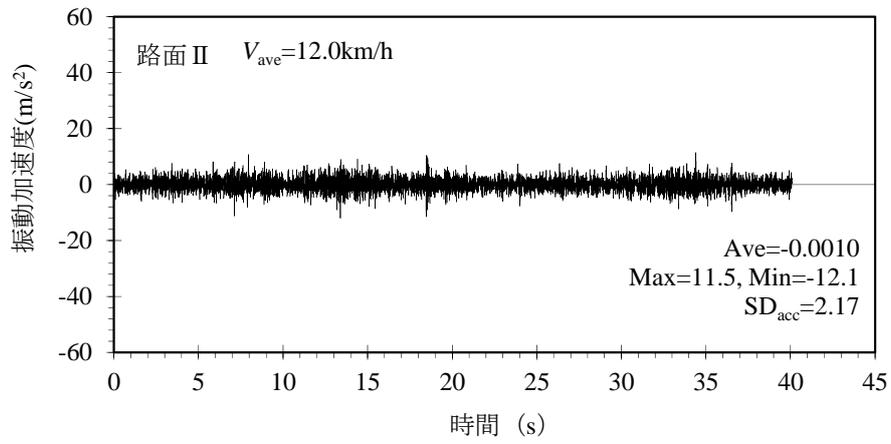


図-3.15 振動加速度の測定結果（路面Ⅱ）

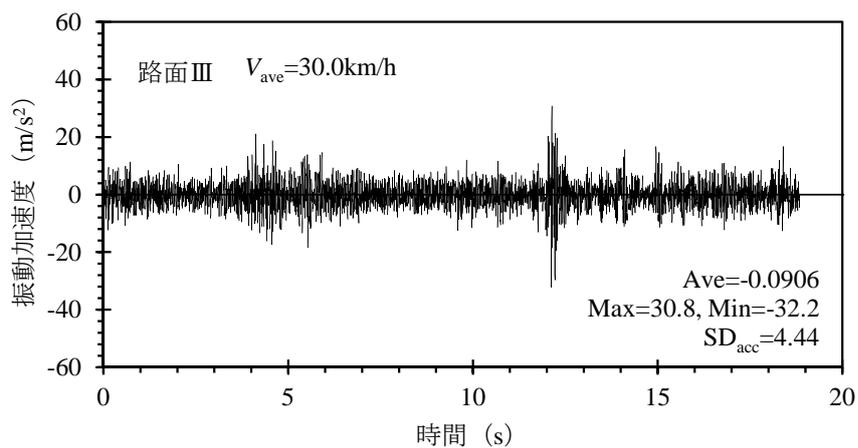
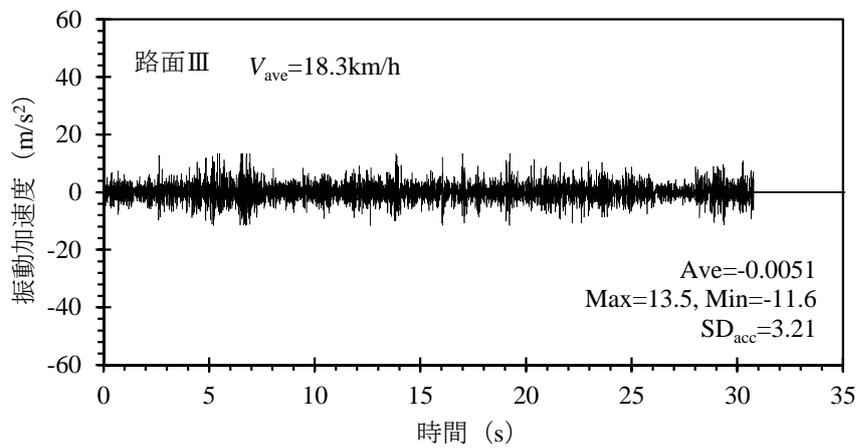
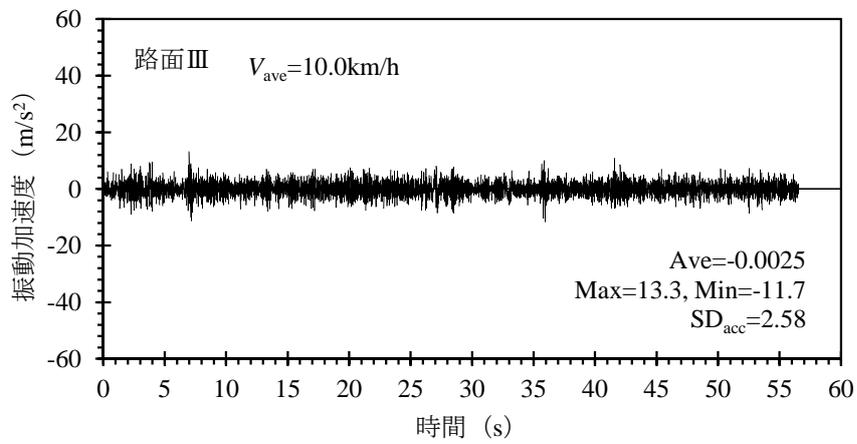


図-3.16 振動加速度の測定結果（路面Ⅲ）

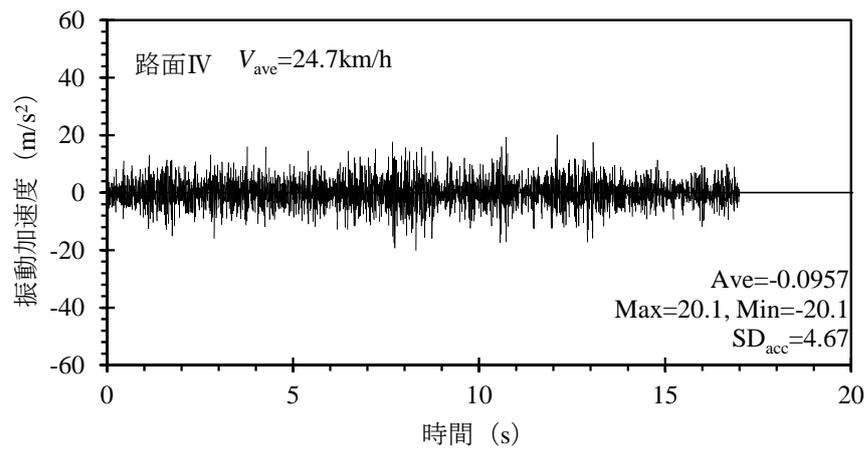
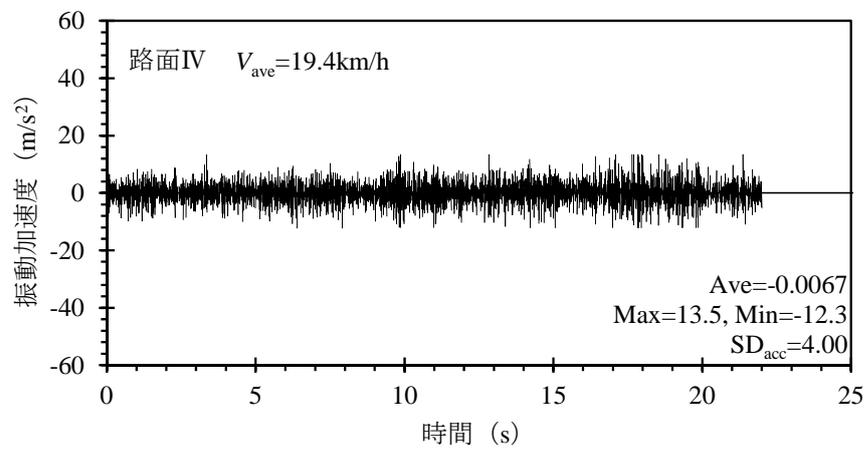
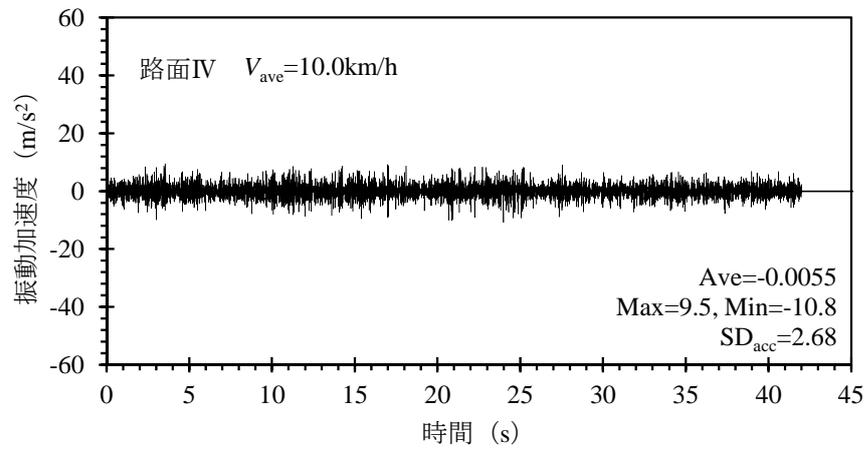


図-3.17 振動加速度の測定結果（路面IV）

次に、走行速度と SD_{acc} の関係を図-3.18 に示す。ここでも路面のプロファイルの評価では路面Ⅱ，路面Ⅰ，路面Ⅳ，路面Ⅲの順に良好であったものに対して、路面Ⅰとそれ以外の路面で異なった傾向を示し、それぞれの路面で見ると表-3.4 に示すような高い相関が得られた。したがって、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、他の路面と同一速度での比較・検討は可能なものとする。

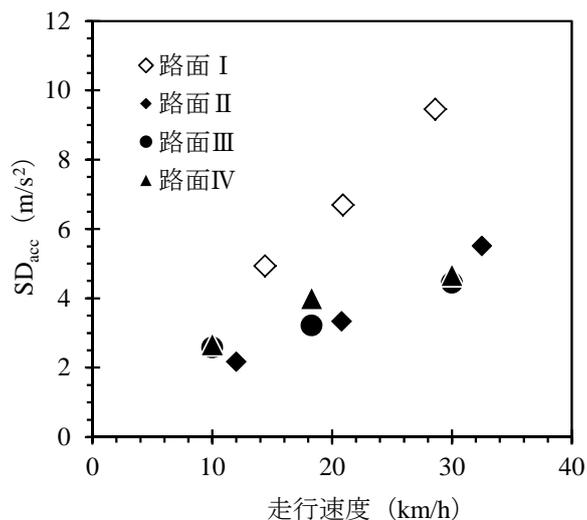


図-3.18 走行速度と SD_{acc} の関係

表-3.4 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

3.3.4 振動加速度の周波数分析

上記振動加速度データをより詳細に分析するために、図-3.14～3.17 に示した振動加速度の周波数分析(汎用ソフト DIAdem2011 を使用)を行った。パワースペクトル密度 (*Power Spectral Density* ; PSD) を図-3.19, 3.20 に示す。

路面Ⅰでは周波数 10Hz 未満の PSD が卓越した分布を示している。これは先に述べた川上らの研究 [21] でも指摘されていることであり、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する。

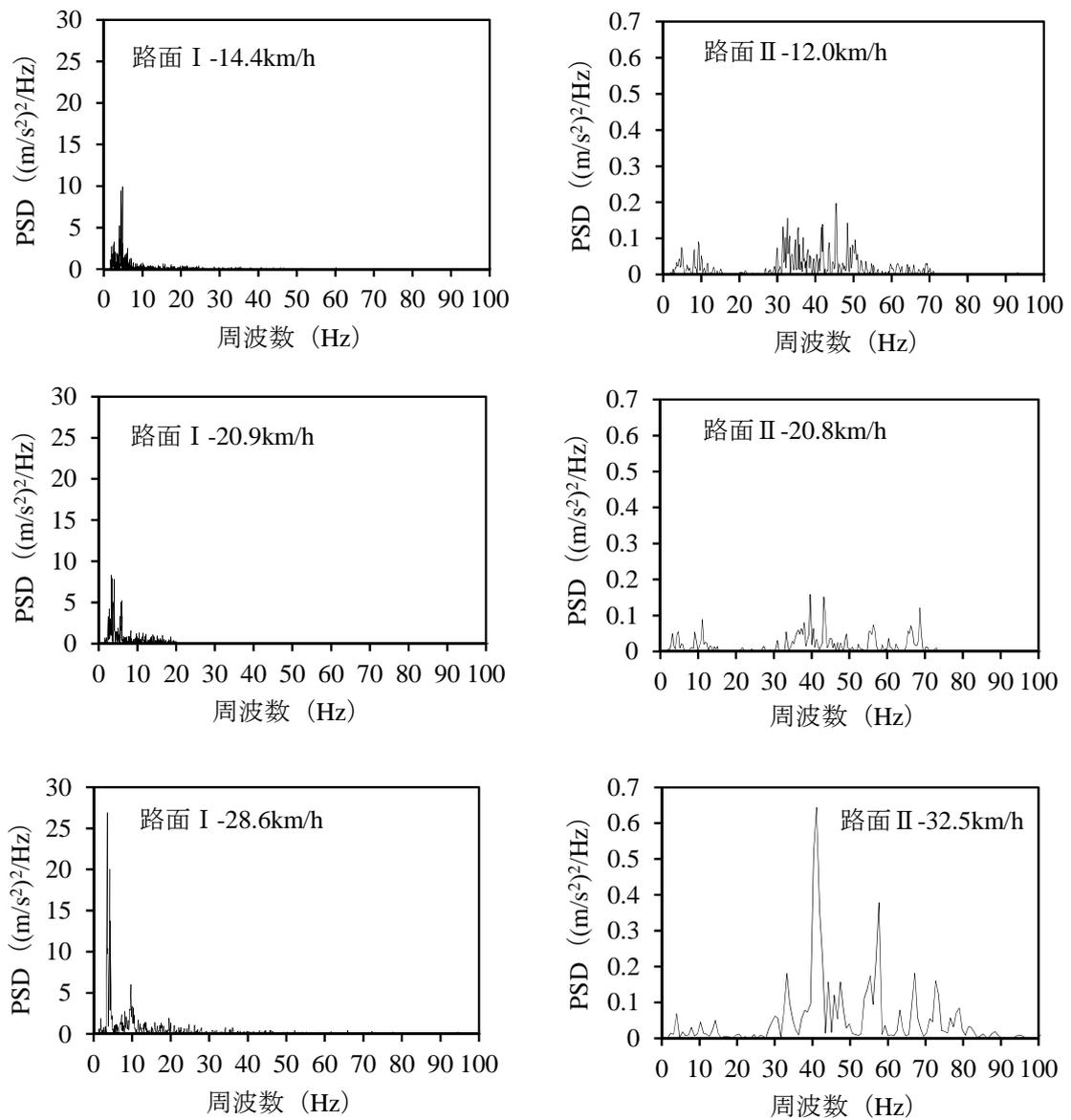


図-3.19 振動加速度の周波数解析結果（路面 I，路面 II）

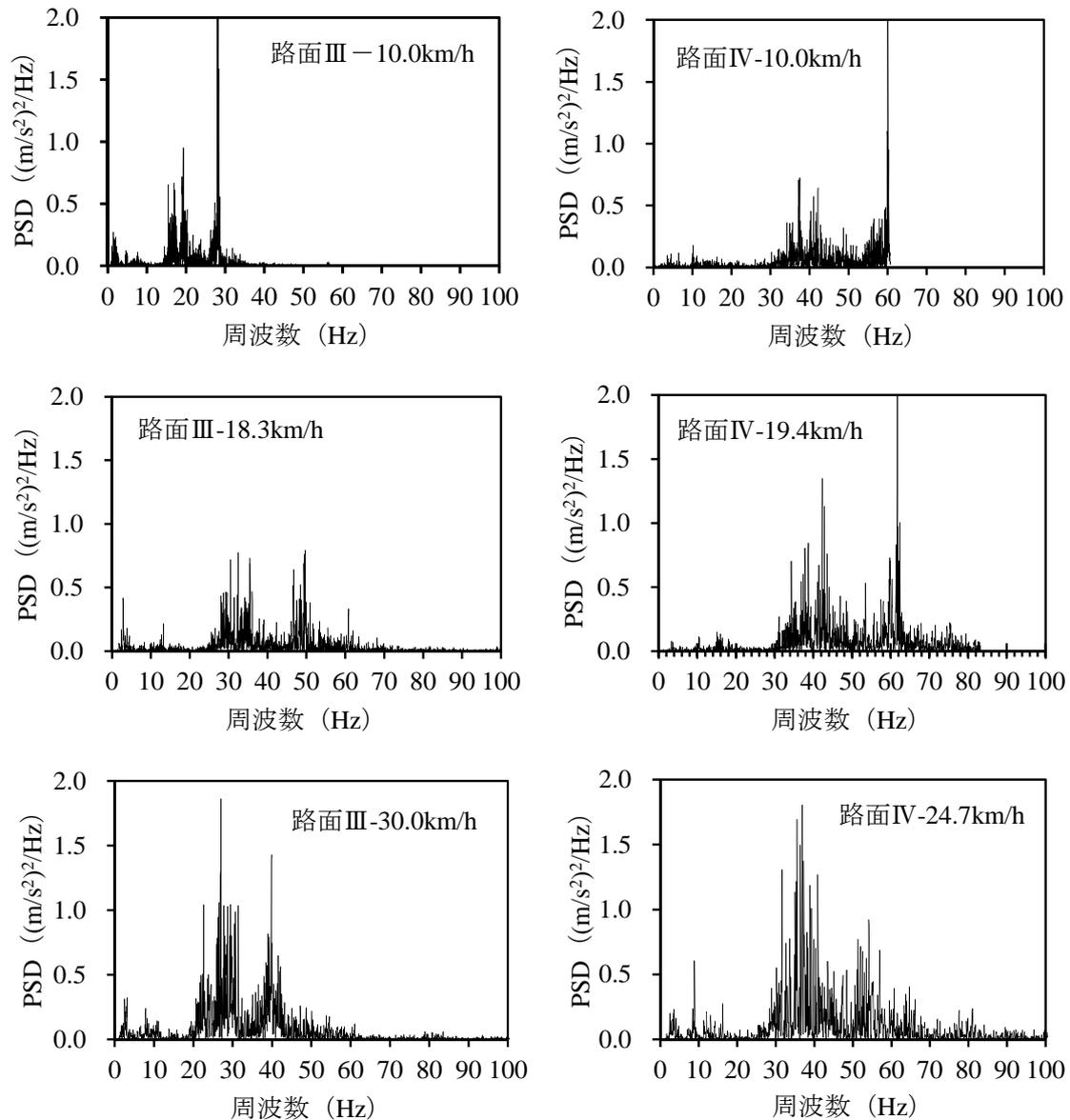


図-3.20 振動加速度の周波数解析結果（路面Ⅲ，路面Ⅳ）

路面Ⅱ，Ⅲ，Ⅳについては，走行速度 10km/h ではやや異なった分布の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 の間にピークが現れている。

前述のように，路面のプロファイルの評価では，路面Ⅱ，路面Ⅰ，路面Ⅳ，路面Ⅲの順に良好と評価されてはいるが，岩元らの研究 [22,23,24] 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。

3.3.5 振動加速度と路面プロファイルの関係

既往の研究によれば、アスファルト路面等においては、路面プロファイルと振動加速度レベルには高い相関があるとされている [25]. 本研究で測定した土砂系舗装の路面プロファイル (σ_{3m} , IRI, SD_{pro}) と振動加速度 (SD_{acc}) の関係を図-3.21 に示す.

地表面下に草株などがある路面 I が少し逸脱した分布となっているが、それを除いたとしても、土砂系舗装の場合には路面プロファイルと振動加速度に一律の相関関係は認められない結果となった. また、走行速度と振動加速度には図-3.18 に示したような正の相関が認められたが、路面プロファイルと振動加速度の関係は走行速度ごとに異なっており、10km/h では正の相関、20km/h では相関はなく一定、30km/h では負の相関が認められる.

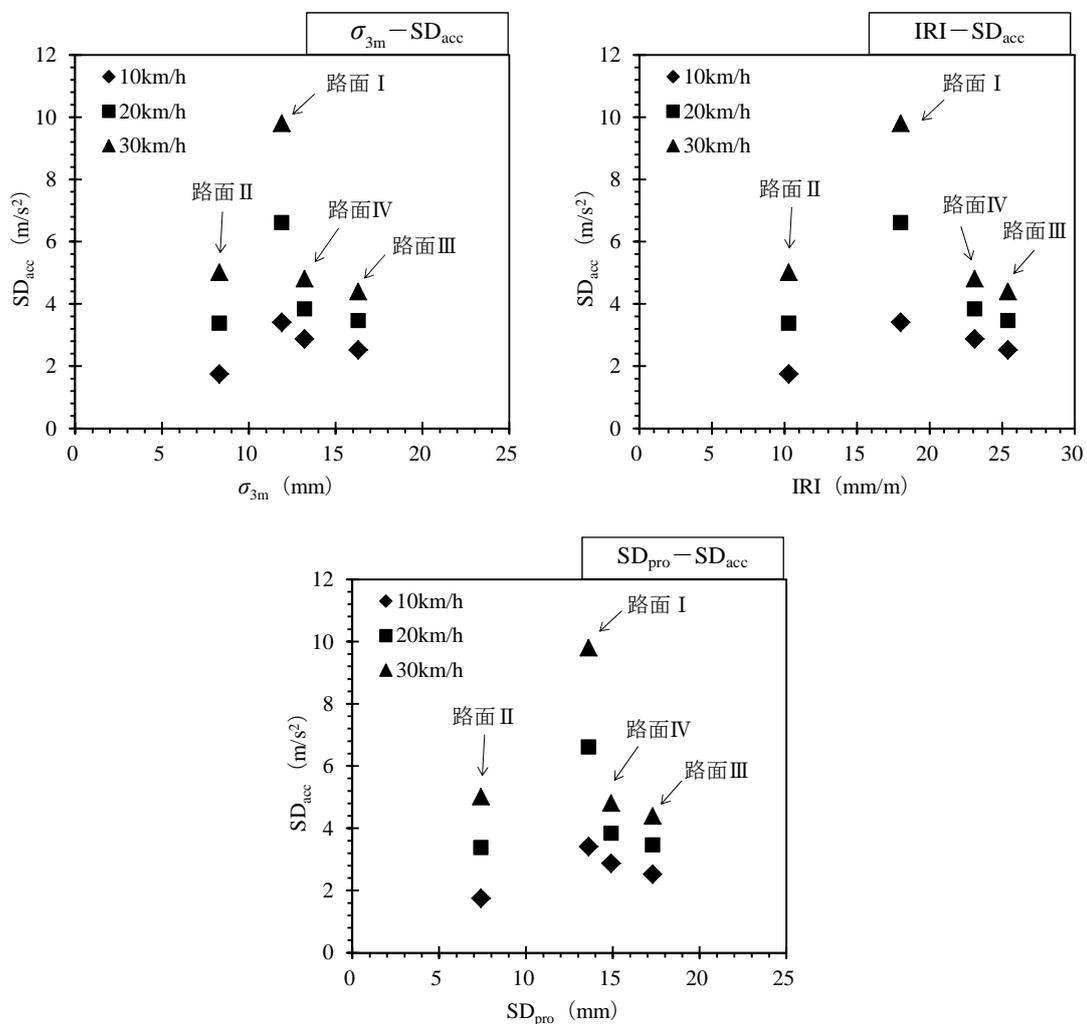


図-3.21 各種路面プロファイルと振動加速度の関係

岩川の研究 [26] によれば，**図-3.22** に示すように，走行速度が大きくなると車輪が路面の凸部で生じる衝撃力でバウンドし，見掛け上実路面よりも良好な路面上を走るようになるため，振動加速度もそれに応じて小さくなるという仮説を立てている．**図-3.21** の結果についても同様の現象が生じているものと考えられるが，それに加えて，凸部のない平坦な面から凹部に転じる箇所であっても高速走行時には車輪が路面から離れて瞬間的に宙に浮いて飛んでいるような状態になっているものと考えられ，結果として，今回のような路面プロファイルが粗い路面の方が 10km/h での振動加速度と 30km/h での振動加速度との差が小さいという事象が現れたものと推察される．

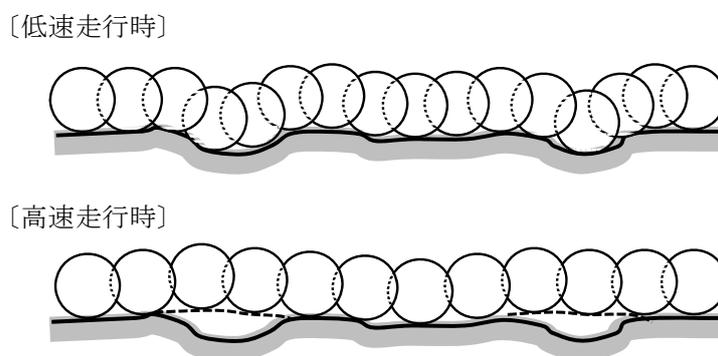


図-3.22 土砂系舗装路面走行時の車輪の軌跡

一般には，路面プロファイルと車両走行時の振動加速度の相関性は強く，IRI もそのような関係性に立脚したものである．しかし，以上の測定・分析結果から判断すると，ほ場内農道における土砂系舗装のように比較的短い間隔で大きな凹凸があるような路面においては，路面プロファイルと車両走行時の振動加速度には必ずしも強い相関があるとは言えないものと考えられる．

3.3.6 振動加速度と荷傷みの関係

第1章にも記述したが，農作物の輸送時に荷傷みが生じる要因は，荷台上での振動の繰返しにあるとして，岩元ら [22,23,24] は，輸送技術の改善に向けて，輸送中に農産物が受ける物理的損傷を室内で等価に再現させる輸送シミュレーションの確立を目的に，レタスなどを試験材料とし，荷台を想定した加振機を使った実験的検討を行い，青果物の物理的損傷の評価には，疲労破壊の解析に用いられる Miner 則の $S-N$ 曲線の適用が可能であることを示している．

まず，一定の応力振幅 S が供試体に繰返して加えられたとき，破壊までに繰返される総サイクル数 N との関係は，

$$N \cdot S^\alpha = \beta \quad \text{式-3.5}$$

で与えられ、輸送時の応力変化を振動加速度の変化として捉えると、式-3.5の S は加速度振幅 G と表すことができることから式-3.6が得られる。

$$N \cdot G^\alpha = \beta \quad \text{式-3.6}$$

α , β は供試体固有の定数である。 N と $S(G)$ の関係は、 x 軸、 y 軸ともに対数を取った両対数紙上で直線関係となる。これは、農産物に作用する振動加速度 G が大きいほど、これに耐え得る許容繰返し数は少なくなることを示している。

次にレベルの異なる加速度 G_i を n_i サイクル ($i=1, 2, \dots, T$) ずつ受けたものの損傷度 (疲労度) FD (Fatigue Damage) は、

$$FD = \sum_{i=1}^T \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad \text{式-3.7}$$

で与えられる。ここに、 N_i は G_i の加速度で破壊に至るまで許容され得る総サイクル数であり、Miner 則と同様に FD が 1 になった時に破壊が生じるというものである。

レタスについては、 $\alpha=4.17$, $\beta=5.32 \times 10^3$ が導出されており、これをグラフ化すると図-3.23 のようになる。これによると、例えば、約 8G の振動が 1 回加わるとレタスに損傷 (折れや擦れなどの物理的損傷) が生じ、2G の振動であれば 300 回未満の繰返しまでは物理的損傷には至らないが、300 回を超えると物理的損傷が生じるというもので、振動を繰り返すことでレタスが疲労破壊するというものである。

