

路面の特性と車両走行性の関係を考慮した路面設計手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）

研究担当者：久保和幸、渡邊一弘、井谷雅司

【要旨】

平成 13 年に性能規定化された「舗装の構造に関する技術基準」が制定され、道路管理者は必要な性能指標とその値を決定することとなった。舗装の設計は、一般に路面設計と構造設計に分けて行われることになり、路面設計においては、道路利用者や沿道住民によって要求される路面の機能や路面への具体的なニーズを踏まえて、求める舗装の性能指標を設定していくことが道路管理者に求められる。近年の環境意識の高まりから自動車メーカーやタイヤメーカーにおいて CO₂ 排出抑制の取組が進められているが、舗装分野においてはその転がり抵抗の測定手法も開発されておらず、自動車の燃費を考慮した路面設計はなされていない。このような車両走行性の観点からは、表層の使用材料の選定を通じた路面のテクスチャを考慮することが路面設計の段階で可能である。

そこで、本研究では、路面のテクスチャに着目したタイヤの転がり抵抗を測定する手法を提案し測定を行うと共に、新たな手法による路面のテクスチャの測定を通じ、路面のテクスチャとタイヤ/路面騒音やすべり摩擦抵抗との関係の把握し、車両走行性を考慮した路面設計手法の検討を行った。その結果、転がり抵抗測定手法に関しては、非駆動輪の転がり抵抗を走行中に測定する平均牽引力測定法を開発した。また、路面のテクスチャ測定手法に関しては、面的なテクスチャ測定結果との検証の結果や実路での適用性より、CTメータを用いた方法による測定が妥当であることを示した。車両走行性を考慮した路面設計手法に関しては、騒音低減機能を求める場合、舗装種別毎に路面のテクスチャを踏まえた設計手法を示した。

キーワード：舗装、路面設計、テクスチャ、転がり抵抗、騒音、すべり摩擦抵抗

1. はじめに

舗装の設計にあたっては、道路管理者は必要な性能指標とその値を決定する必要がある¹⁾。舗装の設計は、一般に路面設計と構造設計に分けて行われ²⁾、路面設計においては、道路利用者や沿道住民によって要求される路面の機能や路面への具体的なニーズを踏まえて、求める舗装の性能指標を設定していくことが道路管理者に求められることになる。近年の環境意識の高まりから自動車メーカーやタイヤメーカーにおいて 2010 年 1 月に（社）日本自動車タイヤ協会によりタイヤの転がり抵抗に関する性能も加味したラベリング制度が開始される³⁾など CO₂ 排出抑制の取組が進められている^{4) 5)}。しかしながら、舗装分野においては実道等を対象とした車両の走行抵抗に関する検討事例^{6) 7)}等はあるものの、舗装路面に着目した転がり抵抗の測定手法も開発されておらず、自動車の燃費を考慮した路面設計はなされていない。このような車両走行性の観点からは、表層の使用材料の選定を通じた路面のテクスチャを考慮することが路面設計の段階

で可能である。

そこで、本研究では、路面のテクスチャに着目したタイヤの転がり抵抗を測定する手法を提案し測定を行うと共に、新たな手法による路面のテクスチャの測定を通じ、路面のテクスチャとタイヤ/路面騒音やすべり摩擦抵抗との関係の把握し、車両走行性を考慮した路面設計手法の検討を行うものである。

2. 路面のテクスチャに着目した転がり抵抗の測定

2.1 測定手法の提案

自動車の燃費測定は、転がり抵抗も含めた走行抵抗を計測するものであるが、シャンダイナモ上やテストコースにおいて測定されている⁸⁾ (写真-1)。また、タイヤラベリング制度におけるタイヤの転がり抵抗の測定では、タイヤを測定機であるドラムに接地させ回転させ、得られた測定値を換算し、転がり抵抗を求めることとされている⁹⁾ (写真-2)。しかし、路面の観点から転がり抵抗を検討する際は、テストコースを全面打換えることは現



写真-1 シャンダイナモ試験 写真-2 タイヤドラム試験

実的でなく、またドラム状のものに各種の路面を貼り付けることも困難である。そこで、路面の種別に応じて転がり抵抗に差があるのかを調べるべく、以下の測定手法を提案した。

