

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420184

研究課題名(和文)自動車用タイヤの放射騒音と転がり抵抗を同時に低減する基礎技術の開発

研究課題名(英文)Development of Technology Reducing Tire Radiation Noise and Rolling Resistance Simultaneously

研究代表者

石濱 正男(Ishihama, Masao)

神奈川工科大学・創造工学部・教授

研究者番号：20298277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：路面からの加振によるタイヤ構造振動と騒音の数理的モデル化をほぼ完成した。また、路面接触による空力的ポンピング音の発生数理モデルを構築した。これにより、タイヤの主要諸元、構造設計要素、路面凹凸の放射騒音への影響予測が従来よりも正確にできるようになった。素性の良い次世代タイヤの方向を定めることができるようになった。さらに、非ニュートン性減衰材をトレッド内に貼付して、転がり抵抗を増やさずにタイヤ振動を低減する新技術を開発した。これにより、環境と安全両性能に優れた次世代タイヤ像として、大径・細幅・高圧タイヤを提示することができた。また、その実力を評価し、その正当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Mathematical modeling of tire structure vibration and radiation noise by road surface excitation has been achieved. Also, a mathematical model of aerodynamic pumping sound generation by road surface contact was constructed. As a result, more accurate prediction of the influence of main tire dimensions, structural design factors, and road surface roughness on radiated noise became possible. Further, a new technology was created to reduce tire vibrations without increasing the rolling resistance by placing non-Newtonian damping material inside the tread. As a result, creation of the next generation tire concept having large diameter, narrow width and high inflation pressure superior in both environmental and safety performance. The design concept was confirmed its validity through experiments.

研究分野：自動車の振動騒音

キーワード：自動車 タイヤ C02 騒音 転がり抵抗 モデル化 振動

1. 研究開始当初の背景

わが国は次のような環境・安全問題を抱えていた。すなわち、CO2 発生総量削減、騒音の環境基準の達成率不十分、雨天時の交通事故増大である。また、ハイブリッドも含めて電気自動車の普及が進んでも、タイヤ転がり抵抗と放射騒音の低減は見込めないで、これらの課題解決のめどがたっていない。

その原因は、タイヤの転がり抵抗削減、濡れた路面でのグリップ向上、放射音低減に直接かかわるタイヤと路面の接触現象の解明と、それによるタイヤ振動騒音発生の予測技術が十分でなかったことであった。また、これら三性能は相互にトレードオフの関係にあるとされてきていた。

例えば、タイヤ放射音研究は、マイク配列を使って音源の位置を計測する間接的な研究や、種々のタイヤの騒音の統計的分析による研究にとどまっていた。タイヤ振動の様子を直接的に解析する研究は欧州でのわずかな試行を除くと、わが国ではほとんど存在しない。ましてや、タイヤ構造設計から高周波振動や騒音を予測する研究は、応募者の研究以外にはほとんど発表されていなかった。

振動騒音予測手法と言う観点から見ると、従来は定在波の存在を仮定するモード解析や、モード解析を基礎とする統計的エネルギー解析 (SEA) が弾性体の振動解析の主流であったが、タイヤ構造を伝播し、減衰の比較的大きい高周波振動解析には役立っていなかった。

タイヤ振動騒音現象解析の困難さは、対象がゴム、スチールワイヤー他の積層による複合構造であること、定在波ではなく時系列波動伝播現象であること、接触による非線形現象であること、内圧で形状を保つ張力構造であることに根差していて、いずれにも十分な知見が得られていなかった。

2. 研究の目的

- 1) タイヤへの路面凹凸からの加振入力計算モデルの構築
- 2) 1kHz 近辺の高周波伝播現象を予測するタイヤの複合構造有限要素モデル構築
- 3) 転がり抵抗を低減できる低損失ゴムとタイヤ内に貼り付ける圧電素子によるセミアクティブ振動制御の成立性の、シミュレーションによる予測と模型実験確認
- 4) 圧電素子による接地変形歪からのエネルギー回生を使った転がり抵抗低減の、シミュレーションによるポテンシャル予測と模型実験確認

