

博士論文

ランナーの着地衝撃に影響を与える
舗装の性質に関する研究

Pavement surface characteristics affecting runners' impact during foot strike

2021年3月

池田 茜

山口大学大学院 創成科学研究科

要旨

2000年代以降、わが国ではランニング人口が増加しつつある。幅広い年齢層のランナーが、ケガなく快適に走り続けられるよう、ランナーの走行快適性を追求した舗装材料を開発することは、舗装工学におけるひとつの新しい分野である。

ランナーの走行快適性に関連して、継続的なトレーニングによるケガの問題等の観点から、スポーツ医工学の分野で盛んに研究されているが、舗装材料の影響を検討したものは少なく、ランナーの走行快適性を考えるときに最大化すべき舗装の性質およびその計測方法については答えを提示していない。一方、舗装工学における走行快適性とはもっぱら車両走行を対象としており、車両にとっての走行快適性の指標およびその調査試験法が、ランナーの走行のための方法としてそのまま適用できるわけではない。

そこで本研究では、アスファルト舗装を中心に、ランナーの走行快適性に寄与する舗装の性質を明らかにし、その評価方法を提案することを目的とする。

第1章「序論」では、本研究の社会的背景と目的、論文の構成を述べている。

第2章「舗装とランナーの着地衝撃に関する研究と課題」では、主にスポーツ医工学分野から先行研究をレビューしている。ランニングに関する統計から、路面素材としてはアスファルト舗装が最もよく走られており、着地衝撃の小さい舗装が好まれることを明らかにした。既往研究で、着地衝撃は床反力計や加速度計、圧力計、筋電位センサなどを用いて計測されており、その大きさは走行速度、走行時間、着地方法、シューズと路面の剛性、ランナーの経験年数の影響を受ける。ただし、路面素材の差が着地衝撃に与える影響を巡っては研究者間で実験結果が対立しているのが現状である。以上を踏まえて、本研究ではアスファルト舗装を中心に、着地衝撃に影響を与える舗装の性質を明らかにし、着地衝撃の評価方法を確立する必要があることを明確にした。

第3章「舗装に対するランナーの着地衝撃の感触に関する調査」では、舗装の表面粗さの異なる2種のアスファルト舗装および弾性舗装による試験コースで、10名の被験者とした走行試験とアンケート調査を実施した。その結果、舗装の表面粗さの標高差が小さい細密(13)に比べ、舗装の表面粗さの標高差が大きい開粒(13)は、ランナーは走行時の着地衝撃を小さく感じることを明らかにした。舗装の表面粗さはランナーの着地時の感触に影響を与えており、舗装の表面粗さの差異によってランナーの走行快適性をコントロールしうることを示唆している。

第4章「ランナーの足首に生じる着地衝撃に関する検討」では、着地衝撃の計測方法を確立し、室内・屋外走行実験に適用した。ウェアラブルな9軸加速度・角速度ワイヤレスセンサを足に装着することにより足の運動を連続的に計測するものである。着地衝撃の計測方法として、従来の床反力計では、定点での着地時反力しか計測できなかったのに対して、本手法により、場所を選ばず、ランナーの足の動きを連続的に観測することが可能となった。また、3軸方向の加速度に加えて3軸方向の角速度の情報も導入することで、時々刻々変化するセンサの姿勢を考慮し、足の運動を固定座標系の中で処理することを可能にした。本センサを用いた室内実験により、走行時の足の運動と加速度波形との対応を明らかにしたのちに、屋外において舗装材料の異なる5種類の路面で走行実験を実施した。実験の結果、着地時

の衝撃加速度ピーク値は、鉛直加速度よりも水平加速度（前後方向）において舗装種別の影響が顕著に現れることを明らかにした。

第5章「舗装の表面粗さがシューズ底面の変位および摩擦特性に及ぼす影響」では、第3章を踏まえ、舗装の表面粗さがランナーの着地衝撃の感触に与える影響を詳細に検討するため、室内実験を実施している。表面粗さと材料の異なる10種類の舗装供試体の表面に、シューズ底を模擬したゴム板を載せて載荷したときの変形を計測することにより、ランナーが着地時に受ける感触をシミュレートしたものである。実験の結果、ランナー着地程度の荷重レベルでは、舗装-シューズ接触面の変形特性に、舗装材料の変形係数はほとんど影響を与えない一方、表面粗さによる差異は顕著に現れることを明らかにした。実験結果は第3章の着地衝撃に関するアンケート結果と整合する。さらに、3D スキャナで計測した表面粗さの標高データに基づき、標高の高いほうから順に接触していくというシンプルな負荷曲線モデルにより、実験上の荷重-変位曲線をモデル化可能であることを明らかにした。ランナーの着地時の感触に対して舗装の表面粗さが支配的に影響することを実証するとともに、表面粗さの標高データから、ランナーの着地時の変形特性を計算的に求めうる可能性を示した。

第6章「ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質に関する検討」では、前章で提案した負荷曲線パラメータを用いた舗装-シューズ接触面の変形・摩擦特性のモデル化の妥当性を検証するため、53名の市民ランナーに対する走行試験を実施した。その結果、被験者の多くは、負荷曲線パラメータの値が中程度であるポーラス(5)およびSMA(5)を最も着地衝撃が小さい舗装と評価した。負荷曲線パラメータは、値が上昇するにつれて接触面の変形性は大きくなるが、同時に摩擦抵抗も増大する。着地衝撃の感触は、接触面の変形性の影響が卓越する領域と、摩擦抵抗の影響が卓越する領域が存在し、両者がバランスするような表面粗さで最も着地衝撃が軽減するものと推察される。

第7章「結論」では、本研究の各章の成果を要約して総括し、本研究をとりまとめた。

ABSTRACT

Since the 2000s, the practice of running has consistently increased worldwide. Development of new pavement especially designed for distance runners is a new promising field in pavement engineering so that city runners at all ages continue the practice of running comfortably without injuries. Although many researchers in biomechanics and sports sciences have studied runners' comfort associated with running injury etiology, running economy and running performance, there is still few in the literature regarding the biomechanical effects of different types of running surfaces on foot-pavement interaction.

The aim of this study is to clarify the influence of running on different types of asphalt pavements on runners' impact during foot strike.

In Chapter 1, **Introduction**, describes the social background and the purpose of this research. This study takes interest in the interactions between runners' foot and pavement surfaces as they affect runners' comfort in running. Focusing on the runners' impact during foot strike, the study aims to identify, quantify, measure and model the factors influencing the interactions.

In Chapter 2, **Literature review on interactions between runners' foot and pavement surfaces**, reviews earlier studies mainly from biomechanics and sports science field, including statistics of runners' preference to running surfaces in the practice of running and its reasons, measurement methods of runners' footstrike impact and so on. Based on the review, this chapter highlights the problems to be solved in this study.

In Chapter 3, **Field test on runners' sensory to types of pavement**, ten adult athlete runners ran for 55 m on four different asphalt pavement surfaces. After the test running, the runners answered the questionnaires regarding degree of impact during foot strike. The results showed that the runners are sensitive to the type of asphalt pavements. Many runners felt smaller footstrike impact on rougher pavement surface, namely, open-graded asphalt concrete, than that on flatter/smooth pavement surface, namely, dense-graded asphalt concrete. The result implies that runners' footstrike impact largely depends on roughness of pavement surface rather than the material stiffness.

In Chapter 4, **Measurement of foot acceleration during running on pavement types with wearable motion sensor**, developed in-situ measurement method of runners' footstrike impact. Utilizing a wearable 9-axis motion sensor with logger, this chapter measured the acceleration of the runners' foot to investigate the effect of pavement materials on the foot strike while running. The results of sensor calibration test showed that the 3-axial accelerations measured by the motion sensor agreed well with those by the video analysis. The sensor posture was also correctly measured. The results of the field tests on five types of pavement materials showed that the acceleration measured at the ankle showed a clear difference according to the road material. Mechanical properties of pavement surface such as stiffness and frictional resistance are manifested as the acceleration on the longitudinal direction while running.

In Chapter 5, **Laboratory experiment on mechanical interactions between foot/shoes and pavement surfaces**, carried out two types of laboratory experiments. The one is normal loading test to rubber sheet on different types of asphalt pavement surfaces in order to investigate deformation characteristics of rubber-pavement interface depending

on the surface roughness. The other is skid-friction test on the asphalt pavement surfaces. The roughness data, namely, digital elevation data of the pavement surfaces were obtained using the 3D-laser profilometer. The test results showed that rubber-pavement interface showed larger deformation in the case of rougher pavement surface. The magnitude of deformation is largely correlated to the parameter of material ratio curve. It means that the deformation characteristics of rubber-pavement surface interface can be modelled using the material ratio curve.

In Chapter 6, **Modeling of runners' footstrike impact using material ratio curve and its validation**, conducted verification experiment for the modeling method proposed in the previous chapter. Fifty-three adult city runners ran twice for 10 meters on all 6 different types of asphalt pavements and evaluated their footstrike impact. According to the runners' evaluation, the pavements of Porous (5) and SMA (5) had the lowest footstrike impact, while their parameter values of the material ratio curve are moderate among the six types of pavements. The parameter value of the material ratio curve indicates not only deformation but also friction at the contact interface of shoes and pavement surface. Large friction may lead to disagreeable footstrike impact. The running test result, therefore, implies that the footstrike impact becomes lowest on the surface roughness with balancing of deformation effect and friction effect.

In Chapter 7, **Conclusions**, summarizes the achievements of this research and describes future challenges and prospects.

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	舗装とランナーの着地衝撃に関する研究と課題	5
2.1	概説	5
2.2	ランナーの舗装に対する走行快適性	5
2.2.1	ランナーの走行快適性に関するアンケート調査	5
2.2.2	ランナーが走行する道路の舗装種類に関する調査	6
2.2.3	ランナーが舗装に求める走行快適性に関する調査のまとめ	7
2.3	ランナーの足に生じる着地衝撃に関する研究と課題	8
2.3.1	ランナーの足に生じる着地衝撃	8
2.3.2	ランナーの足に生じる着地衝撃の測定手法	9
2.3.3	ランナーの足に生じる着地衝撃の影響因子	11
2.3.4	ランナーの足に生じる着地衝撃の研究まとめ	19
2.4	舗装に対するランナーの感触および足に生じる着地衝撃に関する課題	19
2.5	本研究で用いた舗装種類	20
	参考文献	24
第3章	舗装に対するランナーの着地衝撃の感触に関する調査	27
3.1	概説	27
3.2	走行試験場の舗装に関する調査	27
3.2.1	走行試験場の概要	27
3.2.2	走行試験場の舗装の物理特性	28
3.2.3	走行試験場の物理特性および力学特性に関する試験概要	33
3.2.4	舗装の物理特性および力学特性に関する試験結果	36
3.2.5	舗装の物理特性および力学特性の試験結果まとめ	38
3.3	舗装に対する着地衝撃の感触に関するアンケート調査	39
3.3.1	アンケート調査の概要	39
3.3.2	アンケート調査の結果	39
3.4	舗装の物理特性および力学特性と各舗装の評価平均値との相関	41
3.4.1	アンケート結果の定量化	41
3.4.2	アンケート結果と舗装の性質との関係	41
3.5	本章のまとめ	43
	参考文献	44

第4章	ランナーの足首に生じる着地衝撃に関する検討	45
4.1	概説	45
4.2	ランナーの足首に生じる着地衝撃の計測手法に関する検討	45
4.2.1	モーションセンサの概要	45
4.2.2	モーションセンサの性能確認実験の概要	47
4.2.3	モーションセンサの性能確認実験結果	48
4.3	走動作と加速度波形との関係に関する室内実験	51
4.3.1	実施概要	51
4.3.2	実験結果	53
4.4	素材の異なる舗装種別が着地時加速度に与える影響に関する屋外走行実験（その1）	56
4.4.1	実験概要	56
4.4.2	実験結果	58
4.5	素材の異なる舗装種別が着地時加速度に与える影響に関する屋外走行実験（その2）	63
4.5.1	実験概要	63
4.5.2	実験結果	65
4.6	本章のまとめ	70
	参考文献	71
第5章	舗装の表面粗さがシューズ底面の変位および摩擦特性に及ぼす影響	73
5.1	概説	73
5.2	舗装の表面粗さの評価指標	75
5.2.1	対象とした舗装種類	75
5.2.2	舗装の表面粗さ（線粗さ）の評価指標	81
5.2.3	ランナーの着地時を加味した舗装の表面粗さの評価指標の提案	84
5.2.4	舗装の表面粗さ（面粗さ）の評価指標の提案	87
5.2.5	表面粗さの評価指標に関する検討結果のまとめ	89
5.3	ランナーの足に生じる着地衝撃に関する力学的検討	90
5.3.1	ランナーの足に生じる着地衝撃	90
5.3.2	ランナーの足に生じる着地衝撃に関する室内実験の概要	91
5.3.3	アスファルト舗装に対する室内実験結果	97
5.3.4	アスファルト舗装以外の舗装材料に対する室内実験結果	133
5.3.5	ランナーの足に生じる着地衝撃に関する室内実験結果のまとめ	152
5.4	本章のまとめ	153
	参考文献	154

第 6 章	ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質に関する検討	155
6.1	概説	155
6.2	走行試験場の概要	155
6.2.1	走行試験場の舗装	155
6.2.2	走行試験場の概要	158
6.3	舗装から受ける着地衝撃の大きさに関するアンケート調査	160
6.3.1	アンケート調査の概要	160
6.3.2	アンケート調査の結果	162
6.4	アンケート調査結果とゴム板上面の変位量および速度低下率との関係	164
6.5	アンケート調査結果のまとめ	166
第 7 章	結論	167
7.1	各章の結論	167
7.2	本研究の結論	168
7.3	今後の課題	169
7.4	今後の展望	169

謝辞

本研究の関連論文

第1章 序論

1.1 本研究の背景

2000年代以降、健康志向の流れが強まり、わが国ではジョギングやランニングを行うランナーが増加の一途をたどっている。ジョギングやランニングはランニングシューズが一足あれば、年齢や性別を問わず、一人で簡単に始められることから人気の高いスポーツである。

多くのランナーにとって、ランニングシューズへの関心は高い。ランニングシューズは足裏が接地した時に人体へ作用する衝撃力（以下、着地衝撃）から足を保護し、走行パフォーマンスを最大限に引き出す役目を担っている。ジョギングやランニングというスポーツを安全かつ快適に継続するために、ランナーはランニングシューズの持つクッション性やグリップ性などの機能に注意を払っているといえる。

ランナーにとって走行時の快適性（以下、走行快適性）は、ウェアやシューズ、気候のほかに道路の舗装の影響も大きく受けており、ランナーは舗装材料の種類によって、走行快適性に違いを感じて走行している。本研究では、市民ランナーを対象に「走りやすい舗装とはどのような舗装か」をアンケートした。その結果、被験者53名中35名（66%）が「着地衝撃が小さい舗装」と回答した（第2章）。すなわち、ランナーは舗装に対する走行快適性として、着地衝撃を緩衝する作用を最も求めている。

第2章で述べるように、スポーツ医工学の知見によれば、ランナーの足裏で生じる着地衝撃は、踵から踝、膝、腰の順に減衰しながら伝達するため、膝痛や腰痛などの障害発生につながる。着地衝撃の大きさは、走行速度や着地方法、シューズソールの厚さ、走行時間および距離によって大きさは異なり、加えて舗装も影響因子の一つであると言われている。そのため、舗装材料ごとに着地衝撃の大きさを測定して、舗装材料の種類による影響を明らかにする研究を行っている事例がある。しかし、舗装が硬いか（アスファルト舗装・コンクリート舗装）、軟らかいか（芝生・土）という大分類での検討にとどまっており、研究者によって正反対の結果が得られており、測定手法も確立されていないことから、舗装材料の変形係数との関係性は明確になっていないのが現状である。

ランナーがシューズを介して足裏で感じた着地衝撃の大きさ（以下、着地衝撃の感触）に関する知見によれば、舗装材料の種類やアスファルト舗装の種類によって、ランナーは着地衝撃の感触に違いを感じていることは明らかになっている。しかし、ランナーが舗装に対して感じた感触の差は、舗装のどの性質が影響しているのかといった、舗装の影響因子までは明らかになっていない。

そこで本研究は、ランナー走行時の快適性に寄与する舗装の性質とその評価方法を明らかにすることを目的とする。走行快適性としては、前述のアンケート結果に基づき、着地衝撃に焦点を当てる。この過程において、ランナーの足首に生じる着地衝撃をどのように計測するか、という課題についても研究を行った。

ここで、本研究は、ランナーの走行快適性＝ランニング時の走行快適性という客観的な定義や評価が難しい事柄をテーマとしている。「快適」とは一般に、不快な刺激がなく気持ちの良い状態を指すが、不快な刺激が取り除かれればただちに気持ちの良い状態が達成されるわけではない。快適の「快」と「適」は分けて考えるべきで、不快な刺激がない状態を「適（neutral）」、より積極的に好ましい状態を「快（pleasantness）」とするならば、本研究が目指す舗装によって着地衝撃を軽減することは、ランナーへの不快な刺激を取り除くという意味で「適」に該当することを記しておく。

また、本研究が明らかにする、ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさは、ランナーが足/シューズを

介して舗装に接地する際の短時間での力学現象（変形や摩擦）を見ている。この瞬間的な着地衝撃の大きさが、たとえば42.195 kmのような長距離を走った後の疲労の程度にどの程度影響するかについては、本研究の範囲では対象としない。

本研究で対象とした舗装種類は、アスファルト舗装とした。マラソンを含めた道路競走（ロードレース）の走路に関して、日本陸上競技連盟の陸上競技ルールブックによれば、陸上競技場内ではなく、車道を走路とすることが定められている。そして、競技以外の練習時もアスファルト舗装を走行しているランナーが80%であることが明らかになっている。よって、公式競技としての道路競走の走路のみを対象とするものではないが、ランナーが走行する機会の最も多いアスファルト舗装を研究対象とする。

1.2 本研究の目的

本研究では、ランナーの着地衝撃の感触に寄与する舗装の性質を明らかにし、その舗装の評価方法および評価指標を提案することを目的とした。その過程でランナーの足に生じる着地衝撃の大きさを測定する手法を提案することも目的とした。

「感触」とは、人体が接触した時に物体から受けた刺激を人体の皮膚に備わっている受容器が刺激を受け、受けた刺激の情報を能で統合されて感知するまでの一連の流れのことである。ランナーが舗装の表面にシューズを介して接地する、すなわち触れることによって、人体の受容器が刺激を受けて、「温」、「冷」、「触」、「圧」、「痛」の感触の情報が統合されて、脳内で着地衝撃の大きさの大小の判別を行っていると考えた。

この目的に対し、まず、アスファルト舗装の種類ごとのランナーの着地衝撃の感触を調べるために走行試験およびアンケート調査を実施した結果を述べ、ランナーの着地衝撃の感触はアスファルト舗装の種別によって比較的明確に現れ、舗装の表面粗さが影響している可能性を指摘する。次に、ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさについては、ワイヤレス9軸加速度計を用いた計測方法を提案し、屋内・野外走行実験を行って舗装種別と着地衝撃加速度との関係について検討を行う。また、ランナーが感じた着地衝撃の感触の違いは、シューズ底面のゴムの変形特性と摩擦特性によると仮説を立て、室内実験を実施する。最後に、室内実験で得られたゴム底面の変形特性および摩擦特性と、ランナーの着地衝撃の感触との関係を明らかにするため、走行実験およびアンケート調査を再度実施する。これらの成果を踏まえて、ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質と、舗装の性質の評価方法を明らかにする。

1.3 本論文の構成

本論文は第1章から第7章までの章立てで構成されている。各章の概要は、以下のとおりである。また、研究の流れを図1.1のフロー図に示す。

第1章「序論」では、本研究の背景を述べるとともに、関連する研究として、着地衝撃とその計測方法に関する既往の知見を整理し、本研究の目的と課題および構成を示した。

第2章「舗装とランナーの着地衝撃に関する研究と課題」では、本研究のキーワードのうち定量化が難しい「ランナーの舗装に対する走行快適性」を本研究では「着地衝撃の大きさ」と捉え、定義した。既往研究より着地衝撃の定義、計測方法、影響因子に関する知見を整理し、①舗装に対するランナーの感触に関する知見が少ないという課題を有すること、②舗装とランナーの着地衝撃に関する力学的検討に課題を挙げ、本研究の目的と位置づけを明確にした。

第3章「舗装に対するランナーの着地衝撃の感触に関する調査」では、2種のアスファルト舗装および弾性舗装による試験コースで、10名を被験者とした走行試験とアンケート調査を実施する。そして、ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質について検討を行う。

第4章「ランナーの足首に生じる着地衝撃に関する検討」では、ランナーの足首に生じる着地衝撃の計測方法を提案するため、室内・屋外走行実験を実施する。着地衝撃の計測方法として、従来のフォースプレート（床反力計）方式では、定点での着地時反力しか計測できなかったのに対して、本研究で用いるモーションセンサは、ウェアラブルな9軸加速度・角速度ワイヤレスセンサであり、足に装着することにより足の運動を連続的に計測するものである。そして、3軸方向の加速度に加えて3軸方向の角速度の情報も導入することで、時々刻々変化するセンサの姿勢を考慮し、足の運動を固定座標系の中で処理することを可能にする。本センサを用いた室内実験により、走行時の足の運動と加速度波形との対応を明らかにしたのちに、屋外において舗装材料の異なる5種類の路面で走行実験を実施する。

第5章「舗装の表面粗さがシューズ底面の変位および摩擦特性に及ぼす影響」では、第3章のアンケート結果を踏まえて、ランナーの着地衝撃の感触はシューズ底面のゴムの変形と、シューズ底面のゴムと舗装との摩擦を感じ取っており、これらに影響する舗装の性質として舗装の表面粗さであると仮説を立てる。この仮説において室内実験で、まず、シューズ底面のゴムの変形特性については、10種類の舗装供試体の表面に、シューズソールを模擬したゴム板を介して載荷したときの変形を計測する。3Dプリンタ供試体は表面粗さを3Dスキャナで数値化しPLA製の3Dプリントモデルで作製する。これも載荷実験に供することで、舗装材料の変形係数による影響を排除した検討も行う。シューズ底面のゴムと舗装との摩擦特性については、載荷除荷実験と同一のゴムを取り付けた振り子を舗装の表面に振り落としたときの速度低下率を算出する。

第6章「ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質に関する検討」では、第5章の室内実験結果で得られた変形特性・摩擦特性のモデル化の妥当性を検証するために、市民ランナー53名に対する走行実験とアンケート調査を実施する。そして、アンケート結果と第5章の室内実験結果との関係より、ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質を明らかにする。

第7章「結論」では、本研究の各章の成果を要約して総括し、本研究をとりまとめる。

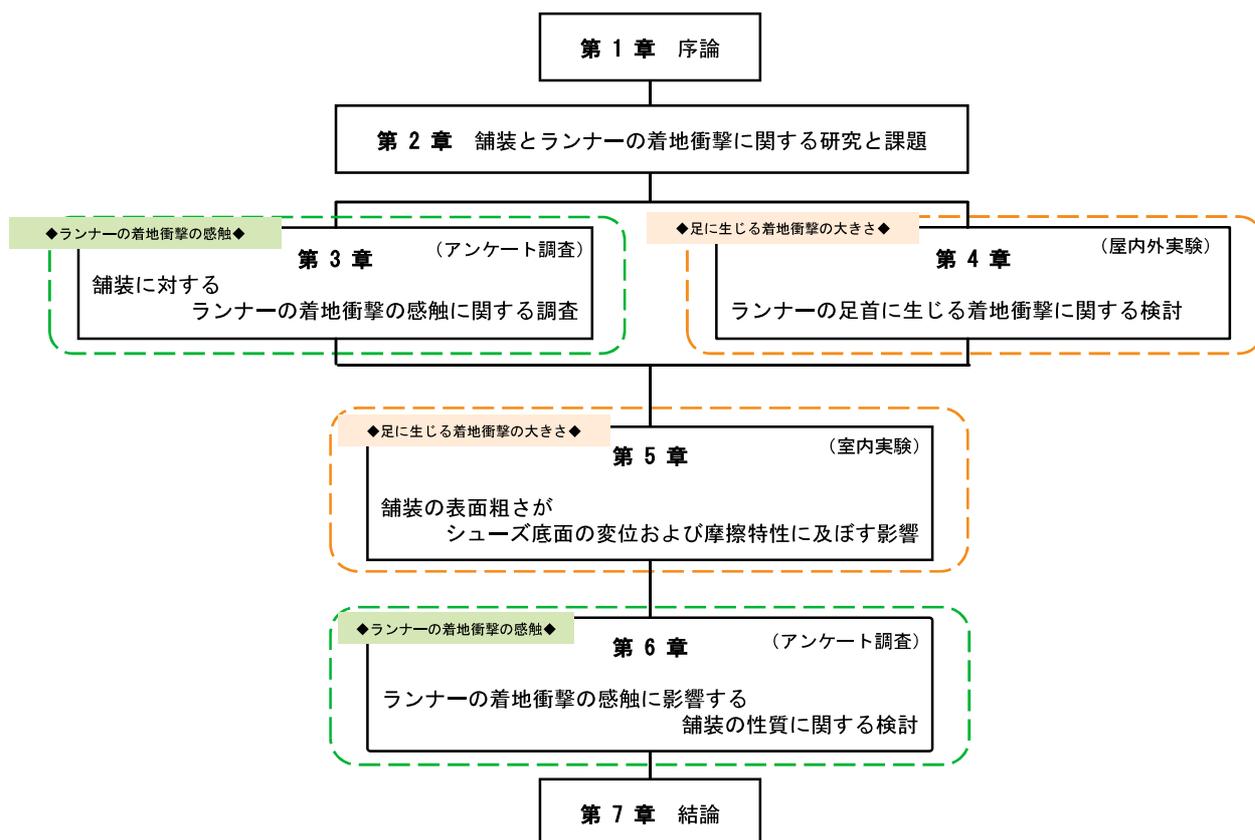


図 1.1 本論文の構成

第2章 舗装とランナーの着地衝撃に関する研究と課題

2.1 概説

本研究は、ランナーの舗装に対する走行快適性に影響している舗装の性質を明らかにすることを目的としている。研究の開始にあたり最も重要なことは、ランナーが舗装に求める走行快適性の項目の抽出である。そこで本章では、まず、ランナーが舗装に求める走行快適性についてアンケート調査を実施した結果を述べ、ランナーが最も重要視する項目は「着地衝撃の小ささ」であることを示す。続いて、舗装とランナーの着地衝撃に関する既往の知見、着地衝撃の計測方法および影響因子について、主にスポーツ医工学分野での先行研究成果に基づいて整理する。最後に、本研究で対象とした舗装種類について説明する。

2.2 ランナーの舗装に対する走行快適性

マラソン大会といった競技や大会時、そして練習時に限らず、ランナーは走行時に快適性を求めている。ランナーは、自分に合ったシューズやウェアを身にまとい、なるべく汗をかかない気候を望んでいる。さらに、走行するコースに関して、信号が少なく、見通しが良く、人が少ない場所を好み、コースの道路については、縦横断勾配が小さく平坦な道路が好ましいであろう。ここで、「快適」¹⁾³⁾とは不快な刺激がなく気持ちの良い状態を示すが、不快な刺激を取り除けば、ただちに気持ちの良い状態が達成されるわけではない。「快適」は「快」と「適」に分けて考えるべきであり、不快な刺激がない状態を「適 (neutral)」より積極的に好ましい状態を「快 (pleasantness)」と区別して考える必要がある。

本研究では、道路の舗装に対してランナーが走行時に感じる「快適性」を対象とする。本研究で示す「快適」とは、舗装からランナーの足に与える不利な刺激がない状態である「適」に焦点を当てる。そして、ランナーの走行快適性は、目で見た舗装の色あいや、耳で聞いた音なども、影響を与えることが考えられる。本研究は、ランナーが舗装に接地する足で感じるとる「感触」に着目して研究を行うこととする。

2.2.1 ランナーの走行快適性に関するアンケート調査

黒岩ら⁴⁾は、アスリートランナーが舗装に対して「走りやすい」、すなわち「快適な走行を行うことができる」と感じる理由は、蹴りやすいこと、路面の凹凸を感じないこと、足元が安定すること、走りがぶれないこと、足裏への負担が少ないことである。「走りにくい」、すなわち「快適な走行を行うことができない」と感じる理由は、路面が滑りやすいこと、路面が硬いこと、着地が安定しないこと、足首に負担がかかること、であると明らかにしている。

舗装がランナーに与える不利な刺激を取り除き、ランナーが快適に走行できる環境を構築するために、ランナーが舗装に対して求めている快適性の項目を明らかにする必要がある。そこで市民ランナーを対象にアンケート調査を実施した。ランナーには、『走行時に快適と感じる舗装は、どのような舗装であるか』という質問に対して、提示した項目に当てはまる項目を選択してもらった。提示した項目は、着地衝撃が小さい、足元が安定する、蹴り出しやすい、路面がすべりにくい、路面の凹凸(わだち掘れなど)がない、足が疲れにくい、以上6項目である。複数項目の回答を可能とした。調査結果を図2.1に示す。回答人数の比率が66%と最も多かった項目は、「着地衝撃が小さい」ことであった。したがって、ランナーが快適

に走行するためには、舗装はランナーに与える不利な「着地衝撃」という刺激を取り除くことが必要である。以上より、本研究は、ランナーの舗装に対する走行快適性のうち、「着地衝撃の大きさ」に着目をして研究を行う。

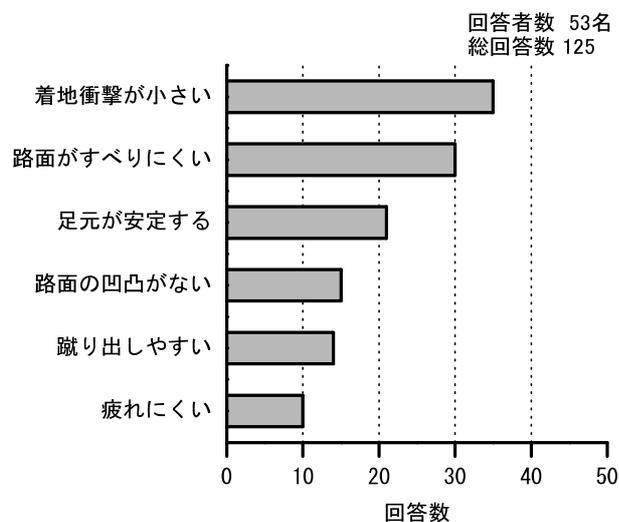


図 2.1 走りやすい舗装に関する調査結果

2.2.2 ランナーが走行する道路の舗装種類に関する調査

黒岩ら⁴⁾は、ジョギングを楽しむランナー38名と競技レベルの高いランナー（大学の陸上部）30名を対象に舗装に関するアンケート調査を実施した。対象とした舗装は、アスファルト舗装、ウレタン舗装、ブロック舗装、コンクリート舗装、土系舗装、ウッドチップ舗装の6種類である。ここで、アスファルト舗装とは、表層でアスファルト混合物を用いた舗装と定義する。競技レベルの高いランナーを対象としたアンケート調査の結果を図 2.2 に示す。快適な走行が行うことができる舗装はアスファルト舗装とウレタン舗装であり、コンクリート舗装やブロック舗装は快適と感じないことがわかる。すなわち、ランナーは材料の異なる舗装に対して違いを感じている。さらに、アスファルト舗装の密粒度アスファルト舗装（図 2.2 には密粒と明記）とポーラスアスファルト舗装（図 2.2 は排水と明記）に対しても、違いを感じており、密粒度アスファルト舗装の方が、ポーラスアスファルト舗装に比べて、走りにくいと回答した人数は多い。

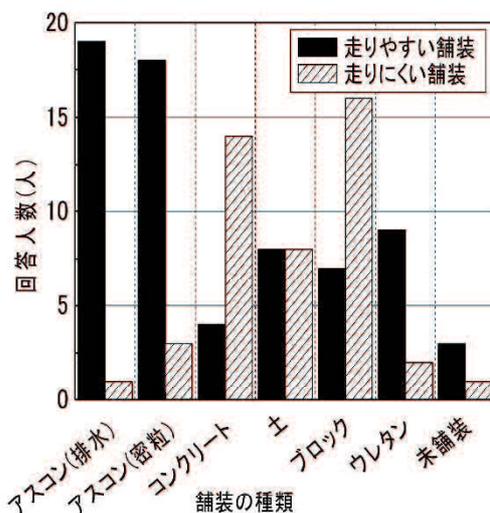


図 2.2 アスリートを対象とした走りやすい舗装に関する調査結果⁴⁾

したがって、アスファルト舗装の表層で用いられている混合物の種類によっても、違いを感じている。

その背景には、競技レベルの高いランナーはアスファルト舗装を走行する頻度が高い。陸上競技場外を走行する競技を道路競走（ロードレース）という。フルマラソンやハーフマラソンも道路競走の一種である。日本陸上競技連盟の陸上競技ルールブック⁵⁾によれば、道路競走における走路の素材と性能について細かい規定はない。ただし、陸上競技場内ではなく、車道を走路とする内容が読み取れる文章が記載されている。国内において舗装されている車道のうち、表層で用いられている舗装材料は、アスファルト混合物が95%を占め、セメント系は5%にとどまる⁶⁾。よって、競技レベルの高いランナーは競技の時、アスファルト舗装を走行している機会が多いことが考えられる。これは、競技レベルの高いランナーのみならず、マラソン大会に出場する一般市民ランナーについても同様のことが言える。

そして、競技時以外については、競技レベルの高いランナーは競技時以外の練習時や、ジョギングやランニングを行う競技レベルの高くない一般ランナーについても、アスファルト舗装を走行しているランナーが80%である⁷⁾ことが明らかになっている。本研究では、一般市民ランナーが日常的に走行している舗装種類に関して、アンケート調査を実施した。被験者は一般市民ランナー53名であった。舗装種類は複数回答を可とした。調査結果を図2.3に示す。アンケート調査より、8割以上のランナーは練習時に走行している舗装の種類はアスファルト舗装であることが明らかになった。

以上より、本研究は、公式競技としての道路競走の走路のみを対象とするものではないが、一般市民ランナーや競技レベルの高いランナーが走行する機会の最も多いアスファルト舗装を研究対象とする。以降では、一般市民ランナーと競技レベルの高いランナーを区別せず、走動作を行う人をランナーと称す。

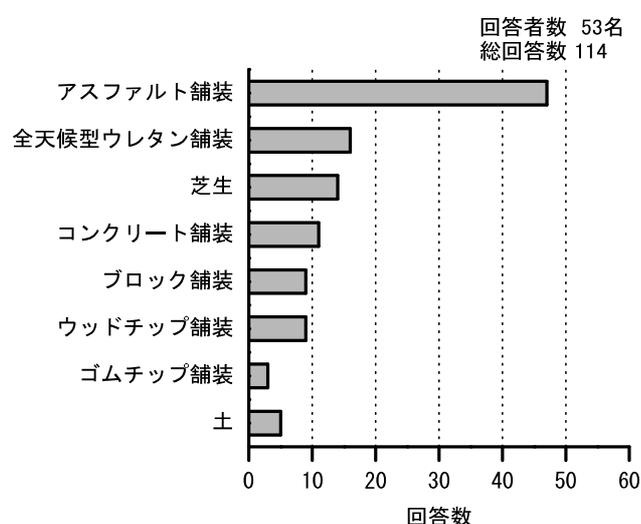


図 2.3 ランナーが日常的に走行している舗装に関する調査結果

2.2.3 ランナーが舗装に求める走行快適性に関する調査のまとめ

- ランナーが快適に走行するためには、舗装はランナーに与える不利な「着地衝撃」という刺激を取り除くことが必要であることから、本研究では、ランナーの走行時に快適と感じる舗装において、「着地衝撃の大きさ」に着目することとした。

- 道路競走の競技で走行する車道部は、国内はアスファルト舗装が 95 %を占めている。そして、練習時に走行している舗装はアスファルト舗装が多いというアンケート調査結果より、本研究で主に対象とする舗装はアスファルト舗装とした。
- ランナーが走行時に快適と感じる舗装を考えると、まず、着地衝撃の大きさについての感触に関する違いが明らかになっていない。そして、ランナーが舗装に対して感じる違いに影響する、舗装の性質とその舗装の性質を評価する指標が明らかになっていない。

2.3 ランナーの足に生じる着地衝撃に関する研究と課題

2.3.1 ランナーの足に生じる着地衝撃

身体動作学で用いられている身体部位の用語⁸⁾を図 2.4 に示す。本研究で「足部」とは内果（以下、くるぶし）から足の指先までを含めた部位を示す。

着地衝撃とは、足裏が接地した時に人体へ作用する衝撃力と定義する。過去の研究^{9),16)-19)}より、着地衝撃は主に床反力計を用いて測定した地面反力の大きさを評価されており、この地面反力の大きさは被験者の体重によって異なるため、体重で除した値を用いている。その知見によれば着地時の地面反力は、体重の約 3 倍^{9),10)}であり、足部から膝部、そして腰部まで着地衝撃は減衰しながら伝達する¹¹⁾。走行距離の増加に伴い、着地衝撃が膝部や腰部へ伝達するため、足部のみならず、膝関節や腰に痛みを生じる障害¹²⁾⁻¹⁵⁾が発症する。体重の約 3 倍の大きさの地面反力を足が着地するたびに舗装から受けることを考えると、道路競走のマラソンやハーフマラソンは走行距離が長いため、ランニング障害が生じやすい。着地衝撃はランニング障害に密接に関係していると考えられ、ランナーが走行快適性として、着地衝撃の小ささを重要視するのは当然といえる。

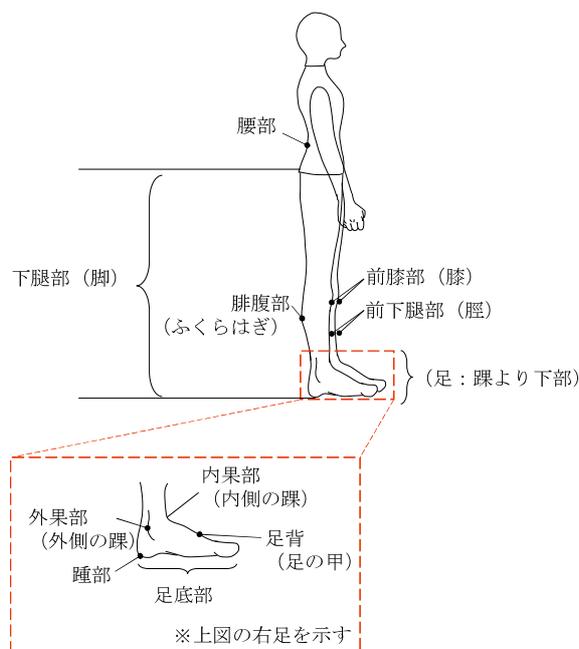


図 2.4 身体動作学で用いられている身体部位の用語⁵⁾

※()は名称とした。

2.3.2 ランナーの足に生じる着地衝撃の測定手法

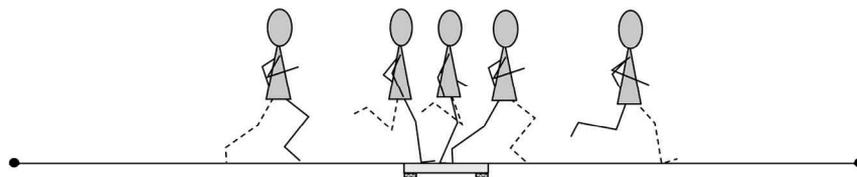
ランナーの足に生じる着地衝撃は、床反力計のみならず、加速度計、圧力計、筋電位センサなどの計測機器を用いて測定が行われている。そして、目的に応じて計測する物理量は異なり、着地衝撃は接地時の地面反力や脛や足首の加速度、足裏の圧力など、様々な指標で評価されている。

(1) 測定場所が固定された測定手法

走動作における足と路面との力のやりとりについて、バイオメカニクスの分野では床反力計（フォースプレート）を用いた計測結果が多く示されている^{9),16)~19)}。床反力計の詳細を図2.5に示す。床反力計の一般的な形状は四角形であるが図2.5に示した400×600 mmのものから走行方向の長さが2 mを超えるものまで大きさは様々である。床反力計の構造は平板の4隅に3軸の力センサ（荷重計）を取り付けたものである²⁰⁾。床反力計は地中埋め込み式が一般的である、図の上部にランナーの着地から蹴り出しまでの動きを示すように、走動作の着地から蹴り出しまでの一歩分の反力を計測するには優れている。しかし、測定位置と範囲が限定される測定方法である。

床反力計で得られた波形の例^{9),16)~19)}を図2.6に示す。図2.6(a)にランナーの着地から蹴り出し間の重心（CoM：The Body's Center of Mass）の動きを示し、図2.6(b)に床反力計で計測した鉛直方向の力・時間曲線を示した。図2.6(b)の縦軸は床反力計で得た荷重を被験者の体重で除した値であり、横軸は床反力計に足が接地した時刻を0 sとして、足が接地してから足が床反力計から離れた時間までを示している。図2.6(b)より、着地動作（図2.6(a)の左図）によってランナーから大きな衝撃を加えることによる地面反力が生じ、床反力計の鉛直方向の力は急激に増加する。この着地時の曲線勾配を、第一ピークまでの曲線勾配（LR：Loading Rate）と称し、評価値の一つとしている。同時に、着地動作によって鉛直方向の力はピーク値を示す。これを鉛直方向の力の第一ピーク（IP：Impact Peak）と称しており、この値も着地衝撃を評価する値として用いられており、床反力計で出力された地面反力の値に、被験者の体重を除した値が図2.6の縦軸の値である。着地動作後、片足で体重を支える動作（図2.6(a)の中央図）を行う時間（以下、立脚期）となる。立脚期には体の重心（CoM：The Body's Center of Mass）が最も低い位置を示す。そのため、ランナーは着地時より大きな力を地面に与え、床反力計の鉛直方向の力は最大値を示す。この鉛直方向の最大値を第二ピーク（GRF_{peak}：Ground Reaction Force Peak）と称す。立脚期後は、蹴り出し動作（図2.6(a)の右図）となり、鉛直方向の力は減少傾向を示す。

床反力計は一歩分の反力を測定し、分析する計測器としては優れているが、多数歩のデータを取得することは難しい。また、床反力計ではプレート自体の剛性による影響があるため、路面素材の差を考慮した実験が難しい。



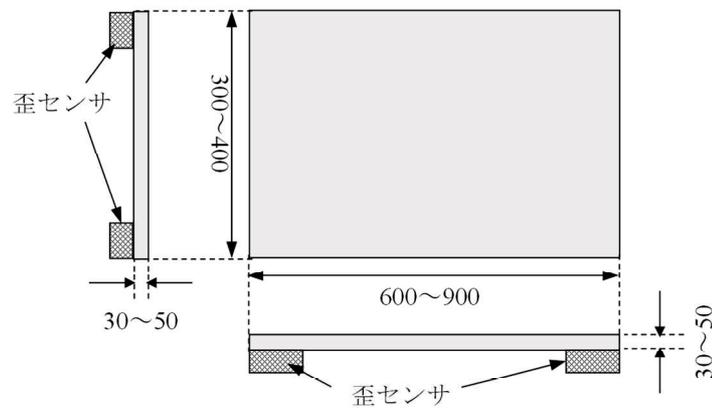
※床面への埋設型と可搬型がある.

床反力計 (フォースプレート)

- 床反力を4か所の歪センサで測定する.
- 床面へ埋設型と可搬型がある.
- フォースプレートに着地するように走行しなければならない.
- 走動作の着地～蹴り出し時の1歩分のみ測定.

【平面および断面図】

単位 (mm)



【フォースプレート 製品例】



フォースプレート TF-4060 (株式会社テック技販)

図 2.5 床反力計 (上下方向)

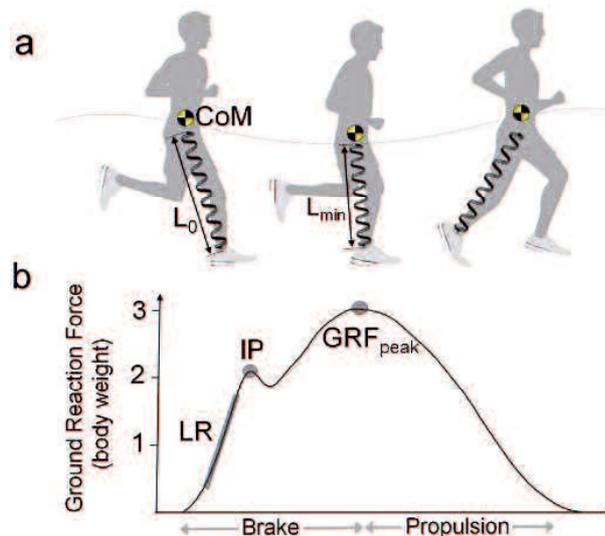


図 2.6 床反力計（上下方向）結果 9),16)-19)

(2) 測定場所によらない測定手法

測定位置を選ばない測定方法として、圧力計や加速度計を用いた研究が行われている。

圧力センサ内蔵のインナーソールを用いた研究については、床反力計と同じ測定間隔1000 Hzでのデータ抽出が難しく、現状のセンサ技術では十分な計測精度が得られていない²¹⁾。

加速度センサは、小型軽量化、ワイヤレス化が進んでおり、足に装着してもほとんど違和感・負担なく走行が可能である。さらに、最近のウェアラブル加速度センサの大きな進歩の一つは、3軸加速度、3軸ジャイロ、3地磁気のセンサを一体化した9軸モーションセンサの登場である^{22),23)}。従来の3軸加速度センサを用いた実験では、センサ姿勢の影響を考慮することが困難であったが^{24),25)}、9軸モーションセンサを導入することでセンサ姿勢を推定することができ、足と路面との力学的相互作用を、より詳細に分析できると期待される。とくに、運動中のセンサの姿勢によらない地上に固定された座標系（グローバル座標系）での加速度を取得できることは、路面と足との相互作用を分析する上で大きな利点となる。

2.3.3 ランナーの足に生じる着地衝撃の影響因子

ランナーの足に生じる着地衝撃に影響を及ぼす因子とその傾向について既往の研究成果をまとめると表 2.1 のとおりである。以下では、因子ごとに知見を概説する。

表 2.1 ランナーの足に生じる着地衝撃に影響する因子と影響結果

影響因子	結果
走行速度	走行速度の増大にともない、大きい。
着地方法	前足着地に比べて、かかと着地は大きい。
シューズのソール	軟らかいソールは、硬いソールに比べて、大きい。
走行距離	走行距離により疲労が蓄積すると、大きい。
ランニング経験年数	競技経験の年数が短いと、走行時間が長くなるにつれて、大きい。
舗装材料	舗装の変形係数が大きいと、大きい。

(1) 走行速度

阿江ら²⁶⁾は、床反力計を用いて、5種類の走行速度 (Slow ; 2.68 m/s, Medium-slow; 3.89 m/s, Medium; 6.52 m/s, Medium-fast; 7.84 m/s, Fast; 9.61 m/s) の地面反力を計測した。結果を図 2.7 に示す。上図は水平方向の結果を示し、下図は鉛直方向の結果を示している。縦軸は床反力計で得た荷重を被験者の体重で除した値であり、横軸は床反力計に足が接地した時刻を 0 s として、足が接地してから足が床反力計から離れた時間までと示している。実線で示した走行速度が高速の場合の波形を用いて説明すると、前後方向の負の値は前方から走者が受ける力であり、正の力は後方から走者が受ける力を示す。水平方向の時間と水平方向の地面反力の関係より、0 s~0.05 sの間は着地時を示しており、0.05 s以降は蹴り出し時を示している。水平方向の値は負を示していることから、着地時 (0 s~0.05 s) は前方からの水平方向の力を受けていることがわかる。0.05 s以降は正の値を示し、蹴り出し動作によって後方からの水平方向の力を受けていることがわかる。結果より、水平方向は速度の増大にともなって、着地時の前方からの力および、蹴り出し時の後方からの力も増大した。鉛直方向は着地時に生じる第一ピークの地面反力と蹴り出し時に生じる第二ピークの地面反力ともに、走速度の増大に伴って増大したと述べている。鉛直方向の第一ピークの地面反力について、低速走行時 (Slow ; 2.68 m/s) は $F/W=1.8$, 中速走行時 (Medium; 6.52 m/s) は $F/W=2.8$ であることから、着地時に体重の 2~3 倍の地面反力が生じている。

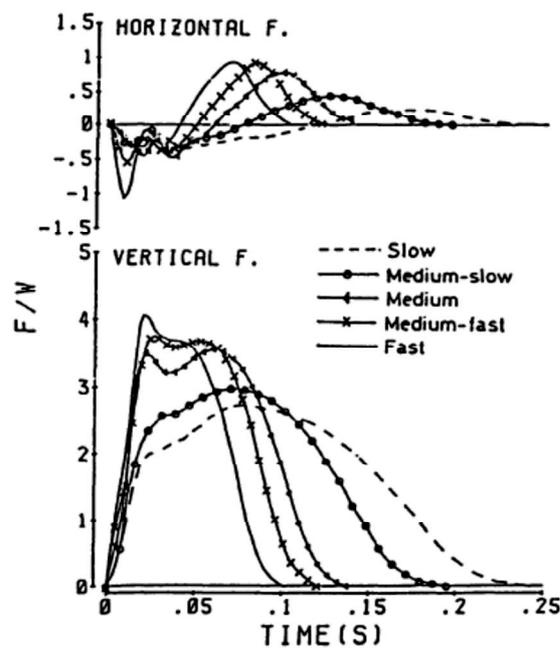


図 2.7 各種疾走速度での地面反力の変化²⁶⁾

Nigg et al.²⁷⁾ は、床反力計を用いて、4種類の走行速度（3～6 m/s）における鉛直方向の第一ピークの地面反力と、および鉛直方向の第一ピークまでの曲線勾配（LR : Loading Rate）を算出した。被験者1名（体重 73kg）の結果である。鉛直方向の第一ピークの地面反力は、低速走行時（3 m/s）は 1.33 kN、中速走行時（6 m/s）は 2.17 kN であった。被験者の体重 73 kg で除した値 F/W で示すと、低速走行時は 1.85、中速走行時は 3.03 であり、阿江らとほぼ同一の結果である。そして、鉛直方向の第一ピークまでの曲線勾配（Loading rate）は 3 m/s の時の 90.0 kN/m、6 m/s の時は 232.8 kN/s であった。よって、鉛直方向の地面反力は走行速度の増大に伴い、増大することを明らかにしている。以上より、着地衝撃は走行速度の増加によって増大し、走行速度が低速走行時（約 3 m/s）～中速走行時（約 6 m/s）、着地時の地面反力は体重の約 2 倍～3 倍であった。

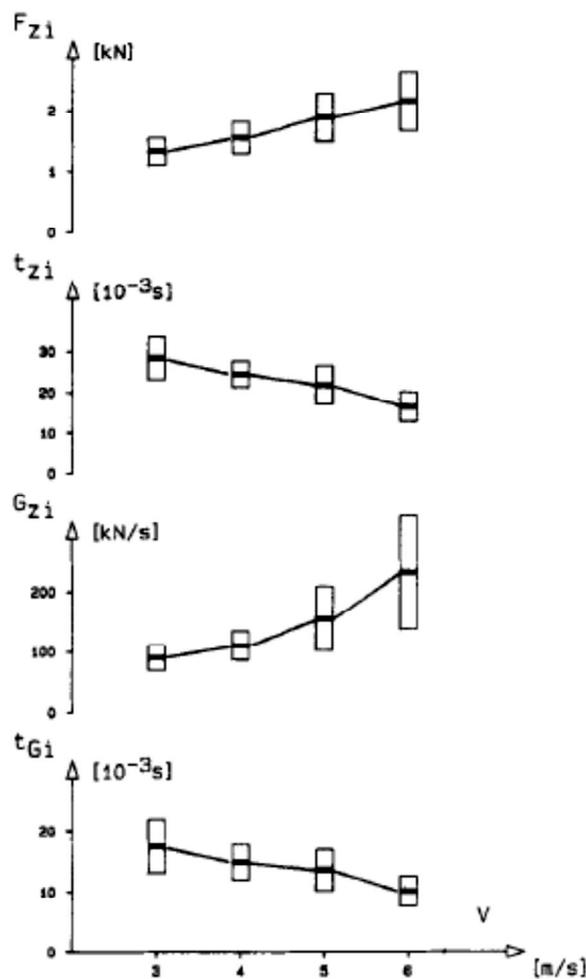


図 2.8 走行速度の影響²⁷⁾

鉛直方向における地面反力の第一ピーク F_{zi} 、第 1 ピークの地面反力の出現時間 t_{zi} 、鉛直方向の第一ピークまでの曲線勾配（Loading Rate） G_{zi} 、

(2) 着地方法（足の着き方）

ランナーの足の着き方（以下、着地動作）はかかと部での着地（かかと着地：Rearfoot Strike）と前足部着地（つま先着地：Forefoot Strike），そして、足裏の中央部で着地する方法（中央部着地：Midfoot Strike）がある。

Davis et al.²⁸⁾ は、鉛直方向の地面反力の第一ピークに着目して考察している。かかと着地とつま先着地の2種類における着地時の鉛直方向の地面反力を図 2.9 に示す。

着地衝撃の大きさを示す鉛直方向の地面反力の第一ピークについて、図 2.9a) に示すかかと着地の場合は見られるが、図 2.9b) に示すつま先着地の場合は見られない。この結果と同様の結果が Cavanagh et al.⁹⁾ の研究結果でも得られている。

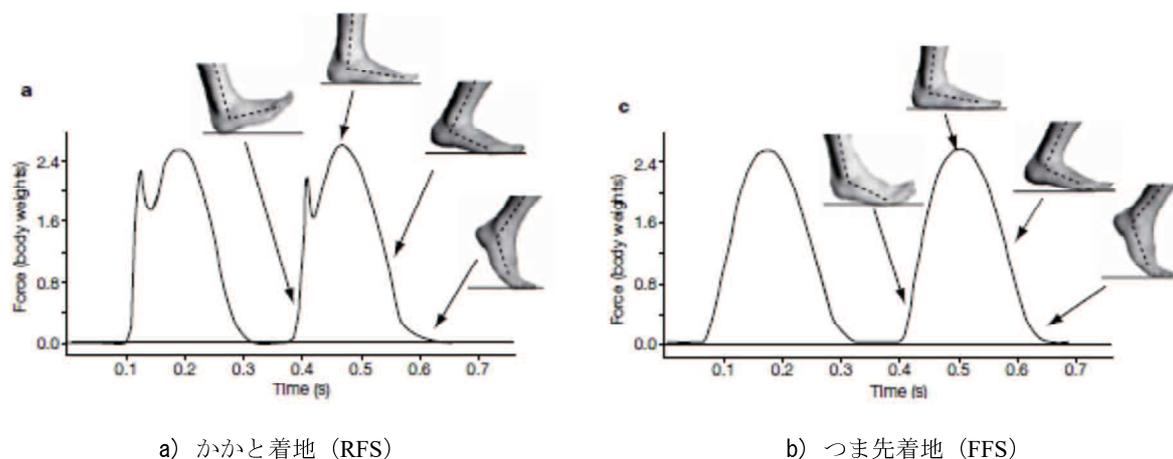


図 2.9 着地動作ごとの鉛直方向の地面反力²⁸⁾

土居ら³⁰⁾は加速度計を用いて着地時に生ずる加速度のピーク値を着地衝撃とし、結果を整理した。着地動作は、かかと着地と中央部着地の2種類であった。着地動作ごとの足首の衝撃加速度ピーク値と走行速度の関係を図 2.10 に示す。3 m/s の低速走行時は着地動作の違いによる足首衝撃加速度の大きさに差異が見られ、中央部着地の方がかかと着地より大きい値を示した。走行速度が増加するとともに2種類の着地動作に差異が見られなくなったと述べている。

以上より、着地動作によって着地衝撃は異なる結果であった。床反力計を用いた結果より、着地衝撃はつま先着地よりかかと着地の方が大きい。加速度計を用いた結果より、着地衝撃はかかと着地より中央部着地の方が大きい。

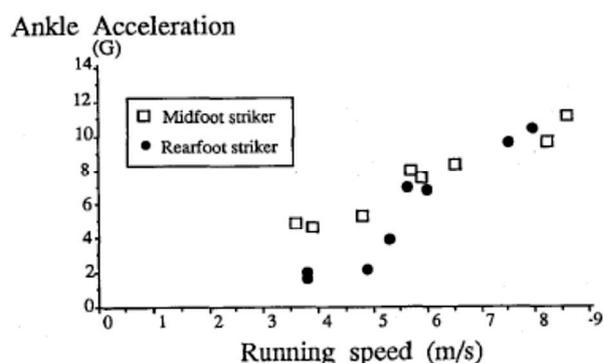


図 2.10 鉛直方向の足首衝撃加速度と走行速度の関係³⁰⁾

(3) シューズのソール

Kulmala et al.¹⁶⁾は、図 2.11 に示すように、硬いソールは軟らかいソールに比べて、鉛直方向の地面反力の第一ピークおよび第一ピークまでの曲線勾配 (Loading Rate) は小さいと述べている。Nigg et al.²⁷⁾は、図 2.12 に示すように、鉛直方向の第一ピークの地面反力および第一ピークまでの曲線勾配 (Loading rate) はシューズのミッドソールの硬度によらず、同程度の値であったと述べている。

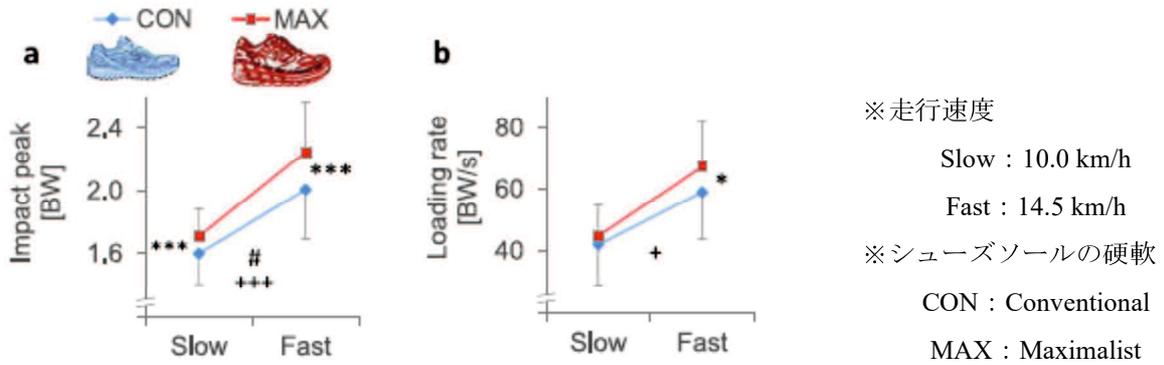
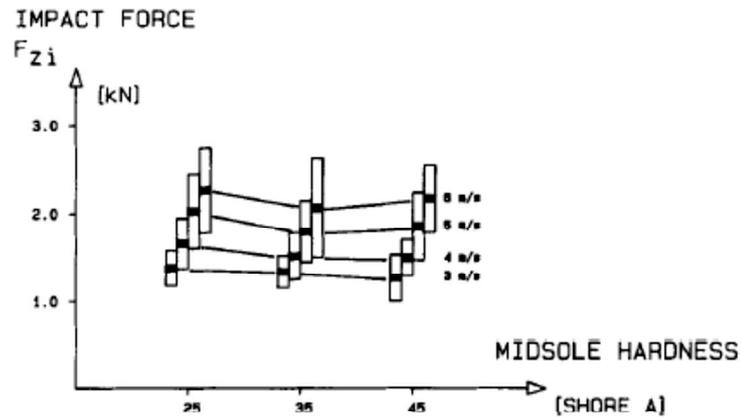
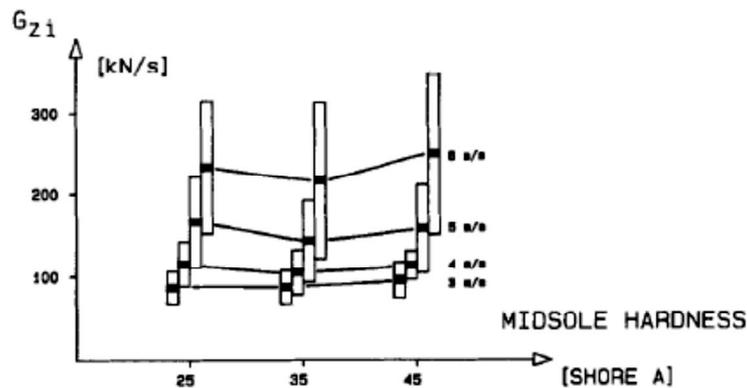


図 2.11 シューズソールの硬軟と(a)鉛直方向における地面反力の第一ピーク (Impact peak) および、(b)鉛直方向における地面反力の第一ピークまでの曲線勾配 (Loading rate) との関係¹⁶⁾



(a) 第一ピークの地面反力



(b) 鉛直方向の第一ピークまでの曲線勾配 (Loading rate)

図 2.12 シューズソール硬度と鉛直方向における地面反力の第一ピーク F_{zi} との関係²⁷⁾

猪俣ら³¹⁾は、シューズのミッドソールの硬軟による影響をシューズのミッドソールの変形量を測定した。シューズのミッドソールの条件や硬度を図 2.13 と図 2.14、表 2.2 に示す。シューズのミッドソールの変形量の測定結果を図 2.15 に示す。シューズのミッドソールの d_1 の変形量のみ、シューズのミッドソール硬度が大きくなると変形量が小さく、シューズのミッドソール硬度が小さいと変形量大きい。しかし、 d_2 や d_3 の位置の変形量に大きな差は見られなかったと述べている。

以上より、鉛直方向の地面反力の第一ピーク、すなわち着地衝撃は軟らかいソールより硬いソールの方が小さい。そしてシューズのミッドソールの硬軟による変形量の差異は足の中央部のみ差異が生じた。

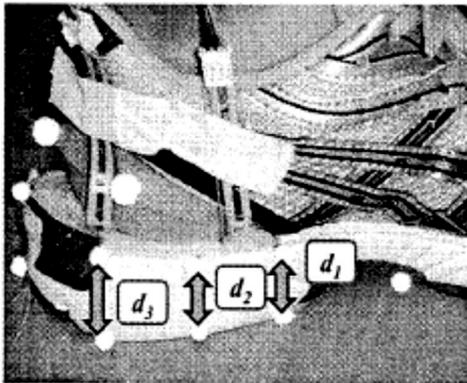


図 2.13 シューズ内側ソールの変形量の測定位置³¹⁾

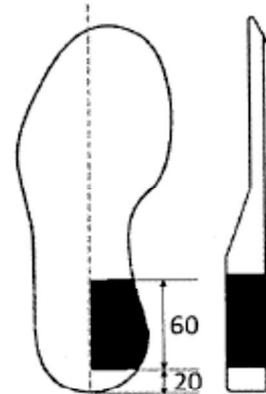


図 2.14 シューズソールの硬度を変化させた位置
(黒塗り部)³¹⁾

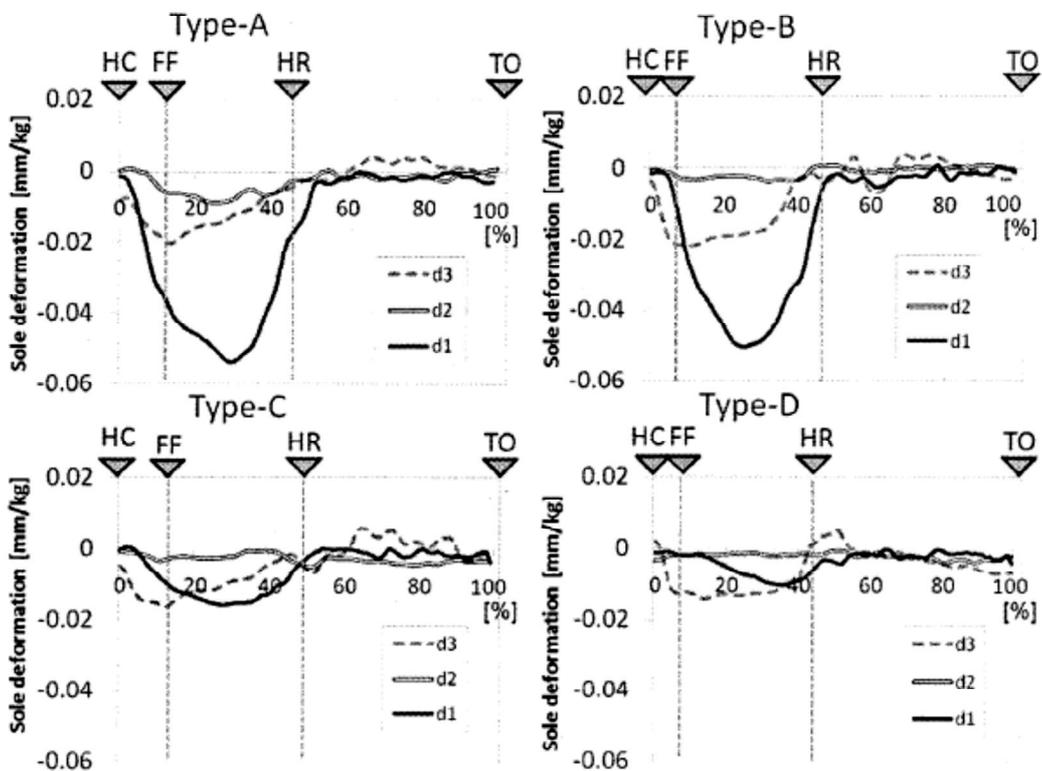


図 2.15 シューズ内側ソール硬度における足の接地期のシューズ内側ソールの変形量³¹⁾

(Type-A : シューズ硬度 40, Type-B : シューズ硬度 50, Type-C : シューズ硬度 60, Type-D : シューズ硬度 70)

(4) 走行距離, 経験年数

川上ら³²⁾は走行時間および経験年数による着地衝撃の大きさの差異を明らかにしている。ここでは、加速度計を用いて測定を行った結果を図 2.16 に示す。陸上競技部に所属する男子大学生ランナー14名（長距離専門, 競技歴 6.8 年）と一般の男子大学生 14 名（特別な運動習慣なし）に 60 分のランニングを行ってもらい、足裏に取り付けた圧力センサを用いて、ランナーの脚にかかる衝撃力の大きさを測定した。その結果、走り始めの衝撃の大きさは、双方ともに 4~6 G の範囲で大きな差はないが、30 分後には一般学生は約 7 G となり陸上部学生の約 1.5 倍となった。さらに 60 分後には約 9 G となり約 2 倍の差が生じた。陸上部学生は 60 分間ずっと 4~5 G を保ち、衝撃の大きさに変化は見られなかった。男子学生のような非鍛錬者は走り始めと比較して 10~35 % も大きくなるのが分かった。これは筋肉の疲労のため下肢の緩衝動作が不十分になったものと考えられる。

以上より、着地衝撃は走行時間および経験年数によって差異があることが明らかになった。普段運動を行っていない非鍛錬者は走行時間が長くなると、大きくなる。普段運動を行っている陸上競技部のランナーは 60 分間、一定の値であった。

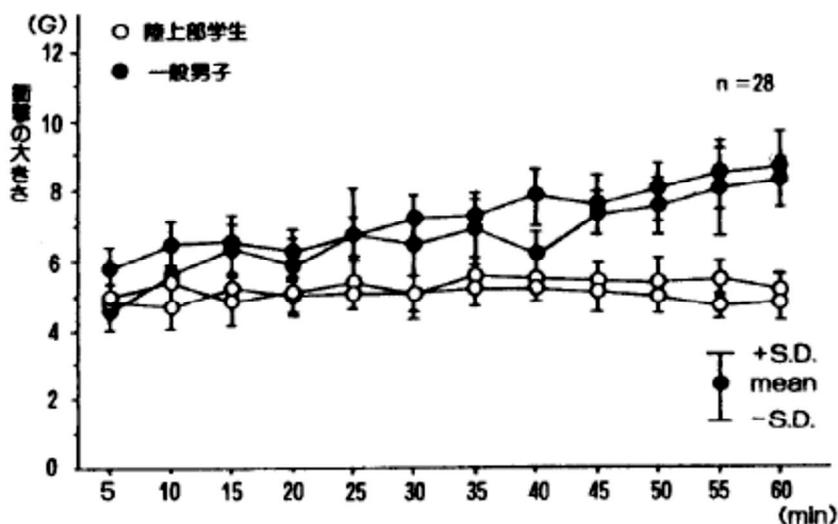


図 2.16 時間当たりの鉛直方向の衝撃の大きさの変化³²⁾

(5) 舗装材料

スポーツ医学・工学分野では、着地衝撃はアスファルト舗装といった「硬い」路面であると大きく^{33),34)}、芝生など「軟らかい」路面であると小さい^{35),36)}といわれており、舗装種類による着地衝撃の差異を検討する時にアスファルト舗装と芝生で測定を行っている研究が多い。ここで、舗装材料の「硬い」、「軟らかい」という用語について定義をする。ここで示した「硬い」、「軟らかい」という用語はスポーツ医学・工学分野では明確に定義されていない。本研究では「硬い」、「軟らかい」という用語は人が感じている硬軟（硬い、軟らかい）であると定義する。そして、ある外力に対する材料の変位、変形量の程度を表す弾性係数やスティフネス、レジリエントモデュラスなどの総称を「舗装材料の変形係数」と以下は記すこととする。

既往の研究で示されたアスファルト舗装と芝生の着地衝撃の計測結果を表 2.2 に示す。著者ごとに着地衝撃の大きさを把握する計測機器が異なる。Tillman et al.³⁷⁾ は床反力計を用いて計測を行っている。車谷

ら³⁸⁾は加速度計と筋電位センサ, Tessutti et al.³⁹⁾はインソール型の足圧計, Dolenc et al.⁴⁰⁾は筋電位センサで計測を行っている。筋電位センサで計測した体位を図 2.17 に示す。

表 2.2 に示した結果を順により, Tillman et al.の結果をみると, アスファルト舗装の方が芝生より小さい値である。車谷らの加速度計で計測した結果と, Tessutti et al.の足圧計で計測した値はアスファルト舗装の方が芝生より大きい値であり, 硬いと言われているアスファルト舗装が柔らかいと言われている芝生より着地衝撃が大きいことを明らかにしている。次に, 筋肉の活動量の結果において, 車谷らは人体の筋肉活動の大きさを計測しており, 芝生の方がアスファルト舗装より大きい値となる。これは芝生の方が着地時の地面の変形量が大きいいため, 足元の安定を保つために筋肉の活動が活発になるからである。一方で, Dolenc et al.の結果は車谷らと同様の手法により筋肉の活動量を求めた結果はアスファルト舗装の方が芝生より大きい値を示し, 車谷らと逆の傾向を示している。

以上より, 着地衝撃は舗装種類によって差異がある。しかし, ランナーの着地衝撃が柔らかい路面より硬い路面の方が小さい値を示す研究も見られ, 床反力計では硬い路面は着地衝撃が大きいという結果とは相反する結果が見られた。研究者ごとに測定方法や測定位置が異なるため, ランナーの着地衝撃の測定方法や測定位置, 評価指標を明確にしておく必要がある。その後, 舗装材料による着地衝撃の測定値の差異について議論するべきであると考え, これらは本研究が取り組む課題の一つとした。