① 平均牽引力測定法

前輪駆動の普通自動車の左後輪に車軸にかかる6方向の力 (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z) を計測できる測定器を取り付け (図-1)、一定速度となるように同一路面上を運転しながら対象路面を走行した時に当該輪にかかる抵抗力 (F_x : 転がり抵抗力) を測定する。当該力は、輪荷重となる鉛直方向の力 (F_z) に比べて微小であること、また各種路面間の差も微小であると考えられること、及び実走速度のばらつきの影響を軽減するため、測定間隔 (サンプリング間隔) を 0.01 秒とし、指定速度 (20、40、60km/h) 毎に 10 回繰り返し測定を行うこととした。

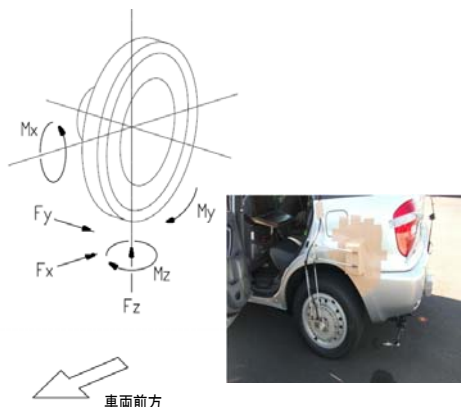


図-1 測定器の計測方向との取付状況

② 惰性走行法

JIS 化されている惰行試験方法¹⁰⁾を参考に、①で使用する自動車を対象路面に指定速度で進入し、同一路面上を一定の距離惰性走行を行った後の退出時の速度を計測し、進入・退出速度の変化率を求める。①と同様の理由から、指定進入速度 (20、40、60km/h) 毎に 10 回繰り返し測定を行うこととした。

③ 軸タイヤ自由転がり法

普通自動車のタイヤ2本を有する車軸 (軸タイヤ) (写真-3) を、一定の坂路 (図-2) から対象路面に向けて転

がし、同一の路面上を転がり始めてから停止するまでの距離を計測する。なお、①、②と比べてタイヤにかかる重量が軽く、また対象路面上を転がる速度も低速であることから、風の影響を除外するために対象路面を覆うテントを設置して測定する。本方法でも 10 回繰り返し測定を行うこととした。



写真-3 軸タイヤ

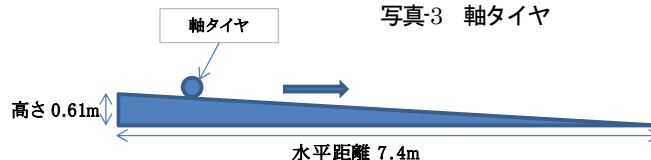


図-2 坂路

2.2 測定対象路面

路面のテクスチャに着目した転がり抵抗の測定を行うためには、対象とする路面は路面のテクスチャ以外の条件を可能な限り同一にする必要がある。土木研究所の舗装路面騒音研究施設 (図-3) は、排水性舗装 A (最大粒径 13mm)、排水性舗装 B (最大粒径 5mm)、多孔質弾性舗装及び密粒度舗装 (最大粒径 13mm) の4種類の舗装路面 (各路面幅 3m×延長 80m) を有し (写真-4)、タイヤと路面から発生する音を正確に測定することを目的とした施設であり、縦横断勾配もほとんどなく平坦性も高い。また、路面の性状を一定に保つため、通常はテントにより路面を保護している。そのため、転がり抵抗の測定にあたり、舗装の剛性は別としても路面のきめ以外の条件がほぼ同一であることから、本施設を対象路面とし、これら4種類の路面間の転がり抵抗の測定を行うこととした。



写真-4 施設の路面

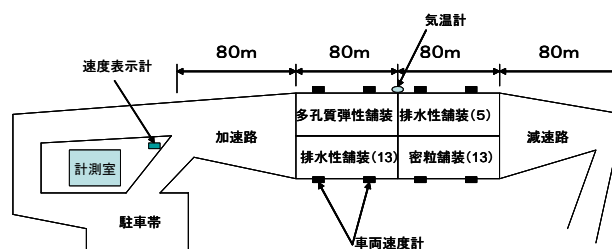


図-3 舗装騒音路面研究施設

なお、対象路面のテクスチャは、舗装調査・試験法便覧¹⁰⁾S022-3T に準拠し、CT メータを用いて各路面の

OWP 上の 2 点及び IWP 上の 1 点の平均プロファイル深さ(MPD)を測定した。

2.3 測定結果

測定結果を表-1 に示す。また、同一指標で転がり抵抗を比較するために、①～③の測定手法による結果より、転がり抵抗係数を以下の方法で算出した結果を表-2 に、テクスチャと転がり抵抗の関係を図-4 に示す。