3. 研究の方法

3.1 タイヤへの路面凹凸からの加振入力計算モデルの構築

(1) 典型的な路面凹凸に対するタイヤトレッドの変形計測解析

3次元形状測定システムにより、図1のような計測法を開発し使用した。

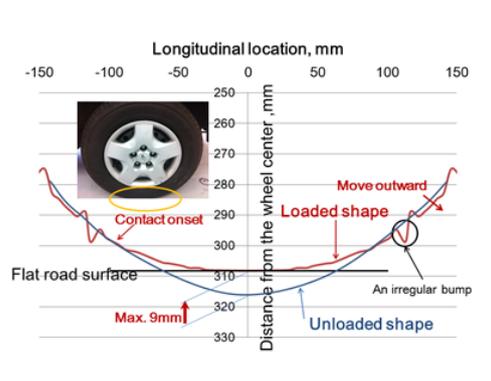


図1 本研究で開発した路面との接触によるトレッドのマクロな変形計測法

(2) 典型的な路面凹凸とタイヤトレッドの接触変形有限要素モデル開発

路面とタイヤの実接触状況を、感圧試験紙と画像処理によって数量的に求める方法を開発して使用した。(図2)

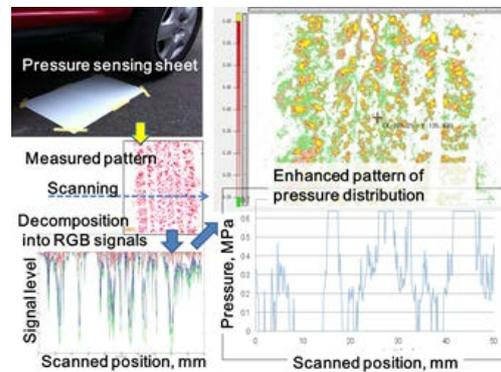


図2 開発した路面突起との接触圧力計測法

(3) 突起による変形予測モデル開発

内圧による張力を受けるスチールベルトで支えられるトレッドゴムと突起の摩擦接触を、逐次にメッシュをスライドさせる非線形有限要素計算法を使用して開発して使用した。(図3)

非線形接触解析有限要素モデル

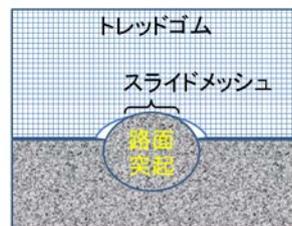


図3 応用した非線形接触解析有限要素法

(4) 突起によるトレッドの局部変形計測法開発

レーザー光を透明路面の下方から照射し、突起により持ち上げられたトレッド表面の3次元計測をする技術を開発した。(図4) これを用いて接触変形非線形有限要素モデルを検証した。

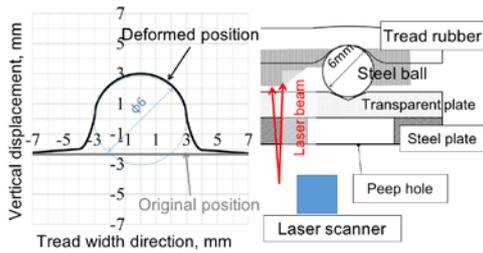


図4 開発した突起によるトレッド変形のレーザー3次元スキャニング法

3.2 ポンピング音の音源となるトレッド上の溝部分の空気流動発生モデル構築

接地によるトレッド上の溝変形をレーザー計測で定量化し、計算流体力学の境界条件として与える手法を開発し使った。(図5) タイヤ変形の計測結果を基に、タイヤ構造有限要素モデルを検証し、計算により溝から出入りする空気量と発生タイミングや路面との関係を計算できる

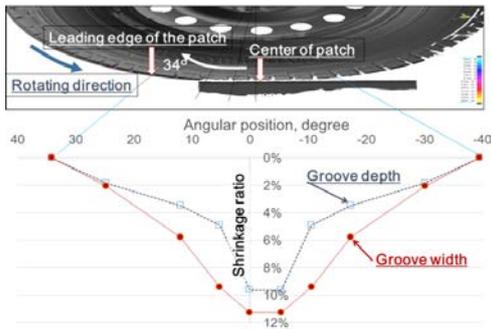


図5 開発したレーザーによるトレッド溝変形計測手法とその結果の一例

3.3 タイヤ構造中の振動音響波の伝播解析手法構築

(1) 転動中のトレッド表面振動伝播計測法の開発

車軸と一緒に運動するサスペンション下端に治具を取り付け、シャシダイナモローラー上で転動するタイヤ表面の振動を、レーザー変位系により計測する方法を開発し使った。

(2) 転動中のトレッド振動とタイヤ空洞内音圧の計測システム開発

車輪の空洞側リム面に増幅器、無線送受信器を装着しマイクロホンと加速度センサーを駆動するシステムを開発使用した。(図6)

