

令和元年6月19日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06498

研究課題名(和文) 生体情報による路面評価法を適用した土系舗装ベースの屋外歩行施設施工と評価

研究課題名(英文) CONSTRUCTION AND EVALUATION OF OUTDOOR REHABILITATION FACILITY BASED ON SOIL PAVEMENT APPLYING A ROAD SURFACE EVALUATION METHOD OF BIO-INFORMATION

研究代表者

鬼塚 信弘 (Onizuka, Nobuhiro)

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号：60270229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は下肢の筋電位や加速度の生体計測と舗装の硬さや舗装のすべり抵抗性の物理性状を関連付けた実験と解析を行い、路面の評価法を構築した。この評価法を適用して土系舗装をベースとした屋外歩行施設を施工し、リハビリテーション効果の有効性と屋外歩行施設舗装に繁茂する雑草状況についても検討した。その結果、下肢の筋活動は舗装の硬さとすべり抵抗係数の違いによって変化し、リハビリテーション効果もあることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、歩行している人の身体の働き、特に下肢を定量的に解析し協議検討を重ねることで、従来の舗装路面の性能評価法の中に、新しい評価項目として定量化した人の属性データを取り入れられる方向で成果をまとめた。実験材料はリデュース、リユース、リサイクルの3Rをなお一層の推進をしながら環境負荷の低減を図り、舗装の計画、設計、施工が実施できる工夫を凝らした。本研究が進むことによって、少子高齢化が進行して行く中で、人口を密集させた小都市の拠点を構築するコンパクトシティにおける健康維持増進のまちづくりにも貢献できるものとなるが、経年劣化による舗装材等の影響についてはさらなるデータの積み上げと議論が必要である。

研究成果の概要(英文)：We have studied the biological measurement using surface myoelectric potential sensors and accelerometers on a test site of pavements. In this study, new pavement in existing pavement is added and wireless equipment is introduced, denoising and normalizing using % maximal voluntary contraction on surface electromyogram is processed. The stiffness and the skid resistance of the road surface has evaluated its potential impact on lower legs. Information obtained these experimentally is compared with that provided by analysis. These discoveries formed a basis for the method of surface evaluation. An outdoor rehabilitation facility using soil paving materials to the surface evaluation method is constructed. Purpose of this experiment in the evaluat, it is examined the effectiveness of rehabilitation and growing state of weeds. As a result, the effectiveness of rehabilitation due to the difference of the stiffness and the skid resistance of the road surface has been clarified.

研究分野：地盤工学

キーワード：筋電位測定 路面評価法 土系舗装 屋外歩行施設 雑草繁茂要因分析 土質試験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に建設された日本のインフラは、老朽化が激しくなり更新期を迎えている。今日のインフラ整備で使用する材料は大量消費してきた当時のように全て新材を用いるのではなく、天然資源の消費を抑制し、リデュース、リユース、リサイクルの3Rを推進しながら環境負荷の低減を図り、再生材を主として用いる循環型社会への転換をしなければならぬ。日本の高齢化社会現象に目を向けると、総人口は2010年の約1億2800万人をピークに減少に転じ、65歳以上の老年人口が年々増加して少子高齢化が進行している。近年、体力や健康の維持増進のため、ウォーキングやジョギング・ランニング、散歩が行われているが、実施者は年齢が上がるほどウォーキング、散歩、ジョギング・ランニングの順が多い。また、運動・スポーツ実施場所は回答数の半数以上が公共スペースであり、このうち道路で行うのが約53%と答えている。つまり今後の道路建設などにおいて、モータリゼーションによって自動車利用が増加する利用形態の発展・多様化する考え方からの脱却が必要となり、社会変化に対応できるインフラ整備を行わなければならない（図1）。