表2.2 舗装種類ごとの着地衝撃の大きさの計測結果³⁷⁻⁴⁰⁾

著者	計測機器	評価指標		計測位置	舗装材料	
		—	単位		アスファルト	芝生
Tillman et al. (2002)	床反力計	鉛直方向の地面反力の第一ピーク値 Impact Peak ^{※1}	[BW]	—	0.75	0.82
車谷ら (2007)	加速度計	加速度のピーク値	[G]	前下腿部	11.2	7.8
	筋電位 センサ	筋活動量 ^{※2}	[%MVC/G]	ぜんけいこつきん 前脛骨筋	0.3	0.5
		筋活動量 ^{※2}	[%MVC/G]	ひふくきん 腓腹筋	1.6	2.8
Tessutti et al. (2012)	足圧計	足圧のピーク値	[kPa]	踵	347.7	299.5
Dolenc et al. (2015)	筋電位 センサ	筋活動量 ^{※2}	[%MVC/G]	ぜんけいこつきん 前脛骨筋	0.276	0.222

※1 着地衝撃 Impact Peak[BW] : 鉛直方向の床反力を測定者の体重[N]で除した値

※2 筋活動量[%MVC / G] : 走行周期の筋活動量[%MVC]を加速度のピーク値[G]で除した値

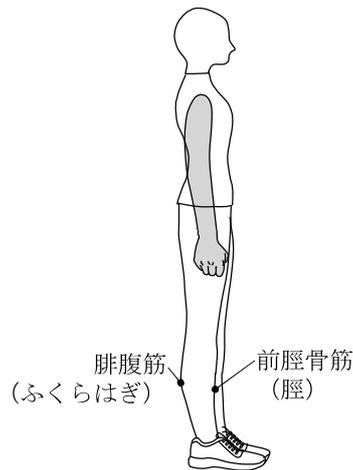


図 2.17 筋電位センサ計測位置¹⁰⁾

2.3.4 ランナーの足に生じる着地衝撃に関する研究のまとめ

以上より、スポーツ医学やスポーツ工学の分野では、ランナーへ着地衝撃が及ぼす影響の因子に関する研究は、ランナーの走行速度や着地方法といった走動作や走行時間による影響は明らかにされている。舗装による影響に関して、ランナーが舗装から受ける着地衝撃の大きさは、体重の約3倍の大きさであること、足裏から踵、踝、膝、腰へと順番に伝達することが明らかにされている。これらは床反力計を用いた研究の結果であり、走動作時のある一歩分の結果である。そのため、近年、測定装置によって走動作が不自然な動きとならないようなワイヤレスなウェアラブル機器を用いた検討が始められている。そのため、実際の道路の舗装で走行し、ランナーの着地衝撃の大きさを計測する研究が行われている。しかし、足圧や加速度や筋電位といった測定機器が多種にわたり、同一の測定機器であっても研究者によっては、同一の舗装材料の種類において、大小関係が異なる結果であるなど、結果的に、舗装材料による影響が明確になっていない。

したがって、ランナーが路面から受ける着地衝撃の大きさを舗装種類ごとに計測するウェアラブル機器を用いた測定方法と評価指標を明確にする必要がある。そのため、本研究では加速度計の一種である9軸モーションセンサを用いて、計測方法と評価手法を明らかにし、ランナーが種類の異なる舗装を走行した場合における走動作分析への適用性を実験的に検証する。

2.4 舗装に対するランナーの感触および足に生じる着地衝撃に関する課題

舗装と着地衝撃の観点から既往の研究より、以下の課題を明らかにした。

- 1) ランナーが快適に走行できる環境を舗装という観点から考えるとき、ランナーが走行している舗装に対して感じた知見は少なく、アスファルト舗装に対して感じる着地衝撃の差異も明らかになっていない。
- 2) ランナーが快適に走行する舗装を考える際、ランナーが舗装に対して感じる着地衝撃の大きさに影響する舗装の性質が明らかになっていない。

- 3) ランナーの足に舗装から受ける着地衝撃の大きさを、実際の舗装で走行している動作時のランナーの足に生じる着地衝撃を測定する方法を明確にする必要がある。

本研究では、ランナーが快適に走行できる環境、すなわち、着地衝撃を小さいと感じるアスファルト舗装で走行できる環境を構築するために、ランナーの着地衝撃の感触を舗装という観点から研究を行う。そして、ランナーが舗装に対して感じる着地衝撃の大きさに影響する舗装の性質を明らかにすることを目的とし、その過程において、ランナーの足に生じる着地衝撃の大きさを測定する手法を提案することを目的としている。この目的に対し、まず、舗装の種別に対するランナーの感触を調べるために走行実験・アンケート調査を実施する。次に、ランナーの足に生じる着地衝撃の大きさについては、ワイヤレス9軸加速度計を用いた計測方法を提案し、屋内・野外走行実験を行って舗装種別と着地衝撃加速度との関係を検討した。また、舗装の表面粗さの影響については、圧縮変形特性と摩擦特性を明らかにするための室内実験を実施する。最後に、室内実験で得られた舗装表面の変形特性・摩擦特性とランナーが走行時に感じる感触との関係を明らかにするため、走行実験・アンケート調査を再度実施し、これらの成果を踏まえて、ランナーが感じている着地衝撃に寄与する舗装の性質を明らかにする。

2.5 本研究で用いた舗装種類

道路面に施す舗装は、車両や歩行者など道路の利用者が快適かつ安全に通行できるようにするための一つの手段である。舗装の表層で用いられる材料は、石や砂をアスファルトおよびセメント、樹脂などで固めたアスファルト混合物やセメント系コンクリート、石やコンクリートブロックなど、用いる材料も形状も異なり、多種多様である。

アスファルト混合物は多種にわたり、骨材と砂、アスファルト、フィラーという材料の混合比率を変化させることで混合物の機能を変化させている。例えば、車道や歩道に多く施工されている密粒度アスファルト混合物は、道路面が緻密で水を下層に透水しない。この密粒度アスファルト混合物と同一の材料を用い、各材料の混合比率を変化させることによって、下層に透水するポーラスアスファルト混合物を作製することができる。これは、各材料の混合比率を変化させることによって、道路面の表面粗さが変化することを意味している。本研究では、アスファルト混合物を締め固めた供試体をアスファルト舗装と称す。

ここで、本研究で用いたアスファルト混合物の一覧を表 2.3 に、アスファルト混合物の各種の合成粒度曲線を図 2.18 に示す。本研究で用いたアスファルト混合物の種類は、車道部および歩道部の表層で用いられている6種類とした。アスファルト混合物は2.36 mm以上の骨材を粗骨材、2.36 mm以下の骨材を細骨材と称す。図 2.18 に示す合成粒度曲線において、ふるいの呼び寸法が2.36 mmの時の通過質量百分率を種類ごとに比較すると、細密粒度ギャップアスファルト混合物⁴⁾(以下、細密(13))は6種類の中で最も大きく、ポーラスアスファルト混合物(13)(以下、ポーラス(13))は6種類の中で最も小さい。2.36 mmの時の通過質量百分率は細密(13)、密粒度アスファルト混合物(以下、密粒(13))、砕石マスチックアスファルト混合物(5)(以下、SMA(5))、ポーラスアスファルト混合物(5)(以下、ポーラス(5))、開粒度アスファルト混合物(13)(以下、開粒(13))、ポーラス(13)の順で小さい。次に、粒度曲線をみると、密粒(13)とSMA(5)は最大粒径が異なるが、2.36 mm以下の合成粒度はほぼ同値である。ポーラス(5)はSMA(5)と最大粒径は同じであるが、2.36 mm以下の合成粒度が粗い。開粒(13)はポーラス(5)と最大粒径は異なるが2.36 mm以下の合成粒度は同値である。そして、ポーラス(13)より粒度が細かい。以上、合成粒度の異なる6種

類のアスファルト混合物を対象とした。本研究で用いた舗装供試体の表面の写真を写真 2.1 に示した。すべて道路および陸上競技場で用いられている舗装を対象とした。

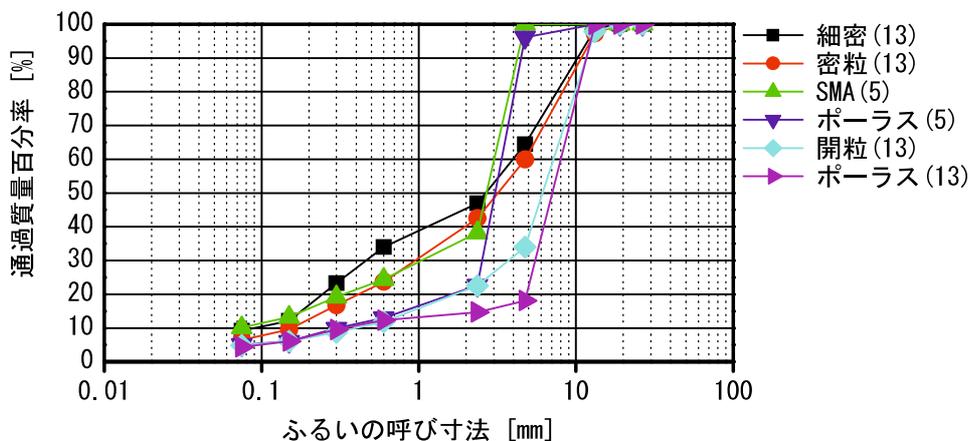


図 2.18 合成粒度 (アスファルト混合物)

透水性レジンモルタルシステム工法 (以下, 弾性舗装) は廃タイヤをチップ化し, その表面を無機粉体と樹脂で特殊コーティングした骨材⁴²⁾ (以下, 弾性骨材) とウレタン樹脂を混合したレジンモルタルを, 開粒(13)の空隙に摺り込んだ舗装である。ポーラス(13)や開粒(13)といった排水性舗装の骨材飛散の抑制や, すべり抵抗性の向上, 騒音低減効果, 凍結抑制効果があり, 車道部で用いられている。

セメント・コンクリート舗装 (以下, コンクリート舗装) の供試体はコンクリート舗装の示方配合⁴³⁾を参考に, ほうき目仕上げとし, 室内で作製した。

陸上ウレタン舗装は, 陸上競技場で使用されている全天候型舗装のポリウレタン系材料を用いた舗装である。陸上競技場によって, 走路の表面粗さが異なり, この差異は施工方法によって生み出される。本研究では, スプレーで仕上げた陸上スプレー舗装と手押しハンドローラーで仕上げた陸上ローラー舗装の2種類とした。

以上の舗装種類の他に, 第4章で述べるランナーの着地衝撃の屋外実験で芝生やウッドチップや土, インターロッキングブロックを対象として検討を行った。

表 2.3 本研究で用いた舗装種類

略称	混合物名称	材料	
細密(13)	細密粒度ギャップアスファルト混合物 ⁴⁾	アスファルト	ポリマー改質アスファルトII型
再生密粒(13)	再生密粒度アスファルト混合物(13)	アスファルト	ストレートアスファルト 60/80
密粒(13)	密粒度アスファルト混合物(13)	アスファルト	ストレートアスファルト 60/80
SMA(5)	砕石マスチックアスファルト混合物(5)	アスファルト	ポリマー改質アスファルトII型
ポーラス(5)	小粒径ポーラスアスファルト混合物(5)	アスファルト	ポリマー改質アスファルトH型 ポリマー改質アスファルトII型
ポーラス(5)	小粒径ポーラスアスファルト混合物(5)	アスファルト	ポリマー改質アスファルトII型,
開粒(13)	開粒度アスファルト混合物(13)	アスファルト	ポリマー改質アスファルトII型
ポーラス(13)	ポーラスアスファルト混合物(13)	アスファルト	ポリマー改質アスファルトH型
弾性 (多)	【母体】開粒度アスファルト混合物(13)	アスファルト, ウレタン樹脂	
弾性 (少)	【母体】開粒度アスファルト混合物(13)	アスファルト, ウレタン樹脂	
コンクリート	コンクリート舗装(20)	コンクリート	
陸上スプレー	全天候型ウレタン舗装	ウレタン	
陸上ローラー	全天候型ウレタン舗装	ウレタン	
芝生		芝	
グラウンド		土	
ウッドチップ		木	
ILB	インターロッキングブロック舗装	コンクリート	
As	密粒度アスファルト混合物(13)	アスファルト	

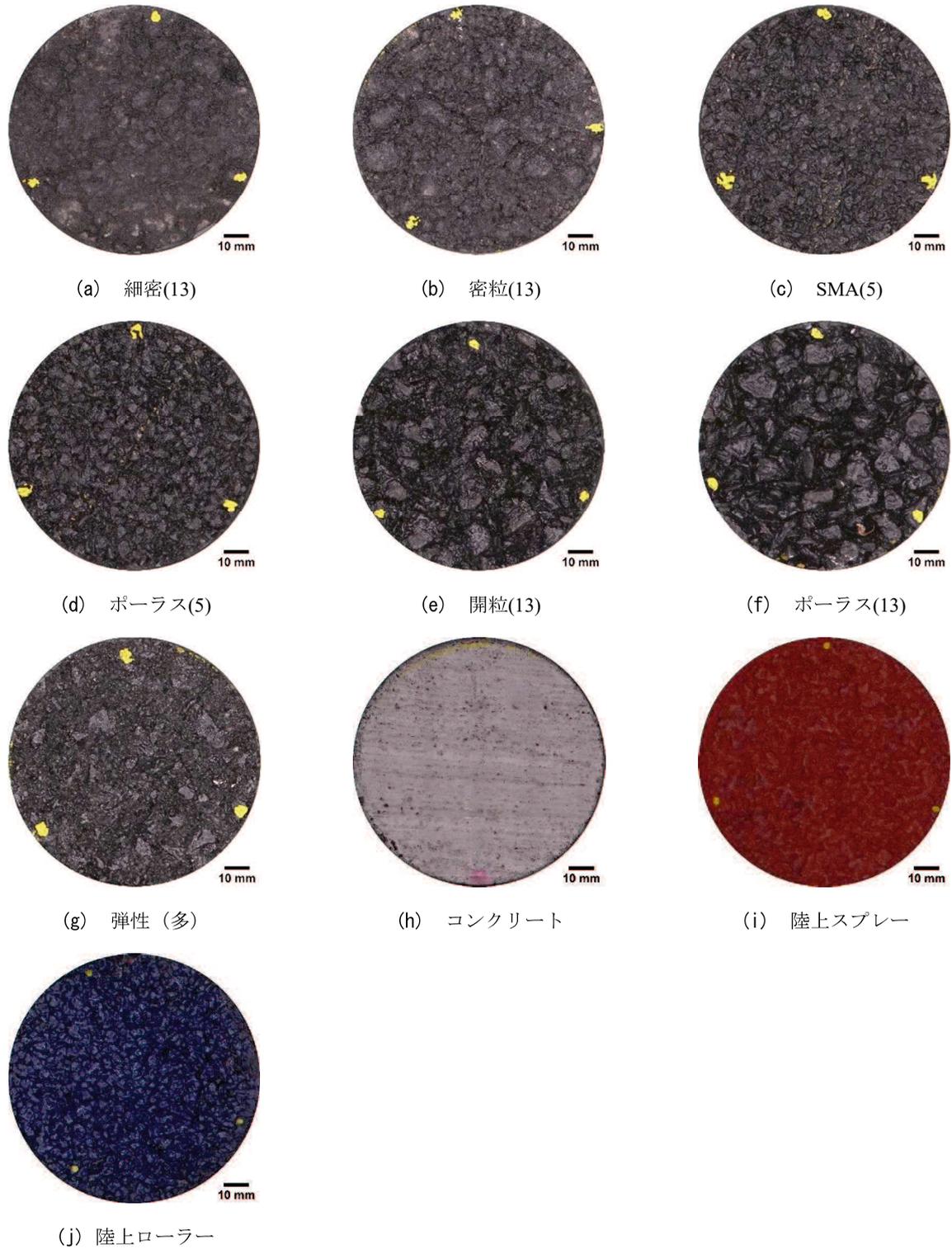


写真 2.1 本研究で用いる舗装供試体の表面

【第2章の参考文献】

- 1) 羽根義：快適性の概念とその側面，人間工学，Vol.29，pp.49-57，1993.
- 2) 長友宗重：人間の側からみた快適性とは，日本音響学会誌，Vol.50，pp.480-484，1994.
- 3) 鈴木浩明：乗り物の快適性評価に影響する諸要因，心理学評論，Vol.42，pp.63-85，1999.
- 4) 黒岩拓馬，川上篤史，峰岸順一，増山幸衛，前川亮太：中長距離走に適した舗装の評価方法に関する研究，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.69，No.3，I_185-I_190，2013.
- 5) 公益財団法人日本陸上競技連盟：陸上競技ルールブック 2020 年度版，株式会社ベースボール・マガジン社，2020.
- 6) 国土交通省道路局：道路統計年報（令和元年度），2020.
- 7) 下永田修二，小宮山伴与志，宮内寿，辻義光，中島観司，岡本真一，島田修：人工芝グラウンドの下地に用いる透水性保水型舗装の衝撃緩衝能について，日本機械学会ジョイントシンポジウム講演論文集，pp.325-329，2006.
- 8) 金子公宥，福永哲夫：バイオメカニクス—身体運動の科学的基礎—，杏林書院，2011.
- 9) Cavanagh, P. R. and Lafortune, M. A.: Ground reaction forces in distance running, *Journal of Biomechanics*, Vol. 13, No. 5, pp. 397-406, 1980.
- 10) 山下文治，山際哲夫：衝撃と下肢関節の障害，バイオメカニズム学会誌，Vol.14，No.2，pp.100-106，1990.
- 11) 田川善彦，松尾重明，山本耕之，宮崎憲一郎，志波直人，井上明生：足接地時における人体への衝撃力—実験とモデル解析によるアプローチ—，バイオメカニズム，Vol.13，pp.113-124，1996.
- 12) 野口蒸治：大衆ランナーのランニング障害—佐伯番匠健康マラソン大会における4年間のアンケート調査の集計—，日本臨床スポーツ医学会誌，Vol.8，No.1，pp.92-94，2000.
- 13) 村上秀孝，野口蒸治，宮本義明：一般市民ランナーにおける下肢のランニング障害—佐伯番匠健康マラソン大会におけるアンケート調査より—，整形外科と災害外科，Vol.46，No.4，pp.1214-1216，1997.
- 14) 岡戸敦男，金村朋直，小林寛和，熊澤雅樹，横江清司：一般市民ランナーを対象としたランニング障害に関する実態調査，スポーツ医・科学，Vol.25，pp.5-7，2014.
- 15) 樽本つぐみ，梶原洋子，木村一彦，小野伸一郎：一般市民男子ランナーにおける障害の実態：第10回加古川ハーフマラソン大会の実態調査から，日本体育学会大会号，Vol.50，p.398，1999.
- 16) Kulmala, J. P., Kospnen, J., Nurminen, J. and Avela, J.: Running in highly cushioned shoes increases leg stiffness and amplifies impact loading, *Scientific Reports*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-7, 2018.
- 17) Blickhan, R.: The spring-mass model for running and hopping, *Journal of Biomechanics*, Vol. 22, No. 11/12, pp. 1217-1227, 1989.
- 18) McMahon, T. A. and Cheng, G. C.: The mechanics of running: how does stiffness couple with speed?, *Journal of Biomechanics*, Vol. 23, No. 1, pp. 65-78, 1990.
- 19) Farley, C. T. and Gonzalez, O.: Leg stiffness and stride frequency in human running, *Journal of Biomechanics*, Vol. 29, No. 2, pp. 181-186, 1996.
- 20) 辻内伸好，伊藤彰人：特集③；人間工学のための計測手法，人間工学，Vo.50，No.5，2014.
- 21) Nagahara, R. and Morin, J. B.: Sensor insole for measuring temporal variables and vertical force during sprinting, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, Vol. 232, No. 4, pp. 369-374, 2018.
- 22) 沢口義人，鬼塚信弘：舗装評価のためのセンサ融合型歩行動作解析システムの開発，第60回自動制御

連合講演会, SaD1-4, 2017.

- 23) Anwary, A. R., Yu, H. and Vassallo, M.: An automatic gait feature extraction method for identifying gait asymmetry using wearable sensors, *Sensors*, Vol. 18, No. 2, 2018.
- 24) Sheerin, K. R., Reid, D. and Besier, T. F.: The measurement of tibial acceleration in runners - A review of the factors that can affect tibial acceleration during running and evidence-based guidelines for its use, *Gait & Posture*, Vol. 67, pp. 12-24, 2019.
- 25) Mitschke, C., Kiesewetter, P. and Milani, T. L.: The effect of the accelerometer operating range on biomechanical parameters: stride length, velocity, and peak tibial acceleration during running, *Sensors*, Vol. 18, No. 1, pp. 36-41, 2018.
- 26) 阿江通良, 横井孝志, 宮下憲, 大木昭一郎, 渋川侃二, 橋原孝博: 疾走中の地面反力の変化—疾走速度の増大による影響, 第35回日本体育学会大会号, p. 381, 1984.
- 27) Nigg, B. M., Bahlsten, H. A., Luethi, S. M. and Stokes, S.: The influence of running velocity and midsole hardness on external impact forces in heel-toe running, *Journal of Biomechanics*, Vol. 20, No. 10, pp. 951-959, 1987.
- 28) Davis, I. S., Rice, H. M. and Wearing, S. C.: Why forefoot striking in minimal shoes might positively change the course of running injuries, *Journal of Sport and Health Science*, Vol.6, No.2, pp.154-161, 2017.
- 29) Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werblw, W. A., Daoud, A. I., D'Andrea, S., Davis, I.S., Mang'Eni, R. O. and Pitsiladis, Y.: Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners, *Nature*, Vol.463, No.28, pp.531-536, 2010.
- 30) 土居陽治郎, 小林一敏, 宮地力, 牛山幸彦: 長距離走における着地動作に関する研究, 筑波大学体育科学系紀要, Vol.12, pp.261-268, 1989.
- 31) 猪股貴志, 林豊彦, 中村康雄, 牛山幸彦: ランニング中の足部運動・足底圧力・ソール圧縮変形の同時計測と官能検査によるソール構造の評価, 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム・シンポジウムヒューマン・ダイナミクス講演論文集, Vol.2008, pp.144-151, 2008.
- 32) 川上正人, 横田幸訓: ランニングシューズにおける障害, および選択, 使用における一考察, 湘南短期大学紀要, Vol.16, pp.115-118, 1998.
- 33) 鳥居俊: ランニング障害—総括—, 臨床スポーツ医学, Vol.34, No.7, pp.640-644, 2017.
- 34) 横江清司: バイオメカニクスからみたランニング損傷の予防, 臨床スポーツ医学, Vol.18, No.1, pp.7-12, 2001.
- 35) Nigg, B. M.: Biomechanics of running shoes, 79, *Human Kinetics Publishers, Inc.*, Champaign, 1986.
- 36) McMahon, T. A. and Greene, P. R.: The influence of track compliance on running, *Journal of Biomechanics*, Vol. 12, No. 12, pp. 893-904, 1979.
- 37) Tillman, M. D., Fiolkowski, P., Bauer, J. A., Reisinger, K. D.: In-Shoe plantar measurements during running on different surfaces: changes in temporal and kinetic parameters, *Sports Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 121-128, 2002.
- 38) 車谷洋, 村上恒二, 佐々木英夫, 大和弘治, 三宅勝次: 路面状態の違いが下腿筋活動へ与える影響, 日本臨床スポーツ医学会誌, Vol. 15, No. 1, pp. 96-101, 2007.
- 39) Tessutti, V., Ribeiro, A.P., Trombini-Souza, F., Sacco, I. C. N.: Attenuation of foot pressure during running on four different surfaces: asphalt, concrete, rubber, and natural grass, *Journal of Sports Sciences*, Vol. 30, No. 14, pp. 1545-1550, 2012.

- 40) Dolenc, A., Stirn, L., Strojnik, V.: Activation Pattern of Lower Leg Muscles in Running on Asphalt, Gravel and Grass, *Collegium antropologicum*, Vol. 39, No. 1, pp. 167-172, 2015.
- 41) 国土交通省北海道開発局, 平成 29 年度北海道開発局道路設計要領 第 1 集 道路 第 5 章 舗装 1, pp.1.5.21-1.5.22, 2017.
- 42) 透水性レジンモルタルシステム工法協議会 : PRMS 多機能工法 技術資料【第 1 版】 , 2012.
- 43) 公益社団法人 日本道路協会 : コンクリート舗装ガイドブック 2010, 2016.

第3章 舗装に対するランナーの着地衝撃の感触に関する調査

3.1 概説

本章は、ランナーが舗装に接地したときに感じる着地衝撃の大きさを調査することを目的として、屋外走行試験を実施する。走行試験後のアンケート調査から、舗装に対するランナーの着地衝撃の感触を明らかにし、ランナーの着地衝撃の感触に影響する、舗装の性質について検討する。

3.2 走行試験場の舗装に関する調査

3.2.1 走行試験場の概要

走行試験場の平面図を図3.1に示す。走行試験場は、幅員7m、延長55mである。全長55mのうち、走行開始位置から30m地点までを計測本区間とし、走行開始位置から30m地点から55m地点は惰行・制動区間とした。アスファルト舗装の表層の施工厚さは50mmとし、下層は既設路盤という断面構成であった。走行試験場の外観を写真3.1に示す。

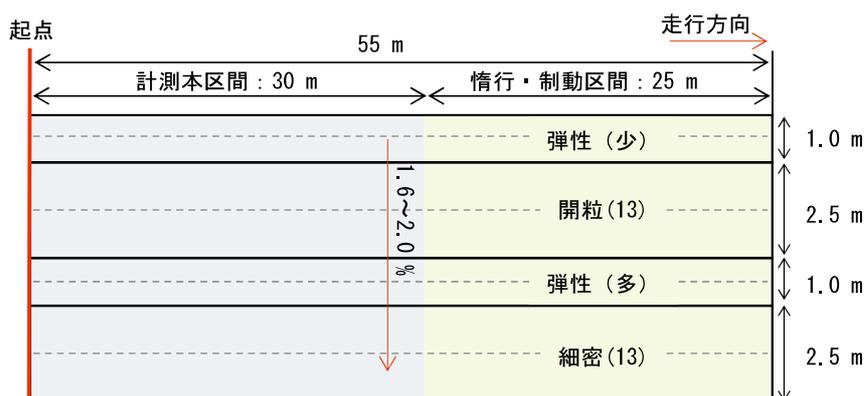


図3.1 走行試験場の平面図



写真3.1 走行試験場

図 3.2 に走行試験場の走行方向の路面プロファイルを示す。この路面プロファイルはマルチロードプロファイラ（以下、MRP）を用いて走行方向におよそ 0.3 mm 間隔で測定した結果に 250 mm の移動平均フィルタをかけた値である。測定した結果、4 種類の舗装ともに縦断勾配は約 0.3% であった。横断勾配はオートレベルを用いて測定し、約 1.6 ~ 2.0% の片勾配であり、一般道路と同等以下である。

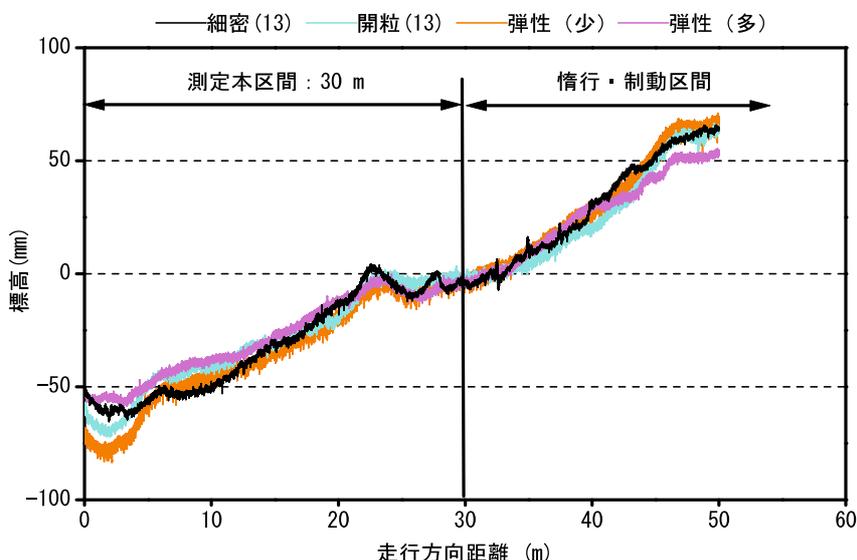


図 3.2 走行試験場の路面縦断プロファイル

3.2.2 走行試験場の舗装の物理特性

走行試験場の舗装種類を表 3.1 に示す。細密(13)、開粒(13)、開粒(13)の空隙にレジンモルタルを擦りこんだ弾性舗装の 2 種類、計 4 種類とした。

(1) アスファルト舗装の物理特性

走行試験場で使用した細密(13)と開粒(13)の材料仕様を表 3.2 に示した。表 3.2 に記した骨材配合割合と合成粒度を図 3.3 と図 3.4 に示す。図 3.3 に示す骨材配合割合について、ここで記す 6 号砕石とは 13.2 mm のふるい目を通過し、4.75 mm のふるい目にとどまった骨材のことであり、7 号砕石とは 4.75 mm のふるい目を通過し、2.36 mm のふるい目にとどまった骨材である。6 号砕石および 7 号砕石など 2.36 mm 以上の粒径の骨材を粗骨材と称し、粗目砂や細目砂など 2.36 mm 以下の骨材を細骨材と称す。細密(13)と開粒(13)の骨材配合割合の大きな違いは、粗骨材の割合である。細密(13)は 55% に対して、開粒(13)は 70% を占めている。この骨材配合割合に基づき、合成した粒度が図 3.4 である。細密(13)と開粒(13)の合成粒度をみると、開粒(13)はふるいの呼び寸法 13 mm 以下全ての寸法において、通過質量百分率が細密(13)に比べて小さい値である。すなわち、開粒(13)は細密(13)に比べて粒度が粗いことを示している。

表 3.1 走行試験場の舗装種類

略称	混合物名称	骨材等の結合材料
細密(13)	細密粒度ギャップアスファルト混合物	ポリマー改質アスファルトII型
開粒(13)	開粒度アスファルト混合物(13)	ポリマー改質アスファルトII型
弾性(少)		ウレタン樹脂
弾性(多)		ウレタン樹脂

※混合物の()内の数字は、骨材の最大粒径を示す。

表 3.2 走行試験場で使用した 2 種類のアスファルト混合物の材料仕様

混合物種類		細密(13)	開粒(13)
配合割合 (%)	6号砕石	39.4	69.7
	7号砕石	17.1	8.3
	粗目砂	8.2	17.0
	細目砂	24.8	—
	石粉	10.5	5.0
	アスファルト	5.8	4.5
合成粒度 (%)	19.0 mm	100.0	100.0
	13.2 mm	98.5	97.8
	4.75 mm	64.4	34.0
	2.36 mm	46.9	22.5
	0.60 mm	34.0	11.8
	0.30 mm	23.3	8.7
	0.15 mm	12.1	6.1
	0.075 mm	9.2	4.8
密度 (g/cm ³)		2.373	2.053
空隙率 (%)		3.3	17.8

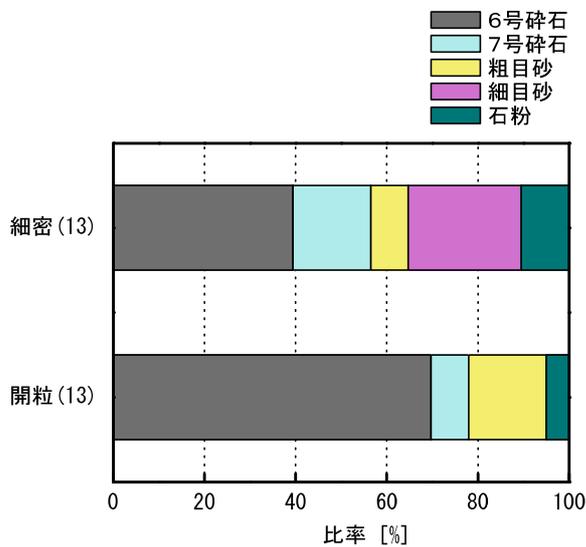


図 3.3 走行試験場のアスファルト混合物の配合割合

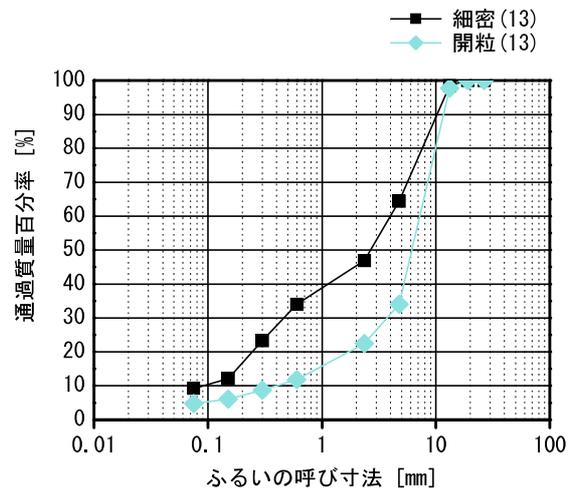


図 3.4 走行試験場のアスファルト混合物の合成粒度

(2) 弾性舗装の物理特性

弾性舗装は開粒(13)の空隙にレジンモルタルを摺り込んだ舗装である。レジンモルタルとは、廃タイヤをチップ化し、その表面を無機粉体と樹脂で特殊コーティングした骨材（以下、弾性骨材）とウレタン樹脂を混合したものである。弾性骨材の粒度を図 3.5 に示し、弾性舗装の使用材料および数量を表 3.3 に示す。図 3.5 に示すとおり、弾性骨材は約 1~2 mm の粒径が占めている。開粒(13)の舗装表面にプライマを塗布したのち、レジンモルタルを表 3.3 に示す割合で混合し、所定の敷き均し量を敷き均し、転圧した。レジンモルタルのウレタン樹脂の配合比率は、弾性骨材の外割 16 %とした。レジンモルタルの敷き均し量は 0.84 kg/m^2 （以下、弾性（少））と、 1.69 kg/m^2 （以下、弾性（多））とした。本研究では、この弾性舗装は、開粒(13)の表面に弾力性を有するレジンモルタルを敷き均すためアスファルト舗装の 2 種類に比べて、ランナーは着地衝撃を小さく感じることを想定した。加えて、レジンモルタルの敷き均し量の違いによって、ランナーは着地衝撃に違いを感じることを想定した。

表 3.3 弾性舗装の使用材料および単位面積当たりの数量²⁾

使用材料	製品名	数量
プライマ	プライマ U-007NA	0.2 kg/m^2
レジンモルタル	—	0.84 kg/m^2 および, 1.69 kg/m^2
	弾性骨材 (TC-55B)	86.2 %
	ウレタン樹脂 (主剤)	9.2 %
	ウレタン樹脂 (硬化剤)	4.6 %

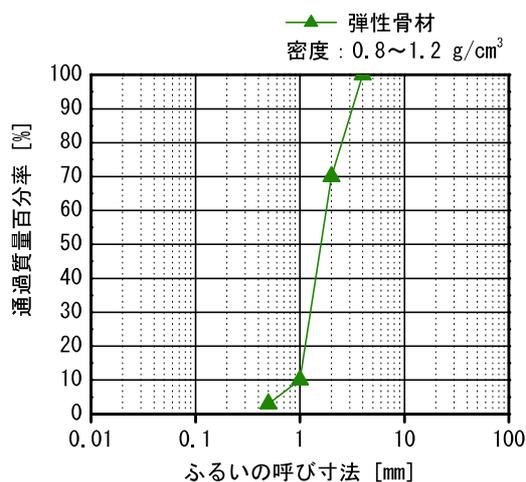


図 3.5 弾性舗装に用いられている弾性骨材の粒度

(3) 走行試験場の舗装の表面粗さ

4種類の舗装の近接写真と表面粗さを表3.4に示す。表に示した表面粗さは、MRPを用いて走行方向に測定した15m~15.1mの0.1m間での結果に対してISO 13473-2:2002およびASTM E1845-09に準拠した勾配補正⁴⁾を行った結果である。縦軸に標高を示している。ここで舗装の表面粗さの概念図を図3.6に示す。本研究において舗装の表面粗さとは、図3.6に示すように、高さや深さ、間隔の異なる山部と谷部が連続する形状をなしている。この山部と谷部が現れる起伏形状のことを表面粗さと称す。そして、表面粗さの高さを標高、表面粗さのある区間における山部の頂点の最大値を標高最大値、谷部の頂点の最大値を標高最小値、標高最大値と標高最小値の差を標高差と称す。表3.4に表面粗さの図中に載荷物を示したように、ソール底面が舗装の表面と接地するのは標高最大値である。標高最大値で接地したのち、ランナーの体重によって載荷され、標高が負の値を大きく示すようになる。舗装種類ごとに示した表より、細密(13)は表面粗さの山部と谷部が出現する間隔が極めて小さく、標高差も小さいのに対して、開粒(13)は表面粗さの山部と谷部が出現する間隔が大きく、標高差も大きい。弾性(少)の表面粗さは出現間隔が小さい山部と谷部があり、出現間隔の大きい山部と谷部もあるという両方が混在しており、開粒(13)と細密(13)を足し合わせたようにも見える。弾性(多)は山部と谷部の間隔が開粒(13)よりは小さいが、弾性(少)よりは大きい。以上、4種類の表面粗さは標高や山部と谷部の出現間隔など差異があることがわかった。4種類の表面粗さの差異を定量化することを次の項で試みる。

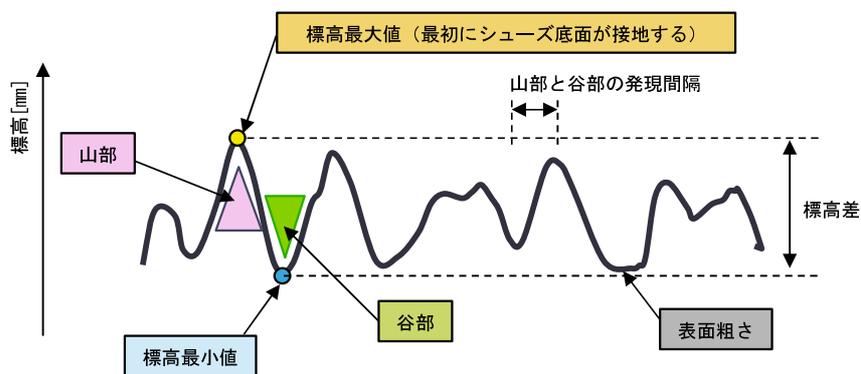
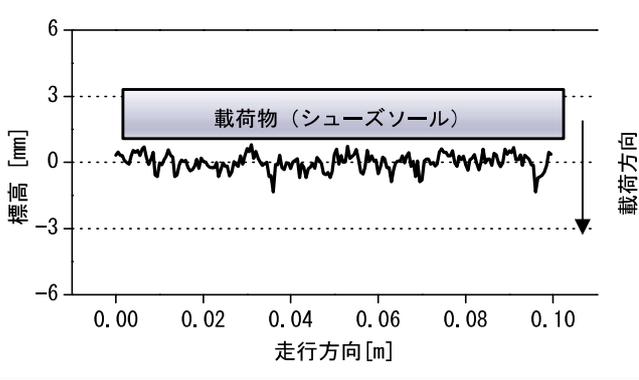
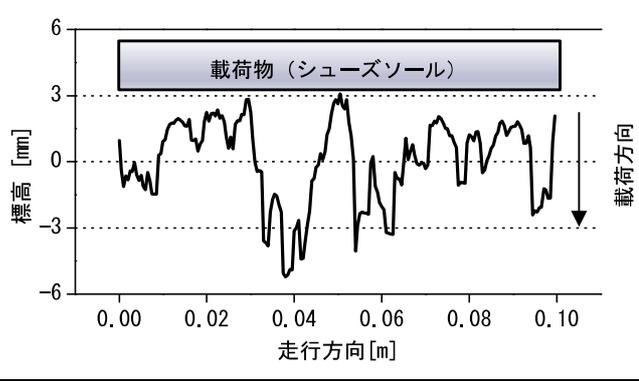
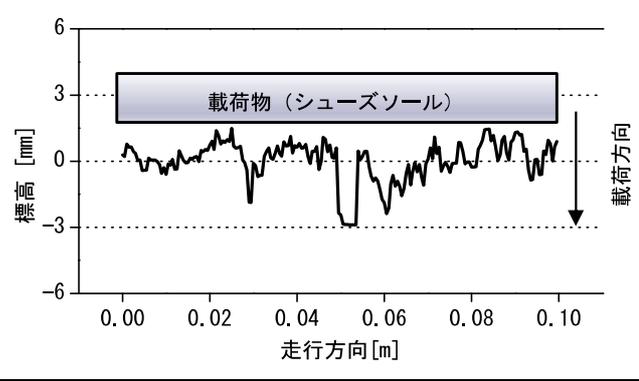
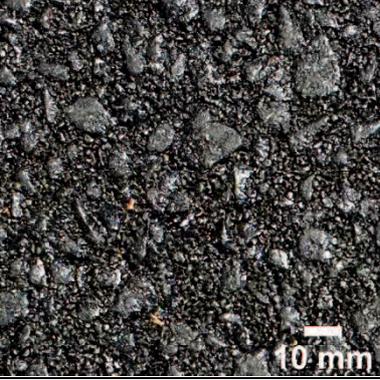
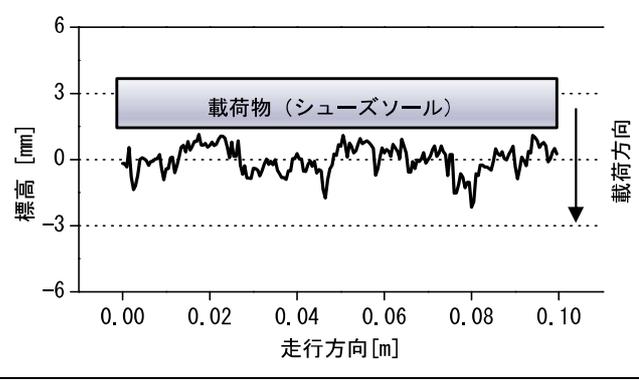


図 3.6 舗装の表面粗さの概念図

表 3.4 走行試験場の走路の舗装表面の近接写真と表面粗さ

	舗装表面の写真	表面粗さ
細密(13)		
開粒(13)		
弾性 (少)		
弾性 (多)		

3.2.3 走行試験場の物理特性および力学特性に関する試験概要

本研究では、舗装の表面粗さと舗装の変形係数、すべり抵抗性の3つの性質がランナーの着地衝撃に及ぼす影響因子として考え、走行試験場で用いた4種類の舗装に対して、試験機器等を用いて測定した。

(1) 舗装の表面粗さ

舗装の表面粗さは、区間長を100 mmとし、区間ごとにISO 13473-2:2002 および ASTM E1845-09 に準拠した勾配補正⁴⁾を行った。勾配補正時の近似直線を標高高さの基準線 (=0) として、表面粗さの評価指標を算出した。標高高さの測定間隔は進行方向0.3 mm、分解能0.03 mmであった。測定した標高高さデータは進行方向に0.5 mm間隔で出力した。走行開始位置から30 m地点までの平均プロファイル深さ^{3),4)} (以下、MPD) と、JIS B 0601-2001 に規定されている表面粗さ指標であるスキューネスとクルトシスを区間ごとに算出し、平均値を代表値とした。

MPDの算出方法を図3.7に示す。MPDは基底長100 mmを中心から2分割し、それぞれの区間の最大値の平均値と基準線との差を算出した値である。舗装表面の粗さを評価する指標として、スキューネス Rsk とクルトシス Rku がある。スキューネス Rsk とクルトシス Rku の概念図を図3.8に示す。スキューネス Rsk は標高度数分布の標高高さの基準線 (=0) からの偏り度合いを示す指標である。クルトシス Rku は標高度数分布の尖り度合いを示す指標である。

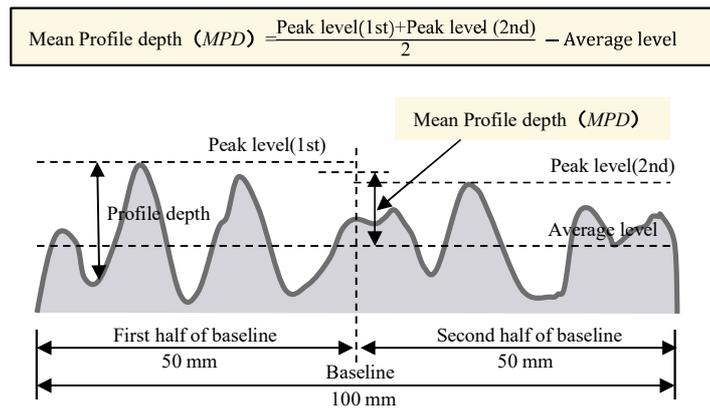


図3.7 MPDの計算方法^{3),4)}

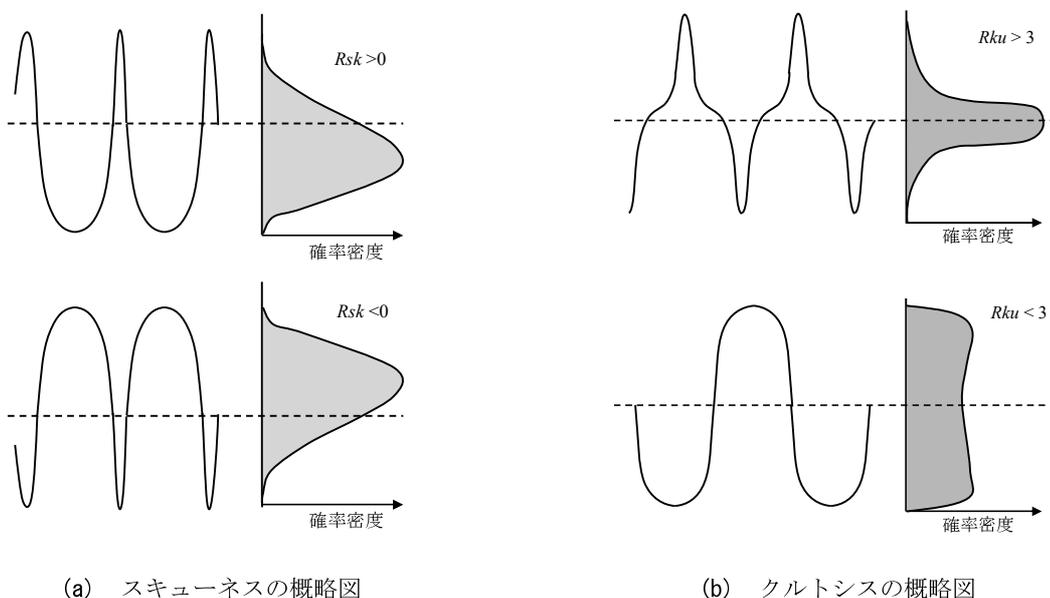


図3.8 各パラメータの説明図⁵⁾ (JIS B 0601-2001から引用)

(2) 舗装の摩擦特性

着地時のブレーキの大きさはシューズ底面と舗装表面の間に生じる摩擦係数が大きな影響因子であると考え、走行試験場の舗装の摩擦に係る物性値としてシューズと舗装表面の間の動摩擦係数を測定した。実験状況を図 3.9 に示す。実験は、荷重計を介してシューズを引張り、動き出した時の荷重を読み取り、動摩擦係数を式-3.1 より、算出した。

実験の詳細として、まず、実験で用いたシューズは被験者が走行実験で履いていたものを使用した。そして、シューズ単体では質量が小さいため、直径 11 mm、質量 5.4~5.7 g の遊技球を用いて、シューズの質量を調整した。遊技球を詰めたシューズを走行試験場の舗装表面に置き、つま先方向に水平引張力を与え、シューズが動き出してから一定となった引張力 F' を読み取った。測定した引張力 F' を用いて、式-3.1 より動摩擦係数 μ' を算出した。遊技球とシューズの質量 W は 3,002 g であった。乾燥路面で測定を行い、測定時の路面温度の平均値は 40.6 °C であった。

$$\mu' = F' / (W/g) \quad (3.1)$$

ここに、

μ' : 動摩擦係数

F' : 引張力 [N]

W : シューズと遊技球の総質量 [kg]

g : 重力加速度 [m/s^2]



図3.9 動摩擦係数実験の状況

(3) 舗装の変形特性

第2章で定義した舗装の変形係数について、本章では、ランナーが舗装表面に接地した時に感じる舗装全層から受ける“硬さ”を評価する指標として、ランナーが足を路面に接地する状況に模している小型FWDを用いて路面弾性係数⁶⁾を測定した。この路面弾性係数は、舗装材料の変形係数とは異なり、舗装構造体としての変形係数（以下、舗装体の変形係数）であることを記しておく。

小型FWD試験は重錘落下型の急速平板載荷試験に位置づけられる。図3.10に示すように、水平かつ平坦な地表面（本研究では舗装表面）に土台付きの円形載荷版を敷き、重錘をガイドロッド沿いに自由落下させたときの荷重と載荷版のたわみとの関係から地盤（本研究では舗装体）の変形係数を求める試験である。荷重とたわみのピーク値を用いて式-3.2の弾性理論式により求める弾性係数を路面弾性係数と呼ぶ。式-3.2の適用にあたりポアソン比0.4を用いた。

$$E_0 = \frac{2(1-\nu^2)\sigma_0 \cdot a}{d_r} = \frac{(1-\nu^2) \cdot P}{2 \cdot a \cdot D} \quad (3.2)$$

ここに、

E_0 : 荷重点の路面弾性係数 [MPa]

ν : ポアソン比

σ_0 : 載荷版の接地圧 [MPa]

a : 載荷版半径 [mm]

d_r : 距離 r にあるセンサのたわみ [mm]

P : 荷重の最大値 [N]

D : たわみの最大値[mm]

小型FWDでは、載荷版の直径と落下重錘の重さと落下高さが可変である。本研究では載荷版直径を100 mm、重錘重さを10 kg、落下高さを500 mmの固定条件とした。測定時の路面温度の平均値は33.8 °Cであった。

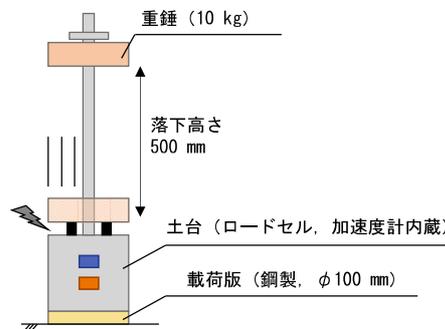


図 3.10 小型FWDの概略図

3.2.4 舗装の物理特性および力学特性に関する試験結果

(1) 舗装の表面粗さ

舗装の表面粗さの測定結果を図 3.11 に示す。図 3.11 (a) に示す MPD はアスファルト舗装の細密(13)と開粒(13)を比較すると、開粒(13)の方が大きい。弾性舗装の2種類を比較すると、弾性(多)より弾性(少)の方が大きい。MPD はある基準線からの標高の最大値に関して評価をしている値であることを踏まえて表 3.4 に示した表面粗さの図を見ると、基準線が標高=0 である。基準線からの標高の最大値を舗装種類ごとに比較すると、標高最大値は細密(13)より開粒(13)の方が大きく、弾性(多)より弾性(少)の方が大きい。そして、4種類で比較すると最も MPD が大きい舗装は開粒(13)で、次に弾性(少)、弾性(多)、細密(13)の順に小さい値を示した。

スキューネスは、ここで示す表面粗さの標高の正值の度数と負値の度数のバランス、すなわち偏り度合いを示す指標である。標高の値が正を示す度数の方が標高の値が負を示す度数よりも多い場合、スキューネスは負の値を示す。アスファルト舗装は表面が平坦になるよう、仕上げているため、アスファルト舗装の表面粗さは谷部を多く有し、谷部の頂点の大小を骨材の配合比率で変化させている。しかし、アスファルト舗装であっても機械的に山部が連続するような表面粗さを有するように仕上げる方法もある。基準

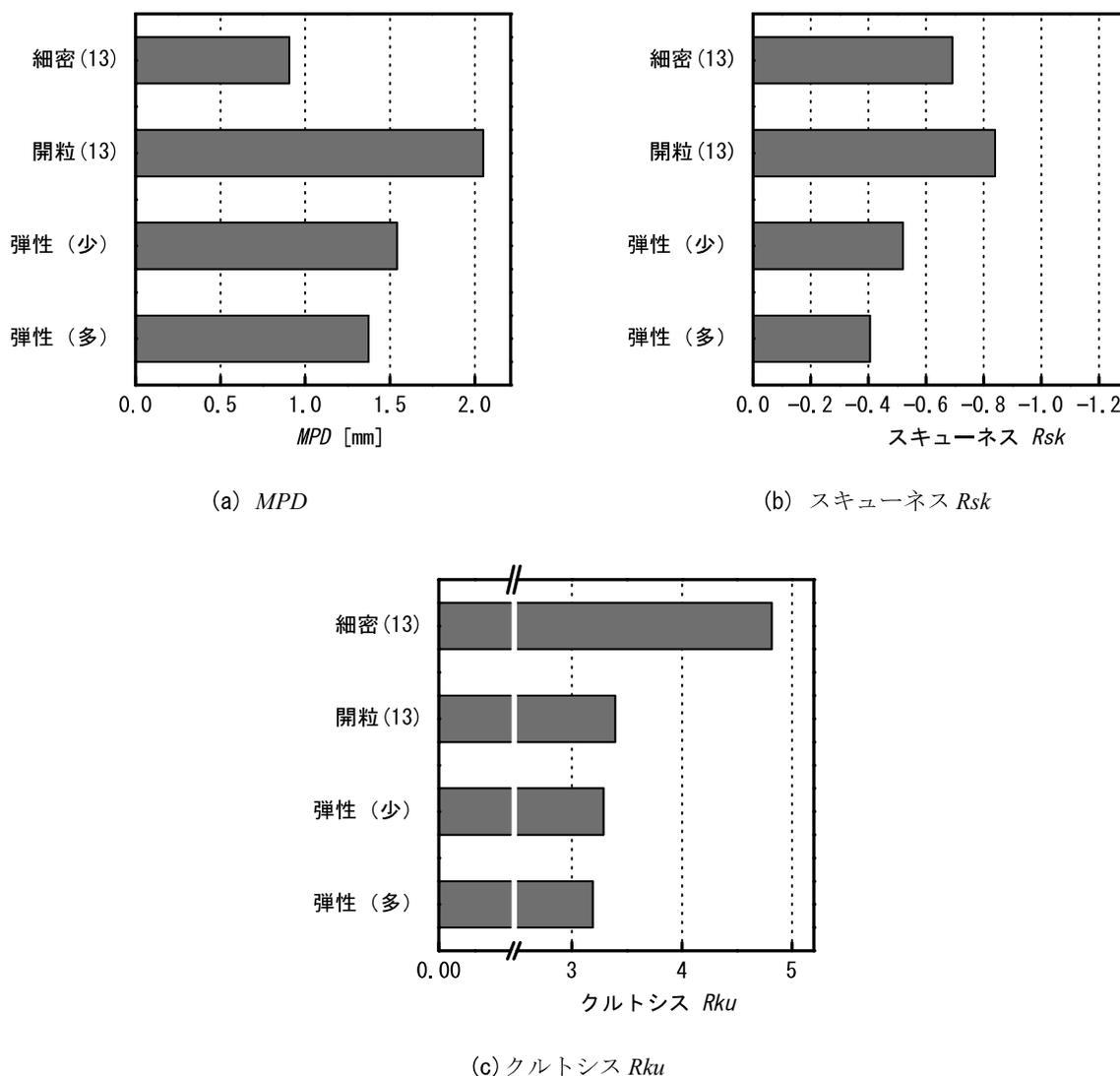


図 3.11 走行試験場の舗装の表面粗さの測定値

線から山部を多く有するか、谷部を多く有するかの判別をすることができる指標としてスキューネスを用いている。図 3.11 (b) の結果より、スキューネスは 4 種類すべての舗装が負の値を示している。よって、標高の値が負を示す度数の方が標高の値が正を示す度数よりも多いことがわかる。スキューネスの結果を舗装種類で比較すると、開粒(13)より細密(13)の方が、弾性(少)より弾性(多)の方が値は小さい。そして細密(13)より弾性(少)の方が値は小さい。よって、開粒(13)は谷部が大きく、かつ多く有する舗装であり、弾性(多)は山部が大きく、かつ多く有する舗装であることが明らかになった。

クルトシスは、標高度数分布の尖り度を示し、標高度数分布が正規分布の場合をクルトシスは“3”を示す。図 3.11 (c) の結果より、クルトシスは細密(13)が 4.8 と極めて大きい値を示している。これは同一の標高を多く有し、標高の値にバリエーションが無いことが示された。開粒(13)と弾性(少)、弾性(多)は 3.1~3.2 とほぼ同一の値を示し、標高度数分布が正規分布に近い曲線であることと、細密(13)に比べて標高の値が豊富であることが示された。

(2) 舗装の摩擦特性

舗装の力学特性の動摩擦係数の測定結果を図 3.12 (a) に示す。本試験の結果はすべて乾燥路面で実施した結果である。アスファルト舗装の 2 種類を比較すると開粒(13)は細密(13)より小さい値であった。この差異はシューズ底面と舗装表面の接地面積の差異であると推察する。細密(13)は表面粗さの山部と谷部の発現間隔が小さく、標高差が小さいため、シューズ底面と接地していた面積は多い。開粒(13)は表面粗さの山部と谷部の発現間隔が大きいため、シューズを引っ張るとソール底面が舗装の谷部を通過している間は接地していないように、接地面積は少ない。そのため、アスファルト舗装は接地面積の差異によって動摩擦係数に差異が見られたと考えられる。弾性舗装の 2 種類を比較すると、弾性(少)は弾性(多)より大きい値を示した。弾性舗装の場合も同様、レジンモルタルを多く敷き均した弾性(多)の方が弾性(少)に比べて山部が多いことから、弾性(少)の方が接地面積は多いためであると推察する。以上より、動摩擦係数は山部と谷部の標高差が小さく、山部と谷部の発現間隔が小さい細密(13)が最も大きい値を示した。

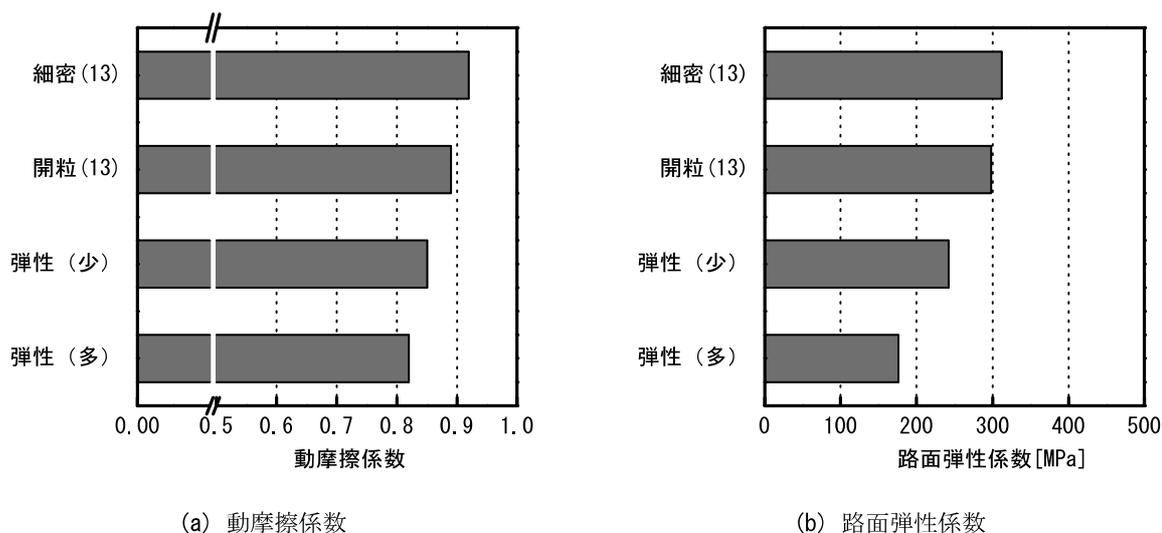


図 3.12 走行試験場の舗装に対する力学試験の結果

(3) 舗装の変形特性

舗装体の変形係数の一つである路面弾性係数の結果を図 3.12 (b) に示す。アスファルト舗装の 2 種類を比較すると細密(13)と開粒(13)は $312 \text{ MPa} \pm 31$ と $298 \text{ MPa} \pm 54$ であった。弾性舗装の 2 種類を比較すると弾性(少)は $242 \text{ MPa} \pm 46$ 、弾性(多)は $176 \text{ MPa} \pm 64$ であり、弾性(少)の方が弾性(多)より大きい値を示した。弾性舗装はレジンモルタルの弾力性が影響していると考えられる。

3.2.5 舗装の物理特性および力学特性の試験結果まとめ

(1) 舗装の表面粗さ

- ・ 細密(13)に関しては、*MPD* は小さく、クルトシスは大きい。表面粗さの標高最大値が小さく、標高の偏りが大きい舗装である。
- ・ 開粒(13)に関しては、*MPD* は大きく、スキューネスは大きい負の値を示す。表面粗さの標高最大値が大きく、表面粗さの標高の値が豊富な舗装であることを意味する。
- ・ 弾性(多)はスキューネスがゼロの値に近く、クルトシスは 3 に近い。弾性(多)は山部が大きく、かつ山部を多く有する舗装である。

(2) 舗装の摩擦特性

アスファルト舗装の 2 種類を比較すると開粒(13)は細密(13)より小さい値であった。弾性舗装の 2 種類を比較すると、弾性(少)は弾性(多)より大きい値を示した。どちらともに、この差異はシューズ底面と舗装表面の真実接地面積の差異であると推察する。

(3) 舗装の変形特性

アスファルト舗装の 2 種類は本実験の温度条件においては、約 300 MPa 程度であった。アスファルト舗装と弾性舗装を比較すると弾性舗装の方が路面弾性係数は小さい結果より、弾性舗装はレジンモルタルの弾力性による差異であると考えられる。

3.3 舗装に対する着地衝撃の感触に関するアンケート調査

3.3.1 アンケート調査の概要

走行試験の被験者は18～27歳（平均21歳）である男女各5名の計10名とした。大学および企業の陸上部で中長距離走の種目を専門としているランナーである。

走行試験で使用するシューズは、被験者が普段、道路競技および練習時に履いているものとした。被験者それぞれのシューズのアウトソールの硬さは、ゴム硬度計CS型を使用して測定した。シューズのアウトソールとは、舗装の表面と接するシューズの底面のことである。シューズの重量は 140.5 ± 13.8 g、シューズのソール全層の厚さは 13.6 ± 2.3 mm、シューズのアウトソールの硬さは、かかとが 51 ± 7 、つま先が 63 ± 5 であった。シューズは被験者ごとに異なるが、各人が普段から競技に使用しているものという観点では統一的である。

走行速度は、被験者が中長距離走の競技時に走行する速度である約20 km/hを目安にして走行してもらった。走行順序は弾性（少）、開粒(13)、弾性（多）、細密(13)とした。走行時の外気温は平均22.2℃、路面温度は平均33.8℃であった。走行試験の前に被験者へ舗装が4種類あることについては伝えたが、4種類の詳細は伝えなかった。また、走行試験とアンケート調査の実施前と実施後に被験者同士で情報を共有しないように伝えた。

アンケート調査項目は、着地衝撃の大きさである。評価は2つの方法で行った。舗装の種類ごとに評価する方法（個別評価）と、舗装4種類すべてを比較して評価する方法（総合評価）である。個別評価は、1種類の舗装を走行した直後に、他の種類の舗装との比較は行わず、走行した1種類の舗装に対して、3件法⁷⁾で「衝撃が小さい、どちらでもない、衝撃が大きい」のいずれかを選択してもらった。総合評価は、4種類の舗装をすべて走行した後、4種類を比較して、着地衝撃の大きさが最も大きい舗装と、最も小さい舗装に該当する1種類の舗装を選択してもらった。

3.3.2 アンケート調査の結果

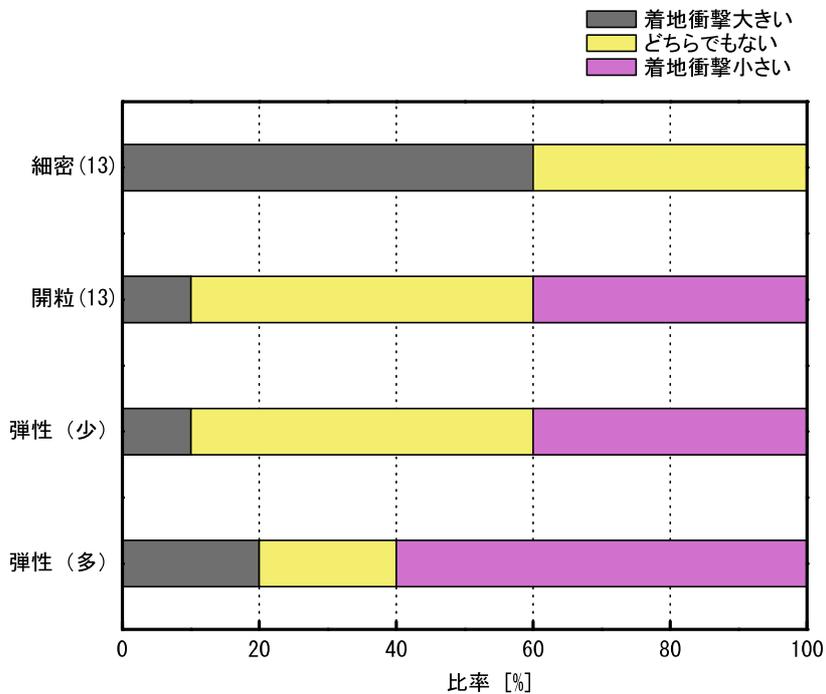
アンケート調査の結果を図3.13に示す。図3.13(a)に個別評価の結果を示し、図3.13(b)に総合評価の結果を示した。図3.13(a)に示す個別評価の結果より、アスファルト舗装の2種類を比較すると、細密(13)は着地衝撃を大きいと感じるランナーが6割を占めた。開粒(13)は着地衝撃を大きいと感じるランナーが1割で、着地衝撃を小さいと感じる、又は、どちらでもないと回答したランナーが9割を占めた。よって、アスファルト舗装の2種類に対してランナーは着地衝撃に違いを感じており、細密(13)は着地衝撃を大きいと感じ、開粒(13)は着地衝撃を小さいと感じるランナーが多くを占めた。

次に、弾性舗装の2種類を比較すると、弾性（少）は着地衝撃を小さいと感じるランナーが4割、どちらでもないが5割であった。弾性（多）は着地衝撃を小さいと感じるランナーが6割、どちらでもないが2割であった。よって、弾性舗装の2種類に差を感じており、弾性（少）も着地衝撃を小さく感じる傾向が見られたが、弾性（多）の方がより明確に着地衝撃を小さく感じる傾向であった。

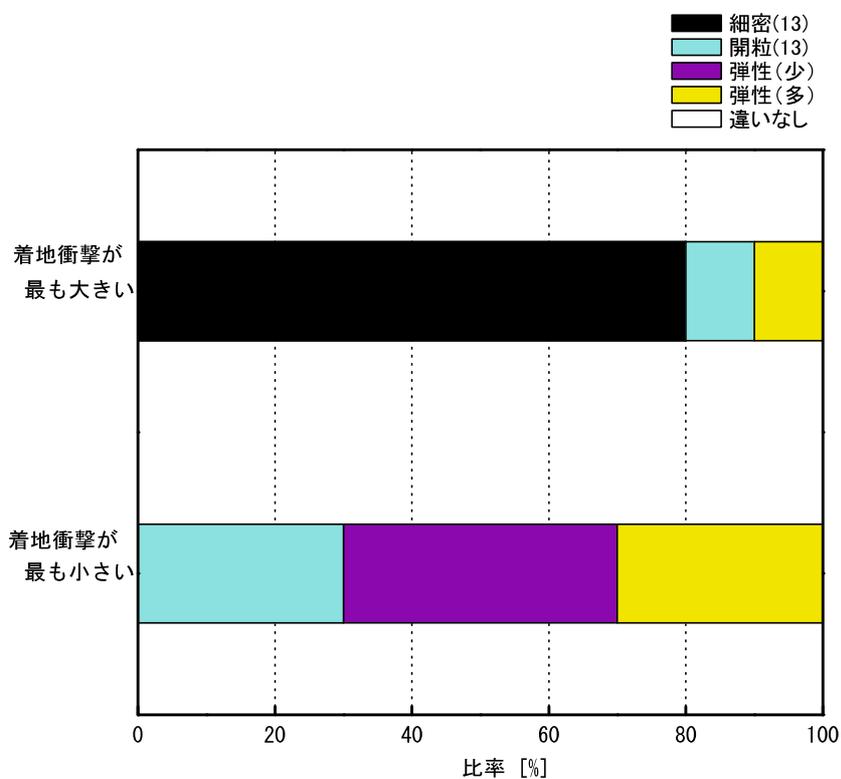
アスファルト舗装と弾性舗装を比較すると、細密(13)と弾性舗装の2種類と比べると、弾性舗装の方が細密(13)より着地衝撃を小さく感じる傾向がみてとれる。開粒(13)と弾性舗装の2種類を比べると、開粒(13)と弾性（少）は結果が同値である。開粒(13)と弾性（多）は差異があり、弾性（多）は開粒(13)に比べて、どちらでもないと回答するランナーが減り、着地衝撃を小さく感じているランナーが多い。

図3.13(b)に示す総合評価の結果より、4種類の中で最も着地衝撃を大きいと感じる舗装は、細密(13)であり、8割のランナーが回答し、明確に判別できることが明らかになった。次に、4種類の中で最も着地

衝撃を小さいと感じる舗装は、開粒(13)と弾性(多)が3割、弾性(少)が4割を占めた。よって、細密(13)以外の舗装種類であり、個別評価で高評価であった弾性(多)が大多数を占める結果ではなかった。したがって、8割のランナーはアスファルト舗装の細密(13)に対して着地衝撃を大きいと感じることと、開粒(13)は着地衝撃が小さいと感じる傾向にあり、弾性舗装と顕著に差は見られなかった。



(a) 個別評価



(b) 総合評価

図 3.13 アンケート調査結果 (10名)

3.4 舗装の物理特性および力学特性と各舗装の評価平均値との相関

3.4.1 アンケート結果の定量化

アンケート調査の個別評価の結果を、青木ら⁸⁾、松浦ら⁹⁾の結果の整理方法を参考とし、[着地衝撃が小さい]を1、[どちらでもない]を0、[着地衝撃が大きい]を-1とし、評価平均値を算出した。ここで、感覚の良否は順序尺度¹⁰⁾であるため、+1・0・-1という等間隔での数値化が妥当なものであるかどうかは議論の余地があるが、今回は間隔尺度¹⁰⁾と捉えて定量化した。着地衝撃に関する各舗装の評価平均値を表3.5に示す。

表 3.5 着地衝撃に関する各舗装の評価平均値

舗装種類	評価平均値
細密(13)	-0.6
開粒(13)	0.3
弾性 (少)	0.3
弾性 (多)	0.4

3.4.2 アンケート結果と舗装の性質との関係

各舗装の物理特性および力学特性と各舗装の評価平均値との相関を調べた結果を図3.14、図3.15に示す。横軸は舗装の物理特性および力学特性の評価値であり、縦軸は着地衝撃に関する各舗装の評価平均値であり、1に近いほど着地衝撃を小さく感じられることを意味する。

(1) 舗装の表面粗さ

表面粗さの各指標の値は、図3.11に示した実験結果で得られた値である。表面粗さの指標として、MPDは測定延長を100mmごとに区切った1区間を2分割した区間での最大値の平均値と基準線との差を算出した値である、すなわち、表面粗さの標高最大値の大小を示す評価指標であり、MPDが増加するという事は、表面粗さの標高最大値が大きい値を示すことを意味する。スキューネスは表面粗さの標高の正値の度数と負値の度数のバランス、すなわち偏り度合いを示す指標である。スキューネスが正の値を示すとは、表面粗さの標高の値が正を示す度数の方が標高の値が負を示す度数よりも多くなることである。すなわち山部の頂点の標高の値が大きくなると同時に山部が多くなることである。クルトシスは標高度数分布の尖り度を示しており、クルトシスが3の値に近づくとは、表面粗さの標高が一極集中せず、さまざまな標高を有することを意味する。