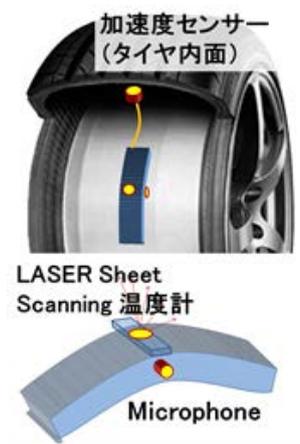


図6 開発した転動中のトレッド振動と空洞内音圧計測システム

(3) タイヤと同様な積層構造を有する平板有限要素モデルでの波動伝播解析

複雑なタイヤ形状や内圧・回転の影響を排除した計算モデルを開発し使った。(図7)

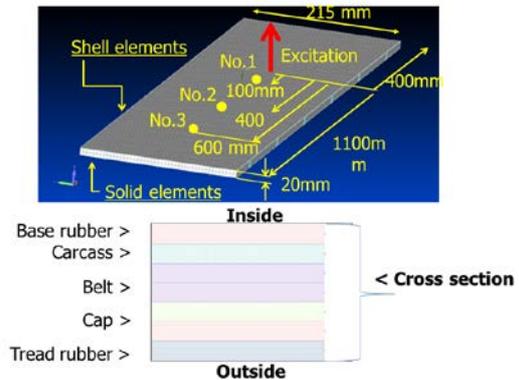


図7 開発した積層複合材のタイヤトレッド有限要素モデル

(4) 複合構造タイヤ有限要素モデルによる路面接触による入力から発生する構造振動伝播シミュレーション手法の開発

上記のほとんど全ての知見を活用し、時系列で突起からの強制速度入力による波動の発生と伝播を計算できるモデルを開発した。(図8)

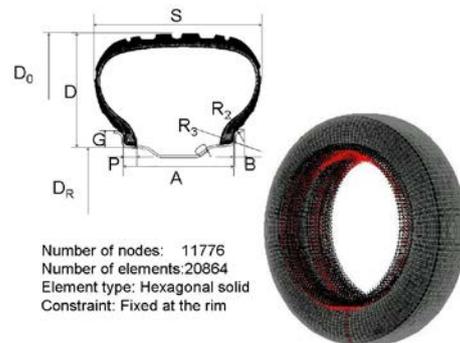


図8 開発した波動伝播予測有限要素モデル

3.4 タイヤの放射騒音と転がり抵抗の両方の低減を実現するアイデア検討手法

(1) 圧電素子を利用した転がり抵抗エネルギーのアクティブ制振への電子回路シミュレーション

路面接触による変形から電力としてエネルギー回生を行い、その電力によってトレッド振動を逆圧電効果によって制振する可能性を、電子回路によって検討した。(図9)

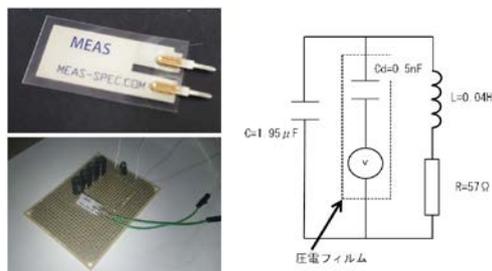


図9 使用した圧電素子と回路

(2) 発明支援法 TRIZ の利用

トレッドの減衰について、振動伝播、転がり抵抗の両立方法を、発明支援技術であるTRIZを使い、時間的、場所的な分離原理と非線形原理を使用してアイデアを創出した。

4. 研究成果

4.1 タイヤへの路面凹凸からの加振入力計算モデルの構築

(1) 突起によるトレッドの局部変形の数理モデル構築

突起貫入によるトレッド、ベルトの変形と応力分布を非線形接触有限要素モデル(上述)で計算できた。(図10) この結果、トレッドゴムにより突起による局部的荷重は分散されてスチールベルトに伝達されること、分散はトレッドゴム厚さにより広がること、トレッド溝により狭くなることなどが判明した。ベルトへの荷重分布はタイヤ構造全体への振動伝播速度と様態を決めるので、タイヤと路面の総合最適化にとって重要な知見である。