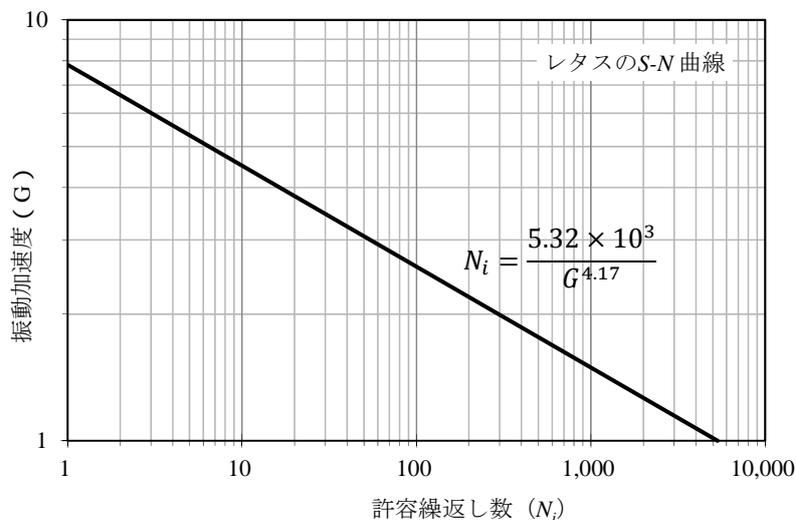


図-3.23 レタスの $S-N$ 曲線 (岩元らの研究 [18,19,20] より)

そこで、図-3.23のS-N曲線を今回計測した路面Ⅰ～路面Ⅳの走行速度ごとの振動加速度データに当てはめ、仮にレタスを軽トラックで運んだとした場合の損傷度FDを試算してみた。結果を図-3.24に示す。

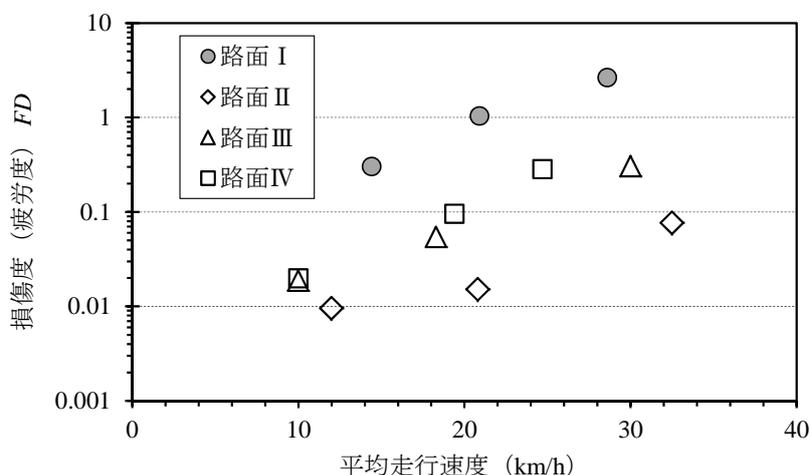


図-3.24 路面Ⅰ～Ⅳの振動加速度から求めた損傷度

いずれの路面でも、走行速度が大きくなると損傷度FDも大きくなっている。路面ごとに見ると、地表面下に草株などがある路面Ⅰについては、走行速度が20km/hを超えるとFDは1を超え、延長が160m程度と短い区間ではあるが、レタスの損傷が懸念される結果となったが、路面Ⅱ～Ⅳについては概ね同じような値であり、すべてFDは1を下回っている。これは、図-3.18で示した走行速度と振動加速度の標準偏差SD_{acc}の関係と同じ傾向であり、路線の延長を同程度に統一したために、累積で求まるFDと全体統計値として求まる標準偏差SD_{acc}が同傾向を示したものと考えられる。実際には、輸送路の路面プロファイルが同じであればSD_{acc}は同程度になるが、その延長が異なれば、延長が長いほどFDは大きくなる。

重複記述となるが、路面のプロファイルの評価では、良好な順に、路面Ⅱ，路面Ⅰ，路面Ⅳ，路面Ⅲであった。しかし、ここでの損傷度の試算結果においては、他の振動加速度に関する検討結果と同様に路面Ⅰの結果が少し乖離しており、その理由が雑草繁茂による影響と推察されることから、荷傷み防止の観点からも雑草繁茂抑制の必要性が窺われる。

3.4 第3章の結論

第3章では、既設土砂系舗装の現状性能として、路面形状特性および車両走行時の荷台の振動特性を取り上げ、まず、既設土砂系舗装の縦断方向の路面形状（路面プロファイル）がどのようになっているのか、プロファイルデータの比較や周波数分析等を行った。そして次に、既設土砂系舗装上を軽トラックが走行した際に荷台の振動はどのような応答を示すのかを把握するために実路での走行実験を行い、振動加速度データの比較や路面プロファイルとの関係を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 土砂系舗装の平たん性(σ_{3m})は一般の道路の維持修繕の管理目標とされている3.5mmを大きく上回っており、土砂系舗装の路面プロファイルの特徴としては、一般の道路よりも短い間隔で大きな凹凸があることと言える。
- (2) 土砂系舗装の路面高さのデータの標準偏差 (SD_{pro}) は概ね正規分布している。
- (3) 土砂系舗装における路面凹凸の損傷度合いの評価には、従前からの平たん性の評価指標である σ_{3m} だけでなく、連続して測定した路面の高さデータの標準偏差 (SD_{pro}) と IRI の関係を把握することが有用である。
- (4) 土砂系舗装における路面プロファイルを IRI で評価するには、走行速度を加味した検討が必要である。
- (5) 土砂系舗装の路面プロファイルの評価には、周波数分析が有効であり、特に 1/3 オクターブバンドフィルターを通すことで、波形成分の違いを明確に分析することができる。
- (6) 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。
- (7) 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。
- (8) 振動加速度の周波数分析を行った結果、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。
- (9) ほ場内農道における土砂系舗装のように比較的短い間隔で大きな凹凸があるような路面では、路面プロファイルと車両走行時の振動加速度には必ずしも強い相関があるとは言えない。
- (10) 土砂系舗装の実測の振動加速度データからレタス輸送時の損傷度を試算した結果、荷傷み防止の観点からも雑草繁茂抑制が重要であることがわかった。

第3章の参考文献

- [1] (社) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説，2001.7.
- [2] (社) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，1978.3.
- [3] (社) 土木学会：FWD および小型 FWD 運用の手引き，舗装工学ライブラリー2，2002
- [4] (社) 土木学会：多層弾性理論による舗装構造解析入門，舗装工学ライブラリー3，2005
- [5] 阿部長門，丸山暉彦，姫野賢治，林正則：たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価，土木学会論文集，No.460/V18，pp.41-48，1993.
- [6] (財) 道路保全技術センター：FWD 運用マニュアル（案），1996.
- [7] 寺田剛，吉村啓之，坂本康文，伊藤正秀：FWD によるアスファルト舗装の疲労破壊輪数の評価に関する検討，土木学会舗装工学論文集第 10 巻，pp.69-76，2005.12.
- [8] The Asphalt Institute: *Research and Development of The Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1) Ninth Edition*, RR-82-2, 1982.
- [9] 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－縦断形状と振動加速度による平坦性の評価－，農業農村工学会論文集 No.278，pp.121-128，2012.4.
- [10] 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ァイルに関する研究，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.I_81-I_86，2011.12.
- [11] 坂本康文，五傳木一，芳賀潤一，緒方英彦：土砂系舗装の路面形状と車両振動特性に関する研究，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)，pp.I_37-I_44，2012.12.
- [12] 国土交通省新技術情報提供システム：けん引式路面性状 3 指標同時測定システム，NETIS No. KT-060081-A
- [13] Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas: *The Little Book of Profiling –Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*, 1998.9.
- [14] (社) 土木学会：路面のプロファイリング入門－安全で快適な路面をめざして－，2003.1.
- [15] 川村彰：講座 路面の評価(第 1 回)－平坦性に着目して－，舗装 Vol.36 No.8，pp.31-35，2001.8.
- [16] 日野幹雄：スペクトル解析 (新装版)，朝倉書店，2010.7.
- [17] <http://www.roadprofile.com/>
- [18] ISO8608 : Mechanical vibration－Road surface profiles－Reporting of measured data，pp.1-30，1995.9.
- [19] 岩川治，高田長武：車両の荷台上の位置と振動加速度との関係，日本林学会誌 45 (11)，

- pp-357-363, 1963.11.
- [20] 農林水産省：土地改良事業計画設計基準・設計「農道」，2005.3.
- [21] 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－，pp.25-30，2000.10.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 吉田武，新田弘之，梁真二：交通振動の軽減に資する舗装構造に関する研究，平成
14年度土木研究所成果報告書，pp.375-378，2003.7.
- [26] 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.

第4章 荷傷みに配慮した土砂系舗装の路面凹凸の閾値に関する研究

4.1 概要

農作物の輸送時の荷傷みは、車両走行に伴う振動が直接的な原因である。車両の走行時に発生する振動は、車両の固有振動によるものと路面凹凸により生じる振動に分けられる。車両の固有振動については、サスペンション技術の進展等により、共振を起こしても搭乗者が不快と感じない範囲で共振が収まるよう設計がなされている[1]。路面凹凸からの振動についても、車両の高度化によりある程度抑制できるようになってきてはいるが、これは主として搭乗者の立場での振動抑制である。農作物の荷傷みに配慮したトラックの研究等も行われている[2]が、ここでの評価に用いられている舗装路面は都市間の幹線道路であることから、生産者の輸送時の荷傷みではなく、集荷後の輸送業者による大量輸送時の荷傷みを対象としたものとなっており、土砂系舗装の路面での評価には至っていないのが実状である。

農作物の荷傷みを防止するには、振動源となる加振力を取り除くことが第一である[3]。すなわち、土砂系舗装の路面凹凸に起因する振動であれば、路面の凹凸を取り除くことが荷傷み防止策となる。実際の路面管理を行うにあたっては、闇雲に路面を平滑にするのではなく、どの程度の凹凸まで許容できるのかを把握することが重要なポイントとなる。しかしながら、土砂系舗装での走行時の振動加速度は、様々な周波数の振動が重なり合って形成されており、図-3.20でも示したように縦断方向に連続した路面のプロファイルだけで振動特性を説明することは難しい。

そこで、本章では路面形状と振動加速度の関係をより単純化し、車両運動シミュレーションソフト(TruckSim8.1)[4]を使って、荷傷みが生じる路面の凹みの閾値を見出すこととした。具体的には、まず、車両運動シミュレーションにより求まる振動加速度と実測した振動加速度とを比較し、強い相関関係があることを示した。次に、正弦波形で近似した仮想路面の凹み上の走行をシミュレートすることで、路面の凹み形状と軽トラックの荷台に生じる垂直方向の振動加速度の関係を調べた。その結果、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ことを明らかにした[5]。

4.2 TruckSim による走行シミュレーションと実測値の比較

4.2.1 シミュレーションの設定条件

車両運動シミュレーションソフト TruckSim8.1 から求まる振動加速度と実測値との関係を把握するために、第3章で示した路面 ~ のプロファイル(図-3.3, 3.4)を使って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ることとした。

TruckSim は、トラック、バス(トレーラ連結車を含む)の様々な運転条件(アクセル、ブレーキ、ハンドル、シフト操作等)と環境条件(摩擦係数や高さ変化のある道路コース、横風等)での動的な挙動をパソコン上の簡単操作でシミュレーション解析・評価するために開発されたものであり、各国の研究機関や教育機関で幅広く活用されている[6]。ただし、TruckSim が上記のような目的で開発されたものであることから、路面は剛体で均一なものとして固定されおり、路面の硬軟に関する入力値は用意されていない。

シミュレーションでの走行速度は、実車走行と同じ 10km/h、20km/h、30km/h の3段階とし、車両は TruckSim 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。シミュレーション走行時の画像を図-4.1 に、また車両の主な入力諸元を表-4.1 および図-4.2 に示す。



図-4.1 シミュレーション走行画像

表-4.1 軽トラックの主な諸元

項目		仕様
全長	mm	3,395
全幅	mm	1,475
全高	mm	1,780
ホイールベース	mm	1,900
トレッド前	mm	1,295
" 後	mm	1,300
荷台床面地上高	mm	655
車両重量	kg	750
搭乗員重量	kg	130

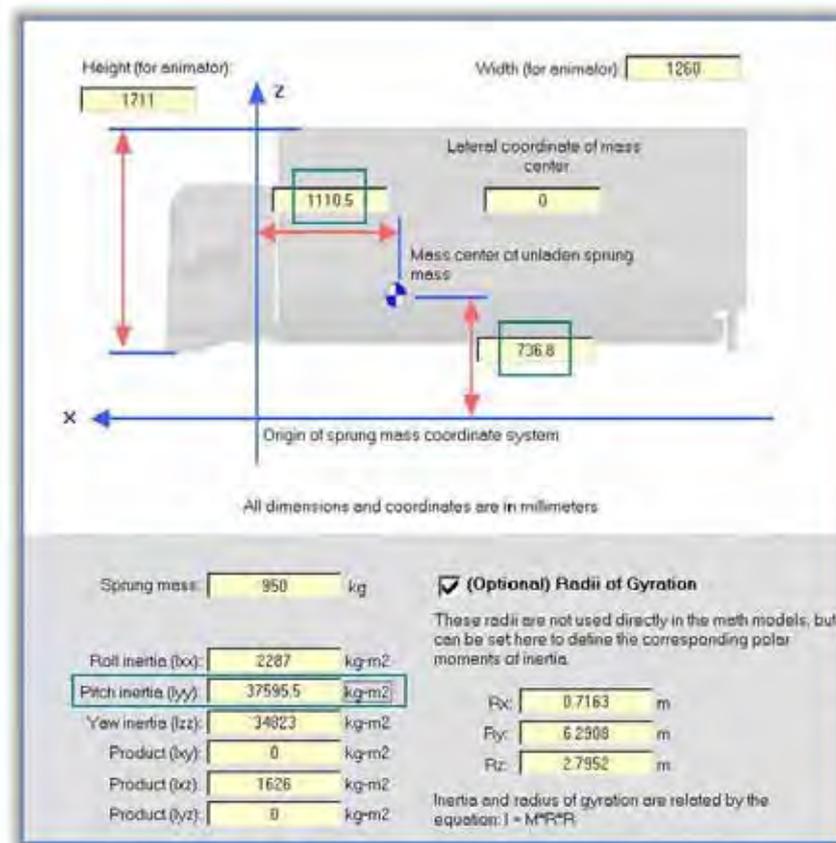


図-4.2 軽トラックの重心位置

また、先にも述べたように TruckSim では路面の剛性は変更できないが、サスペンションのバネの挙動が入力できるようになっている。これは、1980年代にミシガン大学の UMTRI (University of Michigan Transportation Research Institute) が提案した概念に基づく「ヒステリシス付きばねモデル」がベースとなっており、図-4.3 に示すように、荷重が増加する載荷過程（圧縮側）と荷重が減少する除荷過程（伸び側）があり、常に載荷側の力が除荷側よりも大きいというものである。TruckSim には数種類の「荷重～たわみ曲線」が格納されており、それ以外の曲線を直接入力することも可能であるが、具体的な曲線が不明な場合を想定した、図-4.4 に示すような「ばね定数 (Spring Rate (N/mm))」と「摩擦値 (Friction (N))」を入力する簡便な方法も用意されている。載荷過程（上側）の曲線を共通の勾配（ばね定数 (Spring Rate)）と二つの曲線を分離する力の 1/2 とする摩擦値 (Friction) で定義するもので、例えば、上側曲線には摩擦成分を加えて、下側曲線からは摩擦成分を引くと、摩擦値と 2 曲線間の差分の比が 1/2 となるものである。本研究においては、軽トラック製造業者への電話によるヒアリング結果を参考に、ばね定数 (Friction Rate) 100N/mm、摩擦値 (Friction) 500N の簡易なモデルを用いることとした。

なお、慣性モーメントについては、TruckSim の “ Compact Utility Truck ” で標準的に設定されている値を準用し、路面のすべり摩擦係数については既往文献 [7] を参考に $\mu=0.5$ とした。

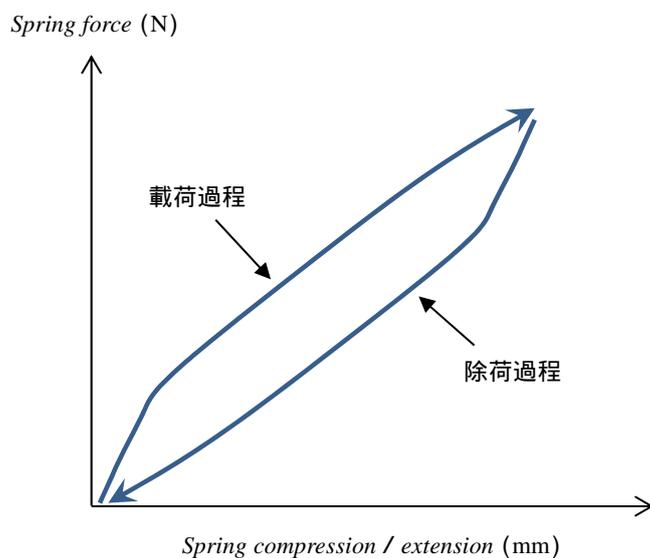


図-4.3 ばねの挙動（荷重 - たわみ曲線）

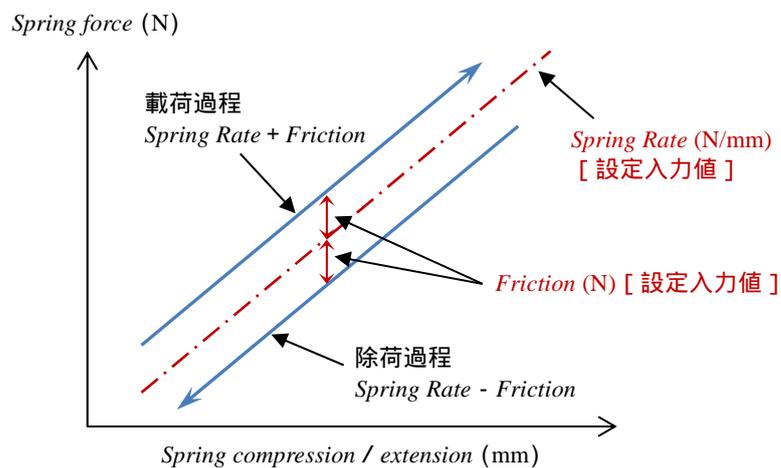


図-4.4 簡易ヒステリシスばねの設定概念

4.2.2 実測値の測定路面

シミュレーション結果と比較する振動加速度の実測データの路面は、第3章と同じ路面～路面である。

路面の外観は、写真-4.1に示すように路面は雑草が繁茂した状態であり、路面は路面を安定処理により改良した路面で土砂系舗装材料に全面覆われた状態である。路面と路面については、車輪通行位置となるわだち部以外に雑草が繁茂しており、一般的に多く見られる土砂系舗装の路面状態である。



路面
(鳥取大付属ほ場内農道, L=161m)



路面
(鳥取大付属ほ場内農道, L=161m)



路面
(一般ほ場内農道, L=157m)



路面
(一般ほ場内農道, L=118m)

写真-4.1 調査対象路面の外観

4.2.3 シミュレーション結果と実測値の比較

TruckSim による走行シミュレーションで得られた振動加速度と実測値を比較したものを図-4.5～4.8 に、また統計値の比較を表-4.2 に示す。

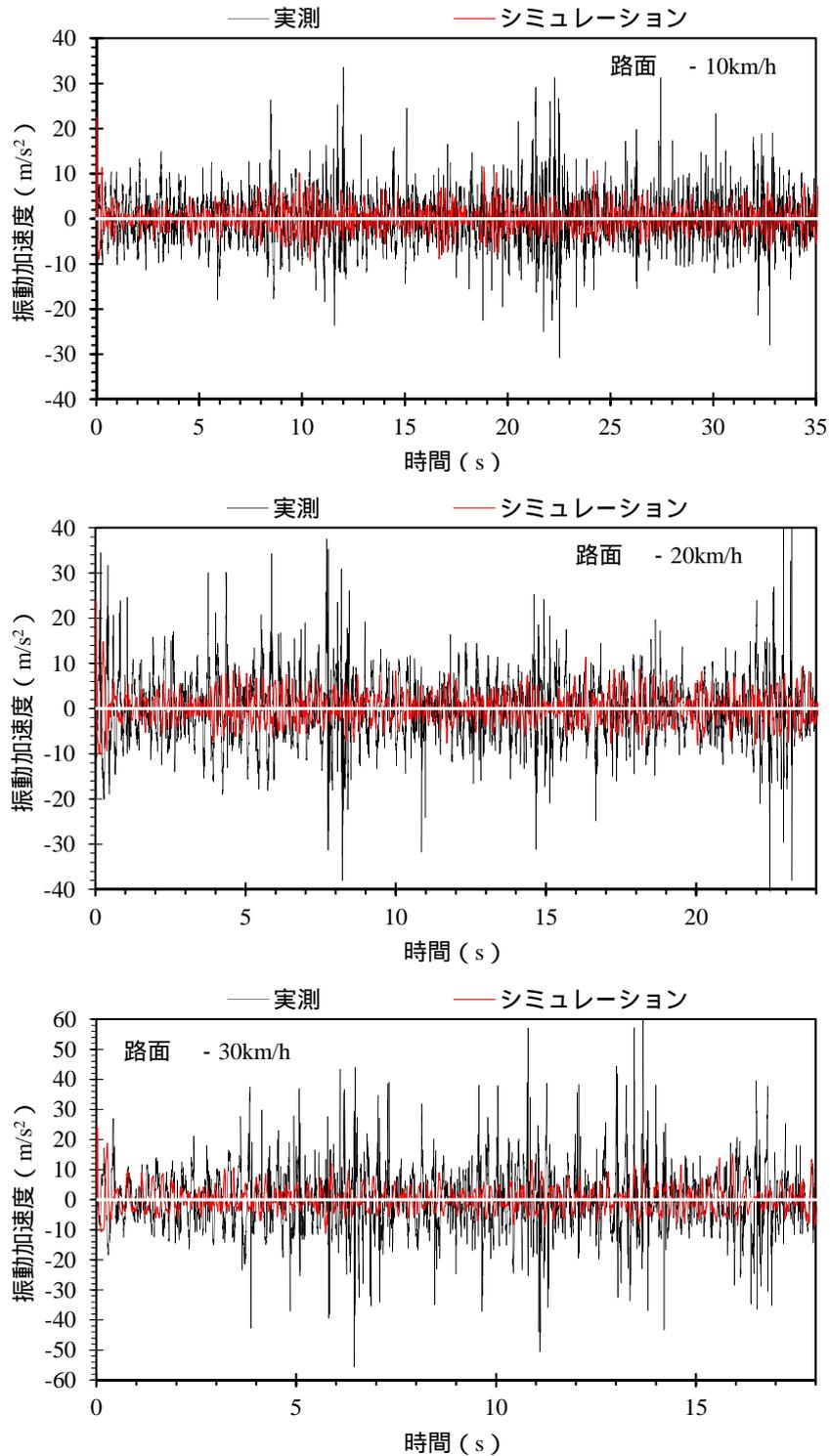


図-4.5 シミュレーションと実測の振動加速度比較 (路面)

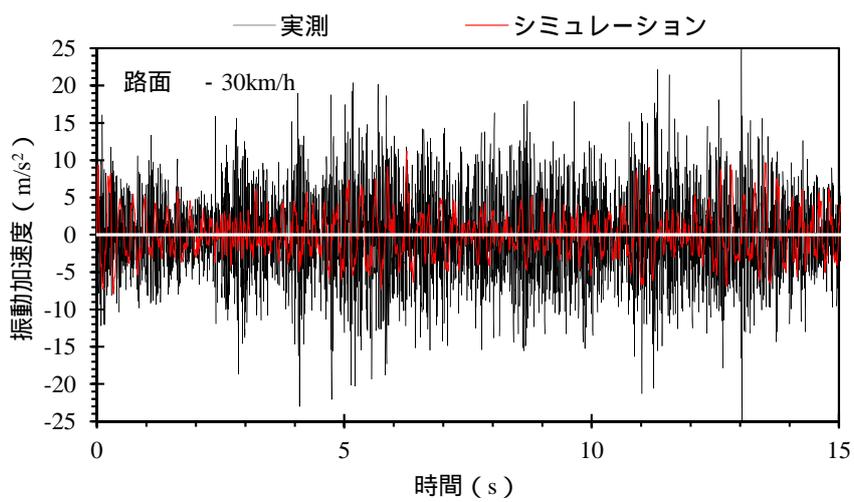
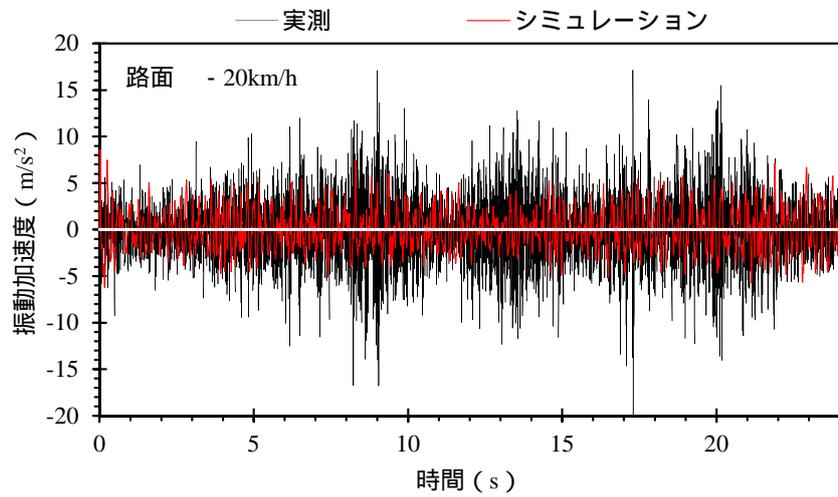
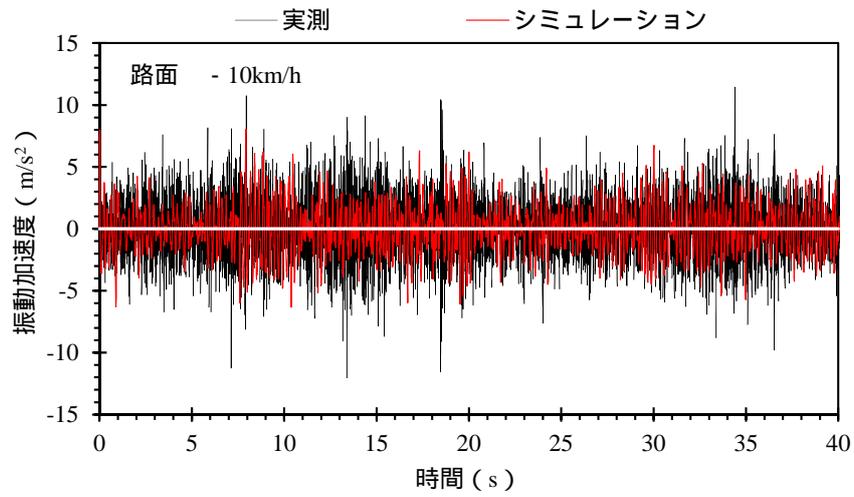


図-4.6 シミュレーションと実測の振動加速度比較 (路面)