<転がり抵抗係数 μr の算出方法>

① 平均牽引力測定法

転がり抵抗力を鉛直方向の力で除算

$$\mu r = Rr / W$$

μr : 転がり抵抗係数

Rr : 牽引力 F_x の平均[N]

(区間内の全データ平均)

W : 鉛直方向力 F_z の平均[N]

(区間内の全データ平均)

② 惰性走行法

進入速度 20、40、60km/h と変えた場合の測定区間 80m を通過するまでの所要時間より、走行抵抗 R を算出し、各進入速度の結果から最小二乗法により空気抵抗及び転がり抵抗に分け、転がり抵抗を試験時車両重量で除算して転がり抵抗係数を求める^{8)、10)、12)}。

$$\mu r = (R - \mu aAV^2) / W$$

R : 走行抵抗[N]

μa : 空気抵抗係数[(km/h)²/Pa]

A : 車両前面投影面積[m²]

V : 試験速度 [km/h]

W : 試験時車両重量 [N]

③ 軸タイヤ自由転がり法

運動エネルギーの法則から初速を求め、停止までの転がり距離を元に算出する。この場合、①、②に比べてタイヤにかかる鉛直方向の力が大きく異なり、タイヤの変形状態が異なることに留意が必要である。回転エネルギー、坂路走行及び空気抵抗によるエネルギーロスは各路面種別で差が微小なものと考えて無視して算出している。

表-2 各路面の転がり抵抗係数

	排水性舗装A 最大粒径13mm	排水性舗装B 最大粒径5mm	多孔質弾性舗装	密粒度舗装 最大粒径13mm
①平均牽引力測定法による 転がり抵抗係数	0.0191	0.0184	0.0199	0.0183
②惰性走行法による 転がり抵抗係数	0.0143	0.0125	0.0139	0.0129
③軸タイヤ自由転がり法 による転がり抵抗係数	0.0107	0.0091	0.0116	0.0101

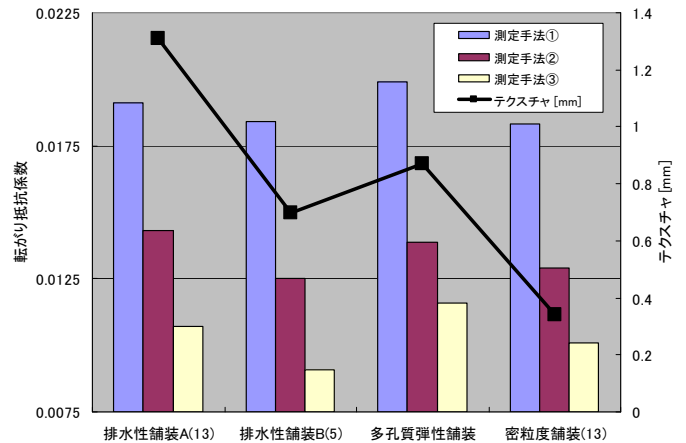


図-4 テクスチャと転がり抵抗の関係

$$\mu r = h / L$$

h : 転がり始める高さ[m]

L : 転がり距離[m]

図-4 より、いずれの測定方法も同様の傾向を示していることから、3 手法とも転がり抵抗の測定に有効であること、また舗装の種別により転がり抵抗に差があることが示唆された。本試験条件下(気温 6~18℃、路面温度 12~25℃、タイヤ空気圧 200kPa)では、多孔質弾性舗装と排水性舗装 A はほぼ同等、また、排水性舗装 B と密粒度舗装はほぼ同等で、前者の 2 種類の方が転がり抵抗が大きい。また、同一舗装種別で舗装の剛性等の条件がほぼ同等と考えられる排水性舗装 A と B では路面のテクスチャの違いが支配的な差であると考えられることから、この転がり抵抗の差は路面のテクスチャの影響であることが示唆された。