図3.11に示した実験結果と表3.5に示す着地衝撃に関する各舗装の評価平均値との関係を図3.14に示した。図3.14(a)に示したMPDと評価平均値との関係より、MPDが増加するとともに評価値が1の値に近づく傾向が示された。すなわち、表面粗さの標高最大値が大きい値を示す舗装であるほど、ランナーは着地衝撃を小さいと感じる傾向が示された。図3.14(b)に示したスキューネスと評価平均値との関係より、0の値に近づくほど評価平均値は正の値を示す傾向であり、標高が基準線より正の値を示すほど、ランナーは着地衝撃を小さいと感じる傾向が示された。図3.14(c)に示したクルトシスの結果よりクルトシスは3の値に近づくほど評価値が1の値に近づく傾向が示された。すなわち、表面粗さの標高に偏りがなく、さまざまな標高を有する舗装であるほど、ランナーは着地衝撃を小さいと感じる傾向が示された。

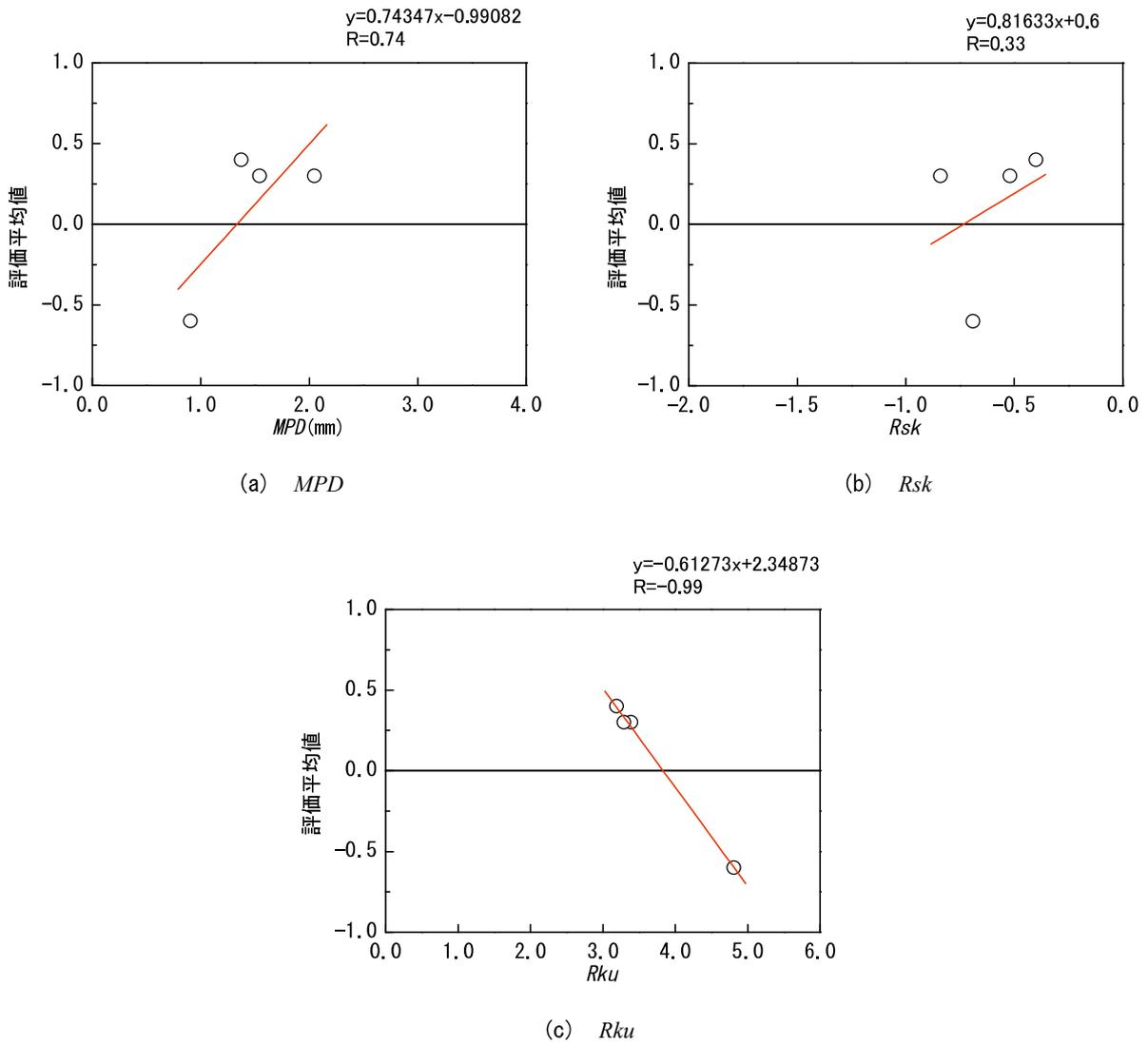


図 3.14 舗装の表面粗さとアンケート調査結果（評価平均値）との関係

(2) 舗装の摩擦特性

図 3.12(a) に示したシューズ引張荷重より算出した動摩擦係数と表 3.5 に示す評価平均値との関係を図 3.15(a) に示す。結果より、動摩擦係数が小さい値を示すほど、評価値が 1 の値に近づく傾向が示された。すなわち、動摩擦係数が小さいほど着地時の水平方向の力が小さくなり、ランナーは着地衝撃を小さく感じる傾向が得られた。

(3) 舗装の変形特性

図 3.12(b) に示した小型 FWD より得られた路面弾性係数と表 3.5 に示す評価平均値との関係を図 3.15(b) に示す。路面弾性係数の増大に伴い、評価平均値が -1 に近づく傾向を示した。すなわち、舗装体の変形係数が小さいほど、ランナーは着地衝撃を小さいと感じる傾向が示された。

以上の結果より、ランナーの着地衝撃の感触は、舗装の表面粗さや摩擦、変形係数に影響していることが示唆された。本研究では、評価平均値との関係が高い傾向を示した「表面粗さ」に着目して研究を行う。

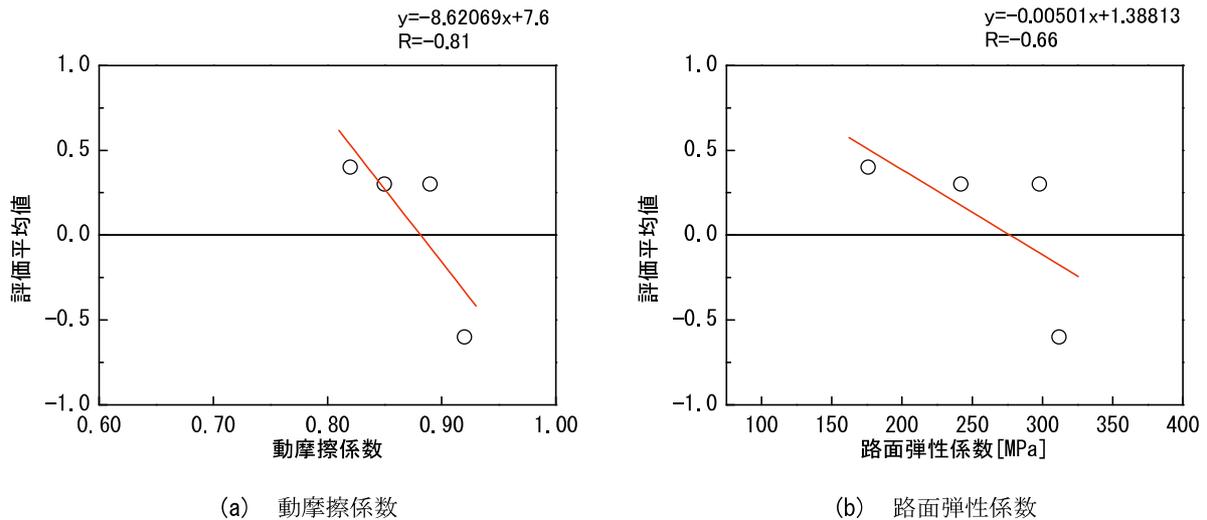


図 3.15 舗装の力学特性とアンケート調査結果（評価平均値）との関係

3.5 本章のまとめ

本章は、ランナーが舗装に接地したときに感じる着地衝撃の大きさを調査することを目的として、屋外走行試験を実施した。走行試験後のアンケート調査から、舗装に対するランナーの着地衝撃の感触を明らかにし、ランナーの着地衝撃の感触に影響する、舗装の性質について検討した。本章で得られた知見について以下に述べる。

- 1) アスファルト舗装の2種類に対して、ランナーが感じる着地衝撃に2種類で差があり、細密(13)は着地衝撃を大きいと感じ、開粒(13)は着地衝撃を小さいと感じるランナーが多くを占めた。
- 2) ランナーは弾性舗装の2種類の結果を比較すると、弾性(少)と弾性(多)の2種類の結果に差があった。弾性(少)は着地衝撃を小さく感じる傾向が見られたが、弾性(多)の方が着地衝撃を小さく感じるランナーが多い傾向が得られた。
- 3) アスファルト舗装と弾性舗装の結果を比較すると、弾性舗装の方が細密(13)より着地衝撃を小さく感じる傾向がみてとれる。開粒(13)と弾性(少)は結果が同値である。開粒(13)と弾性(多)には感じ方に差があり、弾性(多)は開粒(13)に比べて、着地衝撃を小さく感じるランナーが多い傾向が得られた。
- 4) ランナーは表面粗さの標高最大値が大きい標高差が大きい舗装であるほど着地衝撃を小さく感じ、動摩擦係数が小さいほど、着地衝撃を小さく感じる傾向が得られた。
- 5) 路面弾性係数の増大に伴い、評価平均値が-1に近づく傾向を示した。すなわち、舗装体の変形係数が小さいほど、ランナーは着地衝撃を小さいと感じる傾向が示された。

以上の結果より、ランナーの着地衝撃の感触は、舗装の表面粗さや摩擦、変形係数に影響していることが示唆された。本研究では、評価平均値との関係が高い傾向を示した「表面粗さ」に着目をして研究を行う。

【第3章の参考文献】

- 1) 国土交通省北海道開発局,平成 29 年度北海道開発局道路設計要領 第 1 集 道路 第 5 章 舗装 1, pp.1.5.21-1.5.22.
- 2) 透水性レジンモルタルシステム工法協議会: PRMS 多機能工法 技術資料【第 1 版】, 2012.
- 3) 土木学会舗装工学委員会 路面性状小委員会:路面テクスチャとすべり, 土木学会舗装工学ライブラリー10, 2013.
- 4) ASTM Standards: E1845-09 Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth, ASTM, 2010.
- 5) KEYENCE: 表面粗さ測定入門 線粗さ編, キーエンスウェブサイト,
<https://www.keyence.co.jp/ss/products/microscope/roughness/line/parameters/> (2019.9.5 参照)
- 6) 公益社団法人 土木学会 舗装工学委員会: 舗装工学ライブラリー14 非破壊試験による舗装のたわみ測定と構造評価, 公益社団法人 土木学会, p.34, 2015.
- 7) 近藤勉, 鎌田次郎:高齢者対象調査における 3 件法と 5 件法の信頼性係数の違い, 神戸医療福祉大学紀要, Vol.15, No.1, pp.11-18, 2014.
- 8) 青木繁伸, 鈴木庄亮, 柳井晴夫:新しい質問紙健康調査票 (THPI) 作成のこころみ, 行動計量学, Vol.2, No.1, pp.41-53, 1974.
- 9) 松浦茂樹, 島谷幸宏:都市の河川イメージの評価と河川環境整備計画, 土木計画学研究・論文集, No.4, pp.205-212, 1986.
- 10) 田中豊, 脇本和昌:多変量統計解析法, 株式会社現代数学社, pp.138-139, 1987.

第4章 ランナーの足首に生じる着地衝撃に関する検討

4.1 概説

ランナーが路面から受ける着地衝撃の大きさを舗装種類ごとに計測する方法と評価指標を明確にする必要がある。本研究では加速度計の一種である9軸モーションセンサを用いて、計測方法と評価手法を明らかにし、ランナーが舗装を走行した場合における走動作分析への適用性を実験的に検証する。

4.2 ランナーの足首に生じる着地衝撃の計測手法に関する検討

第2章で述べたように、ランナーが舗装から受ける着地衝撃は、体重の約3倍の大きさが足に生じることや足から膝や腰へ伝達することが明らかにされているが、床反力計を用いた限定的な検討であった。近年は、不自由なく走動作を行うことが可能なウェアラブル機器を用いた検討が始められており、実際の道路の舗装で走行し、ランナーの着地衝撃の大きさを計測する研究も行われている。しかし、ランナーの足に舗装から受ける着地衝撃の大きさを、実際の舗装で走行している動作時のランナーの足に生じる着地衝撃を測定する方が明確になっていない。そこで、本研究では9軸モーションセンサを用いてランナーの足首に作用する衝撃加速度を計測し、舗装表面の変形係数との関係を明らかにすることを目的として実験を行う。

4.2.1 モーションセンサの概要

本研究で使用するモーションセンサは、加速度センサ、角速度センサ、地磁気センサをそれぞれ3軸ずつ搭載したワイヤレス式のMEMS慣性センサ・ロガーである。

センサの仕様を表4.1に示す。加速度のレンジは予備実験を参考に $\pm 200\text{ G}$ と決定した。サンプリング速度は調整可能であるが、本研究では本センサの最速値である 1 kHz を使用した。

表 4.1 モーションセンサの仕様

重量	24.0 g
寸法	38×53×11 mm
測定間隔	1000 Hz
加速度	$\pm 200\text{ G}$
角速度	$\pm 6000\text{ dps}$
地磁気	$\pm 10\text{ Gauss}$

運動の解析において、図4.1に示すように、センサ固有の座標系（以下、センサ座標系、 X_{Sensor} , Y_{Sensor} , Z_{Sensor} ）と地上に固定された座標系（グローバル座標系、 X_{Global} , Y_{Global} , Z_{Global} ）がある。

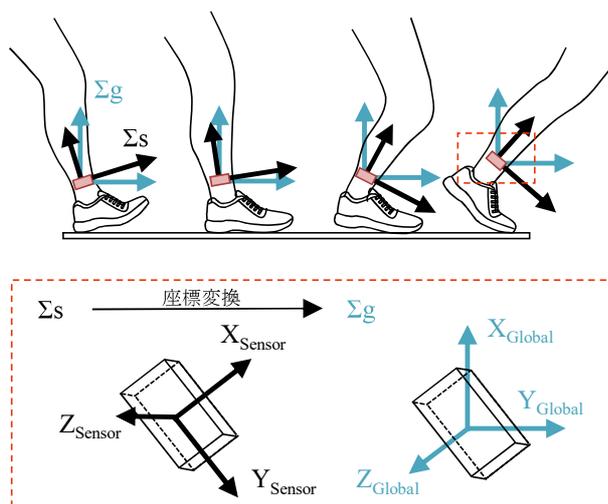


図 4.1 センサの姿勢と座標変換

センサ座標系での加速度(a_x, a_y, a_z)からグローバル座標系での加速度(A_x, A_y, A_z)に変換する際には、クォータニオン (四元数) ¹⁾による式-4.1 を用いて変換を行った。加速度をグローバル座標系に直すことで、センサ姿勢によらない3軸加速度を得ることができる。

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$R_{11} = q_w^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2$$

$$R_{12} = 2(q_x q_y - q_w q_z)$$

$$R_{13} = 2(q_x q_z + q_w q_y)$$

$$R_{21} = 2(q_x q_y + q_w q_z)$$

$$R_{22} = q_w^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2$$

$$R_{23} = 2(q_y q_z - q_w q_x)$$

$$R_{31} = 2(q_x q_z - q_w q_y)$$

$$R_{32} = 2(q_y q_z + q_w q_x)$$

$$R_{33} = q_w^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2$$

ここに

A_x, A_y, A_z : グローバル座標系加速度

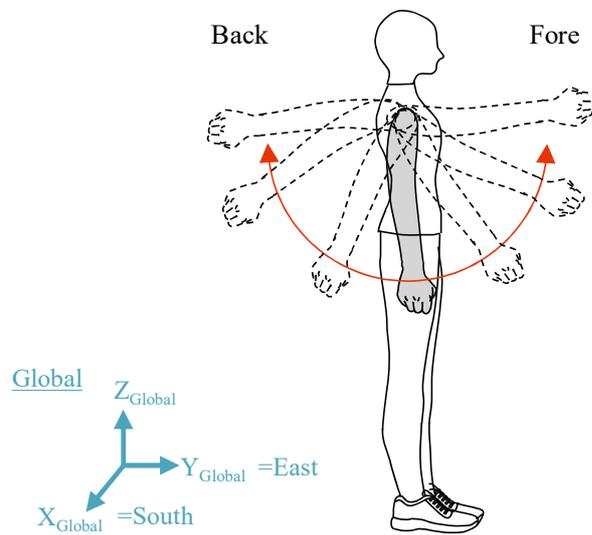
q_w, q_x, q_y, q_z : センサの姿勢を表すクォータニオン

a_x, a_y, a_z : センサ座標系加速度

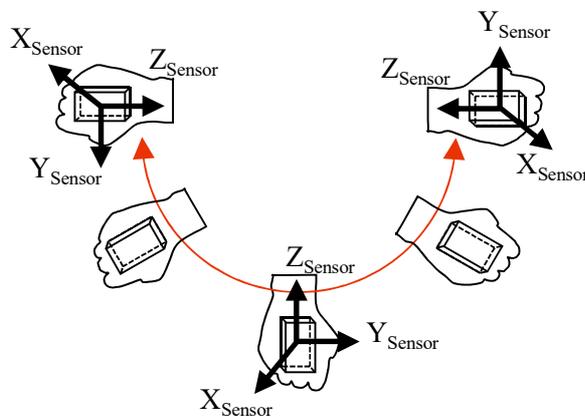
4.2.2 モーションセンサの性能確認実験の概要

センサ座標系の加速度をクォータニオンによる座標変換を行うことによって、モーションセンサの姿勢によらずグローバル座標系の加速度が得られることを確認することを目的として、基礎実験を行った。

実験の概略図を図 4.2 に示す。モーションセンサを手に持ち、腕を前後に 10 往復、振り子運動させる実験である。地上に固定されたグローバル座標系は、腕を振る方向（東向き）を Y 軸、鉛直上向きを Z 軸とする右手座標系（X 軸＝南向き）とした。実験は 4 種類実施した。腕の振り方や振る方向はいずれも同じであるが、振りながら手の中のセンサの姿勢を変化させるか、変化させないかの違いである。実験①は、図 4.2 (b) のように手の中でセンサを握りしめているので、腕に対してセンサの姿勢は変化しない。実験②～④では腕を振りながら手の中でセンサを不規則なスピードで回転させた。それぞれセンサ座標系の X 軸周り、Y 軸周り、Z 軸周りでの回転である。ただし、指を使ってセンサを回しているので軸周りは厳密ではなく、回すスピードも不規則である。



(a) 腕の動き



(b) モーションセンサの動き（センサ姿勢回転なしの場合）

図 4.2 モーションセンサ基礎実験の概略図

この実験の目的は、運動中にセンサの姿勢が時々刻々変化しても、グローバル座標系の加速度は、腕の運動を正しく測ることができるかどうかを確認するものである。正確さを評価するための比較対象は、ビデオの画像解析で求める腕の運動である。被験者はセンサを握る手の甲にターゲット（LED ライト）を装着しており、撮影した動画の各コマからターゲットの中心座標（Y, Z）を特定し、その座標の経時的変化から変位、速度、加速度を算出した。動画撮影にはカメラ付きスマートフォン（iPhone SE, Apple 社）のスロー動画モード（画質：720p, フレームレート：240 fps）を使用した。カメラは被験者から 2.3 m 離れた位置に固定した三脚に、高さ 1 m でセットした。動画のターゲット座標特定（追跡）には画像解析ソフト ImageJ を使用した。座標特定の分解能は、カメラの解像度と実撮影領域との関係から 2.2 mm, 時間特定の分解能は、動画のフレームレートから 4.2 ms である。

4.2.3 モーションセンサの性能確認実験結果

(1) センサ座標系の加速度とグローバル座標系の加速度

図 4.3～図 4.5 は、腕の振り子運動 2 周期分の 3 軸方向加速度波形を示している。左側は加速度センサの出力値（センサ座標系での加速度）、右側は加速度センサの出力値を式(1)によりグローバル座標系に変換した加速度である。図より、加速度センサの出力値は実験①～④で異なる波形を示すのに対して、グローバル座標系に変換することで、実験①～④で得られた加速度波形はほぼ同一の波形を示し、規則的な周期波形となることが確認できる。

以上より、グローバル座標系に加速度を変換することで、運動中にセンサの姿勢が変化しても、絶対座標系の加速度として統一的に評価することが可能であることが確認された。

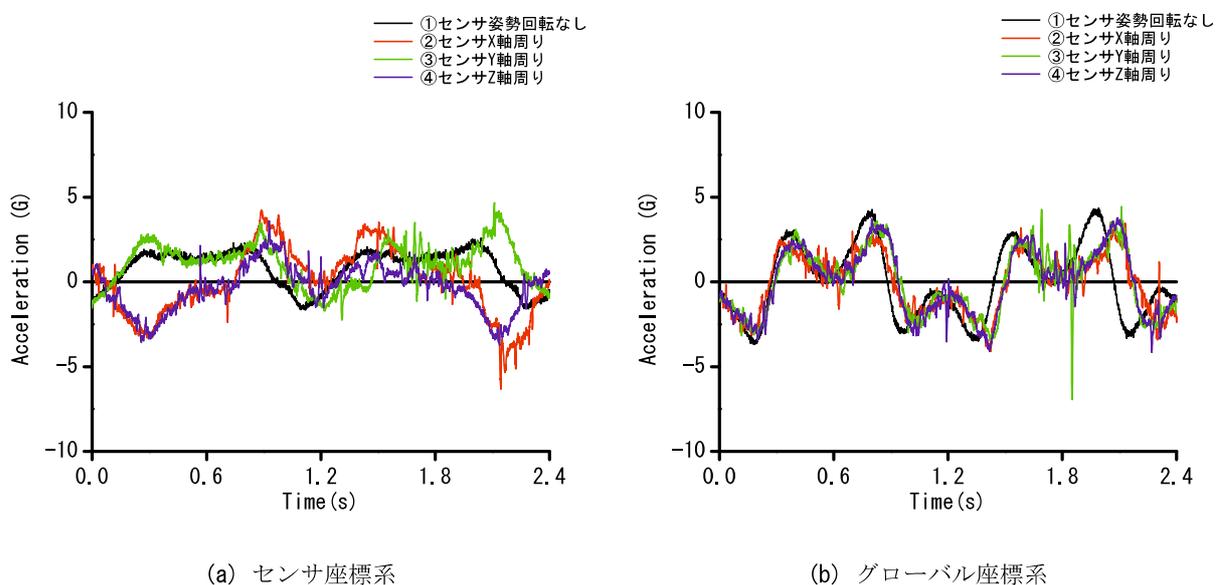


図 4.3 前後方向（Y 軸，東向き正）の加速度

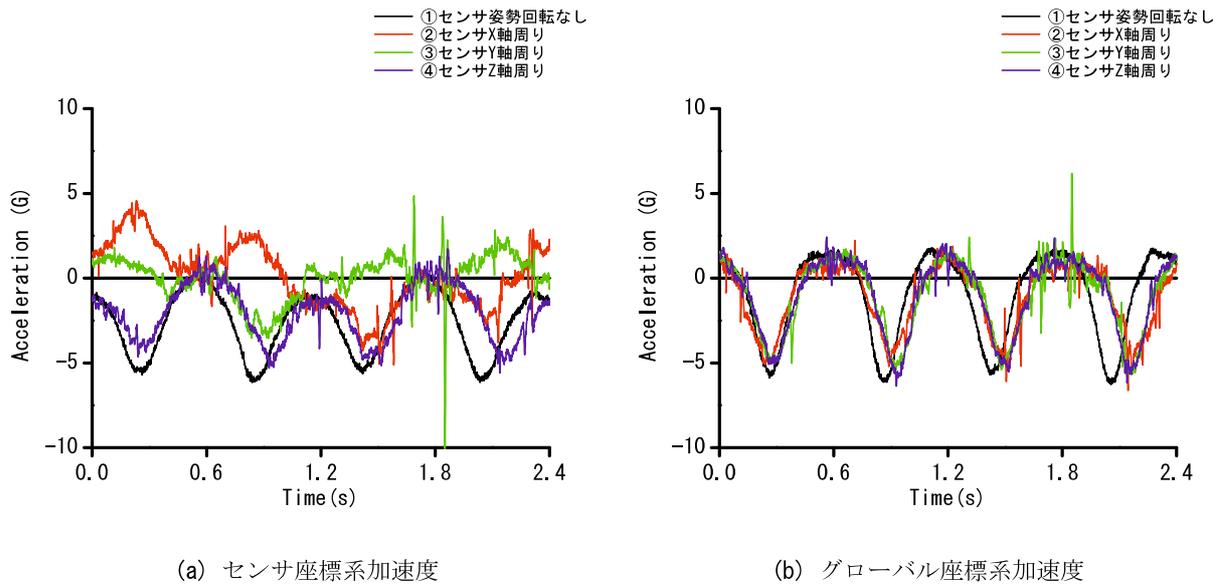


図 4.4 上下方向 (Z 軸, 上向き正) の加速度

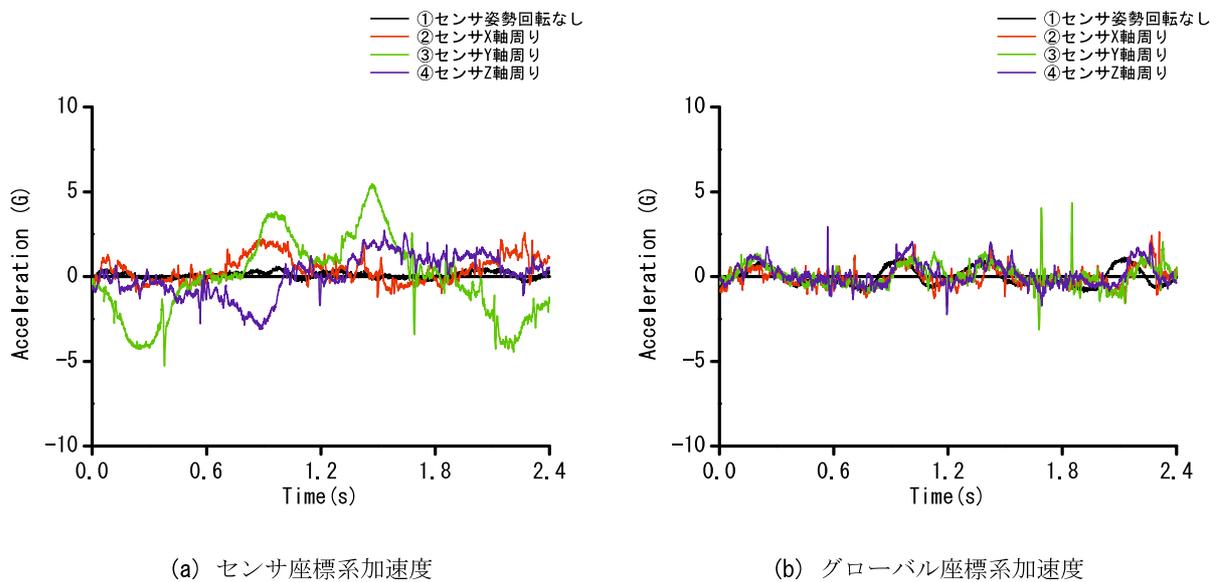


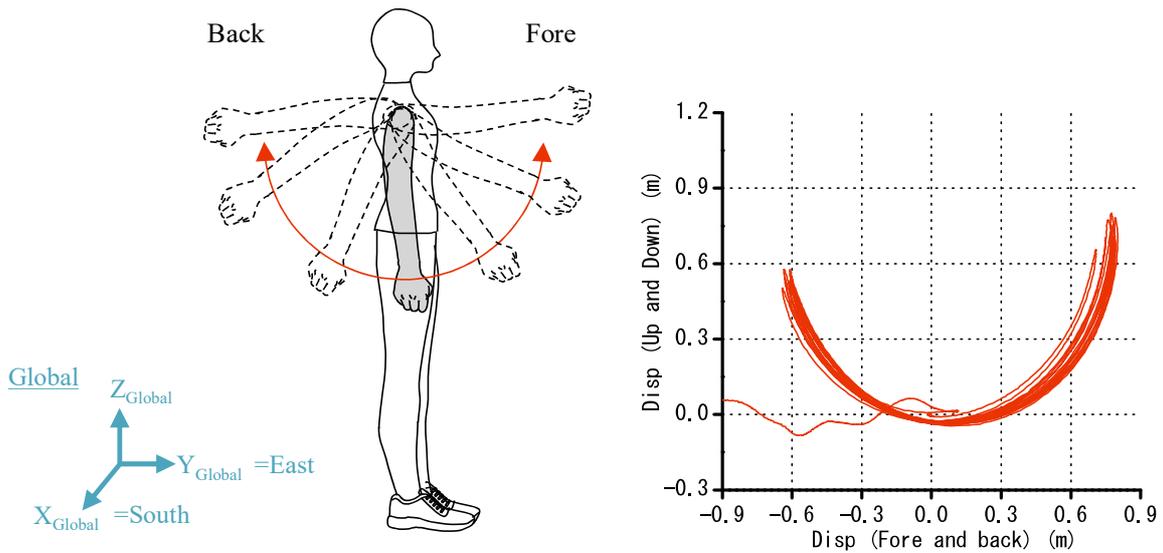
図 4.5 左右方向 (X 軸, 南向き正) の加速度

(2) 動画解析結果との比較

振り子実験の動画から画像解析により追跡した手の動きを図 4.6(b) に示す. 手の座標変化 (図 4.6(c)) を微分して速度 (図 4.6(d)) と加速度 (図 4.6(e)) を求めた.

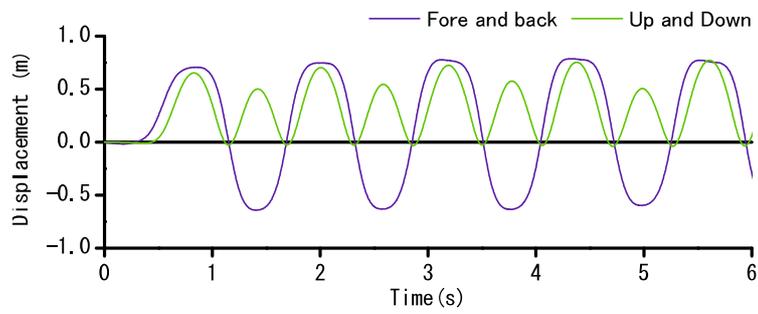
画像解析により追跡した手の動きの加速度とモーションセンサのグローバル座標系加速度を比較した結果を図 4.7 に示す. 図中, モーションセンサの値は, 実験①~④を代表して, 実験① (センサ姿勢回転なし) の結果を表示している. 図より, モーションセンサにより得られたグローバル座標系の加速度波形は, 水平方向, 上下方向ともに, 動画解析による加速度と極めてよく一致している.

以上のセンサ性能確認実験より, モーションセンサによって物体の運動を正しく計測可能であることがわかった. また, クォータニオンを用いた変換により, センサ姿勢によらないグローバル座標系での運動として統一的に評価可能であることが明らかとなった.

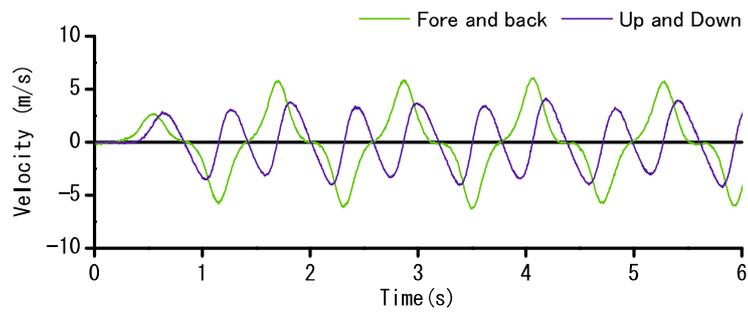


(a) 測定時の概略図

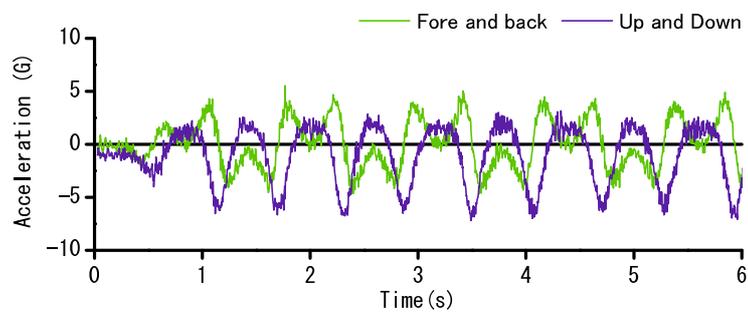
(b) 動画解析より測定した手の動き



(c) 変位

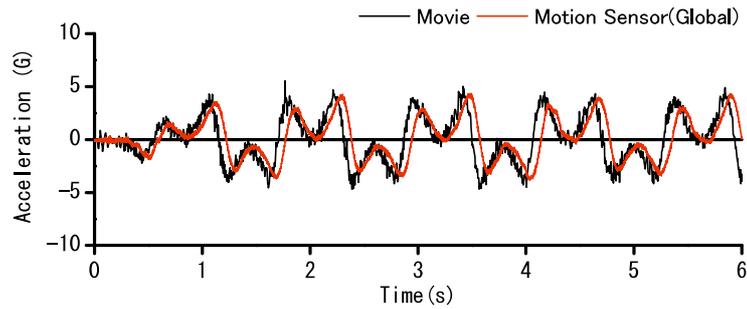


(d) 速度

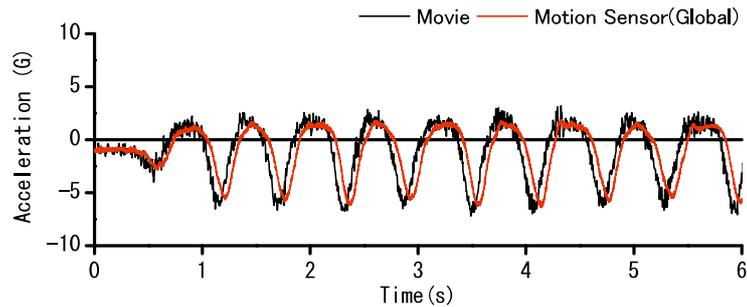


(e) 加速度

図 4.6 動画解析より求めた振り子実験結果



(a) 前後方向



(b) 上下方向

図 4.7 画像解析で算出した加速度とモーションセンサで測定したグローバル座標の加速度との関係

4.3 走動作と加速度波形の関係に関する室内実験

4.3.1 実験概要

本実験は、着地前後の足の動きと加速度波形との関係を明らかにするため、室内走行実験を行った。

被験者は、40代と20代の健常な男性2名とした。各々普段、ランニング時に履いているシューズで実験を行った。そして、被験者の足にモーションセンサを装着し、約5mの走路を走行してもらい、その動作をスロー動画で撮影して走動作を記録した。着地の正確な判定のために、走路中央の床に簡易フットスイッチをセットし、被験者には、右足でこれを踏むように走ってもらった。右足で簡易フットスイッチを踏むことができるまで、走行練習を行ったのち、各々3回、走行実験を行い、3回目の結果を用いた。

この簡易フットスイッチは、図 4.8 に示すように、12 mm 厚の木版 (300 mm × 300 mm) に高感度加速度センサ (±4 G, 1600 Hz) を張り付けたもので、被験者の足が木版に触れた瞬間の振動の立ち上がりを「着地時点」と判定するものである。動画撮影にはカメラ付きスマートフォン (iPhone SE, Apple 社) のスロー動画モード (画質: 720p, フレームレート: 240 fps) を使用した。

使用したモーションセンサの外観を写真 4.1 に示す。被験者の足の2箇所へモーションセンサを取り付けた。取り付け位置をおよび取り付け方法を図 4.9 および図 4.10 に示す。1箇所目は、右足内果上部 (以下、くるぶし) の皮膚面に伸縮ベルトで巻きつけて固定し、取り付けた。2箇所目は、右足足背 (以下、つま先) の皮膚面へ載せ、靴下を履き、シューズの紐を縛ることによって固定し、取り付けた。

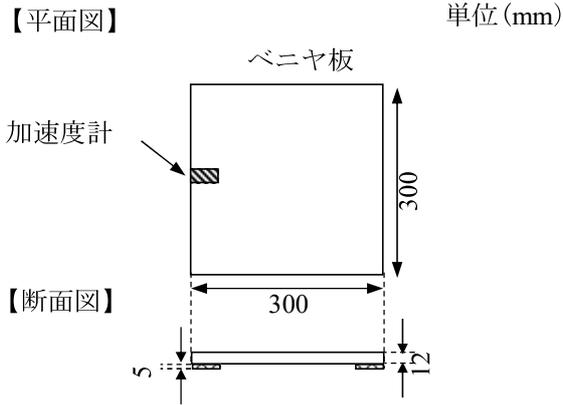
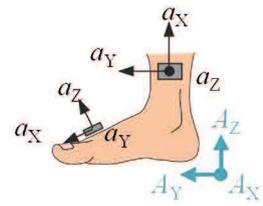


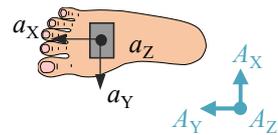
図 4.8 簡易版フットスイッチの概略図



写真 4.1 使用したモーションセンサの外観



(a) 側面図



(b) 上面図

図 4.9 モーションセンサ取り付け位置



(a) つま先

(b) くるぶし

図 4.10 加速度計の固定方法

モーションセンサの加速度センサは、軸の正方向を鉛直下向きに静置した場合、+1Gが出力されるように設定されている。例えば、図 4.11 (a) ~ (c) に示すように、加速度センサの軸の正方向を鉛直上向きとし、加速度センサを上下に動かす運動がある。(a) 上向きの加速や (b) 床面への衝突、(c) 正方向に回転中心がある円運動の場合は、加速度センサの出力値はマイナスの値となる。また、図 4.11 (d) に示すように、加速度センサの軸の正方向を進行方向とし、加速度センサを移動させた場合、床面との摩擦によって加速度センサが減速すれば、加速度センサの出力値はプラスの値となる。

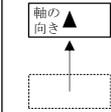
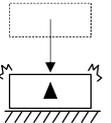
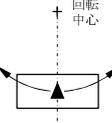
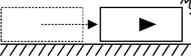
	(a) 加速	(b) 衝突	(c) 回転	(d) 減速
加速度の入力条件				
出力の極性	(-)	(-)	(-)	(+)

図 4.11 走動作時の加速度出力値の概略図

4.3.2 実験結果

(1) 着地動作時の加速度波形

被験者 2 人の着地から蹴り出しまでの走動作時の加速度波形を図 4.12, 図 4.13 に示す. 本実験では, 着地, 全面着地, かかと離床, つま先離床の 4 つの動作に着目し, 各時点を図中に破線で表示した. 横軸の時刻は, 簡易フットスイッチの振動立ち上がりから判断した着地開始時点をゼロとしている. また, 全面着地や離床のタイミングはスロー動画から判定したものである.

本実験の被験者 2 人は着地方法が異なり, 被験者 A は足裏の後方 (かかと部) で着地する方法 (以下, ヒールストライク走法) であり, 被験者 B は足裏全体で着地する方法 (以下, ミッドフット走法) であった.

実験結果の加速度波形は着地方法によらず, 最初に路面を捉えてから足裏の全面が路面と接した時点 (以下, 全面着地) までの間にくるぶしとつま先の両位置において, 前後方向ではプラスの第一ピークが上下方向ではマイナスの第一ピークが顕著に表れている. 図 4.11 の出力極性を参照すれば, 前後方向はプラスの値 (図 4.11 (d)) を示していることから床の摩擦による減速が生じている. 上下方向はマイナスの値 (図 4.11 (b)) を示していることから, 床への衝突が生じていることが考えられる. これより, 上述の第一ピークがブレーキ (前後) と着地による衝突 (上下) に相当することがわかる.

くるぶしの前後方向と上下方向の第一ピークは, 全面着地以降で生じることは着地方法によらず共通している. 着地方法が異なれば, 前後方向のピークの現れる動作時点が異なる. ヒールストライク走法 (被験者 A) の場合, 全面着地で上下方向のピークが生じ, その後, 前後方向のピークが表れる. ミッドフット走法 (被験者 B) の場合は, 全面着地の時点で前後方向のピークが生じ, その後, 上下方向のピークが表れる. これより, 着地時の減速について, ヒールストライク走法の場合は床への衝突 (上下方向) によって概ね減速してから, 床の摩擦 (前後方向) も受けて減速している. ミッドフット走法の場合は, 床の摩擦 (前後方向) によって概ね減速してから, 床への衝突 (上下方向) も受けて減速していることが見てとれる.

(2) 蹴り出し動作時の加速度波形

かかと離床～つま先離床までの蹴り出し動作は, 着地時に比べて速度の増減が小さいため, くるぶし, つま先の両位置とも, 加速度波形には着地時のような明確なピークは生じない. ただし, 蹴り出し期間中のくるぶしの加速度は, まず上下方向の加速度が緩やかにマイナスの値を示し, その後遅れて, 前後方向の加速度がマイナスの値を示し様相は被験者によらず共通する傾向である.

図4.11の出力極性を参照すれば、前後方向と上下方向の波形は図4.11(a)に示すように、前方への加速動作と、上方への加速動作を示している。すなわち蹴り出しは、かかとを上を持ち上げる動作から始まり、体の重心が前方に移動し、足裏が床から離れ、最後につま先が離床する。そのため、くるぶしの加速度について、上下方向は加速動作を示す負の極小値を持つ波形が現れ、前後方向も同様、加速動作を示す負の極小値を持つ波形が現れている。

以上のモーションセンサ、動画解析、フットスイッチを総合した詳細な分析より、モーションセンサによる加速度の波形と足の運動との関係が明らかとなった。着地時は、前後方向のプラスピーク（減速）と上下方向のマイナスピーク（床衝突）として現れ、蹴り出し動作時は上下方向と前後方向ともに、前方への加速動作と、上方への加速動作が生じることから負の極小値を持つ波形として現れる。

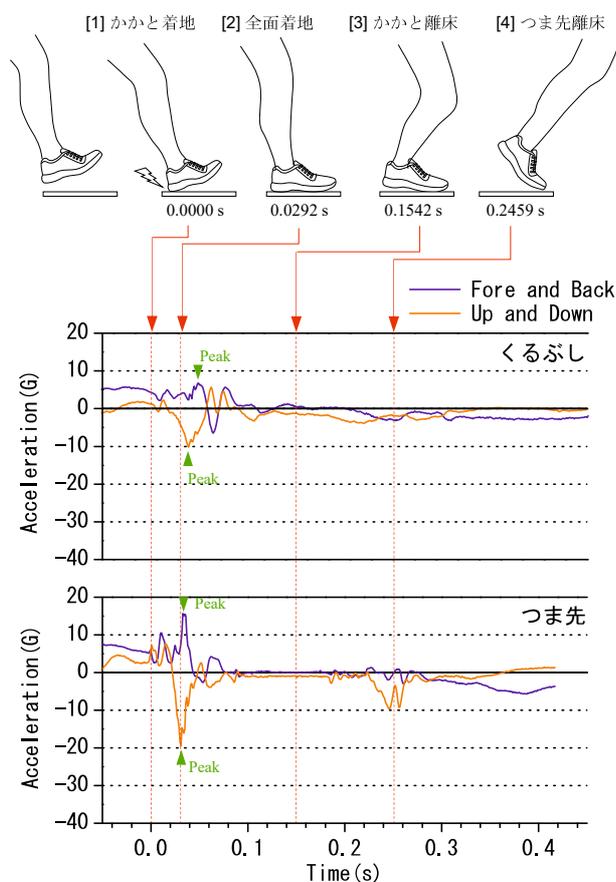


図 4.12 加速度波形と走動作の対応付け（被験者 A：ヒールストライク走法）

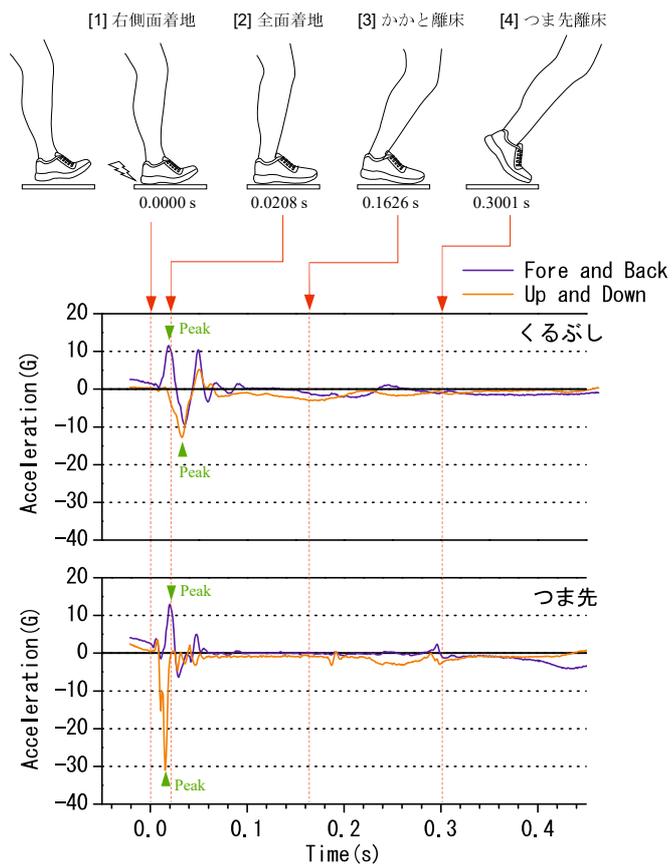


図 4.13 加速度波形と走動作の対応付け (被験者 B: ミッドフット走法)

4.4 素材の異なる舗装種別が着地時加速度に与える影響に関する屋外走行実験（その1）

4.4.1 実験概要

前章で走動作と加速度波形との関係より、着地時の加速度波形で着目すべき時点が明らかになった。これより、本章では舗装種別によって着地時に路面から受ける足への影響の違いを把握することを目的として、屋外の素材の異なる舗装を走行した。

走行した舗装種類と舗装の物理性状を表 4.2 に、舗装表面の写真を写真 4.2 に示す。大学構内のインターロッキングブロック舗装と芝生、アスファルト舗装、公園内のウッドチップ舗装の計 5 種類とした。すべての舗装の下層は碎石路盤であった。舗装の剛性は小型 FWD を用いて計測を行った。载荷条件は、载荷版 $\phi 100$ mm、重錘 10 kg、落下高さ 500 mm とした。载荷点の路面弾性係数²⁾は、荷重とたわみのピーク値を用いて、弾性理論式²¹⁾（ポアソン比 0.40）より求めた。

屋外走行実験は屋内実験と同じ被験者 2 名とした。走行速度は低速（1~2 m/s）、中速（2~3m/s）、高速（3~4 m/s）の 3 速度とし、被験者自身が走行できる最高速度を高速とし、中速と低速を各自で決めて走行を行った。走行距離は各舗装、片道 10 m、往復 20 m とした。よって、5 種類の舗装ごとに往復 20 m を 3 種類の速度で各 1 回、走行および計測を行った。走行時のシューズと服装は、屋内実験と同じものを着用して実験を行った。モーションセンサの取り付け位置と方法は、屋内実験と同位置、同手法とした。ただし、

加速度波形について、モーションセンサを取り付けた右足の接地を基準とし、舗装ごと、走行速度ごとに走行した歩数が約 15 歩であり、走り始めと走り終わりの各 5 歩は、加速および減速により走行周期が乱れやすいことから、走りが安定している 5 歩目~9 歩目の波形データを抽出し、解析対象とした。対象区間の走行周期の変動係数は 5 %以下であった。くるぶしで計測した加速度波形の例を図 4.14 に示す。走行周期は前後方向ピーク値の時刻より算出した。走行周期とは右足の接地から次に右足が接地するまでの時間である。走行速度と比例関係にあり、走行速度が速くなると走行周期は短くなること³⁾⁴⁾が明らかになっていることから、以降、走行速度の代わりに走行周期を用いる。着地動作時の前後方向と上下方向ピーク値は、モーションセンサを取り付けた右足 5 歩分の平均値の絶対値とした。

前章で示したように、加速度の上下方向成分ピーク値は着地時の衝撃（衝突）の強さを示す。また前後方向成分のピーク値は着地時のブレーキ（減速）の強さに相当する。

表 4.2 屋外走行実験（その1）の舗装種類と物理性状

舗装種類	厚さ [mm]	路面温度（平均値）	
		[°C]	载荷点の路面弾性係数 ²⁾ [MPa]
インターロッキングブロック舗装 (ILB)	60	35	283
アスファルト舗装 (As)	50	32	371
グラウンド (Sand)	50	38	128
芝生 (Grass)	30	37	18
	(芝刈込高さ)		
ウッドチップ舗装 (Wood)	30	44	13

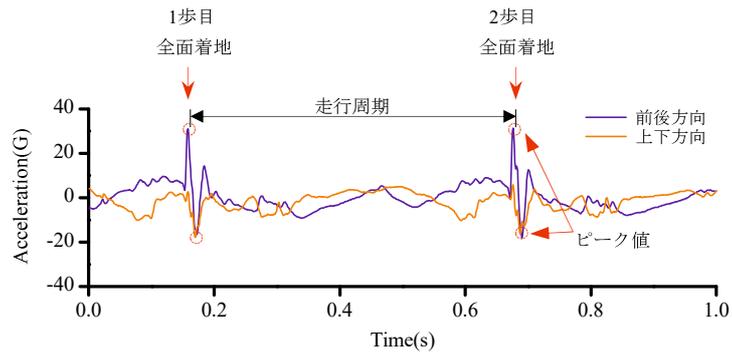
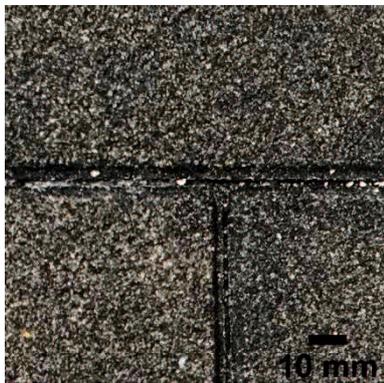
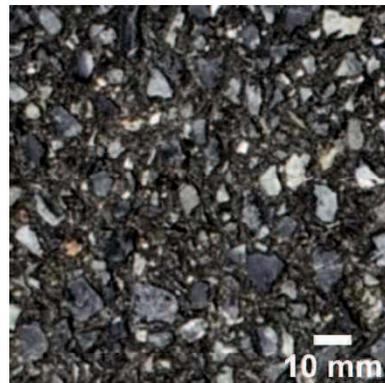


図 4.14 走動作時の加速度波形の例

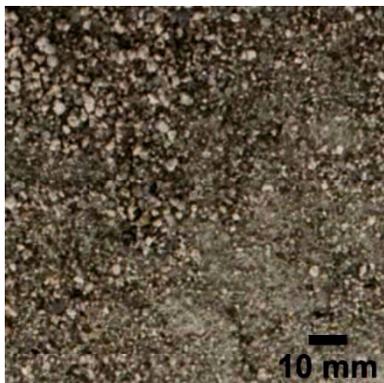
(被験者 B, 高速, ILB 舗装, くるぶし)



(a) インターロッキングブロック舗装 (ILB)



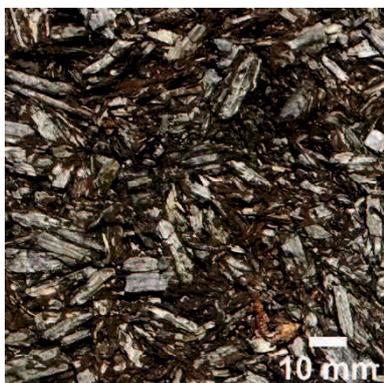
(b) アスファルト舗装 (As)



(c) グラウンド (Sand)



(d) 芝生 (Grass)



(d) ウッドチップ舗装 (Wood)

写真 4.2 屋外走行実験 (その 1) の舗装表面

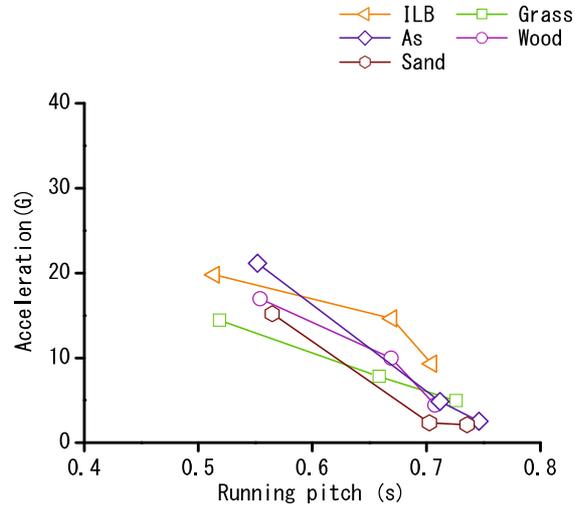
4.4.2 実験結果

被験者 A の走行周期と加速度ピーク値の関係を図 4.15 に示す。前後方向と上下方向もすべての舗装において走行周期が長くなるにつれて加速度ピーク値は小さくなる傾向を示した。前後方向の加速度ピーク値は、走行周期が約 0.7 s の場合はインターロッキングブロック舗装以外、同程度の加速度値を示し、舗装による差が明確に見られない。走行周期が約 0.6 s より短くなると舗装による差がみられ、アスファルト舗装が最も大きく、インターロッキングブロック舗装、ウッドチップ舗装、土、芝生の順で小さい値を示した。上下方向の加速度ピーク値はアスファルト舗装が最も大きく、土、ウッドチップ舗装、芝生、インターロッキングブロック舗装の順で小さい値を示した。

被験者 B の各舗装の走行周期と加速度ピーク値の関係を図 4.16 に示す。前後方向の加速度ピーク値は、走行周期によらずインターロッキングブロック舗装が最も大きく、アスファルト舗装、土、ウッドチップ舗装、芝生の順で小さい値を示した。上下方向の加速度ピーク値は、走行周期が約 0.7 s の場合、グラウンドが最も大きく、アスファルト舗装、その他の 3 種類はほぼ同値であった。走行周期が約 0.6 s より短くなると、アスファルト舗装とウッドチップ舗装が最も大きい。インターロッキングブロック舗装と芝生がほぼ同値でアスファルト舗装やウッドチップ舗装よりも小さい値を示した。したがって、着地方法によらず、前後方向の加速度ピーク値は芝生やウッドチップ舗装で小さく、アスファルト舗装やインターロッキングブロック舗装で大きい値を示した。

【Coefficient of acceleration variation】

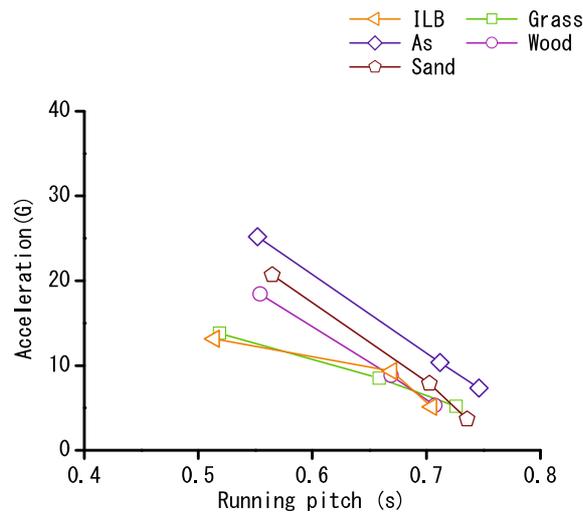
Speed \ Pavement	ILB	As	Sand	Grass	Wood
Low	0.11	0.30	0.50	0.11	0.09
Nomal	0.06	0.43	1.00	0.06	0.23
High	0.10	0.16	0.18	0.10	0.17



(a) 前後方向

【Coefficient of acceleration variation】

Speed \ Pavement	ILB	As	Sand	Grass	Wood
Low	0.04	0.10	0.10	0.04	0.09
Nomal	0.06	0.12	0.17	0.06	0.06
High	0.03	0.10	0.15	0.03	0.15



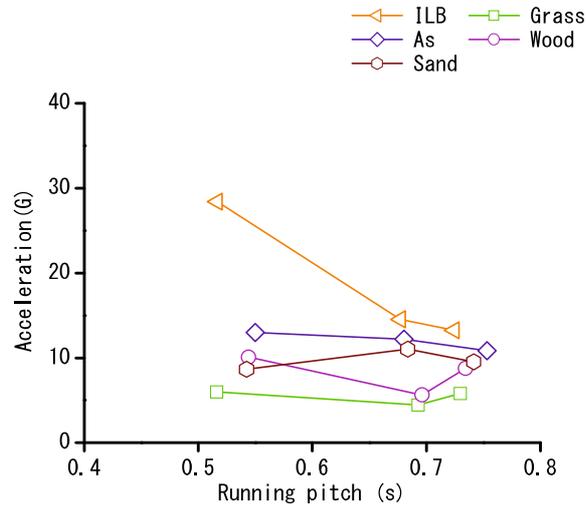
(b) 上下方向

図 4.15 走行周期と加速度ピーク値の関係

(被験者 A : ヒールストライク走法)

【Coefficient of acceleration variation】

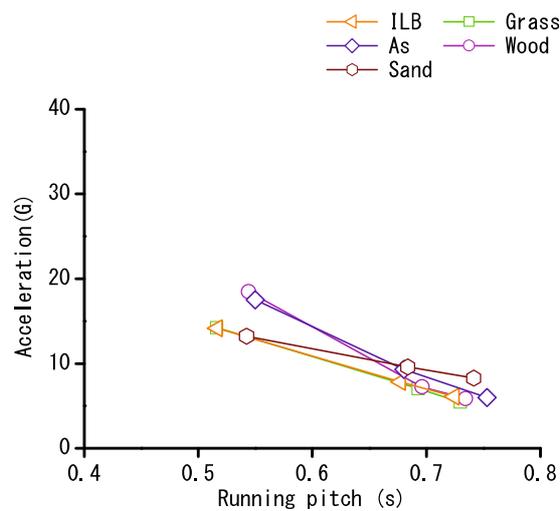
Speed \ Pavement	ILB	As	Sand	Grass	Wood
	Low	0.10	0.03	0.05	0.30
Nomal	0.09	0.06	0.08	0.20	0.12
High	0.10	0.18	0.13	0.64	0.42



(a) 前後方向

【Coefficient of acceleration variation】

Speed \ Pavement	ILB	As	Sand	Grass	Wood
	Low	0.08	0.09	0.10	0.19
Nomal	0.17	0.13	0.14	0.24	0.07
High	0.20	0.26	0.06	0.23	0.20



(b) 上下方向

図 4.16 走行周期と加速度ピーク値の関係

(被験者 B: ミッドフット走法)

次に、舗装表面の変形係数である路面弾性係数と加速度ピーク値との関係を図 4.17 と図 4.18 に示す。図 4.17 に示す被験者 A の結果より、低速および中速走行の場合は上下方向の加速度ピーク値と路面弾性係数は正の相関がある。しかし、高速走行の場合は上下方向より前後方向の加速度ピーク値の方が路面弾性係数と正の相関が高い。図 4.18 に示す被験者 B の結果より、上下方向の加速度ピーク値は路面弾性係数と正の相関が低い。前後方向の加速度ピーク値は路面弾性係数の増大に伴い、増加する傾向が示された。被験者 B はミッドフット走法であり上下方向の衝撃を和らげる走法であり、舗装からの反力を上下方向のみならず前後方向でも荷担するような着地動作を行っている。

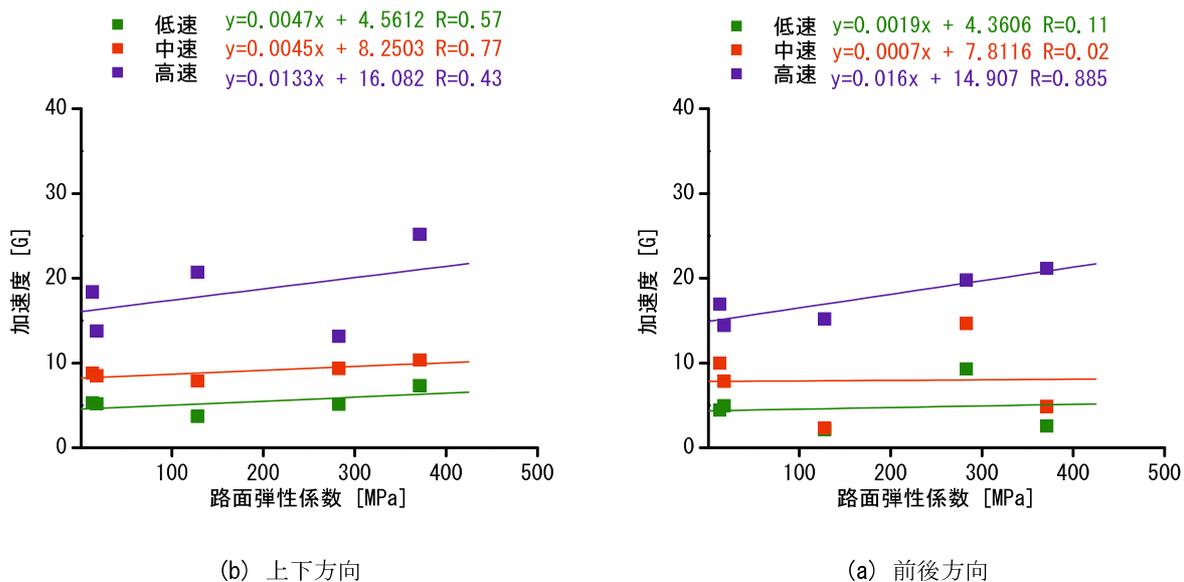


図 4.17 路面弾性係数と加速度ピーク値との関係 (被験者 A: ヒールストライク走法)

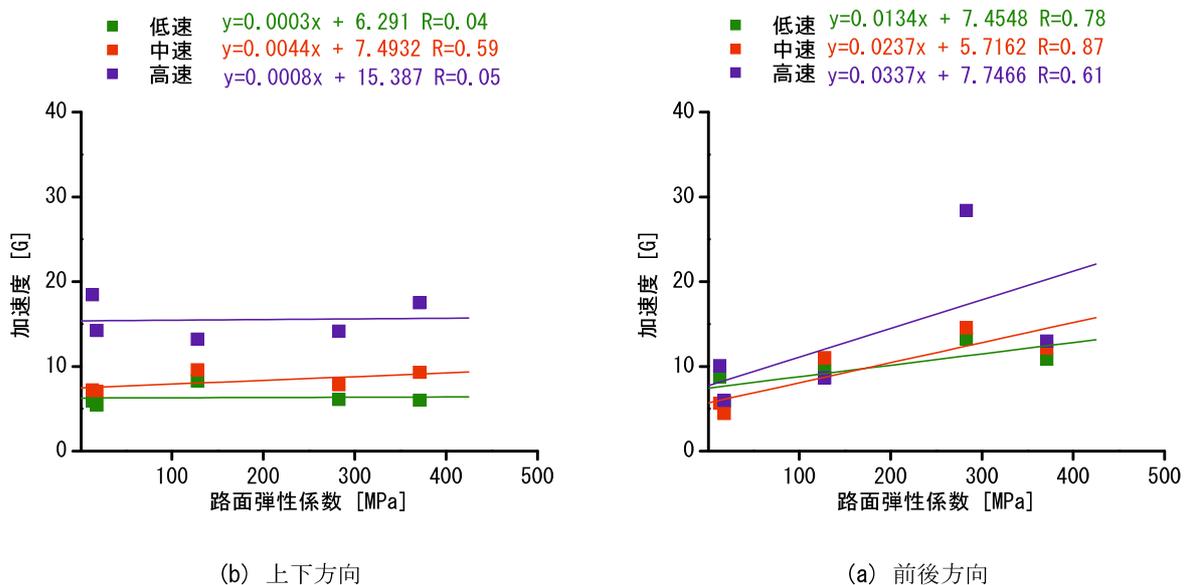


図 4.18 路面弾性係数と加速度ピーク値との関係 (被験者 B: ミッドフット走法)

以上より、舗装の変形特性がランナーの着地衝撃に及ぼす影響として、舗装材料の変形係数が大きくなると上下方向の加速度ピーク値が大きくなると予想していたが、実験結果より、ヒールストライク走法の低速および中速の場合は上記の傾向が見られた。しかし、ヒールストライク走法の高速およびミッドフット

ト走行の低速から高速の場合、上下方向の加速度ピーク値は路面弾性係数の増大による顕著な増加傾向を示さなかった。その代わり前後方向の加速度ピーク値が路面弾性係数の増大による増加傾向を示したため、ランナーが舗装から受ける着地衝撃の大小は、舗装の変形特性のみでは評価することが難しく、舗装のすべり抵抗性なども加味して検討する必要性が示された。

4.5 素材の異なる舗装種別が着地時加速度に与える影響に関する屋外走行実験（その2）

4.5.1 実験概要

本章ではテクスチャの異なるアスファルト舗装から着地時に受ける足への影響の違いを把握することを目的として、テクスチャの異なる5種類のアスファルト舗装を走行した。

走行した舗装種類と舗装の物理性状を表4.3に、舗装表面の写真を写真4.3に示す。示す。野外Bのフィールドのアスファルト舗装5種類を走行した。すべての舗装の下層はアスファルト混合物（ $t=50\text{ mm}$ ）、砕石路盤、路床であった。舗装の剛性は小型FWDを用いて測定を行った。载荷条件は、载荷版 $\phi 100\text{ mm}$ 、重錘 10 kg 、落下高さ 500 mm とした。载荷点の路面弾性係数²⁾は、荷重とたわみのピーク値を用いて、弾性理論式（ポアソン比 0.40 ）より求めた。静摩擦係数はスリップメータを用いて測定を行った。すべり片は市販のランニングシューズのかかと部とした。測定時の路面温度は平均 17.5°C であった。

本実験の被験者は2名とした。健常な20代男性（以下、被験者C）と30代女性（以下、被験者D）の計2名を被験者とした。2名ともにランニング時に履いているシューズで実験を行った。モーションセンサの取り付け位置と方法は、前節で示した屋内実験（その1）と同位置で同手法とした。走行速度は低速（ $1\sim 2\text{ m/s}$ ）、中速（ $2\sim 3\text{ m/s}$ ）、高速（ $3\sim 4\text{ m/s}$ ）の3速度とし、被験者自身が走行できる最高速度を高速とし、中速と低速を各自で決めて走行を行った。走行場の平面図を図4.19に示す。各舗装の施工延長が 10 m であることから、往復 20 m を走行した。なお、 10 m で止まり、方向転換した後に走り出すこととした。5種類の舗装ごとに往復 20 m を3種類の速度で各1回走行し、測定を行った。

モーションセンサを取り付けた右足の接地を基準とし、舗装ごと、走行速度ごと、片道 10 m の走行時の歩数が高速走行時については、約5歩であった。スタート位置から4歩目で減速する動作が見られたため、2歩目と3歩目の2歩分の波形データを往復にて抽出し、解析対象とした。着地動作時の前後方向と上下方向ピーク値は、モーションセンサを取り付けた右足2歩分 $\times 2$ 回（往復走行）、すなわち4歩分の平均値の絶対値とした。

表4.3 屋外走行実験（その2）の舗装種類と物理性状

舗装種類	厚さ [mm]	载荷点の路面弾性係数 ²⁾	
		[MPa]	静摩擦係数
再生密粒(13)	50	1040	0.48
SMA(5)	50	903	0.52
ポーラス(5)-1	50	869	0.52
ポーラス(5)-2	50	846	0.52
ポーラス(13)	50	631	0.53
弾性（多）	50	311	0.58

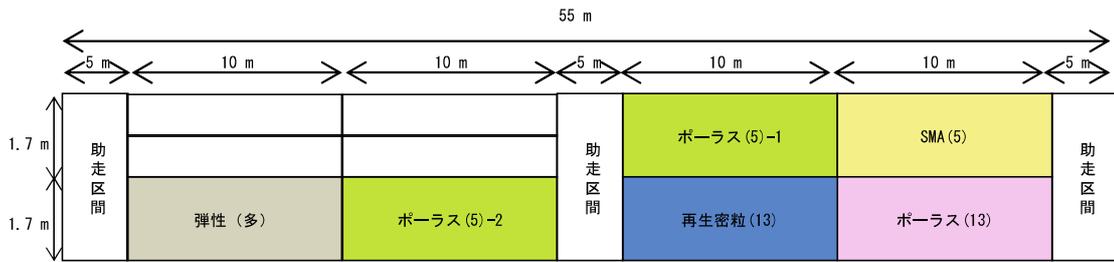
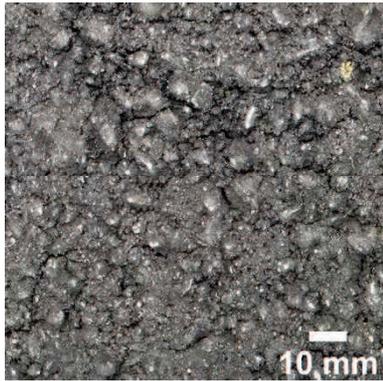
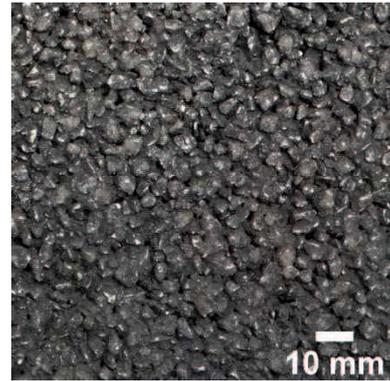


図 4.19 走行場の平面図



(a) 再生密粒(13)



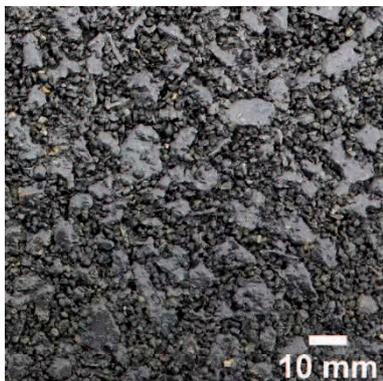
(b) SMA(5)



(c) ポーラス(5)



(d) ポーラス(13)



(e) 弾性(多)

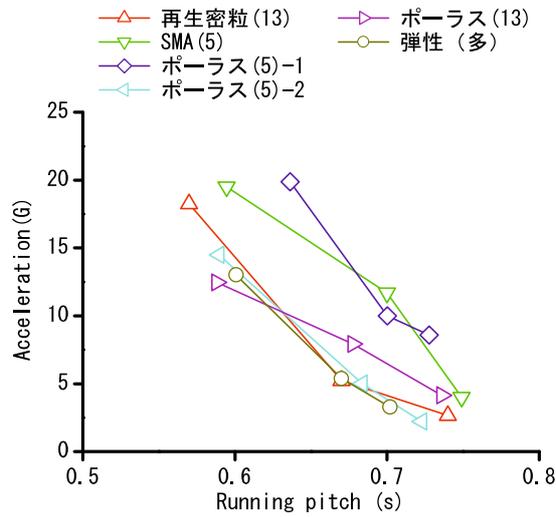
写真 4.3 走行試験場の舗装表面

4.5.2 実験結果

走行周期と加速度ピーク値との関係を図 4.20 と図 4.21 に示す。図 4.20 に示したミッドフット走法の被験者 C の結果より、SMA(5)とポーラス(5)-1 は前後方向の加速度ピーク値が上下方向より大きい。その他の舗装種類については、前後方向の加速度ピーク値に比べて上下方向のピーク値の方が大きい。次に、前後方向および上下方向の加速度ピーク値は舗装種類によらず走行周期が大きくなるにつれて、小さい。すなわち、走行速度が速くなると、加速度のピーク値は大きい。図 4.21 に示したヒールストライク走法の被験者 D の結果より、前後方向の加速度ピーク値より上下方向の加速度ピーク値の方が大きい。大学の屋外実験で示した被験者 A や B, C の結果とは異なる点である。走行周期が小さくなるにつれて、前後方向の加速度は大きい。そして、前後方向および上下方向の加速度ピーク値は舗装種類によらず、走行周期が大きくなるにつれて、小さい。すなわち、走行速度が速くなると加速度のピーク値は大きい。