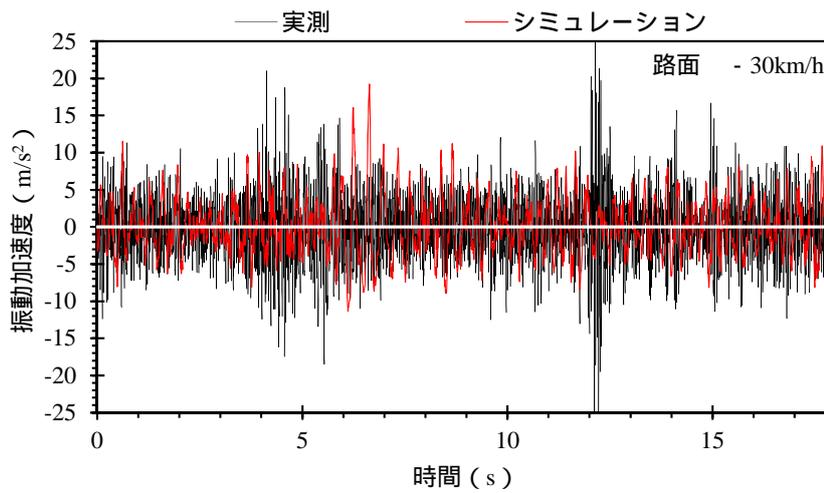
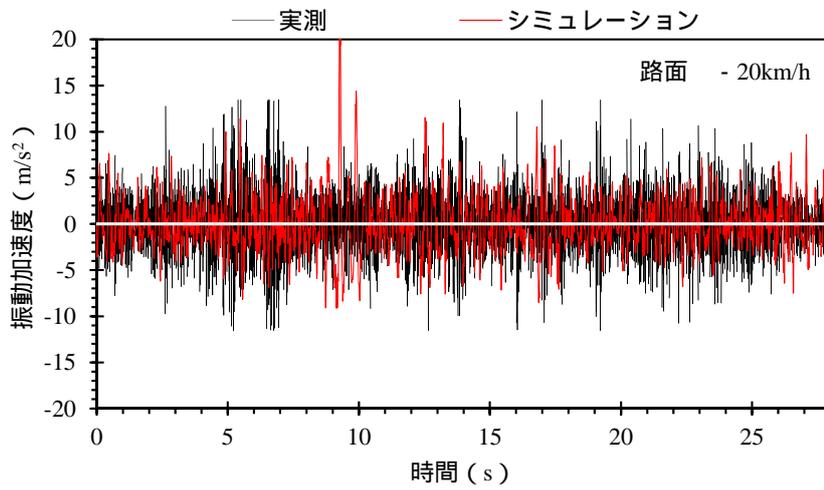
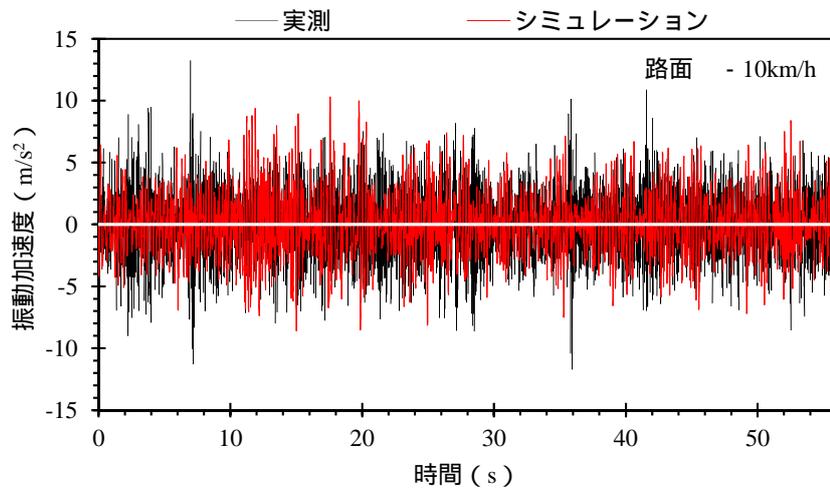


図-4.7 シミュレーションと実測の振動加速度比較（路面 ）

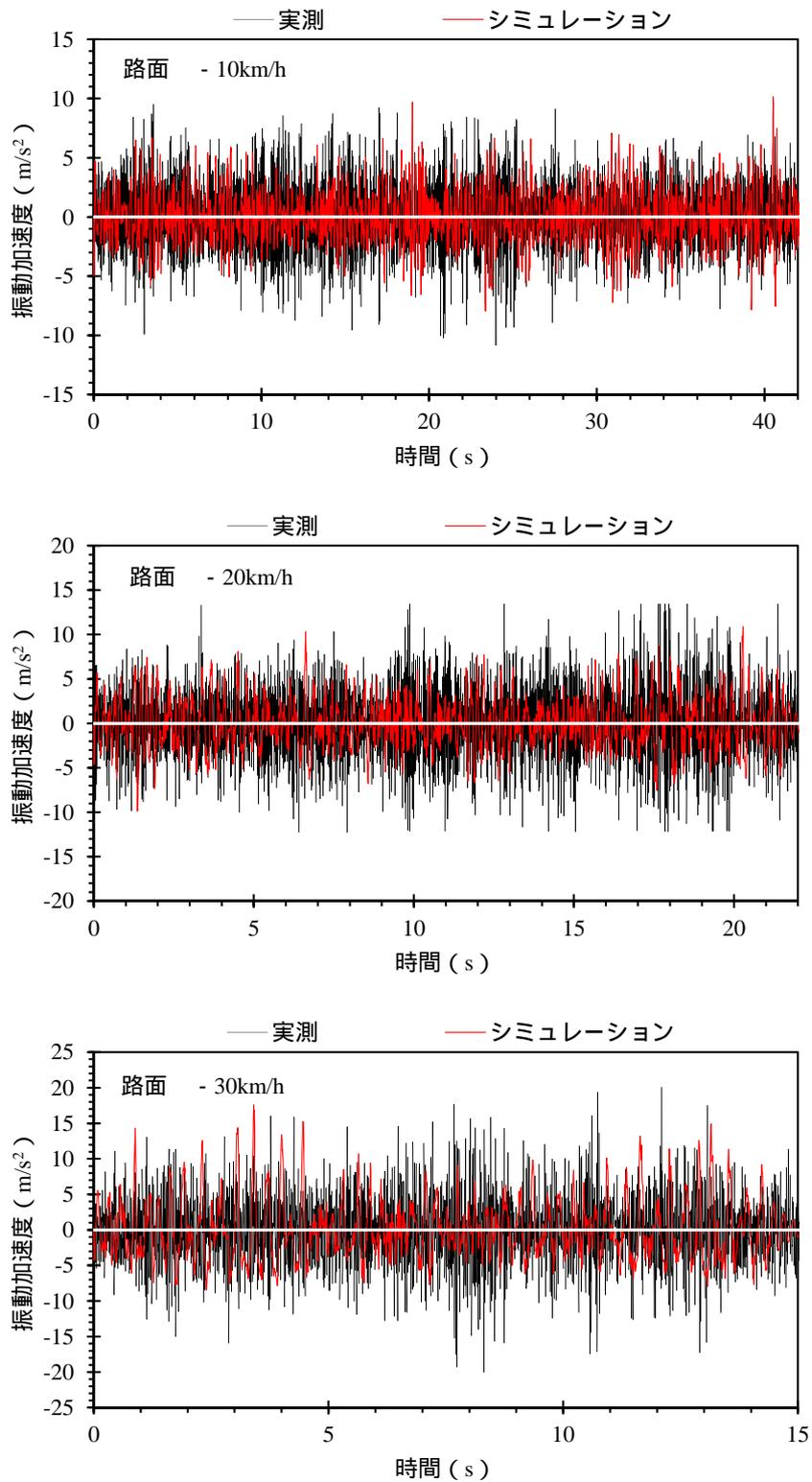


図-4.8 シミュレーションと実測の振動加速度比較 (路面)

表-4.2 シミュレーションと実測の振動加速度の統計値比較 (単位: m/s^2)

		10km/h		20km/h		30km/h	
		実測	TruckSim	実測	TruckSim	実測	TruckSim
路面	Ave	-0.06834	0.00130	-0.06093	0.00279	-0.04253	0.00568
	SD _{acc}	4.92743	2.64887	6.69270	3.22361	9.45196	4.17724
	Max	33.60306	22.58972	60.68302	23.81771	61.45733	24.16202
	Min	-30.78970	-9.27663	-40.94900	-10.08290	-55.59570	-11.32240
路面	Ave	-0.01022	0.00061	-0.11170	0.00076	-0.12130	0.00638
	SD _{acc}	2.17340	1.84924	3.33325	2.14117	5.50608	3.22173
	Max	11.45923	8.03427	17.15337	9.31283	30.23602	11.24793
	Min	-12.05980	-6.35090	-21.57060	-6.26050	-26.11100	-7.91437
路面	Ave	-0.00252	0.00253	-0.00512	0.00297	-0.09056	0.00641
	SD _{acc}	2.57569	2.40788	3.21079	2.99045	4.43909	3.80077
	Max	13.25585	10.31463	13.45469	23.28491	30.82779	19.22123
	Min	-11.72260	-8.60747	-11.60510	-9.12916	-32.23980	-11.36660
路面	Ave	0.00548	0.00139	-0.00670	0.00336	-0.09570	0.00561
	SD _{acc}	2.67788	1.98914	4.00263	2.61397	4.67191	3.94114
	Max	9.51569	10.14380	13.44362	10.89176	20.08715	17.57842
	Min	-10.83480	-7.96868	-12.27380	-9.85804	-20.05400	-8.44936

図-4.5~4.8, 表-4.2を見ると, 振動加速度の平均値 (Ave) については, いずれの条件においても概ねゼロに等しい結果となった。振動加速度の標準偏差 (SD_{acc}) については, 路面 1 では実測値に比べてシミュレーション結果の方が半分程度に小さくなっているが, 路面 2 ~ 4 ではほぼ近い値が得られている。ただし, どの条件でもシミュレーション結果の方が小さく, この要因としては, TruckSim では路面の剛性が均一な状態であるのに対して, 土砂系舗装路面では骨材が露出している部分と砂分が露出している部分などが混在し, 表面の剛性が微妙に変化していて一律ではないことが影響しているためと考えられる。振動加速度の振幅についても同様であり, 路面 1 の実測値とシミュレーションの差が極端に大きい結果となっている。

表-4.2の中から, TruckSim 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の標準偏差 (表-3.4の関係式に基づいて速度補正したもの) の関係を表すと図-4.9のようになる。前述のように路面 1 とそれ以外の路面と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。写真-4.1に示した外観のように, 路面 1, 2 が代表的な土砂系舗

装の路面状態であると考えられ、今回のようにわだち部に雑草が繁茂している路面 のような場合を除けば、土砂系舗装においても、実測した路面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ある程度高い精度で推定することは可能であると考えられる。

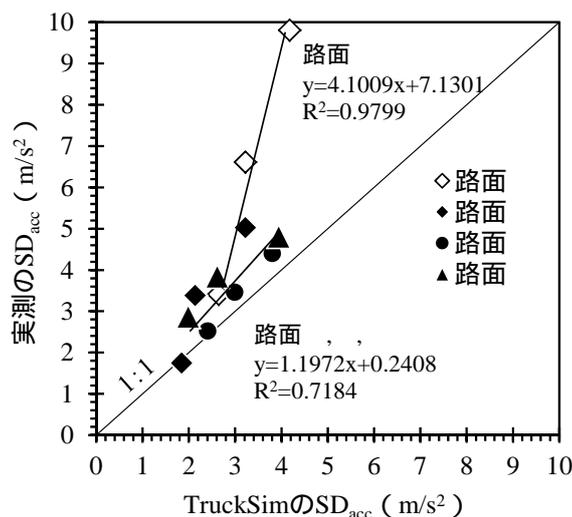


図-4.9 TruckSim と実測の振動加速度の標準偏差の関係

また、試みとして、路面 のプロファイルを使い、TruckSim のサスペンションのバネ定数と摩擦値を変化させることによって路面の剛性を間接的に変化させたと仮定し、その時の振動加速度の標準偏差 (SD_{acc}) を求めてみた。走行速度は 10km/h、20km/h、30km/h の 3 段階とした。結果は図-4.10 に示すように、いずれの走行速度においてもばね定数が大きいほど、また摩擦値が大きいほど SD_{acc} は大きくなる傾向にあるが、走行速度 30km/h ではばね定数が大きいもの (1000N/mm、2000N/mm) については摩擦値を大きくしても SD_{acc} はほぼ一定の値となり、他とは異なる傾向を示した。また、実測値と同等の SD_{acc} が得られるサスペンションの条件を読み取ってみると、走行速度 10km/h の場合はばね定数 100 ~ 300N/mm で摩擦値 0 ~ 1500N であり、走行速度 20km/h の場合はばね定数 2000N 程度で摩擦値 0 ~ 2000N であるが、走行速度 30km/h については、今回の試算条件の中ではばね定数 2000N が最も近い値ではあるが実測値と同等となる条件は得られない。先に行ったシミュレーションでの設定はばね定数 100N/mm、摩擦値 500N であり、ここでの試算結果とは大きく異なっており、当該結果から判断しても、雑草が繁茂した路面 が特異な振動特性を示していることが裏付けられたものと考えられる。

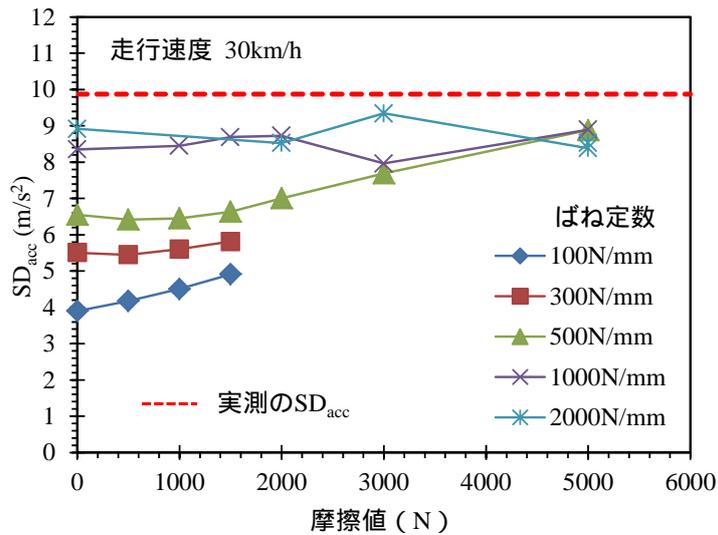
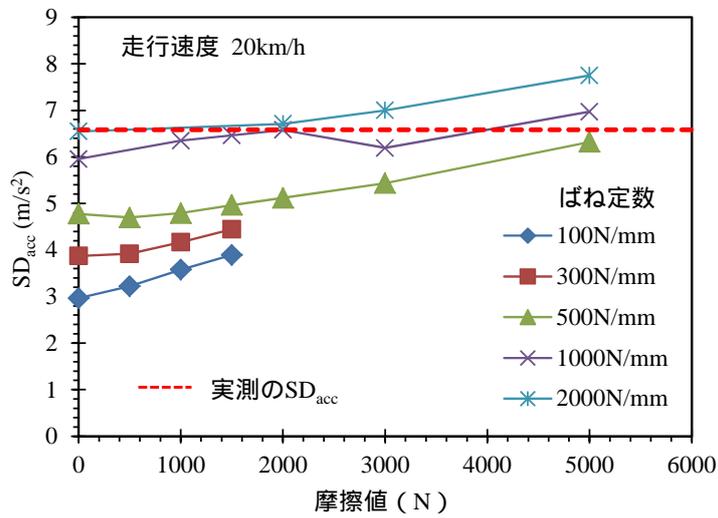
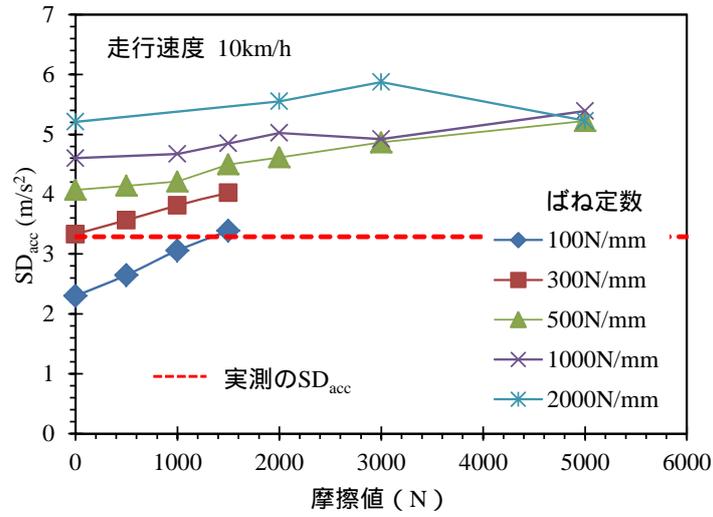


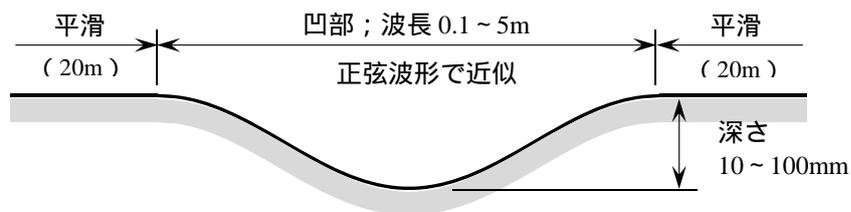
図-4.10 TruckSim のサスペンション係数と振動加速度の標準偏差の関係【路面】

4.3 仮想路面を用いた走行シミュレーション

4.3.1 仮想路面形状と結果の整理方法

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-4.11 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。

路面の凹みは走行方向の車輪片側だけとし, もう一方は平坦な路面とした。また, 発進時と停止時の振動をキャンセルできるように助走および制動区間として凹み部の前後に 20m の平坦路を設けた。車両の設定は表-4.1 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垂直方向の振動加速度を求めた。結果の一例を図-4.12 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, 振動加速度の整理・比較には, 図中に示した最大値を用いることとした。



波長: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0m (19 パターン)
深さ: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100mm (10 パターン)
【計 190 パターン】

図-4.11 仮想路面(凹み)の形状

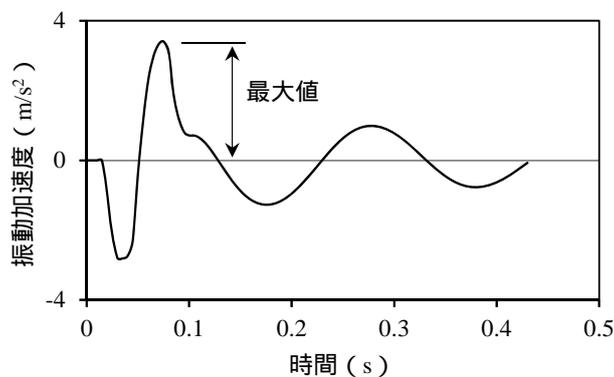


図-4.12 TruckSim の振動加速度の出力例

4.3.2 走行シミュレーション結果

路面形状と最大振動加速度値の関係を図-4.13 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．

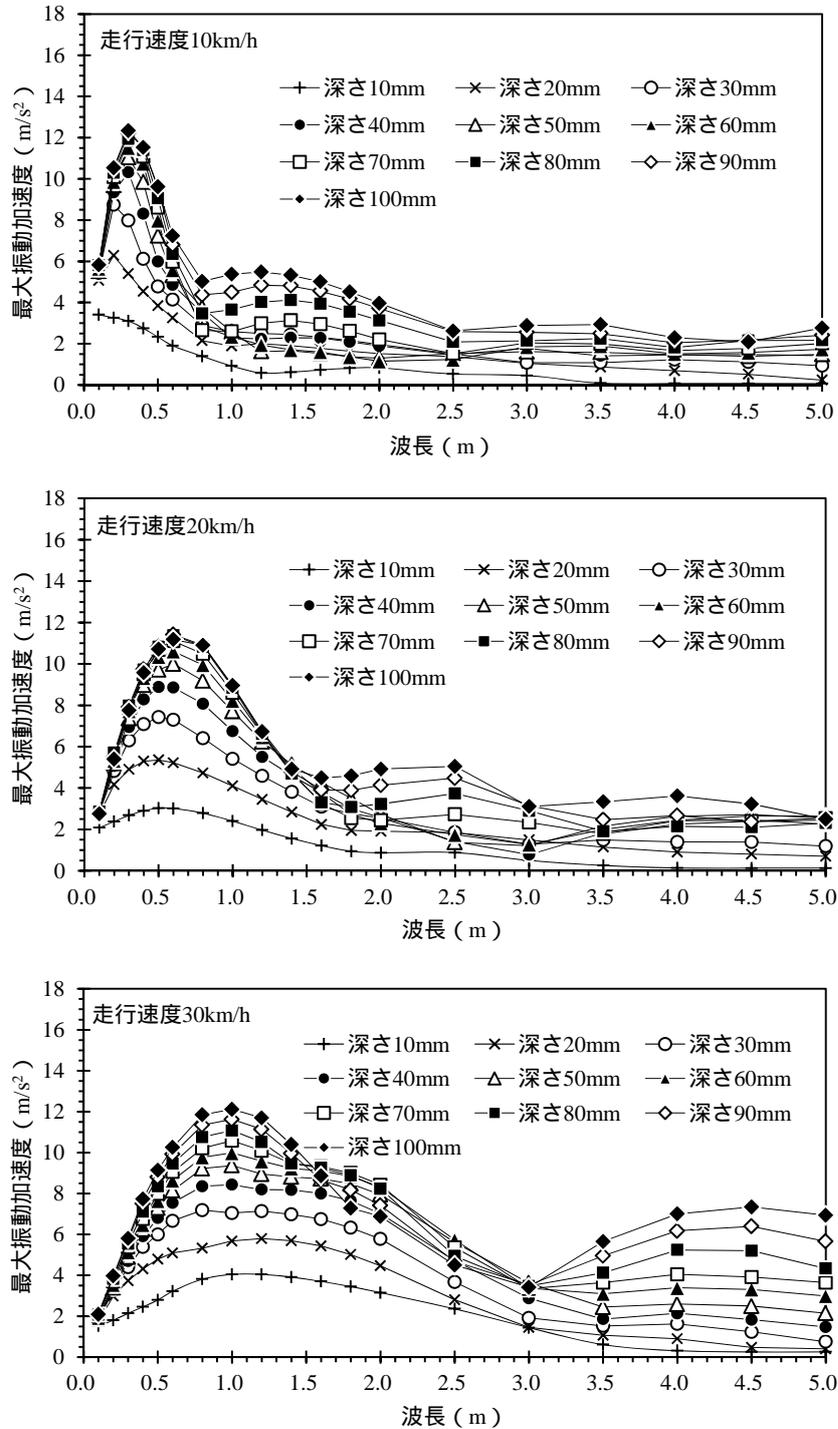


図-4.13 TruckSim で求めた最大振動加速度と波長（深さ）の関係

次に、図-4.13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 [8] を横軸にとって再整理したものを図-4.14 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 [9] 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する。岩元らの研究 [10,11,12] 成果の“ 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 ” という事と偶然一致しているが、荷傷み抑制を目的とした路面の維持管理を考えた場合には、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ことを示唆しているものと考えられる。

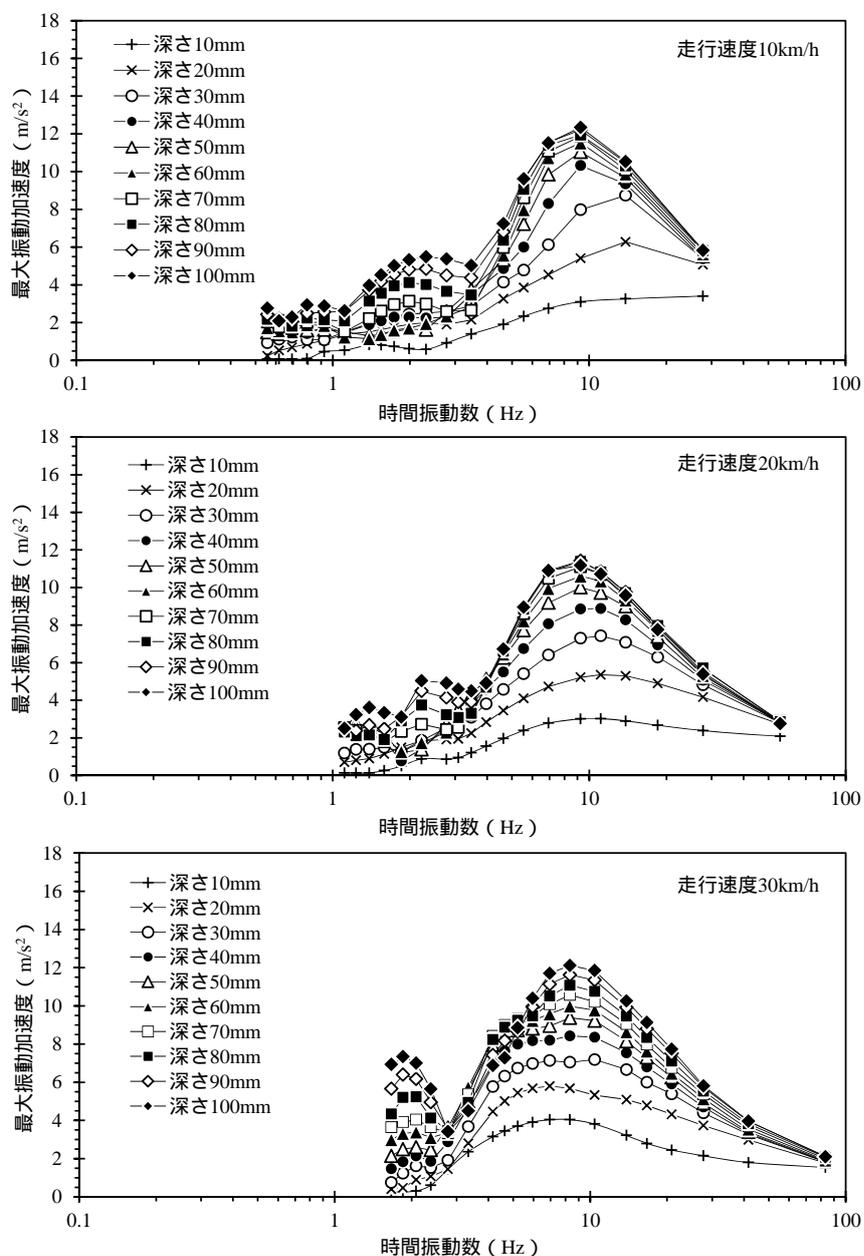


図-4.14 TruckSim で求めた最大振動加速度と時間振動数の関係

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,

$$1/f = L/v \quad \text{すなわち, } L = v/f \quad \text{式-4.1}$$

で与えられる[13]. 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-4.15 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.

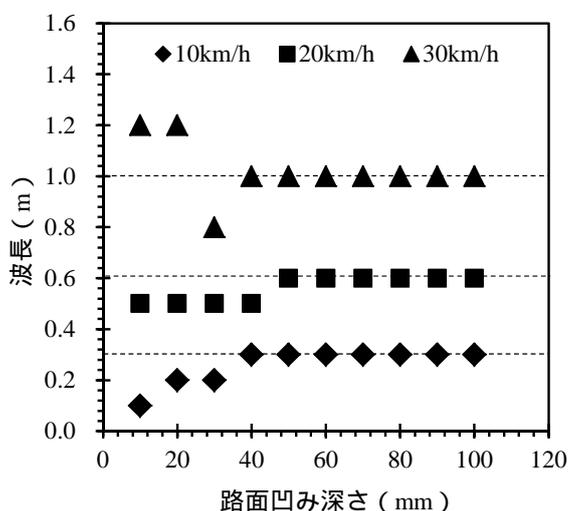


図-4.15 最大振動加速度がピークを示した深さと波長の関係

一方, 路面の凹み深さと最大振動加速度のピーク値の関係をみると図-4.16 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 付近に傾きが変化する点が現れている.

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, 第3章でも記述したように, 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る際に瞬間的に宙に浮いて飛んでいるような状態での走行となり, 見掛け上実路面より凹み深さの小さい路面を走行していることになるためと考えられる [14,15]. また, 実路では路面の凹凸が連続して出現するのに対して, 今回の検討では単一の凹み部でのシミュレーションとしたことも, 上記の事象が顕著に現れた要因の一つであると推察される.