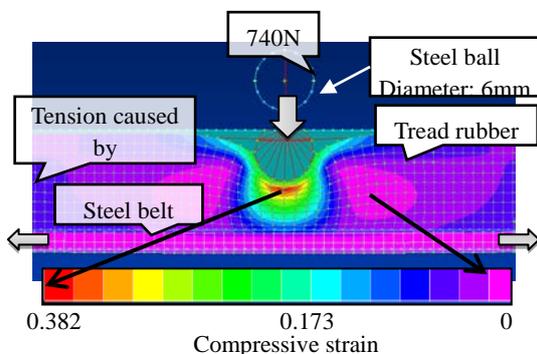


図10 突起のトレッド貫入による応力分布

局部変位はガウス関数(式1)で近似できることを明らかにした。この変位の時間的変化、つまり微分もガウス関数となり、またそ

のフーリエ変換も周波数のガウス関数となるので、取扱いが非常に便利である。

$$f(x) = A + B \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (1)$$

また、複数の突起が近接して存在するときの変形も、このガウス関数の加算で近似することも明らかにし、実路での応用の高さを確認した。(図11)

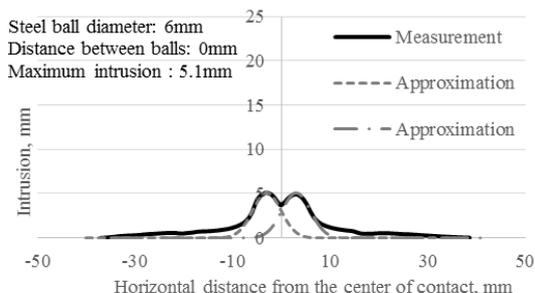


図11 複数突起貫入変形のガウス関数近似

4.2 ポンピング音の音源となるトレッド上の溝部分の空気流動発生モデル構築

路面との接触によるトレッド溝の変形を有限要素解析により計算し、その変形を計算流体力学での強制速度入力として与える方法で、路面付近にトレッド溝が存在する状態での流れ場を計算した。(図12) その結果、溝から間欠的に出入りする空気流の発生原因は、溝深さよりも幅の変化速度によるものとの新しい知見を得ることができた。この空気流量も定量的に得られ、ポンピング音の音源モデルが構築できた。さらに、空気流の方向やトレッド変形の影響も予測できるので、ポンピング音が小さいタイヤ設計にも活用できる。

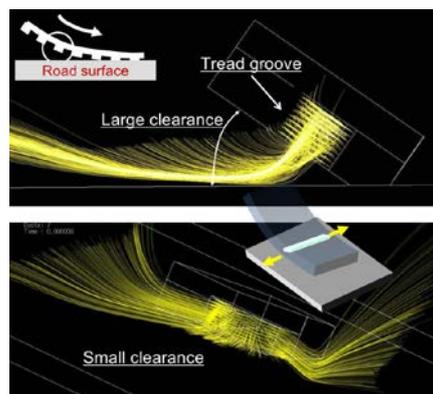


図12 路面との接触変形によりトレッド溝から排出される空気流の計算結果

4.3 タイヤ構造中の振動音響波の伝播解析手法構築

(1) 転動中のトレッド表面振動伝播計測法の開発

車輪と一緒に上下運動するサスペンショ

ンメンバーに装着し、動吸振器などで制振をした治具からレーザースキャニングをする方法を開発した。(図 13) これを使うと、表面波の伝播速度が計測でき、既知であるトレッドの質量密度からトレッド動剛性が推定可能となった。(図 14)