【Coefficient of acceleration variation】

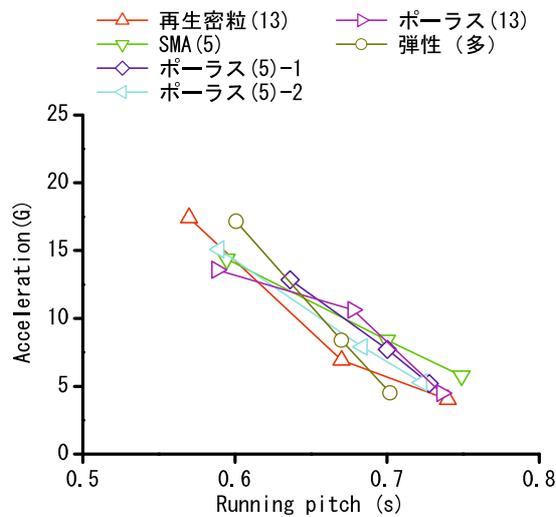
	再生密粒 (13)	SMA(5)	ポーラス (5)-1	ポーラス (5)-2	ポーラス (13)	弾性 (多)
低速	0.05	0.09	0.37	0.23	0.30	0.08
中速	0.34	0.10	0.13	0.09	0.11	0.25
高速	0.20	0.22	0.18	0.25	0.33	0.33



(a) 前後方向

【Coefficient of acceleration variation】

	再生密粒 (13)	SMA(5)	ポーラス (5)-1	ポーラス (5)-2	ポーラス (13)	弾性 (多)
低速	0.54	0.05	0.20	0.29	0.36	0.12
中速	0.34	0.30	0.21	0.20	0.52	0.15
高速	0.24	0.26	0.14	0.14	0.21	0.22

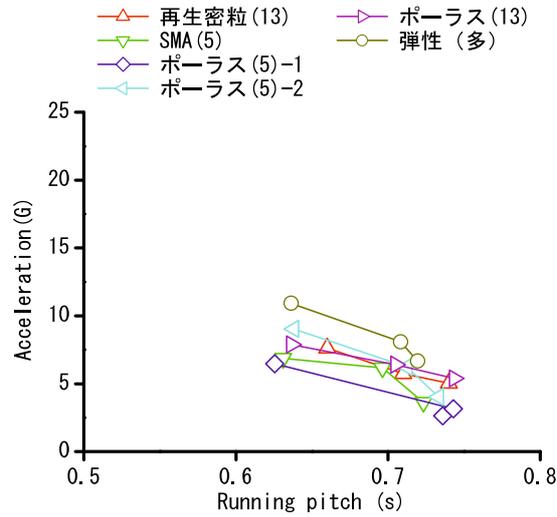


(b) 上下方向

図 4.20 走行周期と加速度ピーク値の関係 (被験者 C: ミッドフット走法)

【Coefficient of acceleration variation】

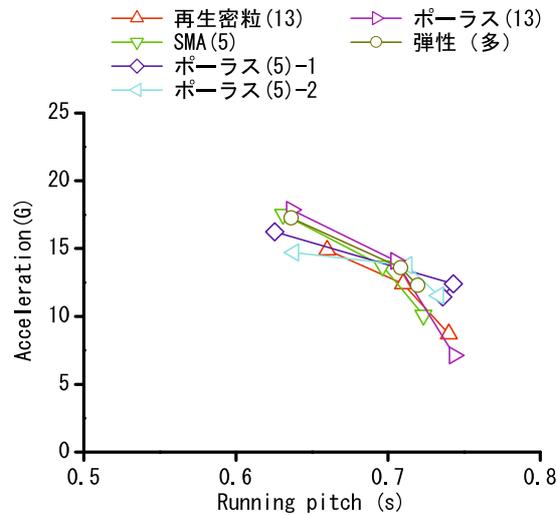
	再生密粒 (13)	SMA(5)	ポーラス (5)-1	ポーラス (5)-2	ポーラス (13)	弾性 (多)
低速	0.12	0.08	0.11	0.24	0.07	0.08
中速	0.35	0.06	0.13	0.14	0.12	0.16
高速	0.06	0.13	0.38	0.19	0.07	0.09



(a) 前後方向

【Coefficient of acceleration variation】

	再生密粒 (13)	SMA(5)	ポーラス (5)-1	ポーラス (5)-2	ポーラス (13)	弾性 (多)
低速	0.06	0.04	0.13	0.05	0.03	0.09
中速	0.07	0.11	0.17	0.10	0.06	0.35
高速	0.11	0.15	0.13	0.14	0.08	0.08



(b) 上下方向

図 4.21 走行周期と加速度ピーク値の関係 (被験者 D: ヒールストライク走法)

次に、舗装表面の変形係数である路面弾性係数と加速度ピーク値との関係を図 4.22 と図 4.23 に示す。図 4.22 に示す被験者 C の結果より、路面弾性係数の増加に伴い、上下方向の加速度ピーク値は低下傾向を示し、前後方向の加速度ピーク値は増加傾向を示した。図 4.23 に示す被験者 D の結果より、路面弾性係数の増加に伴い、上下方向の加速度ピーク値は低下傾向を示し、前後方向の加速度ピーク値も低下傾向を示した。

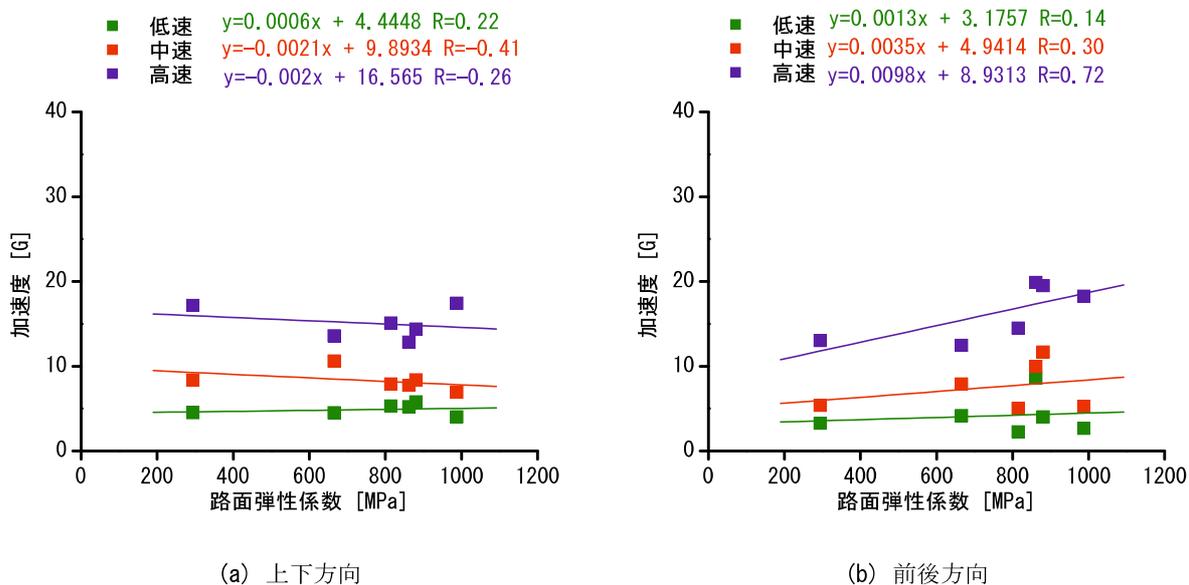


図 4.22 路面弾性係数と加速度ピーク値との関係 (被験者 C: ミッドフット走法)

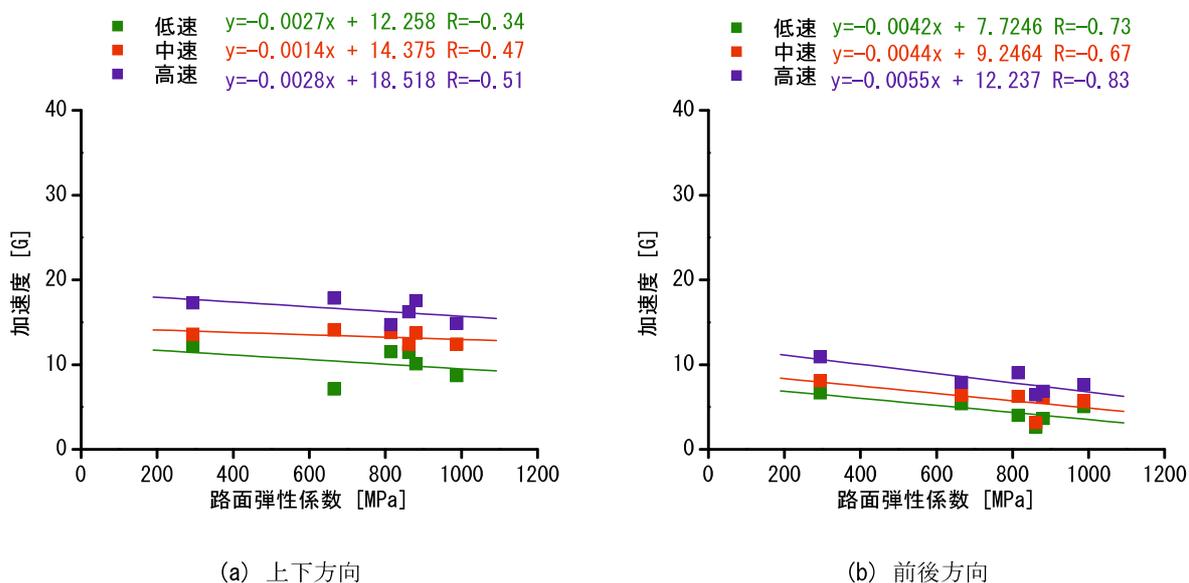
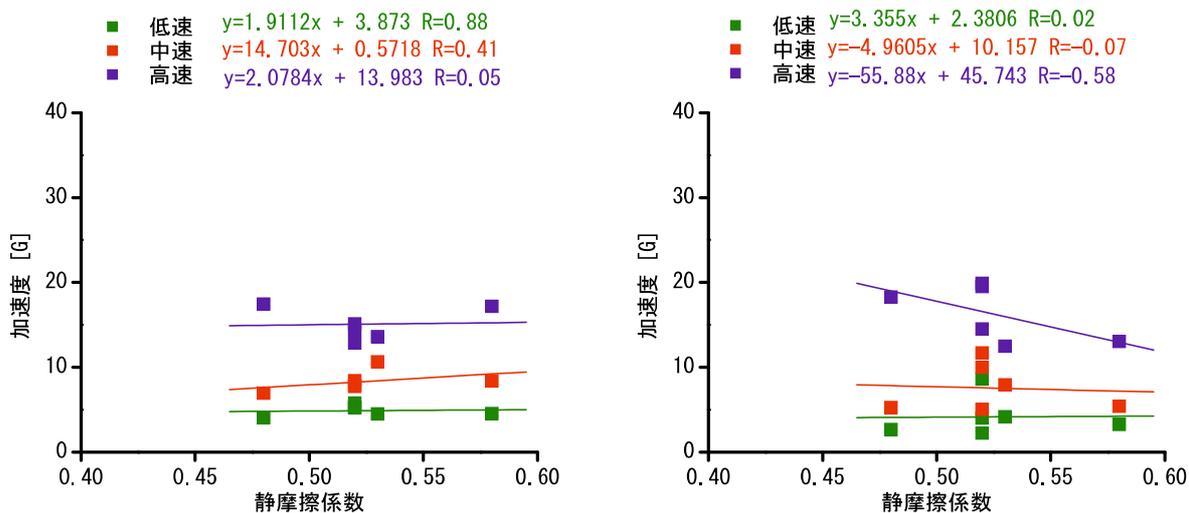


図 4.23 路面弾性係数と加速度ピーク値との関係 (被験者 D: ヒールストライク走法)

最後に舗装表面の静摩擦係数と加速度ピーク値との関係を図 4.24 と図 4.25 に示す。図 4.24 に示す被験者 C の結果より、前後方向および上下方向の加速度ピーク値とは高速走行時において静摩擦係数が大きくなるほど小さい。被験者 C はミッドフット走法であるため、すべり抵抗性の指標と相関があると予想していたが、反する結果となった。図 4.25 に示す被験者 D の結果より、前後方向および上下方向の加速度ピーク値は静摩擦係数の増加に伴い、増大することが見てとれる。よって、ヒールストライク走法の被

験者 D は路面弾性係数の影響よりも、舗装表面のすべり抵抗性の影響を受け、静摩擦係数が大きいほど、すなわち着地による減速が大きいほど加速度は増大する傾向が示唆された。

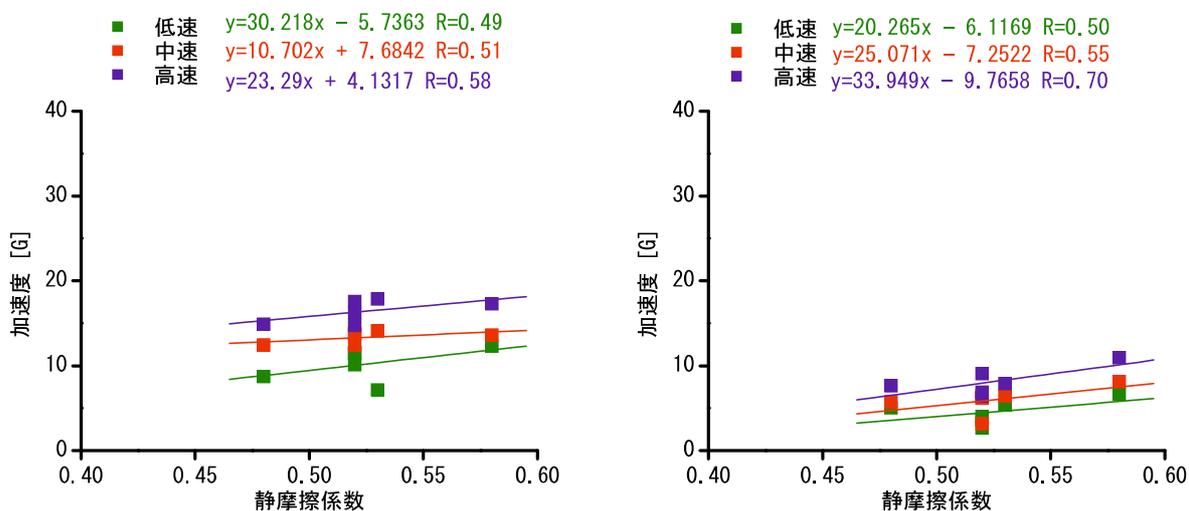
以上より、アスファルト舗装の種類による加速度ピーク値に差異があることを明らかにした。被験者および着地方法によって異なるため、上下方向の加速度ピーク値のみならず前後方向の加速度ピーク値も着目する必要がある。本実験は被験者数が 2 名の結果であるため、被験者を増やして再現性の確認を行う必要がある。



(a) 上下方向

(b) 前後方向

図 4.24 静摩擦係数と加速度ピーク値との関係 (被験者 C : ミッドフット歩法)



(a) 上下方向

(b) 前後方向

図 4.25 静摩擦係数と加速度ピーク値との関係 (被験者 D : ヒールストライク歩法)

4.6 本章のまとめ

本研究では加速度計の一種である 9 軸モーションセンサを用いて、計測方法と評価手法を明らかにし、ランナーが舗装を走行した場合における走動作分析への適用性を実験的に検証した。得られた知見を以下に述べる。

- 1) モーションセンサの性能確認実験より、グローバル座標系に加速度を変換することで、運動中にセンサの姿勢が変化しても、絶対座標系の加速度として統一的に評価することが可能であることを示唆された。
- 2) ウェアラブルな 9 軸加速度・角速度ワイヤレスセンサを足に装着することにより足の運動を連続的に計測するものである。着地衝撃の計測方法として、従来の床反力計では、定点での着地時反力しか計測できなかったのに対して、本手法により、場所を選ばず、ランナーの足の動きを連続的に観測することが可能となった。
- 3) モーションセンサを装着した室内走行実験を行った結果、着地衝撃は、前後方向のプラスピーク（減速）と上下方向のマイナスピーク（床衝突）として現れ、蹴り出しは上下方向と前後方向のマイナスの緩やかな谷（上方への加速と、それに続くつま先を中心とした回転運動）として現れることがわかった。
- 4) 走動作時の着地から立脚期、立脚期から蹴り出しまでの所要時間が明らかになった。
- 5) 走動作時の加速度ピークは、全面着地時に生じることが明らかになった。
- 6) 屋外の走行実験結果より、前後方向の加速度ピークによって、舗装の種類による影響を把握することが可能であることを示唆した。ただし、舗装の変形係数の代表値として路面弾性係数と加速度ピーク値の関係については、明確にはならなかった。

この結果について、被験者が限定的であることから、実験結果の再現性を確認する必要がある。そして、ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさは、舗装の変形係数のみならず、摩擦や表面粗さの影響も考慮しなければならないことを示した。

【第4章の参考文献】

- 1) 矢田部学：クォータニオン計算便利ノート，MSS 技報，Vol. 18, 2007.
- 2) 公益社団法人 土木学会 舗装工学委員会：舗装工学ライブラリー14 非破壊試験による舗装のたわみ測定と構造評価，公益社団法人 土木学会，p. 34, 2015.
- 3) 伊藤章，市川博啓，斎藤昌久，佐川和則，伊藤道郎，小林寛道：100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係，体育学研究，Vol. 43, No. 5-6, pp. 260-273, 1998.
- 4) Kerdok, A. E., Biewener, A. A., Mcmhon, T. A., Weynd, P. G. and Herr, H. M.: Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 92, No. 2, pp. 469-478, 2000.

第5章 舗装の表面粗さがシューズ底面の変位

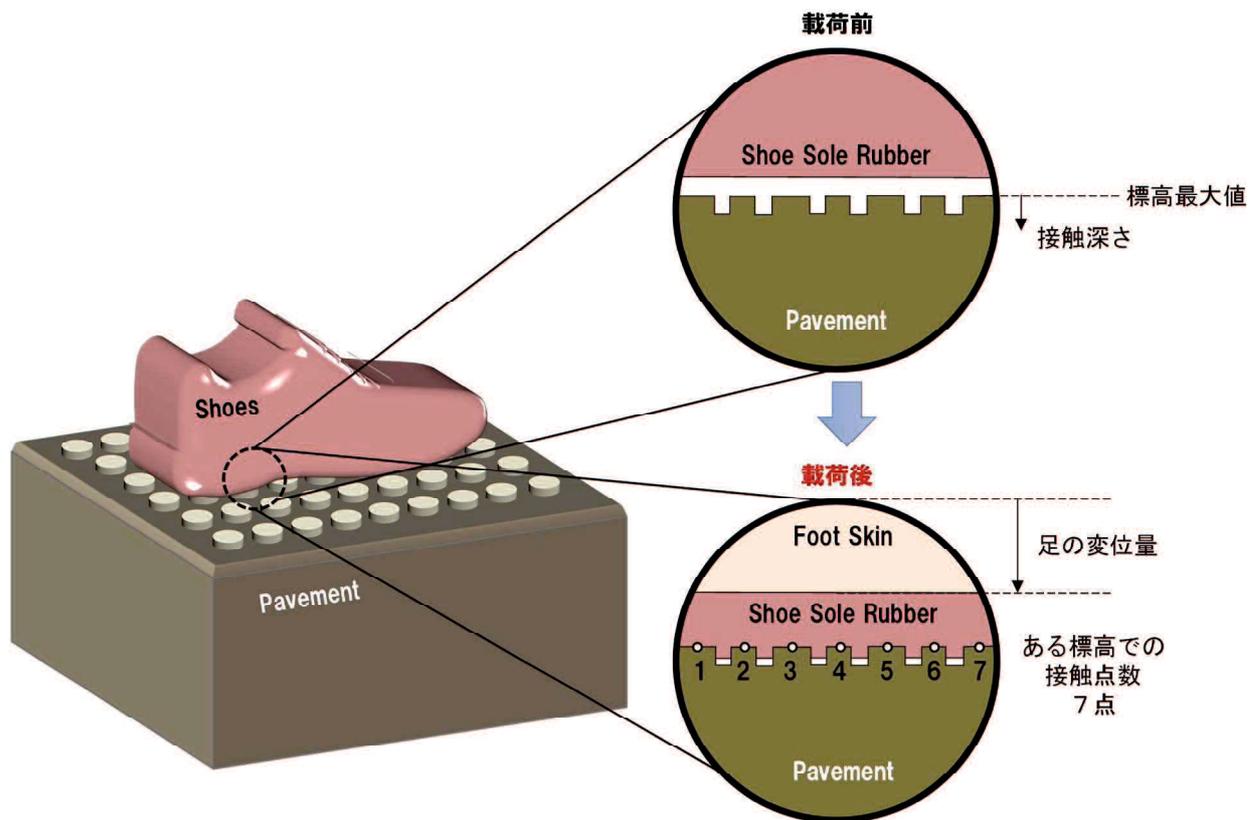
および摩擦特性に及ぼす影響

5.1 概説

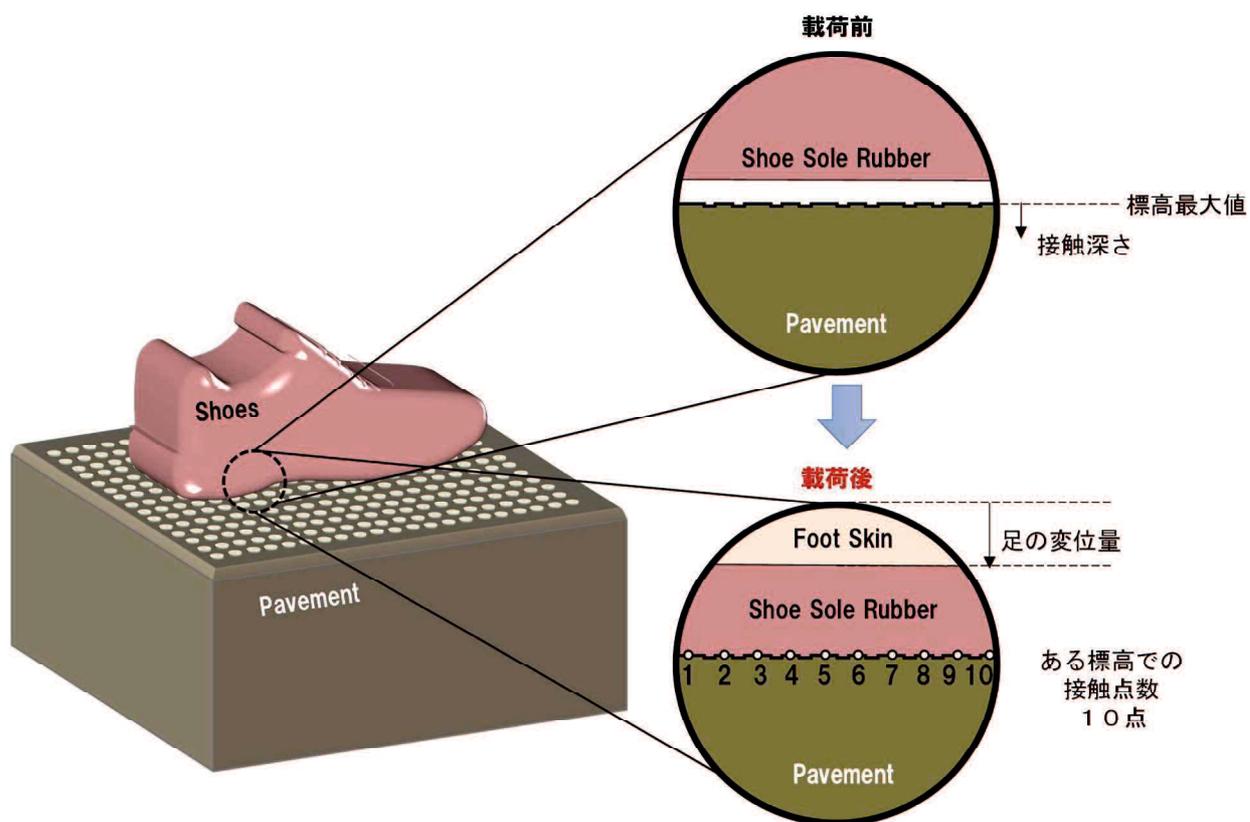
第3章において、アスファルト舗装の細密(13)と開粒(13)でランナーの着地衝撃の感触の違いを明らかにした。ランナーの着地衝撃の感触が舗装種類によって異なるのは、舗装の表面粗さが要因であると考えられる。例えば、指で物体を撫でるとき、表面がツルツルな場合とザラザラな場合とでは手が感じる摩擦抵抗は異なる。同様に、物体に手を押し当てるとき、材質が同じでも表面粗さが異なれば、手が感じる硬さの印象は変化すると考えても不思議はない。

ここで、標高差の大きい表面粗さを有する舗装の場合と標高差の小さい表面粗さを有する舗装に、シューズ底面が接触するプロセスを考えてみる。概念図を図5.1に示す。図5.1(a)は舗装の表面粗さの標高差が大きい場合であり、図5.1(b)は標高差が小さい場合において、同一のランナー（荷重は同一）のシューズ底面が舗装の表面に接地した場合を想定した概念図である。ここで標高差が大きくなると山部と谷部の発現間隔が広くなり、標高差が小さくなると山部と谷部の発現間隔が狭くなると考え、標高差に着目をして説明をする。図5.1に示したシューズソールはゴムとする。第3章で示した表面粗さの概念図を図5.2に示す。図5.1(a)に示す舗装の表面粗さの標高差が大きい場合、標高最大値を示す標高から接地し、丸印で示した同一の標高を示す点が7点である。図5.1(b)に示す舗装の表面粗さの標高差が小さい場合、丸印で示した同一の標高を示す点が10点と、図5.1(a)の標高差が大きい場合に比べて接地点が多い。つまり、舗装の表面粗さの標高差が大きい場合と小さい場合で接地点数が異なる。さらに、シューズ底面のゴムが舗装の表面粗さの山部および谷部へ沈み込むことによって、シューズ底面のゴムの変形量も異なる。この現象は舗装表面とシューズ底面のゴムとの接地による力学の問題である。舗装の表面粗さの差異によって生じるシューズ底面のゴムの変形量および摩擦が影響して、ランナーは着地衝撃の感触の違いを捉えていると仮説を立てた。

本章では、ランナーの足に生じる着地衝撃の大きさに関して、ランナーのシューズ底面のゴムと舗装との力学問題と捉え、ゴムの変形特性および摩擦特性について室内実験を行う。



(a) 舗装の表面粗さの標高差が大きい場合



(b) 舗装の表面粗さの標高差が小さい場合

図 5.1 舗装表面にゴムが接地した場合の概念図

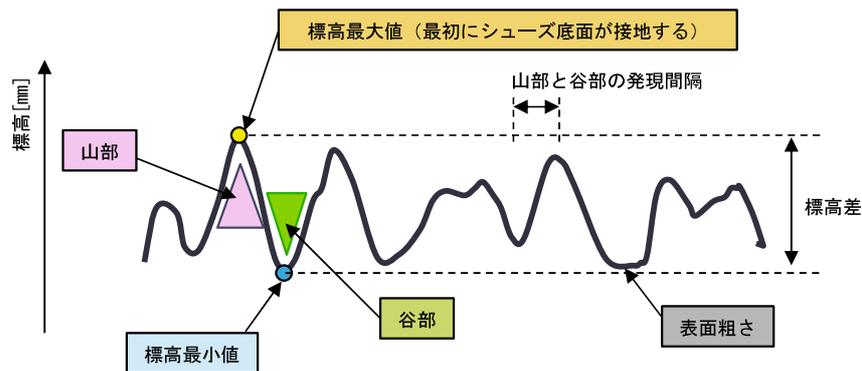


図 5.2 舗装の表面粗さの概念図 (第 3 章に記載)

5.2 舗装の表面粗さの評価指標

物体の表面粗さを表現する指標は種々あるが、利用する力学現象に応じて使い分ける必要がある。ここでは、本研究が対象とするシューズ底面と舗装表面の接地を表現するのに適切な表面粗さ指標について議論する。第 3 章で示した *MPD* は、舗装の表面粗さを評価する指標として *ASTME1845-01* に記述されている。また、ガラスや加工部品などの物体の表面粗さを評価する指標として、日本規格協会 (JIS) が規定した *JIS B 0601 : 2001* や *JIS B 0651* が用いられている。第 3 章で示したスキューネスとクルトシスは *JIS B 0601 : 2001* に記載されている指標である。まず、既存の規格化された指標を用いて、アスファルト舗装の種類ごとの表面粗さを数値化する。検討については、室内で供試体を作製し、第 3 章と同様に *MRP* を用いて、一測線の表面粗さで評価を行った。

本研究で検討しているランナーの着地動作を考えたとき、舗装の表面とシューズ底面は一測線で接地しているのではなく、舗装の表面で接地している。舗装の表面粗さの評価は線粗さで行うことが多いが、本研究ではランナーの着地時に作用する力と表面粗さとの関係を明らかにすることを目的としているため、図 5.1 に示したよう、シューズ底面が舗装の表面粗さの最大標高値から接地することを加味した評価値について検討を行った。

5.2.1 対象とした舗装種類

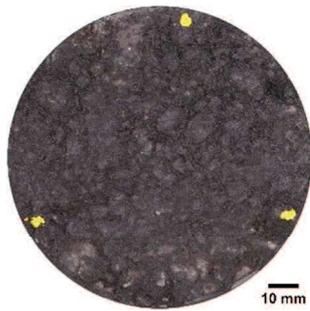
本章で対象とした舗装の種類を表 5.1 に示す。アスファルト舗装については細密(13)、密粒(13)、SMA(5)、ポーラス(5)、開粒(13)、ポーラス(13)の 6 種類とした。アスファルト舗装以外の舗装材料を用いた舗装供試体は、弾性 (多)、ほうき目入りのコンクリート舗装、陸上競技場の全天候型ウレタン舗装の表面粗さが異なる 2 種類 (陸上スプレー、陸上ローラー) の計 4 種類とした。円柱供試体の表面写真を写真 5.1 に、3D 形状測定機で計測した表面の接写を写真 5.2 に示す。そして、アスファルト舗装で用いた混合物の骨材配合割合および合成粒度を表 5.2 に示し、コンクリートの示方配合を表 5.3 に示す。

表 5.1 平板および円柱供試体の舗装種類

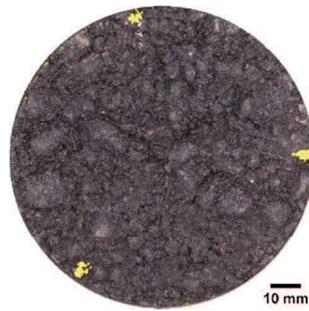
略称	名称	材料	特徴
細密(13)	細密粒度ギャップ アスファルト混合物	ポリマー改質アスファ ルトII型	第3章で使用
密粒(13)	密粒度アスファルト 混合物(13)	ストレートアスファ ルト 60/80	車道，歩道で用いられている。 粒度は，細密(13)より粗い。
SMA(5)	碎石マスチック アスファルト混合物(5)	ポリマー改質アスファ ルトII型	車道部の修繕工法（表層オーバーレイ等） で使用。
ポーラス(5)	小粒径 ポーラスアスファルト 混合物(5)	ポリマー改質アスファ ルト H 型	騒音低減対策として，東京都や高規格道路 （首都高速道路）で用いられている。 表面排水効果がある。
開粒(13)	開粒度アスファルト 混合物(13)	ポリマー改質アスファ ルトII型	第3章で使用
ポーラス(13)	ポーラスアスファルト 混合物(13)	ポリマー改質アスファ ルト H 型	全国の高規格道路（国道・高速道路）で適 用。表面排水効果がある。
弾性（多）	（母体） 開粒度アスファルト 混合物(13)	ポリマー改質アスファ ルトII型	第3章で使用
コンクリート	コンクリート舗装(20)	コンクリート	最大粒径 20 mm のコンクリート舗装。 ほうき目仕上げ。
陸上スプレー	全天候型ウレタン舗装	ウレタン樹脂材	陸上競技場のトラック走路の舗装。 舗装表面はスプレーを塗布し，仕上げる。
陸上ローラー	全天候型ウレタン舗装	ウレタン樹脂材	陸上競技場のトラック走路の舗装。 舗装表面は手押しローラーで仕上げる。

※混合物の()内の数字は，骨材の最大粒径を示す。

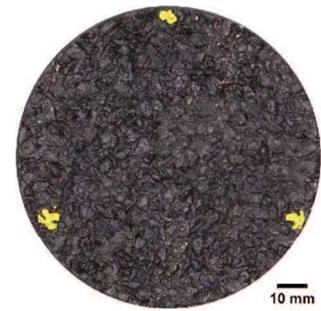
※平板供試体は，陸上スプレーと陸上ローラーは除く。



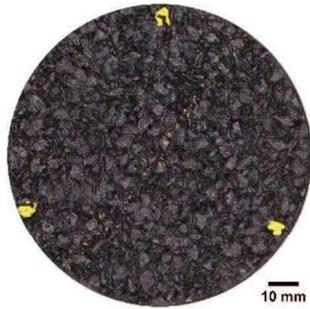
(a) 細密(13)



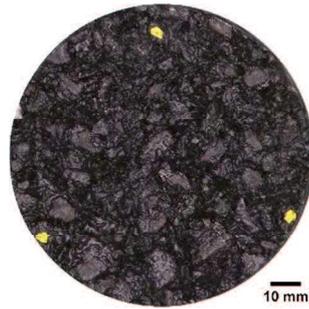
(b) 密粒(13)



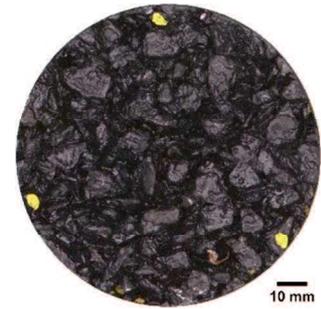
(c) SMA(5)



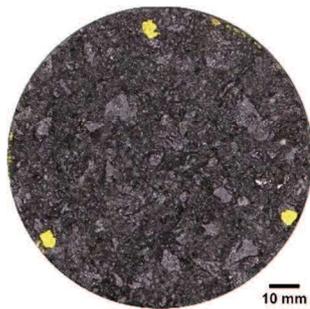
(d) ポーラス(5)



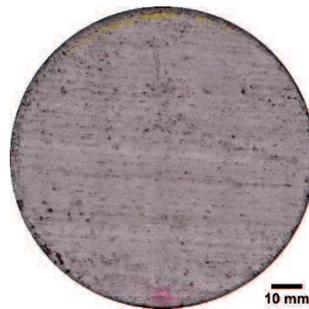
(e) 開粒(13)



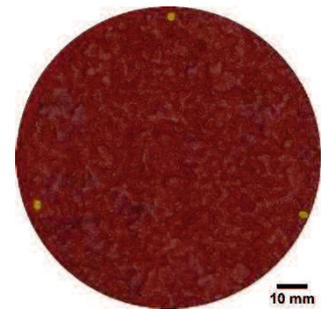
(f) ポーラス(13)



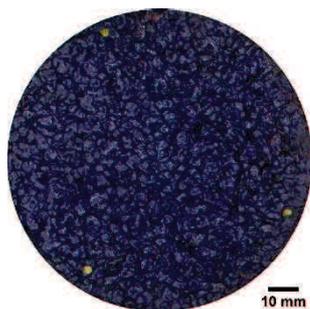
(g) 弾性 (多)



(h) コンクリート

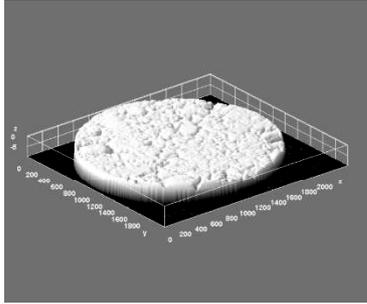


(i) 陸上スプレー

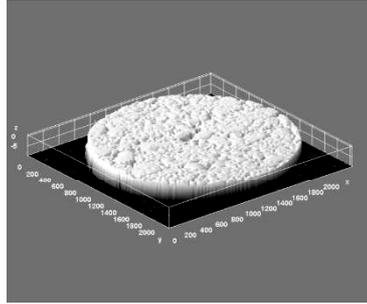


(j) 陸上ローラー

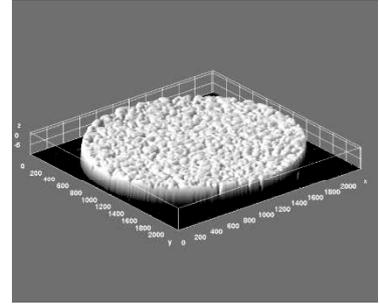
写真 5.1 円柱供試体の表面接写



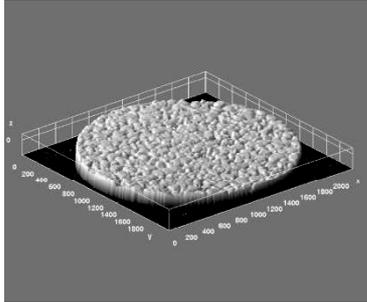
(a) 細密(13)



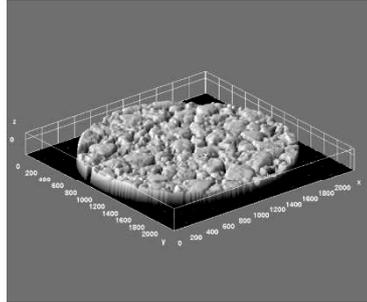
(b) 密粒(13)



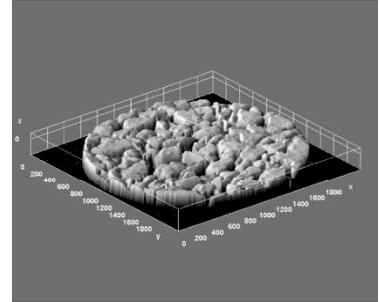
(c) SMA(5)



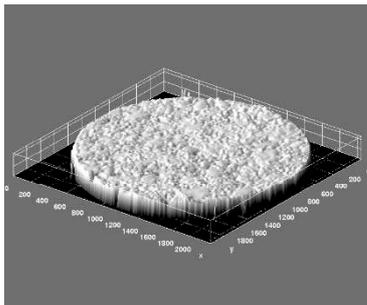
(d) ポーラス(5)



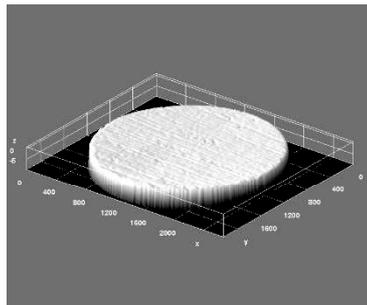
(e) 開粒(13)



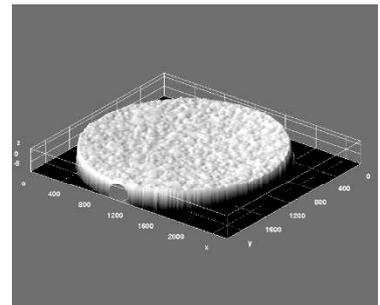
(f) ポーラス(13)



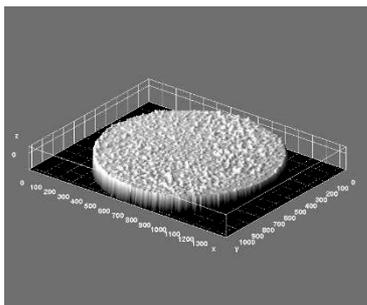
(g) 弾性(多)



(h) コンクリート



(i) 陸上スプレー



(j) 陸上ローラー

写真 5.2 円柱供試体の表面接写 (3D スキャナでの撮影画像)

表 5.2 アスファルト混合物の骨材配合割合及び合成粒度他

混合物種類		細密(13)	密粒(13)	SMA(5)	ポーラス (5)	開粒(13)	ポーラス (13)
配合割合 (%)	6号砕石	39.4	35.5	—	—	69.7	86.0
	7号砕石	17.1	24.5	66.0	85.5	8.3	—
	粗目砂	8.2	24.5	15.0	—	17.0	4.5
	細目砂	24.8	9.0	7.0	9.0	—	4.5
	石粉	10.5	6.5	12.0	5.5	5.0	5.0
	アスファルト	5.8	5.0	6.2	5.6	4.5	5.2
合成粒度 (%)	19.0 mm	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	13.2 mm	98.5	97.2	100.0	100.0	97.8	99.9
	4.75 mm	64.4	59.9	100.0	96.1	34.0	18.1
	2.36 mm	46.9	42.5	38.2	22.6	22.5	14.7
	0.60 mm	34.0	23.7	24.4	13.0	11.8	12.3
	0.30 mm	23.3	16.7	19.2	9.9	8.7	9.5
	0.15 mm	12.1	9.5	13.2	6.0	6.1	6.1
	0.075 mm	9.2	6.4	10.1	5.0	4.8	4.4
密度 (g/cm ³)		2.373	2.424	2.370	2.058	2.053	1.999
空隙率 (%)		3.3	2.7	3.5	17.0	17.8	20.2

表 5.3 平板および円柱供試体のコンクリート舗装の示方配合¹⁾

粗骨材の 最大寸法	スランプ 目標値	空気量の 目標値	水セメント 比	単位粗骨材 かさ容積	単位量 [kg/m ³]				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
[mm]	[cm]	[%]	W/C [%]						
20	4	5.5	44	0.735	145	330	644	1193	0.825

アスファルト混合物は 2.36 mm 以上の骨材を粗骨材、2.36 mm 以下の骨材を細骨材と称す。骨材の配合割合を図 5.3 に示す。骨材の配合割合より、細密(13)や密粒(13)、SMA(5)は細骨材の割合が 40% を占めている。特に細密(13)と SMA(5)はアスファルトと結合し、モルタルを形成するために使用する石粉が 10% 程度を占めている。ポーラス(5)とポーラス(13)は粗骨材が 80% 程度を占めており、細骨材は 20% 以下である。開粒(13)も粗骨材が 70% を占めているが、ポーラス(13)に比べて細骨材の割合が多い。

以上の配合割合によって合成した粒度を図 5.4 に、2.36 mm 通過質量百分率の値を図 5.5 に示す。密粒(13)と SMA(5)を比較すると、最大粒径は異なるが、2.36 mm 以下の通過質量百分率は同値である。ポーラス(5)と SMA(5)を比較すると、最大粒径は同値であるが、2.36 mm 以下の通過質量百分率は SMA(5)よりポーラス(5)の方が小さい。開粒(13)とポーラス(5)を比較すると、最大粒径は異なるが 2.36 mm 以下の通過質量百分率は同値である。ふるいの呼び寸法が 2.36 mm の時の通過質量百分率を種類ごとに比較すると、細密(13)は 6 種類の中で最も大きい。ポーラス(13)は 6 種類の中で最も小さい。2.36 mm の時の通過質量百分率は細密(13)、密粒(13)、SMA(5)、ポーラス(5)、開粒(13)、ポーラス(13)の順で小さくなっている。すなわち、粗骨材を示す割合が大きくなっていることを示された。

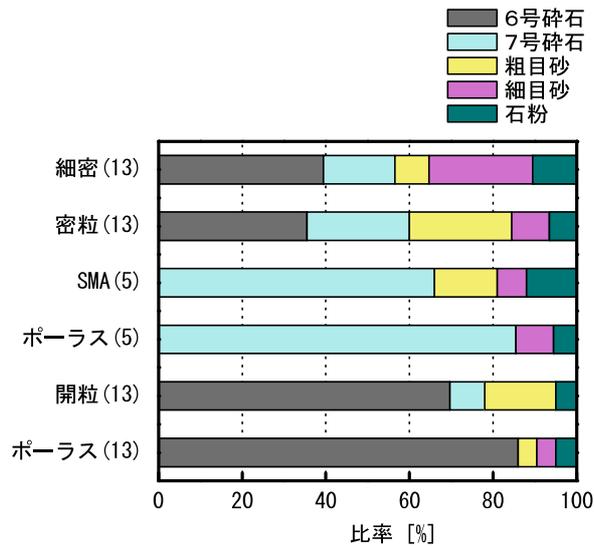


図 5.3 平板および円柱供試体で用いたアスファルト混合物の骨材配合割合

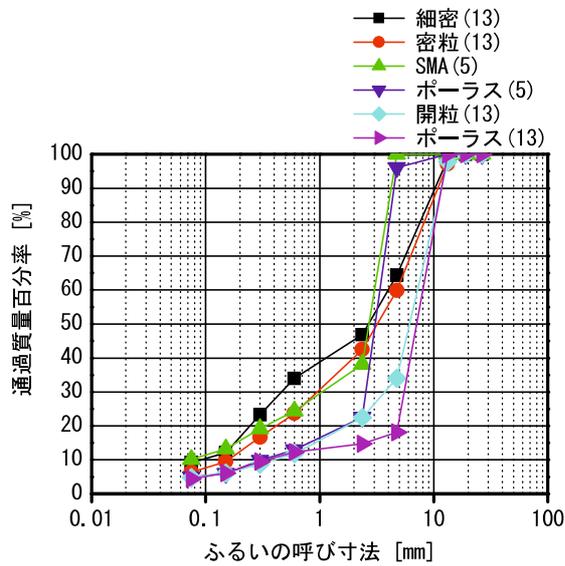


図 5.4 平板および円柱供試体で用いたアスファルト混合物の合成粒度

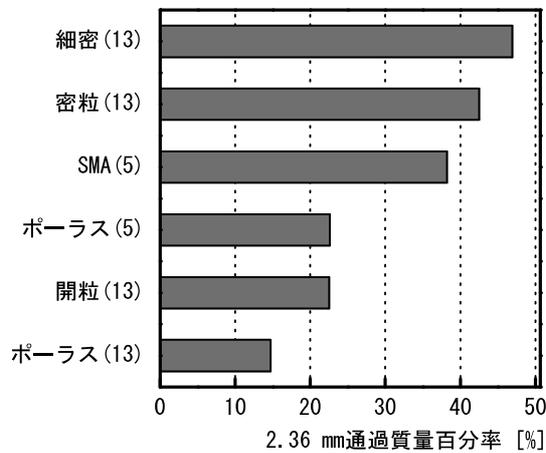


図 5.5 平板および円柱供試体で用いたアスファルト混合物の 2.36 mm 通過質量百分率

5.2.2 舗装の表面粗さ（線粗さ）の評価指標

(1) 測定方法

表面粗さの異なる舗装に対して、第3章で示した *MPD* とスキューネスとクルトシスの指標で評価を行った。ここで用いた指標は、ある一測線を測定したデータを用いた「線粗さ」の評価指標であることを記しておく。以下、舗装の表面粗さ（線粗さ）と記す。

評価対象とする舗装の供試体は、室内で作製した供試体は縦 300 mm、横 300 mm、厚さ 50 mm の正方形（以下、平板供試体）とした。平板供試体を舗装種類ごとに4枚作製した。平板供試体の表面粗さ（線粗さ）の測定方法を図 5.6 に示す。作製した4枚の供試体を測定方向に直列に配置した。その供試体をMRPにてプロファイルを測定した。測定位置は、供試体中心測線および中心測線から 50 mm ずつ左右に離れた3測線とした。区間長 100 mm とし、測定したプロファイルに対して区間ごとに ISO 13473-2:2002 および ASTM E1845-09 に準拠した勾配補正を行い、表面粗さ（線粗さ）を抽出した。表面粗さ（線粗さ）の標高は、勾配補正時の近似直線を標高の基準線 (=0) とした。表面粗さ（線粗さ）の評価指標として *MPD* とスキューネス、クルトシスを区間長ごとに算出した。高さの測定間隔は進行方向 0.3 mm、分解能 0.03 mm であった。測定した高さデータは進行方向に 0.5 mm 間隔で出力した。そして、各平板の延長 300 mm あたり供試体の前後の端部から 50 mm を除く、200 mm を評価区間とした。

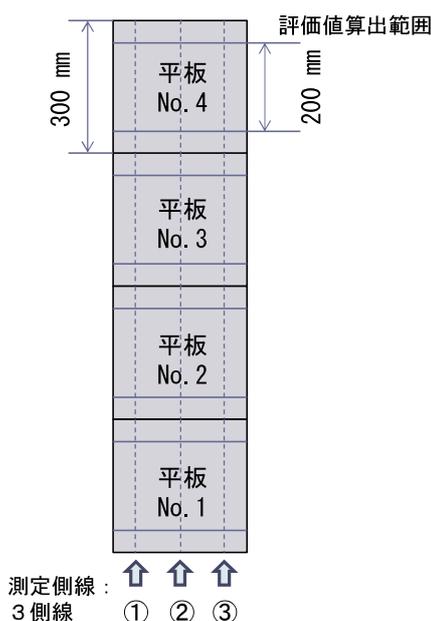
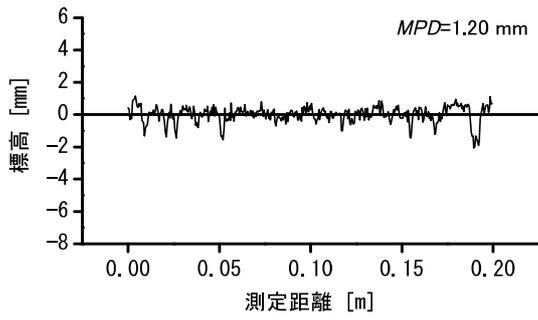


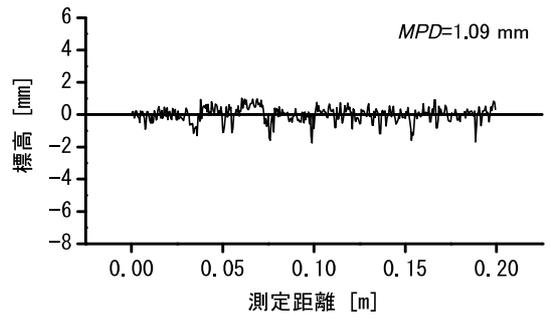
図 5.6 表面粗さ（線粗さ）の測定方法

(2) 測定した表面粗さ（線粗さ）

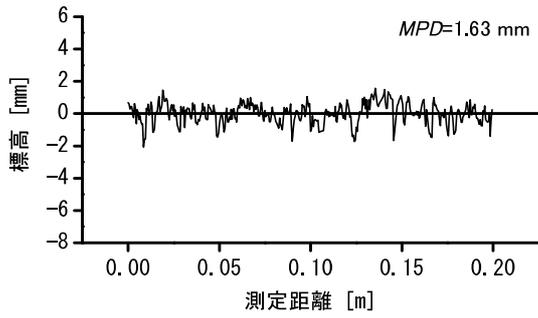
平板供試体で測定した供試体表面の表面粗さ（線粗さ）を図 5.7 に示す。図 5.7(a), (b) に示す細密(13)や密粒(13)は標高差が小さく、山部と谷部の間隔が小さい。図 5.7(e), (f) に示すポーラス(13)と開粒(13)は、標高差のみならず、山部と谷部の間隔が大きい。図 5.7(c), (d) SMA(5)とポーラス(5)は骨材の最大粒径 5 mm とし、13 mm より小さい骨材を粗骨材として用いた。弾性（多）は開粒(13)の空隙に細かい骨材で空隙を埋めることにより、波形間隔および凹凸高さの小さい表面粗さとなる。コンクリートの供試体は、ほうき目を入れたため、細密(13)よりも凹凸の間隔が狭く、凹凸高さも小さい波形であることがわかる。



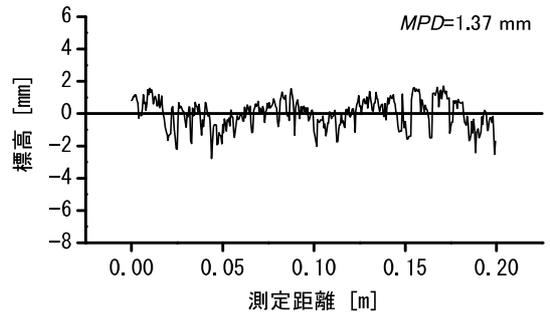
(a) 細密(13)



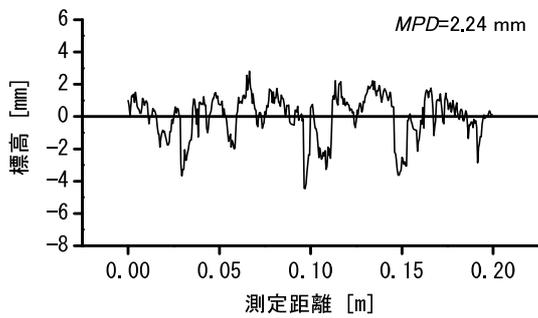
(b) 密粒(13)



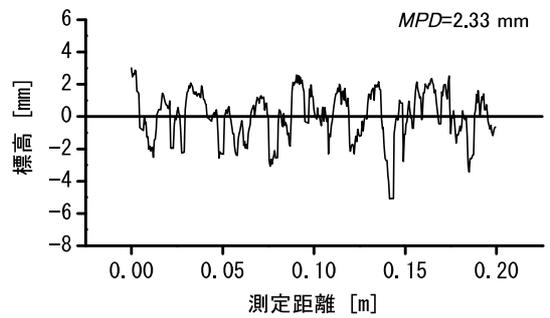
(c) SMA(5)



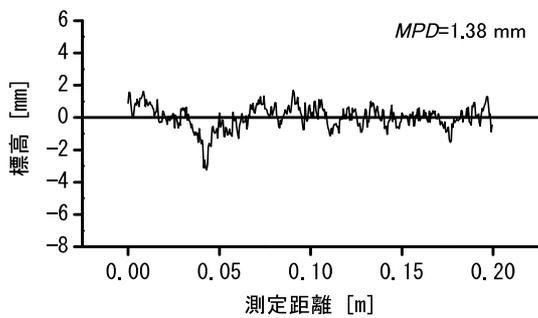
(d) ポーラス(5)



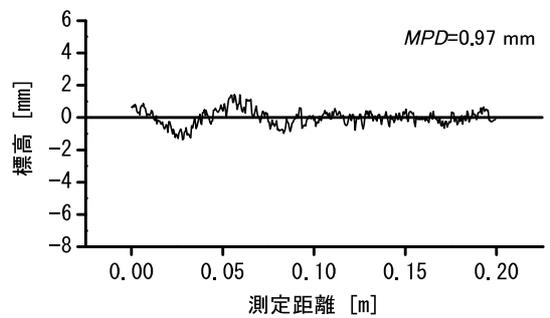
(e) 開粒(13)



(f) ポーラス(13)



(g) 弾性(多)



(h) コンクリート

図 5.7 平板供試体（供試体 No.1, 測線②）の表面粗さ（線粗さ）の例

(3) 表面粗さ（線粗さ）の定量的な評価

表面粗さ（線粗さ）を評価した結果を順に示す。まず、MPDの結果を図5.8に示す。MPDは基底長100mの半分50mm間の標高最大値を意味していることから、アスファルト舗装は開粒(13)とポーラス(13)が2.0mm以上の大きな値を示し、標高最大値が大きいことを示している。細密(13)や密粒(13)は1.0mm程度の小さい値であり、標高最大値が小さいことを示している。SMA(5)はポーラス(5)より大きい値を示しポーラス(5)の方がSMA(5)より小さい値であった。

スキューネスの結果を図5.9に示す。スキューネスは表面粗さ（線粗さ）の標高の正值の度数と負値の度数のバランス、すなわち偏り度合いを示す指標である。標高の値が正を示す度数の方が標高の値が負を示す度数よりも多い場合、スキューネスは正の値を示す。図5.9より、スキューネスはアスファルト舗装の6種類と弾性(多)、コンクリートの8種類のすべての舗装供試体において、負の値であった。よって、標高の値が負を示す度数の方が標高の値が正を示す度数よりも多いことがわかる。スキューネスの結果を舗装種類で比較すると、ポーラス(13)は-1.6とアスファルト舗装の6種類の中で最も負に大きい値を示し、標高の値が負を示す度数、すなわち、谷部が多い路面であることが示された。弾性(多)舗装は7種類の中で最も大きな値であることから、標高の値が正を示す度数、すなわち山部が多い表面粗さ（線粗さ）であることが示された。

クルトシスの結果を図5.10に示す。クルトシスは標高度数分布の尖り度を示し、標高度数分布が正規分布の場合をクルトシスは“3”を示す。結果より、開粒(13)とSMA(5)、ポーラス(13)、密粒(13)が $Rku=3.9\sim 4.4$ の値を示しており、これは同一の標高を多く有し、標高の値にバリエーションが無いことが示された。弾性(多)、ポーラス(5)は約3.0の値を示し、標高度数分布が正規分布に近く、標高の値が豊富であることが示された。

以上より、アスファルト舗装の細密(13)と密粒(13)のように、MPDが同程度の値であった場合でも、スキューネスやクルトシスの値が同値を示すとは限らない。標高最大値は同値であっても、各標高の度数が異なるため、標高度数分布の曲線が異なることが示唆された。

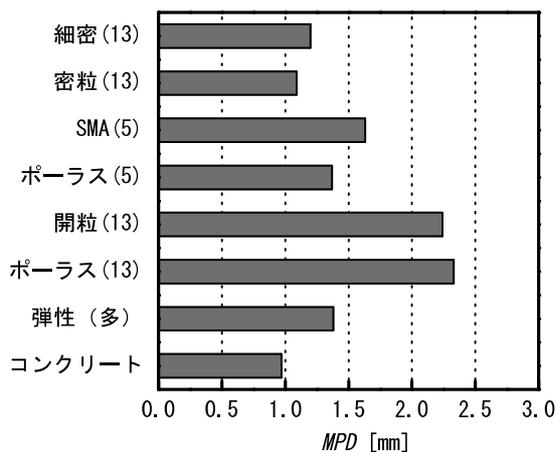


図5.8 舗装の表面粗さ（線粗さ）の評価結果：MPD

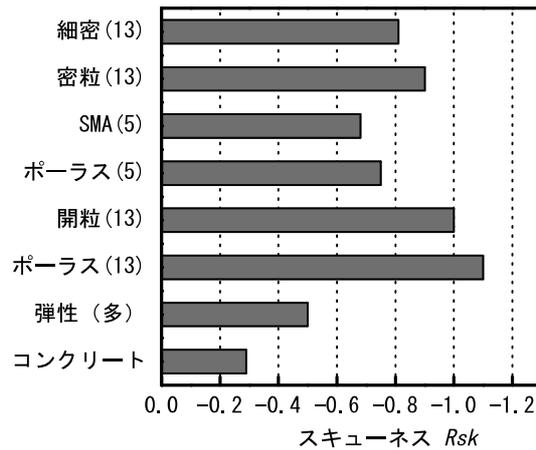


図 5.9 舗装の表面粗さ（線粗さ）の評価結果：スキューネス R_{sk}

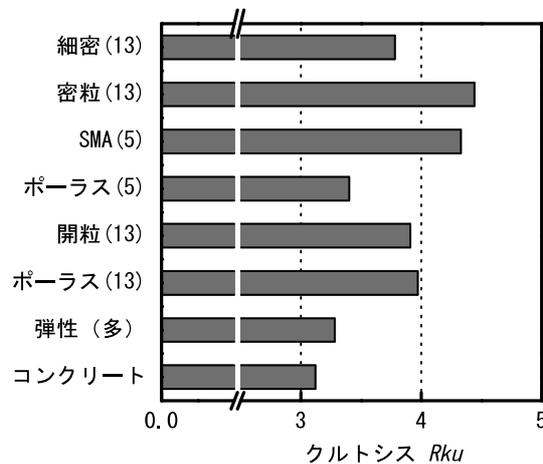


図 5.10 舗装の表面粗さ（線粗さ）の評価結果：クルトシス R_{ku}

5.2.3 ランナーの着地時を加味した舗装の表面粗さの評価指標の提案

(1) 舗装の表面粗さの評価指標の提案事項

a) 表面粗さの評価範囲

本章の冒頭の概説で記したように、ランナーが着地する際、ランナーのシューズの底面は舗装の表面と「面」で接地している。そこで、本研究は舗装の表面粗さを「面」で評価する指標を提案する。ここで用いた指標は、ある表面を測定した標高データを用いた「面粗さ」の評価指標であることを記しておく。以下、舗装の表面粗さ（面粗さ）と記す。

b) 基準面

前項で示した舗装の表面粗さ（線粗さ）の評価指標の基準となる線は、ある区間における表面粗さ（線粗さ）の平均線としている。そのため、表面粗さが異なる舗装ごとに基準線は異なるため、舗装種類ごとに統一的な評価が難しいと考えられる。そこで、本研究では図 5.1 に示したよう、シューズの底面のゴムは接地面内の標高最大値から接地することから、標高最大値を基準面とした。これにより、舗装種類によ

らず、同一条件で基準面を定めることによって、舗装の表面にシューズ底面が接地したときの表面粗さを評価できると考えた。

(2) 舗装の表面粗さ（面粗さ）の測定時の供試体および測定方法

舗装の表面粗さ（面粗さ）の測定時に用いた供試体は、アスファルト舗装と弾性（多）、コンクリートについては、前項で一測線の表面粗さを測定した際に用いた平板供試体から直径 100 mm の円柱供試体を採取した。陸上スプレーは、陸上競技場の全天候型ウレタン舗装の施工現場より円柱供試体を採取した供試体である。陸上ローラーは、全天候型ウレタン舗装の表面の仕上げを行っていない層までの舗装から円柱供試体を採取したのち、室内でウレタン材を塗布し、粗骨ローラーで表面の仕上げを行った供試体である。

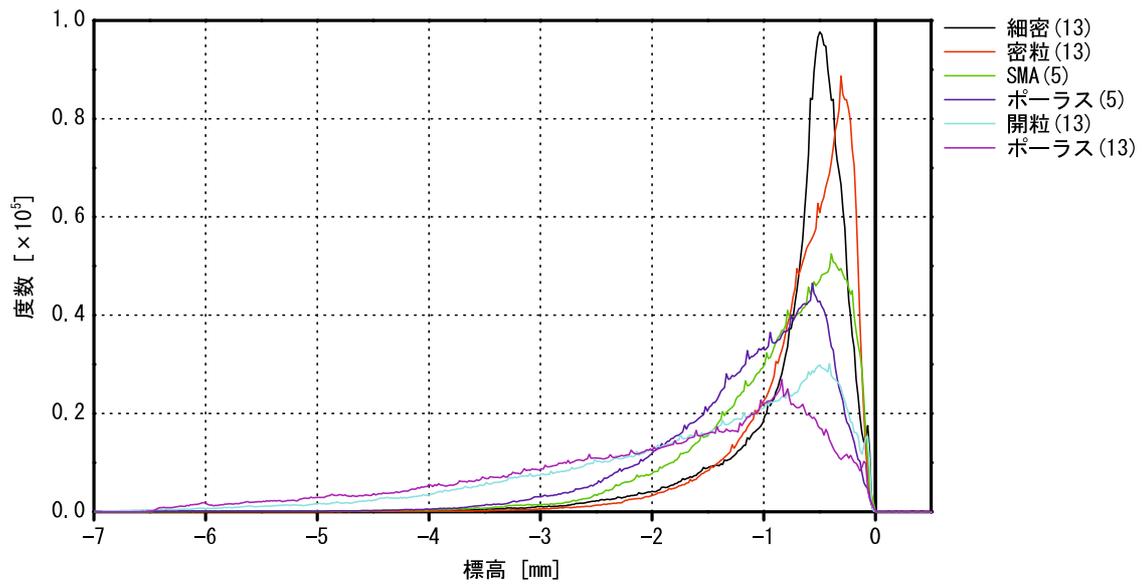
円柱の舗装供試体を対象として面粗さの測定を行った。測定にはワンショット 3D 形状測定機（型式：VR-5000, KEYENCE 製、以下、3D スキャナ）を用いた。本測定機器は、高輝度 LED を内蔵した投光部より照射された構造化照明光により、400 万画素モノクロ C-MOS カメラに写し出された試料の縞投影画像から形状を測定するものである。得られた縞投影画像を使って、任意の部分の高さを測定し、csv ファイルで高さデータを出力した。3次元の高さデータは、高さは 47.116 μm 間隔で出力した。高さ計測の分解能は 0.1 μm である。舗装供試体は直径 100 mm の円柱供試体とした。

(3) 舗装の表面粗さ（面粗さ）の測定結果

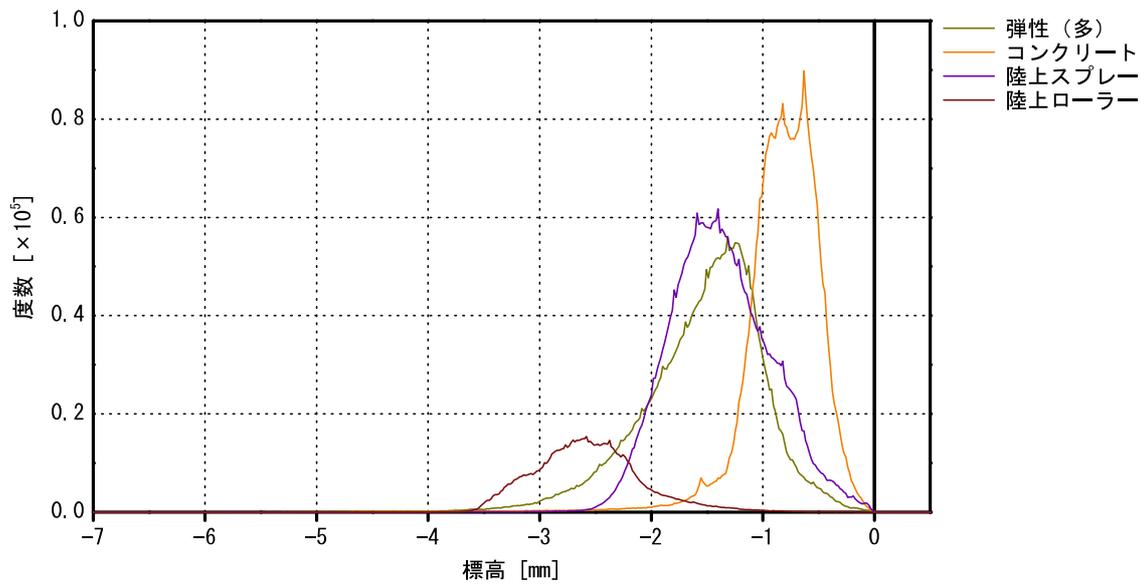
図 5.11 に表面粗さ（面粗さ）を測定した標高データの標高度数分布を示す。図 5.11 (a) にアスファルト舗装の標高度数分布を、図 5.11 (b) にアスファルト舗装以外の舗装材料の標高度数分布を示した。ここでは、標高最大値を基準面とした舗装の表面粗さの標高度数分布を示している。横軸に標高、縦軸に度数を示した。縦軸に示す度数とは、同一の標高における接触点の総数を示す。この標高度数を累積した度数を累積度数と称す。累積度数は、標高度数分布の曲線に囲まれた面積から算出可能であり、接地した投影面積（以下、接地面積）に相当する値である。本研究では、基準面（標高=0）は、標高度数分布において、累積度数の総数（以下、累積度数の総数）に対する累積度数の比率が 0.1 % となる標高を基準面とした。

図 5.11 (a) のアスファルト舗装の標高度数分布をみると、細密(13)と密粒(13)は標高が -0.3 mm ~ -0.5 mm で極めて大きい度数を示している。一方で、開粒(13)やポーラス(13)は、度数が最大を示すまでに細密(13)や密粒(13)に比べて緩やかに度数が増加している。そして、標高が -0.5 mm ~ -1 mm で度数は最大値を示している。このように、舗装種類によって、度数の最大値を示す標高が大きく異なり、最大値を示すまでの度数の増加度合いも異なることがわかる。

次に、図 5.11 (b) のアスファルト舗装以外の舗装材料の標高度数分布より、コンクリートは基準面から度数の最大値を示す標高が -0.6 mm 程度と、アスファルト舗装の細密(13)や密粒(13)と同様に鋭く尖った曲線を描いている。弾性（多）と陸上スプレーは標高 -0.8 mm までは、度数が少ない。すなわち、接地点数が少ないということである。そして、-0.8 mm 以降は度数の増加傾向があり、接地点数が増加したことが把握できる。陸上ローラーは度数の増加傾向が標高 -1.5 mm 程度までみられず、標高 -1.5 mm 以降に度数が増加している、すなわち接地点数が増加している。以上より、標高度数分布を描くことによって、舗装種類によって、異なる度数分布曲線を描くことが明らかになった。次項で標高度数分布を用いて舗装の表面粗さ（面粗さ）の評価指標を提案する。



(a) アスファルト舗装



(b) アスファルト舗装以外の舗装材料

図 5.11 表面粗さの標高度数分布 (円柱供試体)

5.2.4 舗装の表面粗さ（面粗さ）の評価指標の提案

舗装の表面粗さを定量的に評価する指標として、本研究では、シューズ底面が舗装表面に接地したときの接地面積率に相当する累積度数比率から得られる標高を代表値とする。

次の項で示す一軸載荷除荷実験時の最大圧力時の接地面積を測定した結果、10種類の舗装種類のうち、ポーラス(13)が最小値を示し、供試体の接地面積（見掛け面積：7850 mm²）に対して接地した面積の割合（以下、接地面積率）が20%であった。その他の舗装種類は20%以上であったため、舗装種類によらず接地面積率が20%、すなわち、累積度数比率が20%の時の標高を舗装種類が有する表面粗さを評価する代表値とした。接触深さを算出する概略図を図5.12に示す。まず、(a)標高度数分布図は、同一の標高を有する度数すなわち接地点数を示しており、塗りつぶした曲線と横軸に囲まれた面積は、接地する点数の総数を示していることから、接地面積に相当する。次に示す(b)累積度数は、各標高までの度数の総数を示している。すなわち、接地面積の値である。累積度数の曲線は接地面積の増加傾向を示す。曲線の立ち上がり急な場合、接地面積が急激に増加することを示す。緩やかな場合、接地面積は緩やかに増加することを示している。(c)累積度数比率も同じ曲線である。異なる点は、縦軸の値が割合である。各標高までの度数の総数である累積度数を累積度数の総数で除し、比率とした値である。累積度数の値が接地面積に相当することから、累積度数比率は接地面積率に相当する。よって、標高度数分布の曲線が異なれば、接地面積に差異が見られることを踏まえ、本研究では接地面積比が20%となる標高を表面粗さの代表値とした。