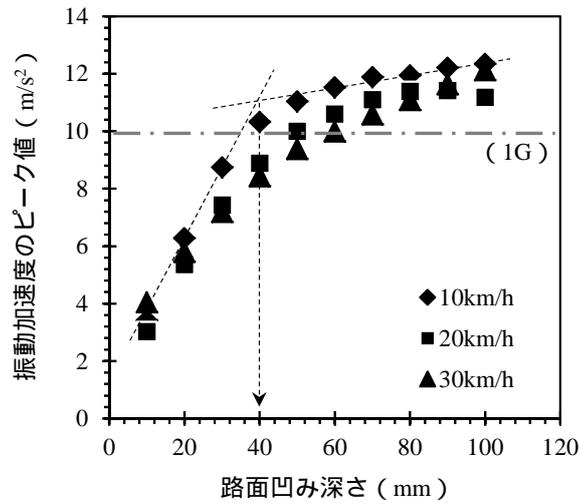


図-4.16 路面の凹み深さと振動加速度のピーク値の関係

岩元らの研究 [10,11,12] によれば，振動加速度が $1G$ ($9.8m/s^2$) 以下であればレタスに物理的な損傷は生じないとしている．図-4.16 で見ると，概ね凹み深さ $40 \sim 60mm$ 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，管理基準の一指標になり得るものと考えられる．

4.4 第4章の結論

第4章では、路面形状と振動加速度の関係をより単純化し、車両運動シミュレーションソフト(TruckSim8.1)を使って、荷傷みが生じる路面の凹みの閾値に関する検討を行った。具体的な検討内容としては、まず、車両運動シミュレーションソフトから求まる振動加速度と実測値との比較から、走行シミュレーションによって実道での振動加速度の推定が可能であることを確認し、次に、正弦波形で近似した仮想路面の凹み上の走行をシミュレートすることで、路面の凹み形状と軽トラックの荷台に生じる垂直方向の振動加速度の関係を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 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ある程度高い相関が認められ、雑草が繁茂している路面かどうかを判別できれば、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。
- (2) 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。
- (3) 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。

第4章の参考文献

- [1] 例えば, 廣川敬康, 赤木新介, 藤田喜久雄, 仲田真基, 近藤一生, 平田隆教: マルチリンク式サスペンションを用いる自動車の総合操安性設計のための最適化モデル, 日本機械学会講演論文集 No.974-1, 1997.3.
- [2] 小林こずえ, 輸送時の荷傷みを低減するトラックの開発 - 「いちご」の傷みと振動特性の関係 -, 包装技術 48(4), pp.344-348, 2010.4.
- [3] 子安勝: 騒音・振動(下), コロナ社, pp.146-155, 1988.8.
- [4] 例えば, 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.
- [5] 坂本康文, 五傳木一, 芳賀潤一, 緒方英彦: 土砂系舗装の路面形状と車両振動特性に関する研究, 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), pp.I_37-I_44, 2012.12.
- [6] <http://carsim.jp/>
- [7] 市原薫, 小野田光之: 新訂版 路面のすべり - 道路・滑走路・床面 -, 技術書院, p.26-27, 1986.11.
- [8] 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.
- [9] 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 / -11, pp.57-65, 1989.7.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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 / -62, pp.83-102, 2003.1.
- [14] 岩川治, 高田長武: 車両の荷台上の位置と振動加速度との関係, 日本林学会誌 45(11), pp-357-363, 1963.11.
- [15] 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.

第5章 土砂系舗装材料の性能評価・照査手法に関する研究

5.1 概要

2005年3月の土地改良事業計画設計基準・設計「農道」の改定[1]を受けて、農道舗装の設計の性能規定化が推し進められている。具体的には、「舗装の構造に関する技術基準・同解説」[2]に準拠しつつ、従来の仕様規定型設計から要求される性能が満足することを照査する性能照査型設計に移行しようとするものである。

舗装の設計は、路面を形成する材料と工法を決定する“路面設計”と、舗装各層の材料と厚さを決定する“構造設計”に分けられる。路面設計においては、わだち掘れに対する抵抗性(塑性変形抵抗性)や部分的な骨材の飛散に対する抵抗性(骨材飛散抵抗性)など、要求される性能のレベルに応じた目標値を具体的に設定し、それを満足できるような材料の特性や定数等を決定することになる。構造設計には、路床の設計 CBR と舗装計画交通量から求まる必要等値換算厚さ T_A を満足するように舗装構成を決定する“経験的設計法”と、舗装各層の弾性係数あるいは変形係数等といった材料定数を用いて、多層弾性理論に基づいた数値解析結果と経験的に定められた破壊規準式から舗装構成を決定する“理論的設計法”とがあり、前者を適用することが多い。

農道の舗装工種は、路面を形成する材料により、アスファルト舗装、コンクリート舗装、土砂系舗装に大別されている。アスファルト舗装やコンクリート舗装については、路面設計や構造設計の手法が確立されており、性能設計に対応できるようになっているが、土砂系舗装については、要求される性能はある程度整理されつつはあるものの、性能指標の目標値を設定できるだけの調査・研究実績が不十分であることから、性能照査型設計への動きが滞っている。土砂系舗装の特徴としては、供用とともに路面に凹凸ができやすく、水に弱いことなどが挙げられるが、要求性能やその値を明確にすることによって、既設の土砂系舗装材料を再利用した耐久性向上技術の発展や設計の合理化などにも繋がるものと考えられる。

そこで、本章では、土砂系舗装の設計の性能規定化に資することを目的として、土砂系舗装の路面に適用可能な幾つかの材料を選定し、種々の物性試験により材料特性を評価するとともに、土砂系舗装材料の性能照査手法について考察を行った。そして、従前の試験方法を応用することで、土砂系舗装材料の塑性変形抵抗性や骨材飛散抵抗性の評価、弾性係数の推定が可能であること等を明らかにした [3,4]。

5.2 土砂系舗装材料の選定とその基本物性

土砂系舗装の路面に適用可能な材料を選定するに際しては、比較対象用として現状が土砂系舗装である農道の路面材料が必要となる。本研究においては、基本となる比較対象用の材料として、現在供用されている鳥取大学付属農場内にある1967年頃には場整備された水田の支線農道の路面材料（以下、現状土）を選定し、路面下の試料を採取した。採取状況を写真-5.1に示す。



写真-5.1 現状土採取状況

次に、一般的舗装材料との比較のために、路盤材として広く使われているクラッシュラン（以下、C-40）についても試験を実施した。また、既設舗装材料の有効活用や再掘削・再利用等を考慮に入れ、セメント系ではなく石灰系の固化材で現状土を安定処理したもの（以下、石灰安定処理土）と、それにフォームドアスファルトも加えて安定処理したもの（以下、石灰フォームド安定処理土）も含めて、計4種類の材料を評価することとした。石灰系固化材は、環境負荷軽減にも配慮し、生石灰に石炭灰（PFBC（*Pressurized Fluidized Bed Combustion*）灰）を混合した防塵タイプの石灰複合系固化材を用いた。以上のように、使用材料の選定にあたっては、資源の有効活用と環境負荷軽減に配慮した。

使用材料の材質・成分は表-5.1に示すとおりである。

表-5.1 使用材料

材料名	材質（成分）	備考
現状土	細粒分質礫質砂（SFG）	鳥取大学付属農場から採取
クラッシュラン	硬質砂岩，40～0mm	C-40
石灰系固化材	生石灰に石炭灰（PFBC灰）を混合した石灰複合系固化材，5～0mm	防塵タイプ
アスファルト	舗装用石油アスファルト，pen.60/80	St.As.60/80

現状土，C-40，石灰安定処理土，石灰フォームド安定処理土のそれぞれの粒度や配合等の一般性状については、以下のとおりである。

5.2.1 現状土

現状土の粒度を図-5.1に示す。現状土は細粒分質礫質砂（地盤材料の工学的分類でSFGに相当する材料）に分類されるもので、自然含水比は6.4~7.7%であった。また、現状土の締固め曲線を図-5.2に示す。図中には、A-c法（ランマー質量2.5kg、モールド内径10cm、3層×25回突固め、湿潤・非繰返し）とE-c法（ランマー質量4.5kg、モールド内径15cm、3層×92回突固め、湿潤・非繰返し）の2つの方法での結果を記載しているが、A-c法は現状土の石灰安定処理土の配合設計を行う際の最適含水比を求めるために実施したものであり、E-c法は後述する各種性状試験における供試体作製時の基準値として求めたものである。A-c法での最大乾燥密度（ ρ_{dmax} ）1.982t/m³、最適含水比（ w_{opt} ）11.8%で、E-c法では最大乾燥密度（ ρ_{dmax} ）1.989t/m³、最適含水比（ w_{opt} ）11.5%であった。

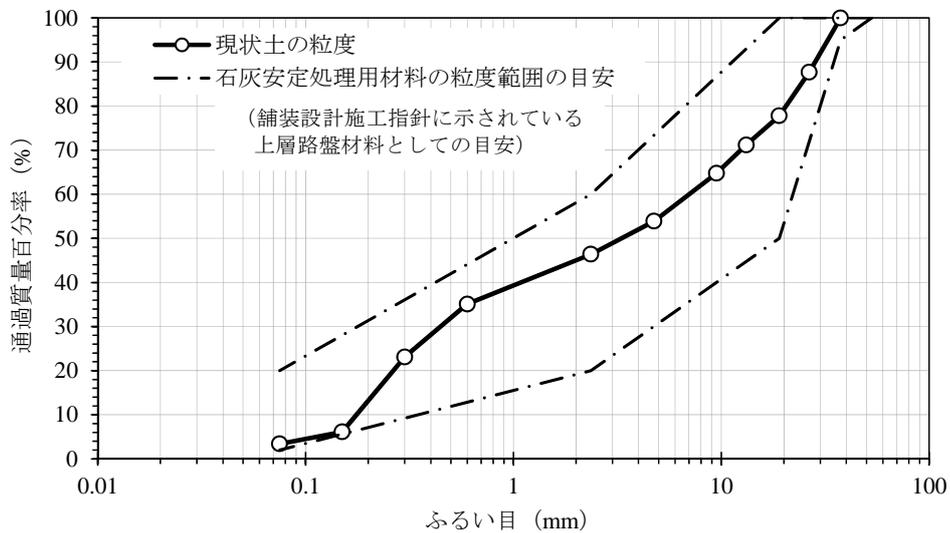


図-5.1 現状土の粒度曲線図

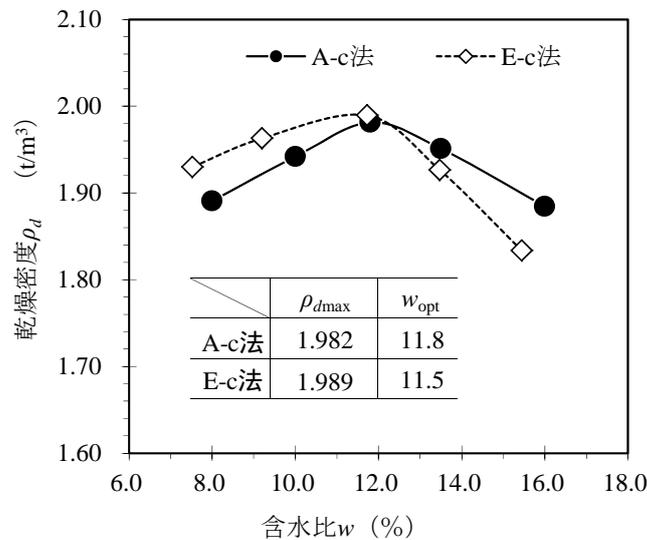


図-5.2 現状土の締固め曲線

5.2.2 C-40

C-40 の粒度を図-5.3 に示す。材質は硬質砂岩で、最適含水比は 3.6%，最大乾燥密度は 2.282t/m^3 であり（E-b 法：ランマー質量 4.5kg，モールド内径 15cm，3 層×92 回突固め，乾燥・非繰返し），これを各種性状試験の供試体作製時の基準値とした。

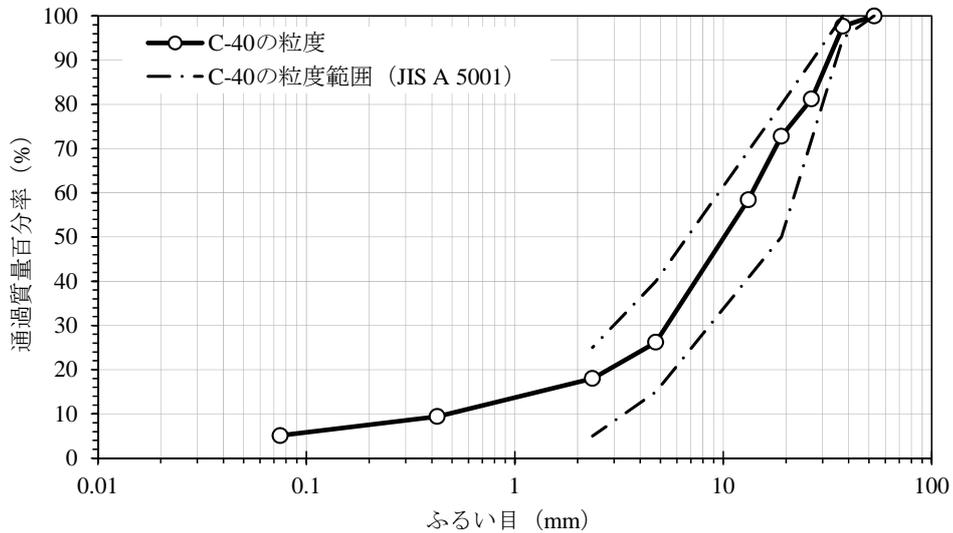


図-5.3 C-40 の粒度曲線図

5.2.3 石灰安定処理土

石灰安定処理土の配合は，下層路盤材としての目標強度である一軸圧縮強度 0.7MPa （養生条件：9 日封緘気中，1 日水浸）[5,6] を満足する固化材量 3.0% を決定配合とした。固化材量と一軸圧縮強度の関係は図-5.4 に示すとおりである。当該試験の供試体作製方法は A 法（ランマー質量 2.5kg，モールド内径 10cm，3 層×25 回突固め）であり，舗装調査・試験法便覧 [7] に準拠し，決定配合の含水比 11.8%，乾燥密度 2.222t/m^3 を各種性状試験の供試体作製時の基準値とした。

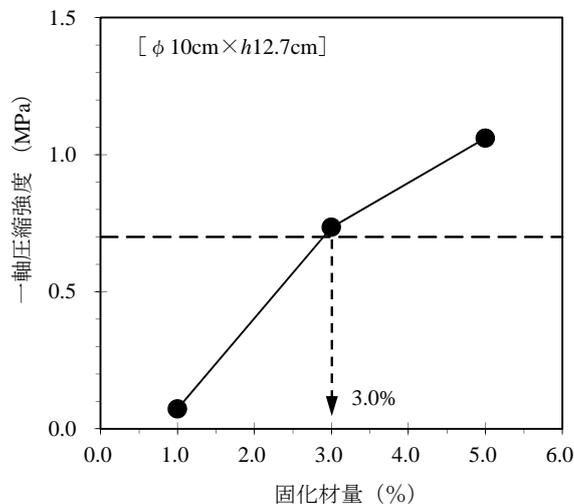


図-5.4 固化材量と一軸圧縮強度の関係

5.2.4 石灰フォームド安定処理土

石灰フォームド安定処理とは、石灰系固化材とフォームドアスファルトを使って混合・処理する工法である。フォームドアスファルトとは、高温（150～180℃程度）の舗装用石油アスファルトに少量の水（1.5～2.5%）とエアアーを同時に添加することで、水の気化に伴う体積膨張を利用して液状のアスファルトをフォームド化（泡状に）させたものである。写真-5.1に泡状となったアスファルトの例を示す。



写真-5.1 フォームドアスファルト

また、図-5.5にその概念を示すが、泡状になることでアスファルトの見掛け上の粘性が低下し、常温であっても湿潤状態の骨材との混合が可能となる。混合時のフォームドアスファルトは、細粒分に付着して極小のアスファルトモルタルとなって混合物中に均一に分散し、このアスファルトモルタルが、締固め時に粗骨材間を接着剤のように固着して強度を発現する。また、粗骨材がアスファルトに被覆されないため、通常のアスファルト混合物と比べると、感温性は極めて小さい。

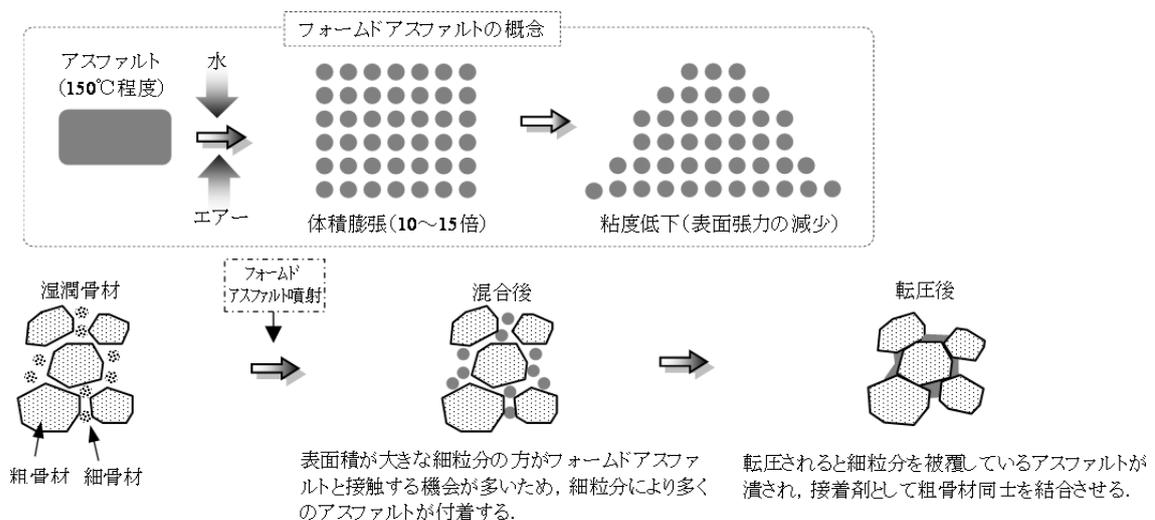


図-5.5 フォームド混合物のメカニズム

固化材にセメントを使用したセメント・フォームド安定処理については、上層路盤材として配合設計方法や目標強度等が定められている [5] が、石灰系固化材の適用については定められたものがない。そこで本研究では、セメント・フォームド安定処理の既定の方法 [8] に準拠して配合を決定することとし、供試体の養生方法については、前述の石灰安定処理土に準じて 9 日封緘気中養生後、1 日水浸養生とした。

フォームドアスファルト量は、式-5.1 [8] に図-5.1 の通過質量百分率 (a=53.6, b=43.0, c=3.4) を代入することにより 4.4% とした。

$$P = 0.03a + 0.05b + 0.2c \quad \text{式-5.1}$$

ここに、 P : 現状土に対するフォームドアスファルトの質量百分率 (%)

a : 現状土の 2.36mm ふるいに残留する部分の質量百分率 (%)

b : 2.36mm ふるいを通過し、0.075mm ふるいに残留する部分の質量百分率 (%)

c : 0.075mm ふるいを通過する部分の質量百分率 (%)

石灰系固化材量は、固化材の添加量と一軸圧縮強度、一次変位量、残留強度率との関係から求めた。一次変位量、残留強度率の求め方の概念は図-5.6 に示すとおりであり、残留強度率は式-5.2 で求めた。結果を図-5.7 に示す。

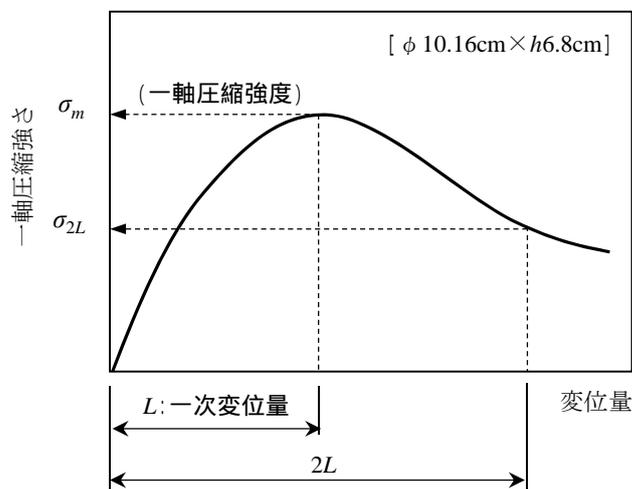


図-5.6 一次変位量、残留強度率の概念図

$$\sigma_r = \sigma_{2L} / \sigma_m \times 100 \quad \text{式-5.2}$$

ここに、 σ_r : 残留強度率 (%)

L : 一次変位量 (1/100mm)

σ_{2L} : 変位量 $2L$ の時の荷重強さ (MPa)

σ_m : 一軸圧縮強度 (MPa)

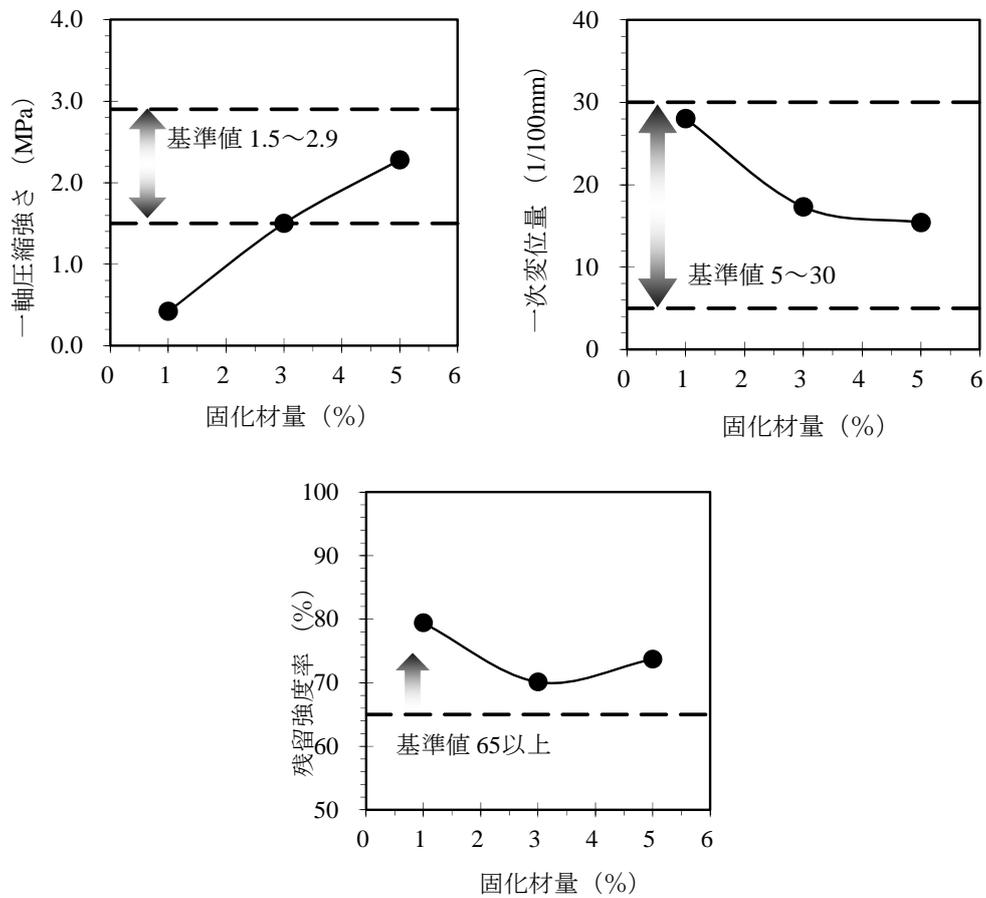


図-5.7 固化材量と一軸圧縮強さ，一次変位量，残留強度率の関係

固化材量が3～5%であれば基準値 [5] を満足しているが，この基準値は上層路盤材としてのものであり，ここでは現状土やC-40（下層路盤材）と比較することを踏まえて，特性値の下限側である固化材量3%を決定配合とした．また，決定配合の含水比は8.5%，乾燥密度は 2.087t/m^3 であり，これを各種性状試験の供試体作製時の基準値とした．

5.3 土砂系舗装材料の各種性能評価

土砂系舗装で一番問題となるのは、路面のぬかるみ等の変状や変形である。そこで本研究では、土砂系舗装の路面に要求される性能として、路面性能に直結した塑性変形抵抗性、骨材飛散抵抗性および透水性を取り上げ、土砂系舗装材料の評価試験を行った。また、舗装構造を理論的に検討する際に必要となる土砂系舗装材料の弾性係数（変形係数）についても実験的検討を行った。

5.3.1 塑性変形抵抗性

塑性変形抵抗性は、アスファルト混合物のわだち掘れ抵抗性の評価に用いられているホイールトラッキング試験機により評価した [9]。供試体の締固めは、ホイールトラッキング試験と同様にローラコンパクタを用いて行い、基準密度に対して締固め度が 100%となるように作製した。試験個数は 1 材料につき 2 個とした。

載荷荷重は、舗装設計に用いる輪荷重 49kN と大型車のタイヤの接地圧から 624N に設定されている [9] が、本研究においては、実路（鳥取大学付属農場内の支線農道）での評価を念頭に置いて、鳥取大学所有の農業用トラクタの駆動輪の接地圧 (0.484MPa) [10] を参考に、527N とした。駆動輪としたのは、直線走行時に路面を変形させる力は操舵輪よりも駆動輪の方が大きいためである。

また、試験温度については、いずれの材料もアスファルト混合物に比べて感温性は極めて小さいことから、常温（約 25℃）で評価することとした。厚さは、材料の最大粒径を考慮して 10cm とし、試験時間は 60 分とした。試験状況は写真-5.2 のとおりである。



写真-5.2 ホイールトラッキング試験状況

試験結果を図-5.8 に、試験後の供試体表面の状態を写真-5.3 に示す。当該試験装置の測定限界変形量は 40mm 程度であるが、現状土は試験開始から直ぐに変形が始まり、30 分経過時点ではほぼ限界値まで変形が進行してしまったことから、塑性変形抵抗性がかなり小

さいことが確認できる。一方、C-40、石灰安定処理土、石灰フォームド安定処理土については、いずれも1~2mmの変形量であり、今回のような試験条件下では、現状土に比べて十分な塑性変形抵抗性（わだち掘れ抵抗性）を有していることがわかった。