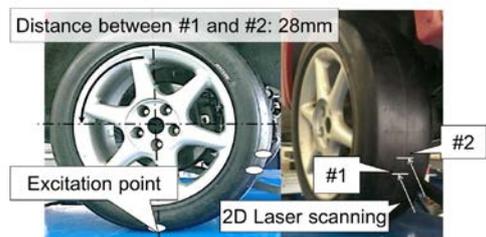


図 13 開発したトレッド表面振動伝播計測技術

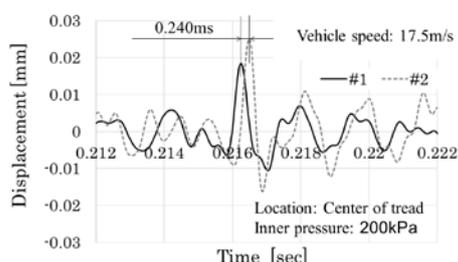


図 14 路面接触加振部位から近いトレッド上の 2 点間の振動計測による伝播速度推定

(2) 転動中のトレッド振動とタイヤ空洞内音圧の舗装劣化モニターへの応用検討

本研究で開発したタイヤ空洞内マイクとトレッド内面加速度計測技術により、実路面走行中の音響振動データを得ることができた。(図 15) タイヤ設計と路面の総合最適化による放射騒音・転がり抵抗・濡れた路面でのグリップなどの向上への手掛かりが得られ、さらに劣化初期の舗装修理により、道路の維持管理予算の大幅削減も期待される。

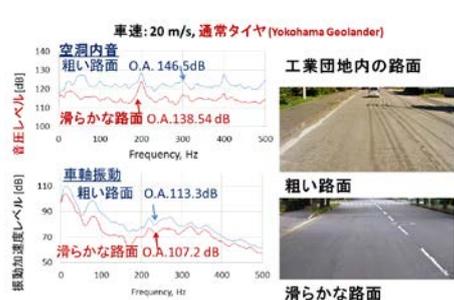


図 15 空洞内音圧とトレッド内面振動計測による舗装劣化の計測事例

(3) 複合構造タイヤ有限要素モデルによる路面接触による入力から発生する構造振動伝播シミュレーション手法の開発

開発した路面突起からの入力モデルと複合積層構造のタイヤ有限要素モデルを使って、単一突起や複数突起との接触によりタイヤ構造を伝播する振動を時系列で計算する

ことができた。(図 16) その結果、1kHz 付近の高周波波動がトレッドに沿って先に伝播し、その後に 100Hz から 200Hz の中周波波動が伝播することがわかった。また、これらの波動伝達速度や構造学的考察から、タイヤ構造は曲げ剛性よりも内圧による張力で支えられる構造体であることも再確認された。

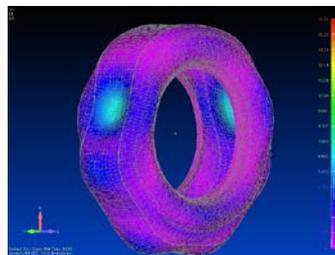


図 16 積層複合構造タイヤ有限要素モデルによる高周波振動伝播シミュレーションの例

4.4 転がり抵抗の増大なしの放射騒音低下

(1) 発明原理の応用による非ニュートン減衰材活用設計法の創出

基礎検討を行った圧電素子による電力回収と振動減衰方法は、圧電素子の剛性がトレッドゴムに対して高過ぎて変形に追従できないことが判明した。そこで、より単純な改善のアイデアを創出した。それは、①トレッドゴムの減衰を比較的小さくしておく。②転がり抵抗への寄与が小さいトレッド中央部に限って振動減衰を大きくする。③路面との衝突による加速度が最大となる接触開始部に限って減衰を大きくするという考え方である。(図 17) この考えを実現する材料として、高分子の中に粒子を分散させ、大加速度下で高分子と粒子が絡み合うことで減衰が急激に変化する「非ニュートン減衰材」(図 18)を採用し、トレッド内面に貼付した。

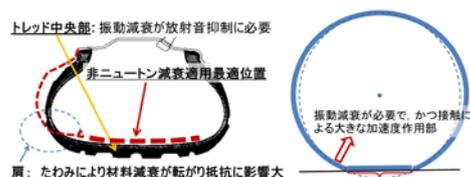


図 17 特定部位と特定タイミングに限定して減衰を大きくするアイデア

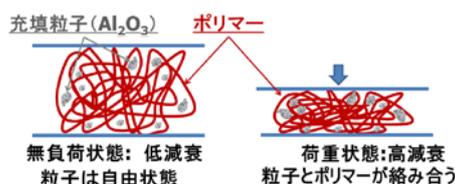


図 18 大加速度下での非ニュートン減衰

(2) 実験検証結果

乗用車に非ニュートン減衰材をトレッド内面に貼付したタイヤを装着し、標準タイヤおよび減衰材と同一質量のゴム板添付タイヤと、ローラー上の突起乗り越し時の車軸に

作用する力で比較評価した結果、振幅が確実に低減することがわかった。(図 19) さらに、これらのタイヤの転がり抵抗を、ISO 標準の試験機で比較評価したところ、転がり抵抗は殆ど変化しないことが確認された。(図 20)