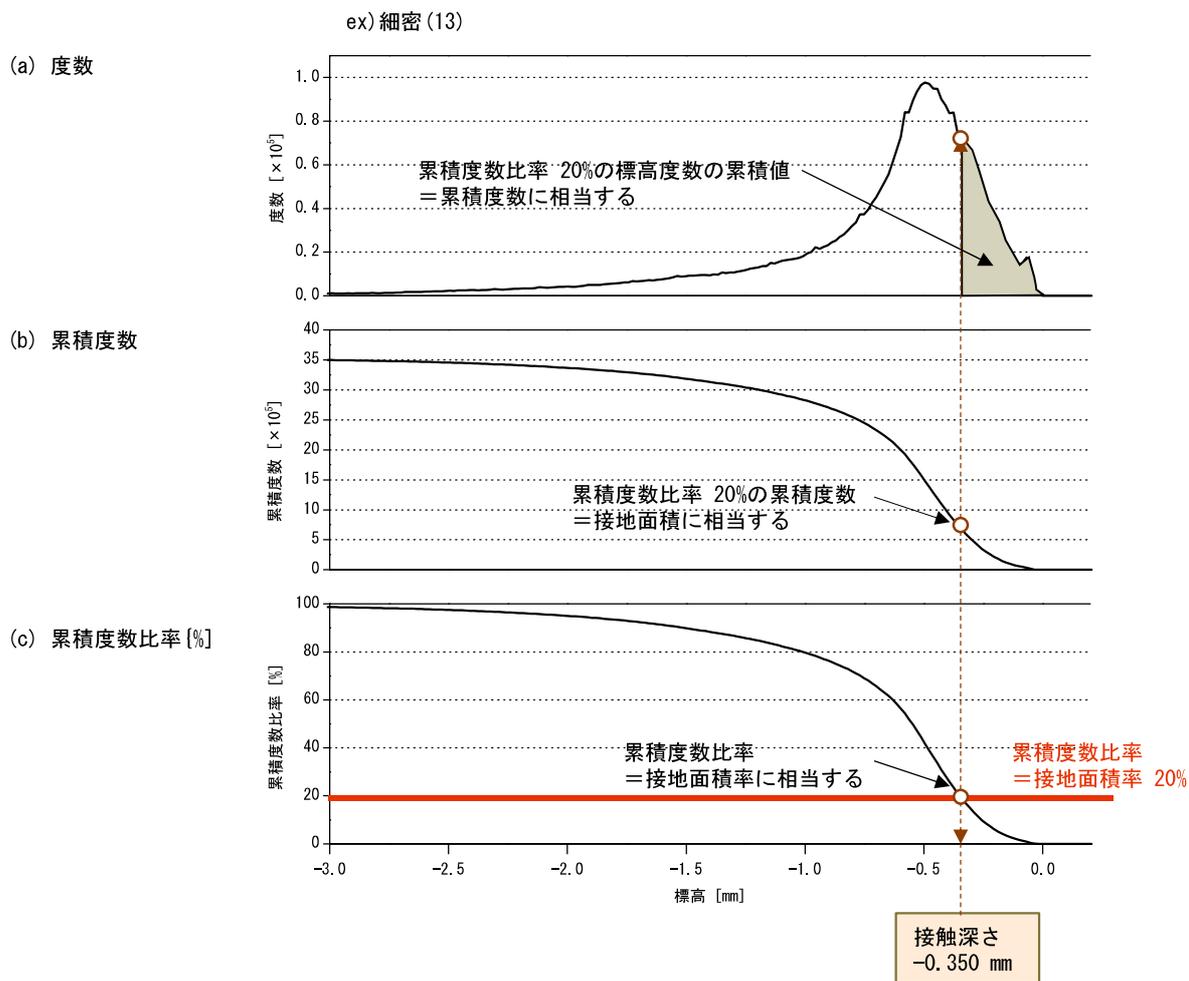


図 5.12 接触深さ算出の概念図

図 5.13 に 10 種類の舗装の表面粗さの標高度数分布と累積度数比率を示した。ここで示した標高度数分布は図 5.11 に示した結果である。累積度数比率を舗装種類ごとにみると、細密(13)と密粒(13)、SMA(5)は標高がゼロの値から曲線の勾配は急な立ち上がりを示している。それに対して、ポーラス(5)と開粒(13)、ポーラス(13)は標高がゼロの値から緩やかに立ち上がる曲線を描いている。この 2 組の違いは標高度数分布より同一の標高における度数に偏りがあれば、累積度数の値が急に大きな値を示すため、累積度数比率の曲線は急な立ち上がりを示す。すなわち図 5.1 (b) に示すように、表面粗さの標高差が小さいことが読み取れる。アスファルト舗装以外の舗装材料である弾性(多)と陸上スプレー、陸上ローラーに関して、標高ゼロから標高が -0.8 mm まで累積度数比率は 10% 以下であり接地点数が増加しないことが読み取れる。以上のことから、累積度数比率の曲線の標高は、ある接地面積に達したとき、載荷物が舗装の表面粗さに沈み込んでいる深さに相当する。本研究ではシューズの底面(ゴム)の沈み込み量に相当すると考え、代表値とした。舗装種類ごとの累積度数比率が 20% の時の標高(以下、接触深さ)を図 5.14 に示す。図に示した接触深さは絶対値で表記し、アスファルト舗装 6 種類とアスファルト舗装以外の舗装材料 4 種類で区別するため、区切り線を記入した。図より、アスファルト舗装は密粒(13)が 0.28 mm と最も小さい値を示し、細密(13)と SMA(5)は同値で 0.35 mm と 0.36 mm とほぼ同値であった。そしてポーラス(5)と開粒(13)も同値を示し、ポーラス(13)が 0.78 mm と 6 種類のうち最大値を示した。そして、弾性(多)は 1.1 mm とポーラス(13)より大きい値であり、コンクリートはポーラス(5)や開粒(13)と同値であった。陸上ローラーは 10 種類の中で最大値を示し、 2.20 mm であった。

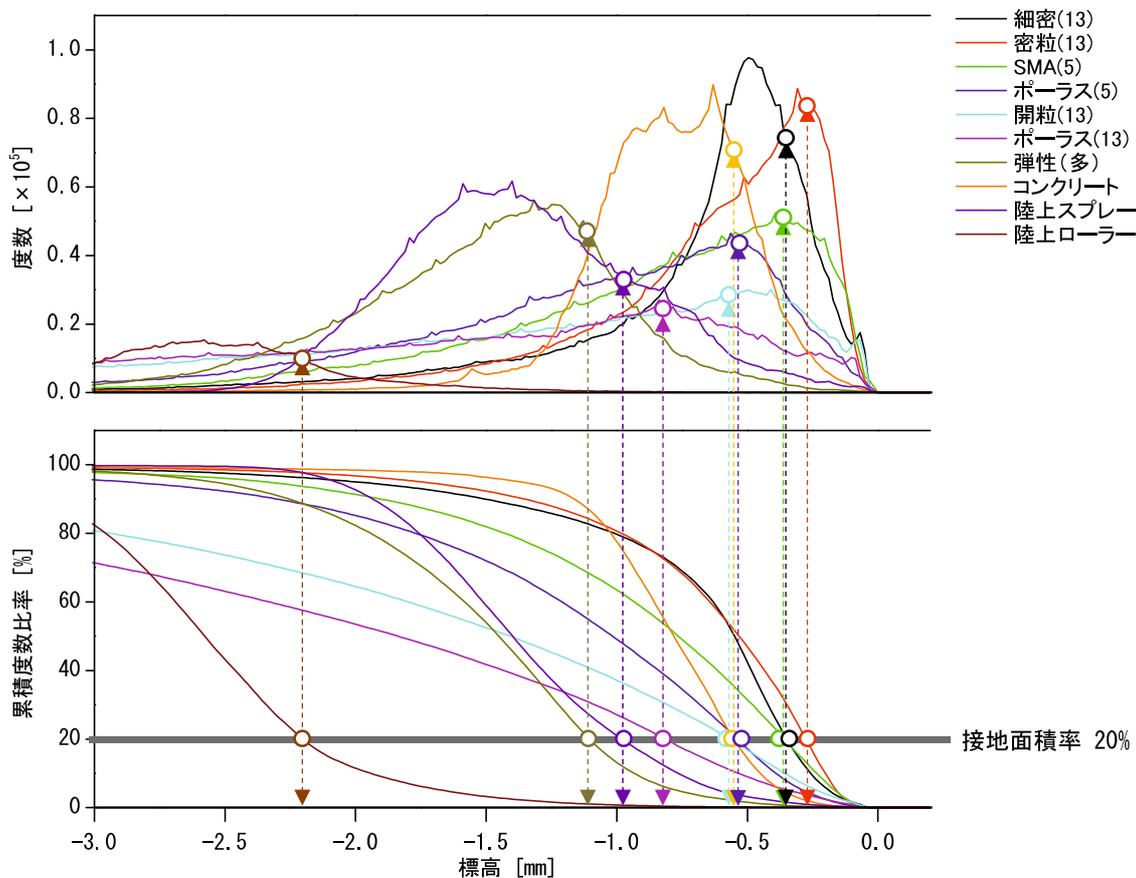


図 5.13 標高度数分布と累積度数比率 (プロットは接地面積率 20%)

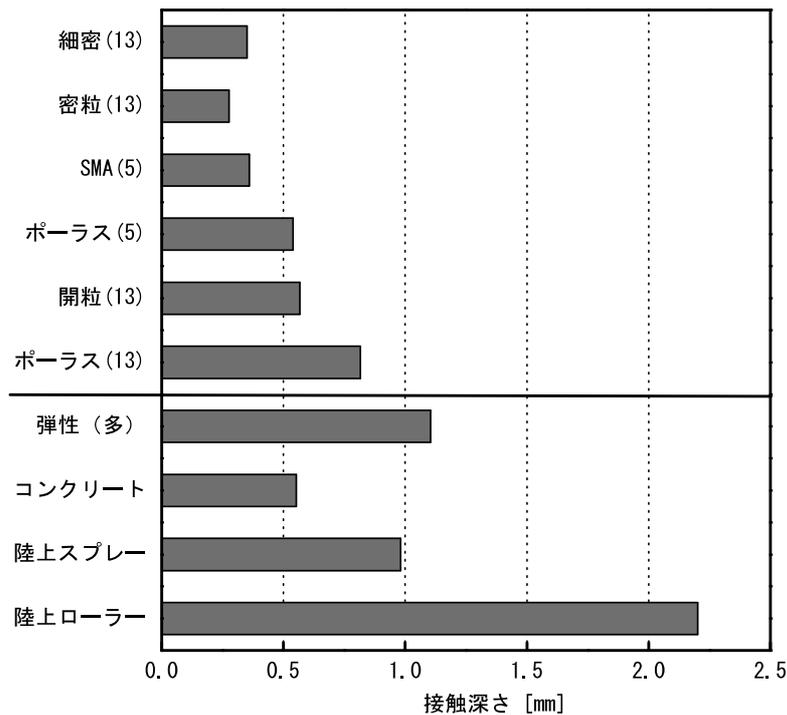


図 5.14 舗装種類ごとの接触深さ

5.2.5 表面粗さの評価指標に関する検討結果のまとめ

本節で得られた知見を以下に記す。

- 舗装の表面粗さ（線粗さ）を評価する指標として、*MPD* とスキューネス、クルトシスという指標を採用して評価を行った。その結果、アスファルト舗装の細密(13)と密粒(13)のように、*MPD* が同程度の値であった場合でも、スキューネスやクルトシスの値が同値を示すとは限らない。標高最大値は同値であっても、各標高の度数が異なるため、標高度数分布の曲線が異なることが示唆された。
- ランナーが舗装に接地することを想定して、本研究では、「面」で表面粗さを評価することと、基準面を標高最大値とすることとし、累積度数比率の20%時の標高（以下、接触深さ）を提案した。
- 標高度数分布は、舗装種類によって差があり、コンクリートと細密(13)、密粒(13)、SMA(5)は、標高度数分布曲線が鋭く尖った形状をしており、同一の標高を示す度数が多い。ポーラス(5)や開粒(13)、標高差が大きく、標高の値が幅広いため、同一の標高を示す度数が少ない。弾性(多)と陸上スプレーや陸上ローラーは、度数の増加が、極めて緩やかであり、アスファルト舗装やコンクリート舗装とは異なる傾向であった。

5.3 ランナーの足に生じる着地衝撃に関する力学的検討

5.3.1 ランナーの足に生じる着地衝撃

本章では、第3章でランナーは舗装種類によって着地衝撃の大きさに違いを感じていた。その影響因子として舗装の表面粗さに着目をして研究を行う。舗装の表面粗さが異なることで、ランナーのシューズ底面のゴムの接地点数や変形量が異なることが想定されることを本章の冒頭で記した。本節では、舗装の表面粗さの差異によりシューズ底面のゴムにどのような影響が生じているのかを明らかにするため、室内実験を行う。ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさは、足に対して上下方向の力と前後方向の力に分けて考える。ランナーが感じる着地衝撃の大きさは、上下方向と前後方向の両方向の力の大きさを、シューズを介して足裏で感じ取り、着地衝撃の大小を脳で判別していたと仮説を立てた。そこで本章では、まず、ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさは、ランナーのシューズ底面のゴムと舗装の力学問題と捉え、室内で実験を行い、舗装種類による影響を把握した。室内実験は、第4章でランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさを測定した際に、ランナーの足に対して上下方向と前後方向の力も影響していることが示唆された。これより、ランナーの足に対して上下方向と前後方向に分けて実験的に検討を行う。まず、ランナーの足に対して上下方向についてはランナーのシューズの底面のゴムと舗装表面の変形特性に関する実験を行う。そして、前後方向については、ランナーのシューズの底面のゴムと舗装表面の摩擦特性に関する実験を行う。

(1) シューズ底面のゴムの変形特性

シューズ底面のゴムの変形特性を把握するため、一軸載荷除荷実験を実施する。ランナーが接地時に舗装へ与える力を固定値とし、着地時に舗装の種類が異なれば、足はどれほど変位するのか、という考えから、舗装種類ごとの足の変位量を実験で明らかにすることを目的とした。二つ目の実験は感圧紙実験である。足の変位が生ずる際、舗装表面とシューズ底面にどのような現象が生じているのか、という足の変位メカニズムを解明することを目的とした実験である。足の変位は、ランナーのシューズの底面が舗装に接地した際、シューズ底面が舗装から受ける圧力の大きさに依存していると仮説をたて、実証実験を行った。上記で述べたランナーの着地衝撃が推定可能なモデルの構築として、足の変位量を舗装の表面粗さと接地面積のデータを用いて定式化を試みた。以上の二つの実験は、シューズを模したゴムを介して変位と圧力を測定することと、実験の供試体は舗装の表面粗さを有する供試体であること、の2点が結果を難しくするが新規性のある実験である。この二つの実験を行うことによって、ランナーの着地衝撃が推定可能なモデルの構築への道筋を立てた。

(2) シューズ底面のゴムと舗装表面の摩擦特性

第4章でランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさは、足に対して上下方向のみならず、前後方向も影響していることが示唆された。これより、ランナーの足が接地した際、足に生じるブレーキの大きさは、シューズ底面のゴムと舗装表面との摩擦特性が影響していると考え、ゴムが舗装表面に接地し、離床するまでに生じた速度の低下率を測定する実験である。舗装からの反力ではなく、舗装とシューズ底面に生ずる摩擦による着地時のブレーキの大きさも、人体に生ずる着地衝撃に影響を及ぼす因子の一つと仮説を立てた。

5.3.2 ランナーの足に生じる着地衝撃に関する室内実験の概要

(1) シューズ底面のゴムの変形特性に関する実験

a) ランナーの足の変位量の測定

本実験は、ランナーが接地時に舗装へ与える力を固定値とし、着地時に舗装の種類が異なれば、足はどれほど変位するのか、ということから足の変位量を明らかにすることを目的とした。実験の概略を説明すると、シューズのソールを模したゴム板を舗装供試体の表面に載せ、載荷し除荷を行う一軸載荷除荷実験を実施した。

載荷時の条件は、図 5.15 および、図 5.16 に示すよう、ランナーの着地から蹴り出しまでの走動作を模して、全面接地した時点で最大荷重に達したのち、蹴り出す動作までの間に、片足で立っている立脚期は一定荷重であると仮定し、蹴り出し時に荷重を除荷するという載荷条件で実験を行った。5秒間で最大荷重に達し、その後5秒間最大荷重を保ち、5秒間で荷重を1Nまで除した。本実験の載荷時間については、ランナーの着地動作の時間(0.01~0.03s)を模してはいない。その理由として、着地衝撃のような動的な荷重の場合、舗装材料の変形係数よりゴムの変形係数の方が支配的であるため、舗装材料による差異の有無を明確にすることが難しいと考えた。そのため、本実験は載荷時間をランナーの着地動作に比べて長い静的荷重時の現象を把握した。本実験で舗装の表面粗さの差異が見いだせれば、今後、ランナーの着地動作である動的荷重での現象を把握することを念頭に置いて、実験を行った。実験の固定値としたランナーの着地時の圧力に関して、着地時においてランナーの足底に発生する圧力の大きさが0.045~0.165 MPa²⁾であることを参考とした。同一供試体で4条件の載荷除荷実験を行うため、供試体の弾性体範囲内で実験を行うことを前提とし、本実験の載荷圧力は0.025~0.102 MPa(200, 400, 600, 800N)とした。アスファルト混合物の弾性係数は600~12,000 MPa³⁾、舗装用コンクリートは28,000 MPa(代表値)³⁾であることから、供試体の破壊はないのとも考え、荷重4条件はすべて同一の供試体を用いて行った。実験は、最大荷重が0.102 MPa(800N)の条件で行い、その後、同一の供試体で0.076 MPa(600N)、0.051 MPa(400N)、0.025 MPa(200N)の順で行った。

実験時の室内と供試体温度は、マラソン大会の主な開催時期である冬季の路面温度を仮定し、20~25℃とした。これは、冬季に実施した舗装に関するアンケート調査(第7章記載)時に計測した路面温度が7.9~26.5℃(平均値17.9℃、最頻値21.4℃、中央値19.5℃)であったためである。

以上の条件で行った実験装置の概略図を図 5.17 に示し、測定した変位量の概略図を図 5.18 に示す。本実験は、万能実験機(オートグラフ AG-50kN X-Plus, 島津製作所製)を用いて所定の荷重条件で載荷および除荷を行った。舗装供試体の表面にゴム板を載せ、ゴム上面へ載荷した。実験で測定すべき変位量はランナーの足の底面の変位を模したゴム上面の変位量 d_1 - d_2 である。載荷版の変位はゴム板と一体化しておらず隙間が生じることと舗装供試体の微小な変形も含まれている。以上を踏まえて、ゴム上面の変位量 d_1 - d_2 はゴム上面の測定変位量 d_1 から舗装供試体上面の測定変位量 d_2 を差し引いた値とした。ゴム上面の測定変位量 d_1 と舗装供試体上面の測定変位量 d_2 はカメラ付きスマートフォン(iPhone7)を用いて動画を撮影し、画像解析ソフト Image J Fiji を用いて変位量を算出した。ゴム上面の変位量を推定するモデル化にあたり、接地した領域の舗装の表面粗さの標高データからゴムが実際に舗装の表面粗さの凹凸へ沈み込んだ変形量 d_3 (以下、ゴム真実接触深さ)を推定した。ただし、ゴム真実接触深さは接地領域のみならず表面粗さの標高が加味されるため、測定することが困難であるため推定値とせざるを得ない値であることを述べておく。

本実験で用いた供試体の種類は”5.2 舗装の表面粗さの評価指標”で用いた円柱供試体(以下、オリジナル供試体)と同種類かつ同一の供試体と、オリジナル供試体と同一の表面粗さを有する3Dプリンタ

(Creator Pro, FLASHFORGE 社) を用いて作製した供試体 (以下, 3D プリンタ供試体) の 2 種類とした。3D プリンタ供試体での実験の背景には, 表面粗さに着目した実験を行うにあたり, オリジナル供試体は舗装材料の変形係数による影響を有するため, 実験結果でゴム板上面の変位量にアスファルト舗装の 6 種類で差がある結果を得たとしても, 供試体の表面粗さによる影響であるとは断定できない。そこで同一の材料を用いて表面粗さのみ異なる 3D プリンタ供試体で実験を行うこととした。3D プリンタ供試体の表面粗さについて, オリジナル供試体の表面粗さに対して再現性を確認した結果, 標準偏差は 0.26~0.55 であった。3D プリンタ供試体の材料は, 10 種類の舗装種類すべてポリ乳酸 (PLA) 樹脂のフィラメントを用いて作製し, オリジナル供試体と同じ条件で載荷除荷実験を実施した。3D プリンタで作製した供試体の厚さは 10~20 mm であったため, 鋼製円板にエポキシ樹脂を用いて供試体を接着させた。そのため, ゴム上面の変位量は 3D プリンタ供試体の変位量とエポキシ樹脂の変位量も差し引いた値とした。

最後に, 実験で使用したゴムはシューズのソールを模擬することとしたが, ソールすべてを模擬してはいない。あくまでもゴムを介した条件で, 舗装の力学特性を把握した実験である。シューズのソールはミッドソールとアウトソールに分類され, 舗装の表面と接地するソールはアウトソールである。ミッドソールとアウトソールの機能が異なるため, 素材と変形係数は全く異なる。そしてシューズのソールは, 同一のメーカーであっても厚さや使用材料が異なる⁴⁾。ランナーによっては, シューズソールの硬度や形状をカスタマイズしたシューズを履いている。そのため, シューズを変数とする前に, まずはシューズのトレッドパターンを有さず, 硬度を一定とし, ゴムの種類と硬度についてはシューズソールを模するものを用いることとした。実験で使用したゴムの種類は, シューズのソールのうち, 直接, 舗装表面と接地する部分 (以下, アウトソール) で用いられているラバー⁵⁾の主材料である天然ゴム (NR ゴム) とした。ゴム板の厚さおよび硬度は, 市民ランナー 53 名を対象とした舗装に対するアンケート調査で着用していたシューズを参考にした。よって, 本実験で用いたゴム板の厚みは 3 mm, ゴム硬度は 65 とした。ゴム板の性状を表 5.4 に示す。ゴム板の大きさは, 舗装供試体と同値である直径 100 mm とした。

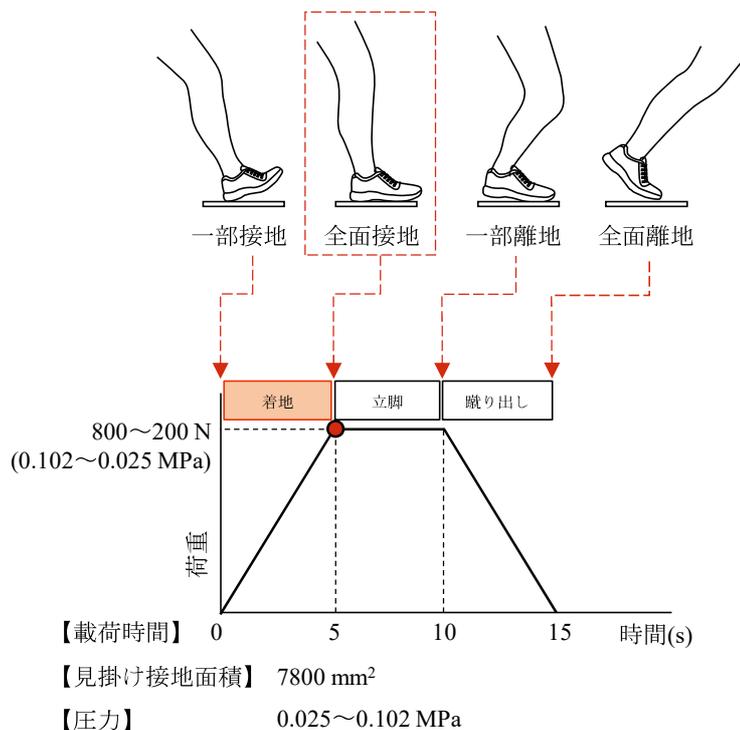


図 5.15 載荷除荷条件

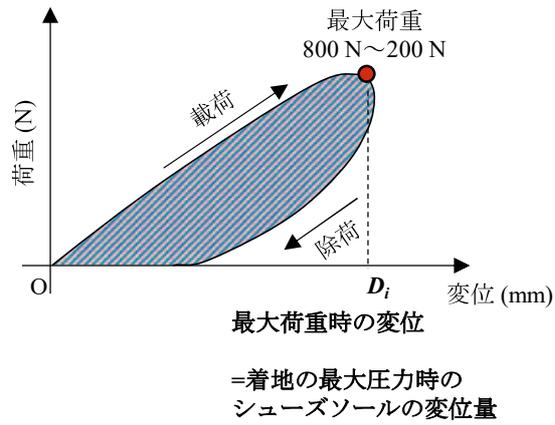


図 5.16 載荷除荷時の変位荷重曲線

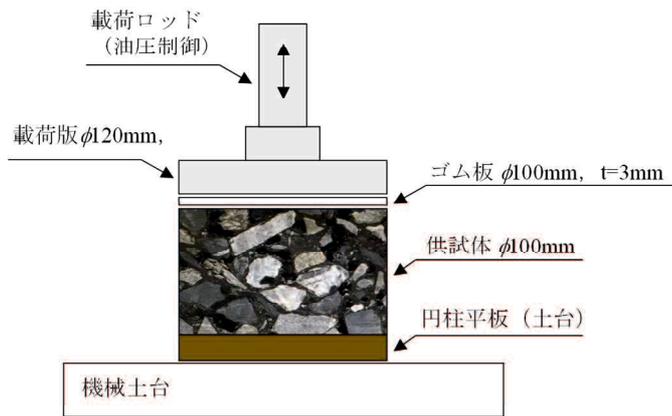


図 5.17 実験装置

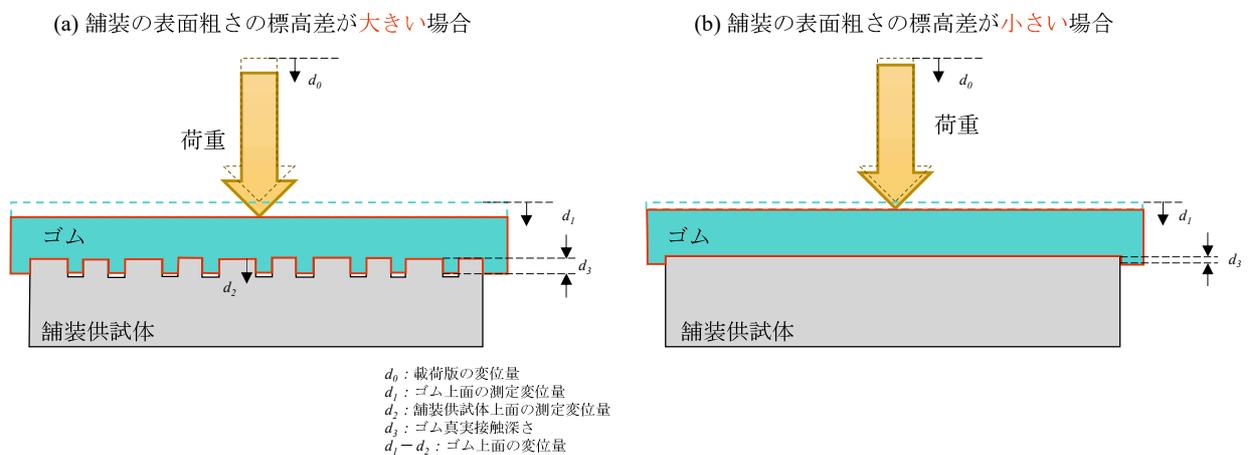


図 5.18 測定した変位量の概略図

表 5.4 ゴム板の性状

試験項目	単位	測定値	試験方法
硬さ	タイプ A	65	JIS K 6253 タイプ A デュロメータ
引張強さ	Mpa	3.9	JIS K 6251
伸び	%	250	JIS K 6251
圧縮永久ひずみ	%	34	[70°C×22 時間]
硬さ変化	ポイント	+10	[70°C×70 時間]
引張強さ変化率	%	+10	
伸び変化率	%	-24	

b) ランナーの足裏の接地圧力と接地面積に関する測定

二つ目の実験は、足の変位が生ずる際、舗装表面とシューズ底面が接地するときの接地点の位置、すなわち接地面積と、接地圧の分布を明らかにすることを目的とした実験である。

舗装の表面粗さの標高差が大きい場合と小さい場合を比較した場合、表面粗さの標高差が大きい場合はゴムを載荷することによりゴムは圧縮するとともに、表面粗さの山部と谷部に追従し、接地する山部に大きな載荷圧力が生じるためゴムは大きく変形する。一方で標高差が小さい場合はゴムの載荷により圧縮されるが載荷圧力が接地面全体に分散するため圧力が小さく、ゴムの変形は小さいことが想定される。よって、感圧紙実験にて、ゴム板が舗装の表面へ接地する面積（以下、接地面積）および接地した時にゴム板に発する圧力（以下、接地圧力）の測定を行い、ゴム上面の変位量との関係を明らかにした。

実験装置および実験条件は前節で示した一軸載荷除荷実験と同じ装置および条件とした。まず、載荷荷重が 0.102 MPa(800 N)の圧力を測定することが可能な感圧紙（プレスケール、富士フィルム製）を用いて、アスファルト舗装 6 種類の接地面積と接地圧力の測定を行った。しかし、アスファルト舗装のポーラス(13)や細密(13)など複数の供試体の接地圧力を計測した際、載荷荷重である 0.102 MPa より大きい圧力を計測した。そのため、測定する感圧紙の測定可能な圧力範囲が異なる 3 種類を使用した。感圧紙の測定可能圧力範囲を表 5.5 に示す。0.05~0.2 MPa が測定可能である感圧紙（以下、低圧力）と、0.2~0.6 MPa が測定可能である感圧紙（以下、中圧力）、0.5~2.5 MPa（載荷荷重の 25 倍の圧力）が測定可能である感圧紙（以下、高圧力）を用いた。3 種類の感圧紙はすべて重ねて、1 度で測定を行うことを試みたが、感圧シートの高さの影響により、舗装供試体に接していないシートの圧力が十分に測定できなかったため、ゴム板と供試体表面の間に感圧紙を 1 種類ごとに、載荷除荷実験を行い、接地面積および接地圧力を測定した。

図 5.19 に示すように感圧紙に赤く発色した面積が接地面積であり、赤色の濃淡で接地圧力を測定することができる。は、実験後の感圧紙（供試体 20 個×感圧紙 3 種類×載荷荷重 4 条件=240 枚）を専用のスキャナ（GT-X830, エプソン製）で読み込み、専用の解析ソフト（プレスケール圧力画像解析システム FPD-8010J, 富士フィルム）にて接地圧力分布データを csv データで出力した。その後、画像解析ソフト Image J Fiji を用いて、接地面積と接地圧力を算出した。

表 5.5 感圧紙の種類

	フィルムの略称	測定可能圧力範囲 [MPa]
1	低圧力	0.05 ~ 0.2
2	中圧力	0.2 ~ 0.6
3	高圧力	0.5 ~ 2.5

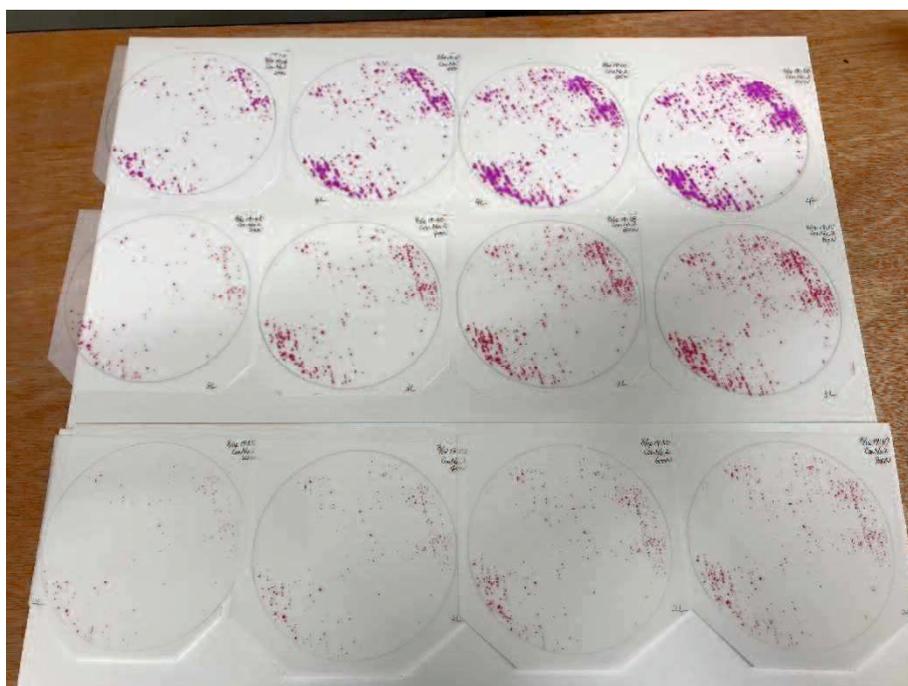


図 5.19 測定後の感圧紙（赤色の領域が接地領域）

(2) シューズ底面のゴムと舗装表面の摩擦特性に関する実験

着地時にランナーの足に生ずる進行方向の速度の減速（以下、速度低下率）を測定する実験を行った。本実験では、振り子式スキッドレジスタンステスタ⁶⁾を用いた。実験装置の概要を図 5.20 に示す。ランナーの足を試験機の振り子に見立て、振り子のゴムスライダ、すなわちランナーのシューズ底面が舗装供試体の表面に接地してから、全面接地するまでの時間 0.02~0.03 s の速度低下率を明らかにする。振り子のゴムスライダの接地時間はゴムスライダが接地してからゴムスライダが離地するまでの時間とし、接地時間が 0.02~0.03 s となる接地距離を明らかにするため、デジタルカメラ（EX-F1, CASIO 製, 336×96 px, 1200 fps）を用いて、振り子のゴムスライダを撮影した。円柱供試体を用いたため、ゴムスライダが舗装供試体に接地する距離（以下、接地距離）は、ゴムスライダの全幅（試験機の正面から見て奥行き方向の長さ：25.5 mm）が舗装供試体に接地した位置からゴムスライダの全幅が離地した位置までの 65 mm が最大距離であった。接地距離が 65 mm の時、撮影した動画のコマワリ画像から接地時間を舗装種類ごとに算出した結果、0.0200~0.0225 s であったことから、本実験では舗装種類によらず接地時間を 0.02125 s と定めた。

試験機の振り子の速度低下率を明らかにするため、振り子にワイヤレス 3 軸加速度計（Acc Stick, 神栄テクノロジー製）を取り付け、振り子のゴムスライダが舗装供試体の表面に接地し、離地する間に生じた加速度を測定した。加速度計は、振り子の進行方向および重力方向を正として測定を行った。

ゴムスライダの接地時の速度は、図 5.21 に示すように振り子の長さが 0.51 m であり、落下前の振り子位置と接地時の振り子位置となす角度が画像解析より 86° であった。これより、ゴムスライダが接地した時刻での速度（以下、接地時速度）は、力学的エネルギー保存則より算出した 3.159 m/s とした。ゴムスライダの接地時間の速度は加速度計で得られた加速度から積分した速度を接地時の速度から減じた値とした。ゴムスライダが離地した時刻は接地してから 0.02125 s 後である。その時刻での速度（以下、離地時速度）を求め、速度低下率は、接地時速度と離地時速度の差を接地時速度で除し、100 を乗じた値とした。

本実験で使用した供試体は、載荷除荷実験で用いた供試体と同一のものとした。実験時の室温と供試体の目標温度は、マラソン大会が開催される冬季の路面温度を仮定して $20\sim 25^\circ\text{C}$ とした。振り子を振り落とす回数は 5 回とし、結果の整理には、最初を除く 4 回の平均値とした。振り子に取り付けたゴムスライダは、アルミニウム製のプレートに $6.35\text{ mm}\times 25.5\text{ mm}\times 76.5\text{ mm}$ のゴム板を 1 枚、エポキシ系樹脂の接着剤を用いて、接着させたものとした。ゴム板は、天然ゴム、硬度 65 とした。ゴムスライダは、供試体ごとに取り換え、ゴムの角が立っている状態で実験を実施した。

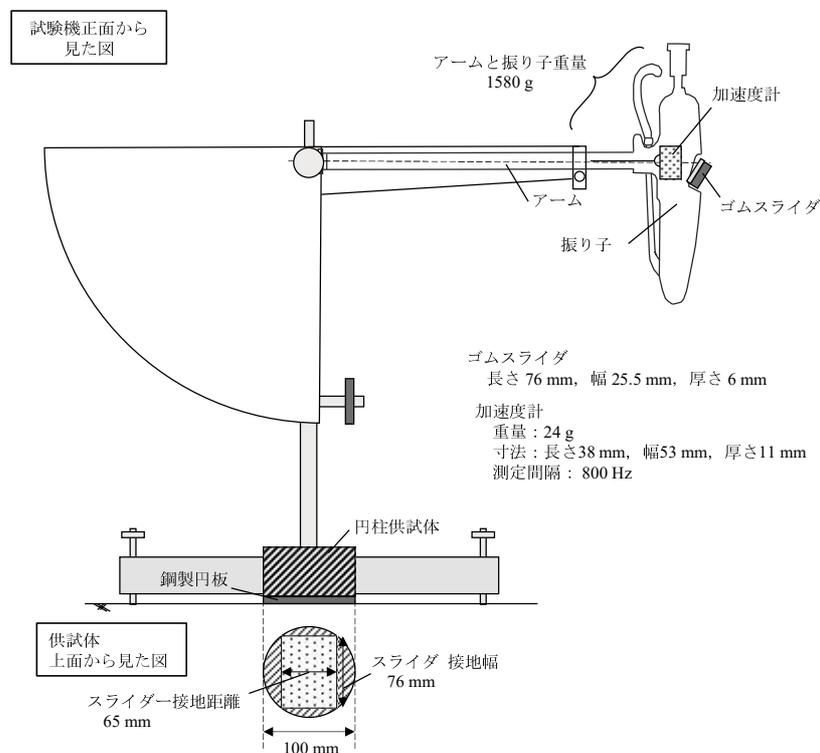


図 5.20 実験装置

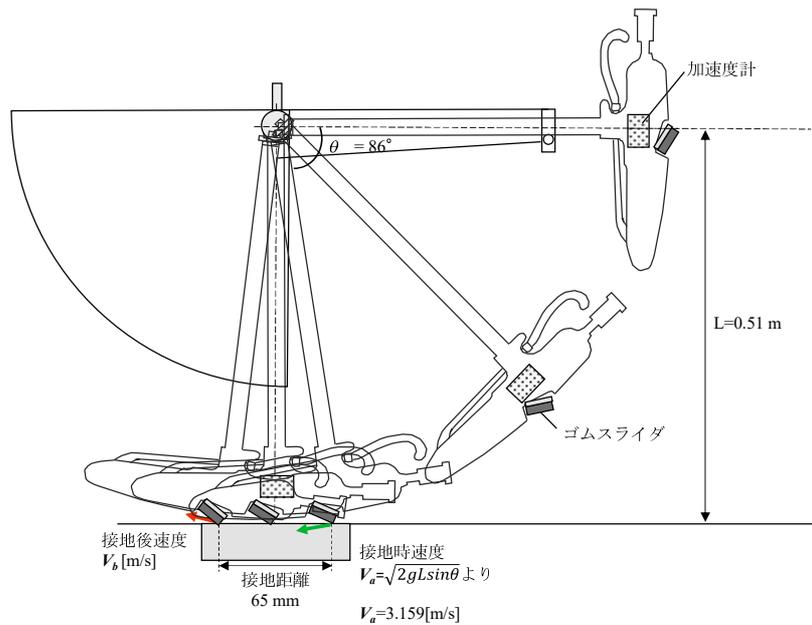


図 5.21 接地している間の振り子とゴムスライダの動き

5.3.3 アスファルト舗装に対する室内実験結果

(1) ランナーの足の変位量に関する結果の考察

一軸荷重除荷実験において、ランナーの足の変位量に相当するゴム上面の変位量を測定した。ここに示すゴム上面の変位量は、オリジナル供試体の変位量および、3D プリンタ供試体の変位量を控除した値である。

a) 変位－荷重曲線

オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の荷重版のヒステリシスカーブを荷重圧力ごとに図 5.22～図 5.25 に示す。図 5.22 に荷重圧力 0.102 MPa 時の結果を示し、図 5.23 に荷重圧力 0.076 MPa 時の結果、図 5.24 に荷重圧力 0.051 MPa 時の結果、図 5.25 に荷重圧力 0.025 MPa 時におけるオリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の結果を示した。結果より、荷重圧力の大きさや供試体の種類によらず、細密(13)および密粒(13)の変位量が最も小さく、ポーラス(13)の変位量が最も大きい。ポーラス(13)に続いて大きい値を示していた舗装種類は開粒(13)であった。細密(13)やポーラス(13)の間に位置するのが SMA(5)やポーラス(5)であった。オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体を比較するとヒステリシスカーブに囲まれた面積の大きさ、すなわち散逸エネルギーの大きさが異なる。オリジナル供試体の方が散逸エネルギーは大きく、3D プリンタは小さい。以降、荷重圧力 0.102 MPa (800 N) 時のみに着目して結果を示す。

オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体のゴム上面の変位量のヒステリシスカーブを図 5.26 に示す。オリジナル供試体は、細密(13)と密粒(13)はほぼ同値の値および曲線を示した。そして SMA(5)、ポーラス(5)、開粒(13)、ポーラス(13)の順に荷重初期の曲線の勾配が緩やかであり、最大変位量も大きい。3D プリンタ供試体の結果をみると、オリジナル供試体と同じ傾向が見てとれる。

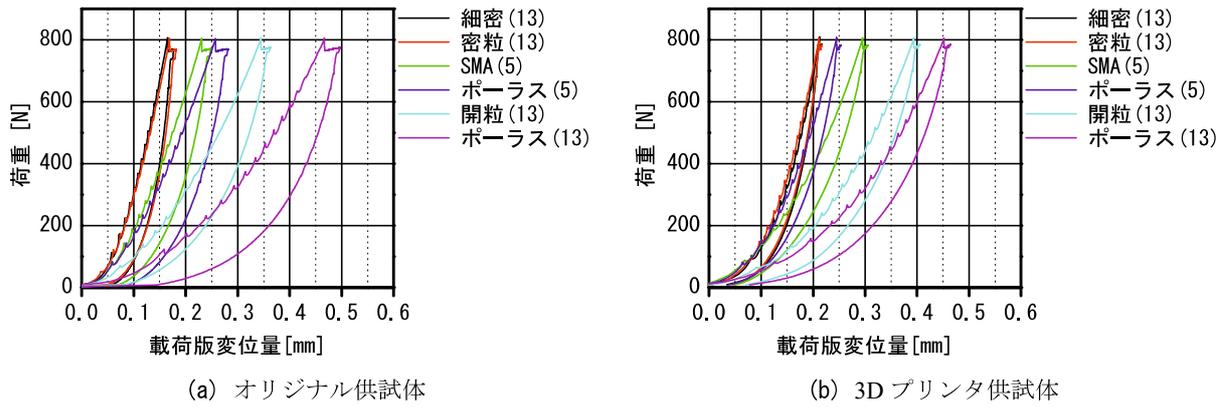


図 5.22 载荷版の荷重変位関係 (载荷圧力 0.102 MPa/载荷荷重 800 N の場合)

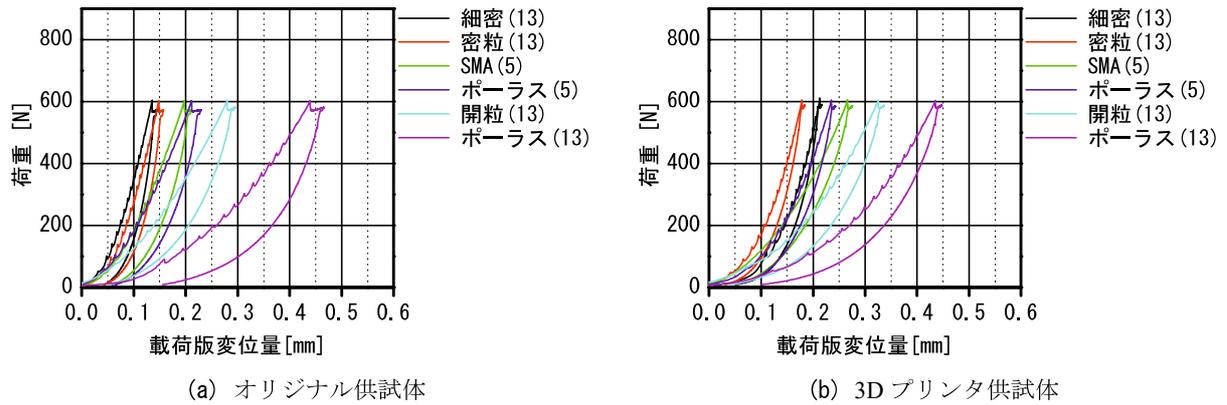


図 5.23 载荷版の荷重変位関係 (载荷圧力 0.076 MPa/载荷荷重 600 N の場合)

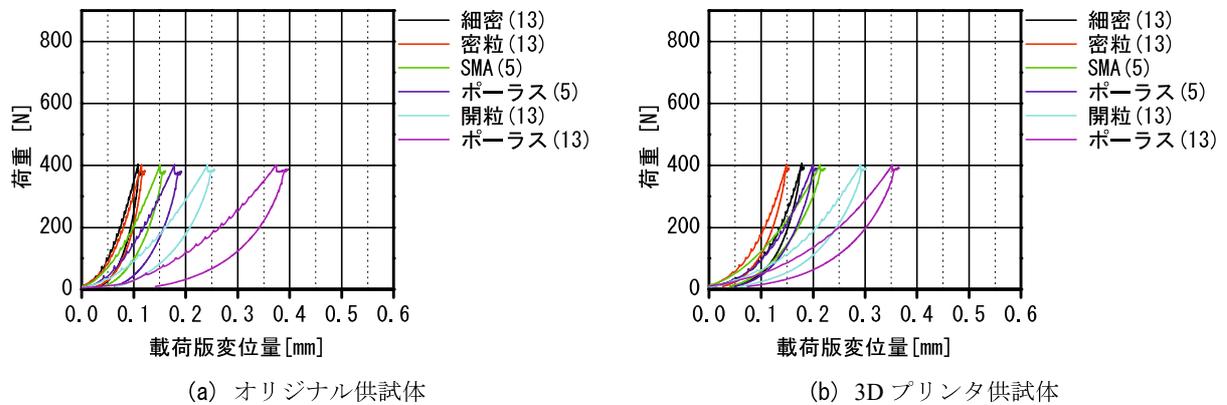


図 5.24 载荷版の荷重変位関係 (载荷圧力 0.051 MPa/载荷荷重 400 N の場合)

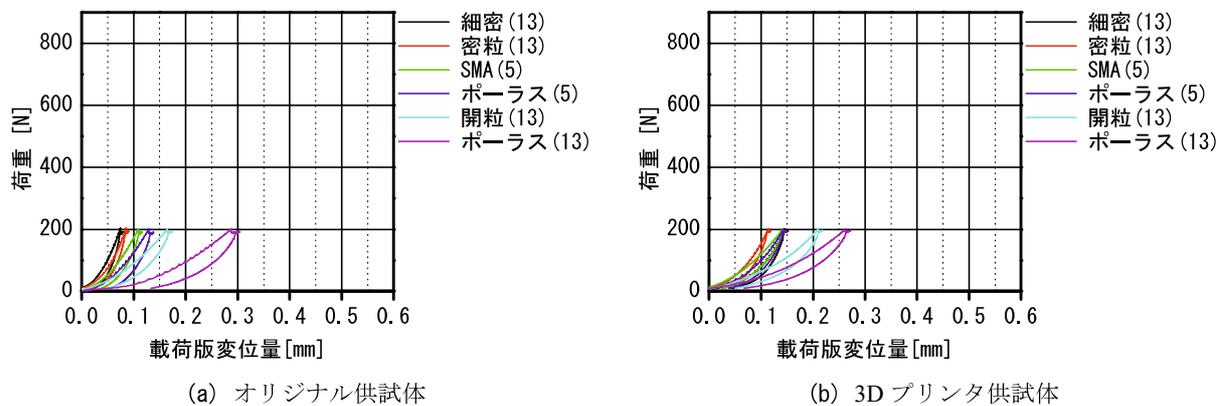
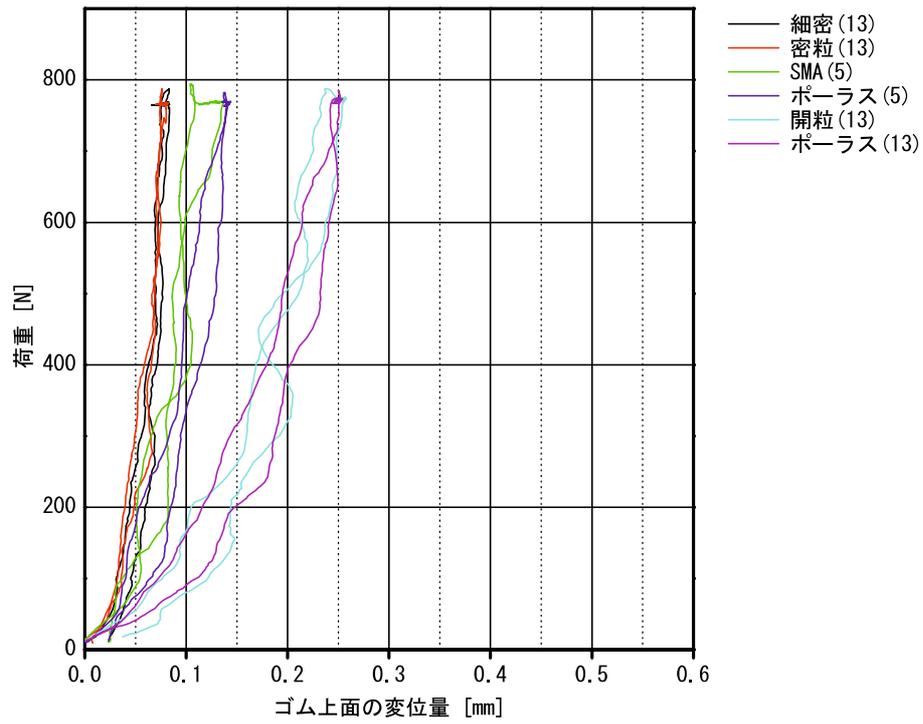
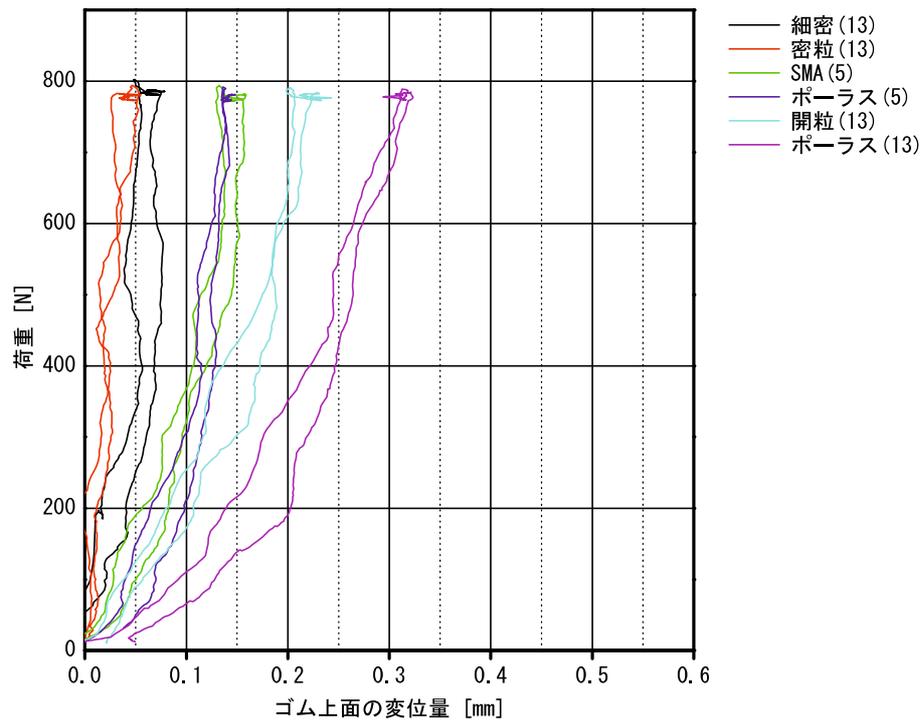


図 5.25 载荷版の荷重変位関係 (载荷圧力 0.025 MPa/载荷荷重 200 N の場合)



(a) オリジナル供試体



(b) 3D プリンタ供試体

図 5.26 ゴム上面の荷重変位関係 (载荷圧力 0.102 MPa/载荷荷重 800 N の場合)

b) オリジナル供試体と 3D プリンタ 供試体におけるゴム上面の最大変位量

同一の舗装種類ごとに 3D プリンタ 供試体とオリジナル供試体の値を比較するため、図 5.27 に各供試体のゴム上面の最大変位量をプロットした。関係図より、ゴムの変位量が 0.2 mm 以下の細密(13)と密粒(13)、SMA(5)、ポーラス(5)はオリジナル供試体と 3D プリンタ 供試体で顕著な差は見られない。変位量が 0.3 mm 程度の開粒(13)とポーラス(13)はオリジナル供試体と 3D プリンタ 供試体で大小関係が異なる。供試体作製時に使用したアスファルト混合物と 3D プリンタのフィラメント材料の弾性係数を比較すると、アスファルト混合物の材料変形係数としての 20°C 時のスティフネス（弾性係数）は、密度の小さいポーラスアスファルト混合物については約 1.5 GPa、密度の大きい密粒度アスファルト混合物や SMA については約 3.0 GPa^{7),8)} である。一方で、3D プリンタ 供試体を作製した材料であるポリ乳酸（PLA）樹脂の一般的な弾性係数は、3.5 GPa⁹⁾ である。この値をみると、3D プリンタ 供試体の方がオリジナル供試体より、変形係数が大きいため、ゴム上面の変位量は大きい結果を得ることが想定される。しかし、必ずしもその結果が得られず、舗装種類によってオリジナル供試体の変位量と 3D プリンタの変位量の大小関係が異なる結果であった。これは、3D プリンタ 供試体を作製する方法としてノズルからフィラメント（PLA 樹脂材料）を押し出し積層する方法であり、積層間隔が 0.1 mm である。舗装の表面の標高差が大きい場合、山部や谷部の勾配が急であるため、積層間隔ごとに段差が生じる。そのため、オリジナル供試体と 3D プリンタ 供試体で変位に差が生じたと考えられる。しかし、積層方法による段差の影響がゴム上面の変位を大きくさせるのか、小さくさせるのかは、今後、実験個数を増やし、再現性を確認する。

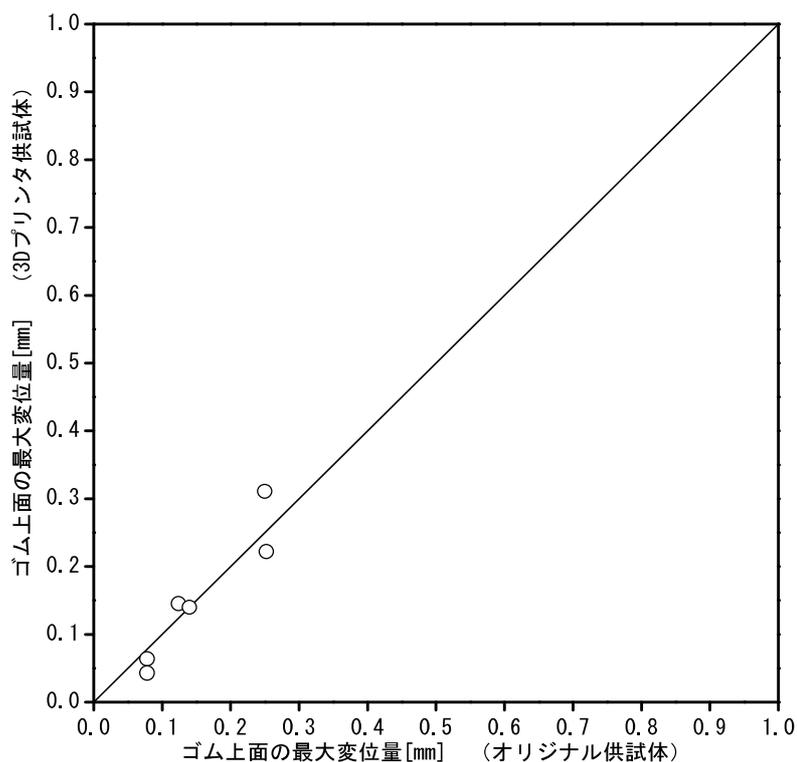


図 5.27 オリジナル供試体と 3D プリンタ 供試体のゴム上面の最大変位量（アスファルト舗装）

c) ゴム上面の最大変位量に影響する舗装の性質

ゴム上面の最大変位量に影響する舗装の性質を明らかにするべく、舗装の性質の一つである舗装の表面粗さ（面粗さ）の評価指標である接触深さとの関係を図 5.28 に示す。ゴム上面の最大変位量は、オリジナル供試体と 3D プリント供試体ともに、接触深さの増加に伴い、ゴム上面の最大変位量は大きくなる傾向が得られた。すなわち、アスファルト舗装に関しては、ゴム上面の最大変位量、すなわちランナーの足の変位量は、舗装の表面粗さ（面粗さ）によって異なること明らかになった。

ここで、接触深さを説明変数、载荷圧力が 0.102 MPa の場合におけるゴム上面の最大変位量を目的変数とした場合、アスファルト舗装のオリジナル供試体の回帰式は式-5.1 のとおりとなり、相関係数は 0.876 となった。これより、接触深さよりゴム上面の最大変位量を予測できる可能性があることが確認された。

$$D_{0.102\text{MPa}} = 0.3482x - 0.0151 \quad (0.276 \leq x \leq 0.816) \quad (5.1)$$

ここに、

$D_{0.102\text{MPa}}$: 载荷圧力 0.102 MPa 時のゴム上面の最大変位量 [mm]

x : 接触深さ [mm]

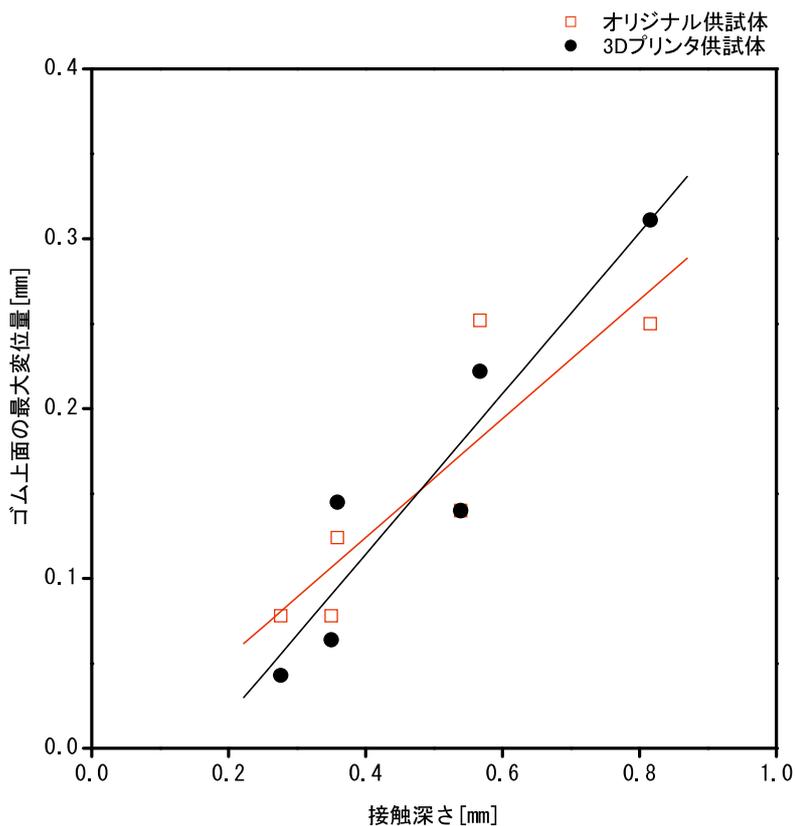


図 5.28 接触深さとゴム上面の最大変位量との関係（アスファルト舗装）

(2) アスファルト舗装の接地面積と接地圧力の測定結果

ゴム上面の変位を舗装の表面粗さの違いにより、差異が見られた。その時のゴム板と舗装供試体表面の接地面積と接地圧力についても舗装の表面粗さの影響を把握した。

a) 舗装種類ごとの接地領域

例として、ポーラス(5)の場合における載荷荷重ごとの接地領域を図 5.29 に示し、感圧紙を用いて測定した 0.102 MPa 時にゴムが接地した領域（以下、接地領域）を図 5.30 に示す。これらは、オリジナル供試体を用いて測定した結果を示している。

図 5.29 に示した載荷荷重ごとの接地領域はポーラス(5)を例として示したが、舗装種類によらず載荷荷重の増加に伴い接地領域が増加する傾向が見てとれた。図 5.30 に示した接地領域をアスファルト舗装の種類ごとに見ると、ポーラス(13)や開粒(13)は細密(13)や密粒(13)に比べて接地領域が少ない。そして、細密(13)や密粒(13)は舗装の表面粗さの谷部にゴムが沈み込み、接地領域が連なって、一つの広い面積を占めているのに対して、ポーラス(13)や開粒(13)は接地領域が繋がっておらず、小さい接地領域が点在している。

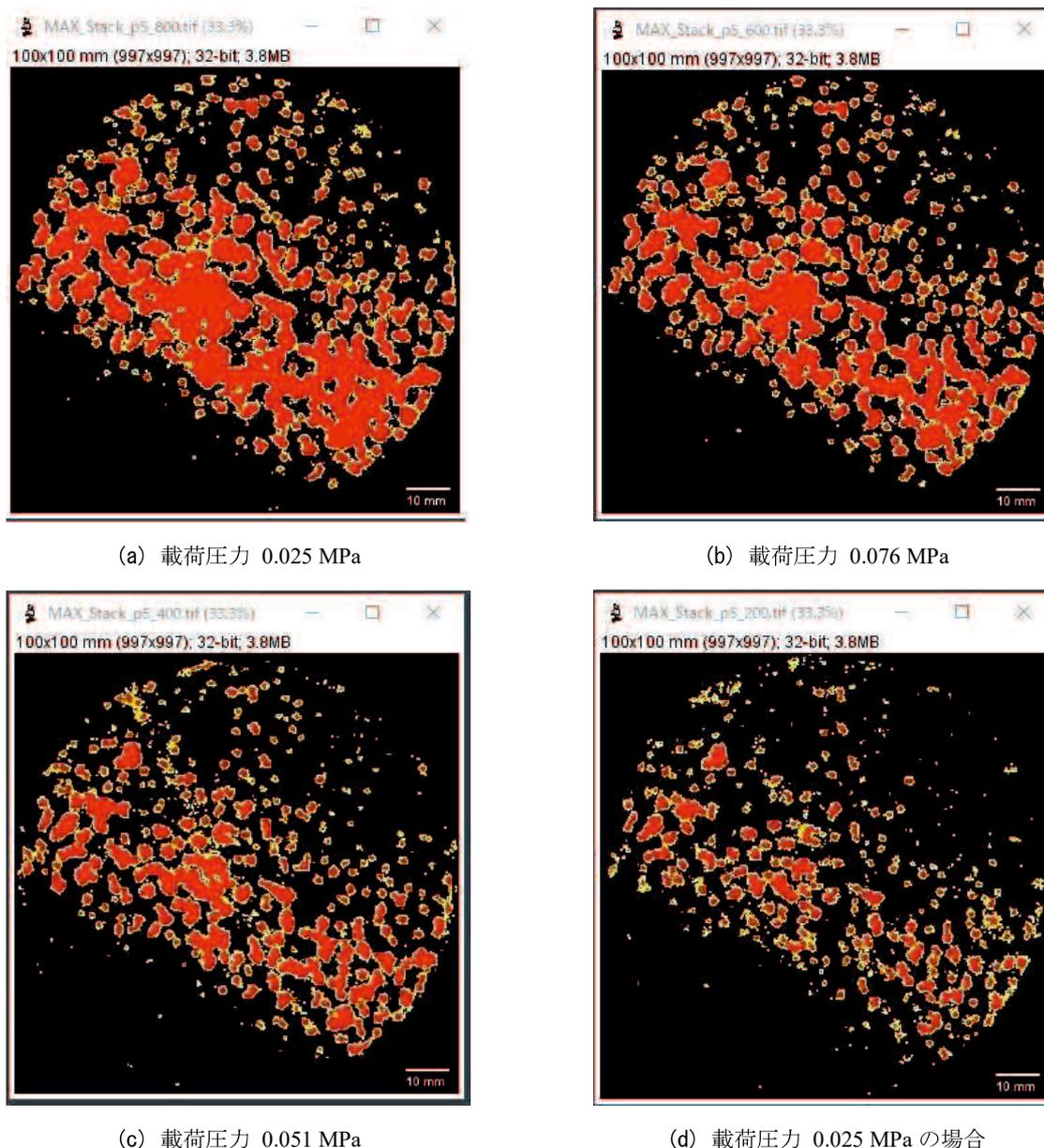
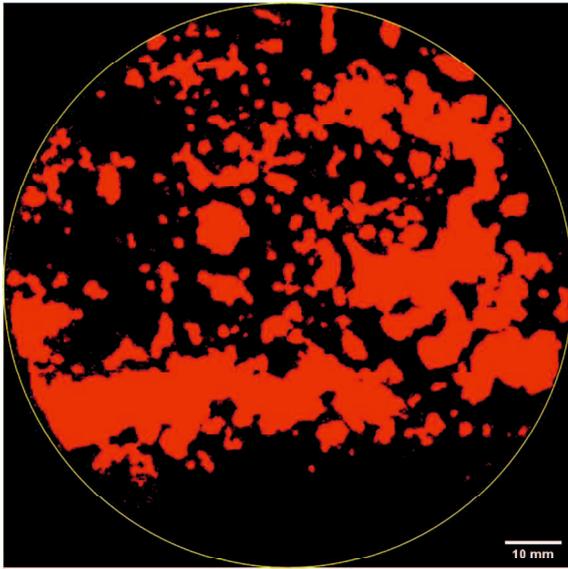
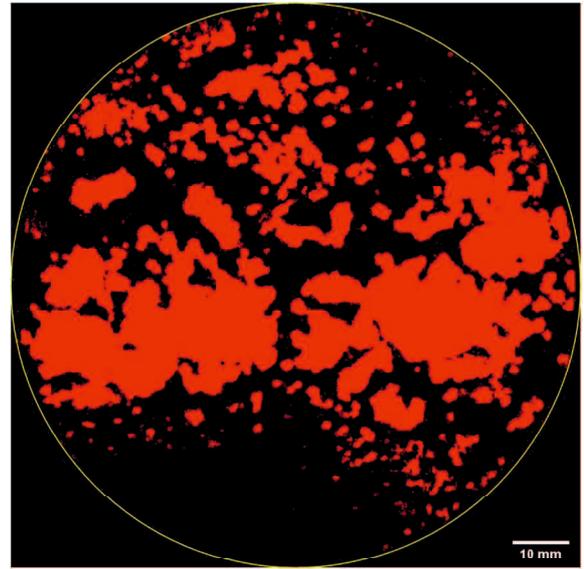


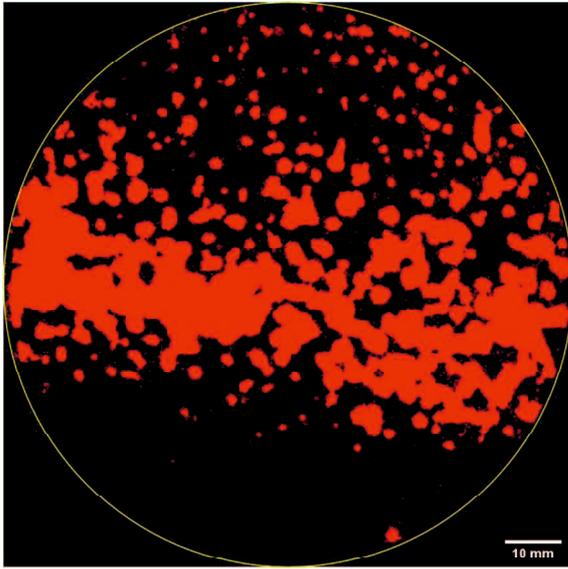
図 5.29 接地面積分布（ポーラス(5)の場合）



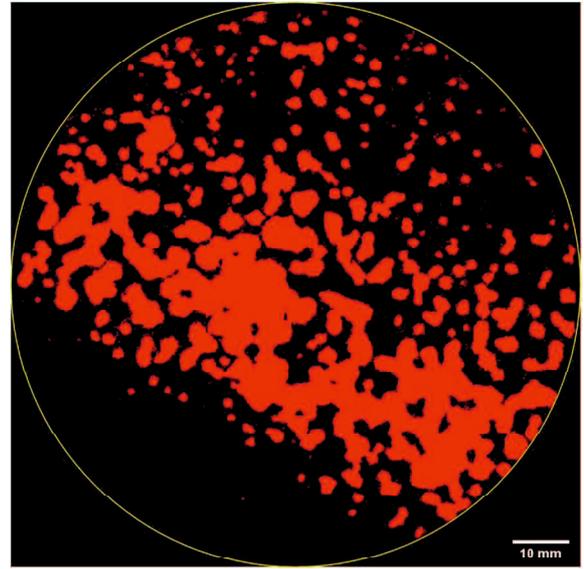
(a) 細密(13)



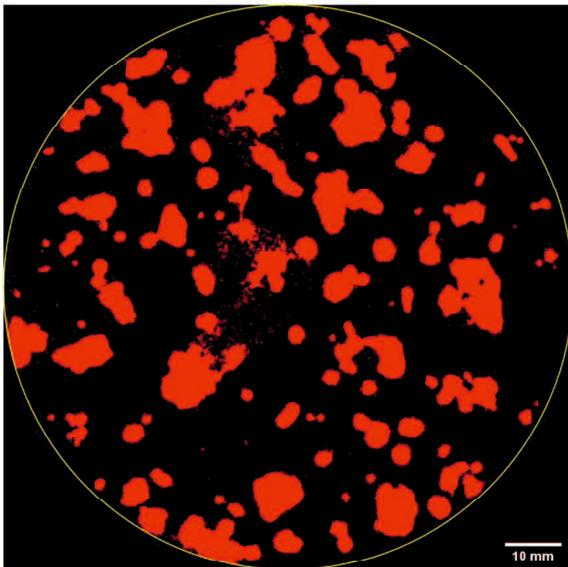
(b) 密粒(13)



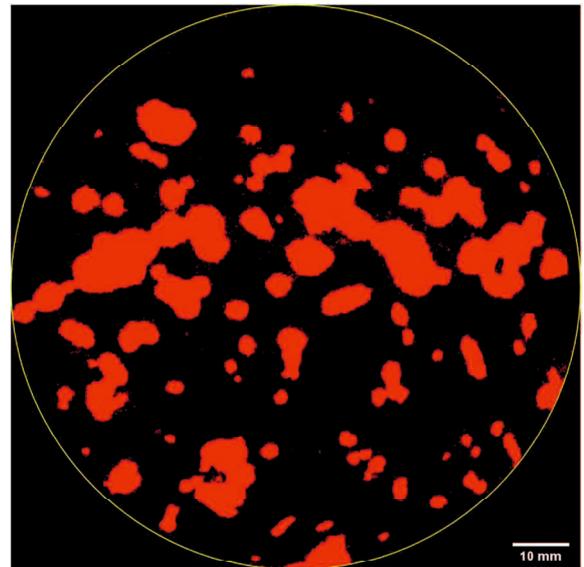
(c) SMA(5)



(d) ポーラス(5)



(e) 開粒(13)