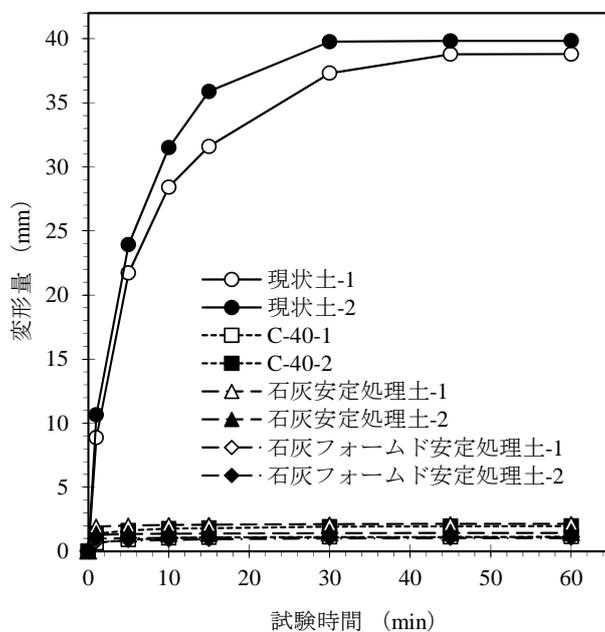


図-5.8 土砂系舗装材料のホイールトラッキング試験結果

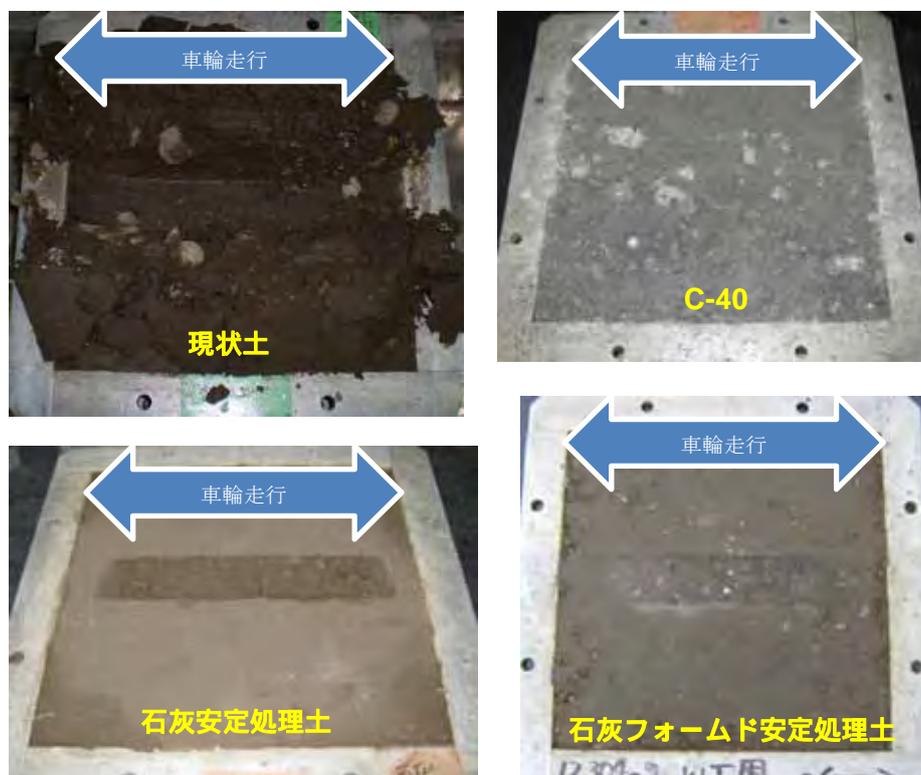


写真-5.3 ホイールトラッキング試験後の供試体表面の状態

ホイールトラッキング試験では、通常 45 分後の変形量と 60 分後の変形量を用いて式-5.3 で算出される動的安定度 (DS : *Dynamic Stability*) の大小 (大きい方が抵抗性大) で塑性変形抵抗性 (アスファルト混合物の耐流動性) が評価される。式中の 15 は 60 分と 45 分の差である 15 分を指しており、42 は当該試験機が 1 分間に走行する回数である。したがって、動的安定度は 1mm の変形に要する走行回数として表されている。

$$DS = 42 \times \frac{15}{d_{60} - d_{45}} \quad \text{式-5.3}$$

ここに、 DS : 動的安定度 (回/mm)
 d_{60} : 60 分後の変形量 (mm)
 d_{45} : 45 分後の変形量 (mm)

図-5.8 に示した変形量から、式-5.3 に代入する試験時間を変えて動的安定度を求めたものを表-5.2 に示す。通常の DS_{60-45} で見ると、C-40 が 31,500 (回/mm) で、それ以外はすべて 63,000 (回/mm) と当該試験で求められる DS の限界値となっている。ただし、現状土については先に述べたように試験時間が 30 分に達したあたりで試験機の測定限界を超えているため、この数値では評価できない。そこで、試験機の測定限界に達する前の測定値で算出した動的安定度が DS_{5-1} 、 DS_{10-5} 、 DS_{15-10} であるが、これによると、現状土が他の材料と比べて極端に小さくなった。また、C-40 は現状土の次に小さく、石灰安定処理土と石灰フォームド安定処理土が同程度となり、変形量の違いが表現できている。供試体 2 個のデータに大きな差が生じているものもあるため、今後は試験回数や試験値の棄却判定等に関する検討が必要なものと考え、評価法の適用の可能性判断に主眼を置くと、土砂系舗装材料の塑性変形抵抗性を動的安定度として表す場合には、従前の試験開始から 45 分から 60 分までの変形量ではなく、試験開始から 15 分程度までの変形量を用いることで、適切な評価が行えるものとする。

表-5.2 各土砂系舗装材料の試験時間と動的安定度の関係 (単位: 回/mm)

	現状土		C-40		石灰安定処理土		石灰フォームド安定処理土	
	1	2	1	2	1	2	1	2
DS_{60-45}	63,000	63,000	31,500	31,500	63,000	63,000	63,000	63,000
DS_{5-1}	13	13	672	672	2,100	2,800	1,527	3,360
DS_{10-5}	66	48	4,200	5,250	10,500	21,000	4,200	21,000
DS_{15-10}	66	48	4,200	5,250	10,500	21,000	9,000	21,000

※ 表中の DS の添え字は、算出に用いた試験時間 (分) を表す。

したがって、土砂系舗装材料の塑性変形抵抗性の評価には、従前からアスファルト混合物の評価に用いられているホイールトラッキング試験の適用が可能であり、また塑性変形抵抗性を評価する指標としては、試験開始から15分程度までの変形量あるいは動的安定度が適しているものとする。

5.3.2 骨材飛散抵抗性

骨材飛散抵抗性については、交差点や大型車の出入り口等でのアスファルト混合物のタイヤの据え切り等への抵抗性を評価するために用いられている回転ホイールトラッキング試験機により評価した [11]。供試体の締固めは、回転ホイールトラッキング試験と同様にローラコンパクタを用いて行い、基準密度に対して締固め度が100%となるように作製した。試験個数は1材料につき2個とした。

載荷荷重については、実路（鳥取大学付属農場内の支線農道）での評価を念頭に置いて、鳥取大学所有の農業用トラクタの操舵輪の荷重に相当する377Nとした [10]。操舵輪としたのは、タイヤの据え切りに対する抵抗性を評価するためである。

試験温度は先のホイールトラッキング試験と同じ常温（約25℃）とし、厚さも10cmとした。試験時間は60分である。

骨材飛散抵抗性の評価は、飛散した骨材の質量を測定時間ごとに計量・累加し、それを当初の質量で除して質量百分率として表した「ねじり骨材飛散率」で行った。試験状況は写真-5.4に示すとおりである。



写真-5.4 回転ホイールトラッキング試験状況

試験結果を図-5.9に、試験後の供試体表面の状態を写真-5.5に示す。

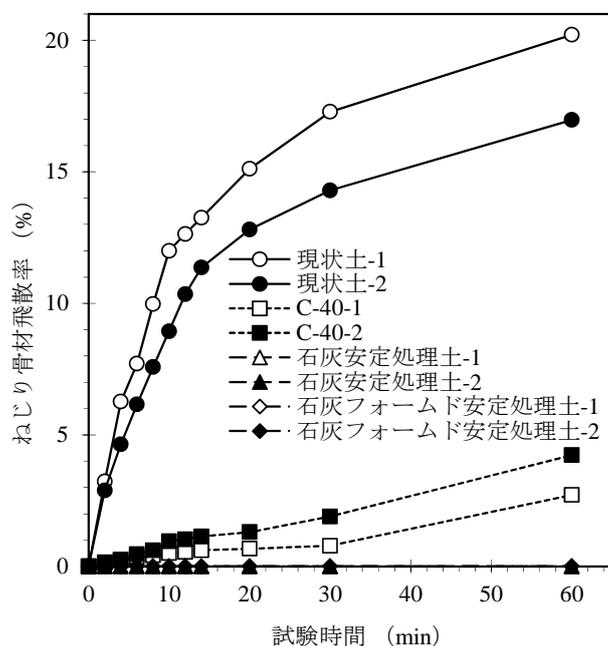


図-5.9 土砂系舗装材料の回転ホイールトラッキング試験結果

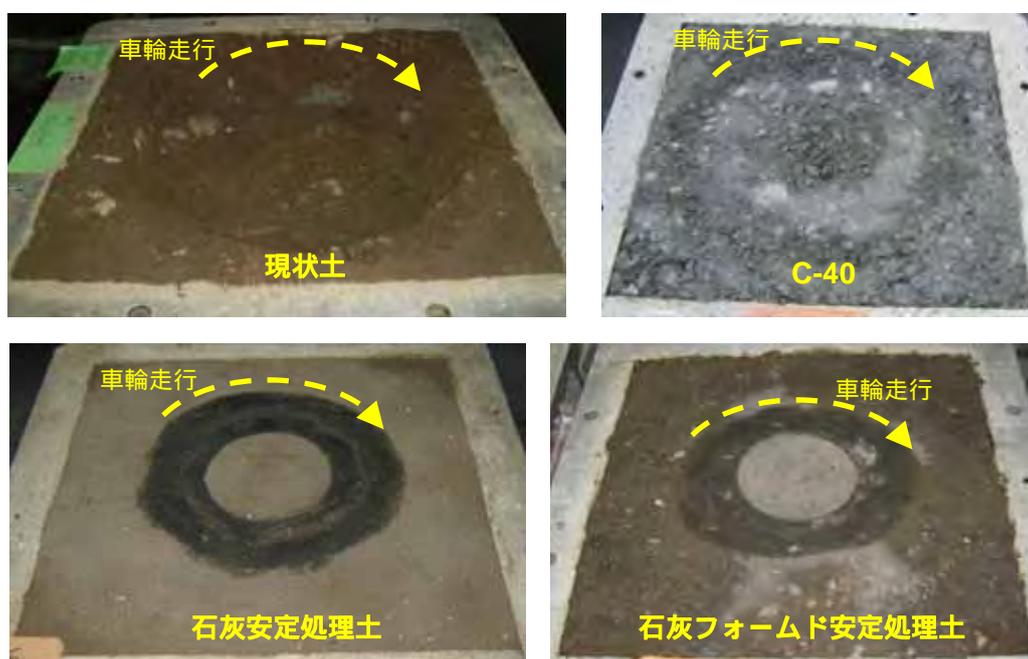


写真-5.5 回転ホイールトラッキング試験後の供試体表面の状態

現状土は、試験開始直後から材料が飛散し、60分後には15%以上にまで増大した。アスファルト混合物における骨材飛散抵抗性の評価では、一つの目安として試験温度50°Cで120分試験後のねじり骨材飛散率が20%以下とされている。これと比べると現状土の骨材

飛散抵抗性はかなり小さく、タイヤのねじり作用に極端に弱い材料であると言える。また、C-40については、60分経過後で4%以下と小さい値ではあるが、30分前後でねじり骨材飛散率の増加傾向が認められる。これは、30分付近で大きな骨材が飛散し始めたためであり、C-40のように結合材がなく粘性のない材料の場合、一度飛散が始まるとそこから進行性破壊が進み、やがてポットホールが発生に至るという実道で生じている現象を再現した結果が得られたものと考えられる。一方、石灰安定処理土と石灰フォームド安定処理土については、60分経過後でも飛散は認められず、いずれの材料もタイヤの据え切り等に対して優れた抵抗性を有していることがわかった。

以上のように、土砂系舗装材料の骨材飛散抵抗性の評価には、従前からアスファルト混合物の評価に用いられている回転ホイールトラッキング試験の適用が可能であり、当該試験機で土砂系舗装の骨材飛散現象が再現できることがわかった。また、骨材飛散抵抗性を評価する指標についても、アスファルト混合物の性能指標として使われている「ねじり骨材飛散率」が適していることがわかった。

5.3.3 透水性

透水性については、アスファルト舗装では、ポーラスな材料であれば簡易な変水位タイプの現場透水試験で求めたり、密実な材料であれば加圧タイプの透水試験で求めたりする[7]が、土砂系舗装材料は土質材料に近いものであることから、ここでは一般の土質試験で広く使われている変水位透水試験（JIS A 1218）で評価することとした。結果を表-5.3に示す。

表-5.3 変水位透水試験結果

舗装材の種類	透水係数 (cm/s)
現状土	1.5×10^{-5}
C-40	9.0×10^{-2}
石灰安定処理土	2.5×10^{-5}
石灰フォームド安定処理土	8.0×10^{-4}

現状土が最も透水係数が小さく、石灰安定処理土と石灰フォームド安定処理土は現状土よりも僅かに透水係数は大きくなっている程度であるが、C-40については 10^{-2} のオーダーで透水性の高い材料であるとの評価であった。この結果は一般的な概念と一致するものであり、土砂系舗装材料の透水性の評価には変水位透水試験を適用し、透水性の指標は透水係数として問題ないものとする。

また、透水係数から類推されることとしては、透水係数が小さい材料であれば一度内部に浸透した水分は移動しにくく、保水状態が長く続くであろうということであり、降水等による路面の泥濘化に対しては、透水係数が大きい材料が望ましいものとする。

5.3.4 弾性係数（変形係数）

舗装の理論的設計方法では、材料特性を弾性係数等で表し、交通荷重に対する舗装の挙動の力学的解析（主に多層弾性理論に基づいた解析）から得られる応力やひずみを破壊規準に照らして、舗装構造が決定される [12]。破壊規準に経験的な供用性と関係付けたものを適用することから、力学的経験的設計法とも呼ばれている [13]。

路床土や路盤材の弾性係数（土質の分野等では変形係数とも呼ばれるが、舗装の設計では弾性係数として取り扱うことから、ここでは弾性係数と表記する）は、レジリエントモデュラス試験と称される繰返し三軸圧縮試験により求めることが一般的とされてきた。しかし、試験装置が特殊であることや習熟度が試験結果に影響するなどの理由から、研究レベルでの活用にとどまっており、それに代わるものとして“繰返し載荷 CBR 試験”が（独法）土木研究所から提案されている [14]。繰返し載荷 CBR 試験は、海外では“*Repeated Loading CBR Test*”として検討が進められており、レジリエントモデュラス試験結果と高い相関があるとされている [15]。

そこで本研究では、土砂系舗装材料の性能照査手法としての繰返し載荷 CBR 試験の適用性について検証実験を行った。試験個数は 1 材料につき 2 個とした。

繰返し載荷 CBR 試験の様子を写真-5.6 に、解析のイメージを図-5.10 に示す。

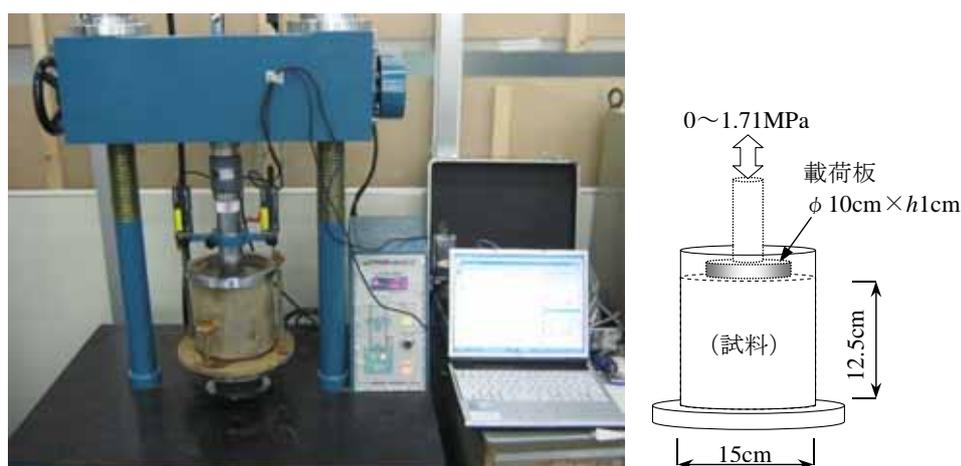


写真-5.6 繰返し載荷 CBR 試験状況

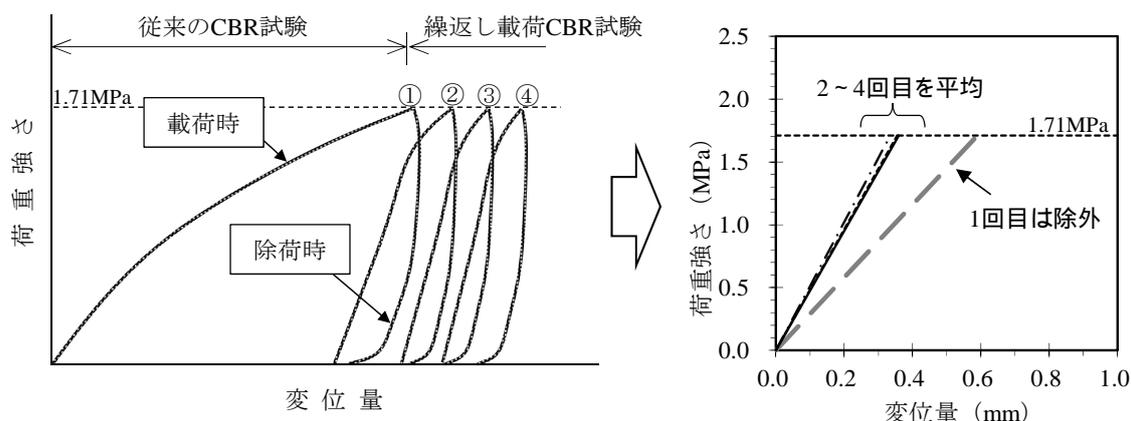


図-5.10 繰返し載荷 CBR 試験の解析イメージ

繰返し載荷 CBR 試験では、通常の CBR 試験の貫入ピストンと試料の間に $\phi 10\text{cm} \times h1\text{cm}$ の載荷板を設置し、載荷速度 $1\text{mm}/\text{min}$ で荷重強さ 1.71MPa (CBR 試験における変位量 2.5mm での標準荷重 13.4kN に相当) までの載荷と除荷を 4 回繰返して、1 回目の測定値を除外した 2~4 回の変位量を用いて式-5.4 により弾性係数を推定する。

$$E_{R\text{-CBR}} = p / \varepsilon_{ave} \quad \text{式-5.4}$$

ここに、 $E_{R\text{-CBR}}$: 推定弾性係数 (MPa)

p : 荷重強さ (= 1.71MPa)

ε_{ave} : 2~4 回のひずみ (変位量 / 供試体高さ 125mm) の平均値

供試体の養生条件は、表-5.4 に示すように通常の CBR 試験と同じとしたが、ほ場内農道においては水の影響の把握も必要であろうと考え、現状土と C-40 については水浸養生しないものも実施することとした。

表-5.4 繰返し載荷 CBR 試験の養生条件

材料の種類	養生条件	備考
現状土	4 日水浸	+ 非水浸
C-40	4 日水浸	+ 非水浸
石灰安定処理土	6 日気中 4 日水浸	—
石灰フォームド安定処理土	6 日気中 4 日水浸	—

試験結果を図-5.11 に示す。水浸条件下での弾性係数を比較すると、現状土 < C-40 < 石灰安定処理土 < 石灰フォームド安定処理土の順で大きくなっており、固化材により材料の剛性が高くなっていることがわかる。

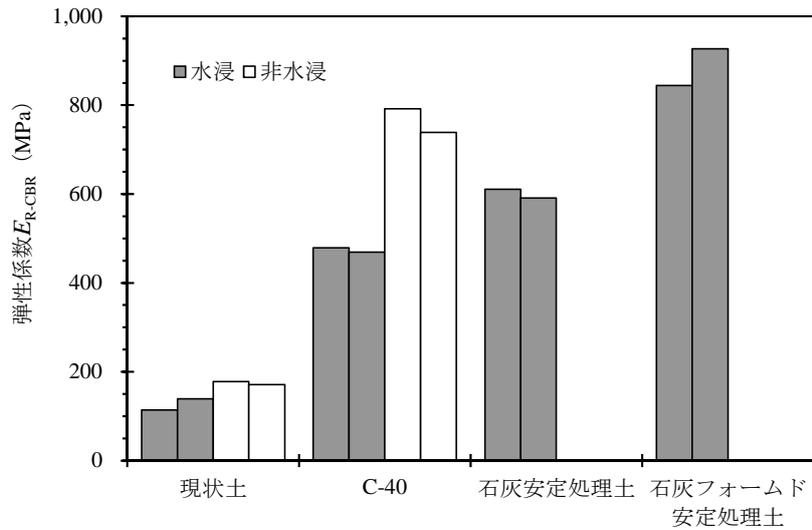


図-5.11 繰返し載荷 CBR 試験結果

一般に粒状路盤材の弾性係数は 100~600MPa といわれており [16], 今回の C-40 の結果も同程度であることから, 繰返し載荷 CBR 試験により妥当な結果が得られているものと考ええる. また, 水浸と非水浸では, 現状土では若干の低下に留まっているのに対して, C-40 において水浸の値が大きく低下している. これは, いずれの材料も降水等によって水分量が増えると変形しやすくなる特性を有していることを示している, 今回使用した C-40 については, 特にその傾向が大きい材料であることを示唆しているものと考ええる.

次に, 別途実施した各材料の CBR 試験結果と弾性係数の関係を図-5.12 に示す. 現状土のように路床材に近い材料の弾性係数は, E_{sg} (MPa) $= 2 \sim 10 \times CBR$ (%) の関係式を使って表現されることが多い [16]. 今回の試験結果はすべてその範囲内に入っており, このことから繰返し載荷 CBR 試験の妥当性が確認できたものと考ええる.

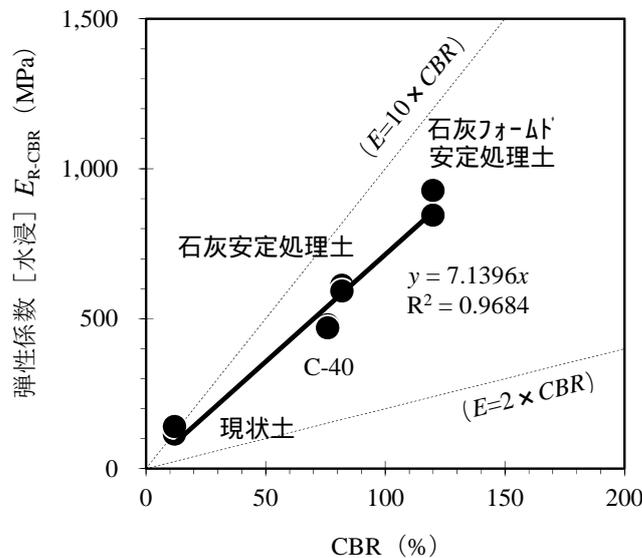


図-5.12 CBR と弾性係数の関係

以上のように、繰返し載荷 CBR 試験は、土砂系舗装材料の弾性係数の推定手法として有用であることがわかったが、海外では繰返し載荷を 100 回まで行うということも試みられている [15]. そこで、水浸により弾性係数が低下した C-40 ついて、粒度を合わせた別の C-40 (硬質砂岩) を使って、水浸・非水浸での 100 回の繰返し載荷 CBR 試験の検証実験を行った. 結果の一例を図-5.13, 5.14 に示す.

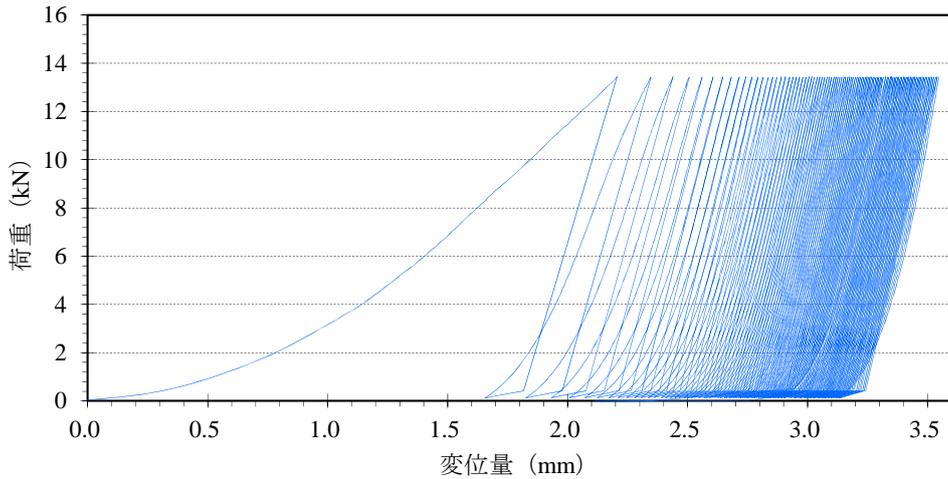


図-5.13 繰返し載荷 CBR 試験結果 (水浸)

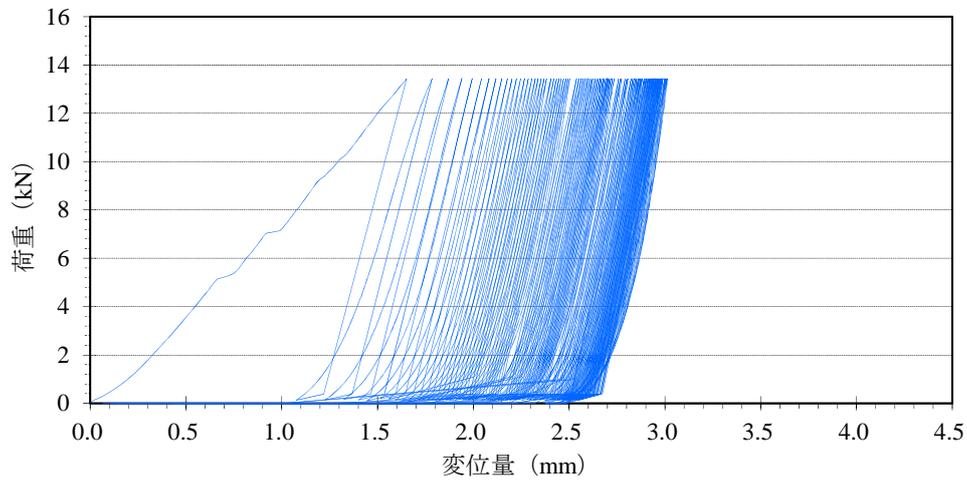


図-5.14 繰返し載荷 CBR 試験結果 (非水浸)

水浸、非水浸のいずれの場合も載荷を繰り返すことによって、載荷ごとの変位量は減少しているが、100 回載荷後の変位量について見ると、水浸では 3~3.5mm 程度、非水浸では 2.5~3mm 程度であり、非水浸に比べて水浸の場合の方が最終変位量が大きくなっている.