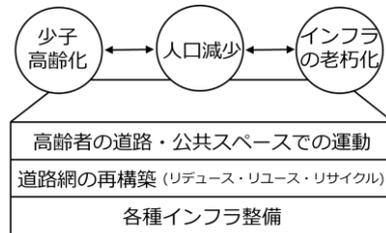


図1 社会変化に対応できるインフラ整備

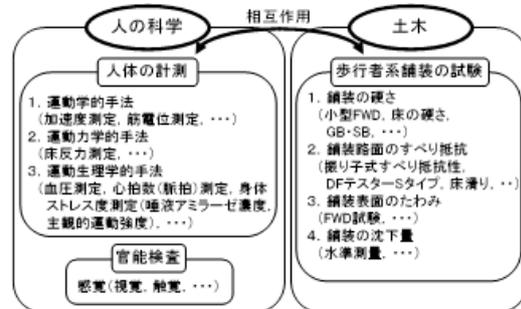


図2 人の科学と土木の複合的な評価

舗装の路面評価を構築するためには、人の科学と土木の複合的な評価が必要となる（図2）。利用者の満足度の度合いは主として歩き心地などの官能検査が行われている。小森谷らはアンケート調査及び舗装の硬さ・すべり抵抗性・平坦性の物理性状測定結果から良好な物理性状の範囲を示し、歩行者系舗装の歩きやすさに関する評価式を提案している。しかし、人の属性データは官能検査によるところが大きく、路面の評価を十分に満足しているとは言い難い。

### 2. 研究の目的

本研究は下肢の筋電位や加速度の生体計測と舗装の硬さや舗装のすべり抵抗性の物理性状を関連付けた実験と解析を行い、路面の評価法を構築し、さらに実際にその評価法を適用して土系舗装をベースとした屋外歩行施設を施工して、リハビリテーション効果の有効性についても検討することを目的とする。

1年目は、2013～2014年に約120Gの舗装硬さのアスファルト舗装などを試験施工した民間道路会社の敷地にて、60G～80G及び130G以上の舗装硬さの舗装を新規に施工する。また、下肢の筋電位測定は前脛骨筋や腓腹筋内側頭、腓腹筋内側頭を部位とし、その部位に表面筋電位の電極を取り付け、足首には加速度計を取り付けた生体計測により、舗装の物理性状と関連付けて解析することを目的とする。2年目は、既往の研究から1年目までに得られた研究成果を基に、下肢の筋電位と舗装の硬さ、下肢の筋電位と舗装のすべり抵抗性の評価式を構築し、路面の評価法を確立する。また、この評価法を適用し、本校に25G～50G程度の舗装硬さの土系舗装をベースとした屋外歩行施設を修繕しながら施工する。2年目で施工した屋外歩行施設において、歩行者の下肢の生体計測と舗装の物理性状を測定し、リハビリテーション効果の有効性と同屋外歩行施設の維持管理について検討することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 各種歩行路における下肢の筋電位測定

床の硬さ試験を舗装の硬さの指標として用い、密粒舗装上に60～80Gのゴムシートを敷いた舗装も含む衝撃加速度の測定を行った。また、舗装のすべり抵抗性は研究協力・支援者の民間道路会社自作の装置を借用した床すべり試験ですべり抵抗係数の測定を行った。被験者は男性4名、女性3名の計7名で、年齢は19歳から20歳の範囲で、同一の運動靴（MIZUNO、マキシマイザーWB3（8KA-33289））、革靴（HARUTA、6550）を履いて試験を行った。各被験者の下肢の左右足の前脛骨筋、腓腹筋内側頭及び外側頭に皿電極を取り付け、研究協力・支援者の民間道路会社の敷地にて試験施工した16種類の舗装上で、路面が乾いた状態と湿った状態で各12歩を5回ずつ測定した（図3）。自然な歩行になるよう歩行速度は規定せずに測定を行った。サンプリング間隔は2000Hzとした。被験者が硬いコンクリート舗装から軟らかい土系舗装までを歩行した時の下肢の筋電位測定と3方向の加速度計を左右足首に装着し、導出された筋電図と加速度を同期させた測定を研究代表者及び研究分担者が共同で行った（図4）。なお、試験装置一式は研究分担者が作製した。

#### (2) 屋外歩行施設における下肢の筋電位測定

本校の既存の屋外歩行施設と土系舗装を生かしながら、土系舗装をベースとした屋外歩行施設を修繕施工した。舗装は異なる路面を交互に配置し、被験者が舗装の硬さや舗装のすべり抵抗



図3 測定対象とした筋



図4 歩行時の筋電位測定



図5 12%勾配の傾斜部の盛土施工



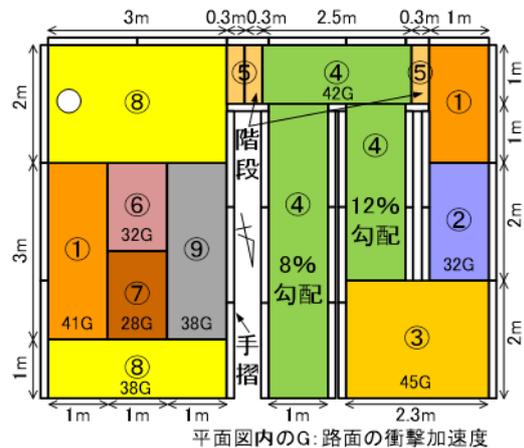
図6 屋外歩行施設修繕施工完成後  
(2017年11月)