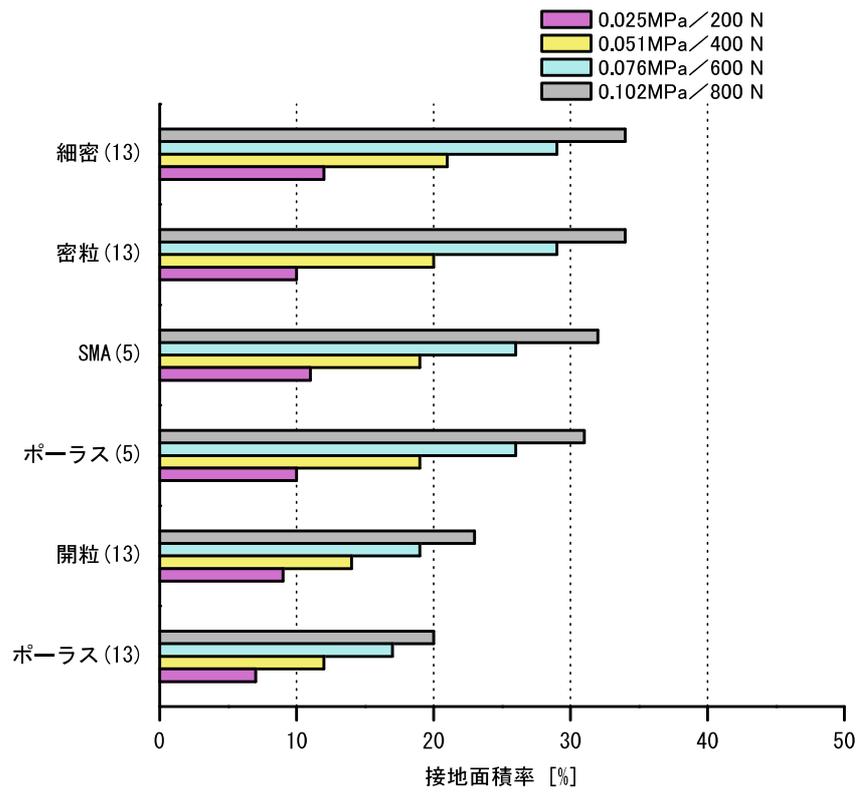
(f) ポーラス(13)

図 5.30 接地領域 (アスファルト舗装, 載荷圧力 0.102 MPa の場合)

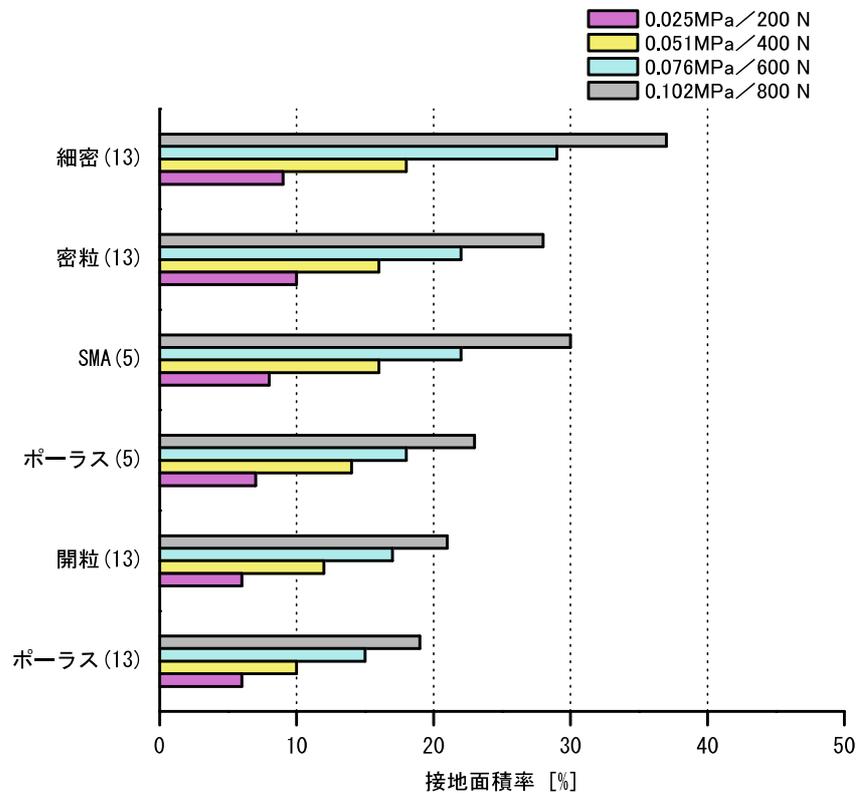
b) 舗装種類ごとの接地面積率

図 5.29 に示した接地領域のピクセル数から算出した接地面積率の結果を図 5.31 に示した。感圧紙の解像度は 0.125 mm であることから、1 ピクセルあたり 0.015625 mm^2 として接地面積を算出し、供試体の見かけ面積 7850 mm^2 に対する比率で記した。アスファルト舗装 6 種類のオリジナル供試体の結果を図 5.31 (a) に、3D プリンタ供試体の結果を図 5.31 (b) に示す。

結果より、アスファルト舗装の種類によらず、载荷圧力の増加に伴い、接地面積率は増加傾向を示した。この傾向はオリジナル供試体のみならず、3D プリンタ供試体でも見てとれる。オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体を比較すると、図 5.32 に示すとおり、3D プリンタ供試体よりオリジナル供試体の方が接地面積は大きい傾向を示した。ポーラス(13)と開粒(13)はオリジナル供試体と 3D プリンタ供試体で大きな差はなく、1:1 の直線状にある。しかし、細密(13)や密粒(13)、SMA(5)、ポーラス(5)は 10 %以下の差異があった。



(a) オリジナル供試体



(b) 3D プリンタ供試体

図 5.31 接地面積率 (アスファルト舗装)

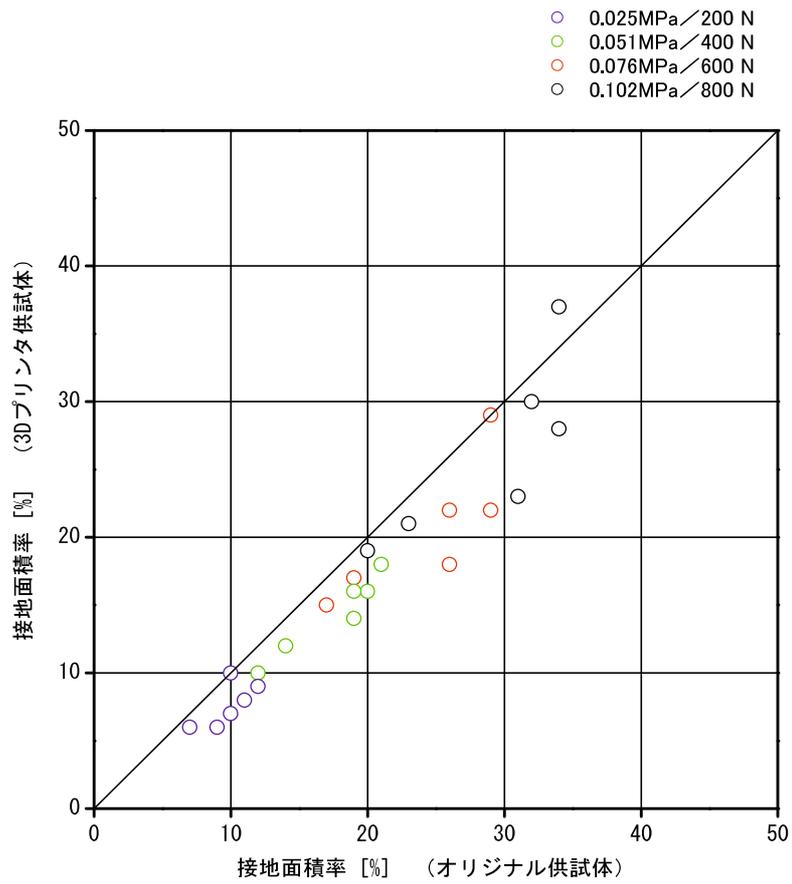


図 5.32 オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の接地面積率の関係 (アスファルト舗装)

c) 接地面積率に影響する舗装の性質

図 5.31 に示した載荷圧力ごとの接地面積率と接触深さとの関係を図 5.33 に示す。図 5.33(a) のオリジナル供試体の結果より、接触深さの増大に伴い、接地面積は減少傾向を示す傾向が得られた。この傾向はオリジナル供試体と図 5.33(b) に示す 3D プリンタ供試体ともに同様の傾向が見られたことから、アスファルト舗装のバインダーによる影響は小さく、舗装の表面粗さにより接地面積率は差異を有することが明らかになった。そして、載荷圧力が大きいほど近似曲線勾配が大きいことから、載荷圧力が増加すると表面粗さの影響が顕著にみられることも示唆された。

ここで、接触深さを説明変数、載荷圧力ごとの接地面積率を目的変数とした場合、アスファルト舗装のオリジナル供試体の回帰式は式 5.2~5.5 のとおりであり、相関係数は載荷圧力 0.102 MPa の場合は、-0.917 であり、載荷圧力 0.076 MPa の場合は-0.902、載荷圧力 0.051MPa の場合は-0.894、載荷圧力 0.025 MPa の場合は-0.860 となった。これより、接触深さより接地面積率を予測できる可能性があることが確認された。

$$A_{0.102\text{MPa}} = -26.4x + 41.9 \quad (0.276 \leq x \leq 0.816) \quad (5.2)$$

$$A_{0.076\text{MPa}} = -23.6x + 36.0 \quad (0.276 \leq x \leq 0.816) \quad (5.3)$$

$$A_{0.051\text{MPa}} = -16.7x + 25.6 \quad (0.276 \leq x \leq 0.816) \quad (5.4)$$

$$A_{0.025\text{MPa}} = -7.7x + 13.6 \quad (0.276 \leq x \leq 0.816) \quad (5.5)$$

ここに、

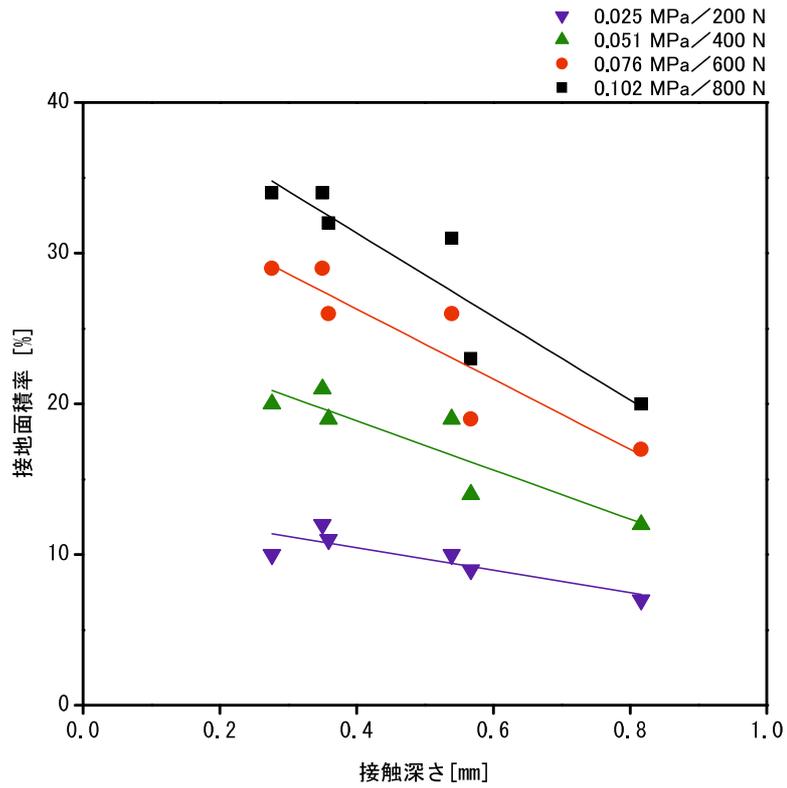
$A_{0.102\text{MPa}}$: 載荷圧力 0.102 MPa 時の接地面積率 [%]

$A_{0.076\text{MPa}}$: 載荷圧力 0.076 MPa 時の接地面積率 [%]

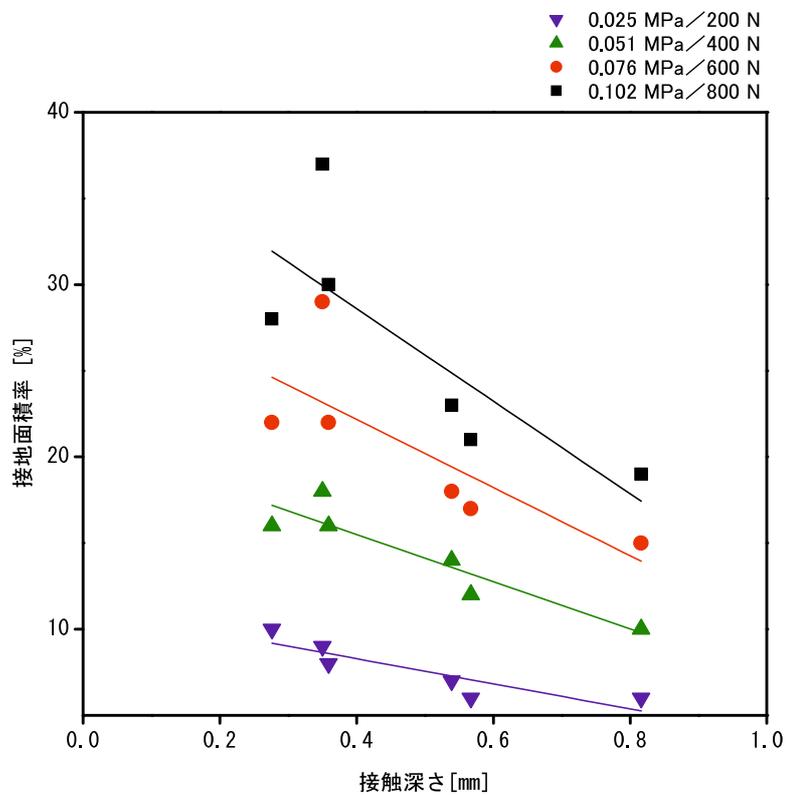
$A_{0.051\text{MPa}}$: 載荷圧力 0.051 MPa 時の接地面積率 [%]

$A_{0.025\text{MPa}}$: 載荷圧力 0.025 MPa 時の接地面積率 [%]

x : 接触深さ [mm]



(a) オリジナル供試体

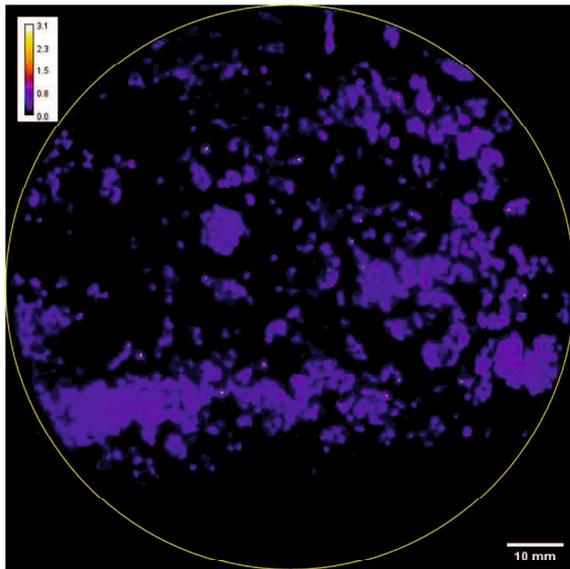


(b) 3D プリンタ供試体

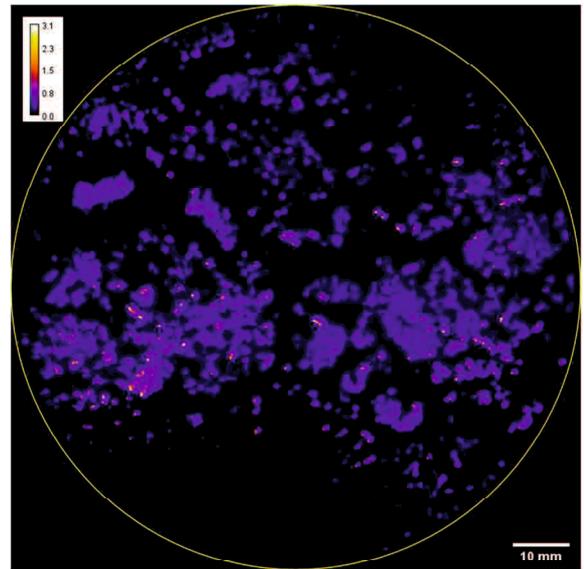
図 5.33 接触深さと接地面積率との関係 (アスファルト舗装)

d) 接地圧力分布

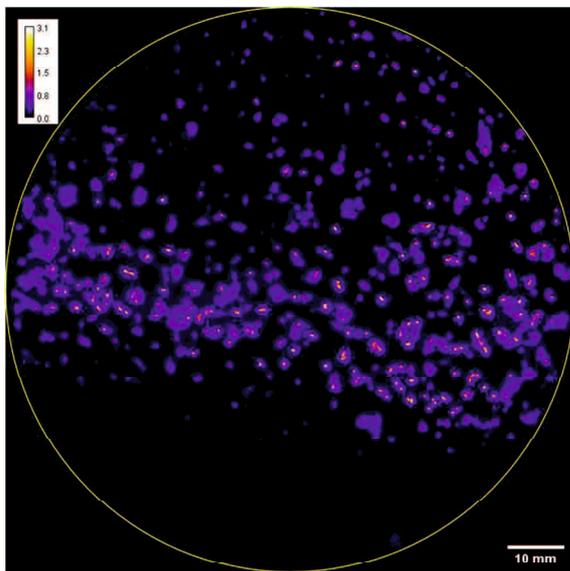
載荷荷重 0.102 MPa 時の接地領域における接地圧力分布を図 5.34 に示す。黒色が圧力 0.0 MPa を示し、紫から赤、黄色、白色を示し、白色が 3.1 MPa の高圧力を示すカラースケールバーとなっている。細密(13)は紫色～濃い青色を示す領域が、接地領域の 9 割を占めており濃い青色より大きい圧力を示す赤色が点在している。密粒(13)は細密(13)に比べて赤色を示す領域が多い。SMA(5)やポーラス(5)は密粒(13)に比べると接地領域が点在しており、赤色よりさらに高圧力を示す白色を示す領域が多い。ポーラス(13)や開粒(13)は濃い青色を示す領域が少なく、赤色から白色の高圧力を示す領域が SMA(5)やポーラス(5)に比べて多い。



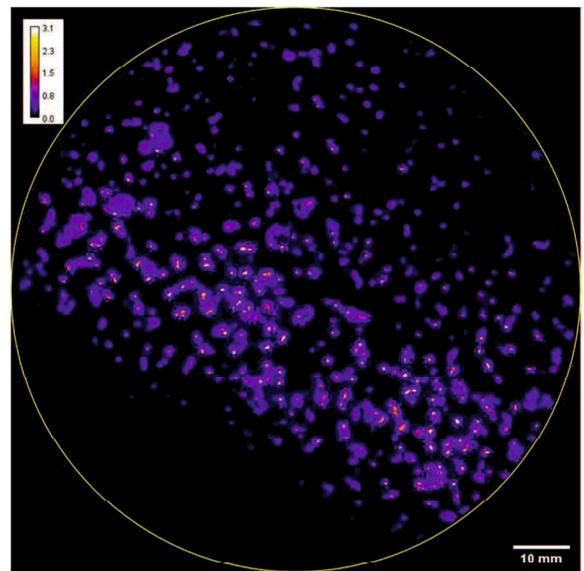
(a) 細密(13)



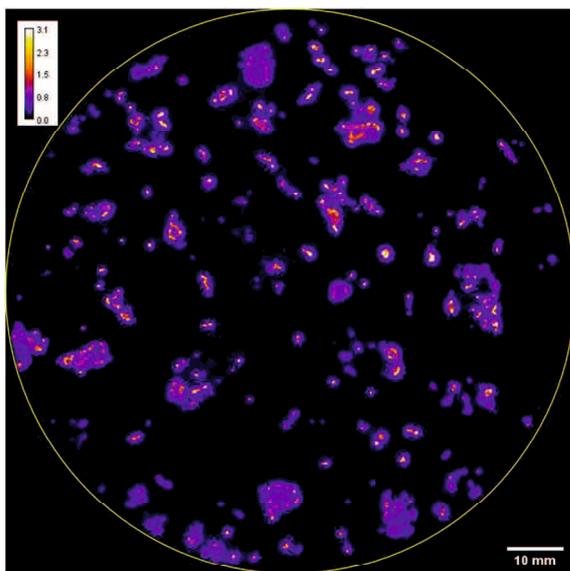
(b) 密粒(13)



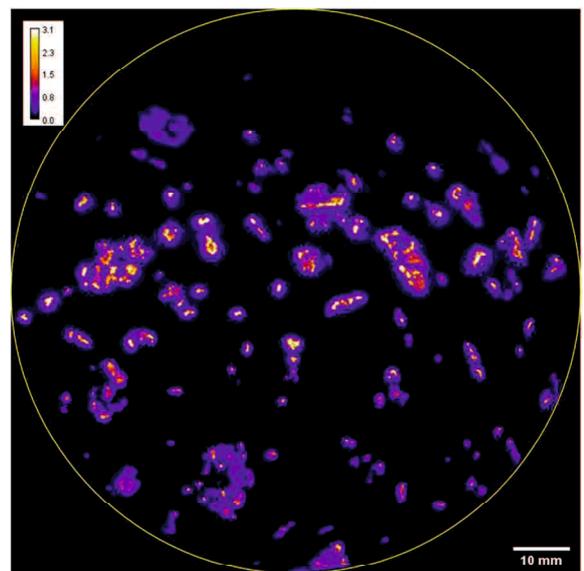
(c) SMA(5)



(d) ポーラス(5)



(e) 開粒(13)

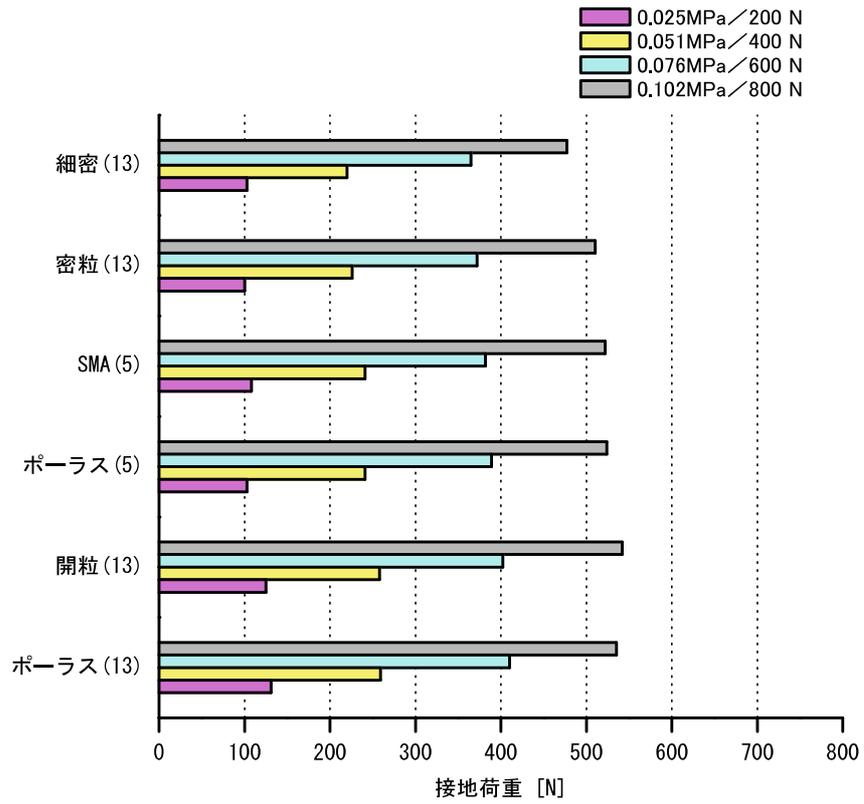


(f) ポーラス(13)

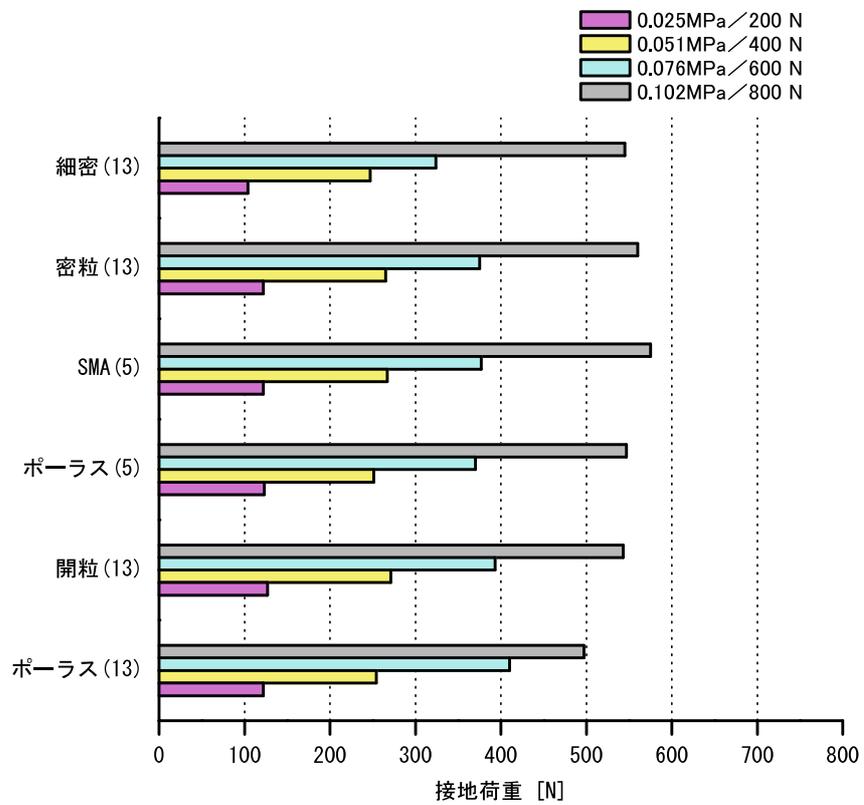
図 5.34 圧力分布 (アスファルト舗装, 載荷圧力 0.102 MPa の場合)

e) 接地荷重

載荷圧力ごとに感圧紙の接地圧力と接地面積から算出した接地荷重を図 5.35 に示す。載荷圧力 0.102 MPa (載荷荷重 800 N) の場合、感圧紙から算出した荷重は 800 N となることを想定していたが、約 500 N と載荷荷重 800 N の約 63 %の接地荷重であった。載荷圧力 0.025 MPa (載荷荷重 200 N) の場合は約半分の接地荷重であった。この理由として、載荷物がゴムであるため、載荷時のゴムの膨張により接地領域が広く真実の接地領域よりも多いため、接地荷重が小さい。また、感圧紙の発色カプセル一つの大きさが数 μm であるため、数 μm 以下の接地面積であってもカプセル 1 個分の面積で換算されてしまうこと、などが影響していると推察した。オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体との関係を図 5.36 に示す。載荷圧力 0.0763 MPa 時を除いてオリジナル供試体より 3D プリンタ供試体の方が大きい傾向を示した。これは、接地面積は 3D プリンタ供試体よりオリジナル供試体の方が大きい傾向であったため、計算上、3D プリンタ供試体の方が単位面積当たりの荷重が大きくなったためと考えられる。



(a) オリジナル供試体



(b) 3D プリンタ供試体

図 5.35 接地荷重 (アスファルト舗装)

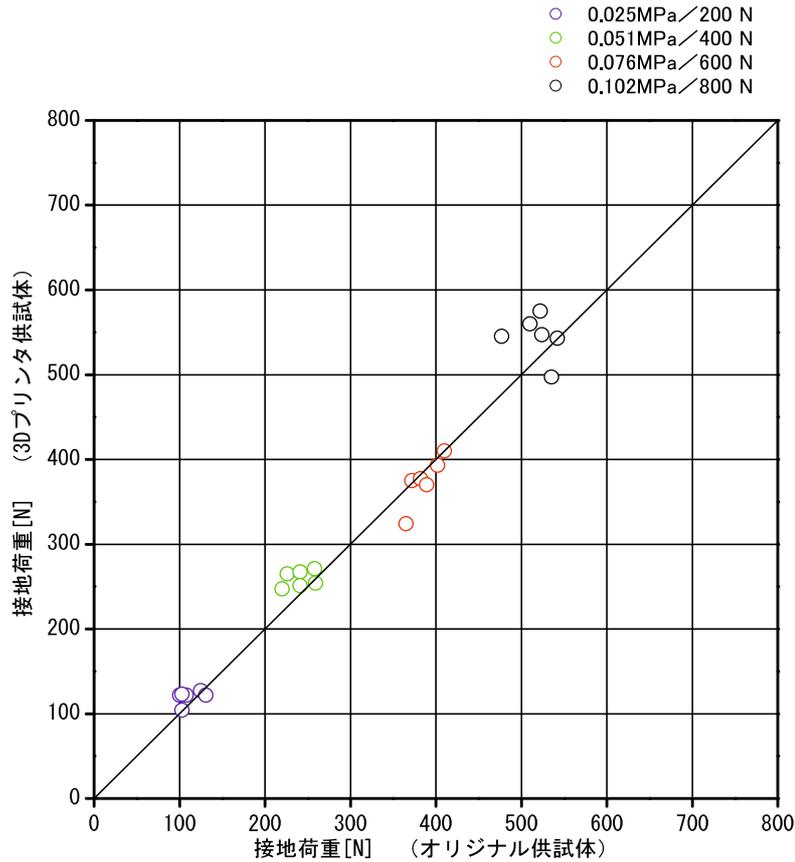
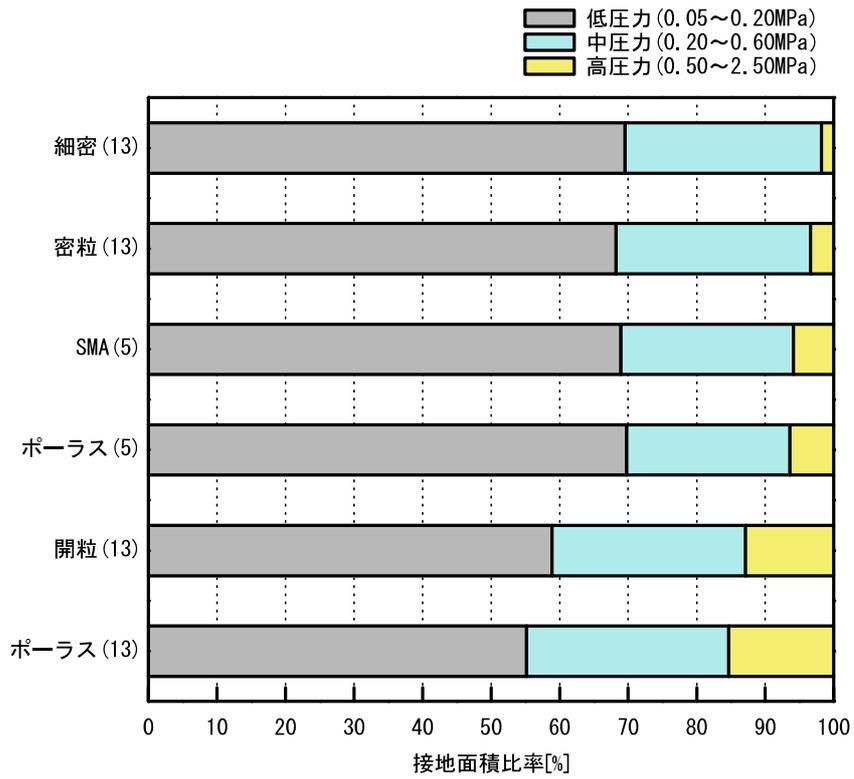


図 5.36 オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の接地荷重 (アスファルト舗装)

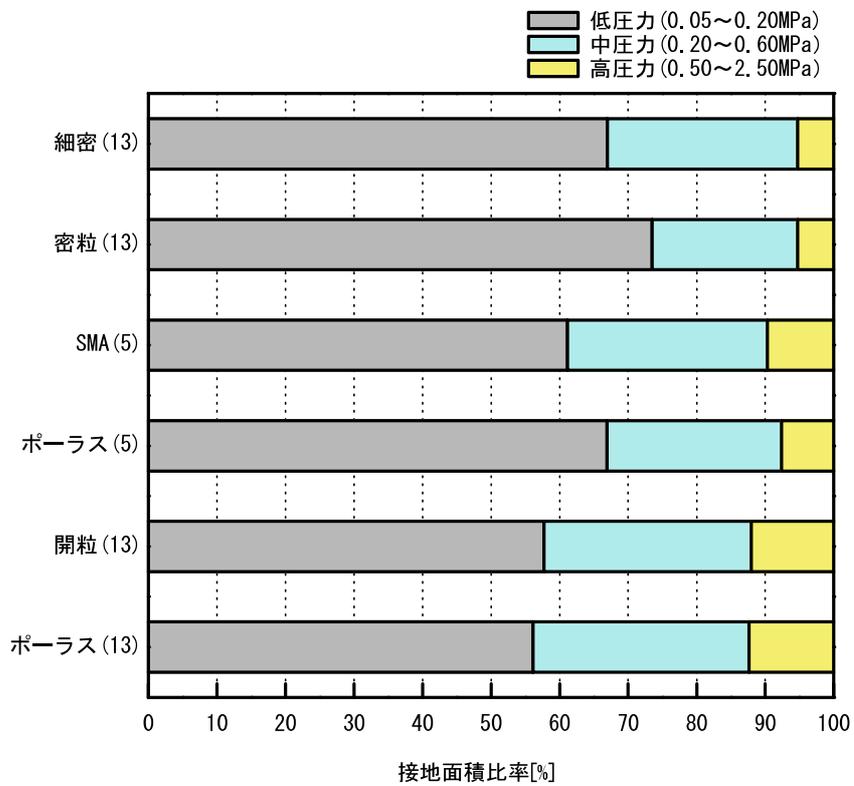
f) 接地面積の圧力分担率

載荷荷重 0.102 MPa (800 N) の時, 図 5.34 に示した接地領域における接地圧力分布において低圧力と中圧力 (黒～濃い青), 高圧力 (濃い青～白) を示した接地面積の割合を図 5.37 に示す. アスファルト舗装の場合, オリジナル供試体の結果は低圧力の範囲を示した接地面積比率が細密(13)と密粒(13), SMA(5), ポーラス(5)は約 70 %を占め, 開粒(13)は 60 %, ポーラス(13)は 55 %であった. 低圧力の接地面積比率が最も少ないポーラス(13)は高圧力の範囲を示した接地面積率が 6 種類の中で最大であり 15 %を占めた. 高圧力の範囲を示した接地面積率が最小値を示したのは細密(13)で 2 %であった.

オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の各圧力の接地面積率を図 5.38 に示した. 低圧力の範囲において, 密粒(13)とポーラス(5)は 3D プリンタ供試体よりオリジナル供試体の方が大きい傾向を示したがその他の種類は, オリジナル供試体より 3D プリンタ供試体の方が大きい傾向を示した. 中圧力と高圧力の範囲はオリジナル供試体より 3D プリンタ供試体の方が大きい傾向を示した. これはゴム上面の変位量の項で述べたように, オリジナル供試体より 3D プリンタ供試体の方が変形係数は大きいことから, 中圧力と高圧力の範囲はオリジナル供試体より 3D プリンタ供試体の方が大きい傾向を示したと推察する.



(a) オリジナル供試体



(b) 3D プリンタ供試体

図 5.37 接地面積の圧力分担率 (アスファルト舗装)

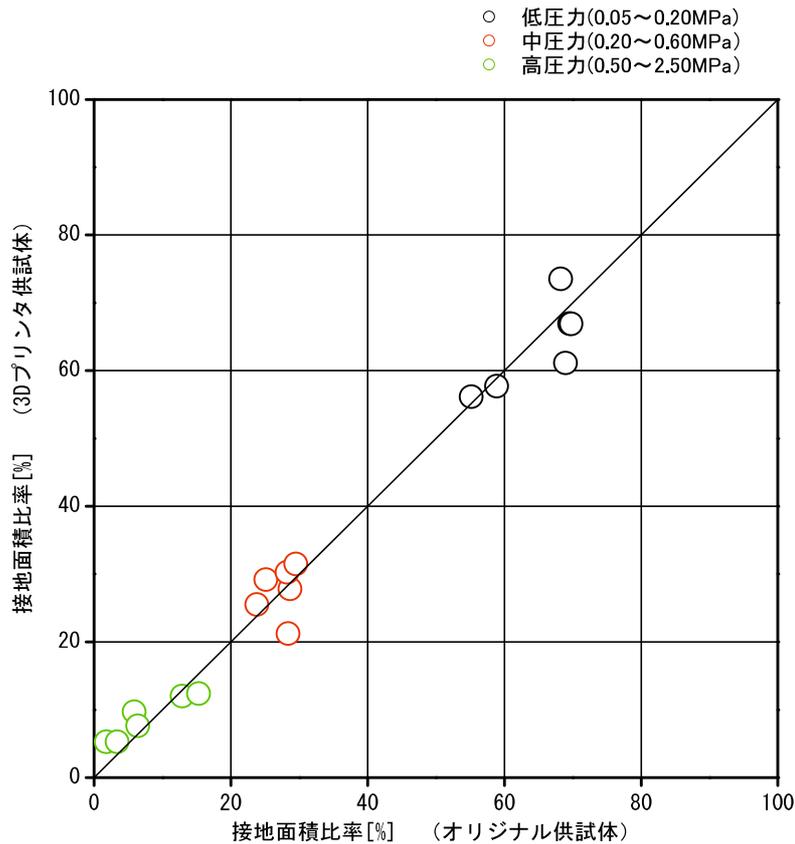


図 5.38 オリジナル供試体と 3D プリント供試体の各圧力における接地面積比率（アスファルト舗装）

g) 高圧力を占めた接地面積比率に影響する舗装の性質

図 5.39 に示した接触深さと高圧力を占める接地面積比率の関係より、接触深さの増大に伴い、高圧力を占める接地面積の割合が多くなる傾向が得られた。すなわち、アスファルト舗装の表面粗さの標高差が大きくなるにつれて、高圧力を占める接地面積の割合が多くなる傾向を得た。この傾向はオリジナル供試体と 3D プリント供試体ともに同様の傾向が見られたことから、アスファルト舗装のバインダーによる影響は小さく、舗装の表面粗さにより高圧力を占める接地面積比率も差異があることが明らかになった。

ここで、接触深さを説明変数、高圧力を占めた接地面積比率を目的変数とした場合、アスファルト舗装のオリジナル供試体の回帰式は式-5.6 のとおりであり、相関係数は 0.903 となった。これより、接触深さより高圧力を占める接地面積比率を予測できる可能性があることが確認された。

$$P_{0.102\text{MPa}} = 24.4x - 4.19 \quad (0.276 \leq x \leq 0.816) \tag{5.6}$$

ここに、

$P_{0.102\text{MPa}}$: 载荷圧力 0.102 MPa 時の高圧力を占める接地面積率 [%]

x : 接触深さ [mm]

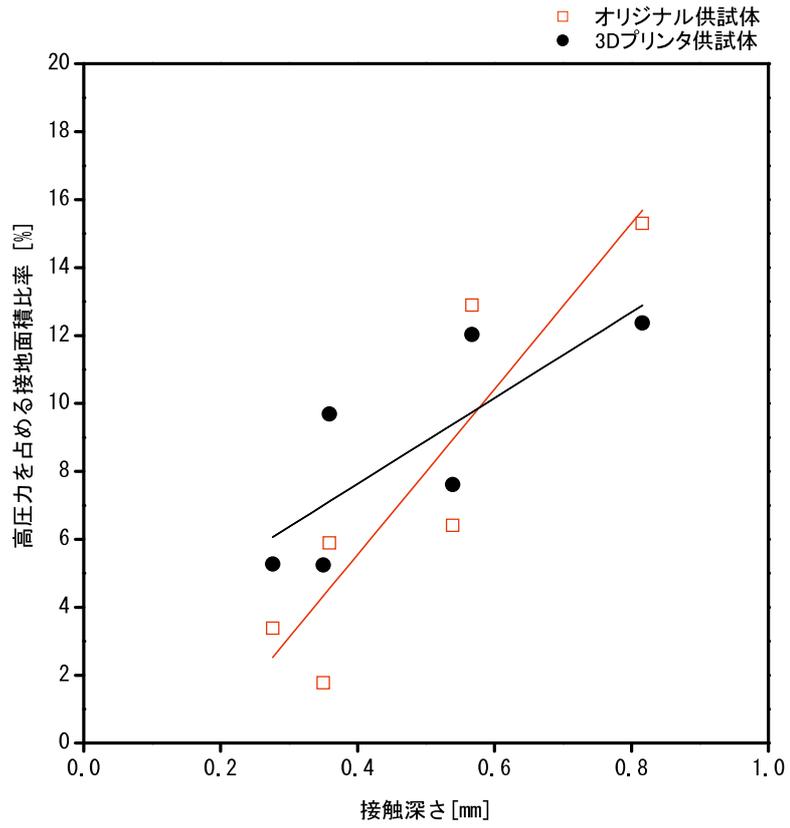


図 5.39 接触深さと高圧力を占める接地面積の割合（アスファルト舗装）

h) ゴム上面の最大変位量と接地面積および接地圧力との関係

前項で算出したゴム上面の最大変位量と接地面積および高圧力を占める接地面積の割合との関係を図 5.40 と図 5.41 に示す。接地面積とゴム上面の最大変位量との関係は負の相関がある。接地面積の増加につれて、ゴム上面の最大変位量が減少する傾向がオリジナル供試体と 3D プリンタ供試体ともに見てとれる。近似曲線の勾配もほぼ同一であることから、本実験条件における変形係数の大小に依存しない。高圧力を占める接地面積の割合とゴム上面の最大変位量との関係は正の相関がある。高圧力を占める接地面積の割合が多いほど、ゴム上面の最大変位量は増加する傾向がオリジナル供試体と 3D プリンタ供試体ともに見てとれる。近似曲線の勾配が異なることから、本実験条件における変形係数の大小に依存する。よって、アスファルト舗装に関して、ゴム上面の変位が生ずるメカニズムは接地面積が小さいことによって圧力が大きくなり、高圧力が生じるためゴムは大きな変形を生ずることが考えられる。

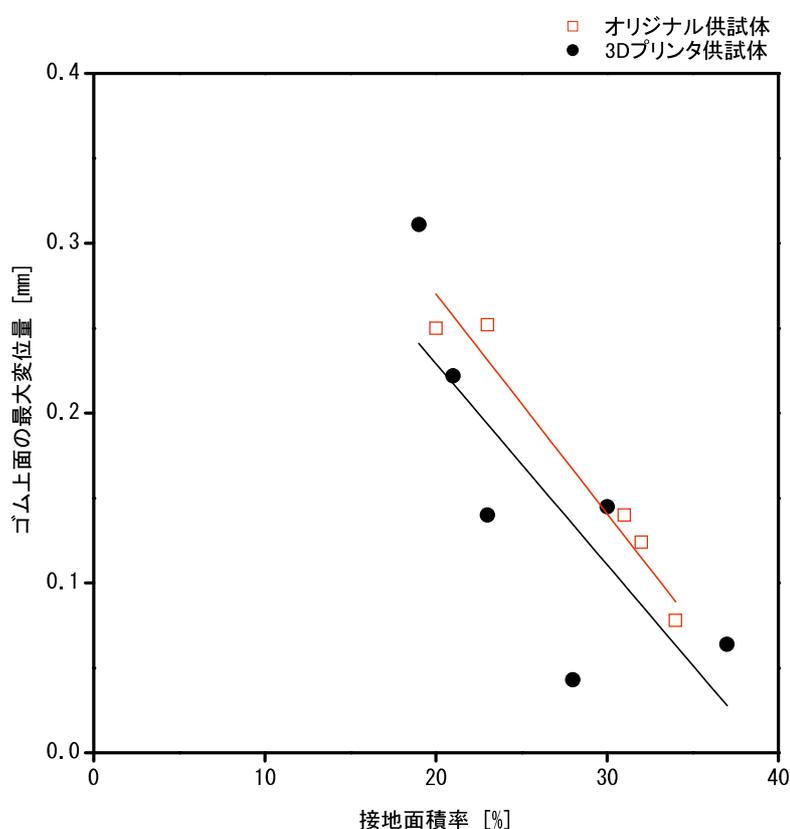


図 5.40 接地面積とゴム上面の最大変位量との関係（アスファルト舗装）

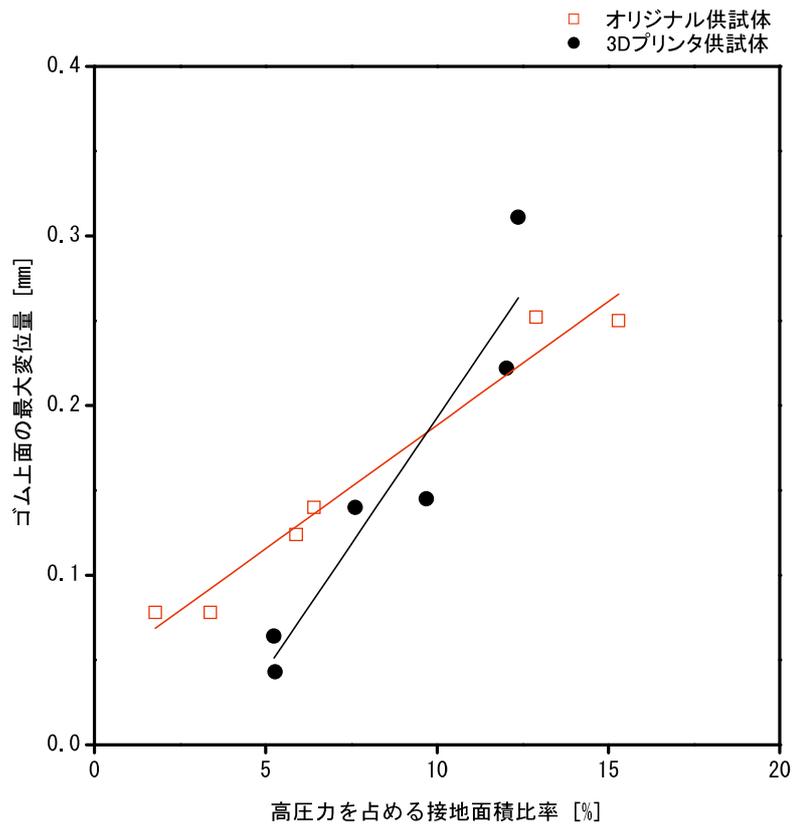


図 5.41 高圧力を占める接地面積の割合とゴム上面の最大変位量との関係 (アスファルト舗装)

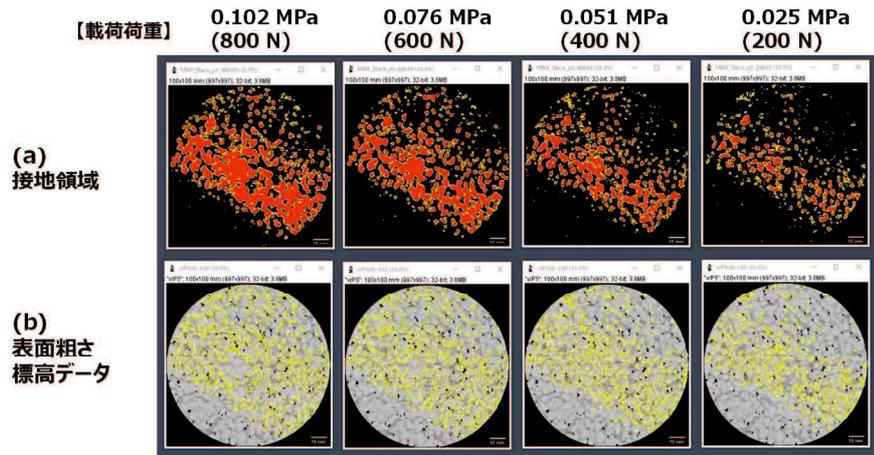
(3) ゴム上面の変位量推定のモデル化

a) ゴム上面の変位量の推定の手順

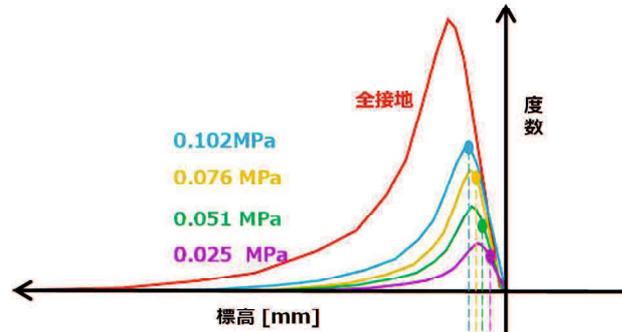
一軸載荷除荷実験と感圧紙実験で、ゴム上面の最大変位量は舗装の表面粗さと載荷荷重によって変化することが明らかになった。すなわち、同一の舗装であっても、ランナーの体重が異なれば、足の変位量は異なる値となる。そのため、体重の異なるランナー各々、舗装種類ごとに足の変位量を算出する場合、ランナー一人ひとり計測を行う必要がある。この場合、時間と労力が膨大に必要とされる。そこで本節では、接地領域と舗装の表面粗さの高さデータを用いて、載荷荷重とゴムの真実接触深さ d_3 (図 5.18) の関係について定式化を試みた。本手法を用いることで、載荷荷重とゴムの沈み込み量の関係を定式化し、舗装の表面粗さからゴムの真実接触深さ d_3 を推定することが可能となる。

定式化の手順を図 5.42 に示す。まず、手順 1 に示すように、感圧紙で測定した載荷荷重ごとの接地領域を 3D スキャナで計測した表面粗さ（面粗さ）の標高データへ重ね合わせる。これにより、接地した領域の標高、すなわちゴムの沈み込んだ深さ（以下、真実接触深さ）を把握することが可能となる。続いて、手順 2 に示すように、接地領域における標高データより、標高度数分布を描く。そして、手順 3 については、物体は舗装の表面粗さの標高がゼロの高さから接地し、載荷荷重が大きくなるにつれて、物体が舗装の表面粗さの形状に沿って沈み込むことが想定される。舗装の表面と接地する物体が液体の場合は標高度数分布の標高＝ゼロから小さい値の順に、各標高のすべての度数が接地すると考えられる。この場合を全接地と称す。しかし、ゴムの場合、液体とは異なり、同一の標高であっても、狭い範囲で大きな標高に囲われていた場合、ゴムは表面粗さの形状に追従して変形することが難しい。表面粗さの形状によっては接地したくても、接地できない領域が存在するため、同一の標高であってもすべての度数が接地しない。この現象により、手順 2 に示す標高度数分布は、全接地時に対して、載荷荷重 200 N～800 N の場合は各標高における度数の値が小さいことがわかる。そこで本研究では、全接地時の標高度数に対する標高度数の割合を算出し、全接地の度数に対する度数比率が 0.8 の場合、すなわち、「ある標高において 80% の度数が得られた場合を接地した」と定義する。度数比率が 0.8 の場合の標高高さを真実接触深さ d_3 と定め、算出を行った。真実接触深さ d_3 とは、ゴムが舗装の表面粗さの谷部へ沈み込んだ深さに相当することから、実験で計測することが困難であることから、標高データと接地領域データから算出可能な値とする。

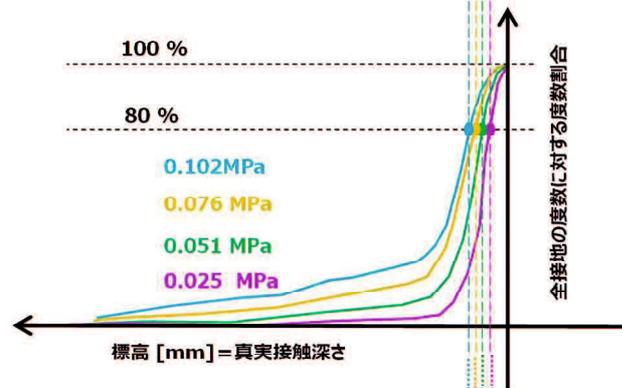
手順(1) : 接地領域を標高データへ重ね合わせ



手順(2) :
接地領域の標高データを出力



手順(3) :
全接地時の標高度数に対する
標高度数の割合を算出



手順(4) :
真実接触深さ (標高度数割合80%) と
荷重の関係

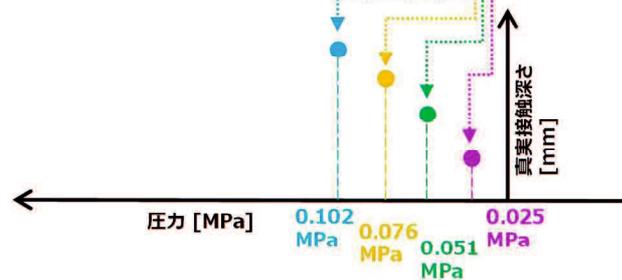
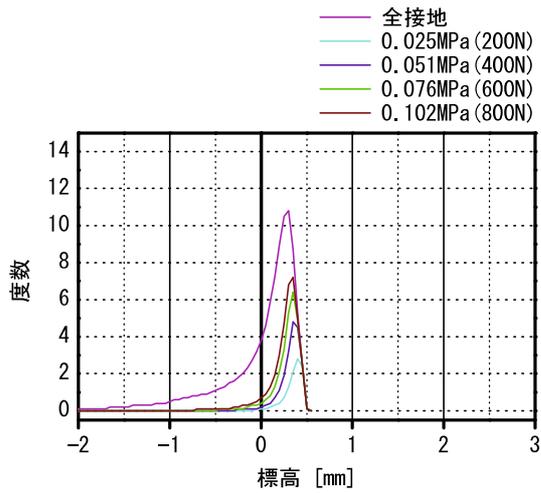


図 5.42 真実接触深さの算出手順

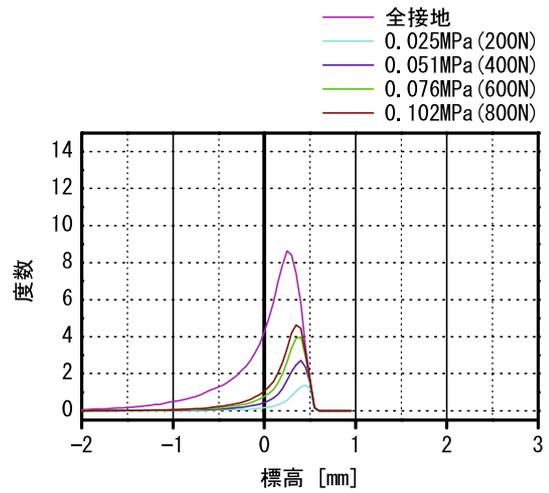
b) 真実接触深さの算出

接地領域を舗装の表面粗さの標高データへ重ね合わせることで得られた、載荷荷重ごとの接地領域における標高度数分布を図 5.43 に示す。標高度数分布の標高の最大値から物体が接地することから、標高の最大値を標高=ゼロとして標高度数分布を描いた。全接地の場合の標高度数分布とは、液体を流し込んだ場合に接地する各標高の度数である。舗装種類によらず、載荷荷重 0.102 MPa (800 N) から 200 N の標高度数分布は、全接地の標高度数分布に比べて、各標高の度数が小さい。そして、載荷荷重が小さくなるにつれて、各標高の度数が小さい傾向が見てとれる。

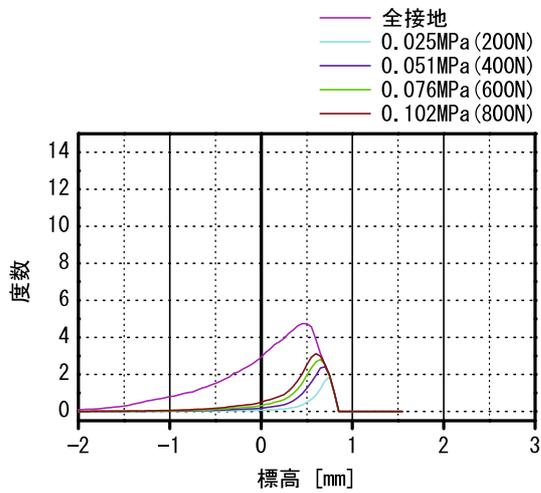
次に、図 5.44 に示す載荷荷重ごとに全接地の度数に対する度数比率を算出した結果より、度数比率が 0.8 の場合の標高高さである真実接触深さ d_3 を読み取り、載荷荷重と真実接触深さ d_3 との関係を図 5.45 に示す。図より、舗装種類によらず、載荷荷重の増加によってゴムの真実接触深さ d_3 も増加する。載荷荷重 200 N の場合は、細密(13)と密粒(13)は 0.11 mm と 0.13 mm と同程度の値であり、SMA(5)とポーラス(5)、開粒(13)は 0.17 mm と同一の値を示した。ポーラス(13)は 0.27 mm であった。よって、載荷荷重が小さい場合は細密(13)および密粒(13)と SMA(5)とポーラス(5)、開粒(13)との差は 0.04~0.06 mm と極めて小さい。載荷荷重 800 N の場合は舗装種類ごとに差が見られた。細密(13)は 0.21 mm であり、ポーラス(13)は 0.51 mm であった。ここで得られた真実接触深さから、ゴム上面の最大変位量の推定式を導く。



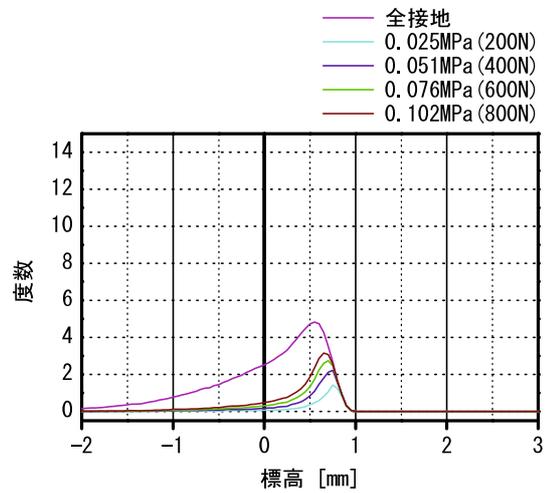
(a) 細密(13)



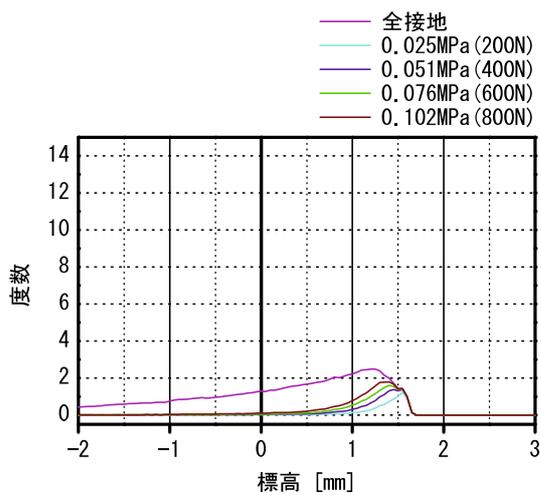
(b) 密粒(13)



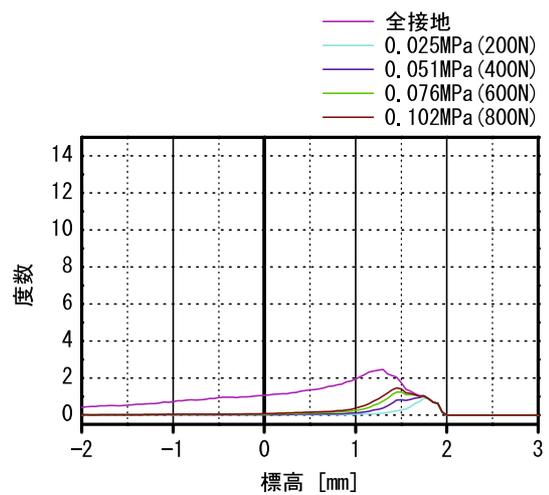
(c) SMA(5)



(d) ポーラス(5)

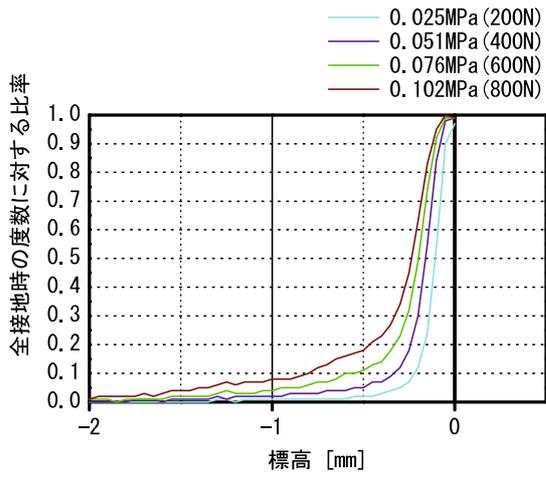


(e) 開粒(13)

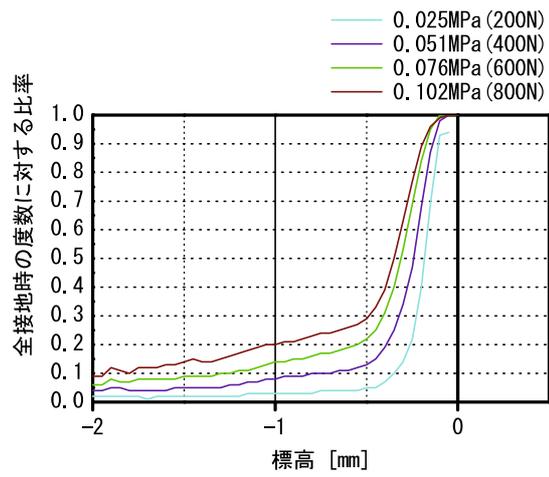


(f) ポーラス(13)

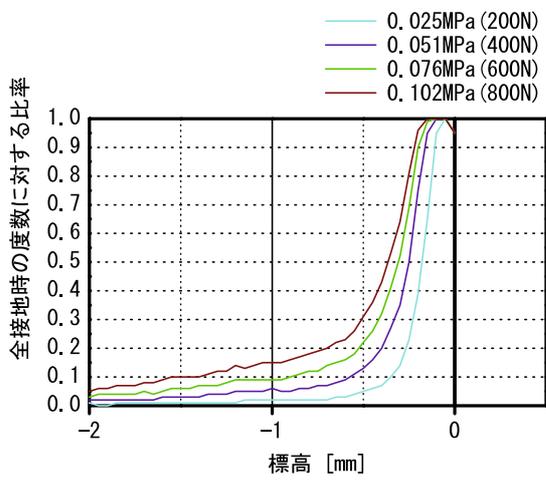
図 5.43 載荷荷重ごとの表面粗さの標高度数分布



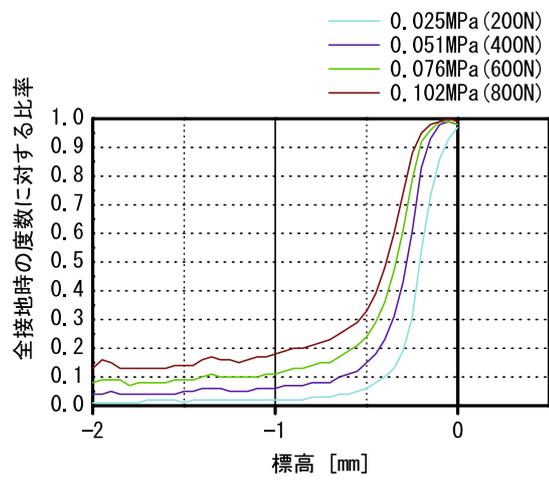
(a) 細密(13)



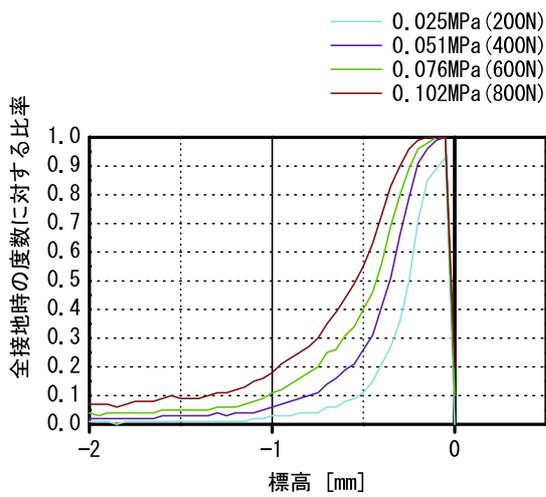
(b) 密粒(13)



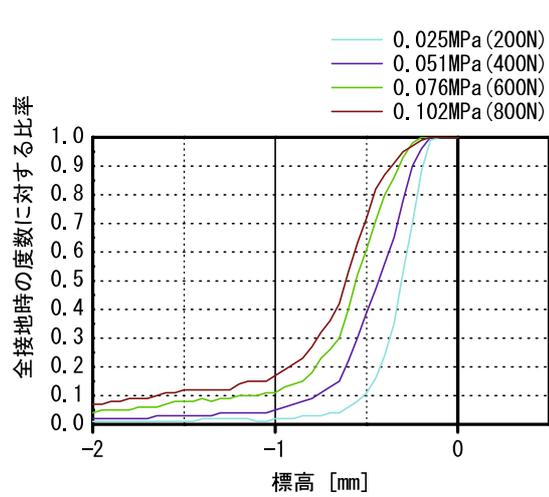
(c) SMA(5)



(d) ポーラス(5)



(e) 開粒(13)



(f) ポーラス(13)

図 5.44 全面接地時の高さ度数に対する度数比率

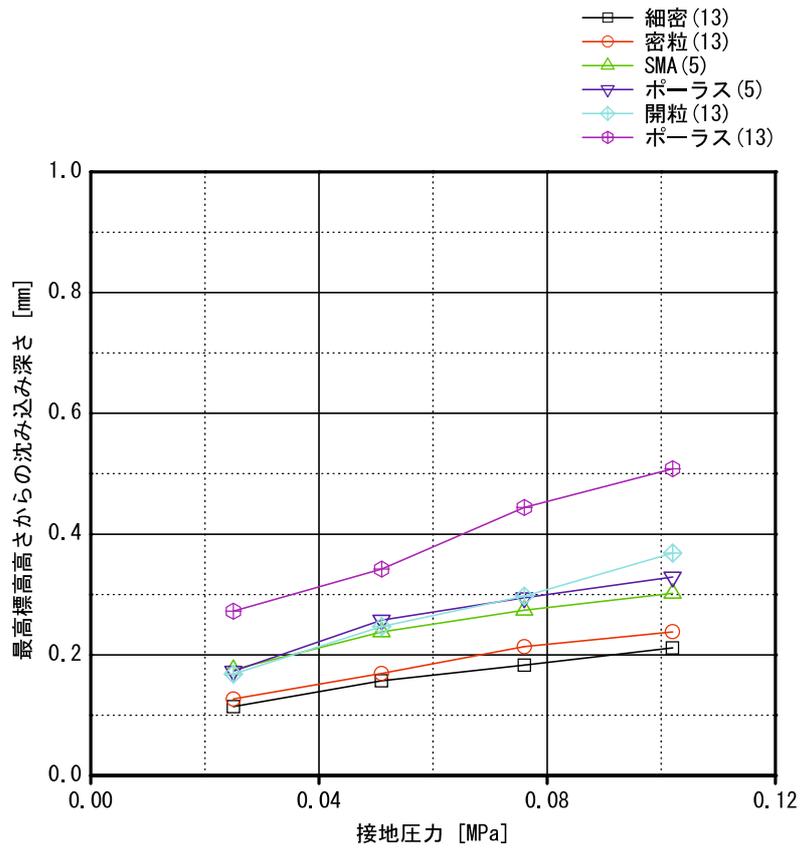


図 5.45 真実接触深さと載荷圧力との関係

c) ゴム上面の最大変位量の推定式

最後に真実接触深さ d_3 とゴム上面の最大変位量との関係を図 5.46 に示す. 真実接触深さ d_3 とゴム上面の最大変位量には正の相関が得られた. 真実接触深さを説明変数, 载荷圧力が 0.102 MPa の場合におけるゴム上面の最大変位量を目的変数とした場合, アスファルト舗装のオリジナル供試体の回帰式は式-5.7 のとおりとなり, 相関係数は 0.904 となった. これより, 接触深さよりゴム上面の最大変位量を予測できる可能性があることが確認された.

$$d_{0.102\text{MPa}} = 0.66 d_3 - 0.067 \quad (0.211 \leq x \leq 0.508) \quad (5.7)$$

ここに,

$d_{0.102\text{MPa}}$: 载荷圧力 0.102 MPa 時のゴム上面の最大変位量 [mm]

d_3 : 真実接触深さ [mm]

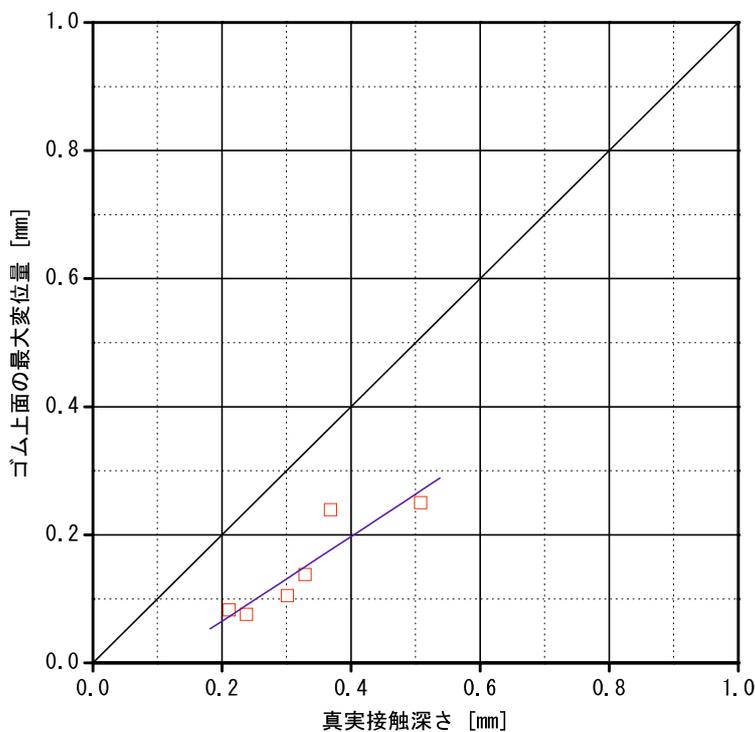
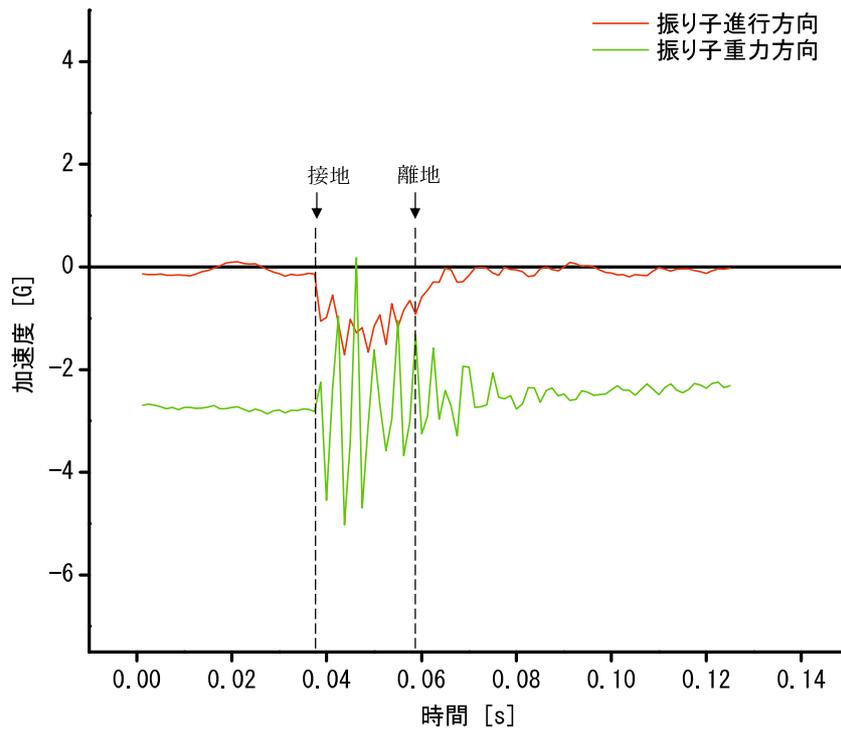