次に、载荷回数ごとの弾性係数の変化を表したものを図-5.15に示す。これは、最初の10回に関しては1回ごとに弾性係数を算出し、それ以降は変位量を10回単位で一つのグループとして、このうち最初の7回は除外して最後の3回の変位量の平均値を用いて弾性係数を算出したものである。例えば、50回载荷時の弾性係数は48回、49回、50回の変位量を平均したもものから弾性係数を算出している。

図-5.15を見ると、载荷20回程度までは弾性係数の増加傾向が認められるが、30回以降では弾性係数に大きな変化は見られず一定値に収束している。また、算出した弾性係数を養生条件の違いで比較してみると、非水浸に比べて水浸の方が大きくなっており、図-5.11とは逆の結果となった。この違いは、先にも述べたように図-5.11に示した材料とは産地や岩質が異なっていることが大きな要因であるが、今回使用したC-40について見ると、水浸によって適度な含水状態が保たれ、载荷するごとにC-40が締め固まっていたために弾性係数が大きくなったものと推察される。

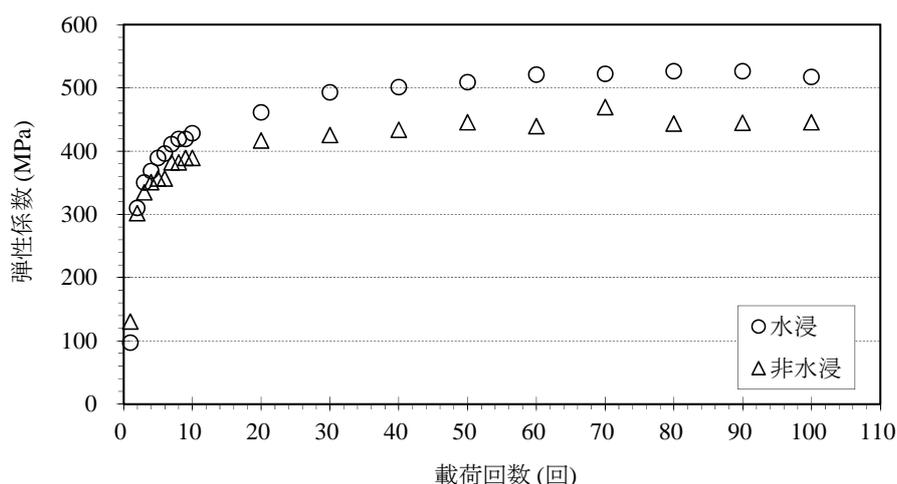


図-5.15 载荷回数と弾性係数の関係

以上のように、繰返し载荷 CBR 試験では、使用材料によっては水浸と非水浸で得られる弾性係数の大小の関係が異なってくる場合があり、繰返し载荷回数についても（独法）土木研究所提案の5回载荷よりも多い载荷回数で弾性係数が一定になる場合もあることがわかった。

したがって、土砂系舗装材料の弾性係数を推定する実験的手法として繰返し载荷 CBR 試験は有用と判断されるが、その適用にあたっては、水浸・非水浸での比較が重要であり、载荷回数については弾性係数が一定になることを目安として適宜設定することが望ましいものとする。

5.4 第5章の結論

第5章では、土砂系舗装の路面に適用可能な4種類の材料を選定し、種々の物性試験により材料特性を評価するとともに、土砂系舗装材料の性能照査手法について既存の試験機を使って実験的検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ホイールトラッキング試験により、土砂系舗装の塑性変形抵抗性（わだち掘れに対する抵抗性）を評価することができる。ただし、その場合の載荷荷重は当該道路を利用する農用車両の駆動輪の輪荷重が望ましい。
- (2) 塑性変形抵抗性を評価する指標としては、試験開始から15分程度までの変形量あるいは動的安定度が適している。
- (3) 回転ホイールトラッキング試験により、土砂系舗装の骨材飛散抵抗性（ポットホールに対する抵抗性）を評価することができる。ただし、その場合の載荷荷重は当該道路を利用する農用車両の操舵輪の輪荷重が望ましい。
- (4) 材飛散抵抗性を評価する指標としては、アスファルト混合物の性能指標として使われている「ねじり骨材飛散率」が適用できる。
- (5) 既設農道の現状土を石灰やフォームドアスファルトで安定処理することで、塑性変形抵抗性や骨材飛散抵抗性を改善できる。
- (6) 土砂系舗装材料の透水性の評価には変水位透水試験を適用し、透水性の指標には透水係数が適用できる。
- (7) 繰返し載荷 CBR 試験は、土砂系舗装材料の弾性係数の推定手法として有効である。ただし、その適用にあたっては、水浸・非水浸での比較が重要であり、載荷回数については弾性係数が一定になることを目安として適宜設定することが望ましい。

第5章の参考文献

- [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：舗装の構造に関する技術基準・同解説，2001.7.
- [3] 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.
- [4] 達増康隆，坂本康文，緒方英彦：繰返し載荷 CBR 試験の土砂系舗装材料への性能照査手法としての適用性，平成 23 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.558-559，2011.9.
- [5] 国土交通省：舗装の構造に関する技術基準，別表 1，2001.6.
- [6] (社) 日本道路協会：舗装設計施工指針（平成 18 年版），2006.2.
- [7] (社) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.6.
- [8] (社) 日本道路協会：舗装再生便覧（平成 22 年版），2010.11.
- [9] (社) 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の評価法編一，2006.1.
- [10] 緒方英彦：農道の設計および機能保全における自動車荷重の一考察，第 20 回農業農村工学会農村道路研究部会研究集会要旨集，2010.11.
- [11] (社) 日本道路協会：舗装性能評価法－必要に応じて定める性能指標の評価法編一，2008.3.
- [12] 坂本康文，久保和幸：舗装の理論的設計体系の構築に向けて，土木技術資料 48-4，2006.4.
- [13] 土木学会舗装工学委員会舗装設計小委員会：力学的-経験的舗装設計指針－生まれ変わった AASHTO 舗装設計指針－，アスファルト Vol.48 No.218，2005.10.
- [14] 久保和幸，井上直：舗装構造の理論設計の高度化に関する研究，独立行政法人土木研究所平成 19 年度重点プロジェクト研究報告書，2007.
- [15] Molenaar, A.A.A. : Repeated load CBR testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials, *TRB 2008 Annual Meeting*, 2008.
- [16] (社) 日本道路協会：舗装設計便覧，2006.2.

第6章 試験舗装による土砂系舗装材料の供用性能に関する研究

6.1 概要

農道は、農耕用の耕作道的性格の道路としてだけでなく、農業機械の導入による生産性の向上、農業近代化施設の整備に伴う農産物流通圏の拡大、輸送量の増大、交通車両の大型化等の農業生産の近代化、農産物流通の合理化などに資するとともに、都市に比べて立ち遅れている農村地域の社会生活環境の改善に資するものであることも求められている。また、2001年に土地改良法の一部改正により、「環境との調和への配慮」が土地改良事業実施の際に求められるようになったことに加えて、農村における生活様式の都市化、混住化等にも対応した「地域や目的に応じた農道の設計」が求められるようになった[1]。さらには、公共工事コスト縮減に向けた設計・施工の合理化や従来の仕様規定から性能規定への移行などの見直しに伴い、舗装に関しては「舗装の構造に関する技術基準」をはじめとして主要な関連諸基準が改定されている。このような状況を踏まえ、2005年3月には、地域や目的に応じた農道設計手法の明記、環境との調和に配慮した農道設計手法の追記、および関連技術基準類の改定に係る見直しに主眼を置いて、「土地改良事業計画設計基準・設計「農道」」(以下、農道基準)が改定され、農道舗装の構造設計についても性能規定が取り入れられた[1]。

既に何度も述べたことではあるが、農道舗装は、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、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、これによって性能規定への移行が滞っているような現状にある。

土砂系舗装の性能を定量的に捉えるためには、初期値を把握した上での継続した調査が不可欠である。そこで、2009年12月に鳥取大学付属農場内にて、第5章で検討した4種類の土砂系舗装材料に、事前除草の有無、施工厚さの違いといった条件を織り交ぜた計7種類の土砂系舗装の試験舗装を構築し、わだち掘れ抵抗性、舗装支持力特性、車両振動特性、含水状態、雑草繁茂状態等について、継続した調査を実施した[3]。

本章では、適用した試験舗装を解説するとともに、約2年間の調査結果を整理・解析することで、7種類の土砂系舗装の供用性能(わだち掘れ抵抗性、舗装支持力特性、車両振動特性、雑草繁茂抑制性能等)を明らかにした[4]。

6.2 試験舗装の概要と調査内容

6.2.1 試験舗装の種類と構造

鳥取大学付属農場内にて 1967 年頃には整備された水田の支線農道を土砂系舗装の試験ヤードに選定し、2009 年 12 月に試験舗装を構築した。選定した既存の舗装は、表面から約 20cm の深さまでが細粒分質礫質砂（地盤材料の工学的分類で SFG に相当する材料）であり、その下に路床としての粘性土層が約 1m という構造の土砂系舗装となっていた。延長が約 160m、幅員が約 4.2m の道路で、写真-6.1 に示すように両側にコンクリート水路を挟んで水田が整備されており、第 3 章で既に記述している路面がこの路線である。



写真-6.1 既設舗装の状態

試験舗装は、表-6.1 に示す 7 種類（区間）を設定した。

表-6.1 試験舗装の種類と条件

区間 No	舗装材の種類	舗装材の厚さ (cm)	除草の有無	備考
1	現状土	15	-	
2	C-40 (置換)	15	-	
3	石灰安定処理土 (改良)	15	あり	石灰系固化材 3% 添加
4			なし	
5	石灰フォームド安定処理土 (改良)	15	あり	石灰系固化材 3% , フォームドアスファルト 4.4% 添加
6			なし	
7		10	なし	

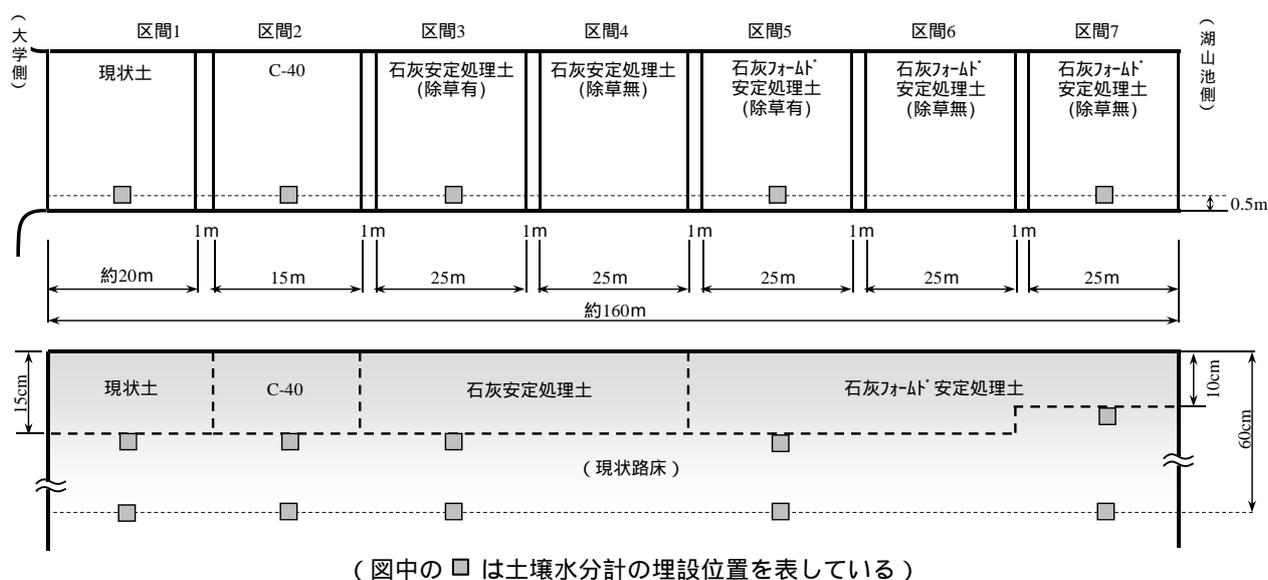
既存の舗装（以下、現状土）（区間 1）を基本舗装とし、一般的な舗装材料としての比較対象として、現状土を路盤材料として広く使われているクラッシュラン（以下、C-40）に置き換えた区間（区間 2）を構築した。また、既設舗装材料の有効活用や再掘削・再利用等を念頭に置いて、現状土を石灰系固化材で安定処理したもの（以下、石灰安定処理土）

(区間3,4)および石灰系固化材にフォームドアスファルトも加えて安定処理したもの(以下,石灰フォームド安定処理土)(区間5,6,7)についても比較・検討することとした。なお,石灰系固化材は,環境負荷軽減にも配慮し,生石灰に石炭灰(PFBC灰)を混合した防塵タイプの石灰複合系固化材(第5章で用いたものと同じ固化材)を用いた。石灰安定処理土は下層路盤材の品質を,また石灰フォームド安定処理土については,上層路盤材としてのセメントフォームド安定処理土の品質を満足するような配合とし,供試体の養生日数は石灰安定処理に準じて10日間とした。

それぞれの試験舗装の構造については,路床土の設計CBRが8であったことから,農道基準にある土砂系舗装のうち砂利道の舗装部分に該当する路盤の厚さ15cmを置換え厚さあるいは改良厚さの標準とし,現状土と比較することとした。ただし,石灰フォームド安定処理土については,上層路盤相当の配合としたが,ここでの比較対象としているC-40,石灰安定処理土が下層路盤材相当であることから,等値換算厚さで同等となる10cmに減厚した試験区間(区間7)も設けた。

また土砂系舗装では,雑草が繁茂しやすく,車両が走行するわだち部だけが露出した状態となっていることが多く見られ,今回の試験ヤードとした道路においてはほぼ全面に雑草が繁茂した状態にあった。現状土を利用した安定処理工法では,このような雑草を取り除いてから施工することが標準的と考えられるが,本研究では除草に要するコストの軽減や工程の短縮を考慮し,除草しない区間も設けてその供用性を把握することとした。

試験舗装の平面図と縦断方向の断面図を図-6.1に示す。代表的な区間には土壌水分計(ケツト科学研究所J-3)を埋設し,土砂系舗装の路床内部の含水状態の変動も把握することとした。



(図中の□は土壌水分計の埋設位置を表している)

図-6.1 試験舗装の平面図および縦断方向の断面図

6.2.2 試験舗装の施工

試験舗装の施工は2009年12月9日に実施した。代表的な施工状況を写真-6.2に示す。フォームドアスファルトを噴射・混合するスタビライザの構造は図-6.2のようになっており、主要な諸元を表-6.2に示す。スタビライザの混合幅は2mであり、今回の道路幅員約4.2mでは通常2レーンに分けての施工となるが、端部施工時に両脇のコンクリート水路の転倒が懸念されたため、道路中心部の2m分のみの施工とし、端部についてはバックホウでの混合とした。したがって、石灰安定処理については全幅員での施工であるが、中心部に比べて端部の攪拌・混合にムラが生じている。また、石灰フォームド安定処理については中心部2mのみであり、両端部約1mずつについては石灰安定処理となっており、石灰安定処理と同様に、中心部に比べて端部の攪拌・混合にムラが生じている。



写真-6.2 試験舗装の施工状況

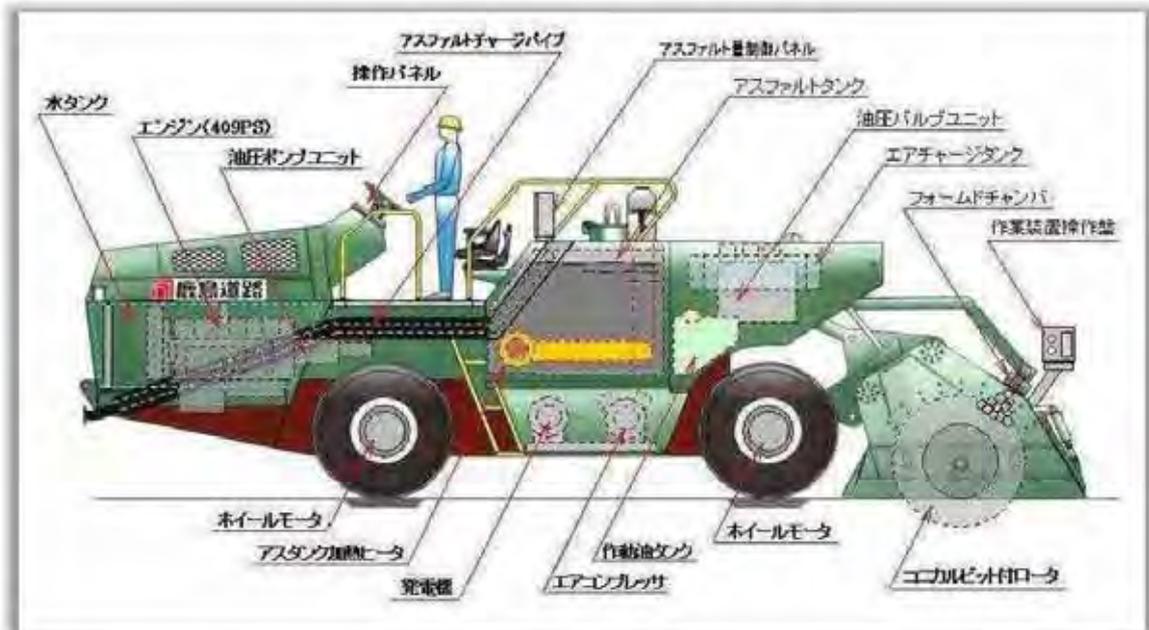


図-6.2 フォームドスタビライザの構造(概略)

表-6.2 スタビライザの主要諸元

項目	仕様
全長	9,000 mm
全幅	2,300 mm
全高	2,925 mm
ホイールベース	3,500 mm
重量	23,000 kg
エンジン出力	301 kW
施工速度	1.5 ~ 10 m/min
ドラム幅	2,000 mm
最大切削深さ	300 mm
ドラムシフト量	700 mm
アスファルトタンク容量	3,500 L
タンク加熱方式	軽油バーナ

石灰安定処理土の区間では、所要量を袋詰めにした石灰系固化材を区間ごとに人力にて均一に散布し、スタビライザにて現状土と混合した。石灰フォームド安定処理土の区間においても同様に石灰系固化材を散布し、スタビライザでフォームドアスファルトを噴射しながら現状土と混合した。その後、モータグレーダで不陸を修正し、タイヤローラで転圧して仕上げた。石灰安定処理土と石灰フォームド安定処理土の配合は、表-6.3 に示すとおり、第5章で検討したものと同一である。

表-6.3 石灰安定処理土と石灰フォームド安定処理土の配合

舗装材の種類	添加材料名	添加量	材質（成分）
石灰安定処理土	石灰系固化材	3.0%	生石灰に石炭灰（PFBC 灰）を混合した石灰複合系固化材，5～0mm
石灰フォームド安定処理土	石灰系固化材	3.0%	生石灰に石炭灰（PFBC 灰）を混合した石灰複合系固化材，5～0mm
	フォームドアスファルト	4.4%	舗装用石油アスファルト，pen.60/80

石灰系固化材およびフォームドアスファルトの添加量は、現状土の乾燥質量に対する質量百分率で表している。

除草ありの区間については、雑草が繁茂している表面の5cm部分を事前に剥ぎ取り、除草なしの区間については、施工後の高さを統一するために、雑草部分を剥ぎ取って一時仮置きし、その下の5cm厚さの現状土を撤去した後に、雑草を含んだ仮置き土をある程度均一に敷き均してから安定処理を行った。

試験舗装の施工直後の路面状態を写真-6.3 に示す。



(a) 区間1から区間7に向かって撮影



(b) 区間7から区間1に向かって撮影

写真-6.3 試験舗装の施工直後の路面状態

6.2.3 調査内容

試験舗装の調査内容を表-6.4 に示す。

表-6.4 調査内容

調査項目	評価内容	測定時期
横断形状測定	わだち掘れ抵抗性	第1回：2009.12
FWD測定	舗装支持力特性	第2回：2010.01
軽トラック走行試験	荷台上の振動特性	第3回：2010.04
トラクタ走行試験	供用車両の促進載荷	第4回：2010.07
		第5回：2011.12
水分量測定	路床内部の含水状態	適宜
目視観察	雑草繁茂の有無， 表面の泥濁化の有無	適宜

2009.12 は試験舗装前の状態で，2010.01 は試験舗装後の初期値である。

主な調査項目として，わだち掘れ抵抗性，舗装体支持力特性および農用車両の走行時の振動特性を取り上げ，試験舗装前も含めて計5回の調査を実施することで，その挙動を把握することとした。

わだち掘れ抵抗性は，区間ごとに中央付近の1測線にてMRP (Multi Road Profiler，クマタカエンジニアリング)[5]で測定した。第3章でも述べたが，MRPにはジャイロセンサが内蔵されており，それによって装置の傾きを認識し，移動しながら絶対高さでの路面の凹凸評価が可能な計測機器である。測定状況を写真-6.4 に示す。



写真-6.4 横断形状の測定状況

舗装支持力特性は、区間ごとに車輪通過位置 3 箇所にて FWD(*Falling Weight Deflectometer*: 重錘落下式たわみ測定装置、写真-6.5) にて測定した。載荷荷重の設定は一般道との比較も考慮して 49kN (衝撃荷重) とした。



重錘の落下による衝撃荷重を舗装路面に作用させ、複数個の変位計で路面のたわみ量を測定する装置で、これによって作用した荷重に対する路面のたわみ形状がわかる。

たわみの形状がわかれば、舗装全体としての支持力だけでなく、舗装を構成する各層の強度を多層弾性理論に基づく逆解析等で推定することもできることから、舗装の構造診断に用いられている。

写真-6.5 FWD 測定状況

振動特性については、ほ場内農道に特徴的な要求性能である荷傷みの軽減を念頭に置いて実施したものであり、第 3 章で記述した方法と同じ軽トラック (ダイハツ HIJET) の荷台中央部に加速度計 (TEAC-706) を設置し、走行時の垂直方向の振動加速度を測定した。その際の走行速度は農道の設計速度の下限值 20km/h を考慮して、10km/h、20km/h、30km/h の 3 段階を目標とした。

また、第 4 回と第 5 回の調査前には、農道での供用車両による促進載荷を目的に、トラクタ (三菱農機 GX510) で同日内に 150 往復 (前・後進を繰返し) 走行し、車両走行による変状の有無についても調べた。トラクタ走行状況を写真-6.6 に示す。



写真-6.6 トラクタ走行状況

水分量については、試験舗装後から約1年間にわたり適宜計測を行うことで、降水や水田水管理と路床内部の含水状態の関係を調べることにした。また、併せて目視で雑草の繁茂状況や降水後の路面の状態も適宜観察することとした。水分計の設置状況を写真-6.7に示す。



写真-6.7 水分計設置状況

6.3 調査結果

6.3.1 わだち掘れ抵抗性

わだち掘れ量の測定結果を図-6.3 に示す。

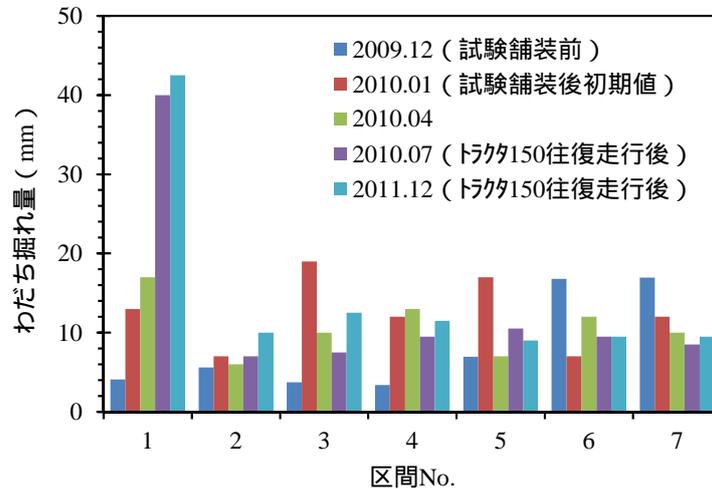


図-6.3 わだち掘れ量の測定結果

試験舗装前は全般的にわだち掘れ量が小さくなっているが、これは雑草がほぼ全面に繁茂し、かつ路面全体が盛り上がったような形状であったためである。試験舗装後にはほぼ平滑に仕上がっており、現状土に含まれていた大きめの礫分が一部表面に露出したことで、概ね 10～20mm という数値になっている。2010年4月の段階では、ほ場の管理車両が通る程度の交通量であったため、いずれの区間も初期値からの変化はほとんど見られない。2010年7月と2011年12月のトラクタ走行後を見ると、区間1の現状土ではわだち掘れ量が40mm程度まで大きくなっているが、それ以外の区間では、わだち掘れの進行はほとんど認められない。これは、第5章の図-5.8で示したホイールトラッキング試験の傾向と同様である。そこで、2011年12月に測定したわだち掘れ深さとホイールトラッキング試験の15分経過時点での変形量との関係を見てみると、図-6.4のように表わされる。

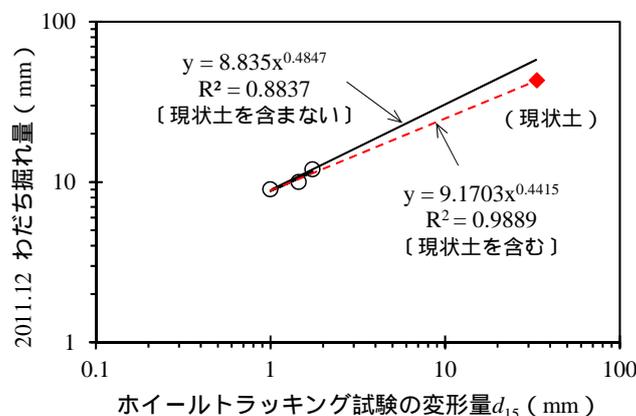


図-6.4 ホイールトラッキング試験の変形量(d_{15})とわだち掘れ深さの関係

図-6.4では、現状土のデータが離れ小島となっているため、現状土を除いた3個のデータから求めた相関式と、参考として現状土も含めたデータから求めた相関式を併記した。調査データは少ないものの、いずれも高い決定係数となっている。また、現状土を含めた相関式は統計上有意なものではないが、現状土を除いた3個のデータに基づく相関式に近いものが得られている。今後調査データを増やす必要はあるものの、土砂系舗装材料であってもアスファルト混合物と同様に[6]、わだち掘れ抵抗性をホイールトラッキング試験機を使って評価できることを示唆しているものとする。

また、今回の調査結果から、C-40、石灰安定処理土、石灰フォームド安定処理土のいずれにおいても、農業用トラクタの300往復走行（一方向として600台走行）に耐え得るわだち掘れ抵抗性を有していることがわかった。

6.3.2 舗装支持力特性

FWDで測定した D_0 たわみ量を図-6.5に示す。 D_0 たわみ量とは載荷板中心位置でのたわみ量のことであり、添え字が中心位置からの距離を表している。測定データに不備があったものを削除して整理したため、一部測定値が欠落している。また、通常FWDのたわみ量は、載荷面の剛性によって反力が異なるため、同一の載荷荷重下でのたわみ量として比較するために標準荷重（今回の計測では49kN）に対するたわみ量に補正して用いられる。これは設定荷重の10%以内であれば、載荷荷重とたわみ量に比例関係が認められることに基づくものである[7]。今回の土砂系舗装の載荷荷重と D_0 たわみ量の関係は図-6.6のよ

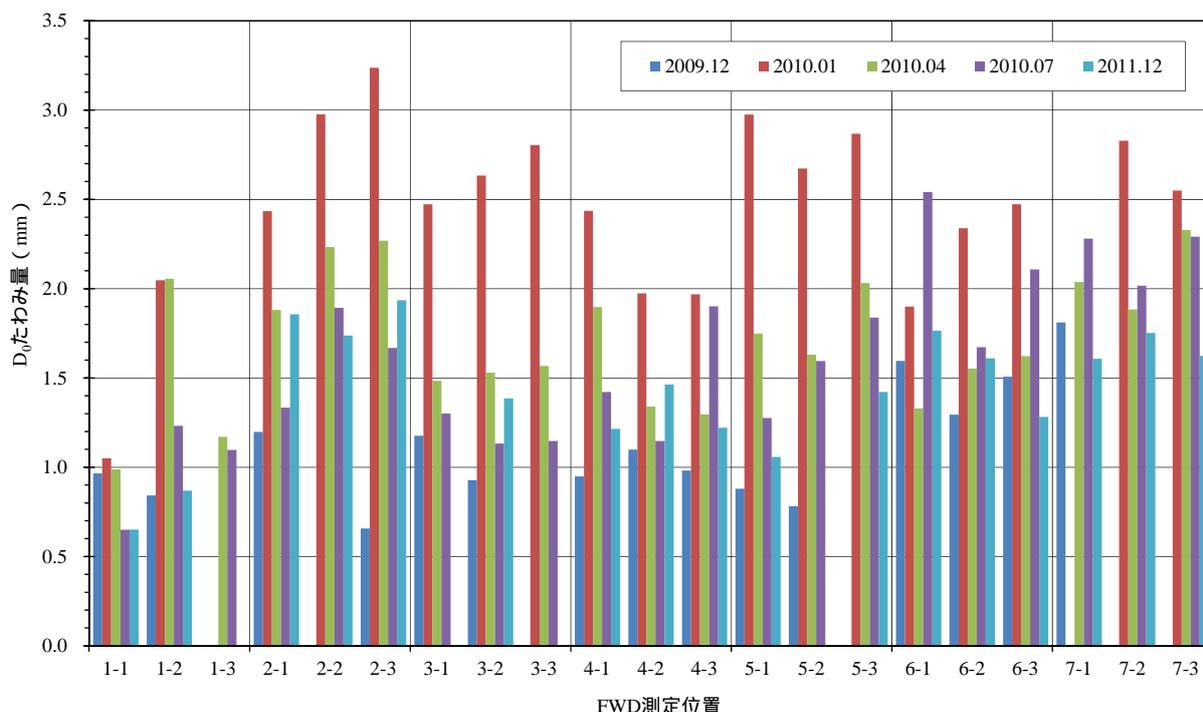


図-6.5 D_0 たわみ量の推移

うであり、大まかには直線関係にあるが、区間ごとに見るとその傾向に違いも認められ、測定荷重のばらつきも大きいことから、ここでは標準荷重への補正は行わずに測定したたわみ量を相対比較することとした。