抗性に順応しないように、工夫を凝らした(図5、図6)。3. (1)で用いた筋電位測定装置により、本校の屋外歩行施設内とその周辺の舗装路面で、下肢の筋電位測定を行った。屋外歩行施設舗装部の平面図を図7に示す。被験者は男性1名、女性2名の合計3名である。年齢は全員20歳で、同一の運動靴を履いて約0.52m/sの歩行速度で15分間行った。舗装路面は乾燥状態であり、舗装ごとの違いが明白になるように、路面を踏みしめながら歩行した(図8)。被験筋は両足の前脛骨筋、腓腹筋外側頭、腓腹筋内側頭と、両足首に取り付けた加速度・角速度・地磁気を観測できる9軸センサーである。

インターバルトレーニングにおいて、路面の硬さ(衝撃加速度)と周回別及び舗装別の筋活動の関係性を検討するために、両足の各部位に計測機器を取り付けた。図7の歩行施設を19歳の被験者4名が15分間歩いて測定した。

### (3) 屋外歩行施設の維持管理

本校の屋外歩行施設にて人の下肢の筋電位測定を行っており、同施設のコネプトの一つである維持管理を容易にすることを目指している。土系舗装に雑草が生えにくい焼黒土、おがくずや脱水ケーキなどを取り入れたが、施設そのものは維持できているものの、雑草が生えにくい舗装でも雑草が見られたため、舗装区画ごとに、土壌の物理試験や化学分析を行い、雑草の繁茂面積と比較しながら、雑草が繁茂する要因を検討した(図9)。



平面図内のG: 路面の衝撃加速度

- ① 焼黒土
- ② 山砂+ (脱水ケーキ+発泡ビーズ)
- ③ 山砂
- ④ 人工芝+再利用 EPS (平坦, 8%・12%勾配)
- ⑤ ゴムチップ+再利用 EPS
- ⑥ おが屑 (ヒノキ) + 山砂+脱水ケーキ
- ⑦ おが屑 (ベイツガ) + 山砂+脱水ケーキ
- ⑧ 山砂+EPS板
- ⑨ 6号碎石

図7 屋外歩行施設舗装部の平面図



図8 歩行の様子(被験者1)



図9 雑草が繁茂している様子  
(2016年5月)

#### 4. 研究成果

##### (1) 各種歩行路における下肢の筋電位測定

床の硬さ試験機 (JIS A 6519)、民間道路会社が自作した舗装のすべり抵抗性試験機により得られた舗装の物理性状の試験結果を表1、表2に示す。硬さ (G) の値が大きいほど舗装が硬く、値が低いほど軟らかいことを示すため、最も軟らかい舗装はおが屑入り舗装1で、最も硬い舗装は遮熱性舗装であることがわかる。また、すべり抵抗係数 (C. S. R) は値が大きいほどすべりにくく、値が低いほどすべりやすいことを示すため、乾燥路面は芝舗装が最もすべりやすく、遮熱性舗装およびウッドチップ舗装が最もすべりにくい舗装であることがわかる。湿潤路面では石板舗装が最もすべりやすく、遮熱性舗装が最もすべりにくい舗装であることがわかる。

表面筋電図法では測定する際にノイズが混入してしまうため、測定した筋電位 (生波形) に対して、ノイズ除去を行った。通常、筋電図には交流雑音や電極リード線が動作中に引っ張られるため、それぞれ 50Hz、10~20Hz のノイズが混入する。したがって、今回はコードの揺れや動作中の皮膚に貼り付けた電極のずれによる影響を highpass フィルター15Hz (低域遮断フィルター)、商用交流電源に由来する影響を notch フィルター50Hz によりノイズ除去を行った。

歩行を時間的要素に沿って観察する際の基本的単位で、片側のかかとが接地して再び同側のかかとが接地するまでの時期を歩行周期と呼ぶ。しかし本研究では足が路面から離れている遊脚期を除いての解析は精度が上がると考え、遊脚期を除いての1歩行周期を切り出す。筋電図からは歩行周期の開始点を特定できないため、あらかじめ記録しておいたフットスイッチにより歩行周期を特定する。