表-1 測定結果一覧

	排水性舗装A 最大粒径13mm	排水性舗装B 最大粒径5mm	多孔質弾性舗装	密粒度舗装 最大粒径13mm
平均プロファイル深さ(MPD) [mm] (OWP上2点、IWP上1点の平均)	1.31	0.70	0.87	0.34
①平均牽引力測定法による 転がり抵抗の平均 [kM]	V=60km/h	0.052	0.050	0.055
	V=40km/h	0.063	0.061	0.066
	V=20km/h	0.074	0.071	0.076
②惰性走行法による 速度の変化率 [%]	初速V=60km/h	8.0	8.6	8.9
	初速V=40km/h	14.9	14.3	15.2
	初速V=20km/h	50.6	43.3	49.9
③軸タイヤ自由転がり法 による停止までの距離 [m]	58.6	68.6	53.9	61.9

表-3 3手法の測定の実道適用性等の比較結果

測定手法	①平均牽引力	②惰性走行法	③軸タイヤ法
測定の容易さ	× (費用, 機器設定, 運転熟練度)	△ (運転熟練度)	○
他の影響要因	○	△ (空気抵抗, 内部抵抗)	× (無軸重(タイヤ変形の差異), 低速による風影響)
実道適用性	○	△ (勾配等の影響)	× (勾配等の影響, 要交通規制)
総合評価	○	△	×

3 手法とも転がり抵抗が測定可能と考えられたことから、測定の容易さ等実道での適用性を整理した結果を表-3に示す。総合評価として、平均牽引力測定法が有利な測定手法と言える。

3. タイヤ/路面騒音、すべり摩擦抵抗と路面のテクスチャの関係

3.1 試験方法

異なる路面のテクスチャを供試体レベルで作製し、それらに対して、タイヤ/路面騒音、すべり摩擦抵抗と路面のテクスチャを以下に示す方法で測定し、それぞれのテクスチャとの関係を把握することとした。なお、タイヤ/路面騒音とすべり摩擦抵抗を取り上げたのは、本研究の対象としている路面設計に関連したテクスチャレベルは、図-5に示すPIARCによるテクスチャの分類¹³⁾ではメガテクスチャレベルの波長以下であるため、同図よりタイヤ/路面騒音とすべり摩擦抵抗を検討対象としたものである。

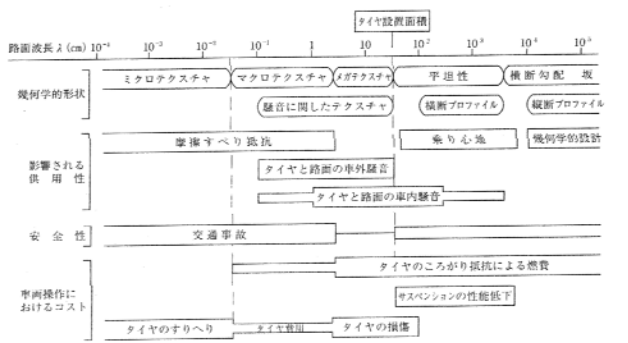


図-5 テクスチャの分類と道路のサービス性能との関係

① タイヤ/路面騒音

タイヤ/路面騒音の測定は、タイヤ/路面騒音測定装置による方法で測定する¹⁴⁾。



写真-5 タイヤ/路面騒音測定装置 (左: 外観, 右: 内部)

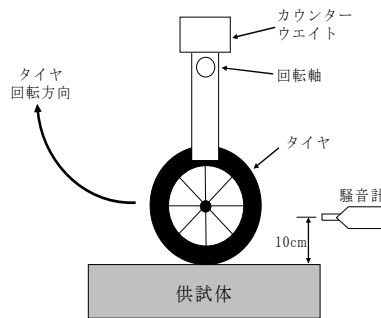


図-6 タイヤ/路面騒音測定方法

測定装置は写真-5に示すとおりである。測定

方法は図-6に示すとおり、回転アームに取り付けたタイヤを30km/hで回転させ、装置底部に設置した供試体にタイヤが接したときの発生音を設置箇所の後方に取り付けた騒音計により計測するものである。タイヤはラグパターンの軽量小型タイヤ(タイヤサイズ 30cm、空気圧 100kPa、質量 3.5kg)である。

同一の供試体に対し5回測定を行い、タイヤ衝突騒音ピーク値(L_{Amax})5回の平均を用いて評価する。

②すべり摩擦抵抗

すべり摩擦抵抗は、舗装調査・試験法便覧¹¹⁾S021-3に準拠し、回転式すべり抵抗測定器(DF テスタ)による測定方法によるものとする。DF テスタの回転速度が20、40、60及び80km/hの時の動的摩擦係数の平均をとることとする。