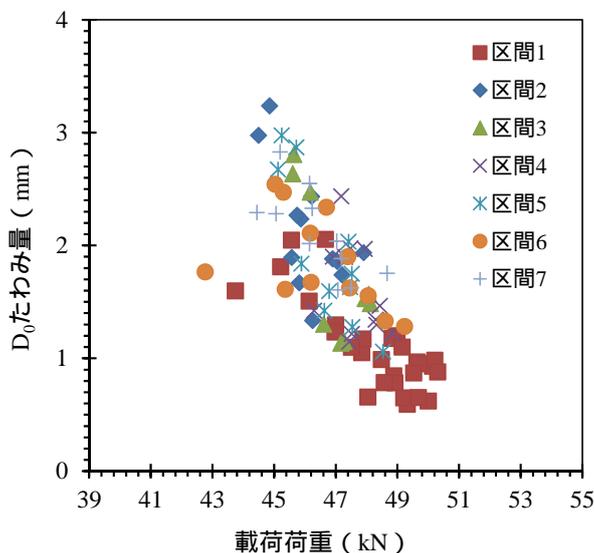


図-6.6 載荷荷重と D_0 たわみ量の関係

まず、図-6.5の全体を見ると、区間1の現状土のたわみ量に比べて他の区間のたわみ量が大きくなっているが、時間経過とともにいずれの区間でもたわみ量は小さくなっている。これは、当該路線が1967年頃にほ場整備されたものであり、長い年月を掛けて少しずつ地表面が固くなっていたものを今回の試験舗装で緩めてしまったことに起因しているためと考えられる。ただし、一旦緩くはなったものの、その後の供用とともに、いずれの区間も徐々にたわみ量は小さくなる傾向にあることは、実際の農道でもこのような事象が起こっているものと考えられ、土砂系舗装の支持力について考察する際には、 D_0 たわみ量が経時的に変化していることを十分理解した上での評価が肝要であると考えられる。除草の有無（区間3, 4と区間5, 6）で見ると、いずれにも大きな違いは認められず、除草せずに改良した場合であっても支持力特性に大きな影響は及ぼさないことがわかった。また、改良厚さの違い（区間6, 7）についても、その差異は明確ではなく、今回のような走行荷重レベルであれば、改良厚さを10cmとしても支持力特性上の問題は生じないものと考えられる。

次に、載荷板中心から200mm離れた D_{200} たわみ量と D_0 たわみ量の差は、舗装表面部分の特性を表すとされている[7]ことから、 $D_0 - D_{200}$ の推移を算出したものを図-6.7に示す。これによると、全体に D_0 でのたわみ量の違いに比べて区間ごとの差は小さくなっていることがわかる。2011年12月の測定結果で見ると、区間5はやや小さいが、区間6, 7の石灰フォームド安定処理土のたわみ量が他の区間に比べて大きい傾向にある。これは、フォームドアスファルト添加によりたわみ性が付与されたためと考えられるが、当該区間は

雑草を除去せずに混合しており，その影響についても否定はできない．また，区間6，7の改良厚さの違いによる支持力特性の差異はここでも明確には現れていない．

続いて，載荷荷重と D_0 たわみ量の時系列データを用いて散逸仕事量 (*Dissipated Work*) を求めた．結果を図-6.8 に示す．

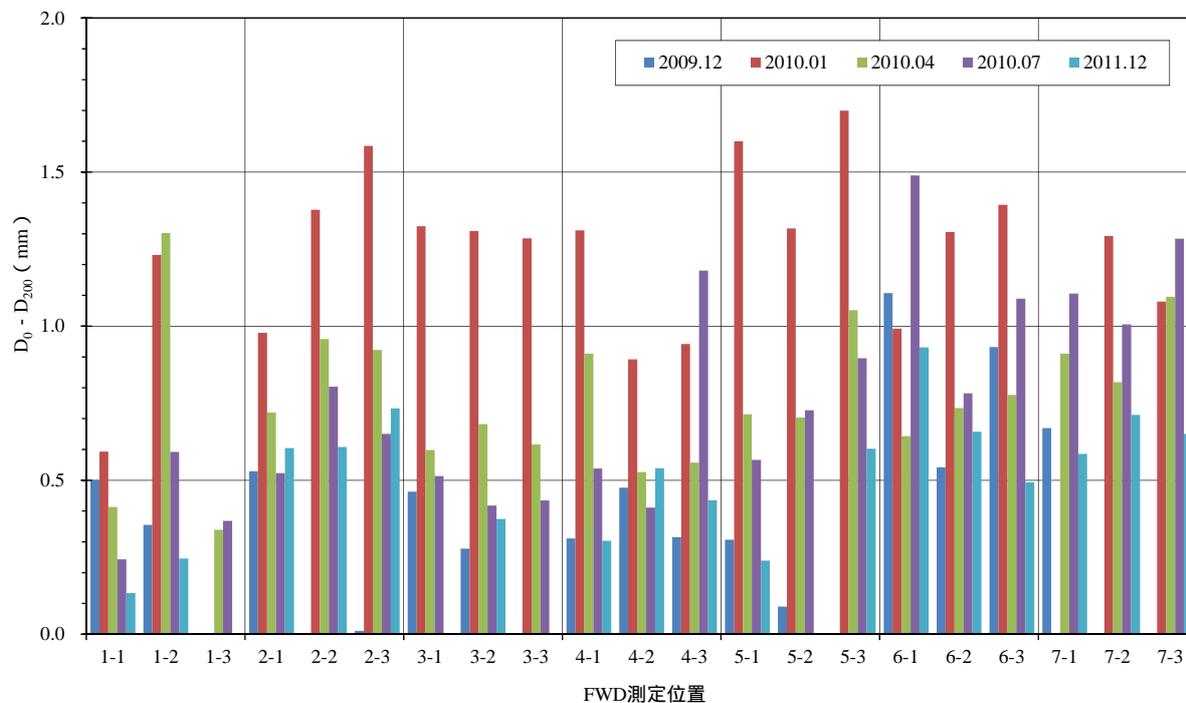


図-6.7 $D_0 - D_{200}$ たわみ量の推移

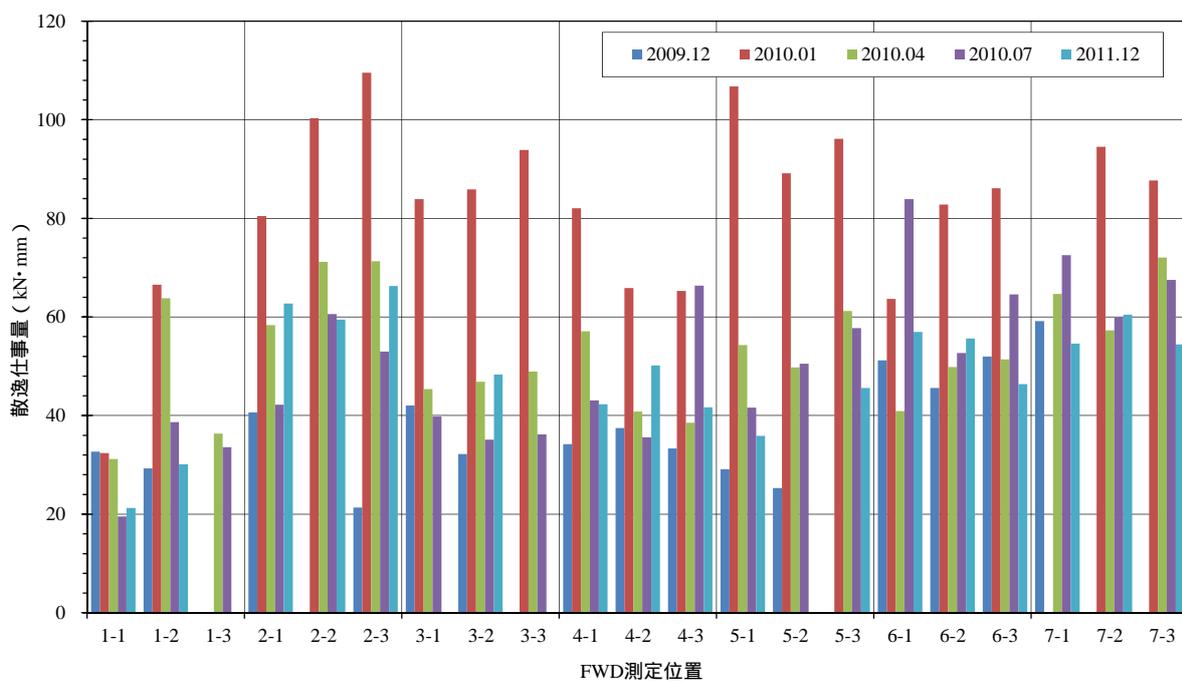


図-6.8 散逸仕事量の推移

散逸仕事量は、図-6.9 に示すように荷重を縦軸に、たわみ量を横軸に時系列でプロットしたヒステリシスループ内の面積として定義され、舗装の疲労ダメージ等と関係が深いとされている [8,9,10].

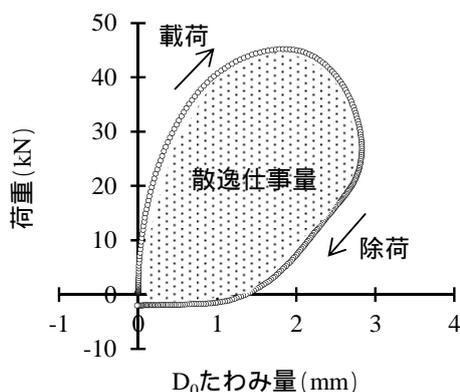


図-6.9 散逸仕事量の概念図

区間ごとの散逸仕事量の傾向は D_0 たわみ量と同じであり、散逸仕事量と D_0 たわみ量の関係を見ると、図 - 6.10 に示すような強い相関関係が認められた。これによれば、区間 1 の現状土に比べて改良を施した区間 2~7 の散逸仕事量(たわみ量)は大きく、舗装としての疲労ダメージは大きいと考えられるが、図-6.3 に示したように区間 1 ではわだち掘れという路面損傷が顕著に現れているのに対して、区間 2~7 のわだち掘れ量は小さく路面の性能としては問題のない結果であった。

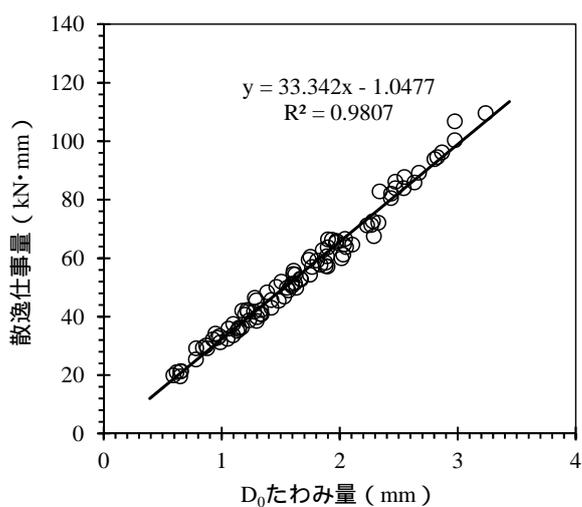


図-6.10 D_0 たわみ量と散逸仕事量の関係

したがって、土砂系舗装においては、路面のたわみ量による舗装支持力特性だけで舗装体を評価するのではなく、今回の試験舗装のように路床部の設計 CBR が 8 と比較的良好な支持力を有した路床上の舗装については、路面を形成する材料の特性が路面の損傷を支配する主たる要因になるものと考えられることから、そのような場合は路面の材料特性を舗装の要求性能とすることが望ましいものとする。

6.3.3 走行車両の振動特性

軽トラックの荷台中央部で測定した垂直方向の振動加速度の標準偏差を図-6.11 に示す。車両は区間7から区間1に向かって走行しているため、区間1のデータに制動による影響が大きく出たことから、区間1を比較から除外し、ここでは試験舗装前の区間ごとの値を比較対象とした。

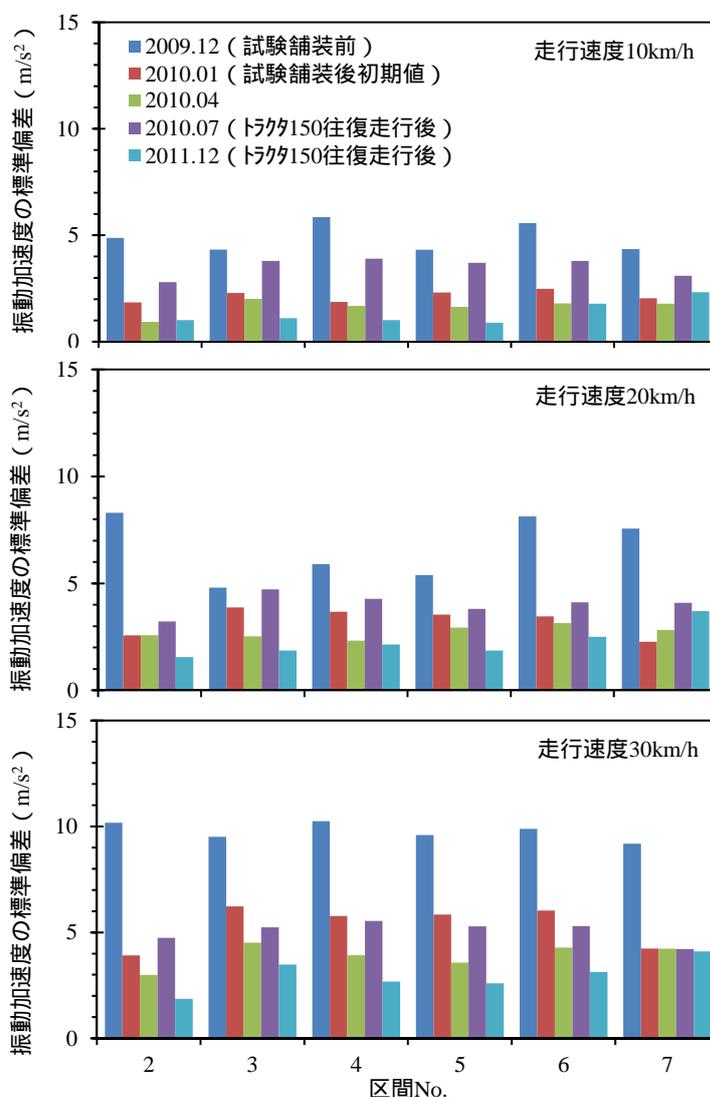


図-6.11 振動加速度の推移

図-6.11を見ると、いずれの区間においても振動加速度の標準偏差は概ね半減しており、今回適用した土砂系舗装材料を舗設することによって、車両の荷台上に生じる振動が抑制されていることがわかる。

また、2011年12月のデータについて、先に求めた散逸仕事量との関係を見ると図-6.12のようになる。これによるとC-40の区間2だけが傾向が異なっており、それを除けば、区間3~7は走行速度ごとに高い相関関係が認められている。車両の走行時の振動は路面のプロファイルと密接な関係があることはよく知られていることであるが、今回のような現状土を改良した比較的新しい土砂系舗装においては、車両の振動特性をFWDのたわみ量から求めた散逸仕事量で説明でき、その散逸仕事量によって荷傷み抑制性能を表現できる可能性を示唆しているものとする。

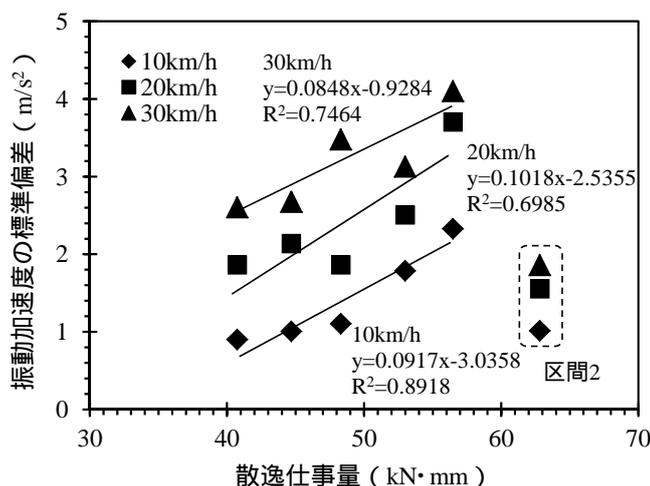


図-6.12 散逸仕事量と振動加速度の標準偏差の関係

6.3.4 路床内部の含水状態

路床の上部と中間部の水分量の年変動(2010年~2011年)を図-6.13, 6-14に示す。降水量のデータは、気象庁の地域気象観測所で観測された鳥取県湖山のもの(アメダスデータ)である。なお、試験舗装箇所の地下水位は、過去の近郊の調査データ[11]から年間を通して1.5m程度で安定していることがわかっており、路面の縦断方向の勾配もほとんどないことから、ここでは地下水位の変動による影響は勘案しないこととした。

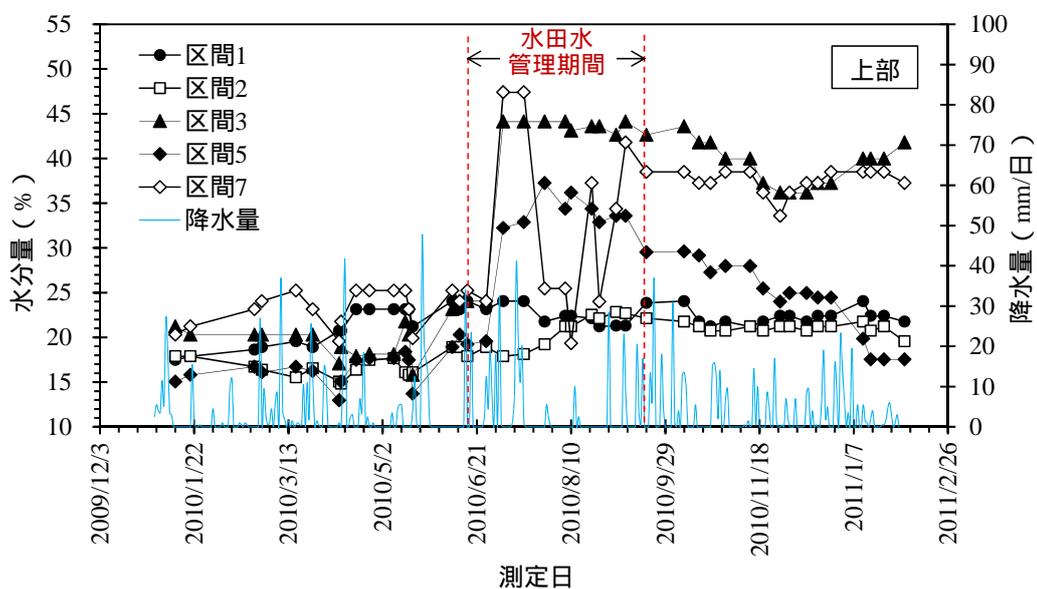


図-6.13 路床上部の水分量の変動

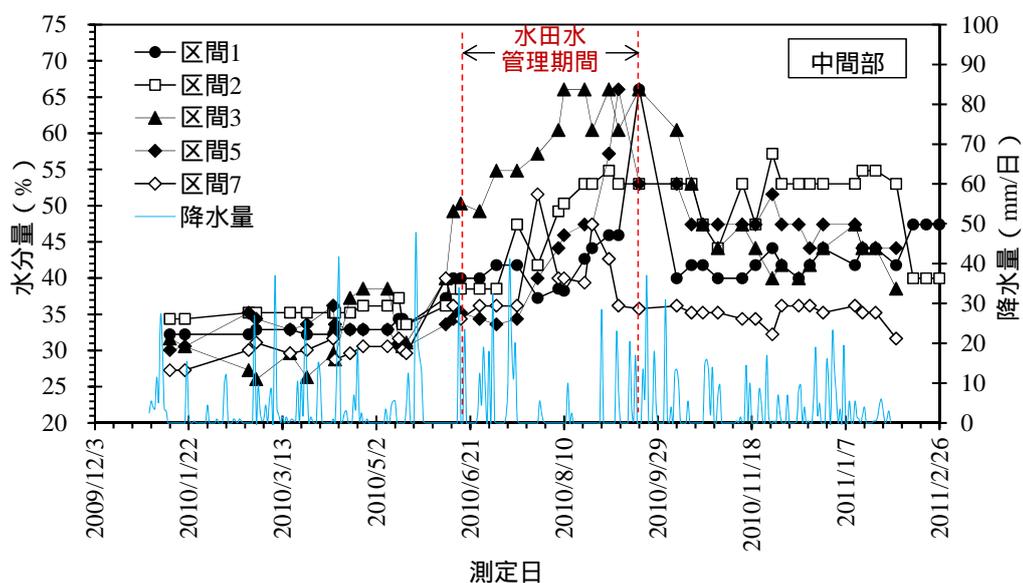


図-6.14 路床中間部の水分量の変動

まず、図-6.13 に示す路床上部の水分量を見ると、1年を通じての変動幅は、区間1, 2では5%程度と小さく、区間3, 5, 7では水田水管理が行われる期間に水分量が増加し、変動幅が20~30%程度と大きくなっている。水田水管理とは、稲の生育状態に応じて水田の水位を変える行為であり、深水、浅水、間断灌漑、落水・中干しを幾度か繰り返すものである。当該ほ場の場合は、深水期の水面の高さは路面の高さよりも若干低い程度である。

また、区間3, 5, 7のうち区間5では、水田水管理期間終了後に水分量が低下を始め、測定開始1年後には測定開始時の値とほぼ等しい状態となった。一方、区間3, 7においては、水田水管理期間終了後の水分量の低下が少なく、1年後の水分量は測定開始時から15%程度増加した値を示した。このことから、路床上部の水分量は、土砂系舗装の種類によって年間の変動幅が異なることが確認できた。

次に、図-6.14に示す路床中間部の水分量について見ると、水分量の変動幅は区間1, 2, 7では30%程度で、区間3, 5においては40%程度となり、前述の上部の水分量に比べて大きな値を示している。また中間部では、すべての工区において、水田水管理期間を境に水分量が増加していることがわかる。このことから、路床中間部の水分量は降水に加えて水田水管理による影響を大きく受けていることが窺える。

また、路床上部、路床中間部のいずれであっても、水田水管理期間前の降水が路床内部の水分量の変動に与える影響は少なく、周囲の水田水管理が土砂系舗装の路床内部の水分量に与える影響の方が、降水によるものよりも大きいことがわかる。

今回の試験舗装では、路床内部の水分量の変化が路面にどのような影響を及ぼすかまでは把握できなかったが、長期的に見れば、土砂系舗装を設計する際には、当該道路周辺の水田水管理の実態を把握し、必要に応じて耐水性などの検討を行うことが肝要であると考えられる。

6.3.5 雑草の繁茂状況

現状土の区間1については、試験舗装時に施工機械の走行等によりある程度雑草が無くなったが、施工後1か月程度でほぼ元の状態に戻っていた。

現状土をC-40で置き換えた区間2では約2年経過した時点でも、雑草の繁茂は少なく、置き換えの効果が現れている。

現状土を安定処理した区間3~7については、施工後半年程度経過した時点で、改良時に攪拌・混合ムラが生じてしまった水路脇の端部に雑草が生え始め、その後徐々に広がりはしたものの、フォームドアスファルトを噴霧した区間5~7は区間3, 4に比べて、繁茂が抑制されている。このことは、改良時の攪拌・混合による草根の切断効果に加えて、フォームドアスファルトで骨材を固着していることが、発芽抑制効果として現れているためと考えられる。

ただし、事前の除草の有無による明確な差異については認められなかった。

2012年10月時点での路面状態を写真-6.8に示す。



写真-6.8 雑草の繁茂状態

6.3.6 降水後の路面状態

現状土の区間1では、降水後に車両が通行すると表面の泥濘化が認められたが、C-40の区間2ではそのような事象は起きていない。これは第5章の表-5.3に示した土砂系舗装材料の透水係数の大小で説明できるが、透水係数が現状土と大差がなかった石灰安定処理土の区間3,4では区間1に比べて泥濘化は抑えられている。石灰系固化材添加による強度増加だけでなく、石灰系固化材が有すると言われている塑性指数の低減効果[12]も現れているものと考えられる。

また、区間5~7の石灰フォームド安定処理土の区間については、区間5では表面部分にやや泥濘化が見られるが、区間6,7では何ら変状は生じていない。フォームドアスファルトを使用した工法は、通常のアスファルト混合物のように骨材をアスファルトで被覆してしまうような工法ではなく、図-5.5に示したように細骨材と一体となったアスファルトモルタル分が粗骨材を接着剤のように固着させる工法であることから、供用中の車両の繰返し荷重によって強度や耐水性の増大が期待できる工法[13]でもあり、石灰系固化材による現状土の塑性指数の低減効果、フォームドアスファルトによる固結効果に加え、供用に伴い強度や耐水性も向上したためと推察される。

写真-6.9に、降水の翌日(2011年12月)に車両が走行した際の路面状態を示す。



写真-6.9 降水後の路面状態

6.4 第6章の結論

実路で構築した各種土砂系舗装材料の試験舗装での調査・検討を通して得られた成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 土砂系舗装においては、ある程度の支持力を有した路床上であれば、路面の材料特性によって舗装の要求性能を設定することができる。
- (2) 今回適用した土砂系舗装材料は、現状土に比べて走行車両の振動を半減することができた。
- (3) 今回のような現状土を改良した比較的新しい土砂系舗装では、車両の振動特性をFWDのたわみ量から求めた散逸仕事量で説明でき、その散逸仕事量によって荷傷み抑制性能を表現できる可能性がある。
- (4) 除草せずに改良した場合であっても、支持力特性には大きな影響を及ぼさない。
- (5) 今回の試験舗装においては、石灰フォームド安定処理の改良厚さ10cmと15cmに支持力特性上の差異は認められなかった。
- (6) 農繁期前の降水が路床内の水分量の変動に与える影響は少なく、路床中間部では水田水管理の影響を大きく受けている。
- (7) 置換え工法や安定処理工法には、ある程度の雑草繁茂抑制効果が期待できる。
- (8) 今回のような現状土であれば、石灰系固化材やフォームドアスファルトで安定処理することで、降水後の表面の泥濁化抑制が期待できる。

第 6 章の参考文献

- [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] 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 - 縦断形状と振動加速度による平坦性の評価 - ，農業農村工学会論文集 No.278 ， pp.121-128 ， 2012.4.
- [4] 坂本康文，五傳木一，芳賀潤一，緒方英彦：試験舗装による土砂系舗装材料の供用性能評価，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)，pp.I_131-I_138 ， 2012.12.
- [5] 国土交通省新技術情報提供システム：けん引式路面性状 3 指標同時測定システム，NETIS No. KT-060081-A
- [6] 伊藤豪誠，近藤陽，池田拓哉：アスファルト混合物の動的安定度の目標値設定手法の提案，土木技術資料 31(1)，pp.30-35 ， 1989.1.
- [7] (社)土木学会：FWD および小型 FWD 運用の手引き，舗装工学ライブラリー2，2002
- [8] Harold Von Quintus and Brian Killingsworth. : Analysis Relating to Pavement Material Characterization and Their Effects on Pavement Performance, *FHWA-RD-97-085*, 1998.1.
- [9] 東滋夫，金井利浩，岡部俊幸，林信也，松井邦人：FWD による時系列データの舗装構造評価への適用，土木学会舗装工学論文集 第 3 巻，pp.31-38 ， 1998.12.
- [10] 丸山記美雄，熊谷政行：FWD 散逸仕事量によるアスファルト舗装の疲労ダメージ評価，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. _27-34 ， 2011.12.
- [11] 清水正善，余悟純生：鳥取平野における地下水位変動特性と地盤沈下の FEM 解析，鳥取大学工学部研究報告第 27 巻，pp.113-121 ， 1996.11.
- [12] 日本石灰協会：石灰安定処理工法 - 設計・施工の手引 - ，2006.7.
- [13] 岩原廣彦，海老澤秀治，坂本康文，谷本昇：フォームドスタビ混合物の性状および適用事例，舗装 33-30 ， pp.9-15 ， 1998.10.