切り出した1歩行周期の筋電位から筋活動量を算出するため、もっとも広く用いられる解析パラメータである筋電図の平均振幅を計算した。平均振幅は Root Mean Square (RMS : 二乗平均平方根) (1)式により求めた。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

ここに、 $N$  : 1歩行周期間のサンプル数、 $x_i$  : 各時刻の筋電位 ( $\mu V$ ) である。振幅の増加は、運動単位の参加程度 (動員と発火頻度により規定される) が増したことを表し、活動電位を生み出す筋繊維が増加、すなわち筋力が増加していることを示す。したがって、舗装を歩いた時の RMS の値が大きいほど、筋活動量が増加していることがわかる。

筋活動量を表す RMS は個々で数値の桁が異なるため、被験者間や被験筋間で比較する場合には正規化する必要がある。本研究では表面筋電図法の代表的な正規化方法である 100%MVC 法により正規化を行った。これはある動作局面の筋活動量を、対象となる筋の最大随意筋収縮時の筋活動量に対する割合 (2)式で示す方法である。

$$\%MVC = \frac{1歩行周期のRMS}{最大筋収縮時のRMS} \quad (2)$$

ここで試験前にあらかじめ測定した最大随意筋収縮時のデータを用いる。得られた MVC 波形から最大振幅の前後1秒程度を対象区間に選択するため、本研究では、最大筋収縮時の RMS は筋電図の最大振幅の時間から前後、各被験者の歩行周期分の区間を対象とした。これにより、1歩行周期の筋活動量を、最大筋力と同じ時間発生させた際の筋活動量との割合でみることができる。

試験は片足6歩の歩行を行っているため、5つの歩行周期が生じる。また、1舗装につき5回の測定を行うため、1被験者・1舗装につき25の歩行周期のデータが取得できる。波形の乱れ等により測定結果には外れ値が混入するため、25歩行周期のデータの10%調整平均値を算出し、それを被験者ごとに行った。10%調整平均値とはデータの上限・下限からそれぞれ10%ずつ除外した平均値である。また、被験者が最大随意筋収縮時に本当に最大であるか疑いがあるため、全被験者の10%調整平均値を集計し、さらに10%調整平均値を計算し、舗装の物理性状に対

表1 床の硬さ試験結果

舗装種	衝撃加速度(G)
おが屑舗装1	27
芝舗装	29
土舗装	41
おが屑舗装2	43
ウッドチップ舗装	52
ゴムチップ平板25mm	59
ゴムチップシート7mm	71
人工芝舗装	83
木レンガ舗装	94
ILB舗装	107
透水性舗装	111
密粒舗装	118
ニート工法舗装	121
石板舗装	122
コンクリート舗装	124
遮熱性舗装	125

表2 床のすべり試験結果

舗装種	すべり抵抗係数(C.S.R) 湿潤路面
石板舗装	0.46
おが屑舗装2	0.57
おが屑舗装1	0.60
ゴムチップシート7mm	0.61
ウッドチップ舗装	0.63
土舗装	0.66
ILB舗装	0.67
ゴムチップ平板25mm	0.69
木レンガ舗装	0.70
芝舗装	0.70
透水性舗装	0.71
人工芝舗装	0.71
コンクリート舗装	0.72
密粒舗装	0.73
遮熱性舗装	0.74
ニート工法舗装	0.76

する筋活動量の値とした。

舗装路面の硬さの違いによる筋活動の変化の解析結果を図10および図11に示す。下肢筋活動は舗装路面の硬さの違いによって曲線的に変化する傾向を示した。前脛骨筋および腓腹筋の筋活動量は、衝撃加速度がおよそ70G~100Gの硬さの範囲で比較的小さく、その範囲より硬いほど、また軟らかいほど筋活動量が比較的大きくなる傾向があるといえる。これは舗装が硬い場合、路面からの反発力がより作用するために筋活動量が増加し、軟らかい場合には体勢を保つため踏ん張り、多くの筋が働き、筋活動量が増加すると考える。また、乾燥路面と湿潤路面を比べると乾燥路面では前脛骨筋、湿潤路面では腓腹筋がより使われていると考える。なお、左右で同様の傾向を示した。