③路面のテクスチャ

路面のテクスチャを測定する方法としては、舗装調査・試験法便覧¹¹⁾S022-1に「砂を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」があるが、本研究の対象となるテクスチャレベルを測定するには精度等の関係から不適である。また、同便覧にS022-2T「センサきめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」(以下、及びS022-3T「回転式きめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」が示されているが、これらは路面上を線状又は一点を中心とした円周状にテクスチャを測定するものであり、路面設計に反映させる指標としては面的なテクスチャとの相関を確認する必要がある。

そこで、測定に先立ちそれらの面的なテクスチャとの相関を確認した。面的なテクスチャは、S022-2Tの測定方法を参考として、高性能の非接触レーザセンサを用いて測定する方法とし、様々な種類の供試体上で50mm間隔で7本の400mmの測線上で路面の凹凸変位量を0.05mmピッチで測定(図-7)し、測線毎の標準偏差をセンサきめ深さとした。図に示すとおり7本(L1~R1)の測線を設けることで、面的なテクスチャを把握することが可能となる。

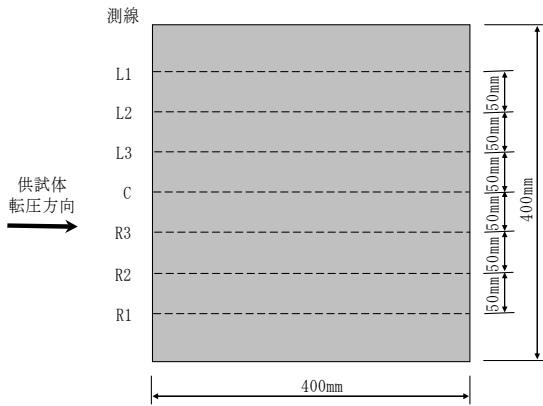


図-7 路面のテクスチャの測定測線

個々の測線のセンサきめ深さ σ_i (mm)

$$= \sqrt{[(\sum d^2 - (\sum d)^2 / n)] / (n-1)}$$

d : 単位区間(400mm)における個々のサンプルリングデータ (mm)

n : 単位区間(400mm)のサンプルリングデータ個数

以上の結果から得られるテクスチャを「レーザきめ深さ」とし、表-4 に示す供試体を対象とした S022-2T によるテクスチャ「センサ装置きめ深さ」、S022-3T によるテクスチャ「CT メータを用いた方法によるきめ深さ」との関係を図-8、9 に示す。

表-4 供試体の種類

供試体の種類	空隙率	表面テクスチャの種類	備考
1 密粒度アスファルト混合物(13)	-	無処理(1)、表面処理(2)	トップコート等により異なるテクスチャを構築(2水準)
2 ポーラスアスファルト混合物(13)	17%	無処理(1)、表面処理(2)	トップコート等により異なるテクスチャを構築(2水準)
	20%	無処理(1)、表面処理(2)	
3 ポーラスアスファルト混合物(10)	20%	無処理(1)、表面処理(2)	トップコート等により異なるテクスチャを構築(2水準)
	23%	無処理(1)、表面処理(2)	
4 ポーラスアスファルト混合物(8)	20%	無処理(1)	
	23%	無処理(1)	
5 ポーラスアスファルト混合物(5)	20%	無処理(1)	
	23%	無処理(1)	
6 透水性レジンモルタル充填工法ポーラスアスファルト混合物(13)	20%	レジンモルタル充填処理(2)	モルタル骨材に硬質骨材、弾性骨材を使用
7 SMA混合物(13)通常型	-	無処理(1)	
8 SMA混合物(13)粗面型	-	無処理(1)	機能性SMA
9 SMA混合物(5)通常型	-	無処理(1)	
10 SMA混合物(5)粗面型	-	無処理(1)	機能性SMA
11 多孔質弾性舗装	-	無処理(3)	ゴム骨材配合3水準
合計		28	

図-8、9 より、いずれの手法とも面的なテクスチャとの関係は良好である。実道での適用を考えると、テクスチャレベルでの路面設計を検討する上ではセンサ装置を用いた方法では同一測線を再現することがやや困難であり、ここでは路面のテクスチャの測定方法として CT メータを用いた手法 (CTM) を提案する。