図 5.46 真実接触深さとゴム上面の最大変位量との関係

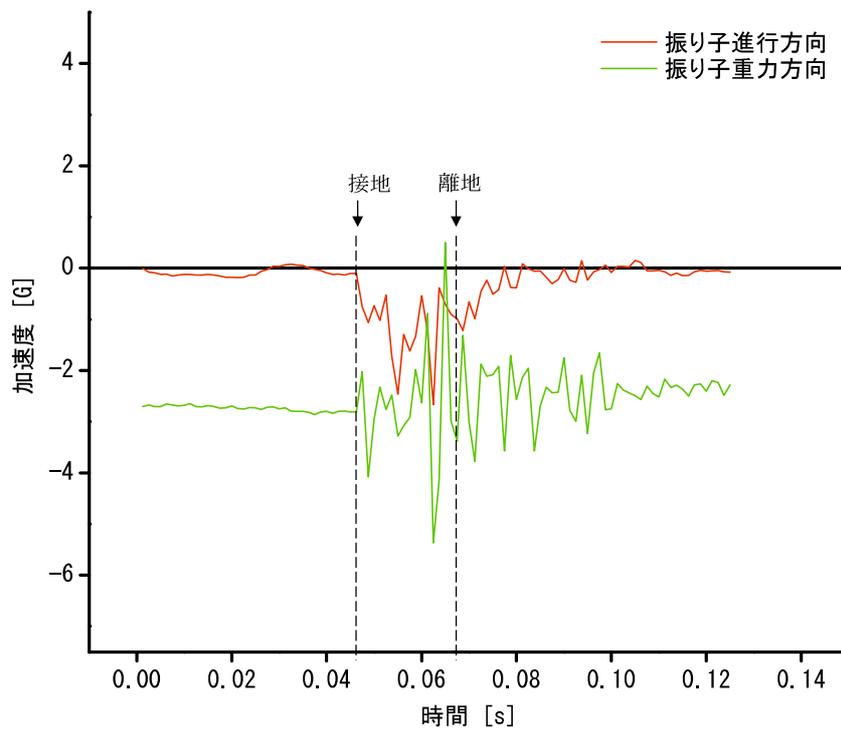
(4) シューズ底面のゴムと舗装表面の摩擦特性に関する実験結果

a) 供試体表面接地時における振り子の加速度波形

振り落とし 1 回分の振り子の加速度の波形を図 5.47 に示す。代表的な供試体として、オリジナル供試体の細密(13)の供試体で計測した加速度波形を図 5.47(a)に、オリジナル供試体のポーラス(13)の供試体で計測した加速度波形を図 5.47(b)に示す。振り子の進行方向の加速度（赤線）が本実験で着目している値である。供試体にゴムスライダが接地した瞬間に振り子の進行方向の加速度（赤線）がゼロ付近の値から負の値を示す。この傾向は細密(13)とポーラス(13)のどちらともに見てとれる傾向である。振り子の進行方向の加速度は細密(13)に比べてポーラス(13)の方が大きな値を示しており、振幅が大きい。



(a) 細密(13)



(b) ポーラス(13)

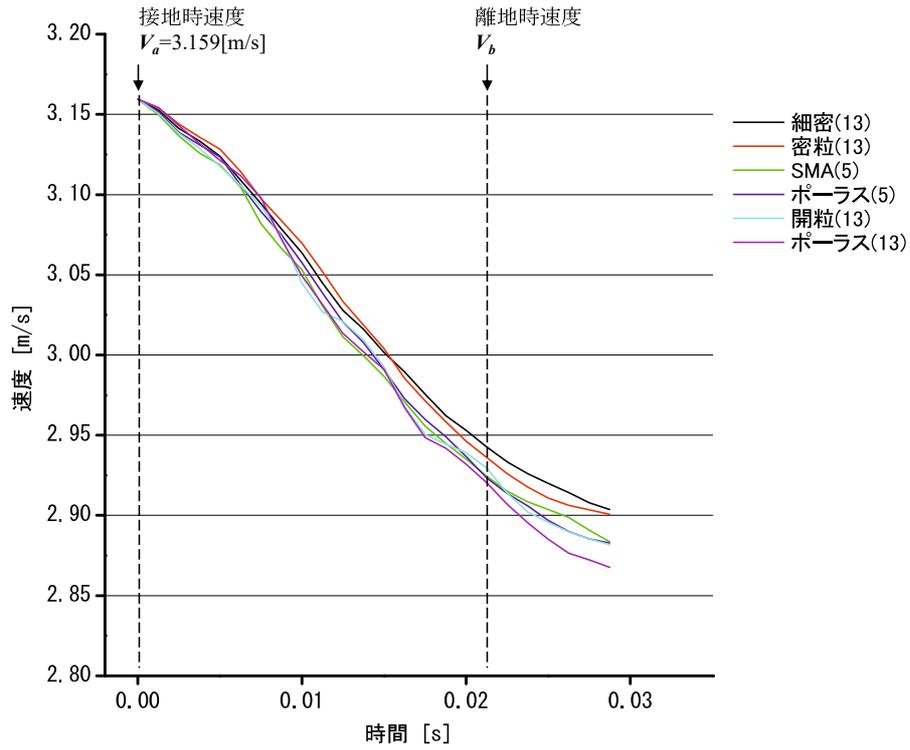
図 5.47 振り子の加速度の例 (振り落とし1回分)

b) 供試体表面接地時における振り子の速度低下率

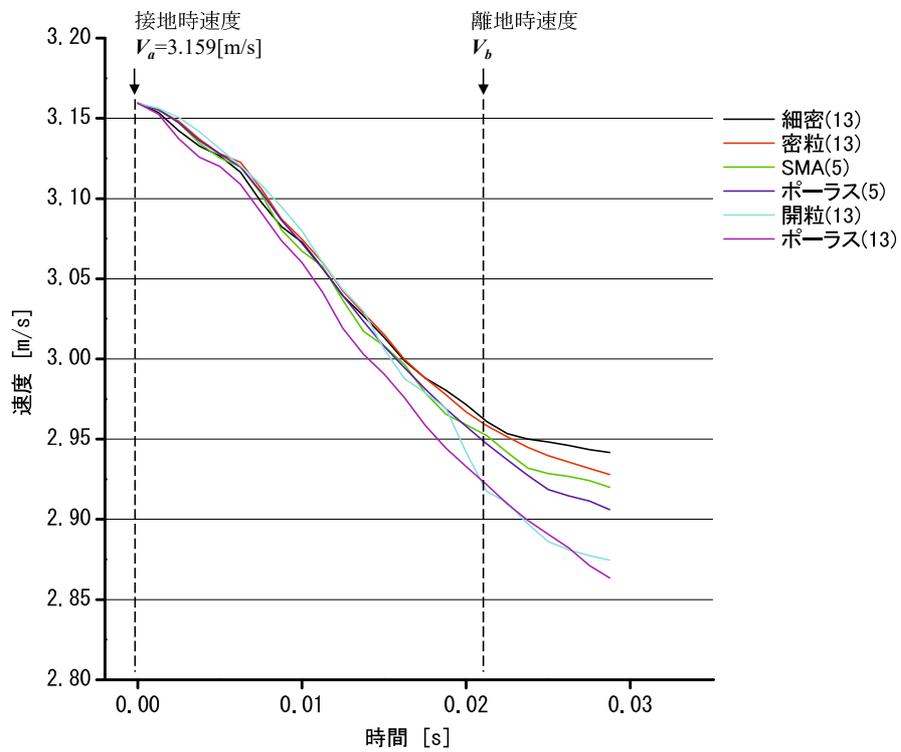
振り子で測定した進行方向の加速度を積分し、時間ごとに速度を算出した結果を図 5.48 に示す。図に示す結果は、振り落とし 1 回分の結果である。接地時の速度は舗装種類によらず同値である。接地後、速度の低下度合いが舗装種類によって異なることが見てとれる。図 5.48 (a) に示したオリジナル供試体の場合、スライダーが接地してから離地時には細密(13)は 2.94 m/s まで速度が低下しており、ポーラス(13)は速度が 2.90 m/s まで低下していることが見てとれる。図 5.48 (b) に示す 3D プリンタ供試体の場合もオリジナル供試体と同じ傾向が得られた。

図 5.48 から離地時の速度を読み取り、接地時速度との差を比率表記した速度低下率を図 5.49 に示した。図 5.49 に示した結果より、オリジナル供試体の速度低下率は 6.6~7.0 % であり、細密(13)と密粒(13)が最も小さく、ポーラス(13)が最も大きい値を示した。この傾向は 3D プリンタ供試体でも同様の傾向が得られ、3D プリンタ供試体の速度低下率は 5.8~7.1 m/s であった。

同一の舗装種類において、オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の速度低下率の関係を、図 5.50 に示した。図 5.49 からも見えてとれるように開粒(13)とポーラス(13)に比べると、細密(13)や密粒(13)は、オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の速度低下率の値に大きな差がある。これは供試体表面に標高差が小さいほど、舗装表面の粗さによる影響より、供試体の材料とゴムの摩擦によって速度低下が生じていたと考えられる。オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体で見られる速度低下率の差については、今後、別のフィラメントで 3D プリンタ供試体を作製し、検討を行う。



(a) オリジナル供試体



(b) 3D プリンタ供試体

図 5.48 ゴムスライダ接地後の振り子の速度変化 (振り落とし1回分・アスファルト舗装)

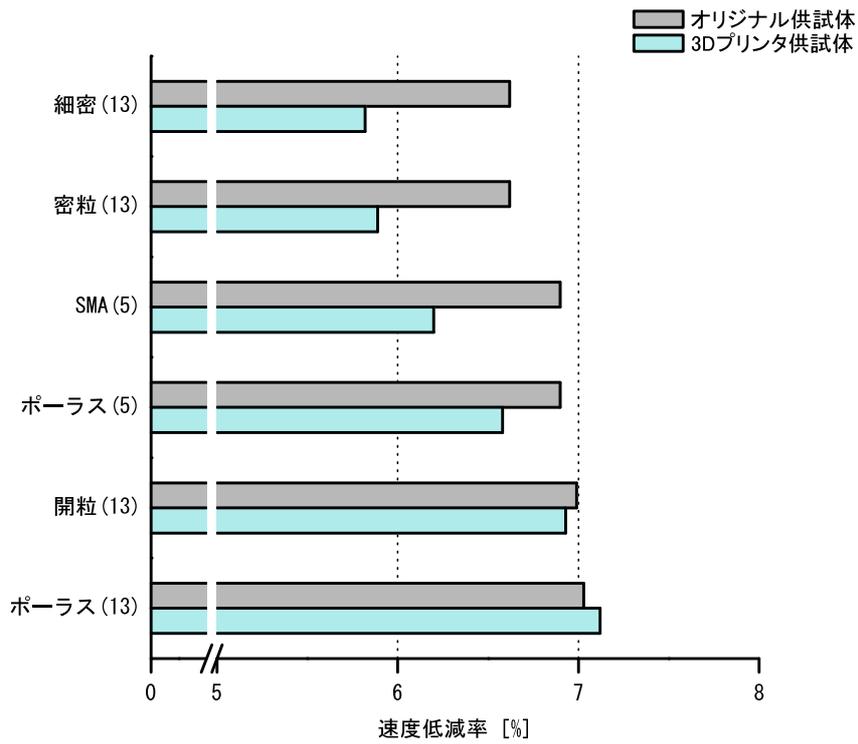


図 5.49 オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の速度低下率 (アスファルト舗装)

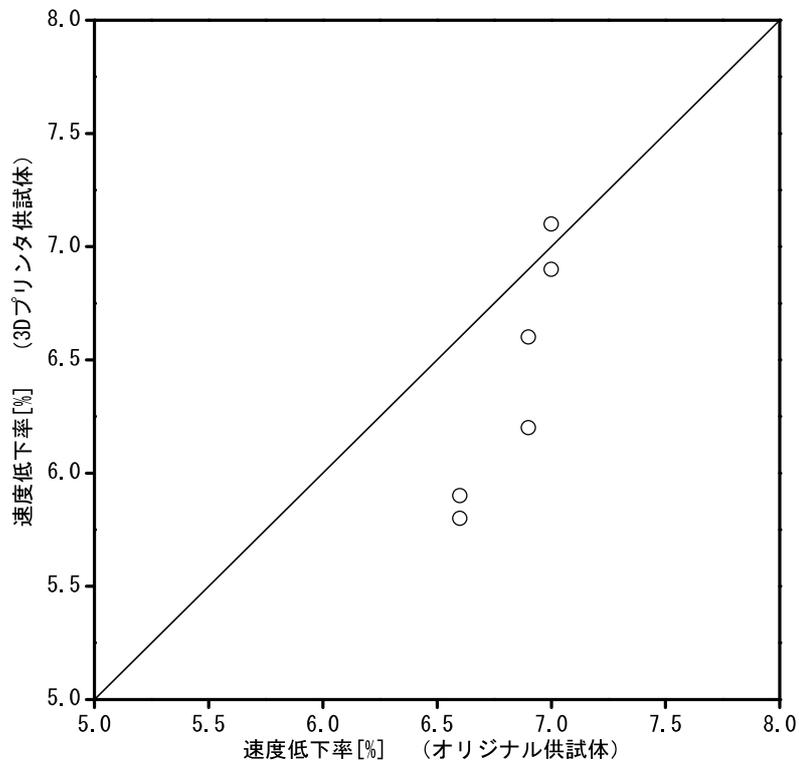


図 5.50 オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の速度低下率の関係 (アスファルト舗装)

c) 舗装の表面粗さと速度低下率との関係

接触深さと速度低下率の関係を図 5.51 に示した. オリジナル供試体において, 接触深さの増加に伴い, 速度低下率も増加する, 正の相関がみられる. 3D プリンタ供試体についてもオリジナル供試体と同様に, 接触深さと速度低下率に正の相関があり, 接触深さの増加によって速度低下率も増加する. すなわち, アスファルト舗装の表面粗さの標高差が大きいほど, 速度低下率が大きいことが明らかになった.

接触深さを説明変数, 速度低下率を目的変数とした場合, アスファルト舗装のオリジナル供試体の回帰式は式(5.8)のとおりとなり, 相関係数は 0.819 となった. これより, 接触深さより速度低下率を予測できる可能性があることが確認された.

$$S = 0.74x - 6.483 \quad (0.211 \leq x \leq 0.508) \tag{5.8}$$

ここに,

S : 速度低下率 [%]

x : 真実接触深さ [mm]

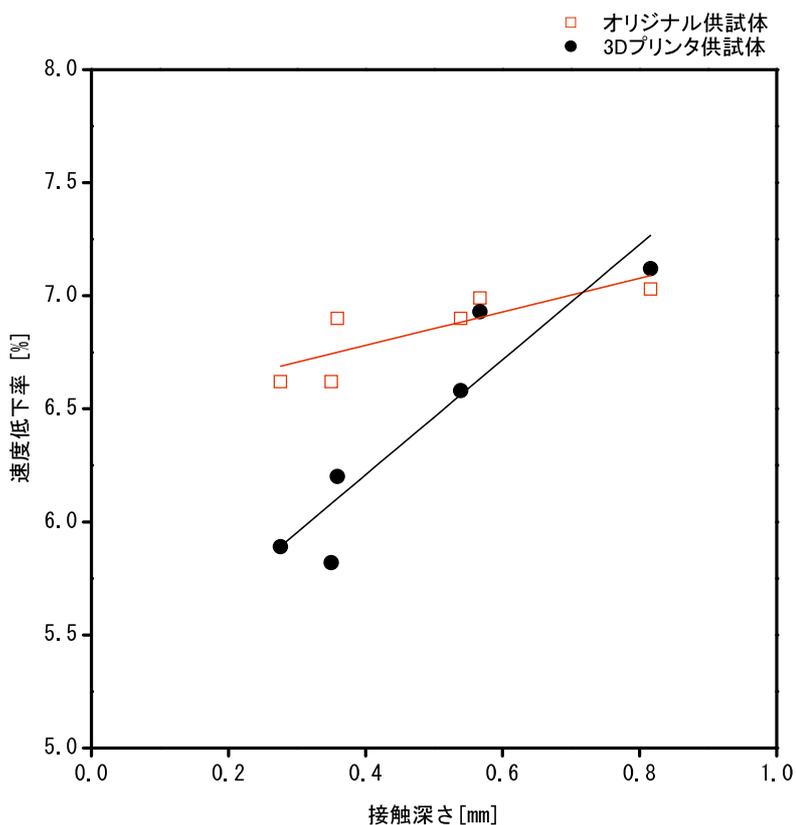


図 5.51 接触深さと速度低下率との関係 (アスファルト舗装)

(5) アスファルト舗装に関する室内実験結果のまとめ

a) ランナーの足の変位量に関する結果まとめ

- ゴム上面の最大変位量は、接触深さの増大に伴い、増加する傾向が得られた。
- アスファルト舗装のゴム上面の最大変位量は、舗装の表面粗さの評価指標である接触深さより予測できる可能性が示された。

b) 舗装材料の接地面積および接地圧力

- アスファルト舗装の種類によらず、載荷圧力の増加に伴い、接地面積および接地圧力は増加傾向を示した。
- 載荷圧力によらず、接触深さと接地面積には負の相関があり、接触深さの増加に伴い、接地面積は減少する傾向が示された。
- 高圧力を占める接地面積比率は接触深さと正の相関があり、接触深さの増加に伴い、増加する傾向を示した。
- 接地面積および高圧力を占める接地面積比率は、接触深さで予測できる可能性が確認された。
- 高圧力を占める接地面積比率の増加に伴い、接地面積は減少し、ゴム上面の最大変位量は増加することが確認された。

c) ゴム上面の変位量推定のモデル化

- 感圧紙で載荷荷重ごとに接地領域と接地箇所における表面粗さの標高の値から、ゴムの真実接触深さを明らかにした。
- 接地領域と舗装の表面粗さの標高のみでゴムの沈み込み深さを推定した。
- アスファルト舗装と天然ゴム（硬度 65）を用いた場合という限定的な条件における結果であるが、舗装の表面粗さの標高データから算出した真実接触深さより、ゴム上面の最大変位量の推定式を導いた。

d) シューズ底面のゴムと舗装表面の摩擦特性に関する実験結果

- オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の速度低下率はオリジナル供試体の方が大きい。これは供試体の使用材料による影響が顕著に見られた。
- 速度低下率と接触深さの関係は正の相関があった。接触深さの増加によって速度低下率は増加する。すなわち、アスファルト舗装の表面粗さの標高差が大きいほど、速度低下率が大きい。

5.3.4 アスファルト舗装以外の舗装材料に対する室内実験結果

本項はアスファルト舗装を除く、アスファルト舗装とは異なる舗装材料の供試体に対する実験結果を示す。対象とした舗装種類は、弾性（多）、コンクリート、陸上スプレー、陸上ローラーである。これらの舗装材料はアスファルト舗装とは使用した材料が異なることから、アスファルト舗装で得られた結果である、「ゴム上面の変位量や接地面積に影響する因子が舗装の表面粗さである」とは言えず、舗装材料の変形係数なども加味して評価する必要があると想定したため、別途、本項で詳しく考察を行うこととした。実験項目および条件はすべて前項に示したアスファルト舗装と同一である。

陸上スプレーと陸上ローラーは、全天候型ウレタン舗装であり、どちらもポリウレタンを舗装材料として用いている。宇治橋¹⁰⁾が全天候型ウレタン舗装で計測した平均ヤング率は582 kN/mであり、アスファルト混合物の変形係数（20°C時のスティフネス 1.5 GPa～3.0 GPa^{8),9)}）やコンクリートの変形係数（弾性係数 28 GPa³⁾）に比べて、全天候型ウレタン舗装の変形係数は小さい。陸上スプレーと陸上ローラーは表面粗さが異なる2種類であるため、表面粗さによる影響を把握することと、舗装材料の剛性が小さい場合の例として、陸上ウレタン舗装の特性を把握することを目的とした。

ここでオリジナル供試体の舗装の表面粗さ（線粗さ）を図 5.52 に示す。ここに示す表面粗さは、面粗さを測定し、ある一測線を抜粋し、弾性（多）、コンクリート、陸上スプレー、陸上ローラーの表面粗さ（線粗さ）を示した。本実験のゴム板は表面粗さの標高の最大値から順に接地することをイメージして図を見ると、弾性（多）は標高の最小値が大きく、谷部が多い。コンクリートは標高最大値と標高最小値の差が小さい。陸上スプレーは山部が多く、山部の頂点の標高がほぼ同一である。陸上ローラーは鋭い上に凸の山部が多く、山部の頂点の標高が同一ではなく、ばらついている。以上の4種類の舗装供試体に対して、前項と同一実験を行った結果を以下に述べる。

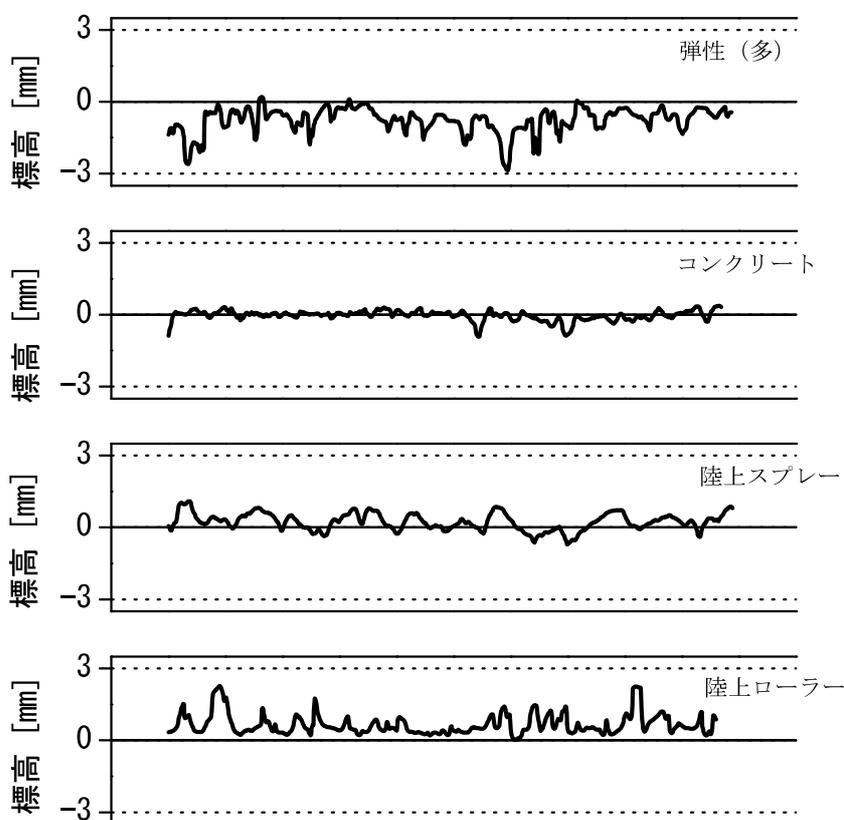


図 5.52 アスファルト舗装以外の舗装材料の表面粗さ（面粗さのある一測線を抜粋）

(1) ランナーの足の変位量に関する結果の考察

一軸載荷除荷実験において、ランナーの足の変位量に相当するゴム上面の変位量を測定した。ここに示すゴム上面の変位量は、オリジナル供試体の変位量および、3D プリンタ供試体の変位量を控除した値である。

a) 変位－荷重曲線

オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の載荷版のヒステリシスカーブを図 5.53～図 5.56 に示す。図 5.53 に載荷圧力 0.102 MPa 時の結果を示し、図 5.54 に載荷圧力 0.076 MPa 時の結果、図 5.55 に載荷圧力 0.051 MPa 時の結果、図 5.56 に載荷圧力 0.025 MPa 時におけるオリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の結果を示した。図 5.53(a)～図 5.56(a) のオリジナル供試体の結果は、載荷圧力の大きさによらず、陸上ローラーは 4 種類の中で最も大きい変位量を示した。陸上スプレーは弾性（多）と同様の傾向を示した。載荷荷重が 400 N までは同一の曲線を描いているが、400 N 以上となると弾性（多）は変位量が伸びず 800 N の場合において弾性（多）と陸上ローラーの変位量に差があった。コンクリートは他の 3 種類に比べて変位量小さい。図 5.53(b)～図 5.56(b) の 3D プリンタ供試体の結果は、陸上ローラーが 4 種類の中で最も大きい変位量を示し、コンクリートが最も小さい変位量であったことはオリジナル供試体と同一の傾向である。陸上スプレーと弾性（多）は載荷初期から異なる荷重変位曲線を描いており、最大変位量に差があり、オリジナル供試体とは異なる傾向を示した。

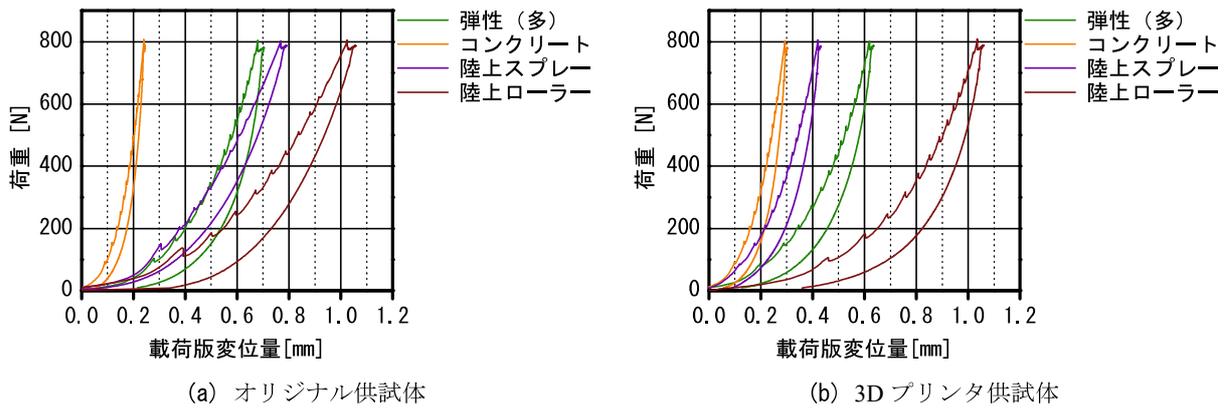


図 5.53 荷重版の荷重変位関係 (荷重圧力 0.102 MPa/荷重荷重 800 N の場合)

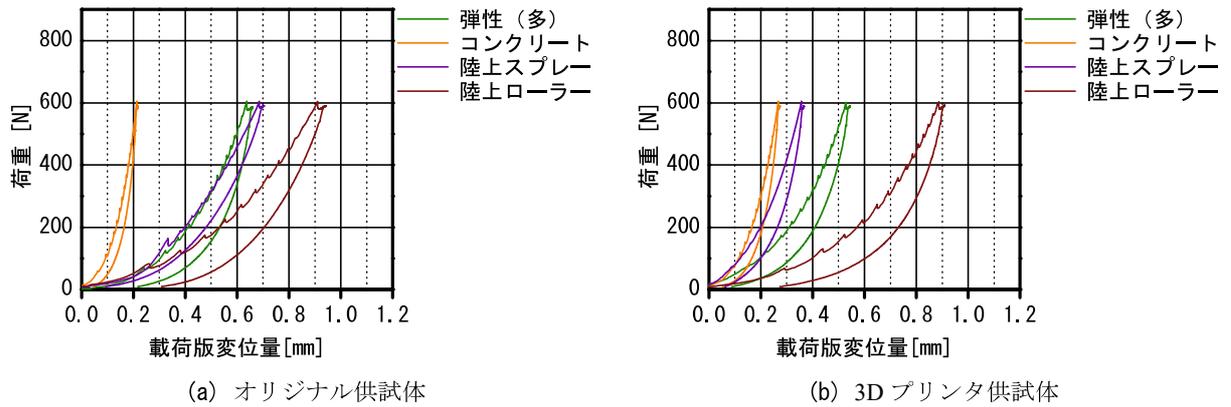


図 5.54 荷重版の荷重変位関係 (荷重圧力 0.076 MPa/荷重荷重 600 N の場合)

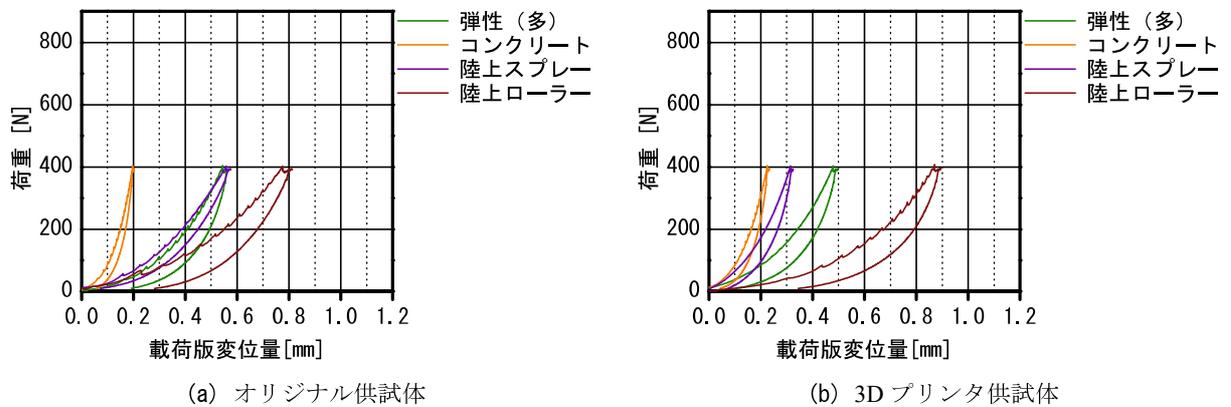


図 5.55 荷重版の荷重変位関係 (荷重圧力 0.051 MPa/荷重荷重 400 N の場合)

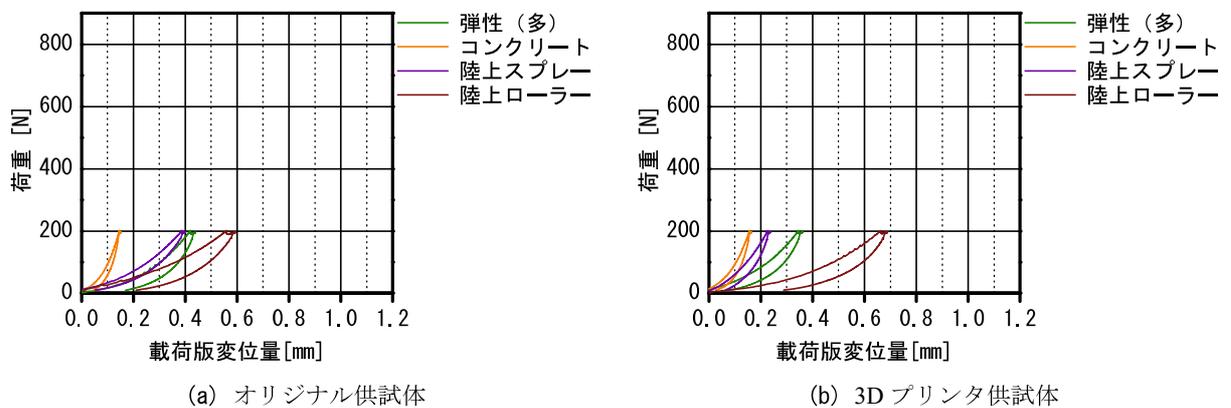


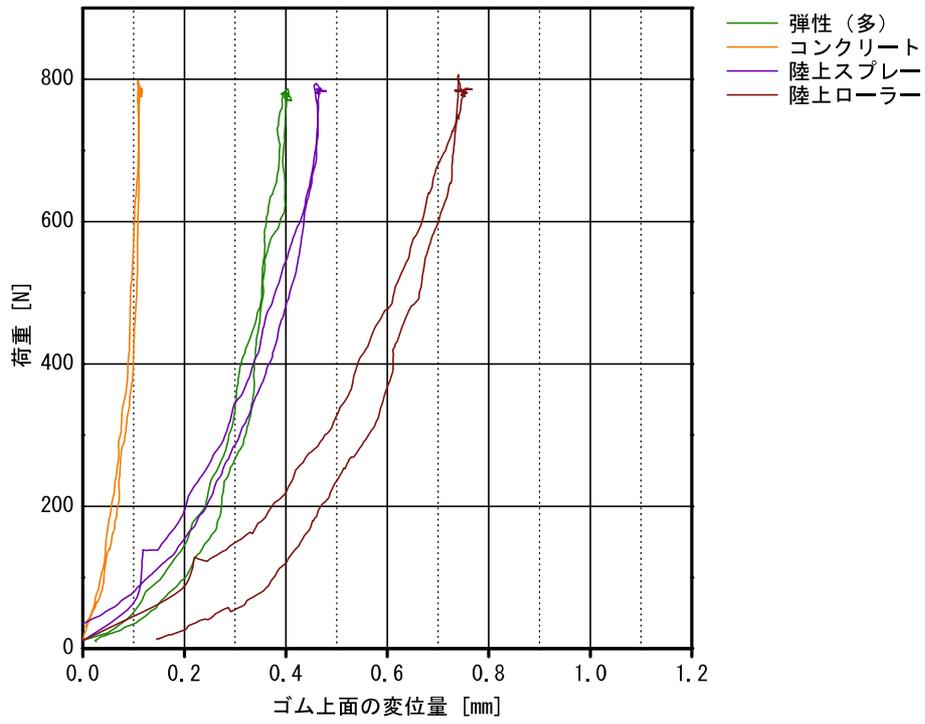
図 5.56 荷重版の荷重変位関係 (荷重圧力 0.025 MPa/荷重荷重 200 N の場合)

b) オリジナル供試体と 3D プリント供試体におけるゴム上面の最大変位量

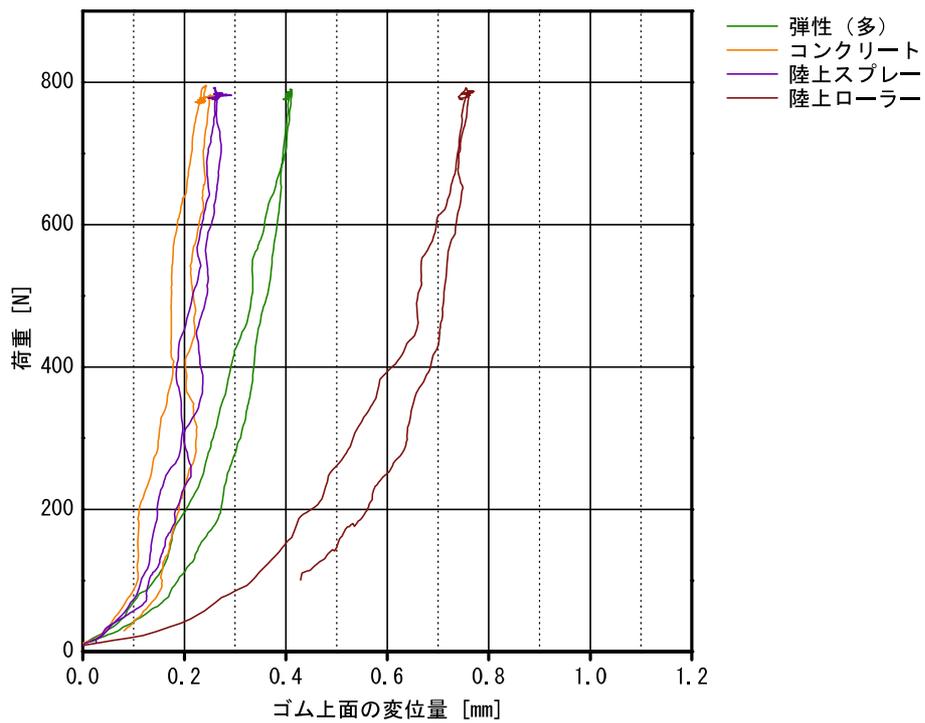
載荷圧力 0.102 MPa (800 N) 時のオリジナル供試体と 3D プリント供試体のゴム上面の変位量のヒステリシスカーブを図 5.57 に示す。図 5.57 (a) に示すオリジナル供試体の結果より、上述した載荷版の変位量の結果の傾向と同じく、4 種類の中で最も大きい変位量を示した。陸上スプレーと弾性 (多) は載荷荷重が 400 N までは同一の曲線を描いているが、400 N 以上となると弾性 (多) は変位量が伸びず 800 N の場合において弾性 (多) と陸上ローラーの変位量に差があった。コンクリートは他の 3 種類に比べて変位量が小さい。一方で図 5.57 (b) に示す 3D プリント供試体の結果をみると、オリジナル供試体と同様の傾向を示し、上述した載荷版の変位量の結果の傾向と同じく、陸上ローラーが 4 種類の中で最も大きい変位量であった。コンクリートが他の 3 種類に比べて最も小さい変位量であった。以上より、陸上スプレーと陸上ローラーは変位量に差が見られたことから、陸上ウレタン舗装に関しても舗装の表面粗さによって、ゴム上面の最大変位量に差があることが明らかになった。

同一の舗装種類ごとにオリジナル供試体と 3D プリント供試体の値を比較するため、図 5.58 に各供試体のゴム上面の最大変位量をプロットした。弾性 (多) と陸上ローラーはオリジナル供試体と 3D プリント供試体の値にほぼ差がない。コンクリートはオリジナル供試体に比べて 3D プリント供試体の方が大きい値を示し、陸上スプレーは 3D プリント供試体に比べてオリジナル供試体の方が大きい値を示した。オリジナル供試体と 3D プリント供試体は同一の表面粗さで作製した供試体であり、異なる点は供試体の材料である。よって、オリジナル供試体と 3D プリント供試体の値の差は、供試体材料の変形係数の影響によるものであると考える。しかし、コンクリートに関しては、弾性係数 28 GPa (代表値)³⁾ に対して 3D プリント供試体の使用材料であるポリ乳酸 (PLA) 樹脂の弾性係数 3.5 MPa⁹⁾ であることからオリジナル供試体の方が剛性は大きい。そのため、ゴム上面の最大変位量は大きいと想定していたが、異なる結果を得た。この理由として、以降で記す図 5.60 (b) の 3D プリント供試体の接地領域をみると接地領域が供試体端部に偏っており、中央部に接地領域が少ないことが見てとれる。これは供試体端部と中央部で約 1 mm の標高差があったためである。よって、一軸載荷除荷実験の結果も 1 mm 以下の表面粗さによってゴム板が変形したのではなく、供試体端部と中央部に有した約 1 mm の標高差によってゴム板が変形した結果がゴム板上面にも反映されたと推察する。そのため、本実験の目的である舗装の表面粗さによる影響の有無を把握することが難しい結果であったことから、コンクリート舗装の供試体は再度検討が必要と考える。ただし、国土交通省の土木工事施工管理基準および規格値 (案)¹¹⁾ で記されたコンクリート舗装の平坦性という指標の規格値は、標準偏差 2.4 mm 以下 (機械施工の場合)、もしくは 3.0 mm 以下 (人力施工の場合) であることから、実際の道路のコンクリート舗装に約 1 mm の標高差はあってもおかしくはない範囲である。そのため本実験で用いたコンクリートの供試体は実際の道路を想定した供試体であったと判断した。コンクリート舗装も足の接地延長および面積には標高差を約 1 mm 有するように仕上げるとゴムも大きく変形し、ランナーの足も変位することにより、着地衝撃を小さくすることができる可能性を見出す結果が得られた。

そして、陸上スプレーについても以降で記す図 5.60 (c) の 3D プリント供試体の接地領域をみると接地領域が供試体端部に偏っており、中央部に接地領域が少ないことが見てとれる。これは供試体端部と中央部で約 1 mm の標高差があったためである。よって、一軸載荷除荷実験の結果も 1 mm 以下の表面粗さによってゴム板が変形したのではなく、供試体端部と中央部に有した約 1 mm の標高差によってゴム板が変形した結果がゴム板上面にも反映されたと推察する。



(a) オリジナル供試体



(b) 3D プリンタ供試体

図 5.57 ゴム上面の荷重変位関係 (载荷圧力 0.102 MPa/载荷荷重 800 N の場合)

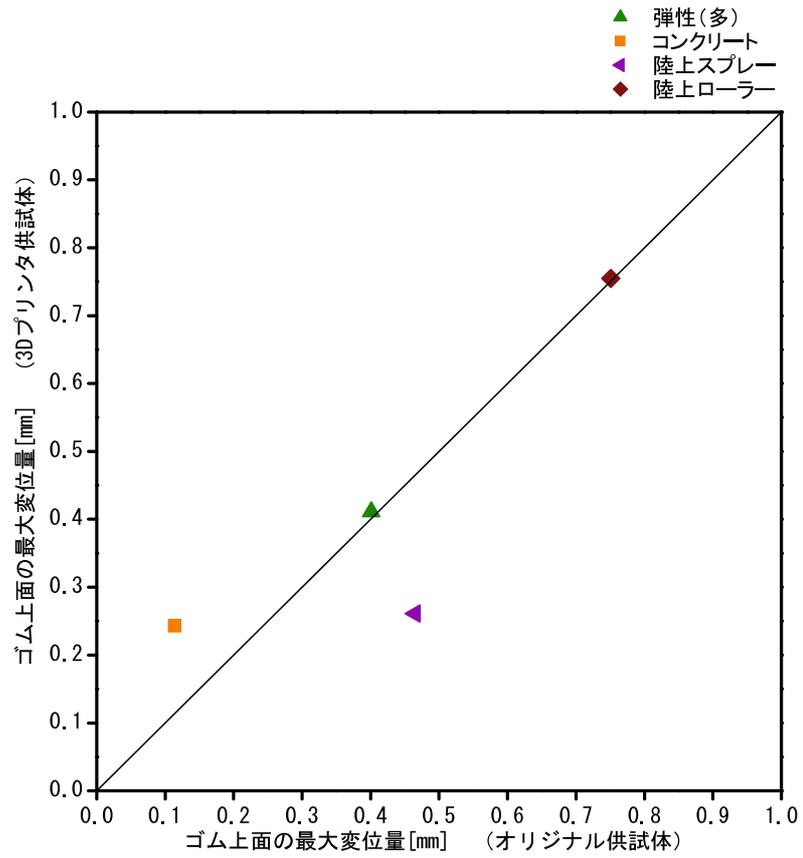
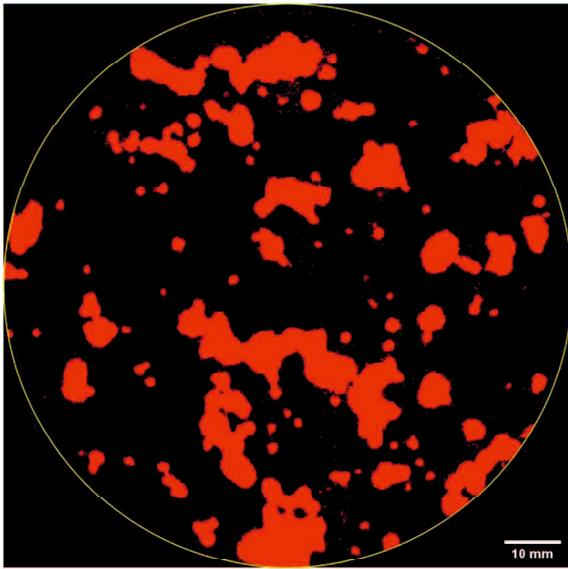


図 5.58 オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体のゴム上面の最大変位量 (アスファルト舗装以外の舗装材料)

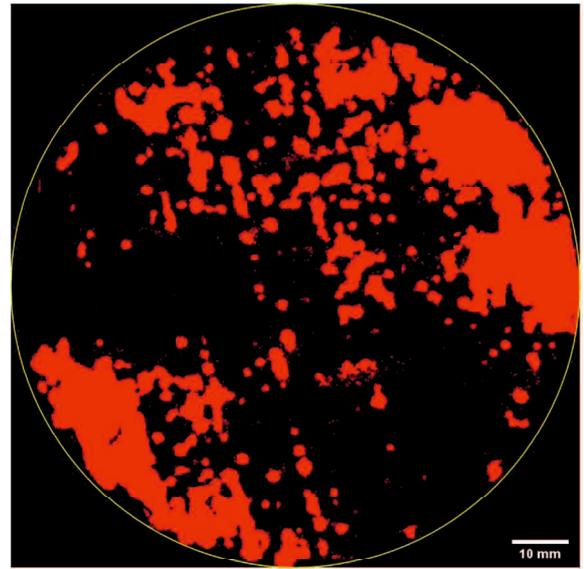
(2) アスファルト舗装以外の舗装材料の接地面積および接地圧力

a) 舗装種類ごとの接地領域

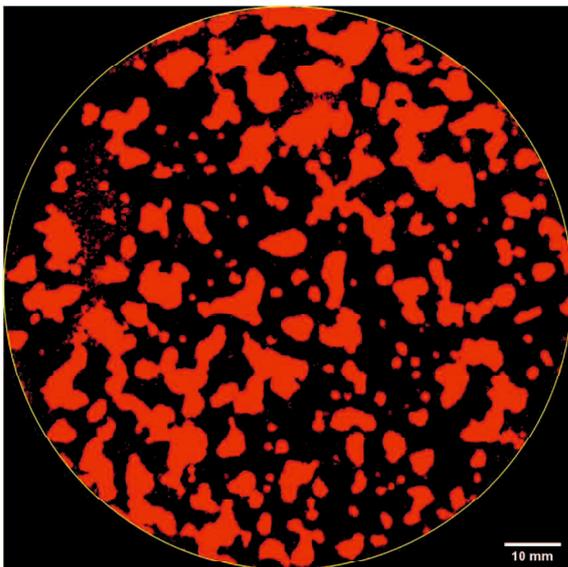
載荷荷重 0.102 MPa (800 N) 時の接地領域を図 5.59 と図 5.60 に示す。図 5.59 がオリジナル供試体の結果で、図 5.60 が 3D プリンタ供試体の結果である。図 5.59 に示したオリジナル供試体の結果より、弾性(多)は図 5.30 に示したポーラス(13)や開粒(13)と同じく、接地領域がつながっておらず、小さい接地領域が点在している。コンクリートは接地領域が供試体の端部に大きな接地領域が見られる。中央部は表面粗さの形状どおりに接地していることがうかがえる。陸上スプレーは弾性(多)と同じように接地領域が連続体となしておらず、小さい接地領域が点在しているが載荷面全域に均一に点在している。陸上ローラーは接地領域が連続している箇所と小さい接地領域が点在している箇所が見てとれる。図 5.60 に示した 3D プリンタ供試体の結果より、弾性(多)は接地領域がつながっておらず、小さい接地領域が点在している。コンクリートは接地領域が供試体端部に偏っており、中央部に接地領域が少ないことが見てとれる。これは供試体端部と中央部で約 1 mm の標高差があったためである。陸上スプレーもコンクリートと全く同じ理由により、供試体端部のみ接地領域を有している。陸上ローラーは弾性(多)に似た接地領域を示し、小さな接地領域が点在している。



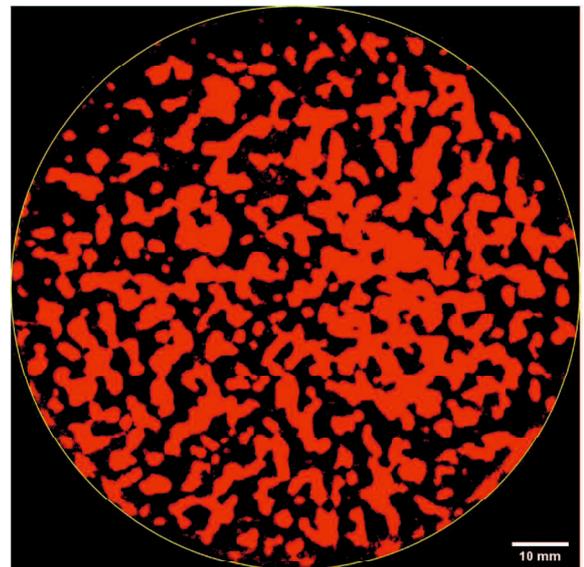
(a) 弾性 (多)



(b) コンクリート

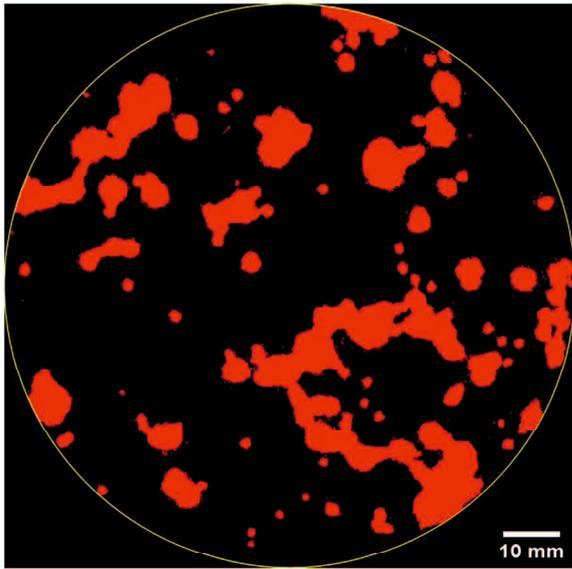


(c) 陸上スプレー

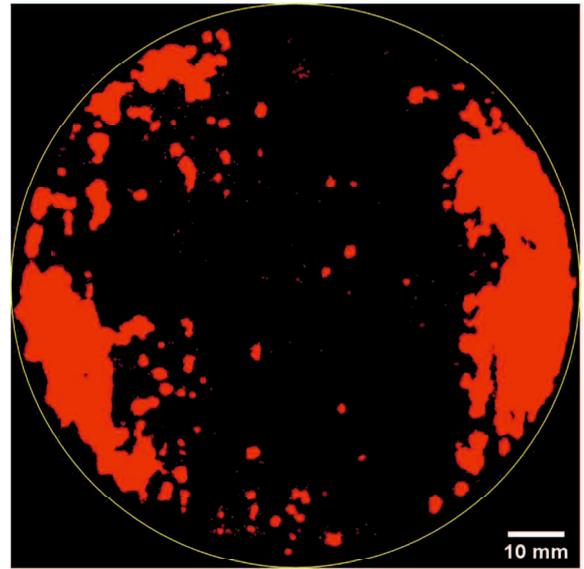


(d) 陸上ローラー

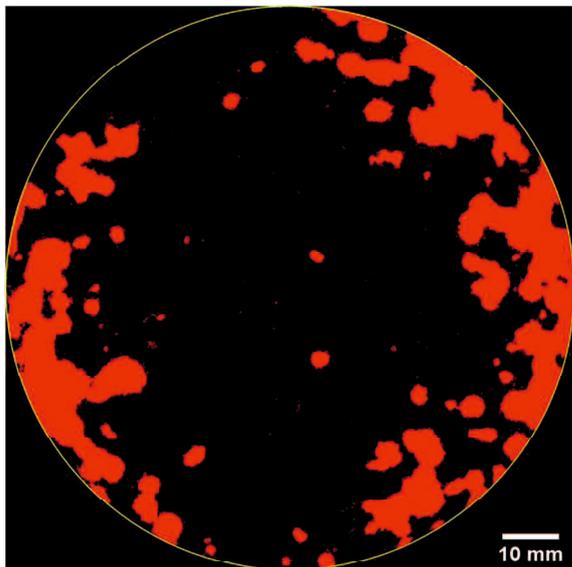
図 5.59 接地領域 (オリジナル供試体, 載荷圧力 0.102 MPa の場合)



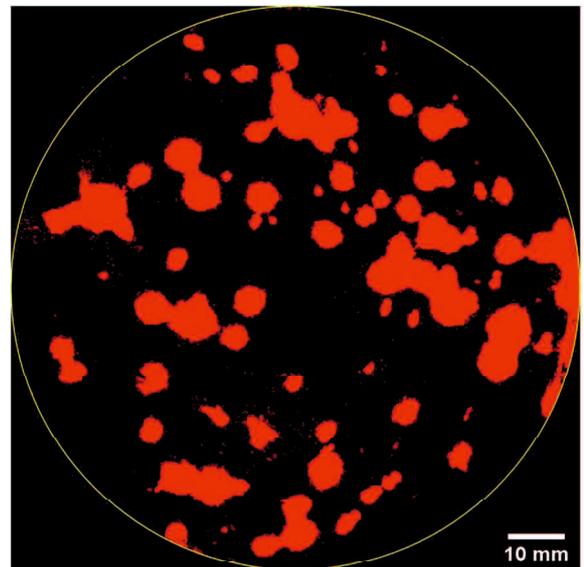
(a) 弾性 (多)



(b) コンクリート



(c) 陸上スプレー



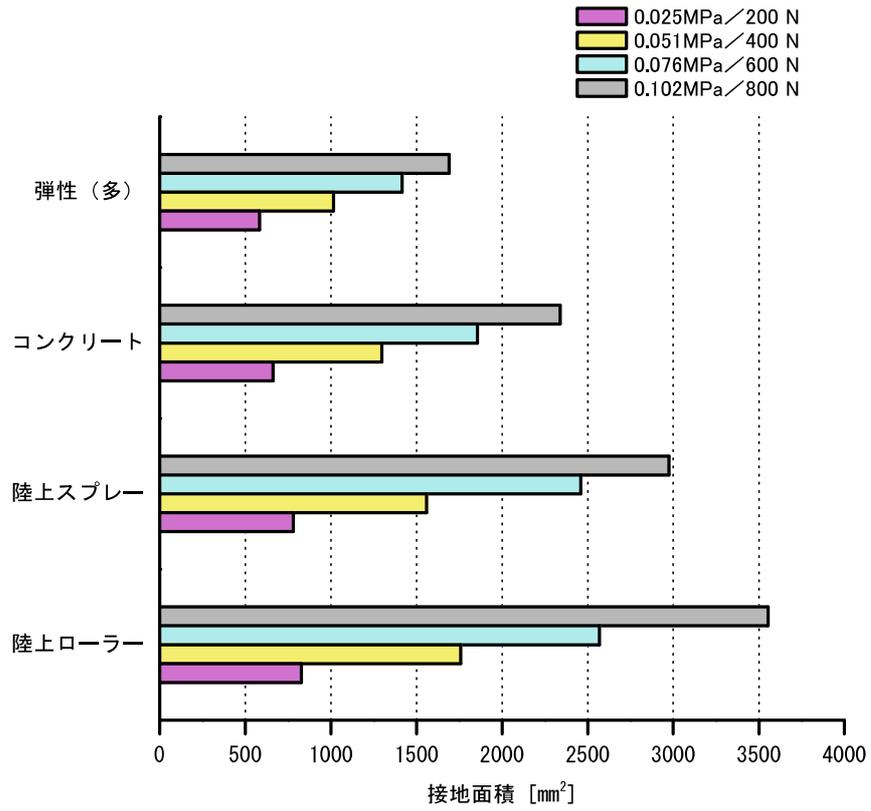
(d) 陸上ローラー

図 5.60 接地領域 (3D プリンタ供試体, 載荷圧力 0.102 MPa の場合)

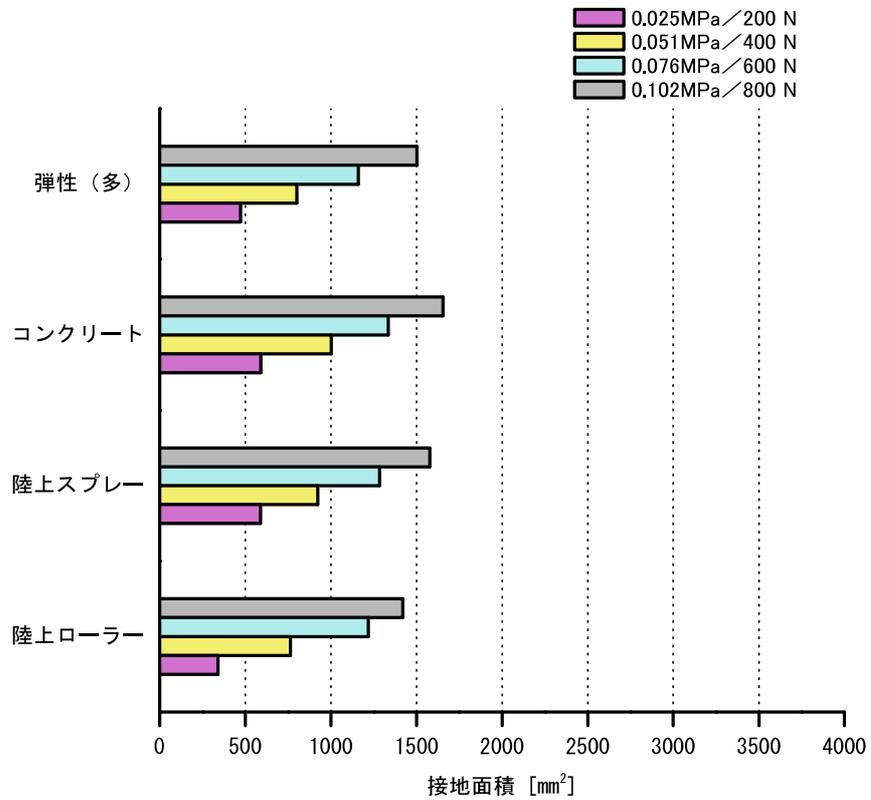
b) 舗装種類ごとの接地面積

舗装種類ごとの接地領域の面積を図 5.61 に示す。オリジナル供試体の結果を図 5.61(a)に、3D プリンタ供試体の結果を図 5.61(b)に示す。オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体どちらも、載荷荷重が増加すると接地面積が大きくなる傾向が見てとれる。図 5.61(a) に示したオリジナル供試体の結果より、載荷荷重 0.102 MPa (800 N) 時に着目すると、弾性 (多) は 1690 mm^2 であり、コンクリートは 2340 mm^2 であった。陸上スプレーと陸上ローラーを比較すると陸上ローラーの方が接地面積は大きい。陸上スプレーと陸上ローラーの違いは舗装の表面粗さであることから、陸上スプレーと陸上ローラーの接地面積の差は舗装の表面粗さの違いによる結果の差であったと推察する。接触深さは陸上ローラーの方が大きい値を示していたことから、接触深さは大きい値を示すほど接地面積が大きいことが示唆された。

オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体を比較すると、図 5.62 に示すとおり、3D プリンタ供試体よりオリジナル供試体の方が大きい結果であった。この結果を図 5.59 と図 5.60 を参考にして考察すると、弾性 (多) はオリジナル供試体と同様の接触領域である。コンクリートは供試体端部のみが接地しており、中央部はほとんど接地していない。陸上スプレーはコンクリートと同じく供試体端部のみが接地し、かつ、接地領域はオリジナル供試体のように点在しておらず連続して連なっている。陸上ローラーはオリジナル供試体に比べて、接地領域が極めて少なく、弾性 (多) に似ている。陸上ローラーのオリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の接地領域の差は供試体の変形係数の違いによるものである。陸上ローラーの表面粗さは図 5.52 に示すように鋭い凸部が多い。そのため、オリジナル供試体の場合は載荷荷重により凸部が押されて変形したことによって接地面積が大きくなった。それに対して 3D プリンタ供試体の場合は表面粗さの凸部が載荷荷重によって押されても変形しないため、接地領域は少ない結果が得られた。



(a) オリジナル供試体



(b) 3D プリンタ供試体

図 5.61 接地面積 (アスファルト舗装以外の舗装材料)

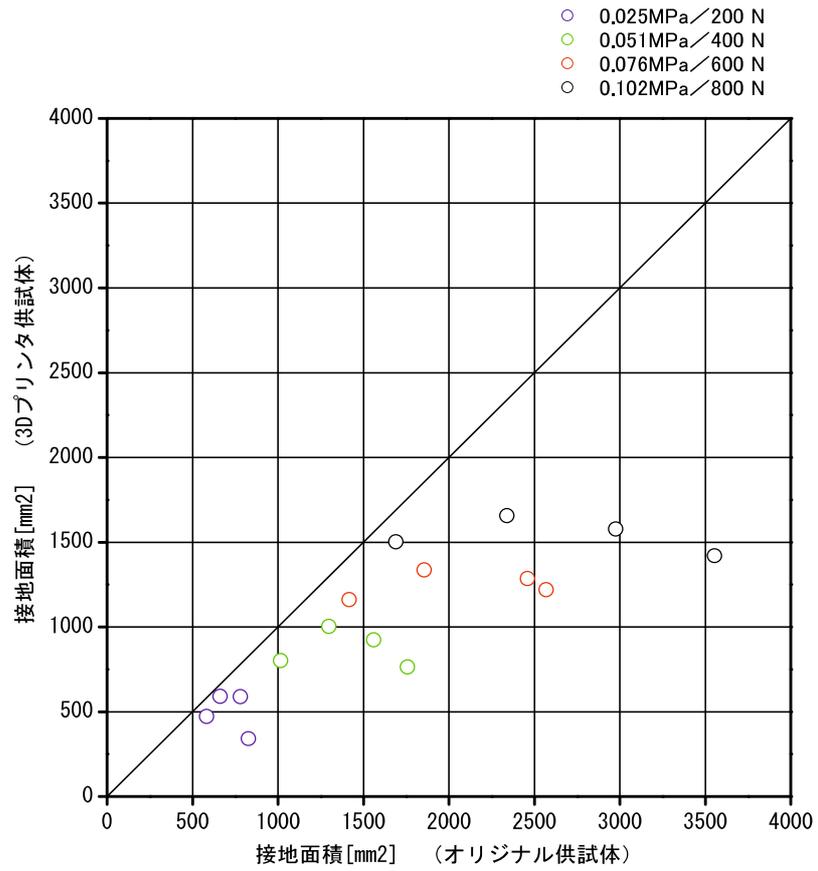
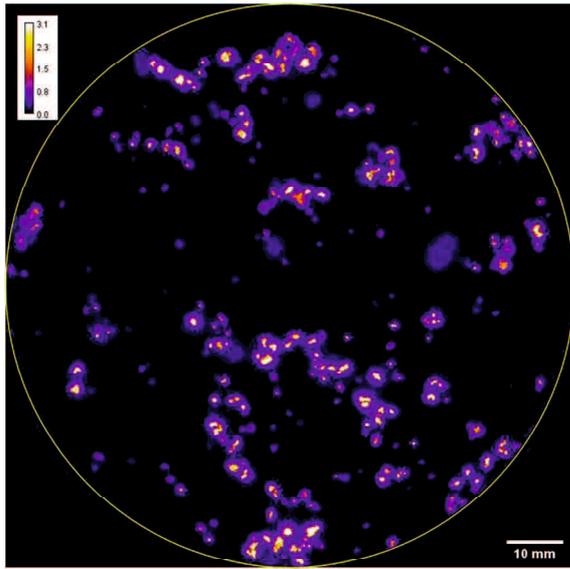


図 5.62 オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の接地面積 (アスファルト舗装以外の舗装材料)

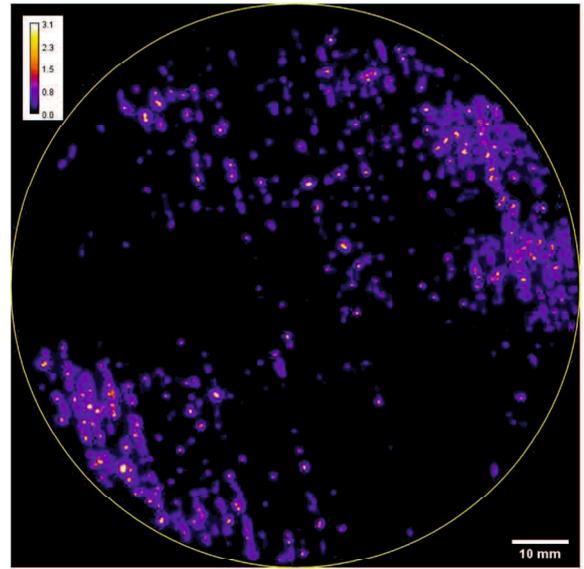
c) 接地圧力分布

接地領域で示した圧力の値に関して分析を行った。載荷荷重 0.102 MPa (800 N) 時の接地領域における接地圧力分布を図 5.63 と図 5.64 に示す。図 5.63 がオリジナル供試体の結果で、図 5.64 が 3D プリンタ供試体の結果である。黒色が圧力 0.0 MPa を示し、紫から赤、黄色、白色を示し、白色が 3.1 MPa の高圧力を示すカラースケールバーとなっている。

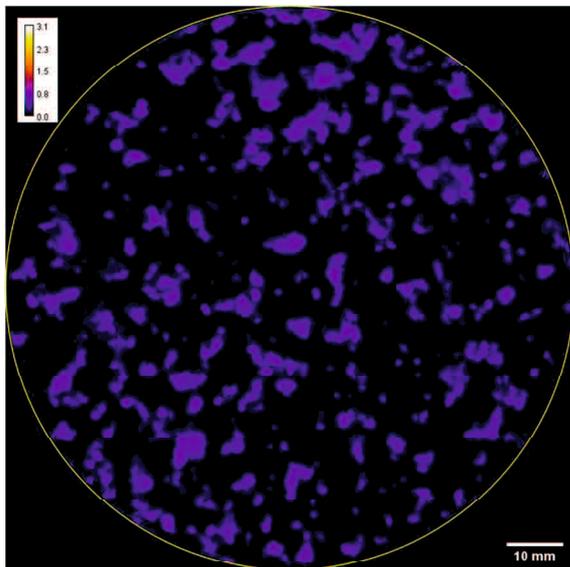
図 5.63 に示したオリジナル供試体の結果より、弾性（多）とコンクリートは白色を示す領域、すなわち高圧力を示す領域がみてとれる。陸上スプレーと陸上ローラーは表面粗さが異なるにもかかわらず、白色を示す領域すなわち、高圧力を示す領域はほとんどないことがわかる。図 5.64 に示した 3D プリンタ供試体の結果より、弾性（多）とコンクリート、そして陸上スプレーと陸上ローラーにも白色を示す領域、すなわち高圧力を示す領域がみてとれる。高圧力を示す領域が最も多くみてとれるのは陸上ローラーである。オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体を比較すると、弾性（多）とコンクリートはオリジナル供試体と同じく、白色の高圧力を示す領域がみてとれる。陸上スプレーと陸上ローラーは白色を示す領域すなわち、高圧力を示す領域が多くみられ、オリジナル供試体と全く異なる圧力分布を示した。



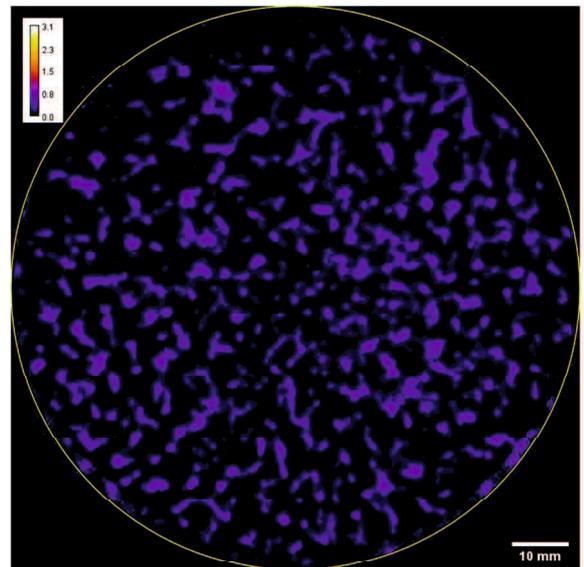
(a) 弾性 (多)



(b) コンクリート

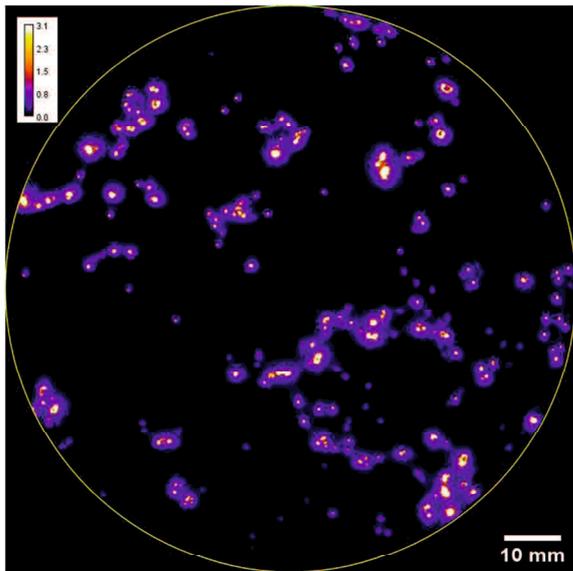


(c) 陸上スプレー

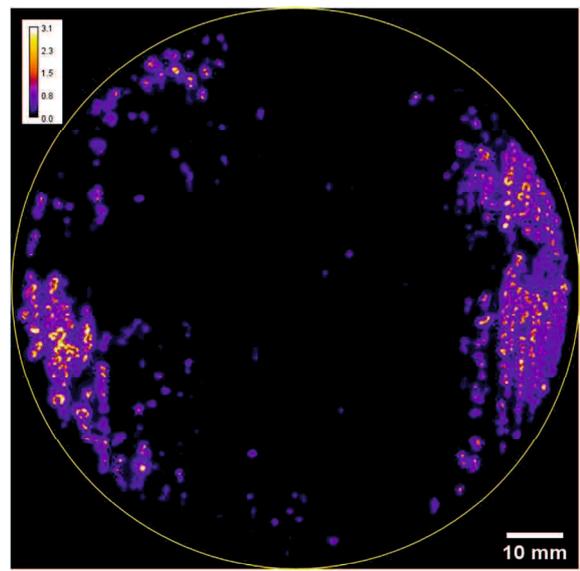


(d) 陸上ローラー

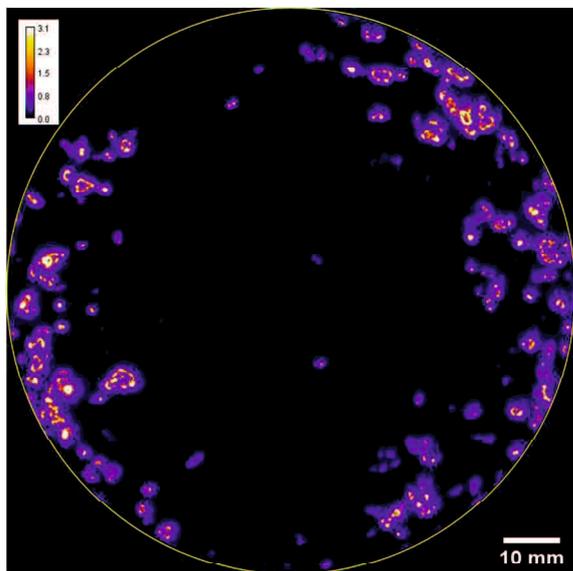
図 5.63 圧力分布 (オリジナル供試体, 載荷圧力 0.102 MPa の場合)