第7章 結論

ほ場内農道は、その用途に応じて幹線農道、支線農道、耕作道に細分される。一般に、幹線農道はアスファルト舗装が施されていることが多く、支線農道、耕作道については、土砂系舗装となっているところが多い。2011年の農道整備状況調査報告によれば、農道の総延長は175,352kmで、そのうち舗装済延長距離は62,616km、舗装率は35.7%となっているが、ここでの舗装に土砂系舗装は含まれていない。

2001年3月に閣議決定された規制緩和推進3か年計画における「基準の内容が技術革新に対して柔軟に対応できるよう、仕様規定となっている基準については原則としてこれをすべて性能規定化するように検討を行う」とする政府の方針を受け、2002年4月には“土木・建築にかかる設計の基本(国土交通省)”が策定された。これにより、各種技術基準類の性能規定化が順次推し進められ、農道においても、“舗装の構造に関する技術基準”に準拠するように、2005年3月の“土地改良事業計画設計基準・設計「農道」”が改定され、舗装の設計に関する性能規定化への方向性が明示された。“土地改良事業計画設計基準・設計「農道」”では、土砂系舗装も含めて舗装として整理されており、土砂系舗装であっても性能規定化が求められていると捉えることができる。

一方、現状では、アスファルト舗装やコンクリート舗装については、性能規定化が着実に進められてきているが、土砂系舗装については、性能規定化の枠から外されたような状態にある。社会資本整備費の見直しや縮減が叫ばれる中、アカウントビリティーとしての道路利用者や沿道住民等への便益確保は必要であり、土砂系舗装にあっては、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ものと考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では、まず、ほ場内農道の利用者でもあり管理者でもある土地改良区に対するアンケート調査から農道の問題抽出を行い、本研究に先立ち、土地改良区が農道に求めている機能について考察し、土砂系舗装に求められる機能を整理した。

次いで、既設土砂系舗装の現状性能の把握を目的として、路面形状特性および車両走行時の荷台の振動特性を取り上げ、まず、既設土砂系舗装の縦断方向の路面形状(路面プロファイル)がどのようになっているのかを調べるために、プロファイルデータの比較や周波数解析等を行った。次に、既設土砂系舗装上を軽トラックが走行した際に荷台の振動はどのような応答を示すのかを把握するために実路での走行実験を行い、振動加速度データの比較や路面プロファイルとの関係を調べた。さらに、荷傷みが生じる路面凹みの閾値を

見出すために、路面形状と振動加速度の関係をより単純化した車両運動シミュレーションによる検討を行った。

また、土砂系舗装の性能評価・照査手法の確立と、土砂系舗装のパフォーマンスを定量的に把握することを目的として、4種類の土砂系舗装材料を選定した室内実験を行うとともに、7種類の試験舗装を鳥取大学付属農場内に構築し、わだち掘れ抵抗性、舗装支持力特性、車両振動特性、含水状態、雑草繁茂状態等について、継続した調査を実施した。

以下に本研究の各章で得られた結論を示し、再度これらの結論を要約するとともに、今後の課題と期待を述べて本論文の結論とする。

第2章では、土地改良区に対するアンケート調査結果を基に、ほ場内農道における土砂系舗装に求められる機能を次のように整理した。

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。

荷（農作物）痛みしない程度の平坦性とわだち掘れ抵抗性（均一な支持力）を有していること。

農道内の雑草の繁茂を抑制すること。

第3章では、既設土砂系舗装の現状性能として、以下のことを明らかにした。

土砂系舗装の平坦性(σ_{3m})は一般の道路の管理目標とされている3.5mmを大きく上回っており、土砂系舗装の路面プロファイルの特徴としては、一般の道路よりも短い間隔で大きな凹凸があると言える。

土砂系舗装の路面高さのデータの標準偏差(SD_{pro})は概ね正規分布している。

土砂系舗装における路面凹凸の損傷度合いの評価には、従前からの平坦性の評価指標である σ_{3m} だけでなく、連続して測定した路面の高さデータの標準偏差(SD_{pro})とIRIの関係を把握することが有用である。

土砂系舗装における路面プロファイルをIRIで評価するには、走行速度を加味した検討が必要である。

土砂系舗装の路面プロファイルの評価には、周波数分析が有効であり、特に1/3オクターブバンドフィルターを通すことで、波形成分の違いを明確に分析することができる。

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。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。

振動加速度の周波数分析を行った結果、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。

ほ場内農道における土砂系舗装のように比較的短い間隔で大きな凹凸があるような路面では、路面プロファイルと車両走行時の振動加速度には必ずしも強い相関があるとは言えない。

土砂系舗装の実測の振動加速度データからレタス輸送時の損傷度を試算した結果、荷傷み防止の観点からも雑草繁茂抑制の大切さが示唆された。

第 4 章では、振動加速度の実測値と車両運動シミュレーションから得られた振動加速度の関係等から、以下のことを明らかにした。

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ある程度高い相関が認められ、雑草が繁茂している路面かどうかを判別できれば、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。

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。

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。

第 5 章では、土砂系舗装の路面に適用可能な 4 種類の材料を選定し、種々の物性試験により材料特性を評価するとともに、土砂系舗装材料の性能照査手法について既存の試験機を使って実験的検討を行い、以下のことを明らかにした。

ホイールトラッキング試験により、土砂系舗装の塑性変形抵抗性（わだち掘れに対する抵抗性）を評価することができる。ただし、その場合の載荷荷重は当該道路を利用する農用車両の駆動輪の輪荷重が望ましい。

塑性変形抵抗性を評価する指標としては、試験開始から 15 分程度までの変形量あるいは動的安定度が適している。

回転ホイールトラッキング試験により、土砂系舗装の骨材飛散抵抗性（ポットホールに対する抵抗性）を評価することができる。ただし、その場合の載荷荷重は当該道路を利用する農用車両の操舵輪の輪荷重が望ましい。

材飛散抵抗性を評価する指標としては、アスファルト混合物の性能指標として使われている“ねじり骨材飛散率”が適用できる。

既設農道の現状土を石灰やフォームドアスファルトで安定処理することで、塑性変形抵抗性や骨材飛散抵抗性を改善できる。

土砂系舗装材料の透水性の評価には変水位透水試験を適用し、透水性の指標には透水係数が適用できる。

繰返し載荷 CBR 試験は、土砂系舗装材料の弾性係数の推定手法として有効である。ただし、その適用にあたっては、水浸・非水浸での比較が重要であり、載荷回数については弾性係数が一定になることを目安として適宜設定することが望ましい。

第 6 章では、4 種類の土砂系舗装材料を使った 7 種類の試験舗装を鳥取大学附属農場内に構築し、約 2 年間の追跡調査を通して、以下のことを明らかにした。

土砂系舗装においては、ある程度の支持力を有した路床上であれば、路面の材料特性によって舗装の要求性能を設定することができる。

今回適用した土砂系舗装材料は、現状土に比べて走行車両の振動を半減することができた。

今回のような現状土を改良した比較的新しい土砂系舗装では、車両の振動特性を FWD で求めた散逸仕事量で説明でき、その散逸仕事量によって荷傷み抑制性能を表現できる可能性がある。

除草せずに改良した場合であっても、支持力特性には大きな影響を及ぼさない。

今回の試験舗装においては、石灰フォームド安定処理の改良厚さ 10cm と 15cm に支持力特性上の差異は認められなかった。

農繁期前の降水が路床内の水分量の変動に与える影響は少なく、路床中間部では水田水管理の影響を大きく受けている。

置換え工法や安定処理工法には、ある程度の雑草繁茂抑制効果が期待できる。

今回のような現状土であれば、石灰系固化材やフォームドアスファルトで安定処理することで、降水後の表面の泥濘化抑制が期待できる。

以上の各章で得られた結論を取りまとめて、再整理すると次のようになる。

(1) 既設土砂系舗装の維持管理について

わだち部まで雑草に覆われた土砂系舗装は、そうでないものに比べて車両走行時の振動が大きくなり、荷傷み抑制上は早期の路面改良が望ましい。

荷傷みに配慮した路面管理を行う場合には、凹み深さ 40mm を閾値とした維持管理を行うことが望ましい。

水田水管理が土砂系舗装の路床の含水状態に大きく影響を及ぼしている。

(2) 土砂系舗装の性能評価・照査手法について

土砂系舗装の塑性変形抵抗性（わだち掘れに対する抵抗性）の評価はホイールトラッキング試験で行うことができ、その場合の載荷荷重は当該道路を利用する農用車両の駆動輪の輪荷重が望ましい。また、塑性変形抵抗性を評価する指標としては、試験開始から 15 分程度までの変形量あるいは動的安定度が適している。

土砂系舗装の骨材飛散抵抗性（ポットホールに対する抵抗性）の評価は回転ホイールトラッキング試験で行うことができ、その場合の載荷荷重は当該道路を利用する農用車両の操舵輪の輪荷重が望ましい。また、骨材飛散抵抗性を評価する指標としては、アスファルト混合物の性能指標として使われている“ねじり骨材飛散率”が適用できる。

土砂系舗装材料の透水性の評価には変水位透水試験を適用し、透水性の指標には透水係数が適用できる。

土砂系舗装材料の弾性係数の推定手法として繰返し載荷 CBR 試験が有効であり、その適用にあたっては、水浸・非水浸での比較が重要で、載荷回数については弾性係数が一定になることを目安として適宜設定することが望ましい。

(3) 土砂系舗装の供用性能 / 整備手法について

試験舗装に用いた C-40、石灰安定処理土、石灰フォームド安定処理土は、現状土よりも良好なわだち掘れ抵抗性を有しており、かつ現状土に比べて走行車両の振動を半減することができた。

土砂系舗装においては、ある程度の支持力を有した路床上であれば構造上の検討は不要であり、路面の材料特性によって舗装の要求性能を設定することができる。

除草せずに改良した場合であっても、支持力特性や施工後の雑草の繁茂状態には大きな影響を及ぼさない。特に石灰フォームド安定処理土の繁茂抑制効果は大きい。今回のような現状土であれば、石灰系固化材やフォームドアスファルトで安定処理することで、降水後の表面の泥濘化抑制が期待できる。特に石灰フォームド安定処理の泥濘化抑制効果は大きい。

石灰フォームド安定処理工法は、既設土砂系舗装の性能向上策として有用である。

以上の本研究で得られた結論を踏まえ、今後の課題と期待を以下に述べる。

今後の課題と期待

本研究を通して基本的な成果は得られたと考えてはいるが、測定路面が鳥取市内に限られたものであり、その数が少ないのも事実である。対象とした土砂系舗装が水田地域のほ場内農道であり、他の地域での材料特性も含めたデータ収集も必要なものと考えられる。また、水田水管理が土砂系舗装の路床の含水状態に大きく影響を及ぼしていることまでは把握できたが、その水の影響によって土砂系舗装材料がどのように性状変化するのか、あるいは支持力特性はどのように変化するのか等の詳細な検討も課題として残っている。土砂系舗装の寿命を考える上では、地下水位の変動が土砂系舗装に及ぼす影響の把握なども必要と考える。

現在の社会資本整備の潮流は、既存ストックの効率的・効果的な維持管理が求められ、延命措置あるいは長寿命化を図る方向に大きく動いてきている。農道整備についても同様であるが、農道の舗装率はまだまだ低く、十分な状態とは言い難い。農道整備の場合、未舗装の農道をアスファルト舗装やコンクリート舗装で整備して欲しいとする土地改良区等からの要望は多いが、その費用負担あるいは補助金の軽減に配慮し、土地改良区自らが簡易なコンクリート舗装を施工する試みなども増えてきている。

現在土砂系舗装は未舗装に分類されており、舗装化を望む声が多く上がっている根本原因としては、土砂系舗装は舗装ではないという認識が強いということが問題として隠れているものと考えられる。土砂系舗装は農道舗装の分類上は「舗装」の範疇に入るものであり、「舗装の構造に関する技術基準・同解説（日本道路協会）」の中にも、『本基準でいう舗装とは、セメント・コンクリート舗装だけでなく、インターロッキングブロック舗装、石畳等すべての舗装をさしている』と記述されている。

したがって、まずは、土砂系舗装が舗装であることを広く知ってもらう必要があり、その上で土砂系舗装の現状性能に何が不足しているのかを明確にし、それを補う方策にはどのようなものがあるかを示すことで、財政にも配慮した農道の既存ストックの効率的・効果的な維持管理の幅が広がるものと考えられる。

2011年3月に発生した東日本大震災後、避難路あるいは緊急物資輸送路等としての道路網整備の重要性が再認識され、震災復旧への対応や今後の減災・防災対策も含めて、農道整備においても新たな段階に来ているものと考えられる。本研究の成果が、その新たな段階への小さな一步になることを期待しつつ、上記の課題等の解決に向けて、今後より多くの研究者が農道に興味を抱き、注力されることを期待したい。

謝 辞

本研究では多くのご指導とご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励とご指導、ご鞭撻をいただいた鳥取大学農学部准教授の緒方英彦先生に心より感謝申し上げます。緒方先生には本研究に着手するきっかけを与えていただき、論文執筆に際しても誠に親身なご指導をいただきました。研究を進めるにあたっては、地元土地改良区の方々とパイプ役となっただき、また、本研究の重要な位置を占める試験舗装の実施に向けては、関係部署との調整や環境の整備なども行っていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。学位論文審査にあつては、島根大学生物資源科学部教授の長束勇先生、同准教授の石井将幸先生、鳥取大学農学部教授（農学部長）の北村義信先生、同教授の猪迫耕二先生に快く審査を引き受けていただき、また貴重なご指導とご助言をいただきました。衷心より感謝申し上げます。

本研究は、農道の中でも最も農道らしい“土砂系舗装”を対象としたものであり、今後の農道整備のあり方を考える上では、土砂系舗装の位置付けの整理を避けて通ることはできないものと思います。本研究の最終目標は『ほ場内農道における土砂系舗装の性能設計に必要な性能指標やその値を示すとともに、効果的で経済的な整備手法を提案すること』にあります。本研究を通して基本となる成果は得られたと考えていますが、最終目標に到達するためには更なるデータ収集と推考が必要であり、今後も継続して研究に取り組んでいく所存です。

本論文は、鹿島道路(株)技術研究所と鳥取大学農学部との共同研究の成果であり、到底私ひとりで成し得たものではなく、多くの方々からご指導、ご助言をいただきました。鹿島道路(株)の滝田裕久氏、石川誠一氏、辻本明人氏、加形護氏、海老澤秀治氏、東滋夫氏他には、本研究をまとめる機会を与えていただきました。深く感謝いたします。研究の遂行にあたっては、鹿島道路(株)技術研究所、本店技術部ならびに中四国支店の皆様に様々な場面でご支援、ご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。鳥取大学附属農場内に構築した試験舗装の追跡調査では、鳥取大学農学部基盤造構学分野の専攻生の皆様に大変ご協力いただきました。誠にありがとうございました。

さて、2011年3月11日の東日本大震災により、太平洋沿岸地域では未曾有の被害を受けました。私の実家は福島県いわき市の沿岸部で兼業農家をしており、辛うじて被災は免れたものの、原発問題と相まってまだまだ復興への道は険しく感じられます。本論文が農業復興に少しでも役立つことを期待しつつ、今後も研究に尽力したいと思います。

最後に、平素の生活の心の支えとなっている家族に感謝の意を表する次第です。

摘 要

ほ場内農道は、その用途に応じて幹線農道、支線農道、耕作道に細分される。一般に、幹線農道はアスファルト舗装が施されていることが多く、支線農道、耕作道については、土砂系舗装となっているところが多い。2011年の農道整備状況調査報告によれば、農道の総延長は175,352kmで、そのうち舗装済延長距離は62,616km、舗装率は35.7%となっているが、ここでの舗装に土砂系舗装は含まれていない。

2001年3月に閣議決定された規制緩和推進3か年計画における「基準の内容が技術革新に対して柔軟に対応できるよう、仕様規定となっている基準については原則としてこれをすべて性能規定化するように検討を行う」とする政府の方針を受け、2002年4月には“土木・建築にかかる設計の基本(国土交通省)”が策定された。これにより、各種技術基準類の性能規定化が順次推し進められ、農道においても、“舗装の構造に関する技術基準”に準拠するように、2005年3月の土地改良事業計画設計基準・設計「農道」が改定され、舗装の設計に関する性能規定化への方向性が明示された。土地改良事業計画設計基準・設計「農道」では、土砂系舗装も含めて舗装として整理されており、土砂系舗装であっても性能規定化が求められていると捉えることができる。

一方、現状では、アスファルト舗装やコンクリート舗装については、性能規定化が着実に進められてきているが、土砂系舗装については、性能規定化の枠から外されたような状態にある。社会資本整備費の見直しや縮減が叫ばれる中、アカウントビリティーとしての道路利用者や沿道住民等への便益確保は必要であり、土砂系舗装にあっては、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ものと考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では、まず、ほ場内農道の利用者でもあり管理者でもある土地改良区に対するアンケート調査から農道の問題抽出を行い、本研究に先立ち、土地改良区が農道に求めている機能について考察し、土砂系舗装に求められる機能を整理した。

次いで、既設土砂系舗装の現状性能の把握を目的として、路面形状特性および車両走行時の荷台の振動特性を取り上げ、まず、既設土砂系舗装の縦断方向の路面形状(路面プロファイル)がどのようになっているのかを調べるために、プロファイルデータの比較や周波数解析等を行った。次に、既設土砂系舗装上を軽トラックが走行した際に荷台の振動はどのような応答を示すのかを把握するために実路での走行実験を行い、振動加速度データの比較や路面プロファイルとの関係を調べた。さらに、荷傷みが生じる路面凹みの閾値を

見出すために、路面形状と振動加速度の関係をより単純化した車両運動シミュレーションによる検討を行った。

また、土砂系舗装の性能評価・照査手法の確立と、土砂系舗装のパフォーマンスを定量的に把握することを目的として、4種類の土砂系舗装材料を選定した室内実験を行うとともに、7種類の試験舗装を鳥取大学付属農場内に構築し、わだち掘れ抵抗性、舗装支持力特性、車両振動特性、含水状態、雑草繁茂状態等について、継続した調査を実施した。

本研究によって得られた知見を以下に概括する。

(1) 既設土砂系舗装の維持管理について

わだち部まで雑草に覆われた土砂系舗装は、そうでないものに比べて車両走行時の振動が大きくなり、荷傷み抑制上は早期の路面改良が望ましい。

荷傷みに配慮した路面管理を行う場合には、凹み深さ 40mm を閾値とした維持管理を行うことが望ましい。

水田水管理が土砂系舗装の路床の含水状態に大きく影響を及ぼしている。

(2) 土砂系舗装の性能評価・照査手法について

土砂系舗装の塑性変形抵抗性（わだち掘れに対する抵抗性）の評価はホイールトラッキング試験で行うことができ、その場合の載荷荷重は当該道路を利用する農用車両の駆動輪の輪荷重が望ましい。また、塑性変形抵抗性を評価する指標としては、試験開始から 15 分程度までの変形量あるいは動的安定度が適している。

土砂系舗装の骨材飛散抵抗性（ポットホールに対する抵抗性）の評価は回転ホイールトラッキング試験で行うことができ、その場合の載荷荷重は当該道路を利用する農用車両の操舵輪の輪荷重が望ましい。また、骨材飛散抵抗性を評価する指標としては、アスファルト混合物の性能指標として使われている“ねじり骨材飛散率”が適用できる。

土砂系舗装材料の透水性の評価には変水位透水試験を適用し、透水性の指標には透水係数が適用できる。

土砂系舗装材料の弾性係数の推定手法として繰返し載荷 CBR 試験が有効であり、その適用にあたっては、水浸・非水浸での比較が重要で、載荷回数については弾性係数が一定になることを目安として適宜設定することが望ましい。

(3) 土砂系舗装の供用性能 / 整備手法について

試験舗装に用いた C-40、石灰安定処理土、石灰フォームド安定処理土は、現状土よりも良好なわだち掘れ抵抗性を有しており、かつ現状土に比べて走行車両の振動を半減することができた。

土砂系舗装においては、ある程度の支持力を有した路床上であれば構造上の検討は不要であり、路面の材料特性によって舗装の要求性能を設定することができる。

除草せずに改良した場合であっても、支持力特性や施工後の雑草の繁茂状態には大きな影響を及ぼさない。特に石灰フォームド安定処理土の繁茂抑制効果は大きい。今回のような現状土であれば、石灰系固化材やフォームドアスファルトで安定処理することで、降水後の表面の泥濘化抑制が期待できる。特に石灰フォームド安定処理の泥濘化抑制効果は大きい。

石灰フォームド安定処理工法は、既設土砂系舗装の性能向上策として有用である。

Abstract

A farm road is subdivided by a main farm road, a branch farm road, and the cultivation way according to the purpose for spending. Generally, a main farm road has asphalt paving in many cases, and a branch farm road and the cultivation way have sediment pavement in many cases. According to the farm road maintenance situation report in 2011, there is 175,352km of the total extension of a farm road. Pavement distance is 62,616km and the pavement rate has become 35.7%. The sediment pavement is not included in this.

The Cabinet decision of the three years of deregulation promotion plan was carried out in March, 2001. The contents of the standard correspond flexibly to technical innovation. For that purpose, the standard, which has been of detailed specifications, is examined for using performance specification in principle. And it was decided upon "the foundations of the design concerning civil engineering and architecture (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)" in April, 2002. Thereby, performance specification of various technical standards was promoted one by one. Also in the farm road, design criteria land improvement business plan "farm road" were reformed in March, 2005, based on "the technical standard of the structure of pavement." In this, the directivity to the formation of performance specification about the design of pavement is specified. On this standard, sediment pavement is also classified as pavement, and performance specification will be required also to sediment pavement.

On the other hand, in the present condition, although performance specification has been applied steadily to asphalt pavement and concrete pavement, sediment pavement is out of this motion. In the present age when reexamination and curtailment of social capital of maintenance expenses are demanded, the convenience to road users as accountability, residents along the route, etc. needs to be secured. Sediment pavement is not always to be replaced to asphalt pavement or concrete pavement. First of all, the action and character of sediment pavement must be evaluated. And performance specification should be determined on the special feature of sediment pavement.

Based on the above a questionnaire was first carried out by this research to the land improvement districts which are also users of farm roads and are administrators. And problems of the farm road were extracted, the functions required by a land improvement districts were considered, and the functions required to sediment pavement was arranged. Next, the road surface shape properties and the vibration characteristics of the vehicles running along it were examined to obtain the present conditions in performance of existing sediment pavement.

A comparison and the frequency analysis of profile data are performed to check how became the road surface shape (road surface profile) of the vertical section direction of the existing sediment pavement. And then, in order to know vibration in the loading platform of a light truck running on existing sediment pavement, a driving experiments were conducted on a real way and comparison of vibration acceleration data and a relation with a road surface profile were investigated. Furthermore, in order to clarify the threshold value of the dent of the road surface not to cause the damage in handling and transport of agricultural products, examination by the vehicle

motion simulation with simplified relations between a road surface shape and the vibration acceleration was carried out.

Moreover, laboratory experiments with four kinds of road materials were conducted to obtain quantitatively the performance of sediment pavement, establishment of the verification technique and the performance evaluation of sediment pavement. In the Tottori University attached farm, seven kinds of experimental pavement were built and investigated for bearing capacities, load support characteristics, vehicle vibration characteristics, moisture conditions, a weed luxuriant growth etc..

The knowledge acquired by this research is summarized below.

(1) Maintenance of the Existing Sediment Pavement

- 1) The vibration characteristics in vehicles running on sediment pavement covered with weeds becomes large to a track part. Since, the measured vibration is larger than the case with similar sediment pavement without weeds, to control the damage on agricultural products in handling and transport, road surface improvements are desirable.
- 2) For the road surface management to prevent the damage in agricultural products, a threshold value of the dent depth should be 40 mm.
- 3) Rice field water management has a great influence on moisture condition of the subgrade of the sediment pavement.

(2) Performance Evaluation or Collation Technique of the Sediment Pavement

- 1) Evaluation of the plastic deformation-resistance (resistance to dig a wheel track) of sediment pavement can be carried out by a wheel tracking examination, under the wheel load of the driving wheel of vehicles. In addition, for an index to evaluate plastic deformation resistance, the volume of deformation for first 15 minutes or dynamic stability is suitable.
- 2) Evaluation of the aggregate scattering-resistance (resistance for the pothole) of sediment pavement can be carried out by a rotary wheel tracking examination under the wheel load of the steering wheel of vehicles. Moreover, "a torsion aggregate scattering rate", currently used as a performance index of an asphalt mixture, can be also used to evaluate aggregates scattering resistance.
- 3) The falling head permeability test is applicable to evaluate water permeability of sediment pavement, and a coefficient of permeability can be used to a permeable index.
- 4) Repeated loading CBR examination is effective to estimate the elastic coefficient of the sediment pavement road material under cyclic loads, and, in its application, the number of loading cycles should be determined to achieve, elasticity coefficient after large number of loading cycles.

(3) Performance (Serviceability) or Maintenance Technique of the Sediment Pavement

- 1) All of C-40, lime stabilization soil and lime formed-asphalt stabilization soil, which were used for experimental pavement, have better resistance than present conditions, and were able to reduce vibration of a running vehicle by half compared with present conditions.
- 2) If sediment pavement road has its subgrade with sufficient bearing capacity, structural examination is unnecessary, and the demand performance of pavement can be focus the material characteristics as a road surface.

- 3) Neither the bearing characteristics nor the luxuriant growth resistance of the weeds after constructions are affected by pavement improvement without weeding out. Especially the luxuriant growth inhibiting effect of the lime foamed-asphalt stabilization soil is large.
- 4) Mud of the surface after rain can be controlled by lime-based solidification materials or foamed-asphalt. Especially control of mud of the surface by lime foamed-asphalt stabilization soil is large.
- 5) The lime foamed-asphalt stabilization construction method is useful as a performance enhancement of the existing sediment pavement.

学位論文の基礎となる学会誌公表論文のリスト

- 学術論文 -

- 〔1〕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ァイルに関する研究，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.I_81-I_86，2011.12.【本論文；第 3 章】
- 〔2〕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.【本論文；第 5 章】
- 〔3〕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 - 縦断形状と振動加速度による平坦性の評価 - ，農業農村工学会論文集 No.278，pp.121-128，2012.4.【本論文；第 3 章，第 6 章】
- 〔4〕坂本康文，五傳木一，芳賀潤一，緒方英彦：土砂系舗装の路面形状と車両振動特性に関する研究，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)，pp.I_37-I_44，2012.12.【本論文；第 3 章，第 4 章】
- 〔5〕坂本康文，五傳木一，芳賀潤一，緒方英彦：試験舗装による土砂系舗装材料の供用性能評価，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)，pp.I_131-I_138，2012.12.【本論文；第 6 章】

- 参考論文 -

- 〔1〕緒方英彦，野田智之，坂本康文，篠塚政則，鎌田修，中村和明：水田地域におけるほ場内農道の要求機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.【本論文；第 2 章】