舗装路面のすべり抵抗係数の違いによる筋活動の変化の解析結果を図12および図13に示す。下肢筋活動は舗装路面のすべり抵抗係数の違いによって直線的に変化する傾向を示した。前脛骨筋および腓腹筋の筋活動量は、すべり抵抗係数が高いほど比較的小さく、すべり抵抗係数が低いほど比較的大きくなる傾向があるといえる。すべりやすいほど体のバランスを保つために多くの筋が働き、筋活動量が増加し、すべりにくいほど摩擦力が働き、余分な力がいらず、安定した歩行ができるため筋活動量が減少すると考える。また、乾燥路面と湿潤路面は硬さの違いによる結果と同様である。なお、傾きは違うものの左右で同様の傾向を示した。

### (2) 屋外歩行施設における下肢の筋電位測定

ここでは1人の被験者の解析結果を示す。前後・上下・内外加速度と合成加速度の変化を表している(図14、図15)。合成加速度は両足ともに上下加速度が大きく反映し、左右の足で違いがみられ、右足の方が大きい結果となった。

本実験の解析では1人の被験者のデータを右足と左足に分けて解析を行った。周回別の筋活動では左足の腓腹筋外側頭は減少していたが、腓腹筋内側頭の中央周波数は両足ともに上昇していた。また、前脛骨筋は両足ともに減少していた(図16)。舗装別の筋活動では、TP(筋の活動量)1周目、TP7周目を比較すると、1周目は路面の衝撃加速度が大きいほどTPが大きくなることを確認できた(図17)。しかし、7周目になると、逆にTPが小さくなることを確認できた。

### (3) 屋外歩行施設の維持管理

図18の土壌硬度では測定日によって値は異なるが、その傾向は類似している。2018年9月28日の土壌硬度は最も低い値となったが、測定前日に雨が降り、自然含水比が高く土壌が軟らかくなったことが要因として考えられる。おがくずを配合している舗装区画4と5はC/N比が30以上の結果を示した(表3)。6~8月上旬にかけて舗装区画1a、2、6aが他の舗装に比べて雑草が非常に多いことがわかる(図19)。3つの舗装区画は建物の手前にあるため、年間を通してあまり日が当たらないところである。また、本フィールドがある地域は2017年春には南西の風向きが多く、学内の植物の種子などが飛来している可能性がある。最も雑草が少ない舗装区画は6bであり、日当たりがとてもよく、EPS板を入れた舗装構造からして、常に土壌が乾いていたため、雑草を繁茂するための水分が足りていなかったと考えられる。舗装区画4、5の舗装も雑草が少なく、図19でもみられたように、おがくず舗装のため、C/N比が高いことが要因として考えられる。