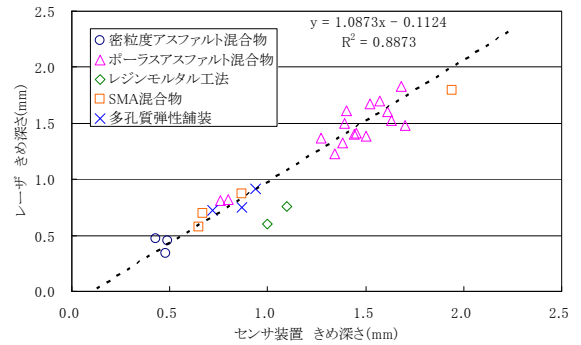


図-8 センサ装置きめ深さとレーザきめ深さの関係

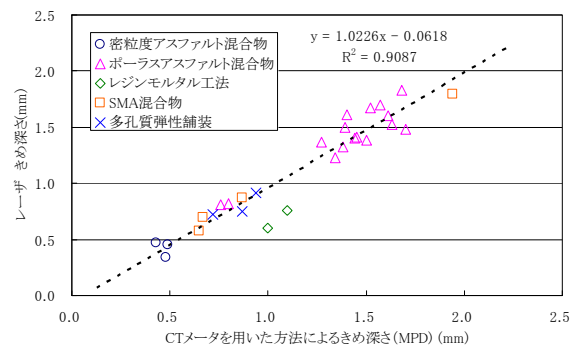


図-9 CT メータを用いた方法によるきめ深さ (CTM) とレーザきめ深さの関係

3.2 供試体

供試体の大きさは 50cm×50cm×5cm とし、3.1③で路面のテクスチャを確認した供試体 (表-4) を対象とした。

3.3 試験結果

各供試体について、路面のテクスチャとタイヤ/路面騒音の関係を図-10 に、すべり摩擦抵抗との関係を図-11 に示す。

図-10 より、全体として路面のテクスチャが大きくなるとタイヤ/路面騒音は小さくなる傾向がある。路面騒音の発生原因の一つとしてタイヤのトレッド溝に起因するエアポンピング音と呼ばれる路面との間にはさまれた空気圧縮が挙げられる¹⁵⁾が、路面の凹凸が多少ある方が空気の逃げ道となることによるものと考えられる。図-12～14 に密粒度舗装、多孔質弾性舗装及び排水性舗装における結果をそれぞれ示す。密粒度舗装ではトップコートによるテクスチャ変化程度では騒音レベルは変わらないこと、多孔質弾性舗装ではもともとゴムが舗装に入っていることからタイヤ加振音の発生量が小さく、テクスチャの増加によるエアポンピング音の減少が顕著に表れることが分かる。また排水性舗装では、もともとエアポンピング音の発生が小さく、路面のテクスチャの他最大粒径や空隙率が騒音に影響を与えるもの¹⁶⁾と考えられる。