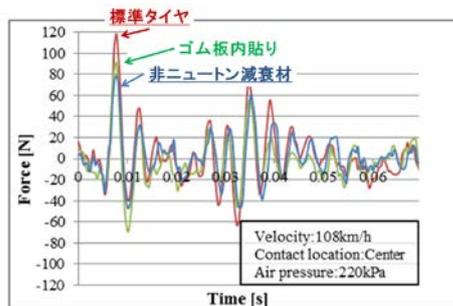


図 19 非ニュートン減衰材応用によるタイヤ振動低減効果 (車軸荷重で評価)

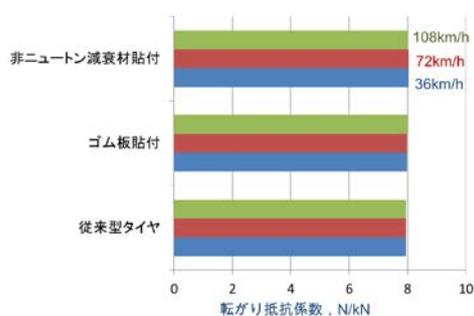


図 20 非ニュートン減衰材応用による転がり抵抗への影響

4.5 研究成果のまとめ

以上のように、タイヤ放射騒音現象の解明と予測計算モデル化は予定通り進んだ。転がり抵抗の増大無しに放射騒音を低減する試みは、当初の電気的方法の成果はでなかったが、非ニュートン減衰の応用と言う異なる方法で目的を達成できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 7 件)

① Masao Ishihama 他 10 名, Perspective of Technology Development for Improving Tire NVH and Accompanying Performances, 自動車技術会 2017 年春季大会講演論文 s171071, 2017 年 05 月 24 日, パシフィコ横浜

② Keisuke Matsumoto, Masao Ishihama, Kohsuke Miyoshi 他 2 名, Tread Vibration Analysis by Measuring Tread Vibration in Rolling Conditions, 自動車技術会 2017 年春季大会講演論文 s171072, 2017 年 05 月 24 日, パシフィコ横浜

③ Kosuke Miyoshi, Masao Ishihama,

Keisuke Matsumoto, 他 3 名, Experimental Evaluation of Next Generation Tire Technology Represented by Large Diameter, Narrow Width and High Inflating Pressure, 自動車技術会 2017 年春季大会講演論文 s17077, 2017 年 05 月 24 日, パシフィコ横浜

④ 石濱 正男, タイヤ振動騒音研究最前線, 自動車技術会振動騒音シンポジウム講演論文 20164695 No.06-16 p.41~46, 2016 年 12 月 02 日, 中央大学駿河台記念館(東京都千代田区)

⑤ Masao Ishihama, Keisuke Matsumoto, Kohsuke Miyoshi, Kuniaki Yoshii, Motohiro Kanda, Tire Cavity Sound Measurement for Identifying Characters of Road Surfaces and Tire Structures, 国際騒音制御学会 Internoise 2016 (国際学会) 講演論文 No.391, 2016 年 08 月 22 日, Congress Center Hamburg, ドイツ, ハンブルグ市

⑥ Keisuke Matsumoto, Masao Ishihama, Kohsuke Miyoshi, Yuhdai Komagamine, Analysis of High-frequency Vibration Wave Propagation on Tire Tread Using a Laser Displacement Sensor and FEM Simulation, 自動車技術会 2016 年春季大会講演論文 No. s161401, 2016 年 05 月 25 日, パシフィコ横浜

⑦ Kohsuke Miyoshi, Masao Ishihama, Yuhdai Komagamine, Itsuki Satoh, Keisuke Matsumoto, Evaluation of Harshness and Road Noise of Next-generation High Inflation Pressure and Large Diameter Tires, 自動車技術会 2016 年春季大会講演論文 No. s161406, 2016 年 05 月 25 日, パシフィコ横浜

[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]

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石濱 正男 (ISHIHAMA Masao)

神奈川工科大学 創造工学部 教授

研究者番号: 20298277