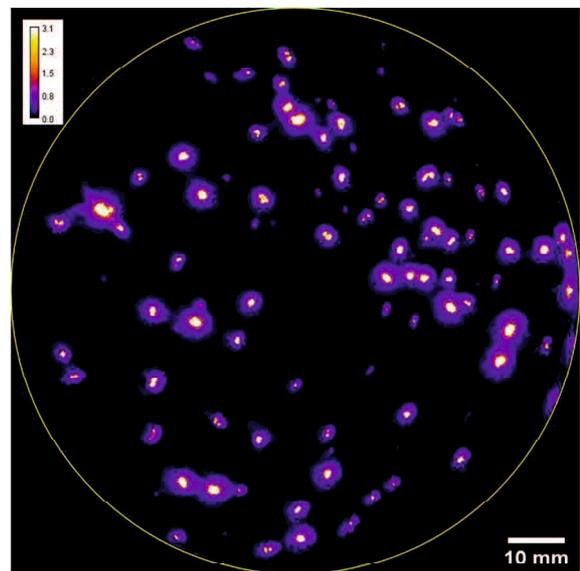
(a) 弾性 (多)



(b) コンクリート



(c) 陸上スプレー



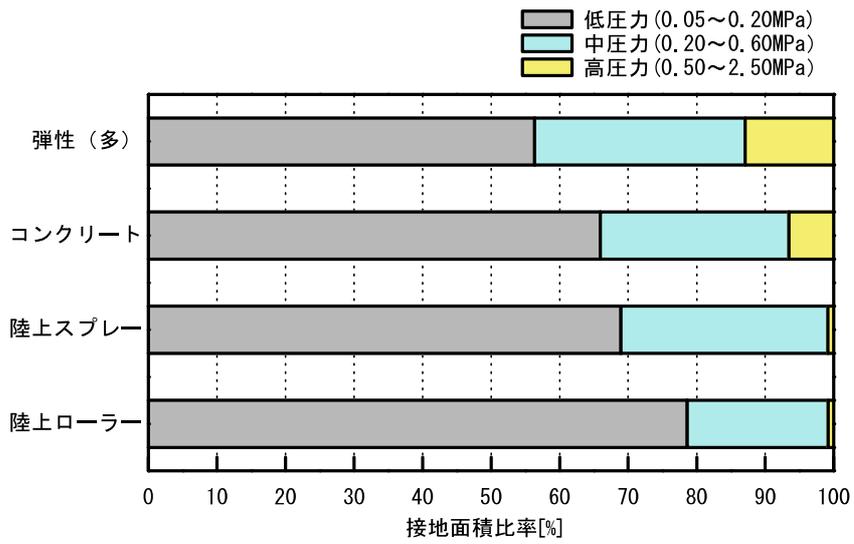
(d) 陸上ローラー

図 5.64 圧力分布 (3D プリンタ供試体, 载荷圧力 0.102 MPa の場合)

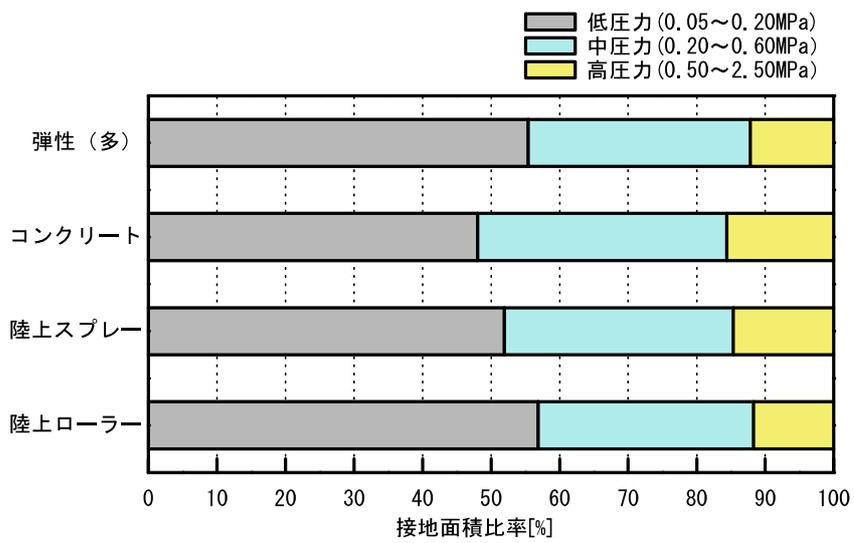
d) 接地面積の圧力分担率

図 5.63 と図 5.64 に示した接地領域における接地圧力分布について、詳細を分析していく。載荷荷重 0.102 MPa (800 N) 時の接地領域で示した低圧力と中圧力 (黒～濃い青)、高圧力 (濃い青～白) の接地面積の割合を図 5.65 に示す。図 5.65 (a) のオリジナル供試体の結果を、図 5.65 (b) に 3D プリンタ供試体の結果を示す。図 5.65 (a) に示したオリジナル供試体の結果より、弾性 (多) は 4 種類の中で最も低圧力の接地面積比率が 55 % と小さく、高圧力を占める接地面積比率が 13 % と大きい。これに対して、陸上ローラーは 4 種類の中で最も低圧力の接地面積比率が大きく、高圧力を占める接地面積比率が 0.8 % と小さい。陸上スプレーと陸上ローラーで比較すると、低圧力と中圧力を占める接地面積比率に差が見られ、陸上ローラーは陸上スプレーに比べて低圧力が大きく、中圧力が小さい。この結果の差異は舗装の表面粗さの違いによるもので、標高差が大きい陸上ローラーの方が大きい圧力を示す面積比率が小さいことが明らかになった。接触深さは陸上ローラーの方が大きい値を示していたことから、接触深さは大きい値を示すほど中圧力を占める接地面積比率が小さいことが示唆された。そして、陸上スプレーや陸上ローラーといった陸上ウレタン舗装は、本実験の載荷荷重条件では高圧力を示す傾向が見られないことが明らかになった。図 5.65 (b) に示した 3D プリンタ供試体の結果より、弾性 (多) は低圧力の接地面積比率が 55 % で、高圧力を占める接地面積比率が 13 % であった。コンクリートは低圧力の接地面積比率が 48 % で、高圧力を占める接地面積比率が 15 % であった。陸上スプレーはコンクリートと同じ傾向を示し、高圧力を占める接地面積比率が 15 % であった。陸上ローラーは高圧力を占める接地面積比率が 12 % であり、コンクリートや陸上スプレーより小さい。

オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体を比較すると、弾性 (多) は同一の結果を示した。コンクリートはオリジナル供試体に比べて 3D プリンタ供試体の方が高圧力を占めた面積が多い。これは接地面積に偏りがあったためと推察する。陸上スプレーはオリジナル供試体では高圧力を占めた面積が 1 % 以下であったが、3D プリンタ供試体の場合は 10～15 % を占める結果であった。陸上ローラーも陸上スプレーと同様の結果である。これは舗装の材料係数の影響によって、圧力分担率が変化したと考える。



(a) オリジナル供試体



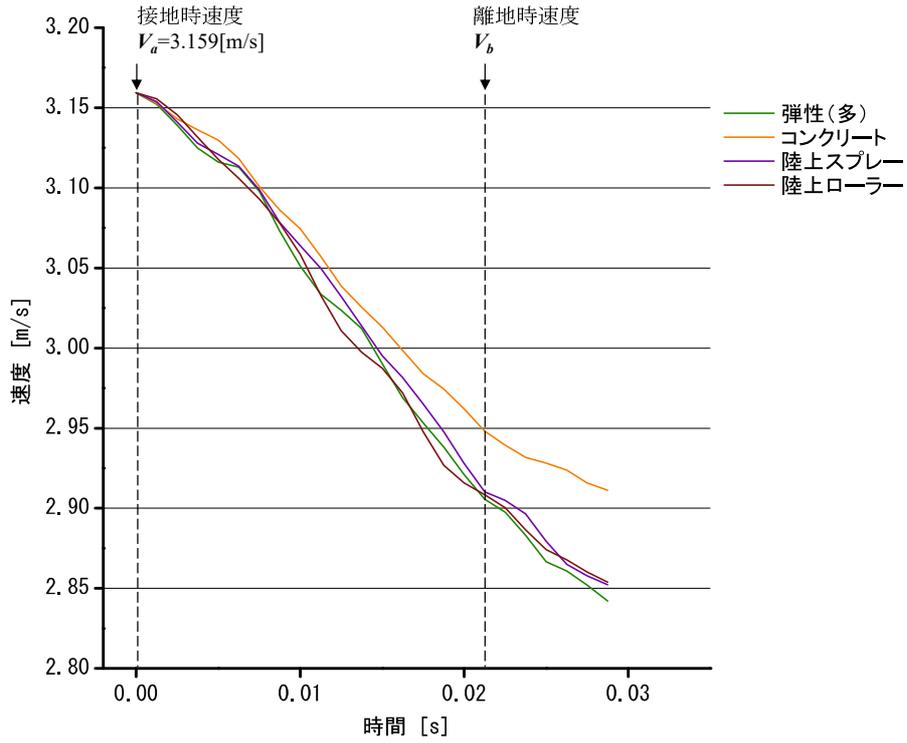
(b) 3D プリンタ供試体

図 5.65 接地面積の圧力分担率 (アスファルト舗装以外の舗装材料)

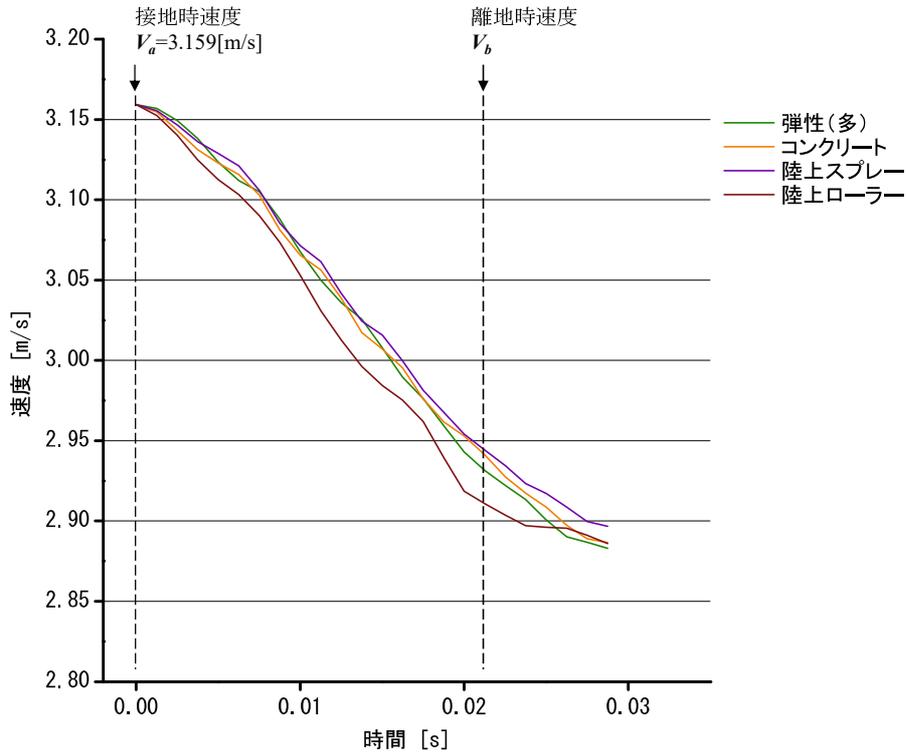
(3) シューズ底面のゴムと舗装表面の摩擦特性に関する実験結果

振り子の進行方向の加速度を積分し、時間ごとに速度を算出した振り落とし1回分の結果を図 5.66 に示す。接地時の速度は舗装種類によらず同値である。接地後、速度の低下度合いが舗装種類によって異なることが見てとれる。この図から速度低下率を算出した結果を図 5.67 に示した。図 5.67 に示したオリジナル供試体の場合、コンクリートが 6.20 m/s と接地時のブレーキが小さいことが示唆された。弾性（多）は 7.53 m/s とコンクリートに比べると大きい。陸上スプレーと陸上ローラーを比べると陸上ローラーの方が大きい値を示し、ブレーキが大きくなる。この理由として、図 5.52 に示した表面粗さの図より、陸上スプレーと陸上ローラーどちらも凸部を有しているが、陸上スプレーより陸上ローラーの方が表面粗さの凸部は鋭くて高いことから、スライダーが鋭くて高い凸部に引っ掛かることによって速度が低減したと推察する。よって、陸上ウレタン舗装の2種類についても舗装の表面粗さによって速度低下率が異なり、接触深さが陸上ローラーの方が大きいことから、接触深さが大きいと速度低下率も大きい値を示すことが示唆された。3D プリンタ供試体の結果も同様のことが言える。

オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の結果を比較すると、速度低下率は舗装種類によらず、オリジナル供試体の方が大きい。これは供試体の使用材料による影響が顕著に見られた。これはアスファルト舗装の結果と同じであり、オリジナル供試体の舗装材料と 3D プリンタ供試体の材料の違いによる差異と推察する。



(a) オリジナル供試体



(b) 3D プリンタ供試体

図 5.66 ゴムスライダ接地後の振り子の速度変化 (振り落とし 1 回分・アスファルト舗装以外の舗装材料)

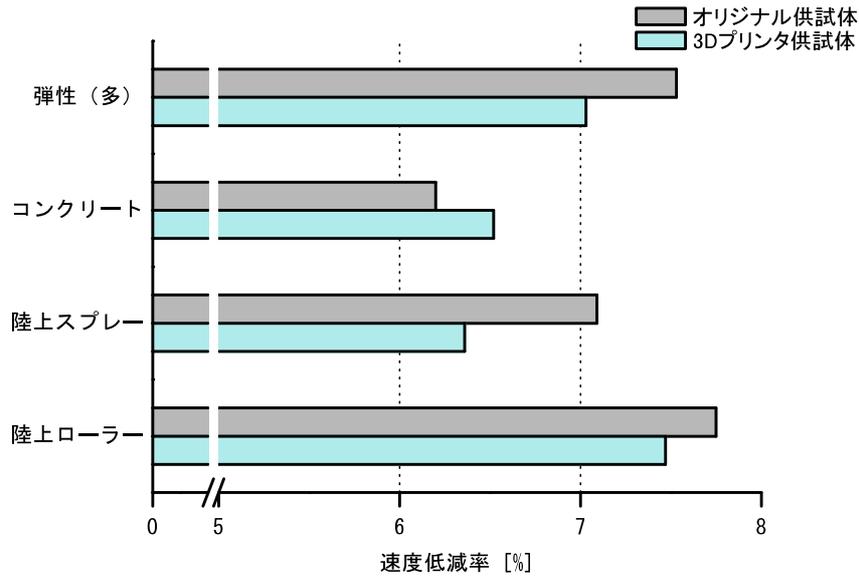


図 5.67 オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の速度低下率 (アスファルト舗装以外の舗装材料)

5.3.5 ランナーの足に生じる着地衝撃に関する室内実験結果のまとめ

a) ランナーの足の変位量に関する結果まとめ

- オリジナル供試体の弾性 (多) は 0.44 mm, コンクリートは 0.11 mm, 陸上スプレーは 0.46 mm, 陸上スプレーは 0.75 mm であった. , 陸上スプレーと陸上ローラーには約 0.3 mm 差があり, 陸上ウレタン舗装に関しても舗装の表面粗さによって, ゴム上面の最大変位量に差があることが明らかになった.

b) アスファルト舗装以外の舗装材料の接地面積および接地圧力

- 載荷圧力の増加に伴い, 接地面積および接地圧力は増加する傾向を示した.
- オリジナル供試体において, 陸上スプレーと陸上ローラーの接地面積に差がみられ, 舗装の表面粗さの違いによる差が見られ, 接触深さは大きい値を示すほど接地面積が大きいことが示唆された.
- オリジナル供試体において, 陸上ローラーと陸上スプレーは高圧力を占める接地面積比率が 1%以下であった.
- 陸上スプレーや陸上ローラーといった陸上ウレタン舗装は, 本実験の載荷荷重条件では高圧力を示す傾向が見られないことが明らかになった.

c) シューズ底面のゴムと舗装表面の摩擦特性に関する実験結果

- 陸上スプレーと陸上ローラーを比べると陸上ローラーの方が大きい値を示し, ブレーキが大きくかかる. この理由として, 陸上スプレーより陸上ローラーの方が表面粗さの凸部は鋭くて高いことから, スライダーが鋭くて高い凸部に引っ掛かることによって速度が低減したと推察する.
- 陸上ウレタン舗装の 2 種類についても舗装の表面粗さによって速度低下率が異なり, 接触深さが陸上ローラーの方が大きいことから, 接触深さが大きいと速度低下率も大きい値を示すことが示唆された.

- オリジナル供試体と 3D プリンタ供試体の速度低下率はオリジナル供試体の方が大きい。これは供試体の使用材料による影響が顕著に見られた。

5.4 本章のまとめ

本章では、ランナーの足に生じる着地衝撃の大きさに関して、ランナーのシューズ底面のゴムと舗装との力学問題と捉え、ゴムの変形特性および摩擦特性について室内実験を行った。実験結果より得られた知見を列挙する。

(1) 舗装の表面粗さの評価指標

- ランナーが舗装に接地することを想定して、本研究では、「面」で表面粗さを評価することと、基準面を標高最大値とすることとした。
- 舗装の表面粗さ（面粗さ）の標高度数分布より、算出可能な累積度数比率の 20% 時の標高である「接触深さ」という指標を提案した。
- 本章で用いた舗装種類に関して、接触深さに差が見られ、舗装の表面粗さ（面粗さ）を評価できることが示唆された。

(2) ランナーの足に生じる着地衝撃の力学的検討

- 舗装種類によらず、載荷面の舗装の表面粗さの違いによって、ゴム上面の変位量に大きな差がみられた。
- アスファルト舗装に関して、ゴム上面の変位量および、接地面積率、高圧力を示す接地面積比率は、舗装の表面粗さの評価指標である「接触深さ」で予測できる可能性があることが確認された。
- 接地面積と接地圧力の結果より、アスファルト舗装については、接触深さが大きいほど接地面積が少なく、高圧力を示す接地面積が多いため、ゴム変位量が大きいことが確認された。
- アスファルト舗装と天然ゴム（硬度 65）を用いた場合という限定的な条件における結果であるが、舗装の表面粗さの標高データから算出した真実接触深さより、ゴム上面の最大変位量の推定式を導いた。
- 陸上ウレタン舗装は、ウレタン材が軟らかい材料であるため、接触深さの大小によらず、接地面積が多く、高圧力を示す面積は少ない。
- ゴムの摩擦特性に関して、速度低下率は舗装種類によらず、接触深さの増加に伴い、増加する傾向が得られた。そして、速度低下率は接触深さで予測できる可能性が確認された。

本実験は静的な載荷条件であったため、今後は、ランナーの着地時間のスケールに合わせた、動的な載荷実験を行う必要がある。そして、載荷圧力の条件等を変化させて実験を行い、舗装の表面粗さの標高データからランナーの足の変位量の推定式の確立を目指す。

【第5章の参考文献】

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：コンクリート舗装ガイドブック 2010, 2016.
- 2) 高橋昌宏, 前田正登, 野村治夫, 柳田泰義：長距離選手における走行時の足底圧分布, スポーツ産業研究, Vol.10, No.1, pp.75-88, 2000.
- 3) 社団法人 日本道路協会：舗装設計便覧, p.117, 2006.
- 4) 原野健一：使用者の目的・スキルに対応したランニングシューズの機能設計, 日本ゴム協会誌, Vol.90, No.9, 2017.
- 5) 原野健一：アスリートを支えるシューズの化学, 化学と教育, Vol.63, Vol.11, 2015.
- 6) Giles, C. G., Sabey, B.E., Cardew, K. H. F.: Development and Performance of the Portable Skid-Resistance Tester, Rubber Chemistry and Technology, Vol.38, No.840, 1965.
- 7) 久利良夫, 佐藤彰紀, 鎌田修, 芳賀潤一, 児玉孝喜：高温域を考慮したアスファルト混合物のステイフネス測定に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第13巻, pp.39-46, 2008.
- 8) 公益社団法人土木学会舗装工学委員会 舗装材料小委員会：舗装工学ライブラリー13a アスファルトの特性と評価, 2015.
- 9) Rodríguez-Panes, A., Claver, J., and Camacho, A. M.: The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis, Materials, Vol.11, No.8, 1333, 2018
- 10) 宇治橋貞幸：スポーツ用具と感性, 精密工学会誌, Vol.66, No.2, pp.193-196, 2000.
- 11) 国土交通省：土木工事施工管理基準および規格値（案）, 2018.

第6章 ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質に関する検討

6.1 概説

アスファルト舗装に関して、ゴムを介した舗装表面の変形や摩擦は、舗装の表面粗さに依存し、接触深さが大きいほどゴムの変形が大きく、舗装とゴムとの摩擦抵抗も大きいことが第5章の室内実験で明らかになった。すなわち、ランナーの足裏で感じる地面反力の大きさは、接触深さが大きいほど、小さいことを意味する。そして、接地時の摩擦によるブレーキの大きさは、接触深さが小さいほど、小さいことを意味する。本章では、この力学的な意味での着地衝撃と、ランナーの感触としての着地衝撃との関係を検証するため、走行試験とアンケート調査を実施する。

6.2 走行試験場の概要

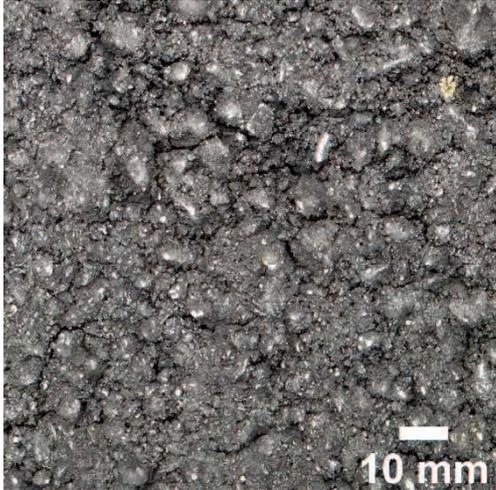
6.2.1 走行試験場の舗装

本章では野外に施工した舗装コースで走行試験とアンケート調査を実施し、ランナーの感触と表面粗さとの関係を検証する。本章で対象とした舗装の種類は、表6.1および写真6.1に示すアスファルト舗装5種類である。アスファルト舗装の混合物の骨材配合と合成粒度を表6.1、図6.1および図6.2に示す。再生密粒(13)は第3章および第5章で使用した細密(13)の代替材料であり、図6.2に示す粒度曲線より、細密(13)と再生密粒(13)の粒度曲線はほぼ同一であることから、ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質の一つである、舗装の表面粗さは、ほぼ同一と考え、採用した。

表6.1 走行試験場の舗装種類

略称	混合物名称	材料	備考
再生密粒(13)	再生密粒度アスファルト混合物(13)	ストレートアスファルト 60/80	骨材配合割合は異なるが、第3章および第5章の細密(13)と同一粒度曲線である。
SMA(5)	砕石マスチックアスファルト混合物(5)	ポリマー改質アスファルトII型	第3章および第5章と同一種類。
ポーラス(5)	小粒径ポーラスアスファルト混合物(5)	ポリマー改質アスファルトII型	第3章および第5章と同一種類。
ポーラス(13)	ポーラスアスファルト混合物(13)	ポリマー改質アスファルトH型	第3章および第5章と同一種類。
弾性(多)	【母体】 開粒度アスファルト混合物(13)	ポリマー改質アスファルトII型/ウレタン樹脂	第3章および第5章と同一種類。

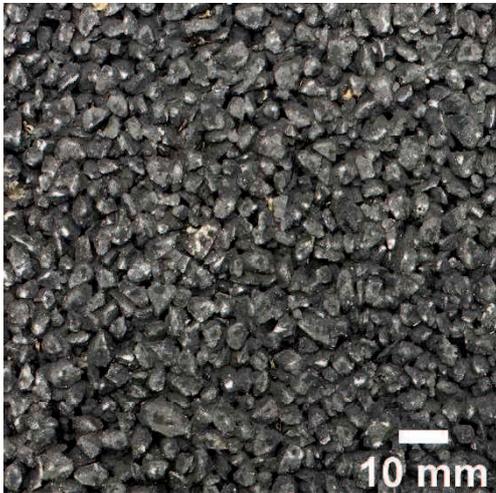
※混合物の()内の数字は、骨材の最大粒径を示す。



(a) 再生密粒(13)



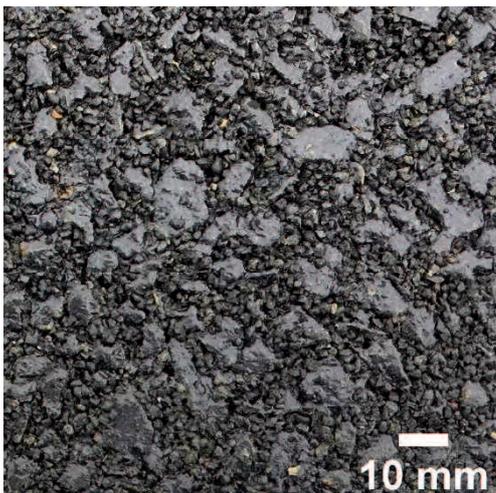
(b) SMA(5)



(c) ポーラス(5)



(d) ポーラス(13)



(d) 弾性 (多)

写真 6.1 走行試験場の走路の舗装表面

表 6.2 骨材配合割合及び合成粒度他

混合物種類		再生密粒 (13)	SMA (5)	ポーラス (5)	ポーラス (13)
配合割合 (%)	再生 As 骨材 (13 mm-0 mm)	50.0	—	—	—
	6号砕石	18.0	—	—	85.0
	7号砕石	12.0	72.0	84.0	—
	粗目砂	10.0	—	—	—
	細目砂	8.0	18.0	10.0	10.0
	石粉	2.0	10.0	6.0	5.0
	アスファルト	5.5	8.0	5.0	4.5
合成粒度 (%)	19.0 mm	100.0	100.0	100.0	100.0
	13.2 mm	98.6	100.0	100.0	95.3
	4.75 mm	68.3	95.0	94.1	20.3
	2.36 mm	46.3	33.0	22.0	14.9
	0.60 mm	29.4	26.8	16.0	13.8
	0.30 mm	20.4	20.1	11.6	10.6
	0.15 mm	10.8	11.1	6.6	5.7
	0.075 mm	6.6	8.0	4.9	4.1
密度 (g/cm ³)		2.356	2.350	2.055	2.008
空隙率 (%)		3.9	4.0	17.5	19.8

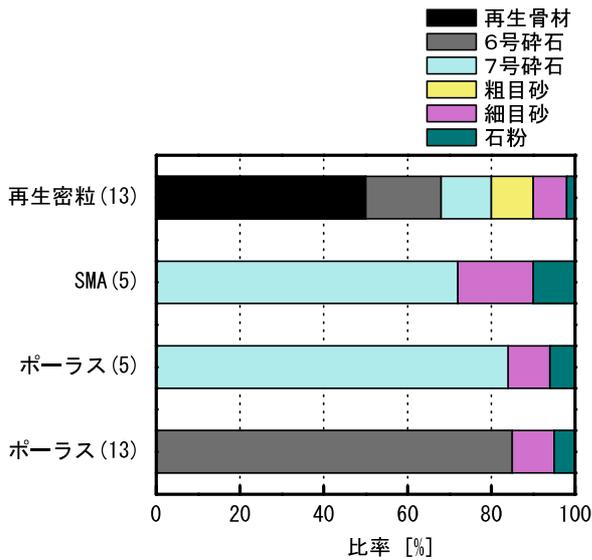


図 6.1 走行試験場のアスファルト混合物の配合割合

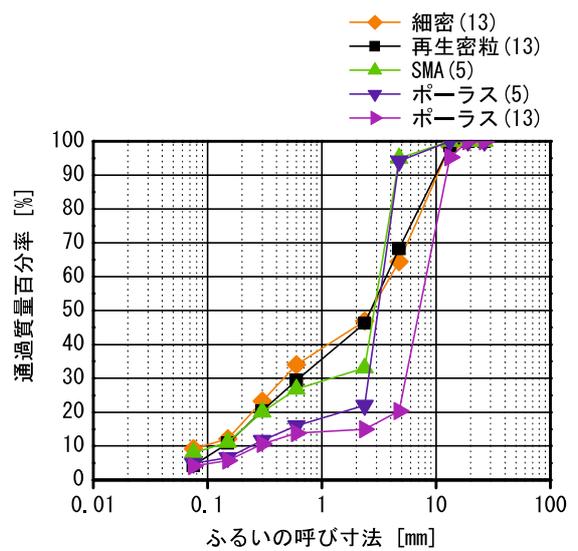


図 6.2 走行試験場のアスファルト混合物の合成粒度

6.2.2 走行試験場の概要

走行試験場の平面図を図 6.3 に示す。走行試験場は、幅員 3.4 m、延長 55 m である。ポーラス(5)については、弾性(多)および SMA(5)と比較して走行できるように、2箇所施工を行った。アスファルト舗装の表層の施工厚さは 50 mm とし、下層は既設の基層 50 mm (アスファルト混合物) と既設路盤層であった。走行試験場の外観を写真 6.2 に示す。

図 6.4 に走行試験場の走行方向の路面プロファイルを示す。この路面プロファイルは MRP を用いて走行方向におよそ 0.3 mm 間隔で測定した結果に 250 mm の移動平均フィルタをかけた値である。測定した結果、ポーラス(13)と SMA(5)の区間 (0~10 m) については、約 0.5% の縦断勾配である。10~45 m 区間については、約 0.1% の縦断勾配であった。横断勾配はオートレベルを用いて計測し、約 1.0 ~ 1.5% の片勾配であり、一般道路および歩道と同程度以下である。よって、舗装の各区間の勾配の差はランナーの評価に影響しないものと考えた。

図 6.5 に走行試験場の舗装の表面粗さの標高度数分布を示す。各舗装 10 m のプロファイルを 100 mm ごとに区切って勾配補正を行った表面粗さである。横軸の高さは、累積度数比率が 0.1% となる高さをゼロとした値である。図より、再生密粒(13)は標高 -1 mm の度数が極めて多く、標高が少ないのに対して、ポーラス(13)は -6 mm まで高さのバリエーションが豊富な路面である。密な路面である再生密粒(13)と粗な路面であるポーラス(13)の間に位置するのが、SMA(5)やポーラス(5)-1 とポーラス(5)-2、弾性(多)である。以上、表面粗さが異なる 5 種類を対象とした。ポーラス(5)-1 とポーラス(5)-2 の度数分布に対して t 検定を行った結果、すべての群(標高)において 5%水準で度数の値に有意な差が認められなかった。よって、以降、ポーラス(5)-1 とポーラス(5)-2 は同一路面として考察を行う。

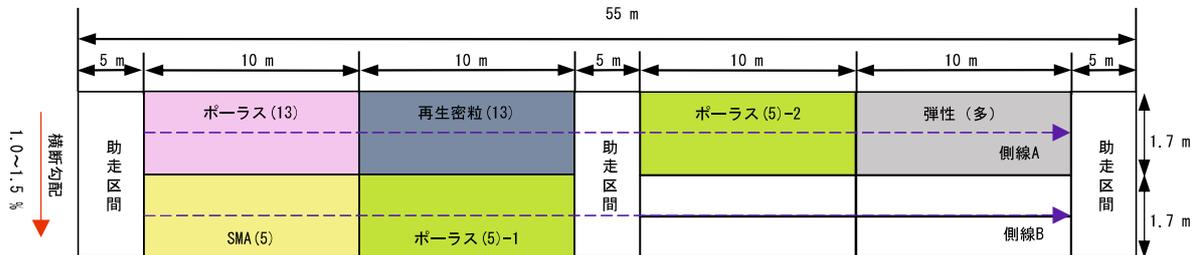


図 6.3 走行試験場の平面図

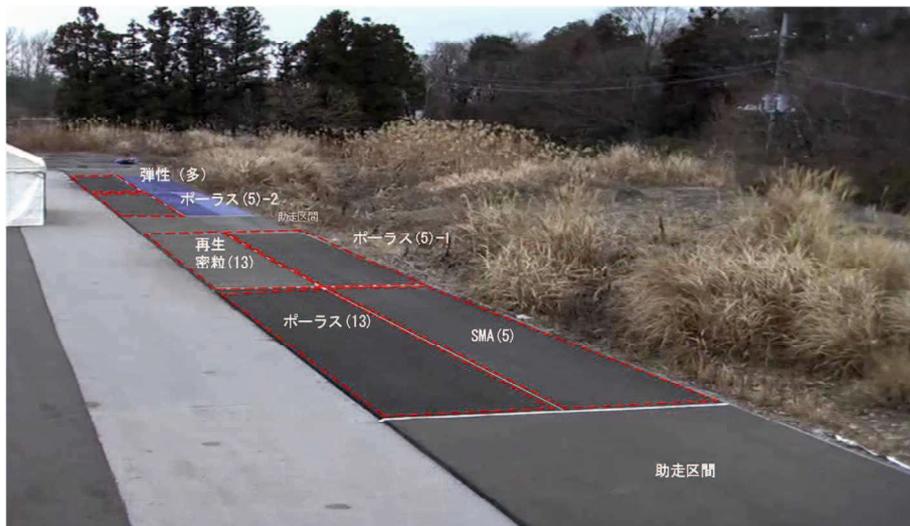


写真 6.2 走行試験場の全景

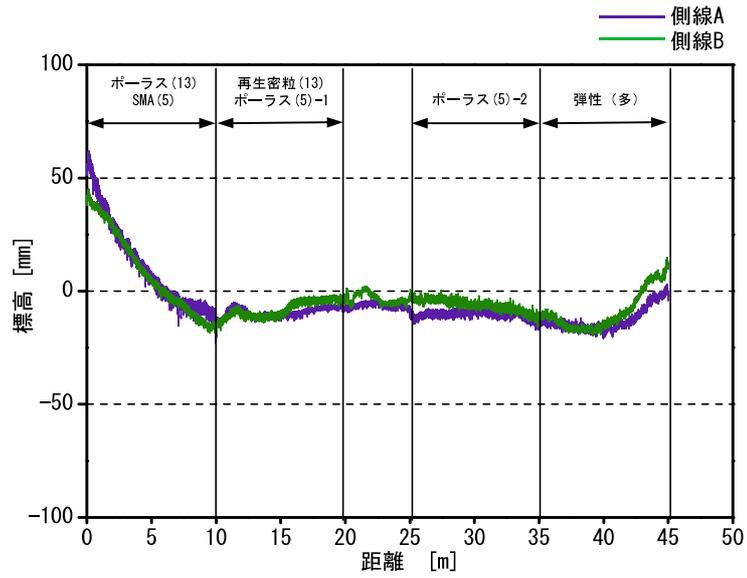


図 6.4 走行試験場の路面縦断プロファイル

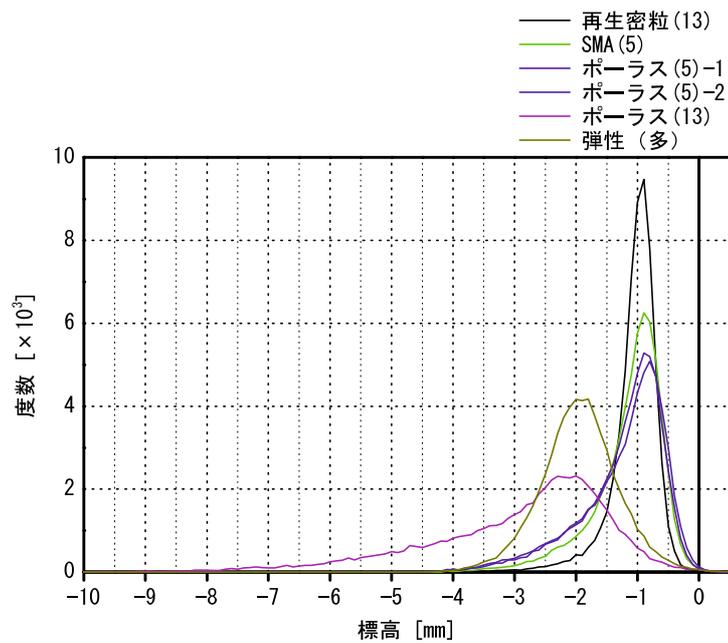


図 6.5 走行試験場の表面粗さ（線粗さ）の標高度数分布

6.3 舗装から受ける着地衝撃の大きさに関するアンケート調査

6.3.1 アンケート調査の概要

(1) 被験者

被験者に関する情報を図 6.6 に示す。まず、性別の人数比率を図 6.6(a) に示す。被験者は一般市民ランナー53名（男性41名、女性12名）である。マラソンクラブに所属しマラソン大会にも出場している比較的レベルの高いランナーが26名、それ以外のランナー（大会には出場しないが日常的に走っているランナー）が27名である。前者を上級ランナー、後者を一般ランナーと呼ぶことにする。図 6.6(b) に年齢の人数比率を示した。上級ランナーは40歳代以上が9割を占め、一般ランナーは40歳代以下が9割を占めた。

次に、1週間当たりの走行距離を図 6.6(c) に示した。上級ランナーは1週間当たり40km以上走行しているランナーが7割を占めており、一日5km以上走行している。一方で、一般ランナーは1週間当たりの走行距離が10km以下のランナーが6割を占めており、聞き取り調査においても、週に一回および二回走る程度で、健康目的で走っているランナーや、他のスポーツ競技の練習でランニングを行っているランナーが多かった。

そして、42.195kmを走行するフルマラソンに出場した回数を図 6.6(d) に、上級ランナーは全員、6回以上であり、16回以上のランナーが6割を占めていた。一般ランナーは一度も出場したことがないランナーが8割を占めていた。

最後に、上級ランナーがマラソン大会に出場した中での完走時間の最高記録を図 6.6(e) に示した。上級ランナー26名すべて、4時間以内で完走した経験を持つランナーであり、男女合計の6割は3時間以内で完走した経験を持つランナーである。

(2) 走行条件

被験者のシューズは、普段、走行する時に履いているものとした。本検討において、シューズは被験者ごとに異なるが、各人が普段から走行時に使用しているものという観点では統一的であると考えた。

走行速度は、普段のランニング時の速度、かつ舗装の違いを感じ取ることができる速度で走るよう指示した。走行時の記録ビデオを解析した結果によれば、平均速度は9.72 km/h ± 0.34 km/hであった。

走行順序はポーラス(13)、再生密粒(13)、SMA(5)、ポーラス(5)-1、ポーラス(5)-2、弾性(多)とし、各種類の舗装の走行距離は片道10m、往復20mとした。

本調査は1月から2月にかけて実施し、走行時の外気温は平均11.3℃、路面温度は平均17.9℃であった。調査の前に、被験者へ種類の異なる舗装が6箇所あることは伝えたが、6箇所の詳細情報は伝えなかった。そして、調査実施前と実施後に、被験者同士で情報を共有しないように伝えた。

(3) アンケート調査項目

アンケート調査項目は、着地衝撃の大きさである。舗装5種類6箇所すべてを比較して評価する方法（総合評価）とした。被験者には、舗装に関する情報を全く与えず、走行する場所と順序をすべて指示して、調査を行った。総合評価は、5種類6箇所の舗装をすべて走行した後、5種類6箇所を比較して、着地衝撃の大きさが最も大きい舗装と、最も小さい舗装に該当する舗装を1つ選択してもらった。

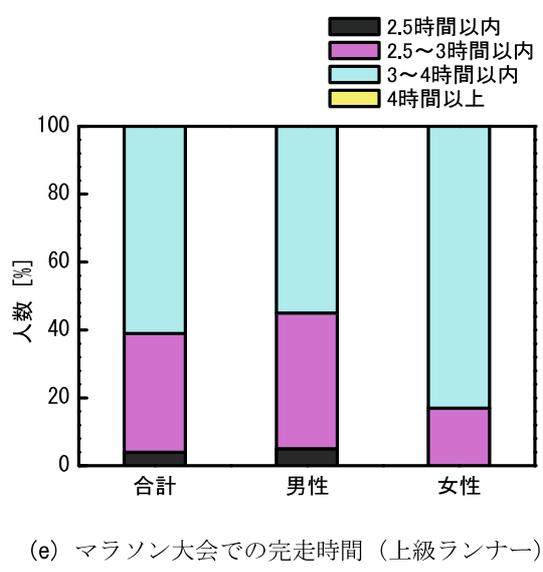
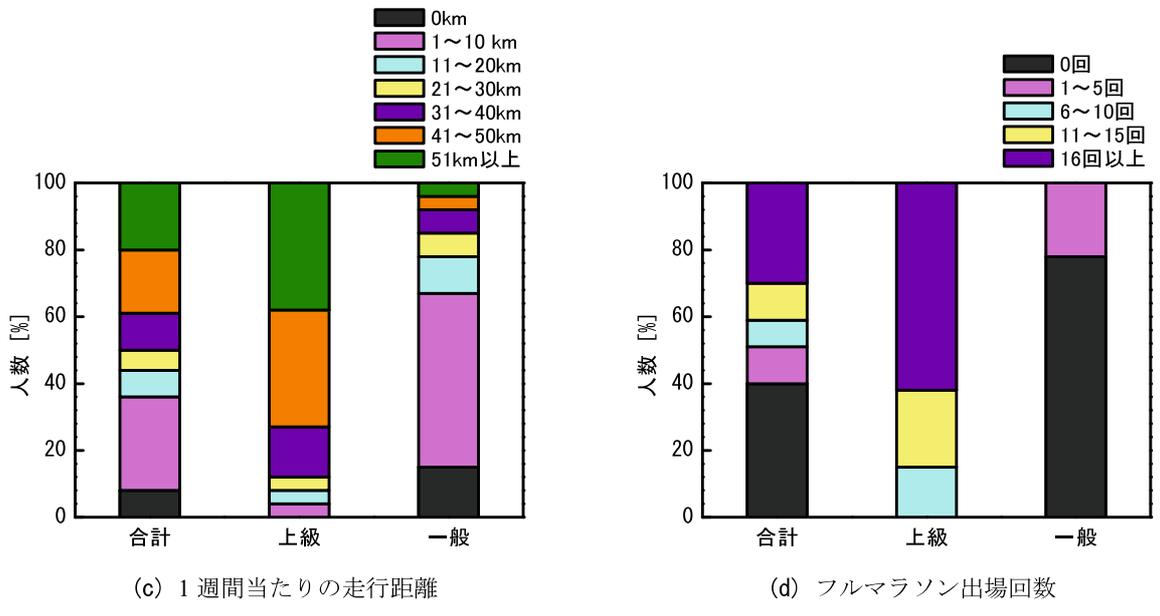
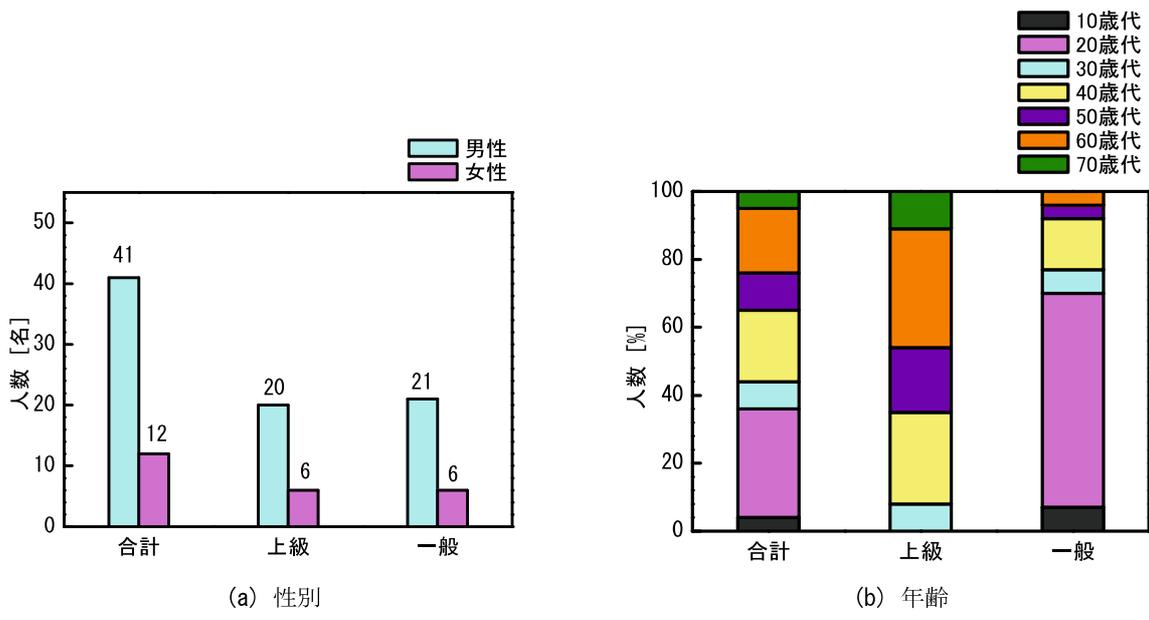


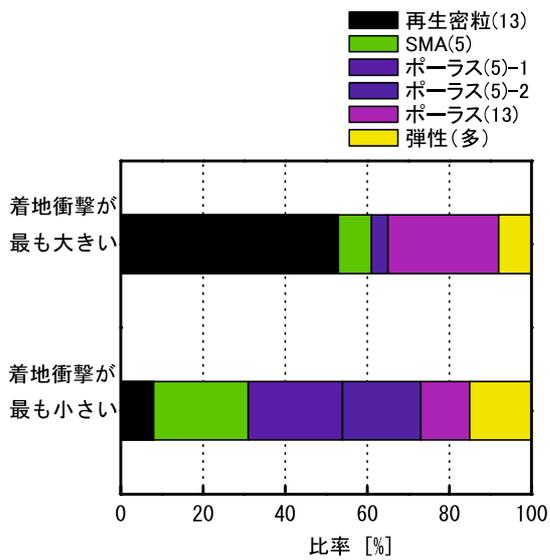
図 6.6 被験者に関する情報

6.3.2 アンケート調査の結果

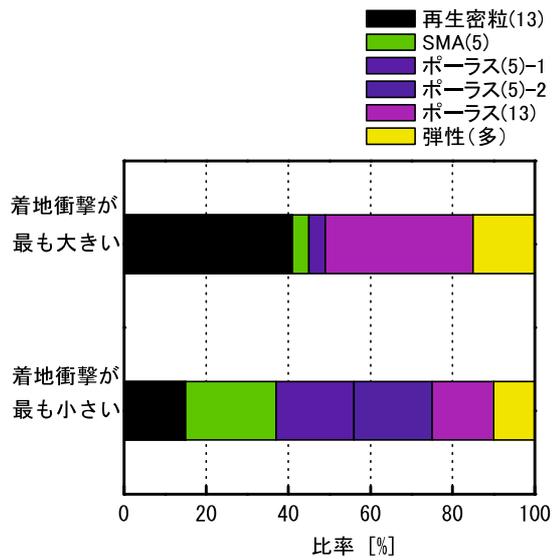
アンケート調査の結果を図 6.7 に示す。図 6.7(a) に上級ランナー 26 名の結果を示し、図 6.7(b) に一般ランナー 27 名の結果を示した。図 6.7(a) の上級ランナーの結果より、着地衝撃が最も大きいと感じた舗装は、再生密粒(13)であった。2 番目に多い回答数を得た舗装はポーラス(13)であった。着地衝撃が最も小さいと感じた舗装は、ポーラス(5)が 5 種類の中で最も多くを占めた。次に SMA(5)が 23 %を占め、弾性(多)が 15 %、ポーラス(13)が 12 %であり、再生密粒(13)は 8 %と最も少ない。図 6.7(b) の一般ランナーの結果より、着地衝撃が最も大きいと感じた舗装は、再生密粒(13)であった。2 番目に多い回答数を得た舗装はポーラス(13)であった。そして、着地衝撃が最も小さいと感じた舗装は、ポーラス(5)が 5 種類の中で最も多くを占めた。次に SMA(5)が 22 %を占め、ポーラス(13)と再生密粒(13)は 15 %であり、弾性(多)が 10 %と最も少ない。

上記の結果に対して、「競技レベルによって回答に有意差がない」という帰無仮説に対し、有意水準を 5 %に設定し、カイニ乗検定を行った。その結果、「着地衝撃が最も小さいと感じた舗装」については、 $p=0.964 > .05$ 、「着地衝撃が最も大きいと感じた舗装」については、 $p=0.927 > .05$ より、帰無仮説が成立し、調査結果のすべての群において 5 %水準で有意差が認められない結果であった。したがって、アンケート調査結果は上級ランナーと一般ランナーを区別せず、合計 53 名の結果を取りまとめた値を用いて、次節で第 5 章の実験で得た結果との関係を明らかにする。

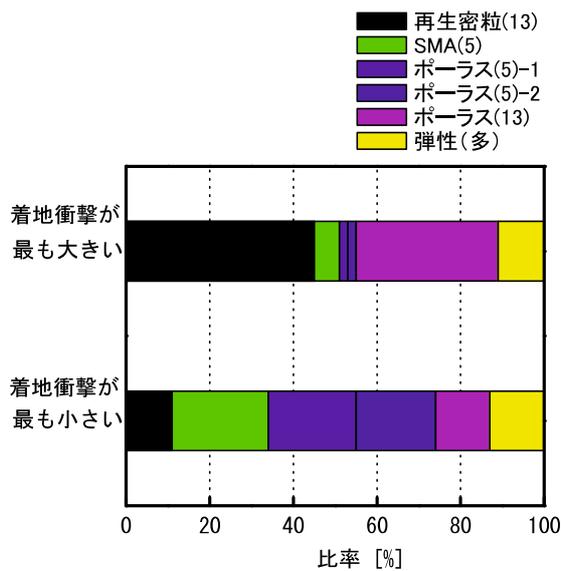
最後に、被験者 53 名の結果(図 6.7(c))に関して、「舗装種類ごとに有意差がない」という帰無仮説に対し、有意水準を 5 %に設定し、カイニ乗検定を行った。その結果、「着地衝撃が最も小さいと感じた舗装」については、 $p=0.0051 < .05$ 、「着地衝撃が最も大きいと感じた舗装」については、 $p=2E-07 < .05$ より、帰無仮説は棄却され、対立仮説が成立し、調査結果のすべての群において 5 %水準で有意差が認められる結果であった。



(a) 上級ランナー



(b) 一般ランナー



(c) 全体

図 6.7 アンケート調査結果

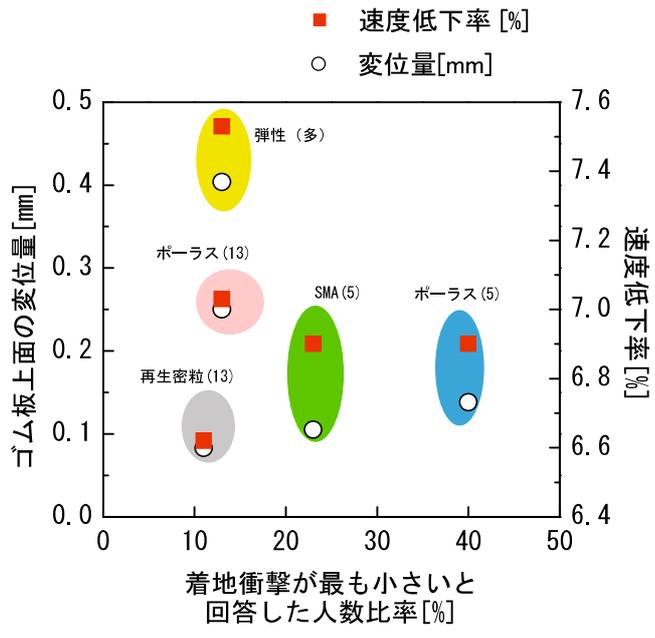
6.4 アンケート調査結果とゴム板上面の変位量および速度低下率との関係

ランナー53名によるアンケート結果と第5章の室内実験の結果の関係図を図6.8に示す。第5章では各舗装供試体の表面にゴム板を重ねて圧縮し、ゴム板上面の変位量から表面粗さの異なる舗装ごとの変位特性を求めた。また、振り子式の摩擦試験を実施し、スライダの速度低下率から異なる舗装ごとの摩擦特性を求めた。図6.8ではこれら二つの情報を縦軸に、アンケート結果を横軸にとって表示している。定性的には、縦軸の値が大きいほど、ゴム上面の変位量が大きく、速度低下率が大きい舗装であることを示す。図に示した再生密粒(13)とは、室内実験の細密(13)と合成粒度曲線が同一であることから、室内実験で用いた細密(13)の結果と再生密粒(13)のアンケート調査との関係を示した。

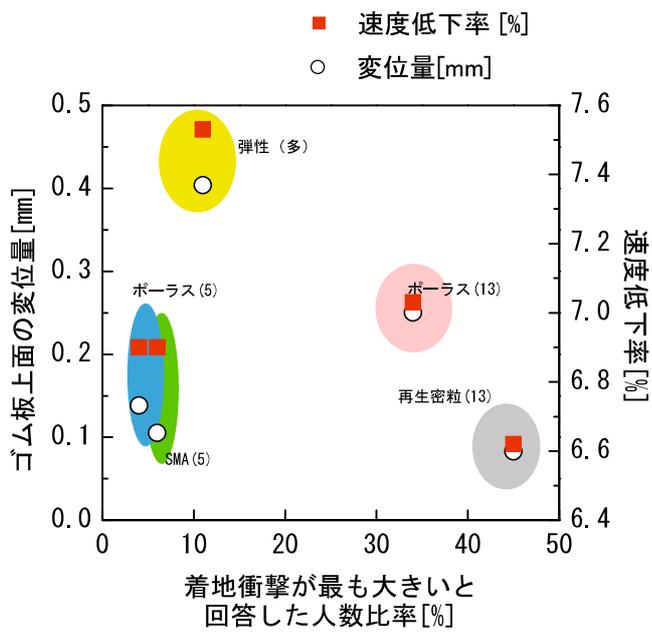
図6.8(a)に示す着地衝撃が最も小さいと感じた舗装であると回答した被験者が最も多い舗装はポーラス(5)であった。次いで、SMA(5)が23%を占めた。この結果より、ポーラス(5)とSMA(5)は、ゴム板上面の変位量および速度低下率が最大値もしくは最小値を示した舗装種類ではなく、ゴム上面の最大変位量が0.10~0.15 mmかつ速度低下率が6.9%程度の舗装の表面粗さを有するアスファルト舗装がランナーの着地衝撃の感触を軽減すると考えられる。ゴム板上面の変位量が5種類の中で最も小さい値を示した細密(13)は、着地衝撃が最も小さい舗装と回答した被験者の比率が10%と低い結果であった。これは、速度低下率は5種類の中で最も小さい値を示し、着地時の足のブレーキは小さいが、ゴム板上面の変位量が小さいため、着地衝撃が大きいと感じていたと考える。一方で、ゴム板上面の変位量が5種類の中で大きい値を示した弾性(多)やポーラス(13)は、着地衝撃が最も小さい舗装であると回答した被験者の比率が10~15%と低い結果であった。これは、速度低下率が5種類の中で大きい値を示していたことから、ゴム板上面の変位量は大きい、着地時の足のブレーキが大きく、着地衝撃が大きいと感じていたと考えられる。

図6.8(b)に示す着地衝撃が最も大きい舗装と回答した被験者が多い舗装は、45%を占めた再生密粒(13)であった。次いでポーラス(13)が34%を占めた。着地衝撃が最も小さい舗装で高評価であったポーラス(5)とSMA(5)は10%以下の回答数であった。

以上より、舗装の表面粗さと相関のあるゴム板上面の変位量と速度低下率の値がポーラス(5)およびSMA(5)を最も着地衝撃が小さい舗装と評価した。ゴム上面の最大変位量が0.10~0.15 mmかつ速度低下率が6.9%程度、すなわち、接触深さ0.36~0.54 mmのアスファルト舗装がランナーの着地衝撃の感触を軽減することが示唆された。



(a) 着地衝撃が最も小さい



(b) 着地衝撃が最も大きい

図 6.8 アンケート調査結果とシューズ底面のゴムの変形および摩擦特性（第 5 章の室内実験結果）との関係

6.5 アンケート調査結果のまとめ

本章では、本章では、力学的な意味での着地衝撃と、ランナーの感触としての着地衝撃との関係を検証するため、走行試験とアンケート調査を実施した。その結果、得られた知見を述べる。

- 1) アンケート調査結果より、再生密粒(13)とポーラス(13)は着地衝撃を大きく感じ、ポーラス(5)とSMA(5)は着地衝撃を小さく感じる傾向が得られた。この結果は上級ランナーも一般ランナーも同様の傾向を示した。
- 2) 舗装の表面粗さと相関のあるゴム板上面の変位量と速度低下率の値がポーラス(5)およびSMA(5)を最も着地衝撃が小さい舗装と評価した。ゴム上面の最大変位量が0.10～0.15 mmかつ速度低下率が6.9%程度、すなわち、接触深さ0.36～0.54 mmのアスファルト舗装がランナーの着地衝撃の感触を軽減することが示唆された。
- 3) 今後、ランナーの走行速度や着地方法など着地衝撃の影響因子も加味して、調査を行う必要がある。そして、ランナーが快適に走行するため、着地衝撃を小さいと感じる舗装の表面粗さの閾値を明確にする必要がある。

第7章 結論

7.1 各章の結論

本研究では、ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質を明らかにするため、走行試験およびアンケート調査を実施した。そして、着地時に生じる力学現象として、シューズ底面と舗装が接地する時の変形と摩擦および、これらに及ぼす舗装の表面粗さの影響を明らかにするための室内実験を実施した。最後に、この力学的な意味での着地衝撃と、ランナーの感触としての着地衝撃との関係を検証するため、走行試験とアンケート調査を実施した。これらの成果を踏まえて、ランナーの着地衝撃の感触に影響する舗装の性質を明らかにし、その舗装の性質の評価方法を提案した。その過程で、ランナーの足に生じる着地衝撃の大きさを測定し、測定方法を提案した。

本研究で得られた主な研究成果は次のとおりである。

第1章では、本研究の背景として、ランナーは走りやすい舗装として、着地衝撃の大きさを最も重要視していることを述べた。ランナーの足に生じる着地衝撃は、踵から踝、膝、腰の順に減衰しながら伝達し、膝痛や腰痛などの障害につながることから、ランナーが重視するのは当然といえる。一方、ランナーが感じる着地衝撃の大きさと舗装の性質との関係は未解明の問題であることから、本研究では、ランナーの着地衝撃の感触に寄与する舗装の性質を明らかにし、その舗装の評価方法および評価指標を提案することを目的とした。この過程で、ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさを測定するが明らかになっていない現状より、本研究で計測方法を提案することも目的としていることを論じた。

第2章では、ランナーの舗装に対するアンケート調査結果を分析し、ランナーの足に生じる着地衝撃という力学現象と、着地衝撃を受けたときのランナーの感触は、分けて考えるべきであることを指摘した。ランナーの足に生じる着地衝撃の大きさに関する既往の研究として、計測方法や影響因子について整理し、課題を述べた。ランナーの舗装に対する感触については、「着地衝撃の大きさ」に限定した研究はなく、舗装の違いを感じ取っている事、そして、走行時に快適と感じる項目について整理し、課題を述べた。

第3章では、着地衝撃の感触に関する研究として、2種のアスファルト舗装および弾性舗装による試験コースで、10名を被験者とした走行試験とアンケート調査を実施した。その結果、ランナーは舗装に対して着地衝撃の大きさに違いを感じており、アスファルト舗装に関しては、密粒系の舗装は着地衝撃を大きいと感じ、ポーラス系の舗装に対して着地衝撃を小さいと感じる傾向を得た。この結果を受けて、着地衝撃の感触は、舗装の変形係数や表面粗さ、摩擦が影響していることが示唆された。これらの影響因子のうち、より関係性の高い傾向が得られた、舗装の表面粗さに着目をした。

第4章では、ランナーの足首に生じる着地衝撃について研究を行った。まず、測定場所を選ばないウェアラブルな計測方法として、9軸のモーションセンサを用いる計測方法を提案し、室内および屋外で走行実験を実施した。その結果、ランナーの走動作と足首で測定した加速度の波形を対応させることに成功し、加速度波形のピーク値は、ランナーの足裏が全面着地する時に生じることを明らかにした。屋外の走行実

験結果より、ランナーの足首に生じる着地衝撃の舗装種類による影響は、上下方向の加速度ピーク値のみならず、前後方向の加速度ピーク値で把握できる傾向を得た。ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさは、舗装の変形係数のみならず、摩擦や表面粗さの影響も考慮しなければならないことを示した。

第5章では、**第3章**のアンケート結果を踏まえて、ランナーはシューズ底面のゴムの変形と、シューズ底面のゴムと舗装との摩擦を感じ取っており、これらに影響する舗装の性質として舗装の表面粗さであると仮説を立てた。この仮説に対して、室内実験でシューズ底面のゴムと舗装の変形特性と摩擦特性を把握した。まず、舗装の表面粗さの評価指標として、舗装の表面粗さ（面粗さ）の標高度数分布より、算出可能な累積度数比率の20%時の標高である「接触深さ」という指標を提案した。

室内実験結果より、アスファルト舗装に関しては、接触深さの増大に伴ない、ゴム上面の変位量は増大し、接地面積率は減少することが明らかになった。シューズ底面のゴムと舗装との摩擦特性に関しても、速度低下率は舗装種類によらず、接触深さの増加に伴い、増加する傾向が得られた。すなわち、舗装の表面粗さの標高差が大きくなるにつれて、ランナーが接地した際の足の変位量は大きくなるが、ランナーが接地した際の足のブレーキは大きくなることが示唆され、舗装の表面粗さにより、シューズ底面のゴムの変形特性および摩擦特性に差が生じることが明らかになった。さらに、舗装の表面粗さ（面粗さ）の標高データから算出した「接触深さ」で、ゴム上面の変位量および速度低下率を予測できる可能性があることを確認した。

第6章では、**第5章**の実験で得たゴム上面の変位量と速度低下率という力学的な観点での着地衝撃と、ランナーの感触としての着地衝撃との関係を検証するため、走行試験とアンケート調査を実施した。その結果、再生密粒(13)とポーラス(13)は着地衝撃を大きく感じ、ポーラス(5)とSMA(5)といった最大粒径が5 mmの舗装は着地衝撃を小さく感じる傾向が得られた。この結果より、ランナーが着地衝撃を小さく感じるアスファルト舗装は、ゴム上面の最大変位量および速度低下率が最適な範囲を有する、すなわち、舗装の表面粗さとして接触深さが0.36~0.54 mmのアスファルト舗装が望ましいことが示唆された。

7.2 本研究の結論

- 1) ランナーの着地衝撃の感触および足首に生じる着地衝撃の大きさに影響する舗装の性質は、舗装の表面粗さであった。
- 2) ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさを測定する方法として、9軸のモーションセンサを用いる計測方法を提案した。
- 3) ランナーの着地衝撃の感触および足首に生じる着地衝撃の大きさに影響する舗装の性質である舗装の表面粗さは、舗装の表面粗さ（面粗さ）の標高度数分布より算出可能な「接触深さ」という指標で評価できる可能性を確認できた。

7.3 今後の課題

以上が本研究の成果であるが、ランナーが快適に走行できる舗装を解明するには、まだ課題が残されていると考えられる。以下に主な今後の課題を示す。

- 1) ランナーが感じる着地衝撃の大きさに関しては、舗装の影響因子として、本研究は舗装の表面粗さに着目をした。室内実験について、载荷条件として、ランナーの着地時間のスケールに合わせる動的な载荷実験を行う必要がある。さらに、陸上競技場のウレタン舗装など舗装材料の変形係数が小さい場合については、载荷したゴムの変形のみならず、舗装の変形も加味した推定式を導くため、実験方法を再考する必要がある。そして、载荷圧力の条件等を変化させて実験を行い、舗装の表面粗さの標高データからランナーの足の変位量の推定式の確立を目指す。そして、舗装の影響因子として、舗装の表面粗さのみならず、舗装の変形係数や摩擦も影響していることが考えられることから、これらの性質も含めて評価式の構築を行うことが必要である。さらに、舗装側の影響因子のみならず、ランナーの着地方法や走行速度、シューズソールの素材の硬軟や底面のテクスチャなど、ランナー側の因子も加味した評価式を構築する必要がある。
- 2) ランナーが舗装に対して感じる走行時の快適性は、本研究で着目した着地衝撃のみならず、着地時および蹴り出し時のすべり抵抗性や足元の安定性も加味して、総合的な評価が必要である。さらに、足裏で感じた感触のみならず、五感である目や耳から感じとった感触も加味する必要もある。
- 3) ランナーの足首に生じる着地衝撃の大きさに関しては、9軸のモーションセンサを用いて加速度ピーク値で評価する方法を提案した。舗装種類による影響は見られたものの、舗装の変形係数といった定量的な値との関係性は明らかにできていない。よって、舗装の変形係数のみならず、摩擦や表面粗さなど、他の性質との関係性も明らかにする必要がある。そして、本研究では着地衝撃が最も大きく生じる踵に近い踝の上部で計測を行った。しかし、人間には足裏や関節にバネを有するため、今後、測定位置も含めて測定手法を検討する必要がある。

7.4 今後の展望

本研究によって、ランナーが着地衝撃を小さいと感じるアスファルト舗装の影響因子として舗装の表面粗さに着目する必要性を明らかにした。その成果を踏まえて今後の発展の可能性を展望する。

- 1) ランナーが走りやすいと感じる舗装の評価が可能となる。

マラソンなどの道路競走で用いるコースのアスファルト舗装に対して、舗装の表面粗さを測定することによって、ランナーが快適に走行できるか否かの評価が可能となる。近年、交通規制を伴わない舗装の表面粗さを測定できる車両型の計測機器があることから、このような計測機器を用いて、コースを事前に測定し、表面粗さデータより接触深さを算出することで、ランナーの走りやすい舗装を定量的に評価することが可能であると考えられる。

- 2) ランナーが走りやすいと感じる舗装の構築が可能となる。

舗装の表面粗さに影響していることが明らかになったため、ランナーが着地衝撃を小さいと感じる接触深さの最適範囲を満足するよう、マラソンコースや練習時のコースに舗装を構築することで、ランナーは

快適に走行することができ、最大限のパフォーマンスを発揮でき、かつランナーの疲労や障害の低減が期待される。

3) ランナーの着地衝撃の計測を簡易に行える。

ランナーの足に生じる着地衝撃の計測は、床反力計や足圧計、筋電位計測器など高価な計測機器を用いて行われていたため、簡易に計測を行うことが難しかった。本研究で提案した上記の計測機器に比べて安価なワイヤレス 9 軸モーションセンサを用いることで、簡易に測定機器の取り付けることができ、かつ、走動作に不自然さを感じさせないため、普段のランニングやジョギング時に着地衝撃を計測することが可能となる。着地衝撃を計測することで、ランニングフォームや疲労度合いを推定できると考えている。

謝辞

本論文は、筆者が日本道路株式会社技術研究所および山口大学大学院創成科学研究科環境共生系専攻博士後期課程へ在職中に行ったランナーの走行時の快適性に関する研究成果を取りまとめたものです。

本研究を進めるにあたり、主査の中島伸一郎准教授より、丁寧かつ熱心なご指導を頂きました。中島准教授には、学部生のときに舗装という分野に出会うきっかけを頂き、多くの苦悩を乗り越えなければならないことを含めた研究の楽しさを教えてくださりました。それが博士後期課程を目指すきっかけとなり、博士後期課程入学後は本研究を通じて、読者に伝わる文章の書き方と説明方法から、研究および実験の理論的根拠の重要性や多角的に物事を見ることの必要性まで、幅広く、研究者としてのあるべき姿を丁寧に教えて頂きました。学生時代を含め、中島准教授の元で研究に携わった6年間は、今後の研究を進める上での大きな糧になります。深く感謝の意を表します。また、本論文の作成に当たり、有益なご指導とご助言を賜った、清水則一教授、麻生稔彦教授、中田幸男教授、吉武勇准教授には、貴重なご意見とご助言を頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

そして、在職のまま、このような貴重な機会を与えて頂きました社長 久松博三氏をはじめ役職員の皆様方には、深く感謝の意を表する次第です。専務執行役員 石井敏行氏には、本研究の進捗状況や内容を気にかけてくださり、さらに本研究と関連する陸上競技場の補修工事に従事する機会を設けて頂き、机上のみならず、現場にて、目で見て、肌で感じたことにより、本論文にオリジナリティを持たせることができました。また、技術研究所前々所長 濱田幸二氏（現、日本道路建設業協会 道路試験所所長）には、私に対して、社内において研究所への道を開いてくださり、研究の進み具合など気にかけて頂きました。皆様には心より感謝を申し上げます。

本研究は、日本道路（株）技術研究所前所長 中原大磯氏（現、株式会社レインボーコンサルタント社長）から、ランナーが走りやすい舗装の開発という課題をいただいたことにより始めることができました。上司の遠藤桂博士からは、研究のバックアップだけでなく、ご自身の学位取得の時の経験など教えていただきました。常日頃から相談や悩みを聞いて頂き、また温かく見守って頂きました。執行役員技術研究所所長 荒尾慶文氏をはじめとする技術研究所、本社営業二部、本社技術営業部、関東技術センター、株式会社レインボーコンサルタント、京浜サンロード株式会社、城南営業所、その他社内外の皆様方には、深く御礼申し上げます。

さらに、本研究はアンケート調査のフィールドの施工に協力いただいた北海道支店道北出張所や北関東支店茨城営業所の協力会社の皆様や被験者の方々のご協力なくしては成り立ちません。アンケート調査にご協力をいただいた、順天堂大学の帖佐寛章名誉教授ならびに陸上競技部男子駅伝の監督および選手の皆様、今治造船株式会社陸上部の監督および選手の皆様には、貴重な練習時間を本研究の調査に当てて頂いたことを感謝いたします。さらに、一般ランナーを対象としたアンケート調査時にご尽力いただいた、株式会社東洋計測リサーチの山下彰会長と山下健太郎社長、社長の奥様と息子様、被験者となっていたいただいた特定非営利法人ニッポンランナーズのランニングチームの皆様を含め、調査にご協力いただいたすべての皆様に感謝いたします。

本研究を修論または卒論のテーマとして共同で実施して頂いた小澤将希氏、縞居公介氏、前畠大輝氏には、大量のデータの整理をして頂いたおかげで円滑に研究を進めることができました。その他、実験に協力いただいた清水・中島研究室の皆さんに感謝します。

最後に、大学へ入学することを温かく受け入れ、論文作成の間、陰ながら支え、励ましてくれた父、母、弟、祖母のみならず、中学や高校の同級生、大学の部活の先輩、同期、後輩にも、感謝の気持ちを贈ります。本当にありがとうございました。

このように、本論文は非常に多くの方々のご指導とご協力によりとりまとめることができました。改めて感謝の意を表し、本論文の謝辞とさせていただきます。

本研究の関連論文

(a)査読のある雑誌等

- (1) 著者氏名: 池田茜, 遠藤桂, 中島伸一郎
論文題目: 中長距離ランナーが走りやすいと感じる舗装のテクスチャ指標に関する研究
学術雑誌名: 土木学会論文集 E1 (舗装工学)
巻、号、頁: 75(2), pp.I_49-I_56
発行年月: 2019 年 12 月
(本文との関連: 第 3 章)
- (2) 著者氏名: 池田茜, 中島伸一郎, 小澤将希, 遠藤桂
論文題目: モーションセンサを用いたランナーの足首加速度の計測と舗装種別の影響
学術雑誌名: 土木学会論文集 E1 (舗装工学)
巻、号、頁: 76(1), pp.51-59
発行年月: 2020 年 10 月
(本文との関連: 第 4 章)

(b)査読のある国際会議の会議録等

なし

(c)その他

- (1) 著者氏名: 池田茜, 遠藤桂, 中島伸一郎
論文題目: 中長距離ランナーが走りやすいと感じるアスファルト舗装のテクスチャ指標に関する検討 (特集 道路環境の改善に寄与する舗装技術(2))
学術雑誌名: 舗装
巻、号、頁: 55(7), pp.30-35
発行年月: 2020 年 7 月発行
(本文との関連: 第 3 章)