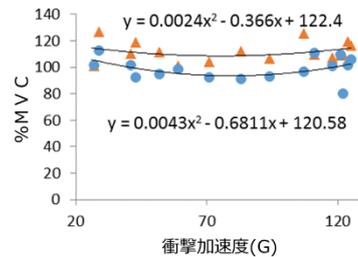


図10 硬さの違いによる革靴での右下肢前脛骨筋の筋活動変化

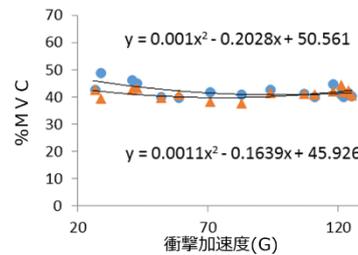


図11 硬さの違いによる革靴での右下肢腓腹筋の筋活動変化

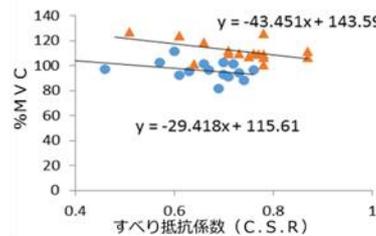


図12 すべり抵抗係数の違いによる革靴での右下肢前脛骨筋の筋活動変化

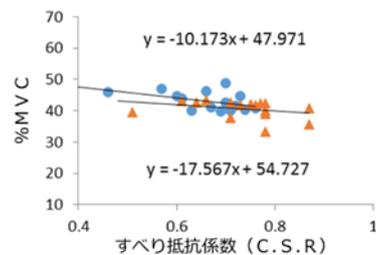


図13 すべり抵抗係数の違いによる革靴での右下肢腓腹筋の筋活動変化

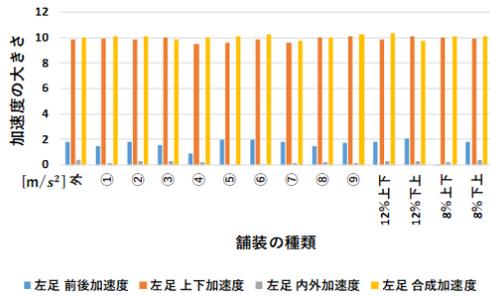


図1 4 舗装別の被験者左足の各加速度の変化

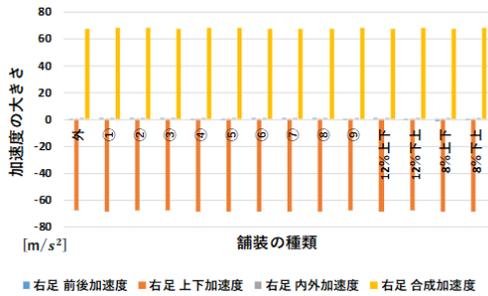


図1 5 舗装別の被験者右足の各加速度の変化

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

①鬼塚信弘、平野晴也、多田悟士、沢口義人、歩行者系舗装の物理性状と筋活動の定量的評価に関する研究、土木学会土木学会論文集 E1 (舗装工学)、査読有、No. 3 (舗装工学論文集)、2016、I\_37-I\_45

②鬼塚信弘、小川維、多田悟士、屋外歩行施設の土系舗装に繁茂する雑草の要因分析、地盤工学会第12回環境地盤工学シンポジウム論文集、査読有、2017、407-410

[学会発表] (計4件)

①鬼塚信弘、河野小春、今野優太、土壌の物理試験と炭素窒素比から見た土系舗装の雑草繁茂面積の比較、地盤工学会第54回地盤工学研究発表会、2019.7.16、大宮ソニックシティ (埼玉県)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件) ○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：沢口 義人

ローマ字氏名：SAWAGUCHI Yoshihito

所属研究機関名：木更津工業高等専門学校

部局名：電子制御工学科

職名：准教授

研究者番号：50455119

研究分担者氏名：楠部 真崇

ローマ字氏名：KUSUBE Masataka

所属研究機関名：和歌山工業高等専門学校

部局名：生物応用化学科

職名：准教授

研究者番号：40403761

(H30 から研究分担者として参画)

表3 C/N結果

舗装区画	N(%)	C(%)	C/N
1a	0.2	3.76	18.8
1b	0.22	3.89	17.7
2	0.01	0.05	5
3	0.009	0.05	5.6
4	0.01	2.02	202
5	0.02	1.85	92.5
6a	0.01	0.12	12
6b	0.01	0.07	7

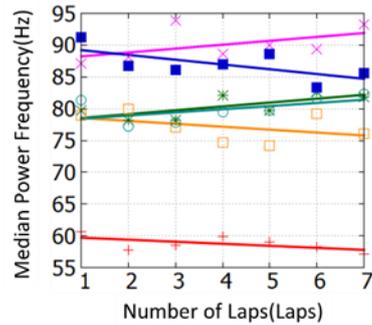


図1 6 周回ごとの中央周波数

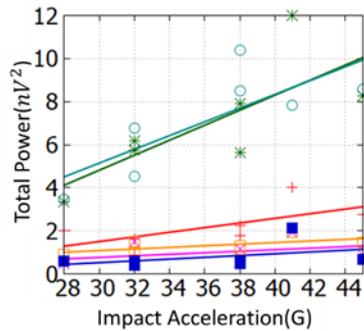


図1 7 路面の衝撃加速度とTP1 周目

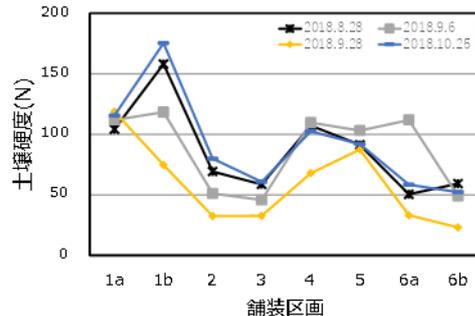


図1 8 プロクターニードル試験結果

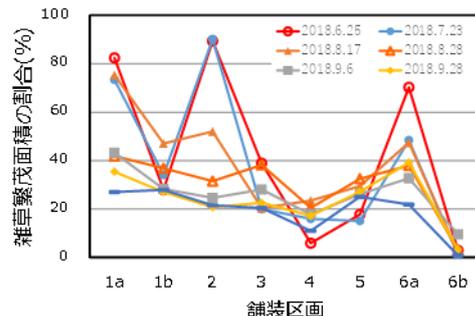


図1 9 画像解析結果