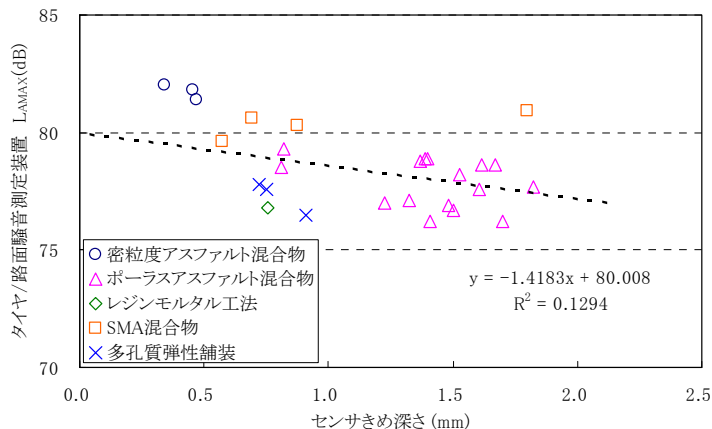


図-10 路面のテクスチャとタイヤ/路面騒音の関係

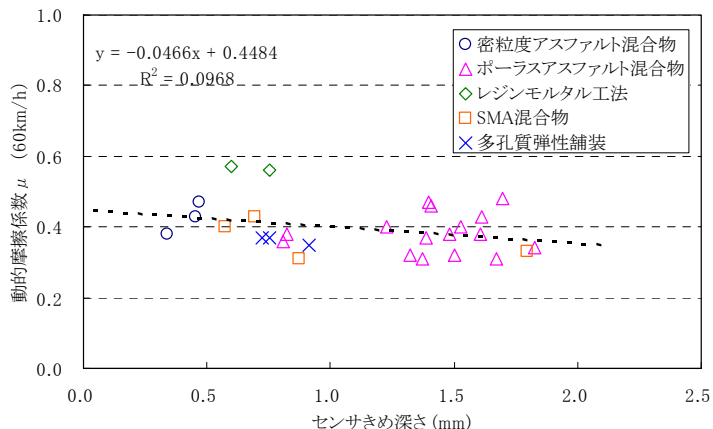


図-11 路面のテクスチャと動的摩擦係数の関係

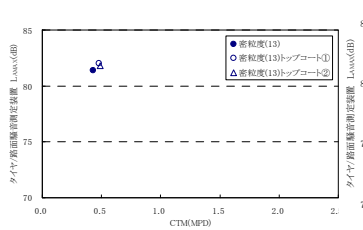


図-12 路面のテクスチャとタイヤ/路面騒音の関係 (密粒度舗装)

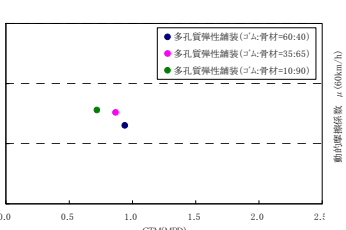


図-13 路面のテクスチャとタイヤ/路面騒音の関係 (多孔質弾性舗装)

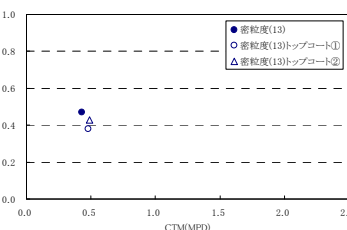


図-15 路面のテクスチャと動的摩擦係数の関係 (密粒度舗装)

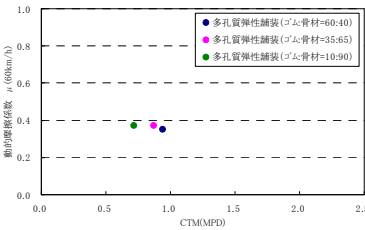


図-16 路面のテクスチャと動的摩擦係数の関係 (多孔質弾性舗装)

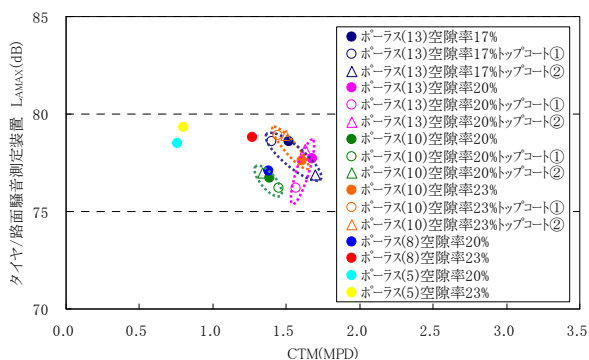


図-14 路面のテクスチャとタイヤ/路面騒音の関係 (排水性舗装)

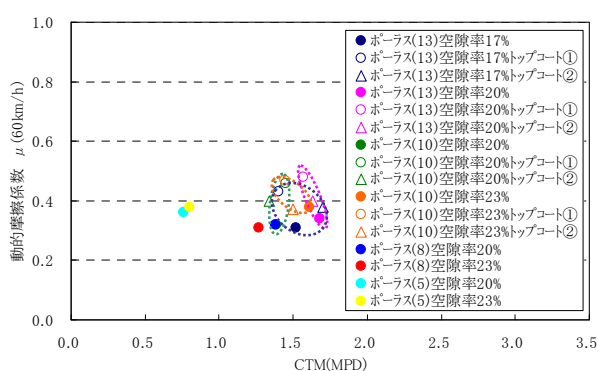


図-17 路面のテクスチャと動的摩擦係数の関係 (排水性舗装)

これらより、騒音を考慮する場合、舗装種別毎に路面のテクスチャを踏まえた路面設計方法が必要と言える。

動的摩擦係数に関しては、図-11 より、全体として路面のテクスチャが大きくなると若干ながら動的摩擦係数は低下する傾向にある。図-15~17 に密粒度舗装、多孔質弾性舗装及び排水性舗装における結果をそれぞれ示す。密粒度舗装ではトップコートによりテクスチャはあまり変化しないが動的摩擦係数は低下すること、多孔質弾性舗装ではトップコートによりテクスチャは変化するが動的摩擦係数はあまり変化しないことが分かる。また排水性舗装では、空隙率や骨材形状が動的摩擦係数に与える要因としては支配的と考えられ、路面のテクスチャをの

相関は小さい。これらより、すべり摩擦抵抗を考慮する場合、路面のテクスチャだけでなく骨材の剛性や粗度を考慮する必要があると考えられる。

8. まとめ

本研究では、路面のテクスチャに着目したタイヤの転がり抵抗を測定する手法を提案し測定を行うと共に、新たな手法による路面のテクスチャの測定を通じ、路面のテクスチャとタイヤ/路面騒音やすべり摩擦抵抗との関係の把握し、車両走行性を考慮した路面設計手法の検討を行った。その結果は以下のとおりである。

①路面に着目した転がり抵抗測定手法を開発した。実道

での適用を踏まえると平均牽引力測定法が最も妥当である。

- ②同一舗装種別では路面のテクスチャが転がり抵抗に影響を及ぼし得る。
- ③センサ装置を用いた方法及びCTメータを用いた方法により路面設計を行う上での路面のテクスチャ測定が可能である。実道での適用を踏まえるとCTメータを用いた方法が妥当である。
- ④路面設計を行う際に騒音低減機能を求める場合、舗装種別毎に路面のテクスチャを踏まえる設計手法を示した。一方、すべり摩擦抵抗に関しては、路面のテクスチャの他、骨材の特性を考慮する必要がある。
 今後は、実道での各所路面における転がり抵抗等車両走行性に関するデータの蓄積、骨材の特性も踏まえた総合的な路面設計手法の確立が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説、2001.7
- 2) 社団法人日本道路協会：舗装設計施工指針、2006.2
- 3) 社団法人日本自動車タイヤ協会：低燃費タイヤ等の普及促進に関する表示ガイドライン（ラベリング制度）の制定について、JATMA ニュース、No.1143、2009.12
- 4) たとえば、鈴木、平井、細井：重量ディーゼル車の燃費シミュレーション、自動車研究、Vol25、No.4、pp.9～12、2003.4
- 5) たとえば、網野：タイヤの技術動向、玄関トライボロジー、No.230、pp.41～43、2006.10
- 6) 吉本、泉尾、早川、長坂：大型自動車の走行抵抗と舗装路面に関する一検討、第27回日本道路会議、2007.11
- 7) 吉本：コンクリート舗装と重量車の転がり抵抗・燃費、コンクリート工学、Vol.48、No.4、pp.11～17、2010.4
- 8) 日本規格協会：JIS D 1012 自動車一燃料消費率試験方法、2005
- 9) 社団法人日本自動車タイヤ協会：低燃費タイヤ等の普及促進に関する表示ガイドライン（ラベリング制度）、2009.12
- 10) 日本規格協会：JIS D 1015 自動車一惰行試験方法、1993
- 11) 社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、2007.6
- 12) 山海堂：自動車の走行性能と試験法、2002.3
- 13) 建設図書：PIARCによるテクスチャの分類と道路のサービス性能との関係、舗装の質疑応答、Vol9、2005.7
- 14) 土木学会：舗装工学ライブラリー4 環境負荷軽減舗装

の評価技術、2007.1

- 15) 藤川、小池、押野：タイヤ／路面騒音低減のためのトレッド溝形状、自動車研究、Vol22、No.12、2000.12
- 16) 坂本、源：低騒音舗装とタイヤ騒音について、第25回日本道路会議、2003.11

A STUDY ON ROAD SURFACE DESIGN METHOD CONSIDERING ROAD SURFACE TEXTURE AND ITS PERFORMANCE

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2008-2010

Research Team : Road Technology Research Group
(Pavement)

Author : KUBO Kazuyuki

WATANABE Kazuhiro

ITANI Masashi

Abstract : The investigation about road surface design method considering road surface texture and its performance was carried. As a result, the test method of rolling resistance on road surface was developed, it was found out that there was difference on rolling resistance between each type of asphalt pavement, it was possible to measure texture on road surface by using CT-meter, and the design method technique of road surface to stand on the texture of road surface was shown.

Key words : pavement, road surface design, texture, rolling resistance, noise, skid resistance